

이종마찰용접 강봉재의 기계적특성과 비파괴 평가

The Mechanical Properties and the Nondestructive Evaluation of Dissimilar Friction Welded Steel Bars

정원택 · 공유식 · 김선진
W. T. Jung, Y. S. Kong and S. J. Kim

Key Words : As Welded(용접재), Post Weld Heat Treatment(PWHT, 용접후열처리), Heat Affected Zone(HAZ, 열영향부), Acoustic Emission(AE, 음향방출), Ultrasonic Attenuation Coefficient(초음파감쇠계수)

Abstract : In this study, dissimilar friction welding were produced using 15mm diameter solid bar in chrome molybdenum steel(SCM440) to carbon steel(S45C) to investigate their mechanical properties and the relationship between the weld parameters and the nondestructive coefficients, such as AE counts and ultrasonic attenuation coefficient. The main friction welding parameters were selected to endure good quality welds on the basis of visual examination, tensile tests, Vickers hardness surveys of the bond of area and heat affected zone. The specimens were tested as-welded and post weld heat treated(PWHT). The tensile strength of the friction welded steel bars was increased up to 100% of the S45C base metal under the condition of all heating time. The ductility of PWHT specimens is higher than as-welded.

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 각종 자동차 및 중장비 부품의 축, 그리고 각종 공구류, 기계부품의 다양한 분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 고가품과 저가품의 이종재 용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성이 좋은 제품의 대량 생산, 자동화의 용이성, 가공시간의 단축, 재료절약, 에너지의 고효율화 등에 마찰용접을 적용하려는 연구가 활발히 추진되고 있다.

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 장점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다^{1, 2)}.

국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적조건 결정과 응용 및 강도에 관한 연구가 보고^{3, 4)} 되는 등 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 강도특성 파악과 신뢰성 있는 데이터의 축적이 필요하다.

한편, 마찰용접재에 대한 비파괴적 연구는 1969년 Adams⁵⁾에 의한 마찰용접 이음면의 결함을 찾기 위한 초음파 펄스를 송수신하는 방법을 이용한 연구와 Wang⁶⁾등에 의한 초음파반사계수를 이용한 연구 등이 있다. 국내에서는 오 등⁷⁻⁹⁾에 의한 마찰용접재의 AE 기법에 의한 실시간 비파괴적 평가에 관한 연구가 있으며, 초음파 반사계수를 초음파 펄스파를 이용하여 구하고, 마찰용접부의 기계적 성질을 비파괴적 방법으로 평가하는 연구¹⁰⁾를 수행한 바 있다. 그러나 이들의 상관관계에 대한 고찰은 미약하며, 이에 대한 비파괴적 평가 방법의 연구는 더 필요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 축 재료 등에 이용되는 S45C

접수일 : 2005년 8월 11일
김선진(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1608
정원택, 공유식 : 부경대학교 기계공학부

와 내마모성, 내피로성 등이 우수한 SCM440의 이종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해 마찰용접 후 열처리전의 상태에 대하여 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 연성 등)과의 상관관계를 고찰하였으며, 또한 동일한 용접조건하에서 마찰용접을 한 후 열처리를 시행하여 용접재(as-welded)와 후열처리재(post-weld heat treatment, PWHT)의 강도 특성을 비교 검토하였다. 또한, 마찰용접시 음향방출시험을 병행하여, AE누적총량과 마찰용접의 변수, 특히 가열시간과 AE누적총량과의 상관성을 검토하였으며, 이종재 마찰용접에 있어 초음파 감쇠계수와 마찰용접변수와의 상관성에 대하여 용접재와 후열처리재를 각각 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 마찰용접 실험재료는 S45C와 SCM440 강재에 대한 강도와 인성, 내마모성에 중점을 두었으며, 국내 P사의 제품이다. 기계구조용 탄소강재(S45C)는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, Cr-Mo강재(SCM440)는 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하며, 주된 용도는 일반기계, 자동차, 선박용, 항공기 등의 축류, 기어류, 냉간단조품, 볼트류 등에 많이 이용된다. Table 1과 Table 2에 SCM440과 S45C의 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

마찰용접 시험편의 강도를 알기 위한 인장 시험편의 형상 및 치수로서 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 또한 경도 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 후 용접부(직경 15mm)를 좌우 10mm로 절단하였고, 중심부를 따라서 절단(wire cutting)하였다. 절단시 열영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 듬뿍 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱하였다.

