718 초내열합금과 SNCRW강의 이중 마찰용접부의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성평가

김정한* · 김남용** · 공유식***,† · 박노광****

*한밭대학교 신소재공학과

** (주)태웅 기업부설연구소

***부경대학교 LINC+사업단

****한국기계연구원 부설 재료연구소 타이타늄그룹

Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Welded Alloy 718 and SNCRW Stainless Steel After Post-Weld Heat-Treatment

Jeoung Han Kim*, Nam-Yong Kim**, Yu Sik Kong***,† and Nho Kwang Park****

*Department of Materials Science & Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

**Research & Development Center, Taewoong Co., Ltd, Busan, 46740, Korea

***Region Collaboration Center of LINC+, Pukyong National University, Busan, 48547, Korea

****Titanium Department, Korea Institute of Materials Science, Changwon, 51508, Korea

†Corresponding author : kongys@pknu.ac.kr

(Received July 8, 2019 ; Revised August 8, 2019 ; Accepted August 26, 2019)

Abstract

This study investigated dissimilar friction welding of Alloy 718 to SNCRW stainless steel. After friction welding, the effect of post-weld heat-treatment (PWHT) on the microstructure and mechanical properties was carefully studied. For this purpose, friction welded samples were annealed at 500, 720, and 900 °C for 8 hrs, respectively. Heat-treatment at 720 °C resulted in highest hardness due to the precipitation of γ' . On the other hand, relatively low hardness was obtained when PWHT was not performed, or the heat-treatment temperature was not 720 °C. Residual stress in the welded joints was effectively reduced when heat treatment was performed at temperatures above 720 °C. Friction welded specimens fractured at the weld joint when no PWHT was performed or when PWHT was performed at 500 or 900 °C. On the other hand, when PWHT was performed at 720 °C, tensile failure occurred in the SNCRW base metal.

Key Words : Transient liquid phase bonding, Metailization, Interconnect, Power semiconductor, Intermetallic compounds, Lap-shear test

1. 서 론

718합금은 우수한 고온강도와 내부식성으로 인해 산업계에 널리 사용되고 있는 Ni기 초내열합금이다^{1,2)}. 그러나, 최근 들어 급등한 Ni 원소재의 가격 때문에 산업계에서 대량사용은 제한적으로 이루어지고 있다³⁾. 근래는 초내열 합금의 일부를 상대적으로 저렴한 합금강

으로 대체하거나 사용량을 줄이려는 시도가 이루어지고 있다⁴⁻⁶⁾. 특히, 718합금과 내열강을 용접·접합하여 사용하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 일반적인 내열합금의 용접 방법은 확산접합, 전자빔용접, 브레이징, 마찰 용접 등이 있다⁷⁾. 브레이징은 통상적으로 낮은 크립강도를 유발하며, 확산 용접은 Al, Ti 원소의 산화 또는 편석이 문제가 된다^{8,9)}. 전자빔 용접은 특성이 우수하나 진공 분위기 제어를 위한 단가 상승 문제가 있

다. 한편, 마찰 용접은 다른 금속을 접합 할 때 가장 경제적이며 높은 생산성을 보이는 장점이 있다¹⁰⁾. 마찰 용접에서는 압력하에서 회전하는 기계적 에너지가 마찰을 통해 열에너지로 변환되어 금속을 결합시키는 에너지로 사용된다. 718합금과 스테인리스강의 마찰용접은 여러 연구자에서 연구된 바가 있는데 많은 공정 변수가 미세조직 및 접합강도에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다¹¹⁾. 주요 마찰용접의 공정변수는 마찰시간, 마찰압력, 시간, 압력, 회전 속도, 그리고 후열처리 (post-weld heat-treatment, PWHT)등이다. 기존의 연구에서는 마찰용접을 위한 기본적인 공정변수 효과 및 이에 따른 접합강도에 대한 연구가 주를 이루었다. 그러나, PWHT의 효과에 대한 미세조직 및 기계적 물성의 변화는 아직 연구가 부족한 상황이다. 본 연구에서는 여러 온도에서 PWHT를 수행하였고 그 후 접합부의 경도, 인장특성, 잔류응력 측정 시험을 하였다. 얻어진 기계적 특성 평가결과를 미세조직 변화와 비교하여 해석하였다.

