

재료 조사시험용 계장캡슐 하단고정부 설계 개선

Design Change of Lower Locking Parts of Irradiation Instrumented Capsules

주기남*, 조만순, 최명환, 강영환, 김봉구, 조영갑, 류정수, 임인철

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소에서 연구개발한 재료 조사시험용 계장캡슐은 하나로에서 산·학·연 이용자들이 요구한 다양한 재료의 중성자 조사시험에 활발히 이용되고 있다. 하나로는 원자로 냉각수의 상향 흐름으로 캡슐 자체의 내진 안전성을 만족시키기 위하여 계장캡슐은 조사시험시 본체 하단부, 본체 상부, 침니 상부, 고정팔 고정부 등 4곳에서 지지 고정된다. 고압·고속의 냉각수 흐름에 노출되는 캡슐 하단 고정부는 하나로 핵연료 하단부를 기본으로 하여 초기 설계·제작되었으나, 그동안 조사시험 과정에서 구조 개선사항이 발생하여 일부 설계 개선되어 왔다. 최근 하나로에서 최장기(29일간) 조사시험된 02M-05U 계장캡슐에서도 캡슐 하단부의 부분적 손상이 발생하였다. 이에 따라 계장캡슐 하단부의 손상 원인 분석과 이러한 손상 문제들을 근본적으로 해결하기 위한 신형 하단부를 설계변경 제작하여 노외 시험시설에서의 검증시험을 통해 건전성을 확인하였다. 향후 새로운 캡슐 하단부는 재료 캡슐 및 크립시험용 캡슐의 조사시험에 적용될 예정이다.

Abstract

The material irradiation instrumented capsule system has been actively utilized for the various material irradiation tests requested by users of research institutes, universities, and industries. Because of the up-stream of coolant in HANARO, the instrumented capsule is supported or fixed at 4 points such as bottom and top of main body, top of reactor chimney, and capsule robot arm. The bottom guide assembly of instrumented capsule, used in high pressure and velocity of coolant was designed and fabricated on the basis of the design of HANARO drive fuel and has been partially modified due to various matters occurred during irradiation tests including 02M-05U capsule. Therefore, the new bottom guide assembly was designed and fabricated to solve those problems fundamentally and its integrity was proved through various out-pile tests. The new design will be applied to all of material and creep capsules in

HANARO.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 재료조사시험용 표준형 계장캡슐을 국산화 연구개발하였다 [1-7]. 연구로를 활용한 캡슐조사시험은 다양한 운전조건을 구현할 수 있으며 조사 시험 변수를 조절할 수 있고 중성자속이 높아 시험 기간을 크게 단축 할 수 있는 장점이 있다. 현재 개발된 재료 조사시험용 표준형 계장캡슐은 하나로에서 원자력 재료들에 대한 산·학·연의 중성자 조사시험 연구에 활발히 활용되고 있다 [6-7].

한라로는 원자로 냉각수의 상향 흐름으로 인해 캡슐 자체의 내진 안전성을 만족시키기 위하여 계장캡슐은 조사시험시 본체 하단부, 본체 상부, 침니 상부, 고정팔 고정부 등 4곳에서 지지 또는 고정된다. 고압·고속의 냉각수 흐름에 노출되는 캡슐 하단 고정부는 하나로 36-봉형 핵연료 집합체의 하단부를 기본으로 하여 초기 설계·제작되어 사용되었으나, 그동안 조사시험 과정에서 여러 손상이 발생하여 일부 설계 개선되어 사용되어 왔다 [8-11]. 그동안 단기적인 조사시험에서는 문제없었던 캡슐 하단부는 최근 최장기 시험기간인 29일간 조사시험된 02M-05U 계장 캡슐에서 조사시험중 guide arm 및 ring 부위의 손상이 발생하였다. 이러한 캡슐 하단부 손상에 대한 원인분석이 있었으나 [13], 해당 부위의 방사능에 따른 작업 제한 등으로 현재까지 FIV(flow induced vibration)에 의한 피로 파괴 혹은 작업과정에서의 물리적인 응력 등으로 추정되었으나, 보다 명확한 손상 원인을 밝히기 위해서는 향후 추가적인 분석이 필요한 실정이다.

한편 이러한 일련의 하단부 손상에 따라 해당 부위의 근본적인 설계변경이 필요하였다 [14]. 따라서 여러 하단부 목감을 설계 제작하여 노외 시험시설에서 성능평가 시험 등을 통해 최적의 설계조건을 도출하였으며 [15-19], 이를 기반으로 하여 신형 하단부에 대한 최종 설계변경으로 제작중이며 [20], 향후 설계개선된 신형하단부는 재료 조사시험용 계장캡슐은 물론 크립시험용 캡슐의 조사시험에 적용될 예정이다.

