



KR9900182

KAERI/TR-1291/99

MATRA-LMR 코드 사용자 지침서

A User's Guide to the MATRA-LMR Code

1999. 4

30 - 48

한국원자력연구소

1

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “MATRA-LMR 코드 사용자 지침서”에 대한 기술보고서로 제출합니다.

1999. 4.

주저자 : 김원석
공동저자 : 김영균
김영진

요 약

가압경수로와는 달리 액체금속로는 냉각재로 사용하는 소듐의 비등점이 매우 높기 때문에 피복재 온도나 핵연료의 최대온도에 설계 제한조건을 두게 된다. 이러한 설계요건을 만족하면서 냉각재 분배 효율을 높이기 위해서는 노심의 온도분포를 정확히 예측할 필요가 있다.

COBRA-IV-i를 근간으로 개발중인 MATRA 코드를 기본으로 하여 이러한 목적에 부합하는 액체금속로용 MATRA-LMR을 개발하였다. 주된 수정·보완 내용은 다음과 같다. 가) 냉각재 물성치를 물대신 소듐으로 대체하여 코드내 Subroutine으로 삽입하였다. 나) 열전달 계수 상관식을 액체금속로용으로 전환하였다. 다) 압력강하에 관련된 상관식을 최근에 발표된 Novendstern, Chiu-Rohsenow-Todreas, Cheng-Todreas 상관식으로 대체하였다. 본 사용자 지침서는 MATRA-LMR (Version 1.0) 코드 사용자를 위하여 코드의 구조와 수식을 기술하고, 입력자료 작성에 대해 설명한 것이다.

SUMMARY

Since sodium boiling temperature is very high, design limits are imposed, unlike LWR, on the maximum temperatures of cladding and fuel pin in sodium cooled liquid metal reactor. Designing a core with efficient flow grouping while satisfying such design limits requires essentially accurate prediction of core temperature distribution.

This necessity led us to develop MATRA-LMR, a detailed subchannel thermal-hydraulics code for liquid metal reactor, based on MATRA which is the completely rewritten version of COBRA-IV-i. The major modifications and improvements implemented into MATRA-LMR are as follows: A) sodium properties are added as a subprogram, B) correlations of heat transfer coefficients are changed for sodium coolant, and C) most recent pressure drop correlations, such as Novendstern, Chieu-Rohsenow-Todreas and Cheng-Todreas, are included. This user's manual describes code structure and equations of MATRA-LMR (Version 1.0), and explains input data preparation.

목 차

요약 -----	ii
1. 서론 -----	1
2. 부수로 해석 코드	
2.1 개요 -----	2
2.2 지배방정식 -----	4
3. MATRA-LMR 코드	
3.1 개요 -----	10
3.2 수치해법 -----	13
3.3 핵연료봉/벽 모델 -----	22
3.4 상관식 -----	22
3.5 코드 구조 및 특성 -----	36
4. 계산예제	
4.1 ORNL 단일 집합체 (19 pin) 실험 -----	41
4.2 KALIMER 127 pin 설계데이터 -----	49
4.3 Blockage 계산 -----	52
5. 향후 코드개선 방향 -----	58
참고문헌 -----	60
부록 A : Connection matrix examples -----	62
부록 B : Program MATRA-LMR code structure -----	64
부록 C : Subroutine description in program MATRA-LMR -----	67
부록 D : Program MATRA-LMR input description -----	86
부록 E : Geometry input description -----	94

1. 서론

액체금속로의 냉각제로 사용하는 소듐은 열전도도가 물의 약 100배 정도이며, 비등점 또한 대기압 상태에서 약 900 °C로 매우 높다. 따라서 소듐을 냉각제로 사용하는 액체금속로는 정상운전시 노심 냉각재온도에 약 300 °C 이상의 여유가 있다. 이와같은 특성 때문에 가압경수로의 경우 설계 제한조건으로 DNBR이 주어지지만 액체금속로의 경우에는 피복재 온도나 핵연료의 최대온도에 설계 제한조건을 두게 된다. 특히 노심계통에 영향을 미치는 주된 요소인 핵연료 피복재 최대 온도, 노심 상부 내부구조물 (Upper Internal Structures)의 경계조건으로 사용되는 핵연료집합체 혼합 평균 냉각재 온도는 노심설계시 반드시 고려할 사항이다. 이러한 설계기준을 만족하면서 냉각재의 냉각효율을 높이기 위하여 노심의 온도분포를 정확하게 예측할 필요가 있다 [김영철, 1994].

초기에는 복잡한 구조로 되어있는 노심의 열수력 계산을 간단하게 수행하기 위해 많은 실험을 수행하여, 이들 실험에서 구한 관계식을 이용한 실험식이 사용되었다. 그러나 실험식의 정확도 향상을 위해서는 여러 실험조건에 따른 방대한 실험적 자료가 요구되면서, 60년대 중반부터 부수로 해석을 통해 노심 열수력 계산을 수행하려는 기본적인 시도가 있었다. 이러한 목적으로 개발된 초기 대표적인 코드로는 각각 영국, 프랑스 그리고 미국에서 개발된 HAMBO, FLICA, COBRA등이 있다. 하지만 이러한 코드들도 실험적인 모델에 그 근간을 두고 있다. 이러한 코드들은 경수로용으로 단상/이상 유동해석을 위해 사용되었으며, 반경방향 유동 계산시 그 유량에 제한 조건을 가지고 있었다. 70년대 중반 액체금속로용 노심계산을 위해 SUPERENERGY를 비롯한 THI-3D, SABRE, BACCHUS 등이 개발되었다. 하지만 현재 설계에 사용되고 있는 코드들은 대부분 오래 전에 개발된 것으로 최근의 실험이나 해석적 결과를 반영하지 못하고 있는 실정이다 [Waltar, 1981].

현재 국내에서는 COBRA-IV-i를 근간으로 부수로 해석 접근 방법을 사용하여 정상상태와 과도상태 하에서 핵연료 집합체 및 원자로심의 열수력 특성을 분석하기 위한 MATRA (Multichannel Analyzer for Transient and steady-state in Rod Array) 코드를 개발하고 있다 [유연중, 1997]. COBRA-IV-i가 CYBER version인데 비해 MATRA는 HP workstation 및 IBM PC version으로서 사용자 환경이 보다 향상되었으며, 코드의 기능면에서도 여러 가지 내용들이 수정·보완되었다. 한편, 계산속도를 향상시키기 위해서 부수로간의 운동량 결합을 액체금속로 핵연료 집합체에 적합한 근사 모델로 대체하여 단순화된 Energy 모델을 사용한 SUPERENERGY-2를 기본으로 하여, 수치해석 방법을 개량하고 최근

에 발표된 상관식을 채택하여 효율성 및 정확도가 개선된 액체금속로용 열수력 코드 SLTHEN이 개발되었다 [Yang, 1997]. 하지만 SLTHEN은 설계용으로 실제 발전소 운전조건하에서 정상상태 계산을 주된 목표로 개발되어 과도기 및 상세 부수로 해석에는 적합하지 않다.

본 지침서에서는 액체금속로 해석을 위해 개발중인 MATRA-LMR에 대하여 기술하고, ORNL 19 Pin 실험 및 KALIMER 설계데이터를 이용한 계산을 예로 입력자료 작성에 대해 설명하였으며, 앞으로의 개발 방향에 대해서도 기술하였다.

2. 부수로 해석 코드

2.1 개요

Rod-bundle 열수력 해석 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 하나는 부수로 해석 방법이고 다른 하나는 porous medium 방법이다. Porous medium 방법은 부수로 해석 방법에 비해 정확하고 그 적용범위도 넓은 반면 입력작성이 복잡하고 계산시간이 많이 걸리는 단점을 가지고 있다. 대표적인 porous medium 코드로는 COMMIX가 있다. MATRA-LMR 코드는 부수로 해석 방법을 사용하고 있으며 여기서는 부수로 해석 방법에 대해 자세히 설명하였다.

부수로 해석은 현재 rod-bundle 열수력 해석에 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 원래 이 방법은 설계계산을 위해 사용되었으나 현재는 안전해석용으로 까지 범위를 확장하여 유로막힘 현상 계산도 수행하고 있다. 부수로 해석의 주된 가정은 반경방향 속도에 비해 축방향 속도가 상당히 커 그 값이 지배적인 위치를 갖는데 있다. 이것은 축방향 및 반경방향 운동량 방정식을 분리하여 취급함으로써 물리적으로나 계산적으로 이점을 취할 수 있다. 즉, 반경방향 운동량 방정식에 가정을 도입하여 식을 단순화 시킬 수 있다. 그림 1과 2는 부수로 해석에 사용된 control volume에 대한 정의와 축방향 및 반경방향 운동량 방정식에 적용된 control volume의 예를 나타내었다.

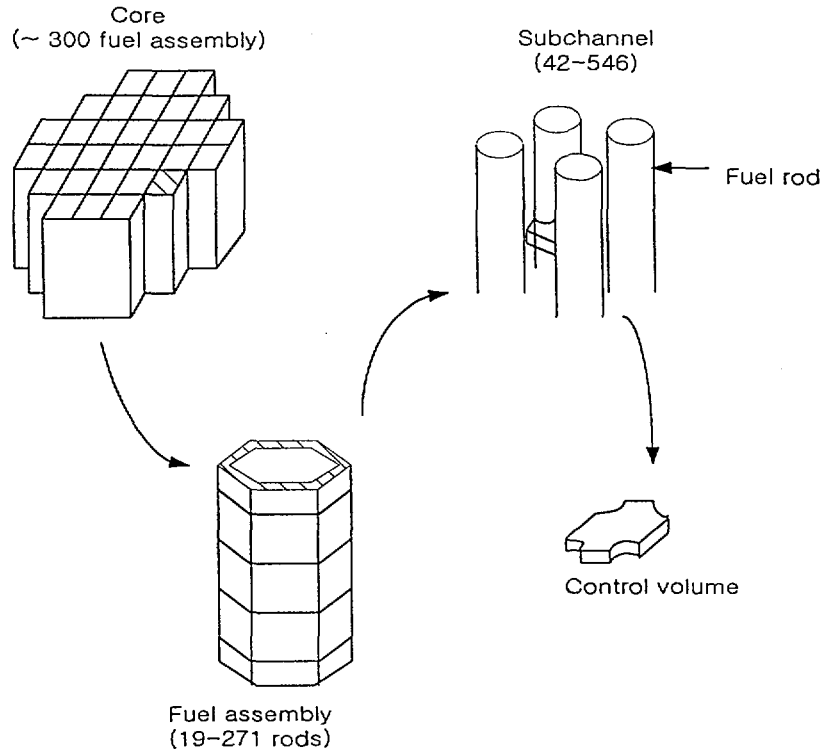


그림 1. 부수로 control volume

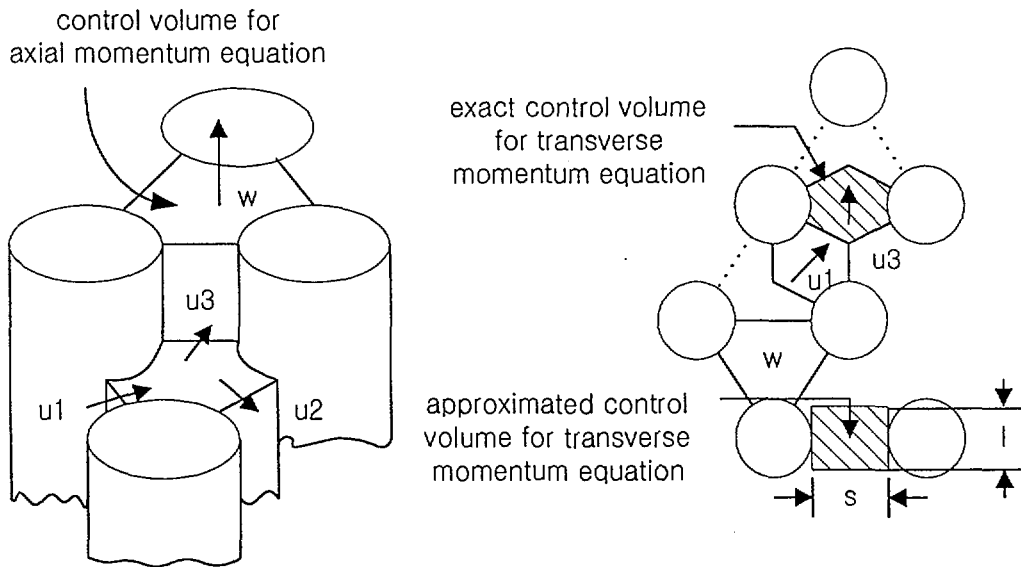


그림 2. 축/반경 방향 운동량 방정식을 위한 control volume

2.2 지배방정식

2.2.1 연속방정식

$$A_{fi} \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_i \rangle + \frac{\Delta m_i}{\Delta z} = - \sum_{j=1}^I W_{ij} \quad (2.1)$$

여기서,

i : 부수로 control volume

j : 인접한 부수로

A_{fi} : 축방향 유량면적

$m_i = \rho v_z A$: 축방향 유량

Δz : 축방향 단위길이

$W_{ij} = \rho v_{ij} A_{ij} / \Delta z$: 부수로 i 와 j 사이의 반경방향 유량

v_{ij} : x와 y 방향에서의 반경방향 속도

A_{ij} : 부수로 i 와 j 사이의 반경방향 유량면적

위의 일반적 형태를 이용한 MATRA-LMR에서의 연속방정식은 다음과 같다.

$$A \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho \rangle_v + \frac{\partial}{\partial X} \langle \rho v_x \rangle_A A + \{D_c^T\} \langle \rho v_y \rangle_s S = 0 \quad (2.2)$$

여기서,

A : 부수로 면적 (ft²)

ρ : 혼합 밀도 (lb_m/ft³) { $\rho = \alpha \rho + (1 - \alpha) \rho$ }

t : 시간 (sec)

m : 축방향 유량 (lb_m/sec) { $m = \rho u A$ }

X : 축방향 좌표 (ft)

[D_c]: 유로간 차분 연산자

[D_c]^T: [D_c]의 전치 연산자 (transpose)

또한, 다음과 같은 상태식도 필요로 한다.

$$\rho = \rho(h, P^*) \quad \text{여기서, } P^* = \text{기준압력}$$

이러한 지배방정식은 COBRA-IV-i의 지배방정식 유도 과정시 사용한 가정을 그대로 사용한 것이다. 표 1에 이러한 가정을 나타내었다.

표 1. COBRA-IV-i 코드의 지배방정식에 사용된 가정

가정	관련지배방정식	효과
<공통>		
1. 열적 평형	공통	상(Phase) 온도 동일
2. 시간에 따른 Geometry 일정	공통	
3. 동일질량교환에 근거한 반경방향 난류 모델	공통	$w_{ij}' = w_{ji}'$
4. 축방향 Node간 난류혼합 무시	공통	난류 반경방향유량에 의한 축방향속도 무시
5. 유체 물성치는 엔탈피와 기준압력의 함수	공통	열팽창 고려, 국부 압력변화에 의한 압축성은 고려 안함
6. 에너지방정식에서 $\partial P/\partial t$ 무시	에너지	음속전파 효과 무시
7. 유체내 열발생 무시	에너지	
8. 운동에너지 변화 무시	에너지	열전달, 대류, 난류혼합만 내부 에너지 변화에 기여
9. 점성에 의한 에너지 소산 무시	에너지	
10. 중력장에 가해지는 일 무시	에너지	
11. 중력가속도만 Body force에 기여	운동량	전자기력 무시
12. 반경방향 Body force 무시	운동량	반경방향 부력 효과 무시
13. 표면장력 효과 무시	운동량	상 압력 동일
14. 마찰과 형상에 의한 항력만 유체항력에 기여	운동량	유체간 전단응력 무시
15. 축방향 위치간 유동면적의 선형적 변화	공통	유동면적의 계단 변화 불가
<양해법>		
16. 균질 유체	운동량,에너지	동일 상 속도 ($u_g=u_i, v_g=v_i$)
17. Courant 제한	공통	최대 Time step 제한 ($\Delta t \leq \Delta x/u$)
<음해법>		
18. 축방향 Slip option 허용, 반경방향은 불가	운동량,에너지	$u_g=u_i, v_g=v_i$
19. 역방향 유량 모사 불가	공통	안정성 때문

여기서 일반식과 MATRA-LMR에서의 변수형태의 차이는 다음과 같다.

Subchannel	MATRA-LMR	
$\langle \phi \rangle$	$\langle\langle \phi \rangle\rangle_v$: volume average
$\{ \phi \}$	$\langle \phi \rangle_A$: surface average
ϕ	$\{ \phi \}$: vector definition
$[]$	$[]$: matrix definition
s	S	: gap width
z, v _z	X, v _x	: coordinate sys. and velocity
W_{ij}^H	w	: cross flow

또한 {D}는 matrix operator로서 부수로, 핵연료봉, 그리고 벽들 사이의 연결 관계를 정의하고 있다. 부수로간의 연결은 matrix $[D_c]$, 핵연료봉과 부수로간은 matrix $[D_r]$, 벽과 부수로간은 matrix $[D_w]$ 을 사용한다. 이것들의 transpose는 $[D_c^T]$, $[D_r^T]$, $[D_w^T]$ 이다. 예로서 그림 3에서와 같이 세 개의 부수로 사이의 열 전도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

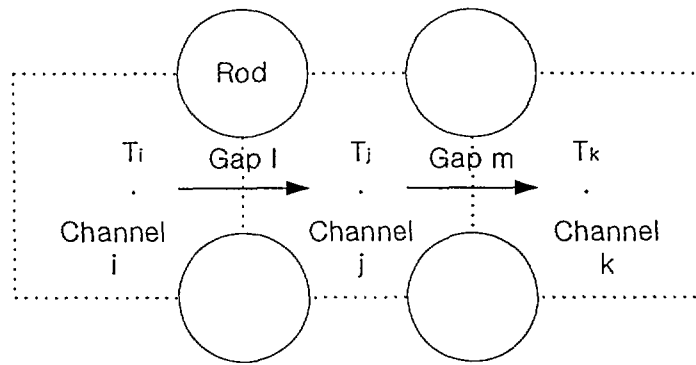


그림 3. 세 부수로 사이의 연결관계

$$Q_j = C_j(T_i - T_j) - C_m(T_j - T_k) \quad (2.3)$$

여기서,

C_l, C_m : constant functions of fluid conductivity and gap dimensions
 윗식을 열전도 diagonal matrix $[C]_{kl}$ 과 matrix operator $[D_c]$, $[D_c^T]$ 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\{Q_j\} = [D_c^T]_{jk} [C]_{kl} [D_c]_{lm} \{T_m\} \quad (2.4)$$

이때 $[D_c]$ 와 $[D_c^T]$ 는 다음과 같다.

$$[D_c] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; [D_c^T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

같은 방법으로 부수로와 핵연료봉, 부수로와 벽과의 관계도 얻을 수 있다. 좀더 자세한 내용은 부록 A에 나타내었다.

2.2.2 에너지 보존식

$$A_f \frac{\partial}{\partial t} [(\rho h)_i] + \frac{\Delta}{\Delta z} [m_i h_i] = \langle q_i' \rangle_{rb} - \sum_{j=1}^I W_{ij}^{*H} [h_i - h_j] - \sum_{j=1}^I W_{ij} \{h^*\} + A_f \left\langle \frac{DP_i}{Dt} \right\rangle \quad (2.5)$$

(1) (3) (6) (5) (2) (4)

여기서 쓰인 가정은 다음과 같다.

- (가) 단상유동인 경우 : $W_{ij}^{*D} h_i - W_{ji}^{*D} h_j = W_{ij}^{*H} [h_i - h_j]$
- (나) 냉각재내 축방향 열전도는 무시한다. : $\{k_e(\partial T / \partial z)\} = 0$
- (다) 냉각재내 열발생원은 없다. : $\langle q''' \rangle = 0$

표 2. 부수로 해석에 사용된 반경방향 유량

	Mass	Momentum	Energy
Flow from subchannels i and j			
Diversion cross-flow	W_{ij}		
Turbulent interchange	W_{ij}^{*D}	W_{ij}^{*M}	W_{ij}^{*H}
Turbulent plus viscous interchange	W_{ij}^{*D}	W_{ij}^{*M}	W_{ij}^{*H}

식 (2.5)에서의 각 항의 물리적 의미는 다음과 같다.

- (1) : 체적내 내부에너지의 증가율
- (2), (3) : 면적 A를 통한 내부에너지의 총변화율
- (4) : 밀도가 일정치 않을 경우 압력에 의한 일
- (5) : 열전도
- (6) : 열원

에너지 보존식에 대한 MATRA-LMR에서의 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & A \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho h \rangle_v + \frac{\partial}{\partial X} \langle \rho v_x h \rangle_A + \{D_c^T\} \langle \rho v_x h \rangle_s S = \{D_r^T\} [P \Phi H] [D_r] \{T\} + \quad (2.6) \\
 & \quad (1) \qquad \qquad (3) \qquad \qquad (2) \qquad \qquad (6) \\
 & \{D_w^T\} [LH] [D_w] \{T\} + \frac{\partial}{\partial X} A \langle k \frac{\partial T}{\partial X} \rangle_A - \{D_c^T\} \left[-\frac{SC \langle k \rangle}{L_c} \right] [D_c] \{T\} - \{D_c^T\} [W] [D_c] \{K\} \\
 & \quad (7) \qquad \qquad (8) \qquad \qquad (5) \qquad \qquad (9)
 \end{aligned}$$

여기서,

- (1), (2), (3), (5), (6) : 위에 정의한 것과 동일
- (7) : 벽열전달
- (8) : 축방향 열전도
- (9) : 반경방향 난류혼합

또한,

- h : 엔탈피 (Btu/lb_m)
- W : 반경방향 유량 (lb/sec-ft) { ω = ρ vS }
- v_x : 축방향 속도 (ft/sec)
- P : 압력 (lb_f/ft²) { P = P_v = P_i }
- v_y : 반경방향 속도 (ft/sec)

2.2.3 축방향 운동량

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \langle m_i \rangle + \sum_{j=1}^I W_{ij} \langle v_z \rangle + \frac{\Delta (m_i v_{zi})}{\Delta z} = -A_r \langle \rho \rangle g_z - A_r \frac{\Delta (P)}{\Delta z} - \sum_{j=1}^I W_{ij}^M (v_{zi} - v_{zj}) - \left\{ \frac{F_{iz}}{\Delta z} \right\} \quad (2.7) \\
 & \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5) \quad (6) \quad (7)
 \end{aligned}$$

각 항의 물리적 의미는 다음과 같다.

- (1) : 체적내 운동량 변화율
- (2), (3) : 체적 V의 표면을 통한 운동량 총변화량
- (4) : Fluid mass에 작용하는 중력에 의한 body force

- (5) : Fluid mass에 작용하는 normal fluid stress (pressure)에 의한 surface force
 (6) : Fluid mass에 작용하는 fluid shear stress에 의한 surface force
 (7) : Dispersed solid에 의해 fluid에 미치는 surface force

MATRA-LMR에서는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho v_x \rangle_v A + \frac{\partial}{\partial X} \langle \rho v_x^2 \rangle_A A + \{D_c^T\} \langle \rho v_x v_y \rangle_s S = -A \frac{\partial}{\partial X} \langle P \rangle_A \\
 & \qquad (1) \qquad (3) \qquad (2) \qquad (5) \\
 & -\frac{1}{2} \left(\frac{f}{D_h} + \frac{k}{\Delta X} \right) \langle \rho v_x^2 \rangle_A A - A \langle \rho \rangle_v g_z \cos \theta - C_T \{D_c^T\} [w'] [D_c] \langle v_x \rangle \\
 & \qquad (7) \qquad (4) \qquad (8)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

여기서,

- (4) : Gravitational force
 (7) : Viscous force
 (8) : Transverse turbulent mixing

2.2.4 반경방향 운동량

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} (W_{ij}) + \frac{\Delta}{\Delta x'} (W_{ij} \langle v_x \rangle) + \frac{\Delta}{\Delta z} (W_{ij} \langle v_x \rangle) = - (s_{ij}^y \frac{\Delta}{\Delta x'} \langle P \rangle) - \left\{ \frac{F_{iz}}{\Delta x' \Delta z} \right\} \\
 & \qquad (1) \qquad (2) \qquad (3) \qquad (5) \qquad (7)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

이때 각항의 물리적 의미는 축방향 운동량 때와 같다. MATRA-LMR에서 윗 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho v_y \rangle_v S + \frac{\partial}{\partial X} \langle \rho v_y v_x \rangle_A S + C_s \{D_c\} [D_c^T] \left\{ N \frac{S}{l} \langle \rho v_y^2 \rangle_s \cos \Delta \beta \right\} = \\
 & \qquad (1) \qquad (3) \qquad (2) \text{ [net lateral momentum flux]} \\
 & \frac{S}{l} \{D_c\} \langle P \rangle_A - \frac{1}{2} \frac{S}{l} K_G \langle \rho v_y^2 \rangle_s - \langle \rho \rangle_v g_z S \sin \theta \cos \beta \\
 & \qquad (5) \qquad (7) \qquad \text{(lateral gravity force)}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

3. MATRA-LMR 코드

3.1. 개요

MATRA-LMR (Multichannel Analyzer for Transient and steady-state in Rod Array-Liquid Metal Reactor)은 그 근간을 COBRA 코드 [Wheeler, 1976]에 두고 있다. COBRA (COolant Boiling in Rod Arrays) 코드는 부수로 해석이라는 기본적인 개념을 활용하고 있다. 즉, 핵연료봉 집합체의 유로면적을 여러개의 부수로 나누고, 다시 각 부수로는 수직적으로 여러개의 control volume으로 나누어, 질량, 에너지 및 운동량 방정식을 유도하여 유량, 압력, 엔탈피 등을 계산한다. 초기 version은 1967년에 미국에 의해 개발되었다. 이 COBRA-I은 단순 반경방향 압력모델을 사용하며, 지배방정식은 코드를 정상상태에서 정방향 수직유량 및 적은량의 수평유량을 갖는 것으로 제한하면서 forward marching 방법으로 계산한다. 따라서 반경방향 유량에서의 안정조건은 항상 수직 node 길이 및 반경방향 저항계수값에 의존한다. 1970년의 COBRA-II에는 이상난류혼합과 과냉각기포 및 반경방향 열전달에 관한 상관식이 추가되었다. 또한 COBRA-III에는 과도상태를 해석할 수 있는 기능을 추가하였다. 1973년에는 COBRA-IIIC가 개발되었다. 여기에는 반경방향 압력모델 대신에 반경방향 운동량 방정식과 연료봉 열전달 모델이 추가되었다.

