

고온 고압 수화학 환경 저주기 피로실험장치 개발

Development of Low-Cycle Fatigue Test Rig in Simulated PWR Environments

*이용성, 김상재, 송택호, 정일석, 김태룡
한전 전력 연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 원전의 1차측 배관재로 사용되고 있는 주조 스테인리스강의 환경피로 수명선도를 작성하기 위해 고온 고압 수화학 환경을 모사할 수 있는 저주기 피로실험장치를 개발하고 변형률 제어 방법으로 실험을 수행하였다. CF8M 재료의 봉상 표준시험편을 이용하여 변형률 속도 0.04%/s의 조건으로 변형률 크기의 변화에 따른 피로수명을 측정하였다. 시험편의 표점거리와 변위 측정장치 위치에 의한 실제 측정거리의 차이로 인해 발생하는 변형률의 오차를 보정하기 위해 유한요소법을 이용하여 그 차이를 계산하고 피로실험 결과를 보정하였다. 보정된 실험결과와 해외 선행결과를 비교하고 그 경향이 동일한 추세를 보임을 확인하였다.

Abstract

For developing fatigue design curve of cast stainless steels that would be used in piping material of domestic nuclear power plants, a low-cycle fatigue test rig was built. It is capable of performing tests in pressurized high temperature water environment of PWR. Cylindrical specimens of CF8M were used for the strain-controlled environmental fatigue tests. Fatigue life was measured in terms of the number of cycles with the variation of strain amplitude at 0.04%/s strain rates. The disparity between target length and measured length of specimens was corrected by using finite element method. The corrected test results showed similar fatigue life trend with another previous results.

1. 서 론

환경피로는 발전설비중 수분과 접촉하고 있는 기기들의 균열발생 메커니즘 중 하나이며 균열에 의한 기기 손상의 주요 원인중 하나인 것으로 알려져 있다¹⁾. 따라서 발전소의 설계 및 운영 측면에서 기기 재료의 수명을 예측, 평가하고 관리하는데 있어 환경의 영향을 어떻게 고려하여야 할 것인지는 매우 중요하다. 특히 원자력발전소의 안전등급 기기들은 비록 피로에 의한 손상 가능성이 낮다는 것이 이미 알려져 있지만 원전의 수명 연장 또는 주기적 안전성 평가(PSR)와 같이 주요 기기들의 건전성을 평가 및 확인하는 과정에서 중요하게 고려되고 있다²⁾. 현재 가동중인 원전의 안전등급 기기들에 대한 피로설계는 ASME B&PV Sec. III, 비파괴 검사를 통해 발견된 균열의 성장거동 평가는 ASME B&PV Sec. XI을 따르고 있다. 그러나 위에서 제시하고 있는 피로수명 곡선과 피로균열 성장 곡선은 수화학 환경의 영향이 충분히 고려되지 못하고 있으며 일부 수화학 조건에서는 기존의 자료들이 충분히 보수적이지 못한 것으로 밝혀졌다^{2),3),4)}. 최근 이와 관련하여 많은 연구들이 수행되었으며 특히 탄소강 및 저합금강에 대한 환경피로의 영향은 비교적 상세하게 연구되고 있다. 스테인리스강에 대해서는 많은 연구들이 진행중에 있으며 지금까지 수행된 스테인리스강의 환경피로 실험결과들은 주로 SS316NG와 SS304 등에 집중되어 있고 용존산소(dissolved oxygen, DO)량이 높은 BWR(boiling water reactor) 조건에서 대부분 수행되어 용존산소나 용존수소 등의 수화학 조건이 다른 PWR(pressurized water reactor) 조건에 대한 환경피로 특성을 명확히 판단하기가 어려운 실정이다^{4),5),6)}. 따라서 본 연구에서는 국내 가압경수로(PWR)의 가동환경을 모사할 수 있는 환경피로실험장비를 개발하고 원전 주냉각재 배관으로 사용되고 있는 주조 스테인리스강에 대한 실험을 수행하여 피로수명선도 작성을 위한 시범데이터를 생산하였다.

2. 저주기 환경피로실험장치 설계 및 제작

2.1 설계요건

원자력발전소의 1차측 고온고압 환경을 모사할 수 있는 피로실험장치를 제작하기 위해 다음의 기능이 설계에 반영되어야 한다. 우선 DO, pH, H₂ 등의 수화학 변수를 제어할 수 있어야 하고 수화학 루프의 누설이 없어야 한다. 피로실험 하중장치는 변형률 제어(strain control)가 가능하고 반복 하중(fully reversed load)을 가할 수 있어야 한다. 변위 측정장치는 표점거리의 변위를 정확히 측정될 수 있도록 굽힘하중이나 좌굴에 대하여 충분한 강성을 보유하여야 한다. 본 실험장치에서는 최대 하중의 크기 60kN, 하중 반복속도 1Hz, 최대 변위 50mm, 최대 운전온도 350℃, 압력은 170bar까지 실험할 수 있도록 설계되었다. 실험장치의 사용 소재와 부품이 피로실험 하중에 견딜 수 있도록 강도 설계를 하고 실험 동작유체에 노출된 소재는 내부식을 고려하여 선정하였다.

