

핵연료 조사시험용 캡슐에 대한 예비 구조건전성 해석

Structural Analysis on Pre-Designed Instrumented Capsule for Fuel Irradiation Test in HANARO

김도식, 강영환, 김봉구, 오종명, 조만순, 손재민

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

하나로(HANARO) 노내에 설치되어 핵연료 조사시험에 사용되는 계장캡슐은 하나로 핵연료에 적용되는 압력강하 허용기준을 만족하여야 하며, 조사시험 중 캡슐의 건전성을 확보하기 위하여 내진, 좌굴 및 충격 안전성 등이 확인되어야 한다. 핵연료 계장캡슐을 구성하는 본체 외통 및 보호관의 외경은 하나로 OR 조사공에서의 수력조건에 따라 각각 48mm 그리고 42.7mm로 결정하였다. 기 수행된 지진응답해석 결과를 기초로 내진 안전성이 확인된 핵연료 캡슐을 대상으로 좌굴 안전성 평가와 노심에서의 장·탈착 작업 또는 시험 중에 발생할 수 있는 자유낙하 및 충격하중에 대한 구조건전성 해석을 수행하였다. 캡슐의 임계좌굴하중은 구조특성상 발생할 수 있는 좌굴에 대한 안정성해석으로부터 6.8kN으로 얻어졌다. 하나로 노심 내에서 운반 중 또는 조사공 내에 장전중에 발생할 수 있는 캡슐의 수중 자유낙하시 충격응력은 충격순간속도와 Moody diagram을 사용하여 평가하였으며, 이때 캡슐 구성재료인 SUS 316의 허용응력보다 낮은 최대 충격응력이 캡슐에 작용됨을 확인하였다. 이와 함께 OR 조사공에서 시험중 타 구조물로부터 캡슐에 가해질 수 있는 최대 허용 수직충격하중(65.3kN)은 재료의 허용응력을 기준으로 결정되었다. 이상의 해석결과를 기초로 설계된 핵연료 계장캡슐은 하나로 노내에서 운반, OR 조사공에 장·탈착 그리고 조사시험동안의 구조건전성 평가 기준을 만족함이 확인되었다.

Abstract

To develop the instrumented capsule to be used for the irradiation test of nuclear fuel, it is necessary to ensure the compatibility of a capsule with HANARO and the structural integrity of capsule. Based on the analytical results of pressure drop in OR test hole of HANARO, the outer diameters of capsule main body and protection tube are 48 and 42.7mm, respectively. The instrumented capsule with these dimensions was selected to estimate the stability of the capsule during installing and testing the capsule in OR test hole. From the buckling stability analysis for the capsule, the critical buckling load was 6.8kN. To analyze the free-drop impact stress of the capsule in the coolant, the terminal impact velocity of the capsule and Moody diagram were utilized. The stress level under free-drop impact is satisfied with the allowable stress of the capsule material, SUS316. 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. It was ensured that the instrumented capsule for the irradiation test of a nuclear fuel estimated in this study 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 등의 소결체 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 및 캡슐 부품들에 대한 최적 치수 결정이 수반되어야 한다.

원자력 선진국의 핵연료 조사용 캡슐 관련 자료를 검토하고, 하나로 OR 조사공에서의 핵적특성 및 양립성 등을 고려하여 선택된 핵연료 계장캡슐 모델은 핵연료용 무게장 캡슐과 유사한 Open basket type 그리고 Sealed type 캡슐이다. 이를 바탕으로 확립된 핵연료 캡슐의 기본설계는 하나로 OR 조사공의 제한요건(수력조건, 양립성) 및 핵연료 조사시험 요구사항(조사 연료봉수, 핵연료 조사온도 및 선출력, 연소도 등) 등을 검토·분석하여 결정하여야 한다.

