

< 논문 >

벨로우즈를 이용한 반복 하중부과장치의 개발 및 성능시험

최명환[†] · 조만순* · 박승재* · 김봉구*

(2006년 9월 19일 접수, 2007년 7월 23일 심사완료)

Performance Tests and Development of the Cyclic Load Device Using a Bellows

Myoung Hwan Choi, Man Soon Cho, Sung Jae Park and Bong Goo Kim

Key Words: Fatigue Capsule(피로캡슐), Cyclic Load Device(반복 하중부과장치), Bellows(벨로우즈), Load Cell(로드셀), Pressure(압력), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

A fatigue capsule is one of the special capsules to investigate the fatigue characteristics of the nuclear materials during an irradiation test in a research reactor, HANARO. In this study, the performance test and the preliminary fatigue test results by using a cyclic load device newly developed for a fatigue capsule are described. In order to obtain the characteristics such as a realization and a controllability of the periodic wave shape and the relationship between the pressure and the load, a spring and rigid bar specimens are used. The fatigue test for the 316L stainless steel specimen with 1.8mm in diameter and 12.5mm in gage length is also performed under the same conditions as the temperature(550 °C) of the specimen during irradiation tests. As a result of the test, the fracture of the specimen occurs at a total of 70,120 cycles (about 12 days), and the displacement in this case is 2.02 mm. It is expected that these results will be used for determining test conditions and a comparison of the in-pile fatigue test results.

1. 서론

계장캡슐(instrumented capsule)은 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용하여 원자력 재료 혹은 핵연료의 중성자에 의한 조사특성 변화를 연구하기 위한 장치이다. 다양한 형태의 캡슐 중에서 특수목적용 캡슐은 원자력 재료에 대한 조사조건과 특성을 조사시험(irradiation test) 중 실시간으로 조절하고 측정하기 위하여 개발 중이며, 크립(creep)과 피로(fatigue)시험을 위한 캡슐이 있다.⁽¹⁾ 한국원자력연구원에서는 2000년 원자력증강기사업의 일환으로 크립캡슐의 개발을 시작하

였고, 초기에는 1개 혹은 2개의 시편을 장착하였으나 최근에 4개의 시편을 장착한 캡슐을 개발하여 조사시험을 완료하였다.⁽²⁻⁵⁾ 또한 노내 중성자분위기에서 실시간으로 316L 스테인리스 강 재료의 피로시험을 위한 캡슐(fatigue capsule; 05S-05K)이 개발 중이며, 하나로 출력 30 MW, 시편온도 550 °C로 하나로 노심에 있는 IR2 조사공에서 조사시험을 수행할 예정이다.

크립과 피로캡슐에서 시편(specimen)은 조사시험 중 정적 혹은 동적하중을 받고, 외경 60 mm, 두께 2 mm인 원통형의 제한된 공간 내에 하중을 부과할 수 있는 장치의 구성이 필요하다. 크립캡슐에서 정적 하중은 벨로우즈(bellows)를 이용하여 부과하였고, 벨로우즈에 공급하는 압력의 크기를 조절함으로써 시편에 일정 목표응력이 작용하도록 하였다. 크립시험과는 달리 피로시험에서는 시편에 주기적인 일정 하중을 가해주어야 한다. 노내 피로시험과 관련하여 Vandermeulen⁽⁶⁾과

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원
E-mail : mhchoi@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-4799 FAX : (042)868-8622
* 한국원자력연구원

