

재조사시험을 위한 캡슐 조립 모의장치의 특성연구
A Study for the Development of the Capsule Assembly Machine
for the Re-irradiation Test

강영환(yhkang2@kaeri.re.kr), 김종균, 염기언, 윤기병, 최명환, 김봉구

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내에는 개량 핵연료 개발을 위하여 캡슐을 이용한 다양한 조사시험이 하나에서 진행 중이다. 또한 기존의 시험보다 고연소도까지 핵연료 조사시험을 수행하기 위하여 기존의 캡슐 제작기술과 다른 새로운 개념의 캡슐 조립기술도 개발되고 있다. 본 논문에서는 캡슐 조립장치의 설계요구사항, 또한 이를 기반으로 설계·제작된 모캡(mock-up) 및 특성시험에 대하여 기술하고 있다. 모캡은 캡슐 본체를 안착하기 위한 base plate, stand, guide pipe, clamping device로 구성되었고, 높이가 약 1.8 m, 외경이 1 m, 무게가 136 kg 이다. 또한 특성시험을 통하여 캡슐 및 보호관이 원격 조립이 되기위한 적정 clamping torque 값은 450kgf·cm 로 밝혀졌으며, 하나로 작업수조에서 캡슐본체와 보호관을 원격으로 조립할 수 있음이 확인되었다.

ABSTRACT

A series of in-pile tests are being carried out to support the advanced fuel development programs at the HANARO reactor. There are still some limitations for satisfying the test requirements. To meet the demands for the high burnup test at HANARO, new capsule assembling technology is required. This paper describes the design requirements, design and fabrication of the mockup, and pre-operational tests performed for the development of the new capsule assembly machine. The mockup manufactured consists of a base plate, a capsule stand, a capsule guide pipe and clamping device and is 1m in outer diameter, 1.8m in height and 136kg in weight. From the pre-operation tests, the optimum clamping torque was 450kgf·cm for preventing rotation and shaking of the capsule main body during assembling capsule main body and protection tube, and this remote assembling procedure can be applicable to the high burnup test.

1. 서론

국내에는 원자력 중장기사업으로 진행되고 있는 원자로 재료 및 핵연료 조사시험을 위한 무게장 캡슐과 계장 캡슐이 성공리에 개발되어 산. 학. 연 이용자들에게 1998년부터 공개되어 활용 중에 있다. 하나로에서의 조사시험은 1998년부터 무게장 캡슐을 이용한 조사시험이 진행 중에 있으며[1~5], 2000년부터 보다 정확한 측정 자료를 핵연료 개발자들이 활용할 수 있도록 특수 계장기술 개발이 되었고[6~8], 2003년부터는 장기간 하나로에서 조사시험 할 수 있도록 기존의 설비의 보완, 새로운 재계장 장비 개발, 또한 기존 기술의 한 단계 높이기 위한 노력이 진행 중이다. 그러나 아직까지 재조사 시험기술개발이 되고 있지 않으며 이는 하나로와 조사재 시험시설 간에 조사장치 등을 이송할 수 있는 수로가 없으며, 또한 핫셀(hot cell)의 한정된 사용공간으로 대략 5~6 m 크기의 캡슐을 제작할 수 없고, 아울러 장기 조사시험시 캡슐 사용재료의 조사손상으로 인한 구조재료의 재사용이 어렵다. 이러한 필요에 따라 새로운 개념의 캡슐조립을 할 수 있는 장치개발이 필요하며 주요 목표는 조립장치의 성능과 캡슐부품들을 하나로 수조에서 조립할 수 있는 방안 수립과 가능성을 평가하는데 있다.

본 논문에서는 하나로에서 고연소도까지 혹은 높은 중성자 조사량까지 조사시험을 수행하기 위한 캡슐 조립장치의 설계요구사항, 또한 이를 기반으로 캡슐 조립장치 모캡(mock-up)의 설계·제작과 예비특성시험에 대하여 기술하고 있다.

