

크립캡슐(01S-01K)의 온도분포 계산과 구조적 건정성 해석 (Temperature Calculation and Structural Analysis for the Creep Capsule(01S-01K))

조만순, 손재민, 김도식, 주기남, 박승재, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

노내시험용 크립캡슐(01S-01K)을 제작하기 위하여 구조적·열적 해석을 수행하고 온도분포를 계산하였다. 이 해석을 통해 캡슐의 구조적 건정성 및 조사공과의 양립성을 확인하고 시험의 온도와 외통에서의 ONB 조건(124℃ 이하)을 검토하였다. 본 캡슐이 조사되는 시험공은 노심 외부 조사공인 IP-15공으로 냉각수가 흐르지 않는 IP공에 대한 발열량, 중성자속과 같은 핵적 특성을 구하고 열전달계수를 산정하여 온도계산을 하였다. 온도계산 결과 시험의 온도는 히터를 작동하지 않는 경우 250℃ 이내로 안전한 조건이며 외통의 온도는 85~110℃로 하나로 안전 제한조건인 ONB 조건을 만족함을 확인하였다. 응력해석을 통해 캡슐 시험시 노심 내에서 운반 중 또는 조사공 내에 장전 중 발생할 수 있는 캡슐의 수중 자유낙하시 충격응력을 평가하여 허용응력보다 낮은 응력이 작용함을 확인하였다. 본체 외통의 내외압차에 응력은 5.39MPa이며, 냉각수압에 의한 임계좌굴응력은 18.93MPa로서 허용응력(STS316, 116.72MPa)보다 낮은 응력이 작용됨을 확인하였다. 최고온도 발생부인 시험부의 길이방향 중앙 단면상에서 외통의 최대응력강도는 6.63MPa이며 최하단부인 하부플러그의 접촉면에서의 응력강도는 25.4MPa였다. 결과적으로 외통의 열응력 및 좌굴응력들의 조합은 ASME code에서 요구되는 강도평가 기준을 만족함을 확인하였다.

Abstract

To design and manufacture the creep capsule(01S-01K) for in-core irradiation test, structural·thermal analysis and temperature calculation were performed. In this analysis, the integrity and the compatibility of capsule with IP test hole were confirmed and temperature considering onset of nucleate boiling(ONB) condition(<124℃) were reviewed.

The nuclear properties such as gamma heat, neutron flux were investigated for IP hole at which the irradiation test has never performed, and the heat transfer coefficient was estimated for temperature calculation inside the capsule. The calculation of temperature for the specimen and the external tube are 250°C and 85~110°C respectively, and the it meets the temperature criterion of ONB. For the free-drop impact stress analysis of the capsule in the coolant, the analysis result is found to be lower than the design stress intensity of the capsule material. The maximum stress intensity in the external tube to thermal gradient was 6.63MPa. At the contact part of the bottom plug and external tube, the maximum stress was 25.4MPa. As a result, the thermal and mechanical stresses due to difference of internal and external pressure were satisfied with the strength criterion of ASME code.

1. 서 론

원자로의 구조재료에 이용되는 지르코늄 합금, STS304, Cr-Ni강 등에 대한 크립시험을 하나로에서 수행하기 위하여 노내시험용 크립캡슐을 설계·제작하였다. 크립시험은 고온에서 시편에 파단이 일어나지 않는 하중을 부과하여 시간에 따른 변형정도를 파악하기 위한 시험으로 원자로에서 사용되는 재료의 건전성과 조사량(fluence)에 따른 기계적 특성 변화를 평가하므로써 재료의 잔존수명을 예측하고 수명연장 연구에 활용하기 위함이다.

