



KR9900040

KAERI/TR - 1035/98

기술보고서  
조사시험용 DUPIC 핵연료 온도분석

1998. 4.

한국원자력연구소

30 - 40

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “조사시험용 DUPIC 핵연료 온도분석”의 기술보고서로 제출합니다.

1998. 4.

과제명 : DUPIC 핵연료 조사시험 및 성능평가

주저자 : 배기광

참여자 : 정인하, 박희성, 이철용, 이영순,

문제선, 강권호, 이도연,

양명승, 박현수

책임감수위원 : 서인석

감 수 위 원 : 이영우

## SUMMARY

With respect to the irradiation plan of DUPIC pellets in HANARO, the conceptual design of DUPIC irradiation pellets with double cladding has been carried out. Based upon the conceptual design of the pellet, the preliminary analysis of the temperature effect on the design and manufacturing parameters of DUPIC pellets through code calculation was performed by the use of HEATING and GENGTC.

The analysed results of the newly designed DUPIC pellets to be irradiated in HANARO revealed that, 1) thermal conductivity of fuel, linear power of fuel and axial gap affected greatly the temperature of fuel and 2) thickness of sheath, gamma heating rate and thermal transfer coefficient affected little the temperature of fuel also, 3) the centerline temperature calculated by HEATING was evaluated higher than that by GENGTC such presented to be desiralde for using GENGTC in the view point of safety GENGTC, 4) by transient thermal analysis, after 160 seconds, the temperature of fuel reaches its equivalent temperature.

## 요약

DUPIC 핵연료 소결체의 하나로 조사시험과 관련하여 이중 피복관으로 구성된 소결체 설계를 수행하였으며 각각의 설계 변수 및 제조 변수가 핵연료의 온도분포에 미치는 영향을 HEATING과 GENGTC를 이용하여 예비분석을 수행하였다.

하나로에서 조사할 DUPIC 핵연료 assembly의 설계해석을 통하여 분석한 결과, 1) DUPIC 핵연료의 조사시험시 열전도도, 출력, 반경 틸새 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치며, 2) 피복재 두께, gamma 열, 열전달 계수 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치지 않는다. 3) HEATING으로 계산한 핵연료의 중심온도가 GENGTC로 계산한 중심온도보다 다소 높게 얻어 안전성의 관점에서 볼때 GENGTC보다 HEATING을 이용하는 것이 바람직하며, 4) Transient 온도 분석의 경우 약 160초 이상의 시간에서 평형 온도에 도달한다.

# 목 차

SUMMARY .....	i
요약 .....	ii
목 차 .....	iii
표 목 차 .....	v
그림목차 .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 본 론 .....	2
1. 핵연료 설계 .....	2
1.1 소결체 설계 .....	2
1.1.1 성분 .....	2
1.1.2 치수 .....	3
1.2 mini-element 설계 .....	3
1.3 핵연료 assembly 설계 .....	4
2. 핵연료 설계 분석 .....	4
2.1 설계 분석의 기본사항 .....	4
2.1.1 열전도도 .....	5
2.1.2 스텐레스강 표면에서의 강제 열전달 계수 .....	5
2.1.3 Zircaloy와 스텐레스강에서의 발열량 .....	5
2.1.4 소결체의 발열량 .....	6
2.2 설계 분석 .....	6
2.2.1 열전도도 .....	7
2.2.2 간격 .....	7
2.2.2.1 핵연료와 zircaloy 피복관 사이의 간격 .....	7
2.2.2.2 Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 사이의 간격 .....	8
2.2.3 gamma 열 .....	9
2.2.4 radiation and natural convection .....	9
2.2.5 피복재의 두께 .....	9

2.2.6 열팽창 .....	10
2.2.7 Forced convection .....	10
2.2.8 출력 .....	11
2.2.9 계산 방법 .....	11
2.2.10 HEATING과 GENGTC .....	12
2.2.11 Transient 분석 .....	12
제 3 장 결 론 .....	33
첨부 1. 노내조사시험 개요 .....	34
첨부 2. HEATING7.2f의 input 및 output 분석 .....	39
첨부 3. HEATING7.2f의 입력 요약표 .....	49
첨부 4. 표준조건의 HEATING7.2f Input .....	50
첨부 5. 표준조건의 HEATING7.2f의 Output .....	52
첨부 6. GENGTC 분석 .....	61
첨부 7. 표준 GENGTC 입력 .....	65
첨부 8. 표준 GENGTC 출력 .....	67

## 표 목 차

표 1. DUPIC 소결체 조사시험 계획 개요 .....	14
표 2. 핵연료 assembly의 기본 설계 사양 .....	15
표 3. 설계 분석에 의한 온도분포 요약 .....	16

## 그림목차

그림 1. 계산에 이용된 도식적인 mini-element 설계 .....	17
그림 2. 핵연료 assembly .....	18
그림 3. 핵연료의 열전도도의 영향 .....	19
그림 4. 핵연료와 zircaloy 간격의 영향 .....	20
그림 5. 핵연료와 zircaloy 간격의 영향 .....	21
그림 6. Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 간격의 영향 .....	22
그림 7. Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 간격의 영향 .....	23
그림 8. Gamma 열의 영향 .....	24
그림 9. Radiation 및 convection의 영향 .....	25
그림 10. Zircaloy 피복관 두께의 영향 .....	26
그림 11. 열팽창의 영향 .....	27
그림 12. 열전달 계수의 영향 .....	28
그림 13. 핵연료 출력의 영향 .....	29
그림 14. SOR 방법에 의한 zircaloy 피복관과 스텐레스강 간격의 온도 분포 .....	30
그림 15. 그림 14의 확대한 결과 .....	31
그림 16. Transient 온도 분석 .....	32



## 제 1 장 서 론

DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel in CANDU reactors) 핵연료 개발은 캐나다 및 미국과 국제공동연구로 수행 중에 있으며 핵연료 가공 및 성능의 실험적 검증 연구도 수행 중에 있다. 이에 따라서 실험적 검증을 위한 조사시험의 필요성이 제기되어 현재 KAERI 에서도 그 준비를 하고 있다.

DUPIC 핵연료의 조사시험 계획은 “DUPIC 핵연료 조사시험 계획 기술 분석” 기술보고서(KAERI/TR-919/97)에 정리하였다. 이 중 소결체 조사시험과 관련한 조사시험 일정은 표 1과 같으며, 각각의 조사시험에 관한 내용은 부록에 첨부하였다.

본 보고서에서는 capsule을 이용한 소결체의 노내조사시험의 예비단계로서 각각의 조사시험용 소결체 설계에 따른 온도분석을 수행하였다. 이 결과는 실제 소결체의 조사시험에서 예측되는 설계 및 가공변수의 영향을 간접적으로 평가할 수 있어 소결체의 설계에 반영할 예정이다. 또한 분석을 위한 S/W인 HEATING과 GENGTC의 간단한 비교를 통하여 조사중 소결체의 온도분석 방법을 정립하고자 하였다.

## 제 2 장 본 론

### 1. 핵연료 설계

시험핵연료를 조사하기 위해서는 사전에 예비적으로 여러 가지 해석과 분석, 실험 및 인허가를 받아야 하는데 본 보고서에서는 조사시험을 위한 DUPIC 핵연료의 설계와 조사중에 예상되는 DUPIC 핵연료의 온도를 분석하였다.

소결체 5개를 한 개의 mini-element로 구성되는 것하고 상단에 핵분열 가스의 포집을 위하여 plenum을 구성하였다. plenum에는 스프링을 삽입하여 이동이나 운전 중에 소결체가 이동하는 것을 최소화하도록 하였다.

5개의 소결체와 스프링은 피복재에 삽입되고 양쪽 끝을 봉단마개 용접으로 밀봉한다. 봉단마개의 상세설계는 mini-element의 장착에 관계되므로 캡슐에 삽입되는 부위의 상세설계와 더불어 완성될 예정이며 예비설계 단계에서는 단순화하였다.

#### 1.1 소결체 설계

##### 1.1.1 성분

DUPIC 핵연료의 조사시험에 사용될 소결체는 천연 이산화우라늄, SIMFUEL 및 DUPIC 핵연료의 3 종류이다. 이들 소결체는 하나로 위치 및 조성에 따라서 출력이 달라지는데 KAERI/TR-919/97에서 분석한 바에 의하면 3개의 mini-element를 동시에 조사할 때 CT에서 DUPIC 핵연료의

출력은 113.37 kw/m으로 예상되며 1.2%의 5개 이산화우라늄 소결체의 경우는 91.95 kw/m의 출력이 예상되었다. 이때의 DUPIC 핵연료는 reference DUPIC 핵연료를 기준으로 하였다.

조사공의 위치에 따라 출력이 변하는데 다른 종류의 소결체와 조사공에 대한 대략의 계산이 가능하므로 본 보고서에서는 예비 출력 분석 결과를 활용하여 45 kw/m의 선출력을 기준으로 분석하였고 정밀한 분석은 추후에 수행할 예정이다.

### 1.1.2 치수

소결체의 치수는 열분석에서 매우 중요한데 본 보고서에서 사용한 소결체는 직경 12.154mm의 CANDU-6 소결체의 제원을 이용하였다. 향후에 수행될 정밀 분석에서는 핵연료의 출력을 고려하여 직경을 수정할 가능성도 있으나 가능하면 CANDU-6의 설계를 이용할 계획이다. 길이는 이번 수행한 결과에는 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않았다.

### 1.2 mini-element 설계

기본적으로 mini-element는 CANDU-6의 연료봉 사양을 충족하도록 하였다. 또한 안전성을 고려하여 2중 피복을 고려하였다. 1차 피복재는 zircaloy-4로서 두께는 0.419mm이며 핵연료와의 간격은 0.0445mm로 하였다. 2차 피복은 두께 0.5 mm의 스텐레스강으로 하였고 1차 피복관과의 간격을 0.1mm로 하였다. 소결체 5개를 1 개의 mini-element에 장전하며 내부에 알루미늄 스페이서와 스프링을 삽입한다. 압력 증가의 완충용으로 plenum을 고려하였고 내부는 He을 충전한다. mini-element의 도식적인

설계를 그림 1에 표시하였다.

### 1.3 핵연료 assembly 설계

핵연료 assembly는 3개의 mini-element로 구성되며 각각의 mini-element는 쉽게 탈착이 되도록 구성하였다. 3 개의 mini-element는 냉각수에 의해 직접 냉각되도록 구성하며 전체 assembly의 유지를 위하여 3 개의 지지봉과 2 개의 양단 접합판으로 고정한다. assembly의 설계도를 그림 2에 나타내었다.

## 2. 핵연료 설계 분석

### 2.1 설계 분석의 기본사항

본 보고서의 설계 검토에서는, 하나로 장전시의 출력과 부자재의 감마열 등의 값은 하나로에서 예비 분석한 자료를 토대로 하였으며 선출력 450 W/cm일 경우에서의 온도 분포를 분석하였다. 따라서 조사공의 위치나 핵연료의 종류에 무관하게 계산하였으며 이 계산 값은 추후에 하나로에서의 조사위치가 결정되면 출력의 백분율 비로 표시될 수 있도록 하였다. DUPIC 핵연료 assembly설계의 기본적인 사양을 표 2에 요약하였다.

분석 코드는 주로 HEATING 7.2f를 이용하였으며 cylindrical coordinate로서 대칭성을 고려하여 r(반경)에 따른 온도 분포를 구하였다. 열팽창을 고려하여 GENGTC를 열팽창을 고려하여 활용하였다.

분석에서는 조사핵연료 assembly가 3개의 mini-element로 구성되어 있으나 각각의 mini-element 주위로 냉각수가 흐르므로 1개의

mini-element에 대해서만 분석을 수행하였다.

### 2.1.1 열전도도

설계에 사용된 물질로서 열전달에 관여하는 재료로는 핵연료, zircaloy, He, 스텐레스강 등이 있는데, 핵연료의 열전도도  $k(W/cm^{\circ}C)$ 는

$$K_{Fuel} = 0.04154 - 3.32 \times 10^{-5}T + 2.21 \times 10^{-8}T^2 - 8.90 \times 10^{-12}T^3 + 1.75 \times 10^{-15}T^4$$

를 이용하였다.(여기서, T는 섭씨 온도이다.)

zircaloy의 열전도도는

$$K_{Zir} = 0.11 + 0.154 \times 10^{-3}T - 0.509 \times 10^{-6}T^2 + 0.156 \times 10^{-8}T^3 - 0.121 \times 10^{-11}T^4$$

를 이용하였고, He의 열전도도는

$$K_{He} = 0.143 \times 10^{-2} + 0.325 \times 10^{-5}T - 0.768 \times 10^{-9}T^2$$
를 이용하였다

스텐레스강의 열전도도로는

$$K_{Ss} = 0.149 + 0.128 \times 10^{-3}T$$
을 사용하였다.

상기 사용된 식들은 일반적인 값을 나타내므로 DUPIC 핵연료의 열전도도와 가장 근접 하다고 판단되는 값으로 향후에 계속 보완을 해야하며 조사로 인한 변화는 무시하였다.

### 2.1.2 스텐레스강 표면에서의 강제 열전달 계수

경계조건으로서 forced convection에 의한 열전달계수는  $27,000w/m^2^{\circ}C$ 를 사용하였으며 냉각수의 온도는  $50^{\circ}C$ 로 하였다.

또한 natural convection과 radiation에 의한 열전달은

### 2.1.3 Zircaloy와 스텐레스강에서의 발열량

발열량으로 두 재료 모두  $60 \text{ w/cm}^3$ 를 사용하였다. zircaloy의 밀도는  $6.5\text{g/cm}^3$ 이며 스텐레스강의 밀도는  $7.8\text{g/cm}^3$ 를 사용하여 계산하였다.

#### 2.1.4 소결체의 발열량

소결체의 발열량은 DUPIC 핵연료의 기준조성으로 계산하여 CT 조사공에서  $1133.7\text{w/cm}$ 를 얻어 사용하였으며 이에 대한 근거는 HAN-RR-CR-97-088을 참조하였다.

## 2.2 설계 분석

핵연료의 조사에서는 연소중 온도의 분포가 매우 중요한 역할을 한다. 본 분석의 기준에 대한 온도 분포의 특징은 모든 온도는 중심에서부터 표면 쪽으로 감소하는데 핵연료에서는 온도가 곡선적으로 감소하며(표면 쪽으로 갈수록 급격히 감소) 피복재와 He에서는 거의 직선적으로 감소한다. 피복재 내에서의 온도 감소는 미미하며 He에서의 온도는 급격하게 감소한다. 따라서 He의 간격 및 핵연료의 열전도도가 큰 영향을 미칠 것으로 분석되었다. 각각의 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 항목에 대한 영향을 분석하였으며 이 결과를 표 3에 정리하였다.

- 열전도도
- 간격
- gamma 열
- radiation and natural convection

- 피복재의 두께
- 열팽창
- Forced convection
- 출력
- 계산 방법
- HEATING과 GENGTC
- Transient

### 2.2.1 열전도도

핵연료의 열전도도는 온도에 직접적인 영향을 받는다. 또한 DUPIC 핵연료는 처음 시도되는 핵연료이므로 그의 정확한 열전도도 값을 측정할 바가 없다. 본 연구에서 사용한 핵연료의 열전도도 값은 SIMFUEL 등에서 측정된 실험 값에서 가장 근사치로 추정되는 것을 사용하였으며 본 연구에서는 이 열전도도 값을 80, 100, 120%로 변화시켜 그 영향을 분석하였다. 이 결과를 그림 3에 표시하였는데 열전도도가 변화함에 따라서 핵연료의 중심온도는 매우 큰 영향을 받았다. 그러나 핵연료 표면의 온도는 거의 변화하지 않았다. 열전도도가 약 20% 변화하는 경우 중심온도는 약 300°C가 변화하므로 정확한 중심온도를 알기 위해서는 열전도도 값의 결정을 신중히 해야한다. DUPIC 핵연료 개발팀에서 계획중인 DUPIC 핵연료의 열전도도 측정 연구가 완료되면 보다 정확한 값을 얻을 수 있으며, 또한 조사후 시험의 결과를 통해서도 어느 정도 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

### 2.2.2 간격

### 2.2.2.1 핵연료와 zircaloy 피복관 사이의 간격

핵연료와 피복재인 zircaloy의 간격은 He으로 채워져 있지만 He의 열전도도가 낮기 때문에 이 부위에서 온도가 상승하게 된다. 간격에 따른 온도상승의 정도를 분석하기 위하여 설계기준치인 0.0445mm에서 0.03mm씩 증가시켜 0.1345mm까지의 영향을 분석하였다. 이 결과는 그림 4와 같다. 분석결과에 의하면 간격이 증가함에 따라 핵연료의 온도는 일정한 폭으로 상승하였다. 이는 핵연료의 표면 뿐 아니라 중심온도의 상승율도 거의 일정하였다. 또한 그림 5와 같이 피복재의 온도는 간격의 변화에 무관하였다. 즉, 피복재의 온도는 변화가 없으나 간격이 증가함에 따라 핵연료의 온도는 일정하게 증가하였다. 이 간격은 제조시의 공차와 관계되는데 작은 차이에 의해서도 핵연료의 온도 변화가 큼을 예상 할 수 있다. 따라서 제조시의 공차는 엄격하게 통제되어야 하며 제조 공차의 허용한도는 이를 감안하여 최종 설계에 반영되어야 한다.

