CF8M 스테인리스 강 저주기 환경피로 실험의 주기적 변형률 경화 특성

정일석† · 하각현* · 김태룡* · 전현익** · 김영신**

Characteristics of the Cyclic Hardening in Low Cycle Environmental Fatigue Test of CF8M Stainless Steel

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

Key Words : Environmental Fatigue(환경피로), Corrosion Fatigue(부식피로), CF8M CASS(CF8M 주조 오스테나이트 스테인리스 강), Cyclic Strain Hardening(주기적 변형률 경화), Low Cycle Fatigue(저주기 피로)

Abstract

Low-cycle environmental fatigue tests of cast austenitic stainless steel CF8M at the condition of fatigue strain rate 0.04%/sec were conducted at the pressure and temperature, 15MPa, 315℃ of a operating pressurized water reactor. The used test rig was limited to install an extensometer at the gauge length of the cylindrical fatigue specimen inside the small autoclave. So the magnet type LVDT's were used to measure the fatigue displacement at the specimen shoulders inside the high temperature and high pressure water autoclave. However, the displacement and strain measured at the specimen shoulders is different from the one at the gauge length for the geometry and the cyclic strain hardening effect. FEM calculated the displacement and the strain of the gauge length from the data measured at the shoulders. Tensile test properties in elastic and plastic behavior of CF8M material were used in the FEM analysis. A series of low cycle fatigue tests simulating the cyclic strain hardening effect verified that the FEM calculation was well agreed with the simulated tests. The process and method developed in this study would be so useful to produce reliable environmental fatigue curves of CF8M stainless steel in pressurized water reactors.

1. 서 론

원자력발전소 압력경계 기기의 피로 건전성을 설계하는 ASME Section III Appendix 의 피로설계용 수명 곡선은 상온에서의 저주기 피로실험 결과를 바탕으로 평균 수명곡선의 변형률에 2 배, 수명에 10 배의 여유(margin)를 부여하여 보수적으로 적용하고 있다[1]. 그러나 압력경계의 기기가 피로측면에서 보수적으로 설계되었다고 하더라도 실 가동 조건에서는 고온, 고압 운전 환경에 의해 재료 표면에 부식 현상이 나타날 수 있으므로 실 운전환경에서의 피로실험 결과를 이용하여 수명을 평가하여야 한다고 주장하고 있다[2]. 현재 가동중인 원전의 안전등급 기기들에 대한 피로설계는 ASME B&PV Sec. III 에 의해 수행되며 비파괴 검사를 통해 발견된 균열의 성장거동 평가는 ASME B&PV Sec. XI 의 절차를 따르고 있다. 그러나 현재 ASME 에서 사용하고 있는 피로수명 평가곡선과 피로균열성장 평가곡선은 가동중 조건인 수화학 환경의 영향이 고려하지 않고 있으며 일부 수화학 조건에서는 기존의 자료들이 충분히 보수적이지 않을 수 있다[2-4].

본 논문에서는 압력경계 배관 재료인 CF8M 주조 스테인리스 강의 실 가동 환경에서의 피로수명 평가에 필요한 환경피로 수명평가 곡선을 개발하는 과정에서 나타나는 주기적 변형률 경화 현상(cyclic strain hardening effect)의 특성을 연구하였다

† 정회원, 한전 전력연구원
E-mail : isjeong@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5660 FAX : (042)865-5604
* 한전 전력연구원
** (주)K.L.E.S.

[5]. 그리고 가동 운전 조건을 실험으로 모사하기 위한 소형 autoclave 내부에서 봉상형 피로 시편의 변위량과 변형률을 정밀하게 측정하기 위한 실험 및 보정 방법을 개발하여 저주기 환경피로 실험을 수행하였으며, 유한요소 해석법에 의한 보정방법을 사용하여 별도의 실험을 수행하여 주기적 변형률 경화 특성과 실험의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

2. 저주기 환경피로실험장치

2.1 장치 설계요건

원자력발전소의 1 차측 고온고압 환경을 모사할 수 있는 피로실험장치를 제작하기 위해 다음 기능이 설계에 반영되어야 한다. 우선 DO, pH, H_2 등의 수화학 변수를 제어할 수 있어야 하고, 피로실험 하중장치는 변형률 제어(strain control)가 가능하고 반복 하중(fully reversed load)을 가할 수 있어야 한다. 변위측정장치는 표점거리의 변위를 정확히 측정할 수 있도록 충분한 강성을 보유하여야 한다.