한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 방사선 환경에서 재료의 특성변화를 조사하기 위하여 재료계장캡슐을 개발하여 활용하고 있다.[1] 이 캡슐을 이용하면 시편의 조사 후 캡슐을 분해하여 시편을 인출한 후 특성변화를 조사할 수 있다. 그렇지만 가동 중인 원자로의 노심에서 실시간으로 재료의 기계적 특성변화를 조사하는 up-grade된 형태의 실험은 선진국에서는 많이 수행되어 왔지만 하나로에서는 수행된 적이 없다. 선진국에서는 재료의 조사크립 특성을 평가하기 위해서 다양한 형태의 크립캡슐을 제작하여 조사크립 시험을 수행하고 있다. 조사크립시험을 위한 장치의 개발은 1960년대 영국에서부터 시작되어 프랑스, 네덜란드, 러시아 등에서 많은 연구가 이루어졌으며, 미국과 일본에서도 연구가 활발히 진행되었다.[2~5] 국내에서는 하나로를 이용하여 조사크립 시험을 수행하기 위해 노내시험용 크립캡슐의 개념설계와 벨로우즈를 비롯한 하중부과장치의 설계, 그립(grip), 하중전달봉과 같은 하중전달장치의 연구 등 크립캡슐에 필요한 요소기술에 대한 연구를 진행해 왔다. Y. Choi 등은 하나로에서 조사시험을 할 수 있는 크립캡슐의 개념설계를 수행하고 모형을 제작하였다.[6&7]

본 연구에서는 노내시험용 크립캡슐의 조사시험 중 구조 건전성 및 하나로 조사공과의 양립성을 확인하기 위하여 캡슐 내부에서의 온도분포를 구하고 구조 건전성 평가 및 열응력에 대한 해석을 수행하였다. 이 해석을 통해 캡슐의 구조적 건전성 및 조사공과의 양립성을 확인하고 시편의 온도와 외통에서의 ONB 조건을 검토하였다.[8] 본 캡슐이 조사되는 시험공은 노심 외부 조사공인 IP-15공으로 조사시험 경험이 없는 IP공에 대한 발열량, 중성자속과 같은 핵적 특성을 구하고 열전달계수를 산정하여 온도계산을 하였다.[9]

2. 크립캡슐(01S-01K) 온도 계산

크립캡슐을 조사시험하는 IP 조사공은 냉각수가 흐르지 않기 때문에 방사선에 의한 온도가 목표온도 이상으로 과도하게 올라가지 않도록 설계시 충분한 여유를 두어야 하며 목표온도와 설계온도의 차이에 해당되는 온도를 히터로 올릴 수 있도록 설계해야 한다. 그렇지 않으면 과도한 온도 상승의 경우 냉각수에 의한 열전달이 매우 낮아 열발산이 어렵게 되기 때문이다. 본 캡슐의 경우에는 히터가 시편과 가깝게 위치해 있기 때문에 히터에 의해 온도를 올리기가 쉬운 구조로 설계되어 있다.

캡슐 내부의 온도를 결정하는데 있어서 가장 중요한 것은 내부 부품 사이의 간격(gap)을 정하는 것이다. 부품사이 간격의 결정은 발열량을 기준으로 부품 사이의 간격과 내부압을 조절하면서 시편의 조사온도를 최종 시험목표로 도달하게 하기 위함이다. 시편이 있는 위치에서 캡슐 부품 사이에 있는 간격은 시편과 히터 사이, 히터와 열매체 사이 및 열매체와 외통 사이가 있다. 시편부는 열전달을 위해 스테인레강 재질로 채워져 있으며 서로 접촉해 놓았기 때문에 단일 부품으로 간주하였다.

캡슐 내부의 온도를 계산하기 위해서는 GENGTC, Heating 7.2f 또는 ANSYS 등의 전산프로그램들이 많이 이용되고 있다.[10] 01S-01K 크립캡슐은 시편부 및 상하 중요부위의 단면이 동심원을 이루고 있어서 프로그램의 운용이 가장 간단한 GENGTC code와 2차원 열계산을 하는 ANSYS code를 이용하여 캡슐 각 부분의 온도를 계산하였다. 본 캡슐의 경우 발열량이 가장 높은 부위가 시편 위치이며 중심위치를 기준으로 볼 때 다른 부분은 빈 공간이며 재료가 채워진 부분은 시편부 밖에 없으므로 시편부의 온도가 가장 높다. 그러므로 시편위치의 단면에 대한 온도계산을 나타내었다. IP-15 조사공에서의 중성자속은 표 1과 같다.[11]

열계산에서 냉각수 온도는 36℃로 설정하였다. 열발산 방식은 캡슐 내부에서는 전도 방식으로 열이 밖으로 전달되고 외통에서는 대류에 의한 열전달 방식으로 열이 냉각수로 발산된다. IP-15공에서의 재질별 감마발열량 분포는 그림 1과 같다.

