

# 니켈기 초합금 레이저 용접부의 미세조직과 기계적 특성 Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Ni-base Superalloy

최 철

한국전력공사 전력연구원 신기술센터

**ABSTRACT** Flat specimens of polycrystal Ni-base superalloy with U-shape notch on both sides were laser clad by injection of IN738LC powder onto surface. The quality of cladding was investigated by microstructural analysis and high temperature tension test, creep test at 950°C. Effects of heat treatment and the angle between the tension axis and the direction of weldment were also investigated.

## 1. 서 론

최근 발전용 가스터빈의 열효율 향상을 목적으로 터빈입구온도가 꾸준히 상승함에 따라 재료의 열화가 가속화되고 부품의 수명이 단축되고 있다. 따라서 극한의 고온·고압환경에 적합한 새로운 고온재료, 내열코팅 및 냉각기술이 개발, 적용되고 있으나, 열악한 운전환경으로 인해 부품의 사용수명은 뚜렷이 연장되지 못하고 있다. 특히 최근 현장에 적용되고 있는 1300°C급 일방향응고 및 단결정 제품은 기존의 1100°C급 다결정 제품보다 훨씬 고가(高價)임에도 불구하고 사용 수명이 비교적 짧고 폐기 비율이 높아, 이로 인한 발전원가 상승이 우려되고 있다. 선진외국에서는 블레이드 팁과 같은 저온·저응력부를 중심으로 용접 재생공정이 일반화되어 있으나, 국내와 다른 운전조건 때문에 부품의 손상 부위 및 형태가 다를 뿐만 아니라, 타국(他國), 타업체(他業體)로의 정비기술 이전 또는 공개를 기피하기 때문에 관련기술의 국내 자체개발이 불가피하다.

현재 발전용 가스터빈 부품의 재생에는 수동 방식의 TIG 용접이 가장 많이 사용되고 있으나, 이것은 저온·저응력부의 재생수리에만 국한되고 고온·고응력부에의 적용이나 고품질의 용접부를 요구하는 경우에는 플라즈마 이행아크 용접(PTAW), 레이저빔 용접(LBW) 또는 전자빔 용접(EBW)과 같은 고에너지 밀도 용접공정이 단

독 혹은 복합적으로 적용되고 있다. 플라즈마 용접은 TIG에 비해 저입열 방식이고 장비도 비교적 저렴하여 대체 기술로 인정받고 있으나 가스터빈 블레이드 재료로 사용되는 석출경화형 니켈기 초합금의 용접에 있어서 많은 결함을 유발함으로써 고온·고응력부에 대한 재생기술로 부적합한 것으로 판단되고 있다. 이에 본 연구에서는 레이저 클래딩 방식을 이용하여 1100°C급 가스터빈 재료인 다결정 니켈기 초합금의 손상부 재생을 시도하고 재생부의 조직과 물성을 평가함으로써 고신뢰도 재생기술로서의 실제 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용한 재료는 IN738LC 및 GTD111 석출경화형 니켈기 초합금으로 진공 정밀주조에 의해 판상시편 형태로 제작하였다. IN738LC 일부를 제외한 모든 시편은 용접 전에 조직 연화의 목적으로 용체화 처리를 수행하였고, 용접 후에는 잔류응력 제거 및 조직제어의 목적으로 후열처리를 실시하였다. 반면에 일부 IN738LC 시편은 2중 V'조직을 가지는 완전 열처리 조건 그대로 용접재생한 후, 별도의 후열처리 과정 없이 바로 시편 가공하여 그 물성을 비교 평가하였다.

용접은 두께 5mm의 판상시편에 깊이 2mm의

U형 인공노치를 0°, 45°, 90° 방향으로 가공한 후, 3.5kW CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 노치의 앞뒷면을 번갈아가면서 IN738LC 분말로 육성용접하였다. 용접부의 건전성을 확인하기 위하여 광학현미경 및 SEM으로 조직을 관찰하였으며, 950°C에서 크리프와 고온인장 실험을 실시함으로써 고온물성을 모재와 비교하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 미세조직 관찰

