2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐의 온도 및 열응력 예비 해석

Preliminary Analysis of Temperature and Thermal Stress on the Open Basket Type Instrumented Capsule for Nuclear Fuel Irradiation Test

김도식, 손재민, 김봉구, 오종명, 조만순, 주기남, 강영환
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료 조사시험용 계장캡슐은 다양한 핵연료의 성능평가를 위하여 하나로의 OR조사공에서 조사시험 될 예정이다. 계장캡슐 내부에는 핵연료 소결체가 장입된 3개의 핵연료봉이 장전되며, 이로 인하여 많은 양의 붕괴열이 발생된다. 따라서 개방형 핵연료 계장캡슐의 조사시험 중 안전성 및 이용자 요구조건의 만족여부를 확인하고자 온도 및 열응력 해석을 수행하였다. 이를 위하여 온도와 열응력 해석을 함께 수행할 수 있는 ANSYS를 사용하였으며, 이 경우 핵연료봉의 대칭성을 이용하여 1/4 모델링하고, 피복관 외면에는 대류경계조건 그리고 피복관과 소결체 사이의 gap에 대해서는 전도만을 고려하였다. 해석에 사용된 요소는 Soild 5(3-D Coupled-field Solid)이다. 또한 유한요소해석을 통하여 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 최대 선출력 =44.7kW/m인 경우 유한요소해석에서는 1927°C 그리고 이론해석에서는 1949°C이었으며, 최대 선출력 =48.8kW/m에서는 각각 2125°C와 2123°C로 거의 동일하였다. 또한 피복관의 내·외면 최고 온도차에 의한 최대열응력은 선출력에 따라 177.0MPa과 194.0MPa 그리고 하단 end cap과 피복관 접촉부에서의 열응력은 각각 88.7MPa과 97.2MPa로 얻어졌다. 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 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 dimensions of open basket type instrumented capsule was determined in the basis of the pressure drop criterion in OR test hole of HANARO(mass flow rate $\dot{m}$<12.7kg/s, pressure drop ΔP>200kPa) and several analyses of structural integrity. The thermal analysis of instrumented capsule was performed by using ANSYS which is a commercial finite element analysis(FEA) code. In the FEA, the convection condition on the surface of cladding and the conduction condition in the gap between pellet and cladding were considered. 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 1927°C(FEA) and 1949°C(theoretical analysis) in the case of maximum linear power=44.7kW/m, and 2125°C and 2123°C respectively in the case of maximum linear power=48.8kW/m. The calculated temperature at the each layer of fuel rod was consistent with the values by theoretical analysis. The maximum thermal stresses in the cladding due to thermal gradient were 177.0MPa and 194.0MPa in each linear power. At the contact part of bottom end cap and cladding, the thermal stresses 88.7MPa in 44.7kW/m and 97.2MPa in 48.8kW/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

한국원자력연구소에서 개발 중인 다양한 핵연료에 대한 성능 및 안전성을 확인하기 위하여 개방형 핵연료 조사시험용 계장캡슐(이하 개방형 핵연료 계장캡슐이라 함)의 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 하나로 OR 조사공에서의 수력조건 및 구조적 건전성이 만족된 개방형 핵연료 계장캡슐의 기본설계를 기초로, 조사시험 중 캡슐의 열적 안전성 및 이용자 요구 조사조건의 만족여부를 검토하기 위해서는 핵연료 계장캡슐에 대한 온도 및 열응력 평가 그리고 고온에서 캡슐부품들의 안전성 검토가 필수적이다.

기존의 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 자료들과 하나로 OR 조사공에서의 핵적특성 및 양립성 등을 고려하여 선정된 개방형 핵연료 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[1~4]. 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 개방형 핵연료 계장캡슐에 대한 온도 및 열응력을 평가하였다.

개방형 핵연료 계장캡슐은 외통의 내·외부로 냉각수가 흐르므로 외통 자체의 온도상승은 거의 나타나지 않으므로 열응력을 무시할 수 있지만, 핵연료 소결체가 장입된 핵연료봉에는 중성자 조사시 많은 양의 붕괴열이 발생하게 된다. 따라서 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. 이상의 온도계산 결과를 토대로 피복관 내·외면 최고 온도차에 의한 최대 열응력과 피복관의 허용응력을 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III의 기준에 적용하여 개방형 핵연료 계장캡슐의 고온 건전성을 확인하였다. 또한 많은 양의 붕괴열이 발생하는 핵연료봉에서 구조적으로 취약부라고 할 수 있는 상·하 end cap 부위의 열응력 해석도 수행하였다.

