

◆ 특집 ◆ 가스터빈 블레이드 설계 기술 II

# 가스터빈 블레이드용 니켈기 초내열 합금의 육성 용접과 전·후처리 조건에 따른 건전성 회복에 관한 연구

## A Study on the Integrity Recovery according to Manual Overlay and Pre- & Post-welding Treatment of Nickel-based Superalloy for Gas Turbine Blade

김형익<sup>1,✉</sup>, 박홍선<sup>1</sup>, 허용<sup>1</sup>, 구재민<sup>2</sup>, 석창성<sup>2</sup>, 양성호<sup>3</sup>, 김문영<sup>3</sup>, 원종일<sup>4</sup>  
Hyung-ick Kim<sup>1,✉</sup>, Hong-sun Park<sup>1</sup>, Yong Huh<sup>1</sup>, Jae-mean Koo<sup>2</sup>, Chang-sung Seok<sup>2</sup>,  
Sung-ho Yang<sup>3</sup>, Moon-young Kim<sup>3</sup> and Jong-il Weon<sup>4</sup>

1 성균관대학교 기계공학부 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

3 한전 KPS GT 정비기술센터 (Gas Turbine Technology Service Center, Korea Plant Service & Engineering)

4 한국화학연구원 (Korea Research Institute of Chemical Technology)

✉ Corresponding author: bluebear@skku.edu, Tel: 031-290-7477

Key Words: Gas Turbine Blade (가스터빈 블레이드), Overlay Welding (육성 용접), Hot Isostatic Processing (열간등압성형), Solution Heat Treatment (용체화 열처리), Aging Heat Treatment (시효 열처리)

### 기호설명

EOH : Equivalent Operating Hours

DS : Directional Solidification

### 1. 서론

터빈 블레이드의 주요 재료로 쓰이는 니켈기 초합금은 고온에 장시간 노출되면서 재료조직 내부에서 결정이 성장하거나 석출물의 규모나 분포 정도가 많아지는 시효(aging)현상으로 인하여 재질적 불안정이 발생한다. 이 결과로 입내 산화, 응력 부식균열 등에 취약해지며, 크리프 저항성이 낮아지거나 연성을 감소시켜 응력-파단 특성에 악영향을 주게 된다.<sup>1,2</sup> 따라서 고온의 온도와 여러 형태의 응력이 복합적으로 작용하는 블레이드의 경우에는 미세조직의 변화에 의존하여 가역적으로 나타나는 재질형 열화와 공동의 성장이나 균열의 발생과 같이 비가역적으로 나타나는 균열형 열화가

나타난다. 가스터빈 블레이드의 미세조직 변화에 의한 재질형 열화는 운전 중 계속 진행되며, 냉각 시스템의 불량이나 코팅층의 열화가 발생했을 때는 블레이드가 초고온에 직접 노출되어 급속한 균열형 열화가 진행된다. 약 3,600rpm 으로 작동하는 가스터빈의 운전 특성과 Fig. 1 과 같은 여러 단(stage)으로 구성되어 있는 구조적 특성으로 인해 이러한 균열형 열화는 1 단 블레이드의 급격한 파손을 일으키게 된다. 또한, 이러한 1 단 블레이드의 파손은 2 단, 3 단 등으로 연쇄 파손을 일으켜 가스터빈 시스템을 붕괴시킬 수도 있다.<sup>3,4</sup> 가스터빈 시스템의 붕괴는 발전소의 대형 안전사고와 전력시스템의 마비를 야기할 수 있다.

위와 같은 안전사고를 방지하기 위하여 제작사에서 권고하는 등가운전시간(equivalent operating hours: EOH) 후에는 재생 정비를 수행하여 블레이드의 건전성을 회복시켜 재사용하게 된다. 이러한 재생 정비를 위해서는 주기 운전 후에 입고 검사, 클리닝(cleaning), 스트리핑(striping), 결함 제거, 비

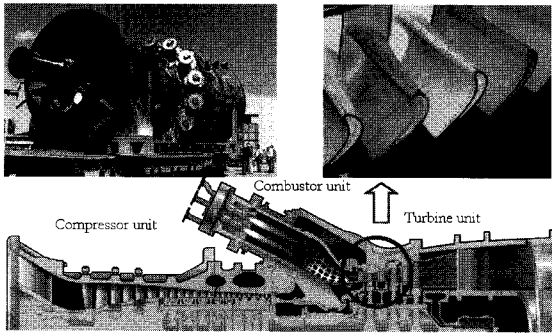


Fig. 1 General Electric MS9001H industrial gas turbine capable of producing 480MW net power output in a combined cycle application. Picture by S. Balsone and J. Schaeffer, General Electric

파괴 검사, 용접 및 가공, 재생 열처리, 코팅 등의 재생 복원공정을 거치며 최종적으로 비파괴 검사, 재질분석 등을 통한 수명진단을 거쳐 재사용하거나 폐기(scrap) 처리를 하게 된다.<sup>5-10</sup> 따라서 주기 운전 후의 재생 정비 중에 결함을 제거함으로써 비가역적인 균열형 열화 요인을 제거하며, 여러 조건의 열처리를 수행함으로써 가역적으로 나타나는 재질형 열화를 원소재의 재질과 비슷하게 복원하여 건전성을 회복시킨다.

