열화 주조 스테인리스강의 환경피로균열 진전 거동

정일석†·이용성*·김상재*·송택호*·조선영**

Environmental Fatigue Crack Propagation Behavior of Aged Cast Stainless Steel

Ill-Seok Jeong, Yong-Sung Lee, Sang-Jai Kim, Taek-Ho Song and Sun-Young Cho

Key Words: Environmental Fatigue(환경피로), PWR(가압경수로), Reversing Direct Current Potential Drop Method(역전직류전위차법), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수 범위)

Abstract

Environmental fatigue crack propagation of CF8M and CF8A steels used in the domestic PWR were investigated on the simulated PWR condition(Temperature: 316℃ Pressure: 15MPa). The test equipment for environmental fatigue(high temperature-high pressure loop, autoclave, load frame, measurement system) were designed. As-received and 60-year aged specimens were used in the test. To compare with environmental fatigue test, another test was performed in the air condition. The fracture surface of specimens were difficult to verify the fracture modes such as striation, intergranular crack and cleavage and so on. As the ferrite content of CF8M is increased, more particles covered fracture surface were peeled.

1. 서 론

환경피로는 발전설비중 수분과 접촉하고 있는 기기들의 균열발생 메커니즘 중 하나이며 균열에 의한 기기 손상의 주요 원인중 하나인 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 발전소의 설계 및 운영 측면에서 피로균열의 생성 및 성장에 미치는 환경의 영향을 어떻게 고려하여 평가할 것인가는 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 있다[2]. 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 피로균열성장 곡선은 수화학 환경의 영향이 충분히 고려되지 못한 것으로 알려져 있으며 일부 수화학 조건에서는 기존의 자료들이 충분히 보수적이지 못한 것으로 밝혀졌다[2-4]. 스테인리스강에 대해서는 최근 많은 연구들이 진행되고 있으나 지금까지 수행된 스테인리스강의 환경피로 실험결과들은 주로 SS316NG와 SS304 등에 집중되어 있고 용존산소(dissolved oxygen, DO)량이 높은 BWR(boiling water reactor) 조건에서 대부분 수행되었다[4-6]. 주조 스테인리스강에 대한 현재까지 발표된 실험 데이터들을 살펴보면 수화학 조건에 따라 일부 데이터들은 열화에 의해 균열성장속도가 촉진되는 것으로 나타난 반면, 일부 데이터들은 열화에 거의 영향이 없는 것으로 나타났다[7]. 그러나 이들 데이터들은 주로 BWR 조건에서 얻

† 한국전력공사 전력연구원
E-mail : isjeong@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5511 FAX : (042)865-5514
* 한국전력공사 전력연구원
** KR정밀(주)

어진 것이므로 용존산소나 용존수소와 같이 수화학 조건이 다른 PWR(pressurized water reactor) 조건에 대한 환경피로 특성을 명확히 판단하는 것이 어려운 실정이다. 따라서, 주기적 안전성 평가나 수명평가와 같이 주요 기기들의 경년열화에 대한 평가가 중요하게 고려되는 경우 이와 같은 불확실성을 제거하여야 한다. 본 연구에서는 PWR 가동환경을 모사할 수 있는 장비를 개발하고 원전 주냉각재 배관으로 사용되고 있는 주조 스테인리스강에 대한 환경피로균열 성장특성을 분석하였다.

2. 환경피로 균열진전속도 측정 실험

2.1 실험시편 제작

국내 PWR 원전의 주냉각재 배관으로 사용되고 있는 재료는 크게 2 종류로 분류된다. 먼저 WH형 발전소에서는 주냉각재 배관으로 주조 스테인리스강이 사용되며, CE형 발전소는 스테인리스로 내부를 덧씌운 탄소강이 사용되고 있다. 주냉각재 배관에 사용되는 주조 스테인리스강으로는 SA351 CF8M과 SA351 CF8A의 2 종류가 사용되고 있으며 탄소강으로는 단조된 SA508 Cl.1a재료가 사용된다. 본 연구에서는 상대적으로 주기적 안정성평가(PSR)의 적용이 빠르고 경년열화에 의한 재료물성치의 변화 가능성이 높은 것으로 알려진 SA351 CF8M과 SA351 CF8A을 실험 대상 배관 재료로 선정하였다. 실제 SA351 CF8M은 고리 1호기, SA351 CF8A는 고리 3&4와 영광 1&2에 사용되고 있는 재료이다.

