

'99추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

지르코늄 합금의 조사 크립 시험 장치 개념 설계
Conceptional Design for the In-pile Creep Measuring Machine of
Zirconium Alloy

최 용*, 최준형**, 김봉구, 강영환

전문대학교*

충남 아산시 탕정면 갈산리

한국원전연료(주)**

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 내에서 지르코늄 합금의 조사 크립시험을 수행하기 위하여 조사 크립 시험용 계장 캡슐에 내장 될 크립시험장치의 개념적 설계를 수행하고 부품별 성능시험을 수행하였다. 응력부가장치는 벨로우즈(bellows)를 사용하여 가스압으로 전달하게 하였다. 열선을 사용하여 시편을 일정한 온도로 유지하고 온도측정이 용이하도록 일자형의 특수 그립(grip)과 이음쇠(yoke)가 고안되었다. 시편의 조사 크립 변형은 선형변위차등변압기(Linear Voltage Differential Transformer, LVDT)를 사용하여 측정하도록 고안되었다. 수치해석에 의하여 300°C, 3 watt/g의 감마 가열속도(gamma heating rate), 5×10^{20} n/cm²의 고속중성자 조사량 및 200 MPa의 응력부가 조건에 대하여 이음쇠와 그립의 건정성이 확인되었다.

Abstract

Conceptional design for in-pile creep test machine of zirconium alloys and performance test of the components were carried. The in-pile creep machine contains bellows for loading on specimen by gas pressure, special yokes and grips with rectangular torus shape for the convenience of specimen loading and keeping them at a constant temperature. The in-pile creep strain of the zirconium alloy specimen is determined with a linear voltage differential transformer (LVDT). Numerical analysis showed that the grip and yoke withstood soundly under the condition of gamma heating rate of 3 watts/g, fast neutron fluence of 5×10^{20} n/cm², pressure of 200 MPa and constant temperature of 300°C.

1. 서론

핵연료 피복관과 압력관 소재로 사용되고 있는 지르코늄 합금은 원자로의 가동 중에 발생하는 조사크립(irradiation creep)에 의하여 열화(degradation)되는 문제점 때문에 조사크립기구(irradiation creep mechanism)를 규명하기 위한 연구가 원자력 선진국에서는 많이 수행되어 왔

으나 국내에서는 연구로용 원자로인 하나로(HANARO)에서 재료시험용 계장캡슐의 조사시험이 1998년 5월에 설계검증을 위한 조사시험이 성공리에 수행되었으며 계장캡슐을 이용한 재료조사시험들이 본격적으로 수행되고 있다. [3-5]

하나로를 이용하여 지르코늄 합금의 조사크립시험을 수행하기 위하여서는 캡슐내에 장착될 노내 조사 크립시험 장치(in-pile creep test machine)가 필연적으로 설계 제작되어야 한다. 노내 조사크립 시험장치는 크게 시편지지부위, 하중전달부위, 변형량 측정 부위, 제어부위로 구분할 수 있으며 대부분의 계장 부품들은 노내에서 이용되므로 중성자 조사 조건과 고온 부식성분위기에서 저항성이 있는 소재를 사용한다.[6] 냉간 가공된 Zircaloy-2 피복관의 단일축 조사크립시험은 1966년 이후부터 Harwell에 있는 DIDO와 PLUTO 시험용 원자로에서 유압기체계기(pneumatic gas gauge)를 사용하여 수행되었다.[6] 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. 조사 크립시험 중의 하중을 변화시키면서 변형량을 직접 측정하는 선형 이동 측정기(linear-motion-probe unit)는 1977년에 개발되었는데 시편의 재충전이 가능하며 400~750℃, 40~900N의 축하중에서 판상 시편의 조사크립거동을 측정할 수 있었다. 원통형 시편의 조사 크립시험 장치는 프랑스에서 1976년 개발되었는데 고압의 기체를 사용하며 원통형의 시편에 하중을 가하면서 250~700℃ 구역에서 크립 변형량을 측정하였다. Wood 등은 JMTR(Japan Materials Testing Reactor, 50MW)의 시험로에서는 밀폐형의 무게기 방식, 헬륨(He) 기체를 사용한 가압 방식 및 벨로우즈(bellows)를 이용한 기계적 하중전달 방식에 대한 조사 크립장치가 자체 개발되어 비교 검토하였다. 이중 조사 크립 변형량을 측정하는데 가장 중요한 변수는 조사되는 부위의 소재가 시험중에 가능한 조사 크립 변형되는 양이 일정하여야 하며, 시편에 비하여 작게 설계 제작되어야 하는 점이다. 조사 크립시험의 결과는 측정된 값이 시편 자체의 크립 변형량 외에도 그립(grip)이나 하중을 가하는 부위가 조사에 의한 변형이 발생하여 전체 측정치에 많은 오차를 주고 있다고 보고하였다.[7] 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 하중을 가해주는 부분을 모터와 스크류에 의하여 기계적으로 작동하는 장치와 벨로우즈를 사용하여 시편과 하중을 가해주는 부위를 비교적 멀리 설치한 장치와 수로형 크립시험 장치(in-channel type irradiation creep tester)가 개발되어 있다.[8] 수로(channel)에 탑재한 장치는 하중을 전달하는 전달 장치의 길이/직경의 비가 3,000/70이며 하중을 직접 전달하는 움직임은 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.[9] 국내에서의 지르코늄합금의 조사시험 연구는 1985년 KAREI/KWU 공동연구의 일환으로 독일 GKN 발전소의 정상 가동된 핵연료봉의 조사 크립 변형량의 측정과 분석은 수행된 적은 있으나 [3], 조사 크립시험장치를 설계 제작하기 위한 연구는 수행되어 있지 않다. 따라서 본 연구의 목적은 하나로에서 원자로 소재의 조사 크립시험을 수행하기 위한 기본 단계로써 지르코늄 합금의 조사 크립시험장치의 개념적 설계를 수행하고 부품별 성능을 분석하는데 있다. 이를 통하여 원자로 소재의 조사 시험을 위한 캡슐 개발에 필요한 기반 자료를 제공하고 조사크립시험 장치의 국산화를 이룩하고자 한다.