2.2 고온 고압 수화학 루프

수화학 루프의 전체 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 수화학 루프 설계에서 가장 주안점을 둔 부분은 운전 안전과 편리성이다. 운전 안전을 위하여 기계적 위험감지 장치(electric contact pressure gage, flow switch, safety valve)와 전기적 위험감지 장치(electric pressure sensor, thermo meter)를 동시에 설치하였다. 즉, 고온 고압부에서 이상 고온 고압에 의한 파손사고가 일어나기 위해서는 최소 3가지 이상의 계측기가 동시에 작동 불능이어야 가능하다. 그리고 배관의 파손에 의한 사고가 일어나면 압력센서의 작동에 의해 즉시 루프 가동이 정지되도록 설계하였다. Fig. 2와 같이 각종 밸브와 계측기들을 패널 전면에 집중시킴으로써 시험자의 편의성을 도모하였다.

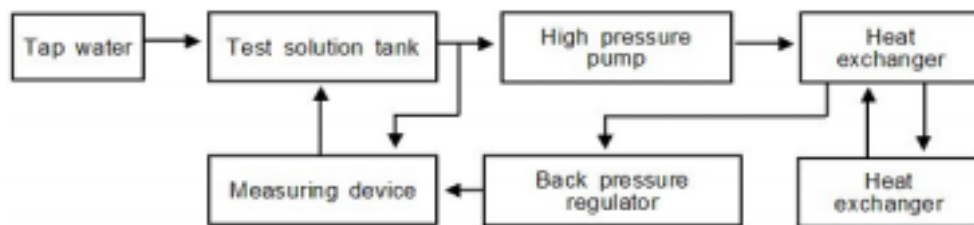


Fig. 1 고온 고압 수화학 루프 구성도

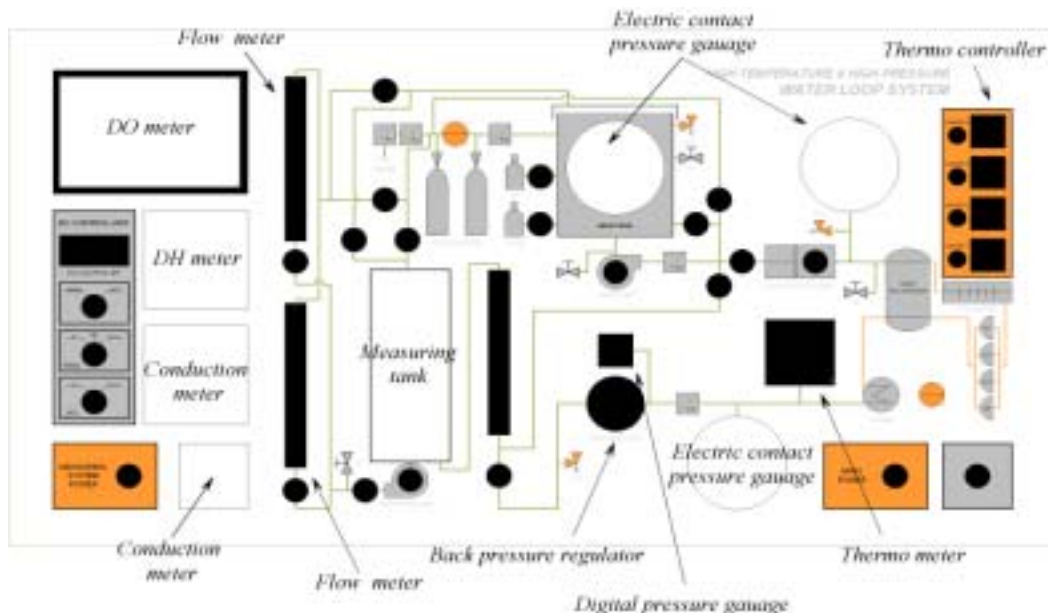


Fig. 2 고온 고압 수화학 루프 운전 패널

2.3 압력용기 및 하중전달장치

시험장치의 전체적인 형상은 Fig. 3에 나타난 바와 같은 형태로 구성하였다. 고온 고수압의 환경을 유지하는 압력용기(autoclave)(1), 시험편이 고정되는 지그(jig) 및 내부 변형률 측정시스템이 장착된 하부구조물(lower structure)(2), 로드셀(load cell)(31), 리미트 센서(32), 액추에이터(actuator)(33), 시험장치 전체를 지탱하여 주는 본체(main frame)(3)로 구성되어 있다.

시험 하중의 인가는 본체에 부착된 액추에이터에 의해 수행된다. 액추에이터는 전기 서보 방식으로 구동되며 변형률 측정 시스템에서 얻어진 변형률 값을 피드백 신호로 사용하여 PID 제어 방식으로 작동된다. 하중의 감지는 액추에이터와 주 로드(rod) 사이에 설치된 로드셀(31)에 의해 전기적으로 이루어진다.