Nieuwenhove⁽⁷⁾은 중성자 조사가 AISI 316L 재료의 피로거동에 미치는 영향을 연구하기 위한 장치에 벨로우즈를 이용하였다. 그들의 장치에서 시편과 벨로우즈 외부는 액체금속(NaK)으로 채워지고, 벨로우즈 내부에 가스를 공급하여 이들 압력차를 이용하여 하중을 부과하였다. 본 피로시험용 캡슐에서도 벨로우즈를 이용하여 개념설계를 하였으나, 가스만의 압력 차이로 반복하중을 부과할 수 있도록 하였다. 따라서 캡슐 제작에 앞서 반복하중을 구현할 수 있는 노의 시험장치를 개발하고, 성능 확인을 통하여 하중부과 개념의 적용 가능성을 평가하는 것이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 피로시험용 노의 반복하중 부과장치(cyclic load device)의 개발과 관련한 장치의 특성과 성능을 파악하기 위한 시험을 수행하였고, 장치를 이용한 피로시험에 대하여 기술하였다. 장치의 기본 성능시험은 스프링 시편을 이용한 반복적인 하중의 구현성을 확인하였고, 상·하한 압력의 크기 설정, 하중 지연시간과 하중 주기의 조절 가능성을 평가하였다. 또한 시편에 작용하는 응력에 대한 정보를 얻기 위하여 강체봉(rigid bar)을 이용하여 압력과 하중의 관계를 구하였다. 마지막으로 장치를 이용한 예비 피로시험을 통하여, 벨로우즈를 이용하는 장치의 개념을 노내 시험용 캡슐에 적용할 수 있음을 확인하였고, 비교를 위한 데이터를 획득하였다.

2. 반복 하중부과장치

노의 피로시험을 위한 하중부과장치는 크게 제어장치부, PLC(programmable logic controller), MMI(man machine interface) 프로그램으로 구성되어 있다. 하중부과 제어장치는 2개의 솔레노이드(solenoid) 밸브와 미터링(metering) 밸브, LVDT, 압력계, 6.35 mm 튜브, 피팅(fitting)류 등으로 구성되었다. Fig. 1은 벨로우즈를 이용하여 시편에 반복적인 하중을 가해주기 위한 장치의 계통도를 나타내었다. 가스공급 튜브의 길이는 실제 캡슐에 사용되는 튜브(3.175 mm, 약 35 m)의 체적과 동일하게 9 m의 6.35 mm 튜브로 제작하였다. 하중의 반복성은 솔레노이드 밸브를 사용하여 벨로우즈에 공급되는 가스의 공급과 배기를 반복적으로 제어함으로써 구현하였다. 하중의 주기는 미

터링 밸브의 수동 조작으로 가스의 공급·배기량을 조절함으로써 조정 가능하다. 솔레노이드 밸브의 동작은 PLC를 통하여 이루어지며, 피로시험용 캡슐과 관련한 하중부과장치를 구동하고 제어하기 위한 PLC 및 MMI 프로그램을 개발하였다.⁽⁸⁾

Fig. 2는 벨로우즈를 이용하여 시편에 힘을 전달하는 하중부과의 개념과 개발한 노의 시험장치의 사진을 나타내었다. 외부에서 벨로우즈에 압력을 가하면 벨로우즈가 수축하면서 내부의 하중 전달봉(push rod)이 아래로 움직인다. 하중 전달봉은 요크(yoke)와 연결되어 있고, 요크는 시편과 연결되어 압력이 시편에 힘으로 전달된다. 시편의 상부에는 용량 4.91 kN(500 kgf), 선형오차 0.017%의 Precision Transducers 사 ST-500 모델의 로드셀(load cell)을 장착하였다. 요크에는 최대 11 mm까지 측정 가능하고 무한 분해능(infinite resolution)을 갖는 GEFFRAN PY2 LVDT가 장착되어, 공급압력에 따른 시편에 작용하는 하중과 시편의 변위를 측정할 수 있는 구조이다. 또한 벨로우즈 leaflet은 Hastelloy 재질이고, 외부직경은 34 mm, 자유길이는 74.5 mm, 스프링상수는 11.77 N/mm로 캡슐의 용도에 적합하도록 주문·제작하였다.

