

< 기술논문 >

## 열처리조건에 따른 Ni기 초합금 용접부의 기계적 특성

김문영<sup>†</sup> · 양성호<sup>\*</sup> · 박상열<sup>\*</sup> · 최희숙<sup>\*</sup> · 고 원<sup>\*</sup> · 채나현<sup>\*</sup>

(2006년 11월 22일 접수, 2007년 3월 12일 심사완료)

### Mechanical Properties for Welding Part on Ni Base Superalloy Material According to Heat Treatment Parameters

Moon Young Kim, Sung Ho Yang, Sang Yeol Park, Hee Sook Choi, Won Ko and Na Hyun Chae

**Key Words:** Blade(블레이드), Bucket(버킷), Damage(손상), DS(Directional Solidification : 일방향 조직), EOH(Equivalent Operation Hour : 상당운전시간), HIP(Hot Isostatic Pressing : 고온등방처리)

#### Abstract

The operating temperature has been increased to improve the efficiency of gas turbine. The most advanced Gas turbine is operated at above 1,500°C. Improvement in material and cooling method permit hot gas path component to run at increased temperature. But, the repair of blades which are developed with advanced manufacture technique is difficult to use normal welding. Most of gas turbine blades are made of precipitation harden nickel base superalloy, which is very hard to weld. Therefore, the employment of welding filler on blade is solid solution nickel base superalloy(Hastelloy X, Inconel 617). In this study, Tensile test in high temperature was conducted on welded GTD111DS with GTD111 to evaluate effect of variation of pre, post treatment. The result of this study showed that the specimen was treated with optimum pre and post treatment(reweld HT(1200°C), Post treatment(1100°C HIP, 1200°C + 1100°C + 800°C HT) is much superior.

#### 1. 서론

가스터빈의 효율 향상을 위해서 터빈부의 1단 블레이드 유입온도를 초고온화시켜 1,500°C 이상으로까지 상승시키고 있다. 운전온도의 상승은 가스터빈 블레이드의 재질 개선 및 냉각방법에 대한 연구 개발에 따라 가능했으나 고온부에서 사용되어지는 재질의 특성상 장시간 사용 후에는

단계적으로 모재에 손상을 주게 마련이다. 모재의 손상을 방지하기 위하여 제작사에서 권고하는 등가운전시간(EOH : 24,000시간) 후에는 재생 정비를 수행하여 부품의 재질을 복원하여 재사용하게 된다. 가스터빈 블레이드는 고온에 장시간 노출됨으로 인하여, 노출시간에 따른 재료의 미세조직 변화에 의하여 강도나 연성이 저하된다. 특히 고온에서 하중을 받는 경우에는 조직변화의 가속화에 의하여 강도나 연성의 저하는 더욱 심해진다. 이러한 가혹한 환경 조건에서 가스터빈의 운전에 무리가 없도록 하기 위해서는 보다 높은 내열강도, 크리프 강도들이 확보되어야 한다. 또한, 가스터빈의 유지·보수에 관계되는 충분한 용접성(weldability)이 확보되어야 한다. 현재 산업

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한전KPS(주) GT정비기술센터

E-mail : mykim@kps.co.kr

TEL : (032)580-8294 FAX : (032)580-8281

\* 한전KPS(주) GT정비기술센터

용 가스터빈에 사용되어지고 있는 동익의 재료는 대부분 석출경화형 니켈기 초내열합금이 사용되고 있으나, 재료에 따라 다르게 나타나지만 용접성은 매우 좋지 않다. 특히 Al+Ti의 함량이 6% 이상이 되면 용접성은 더욱 나빠지게 된다.<sup>(1,2)</sup>

GE 가스터빈 모델의 블레이드는 GTD 111의 소재로 제작되었다. 블레이드의 특이한 형상과 냉각 채널 등으로 인한 시편 채취의 어려움이 있어 관련 물성 정보가 많지 않다. 하지만, 가스터빈 블레이드에 대한 용접 기술을 개발하기 위해서는 소재에 대한 고온 물성 데이터의 확보는 필수적이며, 이들 기계적 특성을 결정짓는 열처리 조건이나 기타 용접 공정에 대한 검토가 이루어져야 한다. 기계적 특성을 파악하기 위해서는 재료에 실질적인 하중을 가하여 고온에서의 응력상태를 파악하는 시험이 이루어져야 한다.

