

## 핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐의 열해석

### Thermal Analysis of on the Open Basket Type Instrumented Capsule for Nuclear Fuel Irradiation Test

김도식\*, 손재민, 김봉구, 오종명, 서철교, 강영환  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

핵연료 조사시험용 계장캡슐은 다양한 핵연료의 성능평가를 위하여 하나로의 OR조사공에서 조사시험될 예정이다. 핵연료 개방형 계장캡슐의 조사시험 중 안전성 및 이용자 요구조건의 만족여부를 확인하고자 열해석을 수행하였다. 이를 위하여 온도와 열응력 해석을 함께 수행할 수 있는 ANSYS를 사용하였으며, 이로부터 얻어진 핵연료봉의 온도분포에 대한 정확성을 검토하기 위한 이론해석에서는 각 층의 열전달이 시간에 무관한 정상상태(steady state)이고, 냉각수 온도는 일정하다고 가정하였다. 이상의 두 가지 해석법으로 평가된 핵연료 소결체의 중심온도는 평균 선출력= 29.677kW/m인 경우 유한요소해석에서는 1227°C 그리고 이론해석에서는 1234°C이었으며, 최대 선출력=33.557kW/m에서는 각각 1433°C와 1429°C로 거의 동일하였다. 또한 최고온도 발생부에서 피복관의 응력강도는 소결체 선출력에 따라 38.3MPa 및 45.1MPa이다. 하단 end cap과 피복관 접촉면에서 피복관의 응력강도는 각각 35.0MPa과 38.5MPa이다. 이상의 열적 해석결과로부터 조사시험 중 소결체의 온도가 이용자들의 요구조건에 부합하는지를 판단할 수 있다. 또한 계산된 열응력과 기계적 응력 그리고 사용된 피복관의 허용응력을 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III의 강도평가 기준에 적용하여 개방형 핵연료 계장캡슐의 고온 안전성을 확인하였다.

#### Abstract

To develop the open basket type instrumented capsule to be used for the irradiation test of various nuclear fuels, it is necessary to examine the thermal behavior due to a thermal gradient as well as the compatibility of a capsule with HANARO and the

structural integrity of a capsule. The thermal analysis of instrumented capsule was performed by using ANSYS, a commercial finite element analysis(FEA) code. To ensure the accuracy of temperature analysis results by ANSYS, the theoretical analysis based on the heat transfer theory was done. From these two methods, the center temperature of pellet was 1227°C(FEA) and 1234°C(theoretical analysis) in the case of average linear power=29.677kW/m, and 1433°C and 1429°C in the case of maximum linear power=33.557kW/m. The maximum stress intensities in the cladding due to thermal gradient were 38.3MPa and 45.1MPa in each linear power. At the contact part of bottom end cap and cladding, the stress intensity of cladding was 35.0MPa in 29.677kW/m and 38.5MPa in 33.557kW/m respectively. The thermal stresses calculated by ANSYS and the mechanical stress due to the difference of internal and external pressures of fuel rod were satisfied with the strength criterion of ASME Boiler & Pressure Vessel Code.

Through the above thermal analysis, it could be decided whether the irradiation temperature condition of pellet agrees with that requested by users. In addition, it was ensured that the instrumented capsule for nuclear fuel irradiation test meets the strength criterion in ASME Boiler & Pressure Vessel Code during the irradiation test in HANARO.

## 1. 서 론

기존의 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 자료들과 하나로 OR 조사공에서의 핵적특성 및 양립성 등을 고려하여 선정된 핵연료 개방형 계장캡슐은 조사시험 중 캡슐 외통의 내·외부로 냉각수가 흘러 핵연료봉을 직접 냉각시키는 구조를 가지고 있다. 선정된 핵연료 계장캡슐은 OR 조사공에서의 수력조건을 만족하도록 설계되었으며, 조사시험 중 내진, 좌굴 및 충격 안정성 등 구조적 건전성이 확인된바 있다<sup>[1~4]</sup>. 이와 같은 해석결과를 기초로 핵연료 계장캡슐의 기본설계를 완성하였으며, 조사시험 중 캡슐의 열적 안전성 및 이용자의 요구 조사조건(핵연료 조사온도, 선출력 및 연소도 등)에 대한 만족여부를 검토하기 위하여 핵연료 개방형 계장캡슐에 대한 온도 및 열응력을 평가하였다.