### 2.2.2.2 Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 사이의 간격

핵연료 assembly에 있는 또 하나의 간격인 zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 사이의 간격에 따라서도 온도 변화가 예상되므로 이에 대한 분석을 수행하기 위하여 간격을 0.05, 0.075, 0.1, 0.15 및 0.2mm로 변화시켜 가며 각각의 경우에 대하여 온도 변화를 분석하였다. 분석결과를 그림 6과 7에 표시하였는데 그림 6의 결과는 그림 5와 같이 간격이 증가함에 따라 핵연료의 온도가 일정하게 증가하며 그림 7에 나타난 것과 같이 간격이 증가함에 따라 내부의 zircaloy 피복관의 일정하게 온도를 상승시킨다. 0.2mm 간격의 경우는 약 800℃의 온도 상승을 나타냈다. 이



간격의 영향도 핵연료와 zircaloy 사이의 간격과 같이 중요하게 취급되어야 하며, 제조 공차 역시 엄격하게 통제되어야 할 것으로 생각된다.

### 2.2.3 gamma 열

피복재를 구성하고 있는 zircaloy와 스텐레스강의 gamma 열에 의한 영향을 분석한 결과를 그림 8에 나타내었다. gamma 열의 계산 기준은  $0.06 \text{ w/mm}^3$ 인데  $0.0$ ,  $0.0238$  및  $0.06 \text{ w/mm}^3$ 의 세 경우로 분석한 결과 이에 대한 영향은 매우 작은 것으로 분석되었는데 이는 피복관의 두께가 얇기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 gamma 열의 영향은 무시하여도 무방할 것으로 판단된다.

### 2.2.4 radiation and natural convection

그림 9에 radiation과 natural convection을 고려한 경우와 고려하지 않은 두 경우의 온도 분포를 표시하였는데, 그림에서와 같이 두 경우의 차이는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서와 같은 설계조건에서는 radiation과 natural convection에 의한 열전달을 무시해도 전체 온도 분포에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

### 2.2.5 피복재의 두께

피복재 중에서 핵연료와 직접 접하고 있는 zircaloy의 두께를 변화시키면서 그 영향을 분석하였다. 그 결과를 그림 10에 나타내었는데 zircaloy 피복관 두께에 따른 영향은 없는 것으로 분석되었다. 이는

zircaloy의 열전도도가 핵연료의 열전도도에 비하여 크기 때문인 것으로 판단되며 그림10에서와 같이 1mm의 두께까지는 이로 인한 온도변화는 없었다.

## 2.2.6 열팽창

HEATING7.2f에서는 열팽창을 고려하지 않는다. 그러나 이에 대한 영향을 파악하기 위하여 열팽창에 의한 각 부위에서의 두께를 보정해 주어야 하는데 금속재료에 대해서는 두께 방향으로 온도가 거의 직선적으로 변하나 핵연료에서는 곡선의 특성을 나타내기 때문에 핵연료의 열팽창을 구하기 위해서는 수치 해석적인 방법을 이용해야 한다. 본 연구에서는 열팽창을 따로 계산하지 않고 GENGTC를 이용하여 계산한 후에 그 결과로서 표시되는 값을 이용하였다.

열팽창의 영향을 그림 11에 나타내었는데 열팽창을 고려하는 경우 중심온도가 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 핵연료 부분은 상대적으로 주위의 피복관에 비하여 온도가 높다. 따라서 피복재의 열팽창 계수가 핵연료에 비하여 약 2배정도 크다고 하더라도, 결과적으로는 핵연료의 팽창으로 인하여 핵연료와 피복재 사이의 간격이 좁아지는 결과가 된다. 이와 같은 상황을 판단해볼 때 열팽창의 영향은 반드시 고려해 주어야 한다.

## 2.2.7 Forced convection

핵연료 표면의 열전달 계수로  $27,000\text{w/m}^2\text{C}$ 를 사용하였으나 이 값은 유량, 유속 및 기하학적 형상 등에 의해서 영향을 받는다. 따라서

실제의 값과는 어느 정도 차이가 있을 것으로 생각된다. 이 영향을 분석하기 위하여 열전달계수를 기준 값의 60, 80, 100 및 120%로 변화시켜 그 영향을 분석하였다. 이 결과를 그림 12에 나타내었는데 그림에서와 같이 열전달계수의 변화에 따른 온도의 변화는 거의 없으므로 종합적으로는 그 영향이 없는 것으로 분석되었다. 따라서 기준의 60~120%범위 내에서의 열전달계수의 변화를 고려하지 않아도 무방할 것으로 생각된다.

### 2.2.8 출력

핵연료의 출력은 핵연료의 온도에 직접적으로 영향을 미치므로 매우 중요한 인자 중의 하나이다. 기본 출력의 80, 100 및 120%로 각각 변화시켰을 때의 예상되는 온도분포를 그림 13에 나타내었다. 출력의 영향은 다른 인자에 비하여 영향이 매우 큰 것으로 분석되어, 기본 출력의 120%의 경우에는 중심 온도가 거의 2800℃까지 상승하였다. 따라서 무엇보다도 핵연료의 출력을 정확히 측정 혹은 계산하는 것이 중요하다. 향후에 수행될 상세 핵연료 설계시에 반드시 고려되어야 할 인자 중의 하나로서 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

### 2.2.9 계산 방법

온도 계산시 HEATING에서는 일반적인 finite difference method를 사용하는데, 계산에서의 수렴이 중요한 역할을 한다. 즉, 수렴 능력을 향상시키기 위하여 successive over-relaxation(SOR) 방법을 병행하여 사용하는데, 일반적인 방법과 SOR의 차이를 분석하기 위하여 zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 사이의 간격의 영향을 두 가지를 병행하여

분석하였다. SOR에 의한 계산 결과를 그림 14, 15에 나타내었는데 간격이 0.3mm 인 경우는 계산 결과가 신빙성이 없으나 그 이하의 좁은 간격에서는 일반적인 결과와 일치하였다. 따라서 본 설계에서는(0.3mm 간격 이하의 경우) 어느 방법을 이용하더라도 영향을 받지 않는다. 그러나 간격을 0.3mm 이상으로 하는 경우는 세심한 주의가 필요하다.

## 2.2.10 HEATING과 GENGTIC

사용된 GENGTIC는 원래 basic language로 작성된 코드이나 다양한 capsule 조사시의 온도 분석에 사용하도록 fortran 용으로 개조한 것으로, 본 보고서에서는 GENGTIC의 계산 결과와 HEATING 7.2f의 계산 결과를 비교하였고 이를 열 팽창 고려시 치수를 보정하는데 이용하였다.

GENGTIC는 계산중에 열팽창을 고려하여 온도 결과에 따라서 반경 틸새를 보정해 주도록 되어있다. 따라서 열팽창 고려시 먼저 GENGTIC를 이용하여 반경틸새 및 재료의 치수를 구한 다음 이 결과를 HEATING의 입력자료로 사용하였다.

분석 결과, 표 3에서와 같이 GENGTIC를 이용하여 계산한 핵연료의 온도가 약간 높게 나타났다. 중심온도는 약 35°C가 증가하였으나 표면 쪽으로 갈수록 그 차이는 감소하였다. 이러한 차이의 원인은 추후에 자세히 검토되어야 할 부분이다. 이 결과를 근거로 할 때 HEATING을 이용하는 것이 안전성의 관점에서 보면 더 유리할 것으로 판단된다.

## 2.2.11 Transient 분석

하나로에 장전하여 조사할 때 온도의 상승정도를 예측하기 위하여

transient 온도를 분석하였다. 입력으로는 열팽창을 고려한 치수를 이용하였으며 그 결과를 그림 16에 나타내었다.

초기에는 온도가 급격히 상승하나 시간이 지남에 따라서 서서히 평형 값에 도달하였다. 평형상태의 온도까지 도달하는데 걸리는 시간은 그림 16에서와 같이 약 160초 이며 이 시간 후에 핵연료의 온도가 최대값에 도달하는 것을 알 수 있었다.

표 1

## DUPIC 소결체 조사시험 계획 개요

(1) 목 적 :

- 천연 이산화우라늄 소결체와 DUPIC 소결체의 성능 비교

(2) 연구내용 및 조사시험 일정

조사시험	조 사 기 간										조사 목적	조사캡슐	
	'97	'98	'99	00	'01	'02	03	04	05	06			
1. 천연우라늄 소결체 조사 시험		98.말										- UO <sub>2</sub> 소결체 특성연구 - 캡슐의 "Proof of concept"	- 무계장 원격조작 캡슐
2. DUPIC 소결체 조사시험(I)		99.9										- DUPIC 소결체 특성연구 - 원격조작 캡슐 성능확인	- 무계장 원격조작 캡슐
3. DUPIC 소결체 조사시험(II)				'00.9								- 소결체 조사거동연구	- 계장 원격조작 캡슐
4. DUPIC 소결체 조사시험(III)					'01.9							- 소결체 조사거동연구	- 정밀 계장 원격조작 캡슐

표 2. DUPIC 핵연료 assembly의 기본 설계 사양

		핵연료	Zircaloy-4	Stainless Steel	He
치수(mm)	내경	-	6.1215	6.6405	-
	외경	6.077	6.5405	7.1405	-
열전도도		식1	식2	식3	식4
밀도		10.6	6.47	7.8	0.000177
Specific heat		식5	293	식6	5190
발열량		0.388	0.6	0.6	-
열전달계수		-	-	27,000	-

※ 단위 : J, kg, s, mm, °C

※ 수식들의 형태에 적합하게 코드를 수정했음.

식1.  $0.04154 - 3.32 \times 10^{-5} T + 2.21 \times 10^{-8} T^2 - 8.9 \times 10^{-12} T^3 + 1.75 \times 10^{-15} T^4$

식2.  $0.1 + 0.154 \times 10^{-3} T - 0.509 \times 10^{-6} T^2 + 0.156 \times 10^{-8} T^3 - 0.121 \times 10^{-11} T^4$

식3.  $0.149 + 0.128 \times 10^{-3} T$

식4.  $0.143 \times 10^{-2} + .325 \times 10^{-5} T - 0.768 \times 10^{-9} T^2$

식5.

온도	s. heat	온도	s. heat	온도	s. heat
-273	0.0	-100	0.043	400	0.0722
-260	0.003	0.0	0.056	1200	0.079
-247	0.0032	100	0.063	2000	0.082
-238	0.009	200	0.0675		

식6.

온도	s. heat	온도	s. heat
0	0.12	400	0.135

표 3. 설계 분석에 의한 온도분포결과 요약(단위:℃)

		핵연료 중심	핵연료 표면	Zr 내표면	Zr 외표면	S.S. 내표면	S.S. 외표면
기준		2416	758	599	574	122	89
열전도도	80%	2738	758	599	574	122	89
	100%	2416	758	599	574	122	89
	120%	2152	758	599	574	122	89
간격 (핵연료,Zr)	0.0445	2416	758	599	574	122	89
	0.0745	2513	855	597	573	122	89
	0.1045	2595	947	595	570	122	89
	0.1345	2665	1035	593	569	121	89
간격 (Zr,SS)	0.05	2220	591	408	377	123	89
	0.1	2416	758	599	574	122	89
	0.2	2683	1057	923	896	122	89
	0.3	4428	1253	1129	1167	120	88
Gamma 열	0.0	2407	749	589	565	119	87
	0.024	2410	753	593	569	120	88
	0.06	2416	758	599	574	122	89
열전달계수	60%	2430	772	614	590	148	115
	80%	2421	763	604	580	132	99
	100%	2416	758	599	575	122	89
	120%	2412	755	595	571	116	83
Transient (열팽창 고려)	10초	1114	460	390	370	95	74
	60초	2272	643	545	519	122	89
	160초	2315	650	551	525	123	90
GENGTC	-	2280	639	541	515	122	88
열팽창	고려	2315	650	551	525	123	90
	무시	2416	758	599	575	122	89
계산방법	Nor.	2416	758	599	574	122	89
	SOR	2416	758	599	574	122	89
출력	80%	1956	650	514	492	109	82
	100%	2416	758	599	575	122	89
	120%	2762	860	679	652	136	97
피복재두께	0.419	2416	758	599	575	122	89
	0.619	2420	762	603	567	121	88
	0.819	2423	765	607	560	120	88
	1.019	2427	769	611	553	119	87



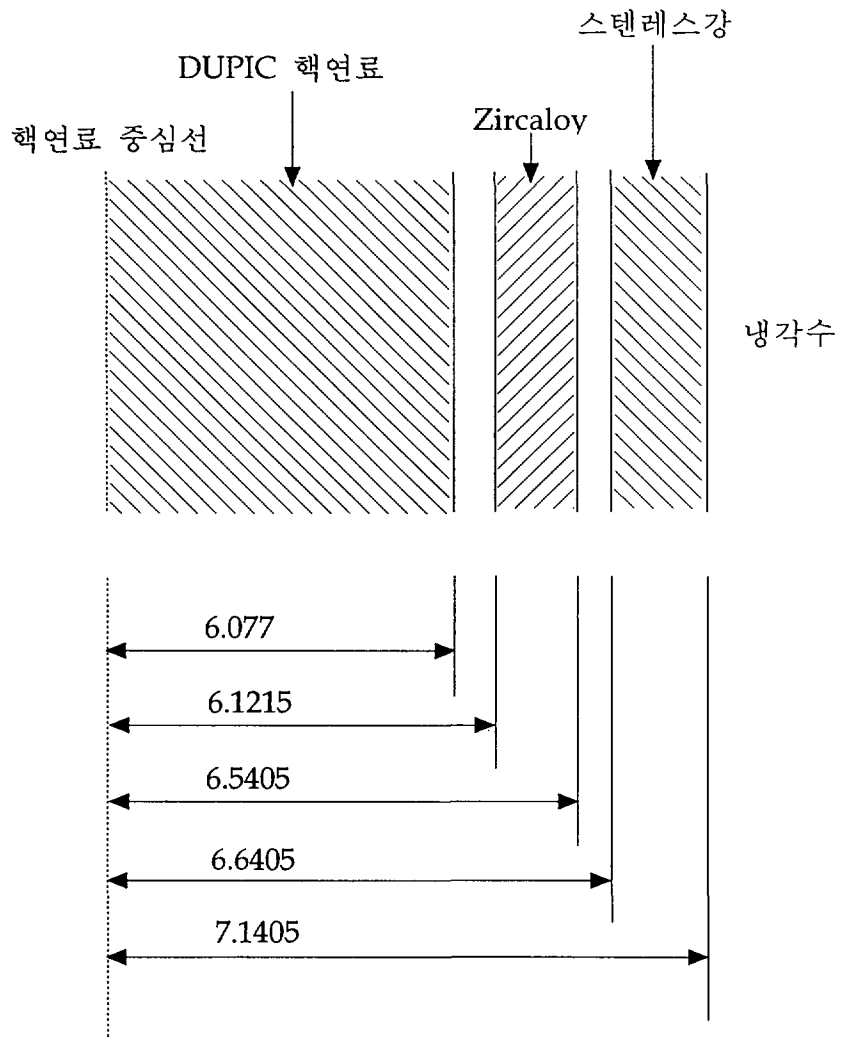
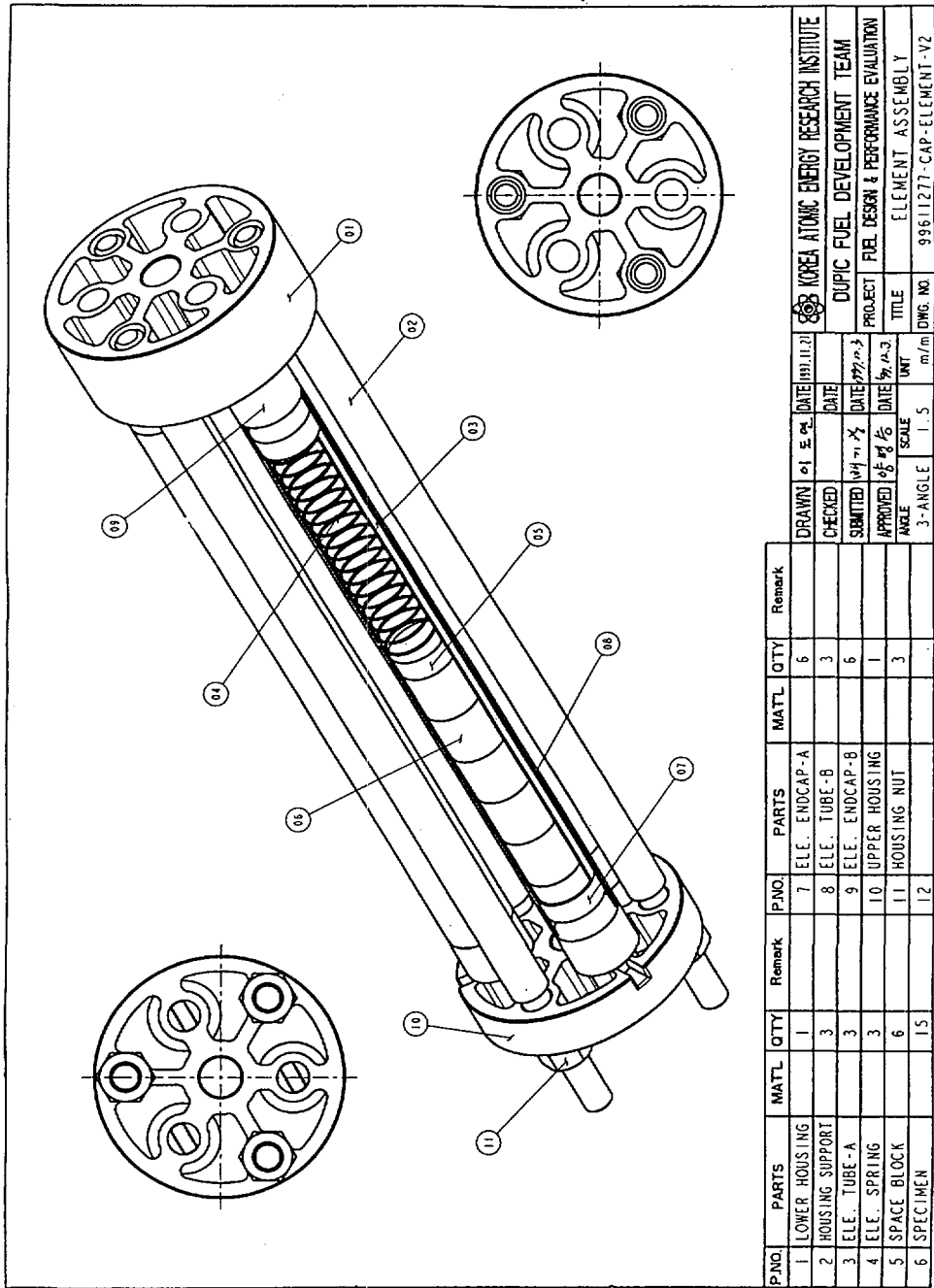


