

'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다공 원통구조 개념을 도입한 캡슐 설계개선 연구 (A Study on the Capsule Design Improvement Using the Concept of Cylindrical Structure with Multi-holes)

강영환, 최창웅
한국원자력연구소

이영신, 최명환
충남대학교

요 약

다목적연구로 하나로(HANARO)를 이용한 재료 조사시험에 이용될 캡슐(Irradiation Capsule)의 설계 개선 노력을 시도하였다. 종래의 단순한 시편배치로부터 다공 원통구조개념을 도입하여 다량의 시편을 동일한 캡슐 내에 장입할 수 있는지에 대한 검토를 위하여 열적 및 역학적 특성분석을 수행하였다. 캡슐에 장입될 조사시편의 온도평가는 열 전달 전산 프로그램인 HEATING 7.2f를 이용 계산하였다. 또한 이들 온도분포로 인하여 발생하는 캡슐 외통에서의 열응력 해석을 통하여 캡슐의 구조적 건전성을 확인하였고, 개선된 시편배치가 사용자의 요구조건을 만족하는 구조물임을 보였다. 이를 토대로 하나로 시험공의 핵적 특성을 파악하기 위하여 캡슐을 설계·제작하여 하나로에서 조사시험을 수행하였으며, 현재 온도예측 평가를 위하여 조사후 시험중에 있다.

Abstract

A new attempt for the capsule design improvement was carried out for the irradiation tests of materials in HANARO. Thermal and mechanical properties of the capsule were studied to evaluate the possibility whether large number of specimens can be accommodated in one capsule using the concept of the cylindrical structure with multi-holes. The temperature of the specimen to be irradiated in HANARO was estimated with the heat transfer analysis program, HEATING7.2f. The structural integrity of the capsule was verified by the thermal stress analysis of the external tube of the capsule, in which an improved arrangement of the specimen satisfied the irradiation test conditions required by the users. A non-instrumented capsule designed with this improved concept had been fabricated and irradiated in HANARO, and has been examined to evaluate the temperature prediction of the specimen.

1. 서 론

원자력발전소에서 사용하는 핵심재료에 대한 요즈음 관심사는 크게 압력용기 등 재료의 수명연장 혹은 잔여 수명평가 시험, 고온 고압 하에서의 내부식 시험 등 신소재 개발에 관련한 기초연구, 차세대 원자로 개발과 관련한 핵 융합로, 액체 금속로 재료에 대한 연구개발등을 들 수 있다. 이러한 시험을 효율적으로 수행하기 위한 방안으로는 종래의 조사기술보다는 보다 깊이 있고 근원적인 기술과 보다 정밀한 시험조건을 구현할 수 있는 기술을 필요로 하고 있다. 이 외에도 이용자들의 관점에서 보면 가장 중요한 요구사항으로 많은 재료시편을 동일한 조사설비에 넣어 보다 경제적으로 수행하기를 요구하고 있다.

이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 종래의 단순한 시편배치[1~2]에서 다공 원통구조개념을 도입하여 한정된 캡슐내 체적에 여러 시편들을 장입할 수 있는 방안에 대한 연구도 이루어지고 있다. 그러나 중요한 사실은 캡슐이 원자로 노심에 장전되기 때문에 핵적, 열적, 규격적인 제한을 역시 받게 된다. 이로서 조사용 시료는 γ 발열에 의해 자기 발열을 하기 때문에, 시료의 온도는 노심내의 위치에 따른 γ 선 강도에 따라 달라진다. γ 선 강도는 대개 노심의 출력분포에 의존하기 때문에, 그 강도는 일정하지 않게 분포한다. 그러므로 캡슐내에 장전될 시료의 온도는 노심의 출력분포에 따라 축방향의 중앙은 높고, 상·하단은 낮게 분포된다[3~4].

