

## 개방형 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 구조건전성 해석

### Structural Analysis on the Open Basket Type Instrumented Capsule for Fuel Irradiation Test in HANARO

김도식, 김봉구, 오중명, 조만순, 손재민, 강영환

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

각종 핵연료의 성능평가를 위한 조사시험에 사용될 개방형(open basket type) 계장캡슐은 시험 중 캡슐의 건전성을 확보하기 위하여 내진, 좌굴 및 충격 안전성 등이 확인되어야 한다. 핵연료 계장캡슐을 구성하는 본체 외통, 보호관, 핵연료 어셈블리 및 상·하 end plate 등의 치수는 하나로 OR 조사공에서의 수력조건에 따라 결정하였다. 기 수행된 지진응답해석 결과를 기초로 내진 안전성이 확인된 핵연료 캡슐을 대상으로 좌굴 안전성 평가와 노심에서의 장·탈착 또는 시험 중에 발생할 수 있는 충격하중에 대한 구조건전성 해석을 수행하였다. 또한 계장캡슐 본체 내에 장착될 핵연료 봉의 안전성을 ASME Boiler & Pressure vessel Code, Section III, Appendix A를 기초로 검토하였다. 임계좌굴하중은 캡슐구조의 특성상 발생할 수 있는 좌굴에 대한 안정성해석으로부터 7.4kN으로 얻어졌다. 조사공에서 시험중 타 구조물로부터 캡슐에 가해질 수 있는 최대 허용 수직충격하중(65.3kN)은 재료의 허용응력을 기준으로 결정되었으며, 좌굴안정성을 고려한 임계좌굴하중이 작용되는 경우의 최대응력은 20.4MPa이었다. 또한 캡슐에 대한 수평충격하중 하에서의 안전성도 평가하였다. 한편 계장캡슐 내에 장전된 핵연료 피복관의 내·외압 차에 의한 최대응력강도  $S$ 는 2.32 MPa이며, 냉각수압에 의한 핵연료봉의 임계좌굴응력은 40.55 MPa로서 구성재료의 허용응력보다 낮은 응력이 작용됨을 확인하였다. 이상의 해석결과를 기초로 개방형 핵연료 계장캡슐은 하나로 노내에서 운반, OR 조사공에 장·탈착 그리고 조사시험동안의 구조건전성 평가 기준을 만족함이 확인되었다.

#### Abstract

To develop the open basket type instrumented capsule to be used for the irradiation test of various nuclear fuels, it is necessary to ensure 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  $\dot{m} < 12.7\text{kg/s}$ , pressure drop  $\Delta P > 200\text{kPa}$ ). From the buckling stability analysis for this capsule, the critical buckling load  $P_{cr}$  was 7.5kN. The vertical impact stress of the capsule under unit impact load was examined by the transient analysis, and the maximum vertical impact load calculated from the impact stress and the allowable stress was

65.3kN. And under the loading  $P_{cr}$  calculated from the analysis of buckling of capsule, the maximum vertical impact stress was 20.4MPa. The structural integrity of a capsule under horizontal impact loading was also examined. The mechanical stresses occurred by a pressure difference at the inner and outer surface of cladding and by a coolant pressure at the surface of cladding were 2.32MPa and 40.55MPa, respectively. These stress values were lower than the allowable stress in each case. Therefore, it was ensured that the instrumented capsule for the irradiation test of various nuclear fuels meets the criteria on the structural integrity during installing and testing the capsule in HANARO.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서는 신형 핵연료 및 DUPIC 핵연료 개발 과제 등에서 개발중인 핵연료에 대한 성능 및 안전성을 확인하기 위하여 핵연료 조사시험용 계장캡슐(이하 핵연료 계장캡슐이라 함)의 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라 하나로 OR 조사공에서 조사시험을 수행할 예정인 핵연료 계장캡슐의 기본설계와 이를 기초로 조사시험 중 캡슐의 안전성 및 이용자의 요구 조사조건을 만족시킬 수 있는 구조 건전성 평가 그리고 캡슐 부품들에 대한 조사시험 중 안전성 검토가 수반되어야 한다.

