

히터열원을 갖는 크립캡슐(02S-08K)의 열 및 응력해석
Thermal and Stress Analysis of the Creep Capsule(02S-08K)
with the Heater Source

최명환, 조만순, 주기남, 손재민, 강영환, 김봉구, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

크립캡슐은 연구로에서 조사시험과 크립시험을 동시에 수행할 수 있는 특수캡슐중의 하나이다. 본 연구에서는 단일채널유동시험시설에서 히터 열원에 의한 크립캡슐(02S-08K)의 온도를 측정하였고, 유한요소해석 프로그램 ANSYS를 이용한 열 및 응력해석을 수행하였다. 해석모델은 이미 설계된 치수를 기본으로 하여 시편부 단면에 대한 2차원 1/4 모델을 생성하였다. 해석을 위하여 히터출력을 열발생밀도로 환산하였고, 복잡한 형상의 히터부를 원환 형태의 면적으로 모델링하였다. 히터 출력이 각각 1.0kW와 1.5kW인 경우, 최대온도는 해석결과가 330.6°C와 448.6°C, 측정결과가 362°C와 445°C로 두 결과는 서로 잘 일치하였다. 또한 1.5kW 히터출력에 대하여 캡슐내부의 최대응력은 74.2MPa로 커넥터에서 발생하였으나, 재료의 허용응력을 만족하였다. 개발된 해석모델은 향후 노내 조사시험 결과와의 비교/검증을 위한 데이터의 생성을 위해 활용될 것이다.

Abstract

The creep capsule is one of the special capsules, which can be simultaneously performed the irradiation and creep test in the normal operating condition of the research reactor, HANARO. In this study, the temperature of the creep capsule(02S-08K) with heater power only is measured in the one-channel flow test facility, and the thermal and stress analysis using a finite element(FE) analysis program, ANSYS is performed. The FE model is generated as a quarter of 2D area for the section of the specimen parts based on the design values. The heater powers for FE analysis are converted to the heat generation density and the complex-shaped heater is modeled as an area of the annular shape. When the heater powers are 1.0kW and 1.5kW, the maximum temperatures of the capsule are 362°C and 445°C for the test, and 330.6°C and 448.6°C for the analysis, respectively. In case of the heater power,

1.5kW, the maximum stress intensity of the capsule is 74.2MPa at the connector, but that is lower than the allowable stress of the connector made of stainless steel. It is expected that the FE model developed can be applicable to the generation of data to compare and verify the results of the irradiation test in the HANARO in-core in the future.

1. 서론

연구로인 하나로(High-Flux Advanced Neutron Application Reactor; HANARO)를 이용한 재료 및 핵연료(fuel) 등의 조사시험(irradiation test)에 계장캡슐(instrumented capsule)이 활발히 활용되고 있으며, 조사시험의 한 분야로서 조사 중 실시간으로 시편에 일어나는 변화를 관찰할 수 있도록 만든 특수목적용 캡슐이 연구, 개발되고 있다[1]. 그 중에서 크립캡슐(creep capsule)은 연구용 원자로인 하나로 노심에서 조사시험을 수행하면서 실시간으로 시편에 하중을 부과하여 시간에 따른 변형량을 측정함으로써 재료의 기계적 특성을 파악하고, 수명예측 및 연장 등의 연구에 활용하기 위해 사용 된다. 본 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 과제에서는 지난 몇 년간 크립시험을 위한 기초적인 연구를 통하여 시편 1개를 장착한 크립캡슐을 설계, 제작하여 2003년 조사시험을 수행한바 있으며[2-4], 2개 혹은 그 이상의 복수시편을 장착하고 조사시험을 수행하기 위한 연구가 추진되고 있다.