또한, 마찰용접 후 용접부의 잔류응력 제거를 위해 후열처리를 하였다. 후열처리 조건은 설정온도까지 20℃/min로 가열하였고, 780℃에서 4시간 유지 후, 노(furnace)내에서 서냉하였다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt. %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
SCM440	0.39	0.21	0.78	0.012	0.012	10.3	0.18	0.06	0.17
S45C	0.45	0.18	0.67	0.015	0.016	0.15	0.19	0.08	0.19

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials		Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness Hv
As-welded	SCM440	1029	799	32.6	13.6	270
	S45C	749	672	42.7	16	238
PWHT	SCM440	837	471	58.7	13.4	229
	S45C	658	429	53.8	27	183

Post weld heat treatment : annealing(780℃×4h→furnace cool)

2.2 실험장치 및 방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model : TOHO TH-25)는 연속구동브레이크형이며, 인장시험기는 만능시험기(Model : KDU-50)로서 인장속도는 2mm/min 으로 각 모재와 용접재를 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기(Model : MVK-H1, Akashi)을 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g/10초의 0.5mm 등간격으로, 용접재와 후열처리재에 대한 경도분포를 3가지로 구분해서 비교 조사하였다.

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 가열압력(P_1), 업셋압력(P_2), 가열시간(t_1), 업셋시간(t_2) 등이다. 먼저 Table 3에서와 같이, 1차 실험에서 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2)을 각각 60, 100(MPa)로 결정하였다. 이와 같이 결정한 이유는 타 문헌^{8, 11)}의 결과로부터 가장 적절한 것으로 나타나고 있기 때문에 이 값을 사용하였다. 그리고 2차 실험에서는 가열시간(t_1)을 변화시켜 용접재와 후열처리재의 기계적 특성을 비교 조사하였다.

Table 3 Various condition of dissimilar friction welding

Rotating speed n(rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Upsetting pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (s)	Upsetting time t_2 (s)	Total upset U_T (mm)
2000	60	100	1~7	5	1.9~10

한편, 마찰용접시 발생하는 AE량을 측정하기 위해서는 고감도 변환기(R15-C 150kHz seonsor)를 용접면에서 마찰용접기의 정지척 방향으로 170mm 떨어진 위치의 정지척 상에 연결된 웨이브 가이드에 부착하였다. 웨이브가이드에 부착한 변환기로부터 전달된 AE신호를 컴퓨터에 저장하여, 그 저장된 결과를 AE 누적총량의 형태로 표현하였다. 넓은 주

파수범위의 스펙트럼을 커버하는 다양한 AE발생원 으로부터 AE가 발생하기 때문에 100~300kHz 범위의 밴드 패스 필터(band-pass filter)를 포함하는 고 감도 센서용 증폭장치를 사용하여 저주파와 고주파 의 소음(noise)을 제거하였으며 40dB로 증폭하여 측 정된 AE신호가 시그널 케이블을 통과하여 장치에 원활이 전달되도록 하였다. 장치에 전달된 AE신호 는 신호처리를 위하여 주증폭기에서 다시 40dB로 증폭하여 전체 시스템 이득(gain)을 80dB로 설정하 였다. 또 외부 소음을 제거하기 위하여 한계전압 (threshold voltage)을 1.0V로 설정하여 이 이상의 진폭을 가지는 AE 펄스(pulse)만을 신호처리 하였 다. 용접 시간에 대응한 AE 신호의 발생기동을 해 석하기 위하여 용접시작부터 용접완료까지에 검출 된 초기 AE 누적량을 고려하였다.

