

## 교류임피던스법에 의한 Nimonic 80A 초내열합금 시효열처리재의 부식거동 고찰

나 은 영\* · 백 신 영\*\*

### The Corrosion Behavior Study by AC Impedance Method for the Aging Heat Treated Nimonic 80A Superalloy

E. Y. Na · S. Y. Baik

**Key words** : Nimonic 80A Super-alloy(초내열합금), Aging Heat-treatment(시효열처리), Electro-chemical corrosion(전기화학적 부식), AC Impedance(교류 임피던스), Phase Shift(위상 천이), Sensitization(예민화), Micro Structure(미세조직)

#### Abstract

In this paper, the effect of aging heat treatment to the Corrosion behavior for the Nimonic 80A superalloy was studied by AC Impedance methods. Tested solution was 3.5% NaCl with temperature 25℃. Electro-chemical corrosion test were carried out for the Nimonic 80A super-alloy which solution heat treated at 1080℃ for 8 hours, followed by aging heat treated at 650℃, 700℃, 750℃, 800℃ and 850℃ with 16hours under vacuum environment.

The obtained results were as follows:

1. Base metal and solution-treated materials were exhibited similar corrosion tendency as Randle equivalent cell. The value of passive film resistance was 579 ohms for the base metal and 124,770 ohms for the solutionized metal, such a difference was arose by the  $\gamma'$  precipitate on the metal surface during heat treatment.

2. The measured value of  $R_p$  for heat-treated at 650℃, 700℃, 750℃, 800℃ and 850℃ were 97,943, 93,111, 26,961, 15,798 and 11,780ohm respectively. Which indicated that the passive film resistance  $R_p$  was reduced as aging temperature increased, due to the growth of grain size and sensitization at the grain boundary.

3. The similar tendency was exhibited for corrosion behavior of the electro-chemical corrosion polarization method and AC impedance method, and confirmed that AC impedance method was useful tool for corrosion research.

\* 정희원, 목포해양대학교 기관공학부 조교(원고접수일 : 99년 8월)

\*\* 종신회원, 공학박사, 목포해양대학교 교수

### 1. 서 론

전기화학적 방법은 이온전도성의 매질에서 발생하는 부식을 검출하는데 폭넓게 사용되고 있다. 이 방법은 주로 분극저항  $R_p$ 를 계산하고  $R_p$ 값을 사용하여 Stern Geary식에서 부식전류  $i_{corr}$ 을 계산하는 것이다.

$$i_{corr} = \beta_a \cdot \beta_c / 2.303 R_p (\beta_a + \beta_c) \quad (1)$$

$\beta_a$ 와  $\beta_c$ 는 양극과 음극의 기울기이며 부식으로 인한 중량 감소  $\Delta W$ 는 다음과 같다.

$$\Delta W = M Q_{corr} / n F \quad (2)$$

$$Q_{corr} = \int_0^t i_{corr} dt = \beta_a \cdot \beta_c / 2.303 (\beta_a + \beta_c) \int_0^t (1/R_p) dt \quad (3)$$

여기에서  $Q_{corr}$ 은 전하량,  $i_{corr}$ 은 부식전류,  $M$ 은 평균분자량,  $n$ 은 산화수이다.

전기화학에서 혼합전위 이론은 Wagner와 Traud에 의해 제안된 것으로 전기화학적분극으로 부식속도를 결정하는 방법이다. 전기화학적 분극 방법으로 부식속도를 결정할 경우에는 항상 분극저항  $R_p$ 를 정확히 계측해야 하고 또한 Tafel 계수도 정확해야 한다. Tafel 계수는 전기화학적 분극 방법으로 계측하면 문제가 없다. 그러나 분극저항  $R_p$ 는 비선형일 경우 전기화학 분극법에서는 오차가 많으므로 이러한 단점을 보완하기 위하여 주파수를 변화시키면 용량성이나 유도성 인자에서 저항이 변하는 성질을 이용하여 주파수에 따른 저항을 계측하는 것이 교류 임피던스법이다. 종전에는 교류 임피던스 방법에서 주로 가청주파수 범위를 사용하였으나 현재는 급격한 분석방법의 발달로 저주파나 고주파의 분석이 가능하게 되었다. 가청 주파수 보다 큰 MHz에서 낮은 mHz 단위의 범위의 활용으로 철강, 니켈, 크롬, 티타늄 등의 전해질에서의 부식반응(활성용해, 부동태, 방식첨가제, 음극반응, 물질이동)의 연구가 가능하게 되었다.<sup>1-5)</sup>