1976년에 개발된 COBRA-IV-i는 COBRA-IIIC에 비해 상당히 많은 부분이 개선되거나 추가되었다. 첫째로, 많은 부수로 계산이 가능하도록 기억장소 압축 기법, 보조 저장장치 및 반복계산 해법을 사용하여 상당량의 기억장소를 압축시키고 계산시간도 단축하였다. 둘째, 보조 프로그램을 사용하여 wire-wrapped 연료봉에 대한 입력자료를 구할 수 있도록 하였다. 셋째, 코드내에 들어 있는 dimension 문에 대해 보조 프로그램을 사용함으로써 일관성 있게 변경 조절할 수 있게 하였다. 넷째, 연료봉 열전달 모델에 축방향 열전도 항목을 추가하였다. 다섯째, Dump 및 Restart 기능을 추가하였다. 즉, 계산결과를 저장하였다가 나중에 동일한 계산을 계속 수행하거나 다른 문제의 초기 예상치를 얻는데 활용할 수 있다. 이와같은 개발과정은 코드를 만든 미국에서 지속적으로 수행된 결과이다. 표 3에 이러한 개발과정을 자세히 나타내었다.

국내에서는 1997년에 COBRA-IV-i를 근간으로하여 정확도를 향상시키고, 사용자 편리를 위해 여러 가지 기능을 추가한 MATRA 코드가 개발되었다 [유연중, 1997]. 추가된 주요 기능은 다음과 같다. 첫째, COBRA 코드가 여러해 계속적으로 개발되어오면서 갖고있는 불필요해지거나 사용이 정지된 subroutine이나 문장을 제거하여 코드구조를 단순화시켰으며, 코드내에서 사용되는 상수들의 유효숫자를 증가시키고 모든 실수들을 double precision으로 수정하여 보다 정확한 계산을 수행할 수 있도록 하였다.

표 3. COBRA 코드 개발 현황

특성 및 모델	COBRA Version				
	I	II	III	IIIC	IV-i
Flow Solution - Steady State					
Forward March	x	x			
Inlet Flow/Exit Pressure Boundary Conditions		x	x	x	
Pressure Drop Boundary Conditions				x	
Flow Solution - Transient					
Full Implicit			x	x	
Explicit Arbitrary Flow Field and Boundary Conditions				x	
Single Phase Flow					
Nonuniform Channel Friction		x	x	x	x
Hot Wall Friction Correlation			x	x	
Laminar Friction Correlation				x	
Two Phase Flow					
1-D Slip Flow	x	x	x	x	x
Subcooled Voids		x	x	x	x
Turbulent Mixing					
Single Phase	x	x	x	x	x
Two Phase Models		x	x	x	x
Crossflow Model					
Pressure Resistance Only	x	x	x		
Transient Momentum Equation			x	x	
Forced Diversion			x	x	
Lateral Momentum Flux				x	
Equation of State					
Reference Pressure	x	x	x	x	x
Superheated Steam Properties				x	
Geometry					
Variable Gap and Area		x	x	x	x
Grid Spacers		x	x	x	x
Blocked Crossflow (Transient)				x	
Wire Wrap Spacer			x	x	
Fluid Energy Solution					
Spatially Explicit	x	x	x	x	
Spatially Implicit				x	
Heat Conduction - Fuel Rods					
Specified Axial / Radial Heat Flux	x	x	x	x	x
CHF Correlations			x	x	
Transient Fuel Rod Model Finite Difference			x		
Axial Conduction				x	
Temperature-Dependent Conductivity				x	
Axial Fuel Zones				x	
Boiling Curve Package				x	
Heat Conduction - Fluid					
Radial Conduction		x	x	x	x
Axial Conduction				x	

표 4. COBRA-IV-i와 MATRA의 차이점

COBRA-IV-i

MATRA

(migration of code)

1. Cyber Mainframe Version --> IBM PC and HP W/S Version

(restructuring of code)

2. Fortran 66 --> Fortran 90

(elimination of unnecessary subroutines)

3. Complicated Structure --> Simplified Structure

(increase in precision and correction of real constants)

4. Single-Precision --> Double-Precision
Real Constants Real Constants

(modification of I/O format)

5. Less Precise I/O --> More Precise I/O

(switching of I/O unit system)

6. British Unit --> British and SI Unit

(option for variable axial noding)

7. Uniform Axial --> Nonuniform Axial
Node length Node Length

(implementation of Chexal-Lellouche Void Model)

8. Old Existing --> New Void Model
Void Modes

(Implementation of equal volume exchange TM & VD models)

9. Less Accurate Two-Phase --> More Accurate Two-Phase
Predictions Predictions

둘째, Fortran 66으로 작성된 코드언어를 Fortran 90으로 수정하여 재구성 함으로써 보다 용이하게 코드구조를 파악할 수 있고 사용하기에도 편리하도록 하였다. 셋째, 기존 COBRA-IV-i에서는 입·출력 단위가 british 단위 하나로 이루어져 있으나 이를 british와 SI 단위로 재구성해 사용자가 입력 및 출력의 단위를 선택할 수 있게 하였다. 넷째, COBRA-IV-i에서는 축방향 node를 나눌 때 균일한 길이로만 나누어야 계산이 가능하였으나, MATRA에서는 이를 가변적으로 사용할 수 있도록 수정하였다. 이는 부수로 blockage와 같은 문제시 특정 부분의 node를 자세히 나누어 사용하므로써 보다 효율적인 계산 수행이 되도록 하기 위한 것이다. 표 4에 이와같이 COBRA-IV-i에서 MATRA로 변경시 수정되거나 추가된 사항을 정리하였다. 또한 MATRA에 대한 코드 검증을 위해 실험과 비교하였으며, 그 결과 기존의 COBRA-IV-i 코드보다 향상된 결과를 보였다 [유연중, 1997].

그러나 여전히 MATRA는 경수로에만 적용이 가능할 뿐 액체금속로에는 사용할 수가 없었다. 이를 액체금속로에 적용할 수 있도록 개발한 것이 MATRA-LMR이다. 이를 위해 다음과 같은 사항이 수정되거나 추가되었다. 첫째, 현재 경수로의 냉각재인 물 대신 액체금속로 냉각재인 소듐에 대한 물성치를 계산하는 상관식을 subroutine으로 작성하여 코드에 재구성함으로써 코드 운용시 기본적으로 계산되도록 하였다. 물에 대한 물성치는 선택적으로 지금과 같이 입력으로 줄 수 있게 하였다. 둘째, 열전달 계수에 대한 사항을 물 대신 소듐에 대한 상관식으로 수정하였으며, 현재 소듐 열전달 계수로 널리 사용중인 상관식중 세가지를 선택적으로 취하여 계산이 가능하도록 코드를 재구성하였다. 마지막으로 핵연료 집합체내 각 부수로의 형태 및 wire-wrap에 의해 유발되는 압력강하는 현재 자주 이용되는 압력강하 상관식 세가지를 코드내에 추가함으로써 선택적으로 적절한 상관식을 이용하여 마찰계수 및 압력강하에 관한 계산을 수행할 수 있도록 하였다. 이에 대한 좀 더 자세한 사항은 뒤에 다시 언급하였다.

3.2 수치해법

MATRA-LMR의 질량, 선형 운동량 및 에너지 보존방정식은 오일러 control volume을 적용하여 유도할 수 있다. 이러한 지배방정식을 풀기 위해 MATRA-LMR에서는 2가지의 수치해법을 사용하고 있는데, 하나는 음해법 (Implicit solution scheme)으로 이는 정상상태나 변화가 작은 과도상태를 모사하는데 사용된다. 다른 하나는 양해법 (Explicit solution scheme)으로 유량의 방

향이 바뀌는 등 변화가 심한 과도상태에 주로 사용된다. 즉, MATRA-LMR 코드내 음해법에서 축방향 유량은 항상 양(+) 방향이고 반경방향 유량에 비해 커야한다는 가정을 가지고 출발한다. 이에비해 양해법은 항상 양(+) 방향을 가져야 한다는 제한조건은 없지만 시간차 (time step)가 작아야 한다는 제한을 갖고 있다. 또한 양해법은 전적으로 과도기 계산에만 사용되고 있다. 이는 음해법이 정상상태 및 과도기 계산을 모두 수행할 수 있는것에 비해 다른점이다. 하지만 역류(recirculation flow)가 흐르는 경우 현재의 음해법으로 정상상태를 구할 수 없지만 양해법으로는 바로 과도기 계산을 수행함으로써 구할 수 있는 장점이 있다. 이밖에 음해법에서는 wire-wrap spacer 모델을 사용하여 wire pitch 및 축방향 유량의 함수로서 wire-wrap에 의해 gap을 통한 반경방향 유량을 구하고 있다. 좀더 자세한 내용은 다음 절에 설명하였다.

3.2.1 음해법 (Implicit solution scheme)

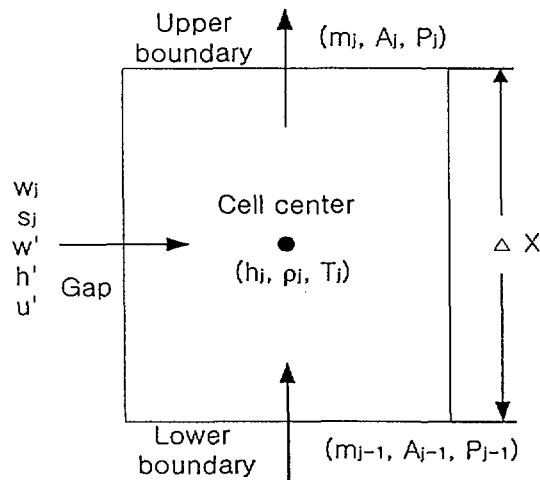


그림 4. 음해법 변수 구성도

윗 그림에서,

- m : 축방향 유량 (lb/sec)
- A : 부수로 유로면적 (ft²)
- P : 압력 (lb/ft²)
- ρ : 혼합밀도 (lb/ft³)
- T : 부수로 온도 (°F)
- w : 반경방향 유량 (lb/sec-ft)
- w' : 난류 반경방향 유량 (lb/sec-ft)
- s : gap width (ft)

- h : 혼합 엔탈피 (Btu/lb)
- h' : 난류 반경방향 유량에 의해 전달된 엔탈피 (Btu/lb)
- $(A_{avg})_j$: 평균 유로면적 = $0.5 (A_j + A_{j-1})$
- $(m_{avg})_j$: $0.5 (m_j + m_{j-1})$

시간도함수는 1차 후진차분으로 구성되며, 시간차분과 관련된 것을 제외한 주된 변수는 new time, 즉 현재의 시간으로 가정하여 동시에 해를 구하게 된다. 따라서 방정식은 time step 크기에 관계없이 안정된 수치해를 얻게된다. 사실 코드내에서 음해법 정상상태해는 $10e10$ 의 time step를 사용하여 구하게 됨을 알 수 있다.

공간도함수에서는 upwind (donor cell) 차분이 대류항에 전적으로 사용된다. 여기서 donor cell의 정의는 축방향 유량이 양(+) 방향이라는 가정하에 이루어졌다. 각 높이에서 모든 부수로의 주요변수는 반경방향 matrix와 연결하여 동시에 해를 구하게 된다. 각 높이에서 모든 부수로의 엔탈피, 밀도, 반경방향유량, 축방향유량, 압력은 다음 높이로 진행되기전에 동시에 해를 구하게 된다.

경계조건은 입구유량, 엔탈피분포, 제로 반경방향유량, 출구에서의 압력등이다. 정상상태 j 높이에서 계산을 위한 h, w, m 의 초기예측치는 $j-1$ 에서 얻어진 해와 $j=1$ 일 때 초기조건으로 주어지는 값에 의해 구해진다. 이와같은 계산후 부수로 압력이 계산된다. 과도기에서 변수들의 초기치는 전 time step에서 얻어진 것을 사용한다.

전체적인 계산순서는 그림 5에 나타나 있다. 이를 좀더 자세히 설명하면, 다음과 같은 순서에 의해서 계산이 이루어진다.

(1) 초기 부수로 유량 : 입구에서의 각 부수로의 유량은 다음과 같이 입력으로 주어진 전체유량을 전체 부수로 면적에 대한 각 부수로의 비율로 곱해주므로써 구하여 진다.

$$m_i = m_t * A_i/A_t \quad (3.1)$$

(2) 에너지 보전식 : 위에서 구해진 유량과 각 부수로에 전달되는 열량, 그리고 $j-1$ 에서의 온도를 이용하여 j 위치에서의 새로운 밀도를 구한다.

$$Q_i = m_i * (h_{out} - h_{in}) \quad (3.2)$$

(3) 연속 방정식 : j 위치에서의 반경방향 유량과 밀도 그리고 $j-1$ 에서의 축방향 유량을 가지고 연속방정식을 사용하여 j 위치의 축방향 유량을 구한다.

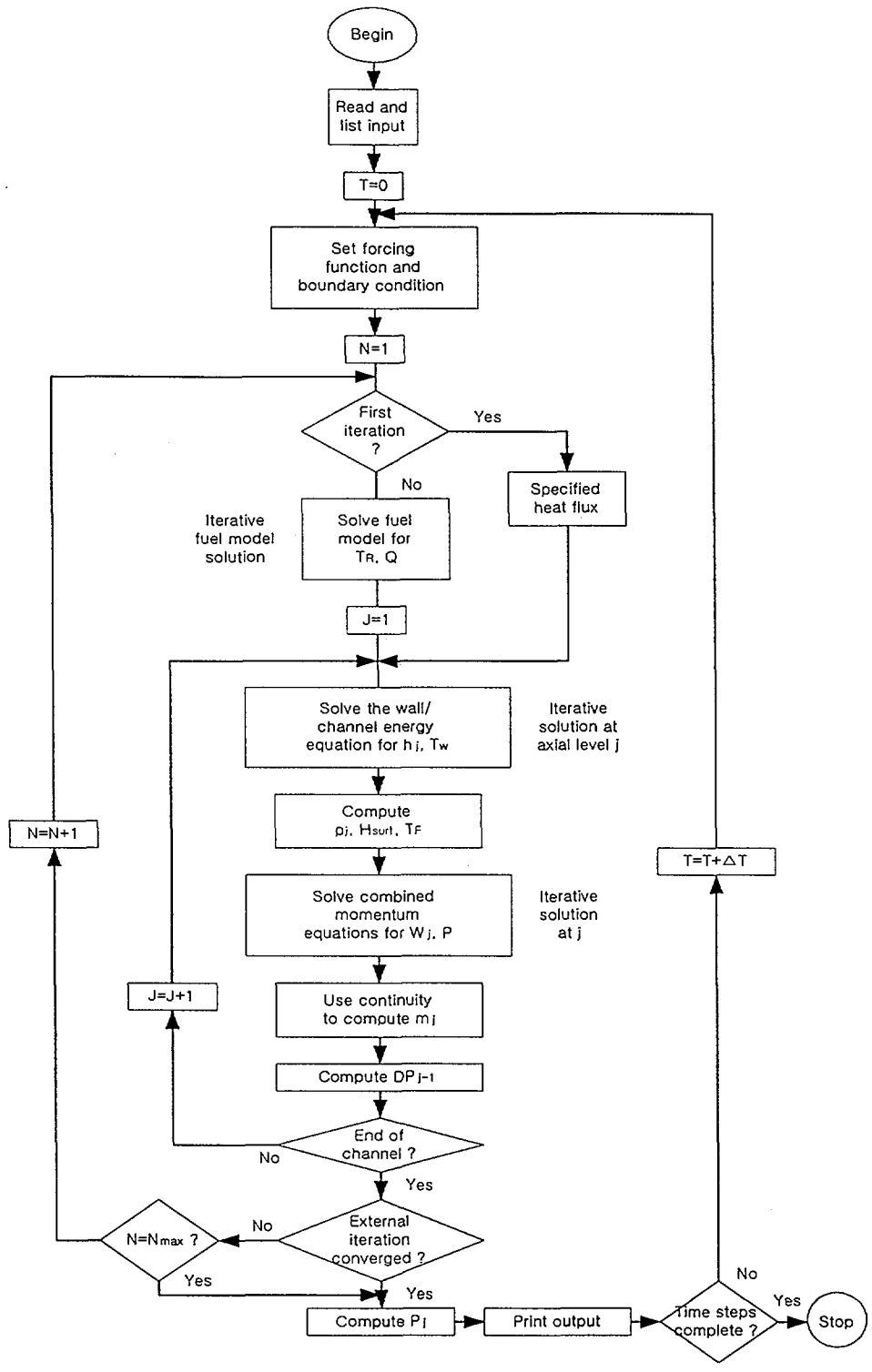


그림 5. 음해법 계산 흐름도

$$\frac{1}{\Delta t}(A_{avg})_j(\rho_j - \rho_j^n) + \frac{m_j - m_{j-1}}{\Delta X} + \{D_c^T\}\{w_j\} = 0 \quad (3.3)$$

(4) 운동량 방정식 (압력강하) : j 위치에서 구하여진 축방향 유량을 이용하여 새로운 속도를 얻고, 이를 사용하여 각 부수로의 j 위치에서의 압력강하를 구한다.

$$v_i = m_i / (A_i \rho_i) \quad (3.4)$$

$$\Delta P_i = f (D_e/L) (1/2) \rho_i v_i^2 \quad (3.5)$$

(5) 각 부수로 출구에서의 ΔP 비교 : 출구에서의 ΔP 는 같다는 가정하에 각 출구에서 얻어진 부수로의 압력강하를 비교하여 이에대한 차이를 구한다.

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \dots \quad (3.6)$$

(6) 입구에서의 새로운 축방향 유량 : (5)에서 구해진 각 부수로별 압력강하를 비교하여 그 비율에 따라 부수로별로 새로운 속도를 계산하고 이를 이용하여 입구에서 새로운 유량을 계산한다.

$$m_i = \rho_i A_i v_i \quad (3.7)$$

(7) 부수로 출구에서의 ΔP 가 각 부수로와의 비교시 에러범위에 들어올 때, 즉 (5)번 항이 만족할 때까지 (2)~(6) 과정을 반복한다.

3.2.2 양해법 (Explicit solution scheme)

Control volume 중심에 ρ , P , h 와 같은 상태변수를 정의하고, 축/반경 방향의 control volume 가장자리에는 m , w 같은 유량변수를 정의한다. 축/반경방향 운동량 방정식은 각 방향의 유량에 따라 별개의 control volume을 정의하여 사용한다. 그림 6은 양해법 control volume에서 정의된 주요변수를 나타내었다.

여기에서도 대류와 관련된 변수항에는 donor cell 방법이 사용된다. 그러나 음해법과는 달리 축방향유량이 항상 양(+) 방향이어야하는 제한은 없고 control volume 경계면에서의 유량방향에 따라 이웃한 node의 값이 선택되어진다. 즉, 에너지방정식에서 축방향유량 m_j 에 의한 엔탈피량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_j^* = h_j \quad \text{if } m_j > 0 \quad (3.8a)$$

$$h_j^* = h_{j+1} \quad \text{if } m_j < 0 \quad (3.8b)$$

반경방향 대류항에 대해서도 같은 방법으로 유량의 방향에 따라 이웃한 부수로의 값을 선택하게 된다.

$$h_j^* = h_k \quad \text{if } w_j > 0 \quad (3.9a)$$

$$h_j^* = h_l \quad \text{if } w_j < 0 \quad (3.9b)$$

여기에서 k와 l은 이웃한 부수로를 나타내며, 유량의 양(+) 방향은 k에서 l로 흐른다.

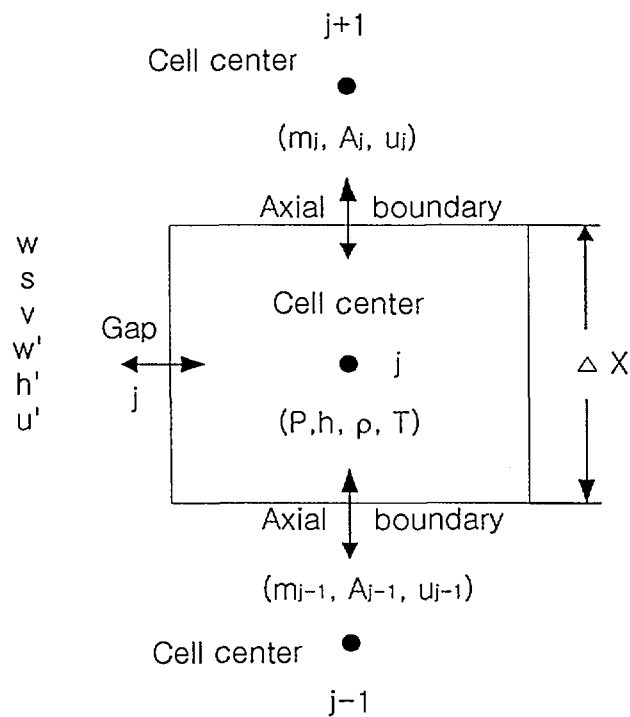


그림 6. 양해법 변수 구성도

양해법 계산은 time step을 갖고 핵연료봉 모델을 시작으로 수행된다. 유량 m과 w에 대한 초기예상치는 초기조건에서의 압력과 유량을 이용한 운동량 방정식으로부터 구하게 된다. 이러한 초기치는 압력과 유량을 조절하여 반복작업을

수행함으로써 점차 각 cell에서의 정확한 값을 얻을 수 있게 된다. 즉, 각 cell에서의 새로운 압력변화율을 구하고, 이를 이용하여 운동량 방정식을 통해 새로운 유량을 계산하게 된다. 다음 이 유량을 사용하여 연속방정식에서 새로운 밀도를 계산한다. 마지막으로 새로운 엔탈피가 이 밀도와 압력에 의한 상태방정식을 사용하여 구해지게 된다. 이러한 계산작업은 최대에러가 주어진 값 이하로 될 때까지 반복하여 수행된다. 그림 7은 이러한 양해법 계산 흐름도를 나타낸 것이다. 이때 중요한 것은 계산에서 빠른 수렴을 얻기 위해 촉진 factor (accelerator)를 사용하지 말아야 한다. 그 이유는 이것이 계산에서 중요한 압력 변화율을 수정함으로써 반복작업으로 인한 에러를 감소시키는 것을 방해하기 때문이다. 실제 촉진 factor를 사용함으로써 최대 얻게 되는 계산시간 감소는 20%이나 이로 인해 발생하는 밀도의 편차에 의한 계산시간 증가는 이보다 크기 때문이다.

3.2.3 수치적 계산 수행

위 두 수치적 방법은 반복법을 사용하고 있으며, 이로 인해 항상 유한한 반복횟수에 의해 에러가 생기게 된다. 또한 불연속인 공간 및 시간차에 대해 유한한 수치를 이용한 문제 해석은 또 다른 에러를 유발한다. 이렇듯 복잡한 비선형 코드 계산에서 완벽한 수학적 해 및 안정성을 갖기란 불가능하다. 다만 실험이나 해석적 수단을 활용하여 코드의 예측능력을 평가하고 이를 통해 정확한 해석에 대한 접근을 할 수 있다. 다음은 두가지 영역에 대해 코드의 적용성을 설명하였다. 하나는 과도기 안정성, 다른 하나는 반복적 해수렴.

(가) 과도기 안정성

여기에서는 주로 양해법에 대해 언급하였다. 음해법인 경우 모든 time step에 대해 무조건적으로 안정성을 갖기 때문이다. 양해법에서 time step을 조정해야 하는 주된 요인은 운동량속 (momentum flux)에서 발생하며 이는 다음과 같다.

$$\Delta t < \frac{\Delta X}{u + \frac{S \Delta X}{A} v} \quad (3.10)$$

대부분의 과도기 계산은 계산도중 조건이 변하며, 이로 인해 초기에 적절하다고 주었던 time step 값이 나중에는 충분하지 않을 수가 있다. 또한 이러한 것을 미리 예방하고자 너무 작은 time step를 주면 계산은 실제 필요한 것보다 많은

량의 계산시간을 소요하게 된다. 따라서 가장 효과적인 것은 계산진행에 따라서 적절하게 time step를 조절해 주어야 한다. 이와같이 courant 조건으로 사용할 수 있는 것이 식 (3.10)이다. 즉, 새로운 time step, Δt^{n+1} ,은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta t^{n+1} = 2\left(\frac{1}{\Delta t'} + \frac{1}{\Delta t^n}\right)^{-1} \quad (3.11)$$

여기서

Δt^n = 현재의 time step

$$\Delta t' = \frac{C \Delta X}{u + \frac{S \Delta X}{A} v}$$

Courant 수, C,의 적절한 값은 0.2이고 최대 0.7을 넘지 않아야 한다. 계산수행시 큰 변화나 갑작스런 변화가 발생하였을 때, time step은 빠르게 조절되지 못하고 계산이 실패하는 경우가 발생한다. 이런 경우 문제를 해결하는 유용한 방법은 코드의 restart option을 이용하여 짧은 과도기를 여러번 수행하는 것이다. 즉, 갑작스런 변화에 의한 불안정성이 발생하였을 때 과도기중 가장 작은 time step을 적용하여 restart를 수행할 수 있다.

