

인코넬 합금의 열처리에 따른 입계 탄화물 석출 및 입계응력부식 거동

孟完永, 南泰運*

한국원자력 연구소

* 한양대학교 금속재료공학과

The Effects of Heat Treatment on Intergranular Carbide Precipitations and
Intergranular Stress Corrosion Cracking of Inconel alloy

Wan-Young Maeng, Tae-Woon Nam*

Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 105, Taejon, Korea

* Hanyang University, Sa 1-dong 1271, Ansan, Korea

ABSTRACT

Inconel alloys used as nuclear power plant components have experienced intergranular stress corrosion cracking problems inspite of their good corrosion characteristics. In order to investigate the effects of heat treatments on carbide precipitation and intergranular stress corrosion cracking(IGSCC) in Inconel alloys, DSC(Differential Scanning Calorimeter), TEM, EDXS and static potential corrosion tests were carried out. Thermal treatment at 750°C for 15hours in Inconel alloys increased the density of intergranular carbide. The carbides are mainly Cr_7C_3 in Inconel 600, and $Cr_{23}C_6$ in Inconel 690. The Cr depletion around grain boundary is not crucial factor on IGSCC. The carbides in grain boundary play an important role as acting dislocation source, and as decreasing stress around growing crack.

1. 연구배경

인코넬합금은 다양한 부식환경에서 강한 응력부식 균열(Stress Corrosion Cracking, SCC) 저항성을 갖고 고온에서 우수한 기계적 특성을 가지기 때문에 원자로의 증기발생기 전열관 및 압력용기 헤드 관통관의 재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 원자로 증기발생기의 분위기는 1차 측으로 고온 고압수(171atm, 310°C)가 흐르고, 2차 측으로 고온 고압의 수증기(약 60atm, 274°C)가 1,800ton/hr의 유속으로 흐르는 가혹한 조건이므로 많은 인코넬 전열

관 손상 사례가 보고되고 있다^{1,2)}. 원자로의 압력 용기 헤드 관통관의 경우도 프랑스 Bugey 원전에서 내압 시험 중 균열이 발견되어 국내외적으로 이 부품에 대한 건전성 평가시험이 진행되고 있다.

증기발생기 전열관 및 압력용기 헤드 관통관의 손상은 균열이 입계에서 선택적으로 생성되어, 입계를 따라 전파되는 입계 응력부식균열(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)에 의한 것으로 알려져 있다. 이 입계 응력부식균열은 증기발생기 전열관의 경우에는 원자로 2차 측의 약한 알칼리 분위기에 의한 응력부식에 의하고, 헤드 관통관의 경우

는 원자로 1차측의 냉각수(Primary Water)에 의한 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)에 의한다. 이러한 손상의 원인 및 대책에 대한 다양한 연구가 광범위하게 진행되고 있다. IGSCC의 기구로서 입계의 불순원자 존재설³⁾, Cr 결핍층의 존재설⁴⁾ 등 다양한 기구가 검토되고 있지만 아직도 정설이 없다.

증기발생기의 전열관 재료로서는 인코넬 600, 인코넬 690, Incoloy 800 등의 재료가 개발되었다. 국내외적으로 원전의 증기발생기 재료로는 인코넬 600 MA(Mill Annealing)가 주로 사용되고 있으나, 열처리 방법을 개선하거나 Cr량을 증가시켜 우수한 부식 특성을 갖는 재료를 개발하고자 노력하고 있다. 열처리 방법의 개선에 의해 인코넬 합금의 내식성을 향상시키기 위해서 TT(Thermal Treatment) 열처리가 개발되었다. TT 열처리는 밀 어닐링한 후 700℃에서 15시간 유지하는 열처리이다. 그리고 Cr량을 증가시켜 인코넬합금의 내식성을 향상시키고자 인코넬 690이 개발되었다. 인코넬 690은 인코넬 600의 2배 정도인 30wt% 정도의 Cr를 함유하고 있다. 한편, 원자로 헤드 관통관용으로 사용되는 인코넬 600의 열처리 조건은 제조사 및 제조이력에 따라 상

당한 차이를 보인다. 국내 원자력 발전소에는 관통관 형태로 가공한 후, 어닐링 열처리로서 750℃에서 2시간 유지후 공랭하는 것과 940℃에서 1.5시간 유지하고 공랭하는 두 종류 재료가 주로 사용되고 있다.

인코넬 합금은 열처리 방법 및 조성변화에 의해 탄화물의 석출 거동이 달라진다. 인코넬 합금의 입계응력부식 특성은 재료의 탄화물 분포형태, 탄화물의 석출에 따른 입계의 Cr 원소의 고갈 등에 크게 의존한다고 보고되고 있다. 본 연구에서는 원자로의 증기발생기 전열관 및 헤드 관통관 재료인 인코넬 합금에 대해서, 열처리 및 조성의 변화에 따른 탄화물 석출, 그에 따른 Cr농도 결핍층 형성 및 입계응력부식 거동과의 상관관계를 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

인코넬 600 및 690의 열처리에 따른 미세조직 변화와 이에 따른 입계응력부식 저항성을 평가하기 위해 열분석 시험, TEM 분석, 입계 EDXS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석 및 정전위법에 의한 입계응력부식시험을 수행하였다.

Table 1. Chemical Composition and Heat Treatments of Inconel Alloys for Steam Generator Tube

	Chemical composition (wt %)										Tensile Prop.			Heat treatment	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe	Co	Y.S. kg/ mm ²	UTS kg mm ²	EL %	MA ℃	TT ℃xh
600 MA	.027	.35	.30	.008	.001	.027	74.50	15.9	8.51	-	34.5	71.3	48	975	-
600 TT	.027	.35	.34	.008	.001	.027	74.50	15.9	8.51	-	35.1	74.6	43	920	700x 15
690 MA	.020	.23	.34	.007	.001	-	59.86	30.1	8.94	.009	34.3	71.4	45	1075	-
690 TT	.020	.23	.34	.007	.001	-	59.86	30.1	8.94	.009	36.1	74.1	45	1075	700x 15

시험 시편은 상용 증기발생기용 튜브재료 및 원자로 용기 헤드 관통관 재료의 열처리 조건을 모사한 인코넬 합금을 제작하여 사용하였다. 증기발생기용 튜브 재료는 Table 1에 보인 바와 같은 조성 및 열처리 조건을 가진 인코넬 합금을 사용하였다. 원자로 용기 헤드 관통관 재료의 열처리 이력을 모사하기 위해, 인코넬 600 판재를 용체화 처리한 다음 급랭하고 국내 원전에 사용중인 헤드 관통관 재료의 열처리 조건인 750℃에서 2시간 열처리 및 940℃에서 1.5시간 열처리를 수행하였다.