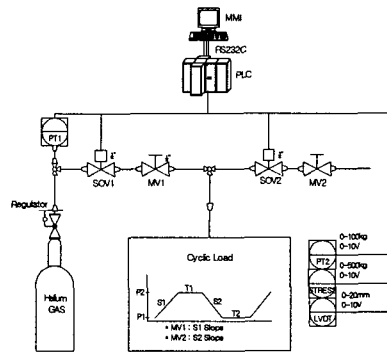


Fig. 1 Schematic diagram of the cyclic load device

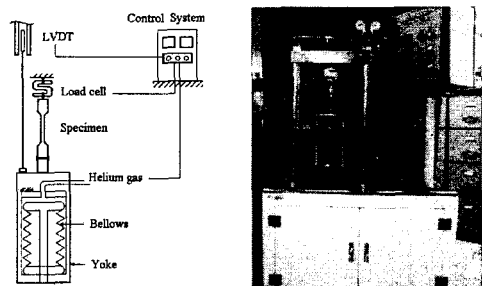


Fig. 2 Concept and the load device using a bellows

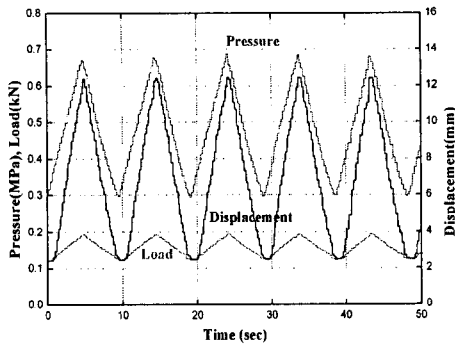


Fig. 3 Triangular wave shapes of the pressure, the LVDT and the load cell

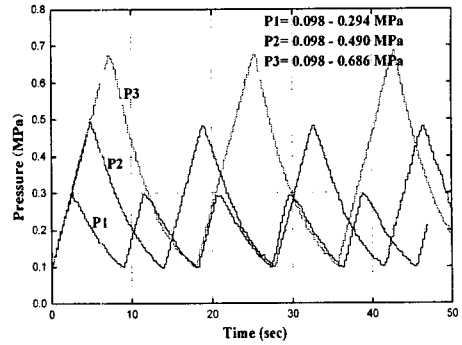
3. 성능시험

3.1 반복하중 구현성

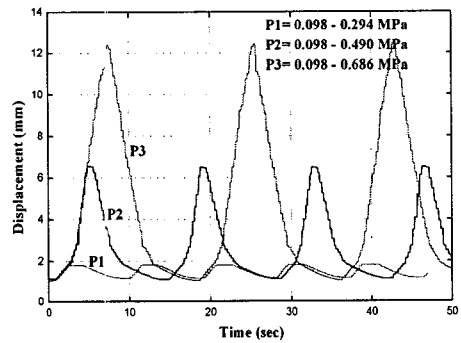
장치의 기본적인 특성과약을 위한 성능시험은 인장 코일스프링을 이용하여 수행하였다. 스프링 시편은 작은 하중에도 큰 변위를 보여 변위신호의 특성을 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 LVDT의 측정 범위가 11 mm로 제한되어 최대 0.686 MPa 이내의 압력만을 가할 수 있었다. 하중주기는 미터링 밸브를 수동으로 조절하여 구현하였다. 노내 피로시험용 캡슐은 시편이 주기적인 삼각파형의 반복하중을 받도록 설계되었다. 따라서 장치는 기본적으로 삼각파형을 구현할 수 있어야 하며, 상·하한 압력의 크기 설정, 일정 시간 유지 및 하중 주기의 조절 가능성을 확인하였다.

Fig. 3은 하중부과장치의 벨로우즈에 압력 0.294~0.686 MPa를 10초 주기로 가해주었을 때의 압력, 변위, 하중곡선을 나타내었다. 절대적인 값의 크기는 서로 다르지만 이들 곡선을 통하여 벨로우즈를 이용한 하중부과장치는 피로시험에 필요한 삼각파형을 정확히 모사하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4은 하한압력을 0.0981 MPa로 고정하고, 상한압력을 각각 0.294, 0.490, 0.686 MPa로 설정하였을 때의 결과이다. 미터링 밸브는 고정하고 압력을 조절하였을 때, 반복하중의 주기가 변하는 것을 통하여, 공급압력의 크기를 제어하여도 하중곡선의 주기를 조절할 수 있다는 것을 알 수 있다. 압력곡선은 가스 공급시 시간에 비례하여 증가하였으나, 배기시에는 압력이 낮은 범위에서



(a) Pressure



(b) Displacement

Fig. 4 Effect of the pressure variation on the load cycle

약간 포물선적인 기울기로 감소하는 특성을 보였다. 또한 압력이 낮은 경우에 변위곡선은 증가와 감소가 완만한 비선형적인 거동을 보였는데, 이는 인장 스프링의 특성 때문으로 판단되며, 압력이 큰 영역에서는 선형적인 거동을 보였다. 이들 결과를 토대로 압력은 0.1 MPa, 변위는 3 mm 이상에서 선형적인 거동을 보임을 알 수 있다.