그림 1. 계산에 이용된 도식적인 mini-element 설계(단위: mm)



P.NO.	PARTS	MATL	QTY	Remark	P.NO.	PARTS	MATL	QTY	Remark
1	LOWER HOUSING		1		7	ELE. ENDCAP-A		6	
2	HOUSING SUPPORT		3		8	ELE. TUBE-B		3	
3	ELE. TUBE-A		3		9	ELE. ENDCAP-B		6	
4	ELE. SPRING		3		10	UPPER HOUSING		1	
5	SPACE BLOCK		6		11	HOUSING NUT		3	
6	SPECIMEN		15		12				

DRAWN	이 포 영	DATE	1997.11.21
CHECKED		DATE	
SUBMITTED	이 포 영	DATE	1997.11.21
APPROVED	이 포 영	DATE	1997.11.21
ANGLE	SCALE	UNIT	
3-ANGLE	1:5	m/m	

KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE	
DUPIC FUEL DEVELOPMENT TEAM	
PROJECT	FUEL DESIGN & PERFORMANCE EVALUATION
TITLE	ELEMENT ASSEMBLY
DWG. NO.	99611277-CAP-ELEMENT-V2

그림 2. 핵연료 assembly

Effect of fuel thermal conductivity

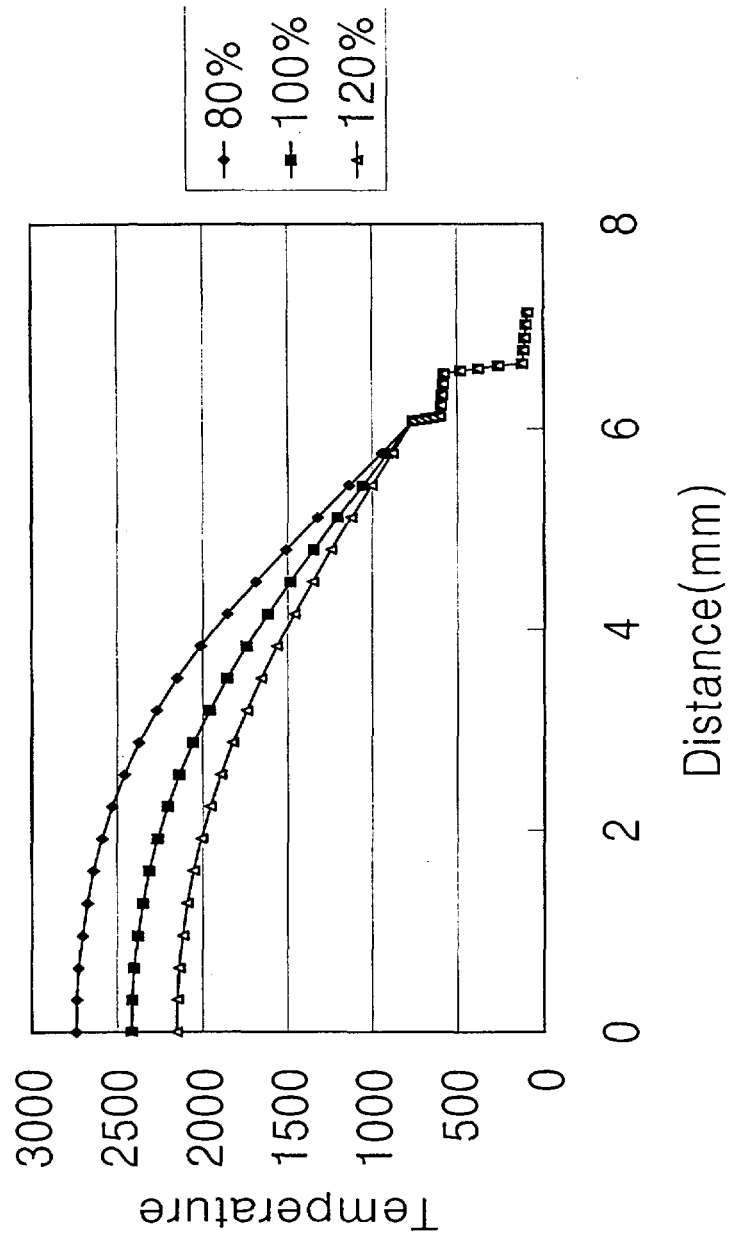


그림 3. 핵연료의 열전도도 영향

Effect of gap between fuel and Zr

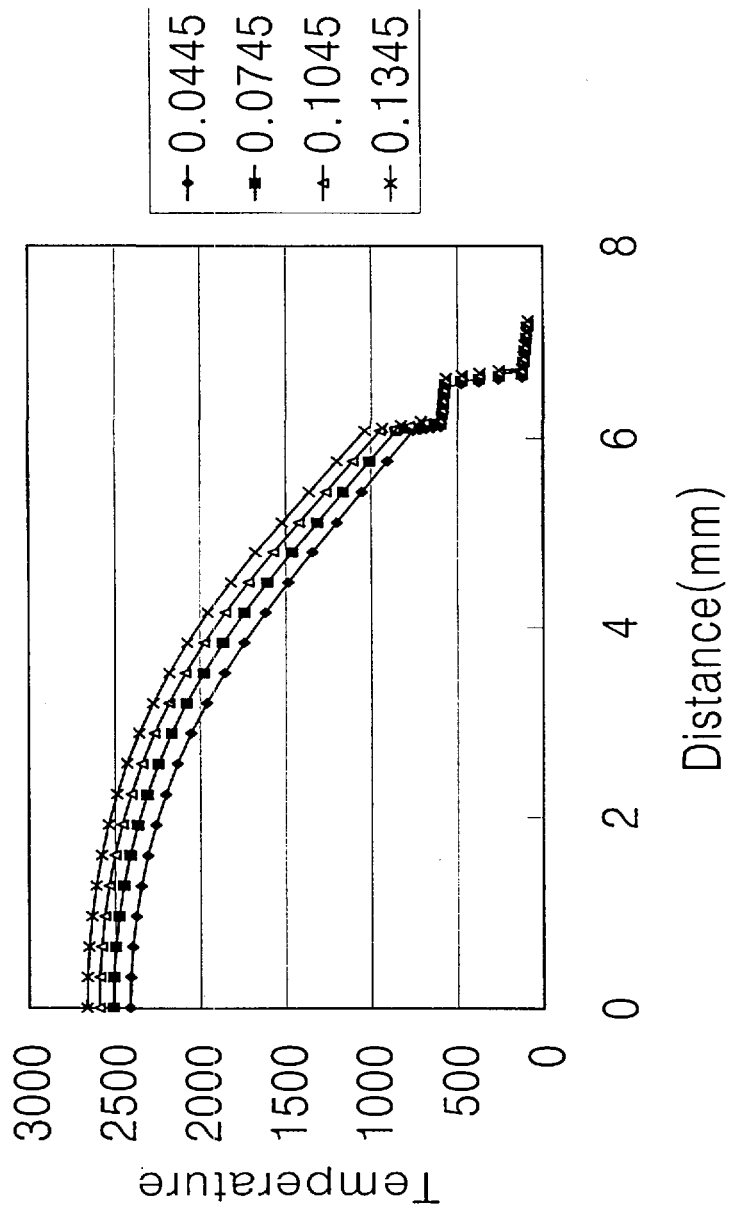


그림 4. 핵연료와 zircaloy 간격의 영향

# Effect of gap between fuel and Zr

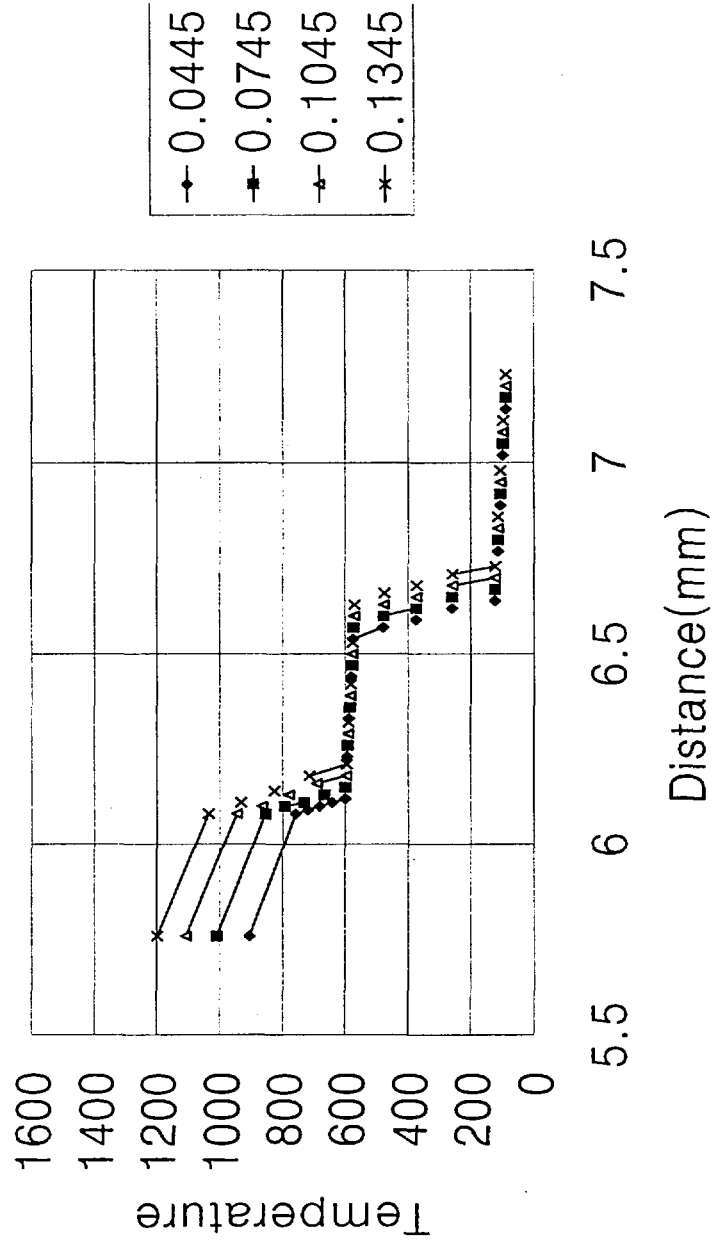


그림 5. 핵연료와 zircaloy 간격의 영향 (피복관의 변화는 거의 없음을 알 수 있다)

