

고온고압 환경피로실험 오토클레이브 내부용 미소변위 측정장치 개발

정일석[†] · 하각현* · 김태룡* · 전현익** · 김영신**

Development of Micro Displacement Extensometer for Environmental Fatigue Test in a High Temperature and High Pressure Autoclave

Ill-Seok Jeong, Gak-hyun Ha, Tae-Ryong Kim, Hyun-Ik Jeon and Young-Sin Kim

Key Words : Extensometer(변형률계), LVDT(Linear Variable Differential Transformer, 변위센서), Displacement(변위), Environmental Fatigue(환경피로), Low Cycle Fatigue(저주기 피로)

Abstract

An extensometer system to measure strain and displacement of cylindrical fatigue specimen in a autoclave of high temperature and high pressure environment has been developed by KEPRI. The extensometer reads the displacement caused by fatigue loads at the target length of the specimen installed inside the autoclave. The performance of the extensometer were tested at 15MPa, 315°C of a operating pressurized water reactor. Two LVDT's of magnet type were connected to the extensometer and used for converting the fatigue displacement to electronic signal. The device is being used for developing environmental fatigue curve of CF8M cast austenitic stainless steel (CASS) in the test condition of low cycle and low strain. This paper introduces the background and results of the development.

1. 서 론

원전 가동 운전조건에서의 환경피로 연구는 미국, 일본, 독일, 스웨덴 등의 규제기관 및 산업체 연구소를 중심으로 활발히 진행되어 설계 및 건전성 평가 기준을 마련하고 있다. 압력경계 기기의 피로 건전성의 설계 기준인 ASME Section III Appendix 의 피로설계용 수명곡선은 상온에서의 저주기 피로실험 결과를 바탕으로 평균수명곡선 변형률의 2 배, 피로수명의 10 배 여유(margin)를 부여하여 보수적으로 적용하고 있다[1]. 압력경계 기기가 피로측면에서는 보수적으로 설계되었다 해도 고온고압 운전환경에서는 금속 기기 재료 표면에 부식이 발생할 수 있으므로 실 운전환경에 의한 영향을 피로 건전성 수명 평가에 반영해야 한다[2]. 현재

원전 안전등급 기기 피로설계는 ASME B&PV Sec. III 로 수행하며 가동 중 비파괴 검사를 통해 발견되는 균열의 성장거동은 ASME B&PV Sec. XI 의 절차로 평가한다. ASME 에서 사용하고 있는 피로수명 평가곡선과 피로균열성장 평가곡선은 가동 중 수화학 환경의 영향이 고려되지 않아 일부 운전 조건에서는 기존의 피로설계 자료들이 충분히 보수적이지 않을 수 있다[2-4].

국내에서는 전력연구원(KEPRI), 원자력환경기술원(KHNP)과 같은 산업체 주도로 한국과학기술원(KAIST)과 함께 환경피로 실험연구가 진행되고 있다. 국산 압력경계 기기 재료의 고온고압 환경피로 특성을 규명하고 설계 및 건전성 평가 기준을 마련하기 위해서는 지속적인 추가 실험연구를 통해 필요한 특성자료를 확보하여야 한다.

본 연구에서는 고온고압 환경의 autoclave 내부에서 시험편 표점거리에서의 변형률을 직접적으로 정밀 계측할 수 있는 변위계측시스템을 개발하여 더욱 현실적인 환경피로 데이터를 생산하고자 하였다.

[†] 정회원, 한전 전력연구원

E-mail : isjeong@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5660 FAX : (042)865-5604

* 한전 전력연구원

** K.L.E.S.(주)

2. 미소변위 측정장치 설계 및 제작

2.1 시스템의 개요

가동 원전의 운전조건에서 환경피로 실험을 가동조건에서 수행하기 위해 폐 루프 시스템과 Autoclave 를 사용한다. Autoclave 내부에 설치되는 봉상형 피로시험편의 표점거리(gage length)에서 직접적인 변형량 측정이 곤란하여 지금까지는 간접적인 방법으로 변형량을 측정하고 유한요소해석(Finite Element Method Analysis)으로 보정하였다. 간접적인 보정방법을 개선하기 위해 고온고압환경 Autoclave 내에서 피로시험편에 직접 장착이 가능한 미소변위 측정용 계측장치를 Fig. 1 과 같이 설계하였다. 고온고압의 수화학 환경하에서 저주기 피로실험을 변형률 제어로 수행하기 위해 Extensometer 에지(edge)로 시험편과의 접촉하도록 하고 변위센서(LVDT)를 이용하여 변형을 정밀하게 측정하도록 개발하였다.