2. 개방형 핵연료 계장캡슐

하나로 OR 조사공에서 조사시험 될 예정인 개방형 핵연료 계장캡슐은 캡슐 본체의 최하단인 rod tip으로부터 상단 end plate 그리고 하부 스토퍼(lower fixture stopper)를 통하여 흐르는 냉각수에 의하여 냉각되어진다. 조사시험 중 소결체의 붕괴열에 의하여 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 스토퍼의 최적 치수를 결정하였다[1]. 그림 1은 개방형 핵연료 계장캡슐의 기본설계도이며, 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 충진되고, 피복관 상·하부에 end cap을 용접하여 제작된다. 핵연료봉 각 부위에 사용된 재질은 그림 2에 표시하였다.

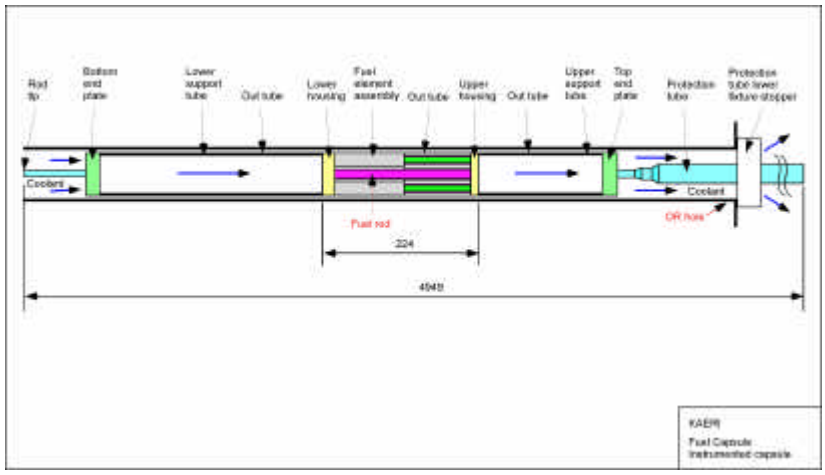

그림 1 핵연료 조사시험용 계장캡슐 모식도

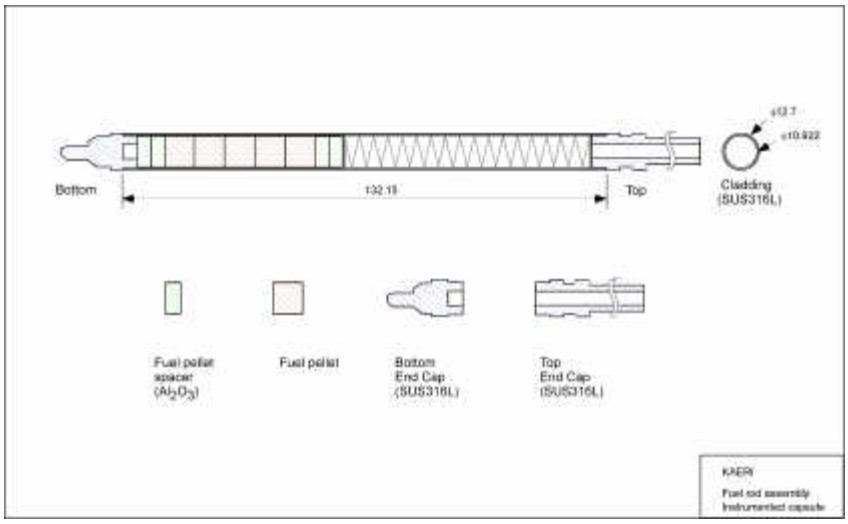

그림 2 핵연료봉 모식도

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 Soild 5(3-D Coupled-field solid)를 사용하였다. 그림 3은 상용 유한요소해석코드인 ANSYS에 의하여 작성된 3차원 해석모델이다.