본 연구의 해석 대상인 핵연료 계장캡슐은 Sealed type 캡슐로서, 원자력 재료의 조사특성 평가를 위하여 활발히 활용되고 있는 재료 조사시험용 계장캡슐[1~3]과 유사하게 크게 캡슐 본체, 보호관 및 안내관으로 구성되어진다. 핵연료 계장캡슐의 본체 및 보호관의 외형 치수들은 OR 조사공에서의 수력조건을 만족하도록 결정되었다. 또한 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 과정에서 발생할 수 있는 수중 자유낙하 사고 및 장전된 상태에서 타 구조물에 의하여 충격하중을 받았을 때 발생하는 동적거동에 대한 충격해석을 수행하였다.

2. 압력강하를 고려한 캡슐 외통 및 보호관 최적 치수 결정

핵연료 계장캡슐의 본체 외통 및 보호관 치수는 강제순환식 냉각수 흐름이 존재하는 하나로 OR 조사공에서의 수력조건(유량 12.7kg/s 이하, 압력강하 200kPa 이상)을 만족하도록 결정하였다. 그림 1은 조사시험동안의 캡슐 장착상태 및 냉각수 흐름에 대한 모식도이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 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. 하부 스톱퍼의 설계는 냉각수의 원활한 흐름을 위한 유로를 확보하기 위하여 그림 1의 오른쪽 그림과 같은 형상을 가지도록 하였다.

계장 캡슐의 최적 외형치수를 결정하기 위하여, 본체 외통, 보호관 및 하부 스톱퍼의 치수에 따른 OR 조사공에서의 압력강하(pressure drop)량을 검토하였다. 이때 관내의 유동은 정상, 난류유동이며, 비압축성 유체가 흐르는 경우로 가정하였다. 표 1은 이의 결과이며, 이 표에서 ΔP_{inlet} 은 유동관 하부에서의 압력강하량(=90kPa), $\Delta P_{friction}$ 은 그림 1의 각 부분 A-A, B-B 및 C-C에서 냉각수와 외통 및 보호관 사이의 마찰에 의한 압력강하량, ΔP_{C-C} 와 ΔP_{B-B} 는 각 부분에서 유로면

적의 급격한 변화에 기인하는 압력강하량 그리고 ΔP_{total} 은 앞의 3가지 압력강하량의 총합을 나타낸다. 상용 SUS 원관의 규격치수, 유동관의 내경(=60mm) 및 OR 조사공에서의 수력조건을 만족하는 최적 치수들은 외통의 외경=48mm, 보호관 외경=42.7mm 그리고 아래 stopper의 치수는 내경=60mm, 외경=49mm, $r_s=2.75$ mm로 선정되었으며, 이때의 압력강하량은 약 212.6kPa이다. 이상의 압력강하 검토를 기초로 확립된 핵연료 계장캡슐의 기본설계도는 그림 2와 같다.