(나) 반복적 해수렴

음해법을 사용할 때 엔탈피나 축방향유량의 변화에 대해서는 빠르게 수렴이 되지만 반경방향 유량에 대한 해는 느리게 수렴이 된다. 이런 경우 다음과 같은 방법이 추천된다. 계산을 일단 N번 iteration 한 후 결과를 보고 restart option을 이용하여 N+5번 돌린 다음 주요 변수값에 대해 비교한 후 큰 차이가 없다면 이를 수렴되었다고 볼 수 있다.

처음 4~5번은 수렴하나 그 다음에는 발산하는 경우, 이때에는 때때로 유량과 압력에 대한 damping factors를 수정함으로써 계산을 가능하게 할 수 있다. 유량과 압력에 대한 damping factors에 대한 적절한 값은 0.6~0.8과 0.8이 추천되고 있다.

수렴은 또한 geometry에 대한 입력데이터에 의해서도 영향을 받는다. 일반적으로, 부수로 면적에 대한 축방향 mesh 크기의 제곱 ($A/\Delta X^2$)은 0.1~10을 유지하는 것이 유리하다. 이러한 값은 gap spacing과 centroid-centroid distance의 비인 S/l 값에도 적용될 수 있다.

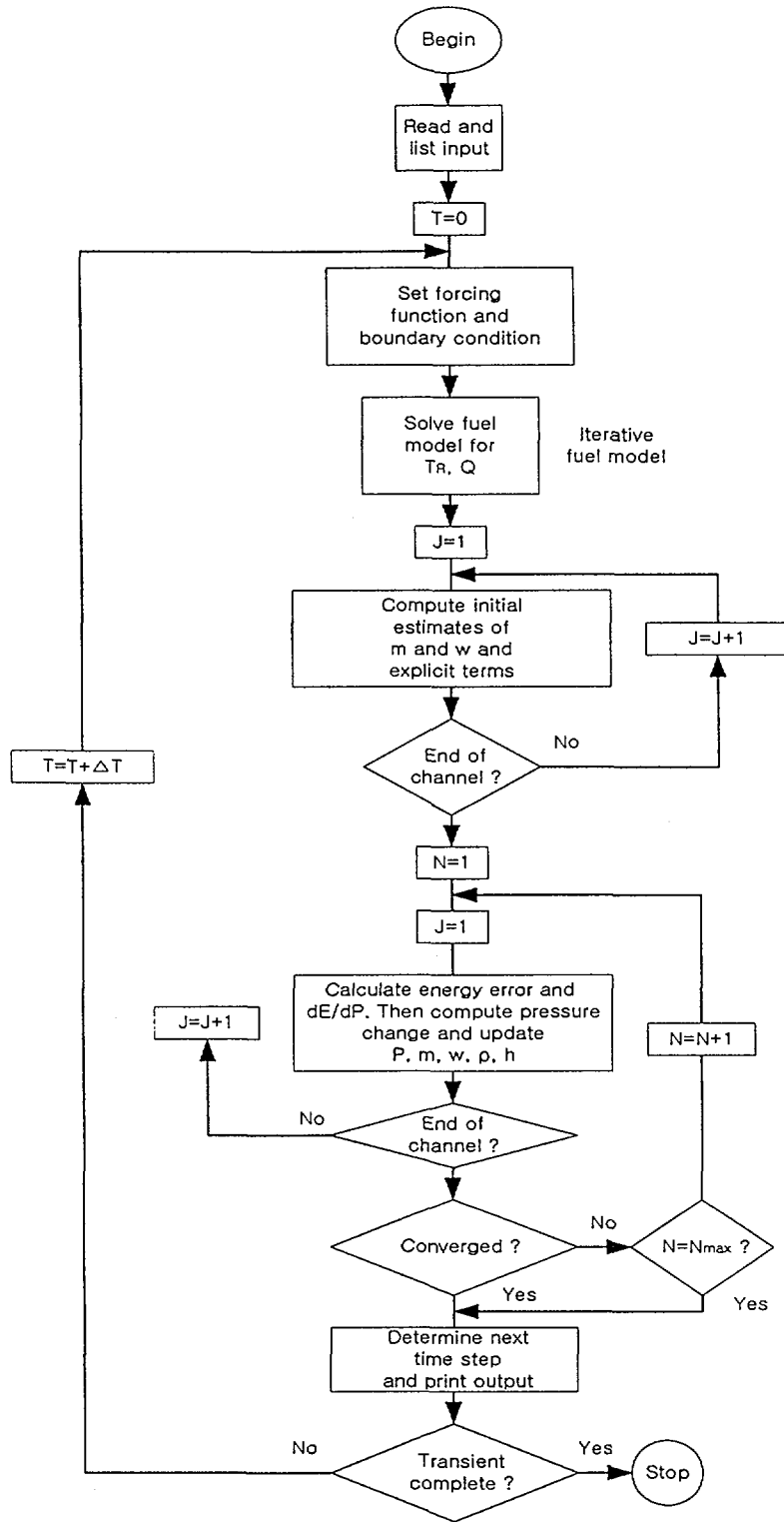


그림 7. 양해법 계산 흐름도

또한 이웃한 부수로와의 면적비는 $5 > A_i/A_j > 0.2$ 사이에 두어야 한다. 만약 면적비가 이 범위를 벗어나면, 상대적으로 큰 면적 부수로에서의 작은 유량 변화가 보다 작은 면적 부수로에서는 유량에 큰 변화를 발생시킬 수 있기 때문에 이 경우 수치적으로 불안정성을 초래할 수 있다.

이와함께 급격한 반경방향 출력분포와 작은 유량을 갖는 문제에 대해서는 음해법으로는 안정성을 찾기 힘들며, 어떠한 dmapping 값을 사용하여도 해를 구할 수 없는 경우가 있다. 이때에는 양해법을 사용함으로써 문제를 해결할 수 있다.

3.3 핵연료봉/벽 모델

코드내 열전달 모델은 물체내 열전달에 의한 온도 분포와 이웃한 부수로로의 표면 열속을 계산하게 된다. 이때 두가지 열전도 모델이 사용되는데 하나는 핵연료봉 열전달 모델로 핵연료봉내 온도분포 및 표면 열속을 계산하고, 다른 하나는 전도성 벽을 사이에 둔 두 부수로 사이의 열전달을 계산하는 벽 모델이 있다.

3.3.1 핵연료봉 모델

이 모델은 핵연료봉내 온도분포를 계산하며 이때 축방향 열전도 효과와 온도 의존적인 열전도성을 고려하고 있다. 해는 반경방향에 대해 Method of Weighted Residuals (MWR) 방법 그리고 시간과 축방향에 대해서는 유한차분법을 사용하여 구하고 있다. 이에대한 자세한 설명은 참고문헌 [Stewart, 1977]에 나타나 있다.

3.3.2 벽 모델

벽을 사이에 둔 두 부수로 사이의 열전달은 lumped parameter, 단일 cell 열전도 모델을 사용하여 계산한다. 이때 수치해법에 따라 달리 계산이 되는데 음해법에서는 벽 에너지 방정식은 유체 에너지 방정식과 함께 동시에 풀게 되지만, 양해법에서는 독립적으로 벽 에너지 방정식에서 유체 에너지 방정식에 주게 되는 열속을 계산하게 된다.

3.4 상관식

코드에서는 5가지의 보존방정식 - 연속, 유체 에너지, 축방향 운동량, 반경방향 운동량, 열전도 - 이 사용되고 있다. 이러한 5가지 보존식에다 유체상태 상관식이 추가되어 6가지 변수 - 유체밀도, 엔탈피, 축방향 유체, 반경방향 유체, 압력, 핵연료 온도 -를 계산하게 된다. 그러나 완벽한 해를 구하기 위해서는 열전달계수, 마찰계수, 난류혼합변수에 대한 절적인 정의가 필요하다.

3.4.1 물성치

코드내 상태방정식의 주된 목적은 유체 밀도와 엔탈피와의 관계를 제공하는 것이다. 다른 온도의존성 물성치는 - 열전도성, 점성 등 - 엔탈피에 관련되어 있다. 과냉각 유체 물성치는 코드내 표로 입력되어 사용되고 있으며, 표에서 정확한 값을 얻기 위해 linear interpolation 방법을 이용하고 있다. 또한 모든 물성치는 입력으로 주어진 압력을 기준으로 사용되고 있다. 입력변수로 주어지는 9가지 물성치는 포화압력과 온도, 액체 및 가스 비체적, 액체 및 가스 엔탈피, 포화액체점성, 열전도성 및 표면장력 등이다. 이때 압력은 포화상태를 결정하는데 쓰이고, 온도는 열전달에 주로 사용된다. 유체가 과냉각일 때 유체 비체적 및 엔탈피는 상태를 결정하며, 가스값은 사용되지 않는다. 점성과 전도성은 상관식에 쓰이는 Reynolds 및 Prandtl 수를 얻는데 이용되고, 또한 전도성은 유체 열전도 계산에도 역시 사용된다. 만약 유체 엔탈피가 기준압력에서 포화 가스 엔탈피값을 넘어서면 계산은 더 이상 수행을 하지 못한다.

MATRA에서는 경수로에 적용하기 위해 물에 대한 물성치만 고려 되어있다. 따라서 MATRA-LMR 개발과 함께 액체금속로 냉각재로 사용하고 있는 소듐에 대한 물성치를 구하기 위해 Argonne National Laboratory에서 발표한 상관식 [Golden, 1967]을 이용하여 MATRA-LMR에서 요구하는 물성치를 구하는 subroutine을 작성하여 이를 코드내에 포함시켰다. 이로써 기본적으로 코드 계산시에 소듐 물성치가 사용될 수 있도록 하였다. 또한 다른 유체의 물성치를 사용할 경우에 대해서는 기존과 같이 입력자료 상에 이를 포함시키므로써 계산이 가능하도록 하였다.

3.4.2 열전달 계수

열전달계수는 각 부수로의 상태로부터 직접 구하여지며, 핵연료봉 모델에서 열전달을 구하기위해 핵연료봉 주위의 평균 열전달계수와 부수로의 평균온도가 다음과 같이 구하여진다.

$$T_{avg} = \frac{1}{\Phi_{avg}} \sum_{i=0}^N (\Phi_i T_i) \quad (3.12a)$$

$$H_{avg} = \frac{1}{\Phi_{avg}} \sum_{i=0}^N (\Phi_i H_i) \quad (3.12b)$$

액체금속로에 대한 열전달 상관식은 다음과 같은 Nusselt (Nu) 관계식을 따르고 있다.

$$Nu = A + B (Pe)^C \quad (3.13)$$

여기서 Pe = Peclet 수 즉, $\{Pe = Re Pr = (DV \rho / \mu) (c_p \mu / k) = (DV \rho c_p / k)\}$. A, B, C는 geometry와 경계조건에 따라 결정되는 상수값이다. 또한 Peclet 수는 Reynolds와 Prandtl 수의 곱으로, 그 결과 점도에 대한 항은 제거된다. 즉, 액체금속 냉각재의 열전달에서는 점도가 별 영향이 없음을 알 수 있다. MATRA-LMR에서는 최근에 수행된 실험값에 근거하여 발표된 상관식을 취하고 있으며, 이는 현재 액체금속로의 소듐 열전달계수로 가장 많이 사용하고 있는 상관식이다. 특히 P/D (Pitch to Diameter)는 액체금속로 열전달계수의 중요한 변수로 작용하고 있다. 따라서 실험에서 얻어진 여러 상관식들도 그 적용범위를 P/D에 의해 제한하고 있다.

(가) Schad-Modified 상관식

이는 Carelli가 CRBRP 해석을 위해 Schad 상관식을 수정한 것으로 P/D의 범위는 1.1에서 1.4까지이며, Peclet (Pe) 수에 따라 두 식으로 나누어져 사용되고 있다 [Carelli, 1976].

- $150 < Pe \leq 1000$

$$Nu = [-16.15 + 24.96 (P/D) - 8.55 (P/D)^2] Pe^{0.3} \quad (3.14)$$

- $Pe \leq 150$

$$Nu = 4.496 [-16.15 + 24.96 (P/D) - 8.55 (P/D)^2] \quad (3.15)$$

(나) Westinghouse 상관식

FFTF 해석에 사용된 상관식으로 이 또한 적용범위를 P/D는 1.1에서 1.4까지 그리고 Pe는 10에서 5000까지로 정해 놓고 있다 [Carelli, 1976].

$$Nu = 4.0 + 0.33 (P/D)^{3.8} (Pe/100)^{0.86} + 0.16 (P/D)^{5.0} \quad (3.16)$$

(다) Lyon-Martinelli 상관식

윗 두 상관식은 Rod bundle에 대한 실험에서 얻어진 것이나, 이 상관식은 원형 tube내로 유체가 흐르고, 이 tube 벽을 따라 일정한 열속이 이루어질 때 얻어진 상관식으로 1951년 Lyon에 의해 발표되었다 [Lyon, 1951].

$$Nu = 7 + 0.025 Pe^{0.8} \quad (3.17)$$

기존 MATRA의 열전달계수는 냉각재로 물을 사용하는 PWR 해석을 위해 Dittus-Boelter 상관식을 사용하고 있다. 이 또한 input option에 의해 위 세 상관식과 함께 선택적으로 사용할 수 있게 하였다.

3.4.3 핵연료 집합체내의 압력강하

노심설계에 있어서 펌프 압력헤드에 의해 주어지는 압력강하는 액체금속로의 운전조건, 즉 노심의 입구 및 출구온도 같은 변수에 영향을 미치고 있다. 최대 압력강하 역시 일차측 loop 유량의 함수로 설계된 펌프헤드의 제한조건에 의해 결정된다. CRBRP 설계를 예로들면 최대 피복재 중심온도가 1200 °F로 주어지고, 설계 압력강하가 128 psi이면 이러한 설계조건을 넘지 않는 최대 노심입구 및 출구온도는 705 °F, 965 °F이다 [Tang, 1978].

이러한 노심내 압력강하는 주로 집합체 입구노즐, 핵연료봉, 집합체 출구노즐에서 발생하는데 그중 핵연료봉에서 가장 많은 압력강하가 발생하고 있다. 압력강하는 다음 두 성분에 의해서 발생하는데 하나는 형태손실에 의한 압력강하이므로 다른 하나는 마찰에 의한 압력강하이다.

- 형태손실에 의한 압력강하

$$\Delta P = K (\rho V^2/2) \quad (3.18a)$$

- 마찰에 의한 압력강하

$$\Delta P = f (L/D) (\rho V^2/2) \quad (3.18b)$$

이러한 방법은 grid 타입의 spacer 계통에서는 만족할 만한 결과를 보이나, wire-wrap spacer, 특히 조밀하게 구성된 계통에서는 정확하지 못하다. 따라서 일반적으로 wire-wrapped 핵연료봉 압력강하 계산은 실험에서 구한 압력강하 상

관식을 사용하고 있다. 초기 액체금속로 핵연료봉 압력강하를 계산하기 위해 널리 사용된 것은 1960년도 초반 페르미 발전소를 위해 Stordeur [1961]가 개발한 상관식이었다. 1960년말 Sangster [1968]는 rod pitch-to-diameter (P/D) ratio, wire lead-to-diameter (H/D) ratio를 사용하여 wire spacer를 위한 상관식을 개발하였다. 그 후 Novendstern [1972]은 이전 상관식에다 실험에서 얻은 결과를 이용하여 액체금속로 핵연료 집합체내의 압력강하를 계산하기 위한 상관식을 개발하였다. 이는 또 Chiu-Rohsenow-Todreas [1978]에 의해 개량되었으며, 최근에는 Cheng-Todreas [1986]에 의한 상관식이 발표되었다. 여기에서는 Novendstern, Chiu-Rohsenow-Todreas, Cheng-todreas 모델들에 대해 상세히 언급하였다.

(가) Novendstern에 의한 압력강하 모델

6각형 duct 안에 장전된 핵연료봉을 wire로 감아서 간격을 유지시킴과 동시에 유랑혼합을 강화시키는 wire-wrap 개념은 현재 액체금속로 설계에 보편적으로 도입된 개념이다. 그러나 wire에 의해 발생하는 복잡한 기하형상 때문에 단순한 모델로는 핵연료봉 지역내의 압력강하를 계산식으로 정확히 예측하기가 힘들다. 따라서 실험에 의한 모델링 방법이 매우 유용하게 쓰일 수 있게 된다. Novendstern은 그 이전의 압력강하 모델 개념과 실험결과를 이용하여 새로운 상관식을 발표하였는데 이는 매끈한 원관의 난류유동에서 구한 압력강하에다 실험에서 구한 보정치를 곱하여 계산하는 것이다. 특히 Novendstern 모델은 압력강하가 주로 식 (3.18b)의 마찰에 의한다는 가정하에 계산되었다 [Novendstern, 1972].

$$\Delta P = M f_s (L/D_{ei}) (\rho V_i^2/2) \quad (3.19)$$

여기서 M은 wire가 없는 매끈한 관에서의 마찰 압력강하에 wire의 영향을 보정하기 위해 실험에서 구한 보정치이다. 이는 기본적으로 wire lead와 핵연료봉 직경비 (H/D) 및 핵연료봉의 pitch와 핵연료봉 직경비 (P/D)의 함수로 구성되어 있다. 또한 D_{ei} 와 V_i 은 그림 8에서 보듯이 각각 부수로에서의 등가수력직경과 유랑의 속도를 나타내며, L은 부수로의 축방향 길이를 나타낸다. 각 부수로내 냉각재의 평균밀도는 같다고 가정한다. M은 다음과 같다.

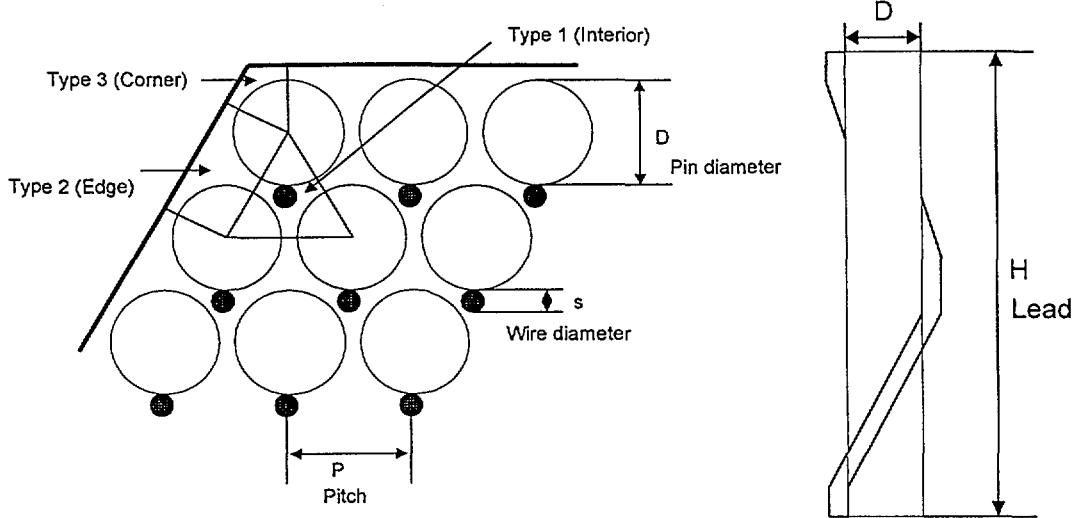


그림 8. 부수로 형태 및 Wire-wrap 형상

$$M = \left[\frac{1.034}{(P/D)^{0.124}} + \frac{29.7 (P/D)^{6.94} (Re)^{0.086}}{(H/D)^{2.239}} \right]^{0.885} \quad (3.20)$$

매끈한 관에서의 마찰계수 (f_s)는 Blasius 실험식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_s = 0.316 / Re_i^{0.25} \quad (3.21)$$

여기서 Re_i 또한 각 부수로 타입에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$Re_i = (\rho V_i D_{ei}) / \mu \quad (3.22)$$

식 (3.19)에서 압력강하를 계산하기 위해서는 마지막으로 부수로에서의 유속 V_i 가 요구된다. 집합체내에서는 각 부수로간의 압력강하가 같기 때문에, 유량의 속도는 마찰계수 관계식을 사용하여 구할 수 있다. 그림 8에 나타낸 세 부수로 타입의 압력강하가 같다고 가정하면 다음과 같다.

$$f_1 (L/D_{e1}) (\rho V_1^2/2) = f_2 (L/D_{e2}) (\rho V_2^2/2) = f_3 (L/D_{e3}) (\rho V_3^2/2) \quad (3.23)$$

또한 각 부수로의 마찰계수 관계식을 다음과 같이 가정하였다.

$$f_i = C / Re_i^m = C / (\rho V_i D_{ei} / \mu)^m \quad (3.24)$$

여기서 C와 m은 세 부수로 타입 모두 같다고 가정하였다. 식 (3.24)를 식 (3.23)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_1^{(2-m)} / D_{e1}^{(1+m)} = V_2^{(2-m)} / D_{e2}^{(1+m)} = V_3^{(2-m)} / D_{e3}^{(1+m)} \quad (3.25)$$

이때 비압축성 유량을 가정하여 연속 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$N_1 V_1 A_1 + N_2 V_2 A_2 + N_3 V_3 A_3 = V_{TOT} A_T \quad (3.26)$$

여기서, N_1, N_2, N_3 는 집합체내 각 부수로 타입의 총 개수, 그리고 A_1, A_2, A_3 는 각 부수로 타입의 유로면적을 나타내며, V_{TOT} 는 집합체의 평균유속을, A_T 는 총 유로면적을 나타낸다. 식 (3.25)에서 V_2 와 V_3 를 V_1 으로 나타내어 식 (3.26)에 대입하면 다음과 같다.

$$V_1 [N_1 A_1 + N_2 A_2 (D_{e2}/D_{e1})^\alpha + N_3 A_3 (D_{e3}/D_{e1})^\alpha] = V_T A_T \quad (3.27)$$

여기서 $\alpha = (1+m)/(2-m)$. 난류 마찰계수에 대한 Blasius 관계식을 적용하면 $m=0.25$. 따라서 $\alpha=0.714$ 이다. 식 (3.27)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{V_{TOT} A_T}{N_1 A_1 + N_2 A_2 \left(\frac{D_{e2}}{D_{e1}}\right)^{0.714} + N_3 A_3 \left(\frac{D_{e3}}{D_{e1}}\right)^{0.714}} \quad (3.28)$$

V_2 와 V_3 에 대해서도 위와 같이 구할 수 있다.

$$V_2 = \frac{V_{TOT} A_T}{N_2 A_2 + N_1 A_1 \left(\frac{D_{e1}}{D_{e2}}\right)^{0.714} + N_3 A_3 \left(\frac{D_{e3}}{D_{e2}}\right)^{0.714}} \quad (3.29)$$

$$V_3 = \frac{V_{TOT} A_T}{N_3 A_3 + N_2 A_2 \left(\frac{D_{e2}}{D_{e3}}\right)^{0.714} + N_1 A_1 \left(\frac{D_{e1}}{D_{e3}}\right)^{0.714}} \quad (3.30)$$

이러한 계산을 위해서 사용된 등가수력직경 (D_e)는 다음과 같이 정의한다.

$$D_{ei} = 4 A_i / P_{wi} \quad (3.31)$$

여기서 A_i 는 각 부수로의 유로단면적, P_{wi} 는 유체와 접촉하는 둘레이다. 이를 각 부수로 타입별로 정리하면 다음과 같다.

- 부수로 타입 1 (Interior)

$$A_1 = \frac{\sqrt{3}}{4} P^2 - \frac{\pi D^2}{8} - \frac{\pi s^2}{8} \quad (3.32a)$$

$$P_{w1} = \frac{\pi D}{2} + \frac{\pi s}{2} \quad (3.32b)$$

- 부수로 타입 2 (Edge)

$$A_2 = P \left(\frac{D}{2} + s\right) - \frac{\pi D^2}{8} - \frac{\pi s^2}{8} \quad (3.33a)$$

$$P_{w2} = P + \frac{\pi D}{2} + \frac{\pi s}{2} \quad (3.33b)$$

- 부수로 타입 3 (Corner)

$$A_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{D}{2} + g\right)^2 - \frac{\pi D^2}{24} - \frac{\pi s^2}{24} \quad (3.34a)$$

$$P_{w3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{D}{2} + g\right) + \frac{\pi D}{6} + \frac{\pi s}{6} \quad (3.34b)$$

이때 P 는 rod pitch, D 는 rod 직경, s 는 wire 직경, g 는 duct와 rod 사이의 길이를 나타낸다.

