

# 가스터빈 1단 블레이드의 GMAW와 Laser cladding 용접특성 평가

\*김형익<sup>1</sup>, 박홍선<sup>1</sup>, 양성호<sup>2</sup>, 김문영<sup>2</sup>, 석창성<sup>3</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 대학원 기계공학부, <sup>2</sup>한전기공 G/T정비기술센터, <sup>3</sup>성균관대학교 기계공학부

## Welding Characteristic Evaluation of GMAW and Laser Cladding for G/T 1st Blade

\*H. I. Kim<sup>1</sup>, H. S. Park<sup>1</sup>, S. H. Yang<sup>2</sup>, M. Y. Kim<sup>2</sup>, C. S. Seok<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Mech. Eng., Graduate school, Sungkyunkwan Univ., <sup>2</sup> KPS Gas Turbine Service Center, <sup>3</sup> Dept. of Mech. Eng., Sungkyunkwan Univ.

Key words : Gas Turbine, Blade, Gas Metal Arc Welding(GMAW), Laser cladding

### 1. 서 론

산업 발달에 따른 경제성장과 생활수준의 향상으로 전력에 대한 수요가 꾸준히 증가함에 따라, 원활한 전력의 공급을 위하여 발전설비 용량도 증가되는 추세이다. 2003년 기준으로 원자력발전설비의 비중이 28%로 석탄에 의한 화력발전과 함께 많은 비중을 차지하고 있지만, 사고 발생의 위험성과 방사성 폐기물 처리 문제 등으로 인해 건설계획에 어려움이 있는 실정이다.<sup>1</sup> 하지만, LNG를 이용하는 가스터빈 발전은 터빈의 폐열을 이용한 복합 화력발전과 열교환기를 이용하여 만든 온수를 대형 건물이나 지역난방으로 공급하는 열병합발전으로 발전하면서 비중을 넓혀가고 있다.

이러한 가스터빈의 효율 향상을 위해서 터빈부의 1단 블레이드 유입온도를 초고온화시켜 1,300℃ 이상으로까지 상승시키고 있다. 가스터빈의 블레이드는 고온에서 장시간 사용함에 따라 모재가 손상을 받기 때문에 모재의 손상을 방지하기 위하여 제작사에서 권고하는 등가운전시간(EOH=약 24,000시간) 후에는 재생 정비를 수행하여 부품의 재질을 복원하여 재사용하게 된다. 또한 1주기 운전 후에는 비파괴 검사, 재질분석을 통한 수명진단을 거쳐 재사용이나 폐기(scrap) 처리를 하게 된다.<sup>2</sup>

1주기 운전 후, 부품의 건전성을 회복하기 위한 재생 복원공정(클리닝, 스트리핑, 용체화 열처리, 결함제거, 비파괴 검사, 용접 및 가공, 복원열처리, 코팅)중에서 가장 중요한 재질 및 형상복원공정의 경우, 국내에서는 1주기 운전 후 손상된 블레이드 팁(Tip) 부분을 제거한 후에 육성용접 정비하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 현재 적용되고 있는 수동용접방법인 GMAW(Gas Metal Arc Welding)과 연구개발이 진행되고 있는 자동용접방법인 Laser Cladding 방법에 대한 기계적 물성을 비교 분석하였다. 발전용 가스터빈의 1단 블레이드의 소재로 DS(Directionally Solidified) 조직과 더불어 single crystal 조직까지 개발하고 있으나, 항공용에 비해 상대적으로 크기가 큰 발전용 가스터빈 블레이드의 경우에는 아직까지 제작이 어렵고, 재생 복원 공정이 확립되지 않아 적용도가 낮다.<sup>3</sup> 따라서 본 연구에서는 발전용 가스터빈의 1단 블레이드의 소재로 사용되고 있는 GTD 111DS 소재를 대상으로 하였다.

### 2. GMAW 수동용접

등가운전시간이 24,512hr인 GTD 111DS 소재에 재질이 다른 두 용접봉인 IN 625(Solid Solution Strengthened Alloy)와 GTD 111(Precipitation Strengthened Alloy)으로 용접하여 연성에 의한 고온특성 및 용접 적용상의 문제점을 검토하였다.

#### 2.1 IN 624 용접봉을 이용한 상온 용접

용접된 블레이드를 모재와 용접부가 모두 포함되도록 시편을 절단한 뒤, 연마, Etching(Oxalic Acid)하여 미세조직을 관찰하였다. Fig. 1은 상온 용접 후에 1,121℃ 열처리를 수행한 모재와 HAZ의 미세조직이다. 모재의 미세조직에서  $\gamma/\gamma'$  공정과 MC 카바이드를 관찰 할 수 있으며, 크기가 큰  $\gamma'$  이 존재하고 있는 것도 확인 할 수 있었다. 또한, HAZ의 미세조직에서 니들상이 석출된 것을 확인 할 수 있었다. 용접 후 열처리를 수행한 후에도

Table 1 Hardness for welded with IN 625(HV<sub>300</sub>)