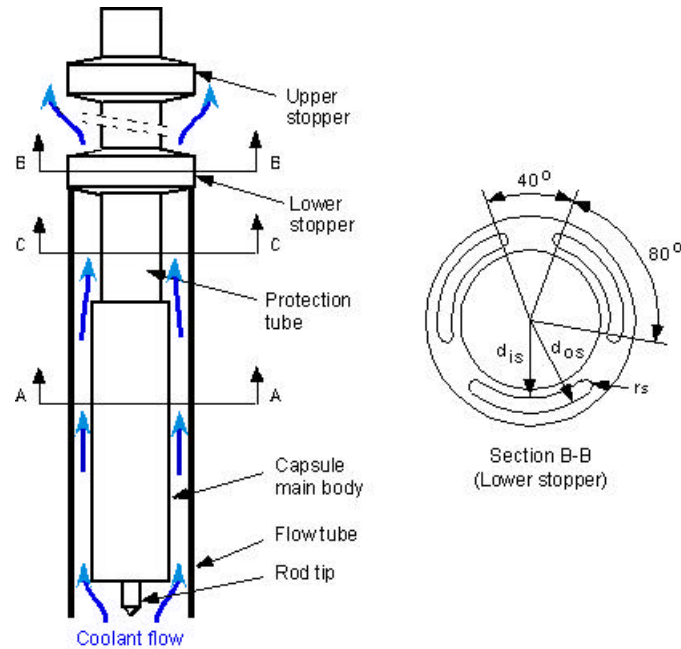


그림 1 OR 조사공에 장전된 핵연료 계장캡슐과 냉각수 흐름

표 1 핵연료 캡슐 치수에 따른 압력강하량

치수 (mm)			압력강하량(kPa)				
외통 외경	보호관 외경	하부 스토퍼	ΔP_{inlet}	$\Delta P_{friction}$	ΔP_{C-C}	ΔP_{B-B}	ΔP_{total}
48.0	42.7	$d_{os}=60$ $d_{is}=48$ $r_s=3$	90	72.016	9.161	28.608	199.784
		$d_{os}=60$ $d_{is}=49$ $r_s=2.75$				41.415	212.592
		$d_{os}=60$ $d_{is}=50$ $r_s=2.5$				59.903	231.097

- * 유동관 내경 = 60mm
- * 질량유량 $\dot{m} = 12.7$ kg/s

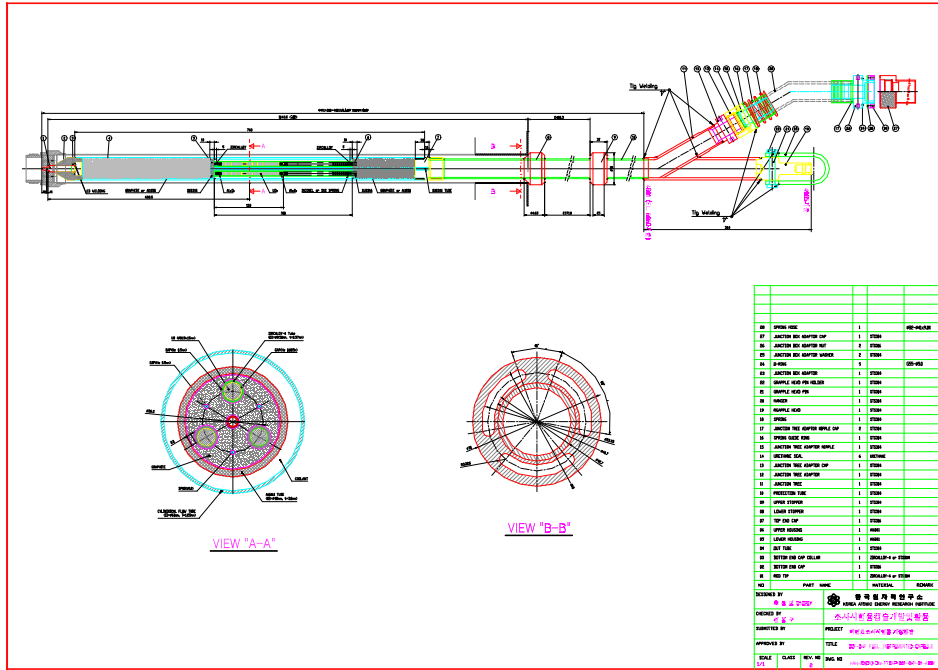


그림 2 핵연료 계장캡슐의 기본설계도

3. 핵연료 계장캡슐의 예비 구조건전성 해석

핵연료 계장캡슐은 강제 순환식 냉각수 흐름이 있는 하나로 노심에 장전되어 조사시험이 수행되며, 특히 조사시험 중 핵연료 온도, 핵연료봉 내압 및 핵연료 변형량 등의 측정을 위한 여러 계장선들을 보호하기 위하여 본체 상부에 설치된 약 4000mm의 긴 보호관으로 인하여 캡슐에는 시험 중 유체유발진동(flow induced vibration, FIV)이 크게 발생될 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 들 중 핵연료 계장캡슐이 장전될 OR5 조사공에 대한 지진응답해석으로부터, 다음 표 2의 CASE 1과 2에서의 발생 응력들은 모두 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Part NF에서 규정하는 허용응력보다 작은 값을 나타내므로 구조적으로 건전함을 보고하였다. 또한 침니내부지지대와 핵연료 캡슐의 보호관은 주변의 원자로 구조물들과 간섭이 없으므로 변위 제한조건이 없음도 밝혔다. 이와 같은 지진응답해석 결과를 기초로 OR 조사공에서의 수력조건을 만족하는 핵연료 계장캡슐에 대한 내진 안전성이 확인되었다[6].