핵연료 소결체의 조사온도 평가 및 핵연료 계장캡슐의 고온 건전성을 검토하기 위하여 상용 유한요소 코드인 ANSYS를 이용한 온도 및 열응력해석을 수행하였다. 또한 이로부터 얻어진 온도계산 결과를 비교·검토하기 위하여, 핵연료봉 각 층에서의 열전달이론을 적용한 이론적 온도평가도 수행하였다. 또한 캡슐 내부에 장착된 핵연료봉에는 소결체가 장전되어 중성자 조사시 열과 핵분열 생성기체가 발생하므로 온도 및 압력변화가 예상된다. 따라서 이상의 온도해석 결과를 토대로 피복관 내·외면 최고 온도차에 의한 최대 열응력과 기계적 응력을 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III의 기준에 적용하여 핵연료 개방형 계장캡슐의 고온 건전성을 확인하였다.

## 2. 핵연료 개방형 계장캡슐

하나로 OR 조사공에서 조사시험 될 예정인 핵연료 개방형 계장캡슐은 캡슐 본체의 최하단인 rod tip으로부터 상단 end plate 그리고 하부 스톱퍼(lower fixture stopper)를 통하여 흐르는 냉각수에 의하여 냉각되어진다. 조사시험 중 피복관의 온도가 상승하므로 OR 조사공에서의 수력조건(유량 12.7kg/s 이하, 압력강하 200kPa 이상)을 만족하고 동시에 핵연료봉의 냉각효율을 높이기 위하여 캡슐 본체의 외통, 상·하단 end plate와 핵연료봉 어셈블리(fuel element assembly) 그리고 보호관(protection tube) 및 하부 스톱퍼의 최적 치수를 결정하였다<sup>[1]</sup>. 그림 1은 개방형 핵연료 계장캡슐의 개략도이며, 본체 내에 장전된 핵연료봉의 형상 및 치수는 그림 2에 나타내었다. 핵연료봉은 피복관 내부에 5개의 소결체, 소결체 상·하부에 2개씩의 fuel pellet spacer가 장입되고, 그 상부에 소결체 고정용 fuel rod plenum spring이 삽입된 후, 약 1기압의 He이 충전되고, 피복관 상·하부에 end cap을 용접하여 제작된다. 핵연료봉 각 부위에 사용된 재질은 그림 2에 표시하였다.

