

## Fe-Cr-Mn-N계 스테인리스강의 부식 특성 및 기계적 성질에 미치는 시효 열처리 및 W의 영향

전 유 택 · 주 욱 현\* · 김 영 식\*\* · 박 용 수\*

현대강관 기술연구소, \*연세대학교 재료공학부, \*\*안동대학교 재료공학부

### Effects of Aging and W Addition on the Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Fe-Cr-Mn-N Stainless Steels

Yu Taek Jeon, Uk Hyon Joo\*, Young Sik Kim\*\*, Yong Soo Park\*

Technical Laboratories, Hyundai Pipe Co. Ltd., 540-850

\*Dep't of Metallurgical Engineering, Yonsei University

\*\*Dep't of Materials Science and Engineering, Andong National University

The characteristics of the mechanical properties and sensitization behaviors in Fe-Cr-Mn stainless steels by W addition and aging treatment were studied. Yield strength, tensile strength, elongation and impact energy decreased, and hardness increased slightly by aging treatment. W-containing alloys showed especially a larger degree of brittle characteristics due to the hard chi ( $\chi$ ) phase formed from the decomposition of ferrite. Carbides precipitated in grain boundary had a bad effect on impact energy rather than on strength and hardness. Ni addition suppressed the formation of ferrite and resulted in some improvement of mechanical properties. Anodic polarization tests showed that the corrosion resistance of aged alloys decreased by the formation of carbides and secondary austenites. It was observed that W addition made no improvement of the pitting potential and passive current density of aged alloys in the HCl solution. But Ni and W decreased critical current density in the sulfuric acid and made easier formation of passive film, contributing to corrosion resistance. From the results of EPR (Electrochemical Potentiokinetic Reactivation), DOS (Degree of Sensitization) increased with aging time and carbides and ferrite were preferentially attacked. It was observed that Ni delayed the sensitization. It can be concluded from the previous results that the selective dissolution of ferrite is due to the ferrite decomposition to chi ( $\chi$ ) phase and secondary austenites. In the secondary austenite, Cr and W which are known to improve the corrosion resistance were depleted. Therefore, it seems that ferrite phase became sensitive to corrosion.

**Keywords :** Fe-Cr-Mn-N steel, austenite, ferrite, precipitation,  $M_{23}C_6$  carbides, Chi phase, EPR(Electrochemical Potentiokinetic Reactivation), ferrite decomposition DOS (Degree of Sensitization).

## 1. 서 론

Fe-Cr-Mn계 스테인리스강은 본래 저방사화능 (Low activation)과 우수한 고온 기계적 성질을 인정받아 구미 각국에서 핵융합 에너지 고속 증식로의 구조재료로서 적용이 검토되고 있는 재료 중의 하나이다. 제1별 재료로서 초기에는 316형 스테인리스강 및 그 개량형인 PCA (Primary Candidate Alloy), JPCA (Japanese Primary Candidate Alloy) 등이 고속 증식로 연료 피복관 및 나팔관에 사용되었다.<sup>1)</sup> 따라서 고속 증성자에 의한 조사 (Radiation) 효과와 대형 화학 장치의 구조 재료로서의 사용 실적이 풍부하다는 이유로 많은 연구가 이루어져 왔다. Fe-Cr-Mn계 스테인리스강은 고온 강도와 방사능에 노출되었을 때 기계적 성질은 안정적이지만 Ni에 비해서 Mn은 내식성 향상에 도움을 주지 못한다. Miyahara 등의 연구 결과에 따르면,<sup>2)</sup> Fe-12%Cr-Mn계 스테인리스강에서 5~30% Mn 함량의 변화에서도 큰 내식성의 차이가 나타나지 않았다. Lunarska<sup>3)</sup>는 Fe-18Cr-5Ni강에서 5, 7~15%Mn의 첨가는 공식 저항성과 부동태화 특성을 저하시키는 것으로 보고하였다. 또한 Hochmann 등의 연구 결과에 따르면,<sup>4)</sup> 2상 스테인리스강을 600~900°C의 온도 범위에서 시효 열처리를 하는 경우 주로 시그마상에 의해 충격 인성의 저하가 발생하였다.

N은 오스테나이트 조직을 안정화시키고 강도 및 내식성을 향상시키며<sup>5-8)</sup> 시그마 상의 생성을 억제하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup> 또한 N은 Fe-Cr-Ni계 스테인리스강에서 탄화물 석출을 지연시키고 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 탄화물에서 탄소의 위치를 바꾸어 주는 것으로 알려져 있다.<sup>10, 11)</sup> 이처럼 N를 첨가하였을 때 많은 장점들을 얻을 수 있으나 N는 강중에 첨가될 수 있는 양이 제한되기 때문에 고용한도 이상 첨가시 결함이 유발되어 제조시 많은 어려움이 따른다.<sup>12)</sup> 그러나 Mn은 N의 고용한도를 증가시켜 주기 때문에<sup>13, 14)</sup> Fe-Cr-Mn강과 Fe-Mn강은 오스테나이트계 Fe-Cr-Ni강보다 더 많은 탄소와 질소를 함유할 수 있으며, 다양하고 더 복잡한 석출거동을 보여준다. 그리고 2상 조직으로 이루어질 경우에는 금속간화합물 (Intermediate Phase) 등 다양한 상