조사시험이 수행된 01S-01K 캡슐의 경우, 중성자속이 매우 낮은 IP-15공에서 시험이 수행되었으며, 현재 조사후시험을 위하여 대기중에 있다. 그러나 본 연구에서 고려한 크립캡슐(02S-08K)은 직경 3.8mm의 인장시편 1개를 장착하고 중성자속이 높은 노심 CT 조사공에 장전하여 조사온도 600°C에서 시험할 예정이다. 본 캡슐과 관련한 하중부과장치, 변위측정을 위한 LVDT(linear variable differential transformer), 온도계산, 시편부 및 히터 설계 등의 기술적인 내용에 대해서는 참고문헌[5]에 상세히 언급되었다. 조사시험에 관련된 여러 기술들 중에서 특히 조사시험 이전 설계 단계에서 시편부의 온도를 예측하는 것은 이용자의 요구조건을 만족하는 분위기에서의 조사시험을 위해서 중요하다. 그러나 크립캡슐은 하중 부가장치나 측정 장치들이 시편 주위를 둘러싸는 복잡한 형상으로 인하여 많은 갭(gap)을 갖게 되고, 이러한 갭은 온도예측을 어렵게 하는 원인 중의 하나가 된다. 이전의 연구에서 온도계산은 주로 GENGTC[6]를 이용하였으나, 이 프로그램은 캡슐의 열계산 전용 프로그램이므로 구조건전성 평가를 위한 열응력 계산을 수행할 수 없는 단점이 있다. 따라서 이전 크립캡슐의 열응력 해석에서는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS[7]를 적용하였고, 충격 및 좌굴해석 등을 통하여 구조건전성을 평가하였다[8].

유한요소해석 프로그램을 이용하여 신뢰할 만한 온도 및 응력을 계산하기 위해서는 무엇보다도 모델을 정확히 생성하는 것이 중요하다. 따라서 개발된 해석모델에 대한 검증이 필요하며, 이는 히터(heater)를 열원으로 한 노외에서의 온도측정이나 조사시험 후의 온도측정 결과와의 비교를 통하여 이루어 질 수 있다. 본 연구자들은 노외 온도측정 결과

를 기초로 하여 ANSYS를 이용한 유한요소 해석모델 개발에 대한 연구를 수행한 바 있으며[9], 본 논문에서는 모델 개발의 일부내용과 개발된 모델을 이용한 열 및 응력해석에 대하여 기술하였다. 02S-08K 크립캡슐에 대하여 1.0과 1.5kW의 히터 출력을 열원으로 고려하였고, 노외의 단일채널유동시험시설(one-channel flow test facility)에서 온도를 측정하여 해석결과와 비교하였다. 유한요소모델은 시편부 단면에 대한 2차원 1/4 모델을 생성하였고, 히터부를 원환(annular) 형태의 면적으로 모델링하였다. 개발된 해석모델을 이용하여 캡슐외통과 열매체 사이의 갭이 온도에 미치는 영향과 히터 출력에 따른 열해석을 수행하였다. 또한 응력해석을 수행하여 캡슐내부와 외통에서의 응력강도(stress intensity) 및 응력분포 등을 고찰하였다.

2. 모델

본 연구에서 고려한 크립캡슐의 형상에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었는데, 크립캡슐은 크게 세 부분으로 분류할 수 있다. 첫째, 하단부 rod tip은 하나로 노심에 장전하기 위한 부분이고, 둘째, 보호관(protection tube)은 제어 및 계측에 필요한 계장라인들을 노외의 장치까지 안내하는 역할을 한다. 셋째, 캡슐 본체(main body)는 크립시험에 필요한 각 부품들을 포함하는 부위로서 시편, 벨로우즈를 포함한 하중부과장치, 히터, 변위 측정용 LVDT, 열전대(thermocouple) 등을 포함하고 있다.

캡슐 본체 시편부의 단면 형상 및 명칭을 Fig. 2에 나타내었고, Table 1에는 각 부품의 크기 및 재료 등을 나타내었다. 크립캡슐의 단면은 크게 7부분으로 구성되는데, 중앙에는 인장시편(tensile specimen)이 배치되고, 계속해서 반경방향으로 시편 둘레에 스페이서(spacer1&2), 히터 홀더(heater holder), 커넥터(connector), 열매체(thermal media), 외통(external tube)으로 구성되며, 이들 사이에는 각각 헬륨(helium)으로 채워진 갭(gap)이 존재한다. 또한 Fig. 2는 각 부위의 온도측정을 위해 설치된 열전대의 위치를 나타내었다. 열전대는 스페이서1의 외곽부에 TC1이 위치하고, 스페이서2에 TC2, 히터홀더에 TC3, 커넥터에 TC4, 마지막으로 열매체의 외표면에 TC5가 설치되었다.