##### 3.1.1 완전열처리 시편

IN625와 같은 고용강화형 합금과 달리 IN738LC 및 GTD111과 같은 석출경화형 니켈기 초합금을 용접함에 있어서 연성의 부족, 구속 또는 잔류응력에 의해 용접 중 혹은 후열처리 과정에서 용접결합이 발생하기 쉽다. 따라서 TIG 및 플라즈마 용접과 같은 대부분의 용접 재생작업에서는 용접 전에 재료 연화의 목적으로 용체화처리를, 용접 후에는 잔류 응력 제거를 목적으로 후열처리를 실시한다. 그러나 고밀도 에너지 방식의 레이저 용접을 사용하면 별도의 용체화처리 없이도 건전한 용접부를 얻을 수 있다. 다만 용접부가 2중 V'상의 열처리 조직을 갖지 않으므로 용접부와 모재 사이에 조직의 불연속성이 발생하고, 용융선(Fusion Line) 상부나 비드와 비드 사이의 계면 또는 교차 지점에서 기공이 관찰된다. 용융선 직하의 모재에서도 2중 V'상 조직이 나타남으로써 HAZ가 매우 좁은 특성을 보인다.

##### 3.1.2 용체화처리 시편

조직 연화된 용체화 시편을 대상으로 레이저 클래딩(Cladding)한 후, 잔류응력 제거 및 물성회복을 위해 후열처리를 실시하였다. 모재에 비해 용접부의 결정립이 매우 미세하고 상대적으로 많은 입계 면적을 가지는 것으로 관찰되었다(Fig. 1). 또한 완전열처리 시편과 달리 용접부에서 상당한 용접균열이 발견되었다. 이것은 후열처리 과정에서 도입된 것으로 생각되며, 거의 모든 균열이 입계를 따라 사슬 형상으로 석출한 Ti 및 Mo-rich의 MC 탄화물을 따라 발달하였다. 미시적으로는 용접부와 모재 모두에서 동일한 형상의 V'상이 부위에 관계없이 균일하게 관찰되었다.

#### 3.2 경도 시험

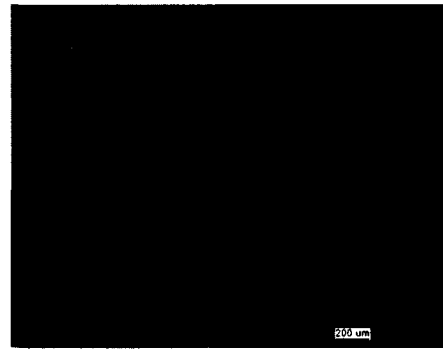


Fig. 1 Cross-section of IN738LC laser-cladding layer.

한쪽 용접부에서 모재를 가로질러 반대편 용접부까지 깊이 방향으로 경도값을 측정하였다. 전체적으로 경도값은 용접부와 모재 사이에 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 다만 후열처리를 수행하지 않은 완전열처리 시편에서는 모재가 용접부보다 다소 높은 경도값을 보인 반면, 후열처리한 시편에서는 모재부분이 용접부에 비해 약간 낮게 나타났다.

#### 3.3 고온인장 시험

용접시편의 고온인장 특성을 표준시편과 비교하였다. Fig. 2에서 GTD111 및 IN738LC 표준시편은 950°C에서 각각 723MPa, 635MPa의 인장강도와 16.1%, 15.4%의 평균 연신율을 보인다.

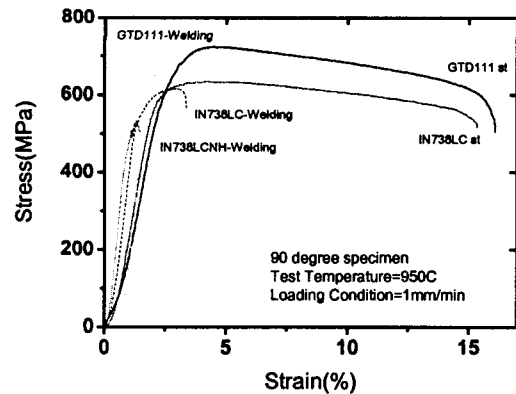


Fig. 2 Variation of tensile properties at 950°C as a function of specimen condition.

이에 반하여 용접시편은 표준시편과 비교하여 97% 이상의 높은 인장강도값을 보였으나, 인장연신율(3.36~3.76%)은 모재의 22~23%에 불과하였다. 완전열처리 시편은 연신율(1.5%)뿐만 아니라 항복 및 인장강도(442.7MPa/533.8MPa)도 표준시편과 비교하여 크게 낮게 나타났다.