들이 석출될 수 있어 기계적 특성 및 내식성에 많은 문제가 발생된다. 따라서 Fe-Cr-Mn계 합금에 N를 첨가하여 상안정성에 대한 연구가 최근 들어 진행되고 있다.<sup>15, 16)</sup>

W은 Mo에 비하여 상대적으로 짧은 방사능 반감기로 인해 Fe-Cr-Mn계 합금에서 내식성을 증가시킬 목적으로 첨가되는 원소이다. 그러나 오스테나이트 기지에 페라이트 상을 생성시키며 시효시에는 페라이트상이 2차 오스테나이트 상과 chi상 등으로 분해되는 경향이 보고된다.<sup>17)</sup>

따라서 본 연구에서는 Fe-Cr-Mn-N계 스테인리스강의 기계적특성 및 부식특성 개선을 위하여 Mo 대신에 W을 첨가하였으며, 또한 W 첨가에 따른 페라이트 상의 생성을 억제하기 위하여 Ni을 소량 첨가하여 시효 열처리에 따른 기계적 특성과 예민화 거동에 대하여 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 실험 합금의 제조

실험합금은 Schaeffler도를 고려하여 페라이트 형성원소인 W의 함량을 변화시켜 조성을 설정한 후 고주파 유도로를 사용하여 진공용해로 제작되었다. 제작된 실험 합금들의 화학조성은 Table 1과 같다. 열간 압연은 1270°C, Ar 분위기 하에서 2시간 soaking을 행한 후, 최종 두께 5mm로 행하였으며, 소둔 열처리는 1200°C, 30분간 실시한 후 수냉하였

Table 1. Chemical Compositions of the experimental alloys (wt%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	W	N	Fe
C11	0.09	0.52	14.4	-	16.1	0.29	0.01	0.40	Bal.
C13	0.11	0.50	13.5	-	14.5	0.24	3.60	0.43	Bal.
C14	0.07	0.51	13.9	1.57	15.1	0.17	3.57	0.43	Bal.

다. 시효 열처리는 Fe-Cr-Mn계 합금의 carbide,  $\sigma$ ,  $\chi$  상 등의 석출 온도구간으로 알려진 500°C ~ 800°C 범위 중 650°C에서 1시간, 10시간, 100시간 동안 행하여 수냉 후 시효 시간에 따른 예민화 거동 및 기계적 특성 변화를 관찰하였다.

## 2.2 기계적 시험

기계적 특성 시험으로 인장시험, 경도시험, 충격 시험을 행하였다. 인장시험은 ASTM A370 규격의 sub-size로 가공하여 9mm/min 속도로 행하였다. 경도시험은 로크웰 경도기를 사용하여 150kg의 하중을 가하여 C-scale로 측정하였다. 충격시험은 ASTM sub-size의 시편을 이용하여 샤피 충격시험기를 사용하여 충격에너지를 측정하였다.

## 2.3 부식 시험

실험합금들의 부식특성을 평가하기 위하여 양극 분극시험을 행하였으며 입계 예민화 정도를 평가하기 위하여 EPR 시험을 행하였다.

### 2.3.1 양극분극시험

양극분극시험용 시편은 SiC 연마지를 사용하여 #2000 grit까지 연마하고 증류수로 세척한 후, 용액 중에 노출되는 시편의 면적을  $1\text{cm}^2$ 가 되도록 준비하였다. 시험 용액으로는 탈기된 30°C의 1%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  용액과 0.01M HCl 용액을 사용하였으며, 장비는 EG&G PAR Model 263A Potentiostat/Galvanostat을 이용하였다. 상대전극(Counter Electrode)으로는 두 개의 고밀도 탄소봉을, 기준전극(Reference Electrode)으로는 포화감홍전극(Saturated Calomel Electrode, SCE)을 사용하였다. 표면에 생성된 산화물이나 불순물을 제거하기 위하여 음극전위를 인가하여 10 분간 강제 환원한 후에 개방회로전위 상태에서 다시 10 분간 유지하고 부식 전위로부터 양극 방향으로 1mV/sec의 속도로 전위를 증가시키면서 분극시험을 하였다.

