

## 전기화학적 방법에 의한 주조 스테인리스강 CF8M의 $\sigma$ 상 열화평가

권재도\* · 김중형\*\* · 박중철\*\* · 변장환\*\*\* · 이우호\*\*\*\*  
(1999년 2월 22일 접수)

### Evaluation of the $\sigma$ -Phase Degradation for Cast Stainless Steel CF8M by the Electrochemical Method

Jae Do Kwon, Joong Hyoung Kim, Joong Cheul Park,  
Jang Hwan Byun and Woo Ho Lee

**Key Words :** Cast Stainless Steel-CF8M(주조 스테인리스강 CF8M), Degraded Material(열화재), Electrochemical Potentiokinetic Reactivation(전기화학적 분극실험) Intergranular Corrosion(입계부식), Chromium Depleted Zone(크롬고갈지역), Degree of Sensitization(예민화도)

#### Abstract

The present investigation is concerned with the degradation characteristics of cast stainless steel(CF8M), exposed to the  $\sigma$ -phase degradation at 700°C. In the present paper, the degradation of CF8M at 700°C is evaluated by a non-destructive test, DL-EPR(double loop electrochemical potentiokinetic reactivation). The surface of specimens is observed by using scanning electron microscopy after DL-EPR test. Also, chromium contents of matrix, grain boundary and ferrite phase are analyzed by electron probe X-ray micro analyzer. Through the experiments, the following results are obtained; 1) The degree of sensitization(DOS) of CF8M aged up to 15hr at 700°C is increased with aging time while that is decreased with aging time from 15hr to 150hr. 2) The impact energy decreases with increase of  $\sigma$ -phase while DOS increases with  $\sigma$ -phase until aging time reaches to 15hr. After the aging time, 15hr, the  $\sigma$ -phase and the rate of impact energy with respect to aging time decreases. Therefore the degradation behavior of the CF8M can be evaluated by comparing SEM micrographs and the value of DOS.

#### 1. 서론

발전 설비 및 고온 고압용기 등과 같이 가혹한 환경 하에서 장시간 사용되는 기계 구조물들은 열화현상으로 인하여 강도 및 파괴인성이 저하하는 경우가 있으므로, 재료의 열화 여부를 평가하는 것은 매우 중요한 연구의 대상이라 할 수 있다. 주조 스테인리스강에서의 재질의 열화평가 방법으로 지금까지는 Trautwein 및 Chung and Leax 등의 파괴적 열화 평가방법<sup>(1,2)</sup>이 주로 사용

되었다. 그러나 이러한 파괴적 열화평가 방법을 운전중인 실제의 구조물에 적용하기에는 상당한 어려움이 있으므로 초음파법, 표면 레프리카법, 전기저항법 및 전기화학적 방법<sup>(3-5)</sup> 등과 같은 비파괴적 방법에 의한 열화평가가 시도되고 있는 실정이다. 한편 CF8M과 같은 주조 스테인리스강은 내식성 및 고온에서의 특성이 우수하여 발전설비의 고온 고압용 재료, 부식저항 펌프 및 밸브 재료로 사용되고 있다. 이와 같은 주조 스테인리스강은 지금까지의 연구결과 재질열화현상이 발생하여 충격치가 저하되며, 인장, 경도 및 피로균열 진전거동에도 영향을 미친다는 보고가 있다.<sup>(6)</sup> 아울러 오스테나이트계 스테인리스강은 400~850°C의 온도 범위에서 일정시간 유지되면 입계를 중

\* 회원, 영남대학교 기계공학부

\*\* 회원, 영남대학교 대학원

\*\*\* 대구 도시가스

\*\*\*\* 회원, 한국 원자력안전 기술원

심으로 크롬탄화물이 석출되고, 탄화물이 석출된 주변에는 크롬의 농도가 현저히 낮은 크롬고갈 지역(chromium depleted zone)을 형성하게 된다. 이와 같은 크롬고갈 지역이 형성된 재료는 재료 고유의 내식성을 상실하게 되고, 이러한 재료는 입계부식에 대하여 매우 취약한 것으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