2. 개념설계 방법

국내 연구로용 원자로인 하나로(HANARO)를 사용하여 수행될 지르코늄 합금의 노내 조사크

립 시험 장치를 설계하기 위하여 캡슐의 제원을 고려하고 지르코늄 합금의 조사크립 거동을 조사하였다. 지르코늄 합금의 조사시험중에 측정할 수 있는 시편의 표면온도와 조사크립 변형량을 측정할 수 있도록 열전대, 변형량 측정기, 하중부가장치등을 검토하였다. 하나로에서의 조사크립시험 조건을 고려하여 300℃, 3 watt/g의 감마 가열속도(gamma heating rate), 5×10^{20} n/cm²의 중성자 조사량 및 200MPa의 응력부가 조건에 대하여 이음쇠와 그립부위에서의 온도, 조사량 및 하중에 따른 변형량을 유한요소법에 의한 수치해석으로 분석하였다.

3. 개념설계 결과 및 고찰

하나로에서 조사시험에 사용되고 있는 캡슐의 제원과 원자력 선진국에서 사용중인 지르코늄 합금의 조사크립 시험 장치를 비교하였다. 그림 1은 노내시험장치의 개괄도이다. 노내시험장치는 크게 시편지지부위, 하중전달부위, 변형량 측정 부위, 제어부위로 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 설계되었다. 헬륨기체의 압력은 고압 컴프레서(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. 제어부위는 시편주위에 300℃의 일정한 온도를 유지하기 위하여 300 watt 용량의 밴드형 열선이 설치되었으며 온도조절을 위하여 alumel/chromel 열전대를 이용하여 온도감지 센서로 사용하였다. 히터와 열전대에 연결된 전선은 열적 안정도가 우수한 알루미늄나 절연체로 보호하고 304L 스테인레스 관을 통하여 계장캡슐 상단으로 확장되어 온도조절장치(temperature controller)와 연결되었다.

지르코늄 합금의 노내 크립 시험장치의 부품들은 노내에서 이용되므로 중성자 조사 조건과 고온 부식에 저항성이 있는 소재로서 Zircaloy-4 와 스테인레스 강을 선정하였다. 표 1과 2는 크립시험 장치를 설계하기 위하여 이용된 벨로우즈 압력조절 장치의 특성과 Zircaloy-4와 304L 스테인레스 강의 물성이다.

그림 2는 응력부가 장치의 주요 부품인 시편 그립에 하중과 온도에 따른 응력분포를 유한요소법으로 해석한 결과이다. 여기서 Zircaloy-4 시편은 그립과 접촉되는 부위가 10mm인 사각형이고 측정부위(gauge)의 직경과 길이는 각각 3mm와 62mm이다. 그립은 304L 스테인레스 강으로써 상단과 하단에 단면이 각각 15x10mm인 두 개의 그립이 Zircaloy-4 시편를 접촉하고 직경 6mm의 핀으로 고정되도록 가정하였다. 그림 2에서와 같이 3차원으로 도시한 그립의 응력분포는 핀 고정 부위에서 비교적 높게 관찰되었으나 시편의 저항력에 비하여 상당히 여유 있는 값을 보여주고 있다. 또한 하나로의 운전 조건을 고려한 300℃, 3 watt/g의 감마 가열속도(gamma heating rate), 5×10^{20} n/cm²의 중성자 조사량 및 200 MPa의 응력부가 조건에 대하여 이음쇠와 그립의 응력분포는 크게 변화하지 않았다. 이것은 시험용 원자로내에서 노내 조사 크립시험중에서 주어진 기하학적 모양의 그립과 이음쇠가 건전하게 작동할 수 있음을 의미한다.

