

핵분열생성물 방출 해석코드 COPA-FPREL 개발
Development of a Fission Products Release Analysis Code
COPA-FPREL

KAERI

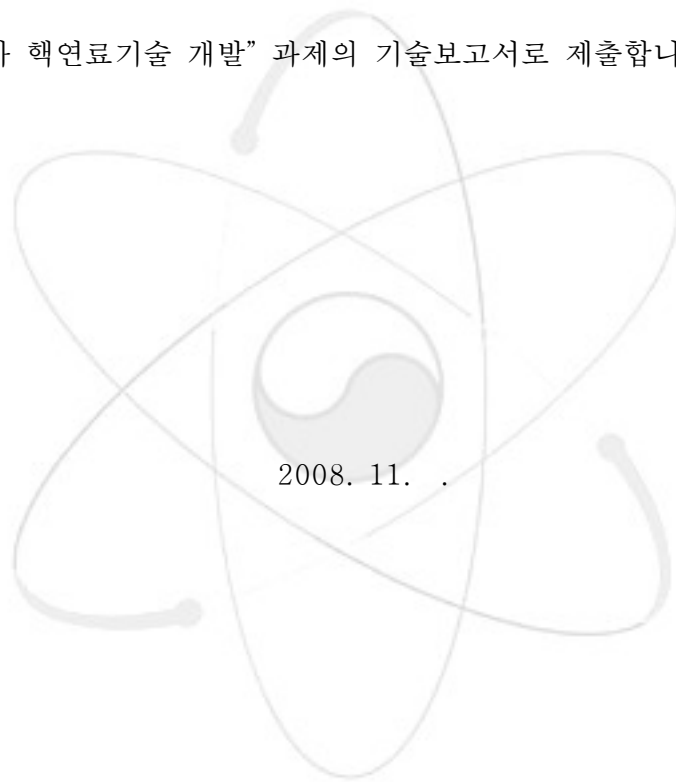
한국원자력연구원

Korea Atomic Energy Research Institute

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

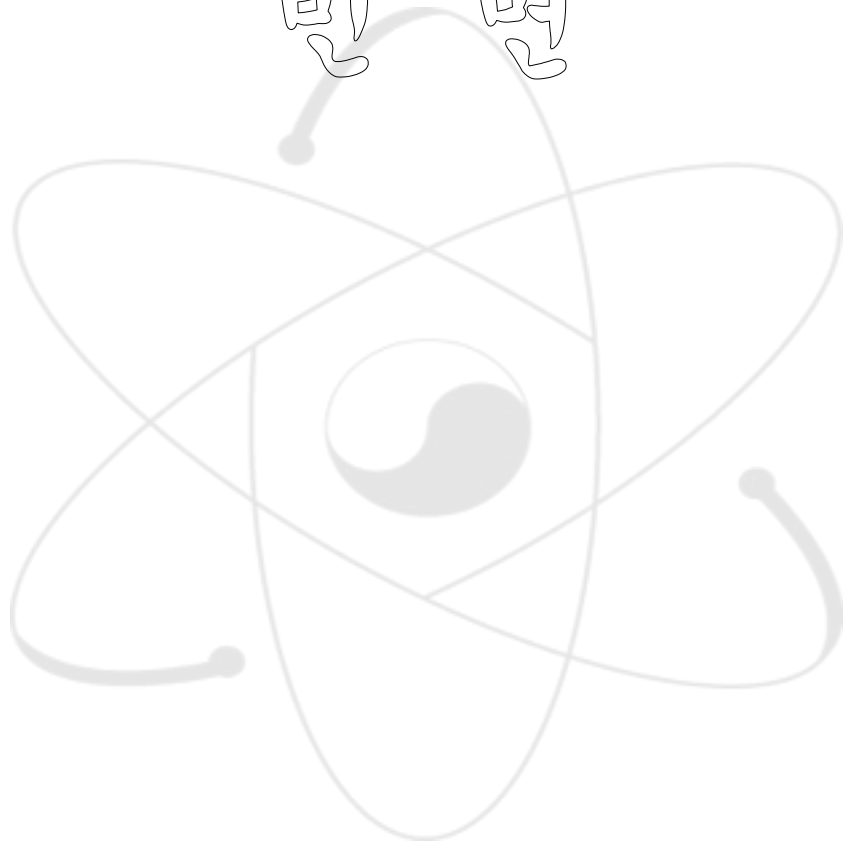
본 보고서를 “피복입자 핵연료기술 개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.



주 저 자 : 김영민 (수소생산원자로기술개발부)

공 저 자 : 김연구 (수소생산원자로기술개발부),
오승철 (수소생산원자로기술개발부),
정경채 (수소생산원자로기술개발부),
김웅기 (수소생산원자로기술개발부),
조문성 (수소생산원자로기술개발부),
이영우 (수소생산원자로기술개발부)

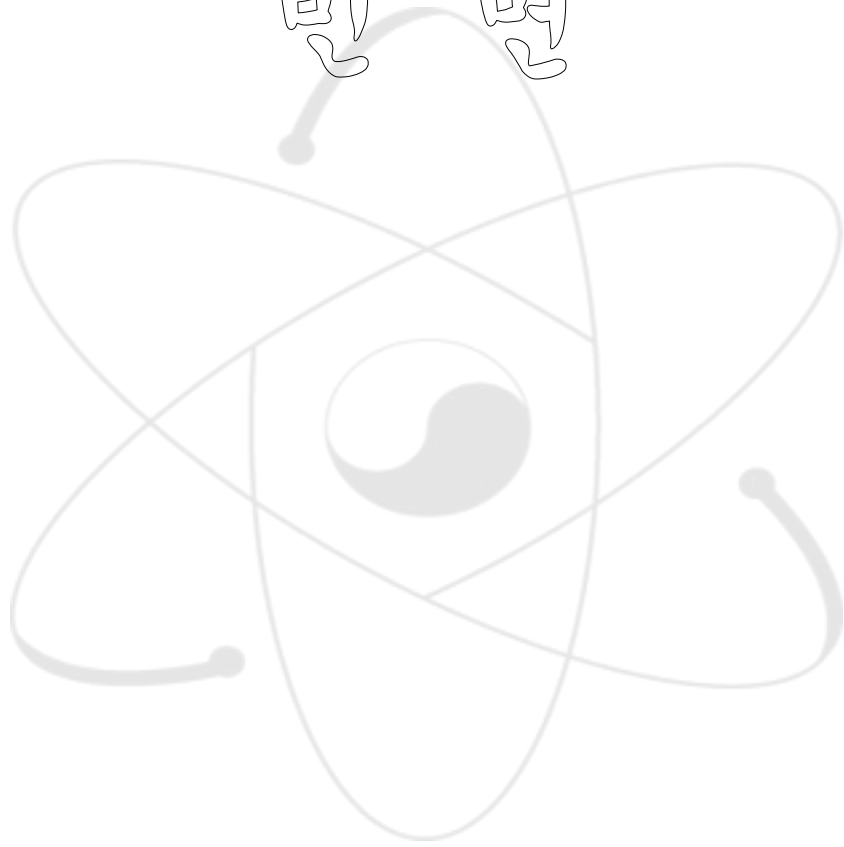
비명



요 약

고온가스로 핵연료로부터의 핵분열생성물 방출을 계산하는 컴퓨터 프로그램 COPA-FPREL을 개발하였다. COPA-FPREL은 유한차분법을 이용하여 핵분열생성물의 피복입자 및 핵연료체 내에서의 이동 그리고 냉각재로의 방출을 계산한다. 핵연료입자의 연료핵, 완충층 그리고 세 개의 피복층은 각각 일정 개수의 유한차분구간으로 나누고, 그 각 구간에 생성물을 포함하는 Fick 확산식을 적용하였다. 파손된 피복층에서의 확산은 그 확산계수로서 큰 수를 할당하여 표현하였다. 핵연료체 또한 일정 개수의 유한차분구간으로 나누어서, 선원향을 포함하는 Fick 확산식을 적용하였다. PMR (prismatic modular reactor)의 경우, 컴팩트(compact)와 흑연구조물 사이의 gap에서 핵분열생성물의 기체압과 그 컴팩트(compact)와 흑연구조물 표면의 핵분열생성물 농도가 수착평형(sorption isotherm)에 있다고 가정하였다. 냉각재와 접해있는 핵연료체의 표면에 형성되는 경계층에서 표면 쪽의 기체압과 표면의 핵분열생성물 농도가 수착평형에 있다고 가정하였다. 그 경계층을 통하여 물질전달이 일어난다. 가열 및 조사 조건에서 핵종 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 이 연료입자, 페블(pebble), 육각블럭(prismatic fuel block)에서 방출되는 분율을 계산하였다.

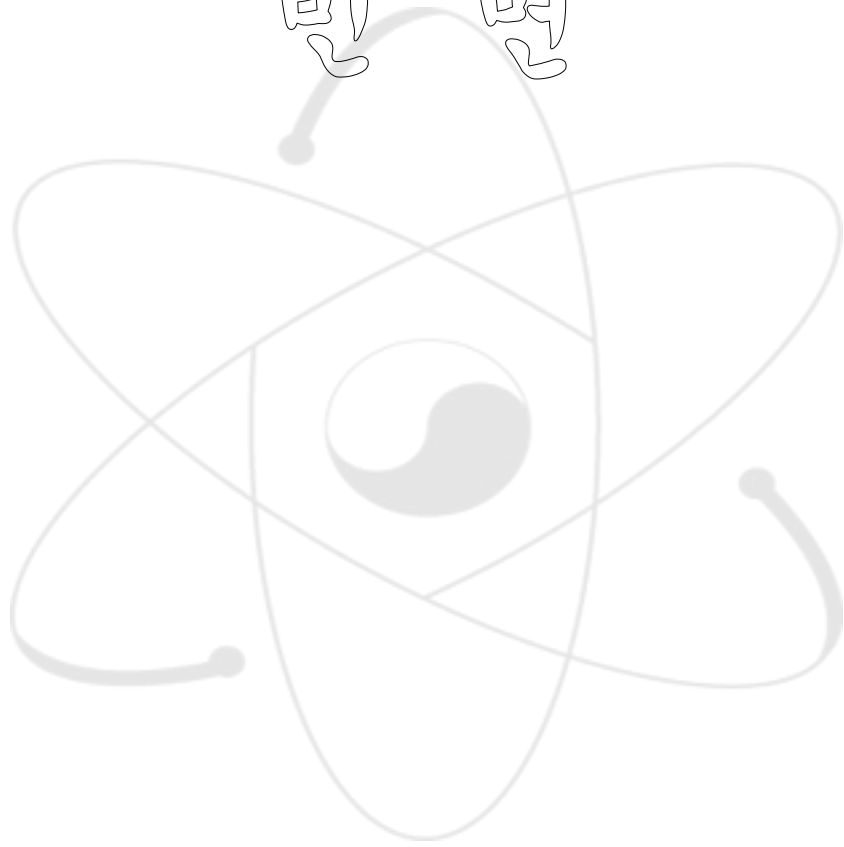
비명



Summary

A computer code, COPA-FPREL, has been developed to estimate the releases of fission products from a high temperature gas-cooled reactor (HTGR) fuel under normal and accident conditions. The COPA-FPREL code treats the fission product releases from a coated fuel particle, the diffusion in the fuel element and structural graphite, and the leakage into a coolant. The code uses a finite difference method to calculate the fission product migration. In the finite difference method, the kernel, buffer and the coating layers of a coated fuel particle are divided into small intervals, respectively. A Fickian diffusion equation including birth rates is applied to the intervals. The effect of a failure of the coating layers on the release from a coated fuel particle is described with a relatively higher diffusion coefficient than usual. The fuel element and structural graphite are also divided into various small intervals, respectively. A Fickian diffusion equation including source terms is applied to the intervals. In a prismatic HTGR fuel, a sorption equilibrium is assumed to form between the compact and graphite sleeve surfaces, and between the graphite sleeve surface and the graphite side of the boundary layer which forms on the graphite sleeve surface facing a coolant. In a pebble-bed HTGR, a sorption equilibrium is set up between the pebble surface and the graphite side of the boundary layer which forms on the pebble surface. A mass transfer occurs through the boundary layer into the bulk coolant. For the isotopes ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{110}\text{Ag}^m$, the fractional releases from a TRISO-coated fuel particle, a pebble and a fuel block under heating and irradiation were calculated using the COPA-FPREL.

비명



Contents

Submission	i
Summary (Korean)	iii
Summary (English)	v
Contents (English)	vii
Contents (Korean)	ix
Nomenclature	xi
Contents of tables	xv
Contents of figures	xvii
Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Migration of fission products in a coated fuel particle	3
Chapter 3 Migration of fission products in a fuel element	9
Section 1 Diffusion in a pebble	9
Section 2 Diffusion in a fuel block	14
Chapter 4 Structure and functions of COPA-FPREL	21
Chapter 5 Estimations of some fission product releases	25
Section 1 Release from a coated fuel particle under heating	28
Section 2 Release from a pebble under heating	30
Section 3 Release from a pebble under operational PBR conditions	31
Section 4 Release from a fuel block under operational PMR conditions	34
Chapter 5 Conclusion	41

Chapter 6 References 43

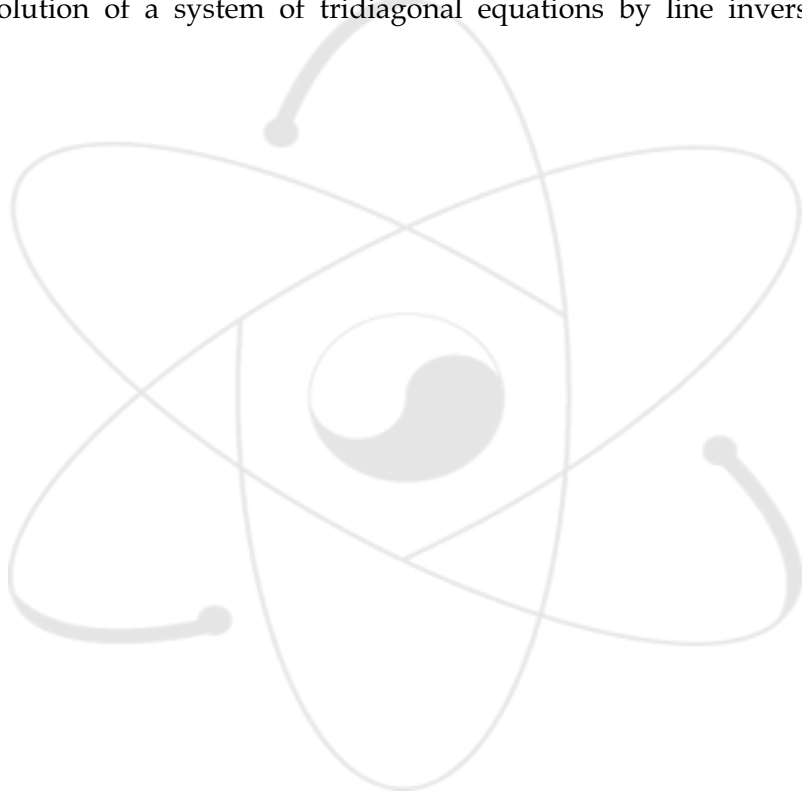
Appendix A. Finite difference equations for a fission product diffusion 47

Appendix B. Mass transfer through graphite surface 57

Appendix C. Mass transfer through a gap between compact and structural
graphite 63

Appendix D. Mass transfer coefficient of a fission product in helium 73

Appendix E. Solution of a system of tridiagonal equations by line inversion .. 77



목 차

제 출 문	i
요 약	iii
Summary	v
Contents	vii
목 차	ix
Nomenclature	xi
표 목 차	xv
그림목차	xvii
제 1 장 서론	1
제 2 장 TRISO 입자에서 핵분열생성물의 이동	3
제 3 장 핵연료체를 통한 핵분열생성물의 이동	9
제 1 절 페블 내의 확산	9
제 2 절 육각블럭 내의 확산	14
제 4 장 COPA-FPREL의 구조와 기능	21
제 5 장 핵분열생성물 방출 계산	25
제 1 절 가열조건에서 피복입자에서의 방출	28
제 2 절 가열조건에서 페블에서의 방출	30
제 4 절 PBR 운전조건에서 페블에서의 방출	31
제 4 절 PMR 운전조건에서 육각블럭에서의 방출	34
제 5 장 결론	41

제 6 장	참고문헌	43
부록 A.	핵분열생성물 확산에 대한 유한차분식	47
부록 B.	흑연표면을 통한 물질전달	57
부록 C.	컴팩트와 흑연구조물 사이의 gap을 통한 물질전달	63
부록 D.	헬륨에서 핵분열생성물의 물질전달계수	73
부록 E.	Line inversion 법에 의한 삼중 대각방정식계의 해	77



Nomenclature

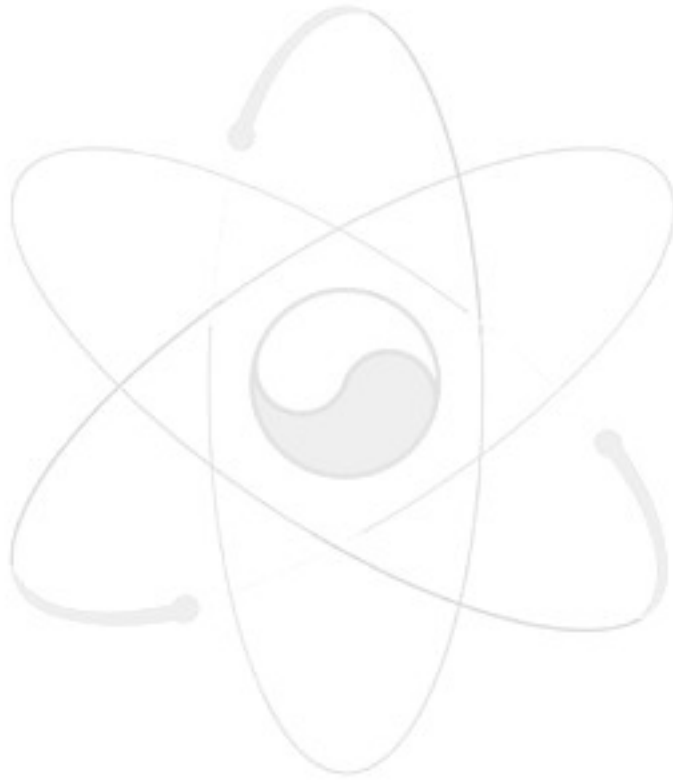
A_c	1/12 of the coolant hole area in a fuel block (cm^2)
A_f	1/6 of the fuel surface area in a fuel block (cm^2)
\dot{B}	Birth rate per volume ($\mu\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)
$\dot{B}_{fission}$	Fission product generation rate per volume due to fission ($\mu\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)
\dot{B}_{recoil}	Recoil rate per volume ($\mu\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)
C	Concentration ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C^0	Initial concentration ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C_a	Concentration at the graphite side of a boundary layer between graphite and coolant ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C_{gap}	Concentration in a gap ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C_m	Mass concentration at a surface ($\mu\text{mol/g}$)
$C_{m,t}$	Transition concentration ($\mu\text{mol/g}$)
C_p	Concentration at the surface of a particle ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C	Mixed mean concentration in a coolant ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C_m^-	Concentration at the left side of node m ($\mu\text{mol/cm}^3$)
C_m^+	Concentration at the right side of node m ($\mu\text{mol/cm}^3$)
D	Diffusion coefficient (cm^2/s)
D_0	Pre-exponent factor of a diffusion coefficient (cm^2/s)
\dot{F}	Fission rate per volume (fissions $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)
J	Current ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
M	Total number of nodes
N	Number of intervals
P	Vapor pressure (Pa)
P_F	Freundlich isotherm vapor pressure (Pa)
P_{gap}	Vapor pressure in a gap (Pa)
P_H	Henrian isotherm vapor pressure (Pa)

Q	Activation energy (J/mol)
R	Gas constant (8.314 J mol ⁻¹ K ⁻¹)
\dot{S}	Source term (μmol s ⁻¹ cm ⁻³)
T	Temperature (K)
V	Volume (cm ³)
f_d	Failure fraction of coated particles
f_j	Heavy metal contamination fraction in a layer j
f_{mg}	Heavy metal contamination fraction in matrix graphite
f_{sg}	Heavy metal contamination fraction in structural graphite
h	Mass transfer coefficient in He coolant (cm/s)
h_{gap}	Mass transfer coefficient in a gap (cm/s)
m	m -th node
n	Coated particle density in a pebble or a compact (particles/cm ³)
r	Radial coordinate (cm)
r_p	Pebble radius (cm ²)
t	Time (s)
ℓ	Recoil length (cm)
λ	Decay constant (s ⁻¹)
ξ	Fission yield (atoms/fission)
ρ	Density (g/cm ³)
ϕ	Partition factor