따라서 입계부식의 특성을 가장 잘 평가할 수 있는 방법이 사용된다면  $\sigma$  상 열화재의 열화특성은 평가가 가능할 것으로 사료되어, 본 연구에서는 열화 정도를 비교과적인 방법으로 평가하기 위하여 전기화학적 분극시험법을 사용하여 열화평가를 수행하여 보았다. 이때 입계부식에 대한 예민화 정도를 측정하기 위한 방법으로는 SL-EPR(Single Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation)시험<sup>(8,9)</sup>과 DL-EPR(Double Loop EPR) 시험방법<sup>(10)</sup> 등이 있으며, 본 연구에서는 SL-EPR에 비하여 재현성이 좋고 거친 시험편 표면에도 시험결과가 양호한 DL-EPR방법을 수행하였다. 시험 후 표면의 전자 현미경 관찰 및 EPMA 분석자료와 충격시험 결과로부터 전기화학적 시험결과를 활용하여 열화를 추정할 수 있는 방법을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 모의 열화재의 전기화학적 분극 시험

### 2.1 모의 열화재 제작

본 연구에서는 원전설비용 주조 스테인리스강 제조업체에서 공급받은 CF8M을 사용하였으며, 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 1 및 2에 나타내었다. 아울러 주조 스테인리스강의 열화를 평가하기 위해서는 장기 사용된 실제의 열화재로서 열화를 평가하는 것이 가장 이상적이지만, 실제 장기 사용된 열화재를 입수하는 것이 불가능하므로 실험실에서 모의 가속 열화재를 제작하였다. 주조 스테인리스강은 일반적으로  $\sigma$  상 취화구간인 700~810°C와 475°C 취화구간인 400~550°C에서 짧은 시간에 충격에너지가 급격하게 감소한다고 보고되고 있다.<sup>(11)</sup> 따라서 본 연구에서는  $\sigma$  상 취화구간인 700°C에서 20분, 5시간, 15시간, 50시간 및 150시간 유지 후 급냉하는 방법<sup>(12)</sup>을 적용하여 열화재를 제작하였다. 아울러 모의 열화 전의 원래의 재료를 건전재(virgin material)라

Table 1 Chemical composition of CF8M.

Composition, wt. %							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.074	1.21	0.0318	0.0126	1.14	9.59	18.67	2.73

Table 2 Mechanical properties of CF8M.

0.2% Proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
318	525	68.6	46.5

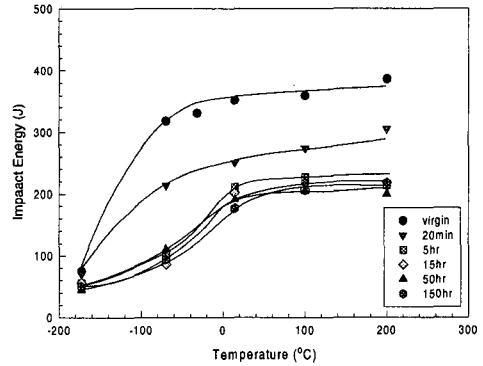


Fig. 1 Change of Charpy impact energy curves by thermal aging on the various kind of degraded materials.

정의하고, 모의 열화방법에 의해 제작된 열화재(degraded material)를 각각 20분, 5시간, 15시간, 50시간 및 150시간 열화재라 정의하였다. 조직사진 및  $\sigma$ 상의 양은 저자의 선행 연구결과<sup>(12)</sup>에 나타낸바 있으며, 20분 열화재는 8-9%, 나머지 열화재는 12-13% 정도이었다.

이와 같은 열화재의 열화정도를 평가하는 기준을 설정하기 위하여 샤피(Charpy)충격시험을 수행하였다. Fig. 1은 건전재 및 700°C 모의 열화재의 샤피(Charpy)충격시험 후 시험온도와 충격흡수에너지 사이의 관계<sup>(12)</sup>를 나타낸 것으로, 충격시험결과를 보면 열화의 초기과정인 즉, 20분 및 5시간 열화재의 상부단 충격에너지(upper shelf energy)가 크게 감소하며, 15시간, 50시간 및 150시간의 경우는 미소하게 변화함을 알 수 있다.