표 2 지진응답해석 시의 핵연료 계장캡슐 치수 [5]

OR 조사공	OR5 조사공 (SUS304)		
	보호관 외경/두께	본체 외경/두께	시험중량
Case 1	34/1.65mm	58/2mm	20kg
Case 2	60.5/1.65mm	58/2mm	20kg

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

3.1 좌굴안전성 해석

핵연료 계장캡슐은 그림 3에서 보는 바와 같이 외경(48 또는 42.7mm)에 비하여 전체 길이(5000mm)가 매우 긴 구조적 특징으로 인하여 좌굴의 발생 가능성이 상당히 높으므로, 좌굴 안정성에 대한 검토가 반드시 필요하다고 하겠다. 좌굴해석은 아래의 표 3에 나타낸 4가지 경계조건에 대하여 캡슐과 보호관이 구조적 안정성을 유지하기 위한 최소하중인 임계좌굴하중을 검토하고, 이를 기초로 계장캡슐의 좌굴안정성을 평가하였다.

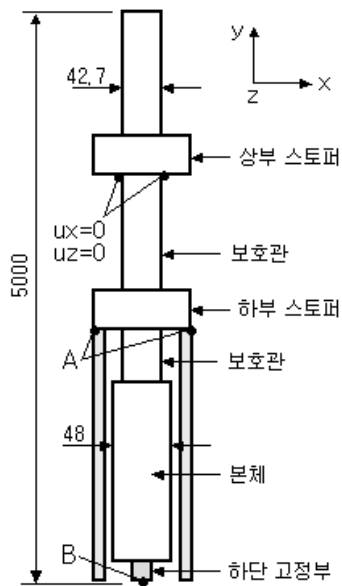


표 3 좌굴해석에 적용된 경계조건

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
A	Simple support	Fixed	Simple support	Fixed
B	Simple support	Simple support	Fixed	Fixed

그림 3 OR 조사공에 장전된 핵연료 계장캡슐 모식도



그림 4 좌굴안정성 평가를 위한 유한요소 모델

해석 대상인 핵연료 계장캡슐의 재질은 각각 본체(main body) 외통의 경우 SUS316, 보호관(Protection tube)은 SUS304, 상부와 하부 스톱퍼(upper & lower stopper)는 SUS304이며, 하단 고정부(rod tip)는 Zircaloy-4로 하였다. 그림 4는 좌굴해석을 위하여 ANSYS에서 작성된 유한요소 모델이며, 보다 보수적인 해석을 위하여 실제 외통 내에 삽입될 열매체를 제외한 중공원관(hollow pipe)으로 캡슐 본체 외통과 보호관을 모델링하였다. 또한 상부와 하부 스톱퍼가 좌굴 거동에 영향을 줄 것으로 생각되므로, 이들도 그림 4의 모델링에 고려하였다. 좌굴 안정성 해석을 위하여 사용된 요소는 2차원 보 요소(Beam188)이다. 경계조건은 그림 3의 A와 B점에 대하여 각각 단순 지지(simple support)와 완전고정(fixed)을 조합한 4가지 조건(표 3 참조)으로 하였으며, 하중조건으로는 보호관의 최상단에 1N의 단위하중을 부하하여 좌굴해석을 수행하였다.

표 3의 4가지 경계조건에 따른 해석결과로부터 핵연료 계장캡슐의 임계좌굴하중은 캡슐 보호관의 하부 스톱퍼와 유동관의 접촉점(A점) 그리고 하단 고정부(B점)가 단순 지지된 Case 1에서 6.8kN으로 가장 낮은 하중을 나타내었다. 따라서 핵연료 계장캡슐에 대하여 가장 보수적으로 산출된 임계좌굴하중(6.8kN)은 실제 핵연료 캡슐의 장전시 취급기구의 자중과 고정하중을 고려한 최대 작용하중인 1kN보다 훨씬 높은 값이므로, 좌굴에 대한 핵연료 캡슐의 안전성이 확보된다.