2.2 제어 프로그램

프로그램은 시험편의 치수 및 실험조건 설정이 용이함은 물론 장시간의 시험에도 안정성을 가지도록 제작되었으며 사용자의 요구에 의한 수정도 가능하도록 설계하였다. 본 연구를 위하여 변형량의 평균값의 변화를 반영할 수 있는 수식적용 기능, 내장 LVDT 외의 추가 변위계측장치 입력 모듈을 추가하였다.

3. 저주기 환경피로 실험

이상의 설계요건에 따라 제작된 저주기 환경피로 실험장치의 모습은 그림 1 과 같다.

3.1 시험편

실험에 사용된 표준시편은 ASTM E 606-92[7]에서 제시한 저주기 피로실험시편 규격에 따라 그림 2 와 같이 제작하였다. 표점거리간 거리는 19.05mm, 시편중앙부의 지름은 9.63mm 이며, 시편의 끝단 이음부의 모양은 시편 고정장치의 설계형상에 맞게 제작하였다[6].

시험편 재료는 경수로형 원전 1 차 냉각재 배관의 재료인 CF8M 의 화학적 조성을 조사하여 가동중인 배관재와 동일한 CF8M CASS ingot 을 제작하였으며, 1050°C에서 4 시간 동안 후 열처리하고 급냉하였다. 주조 스테인리스강의 화학 조성은 표 1 과 같다.

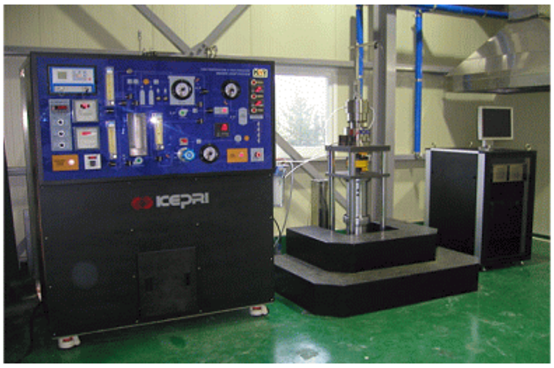

Fig. 1 Low-cycle environmental fatigue test rig

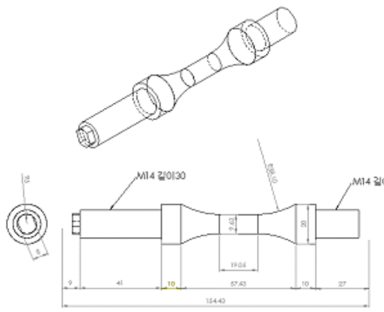

Fig. 2 Low-cycle fatigue test specimen

Table 1 Chemical composition

Materials	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
CF8M(1)	0.059	0.916	1.167	19.88	8.21	2.329	0.007	0.043
CF8M(2)	0.058	0.918	1.116	19.35	8.39	2.351	0.006	0.043
Average	0.058	0.917	1.141	19.62	8.30	2.340	0.006	0.043

3.2 실험조건 및 방법

가압경수로 환경과 비슷한 환경에서 실험을 수행하기 위하여 압력용기 내 실험용액의 최대 온도는 315°C, 최대 압력은 15MPa, 용존산소는 5ppb 이하로 설정하였다. 하중비는 R=-1 로 인장 및 압축이 반복되는 톱니형파이며 변형률 속도(strain rate)를 0.04%/s로 하여 최대 변형률(strain amplitude) 값이 시편 표점거리의 0.4%, 0.6%, 0.8%인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 이상의 실험조건과 수질 측정값을 표 2 에 나타내었다. 모든 실험은 변형률 제어(strain control)의 방법으로 수행되었으며 피로수명은 실험하중이 초기 인장하중의 25%로 감소할 때의 사이클 수(N_{25})에 의해 결정하였다[7].