Effect of gap between Zr and SS

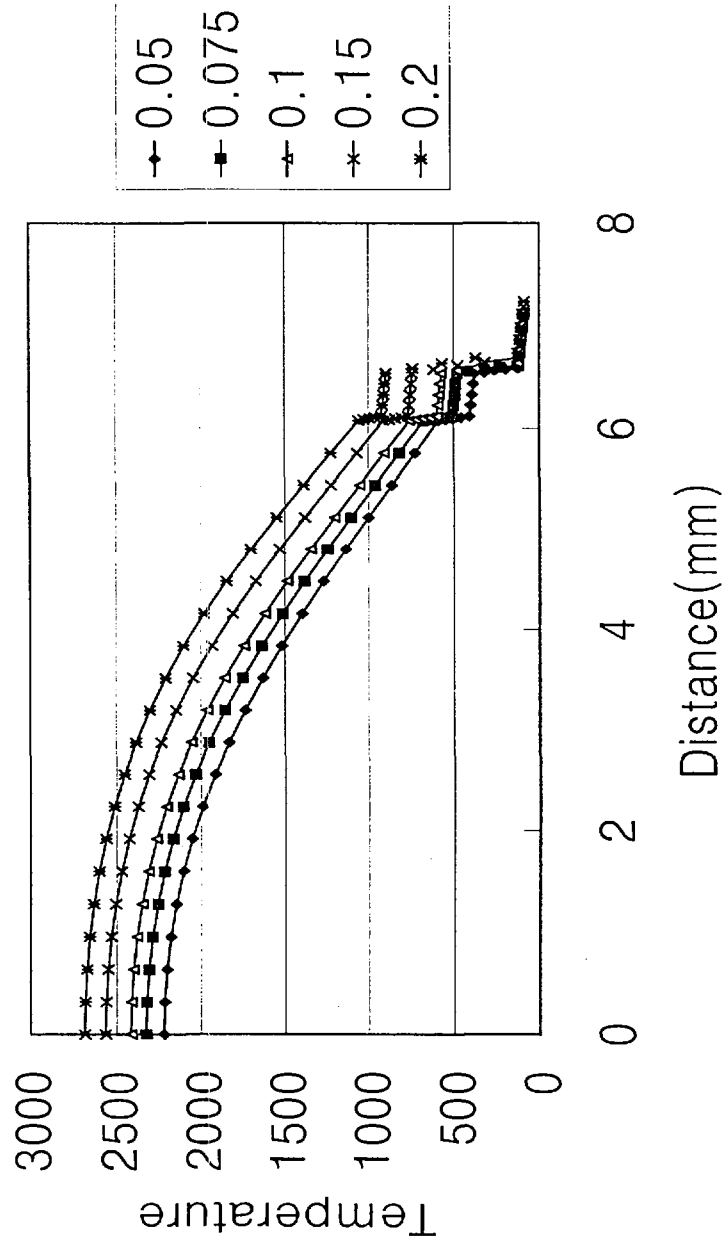


그림 6. Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 간격의 영향

### Effect of gap between Zr and SS

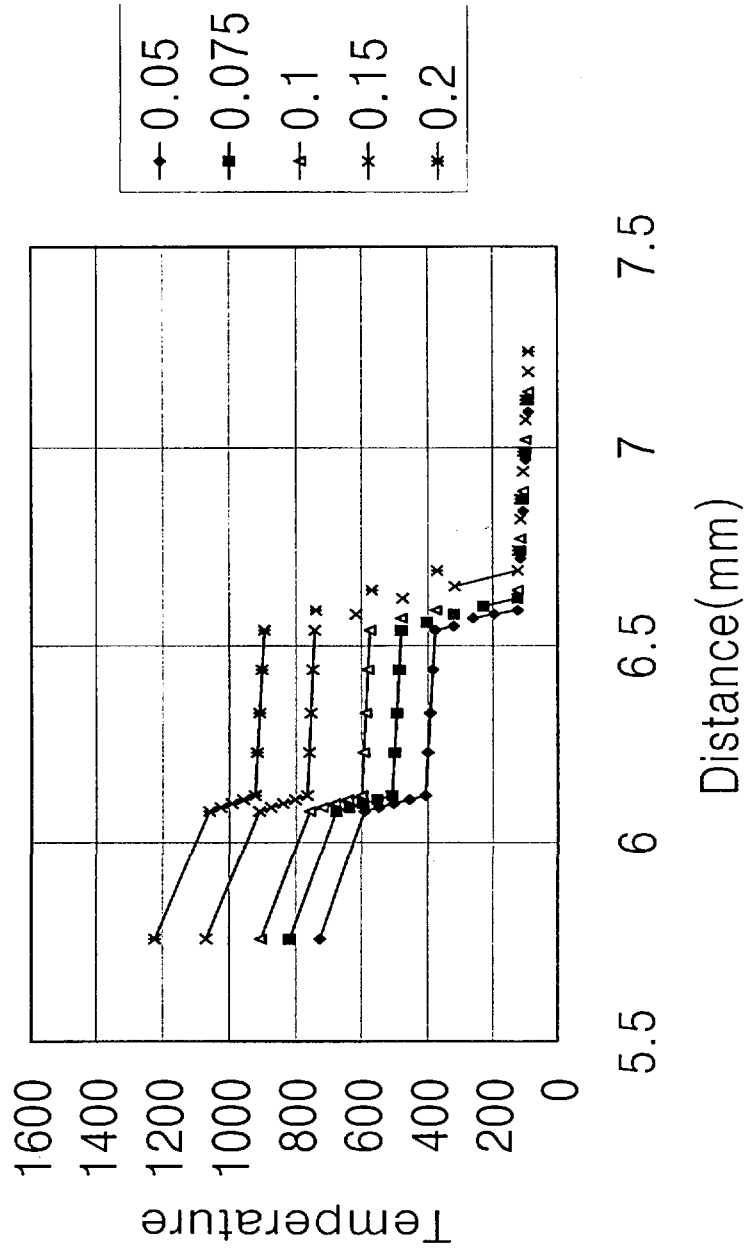


그림 7. Zircaloy 피복관과 스테인레스강 피복관 간격의 영향  
(간격에 따라서 zircaloy 피복관의 온도가 일정하게 상승함)

