

‘2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다양한 원자력재료의 조사시험용
계장캡슐의 설계 및 제작

Design of An Instrumented Capsule for Irradiation Test
of Various Nuclear Materials

김도식*, 강영환, 주기남, 손재민, 박승재

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이영신, 고재화
충남대학교

요 약

하나로 공동이용 활성화 사업의 일환으로 연구소의 이용자(대학교)들의 다양한 조사시험 요구조건(조사량, 온도)들을 만족하는 하나로 조사시험용 계장캡슐(00M-01U)을 설계·제작하였다. 캡슐의 기본설계는 하나로 조사시험을 성공리에 수행한 다공구조의 99M-01K 캡슐을 기본으로 하였다. 00M-01U 캡슐은 재료특성치가 상당한 차이를 나타내는 2종류(Fe 계열과 Zr 계열)의 원자력 재료들이 여러 가지 조사조건 하에서 시험되어야 하므로, 캡슐 부품들에 대한 상세 설계시 각 재료의 특성을 고려하여 시편을 배치하고 핵적 특성을 계산하였다. 캡슐은 각 단에 독립제어 전기히터가 장착된 5단의 다공구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe/Sapphire 중성자 모니터를 설치하였다. 조사시편은 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료로 제작된 small tensile, Charpy, 1/3 Charpy, small punch, TEM, EPMA 그리고 microhardness 시편 등이며, 이용자 요구 조사조건에 따라 캡슐에 장입되었다. 캡슐은 하나로 IR2 조사시험공에서 각 단별로 조사온도가 300과 $350 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조건 그리고 중성자 조사량은 최대 $1.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)까지 조사될 예정이다.

Abstract

As part of the project for active utilization of HANARO, an instrumented capsule (00M-01U) was designed and fabricated for the irradiation test of various nuclear materials under irradiation conditions requested by external researchers from universities. The basic structure of this capsule was based on that of the 99M-01K capsule successfully irradiated in HANARO. However, because two types of

materials(Fe and Zr base alloy) having quite different material properties were inserted in this capsule, the differences of material properties was considered in the calculation of nuclear characteristics. The capsule is composed of 5 stages having many kinds of specimens and independent electric heaters in each stage. During the irradiation test, the temperature of the specimens and the thermal/fast neutron fluences were measured by 14 thermocouples and 5 sets of Ni-Ti-Fe neutron fluence monitors installed in the capsule. Various types of specimens such as small tensile, Charpy, 1/3 Charpy, small punch, TEM, EPMA and microhardness specimens were inserted in the capsule. The specimens will be irradiated in the IR2 test hole of HANARO at 300 and $350 \pm 10^\circ\text{C}$ up to a fast neutron fluence of $1.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$).

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐을 국내 기술력으로 개발하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다[1-5]. 연구로를 활용한 캡슐조사시험은 다양한 운전조건을 구현하고 조사시험 변수를 조절할 수 있으므로, 여러 가지 원자력 재료의 실제 사용조건을 그대로 모사할 수 있다. 또한 중성자속이 높아 조사시험 기간을 크게 단축하여 단기간에 원자력 관련 재료 및 구조물의 조사성능 예측 및 평가를 가능하게 하는 유용한 설비이다.

현재까지 개발되고 조사시험이 완료된 캡슐은 주로 한국중공업(주)에서 제작되어 한국 표준형 가압경수형 원자로인 영광3호기 이후 국내의 전 경수형 원자로에 사용되고 있는 원자로 압력용기(reactor pressure vessel, RPV) 재료의 조사손상 건전성을 입증하기 위한 것이었다. 그러나 이외의 여러 가지 원자력 재료들에 대한 조사특성을 평가하고자 하는 이용자들의 조사시험 요구가 급증하고 있으며, 이에 따라 국산 RPV재의 조사특성 평가의외에 의해 현재 개발되어 있는 조사시험용 표준형 계장캡슐을 활용하여 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등의 조사손상 건전성을 입증하고자 하나로 조사시험용 계장캡슐(00M-01U)을 설계·제작하였다.

