

# IN738LC 초내열합금의 레이저 육성용접 특성

## Laser cladding characteristics of IN738LC superalloy

한국중공업(주) 용접기술연구소 변진귀, 한원진, 박광수, 김우성, 배강국

### I. 서론

고온환경에서 사용되는 가스터빈 블레이드는 운전 중 여러가지 원인에 의해서 결함이 발생하는 데, 이러한 결함이 발생하였을 시에는 교체 또는 보수하여 사용한다. 블레이드는 니켈 혹은 코발트기지의 초내열합금으로서 단결정(Single Crystal, SC), 일방향 응고 주조품(Directionally Solidified Casting, DS) 및 정밀주조품으로  $\gamma'$  석출물, 산화물 등에 의해서 강화되어 있어 고온에서 보수 용접이 이루어지면 재료의 기계적인 특성을 약화시킬 수 있다. 특히 항공기용 가스터빈이나 고효율의 발전용 가스터빈의 1 단 블레이드의 경우에는 크립강도를 개선한 DS 부품이나 SC 부품을 사용하고 있으며, 이러한 재료에 대해서는 미세균열의 발생에 의한 크립강도의 저하를 방지 하기 위해서 용접 시 입열량에 대한 정밀한 제어가 필요하다.

따라서 본 연구는 Ni기 초내열합금인 IN738LC 합금의 레이저 육성용접 특성과 용접조건에 따른 용접부 균열 발생의 영향을 조사하였으며, 또한 용접부에 대한 건전성 평가를 실시하여 최적 용접조건을 확립하고자 하였다.

### II. 실험방법

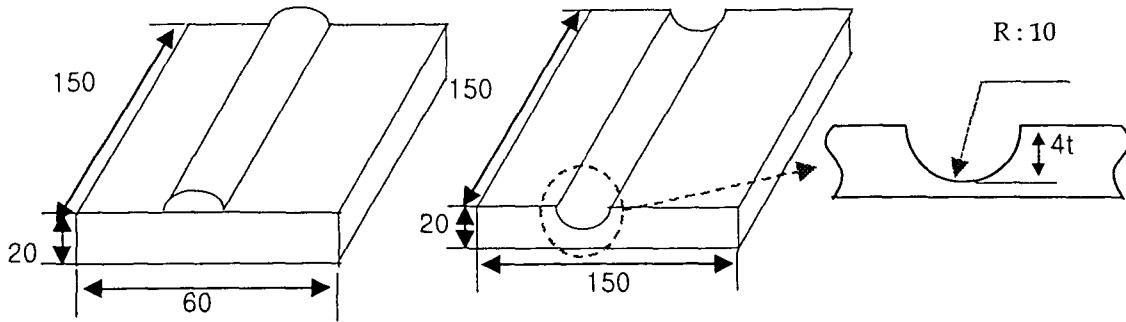
본 실험에서는 2kW 펄스형 Nd:YAG 레이저(IQL 사)를 사용하고, 동축형 육성용접용 헤드를 자체 설계 및 제작하여 실험하였다. 실험에 사용된 모재로는 IN738LC(Table 1. 참조)를 사용하였으며, 용가재로는 모재보다 연성이 크고 고용경화형 합금인 IN625 파우더(Table 2. 참조)를 용가재로 사용하여 레이저의 출력, 펄스폭 및 주파수, 용접속도, 파우더 송급량, 노즐과 시편 표면사이의 거리 등 다양한 변수들에 대해서 Fig. 1 과 같은 형상의 시편에 대해 Bead on Plate 및 Groove Plate 에서 용접시험을 수행하고, 그 결과 양호한 조건에 대해 Mock-up 시험을 하였다.

Table 1. 모재의 화학조성

성분	C	Fe	Cr	Ti	W	Mn	Ta	Nb	Al	Zr
Wt %	0.10	0.06	15.85	3.53	2.49	0.01	1.88	0.89	3.66	0.024
성분	B	Co	Cu	Mo	Si	V	S	P	Ni	
Wt %	0.012	8.27	0.01	1.84	0.01	0.01	0.002	0.002	Bal	

Table 2. 용가재의 화학조성

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Co	Fe
0.025	0.4	0.34	0.007	0.008	21.4	60.4	8.9	0.01	3.52	0.04	4.6