원자력 선진국의 핵연료 조사시험용 캡슐 관련 자료와 하나로 OR 조사공에서의 핵적특성 및 양립성 등을 고려하여 선택된 핵연료 계장캡슐 모델은 핵연료용 무계장 캡슐과 유사한 개방형(open basket type) 및 밀폐형(sealed type) 계장캡슐이다. 핵연료 계장캡슐에 장전될 핵연료봉 내부에는 핵연료 소결체가 장입되어 중성자 조사시 많은 양의 붕괴열이 발생하므로, 이용자들이 요구하는 소결체의 조사온도 조건을 만족시키기 위해서는 위의 두가지 캡슐 중 냉각효율이 좀 더 우수한 개방형 계장캡슐이 유리하다. 이와 같이 선정된 개방형 핵연료 계장캡슐의 기본설계는 하나로 OR 조사공의 제한요건(수력조건, 양립성) 및 조사시험 요구사항(조사 연료봉수, 핵연료 조사 온도 및 선출력, 연소도 등) 등을 검토·분석하여 결정하여야 한다.

본 연구의 해석 대상인 핵연료 계장캡슐은 개방형(open basket type) 캡슐로서, 밀폐형과는 달리 조사시험 중 캡슐 외통 내로 냉각수가 흘러 핵연료봉을 직접 냉각시키는 구조를 가지고 있다. 캡슐의 구성은 원자력 재료의 조사특성 평가를 위하여 활발히 활용되고 있는 재료 조사시험용 계장캡슐[1~3]과 유사하게 크게 캡슐 본체, 보호관 및 안내관으로 구성되어진다. 조사시험 중 노심 내 냉각수의 강제흐름으로 인한 유체유발진동(flow induced vibration, FIV)과 지진하중 하에서의 하나로 침니내부지지대에 대한 구조 건전성 해석결과[4,5]를 기초로 핵연료 계장캡슐의 내진 안전성을 확인하였다. 계장캡슐은 외경에 비하여 길이가 긴 기하학적 형상으로 인하여 좌굴이 발생할 수 있으므로, 캡슐 본체 및 보호관에 대한 좌굴해석을 수행하여 이의 안전성을 평가하였다. 또한 계장캡슐을 하나로 OR 조사공에 장·탈착하는 과정 및 장전된 상태에서 타 구조물에 의하여 충격하중을 받았을 때 발생하는 동적거동에 대한 충격해석을 수행하였다. 이와 함께 계장캡슐 본체 내에 장착될 핵연료 봉의 건전성을 ASME Boiler & Pressure vessel Code, Section III를 기초로 검토하였다.

## 2. 개방형(open basket type) 핵연료 계장캡슐의 기본 설계도

OR 조사공에서 조사시험될 개방형 핵연료 계장캡슐은 CT 또는 IR 조사공에서 시험되는 재료 계장캡슐과는 달리 2개의 스톱퍼(stopper)가 보호관부에 설치되어 있다. 이 스톱퍼들은 시험 중 계장캡슐을 고정하는 기능을 하며, 상부 스톱퍼(upper stopper)는 침니내부지지대 그리고 하부 스톱퍼(lower stopper)는 OR 조사공의 유동관 상부에 고정된다. 개방형 핵연료 계장캡슐의 각 부분 치수들은 강제순환식 냉각수 흐름이 존재하는 하나로 OR 조사공에서의 수력조건(유량 12.7kg/s 이

하, 압력강하 200kPa 이상)[6]을 만족하도록 결정하였다. 또한 상·하 end plate와 핵연료 어셈블리의 설계는 냉각수의 원활한 흐름을 위한 유로를 확보하도록 하였다. 그림 1은 개방형 핵연료 계장캡슐의 기본설계도이다.