캡슐의 주요설계는 하나로 조사시험을 성공리에 수행한 다공구조의 99M-01K 캡슐[6]을 기본으로 하였다. 기존의 계장캡슐들은 한가지 재료의 조사성능 평가를 위하여 제작 시험되었지만, 본 00M-01U 캡슐은 재료특성치가 상당한 차이를 나타내는 2종류(Fe 계열과 Zr 계열)의 원자력 재료들이 여러 가지 조사조건 하에서 시험되어야 하므로, 캡슐 부품들에 대한 상세 설계시 각 재료의 특성을 고려하여 설계하였다. 캡슐은 이용자들의 다양한 조사시험 요구조건들을 만족시키기 위하여 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 장착되어 조사시험 동안 시편의 온도 및 조사량을 측정할 수 있다.

캡슐 내에 장입된 조사시편은 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등으로 제작된 small tensile, Charpy, 1/3 Charpy, small punch, TEM, EPMA 그리고 microhardness 시편 등이다. 캡슐은 이용자들의 조사 요구조건에 따라 하나로 IR2 조사시험공에서 조사온도 300 및 $350 \pm 10^\circ\text{C}$ 그리고 조사량은 최대 $1.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)까지 시험이 수행된다.

본 캡슐의 조사시험을 통하여 얻어질 결과들은 위에서 언급한 여러 재료들의 조사 건

전성 평가를 위한 기초자료로 활용되어, 압력용기, 핵연료 피복관 및 핵연료 저장·수송용기의 안전성 그리고 국내 자체 개발을 위한 기술력 확보 차원에서 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통하여 얻어진 경험과 축적된 기술을 기초로 향후 여러 가지 원자력 재료들에 대한 다양한 조사조건을 만족시킬 수 있는 계장캡슐의 개발이 활발히 추진될 것이다.

2. 00M-01U 캡슐의 설계 및 제작

원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등의 조사특성 평가를 위한 00M-01U(M은 Material, U는 University의 약자) 계장캡슐은 표 1에 정리한 연구소의 이용자들의 조사시험 요구조건들을 만족하도록 설계·제작되었다. 또한 캡슐의 기본구조는 다공구조의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐에 근거하여 그림 1과 같이 설계되었다.

계장캡슐은 먼저 캡슐 이용자와의 협의를 통하여 캡슐의 주요구조, 장입시편 치수 및 임시배치 위치, 조사조건 등을 결정하는 기본설계를 수행하고, 이를 토대로 조사시험이 수행될 하나로 시험공에서의 감마발열률(gamma heating rate) 분포를 계산한 후, 계산된 값을 사용하여 열매체와 캡슐외통간의 간격(gap) 설계, 시편의 최종배치 및 열전대(T/C)와 중성자모니터(F/M)의 배치위치 결정 등의 절차로 설계된다.

2.1 캡슐 기본설계

캡슐은 크게 본체부, 보호관부, 안내관부로 나뉘어지며, 캡슐 본체는 $\varnothing 60\text{mm}$ 의 STS 316 재질의 튜브 내부에 5단의 Al 열매체로 구성되고, 각 열매체 내에는 조사시편을 포함하여 계장품들(T/C, F/M)이 설치된다. 조사시편의 온도는 하나로 출력조건에서 캡슐 내 He 진공도를 제어하여 1차 조절되며, 각 단별로 독립적으로 작동하는 전기히터로 최종 조절되어진다.

00M-01U 캡슐은 한가지 재료의 조사특성 평가를 위하여 제작 시험되었던 기존의 계장캡슐과는 다르게 이용자 요구조건에 따라 2종류(Fe 계열, Zr 계열)의 원자력 재료들이 각기 다른 조사조건에서 시험된다. 따라서 시험 중 조사시편들이 이용자 요구조건에 맞게 조사되는지를 확인하기 위하여 현재의 표준형 계장캡슐 기본 설계에서 수용될 수 있는 최대 개수인 14개의 열전대를 설치하였으며, 중성자 조사량 측정을 위한 5개의 중성자 모니터를 각 단에 배치하였다.

2.2 시편 배치

00M-01U 캡슐에는 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등으로 제작된 small tensile, Charpy, 1/3 Charpy, small punch, TEM, EPMA 그리고 microhardness 시편 등이 장입되었다. 표 2는 00M-01U 캡슐에 장입된 422개의 시편을 종류별로 정리한 것이며, 이들 중 Charpy를 제외한 시편들은 각각의 홀더 내에 집어넣은 상태로 열매체의 시편구멍 내에 장입된다.