2. 하나로 조사시험용 계장캡슐 주요 구조

원자력 및 여러 신소재의 중성자 조사시험에 활발하게 활용되는 조사시험용 캡슐은 하나로 고압·고속의 냉각수 흐름 속에 그림 1과 같이 설치된다. 조사시험을 위한 일련의 시설로는 시편이 포함되는 캡슐본체, 침니고정용 basket, 고정용 robot arm, 캡슐 제어장치 등과 조사후 처리를 위한 캡슐 절단기, 해체시설로의 운반에 필요한 cask 등의 시설도 필요하다. 캡슐 본체의 경우 하단 고정부, 본체(시편 포함), 보호관, 안내관 등의 주요 구조로 구성되며, 조사시험중의 온도, 기체 압력 등의 조건은 캡슐 본체와 계장선으로 연결된 캡슐 제어장치를 통해 조절/기록된다 (그림 2 참조).

일반적으로 캡슐 본체의 내부 구조는 중심부에 분산배치되어 있는 조사시편을 중심으로 시편 온도 미세조절용 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단 구조로 되어 있으며, 조사 시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 12개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 설치되었다.

한편 계장캡슐은 하나로는 원자로 냉각수의 상향 흐름으로 인해 캡슐 자체의 내진 안전성을 만족시키기 위하여 조사시험시 본체 하단부, 본체 상부, 침니 상부, 고정팔 고정부 등 4곳에서 지지 또는 고정된다.

조사시험후 원자로 노심에서 인출된 캡슐은 일정기간 하나로 작업수조에서 방사능 냉각처리된 다음 캡슐 절단기를 사용하여 절단되어 이송용 캐스크에 넣어져 조사후시험시설인 IMEF로 이송/해체된다. 분리 해체된 조사시험편들은 각 이용자들에 인도되어 각종 조사후 재료물성시험이 수행되게 된다.

3. 계장캡슐 하단부 손상 및 설계변경 이력

캡슐 최하단부에서 1차적으로 캡슐을 고정하는 역할을 하는 캡슐 하단부는 기본적으로 36-봉 핵연료 집합체 하단부를 기본으로 하여 설계되었다. 캡슐 하단부에서는 그동안 13개의 재료 조사시험용 캡슐을 조사시험하는 동안 여러 손상사례가 발생하였으며 [8-11], 이에 따라 하단부 보호를 위해 조사시험용 캡슐의 조사시험절차의 변경 작업과 하단부 자체의 일부 설계변경 작업이 진행되어 왔다 [9,21,22].

재료 조사시험용 계장캡슐의 초기 하단부는 36-봉 핵연료 집합체 하단부 설계를 바탕으로 그림 3(a)에서와 같이 설계되었다(A형). 캡슐 진동특성 평가용 목감 캡슐에 정상적으로 적용되었던 A형 하단부가 적용된 재료 조사시험용 97M-01K 캡슐은 표 1, 그림 3(a)에서와 같이, 20MW CT/IR2에서 0.54일간 조사후 arm 1개가 손상되었다. 97M-01K 계장캡슐의 하단부 guide arm 3개 중 하나가 절단되어 1차 조사 후 캡슐을 임시 보관하였던 작업수조 바닥에서 발견되었는데, 이 손상은 작업수조에서 구조물에 걸려 물리적 힘에 의하여 발생한 것으로 추정된 바 있으며 [8], 이에 따라 그림 3(b)와 같이 guide arm 끝 부위가 다른 구조물에 걸리는 것을 억제하도록 설계변경 하였다 (B형).

그림 3(b)와 같이 설계 변경, 제작된 하단부는(B형) 무계장캡슐인 98M-1K 캡슐에 적용되어 20MW CT에서 10시간 정상적으로 조사시험되었다. 그러나 동일한 하단부를 적용한 98M-02K 캡슐은, 20MW CT에서 2.2일간 조사/인출 후 작업수조에서의 비디오 검사과정에서 arm 1개가 손상/유실되었음을 확인하였다. 유실된 arm은 1차 냉각수 펌프 가동으로 냉각수 회로 계통인 스트레이너에 이동된 후 추후 회수되었다. 조사 후 손실된 하단부 guide arm 하나는 노심 구조물에 걸쳐 있었던 것으로 추정되었으며, 손상 원인은 인출과정에서의 물리적인 외력인 것으로 추정되었다 [10]. 따라서, 그림 3(c)와 같이 guide arm 끝 부위에 ring을 보강하여 기계적 강도를 향상시키고, 물리적인 외력을 분산시키도록 설계변경 하였다(C형). 또한 조사시험을 위한 캡슐 장·탈착시 캡슐 guide arm에 외력이 작용하지 않도록 조사시험절차서를 상세 개정하여 적용하였다 [21].

