

핵연료 조사시험용 계장캡슐 개발

Development of an Instrumented Capsule for Irradiating Nuclear Fuel in HANARO

김봉구*, 오종명, 손재민, 박승재, 류정수, 조영갑, 강영환
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

현재 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 핵연료 조사시험용 캡슐 개발이 진행되고 있다. 무계장캡슐을 이용한 핵연료의 조사시험 및 조사후시험으로 핵연료의 조사성능을 평가하고 있으며, 조사시험 중 핵연료 온도, 핵연료봉 내압 및 핵연료 변형 등의 핵연료 특성을 측정하기 위한 계장캡슐을 제작하여 설계검증시험을 수행할 계획이다. 이를 위해 계장캡슐의 기본설계를 바탕으로 핵적해석, 기계적 및 열적해석과 모의캡슐 제작 및 노외시험 등을 수행하여 계장캡슐의 건전성과 하나로 조사공과의 양립성을 확인하였다. 그리고, 일부 부품의 설계를 개선하였다.

Abstract

The capsule development for irradiating nuclear fuel is going on through the mid- and long-term Nuclear R&D program supported by the MOST(Ministry of Science and Technology). In order to evaluate the fuel performance, the irradiation test of fuel in HANARO and the post-irradiation examination is performing. To measure characteristics such as fuel temperature, internal pressure of fuel rod, elongation of fuel during irradiation test, the instrumented capsule is being manufacturing, and its design verification test will be performed in HANARO. For the purpose of the test, nuclear analysis, mechanical and thermal analysis were done and mock-up capsule was manufactured based on the basic design of instrumented capsule, and out-of-pile test was performed. And, the integrity of the instrumented capsule and the compatibility with test hole in HANARO were confirmed. Design of several parts was also changed to optimize the design of the capsule.

1. 서 론

연구용 원자로인 하나로(HANARO: High-flux Advanced Neutron Application Reactor)를 이용한 원자로 재료 및 핵연료의 조사시험은 원자력발전소의 운전조건을 구현할 수 있으며, 조사시험 변수를 조절 및 측정할 수 있고, 하나로의 중성자속이 높아 시험기간을 크게 단축할 수 있는 장점이 있다. 현재까지 재료 조사시험용 무계장캡슐과 계장캡슐, 핵연료 조사시험용(이하 핵연료용) 무계장캡슐을 개발하여 활용하고 있다[1-7]. 한편, 조사시험 중 핵연료 설계 및 노내 성능해석과 관련한 주요인자(핵연료 중심 및 표면온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이, 중성자 조사량 등)의 측정은 필수적이다. 이를 위해 핵연료 조사시험 요구조건과 하나로 OR 조사공과의 양립성을 고려하고, 하나로 가동 및 주변 설비와의 간섭이 일어나지 않도록 부가되는 요구사항에 적합하도록 2종류 계장캡슐의 기본설계를 완료하였다. 계장캡슐의 전체길이는 약 4.6 m이고, 조사핵연료봉이 설치되는 외통의 길이는 약 1m이며, 외통 내부에는 핵연료 온도측정용 열전대와 중성자속 측정용 SPND(self-powered neutron detector)가 설치된다. 또한, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이를 측정할 수 있는 계측기와 LVDT가 설치될 수 있다. 이와 같은 각종 계측기 설치를 위한 계장기술도 함께 개발되고 있다[8,9]. 계장캡슐의 기본설계를 바탕으로 하나로 노심 내에서의 핵적해석, 캡슐 구조에 대한 기계적 및 열적해석 등으로 구조적 건전성 및 하나로 조사공에서의 양립성을 확인하였다[10-12]. 그리고, 모의 계장캡슐을 제작하여 노외시험을 수행하였다. 이 결과를 토대로 핵연료용 계장캡슐의 일부 부품의 설계를 개선하여 계장캡슐을 제작 중에 있다. 향후 본 핵연료용 계장캡슐을 이용하여 노외성능시험을 수행하고, 하나로 노심에서 핵연료용 계장캡슐의 설계검증시험을 수행할 예정이다.

2. 핵연료용 계장캡슐 설계

원자력 중장기사업으로 수행되고 있는 신형 핵연료개발, 핵비확산성건식공정산화물핵연료(DUPIC 핵연료) 개발과제 등에서 핵연료 조사시험을 위해 요구하는 기본사항은 다음과 같다[13].