2.2 전기화학적 분극시험 방법

전기화학적 분극시험(EPR : electrochemical potentiokinetic reactivation)에서는 건전재 및 5가지 단계별 열화재를 사용하여 가로, 세로 및 두께가 12×12×3mm가 되도록 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 저속(60rpm)으로 절단한 후, 시험편에 전선을 연결하여 전기가 흐를 수 있도록 하였다. 그 후 시험편은 에폭시수지를 이용하여 마운팅(mounting)하고, 시험편과 에폭시수지 사이의 틈을 방지하고 일정한 표면적(1cm<sup>2</sup>)을 얻기 위하여 래커(lacquer)를 이용한 2차 피복을 하였다. 그리고 시험편의 표면은 #400에서 #1500까지의 연마지(emery paper)를 이용하여 단계적으로 연마한 후 0.05 $\mu$ m 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)분말을 이용하여 마무리 연마를 하였다. 분극시험에 사용된 수용액은 0.5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 와 0.01M KSCN의 혼합용액을 사용하였다. 시험준비중 생성되었을지도 모르는 산화 피막을 제거하고, 시험편들의 표면을 동일하게 하기 위하여 -500mV에서 10분간 유지한 후, 즉시 시험을 시작하였다. 시험이 종료되면 증류수로 1차 세척 및 아세톤으로 2차 세척을 하여 전자 현미경(SEM)으로 시험편 표면을 관찰하였다. Fig. 2는 전기화학 분극 시험에 사용된 장치의 개략도로서, E. G. & G. Princeton Applied Research(PAR)의 Potentiostat/ Galvanostat (Model 273A)이고, 이 장치는 PAR Model 352 software에 의해 조정되도록 되어 있다. 기준전극(reference electrode)은 포화 칼로멜전극(Saturated Calomel Electrode ; SCE)을 사용하였으며, 초기전위(initial potential)와 순환되는 최고전위(vertex potential)는 여러 차례의 예비시험을 수행하여 분극거동이 잘 나타나는 -500mV와 1200mV로 하고, 주사속도는 1.667mV/sec로 하였다.

2.3 분극 곡선 측정

DL-EPR법은 재료의 양극주사(anode scan) 동안의 최대 전류 밀도값(I<sub>a</sub>)과 역주사(reverse scan) 동안의 최대 전류 밀도값(I<sub>r</sub>)을 측정함으로써 입계 부식의 예민화를 판단한다. 즉, 예민화정도를 나타내는 DOS(degree of sensitization)값은 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$DOS = \frac{I_r}{I_a} \times 100 \quad (1)$$

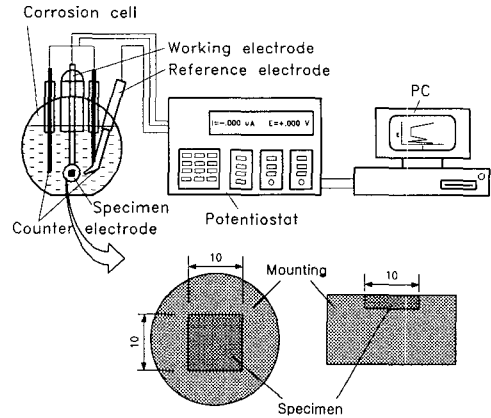
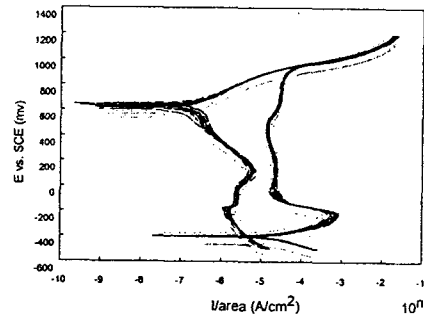
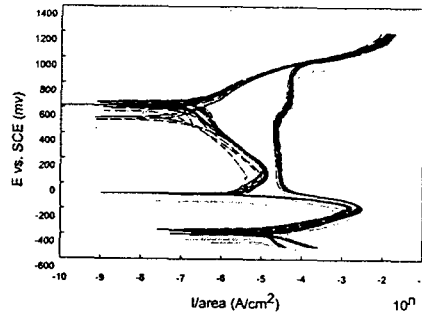


Fig. 2 Schematic diagram of EPR test and epoxy mounted specimen.



(a) Virgin



(b) 5hr degraded

Fig. 3 DL-EPR curves that tested 20 times for virgin and 5hr degraded.