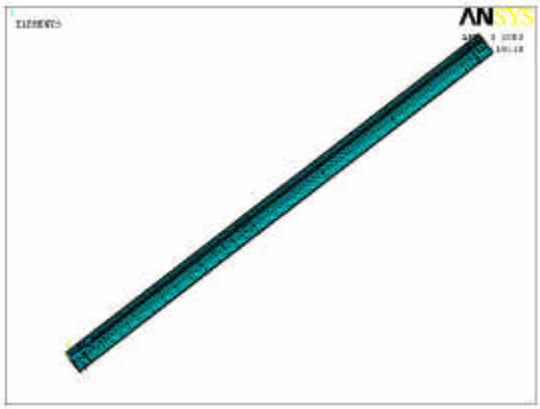

그림 3 유한요소 해석모델

3.2. 이론해석

그림 4는 핵연료봉(그림 2 참조)의 소결체가 장입된 부분에 대한 단면도이다. 피복관의 바깥쪽에는 약 40℃의 냉각수가 흐르고, 피복관과 소결체 사이의 gap에는 He이 충진되어 있다. 핵연료봉에 대한 이론적 온도해석을 위하여, 다음의 4가지 가정을 적용하였다. 열전도(conduction)는 시간(t)에 무관한 정상상태(steady state)이다. 피복관, He 및 소결체 각각에서의 열전도도(thermal conductivity)는 균일하다. 피복관 주위의 열전달계수(heat transfer coefficient)와 냉각수 온도는 일정하다. 피복관에서 원주방향(θ)의 열전달률(heat flow)은 반경방향(r)보다 상당히 작으므로 무시한다.

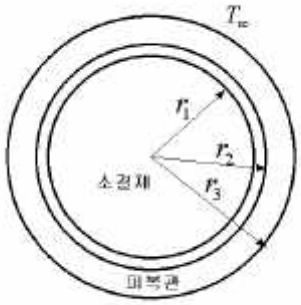

그림 4 이론해석모델

내부에 균일하게 분포된 열원(소결체)을 가진 중공원관에서 각 층의 경계면 온도는 이미 알고있는 냉각수 온도(T_∞)를 기준으로 결정하며, 전체 해석모델은 정상상태이며 각 층에서 열평형을 이루고 있다. 따라서 이러한 가정으로부터 3개의 경계면에서 온도는 다음과 같이 구할 수 있다[5].

소결체 부분의 열전달률(q_1)과 He 부분의 열전달률(q_2)은 같다.

$$\dot{q}_{pl}\pi\, r_1^{\,2} L = 2\pi L k_{he} \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \qquad (1)$$

식(1)을 정리하면, 소결체 표면온도(T_1)은

$$T_1 = \frac{\dot{q}_{pl}\ r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2k_{he}} + T_2 \tag{2}$$

이다.

여기서 $\dot{q}_{pl}$: 소결체의 열발생밀도(W/m^3)

k_{he} : 헬륨의 열전도도(W/m°C)

r_1 : 소결체의 반경=He gap의 내경(m)

r_2 : He gap의 외경(m)

T_1 : 소결체의 외면 온도=He gap의 내면 온도(°C)

T_2 : He gap의 외면 온도(°C)

He gap부분의 열전달률(q_2)과 피복관에서의 열전달률(q_3)은 같다.

$$\frac{2\pi L k_{he}(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi L k_{clad}(T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} + \dot{q}_{clad}(\pi r_3^2 - \pi r_2^2)L \tag{3}$$

식(3)을 정리하면,

$$T_2 = \frac{\left(\frac{2k_{he}T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \frac{2k_{clad}T_3}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} - \dot{q}_{clad}(r_3^2 - r_2^2)\right)}{\frac{2k_{he}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \frac{2k_{clad}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} \tag{4}$$

이다.

여기서 $\dot{q}_{clad}$: 피복관의 열발생밀도(W/m^3)

k_{clad} : 피복관의 열전도도(W/m°C)

r_2 : He gap의 외경=피복관 내경(m)

r_3 : 피복관의 외경(m)

T_2 : He gap의 외면 온도=피복관의 내면 온도(°C)

T_3 : 피복관의 외면 온도(°C)

피복관 부분의 열전달률(q_3)과 피복관과 냉각수 사이의 열전달률(q_4)은 같다.

$$2\pi L k_{clad}\frac{T_2-T_3}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}+\dot{q}_{clad}(\pi\, r_3{}^2-\pi\, r_2{}^2)L=2h\pi r_3 L(T_3-T_\infty) \tag{5}$$

식(5)를 정리하면,

$$T_3=\frac{\frac{2k_{clad}T_2}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}+\dot{q}_{clad}(\,r_3{}^2-\,r_2{}^2)+2h r_3 T_\infty}{2hr_3+\frac{2k_{clad}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} \tag{6}$$

이다.

여기서 h : 피복관 표면에서의 열전달계수(W/m^{2o}C)

T_∞ : 냉각수 온도(^{o}C)

이제 식(2)를 식(4)에 대입하면, 피복관의 내면 온도(T_2)는

$$T_2=\frac{\dot{q}_{pl}\,r_1{}^2+\frac{2k_{clad}T_3}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}-\dot{q}_{clad}(\,r_3{}^2-\,r_2{}^2)}{\frac{2k_{clad}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} \tag{7}$$

이다.

식(7)을 식(6)에 대입하면, 피복관 외면온도(T_3)는

$$T_3=\frac{\dot{q}_{pl}\,r_1{}^2+2hr_3T_\infty}{2hr_3} \tag{8}$$

이다.