(a) Bead on Plate 시편

(b) Groove Plate 시편

Fig. 1 시험편 형상

### III. 실험결과

#### (1) Bead on Plate 시험 결과

Photo 1.과 Photo 2.는 Bead on Plate 에서 육성용접을 실시한 결과 양호한 조건을 나타낸 것에 대한 비드 형상, 단면형상 및 단면 조직사진을 나타낸 것이며, 이때의 용접조건은 레이저 출력 500W, 펄스폭 6ms, 주파수 30Hz, 용접속도 500mm/min, 파우더 공급량 10g/min 일때 용착금속 및 HAZ 에서 균열이 발생하지 않은 양호한 조건으로 나타났다. Photo 2.의 단면 조직사진에서 HAZ 부에는 다수의  $\gamma'$  및 탄화물이 용해되는 양상을 나타내었다.



(a) 비드 형상



(b) 단면형상

Photo 1. Bead on Plate 육성용접 결과 비드 형상 및 단면 형상

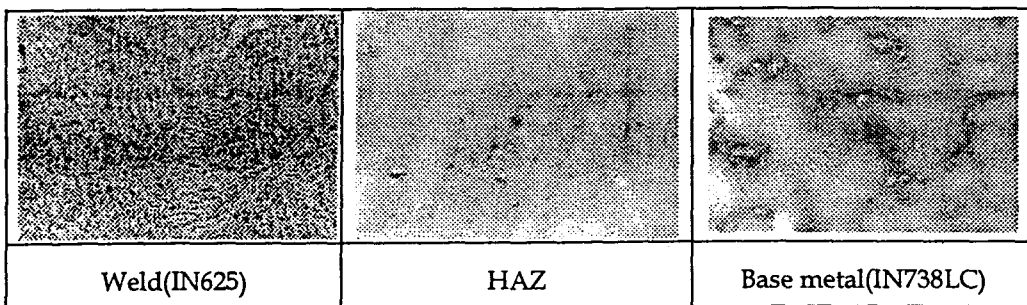


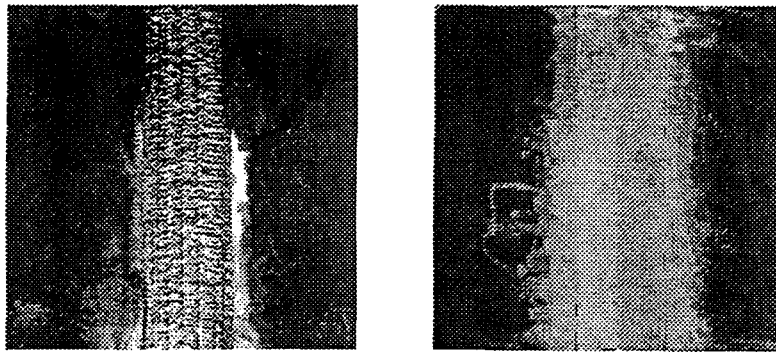
Photo 2. Bead on Plate 육성용접 결과 사용한 레이저 용접부 미세조직  
(500W, 100mm/min, 10g/min, as-weld)

#### (2) Groove Plate 시험 결과

Table 3.은 Groove Plate 육성용접에서 액체탐상검사 결과 결함이 없는 조건을 표로 나타낸 것이고, Photo 3.은 Table 3.의 조건 G6-1에 대해 용접후 및 액체탐상검사 결과를 나타낸 것이다.

Table 3. Groove Plate 시험 조건

No	레이저출력(W)	펄스폭(ms)	주파수(Hz)	용접속도 (mm/min)	파우더 공급속도 (g/min)
G6-1	500	6	30	500	10
G6-2	600	6	30	500	10
G6-3	500	6	30	200	10



(a) 500W, 500mm/min (as-weld) (b) 500W, 500mm/min(PT)

Photo 3. Groove plate 의 레이저 용접시험후 액체침투 검사 결과

(3) 인장시험 결과

Fig. 2 는 Table 3.에 나타낸 조건으로 용접된 시험편에 대해 상온 및 고온(650°C) 인장시험 결과를 나타낸것이다. 시험에 이용된 인장시험편은 ASTM A 370 2.5mm small-size 에 따라 제작하였으며, 인장시험 조건은 Strain rate : 0.04mm/s 으로 각 조건당 2 회 시험하여 평균 값을 산출하였다. Fig. 2 에서 500W, 200mm/min 의 레이저 용접 시험조건에서 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었으며 이때의 인장강도는 IN738LC 모재에 비교하여서는 상온에서 약 67%, 650°C에서는 약 60% 정도의 인장강도 값을 나타내었으며, IN625 Bar 와 비교했을 경우에는 상온에서는 약 76%, 650°C에서는 약 79% 정도의 인장강도 값을 나타내었다.

