

Ni 기 초내열합금의 용접균열 발생에 미치는 PTA 용접 조건의 영향

Effects of the plasma transferred arc welding conditions on the formation of the weld hot cracking in Ni base superalloy

*이경운, 한원진, 김우성, 배강국, 송근호

한국중공업(주) 기술연구원 용접기술연구실, 경남 창원

1. 서론

고온환경에서 사용되는 가스터빈 블레이드는 운전 중 여러가지 원인에 의해서 결함이 발생하는 데, 이러한 결함이 발생하였을 시에는 교체 또는 보수하여 사용하여야 한다. 또한 이들의 재질은 단결정 (Single Crystal, 이하 SC), 일방향 응고 주조품(Directionally Solidified Casting, 이하 DS) 및 정밀주조 품의 니켈 혹은 코발트기지의 초내열합금으로써 γ' 석출물, 산화물 등에 의해서 강화되어 있어서 만약 보수과정이 고온에서 이루어지면 재료의 기계적인 특성을 약화시킬 수 있다. 특히 항공기 가스터빈이나 보다 고효율의 발전용 가스터빈의 1 단 블레이드의 경우에는 크립강도를 개선한 DS 부품이나 SC 부품을 사용하고 있으며, 이러한 재료에 대해서는 미세균열의 발생으로 인한 크립강도를 저하시키지 않게 하기 위해서 용접시 입열량에 대한 정밀한 제어가 필요하다.

따라서 본 연구는 Ni 기 초내열합금인 IN738LC 합금의 Plasma Transferred Arc(PTA) 용접 특성과 용접조건에 따른 용접부 균열 발생의 영향을 조사하였으며, 또한 용접부에 대한 건전성 평가를 실시 하여 최적 용접조건을 확립하고자 하였다.

2. 실험조건

Table 1 은 시험에 사용된 모재와 용가재 사양을 명시한 것이다. 모재는 IN738LC 합금으로서 가스터빈 블레이드와 동일한 진공 정밀주조 방법으로 제작하였으며, 용가재는 용착금속 및 HAZ 에 균열을 유발하는 Al 과 Ti 가 제거된 IN 625 파우더를 사용해서 가스터빈 소재로 널리 사용되는 IN738LC 합금에 대해서 PTA 용접 시험을 실시하였다. 일반적인 아크용접과 비교시 PTA 용접은 고밀도 에너지의 플라즈마 아크와 파우더 용가재를 사용하기 때문에 입열제어가 용이할 뿐만 아니라 저입열 용접이 가능하다. Photo. 1 은 당사가 보유한 PTA 용접 장치와 시험 장면이다. 본 시험에서는 Bead on plate 및 Groove plate 에 대하여 용접조건(전압, 전류, 파우더의 송급량 및 송급 속도 등) 변화에 따른 시험을 실시하고 용접부 건전성을 분석하였으며, 이를 토대로 실제 가스터빈 블레이드에 보수 용접을 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 예비 실험

Table 2 는 최적 용접변수를 설정하기 위한 Bead on Plate 와 Groove Plate 용접 조건을 나타낸다. Bead on Plate 용접조건에 대해서 IN738LC Plate 에 PTA 용접시험한 결과 용접 전류 75A~120A, 용접 속도 50~80mm/min, 파우더 송급량 4~10g/min 의 용접조건이 용착금속 및 HAZ 에서 균열이 발생하지 않은 양호한 조건으로 나타났다. 고전류 용접조건에서는 HAZ 및 용착금속부에서 균열이 발견되었

으며 전류가 너무 낮을 경우에는 파우더의 용융이 제대로 이루어지지 못하고 또한 전류가 증가하고 용접속도가 감소할수록 용입깊이는 증가하였으며 아울러서 균열도 쉽게 발생하였다.

또한 Table. 2 의 시험조건으로 Groove plate 용접을 수행한 Groove plate 의 형상은 Fig. 1 과 같으며 시험결과 대부분 고전류 용접조건에서 결함(균열)이 확인되었지만, 결함의 분포 밀도와 수는 75~100A, 50~75mm/min, 4~10g/min 에서 가장 작게 나타났다.

3.2 Mock-up 시험

상기 Groove 용접에서 얻어진 최적 용접조건을 이용하여 실제 복합화력 발전소에서 운전된 1 단 블레이드에 대해 PTA Mock-up 시험을 수행하였다. 용접시험은 위의 시험과 동일하게 당사가 보유한 PTA System 을 이용하였다. 시험에 사용된 블레이드는 한화에너지의 WH501F 모델 1 단 블레이드로서 소재는 U520 의 다결정 정밀 주조품이다. 블레이드의 Tip 과 Edge 부위를 Photo 5 와 같이 인위적으로 절단하여 PTA 용접 시험을 통해 가장 양호한 용접조건으로 판명된 75A, 50mm/min 를 이용해 육성 용접 시험을 수행하였다.