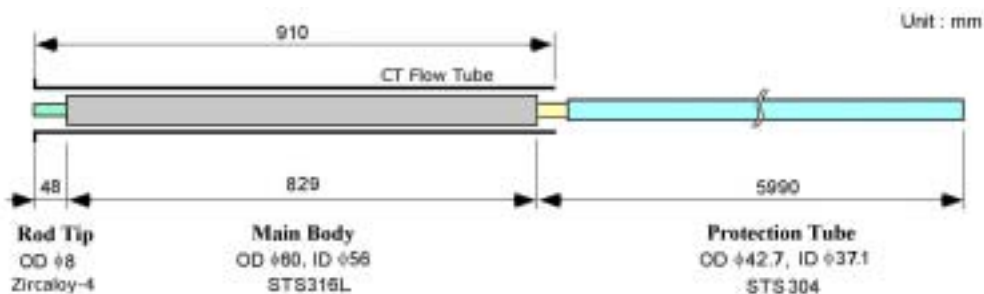


Fig. 1 Schematic view of the creep capsule

Table 1. Material and dimension of the creep capsule

Component	Material	Out diameter (mm)	Gap size (mm)	Thermocouple
Specimen	STS316L	3.8	0.05	
Spacer1	STS304	8	0.05	TC1
Spacer2	STS304	14.2	0.1	TC2
Heater holder	STS304	23.6	0.1	TC3
Connector	STS304	31.8	0.1	TC4
Thermal media	A1050	55.2	0.4	TC5
External tube	STS316L	60	-	

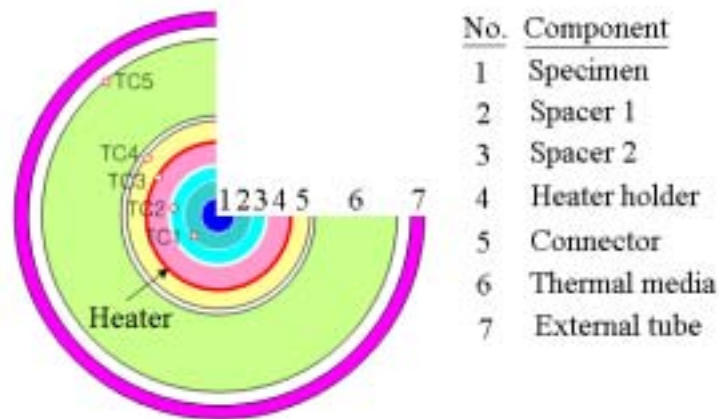


Fig. 2 Section view and name of components for the creep capsule

크립캡슐의 온도분포에 큰 영향을 미치는 부품들 사이의 갭은 열매체와 외통 사이가 0.4mm로 설계되었고, 시편과 스페이서 사이는 거의 밀착되도록 설계되었으며, 나머지 다른 부품들 사이의 갭은 0.1mm로 설계되었다. 또한 조사시험중 온도제어를 위한 시편부의 가열을 위하여 길이 100mm의 히터 홀더에는 직경 18mm, 피치 3mm로 최대 2.5kW 용량의 히터가 감겨 있다.

3. 노외 온도측정

해석모델의 비교/검증을 위하여 노외에서의 히터 출력에 따른 온도를 측정하였으며, 시험은 단일채널 유동시험시설에서 조사시험중 하나로에서의 유동조건과 동일한 200kPa의 차압조건, 냉각수 온도 35 °C에서 수행하였다[10]. 이때 열원으로 사용한 히터의 출력은 각각 1.0kW와 1.5kW이고, 온도가 정상상태(steady state)에 도달하여 변화가 없는 상태에서 5개 열전대에서의 온도를 기록하였다.

4. 유한요소해석

이미 언급된 바와 같이 캡슐의 온도분포에 크게 영향을 미치는 요소는 부품들 사이의 갭 크기이며, 특히 열매체와 외통사이의 헬륨 갭이 온도에 큰 영향을 미치나 부품들 사이의 갭은 이미 설계, 제작되었기 때문에 해석에서는 Table 1과 같이 설계된 치수를 반영하였다. 여기서 시편과 스페이서1, 스페이서1과 스페이서2 사이는 거의 밀착되도록 설계되었으며 해석에서는 0.05mm의 갭으로 가정하였다.