열분석 시험은 Netzsch model 404인 시차 열량 분석기(Differential Scanning Calorimeter, DSC)를 이용하여 Ar 분위기에서 분당 10℃의 가열 속도로 800℃까지 승온하면서 반응열분석을 수행하였다. TEM은 가동전압이 200KV인 JEOL 2000FX II 모델을 사용하였고, EDXS 분석은 TEM에 부착된 OXFORD Link ISIS-5947 모델을 사용하였다. 정전위법에 의한 입계응력부식시험은 C-ring 형태의 인코넬 합금 시편에 응력을 부과하고 300℃, 75기압의 10% NaOH 수용액에서 7일간 수행하였다. 정전위법에 의한 입계응력부식시험의 자세한 내용은 기 발표한 논문⁵⁾에 서술하였으므로 자세한 언급은 생략한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 탄화물 석출 및 분포

3.1.1 탄화물 석출

인코넬 합금에서 석출되는 탄화물은 주로 Cr₂₃C₇ 및 Cr₇C₃인데 다음 반응에 의해 생성된다.



이 반응은 발열 반응이다. 이 탄화물 석출 과정을 분석하기 위한 열분석 시험 결과를 Fig. 1에 보였다. 용체화처리 후 급랭한 시편을 분당 10℃의 일정한 승온 속도로 800℃까지 가열시 나타나는 열량 변화를 보여준다. 약 550℃ 정도에서 하나의 피크

(peak)가 형성하는 한 개의 발열반응 현상이 관찰되었다. 이 반응의 가역 반응성을 조사하기 위하여 800℃까지 가열된 시편을 노냉한 후 동일 시편을 다시 800℃까지 재가열하여 열간 분석을 수행하였다. Fig. 1에서 보였듯이 재가열한 시편에서는 550℃에서 나타나는 발열반응 현상이 소멸하였다. 따라서 용체화처리된 시편에서 나타나는 550℃ 발열반응은 비가역반응(irreversible reaction)이다.

이러한 반응의 원인을 알아보기 위해 550℃에서 최대 피크를 나타낸 후 반응이 완전히 진행되었다고 생각되어지는 650℃까지 DSC에서 동일 조건으로 가열된 시편의 미세조직을 관찰한 결과, 이 시편에는 입자 성장이나 재결정이 발생하지 않았으며, 탄화물 조직이 석출되었다. 따라서 Fig. 1에서 나타난 550℃ 부근의 피크는 탄화물의 석출반응이고 이 온도에서 가장 활발한 반응임을 확인하였다.

원자로 용기 헤드 관통관에 사용되는 인코넬 600 합금의 열처리 과정을 모사하여 재료에 석출되는 탄화물의 석출 및 성장 과정을 분석하기 위해 750℃에서 2시간, 940℃에서 1.5시간 열처리된 시편의 미세조직을 분석하였다. 결과는 Fig. 2에서 보인 바와 같이 열처리에 따른 조직의 변화가 뚜렷하다. Fig. 2

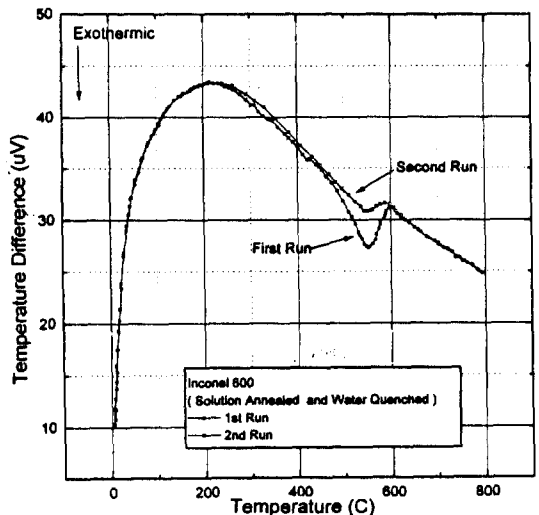
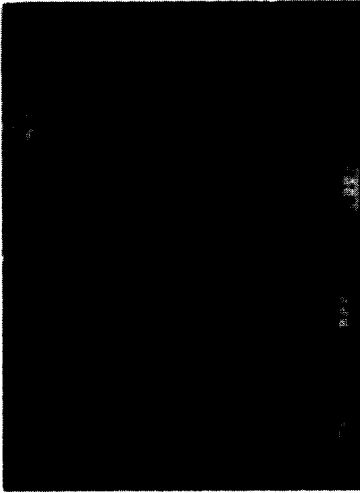


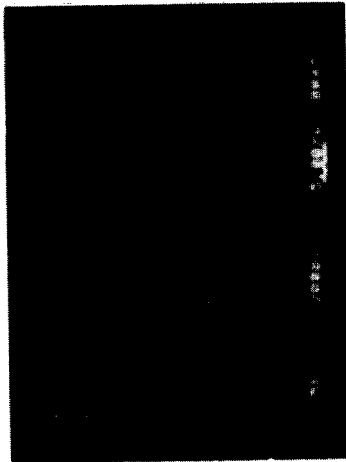
Fig. 1 DSC(Differential Scanning Calorimeter) Curves of Solution Treated and Water Quenched Inconel 600



