

Alloy718 마찰접합조건의 최적화와 비파괴 평가

권상우* · 공유식** · 김선진**

*부경대학교 기계공학부 대학원

**부경대학교 기계공학부

Optimization of Friction Welded Joint Conditions in Alloy718 and the Nondestructive Evaluation

SANG-WOO KWON*, YU-SIK KONG**, AND SEON-JIN KIM**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Friction welding(FRW) 마찰용접, Heat affected zone(HAZ) 열영향부, Weld interface(WI) 용접계면, Acoustic emission(AE) 음향방출, Ultrasonic attenuation coefficient 초음파 감쇠계수

ABSTRACT: Friction welding was performed to investigate mechanical properties for Ni-base superalloy with 15 mm diameter solid bar. The main friction welding parameters were selected to endure good quality welds on the basis of visual examination, tensile tests, impact energy test, Vickers hardness surveys of the bond of area and heat affected zone. And then, the nondestructive technique to evaluate the weld quality was carried out by acoustic emission(AE) and ultrasonic attenuation coefficient. The tensile strength of the friction welded joint was shown up to 90 % of the Alloy718 base metal under the condition of the heating time over 5 sec. The optimal welding conditions were $n = 2,000 \text{ rpm}$, $P_1 = 200 \text{ MPa}$, $P_2 = 200 \text{ MPa}$, $t_1 = 8 \text{ sec}$ and $t_2 = 5 \text{ sec}$ when the total upset length was 4.4 mm.

1. 서 론

마찰용접(Friction welding, FRW)은 동종재는 물론 가스용접, 저항용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에는 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며, 또한 경제적인 면과 기술적인 면에서도 많은 잇점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체 상태의 두 재료를 가압하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압착시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다(대한용접학회, 1998; AWS, 1981).

국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적조건의 결정과 응용 및 강도에 관한 연구가 Cho and Suh(1997), Jeong and Shinoda(1997), Oh et al.(2000) 등에 의하여 보고되는 등 동종 및 이종재료의 마찰용접에 관한 연구가 증가되고 있다. 그러나 마찰용접조건과 인장강도간의 관계에 관하여 많이 보고되고 있지만, 실용상 중요한 피로강도의 관점에서 이것을 평가하고, 또 신뢰성 제고를 위한 통계적 해석을 연구한 보고는 드물다. 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용하고 구조물 혹은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 실용적 평가방법에 의한 마찰용접재의 용접부의 강도 특성 파악과 신뢰성

교신저자 김선진: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-620-1608 sjkim@pknu.ac.kr

있는 데이터의 축적이 필요하다. 한편, 원자력 발전소용 스템밸브(Stem valve)는 일반적으로 내열 스테인레스강으로 가공이 되고 있으나 고온, 고압하에 작동되기 때문에 수명상의 한계가 있다. 이를 초내열 합금으로 대체하게 될 경우 우수한 크리프-파단 특성을 활용할 수 있으며 또한, 인장강도의 비약적인 향상을 기대할 수 있다. 그러나 니켈기 초내열합금은 일반 스테인레스강에 비해서 가격이 비싸서 실제로 생산되는 부품의 제품단가를 높인다는 문제점이 있다. 스템밸브의 구성부분 중 직접적으로 고온·고압의 가스에 노출되는 헤드부분만을 니켈기 초내열합금으로 사용하고, 스템을 포함한 여타 부분은 일반 스테인레스 강으로 대체한다면 초내열합금의 내구성을 갖으면서 제조단가가 낮은 제품을 개발할 수 있다. 그러므로 이를 재료를 접합할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있는 실정이다(Mary and Jahazi, 2006).

따라서 본 연구에서는 이를 재료의 접합기술을 개발하기 위한 초기단계로서 니켈기 초내열합금인 Alloy718의 동종 금속간의 마찰용접을 시행하였고, 최적 마찰접합의 최적조건을 결정하기 위해 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질과의 상관관계를 고찰하였다. 또한 비파괴 검사법인 음향방출법(Acoustic emission, AE)과 초음파시험(Ultrasonic test, UT)을 병행하여 마찰가열시간과의 두 시험에서의 정량적 상관성을 도출하여 용접품질을 평가하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 마찰용접 실험재료는 니켈기 초내열합금인 Alloy718이며, 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하며, 주된 용도는 일반기계, 자동차, 선박용, 항공기 등의 축류, 스템밸브류, 볼트류 등에 많이 이용된다. Table 1과 Table 2에 화학 성분과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

마찰용접 시험을 위한 시험편의 접합부는 직경 15mm, 측의 물림부는 직경 20mm, 전체 길이는 80mm로 가공하였다. 그리고 마찰용접 시험편의 강도를 알기 위한 인장 시험편의 형상 및 치수로서 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 또한 절삭유를 충분히 급유함으로써 가공시 발생하는 열영향을 최소화 시켰다.