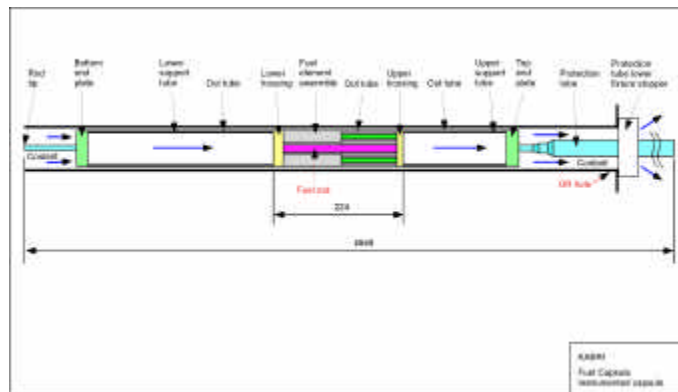


그림 1 핵연료 조사시험용 계장캡슐 개략도

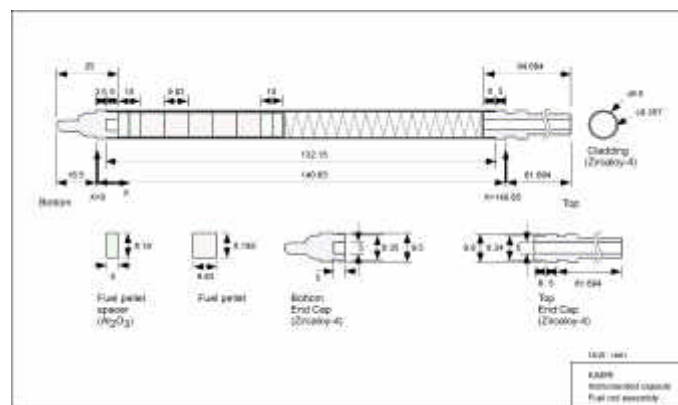


그림 2 핵연료봉 개략도

### 3. 핵연료봉의 온도 해석

#### 3.1. 유한요소해석

그림 2의 핵연료봉에 대한 구조적 대칭성을 이용하여 1/4 모델링하고, 피복관 외면에 대류경계조건 그리고 피복관과 소결체사이의 He gap에 대해서는 전도만을 고려하였다. 해석에 사용된 요소는 8개의 절점과 각 절점에서 6개의 자유도를 가지며, 응력 및 온도해석이 가능한 Solid 5(3-D Coupled-field solid)를 사용하였다. 그림 3은 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS에 의하여 작성된 3차원 해석모델이다.



그림 3 유한요소 해석모델

#### 3.2. 이론해석

그림 4는 핵연료봉(그림 2 참조)에서 소결체가 장입된 부분의 단면도이다. 피복관의 바깥쪽에는 약 40°C의 냉각수가 흐르고, 피복관과 소결체 사이의 gap에는 He이 충전되어 있다.

내부에 균일하게 분포된 열원(소결체)을 가진 중공원관에서 각 층의 경계면 온도는 이미 알고있는 냉각수 온도( $T_{\infty}$ )를 기준으로 결정하며, 전체 해석모델은 정상상태이며 각 층에서 열평형을 이루고 있다. 따라서 이러한 가정으로부터 3개 경계면에서의 온도를 계산할 수 있다<sup>[5]</sup>.

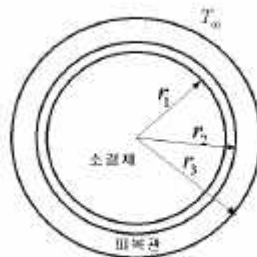


그림 4 이론해석모델

#### 4. 핵연료봉 온도분포 계산결과

핵연료봉의 온도계산을 위하여 사용된 값들은 다음과 같다.

- (1) 치수 : 소결체 반경( $r_1$ )= $4.096 \times 10^{-3}$ m, 피복관 내경( $r_2$ )= $4.1785 \times 10^{-3}$ m, 피복관 외경( $r_3$ )= $4.75 \times 10^{-3}$ m
- (2) 열전도도 : 소결체( $k_{pl}$ )= $3.227$ W/m $^{\circ}$ C , He( $k_{he}$ )= $0.239$ W/m $^{\circ}$ C, 피복관( $k_{clad}$ )= $13.656$ W/m $^{\circ}$ C
- (3) 피복관 표면에서의 열전달계수 :  $h=4.2404 \times 10^4$ W/m $^2$ C
- (4) 냉각수 온도( $T_{\infty}$ )= $40^{\circ}$ C
- (5) 소결체의 선출력= $29.677$ kW/m(평균 선출력)와  $33.557$ kW/m(최대 선출력)<sup>[6]</sup>

##### 4.1. 소결체 중심 및 표면온도

표 1은 유한요소해석(ANSYS) 및 이론해석<sup>[5]</sup>으로부터 계산된 소결체에 대한 중심 및 표면온도를 정리한 것이다. 본 논문에서 고려한 소결체의 선출력들에 대하여 소결체 중심 및 표면온도의 유한요소해석 결과는 이론해석의 계산결과들과 잘 일치함을 보이고 있다. 또한 소결체 평균 및 최대 선출력= $29.677$  및  $33.557$ kW/m인 두 경우에서 계산된 소결체의 중심온도를 용융온도와 비교함으로써, 그림 2의 설계치수를 가진 핵연료봉에 대한 소결체의 고온 건전성을 확인할 수 있다. 그림 5와 6은 소결체의 최대 선출력= $33.557$ kW/m인 경우, 핵연료봉에 대한 온도 계산결과와 대표적 예이다.