첨자

B	Buffer
CP	Coated particle
CPF	Failed coated particle
I	IPyC
K	Kernel
O	OPyC

S	SiC
f	Fuel
g	Graphite
i	Isotope
j	Layer (K, B, I, S, O)
j'	Layer on layer j



비명

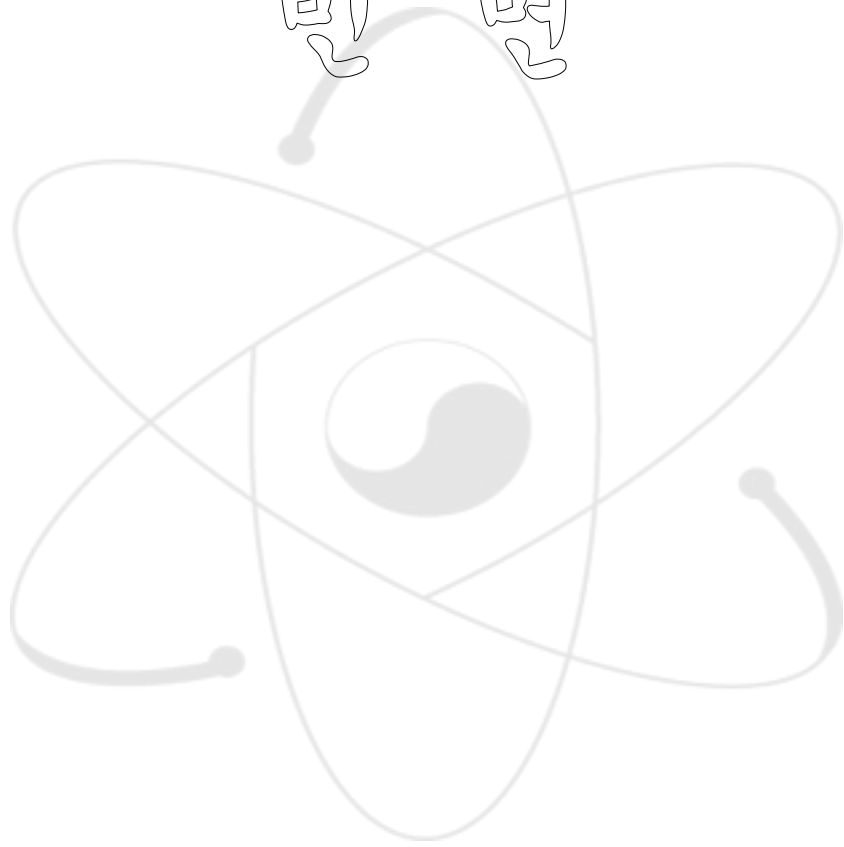


표 목 차

표 4.1. COPA-FPREL의 주요 부프로그램 및 그 기능	23
표 5.1. Cesium, strontium 및 silver의 확산계수	26
표 5.2. 펄 표면에서 cesium, strontium 및 silver의 수착평형상수	27
표 5.3. 콤팩트 표면에서 cesium, strontium 및 silver의 수착평형상수	27
표 5.4. 흑연구조물 표면에서 cesium, strontium 및 silver의 수착평형상수	27
표 5.5. 피복입자 및 흑연의 열전도도	27
표 5.6. 피복입자의 두께, 밀도 및 분배계수	28
표 5.7. 시험계산을 위한 pebble-bed reactor	32
표 5.8. 시험계산을 위한 prismatic modular reactor	36
표 B.1. Freundlich sorption isotherm parameters	61

비명

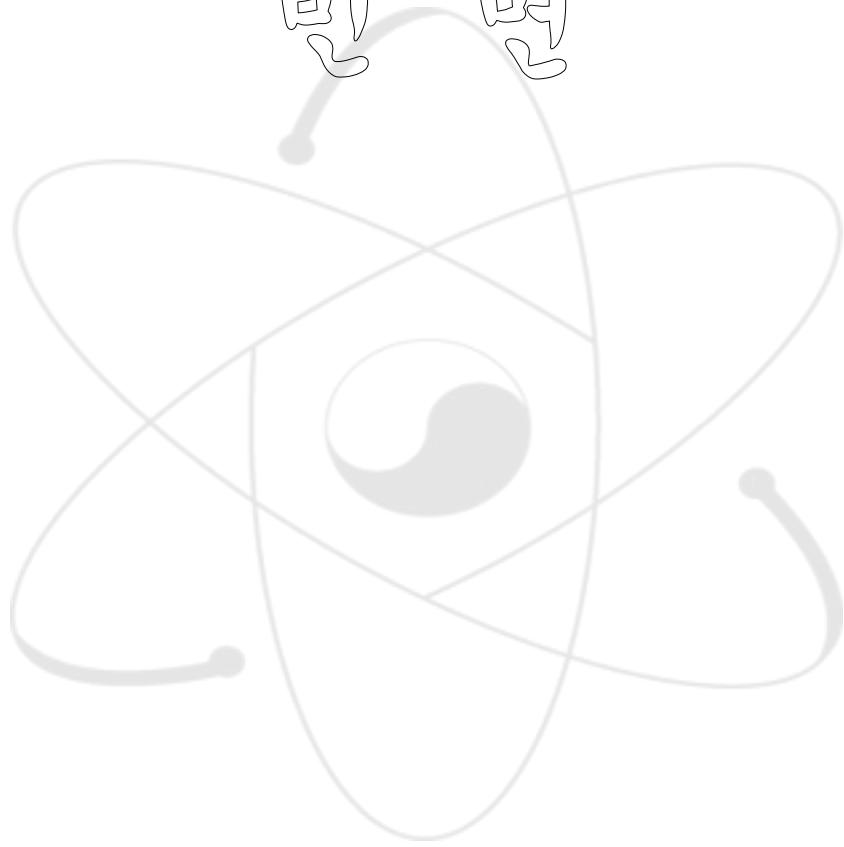


그림 목 차

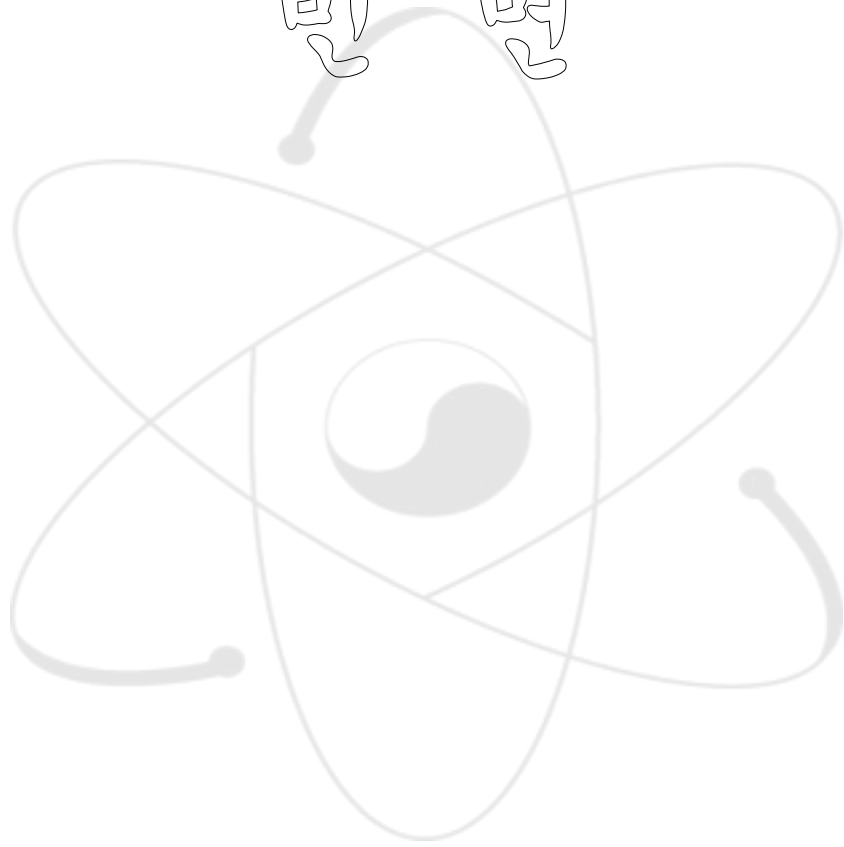
그림 2.1. TRISO 입자	3
그림 2.2. TRISO 입자의 유한차분구간	5
그림 3.1. Pebble-bed reactor의 페블	9
그림 3.2. 페블의 유한차분구간	12
그림 3.3. PMR 핵연료 육각블럭의 대칭요소	15
그림 3.4. PMR 핵연료 육각블럭의 대칭요소의 equivalent slab	15
그림 3.5. Equivalent slab의 유한차분구간	17
그림 4.1. COPA-FPREL에서의 계산과정	23
그림 5.1. UO ₂ 연료핵에서 ¹³⁷ Cs의 방출분율	29
그림 5.2. 가열 중인 TRISO로 부터의 ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹¹⁰ Ag ^m 의 방출분율 (1600 °C로 200시간 가열 후 1800 °C 200시간 추가 가열)	30
그림 5.3. 1800 °C로 가열 중인 장전 페블에서의 ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹¹⁰ Ag ^m 의 방출분율	31
그림 5.4. 냉각재 온도 500 °C일 때 PBR 페블에서 방출되는 ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹¹⁰ Ag ^m 의 방출분율	33
그림 5.5. 냉각재 온도 900 °C일 때 PBR 페블에서 방출되는 ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹¹⁰ Ag ^m 의 방출분율	34
그림 5.6. 출력 및 냉각재 온도에 따른 equivalent slab 길이의 변화	37
그림 5.7. 냉각재 온도 590 °C일 때 PMR 핵연료 육각블럭에서 방출되는 ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹¹⁰ Ag ^m 의 방출분율	38
그림 5.8. 냉각재 온도 950 °C일 때 PMR 핵연료 육각블럭에서 방출되는 ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹¹⁰ Ag ^m 의 방출분율	39
그림 A.1. 확산매질에서 유한차분구간	48
그림 B.1. 고온가스로 핵연료체에서 핵분열생성물의 농도	58
그림 C.1. 컴팩트 및 흑연구조물 사이의 gap에서의 핵분열생성물의 농도	63
그림 C.2. gap 주변의 유한차분구간	67

제 1 장 서론

고온가스로 노심에는 가압경수로의 핵연료집합체 (fuel assembly)에 해당하는 페블 (pebble) 또는 육각블럭 (prismatic fuel block)이라 불리는 핵연료체가 들어 있다. 기체 및 금속 핵분열생성물은 핵연료체에서 생성되어 냉각재로 방출되고 1차 계통에 침착(deposition)한다. 고온가스로의 안전 설계 및 운전을 위하여 핵분열생성물 방출을 정확하게 평가하여야 한다. 이를 위하여 핵연료체에서 냉각재로의 핵분열생성물 방출을 모사 할 수 있는 컴퓨터 프로그램 개발이 필요하다.

고온가스로 핵연료성능분석코드 COPA (coated particle)가 개발되고 있다[1]. COPA 코드는 총 9개의 모듈로 구성되어 있는데, COPA-FPREL은 그 COPA 코드의 모듈 중 하나이며 핵분열생성물 방출 분석을 담당한다. 본 보고서에 COPA-FPREL 개발을 위하여 수행된 수학적 모델링과 cesium, strontium, silver에 대한 방출량 계산 결과를 기술하였다.

비명



제 2 장 TRISO 입자에서 핵분열생성물의 이동

TRISO 입자는 그림 2.1과 같이 연료핵 (kernel), 완충층 (buffer layer), 내부열분해 탄소층 (inner pyrocarbon layer, IPyC), 탄화규소층 (silicon carbide layer, SiC), 외부 열분해탄소층 (outer pyrocarbon layer, OPyC)으로 구성되어 있다. 핵분열생성물은 연료핵물질 및 피복층에 오염된 핵물질의 핵분열에 의해서 발생한다. 또한 이웃한 층에서의 반도 (recoil)에 의해서 생성되기도 한다. 생성된 핵분열생성물은 바깥 방향으로 확산한다. 그 확산은 보통 농도와 온도에 의존하는 현상이다.

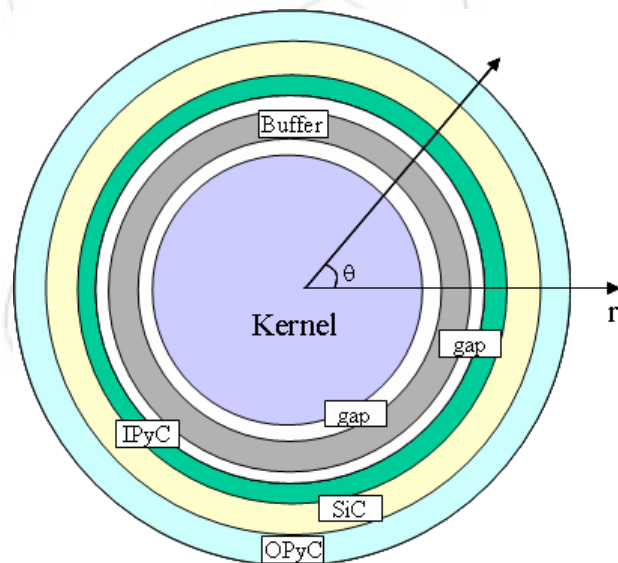


그림 2.1. TRISO 입자

TRISO 입자 내부에서의 핵분열생성물 이동은 다음의 Fick 확산식으로 표현할 수 있다[2,3].

$$\frac{\partial C_j(r,t)}{\partial t} = \dot{B}_j(r,t) - \lambda C_j(r,t) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 D_j(C_j, r, t) \frac{\partial C_j(r,t)}{\partial r} \right], \quad (2.1)$$

$$J_j(0,t) = 0, \quad (2.2)$$

$$C_j(r_j,t) = \phi_{i,j} C_j(r_j,t), \quad (2.3)$$

$$J_j(r_j,t) = J_j(r_j,t), \quad (2.4)$$

$$C_j(r_0,t) = C_p(t), \quad (2.5)$$

$$C_j(r,0) = C_j^0(r), \quad (2.6)$$

여기서

$$D = D_{0,1} e^{-Q_1/(RT)} + D_{0,2} e^{-Q_2/(RT)}. \quad (2.7)$$

층 j 에서 단위부피당 핵분열생성물 발생률은 다음과 같다.

$$\dot{B}_j = f_j \dot{B}_{fission,j} + \Delta \dot{B}_{recoil,j}. \quad (2.8)$$

핵분열에 의한 단위부피당 핵분열생성물 발생률은 다음과 같다.

$$\dot{B}_{fission} = \xi \dot{F} / 6.023 \times 10^{17}. \quad (2.9)$$

층 j 에서 단위부피당 반도속도는 다음과 같다[4].

$$\dot{B}_{recoil,j} = \pi(\ell r_j^2 - \ell^3/12)\dot{B}_{fission,j}. \quad (2.10)$$

유한차분법에서 연료핵, 완충층, 내부열분해탄소층, 탄화규소층, 외부열분해탄소층은 각각 N_K, N_B, N_I, N_S, N_O 개의 구간으로 나눈다. 유한차분구간에서 절점(node)의 번호는 그림 2.2와 같이 매겨진다. 층 사이의 계면의 절점번호는 안 쪽으로부터 $N_K+1, N_K+N_B+1, N_K+N_B+N_I+1, N_K+N_B+N_I+N_S+1$ 이다. 절점의 총 개수는 M 은 $N_K+N_B+N_I+N_S+N_O+1$ 이다. 각 구간에 대한 유한차분식은 point scheme을 이용하는 유한차분법으로 구할 수 있다[5].

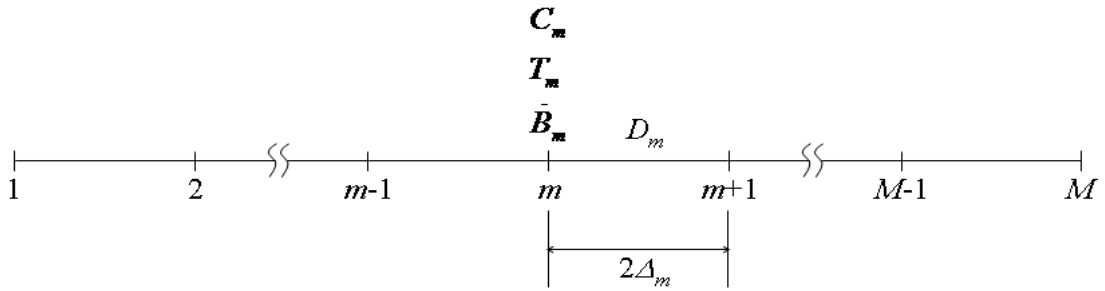


그림 2.2. TRISO 입자의 유한차분구간

부록 A에서와 같이 식 (2.1)을 부피적분하면 다음의 유한차분식을 구할 수 있다.

$$V_1^{(n)} C_1^{(n)} - U_1^{(n)} C_2^{(n)} = X_1^{(n)} , \quad (2.11)$$

$$- W_m^{(n)} C_{m-1}^{(n)} + V_m^{(n)} C_m^{(n)} - U_m^{(n)} C_{m+1}^{(n)} = X_m^{(n)} , \quad (2.12)$$

$, m = 2, 3, \dots, M-2$

$$- W_{M-1}^{(n)} C_{M-2}^{(n)} + V_{M-1}^{(n)} C_{M-1}^{(n)} = X_M^{(n)} + U_{M-1}^{(n)} C_M^{(n)} , \quad (2.13)$$

여기서

$$V_1^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} + \omega \gamma_1^{(n)} , \quad (2.14)$$

$$U_1^{(n)} = \omega \gamma_1^{(n)} \phi_2 , \quad (2.15)$$

$$X_1^{(n)} = \Delta t^{(n)} H_{r,1} [\omega \dot{B}_1^{(n)} + (1 - \omega) \dot{B}_1^{(n-1)}] \\ + [1 - (1 - \omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} C_1^{(n-1)} , \quad (2.16)$$

$- (1 - \omega) \gamma_1^{(n)} [C_1^{(n-1)} - \phi_2 C_2^{(n-1)}]$

$$W_m^{(n)} = \omega \gamma_{m-1}^{(n)} , \quad (2.17)$$

$$V_m^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{\ell,m} \phi_m + H_{r,m}) + \omega \gamma_{m-1}^{(n)} \phi_m + \omega \gamma_m^{(n)} , \quad (2.18)$$

$$U_m^{(n)} = \omega \gamma_m^{(n)} \phi_{m+1} , \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
X_m^{(n)} = & \Delta t^{(n)} [H_{l,m} + H_{r,m}] [\omega \dot{B}_m^{(n)} + (1-\omega) \dot{B}_m^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{l,m} \phi_m + H_{r,m}) C_m^{(n-1)} \\
& + (1-\omega) \gamma_{m-1}^{(n)} [C_{m-1}^{(n-1)} - \phi_m C_m^{(n-1)}] \\
& - (1-\omega) \gamma_m^{(n)} [C_m^{(n-1)} - \phi_{m+1} C_{m+1}^{(n-1)}]
\end{aligned} \quad , \quad (2.20)$$

식 (2.17)-(2.20)의 $m = 2, 3, \dots, M-1$.

입자표면에서의 농도 $C_M^{(n)}$ 은 식 (2.5)로 주어진다. 입자표면에서의 current는 다음과 같다.

$$J_M^{(n)} = \frac{W_M^{(n)} C_{M-1}^{(n)} - V_M^{(n)} C_M^{(n)} + X_M^{(n)} - (1-\omega) \Delta t^{(n)} r_M^2 J_M^{(n-1)}}{\omega \Delta t^{(n)} r_M^2} , \quad (2.21)$$

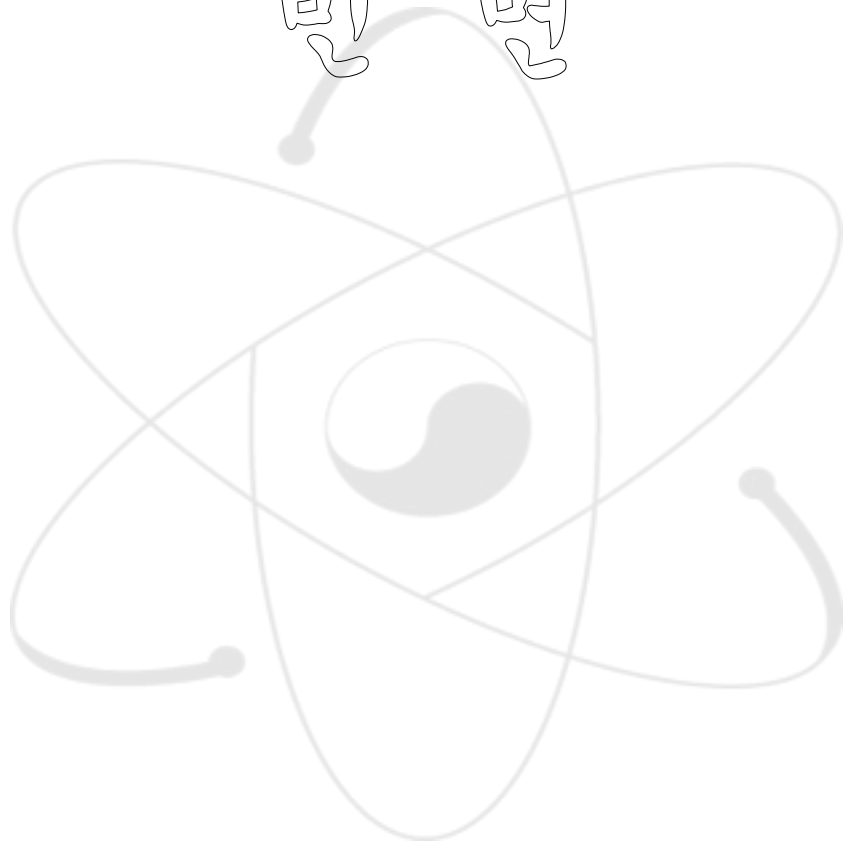
여기서

$$W_M^{(n)} = \omega \gamma_{M-1}^{(n)} , \quad (2.22)$$

$$V_M^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{l,M} \phi_M + \omega \gamma_{M-1}^{(n)} \phi_M , \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned}
X_M^{(n)} = & \Delta t^{(n)} H_{l,M} [\omega \dot{B}_M^{(n)} + (1-\omega) \dot{B}_M^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{l,M} \phi_M C_M^{(n-1)} \\
& + (1-\omega) \gamma_{M-1}^{(n)} [C_{M-1}^{(n-1)} - \phi_M C_M^{(n-1)}]
\end{aligned} . \quad (2.24)$$

비명



제 3 장 핵연료체를 통한 핵분열생성물의 이동

핵연료체는 PBR (pebble-bed reactor)에서는 펄블 (pebble), PMR (prismatic modular reactor)에서는 육각블럭 (prismatic fuel block)을 말한다. 핵연료체의 물질은 흑연이다. 핵분열생성물은 냉각재로 이동하는 중에 많은 양이 흑연에 포획된다. 핵연료체에서의 이동은 농도와 온도에 의존한다.