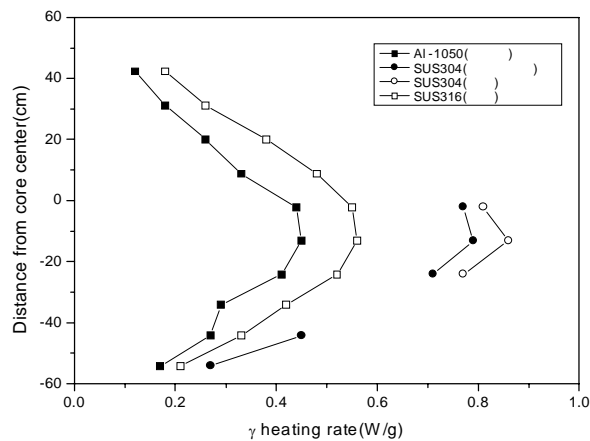


그림 1 IP-15공에서 재질별 감마발열량

자연대류에 의한 열전달계수를 산정하기 위해서는 Gr^*Pr 의 값이 중요하기 때문에 먼저 이 값을 구하면 1.4755×10^{14} 이다. 이 값이 10^{14} 이상이면 난류 영역으로 간주되며 난류영역에서의 자연대류의 열전달식 $Nu_x = 0.17(Gr^*Pr)^{1/4}$ 에 따라 열전달계수 h 를 구하면

880W/m²℃가 된다.[12] 이 값은 일차냉각수가 흐르는 노심조사공에서의 강제대류에 의한 열전달계수 30,300W/m²℃와 비교하여 약 3% 정도에 해당되는 작은 값으로 이 조사공에서의 열방출량이 매우 적음을 알 수 있다.[13]

온도계산에서는 먼저 히터 선정을 위해 1기압 상태에서 히터를 2kW와 3kW로 바꾸면서 온도를 비교하였다. 이 경우의 온도 분포는 표 2와 같다. 히터의 성능평가 결과 2kW 용량의 히터를 사용해도 충분한 온도를 얻을 수 있다. 다음에 He 층에서의 열전달계수가 1기압 상태에서의 열전달계수의 0.4배가 되는 조건(He 압력 50torr 정도)에서 온도 계산을 하였다. 각각의 압력에서 히터 출력을 20%씩 증가시키면서 온도 변화를 계산하였다. 온도계산에 사용된 크립캡슐 시편부의 단면은 그림 2와 같다.

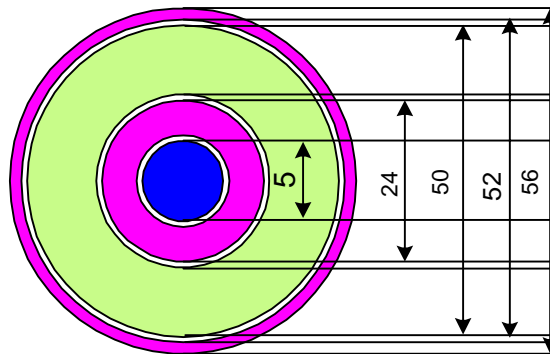


그림 2 시편부 단면 모델
(시편, 히터 STS304/열매체 Al-1050/외통 STS304)

히터를 2kW로 정한 후 캡슐 내부의 진공도 및 히터 출력 변화에 따른 온도 분포를 계산하였다. 그림 3은 갭을 0.1mm로 고정한 상태에서 히터출력 변화에 따른 온도분포를 보여 준다. 초기 설계 목표 온도는 250℃로 히터 출력을 20%인 400W로 하더라도 충분히 목표 온도에 도달시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 히터출력을 증가시키면 따라 외통에서의 온도가 상승하게 된다. 외통에서 하나로에서의 ONB(onset of nucleate boiling) 조건(124℃ 이하)을 만족하기 위해서는 히터의 출력을 400W이하로 조절할 필요가 있다.