2.2 실험장치 및 실험방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model : TOHO TH-25)는 연속구동 브레이크 형(Continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전체은 Ø25mm이고 고정체은 Ø40mm이다. 그리고 이음부의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기(Model : KDU-50)로서 인장속도는 2 mm/min으로 각 모재와 용접재를 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model : MVK-H1, Akashi)를 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g/10초의 0.5mm 등간격으로 좌우 각 12mm 까지 중심부와 원주부 등 3가지로 구분해서 측정하였다.

한편, 마찰용접시 발생하는 AE량을 측정하기 위해서는 고감도 변환기(R15-C 150kHz sensor)를 용접면에서 마찰용접기의 정지체 방향으로 170mm 떨어진 위치의 정지체 상에 연결된 웨이브 가이드에 부착하였다. 웨이브가이드에 부착한 변환기로부터 전달된 AE신호를 컴퓨터에 저장하여, 그 저장된 결과를 AE 누적총량의 형태로 표현하였다. 넓은 주파수범위의 스펙트럼을 커버하는 다양한 AE발생원으로부터 AE가 발생하기 때문에 100~300kHz 범위의 밴드 패스 필터(Band-pass filter)를 포함하는 고감도 센서용 증폭장치를 사용하여 저주파와 고주파의

소음(Noise)을 제거하였으며 40dB로 증폭하여 측정된 AE신호가 시그널 케이블을 통하여 장치에 원활이 전달되도록 하였다.

장치에 전달된 AE신호는 신호처리를 위하여 주증폭기에서 다시 40dB로 증폭하여 전체 시스템 이득(Gain)을 80dB로 설정하였다.

또한, 마찰용접 조건에 대한 초음파 감쇠계수의 측정은 탐촉자 내의 압전재료에 적정 펄스전압을 가하여 진동(초음파)를 만들고 그 진동이 시험편 배면에서 반사되어오는 것을 압전재료가 전기적 신호로 바꾸어 CRT상으로 나타나게 하는 펄스반사법 중에서 수직탐상법으로 측정하였다. 표준시험편은 KS B 0831에 규정된 STB-A1을 사용하였고, 초음파의 발생과 수신을 위해서 Parametric사의 Ø10 주파수 5MHz인 탐촉자를 사용하였으며, USD-15 초음파 탐상기를 사용하여 초음파 파라미터를 측정하였다.

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 가열압력(P1), 업셋압력(P2), 가열시간(t1), 업셋시간(t2) 등이다. 먼저 참고문헌(오세규 등, 1988; 이배섭 등, 2005; Oh et al., 2000)을 통하여 Fig. 1의 조건으로 실험 후 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 결정하였다. 그리고 이 조건을 기준으로 가열시간 변화에 따른 상관관계와 총업셋량(UT)의 변화를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입력변화의 상관성

Fig. 1은 압력변화에 따른 인장강도 결과를 나타낸다. 먼저 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2), 가열시간(t_1)과 업셋시간(t_2)을 각 4가지 조건으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그림에서 보면 타 조건에 비해 $P_1=200\text{ MPa}$, $P_2=200\text{ MPa}$, $t_1=10\text{ sec}$, $t_2=5\text{ sec}$ 의 인장강도가 971MPa로 높게 나타났다. 이는 모재 인장강도(988MPa)의 98%에 달하며, 거의 100%에 근접하는 결과이다. 또한 본 실험 결과는 타 문헌(오세규 등, 1988; 이배섭 등, 2005; Oh et al., 2000)의 결과와도 비교적 잘 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적조건을 P_1 과 P_2 를 각 200MPa, t_1 과 t_2 를 각각 10, 5sec로 결정하였다.

