

극저온 환경에 적용되는 INCONEL 718합금의 Gas Tungsten Arc Welding 기계적 특성 평가

김기홍[†] · 문인상* · 문일윤* · 이병호**

(주) 비츠로테크 특수사업부 우주항공팀, *한국항공우주연구원 미래기술연구팀

** (주) 비츠로테크 특수사업부 대표이사

Mechanical Properties Evaluation of Gas Tungsten Arc Welding for INCONEL 718 alloy apply to Cryogenic Condition

Kihong Kim[†], Insang Moon*, Ilyoon Moon* and Byungho Rhee**

Vitzrotech Co., Ltd, Kyunggi-Do, 425-833, Korea

*Korea Aerospace Research Institute, Dae-jeon, 305-333, Korea

**President of Vitzrotech Co., Ltd, Kyunggi-Do, 425-833, Korea

(2009년 11월 17일 접수 : 2009년 12월 17일 최종수정 : 2009년 12월 18일 채택)

Abstracts Inconel 718 alloy has excellent mechanical properties at room temperature, high temperature and cryogenic conditions. UTS of base metal is about 900MPa at room temperature; this is increased up to 1300MPa after heat treatment & aging-hardening. Mechanical properties of Inconel 718 Alloy were similar to those shown in the the results for tensile test; mechanical properties of Inconel 718 alloy's GTAW were similar to those of base metal's properties at room temperature. Mechanical properties at cryogenic conditions were better than those at room temperature. Heat-treated Inconel 718, non- filler metal GTAW on Inconel 718 and GTAW used filler metal on Inconel 718's UTS was 1400MPa at cryogenic condition. As a result, the excellent mechanical properties of Inconel 718 alloy under cryogenic conditions was proved through tensile tests under cryogenic conditions. In addition, weldability of Inconel 718 alloy under cryogenic conditions was superior to that of its base-metal. In this case, UTS of hybrid joint (IS-G) at -100°C was 900MPa. Consequently, UTS of Inconel 718 alloy is estimated to increase from -100°C to a specific temperature below -100°C. Therefore, Inconel 718 alloy is considered a pertinent material for the production of Lox Pipe under cryogenic conditions.

Key words INCONEL 718 alloy, cryogenic tensile test, rocket engine, of lox pipe, high strength alloy, gas tungsten arc welding.

1. 서 론

터보펌프를 장착한 액체로켓엔진은 엔진 구동 시 고압으로 승압된 산화제와 연료가 연소기로 공급된다. 특히 산화제측은 극저온 고압상태로 공급되므로 온도, 압력, 진동 등의 환경에 적합한 산화제 배관을 설계하여야 한다. 따라서, 액체로켓엔진에 사용되는 액체 산소용 배관은 극저온 환경에서의 물성과 고압상태에서도 내구성이 양호한 소재로 개발되어야 한다.

Ni기 초내열합금의 하나인 INCONEL 718은 내식성, 용접성, 피로 및 크리프 특성이 우수한 소재로 잘 알려져 있다. 또한, 극저온에서 고온까지의 기계적 특성이 우수하여 Rocket Motor Casing이나 초전도 구조재 등의

저온 구조물로 사용되며, 액체수소 온도인 -253°C에서 650°C까지의 넓은 온도범위에 걸쳐 적용되고 있다. 뿐만 아니라, 용접부의 악영향을 끼치는 수소취성에 대한 저항성과 응력부식 저항성이 양호하며, 용체화처리 및 시효처리에 따라 여러 수준의 기계적 강도 값을 가질 수 있어 우주항공산업, 원자력산업, 석유화학공업 등 사용 용도가 매우 다양하다.^{1,2)}

따라서, 본 연구에서는 극저온 환경에 유용한 INCONEL 718 용접부의 기계적 특성을 평가하여, 산화제 배관 제작에 적용 타당성을 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 사용소재

본 시험에 사용된 소재는 2 mm 두께의 INCONEL 718 합금으로, 화학 조성 및 기계적 특성을 Table 1과 Table

[†]Corresponding author

E-Mail : khkim@vitzrotech.com (K. Kim)

Table 1. Chemical composition of INCONEL 718 Alloy.(wt%)

	C	Mn	Fe	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Ni	기타
IN-718	0.03	0.11	17.74	18.66	0.60	0.93	2.90	5.00	bal.	5.00

2에 나타내었다.