한편, 동일 재료에 대하여 인장하중축에 대한 용접부 방향의 영향을 조사한 결과, 대체로 45도 시편이 가장 열악한 강도 및 연신율을 보였으며, 용접부의 방향이 인장축과 평행인 0도 시편에서 가장 우수한 물성을 보였다. 이것은 시편 단면적에 있어서 45도 시편의 용접부 면적이 가장 넓기 때문으로 사료된다. 이러한 경향은 인장 변형 및 파괴가 모재보다는 용접부에서 우선적으로 개시되어 파단됨을 의미하는 것으로 용접부의 건전성을 충분히 확보하지 못한 것으로 판단된다(Fig. 3).

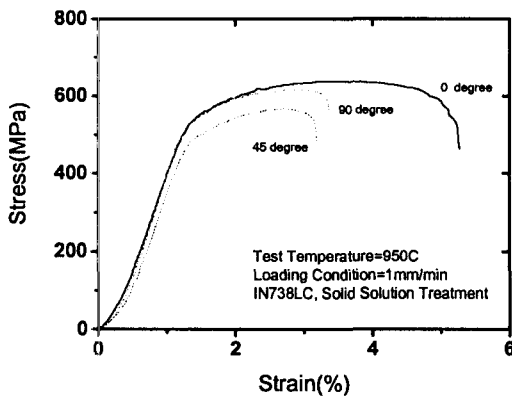


Fig. 3 Variation of tensile properties at 950°C as a function of the angle between tension axis and the direction of weldment.

3.4 크리프 시험  
3.4.1 시험 결과

용접시편의 크리프 수명과 연신율을 모재인 GTD111 및 IN738LC 표준시편과 비교한 결과, 크리프 수명은 표준시편 대비 15~19% 수준으로 크게 낮은 값을 보인 반면, 연신율은 68% 수준으로 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 4). 크리프 변형속도는 표준시편 및 용접시편 모두 IN738LC에서 빠르게 나타나 GTD111보다 짧은 크리프 수명을 보였으며, 각 재료별 용접시편은 모재에 비해 3~4배 빠른 크리프 변형속도를 나타냈다. 완전열처리 시편은 용체화처리 시편에 비해 짧은 크리프 수명을 보였으나 연신율은 오히려 높게 나타났다.

4. 결 론

발전용 가스터빈 블레이드 재료인 IN738LC 및 GTD111 니켈기 초합금에 대하여 레이저에 의한 재생용접 가능성을 확인하기 위하여 IN738LC 분

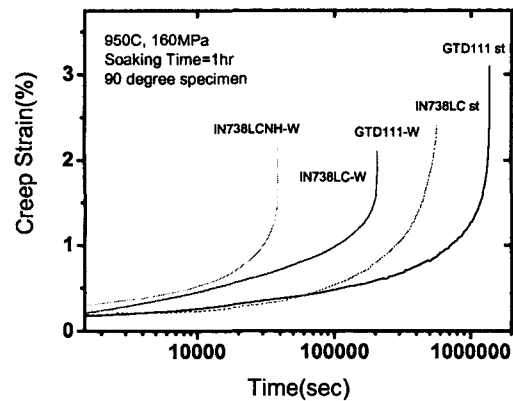


Fig. 4 Variation of creep properties at 950°C as a function of specimen condition.

말을 이용하여 클래딩한 후, 조직관찰과 물성평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CO<sub>2</sub> 레이저에 의하여 완전열처리 조건에서도 용접균열의 발생 없이 클래딩이 가능하였다. 다만 용접부가 2중 V'상을 가지지 않으므로 별도의 후열처리 공정이 필요한 것으로 판단된다.
- 2) 용접재생 시편은 모재 대비 97% 이상의 고온인장 강도를 가지지만 후열처리 과정에서 입계탄화물을 따라 용접균열이 발달함으로써, 모재 대비 연신율은 22~23%, 크리프 수명은 15~19% 수준으로 매우 열악한 값을 나타냈다.
- 3) 용접재생 시편이 열악한 물성을 가지는 주원인은 부적절한 후열처리 조건에서 비롯된 것으로 사료되며, 후열처리 과정에서의 용체화 처리 온도는 재생 열처리 조건과 상이하게 조절해야 할 것으로 판단된다.
- 4) 상기의 열악한 물성에도 불구하고 석출경화형 니켈기 초합금의 클래딩에 있어서 레이저 용접공정이 타 재생공정과 비교하여 가장 신뢰도 높은 재생부를 제공하며, 양산할 경우 경제성도 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. D.W. Gandy : Status of Weld Repair Technology for Nickel-Based Superalloy Gas Turbine Blading, EPRI Final Report TR-108272, 1998
2. V.P. Swaminathan, P. Lowden : Gas Turbine Blade Life Assessment and Repair Guide, EPRI Final Report GS-6544, 1989