### 2.3.2 EPR(Electrochemical Potentiokinetic Reaction) 시험

EPR 시험은 석출물에 의한 입계 예민화 정도를 평가하는 전기화학적 방법이다. 시편은 양극분극 시험용 시편과 동일하게 준비하고 시험 후의 시편 표면을 관찰하기 위하여 SiC grit #2000까지 연마하였다. 준비된 시편은 30°C의 0.5M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 0.01M KSCN 혼합용액에서 양극분극시험에서와 동일한 방법으로 30 분간 탈기시키고, 10분간 강제 환

원 후, 10분간 개방회로 전위로 유지하였다. 그 후 cyclic voltametry 방법으로 주사속도 1.67mV/sec로 200mV까지 양극 방향으로 주사한 후, 다시 역으로 부식 전위까지 재환성화시켜 그 때 나타난 양극 전류 피크 (Ia)와 재환성화 피크 (Ir)의 전류밀도비 (Ir/Ia)의 값을 구하여 예민화정도 (DOS, Degree of Sensitization)를 평가하였다. 시험 후 시편은 아세톤으로 세척하고 광학현미경을 사용하여 표면에서의 예민화된 조직을 관찰하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 기계적 특성

Fig. 1은 각 합금의 시효 열처리에 따른 경도 변화이다. 시효 시간이 증가함에 따라 경도가 증가하였으며 W이 첨가된 합금의 경도 증가가 큰 경향을 보였다. 이는 앞서의 미세구조 관찰에서 입계를 따라 석출된  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  탄화물 석출 및 페라이트 분해에 의해 생성된 경한 chi 상에 기인된 것으로 생각된다. 또한 페라이트 상분율이 컸던<sup>17)</sup> C13 합금의 경도가 C14에 비하여 큰 값을 보였다.

Fig. 2는 시효 열처리에 따른 충격시험결과이다. C11 합금은 시효시간이 증가함에 따라 충격에너지 값이 지속적으로 감소하여 입계에 형성된 탄화물에 의해 취성이 유발됨을 알 수 있다. 페라이트와 오스

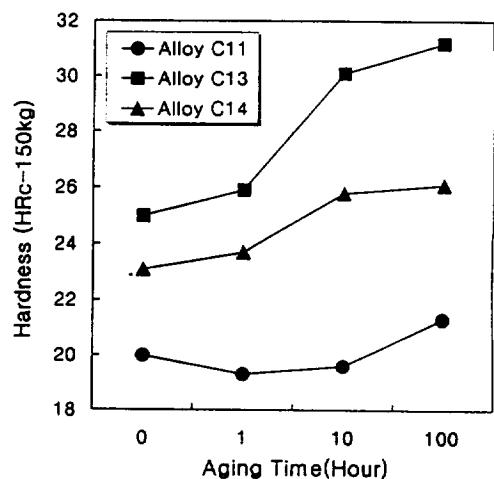


Fig. 1. Effects of aging time on the hardness of C11, C13, and C14 alloys aged at 650°C.

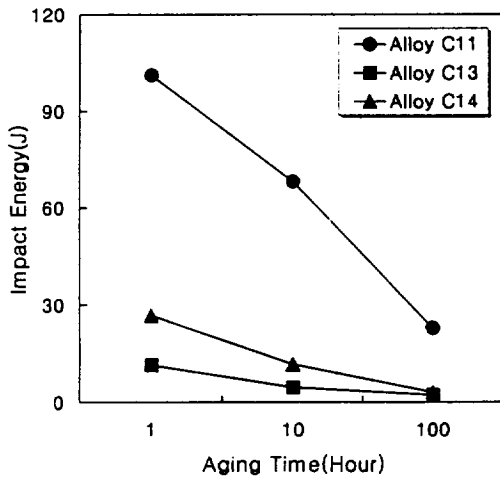


Fig. 2. Effects of aging time on the impact energy of C11, C13, and C14 alloys aged at 650°C.

테나이트 2 상으로 이루어진 C13 합금과 C14 합금은 C11 합금에 비하여 매우 낮은 충격에너지 값을 보였다. C13 합금은 가장 낮은 충격 에너지 값을 보였으며 이는 앞서 경도시험 결과와 동일한 경향을 보인다. 이는 페라이트 분해에 의해 생성된  $\chi$  상에 기인하며 C13 합금의 페라이트 상분율이 크기 때문으로<sup>17)</sup> 사료된다. 즉 페라이트 상분율이 클수록 페라이트상의 분해로 생성되는  $\chi$  상이 많기 때문이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 시효재와 소둔재에 대한 인장 시험 결과이다. C11 합금의 경우 시효시간이 1시간 이하에서는 강도 및 연신율의 저하가 크지 않아 초기 입계에 석출된 탄화물의 양이 적어 취성을 유발하지 않는 것으로 생각된다. 그러나 항복강도와 인장강도가 시효 시간이 증가함에 따라 감소하였으며, 100시간 시효에서는 연신율의 현저한 저하가 관찰되었다. 이는 미세구조 관찰에서 알 수 있듯이<sup>17)</sup> 100시간 시효했을 때 입계를 따라 연속적으로 심하게 석출된 탄화물들에 기인된 것으로 생각할 수 있다. W이 첨가된 합금들은 항복강도와 인장강도, 연신율이 시효처리 시간이 증가함에 따라 감소하여 페라이트 상 분해로 생성된  $\chi$  상에 의해 재료의 취성이 유발되는 것으로 보인다. 특히 소둔재에 비하여 초기 시효시에 인장강도가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 따라서 인장특성 시험 결과 W 및