98M-02K 캡슐의 하단부 guide arm 손상으로 인해 하단부 guide arm 끝부위에 그림 3(c)와 같이 ring을 보강한 설계로 변경/제작된 하단부는(C형) 99M-01K, 99M-02H 캡슐에 적용되어 22MW CT에서 각각 3일씩 정상적으로 조사시험되었다. 그러나 동일한 하단부 설계의 00M-03K 캡슐은, 24MW IR2에서 11일간 조사/인출 후 비디오 검사과정에서 arm-ring 2곳이 손상되었음을 확인하였다. 이러한 하단부 guide의 arm-ring 접속 부위의 손상은 캡슐 탈착 과정에서 물리적인 외력에 의해 발생한 것으로 추정되었다 [11]. 그러나 arm에 작용한 외부응력이 분산되어 일부 손상 발생에도 불구하고 ring 및 arm은 이탈하지 않은 점과 작업시의 일부 무리한 절차 적용 등을 확인하여 추가의 설계 변경은 하지 않았다. 99M-01K 캡슐부터 적용되어온 C형 하단부는 00M-03K 캡슐의 조사시험시 일부 손상이 보고되었으나, 01M-05U 캡슐에도 적용되어 24MW CT에서 20일간 정상적으로 조사시험되었다.

그러나 동일한 하단부 설계의 02M-05U 캡슐은, 24MW CT에서 14일간 조사후 비디오

검사과정에서 arm-ring이 손상/분리되었고, arm 하나가 손상 유실되었음이 확인되었다 [12] (그림 4(a) 참조). 이러한 하단부 guide의 arm-ring 접속 부위의 손상은 작업과정에서 별다른 외부 응력 발생 가능성이 적은 점으로 미루어 그동안의 손상원인 추정과는 달리 냉각수의 진동유발에 의한(FIV) 피로 파괴에 의해 발생했을 가능성이 새로이 추정되었다 [13]. 한편 손상된 02M-05U 캡슐의 조사시험은 잔존하는 2개의 arm과 ring을 제거한 후 2차 조사시험을 수행하였다 [14]. 이를 위해 02M-05U 캡슐의 조사시험을 위한 arm과 ring 제거 조치와 새로운 조사시험절차서를 작성하여 [22], 24MW CT에서 15일간 2차 조사시험을 수행하였는데, 잔존하는 2개의 arm 중의 하나가 손상 유실되었다 (그림 4(b) 참조).

4. 손상 원인 분석

캡슐 하단부의 손상원인으로는 크게 2가지로 추론되어 왔다. 먼저 캡슐 장탈착 과정에서 해당 부위에 기계적 외력이 작용하여 강제 파손되는 경우와 하단부 주위를 흐르는 고압/고속의 냉각수에 의해 유발된 진동에(FIV, flow-induced vibration) 기인한 피로 파괴로 유추되었다 [8,13]. 전자인 외력 파괴는 주로 초기 하단부 손상 발생시 유력한 것으로 추론되어 이를 방지하기 위하여 관련 조사시험 절차를 보완하고 하단부 또한 외력 작용이 분산되도록 설계변경하였다 [9,21]. 그러나 이러한 대책 후에도 조사시험 기간이 늘어남에 따라 하단부 손상이 재발함에 따라 점차 손상 원인으로 FIV에 의한 피로파괴에 관심이 증가하고 있다. 그림 5는 최근 손상된 02M-05U 캡슐의 하단 손상부에 대한 확대 사진으로서 피로파괴 특징인 'chevron pattern' 및 'clamshell mark' 등이 [23] 일부 관찰되기도 하였으나, 향후 추가적인 분석이 필요하다.