2. 실험방법

마찰용접시험을 수행하기 위해 TOHO (TH25) Break-type의 소형마찰압접기 장비를 사용하였다. 718합금과 SNCRW강의 직경 20 mm의 원통형 시편을 사용하여 이중 마찰용접을 수행하였다. 마찰압접 공정조건은 회전수 150 RPM, 발열압력은 35 MPa, 발열시간 40 sec, 업셋압력 100 MPa, 업셋시간은 5 sec였다. 718합금 및 SNCRW의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다. 718합금은 마찰용접 전에 1000 °C에서 2 시간 동안 용체화처리 하였다. 시험편은 직경 20 mm, 길이 100 mm의 환봉으로 가공하였다. 마찰용접 후 시편은 500, 720, 900 °C에서 8시간 PWHT 처리 후 공냉하였다. 그 후 기계가공을 통해 플래쉬가 제거된 시편에서 경도 및 인장시험용 시편들이 채취되었다. PWHT 처리 전·후 경도시험은 압입자를 1 kg의 하중으로 1 mm 간격으로 10 초 동안 가압하여 수행하였다. 인장시험 편의 게이지 길이는 25 mm이고, 인장시험은 크로스 헤드 속도 2.5 mm/min 조건으로 수행되었다. 또한, 열처리 전·후로 상분석을 위하여 Rigaku 장비를 이용하여 XRD 분석이 수행되었다. 잔류 응력평가는 나노압입법으로 수행되었으며 Frontics사의 장비를 사용하였다. 나노 압

입시험용 표준시편 제작을 위해 718합금 및 SNCRW합금을 1000 °C에서 24시간 어닐링 하였고 이 시편들은 잔류응력이 제거된 상태라고 가정하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 1은 718합금과 SNCRW의 마찰접합 후의 시편의 거시적 구조를 보여준다. 마찰접합 시편의 형상은 718합금이 SNCRW보다 높은 강도를 가지기 때문에 SNCRW로 굽어지는 현상을 보였다. SNCREW부분의 플래쉬 (Flash)에서는 균열이 발생하지 않은 반면 718합금쪽에서는 균열이 다수 발생하였다. 이것은 718합금의 강도가 높아 소성변형이 어려웠기 때문으로 판단된다. Fig. 2는 마찰접합 직후 718합금 및 SNCRW의 위치 별 미세조직 변화를 보여주고 있다. 718합금 부분의 경우 접합부에서 비교적 멀리 떨어진 부위는 결정립도가 상대적으로 크고 결정립계면이 매우 부드럽러웠다. 반면, 접합면에 가까워 질수록 결정립도가 미세해지고 물결(wavy)형태의 결정립계면이 관찰되었는데 이는 전형적인 동적재결정 조직의 특징이다¹²⁾. 반면, SNCREW 부분에서는 718합금에 비해 동적재결정이 활발하게 발생하지 않았다.

마찰접합 후 PWHT를 500, 720, 900 °C에서 8시간 수행하였고 이에 따른 경도의 변화를 측정하였다. Fig. 3은 경도 및 부위별 미세조직 변화를 보여준다. 용접 직후 (as-welded)에서는 718합금 모재부의 경도

Fig. 1 Appearance of friction welded Alloy 718 and SNCRW stainless steel specimens

Table 1 Chemical compositions of Alloy 718 and SNCRW (wt.%)

Material	Cr	Fe	Mo	Al	Si	Mn	Ti	C	Ni
Alloy 718	19.0	17.8	2.8	0.62	0.1	0.06	1.1	-	Bal.
SNCRW	19.9	68.5	-	0.01	1.4	0.8	0.01	0.2	9.2

Fig. 2 Optical images revealing the microstructure of Alloy 718 after friction welding

Fig. 3 Hardness value of Alloy 718 and SNCrW friction welded specimens after post-weld heat treatment¹³⁾

는 SNCrW 모재부 보다 200 Hv 정도 경도가 더 높았다. 그러나, 718합금에 가까운 열영향부 (heat affected zone, HAZ)에서는 경도가 급격히 낮아졌고 다시 SNCrW쪽으로 이동하면서 경도가 상승하는 모습을 보여주었다. 이는 마찰접합 후 높은 마찰열로 인해 주요 강화상인 γ'' 석출상이 HAZ에서 용해되었기 때문으로 사료된다¹³⁾. 500 °C 열처리한 소재의 경도는 as-weld 상태와 유사한 거동을 보였다. 한편, 720 °C 열처리의 경우 HAZ의 경도가 급격히 상승하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 마찰접합 중 기지에 고용되었던 γ'' 상이 720 °C에서 다시 재석출되었기 때문으로 보인다. 반면, 열처리 온도가 더 높아져 900 °C가 되면 HAZ 외에 718합금의 모재부에서도 경도가 크게 하락하였다. 이는 900 °C에서 γ'' 상이 재고용되었기 때문이다¹³⁾. 한편, HAZ 경계쪽에서 결정립도는 열처리에 따라 크게 변화하지 않았다. 이는 경도의 변화가 결정립 크기 변화보다는 강화상의 석출 여부에 크게 관계되어있음을 반