본 연구에서는 하나로(Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor : HANARO) 노내에 설치되어 재료 조사시험에 사용될 캡슐에 다공 원통구조 개념을 도입하였을 때 하나로와 양립할 수 있는지를 검토하기 위하여 수행된 온도계산과 응력해석에 대한 내용을 담고 있다. 캡슐 본체에서의 온도는 전산코드 HEATING 7.2f[5]를 이용하여 계산하였고, 각 시편 영역에 대한 축방향 및 반경방향 온도에 대하여 고찰하였다. 캡슐본체 외통에서의 온도 구배로 인한 열응력을 계산하여 재료의 허용응력과 비교함으로써 구조적 건전성을 확인하였다.

2. 설계개념

재료시험용 캡슐 본체의 구조는 크게 시편홀더(holder), 시험편, 조사량 평가용 도시메타(dosimeter), 열전대 혹은 온도 모니터(monitor), 외통으로 구성되어 있다. 본체외통은 길이가 837 mm, 두께가 2 mm, 외반경이 60 mm인 원통셀이다. 캡슐의 본체는 이용자의 요구사항을 서로 다르게 제어할 수 있도록 5 단으로 분할되어 있고 각 단의 길이는 120 mm 이다. 각단에는 이용자의 요구조건에 맞게 조사시편을 설계하여 조사시험에 이용하여 왔다[1~4]. 종전의 시편구조 개념은 그림 1과 같이 단순한 구조를 갖도록 사용해 왔으나, 이러한 설계 개념으로는 한정된 시편만을 수용할 수 있게 된다. 그러므로 이용자들이 요구하는 원형 및 사각구조의 시편을 수용할 수 있는 설계개념이 가장 바람직한 설계 방향이라고 볼 수 있으나, 이번에 고려한 개념은 사각 구조를 갖는 시편을 이용한 설계 방향에 대한 가능성을 보는 것이 주요 목적이다.

일반적으로 원자력 선진국에서 1회 조사시험에 사용하는 시편의 개수는 사용하는 조사설비 특성에 좌우되므로 정확히 계산하기는 어렵다. 그러나 일본의 경우 재료 시험로에서 사용하는 캡슐 하나에 넣어 시험하는 개수는 1988에서부터 1989년까지 수행된 35개 정

도의 조사시험에서, 총 캡슐 내에 집어넣은 시편의 수는 시편의 규격에 따라 다르지만 표준시편이라고 가정하여, 인장, 충격, 파괴 시편 등 평균하여 40 여개의 시편을 넣어 조사 시험을 수행한 것으로 계산된다[6]. 이러한 통계자료에 근거하여 하나로에서 사용하는 우리 캡슐의 기하학적 형상, 이용자들이 요구하는 시편 규격 및 하나로의 핵적, 열수력 특성을 감안한 설계 가능성을 해석적으로 검토하였다.

설계 개선된 캡슐에 넣는 시편은 원자력발전소 압력용기재료인 SA508 class3 이고, 다음의 표 1과 같으며, 이용자가 요구하는 시편의 기하학적 형상을 고려한 이용자 요구조건을 만족시키기 위하여 다음의 매개변수를 고려한 설계를 수행하였다: 중앙홀 유무/크기에 따른 온도분포, 중앙 홀에서의 시편까지의 거리/시편크기가 온도에 미치는 영향을 검토한 최적 설계방안을 해석적으로 검토하였다.

표 1. 시험편

	시 편 종 류	수 량	규 격	비 고
1	PCvN (U-notch)	16	10x10x55mm	
2	Charpy (V-notch)	16	10x10x55mm	
3	Small Tensile	56	27,5x5,0x0,5mm	
4	1/2T-CT	6	31,75x30,48x12,7mm	
5	Small Punch	72	10x10x0,5mm	
6	Small Punch-ABI	12	27,5x10x2,0mm	
7	MBE	80	10x2,5x1,0mm	
전체 시편 수량		258		