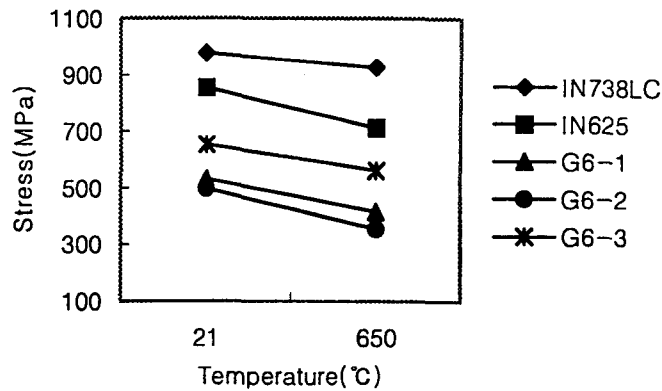


Fig. 2 레이저 육성 용접부 인장시험 결과

**(4) Mock-up 시험**

Mock-up 시험은 실제 복합화력 발전소에서 운전 후 결함이 발생한 1 단 블레이드를 입수하여 실시하였다. 시험에 사용된 블레이드는 한화에너지의 WH501F 모델 1 단 블레이드로서 소재는 U520 의 다결정 정밀 주조품이다. 시험을 위해서 블레이드의 Tip 과 Edge 부위를 인위적으로 절단하여 Groove Plate 용접 시험을 통해 가장 양호한 용접조건을 이용해 육성 용접 시험에 수행하였다.

Photo 4.는 파손 블레이드에 대한 레이저 육성용접 보수 Mock-up 시험 장면을 나타낸 것이고, Photo 5.는 파손 블레이드 레이저 용접 보수 Mock-Up 시험후 가공전 블레이드의 형상을 나타낸 것이다. Photo 5.에서 볼 수 있는 바와 같이 Edge 및 Tip 형상을 따라서 정밀한 용접이 가능하기 때문에 약간의 후 가공 만으로도 실 제품화 할 수 있으며 보수 용접시 냉각을 막는 비율도 PTA 용접에 비해서 대단히 낮아 EDM 홀 가공 시간도 줄일 수 있다.