2. 캡슐 조립장치의 설계 및 모캡 제작

가. 캡슐조립 모의 장치 설계요구사항

연구용 원자로인 하나로에서 장기간의 조사시험을 수행하기 위하여, 재조사 시험기술의 일환으로, 캡슐제작기술 개발이 진행되고 있다. 계장캡슐은 본체와 보호관의 조립을 통하여 제작되며, 현재 고려중인 캡슐 조립절차는 본체에서 노출된 여러 가닥의 전선들을 어떻게 처리하는가에 따라 2 가지를 고려하고 있다. 한 가지 방법은 조사재시험시설의 핫셀 내에서 본체와 연결된 계장선을 라운드로 감아 이송용 캐스크에 넣어 하나로 작업수조로 옮긴 후 조립장치에 넣은 후 본체와 보호관을 특수 공구(tool)를 이용하여 bolting 하여 조립하는 방법과 나사 구조가 없고, 용접이 불필요하고 내진저항성이 큰 특수 조인트(joint)를 이용하여 캡슐본체와 보호관을 연결하는 방법으로 나눌 수 있다.

일본 JMTR과 노르웨이 IFE가 현재 사용하고 있는 재조사를 위한 단위기술[9~11]과 하나로 설계특성을 고려한 캡슐조립 장치 설계 요구사항들은 다음과 같다.

기능적 요구사항(functional requirements)[12~13]으로는 (1) 캡슐의 조립은 M6 핫셀에 설치되는 캡슐 재계장 장비를 이용하여 시험 핵연료봉 및 캡슐 본체에 계장품이 설치된 후 이를 이송용 cask를 이용하여 하나로 작업 수조로 옮겨 캡슐의

조립이 이루어 질 수 있어야 한다. (2) 조립장치는 시험 핵연료 봉이 장착된 캡슐본체의 장착 및 탈착작업이 원격조작으로 연결 및 분리가 용이한 구조이어야 한다. (3) 조립장치 본체를 포함한 모든 장비는 제염작업이 용이한 구조이어야 하며, 원격조작용 공구로 쉽게 조작할 수 있는 구조이어야 한다. (4) 캡슐 조립용 스탠드(stand)는 하나로 작업 수조 내에서 불필요한 공간을 차지하지 않는 크기이며 기기 전체의 중량은 가능한 맨브릿지 크레인(manbridge crane, 용량 1톤)을 사용하여 작업 수조 내에서 작업이 용이하도록 한다. (5) 원자로 수조 밖에 있는 제어장치 패널과 캡슐내부에 설치된 각종 센사들을 이어주는 모든 배선(열전대, SPND, 가스관 등)은 작업 수조 내에서 연결작업이 이루어질 수 있도록 설계, 제작되어야 한다. (6) 캡슐조립은 clamping screw를 이용하여 구동되도록 설계하며, push rod를 이용하여 적합한 위치에 캡슐이 장착되어 jaw가 캡슐조립 작업이 진행되는 동안 흔들리지 않도록 유지하여야 한다.

성능 요구사항(performance requirements)으로는 (1) 캡슐조립 장치는 조사재시험시설에서 제작될 계장캡슐본체와 보호관을 하나로 수조에서 조립하는데 용이한 구조를 가져야 한다. (2) 캡슐조립 모의장치 설계에서 고려 되어야 할 중요 관점은 작업 수조내 타 시설과의 간섭사항, 구조적 건전성 확보를 위한 강도 등을 들 수 있다. (3) 캡슐조립 모의장치에 사용할 재료선정은 작업 중 부식이 되지 않는 재료를 선정하여 제작되어야 한다.