조사시험에 이용되는 캡슐은 이미 몇 번의 경험을 토대로한 설계로 5 단으로 나누었으며 하나로의 설계조건에 양립하고, 원하는 시편의 종류, 수량 및 크기를 수용할 수 있도록 설계하고자 하였다. 일차로 감마속이 낮은 영역은 비교적 큰 시편을 배치하고 감마열이 높은 영역은 가능한 중심에 빈 구멍을 도입한 다공 구조를 고려한 설계를 하였다. 중심공 크기, 시편과 중심공 간의 거리 등을 고려한 해석으로 생산된 설계개선된 모델의 각 다섯 영역에서 캡슐 상부의 일단에는 1/2t-CT 시험편을 넣도록 하였고, 2 단에는 Charpy 시험편을 배치하였다. 나머지 감마열이 높은 3 단에서 5 단까지에는 중심에 빈 구멍을 설계하여 원하는 온도가 되도록 시편을 배치하였다.

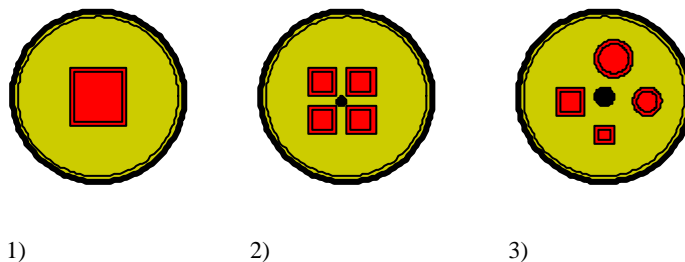


그림 1. 설계 개선된 캡슐내 시편배치

3. 해석모델 및 방법

캡슐내부 시편배치의 설계개선을 통하여 그림 1의 2)에서와 같은 형상이 결정되었다. 이들 배치에서 캡슐 내부에 발생하는 온도분포를 계산하기 위하여 유한차분법(FDM)을 이용한 열전달 전산 프로그램인 HEATING 7.2f를 사용하였다. 본 해석에서는 캡슐의 반경방향과 축방향으로 온도분포를 고찰하기 위하여 2차원의 모델을 생성하였다. 그러나 그림 1에서 보는 바와같이 4각 형상의 시편으로 인하여 단면형상이 축대칭이 되지 않는 경우에는 본 프로그램의 적용이 쉽지 않고, 온도분포 또한 축대칭이 되지 않을 것이다. 이러한 경우에는 그림 2에서와 같이 시편영역을 근사화함으로써 온도를 계산할 수 있다[3]. 일본 원자력연구소에서는 캡슐 설계시 온도계산을 위하여 1차원 프로그램인 GENGTC[7]를 이용해 왔으며, 이를 위하여 시편 영역 근사화의 개념을 사용하였다. 이때의 가정은 원주를 동등하게 하여 가능한 외면에서의 열유속을 동등하게 하고, 단면적은 가능한 한 동일하게 하여 내부 발열량을 동일하게 해준다. 이상의 가정에 근거하여 4각 단면의 시편부를 다음과 같은 식을 적용하여 R_o , R_i 인 중심축 대칭이 되는 구조로 근사화할 수 있으며, 이를 통하여 계산된 크기를 적용하여 온도를 평가할 수 있다.

$$R_o = \frac{4a}{\pi} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{2}{\pi} \{4a^2 - \pi t(2a - t)\}^{1/2} \quad (2)$$

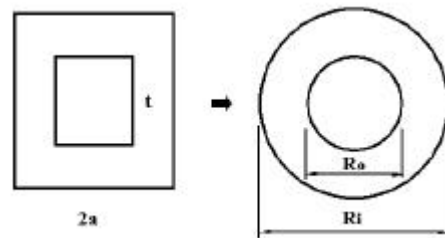


그림 2. 해석을 위한 4각 시편영역의 근사화

그림 3은 HEATING 7.2f 해석을 위하여 생성한 축단면의 1/2 모델을 나타낸다. 모델에서 캡슐은 크게 다섯 영역의 시편 구간(Region I ~ Region V), 열매체, 외통 그리고 단열부분등으로 모델되었다. 표 2에는 캡슐본체 내부의 각 영역에 대한 설명과 사용재료에 대하여 나타내었다.

