'00춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

지르코늄 합금의 조사 크립 시험장치의 제작 및 성능 평가

Manufacturing and Performance Tests of In-pile Creep Measuring Machine of Zirconium Alloys

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 크립시험장치의 목합(mock-up)을 설계·제작하고 부품별 성능시험을 수행하였다. 목합은 하나로에 적합하도록 직경과 길이가 각각 55x700mm이었다. 하중은 가스압에 의하여 벨로우즈(bellows)를 균일하게 수축시켰고 回자형 이음쇠(yoke)와 그립(grip)을 통하여 시편에 전달되었다. 그립에 설치된 시편의 변형량은 이은쇠와 밀대(push rod) 및 환형 베어링을 통하여 선형변위차등변압기에 정확하게 전달되었다. 하중에 따른 시편의 변위는 선형변위차등변압기(Linear Voltage Differential Transformer, LVDT)와 압력계를 사용하여 측정하였다. 이를 통하여 직경 3mm의 인장 시편의 하중-변위 곡선을 얻었다.

Abstract

A mock-up of the in-pile creep test machine of zirconium alloys for HANARO was designed and manufactured, which performance tests were carried. The dimension of the in-pile creep machine is 55 mm in diameter and 700 mm in length for HANARO, respectively. Load is transferred to specimen by through the working mechanisms in which the contraction of bellows by gas pressure moves a yoke and an upper grip connected to a specimen, simultaneously. It was observed that the extension of the specimen mounted in grips was transferred to a linear voltage differential transformer perfectly by a yoke and a push rod in a bearing. The displacement of specimen with applied pressure was determined with the LVDT and a pressure gauge, respectively. Resultant stress-strain behaviors of the specimen was determined by the displacement-applied gas pressure curve, which showed similar values obtained with a standard tensile test machine.

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.[1-4] 조사크립시험을 수행하기 위하여서는 조사크립시험용 캡슐을 우선 설계·제작하여야 한다. 조사크립시험용 캡슐은 시험 방법에 따라서 다양하모양과 계측장치를 부착하고 있다. 1966년 Harwell에 있는 DIDO와 PLUTO 시험용 원자로에서 사용한 지르코늄 합금의 단일축 조사크립시험 장치에서는 유압기체계기를 사용하여 변형량을 측정하였다.[1] 유압기체계기는 조사량에 영향을 받지 않기 때문에 조사되는 시편의 모든 위치에서 크립 변형량을 측정할 수 있는 장점이 있으나 전체 크립 변형량이 수% 이상의 큰 범위에서는 신뢰성 낮은 단점이 있다. 조사크립시험 중의 하중을 변화시키면서 변형량을 직접 측정하는 선형이동측정기(linear-motion-probe unit)는 1977년에 개발되었는데 시편의 재충전이 가능하며 400 750℃, 40 900N의 축하중에서 판상 시편의 조사크립거동을 측정할 수 있었다. 원통형 시편의 조사크립시험 장치는 프랑스에서 1976년 개발되었다. 고압의 기체를 사용하며 시편에 하중을 가하면서 250 700℃ 구역에서 크립 변형량을 측정하였다. Wood 등은 JMTR(Japan Materials Testing Reactor, 50MW)의 시험로에서는 밀폐형의 무계기 방식, 헬륨(He)기체를 사용한 가압 방식 및 벨로우즈(bellows)를 이용한 기계적 하중전달 방식에 대한 조사 크립장치가 자체 개발되어 비교 검토하였다. 이중 조사크립 변형량을 측정하는데 가장 중요한 변수는 조사되는 부위의 소재가 시험중에 가능한 조사크립 변형되는 량이 일정하여야 하며, 시편에 비하여 작게 설계 제작되어야 하는 점이다. 조사크립 시험의 결과는 측정된 값이 시편 자체의 크립 변형량외에도 그립(grip)이나 하중을 가하는 부위가 조사에 의한 변형이 발생하여 전체 측정치에 많은 오차를 주고 있다고 보고하였다.[2] 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 하중을 가해주는 부분을 모터와 기어(gear)에 의하여 기계적으로 작동하는 장치와 벨로우즈를 사용하여 시편과 하중을 가해주는 부위를 비교적 멀리 설치한 장치와 수로형 크립 시험 장치(in-channel type irradiation creep tester)가 개발되어 있다.[3] 수로(channel)에 탑재한 장치는 하중을 전달하는 전달 장치의 길이/직경의 비가 3,000/70이며 하중을 직접 전달하는 움직이는 축(active draw)과 수동축(passive draw)으로 구성되어 있다. Sigma-26의 조사 크립 장치는 인장하중을 압축하중으로 변환시키는 특수한 그립(grip)을 설계 제작하여 인장시험 장치를 활용한 압축시험 장치를 사용하고 있다.[5] 국내에서는 연구로용 원자로인 하나로(HANARO)에서 재료시험용 계장캡슐의 조사시험이 1998년 5월에 설계검증을 위한 조사시험이 성공리에 수행되었으며 계장캡슐을 이용한 재료조사시험들이 본격적으로 수행되고 있다.[6-8]