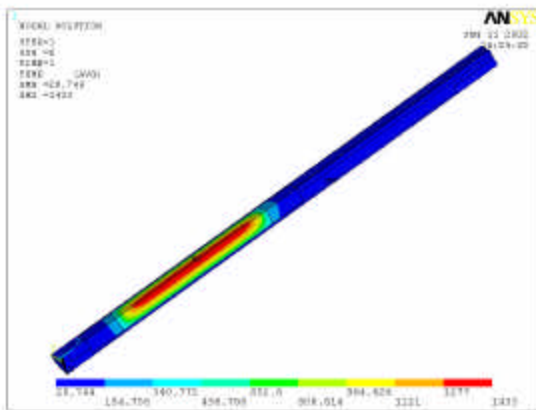


그림 5 핵연료봉의 전체 온도분포  
(최대 선출력= $33.557$ kW/m)

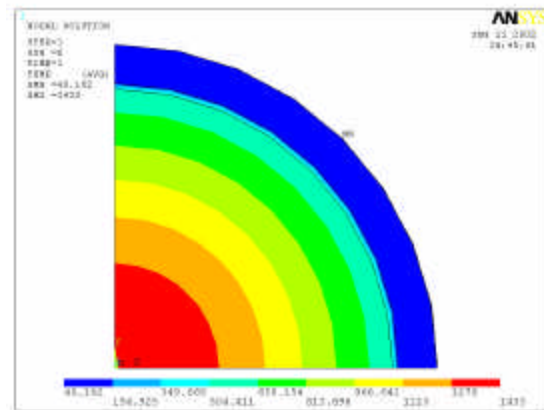


그림 6 최고온도 부분 단면의 온도분포  
(최대 선출력= $33.557$ kW/m)

표 1 소결체 중심 및 표면 온도

소결체 선출력 (kW/m)	열발생밀도 (W/m <sup>3</sup> )	계산프로그램	소결체 중심온도 (°C)	소결체 표면온도 (°C)
29.677 (평균)	563e6	ANSYS	1227	503
		이론해석	1234	502
33.557 (최대)	637e6	ANSYS	1433	550
		이론해석	1429	548

#### 4.2 피복관 내·외면 온도분포

핵연료봉 내의 소결체를 감싸고 있는 피복관의 고온 건전성을 확인하기 위하여 피복관 내·외부의 온도분포를 평가하였다.

그림 7 및 8은 최대 선출력=33.557kW/m인 경우 피복관에 대한 온도해석 결과를 나타낸 대표적 예이며, 소결체 선출력에 따른 피복관 내·외면의 온도는 표 2에 정리하였다. 최고 온도는 그림 7에서 보는 바와 같이 장입된 5개 소결체의 중앙부에서 나타나며, 그 값은 각각 평균 선출력= 29.677kW/m인 경우 104.03°C 그리고 최대 선출력=33.557kW/m인 경우 112.35°C이다. 피복관 내면 최고온도 발생점에 해당하는 외면의 온도는 각각 63.47 및 66.58°C로서, 하나로의 안전 제한조건인 Onset of nucleate boiling(ONB) 온도조건 (125°C 이하)을 만족한다.

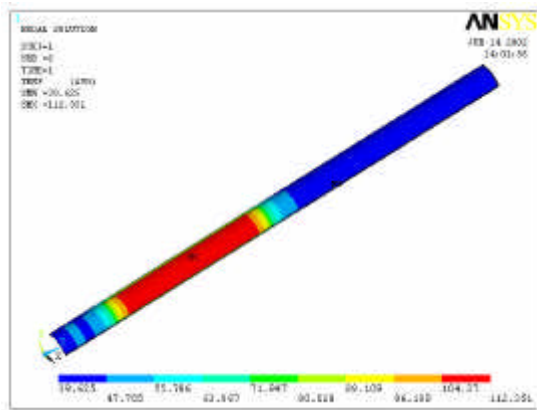


그림 7 피복관의 온도분포 (최대 선출력=33.557kW/m)

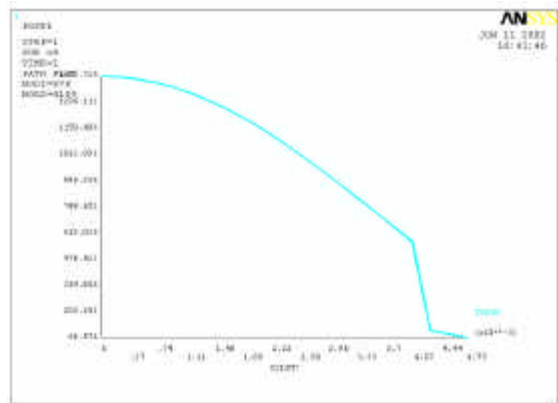


그림 8 최고온도 부분 단면의 온도 (최대 선출력=33.557kW/m)