해석에 적용된 경계조건으로는 일차 냉각수가 접하는 캡슐외통에서의 냉각수 온도는 40℃이고, 캡슐외통 표면에서의 열전달계수는 $3.03 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 이다. 또한 He 캡에서는 대류나 복사는 무시할 정도이므로 고려하지 않고 전도만을 고려하였다. 열계산을 위하여 적용한 하중조건으로는 캡슐의 축방향 각 위치에서의 γ 선 강도에 따른 재료의 열발생 밀도를 적용하였다.

표 2. 모델 영역설명 및 재료

영역번호	명 칭	재 료
2	End Plug	SUS 304
10,14,17,21,24,28,31,35,40	Holder	Aluminum
6,16,23,30,37,43	Insulator	Al ₂ O ₃
9,45	Reflector	SUS 304
12,19,26,33,38	Test Specimen	SUS 304
4,8,11,13,15,18,20,22,25,27,29, 32,34,36,39,41,44,46,47,49,51,53	Helium Gap	Helium
55	External Tube	SUS 304
1	Rod Tip	SUS 304

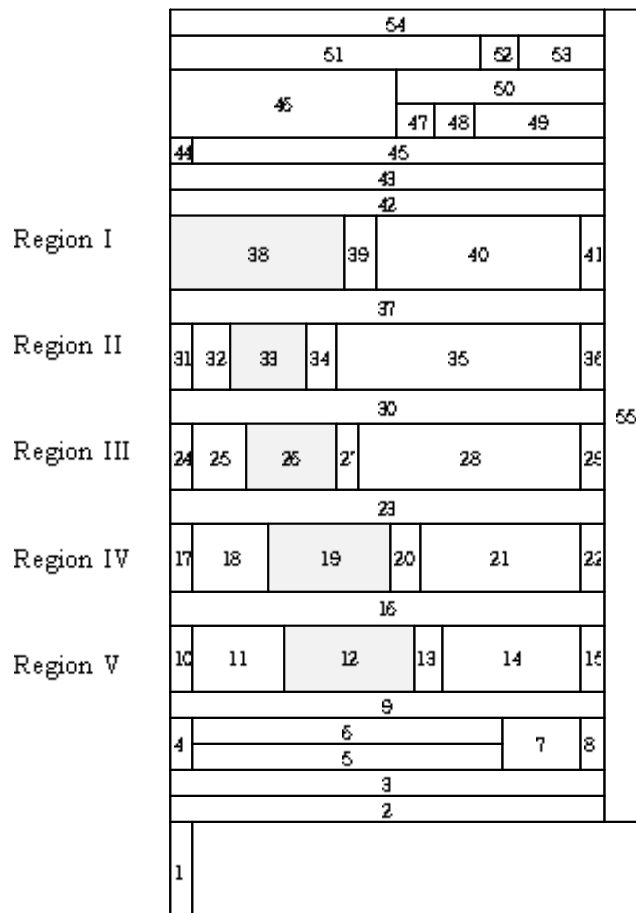


그림 3. 온도계산모델

4. 해석결과 및 고찰

4.1 온도분포

캡슐내부 다섯 개의 시편영역에 대한 온도계산 결과인 각 단의 종양에서의 반경방향 온도분포를 그림 4에 나타내었다. 여기서 Region I은 캡슐의 상부이고, Region V는 제일 하단부의 시편영역이다.

모든 단에서의 반경방향 온도분포는 시편과 열매체, 열매체와 캡슐외통에 설계된 헬륨(Helium) 갭 부분에서의 온도강하를 뚜렷이 확인할 수 있다. 시편부에서의 온도가 비교적 낮은 1단과 2단에서는 시편과 열매체 사이에서 약 65 °C, 3~5단에서는 약 90 °C의 온도 감소가 나타났다. 또한 캡슐외통과 열매체 사이의 갭으로 인하여 평균 45 °C의 온도감소를 보였다. 이것은 강제대류 영역인 캡슐외통에서의 냉각수 온도가 약 40 °C이고, 갭의 헬륨가스는 온도에 따른 열전도도가 낮아 거의 단열역할을 하기 때문이다.