한편 99M-01K 캡슐의 1단 및 2단에는 캡슐 중심부에 각각 최대 부피를 가지는 RCT(round compact tension)시편과 4개의 Charpy 시편을 사각 형태로 배치하였다. 그러나 00M-01U 캡슐의 경우 이와 같은 단순한 시편의 중심배치로는 이용자가 요구하는 조사온도를 맞출 수 없으므로, 99M-01K 캡슐의 3, 4, 5단에서 사용되어 온

도제어 효과가 입증된 시편배치 형태인 캡슐 중심부에 빈 공간을 두고 이를 중심으로 시편을 분산배치하는 다공형태로 본 캡슐의 모든 단을 동일하게 설계하였다. 또한 이와 같은 분산형 시편배치 방식을 적용함으로써 시편의 중심배치 형식에 비하여 시편의 캡슐 내 체적률을 크게 향상시킬 수 있었다. 그림 2는 기존 계장캡슐에 대한 중성자 조사량(neutron fluence)을 참조하여 이용자들의 조사시험 요구조건(표 1)을 만족하도록 작성한 시편배치도이다. 이 그림에서 이용자가 요구한 중성자 조사량이 상대적으로 낮은 Fe 계열의 시편들은 주로 1단(최상단), 2단 및 5단(최하단)에 장입되며, 이용자 요구 중성자 조사량이 상대적으로 높은 Zr 계열의 시편들은 주로 3단 및 4단에 배치하였다.

2.3 핵적 특성 계산

위의 시편배치도를 기준으로 MCNP 전산코드를 이용하여 조사시편 및 캡슐 부품들에 대한 감마발열률(gamma heating rate)과 중성자 조사량 분포를 계산하였다[7]. 핵설계에서의 분석대상 노심은 조사시험 예상시기인 2000년 11월초의 예상 노심으로 36봉 핵연료 다발이 20개, 18봉 핵연료 다발이 12개 장전되어 있는 완전 장전 노심이다. 핵연료는 모두 새 핵연료 그리고 제어봉은 450mm 삽입된 상태로 가정하였다. 조사시편이 받는 고속 중성자 조사량 및 시편에서의 감마발열률은 원자로가 24MW로 10일 동안 운전하는 경우를 대상으로 하고, 99M-01K에서 사용된 방식과는 동일한 prompt & delayed gamma 값을 구하는 방식으로 계산하였다. 또한 본 캡슐에는 기존의 계장캡슐들과 다르게 재료 물성치가 상이한 Fe 계열과 Zr 계열의 2종류 재료가 혼입되므로, 이의 영향도 고려하였다. 그림 3은 조사시편에서의 감마발열률을 나타낸 것이며, 감마발열률은 캡슐이 노심 중앙에서 오른쪽인 IR2에 장전되므로 열매체 내에 270°로 배치된 시편(그림 중 -4로 표기)에서 가장 높은 값을 보인다. 이 결과를 기초로 조사시편의 11월초로 예상되는 조사시험시 예측되는 원자로 제어봉의 위치변화와 핵연료의 연소도 효과를 고려하여, 그림 4와 같이 00M-01U 캡슐에 대한 최종 열설계용 감마발열률 곡선(gamma heating rate curve)을 결정하였다.

2.4 열설계

기존의 계장캡슐의 경우 캡슐내 시편의 최종 조사온도로 1가지의 시험 목표온도를 설정하였지만, 본 캡슐에서는 이용자들의 요구조건에 따라 300 및 350±10℃의 2가지 온도를 목표로 하고 있다. 조사시험중 시편의 조사온도는 원자로 출력으로 일정 온도까지 상승하면 캡슐 내 He 압력 및 전기히터 출력 등을 조절하여 순차적으로 최종 시험 목표온도에 도달하게 된다. 일반적으로 원자로 출력만으로 도달하게 되는 1차 목표 조사온도를 기준으로 캡슐 각 부품간의 간격(gap)을 조절하여 각 시편의 길이에 따른 온도편차를 줄이게 된다.

캡슐 부품간에 존재할 수 있는 간격들 중 시편과 열매체간의 간격은 열매체를 기계 가공함에 있어서의 어려움 때문에 모두 0.1mm로 고정하였다. 하나로 캡슐의 경우 열매체와 캡슐외통의 간격이 작으므로 1차 목표 조사온도에 도달한 후 전기히터에 의하여 조절할 수 있는 온도범위가 매우 작다. 한편 99M-01K 캡슐에서와 마찬가지로 비교적 고진공 상태인 0.4K_{He=1atm} 조건에서 열매체와 캡슐외통의 간격(gap) 설계를 수행하여 각 단 시편의 온도가 원하는 조사온도로 유지되도록 하였다. 따라서 00M-01U 캡슐

의 열설계에서는 $0.4K_{He=1atm}$ 진공조건에서 시편의 설계 목표온도를 최종 시험 목표온도와 동일하게 각 단계 따라 $290\sim 350^{\circ}C$ 범위로 설정하였다.