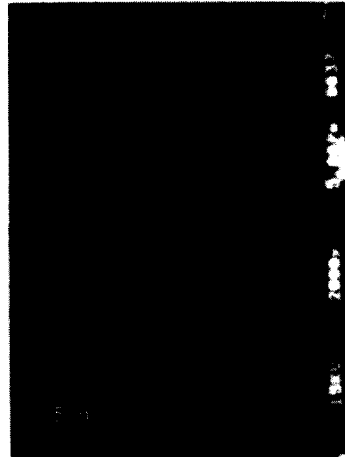
a) As Received



c) Heat Treated
(750°C 2Hours)



b) Solution Annealed
and Water Quenching



d) Heat Treated
(940°C 1.5Hours)

Fig. 2 Carbide Precipitation of Inconel 600 Alloys Heat-Treated in Various Conditions

의 a)는 입수된대로의 판재 형태의 재료이고 b)는 용체화 처리후 급랭한 조직이다. c)는 급랭된 조직인 b)를 750°C에서 2시간 열처리한 조직이고 d)는 940°C에서 1.5시간 열처리한 조직이다. 입수된 재료의 조직인 a)를 보면 입계탄화물의 석출은 거의 없고 대부분의 탄화물이 입내에 분포되어 있다. 탄화물의 크기도 0.6 μm 정도이다. 이것을 1120°C에서 15분간 열처리하여 용체화 처리한 다음 급랭하면 b)와 같은

조직이 얻어진다. b)를 보면 급랭효과 때문에 탄화물이 석출되지 못하고 기지 금속에 고용되어 있다. 입계에도 탄화물의 석출이 거의 관찰되지 않는다. 이 조직을 750°C에서 2시간, 950°C에서 1.5시간 열처리하면 Fig. 2의 c)와 d)와 같은 조직이 된다. c)를 보면 탄화물이 입계 및 입내에 분포되어 있다. 입계에는 연속한 얇은 띠형태로 탄화물이 분포되어 있다. 탄화물의 크기는 Fig. 3을 참고하면 0.1 μm 에서

1 μ m 정도이다. d)를 보면 입계에 연속된 탄화물이 석출되어 있고 입내에도 부분적으로 탄화물이 석출되어 있다. 탄화물의 크기는 1 μ m에서 3 μ m 정도로 분포되어 있어 c)에 비해 상대적으로 크다. 940 $^{\circ}$ C에서 1.5시간 열처리한 경우 탄화물의 크기가 750 $^{\circ}$ C에서 2시간 열처리한 경우보다 5배 정도 성장하였다.

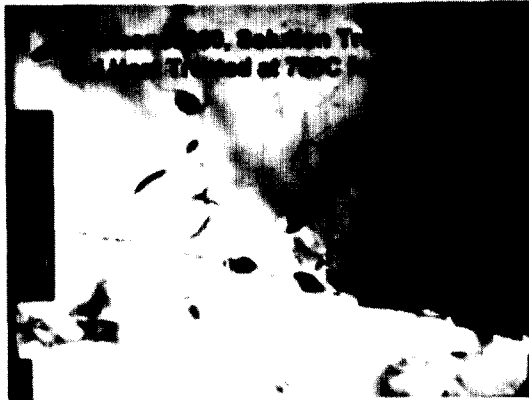


Fig. 3 Comparison of Intergranular Carbides of Inconel 600 Formed After Heat Treatment at 750 $^{\circ}$ C for 2Hours and at 940 $^{\circ}$ C 1.5Hours

3.1.2 탄화물 분포

원자로의 증기발생기 전열관에 사용되는 상용 인코넬 600MA, 600TT 및 690MA, 690TT의 탄화물 분포를 Fig. 4와 Fig. 5에 보였다. 이 그림들은

동일 위치의 입내 및 입계 탄화물의 석출거동을 분석하기 위해 미세경도기로 압입하여 위치를 표시하였다. 처음에는 탄화물 조직만 노출되도록 phosphoric acid로 에칭하여 탄화물 분포를 관찰하였고 두번째로 동일위치에서 Nital로 에칭하여 입계를 노출시켜 탄화물과 입계와의 연계성을 관찰하고자 하였다.

Fig. 4의 (a)와 (b)를 관찰하면 인코넬 600MA의 경우 주로 입내에 탄화물이 석출되어 있는 것을 알 수 있다. 입계에도 일부의 탄화물 석출이 관찰되는데 주로 triple point에서 생성된다. Fig. 4의 (c)와 (d)의 인코넬 600TT에서는 탄화물이 주로 입계를 따라 석출되어 있다. 그리고 인코넬 600TT의 입계를 따른 탄화물의 밀도는 인코넬 600MA에 비해 상당히 크다. Fig. 5의 (a)와 (b)의 인코넬 690TT는 대부분의 탄화물이 입계를 따라 연속적으로 석출되어 있고 입내에는 거의 탄화물이 관찰되지 않는다. Fig. 5의 (c)와 (d)의 690MA는 뚜렷한 입계가 관찰되지 않고 다량의 쌍정 조직이 관찰된다. 이 합금에서는 다양한 크기의 탄화물이 혼재하고 탄화물이 무질서하게 분포하고 있다.

이와 같은 분포는 Fig. 6의 TEM 조직 사진에서도 나타나는데 (a)의 인코넬 600MA 합금의 경우는 주로 구형의 입내 탄화물이 관찰되고 (b)의 600TT의 경우는 입계에 탄화물 석출이 관찰된다. (c)의 690MA의 경우는 조대한 입내 탄화물이 관찰되고 (d)의 690TT의 경우는 입계를 따르는 연속적인 탄화물 분포를 관찰할 수 있다.