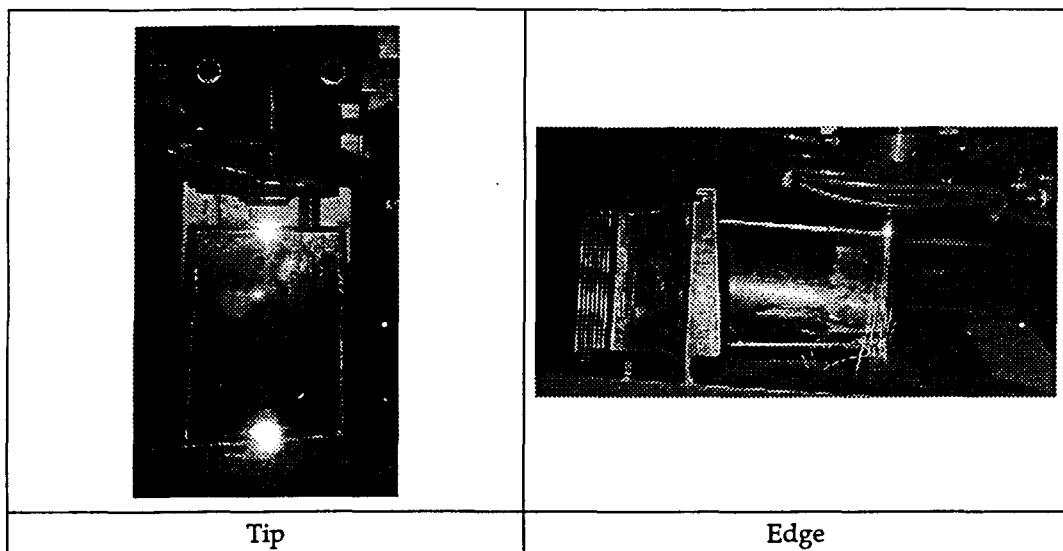


사진 3. 파손 블레이드 의 Tip 및 Edge 의 레이저 용접 보수 Mock-up 시험 장면

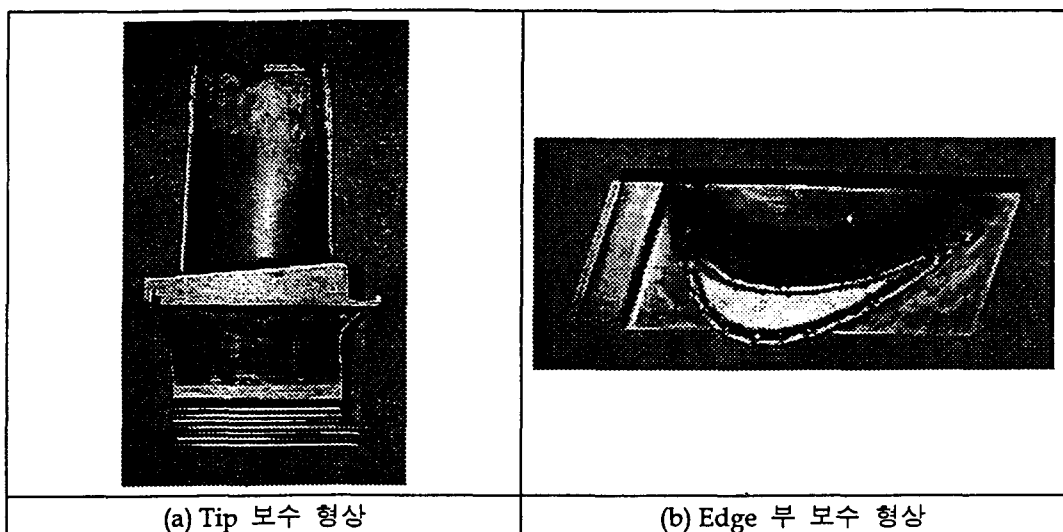


사진 4. 파손 블레이드 레이저 용접 보수 Mock-Up 결과

#### IV. 결론

본 연구에서는 1100℃ 이상급 가스터빈 1 단 블레이드 소재로 널리 사용되고 있는 IN738LC 정밀 주조품에 대한 용접 특성을 조사하고 실제 가스터빈 발전소에서 사용된 블레이드에 대해서 레이저 육성용접 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) IN738LC Plate 에 대한 IN625 파우더 용가재 레이저 용접 시험결과 500W, 200mm/min 의 레이저 용접 시험조건에서 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 이때의 인장강도는 IN738LC 모재와 비교하여서 상온에서 약 67%인 654MPa, 650℃에서는 560MPa 의 인장강도 값을 나타내었다.
- (2) 용가재로 IN625 파우더를 사용하여 IN738LC Plate 레이저용접 시험에서 양호한 조건으로 구해진 500W, 200mm/min, 10g/min 의 조건에서 Mock-Up 시험을 하였다. 레이저 용접 보수 Mock-Up 시험을 통해 레이저 용접을 블레이드 보수 용접에 이용할 경우 Edge 및 Tip 형상을 따라서 정밀한 용접이 가능하기 때문에 약간의 후 가공 만으로도 실 제품화 할 수 있고 보수 용접시 냉각홀을 막는 비율도 PTA 용접에 비해서 대단히 낮아 EDM 홀 가공 시간도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

#### V. 참고문헌

- (1) Superalloy source book, Matthew J. Donachie, JR., ASM, 1984
- (2) Superalloys A Technical Guide, Elihu F. Bradley, ASM, 1988
- (3) Superalloys II, John Wiley & Sons, 1987
- (4) "Current state of hot section turbine repair and recovery technology in the western world" Tokyo international gas turbine congress, 1983, p 749
- (5) "High temperature electron beam welding of the nickel-base superalloy IN-738LC", Welding Research, Nov., 1982, p.343
- (6) "Improving the weldability of Ni-base superalloy 713C", Welding research supplement, Vov., 1982, p.348
- (7) "Repair of air cooled turbine vanes of high performance aircraft engines problems and experience", Materials Science and Technology, September, 1985, p.719
- (8) "Evaluation of the weldability of the gas turbine blade materials IN 738LC and Rene 80", Proceedings from materials solutions '97 on joining and repair of gas turbine components 15-18, September, 1997, p.7