Fig. 5는 하한(0.294 MPa)과 상한(0.588 MPa) 압력에서 각각 3초의 유지시간(holding time)을 주었을 때의 신호를 나타내었다. 하한 압력에서는 유지시간을 정확히 구현하고 있으나, 상한압력에서는 약간 overshoot되어 제어하고자 하는 설정압력 보다 약 10% 큰 값을 유지하는 특성을 보였다. 이러한 경향은 유지시간을 주었을 경우의 제어 프로그램과 밸브 사이의 응답시간 지연, 가스의 압축으로 인해 발생하는 장치의 특성으로 판단된다. 그러나 피로시험에서 적용하고자 하는 삼각파형의 경우에는 압력이 상한 설정치에 도달

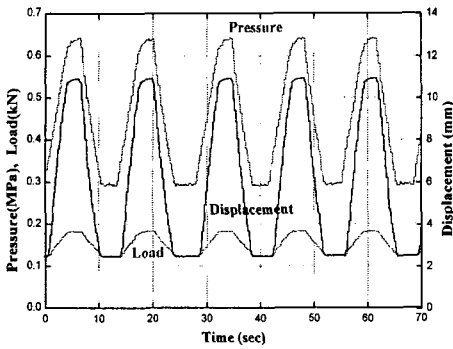


Fig. 5 Effect of the holding time at lower and upper pressure (holding time, 3 sec)

하면 배기벨브를 열어 가스를 배출하기 때문에 overshoot 양은 매우 작아 시험에는 큰 영향을 미치지 않았다.

3.2 압력-하중 관계

노내 조사시험용 캡슐에는 공간상의 제한과 중성자의 영향으로 인하여 로드셀을 장착할 수 없다. 따라서 시편에 작용하는 응력을 계산하기 위해서는 하중에 대한 정확한 정보가 필요하며, 하중은 벨로우즈에 공급되는 압력에 의해서 발생하기 때문에 압력과 하중의 관계를 얻는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 직경 20 mm의 강제봉을 사용하여 압력과 하중의 관계를 얻었다.

Table 1과 Fig. 6에는 벨로우즈의 공급압력에 따른 로드셀을 이용하여 측정된 하중을 나타내었다. 스프링 시편과는 달리 강제봉은 큰 압력에서도 변위가 발생하지 않고, 모든 하중이 로드셀에 전달되었다. 시험은 예상 사용압력의 약 2배인 4.91 MPa까지 수행하였으며, 최대압력에서 하중은 3.27 kN으로 측정되었다. 또한 피로캡슐용 벨로우즈의 압력에 따른 측정하중의 추세곡선을 일차 근사식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_c = 0.671p - 0.021 \quad (1)$$

여기서 p는 벨로우즈 내 공급압력(MPa), Fc는 로드셀로 측정된 하중(kN)이다. 측정값과 근사식 사이의 최대오차로부터 곡선의 선형성⁹⁾을 검토한 결과, 압력에 따른 하중곡선은 1.0%의 선형오차를 갖는 것으로 평가되었다. 최종 피로시험을 위한 압력의 범위가 결정되면 식을 이용하여 시편에 작용하는 하중을 알 수 있고, 시편의 직경과 하중을 이용하여 응력을

Table 1 Measured and calculated load of the fatigue capsule's bellows with the pressure

Pressure (MPa)	Measured (kN)	Equation 1 (kN)	Calculated (kN)	
			φ28mm	φ34mm
0.49	0.31	0.31	0.30	0.44
0.98	0.64	0.64	0.61	0.89
1.47	0.96	0.97	0.96	1.33
1.96	1.29	1.29	1.21	1.77
2.45	1.62	1.62	1.50	2.23
2.94	1.96	1.95	1.81	2.67
3.43	2.28	2.28	2.11	3.12
3.92	2.61	2.61	2.41	3.56
4.41	2.94	2.94	2.72	4.00
4.91	3.27	3.27	3.02	4.45

