

PWR 환경에서 RCS 배관재의 피로파괴 거동 연구
Fatigue Characteristics of RCS Tube Materials
on the PWR Condition

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

조선영
KR 정밀(주)
경기도 용인시 포곡면 전대리 137-1

요 약

PWR 원전설비중 RCS 배관재료로 사용되는 CF8M과 CF8A의 부식피로 특성을 연구하였다. PWR 환경(온도:316℃, 압력: 15MPa)을 모사하기 위해 INSTRON, 오토크레이브, LOOP 및 측정 시스템으로 구성된 장치를 제작하였다. 실험 결과 ΔK 범위가 11 ~ 20 $MPa \sqrt{m}$ 에서의 균열 성장 속도는 공기중보다 PWR 환경에서 더 빨리 성장하였고, 20 $MPa \sqrt{m}$ 이상에서는 비슷한 균열성장 속도를 보였다. 한편, ferrite 함량 차이에 따른 균열성장속도 차이는 없었다. 실험 후 파단면을 관찰하면, 실험 중에 생성된 산화막으로 덮혀 있으며, 산화막 입자의 크기는 ferrite 함량이 많은 CF8M 시편에서 더 크게 관찰되었다.

Abstract

In this study, corrosion fatigue characteristics of CF8M and CF8A steel were investigated on the simulated PWR condition(Temp.:316℃, Pres.: 15MPa). To make the simulated PWR condition, the special test machine consisted of INSTRON, Autoclave, LOOP and Measurement system was developed. As ΔK is ranged from 11 to 20 $MPa \sqrt{m}$, Crack growth rate of PWR condition is faster than air condition. Above 20 $MPa \sqrt{m}$, the crack growth rate of PWR and air condition is similar. Corrosion fatigue characteristics regardless of the ferrite contents(10~25wt.%) is not

different. After the test, the fracture surface of specimens was examined. It was difficult to verify the fracture modes such as striation, intergranular crack and cleavage and so on. As the ferrite content of CF8M is increased, the more particles covered fracture surface were peeled.

1. 서론

PWR 원전설비중 RCS 배관은 290~320℃의 고온과 약 17MPa의 고압의 수화학 환경하에서 가동된다. 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.1a 재료가 사용된다. 본 연구에서는 상대적으로 주기적 안정성평가(PSR)의 적용이 빠르고 경년열화에 의한 재료물성치의 변화 가능성이 높은 것으로 알려진 SA351 CF8M과 SA351 CF8A를 실험 대상 배관 재료로 선정하였다. 실제 SA351 CF8M은 고리 1호기, SA351 CF8A는 고리 3&4와 영광 1&2에 사용되고 있는 재료이다. 이러한 주조스테인리스강은 경수로 1차 압력경계 내의 주배관, 밸브 및 펌프 케이싱 등에 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 CF8M은 몰리브데니움의 첨가로 오스테나이트 기지에 약 15-25%의 ferrite가 생성되어 있는 듀플렉스 상을 이루며, 이것은 산화 및 환원성 부식분위기에서의 내식성을 증가시키는 역할을 한다⁽¹⁾. 그러나, 이러한 몰리브데니움의 첨가에 따른 듀플렉스 상의 생성은 열취화에 민감하여 원전 운전온도에서 장시간 사용됨에 따라 인장강도가 증가하고 파괴인성이 감소되는 경향을 보이고 있다⁽²⁾. 한편, CF8A는 CF8M에서 열취화로 인해 파괴인성이 저하된다는 것이 알려지면서 배관재로 사용되기 시작하였으며, 화학조성 측면에서 CF8과 동일하고 Wrought 스테인리스 Type304와 유사하다. 그러나, 인장강도에서 CF8보다 높은 강도를 요구하고 있다. 일반적으로 CF 계열 합금은 열처리로 강도를 증가시키지 않고 Specification 내에서 합금원소의 조절을 통해 ferrite/austenite의 비를 조절하여 강도를 증가시킨다⁽¹⁾. 따라서, SA351 CF8A는 주어진 화학조성 하에서 ferrite/austenite의 비를 조절하여 CF8보다 인장강도와 항복강도를 5~10ksi 정도 증가시키는 것으로 알려져 있다. 한편, 화학조성 측면에서 CF8A의 ferrite 조직은 열적으로 불안정하여 425℃ 이상에서는 사용을 금하고 있다. 이들 재질은 발전소 운전온도에서 열시효 취화가 발생하며, ferrite 내에서 Cr-rich α' phase, Ni- & Si-rich G phase, $M_{23}C_6$, γ (austenite)의 석출 및 성장이 열취화의 주요 메커니즘인 것으로 알려져 있다. 그리고, ferrite/austenite 경계에서 탄화물의 석출 및 성장 역시 열취화의 원인이 되며, 이와 같이 국부적으로 상의 생성과 화학조성의 변화는 인장강도를 증가시키고 파괴인성을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 또한, 국부적인 화학조성 변화와 인장강도 증가가 고온에