- 최대선출력 500W/cm 이하
- 연소도 60~100MWD/kgU
- 핵연료 특성 : 핵연료 온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 변형량 등 측정
- 조사량

이와 같은 조사시험 요구사항과 하나로 OR 조사공의 수력조건(유량 12.7kg/s 이하, 압력강하 200kPa 이상)을 만족하는 외통 직경, 하나로 침니 내부지지대의 고정 방법 및 양립성 등을 고려하여 밀폐형(sealed basket type)과 개방형(open basket type) 계장캡슐에 대한 기본설계를 완성하였다. 이러한 기본설계를 바탕으로 핵연료용 계장캡슐 설계기준(하나로 조사공 장전/인출 시, 조사시험기간동안, 조사 완료 후 이동 시 기계적 구조건전성과 기하학적 제원 안전성 유지, 캡슐 기밀성 유지, 조

사공과의 열수력적 양립 등)과 설계 요구사항(이용자 요구사항, 기능적 요구사항, 성능 요구사항, 연관 계통과의 요구사항, 설계한계 및 강도 요구사항, 지진 요구사항, 환경 요구사항, 안전 요구사항, 품질보증 계획 등)을 검토하여 핵연료용 계장캡슐의 설계 요구서를 작성하였다.

2.1. 핵연료용 밀폐형(sealed basket type) 계장캡슐

하나로 OR 조사공의 수력조건을 만족하는 외통 직경, 침니 내부지지대 등의 요구조건을 고려한 핵연료용 밀폐형 계장캡슐의 기본설계는 그림 1과 같다. 캡슐본체의 외통 외경은 48.6mm(두께=2.8mm), 보호관 외경은 42.7 mm(두께=2.8mm)이다.

2.1.1 핵적해석

핵연료용 밀폐형 계장캡슐의 기본설계에 대해 하나로 출력 30MW에서 조사 시험이 수행된다고 가정하여, 조사 핵연료에서의 최대 선출력이 50kW/m 및 40kW/m를 넘지 않는 핵연료의 최대 농축도, 반응도 제한조건 12.5mk를 초과하지 않는 핵연료의 최대 농축도, 조사 후 핵분열생성물 종류 등에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과, 10%의 여유를 고려한 선출력 값은 36.3kW/m 또는 45.4kW/m이며, 이에 해당하는 핵연료의 농축도는 1.8% 또는 2.24%로 평가되었다. 그러나, 밀폐형 계장캡슐 설계에 변화가 있을 경우, 핵연료 선출력 및 농축도에 대한 핵적해석은 다시 수행되어야 한다.

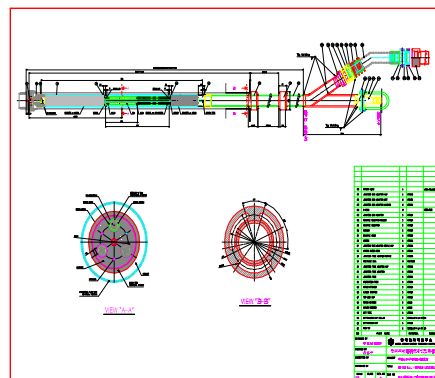


그림 1. Sealed basket type 계장캡슐 설계도

2.1.2 구조적 및 열적해석

침니내부지지대 OR clamp(수평 2방향 고정 및 수직 아래방향 고정), reflector 상부(수평 2방향 고정 및 수직 위방향 고정), spider(수평 2방향 고정)에서의 경계조건으로 해석한 결과로부터 캡슐 본체 외경은 48~50mm, 보호관 외경은 34.0~48.6mm의 경우에 대하여 구조 건전성은 만족되었다. 캡슐 외통의 내·외압차에 의하여 발생하는 응력강도 P_m 은 ASME Boiler & Pressure Vessel Code에 따라

검토된 설계응력강도 S_m 보다 낮은 3.6MPa로 작용하므로, 내·외 압력차에 대한 캡슐 외통의 안정성이 확인되었다. 보호관 최상단에 작용하는 단위 수직하중 하에서 캡슐과 보호관이 구조적 안정성을 유지하기 위한 최소하중인 임계좌굴하중은 6.8kN이었다. 캡슐이 수중에서 자유낙하하여 충격을 받는 경우의 충격응력은 충격순간속도와 Moody diagram(마찰계수 vs. Reynolds 수)으로부터 평가되었으며, 캡슐 본체 재료인 STS316의 허용응력(172.2MPa)보다 낮은 122.57MPa의 충격응력이 캡슐에 작용하므로 캡슐의 수중자유낙하 시 충격안정성이 확보되었다. 충격응력과 재료의 허용응력을 고려하여 계산된 수직과 수평방향의 최대 허용충격하중은 60.4kN과 426.6N이었다.