비상시 시험 장치의 정지는 변위 측정장치의 신호와 로드셀(31)의 신호를 받아 소프트웨어 적으로 작동하는 것이 기본이며, 소프트웨어의 이상으로 인한 액추에이터의 폭주를 막기 위해 로드셀(31) 측면부에 리미트 센서(32)를 설치하여 이중 안전 방안을 강구하였다.

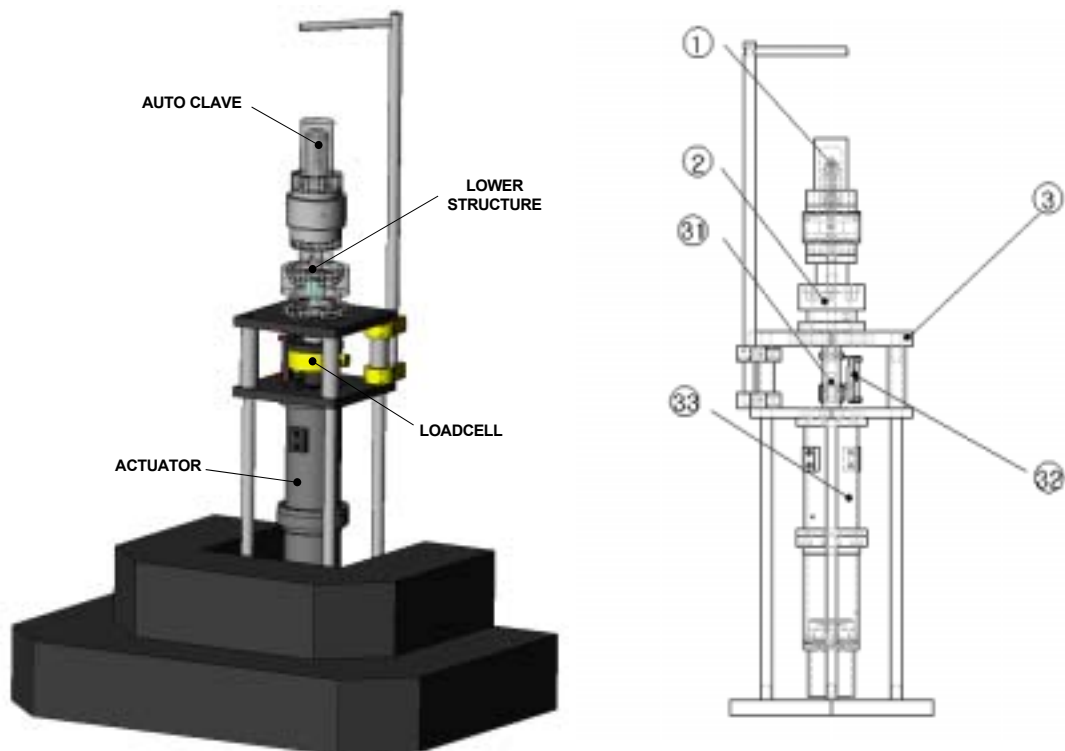


Fig. 3 소형 Autoclave를 장착한 저주기 환경피로 실험장치

변위 측정 장치는 피로 시험편 표점 거리의 변화를 외부에서 정확하게 측정할 수 있도록 Inconel 재질의 변위측정 장치를 사용하였다. 특히 굽힘 하중과 좌굴을 받는 부위는 측정값에 영향을 미치지 않도록 충분한 강성을 갖도록 설계하였다. LVDT와 같은 기존의 변위측정 장치의 센서는 대부분 Autoclave 외부에서 작동하기 때문에 고압 챔버 관통부의 밀봉과 측정 오차가 있을 수 있다. 본 연구에서는 고압 챔버 내부 고온 고압 환경에서 직접 변위를 측정할 수 있는 자기식 변위센서를 채택하여 밀봉문제를 해결하고 측정오차를 줄일 수 있도록 하였다. 그리고 변위센서는 2개를 장착하여 피로시험 봉상시편 표점부의 변위를 정확히 측정할 수 있도록 하였다.

2.4 제어 프로그램

본 실험에서 사용되는 저주기 환경피로실험 제어 프로그램을 Fig. 4에 나타내었다. 프로그램은 시험편의 치수 및 실험조건 설정이 용이함은 물론 장시간의 시험에도 안정성을 가지도록 제작되었으며 사용자의 요구에 의한 수정도 가능하도록 설계되었다.

