

‘01 춘계 학술 발표회 논문집

한국원자력학회

하나로용 조사 크립 캡슐의 구조적 건정성과 성능 평가
Structural Integrity and Performance Tests
of In-pile Creep Capsule for HANARO

최 용*, 김봉구, 강영환

선문대학교*

충남 아산시 탕정면 갈산리

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 내에서 지르코늄 합금의 조사 크립시험을 수행하기 위한 조사 크립 시험용 크립 캡슐을 설계·제작하고 부품별 조립 공정과 성능시험을 수행하였다. 크립 캡슐은 하나로에 적합하도록 직경과 길이가 각각 55x700mm이었다. 벨로우즈에 의한 하중 부과 장치가 설치된 압력용기, 시편, 이음쇠, 그립, 원형 받열체, 이음쇠와 밀대, 베어링이 설치된 본체 용기와 선형변위차등변압기, 분리기 및 스톱퍼가 장착된 상부 용기로 구성되어 있다. 각각의 용기는 최종적으로 용접공정과 마무리 공정으로 완성되었으며 밀폐·분리되어 있어서 조립작업에서 시편의 배치가 유리하게 하였으며 동시에 해체 작업에서 안정성을 강화하였다. 지르코늄 피복관을 이용한 캡슐 안에서의 시편의 온도 측정과 하중에 따른 하중에 따른 크립 변형량을 측정하여 지르코늄 캡슐의 건정성을 확인하였다.

Abstract

An in-pile creep capsule of zirconium alloys for HANARO was designed and manufactured, which performance tests of its parts were carried. The in-pile creep capsule has the dimension of 55 mm in diameter and 700 mm in length for HANARO, respectively. The capsule has three isolated chambers such as a pressure chamber, a main chamber and connector chamber. The pressure chamber contains bellows which rides a loading to a specimen by external pressure. The main chamber contains a specimen, grips, yoke, a push rod, a round heater and a bearing. The connector chamber contains a LVDT, a stopper and separators. Each chamber was assembled by welding and final size controlling processes. These processes had advantages of improvements in alignment during assembling and safety during disassembling. Temperature monitoring and strain measurement of Zircaloy-4 cladding tubing by using this capsule resulted in confirm the structural integrity of the capsule.