INCONEL 718의 용접은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)를 적용하였으며, Shield gas는 고순도 Ar gas를 사용하였고, 용접전류는 125 mA, 이송속도 30 cm/min조건으로 용접을 실시하였다. 용접 후 열처리는 H₂ 분위기에서 Solution Treatment 1060°C · 1hour, Aging 720°C · 8hour + 620°C · 8hour 처리 후 상온까지 Air cooling하였다.³⁾ (Fig. 1)

인장시험은 상온과 저온(-50°C, -100°C) 환경에서 5가지 조건으로 구분하여 실시하였으며, 시험조건은 Table 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

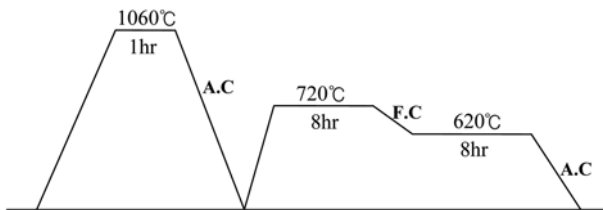
3.1 상온 기계적 특성

INCONEL 718의 인장시험 결과 모재 강도는 Mill Sheet 상에 나타난 918.4 MPa 값과 유사한 강도를 나타내었다. 하지만 용체화 처리 및 시효경화 열처리 후의 강도 값은 Mill Sheet 상에 나타난 1390MPa 보다 낮은 1290MPa로 측정된 반면, 변형률은 45%로서 유사한 결과 값을 나타내었다.(Fig. 2~4)

Table 2. Mechanical Properties of INCONEL 718.

	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	E (%)	HRB
IN-718	457.8	918.4	50.5	94.2
S-A	1153.5	1390.7	22.4	114

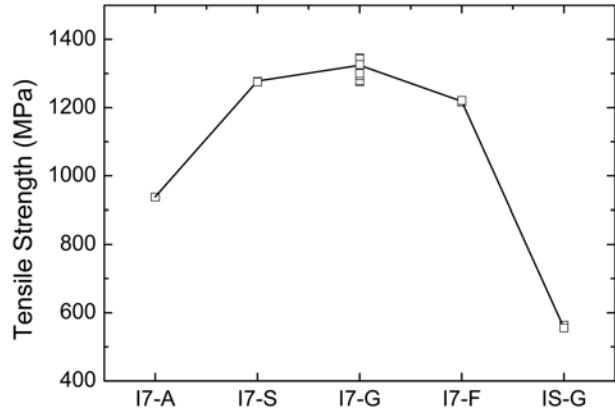
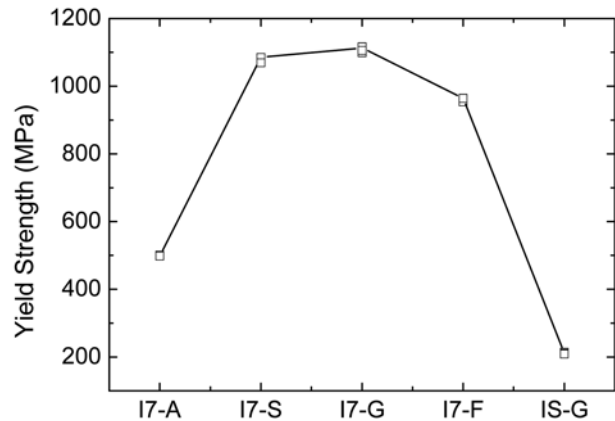
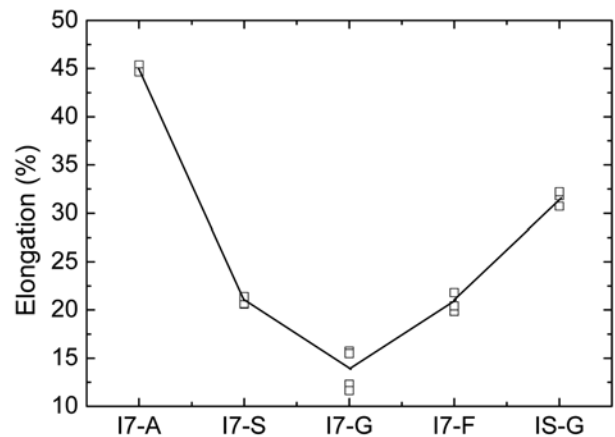
*S-A : Solution Treatment + Aged