(나) Chiu-Rohsenow-Todreas (CRT)에 의한 압력강하 모델

CRT 모델은 압력강하를 보다 정확히 계산하기 위해서 Novendstern 모델을

개선한 것이다 [Chiu, 1978]. 즉 CRT 모델에서는 압력강하를 마찰에 의한 항과 wire-wrap에 수직인 유동으로부터의 형태손실에 의한 항으로 구성한다.

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_r \quad (3.35)$$

먼저 형태손실에 의한 항 (ΔP_r)을 살펴보면, 식 (3.18a)에서 형태계수 K는 여기서 $C_D A_r / A'$ 로 표현된다. 여기서 C_D 는 무차원 상수, A_r 은 부수로내 wire-wrap의 투영면적, A' 는 wire-wrap이 없을 때의 부수로 면적을 나타낸다. 여기서 다시 C_D 는 wire-wrap에 수직인 속도 (V_p) 그리고 wire가 없는 부수로내에서의 마찰계수 (f_s)와의 관계식에 따라 형태손실에 의한 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_r (\text{one lead}) = C_1' f_s (A_r / A') (\rho V_p^2 / 2) \quad (3.36)$$

전체 부수로 길이 (L)를 고려하면 L/H 만큼의 lead가 있으므로 다음과 같이 된다.

$$\Delta P_r = C_1' f_s (A_r / A') (L/H) (\rho V_p^2 / 2) \quad (3.37)$$

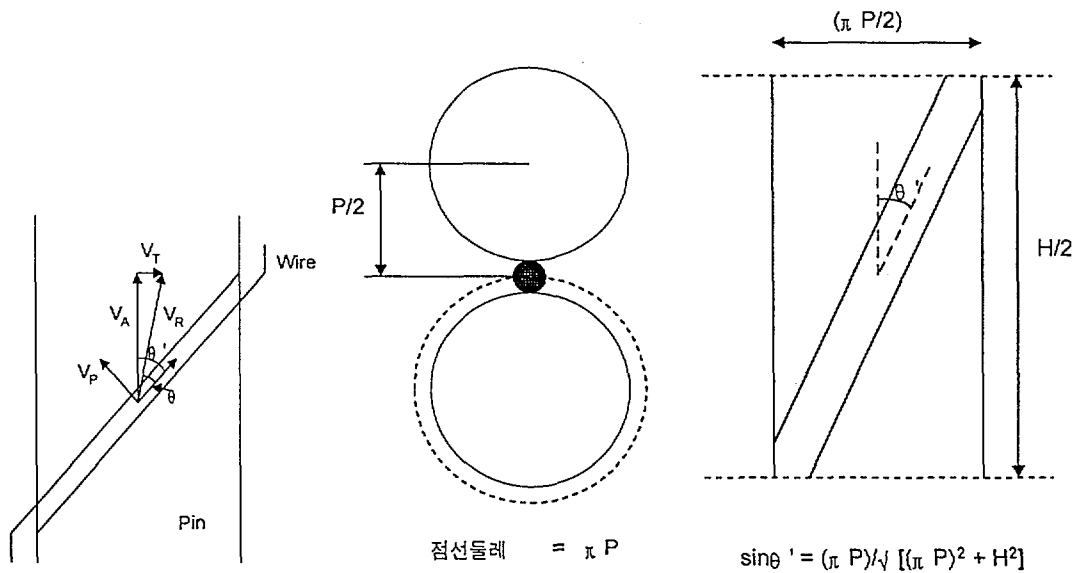


그림 9. Chiu-Rohsenow-Todreas 모델

식 (3.37)에서 속도 V_p 는 그림 9에 나타난 기하형상의 고려에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_p^2 = V_R^2 \sin^2 \theta = V_A^2 [1 + (V_T/V_A)^2] \sin^2 \theta \quad (3.38)$$

따라서 식 (3.37)은 다시 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta P_r = C_1 f_s \frac{A_r}{A'} \frac{L}{H} \left(\frac{\rho V_A^2}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{V_T}{V_A} \right)^2 \right] \sin^2 \theta \quad (3.39)$$

여기서,

$$f_s = 0.316 / \text{Re}^{0.25} \quad (\text{Blasius 관계식})$$

$$A_1' = \frac{\sqrt{3}}{4} P^2 - \frac{\pi D^2}{8} \quad (\text{부수로 타입 1 - Interior}) \quad (3.40)$$

$$A_{r1} = \frac{1}{6} \left[\frac{\pi}{4} (D + 2s)^2 - \frac{\pi D^2}{4} \right] \quad (\text{부수로 타입 1 - Interior}) \quad (3.41)$$

식 (3.35)에서 마찰에 의한 압력강하 (ΔP_s)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_s = f_R (L_R/D_{eR}) (\rho V_R^2/2) \quad (3.42)$$

이때 아래첨자 R은 V_R 에 관련된 변수를 말하며, 이는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_s = f_s \frac{L}{D_e} \frac{\rho V_A^2}{2} \left[1 + \left(C_2 \frac{V_T}{V_A} \right)^2 \right]^{1.375} \quad (3.43)$$

여기서 f_s 는 식 (3.39)에 쓰인 것과 같고, 상수 C_2 는 실험에서 구한 값이다. CRT 모델에 의한 압력강하는 위 두 식 (3.39)와 (3.43)의 합이므로 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_r + \Delta P_s \\ &= f_s \frac{L}{D_e} \frac{\rho V_A^2}{2} \left\{ C_1 \left(\frac{A_r}{A'} \right) \left(\frac{D_e}{H} \right) \sin^2 \theta \left[1 + \left(\frac{V_T}{V_A} \right)^2 \right] + \left[1 + \left(C_2 \frac{V_T}{V_A} \right)^2 \right]^{1.375} \right\} \quad (3.44) \end{aligned}$$

Chiu 등은 부수로 해석에서 부수로 타입 1 (Interior)에서는 짧은 거리에서의 방향전환이 주로 이루어져 마찰에 의한 것보다는 주로 형태손실에 의한 압력강하에 영향을 받고, 부수로 타입 2 (Edge)에서는 마찰에 의한 압력강하의 영향을 주로 받는다는 가정하에 interior에서는 $(V_T/V_A)=0$ 이고 $\theta = \theta'$ 가 되며, edge에서는 $C_1'=0$ 로 하여 식 (3.44)의 전체 압력강하를 부수로 별로 나타내었다. 또한 이때 부수로 타입 3 (corner)에 대한 압력강하는 edge의 압력강하와 같다고 가정하였다.

$$\Delta P_1 = f_{s1} \frac{L}{D_{e1}} \frac{\rho V_1^2}{2} \left[1 + C_1 \frac{A_{r1}}{A_1} \frac{D_{e1}}{H} \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2} \right] \quad (3.45)$$

$$\Delta P_2 = f_{s2} \frac{L}{D_{e2}} \frac{\rho V_2^2}{2} \left\{ 1 + \left[C_2 \left(\frac{V_T}{V_2} \right) \right]^2 \right\}^{1.375} \quad (3.46)$$

여기서,

$$C_1 = \pi^2 C_1' \quad (3.47)$$

$$\sin \theta' = \frac{\pi P}{\sqrt{(\pi P)^2 + H^2}} \quad (3.48)$$

또한 Chiu에 의해 (V_T/V_2) 는 아래와 같이 $n(V_T/V_2)_{gap}$ 으로 두 edge 사이 gap에서의 관계식으로 나타내었다.

$$n = \frac{s(\frac{P}{2})}{\left[(\frac{D}{2} + s) \frac{P}{2} - \frac{\pi D^2}{16} \right]} \quad (3.49)$$

$$\left(\frac{V_T}{V_2} \right)_{gap} = 10.5 \left(\frac{s}{P} \right)^{0.35} \frac{P}{\sqrt{(\pi P)^2 + H^2}} \left(\frac{A_{r2}}{A_2} \right)^{0.5} \quad (3.50)$$

$$A_{r2} = \frac{1}{4} \left[\frac{\pi}{4} (D + 2s) - \frac{\pi D^2}{4} \right] \quad (3.51)$$

$$A_2 = P \left(\frac{D}{2} + s \right) - \frac{\pi D^2}{8} \quad (3.52)$$

P = Rod pitch (그림 8 참조)

H = Wire lead (그림 8 참조)

여기에서도 Novendstern 모델에서와 같이 각 부수로의 속도를 구하기 위해 $\Delta P_1 = \Delta P_2$ 관계식을 사용한다. 이와같은 방법으로 속도를 구하면 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{V_{TOT} A_T}{N_1 A_1 + (N_2 A_2 + N_3 A_3) \left(\frac{D_{e2}}{D_{e1}} \right)^{0.714} \left[\frac{C_1 \frac{D_{e1}}{H} \frac{A_{r1}}{A_1} \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2} + 1}{C_3 \left\{ 1 + \left[C_2 n \left(\frac{V_T}{V_2} \right)_{gap} \right]^2 \right\}^{1.375}} \right]^{0.571}} \quad (3.53)$$

$$V_2 = \frac{V_{TOT} A_T}{N_1 A_1 \left(\frac{D_{e1}}{D_{e2}} \right)^{0.714} \left[\frac{C_3 \left\{ 1 + \left[C_2 n \left(\frac{V_T}{V_2} \right)_{gap} \right]^2 \right\}^{1.375}}{C_1 \frac{D_{e1}}{H} \frac{A_{r1}}{A_1} \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2} + 1} \right]^{0.571} + N_2 A_2 + N_3 A_3} \quad (3.54)$$

여기서 $C_3 = C_{f2} / C_{f1}$

상수 C_1, C_2, C_3 는 실험에서 얻은 값으로 이는 다음과 같다.

$$C_1 = 2200$$

$$C_2 = 1.9$$

$$C_3 = 1.2$$

(다) Cheng-Todreas에 의한 압력강하 모델

Cheng-Todreas에 의해 제안된 압력강하 모델은 많은 실험자료에서 얻은 결과로 이는 각각의 부수로에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다 [Cheng, 1986].

$$\Delta P_i = f_i (L/D_{ei}) (\rho V_i^2/2)$$

- Interior 부수로

$$f_i = \frac{1}{Re_1^m} \left[C_A \left(\frac{P'_{w1}}{P_{w1}} \right) + W_d \left(\frac{3A_{r1}}{A_1} \right) \left(\frac{D_{e1}}{H} \right) \left(\frac{D_{e1}}{D_w} \right)^m \right] \quad (3.55)$$

- Edge 부수로

$$f_2 = \frac{C'_{f2}}{Re_2^m} \left[1 + W_s \left(\frac{A_{f2}}{A_2} \right) \tan^2 \theta \right]^{\frac{(3-m)}{2}} \quad (3.56)$$

- Corner 부수로

$$f_3 = \frac{C'_{f3}}{Re_3^m} \left[1 + W_s \left(\frac{A_{f3}}{A_3} \right) \tan^2 \theta \right]^{\frac{(3-m)}{2}} \quad (3.57)$$

여기서

1) C_{fi}' (Bare rod의 마찰계수 상수)

$$C_{fi}' = b_0 + b_1 (P/D - 1) + b_2 (P/D - 1)^2 \quad (3.58)$$

이때 b_0, b_1, b_2 는 다음과 같이 주어진다.

부수로타입	$1.0 \leq P/D \leq 1.1$			$1.1 \leq P/D \leq 1.5$		
	b_0	b_1	b_2	b_0	b_1	b_2
Interior	0.09378	1.398	-8.664	0.1458	0.03632	-0.03333
Edge	0.09377	0.8732	-3.341	0.1430	0.04199	-0.04428
Corner	0.1004	1.625	-11.85	0.1499	0.006706	-0.009567

2) W_d (Wire drag 상수)

$$W_d = [29.5 - 140 (D_w/D) + 401 (D_w/D)^2] (H/D)^{-0.85} \quad (3.59)$$

여기서 D_w 는 wire 직경

3) W_s (wire sweeping 상수)

$$W_s = 20.0 \log (H/D) - 7.0 \quad (3.60)$$

4) Re (Reynolds 수)

$$Re_i = \rho D_{ei} V_i / \mu$$

5) m (Reynolds 지수)

$$m = 0.18 \text{ (실험에서 구함)}$$

6) Bare rod 유량면적 및 wetted perimeter

$$A_1' = \left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)P^2 - \frac{\pi D^2}{8} \quad (3.61)$$

$$A_2' = P\left(W - \frac{D}{2}\right) - \frac{\pi D^2}{8} \quad (3.62)$$

$$A_3' = \frac{\left(W - \frac{D}{2}\right)^2}{\sqrt{3}} - \frac{\pi D^2}{24} \quad (3.63)$$

$$P_{w1}' = \pi D / 2 \quad (3.64)$$

여기서, $W = D + s$

7) Wire-wrapped wetted perimeter

$$P_{w1} = P_{w1}' + \frac{\pi D_w}{2 \cos \theta} \quad (3.65)$$

여기서,

$$\cos \theta = \frac{H}{\sqrt{H^2 + [\pi(D + D_w)]^2}} \quad (3.66)$$

8) Wire projected area

$$A_{r1} = (1/6) \pi (D + D_w) D_w \quad (3.67)$$

$$A_{r2} = (1/4) \pi (D + D_w) D_w \quad (3.68)$$

$$A_{r3} = (1/6) \pi (D + D_w) D_w \quad (3.69)$$

9) Hydraulic equivalent diameter

$$D_{e1} = 4 A_1 / P_{w1}$$

10) Wire-wrapped flow area

$$A_1 = A_1' - (\pi D_w^2) / (8 \cos \theta)$$

11) 위에서 사용한 변수들은 다음과 같이 정의되었다.

H = Wire lead length

D_w = Wire diameter
 $\tan 2\theta = (1 / \cos 2\theta) - 1$
 P = Rod pitch
 D = Rod diameter

3.5 코드 구조 및 특성

부록 B는 MATRA-LMR 코드의 구조를 나타낸 것으로 주 프로그램인 matra.f를 중심으로 총 67개의 부 프로그램으로 구성되어 있으며, 총 프로그램 길이는 약 15000 line으로 형성되어 있다. 부록 C는 이러한 부 프로그램에 대한 간단한 기능과 변수들에 대한 설명을 나타내었다. 부록 D는 주 프로그램인 matra.f에 사용되는 입력자료에 대한 설명을 나타내었다. 이 입력자료는 12개의 Card Group으로 나누어져 각 Group에 해당하는 자료를 입력하게 된다. 이를 좀 더 자세히 나누면 다음과 같다. Group 1은 유체의 물성치에 대한 입력자료, Group 2는 마찰계수 및 이상유동 상관식, Group 3은 축방향 출력분포, Group 4는 부수로 배치 및 기하학적 형태에 대한 자료, Group 5는 부수로 면적 변화, Group 6은 핵연료봉 간격의 변화, Group 7은 wire-wrap에 대한 자료, Group 8은 핵연료봉 배치 및 핵연료의 물리적 성질, Group 9는 계산변수, Group 10은 난류혼합 상관식, Group 11은 운전조건, 마지막으로 Group 12는 계산결과에 대한 인쇄양식으로 구성되어 있다. 특히 각 입력자료는 Group별 변수들에 지정된 format에 의해 정확히 제공되어야 한다. 표 5는 카드별 입력자료를 요약한 것이다.

그림 10은 MATRA-LMR 코드의 전체 계산 흐름도를 나타낸 것으로 계산 초기 엔탈피 $h(x)$ 가 계산되고, 축방향 유량 $m(x)$ 초기값이 주어진 다음 다시 계산이 수행되어 $m(x)$ 와 반경방향 유량 $w(x)$ 값이 구해진다. 이때 $m(x)$ 나 $w(x)$ 값이 수렴하지 못하면 Jump 값이 1이 되어 불수렴 판정이 되고, 이어 압력과 압력강하가 계산되고, 이 값에 의해 새로운 유량이 구해져 계산이 처음부터 반복된다. Jump 값이 2가 되거나 최대 반복계산 횟수를 초과하면 계산은 종료된다. 그림 11는 계산과정을 보여주고 있다. MATRA-LMR 계산을 위해서는 먼저 SPECSSET, SPECSPL, GEOM, COBMAT 프로그램을 먼저 수행하여야 한다. 이러한 계산은 프로그램 수행시 기억장소를 최소화하거나, 주 프로그램 계산전 기하학적 입력자료를 얻기 위해 COBRA-IV-i에서 개발된 것과 함께 다시 MATRA로 개량되면서 사용자 편의를 위해 추가시킨 내용들이다. 이에 대해 좀 더 상세히 설명하면 다음과 같다.

표 5. MATRA-LMR 입력카드 group별 요약

Card group	Input
Primary card	- Max. computation time limit - Restart option and title
Group 1 (Fluid properties)	- Fluid property table
Group 2 (Friction factors)	- Turbulent and laminar friction factor coefficients
Group 3 (Axial heat flux table)	- Axial heat flux table
Group 4 (Channel layout and dimensions)	- Channel geometry - Thermal connection data for subchannel
Group 5 (Channel area variation)	- Table for axial location vs. channel area variation
Group 6 (Gap size variation)	- Table for axial location vs. gap size variation
Group 7 (Wire wrap and grid data)	- Wire-wrap or grid data - Loss coefficient with grid
Group 8 (Rod layout and fuel properties)	- Rod dimension, radial power factors - Rod material properties
Group 9 (Calculational variable)	- Numerical scheme option (Implicit/Explicit) - Channel length, transient time, convergence criteria - Crossflow resistance (KIJ, SL), damping factors
Group 10 (Turbulent mixing)	- Turbulent mixing correlations - Conduction geometry factor
Group 11 (Operation condition)	- Operation condition, transient forcing functions
Group 12 (Output option)	- Print option for calculation

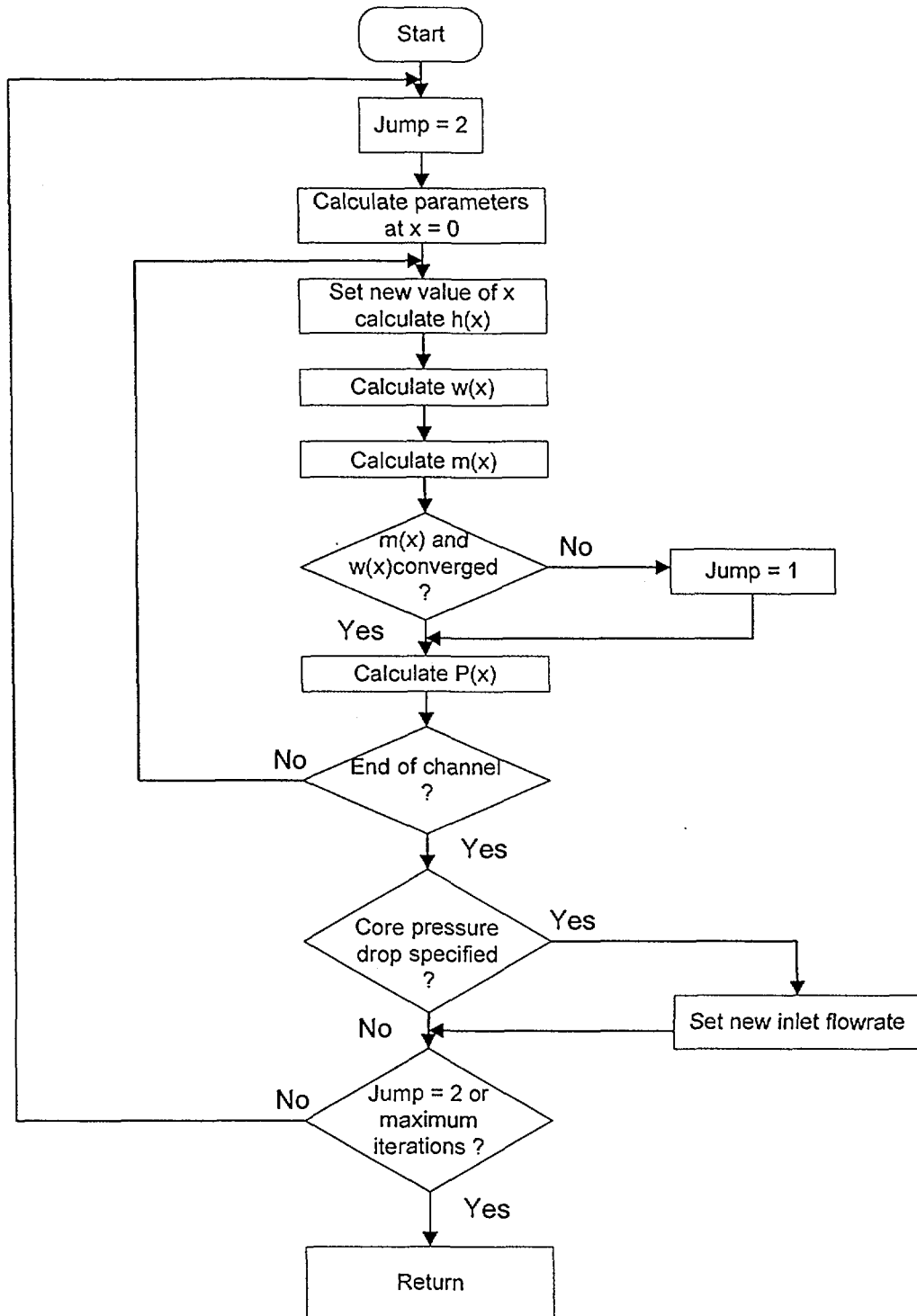


그림 10. MATRA-LMR 계산 흐름도

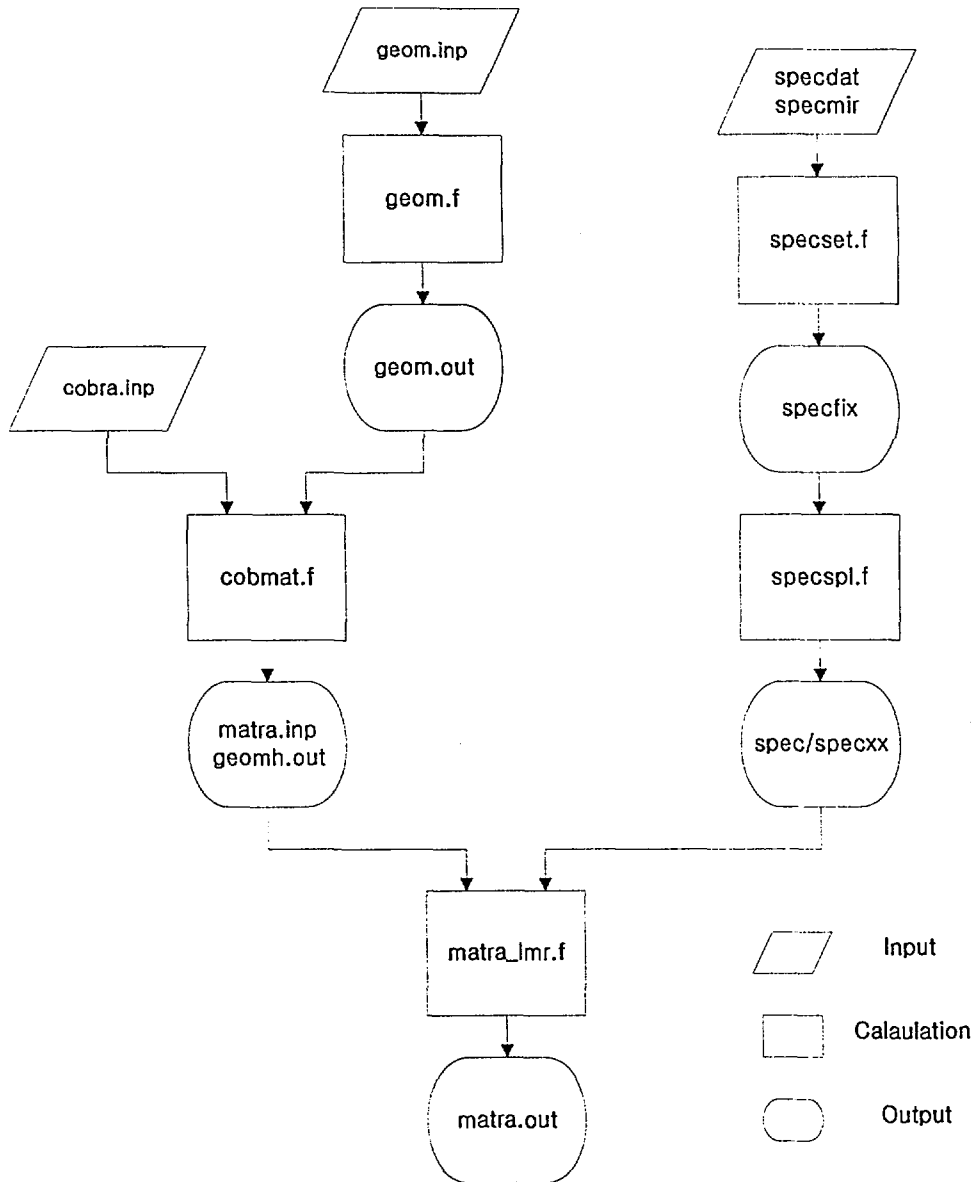


그림 11. MATRA-LMR 계산과정

3.5.1 SPECSET 프로그램 (specset.f)

이 보조 프로그램의 주된 목적은 프로그램 수행시 요구되는 기억용량을 최소화하기 위해서 MATRA-LMR 코드의 dimension을 다시 조정하는 작업이다. 따라서 SPECSET의 입력은 모의 하고자 하는 문제에 따라 MATRA-LMR 코드

수행시 적절한 dimension을 배정하기 위해 계산하고자 하는 문제에서 요구되는 최대 dimension을 주도록 되어있다. 이때 dimension을 요구하는 주요 변수는 다음과 같다.