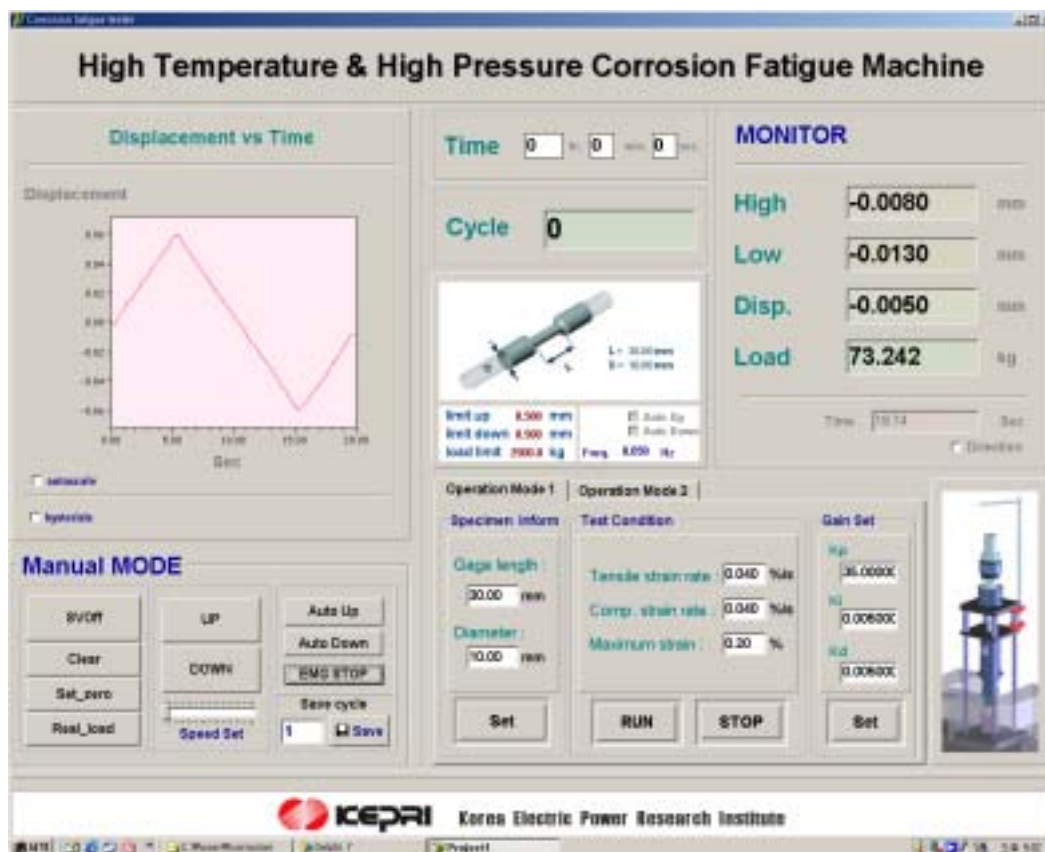


Fig. 4 저주기 환경피로 실험 제어 프로그램

3. 저주기 환경피로 실험

이상의 설계요건에 따라 제작된 저주기 환경피로 실험장치의 모습은 Fig. 5와 같다.



Fig. 5 저주기 S-N 환경피로 실험 장치

3.1 시험편

실험에 사용된 표준시험편은 ASTM E 606-92⁷⁾에서 제시한 저주기 피로실험시험편 규격에 따라 Fig. 6과 같이 제작하였다. 표점거리간 거리는 19.05mm, 시험편중앙부의 지름은 9.63mm이며, 시험편의 끝단 이음부의 모양은 시험편 고정장치의 설계형상에 맞게 제작하였다. 시험편의 재질은 현재 고리 1발전소의 1차계통 냉각재 배관의 재료로 사용되는 CF8MH(25wt% ferrite)를 선택하였다.

3.2 실험조건 및 방법

PWR 환경조건하에서 실험을 수행하기 위하여 autoclave내 실험용액의 최대 온도는 316°C, 최대 압력은 15MPa, DO(dissolved oxygen)는 5ppb로 설정하였다. 하중비는 $R=-1$ 로 인장 및 압축이 반복되는 톱니형파이며 변형률 속도(strain rate)를 0.04%/s로 하여 최대 변형률(strain amplitude)값이 시험편 표점거리의 0.5%, 0.6%, 0.7% 인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 이상의 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 모든 실험은 변형률 제어(strain control)의 방법으로 수행되었으며, 피로수명은 실험하중이 초기 인장하중의 25%로 감소할 때의 사이클수(N_{25})에 의해 결정되었다⁸⁾.

