

고속 추진체용 Alloy 718 노즐 단조품의 전자빔 용접성 평가

이채훈¹·김정한²·홍재근²·염종택²·윤종원¹·박노광[#]

Electron Beam Weldability of Alloy 718 Nozzle for Jet Propulsion Component

C. H. Lee, J. H. Kim, J. K. Hong, J. T. Yeom, J. W. Yoon, N. K. Park

(Received May 8, 2008)

Abstract

In this study, mechanical properties of Alloy 718 welded after forgings for jet propulsion component was investigated. Hot-forged and machined work-pieces(230mm×70mm×15mm) which have different grain sizes are welded by electron beam welding technique. After welding, the components were solution heat-treated and aged. Samples were sectioned to analyze the microstructural evolution and formation of micro-crack. It was found that HAZ grain boundary liquation crack generally initiates in the coarse grains rather than the fine grains. Needle-like phases with high Nb contents were found at the outer part near the base metal. Vickers hardness and tensile tests were carried out at room temperature and at 649°C. The tensile properties of electron beam welding specimens exhibited around 100MPa and 10% decrease in strength and elongation, respectively.

Key Words : Superalloy, Alloy718, Electron Beam Welding, Microstructures, Mechanical Properties

1. 서론

마하 3이상의 초고속 추진체 공기 주입부의 온도는 500-800K 사이 이며, 이는 Burner에서 최고 2000K 까지 상승한 후 노즐부에서 800K까지 냉각하게 된다. 여기서 노즐 부위는 고속추진에 있어서 중요 핵심부위로서 추진력을 얻기 위해 연소 개스를 배출하는 기능을 하고 있다. 특히, 노즐 부품은 고온 고압을 견뎌야 하기 때문에 기존의 내열 스테인리스 강으로는 속도향상 및 효율에 한계가 있어 600°C까지 장시간 사용이 가능한 초내열 합금 소재를 이용한 부품의 개발이 요구된다. 초내열 합금 Alloy 718은 Ni-Cr-Fe기 합금 조성에 Nb, Mo, Al 및 Ti가 첨가된 합금으로써 각 합금

원소에 의한 고용 및 시효 경화 효과를 극대화하여, 고온에서의 기계적 특성을 개선한 합금이다 [1~3]. 또한 Alloy718 합금은 다른 초내열합금에 비하여 단조 성형성이 뛰어나 각종 내열용 소재나 가스 터빈 디스크 등 특수한 내열부품으로도 가장 널리 사용되고 있다. 이러한 구조물의 재료 생산성의 향상과 함께 가공 공정수 감소에 의한 원가 절감에는 용접구조의 채용이 매우 유효하며, 또 복잡한 형상의 부품조립과 제조, 가공과 사용 중에 생기는 약간의 결함과 손상의 완전보수에도 용접은 중요한 역할을 한다. 일반적으로 Alloy718의 용접부의 기계적 특성은 용접시 빠른 냉각과정을 겪는 용접금속의 미세조직에 의해 영향을 받는다고 알려져 있다. Alloy718의 용융영역은 전

1. 동의대학교 신소재공학과

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자 : 한국기계연구원 부설 재료연구소,

E-mail: pnk@kims.re.kr

형적으로 수지상과 수지상간 영역의 2차 응고에 의해 생성된 미소편석으로 구성되어 있다. 미소편석과 용접금속의 응고시 변태된 비평형상은 바람직하지 않은 금속간 화합물과 화학적으로 불균일한 상의 형성을 초래하여 용접금속의 기계적 성질을 저하시키고 강화효과를 위해 첨가된 합금원소가 금속간 화합물을 형성하여 고온성질을 저하시킨다. 고용점금속들은 용접이 어렵고 용접 시 용융영역 응고균열 혹은 열영향부 액화균열이 생기기 쉽다. 일반적으로 용융영역의 응고균열과 HAZ부 액화균열은 용접전 모재의 성질에 의해 균열감수성이 결정되는데 조직의 불균일함이 열영향부와 용접금속에서 발생하는 균열을 야기하게 되고 이에 따른 결과로 완제품에 요구되는 상온 및 고온 특성의 열화가 발생하게 된다[4-6].