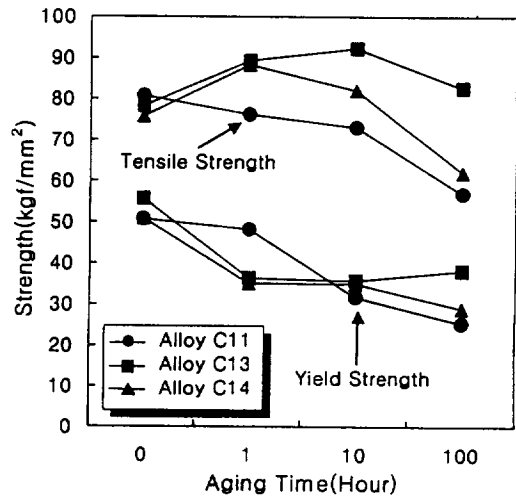


Fig. 3. Effects of aging time on the mechanical properties of C11, C13, and C14 alloys aged at 650°C.

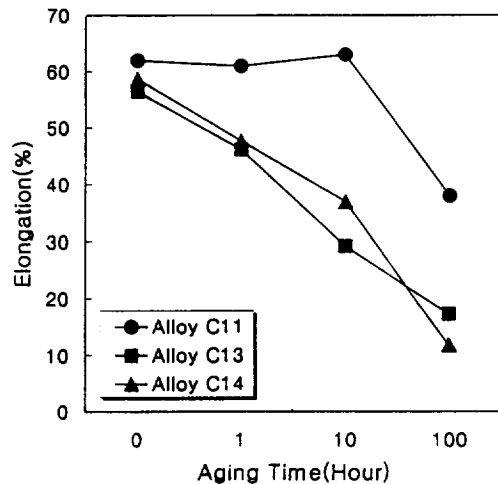


Fig. 4. Effects of aging time on the elongation of C11, C13, and C14 alloys aged at 650°C.

Ni 첨가에 의한 특성 개선 효과는 거의 없는 것으로 관찰되었다.

### 3.2 일반부식특성

Fig. 5는 1 vol%  $H_2SO_4$  용액에서의 양극분극시험 결과이다. W은 소둔재의 입계전류밀도를 현저히 감소시켜 부동태화에 매우 유용한 원소임을 알 수 있다. Ni도 입계전류밀도를 저하시키는 것으로 관찰