	1	2	3	Mean Value
HAZ	443.6	457.6	459.8	453.7
Welding	431.2	436.4	444.2	437.3

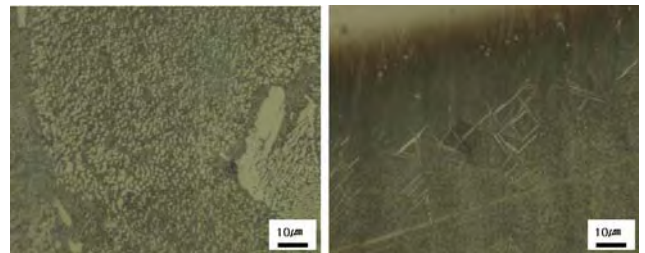


Fig. 1 Base metal and HAZ for welded blade with IN 625 at RT

열영향부가 경도가 가장 높은 것은 모재와 용접부의 경계에 새로운 석출물의 생성으로 인한 미세조직의 변화에 의한 것으로 추측된다.

#### 2.2 GTD 111 용접봉을 이용한 상온 용접

모재부에서  $\gamma/\gamma'$  공정, MC, 크기가 큰  $\gamma'$  등을 확인할 수 있으며, 열영향부에서는 이러한 미세조직이 관찰되지 않았다. 용접부에는  $\gamma/\gamma'$  공정 조직이 관찰되지 않고, MC 카바이드만 관찰이 되었다. 상온 용접 중 8 Pass 만에 균열이 발생하였는데, 이것은 용접부의 응고 수축에 의한 응력을 용접부에서 견디지 못하여 균열이 발생한 것으로 사료된다.

Table 2 Hardness for welded with GTD 111(HV<sub>300</sub>)

	1	2	3	Mean Value
Base metal	424.3	438.2	427.6	430.1
HAZ	450.2	463.5	462.3	458.7
Welding	442.8	452.0	438.4	444.4

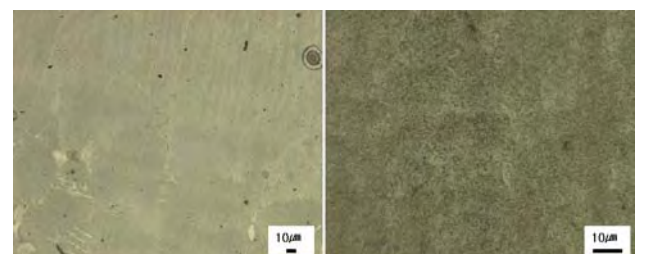


Fig. 2 HAZ and welding for welded blade with GTD 111 at RT

#### 2.3 GTD 111 용접봉을 이용한 900℃ 용접전 가열 용접

용접 후 형광침투 검사 결과에서 균열이 발견되지 않았으며, 모재의 미세조직에서는  $\gamma/\gamma'$  공정, MC, Eta상 등을 관찰할 수 있다. 크기가 크고, 길쭉하게 늘어난 Primary  $\gamma'$  이 관찰되었다. 용접부의 미세조직은 모재에 비하여  $\gamma'$  의 크기가 작았으며,  $\gamma/\gamma'$  공정도 발견되지 않았다. 열영향부에서는 새로운 상이나 석출물은 관찰되지 않았으며, 용접부, 용접부와 모재 사이 경계, 모재에서도 균열이 발견되지 않았다.

Table 3 Hardness for welded with GTD 111(HV<sub>300</sub>)

	1	2	3	Mean Value
Base metal	405.8	400.7	403.2	403.2
HAZ	451.8	449.8	443.9	448.5
Welding	409.2	402.4	438.4	416.7

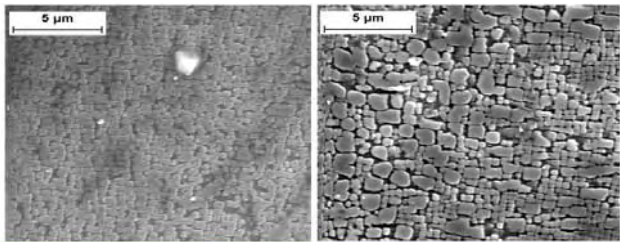


Fig. 3 Welding and HAZ for welded blade with GTD 111 at 900°C

**2.4 GTD 111 용접봉을 이용한 1,100°C 용접진 가열 용접**

용접 후 비파괴 검사인 형광침투 검사를 통하여 균열 발생 여부를 확인하였으나, 균열은 발견되지 않았다. 용접 후 열처리를 수행한 뒤 시편을 절단하여 미세조직을 관찰하였다. 균열은 용접부와 모재에 걸쳐 발생되었다. Fig. 4는 균열 발생 부위와 균열의 단면 미세조직 사진으로서, 균열이 결정입계를 따라 발생한 것을 확인할 수 있다.