제 1 절 펄블 내의 확산

펄블은 그림 3.1과 같이 핵연료 영역과 흑연 영역으로 이루어져 있다. 핵연료 영역은 피복입자를 혼합한 흑연 구(sphere)이다. 핵분열생성물은 피복입자에서 발생하여 핵연료 영역과 흑연 영역을 차례로 이동하고 주변의 냉각재로 방출된다.

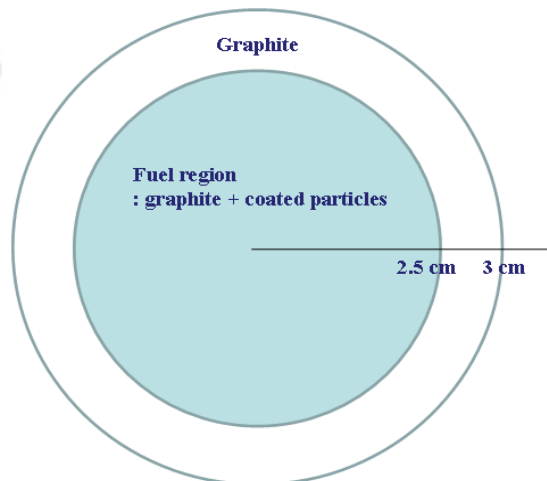


그림 3.1. Pebble-bed reactor의 펄블

폐블 내부에서의 핵분열생성물 이동은 다음의 Fick 확산식으로 표현할 수 있다[6].

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = \dot{S}(r,t) - \lambda C(r,t) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 D(C,r,t) \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right], \quad (3.1)$$

$$J(0,t) = 0, \quad (3.2)$$

$$C(r,0) = C^0(r), \quad (3.3)$$

폐블 표면에서 핵분열생성물은 증발한다. 폐블 표면에는 경계층이 형성되는데, 그 계면에서 폐블 쪽의 핵분열생성물의 증기압은 폐블 표면에서의 핵분열생성물 농도와 다음과 같은 단성분 수착평형(single-component sorption isotherm) 관계에 있다[7].

$$P = P_F + P_H, \quad (3.4)$$

$$\ln P_F = (A + B/T) + (G + E/T) \ln C_m, \quad (3.5)$$

$$\ln P_H = (A + B/T) + (G - 1 + E/T) \ln C_{m,t} + \ln C_m, \quad (3.6)$$

$$\ln C_{m,t} = d_1 - d_2 T, \quad (3.7)$$

여기서 A, B, G, E, d_1, d_2 는 수착평형상수이며 실험치 이다. 수착평형은 부록 B의 핵종 사이의 수착경쟁을 표현하는 다성분 수착평형으로 기술할 수도 있다[8]. 경계층을

통하여 다음과 같은 물질전달이 일어난다.

$$J(r_p, t) = h(C_a - C_\infty), \quad (3.8)$$

물질전달계수 h 는 부록 D에 주어져 있다[9].

핵연료 영역에서의 선원항은 (1) 피복입자로부터의 단위부피당 방출률과 (2) matrix graphite에 오염되어 있는 우라늄의 핵분열에서 발생하는 단위부피당 발생률을 의미한다.

$$\dot{S}(r, t) = 4\pi r^2 [f_d J_{CPF}(r_O, t) + (1 - f_d) J_{CP}(r_O, t)] + f_{mg} \dot{B}_{fission}. \quad (3.9)$$

흑연 영역에서의 선원항은 흑연에 오염되어 있는 우라늄의 핵분열에서 발생하는 단위부피당 발생률을 의미한다.

$$\dot{S}(r, t) = f_{sg} \dot{B}_{fission}. \quad (3.10)$$

유한차분법에서 핵연료 및 흑연 영역은 각각 N_f 및 N_g 개의 구간으로 나눈다. 유한차분구간에서 절점의 번호는 그림 3.2와 같이 매겨진다. 계면의 절점번호는 $N_f + 1$ 이다. 절점의 총 개수는 M 은 $N_f + N_g + 1$ 이다. 각 구간에 대한 유한차분식은 피복입자에서와 마찬가지로 point scheme을 이용하는 유한차분법으로 구할 수 있다.

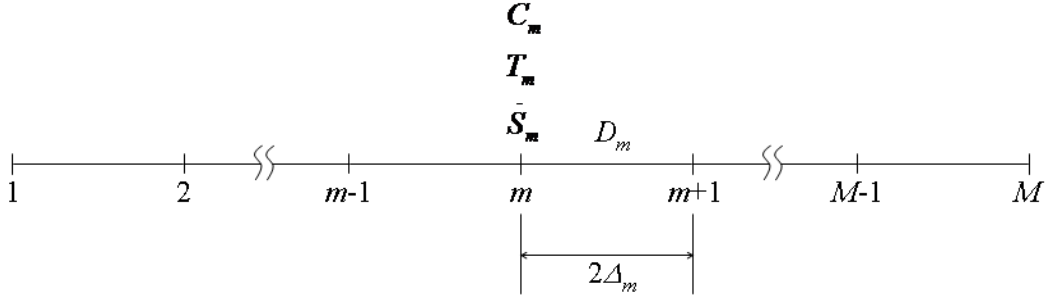


그림 3.2. 페블의 유한차분구간

부록 A 및 B의 방법을 식 (3.1)에 적용하면 다음의 유한차분식을 구할 수 있다.

$$V_1^{(n)(k-1)} C_1^{(n)(k)} - U_1^{(n)(k-1)} C_2^{(n)(k)} = X_1^{(n)(k-1)} , \quad (3.11)$$

$$- W_m^{(n)(k-1)} C_{m-1}^{(n)(k)} + V_m^{(n)(k-1)} C_m^{(n)(k)} - U_m^{(n)(k-1)} C_{m+1}^{(n)(k)} = X_m^{(n)(k-1)} , \quad (3.12)$$

$, m = 2, 3, \dots, M-1$

$$- W_M^{(n)(k-1)} C_{M-1}^{(n)(k)} + V_M^{(n)(k-1)} C_M^{(n)(k)} = X_M^{(n)(k-1)} , \quad (3.13)$$

여기서

$$V_1^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} + \omega \gamma_1^{(n)} , \quad (3.14)$$

$$U_1^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_1^{(n)} \phi_2 , \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}
X_1^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} H_{r,1} [\omega \dot{S}_1^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_1^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} C_1^{(n-1)} , \\
& - (1-\omega) \gamma_1^{(n)} [C_1^{(n-1)} - \phi_2 C_2^{(n-1)}]
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$W_m^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_{m-1}^{(n)} , \tag{3.17}$$

$$V_m^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{\ell,m} \phi_m + H_{r,m}) + \omega \gamma_{m-1}^{(n)} \phi_m + \omega \gamma_m^{(n)} , \tag{3.18}$$

$$U_m^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_m^{(n)} \phi_{m+1} , \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
X_m^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} [H_{\ell,m} + H_{r,m}] [\omega \dot{S}_m^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_m^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{\ell,m} \phi_m + H_{r,m}) C_m^{(n-1)} \\
& + (1-\omega) \gamma_{m-1}^{(n)} [C_{m-1}^{(n-1)} - \phi_m C_m^{(n-1)}] , \\
& - (1-\omega) \gamma_m^{(n)} [C_m^{(n-1)} - \phi_{m+1} C_{m+1}^{(n-1)}]
\end{aligned} \tag{3.20}$$

식 (3.17)-(3.20)의 $m = 2, 3, \dots, M-1$,

$$W_M^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_{M-1}^{(n)} , \tag{3.21}$$

$$V_M^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell,M} \phi_M + \omega \gamma_{M-1}^{(n)} + \omega \Delta t^{(n)} r_{M,2}^2 \psi^{(n)(k-1)} , \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
X_M^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} H_{\ell,M} [\omega \dot{S}_M^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_M^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell,M} \phi_M C_M^{(n-1)} \\
& + (1-\omega) \gamma_{M-1}^{(n)} [C_{M-1}^{(n-1)} - \phi_M C_M^{(n-1)}] \\
& - (1-\omega) \Delta t^{(n)} r_M^2 J_M^{(n-1)} + \omega \Delta t^{(n)} r_M^2 \chi^{(n)} .
\end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\psi = \frac{he^{x_g}}{RT_M \rho_g} \left[\left(\frac{C_M}{\rho_g} \right) + C_{m,g,t}^{y_g-1} \right], \quad (3.24)$$

$$x = A + B/T, \quad (3.25)$$

$$y = G + E/T, \quad (3.26)$$

$$\chi = hC_\infty. \quad (3.27)$$

제 2 절 육각블럭 내의 확산

Prismatic reactor의 육각블럭에는 그림 3.3과 같은 대칭요소가 많이 있다. 대칭요소는 컴팩트, 컴팩트 및 흑연구조물 사이의 gap, 흑연구조물, 냉각재 통로로 구성되어 있다. 컴팩트는 피복입자가 섞여 있는 흑연실린더이다. 핵분열생성물은 컴팩트의 피복입자에서 발생하여, 컴팩트, gap, 흑연구조물을 통하여 이동하고 냉각재로 방출한다. 물질전달을 보다 쉽게 계산하기 위하여 대칭요소는 그림 3.4와 같은 equivalent slab으로 근사한다[8,10]. slab의 두께는 대칭요소와 같은 물질전달저항을 갖도록 조정되어야 한다. 그러나 대칭요소에서의 물질전달은 계산이 까다롭기 때문에 물질전달저항 대신 열전달저항이 같도록 조정된다.

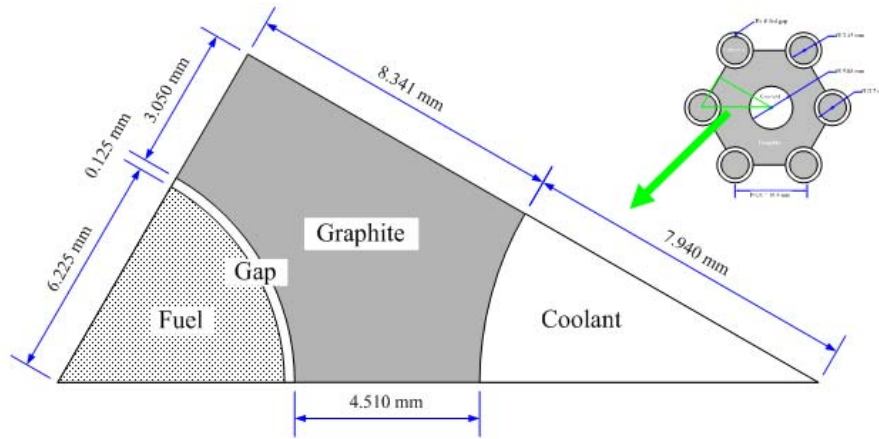


그림 3.3. PMR 핵연료 육각블럭의 대칭요소

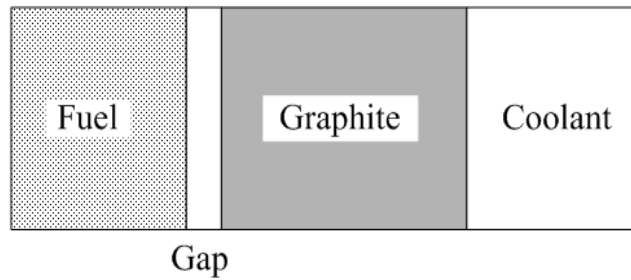


그림 3.4. PMR 핵연료 육각블럭의 대칭요소의 equivalent slab

컴팩트 및 흑연 내부에서의 핵분열생성물 이동은 다음의 Fick 확산식으로 표현할 수 있다[6].

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = S(r,t) - \lambda C(r,t) + \frac{1}{r^z} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^z D(C,r,t) \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right], \quad (3.28)$$

$$\mathcal{J}(0,t)=0, \quad (3.29)$$

$$\mathcal{C}(r,0)=C^0(r), \quad (3.30)$$

여기서

$$z = \begin{cases} 1 & \text{for fuel compact} \\ 0 & \text{for graphite} \end{cases}.$$

식 (3.28)의 선원항은 페블의 경우에서와 같다.

컴팩트와 흑연구조물 사이의 gap에서 분열생성물 증기압은 컴팩트와 흑연구조물 표면에서의 핵분열생성물 농도와 동시에 수직평형 관계에 있다고 가정할 수 있다.

$$e^{x_f}(C_{m,f}^{y_f} + C_{m,t,f}^{y_f-1} C_{m,f}) = e^{x_g}(C_{m,g}^{y_g} + C_{m,t,g}^{y_g-1} C_{m,g}). \quad (3.31)$$

냉각재와 접해 있는 흑연구조물 표면에서의 경계조건은 페블의 경우와 같다.

유한차분법에서 핵연료 및 흑연 영역은 각각 N_f 및 N_g 개의 구간으로 나눈다. 유한차분구간에서 절점의 번호는 그림 3.5와 같이 매겨진다. 절점의 총 개수는 M 은 $N_f + N_g + 2$ 이다. 각 구간에 대한 유한차분식은 피복입자 및 페블의 경우와 마찬가지로 point scheme을 이용하는 유한차분법으로 구할 수 있다.

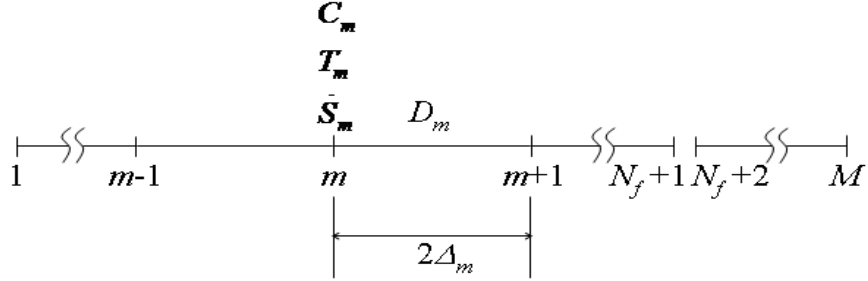


그림 3.5. Equivalent slab의 유한차분구간

부록 A-C에서와 같은 방법을 식 (3.28)에 적용하면 다음의 유한차분식을 구할 수 있다.

$$V_1^{(n)(k-1)} C_1^{(n)(k)} - U_1^{(n)(k-1)} C_2^{(n)(k)} = X_1^{(n)(k-1)}, \quad (3.32)$$

$$- W_m^{(n)(k-1)} C_{m-1}^{(n)(k)} + V_m^{(n)(k-1)} C_m^{(n)(k)} - U_m^{(n)(k-1)} C_{m+1}^{(n)(k)} = X_m^{(n)(k-1)}, \quad (3.33)$$

$m = 2, 3, \dots, N_f$

$$- W_{N_f+1}^{(n)(k-1)} C_{N_f}^{(n)(k)} + V_{N_f+1}^{(n)(k-1)} C_{N_f+1}^{(n)(k)} + \omega \Delta t^{(n)} r_{N_f+1} J_f^{(n)(k)} = X_{N_f+1}^{(n)(k-1)}, \quad (3.34)$$

$$V_{N_f+2}^{(n)(k-1)} C_{N_f+2}^{(n)(k)} - U_{N_f+2}^{(n)(k-1)} C_{N_f+3}^{(n)(k)} - \omega \Delta t^{(n)} J_g^{(n)(k)} = X_{N_f+2}^{(n)(k-1)}, \quad (3.35)$$

$$- W_m^{(n)(k-1)} C_{m-1}^{(n)(k)} + V_m^{(n)(k-1)} C_m^{(n)(k)} - U_m^{(n)(k-1)} C_{m+1}^{(n)(k)} = X_m^{(n)(k-1)}, \quad (3.36)$$

$m = N_f + 3, N_f + 4, \dots, M-1$

$$- W_M^{(n)(k-1)} C_{M-1}^{(n)(k)} + V_M^{(n)(k-1)} C_M^{(n)(k)} = X_M^{(n)(k-1)}, \quad (3.37)$$

$$C_{N_f}^{(n)(k)} - a C_{N_f+1}^{(n)(k)} = b \quad , \quad (3.38)$$

$$A_f J_f^{(n)(k)} - A_c J_g^{(n)(k)} = \frac{X_{gap}^{(n)(k-1)}}{\omega \Delta t^{(n)}} \quad , \quad (3.39)$$

여기서

$$V_1^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} + \omega \gamma_1^{(n)} \quad , \quad (3.40)$$

$$U_1^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_1^{(n)} \phi_2 \quad , \quad (3.41)$$

$$X_1^{(n)(k-1)} = \Delta t^{(n)} H_{r,1} [\omega \dot{S}_1^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_1^{(n-1)}] \\ + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} C_1^{(n-1)} \quad , \quad (3.42) \\ - (1-\omega) \gamma_1^{(n)} [C_1^{(n-1)} - \phi_2 C_2^{(n-1)}]$$

$$W_m^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_{m-1}^{(n)} \quad , \quad (3.43)$$

$$V_m^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{\ell,m} \phi_m + H_{r,m}) + \omega \gamma_{m-1}^{(n)} \phi_m + \omega \gamma_m^{(n)} \quad , \quad (3.44)$$

$$U_m^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_m^{(n)} \phi_{m+1} \quad , \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned}
X_m^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} [H_{l,m} + H_{r,m}] [\omega S_m^{(n)} + (1-\omega)S_m^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega)\lambda \Delta t^{(n)}] (H_{l,m}\phi_m + H_{r,m}) C_m^{(n-1)} \\
& + (1-\omega)\gamma_{m-1}^{(n)} [C_{m-1}^{(n-1)} - \phi_m C_m^{(n-1)}] \\
& - (1-\omega)\gamma_m^{(n)} [C_m^{(n-1)} - \phi_{m+1} C_{m+1}^{(n-1)}] \quad , \tag{3.46}
\end{aligned}$$

$$W_{N_f+1}^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_{N_f}^{(n)} \quad , \tag{3.47}$$

$$V_{N_f+1}^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{l,N_f+1} \phi_{N_f+1} + \omega \gamma_{N_f}^{(n)} \phi_{N_f+1} \quad , \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned}
X_{N_f+1}^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} H_{l,N_f+1} [\omega \dot{S}_{N_f+1}^{(n)} + (1-\omega)\dot{S}_{N_f+1}^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega)\Delta t^{(n)} \lambda] H_{l,N_f+1} \phi_{N_f+1} C_{N_f+1}^{(n-1)} \\
& + (1-\omega)\gamma_{N_f}^{(n)} [C_{N_f}^{(n-1)} - \phi_{N_f+1} C_{N_f+1}^{(n-1)}] \\
& - (1-\omega)\Delta t^{(n)} r_{N_f+1} J_f^{(n-1)} \quad , \tag{3.49}
\end{aligned}$$

$$V_{N_f+2}^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,N_f+2} + \omega \gamma_{N_f+2}^{(n)} \quad , \tag{3.50}$$

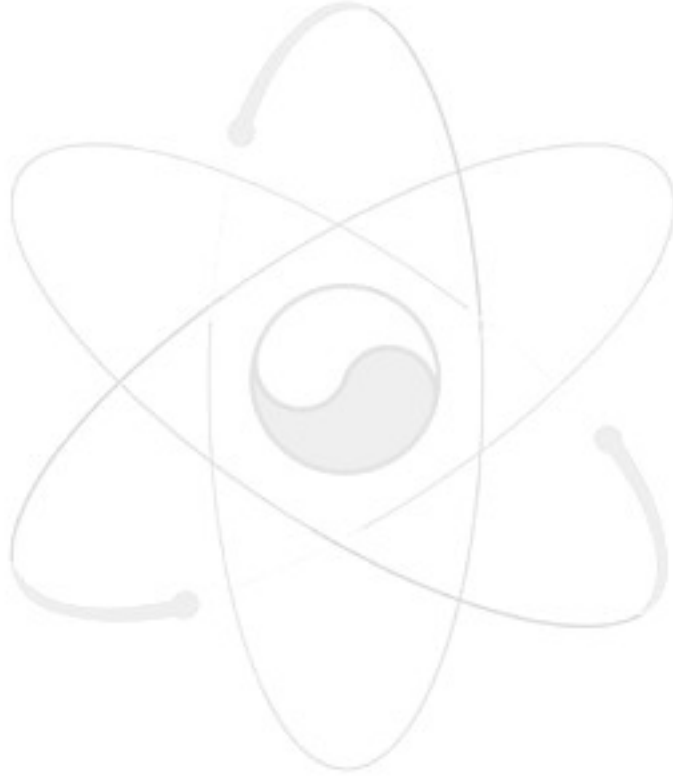
$$U_{N_f+2}^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_{N_f+2}^{(n)} \phi_{N_f+3} \quad , \tag{3.51}$$

$$\begin{aligned}
X_{N_f+2}^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} H_{r,N_f+2} [\omega \dot{S}_{N_f+2}^{(n)} + (1-\omega)\dot{S}_{N_f+2}^{(n-1)}] \\
& + [1 - (1-\omega)\Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,N_f+2} C_{N_f+2}^{(n-1)} \\
& - (1-\omega)\gamma_{N_f+2}^{(n)} [C_{N_f+2}^{(n-1)} - \phi_{N_f+3} C_{N_f+3}^{(n-1)}] \\
& + (1-\omega)\Delta t^{(n)} J_g^{(n-1)} \quad , \tag{3.52}
\end{aligned}$$

$$W_M^{(n)(k-1)} = \omega \gamma_{M-1}^{(n)} \quad , \tag{3.53}$$

$$V_M^{(n)(k-1)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell, M} \phi_M + \omega \gamma_{M-1}^{(n)} \phi_M + \omega \Delta t^{(n)} \psi^{(n)(k-1)}, \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} X_M^{(n)(k-1)} = & \Delta t^{(n)} H_{\ell, M} [\omega \dot{S}_M^{(n)} + (1 - \omega) \dot{S}_M^{(n-1)}] \\ & + [1 - (1 - \omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell, M} \phi_M C_M^{(n-1)} \\ & + (1 - \omega) \gamma_{M-1}^{(n)} [C_{M-1}^{(n-1)} - \phi_M C_M^{(n-1)}] \\ & - (1 - \omega) \Delta t^{(n)} J_M^{(n-1)} + \omega \Delta t^{(n)} \chi^{(n)}. \end{aligned} \quad (3.55)$$



제 4 장 COPA-FPREL의 구조와 기능

COPA 코드는 총 9개의 모듈로 구성되어 있다: MECH, FAIL, TEMTR, TEMPEB, TEMBL, FPREL, MPRO, BURN, ABAQ. 각 모듈은 고유의 기능과 모델을 갖고 있으며, 독립적으로 실행되거나 다른 모듈에 삽입되거나 다른 모듈의 입력 자료를 생산하는데 사용된다. COPA-FPREL은 약 5000 줄로 이루어진 FORTRAN 프로그램이다. 제 3 장에서 유도한 수식을 이용하여 PBR 및 PMR의 핵연료 및 핵연료체에서의 핵분열생성물 이동을 모사한다. COPA-FPREL 코드는 또한 조사시험 및 가열시험 조건에서 피복입자 및 핵연료체로부터의 핵분열생성물 방출을 모사한다.