히터를 열원으로 하는 모델의 경우에 유한요소해석에서 중요한 사항중의 다른 하나는 히터를 어떻게 모델링 하는 가에 있다. 02S-08K 캡슐에 사용된 주 히터의 발열부는 직경 1.5mm, 길이 1,580mm이고, 길이 100mm의 히터 홀더에 직경 18mm, 피치 3mm로 감겨있다. 따라서 ANSYS 해석을 위해서는 히터의 출력을 단위 체적당의 출력인 열발생밀도 (heat generation density)로 계산할 필요가 있으며, 해석모델에서는 히터부를 얼마의 면적으로 고려할 것인가를 결정하여야 한다. 히터 출력의 열발생밀도 계산 및 히터부의 모델에 대한 상세한 내용은 참고문헌[9]에서 언급되었고, 여기서는 간략히 결과만을 기술한다.

우선, 히터의 열발생밀도는 킬로와트(kW) 단위의 출력을 발열부의 체적으로 나누어 계산하였으며, 히터출력 1.0kW는 358.2MW/m^3 , 1.5kW는 537.2MW/m^3 으로 계산되었다. Fig. 3은 히터홀더에 히터가 감겨있는 축방향 단면과 유한요소해석에서 어떻게 모델하였는가에 대한 개념을 나타내었다. 이때 해석모델은 2차원 평면모델로 고려하였기 때문에 원환형태의 히터부 면적을 결정해야 하며, 해석모델의 체적과 히터 발열부의 체적을 동일하게 하여 히터부 외경을 계산하였다. 계산결과 히터부의 외경은 18.96mm로 결정되었고, 내경은 설계값인 18mm를 사용하여 해석모델을 생성하였다.

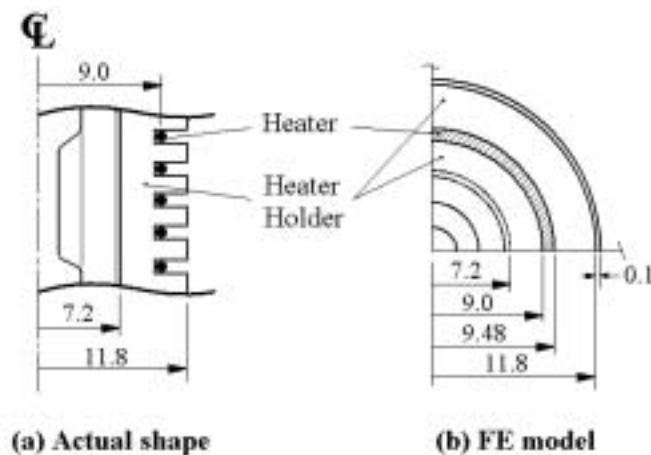


Fig. 3 Schematic view for the FE modeling of the heater

해석을 위한 유한요소 모델링은 온도 및 열응력 해석이 동시에 가능한 PLANE13(2-D coupled field solid) 요소를 사용하였고, 원주방향 대칭성을 고려하여 Fig. 4와 같이 시편부 단면에 대하여 2차원 평면 1/4 모델을 생성하였다. 경계조건으로는 x, y축 대칭 경계조건을 적용하였고, 외통 표면에서의 열전달 계수는 CT 조사공에서의 재료 캡슐과 동일한 값인 $30.3\text{kW/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ [11], 외통 주변의 냉각수 온도는 35°C 를 적용하였다. 하중은 단위 체적당의 출력인 열발생밀도를 위에서 모델된 히터부에 적용하였다.

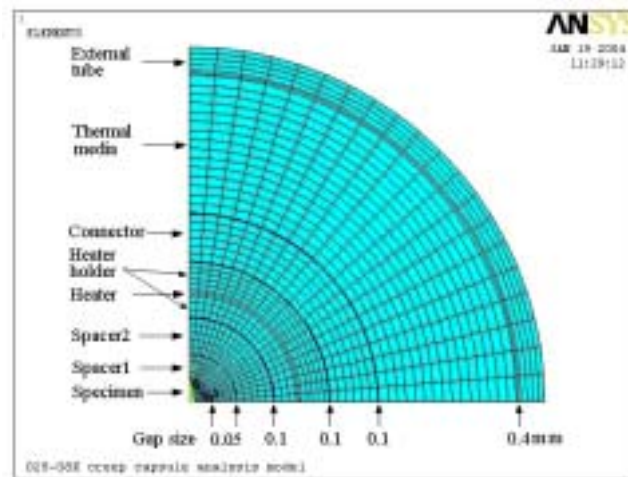


Fig. 4 FE analysis model of the creep capsule

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 크립시험용 캡슐에 대한 노내 조사시험전 노외에서의 온도측정 및 해석결과에 대하여 기술하였으며, 측정온도는 히터 출력에 따른 5개 열전대에서의 온도가 변화 없이 안정화 되었을 때의 값을 나타내었다.