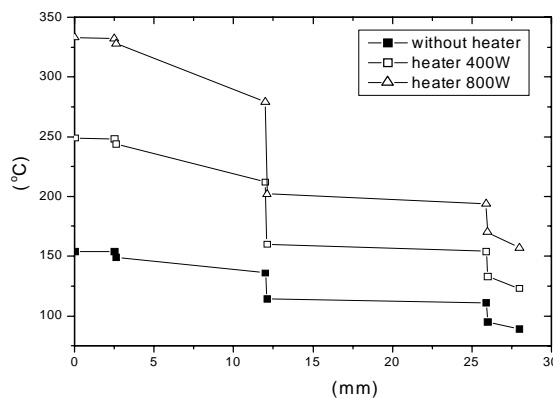


그림 3 히터 출력에 따른 온도(gap 0.1mm)

그림 4는 갭이 0.1mm인 상태에서 내부 진공을 1기압과 50torr로 변화시킬 때의 온도 분포를 나타내고 있다. 히터 출력이 없는 상태에서 내부 진공을 50torr로 변화시키면 시편의 온도가 210℃까지 올라감을 알 수 있다. 히터 출력을 400W로 한 상태에서 캡슐 내부 진공도를 1기압에서 50torr($He_{k=0.4}$)로 변화시키면 시편의 온도는 225에서 280으로 상승한다. 이 그림에서도 외통의 온도가 ONB 조건을 만족하기 위해서는 히터의 출력을 400W 이하로 조절할 필요가 있다.

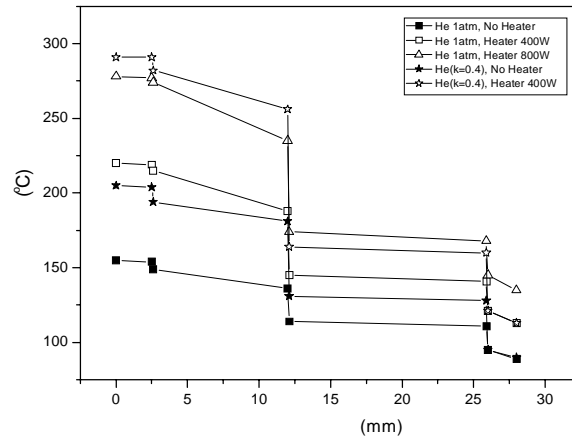


그림 4 히터와 진공도 조절에 따른 온도 (gap 0.1mm)

그림 5는 히터를 400W로 고정한 상태에서 갭을 0.1mm에서 0.8mm까지 변화시킬 때의 온도를 나타낸다. 갭이 0.1mm일 때 시편의 온도는 225℃이며, 갭이 0.3mm일 때 270℃, 갭이 0.5mm일 때 315℃, 갭이 0.8mm에서 375℃까지 상승한다. 이 경우 외통에서의 온도는 110℃로 하나로에서의 ONB 조건을 만족한다. 온도계산 결과 감마발열량만으로 중심 위치에서 외통표면까지의 온도는 375~89℃의 범위에 있다. 갭을 증가시키면 외통 온도는 일정하게 89℃로 유지되지만 시편의 온도는 갭 간격에 따라 400℃ 이상으로 올릴 수 있다는 것을 확인하였다.

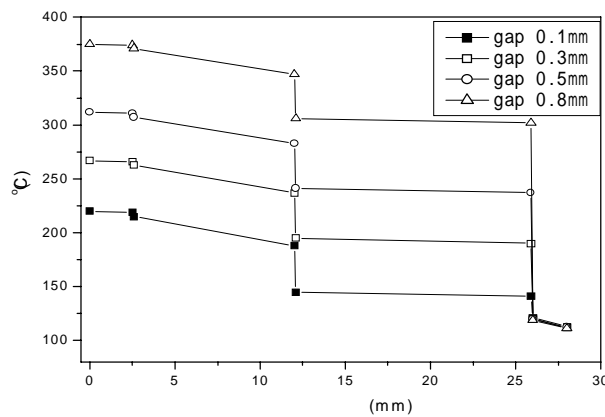


그림 4 갭 변화에 따른 온도(히터 400W)