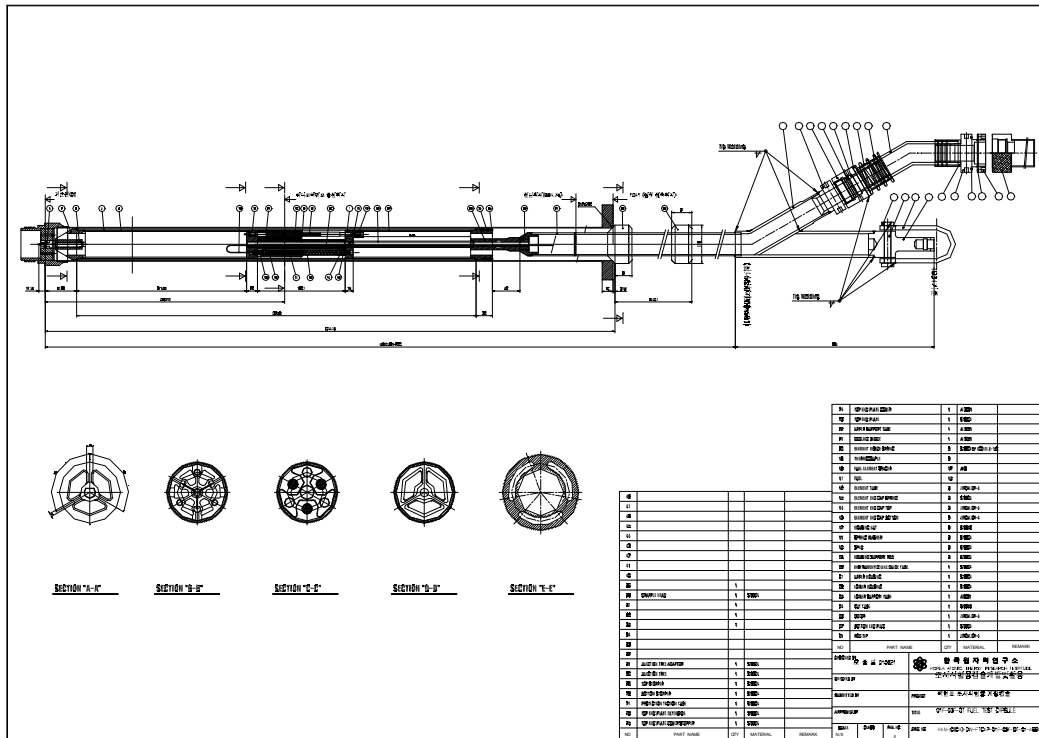


그림 1 개방형 핵연료 계장캡슐의 기본설계도

### 3. 개방형 핵연료 계장캡슐의 구조건전성 해석

핵연료 계장캡슐은 강제 순환식 냉각수 흐름이 있는 하나로 노심에 장전되어 조사시험이 수행된다. 특히 조사시험 중 핵연료 온도, 핵연료봉 내압 및 핵연료 변형량 등의 측정을 위한 여러 계장선들을 보호하기 위하여 본체 상부에 설치된 약 5000mm의 보호관으로 인하여 캡슐에는 시험 중 유체유발진동(flow induced vibration, FIV)이 크게 발생할 수 있다. 이와 같은 유체유동과 지진하중에 의한 진동을 억제하기 위하여 침니 내에 새로운 내부지지대를 설치하였으며, 이에 따라 각 조사공에 장전된 캡슐들을 대상으로 내진해석(seismic analysis)을 수행한 바 있다[5]. 이 들중 핵연료 계장캡슐이 장전될 OR5 조사공에 대한 지진응답해석으로부터, 캡슐 각 부분에서의 발생 응력들은 모두 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Part NF에서 규정하는 허용응력보다 작은 값을 나타내었다. 또한 침니내부지지대와 핵연료 캡슐의 보호관은 주변의 원자로 구조물들과 간섭이 없으므로 변위 제한조건이 없음도 밝혔다. 이와 같은 지진응답해석 결과를 기초로 OR 조사공에서의 핵연료 계장캡슐에 대한 내진 안전성이 확인되었다[7].

이상에 검토한 바와 같이 하나로 OR 조사공에서의 수력조건을 만족하고 내진 안전성이 확인된 개방형 핵연료 계장캡슐의 운반, 설치 및 조사시험 중 구조 건전성을 확보하기 위하여 다음과 같이 구조 건전성 해석을 수행하였다.

#### 3.1 좌굴안전성 해석

개방형 핵연료 계장캡슐은 그림 2에서 보는 바와 같이 외경(56 또는 42.7mm)에 비하여 전체 길

이(4934mm)가 매우 긴 구조적 특징으로 인하여 좌굴의 발생 가능성이 상당히 높으므로, 좌굴 안정성에 대한 검토가 반드시 필요하다고 하겠다. 좌굴해석은 그림 2에 나타난 경계조건에 대하여 캡슐과 보호관이 구조적 안정성을 유지하기 위한 최소하중인 임계좌굴하중  $P_{cr}$ 을 검토하고, 이를 기초로 계장캡슐의 좌굴안정성을 평가하였다.