히터 출력 1.0kW와 1.5kW에서의 측정온도 및 해석결과를 Table 2에 나타내었다. 1.0kW 히터출력시 시편에 가까운 스페이서1의 TC1 열전대에서 측정된 온도는 362°C 이고, 스페이서2에서는 이보다 약간 높은 366°C 를 보였다. 또한 캡슐 외통쪽으로 갈수록 온도는 감소하여 열매체의 표면에 설치된 TC5에서는 177°C 로 측정되었다. 해석결과는 시편부에서 330.6°C 를 보여 시험결과와 8.68%의 차이를 보이고, 최대오차는 TC3가 위치한 히터홀더 부위에서 10.5%의 차이를 보였다. 그러나 열전대 TC3는 Fig. 3(a)에서 반경 10mm되는 부위에 설치된 것으로 히터부의 실제형상이 복잡하다는 것을 고려한다면, Fig. 3(b)와 같이 히터부를 모델링하여 해석한 결과는 시험결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다.

히터 출력 1.5kW에서 TC1의 온도는 445°C 로서 1.0kW에서의 온도에 비해 83°C 의 온도

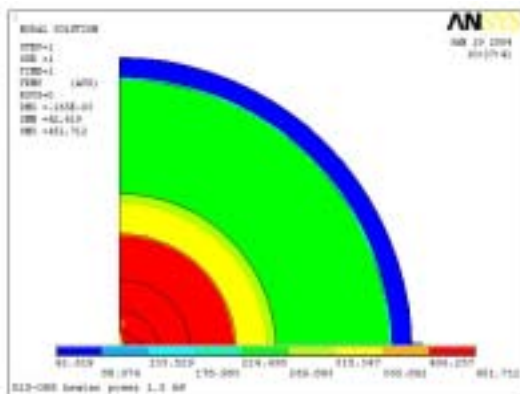
상승을 보였으며, 전반적으로 히터의 출력 증가로 인해 약 18% 정도의 높은 온도를 나타내었다. 해석결과는 캡슐의 중앙부(TC1~TC3) 온도가 시험결과와 1%이내의 오차로 잘 일치하지만, TC4와 TC5에서는 시험결과가 약 9%정도 낮았다. 또한 히터출력의 증가로 인한 해석결과는 약 26%의 온도증가를 보였다.

Fig. 5는 히터출력이 1.5kW인 경우의 온도분포 및 반경방향 온도를 나타내었다. 전반적으로 시편과 스페이서 등의 시편 중앙부에서 최대온도를 보였다. 이것은 시편, 스페이서1, 스페이서2가 같은 재료로 이루어져 있으며 이들은 거의 밀착되도록 제작되었고, 해석에서도 이를 반영하여 0.05mm의 갭으로 모델하였기 때문이다. 또한 반경방향의 온도분포는 0.1mm의 갭으로 설계된 스페이서2, 히터홀더, 커넥터, 열매체 사이에서는 온도감소가 비교적 심하며, 특히 0.4mm의 갭을 갖는 열매체와 외통사이에서는 183°C의 급격한 온도감소를 보였다. 이는 갭에 충전된 헬륨 가스의 열전도도가 다른 금속에 비해 낮아 열을 잘 전달하지 못하기 때문이다.

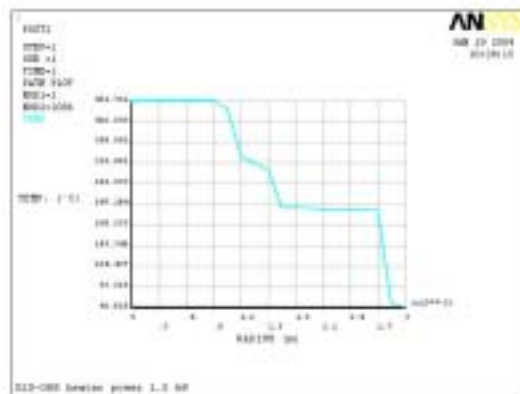
Table 2. Temperatures(°C) with the heater power (water temp. 35°C)