핵연료용 밀폐형 계장캡슐의 각 부품들에 대한 조사시험 중 안전성을 검토하고 조사시험 요구조건을 만족하기 위하여 부품 재원 등에 대한 온도해석모델을 확립하고 해석을 수행하였다. 해석에서는 캡슐 외통과 열매체, 열매체와 핵연료 피복관 등의 간격(gap), 열매체의 종류 및 핵연료봉의 장입위치 등을 조절할 수 있게 하였다. 이로부터 이용자들의 조사시험 조건(온도, 조사량)을 만족시킬 수 있는 핵연료용 밀폐형 계장캡슐의 설계가 가능하다.

이상과 같이 구조 및 열해석을 통하여 얻어진 결과들을 기초로 향후 핵연료 조사시험 이용자 요구에 따라 밀폐형 계장캡슐 설계를 위한 설계 기반기술을 확립하였다.

2.1.3 밀폐형 모의캡슐 제작 및 노외시험

핵연료용 밀폐형 계장캡슐 내에 설치되는 핵연료의 조사 중 표면온도조절 가능성을 확인하기 위하여 이중 피복된 핵연료봉을 설계하고 모의 핵연료봉을 제작하였다. 그리고, 하나로 조사공에서와 동일한 수력조건 하에서 수행된 노외시험으로 하나로 조사공에서의 수력적 양립성을 확인하고, 혼합 gas에 의한 모의 핵연료봉 표면온도(약 300℃) 제어 및 제어계통에 대한 타당성 실험을 수행하였다. 그 결과, 이중 피복으로 조사 중 핵연료 표면의 온도조절 가능성을 확인하였다[14]. 그러나, 이중 피복 핵연료봉에 온도측정, 핵연료봉 내압 및 핵연료 변형 등의 측정을 위한 계장에 대한 기술 개발은 계속되어야 한다.

2.2 핵연료용 개방형(open basket type) 계장캡슐

조사중 핵연료 온도 측정용 열전대가 설치된 시험 핵연료봉의 고정, 중성자 측정용 SPND 설치 및 계장선 인출과 하나로 OR 조사공과의 interface를 고려한 개방형(open basket type) 계장캡슐의 기본설계는 그림 2와 같다.

2.2.1 핵적해석

개방형 계장캡슐의 설계검증시험을 위한 조사시기를 고려하여 하나로 of 출력 30 MW로 가정하고, 다음과 같은 핵적해석을 수행하였다.

- 핵연료의 선출력 변화
- 농축도 변화에 따른 핵연료 선출력 변화

핵적해석 결과에 따르면, 개방형 계장캡슐의 설계검증에 사용되는 핵연료의 농축도는 2.0w/o, 선출력은 최대 500 W/cm 이하로 하는 것이 적합하다고 나타났다. 그러나, 개방형 계장캡슐 설계검증시험 전에 핵적해석으로 안전성 분석은 수행되어야 한다. 그리고, 이용자 및 조사시험 요구조건에 따라 농축도가 2.0w/o 이상인 핵연료의 경우 중성자 차단막(Hf 등) 사용, 핵연료 위치 조절 등의 초기 선출력을 낮추는 방안에 대해서는 조사공, 조사시기, 조사기간 등을 고려하여 해석을 재수행하여야 한다.