저주기 환경피로 실험은 가동 운전 조건을 실험으로 모사하기 위하여 소형 autoclave 내부에서 실험을 수행하며 그림 3 과 같이 시편의 표점거리 밖에 체결된 LVDT 변위센서를 사용하여 변위와 변형률을 계측하게 된다. Real gage(R.G)는 extensometer

로 strain 을 측정 또는 제어하기 위하여 사용되며, 장비에 내장된 LVDT 가 설치되는 시험편의 위치를 shoulder gage(S.G)로 정의한 것이다. 표점거리 내에서 발생되는 주기적 변형률 경화는 shoulder gage 부에서도 변형률 또는 변위의 형태로 나타나며, 시험편의 측정위치가 다르므로 피로사이클과 변형률의 관계는 차이가 있다. 이와 같은 특성을 고려하기 위하여 본 연구에서는 두 가지 방법으로 실험을 수행하였다. 한가지는 FEM 을 이용하여 변형률 경화 특성을 적용하였고, 다른 하나는 공기중 실험을 통하여 시편 변위 측정부의 실제 변위거동을 모사할 수 있는 수식을 유도하여 실험에 적용하는 방법이다.

Table 2 Test conditions

Load Ratio (R)	-1 (tensile/compress)
Strain Rate	0.04%/s
Strain Amplitude (ε_a)	0.4%, 0.6%, 0.8%
Temperature	315℃
Pressure	15MPa
DO (dissolved oxygen)	< 5ppb

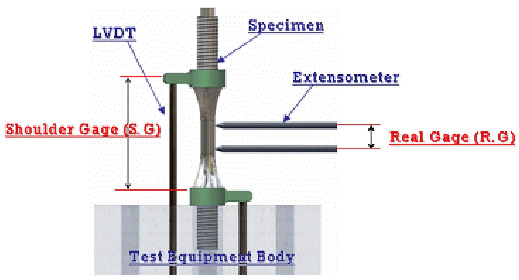

Fig. 3 Real gage and Shoulder gage of specimen

3.3 FEM 을 이용한 저주기 환경피로 실험결과

저주기 환경피로 실험은 표점거리의 변형량을 기준으로 제어를 하며, 표점거리와 실제측정거리가 다르기 때문에 실제로 측정되는 변형량과 표점거리 변형량과의 상관관계를 구하여 보정해주어야 한다. 동일 재료로 고온 인장실험을 수행한 결과와 실험조건을 입력데이터로 사용하여 그림 4 와 표 3 과 같이 유한요소 해석(FEM, finite element method) 방법으로 표점거리와 측정구간 사이에서의 변형량 차이를 계산하였다. 표점거리 보정을 위한 유한해석은 방법은 다음과 같다.

3.3.1 경계조건

유한요소해석 프로그램 ABAQUS 를 이용하여 시편을 모델링 하였다. 시편의 한쪽을 고정단으로 하고 반대편을 하중단으로 하여 축방향으로 분포하중을 인가하였다. 고정단에서의 축방향 변위를 고정하고 하중단에 분포하중을 non-linear 조건에서 하중을 서서히 늘려 인가하면서 표점거리 변위의 변화와 그립간 거리의 변화를 계산하였다.

3.3.2 해석결과

동일 재료의 315℃ 고온 인장시험 결과를 입력하고 비선형 응력해석을 수행하였으며 축방향 길이 신장량 해석결과는 그림 4 와 같다. 해석 결과를 바탕으로 표점거리 평행부 변위와 측정부 변위와의 상관 관계를 도시하고 이를 회귀분석(regression) 하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$y = -8.0102x^3 + 3.7336x^2 + 0.365519x + 0.00018653 \qquad (1)$$

관계식 (1)을 이용하여 실제 실험에서 적용되었던 측정부의 변위값으로부터 표점거리 평행부의 변위값을 구하면 보정된 Strain amplitude 를 얻을 수 있다.