COPA-FPREL 코드에서 수행되는 계산 순서는 그림 4.1에 나타내었다. 특정 시점에서 플루언스, 연소도, 냉각재 온도가 순차적으로 계산된다. 핵연료체 내부의 온도는 입력옵션변수의 값에 따라 냉각재 온도를 이용하여 그 분포가 계산되거나 일정하다고 가정되기도 한다. 핵연료체의 온도에 따라 새로운 확산계수, 수축팽형상수, 물질전달계수의 값이 계산된다. 피복입자로부터 방출되는 양과 핵연료체에 오염된 우라늄의 핵분열로 생성되는 양으로 이루어진 선원항이 계산된다. 유한차분식이 비선형일 때는 반복법 (successive substitution)으로 농도분포를 계산한다. 피복입자로부터의 방출률을 계산하기 위해서는 핵연료체에서와 마찬가지로 유한차분법이 피복입자에 적용된다. 피복입자 내부의 온도 및 농도 분포가 그 유한차분법으로 계산된다. 피복입자 표면에서의 핵분열생성물 농도는 그 피복입자가 위치한 핵연료체 내의 위치에서의 핵분열생성물 농도이다. 피복입자 표면의 온도는 그 피복입자가 위치한 핵연료체 내의 위치에서의 핵연료체 온도이다. 핵연료체 내부의 온도와 마찬가지로, 피복입자 내부의 온도는 입력옵션변수의 값에 따라 피복입자 표면의 온도를 이용하여

그 분포가 계산되거나 일정하다고 가정되기도 한다.

표 4.1에 COPA-FPREL 코드에 포함되어 있는 주요 부프로그램과 그 기능을 나타내었다. 부프로그램 TEMTR, TEMPEB, TEMBL은 원래 COPA 코드의 모듈이지만 COPA-FPREL 코드에 삽입되었다. 부프로그램 TEMTR, TEMPEB, TEMBL은 각각 피복입자, 페블, 육각블럭 내부의 온도분포를 유한차분법으로 계산한다. 부프로그램 FPREL_CP는 피복입자 내부의 농도분포를 계산하고 그 농도분포를 이용하여 방출률을 계산한다. FPREL은 COPA-FPREL 코드의 주프로그램이며, 핵연료체 내부의 농도분포를 계산하고 그 농도분포를 이용하여 방출률을 계산한다. 원자로 운전조건에서 시간에 따른 피복입자 파손율은 COPA-FAIL 코드로 계산하여, COPA-FPREL 코드에 입력된다.

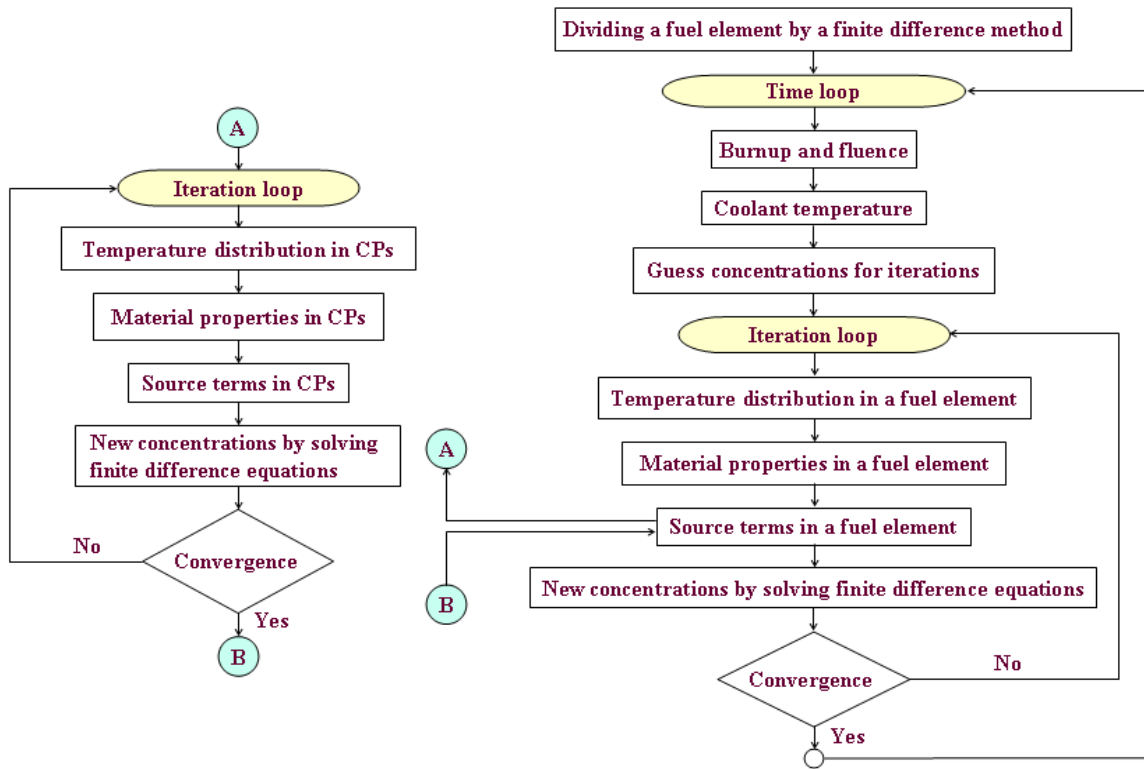
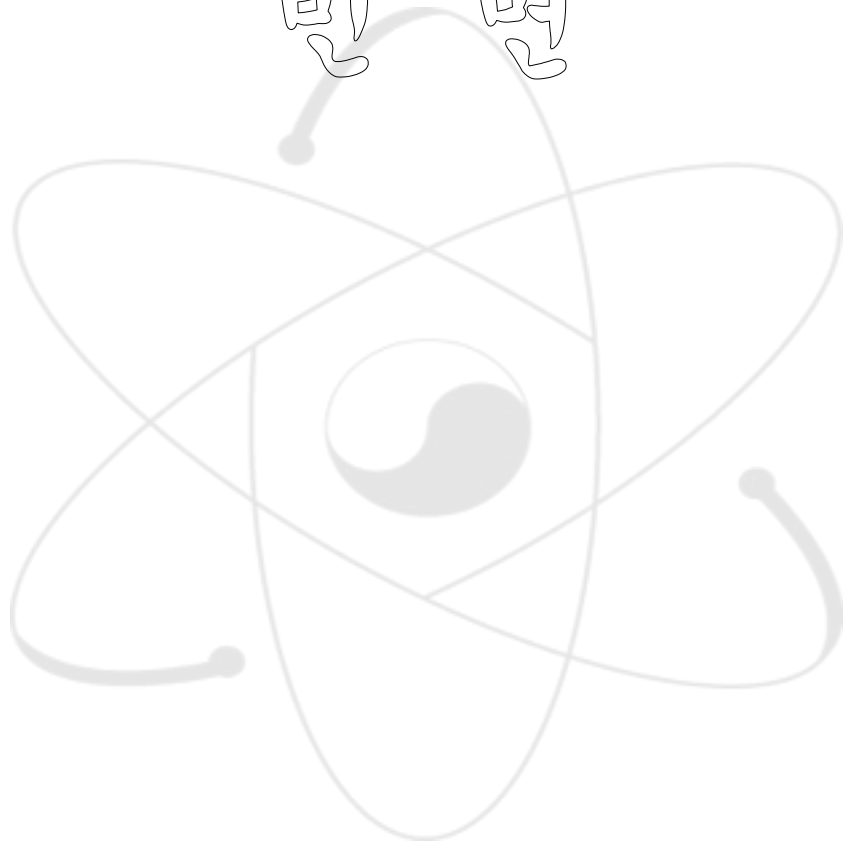


그림 4.1. COPA-FPREL에서의 계산과정

표 4.1. COPA-FPREL의 주요 부프로그램 및 그 기능

Subroutines	Functions
TEMTR	Temperature distribution within a coated particle
FPREL_CP	Concentration distribution within a coated particle
TEMPEB	Temperature distribution within a pebble
TEMBL	Temperature distribution within an equivalent slab
FPREL	Main module. Concentration distribution within a fuel element

비명



제 5 장 핵분열생성물 방출 계산

가열 및 조사 조건에 있는 피복입자, 페블, 육각블럭에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출을 계산하였다. 표 5.1에 cesium, strontium, silver의 확산계수를 나타내었다[7,12]. 표 5.2-5.4에 페블, 컴팩트 및 흑연구조물 표면에서 cesium, strontium, silver의 수착평형상수를 나타내었다[7,12]. 냉각재와 접해 있는 페블 및 흑연구조물 표면에 형성되는 경계층에서 핵분열생성물의 물질전달계수는 부록 D에 기술하였다 [9,11]. 피복입자 및 핵연료체의 열전도도는 표 5.5에 나타내었다[13,14]. ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 핵분열수율은 각각 0.0658, 0.0577, 0.00305이다[15]. 표 5.6에 계산에 적용한 피복입자의 두께, 밀도, 분배계수를 나타내었다.

표 5.1. Cesium, strontium 및 silver의 확산계수

Isotopes	Materials	D_1 (cm ² /s)	Q_1 (J/mol)	D_2 (cm ² /s)	Q_2 (J/mol)
Cesium	UO ₂	5.6×10^{-4}	209000	5.2	362000
	Buffer	1×10^{-4}	0		
	PyC	6.3×10^{-4}	222000		
	PyC, PMR ^(a)	5.0×10^{-1}	318000		
	SiC	$5.5 \times 10^{-10} e^{\phi/5}$ (b)	125000	1.6×10^2	514000
	SiC, PMR ^(a)	6.7×10^{-10}	106000	1.1	437000
	A3-3	3.6	189000		
	A3-27	3.6×10^1	189000		
	H-451	1.72×10^{-2}	148900		
Strontium	UO ₂	2.2×10^1	488000		
	Buffer	1×10^{-4}	0		
	PyC	2.3×10^{-2}	197000		
	SiC	1.2×10^{-5}	205000	1.8×10^{10}	791000
	A3-3	1×10^2	303000		
	A3-27 ^(c)	1×10^2	303000		
	H-451	1.66×10^2	268000		
Silver	UO ₂	6.7×10^{-5}	165000		
	Buffer	1×10^{-4}	0		
	PyC	5.3×10^{-5}	154000		
	SiC	3.6×10^{-5}	215000		
	A3-3	1.6×10^4	258000		
	A3-27 ^(c)	1.6×10^4	258000		
	H-451	1.38×10^2	226000		

(a) Values for FPR calculation in a PMR.

(b) ϕ = fluence (10^{21} nvt).

(c) The values of A3-3 are used.

표 5.2. 페블 표면에서 cesium, strontium 및 silver의 수착평형상수

Element	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>G</i>	<i>E</i>	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂
Cs	25.14	-44930	-3.118	6707	0.122	0.
Ag ^(a)	24.0	-35700	-1.56	6120	2.04	1.79×10 ⁻³
Sr	22.8	-50617	-0.913	5214	-1.897	0.

(a) 흑연구조물 자료와 같다고 가정함.

표 5.3. 컴팩트 표면에서 cesium, strontium 및 silver의 수착평형상수

Element	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>G</i>	<i>E</i>	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	Data ^(a)
Cs	19.33	-4.729×10 ⁴	1.518	4338	3.397	6.15×10 ⁻⁴	Yes
Ag	19.3	-4.73×10 ⁴	1.51	4340	3.40	6.15×10 ⁻⁴	No
Sr	54.3	-1.49×10 ⁵	-8.52	2.85×10 ⁴	3.13	0.0	Yes

(a) Indicates whether experimental data exists for sorption of the FP in graphite, and the type of graphite.

표 5.4. 흑연구조물 표면에서 cesium, strontium 및 silver의 수착평형상수

Element	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>G</i>	<i>E</i>	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	Data ^(a)
Cs	24.00	-35730	-1.561	6123	2.035	1.786×10 ⁻³	H-451
Ag	24.0	-35700	-1.56	6120	2.04	1.79×10 ⁻³	No
Sr	19.38	-40090	-0.324	4088	-2.12	0.0	H-451

(a) Indicates whether experimental data exists for sorption of the FP in graphite, and the type of graphite.

표 5.5. 피복입자 및 흑연의 열전도도

Materials	Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)
UO ₂ kernel	MATPRO [14]
Low-density pyrocarbon	0.5
High-density pyrocarbon	4
Silicon carbide	16
Graphite	25

표 5.6. 피복입자의 두께, 밀도 및 분배계수

Layers	Thickness (μm)	Density (g/cm^3)
OPyC	40	1.90
SiC	35	3.20
IPyC	40	1.90
Buffer	100 or 95	1.02
Kernel	500*	10.83
Partition factors between layers		
Kernel - Buffer		1
Buffer - IPyC		1
IPyC - SiC		2
SiC - OPyC		1

* Diameter

제 1 절 가열조건에서 피복입자에서의 방출

그림 5.1에 지름이 500 μm 인 UO_2 연료핵이 1200 $^\circ\text{C}$ 및 1600 $^\circ\text{C}$ 로 가열될 때 그 연료핵에서 방출되는 ^{137}Cs 의 방출분율을 나타내었다. 확산계수가 일정하다고 가정하면 다음과 같은 해석해가 존재한다[16].

$$FR = 1 - \frac{6e^{-\lambda t}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n^2\pi^2 D'}}{n^2}, \quad (5.1)$$

여기서 $D' = Dt/r_K^2$. 해석해와 COPA-FPREL로 계산한 수치해가 매우 잘 일치하고 있다.

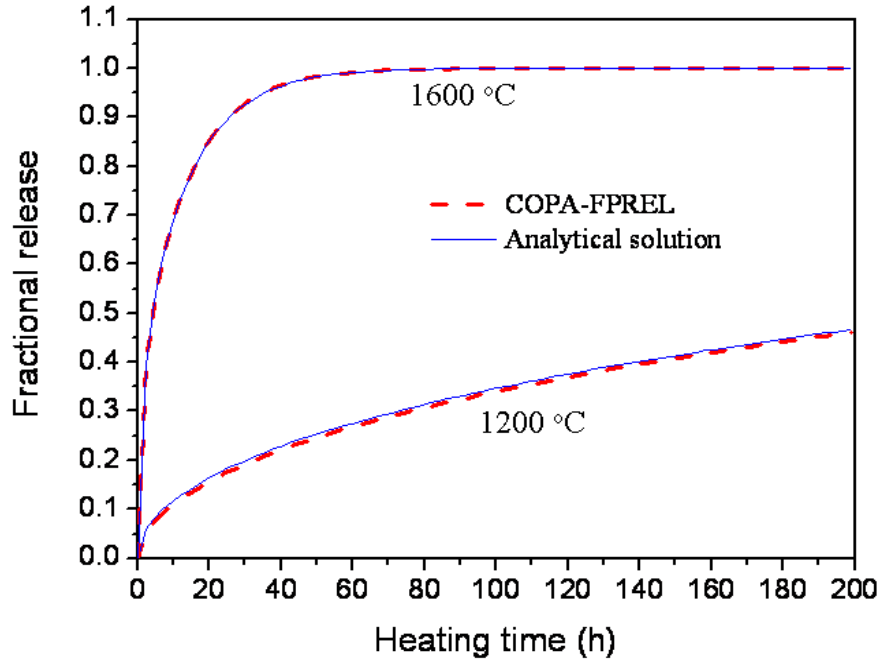


그림 5.1. UO_2 연료핵에서 ^{137}Cs 의 방출분율

그림 5.2는 가열 중인 TRISO 피복입자에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율을 나타내고 있다. 가열은 처음 200 시간 동안은 1600 °C에서 행해지고, 그 다음 200 시간은 1800 °C에서 행해진다. 이 경우 완충층의 두께는 100 μm 로 하였다. 핵분열 생성물 중에서 $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출률이 제일 크다. 처음 200 시간은 ^{90}Sr 의 방출률이 ^{137}Cs 의 방출률보다 매우 크지만, 가열 종료 시점에서는 두 핵분열생성물의 방출률은 거의 같아지고 있다.

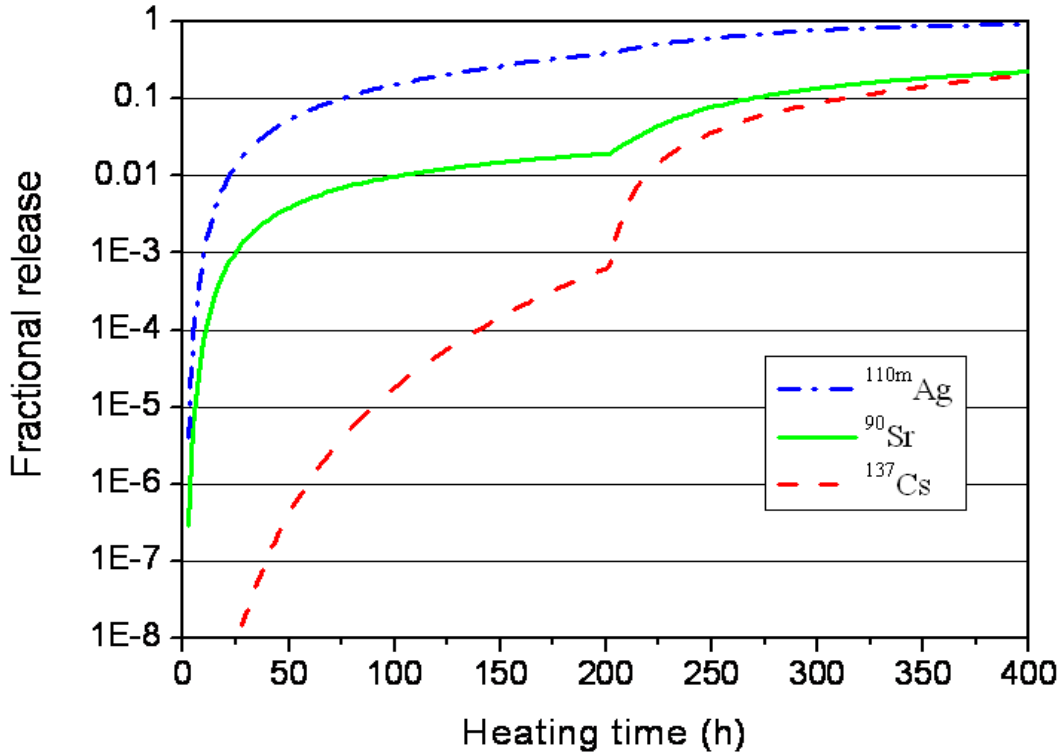


그림 5.2. 가열 중인 TRISO로 부터의 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율 (1600 °C로 200시간 가열 후 1800 °C 200시간 추가 가열)

제 2 절 가열조건에서 페블에서의 방출

페블에 들어 있는 피복입자의 수는 15000개이다. 페블의 지름은 6 cm이고, 페블의 핵연료 영역은 5 cm이다. 피복입자의 파손율은 4×10^{-5} 로 가정하였다. 완충층, 내부 열분해탄소층, 탄화규소층, 외부열분해탄소층 및 흑연에서의 오염률은 각각 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6} 으로 가정하였다. 이 경우 완충층의 두께는 100 μm 로 하였다. 핵분열생성물은 초기에는 연료핵에만 일정하게 존재한다고 가정하였

다. 그림 5.3에 1800 °C로 가열 중인 장전 폐블에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율을 나타내었다. 핵분열생성물 중에서 $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출률이 제일 크다. ^{137}Cs 및 ^{90}Sr 의 방출률은 가열초기를 제외하고는 거의 일치하고 있다. 가열초기에는 ^{137}Cs 의 방출률이 ^{90}Sr 의 방출률보다 매우 크다.