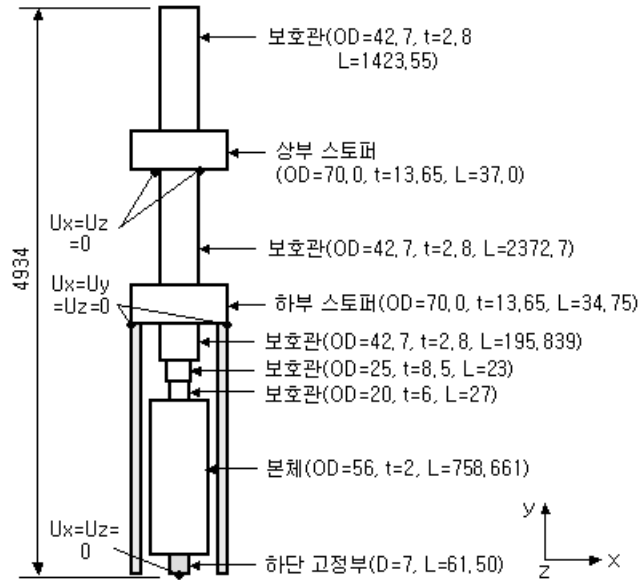


그림 2 OR 조사공에 장전된 개방형 핵연료 계장캡슐 모식도

해석 대상인 개방형 핵연료 계장캡슐의 재질은 각각 본체 외통(out tube)의 경우 STS316L, 보호관(protection tube)은 STS304, 상부와 하부 스톱퍼(upper & lower stopper)는 STS304이며, 하단 고정부(rod tip)는 Zircaloy-4로 하였다. 그림 3은 좌굴해석을 위하여 ANSYS에서 작성된 유한요소모델로서, 상부와 하부 스톱퍼가 좌굴 거동에 영향을 줄 것으로 생각되므로 이들도 모델링에 포함하였다. 좌굴안정성 해석을 위하여 사용된 요소는 2차원 보 요소(Beam188)이다. 경계조건은 그림 2와 같으며, 하중조건은 보호관의 최상단에 1N의 단위하중을 부하하여 좌굴해석을 수행하였다.

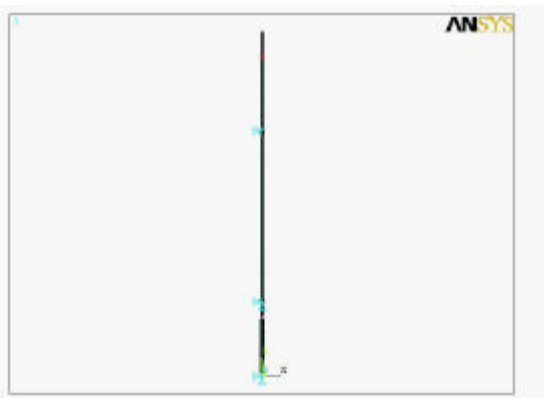


그림 3 좌굴안정성 평가를 위한 유한요소 모델

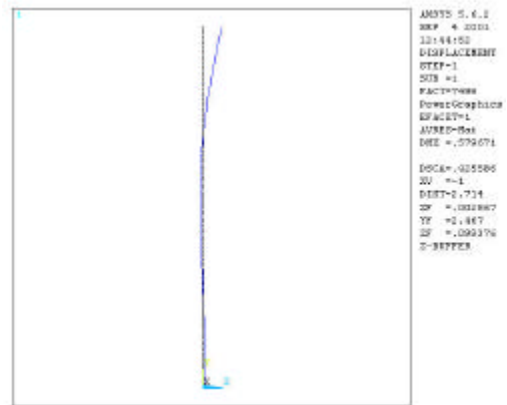


그림 4 좌굴해석결과 (Mode I)

그림 4는 좌굴해석 결과로서, 개방형 핵연료 계장캡슐의 임계좌굴하중은 7.5kN으로 얻어졌다. 따라서 핵연료 계장캡슐에 대하여 산출된 임계좌굴하중(7.5kN)은 실제 핵연료 캡슐의 장전시 취급 기구의 자중과 고정하중을 고려한 최대 작용하중인 1kN보다 훨씬 높은 값이므로, 개방형 핵연료 캡슐에 대한 좌굴안전성이 확보된다.