4. 결론

국내 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용하여 지르코늄 합금의 조사크립시험을 수행하기 위한 노내 조사 크립시험 장치(in-pile creep test machine)의 개념적 설계와 부품별 성능 시험 수치해석을 통하여 수행하였다. 노내시험장치는 크게 시편지지부위, 하중전달부위, 변형량 측정 부위, 제어부위로 구성되어 있다. 응력부가 장치는 316L 스테인레스 강의 벨로우즈(bellows)를 사용하여 헬륨 가스압으로 전달하게 하였다. 시편의 조사 크립 변형량은 시편의 크립 변형에 따라서 발생한 변위를 상부 이음쇠(upper yoke)상단에 연결된 전달축(push rod)을 통하여 선형변위차등변압기(Linear Voltage Differential Transformer, LVDT)로써 측정할 수 있도록 고안되었다. 제어부위는 시편주위에 300℃의 일정한 온도를 유지하기 위하여 300 watt 용량의 밴드형 열선이 설치되어 있다. 히터와 열전대에 연결된 전선은 열적 안정도가 우수한 알루미늄 절연체로 보호하고 304L 스테인레스 관을 통하여 캡슐 상단으로 확장되어 온도조절 장치(temperature controller)와 연결되었다. 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 확인되었다. 이러한 개념적 설계를 적용함으로써 하나로 내에서 계장캡슐 내에 지르코늄 합금의 조사크립시험을 수행할 수 있는 장치를 제작하기 위한 기초 자료를 확보하였다. 앞으로는 하나로를 이용한 재료조사시험이 활발히 수행될 것으로 예상되므로 보다 구체적인 제작 방안의 연구가 필요하다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

6. 참고문헌

- 1) T. J. Cater, "The Irradiation and Post-Irradiation Examination of Two Korea Fuel Bundles Made by KAERI", EXP-BDL-43106, AECL, 1984.
- 2) Y. Choi, B. Friching and H. Gazaroli, "Evaluation of Irradiation Clad Creep", B 21/87/2 070 R&D 924287, Erlangen, Germany, 1987.
- 3) 강영환, KAERI/CEA-IRDI/FRAGEMA 국제공동연구 참가 보고서, KAERI/TR-84/ 86.
- 4) 주기남 외, 원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐 설계,제작 보고서, KAERI/TR-1392/99, 한국원자력연구소, 1999.
- 5) 강영환 외, 계장캡슐(97M-01K)개발을 위한 하나로 조사 시험 보고서, KAERI/TR-1393/99, 한국원자력연구소, 1999.
- 5) 김봉구 외, "핵연료 조사시험용 계장기술 현황분석", KAERI/AR-513/98, 한국원자력연구소, 1999.
- 6) M. Masson, Journal of Nuclear Materials, vol. 65, 1977, pp. 307-312.
- 7) JMTR Irradiation Handbook, 1995.
- 8) Toshin Kogyo Co, unpublished paper.

Table 1. Bellows Pressure Controller Specification

Pressure Range [psi]	0 ~ 2000
Control Accuracy [%]	±0.1
Alarm Circuit	high and low
Electrical Supply [V]	110 (60Hz)
Materials	SUS 304L
Tensile Strength [MPa]	537
Elastic Modulus [GPa]	193
Poisson's Ratio	0.3

Table 2. Material Properties of Zircaloy-4 and 304L Stainless Steel for In-pile Creep Test Machine

Materials	Temp. [°C]	Elastic Modulus [Pa]	Poisson's Ratio	Yield Strength (un-irradiated) [MPa]	Yield Strength (irradiated)* [MPa]
Zircaloy-4	20	98,049	0.369	353	698
	300	79,004	0.347	225	570
SUS 304L	20	199,055	0.263	483	793
	300	176,427	0.285	441	531

* $N_{vt} > 6 \times 10^{20}$ ($>1\text{MeV}$)