표 2 최고온도 부분에서 피복관의 내·외면 온도

소결체 선출력 (kW/m)	위치	계산프로그램	온도 (°C)
29.677 (평균)	피복관 내면	ANSYS	104.03
		이론해석	107.78
	피복관 외면	ANSYS	63.47
		이론해석	63.45
33.557 (최대)	피복관 내면	ANSYS	112.35
		이론해석	116.69
	피복관 외면	ANSYS	66.58
		이론해석	66.53

#### 4.3. 상·하 end cap부의 온도분포

앞에서 언급한 바와 같이 소결체가 장전된 핵연료봉에서는 중성자 조사에 의하여 열과 핵분열 생성기체가 발생하므로 온도 및 압력변화가 예상되므로, 핵연료봉의 전체 구조상 가장 취약부라고 할 수 있는 상·하 end cap부(그림 9 참조)에 대한 온도계산을 수행하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 상단보다는 소결체에 가까운 하단 end cap부의 온도가 더 높게 나타나며, 이에 대한 온도분포 평가결과는 그림 10 및 11과 같다. 또한 그림 12와 13은 소결체 선출력에 따른 그림 9의 A-A 선상에서 피복관의 온도분포 그래프이며, 표 3에 계산된 온도 값을 정리하였다. 각 선출력에 대하여 피복관 내·외면 온도차는 각각 8.77°C(그림 12) 및 9.48°C(그림 13)이다.

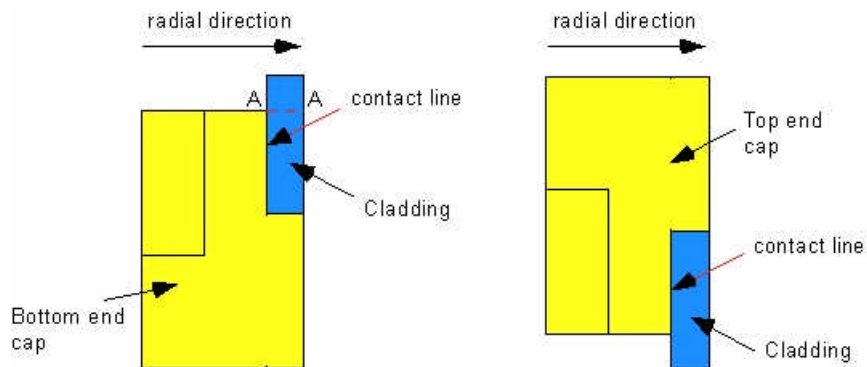


그림 9 하·상단 end cap부

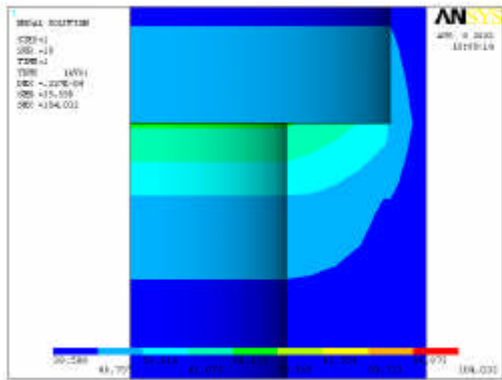


그림 10 핵연료봉 하단 end cap부의 온도분포 (평균 선출력=29.677kW/m)

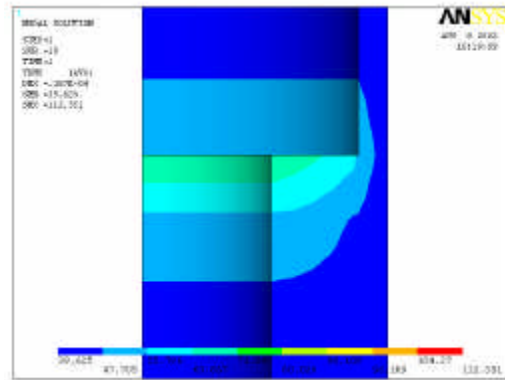


그림 11 핵연료봉 하단 end cap부의 온도분포 (최대 선출력=33.557kW/m)