또한 소결체 중심온도(T_o)는

$$T_0=T_1+\frac{\dot{q}_{pl}\,r_1{}^2}{4k_{pl}} \tag{9}$$

이다.

여기서 k_{pl} : 소결체의 열전도도(W/m^{o}C)

4. 핵연료봉 온도분포 계산결과

핵연료봉의 온도계산을 위하여 사용된 값들은 다음과 같다.

(1) 치수 : 소결체 반경(r_1)=5.4165×10^{-3}m, 피복관 내경(r_2)=5.461×10^{-3}m, 피복관 외경(r_3)=6.35×10^{-3}m

(2) 열전도도 : 소결체(k_{pl})=2.299W/m℃ , He(k_{he})=0.233W/m℃, 피복관(k_{clad})=14.000 W/m℃

(3) 피복관 표면에서의 열전달계수 : h=4.2404e4 W/m^2℃

(4) 냉각수 온도(T_∞)=40℃

(5) 소결체의 선출력=44.7kW/m와 48.8kW/m[6,7]

4.1. 소결체 중심 및 외면온도

표 1은 유한요소해석(ANSYS) 및 이론해석(식(2), (9))로부터 계산된 소결체에 대한 중심 및 표면온도를 정리한 것이다. Heating, 이론해석 및 ANSYS에서는 온도계산 시 열팽창을 고려하지 않으므로, 열팽창을 고려하는 FEMAXI-IV, GENGTC로 계산된 온도보다 다소 높은 값을 보인다. 그러나 본 논문에서 고려한 소결체의 선출력들에 대하여 소결체 중심 및 표면온도의 유한요소해석 결과는 이론해석 또는 다른 온도계산 프로그램의 계산결과들과 잘 일치함(최대 5% 오차)을 보이고 있다. 또한 선출력=44.7 및 48.8kW/m인 두 경우에서 계산된 소결체의 중심온도를 용융온도와 비교함으로서, 그림 2의 설계치수를 가진 핵연료봉에 대한 소결체의 고온 건전성을 확인할 수 있다. 그림 5와 6은 소결체의 선출력=48.80kW/m인 경우, 핵연료봉에 대한 온도 계산결과의 대표적 예이다.

표 1 소결체 중심 및 표면 온도

소결체 선출력 (kW/m)	열발생밀도 (W/m^3)	계산프로그램	소결체 중심온도 (°C)	소결체 표면온도 (°C)
44.7	485e6	Heating	1939*	-
		FEMAXI-IV	1902*	-
		GENGTC	1848*	-
		ANSYS	1927	400
		이론해석	1949	394
48.8	529e6	Heating	2139*	-
		FEMAXI-IV	2075*	-
		GENGTC	2040*	-
		ANSYS	2125	427
		이론해석	2123	426

* Ref[6,7]

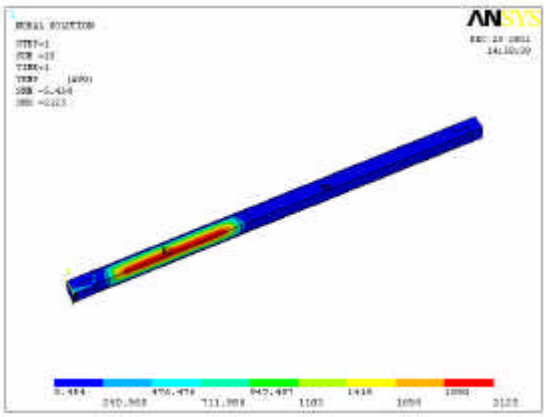

그림 5 핵연료봉 전체 온도분포
(소결체의 선출력=48.80kW/m)

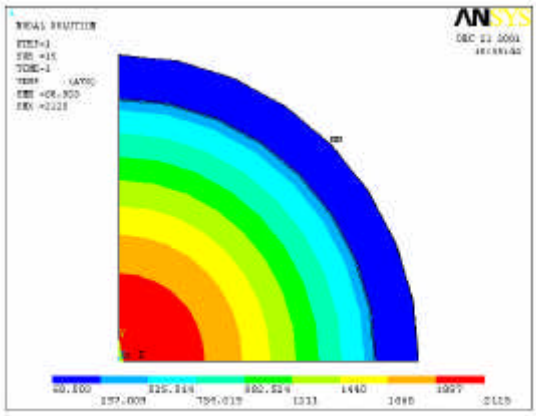

그림 6 최고온도 부분 단면
(소결체의 선출력=48.80kW/m)

4.2 피복관 내·외면 온도분포

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

그림 7과 8은 선출력=44.7과 48.8kW/m인 경우 피복관 내면에 대한 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 장입된 5개 소결체의 중앙부에서 최고온도가 나타나며, 그 값은 각각 143.31°C와 152.77°C임을 알 수 있다. 또한 최고온도 발생단면에서 반경방향으로의 온도분포는 그림 9 및 10과 같으며, 피복관 내면 최고온도 발생점에 상당하는 외면의 온도는 각각 66.29 및 68.68°C로서, 하나로의 안전 제한조건인 Onset of nucleate boiling(ONB) 온도조건(125°C 이하)을 만족한다.