3.2 업셋량의 상관성

Fig. 2는 마찰용접에서 업셋량(U_T)과 가열시간(t_1)의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이, 가열시간이 증가할수록 각 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 가열시간이 8초일 때 총 업셋량은 4.4mm로 나타났고, 18초일 때 14.8mm가 되었다. 따라서 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 매우 효율적인 방법이라고 판단된다. 이것으로부터 알 수 있듯이, 업셋량과 가열시간 사이에는 강한 양(Positive)의 선형적인 상관관계가 있음이 확인되었다. 타의 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형적인 증가관계를 나타내는 결과가 많이 보고(Kong and Kim, 2006; Oh et al., 2000)되고 있다.

Table 1 Chemical composition of material (wt. %)

Material	Al	Si	Mn	Cr	Ti	Fe	Mo	Ni
Alloy718	0.62	0.1	0.06	19.2	1.1	17.7	2.8	Bal.

Table 2 Mechanical properties of material

Material	Tensile strength $\alpha(\text{MPa})$	Yield strength $\alpha_y(\text{MPa})$	Reduct- ion of area $\gamma(\%)$	Elongation $\epsilon(\%)$	Hard- ness (HV)
Alloy718	988	600	61.6	48.5	255

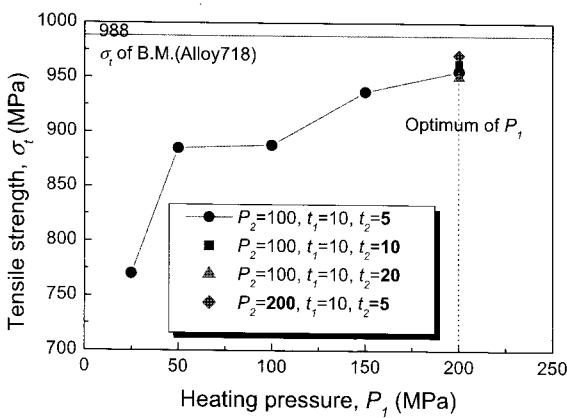


Fig. 1 Relationship between tensile strength and heating pressure in as-welded specimen

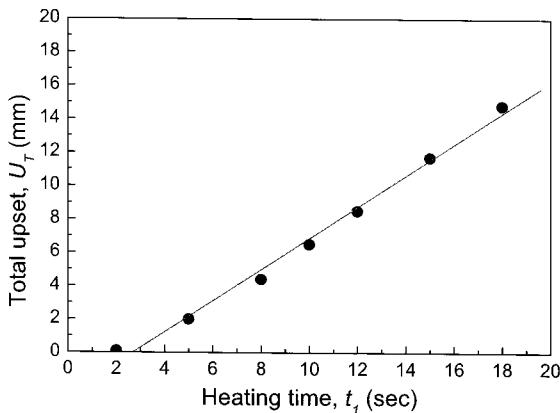


Fig. 2 Relationship between total upset and heating time in as-welded specimen

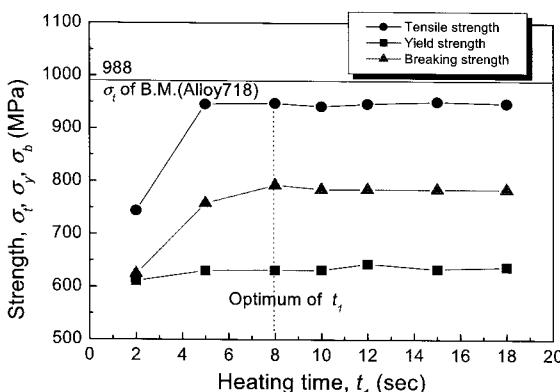


Fig. 3 Relationship between strength and heating time in as-welded specimen

3.3 용접변수와 강도의 상관성

Fig. 3은 가열시간과 각종 강도(인장강도, 항복강도, 파괴강도)와의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 인장강도는 모재의 인장강도(988MPa)에 비해 모든 조건에서 낮게 나타났으며, 평균적으로 가열시간이 증가하면 다소 증가하는 경향을 보였으나 항복강도와 파괴강도는 가열시간 2초인 경우를 제외하고는 비슷한 결과를 보였다. 따라서 최적조건을 정적 강도적인 측면에서 고려해 볼 때, 가열시간은 8초 정도가 적합하다고 판단된다. 다만, 마찰용접시 전전한 접합(인장강도만을 중심으로)이 되는 최적조건의 범위는 비교적 넓었고, Fig. 1에서와 같이, 비교적 높은 용접압력에서의 결과가 실험적으로 우수하였다. 이는 타의 실험결과(이배섭 등, 2005; Kong and Kim, 2006; Oh et al., 2000)에서도 비슷한 결과를 보고하고 있다.