### 3.2 충격해석

구조물의 고유 성질인 고유진동수 보다 짧은 시간 동안 구조물에 가해지는 충격하중으로 인한 구조물의 동적거동은 정하중(static load)이 작용하는 경우와는 매우 다르게 나타나므로, 이에 대한 고려가 반드시 필요하다. 이를 위하여 핵연료 계장캡슐을 하나로 노심에 장·탈착하는 과정에서 발생할 수 있는 가상의 사고 또는 장전된 상태에서 타 구조물에 의하여 충격을 받았을 때 발생하는 동적거동을 검토하였다. 특히 계장캡슐을 하나로 노심 내에 장전한 후 외부 충격하중이 작용하는 경우에 대한 수직 및 수평충격해석을 수행하였다.

#### 3.2.1 수직 충격해석

수직 충격하중을 받는 경우의 해석에서는 계장캡슐이 OR 조사공에 장전된 상태에서 외부 충격하중을 받는 것으로 가정하고, 램프(ramp)하중이 캡슐 고유주기보다 짧은 시간에 작용하는 경우의 천이해석(transient analysis)을 수행하였다.

해석모델과 경계조건은 좌굴해석(그림 3)과 동일하며, 해석을 위하여 2차원 보 요소(Beam188)를 사용하였다. 하중조건은 보호관의 최상단에 단위하중(1.0N)이 캡슐 고유주기(1/10.919Hz≃0.09sec)[5]의 1/20인 4.6msec동안 수직으로 작용하는 램프하중으로 하였다.

수직 충격하중으로 인하여 캡슐에 발생하는 최대응력은 그림 5의 보호관 부위에서 2.85kPa로 얻어졌으며, 이 값과 보호관 재료(STS304)의 허용응력 관계로부터 결정된 최대 허용 수직충격하중은 65.3kN이다.

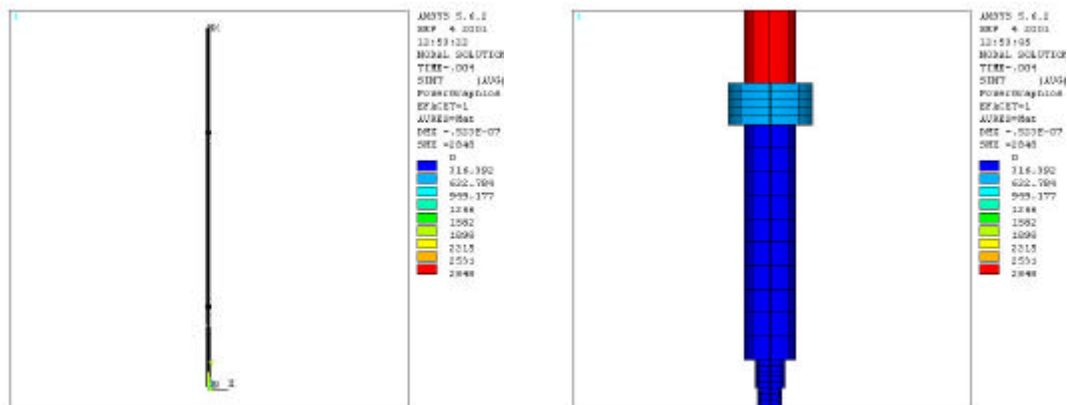


그림 5 단위하중(1N)하의 수직 충격응력 분포

이상에서 검토한 바와 같이 캡슐에 가해질 수 있는 최대 수직충격하중은 65.3kN이지만, 직경에 비하여 길이가 매우 긴 구조적 특성을 가진 계장캡슐의 임계좌굴하중  $P_{cr}$ 은 7.5kN이었다. 따라서 좌굴에 대한 안정성을 고려한 수직충격하중이 작용될 경우 개방형 핵연료 계장캡슐의 안전성을 검토하였다. 그림 6은 수직 충격해석결과로서, 최대 수직충격응력은 보호관 부위에서 20.4MPa로 얻어졌다. 이 값은 재료의 허용응력(186MPa)보다 훨씬 작은 값이므로, 핵연료 계장캡슐에 임계좌굴하중이 작용하는 경우에서 수직 충격안전성을 확인할 수 있었다.