- MC : 최대 부수로수
- MG : 최대 부수로 gap 수
- MR : 최대 핵연료봉 수 (1개의 집합체내)
- MX : 최대 축방향 node 수

이와같은 조정 dimension 수는 specdat에 입력으로 주게되며, 그외 코드 수행시 필요한 common 문이나 data 문에 대한 것은 specmir에 정의하도록 되어 있다.

3.5.2 SPECSPL 프로그램 (specspl.f)

이 프로그램은 COBRA-IV-i에서 MATRA로 전환되면서 개발된 것이다. COBRA-IV-i에서는 SPECSET에서 수행된 출력물을 각 subroutine에서 dimension, common 및 data 문으로 사용하기 위해 각 subroutine 안에 포함시켰는데 MATRA에서는 이를 각 subroutine에 포함시키지 않고 'INCLUDE' option을 이용하여 사용할 수 있도록 SPECSET의 출력을 'spec' directory 안에 나누어 모아 두었다. 이렇게 함으로써 하나의 common 문을 수정하고자 할 때 각 subroutine 별로 찾아가 수정할 필요 없이 'spec' directory 내에서 수정함으로써 똑같은 효과를 얻을 수 있다. 즉, 이와같은 목적을 위해 SPECSET 출력물을 각 section 별로 나누어 'spec' directory 안에 저장하는 작업을 SPECSPL 프로그램에서 수행하고 있다.

3.5.3 GEOM 프로그램 (geom.f)

이 보조 프로그램은 육각형 핵연료 번들에 대한 MATRA-LMR 코드의 기하학적 입력을 생산한다. 즉, MATRA-LMR 입력카드의 group 4, 7, 8 내용을 여기서 생산하게 된다. 각 입력카드별 생산되는 내용은 다음과 같다.

- 입력카드 4
부수로 면적, wetted perimeter, heated perimeter, 그리고 반경방향 운동량 속 모델 사 용시 쓰이는 gap 방향 각도 등이다.
- 입력카드 7

wire-wrap에 관한 필요한 정보.

- 입력카드 8

핵연료봉 직경, 축방향 출력 분포 등이다.

이 GEOM 프로그램을 위한 입력은 부록 E에 상세히 나타나 있다.

3.5.4 COBMAT 프로그램 (cobmat.f)

이 프로그램은 MATRA 코드를 개발하면서 추가된 내용으로 COBRA-IV-i에서 작성된 입력을 MATRA-LMR 입력으로 전환시켜주는 프로그램이다. 이는 MATRA 코드 계산시 입력의 정확도를 높이기 위해서 입력양식을 수정하였으며, 이로인해 COBRA에서 작성된 cobra.inp나 GEOM 계산결과 얻어지는 geom.out을 바로 사용할 수 없어 이를 MATRA에서 사용할 수 있도록 전환하기 위해 개발된 보조 프로그램이다.

4. 계산예제

4.1 ORNL 단일 집합체 (19 pin) 실험

4.1.1 실험소개

ORNL에서 수행한 19 pin 실험 (FFM-2A)은 액체금속로 설계요건에 따라 wire-wrap된 핵연료봉이 육각형의 duct내에 배치된 집합체로 구성되어 있다. 이 실험의 주된 목적은 집합체내 온도분포를 구하는 것이다 [Fontana, 1974]. FFM-2A 실험의 구성도는 그림 12에 잘 나타나 있다. 핵연료봉 직경은 0.23 in., wire-wrap 직경은 0.056 in. 그리고 pitch는 12 in. 이다. 실제 노심중 가열된 부분은 중간에 위치한 21 in.이며, 이 부분의 시작점은 유량이 유입되는 노즐에서부터 16 in. 높이에 있다. 코드 모의시에는 총 40 in.를 고려하였는데 이는 노즐입구에서부터 시작하여 가열부위 끝에서 위로 3 in. 까지이다. 따라서 출구 온도를 구하기 위한 thermocouple은 가열부위 끝부분으로 밑에서부터 37 in.에 설치되어 있다 MATRA-LMR의 주요 입력자료는 표 6에 나타내었다. 그림 13은 19 pin 해석을 위한 MATRA-LMR 코드의 핵연료봉 및 부수로 번호체계를 나타낸 것이다.

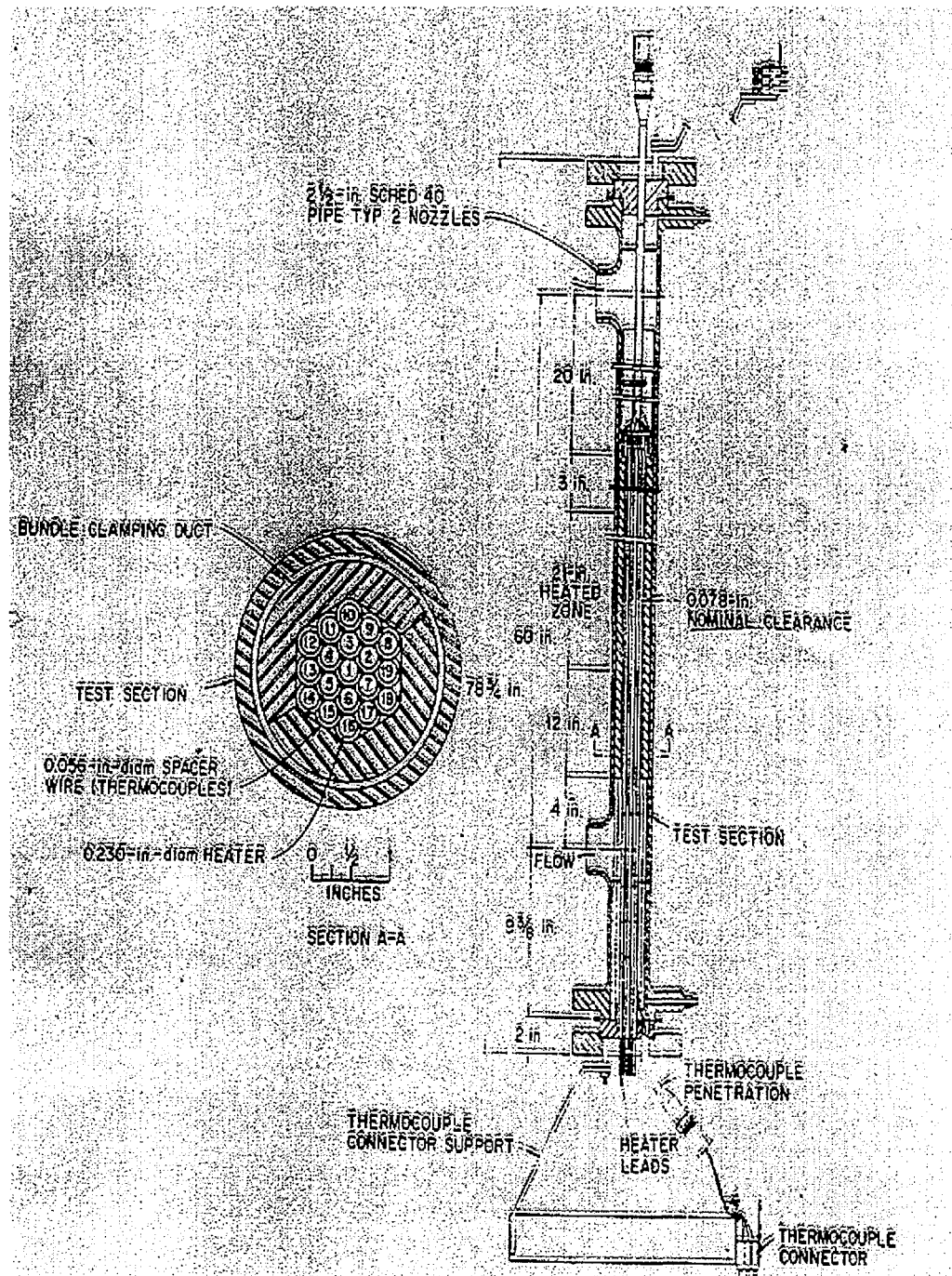


그림 12. ORNL FFM-2A 실험 구성도

표 6. MATRA-LMR을 위한 ORNL FFM-2A 19 pin 집합체 입력자료

분류	입력변수	입력치
기하형상	봉 직경 (in.)	0.230
	봉 pitch (in.)	0.286
	wire-wrap 직경 (in.)	0.056
	wire-wrap pitch (in.)	12
	rod pitch/rod diameter (in.)	1.243
	duct 내벽간 길이 (in.)	1.343
	노심 가열길이 (in.)	21 (총길이 = 40)
운전조건	출구압력 (psia)	14.7
	입구온도 (°F)	599
	입구질량속도 ($\times 10^6$ lbm/hr-ft ²)	4.56, 0.0614
	평균열속 ($\times 10^6$ Btu/hr-ft ²)	0.55, 0.0085
	축방향 출력분포	균일
	반경방향 출력분포	균일
계산변수	wire pitch fraction (δ)	0.0833
	난류혼합인자 (β)	0.01
	열전도 형상인자 (G_k)	0.5
	축방향 node 수	40
상관식	부수로 마찰계수 - novendstern, CRT - CT	$0.316Re^{-0.25}$ $Re^{-0.18}$
	열전달 계수	Lyon-Martinelli

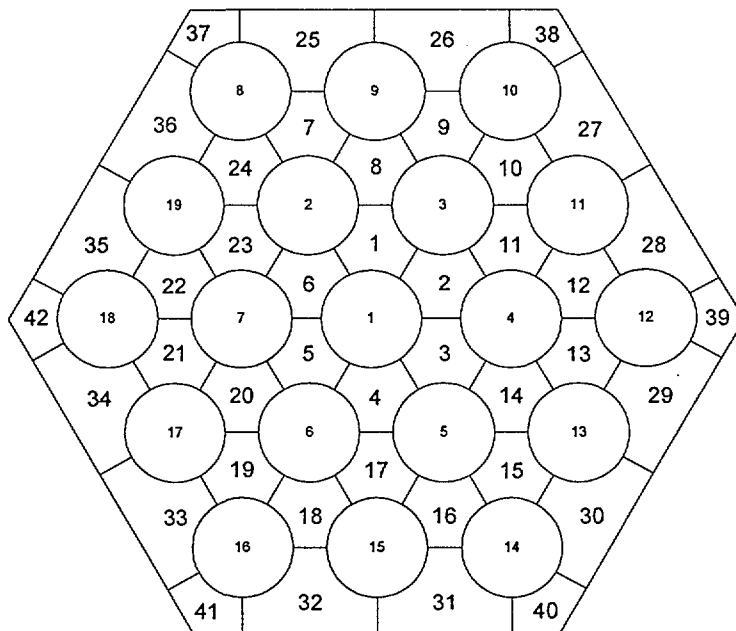


그림 13. MATRA-LMR 부수로 번호체계

4.1.2 GEOM 입력자료 작성 (ORNL 19 pin)

GEOM 프로그램은 육각형 rod bundle에 대해 MATRA-LMR 주 프로그램의 입력자료 group 4, 7, 8 항을 몇 개의 기본적 입력만으로 자동적으로 계산해 준다. 각각의 값은 특별한 언급이 없는한 5 자리로 주어진 format을 맞추어야 한다.

```
-----  
1 ORNL 19-Rod FFM-2A Test (GEOM input)          GEOM.1  
                                                    GEOM.2  
.286 .2301.2431.3430.000                          GEOM.3  
111100                                             GEOM.4  
19 .231.000 0 0 0.0833 1 0                       GEOM.5  
                                                    GEOM.7  
-----
```

(1) GEOM.1

1 ORNL 19-Rod FFM-2A Test (GEOM input)

값 1은 그림 13과 같은 표준 부수로 번호체계를 나타내는 것으로 코드 자체적으로 부수로 및 rod에 대한 번호체계를 갖는다. 현재는 이외 다른 option이 없어 default 값 또한 1이다. 다음은 제목으로 column 6~72사이에 적당한 문자나 숫자를 줄 수 있다.

(2) GEOM.2

Blank card를 반드시 넣어 주어야 한다. 이는 현재의 GEOM 입력형식이 두 종류중 option 2에 해당됨을 의미한다. 대부분 option 2를 사용한다.

(3) GEOM.3

.286 .2301.2431.3430.000

이번 카드에 주어지는 값 .286은 rod pitch (P), .230은 rod diameter (D), 1.243은 P/D 비, 1.343은 집합체의 flat-to-flat 내부직경, 0.000은 rod packing factor로 0 또는 1의 값을 주게된다.

(4) GEOM.4

111100

앞부분 4칸에 주어진 값 1은 MATRA-LMR group 4, 7, 8의 입력자료를 결과물로 나타낸다는 뜻이고, 그 다음 0은 punched deck과 관련된 내용으로 0으로 처리하다. 마지막 0은 반경방향 출력에 관련된 것으로 0일 경우 nominal 값이 다음 카드 5번에 주어지고, unit 번호가 쓰이면 카드 6번에서 상대적인 반경방향 출력을 입력해 주어야 한다.

(5) GEOM.5

19 .231.000 0 0 0.0833 1 0

19와 .231은 집합체내 연료봉 갯수 및 직경, 1.000은 nominal rod 출력, 네 번째 값 0은 $0.316Re^{-0.25}$ 로 계산되는 마찰계수값을 전 부수로에 적용한다는 의미이며, 내부 부수로와 가장자리 및 코너 부수로별로 이 값을 달리 줄 수도 있다. 다섯 번째 값 0은 wire-wrap 회전방향을 나타내는 것으로 위에서 볼 때 반시계방향을 의미한다. 여섯 번째 값 0은 wire-wrap 출발각도를 나타내며, 일곱 번째 .0833은 forcing 반경방향 유량에 대한 효율적인 wire pitch fraction (DEL)을 나타낸다. 이 값은 보통 $DEL = \Delta x / (\text{wire pitch})$ 값을 사용하도록 추천되고 있다. 여덟 번째 값 1은 코너 부수로를 모델링하겠다는 뜻이고, 마지막 0은 SLTHEN 코드와의 rod 번호체계에 대한 입력순서를 맞추기 위한 것으로 0일 경우는 MATRA-LMR의 번호체계를 따른다는 뜻이다.

(6) GEOM.7

끝내기 위한 blank 카드.

4.1.3 MATRA-LMR 입력자료 작성

```

-----
5000 0 0 0 Matra.1
1 0 ORNL 19-ROD FFM-2A TEST BUNDLE HIGH FLOW / HIGH POWER
1 100 0 0 0 3 0 Setri.1
2 0 0 0 0 1 0 0 Setri.2
0.316-0.25 0.0 Setri.2.1
64. -1. 0.0 Setri.2.2
3 6 Setri.3
0.000 0.0.3999 0.0.4000 1.0.9250 1.0.9251 0.01.000 0.0 Setri.3.1
4 42 42 60 0 9 9 Setri.4
7 1 60 0 0 0 9 Setri.7
12. .230 .056 .286 Setri.7.1

```

8	19	19	0	0	0	0	0	0	9	Setri.8
9	0	0	0	0	0	0				Setri.9
40.	0.							0.5		Setri.9.1
40		200	200							Setri.9.2
10	0	0	1	0	0	0				Setri.10
0.01										Setri.10.1
0.5										Setri.10.3
11	1	1	0	0	0	0	0	0		Setri.11
14.696		599.		4.56		.550				Setri.11.1
12	3	0	0	0	0	0	0	0		Setri.12

(1) Matra.1

5000 0 0 0

값 5000은 최대허용 계산시간을 의미하는 것으로 5000초가 지나면 자동적으로 계산은 중지된다. 두 번째 0은 입력 단위를 british로, 세 번째 0은 입력데이터의 출력을 british로, 마지막 0은 계산결과를 british로 출력하겠다는 뜻이다.

(2) Setri.0

1 0 ORNL 19-ROD FFM-2A TEST BUNDLE HIGH FLOW / HIGH POWER

1은 case 번호를 나타내며, 0은 모든 입력자료를 출력한다는 것이고, 다음은 제목을 나타낸다.

(3) Setri.1

1 100 0 0 0 3 0

1은 group 번호, 100은 읽어들이 물성치의 카드수를 나타내는 것으로 소품인 경우 코드 내부에서 계산되어 표가 만들어지나 이때 총 표의 길이 100은 입력으로 넣어주어야 한다. 세 번째 0은 superheated 증기 표는 사용하지 않겠다는 것이고, 네 번째 0은 superheated 증기 물성치의 범위를 지정하는 것으로 세 번째가 0이므로 네 번째는 당연히 0을 사용하여야 한다. 다섯 번째 0은 물성치의 값을 표에서 interpolation하여 찾아 쓰겠다는 것이다. 여섯 번째 3은 열전달계수를 Lyon-Martinelli식을 사용하겠다는 것이고 마지막 0은 압력강하 상관식을 Novenstern 식으로 계산한다는 내용이다.

(4) Setri.2

2 0 0 0 0 1 0 0

2는 group 번호, 그 뒤에 나타나는 0들은 이상유동에 관련된 것으로 액금로에서

는 사용하지 않는다. 여섯 번째 1은 총류마찰계수에 대한 상관식을 사용하겠다는 의미이다.

(5) Setri.2.1

0.316-0.25 0.0

난류마찰계수 상관식.

(6) Setri.2.2

64. -1. 0.0

총류마찰계수 상관식

(7) Setri.3

3 6

3은 group 번호, 6은 축방향 출력분포가 상대위치에 따라 6개의 normal 출력 값이 쓰인다는 뜻이다. 즉, 상대위치값은 0과 1을 포함한 그 사이의 값이 사용 되고, 축방향 출력값은 평균값을 1로 할 때 상대적인 비교값이 쓰인다.

(8) Setri.3.1

0.000 0.0.3999 0.0.4000 1.0.9250 1.0.9251 0.01.000 0.0

이는 위에서 설명한대로 상대위치값과 출력값을 나타낸 것으로 처음 0.000위치 일 때 출력은 0.0, 다음은 (.3999, 0.0), (.4000, 1.0), (.9250, 1.0), (.9251, 0.0), (1.000, 0.0)으로 총 6쌍을 이루고 있다.

(9) Setri.4

4 42 42 60 0 9 9

4는 group 번호, 42는 19 pin 집합체에서 총 부수로수를 나타낸다. 60은 총 gap 수, 다섯 번째 0은 부수로 사이에 thermal connection을 이루는 벽이 없다는 뜻 이고, 다음 9는 GEOM에서 구한 geometry 입력중 Setri.4.1을 읽어 들이겠다는 것이고, 마지막 9는 Setri.4.3을 읽어들인다는 의미이다.

(10) Setri.7

7 1 60 0 0 0 9

7은 group 번호, 1은 wire-wrap option, 60은 gap 수, 다음 0들은 grid에 관련된 사항들이다. 마지막 9는 역시 Setri.7.2와 7.3을 GEOM에서 계산한 것을 쓰겠다는 의미이다.

(11) Setri.7.1

12. .230 .056 .286

12는 wire-wrap pitch, .230은 rod outer diameter, .056은 wire-wrap diameter, .286은 rod pitch를 나타낸다.

(12) Setri.8

8 19 19 0 0 0 0 0 0 9

8은 group 번호, 19는 총 rod 수, 다음 0들은 연료봉 모델에 대한 option을 사용하지 않겠다는 뜻이고, 마지막 9는 Setri.8.1 입력을 GEOM에서 계산된 것을 가져다 쓰겠다는 의미이다.

(13) Setri.9

9 0 0 0 0 0 0

9는 group 번호, 그 다음 0은 결과물 출력 option으로 출방향 모든 위치에서 출력을 하겠다는 것, 세 번째 0도 출력 option으로 모든 time step에서 출력을 하겠다는 뜻이다. 네 번째 0은 수치해법을 음해법 (Implicit solution)을 사용한다는 것이다. 만약 양해법을 사용할 의도가 있다면 여기서 적당한 option을 선택하여야 한다. 다섯 번째 0은 roll option을 사용하지 않는다는 것이고, 여섯 번째 0은 최대 time step를 나타내고, 마지막 0은 축방향 node 길이를 균일하게 놓겠다는 뜻이다. 축방향 node 크기를 모의 대상과 조건에 따라서 신축적으로 조절하여 사용할 수 있다.

(14) Setri.9.1

40. 0. 0.5

40은 총 축방향 길이, 0은 과도기 계산시간, 중간에 blank 값은 모두 default 값을 사용하겠다는 뜻으로 여기에는 각종 convergence limit, KIJ, SL, 및 accelerator와 damping factor가 포함된다. 마지막 0.5는 축방향 유량에 대한 damping factor를 default 값을 쓰지 않고 나타내었다.

(15) Setri.9.2

40 200 200

40은 축방향 node 수, 200은 최대 허용되는 iteration 수를 나타낸다.

(16) Setri.10

10 0 0 1 0 0 0

10은 group 번호, 중간에 1은 반경방향 열전도도를 고려하겠다는 것이고 첫 번째 0은 난류혼합상관식에 대한 선택이고, 나머지는 이상난류혼합모델과 관련된 것들이다.

(17) Setri.10.1

0.01

난류혼합상관식에 쓰이는 상수값

(18) Setri.10.3

0.5

반경방향 열전도성 혼합에 대한 geometry factor. 보통 0.5가 추천된다.

(19) Setri.11

11 1 1 0 0 0 0 0 0

11은 group 번호, 첫 번째 1은 입구온도가 입력으로 주어지는 것을 의미하고, 두 번째 1은 입구유속에 대한 입력 option을 나타낸 것이다. 나머지는 과도기와 관련된 forcing function으로 출구압력, 입구온도, 입구유속, 평균열속등이 이에 속한다.

(20) Setri.11.1

14.696 599. 4.56 .550

14.696 (psia)은 출구압력, 599. (°F)은 입구온도, 4.56 (Mlb/hr-ft²)은 입구유속, .550 (MBtu/hr-ft²)은 평균열속을 의미한다.

(21) Setri.12

12 3 0 0 0 0 0 0 0

12는 group 번호, 3은 출력 option으로 부수로, 반경방향 유량, 핵연료 온도에 대해 출력을 지시한 것이다. 나머지 사항도 상세한 출력 option을 나타내는 것이다.

보다 자세한 입력작성에 대한 설명은 부록 D에 잘 나타나있다.

4.2 KALIMER 271 pin 설계데이터

4.2.1 개요

전기출력 150 MWe (열출력 392 MWth)의 pool-type 소듐냉각로인 KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor)는 현재 개념 설계중이다. 노심구성은 두개의 핵연료 지역이 있으며 그주위에 반사체가 둘러있다. Active core 길이는 1 m, 직경은 1.72 m 이다. 주요 설계데이터는 표 7에 정리하였으며, 반경방향 출력분포는 이 계산에서는 일정한 것으로 가정하였다. 그림 14는 KALIMER 127 pin blanket에 대한 MATRA-LMR의 부수로 번호체계를 나타낸 것이다 [Park, 1998].