그림에서 특이한 사항은 가열시간이 2초일 때, 인장강도, 항복강도 그리고 파단강도가 비슷한 값으로 비교적 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 다른 조건에서는 모재에서 연성적 파단을 나타낸 반면에, 가열시간 2초의 경우에는 용접계면(Weld interface)에서 바로 파단이 일어난 취성파괴(Brittle fracture) 양상의 원인으로 생각된다.

Fig. 4는 마찰 가열시간과 연성(연신율, 단면수축률)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 가열시간 2초의 경우를 제외한 가열시간이 5~18초인 경우, 연신율은 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 단면수축률도 약 50%로 비슷하였고, 8초에서 55%로 비교적 높게 나타나고 있다. 따라서 앞의 강도적인 측면과 더불어 인성적인 측면에서 고려해 볼 때, 최적 마찰 가열시간은 8초가 적합하다고 판단된다. 이는 마찰용접재의 인장강도가 모재와 비슷한 경우 취성의 영향이 적고 연성이 우수하기 때문이다. 그림에서 특이한 사항은 가열시간 2초에서 연성적 측면은 가장 낮게 나타났고, 용접계면에서 취성파단 되었다. 이는 가열시간이 짧기 때문에 짧은 시간에 많은 열을 받아 열영향부에서의 많은 열변형의 동반이나 짧은 시간으로 인한 용입 불량 등의 원인으로 사료되며, 타 문헌(이배섭 등, 2005; Kong and Kim, 2006; Oh et al., 2000)에서도 비슷한 결과를 보고하고 있다. 이상에서 알 수 있듯이, 강도적인 측면과 인성적인 측면을 조합하여 고려해 볼 때, 가열시간이 5초 이하는 마찰용접 조건으로 타당하지 않다고 판단된다.

Fig. 5는 가열시간과 충격에너지 값과의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모재의 충격에너지 값($22.3\text{kg}\cdot\text{m}$)에 비해 전체적으로 약 60%에 근접한 결과이다. 이는 인장강도와 비교할 때 비슷한 경향으로 나타났으며, 마찰용접부의 충격에너지 값은 5초와 8초일 때 $15.1\text{kg}\cdot\text{m}$ 과 $14.9\text{kg}\cdot\text{m}$ 로 최대값을 기록하였다. 이 값은 약 68%에 근접한 결과이다.

3.4 마찰용접부의 경도분포

Fig. 6은 최적 마찰용접 조건($n=2000\text{rpm}$, $P_1=200\text{MPa}$, $P_2=200\text{MPa}$, $t_1=8\text{sec}$, $t_2=5\text{sec}$)에서 용접한 시험편의 경도분포를 나타내었다. 경도 측정은 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주