# Effect of gamma heating

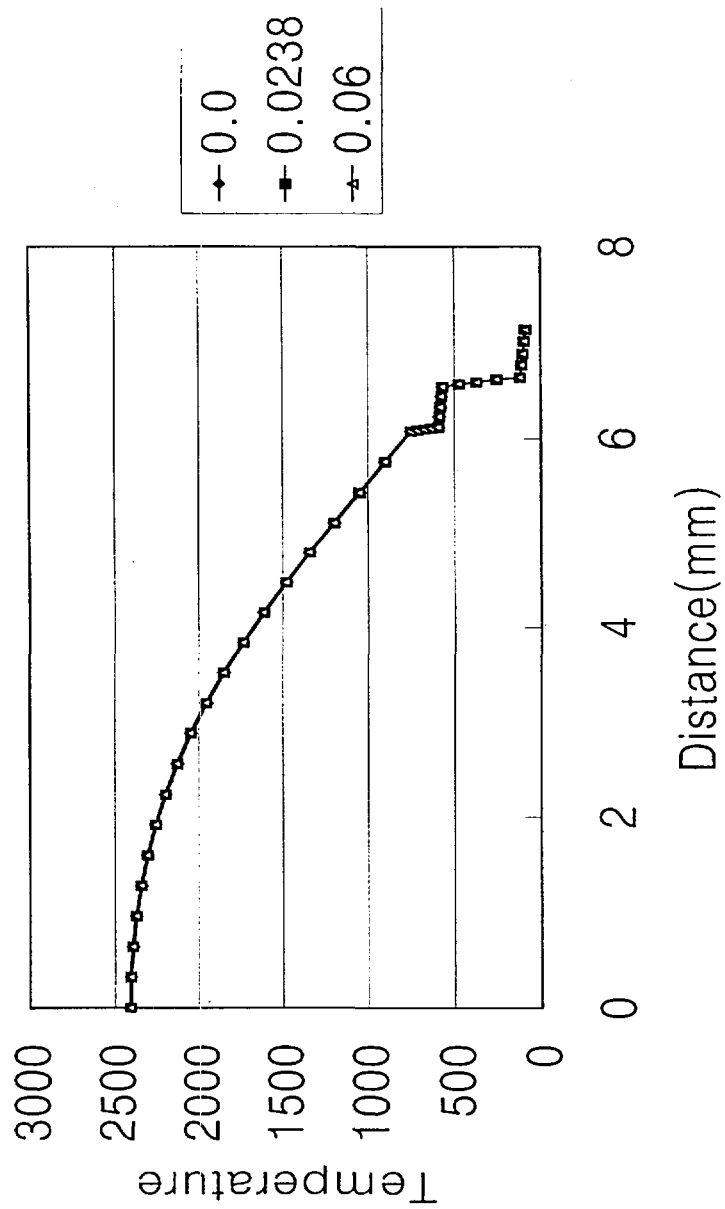


그림 8. Gamma 열의 영향



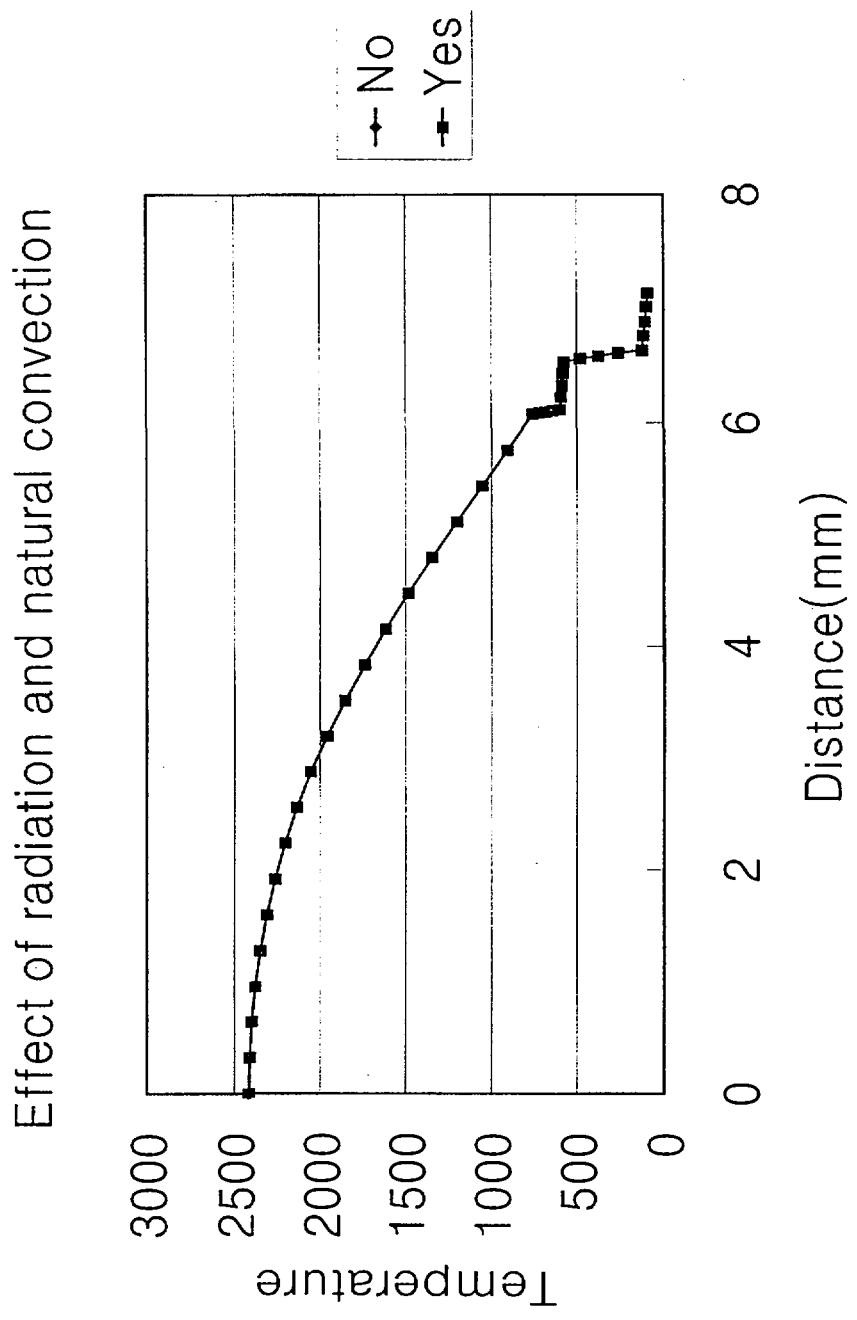


그림 9. Radiation 및 convection의 영향

Effect of zircaloy thickness

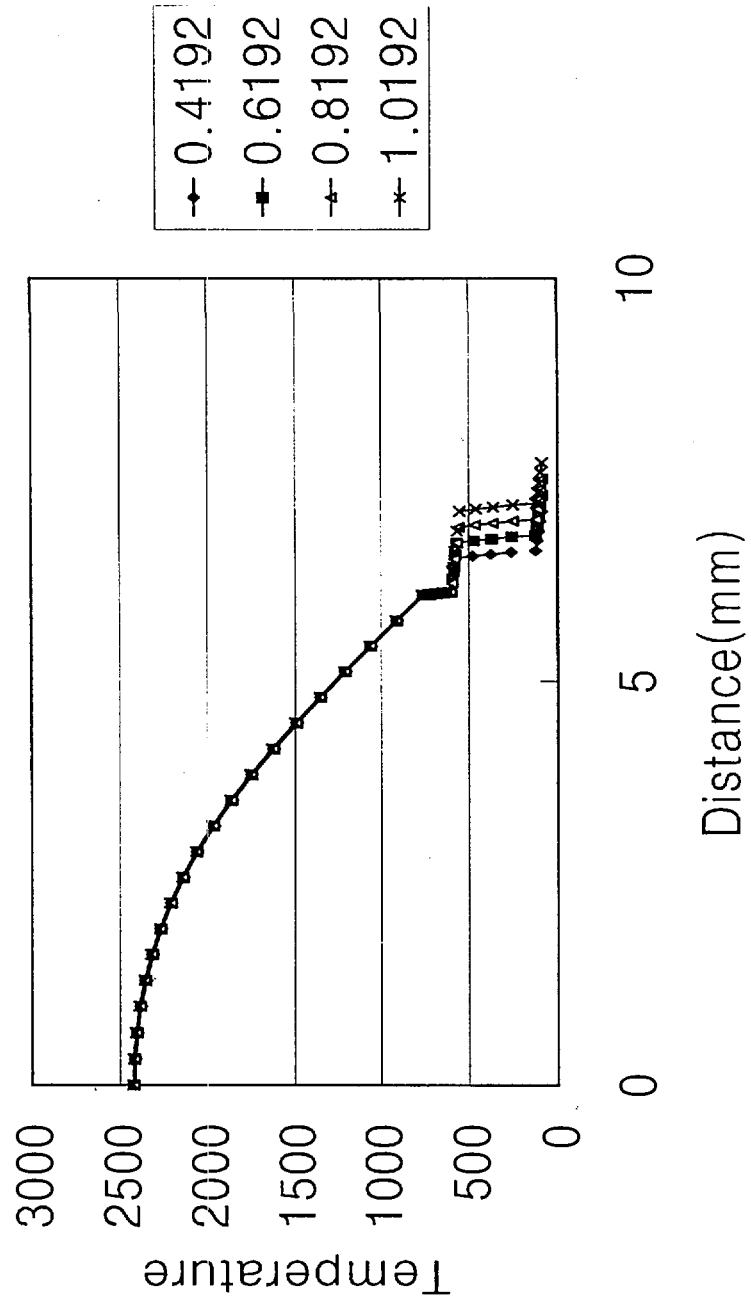


그림 10. Zircaloy 피복관 두께의 영향

Effect of thermal expansion

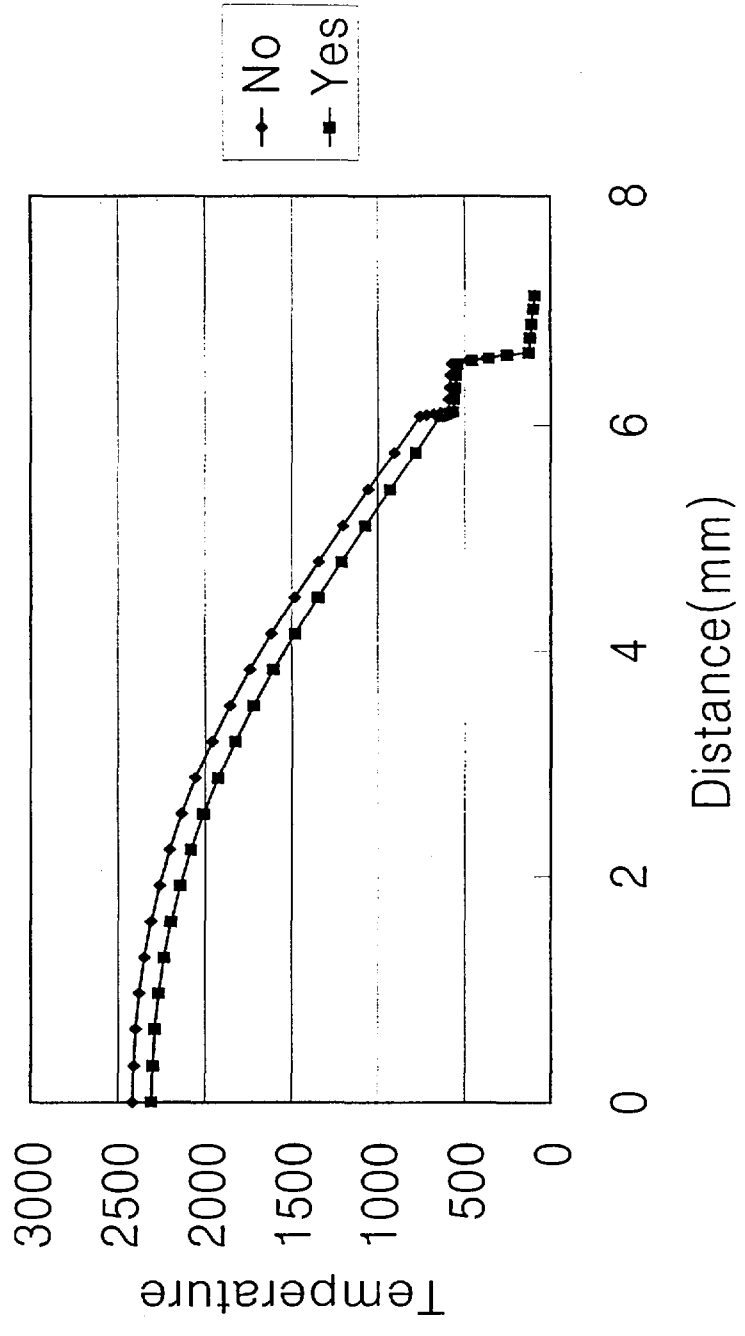


그림 11. 열팽창의 영향

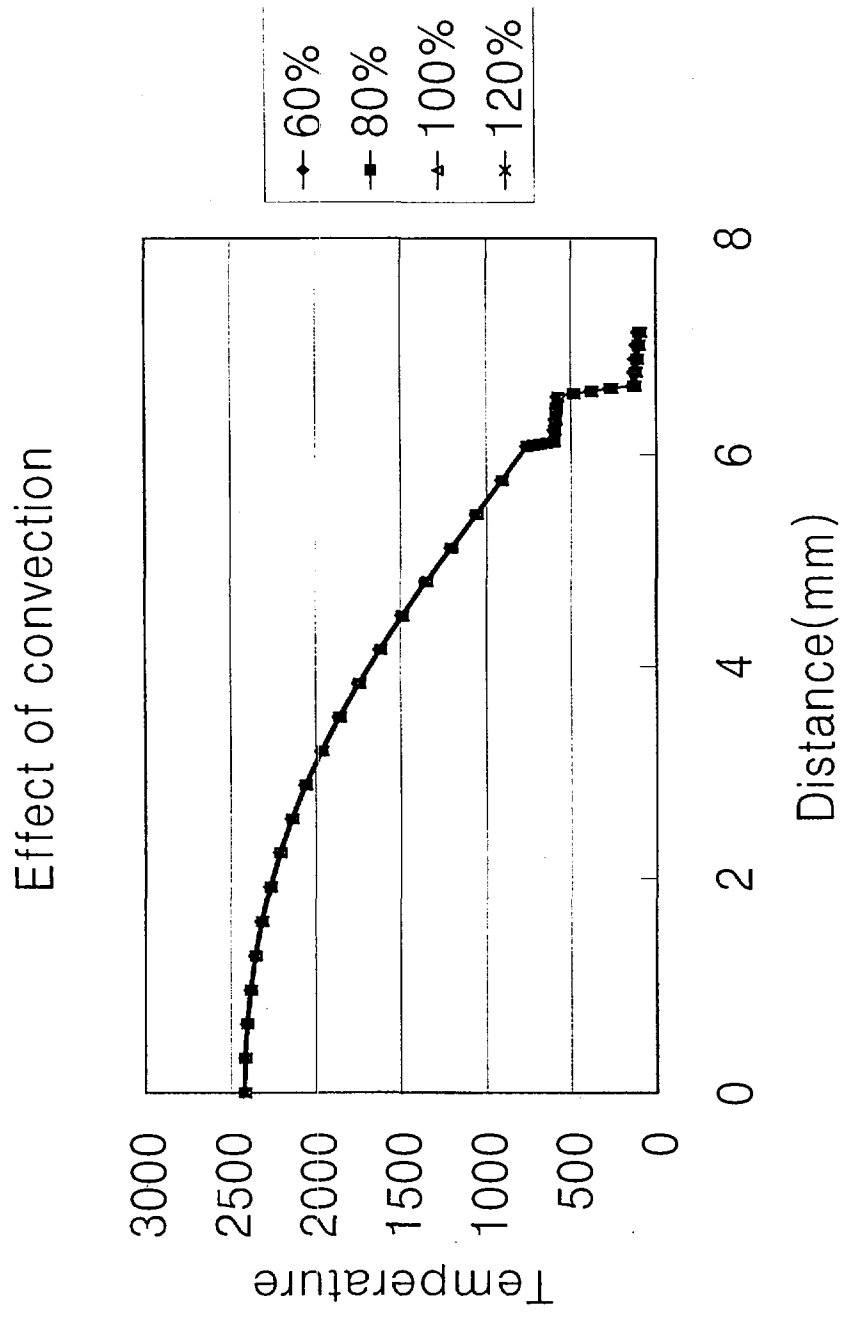


그림 12. 열전달 계수의 영향

### Effect of fuel power

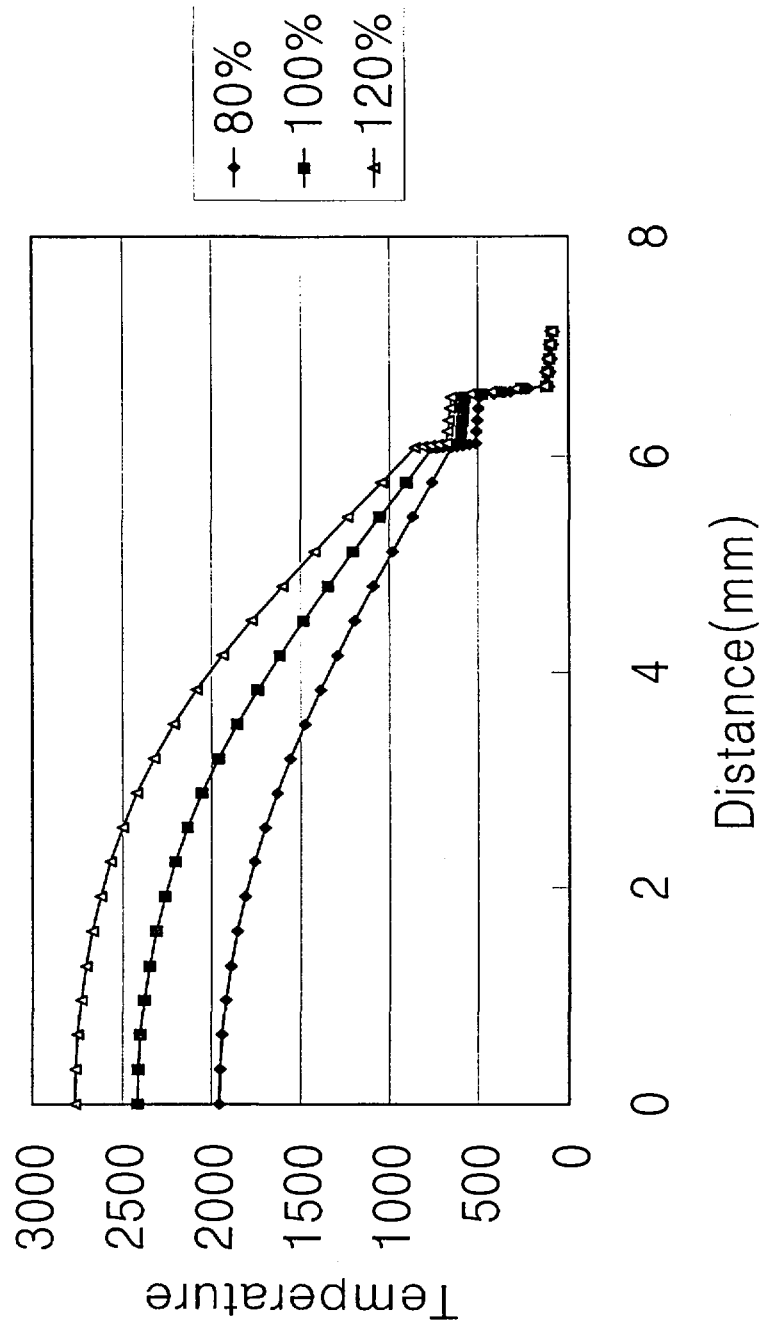


그림 13. 핵연료 출력의 영향

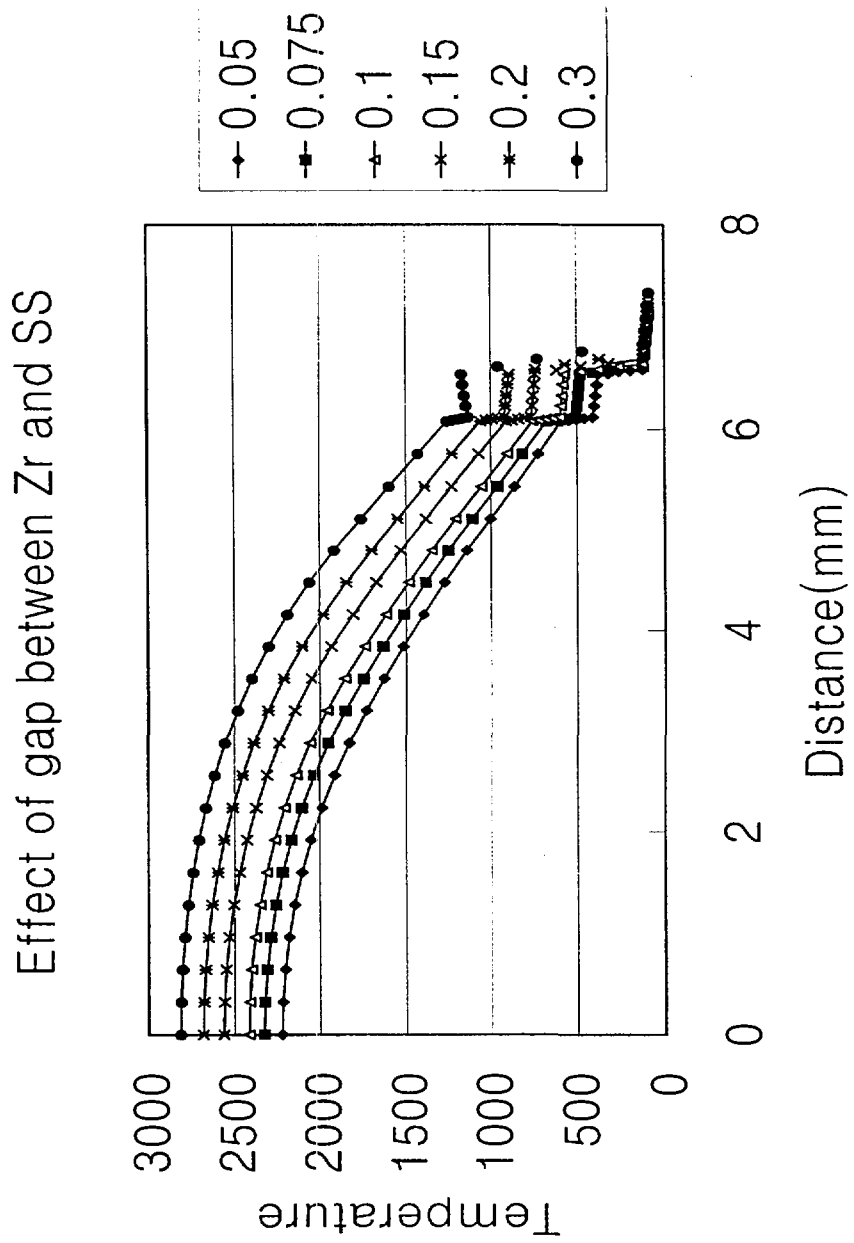


그림 14. SOR 방법에 의한 zircaloy 피복관과 스텐레스강 간격의 온도 분포 (일반적인 방법과 결과가 같으나 간격이 0.3 mm 이상에서는 결과가 다르다)

### Effect of gap between Zr and SS

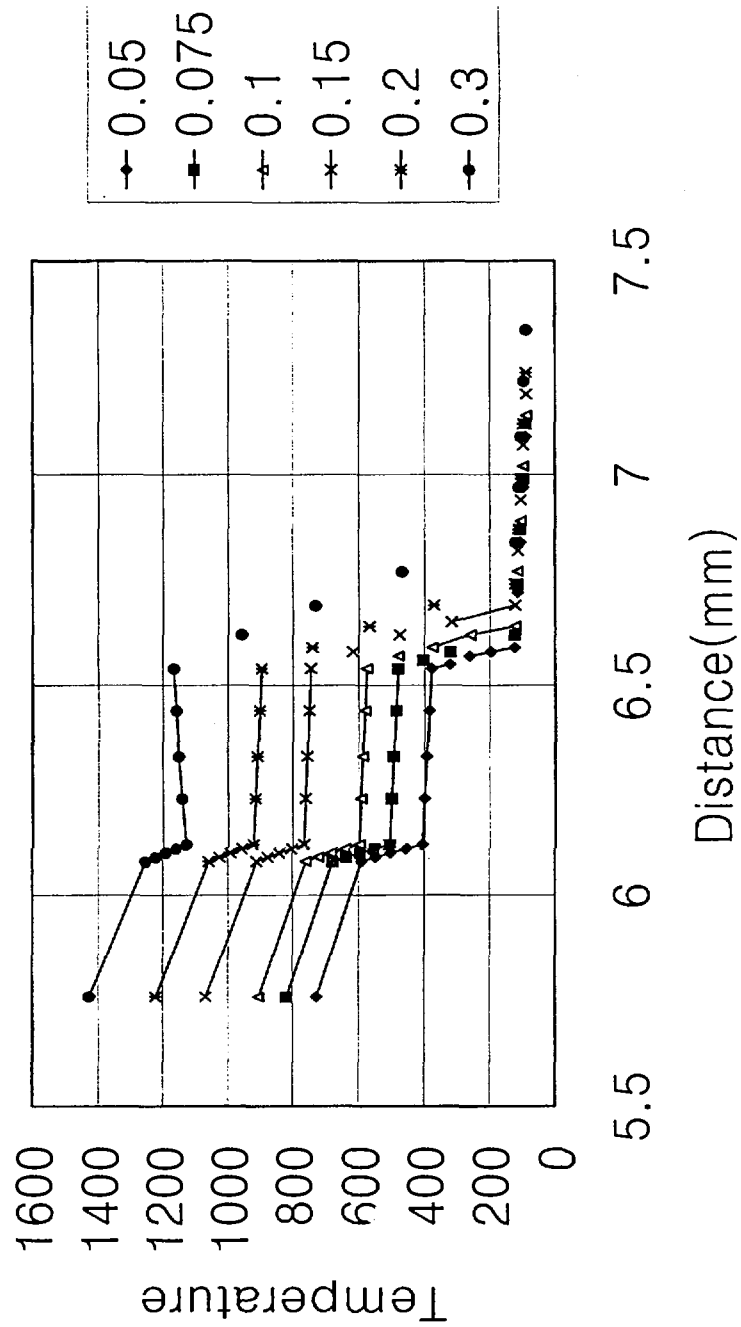


그림 15. SOR 방법에 의한 Zircaloy 피복관과 스테인레스강  
간격의 온도분포 ( 그림 14를 확대)

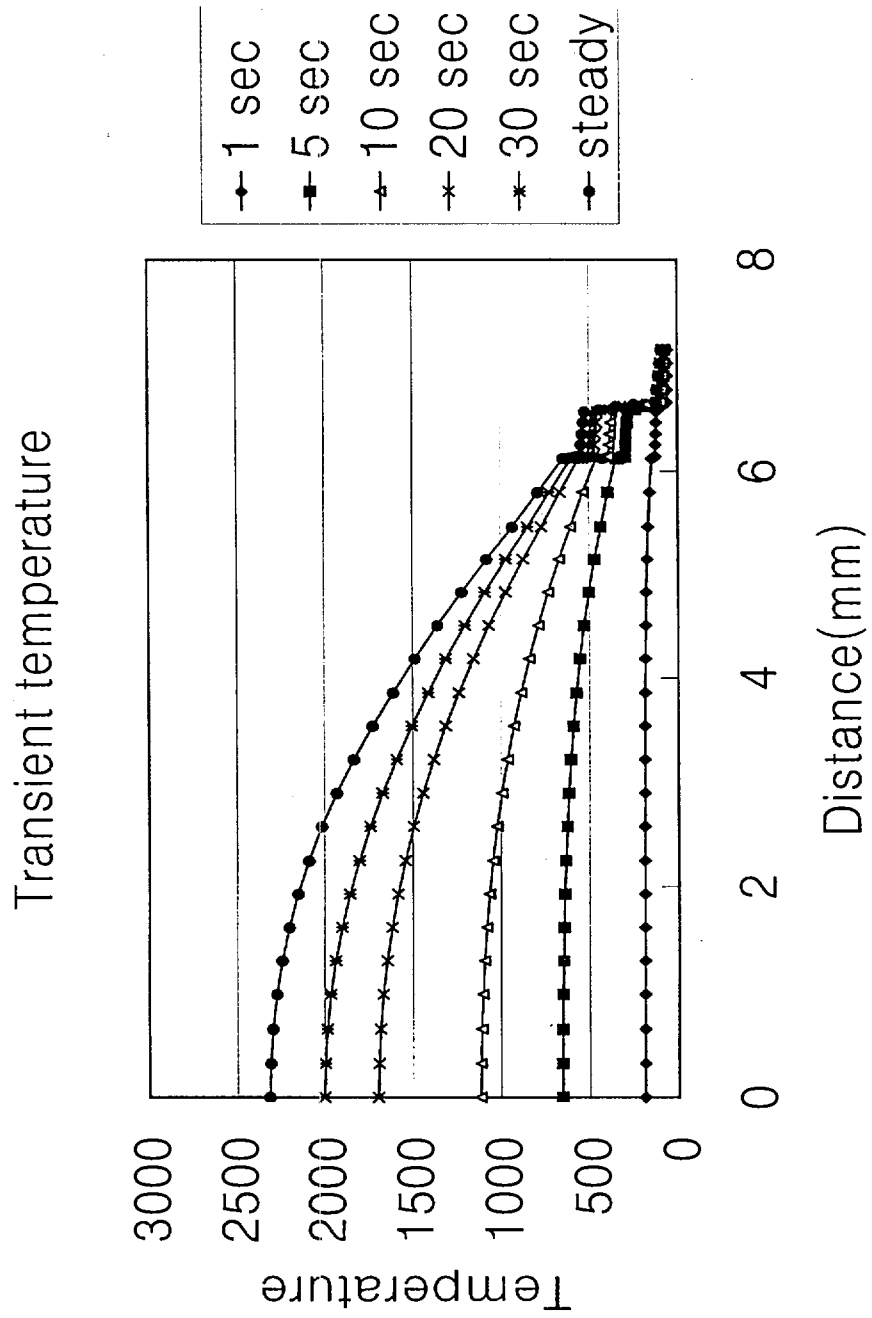


그림 16. Transient 온도 분석



### 제 3 장 결 론

DUPIC 핵연료 assembly의 설계해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DUPIC 핵연료의 조사시험시 열전도도, 출력, 반경 틈새 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치며,
2. 피복재 두께, gamma 열, 열전달 계수 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치지 않는다.
3. 안전성의 관점에서 GENGTC보다 HEATING을 이용하는 것이 바람직하다.
4. Transient 온도 분석의 경우 약 160초 가 경과한 후 평형 온도에 도달한다.