Fig. 3은 건전재 및 각 단계별 모의 열화재에 대해 20회씩 시험을 수행한 분극 곡선의 일 예로 건전재 및 5시간 열화재의 분극곡선을 나타낸 것

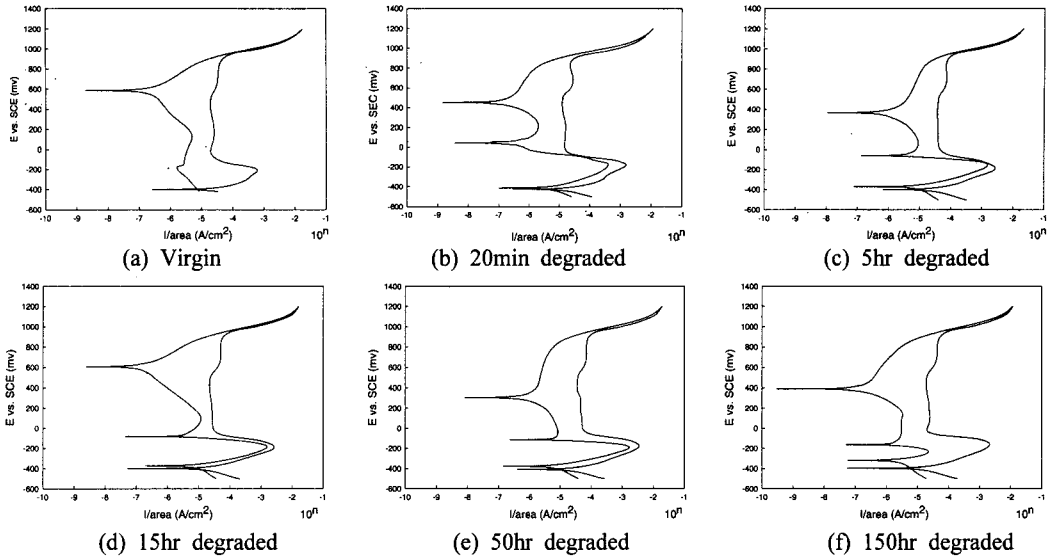


Fig. 4 DL-EPR curve of CF8M in 0.5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0.01M KSCN solution.

이다. Fig. 4에는 건전재 및 각 단계별 열화재에 대하여 20회씩 시험을 수행하여 얻은 곡선중 대표적인 것을 나타내 보았다. Fig. 4 (a)의 건전재의 DL-EPR곡선을 보면 재활성화 전류( $I_r$ )가 관찰되지 않아 예민화가 전혀 일어나지 않았음을 알 수 있으며, (b)의 20분 열화재의 DL-EPR곡선에서는 DOS값의 평균이 33.56으로 예민화가 발생했음을 알 수 있다. 한편 (c)의 5시간 열화재의 DL-EPR 곡선에서는 예민화 정도를 나타내는 DOS값의 평균은 57.77이므로 예민화가 상당히 발생했음을 알 수 있다. (d)의 15시간 열화재의 DL-EPR곡선을 보면 DOS값의 평균이 60.98로 5시간 열화재보다 입계부식이 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 (e)의 50시간 열화재와 (f)의 150시간 열화재의 경우에는 DOS값의 평균이 49.04와 2.12로 상당히 감소하였다.

본 시험에서는 건전재 및 각 단계별 열화재에 대하여 20번씩 시험을 수행한 후, 예민화 정도를 통계학적인 관점에서 평가해보았다.

$$\log \delta = \frac{\sum_{i=1}^N \log x_i}{N} \quad (2)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\log x_i)^2}{N} - (\log \delta)^2} \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 변수,  $N$ 은 모집단 수,  $\delta$ 는  $\log x$ 의 평균치,  $\zeta$ 는  $\log x$ 의 표준편차를 나타낸다. Fig. 5는 건전재 및 각 단계별 열화재에 대한 DOS값을 구하고, 그 값을 각 단계별 열화 정도에 따라 대수 정규 확률지에 출력한 결과를 나타낸 것이다.

그 결과 시험 자료와 통계적 해석결과 얻은 DOS값은 열화시간에 관계없이 대수 정규분포를 따른다는 것을 알 수 있었으며, 통계학적으로 분포상태의 적합여부는 K.S (Kolmogorov-Smirnov)검정을 통하여 대수 정규분포에 적합함을 확인하였다. 건전재 및 각 단계별 열화재의 DOS값의 평균 ( $\log \delta$ )과 표준편차( $\zeta$ )는 식(2)에 의해 구하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 여기서 대수 정규분포는 누적빈도의 우측에 톱니모양으로 비대칭 분포를 갖는 것으로, 톱니모양의 수렴성이 좋지 않아서 평균 및 표준편차에 비해서 다소 큰 DOS값도 출현할 확률이 존재하기 때문에 실험적으로 구한 DOS값을 해석할 때 유의해야 할 부분으로 생각된다.