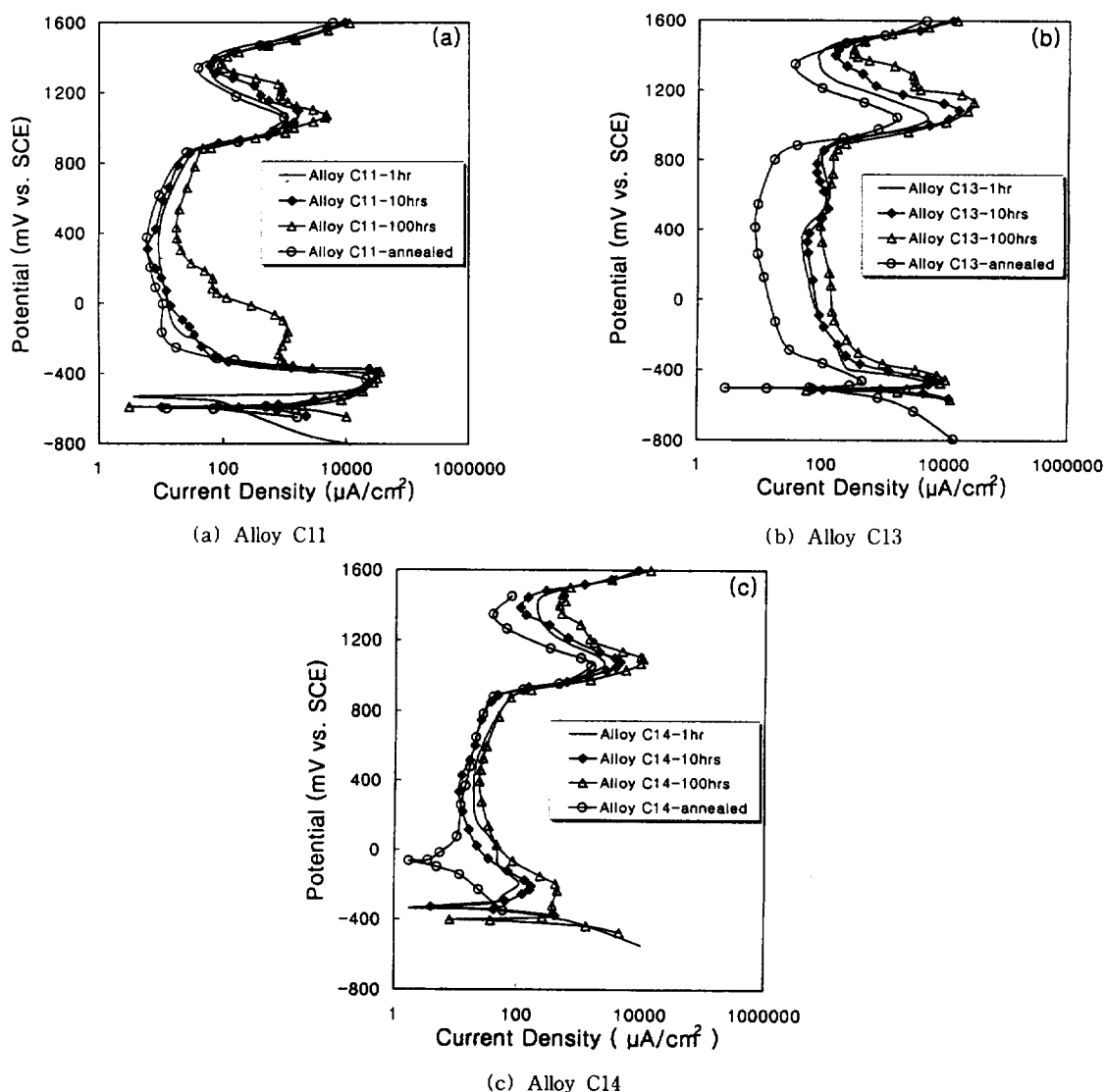


Fig. 5. Anodic polarization curves of alloys in 1%  $H_2SO_4$  solution at 30°C

되었다. 시효 처리를 했을 때에는 모든 합금에서 부동태 전류밀도와 임계 전류밀도가 증가하였다. 임계 전류밀도가 크다는 것은 부동태 피막이 형성되기 위하여 표면에서 용해가 보다 많이 일어나야 함을 의미하며, 부동태 전류밀도의 증가는 표면에 형성된 부동태 피막을 통해 금속 이온들의 용해가 보다 많이 일어남을 의미한다. 따라서 시효처리 시간이 증가함에 따라 부동태 피막의 특성 저하가 일어남을 알 수 있다. 시효재의 경우 W만 첨가된 C13 합금

은 W이 첨가되지 않은 C11 합금보다 낮은 임계전류밀도 값을 보이나 부동태 전류밀도는 다소 증가하는 경향을 보였다. Ni를 첨가한 C14 합금은 시효했을 때에도 C13 합금에 비해 상대적으로 임계전류밀도와 부동태 전류밀도의 값이 작았다. 따라서 Ni이 황산 분위기 하에서 소둔재 및 시효재의 내식성 증가에 기여함을 알 수 있다. 그러나 C11 합금에 비하여 W 및 Ni이 첨가된 C13, C14 합금의 시효재가 임계전류밀도는 낮기 때문에 부동태 피막의