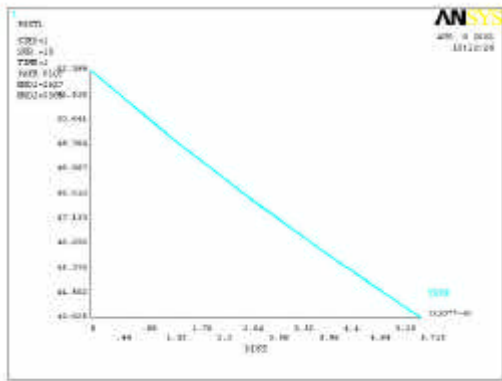


그림 12 A-A선상의 온도 (평균 선출력=29.677kW/m)

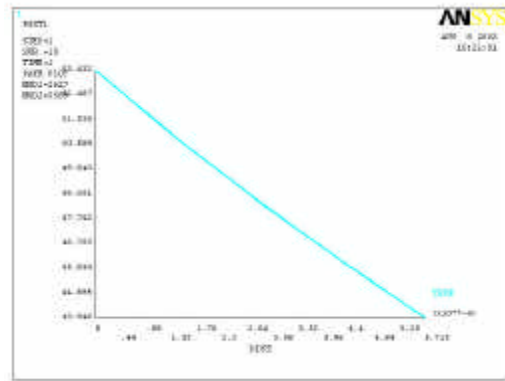


그림 13 A-A선상의 온도 (최대 선출력=33.557kW/m)

표 3 상·하 end cap부에서 피복관의 온도

소결체 선출력 (kW/m)	위치	온도 (°C)
29.677 (평균)	피복관 내면	52.40
	피복관 외면	43.63
33.557 (최대)	피복관 내면	53.43
	피복관 외면	43.95

이상의 온도해석 결과로부터 계산된 소결체의 중심 및 표면 온도를 기초로 이용자들이 요구하는 소결체의 조사온도 조건을 만족하는지 여부를 검토할 수 있다. 또한 조사시험



중 핵연료 계장캡슐의 열적 안전성을 확인하기 위한 기본 자료를 제공한다.

### 5. 열응력 해석

핵연료봉에는 5개의 소결체가 장전되어 중성자 조사시 열이 발생하므로, 그림 7에서 보는 바와 같이 피복관의 표면온도가 상승하게 된다. 이러한 피복관 두께방향으로의 온도차에 의하여 열응력이 발생하게 되므로, 조사시험 중 핵연료봉의 고온 건전성을 확보하기 위하여 피복관에서 발생하는 최대 열응력을 평가하였다.

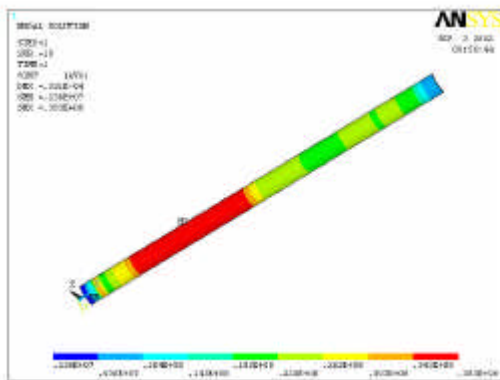


그림 14 피복관의 열응력분포  $P_e$  (평균 선출력=29.677kW/m)

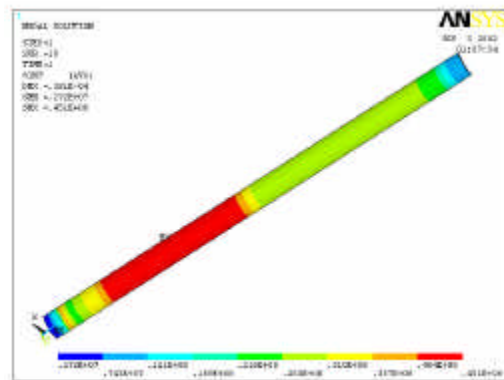


그림 15 피복관의 열응력분포  $P_e$  (최대 선출력=33.557kW/m)

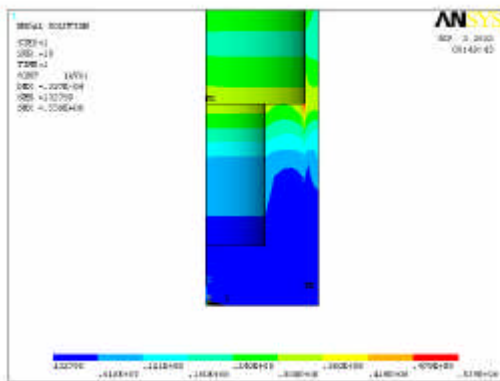


그림 16 핵연료봉 하단 end cap부의 열응력분포  $P_e$  (평균 선출력=29.677kW/m)