1. 서론

원자로용 핵연료 피복관은 사용중에 조사크립(irradiation creep)에 의하여 열화(degradation)되는 문제점이 있기 때문에 조사크립기구(irradiation creep mechanism)를 규명하기 위한 연구가 원자력 선진국에서는 많이 수행되어 왔다.[1, 2] 조사 크립시험을 수행하기 위하여서는 조사 크립시험용 캡슐을 우선 설계·제작하여야 한다. 조사 크립시험용 캡슐은 시험 방법에 따라서 다양하모양과 계측장치를 부착하고 있다. 조사 크립시험용 캡슐은 DIDO와 PLUTO 시험용 원자로에서 사용한 지르코늄 합금의 단일축 조사 크립시험 장치에서는 유압기체계를 사용하여 변형량을 측정하였으며 JMTR(Japan Materials Testing Reactor, 50MW)의 시험로에서는 밀폐형의 무게장 방식, 헬륨(He)기체를 사용한 가압 방식 및 벨로우즈(bellows)를 이용한 기계적 하중전달 방식에 대한 조사 크립장치가 자체 개발되어 사용되고 있으나 국내 다목적 시험로인 하나로(HANARO)에 적합한 조사 크립시험 장치에 직접 적용하기에는 구조적으로 문제점이 있다. 조사 크립시험을 수행하기 위한 캡슐의 소재는 시편 자체의 크립 변형량 외에도 크립이나 하중을 가하는 부품의 조사 변형이 전체 측정치에 많은 오차를 주기 때문에 장치가 단순하여야 하며 조사크립 변형되는 량이 일정하고 시편과 비교하여 작아야 한다.[2] 이와 같은 문제점을 고려하여 하중을 가해주는 부분은 주로 벨로우즈를 사용하고 있으며 구조적으로 수로(channel)에 탑재한 장치와 하중을 직접 전달하는 움직이는 축(active draw)과 수동축(passive draw)으로 구성되어 있는 장치 등이 개발되어 있다. [3, 4] 국내에서는 연구로용 원자로인 하나로(HANARO)에서 재료시험용 계장캡슐의 조사시험이 1998년 5월에 설계검증을 위한 조사시험이 성공리에 수행되었으며 계장캡슐을 이용한 재료조사시험들이 본격적으로 수행되고 있다.[5] 국내에서의 지르코늄합금의 조사시험 연구는 1985년 KAREI/KWU 공동연구의 일환으로 독일 GKN 발전소의 정상 가동된 핵연료봉의 조사 크립 변형량의 측정과 분석은 수행된 적은 있으나[6], 조사 크립시험 장치를 설계 제작하기 위한 연구는 수행되어 있지 않다. 한편 Y. Choi 등은 국내 시험로인 하나로(HANARO)에 적합한 노내조사 크립시험 장치(in-pile creep test machine)의 개념적 설계와 부품별 성능시험 수치해석을 통하여 수행하였다.[6] 이 노내시험장치는 크게 시편지지부위, 하중전달부위, 변형량 측정 부위, 제어부위로 구성되어 있으며 응력부가 장치는 316L 스테인레스 강의 벨로우즈(bellows)를 사용하여 헬륨 가스압으로 전달하게 구성되어 있다. 수치해석에 의하여 300℃, 3 watt/g의 감마 가열속도(gamma heating rate), 5×10^{20} n/cm²의 중성자 조사량 및 200 MPa의 응력부가 조건에 대하여 이음쇠와 그립의 건전성이 확인되었으며 조사 크립시험을 수행할 수 있는 장치를 제작하기 위한 기초 자료를 확보하였으나 구체적인 제작 방안의 연구는 아직 수행되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 하나로에서 원자로 소재의 조사 크립시험 장치를 제작하기 위하여 지르코늄 합금의 조사 크립 캡슐을 설계·제작하고 각각의 부품의 안정성과 구조적 건정성을 평가하는데 있다. 이를 통하여 원자로 소재의 조사 시험을 위한 조사 크립 캡슐 개발에 필요한 기반 자료를 제공하고 조사 크립시험 장치의 제조기술을 확보하고 하나로에 적합한 조사 크립시험 캡슐의 완전한 국산화를 이룩하고자 하였다.

2. 실험방법

조사 크립시험용 캡슐은 mockup의 설계와 제작 경험을 바탕으로 기본 구조는 하중부과장치, 시편지지부위와 변형량을 측정하는 부위로 구성되어 있으며 작동 원리는 하중부과장치는 벨로

우즈를 사용하여 가스압에 의하여 수축되며 이것이 고정쇠(yoke)를 통하여 시편에 전달되도록 구성되어 있다. Mockup과의 기본적인 차이점은 조립공정중에 시편의 배치와 해체 작업중에 안정상을 고려하여 압력 용기(pressure chamber), 본체 용기(main chamber) 및 연결 용기(connector chamber)의 세 개의 고립된 용기로 제작하여 조립하는 방법이 고안되었다. 압력 용기는 외부 가스 압력에 의하여 벨로우즈가 수축하여 시편에 하중이 부과되도록 고안되었으며 본체 용기에는 시편, 이음쇠, 그립, 원형 발열체, 이음쇠와 밀대, 베어링이 설치되었고 상부 연결용기는 선형변위차등변압기, 분리기 및 스톱퍼가 장착되었다. 각각의 용기는 최종적으로 용접공정과 마무리 공정으로 완성되었으며 하나로에 적합하도록 직경과 길이가 각각 55x700mm 이었다. 조립 공정에서 각각의 부품의 작동시험이 검사된 후 조립되었다. 시편은 본체 용기를 조립하는 과정에서 Zircaloy-4 피복관을 표준 인장시편 모양으로 가공하여 장착하고 크립 캡슐이 조립된 후에 온도 측정과 크립 변형량 측정을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