Fig. 6에는 건전재 및 각 단계별 열화재에 대하여 상부단 충격에너지와 DOS값과의 관계를 그래프로 나타내었다. 그 결과 15시간 열화재까지는 충격에너지가 감소함에 따라 DOS값도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 그러나 50시간 및 150시간 열화재는 급격하게 DOS 값이 급격하게 감소하

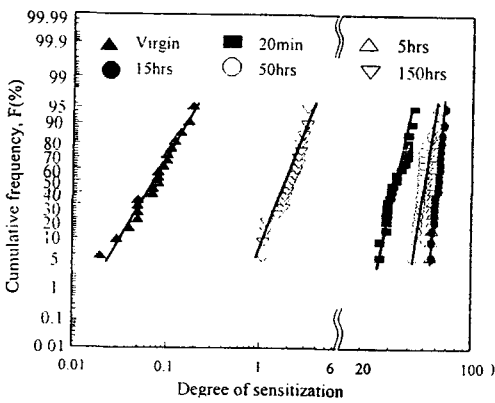
었다. 이와 같은 원인은 제 3 및 4절의 전자현미경 관찰결과 및 EPMA 분석결과와 함께 비교 설명하고자 한다.

**Table 3** Statistical relationships of DOS in virgin and each degradation materials.

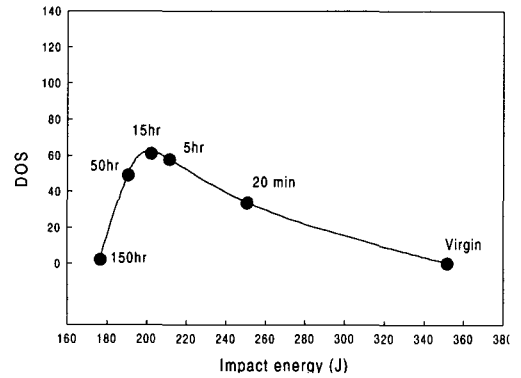
Specimens	Virgin	20min	5hr	15hr	50hr	150hr
Mean (log $\delta$ )	- 1.13	1.52	1.76	1.79	1.69	0.30
S.D ( $\zeta$ )	0.24	0.07	0.01	0.02	0.04	0.15

### 3. SEM에 의한 입계부식 거동관찰

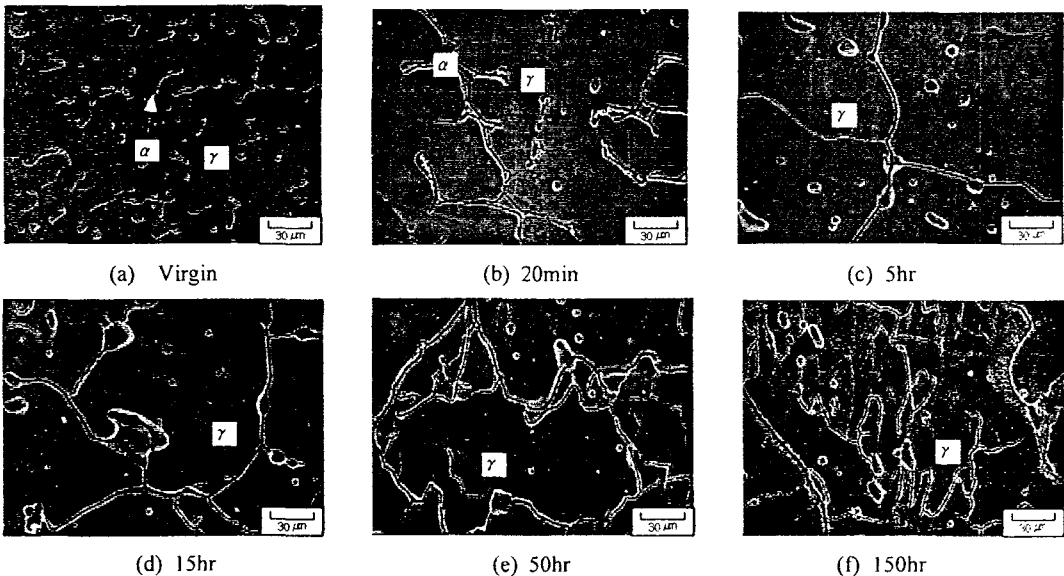
Fig. 7은 건전재와 5가지 단계 모의 열화재의 EPR 시험후 입계부식 형태를 전자 현미경(SEM)으로 500배 확대 촬영한 사진으로 EPR 시험 결과와의 연관성을 조사하고자 하였다. Fig. 7의 (a)의 건전재는 부동태 피막 이 치밀하여 입계부식의 영향을 받지 않았음을 알 수 있으며, (b)의 20분 열화재는 EPR 곡선에서 입계부식에 민감한 것으로 나타났는데 사진에서도 역시 건전재에서