표 7. KALIMER 127 pin blanket에 대한 98.03 설계자료

Core	Core thermal output (MWth)	392.2
	Core electric power (MWe)	150.0
	Core inlet / outlet temperature (°C)	386.2 / 530.0
	Total flow rate (kg/s)	2143
	Active core height (mm)	1000
	Core diameter (mm)	3447.3
	Core configuration	radial homogeneous
	Pins per fuel assembly (driver/radial blanket)	271 / 127
127 pin assembly	Total axial height (mm)	3163.0
	Rod outer diameter (mm)	12
	Rod pitch (mm)	13
	Wire wrap diameter (mm)	0.95
	Wire wrap lead (mm)	300
	Cladding thickness (mm)	0.54
	Duct wall thickness (mm)	3.7
	Duct inside flat-to-flat distance (mm)	149.8
	Nominal linear pin power (W/cm)	34.91
	Assembly nominal flowrate (kg/s)	4.59
	Assembly coolant inlet temperature (°C)	386.2
	Number of axial nodes	250
	Radial power distribution	uniform

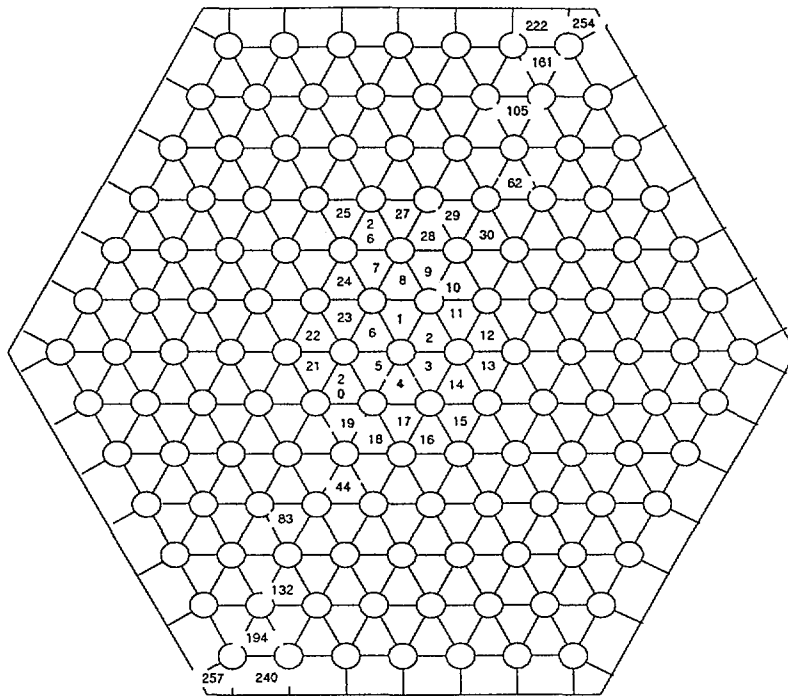


그림 14. KALIMER 127 pin blanket 부수로 번호체계

4.2.2 GEOM 입력자료 (KALIMER 127 pin)

```
-----
1 (127 pin / 0702 driver, 0.488 MWth, 4.59 kg/sec)

.5118.4724 .0005.898 .000
111100
127.47241.000 0 0 0.0322 1 0
-----
```

4.2.3 MATRA-LMR 입력자료 (KALIMER 127 pin)

```
-----
30000      0      1      1
1          0 (127 pin / 0702 driver, 0.488 MWth, 4.59 kg/sec)
1          100     0      0      0      3      1
2          0       0      0      0      1      0      0
0.316     -0.25    0.0
64.       -1.      0.0
3         26
.0000     .0000    .3530   .0000   .3533   .7170   .3612   .7170   .3770   .7920
-----
```

.3929	.8730	.4087	.9530	.4245	1.094	.4403	1.159	.4561	1.210
.4719	1.246	.4877	1.294	.5035	1.299	.5193	1.287	.5351	1.257
.5509	1.156	.5667	1.099	.5825	1.029	.5984	.9480	.6142	.7740
.6300	.6870	.6458	.6010	.6616	.5260	.6695	.5260	.6698	.0000
1.000	.0000								
4	258	258	384	0	9	9			
7	1	384	0	0	0	9			
11.811	.47244	.0374	.5118						
8	127	127	2	1	0	0	0	0	9
7.107	22.69	.9667	.4724	15.17	.1219	.4783	.0209	24471.	
9	0	0	0	0	0	0			
124.5									0.0
0.5									
250		200	200						
10	0	0	1	0	0	0			
0.01									
0.5									
11	1	1	0	0	0	0	0	0	
14.696	727.16	.681001	.029352						
12	2	0	0	0	0	0	0	0	

4.3 Blockage 계산

4.3.1 개요

액체금속로 집합체의 유로막힘 (Blockage)은 그 부근에서의 냉각재 온도를 상승시키고, 그 결과 소듐비등 및 피복재 건전성을 위협한다. 따라서 안전해석 및 집합체 설계평가와 관련하여 유로막힘에 의한 온도분포 영향을 분석하기 위하여 많은 실험과 이론적인 연구가 진행되어 왔다. 집합체내 유로막힘 현상은 다음과 같은 원인으로 발생할 수 있다. 가) 핵연료봉의 swelling과 bending에 의한 유로면적 감소, 나) 손상된 wire-wrap spacers나 핵연료봉의 파편, 다) 건설시 남겨진 외부물질, 구조물에서 떨어져 나온 파편, 운전중 발생한 화학적 생성물등이다.

현재의 액체금속로는 유로막힘을 일으키는 파편이 노심내로 유입되는 것을 방지하도록 설계되어 있으며, 또한 와이어랩을 사용할 경우 파편의 크기뿐 아니라 노심내에서 축적될 가능성을 크게 줄이고 있다. 그럼에도 불구하고 만일의 경우에 노심내에서 유로막힘이 발생하면 유로막힘이 있는 윗 부분에 어느정도 영역까지는 유속과 유량이 정상적인 상태와 비교하여 현저하게 적어지면서 역유동이 형성되기 때문에, 그 영역에서의 핵연료봉 피복재 온도상승은 불가피하다. 이는 액체금속로의 안전성에 영향을 끼치므로 액체금속로 설계단계에 있어서 이에 대한 정확한 현상분석 및 해석이 필요하다. 액체금속로의 안전성과 관련된

유로막힘 영향은 blockage의 크기와 재질, 노심내의 위치, 핵연료봉 출력 그리고 냉각재 유속등에 의해 좌우된다. 이 인자들에 의해서 blockage가 끼치는 영향의 정도가 결정되며, 이에 의해 파생되는 노심내의 불균형한 온도분포의 정도를 가늠할 수 있다.

계산에 사용된 THORS 실험은 19개의 핵연료봉을 사용하며, 그 기하학적 구조는 CRBR (Clinch River Breeder Reactor)과 FFTF (Fast-Flux Test Facility)와 동일한 크기와 모양으로 수행되었다. 즉, 연료봉의 지름은 0.23 in., 지름 0.056 in.인 와이어랩은 피치가 12 in. 그리고 핵연료 봉간의 간격은 0.286 in.로 구성되어 있다 [Lin, 1978].

계산은 heating zone 위치에서 가장자리 부수로의 일부가 유로막힘이 발생한 경우이다. 실제 실험에서 가장자리 핵연료봉과 덕트벽면 사이의 간격이 0.028 in.이고, 가장자리 핵연료봉에 위치한 와이어랩의 지름 또한 0.028 in.인 반면, 노심의 중심부에 있는 핵연료봉의 와이어랩 지름은 0.056 in.이다. MATRA-LMR 코드의 입력과정에서는 집합체내 와이어랩 지름을 동일한 값으로 사용해야하는 이유로, 입력시 모든 핵연료봉의 와이어랩 지름을 0.028 in.로 사용하였고, 중심부 부수로에서는 이를 보정해 주기 위하여 부수로의 단면적을 조절하여 계산을 수행하였다.

▷ MATRA input data 계산과정

· mass flux

$$\begin{aligned} G &= \rho v = 874 \text{ kg/m}^3 \times 7.2 \text{ m/s} \\ &= 54.56 \text{ lbm/ft}^3 \times 85039.4 \text{ ft/hour} \\ &= 4.64 \text{ MLB/hr-ft}^2 \end{aligned}$$

· heat flux

$$q' = 85 \text{ W/cm}^2 = 0.270 \text{ MBtu/hr-ft}^2$$

FFM bundle 5 계열 실험은 3개의 실험을 수행하였는데 첫째 5B 실험은 덕트벽과 blockage plate가 밀착되어 틈이 없는 경우이고, 두번째 5B-d 실험은 덕트벽과 blockage 사이에 0.3556 mm (0.014 in.)의 틈이 형성되어 유량이 존재하는 경우이다. 마지막으로 5C는 같은 조건에서 blockage를 제거한 실험이다. 본 모의에서 사용한 실험은 5B-d 이다.

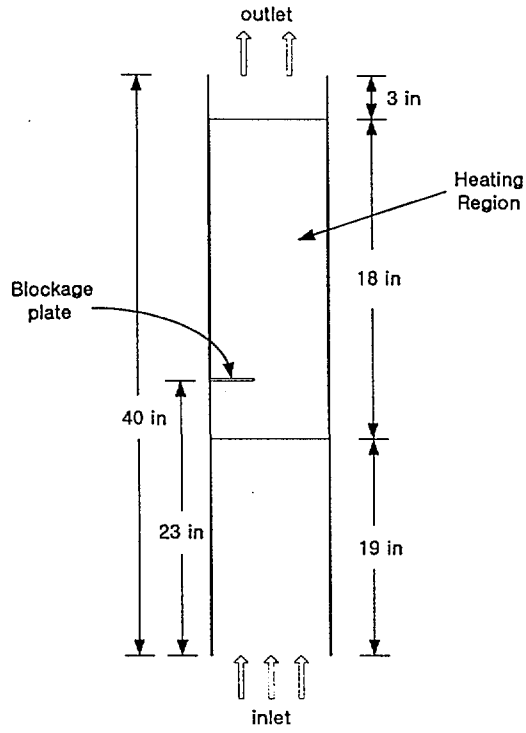


그림 15. FFM 5B-d 실험 구성

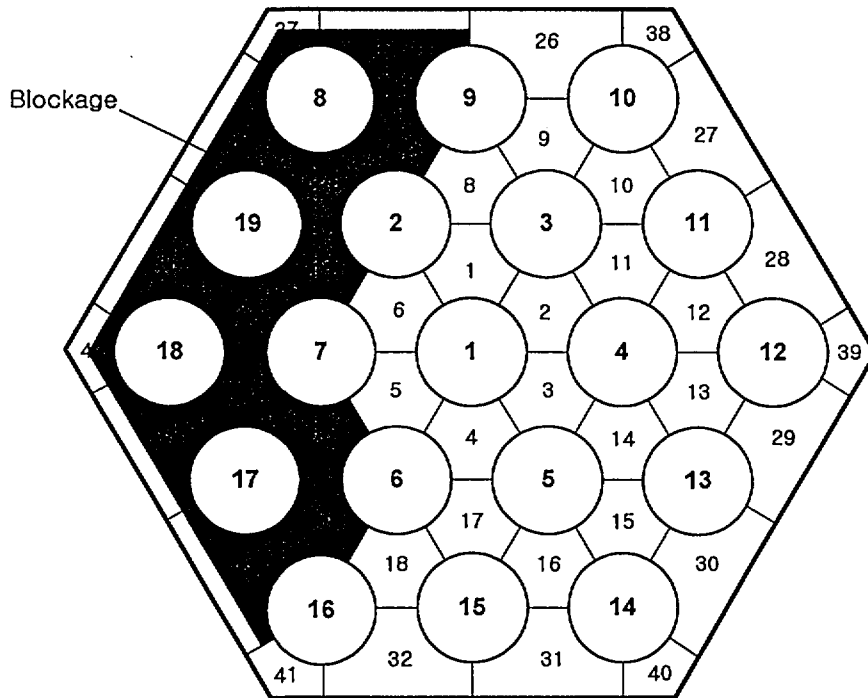


그림 16. MATRA-LMR 코드 번호체계와 blockage

표 7. 입력데이터 (ORNL 19 pin Test of the 14 edge blockages)

Number of rods	19
Number rod channels	42
Number of gaps	60
Rod diameter	0.23 in. (5.84E-3 m)
Rod pitch	0.286 in. (7.26E-3 m)
Wire-wrap diameter	0.056 in. (1.42E-3 m)
Wire-wrap pitch	12 in. (0.3048 m)
Total axial length	40 in. (1.016 m)
Flat to flat of inside duct	1.277 in. (0.03243 m)
Distance between rod and duct wall	0.028 in. (7.112E-4 m)
Radial power distribution	1.0 (uniform)
Axial power distribution(normalized)	0 - 19 in. : 0 19 - 37 in. : 1 (Heating zone = 18 in.) 37 - 40 in. : 0
Inlet mass flux	7.2 m/s (4.64 Milbm/hr-ft ²)
Rod heat flux	85 W/cm ² /rod (0.270 MBtu/hr-ft ²)
Initial temperature	600 °F (316 °C)
Outlet pressure	14.696 psia (1.01324E5 Pa)
Thickness of blockage plate	0.125 in. (3.175E-3 m)
Location of blockage plate	4 in. from the start of heated zone (23 in.)
Thermocouple	3 in. from the end of heated zone (40 in.)
Pressure drop correlation	CRT model
Heat transfer correlation	Lyon-Martinelli model

그림 16에서 보듯이 실험 FFM 5B-d는 42개 부수로중 14개 부수로가 23 in. 높이에서 blockage plate에 의해 막혀있다. 이중 interior 부수로 (7, 19, 20, 21, 22, 23, 24)는 100% 막힌상태이고, edge 부수로 (25, 33, 34, 35, 36)는 위에서 언급한대로 덕트벽과의 틈이 형성되어 실제로는 80%의 막힌상태를 유지하고 있다. 마지막으로 corner 부수로 (37, 42)는 edge 부수로와 같이 덕트벽 사이에 틈이 있으나 그 형태의 차이에 따라 50% 정도의 막힌상태를 유지하고 있다.

Blockage가 발생한 FFM 5B-d 실험에서는 덕트벽과 blockage plate 사이에 0.3556 mm (0.014 in.)의 간격을 주어 덕트벽을 타고 유량이 흐를 수 있도록 실험을 수행하였다. 이에 맞게 입력자료에서도 덕트벽과 인접한 가장자리 부수로에 대해서는 덕트벽과의 간격 0.3556 mm (0.014 in.)를 통하여 유량이 흐른다고 가정하고 blockage에 의해 막히는 부수로 면적변화를 계산하여 입력으로 주었

다. 즉 interior 부수로에서는 100% 막힘, edge 부수로에서는 80% 막힘, 그리고 corner 부수로에서는 50% 막힘을 고려하였다. 계산결과 implicit scheme으로는 어느 부수로에 대해서도 70%이상의 유로면적 막힘에 대한 계산이 수행되지 않았다. 이는 implicit scheme으로는 recirculation 유동이 생성되는 100% blockage 계산에 근본적인 한계가 있다고 여겨진다. Recirculation 유동이 과다하게 생성되는 100%에 가까운 문제를 해석할 수 있다고 추천되어 있는 explicit scheme에 대해서는 정확한 적용방법과 자료가 부족하여 explicit scheme으로 본 연구의 blockage 사고해석에 대해 계산을 수행하지 못하였다. 향후에 explicit scheme에 대한 보다 많은 자료수집 및 코드내 분석작업이 요구된다. 따라서 다음의 blockage에 대한 입력자료는 최대 70%에 대한 것을 나타낸 것으로 FFM 5B-d 실험과는 다소 차이가 있다.

4.3.2 GEOM 입력자료 (boackage)

```

-----
1 ORNL 19-Rod FFM-2A Test (GEOM input)

.286 .2301.2431.3430.000
111100
19 .231.000 0 0 0.0001 1 0
-----

```

4.3.3 MATRA-LMR 입력자료 (blockage)

```

-----
5000      0      1      1
1          0 ORNL 19-ROD FFM-5B TEST BUNDLE (Blocked)
1         100      0      0      0      3      1
2          0      0      0      0      1      0      0
0.316    -0.25     0.0
64.      -1.      0.0
3         6
0.000     0.0    .4749     0.0    .4750     1.0    .9250     1.0    .9251     0.0
1.000     0.0
4         42     42      0      0      9
5         14     6      10
0.000    .5749    .5750    .5781    .5782     1.0
7
1.0      1.0    0.3000    0.3000     1.0     1.0
19
1.0      1.0    0.3000    0.3000     1.0     1.0
20
1.0      1.0    0.3000    0.3000     1.0     1.0
21
-----

```

1.0	1.0	0.3000	0.3000	1.0	1.0
22					
1.0	1.0	0.3000	0.3000	1.0	1.0
23					
1.0	1.0	0.3000	0.3000	1.0	1.0
24					
1.0	1.0	0.3000	0.3000	1.0	1.0
25					
1.0	1.0	0.2992	0.2992	1.0	1.0
33					
1.0	1.0	0.2992	0.2992	1.0	1.0
34					
1.0	1.0	0.2992	0.2992	1.0	1.0
35					
1.0	1.0	0.2992	0.2992	1.0	1.0
36					
1.0	1.0	0.2992	0.2992	1.0	1.0
37					
1.0	1.0	0.4524	0.4524	1.0	1.0
42					
1.0	1.0	0.4524	0.4524	1.0	1.0
6	23	6			
0.000	.5749	.5750	.5781	.5782	1.0
32					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
56					
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0
35					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
34					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
11					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
55					
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0
36					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
37					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
38					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
39					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
40					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
12					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
41					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
42					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
14					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
13					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
15					
1.0	1.0	0.0001	0.0001	1.0	1.0
43					

1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0					
44										
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0					
60										
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0					
58										
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0					
59										
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0					
57										
1.0	1.0	0.5000	0.5000	1.0	1.0					
7	1	60	0	0	0	9				
12.	.230	.028	.286							
8	19	19	0	0	0	0	0	0	9	
9	0	0	0	0	0	0				
40.										0.
0.5										
320		200	200							
10	0	0	1	0	0	0				
0.01										
0.5										
11	1	1	0	0	0	0	0	0		
14.696	599.	4.64	.270							
12	1	0	0	0	0	0	0	0		

5. 향후 코드개선 방향

소뚱을 냉각재로 사용하고 있는 액체금속로에서는 소뚱의 높은 열전도성으로 인하여 노심 집합체간 열전달 현상이 집합체내 온도분포에 상당한 영향을 미친다. 특히 인접한 두 집합체의 온도차가 크거나 유량이 적은 경우에는 그 영향이 더욱 클 것이다. 이와같이 집합체간 열전달 계산의 중요성 때문에 보다 정확한 집합체내 온도분포를 예측하여 노심전체에 대한 열수력 해석을 하기 위해서는 전체노심에 대한 동시 계산이 필요하다. 또한 집합체간 열전달로 인하여 집합체의 열적 휨 (bowing) 현상이 발생하면 노심내 반응도가 달라지고, 집합체의 삽입 및 인출에 위험을 줄 수도 있다. 따라서 노심 열수력 해석에서 집합체간 열전달을 고려하여야 한다. 현재의 MATRA-LMR 코드가 단일 집합체 해석만 수행이 가능하나 이와같은 기능을 추가한 다집합체 해석이 가능하도록 집합체간 열전달 모델링 개발 및 전체노심으로의 확장작업이 추진되고 있다. 그림 17은 MATRA-LMR 코드의 전체적인 개발방향을 나타낸 것이다.

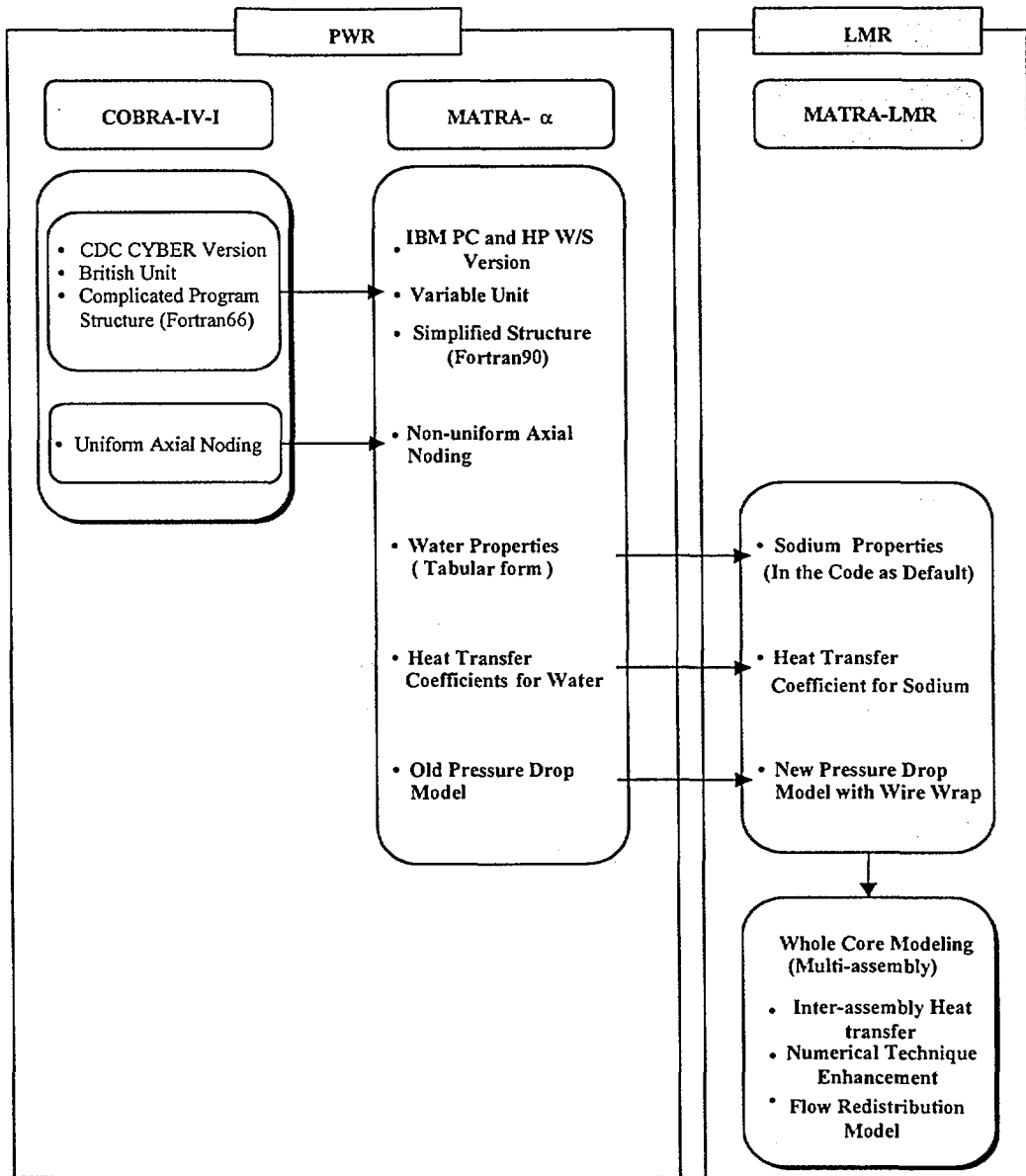


그림 17. MATRA-LMR 코드 개발 과정

참고문헌

김영철외, "액체금속로 요소기술개발", KAERI/RR-1396/93, pp. 136-170, 1994

유연중, 황대현, "부수로 해석 코드 MATRA α -version 개발", '97 추계학술발표회, 한국원자력학회, 1997

Carelli, M. D., Kazimi, M. S., "Heat Transfer Correlation for Analysis of CRBRP Assemblies", Westinghouse Report, CRBRP-ARD-0034, 1976

Cheng S. K., and Todreas N. E., "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters", Nucl. Eng. Design, Vol. 92, pp. 227-251, 1986

Chiu C., Rohsenow W. M., Todreas N. E., "Turbulent Flow Split Model and Supporting Experiments for Wire-wrap Core Assemblies", COO-2245-56TR, MIT, 1978

Fontana R. E. et al, "Temperature Distribution in the Duct Wall and at the Exit of a 19-Rod Simulated LMFBR Fuel Assembly (FFM Bundle 2A)", Nuclear Technology, Vol. 24, pp. 176-200, 1974

Golden, G. H. and Tokar, J. V., "Thermophysical Properties of Sodium", ANL-7323, Argonne National Laboratory, 1967.

Lin, E. I. H., et al, "Thermal-Hydraulic Analysis of a Wire-Wrapped 19-Rod Bundle with Edge Blockage", Transactions of the ANS, 1978, vol. 28, page 539-540

Lyon, R. N., "Liquid metal heat transfer coefficients", Chem. Eng. Prog. pp. 47-75, 1951

Novendstern E., "Turbulent Flow Pressure Drop Model for Fuel Rod Assemblies Utilizing A Helical Wire-wrap Spacer System", Nucl. Eng. Design, Vol. 22, pp. 19-27, 1972

Park C. K., Development of Korea Advanced Liquid Metal Reactor, IWGFR, 1998.

Sangster, W. A., "Calculation of Rod Bundle Pressure Loss", Paper 68-WA/HT-35, ASME, 1968.

Stewart C. W., "COBRA-IV : The Model and The Method", Pacific Northwest Laboratories, Washington, 1977

Stordeur, A. N., "Drag Coefficients for Fuel-Element Spacers", Nucleonics, 19, pp. 74-79, 1961.

Tang Y. S. et. al, "Thermal Analysis of Liquid-Metal Fast breeder Reactors", American Nuclear Society, 1978

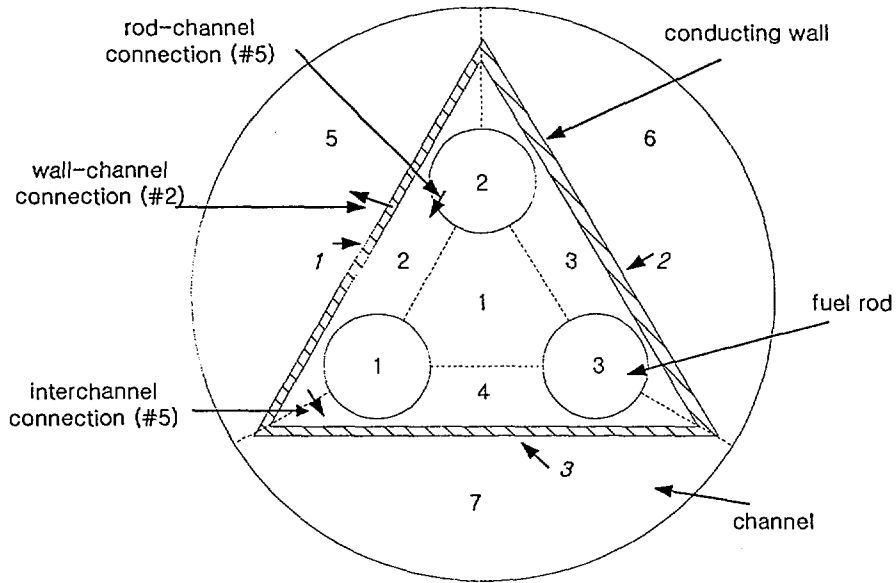
Yang W. S., "An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model", Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 29, No. 5, pp. 406-416, 1997

Yang W. S. and Yacout A. M., " Assessment of the SE2-ANL Code Using EBR-II Temperature Measurements", Proc. 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NUREG/CP-0142, Saratga springs, New York, Vol. 3, pp. 2934, US Nuclear Regulatory Commission, 1995

Waltar A. E. and Reynolds A. B., "Fast Breeder Reactors", Pergamon Press, New York, 1981

Wheeler C. L., et. al, "COBRA-IV-i : An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores", BNWL-1662, 1976

부록 A Connection matrix examples



1. Connections

Interchannel connections		
No.	Chan.	Chan
1	1	2
2	1	3
3	1	4
4	2	3
5	2	4
6	3	4
7	5	6
8	5	7
9	6	7
Nc = 9		

Rod-Channel connections		
No.	Chan.	Chan
1	1	1
2	1	2
3	1	4
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	3
9	3	4
Nr = 9		

Wall-Channel connections		
No.	Chan.	Chan
1	1	2
2	1	5
3	2	3
4	2	6
5	3	4
6	3	7
Nw = 6		

2. Matrix elements

Matrix operator [Dc], [Dr], [Dw]는 위 그림과 표에 의해 다음과 같다.