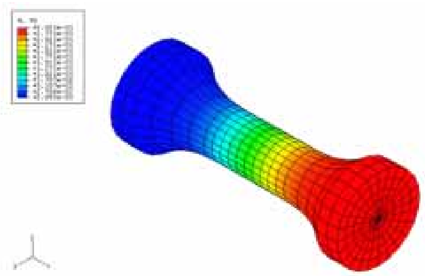

Fig. 4 FEM result of specimen elongation

Table 3 Results of compensation

Strain Amplitude (ε_a)	Corrected Strain Amplitude (ε_a)
0.4	0.580
0.6	0.800
0.8	1.014

3.3.3 저주기 환경피로 실험결과

상기의 해석결과에 따라 보정된 strain amplitude 를 적용하여 저주기 환경피로 실험을 수행한 결과를 표 4 에 요약하였다. 그림 5 는 측정된 피로하중의 최대치의 변화를 그린 선도이다. 초기 피로주기횟수 구간에서 주기적 변형률 경화의 영향으로 일정 변형률에서 피로 하중 최대치가 증가하는 것을 볼 수 있다. 주기적 변형률 경화현상은 초기의 피로주기횟수 구간에 큰 영향을 주고, 피로수명의 20% 이후 구간에서는 안정적으로 진행한다. 또

한 실험 조건인 변형률 크기의 값이 0.8%, 0.6%, 0.4%로 감소할수록 동일 반복주기횟수에서 경화현상이 감소함을 볼 수 있다.

Table 4 Test results

	Strain amplitude (%)		
	ε_α= 0.4	ε_α= 0.6	ε_α= 0.8
Strain rate (%/s)	0.04	0.04	0.04
Frequency(Hz)	0.025	0.0167	0.0125
Fatigue life(cycles)	8,300	3,040	1,660

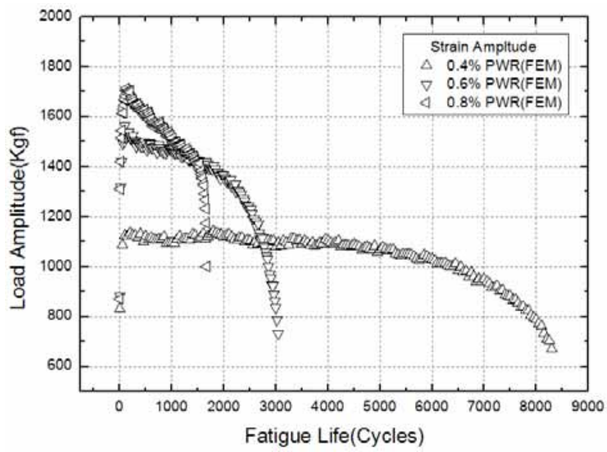

Fig. 5 Graph of load amplitude vs. fatigue life

3.4 수식을 적용한 저주기 환경피로 실험결과

주기적 변형률 경화 특성을 반영하고 실제 표점거리를 직접적으로 측정하여 보다 정밀한 변형률 계측을 위하여 다음과 같은 보정방법을 개발하였다.

PWR 환경을 제외한 동일한 조건의 공기중 고온실험을 통해 표점거리(R.G.)와 실제 측정거리(S.G)의 상관관계를 규명하고, 변형률 경화현상이 고려된 수식을 유도한다. 이 수식을 이용하여 실제 측정거리(S.G.)에 장착된 LVDT 의 변위를 cycle 에 따라 제어한다. PWR 조건의 고온 고수압 실험은 고온 실험을 통하여 유도된 수식을 사용하여 수행하게 된다. 그 이유는 온도에 따른 재료특성에 따라 공기중 고온상태와 동일 온도의 수화학 상태에서는 열팽창 및 피로특성은 동일하며, 환경에 의해 피로수명이 다르게 나타날 것으로 가정하였기 때문이다.