제작사에서 권고하는 손상 블레이드의 건전성 회복 방법은 넓은 범위를 갖는 열처리 조건과 최소 사양, OEM 방식의 라이센스 등으로 제한적인 정보만을 제공하고 있다. 따라서 이러한 건전성 회복의 방법을 정량적으로 평가하여 가스터빈 블레이드의 운전 수명을 연장시키는데 기여할 수 있는 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 균열형 열화 요인을 제거하고 형상을 복원하는 용성 용접과 이에 따른 전·후처리 조건을 분석하여 니켈기 초내열 합금의 건전성 회복에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위하여 용성 용접의 전·후처리 조건을 설정하고, 전열처리 조건, 열간등압성형 조건, 용체화 열처리 조건, 시효 처리 조건에 따른 기계적 특성 변화에 대해 고찰하였다.<sup>11,12</sup> 또한, 이에 따른 미세조직을 관찰하여 고온 인장강도와 미세조직과의 연관성을 분석하였으며, 주요 용성 용접 전·후처리 조건에서의 파단 분석을 수행하여 전·후처리 조건이 열화 소재와 용성 용접부의 건전성 회복에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.<sup>13,14</sup>

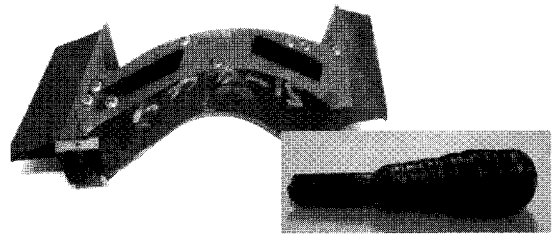


Fig. 2 Cut-out specimen for the platform of GTD 111DS material blade(L) and overlay welding state(R)

2. 블레이드에서의 시편 채취 및 제작

용성 용접 전·후처리 조건에 따른 기계적 특성을 평가하기 위하여 Fig. 2 와 같이 GTD 111DS 소재의 사용 블레이드(EOH=24,512hr) 플랫폼부에서 인장시편의 모재부에 해당하는 환봉을 채취하여 용성 용접을 하였다. Fig. 3 과 같이 평행부 지름이 4mm, 평행부 길이가 약 16mm 이상의 인장시편의 형태로 가공하였다.

블레이드 용성 용접시 사용된 용접봉은 GTD 111DS 재질에 일반적으로 사용하고 있는 PMet 811

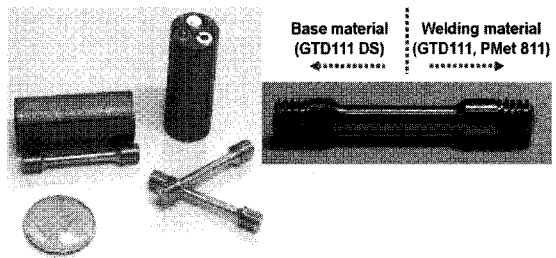


Fig. 3 The size and appearance of specimen(L) and substrate and welding division after manual overlay welding(R)

Table 1 Nominal chemical composition of GTD 111DS and GTD 111(PMet 811) (wt%)

	Ni	Cr	Co	Mo	Ti
GTD111 DS	Bal.	13.6	9.14	1.60	4.90
GTD111	Bal.	13.72	9.20	1.50	4.74

	Al	Ta	W	C	B
GTD111 DS	3.00	2.87	3.44	0.09	0.01
GTD111	2.82	2.62	3.60	0.10	0.01

(소재: GTD 111)이다. GTD 111 과 GTD 111DS 은 화학적 조성비는 거의 유사하며, GTD 111 은 다결정 등축성(equiaxed) 조직인데 비하여 GTD111DS 는 응고시 냉각을 조절하여 결정을 길이 방향으로 성장시킨 일방향 주조(directional solidification: DS) 조직이다. Table 1 은 제작사에서 공급하는 용접봉(GTD 111)과 GTD 111DS 의 일반 화학 조성을 나타내고 있다.