국내에서의 지르코늄합금의 조사시험 연구는 1985년 KAREI/KWU 공동연구의 일환으로 독일 GKN 발전소의 정상 가동된 핵연료봉의 조사 크립 변형량의 측정과 분석은 수행된 적은 있으나[9], 조사 크립시험장치를 설계 제작하기 위한 연구는 수행되어 있지 않다. 한편 Y. Choi 등은 국내 시험로인 하나로(HANARO)에 적합한 노내 조사크립시험 장치(in-pile creep test machine)의 개념적 설계와 부품별 성능시험 수치해석을 통하여 수행하였다.[10] 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), $5x10^{20}$ n/cm^2의 중성자 조사량 및 200 MPa의 응력부가 조건에 대하여 이음쇠와 그립의 건전성이 확인되었으며 조사크립시험을 수행할 수 있는 장치를 제작하기 위한 기초 자료를 확보하

였으나 구체적인 제작 방안의 연구는 아직 수행되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 하나로에서 원자로 소재의 조사 크립시험 장치를 제작하기 위한 기본 단계로써 앞서 수행한 지르코늄 합금의 조사 크립시험장치의 개념적 설계를 바탕으로 조사크립시험장치의 목합(mock-up)을 제작하고 부품별 성능을 분석하는데 있다. 이를 통하여 원자로 소재의 조사 시험을 위한 캡슐 개발에 필요한 기반 자료를 제공하고 조사크립시험 장치의 제조기술을 확보하고 하나로에 적합한 조사크립시험장치의 완전한 국산화를 이룩하고자 한다.

2. 실험방법

국내 연구로용 원자로인 하나로(HANARO)를 사용하여 수행될 지르코늄 합금의 노내 조사크립 시험장치를 설계·제작하기 위하여 조사크립시험용 목합(mock-up)을 설계·제작하였다. 목합은 개념 설계 결과를 바탕으로 하중부과장치, 시편지지부위와 변형량을 측정하는 부위로 구성되어 있다. 하중부과장치는 벨로우즈를 사용하여 가스압에 의하여 수축되며 이것이 고정쇠(yoke)를 통하여 시편에 전달되도록 구성되어 있다. 시편지지부위는 상·하부 그립(grip)으로 구성되며 시편은 핀으로 고정시켰다. 변형량은 선형변위차등변압기(Linear Voltage Differential Transformer, LVDT)와 압력계를 사용하여 측정하였다. 각각의 부품은 304L 스테인레스강을 사용하여 정밀 가공을 통하여 제작되었다. 제작된 목합의 각각의 부품의 작동시험이 검사된 후 조립되었다. 조립된 목합은 하나로에서의 조사크립시험 조건을 고려하여 직경 3mm의 봉상 표준 인장시편을 장착하고 노외 성능시험이 수행되었다. 노외 성능시험은 알곤가스압에 따른 변형량을 측정하고 이를 이용하여 응력-변형율 곡선을 었었다. 동시에 표준 인장시험기를 사용하여 얻은 응력-변형율 곡선을 비교함으로써 자료의 정확도를 비교하였다.

3. 결과및 고찰

하나로에서 조사시험에 사용되고 있는 캡슐의 제원과 원자력 선진국에서 사용중인 지르코늄 합금의 조사크립 시험 장치를 비교하여 얻은 개념 설계를 바탕으로 조사크립시험용 목합을 설계 제작하였다. 표 1은 제작된 조사크립시험용 목합의 제원이다. 그림 1은 조사크립시험용 목합이다. 이 장치는 크게 시편지지부위, 하중전달부위, 변형량 측정부위로 구성되어 있다. 하중전달부위는 고압의 헬륨(He)기체가 압력용기(pressure chamber)내에 설치된 벨로우즈(bellows)를 축소시켜서 이음쇠(yoke)를 이동시키고 전달축(pull load)들 통하여 그립(grip)에 연결된 시편(specimen)에 하중을 전달하도록 설계되어 잇다. 기체의 압력은 고압 컴프레셔(compressor)와 압력계(pressure regulator)를 사용하여 조절되도록 고안되었다. 변형량 측정 부위는 시편이 크립 변형함에 따라서 늘어난 변위를 상부 이음쇠(upper yoke) 상단에 연결된 전달축(push rod)을 통하여 선형전위차등변압기에 전달되고 이것의 전기적 신호를 정량화하여 시편의 변위를 측정할 수 있도록 고안되었다. 지르코늄 합금의 노내 크립 시험장치의 부품들은 노내에서 사용되므로 중성자 조사 조건과 고온 부식에 저항성이 있는 소재로서 304L 스테인레스 강을 사용하여 제작하였다.