선박의 내연기관에 사용되는 연료유 비용을 절감하기 위하여 기관 제작회사들은 고효율 기관 및 유류 가격이 저렴한 저질 연료유를 사용할 수 있는 기관의 개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 기관에 사용되는 배기밸브(Exhaust Valve)는 폭발, 연소행정중에는 연소실의 일부를 형성하여 가장 높은 압력과 온도를 받게되어 기관 부품중 최악의 조건 하에서 작동되고 있다. 최근에는 초내열재료를 배기밸브재료로 채용하고 있으며 일부 중형기관 및 대형기관에서는 Ni기 초내열합금인 Nimonic 80A를 사용하기 시작하였다.<sup>6)</sup> Nimonic 80A는 제2차 세계 대전시 급격한 항공기의 발달과 함께 항공기용 Turbine blade로 1944년경 개발된 단조합금재료로서<sup>7)</sup> 내고온성, 내산화성, 내식성이 뛰어나고 인장강도, 경도 등의 기계적인 성질도 우수하여 항공기뿐만 아니라 원자로, 우주선, 산업 플랜트 등의 고온부에 사용되고 있는 재료이다.<sup>8,9)</sup>

본 논문에서는 전보<sup>10,11)</sup>에서 경도와 전기화학적 분극에 의한 내식성을 연구와 관련하여 이 재료를 용체화 열처리한 후 시효처리온도에 따른 부식적 특성을 교류 임피던스에 의하여 전기화학적 부식 경향을 고찰하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 Nimonic 80A Superalloy재에 대하여 1,080℃에서 8시간 용체화하고 650~850℃ 범위에서 16시간 시효열처리를 실시한후 열처리에 따르는 부식 거동을 교류임피던스법을 이용하여 연구하고자 한다.

### 2. 실험방법

#### 2-1. 실험에 사용된 모재의 화학적 성분

실험에 사용한 모재는 중대형 기관의 배기밸브 재료로 사용되는 Nimonic 80A 초내열합금 (직경 30mm, 길이 2,000mm)이다. 이 재료의 화학적 성분은 Table 1에서 보는 바와 같이 Ni과 Cr이 주성분이며, 고온에서 강도를 향상시키는  $\gamma'$ 상의 생성을 위해 Al과 Ti가 합금되었다.

Table 1. Chemical compositions of Nimonic 80A superalloy(wt%).

Elements	C	Si	Fe	Cu	Cr	Ti	Al	Co	Ni	Mo	Mn
wt%	>0.10	0.99	2.54	0.67	21.11	2.40	2.96	0.95	67.58	0.38	0.41

2-2. 시편의 크기 및 열처리

모재를 열처리와 교류임피던스 시험을 하기 위하여 직경  $\phi 30\text{mm}$  봉재를 직경  $\phi 15\text{mm} \times$  높이  $10\text{mm}$  원통형으로 제작하였다. 시편을  $1,080^\circ\text{C}$ 에서 8시간 용체화 열처리 후 공냉시켰으며, 이 용체화 된 재료를 온도  $650^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  및  $850^\circ\text{C}$ 에서 각각 16시간 시효열처리를 실시한 후 공냉하였으며 시험 중 표면의 산화를 억제하기 위하여 진공분위기에서 열처리를 실시하였다.

2-3. 전기화학적 교류 임피던스 측정

시효열처리된 시편의 부식거동을 알아보기위하

여 ASTM G-106(Practice for Verification of Algorithm and Equivalent for Electrochemical Impedance Measurement)<sup>12)</sup> 규격에 따라 전기화학적 교류 임피던스법에 의해 합성 임피던스와 위상천이를 측정하였다. 교류 임피던스 측정기기는 Gamry사의 Potentiostat CMS 300과 Stanford Research사의 SR 810 Lock-In Amplifier를 사용하였다. 3.5% NaCl용액을 사용하여  $25^\circ\text{C}$  온도에서 임피던스를 측정하였으며, 실험은 자연상태에 가깝게 하기 위해 대기상태에서 측정하였다. 임피던스 측정에서 DC 5mV, AC  $\pm 10\text{mV}$ 를 인가하였으며, 교류 주파수는  $100\text{kHz} \sim 0.03\text{Hz}$ 를 인가하

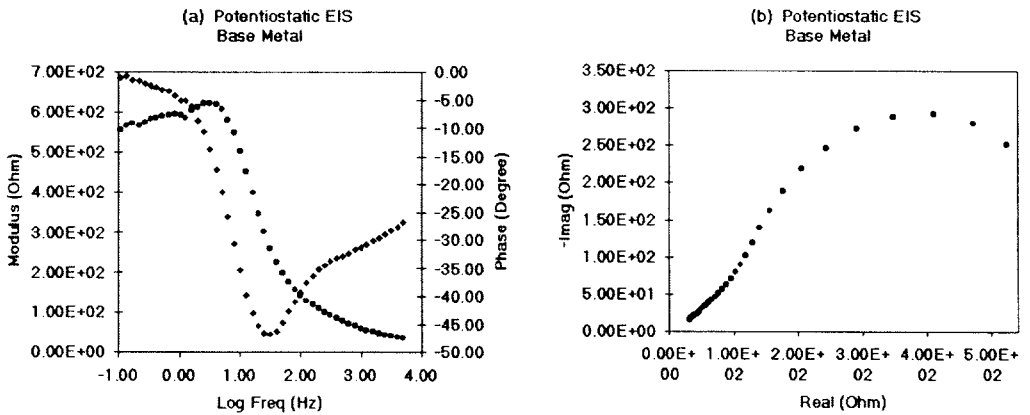


Fig. 1 AC Impedance test result for Nimonic 80A, base metal(x200)  
a) Bode Plot b) Nyquist Plot