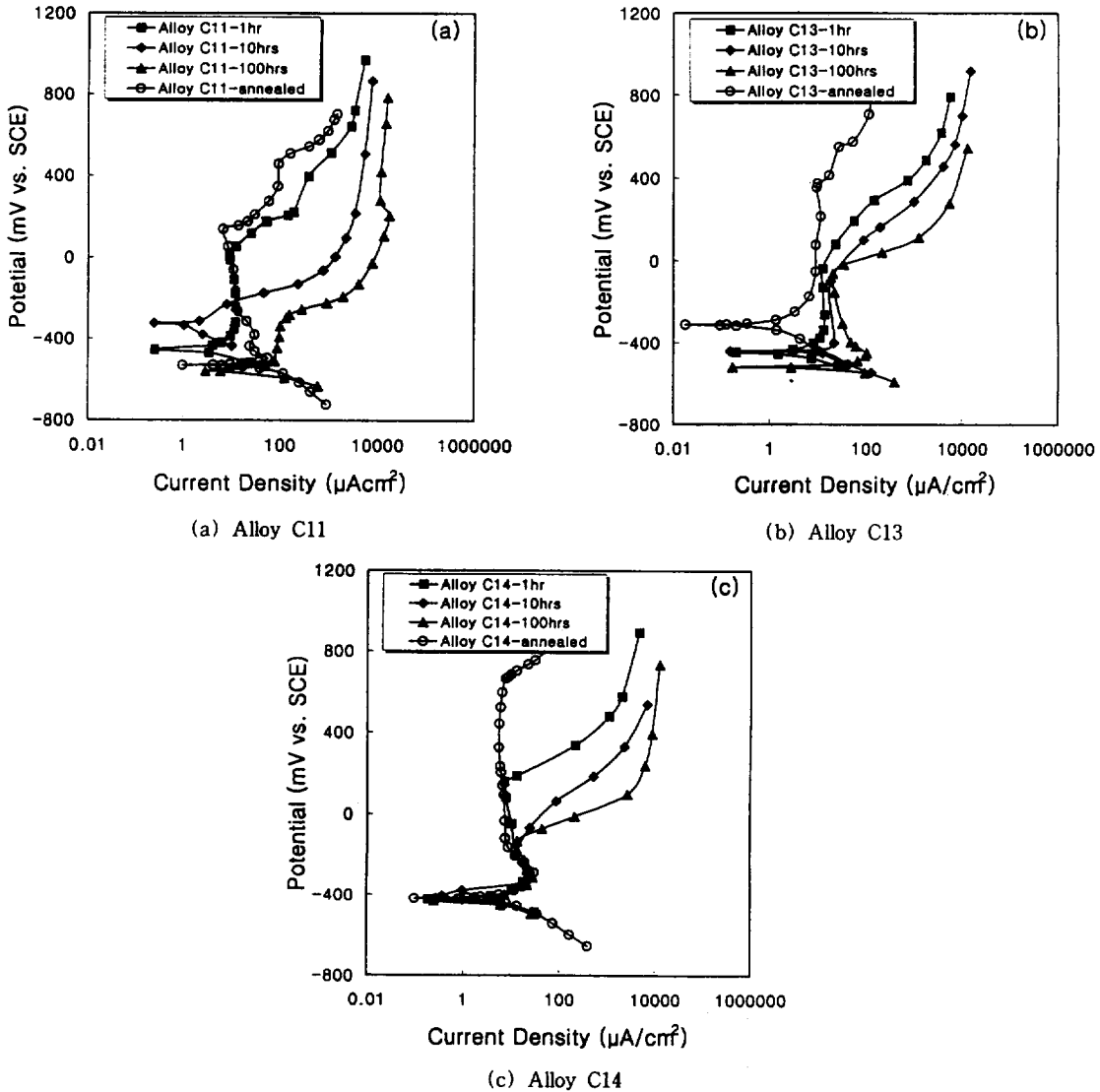


Fig. 6. Anodic polarization curves of alloys in 0.01M HCl solution at 30°C

형성은 용이하나 부동태 전류밀도가 높아 형성된 부동태 피막은 오히려 불안정함을 알 수 있다. 이는 페라이트가 분해되며 생성된  $\chi$  상에 W이 보다 농축되며 인접부위에서는 이들 원소의 고갈로 인해 부동태 피막이 상대적으로 불안정한 것에 기인된 것으로 판단된다.

Fig. 6은 1시간, 10시간, 100시간 시효 열처리한 합금과 1200°C에서 30분간 소둔 열처리만 한 합금에 대해 탈기된 30°C, 0.01M HCl 용액에서 양극분

극실험을 행한 결과이다. 시효 열처리 시간이 증가함에 따라 공식전위가 현저히 감소되고 부동태 전류밀도가 증가하며 부동태 영역이 감소하였다. 따라서 시효 처리에 의해 내식성이 현저히 저하하는 경향을 보였다. W는 소둔재의 공식전위를 증가시켰으나 시효재에 있어서는 W이 첨가된 합금과 첨가되지 않은 합금간에 공식전위의 차이가 거의 없어 W 첨가 효과는 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 그러나 Ni이 첨가된 C14 합금에서는 시효처리를 행하

여도 임계전류밀도가 거의 일정하며 공식전위만 낮아지는 경향을 보였다. 따라서 소량의 Ni 첨가가 내식성에 기여함을 확인할 수 있다.

### 3.3 예민화 특성

Oxalic Etch 시험법은 입계 예민화 현상을 정성적으로 Step, Dual, Ditch mode로서 판별한다. 그러나 시험결과가 정량적이지 못하며 대개 파괴적이라는 단점이 있다. 따라서 입계의 예민화된 정도를 정량적으로 보여주는 방법으로서 EPR 시험을 사용한다. Fig. 7은 EPR 시험으로부터 측정된 예민화 정도(DOS, Degree of Sensitization)를 시효 시간에 따라 도시한 그래프이며 Fig. 8은 EPR 시험 후의 표면 관찰 결과이다. 시효시간이 증가함에 따라 DOS 값이 증가하여 예민화가 진행됨을 알 수 있다. W 및 Ni이 첨가되지 않은 C11 합금과 W만 첨가된 C13 합금에서는 시효 시간이 10 시간까지 DOS 값이 크게 증가하였다. 그러나 W와 Ni이 첨가된 C14 합금은 다른 합금들에 비하여 10 시간 시효까지 DOS가 낮았으며 다른 합금 1 시간 시효했을 때와 비슷한 DOS 값을 보였다. 따라서 Ni이 예민화 현상을 지연시키는 효과가 있는 것으로 관찰되었다. 그러나 C14 합금의 경우 100 시간 시효에서 DOS 값이 현저하게 증가하였다. 앞서 Fig. 5에서 황산 용액에서의 양극분극시험 결과를 살펴보면 C14 합금의 임계전류밀도가 가장 낮은 값을 보였다. 즉 anodic scan에서 가장 낮은  $I_a$  값을 갖고

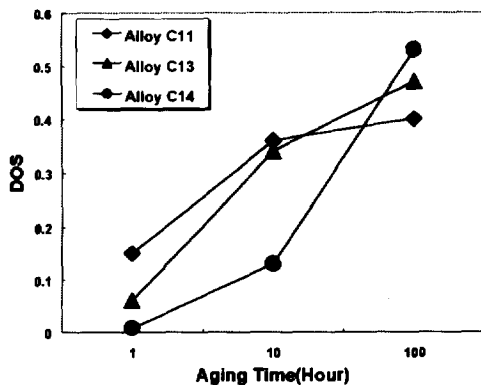


Fig. 7. The variation of the DOS(Degree of sensitization) values of C11, C13, and C14 alloys with aging time.