3.4.1 공기중 고온 실험결과 및 수식의 유도

본 실험에 앞서 수행한 공기중 고온 실험결과를 표 5 에 요약하였다. 그림 6 은 실험 중 계측된 extensometer 와 LVDT 의 변형률 상관관계를 나타내고 있다. 실험 전구간에서 선형의 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다. Extensometer 를 사용하여 제어한 고온실험에서 계측된 LVDT 의 변위거동을 그림 7 에 도시하였으며, 이를 통해 PWR 실험환경의 autoclave 내부 LVDT 변위거동을 파악하였다. 제어프로그램을 통해 실험에 반영되는 수식은 2 단계로 나누어 적용하였으며, 그 이유는 피로실험의 초기 및 중간단계에서의 shoulder gage 의 변위 변화 특성이 상이하여 1 개의 수식으로는 파형을 적절히 모사할 수 없기 때문이다. 첫번째 단계는 초기 피로 주기횟수 구간으로서 주기적 변형률 경화현상의 영향이 큰 초기부분 데이터를 외삽하여 3 차 polynomial 로 나타낸 것이다. 2 번째 단계는 변위거동이 안정화된 영역을 정리하여 수식화하는 것을 도시하고 있다. 주기적 변형률 경화현상을 고려하기 위하여 유도된 수식은 strain amplitude, 0.6% 실험의 경우 다음과 같다.

Step 1: $y = 0.00000000000005\,x^3 - 0.00000000203561\,x^2 + 0.00002694498772\,x$ (2)

Step 2: $y = 0.000000000000000002x^3 - 0.000000000001043333x^2 + 0.000000172683793925x + 0.114354586$ (3)

수식(1)과 (2)를 저주기 환경피로 실험에 적용하여 LVDT 변위센서의 실제 거동을 모사할 수 있다.

Table 5 Test results in air, 315℃

	Strain amplitude (%)		
	ε_α= 0.4	ε_α= 0.6	ε_α= 0.8
Strain rate (%/s)	0.04	0.04	0.04
Frequency(Hz)	0.025	0.0167	0.0125
Fatigue life(cycles)	10,230	5,214	2,654

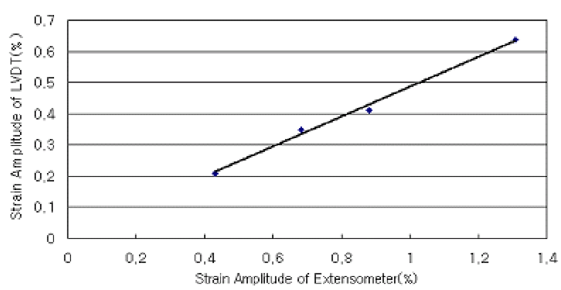

Fig. 6 Relation of extensometer and LVDT strain

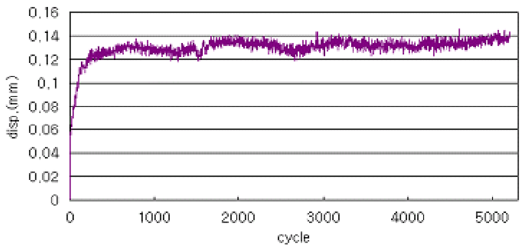

Fig. 7 Displacement behavior of LVDT

3.4.2 저주기 환경피로 실험결과

상기의 실험조건에 따라 유도 수식을 적용하여 저주기 환경피로 실험을 수행한 결과를 표 6 에 요약하였다. 유도 수식의 적용은 1 단계 구간이 끝나면 실험을 일시 중지한 후 2 단계 수식으로 교체한 후 실험을 재개하였으며 하중과 변형량이 큰 변화 없이 연결되도록 유지하였다. 그림 8 은 측정된 피로하중의 최대치의 변화를 그린 선도이다. 초기 피로 주기횟수 구간에서 소성변형에 의해 발생하는 주기적 변형률 경화(cyclic strain hardening)의 영향으로 일정 변형률에서 피로 하중 최대치가 증가하는 것을 볼 수 있다. 주기적 변형률 경화현상은 초기의 피로주기횟수 구간에 큰 영향을 주고, 피로수명의 20%~40% 이후 구간에서는 안정적으로 진행한다. 또한 실험 조건인 변형률 크기의 값이 0.8%, 0.6%, 0.4%로 감소할수록 동일 반복주기횟수에서 경화현상이 감소함을 알 수 있다.