그림 2는 제작된 목합의 부품의 조립전의 사진이다. 각각의 부품은 정밀가공에 의하여 제작

되었다. 특히 벨로우즈를 장착한 압력된과 가스유입관은 베리륨 용접에 의하여 고압의 가스가 누출되지 않도록 제작하였다. Zircaloy-4 시편은 그립과 핀에 의하여 상·하부 그립에 고정되었다. 핀의 크기는 개념설계에서 응력해석을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 직경 6mm의 핀으로 하였다.[10] 그림 3은 제작된 목합을 사용하여 얻은 하중-변형량 곡선이다. 여기서 시험의 경제성을 고려하여 하중은 알곤가스압을 사용하였으며 가스압에 따른 시편의 변형량을 측정한 것이다. 그림 3에서와 같이 전형적인 하중-변형량 곡선을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 목합에서 측정된 값의 정확도를 검토하기 위하여 표준 인장시험기를 사용하여 응력-변형율 곡선을 구하여 비교하였다. 실제로 소재의 항복강도와 최대인장강도는 변형속도에 의존하다. 벨로우즈를 사용하여 인장시키는 경우에는 하중을 가스압에 의하여 부과하므로 변형속도조절 방식(cross head speed control method)의 인장시험장치보다는 하중조절방식(load control method)의 인장시험 장치를 사용하여 측정한 값과 비교하는 것이 유리하다. 그림3은 목합에서 얻은 하중-변형량곡선이다. 이를 이용하여 얻은 최대 인장강도는 93.8 kgf/mm^2 이며 이 값은 표준 인장시험기를 사용하여 얻은 97.9 kgf/mm^{2}값과 유사한 값을 보였다. 이상으로부터 하나로용 조사크립시험 장치의 개념설계를 통하여 제작된 조사크립시험용 목합(mock-up)의 건전성이 확인되었다.

4. 결론

국내 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용하여 지르코늄 합금의 조사크립시험을 수행하기 위한 노내 조사크립시험 장치(in-pile creep test machine)의 개념적 설계를 바탕으로 지르코늄 합금의 조사크립시험용 목합(mock-up)을 제작하고 성능시험을 수행하였다. 조사크립시험용 목합은 크게 하중전달부위, 시편지지부위, 변형량 측정부위로 구성되어 있다. 하중전달 부위는 가스압에 의하여 수축되는 벨로우즈(bellows)가 이음쇠를 이동시킴으로써 시편에 전달되도록 제작하였다. 시편지지부위는 직경 3mm의 봉상 인장시편을 상·하부 그립과 핀을 이용하여 고정되도록 제작하였다. 시편의 크립 변위는 상부 그립 상단에 연결된 전달축(push rod)을 통하여 선형변위차등변압기(Linear Voltage Differential Transformer, LVDT)로써 측정할 수 있도록 제작하였다. 제작된 목합의 노외 성능시험은 하중-변형량 곡선을 바탕으로 구한 응력-변형율 곡선은 표준인장시험기를 사용하여 얻은 값과 비교할 때 인장강도와 항복강도가 거의 유사한 값을 보였다. 이상으로부터 하나로용 조사크립시험 장치의 개념설계를 통하여 제작된 조사크립시험용 목합(mock-up)의 건전성이 확인하였다. 이상으로부터 하나로를 사용하여 지르코늄 합금의 조사크립시험 장치의 설계·제작과 성능시험의 기반기술을 확보하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

6. 참고문헌

1) 김봉구 외, "핵연료 조사시험용 계장기술 현황분석", KAERI/AR-513/98, 한국원자력연구소, 1999.

2) M. Masson, Journal of Nuclear Materials, vol. 65, 1977, pp. 307-312.

3) JMTR Irradiation Handbook, 1995.

4) Toshin Kogyo Co. unpublished paper.

5) T. J. Cater, "The Irradiation and Post-Irradiation Examination of Two Korea Fuel Bundles Made by KAERI", EXP-BDL-43106, AECL, 1984.

6) 강영환, KAERI/CEA-IRDI/FRAGEMA 국제공동연구 참가 보고서, KAERI/TR-84/ 86.