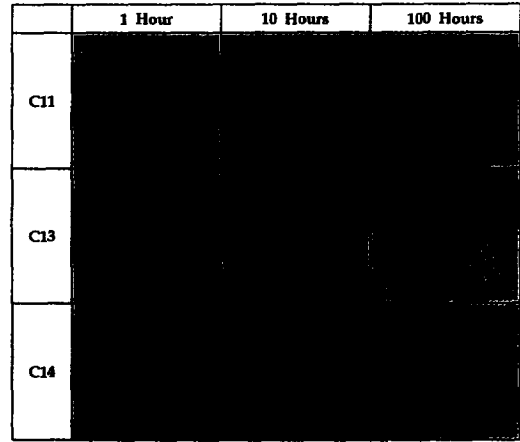


Fig. 8. Optical micrographs of C11, C13, and C14 alloys aged at 650°C after EPR test.

reactivation scan에서는 C13 합금에서와 유사한 Ir 값을 가짐으로써 이들의 비를 계산한 DOS값이 C14 합금에서 크게 나온 것으로 생각된다. EPR 시험 후, 표면 관찰결과에서 C11 합금은 10시간 시효했을 때 입계가 예민화 현상에 의하여 깊게 부식되어 100시간 시효했을 때의 표면과 비슷한 양상을 보였다. 또한 입계뿐만 아니라 오스테나이트 기지에서도 균일부식이 심하게 관찰되었다. 페라이트와 오스테나이트 두 상으로 이루어진 합금들에서는 1시간 시효시 주로 페라이트 상에서만 선택적으로 부식되고 국부적으로 파괴되는 양상을 보였으며 입계에서는 거의 예민화가 발생하지 않았다. 그러나 10시간 시효에서는 C13 합금의 경우 입계에서 부분적으로 예민화 현상에 의하여 부식이 발생하였으며 페라이트 상이 파괴되어 떨어져 나가는 특성을 보였다. C14 합금은 10시간 시효에서도 입계에서의 선택적 부식 현상은 매우 미약하였다. 페라이트상의 선택적 부식은 C13 합금과 유사한 경향을 보였다. 100시간 시효에서는 두 합금 모두 페라이트상이 심하게 부식되고 입계에서도 예민화가 발생한 것을 확인할 수 있다. 그러나 C11 합금과는 달리 오스테나이트 기지에서는 부식이 거의 발생하지 않았다. 따라서 W이 첨가되었을 때 기지보다는 생성된 페라이트 상의 분해로 인해 발생하는 예민화 현상이 더 큰 문제가 됨을 알 수 있다. 따라서 전체적으로 EPR 시험으로부터 얻어진 DOS 값의 변화와 표면

관찰 결과는 잘 일치하는 경향을 보였다.

#### 4. 고 찰

인장시험, 충격시험, 경도시험 결과 시효 처리 시간이 증가함에 따라 재료에 취성이 유발되었다. 특히 W이 첨가된 합금들에서 이러한 재료의 취성으로 인해 경도가 증가하며 충격에너지 값이 감소하고 강도가 저하되는 특성을 보였다. 또한 Ni이 첨가되어 페라이트 상분율이 상대적으로 적은 C14 합금의 인성이 C13 합금보다 우수한 것으로 관찰되었다. 이러한 경향은 페라이트 상분율의 결과와 연관되는 것으로 생각된다. C13 합금은 페라이트의 상분율이 약 21% 정도이며 C14 합금은 약 8% 정도의 페라이트 상분율을 보였다. 페라이트 상은 앞서의 미세조직 관찰 결과에서 시효 열처리시 2차 오스테나이트와 chi 상으로 분해되었다. 이때 생성된 chi 상은 주로 W 원소가 농축된 상으로 매우 경하다는 특징을 가지며 여러 연구자들 의하면 재료의 취성을 유발시키는 것으로 알려져 있다<sup>18)</sup>. 따라서 페라이트 상분율이 큰 C13 합금이 페라이트 분해에 의해 chi 상이 많이 생성되기 때문에 인성 저하가 보다 클 것으로 유추할 수 있다. 이러한 경향은 기계적 특성 시험 결과들과 잘 일치하였다. 반면 W과 Ni이 첨가되지 않은 오스테나이트 단상 조직의 C11 합금은 시효 열처리에 의해 인장특성 및 경도 값의 변화는 거의 없으나 충격에너지는 감소하였다. 이로부터 입계에 석출된 탄화물은 강도 및 경도에는 큰 영향을 주지 않으나 충격에너지 값을 감소시켜 취성을 유발시키는 것으로 생각된다.