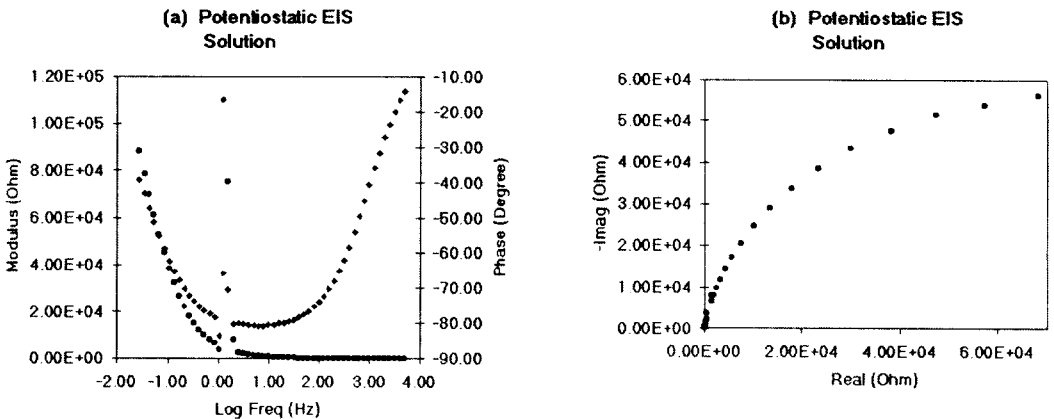


Fig. 2 AC Impedance test result for Nimonic 80A, solution treated(x200)  
a) Bode Plot b) Nyquist Plot

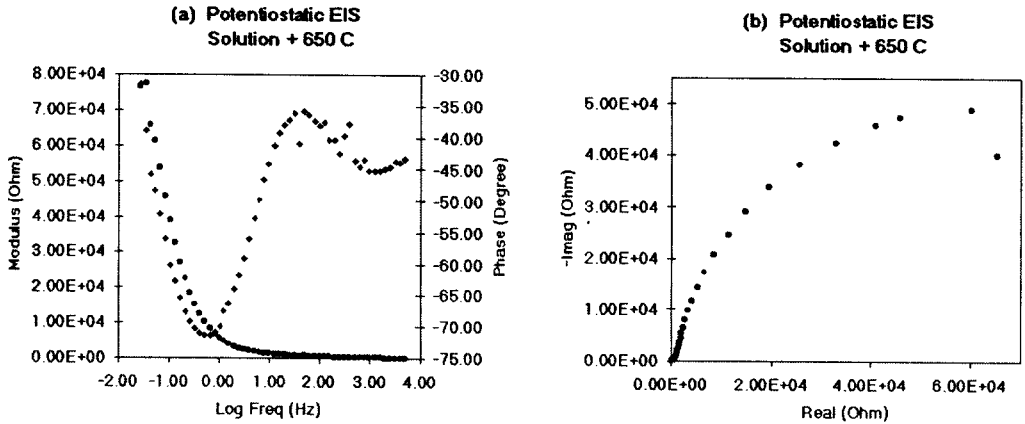


Fig. 3 AC Impedance test result for Nimonic 80A, age heat treated at 650°C (x200)  
 a) Bode Plot                      b) Nyquist Plot

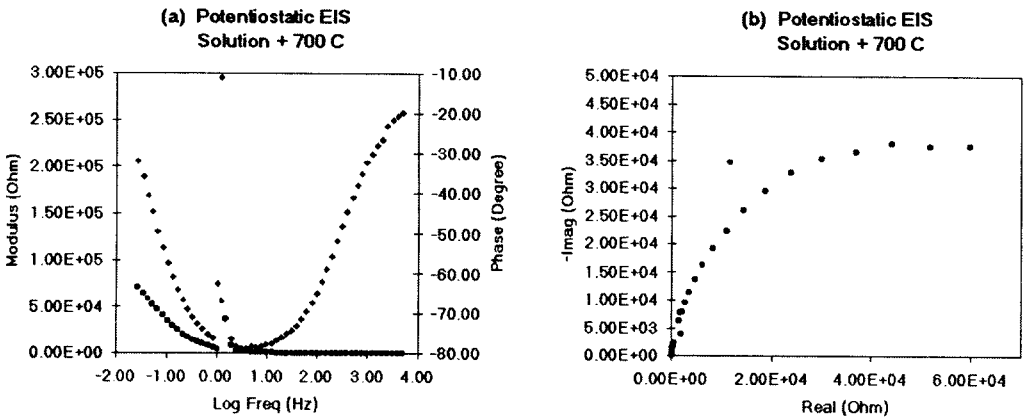


Fig. 4 AC Impedance test result for Nimonic 80A, age heat treated at 700°C (x200)  
 a) Bode Plot                      b) Nyquist Plot