3.2 충격해석

구조물의 고유 성질인 고유진동수 보다 짧은 시간 동안 외력이 구조물에 가해지는 충격하중으로 인한 구조물의 역학적 거동은 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 계장캡슐이 하나로 노심 내의 수중에서 캡슐 취급기구(capsule handling tool)로부터 분리되어 자유낙하하는 경우 그리고 장전 후 외부 충격하중이 작용하는 경우에 대한 충격해석을 수행하였다.

3.2.1 수중 자유낙하 충격해석

핵연료 계장캡슐을 조사공에 장착하기 위한 취급기구로부터 분리된 캡슐이 수중에서 수직으로 자유낙하하여 원자로 바닥이나 타 구조물과 충돌할 때의 충격응력을 계산하기 위해서는 먼저 자유낙하한 캡슐의 충격순간속도를 알아야 한다.

수중에서 자유낙하하는 캡슐에 작용하는 수직방향 힘의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum F_y &= ma = F_D + F_B - F_w \\ &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 F_D 는 캡슐의 저항력, F_B 는 부력 그리고 F_w 는 중량을 나타낸다. 계산된 수직방향 힘들을 식(1)에 대입하고, 충격순간속도 V 의 항으로 정리하면 식(2)의 속도와 마찰계수 f 의 관계식이 얻어진다.

$$V = \sqrt{\frac{1.75}{f}} \tag{2}$$

한편 상용 원관(pipe) 내의 유체유동에 대한 Reynolds 수와 마찰계수의 관계를 정리한 Moody diagram[7]에서 매끈한 관(smooth pipe)의 마찰계수를 가정하고, 이 값을 식(2)에 대입하여 구한 속도를 아래의 식(3)에 고려하여 Reynolds 수를 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho VD}{\mu} \\ &= 1.0325 \times 10^{-5} V \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ρ : 40°C 물의 밀도(=992.2kg/m³)

V : 충격순간속도

D : 캡슐의 평균직경(=본체직경+보호관 직경)/2)

μ : 40°C 물의 점성계수(=0.656×10⁻³ kg/m sec)

식(3)의 Reynolds 수와 가정된 마찰계수에 상당하는 Moody diagram 상의 Reynolds 수의 차이가 가장 작을 때의 속도 V 가 구하고자 하는 캡슐의 충격순간속도이며, 핵연료 계장캡슐에 대하여 12.185m/sec로 얻어졌다.

결정된 충격순간속도 V 에 따른 핵연료 계장캡슐에서의 충격응력[8]은 다음 식(4)로부터 구하여진다.

$$\sigma_{Impact} = V \sqrt{E \rho} = 168.648 \text{ (MPa)}$$

여기서 E 는 캡슐 본체 재료인 SUS316의 Young's modulus 그리고 ρ 는 밀도이다.

계산된 충격응력 σ_{Impact} 는 계장캡슐 본체의 재료인 SUS316에 대한 허용응력 σ_a (=186MPa)보다 작은 값을 보인다. 이와 같이 핵연료 계장캡슐이 수중에서 자유 낙하하여 충격을 받는 경우 재료의 허용응력보다 낮은 응력이 작용하므로, 계장캡슐의 수중 자유낙하 충격안정성이 확보됨을 알았다.

3.2.2 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.