시험편 재료 국내 원전에서 CF8M이 사용되고 있는 고리 1호기와 CF8A가 사용되고 있는 영광 1,2호기 주냉각재 배관의 재료시험성적서(Certified Material Testing Report, CMTR)에 근거하여 시편 블록을 제작하였다. 실제 발전소에 공급된 것과 동일한 재료를 이용하여 시험하는 것이 가장 바람직하지만, 고리 1호기와 영광 1,2호기 배관의 제작자인 미국 Sandusky F&M사와 접촉해 본 결과 동일 배관의 잔존 재료가 없으며, 동일한 방법에 의한 시편 블록의 제작이 불가능한 것으로 확인되었다. 따라서, CMTR 에 기술되어 있는 화학조성과 인장강도 등을 고려하여 시편 블록의 화학조성과 주조 방법을 결정하고 포항제철연구소와 삼신특수강으로부터 시편 블록을 제작하였다. CF8M의 경우, ferrite 함량의 차이에 따른 부식피로 특성을 알아보기 위하여 각각 25wt.%와 10wt.%로 조절하여 제작하고 CF8MH, CF8ML로 정하여 사용하였다. 화학적 조성은 Table 1과 같다. 시험편은 ASTM E 647-95[8]에 근거하여 1TCT 시험편을 준비하였다. 열화된 시편의 환경피로 특성을 알아보기 위해 아레니우스식을 이용하여 Q=125kJ/mole, 290℃가동온도, 400℃ 가속열화온도의 조건으로 시편을 60년 가속열화를 시킨 후 실험에 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of CF8M and CF8A

Comp(%)	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S
CF8MH	0.043	0.563	1.27	20.43	9.1	2.62	0.171
CF8ML	0.046	0.587	1.16	17.92	10.8	2.38	0.015
CF8A	0.05	0.626	1.18	19.88	8.74	-	0.014

.CF8MH:25wt.% ferrite, CF8ML:10wt.% ferrite

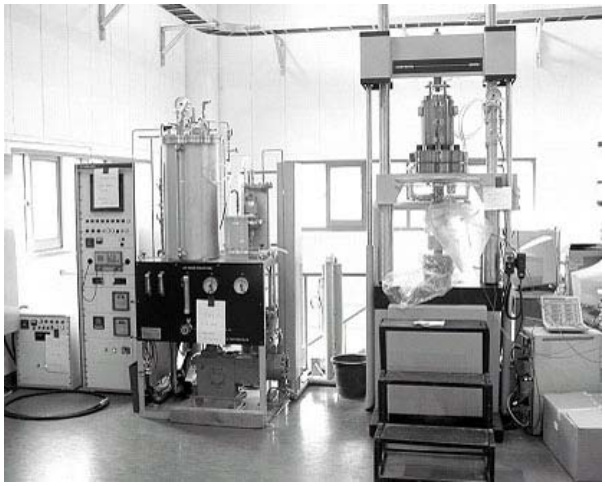

Fig. 1 Configuration of corrosion fatigue tester

2.2 실험장비

주냉각배관의 가동환경은 316℃, 15㎫ 정도이며, 이러한 환경에 적합한 부식피로시험장비를 설계하였다. 전체적인 구성은 Fig. 1에서와 같이 하중장치, 부식환경모사를 위한 챔버, 용액순환을 위한 LOOP, 제어기 등으로 크게 나눌 수 있으며 실험장치는 고온수화학 Loop, Autoclave, Loading Machine, DAQ로 구성되어 있다. 고온 수화학 Loop의 주요 설계요건은 최대유량이 6L/hr, 온도와 압력은 340℃, 17MPa, 수화학조성에서 용존산

소(DO)는 5ppb이하, 용존수소(DH)는 30mL/kg·H_2O 이하, 전도도는 20~ 30μS/cm 이하의 조건을 조성할 수 있도록 하였다. Autoclave는 내부 용량이 8L로 내부를 hastelloy로 덧씌워 부식에 저항성이 높도록 하였으며, 인장하중과 압축하중을 모두 수용할 수 있도록 내부의 하중지지물을 설계하였다.