서의 부식피로(EAC)에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되고 있으나, 아직까지 명확하게 설명되지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 원자력발전소 주냉각배관이 가동되는 환경을 조사하여, 배관재가 여러 가지 환경인자, 즉 용존산소(dissolved oxygen), pH, 용존수소(dissolved hydrogen), 전도도(conductivity) 온도, 순환속도 등을 고려하여 배관재에 대한 부식피로자료를 축적하는 것은 큰 의미를 갖는다. 이러한 중요성으로 인해 관련된 연구가 여러 연구기관으로부터 보고서를 통해 보고되고 있지만 대부분의 실험데이터는 BWR(boiling water reactor)에 관련한 데이터가 많으며⁽³⁻⁵⁾, 국내에 건설된 PWR (pressurized water reactor)에 대한 자료는 부족한 실정이고, 기타 다른 조건의 저주기부식피로실험에 대한 자료도 최근에 발표되고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 따라서 주냉각배관의 부식피로특성을 평가하기 위해 가동환경을 조사할 수 있는 장비개발과 CF8M과 CF8A에 대한 부식피로특성 평가와 CF8M의 경우, ferrite 함량과 열취화특성의 차이에 따른 부식피로특성평가를 병행하였다.

2. 주냉각배관재의 부식피로특성

2.1 시험편

시험편 재료는 실험에 사용될 배관재로 주조 스테인리스강(SA351 CF8M & CF8A)이 선택됨에 따라 국내 원전에서 CF8M이 사용되고 있는 고리 1호기와 CF8A가 사용되고 있는 영광 1,2호기 주냉각재 배관의 재료시험성적서(Certified Material Testing Report, CMTR)에 근거하여 시험 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 시험 블록의 제작이 불가능한 것으로 확인되었다.

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

따라서, CMTR 에 기술되어 있는 화학조성과 인장강도 등을 고려하여 시험 블록의 화학조성과 주조 방법을 결정하고 포항제철연구소와 삼신탄수강으로부터 시험 블록을 제작하

였다. CF8M의 경우, ferrite 함량을 25wt.%와 10wt.%로 조절하였다. 본 논문에서는 CF8M ferrite 25wt.%, 10wt.%인 재료에 대해 각각 CF8MH, CF8ML로 정하여 사용하였다. 화학적 조성은 Table 1과 같다. 시험편은 ASTM E 647-95⁽⁹⁾에 근거하여 1TCT 시험편을 준비하였다.