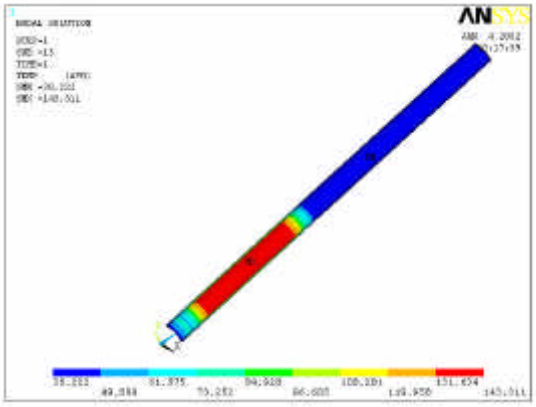

그림 7 피복관 내면 온도분포
(소결체의 선출력=44.7kW/m)

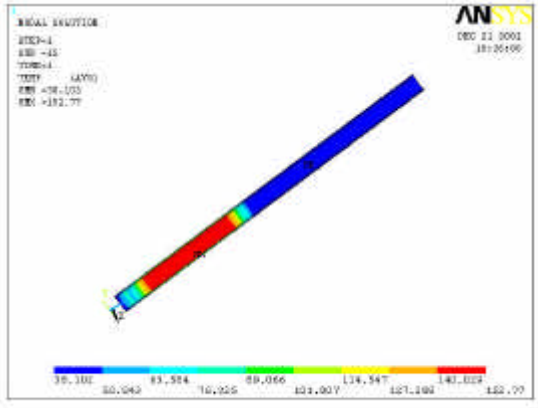

그림 8 피복관 내면 온도분포
(소결체의 선출력=48.8kW/m)

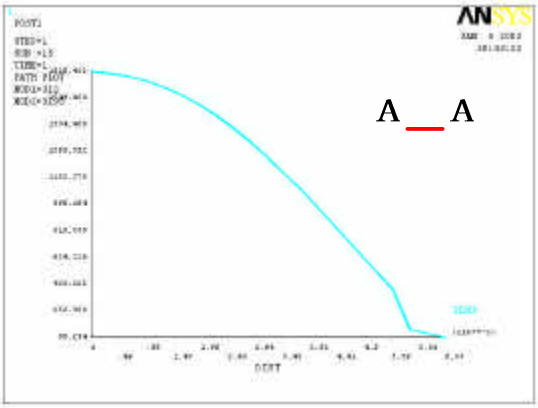

그림 9 최고온도부분 단면온도
(소결체 선출력=44.7kW/m)

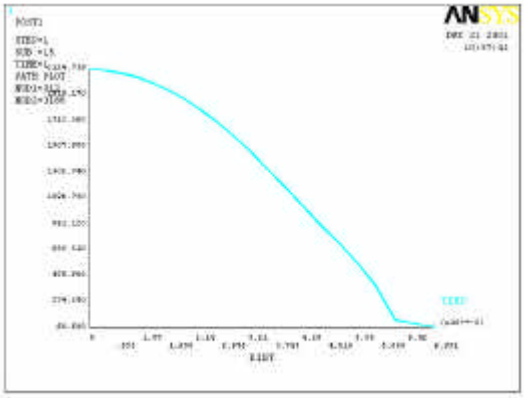

그림 10 최고온도부분 단면 온도
(소결체 선출력=48.8kW/m)

4.3. 상·하 end cap 부의 온도분포

앞에서 언급한 바와 같이 핵연료 피복관 내에 장입된 소결체에서는 조사시험 중 중성자 조사에 의하여 많은 양의 붕괴열이 발생하므로, 핵연료봉의 전체 구조상 가장 취약부라고 할 수 있는 상·하 end cap부(그림 11 참조)에 대한 온도계산도 수행하였다. 그림 7과 8에서 보는 바와 같이 상단보다는 소결체에 가까운 하단 end cap부의 온도가 더 높게 나타나며, 이에 대한 온도분포 평가결과는 그림 12 및 13과 같다. 또한 그림 14와 15는 소결체 선출력에 따라 그림 11의 하단 end cap(bottom end cap)에서 A-A 선상의 반경방향으로의 온도분포 그래프이다. 각 그림에서 피복관 내·외면 온도차는 각각 32.50°C 및 34.56°C이다.