Photo. 4 는 Mock-up 시험 장면을 나타낸다. Mock-up 시험 시 블레이드의 둘레로 보강대를 가접한 후 Working Table 의 척에 블레이드를 물려서 고정 한 후 용접 시험하였다. 용접 시험 결과 용접 후의 블레이드 모습은 Edge 부 및 Tip 부 모두 표면은 비교적 거친 모습이며 냉각홀 또한 2~3mm 정도 막히는 결과를 나타내었다. 따라서 PTA 용접 후에는 반드시 표면 그라인딩 및 EDM 가공이 필요한 것으로 사료된다.

3.3 침투 탐상 검사 및 조직검사

Mock-up 시편에 대해 PTA 용접을 실시한 후 용접부에서의 결함 발생 유, 무를 확인하기 위한 침투 탐상 검사(PT, RT)를 실시하였는데, 어떠한 결함도 발생되지 않았다.

Photo. 2~3 은 예비 실험에서 수행한 Bead on Plate 와 Groove Plate 용접부에서의 Macro 조직 사진 및 형상을 나타낸다.

3.4 인장강도 시험

Groove plate 용접시험 후 상온 및 650℃에서 인장시험을 수행하였다. 인장시험편은 ASTM A 370 2.5mm small-size 시편을 이용하였고 인장시험 조건은 Strain rate : 0.04mm/s 으로 각 조건 당 2 회 이상 시험하여 평균값을 산출하였다. 인장시험결과 IN738LC 모재와 비교한 결과 상온에서 약 60%, 650℃에서는 약 35% 정도의 인장강도 값을 나타내었으며 IN625 소재와 비교했을 경우에는 상온에서는 약 70%, 650℃에서는 약 45% 정도의 인장강도 값을 나타내었다.

4. 결 론

가스터빈 블레이드와 같은 석출강화형 Ni 기 초내열합금은 균열 감수성이 매우 높기 때문에 종래의 용접 방법인 GTAW Process 등으로는 건전한 용접부를 얻기가 힘든 것으로 알려져 있다. 따라서 해외 선진업체에서는 Powder 를 이용한 PTAW 혹은 LBW Process 가 확대 적용되고 있다.

본 연구에서와 같이 PTAW Process 를 이용한 가스터빈 블레이드 보수용접은 충분히 가능한 것으로 확인 되었으며, 또한 Ni 기 초내열 합금에서 요구되어지는 고온 물성치 평가는 현재 수행중에 있다.

향후 LBW Process 를 이용한 보수용접을 수행할 예정이다.

Table 1. The Specification of Base Metal & Weld Metal

① 모재 : IN738LC(Ni 기 초내열합금)

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	

② 용가재 :

- Brand Name : Alloy ANVAL 625 Powder
- 화학 성분(Chemical Composition)

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

Table 2. IN738LC Welding parameters of PTA Welding

전류 (A)	전압 (V)	용접속도 (mm/min)	Powder 송급량 (g/min)	적용가스(Ar : 99.99%)		
				Center Gas(l / min)	Plasma gas (l / min)	Shielding gas(l / min)
75~150	20~23	20~100	4~10	50~100	50~80	100~150

