

공학석사 학위논문

이종마찰용접 강봉재의 기계적 특성과 비파괴평가에 관한 연구

지도교수 김선진

이 논문을



학위논문으로

출함

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계공학과

정 원 택

정원택의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월 18일

주 심 공학박사 김 영 식 

위 원 공학박사 오 명 석 

위 원 공학박사 김 선 진 

목 차

Abstract	ii
Nomenclature	iv
1. 서 론	5
2. 이론적 배경	7
2.1 마찰용접의 원리	7
2.2 마찰열 발생에 대한 해석	9
2.3 AE 신호의 특성	11
2.4 초음파 감쇠계수	14
3. 시험편 및 실험방법	17
3.1 재료 및 시험편	17
3.2 실험장치 및 실험방법	20
4. 결과 및 고찰	24
4.1 용접조건과의 상관성	24
4.2 가열시간과 업셋량과의 상관성	25
4.3 용접변수와 강도의 상관성	27
4.4 용접부의 경도분포	32
4.5 용접부의 조직검사	35
4.6 AE누적총량과 가열시간과의 관계	38
4.7 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계	40
5. 결 론	43
참고문헌	44
감사의 글	

A Study on the Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars and the Nondestructive Evaluation

Won-Taek Jung

*Department of Mechanical Engineering
Industrial Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

Friction welding has been shown to have significant economic and technical advantages. However, one of the major concerns in using the friction welding products is the reliability of the weld quality. No reliable nondestructive test evaluation is available at present for detecting weld quality, particularly in a production environment.

In this study, dissimilar friction welding were produced using 15mm diameter solid bar in chrome molybdenum steel(KS SCM440) to carbon steel(KS S45C) to investigate their mechanical properties and the relationship between the weld

parameters and the nondestructive coefficients. The main friction welding parameters were selected to endure good quality welds on the basis of visual examination, tensile tests, Virkers hardness surveys of the bond of area and HAZ and macrostructure investigations. The specimens were tested as-welded and post weld heat treated (PWHT). And also, the relationships between the weld parameters and nondestructive coefficients, such as AE counts and ultrasonic attenuation coefficient.

The study has led to the following concluding remarks.

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 total upset increases lineally with increasing the heating time. Optimal welding conditions were determined as, rotating speed, $n=2,000(\text{rpm})$, heating pressure, $P_1=60(\text{MPa})$, upsetting pressure, $P_2=100(\text{MPa})$, heating time, $t_1=4(\text{s})$ and upsetting time, $t_2=5(\text{s})$ when the total upset length is 5.4(mm). The toughness of PWHT specimens is higher than as-welded. It is seem to be that there are not evident relationship between AE counts, ultrasonic attenuation coefficient and heating time. But, more work is required to clarify this issue.

Nomenclature

n	:	Rotating Speed (rpm)
P_1	:	Heating Pressure (MPa)
P_2	:	Upsetting Pressure (MPa)
t_1	:	Heating Time (s)
t_2	:	Upsetting Time (s)
U_1	:	Heating Time Upset (mm)
U_1	:	Upsetting Time Upset (mm)
U_T	:	Total Upset (mm)
HAZ	:	Heat Affected Zone
WI	:	Weld Interface
Hv	:	Virkers' Hardness
AE	:	Acoustic Emission
N	:	AE Total counts (count)
A_1	:	Echo Amplitude (%)
A_2	:	Echo Amplitude (%)
a	:	Ultrasonic Attenuation Coefficient (dB/m)
P_0	:	Original pressure level at a source
P	:	Pressure level at second reference location
L	:	Distance of pulse travel
dB	:	Ultrasonic Amplitude

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 이중재 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 이중금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며, 또한 경제적인 면과 기술적인 면에서도 많은 잇점을 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 이중금속의 용접에 많이 응용되고 있다^{1, 2)}.