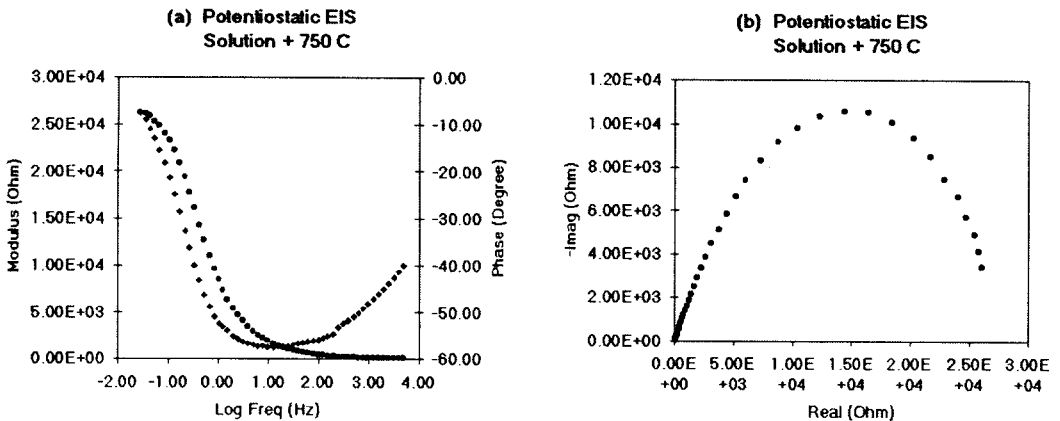


Fig. 5 AC Impedance test result for Nimonic 80A, age heat treated at 750°C (x200)  
 a) Bode Plot                      b) Nyquist Plot

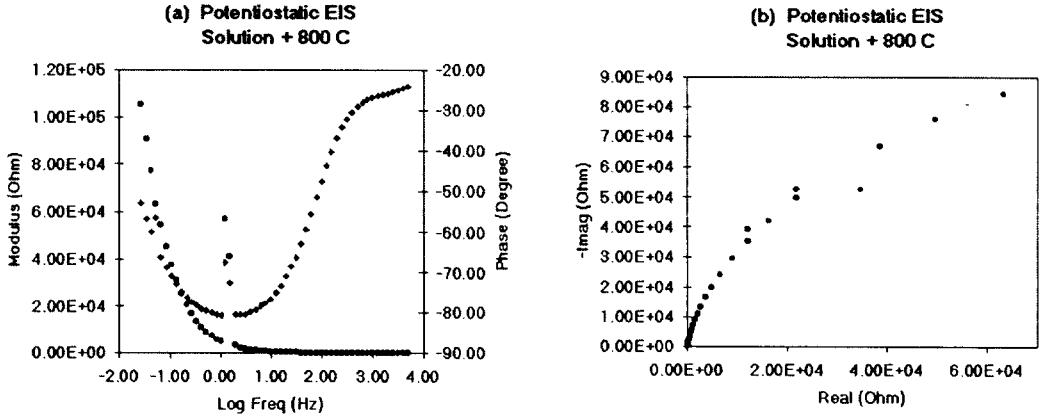


Fig. 6 AC Impedance test result for Nimonic 80A, age heat treated at 800 °C(x200)  
a) Bode Plot b) Nyquist Plot