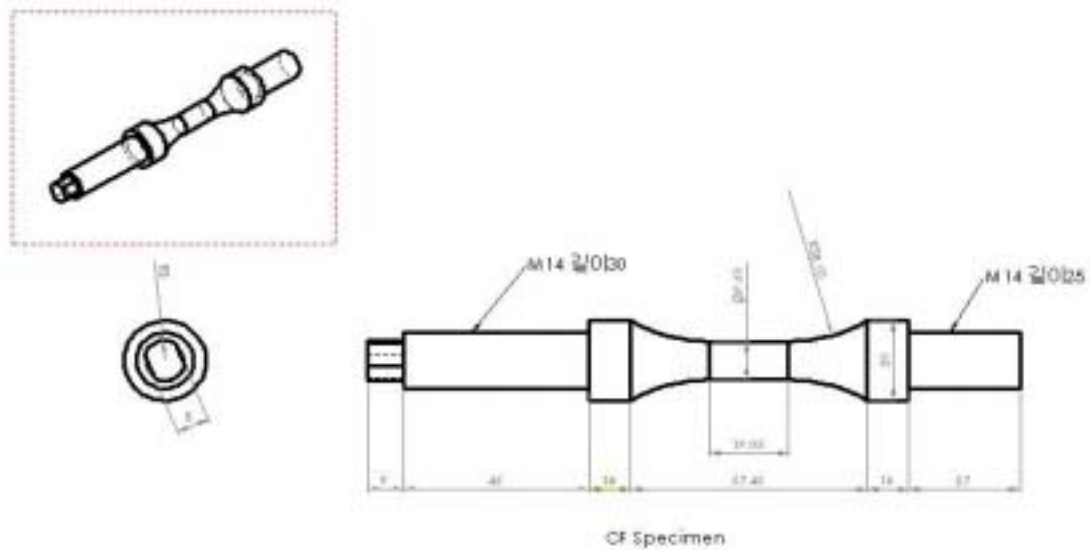


Fig. 6 저주기 환경피로실험 시편의 형상 및 치수

Table 1 저주기 환경피로 실험조건

Load Ratio (R)	-1 (tensile/compress)
Strain Rate	0.04%/s
Strain Amplitude (ϵ_a)	0.5%, 0.6%, 0.7%
Temperature	316℃
Pressure	15MPa
DO (dissolved oxygen)	5ppb

3.3 저주기 환경피로 실험결과

상기의 실험조건에 따라 저주기 환경피로 실험을 수행한 결과를 Table 2에 요약하였다. Fig. 7은 저주기 피로실험 동안에 측정된 피로하중 최대치의 변화를 그린 선도이다. 초기 피로 주기횟수 구간에서 소성영역에서 발생하는 변형률 경화(strain hardening) 영향으로 일정 변형률에서 피로 하중 최대치가 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험 조건인 변형률의 크기의 값이 0.7, 0.6, 0.5%로 감소할수록 동일 반복주기횟수에서 경화현상이 감소함을 알 수 있다.

변형률 크기 0.5%의 경우는 실험중 외부요인으로 장치 가동이 중단됨으로 인해 8000cycle에서 하중이 불연속적으로 주어졌다. 무정전 전원 공급장치를 거쳐 동력을 공급하였기 때문에 고온고압 수화학 루프 온도와 압력은 초기 값으로 유지되고 전열기는 계속 작동되고 있었다. 그러나 실험 운영 소프트웨어가 전원 불연속의 경우에 실험을 재 기동하는 절차가 고려되지 않았기 때문에 피로 실험기 가동이 중단되었다. 장치 가동 중단 시점에서의 피로하중 크기 기록을 실험 도중에 파악할 수 없어 동일한 변형률 크기 조건에서 피로 시험기를 재 기동하였다. 재 기동 피로하중이 중단전의 하중치보다 낮게 적용되었지만 변형률 제어 모드로 실험을 하였기 때문에 하중의 크기가 피로실험 자체에 영향을 미치지 않는다.

Table 2 저주기 환경피로 실험결과

	Strain amplitude (%)		
	$\epsilon_a = 0.5$	$\epsilon_a = 0.6$	$\epsilon_a = 0.7$
Strain rate (%/s)	0.04	0.04	0.04
Frequency(Hz)	0.0143	0.0167	0.02
Fatigue life (cycles)	1146	3781	13951

