

니켈계 초내열합금 PTA용접부의 고온균열감수성과 고온연성거동에 관한 연구

A Study on Relationship between Hot Ductility Behavior and Hot Cracking Susceptibility in PTA Weld of Ni-based Superalloy

이청래*, 김성욱*, 최우혁*, 임상호*, 이창희**, 김재철***, 최 철***

* 한양대학교 대학원 재료공학과

** 한양대학교 재료공학과

*** 한전전력연구원 발전연구소

ABSTRACT In general, nickel-base superalloy has been extensively used as land-based gas turbine blades and vanes. Plasma transferred arc welding(PTAW) has been considered as a repair welding process of nickel-base superalloy. This research evaluated the relationship between hot ductility behavior and hot cracking susceptibility in nickel-base superalloys. Ductility recovery rate of nickel base superalloys was found to be poor due to incipient melting and constitutional liquation. This seems to increase the hot cracking susceptibility.

1. 서 론

최근 원자력 발전소의 감소추세와 환경문제로 인해 고효율 복합발전 개발에 관심이 집중되고 있으며, 발전용 가스터빈의 수요도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 초내열합금인 GTD111과 IN738LC는 고온에서 높은 강도를 유지하며 동시에 크리이프(creep)저항성과 내부식성 및 내산화성이 우수한 소재로 1100℃급 가스터빈용 고온부품으로 많이 사용되어지고 있으나¹⁾ 장시간 고온·고압의 열악한 환경에 노출되므로써 고온손상이 발생하고 그 정비 회수율 또한 매우 낮아 손상품을 정비하여 사용수명을 연장하고 발전원가를 절감시킬 수 있는 재생기술이 필요하다. 재생기술로써 PTAW(Plasma Transferred Arc Welding)을 이용한 육성용접법이 적용되고 있지만²⁾ 일반적으로 GTD111과 IN738LC는 고온균열감수성이 매우 높은 것으로 알려져 있어 그 재생에 있어서 많은 어려움이 있다. 현재 알려진 고온균열은 입계에 액상이 존재함에 따라 용접시 발생하는 것으로 알려져 있고, 그 원인으로는 incipient melting과 constitutional liquation에 의한 액상의 형성을 들 수 있다³⁾. 본 연구에서는 PTAW에 의한 육성용접시 발생하는 HAZ(Heat Affected Zone)의 고온균열을 분석하고 그 원인

을 파악하고자 하였고, gleeble system을 이용한 hot ductility test를 실시하여 hot-ductility거동을 파악하고 고온균열감수성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

PTA적용에 사용된 모재는 실제 블레이드와 동일한 니켈계 초내열합금인 GTD111과 IN738LC를 정밀주조한 시편을 사용하였고, filler metal로는 모재와 유사한 성분을 지닌 IN625와 IN738LC를 사용하였다. Table 1은 모재와 filler metal의 화학조성을 표시하였다.

Table 1 Chemical composition of base metal and filler metal

	Ni	Cr	Co	Ti	Al	W	Mo	Ta	Nb	C	Zr	B	Fe
IN738LC	bal	16	8.5	3.4	3.4	2.6	1.7	1.7	0.9	0.11	0.05	0.01	-
GTD111	bal	14	9.5	4.9	3.0	3.8	1.5	2.8	-	0.1	-	0.01	-
IN625	bal	22	-	0.2	0.2	-	9.0	-	3.6	0.05	-	-	2.5

육성용접은 크게 filler metal의 양과 입열량의 변화인 용접속도를 변수로 하여 실험을 실시하였다. 고온균열감수성평가인 hot ductility test는 NST(nil strength temperature)를 먼저 측정하고 NST를 P.T(peak temperature)로 한 용접열사이

클에 의해 실험하였으며, 실험하고자하는 온도에서 50mm/s의 속도로 인장시험을 실시하여 단면 수축률을 측정하여 ductility를 평가하였다. Figure. 1은 hot ductility test를 위한 기본적인 gleeble system을 나타내고 있다. gleeble system의 시편크기는 $\Phi 4 \times 90\text{mm}$ 로 실험하였으며, 열처리에 따른 hot-ductility거동을 비교하기 위해 S.T(Solution Treatment;1120°C, 2h)와 S.T+A.T(aging treatment ;843°C,24h)열처리를 실시하였다.