**Fig. 5** Log-normal distribution plots of the DOS in the CF8M.



**Fig. 6** Relationship between the upper shelf impact energy of room temp. and DOS of CF8M.



**Fig. 7** SEM photomicrographs of the degraded surface of CF8M by DL-EPR test.

나타난 페라이트상이 상당히 조대화 되었고, 페라이트-오스테나이트상 경계면에 탄화물들이 생성<sup>(13)</sup>되어 그 주위가 부식되었음을 알 수 있다. (c)의 5시간 열화재는 페라이트-오스테나이트상 경계면을 따라 탄화물들이 연속적으로 성장하여 입계주위가 부식되었음을 알 수 있으며, (d)의 15시간 열화재의 경우 입계의 침식부위가 가장 넓게 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 15시간 열화재가 가장 높은 DOS 값을 가졌던 EPR 시험결과와도 잘 일치한다고 할 수 있다. 그리고, DOS값이 비교적 낮았던 (e)의 50시간 열화재, (f)의 150시간 열화재의 경우, 장시간 열처리에 의하여 입내의 크롬이 입계로 확산되어 입계부위가 좁게 침식되는 복원효과(healing effect)를 보여준다.

이는 5시간 및 15시간 열화재의 경우 탄화물이 입계를 따라 연속적으로 형성되어 전기화학적 부식이 일어날 수 있는 연속적인 부식경로를 제공하기 때문에 입계의 침식부위가 넓은 선명한 선으로 나타나는 것으로 사료되며, 50시간 및 150시간 열화재의 경우는 입계에 석출된 크롬탄화물이 분해되어 연속적인 부식경로를 제공하지 못하고 불연속적인 침식을 보이고 있으며, 탄화물들이 입내에도 존재하는 것을 볼 수 있다. 그 결과 하나의 결정립(grain) 안에 sub grain들이 형성되고, 입계부식 뿐만 아니라 전면부식도 심하게 일어나므로 50시간, 150시간 열화재로 갈수록 DOS값이 떨어지는 이유를 확인할 수 있었다. 아울러, DL-EPR 시험 후 입계부식의 폭을 전자 현미경으로 3000배 확대 촬영한 다음 0.001mm까지 측정 가능한 만능 투영기( $\times 10$ )에서 디지털 마이크로미터로 측정하였다.

Fig. 8은 건전재 및 모의 열화재에 대한 DOS값 및 입계부식 폭과 모의 열화시간의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.  $\square$  은 분산범위를 나타낸다.

20분 열화재는 열화시간이 짧은 관계로 탄화물이 불연속적으로 미세하게 분포하므로 뚜렷한 입계부식폭을 관찰할 수 없었다. 5시간 및 15시간 열화재는 크롬고갈지역의 확대로 입계부식폭이 넓어졌으며, 50시간 및 150시간 열화재로 갈수록 입계부식폭이 크게 감소함을 알 수 있는데, 이는 DOS값이 15시간 열화재까지는 증가하고, 50시간 및 150시간 열화재로 갈수록 떨어지는 EPR test의 결과와도 잘 부합된다고 할 수 있다.

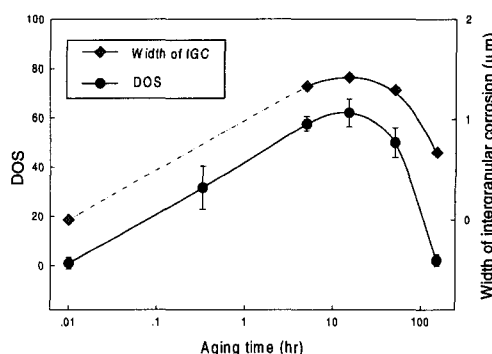


Fig. 8 DOS and width of intergranular corrosion for aging time.

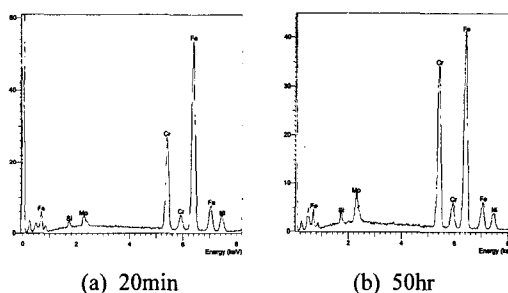


Fig. 9 Result of EPMA at grain boundary for degraded time.