**Fig. 1.** Heat treatment of INCONEL 718 Alloy.³⁾**Table 3.** Tensile Testing Coupon Condition of INCONEL 718

Sample Name	Testing Condition
I7-A	INCONEL 718 As-received
I7-S	INCONEL 718 Solution Treatment + Aged
I7-G	INCONEL 718 GTAW-autogenous welding
I7-F	INCONEL 718 GTAW-used of Filler Metal
IS-G	INCONEL 718 + STS 316L GTAW-autogenous welding

타내었다.(Fig. 2~4)

Fig. 4는 각 조건에 따른 변형률을 나타낸 것으로, 열처리 후 변형률이 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 이

**Fig. 2.** Tensile Strength (UTS) of INCONEL 718 Alloy.**Fig. 3.** Yield Strength of INCONEL 718 Alloy.**Fig. 4.** Elongation of INCONEL 718 Alloy.

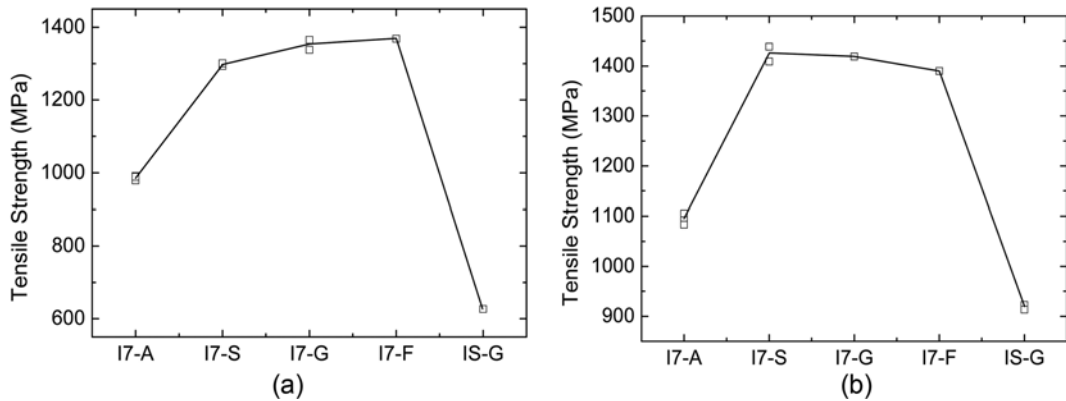


Fig. 5. Tensile Strength of INCONEL 718 Alloy apply to Cryogenic conditions. (a) -50°C and (b)-100°C.

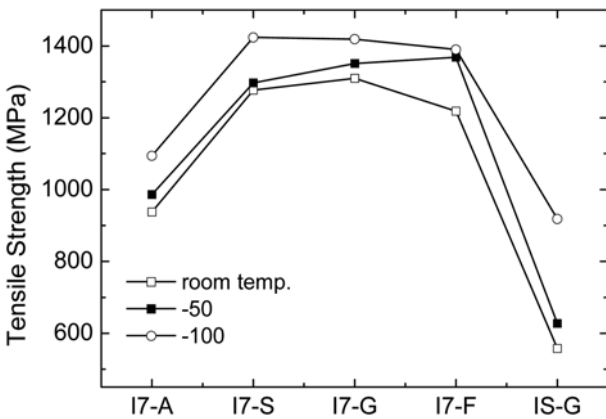


Fig. 6. Tensile Strength of INCONEL 718 Alloy to Compare Room Temperature with Cryogenic Conditions.