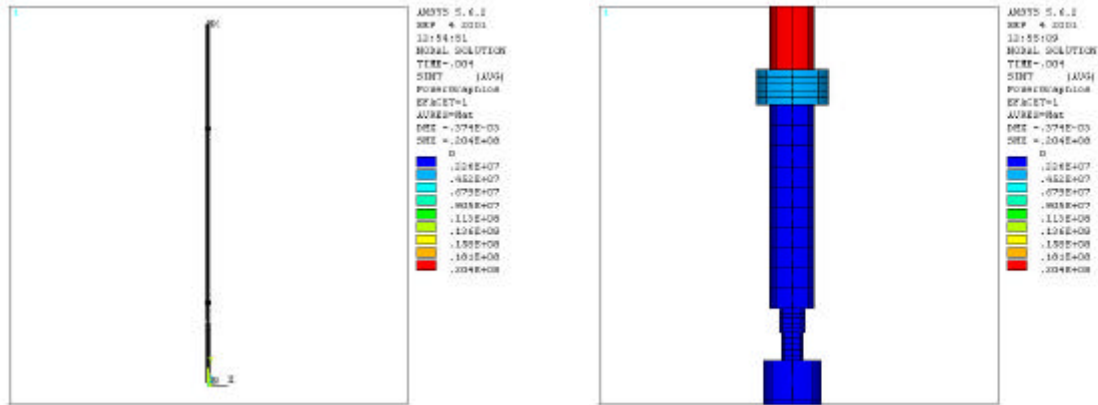


그림 6 임계좌굴하중(7.5kN)하의 수직 충격응력 분포

### 3.2.2 수평 충격해석

핵연료 계장캡슐에 수평방향으로 충격력이 작용하는 경우의 경계조건은 그림 2와 같으며, 하중 조건으로는 그림 7과 같이 상·하부 스토퍼의 중앙에 단위하중(1.0N)을 캡슐 고유주기(1/10.919Hz  $\approx$  0.09sec)[5]의 1/20인 4.6msec동안 수평으로 작용하는 램프하중으로 하였다. 해석에 사용된 요소는 2차원 보 요소(Beam188)이다.

