

원전 1차 측 배관재질의 열화에 따른 응력부식균열 발생 비교 실험 연구

박광진[†] · 이규영^{*} · 배동호^{**}

Experimental Studies on Comparison of Stress Corrosion Cracking Generation Due to Pipe Material Degradation in the Primary Stage of the Nuclear Power Plant

Kwang Jin Park[†], Gyu Young Lee^{*} and Dong Ho Bae^{**}

Key Words: Artificial degradation(인공열화), Corrosion susceptibility(부식민감도), Corrosion rate(부식속도), Stress Corrosion Cracking(응력부식균열), Environment strength(환경강도)

Abstract

In this report, stress corrosion cracking generation due to pipe material degradation in the primary stage of the nuclear power plant was investigated. Firstly, after artificially degrading the CF8A steel during 2, 4, and 6 months in actual temperature, 400°C, assessed corrosion susceptibility of the degraded material following ASTM G5 standard. And next, the S.C.C. tests for the degraded material were conducted under the condition of 60°C, 2wt.% H₂BO₃+LiOH solution, 0.8 oy. From the results, Corrosion rates linearly increased with degradation period and solution temperature increase. And both the raw material and the degraded materials were not failed in the S.C.C. test condition. In spite of long time test (about 3,900 hrs) under S.C.C. condition, surface pits or surface corrosion by the electro chemical reaction were not observed. And also, even though the nondestructive DCPD and ACPD methods were applied to on-line monitor the S.C.C. failure processes it was impossible because the surface pits and cracks were not generated.

1. 서 론

열악한 환경에서 사용되는 재료는 크립(creep), 피로, 산화 및 부식 등과 같은 여러 형태의 손상 기구에 의해 고장과 파손을 일으킴으로, 사용 중에 있는 에너지 변환설비의 경년열화(aging degradation)에 의한 열화도와 손상정도를 진단 및 평가하고, 이에 따른 수명예측기술과 합리적인 검사주기 설정기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

이러한 필요성에 의해서 사용 중 설비의 건전성을 실시간 감시 및 검사하는 기술들이 초음파 시험, 압입시험, 전기저항 측정 등 음향과 물리적 현상을 이용하는 기술들이 개발되고 있으나, 이러한 비파괴시험법들은 각각 장·단점을 가지고 있기 때문에, 사용 중 설비의 건전성과 잔존수명을 신뢰성 있게 진단하고 평가하기 위해서는 환경인자와 재료에 대한 데이터베이스(data base)가 구축되어야 할 것이다[1-3].

최근 들어 국내에서는 원자력 발전 플랜트와 같은 대형 에너지 변환설비의 수가 증가됨과 더불어, 주요 에너지변환설비인 보일러, 터빈, 열교환기, 배관 등과 같이 열악한 부식 환경에서 장시간 운용되는 기기의 수가 증가하는 추세에 있다. 그런데 이들 중에는 1970년대 경제개발의 일환으로 중·화학공업육성책이 시작되면서 건설된

[†] 성균관대학교 기계공학부 석사과정

E-mail : mool2ni@skku.edu

TEL : (031)290-7479 FAX : (031)290-7939

^{*} 성균관대학교 기계공학부 박사과정

^{**} 성균관대학교 기계공학부 교수

것들이 많고, 이제 그 대부분이 설계수명에 가까워지거나 한계를 넘어 노후화됨에 따라 고장 또는 손상사고에 의한 시간적, 경제적 손실을 일으키는 빈도가 증가하기 때문에, 이에 대한 개선의 요구와 안전상의 문제점이 제기되고 있는 실정이다. 예로서, 미국 국립 압력용기 위원회에서 1981-1984년 동안 조사한 발전설비 등 주요설비의 사고는 부식에 기인한 것이 전체 사고의 33.9%로서 가장 많았으며, 국내 고리원자력 발전소 사고로 인하여는 10일간의 운전정지로 52억 원의 손실을 야기한 예도 있다. 따라서 발전설비의 부식에 의한 재료열화로부터 발전안전사고와 사고에 의한 경제적 손실을 예방하기 위하여 신뢰성 있는 기술로 부식열화를 진단하고 평가하는 것은 여러모로 매우 중요하다[4].