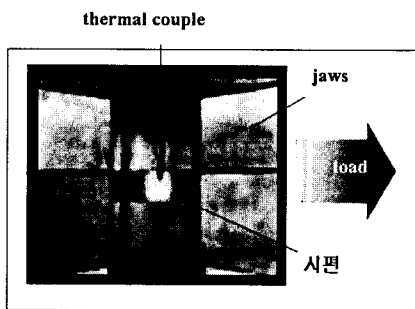


Fig. 1 Schematic illustration of hot ductility test

미세조직 관찰을 위해 chromic acid(1g)+증류수(90ml)를 사용한 전해에칭을 하거나 마블용액(CuCl₂ 2g+HCl 10ml+alcohol 10ml)을 이용하여 화학에칭을 하였다. 육성용접부 및 실험시편의 형상 및 조직관찰을 위해 금속현미경과 SEM을 이용하였고, 성분분석은 EDS를 이용하여 확인하였다.

3. 실험 결과

3.1 PTA육성용접

3.1.1 용접변수에 따른 균열

Filler metal의 양이 증가함에 따라 용융부의 체적이 변화하게 되고 그에 따라 용접시 작용하는 수축응력이 달라지게 된다. 용접속도의 변화는 용융풀이 변화하게 됨과 동시에 단위면적당 공급되는 filler metal의 양이 다르게 된다. Figure. 2는 filler metal과 용접속도의 변화에 따른 총균열길이의 변화를 나타내고 있다. Filler metal의 양이 증가함에 따라 수축응력이 증가하여 균열감수성이 높아졌으며, 용접속도가 증가함에 따라서도 용융부의 체적이 증가하여 수축응력이 증가함을 알 수가 있었다. 물론 용융부의 조성이 변화함에 따라 응고속도에도 영향을 미쳤을 것이라고 사료된다.

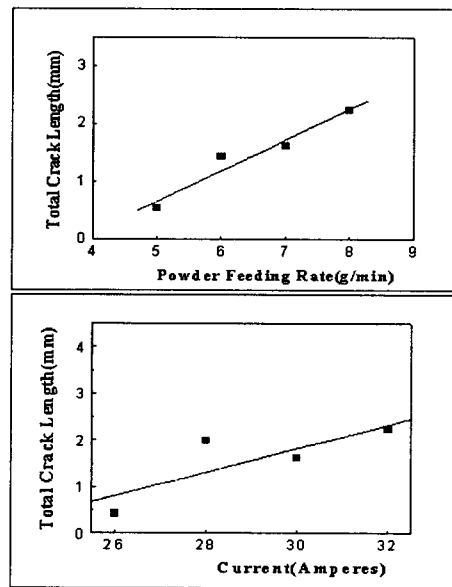


Fig. 2 The total crack length according to the powder feeding rate and the current

3.1.2 용접부의 미세조직

일반적인 모재의 미세조직은 기지인 r에 r'이 석출되어져 있고, 용질원자의 편석에 의해 MC카바이드와 r/r' eutectic이 형성되어져 있다.

또한 GTD111일 경우는 η 상이 형성되어있음을 알 수가 있었다. Figure. 3은 IN738LC기지에 IN625의 filler metal로 육성용접한 후, 용접부를 SEM으로 관찰한 조직사진과 mapping결과를 보여주고 있다. 보여지는 것과 같이 HAZ에 균열이 발생한 것을 알 수가 있었고 균열발생주변에 Ti와 Nb가 rich한 것으로 관찰되어졌다.