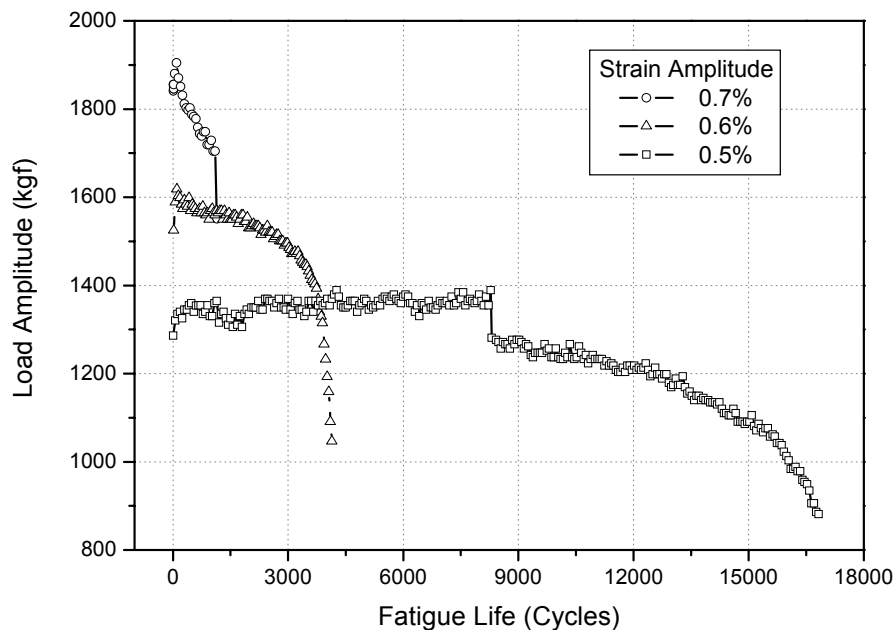


Fig. 7 최대 하중 변화 선도

3.4 실험 결과값의 보정

본 실험에서는 실험시편의 변위를 측정하는데 있어 시험편의 형상 및 고온 고수압의 조건으로 인해 표점거리로부터 직접 변형량을 측정할 수 없어 시험편의 곡률구간이 끝나는 지점(실제 측정부)에서 변형률을 간접적으로 측정하였다. Fig. 8에서와 같이 표점거리와 실제 측정거리가 다르기 때문에 본 실험에서처럼 표점거리의 변형량을 기준으로 제어 (strain control)하는 경우에는 실제로 측정되는 변형량과 표점거리 변형량과의 상관관계를 구하여 보정해주어야 한다.

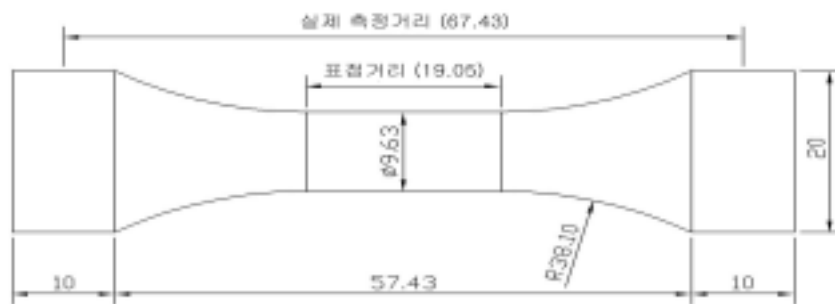


Fig. 8 실험시편에서의 표점거리 및 실제 측정거리 위치

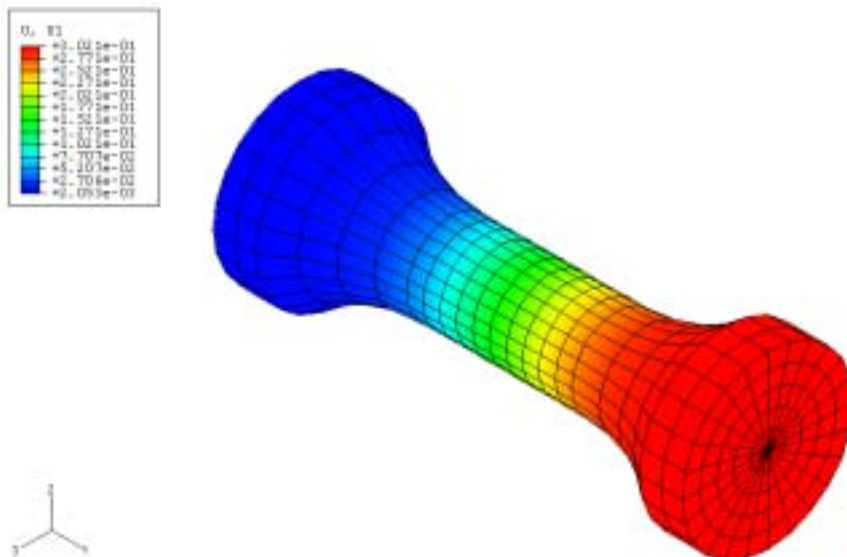


Fig. 9 변위량 분포 해석 결과

상온에서 실험하는 경우 별도의 변위측정기(extensometer 또는 LVDT)를 이용하여 표점거리와 측정부의 상관관계를 계산할 수 있지만, PWR환경에서는 표점거리의 변위변화를 직접 측정할 수가 없기 때문에 동일재료로 고온 인장실험을 수행한 결과와 실험조건을 입력데이터로 사용하여 유한요소 해석(FEM, finite element method) 방법으로 표점거리와 측정구간 사이에서의 변형량 차이를 계산하고 해석 결과를 바탕으로 표점거리의 변위와 측정부의 변위와의 상관관계를 Fig. 9와 같이 구하였다. 여기서 x는 실측정부 변위, y는 표점거리에서의 변위량이다. 이렇게 구한 관계식에 실험 장치를 통해 측정된 변형률을 적용함으로써 표점거리의 변형률을 수식적으로 구할 수 있다. 실제 실험으로부터 얻어진 측정부의 변위값으로부터 표점거리의 변위값을 구하면 보정된 Strain amplitude를 얻을 수 있다. 그 값을 Table 3에 나타내었다.