캡슐 내 시편의 조사온도를 결정하는데 있어서 가장 중요한 단계는 캡슐 내 부품간의 간격을 설계하는 것이다. 이는 앞에서 계산된 감마발열량을 사용하여 부품간의 간격을 조절해가면서 각 단계로 시편의 조사온도가 최종 시험 목표온도로 일정하게 유지되게 조정하는 과정이다. 캡슐 내 시편의 조사온도를 계산하기 위하여 GENGTC, Heating 2f 또는 ANSYS 등의 전산 프로그램들이 이용될 수 있지만, 00M-01U 캡슐에서는 기존의 계장캡슐 설계에 사용되어왔던 GENGTC와 ANSYS code를 이용하여 시편의 조사온도를 계산하였다. GENGTC code는 시편의 온도계산을 수행한 후 열매체와 외통간의 간격(gap)에 따른 시편온도와 감마발열량 선도를 작성하고, 이 선도로부터 시편의 설계 목표온도를 만족하도록 열매체와 외통간의 간격이 결정된다. 이상의 절차로부터 결정된 열매체와 외통간의 간격은 캡슐의 최상단(1단) 위로부터 캡슐 중심부로 갈수록 감소하다가 최하단(5단)으로 갈수록 다시 증가하는 경향을 가진다. 한편 열매체 단면상의 전체 온도분포를 2차원적으로 계산할 수 있는 ANSYS code에 의한 열해석에서는 2차원 온도 및 응력을 동시에 계산할 수 있는 PLANE13 요소를 사용하였으며, 경계조건으로는 감마발열량에 의한 시편, 열매체 및 캡슐 외통의 열발생밀도(heat generation density)와 냉각수의 온도가 사용된다. 그림 5는 00M-01U 캡슐의 2단에 대한 온도해석모델을 나타낸 것이며, 이 모델을 사용하여 계산된 대표적인 온도분포는 그림 6과 같다. 이 그림으로부터 최대온도는 열매체 내에 270° 로 배치된 열발생밀도(=감마발열량 \times 밀도)가 가장 높은 시편에서 나타났다. 또한 시편에서의 최대와 최소온도의 차이는 약 $6^{\circ}C$ 를 나타내고 있으며, 다른 단계 대해서도 이와 유사한 결과를 보인다. 따라서 열매체와 캡슐외통간의 간격은 시편의 최대온도를 기준으로 하여 설계 목표온도를 만족하도록 결정한다. 이상의 절차로부터 결정된 열매체와 캡슐외통 사이의 간격(gap)을 사용하여, 이용자들이 요구하는 조사온도를 만족시킬 수 있는 계장캡슐을 설계한다.

2.5 시편온도 및 중성자 조사량 측정

캡슐 내 시편부에는 14개의 열전대가 설치되어 있으며, 조사시험 동안 조사시편의 온도 변화가 캡슐온도제어장치에 연속적으로 지시 및 기록된다. 또한 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe 및 Sapphire Fluence Monitor(F/M) 5개가 각 단계의 Al 열매체 내에 설치되고, 조사시험후 해체되어 시편의 정확한 조사량 평가에 사용될 예정이다.

2.6 캡슐 제작

이상에서 언급한 바와 같은 캡슐의 상세설계 방침에 따라 캡슐은 하나로 설계 기준에 준하여 최종 설계되었으며, 그동안의 하나로 캡슐 제작 등을 통하여 캡슐 제작 경험을 충분히 확보하고 있는 대우정밀(주)에서 제작되었다.

3. 하나로 조사시험 계획

제작된 00M-01K 캡슐은 하나로 조사시험 전 노외에서 정해진 절차에 따라, 캡슐외관 및 치수검사, 본체 및 보호관부의 내압 및 He 누설시험, 전기히터와 열전대의 단락여부

및 성능평가, 캡슐온도제어장치와의 양립성 시험 등 여러 가지 건전성 평가가 우선적으로 수행될 것이다. 캡슐이 이들 노외 시험조건을 모두 만족하는 경우, 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에 장입되어 시편 조사온도 300 및 $350 \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 10일간 조사시험될 예정이다.