실험에 사용된 노즐용 상, 하부 단조품의 용접 전 조직분석 결과 단조시 금형과 직접 맞닿아 변형량이 적게 부하된 부위에서는 비교적 조대한 결정립도를 보인 반면 내부의 소성 유동부는 매우 미세한 결정립 크기를 가지고 있었다. 따라서 본 연구에서는 초고속 추진체의 노즐로 사용되는 Alloy718 빌렛을 단조공정을 통해 불균일한 결정립도를 형성한 후 전자빔 용접하여 용접 전 미세조직이 용접부의 경도, 인장성질에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 실험은 단조뿐 아니라 압연, 압출 등의 가공된 제품에 용접공정 적용시 미세조직의 영향에 대한 데이터 베이스로서 사용될 수 있을 것이다.

2. 실험 방법

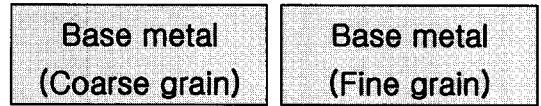
2.1 시편 제작 및 열처리

본 실험을 위해 사용된 Alloy718 합금 빌렛의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다.

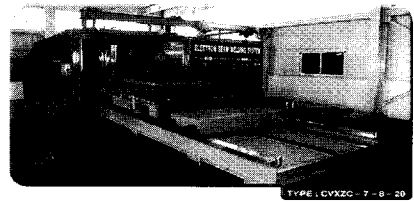
모재는 노즐 제작을 위하여 Alloy718 빌렛을 최종 가열온도 1120℃에서 2시간 유지한 후 단조하여 제작된 제품을 금형과 직접 맞닿아 변형량이 적게 부하되어 결정립이 조대한 부분과 재결정으로 인해 매우 미세한 결정립 크기를 가지게 된 내부의 소성 유동부를 230mm×70mm×15mm로 절단하여 광학 현미경으로 관찰한 결과, 각각 180 μm(ASTM G Number-2), 55 μm(ASTM G Number-5)로 나타났다. 결정립 크기가 다른 두 개의 Alloy 718 소재는 Fig. 1과 같이 I형 이음에 대해, 진공 챔버(chamber) 내에서 가속전자빔을 투사하여 전자

Table 1 Chemical composition of Alloy718(wt.%)

Al	Si	Mn	Cr	Ti	Fe	Mo	Ni
0.62	0.1	0.06	19.2	1.1	17.2	2.8	Bal.



(a)



(b)

Fig. 1 Sketch illustrating (a) EB weld joint (b) EB welding machine

Table 2 Electron beam welding condition

Accelerating voltage (kV)	Beam current (mA)	Weld speed (mm/min)	Focal position	Vacuum (Torr)
60	120	1200	±0	2x10 ⁻⁴

빔 용접을 실시하였다. 용접전 소재는 솔벤트로 표면의 오염물질을 제거하고, BOP 용접으로 적정 용접 조건을 선정후 Table 2에 나타나는 용접조건으로 용접되었다.

용접 후열처리는 AMS 5662 규격에 따라 955℃에서 1시간 유지 후 물 웅칭하여 용체화 처리 후 718℃에서 8시간 동안 시효처리하고 37℃/hr로 노내에서 냉각 한 뒤, 다시 8시간 동안 시효처리하였다.

2.2 미세조직 관찰

용접 후 미세조직 관찰을 위해 접합방향과 수직인 방향으로 단면을 절단하여 샌드페이퍼(sand paper(#1500까지))와 버퍼(buffer(Diamond paste 3, 1 μm))를 이용하여 폴리싱하고 CrO3 18g을 증류수 300ml에 희석시킨 용액에서 전해 에칭(20℃, 3V, 2min)하여 광학현미경(optical microscope, OM)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 미세조직을 관찰하였다.