Fig. 4 Crack for welded blade with GTD 111 at 1,100°C

**3. Laser cladding 자동용접**

Fig. 5의 왼쪽 그림은 IN 625 파우더를 이용하여 GTD 111DS 모재에 상온에서 클래딩을 실시한 시편의 미세조직 사진으로써 모재와 클래딩부의 경계부에 조금의 다일루션이 보이고 있다. 모재, 모재와 클래딩부의 경계, 클래딩부에 니들 석출상이나 균열이 관찰되지 않았다. Fig. 5의 오른쪽 그림은 IN 939를 이용하여 GTD 111DS 모재에 클래딩을 실시한 시편의 미세조직으로써 육성부위에서 균열이 발생하였다. IN 939는 석출경화형 니켈기 지 초내열합금으로  $\gamma'$  이 주 강화인자이다. IN 939 클래딩 파우더는 Al+Ti의 양이 6%가 넘으므로 용접을 하기가 힘들다. 그러나 IN 738이나 GTD 111의 파우더에 비하여는 클래딩이 쉬운 편이다. 그 이유는  $\gamma'$  의 생성속도를 줄이는 Cr의 양이 IN 738이나 GTD 111에 비하여 많기 때문이다.<sup>4</sup> 클래딩시 용융된 파우더가 다시 응고하면서 수축이 발생하고 이 수축에 의하여 용접부나 모재에 균열이 발생하게 된다. 그리고 용접 후 열처리 시 주 강화인자인  $\gamma'$  이 성장하면서 응력을 발생시켜 결정입계를 따라 균열을 발생시킨다고 알려져 있다.

클래딩 후 인장시편을 제작하여 인장시험 후 시편의 모습을



Fig. 5 Laser cladding with IN 625 powder(L) and IN 939 powder(R) 634

Table 4 Tensile Test results of Laser cladding (MPa)

Cladding Powder	Test Temp.	Yield Strength	Tensile Strength
IN 939	25°C	843	843
IN 625	25°C	450	864
IN 625	760°C	320	433

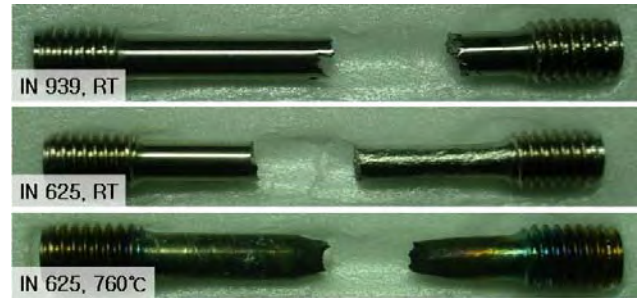


Fig. 6 Tensile Test results of Laser cladding

Fig. 6에 나타내었다. 사진의 왼쪽은 모재부이며, 오른쪽은 Inconel 파우더를 클래딩한 부분이다. 상온 시험임에도 불구하고, IN 625는 클래딩부가 모재에 비해 많은 연신 변형이 나타나는 것을 볼 수 있고, 760°C 시험에서는 necking부가 클래딩부에 심하게 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한, GMAW 수동용접시 표준 열처리에서의 760°C 인장강도에 비해 적은 값을 나타내어 이에 따른 열처리 조건이나 파우더 등의 기술 개발이 필요하다.

**4. 결론**

IN 625를 이용한 상온 용접에서는 특별한 균열이 발생하지 않았으나, 열처리 후 열영향부에 니들상이 석출된 것이 관찰되었다. 또한, 용접중 발생할 수 있는 Hot Cracking이나, 용접 후 열처리 도중에 발생할 수 있는 Strain Aging Cracking은 관찰되지 않았다. IN 625의 자체 연성으로 용접부의 응고 수축을 견딜 수 있는 것으로 판단된다. GTD 111을 이용한 상온 용접은 용접 진행중 균열이 발생하였다. 용접부의 응고 수축에 의한 응력을 용접부가 견디지 못하고 균열이 발생한 것으로 판단된다. GTD 111 용접봉을 이용한 용접은 모재의 성질과 같은 용접부를 만들 수 있기 때문에 가장 이상적인 용접봉으로 여겨진다. 하지만 상온 용접에서는 용접중 균열이 발생되기 때문에 모재를 가열하여 용접중 발생하는 용접부의 수축응력을 견딜 수 있도록 모재에 연성을 부여하여야 한다. 900°C로 모재를 가열한 용접에서는 모재와 용접부, 열영향부에서 결함이 발견되지 않았다.

상온에서의 Laser cladding 자동용접은 파우더 특성에 따른 결합 발생에 대한 연구와 고온 물성 향상에 대한 연구가 필요하다.

**후기**

이 논문은 전력산업연구개발사업과 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

**참고문헌**

1. 산업자원부: 제2차 전력수급기본계획, 산업자원부 전력산업과, 2004. 12.
2. 하정수 외: 고온고압설비용 정밀 수명진단 및 통합관리기술, 전력연구원, 2002. 11.
3. M. Konter, M. Thumann, "Materials and manufacturing of advanced industrial gas turbine components", Journal of Materials Technology, 117, 386-390, 2001
4. Z.Mazur, A.LunaRamirez, J.A. Juanrez-Islas, A. Compos-AmezCua, " Failure Analysis of a Gas Turbine Blade Made of Inconel 738LC alloy", Engineering Failure Analysis, 12, 3 474-486, 2005.