조사시험이 완료된 캡슐은 하나로 작업수조 내에서 일정기간 냉각을 위하여 임시 보관 후 캡슐절단장치로 절단된다. 절단된 캡슐은 캡슐운반용 Cask에 넣어져 IMEF 시설로 이송된 후 해체될 것이다. 캡슐 해체 후 조사시편 및 F/M은 IMEF 시설에서 분류 정리되고, 이들을 사용하여 재료의 조사특성 및 중성자 조사량 평가 등의 작업이 수행될 예정이다.

4. 결 론

원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 사용후 핵연료 저장·수송용기 재료 등의 중성자 조사특성 평가용 계장캡슐(00M-01U)은 다공구조의 표준형 계장캡슐을 기본으로 설계·제작하였다. 본 캡슐의 상세설계 시에는 다양한 조사시험 요구조건에 따른 시편배치, 재료의 물성치 차이를 고려한 핵적특성 평가, 원자로 제어봉의 위치변화와 핵연료의 연소도 효과를 감안한 감마발열량 계산, 시편의 실제 조사온도를 기준으로 한 열매체와 캡슐 외통간의 간격설계 등을 수행하였다.

00M-01U 캡슐은 하나로 IR2 조사시험공에 장입되어 조사온도 300 및 $350 \pm 10^\circ\text{C}$, 중성자 조사량은 최대 $1.0 \times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1.0\text{MeV}$)까지 조사될 예정이다. 조사시험후 시편의 조사특성 평가를 통하여 원자로 압력용기, 핵연료 피복관 및 핵연료 저장·수송용기 재료들의 조사 건전성 평가를 위한 기초자료가 제공되고, 이들 재료를 사용한 기기의 국내 자체 제작기술력 확보 차원에서 큰 도움을 줄 것이다. 또한 본 연구를 통하여 얻어진 계장캡슐 설계 및 제작 경험과 축적된 기술은 향후 이용자들이 요구하는 여러 가지 원자력 재료들에 대한 다양한 조사조건을 보다 더 정확하게 만족시킬 수 있도록 하는데 크게 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력연구기반확충사업 중 하나로 공동이용 활성화 사업 과제에 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. Y. H. Kang et als, 1999, "Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule through Vibration Test," Proceedings of The Sixth Asian Symposium on Research Reactor, Mito, Japan, pp. 227~232.
2. K. N. Choo, et als, 1999, "Irradiation of Reactor Materials using an Instrumented Capsule in HANARO," Proceedings of The Sixth Asian Symposium on Research Reactor, Mito, Japan, pp. 279~284.
3. 강영환 외, 1999, "ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석," '99 원자력학회 추계학술대회 논문집.
4. 강영환 외, 1999, "조사시험용 캡슐개발 및 활용," KAERI Report, KAERI/RR-

2038/99.

5. 강영환 외, 2000, “하나로 캡슐의 설계개선,” ‘00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.
6. 주기남 외, 2000, “한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 재료의 하나로 조사시험용 계장캡슐 설계·제작,” ‘00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.
7. 서철교, 2000, “계장캡슐 00M-01U의 핵적특성,” 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-00-066.
8. 주기남 외, 1999, “원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐(98M-02K) 설계·제작 보고서,” KAERI/TR-1392/99.

표 1 이용자 요구 조사조건

재 질	시편종류	조사온도(°C)	조사량(n/cm ²)
SA508 class3 Type 309L stainless steel	Small tensile	288	5×10 ¹⁸ ~3×10 ¹⁹
	1/3 Charpy		
	Microhardness		
	TEM		
SA508 class 3 Type 304 stainless steel	Small tensile	300	5×10 ¹⁸
	TEM		
Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe Zr-1Nb-1Sn-0.2Mo-0.1Fe Zr-1Nb-1Sn-0.5Mo-0.1Fe	TEM	300	1×10 ¹⁹
			5×10 ¹⁹
	EPMA		1×10 ²⁰
SA305 LF2 Type 304 stainless steel	Small tensile	350	5×10 ¹⁹
	Charpy		
Zirconium alloy	Small tensile	300	~1×10 ²⁰
	TEM	350	