그러나 01S-01K 크립캡슐의 설계에 있어서는 중요한 설계 변수인 갭 간격을 0.1~0.3mm 범위로 하였다. IP 조사공에서는 냉각수의 흐름이 없기 때문에 자연대류에 의한 열발산만 있는데 현재 이 경우에 대한 열전달계수의 자료가 전혀 축적되어 있지 않다. 열전달계수는 온도계산을 하는데 가장 기본적인 자료로서 온도계산의 정확성 여부가 이 값에 의해 결정된다. 열전달계수에 대한 자료는 조사시험시 측정을 통해 입증될 필요가 있다. 장시간 조사시험을 하는 크립캡슐 01S-01K에서 갭간격을 증가할 경우 시편에서 과도한 온도가 발생될 수가 있기 때문에 부품들 사이의 갭을 0.1~0.3mm로 하여 시편부에서의 설계온도를 280℃ 정도로 하고 온도변화는 제어하도록 하였다.

표 1 Neutron fluence at 24MW power for 10 days operation(nvt)

Height (cm)	E > 0.1 Mev			E > 1.0 Mev			
	C-SUS304 (inner)	C-SUS304 (middle)		C-SUS304 (inner)		C-SUS304 (middle)	
lower	upper		fsd	fsd		fsd	
-24.2	-13.2	1.77E+17	0.2944	1.86E+17	0.1192	1.32E+17	0.1787
-13.2	-2.2	2.58E+17	0.1993	2.59E+17	0.0958	1.23E+17	0.1615
-2.2	8.8	2.76E+17	0.2140	2.94E+17	0.0897	1.82E+17	0.1405

표 2 시편부 단면에서의 온도 분포(히터 2kW)

Gamma(W/g)	0.86					
히터(2kW)발열 %	0	20	40	60	80	100
시편부 중심(℃)	154	219	278	332	383	430
시편 표면(℃)	154	219	277	332	382	429
히터 내면(℃)	149	215	274	328	378	426
히터 표면(℃)	136	188	235	278	318	355
열매체 내면(℃)	114	145	174	202	228	253
열매체 표면(℃)	111	141	168	194	218	241
외통 내면(℃)	95	121	145	170	195	218
외통 표면(℃)	89	112	135	157	180	202

3. 구조건전성 해석

크립캡슐은 냉각수 흐름이 없는 외부 조사공에 장전되므로, 캡슐 장전에 따른 압력강하를 측정할 필요가 없으며, 강제 냉각수 흐름에 의한 유체유발진동(FIV)의 영향도 받지 않는다. 크립캡슐을 조사공에 고정하기 위한 하부 플러그는 IP 조사공 하단의 receptacle위에 얹혀진 상태로 시험되며 본체 상단에 보호관(STS304) 대신 스프링 호스가 장착된다.

(1) 수중 자유낙하 충격해석

크립캡슐을 하나로 수조 내에서 운반 중 조사공에 장착하기 위한 취급기구로부터 분리된 캡슐이 수중에서 수직으로 자유낙하하여 원자로 바닥이나 타 구조물과 충돌할 때의 수중 자

유낙하 충격에 대한 계장캡슐의 충격안전성을 평가하였다. 캡슐은 회전 없이 수직으로 낙하한다고 가정하고, 수중에서 떨어지는 캡슐의 마지막 속도로서 충격응력을 계산하여 구조건전성을 확인하였다.

원관 내의 유체유동에 대한 Reynolds 수와 가정된 마찰계수에 상당하는 Moody diagram 상의 Reynolds 수의 차이가 가장 작을 때의 속도 V 가 구하고자 하는 캡슐의 충격순간속도이며, 크립캡슐에 대하여 8.840m/sec로 얻어졌다. 결정된 충격순간속도 V 에 따른 크립캡슐에서의 충격응력[14]은 다음 식(1)로부터 구하여진다.

$$\begin{aligned}\sigma_{Impact} &= V \sqrt{E\rho} \\ &= 8.840 \sqrt{(193.98 \times 10^9) \times 7800 / 9.81} \text{ (Pa)} \\ &= 109.51 \text{ (MPa)}\end{aligned}\tag{1}$$

여기서 E : Young's modulus, STS304 (=193.98GPa, 40°C)

ρ : 밀도, STS304 (=7800kg/m³)

이상과 같이 계산된 충격응력 σ_{Impact} 는 크립캡슐의 재료인 STS304에 대한 허용응력 (=172.2MPa, 40°C)보다 작은 값을 보이므로 수중 자유낙하의 충격안전성이 확보된다.