나. 캡슐조립 모의 장치 제작

최종 설계·제작 완료된 캡슐조립 모의장치는 그림 1 과 같다. 장치 구성은 캡슐본체를 장전시 안내해주고 받쳐주는 base plate, capsule stand, guide pipe와 캡슐본체를 원격으로 조립시 움직이지 않도록 하는 clamping device로 구성되어 있다.[13]

Base structure 부분은 base plate와 capsule stand를 포함하는 구조물이다. Base plate는 두께 15mm x 직경 1,000mm의 원 소재를 heavy duty face lathe (SEIBUKOKI, LHS-3616)에 고정시킨 후 외경 및 두께를 가공하였으며, radial drilling machine에서 직경 10mm의 water drain hole 및 캡슐스탠드 하단부 플랜지 조립용 tab hole을 가공하였다. Base structure 부분은 두께 14mm x 직경 980mm 규격의 STS304 base plate, 두께 14mm x 외경 220mm x 내경 139.8mm의 캡슐스탠드 하단부, 외경 139.8mm x 내경 129.8mm x 길이 1,000mm 규격의 파이프로 구성되어 있다. 하나로 수조에서 본 장치 인출시 냉각수가 하부로 유출될 수 있도록 캡슐스탠드 상부플랜지 중앙에는 직경 20mm의 구멍을 가공하였고 bolt circle diameter 110mm 원주상에 M10 tap 6개소를 가공하여 캡슐 가이드 파이프 구조물과 조립이 가능하도록 설계·제작하였다.

캡슐을 하나로 수조에서 원격으로 장입하기 위한 캡슐안내 구조물은 핵연료 캡슐 외경이 58mm인 점을 고려하여 외경 73mm x 내경 59mm x 길이 700mm인 STS

304 seamless 파이프로 설계·제작하였다. 캡슐안내 파이프 상단부에는 clamping device가 설치될 안내 파이프 상부 플랜지(guide pipe top flange)를 용접하여 캡슐안내 구조물을 완성하였다.

캡슐조립 장치의 주요부분인 캡슐 clamping device는 원격 전용 공구를 이용하여 M20 x 2.5p 규격의 control screw를 회전시켜 축 방향으로 작용하는 힘이 push rod로 전달되어 반경방향으로 전환되도록 제작하였다. Push rod에 폭 3.5mm x 길이 18mm의 key groove를 가공하고 push rod guide에 M3 set screw를 체결하여 push rod와 push rod guide가 하나로 수조에서 이탈되지 않도록 설계·제작하였다.

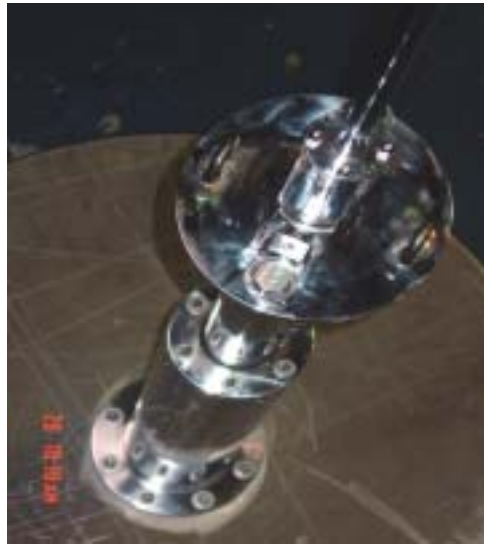


그림 1. 캡슐조립용 모의장치

캡슐 본체는 캡슐 조립장치의 성능시험을 위하여 핵연료 캡슐의 규격으로 직경 58mm x 길이 886mm로 모형을 설계·제작하였다. 캡슐본체 상단부 플랜지에는 보호관의 원격조립이 용이하도록 테이퍼 가공된 안내 핀(pin) 2개를 설치하였다. 또한 보호관과 캡슐본체의 조립은 M8 bolt 4개를 원격으로 조립하는 방식으로 보호관 플랜지 하단부 4mm에 M8 tap을 가공 후 직경 8.5mm 구멍을 가공하여 M8 볼트를 체결하므로써 하나로 수조의 원격조립·해체 작업도중 장치에서 이탈되지 않도록 설계·제작하였다.