5. 신형 하단부 설계 개선

02M-05U 캡슐의 하단부 guide arm 조사중 손상현상에 따라 [12], 원인분석을 통하여 1차 설계변경(안)이 작성되었고 [15], 이에 대한 검토를 통하여 '계장캡슐 하단부 설계변경(II)' 안이 [16] 최종 마련되었다. 이에 따라 일체형 및 분리형 mock-up 하단부를 설계/제작하여 노외 시험시설을 이용하여 캡슐 장탈착 특성, 압력강하 특성, 온도조절 특성, 변위 특성, 내구성 등을 종합적으로 시험 평가하여 최적모델을 선정하였다 [17-19] (신형 캡슐하단부(그림 6) 참조). 신형 캡슐 하단부는 다음과 같이 설계변경되었다.

1) Ring 및 arm을 제거하여 손상 원인을 완전히 제거하였다.

2) Rod Tip 설계 변경 :

- 재질 변경(14% cold worked(CW) STS 304로(혹은 316)) ; Zircaloy-4 재질을 STS로 변경함으로써 이종금속간의 용접부위를 없앴. 일반적인 STS 304의 경우 소성변형과 관련된 항복강도(yield stress) 값이 Zircaloy-4에 비해 60% 정도로 낮으나, 14%CW STS의 경우 충분한 강도를 가지고 있음(약 160%) (표 2 참조).
- 하부 neck 부위 직경을 기존 6.6mm에서 6.8mm로 키움으로 강도 향상.
- 상부 용접부 회전방지용으로 가공한 부위를 3.0에서 3.5mm로 키움.
- 용접을 EB welding에서 TIG welding으로 변경.

3) Bottom Guide Body 변경 :

- Arm 제거하여 단순 ring 형으로 변경.
- 재질 변경(STS 304로 변경) ; Zircaloy-4 재질을 STS 304로 변경, 중심 구멍 내부에 산화막 과정 제거.

- Bottom guide body(ring)의 반경을 19mm로 줄이고(동위원소 캡슐의 경우 18mm), 상부의 Spring 홈을 없앴(홈 깊이만큼 body 길이 작아짐). 하부는 단일 평면으로 하여 캡슐의 유동관 고정작업시 유동관 스카이드에 면이 닿게 함.

4) Spring 변경 :

- 양단 끝을 좀더 round 하게 변경(회전시 마찰 감소용).

5) Bottom Guide Cap 변경 :

- Cone 형으로 제작하고 bolt 구멍을 냄.
- Rod tip 연결부의 취약성을 보강하기 위하여 내부 ring 길이를 7에서 10mm로 변경.

한편 캡슐 하단부 설계변경과 관련하여 캡슐 하단부 스프링 또한 캡슐 원자로 장전용 tool의 재질 변경 및 그동안 캡슐 장탈/착 작업시 보다 원활한 캡슐 장탈착을 위한 캡슐 스프링 하중값의 감소 요구 등의 이유로 스프링 상수를 1.2kg/mm에서 1.0kg/mm로 변경하고, 재질 또한 노내 조사안전성 등의 이유로 STS 스프링강에서 Inconel(X-750) 재질로 변경하는 것으로 결정하였다 [19]. 이에 따라 1차로 선경 $\phi 2.3\text{mm}$ 의 Inconel X-750 재질로 기존 스프링 규격에 맞추어 스프링 상수 1.0kg/mm를 목표로 시제품을 제작하여 특성을 평가한 결과 재질의 한계로 최대밀착시 스프링 자체의 소성변형이 일어나 설계한 초기 자유장(free length)이 최대 7mm까지 줄어드는 현상이 발생하며 변위에 따른 스프링 상수의 값도 불안정하여 캡슐에 적용할 수 없었다.

따라서 2차로 스프링 전문제작사와의 기술협의를 따라 (스프링 선경을 줄이면 자유장 감소가 줄어듦) 스프링 선경 $\phi 2.0\text{mm}$ 의 Inconel X-750 및 X-718 재질로 2차 시제품을 제작하였다. 이 경우 1차 제품에 비해 최대 밀착시 줄어드는 자유장은 약간 줄어들었으나, 스프링 상수가 설계치에 비해 너무 커 캡슐설계에 적용하기에 부적합하였다.