Note) Arc length : 10~12mm

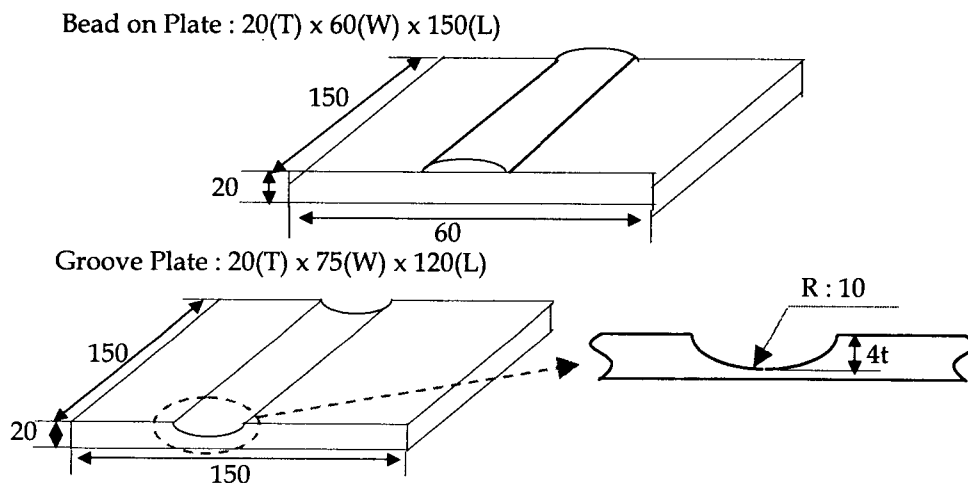


Fig. 1 A Schematic configuration of PTA Welding Joint

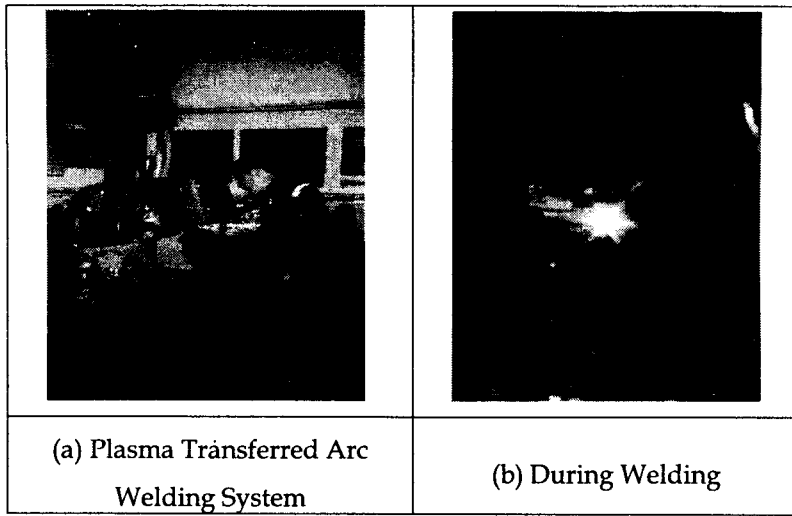


Photo. 1 Plasma Transferred Arc Welding System

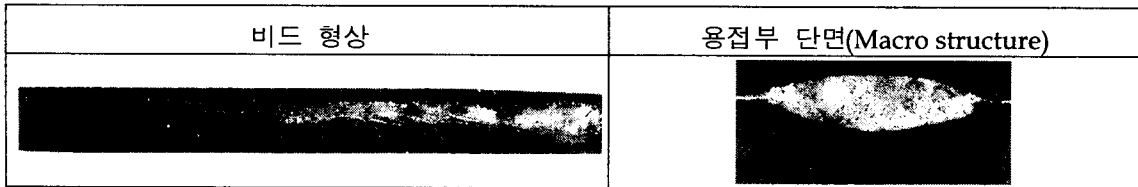


Photo. 2 Bead on Plate 의 용접 형상 및 단면

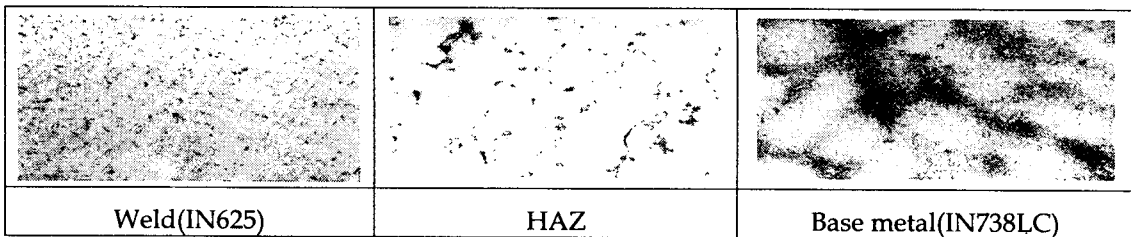


Photo. 3 IN738LC 모재의 IN625 파우더 용가재를 사용한 PTA 용접부 미세조직

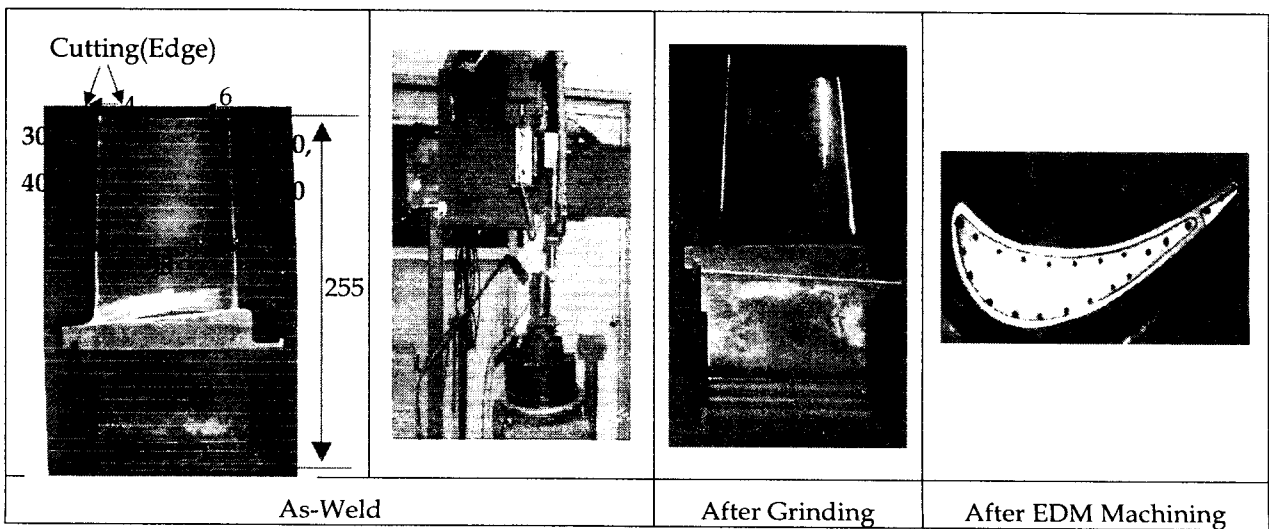


Photo. 4 Mock-up Test of PTA Welding