## 첨부 1. 노내조사시험 개요

### 1. 모의 DUPIC 소결체 조사시험 (1998)

모의 소결체로 천연 이산화우라늄에 안정한 핵분열생성물을 혼합하여 제조한 SIMFUEL을 이용하며, 모든 사양은 조사후 시험시설에 보관되어 있는 G23 assembly를 기준으로 한다.

가장 간단한 설계의 무계장 캡슐을 이용하며 아직은 조사 경험에 미미한 실정이므로 이를 통하여 주변의 관련 기술을 단기에 습득할 수 있는 하나로에서의 최초 핵연료 조사시험으로 그 의의가 크다.

조사기간은 단기이며 조사시험의 결과는 계속적으로 사용될 캡슐의 설계와 성능의 입증에 사용하고 후에 수행될 소결체 조사시험에 중요한 기본 자료로 이용한다. 또한 하나로에서 조사할 여러 종류의 핵연료의 특성을 기본자료로 추적하여 이를 database화 한다.

모든 소결체의 조사시험을 위한 하나로에서의 조사공은 조사시험을 계획할 당시에는 IR2를 활용할 계획이었으나, 예비 계산 결과 출력이 높아 OR을 이용할 계획이다. 모의 핵연료의 설계는 CANDU-6의 설계를 최대한 기준하며, 이 조사시험의 결과를 DUPIC 핵연료 설계에 반영하도록 한다. 모든 소결체의 조사시험에서는 자료의 비교분석을 위하여 천연 이산화우라늄 소결체를 동시에 장전하여 동일한 조건으로 조사한 후에 수집된 자료들을 비교 검토한다.

#### 1) 목적

모의 DUPIC 소결체의 조사시험을 통하여 DUPIC 핵연료의 설계 기준을 확립하며, 캡슐의 설계와 조사시의 노물리 및 열적인 조사핵연료의

설계의 검증이며 부수적인 목적으로 핵분열 생성물의 거동, 고밀화 및 팽윤 미세구조의 변화 소결체의 조사 거동 정보 수집과 온도, 선출력 및 연소도 등의 조사조건의 확립 및 캡슐을 이용한 조사시험 경험획득 과 이와 관련한 기술의 축척이다.

## 2) 조사조건

최초의 산화물 핵연료 조사시험으로서 인허가 등을 고려하여 저 선출력 및 저 연소도로 조사한다.

## 2. DUPIC 소결체 조사시험(1)(1999)

간단한 무게장 캡슐을 이용하며 원격으로 조사시험 핵연료 및 캡슐을 제조해야 하므로 설계시 이를 고려한다. 이를 통하여 원격으로 핵연료를 취급하고 조사할 수 있는 기술을 개발한다. 내부에는 온도와 중성자속을 측정할 수 있는 passive marker를 삽입한다.

조사기간은 단기로 하며 최초의 DUPIC 소결체의 조사시험이므로 이후에 수행할 조사시험의 기본 자료 생산에 주력한다.

### 1) 목적

주목적으로는 PIE를 통한 예측치의 자료 검증과 DUPIC 소결체의 조사거동(핵분열 기체의 거동, 고밀화 및 팽윤, 미세구조의 변화, 성분 불균일의 영향, hot spot)에 관한 성능 자료수집과 조사조건(온도, 선출력 및 연소도)을 확립하며 부수적으로 캡슐의 원격 제조 및 취급기술에 필요한 요소기술을 개발한다.

## 2) 조사조건

최초의 DUPIC 소결체 조사시험이므로 저 선출력 및 저 연소도로 조사하여 안전성을 향상시킨다.

## 3. DUPIC 소결체 조사시험(2)(2000)

준계장 캡슐을 이용하여 조사시험을 수행하며 핵연료에 직접 계장하지 않고 주위의 mini-element에 계장을 한다. 계장 내용은 온도와 내부 압력 및 중성자속을 측정할 수 있도록 설계하며 온도 및 압력 등의 조절기능은 고려하지 않는다.

조사기간은 처음에는 단기로 하며 후에 장기간의 조사시험을 수행하도록 한다.

### 1) 목적

CANDU 상용로 조건이 아닌 경우에 대하여 DUPIC 소결체의 핵분열 기체 방출 및 열적 거동 등 노내거동에 대한 database의 구축과 물질과 제조공정 등에 따라 노내 성능에 미치는 영향을 분석하며 또한 정상상태에서의 DUPIC 핵연료다발의 거동 및 성능 분석, Pu 등 여러 종류의 핵분열생성물을 함유한 DUPIC 핵연료의 해석을 위하여 열전도도, 고밀화 및 팽윤 등의 기존 모형의 지속성 검토, DUPIC 핵연료의 온도, 압력, 변형 및 파손 이력 등의 성능 특성을 이용한 모형화와 기존 성능 분석 코드의 DUPIC 핵연료용으로의 적용성 및 확장성 검토 등을 포함한다.

### 2) 조사조건

표준 선출력과 표준 연소도(15,000 MWd/THM)로 조사시험을

수행한다. 상세한 조사조건은 이전에 수행한 조사시험의 결과를 반영하여 결정한다.

#### 4. DUPIC 소결체 조사시험(3)(2001)

계장 캡슐을 이용하여 조사시험을 수행하며 핵연료에 직접 계장하지 않고 주위의 mini-element에 계장을 한다. 계장은 온도와 내부 압력 및 중성자속을 측정할 수 있도록 하며 필요한 변수를 조절할 수 있도록 설계한다.

##### 1) 목적

CANDU 상용로 조건이 아닌 경우에 대하여 DUPIC 소결체의 핵분열 기체 방출 및 열적 거동 등 노내거동에 대한 database의 구축과 물질과 제조공정 등에 따라 노내 성능에 미치는 영향을 분석하며 또한 정상상태에서의 DUPIC 핵연료다발의 거동 및 성능 분석, Pu 등 여러 종류의 핵분열생성물을 함유한 DUPIC 핵연료의 해석을 위하여 열전도도, 고밀화 및 팽윤 등의 기존 모형의 지속성 검토, DUPIC 핵연료의 온도, 압력, 변형 및 파손 이력 등의 성능 특성을 이용한 모형화와 기존 성능 분석 코드의 DUPIC 핵연료용으로의 적용성 및 확장성 검토 등을 포함한다.

##### 2) 조사조건

표준 선출력과 표준 연소도(15,000 MWd/THM)로 조사시험을 수행한다. 상세한 조사조건은 이전에 수행한 조사시험의 결과를 반영하여 결정한다.

이의 수행을 위하여 먼저 조사시험용 DUPIC 핵연료의 설계와 조사시험용 캡슐의 설계를 수행하였으며, 이 설계에 근거하여 현재 조사시험용 캡슐을 제작 중에 있다. 이 캡슐은 무게장으로서 계속적으로 사용할 예정이기 때문에 "proof of concept"의 관점에서 초기 설계의 확립이 매우 중요하다. 이와 아울러 예비 단계에서 수행한 온도 등의 분석을 체계적으로 수행하여, 하나로에서 조사시험을 수행할 때 중요한 온도 분석과 이에 영향을 미치는 설계 인자를 분석하였다.

조사시험용으로 사용하기 위해서는 여러 가지 해석과 분석 및 인허가를 받아야 하는데 본 보고서에서는 예비적인 소결체 조사시험용 핵연료의 설계를 수행하였다. 핵연료의 설계에는 주로 소결체의 제원과 안전성을 고려한 이중 피복재 및 연료봉, 핵연료 assembly를 설계하였다.

온도의 분석은 매우 중요한 사항이나 처음 시도하는 업무로서 본 보고서에서는 HEATING7.2f를 이용하여 분석하였으며 보조로 GENGTC를 활용하여 분석 코드의 장단점 비교와 아울러 DUPIC 핵연료 조사시의 온도 분포 분석을 수행하였다. HEATING7.2f와 GENGTC는 사용목적에 맞도록 약간의 수정을 가하였다.

이 분석의 결과는 DUPIC 핵연료 조사시험의 안전성 분석을 위한 기초자료로 활용하며 조사시험후의 PIE 결과와 비교 검토하여 차후 유사한 실험에 대한 기반자료로 활용할 수 있을 것이다.

## 첨부 2. HEATING7.2f의 input 및 output 분석

### 1. General

- 입력은 title, parameter 및 data block으로 구성되며 data block은 keyword와 data cards로 되어 있다.
- keyword는 1행부터 4글자 이상의 주어진 문자로 인식되며 입력의 마지막은 %+'blank'로 끝난다.
- 각각의 숫자는 공백이나 ','로 구분되는데 문자는 반드시 공백으로 분리되어야 한다. 1 ~ 72행 까지만 data로 인식되며 73 ~ 80 행은 data의 label이 위치한다. 1줄의 data 양이 많으면 다음 줄에 '@'를 입력후 계속시킬 수 있으며 comment는 '\*' 로 시작한다.
- 단위는 서로 통일해야되며 radiation의 경우는 온도가 Fahrenheit로 계산되어 지므로 이를 알맞게 설정해 주어야 한다.
- 특수 목적의 부프로그램을 추가할 수 있다.

#### 1.1 실행방법

- HEATING을 설치한 후 H72\_PC diectory에 필요한 input file을 작성한 후(D1.dat 등)
- H7 -i d1.dat (return)으로 실행되며 자동으로 plot0000 이라는 graphic을 위한 output file과 print0000이라는 data output file이 생성된다.
- H7map (return)에 의해서 plot0000은 각 node와 온도의 table로 변환되어 온도를 알 수 있다.

## 2. 입력의 설명

### 2.1 제목

실험 및 계산의 제목으로서 생략할 수 없다.

### 2.2 Parameter

- Card P

- ① 최대의 CPU 시간(초) : 계산 중에 CPU 시간이 정해진 시간(초)보다 초과하면 강제로 정지됨.
- ② 좌표계 형식  
1 r- $\theta$ -z 2 r- $\theta$                       3 r-z                      4 r                      5 z  
6 x-y-z                      7 x-y                      8 x-z                      9 x  
10 r                      11 r- $\varphi$                       12 r- $\theta$ - $\varphi$
- ③ 초기 시간 : restart 또는 transient 때 사용함.  
재시작이 아니면 모든 초기시간을 나타내며, 재시작의 경우 이 시간부터 계산을 수행함. 0 이면 전 계산의 끝부터 계산함.
- ④ 온도 단위 : radiation이 포함된 경우에만 유효함.  
0 °F                      1 °C                      2 절대온도
- ⑤ Net transient energy flow calculation flag  
0이 아니면 transient에서 net energy flow를 계산해서 출력함
- ⑥ Convergence information flag  
0이 아니면 수렴과정에 대한 정보를 다른 파일로 출력함.
- ⑦ Output of selected information  
nodal description(1)  
capacitance, power, conductance at initial time level(10)  
capacitance, power, conductance at every reevaluation(20)  
Temp. distribution every steady-state iteration(100 or 200)  
Temp. distribution every transient explicit time level(100 or 200)  
Temp. distribution nonlinear transient implicit iteration(100)



Temp. distribution linear transient implicit iteration(200)  
예, 11, 31, 210, 311 등

## 2.3 Data Block

### 2.3.1 Region data block

- keyword card : REGIONS

- Card R1

- ① 구역 번호
- ② 물질 번호
- ③ 작은  $x(r)$  값
- ④ 큰  $x(r)$  값
- ⑤⑥⑦⑧ ;  $y(\theta)$ ,  $z(\varphi)$ 에 관한 범위 값

- Card R2

- ① 초기 온도 번호
- ② 열 발생 조건 번호
- ③ 작은  $x(r)$  값의 경계 조건
- ④ 큰  $x(r)$  값의 경계 조건
- ⑤⑥⑦⑧ ;  $y(\theta)$ ,  $z(\varphi)$ 에 관한 범위 값의 경계 조건

### 2.3.2 Materials data block

- keyword card : MATERIALS

- Card M

- ① 물질 번호
- ② 물질 이름
- ③ 열전도도(함수 사용할 때 함수값의 곱의 비율, anisotropy)
- ④ 밀도(함수 사용할 때 함수값의 곱의 비율)
- ⑤ 열용량(함수 사용할 때 함수값의 곱의 비율)
- ⑥ 열전도도의 온도의존 함수 번호

- ⑦ 밀도의 온도의존 함수 번호
- ⑧ 열용량의 온도의존 함수 번호
- ⑨ 상변태 여부(5 개를 넘지 못함)
- Card PC(상변태)
  - ① 상변태 온도
  - ② 잠열
- Card ML(물성 사전)
  - ① 물질 번호
  - ② 물질 이름(사전에 있는 약어의 이름)
  - ③ 변환시의 단위
    - 0 cm-g-s-cal-°C(default)            1 m-kg-s-J-°C            2 m-kg-s-J-K
    - 3 ft-lb-hr-Btu-°F            4 in-lb-s-Btu-°F
    - 5 user-defined : 다음의 변환 계수를 이용함.
  - ④ 밀도의 변환 계수
  - ⑤ 열용량의 변환 계수
  - ⑥ 열전도도의 변환 계수
  - ⑦ 온도의 변환 계수( $X_T$ ),  $T = X_T * T_{lib} + X_{TP}$
  - ⑧ 온도의 변환 계수( $X_{TP}$ )
  - ⑨ 상변태 여부

### 2.3.3 Initial temperature data block

- keyword card : INITIAL TEMPERATURES
- Card I
  - ① 초기 온도 번호
  - ② 초기 온도(함수 사용할 때 함수값의 곱의 비율)
  - ③ x 축 의존함수 번호
  - ④ y 축 의존함수 번호
  - ⑤ z 축 의존함수 번호

### 2.3.4 Heat generation data block

- keyword card : HEAT GENERATIONS

- Card G

- ① 열 발생 번호
- ② 부피 열 발생(함수 사용할 때 함수값의 곱의 비율)
- ③ 열 발생의 x 축 의존함수 번호
- ④ 열 발생의 y 축 의존함수 번호
- ⑤ 열 발생의 z 축 의존함수 번호

### 2.3.5 경계 조건

- keyword card : BOUNDARY CONDITIONS

- Card B1

- ① 경계 조건 번호
- ② 경계 조건 형식  
1 표면-경계                      2 고정 표면 온도                      3 표면-표면
- ③ 경계 온도(표면-표면의 경우는 사용 안함)
- ④ 시간 의존함수 번호
- ⑤ x 축 의존함수 번호(- 부호는 tabular)
- ⑥ y 축 의존함수 번호
- ⑦ z 축 의존함수 번호

- Card B2

- ① Forced convection heat transfer coefficient
- ② Coefficient for radiation
- ③ Natural convection multiplier term
- ④ Natural convection exponent term
- ⑤ Prescribed heat flux
- ⑥ 시간 및 온도 의존 flag

- Card B3(option)

- ① Forced convection coefficient 시간 의존함수 번호
- ② Radiation coefficient 시간 의존함수 번호

- ③ Natural convection multiplier 시간 의존함수 번호
- ④ Natural convection exponent 시간 의존함수 번호
- ⑤ Heat flux 시간 의존함수 번호

- Card B4(option)

- ① Forced convection coefficient 온도 의존함수 번호
- ② Radiation coefficient 온도 의존함수 번호
- ③ Natural convection multiplier 온도 의존함수 번호
- ④ Natural convection exponent 온도 의존함수 번호
- ⑤ Heat flux 온도 의존함수 번호

### 2.3.6 X(Y,Z) grid data block

- keyword card : X(Y,Z)GRID

- Card X1

x(y,z) 축 범위

- Card X2

node 수

### 2.3.7 Connector data block

- keyword card : CONNECTORS

- Card C1

- ① Base node 번호
- ② Base node에 연결될 node 수
- ③ 경계조건 번호
- ④ Reciprocal connector flag(역방향 고려 여부)

- Card C2

Paired data entries(C1의 2번 항에 해당하는 data pair)

첫 수는 base node에 연결될 node 번호

두 번째 수는 경계조건의 열전달계수의 곱의 비율

### 2.3.8 함수 data block(7.2f에서 수정됨)

- $F(v) = A_1 + A_2v + A_3v^2 + A_4v^3 + A_5v^4 + A_6\exp(A_7v) + A_8\sin(A_9v) + A_{10}\ln(A_{11}v)$
- keyword card : ANALYTICAL FUNCTIONS
- Card A1
  - ① 함수 번호
- Card A2
  - 함수 계수 번호
  - 함수 계수

### 2.3.9 Tabular 함수 data block

- keyword card : TABULAR FUNCTIONS
- Card T1
  - ① Tabular 함수 번호
- Card T2
  - 독립 변수
  - 종속 변수
  - linear interpolation을 사용함. extrapolation은 끝부분의 값을 사용

## 2.4 출력

### 2.4.1 출력 data block

- keyword card : PRINTOUT TIMES
- Card O
  - 출력시간

### 2.4.2 Node monitored data block

- keyword card : NODES MONITORED.