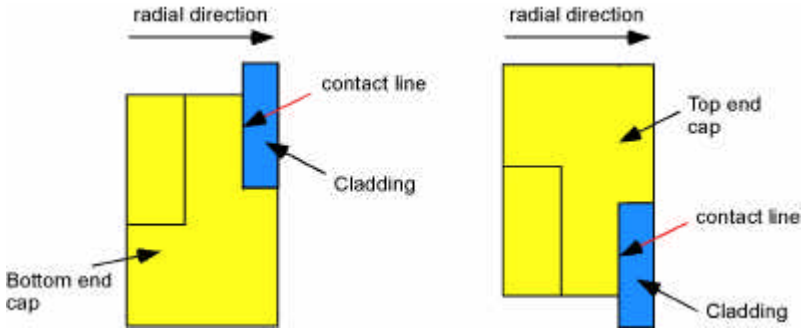

그림 11 하·상단 end cap 부

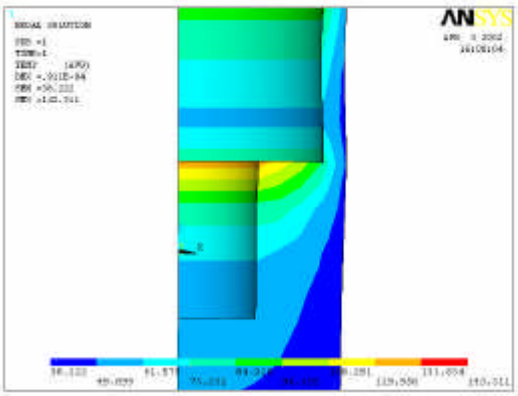

그림 12 하단 end cap부위의 온도분포
(소결체 선출력=44.7kW/m)

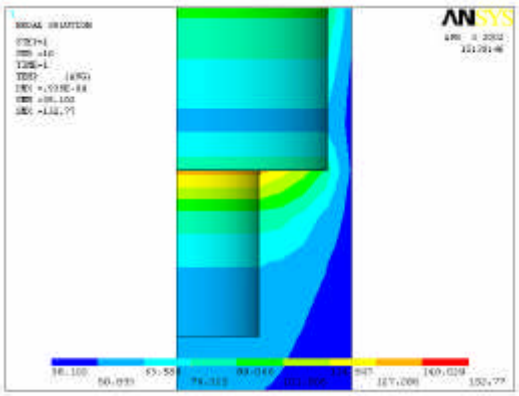

그림 13 하단 end cap부위의 온도분포
(소결체 선출력=48.8kW/m)

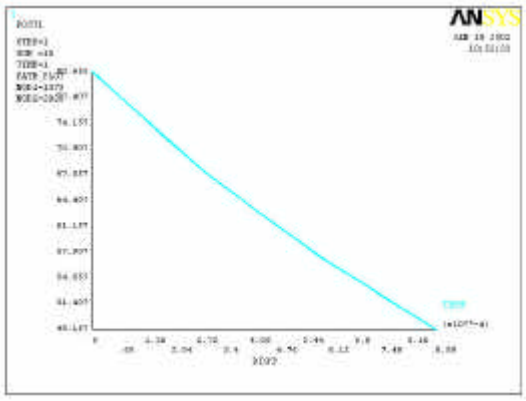

그림 14 A-A선상의 온도분포
(소결체 선출력=44.7kW/m)

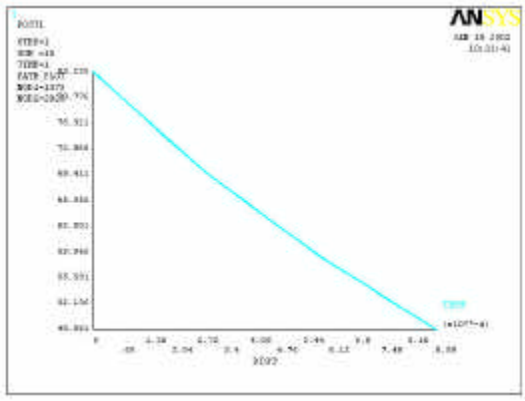

그림 15 A-A선상의 온도분포
(소결체 선출력=48.8kW/m)

이와 같은 ANSYS의 온도해석 결과와 이론해석(식(7) 및 (8))에 의하여 계산된 피복관 및 하단 end cap부의 온도 평가결과를 표 2와 3에 정리하였다. 표 3에서 *로 표시한 계산온도는 열팽창을 고려한 피복관 치수(GENGTC 1차원 온도계산 결과)를 사용하여 Heating 7.2f[6]로 계산된 온도 값이다. 본 논문에서 고려된 온도계산법에 의하여 얻어진 피복관 내·외면 최고온도는 거의 동일한 값을 보인다.