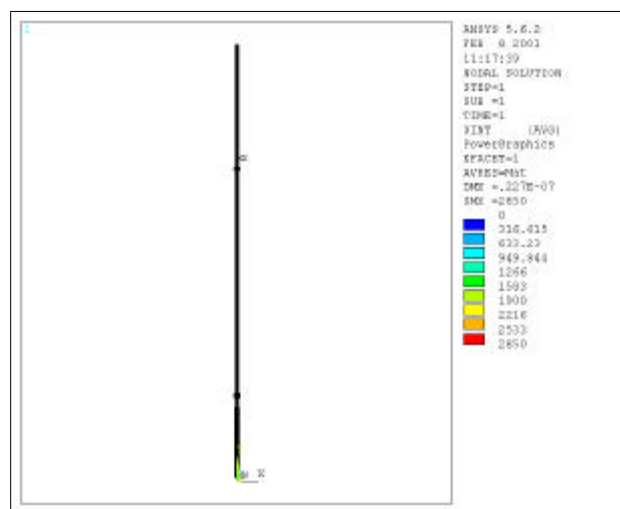


그림 5 단위하중하의 수직 충격응력 분포

해석모델과 경계조건은 그림 4 및 표 3의 좌굴해석과 동일하며, 해석을 위하여 2차원 보 요소(Beam188)를 사용하였다. 하중조건은 보호관의 최상단에 단위하중(1.0N)이 캡슐 고유주기(1/8.1Hz \approx 0.12sec)[5]의 1/20인 6msec동안 수직으로 작용하는 램프하중으로 하였다.

수직 충격하중으로 인하여 캡슐에 발생하는 최대응력강도(stress intensity)는 그림 5로부터 2.85kPa로 얻어졌으며, 이 값과 재료(SUS316)의 허용응력의 관계로부터 결정된 최대 허용 수직충격하중은 65.3kN이다. 따라서 조사공 내에 장전된 캡슐에 실제 작용될 수 있다고 예상되는 수직하중은 최대 허용 수직충격하중보다 훨씬 작을 것이므로, 수직 충격하중에 대한 핵연료 계장캡슐의 사용 중 안전성이 확보되었다.

4. 결론

경수로용 신형 핵연료 및 DUPIC 핵연료 등의 조사시험을 위하여 필수적인 핵연료 계장캡슐은 하나로 OR 조사공에 장전되어 조사시험이 수행될 예정이다. 본 연구에서는 핵연료 캡슐의 상세설계에 앞서 하나로와의 양립성을 고려하여 정립된 기본설계를 바탕으로 예비 구조건전성 해석을 수행하였다. 이로부터 다음과 같은 결과들이 얻어졌다.

1. 상용 SUS 원관의 규격치수 및 유동관의 내경을 고려하고 OR 조사공에서의 수력조건을 만족하도록 결정된 캡슐의 최적 치수들은 외통 외경=48mm, 보호관 외경=42.7mm 그리고 하부 스토퍼의 치수는 내경=60mm, 외경=49mm, $r_s=2.75$ mm이며, 이때의 압력강하량은 212.6kPa이었다.
2. 계장캡슐의 좌굴안정성은 캡슐과 보호관이 구조적으로 안정성을 유지하기 위한 최소하중인 임계좌굴하중을 기초로 평가되었다. 가장 보수적으로 산출된 임계좌굴하중(6.8kN) 이하의 하중이 작용되는 경우에는 좌굴에 대한 구조적 안정성이 확보된다.
3. 캡슐을 하나로 노심 내에 장·탈착 시 그리고 장전시 캡슐에 작용될 수 있는 충격하중에 대한 구조건전성 해석을 수행하였다. 핵연료 계장캡슐이 수중에서 자유 낙하하여 충격을 받는 경우 재료의 허용응력보다 낮은 응력이 작용하였으며, 이로부터 계장캡슐의 자유낙하 충격안정성을 확인하였다. 또한 수직 충격해석에서 보호관의 최상부에 6msec동안 단위하중이 작용할 때 캡슐에 대한 최대 허용 수직충격하중은 65.3kN이었다.

이상에서 얻어진 구조 건전성 해석결과들은 핵연료 계장캡슐의 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] HAN-RS-CR-00-024, 2000, "핵연료 조사시험용 계장캡슐 개념설계(안)에 대한 타당성 검토,"

내부통신문.

[7] 손병진, 1984, “유체역학,” 8장 점성유동, pp. 447~465.

[8] Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., 1970, “Theory of Elasticity,” Chapter 14 The Propagation of Waves in Elastic Solid Media, The third edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 497~504.