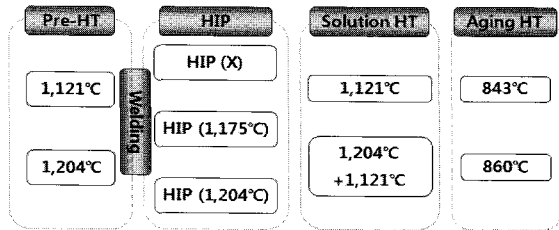


Fig. 4 Procedure of pre-welding and post-welding treatments for manual overlay welding

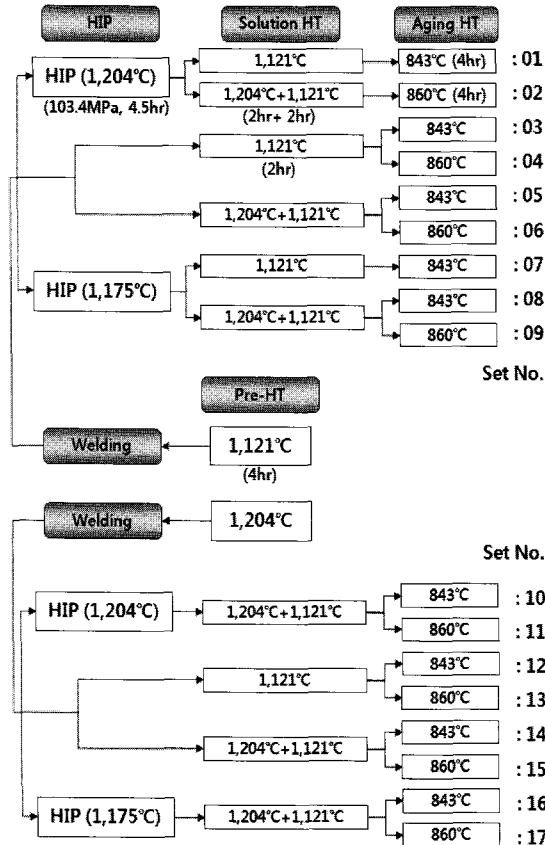


Fig. 5 Condition of pre-welding and post-welding treatment for manual overlay welding

가공 후 시편의 모습을 보면 육안으로는 모재인 GTD 111DS 재질과 용접부인 GTD 111 재질과의 구분이 어렵다. 두 재질간의 접합부가 시편의 중간부에 위치하지만 가공상의 오차에 따라 이러한 위치가 변할 수 있어 인장시험 후 에칭을 통하여 시편의 파단 위치 등을 판단하였다.

### 3. 육성 용접의 전·후처리 조건 선정

육성 용접의 전·후처리 조건에 따른 시편의 기계적 특성을 평가하기 위하여 조건을 총 5 단계로 구분하여 각 조건 별로 2~3 가지 조건을 설정하였다. 1 단계를 ‘용접 전 열처리’, 2 단계를 ‘용접’, 3 단계를 ‘열간등압성형’, 4 단계를 ‘용체화 열처리’, 5 단계를 ‘시효 처리’로 설정하였다. 육성 용접 시편의 전·후처리 조건의 개략도를 Fig. 4 에 나타냈으며, 각각의 조건이 조합된 17 종류의 조건을 Fig. 5 에 나타냈다. 모든 시편의 모재부는 GTD 111DS 소재의 사용 블레이드 (EOH=24,512hr) 플랫폼부를 사용하였다.

1 단계인 ‘용접 전 열처리’ 조건은 1,121°C(4hr) 와 1,204°C(4hr)로 진공로에서 열처리를 한 2 가지 조건으로 설정하였다. 모재가 갖고 있는 잔류응력을 제거하기 위한 용접 전 열처리는 석출강화형 니켈기 초내열합금의 강화 원소에 영향을 주는 온도를 설정하여 실험을 실시하였다. 1,121°C(2,050°F) 의 온도는 1 차  $\gamma'$ 을 부분적으로 고용시킬 수 있는 열처리이고, 1,204°C(2,200°F) 열처리는 1 차  $\gamma'$ 을 완전 고용시킬 수 있는 온도이므로 2 가지 조건을 비교하였다.

2 단계인 ‘용접’ 조건은 GTD 111DS 재질에 GTD 111 소재 용접봉(PMet 811)을 사용하였다. 고온의 불활성 분위기에서 용접을 하였다.

3~5 단계의 ‘열간등압성형’, ‘용체화 열처리’, ‘시효 처리’는 용접 후 처리로서, ① 용접시 발생하는 기공 및 균열 등의 결함을 제거하고, ② 용접시 발생하는 온도 편차에 의해 생성되는 1 차  $\gamma'$ 의 생성과 성장의 불균일성을 없애고, ③ 용접 후 모재와 용접부의 기계적 성질을 복원하기 위함이다.

3 단계인 ‘열간등압성형’ 조건은 1,204°C(4.5hr), 1,175°C(2,150°F, 4.5hr) 열간등압성형한 조건과 열간등압성형을 하지 않은 조건으로, 총 3 가지 조건을 설정하였다. 열간등압성형한 경우의 압력 조건은 103.4MPa(15ksi) 조건으로 실시하였다.

4 단계인 ‘용체화 열처리’ 조건은 1,121°C(2hr) 용체화 열처리한 조건과 1,204°C(2hr) 열처리 후 다시 1,121°C(2hr) 용체화 열처리를 한 2 가지 조건으로 설정하였다. 3 단계 열간등압성형은 고온의 처리 과정에서 급냉되지 않기 때문에 서냉되면서 불필요한 석출물들이 석출될 가능성이 있다. 그러므로 열간등압성형을 실시한 시편에 대해서 불필요한 석출물을 고용시킬 수 있는 1,204°C에서 완전 고용 열처리가 가능한 조건을 설정하였다. 또한, 완전 고용 열처리 후 1 차  $\gamma'$ 을 위한 1,121°C에서의 고용 열처리 조건을 설정하였다.