하나로의 조사 크립시험용 캡슐의 제원과 제조 방법은 원자력 선진국에서 사용중인 지르코늄 합금의 조사크립 시험 장치를 비교하여 얻은 개념 설계와 mockup 제작에서 습득한 기술을 바탕으로 결정되었다. 그림 1은 조사 크립시험용 캡슐의 개념도이다. 캡슐은 크게 압력부과 용기, 본체 용기와 연결 용기로 구성되어 있다. 압력부과 용기는 고압의 헬륨(He)기체가 압력용기(pressure chamber)내에 설치된 벨로우즈(bellows)를 축소시켜서 이음쇠(yoke)를 이동시키도록 고안되어 있다. 기체의 압력은 고압 컴프레서(compressor)와 압력계(pressure regulator)를 사용하여 조절되도록 고안되었다. 본체 용기는 시편이 장착되는 곳으로써 압력용기로부터 전달된 하중이 전달축(pull load)들 통하여 그립(grip)에 연결된 시편(specimen)에 하중을 전달하도록 설계되어 있다. 변형량 측정 부위는 시편이 크립 변형함에 따라서 늘어난 변위를 상부 이음쇠(upper yoke) 상단에 연결된 전달축(push rod)을 통하여 연결 용기에 장착된 선형전위차등변압기에 전달되고 이것의 전기적 신호를 정량화하여 시편의 변위를 측정할 수 있도록 고안되었다. 각각의 축의 위치는 내부에 흑연의 o-링이 장착된 베어링으로써 받쳐 있다. 연결 용기에는 선형변위 차동계가 장착되어 있으며 시편의 파소에 따른 충격을 완화하기 위하여 스톱퍼(stopper)와 압력관, 열전대, 전선 등의 분리를 위한 분리기가 장착되었다. 대부분의 소재는 중성자 조사 조건과 고온 내식성을 고려하여 304L 스테인레스 강을 사용하여 제작하였으며 발열체는 탄화규소를 사용하였다.

그림 2는 제작된 캡슐과 온도 및 압력 측정용 장치의 사진이다. 각각의 부품은 정밀가공에 의하여 제작되었으며 하중부과 용기, 본체용기 및 연결 용기는 조립 후에 용접공정으로 완성되었다. Zircaloy-4 시편은 본체 용기 내에 조립 공정 중에 그립과 핀에 의하여 상·하부 그립에 고정되었으며 핀의 크기는 개념설계에서 응력해석을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 직경 6mm의 핀으로 하였다. 그림 3은 제작된 캡슐을 사용하여 Zircaloy-4 피복관을 가공하여 제작된 시편의 전형적인 응력-변형량 곡선이다. 여기서 시험의 경제성을 고려하여 하중은 알곤 가스압을 사용하였으며 가스압에 따른 시편의 변형량을 측정하는 것이다. 시험 중의 온도는 $300 \pm$

0.5 °C로 일정하게 유지되었다. 캡슐에서 측정된 값의 정확도를 검토하기 위하여 Zircaloy-4 피복관의 표준 인장시험기를 사용하여 응력-변형률 곡선을 구하여 비교하였다. 소재의 항복강도와 최대인장강도는 변형속도에 의존하는 현상을 고려한다면 본 연구에서 제작된 캡슐에서 얻은 응력-변형률 값은 비교적 유사한 값으로 관찰되었다. 이상으로부터 하나로용 조사 크립시험 장치의 개념설계를 통하여 제작된 조사 크립시험용 캡슐의 건전성이 확인되었다.