또한, 마찰용접 조건에 대한 초음파 감쇠계수의 측정은 탐촉자 내의 압전재료에 적정 펄스전압을 가하여 진동(초음파)를 만들고 그 진동이 시험편 배 면에서 반사되어오는 것을 압전재료가 전기적 신호 로 바꾸어 CRT상으로 나타나게 하는 펄스 반사법 중에서 수직탐상법으로 측정하였다. 또한 초음파의 산란 및 감쇠의 정밀한 측정을 위해서 탐촉자와 재 료사이의 신호의 감소를 최대한 줄이기 위하여 접 촉매질(couplant)을 사용하였으며, 표면의 조도를 개 선하기 위해서 샌드페이퍼를 사용하여 측정 부위의 시험편 표면을 동일하게 연마하였다. 표준시험편은 KS B 0831에 규정된 STB-A1을 사용하였고, 초음 파의 발생과 수신을 위해서 Parametric사의 Ø10 주 파수 5MHz인 탐촉자를 사용하였으며, USD-15 초 음파 탐상기를 사용하여 초음파 파라미터를 측정하 였다. 초음파가 탐촉자로부터 시험편에 수직으로 입 사하게 되면 시험편의 표면, 배면에서 반사가 일어 난다. 탐상기 화면에서 보면 세로축이 음압, 가로축 이 음파가 이동한 거리가 된다. 따라서 표면에서 반 사된 음파가 화면상에서 가장 왼쪽에 표시되고, 그 다음엔 표면에서 다시 반사가 일어나 시험편 내부 를 한번 더 왕복한 파가 순서대로 표시된다. 본 실 험에서는 초음파의 전파특성상 근거리 음장에서는 감쇠의 효과가 없고, 음압의 변화가 심하기 때문에 신호의 크기에 의존하는 음파의 분석이 일정하지 않으므로, 이 영역에서의 검사는 가능하면 피하기 위해서 두 번째와 세 번째 신호의 크기를 비교하여 감쇠계수를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접변수와 강도와의 상관성

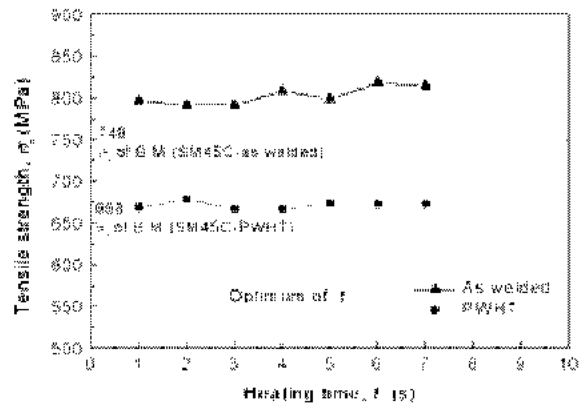


Fig. 1 Relationship between tensile strength and heating time in as-welded and PWHT

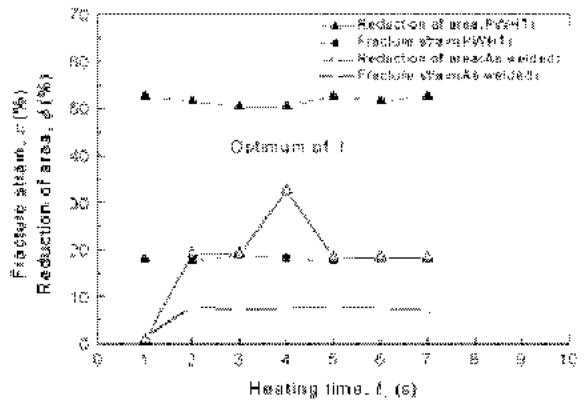


Fig. 2 Relationship between ductility and heating time in as-welded and PWHT

Fig. 1은 용접재와 후열처리재의 가열시간과 인장 강도와의 관계를 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있 듯이 용접재의 경우, S45C 모재의 인장강도(749 MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났고, 또한 후열처리재의 경우에서도, S45C 모재의 인장강도 (658MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났다. 그 리고 용접재와 후열처리재의 인장강도는 비슷한 경 향으로 나타났으며, 용접재에 비해 후열처리재의 인 장강도가 약 100MPa이상 낮게 나타났다.

그림에서 특이한 사항은 가열시간이 4초일 때, 용 접재의 인장강도(807.9MPa)는 비교적 높게 나타났 으나, 후열처리재의 인장강도(667.1MPa)는 가장 낮 게 나타났다. 이는 모재의 인장강도에 비해 높게 나 타나므로 문제가 되지 않는 것으로 판단된다. 따라 서 마찰용접시 건전한 접합(인장강도만을 중심으로)

이 되는 최적조건의 범위는 비교적 넓었고, 비교적 모든 조건의 결과가 실험적으로 우수하였다.