2.3 기계적 특성

Alloy 718 의 용접 후 고온 및 상온에서의 기계적 특성을 평가하고 추진체 노즐로서 제품의 요구특성을 만족하는지를 알아보기 위해 용접부를 중심에 포함한 용접부가 중심에 위치한 인장시험편을 ASTM E 8M 규격에 맞게 제작하여 상온 및 고온 인장시험(649°C)을 수행하였고 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 경도(100g, 5sec)를 측정하여 모재에서 열영향부를 거쳐 용접금속에 이르는 용접부 전체의 경도분포를 조사하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직 분석 결과

Fig. 2 는 전자빔 용접된 Alloy718 의 모재, 열영향부, 용접금속의 거시조직이다. Fig. 2 의 거시조직에서 왼쪽 모재는 ASTM G-Number 2 정도의 조대한 결정립이, 오른쪽의 모재는 ASTM G-Number 5 정도의 미세한 결정립이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

용접금속은 열방산 방향의 반대방향으로 성장한 전형적인 수지상의 주상조직이 관찰되었다. SEM 조직 분석 결과를 Fig. 3 에 나타내었고, Fig. 3 에 표시된 a)수지상정과 b)수지상간 영역의 EDS 분석 결과를 Tabel 3 에 나타내었다.

그림에서 보듯이 Fig. 3-a) 의 수지상정에서는 Nb 의 함량이 2.36wt%정도로 낮은 반면 Fig. 3-b) 의 수지상간 영역에서는 Fe, Cr, Ti 등의 함량이 낮아지고 Nb 의 함량이 21.6wt%로 크게 높아진 것을 확인할 수 있었고, 이 원인은 Ni₃Nb(γ')의 석출 때문인 것으로 판단된다. SEM 분석결과 조대한 결정립의 HAZ 에서 결정립계를 따라 크랙이 발생된 것을 확인할 수 있었고, 미세한 결정립도를 가진 소재의 HAZ 에서는 관찰되지 않았다. 이러한 균열 생성에 미치는 결정립도의 영향은 용고시 입계에 편석된 용질 원자로 인해 결정립계가 취약하게 되고 용고 수축으로 인한 인장 변형이 가해지는데 조대한 결정립으로 이루어진 HAZ 에서는 미세한 결정립으로 이루어진 HAZ 보다 입계면적이 작기 때문에 인성이 저하하여 균열이 먼저 생성된다는 것이 우세한 이론으로 많은 연구에서 보고되고 있다[7-8].

Fig. 4 는 180 μ m의 조대한 결정립을 가진 모재 쪽 HAZ 결정립에서 발견된 액화균열의 OM 및 SEM 사진이다. 결정립계 HAZ 액화균열 주위의

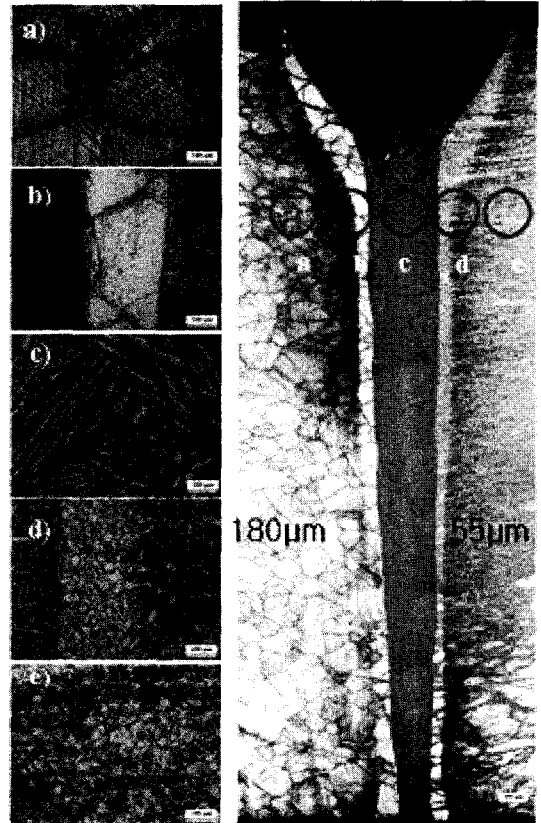


Fig. 2 Macro & microstructure of EB welded cross section for dissimilar grain size Alloy 718



Fig. 3 SEM images observed at fusion zone dendrite. (a) Dendrite (b) Inter-dendrite.

성분 분석 결과, 높은 함량의 Nb 를 나타내었는데 이는 NbC 와 δ 상(Ni₃Nb)등의 석출 또한 결정립계 HAZ 액화균열에 영향을 주기 때문이라고 생각된다.