국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적조건의 결정과 응용 및 강도에 관한 연구가 보고³⁻⁶⁾는 등 이중재료의 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 Adams⁷⁾에 의한 마찰용접 이음면의 결함을 찾기 위한 초음파 펄스를 송수신하는 방법을 이용한 연구와 Wang⁸⁾등에 의한 초음파반사계수를 이용한 연구 등이 있다. 국내에서는 오등에 의한 마찰용접재의 AE 기법에 의한 실시간 비파괴적 평가에 관한 연구가 있으며, 초음파 반사계수를 초음파 펄스파를 이용하여 구하고, 마찰용접부의 기계적 성질을 비파괴적 방법으로 평가하는 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이들의 상관관계에 대한 고찰은 미약하며 이에 대한 비파괴적 평가 방법의 연구는 더 필

요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 축 재료 등에 이용되는 S45C와 내마모성, 내피로성 등이 우수한 SCM440의 이종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해 마찰용접후 열처리전의 상태에 대하여 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 인성 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 후열처리재에 대하여 비교 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 마찰용접의 원리

금속 결정면에 힘을 가할 때 결정을 분리시키려면 접촉면의 원자 결합을 파괴시킬 정도의 큰 힘이 요구된다.

Fig. 2-1은 마찰용접의 원리를 설명하기 위한 원자 사이의 거리와 힘과의 관계를 나타내고 있다. 원자간의 거리가 가까울수록 인력은 크게 작용하고 $X=0$ 에서 쌍곡선의 모양으로 나타나며, 등가 위치 X' 는 인력과 반발력의 합이 영(zero)일 때의 위치이다. Fig. 2-1에서 인력과 반발력이 최고가 되는 A위치보다 더 근접시키는 방법이 마찰용접의 원리이고, 이러한 근접이 이루어지려면 재료가 소성 변형을 일으킬 수 있을 정도의 막대한 외력을 필요로 하게되며⁹⁾, 동시에 변형 저항을 저하시켜 주므로써 가능한데, 변형 저항을 저하시키는 데는 가열원을 필요로 한다. 이처럼 마찰용접은 마찰열을 이용하여 변형저항을 줄이고 가압력으로 접촉면의 원자결합을 파괴시킴으로써 이루어지는 결합이다.

Fig. 2-2는 마찰용접의 기본적인 기구(mechanism)를 나타낸다²⁾. Fig. 2-2에서 재료를 회전부 유압척(hydraulic chuck)에 설치하여 일정한 회전수로 돌릴 때, 다른 시험편은 고정부 유압실(hydraulic chamber)의 척에 고정 설치하며, 일정한 마찰 추력에 의하여 재료를 밀어 접촉시킨다. 양측 재료의 접촉면은 축 방향의 일정 가압 압력에 의하여 일정시간동안 가열되므로써 접촉점이 확대되어 재료의 깊이 방향으로 열이 전도 됨과 동시에 고온 영역이 발생하며, 고온 영역이 용접에 필요할 정도의 높은 온도(단조 온도 정도)로 확대될 때 회전을 급정지 시킴과 동시에 축 방향의 일정 압력을 일정 압력시간 동안 가하여 용접을 완료한다. 마찰용접은 고온의 마찰 열원을 사용하기 때문에 접촉면의 온도는 통상 1200℃ 정도이고 접촉부에서는 온도 상승에 의하여 소성 유동이 일어나며, 이때 마찰 추력을 사용함으로써 용접이 이루어지는 것이다. 마찰용접법의 유형은 크게 연속형(continuous drive type)과 관성형(inertia type)의 두 가지로 나눌 수 있는데 소련, 일본, 유럽쪽은 주로 연속형을 사용하는 추세이

고, 미국쪽은 관성형을 사용하는 경향이 있으나 원리적인 면에서는 크게 차이를 볼수 없으며 각각의 용접조건 설정이나, 재료의 선택에 약간의 장단점이 있다^{1, 2)}.