4. 결론

국내 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용하여 지르코늄 합금의 조사 크립시험을 수행하기 위한 노내조사 크립시험 캡슐(in-pile creep capsule)을 제작하고 구조적 건전성 시험을 수행하였다. 크립 캡슐의 크기는 하나로에 적합하도록 직경과 길이가 각각 55x700mm이었으며 구조적으로 벨로우즈에 의한 하중 부과 장치가 설치된 압력용기, 시편, 이음쇠, 그립, 원형 발열체, 이음쇠와 밀대, 베어링이 설치된 본체 용기와 선형변위차등변압기, 분리기 및 스토퍼가 장착된 상부 용기로 구성되어 있다. 각각의 용기는 최종적으로 용접공정과 마무리 공정으로 완성되었으며 밀폐·분리되어 있어서 조립작업에서 시편의 배치가 유리하게 하였으며 동시에 해체 작업에서 안정성을 강화하였다. 제작된 캡슐의 구조적 건전성 시험은 지르코늄합금 피복관을 가공하여 제작된 시편을 300°C에서 외부 가스압에 의하여 크립 변형시키고 시험중에 측정된 온도 변화와 응력-변형률 곡선의 측정으로 수행되었다. 이상으로부터 하나로용 조사 크립시험 장치의 개념설계를 통하여 제작된 조사 크립시험용 캡슐의 건전성이 확인하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

6. 참고문헌

- [1] Y. Choi, B. Frichting and H. Gazaroli, "Evaluation of Irradiation Clad Creep", B21/87/2 070 R&D 924287, Erlangen, Germany, 1987.
- [2] F. Scott, "The Dounreay First-reactor Uniaxial Creep-Measuring Machine", Journal of Nuclear Materials, vol. 65 pp. 313-328, 1977.
- [3] JMTR Irradiation Handbook, 1995.
- [4] Massaki Yokai, Toshin Kogyo Co. unpublished paper, 1999.
- [5] Y. H. Kang et al., "Capsule Development and Utilization for Material Irradiation Tests", KAERI/RR-2038/99.
- [6] Y. Choi, B. G. Kim and Y. H. Kang, "Manufacturing and Performance Tests of In-pile Creep Measuring Machine of Zirconium Alloy", Proceedings of the Korean Nuclear Society spring meeting, May 1999.

Table 1. Characteristics of zirconium creep capsule

parts	pressure chamber, main chamber, connector chamber
materials	SUS 304, graphite, silicon carbide
dimension	O.D 55x700 mm
max. extension	20 mm
operating temp.	<400°C
electricity	220V 1Phi
compressor power	1.5 KW
compressor speed	1750 rpm
remarks	auto on/off with sub-tank

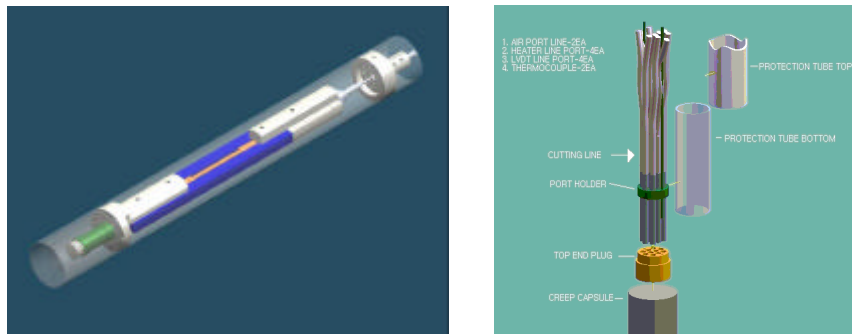


Fig. 1. Schematic view of in-pile creep capsule



Fig. 2. Photo of in-pile creep capsule and controller

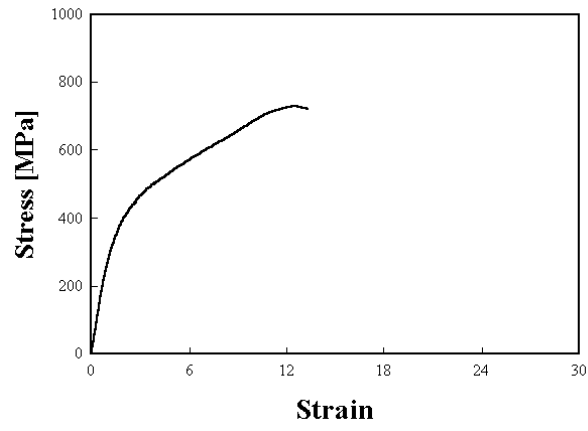


Fig. 3. Typical stress-strain curve obtained by a creep capsule