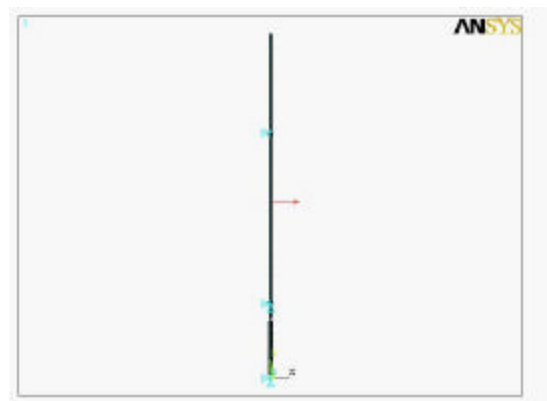


그림 7 수평 충격해석을 위한 유한요소 모델

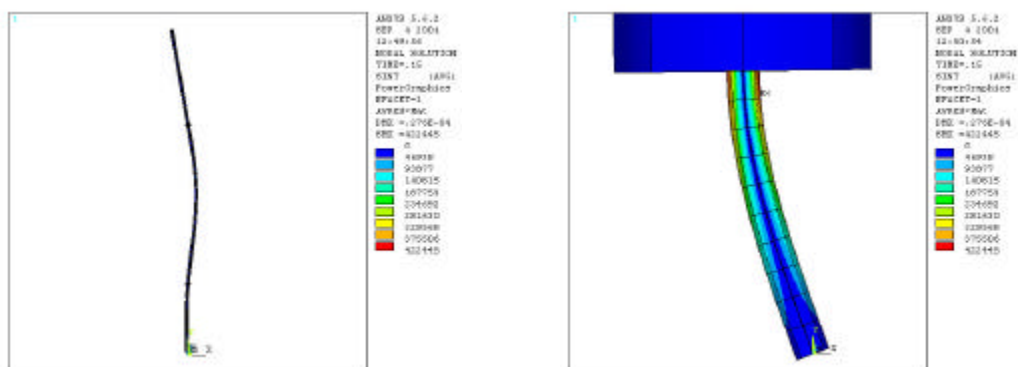


그림 8 단위하중(1N)하의 수평 충격응력 분포

그림 8은 수평방향 단위 충격하중에 의하여 얻어진 응력분포를 보여준다. 최대 수평 충격응력(0.422MPa)은 캡슐 최하단 고정부(rod tip)에서 발생하였다. 이 값은 보다 보수적인 해석을 위하여 캡슐의 최하단 고정부(그림 1의 왼쪽끝단) 즉, bottom guide assembly를 그 중앙에 조립되는 직경 7mm인 rod tip만으로 모델링하여 얻어진 결과이므로, 실제의 경우는 얻어진 값보다 훨씬 큰 하중 하에서도 충분히 안전성을 유지할 것이다. 그러므로 조사공 내에 장전된 캡슐에 작용될 수 있다고 예상되는 수평하중은 최대 허용 수평충격하중보다 훨씬 작을 것이므로, 충격하중에 대한 핵연료 계장캡슐의 사용 중 안전성이 확보된다.

#### 4. 핵연료봉의 응력해석

개방형 핵연료 계장캡슐은 그림 1에서 보는 바와 같이 캡슐 외통 내·외부로 냉각수가 자유롭게 흘러 장전된 핵연료봉을 직접 냉각시키는 구조를 가지고 있다. 따라서 본체 외통의 내·외부에는 냉각수가 흐르므로 온도변화가 거의 없어 캡슐 외통의 내부 열응력이 무시될 수 있다. 그러나 핵연료 봉은 내부에 핵분열물질이 있어 중성자 조사시 많은 양의 붕괴열이 발생하므로 온도 및 압력의 큰 변화가 예상된다. 따라서 ASME Boiler & Pressure vessel Code, Section III의 수식을 적용하여 핵연료 피복관에 대한 응력해석을 수행하였다.

##### 4.1 핵연료봉 내·외압차에 의한 응력

피복관 내부와 외부의 압력차( $P$ )는 약 0.3MPa이며, 이들 압력의 차이에 의하여 피복관에 작용하는 응력은 ASME Code, Section III, Appendix A, Article A-2000 "Analysis of cylindrical shell"에서 규정하고 있는 아래의 식들을 적용하여 계산하였다.

피복관에서 원주방향, 축방향 및 반경방향의 주응력들은 식(1)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_h &= P \frac{1+Z^2}{Y^2-1} = 2.19 \text{ MPa} \\ \sigma_2 = \sigma_z &= P \frac{1}{Y^2-1} = 1.03 \text{ MPa} \\ \sigma_3 = \sigma_r &= P \frac{1-Z^2}{Y^2-1} = -0.14 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{1}$$

여기서 1, 2, 3은 각각 원주방향, 축방향 및 반경방향

$Y$  : 피복관의 외경과 내경의 비 =  $D_o/D_i=9.50/8.357=1.137$

$Z$  : 피복관의 외경과 평균직경의 비 =  $D_o/((D_i+D_o)/2)=9.50/((8.357+9.50)/2)=1.064$

이로부터 피복관의 내·외압차에 의한 최대응력강도( $S$ )는 주응력의 최대 차로 나타낼 수 있다.

$$S = |\sigma_1 - \sigma_3| = 2.32 \text{ MPa}$$

즉, 피복관 내·외부의 압력차에 의하여 작용하는 기계적 응력은 2.32MPa로서, 재료인 Zircaloy-4의 허용응력(156.41MPa)보다 매우 낮게 작용하므로 이에 의한 피복관의 안전성이 확보된다.