일반 부식시험과 예민화 시험 결과 시효처리 시간이 증가함에 따라 부식저항성이 저하되고 예민화에 민감한 경향을 보였다. 특히 C13, C14 합금에서 페라이트상은 시효 시간이 증가함에 따라 선택적으로 부식되어 떨어져 나가는 경향을 보였다. 이는 페라이트 상이 분해되며 생성된 2 차 오스테나이트 상이 Cr 및 W 함량이 매우 낮기 때문에 부식에 상대적으로 민감하여 예민화 현상이 촉진되는 것으로 생각된다. Ni의 첨가는 EPR 시험결과 시효시 예민화 특성을 지연시키는 것으로 관찰되었다. 이는 양극분극시험 결과 Ni이 첨가된 경우 임계전류밀도

값이 저하되는 현상과 관련있는 것으로 생각된다. 스테인리스강의 내식성은 표면에 형성되는 수십 Å 두께의 부동태 피막에 의해 결정된다. 부동태 피막은 임계전류밀도가 낮을수록 형성이 용이해지며 보다 우수한 내식성을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 Ni의 첨가는 임계전류밀도를 저하시켜 부동태 피막 형성을 용이하게 때문에 예민화 현상을 저하시키는 효과가 있는 것으로 생각된다.

#### 5. 결 론

1) 인장시험, 충격시험, 경도시험결과 시효 처리 시간이 증가함에 따라 강도 및 연신율, 충격에너지 값이 감소하였으며 경도가 증가하여 재료가 취화되는 것으로 관찰되었다. 특히 W이 첨가된 합금에서는 페라이트 상의 분해로 이러한 재료의 취성이 크게 관찰되었다.

2) 양극분극시험 결과 염화물 환경 하에서는 시효 열처리 시간이 증가함에 따라 공식전위가 현저히 감소되고 부동태 전류밀도가 증가하며 부동태 영역이 감소하여 내식성이 저하되었다. W는 소둔재의 공식전위를 증가시켰으나 시효재에 있어서는 W이 첨가된 합금과 첨가되지 않은 합금간에 공식전위의 차이가 거의 없어 W 첨가 효과는 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 황화물 환경 하에서도 시효 시간이 증가함에 따라 임계전류밀도가 증가하여 부동태화가 어려움을 알 수 있었다. 그러나 Ni 첨가는 임계전류밀도를 감소시켜 시효재의 경우에도 내식성에 기여함을 알 수 있었다.

3) EPR 시험에 의해 예민화도를 측정한 결과 시효시간이 증가함에 따라 DOS 값이 증가하여 예민화가 촉진되었다. 특히 입계에 석출된 탄화물이나 페라이트 상에서 선택적으로 부식되어 국부적으로 파괴되는 양상을 보였다. Ni이 첨가되면 예민화에 필요한 시효시간이 길어짐으로써 예민화 현상을 억제하는데 효과가 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 기초전력공학공동연구소 원자력안전연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.



## References

1. Y. Hosoi, *Materia*, **32**, pp. 652-653, (1993).
2. Kazuya Miyahara, Reiko Sugihara, Tadashi Satoh and Yuzo Hosoi, Proc. Inter. Conf. Stainless Steels, Chiba, ISIJ, pp. 134-145, (1991).
3. E. Lunarska, *Corrosion*, **31**, p. 231, (1975).
4. J. Hochmann, A. Desestret, D. Jolly and R. Mayoud, *Met. Corr. Industrie*, **390**, pp. 591-592, (1974).
5. E. Dulis, "Iron St. Inst.", 1964.
6. R.A. Lula, "Manganese Stainless Steels", Manganese Center, Paris.
7. J. R. Kearns, Proc. Conf. New Developments in Stainless Steel Technology ASM, p. 117, (1985).
8. C. E. Bates, O. V. Rogers and R. W. Monroe, Proc. Conf. New Developments in Stainless Steel Technology ASM, p. 207, (1985).
9. H. Y. Chang, Y. S. Park and Y. S. Kim, Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting, **2**, p. 591, (1995).
10. H. Thier, A. Baumel and E. Schmidtman, *Arch. Eisenhaus*, **40**, p. 333, (1969).
11. C. DaCasa, B. Nileswar and D.A. Melford, J. IISI, London, 207, (1969).
12. Donald Peckner, Handbook of Stainless Steels, pp. 3-30~3-31, McGraw-Hill Book Company (1977).
13. Z. S. Beer, *Tr. Met. Soc. AIME*, p. 221, (1961).
14. M. A. Small, R. D. Pehlke, *Tr. Met. Soc. AIME*, p. 242, (1968).
15. J. Y. Kim, Y. S. Kim and Y. S. park, *this Journal*, **28**, pp. 12-21, (1999).
16. J. Y. Kim, Y. S. Kim and Y. S. park, *this Journal*, **28**, pp. 131-141, (1999).
17. Y. T. Jeon, U. H. Joo, Y. S. Kim and Y. S. park, *this Journal*, Submitted, (2000).
18. J. O. Nilsson, *Materials Science and Technology*, **8**, p. 685, (1992).