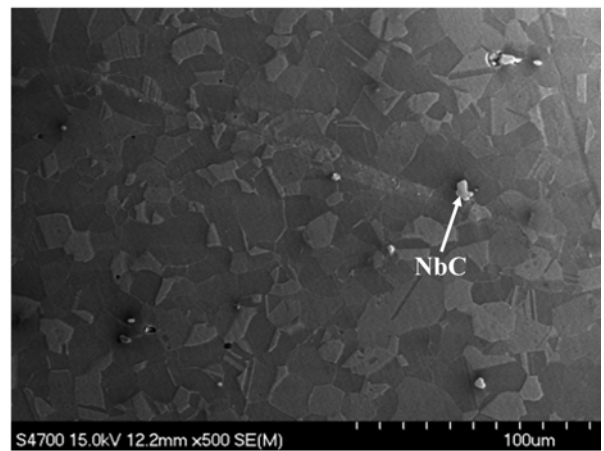
는 시효경화 열처리에 의하여 변형률이 감소 된 것으로, 열처리 전과 후의 항복강도와 인장강도 값을 비교하면, 열처리 전의 경우(17-A) 항복강도와 인장강도의 차이가 440MPa 인 것에 비해, 열처리 후(17-S)는 200MPa로 감소하였음을 확인하였다.(Fig. 2~3)

INCONEL 718의 용접부는 결함이 없는 양호한 비드를 형성하였으며, 제살용접부(17-G)의 인장강도는 열처리된 모재(17-S)보다 높은 1310 MPa을 나타내었고, 일부 시편에서는 모재파단이 발생하였다. 반면, ERNiFeCr-2 용접봉을 사용한(17-F) 용접시편은 1220MPa을 나타내었다.

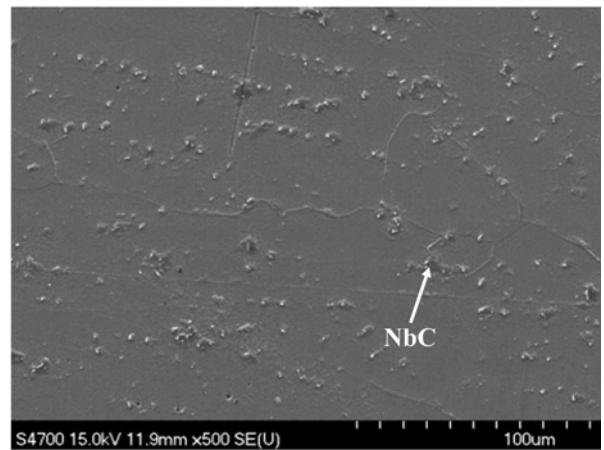
INCONEL 718합금과 STS316L합금의 제살용접 시편은 STS316L에서 파단이 발생하였다. STS316L 모재의 항복강도가 290MPa, 인장강도 560MPa로서 시험결과와 비교하면, 항복강도는 200MPa로 저하되었으나, 인장강도는 STS316L 모재와 유사한 값을 나타내었다.

3.2 저온 기계적 특성

INCONEL 718합금의 저온 인장강도는 -50°C에서 1000 MPa를 나타내었으며, 열처리된 모재의 인장강도는 1300MPa를 나타내었다. 그리고 -100°C에서는 모재 및 열처리 시



(a)



(b)

Fig. 7. Microstructure of INCONEL 718 Alloy. (a) Base Metal(17-A) and (b)Heat Treated(17-S).

편의 인장강도가 각각 1100MPa, 1400MPa를 나타내었으며, 온도가 감소할수록 INCONEL 718합금의 인장강도는 증가함을 알 수 있었다.