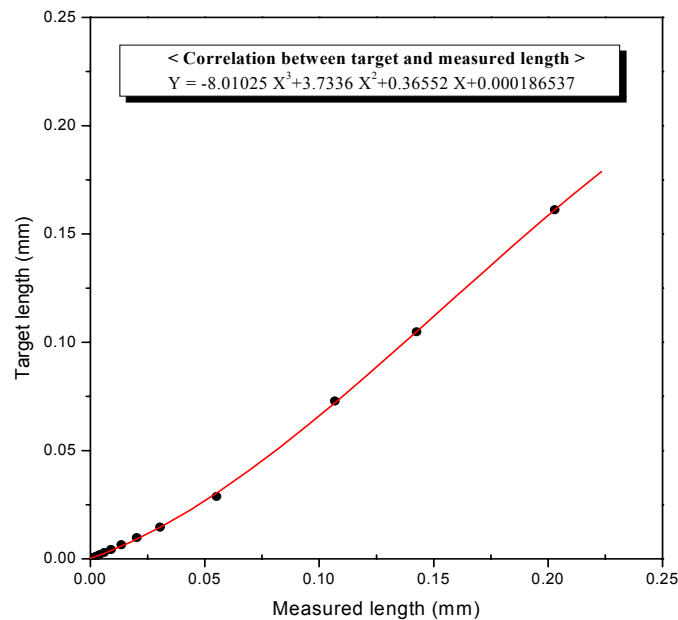


Fig. 10 표점거리와 측정부 변위와의 상관관계

Table 3 표점거리 및 Strain amplitude의 보정결과

실험 측정부 변위(mm)	FEM으로 보정된 표점거리 변위(mm)	적용 Strain Amp.(ϵ_a)
0.1995	0.1581	0.0083
0.1320	0.0951	0.0050
0.1050	0.0705	0.0037

3.5 보정된 저주기 피로선도 작성

보정된 strain amplitude를 고려하여 PWR 환경에서 strain control 된 ϵ -N 시험결과를 재정리하고, ASME data와 함께 나타낸 결과는 Fig. 11과 같다. 유한요소 해석결과를 적용하기 전에 비해 적용한 후의 값이 ASME design curve와 mean curve의 기울기에 가까움을 확인할 수 있다. Fig. 11에서와 같이 보수적으로 평가된 ASME code 저주기 피로 선도의 하한(low bound)인 설계곡선 보다는 주조스테인리스강의 피로수명이 길지만 평균 곡선보다는 수명이 짧게 나타남을 알 수 있다.

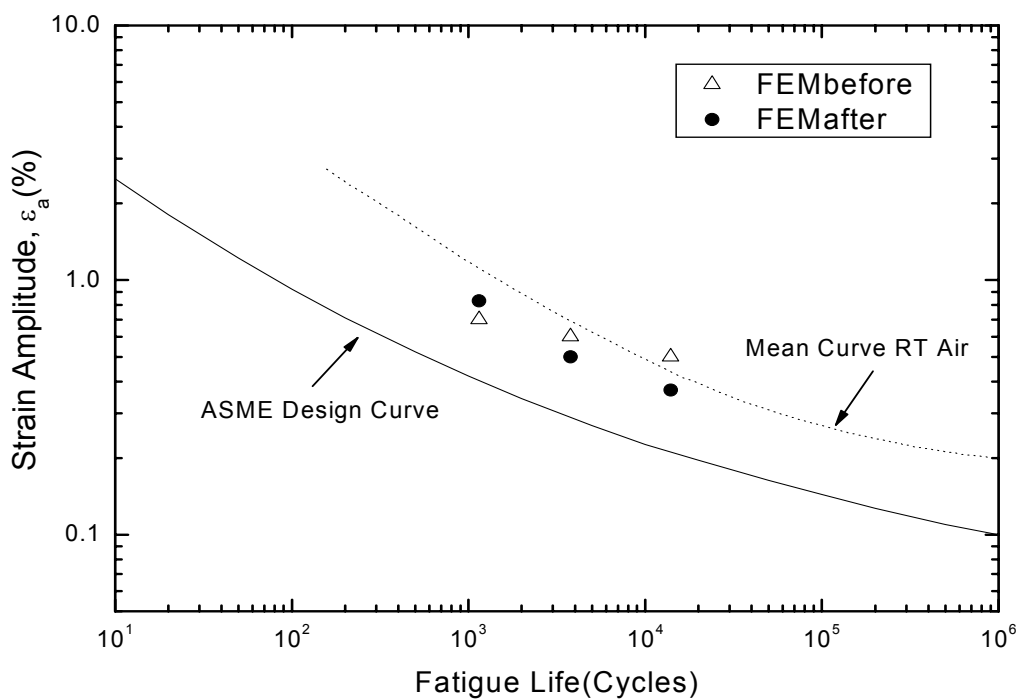


Fig. 11 표점거리 변형량 보정 저주기 피로 선도 비교

4. 실험결과 고찰

Fig. 12는 상기 실험결과로 구한 CF8M 재료의 피로수명 데이터와 일본에서 실험한 스테인리스강의 환경피로 실험결과들을 비교한 선도이다. 본 연구에서와 같은 실험조건인 비열화재 CF8M 변형률 속도 0.04%/s 데이터인 $\blacktriangle$ 와 근접하고 변형률 크기 감소에 따른 피로 수명 증가 추세가 다른 스테인리스강 환경피로 데이터들과 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 국내에서 처음으로 본 연구에서 시작품으로 제작한

저주기 환경피로 실험장치의 신뢰도를 가늠할 수 있는 기술적 근거가 된다. 하지만 본 실험에서는 피로주기의 증가에 따른 재료의 변형률 경화(strain hardening)현상을 고려하지 않았으므로 차후 실험 및 연구를 통하여 보완되어야 할 것이다.