실제 개선된 시편배치의 캡슐에 대한 각 단에서의 온도분포로서 종양에 홀이 없이 꼭 차게 설계된 1단에서는 종양에서 최대온도 237 °C이고, 외부로 갈수록 온도가 감소하여 반경방향 시편 외부에서 최소온도인 173 °C를 나타내었다. 1단과 비슷하게 설계된 2단에서는 1단보다 약간 낮은 시편부 온도를 보였다. 3~5단은 시편부의 높은 온도를 감소시키기 위해서 종양부에 헬륨가스의 구멍을 설계한 경우로서 시편부에서의 최대온도는 280~300 °C의 범위에 존재하였고, 시편부의 최소온도는 235~241 °C 정도의 값을 보였다.

캡슐내부에서 시편을 지지하기 위하여 설계된 캡슐 열매체에서는 반경방향의 온도 강하는 매우 작아 약 10 °C의 온도구배를 보였다. 이것은 열매체의 재료가 순수 알루미늄으로서 열전도도가 좋기 때문이다.

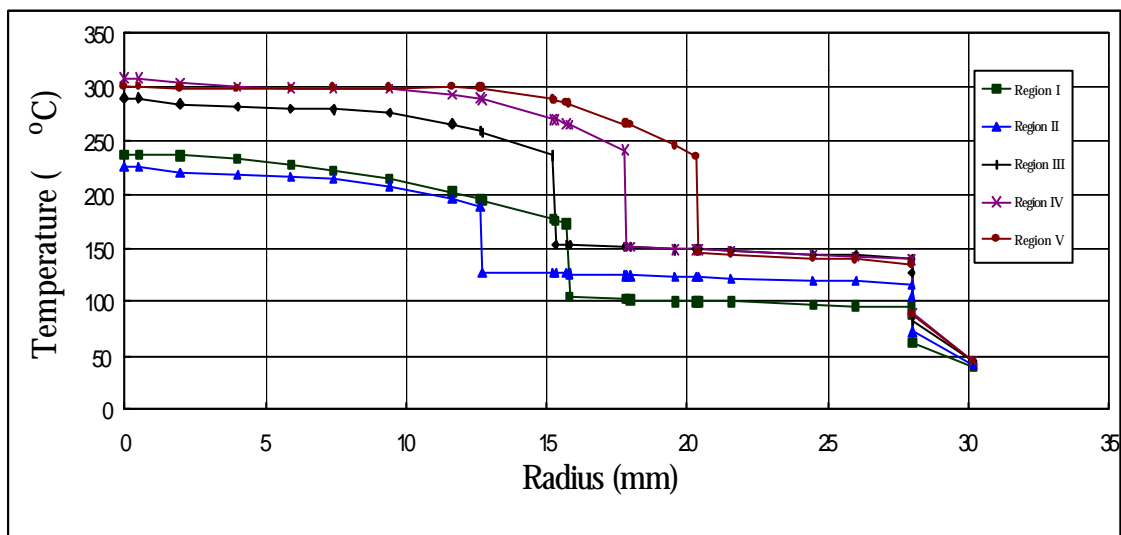


그림 4. 다섯 시편영역의 반경방향 온도분포

그림 5는 캡슐 내부 영역에서의 축방향 및 반경방향의 온도분포를 나타낸 것으로서, 4단에서 최고 높은 온도를 보이며, 캡슐 상부의 1, 2단에서는 비교적 낮은 온도를 나타낸다. 반경방향으로는 이미 언급된 것처럼 시편영역과 열매체 사이의 헤룸 갭에 의해서 급격한 온도 감소를 확인할 수 있고, 축방향 온도분포는 영역 사이의 단열재(Al_2O_3)로 인하여 각 단은 서로 독립적인 온도분포를 보이고 있다. 또한 캡슐 외통에서의 냉각유체 온도가 낮기 때문에 캡슐 내부의 온도분포는 축방향으로의 구배 보다는 반경방향으로의 온도 구배가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다.