5 단계인 ‘시효 처리’ 조건은 843°C(4hr)와 860°C(4hr)를 한 2 가지 조건으로 설정하였다. 용체화 열처리 후 2 차  $\gamma'$ 을 석출 및 성장시키기 위하여 시효 처리를 하였다. 843°C(1,550°F)와 860°C(1,580°F)의 열처리는 온도 차이에 따른 2 차  $\gamma'$ 의 크기나 분포의 차이를 보기 위하여 설정하였다.

#### 4. 육성 용접의 전·후처리 조건에 따른 기계적 특성 평가

##### 4.1 상온과 고온 기계적 특성의 연관성 분석

고온 물성 평가에는 인스트론(Instron)사의 5ton 용량의 전기 유압식 UTM(universal testing machine)을 사용하였다. 상온(25°C)과 고온(760°C) 기계적 특성과의 연관성을 살펴보면, 상온에서 760°C로 시험온도가 올라가면서 최대 233MPa, 최소 12MPa의 인장강도의 저하가 나타났다. 상온 시험에서의

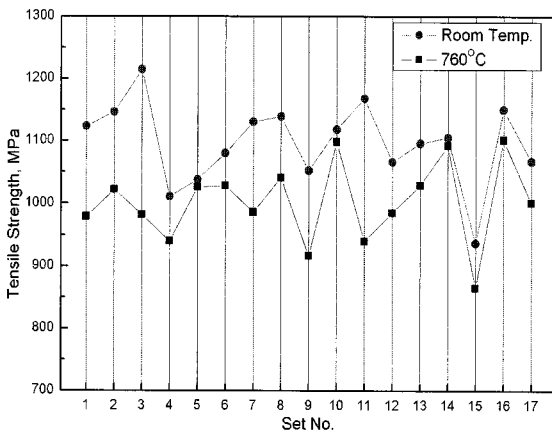


Fig. 6 The variation of tensile strength at 25°C and 760°C according to pre-welding and post-welding treatment condition

파단 위치를 살펴보면, 용접재 파단 7 종류, 모재 파단 10 종류이며, 760°C 시험의 경우에는 용접재 파단 13 종류, 모재 파단 4 종류로 나타났다.

Fig. 6 과 같이 시험온도 상승에 따라 인장강도의 저하는 나타났지만, 전·후처리 조건에 따라 상온과 760°C에서의 인장강도 간의 뚜렷한 경향을 찾기는 어려웠다.

##### 4.2 용접 전 열처리 조건에 따른 기계적 특성 평가

육성 용접의 전·후처리 시편 조건에 따른 기계적 특성을 평가하기 위한 5 단계 중 1 단계로 ‘용접 전 열처리’ 조건인 1,121°C(2hr)와 1,204°C(2hr)의 2 가지 조건으로 데이터를 분류하였다. 1 단계인 ‘용접 전 열처리’ 조건만 다르고 나머지 2 단계 ‘용

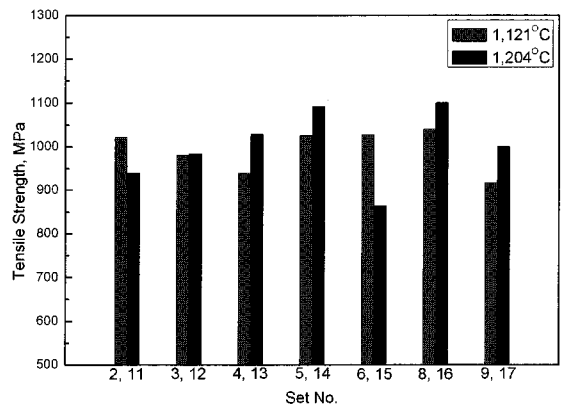


Fig. 7 The comparison of tensile strength at 760°C on ‘pre-heat treatment of welding’

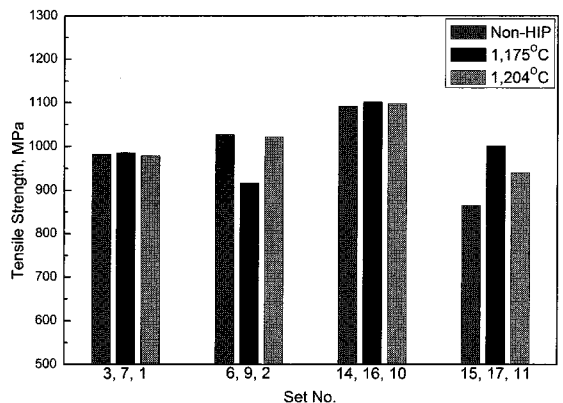


Fig. 8 The comparison of tensile strength at 760°C on ‘HIP treatment’ condition

접', 3 단계 '열간등압성형', 4 단계 '용체화 열처리', 5 단계 '시효 처리'는 동일한 조건으로 정리하여 Fig. 7에 나타냈다. 총 7 종류로 분류가 가능했으며 각 종류별 760℃ 인장강도를 비교해 보면, 1,204℃ 전열처리 조건의 인장강도가 높은 종류는 5 종류, 1,121℃ 전열처리 조건의 인장 강도가 높은 종류는 2 종류로 나타났다.