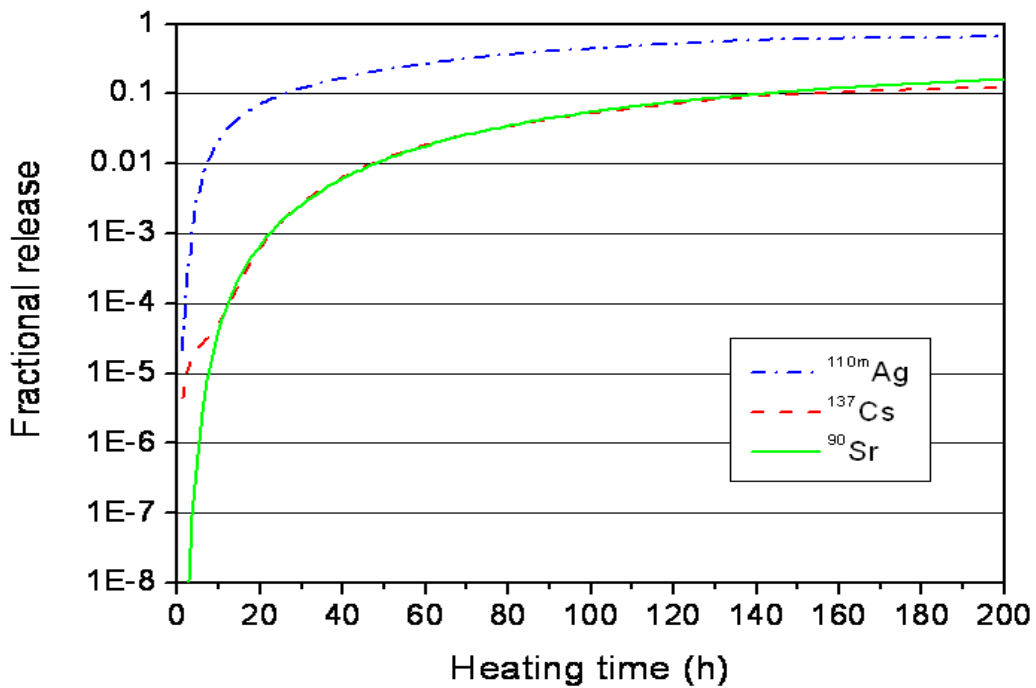


그림 5.3. 1800 °C로 가열 중인 장전 폐블에서의 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율

제 3 절 PBR 운전조건에서 폐블에서의 방출

표 5.7에 방출률 계산을 위해 설정한 PBR 관련 자료를 나타내었다. 최대 플루언스

와 최대 운전시간은 각각 4×10^{21} nvt 및 860 일로 하였다. 플루언스와 시간은 일차 종속 관계에 있다고 가정하였다. 운전기간 중의 냉각재 온도는 500 °C 및 900 °C로 일정하다고 가정하였다. 피복입자의 파손율은 4×10^{-5} 로 가정하였다. 완충층, 내부열 분해탄소층, 탄화규소층, 외부열분해탄소층 및 흑연에서의 우라늄 오염률은 각각 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6} 으로 가정하였다. 이 경우 완충층의 두께는 95 μm 로 하였다. 흑연은 A3-3이라고 가정하였다.

그림 5.4 및 5.5에 각각 냉각재 온도 500 °C 및 900 °C로 운전 중인 PBR 펄블에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^{\text{m}}$ 의 방출분율을 나타내었다. 전 운전기간에 걸쳐 핵분열생성물 방출분율이 $^{110}\text{Ag}^{\text{m}}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr 의 순으로 크다. 냉각재 온도가 500 °C일 때 ^{90}Sr 의 방출률은 다른 두 핵종에 비해 극히 작다. 운전시간이 860일 때 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^{\text{m}}$ 의 방출분율은 각각 $1.03 \times 10^{-8} \sim 7.15 \times 10^{-4}$, $4.67 \times 10^{-16} \sim 8.88 \times 10^{-7}$, $3.14 \times 10^{-6} \sim 2.73 \times 10^{-2}$ 로 계산되었다. 그림 5.4 및 5.5에 따르면 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^{\text{m}}$ 의 방출은 냉각재 온도에 크게 의존하고 있다.

표 5.7. 시험계산을 위한 pebble-bed reactor

Design parameters	Values
Active core height/inner diameter (m)	11/3.7
Fuel material	UO ₂
Enrichment (wt. %)	8
Thermal power (MW)	400
Power density (W/cm ³)	4.3
Inlet/outlet temperature (°C)	500/900
Coolant mass velocity (kg/s)	185
Primary coolant pressure (MPa)	9.0
Number of pebbles in a core	450000
Number of coated particles per pebble	15000
Diameters of fuel region/pebble (cm)	5/6

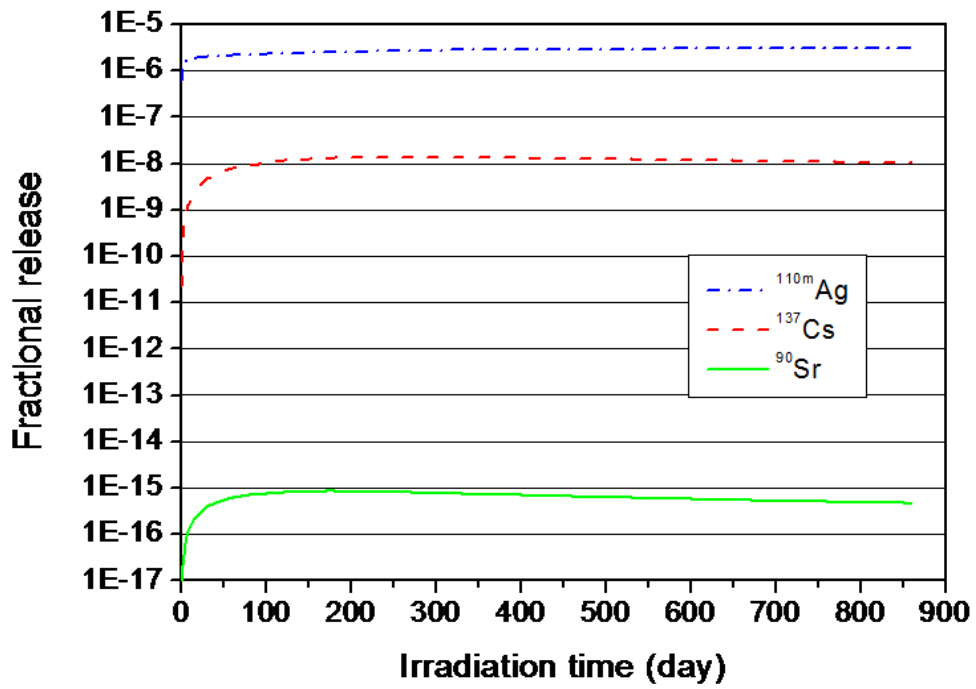


그림 5.4. 냉각재 온도 500 °C일 때 PBR 페블에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율

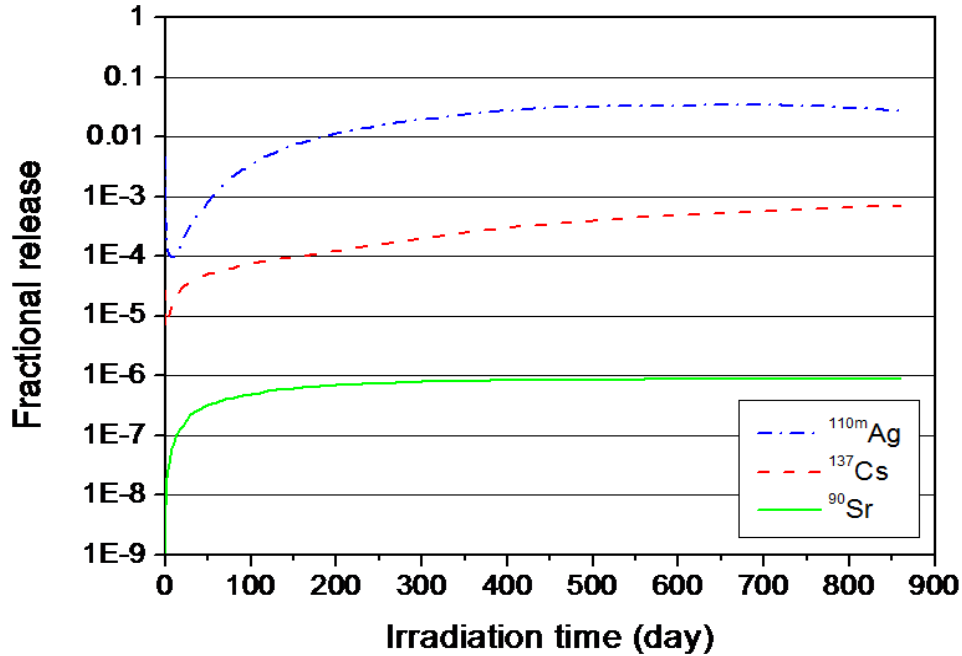


그림 5.5. 냉각재 온도 900 °C일 때 PBR 펠에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율

제 4 절 PMR 운전조건에서 육각블럭에서의 방출

표 5.8에 방출률 계산을 위해 설정한 PMR 관련 자료를 나타내었다. 최대 플루언스와 최대 운전시간은 각각 4×10^{21} nvt 및 860 일로 하였다. 플루언스와 시간은 일차 종속 관계에 있다고 가정하였다. 운전기간 중의 냉각재 온도는 590 °C 및 950 °C로 일정하다고 가정하였다. 피복입자의 파손율은 4×10^{-5} 로 가정하였다. 완충층, 내부열분해탄소층, 탄화규소층, 외부열분해탄소층 및 흑연에서의 우라늄 오염률은 각각 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6} 으로 가정하였다. 이 경우 완충층의 두께는 95 μm 로 하였다. 컴팩트 및 흑연구조물의 흑연은 H-451이라고 가정하였다.

그림 5.6에 출력과 냉각재 온도에 따른 equivalent slab의 길이 변화를 나타내었다. 초기의 입자 당 출력은 317 mW, 최종 시점에서의 입자 당 출력은 123 mW로 계산되었다. 피복입자 당 출력이 시간에 따라 변하기 때문에 COPA-FPREL로 육각블럭에서의 방출률을 계산할 때 매 시점마다 새로운 equivalent slab의 길이가 그림 5.6에 따라 보간 (interpolation)하여 계산된다. 그림 5.7 및 5.8에 각각 냉각재 온도 590 °C 및 950 °C로 운전 중인 PMR 육각블럭에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율을 나타내었다. 냉각재 온도가 590 °C일 때 ^{90}Sr 은 방출되지 않는 것으로 평가되었다. ^{137}Cs 의 방출분율이 $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율보다 더 크다. 냉각재 온도가 950 °C일 때는 방출분율이 $^{110}\text{Ag}^m$, ^{137}Cs , ^{90}Sr 의 순으로 크다. 표 5.4에 따르면 $^{110}\text{Ag}^m$ 과 ^{137}Cs 의 흑연구조물 표면에서의 수착평형 특성은 별 차이가 없다. 표 5.1의 흑연구조물에서의 확산 자료에 의하면 약 760 °C 이하에서는 ^{137}Cs 의 확산계수가 $^{110}\text{Ag}^m$ 의 확산계수보다 더 크고, 약 760 °C 이상에서는 반대로 된다. 이 때문에 냉각재 온도가 590 °C 및 950 °C일 때 $^{110}\text{Ag}^m$ 와 ^{137}Cs 의 방출분율의 크기가 뒤바뀐다. 운전시간이 860일 때 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율은 각각 $1.34 \times 10^{-13} \sim 1.67 \times 10^{-2}$, $0 \sim 1.14 \times 10^{-3}$, $9.25 \times 10^{-18} \sim 1.99 \times 10^{-1}$ 로 계산되었다. 그림 5.7 및 5.8에 따르면 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출은 냉각재 온도에 크게 의존하고 있다.

표 5.8. 시험계산을 위한 prismatic modular reactor

Design parameters	Values
Active core height/inner diameter (m)	7.93/2.96
Fuel material	UO ₂
Enrichment (wt. %)	19.8
Thermal power (MW)	600
Power density (W/cm ³)	6.6
Inlet/outlet temperature (°C)	590/950
Coolant mass velocity (kg/s)	320
Primary coolant pressure (MPa)	7.0
Number of fuel columns in a core	102
Number of fuel blocks in a fuel column	10
Number of compacts in a fuel block	3126
Number of coated particles in a compact	4830
Compact diameter/length (mm)	12.45/49.3

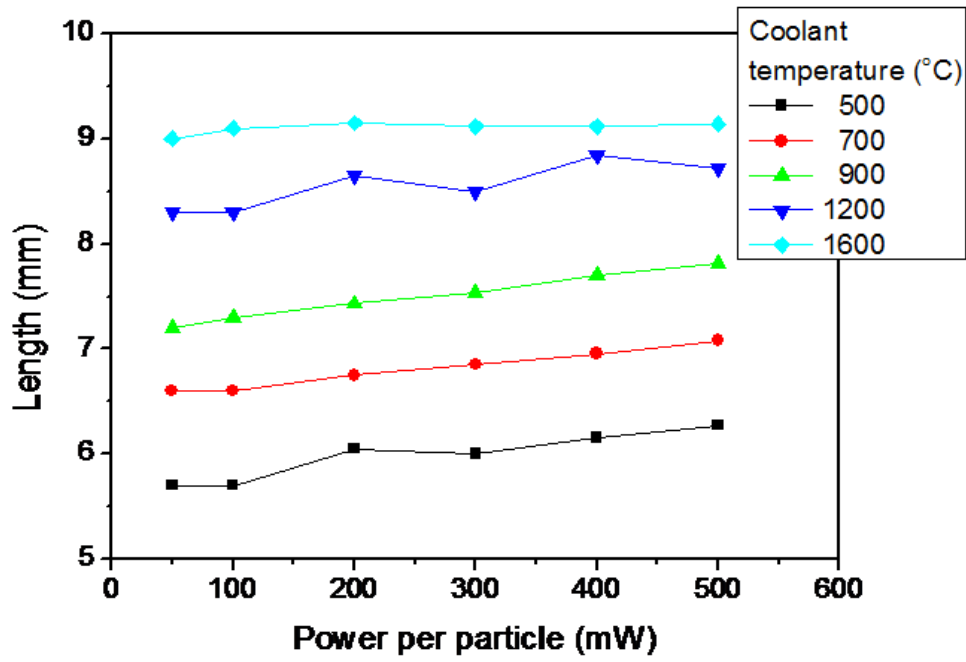


그림 5.6. 출력 및 냉각재 온도에 따른 equivalent slab 길이의 변화

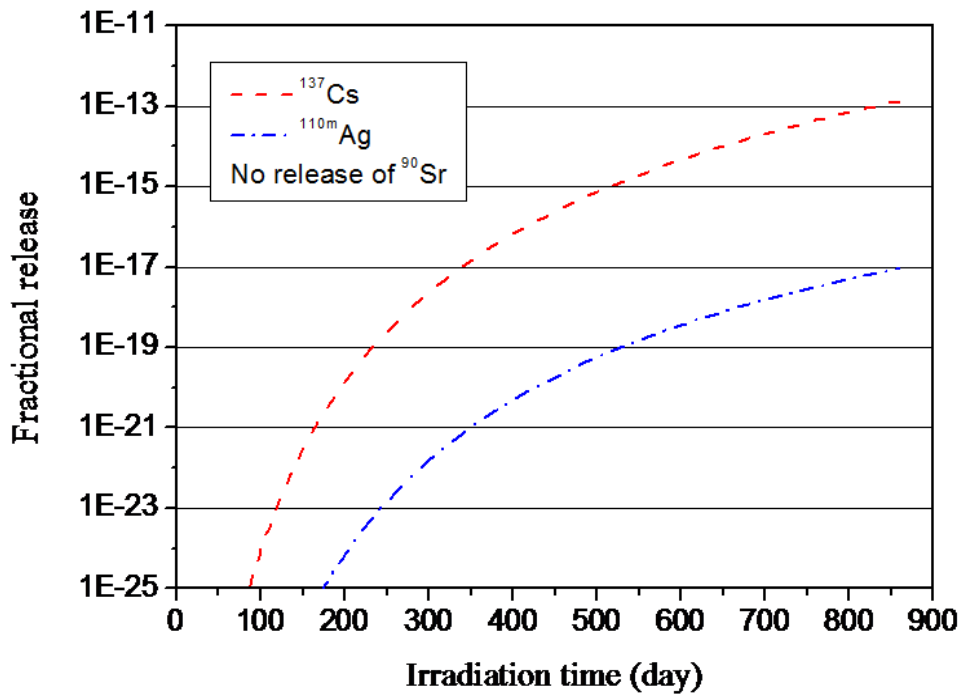


그림 5.7. 냉각재 온도 590 °C일 때 PMR 핵연료 육각블럭에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^{\text{m}}$ 의 방출분율

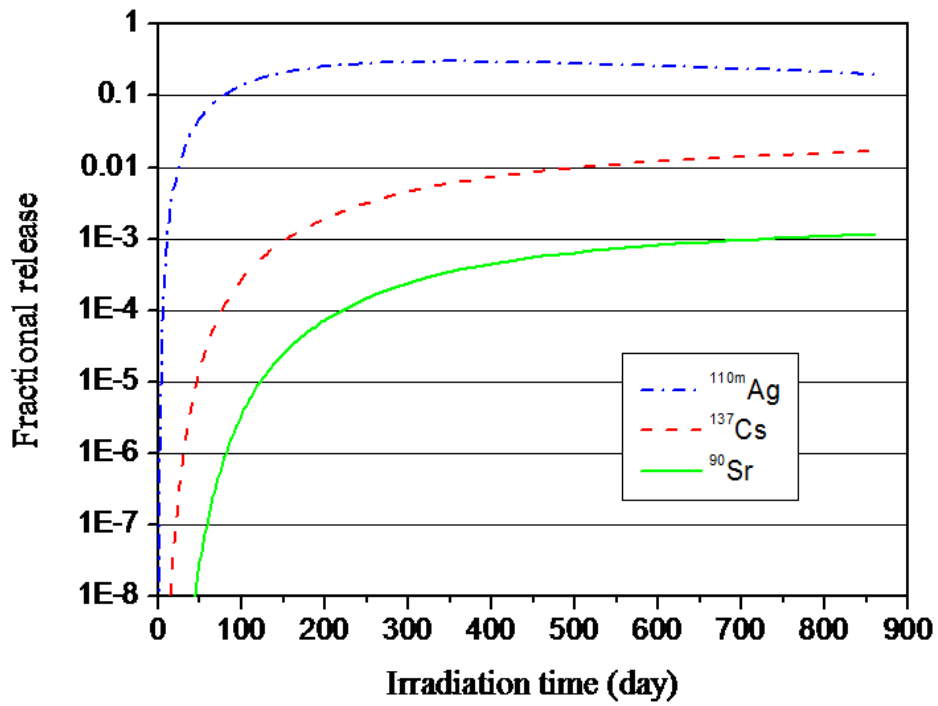
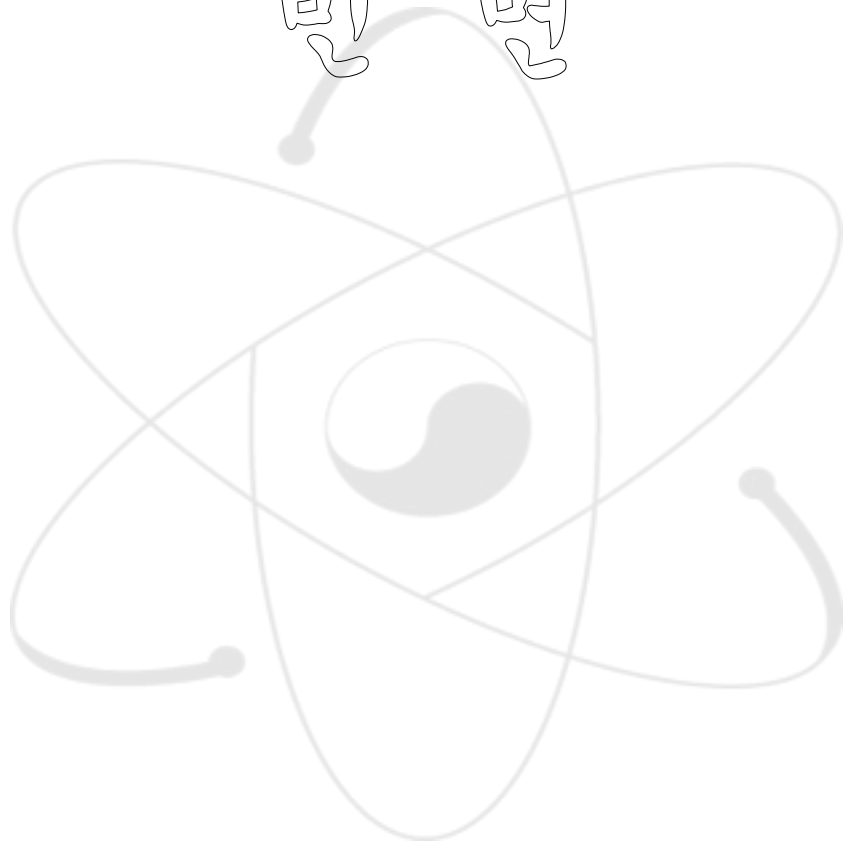