Autoclave는 고온, 고압의 부식조, pressure balancing mechanism, heating unit, thermo-controller 등으로 구성되어 있다. Autoclave는 상하단의 금속 gasket을 이용하여 밀봉하고 있으며, pressure balancing mechanism을 이용하여 autoclave내에 발생하는 압력으로 인해 정확한 하중부하가 이루어지지 않는 문제점을 해결하였다. Autoclave 상하판 외벽에 히터가 장착되어 있어 내부의 온도를 thermo-couple로 감지하여 thermo-controller를 통해 정확히 제어함으로써 실험의 신뢰성을 높였다. 고온 수화학 Loop는 고압펌프를 이용하여 열교환기와 autoclave의 내부로 탱크에 보관중인 시험용액을 분사하도록 되어있다. 시험용액은 압력이 유지되는 동안 back pressure regulator에 의해 분사되어지며, 유량계를 거쳐 시험용액 탱크로 회수된다.

2.3 균열길이 측정

고온 수화학조건하에서는 실험기간동안 실험조건유지의 문제점과 재료부식에 의해 발생하는 부식생성물과 보호피막, 용액에서 굴절 등의 현상으로 인해 균열길이를 광학적으로 직접 측정하기가 어렵다. 특히, 고온·고압인 경우 부식조 내부를 모니터링(monitoring)할 수 없기 때문에 결과적으로 간접적인 방법을 통해 균열길이를 측정할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 여러 간접적 균열측정법중 역전직류전위차법(reversing direct current potential drop)을 사용하였다. 기본원리는 시험편의 전기저항이 균열진전에 따라 단면적의 감소로 인해 증가하는 물리적 특성 변화 원리를 이용한다. 시험편에 일정한 전류를 흘려 균열의 양단에서 전위차를 측정하고 균열길이 증가분을 전위차 증가분과 대응하여 검출할 수 있다. 역전직류전위차법은 전류가 한쪽 방향으로 흘러 발생하는 DC Potential로 발생하는 열전효과(thermoelectric effects)의 영향을 방지할 수 있다. 균열길이 측정 오차를 최소화하기 위해서는 열적으로 유도된 전압을 보정해 주어야 한다. 열전효과의 영향을 방지하고 장기 실험기간동안 안정된 고해상도의 균열길이를 측정하기 위해 일정 시간간격으로 전류방향을 역전시켜서 전압을 측정함으로써 신뢰할 수 있는 균열길이를 측정할 수 있다[8].

Table 2 Test conditions in PWR environment

Load ratio	Freq. Hz	Temp. ℃	Pres. MPa	DO ppb
0.2	0.5	316	15	5

2.4 실험조건

PWR 환경조건에서 주냉각배관재에 대한 부식피로특성평가를 위한 실험조건은 역학적 측면에서 하중반복속도(Freq.)와 하중비(R)를 들 수 있으며, 환경적 측면에서는 PWR 환경을 모사할 수 있도록 설계된 Autoclave와 Loop와 관련하여 온도, 압력, 용존산소농도(DO), 용존수소농도(DH), pH 등이 있다. 본 연구에서는 역학적 조건인 하중반복속도는 0.5㎐, 하중비는 pressure transient를 고려하여 0.2, ΔK는 약 11~30㎫$\sqrt{\mathrm{m}}$ 인 범위로 설정하였다. 환경변수는 1차 냉각배관의 출구측 온도인 316℃로 설정하여 온도의 영향을 충분히 고려하였고, 압력은 온도에 따른 포화압력에 따르므로 약 15㎫ 정도로 정하였다[10]. DO의 영향을 고려하기 위해 가동환경과 유사하도록 5ppb로 설정하였다. Table 2에 환경 피로 실험조건을 정리하였다.

2.5 실험결과 및 고찰

환경피로 실험은 ASTM E 647-95에 의거하여 진행되었다. CF8MH와 CH8ML, CF8A 배관재를 건전재와 열화재로 구분하여 실험을 수행하고 환경조건에 따른 부식피로특성평가와 CF8MH와 CF8ML의 페라이트 함량에 따른 부식피로 특성평가, 그리고 공기중 조건에서의 환경피로 실험결과와 비교평가 하였다.