### 4.3 열간등압성형 조건에 따른 기계적 특성 평가

육성 용접 전·후처리 시편 조건에 따른 기계적 특성을 평가하기 위한 5 단계 중 3 단계로 '열간등압성형' 조건인 1,175℃(15ksi, 4.5hr)와 1,204℃(15ksi, 4.5hr), 열간등압성형을 하지 않은 조건의 3 가지 조건으로 데이터를 분류하였다. 3 단계인 '열간등압성형' 조건만 다르고 나머지 1 단계 '전열처리', 2 단계 '용접', 4 단계 '용체화 열처리', 5 단계 '시효 처리'는 동일한 조건으로 정리하여 Fig. 8에 나타냈다. 총 4 종류로 분류가 가능했으며 각 종류별 760℃ 인장강도를 비교해 보면, 열간등압성형의 유/무와 열간등압성형 온도의 차이에 의한 변화를 찾기는 어려웠다.

하지만, 5 단계 '시효 처리'를 843℃(4hr)로 한 경우인 3 번, 7 번, 1 번 조건 그룹과 14 번, 16 번, 10 번 조건 그룹은 동일 그룹 안에서 특별한 인장강도의 차이는 나타나지 않지만, 비교적 고르게 높은 인장 강도를 나타냈다.

### 4.4 용체화 열처리 조건에 따른 기계적 특성 평가

육성 용접 전·후처리 시편 조건에 따른 기계적

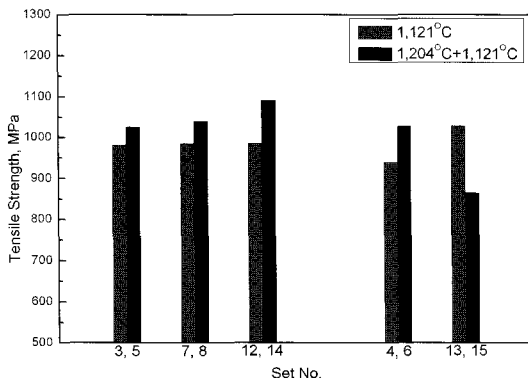


Fig. 9 The comparison of tensile strength at 760℃ on 'Solution treatment'

특성을 평가하기 위한 5 단계 중 4 단계로 '용체화 열처리' 조건인 1,121℃(2hr)인 조건과 1,204℃(2hr) 열처리 후 1,121℃(2hr) 열처리([1,204℃+1,121℃])한 2 가지 조건으로 데이터를 분류하였다.

4 단계인 '용체화 열처리' 조건만 다르고 나머지 1 단계 '전열처리', 2 단계 '용접', 3 단계 '열간등압성형', 5 단계 '시효 처리'는 동일한 조건으로 정리하였다. 총 5 종류로 분류하고, 다시 5 단계 '시효 처리' 조건으로 분류하여 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 9의 좌측 3 번, 5 번, 7 번, 8 번, 12 번, 14 번 조건이 843℃ 시효 처리한 조건이며, 우측의 4 번, 6 번, 13 번, 15 번 조건이 860℃ 시효 처리한 조건이다.

각 종류별 760℃ 인장강도를 비교해 보면, 5 종류 중 1,204℃ 열처리 후 1,121℃ ([1,204℃+1,121℃]) 용체화 열처리 조건의 인장강도가 높은 종류가 4 종류 나타났으며, 시효 처리가 843℃인 경우는 모두 [1,204℃+1,121℃] 용체화 열처리 조건의 인장강도가 높은 것으로 나타났다. 인장강도의 차이도 최대 107MPa, 최소 44MPa 로 다른 조건에 비해 차이가 두드러졌다.

### 4.5 시효 처리 조건에 따른 기계적 특성 평가

육성 용접 전·후처리 시편 조건에 따른 기계적 특성을 평가하기 위한 5 단계 중 마지막 단계로 '시효 처리' 조건인 843℃(4hr)와 860℃(4hr)의 2 가지 조건으로 데이터를 분류하였다. 총 17 종류 중 5 단계 '시효 처리'가 843℃인 경우는 9 종류이며, 860℃인 경우는 8 종류이다. 각 집단의 760℃ 인장강도 평균을 보면, '시효 처리'가 843℃인 경우는 1,032MPa, 860℃인 경우는 968MPa 으로 843℃ 시