고온 사용 소재의 기계적 특성을 평가하는 일반적인 방법은 일축 상에서 시험되어지는 인장시험, 크리프 시험 등이 있다. 이러한 시험법은 시험이 비교적 간단하며, 높은 신뢰성을 갖는다. 이는 재료의 강도에 대한 기초적인 설계 정보를 제공하고, 재료의 특성을 규명하기에 적합하다. 따라서 본 연구에서는 가스터빈 손상 블레이드의 용접정비 기술을 개발하기 위하여 가스터빈 블레이드의 모재인 GTD 111DS 소재에 수동용접하여 시편을 제작하고 용접전·후 처리조건에 따른 고온 기계적 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 용접 전처리

용접 전열처리는 GTD 111이 석출경화형 니켈기지의 초내열합금이므로 강화원소인  $\gamma'$ 에 영향을 주는 온도를 설정하여 실험을 실시하였다. 1,100°C의 온도는  $\gamma'$ 을 부분적으로 고용시키는 열처리이고, 1,200°C 열처리는  $\gamma'$ 을 완전 고용시키는 온도이므로, 두 가지 조건을 비교하였다.<sup>(3,4)</sup> 추가로 1,200°C보다 높은 온도에 대하여서도 열처리를 수행하여 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 1은 GTD 111의 열시차 분석결과이다. 열시차 분석결과로부터 미세조직내 새로운 상(phase)의 석출 및 고용의 온도를 예측해 볼 수 있다.

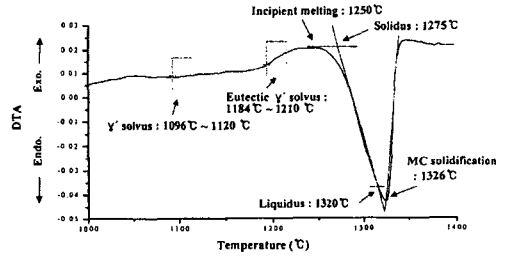


Fig. 1 DTA(Differential Thermal Analysis) data of GTD 111 Wire

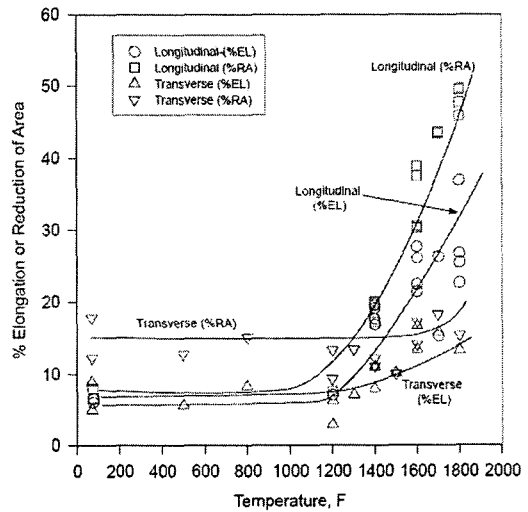


Fig. 2 Variation of ductility of longitudinal and transverse specimens according to temperature<sup>(5)</sup>

2.2 용접

용접은 고온의 불활성분위기에서 GTD 111 용접봉을 이용하여 실시하였다. 용접육성부위가 모재와 같은 성질을 갖기 위해서 모재와 같은 재료를 사용하여 용접하므로, 용접중 결합발생을 적게하기 위해서 모재의 용접전 가열은 필수적이다. 용접전 가열온도는 온도별 모재의 변형률 조사하여 가로 및 세로방향 모두에 대해서 양호한 변형률을 갖는 온도 900°C로 용접전 가열을 실시하여 GTAW의 방법을 선택하여 용접을 실시하였다. 그리고 용접전 가열과 용접후 냉각에서 급냉시 균열이 발생할 수 있으므로 급냉은 피해야 한다. Fig. 3은 고온인장 실험을 위하여 시편을 채취한 블레이드의 사진이다. 이렇게 채취한 시편을 Fig. 4와 같이 용접을 실시하고, Fig. 5는 불활성 분위기 용접챔버에서 용접을 하고 있는 사진이다.