그림 5.8. 냉각재 온도 950 °C일 때 PMR 핵연료 육각블럭에서 방출되는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$ 의 방출분율

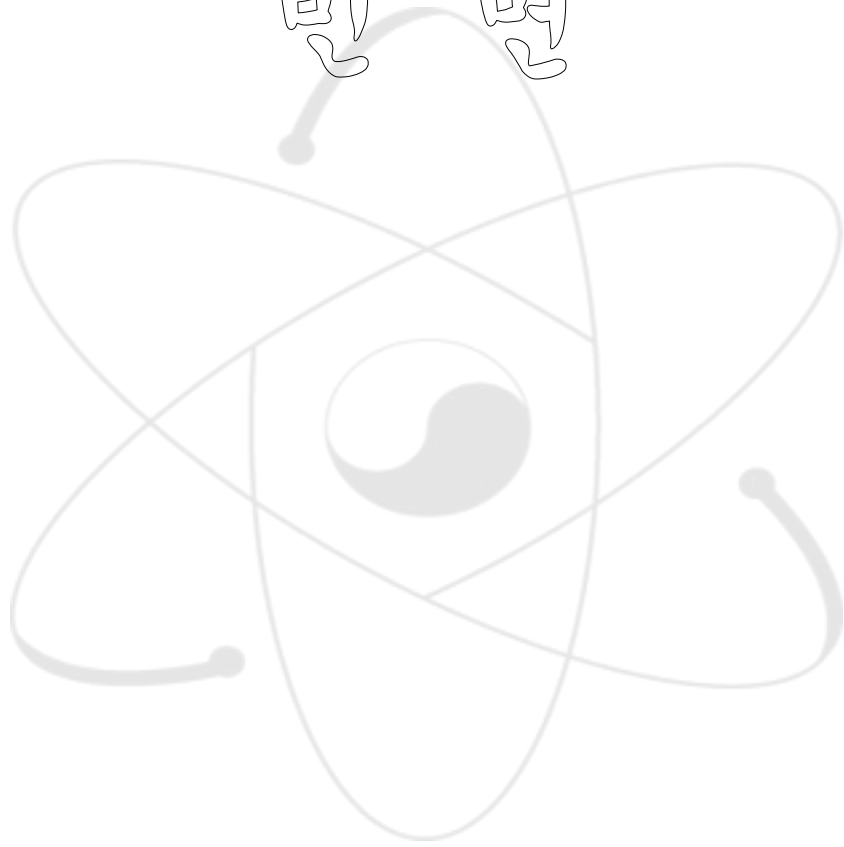
비명



제 5 장 결론

고온가스로의 핵연료에 적용할 수 있는 핵분열생성물 방출 분석코드 COPA-FPREL을 개발하였다. COPA-FPREL은 원자로 운전조건, 조사조건 및 가열조건에서 고온가스로의 피복입자 및 핵연료체 내부의 온도 및 핵분열생성물 농도 분포를 계산한다. 그 농도분포를 이용하여 핵연료체에서 냉각재로의 핵분열생성물 방출을 계산한다. UO_2 연료핵에서의 ^{137}Cs 방출률 계산 결과, 해석해와 COPA-FPREL에 의한 수치해가 매우 잘 일치하였다. COPA-FPREL을 이용하여 원자로 운전조건에서의 방출분율을 계산한 결과, PBR 운전조건에서는 $^{110}\text{Ag}^m$, ^{137}Cs , ^{90}Sr 의 순으로 방출분율이 큰 것으로 평가되었다. PMR 운전조건에서는 저온일 때는 ^{137}Cs , $^{110}\text{Ag}^m$, ^{90}Sr 의 순으로, 고온일 때는 $^{110}\text{Ag}^m$, ^{137}Cs , ^{90}Sr 의 순으로 방출분율이 큰 것으로 평가되었다. 방출분율은 온도에 크게 의존하였다. IAEA CRP-6 accident benchmarking program을 통하여 COPA-FPREL에 대한 검증 (verification) 및 타당화 (validation) 작업을 수행하고 있다.

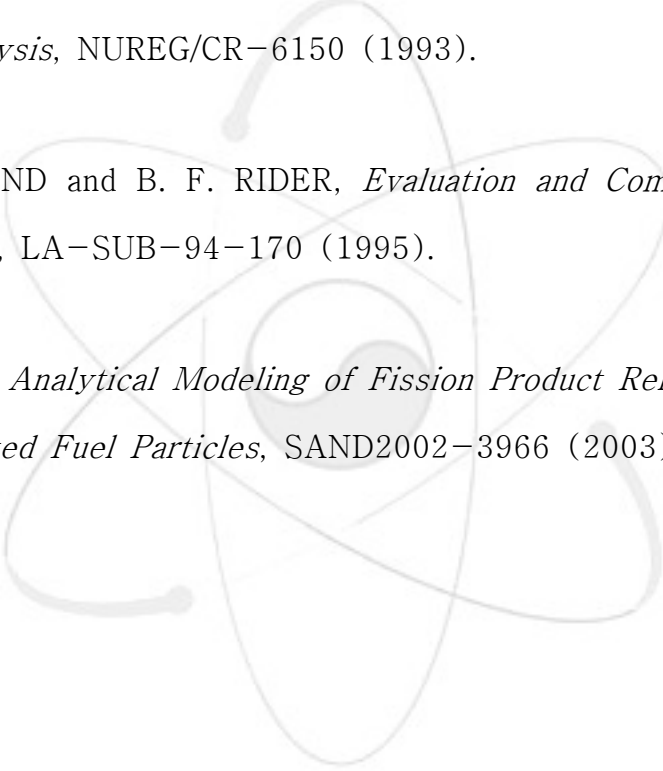
비명



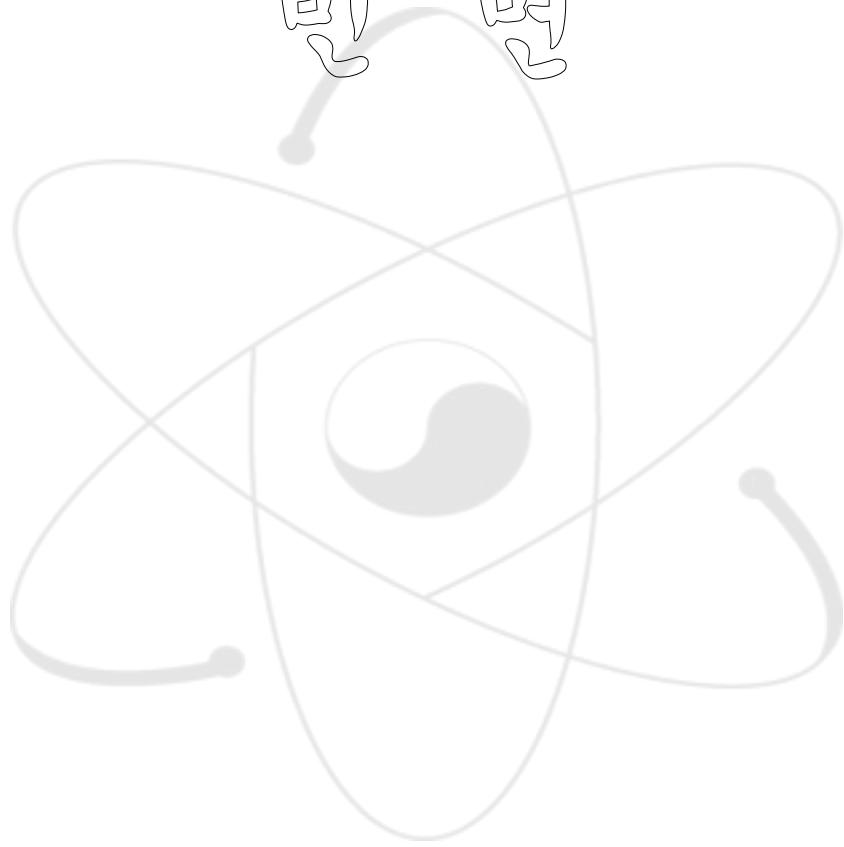
제 6 장 참고문헌

- [1] Y. M. KIM, M. S. CHO, Y. W. LEE and W. J. LEE, "Development of a Fuel Performance Analysis Code COPA," *Proceedings of the 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR-2008)*, September 28 – October 1, 2008, Washington D.C., USA.
- [2] R. W. DUNLAP and T. D. GULDEN, "Diffusion Model for Release of Fission Products from Coated Particle Fuels," *Nucl. Sci. Eng.*, **32**, 407–416 (1968).
- [3] P. D. SMITH and R. G. STEINKE, *COPAR, A Program to Compute Release of Metallic Fission Products from Coated Particles*, GA-A1403 (1977).
- [4] H. KROHN and R. FINKEN, *FRESCO-II: Ein Rechenprogramm zur Berechnung der Spaltproduktfreisetzung aus kugelformigen HTR-Brennelementen in Bestrahlungs- und Ausheizexperimenten*, Jul-Spez-212 (1983).
- [5] S. NAKAMURA, *Computational Methods in Engineering and Science*, John Wiley & Sons, Inc. (1977).
- [6] B. FORUTANPOUR and B. ROSS, *FIPERX, A FORTRAN for the Solution of One-dimensional Linear and Non-linear Diffusion Problems*, GA-9904 (1969).

- [7] R. C. MARTIN, *Compilation of Fuel Performance and Fission Product Transport Models and Database for MHTGR Design*, ORNL/NPR-91/6 (1993).
- [8] J. APPEL and B. ROSS, "A Study of the Release of Radioactive Metallic Isotopes from High-Temperature Gas-Cooled Reactors," *Nucl. Sci. Eng.*, **34**, 201-213 (1968).
- [9] J. KESHAW and H. MERWE, "GETTER - A Model for Fission Product Release from Spherical HTR Fuel Elements," *Proceedings HTR 2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, Johannesburg, South Africa (2006).
- [10] P. D. SMITH, *TRAFIC, A Computer Program for Calculating the Release of Metallic Fission Products from an HTGR Core*, GA-A14721 (1978).
- [11] W. W. HUDRITSCH and P. D. SMITH, *PADLOC, A One-dimensional Computer Program for Calculating Coolant and Plateout Fission Product Concentrations*, GA-A14401 (1977).
- [12] *Fuel Performance and Fission Product Behaviour in Gas Cooled Reactors*, IAEA-TECDOC-978 (1997).

- 
- [13] *Development of Improved Models and Designs for Coated-Particle Gas Reactor Fuels*, INEEL/EXT-05-02615 (2001).
- [14] D. T. HAGRMAN, Ed., *SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO -- A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis*, NUREG/CR-6150 (1993).
- [15] T. R. ENGLAND and B. F. RIDER, *Evaluation and Compilation of Fission Product Yields*, LA-SUB-94-170 (1995).
- [16] F. GELBARD, *Analytical Modeling of Fission Product Releases by Diffusion from Multicoated Fuel Particles*, SAND2002-3966 (2003).

비명



부록 A. 핵분열생성물 확산에 대한 유한차분식

핵분열생성물의 구형 매질에서의 확산은 다음의 식으로 표현한다.

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = \dot{s}(r,t) - \lambda C(r,t) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 D(C,r,t) \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right] , \quad (\text{A.1})$$

여기서

$C(r,t)$ = 핵분열생성물의 농도 ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$),

$\dot{s}(r,t)$ = 생성률 ($\mu\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1}$),

$D(C,r,t)$ = 확산계수 (cm^2/s),

λ = 붕괴상수 (s^{-1}),

r = r 좌표 (cm),

t = 시간 (s)

이다. 유한차분법에서는 그림 A.1과 같이 구형 매질을 그 중앙에서 표면까지를 $M-1$ 개의 유한차분구간으로 나눈다. 특정 시간에서 각 구간 안에서는 물성이 동일하다고 가정한다.

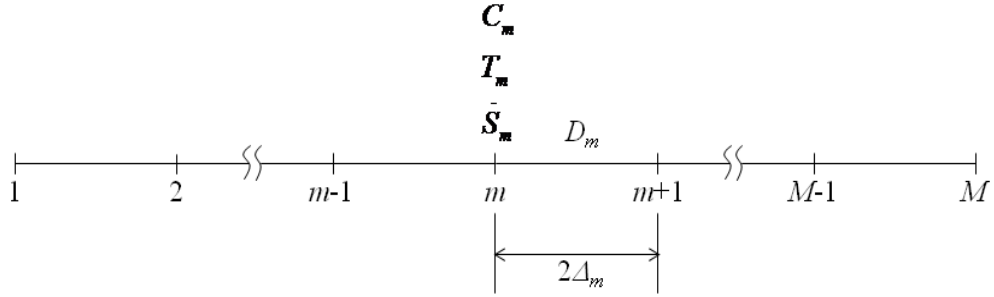


그림 A.1. 확산매질에서 유한차분구간

식 (A.1)을 r_1 부터 $r_1 + \Delta_1$ 까지 체적에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} r^2 \frac{\partial C}{\partial t} dr = \int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} r^2 \dot{S} dr - \lambda \int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} r^2 C dr + \int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial C}{\partial r} \right) dr. \quad (\text{A.2})$$

식 (A.2)의 각 항을 전개하면 다음과 같다.

$$\int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} r^2 \frac{\partial C}{\partial t} dr \approx H_{r,1} \frac{dC_1}{dt}, \quad (\text{A.3})$$

$$\int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} r^2 \dot{S} dr \approx H_{r,1} \dot{S}_1, \quad (\text{A.4})$$

$$\lambda \int_{r_1}^{r_1 + \Delta_1} r^2 C dr \approx \lambda H_{r,1} C_1, \quad (\text{A.5})$$

$$\int_{r_1}^{r_1+\Delta_1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial C}{\partial r} \right) dr \approx -\frac{D_1}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 C_1 + \frac{D_1}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 \phi_2 C_2 + r_1^2 J_1 , \quad (\text{A.6})$$

여기서

$$H_{r,1} = [(r_1 + \Delta_1)^3 - r_1^3] / 3 \quad (\text{A.7})$$

이다. 식 (A.3)-(A.6)을 식 (A.2)에 대입하고, $J_l = 0$ 을 적용하면 다음과 같다.

$$H_{r,1} \frac{dC_1}{dt} = H_{r,1} \dot{S}_1 - \lambda H_{r,1} C_1 - \frac{D_1}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 C_1 + \frac{D_1}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 \phi_1 C_2 . \quad (\text{A.8})$$

식 (A.8)을 시간에 대해서 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & H_{r,1} \frac{C_1^{(n)} - C_1^{(n-1)}}{\Delta t^{(n)}} \\ &= H_{r,1} \left[\omega \dot{S}_1^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_1^{(n-1)} \right] - \lambda H_{r,1} \left[\omega C_1^{(n)} + (1-\omega) C_1^{(n-1)} \right] \\ & \quad - \frac{D_1^{(n)}}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 \left[\omega C_1^{(n)} + (1-\omega) C_1^{(n-1)} \right] \\ & \quad + \frac{D_1^{(n)}}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 \phi_2 \left[\omega C_2^{(n)} + (1-\omega) C_2^{(n-1)} \right] . \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

식 (A.9)를 정리하면 다음과 같은 유한차분식을 얻을 수 있다.

$$V_1^{(n)} C_1^{(n)} - U_1^{(n)} C_2^{(n)} = X_1^{(n)} , \quad (\text{A.10})$$

여기서

$$V_1^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r,1} + \omega \gamma_1^{(n)} , \quad (\text{A.11})$$

$$U_1^{(n)} = \omega \gamma_1^{(n)} \phi_2 , \quad (\text{A.12})$$

$$\begin{aligned} X_1^{(n)} = & \Delta t^{(n)} H_{r,1} [\omega \dot{S}_1^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_1^{(n-1)}] \\ & + [1 - (1-\omega) \lambda \Delta t^{(n)}] H_{r,1} C_1^{(n-1)} , \\ & - (1-\omega) \gamma_1^{(n)} [C_1^{(n-1)} - \phi_2 C_2^{(n-1)}] \end{aligned} , \quad (\text{A.13})$$

$$\gamma_1^{(n)} = \Delta t^{(n)} \frac{D_1^{(n)}}{2\Delta_1} (r_1 + \Delta_1)^2 . \quad (\text{A.14})$$

식 (A.1)을 $r_{m-1} + \Delta_{m-1}$ 부터 $r_m + \Delta_m$ 까지 부피에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} r^2 \frac{\partial C}{\partial t} dr \\ & = \int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} r^2 \dot{S} dr - \lambda \int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} r^2 C dr + \int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial C}{\partial r} \right) dr \end{aligned} . \quad (\text{A.15})$$

식 (A.15)의 각 항을 전개하면 다음과 같다.

$$\int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} r^2 \frac{\partial C}{\partial t} dr \approx (H_{\ell,m} \phi_m + H_{r,m}) \frac{dC_m}{dt} , \quad (\text{A.16})$$

$$\int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} r^2 \dot{S} dr \approx (H_{\ell,m} + H_{r,m}) \dot{S}_m , \quad (\text{A.17})$$

$$\lambda \int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} r^2 C dr \approx \lambda (H_{\ell,m} \phi_m + H_{r,m}) C_m , \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{aligned} & \int_{r_{m-1} + \Delta_{m-1}}^{r_m + \Delta_m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial C}{\partial r} \right) dr \\ & \approx \frac{D_{m-1}}{2\Delta_{m-1}} (r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2 C_{m-1} \\ & - \left[\frac{D_{m-1}}{2\Delta_{m-1}} (r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2 \phi_m + \frac{D_m}{2\Delta_m} (r_m + \Delta_m)^2 \right] C_m , \\ & + \frac{D_m}{2\Delta_m} (r_m + \Delta_m)^2 \phi_{m+1} C_{m+1} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

여기서

$$H_{\ell,m} = [r_m^3 - (r_{m-1} + \Delta_{m-1})^3] / 3, m = 2, 3, \dots, M , \quad (\text{A.20})$$

$$H_{r,m} = [(r_m + \Delta_m)^3 - r_m^3] / 3, m = 1, 2, \dots, M-1 , \quad (\text{A.21})$$

$$C_m = C_m^+ = C_m^- / \phi_m , \quad (\text{A.22})$$

C_m^+ = 절점 m 에서 오른편의 농도,

C_m^- = 절점 m 에서 왼편의 농도,

ϕ_m = 절점 m 에서의 분배계수

이다. 식 (A.16)에서 식 (A.19)를 식 (A.15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& (H_{\ell,m}\phi_m + H_{r,m})\frac{dC_m}{dt} \\
&= (H_{\ell,m} + H_{r,m})\dot{S}_m - \lambda(H_{\ell,m}\phi_m + H_{r,m})C_m \\
&+ \frac{D_{m-1}}{2\Delta_{m-1}}(r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2 C_{m-1} \\
&- \left[\frac{D_{m-1}}{2\Delta_{m-1}}(r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2 \phi_m + \frac{D_m}{2\Delta_m}(r_m + \Delta_m)^2 \right] C_m \\
&+ \frac{D_m}{2\Delta_m}(r_m + \Delta_m)^2 \phi_{m+1} C_{m+1}
\end{aligned} \tag{A.23}$$

식 (A.23)을 시간에 대해서 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& (H_{\ell,m}\phi_m + H_{r,m})\frac{C_m^{(n)} - C_m^{(n-1)}}{\Delta t^{(n)}} \\
&= (H_{\ell,m} + H_{r,m})[\omega \dot{S}_m^{(n)} + (1-\omega)\dot{S}_m^{(n-1)}] \\
&- \lambda(H_{\ell,m}\phi_m + H_{r,m})[\omega C_m^{(n)} + (1-\omega)C_m^{(n-1)}] \\
&+ \frac{D_{m-1}^{(n)}}{2\Delta_{m-1}}(r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2 [\omega C_{m-1}^{(n)} + (1-\omega)C_{m-1}^{(n-1)}] \\
&- \left[\frac{D_{m-1}^{(n)}}{2\Delta_{m-1}}(r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2 \phi_m + \frac{D_m^{(n)}}{2\Delta_m}(r_m + \Delta_m)^2 \right] [\omega C_m^{(n)} + (1-\omega)C_m^{(n-1)}] \\
&+ \frac{D_m^{(n)}}{2\Delta_m}(r_m + \Delta_m)^2 \phi_{m+1} [\omega C_{m+1}^{(n)} + (1-\omega)C_{m+1}^{(n-1)}]
\end{aligned} \tag{A.24}$$

식 (A.24)를 정리하면 다음과 같은 유한차분식을 얻을 수 있다.

$$- W_m^{(n)} C_{m-1}^{(n)} + V_m^{(n)} C_m^{(n)} - U_m^{(n)} C_{m+1}^{(n)} = X_m^{(n)}, \tag{A.25}$$

여기서

$$m = 2, 3, \dots, M-1,$$

$$W_m^{(n)} = \omega \gamma_{m-1}^{(n)}, \quad (\text{A.26})$$

$$U_m^{(n)} = \omega \gamma_m^{(n)} \phi_{m+1}, \quad (\text{A.27})$$

$$V_m^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{\ell, m} \phi_m + H_{r, m}) + \omega \gamma_{m-1}^{(n)} \phi_m + \omega \gamma_m^{(n)}, \quad (\text{A.28})$$

$$\begin{aligned} X_m^{(n)} = & \Delta t^{(n)} (H_{\ell, m} + H_{r, m}) [\omega \dot{S}_m^{(n)} + (1 - \omega) \dot{S}_m^{(n-1)}] \\ & + [1 - (1 - \omega) \Delta t^{(n)} \lambda] (H_{\ell, m} \phi_m + H_{r, m}) C_m^{(n-1)} \\ & + (1 - \omega) \gamma_{m-1}^{(n)} [C_m^{(n-1)} - \phi_m C_m^{(n-1)}] \\ & - (1 - \omega) \gamma_m^{(n)} [C_m^{(n-1)} - \phi_{m+1} C_{m+1}^{(n-1)}] \end{aligned}, \quad (\text{A.29})$$

$$\gamma_m^{(n)} = \Delta t^{(n)} \frac{D_m^{(n)}}{2\Delta_m} (r_m + \Delta_m)^2 \quad (\text{A.30})$$

이다.