그래서 본 연구에서는 인공열화된 원전 1차 측 배관재질에 대한 부식민감성과 응력부식균열을 평가하여 재료의 신뢰성을 평가하였다.

2. 배관재질 CF8A 강의 고온 가속열화

실 환경 하에서 사용 중에 발생하는 온도에 의한 재질열화를 인공적으로 유도하여 부식과 응력부식균열 특성 및 기계적 특성의 영향을 평가하기 위해, 고리 2호기 원전 1차 측 배관재료인 CF8A강을 실 환경 온도인 400℃에서 2, 4, 6개월간 가속열화 시켰다. 가속열화는 실 배관의 장기간 사용과정에서 관내를 유동하는 냉각유체의 온도와 열전달에 의한 열화를 모방(simulation)하기 위해 배관으로부터 채취한 재료 자체를 가속열화시킨 후 본 연구에 필요한 시편의 형상을 가공하였다. CF8A강의 화학적 성분은 Table 1과 같고, 가속열화를 위해서는 고온 로(high temperature furnace)를 사용하였다. 그리고 열화 후 고온 로에서 인출한 CF8A강의 상태는 Fig.1과 같다.

Table 1 Chemical compositions of CF8A steel

(wt.%)					
C	Mn	Si	Cr	Ni	S
0.05	0.626	1.18	19.88	8.74	0.014



Fig. 1 CF8A steel artificially degraded at high temperature

3. 배관재 CF8A강의 전기화학적 부식열화 특성 평가

3.1. 시험편 및 시험장치

전기화학적 부식특성을 평가하기 위한 시험편은 원전배관계의 1차 냉각계통 배관재인 Table 1의 CF8A강을 대상으로 건전재와 열화재로 나누어 실험하였다. 시험편은 ASTM G5[5]에 근거하여 10×10×10mm³의 정육면체로 제작한 후, 에폭시수지(epoxy resin)를 사용하여 마운팅(mounting)하였고, 표면과 마운팅 간극 사이의 틈부식(crevice corrosion)을 방지하기 위해 페인팅(painting)을 하여 24시간 상온에서 건조시켰다. 시험편은 모두 600-grit SiC paper로 연마(wet polishing)하였으며, 전기화학적 부식열화도 평가 시험장치는 Potentio stat(Perkin Elmer Co., Model 273A)와 부식 셀(corrosion cell)을 사용하였다. 분극시험을 위한 전극은 보조전극(counter electrode)으로 탄소봉 2개, 기준전극(reference electrode)으로 감홍전극(SCE)을 사용하였다.

3.2. 실험 조건 및 방법

본 실험을 수행함에 있어서는 원전 1차 측 실 환경 (360 ℃, 150기압)을 고려하는 것이 타당하나, 실험장치 제작과 고온·고압조건에서의 실험 등이 매우 어렵기 때문에 실험온도를 상온, 60, 90 ℃ 로 하여 온도변화에 따른 전기화학적 특성의 정성적 변화를 면밀히 검토하였다. 그리고 각각의 실험온도에서 가속열화재의 열화기간에 따른 부식특성을 정량적으로 평가하였다. 실험방법은 부식 시험편이 open-circuit potential상태로 유

지된 후 분극실험을 시작하였고, 동 전위 분극실험은 분당 10mV(0.166mV/s)로 -250mV(oc)부터 scan 하였다. 부식용액은 고리 2호기 원전발전소 1차 측 냉각용액인 붕산+수산화 리튬 혼합용액을 사용하였다.