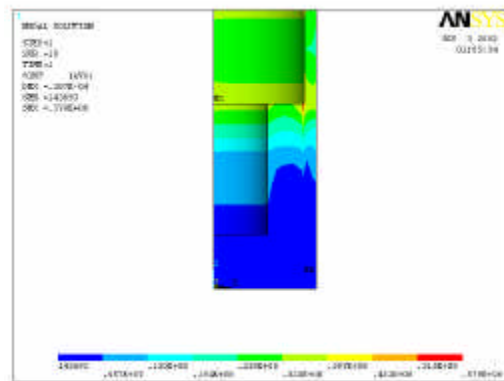


그림 17 핵연료봉 하단 end cap부의 열응력분포  $P_e$  (최대 선출력=33.557kW/m)

그림 14 및 15는 피복관의 열응력분포 해석결과이며, 최고온도 발생부에서 피복관의 응력강도(stress intensity,  $P_e$ )는 소결체 선출력에 따라 38.3MPa 및 45.1MPa이다. 또한 그림 16 및 17은 핵연료봉의 열응력분포 해석결과에서 하단 end cap 부를 확대하여 나타낸 것이다. 하단 end cap과 피복관 접촉면에서 피복관의 응력강도( $P_e$ )는 각각 35.0MPa과 38.5MPa이다.

한편 피복관의 내·외면 온도차에 의한 열응력은 내면에 압축응력 그리고 외면에는 인장응력으로 나타난다. 원통형태인 피복관에서의 원주방향 최대열응력 ( $\sigma_\theta$ )<sub>max</sub>는 아래의 식(1)로 얻어진다.

$$(\sigma_\theta)_{\max} = \frac{\alpha E(T_i - T_o)}{2(1 - \nu)} \quad (1)$$

여기서  $\theta$  : 피복관 원주방향

$T_i - T_o (= \Delta T)$  : 핵연료 피복관 내·외벽 온도차

$\alpha$  : 피복관의 열팽창계수,  $E$  : 피복관의 Young's modulus

$\nu$  : 피복관의 Poisson's ratio

소결체의 선출력에 따라 이론해석 식(1)의 계산결과(표 2의 ANSYS 온도계산 결과 사용)와 유한요소해석 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4 피복관의 원주방향 최대 열응력( $(\sigma_\theta)_{\max}$ )

소결체 선출력 (kW/m)	계산프로그램	피복관의 원주방향 최대 열응력 (MPa)
29.677 (평균)	ANSYS	15.56
	이론해석	16.04
33.557 (최대)	ANSYS	17.83
	이론해석	18.10

이상의 열응력 해석 및 기계적 응력 해석결과[7]를 기초로 핵연료봉의 조사시험 중 열적 안전성을 확인하기 위하여 ASME Boiler & Pressure Vessel, Section III의 강도평가 기준을 적용하였다. 그림 14~17에서 얻어진 피복관의 최대 열응력( $P_e$ ) 및 하단 end cap부 피복관의 열응력( $P_e$ ), 핵연료봉 내압에 의한 막응력( $P_m$ ) 그리고 냉각수압에 의한 좌굴응력( $P_{cr}$ )을 사용한 강도평가 결과를 표 5에 정리하였다. 표에 알 수 있듯이 핵연료봉 각 부위에서 발생하는 열응력( $P_e$ ) 및 기계적 응력( $P_m$ )의 합은  $3S_m (= 463.8\text{MPa})$ 보다 작으므로, ASME Code의 강도평가 기준을 만족한다. 따라서 본 논문의 해석대상인 핵연료 계장캡슐의 조사시험 중 고온 안전성이 확인되었다.