(2) 기계적 및 열응력 해석

크립캡슐이 장전된 상태에서 캡슐 외통에는 약 4기압의 수압이 작용한다. 캡슐 내부에 장착된 시편 및 캡슐 구성 부품들에서는 중성자 조사시 열이 발생하므로, 이들에는 온도 변화에 따른 열응력 및 열변형이 예상된다. 따라서 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Division 1의 해당기준을 적용하여 크립캡슐의 외통 및 하부 플러그에 대한 응력해석을 수행하였다.

(가) 외통의 내·외압차에 의한 응력

크립캡슐을 조사공에 장전 시 외통 내부와 외부의 압력차(P)는 약 0.3MPa[15]이며, 이들 압력차이에 의하여 외통에 작용하는 응력은 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Appendix A에서 규정하고 있는 식들을 적용하여 계산하였다.

외통에서 원주방향, 축방향 및 반경방향의 주응력들은 식(2)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_h &= P \frac{1+Z^2}{Y^2-1} = 5.196 \text{ MPa} \\ \sigma_2 = \sigma_z &= P \frac{1}{Y^2-1} = 2.504 \text{ MPa} \\ \sigma_3 = \sigma_r &= P \frac{1-Z^2}{Y^2-1} = -0.189 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{2}$$

여기서 1, 2, 3은 각각 원주방향, 축방향 및 반경방향

Y : 외통의 외경과 내경의 비= $D_o/D_i=56/52=1.077$

Z : 외통의 외경과 평균 직경의 비

= $D_o/((D_i+D_o)/2)=56/((52+56)/2)=1.037$

P : 캡슐 외통의 내·외압 차 (=0.3MPa)

D_o : 외통 외경(m)

D_i : 외통 내경(m)

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

$$S = |\sigma_1 - \sigma_3| = 5.39\text{MPa}$$

즉, 외통 내·외부의 압력차에 의하여 작용하는 기계적 응력은 5.39MPa로서, 외통 재료인 STS316의 허용응력(=116.72MPa, 90°C) 보다 매우 낮게 작용하므로 이에 의한 크립캡슐 외통의 안전성이 확보된다.

(나) 냉각수압에 의한 외통의 좌굴응력

크립캡슐 외통 표면에 흐르는 냉각수로 인한 수압(P)은 약 0.4MPa[12]이며, 냉각수압에 의한 좌굴응력(3P)은 1.2MPa이다. 한편 외통에 대하여 균일한 외압이 작용할 경우의 임계좌굴응력(P_{cr})은 다음 식(3)으로 얻어진다.

$$P_{cr} = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)R_o^3} = 18.93\text{MPa} \quad (3)$$

여기서, E : Young's modulus, STS316 (=190.72GPa, 90°C)

t : 외통 두께 (=2mm)

ν : Poisson's ratio, STS316 (=0.3, 90°C)

R_o : 외통 외경 (=56mm)

그러므로 냉각수압에 의한 좌굴응력 3P는 외통의 임계좌굴응력 P_{cr} 보다 매우 낮은 값으로서, 외통의 수압에 의한 좌굴 안전성이 확보된다.