3.3 실험결과

Fig. 2는 용액의 온도별 열화기간에 따른 동 전위분극곡선을 가지고, Tafel외삽법으로 구한 열화기간에 따른 부식속도를 나타낸 것이다. 건전재(비열화재)와 열화재의 부식속도(corrosion rate)는 공히 부식전류밀도(corrosion current density)에 비례하며, 부식전류밀도가 클수록 증가한다. 따라서 Fig.2와 같이, 건전재에 비해 열화재의 부식속도가 크고, 열화기간이 길어질수록 부식속도는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 열화기간이 같은 경우 붕산+수산화 리튬 혼합용액의 온도가 증가하면 부식속도가 증가하

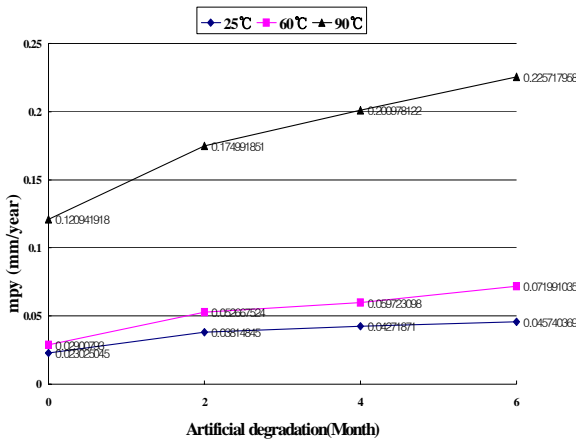


Fig. 2 Relationship between corrosion rates and artificial degradation period

는 경향을 나타내고 있으며, 특히 90°C의 경우는 상온과 60°C에 비해 부식속도가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, 금속재료의 부식을 가속화하는 유해 인자의 하나인 염화물 가운데 대표적인 Fig. 3의 NaCl 수용액에 대한 CF8A 인공열화재의 부식속도와 본 연구에서 얻어진 결과를 정량적으로 비교하면 염화물에 비해 부식속도가 매우 작은 것을 알 수 있다.

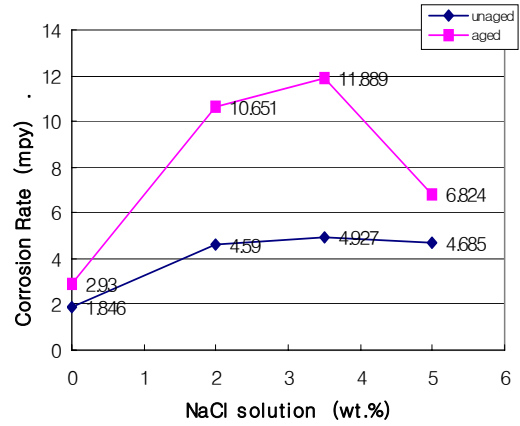


Fig. 3 Relationship between corrosion rates and concentration of NaCl solution [6]

즉 이것은 고리 2호기 원전발전소 1차 측 냉각용액인 붕산+수산화 리튬 혼합용액에 대해서 원전 1차측 배관재인 CF8A강의 부식열화도는 매우 낮음을 의미한다.

4. CF8A재질 배관의 응력부식균열 발생 가능성 평가

4.1. 재료 및 시험편

재료는 전기화학적 부식민감성 평가를 위한 것과 동일한 2, 4, 6 개월간 가속 열화된 CF8A 강이며, 시험편의 형상은 Fig.4와 같다.