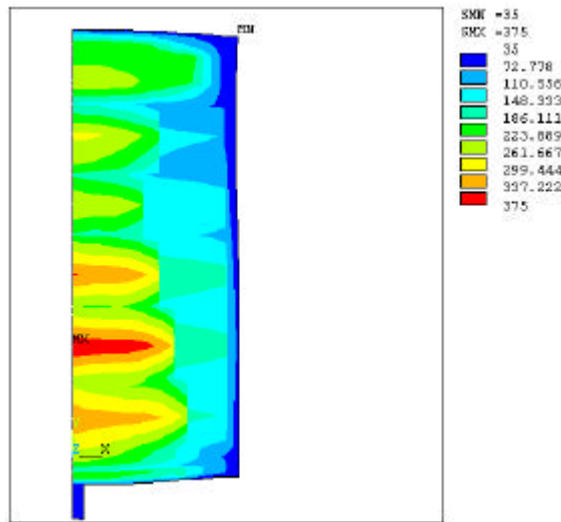


그림 5. 캡슐 내부의 온도분포

4.2 열응력 해석

캡슐에 발생하는 응력에는 내외부의 압력에 의해 발생하는 일차막응력(P_m)과 이차응력으로 분류되는 열응력(P_e)이 있다. 내압으로 인한 응력이나 캡슐외통의 표면에 흐르는 냉각유체의 압력으로 인한 좌굴응력은 참고문헌[2,8]에서 계산된바 있고, 캡슐외통에 작용하는 일차막응력은 4.38 MPa로 계산되었으며, 새로운 캡슐에 대해서도 동일한 결과를 보인다. 설계 개선된 시편배치에 대한 열해석 결과는 기존 캡슐에 대한 온도분포와는 다르고, 이로 인한 열응력 또한 달라질 것으로 예상되기 때문에 캡슐 외통에서의 열응력을 계산하였다.

개선된 시편배치에서 캡슐 외통에서의 열응력은 내부와 외부벽에서의 온도차로 인하여 발생하며, 열해석 결과 캡슐 외통부에서 최대 온도구배를 갖는 영역은 4단 이었다. 이때 두께 방향 온도는 내부벽에서 105.5 °C이고, 외부벽에서 49.7 °C로 계산되었기 때문에, 이들의 온도차는 $\Delta T = 55.8$ °C이다. 이들 온도차로 인한 열응력은 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다[9].

$$\sigma_{\theta, max} = \frac{1}{2} \Delta T \alpha \frac{E}{(1-\nu)} \quad (3)$$

여기서 $\sigma_{c,max}$ 는 캡슐 원주방향의 최대 열응력이며, ΔT 는 $|T_i - T_d|$ 로 캡슐외통의 내벽과 외벽온도의 차이, α 는 열팽창 계수로서 스테인레스 강 재료에 대하여 17.07×10^{-6} ($1/^\circ C$)를 사용하였다. 또한 E는 재료의 탄성계수이고, ν 는 프와송비로서 193 GPa과 0.27을 사용하였다. 이들 데이터를 식(3)에 대입하여 캡슐 외통에서의 응력을 계산하면 125.9 MPa의 응력이 작용함을 알 수 있다. 따라서 캡슐외통에서의 일차막응력(4.36 MPa)과 열응력(125.9 MPa)의 조합된 응력($P_m + P_e$)은 130.26 MPa로 평가할 수 있다. 이들 응력값은 일차 막응력에 대한 허용 응력강도인 137.2 MPa과 조합응력 상태에서의 설계응력의 3배인 허용 응력강도($3S_m$) 411.9 MPa 보다 충분히 낮은 범위에 있다.