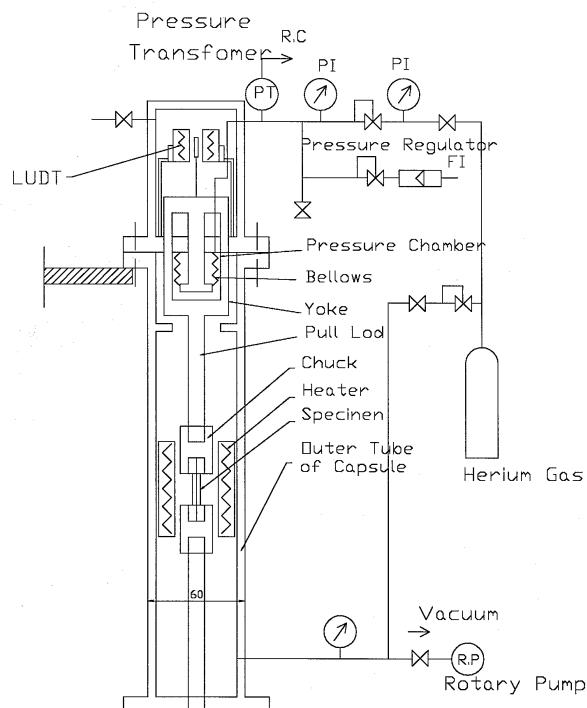


Fig. 1. Schematic diagram of in-pile creep test machine

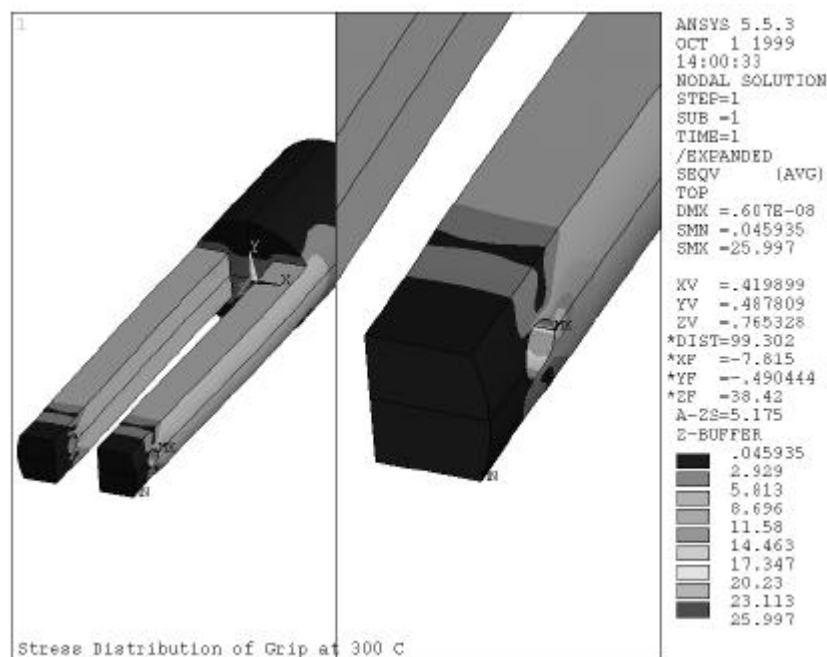
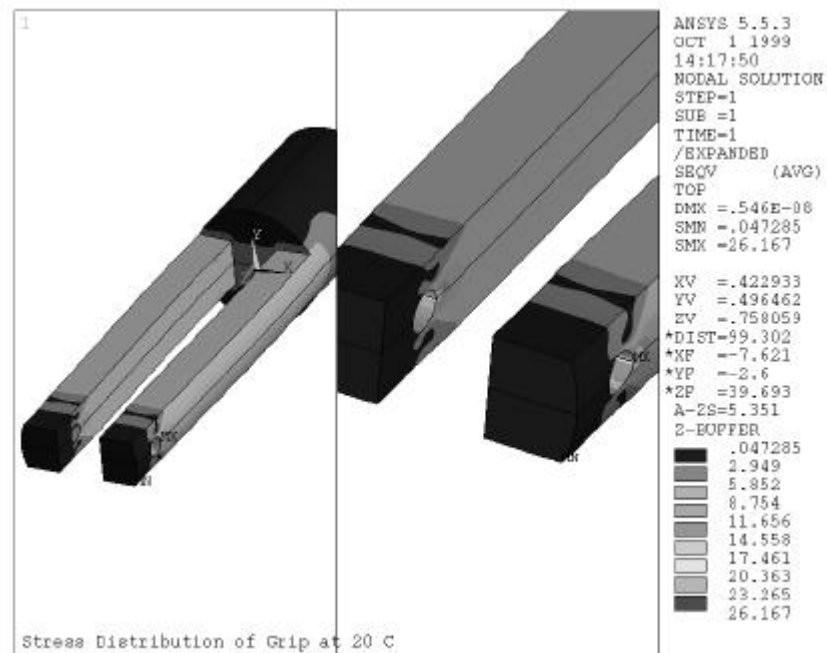


Fig. 2. Stress distribution near grip with temperature under loading
 (top) 20°C (bottom) 300°C