표 2 00M-01U 캡슐에 장입된 시편

시편종류	재질	개수
Charpy	Type 304 stainless steel	3
	SA350 LF2	3
TEM	SA508 class3	32
	Type 309L stainless steel	12
	Type 304 stainless steel	20
	Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe	18
	Zr-1Nb-1Sn-0.2Mo-0.1Fe	18
	Zr-1Nb-1Sn-0.5Mo-0.1Fe	18
	Zirconium alloy	54
EPMA	Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe	9
	Zr-1Nb-1Sn-0.2Mo-0.1Fe	9
	Zr-1Nb-1Sn-0.5Mo-0.1Fe	9
Small tensile	SA508 class3	52
	Type 309L stainless steel	16
	Type 304 stainless steel	20
	SA350 LF2	10
	Zirconium alloy	51
Small punch	SA508 class3	40
1/3 Charpy	SA508 class3	24
Microhardness	SA508 class3	4

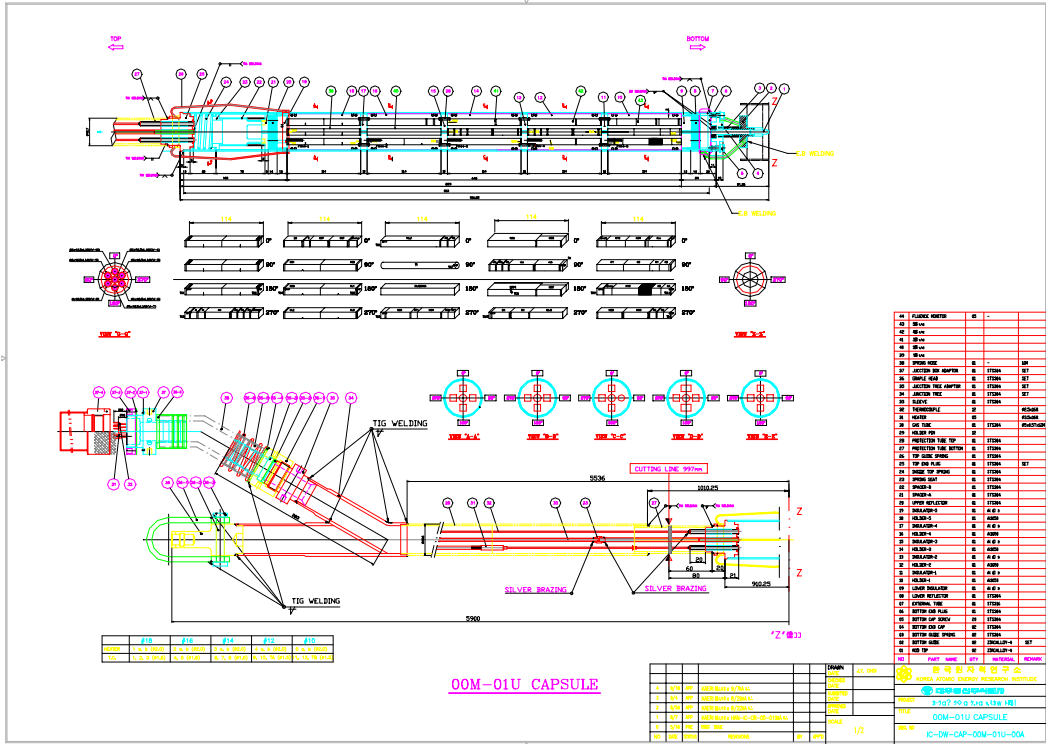
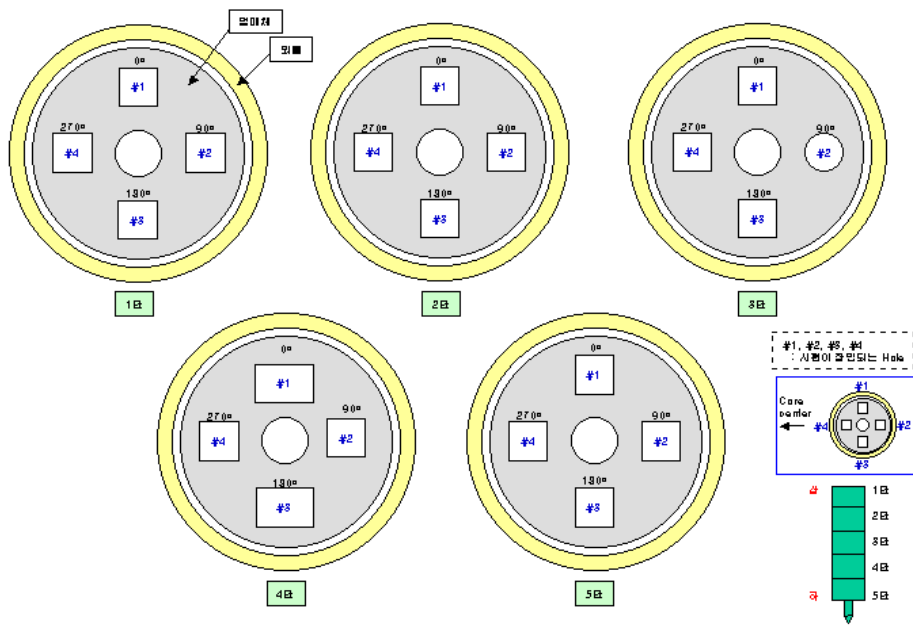
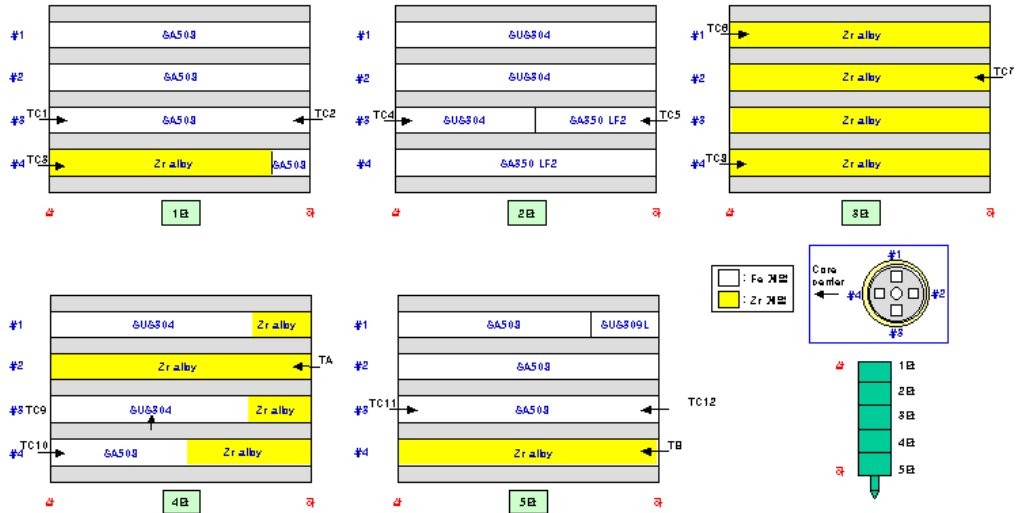