5. 설계 개선된 캡슐제작 및 시험

다공 원통구조 개념을 도입한 설계 개선된 캡슐(98M-01K)은 그림 6에서 보는 바와 같이, 258개의 시험편이 설계되었고, 이들 시험편은 캡슐내 다섯영역의 열매체에 장입되었다 [10]. 또한 조사 시험중 발생하는 열은 연구로 1 차 냉각수에 의해 제거되도록 설계·제작되었다. 캡슐 크기는 길이가 1029cm이고 외경이 60 mm(두께 2.0 mm)인 원통형 구조로서 스테인레스 강(SS 316)을 사용하여 제작한 무계장 캡슐이다. 캡슐본체 내에는 조사시험편 외에 조사공에서의 중성자속 분포 측정을 위하여 F/M(flucence monitor) sets(Ti, Fe, Ni, Nb, Lu, Mo, Cu, Co, Ag, In, Ta)를 설치하였고, 조사시험편의 온도평가를 위하여 국내에서 개발된 T/M(thermal monitor)(Sn-Sb 1%, Pb-In 25%, Pb/In/Sb, Pb/In, Pb/In/Ag, Pb/Sb)를 설치하였다. 캡슐은 하나로 센터 품질 기준 "T" class, 내진등급 II 에 해당하는 규격에 따라 대우 정밀(주)에서 제작되었다.

본 캡슐을 이용한 조사시험은 하나로 노심내 CT조사공에 설치되어 20 MW에서 10시간 동안 수행되었고, 현재 조사후 시험중에 있다.



그림 6. 조립전 중성자 측정용 무계장 캡슐(98M-01K)

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 단순화된 시편 배치에서 다공원통 구조의 개념을 도입한 캡슐 설계 개선에 대한 내용을 기술하였으며, 이들 개선된 모델에 대한 열해석 및 열응력 해석을 수행하였다.

1) 사각 단면의 시편배치를 원형 단면을 갖는 모델로 근사화하여 계산하는 방법을 적용하였고, 이를 통하여 캡슐본체 시편부에서의 최고온도는 1, 2단에서 240~260 °C, 3~5단은 280~300 °C 범위에 있어 사용자의 요구조건을 만족시키기 위한 온도제어의 가능성을 확인하였다. 개선된 캡슐본체의 내외부 온도구배로 인한 열응력은 125.9 MPa로 계산되었고, 압력차로 인한 막응력과 조합응력은 130.26 MPa로서 조합응력에 대한 허용응력강도를 충분히 만족하였다.

2) 다공원통구조 개념을 도입한 설계개선으로 이용자들이 요구하는 조건을 만족하는 캡슐을 성공리에 설계, 제작할 수 있음을 확인하였고, 현재 이를 활용한 조사시험이 하나로에서 수행되었고, 설계검증을 위한 조사후 시험중에 있다.

Acknowledgement

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 주기남 외 다수, "하나로 재료조사시험용 계장캡슐 (97M-01K) 설계·제작 보고서", 한국원자력연구소, KAERI/TR-1226/99, 1999.
2. 강영환 외 5인, "재료 조사시험용 계장캡슐의 열적 및 역학적 특성", 한국원자력학회 '95 추계학술발표회 논문집(Ⅱ), pp.617~622, 1995.
3. 강영환 외 다수, "KMRR을 이용한 노내검증실험 평가기술 개발", 한국원자력연구소, KAERI/RR-1398/93, 1994.
4. 강영환 외 다수, "계장캡슐활용기술개발", 한국원자력연구소, KAERI/RR-1760/96, 1997.
5. K.W. Childs, "HEATING 7.2f User's Manual", ORNL, 1993.
6. JAERI, "JMTR Irradiation Handbook", 1994.
7. H. Someya, et al, "GENGTC-JB: A computer program", JAERI-M 87-148, 1987.
8. Y.H. Kang, Y.S. Lee and M.H. Choi, "Thermal and Mechanical Characteristics of Instrumented Capsule for Material Irradiation Test", Proceeding of the 5th Asian Symposium On Research Reactors, Vol. 1, pp.328~332, 1996.
9. ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", Section III, Div. 1, Subsection NB, 1989.
10. 김봉구 외 다수, "중성자속 측정용 무계장계장 캡슐 제작", KAERI/TR-1249/99, 1999.