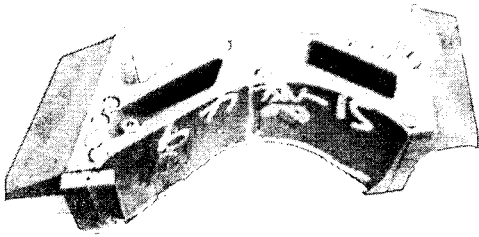


Fig. 3 Location of specimens taken from blade root



(a)



(b)

Fig. 4 Build up specimen by GTAW(a) and machined specimen for hot tensile test(b)



Fig. 5 Specimen welding

Table 1 Pre & post welding treatment condition

	Preweld Heat Treatment	Postweld Treatment	
		HIP	Heat Treatment
1	1,100 °C		1,100 + 800 °C
2	1,200 °C	1,100 °C + 15ksi	1,200 + 1,100 + 800 °C

2.3 용접 후처리

용접 후처리는 고온등방처리(hot isostatic pressing), 고용화 열처리, 시효열처리로 구분하여 실시하였다.

고온등방처리는 용접중 발생한 미세균열(micro-crack)과 기공(pore) 등을 제거하여 용접부의 성질을 개선할 수 있는 공정이다.

고용화 열처리는 용접중 발생한 불균일한 감마프라임의 석출이나 성장을 균일화 시켜 재료 내부의 응력을 균질화 시킨다. 이번 실험에서는 고용화 열처리를 두번에 걸쳐 실시를 하였다. 용접부와 모재사이에 감마프라임의 균일화를 위하여 1,200 °C와 1,100 °C에서 고용화 열처리를 실시하였다.

시효열처리를 통하여 재료의 기본 물성을 복원할 수 있게 하였다.

3. 실험 결과

3.1 미세조직

Table 2는 미세조직 및 고온인장시험에 사용한 시편의 운전이력이다. 운전시간에 따른 미세조직과 인장응력 값이 어떻게 변화하는지 확인하였다.

3.1.1 신재의 미세조직

Fig. 6은 GTD 111DS 신재의 미세조직 사진이다. (a), (b)는 광학 현미경 사진으로 결정입계와 결정입계에 석출되어있는 카바이드 등의 석출물을 확인 할 수 있다. (c), (d)는 주사전자현미경(SEM)사진으로 입방체 형태의 Primary  $\gamma'$  과 둥근형태의 Secondary  $\gamma'$  을 관찰 할 수 있다.

Primary  $\gamma'$  의 크기는 0.48~0.67 $\mu$ m이다. Secondary  $\gamma'$  은 0.157 $\mu$ m 정도의 크기를 갖고 있다.

Table 2 Operating history of specimens

	Operating History			Remarks
	Operating Hour	Starts	EOH(hr)	
New Material	0	0	0	GTD 111DS
SP 1	12,492	601	24,512	GTD 111DS