Control screw 체결·해체용 원격공구는 육각 socket 방식으로 설계·제작하였다. 원격공구는 control screw의 육각형 대변의 길이가 25mm로 설계·제작되어 있으므로 내경 대변 길이가 25.5mm인 hexagonal socket을 방전 가공하였다. 원격공구는 socket을 외경 34mm x 두께 3mm 규격의 STS 304 pipe의 하단부에 TIG 용접하고 상단부에는 handle을 부착하여 제작하였다. 또한 Locking bolt 체결·해체용 원격공구도 동일개념으로 설계·제작하였는데 내경 대변 길이가 10.2mm인 hexagonal socket에 외경 21.7mm x 두께 3.7mm규격의 STS pipe를 TIG 용접하여 제작하였다.

3. 캡슐 조립장치의 제작검사 및 시험

캡슐조립 모의 장치 제작검사는 크게 외관검사, 치수검사, 및 중량검사를 하였으며 도면에 따른 검사 결과 잘 만들어졌음이 확인되었다. 캡슐조립 모의 장치 시험은 캡슐 플랜지(flange)와 계장선들이 통과하는 플랜지 사이에는 밀폐용 개스켓(gasket)을 설치하는 것을 검토하기 위하여 이에 대한 누설시험을 그림 2에서와 같은 장치를 이용하여 수중에서 2차에 걸쳐서 수행하였다. 아울러 캡슐 안내 파이프 내에 삽입되는 캡슐 및 보호관이 원격 조립시 회전, 유동을 방지하기 위하여 clamping device 에 장착되어 있는 clamping jaw로 완벽하게 고정하여야 하는데 이때에 캡슐본체의 변형 및 손상방지를 위한 clamping torque test를 수행하였다.

누설시험(leak test)은 자체에서 제작한 개스켓과 특수 메탈 개스켓 전문 업체인 “SC·개스켓”으로부터 구입한 double jacket type(jacket : 알루미늄 A1050 /fil: non- asbestos)(그림 3, 4 참조)을 장착하여 시험을 하였다. 누설시험(leak test)은 수중 bubble test 방법으로 시험용 chamber 내부에 5 bar의 공기압을 걸어, 금속 개스켓을 장착한 후 플랜지 틈새에 미세한 공기방울의 발생여부를 정밀 관측하는 방법을 택하였다. 170kgf·cm의 clamping torque로부터 시작하여 190kgf·cm 까지 3단계로 구분하여 매 시간마다 3회에 걸쳐 시험한 결과 표 1과 같이 190kgf·cm의 clamping torque 에서 미세한 공기방울(bubble)이 발생하지 않았다.

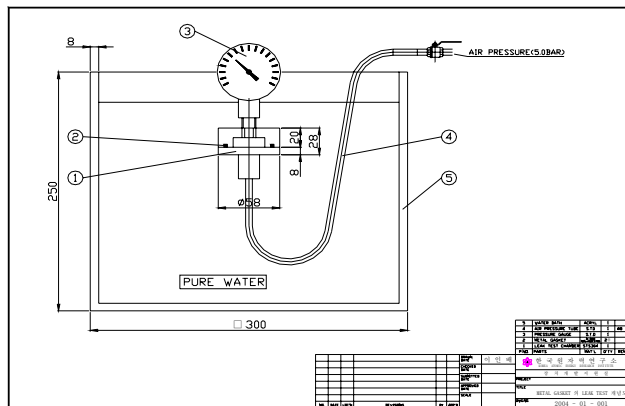


그림 2. Metal Gasket 의 leak test 개념도

이상과 같은 제 1, 2 차 누설시험(leak test)에서 얻은 결론은 자체 제작한 알루미늄 개스켓 및 전문 업체에서 구입한 double jacket type 2종을 같은 방법과 조건 하에서 3개의 개스켓을 반복, 교체하여 clamping torque(170, 180, 190kgf·cm)를 3 단계로 증가시키면서 3회에 걸쳐서 시험한 결과, 1, 2차 누설시험 공히 clamping torque 값이 190kgf·cm 에서 미세한 공기방울이 전혀 발생하지 않았다.