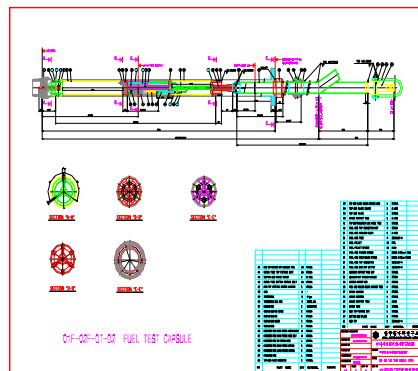


그림 2. Open basket type 계장캡슐 설계도

2.2.2 구조적 · 열적해석

개방형 계장캡슐의 본체 외통, 보호관, 핵연료봉 어셈블리 및 상·하 end plate 등의 형상 및 치수를 하나로 OR 조사공에서의 수력조건($\dot{m}=12.7\text{kg/s}$ 이하, $\Delta P=200\text{kPa}$ 이상)에 양립하도록 결정하였다. 임계좌굴하중은 7.5kN, 최대허용수직 충격하중은 60.5kN, 임계좌굴하중 작용시 최대 수직충격응력은 20.4MPa이었으며, 캡슐에 대한 수평충격하중 하에서의 안전성도 확인하였다. 핵연료봉 피복관의 내·외압 차에 의한 최대응력강도 P_m 은 3.1MPa, 냉각수압에 의한 핵연료봉의 임계좌굴 응력 P_{cr} 은 43.3MPa로서, ASME Boiler & Pressure Vessel Code의 강도평가기준 ($P_m < S_m (=161.05\text{MPa}, 120^\circ\text{C})$, $3P (=1.2 \text{ MPa}) < P_{cr}$)을 만족하였다. 이상의 해석결과를 기초로 개방형 핵연료용 계장캡슐은 하나로 OR 조사공에 장·탈착 시는 물론 조사 시험동안의 구조건전성 평가 기준을 만족함이 확인되었다.

개방형 계장캡슐의 구조에서 피복관 내부에 장입된 소결체는 중성자 환경에서 핵분열반응에 의해 많은 양의 열이 발생되므로, 캡슐 내의 핵연료봉에 대한 온도분포 및 응력을 검토하여 계장캡슐의 조사시험 중 온도 및 건전성을 확인하였다. 온도해석은 핵연료봉의 온도분포에 영향을 미치는 인자들인 소결체의 열전도도, 소결체와

피복관사이 간격(gap)에서의 열전도도, 피복관 외면에서의 열전달계수, 그리고 중성자 조사에 의한 UO_2 의 열전도도 변화, 간격에 채워지는 기체의 온도에 의한 열전도도 변화 및 냉각수의 특성(열전도도, 속도, 밀도, 점도) 등을 고려하여 수행하였다.

HANARO 출력이 30MW이고, 소결체의 농축도가 2.0w/o인 경우, 평균 및 최대 선출력(29.677과 33.557kW/m)에서의 핵연료봉에 대한 온도해석 결과는 표 1과 같다.

표 1. 핵연료봉 전체 및 최고 온도부분의 온도해석 결과

소결체 선출력 (kW/m)	열발생 밀도 (W/m ³)	계산 프로그램	소결체 중심온도 (°C)	소결체 표면온도 (°C)	Cladding 내면 최고 온도	Cladding 내면 최고 온도부분의 Cladding 외면 온도
29.677 (전체평균)	563e6	ANSYS	1227.00	503.18	104.03	63.47
		이론해석	1233.60	501.84	107.78	63.45
33.557 (전체최대)	637e6	ANSYS	1433.00	549.85	112.35	66.58
		이론해석	1428.71	548.10	116.69	66.53

온도해석 결과를 기초로 핵연료봉의 최대 열응력을 검토하여 조사시험 중 핵연료봉의 안전성을 확인하였다. 표 1의 선출력에 따른 핵연료봉 피복관 두께방향으로의 최고온도차($\Delta T=40.56^\circ\text{C}$ 와 45.77°C)에 의한 열응력 P_{et} 는 각각 14.69MPa 및 16.57 MPa로서 ASME Boiler & Pressure Vessel Code의 강도평가기준($P_m + P_{et} < 3S_m$, $S_m=161.05\text{MPa}$, 120°C)을 만족하였다.

2.2.3 모의 계장캡슐 제작

핵연료용 개방형 계장캡슐의 기본설계를 근거로 모의 계장캡슐을 제작하였다. 이때 조사 핵연료봉을 최대 6개(핵연료봉 어셈블리 2 sets)까지 수용할 수 있도록 하였다(그림 3 참조).



그림 3. 핵연료용 모의 계장캡슐 부품 및 조립 사진

2.3 노외시험

개방형 계장캡슐 기본설계를 기초로 모의 계장캡슐 제작을 완료하고, 이에 대한 유량(9, 12.7kg/s) 변화, 그리고 유로면적 변화(핵연료 표면온도 조절을 위한 이중피복관 핵연료봉 설치 시)에 따른 압력강하량 평가로 하나로 조사공과의 양립성을 확인하였으며, 개방형 계장캡슐에 대한 공기 중에서의 진동특성을 확인하였다.