3.1.3 탄화물 종류 및 형태

인코넬 합금에서는 탄화물이 Cr $_7$ C $_3$ 및 Cr $_{23}$ C $_7$ 형태로 존재한다. Cr $_{23}$ C $_7$ 의 결정구조는 fcc이고 Cr $_7$ C $_3$ 의 결정구조는 pseudo hexagonal이다⁶⁾. 인코넬 600에서는 탄화물이 주로 Cr $_7$ C $_3$ 형태로 석출되고 인코넬 690에서는 Cr $_{23}$ C $_7$ 형태로 석출되었다. 이와 같은 사실은 TEM 및 TEM에 부착된 EDXS를 이용하여 확인되었는데, 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 보였다. Fig. 7의 (a)는 인코넬 690TT인데 탄화물이

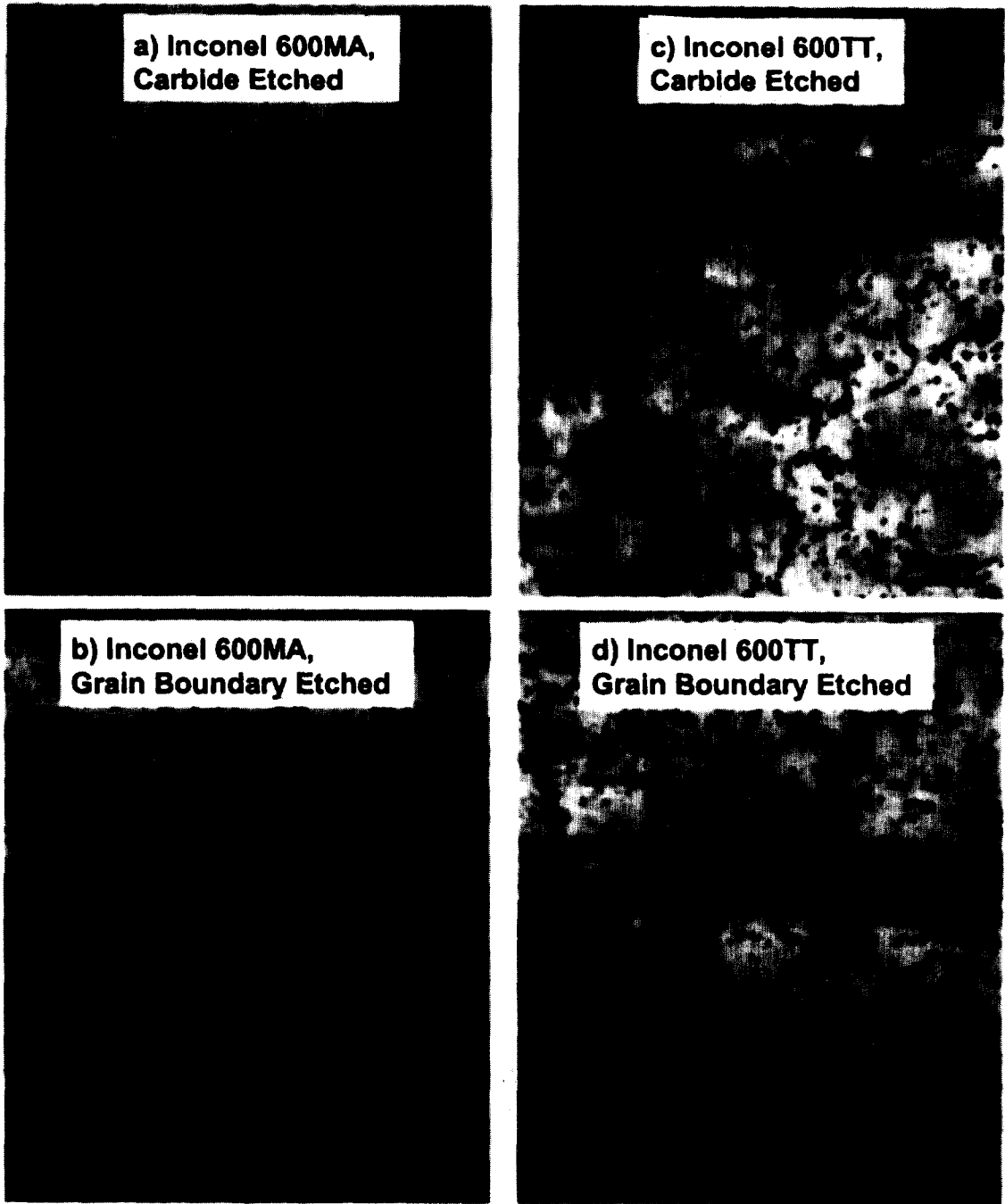


Fig. 4 Dual Etched Microstructures of Inconel 600MA and Inconel 600TT

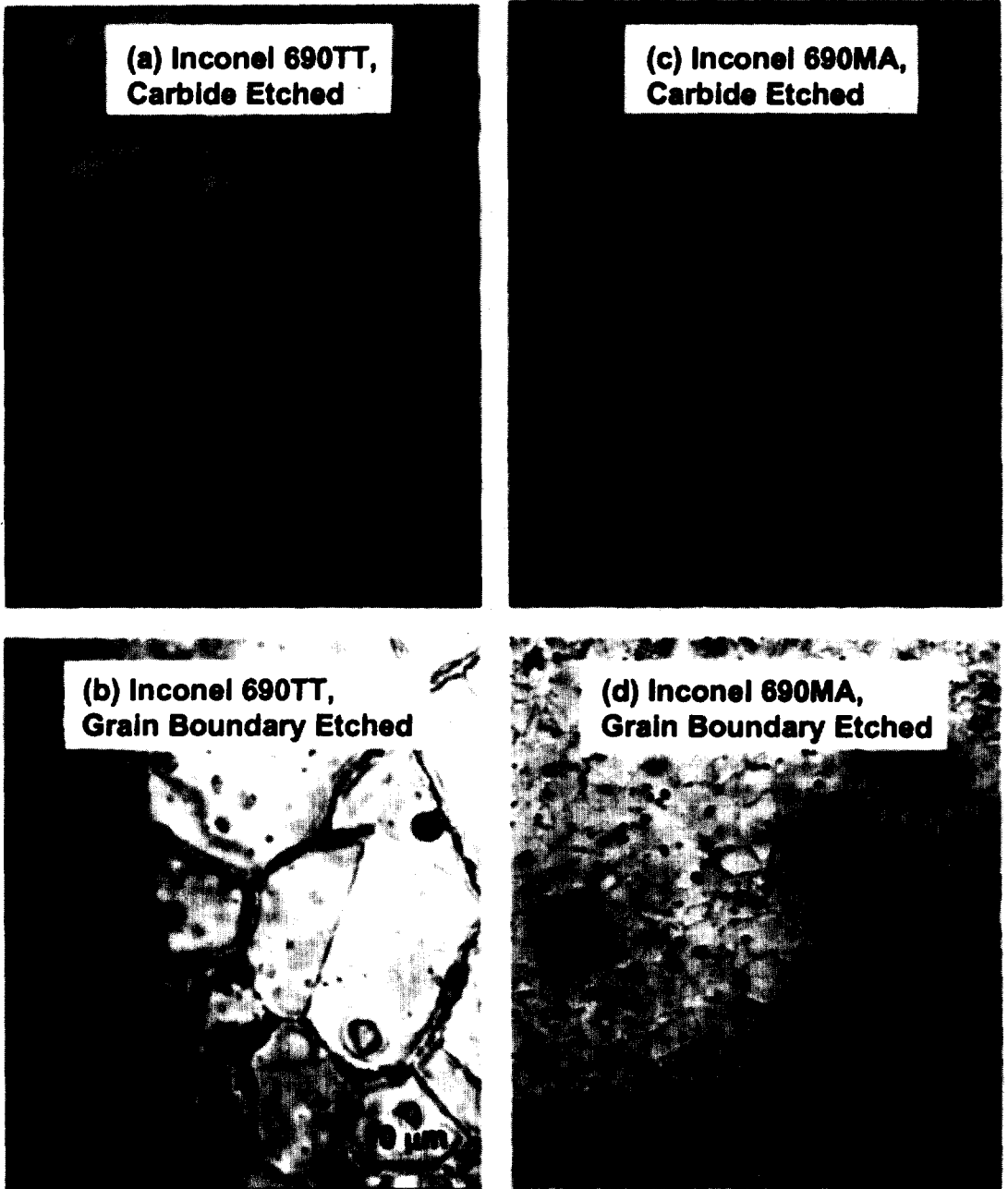


Fig. 5 Dual Etched Microstructures of Inconel 690MA and Inconel 690TT



Fig. 6 Carbide morphology of Inconel Alloys.
 (a) Inconel 600MA, (b) Inconel 600TT, (c) Inconel, 690MA, (d) Inconel 690TT