Fig. 4 XRD patterns of Alloy 718 and SNCrW friction welded specimens after post-weld heat treatment

Fig. 5 Macro photos showing the shape of Alloy 718 and SNCrW specimens after tensile testing

증한다¹⁴⁾.

720 °C×8시간 조건에서 PWHT된 시편의 HAZ 정도상승이 원인이 γ'' 상의 석출과 관련이 있는지 확인하기 위해서 각 시편마다 XRD 분석을 수행하였다. Fig. 4는 각 시편에서 XRD 분석한 결과를 나타내었다. 공통적으로 모든 시편에서 γ 상인 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 가 관찰되었다. 그러나, 주강화상인 γ'' (Ni_3Nb)는 720 °C×8시간 조건에서만 관찰되었다. 따라서 720°C×8시간의 조건에서의 정도상승은 γ'' 상의 재석출이 원인임을 알 수 있었다.

Fig. 5는 PWHT 효과에 따른 상온인장시험의 결과를 보여주는 사진이다. 파단시편 사진 위의 화살표들은 인장 후 파단 지점을 나타낸다. As-weld 와 500, 900 °C PWHT 조건에서는 모두 용접부에서 파단이 일어났다. 그러나, 720 °C×8시간 PWHT 조건에서는 SNCrW 모재에서 파단이 일어난 것을 확인할 수 있었다. 이는 열처리 효과에 의해 718합금 모재부와 HAZ 강도가

Fig. 6 Distribution of residual stress of Alloy 718 and SNCrW friction welded specimens after post-weld heat treatment. Red dots indicate the position of measurement

크게 상승한 반면 SNCrW 모재부의 강도는 여전히 낮기 때문에 나타난 현상이다¹⁵⁾. 이 결과는 마찰용접 후 PWHT처리의 필요성을 다시 한번 보여주는 결과이다.

Fig. 6는 마찰용접 후 용접후열처리 조건별에 따라 잔류응력을 측정된 값을 나타내었다. SNCrW 영역에서 압축잔류응력이 관찰되고, 718합금 영역에서는 인장잔류응력이 관찰되었다. 이는 718합금이 SNCrW보다 상대적으로 아주 높은 강도를 가지기 때문으로 판단된다¹⁶⁾. PWHT온도가 높을수록 잔류응력이 적어짐을 확인할 수 있었다. 900°C×8시간 조건에서 가장 낮은 잔류응력이 관찰되었지만 앞에서 보인 결과와 같이 900°C×8시간 조건에서는 γ'' 상의 재고용으로 경도가 매우 낮았다. 따라서, 비교적 잔류응력이 낮고 γ'' 상의 재석출 효과를 얻을 수 있는 720°C×8시간의 조건이 마찰용접 PWHT 조건 중 가장 적합한 온도로 판단된다.

4. 결 론

718합금과 SNCrW강의 이중 마찰용접을 수행하였고, PWHT에 따른 미세조직 및 기계적특성 변화를 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 718합금과 SNCrW의 마찰접합부를 720 °C 열

처리한 경우 γ'' 의 석출로 인해 높은 경도가 얻어졌다. 반면, PWHT가 수행되지 않았거나 온도 조건이 다른 경우 상대적으로 낮은 경도가 얻어졌다.

2) 마찰접합부의 잔류응력은 720 °C 이상에서 열처리가 수행되었을 때 효과적으로 감소되었다.

3) PWHT가 수행되지 않았거나 500, 900 °C에서 PWHT가 수행된 경우 마찰용접 시편은 용접 이음부에서 파단되었다. 반면, 720 °C에서 PWHT가 수행된 경우 SNCrW 모재 금속에 인장 파단이 발생했다.