Thermocouple	R. Coord. (mm)	Heater power, 1.0kW			Heater power, 1.5kW		
		Test	ANSYS	Error*	Test	ANSYS	Error*
TC1	4	362	330.6	8.68	445	448.6	-0.81
TC2	7.1	366	330.6	9.68	450	448.6	0.31
TC3	10.4	358	320.4	10.5	438	434.4	0.82
TC4	15.9	234	224.5	4.04	278	303.7	-9.25
TC5	27.6	177	171.9	2.85	215	231.6	-7.72

* Error = (Test-ANSYS)/Test×100(%)



(a) Temp. distribution



(b) Temp. profile in the radial direction

Fig. 5 Temperatures of the creep capsule for the heater power, 1.5kW

Table 3은 캡슐 주변의 냉각수 온도에 따른 해석 결과를 나타내었다. 냉각수 온도가 35°C에서 40°C로 상승하였을때 온도는 전반적으로 약 3~4°C의 상승을 보였으며, 비록 미소한 차이이기는 하지만 히터 출력이 큰 경우에 온도차가 적게 나타났다. 또한 이들 결과를 통하여 냉각수 온도가 상승하거나 강하하더라도 캡슐 내부 온도의 변화는 크지 않으며, 냉각수의 온도변화에 따라 캡슐 내부의 온도도 선형적으로 증가하거나 감소할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 6은 히터출력 1.5kW에 대한 캡슐 외통과 열매체 사이 갭의 크기가 온도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 고려한 갭의 크기는 0.1~0.5mm의 범위에서 0.1mm씩 변화시키면서 온도변화를 살펴보고, 다른 부분의 갭 크기는 설계값을 유지하였다. 갭이 커짐에 따라 전체적인 온도는 일정하게 상승하며, 갭이 0.1mm 커지면 시편부에서는 약 35°C, 열매체에서는 약 45°C의 온도가 증가하였다.

Table 3. Effects of the cooling water's temperature of the creep capsule by analysis

Thermocouple	Heater power, 1kW		Heater power, 1.5kW	
	Cooling water 35 °C	Cooling water 40 °C	Cooling water 35 °C	Cooling water 40 °C
TC1	330.6	334.1	448.6	451.7
TC2	330.6	334.1	448.6	451.7
TC3	320.4	323.9	434.4	437.5
TC4	224.5	228.5	303.7	307.2
TC5	171.9	176.2	231.6	235.4

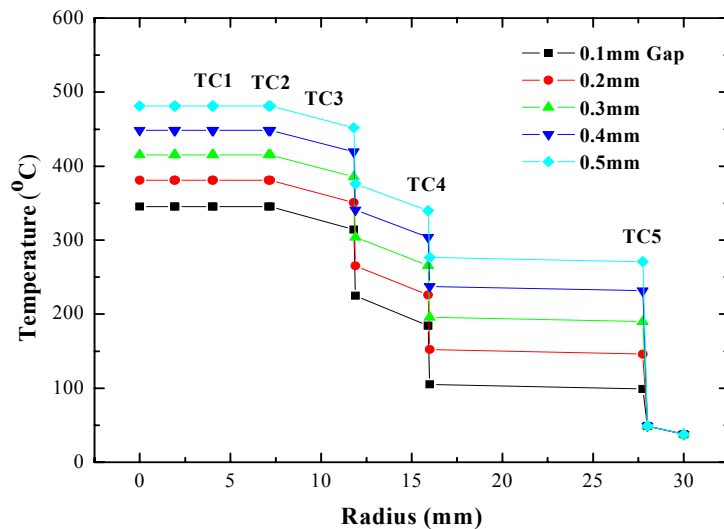


Fig. 6 Temperatures of the capsule with gap size between the thermal media and the external tube for the heater power, 1.5kW