표 2 피복관 및 하단 end cap부 온도(선출력=44.7kW/m)

위치		계산프로그램	온도 (°C)
피복관 내면 최고 온도		ANSYS	143.31
		이론해석	145.00
피복관 내면 최고 온도부분에 상당하는 피복관 외면 온도		ANSYS	66.29
		이론해석	66.42
하단 end cap과 피복관 접촉면	피복관 내면 온도	ANSYS	80.66
	피복관 외면 온도	ANSYS	48.16

표 3 피복관 및 하단 end cap부 온도(소결체 선출력=48.8kW/m)

위치		계산프로그램	온도 (°C)
피복관 내면 최고 온도		GENGTC → Heating*	150.36
		ANSYS	152.76
		이론해석	154.52
피복관 내면 최고 온도부분에 상당하는 피복관 외면 온도		GENGTC → Heating*	69.85
		ANSYS	68.68
		이론해석	68.82
하단 end cap과 피복관 접촉면	피복관 내면 온도	ANSYS	83.24
	피복관 외면 온도	ANSYS	48.68

* Ref.[6]

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

그림 7과 8에서 보는 바와 같이 핵연료봉 내에 장입된 소결체의 붕괴열로 인하여 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 16 및 17은 핵연료봉의 열응력분포 해석결과에서 하단 end cap부위를 확대하여 나타낸 것이다. 피복관 전체에서 최고온도 발생부의 최대 열응력은 소결체 선출력에 따라 177.0MPa 및 194.0MPa이며, 하단 end cap과 피복관 접촉면 상의 피복관에서의 열응력은 각각 88.7MPa과 97.2MPa이다.

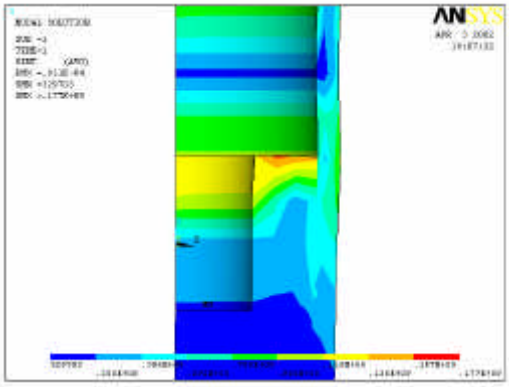

그림 16 핵연료봉의 열응력분포
(소결체 선출력=44.7kW/m)

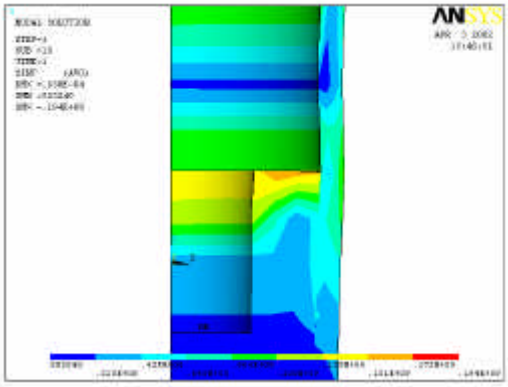

그림 17 핵연료봉의 열응력분포
(소결체 선출력=48.8kW/m)

한편 내·외면 온도차에 의한 열응력은 피복관 내면에 압축응력 그리고 외면에는 인장응력으로 나타난다. 원통형태인 피복관에서의 열응력은 아래의 식(10)으로 얻어진다.

$$\sigma_\theta = \sigma_z = \frac{\alpha E(T_i - T_o)}{2(1-\nu)} \qquad (10)$$

여기서 θ : 피복관 원주방향, z : 피복관 길이방향
r_i : 피복관 내경(m), r_o : 피복관 외경(m)
$T_i - T_o (= \Delta T)$: 핵연료 피복관 내·외벽 온도차
α : 피복관의 열팽창계수
E : 피복관의 Young's modulus
ν : 피복관의 Poisson's ratio

소결체의 선출력에 따라 이론해석 식(10)의 계산결과와 그림 16 및 17에서 얻어진 유한요소해석 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4 피복관 및 하단 end cap부의 열응력($(\sigma_\theta)_{max}=P_t$)

소결체 선출력 (kW/m)	계산프로그램	피복관의 최대 열응력 (MPa)	하단 end cap부 피복관의 열응력 (MPa)
44.7	ANSYS	177.0	88.7
	이론해석*	163.6	69.0
48.8	ANSYS	194.0	97.2
	이론해석*	178.5	73.4

* 이론해석 : 표 2 및 3의 ANSYS 결과를 식(10)에 대입하여 구함.