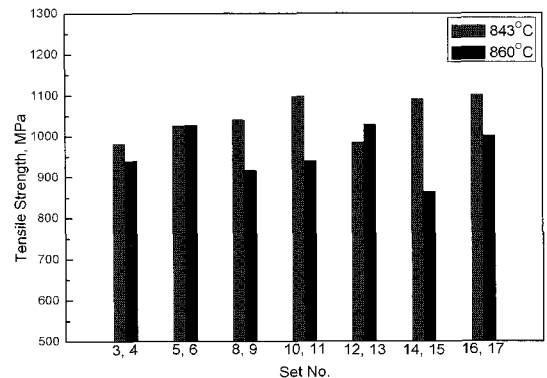


Fig. 10 The comparison of tensile strength at 760℃ on 'Aging treatment'

효 처리를 한 그룹이 860°C 시효 처리를 한 그룹보다 평균 인장강도가 약 64MPa 정도 높게 나타났다.

5 단계인 ‘시효 처리’ 조건만 다르고 나머지 1 단계 ‘전열처리’, 2 단계 ‘용접’, 3 단계 ‘열간등압성형 처리’, 4 단계 ‘용체화 열처리’는 동일한 조건으로 정리한 7 종류를 Fig. 10 에 나타냈다. 각 종류별 760°C 인장강도를 비교해 보면, 7 종류 중 843°C 시효 처리 조건의 인장강도가 높은 종류가 5 종류 나타났으며, 비슷한 인장강도를 갖는 종류가 1 종류, 860°C 시효 처리 조건의 인장강도가 높은 종류는 1 종류가 나타났다.

**5. 육성 용접의 전·후처리 조건에 따른 미세조직 평가**

전·후처리는 용접을 실시한 후 모재와 용접부의 기계적 성질을 복원하는 열처리로써, 용접시 발생하는 온도 편차에 의해 생성되는 의 생성과 성장의 불균일성을 없애고, 용접시 발생하는 기공, 균열 등의 결함을 제거하는 과정이다. 따라서 여

러 종류의 용접 전·후처리 조건이 인장시험 결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 인장시편의 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 관찰은 인장시험 후 시편의 그림부를 마운팅하고, 광학현미경과 SEM 을 이용하여 관찰하였다.

**5.1.1 차  $\gamma'$  의 크기 평가**

육성 용접 전·후처리 조건에 따른 1 차  $\gamma'$  의 크기를 분석하기 위하여 모재와 용접부를 관찰하였다.

4 장의 인장시험 결과와 비교하여 Table 2 와 Table 3 을 살펴보면, 760°C 인장시험에서 모재부가 파단된 2, 4, 7, 15 번 조건에서는 1 차  $\gamma'$  의 평균 크기가 약 0.473~0.896  $\mu\text{m}$  로 나타났다. 가장 좋은 강도를 갖는 것으로 알려진 1 차  $\gamma'$  의 크기가 약 0.4~0.6  $\mu\text{m}$  인 점을 감안해보면, 모재부의 파단은 일부분 재질상의 결함에 의한 것으로 사료된다.

1 차  $\gamma'$  이 타원 형태인 4 번 조건을 제외하면, 1 차  $\gamma'$  의 평균 크기가 일반적인 GTD 111DS 재질의 주기 운전 후 블레이드에 비하여 작은 것을 알 수 있다.

Table 2 The primary  $\gamma'$  size on base metal for pre-welding and post-welding treatment conditions ( $\mu\text{m}$ )

Set No.	Welding			
	Mean	Min.	Max.	Std. Dev.
1	1.232	0.856	1.822	0.239
2	0.977	0.622	1.534	0.182
3	0.714	0.527	1.083	0.099
4	0.809	0.425	1.304	0.211
5	0.833	0.384	1.246	0.162
6	0.647	0.41	0.922	0.096
7	0.957	0.604	1.560	0.200
8	0.668	0.472	0.847	0.086
9	0.682	0.504	1.029	0.107
10	0.654	0.446	0.831	0.088
11	0.662	0.501	0.88	0.084
12	0.947	0.652	1.316	0.160
13	0.692	0.476	0.955	0.083
14	0.716	0.536	0.944	0.094
15	0.722	0.479	1.017	0.104
16	0.705	0.455	0.955	0.114
17	0.820	0.485	1.726	0.227

Table 3 The primary  $\gamma'$  size on welding for pre-welding and post-welding treatment conditions ( $\mu\text{m}$ )

	Base metal			
	Mean	Min.	Max.	Std. Dev.
1	0.765	0.331	1.251	0.151
2	0.473	0.138	0.769	0.112
3	0.547	0.067	0.788	0.117
4	0.896	0.355	1.794	0.256
5	0.481	0.195	0.996	0.124
6	0.409	0.094	0.591	0.086
7	0.823	0.047	1.670	0.246
8	0.466	0.167	0.803	0.122
9	0.477	0.067	0.710	0.106
10	0.465	0.120	0.797	0.127
11	0.589	0.308	0.929	0.104
12	0.438	0.214	0.762	0.093
13	0.716	0.047	1.216	0.192
14	0.493	0.195	0.733	0.098
15	0.532	0.224	0.808	0.126
16	0.554	0.275	0.928	0.119
17	0.426	0.241	0.689	0.085