표 5 핵연료봉에 대한 압력 및 열하중 하에서의 강도평가

Position	Stress item	Calculated stress, $\sigma$ (MPa)	Design stress intensity, $S_m$ (MPa)	Allowable stress intensity, $S_a$ (MPa)	ASME Code requirement
피복관	$P_m$	3.1 <sup>[7]</sup>	154.6	154.6	$P_m < S_m$
	$P_{cr}$	43.3 <sup>[7]</sup>	-	1.2	$P_{cr} > 3P$
	$P_m+P_e$	3.1+38.3*	154.6	463.8	$P_m+P_e < 3S_m$
3.1+45.1**					
하단 end cap	$P_m+P_e$	3.1+35.0*	154.6	463.8	$P_m+P_e < 3S_m$
		3.1+38.5**			

\* 평균 선출력의 경우(그림 14, 16), \*\* 최대 선출력의 경우(그림 15, 17)

## 6. 결 론

핵연료 계장캡슐은 하나로 OR 조사공에 장전되어 다양한 핵연료의 성능 및 안전성 평가를 위하여 필수적인 조사시험에 적용될 예정이다. 본 연구에서는 하나로와의 양립성 및 구조건전성이 입증된 핵연료 개방형 계장캡슐에 대한 온도 및 열응력해석을 수행하였다. 이로부터 결과들은 다음과 같다.

1. 유한요소 및 이론해석으로부터 핵연료봉에 대한 각 경계면에서의 온도를 평가하였다. 고려한 소결체의 선출력(=29.677 및 33.557kW/m)들에 대하여 계산된 소결체의 중심온도를 용융온도와 비교함으로써, 소결체의 고온 건전성을 확인할 수 있다.
2. 핵연료봉 내의 소결체를 감싸고 있는 피복관의 고온 건전성을 확인하기 위하여 피복관 내·외면의 온도분포를 평가하였다. 장입된 소결체들의 중앙부에서 최고온도가 나타나며, 내면에서는 각각 104.03°C와 112.35°C이었다. 피복관 내면의 최고온도 발생점에 상당하는 외면의 온도는 각각 63.47 및 66.58°C로서, 하나로 안전 제한조건인 Onset of nucleate boiling(ONB) 온도조건(125°C 이하)을 만족한다.
3. 핵연료봉의 전체 구조상 가장 취약부라고 할 수 있는 상·하 end cap부에 대한 온도 계산을 수행하였다. 하단 end cap(bottom end cap)과 피복관의 접촉부에서 피복관 내·외면 온도차는 선출력에 따라 각각 8.77°C 및 9.48°C이다.
4. 최고온도 발생부에서 피복관의 응력강도(stress intensity,  $P_e$ )는 소결체 선출력에 따라 38.3MPa 및 45.1MPa이다. 하단 end cap과 피복관 접촉면에서 피복관의 응력강도( $P_e$ )는 각각 35.0MPa와 38.5MPa이다. 피복관의 최대 열응력( $P_e$ ) 및 하단 end cap부 피복관의 열응력( $P_e$ ), 핵연료봉 내압에 의한 막응력( $P_m$ ) 그리고 냉각수압에 의한 좌굴응력( $P_{cr}$ ) 들

의 조합은 ASME Code의 강도평가 기준을 만족한다.

이상에서 얻어진 열 및 기계적 해석결과들을 기초로 핵연료 개방형 계장캡슐의 조사시험 중 안전성을 확인하였고, 추후 캡슐 설계 시에 기본 자료로 활용되어질 수 있다. 또한 이용자들이 요구하는 소결체의 조사온도 조건을 만족하는지 여부를 검토할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

### 참고문헌

- [1] 김도식 등, 2001, “개방형 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 구조건전성 해석,” 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집.
- [2] 이재한 등, 1999, “하나로 침니내부지지대에 대한 동특성 및 지진응답 영향 해석,” ‘99 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.
- [3] 류정수 등, 1999, “하나로 침니내부지지대에 대한 구조건전성 평가,” KAERI/TR-1398/99, 한국원자력연구소.
- [4] 류정수 등, 2000, “하나로 침니내부지지대의 설계 지침서,” KAERI/TR-1577/2000, 한국원자력연구소.
- [5] 김도식 등, “개방형 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 온도 및 열응력 예비 해석,” 2002 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.
- [6] 서철교, 2002, “OR5에 위치한 핵연료 계장 캡슐(O2K-06F)의 선출력 및 발열량,” HAN-RR-CR-900-02-016, 한국원자력연구소.
- [7] 김도식 등, 2002, “핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐에 대한 구조 건전성 해석,” KAERI/TR-2178/2002, 한국원자력연구소.