이에 3차로 또 다른 스프링 전문제작회사인 한국스프링(주)와 협의하여 스프링 선경 $\phi 2.54\text{mm}$ 의 Inconel X-750 재질로 3차 시제품 2종류를 5개씩 제작하였다. 3차 시제품은 1,2차 시제품 시험으로부터 밝혀진 기존 설계치의 기술적 한계를 극복하기 위하여 기존의 노외성능 평가 결과에 영향을 주지 않는 범위 내에서 설계를 변경하여 제작하였다. 설계변경 주요사항은 1) 스프링 내경을 증가시켜 탄성한도를 유지함으로써 최대밀착시에도 자유장 감소를 없앴, 2) 자유장을 감소시키는 대신 스프링 상수를 증가시켜 캡슐설계 하중조건을 만족시킴 등이다. 시제품은 최대변위 22mm까지 스프링 상수값을 연속적으로 측정하였으며, 3회 이상 시험하여 측정값의 재현성을 확인하였다. 시험결과 3차 시제품 2종류 모두 초기 및 장전후 하중이 캡슐의 원자로 실제무게($\sim 21.8\text{kg}$)을 초과하는 등 기본적인 캡슐 설계요구치를 만족한다 (표 3 참조). 또한 실제 하나로에서의 캡슐 조사시험의 경우, 캡슐 자체를 원자로 침니고정틀과 고정팔로 고정/지지하며, 캡슐 상부 방향으로의 냉각수 흐름 등을 감안할 때, 사용 스프링은 충분한 고정역할을 할 것으로 사료되었다. 결과적으로 제작 스프링 2종류는 캡슐 사용조건에서 거의 비슷한 스프링 하중특성을 보이나, 기존 캡슐의 자유장 62mm를 감안하여 자유장 53mm 스프링을 신형 캡슐 하단부 스프링으로 선정하고, 이에 따라 스프링 연관 부품인 bottom guide body 및 bottom end cap 관련 부위를 설계변경하였다. 이러한 스프링 부위의 설계변경은 보다 원활한 캡슐 장탈착 작업을 가능케 함으로써 작업 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 향후 계획

그동안 손상 원인 분석 및 목갑제작과 노외 평가시험 등을 통해 캡슐 하단부에 대해

설계변경을 하였으며, 이에 의거하여 하나로에서 조사시험할 신형 캡슐 하단부를 제작하였다. 설계변경된 하단부에 대한 심의를 거쳐 신형 캡슐 하단부는 향후 캡슐 조사시험에 적용할 예정이다. 그리고 조사시험후 건전성 평가를 통해 조사시험 안전성이 확인될 경우 신형 하단부는 향후 모든 재료 캡슐 및 특수목적용 캡슐에 적용할 수 있을 것이다.

5. 결 론

하나로 핵연료의 하단부를 기본으로 하여 설계·제작된 캡슐 하단부는 그동안 조사시험 과정에서 여러 손상이 발생하여 일부 설계 개선되어 왔다. 계장캡슐 하단부의 손상 원인 분석과 이에 따른 조사시험절차의 변경 작업이 수행되었으며, 이러한 손상 문제들을 근본적으로 해결하기 위한 새로운 캡슐 하단부를 설계변경하였다. 목캡 하단부를 제작하여 노외 시험시설에서의 성능 및 안전성 검증시험을 통해 최적의 캡슐 하단부 설계를 도출하여 신형 하단부를 제작하였으며, 이에 따라 조사시험 동안 캡슐의 하단부 구조 안전성을 향상시켰다. 신형 캡슐 하단부는 향후 모든 재료 및 크립 등 특수 목적의 캡슐 조사시험에 적용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력중장기사업중 조사시험용캡슐개발및활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
2. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1760/96 (1997).
3. K.N. Choo et. al., Design of a new capsule controlling neutron flux and fluence and temperature of test specimens, J. Kor. Nucl. 29(2), 148 (1997).
4. Y.H. Kang et. al., Structural analysis for the HANARO irradiation capsule through vibration test, Pro. of 6th ASRR symposium, Mito, Japan, march 1999.
5. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-2038/99 (2000).
6. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-2360/03 (2003).
7. 주기남외, 2003년도 재료캡슐 하나로 조사시험, '03추계원자력학회, 용평, Korea, October 2003.
8. 주기남, 하나로 IR2 시험공 조사시험 비정상 거동 분석, HAN-IC-CR-98-002, 1998.8.17
9. 김봉구, 98M-01K 캡슐 guide spring 및 하단부 설계 변경 확인, HAN-IC-OT-98-006, 1998.12.2
10. 98M-02K 캡슐 하단부 Guide Pin 절단, HAN-IC-memo-99C-012, (1999.7.21)
11. 주기남, 00M-03K 캡슐 하단부 Bottom Guide 링부 손상, HAN-IC-memo-c1-927, 2001.9.11
12. 주기남, 임인철, 02M-05U 캡슐 하단부 Bottom Guide Arm-Ring 부 손상, 하나로 memorandum, HAN-IC-CR-03-007, 2003.5.14
13. 주기남, 임인철, 02M-05U 캡슐 하단부 손상 원인분석 및 대책, 하나로 회의록,