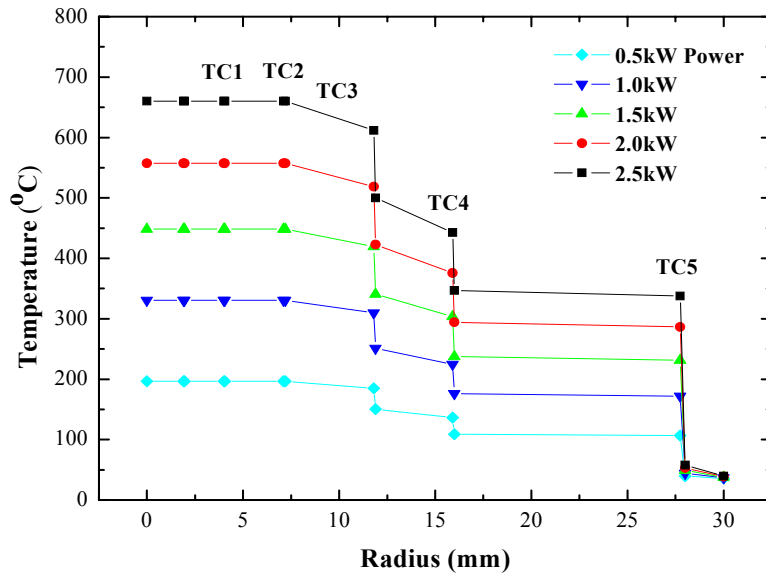


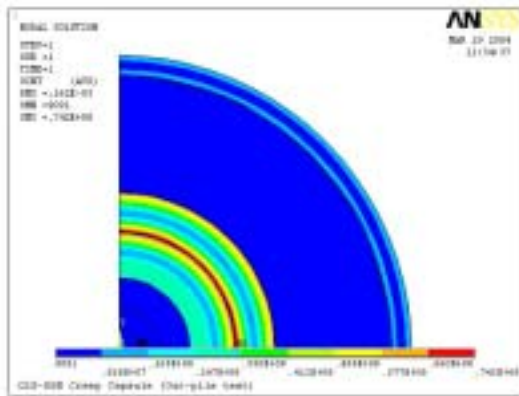
Fig. 7 Temperatures of the creep capsule with the heater power

Fig. 7은 해석을 통한 히터 출력 0.5~2.5kW에서의 온도계산 결과를 보이고 있다. 히터 출력이 커지면서 온도는 증가하게 되는데, 출력이 낮은 경우(0.5~1.0kW)에는 시편부의 온도차가 134°C 이지만 출력이 큰 경우(2.0~2.5kW)에는 온도차가 103°C로 약간 줄어드는 결과를 보였다. 이것은 캡슐 외통을 둘러싼 냉각수의 온도가 35°C로 동일한 조건에서 히터 출력 증가에 따라 캡슐 내부의 온도가 상승하면 갭 부분에서의 온도감소는 증가하게 된다. 그러나 상대적으로 히터 출력이 커질수록 갭 부분에서의 온도의 감소비율은 줄어들기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 특히 본 그림으로부터 캡슐 외통과 열매체 사이의 갭에서 온도변화가 두드러지게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

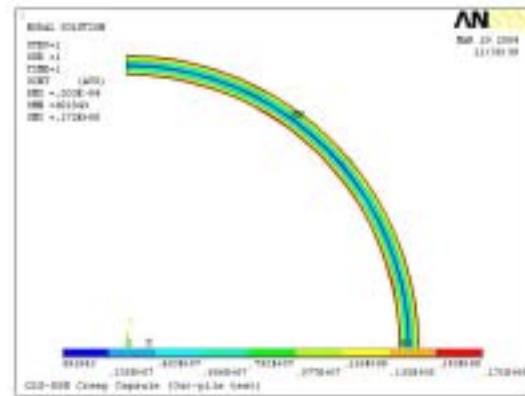
Table 4는 히터출력에 따른 캡슐 전체 및 외통부에 대한 응력강도(stress intensity)를 나타내었고, Fig. 8은 히터출력이 1.5kW인 경우의 응력분포를 나타내었다. 히터에 의한 캡슐 내부에서의 최대응력은 히터출력 1.0과 1.5kW인 경우 각각 52과 74.2MPa이고, 캡슐 외통에서의 응력은 각각 11.5과 17.2MPa를 보였다. 또한 최대응력은 원환 형태를 갖는 커넥터의 내면에서 발생하였다. 일반적으로 열응력은 재료의 특성치 (E, α, ν)와 온도구배의 함수로 표현되는데, 이 경우 온도구배가 가장 큰 부분이 커넥터이기 때문에 최대응력이 발생한 것이다. 또한 최대온도는 시편부에서 발생하지만 온도가 거의 일정한 분포를 보이기 때문에 응력이 매우 작게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 캡슐의 열에 의한 건전성 측면에서는 최대응력이 발생하는 커넥터의 재료가 스테인레스 강(STS304)이고, 이 재료의 허용응력이 107.5MPa(125°C)임을 고려한다면 현 상태에서의 구조적 건전성은 충분히 확보하고 있는 것으로 평가된다.