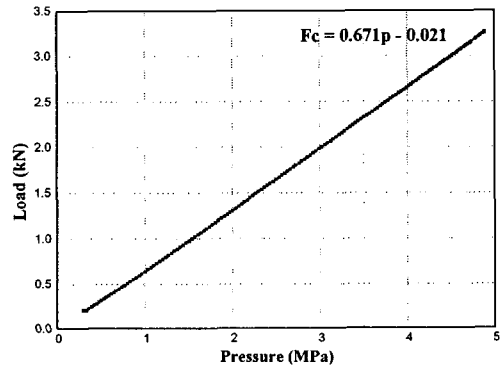


Fig. 6 Pressure vs load relationship of a bellows for the fatigue capsule

계산할 수 있다. 또한 표에는 벨로우즈 공급압력과 유효면적을 이용하여 계산한 하중을 같이 나타내었다. 벨로우즈의 공칭 외경은 34 mm이나, 실제 leaflet 형상을 고려한 압력이 작용하는 유효면적을 직경 28 mm로 계산할 때 시험결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다.

4. 예비 피로시험

개발된 하중부과 장치의 성능 및 피로시험 가능성을 확인하고, 노내 시험과의 비교데이터를 획득하기 위한 예비 피로시험을 수행하였다.

4.1 시편 및 시험조건

노외 피로 검증시험에 사용한 시편은 316L 스테인리스 강으로써, 기계적 특성이 우수하고 중

Table 2 Specification of the fatigue specimen and test conditions

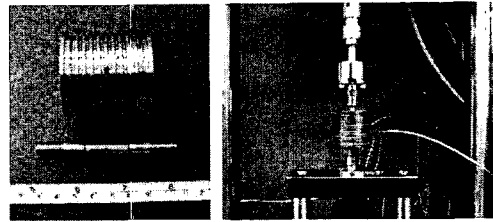
Specimen	316L Stainless steel, φ1.8mm, Gage length=12.5 mm
Target temp.	550 °C
Pressure	1.37~1.86 MPa
Load	0.89~1.23 kN
Stress	351~482 MPa
Load cycle	4 cycle/min.(0.067 Hz)
Shape of load	Triangular wave

성자 조사에 의한 내구성도 양호하여 차세대 원자로의 구조재료로 많이 연구되고 있다.^(10,11) 또한 시편은 직경 1.8 mm, 게이지부 길이 12.5 mm인 원형 단면의 시편으로 제작하였다.

Table 2에는 예비 피로시험을 위한 시험조건을 나타내었다. 시험은 상온의 실험실에서 수행하였고, 시편온도는 550 °C, 벨로우즈에 공급하는 압력은 1.37~1.86 MPa, 삼각파형의 하중주기는 4 cycle/min.에서 수행하였다. 표에서 응력은 식 (1)을 통해 계산한 하중을 시편의 단면적으로 나누어 계산하였다. 또한 노외시험에서는 노내 시험에 사용되는 헬륨가스 대신에 비용의 절감을 위하여 질소가스를 사용하였고, 그 소모량을 예측하였다.

4.2 시편 가열장치

캡슐을 이용한 노내 조사시험에서 시편은 증상을 받아 발열을 하고, 헬륨가스의 진공도 조절과 히터에 의해서 550 °C의 일정한 온도를 유지하게 된다. 따라서 하중 부과장치를 이용한 노외 시험시 온도조건을 맞추기 위하여 시편 가열장치를 제작하였다. Fig. 7은 노외 하중부과장치에 맞추어 제작한 가열장치인 히터블록과 이들이 장착된 상태의 사진을 나타내었다. 블록은 스테인리스 강으로 제작하였고, 내부에 φ8 mm의 구멍을 뚫어 시편의 게이지부를 감싼 스페이서를 끼울 수 있도록 하였다. 히터블록 외부에는 2.5 kW 용량의 히터를 감았고, 시편 중앙부의 온도를 측정하기 위해 직경 1.6 mm의 K-type 열전대를 히터블록 측면으로 설치하였다. 또한 시험중 안전과 열손실을 줄이기 위하여 히터블록을 석면으로 감싼 상태에서 시험을 수행하였다.