입계에 석출되어 있다. 화살표 표시된 탄화물의 회절 패턴을 Fig. 7의 (b)에 보였다. 탄화물상 및 인코넬 합금 모상의 회절면은 모두 zone(001)에 속하는 면이고 모상과 탄화물의 결정 구조는 fcc(face centered cubic)이다. 두 상 사이는 방향관계를 가지는데 Fig. 7에 보인 바와 같이 $\{100\}\gamma//\{100\}_{Cr_23C_6}$ 및 $\langle 100\rangle\gamma//\langle 100\rangle_{Cr_23C_6}$ 의 관계를 갖는다. 이 탄화물의 조성은 Fig. 8의 (a)에 보였다. 탄화물의 조성은 87wt% Cr, 3wt% Fe, 10wt% Ni이다. 인코넬 690TT에 석출된 탄화물의 결정구조 및 조성으로부터 이 탄화물은 $Cr_{23}C_7$ 형태인 것을 확인하였다. 한편, Fig. 7의 (d)에 보였다. 회절 패턴으로부터 이 상은 pseudo hexagonal임을 알 수 있다. 이 회절 패턴에는 각 회절면에서 상호평행한 연속적인 띠

(streak)를 관찰할 수 있는데 이 띠는 Cr_7C_3 와 같이 hcp 구조의 탄화물에만 나타나는 전형적인 것이다²⁾. 이것은 재료의 적층결합 에너지와 관련을 가지는 띠이다. 이 상의 조성은 Fig. 8의 (d)에 보였는데 94wt% Cr, 2wt% Fe, 4wt% Ni로 구성되어 있다. 인코넬 600TT에 형성되는 탄화물은 이상의 결정구조 및 조성으로 판단할 때에서 열처리한 인코넬 600 시편, 증기발생기 튜브용 인코넬 600MA 시편 등의 탄화물도 분석결과 Cr_7C_3 의 형태였다. 한편, 인코넬 690MA 및 인코넬 690TT 등 인코넬 690합금에 존재하는 입계 및 입내 탄화물은 분석결과 $Cr_{23}C_6$ 형태로 존재했다. 인코넬 합금에는 탄화물 외에도 다양한 형태의 개재물이 존재하였는데 Mg 및 Ti-rich 상 등을 관찰할 수 있었다. 이 개재물들의 조성 및 인