극저온 환경에서 INCONEL 718합금의 용접부는 -50°C, -100°C에서도 양호한 접합강도를 나타내었다. 제살 용접

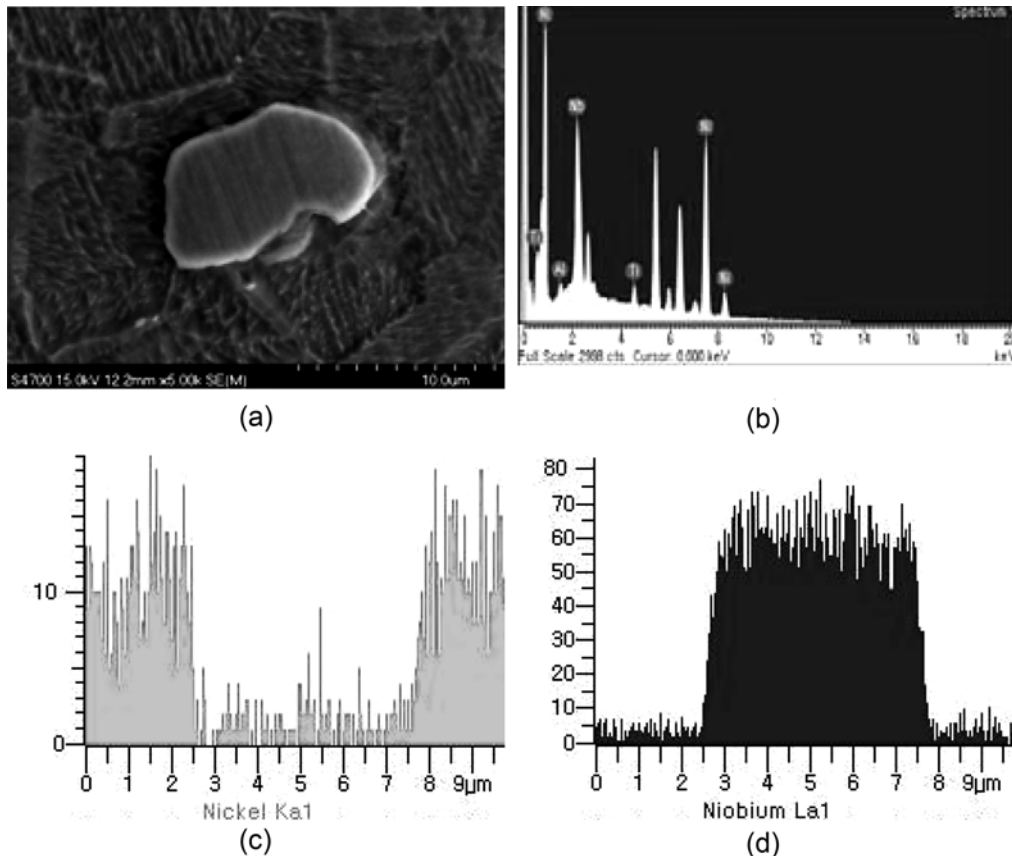


Fig. 8. EDS analysis of Precipitation phase. (a) Precipitation phase of SEM, (b) Spectrum analysis, (c) Linescanning profile of Ni and (d) Linescanning profile of Nb.

부는 -50°C 접합강도가 상온과 유사한 1340MPa를 나타내었으며, -100°C 에서는 1400MPa 이상의 고강도를 나타내었다. 그리고, 용접봉 접합시편도 제살 용접부와 유사한 1400MPa의 고강도를 나타내었으며, 열처리 모재 강도와 유사하다. 따라서, 용접시편의 상온시험 결과와 저온시험 결과를 바탕으로 산화제 배관의 용접은 용접봉을 사용하지 않고, 제살용접만으로도 충분히 고강도의 특성을 보유할 수 있다.

INCONEL 718합금과 STS 316L합금의 이중접합부 인장강도는 -100°C 에서 900MPa를 나타내어 상온에서의 인장강도 560MPa에 비해 크게 증가하여 양호한 용접특성을 나타내었다. 그리고 INCONEL 718합금의 동종접합 결과와 마찬가지로 이중접합부의 접합강도 또는 STS316L 모재의 인장강도가 저온환경에서 향상되었으며, 배관 제작 시 압력이 적은 부위에는 비용 절감을 위하여 이중재료의 적용도 적합한 것으로 사료된다.

INCONEL 718합금의 상온시험 결과와 저온시험 결과를 비교하면, Fig. 5에서 보는 바와 같이 상온보다 저온에서의 인장강도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 17-F 시편을 제외하고는 -50°C 보다 -100°C 환경에서 인장강도가 크게 증가함을 알 수 있었다.

3.3 모재 및 접합부 단면 분석

INCONEL 718합금은 시효에 따른 주강화 석출물인 γ' 상 Ni[Al,Ti]과 γ'' 상 Ni_3Nb 에 의하여 고강도효과를 얻는 것으로 보고되고 있다.¹²⁾ 또한 Ti, Cr, Mo 원소와 함께 MC, M_{23}C_6 , M_6C 형태의 탄화물 형성에 의한 강화효과를 얻는 것으로 보고되고 있다.⁴⁾ 본 실험에서는 이러한 강화상을 확인하기 위하여 SEM 및 EDS 분석을 실시하였다.