### 5.2 고온(760℃) 인장강도와 미세조직의 연관성 분석

Fig. 11 에 동일한 고온 인장강도의 범위 내에 속해 있는 그룹별로 파단부의 일반 미세조직을 분류하였다. Fig. 11 의 가장 위쪽이 고온 인장강도가 약 1,100MPa 의 범위에 속하는 16 번 조건의 파단

부인 용접부, 10 번 조건의 파단부인 용접부, 14 번 조건의 파단부인 용접부 일반 미세조직이다. 또한, 가장 아래쪽이 고온 인장강도가 약 950MPa 이하의 범위에 속하는 9 번 조건의 파단부인 용접부, 15 번 조건의 파단부인 모재부 일반 미세조직이다. Fig. 11 의 위에서 아래쪽으로 살펴보면, 1 차  $\gamma'$  의 크기가 커지며, 입방형에서 구형화되어 가는 것을 알 수 있다. 하지만 일부 조건에서 동일 그룹과 다른 일반 조직들이 관찰되어, 일반적인 미세조직 관찰로 정성적인 기계적 강도 차이를 예측할 수 있지만, 모재부와 용접재가 있는 이중재의 경우 이러한 예측이 어긋날 수 있음을 보여준다.

Fig. 12 에 각 Set No.별로 측정된 파단부의 1 차  $\gamma'$  분포를 Fig. 11 의 그룹별로 나타냈다. 고온 인장강도가 높았던 I 그룹의 경우, 1 차  $\gamma'$  의 분포가 약 0.4~0.9  $\mu\text{m}$  로 다른 그룹에 비해 편차가 넓지 않은 것으로 나타났다. 하지만 IV와 V 그룹의 경우에는 편차가 넓게 나타났다. V 그룹의 11 번, 9 번은 1 차  $\gamma'$  의 크기나 분포는 I 그룹과 유사하나 모양이 구형 및 타원형을 나타내어 기계적 강도가 약한 것으로 판단된다. 또한, 용접 중 발생할 수 있는 여러 결함 요소에 의해 용접부에서 발생한 국부적인 응력 집중으로 기계적 강도를 떨어뜨리는 결과를 초래할 수 있을 것으로 판단된다.

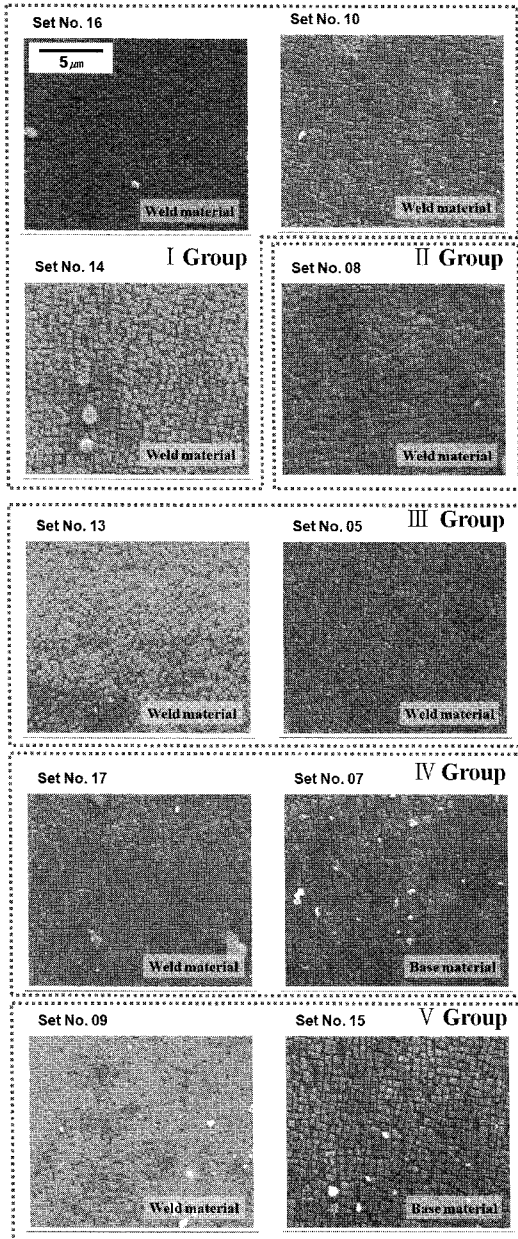


Fig. 11 Microstructures of the groups which have the similar tensile strength

### 6. 결론

본 연구에서는 육성 용접과 이에 따른 전·후 열처리 조건을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 동일한 전·후처리 조건이라도 1 차  $\gamma'$  과 2 차  $\gamma'$ ,