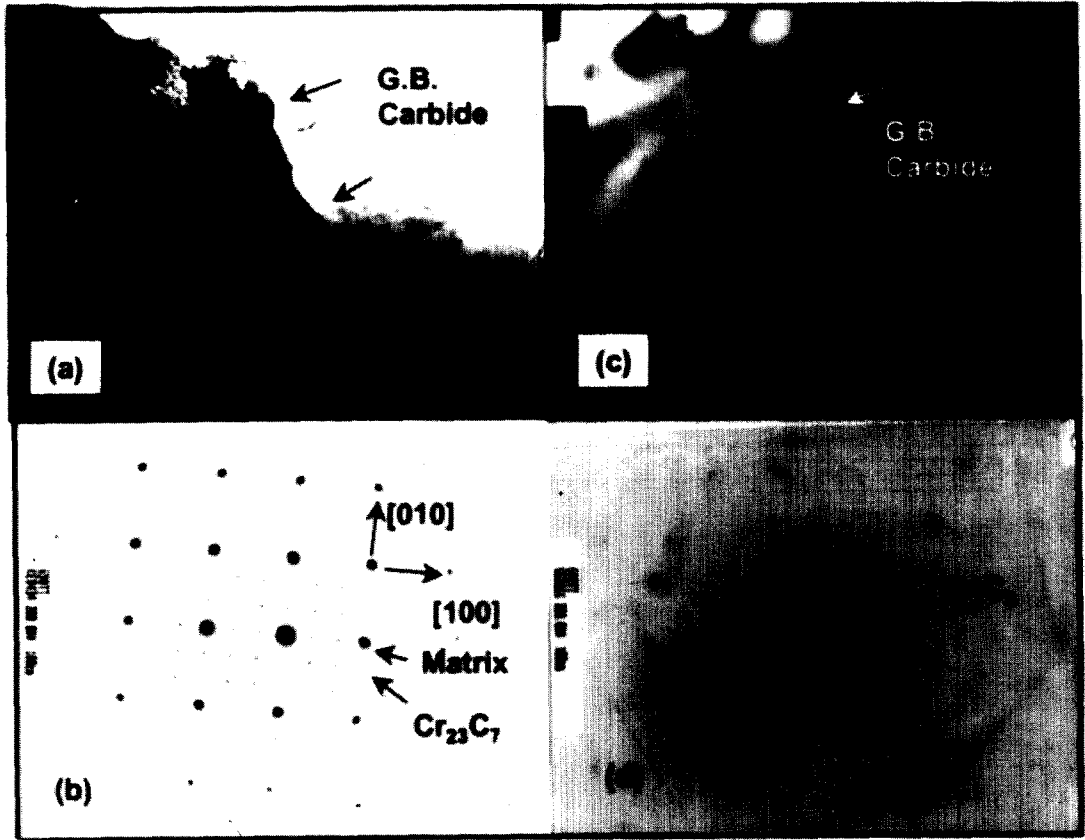


Fig. 7 Intergranular Carbides and Diffraction Patterns of Inconel 600 and Inconel 690

코넬 600 및 690 합금의 모상의 조성을 Fig. 8에 보였다.

3.2 입계 Cr 농도

입계에 탄화물이 석출되면 입계의 Cr 농도가 고갈된다. Cr 농도가 고갈되는 정도는 열처리 및 조성에 따라 변한다. 입계의 Cr 농도 고갈에 미치는 열처리 온도의 영향을 평가하기 위해 용체화처리 후 급랭된 인코넬 600 시편을, 750°C에서 2시간 및 940°C에서 1.5시간 열처리하여 이 시편의 입계 농도분포를 TEM에 부착된 EDXS를 이용하여 측정하였다. 이 2가지 조건에서 열처리된 시편의 농도 분포변화를 Fig. 9에 보였다. 이 합금의 평균 Cr 농도는 14wt% 정도인데 750°C에서 2시간 열처리된 시편의 입계는

9wt%의 Cr 농도를 갖는다. 탄화물 석출에 의해 평균 Cr 농도보다 5wt% 정도 Cr 농도가 감소하였다. 940°C에서 1.5시간 열처리한 시편의 경우는 입계에서 Cr의 농도가 12wt% 정도이다. Cr의 농도가 약 2wt% 정도 감소하였다. Fig. 3에 이 두가지 열처리 조건의 입계에서의 탄화물 분포를 보였다. 940°C의 경우 탄화물이 상당히 성장하였다. 이와 동시에 탄화물의 결핍량도 상당히 감소한 것을 Fig. 9의 분석으로부터 알 수 있다. 밀 어닐링(MA)만 한 시편의 경우는 Fig. 10에 인코넬 600MA에 경우처럼 거의 입계에 탄화물의 결핍층이 형성된다. 열처리가 계속되거나 Fig. 9의 950°C의 경우처럼 고온에서 열처리된 경우, 이 결핍층은 점차 회복되어 평균 조성에 가까워진다. Cr 결핍층은 입계 열처리시간을 지나면 다