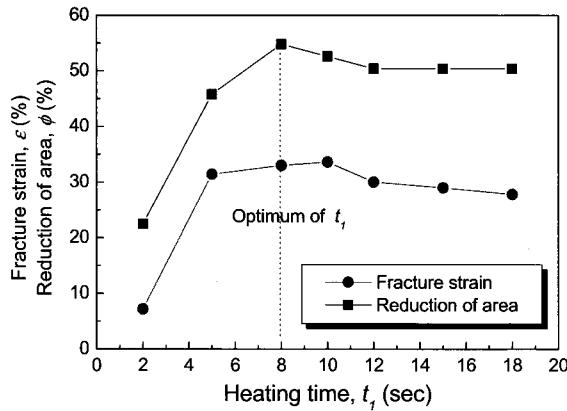


Fig. 4 Relationship between ductility and heating time in as-welded specimen

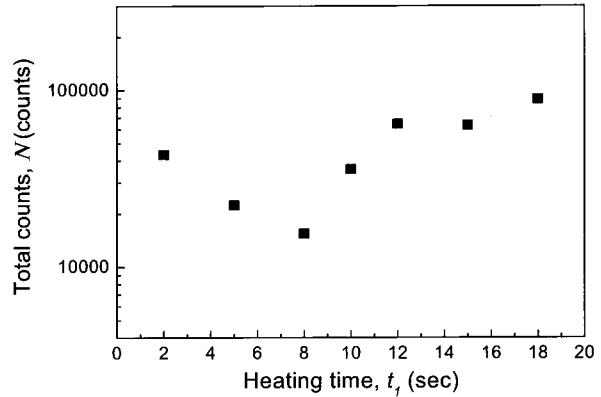


Fig. 7 Relationship between AE total counts and heating time

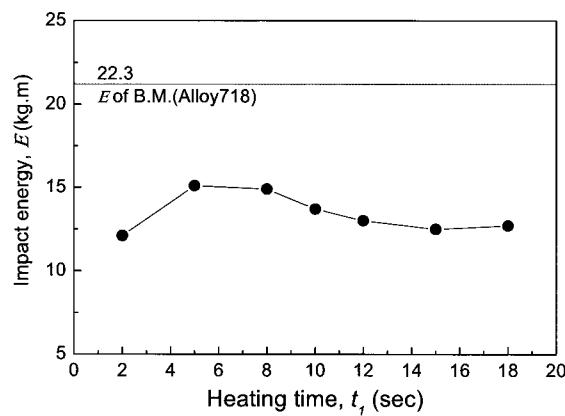


Fig. 5 Relationship between impact energy and heating time in as-welded specimen

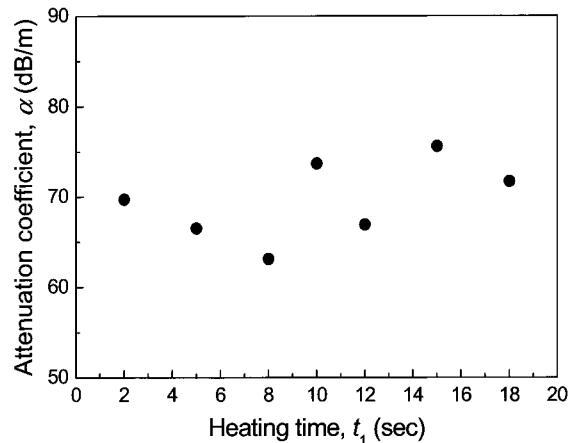


Fig. 8 Relationship between ultrasonic attenuation coefficient and heating time

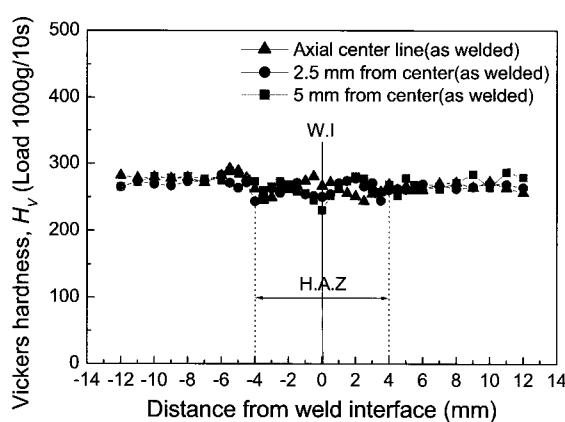


Fig. 6 Hardness distribution [welding condition: $n = 2000\text{rpm}$, $P_1 = 200\text{MPa}$, $P_2 = 200\text{MPa}$, $t_1 = 8\text{sec}$, $t_2 = 5\text{sec}$]

부의 경도분포를 각각 조사하기 위해 3가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경(15mm)의 중심부(원주끝에서 7.5mm), 두 번째는 중심부에서 2.5mm인 지점, 세 번째는 중심부에서 5mm인 지점으로 구분하여 조사하였다.

용접재의 경도분포 그래프를 보면, 모재의 경도는 $H_V 255$ 으로 나타났으며, 이들 재료의 용접계면(Weld interface, WI)부의 경도는 약 $H_V 250$ 으로서 모재보다 다소 낮게 나타났다. 그리고 열영향부(Heat affected zone, HAZ)는 용접계면으로부터 좌우 약 4mm로 판단된다.