ORCID: J.H. Kim <https://orcid.org/0000-0002-6997-4239>

ORCID: Nho Kwang Park: <https://orcid.org/0000-0002-3404-6379>

References

1. D. H. Kim, Y. H. Lee and J. H. Kim, Effect of Second Aging Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of SUH660 Alloy, *Korean J. Met. Mater.* 667 (2016) 311-316.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.099>
2. N. K. Park, J. H. Kim and J. T. Yeom, Recrystallization and grain growth during alloy 718 processing, *Mater. Sci. Forum.* 539-543 (2007) 3094-3099.
3. J. T. Yeom, C. S. Lee, J. H. Kim, D. G. Lee and N. K. Park, Continuum damage model of creep-fatigue interaction in Ni-base superalloy, *Key Eng. Mater.* 340-341 (2007) 235-240.
4. J. H. Kim, K. R. Lim, J. W. Won, Y. S. Na and H. S. Kim, Mechanical properties and deformation twinning behavior of as-cast CoCrFeMnNi high-entropy alloy at low and high temperatures, *Mater. Sci. Eng. A.* 712 (2018) 108-113.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.081>
5. N. K. Adomako, J. H. Kim and Y. T. Hyun, High-temperature oxidation behaviour of low-entropy alloy to medium- and high-entropy alloys, *J. Therm. Anal. Calorim.* (2018).
<https://doi.org/10.1007/s10973-018-6963-y>
6. J. H. Kim, K. R. Lim, J. W. Won, Y. S. Na and H. S. Kim, Mechanical properties and deformation twinning behavior of as-cast CoCrFeMnNi high-entropy alloy at low and high temperatures, *Mater. Sci. Eng. A.* 712 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.081>
7. N. Kwabena, J. O. Kim and J. Han, Materials Science & Engineering A Microstructural evolution and mechanical properties of laser beam welded joints between pure V and 17-4PH stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A.* 7 (2019) 208-217.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.036>
8. T. Park and J. H. Kim, Microstructure and Mechanical Properties of Oxide Dispersion Strengthened alloy Based on Commercially Pure Titanium, *Korean J. Powder.* 25 (2018) 327-330.
<https://doi.org/10.4150/KPML.2018.25.4.327>

9. S. Eun, K. Noh, J. Yong, Y. Ju and J. Han, Hardness and Microstructure evolution of SUS630 Stainless steel Fabricated by Directed Energy Deposition, *J. Korean Inst. Met. Mater.* 25 (2018) 220-225.
<https://doi.org/10.4150/KPMI.2018.25.3.220>.
10. B. M. Arkhurst, J. Park, C. Lee and J. H. Kim, Direct Laser Deposition of 14Cr Oxide Dispersion Strengthened Steel Powders Using Y_2O_3 and HfO_2 Dispersoids, *Korean J. Met. Mater.* 55 (2017) 550-558.
<https://doi.org/10.3365/KJMM.2017.55.8.550>
11. R. Cortés, N. K. Rodríguez, R. R. Ambriz, V. H. López, A. Ruiz and D. Jaramillo, Fatigue and crack growth behavior of Inconel 718-AL6XN dissimilar welds, *Mater. Sci. Eng. A* 745 (2019) 20-30.
12. B. M. Arkhurst and J. H. Kim, Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Oxide Dispersion Strengthened Steels Made from Water-Atomized Ferritic Powder, *Met. Mater. Int.* (2018).
<https://doi.org/10.1007/s12540-018-0071-1>
13. N. Y. Kim, J. H. Kim, Y. S. Kong, J. W. Yoon, J. T. Yeom, D. G. Lee and N. K. Park, The effect of post weld heat treatment on mechanical properties of friction-welded alloy 718 and SNCRW stainless steel, *Adv. Mater. Res.* 26-28 (2007) 511-514.
14. B. M. Arkhurst, J. H. Kim and M. Y. Lee, Hot metal pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to AZ31 Mg alloy and the effect of the oxide surface layer on joint strength, *Appl. Surf. Sci.* (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.009>
15. B. Mensah, J. Han and M. Lee, Applied Surface Science Hot metal pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to AZ31 Mg alloy and the effect of the oxide surface layer on joint strength, *Appl. Surf. Sci.* 477 (2019) 241-256.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.009>
16. B. Mensah, J. Bok, Y. Seoung, M. Lee and J. Han, Interfacial structure and bonding mechanism of AZ31 / carbon-fiber-reinforced plastic composites fabricated by thermal laser joining, *Compos. Part B.* 167 (2019) 71-82.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.002>