2.2 부식피로시험장비

주냉각배관의 가동환경은 316°C, 15MPa 정도이며, 이러한 환경에 적합한 부식피로시험장비를 설계하였다. 전체적인 구성은 하중장치, 부식환경모사를 위한 챔버, 용액순환을 위한 LOOP, 제어기 등으로 크게 나눌 수 있으며, 하중장치와 부식챔버에 대한 개략도를 Fig.2와 같이 나타내었다. Fig.2와 같이 부식피로 시험장치는 고온 수화학 LOOP, Autoclave, Loading Machine, DAQ로 구성되어 있다. 고온 수화학 LOOP의 주요 설계요건은 최대유량이 6 L/hr, 온도와 압력은 340°C, 17MPa, 수화학조성에서 용존산소(DO)는 5ppb 이하, 용존수소(DH)는 30mL/kg·H₂O 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-controller등으로 구성되어 있다. Pressure vessel은 상하단의 금속 gasket을 이용하여 sealing하고 있으며, pressure balancing mechanism을 이용하여 Autoclave내에 발생하는 압력으로 인해 정확한 하중부하가 이루어지지 않는 문제점을 해결하였다. Autoclave 상하판 외벽에 heater가 장착되어 있어 내부의 온도를 thermo-couple로 감지하여 thermo-controller를 통해 heater를 정확히 제어함으로써 시험의 신뢰성을 높였다. 고온 수화학 LOOP는 고압펌프를 이용하여 열교환기와 Autoclave안으로 탱크에 보관중인 시험용액을 분사하도록 되어있다. 시험용액은 back pressure regulator에 의해 압력을 유지되는 동안 분사되어지며, flow meter를 거쳐 시험용액 탱크로 회수된다.

2.3 균열길이 측정

고온 수화학조건하에서는 시험기간동안 시험조건유지의 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 수밖에 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 측정오차를 최소화하기 위해서는 열적으로 유도된 전압을 보정해 주어야 한다. 열전효과 의 영향을 방지하고 장기 실험기간동안 안정된 고해상도의 균열길이를 측정하기 위해 일정 시간간격으로 전류방향을 역전시켜서 전압을 측정함으로써 신뢰할 수 있는 균열길이를 측정할 수 있다⁽⁹⁾.

2.4 실험조건

PWR환경하에서 주냉각배관재에 대한 부식피로특성평가를 위한 실험조건은 역학적인 측면에서 하중반복속도(Freq.)와 하중비(R)를 들 수 있으며, 환경적 측면에서는 PWR환경을 모사할 수 있도록 설계된 Autoclave와 LOOP를 이용하여 온도, 압력, 용존산소농도(DO), 용존수소농도(DH), pH 등이 있다. 본 연구에서는 역학적 조건인 하중반복속도를 0.5Hz, 하중비는 pressure transient를 고려하여 0.2, ΔK 는 약 $11\sim 30\text{ MPa}\sqrt{m}$ 인 범위로 설정하였다. 환경변수는 1차 냉각배관의 출구측 온도인 316°C로 설정하여 온도의 영향을 충분히 고려하였고, 압력은 온도에 따른 포화압력에 따르므로 약 15MPa 정도로 정하였다⁽¹⁰⁾. DO의 영향을 고려하기 위해 가동환경과 유사하도록 5ppb로 설정하였다. Table 2에 실험조건을 정리하였다.

Table 2 Test conditions

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

2.5 실험결과 및 고찰

부식피로시험은 ASTM E 647-95에 의거하여 실험이 진행되었다. 열화되지 않은 CF8MH와 CH8ML, CF8A 배관재에 대해 재료별 부식피로특성평가와 CF8MH와 CF8ML의 페라이트 함량에 따른 부식피로 특성평가, 그리고 공기중 조건에서 피로실험한 결과와 비교평가 하였다. Fig.3과 Fig.4는 PWR 조건과 공기중 조건의 a-N선도와 ΔK -da/dN 선도이다. Precrack선단으로부터 공기중 조건에서의 피로특성과 달리 PWR환경의 영향으로 인해 균열진전이 지연되거나 멈추는 현상이 3가지 시편에서 모두 나타났다. 이것은 균열선단부가 blunting되거나 재료내에 누적되어 균열진전이 되기 위한 strain energy의 영향인 것으로 판단된다. 따라서 실질적인 평가를 위해서는 균열이 안전성장되는 영역부터 고려하였다. Fig.4은 공기중 조건에서 CF8MH에 대한 자체실험결과와 권재도의 비열화재에 대한 CF8M(ferrite 함량자료 없음) 피로특성을 PWR 조건의 실험결과와 비교하였다. ΔK 의 범