##### 4.2 냉각수압에 의한 핵연료봉의 좌굴응력

피복관 표면에 흐르는 냉각수로 인한 수압( $P$ )은 약 0.4MPa이며, 냉각수압에 의한 좌굴응력( $3P$ )은 1.2MPa이다. 한편 피복관에 대한 임계좌굴응력( $P_{cr}$ )은 다음 식(2)로부터 40.55MPa로 얻어졌다.

$$P_{cr} = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)R_o^3} = 40.55 \text{ MPa} \quad (2)$$

여기서,  $E$  : Young's modulus(Zircaloy-4)

$t$  : 핵연료 피복관 두께

$\nu$  : Poisson's ratio(Zircaloy-4)

$R_o$  : 핵연료 피복관 외반경

그러므로 냉각수압에 의한 좌굴응력  $3P$ 는 피복관의 임계좌굴응력  $P_{cr}$ 보다 매우 낮은 값으로서, 피복관의 좌굴 안정성이 확보된다.

## 5. 결론

핵연료 계장캡슐은 하나로 OR 조사공에 장전되어 신형 및 DUPIC 핵연료 등 다양한 핵연료의 성능 및 안전성 평가를 위하여 필수적인 조사시험에 적용될 예정이다. 본 연구에서는 개방형 핵연료 계장캡슐의 상세설계에 앞서 하나로와의 양립성을 고려하여 정립된 기본설계를 바탕으로 구조건전성 및 핵연료봉에 대한 응력해석을 수행하였다. 이로부터 결과들은 다음과 같다.

1. 개방형 계장캡슐의 좌굴안정성은 캡슐과 보호관이 구조적인 안정성을 유지하기 위한 하중인 임계좌굴하중을 기초로 평가되었다. 임계좌굴하중(7.5kN) 이하의 하중이 계장캡슐에 작용되는 경우에는 좌굴에 대한 구조적 안정성이 확보된다.
2. 하나로 노심 내에 장·탈착 시 그리고 시험 중 캡슐에 작용될 수 있는 수직 및 수평충격하중에 대한 구조건전성 해석을 수행하였다. 수직 충격해석에서 보호관의 최상부에 4.6msec동안 단위하중이 작용할 때 캡슐에 대한 최대 허용 수직충격하중은 65.3kN이었으며, 좌굴안정성이 유지되는 한계하중인 임계좌굴하중 하에서 최대응력은 보호관 부위에서 20.4MPa로 얻어졌다. 또한 보호관에 설치된 상·하부 스톱퍼의 중앙에 수평 충격하중이 작용되는 경우의 최대응력은 최하단 rod tip에서 발생하였다. 이상의 충격 해석결과로부터 최대허용하중 및 발생응력들은 실제 작용하중 또는 재료의 허용응력보다 훨씬 낮은 값을 나타내므로 계장캡슐의 충격안전성을 확인하였다.
3. 계장캡슐 내부에 장전되는 핵연료봉에 대하여 내·외압차 및 냉각수압에 의한 응력해석을 수행하였으며, 얻어진 최대 및 좌굴응력은 각각의 허용응력보다 훨씬 낮은 값을 나타내었다.

이상에서 얻어진 구조 건전성 및 응력해석 결과들을 기초로 개방형 핵연료 계장캡슐의 안전성을 확인하였고, 추후 상세 설계시에 기본 자료로 활용되어질 것이다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- [1] Choo, K.N. et al., 1999, "Irradiation of Reactor Materials Using an Instrumented Capsule in HANARO," The 6th Asian Symposium on Research Reactor, pp. 279~284.
- [2] 주기남 등, 2000, "한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 소재의 조사용 계장캡슐(99M-01K·02H) 설계·제작 보고서," KAERI/TR-1646/2000.
- [3] 강영환 등, 2000, "하나로 캡슐의 설계개선," 2000 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, pp.



494~499.

[4] 이재한 등, 1999, “하나로 침니내부지지대에 대한 동특성 및 지진응답 영향 해석,” ‘99 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, pp. 423.

[5] 류정수 등, 1999, “하나로 침니내부지지대에 대한 구조건전성 평가,” KAERI/TR-1398/99.

[6] 양선규 등, 1996, “하나로 핵연료 부수로 유속 및 압력강하 측정,” KAERI/TR-735/96.

[7] HAN-RS-CR-00-024, 2000, “핵연료 조사시험용 계장캡슐 개념설계(안)에 대한 타당성 검토,” 내부통신문.