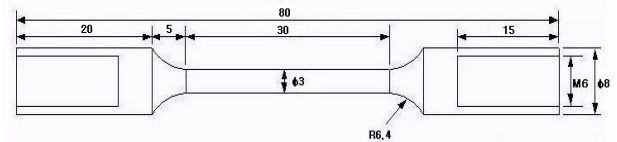


Fig. 4 Configuration of S.C.C specimen

4.2. S.C.C 실험 조건

고리원전 2기 1차측 냉각계통 배관재질인 CF8A강의 응력부식균열 가능성을 실험적으로 평가하기 위한 실험조건은 Table 2와 같다. 용액은 현재 사용되고 있는 실제의 2wt.% H2BO3+Li7OH solution으로 하였으며, 용액의 온도는 60°C로 일

정하게 하고, 용액의 순환속도도 실제상황을 고려하여 0.5 l/min로 하여 순환되도록 설정하였다.

Table 2 S.C.C test condition

Contents	Condition	Remark
Applied stress	0.8 σ_y	
Corrosion solution	60 °C, 2 wt.% H2BO3+Li7OH solution	
Circulating rate of solution	0.5 l/min	

4.3. 실험 장비

응력부식균열(S.C.C.) 실험을 위한 하중장치는 여러 형태가 있으나, 일정하중조건 하에서 S.C.C. 발생 수명 또는 강도를 평가하거나 비교적 신뢰성 높은 데이터(data)를 획득하기 위해서는 Fig.5와 같은 lever type이 유리하다. 그러나 다수의 시편을 동시에 실험하는 경우는 많은 공간이 확보되어야한다. 본 연구에서도 다수의 시편에 대한 S.C.C 실험을 동시에 수행해야 하는 상황이고, 실험기간 동안 부식작용에 의해 시편의 시효연화(aging softening) 등이 예상되나 일정 응력조건(constant stress condition)이 계속 유지되도록 함과 동시에 연구의 목적에 맞는 데이터와 정보를 획득하기위해서 Fig. 5와 같이 Lever type으로 설계 제작하였다.

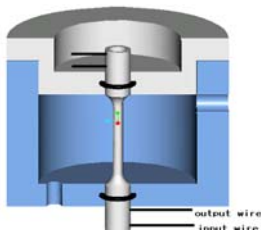
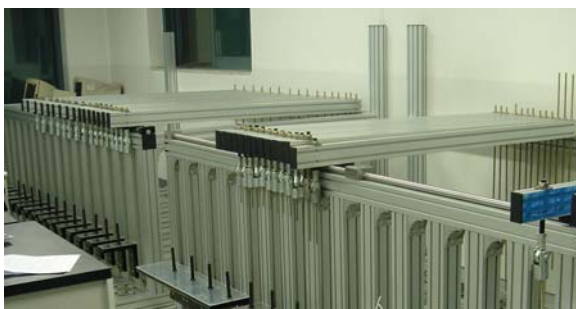


Fig. 5 S.C.C. test equipment

4.4. 용액 순환 장치

용액순환장치의 전체적인 Layout은 Fig. 6과 같다. 부식용액과 시편표면에서의 전기화학적 부식작용을 야기하는 동안 부식용액의 화학적 평형을 유지하기 위해 주기적(7일 간격)으로 새로운 용액을 교환하였다. 그리고 용액내의 용존산소(dissolved oxygen)를 제거하기 위해 용액교환 시는 약 2 시간동안 질소로 탈산시켰으며, 실험이 진행되는 동안에도 질소가스를 0.5cc/min로 수조에 투입하여 용액 중의 용존산소를 제거하였다. 부식조(corrosion cell) 내의 용액의 온도를 60 °C로 일정하게 유지하기 위해서 온도조절이 가능한 수조(water tank)를 제작 설치함으로써, 부식조에 유입되는 용액 온도를 일정하게 조절하였다.



Fig. 6 Circulating system

부식조에 유입되는 용액의 유동속도는 유체유동에 의한 부식의 가속화를 억제하기 위해 0.5 l/min로 유지하였다. 그리고 수조 (water bath), 펌프(화학용 pump), 관(tube), Manifold 및 연결구(fittings) 등 순환계 부품일체는 비금속재로 하여 순환하는 부식용액과의 부식작용에 의한 화학적 손실을 최소화하였다.