Table 4. Stress intensity with the heater power (water temp. 35°C)

Item \ Heater Power	1.0kW		1.5kW	
	Max.(connector)	External Tube	Max.(connector)	External Tube
Stress (MPa)	52	11.5	74.2	17.2
Temperature (°C) (Inner/Outer surface)	330.6 (250.9/224.5)	44.2/36.8	448.6 (340.8/303.7)	48.7/37.6



(a) Stress distribution



(b) External tube stress

Fig. 8 Stress intensity of the creep capsule for the heater power, 1.5kW

6. 결 론

- (1) 히터 출력 1.0과 1.5kW인 경우, 시편부 온도(TC1)는 각각 362와 445°C로 측정되었고, 해석결과는 각각 330.6과 448.6°C로서 두 결과는 서로 잘 일치하였다.
- (2) 캡슐 외통 주변의 냉각수의 온도 증가에 따라 내부의 온도변화는 선형적인 증가를 보였으며, 외통과 열매체 사이의 갭이 커짐에 따라 전체적인 온도는 상승하여 0.1mm 갭의 증가는 약 35~45°C의 온도 증가를 보였다.
- (3) 히터 출력이 커지면서 온도는 증가하게 되는데, 출력이 낮은 경우(0.5~1.0kW)에는 시편부의 온도차가 134°C 이지만 출력이 큰 경우(2.0~2.5kW)에는 온도차가 103°C로 약간 줄어드는 결과를 보였다.
- (4) 히터 출력 1.5kW시 최대응력은 커넥터의 내면에서 74.2MPa 발생하였고, 이는 재료의 허용응력 이내의 값으로서 캡슐이 열에 의한 구조적 건전성을 확보하고 있음을 확인하였다.
- (5) 해석과 시험을 통한 온도결과는 서로 잘 일치하여 유한요소해석 모델이 신뢰성 있게 생성되었고, 본 해석모델은 향후 노내 조사시험 결과와의 비교/분석을 위한 온도 및 열응력 계산에 적용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력증장기사업 중 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Y.H. Kang et al., 2003, "Capsule Development and Utilization for Material Irradiation Tests", KAERI/RR-2360/03, KAERI.
2. 최용 외, 1999, "지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 개념설계", 한국원자력학회 1999년 추계학술발표회 논문집.
3. 조만순 외 5인, 2001, "조사 크립캡슐의 예비설계", 한국원자력학회 2001년 추계학술발표회 논문집.
4. 조만순 외 12인, 2003, "조사시험용 크립캡슐(01S-01K) 설계/제작 및 설계특성시험", KAERI/TR-02402/2003, KAERI.
5. 조만순, 강영환, 박승재, 손재민, 주기남, 김영진, 2003, "크립캡슐 02S-08K 설계 제작", 한국원자력학회 2003 추계학술발표회 논문집.
6. H. Someya, T. Kobayashi, M. Niimi, T. Hoshiya, Y. Harayama, 1987, "GENGTC-JB: A Computer Program to Calculate Temperature Distribution for Cylinder Geometry Capsule", JAERI-M-87-146.
7. ANSYS IP Inc., 2002, "ANSYS User's manual", Ver. 7.0, ANSYS IP Inc..
8. 조만순 외 5인, 2003, "크립캡슐(01S-01K)의 온도분포 계산과 구조적 건전성 해석", 한국원자력학회 2003년 춘계학술발표회 논문집.
9. 최명환 외 5인, 2004, "열해석을 위한 크립캡슐의 유한요소모델 개발", HANARO Workshop 2004, 한국원자력연구소.
10. 최명환 외 8인, 2004, "원추형 하단부 구조를 갖는 캡슐의 노외시험", KAERI/TR-2655/ 2004, KAERI.
11. Y.S. Lee, M.H. Choi and Y.H. Kang, 2001, "Thermal and Mechanical Characteristics of an Instrumented Capsule for a Material Irradiation Tests", Nuclear Engineering and Design, Vol.205, pp.205-212.