Table 6 Test results

	Strain amplitude (%)		
	ε_α= 0.4	ε_α= 0.6	ε_α= 0.8
Strain rate (%/s)	0.04	0.04	0.04
Frequency(Hz)	0.025	0.0167	0.0125
Fatigue life(cycles)	6,818	3,610	1,473

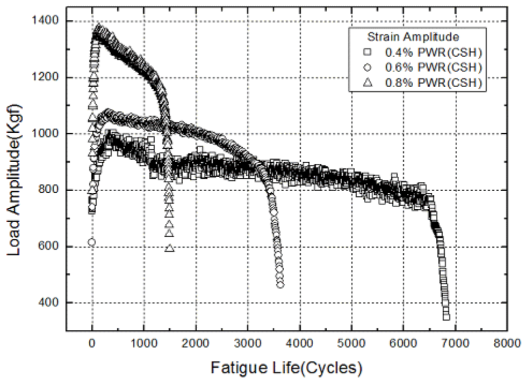

Fig. 8 Graph of load amplitude vs. fatigue life

3.4.3 유도 수식의 검증

주기적 변형률 경화현상을 적용하기 위한 수식은 모든 실험조건에 대하여 개별적으로 유도되었으며, strain amplitude, 0.6% 실험의 경우 수식을 사용하여 저주기 환경피로 실험을 수행한 후 측정된 LVDT 의 변위거동을 그림 9 에 도시하였다. 공기중 고온실험에서 계측된 LVDT 의 변위거동을 성공적으로 모사하고 있음을 알 수 있다.

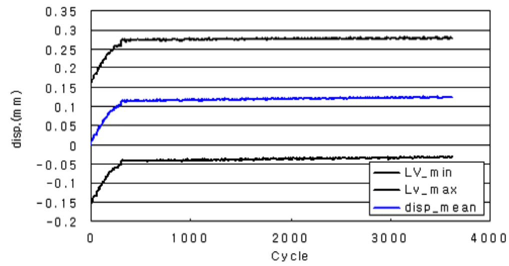

Fig. 9 Modified displacement behavior of LVDT

4. 실험결과 고찰

그림 10 은 상기 실험의 결과로 구한 CF8M 재료의 피로수명 데이터이다. 유도수식을 적용하여 저주기 환경피로 실험을 수행한 결과와 FEM 을 사용한 실험결과가 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 11 은 본 실험결과를 선행 유사 실험결과와 비교한 것이다. 2004 년 전력연구원의 실험방법과 본 실험의 FEM 해석을 이용한 실험방법은 동일하며 실험결과 또한 거의 유사하게 나타났다.

유도 수식을 이용하여 주기적 변형률 경화 특성을 고려한 실험과 FEM 해석을 이용하여 real gage 부와 shoulder gage 간의 상관관계를 정의하고 PWR 환경에서 실험한 결과와 비교해보면, FEM 해석을 통한 방법이 수식을 사용한 실험방법에 의한 피로수명보다 약간 보수적임을 알 수 있으나 유사한 피로수명 경향을 나타낸다. 이상의 결과는 FEM 해석을 통한 방법이 유효한 방법임을 검증한 것이며, 더불어 본 연구를 통해 개발된 유도 수식을 사용한 방법 역시 신뢰성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

일본의 데이터는 ASME 피로설계곡선에 가깝지만 본 실험의 결과는 공기중 평균곡선에 가깝게 나타나고 있으며 일본의 데이터에 비해 피로수명이 길다. 이것은 변형률 속도(strain rate)와 열화상태는 유사한 조건이지만 수화학 조건이 다르기 때문이며, 일본의 데이터는 용존산소(disolved oxygen)가 8ppb 인 것에 반해 본 실험은 5ppb 이하로 유지시켰으며 유량 등 기타의 수화학 조건도 상이하다. 일반적으로 실험실 조건상 Flow rate 는 발전소 가동상태와 비교하여 stagnant 에 가깝고, 이에 따라

전도도, pH 등과 같은 영향이 커져, 실험결과에 대한 차이가 클 수 있다. 본 실험의 조건은 국내 가동원전의 운전환경을 기초로 하여 설정한 것이다.