그러나 조사 캡슐은 수중에서 장시간 동안 조사하여야 하는 특성으로 인하여 금속 개스켓 보다는 금속 피복 개스켓(double jacketed gasket)이 압축-복원성이 우수하고 장시간에 따른 밀폐효과가 크므로, double jacketed gasket 으로 채택·장착

하여야 하고, 또한 적정 clamping torque는 안전성을 고려하여 190kgf·cm 로 체결해야한다. 그러나 앞으로 누출시험결과 외에 개스켓의 기계적 특성 등을 고려한 상세 분석이 이루어져 보다 정확한 설계 자료를 얻어야 한다.

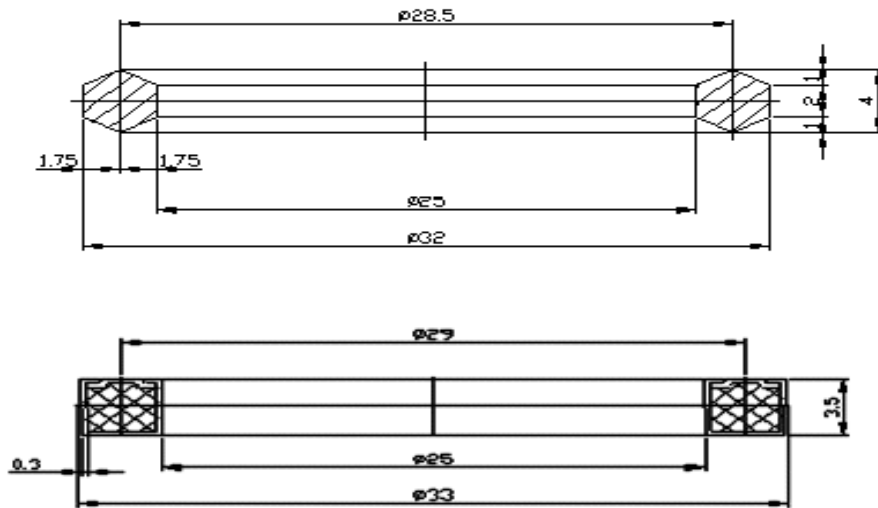


그림 3. 누출시험전 Metal gasket(A1050) 및 Double jacketed gasket(A1050/non-asbestos)단면



그림 4. 누설시험용 피복개스켓 및 관련부품

캡슐 안내 파이프 내에 삽입되는 캡슐 및 보호관은 원격 조립시 회전, 유동을 방지하기 위하여 clamping device 에 장착되어 있는 clamping jaw로 완벽하게 고정하여야 하는데, 이때에 캡슐 본체의 변형 및 손상방지를 위하여서는 최적의 clamping torque 값으로 고정되어야 한다. Clamping device unit에는 clamping jaw 와 taper 형태로 특수 제작된 2개의 조절용 bolt(M20 x P2.5)로 구성되어 있으며, 이 조절용 bolt를 원격조립 공구 손잡이에 torque wrench (KANTON-900QLK)를 장착하여 단계별로 clamping torque 시험을 한 결과는 표 2 와 같다.