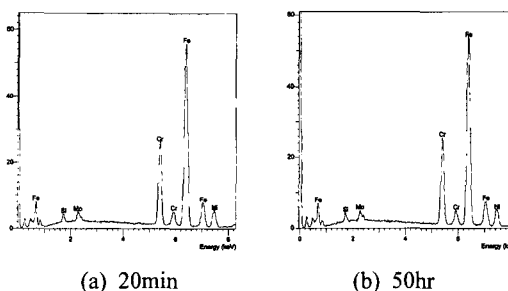


Fig. 10 Result of EPMA at matrix for degraded time.

#### 4. EPMA 분석결과

700℃ 모의 열화에 따른 복원효과를 조사하기 위하여 건전재 및 5가지 단계 열화재의 입내와 입계부위의 크롬함량을 EPMA(Electron Probe X-ray Micro Analyzer)를 사용하여 분석하였다. Fig. 9 및 Fig. 10에는 그 대표적인 예로 20분 열화재와 50시간 열화재의 입계 및 입내의 크롬함량을 분석한 결과를 나타내었으며, 열화시간에 따른 입계,

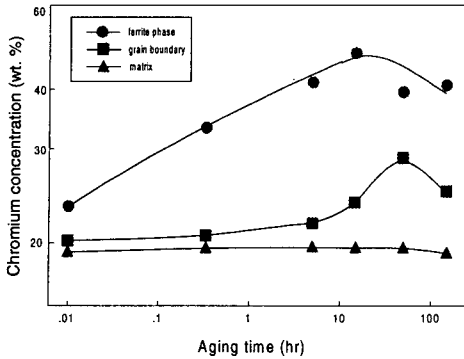


Fig. 11 Relation between chromium concentration and aging time.

5. 결론

림에서 보듯이 20분 열화재, 5시간 열화재 및 15시간 열화재는 입내에 비하여 상대적으로 취약한 입계에 크롬탄화물이 집중적으로 석출되어 입계 주위에 크롬고갈영역을 형성하였으며, 50시간 열화재, 150시간 열화재와 같이 700℃에서 장시간 유지될 때는 입계에 석출된 크롬이 분해되어 불연속적인 침식을 보이고 크롬의 확산에 의한 복원효과에 의하여 입계부식 부위는 좁아지지만 입내에도 탄화물들이 석출되어 전면부식의 양상을 보인다.

주조 스테인리스강(CF8M)의 700℃ 각 단계별 열화재의 재질 열화를 평가하기 위해 전기화학적 분극시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 700℃ 모의 열화재의 경우 DL-EPR 시험후의 예민화정도를 나타내는 DOS값이 15시간 열화재까지는 상승하고, 50시간 및 150시간 열화재에서는 오히려 감소한다.

(2) SEM에서 건전재 및 모의 열화재들의 EPR 시험후의 표면을 관찰한 결과, 5시간 및 15시간 열화재는 입계부식이 심하게 일어남을 알 수 있었고, 50시간 및 150시간 열화재는 sub grain이 관찰되며, 입계 부식과 동시에 전면부식이 심하게 일어남을 확인할 수 있었다.

(3) 입계와 입내에 EPMA분석을 수행하여 크롬함량을 확인한 결과, 50시간 열화재까지는 입계주위에 크롬함량이 많아지고, 150시간 열화재는 입내의 sub grain 형성으로 인하여 입계의 크롬함량이 감소한다. Fig. 7의 SEM사진에서 50시간 열화재와 150시간 열화재의 입계부위가 15시간 열화재의 입계부위 보다 좁게 부식된 것에서도 복원효과를 확인할 수 있다.

(4) CF8M의 열화정도를 평가하기 위해서는 열화 초기 단계에서는  $\sigma$ 상의 증가에 따라 충격치가 급격히 감소되며, 이 경우 EPR 시험결과인 DOS값만으로도 열화의 평가가 가능하다. 그러나 열화가 많이 진행된 후에는  $\sigma$ 상의 증가폭 및 충격치의 저하폭이 둔화되어, 전자현미경에 의한 표면관찰과 DOS값을 같이 비교하여 열화정도를 판단 할 수 있다.