- HAN-IC-MM-03-001, 2003.5.15
14. 하나로 이용 연구단, 제 20차 원자로 안전 심의 위원회 회의록, 2003.5.27
 15. 주기남, 계장캡슐 하단부 설계변경(안), 하나로 내부통신문, HAN-IC-CR-03-011, 2003.6.27
 16. 주기남, 하나로 조사시험용 계장캡슐 하단부 설계변경(II), 하나로 내부통신문, HAN-IC-CR-03-C013, 2003.7.17
 17. 주기남, 계장캡슐 신형 하단부 노외시험 협의, 하나로 회의록, HAN-IC-MM-03-002, 2003.8.29
 18. 최명환, 원추형 하단부 구조를 갖는 캡슐의 노외시험, 하나로 기술보고서, KAERI/TR-2655/2004
 19. 주기남, 신형 캡슐 하단부 Guide Spring 제작 및 평가, 하나로 내부통신문, HAN-IC-CR-04-001, 2004. 2. 2
 20. 주기남, 하나로 설계변경요청서, HAN-IC-DCR-04-002, 2004. 3. 22
 21. 주기남, 계장캡슐 조사시험 절차서, HAN-IC-TP-02-002, 2002.4
 22. 주기남, 02M-05U 계장캡슐 2차 조사시험 절차서, HAN-IC-TP-03-001, 2003.6.4
 23. R.M. Caddell, Deformation and fracture of solids, Prentice-Hall Inc., New Jersey, pp.295-296 (1980)

Table 1. 원자력 재료 조사시험용 계장 캡슐 일람표

캡슐명	이용자	시험 (수)	시험 재료	조사조건	하단부
95M-01K (non-instrumented)	KAERI (Capsule)	Tensile / Charpy (87)	STS304, Inconel Zr-Nb, SA508-3	15-22MW CT/IR2, 140 일 210-265°C 1.35×10^{21} n/cm ²	A : 95.11. 정상
97M-01K	KAERI (Capsule)	SP / Tensile / Charpy MBE / TEM (251)	STS304, SA508-3	20MW CT/IR2, 0.54 일 290±10°C 2.8×10^{18} n/cm ²	A : 96.5. 외부 손상
98M-01K (non-instrumented)	KAERI (RPV/Cap.)	CT / Charpy / PCVN / ABI Tensile / MBE / SP (258)	SA508-3	20MW CT, 0.4 일 290±10°C 4.5×10^{18} n/cm ²	B : 99.2. 결상
98M-02K	KAERI (RPV)	CT / Charpy / PCVN MBE / SP (329)	SA508-3	20MW CT, 2.2 일 290±10°C 2.6×10^{19} n/cm ²	B : 99.7. 손상
99M-01K	KAERI(RPV) HANJUNG	CT / Charpy / PCVN / ABI Tensile / MBE / SP (134)	SA508-3	22MW IR2, 3 일 290±10°C 3.0×10^{18} n/cm ²	C : 00.6. 결상
99M-02H	HANJUNG	Charpy / PCVN / ABI Tensile / MBE / SP (131)	SA508-3	22MW IR2, 3 일 290±10°C 2.9×10^{18} n/cm ²	C : 00.6. 결상
00M-01U	Universities	Charpy / Tensile / Growth Tube / TEM / EPMA (505)	Zr alloys SA508, STS304	24MW IR2, 10 일 290-350°C 1×10^{20} n/cm ²	C : 00.11. 정상
00M-02K	KAERI (RPV)	CT / Charpy / PCVN MBE / SP (488)	SA508-3 (Y3-5,U4,K1,J)	24MW IR2, 3 일 290±10°C 2.6×10^{19} n/cm ²	C : 01.5. 결상
00M-03K	KAERI (ZrPT/RCM)	Growth / TEM Tensile (267)	Zr alloys STS 304, Cr-Mn	24MW IR2, 11 일 300/330°C 1×10^{19} n/cm ²	C : 01.8. 손상
01M-05U	KAERI Universities	Tensile / Growth / Hardness Tube / Optical / TEM (267)	Zr alloys Al-Cu, Ti alloys	24MW CT, 20 일 290-350°C 3.2×10^{18} n/cm ²	C : 02.4. 정상
02M-05U	KAERI Universities	SP/Tensile / Charpy / Hardness / Optical (502)	STS / Cr-Mn RPV,Al-Cu/Ag, Ti	24MW CT, 25 일 290-330°C 3.5×10^{18} n/cm ²	C : 03.4. 손상
02M-02K	KAERI (RPV)	Charpy / PCVN / SP / Tensile / ABI / TEM (776)	SA508-3, Fe alloys (IHT, U4)	24MW CT, 6 일 290±10°C 6.4×10^{18} n/cm ²	C : 03.8. 정상
03M-06U	KAERI Universities	Bar / Charpy / Tensile / ER / TEM (158)	STS / SA508-3, Fe/Zr/Al/Cu-Ag	28-30MW CT, 19 일 290-320°C 3.7×10^{18} n/cm ²	D : 04.4. 배전