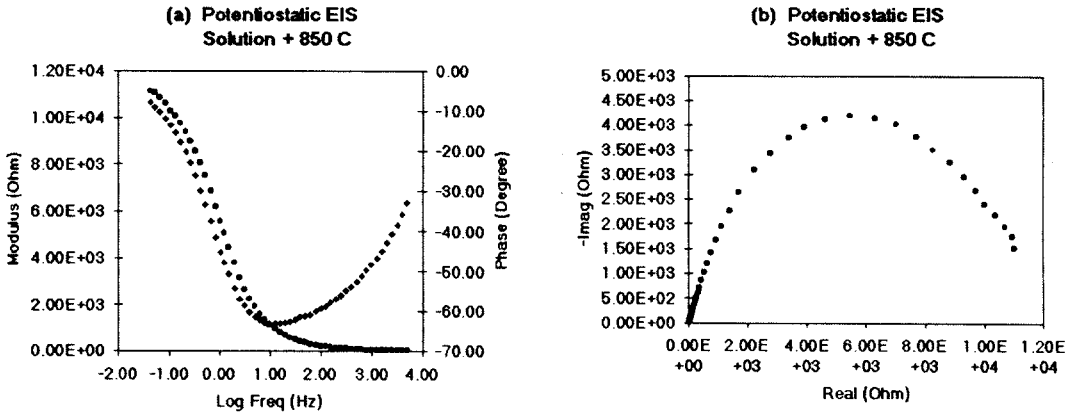


Fig. 7 AC Impedance test result for Nimonic 80A, age heat treated at 850 °C(x200)  
a) Bode Plot b) Nyquist Plot

였다. 전위측정은포화칼로멜전극(SCE)을기준전극으로사용하였고, 대극은 고밀도 탄소 전극을 사용하였다.

2-4. 임피던스 측정후 시편의 표면 관찰

전기화학적 분극측정후 각 시편을 Hitachi S-2150 SEM으로 가속 전압 15kV를 인가하여 부식이 발생한 표면상태를 촬영하였고 조직 사진을 위해 금속현미경 Meiji ML-MET를 사용하였다.

3. 교류 임피던스 측정 결과

3.5% NaCl용액에서 실험 모재, 1,080°C에서 8

시간 용체화 열처리재, 용체화 열처리 후, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C 및 850°C에서 16시간 시효열처리한 시편의 AC 임피던스 측정 결과는 Fig.1~7과 같다.

Fig.1~7의 Nyquist 선도에서 보는 바와 같이 x축을 실저항, y축을 Imaginary 저항으로 표시하면 반원으로 계속되며 이러한 경우 Fig. 8의 Randle 회로로 등가회로를 구성 할 수 있다.  $R_{sol}$ 는 용액의 저항,  $R_p$ 는 시편 표면에 형성된 표면의 피막 저항이며  $C_{dl}$ 은 표면 피막의 capacitor 성분이다.

Fig. 8의 Randle 회로에서 합성임피던스 Z는 다음과 같다.

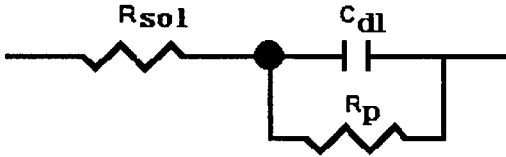


Fig. 8 Randle equivalent circuit for passive film.

$$Z = R_{sol} + R_p / (1 - j\omega C_{dl} R_p) \tag{4}$$

위 식에서 임피던스를 실수부와 허수부로 분리하면 다음과 같다.

$$Z = Z_1 + jZ_2 \tag{5}$$

위의 (5)식을 실수부  $Z_1$ 과 허수부  $Z_2$ 로 표시하면

$$Z_1 = R_{sol} + \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_{dl}^2 R_p^2} \tag{6}$$

$$Z_2 = \frac{\omega C_{dl} R_p^2}{1 + \omega^2 C_{dl}^2 R_p^2} \tag{7}$$

(6)과 (8)식에서  $\omega$ 를 소거하면 다음식이 된다.

$$(Z_1 - R_{sol} - \frac{R_p}{2})^2 + Z_2^2 = (\frac{R_p}{2})^2 \tag{8}$$

(8)식은 원의 방정식으로서 실수  $Z_1$ 을 x축, 허수  $Z_2$ 를 y축으로 표시하면 원의 중심은  $(R_{sol} + R_p/2, 0)$ 가 되고 반경은  $R_p/2$ 가 된다.  $Z_1$  임피던스는 주파수  $f \rightarrow \infty$ 일 때  $\omega = 2\pi f$ 로서  $R_{sol}$ 이 되고 주파수  $f \rightarrow 0$ 일 때는  $R_{sol} + R_p$ 가 된다. 따라서 x축과 교점에서  $R_{sol}$ 과  $R_p$ 를 구할 수 있다. 실험의 범위내에서 반원이 완성되지 않는 경우  $R_p$ 값은 EG&G 회사의 Zplot Simulation Program을 사용하여  $R_p$ 값을 계산하였다.

Fig.1의 모재를 이 등가회로에 적용시키면  $R_{sol}$ 와  $R_p$ 값이 31.3 및 578.7 $\Omega$ 이고  $C_{dl}$ 이 1.1 $\mu F$ 이고 최대 위상 천이는 주파수 31.55Hz에서 46.8도로 측정되었다. Fig. 2의 1,080 $^{\circ}C$ 에서 8시간 용체화한 경우  $R_{sol}$ 는 10.8,  $R_p$ 는 124,770 $\Omega$ 이고  $C_{dl}$ 은 0.27 $\mu F$ 이며 최대 위상천이는 83.5도로 측정되었다. Fig. 3~7의 650 $^{\circ}C$ , 700 $^{\circ}C$ , 750 $^{\circ}C$ , 800 $^{\circ}C$  및 850 $^{\circ}C$ 에서 16시간 시효열처리한 시편과 모재 및 용체화 열처리한 시편의 임피던스 측정 결과  $R_{sol}$ 는 각각 57.2, 19.4, 39.0, 27.7 및 20.3 $\Omega$ 이고  $R_p$ 는

Table 2. AC Impedance measured results for base metal, solutionized and aging heat treated specimen.