또한 열영향부에서 중심부와 원주부의 경도치가 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 대부분의 마찰용접에서는 원주 속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이로 인해 마찰온도가 높으며, 따라서 원주부의 마찰열이 중심부로 전달되어 원주부의 경도치가 높게 나타나지만 여기서는 직경이 작기 때문에 거의 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

3.5 AE누적총량과 가열시간과의 관계

Fig. 7은 가열시간과 AE누적총량의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 확실한 상관성이 보이지 않았으나 전체적인 경향으로는 가열시간이 증가하면 AE누적총량이 감소하였다가 8초 후에는 다시 증가하는 형태로 나타났다. 따라서 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 8초의 경우 AE 누적총량이 15400정도로 가장 낮은 값을 보였다. 이는 가열시간 중에 AE를 발생하는 인자의 영향이 적어 양호한 용접이 이루어지고 있음을 시사해준다고 할 수 있다.

3.6 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계

Fig. 8은 가열시간과 초음파 감쇠계수(dB/m)와의 변화를 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 마찰 가열시간과 초음파 감쇠계수와의 관계에서는 확실한 상관성이 보이지 않았으나, 전체적인 경향으로 보아 가열시간이 증가하면 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 초음파의 감쇠의 원인은 다음에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉, 결정입자 및 조직에 의한 산란, 점성감쇠, 전위운동에 의한 감쇠, 강자성재료에서 자벽의 운동에 의한 감쇠, 잔류응력 등을 들 수 있다 (Adams and Taylor, 1969). 그러나 이에 대한 추가 연구가 향후 필요하다고 본다. 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 8초인 경우에 초음파 감쇠계수가 가장 적은 값을 나타났으며, 이는 AE 누적총량의 결과와 비슷한 경향을 얻었다.

4. 결 론

니켈기 초내열합금인 Alloy718의 마찰용접과 비파괴 시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 마찰가열시간이 2초를 제외한 모든 용접조건에서 용접부의 이음효율이 모재의 90% 이상 되었으며, 용접재의 강도 및 연성을 고려한 최적 마찰용접조건은 다음과 같다.

$$n=2,000\text{rpm}, P_1=200\text{MPa}, P_2=200\text{MPa}, t_1=8\text{sec}, t_2=5\text{sec}$$

(2) 경도분포 조사에서 모재의 경도는 Hv 255으로 나타났으며, 이들 재료의 용접계면부의 경도는 약 Hv 250으로서 모재부와 비슷한 양상으로 나타났다.

(3) 마찰가열시간이 8초에서 AE누적총량이 가장 낮은 값으로 나타났다. 이는 가열시간 중에 AE를 발생하는 인자의 영향이 적어 양호한 용접이 이루어짐을 시사해준다. 또한 초음파 감쇠계수와의 관계에서도 8초에서 가장 낮은 값을 나타났으며,

전체적인 경향은 AE 누적총량과 비슷하게 나타났다.

참 고 문 헌

- 대한용접학회 (1998). 용접·접합편집, pp 663-664.
 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈 (1988). "S45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제2권, 제2호, pp 312-321.
 이배섭, 공유식, 김선진 (2005). "해양차량 속업소비용 강재의 이종 마찰용접과 AE 평가", 한국해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 44-48.
 Adams, D.F. and Taylor, S.K. (1969). "Detection of Faults in Friction Welded studs by Ultrasonics", Welding and Metal Fabrication, pp 412-421.
 AWS(1981). Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding, 7th edition, Vol 1, pp 153-220.
 Cho, H.S. and Suh, S.J. (1997). "Friction Welding of Inconel 713C and SCM440", Journal of KWS, Vol 15, No 6, pp 78-84.
 Jeong, H.S. and Shinoda, T. (1997). "Fundamental and Basic Application of Friction Welding", Journal of KWS, Vol 15, No 6, pp 1-12.
 Kong, Y.S. and Kim, S.J. (2006). "Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars in Relation to Post Weld Heat Treatment", Trans. of the KSME(A), Vol 30, No 4, pp 402-408.
 Mary, C. and Jahazi, M. (2006). "Linear Friction Welding of IN718 Process Optimization and Microstructure Evolution", Advanced Materials Research, Vols 15-17, pp 357-362.
 Oh, S.K., Kong, Y.S., Yoo, I.J. and Kim, I.S. (2000). "Creep Life Prediction for Dissimilar Friction-Welded-Joints of Turbine Impeller Heat Resisting Steels and AE Evaluation(1)-FRW and AE Evaluation", Proc. of International Offshore and Polar Eng. Conf., pp 203-207.

2007년 10월 22일 원고 접수

2008년 2월 4일 최종 수정본 채택