이용자 요구조건인 핵연료 표면온도(600~800℃) 제어를 충족시키기 위하여 이중피복관 모의 핵연료봉을 설계/제작하였으며, 이를 핵연료용 무계장캡슐에 설치하고 피복관 gap 사이에 주입되는 He/Ne 혼합비에 따른 모의 핵연료봉 표면온도변화를 관찰하여 온도제어 가능성을 확인하였다. 그리고, 핵연료용 개방형 모의 계장캡슐에 대한 공기 중에서의 진동특성시험에서 캡슐 하단부의 변위가 크게 나타났다[15]. 이에 따라 이 부분의 설계를 개선하였다. 개방형 계장캡슐 상세설계도, 제작기술시방서, 구매시방서를 작성하였으며, 현재 핵연료용 개방형 계장캡슐이 제작 중에 있다. 계장캡슐의 제작이 완료되면 노외성능시험을 수행하고, 열전대가 설치된 핵연료봉을 조립하여 하나로에서 설계검증시험을 수행할 계획이다. 또한, 계장캡슐 내에 압력 및 변형 측정용 계측기가 설치된 핵연료봉과 LVDT를 고정하기 위하여 계장캡슐의 설계를 개선하고, 노외성능시험으로 설계 타당성을 확인한 후 핵연료 조사시험에 활용할 계획이다.

3. 결 론

핵연료 조사시험 중 핵연료 특성을 측정하여 핵연료의 조사성능을 평가할 수 있도록 하기 위한 계장캡슐의 기본설계, 핵적해석, 기계적 및 열적해석, 노외시험 등을 수행하였다. 이를 통한 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) 핵연료 조사시험 요구사항, 하나로 조사공에서의 요구사항 및 품질요건 등을 검토하여 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 설계 요구서를 작성하였다.

2) 핵연료용 계장캡슐에 대한 핵적해석, 구조적 및 열적해석, 노외시험으로 계장캡슐의 구조적 건전성과 하나로 조사공에서의 양립성을 확인하여 계장캡슐 설계를 위한 기반기술을 확보하였다.

3) 계장캡슐의 설계검증시험을 완료하면 핵연료 조사시험 중 핵연료 온도, 핵연료 봉 내압 및 핵연료 변형 등을 측정할 수 있게 된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행된 조사시험용 캡슐개발 및 활용 과제의 연구결과이다.

참고문헌

- [1] 주기남 외, 원자로압력용기, 노심/중수로압력관 재료의 하나로 계장캡슐 (00M-02K, 00M-03K) 조사시험, 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회
- [2] 주기남 외, Irradiation fo HANARO Instrumental Capsule (00M-01U) for the Researches of Universities, 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회
- [3] 주기남 외, 한국중공업(주)제작 국산 원자로 압력용기 재료의 하나로 계장캡슐(99M-01K.02H)조사시험, 한국원자력학회 2000,추계학술발표회
- [4] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 무게장캡슐 설계개선, KAERI/TR-2160/02, 한국원자력연구소, 2002.
- [5] 김대호 외, Non-instrumented Capsule Design of HANARO Irradiation Test for the High Burn-up Large Grain UO₂ Pellets, 한국원자력학회 2001 추계학술발표회
- [6] 송기찬 외, 제4차 건식 재가공 핵연료 조사시험 계획서, KAERI/TR-2201/02, 한국원자력연구소, 2002.
- [7] 김봉구 외, Development of Non-Instrumented Capsule for Neutron Flux Measurement in HANARO, 한국원자력발표회 1999,춘계학술발표회
- [8] 김봉구 외, Development of Instrumented Test Rod for Nuclear Fuel Irradiation Test in HANARO, 한국재료학회 2001 추계학술발표회
- [9] 손재민 외, LVDT를 이용한 핵연료봉 내부 압력측정을 위한 노의시험, KAERI/TR-1972/01, 한국원자력연구소, 2001.
- [10] 김도식 외, 핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐에 대한 구조 건전성 해석, KAERI/TR-2178/02, 한국원자력연구소, 2002.
- [11] 김도식 외, 핵연료 조사시험용 밀폐형 계장캡슐에 대한 예비구조 건전성 해석, KAERI/TR-2237/02, 한국원자력연구소, 2002.
- [12] 김도식 외, Temperature and Thermal Stress Analysis on the Open Basket Type Instrumented Capsule for Nuclear Fuel Irradiation Test, 한국재료학회 2002 춘계학술발표회
- [13] 강영환 외, Fuel Irradiation Capsule Development Status for Advanced Fuel Development in the HANARO 한국재료학회 2002 춘계학술발표회
- [14] 강영환 외, Out-pile characteristics of basic designed capsule mockup, 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회
- [15] 강영환 외, 하나로 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 진동시험보고서, KAERI/TR-2206/02, 한국원자력연구소, 2002.