- Card S

- ① No. of s-s iterations or transient time step  
Nodes to be monitored

## 2.5 Solution sequence

### 2.5.1 Steady-state data block

- keyword card : STEADY-STATE

- Card SS

- ① Solution technique
  - 1 SOR 2 direct solution(1/2 dimension only)
  - 3 conjugate gradient
- ② 최대 iteration 수  
default : 500(SOR), 20(d.s. and c.g.)
- ③ 수렴 기준  
default : 10e-5
- ④ Overrelaxation factor  
default : 1.9(SOR),  $1 < \text{o.f.} < 2$
- ⑤ Updating time-dependent properties  
no. of iteration, default : 1
- ⑥ Time  
모든 시간 관련 함수의 계산 시각

### 2.5.2 Transient data block

- keyword card : TRANSIENT

- Card TR

- ① Transient Solution Technique
  - 1 Explicit(TR1)                      2 Implicit(TR2, TR3)
- ② 최종 시간

- Card TR1

① 초기 시간 단계

Stability criterion과 관계함. 0.0이면 stability criterion의 값을 사용한다.

② Levy Technique Option

Levy의 방법의 곱의 상수임. 0 또는 1이면 Levy 방법을 사용하지 않으며 1 보다 크면 ①의 값을 사용하지 않고 초기 값으로 stability criterion을 사용한다.

③ 온도 의존함수의 Updating

No. of time step. Levy방법을 사용하거나 0 또는 blank이면 매 time step 마다 계산함. 최대 값은 10

- Card TR2

① Implicit Time-differencing Scheme

$0.5 < \theta < 1.0$ , default는 0.5

② 수렴 기준 한도

Default는  $10e-5$

③ Number of Iterations Between Convergence Check for Linear Loop

Default is 1

④ 수렴 기준 한도 for 온도 의존 함수

default :  $10e-5$

⑤ 보조 수렴기준 한도 for 온도의존 함수

default is zero

⑥ SOR Acceleration Parameter Initial Value

positive : remain constant,

zero : optimized empirically

negative : Carre's technique로 계산함.

⑦ Time step between acceleration parameter optimization

⑥번이 0일 때 유효함. default is 1

⑧ Number of iterations criteria for acceleration parameter update

default is 12

⑨ Change-in-number-of-iteration criteria  
default is 2

- Card TR3(여러장 가능)

① Initial Time Step

0이면 stability criterion을 이용함.

② Time step multiplication factor

Default는 1.0. 변수가 완만히 변하면 1.0~1.1의 값 이용

③ Maximum Time step

Default is 10e50

④ Time at which new TR3 cas is to be read

default : 10e50

⑤ Maximum Temperature change per time step

0이면 작용안함

⑥ Maximum Percentage Temperature change per time step

0이면 작용안함

⑦ Minimum Time step

default is one-tenth of initial time step



첨부 3. HEATING7.2f의 입력 요약표

		Required Characters(4)	Label	Remark
Title		-		
Parameter		-	P	
Data block	Model	REGIONS	R1, R2	
		MATERIALS	M, PL, ML	
		INITIAL CONDITIONS	I	
		HEAT GENERATIONS	G	
		BOUNDARY CONDITIONS	B1 ~ 4	
		XGRID	X1, X2	
		YGRID	Y1, Y2	
		ZGRID	Z1, Z2	
		CONNECTORS	C1, C2	
		ANALYTICAL FUNCTIONS	A1, A2	
	TABULAR FUNCTIONS	T1, T2		
	Output	PINTOUT TIMES	O	
		NODE MONITORED	S	
	Solution Sequence	STEADY-STATE	SS	
TRANSIENT		TR, TR1~3		
%		-		

첨부 4. 표준조건 의 HEATING7.2f Input

DUPIC Fuel

\* mini-element in capsule-element

\* Units: J, kg, s, mm, C

\* Time limit, Axis

15 4

P

REGIONS

1 1 0.0 6.077

R1

1 1 0 0

R2

2 3 6.077 6.1215

R1

1 0 0 0

R2

3 2 6.1215 6.5405

R1

1 2 0 0

R2

4 3 6.5405 6.6405

R1

1 0 0 0

R2

5 4 6.6405 7.1405

R1

1 3 0 2

R2

MATERIALS

1 Fuel 0.1 10.96 0.0 1

M

2 Zircaloy 0.1 6.47 0.0 2

M

3 Helium 0.1 0.00 0.0 3

M

4 S-Steel 0.1 7.8 0.0 4

M

HEAT GENERATIONS

\* fuel, zircaloy, s.s(304)

1 0.3880

G

2 0.059995

G

3 0.059982

G

INITIAL TEMPERATURE

1 51.0

I

BOUNDARY CONDITIONS

2 1 50.0

B1

2.7e-2

B2

XGRID

0.0 6.077 6.1215 6.5405 6.6405 7.1405

X1

```

19      4      4      4      4
ANALYTICAL FUNCTIONS
* thermal conductivity of DUPIC fuel(1), zircaloy(2), He(3), S-steel(4)
1                                             A1
1 0.04154 2 -3.32E-5 3 2.21E-8 4 -8.90E-12 5 1.75E-15 A2
2                                             A1
1 0.110 2 0.154E-3 3 -0.509E-6 4 0.156E-8 5 -0.121E-11 A2
3                                             A1
1 0.143E-2 2 0.325E-5 3 -0.768E-9 A2
4                                             A1
1 0.149 2 0.128E-3 A2
STEADY-STATE
2 500 SS
*
```

첨부 5. 표준조건의 HEATING7.2f의 Output

Current Time: 06-Feb-98 09:46:32

Computer: PC/DOS

```
H H EEEEE AAA TTTT III N N GGG
H H E A A T I N N G G
H H E A A T I NN N G
HHHHH EEE AAAAA T I N N N G
H H E A A T I N NN G GG
H H E A A T I N N G G
H H EEEEE A A T III N N GGG
```

Version : HEATING 7.2f

Release date : August 31, 1993

Contacts : Kenneth W. Childs or Gary E. Giles  
Phone : (615) 576-1759 (615) 574-8667  
FAX : (615) 576-0003 (615) 576-0003  
E-mail : KCH@ORNL.GOV GEG@ORNL.GOV  
Address : Heat Transfer and Fluid Flow Group  
Computing Applications Division  
Oak Ridge National Laboratory  
Post Office Box 2003  
Oak Ridge, Tennessee 37831-7039

\*\*\*\*\* ECHO OF INPUT DATA \*\*\*\*\*

Record

```
1 DUPIC Problem 1
2 * mini-element in capsule-element
3 * Units: J, kg, s, mm, C
4 * Time limit, Axis
5 15 4 P
6 REGIONS
7 1 1 0.0 6.077 R1
```

8	1	1	0	0						R2
9	2	3	6.077	6.1215						R1
10	1	0	0	0						R2
11	3	2	6.1215	6.5405						R1
12	1	2	0	0						R2
13	4	3	6.5405	6.6405						R1
14	1	0	0	0						R2
15	5	4	6.6405	7.1405						R1
16	1	3	0	2						R2
17	MATERIALS									
18	1	Fuel	0.1	10.96	0.0	1				M
19	2	Zircaloy	0.1	6.47	0.0	2				M
20	3	Helium	0.1	0.00	0.0	3				M
21	4	S-Steel	0.1	7.8	0.0	4				M
22	HEAT GENERATIONS									
23	* fuel, zircaloy, s.s(304)									
24	1	0.3880								G
25	2	0.059995								G
26	3	0.059982								G
27	INITIAL TEMPERATURE									
28	1	51.0								I
29	BOUNDARY CONDITIONS									
30	2	1	50.0							B1
31	2.7e-2									B2
32	XGRID									
33	0.0	6.077	6.1215	6.5405	6.6405	7.1405				X1
34	19	4	4	4	4					X2
35	ANALYTICAL FUNCTIONS									
36	* thermal conductivity of DUPIC fuel(1), zircaloy(2), He(3), S-steel(4)									
37	1									A1
38	1	0.04154	2	-3.32E-5	3	2.21E-8	4	-8.90E-12	5	1.75E-15
39	2									A1
40	1	0.110	2	0.154E-3	3	-0.509E-6	4	0.156E-8	5	-0.121E-11
41	3									A1
42	1	0.143E-2	2	0.325E-5	3	-0.768E-9				A2
43	4									A1
44	1	0.149	2	0.128E-3						A2
45	STEADY-STATE									
46	2	500								SS

\*\*\*\*\* CASE DESCRIPTION \*\*\*\*\*

DUPLIC Problem 1

\*\*\*\*\* SUMMARY OF PARAMETER CARD DATA \*\*\*\*\*

Maximum cpu time - 15.00 seconds  
 Geometry type number - 4 (or r-cy)  
 Initial time - 0.000000D+00  
 Temperature units - Fahrenheit (Significant only if radiation involved)

This is a restart of previous case - No  
 Read node-to-node connector data file - No  
 Redirect or suppress convergence information - Yes (Suppress)

Output selected information during calculations - No

\*\*\*\*\* SUMMARY OF REGION DATA \*\*\*\*\*

Region Number	Material Number	Initial Temp. No.	Heat Gen. Number
1	1	1	1
2	3	1	0
3	2	1	2
4	3	1	0
5	4	1	3

----- Dimensions / Boundary Numbers -----

Region Number	First Axis		Second Axis		Third Axis	
	Smaller	Larger	Smaller	Larger	Smaller	Larger
1	0.0000E+00	6.0770E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	0	0	0	0	0	0
2	6.0770E+00	6.1215E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

	0	0	0	0	0	0
3	6.1215E+00	6.5405E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	0	0	0	0	0	0
4	6.5405E+00	6.6405E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	0	0	0	0	0	0
5	6.6405E+00	7.1405E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	0	2	0	0	0	0

\*\*\*\*\* SUMMARY OF MATERIAL DATA \*\*\*\*\*

Material Number	Material Name	----- Thermal Parameters -----			Phase Change
		-- Temperature-Dependent Function Numbers --			
		Conductivity	Density	Specific Heat	
1	fuel	1.000000D-01	1.096000D+01	0.000000D+00	No
		1	0	0	
2	zircaloy	1.000000D-01	6.470000D+00	0.000000D+00	No
		2	0	0	
3	helium	1.000000D-01	0.000000D+00	0.000000D+00	No
		3	0	0	
4	s-steel	1.000000D-01	7.800000D+00	0.000000D+00	No
		4	0	0	

\*\*\*\*\* SUMMARY OF INITIAL TEMPERATURE DATA \*\*\*\*\*

Number	Initial Temperature	Position-Dependent Function Numbers		
		x or r	y or th	z or p
1	5.10000D+01	0	0	0

\*\*\*\*\* SUMMARY OF HEAT GENERATION RATE DATA \*\*\*\*\*

Number	Power Density	Time-, Temperature-, and Position-Dependent Function Numbers				
		Time	Temperature	X or R	Y or Theta	Z or Phi
1	3.88000D-01	0	0	0	0	0
2	5.99950D-02	0	0	0	0	0
3	5.99820D-02	0	0	0	0	0

\*\*\*\*\* SUMMARY OF BOUNDARY CONDITION DATA \*\*\*\*\*

Number: 2 Type: Surface-to-Environment  
 Temperature and Any Functions Used to Define Dependence:  
 Temperature : 5.000000E+01  
 Heat Transfer Coefficients and Any Functions Used to Define Dependence:  
 Forced Convection : 2.700000E-02

\*\*\*\*\* SUMMARY OF GRID STRUCTURE \*\*\*\*\*

X (or R) Gross Grid Lines and Number of Divisions

0.000000E+00	6.077000E+00	6.121500E+00	6.540500E+00	6.640500E+00
7.140500E+00				
19	4	4	4	4

X (or R) Fine Grid Lines Generated by HEATING

1	0.00000E+00	2	3.19842E-01	3	6.39684E-01	4	9.59526E-01
5	1.27937E+00	6	1.59921E+00	7	1.91905E+00	8	2.23889E+00
9	2.55874E+00	10	2.87858E+00	11	3.19842E+00	12	3.51826E+00
13	3.83811E+00	14	4.15795E+00	15	4.47779E+00	16	4.79763E+00
17	5.11747E+00	18	5.43732E+00	19	5.75716E+00	20	6.07700E+00
21	6.08812E+00	22	6.09925E+00	23	6.11037E+00	24	6.12150E+00
25	6.22625E+00	26	6.33100E+00	27	6.43575E+00	28	6.54050E+00
29	6.56550E+00	30	6.59050E+00	31	6.61550E+00	32	6.64050E+00
33	6.76550E+00	34	6.89050E+00	35	7.01550E+00	36	7.14050E+00

\*\*\*\*\* LISTING OF ANALYTICAL FUNCTIONS \*\*\*\*\*

$$f(v) = a(1) + a(2)*v + a(3)*v*v + a(4)*v*v*v + a(5)*v*v*v*v + a(6)*\exp(a(7)*v) + a(8)*\sin(a(9)*v) + a(10)*\log(a(11)*v)$$

Analytical Function Number: 1

a( 1) = 4.15400E-02  
 a( 2) = -3.32000E-05  
 a( 3) = 2.21000E-08



a( 4) = -8.90000E-12  
a( 5) = 1.75000E-15

Analytical Function Number: 2

a( 1) = 1.10000E-01  
a( 2) = 1.54000E-04  
a( 3) = -5.09000E-07  
a( 4) = 1.56000E-09  
a( 5) = -1.21000E-12

Analytical Function Number: 3

a( 1) = 1.43000E-03  
a( 2) = 3.25000E-06  
a( 3) = -7.68000E-10

Analytical Function Number: 4

a( 1) = 1.49000E-01  
a( 2) = 1.28000E-04

\*\*\*\*\* SOURCES OF NON-LINEARITY IN THE MODEL \*\*\*\*\*

Temperature dependent conductivity

\*\*\*\*\* NUMBER OF PARAMETERS SPECIFIED BY THE INPUT DATA \*\*\*\*\*

Regions	5
Materials	4
Phase changes	0
Initial temperatures	1
Heat generations	3
Boundary conditions	1
Gross grid lines along x or r axis	6
Fine grid lines along x or r axis	36
Gross grid lines along y or theta axis	1
Fine grid lines along y or theta axis	1
Gross grid lines along z or phi axis	1
Fine grid lines along z or phi axis	1

Analytic functions	4
Tabular functions	0
Node-to-node connectors	0
Transient printout times	0
Nodes for monitoring of temperatures	0
Number of nodes	36
Number of specified-temperature nodes	0
Position-dependent boundary temperature nodes	0
Bandwidth for direct solution	3

\*\*\*\*\* MEMORY REQUIREMENTS FOR VARIABLY DIMENSIONED ARRAYS \*\*\*\*\*

Phase 1	5K
Phase 2	10K
Phase 3	11K
Phase 4	14K

\*\*\*\*\* INITIAL CONDITIONS \*\*\*\*\*

Number of iterations completed = 0  
Current problem time = 0.0000000D+00  
Elapsed cpu time (hr:min:sec) = 00:00:00.72

Minimum Temperature = 5.10000E+01 at node 7  
Maximum Temperature = 5.10000E+01 at node 2

HEAT GENERATION

Number	Current Rate (energy/time)	
	(Modeled)	(Neglected)
1	4.50153E+01	0.00000E+00
2	9.99957E-01	0.00000E+00
3	1.29844E+00	0.00000E+00
---	-----	-----
Sum	4.73137E+01	0.00000E+00

BOUNDARY HEAT FLOW

Number	Environment	Current Rate (energy/time)
--------	-------------	----------------------------

	Temperature	(Modeled)	(Neglected)
2	5.00000E+01	-1.21136E+00	0.00000E+00

\*\*\*\*\*

BEGIN STEADY STATE CALCULATION - DIRECT SOLUTION TECHNIQUE

\*\*\*\*\*

Maximum number of iterations = 500  
 Convergence criterion = 1.000000D-05

\*\*\*\*\* STEADY-STATE SOLUTION OUTPUT \*\*\*\*\*

Number of iterations completed = 8  
 Current problem time = 0.0000000D+00  
 Elapsed cpu time (hr:min:sec) = 00:00:00.83

Minimum Temperature = 8.90584E+01 at node 36  
 Maximum Temperature = 2.41594E+03 at node 1

HEAT GENERATION

Number	Current Rate (energy/time)	
	(Modeled)	(Neglected)
1	4.50153E+01	0.00000E+00
2	9.99957E-01	0.00000E+00
3	1.29844E+00	0.00000E+00
---	-----	-----
Sum	4.73137E+01	0.00000E+00

BOUNDARY HEAT FLOW

Number	Environment	Current Rate (energy/time)	
		Temperature	(Modeled) (Neglected)
2	5.00000E+01	-4.73137E+01	0.00000E+00

\*\*\*\*\* END OF HEATING EXECUTION \*\*\*\*\*

DUPIC Problem 1

\*\*\*\*\* Number of warnings -- 0

\*\*\*\*\* Number of errors -- 0

## 첨부 6. GENGTC 분석

### 1. 개요

GENGTC-PC는 FORTRAN으로 작성된 온도분석용 프로그램이다. 본 분석에 사용된 파일은 다음과 같이 구성되어 있다.