Table 3 Chemical composition of EDS analysis at the position of (a) and (b) in Fig. 2(wt%)

Area	Element						
	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb
a)Dendrite	0.56	0.97	19.59	19.8	0.38	54.8	2.36
b)Inter-dendrite	0.37	2.03	8.7	8.76	0.5	58	21.6

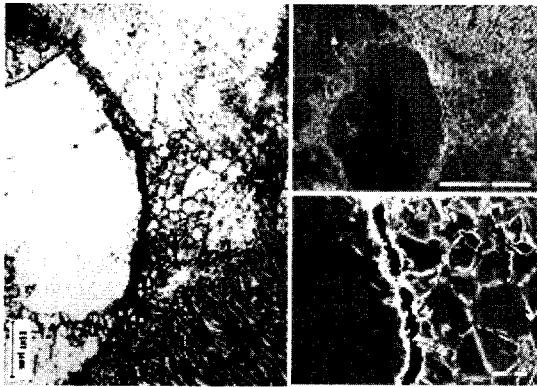


Fig. 4 (a) OM and (b), (c) SEM image of occurred at the HAZ grain boundary liquation

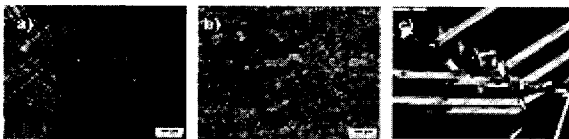


Fig. 5 (a) HAZ at the base metal of coarse grain(OM). (b) HAZ at the base metal of fine grain(OM). (c) Needle like phases observed at both HAZs (SEM)

게다가 Fig. 5 에서 나타나듯이 HAZ 와 모재 사이의 일정영역에서 결정립 내부에 일정방위를 가지는 δ 상(Ni_3Nb)이 매우 많이 분포하고 있음이 관찰되었다.

이에 대한 원인은 용접 시 열 이력과 용접 후 열처리 이력에 관계되는데, HAZ 의 냉각속도는 Fig. 6 에 보여진 Alloy718 의 TTT 곡선에서 점선으로 표시된 결정립계 δ 상(Ni_3Nb)이 석출되는 영역을 지나는 비교적 빠른 냉각속도로 응고되고, HAZ 와 모재 사이의 일정영역까지는 HAZ 의 냉각속도보다 느리게 되어 입계와 입내에 모두 δ 상(Ni_3Nb)이 석출되는 영역을 지나기 때문이라고 판단된다. 이러한 δ 상의 존재는 크리프 특성을 향상

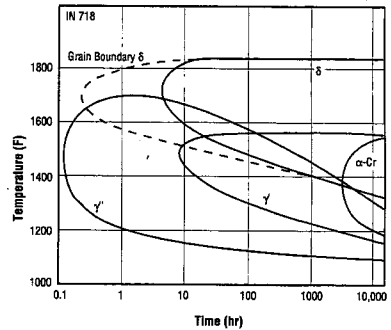


Fig. 6 Time-temperature-transformation(TTT) diagram [9]

시키지만 형태 및 분포양상에 따라서 파괴성질을 저하시킨다[10].

3.2 기계적 특성평가

접합부의 기계적 특성을 평가하기 위해 상온 및 고온 인장시험과 비커스 경도 시험을 실시하였다. Alloy718 전자빔 용접부의 용접금속에서 HAZ를 지나 모재에 이르는 경도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 180 μ m의 조대한 결정립 크기를 가진 모재의 경도 값은 450Hv~500Hv로 나타났고 HAZ에서는 440Hv의 다소 낮은 경도 값을 나타내었다. 55 μ m의 미세한 결정립 크기를 가진 모재의 경도 값은 450~460Hv, HAZ에서는 470Hv로 다소 높은 경도 값을 나타내었다. 결정립도의 차이에도 불구하고 경도 값의 차이가 크지 않은 것은 용체화 처리 후 시효처리에 의해 γ'' 등이 석출되었기 때문으로 생각된다. 모재의 상온 및 고온(649 $^{\circ}$ C) 인장 시험 결과를 Table 4에 나타내었다. 모재의 열처리도 용접 후 열처리와 동일하게 수행 되었다. 용접부가 중심에 위치한 인장시험편의 상온 및 고온 인장 시험 후 파단은 모두 모재에서 일어났으며 모재에서 각각 1355MPa, 1042MPa 였던 상온 인장강도와 항복강도는 1230MPa, 950.5MPa로 낮아졌다. 고온 인장시험 결과 모재에서 각각 1095MPa, 1011MPa였던 인장강도와 항복강도가 962MPa, 903MPa로 다소 낮아진 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