INCONEL 718합금의 모재와 1060°C 용체화처리 후 2단 시효경화 열처리를 실시한 모재의 석출상을 비교한 결과, 시효 처리된 모재에서 석출상의 분포도가 큰 것을 관찰하였다. 석출상은 Nb에 의한 NbC의 탄화물로 사료되며, 열처리를 실시한 모재의 인장강도가 증가한 것은 NbC 탄화물의 분포도가 증가한 것이 원인으로 판단된다. 그 외의 석출상은 관찰 되지 않았으며, 이것은 Fig. 8의 EDS 분석결과 Ni 76.6 wt%, Nb 20.3 wt%, Ti 2.4 wt%, Al 0.7 wt%이 검출되어 열처리에 의한 강화원인을 간접적으로 알 수 있었다.

Fig. 9는 INCONEL 718합금과 STS316L의 이중접합부 Fusion Line에 근접합 용접부의 석출물을 Line Scanning하여 관찰한 것으로 INCONEL 718모재 방향으로 다량의 탄화물이 관찰되었다. 각 원소의 peak를 살펴보면, M_{23}C_6

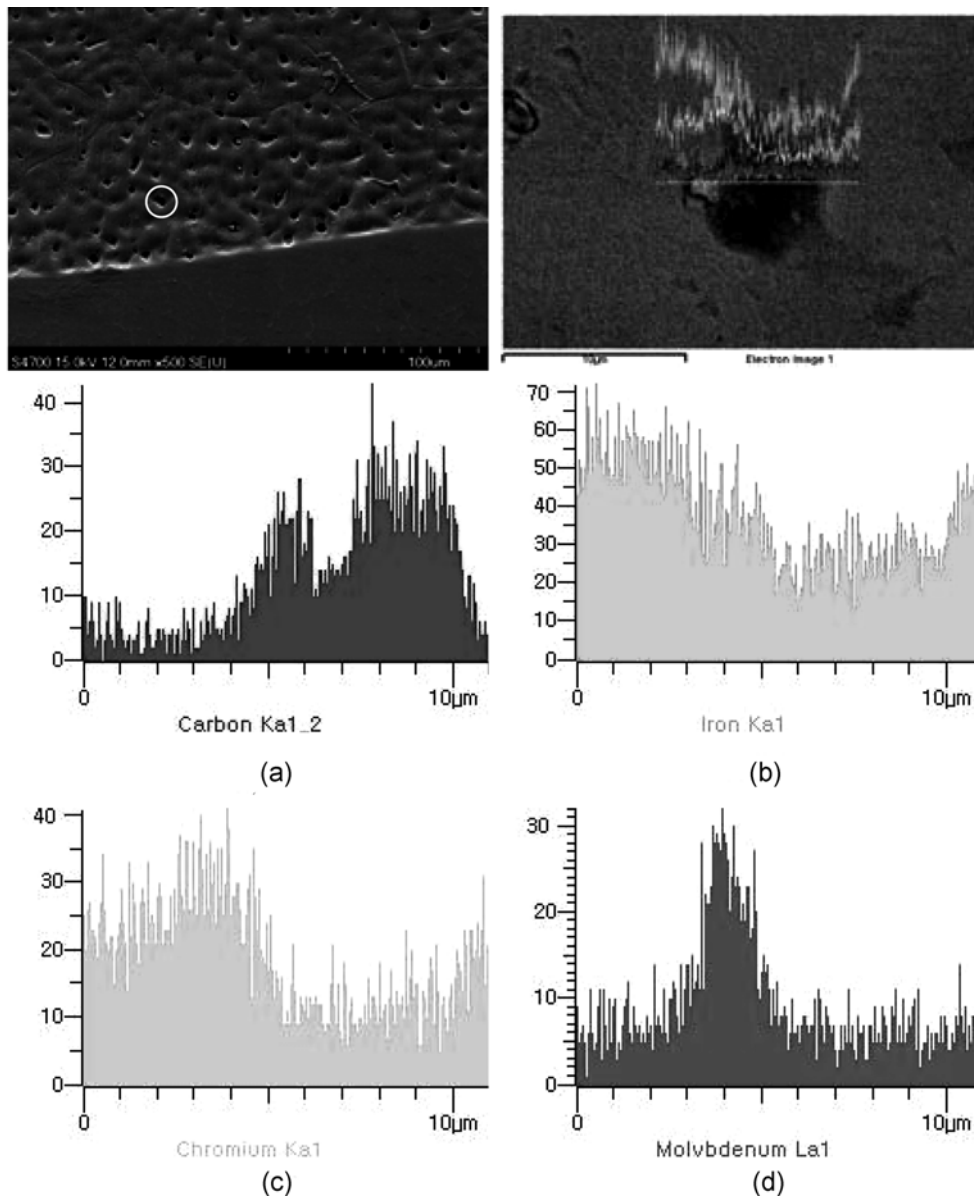