2.2 시스템의 구성

변위계측시스템은 CT(Compact Tension) 타입 시험편으로 균열진전 피로실험(Crack Growth Rate Fatigue Test)을 수행할 수 있도록 설계되었다. 봉상 피로 시험편에 변위 계측기가 장착되도록 구조를 설계하여 봉상시험편의 표점거리 게이지 부에 변위 센서의 에지를 직접 설치하여 변형률을 모니터링 하고 제어할 수 있다.

Fig. 2 는 개발된 변위계측장치의 모습이며 변위를 측정하는 LVDT 변위센서와 에지, 시험편을 연결하는 가이드 및 지지대로 구성되어 있다. 지지대에는 시험편의 변형을 고려한 스프링 고정편이 있으며, 볼트와 스프링 그리고 에지에 의해 계측자가 고정될 수 있도록 장력이 주어진다. 스프링과 에지, 가이드 등의 주요부분은 부식환경을 고려하여 재료의 선택과 설계가 이루어졌다.

3. 측정장치 성능실험

3.1 변위 측정 시험

개발된 변위측정시스템의 측정 범위는 저주기 피로시험에 적합하도록 +5mm ~ -5mm 로 선정하였으며 Fig. 3 과 같은 고온고압용 환경피로시험장치를 사용하여 성능실험과 교정실험을 수행하였다. 교정(calibration)을 위한 시험편은 Fig. 4 와 같이 시험편으로 인한 구속이 없이 변위측정이 가능하도록 제작하였다. 교정실험 결과를 Table 1 에 정리하였으며 검교정 기관을 통하여 인증된 내장 LVDT 센서

를 내장한

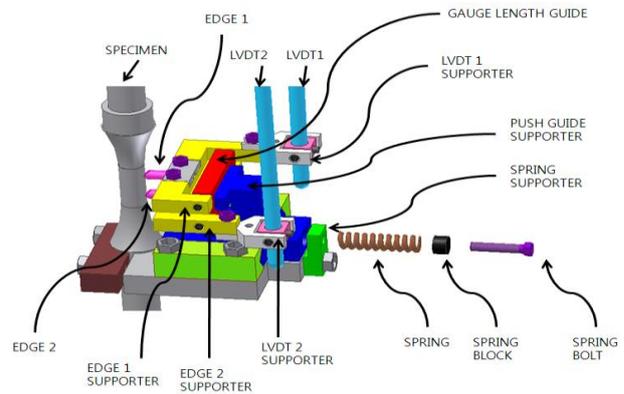


Fig. 1 Diagram of extensometer system

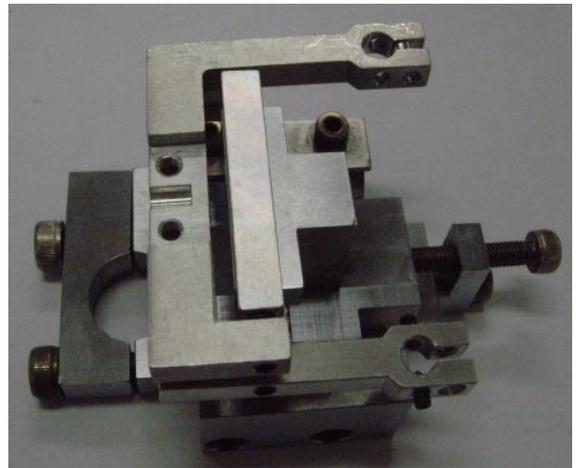


Fig. 2 Photograph of the extensometer system

Actuator 와 Micrometer 와의 비교를 통하여 신뢰성 있는 계측결과를 보여주고 있다.

3.1 고온고압환경에서의 성능실험

변위계측시스템의 고온고압 환경에서의 데이터 검증을 위하여 Table 2 와 같은 조건에서의 성능실험을 실시하였다. 온도와 압력의 가동원전의 운전조건을 고려하여 315℃, 15MPa 로 설정하였으며, 변형률 속도, 0.004%/sec 와 변형률 진폭 0.8%를 사용하였다.

개발된 변위계측장치를 사용한 변형률 제어실험의 결과는 Fig.5 와 같이 전형적인 저주기 피로시험의 사이클 대 하중변화 형태를 보이고 있다. Fig. 6 은 실험 후 시험편의 피로균열이며 에지의 지나친 응력집중에 의한 시험편 표면의 균열은 보이지 않았다.