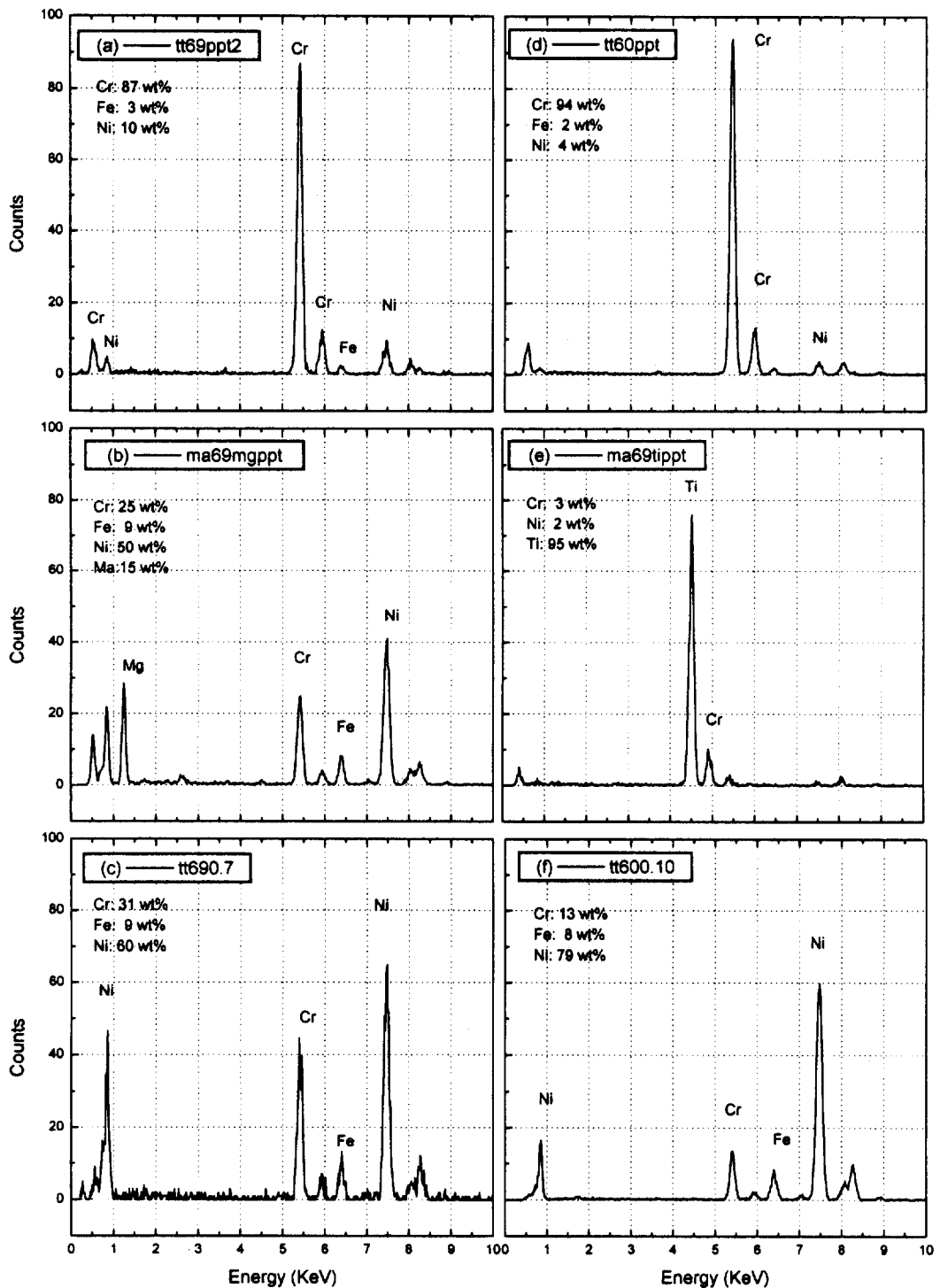


Fig. 8 EDXS Analysis of Various Carbides and Matrix of Inconel Alloys. Composition of (a) Cr Carbide($Cr_{23}C_6$) in Inconel 690TT, (b) Mg Inclusion, (c) Inconel 690 Matrix, (d) Cr Carbide(Cr_7C_3) in Inconel 600TT, (e) Ti Inclusion, (f) Inconel 600 Matrix

시 회복되는 경향을 가진다.

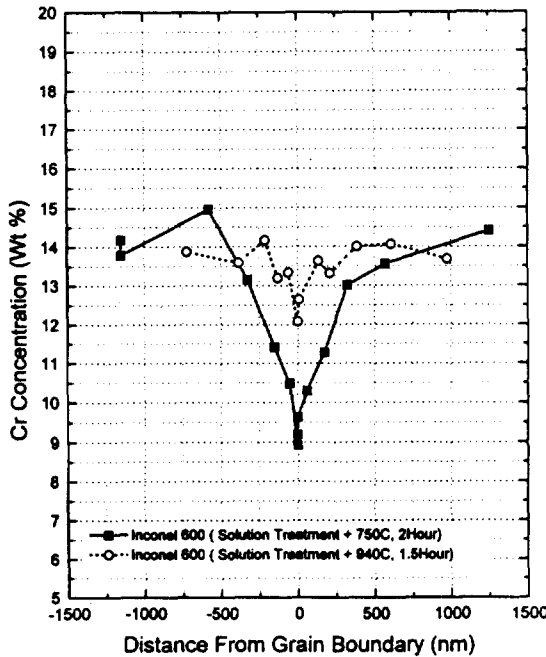


Fig. 9 Cr Concentration Profiles around Grain Boundary of Inconel 600MA Heat-Treated at 750°C for 2Hours and at 940°C for 1.5Hours.

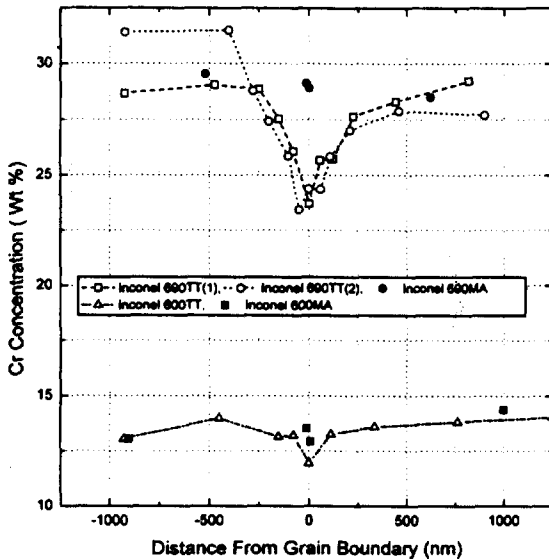


Fig. 10 Cr Concentration Profiles around Grain Boundary of Inconel Alloys

Fig. 10은 증기발생기 전열관 튜브 재료인 인코넬 600MA, 600TT, 690MA 및 690TT 합금에 대한 입계 주위의 Cr 농도 분포를 보인 것이다. 인코넬 600MA의 경우 입계에서 Cr의 결핍층이 관찰되지 않는다. 600TT의 경우는 Fig. 10에 보인 바와 같이 12% 정도의 입계 Cr농도를 갖는다. 700°C에서 15시간 열처리에 의해 입계의 농도 분포가 950°C에서 2시간 열처리된 시편과 유사한 값을 갖는다. 평균 Cr의 농도가 30% 정도인 인코넬 690합금의 경우는 TT열처리에 의해 입계에서 Cr의 농도가 24% 정도이다. 인코넬 600TT에 비해 Cr 농도가 입계에서 더 감소하였지만, 입계에 존재하는 Cr의 절대량은 2배 정도이다. 690MA에서는 600MA와 마찬가지로 Cr의 결핍층이 관찰되지 않는다.

3.3 입계응력부식에 미치는 미세조직의 영향

C-ring시편에 ASTM에 규정된 계산방법에 의해 응력을 70kg/mm² 정도 부과하여 소성변형시킨 시편을 300°C, 75기압의 10% NaOH 수용액 환경에 1주일간 정전위 시험한 결과 인코넬 600MA의 경우는 Fig. 11과 같은 균열이 발생되었으나 인코넬 600TT, 690MA, 690TT의 경우는 균열이 관찰되지 않았다. 그림에서 보듯이 인코넬 600MA의 경우 SCC에 의한 균열은 입계를 따라서 진전해 가는 입계 응력부식 균열이다. 균열은 표면에서 생성되어 7개



Fig. 11 Initiation of IGSCC of Inconel 600MA

정도의 결정립계를 통과하고 진전 길이가 100 μm 이상 성장하였다.

인코넬 600TT 및 690MA, 690TT에 비해 상대적으로 인코넬 600MA가 입계응력부식에 취약한 것을 알 수 있다. 입계응력부식에 영향을 주는 인자는 부식환경, 응력, 재료 자체의 응력부식민감성이다. 본 시험에서는 부식환경 및 응력이 동일하므로 600TT의 경우 열처리에 의해 미세조직이 변화되어 입계응력부식저항성이 증가한 것으로 판단된다. Cr 양이 30%인 690MA 및 690TT의 경우 응력부식 저항성 증가는 Cr의 증가에 의한 것으로 보인다.