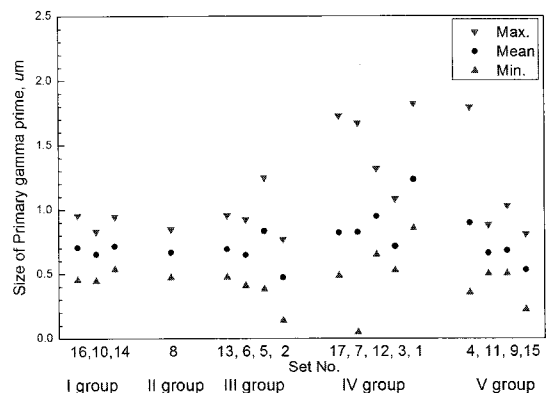


Fig. 12 Distribution of the primary  $\gamma'$  size according to pre-welding and post-welding treatment condition

MC 탄화물 등의 영향으로 인장시험 온도에 따라 파단 부위가 상이하게 나타나는 경우가 발생하였으며, 전·후처리 조건에 따른 상온과 고온 인장강도 사이의 특별한 연관성을 갖지 않는 것으로 나타났다.

전·후처리를 동일한 조건으로 묶어 개별적으로 분석한 결과, 용접 전 처리는 1,204℃ 조건, 열간등압성형은 열간등압성형 유/무와 열간등압성형 온도에 따른 차이를 판단하기는 어렵지만, 용체화 열처리는 1,204℃ 열처리 후 1,121℃ 열처리한 조건, 시효 처리는 843℃ 조건이 기계적 강도를 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 조건이 조합된 시편 또한 높은 기계적 강도를 나타내어 육성 용접에 의한 건전성 회복에 적합한 조건으로 판단된다.

인장강도가 낮을수록 1 차  $\gamma'$ 의 모양이 입방형에서 구형화되어 가고, 크기가 증가하며 편차가 커지는 것을 확인하였다. 그러나 일부 조건에서 동일 그룹과 다른 조직들이 관찰되어, 일반적인 미세조직 관찰로 정성적인 기계적 강도의 차이를 예측할 수 있지만, 모재부와 용접부가 있는 이중재의 경우 이러한 예측이 어긋날 수 있음을 보여준다.

## 후 기

이 논문은 전력산업연구개발사업과 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- Bradley, E. F., "Superalloy - A technical guide," ASM International, pp. 18-20, 1998.
- Daleo, J. A., Ellison, K. A. and Woodford, D. A., "Application of stress relaxation testing metallurgical life assessment evaluation of GTD111 alloy turbine buckets," Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 121, Issue 1, pp. 129-137, 1999.
- Ojo, O. A., Richards, N. L. and Chaturvedi, M. C., "Microstructural study of weld fusion zone of TIG welded IN 738LC nickel-based superalloy," Scripta Materialia, Vol. 51, Issue 7, pp. 683-688, 2004.
- Chang, J. -C., Yun, Y. -H., Choi, C. and Kim, J. -C., "Failure analysis of gas turbine buckets," Engineering Failure Analysis, Vol. 10, No. 5, pp. 559-567, 2003.
- Kim, M. -Y., "Development for localization of the gas turbine 1st stage bucket," Journal of KSME, Vol. 46, No. 10, pp. 48-56, 2006.
- Swaminathan, V. P., Cheruvu, N. S., Klein, J. M. and Robinson, W. M., "Microstructure and property assessment of conventionally cast and directionally solidified buckets refurbished after long-term service," Proceedings of the International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Paper No. 98-GT-510, 1998.
- Kim, H. -I., Huh, Y., Park, H. -S., Seok, C. -S. and Kim, M. -Y., "The Microstructural Analysis of the Effect of FIC on Gas Turbine Blade," International Journal of Modern Physics B, Vol. 20, Issues 25-27, pp. 4135-4140, 2006.
- Kang, S. -H., Chung, K. -J. and Kim, D. -E., "New Repair Technologies for 7FA/FA+ Class Stage 1 Buckets," KSME Spring Conference, pp. 2205-2210, 2003.
- Khan, T., Caron, P. and Nakagawa, Y. G., "Mechanical behavior and processing of DS and single crystal superalloy," Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 38, No. 7, pp. 16-19, 1986.
- Cho, C. -Y., "Status and prospects of high temperature materials and parts for gas turbine," Journal of KSME, Vol. 46, No. 10, pp. 34-40, 2006.
- Roth, S. V., Burghammer, M., Gilles, R., Mukherji, D., Rosler, J. and Strunz, P., "Precipitate scanning in Ni-base  $\gamma/\gamma'$ -superalloys," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 200, pp. 255-260, 2003.
- Durand-Charre, M., "The microstructure of superalloys," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 67-82, 1997.
- Tien, J. K. and Caulfield, T., "Superalloys, supercomposites and superceramics," Academic Press, pp. 183-213, 1989.
- Kim, H. I., "A Study on the Integrity Recovery of Nickel-based Superalloy for Gas Turbine Blade," Dept. of Mechanical Design, Doctoral thesis, Sungkyunkwan University, 2008.