7) 주기남 외, 원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐 설계.제작 보고서, KAERI/TR-1392/99, 한국원자력연구소, 1999.

8) 강영환 외, 계장캡슐(97M-01K)개발을 위한 하나로 조사 시험 보고서, KAERI/TR-1393/99, 한국원자력연구소, 1999.

9) Y. Choi, B. Frichting and H. Gazaroli, "Evaluation of Irradiation Clad Creep", B 21/87/2 070 R&D 924287, Erlangen, Germany, 1987.

10) 최 용, 최준형, 김봉구, 강영환, “지르코늄합금의 조사크립시험장치 개념설계”, '99원자력학회 추계학술발표회 논문집

Table 1. Characteriscs of the in-pile creep tester

parts	grips, yoke, push load, bellows, bearing LVDT
materials	SUS 304, SUS 316
dimension	O.D 50x700 mm
max. extension	2 mm
operating temp.	<330℃
electricity	220V 1Phi
pressure operating	< 200 Kg/mm2
free air delivery	40 l/min.
compresser power	0.75 KW
compressor speed	1750 rpm
remarks	auto on/off with sub-tank

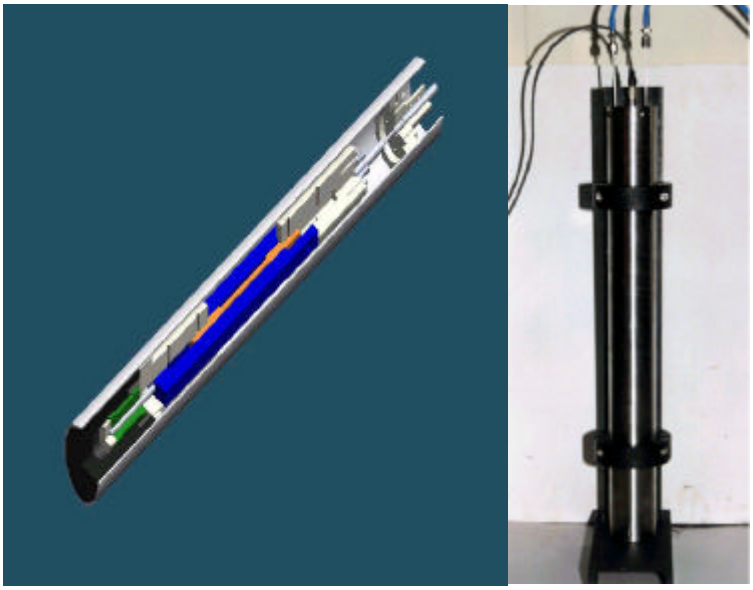

Fig. 1. Quarter view of in-pile creep assembly and photo of its mock-up

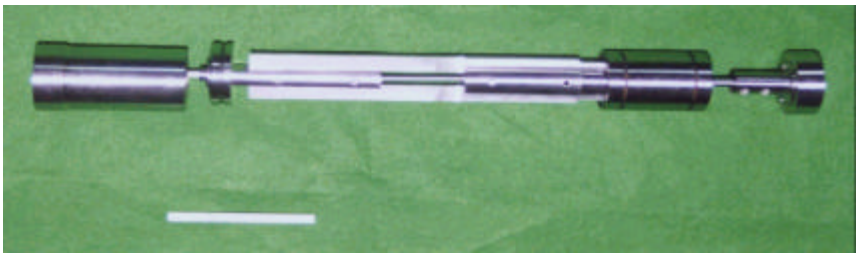

Fig. 2 Photo of in-pile creep test machine before assembling
(from left to right : pressure vessel including bellows,
low grips, specimen, upper grip, bearing, yoke and push rod)

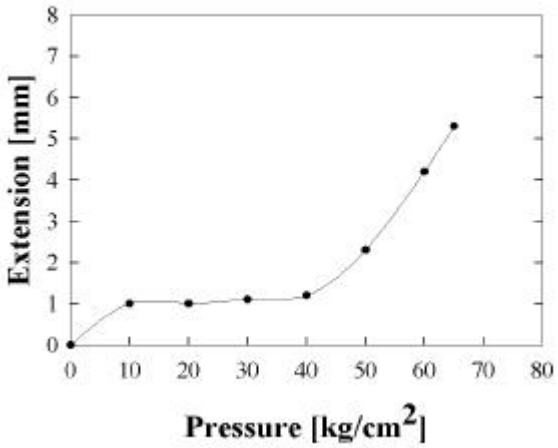

Fig. 3. Pressure-extension curve determined by mock-up