절점 $m=M$ 에서의 유한차분식은 같은 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-W_M^{(n)} C_{M-1}^{(n)} + V_M^{(n)} C_M^{(n)} = X_M^{(n)}, \quad (\text{A.31})$$

여기서

$$W_M^{(n)} = \omega \gamma_{M-1}^{(n)}, \quad (\text{A.32})$$

$$V_M^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell, m} \phi_M + \omega \gamma_{M-1}^{(n)} \phi_M , \quad (\text{A.33})$$

$$\begin{aligned} X_M^{(n)} = & \Delta t^{(n)} H_{\ell, M} [\omega \dot{S}_M^{(n)} + (1 - \omega) \dot{S}_M^{(n-1)}] \\ & + [1 - (1 - \omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell, M} \phi_M C_M^{(n-1)} \\ & + (1 - \omega) \gamma_{M-1}^{(n)} [C_{M-1}^{(n-1)} - \phi_M C_M^{(n-1)}] , \quad (\text{A.34}) \\ & - \Delta t^{(n)} r_M^2 [\omega J_M^{(n)} + (1 - \omega) J_M^{(n-1)}] \end{aligned}$$

$$J_M^{(n)} = \text{절점 } M \text{에서의 current } (\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1})$$

이다.

Slab과 cylinder에 대해서도 구형 매질에서와 같은 방법으로 유한차분식을 구할 수 있으며, 변수의 일부가 다음과 같이 정의된다.

Slab의 경우:

$$\gamma_m^{(n)} = \Delta t^{(n)} \frac{D_m^{(n)}}{2\Delta_m} \quad (\text{A.35})$$

$$H_{\ell, m} = \Delta_{m-1} \quad (\text{A.36})$$

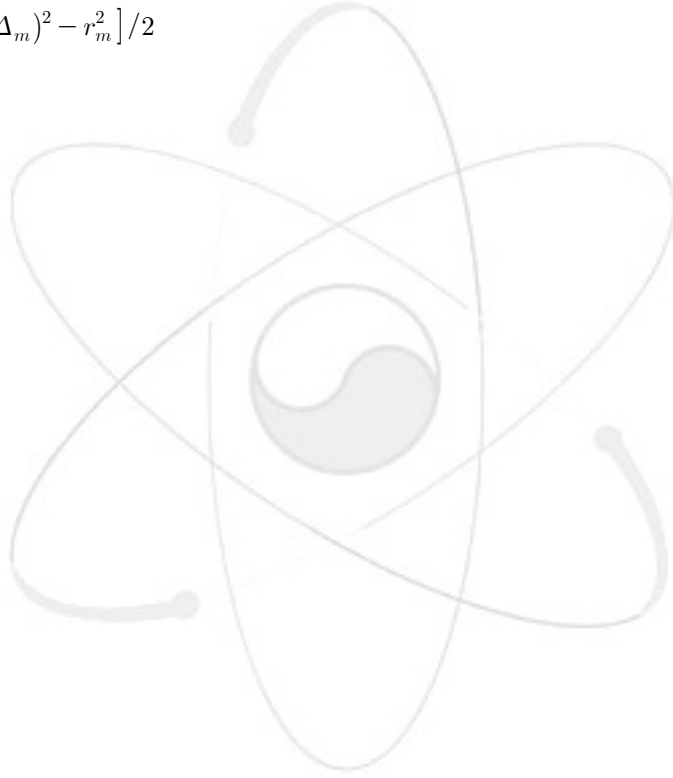
$$H_{r, m} = \Delta_m \quad (\text{A.37})$$

Cylinder의 경우:

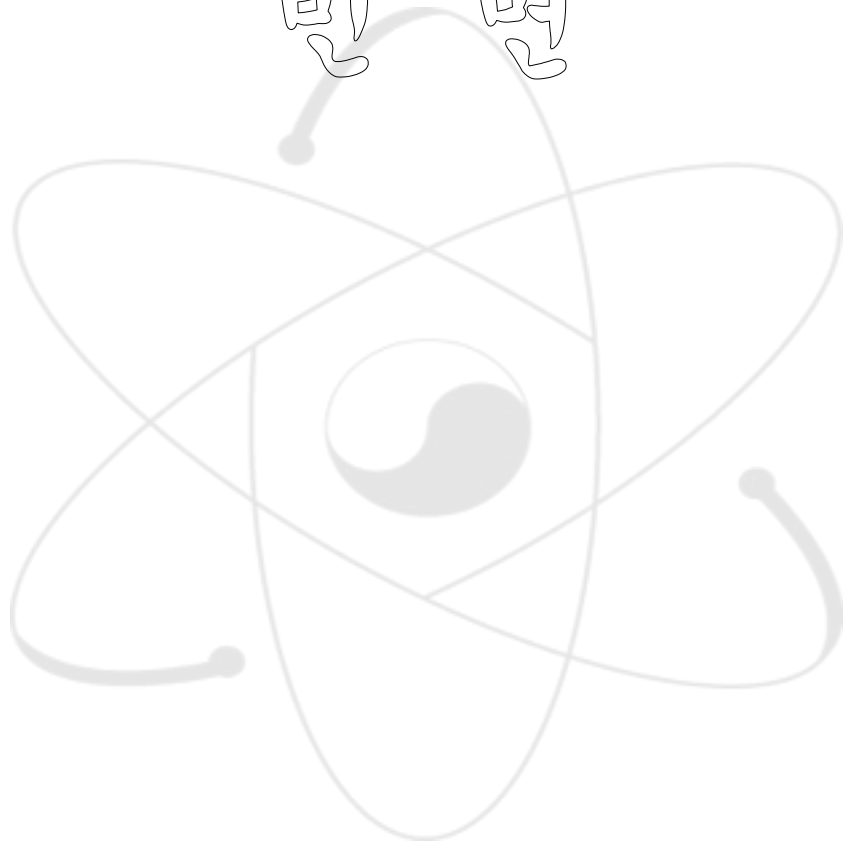
$$\gamma_m^{(n)} = \Delta t^{(n)} \frac{D_m^{(n)}}{2\Delta_m} (r_m + \Delta_m) \quad (\text{A.38})$$

$$H_{\ell,m} = [r_m^2 - (r_{m-1} + \Delta_{m-1})^2] / 2 \quad (\text{A.39})$$

$$H_{r,m} = [(r_m + \Delta_m)^2 - r_m^2] / 2 \quad (\text{A.40})$$



비명



부록 B. 흑연표면에서의 물질전달

그림 B.1과 같이 헬륨 기체에 접해있는 흑연 표면에서는 기체막이 형성된다. 그 기체막을 통하여 물질전달이 일어난다. 그 흑연 표면에서의 current는 다음과 같다.

$$J_i = h_i(C_{ai} - C_{\infty i}) , \quad (B.1)$$

여기서

$$C_{ai} = \frac{P_i}{RT} \quad (\mu\text{mol}/\text{cm}^3), \quad (B.2)$$

$$R = 8.314 \quad (\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}),$$

$$T = \text{온도 (K)},$$

$$P = \text{압력 (Pa)},$$

$$C_a = \text{기체막에서 흑연 쪽에서의 핵분열생성물 농도 } (\mu\text{mol}/\text{cm}^3),$$

$$C_{\infty} = \text{냉각재에서 핵분열생성물 농도 } (\mu\text{mol}/\text{cm}^3),$$

$$h = \text{냉각재에서 핵분열생성물의 물질전달계수 (cm/s)},$$

$$D = \text{확산계수 (cm}^2/\text{s)},$$

$$r = r\text{-좌표 (cm)},$$

$$\text{첨자 } i = \text{핵분열생성물}$$

이다.

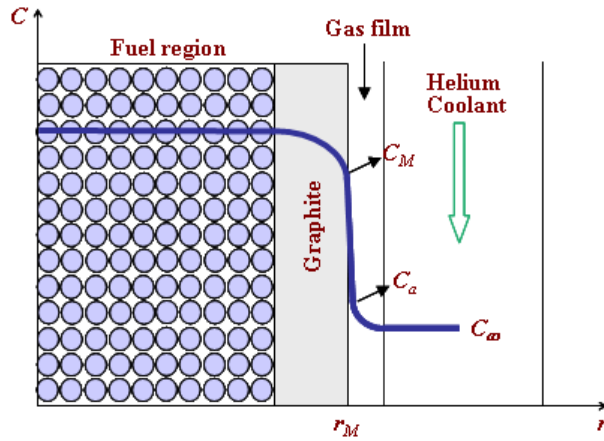


그림 B.1. 고온가스로 핵연료체에서 핵분열생성물의 농도

흑연과 냉각재의 경계면에서 흑연 표면에서의 핵분열생성물 농도와 기체막의 흑연 쪽에서의 핵분열생성물 증기압은 단성분 혹은 다성분 수착평형 (sorption isotherm)으로 다르게 표현할 수 있다.

B.1. 단성분 수착평형

흑연과 냉각재의 사이에 형성된 기체막에서 흑연 쪽에서의 핵분열생성물 증기압을 단성분 수착평형으로 나타내면 다음과 같다.

$$P = e^x \left[\left(\frac{C}{\rho} \right)^y + C_{m,t}^{y-1} \left(\frac{C}{\rho} \right) \right], \quad (B.3)$$

여기서

P = 흑연과 냉각재의 사이에 형성된 기체막에서 흑연 쪽에서의 증기압 (Pa),

C = 흑연 표면에서의 농도 ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$),

ρ = 흑연 밀도 (g/cm^3),

$C_{m,t} = e^{d_1 - d_2 T}$ = transition concentration ($\mu\text{mol}/\text{g}$),

$x = A + B/T$,

$y = G + E/T$,

T = 흑연표면의 온도 (K),

A, G, d_1 = 상수 (-),

B, E, d_2 = 상수 (K),

이다.

기체막에서 흑연 쪽의 농도는 이상기체법칙에 의해 다음과 같다.

$$C_a = \frac{P}{RT} \quad (\text{B.4})$$

흑연 표면에서의 current는 다음과 같이 변환된다.

$$J = \psi C - \chi \quad (\text{B.5})$$

여기서

$$\psi = h\zeta \quad (\text{B.6})$$

$$\zeta = \frac{e^x}{RT} \left[\frac{C^{y-1}}{\rho^y} + \frac{C_{TR}^{y-1}}{\rho} \right], \quad (\text{B.7})$$

$$\chi = h C_\infty \quad (\text{B.8})$$

이다.

B.2. 다성분 수착평형

흑연과 냉각재의 사이에 형성된 기체막의 흑연 쪽에서의 핵분열생성물의 증기압을 다성분 수착평형으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_i = P_{mono,i} \frac{C_i}{C_{mono,i}} \left(\sum_k \sum_j \frac{C_{k,j}}{C_{mono,k}} \right)^{u_i-1}, \quad (\text{B.9})$$

여기서

$$u_i = \gamma_i + \delta_i 10^3 / T, \quad (\text{B.10})$$

$$P_{mono,i} = 101325 \exp(A_i + B_i 10^3 / T), \quad (\text{B.11})$$

$$A_i = \alpha_i + \gamma_i \ln(C_{mono,i}), \quad (\text{B.12})$$

$$B_i = \beta_i + \delta_i \ln(C_{mono,i}), \quad (\text{B.13})$$

$C = C_M =$ 흑연 표면에서의 농도 ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$),
 C_{mono} = geometric monolayer concentration ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$),
 P_{mono} = C_{mono} 에 대응하는 기상(gas phase)의 압력 (Pa),
 a, β, γ, δ = Freundlich sorption isotherm parameters

이다. Freundlich sorption isotherm parameter는 표 B.1에 나타내었다.

표 B.1. Freundlich sorption isotherm parameters

Isotope	a	β	γ	δ	C_{mono} ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$)
Sr	12.8	-38.7	0.034	1.78	20.8
Ba	5.90	-34.3	0.566	3.28	20.4
Cs	26.0	-56.3	-6.3	10.5	14.0

식 (B.9)를 식 (B.4)에 대입하면 다음과 같다.

$$C_{ai} = \zeta_i C_i, \quad (\text{B.14})$$

여기서

$$\zeta_i = \frac{P_{mono,i} S^{u_i-1}}{RT C_{mono,i}}, \quad (\text{B.15})$$

$$S = \sum_k \sum_j \frac{C_{k,j}}{C_{mono,k}} \quad (\text{B.16})$$

이다. S의 하한값은 0.033이다.

식 (B.14)를 식 (B.1)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

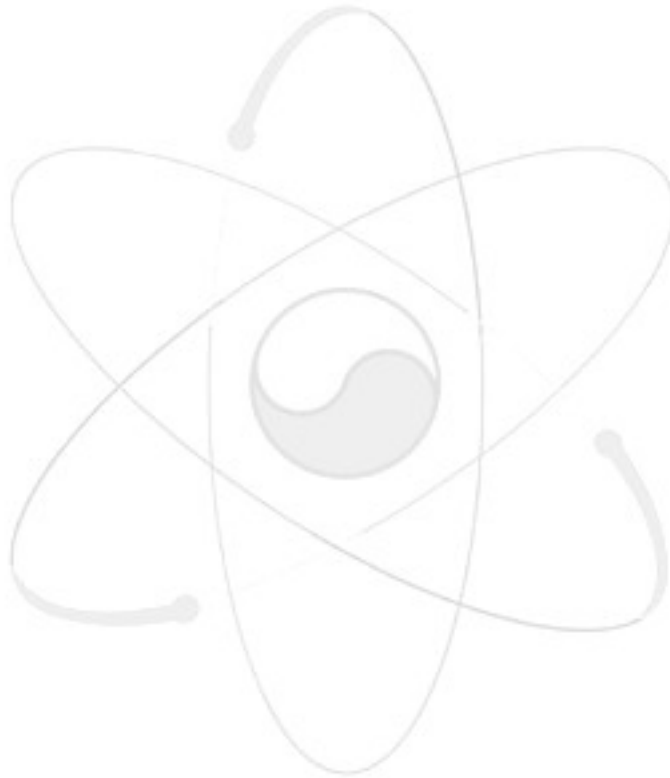
$$J_i = \psi_i C_i - \chi_i , \tag{B.17}$$

여기서

$$\psi_i = h_i \zeta_i , \tag{B.18}$$

$$\chi_i = h_i C_{\infty i} \tag{B.19}$$

이다.



부록 C. 컴팩트와 흑연구조물 사이의 gap을 통한 물질전달

컴팩트 표면과 흑연의 표면 각각에 기체막이 형성된다. 컴팩트 표면에서 핵분열생성물이 증발하여 gap으로 유입되고, 흑연 표면에서 침착하면서 gap에서 방출된다. gap에서의 농도 분포는 그림 C.1과 같다. 실제의 농도 분포는 실선과 같지만, 이 경우 기체막을 통한 물질전달을 계산하기 위해서는 기체막에서의 물질전달계수가 알려져야 한다. 보수적 계산을 위하여, gap에서의 핵분열생성물의 증기압이 흑연 및 컴팩트 표면에서의 핵분열생성물 농도와 동시에 수직평형을 이루고 있다고 가정한다. 이 평형모델에서는 물질전달계수가 필요하지 않다.

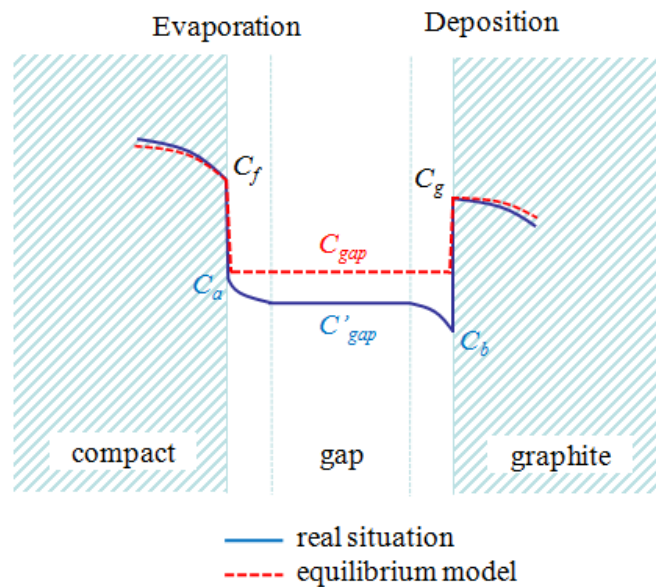


그림 C.1. 컴팩트 및 흑연구조물 사이의 gap에서의 핵분열생성물의 농도

C.1. 수착평형조건

Gap에서 핵분열생성물의 증기압은 컴팩트 및 흑연 표면에서의 핵분열생성물 농도와 동시에 수착평형에 있다고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{gap} = e^{x_f} (C_{m,f}^{y_f} + C_{m,t,f}^{y_f-1} C_{m,f}) = e^{x_g} (C_{m,g}^{y_g} + C_{m,t,g}^{y_g-1} C_{m,g}) , \quad (C.1)$$

여기서

P_{gap} = gap에서의 기체압 (Pa),

C_m = mass concentration ($\mu\text{mol/g}$) = C/ρ ,

C = volume concentration ($\mu\text{mol/cm}^3$),

ρ = 밀도 (g/cm^3),

$C_{m,t} = e^{d_1 - d_2 T}$ = transition concentration ($\mu\text{mol/g}$),

$x = A + B/T$,

$y = G + E/T$,

T = 온도 (K),

A, G, d_1 = 상수 (-),

B, E, d_2 = 상수 (K),

첨자 f = 컴팩트,

첨자 g = 흑연

이다.

컴팩트 표면에서의 농도는 흑연 표면에서의 농도의 함수로 표현할 수 있다.

$$C_f = C_f(C_g) . \quad (C.2)$$

식 (C.2)를 Taylor 전개하면 다음과 같다.

$$C_f^{(k)} - aC_g^{(k)} = b , \quad (C.3)$$

여기서

$$a = \left(\frac{dC_f}{dC_g} \right)^{(k-1)} , \quad (C.4)$$

$$b = C_f^{(k-1)} - aC_g^{(k-1)} , \quad (C.5)$$

$$\frac{dC_f}{dC_g} = \frac{\rho_f e^{x_g} (y_g C_{m,g}^{y_g-1} + C_{mt,g}^{y_g-1})}{\rho_g e^{x_f} (y_f C_{m,f}^{y_f-1} + C_{mt,f}^{y_f-1})} , \quad (C.6)$$

$k =$ iteration number

이다.

C.2. 물질수지

Gap 내부에서의 핵분열생성물의 변화량은 다음과 같다.

$$\int_{V_{gap}} \frac{\partial C_{gap}}{\partial t} dV_{gap} = J_f A_f - J_g A_c - \lambda \int_{V_{gap}} C_{gap} dV_{gap} , \quad (C.7)$$

여기서

$t =$ 시간 (s),

$V_{gap} =$ gap의 부피 (cm^3),

$dV_{gap} = dr \cdot 1.1$ (cm^3),

$r = r$ 좌표 (cm),

$J =$ current ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$),

$A_f =$ 컴팩트 표면적의 1/6 (cm^2),

$r_f =$ 컴팩트의 반지름 (cm),

$A_c =$ 냉각재 통로 표면적의 1/12 (cm^2),

$r_c =$ 냉각재 통로의 반지름 (cm),

$\lambda =$ 붕괴상수 (s^{-1})

이다. 식 (C.7)의 적분항을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{dC_{gap}}{dt} V_{gap} = J_f A_f - J_g A_c - \lambda C_{gap} V_{gap} . \quad (C.8)$$

다시 식 (C.8)을 유한차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A_f J_f^{(n)} - A_c J_g^{(n)} = \frac{X}{\omega \Delta t^{(n)}} , \quad (\text{C.9})$$

여기서

(n) = time step,

$$X = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] V_{gap} C_{gap}^{(n)} - [1 + (1 - \omega) \Delta t^{(n)} \lambda] V_{gap} C_{gap}^{(n-1)} - (1 - \omega) \Delta t^{(n)} [A_f J_f^{(n-1)} - A_c J_g^{(n-1)}] , \quad (\text{C.10})$$

$$C_{gap}^{(n)} = \frac{P_{gap}^{(n)}}{RT_{gap}} \quad (\text{C.11})$$

이다. 식 (C.11)에서 gap에서의 핵분열생성물의 증기압은 식 (C.1)을 이용하여 계산할 수 있다.

C.3. 컴팩트 및 흑연 표면에서의 유한차분식

그림 C.2에 gap 주변의 유한차분구간을 나타내었다.