Kind of specimen	$R_{sol}(Ohm)$	$R_p(Ohm)$	$C_{dl}(\mu F)$	phase shift (max, degree)
base metal	31.3	579	1.10	46.8
solution heat treated	10.8	124,770	0.27	83.5
solution+650 $^{\circ}C$ age heat treated	57.2	97,943	0.15	71.4
solution+700 $^{\circ}C$ age heat treated	19.4	93,111	0.17	78.8
solution+750 $^{\circ}C$ age heat treated	39.0	26,961	0.12	55.7
solution+800 $^{\circ}C$ age heat treated	27.7	15,798	0.21	80.7
solution+850 $^{\circ}C$ age heat treated	20.3	11,780	0.29	63.2

각각 97,943, 93,111, 26,961, 15,798 및 11,780 $\Omega$ 이며  $C_{dl}$ 은 0.15, 0.17, 0.12, 0.21 및 0.29 $\mu F$  및 phase shift는 71.4, 78.8, 55.7, 80.7, 63.2로 측정되었으며 정리하면 Table 2와 같다.

교류임피던스 실험 결과에서 살펴본 바와 같이 모재와 용체화처리를 비교하면 용체화 처리재의  $R_p$ 값이 훨씬 크며 이러한 결과는 전보<sup>10,11</sup>의 전기화학적 분극 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 열처리 온도가 증가될수록  $R_p$ 값이 감소하였다.

#### 4. Micro Structure 고찰

일반적으로 시효 석출강화 효과를 갖는 합금은 용해온도 이상의 고온에서 용체화처리 후 급냉 담금질시켜 과포화된 조직으로 만들고 다시 온도를 상승시켜 과포화된 성분을 시효에 의해 석출시키면 강도와 내열성이 증가된다. 이 실험에서 사용된 재료는 이러한 석출성질을 이용하여 모상인 Ni-Cr 계에 Ti나 Al을 합금시켜 시효시키면 석출상인  $Ni_3Al$ 이나  $Ni_3Ti$ 의 초격자  $\gamma'$ 이 생성되며 고온 내열재료에서  $\gamma'$ 성분이 증가하고  $\gamma'$ 이 미세하게 분산될수록 내열강도는 증가하게 된다.<sup>13,14</sup> 용체화와 시효 열처리를 실시하면 다음과 같은 입자나 석출물(주로  $\gamma'$ )의 성장이 예상된다.

$$r^3 = 64 \Gamma D C V_{mt} / 9RT \tag{9}$$

여기에서  $r$ 은 평균입경,  $\Gamma$ 는  $\gamma$ - $\gamma'$ 의 계면자유에너지,  $D$ 는  $\gamma$ 중의  $\gamma'$ 입자의 확산상수,  $C$ 는  $\gamma$ 중의  $\gamma'$  평균분자농도,  $V_m$ 은  $\gamma'$ 의 평균분자량,  $R$ 은 가스상수 및  $t$ 는 노출시간이다. 이식에서 용체화 처리 온도가 높아지면 확산이 빨라져 입경은 크게되고 입경이 커질수록 입계의 폭이 증가하며 이 부분이 입내와 성분적으로 차이가 발생하여 부식이 조장될 것이다. 물론 입내에서도  $\gamma'$ 의 생성에 따라 석출물과 모상과의 misfit에 따른 에너지 증가, 석출물의 생성에 따른 정합의 상실 등으로 내부응력이 증가하게 된다. 따라서 응력이 증가하면 피막의 보호성이 감소되어 부식이 심해지고  $R_p$ 값도 감소하게 된다.