Table 2. Zircaloy-4와 STS 304 재료의 기계적 특성 비교 (상온)

재료	Yield stress (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	문헌
Zircaloy-4	363	532	24	1
STS 304	255	607	60	2
14% CW STS 304	588	695	42	3

- 1) 02M-05U capsule EMR, rod tip specification.
- 2) 02M-05U capsule EMR, spacer 등 (STS 304 rod)
- 3) Mill certificate, (주)금강공업.

Table 3. 캡슐 하단부 스프링 특성 비교

변수	핵연료 (36봉)	계장캡슐			Tool 8.9m	
		변경	초기설계	기존	변경(AI)	기존(STS)
공기중(kg)	6.57	36.3			24	40
부력(kg)		~14.5				
원자로 실제무게(kg)	~5.1	~21.8			18	37
Spring상수(kgf/mm)	0.8	1.37	1.0	1.2		
자유장(mm)	62.5±0.5	53	62.5±0.5	62.5±0.5		
조립거리(초기 62mm)	35.9	34.9	35.9			
초기조립하중(kg)	21.6	25.7	26.1	31.32		
장전시 필요하중(kg)	29	34.9	35.1	42.12		
압축거리(최소)(mm)	9(7.4)	6.65(5.5)		9(7.4)		
장전후 하중(kg)	23.7	30.5 (3.5mm 압축)	29.6 (3.5mm 압축)	34.68 (2.8mm압축)		

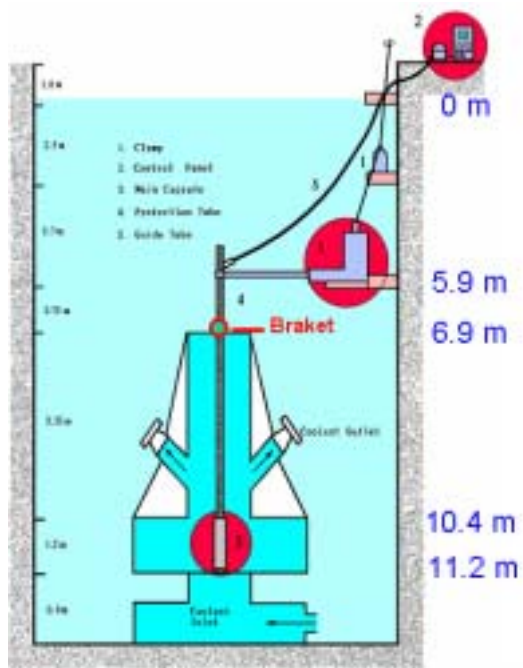
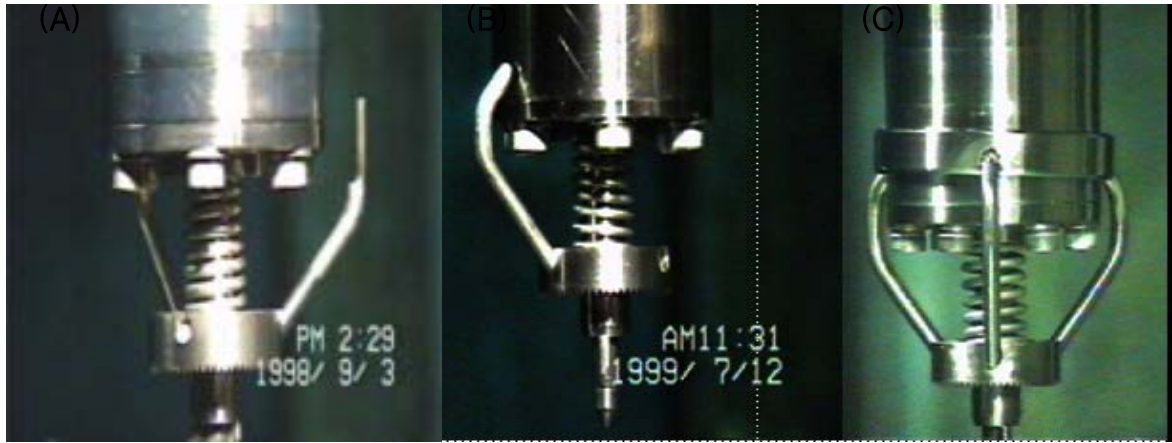