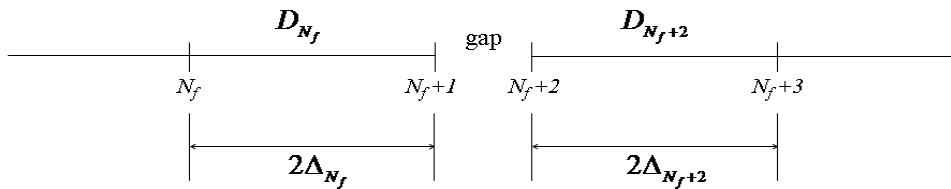


그림 C.2. gap 주변의 유한차분구간

Gap 주변에서 핵분열생성물의 이동은 다음과 같이 Fick 확산식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = \dot{S}(r,t) - \lambda C(r,t) + \frac{1}{r^z} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^z D(C,r,t) \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right] , \quad (\text{C.12})$$

여기서

$$z = \begin{cases} 1, & r \leq r_{N_f+1} \\ 0, & r \geq r_{N_f+2} \end{cases} , \quad (\text{C.13})$$

$C(r,t)$ = 핵분열생성물의 농도 ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$),

$S(r,t)$ = 선원항 ($\mu\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1}$),

$D(C,r,t)$ = 확산계수 (cm^2/s)

이다.

식 (C.12)를 $r_{N_f} + \Delta_{N_f}$ 에서 r_{N_f+1} 까지 부피에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} r \frac{\partial C}{\partial t} dr = \int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} r \dot{S} dr - \lambda \int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} r C dr + \int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) dr . \quad (\text{C.14})$$

식 (C.14)의 각 항을 전개하면 다음과 같다.

$$\int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} r \frac{\partial C}{\partial t} dr \approx H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} \frac{dC_{N_f+1}}{dt} , \quad (\text{C.15})$$

$$\int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} r \dot{S} dr \approx H_{\ell, N_f+1} \dot{S}_{N_f+1} , \quad (\text{C.16})$$

$$\lambda \int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} r C dr \approx \lambda H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} C_{N_f+1} , \quad (\text{C.17})$$

$$\begin{aligned} & \int_{r_{N_f} + \Delta_{N_f}}^{r_{N_f+1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) dr \\ & \approx -r_{N_f+1} J_{N_f+1} - \frac{D_{N_f}}{2\Delta_{N_f}} (r_{N_f} + \Delta_{N_f}) (\phi_{N_f+1} C_{N_f+1} - C_{N_f}) , \end{aligned} \quad (\text{C.18})$$

여기서

$$H_{\ell, N_f+1} = [r_{N_f+1}^2 - (r_{N_f} + \Delta_{N_f})^2] / 2 , \quad (\text{C.19})$$

$$(C.20) \quad C_{N_f+1} = C_{N_f+1}^+ = C_{N_f+1}^- / \phi_{N_f+1} ,$$

$C_{N_f+1}^+$ = 절점 N_f+1 에서 오른편의 농도,

$C_{N_f+1}^-$ = 절점 N_f+1 에서 왼편의 농도,

ϕ_{N_f+1} = 절점 N_f+1 에서의 분배계수

이다. 식 (C.15)에서 식 (C.18)을 식 (C.14)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} \frac{dC_{N_f+1}}{dt} &= H_{\ell, N_f+1} \dot{S}_{N_f+1} - \lambda H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} C_{N_f+1} \\
&\quad - \frac{D_{N_f}}{2\Delta_{N_f}} (r_{N_f} + \Delta_{N_f}) (\phi_{N_f+1} C_{N_f+1} - C_{N_f}) - r_{N_f+1} J_{N_f+1}
\end{aligned} \quad . \quad (C.21)$$

식 (C.21)을 시간에 대해서 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} \frac{C_{N_f+1}^{(n)} - C_{N_f+1}^{(n-1)}}{\Delta t^{(n)}} \\
&= H_{\ell, N_f+1} \left[\omega \dot{S}_{N_f+1}^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_{N_f+1}^{(n-1)} \right] \\
&\quad - \lambda H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} \left[\omega C_{N_f+1}^{(n)} + (1-\omega) C_{N_f+1}^{(n-1)} \right] \\
&\quad + \frac{D_{N_f}^{(n)}}{2\Delta_{N_f}} (r_{N_f} + \Delta_{N_f}) \left[\omega C_{N_f}^{(n)} + (1-\omega) C_{N_f}^{(n-1)} \right] \\
&\quad - \frac{D_{N_f}^{(n)}}{2\Delta_{N_f}} (r_{N_f} + \Delta_{N_f}) \phi_{N_f+1} \left[\omega C_{N_f+1}^{(n)} + (1-\omega) C_{N_f+1}^{(n-1)} \right] \\
&\quad - r_{N_f+1} \left[\omega J_{N_f+1}^{(n)} + (1-\omega) J_{N_f+1}^{(n-1)} \right]
\end{aligned} \quad (C.22)$$

식 (C.22)를 정리하면 다음과 같은 유한차분식을 얻을 수 있다.

$$- W_{N_f+1}^{(n)} C_{N_f}^{(n)} + V_{N_f+1}^{(n)} C_{N_f+1}^{(n)} + \omega \Delta t^{(n)} r_{N_f+1} J_{N_f+1}^{(n)} = X_{N_f+1}^{(n)} \quad , \quad (C.23)$$

여기서

$$W_{N_f+1}^{(n)} = \omega \gamma_{N_f}^{(n)} \quad , \quad (C.24)$$

$$V_{N_f+1}^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} + \omega \gamma_{N_f}^{(n)} \phi_{N_f+1} \quad , \quad (C.25)$$

$$\begin{aligned}
X_{N_f+1}^{(n)} = & \Delta t^{(n)} H_{\ell, N_f+1} \left[\omega \dot{S}_{N_f+1}^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_{N_f+1}^{(n-1)} \right] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{\ell, N_f+1} \phi_{N_f+1} C_{N_f+1}^{(n-1)} \\
& + (1-\omega) \gamma_{N_f}^{(n)} \left[C_{N_f}^{(n-1)} - \phi_{N_f+1} C_{N_f+1}^{(n-1)} \right] \\
& - (1-\omega) \Delta t^{(n)} r_{N_f+1} J_{N_f+1}^{(n-1)} \quad , \tag{C.26}
\end{aligned}$$

$$\gamma_{N_f}^{(n)} = \Delta t^{(n)} \frac{D_{N_f}^{(n)}}{2\Delta_{N_f}} (r_{N_f} + \Delta_{N_f}) \tag{C.27}$$

이다.

같은 방법으로 식 (C.12)를 r_{N_f+2} 에서 $r_{N_f+2} + \Delta_{N_f+2}$ 까지 부피에 대하여 적분하면 다음과 같은 유한차분식을 얻을 수 있다.

$$V_{N_f+2}^{(n)} C_{N_f+2}^{(n)} - U_{N_f+2}^{(n)} C_{N_f+3}^{(n)} - \omega \Delta t^{(n)} J_{N_f+2}^{(n)} = X_{N_f+2}^{(n)} \quad , \tag{C.28}$$

여기서

$$V_{N_f+2}^{(n)} = [1 + \omega \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r, N_f+2} + \omega \gamma_{N_f+2}^{(n)} \quad , \tag{C.29}$$

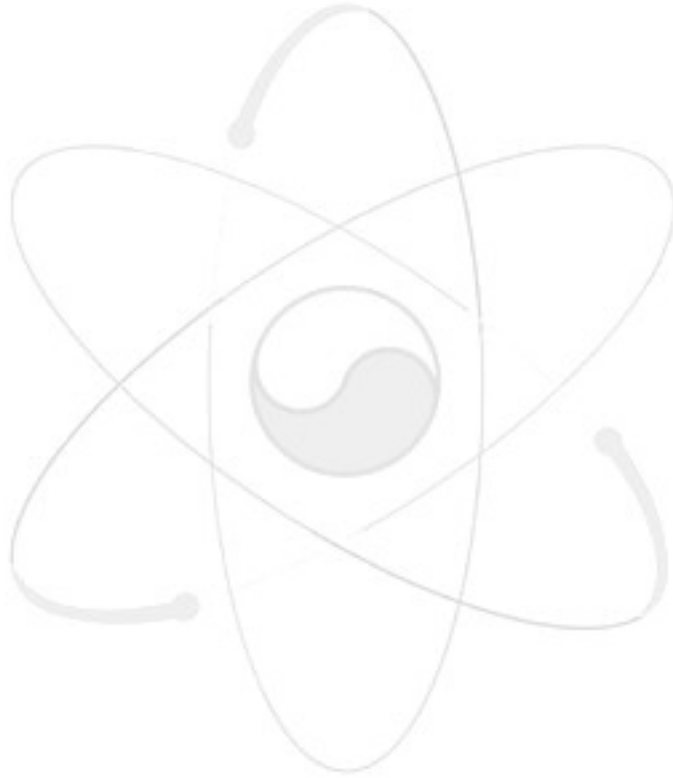
$$U_{N_f+2}^{(n)} = \omega \gamma_{N_f+2}^{(n)} \phi_{N_f+3} \quad , \tag{C.30}$$

$$\begin{aligned}
X_{N_f+2}^{(n)} = & \Delta t^{(n)} H_{r, N_f+2} \left[\omega \dot{S}_{N_f+2}^{(n)} + (1-\omega) \dot{S}_{N_f+2}^{(n-1)} \right] \\
& + [1 - (1-\omega) \Delta t^{(n)} \lambda] H_{r, N_f+2} C_{N_f+2}^{(n-1)} \\
& - (1-\omega) \gamma_{N_f+2}^{(n)} \left[C_{N_f+2}^{(n-1)} - \phi_{N_f+3} C_{N_f+3}^{(n-1)} \right] \\
& + (1-\omega) \Delta t^{(n)} J_{N_f+2}^{(n-1)} \quad , \tag{C.31}
\end{aligned}$$

$$H_{r, N_f+2} = \Delta_{N_f+2} \quad , \quad (C.32)$$

$$\gamma_{N_f+2}^{(n)} = \Delta t^{(n)} \frac{D_{N_f+2}^{(n)}}{2\Delta_{N_f+2}} \quad (C.33)$$

이다.



부록 D. 헬륨에서 핵분열생성물의 물질전달계수

헬륨 냉각재에서 핵분열생성물 i 의 확산계수는 다음과 같다.

$$D_i = D_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1.65} \left(\frac{P_{ref}}{P} \right) \left(\frac{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_{He}}}{\frac{1}{M_{ref}} + \frac{1}{M_{He}}} \right)^{1/2}, \quad (D.1)$$

$$= 8.984 \frac{T^{1.65}}{P} \left(\frac{1}{M_i} + 0.25 \right)^{1/2}$$

여기서

$D_{ref} = 0.1682 = 1 \text{ atm}, 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 확산계수 (cm^2/s),

$T_{ref} = 1000 \text{ (K)}$,

$P_{ref} = 23.83 \times 10^{13} \text{ (Pa)}$,

$M_{ref} = 137 \text{ (g/mol)}$,

$T = \text{냉각재 온도 (K)}$,

$P = \text{전압 (Pa)}$,

$M = \text{핵분열생성물의 분자량 (g/mol)}$,

첨자 i 는 핵분열생성물

이다.

튜브 속의 환상유동(annular flow)에서 강제대류에 의한 핵분열생성물의 물질전달 계수는 다음과 같다.

$$h_i = \begin{cases} 3.66 \frac{D_{He,i}}{d_c} & \text{for } Re < 2100 \text{ and } \frac{L}{d_c Re Sc} \geq 0.7 \\ 1.86 \left(\frac{d_c}{L}\right)^{0.33} Re^{0.33} Sc^{0.33} \frac{D_{He,i}}{d_c} & \text{for } Re < 2100 \text{ and } \frac{L}{d_c Re Sc} < 0.7 \\ 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.44} \frac{D_{He,i}}{d_c} & \text{for } Re \geq 2100 \end{cases}, \quad (D.2)$$

여기서

h = 헬륨 냉각재에서 핵분열생성물의 물질전달계수 (cm/s),

D_{He} = 헬륨 냉각재에서 핵분열생성물의 확산계수 (cm²/s),

d_c = 냉각재 통로의 수력학적 지름 (cm),

L = hydrodynamic entry length (cm),

Re = Reynolds number,

Sc = Schmidt number

이다. Reynolds number와 Schmidt number는 각각 다음과 같다.

$$Re = \frac{d_c v \rho}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi d_c \mu}, \quad (D.3)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{He,i}}, \quad (D.4)$$

여기서

v = 냉각재 유속 (cm/s),

ρ = 냉각재 밀도 (g/cm³),

μ = 냉각재 동적 점도 (g cm⁻¹ s⁻¹),

\dot{m} = 냉각재 질량 유속 (g/s)

이다. 헬륨 냉각재의 동적점도는 다음과 같다.

$$\mu = 5.31 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{1273} \right)^{0.678} \quad (\text{D.5})$$

이다.

PBR의 페블에서 냉각재로의 핵분열생성물의 물질전달계수는 다음과 같다.

$$h_i = \frac{Sh D_{He,i}}{d_{pebble}}, \quad (\text{D.6})$$

여기서

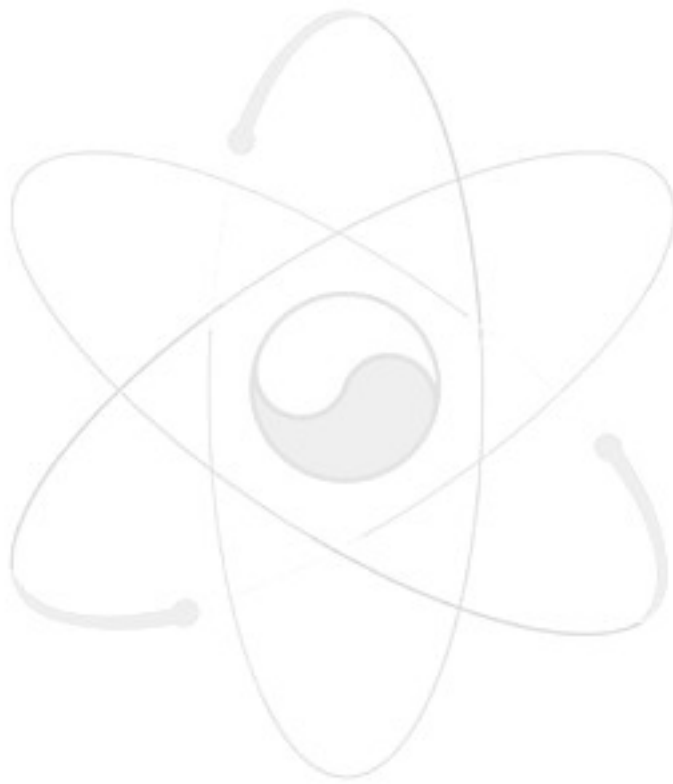
d_{pebble} = pebble의 지름 (cm),

Sh = Sherwood number

이다. Sherwood number는 다음과 같다.

$$Sh = 1.27 \frac{Sc^{1/3}}{\epsilon^{1.18}} Re^{0.36} + 0.033 \frac{Sc^{1/2}}{\epsilon^{1.07}} Re^{0.86}, \quad (\text{D.7})$$

여기서 ε 는 페블층 (pebble bed)의 공극률 (void fraction)이다.



부록 E. Line inversion 법에 의한 삼중 대각방정식계의 해

삼중 대각방정식계 (a system of tridiagonal algebraic equations)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_1 C_1 - U_1 C_2 = X_1 , \quad (\text{E.1})$$

$$-W_m C_{m-1} + V_m C_m - U_m C_{m+1} = X_m, \quad m = 2, 3, \dots, M-1 , \quad (\text{E.2})$$

$$-W_M C_{M-1} + V_M C_M = X_M . \quad (\text{E.3})$$

식 (E.1)에서 (E.3)의 양변을 V 로 나누고 정리하면 다음과 같다.

$$C_M = F_M , \quad (\text{E.4})$$

$$C_m = E_m C_{m+1} + F_m, \quad m = M-1, M-2, \dots, 2, 1 , \quad (\text{E.5})$$

여기서

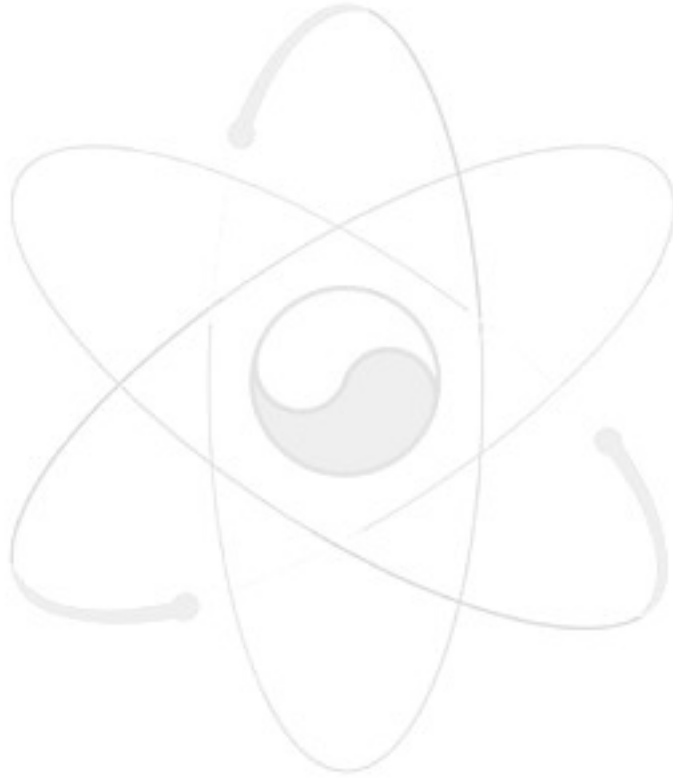
$$E_1 = U_1 / V_1 , \quad (\text{E.6})$$

$$F_1 = X_1 / V_1 , \quad (\text{E.7})$$

$$E_m = \frac{U_m}{V_m - W_m E_{m-1}}, \quad m = 2, 3, \dots, M-1, \quad (\text{E.8})$$

$$F_m = \frac{X_m + W_m F_{m-1}}{V_m - W_m E_{m-1}}, \quad m = 2, 3, \dots, M \quad (\text{E.9})$$

이다.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3649/2008					
제목 / 부제	핵분열생성물 방출 해석코드 COPA-FPREL 개발				
연구책임자 및 부서명 (AR, TR 등의 경우 주저자)	김영민 (수소생산원자로기술개발부)				
연구자 및 부서명	김연구, 오승철, 정경채, 김용기, 조문성, 이영우 (이상 수소생산원자로기술개발부)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2008. 11.
페이지	78 p.	도표	있음(○), 없음()	크기	가로 210mm × 세로 297mm
참고사항					
공개여부	공개(○), 비공개()		보고서종류	기술보고서	
비밀여부	대외비(), _ 급비밀				
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄 내외)	<p>고온가스로 핵연료에서의 핵분열생성물 방출을 계산하는 컴퓨터 프로그램 COPA-FPREL을 개발하였다. COPA-FPREL은 유한차분법을 이용하여 핵분열생성물의 피복입자 및 핵연료체 내에서 확산 그리고 냉각재로의 방출을 계산한다. 핵연료입자의 연료핵, 완충층, 세 개의 피복층은 각각 일정 개수의 유한차분구간으로 나눈다. 그 각 구간에 생성물을 포함하는 Fick 확산식을 적용하였다. 파손된 피복층에서의 확산은 그 확산계수로 큰 수를 할당하여 표현하였다. 핵연료체 또한 일정 개수의 유한차분구간으로 나누어서, Fick 확산식을 적용하였다. 컴팩트와 후연구구조물 사이의 gap에 접한 표면, 냉각재와 접해있는 핵연료체의 표면에 수차평형을 적용하였다. 가열 및 조사 조건에서 핵종 ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{110}\text{Ag}^m$이 연료입자, 페블, 육각블럭에서 방출되는 분율을 계산하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	COPA-FPREL, 핵분열생성물 방출, 핵분열생성물 확산, 피복입자, TRISO, 핵연료체				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-3649/2008				INIS Subject Code	
Title / Subtitle		Development of a Fission Products Release Analysis Code COPA-FPREL			
Project Manager and Department (or Main Author)		Young Min KIM (Nuclear Hydrogen Reactor Technology Development Division)			
Researcher and Department		Yeon Ku KIM, Seung Chul Oh, Kyung Chai JEONG, Woong Ki KIM, Moon Seong CHO, Young Woo LEE (Nuclear Hydrogen Reactor Technology Development Division)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2008. 11.
Page	78 p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ()	Size	210 mm × 297 mm
Note					
Open	Open(○), Closed()		Report Type	Technical report	
Classified	Restricted(), ___Class Document				
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>A computer code, COPA-FPREL, has been developed to estimate the releases of fission products from a high temperature gas-cooled reactor (HTGR) fuel under normal and accident conditions. The COPA-FPREL code treats the migration of fission product in a coated fuel particle and a fuel element, and the leakage into a coolant using a finite difference method. In the finite difference method, the kernel, buffer and the coating layers of a coated fuel particle are divided into small intervals, respectively. A Fickian diffusion equation including birth rates is applied to the intervals. The fuel element is also divided into various small intervals, respectively. A Fickian diffusion equation including source terms is applied to the intervals. For the isotopes ^{137}Cs, ^{90}Sr and $^{110}\text{Ag}^m$, the fractional releases from a TRISO-coated fuel particle, a pebble and a fuel block under heating and irradiation were calculated using the COPA-FPREL.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		COPA-FPREL, fission product release, fission product diffusion, coated particle, TRISO, fuel element			