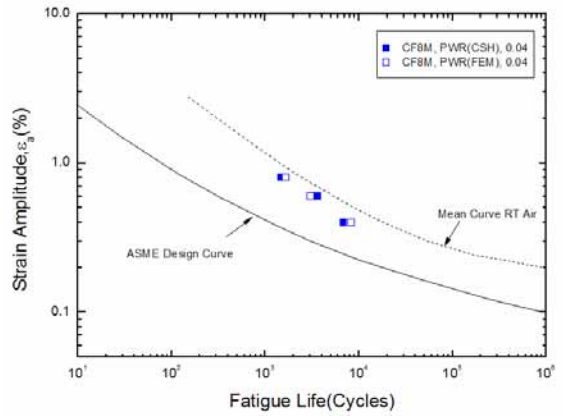

Fig. 10 The comparison of strain amplitude vs. fatigue life

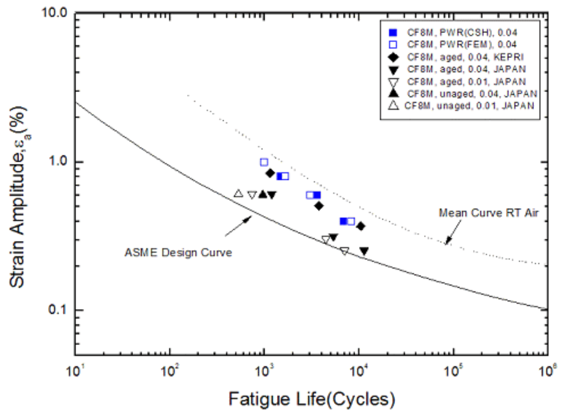

Fig. 11 The comparison of strain amplitude vs. fatigue life included others results

5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 1 차 계통 배관재료로 사용되고 있는 주조 스테인리스강인 SA 351 CF8M 스테인리스강의 주기적 변형률 경화 현상(cyclic strain hardening effect)을 고려한 저주기 환경피로 실험을 수행하였고, 기존의 FEM 해석을 이용한 방법과 새로이 개발된 수식을 이용한 방법을 상호 검증을 실시하였다.

본 연구를 통해 개발된 유도 수식을 이용한 주기적 변형률 경화 특성 보정 방법은 실험 시편의 Shoulder gage 부를 계측하는 LVDT 의 변위거동을 cycle 에 따라 2 단계로 구분하여 수식화하고 실험장치 제어프로그램에 입력하여 시험편의 real gage 부에서 발생하는 주기적 변형률 경화 특성을 저주기 환경피로 실험에서 모사하는 것이라 요약할 수 있다. 수식을 이용한 보정방법을 사용한 피로수명 특성을 비교한 결과, FEM 해석에 의해 얻은 결과나 기존 데이터의 경향과 유사하며 ASME Mean Curve RT air Curve 보다 낮게 나타났다. 또한 수식을 이용한 주기적 변형률 경화 특성 보정 방법을 통하여, 기존의 간접적인 FEM 해석을 통한 보정방법의 신뢰성을 확인 검증하였다. 하지만 간접적인 해석방법의 한계를 고려할 때 직접적인 현상을 실험에 적용하는 것이 현실적이며 실제현상을 더욱 근사적으로 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 주기적 변형률 경화 현상 보정방법은 향후 다양한 변형률 속도와 열화시편에 대한 데이터 확보를 위하여 추가적인 환경피로 수명평가 곡선 개발 연구에 활용될 것이며, 향후 국내 원전 주요기기의 환경피로 건전성 평가에 필요한 피로 물성치 생산의 기술기반 확립에 이바지 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국전력공사와 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업 원전기술혁신분야의 CF8M 스테인레스강 환경피로 실험 연구의 일환으로 수행하였습니다.

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*

(5) Julie A. Bannantine, et.al, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," 1990, *Prentice-Hall, Inc.,* pp. 40~87

(6) 1993, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," *ASTM E 606-92, pp. 523-537*

(7) 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*