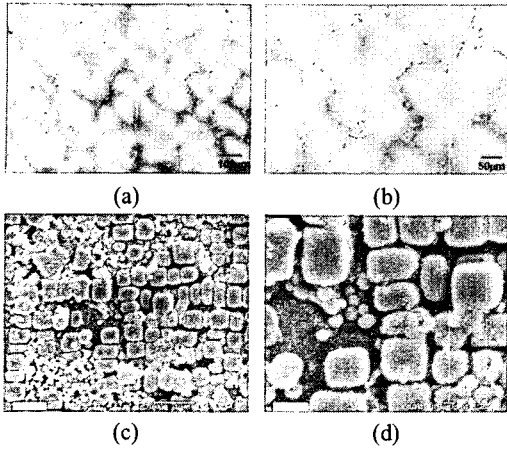


Fig. 6 Microstructure of no aged GTD 111DS

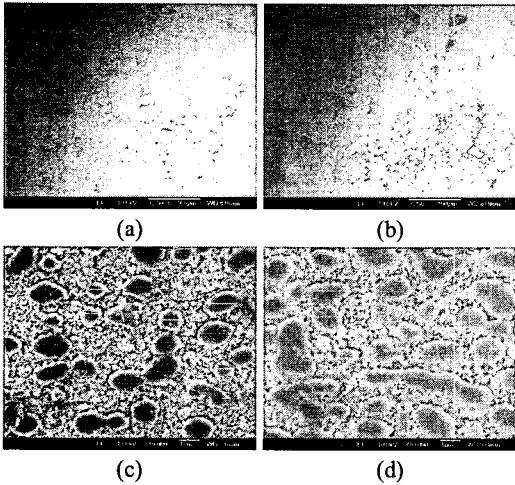


Fig. 7 Microstructure of heat treated SP 1 at 1,100°C

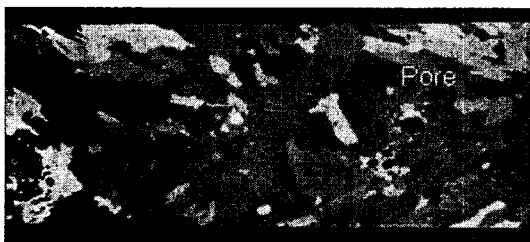


Fig. 8 Observation of welding deposition

### 3.1.2 SP 1의 미세조직

#### 3.1.2.1 1,100°C 고온 열처리후 미세조직

Fig. 7은 등가운전시간 24,512시간을 운전한 블

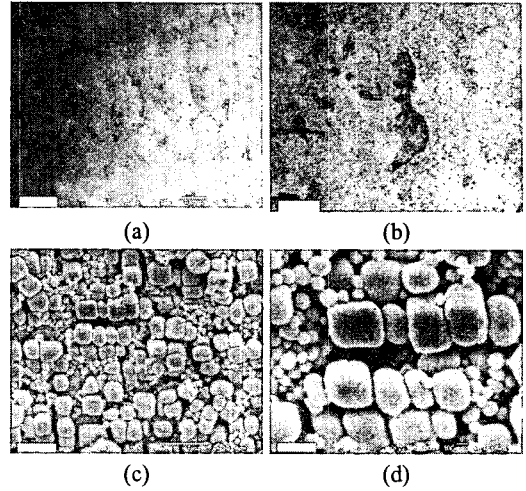


Fig. 9 Microstructure of hiped and heat treated SP1

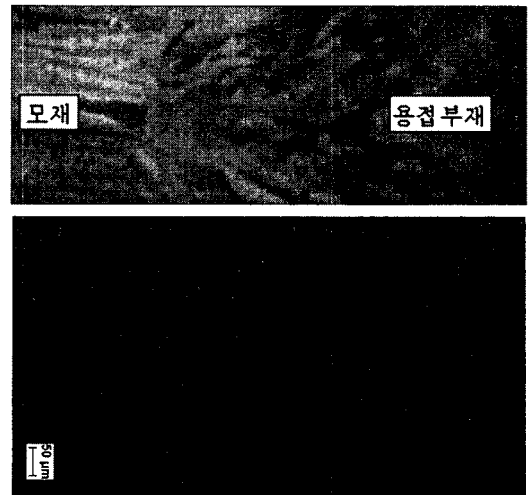


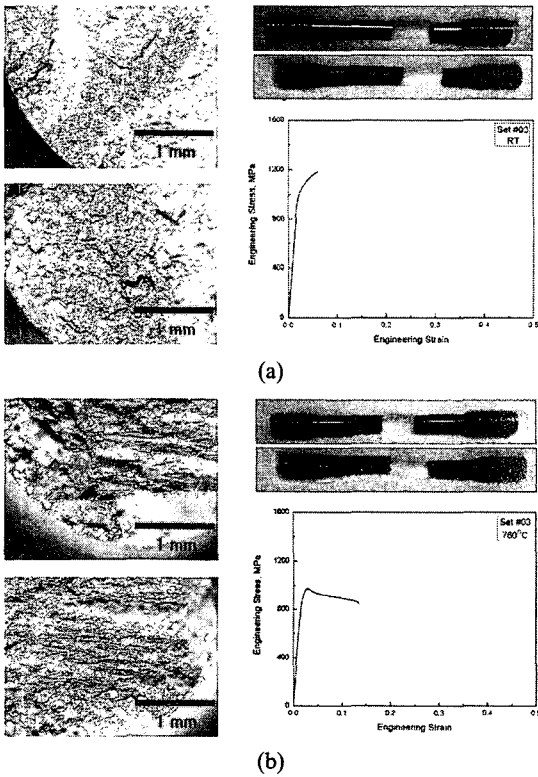
Fig. 10 Observation of hiped and heat treated welding specimen

레이드의 Airfoil에서 채취한 시편을 1,100°C에서 2시간 동안 고온열처리를 수행한 시편의 미세조직 사진이다. (a), (b)는 저배율 사진으로 카바이드,  $\gamma/\gamma'$  공정 등이 관찰된다. (c), (d)는 고온열처리를 실시한 후에 운전의 영향으로 조대화되고 구상화된 모양의  $\gamma'$ 의 변화가 있는 것을 알 수 있다. Primary  $\gamma'$ 의 크기는 0.92~1.25 $\mu\text{m}$ 의 범위를 나타내고 있다.