위가 $11\sim 20\text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서는 공기중 조건에서보다 PWR환경이 더 빠른 균열진전속도를 갖는다. 이것은 균열이 안정성장영역에서 저주기피로시험을 할 경우, 부식환경의 영향, 균열선단부에서 금속용해나 균열이 진전한 후, 신생면이 부식환경에 노출되어 재부식과 응력집중, 균열진전이 되는 주기적인 성장을 함으로써 공기중에서보다 빠른 균열진전 속도를 갖게 될 것으로 판단된다. 그러나, 실험이 종료된 후, 파면분석을 통해 이러한 가정을 확인하여야 하지만 산화물과 장기간 실험으로 인한 파면 변형이 발생하여 확인 어려웠다. ΔK 의 범위가 $20\text{ MPa}\sqrt{m}$ 이상에서는 점차 환경요인에 의해 균열진전속도가 빨라졌던 것에 비해 서서히 균열진전속도 상승률이 줄어 이로 인해 $30\text{ MPa}\sqrt{m}$ 정도에서는 공기중 조건과 비슷한 균열진전속도형태를 갖는다. CF8M과 CF8A의 주냉각배관재는 균열선단에서 영향을 받는 인자가 환경적인 인자와 역학적인 인자가 함께 존재하여 낮은 ΔK 범위에서는 환경적인 인자의 추가적인 영향으로 균열진전 속도가 가속되지만 임계범위를 지나면 역학적인 영향이 커져 환경적인 영향이 크게 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 페라이트 함량에 따른 부식피로특성변화를 비교하면, Fig.4와 같이 유사한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 10wt.%~ 25wt.%의 페라이트함량을 갖는 CF8M 배관재는 페라이트 함량에 따른 부식피로특성변화를 크지 않다는 것이다. 또한 CF8M과 CF8A사이의 부식피로특성이 크지 않음을 확인하였다. 즉, 몰리브덴의 함유유무에 따라 크게 부식피로특성이 달라지지 않는다는 것을 의미한다. 이상의 결과에 대해 Fig.5와 같이 재료별, 위치별, 배율별에 따라 금속파면사진을 촬영하였다. 균열성장 후, 균열면이 고온고수화학상태에 노출되면서 두텁고, 치밀한 산화피막이 생성되며, striation이나 입계균열, 입내균열, 벽계파괴와 같은 파면특성을 구분하기가 어렵다. 균열이 진전되면서 개재물의 크기나 떨어져나간 개수가 감소되고, CF8MH가 CF8ML의 파면보다 개재물이 떨어져나간 흔적이 더욱 많았다. 이것은 316°C 의 유지온도에서 배관재가 열취화가 서서히 진행됨과 동시에 ferrite와 austenite사이에서 입계부식균열이나 슬립면을 따른 균열성장에서 신생면의 노출이 반복됨에 따라 상대적으로 취성을 갖는 ferrite에서 금속조직을 덮고 있는 산화물과 함께 떨어져나간 것으로 예측할 수 있다. 그러나 이러한 영향으로 인해 부식피로특성이 크게 민감하지 않다는 것을 Fig.4로부터 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구는 PWR 환경하에서 주냉각배관재인 CF8M과 CF8A를 대상으로하여 부식피로특성평가를 수행하였으며, 이러한 실험을 위해 PWR환경을 모사하기 위한 실험장비 구축과 균열측정을 위해 Reversing DCPD법을 적용하였다. 국내에서는 거의 전무한 PWR환경에서 주냉각배관재에 대한 피로특성자료를 축적함에 있어 큰 의미가 있겠다.

- 1) PWR 환경하에서 CF8MH와 CF8ML, CF8A에 대한 부식피로특성은 ΔK 의 범위가

11~20 MPa \sqrt{m} 에서 공기중 조건에 비해 균열진전속도가 더 빠르게 나타났으며, 20MPa \sqrt{m} 이상부터 공기중 조건과 비슷한 균열진전속도를 나타냈다.