Fig. 2~3은 공기중 조건과 PWR 환경에서의 건전재 및 열화재에 대한 응력확대계수와 균열진전속도와의 관계를 각각 보여주고 있다. 실험결과를 Paris의 회귀식에 적용시켰을 경우의 상수 m과 C 값을 Table 3~4에 나타내었다.

Table 3 Results of CF8M & CF8A in air condition

Aging Time (years)	Specimen	C	m
As-received	CF8MH	4.80E-11	4.48
	CF8A	3.80E-13	5.75
Aged(60)	CF8MH	8.64E-12	5.17
	CF8A	1.88E-13	6.27

Table 4 Results of CF8M & CF8A in PWR condition

Aging Time (years)	Specimen	C	m
As-received	CF8MH	2.93E-08	2.46
	CF8ML	2.22E-8	2.26
	CF8A	4.13E-10	3.96
Aged(60)	CF8MH	5.60E-10	3.79
	CF8ML	9.74E-10	3.67

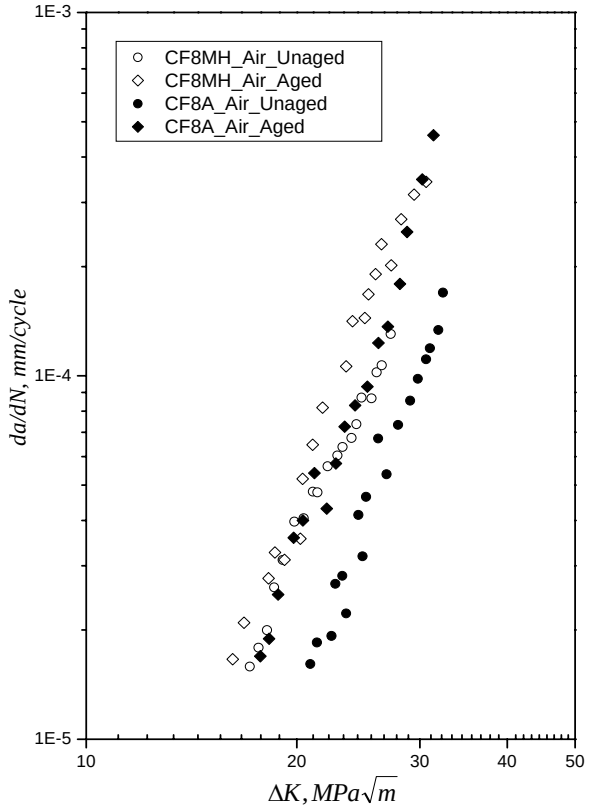

Fig. 2 da/dN-ΔK curve in air condition

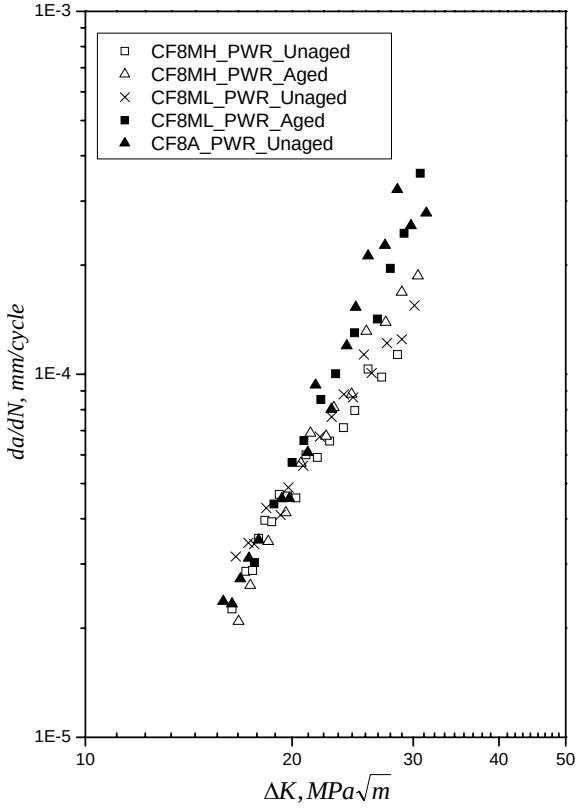

Fig. 3 da/dN-ΔK curve in PWR condition

Fig. 2에서 CF8MH와 CF8A의 건전재와 열화재를 공기중 실험조건에서 비교한 결과 건전재의 경우 페라이트 함량이 높은 CF8MH가 CF8A에 비해 균열진전속도가 빠르게 나타났으며, 열화재의 경우 300~450℃의 온도범위에서 주조스테인리스강의 열취화 특성으로 인해 CF8MH와 CF8A사이에 균열진전 특성이 크게 차이나지 않았다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 실제 원전에서 사용중인 배관의 건전성을 평가하는 경우 두 재료간에 균열진전 특성이 유사하게 나타날 수 있음을 고려할 수 있고, 설계자료로 사용된 건전재 CF8A의 균열진전특성은 장수명 평가되었을 가능성을 확인할 필요가 있다.

PWR 조건하에서 건전재와 열화재의 실험결과를 Fig. 3과 같이 나타내었다. CF8MH와 CF8ML에 대해 열화재가 건전재보다 빠른 균열진전 특성을 보이며, △K가 22㎫$\sqrt{\text{m}}$ 보다 큰 영역에서 열화재의 균열진전속도가 가속화됨을 알 수 있다. 이러한 특성은 열화재가 취성특성으로 인한 파괴인성이 저하됨에 따라 부식환경에 의한 영향보다 역학적인 요인이 더욱 크게 작용하기 때문인 것으로 생각된다. CF8A는 입계부식 균열진전에 취약하여 PWR 환경에서 균열진전속도가 빠르게 나타날 수 있는데, 위의 결과에서처럼 다른 건전재보다 균열진전속도가 빠르게 나타남을 확인할 수 있다.