기존의 많은 연구 보고^{8,9)}로 판단할 때, 입계의 Cr 결핍층은 인코넬 합금의 입계응력부식저항성을 떨어뜨리는 주된 요인 중 하나이다. 그러나 본 연구의 결과를 바탕으로 고찰하면 입계의 Cr농도가 입계응력부식저항성에 결정적인 영향을 미치는 것으로 보이지는 않는다. 왜냐하면 인코넬 600MA의 경우 입계의 Cr고갈이 관찰되지 않지만 Fig. 11과 같은 입계응력부식균열이 관찰되었고 입계 Cr량이 작은 600TT에 비해서도 입계응력부식에 대한 저항성이 떨어지기 때문이다. 이러한 사실은 입계응력부식저항성에 영향을 미치는 인자로서 입계의 Cr 결핍량 외에 다른 인자가 존재함을 의미한다.

인코넬 600MA를 TT 열처리하면 Fig. 4의 (c)와 (d)에서 관찰할 수 있는 것과 같이 탄화물의 분포가 변화한다. TT열처리에 의한 인코넬 600TT 합금의 입계응력부식저항성 증가는 입계에 탄화물 생성에 의한 입계의 응력이완과 관련을 가지는 것으로 보인다. 입계응력부식균열은 입계를 따라 재료가 국부적인 응력을 받을 때 균열이 생성하여 성장하는 현상이다. 입계에 석출하는 탄화물에 의해 균열 선단의 응력 상태가 변화하면 입계응력부식에 의한 균열 진전 속도가 변할 수 있다. S. M. Bruemmer¹⁰⁾ 등은 Fig. 12에 보인 바와 같은 모델을 제시했다. 입계에 석출된 탄화물은 전위원의 역할을 할 수 있다. 입계에 응력이 걸리면 입계 탄화물에 의해 전위가 생성되고, 균열 선단에 소성역이 생성된다. 이에 따라 Fig. 12의

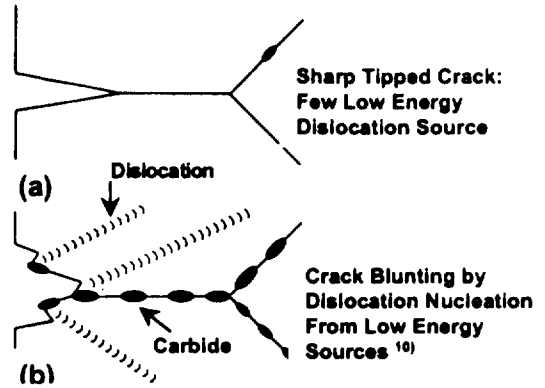


Fig. 12 Grain Boundary Carbides Acting as Dislocation Source, and Promoting Crack Blunting in Inconel Alloys

(b)처럼 균열선단의 곡률반경이 커져서(crack blunting) 균열선단에 걸리는 응력이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 실제 탄화물에 의한 전위의 발생 현상을 관찰할 수 있었는데 Fig. 12의 (c)에 보인 바와 같다. 입계에 석출되어 있는 탄화물이 전위원으로 작용하여 탄화물로부터 전위가 발생하는 모습을 보인다. 이와 같이 과정으로 입계 탄화물은 재료의 입계응력부식 균열 저항성에 중요한 역할을 한다. TT열처리되면 인코넬 합금의 입계 탄화물 분포가 변화한다. 따라서 인코넬 600TT 및 690TT 합금의 응력부식저항성

증가는 입계 탄화물의 석출 밀도 증가에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) 밀어닐링된 인코넬 합금을 700℃에서 15시간 열처리(TT열처리)하면 입계 탄화물의 분포가 변화한다. TT열처리된 인코넬 합금(인코넬 600TT, 690TT)는 밀어닐링된(600MA) 인코넬 합금에 비해, 입계에 탄화물이 조밀하게 분포한다. 인코넬 600에 석출하는 탄화물은 주로 Cr_7C_3 이고 인코넬 690에는 주로 $Cr_{23}C_6$ 형태로 존재한다.
- 2) 입계의 Cr농도 결핍층이 인코넬 합금의 입계응력 부식균열 저항성에 결정적인 영향을 미치지 않는다. 입계응력부식균열 저항성은 입계 탄화물 분포에 큰 영향을 받는다. 입계 탄화물이 전위원으로 작용하여 균열선단의 응력을 완화하는 역할을 하는 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- 1) L. Stieding, B. Stellwag, N. Wieling and R. Rieb : Kerntechnik, 55(1990) 340
- 2) S.J. Green and J.P.N. Paine : Nucl. Tech., 55(1981) 10
- 3) K. Yamanaka, K. Tokimasa, H. Miyuki and H. Nagano : EPRI Meeting on IGA and Primary Water IGSCC Mechanisms, April, Washington, USA, (1987)
- 4) R.W. Staehle : Proceedings of the Conference "Fundamental Aspects of Stress corrosion Cracking", Sept. (1967), 1
- 5) 맹완영, 남태운, "고온, 고압 환경하에서 정전위 법에 의한 인코넬 합금의 입계응력부식 저항성 평가", 대한금속학회지, 제35권, 제8호 (1997) 1019
- 6) A.L. Bowman, G.P. Arnold, E.K. Storms, and N.G. Nereson : Acta Cryst., Vol. B28, (1972) 3102-03
- 7) D.J. Dyson and K.W. Andrews : J. Iron Steel Inst., Vol. 207, (1969) 208-19
- 8) G.S. Was and V.B. Rajan : Metall. Trans. A., Vol. 18A, (1987) 1313-23
- 9) C.I. Briant, C.S. O'Toole, and E.L. Hall : Corrosion, Vol. 42, (1986) 15-27
- 10) S.M. Bruemmer, L.A. Charlot, and C.H. Henager, Jr. : "Microstructure and Microdeformation Effects on IGSCC of Alloy 600 Steam Generator Tubing", Corrosion, Vol. 44, No.11 (1988), 782