Fig. 8은 용접부 미세조직 사진이다. 용접내부에 많은 기공(pore)이 존재하고 있는 것을 확인

**Table 3** The test results according to condition of pre- and post-welding treatment for welding

		Test condition	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Rupture Location
1	Condition 1	Room Temp	980	1,215	substrate
2	Condition 2	Room Temp	1,057	1,150	substrate
3	Condition 1	760°C	870	982	welding
4	Condition 2	760°C	869	1,101	welding

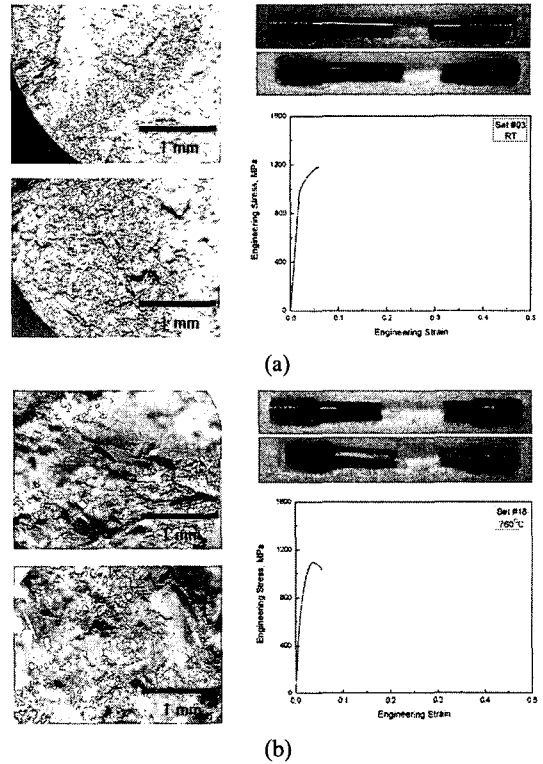


**Fig. 11** Fracture surface, appearance and stress-strain curve at room temperature(a) and at 760°C(b) for SP 1 treated by condition 1

할 수 있다. 이러한 기공들이 균열 발생시 시작점으로 작용할 가능성이 높다.

3.1.2.2 1,100°C HIP, 1,200°C 열처리 미세조직

Fig. 9는 등가운전시간 24,512시간을 운전한 블레이드의 Airfoil에서 채취한 시편을 1,100°C, 15ksi



**Fig. 12** Fracture surface, appearance and stress-strain curve at room temperature(a) and at 760°C(b) for SP 1 treated by condition 2

에서 HIP 처리를 실시하고, 1,200°C, 1,100°C에서 고용열처리를 실시하였다. 마지막으로 800°C에서 시효열처리를 실시하였다.

(a), (b)는 저배율 사진으로 카바이드,  $\gamma/\gamma'$  공정 등이 관찰되고, (c), (d)에서 관찰되는  $\gamma'$ 은 입방체 모양을 띠고 있다. Primary  $\gamma'$  사이에는 Secondary  $\gamma'$ 이 잘 발달되어 있는 것을 관찰할 수 있다. Primary  $\gamma'$ 의 크기는 0.37~0.55 $\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 10은 불활성 분위기의 예열된 상태에서 실시하면서 GTAW 용접을 실시하고, HIP 처리와 고용화 열처리, 시효열처리를 실시한 시편의 사진이다. Fig. 9에서 관찰된 기공은 관찰되지 않는다.

같은 운전이력, 같은 용접 파라메타를 갖고 있는 두 시편에서 결함이 다르게 나타났다. 즉, HIP 처리를 수행하지 않은 조건에서는 기공이 발견되었고, HIP 처리를 실시한 시편에서는 기공이 발견되지 않았다.

3.2 고온 인장 특성

같은 운전이력을 갖는 시편에 대해서 Table 1

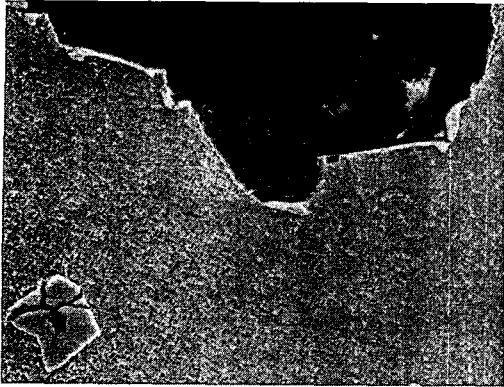


Fig. 13 Microstructure of fracture face

에서 언급된 서로 다른 용접 전·후처리를 수행함으로써 고온인장 특성이 어떻게 변화하는지에 대하여 검사를 수행하였다.