(가) [Dc] : Channel-Channel

		Channel No.								
		1	2	3	4	5	6	7		
[Dc] =	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	Interchannel connection No.
	2	0	-1	0	0	0	0	0	2	
	3	0	0	-1	0	0	0	0	3	
	4	0	1	-1	0	0	0	0	4	
	5	0	0	1	-1	0	0	0	5	
	6	0	0	0	1	-1	0	0	6	
	7	0	0	0	0	1	-1	0	7	
	8	0	0	0	0	1	0	-1	8	
	9	0	0	0	0	0	1	-1	9	

(나) [Dr] : Rod-Channel

		Channel No.							Wall No.				
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3		
[Dr] =	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	Rod-Channel connection No.
	2	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	
	3	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	3	
	4	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	
	5	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	5	
	6	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	6	
	7	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	
	8	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	8	
	9	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	9	

(다) [Dw] : Wall-Channel

		Channel No.							Wall No.				
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3		
[Dw] =	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	Wall-Channel connection No.
	2	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	2	
	3	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	3	
	4	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	4	
	5	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	5	
	6	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	6	

부록 B Program MATRA-LMR code structure

```

matra - clear          - loc4(f)

- sysdt              - date(s), time(s)

- restrt

- setup              - clear
                        - sysdt
                        - setri
                        - limits
                        - dsodium
                        - load
                        - van
                        - ciunit
                        - prop - curve
                              - tsa(f) - psa(f)
                              - taf(f) - psa(f), tsa(f)
                              - steam - curve
                              - fspre(f)- eaz
                                      - root(f)
                        - curve
                        - taf(f)
                        - iswap
                        - split - area
                        - prop - curve, tsa, taf, steam, fspre
                        - void - scqual, bvoid
                        - mix - curve
                        - differ - curve, taf

                        - ciunit
                        - setpi
                        - setiv

```

- iswap
- result - curve, taf(f), sysdt
- curve
- taf(f) - psa(f), tsa(f)
- prop - curve, tsa(f), taf(f), steam, fspre(f)
- iswap
- scheme
 - sysdt
 - cptime - secnds(s)
 - heat - rollit
 - curve
 - temp - gauss
 - iswap
 - hcool - chfcor
 - htcor - curve
 - rollit
 - area - curve
 - prop - curve, tsa(f), taf(f), steam, fspre(f)
 - void - scqual(f), bvoid(f)
 - force
 - mix - curve
 - differ - curve, taf(f)
 - energy
 - divert - differ
 - iswap
 - pbound - iswap
- xschem
 - heat - rollit, curve, temp, iswap, hcool
 - rollit
 - prop - curve, tsa(f), taf(f), steam, fspre(f)

- force
- curve, taf(f)
- mix - curve
- differ - curve, taf(f)
- iswap

- void - scqual(f), bvoid(f)

- heat - rollit
- curve
- temp - gauss
- iswap
- hcool - chfcor
- - htcor - curve

- area - curve

- chf - rollit
- iswap
- chf1 - rollit, iswap
- chf2 - rollit, iswap

- dumpit - loc4

부록 C Subroutine description in program MATRA-LMR

1. Program MATRA

- Driver routine for the MATRA code
- Calls most of the major subroutines controls the transient calculation, and updates the boundary conditions.
- Initializes variables :
 - . To zeroes (CLEAR)
 - . To the values saved from a previous run (RESTRT)
- Controls input/output :
 - . Input (SETUP)
 - . output (result)
- Directs the solution approach :
 - . Steady-state and implicit transient (SCHEME)
 - . Explicit transient (XSCHM)
- Sets the transient boundary conditions and forcing functions at the beginning of each time step

2. Subroutine AREA (J, JX)

* Functions

- Calculates channel area and gap spacing by using the tabular list of channel area and gap spacing variations supplied as input.
- Uses a linear interpolation to select values from these values.
- Corrects channel area and hydraulic diameter according to the wire wrap inventory when forced crossflow due to wire wrap is included.

* Arguments

- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

3. Function BVOID (I, J)

* Acronym

- Bulk VOID fraction

* Functions

- Calculates the bulk void fraction used in the implicit solution scheme according to a correlation selected by the user for a given quality.
- Not used in the explicit solution scheme because there the homogeneous model is used exclusively.
- Provides several correlation forms requiring arbitrary constants read from input. These are

provided so that the user can select the correlation form and coefficients that are most applicable to the particular problem.

* Arguments

- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)

4. Subroutine CHF (JSTART, JEND)

* Acronym

- Critical Heat Flux

* Functions

- Searches MATRA output at the end of each time step for the occurrence of critical heat flux. The search is made on each rod at a specified axial location range by considering each rod and the adjacent channels.
- At the completion of the channel enthalpy and flow calculation, an optional call to Subroutine CHF is provided to calculate critical heat flux ratios over the portion of the channel denoted by JX=JSTART through J=JEND. The critical heat flux ratio CHFR(N,J) and critical channel CCHANL(N,J) are calculated for each rod N at axial location J. CHFR(N,J) is also searched to determine the minimum critical heat flux ratio MCHFR(J), critical rod MCHFRR(J), and critical channel MCHFRC(J) at each axial location J. The data is printed as part of the fuel temperature and heat flux output.
- Although the B&W-2 and W-3 CHF correlations are included, users can program other correlations of their choice as options.

* Arguments

- JSTART : Starting axial location (physical axial level) for calculation of CHF
- JEND : Ending axial location (physical axial level) for calculation of CHF

5. Function CHF1 (N, I, J, JX)

* Acronym

- Critical Heat Flux 1

* Functions

- Returns a CHF value by the B&W-2 CHF correlation.
- Uses the coolant properties of the Ith channel to calculate the CHF of the Nth rod at the JXth axial location.

* Arguments

- N : Index for rod identification number
- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

6. Function CHF2 (N, I, J, JX)

* Acronym

- Critical Heat Flux 2

* Functions

- Returns a CHF value by the W-3 CHF correlation.
- Uses the coolant properties of the Ith channel to calculate the CHF of the Nth rod at the JXth axial location.

* Arguments

- N : Index for rod identification number
- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

7. Subroutine CHFCOR (N, I, J, JX)

* Acronym

- Critical Heat Flux CORrelation

* Functions

- Calculates the critical heat flux used only by Subroutine HCOOL.
- Three CHF correlations are included, and the system pressure is used as the basis for selecting the appropriate correlation.

* Arguments

- N : Index for rod identification number
- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

8. Subroutine CIUNIT (ICIU, ICBU, NGROUP)

* Acronym

- Conversion of Input UNIT system

* Functions

- Converts SI to British (ICIU=1)
or British to SI units (ICIU=2).
- Converts British units (in -> ft ; hr -> sec) (ICBU=1)
(ft -> in ; sec -> hr) (ICBU=2).

* Arguments

- ICIU : Input unit conversion switch
ICIU=0 : Converts none.

- ICIU=1 : Converts SI to British units.
- ICIU=2 : Converts British to SI units.
- ICBU : British unit conversion switch
 - ICBU=0 : Converts none.
 - ICBU=1 : Converts British units (in -> ft ; hr -> sec).
 - ICBU=2 : Converts British units (ft -> in ; sec -> hr).
- NGROUP : Card group number for conversion of units

9. Subroutine CLEAR (STATUS)

- * Functions
 - Zeroes common blocks prior to execution
 - Calculates the size of any common block to be zeroed by using Function LOC4
- * Arguments
 - STATUS : Flag which may be selectively used to zero common blocks for each case in multiple case execution passes
 - STATUS='NEW' : All common blocks are zeroed :
 - ISTAT='NEW' in Main Program MATRA only for the 1st case.
 - STATUS='OLD' : Only Common Block /LARGE1/ is zeroed :
 - ISTAT='OLD' in Subroutine SETUP from the 2nd case.

10. Subroutine CPTIME (MTIME)

- * Acronym
 - Central Processing TIME
- * Functions
 - Returns elapsed calculation time.
 - Function SECNDS returns the number of seconds that have elapsed since midnight, less the value of its argument.
 - Function SECNDS returns a REAL*4 value, and its argument must be of type REAL*4 also.
- * Arguments
 - MTIME : Elapsed calculation time [sec]

11. Subroutine CURVE (FX, X, F, Y, N, JERROR, ISAVE)

- * Functions
 - Performs linear interpolation of tabulated data.
- * Arguments
 - FX : Quantity to be found
 - X : Independent variable

- F : Input array of values of the dependent variable (monotonic with Y)
- Y : Input array of values of the independent variable (monotonic increase)
- N : Number of entries in the table of F (number of F or Y values)
- JERROR : Error signal (JERROR=10)
- ISAVE : Table search switch
 - ISAVE=0 : A complete table search on the independent variable is done.
 - ISAVE=1 : The location in the table which brackets the independent variable is known from a previous call to Subroutine CURVE, and the table search is not performed.

12. Subroutine DIFFER (IPART, J, JX)

* Functions

- Calculates differential terms in energy and momentum equations.
- Consists of 4 parts as indicated by IPART :
- Part 1 calculates the enthalpy gradient dh/dx. For the steady-state and SCHEME transient calculations, dh/dx consists only of the energy change due to axial conduction and energy transport from the rods. For the XSCHM transient, dh/dx contains all forms of energy transport and is truly the steady-state energy gradient dh/dx. When the conducting wall heat transport model is used, the overall wall-to-coolant heat transfer coefficient UWALL along with a coefficient to convert coolant temperature to enthalpy is also calculated in Part 1.
- Part 2 calculates the crossflow resistance CIJ and the lateral momentum flux term.
- Part 3 calculates the pressure loss coefficient DPK and the other components of the pressure gradient dp/dx without the diversion crossflow w terms.
- Part 4 calculates the complete pressure gradient dp/dx including the diversion crossflow w terms.

* Arguments

- IPART : Flag to designate a particular calculation part
 - IPART=1 : Calculates dh/dx (enthalpy gradient).
 - IPART=2 : Calculates CIJ (crossflow resistance) and lateral momentum flux term.
 - IPART=3 : Calculates DPK (pressure loss coefficient) and dp/dx (pressure gradient) without w (diversion crossflow) term.
 - IPART=4 : Calculates dp/dx (pressure gradient) with w (diversion crossflow) term.
- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

13. Subroutine DIVERT (J, JX)

* Functions

- Sets up the coefficient matrix [AAA] and the vector {B} such that [AAA]{w}={B}, and then solves the set of equations for w.
- Performs iterative solution by using SOR (Successive Over-Relaxation : Gauss-Seidel with over-relaxation).

* Arguments

- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

14. Subroutine **DSODIUM** (TC, N, IUNIT, PP, TT, VVF, VVG, HHF, HHG, UUF, KKF, SSIGMA)

- Thermodynamic properties of sodium.
- Reference : ANL-CEN-RSD-79-1

15. Subroutine **DUMPIT** (NTSAVE)

* Functions

- Stores (dumps) all common blocks on the logical unit 8.
- Allows the user to save the current calculated values, look at the results, and then, if desired, continue the solution.

* Arguments

- NTSAVE : Index for the current time step

16. Subroutine **EAZ** (X, F, DF, NR)

* Acronym

- Equivalent Annular Zone

* Functions

- Calculates the function value F for NR=1, and both the function value F and 1st derivative of the function DF for NR=2, at X.
- Here the function is generated to find the root of the nonlinear equation : the Rehme correlation for single-phase friction factor for the equivalent annular zone of triangular rod array.

* Arguments

- X : Guess for root of the function F
- F : Function value
- DF : 1st derivative of the function F
- NR : Case index for number of results

17. Subroutine **ENERGY** (NN, J, JX, TFLO, TFLOJ, QOH)

* Functions

- Solves simultaneous equations of energy.
- * Arguments
 - NN : Index for external iterations
 - J : Index for axial location (current calculation level)
 - JX : Index for axial location (physical axial level)
 - TFLO : Total axial flow rate at bundle inlet for the 1st external iteration [lbm/sec]
 - TFLOJ : Total axial flow rate at current calculation level J for the 1st external iteration [lbm/sec]
 - QOH : Maximum enthalpy error for each external iteration

18. Subroutine FORCE (J, JX)

- * Functions
 - Specifies forced crossflow at selected gaps and at selected axial locations.
 - If a forced crossflow is specified, FDIV=1. ; otherwise, FDIV=0.
 - Includes two options for forced crossflow :
 - One option is the forced crossflow due to wire wrap calculated by the wire wrap model.
 - The other option is the forced crossflow due to grid spacer specified as a fraction of axial flow.
- * Arguments
 - J : Index for axial location (current calculation level)
 - JX : Index for axial location (physical axial level)

19. Function FSPRE (J)

- * Acronym
 - REhme correlation for Single-Phase Friction factor
- * Functions
 - Calculates the single-phase turbulent friction factor for triangular rod array with wire wrap or grid spacer by using the Rehme correlations.
- * Arguments
 - J : Index for axial location (current calculation level)

20. Subroutine GAUSS (T, NP, SM)

- * Functions
 - Solves fuel rod heat conduction equation by the Gauss-Jordan elimination.
- * Arguments
 - T : Temperature of rod [F]
 - NP : Number of fuel collocation points plus one
 - SM : Components of coefficient matrix for the fuel rod heat conduction equation

21. Subroutine HCOOL (N,I,J,JX,HTC,IMODE,NSS)

* Functions

- Determines heat transfer coefficient.
- Determines which regime on the boiling curve is appropriate.
- Calls Subroutine HTCOR to obtain the heat transfer coefficient, and calls Subroutine CHFCOR to obtain the critical heat flux.

* Arguments

- N : Index for rod identification number
- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)
- HTC : Heat transfer coefficient calculated in Subroutine HTCOR [Btu/sec-ft²-F]
- IMODE : Flag to designate regions on the boiling curve
- NSS : Flag to indicate from which routine Subroutine HEAT is called
 - NSS=0 : SCHEME
 - NSS=1 : XSCHEM
 - NSS=2 : MATRA

22. Subroutine HEAT (NSS, JB, NHT, JX3)

* Functions

- Calculates rod internal temperatures, surface heat flux, linear heat input to each channel, average fluid temperature and heat transfer coefficient around a rod.
- Consists of 3 parts as indicated by NHT :
- Part 1 calculates the heat flux of each rod based on the rod power, and the rod internal temperatures if the fuel model is used.
- Part 2 calculates the linear heat input to each channel using the heat flux from Part 1.
- Part 3 calculates the average fluid temperature and average heat transfer coefficient around a rod used in the fuel rod heat conduction equation.

* Arguments

- NSS : Flag to indicate from which routine Subroutine HEAT is called
 - NSS=0 : SCHEME
 - NSS=1 : XSCHEM
 - NSS=2 : MATRA
- JB : Index for axial location (current calculation level)
- NHT : Flag to designate a particular calculation part
 - NHT=1 : Calculates rod internal temperatures and surface heat flux.
 - NHT=2 : Calculates linear heat input to each channel.

NHT=3 : Calculates average fluid temperature and heat transfer coefficient around a rod.

- JX3 : Index for axial location (physical axial level)

23. Subroutine HTCOR (HTC, TSURF, N, I, J, RE, DE, IPART)

* Acronym

- Heat Transfer CORrelation

* Functions

- Calculates a heat transfer coefficient by the correlation specified in the call list.

* Arguments

- HTC : Heat transfer coefficient [Btu/sec-ft²-F]
- TSURF : Rod surface temperature [F]
- N : Index for rod identification number
- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)
- RE : Reynolds number
- DE : Hydraulic diameter [ft]
- IPART : Flag to designate a particular heat transfer correlation
 - IPART=1 : Dittus-Boelter
 - IPART=2 : Thom
 - IPART=3 : Schrock and Grossman
 - IPART=4 : Mcdonough, Milich, and King
 - IPART=5 : Groeneveld
 - IPART=6 : Dougall and Rohsenow
 - IPART=7 : Berenson

24. Subroutine ISWAP (I, J, K)

* Functions

- Interchanges the input and output logical unit designations in conjunction with the roll option ; i.e., logical unit I becomes logical unit J, and vice versa.
- K is a file positioning switch :
- If K is equal to 1, then both I and J are positioned at the beginning of the 1st record.
- If K is not equal to 1, then both I and J are positioned at the beginning of the 2nd record.

* Arguments

- I : Input/output device for roll option
- J : Input/output device for roll option
- K : File positioning switch

- K=1 : Both the logical units I and J are positioned at the beginning of the 1st record
K=2 : Both the logical units I and J are positioned at the beginning of the 2nd record.

25. Subroutine LIMITS (NUM, NMIN, NMAX, NGROUP, NCARD, ERROR)

*** Functions**

- Enhances the editing of input data within Subroutine SETRI.
- Guarantees that the values read into an array are within the dimensioned limits of the code.
- If not, NUM is changed only for the convenience of editing :
 - If $NUM < NMIN$, then $NUM = NMIN$;
 - If $NUM > NMAX$, then $NUM = NUM$ (for dummy reads).
- However, the case will be terminated after the input data are edited and printed.
- A limit of NERRMX (25) accumulated errors are allowed, after which the editing will cease.

*** Arguments**

- NUM : Input parameter to be checked
- NMIN : Minimum allowable value for NUM
- NMAX : Maximum allowable value for NUM
- NGROUP : Card group identifier for editing diagnostics
- NCARD : Input card counter for labeling which card may be in error
- ERROR : Alphanumeric flag for editing :
 - If $ERROR = 'YES'$, then the code will terminate following the editing and printing of input data.

26. Subroutine LOAD (X1, X2, X3, MIN, MAX, LIMIT, NSTEP, IMAGE, NCARD, LU)

*** Functions**

- Replaces redundant logic within Subroutine SETRI.
- Allows the loading of input data only after the group card parameters have been verified.

*** Arguments**

- X1 : 1st variable to be loaded (step=1)
- X2 : 2nd variable to be loaded (step=2)
- X3 : 3rd variable to be loaded (step=3)
- MIN : Maximum allowable sets of (X1,X2,X3) which can be loaded
- MAX : Number of sets of (X1,X2,X3) which the user attempts to load:
 - If $MAX > MIN$, then a dummy read is used to account for remaining cards. This allows subsequent input to be edited.
- LIMIT : Maximum number of input data per card which can be loaded via the formatted IMAGE

- NSTEP : Number of variables to be loaded sequentially (1 to 3)
- IMAGE : Variable FORMAT to be used for loading input data
- NCARD : Input card counter for labeling which card may be in error
- LU : Input device used for reading in input data

27. Function LOC4 (IX)

* Acronym

- LOCation of variable in 4-byte unit

* Functions

- Returns the address (memory reference) of its argument as an INTEGER*4 value in 4-byte unit.

- Function LOC returns the address (memory reference) of its argument as an INTEGER*4 value in 1-byte unit.

* Arguments

- IX : Name of the object whose address to be retrieved

28. Subroutine MIX (J)

* Functions

- Calculates the turbulent mixing w' , which is designated by WP.
- Since completely general correlations for turbulent mixing have not been developed for single- and two-phase flow, this subroutine is set up so that improved correlations can be included when they become available.
- The approach used is to separate the turbulent mixing into boiling and nonboiling conditions :
 - . For nonboiling condition (single-phase flow), several correlation forms are included.
 - . For boiling condition (two-phase flow), the single-phase correlations may be assumed, or the turbulent mixing parameter may be specified as a function of quality or void fraction.

* Arguments

- J : Index for axial location (current calculation level)

29. Subroutine PBOUND (JUMP)

* Acronym

- Pressure drop BOUNDary condition

* Functions

- Modifies the inlet flow rate for the steady-state solution until all channel pressure drops are approximately equal to the specified pressure drop DPS.

* Arguments

- JUMP : Convergence indicator
 - JUMP=1 : Not converged
 - JUMP=2 : Converged

30. Subroutine PROP (IPART, J, JX)

* Acronym

- PROPerTy of fluid

* Functions

- Calculates fluid properties.
- Consists of 2 parts as indicated by IPART :
- Part 1 calculates the saturated fluid properties as a function of the input system reference (exit) pressure, and sets up the table of superheated vapor properties by calling Subroutine STEAM.
- Part 2 calculates the subcooled or superheated fluid properties as a function of enthalpy, and limits these to saturated values during boiling, and also calculates miscellaneous parameters.

* Arguments

- IPART : Flag to designate a particular calculation part
 - IPART=1 : Calculates the saturated fluid properties as a function of input system (exit) pressure, and sets up the table of superheated vapor properties by calling Subroutine STEAM.
 - IPART=2 : Calculates the subcooled or superheated fluid properties as a function of enthalpy, and limits these to saturated values during boiling, and also calculates miscellaneous parameters.
- J : Index for axial location (current calculation level)
- JX : Index for axial location (physical axial level)

31. Function PSA (T)

* Acronym

- SAuration Pressure

* Functions

- Calculates the saturation pressure [N/m² : Pa] for a given saturation temperature [C] of light water (H₂O) according to the 1967 IFC Formulation of Properties for Water and Steam.

* Arguments

- T : Saturation temperature [C]

32. Subroutine RESTRT (NTSTRT, ISTART)

* Acronym

- REStART

* Functions

- Initializes variables to the values saved by Subroutine DUMPIT from a previous run.

* Arguments

- NTSTRT : Index for the 1st time step

- ISTART : Index for the 1st external iteration

33. Subroutine **RESULT** (NT)

* Functions

- Prints out and/or plots calculation results for each time step.

* Arguments

- NT : Index for the current time step

34. Subroutine **ROLLIT** (J, JX, SAVEA1, SAVEA2, SAVEA3, NWR, NDXP1, LUO,LUI)

* Functions

- Reads and writes temporary storage values of the axial dependent variables in conjunction with the roll option.

* Arguments

- J : Index for axial location (current calculation level)

- JX : Index for axial location (physical axial level)

- SAVEA1 : Vector of length NWR, equivalenced to the axial dependent variables at the axial location J-1

- SAVEA2 : Vector of length NWR, equivalenced to the axial dependent variables at the axial location J

- SAVEA3 : Vector of length NWR, equivalenced to the axial dependent variables at the axial location J+1

- NWR : Width of SAVEA1, SAVEA2, and SAVEA3 arrays (M1)

- NDXP1 : Number of axial nodes plus one

- LUO : Output device for roll option

- LUI : Input device for roll option

35. Function **ROOT** (FTN, X1, X2, TOLX, TOLF, IMAX, METHOD)

* Functions

- Finds the root of a function known to lie between X1 and X2. The root, returned as ROOT, will be refined until the absolute value of its accuracy is within TOLX or the absolute value of the function value is within TOLF.

- FTN (X,F,DF,NR) is a user-supplied subroutine that returns the function value F for

NR=1, and both the function value F and 1st derivative of the function DF for NR=2, at X. NR is the case index for number of results.

* Arguments

- FTN : A user-supplied subroutine that returns F and DF
- X1 : Initial lower bound
- X2 : Initial upper bound
- TOLX : Convergence factor for X
- TOLF : Convergence factor for F
- IMAX : Maximum allowed number of iterations
- METHOD : Flag to designate a particular root finding method
 - METHOD=1 : Bisection method
 - METHOD=2 : Newton-Raphson method
 - METHOD=3 : Newton-Raphson / Bisection method

36. Subroutine SCHEME (JUMP, ISTART)

* Functions

- Sets up and performs the solution of the implicit finite difference scheme.
- Performs the steady-state and implicit transient solution.
- Performs the calculations through the bundle in a stepwise manner given a set of boundary and initial conditions.
- First the enthalpy $h(x)$ is calculated and an estimate for axial flow $m(x)$ is made for the 1st iteration only. The diversion crossflow $w(x)$ and axial flow $m(x)$ are then calculated. Any value of $w(x)$ or $m(x)$ not converged to within a selected tolerance is sufficient to set the convergence flag JUMP to 1. Following the crossflow and axial flow calculations, the pressure $p(x)$ and lateral pressure difference $dp(x)$ are calculated. The procedure is repeated stepwise up the bundle until the exit is reached. If the crossflows and axial flows are converged (JUMP=2), or the maximum allowable number of iterations is reached, control is returned to the main program. Otherwise the bundle is swept again using new estimates for flows in the calculations.
- Regardless of convergence, a minimum number of iterations is required depending on the fuel model options employed :

Minimum Number Iterations	Fuel Model Options
-----	-----
2	No fuel model
3	Fuel model without RELAP-type heat transfer package
4	Fuel model with RELAP-type heat transfer package

* Arguments

- JUMP : Convergence indicator
 - JUMP=1 : Not converged
 - JUMP=2 : Converged
- ISTART : Starting iteration number ; May be other than 1 for restart cases

37. Function SCQUAL (I,J)

- * Acronym
 - SubCooled QUALity
- * Functions
 - Levy model for subcooled void
 - Calculates the subcooled true quality as a correction to the equilibrium quality.
- * Arguments
 - I : Index for channel identification number
 - J : Index for axial location (current calculation level)

38. Subroutine SETIV

- * Acronym
 - Initializing Variables in subroutine SETup
- * Functions
 - Initializes and sets up variables to run problems.
 - Calculates miscellany from input.