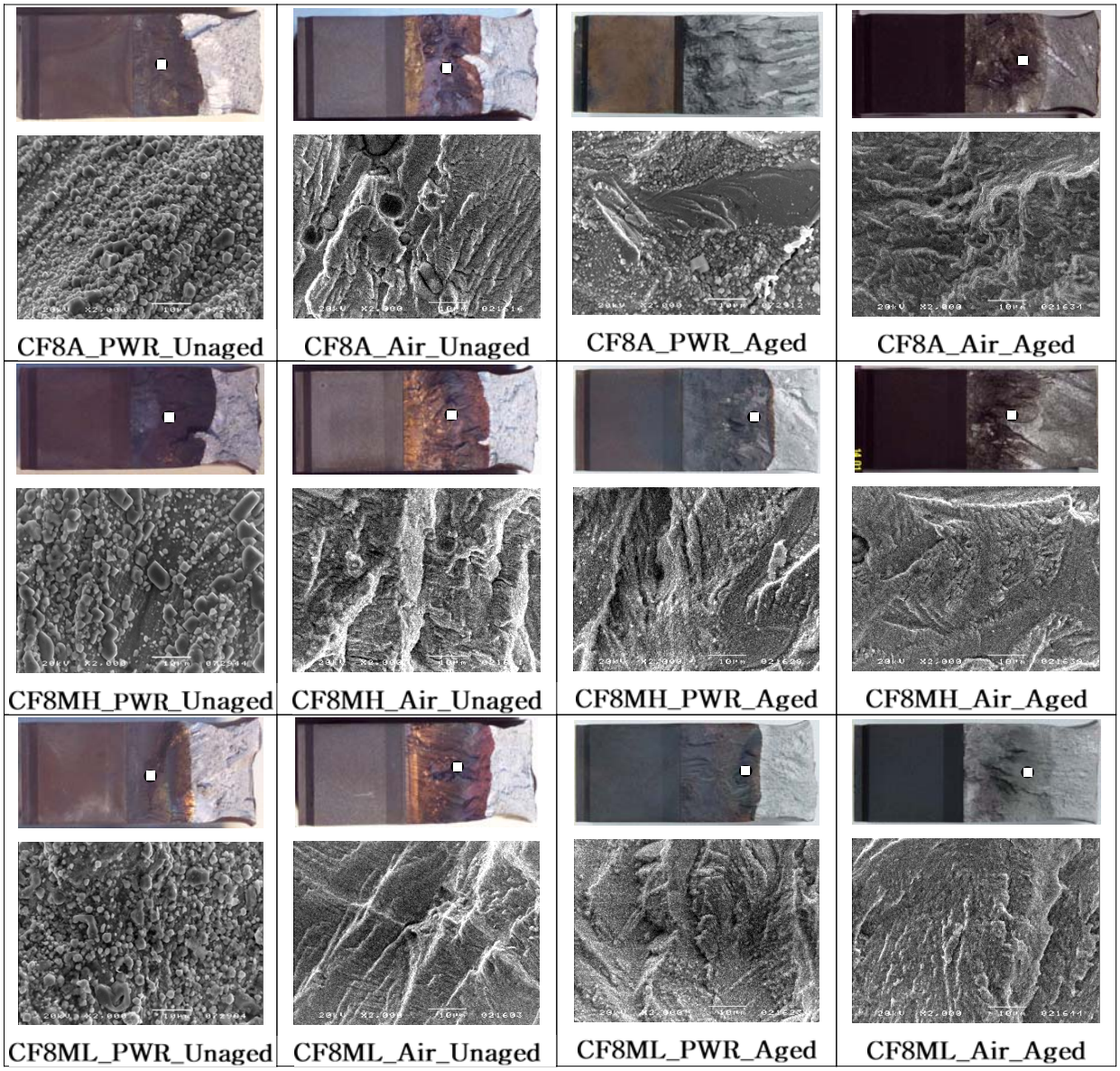

Fig. 4 Fractograph after test on air and PWR conditions using aged and unaged specimens. ○ SEM(X2000) photo position.

저배율 사진에서 파면은 전반적으로 벽개면과 벽개단이 관찰된다. 이것으로 모든 시험편은 취성적인 거동으로 파단되었다는 것을 판단할 수 있다. SEM 촬영 위치를 나타내는 표시 ○ 별로 각 시편을 비교 하면, 고온 고수화학 상태에서 실험한 시험편에서는 두텁고, 치밀한 산화 피막이 생성되어, striation, 입계균열, 벽개면 등을 구별하기 어렵다.

그러나 산화물 알갱이의 크기가 균열이 진전할수록 작아지는 현상을 이용해, 환경피로 실험 끝부분에서 생성된 파단면을 관찰하면, 상온 실험에서 실험한 시험편의 파단면과 비슷한 벽개면이 관찰된다. 또한, 석출물이 빠져 나간 자국, Striation 등이 보이며, 이차 균열도 관찰할 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 PWR 환경하에서 주냉각배관재인 CF8M과 CF8A를 대상으로하여 부식피로특성평가를 수행하였으며, 정확한 실험을 위해 PWR환경을 모사하기 위한 실험장비 구축하고 균열측정방법으로 Reversing DCPD법을 적용하였다. 