(다) 크립캡슐의 열응력 해석

조사시험 중 중성자 및 감마선 조사에 의하여 크립캡슐 각 부품들의 온도가 상승하게 되며, 이로 인하여 부품들에는 열변형이 발생하게 된다. 크립캡슐에 내장된 구성부품들 간에 간섭이 일어나는지를 검토하기 위하여, 시편 및 각 부품에서 발생하는 최대 열변형을 평가하였다. 캡슐 각 부품의 온도변화에 따른 열변형을 각 부품의 경계면에서의 초기 치수와 열변형된 변위 값으로 표 3에 정리하였다. 각 부품에서 발생하는 열변형량은 인접한 부품들의 초기 치수보다 작은 값을 나타내므로, 이들간에는 열변형에 의한 간섭이 발생하지 않음을 알 수 있다. 크립캡슐의 시편부 단면상에서의 온도차에 의하여 각 부품들에는 열응력이 발생하게 되므로, 조사시험 중 크립캡슐의 고온 건전성을 확보하기 위하여 시편부 단면상에서 발생하는 열응력을 평가하였다. 그림 5는 시편부 단면에서의 온도변화에 따른 열응력 분포 및 반경방향의 열응력 그래프이다. 크립캡슐 시편부에서의 최고 열응력($\sigma_{int.}max.$)는 21.7MPa이며 connect 외면에서 발생하였다. 그러나 이 값은 connect 재료인 STS304의 허용응력(=107.48MPa, 125°C)보다 훨씬 낮은 값이므로, 이에 대한 열적 안전성이 확인되었다. 캡슐 외통에서의 열응력 분포는 그림 6과 같다. 외통에서의 최대 열응력강도 146.63MPa($(\sigma_{int.}max., P_e)$)이었으며, 이 값은 외통 재료인 STS304의 허용응력(=116.72MPa, 90°C)보다 훨씬 낮은 값이다. 응력해석 결과를 기초로 크립캡슐의 조사시험 중 구조적 건전성을 확인하기 위하여 ASME Boiler & Pressure Vessel, Section III, Division 1의 강도평가 기준을 적용하였다. 그림 6에서와 같은 최대열응력(P_e), 외통 내외압 차에 의한 막응력(P_m), 그리고 냉각수에 의한 좌굴응력(P_{cr})을 고려한 강도평가 결과는 표 4와 같다. 표에서와 같이 기계적 응력은 각각의 허용응력 강도보다 작으며 각 부위에서 발생하는 열응력(P_e) 및 기계적응력(P_m)의 합도 $3S_m$ (=350.16)보다 작으므로 ASME Code의 강도 평가기준을 만족한다.

표 3 시편부 단면상 각 경계에서의 열변형

부분	시편 중심으로부터 반경(mm) - 초기 -	열변형 변위(mm) by ANSYS	시편 중심으로부터 반경(mm) - 열변형 후 -
시편중앙	0.00	0	0.00
시편표면	1.00	0.0025197	1.0025
Spacer 내면	1.25	0.0030559	1.2530
Spacer 외면	2.50	0.0061117	2.5061
Spacer 내면	2.60	0.0058951	2.6058
Connect 외면	12.00	0.027172	12.0271
Shield equipment 내면	12.10	0.029490	12.1294
Shield equipment 외면	25.90	0.063121	25.9631
External tube 내면	26.00	0.033866	26.0338
External tube 외면	28.00	0.036471	28.0364

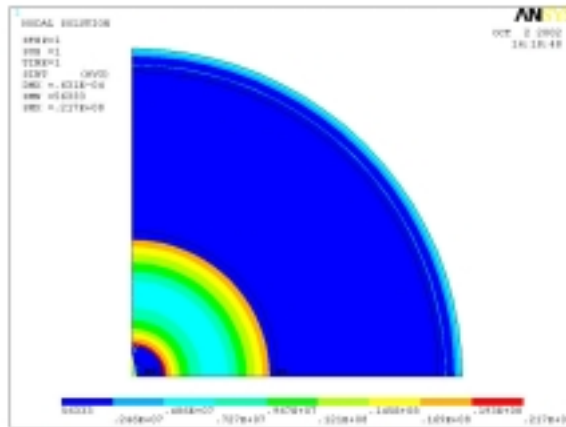


그림 5 시편부 단면에서의 열응력 분포 σ_{int} .