39. Subroutine SETPI (ERROR)

- * Acronym
 - Printing out Input data in subroutine SETup
- * Functions
 - Prints out input data.
- * Arguments
 - ERROR : Alphanumeric flag for editing :
 - If ERROR='YES', then the code will terminate following the editing and printing of input data.

40. Subroutine SETRI (ERROR)

- * Acronym
 - Reading in Input data in subroutine SETup
- * Functions
 - Reads in input data.
- * Arguments

- ERROR : Alphanumeric flag for editing :
 If ERROR='YES', then the code will terminate following the editing and printing of input data.

41. Subroutine SETUP

* Functions

- Reads in and prints out input data, converts input printout unit systems, and also initializes and sets up variables to run problems.
- Reads in input data : SETRI
- Editing of input (Checks input against dimension limits) : LIMITS
- Loading of input : LOAD (& READ statements)
- Prints out input data : SETPI
- Converts input printout unit systems : CIUNIT
- Initializes and sets up variables to run problems : SETIV

42. Subroutine SPLIT (IG, GIN)

* Functions

- Corrects flow estimate by iterations. This procedure assumes that there is a density change with length and that no diversion crossflow is occurred. Convergence tolerance is E.
- Divides the channel flow rates at the inlet of the bundle to give equal pressure gradients across the 1st axial node by assuming that there is no spatial acceleration component of pressure drop.

* Arguments

- IG : Option for specified inlet mass velocity
 - IG=0 : Uniform inlet mass velocity GIN (SETRI 11.1) specified
 - IG=1 : Average bundle mass velocity GIN (SETRI 11.1) specified but channel inlet flows split for equal pressure gradient across the 1st axial node
 - IG=2 : Average bundle mass velocity GIN (SETRI 11.1) specified but channel inlet flows split by individual channel inlet flow fraction (SETRI 11.3) specified
- GIN : Inlet mass velocity [Mlbm/hr-ft²] : [kg/sec-m²]

43. Subroutine STEAM (PRESS)

* Functions

- Initializes the tabular values of superheated steam properties.

* Arguments

- PRESS : System reference (exit) pressure [psia]

44. Subroutine **SYSDT** (D,T)

* Acronym

- current SYStem Date and Time

* Functions

- Returns the current system date and time.

* Arguments

- D : 9-byte character string of the form 'dd-mmm-yy'

- T : 8-byte character string of the form 'hh:mm:ss'

45. Function **TAF** (I1, P1, P2)

* Functions

- Calculates the properties of light water in Subregion 1 (liquid) and Subregion 2 (vapor) according to the 1967 IFC Formulation of Properties for Water and Steam.

46. Subroutine **TEMP** (TT, N, JJ, IFLAG, ISS, JXX)

* Acronym

- TEMPerature of rod

* Functions

- Calculates the steady-state and transient fuel rod internal temperature distribution.

- The mathematical model considers both variable thermal conductivity and axial conduction. Also, axially varying fuel types are permissible.

- The problem is solved in the radial coordinate by the orthogonal collocation method of weighted residuals using the Kirchoff's transformation in the fuel rod heat conduction equation.

- The time derivative and axial coordinate are handled by conventional finite difference techniques.

* Arguments

- TT : Temperature of rod [F]

- N : Index for rod identification number

- JJ : Index for axial location (current calculation level)

- IFLAG : Convergence indicator

IFLAG=0 : Not converged

IFLAG=1 : Converged

- ISS : Flag to designate time dependency of calculation

ISS=0 : Transient calculation

ISS=1 : Steady-state calculation

- JXX : Index for axial location (physical axial level)

47. Function TSA (P)

* Acronym

- SATuration Temperature

* Functions

- Iterates saturation temperature [C] for a given saturation pressure [N/m² : Pa] for heavy or light water depending what procedure for PSA has been chosen.

* Arguments

- P : Saturation pressure [N/m² : Pa]

48. Subroutine VAN (NCARD, ERROR)

* Acronym

- Variable Axial Node

* Functions

- Allows variable axial node.

* Arguments

- NCARD : Input card counter for labeling which card may be in error
- ERROR : Alphanumeric flag for editing :
If ERROR='YES', then the code will terminate following the editing and printing of input data.

49. Function VCHLE (I,J)

* Acronym

- CHexal-LEllouche correlation for bulk Void fraction

* Functions

- Calculates the bulk void fraction by using the Chexal-Lellouche correlation.

* Arguments

- I : Index for channel identification number
- J : Index for axial location (current calculation level)

50. Subroutine VOID (J)

* Functions

- Calculates subcooled void fraction, bulk void fraction, two-phase mixture density, two-phase momentum specific volume, two-phase momentum velocity, two-phase friction multiplier, effective flow density for energy, and two-phase friction factor.
- Not used in the explicit solution scheme because there the homogeneous model is used exclusively.

* Arguments

- J : Index for axial location (current calculation level)

51. Subroutine XSCHEM (IPART)

* Acronym

- eXplicit SCHEMe

* Functions

- Performs the explicit transient solution.
- A normal call to Subroutine XSCHEM (IPART=2) advances the solution one complete time step and calculates the duration of the next time step.
- For the running start option, the steady-state implicit solution is first calculated. The resulting channel flows are then used to determine the maximum time step allowed for the explicit transient by a call to Subroutine XSCHEM (IPART=1). Otherwise, an input value for the maximum allowable time step is used for the 1st time step.
- One pass through Subroutine XSCHEM (IPART=2) results in three channel sweeps. The 1st sweep calculates tentative flows and also updates fuel temperatures, if a fuel model is used. The 2nd sweep is iterated for the actual flow/pressure field solution until the maximum dilation in any one cell is sufficiently small. The 3rd sweep finds the maximum Courant number in the mesh for calculating the next time step.

* Arguments

- IPART : Flag to designate a particular calculation part
 - IPART=1 : Adjusts time step according to the maximum Courant number.
 - IPART=2 : Advances the solution one complete time step and calculates the duration of the next time step.

부록 D Program MATRA-LMR input description

Program MATRA-LMR

Matra.1

/MAXT, IIUNIT, JIUNIT, JOUNIT/ (4I5)

- * MAXT : Computer time limit
- * IIUNIT : Input unit system
 - = 0 : British
 - = 1 : SI
- * JIUNIT : Input print unit system
 - = 0 : British
 - = 1 : SI
- * JOUNIT : Output printout unit system
 - = 0 : British
 - = 1 : SI

Restrt.1

/NJUMP, NA, IT, NTT, TTT/ (4I5, F5.0)

--> Option input : MAXT negative

- * NJUMP : Restart flag
 - = 0 : Continue calculation on a previous steady-state or transient solution, do not read in any additional data.
 - = 1 : New problem calculation with a previous solution reading additional data.
 - = 2 : Read dump tape, print input and results then stop.
 - = 3 : Same as (= 0), but all the input data is printed.
- * NA : Number of additional iterations
- * IT : Begin a transient solution at time zero from a previous solution. (= 1)
- * NTT : Number of additional time steps
- * TTT : Total additional transient time (sec)

Setri.0

/KASE, J1, TEXT/ (2I5, 17A4)

- * KASE : Problem case number
- * J1 : Print option for input data.
 - = 0 : Print only new input data.
 - = 1 : Print all input data.

- = 2 : Print only operating conditions.
- = 10 : Print all input data, then stop.
- * TEXT : Output text for problem identification.

Group 1 - Fluid property table

Setri.1

- /NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6/ (7I5)
- * NGROUT = 1
- * N1(NPROP) : Number of property cards to be read (= 100)
- * N2(ISTEAM) : No superheated steam properties (= 0)
- * N3 : Not applicable if N2=0 (= 0)
- * N4(J9) : Method for calculation of fluid properties (= 0 : interpolation)
- * N5(IFLUID) : Option for heat transfer coefficient
 - = 0 : Dittus-Boelter (for water)
 - = 1 : Schad-modified (CRBRP)
 - = 2 : Westinghouse (FFTF)
 - = 3 : Lyon-Martinelli
- * N6(NFSPLT) : Option for flow split and pressure drop
 - = 0 : Novendstern
 - = 1 : Chiu-Rohsenow-Todreas (CRT)
 - = 2 : Cheng-Todreas (CT)

Group 2 - Friction factor and two phase flow correlation

Setri.2

- /NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7/ (8I5)
- * NGROUP = 2
- * N1(J2) : Subcooled void formation correlation (= 0 : no subcooled voids)
- * N2(J3) : Void fraction correlation (= 0 : homogeneous model)
- * N3(J4) : Two phase friction multiplier (= 0 : homogeneous model)
- * N4(NVISCW) : Wall viscosity correlation
 - = 0 : No heated wall correlation in friction factor
 - = 1 : Include heated wall correlation in friction factor
- * N5(LAMNF) : Laminar friction factor (= 0 : no laminar correlation)
- * N6 : = 0 (not use)
- * N7(J8) : Single phase turbulent friction factor (= 0 for sodium)

Setri.2.1

/AA, BB, CC/ (3F5.3)

* Turbulent friction factor coefficient : $f = AA (Re)^{BB} + CC (0.316 Re^{-0.25})$

Group 3 - Axial heat flux table

Setri.3

/NGROUP, N1/ (2I5)

* NGROUP = 3

* N1(NAX) : Number of entries in heat flux table

Setri.3.1

/Y(I), AXIAL(I)/ (12F5.3)

* Y : Relative position (X/L)

* AXIAL : Relative heat flux at (X/L) (Local flux / average flux)

Group 4 - Channel layout and dimensions

Setri.4

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6/ (7I5)

* NGROUP = 4

* N1 : Number of data cards of subchannel

* N2(NCHANL) : Total number of subchannels

* N3(NS) : Number of gaps

* N4(NWK) : Number of thermal connections (= 0)

* N5 : Logical unit from which card set Setri.4.1 is to be read. (= 9)

* N6 : Logical unit from which card set Setri.4.3 is to be read. (= 9)

Setri.4.1

: Read datas from results of geometry calculation (geom.out)

Setri.4.3

: Read datas from results of geometry calculation (geom.out)

Group 5 - Subchannel area variation

--> Not use without area variation

Setri.5

/NGROUP, N1, N2/ (3I5)

* NGROUP = 5

* N1(NAFACT) : Number of subchannel for which area variation tables are to be read

* N2(NAXL) : Number of axial location for subchannel area variations

Setri.5.1

/AXL(I)/ (12F5.3)

- * AXL : Axial location (X/L) where subchannel area variations will be specified

Setri.5.2

/I, AFACT(I)/ (I5 / 12F5.3)

- * I : Identification number of a subchannel with area variations
- * AFACT : Relative subchannel area($A_i/A_{nominal}$) at each axial level(AXL)

Group 6 - Gap size variation table

--> Not use without gap variation

Setri.6

/NGROUP, N1, N2/ (3I5)

- * NGROUP = 6
- * N1(NGAPS) : Number of gaps with gap variation
- * N2(NGXL) : Number of axial location for gap variation

Setri.6.1

/GAPXL(I)/ (12F5.3)

- * GAPXL : Axial locations (X/L) where GAP variations will be specified

Group 7 - Wire wrap and spacer design information

Setri.7

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6/ (7I5)

- * NGROUP = 7
- * N1(J6) = 1 : Wire wrap input
= 2 : Grid spacer input
= 3 : Wire wrap input and grid spacer loss coefficient input
- * N2 : Number of GAPS
- * N3(NGRID) : Number of axial location for grid spacers (= 0)
- * N4(NGRIDT) : Number of grid types for which data will be supplied (= 0)
- * N5(NRAMP) : Number of iterations over which the loss terms and wire wrap effect are to be ramped into the solution (= 0)
- * N6 : Logical unit that card sets Setri.7.2 and Setri.7.3 are to be read (= 9)

Setri.7.1

/PITCH, DIA, THICK, PITCHR/ (4E10.5)

- * PITCH : Wire wrap pitch (in.)

- * DIA : Rod or cladding outer diameter (in.)
- * THICK : Wire wrap diameter (in.)
- * PITCHR : Rod pitch (in.)

Setri.7.2

Read datas from results of geometry calculation (geom.out)

Setri.7.3

Read datas from results of geometry calculation (geom.out)

Group 8 - Rod layout and fuel properties

Setri.8

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9/ (10I5)

- * NGROUP = 8
- * N1 : The number of cards of rod data to be read
- * N2(NROD) : The total number of rods
- * N3(NC) : Order of approximation used in fuel model (= 0 no fuel model)
- * N4(NFUEL) : The number of fuel materials (= 0 : not applicable)
- * N5(NCHF) : Critical heat flux option (= 0 : no CHF calculation)
- * N6(NQAX) : Additional fuel model options (= 0 : not applicable)
- * N7(NHTC) : Heat transfer correlation option (= 0 : Setri.1.N5)
- * N8(NRODTP) : Option for axially varying fuel material (= 0)
- * N9 : Logical unit from which card set Setri.8.1 is to be read (= 9)

Group 9 - Calculation variables

Setri.9

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6/ (7I5)

- * NGROUP = 9
- * N1(NSKIPX) : Output print option
 - = 0 or 1 : Print all axial levels
 - > 1 : Print every N1 axial levels
- * N2(NSKIPT) : Output print option
 - = 0 or 1 : Print all axial levels
 - > 1 : Print every N2 axial levels
- * N3(K11) : Specifies the solution algorithm to solve the problem
 - = 0 : Implicit for both steady-state and transient
 - = 1 : Implicit steady-state and explicit transient with Δp
 - = 2 : Start explicit transient with zero flow initial condition, and Δp B.C.

- = 3 : Implicit steady-state and explicit transient with inlet flow B.C.
- = 4 : Start explicit transient with zero flow I.C. and inlet flow B.C.
- * N4(IROLL) : Problem roll option (= 0 : no roll option)
- * N5(ITSTEP) : Maximum time step table
 - = 0 : FDT(Setri.9.3) for all time
 - > 0 : Read variable max. timestep (time vs. max. time step)
- * N6(NVAZ) : Number of axial zones for variable axial node length
 - = 0 or 1 : Uniform axial node length
 - > 1 : Read variable axial node length (no. of nodes vs. axial length fraction)

Setri.9.1

/Z, TTIME, WERRX, WERRY, FERROR, KIJ, SL, FTM, THETA, USDON, DAMPNG,
 ACCELY, ACCELF/
 (13E5.0)

- * Z : Total axial length (in.)
- * TTIME : Total transient time (sec)
- * WERRX : External crossflow convergence limit (= 0 : default = 0.1)
- * WERRY : Internal crossflow convergence limit (= 0 : default = 0.001)
- * FERROR : External axial flow convergence limit (= 0 : default = 0.01)
- * KIJ : Turbulent crossflow resistance factor (= 0 : default = 0.5)
- * SL : Transverse momentum factor (= 0 : default = 0.5)
- * FTM : Turbulent momentum factor (= 0 : default = 0.)
- * THETA : Bundle orientation (= 0 : vertical)
- * USDON : Contribution of velocity from the donor and receiver subchannels (= 0)
- * DAMPNG : Damping factor for iterative SP term (= 0 : default = 0.8)
- * ACCELY : Crossflow solution accelerator (= 0 : default = 1.6)
- * ACCELF : Damping factor for iterative axial flow (= 0.5 recommand : default = 1.)

Setri.9.2

/NDX, NDT, NTRIES, ITRY, ITRYM/ (515)

- * NDX : Number of axial nodes
- * NDT : Total number of time steps allowed. For implicit transient the time step size is
 (TTIME / NDT)
- * NTRIES : Max. number of external iterations allowed in implicit solution scheme
 (reasonable value = 200)
- * ITRY : Max. number of internal iterations allowed in implicit solution scheme
 (reasonable value = 200)
- * ITRYM : Min. number of iterations in the internal crossflow solution(= 0 : default = 5)

Group 10 - Turbulent mixing correlation

Setri.10

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6/ (7I5)

- * NGROUP = 10
- * N1(NSCBC) : Single phase turbulent mixing option
= 0 : $W_k = ABETA * (SkG)$
- * N2(NBCC) : Option for two phase mixing (= 0 : same as subcooled)
- * N3(J5) : Option for radial thermal conduction mixing
= 0 : No thermal conduction (for water)
= 1 : Read thermal geometry factor at Setri.10.3
- * N4(j10) : Independent variable of two phase turbulent mixing function (= 0)
- * N5(ISTM) : Turbulent mixing model (= 0)
- * N6(ISVD) : Void drift model (= 0)

Setri.10.1

/ABETA, BBETA/ (2F5.3)

- * ABETA, BBETA : Constants coefficients for the turbulent mixing correlation (Recom. = 0.01, 0.0)

Setri.10.3

/GK/ (F5.3)

- * GK : Geometry factor for radial thermal conduction mixing (= 0.5 : recommand)

Group 11 - Operating conditions and transient forcing functions

Setri.11

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8/ (9I5)

- * NGROUP = 11
- * N1(IH) : Inlet enthalpy or temperature
= 0 : Inlet enthalpy
= 1 : Inlet temperature
= 2 : Inlet enthalpy for each subchannel
= 3 : Inlet temperature for each subchannel
- * N2(IG) : Inlet mass flux (= 1 : recommand)
= 0 : Inlet mass flux for each subchannel
= 1 : Average bundle mass flux but subchannel flow is split to give equal dp/dx
= 2 : Average bundle mass flux but flow is split by flow fraction supplied
- * N3(NP) : Transient forcing function for system pressure (= 0)

- * N4(NH) : Transient forcing function for inlet temperature (= 0)
- * N5(NG) : Transient forcing function for inlet mass flux or pressure drop (= 0)
- * N6(NQ) : Transient forcing function for average heat flux (= 0)
- * N7(K10) : Option for pressure drop boundary condition transients (= 0)
- * N8(NHK) : Transient forcing function for exit enthalpy (= 0)

Setri.11.1

/PEXIT, HIN, GIN, AFLUX, HOUT, DPS/ (6F10.0)

- * PEXIT : System pressure (psia)
- * HIN : Inlet temperature (F)
- * GIN : Inlet mass flux (Mlb/hr-ft²)
- * AFLUX : Average heat flux (MBtu/hr-ft²)
- * HOUT : Exit enthalpy (= blank)
- * DPS : Option pressure drop rather than flow B.C. in the steady-state (= blank)

Group 12 - Output options for calculations

Setri.12

/NGROUP, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8/ (9I5)

- * NGROUP = 12
- * N1(NOUT) : Print option
 - = 0 : Subchannel data only
 - = 1 : Subchannel data and crossflow only
 - = 2 : Subchannel data and fuel rod temperatures only
 - = 3 : Subchannel data, crossflows and fuel rod temperatures
- * N2(NPCHAN) : Option for subchannel data printout
 - = 0 : All subchannel data
 - > 0 : Read N2 subchannel identification numbers of subchannels to be printed
- * N3(NPROD) : Option for fuel rod heat flux and temperature printout
 - = 0 : All rods are printed
 - > 0 : Read in N3 rod id. no. of rods to be printed
- * N4(NPNODE) : Option for interior fuel node temp. printout for all rods
 - = 0 : Print rod centerline, rod surface and cladding surface temp.
- * N5(NPGAP) : Option for GAP crossflow printout
 - = 0 : Print crossflow for all GAPs
 - > 0 : Read GAP no. of GAPs to be printed
- * N6(NSKPLT) : Option for transient plotting (= 0 : no plots are printed)
- * N7(NPLTCH) : Option to plot channels (= 0 : no plots)
- * N8(NPLTGP) : Option for GAP crossflow plotting (= 0 : no plot)

부록 E Geometry input description

Program GEOM

Program GEOM automatically calculates, and makes card images of, MATRA input data for input card groups 4, 7, 8, for hexagonal rod bundles.

Card 1

/JCONTU, HEADER/ (15, 18A4)

JCONTU = 1 : standard GEOM run

HEADER : job title

Card 2

Blank card.

Card 3

/RPITCH, RODDIM, PD, FFD, PACFAC/ (5E5.3)

RPITCH : rod pitch (in.)

RODDIM : rod diameter (in.)

PD : ratio of rod pitch to rod diameter

FFD : flat to flat I.D. duct dimension

PACFAC : rod packing factor

= 0 : assembly tolerances are applied only to the peripheral gaps and the interior gaps are assumed to have a width defined as the rod pitch minus the rod diameter.

= 1 : assembly tolerances are applied uniformly and the peripheral and interior gaps have the same dimensions.

Card 4

/IOUT(1), IOUT(2), IOUT(3), IOUT(4), NPUN, IRODP/ (6I1)

IOUT(1) = 1 : area and gap connection data for MATRA group 4 are output.

IOUT(2) = 1 : gap direction angles for MATRA group 4 are output.

IOUT(3) = 1 : MATRA group 7 wire wrap data are output.

IOUT(4) = 1 : rod to channel connection data for group 8 are output.

NPUN = 0 : output is to be on logical unit 9.

IRODP = 0 : use the nominal value of the rod power factor in Card 5.

= unit no. : individual relative rod powers for group 8 are to be read sequentially from logical unit IRODP.

Card 5

/NRODS, RDIAM, RAD, NTYPO, CW, IS, DEL, CORNER, ICOBRA/
(I5, 2F5.3, 3I5, F5.3, 2I5)

NRODS : number of rods

RDIAM : nominal rod diameter (in.)

RAD : nominal rod power factor. If IRODP = unit no., NTYPO = 0

NTYPO : subchannel friction factor typing parameter.

= 0 : all subchannels are type 1. ($0.316Re^{-0.25}$)

= 1 : interior subchannels are type 1, side are type 2, and corner are type 3.

CW : wire wrap direction indicator.

= 0 : counterclockwise wrapping

= 1 : clockwise wrapping

IS : wire wrap starting angle (degrees).

DEL : the effective wire pitch fraction for forcing crossflow.

CORNER : corner subchannel switch.

= 0 : corner subchannels omitted

= 1 : they are included

ICOBRA : option for for cobra rod sequence for input

= 0 : cobra code rod sequencing

= 1 : slthen code rod sequencing (change cobra rod sequencing)

Card 6

If IRODP = unit no. in Card 4, use relative rod powers (12F5.3)

Card 7

Blank card.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-1291/99			
제목/부제	MATRA-LMR 코드 사용자 지침서		
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김원석 (칼리머 노심설계 기술 개발)		
연구자 및 부서명	김영균, 김영진 (칼리머 노심설계 기술 개발)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	97 p.	도표	있음(V), 없음()
발행년	1999. 4.		
크기	26 Cm.		
참고사항	'99 중장기 과제		
비밀여부	공개(V), 대외비(), _ 금비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약 번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>가압경수로와는 달리 액체금속로는 냉각재로 사용하는 소듐의 비등점이 매우 높기 때문에 피복재 온도나 핵연료의 최대온도에 설계 제한조건을 두게 된다. 이러한 설계요건을 만족하면서 냉각재 분배 효율을 높이기 위해서는 노심의 온도분포를 정확히 예측할 필요가 있다.</p> <p>가압경수로 해석을 위해 COBRA-IV-i를 근간으로 개발중인 MATRA 코드를 기본으로 하여 이러한 목적에 부합하는 액체금속로용 MATRA-LMR을 개발하였다. 주된 수정·보완 내용은 다음과 같다. 가) 냉각재 물성치를 물대신 소듐으로 대체하여 코드내 Subroutine으로 삽입하였다. 나) 열전달 계수 상관식을 액체금속로용으로 전환하였다. 다) 압력강하에 관련된 상관식을 최근에 발표된 Novendstern, Chiu-Rohsenow-Todreas, Cheng-Todreas 상관식으로 대체하여 더욱 정확한 계산을 수행할 수 있게 하였다.</p> <p>본 사용자 지침서는 MATRA-LMR (Version 1.0) 코드 사용자를 위하여 코드의 구조와 수식을 기술하고, 입력자료 작성에 대해 설명한 것이다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	액체금속로, 부수로해석, MATRA-LMR, COBRA, 사용자지침서		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-1291/99							
Title/ Subtitle		A User's Guide to the MATRA-LMR code					
Project Manager and Department		Kim Won-Seok (KALIMER Core Design)					
Researcher and Department		Kim Young-Gyun, Kim Young-Gin (KALIMER Core Design)					
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI			Publication Date	1999. 4.
Page	97 p.	Ill. & Tab.	Yes(V), No ()			Size	26 Cm.
Note	'99 Mid-long Term Project						
Classified	Open(V), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Technical Report			
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>Since the sodium boiling point is very high, maximum cladding and pin temperatures are used for design limit condition in sodium cooled liquid metal reactor. It is necessary to predict accurately the core temperature distribution to increase the sodium coolant efficiency.</p> <p>Based on the MATRA code, which is developed for PWR analysis, MATRA-LMR is being developed for LMR. The major modifications are as follows : A) The sodium properties table is implemented as subprogram in the code. B) Heat transfer coefficients are changed for LMR C) The pressure drop correlations are changed for more accurate calculations, which are Novendstern, Chiu-Rohsenow-Todreas, and Cheng-Todreas correlations.</p> <p>This user's guide describes code structure and equations of MATRA-LMR (Version 1.0), and explains input data preparation.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		LMR, Subchannelanalysis, MATRA-LMR, COBRA, User's guide					