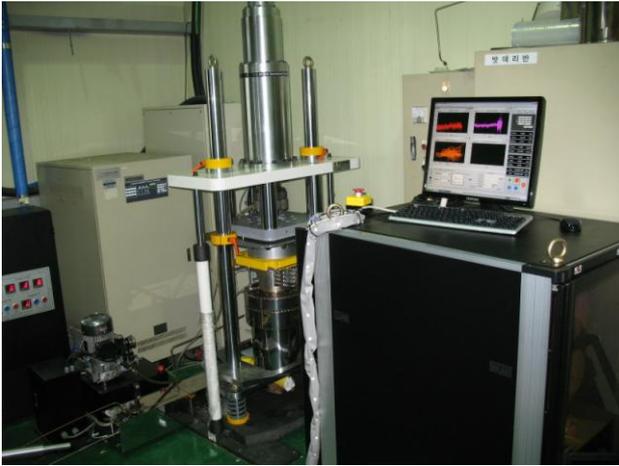


Fig. 3 Environmental fatigue test equipments

-0.800	-0.802	-0.83
-0.900	-0.901	-0.91
-1.000	-1.003	-1.03
-2.000	-2.004	-2.04
-3.000	-3.010	-3.03
-4.000	-4.011	-4.06
-5.000	-5.009	-5.04

Table 2 Test conditions

Load Ratio (R)	-1 (tensile/compress)
Strain Rate	0.004%/s
Strain Amplitude (ϵ_a)	0.8%
Temperature	315 °C
Pressure	15MPa



Fig. 4 Specimen for calibration

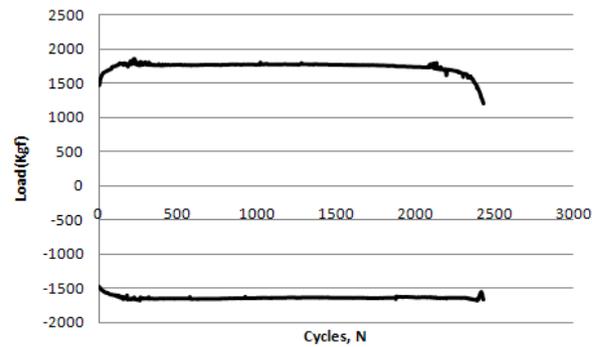


Fig. 5 Graph of load amplitude vs. fatigue life

Table 1 Displacement measuring test result

Extensometer System	Actuator	Micrometer
+5.000	+5.030	+5.05
+4.000	+4.023	+4.04
+3.000	+3.013	+3.03
+2.000	+2.010	+2.05
+1.000	+1.011	+1.02
+0.900	+0.902	+0.90
+0.800	+0.801	+0.81
+0.700	+0.698	+0.70
+0.600	+0.599	+0.60
+0.500	+0.501	+0.49
+0.400	+0.402	+0.41
+0.300	+0.297	+0.30
+0.200	+0.199	+0.20
+0.100	+0.101	+0.11
0.000	0.000	0.00
-0.100	-0.095	-0.10
-0.200	-0.197	-0.21
-0.300	-0.298	-0.31
-0.400	-0.399	-0.40
-0.500	-0.498	-0.50
-0.600	-0.599	-0.62
-0.700	-0.701	-0.71

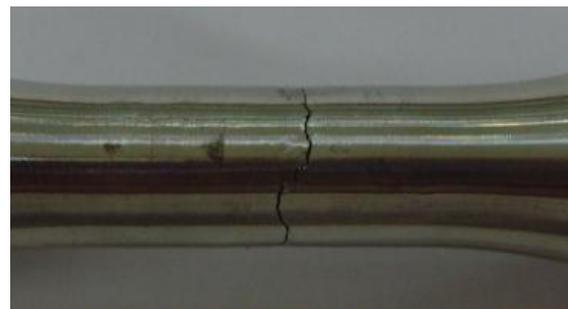


Fig. 6 Fatigue crack

4. 결론

본 연구에서는 환경피로와 같은 고온고수압 환경에서의 저주기 피로실험을 위한 변위계측시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 교정과 고온고압 성능시험을 통해 신뢰성 있는 결과를 보여주었다.

고온고압의 상태의 autoclave 와 같은 밀폐된 공간에서의 시편의 게이지부에 대한 직접적인 변형

를 측정법이 국내외적으로 전무한 현실에서 본 연구의 성과인 고온고압 실험용 변위계측시스템의 개발은 해당 분야 연구개발의 중요한 핵심 기술이 될 것이며, 다양한 응용을 통해 여러 분야에 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) O.K. Chopra, 1999, "Overview of Fatigue Crack Initiation in Carbon and Low-Alloy Steels in Light Water Reactor Environments," *J. Pres. Ves. Tech. Vol. 121*.
- (2) D.A. Gerber, 1998, "Evaluation of Environmental Fatigue Effects for a Westinghouse Nuclear Power Plant," 1998, *EPRI TR-110043*
- (3) M. Itatani, et.al, "Fatigue Crack Growth Curve for Austenitic Stainless Steels in BWR Environment," 2001, *J. Pres. Ves. Tech. Vol. 123*.
- (4) Y.S. Garud, et.al., 1997, "Corrosion Fatigue of Water-Touched Pressure Retaining Components in Power Plants," *EPRI TR-106696*