GEND.EXE(GEND.FOR) : Main program(source)

MGEN.DAT : 각종 재료의 물성 데이터 파일

D1.DAT : Input data file

D1.TXT : Output data file

#### 1.1 사용 방법

사용 방법은 DOS 창에서 같은 directory 내에 모든 file을 copy한 후 D1.dat의 input file에 필요한 사항을 입력 후,

gend (return) 하면 input file을 물어보며 이를 입력하면 자동으로 output file이 생성된다.

### 2. 입력 data

#### 2.1 Group A : Title

TITL : Title

#### 2.2 Group B : 기본조건

ND9 : node 수

NFUEL : 중심온도 계산 방법의 종류

1 = Lyons equation (UO<sub>2</sub>)

0 = 평균온도법

-1 = Baily-Asamoto equation( (Pu,U)O<sub>2</sub>)

-2 = Asamoto equation (UO<sub>2</sub>)

NGT : 소결체 표면의 열전도조건

0 = 열전도율 사용( $W/cm^2 \cdot ^\circ C$ )

-1 = gap 전도율 사용

NP : 소결체내의 출력밀도분포 사용할 때 분할 수(<20)

NOPT : 선출력을 node 1 이외에 적용할 때의 대상 번호

NOPT>0 이면 NFUEL은 평균온도법을 적용함.

MOD : 소결체에서 온도에 따라서 밀도를 보정할 경우 1을 입력하며

이때에는 1400, 1900 $^\circ C$ 로 나누어 계산함.

2.2 Group C : 소결체내의 출력 밀도분포

RP(i), i=1, NP : 출력밀도영역의 반경(cm)

CP(i), i=1, NP : 중심을 1로한 선출력비

2.2 Group D : 초기 변수

H11 : capsule 외표면의 열전도율( $W/cm^2 \cdot C$ )

T11 : 냉각수온도

R11 : 중심에 hole이 있는 경우의 hole의 반경(cm)

DENS : 이론밀도비(%)

GAP : 소결체 표면 열전달율( $W/cm^2 \cdot ^\circ C$ )

NGT=0 및 GAP=0.0이면 GAP=0.7383으로 계산함

2.2 Group E : node에 변수

R(i), i=1, ND9 : 각 node의 반경(cm)

PG(i), i=1, ND9 : Gamma 가열율의 node 마다의 가열비(%)

E(i), i=1, ND9 : 각 node 표면의 복사율(%)

2.2 Group F : 계산 변수

NGEO : gap 해석 회수

NGAM : gamma 가열율 해석회수

NPOWER : 선출력 해석회수

NGET : gap 치수를 변동시키는 node 번호

GDELT : gap 치수의 미소변동치(cm)

G11(i), i=1, NGAM : gamma 가열율(W/g)

F11(i), I=1, NPOWER : 선출력(W/cm)

## 2.2 Group G : 물성치에 대한 변수

MX(i), i=1, ND9 : 재료의 종류

0 = 기체/액체, 1 = 고체

NW(i), i=1, ND9 : 각 node의 재료 번호(표 참조)

NW(i) = 0 이면 C(j, I)와 S(j, I)를 사용함.

D(y) : 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

C(j, i), i=1, 5 : 열전도율(W/cm<sup>2</sup> · °C)

$$C_f = C_0 + C_1T + C_2TT + C_3TTT + C_4TTTT$$

S(j, i), i=1, 2 : 열팽창율(°C<sup>-1</sup>)

$$L_f = (S_0 + S_1T) \cdot 10^{-6}, T \text{는 } ^\circ\text{C}$$

### 재료번호표

번호	재료	번호	재료
1	Nb-1%Zr	14	Graphite
2	Hastelloy-X	15	Li
3	He	16	Mo
4	NaK-44	17	W
5	Ne	18	Sol-gel
6	SUS316	19	SiC
7	SUS304	20	Al
8	T-111	21	N <sub>2</sub>
9	UN	22	Ti
10	UO <sub>2</sub>	23	2/5H
11	W-26%Re	24	Ta
12	Zr-2	25	Be
13	Ar		

첨부 7. 표준 GENGTC 입력

```
*          *****
*          * GENTC-PC INPUT DATA LIST *
*          *****
* -----
* A. --- TITLE CARD ---
*  TITLE : DUPIC capsule-element
* -----
*
* B. --- CONTROL ---
* ND9    NFUEL   NGT    NP    NOPT   MOD
*   5      0     -1     0     0       0
*
* C.1 IF NP GREATER THAN ZERO RP & CP REQUIRED
*  RP(I), CP(I)
*  0.6077
*  1.0
*
* D. ----- BASIC CONSTANT -----
*
* H11      T11    R11    DENS    GAP
*  2.7     50.0   0      1.0     0.7
*
* E. ----- NODE POINT PARAMETER -----
*
* <1> R (I), I=1,ND9 : RADIAL CM
* <2> PG(I), I=1,ND9 : GAMMA HEATING PERCENTAGE BY MATERIAL
* <3> E (I), I=1,ND9
*
*  0.6077  0.61215  0.65405  0.66405  0.71405
*  0.00    0.0      1.0      0.0      0.833
*  0.0     0.0      0.0      0.0      0.0
*
* F. ----- ANALYTICAL PARAMETER -----
```



```

*
* N GEO      NGAM      NPOWER
  1          1          1
*
* <1> GEOMETICAL PARAMETER ( NODE & DELTA GAP )
* NGET      GDELTA
  2          0.001
*
* <2> GAMMA HEATING
* G11(I), I=1,NGAM W/G ; NODE DATA DEFINE BY MULTIFLY %
  3.664
*
* <3> LINEAR POWER GENERATION W/CM
* F11(I), I=1,NPOWER W/CM
  450.
*
* <4> IFGA  IFGI  :  IFGB  IFG2  :  IFGC  IFG3
*   THREE LINE REQUIRED
  0    2    2    2
  0    2    2    2
  0    2    2    2
*
* G. -----PHYSICAL PARAMETER BY MATERIAL -----
*
* <1> MX(I), I=ND9
* <2> NW(I), I=ND9
  1    0    1    0    1
  0    3    12   3    6
* <3> USER COEFFICIENT
* D      C1      C2      C3      C4      C5      S1  S2
  10.96 0.04154 -3.32E-5 2.21E-8 -8.90E-12 1.75E-15 9.61 .16E-2
*
*

```

첨부 8. 표준 GENGTC 출력

```

*          *****
*          * GENTC-PC INPUT DATA LIST *
*          *****
* -----
* A. --- TITLE CARD ---
* TITLE : DUPIC capsule-element
* -----
*
* B. ---- CONTROL ----
* ND9      NFUEL   NGT    NP     NOPT   MOD
*   5         0     -1     0      0      0
*
* C.1 IF NP GREATER THAN ZERO RP & CP REQUIRED
* RP(I), CP(I)
* 0.6077
* 1.0
*
* D. ----- BASIC CONSTANT -----
*
* H11      T11     R11     DENS    GAP
* 2.7      50.0   0       1.0    0.7
*
* E. ----- NODE POINT PARAMETER -----
*
* <1> R (I), I=1,ND9 : RADIAL CM
* <2> PG(I), I=1,ND9 : GAMMA HEATING PERCENTAGE BY MATERIAL
* <3> E (I), I=1,ND9
*
* 0.6077  0.61215  0.65405  0.66405  0.71405
* 0.00    0.0      1.0      0.0      0.833
* 0.0     0.0     0.0      0.0      0.0
*
* F. ----- ANALYTICAL PARAMETER -----
*
* NGEO      NGAM     NPOWER
* 1          1        1
*
*

```

```

* <1> GEOMETICAL PARAMETER ( NODE & DELTA GAP )
* NGET      GDELTA
   2        0.001
*
* <2> GAMMA HEATING
* G11(I), I=1,NGAM W/G ; NODE DATA DEFINE BY MULTIFLY x
   3.664
*
* <3> LINEAR POWER GENERATION W/CM
* F11(I), I=1,NPOWER W/CM
   450.
*
* <4> IFGA  IFGI  : IFGB  IFG2  : IFGC  IFG3
*   THREE LINE REQUIRED
   0   2   2   2
   0   2   2   2
   0   2   2   2
*
* G. -----PHYSICAL PARAMETER BY MATERIAL -----
*
* <1> MX(I), I=ND9
* <2> NW(I), I=ND9
   1   0   1   0   1
   0   3   12  3   6
* <3> USER COEFFICIENT
* D      C1      C2      C3      C4      C5      S1  S2
   10.96 0.04154 -3.32E-5 2.21E-8 -8.90E-12 1.75E-15 9.61 .16E-2
*
*

```

TITLE : DUPIC capsule-element

1 TI

INPUT DATA

```

ND9  : MAX. NODE NO. = 5   NPOWER : NQF      = 1
NGAM : NQG           = 1   NCEO   : NDIM     = 1
T11  : COOLANT TEMP.      = 50.00 C.
H11  : SURFACE COEFF.     = 2.70 W/CM2.C.
GAP  : GAP CONDUCTANCE    = .70 W/CM2.C.

```

R11 : INSIDE HOLE RADIUS = .00 CM.  
 NFUEL : LAMBDA OF SPECIMEN = 0

CETUS

NP : NO. OF REGION FOR POWER DIST. = 0  
 DENS : INITIAL DENSITY = 1.0000

	RADIUS (CM)	EMISSIVITIES	MAT TYPE	MAT SEL
1	.6077	.0000	1	0
2	.6122	.0000	0	3
3	.6540	.0000	1	12
4	.6640	.0000	0	3
5	.7140	.0000	1	6

NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS

	DENSITY GR/CC.	C0 W/CM.C	C1	C2	C3	C 4	A0 *1.E-06/C.	A1
1	10.960	.415E-01	-.332E-04	.221E-07	-.890E-11	.175E-14	9.610	.160E-02
2	.000	.143E-02	.325E-05	-.768E-09	.000E+00	.000E+00	.000	.000E+00
3	6.470	.110E+00	.154E-03	-.509E-06	.156E-08	-.121E-11	6.584	.781E-03
4	.000	.143E-02	.325E-05	-.768E-09	.000E+00	.000E+00	.000	.000E+00
5	7.800	.141E+00	.137E-03	.000E+00	.000E+00	.000E+00	15.564	.270E-02

1 --- RESULT ---

RUN NUMBER : 1 1 1  
 1. GAP : 4.450E-03  
 2. GAMMA HEATING : 3.664E+00  
 3. LINEAR POWER : 4.500E+02

TEMP. DISTRIBUTION, C.

NODE	TEMPERATURE C.	POWER(F,G) W/CM.	T. CONDUCTIVITY, W/CM. C.	MAT. NO.	COLD RADIUS CM.	CALC. RADIUS CM.	ACT. RADIUS CM.
0	2280.40						
1	.639E+03	.450E+03	.204E-01	0	.60770E+00	.61170E+00	.61170E+00
2	.541E+03	.450E+03	.308E-02	3	.61215E+00	.61429E+00	.61429E+00
3	.515E+03	.454E+03	.185E+00	12	.65405E+00	.65634E+00	.65634E+00
4	.122E+03	.454E+03	.239E-02	3	.66405E+00	.66492E+00	.66492E+00
5	.879E+02	.459E+03	.155E+00	6	.71405E+00	.71498E+00	.71498E+00

**서 지 정 보 양 식**

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1035/98	-	-	-		
제목/부제	조사시험용 DUPIC 핵연료 온도분석				
주저자	배기광/핵연료 설계 및 성능평가				
연구자 및 부서명	정인하, 박희성, 이철용, 이도연, 이영순, 양명승/핵연료 설계 및 성능평가 문재선/TRIGA 연구로 페로 사업팀 박현수/핵연료주기 기술개발단				
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1998. 3
면수	69	도포	유( O ), 무( )	크기	26 cm
참고사항	-				
비밀여부	공개(O), 대외비( ),	급비밀	보고서종류	기술보고서	
위탁연구기관	-		계약번호	-	
<p><b>초록(300 단어 내외)</b></p> <p>DUPIC 핵연료 소결체의 하나로 조사시험과 관련하여 이중 피복관으로 구성된 소결체 설계를 수행하였으며 각각의 설계 변수 및 제조 변수가 핵연료의 온도분포에 미치는 영향을 HEATING과 GENGTC를 이용하여 예비분석을 수행하였다. 분석한 결과, 1) DUPIC 핵연료의 조사시험시 열전도도, 출력, 반경 틸새 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치며, 2) 피복재 두께, gamma 열, 열전달 계수 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치지 않는다. 3) HEATING으로 계산한 핵연료의 중심온도가 GENGTC로 계산한 중심온도보다 다소 높게 얻어 안전성의 관점에서 볼때 GENGTC보다 HEATING을 이용하는 것이 바람직하며, 4) Transient 온도 분석의 경우 약 160초 이상의 시간에서 평형 온도에 도달한다.</p>					
<p><b>주제명 키워드(10 단어 내외) :</b></p> <p>DUPIC 핵연료, 소결체, 하나로, 조사시험해석, 온도분석</p>					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Per. Org. Rep. No.	Spon.Org. Rep. No	Standard Rep. No	INIS Sub. No.		
KAERI/TR-1035/98	-	-	-		
Title/Subtitle	Temperature Effect Analysis of DUPIC Pellet for Irradiation				
Proj. Mang./Dept. (main author)	K.K.Bae/DUPIC fuel design and evaluation				
Researchers/Dept.	I.H.Jung, H.S.Park, C.Y.Lee, K.H.Kang, D.Y.Lee, Y.S.Lee, M.S.Yang/DUPIC Fuel Design & Evaluation J.S.Moon/TRIGA Reactor D&D Team H.S.Park/Nuclear Fuel Cycle Dev. Group				
Pub. Place	Teajon	Pub. Org.	KAERI	Date	1998. 3
Page	69	Ill. & Tab.	Yes( O ), No( )	Size	26 cm
Note	-				
Classified	Open(O ), Outside( ),	Class	Rep. Type	Technical	
Spons. Org.	-		Contract No.	-	
<p>Abstract(about 300 words)</p> <p>Conceptual design of DUPIC irradiation pellets with double cladding was carried out. And the preliminary study of the temperature effect on the design and manufacturing parameters of DUPIC pellets through HEATING and GENGTC was performed.</p> <p>The analysed results of the newly designed DUPIC pellets to be irradiated in HANARO, were, 1) thermal conductivity of fuel, linear power of fuel and axial gap affected greatly the temperature of fuel, 2) thickness of sheath, gamma heating rate and thermal transfer coefficient affected little the temperature of fuel. 3) the centerline temperature calculated by HEATING was evaluated higher than that by GENGTC such presented to be desirable for using GENGTC in the view point of safety GENGTC, 4) by transient thermal analysis, after 160 seconds, the temperature of fuel reaches its equivalent temperature.</p>					
<p>Subject Keywords(about 10 words) :</p> <p>DUPIC fuel, pellet, HANARO, irradiation analysis, temperature analysis</p>					