추진체 노즐로 사용되는 Alloy718 의 단조 후 결정립도가 상이한 두 소재를 이용한 전자빔 용접부의 미세조직 및 기계적 특성을 관찰한 결과를 요약하면

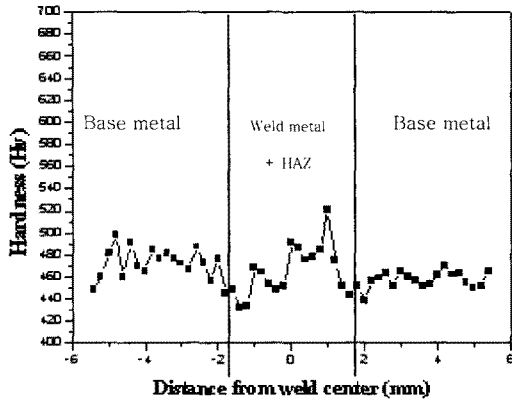


Fig. 7 Variation of Vickers hardness with respect to the distance from welded center

Table 4 Tensile test results

	R.T. (Welded/Parents)	649°C (Welded/Parents)
Tensile strength (MPa)	1230 / 1355	962 / 1095
Yield strength (MPa)	950.5 / 1042	903 / 1011
Elongation (%)	10.5 / 24	12.65 / 22.8

(1) 용접금속은 열방산 방향의 반대방향으로 성장한 수지상이 발견되었고 SEM/EDS 분석결과, 수지상간 영역에 Nb-rich 상이 형성되었다.

(2) 조대한 결정립을 가진 소재의 HAZ 에서 결정립계 HAZ 액화균열이 발견되었고 미세한 결정립을 가진 소재의 HAZ 에서는 결정립계 액화 균열이 없는 것으로 보아 결정립의 크기가 HAZ 의 균열생성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

(3) 균열 주위에 생성된 취성의 NbC, δ 상(Ni₃Nb) 등의 석출이 결정립계 HAZ 액화균열을 야기하는 것으로 판단된다.

(4) 용접부의 상온 및 고온 인장시험 결과, 모재에 비해 낮은 인장강도, 항복강도, 연신률이 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 고청정 Alloy 718 적용 부품개발 사업의 재원으로 한국 기계연구원 부설 재료연구소의 지원에서 수행된 내용으로, 관계기관의 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

- [1] W. D. Cao, R. Kennedy, 2004, Superalloys, pp. 91-99.
- [2] M. J. Donachie, S. J. Donachie, Superalloys A technical guide 2nd edition. ASM international.
- [3] J. F. Barker et al., 1970, J. Met. January, pp.31.
- [4] T. E. Kilgren, C. E. Lacet, 1946, The control of weld got cracking in nickel chromium iron alloys, Welding Journal, Vol. 25, pp. 11.
- [5] Chen, W., Chaturvedi, M.C., Richards, N.L., 2001. Effect of boron segregation at grain boundaries on heat affected zone cracking in wrought Inconel 718. Metal. Trans. A 32, 931-939.
- [6] S. C. Ermst, W.A. Baeslack III, J. C. Lippold, 1989, Welding Journal. pp. 418-430.
- [7] T. F. Bower, H. D. Brody, M. C. Flemings, 1966 AIME Met. Soc. Trans. Vol. 236, pp. 624-634.
- [8] N. L. Richard, X. Huang, 1991, Mater. Character. Vol. 28. pp. 11-13.
- [9] J. W. Brooks, P. J. Bridges, 1988, Metallurgical Stability of Inconel Alloy 718, Sixth International Symposium on Superalloys, held in Champion, PA, September pp. 18-22, pp. 33-42.
- [10] S. Azadian, L-Y. Wei, R. Warren, 2004, Delta phase precipitation in Inconel 718, Mater. Character. Vol. 53 pp. 7-16.