- 2) CF8M의 ferrite 함량에 따른 부식피로특성차이는 확인할 수 없었다.
- 3) CF8M과 CF8A의 부식피로특성이 화학적 조성중 차이가 나는 몰리브덴유무에 따라 크게 영향 받지 않는다.
- 3) ferrite 함량이 증가할수록 CF8M의 금속과단면에서 개재물의 박리가 증가하였고, 금속표면에 치밀하고, 두터운 산화물로 인해 파면분석이 불가능하였다.

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) D Peckner and I.M. Bernstein, 1987, "Handbook of Stainless Steels," McGraw-Hill Book.
- (2) M.E. Lapides, 1991, "Cast Austenitic Stainless Steel Sourcebook," EPRI TR-100034.
- (3) M. Itatani, et.al, 2001, "Fatigue Crack Growth Curve for Austenitic Stainless Steels in BWR Environment," J. Pres. Ves. Tech. Vol. 123.
- (4) W.E. Ruther, et.al, 1993, "Environmentally Assisted Cracking in Light Water Reactors," NUREG/CR-4667, Vol.15.
- (5) O. K. Chopra, 1999, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Fatigues of Austenitic Stainless Steels," NUREG/CR-5704.
- (6) 조선영 외4명, 2000, "Turbine Blade재료의 부식민감성과 부식피로특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 A권, 제24권 제3호, pp.603-612.
- (7) 조선영 외2명, 2001, "고온의 인공해수 중 12Cr강의 부식피로특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 A권, 제25권 제5호, pp.772-778.
- (8) 조선영 외2명, 2001, "12Cr합금강의 부식특성 및 인공열화된 12Cr합금강의 피로특성," 대한기계학회논문집 A권, 제25권 제6호, pp.965-971.
- (9) 1995, "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates," ASTM E 647-95, pp. 578~614.
- (10) 한국전력공사 원자력발전처, 1993~1997, "원자력 화학연보," pp.185~286.