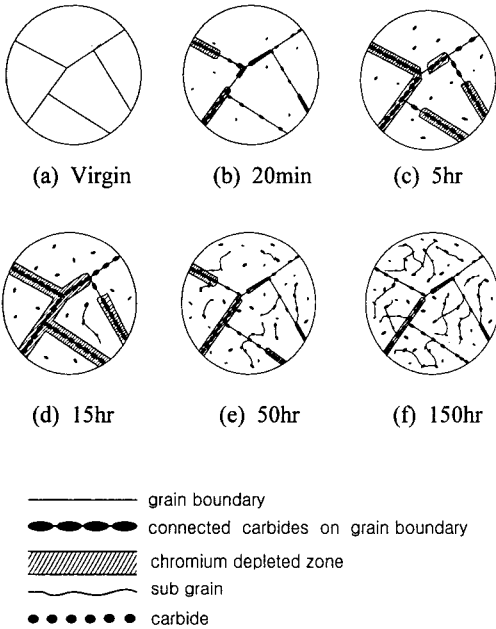


Fig. 12 Schematic representation of carbide precipitation at a grain boundary.

입내 및 페라이트상의 크롬함량의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 열화시간이 길어질수록 크롬이 입계주위로 확산되어 가는 것을 알 수 있으며, 입내에서는 미소하게나마 감소하는 것을 알 수 있다.

이상의 전자현미경 관찰 및 EPMA 분석결과와 DL-EPR시험 결과로부터 각 단계별 모의 열화재의 입계에서의 크롬탄화물 석출과 크롬고갈지역이 발생하는 기구를 Fig. 12에 나타내었다. 위 그

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Trautwein, A. and Gysel, W., 1982, "Influence of Long-time Aging of CF-8 and CF-8M Cast steel at Temperature Between 300 and 500°C on Impact Toughness and Structural Properties," *Stainless Steel Castings*, ASTM STP 756, pp. 165~189.
- (2) Chung, H. M. and Leax, T. R., 1989, Embrittlement of Laboratory and Reactor aged CF8-3, CF-8, CF8M Duplex Stainless Steel," *International Workshop on Intermediate Temperature Embrittlement Processes in Duplex Stainless Steel*, August 1-2, Oxford, England.
- (3) Covino, B. S., Cramer, S. D., Russell, J. H. and Simmons, J. W., 1997 "Corrosion and Polarization Behavior of Sensitized High-Nitrogen Stainless Steels," *Corrosion*, Vol. 53, No. 7, pp. 525~536.
- (4) Trethewey, K. R. and Chamberlain, 1988, "Corrosion for Students of Science and Engineering," pp. 29~30, pp. 120~133, pp. 180~182.
- (5) 권재도, 문윤배, 김상태, 1998, "열화평가에 전기화학적 방법의 응용에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제1호, pp. 2237~2244
- (6) Jansson, Christer 1990, "Degradation of Cast Stainless Steel Elbows after 15 years in Service," Fontevraud II International Symposium, Royal Abbey of Fontevraud-France, September 10-14.
- (7) Solomon, H. D. and Devine, T. M., 1979, "Influence of Microstructure on the Mechanical Properties and Localized Corrosion Resistance of a Duplex Stainless Steel," ASTM STP 672.
- (8) Yi, Y. and S. Shoji, T., 1996, "Detection and Evaluation of Material Degradation of Thermally Aged Duplex Stainless Steels : Electrochemical Polarization Test AFM Surface Analysis," *Journal of Nuclear Materials* 231, pp. 20~28.
- (9) Jun Sang Park and Young Ku Yoon, 1995, "Evaluation of aging Embrittlement of Duplex Stainless Steels by Electrochemical Method," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 32, No. 8, pp. 1163~1168.
- (10) Akashi, M., Kawamoto, T. and Umemura, F., 1980, "Evaluation of IGSCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steel Using Electrochemical Reactivation Method" in *Corrosion Eng.*, Vol 29, p. 163.
- (11) Prepared Under the Direction of the ASM International Handbook Committee, 1996, "Fatigue and Fracture Properties of Stainless Steels," *ASM hand book* Vol. 18(Fatigue and Fracture), pp. 717~718.
- (12) 권재도, 이우호, 장순식, 박중철 1999, "스테인리스강 주물(CF8M)의  $\sigma$  상 열화거동 및 강도평가," 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제3호, pp. 409~414.
- (13) Devine, T. M. 1988, "Kinetics of Sensitization and De-sensitization of Duplex 308 Stainless Steel," *Acta Metall.*, Vol. 36, No. 6, pp. 1491~1501.