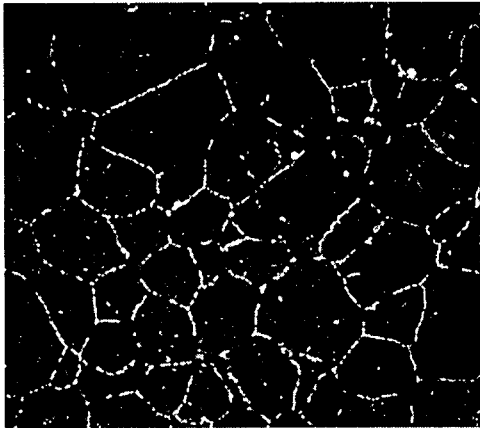


Fig. 9 Micro structure for Nimonic 80A base metal.(x200)

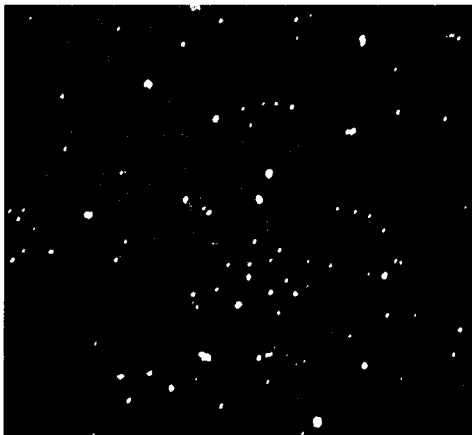


Fig. 10 Micro structure for Nimonic 80A, solution heat treated metal.(x200)

다.

Fig. 9는 모재의 조직사진으로서 비교적 입경이 적으며 부식이 전면에 달하고 있음을 알 수 있다. 이러한 부식은 균일 부식에 가까우며 피막의 보호성이 떨어진다.

Fig. 10은 용체화열처리한 시편의 조직으로서 조직내에 과포화된 Ti나 Al을 함유하여 misfit 응력이 적으며 노출된 표면은  $\gamma'$ 의 석출물이 없으므로 Ni과 Cr성분으로 구성된 피막이 형성되어 상당히 안정한 피막이 되어 Table 2에서와 같이  $R_p$ 값이 124,770 $\Omega$ 으로 증가한다.

Fig.11은 850 $^{\circ}\text{C}$ 에서 시효열처리하고 임피던스 측정 한 후의 조직으로서 비교적 고온에서 열처리하여 결정립이 크고 입계의 에민화가 상당히 증가하였으며 Pit는 입계,  $\gamma'$  석출물 및 오스테나이트 쌍정부 등에서 주로 발생하였으며 Table 2에서와  $R_p$ 값이 11,780 $\Omega$ 으로 감소하였다.

용체화와 시효열처리의 부동태피막의 저항이 변화한 이유는 용체화 열처리하면  $\gamma'$ (Ni<sub>3</sub>Al) 석출물이 용체화되어 석출에 의한 응력이 감소될 뿐만 아니라 결정립내에  $\gamma'$ 상과  $\gamma$ 상의 상호 전위차 즉 이중금속 전지가 없어짐에 따라 내식성이 증가되는 것으로 판단된다. 용체화 조직을 시효열처리하면  $\gamma'$ 이 낮은 온도인 650 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 미세하게 석출되고 850 $^{\circ}\text{C}$ 의 고온에서는 입자의 수는 적고 입경은 커지게 된다. 즉 저온에서는 핵생성 site가 많아 다량으로 핵이 생성되나 입열에 따른 성장 활성화

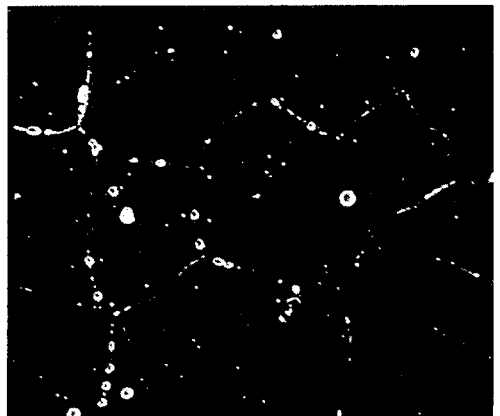


Fig. 11 Micro structure for Nimonic 80A, solution and age heat treated at 850 $^{\circ}\text{C}$ .(x200)

에너지가 적어 서서히 성장하고 고온에서는 성장에 필요한 활성화 에너지가 크므로  $\gamma$  입자가 빨리 성장하여 커지게 된다. 한편 이러한  $\gamma$ 의 성장에 따라 Reppich 등<sup>15)</sup>이 연구한 바와 같이 계면 응력이 증가되므로 부식은 증가하게 된다. 한편 부식의 형태는 저온인 650℃의 경우  $\gamma$ 이 미세하게 다량으로 석출되므로 부식부는 전체 결정립에 대해 거의 동시에 부식되므로 국부부식보다는 일반부식에 가깝게 균일화되며 850℃의 고온에서는 결정의 성장에 따라 미량성분의 편석 등으로 결정립내보다 결정립계에서 부식이 많이 발생한다.

$\gamma$ 가 온도의 지수 함수적으로 성장한다는 연구와 같이 850℃와 같은 고온에서 시효열처리를 실시하면 성장이 빠르고 입계가 입내보다는 탄소나 미량원소 등의 편석 때문에 성분의 농도차이가 발생하여 Pit 발생부위가 되고 일단 발생한 Pit는 Tada 등<sup>16)</sup>이 지적한 바와 같이 적은 양극에 큰 음극이 되어 더욱 성장하여 심한 깊이까지 부식하는 전형적인 공식(pitting) 형태의 부식이 된다.