그림 1 조사시험 중의 노심 및 조사시험용 캡슐 시스템



그림 2 재료 조사시험용 계장캡슐

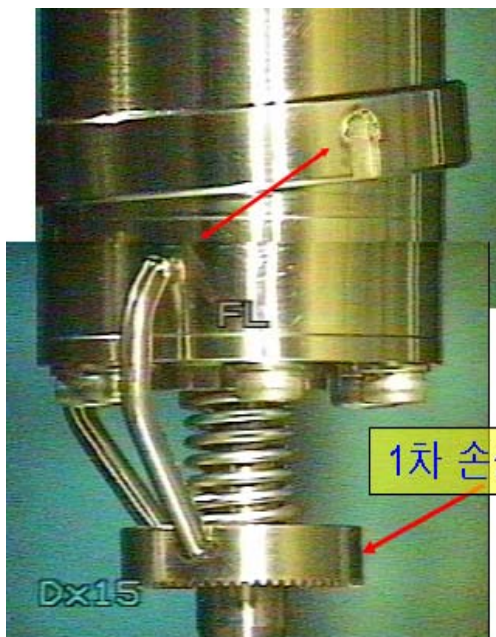


(A) 97M-01K

(B) 98M-02K

(C) 00M-03K(02M-05U)

그림 3. 재료 조사시험용 계장캡슐의 Bottom Guide 설계변경 이력



(A) 1차 손상



(B) 2차 손상

그림 4. 02M-05U 캡슐 하단부의 1, 2차 조사시험후 손상 모습

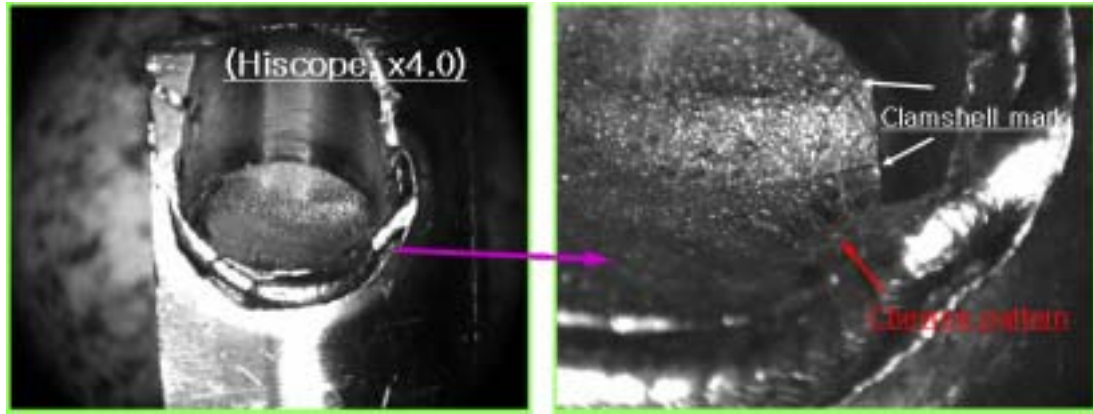


그림 5. 02M-05U 캡슐 하단부 1차 손상부(arm 절단부)의 파면면

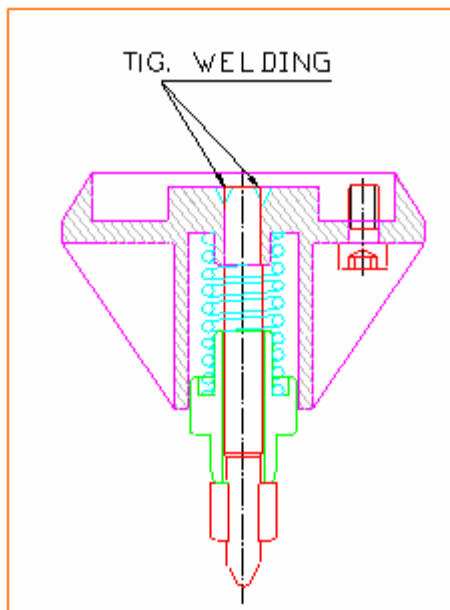


그림 6. 신형 캡슐 하단부 설계 및 제작 mock-up