표 1. Double jacketed gasket의 누출 시험결과

D/J 개스켓 (회수/Ea)	Leak Test (단계)	Clamping Torque (kgf-cm)	Bubble Test 결과	비 고
1회	1단계	170	Reject	
	2단계	180	Reject	
	3단계	190	Accept	권장
2회	1단계	170	Reject	
	2단계	180	Accept	
	3단계	190	Accept	권장
3회	1단계	170	Reject	
	2단계	180	Accept	
	3단계	190	Accept	권장

표 2. Capsule main body의 clamping test data

Clamp test		Clamping torque (kgf-cm)	Clamping 후 유동시험 결과	비 고
(회수별)	(단계별)			
1회	1단계	300	Reject	
	2단계	400	Reject	
	3단계	450	Accept	권장
2회	1단계	350	Reject	
	2단계	400	Reject	
	3단계	450	Accept	권장
3회	1단계	400	Reject	
	2단계	430	Reject	
	3단계	450	Accept	권장

이상과 같이 clamping torque를 3단계로 증가시키면서 3회에 걸쳐서 시험한 결과, 안전성을 고려한 적정 clamping torque 값은 450kgf·cm 로 체결해야한다는 결과를 얻었다.

4. 결론 및 향후계획

하나로에서 고연소도까지 조사시험을 수행하기위한 캡슐조립장치의 사용조건 및 설계요구사항이 도출되었다. 또한 이를 기반으로 캡슐 조립 모의 장치의 설계·제작이 이루어졌다. 모의장치는 캡슐본체를 안착하기 위한 base plate, capsule stand, guide pipe로 구성되었고, 제작된 모캡은 높이가 약 1.8 m, 외경이 1 m, 무게가 136 kg 정도이며, 구조재료를 포함한 모든 재료는 스테인레스 강을 사용하여 제작하였다. 기초성능 실험 수행으로 하나로 작업수조에서 캡슐본체와 보호관을 원격으로 조립할 수 있음이 확인되었다.

앞으로 하나로 캡슐조립 모의 장치를 이용하여 하나로 작업 수조에서의 캡슐을 조립하는데 사용상 예상되는 문제점들을 검토 분석하고, 설계개선점들을 정리하고, 향후 하나로에서 사용할 장치 설계에 필요한 자료들을 얻는 일이 진행된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. I.H. JUNG, et al., Characterization of Irradiated Simulated DUPIC Fuel, Metals and Materials International, Vol.7, No.5, pp513-518, 2001
2. K.H. KIM, et al., A Study on the In-reactor Behavior of Centrifugally Atomized U3Si Dispersion Fuel Irradiated up to High Burn-up under Normal Power Condition, Proc. of the KNS Spring Mtg., Cheju, Korea, May 2001
3. D.H. KIM, et al., Non-instrumented Capsule Design of HANARO Irradiation Test for the High Burn-up Large Grain UO₂ pellet, Proc. of the KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea, Oct. 20
4. B.G. KIM, et al., Capsule Development for the Fuel Irradiation Test in HANARO, Proc. of the 6th ASRR Mtg., Tokai, Japan, April 1999.
5. B.G. KIM, et al., Capsule Development for an Irradiation Test of the Nuclear Fuel in HANARO, Proc. of KNS Spring Mtg., Korea, May 2000
6. Y.H. KANG, et al., Fuel Irradiation Experiments for an Advanced PWR Fuel Development in the HANARO, 2002 Fuel Safety Research Specialist' Meeting, Tokai Japan (2002)
7. Y.H. Kang, et al., Temperature Controllable Capsule Development for an Advanced Fuel Development, Proc. Kor. Mat. Sci. Soc., Autumn 2001
8. Y.H. Kang, et al., Advanced Fuel Irradiation Experiments in the HANARO, The American Nuclear Energy Symposium, Miami, USA(2002)
9. M. Shimizu, et al., Re-instrumentation Technique of Pressure Gauge for Irradiated Fuel Rod, JMTR Project, JAPAN.
10. M. Shimizu, et al., Development of Re-instrumentation Devices, JMTR Project, JAPAN.
11. K. Ohsima and Y. Komori, Private Communication
12. 김종균 외 3인 , 캡슐조립 모의장치 기술시방서, HAN-IC-DD-SP-03-004(2003).
13. 강영환 외 3인, 캡슐조립 모의장치 설계·제작 보고서, KAERI/TR-2693/2004.