현미경 조직에 의한 시편 표면을 검토한 결과 부식의 기점은 상경계부, 결정립계, 쌍정경계부 및 석출물 주위이며 이러한 곳에서는 피막이 불안정하다는 Kopecky 등<sup>17)</sup>이 보고한 바와 같이 pitting의 시작부는 주로 결정립계나  $\gamma$  석출부이다. 이러한 곳은 성분편석이 심하고, 상경계부로서 불안정한 피막 또는 쌍정경계부에서 석출물이 미세하게 분산된다. 저온에서는 결정립계, 석출물, 결정립내가 비슷하게 부식하나 고온에서는 결정립이 크게 성장하면서 성분편석이 심하여 결정립계나  $\gamma$  경계부에서 부식이 심하게 발생한다.

### 5. 결 론

디젤기관의 배기밸브나 가스터빈의 로터, 블레이드 등에 사용되고 있는 Nimonic 80A 초내열합금을 1080℃에서 8시간 용체화 열처리하고 650℃, 700℃, 750℃, 800℃ 및 850℃에서 각각 16시간 시효열처리를 실시하여 시효열처리에 따른 교류임피던스법에 의한 부식피막의  $R_p$ 값을 측정된 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 모재와 용체화 열처리재의 경우 Randle cell

과 등가회로를 이루며  $R_p$ 값은 579Ω과 124,770 Ω으로서 모재는  $\gamma$ 의 석출경화에 따라서 용체화재보다 부동태 피막 저항  $R_p$ 값이 감소하였다.

2. 시효열처리에 따른  $R_p$ 값의 변화는 650℃에서 97,943Ω, 700℃에서 93,111Ω, 750℃에서 26,961Ω, 800℃에서 15,798Ω 및 850℃에서 11,780Ω으로 시효열처리 온도가 높아짐에 따라 입경이 증가하고 입계의 에민화가 심하여  $R_p$ 값이 감소하였다.
3. 교류임피던스법에 의한 부동태 피막의  $R_p$  측정 결과와 전기화학적 분극곡선의 부식 경향은 잘 일치하고 있으며 교류임피던스에 의한 방법이 수치화되고 정밀하면서도 재현성이 좋아 내식성 재료의 부식속도를 구하는 유용한 방법임을 확인하였다.

### 참고문헌

1. R. M. Latanision. Corrosion, vol. 51. no.4. (1994) pp 270~283
2. Y. C. Lu. et al. Corrosion vol. 47. no.11 (1991) pp 835~839.
3. R. Hirayama, S. Haruyama. Corrosion vol. 47. no.12 (1991) pp 952~957
4. C. Gabrielli, M. Keddam, Corrosion. vol. 48, no.10 (1992) pp 794~807
5. S. E1 Haijail et al. Corrosion vol. 52. no.11 (1996) pp 865~871
6. Max Briner, Motorship Special Supplement, Aug. (1983) p. 23
7. W. Betteridge et al, 「The Nimonic Alloys」2nd ed., Edward Arnold Pub. Co., N.Y. (1981) p. 54
8. G.W. Meetham, 「The Development of Gas Turbine Materials」Applied Science Pub. Co., (1981) p. 296
9. C.T.Sims et al, 「The Superalloys」John Wiley & Son's Inc., (1972) p. 16
10. 백신영, 목포해양대학교 논문집 제6집(I) (1998) pp 143~153
11. 나은영, 목포해양대학교 논문집 제6집(I) (1998) pp 181~194
12. ASTM G5-106, Annual Book of ASTM Standard,



vol. 03, 02 (1993)

- 13. R. Thamburaj et. al, International Metals Reviews, 28, 1 (1983) pp 1~22.
- 14. D.A. Grose and G.S. Ansell, Metallurgical Transaction A. 12A. 9 (1981) pp 1631~1645.
- 15. B. Reppich, Acta Metall 30, 2 (1982) pp 87~94.
- 16. M.A. Tada, Z. Metallkde, 72, 8 (1981) pp 546~549.
- 17. C.H.V. Kopecky et. al, Acta Metall, 33, 5 (1985) pp 873~879.

### 저 자 소 개



#### 나은영 (羅恩英)

1975년 8월생. 1997년 목포해양대학교 기관공학부 졸업. 1998년 현재 목포해양대학교 대학원 기관공학부. 재료공학전공 목포해양대학교 조교



#### 백신영 (白新榮)

1951년 4월생. 1975년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 금속공학(석사). 1991년 전남대학교 대학원 금속공학 졸업(박사). 1985년~현재 목포해양대학교 교수