Fig. 9. EDS analysis of IS-G. (a) Linescanning profile of C, (b) Linescanning profile of Fe, (c) Linescanning profile of Cr and (d) Linescanning profile of Mo.

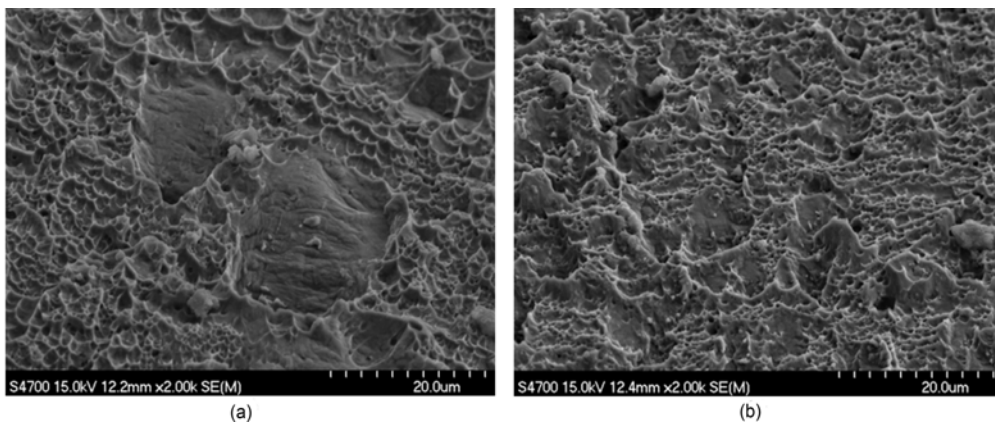


Fig. 10. Fracture surface of INCONEL 718 Alloy. (a) Base Metal(I7-A) and (b) Heat Treated(I7-S).



Fig. 11. Picture of Welded INCONEL 718 Alloy. a) Fracture of weld zone (I7-G) and b) Fracture of base metal (I7-F).

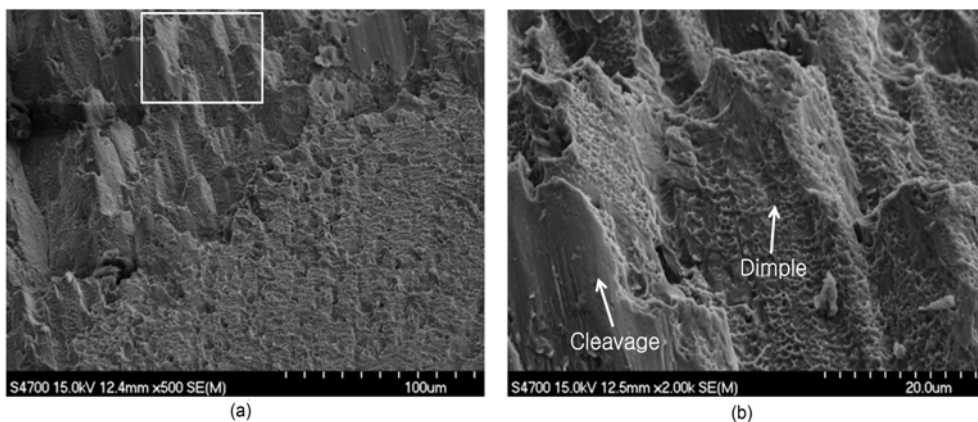


Fig. 12. Fracture surface of Welded INCONEL 718 Alloy. a) Fracture of cleavage & dimple and b) Fracture of dimple in cleavage.