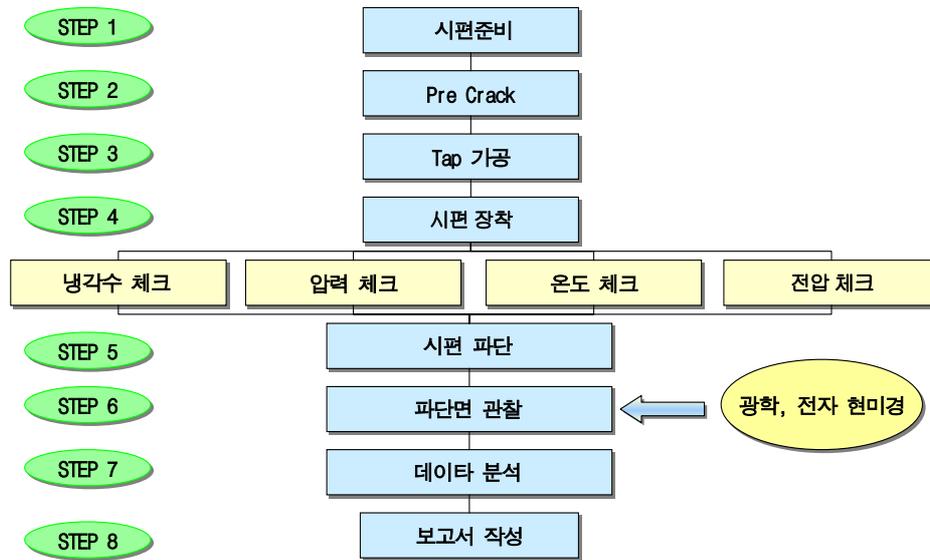


Fig. 1 Test Method

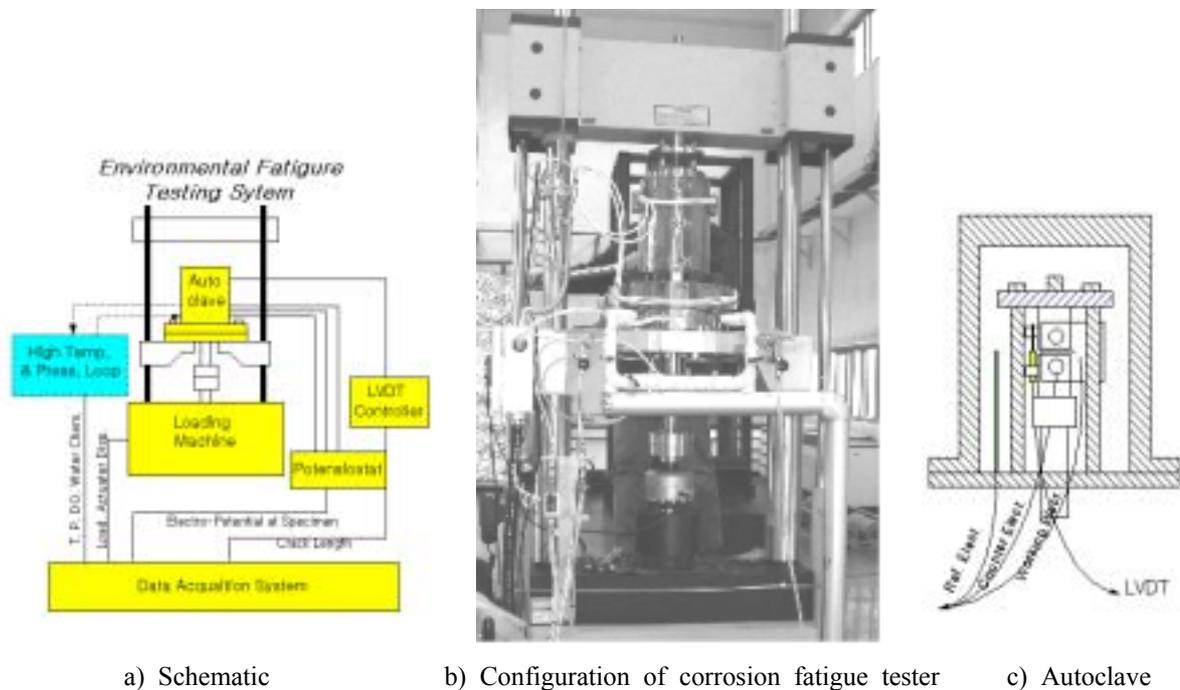


Fig. 2 Corrosion fatigue tester and autoclave

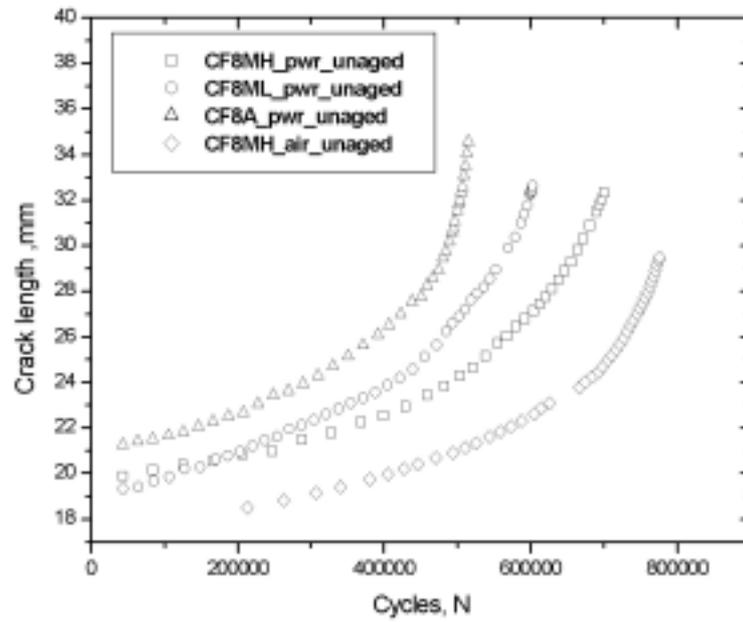


Fig. 3 a-N curve of specimens

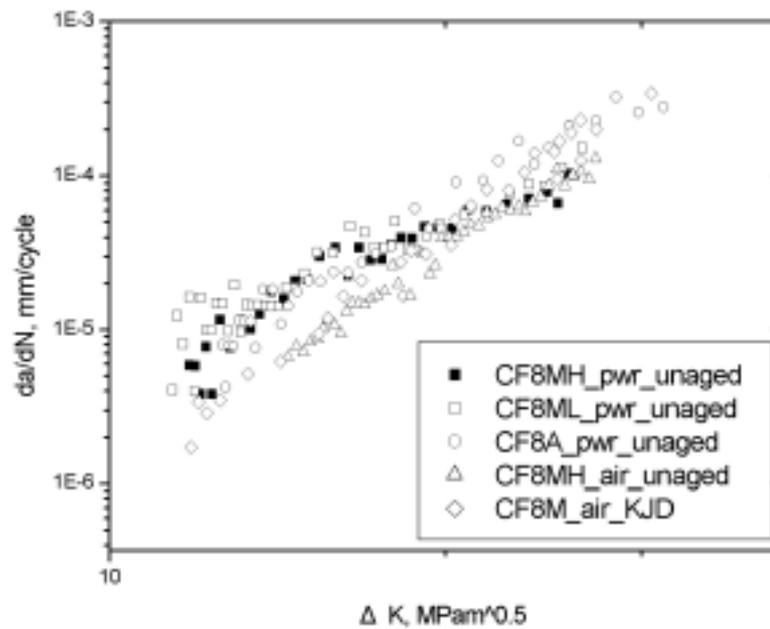
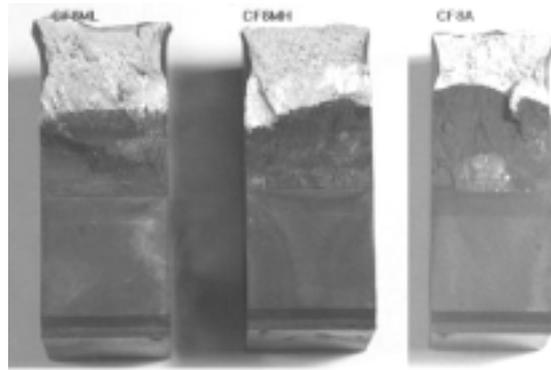
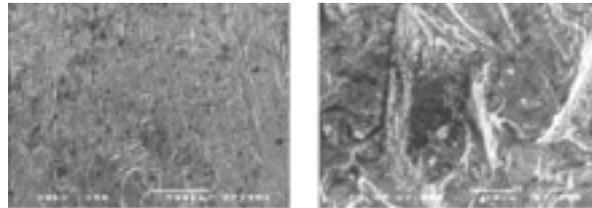


Fig. 4 ΔK -da/dN curve of specimens



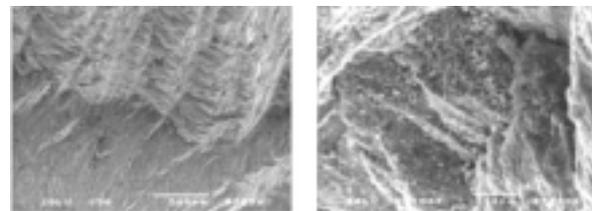
a) Macrostructure (photo)



×50

×2,000

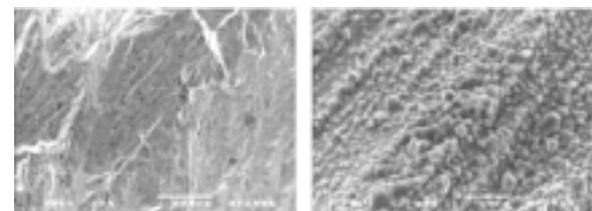
b) CF8M ferrite 25wt.%(CF8MH)



×50

×2,000

c) CF8M ferrite 10wt.%(CF8ML)



×50

×2,000

d) CF8A

Fig. 5 Fractograph after test on PWR condition