Fig. 2는 용접재와 후열처리재의 가열시간과 연성(연신율, 단면수축율)과의 관계를 나타낸다. 그림에서와 같이 후열처리재의 연신율과 단면수축율은 용접재에 비해 거의 두배 이상 높게 나타났다. 용접재의 결과를 보면, 연신율은 약 7%로 거의 일정한 경향을 보이고 있고, 단면수축율도 약 19%로 일정하지만 4초에서 33.4%로 높게 나타나고 있다. 이는 S45C 모재의 연신율(16%), 단면수축율(42.7%)에 비해 훨씬 낮게 나타났다. 반면에 후열처리재는 연신율 약 19%, 단면수축율 약 52%로 모재(S45C)보다 높게 나타남을 알 수 있으며, 모든 용접조건에서 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서 마찰용접 후 열처리시 용접품질(인장강도, 연성)과 관련 있는 최적조건의 범위는 넓어졌고, 용접재에 비해 후열처리재의 기계적 성질이 모든 조건의 결과에서 실험적으로 우수하였다.

3.2 마찰용접부의 경도분포

Fig. 3에는 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편의 경도와 이를 후열처리 한 시험편의 경도분포를 비교하여 나타내었다. 경도 측정은 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주부의 경도분포를 각각 조사하기 위해 3가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경(15mm)의 중심부(원주 끝에서 7.5mm), 두 번째는 중심부에서 2.5mm인 지점, 세 번째는 중심부에서 5mm인 지점으로 구분하여 조사하였다.

용접재의 경도분포 그래프를 보면, 모재의 경도는 SCM440이 270Hv으로 S45C의 238Hv보다 다소 높은 편이며, 이들 재료의 용접계면(weld interface, WI)의 경도는 430Hv로서 두 재료의 모재보다 아주 높게 나타났다. 그리고 SCM440측 열영향부에서 최고의 경도값(587Hv)을 나타내고 있다. 이는 용접계면 부근에서 마찰용접시 국부가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료된다¹²⁾.

또한 열영향부(heat affected zone, HAZ)를 두가지로 구분해서 보면, 시험편 중심부는 SCM440측 3.0mm+S45C측 2.3mm~5.3mm 이고, 원주끝 부분은 SCM440측 3.1mm+S45C측 2.9mm~6.0mm 로 판단된다. 여기서 열영향부가 중심부보다 원주부가 크게 나타나고, 피크치의 경도치가 원주부에 가까울수록 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 마찰용접시 원주속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이

로 인해 마찰온도가 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달된다. 따라서 원주부의 온도가 중심부보다 급격히 상승함에 따라 냉각속도가 더욱 빠르게 진행되어 담금질 효과가 크게 작용하기 때문으로 생각된다.

경도시험에서 특이한 사항은 S45C측 열영향부의 경도분포가 용접계면에서 급격히 감소하는 반면에, SCM440측은 경도분포가 약 3mm정도의 피크치를 유지 후 급격히 저하하는 현상을 나타내고 있다. 이는 국부가열과 마찰압접시 인장강도가 높은 SCM440의 이종재간 접합성에 따른 특성이라 생각된다. 따라서 용접후 열처리를 시행하여 경도분포를 조사한 결과, 그림에서와 같이 용접부의 피크치가 모재의 경도치 이하로 완화됨을 알 수 있다. 이는 용접시에 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 완전히 제거됨을 의미한다.