이상의 열응력 해석결과를 기초로 핵연료봉의 조사시험 중 열적 안전성을 확인하기 위하여 ASME Boiler & Pressure Vessel, Section III을 적용하였다. 표 4에서 얻어진 피복관의 최대 열응력 및 하단 end cap부 피복관의 열응력과 핵연료봉 내압에 의한 막응력을 사용한 강도평가 결과를 표 5에 정리하였다. 표에 알 수 있듯이 핵연료봉 각 부위에서 발생하는 열응력(P_t) 및 기계적 응력(P_m)의 합은 $3S_m$(=307.59MPa)보다 작으므로, ASME Code의 강도평가 기준을 만족한다. 따라서 본 논문의 해석대상인 핵연료 계장캡슐의 조사시험 중 고온 안전성이 확인되었다.

표 5 핵연료봉의 열응력해석결과 및 강도평가 기준

소결체 선출력 (kW/m)	부위	응력항	계산응력 (MPa)	허용응력, S_m (MPa)	ASME code requirement
44.7	피복관	P_m+P_t	1.97+177.0	102.53	P_m+P_t < $3S_m$
	하단 end cap	P_m+P_t	1.97+88.7	102.53	P_m+P_t < $3S_m$
48.8	피복관	P_m+P_t	1.97+194.0	102.53	P_m+P_t < $3S_m$
	하단 end cap	P_m+P_t	1.97+97.2	102.53	P_m+P_t < $3S_m$

5. 결 론

핵연료 계장캡슐은 하나로 OR 조사공에 장전되어 다양한 핵연료의 성능 및 안전성 평가를 위하여 필수적인 조사시험에 적용될 예정이다. 본 연구에서는 개방형 핵연료 계장캡슐의 상세설계에 앞서 하나로와의 양립성 및 구조건전성을 고려하여 정립된 기본설계를 바탕으로 온도 및 열응력해석을 수행하였다. 이로부터 결과들은 다음과 같다.

1. 유한요소해석 및 이론해석으로부터 핵연료봉에 대한 각 경계면에서의 온도를 평가하였다. 고려한 소결체의 선출력(=44.7 및 48.8kW/m)들에 대하여 소결체 중심 및 표면온도의 유한요소해석 결과는 이론해석 또는 다른 온도계산 프로그램의 계산결과들과 잘 일치함(최대 5% 오차)을 보였다. 또한 계산된 소결체의 중심온도를 용융온도와 비교함으로서, 소결체의 고온 건전성을 확인할 수 있다.
2. 핵연료봉 내의 소결체를 감싸고 있는 피복관의 고온 건전성을 확인하기 위하여 피복관 내·외부의 온도분포를 평가하였다. 장입된 소결체들의 중앙부에서 최고온도가 나타나며, 그 값은 각각 143.31°C와 152.76°C이었다. 피복관 내면 최고온도 발생점에 상당하는 외면의 온도는 각각 66.29 및 68.68°C로서, 하나로의 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 온도계산을 수행하였다. 하단 end cap(bottom end cap)과 피복관의 접촉부에서 피복관 내·외면 온도차는 각각 32.50°C 및 34.56°C이다.
4. 피복관 전체에서 최고온도 발생부의 최대 열응력은 소결체 선출력에 따라 177.0MPa 및 194.0MPa이며, 하단 end cap과 피복관 접촉면 상의 피복관에서의 열응력은 각각

88.7MPa과 97.2MPa이다. 피복관의 최대 열응력 및 하단 end cap부 피복관의 열응력과 핵연료봉 내압에 의한 막응력의 합은 ASME Code의 강도평가 기준을 만족한다.

이상에서 얻어진 온도 및 열응력 예비해석 결과들을 기초로 개방형 핵연료 계장캡슐의 조사시험 중 안전성을 확인하였고, 추후 상세 설계시에 기본 자료로 활용되어질 것이다. 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 추계학술발표회 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] J. P., Holman, 열전달, Fifth edition, 제 2 장 정상상태의 전도, pp. 38.
[6] 배기광 등, 1998, “DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성 분석 보고서,” KAERI/TR-1157/98, 한국원자력연구소.
[7] 박희성 등, 1999, “DUPIC 핵연료봉 열적거동해석,” KAERI/TR-1213/99, 한국원자력연구소.