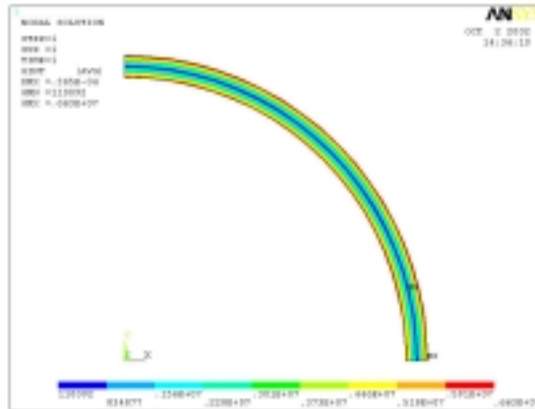


그림 6 외통의 열응력 분포, σ_{int} .

표 4 크립캡슐에 대한 기계적 및 열응력

Parts	Stress item	Calculated stress, σ (MPa)	Design stress intensity, S_m^* (MPa)	Allowable stress intensity, S_a (MPa)	ASME code requirement
External tube	P_m	5.39	116.72	116.72	$P_m < S_m$
	P_{cr}	18.93	-	1.2	$P_{cr} < 3P$
	P_m+P_{et}	5.39+6.63	116.72	350.16	$P_m+P_{et} < 3S_m$

6. 결론

크립캡슐은 하나로 조사공에 장전되어 다양한 원자력 재료의 조사 크립거동 평가를 위하여 활용될 예정이다. 본 연구에서는 고방사선 영역인 하나로 노심(CT 또는 IR 조사공)에서 시험될 크립캡슐의 설계·제작에 앞서 외부 조사공(IP-15)의 핵적 특성을 검토하고 캡슐 내부에서의 온도계산을 하였으며 장기간 시험시 캡슐의 건전성을 검토하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 온도계산 결과 시편의 온도는 히터를 작동하지 않는 경우 250℃ 이내로 안전한 조건이며 외통의 온도는 85℃로 ONB 조건을 만족함을 확인하였다. 응력해석을 통해 캡슐의 수중 자유낙하시 충격응력을 평가하여 허용응력보다 낮은 응력이 작용함을 확인하였다. 본체 외통에 대한 열 및 기계적 응력을 구한 결과 허용응력(STS316, 116,72MPa)보다 낮으며 응력들의 조합에 대해서도 ASME code에서 요구되는 기준을 만족함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력중장기사업 중 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강영환 외, "Present status of an instrumented capsule development for fuel test in HANARO", HANARO Workshop, 2001
2. M. Mason, Journal of Nuclear Materials, vol. 65, 1977, pp 307-312
3. H. NAKATA, Irradiation facilities in JMTR, JAERI Report, 1982
4. Y. Kurata et al., "In-pile and post-irradiation creep of type 304 stainless steel under different neutron spectra", J. Nuclear Material, pp. 386-390, 2000
5. J. Ahlf, A. Zurita, High flux reactor(HFR), Peten characteristics of the installation and the irradiation facilities, 1992
6. 맹완영 외, "노외시험용 특수캡슐 개발", KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1563/00, 2000
7. 최용 외, "지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 개념설계", '99 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1999.
8. 손재민. 김도식 외, "하나로 IP 조사공에서 시험될 크립캡슐(01S-01K)에 대한 구조건전성 및 열해석", KAERI/TR-2405/2003
9. 조만순 외, "노내시험용 크립캡슐의 설계 및 계획", '02 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2002.
10. GENGTC-JB, 조사용 캡슐 내 온도평가 프로그램, JAERI-M 87-148, 1987
11. 서철교, "크립캡슐의(01S-01K)의 조사량 및 발열량 예비평가", KAERI 내부통신문, HAN-RR-CR-920-01-079, 8. 11. 2001.
12. J. P. Holman, Heat Transfer, Fourth Edition, pp. 300~307 & pp. 299~306, McGraw Hill
13. K. N. Choo, et als, "Design and Fabrication of HANARO Instrumented Capsule for Irradiation Test of Reactor Vessel, Core, Pressure Tube Materials," '01 한국원자력학회 추계학술대회 논문집. 2001.
14. Timoshenko, S.P. and Goodier, J. N., 1970, "Theory of elasticity", Chapter 14 The propagation of waves in elastic solid media, 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, pp, 497~504
15. 강영환 등, 1993, "KMRR을 이용한 노내검증 시험 평가기술 개발", KAERI/RR-1398/93