형태의 Cr과 Fe탄화물로 판단되며, 일부 M_6C 형태의 Mo 탄화물로 추측되는 peak가 관찰되었다. 이는 STS316L에 다량 함유되어 있는 Cr과 Fe의 영향으로 판단된다.

3.4 파단면 분석

각 시편의 인장시험 후 파단면을 SEM 분석을 실시하였다. INCONEL 718합금의 모재와 열처리 인장시편은 모두 시편 중심부에서 파단이 발생하였으며, Fig. 10에서 보는바와 같이 파단면은 연성파괴 형태를 나타내었다. 하지만 모재보다 열처리 시편의 파단면 dimple이 더 조밀한 구조로 형성되었으며, 이는 인장강도의 차이로 해석된다. INCONEL 718합금의 용접 시편은 I7-G의 경우 일부 모재에서 파단이 발생하였으며, 대부분의 시편이 용접부에서 파단이 발생하였다.(Fig. 11) 그리고 용접봉을 이용한 I7-F시편은 모두 모재에서 파단이 발생하였다.

용접부에서 파단이 발생한 I7-G시편의 파단면은 Fig. 12a)에서 보는 바와 같이 벽개와 연성파괴 형태가 복합적으로 형성되어 있는 것으로 관찰되었다. 그리고, Fig. 12b)의 벽개 파단부를 2000배율로 확대하여 관찰한 결과 벽개부에서도 dimple이 관찰되었다. 따라서, 용접부의 인장강도가 모재강도와 유사하기 때문에, 용접부에서 파

단이 발생하더라도, 용접부는 취약구조가 아닌 안정된 구조로 접합이 이루어졌다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

극저온 산화제 배관에 적용되는 INCONEL 718 합금의 모재, 용접부 및 이종접합 시편을 인장시험과 SEM 및 EDS 분석을 통하여 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1)극저온 환경에 적용되는 INCONEL 718합금은 상온에서 온도가 감소할수록 인장강도가 계속 증가하며, -100°C 에서는 최고값을 나타내었다.

2)INCONEL 718합금의 기계적 특성은 -100°C 이하의 온도에서 일정온도까지는 인장강도가 계속 증가할 것으로 사료된다.

3)INCONEL 718합금과 STS 316L의 이종접합부의 인장강도는 STS 316L의 모재강도와 유사한 값을 나타내어 양호한 용접부를 형성한 것으로 판단된다.

4)INCONEL 718합금의 강화상은 NbC의 탄화물로서, 열처리 후에는 이러한 탄화물이 증가하였다.

5)I7-G의 파단면은 벽개와 연성파괴 형태를 나타내었

으며, 벽개면에서도 dimple이 관찰되었다.

따라서, 극저온 환경에서의 내구성이 양호하며, 안정된 구조의 용접부를 형성하여, 산화제 배관의 제작 시 극저온 및 고압 환경에서 기계적 특성이 양호한 INCONEL 718합금이 적합한 소재로 판단된다.

향후 INCONEL 718합금의 용접부 및 모재에 대하여, 미세조직 및 정확한 상 분석을 실시하고, 이러한 결과를 바탕으로 극저온 환경에서 기계적 특성이 증가하는 원인을 분석해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. J. H. Choi, K. R. Lee, C. Y. Jo and I. B. Kim, J. Kor. Soc. Heat Treat., **5**(2), 94 (in Korean) (1992).
2. J. D. Kim, T. G. Han, J. Y. Kang, in proceeding of the Korean Welding and Joining Society, (SHI, Kyongbuk, Korea, Nov. 2005, in Korean), p.174.
3. The Korean Welding and Joining Society, "Handbook of Welding and Joining" (in Korean), p. 313 (1998).
4. W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys" (trans. by B. H. Han, ed. Intervision, in Korean), 2nd ed., p.505, Intervision, Korea (2003).