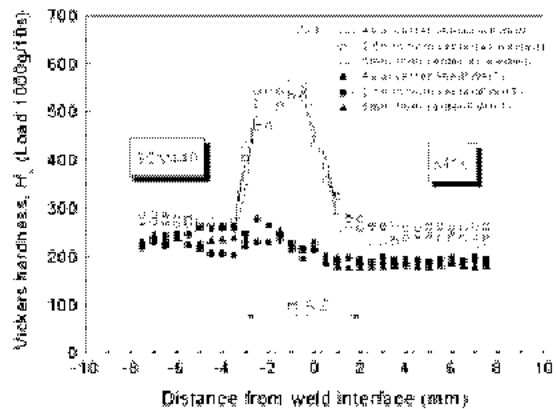


Fig. 3 Hardness distributions of as-welded and PWHT specimen

3.3 AE누적총량과 가열시간과의 관계

Fig. 4는 SCM440과 S45C의 이종 마찰용접에 의한 각각의 마찰용접 가열시간(heating time)에 따른 AE누적총량을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 마찰 가열시간과 AE누적총량과의 관계에는 확실한 상관성이 보이지 않았으나 전체적인 경향으로 볼 때 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 가열시간 4초인 경우의 용접시간과 AE카운트수 및 용접시간과 누적총량과의 결과를 일례로 각각 나타내었다. 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 4초인 경우의 AE총 누적량이 30,000정도로 가장 낮은 값을 보였다. 이는 가열시간 중에 AE를 발생시키는 인자의 영향이 적어 양호한 용접이 이루어지고 있음을 시사해준다고 할 수 있다.

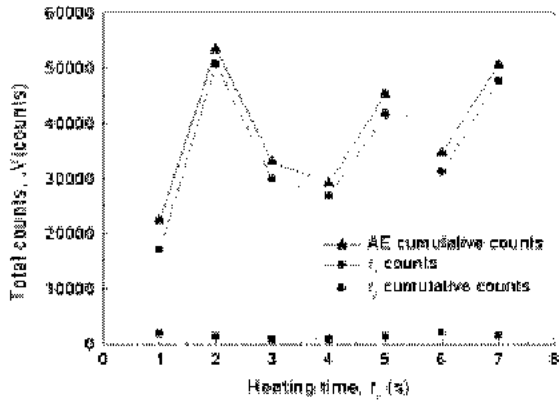


Fig. 4 AE total counts vs. heating time

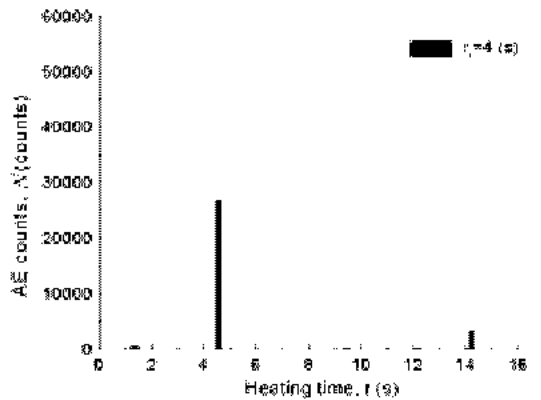


Fig. 5 AE counts(N) vs. welding time(t)

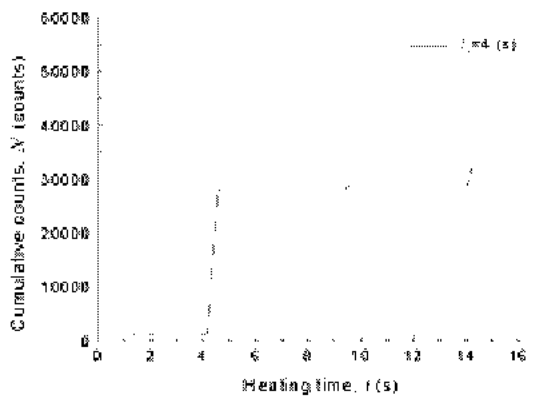


Fig. 6 AE cumulative counts(N) vs. welding time(t)