Table 3은 760℃에서 실시한 고온인장 실험결과이다. Table 1의 Condition 2의 조건 인장값이 Condition 1의 인장값보다 119MPa이 높다.

Fig. 11은 Table 1의 Condition 1의 조건으로 용접 전·후 처리를 실시한 시편에 대한 상온, 고온인장 시험의 그래프와 파단면 사진을 보여 주고 있다. 파단위치는 상온인장의 경우는 모재, 고온인장의 경우에는 용접부에서 발생하였다. 고온인장시편의 경우 입계면을 따라 파단이 일어난 것을 Fig. 13을 통하여 확인 할 수 있다.

Fig. 12는 Table 1의 Condition 2의 조건으로 용접 전·후 처리를 실시한 시편에 대한 상온, 고온인장 시험의 그래프와 파단면을 보여 주고 있다.

#### 4. 결 론

운전시간이 같은 동일 재질의 모재를 같은 재료의 용접봉을 이용하여 용접을 하였을 때 용접 전·후처리에 따른 미세조직과 고온인장 특성이 어떻게 변화하는지에 대하여 실험을 실시하였다.

용접 전·후처리가 다른 두 시편에 대한 미세조직 관찰에서는 다음과 같은 특성이 나타났다. 1,100℃의 용접전 열처리와 용접후 1,100℃의 고용열처리와 800℃의 시효열처리를 실시하였을 때, Primary  $\gamma'$  과 공정조직의 큰 변화는 관찰할 수 없었다. 용접부에서는 용접중 발생된 기공이 관찰되었고, 미세조직내 불균일이 관찰되었다. 그러나, 1,200℃의 전열처리와 용접 후처리로 1,10

0℃의 HIP, 1,200℃와 1,100℃의 고용열처리, 800℃ 시효열처리를 수행한 결과 균일한 Primary  $\gamma'$  을 얻을 수 있었다. 용접부에서 기공도 발견할 수 없었다.

용접 전·후처리가 다른 두 시편에 대한 고온인장 실험결과 Table 1의 Condition 2의 조건이 Condition 1의 조건보다 좋은 결과값을 얻었다. 파단위치는 모두 용접부에서 발생하였다. 용접부는 모재와 결정립의 일방향이 아닌 서로 다른 방향의 결정립을 갖고 있으므로, 재료에 가해지는 응력방향에 대하여 일정 방향을 갖게 되어 약하게 된다. 760℃의 인장시험의 결과도 같은 양상의 결과가 나타나고 있다. 용접 전·후 조건에 따른 고온인장값의 차이는 Fig. 8과 Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 용접내 결함 정도의 차이와 미세조직의 균일, 불균일의 차이로 인한 고온인장의 차이로 보여진다.

#### 후 기

본 논문은 산자부에서 주관하는 전력산업연구개발과제의 2차년도 보고서를 활용하여 작성한 논문입니다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, M. Y., Park, S. Y. and Yang, S. H., 2006, "Properties Variation According to Heat Treatment for Gas Turbine Blade(Bucket) Material of GTD-111DS," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 30, No. 3, pp. 349~355.
- (2) Lim, L. C., Yi, J. Z., Liu, N. and Ma, Q., 2002, "Mechanism of Post-Weld Heat Treatment Cracking in Rene 80 Nickel Based Superalloy," *Materials Science and Technology*, Vol 18, pp. 407~412.
- (3) Sajjadi, S.A., Zebajjad, S.M., Guthrie, R.I.L and Isac, M., 2005, "Microstructure Evolution of High Performance Ni Base Superalloy GTD 111 With Heat Treatment Parameters," *Journal of material processing technology*, Vol. 175, Issues 1-3, pp. 376~381.
- (4) Choi, B. G., Kim, I. S. and Jo, C. Y., "Effect of Thermal Exposure on Microstructural Degradation

and Mechanical Properties of Ni Base Superalloy GTD 111," *Proceeding of the 6th International Charles Parsons Turbine Conference*. pp. 861~879.

(5) Viswanathan, R., 2001, "Gas Turbine blade Superalloy Material Properties Hand Book," *EPRI(TR1004652)*, pp. 17-1~17-16.