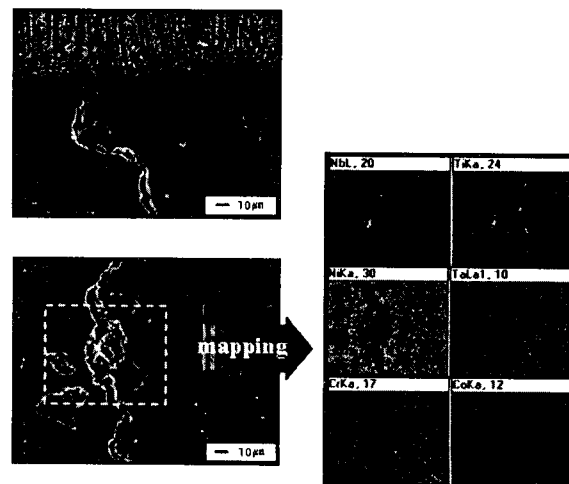


Fig. 3 Microstructure and mapping of HAZ

3.2 Hot ductility test

3.1.1 NST test

NST test는 매우 적은 load를 가하였을 때 시편이 파단되는 온도를 말하며, 이 때 재료의 강도가 zero가 된다. 즉 NST온도에서부터 ductility가 회복이 될 때까지의 구간을 평가함으로서 그 재료의 균열감수성정도를 판단할 수 있다. Table. 2는 열처리에 따른 NST측정결과이다.

Table 2 Data of NST test

	As cast	S.T	S.T+A.T
IN738LC	1289°C	1285°C	1290°C
GTD111	1294°C	1283°C	1297°C

3.1.2 Hot-ductility behavior

고온에서 ductility거동은 고온균열감수성과 관계가 있고, ductility의 회복이 느릴수록 고온균열감수성이 높은 것으로 알려져 있다⁴⁾. NST를 P.T로 실험을 실시한 결과, IN738LC는 Figure. 4처럼 매우 느린 회복속도 나타냈고, 1000°C정도에서의 ductility값이 10%이하의 낮은 값을 보였다. GTD111도 같은 경향을 보임을 알 수가 있었다.

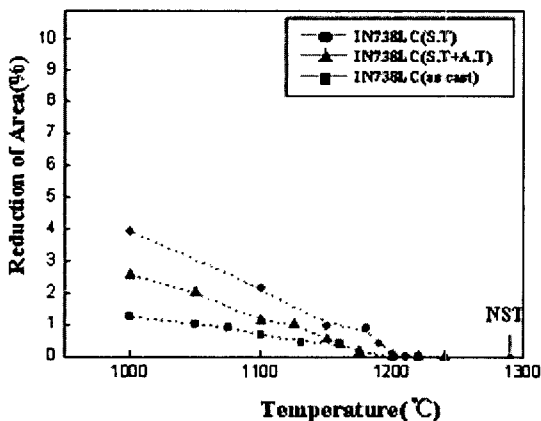


Fig. 4 Hot-ductility behavior of IN738LC

그 원인으로는 열사이클에 의해 저융점상에서 incipient melting이 일어나고, MC카바이드주위에 constitutional liquation이 형성됨으로써 ductility의 회복속도가 느림을 알 수가 있었고, 1000°C정도에서의 낮은 ductility값은 형성되었던 액상이 다시 응고하면서 형성된 eutectic상과 카바이드에 의해 균열의 propagation이 용이해지면서 나타난 현상으로 사료되어진다.

4. 결 론

PTA에 의한 육성용접기술은 적절한 희석률과 체적의 변화에 의해 수축응력을 감소시키므로서 균열감수성을 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있다. GTD111과 IN738LC는 ductility 회복이 매우 느린 것을 알 수가 있었고, 그 주요원인으로는 incipient melting과 constitutional liquation으로 볼 수가 있었고, 특히 constitutional liquation은 MC카바이드에 의해 결정립계(grain boundary)에 형성되므로서 균열감수성이 증가시킨 요인으로 볼 수 있다. 실제 육성용접시 발생한 균열과 hot ductility test에 의한 결과를 비교해보면, 균열은 grain boundary에서 MC카바이드에 의한 constitutional liquation에 의해 시작이 되고, 결정립계(grain boundary)를 따라 propagation이 일어나는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. J. A. Daleo, J. R. Wilson : GTD111 Alloy Material Study, Journal of Engineering for Gas turbines Power, vol.120, April 1998
2. G. A. Saltzman, P. Sahoo : Applications of plasma arc weld surfacing in turbine engines, Proceeding of the fourth national thermal spray conference, Pittsburgh, PA, USA, 4-10 May 1991
3. J. J. Pepe and W. F. Savage : Effects of constitutional liquation in 18-Ni maraging steel weldments, welding research supplement, April 1993
4. W. Lin, J. C. Lippold and W. A. Baeslack : An evaluation of heat-affected zone liquation cracking susceptibility, Part I: Development of a method for quantification, welding research supplement, April 1993