4.5. 결 과

고리 2기 원전 1차측 배관재질 CF8A강을 2, 4, 6개월간 400 °C에서 가속열화 시킨 후 60 °C의 1차 측 냉각용액인 붕산+수산화 리튬 혼합용액과 0.8 σ_y 조건에서 S.C.C.발생수명 평가를 위한 실험을 2개월 열화(6,936시간), 4개월 열화(5,448시간), 6개월 열화(3,984시간) 동안 수행하였으나, 파단된 시편은 없었다.

그리고 시편의 표면상황을 면밀히 관찰하기 위해 탈거 후 즉시 초음파 세척기(ultrasonic washer)

로 시편표면을 덮고 있는 전기화학적 부식작용에 의한 부식생성물을 제거하고자 하였으나 깨끗하게 제거되지 않았다. Fig. 7은 초음파세척 후의 시편상태를 나타낸 것이다. Fig. 7의 시편들에 대한 표면을 배율 50배로 현미경 관찰결과 시편표면에는 표면 피트(pit)가 관찰되지 않았다. 시편표면에 흡착된 부식생성물은 매우 안정적이고, 이것은 부식용액과 시편 표면의 금속 간 부식작용뿐만 아니라 S.C.C.에 의한 재료과단과정을 방해하는 보호피막(protective film)으로서 역할을 한 것으로 추정된다.

따라서 시간지연성 손상 메카니즘(time delayed damage mechanism)인 S.C.C.의 특성상 본 연구에서 설정한 S.C.C. 환경조건에서 CF8A강의 시편표면에 Pit발생과 S.C.C.에 의한 표면균열의 발생은 확인되지 않았다.



(a) raw material



(b) degraded for 2 months



(c) degraded for 4 months



(d) degraded 6 months

Fig. 7 Conditions of S.C.C. tested specimens

5. 결 론

400°C 조건에서 2, 4, 6개월간 인공열화한 CF8A강의 열화재와 비열화재에 대해 전기화학적 부식열화도를 평가하고 이를 바탕으로 하여 응력부식균열 시험을 하중조건(0.8σy (σy: 열화재의 정적 항복강도)), 원전 1차 측 냉각용액(붕산+수산화 리튬 혼합용액: 고리 2기 원전발전소 기준), 용액온도(60°C), 순환속도 (0.5 l/min)에서 수행한 결과 다음의 결과를 얻었다.

(1) 열화재는 열화기간이 길고 온도가 증가 할수록 부식열화속도가 선형적으로 증가하였다.

(2) 400°C 조건에서 2, 4, 6개월간 인공열화한 CF8A강의 열화재와 비열화재 공히 설정된 응력 부식환경 및 조건에서 과단되지 않았다.

(3) 응력부식 환경 및 조건에서 장시간(약 3900 hrs, 5.5개월) 경과되었음에도 불구하고, 전기화학적 부식작용에 의해 시편표면에는 피트(pit) 또는 표면부식은 관찰되지 않았다.

참고문헌

- [1]“腐蝕과 破壞,” 日本機械學會, 日本工業出版社, pp.71-74, 1984
- [2]“機械構造物의 破損事例와 解析技術,” 日本機械學會 技術資料, 1984
- [3]大谷, 駒井,“總合材料強度學講座-環境·高溫強度學,” Ohm Co., pp.39-82, 1984
- [4]김남하, “국제 압력기기 기술기준의 동향과 우리방향,” 한국압력기기공학회지, Vol.1, No.1, pp.14-15, 2005
- [5]ASTM, "Standard Reference Test fir Making

Potential-static and Potentiodynamic Anodic
Polarization Measurement," G5, pp.73-76, 1987
[6]ASM Handbook, "Electrochemical Methods of
Corrosion Testing," Vol.13A, pp.446-461, 2003

참고문헌

(1) Put reference text here. Put reference text here.
Put reference text here. Put reference text here.