국내에서는 거의 전무한 PWR환경에서 주냉각배관재에 대한 피로실험자료를 축적하고 그 특성을 파악함에 있어 큰 의미가 있다고 생각되며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 공기중 조건보다 PWR 환경조건에서 전체적으로 균열진전속도가 높게 나타나는 현상을 보이므로 기존에 설계시 반영했던 공기중 조건에서의 설계기준에 대한 재평가가 이루어질 필요가 있는 것으로 판단된다.

2) CF8A 재료에 대해 건전재와 열화재의 피로진전 특성 차이가 크게 나타남에 따라 CF8A 배관의 설계수명에 있어 장수명 평가 가능성 여부를 확인해 볼 필요가 있다.

3) PWR 조건 내에서는 재료의 열화에 의해 재료물성이 바뀌어 균열성장속도를 높이는 것보다는 가동환경과 역학적 하중이 복합적으로 작용하여 피로균열 성장에 더 큰 영향을 줄 수 있다.

4) PWR 환경조건에서 CF8M의 ferrite 함량에 따른 부식피로특성 차이는 크게 나타나지 않았다.

5) 파단면은 시편의 종류와 실험 조건에 관계없이 벽개면이 관찰되는 취성파면이며, 석출물이 빠져 나간 자국, Striation, 이차 균열도 관찰할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

(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) W. J. Shack, 1994, "Review of Environmental Effects on Fatigue Crack Growth of Austenitic Stainless Steels", NUREG/CR-6176

(8) 1995, "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates", ASTM E 647-95, pp. 578-614