그림 1 00M-01U 캡슐의 설계도



(a) 캡슐 중단면



(b) 캡슐 횡단면

그림 2 시편배치도

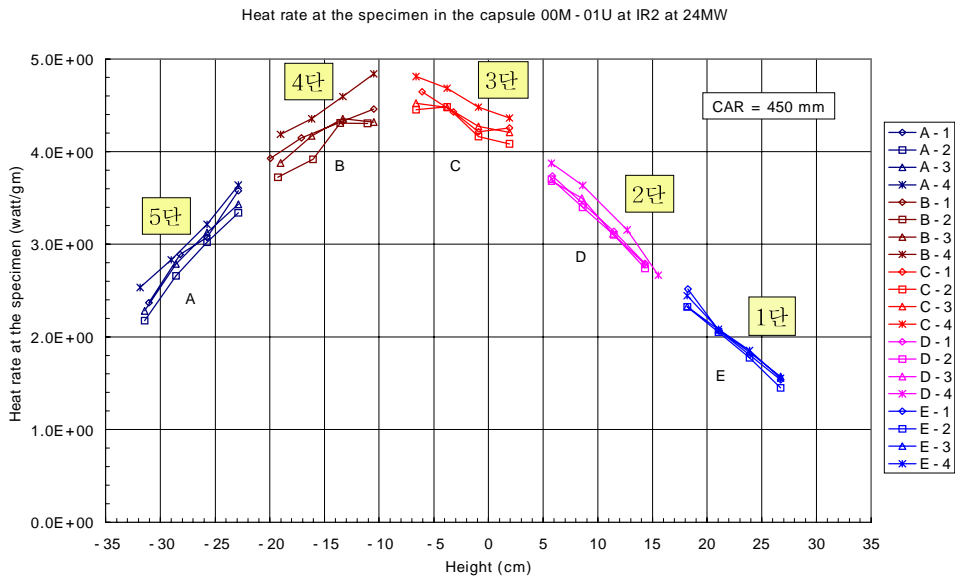


그림 3 캡슐 내 조사 시편에서의 추정된 감마발열량(IR2, 24MW, 10일 조사)