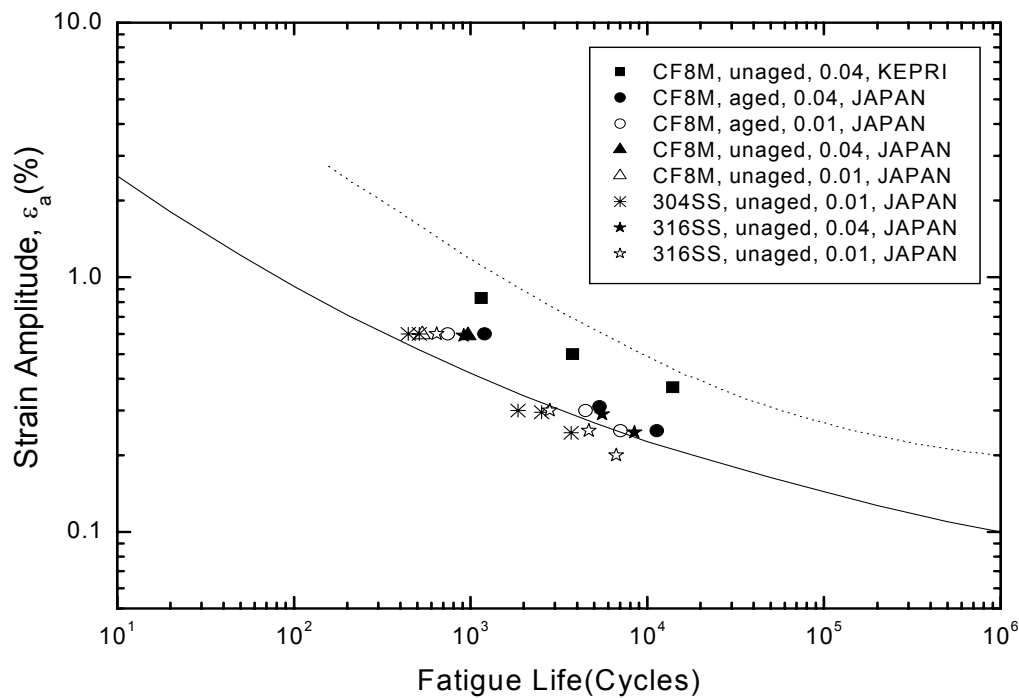


Fig. 12 선행 연구결과와의 비교

3. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소의 고온 고수압 환경을 모사한 저주기 피로실험장치를 개발하고, 현재 고리 1호기의 1차 계통 배관재로 사용되고 있는 CF8M에 대하여 피로 실험을 수행하였다. 실험결과를 유한요소 해석을 통해 보정하고, 보정된 실험결과와 변화 추이가 해외 선행결과들과 동일한 추세를 보임을 확인하였다. 이 결과는 개발된 실험장치의 신뢰도를 확인할 수 있는 근거로 활용될 수 있다. 그러나 동 실험 결과는 피로주기 진척에 따른 변형률 경화 및 연화가 고려되지 않았으므로 동일 온도, 하중 조건에서의 고온 예비 피로실험을 수행하고 이를 바탕으로 변형률을 조정하며 변형률 경화를 고려한 저주기 환경피로실험 자료를 생산하고 기기 피로수명 평가에 활용하여야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업 중 원전 주기적 안전성 평가 기술개발(대과제)의 세부과제인 경년열화 손상관리 적용기술 개발의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Y.S. Garud, et.al., 1997, "Corrosion Fatigue of Water-Touched Pressure Retaining Components in Power Plants", EPRI TR-106696
- (2) D.A. Gerber, 1998, "Evaluation of Environmental Fatigue Effects for a Westinghouse Nuclear Power Plant", 1998, EPRI TR-110043
- (3) 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.
- (4) M. Itatani, et.al, "Fatigue Crack Growth Curve for Austenitic Stainless Steels in BWR Environment", 2001, J. Pres. Ves. Tech. Vol. 123.
- (5) W. E. Ruther, et.al, 1993, "Environmentally Assisted Cracking in Light Water Reactors", NUREG/CR-4667, Vol.15
- (6) O. K. Chopra, 1999, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Fatigues of Austenitic Stainless Steels", NUREG/CR-5704
- (7) 1993, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing", ASTM E 606-92, pp. 523-537
- (8) O. K. Chopra and W. J. Shack, 2003, "Review of the Margins for ASME Code Fatigue Design Curve-Effects of Surface Roughness and Material Variability", NUREG/CR-ANL-02/39