**Fig. 7** Heater block and test section instrumented with a heater and a thermocouple

4.3 결과 및 고찰

Fig. 8은 노외 피로시험 초기의 압력과 변위곡선을 나타내었다. 히터에 전원 공급 후, 시편은 상온, zero 변위에서 시작하여 약 10분 후에 목표 온도 550 °C에 도달하였고, 하중을 가하지 않은 상태에서 약 3시간을 유지하였다. 이때 변위는 약 2시간 동안 포물선적으로 증가하여 0.93 mm에 도달한 후 일정 변위를 유지하였다. 가열과정에서의 변위 증가는 시편과 시편을 잡아주기 위한 지그의 열팽창, 연결부에 존재할 수 있는 약간의 갭 등이 채워지면서 발생한 것으로 판단된다. 본 시험에서는 변위가 평형상태에 도달한 약 3시간 후에 벨로우즈에 압력을 공급해 시편에 하중이 작용하도록 하였다. 하중을 가해주기 시작하였을 때, 변위는 0.93 mm에서 급격히 증가하여 압력이 1.37 MPa일 때 1.24 mm, 1.86 MPa일 때 1.26 mm로 최대 0.33 mm가 증가하였다. 또한 피로시험중 가해진 최소, 최대 압력에 대한 목표값과 실제 측정값 사이의 상대오차를 검토한 결과, 본 시험기는 2.6%의 상대오차를 갖는 것으로 평가되었다.

노내 시험용 캡슐의 개발에서 시편은 원자로의 한 주기인 23일 내에 파단이 발생할 수 있도록 설계하였고, 노외시험을 통하여 이를 확인하고자 하였다.⁽¹²⁾ 따라서 예비 피로시험은 시험분위기 및 조건을 일정하게 유지한 상태에서 시편의 파단시까지 지속하였으며, 이때의 총 반복하중수를 피로수명으로 평가하였다. Fig. 9는 시편이 파단되는 순간까지의 최대하중(1.23 kN)에서의 변위이력을 나타내었다. 이때 시편에 작용하는 응력비는 0.73을 유지하였고, 하중 주기의 증가에 따라 시편의 변위는 지속적으로 증가하였다. 최소하중(0.89 kN)에서의 변위도 최대하중에서의 변위경향과 동일하였고, 이들 하중을 반복하면서 변형량은 평균 0.02 mm를 유지하였다. 그림에서 보인

바와 같이 시편은 총 70,120 cycle(약 12일)의 하중 반복 후에 파단 되었다. 파단순간 LVDT의 최대 변위는 2.02 mm를 보였고, 파단 후에는 LVDT의 측정범위인 11 mm를 넘어 측정이 종료 되었다. 또한 시험이 수행되는 동안 벨로우즈에 공급한 가스는 최고압력 11.77 MPa에서 시작하여 2.45 MPa까지 사용하였고, 하루에 1.5병의 질소가스가 소모되었다.

이상의 316L 스테인리스 강 시편에 대한 노의 하중부과장치를 이용한 예비 피로시험을 통하여, 노내 시험용 캡슐에 벨로우즈를 이용한 하중부과 장치의 개념을 적용할 수 있음을 확인하였다. 향후 노내 시험용 피로캡슐은 예비 피로시험과 동일한 조건에서 23일간 조사시험을 수행할 예정이다. 또한 노내 시험 결과는 노의 시험으로 구한 피로수명과 비교함으로써 중성자가 재료의 피로 수명에 미치는 영향을 평가할 예정이다.

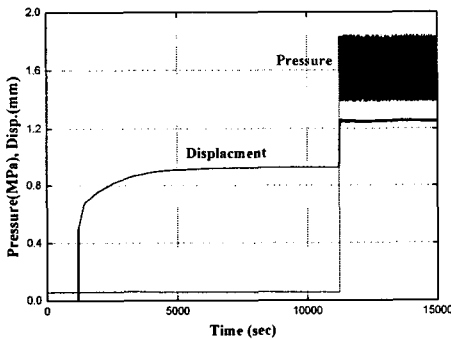


Fig. 8 Pressure and displacement history of the specimen in the early stage of the test

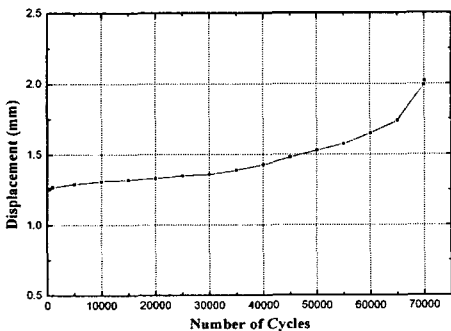


Fig. 9 Displacement history of the specimen with load cycles at the maximum load(1.23 kN)

5. 결론

(1) 노의 하중부과장치는 목표로 하는 하중곡선인 삼각파형을 잘 구현하였으며, 상한·하한 압력의 크기 및 유지시간의 조절이 가능하였다. 또한 하중의 주기는 미터링 밸브 혹은 압력크기의 조절로 조정 가능하고, 상한압력에 유지시간을 주었을 때 목표압력보다 약 10% 정도 overshoot되는 특성을 보였으나 삼각파형에는 그 영향이 매우 작았다.