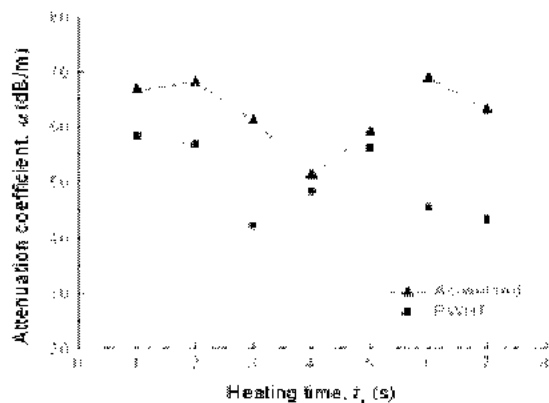


Fig. 7 Ultrasonic attenuation coefficient vs. heating time

3.4 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계

Fig. 7은 본 연구에서 실험한 SCM440과 S45C의 마찰용접재(as-welded)와 후열처리재(PWHT)의 가열시간(t)과 초음파 감쇠계수(α)와의 변화를 조사한 결과를 나타낸다. 먼저 용접재의 경우, 마찰 가열시간과 초음파 감쇠계수와의 관계에는 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, 잔류응력으로 인한 음장의 산란에 의한 결보기 감쇠 등을 들 수 있다. 그러나 이에 대한 연구가 좀더 필요하다고 본다. 앞의 3.1절에서와 같이 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 4초인 경우에 초음파 감쇠계수가 가장 적은 값으로 나타났으며, 이는 AE의 결과와 비슷한 경향을 얻었다.

또한, 후열처리재의 경우, 용접재의 경우와 비슷한 결과를 보였다. 즉, 가열시간과 초음파 감쇠계수와의 관계에는 확실한 상관성이 보이지 않았으나 후열처리재의 경우에도 감쇠계수는 가열시간의 증가와 더불어 감소하다가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이 경우는 가열시간이 3초에서 가장 낮은 값을 보였다. 한편, 마찰가열시간 4초인 경우에 있어서 용접재와 후열처리재의 초음파 감쇠계수는 각각 51.3과 48.29dB/m로 용접후열처리에 의해 5.87%로 감소하였다.

4. 결 론

각종 동력전달용 축 재료 등에 사용되는 SCM440과 S45C의 이종재 마찰용접을 수행하여, 용접재와 후열처리재의 기계적 특성 및 비파괴 평가에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접재에 비해 후열처리재의 연성치가 두 배 이상 높았고, 모든 용접조건에서 거의 일정한 경향의 강도와 연성치가 나타났다.
- 2) 마찰용접재의 용접계면의 경도는 두 재료의 모재에 비해 높게 나타났고, 후열처리재를 시행하여 용접재에서 나타나는 피크치의 정도값(587Hv)이 모재의 정도치 이하로 완화되었다. 이는 용접시 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 완화되었음을 확인하였다.

- 3) AE 누적총량과 가열시간과의 관계는 확실한 상관성이 보이지 않았으나, 가열시간 4초인 경우의 AE 누적총량이 30,000 카운트 정도로 낮게 나타났다.
- 4) 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계는 확실한 상관성이 보이지 않았으나, 가열시간이 증가하면 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다.

참고 문헌

1. 오세규, 공유식, 박일동, 유인중, 2000, "열간금형재의 마찰용접 최적화와 AE평가", 한국동력기계공학회지, 제4권, 제4호, pp. 54-58.
2. AWS, 1981, "Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding", 7th edition, Vol. 1, pp. 153~220.
3. Jeong, H. S. and Shinoda, T., 1997, "Fundamental and Basic Application of Friction Welding", Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 1~12.
4. Kang, S. B. and Min, T. K., 1988, "A Study on the Friction Weldability of Carbon Steel(S45C) to Aluminum Alloy(A6063)", Journal of KWS, Vol. 16, No. 2, pp. 153~220.
5. Adams, D. F. and Taylor, S. K., 1969, "Detection of Faults in Friction Welded Studs by Ultrasonics", Welding and Metal Fabrication, pp. 412~421.
6. Wang, K. K. and Ahmed, S., 1976, "Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar Metal Friction Welds", Fourth North American Metal Working Research Conference Proceedings, pp. 384~389.
7. 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., ISOPE, Seattle, USA, pp. 203-207.
8. 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈, 1988, "S45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제2권, 제2호, pp. 312~321.
9. 오세규, 장홍근, 장지훈, 1995, "Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴 검사학회지, 제15권, 제4호, pp. 511~519.
10. 오세규, 김동조, 1988, "초음파법에 의한 이종재료 마찰용접강도 해석법의 개발", 한국해양공학회지, 제2권, 제1호, pp. 135~149.
11. 공유식, 조상근, 김영대, 오세규, 2002. "플러저용 강재의 이종재 마찰용접과 AE에 의한 실시간 평가", 한국동력기계공학회지, 제6권, 제2호, pp. 48~53.
12. 조현수, 서성재, 1997, "Inconel 713C와 SCM440의 마찰용접", 대한용접학회지, 제15권, 제6호, pp. 78-84.