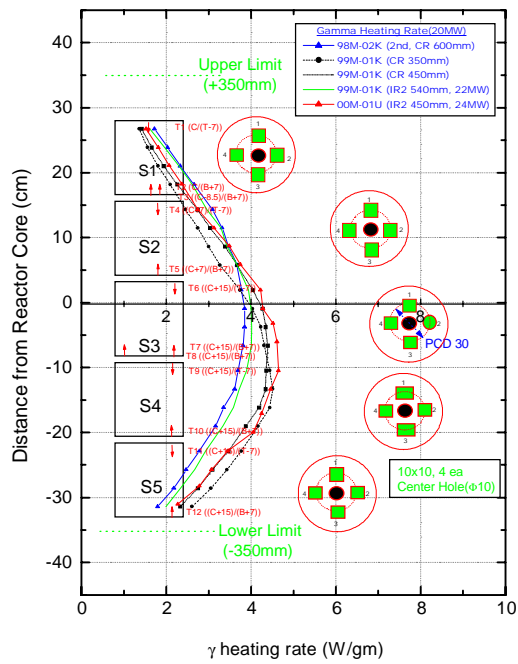


그림 4 캡슐 내 조사시편에서의 교정 감마발열량 (IR2, 24MW, 10일 조사)

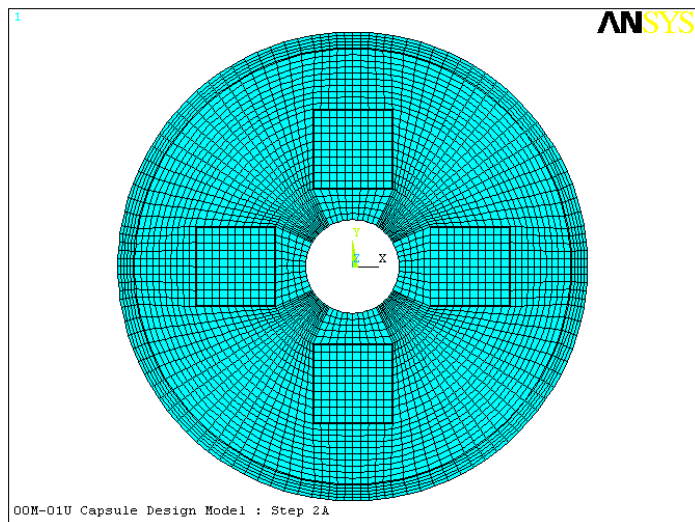


그림 5 ANSYS를 사용한 유한요소해석모델 (2단)

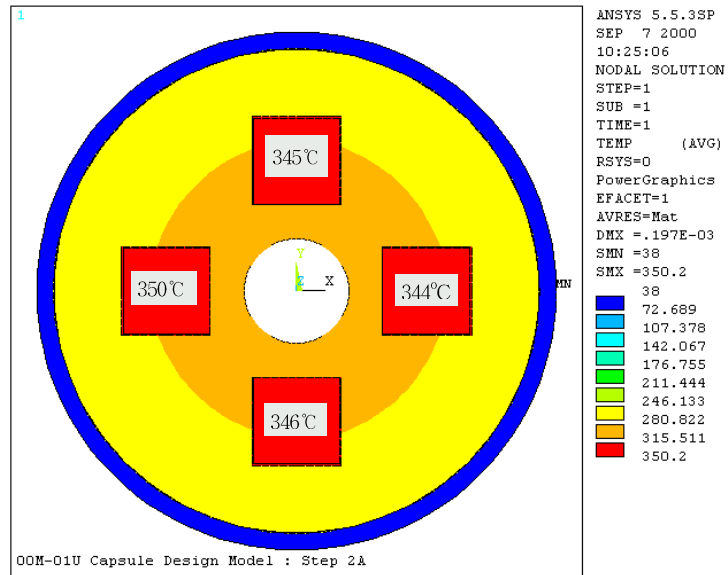


그림 6 ANSYS를 사용한 온도분포 해석결과 (2단)