(2) 벨로우즈의 공급압력에 따른 로드셀에서의 하중 특성을 구한 결과, 외경 34 mm 규격의 벨로우즈는 leaflet을 고려하여 직경 28 mm로 압력작용 유효면적을 계산할 때 측정하중과 잘 일치하였고, 다음과 같은 압력-하중의 관계식을 보였다.

$$F_c = 0.671p - 0.021$$

(3) 시편 가열장치를 부착한 노의 하중부과장치를 사용하여 수행된 316L 스테인리스 강 시편의 고온(550 °C) 피로시험으로부터 얻어진 피로수명은 70,120 cycle로 평가되었고, 이를 통하여 원자로 한 주기 내에 피로시험이 가능함을 확인하였다.

(4) 피로캡슐의 개발에 있어서 벨로우즈를 이용한 반복하중부과가 가능하며, 장치의 개념과 프로그램 등을 캡슐에 직접 적용할 수 있게 되었다. 또한 시험결과는 향후 노내 피로시험용 캡슐의 조사시험시 시험조건을 결정하고, 재료의 피로수명을 비교 평가하는데 이용될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업인 중성자이용 조사기술 고도화 및 신소재개발 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Kim, B.G. et al., 2005, "Capsule Development and Utilization for Material Irradiation Tests (Interim Report of Phase III)," KAERI/TR-3013/2005, KAERI.
 (2) Cho, M.S. et al., 2005, "The Irradiation Test Results of the Creep Capsule (02S-08K)," KAERI/TR-2990/2005, KAERI.

- (3) Choi, Y., Cho, M.S., Kim, B.G. and Kang, Y.H., 2005, "Multi-Channel Mechanical Test Machine for HANARO," *International Symposium on Research Reactor and Neutron Science*, pp. 294~296.
- (4) Kang, Y.H., Cho, M.S., Kim, B.G. and Choi, Y., 2005, "Status of the Study on the Irradiated Materials by a Special Capsule in HANARO," *18th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*, pp. 1037~1040.
- (5) Cho, M.S. et al., 2006, "The Irradiation Test Plan of the 04S-23K Creep Capsule," KAERI/TR-3175/2006, KAERI.
- (6) Vandermeulen, W., Hendrix, W., Massaut, V. and Velde, J. Van. de, 1991, "The Effect of Neutron Irradiation on the Fatigue Behaviour of AISI 316L-Results of First In-pile Tests," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 183, pp. 57~61.
- (7) Nieuwenhove, R.V. and Moons, F. 1994, "In-pile AISI 316L Low Cycle Fatigue," FT/Mol/95-01, Belgium.
- (8) Park, S.J., Cho, M.S., Choi, M.H. and Kim, B.G., 2005, "Fatigue Capsule Control System (FTCTS-2005) MMI Program," Registration No.: 2005-01-182-005647, Program Deliberation & Mediation Committee.
- (9) Doebelin, E.O., 1990, *Measurement Systems; application and design*, McGraw-Hill, New York, USA.
- (10) Hong, S.G., Yoon, S.S. and Lee, S.B., 2004, "The Influence of Temperature on Low Cycle Fatigue Behavior of Prior Cold Worked 316L Stainless Steel(I)," *Journal of the KSME*, Vol. 28, No. 4, pp. 333~342.
- (11) Kim, D.W., Ryu, W.S., Hong, J.H. and Choi, S.K., 1998, "Effect of Nitrogen on High Temperature Low Cycle Fatigue Behaviors in Type 316L Stainless Steel," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 254, pp. 226~233.
- (12) Choi, M.H. et al., 2006, "Performance Test of a Capsule Load Device and Fatigue Test using the Device," KAERI/TR-3191/2006, KAERI.
- (13) Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L. 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, USA.