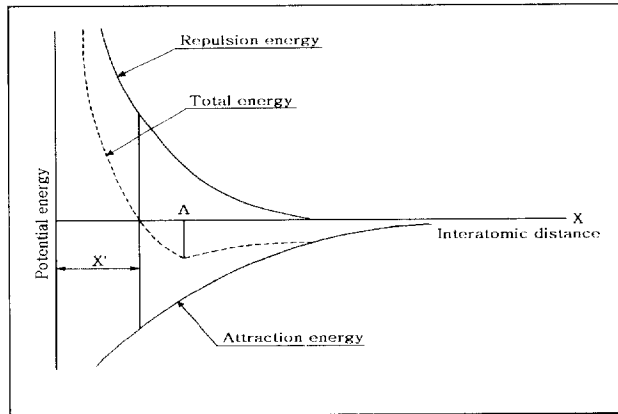


Fig. 2-1 Transformation of force in the atoms at distance

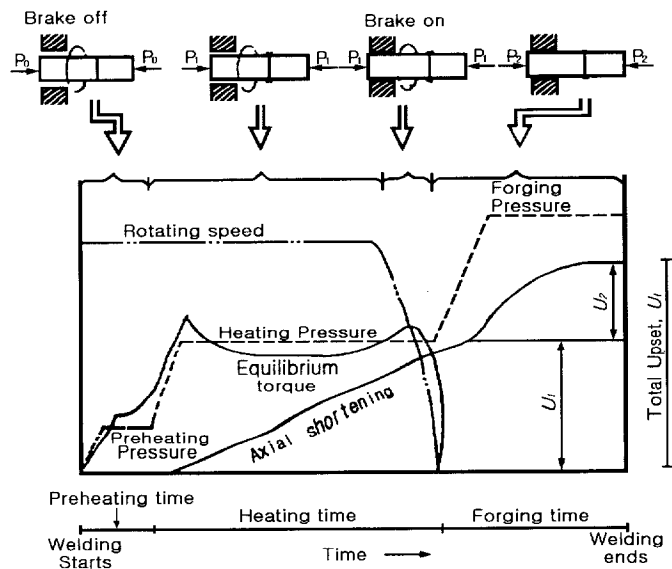


Fig. 2-2 Principle of friction welding (continuous drive type)

2. 2 마찰열 발생에 대한 해석

마찰용접에서 열 사이클은 표면에서 원자 결합의 파괴와 결합의 연속적인 과정으로 간주된다¹⁰⁾. 마찰용접에서는 소성 저항을 줄이기 위한 마찰 발열량과 두 재료 표면의 원자끼리의 간격을 좁히기 위한 압축압력의 크기가 용접성에 주로 영향을 미친다고 알려져 있으나 더욱 더 중요한 것은 열 해방율이다. 이러한 경우 접촉면의 온도 상태는 마찰 표면에서 일어나는 현상의 총합일 뿐만 아니라, 용접 장비와 용접 부위 강도 특성 과정들의 효율성에 의하여 결정되어진다. 기본적인 마찰력은 Fig. 2-3과 같이 미소 단면적 dA 에 작용하며, dA 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dA = 2\pi r \times dr \quad (1)$$

마찰력 dF 는

$$dF = Pf 2\pi r dr \quad (2)$$

가 된다. 이러한 단면적에 작용하는 열은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dQ = Pfn 4\pi^2 r^2 dr \quad (3)$$

접촉면에서 발생하는 전체 에너지는 방정식(3)을 적분함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \int_0^r Pfn 4\pi^2 r^2 dr \quad (4)$$

마찰 효율계수는 일정하지 않으며 표면의 상태, 재료의 온도구배, 표면온도와 속도에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. f 에 관한 정확한 값을 알지 못하면 식(4)는 적분되지 않는다. 그래서 그것은 다음과 같은 식에 의하여 에너지 입력 값을 얻을 수 있다.

$$Q = 2\pi M_t n \quad (5)$$

여기서 M_t 는 토크(torque)이다. 총 에너지의 일부분만이 시험편의 소성변형의 확장을 위하여 사용되어지고, 에너지 모두는 열로 변환된다고 가정한다.

회전축(0점)주위의 이러한 힘들의 모멘트는 다음 식과 같다.

$$dM = r \times dF = r \times dA \times P \times f = r \times 2\pi r \times dr \times P \times f \quad (6)$$

Fig. 2-3은 모재의 마찰면에서 반경방향의 열발생 분포가 포물선상으로 되는 것을 나타내고 있다. 여기서 f 는 마찰 효율 계수이며, 압력 P 는 마찰면에 균등하게 분포하고 있는 것으로 하면 모멘트 M 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{2}{3} \pi P f r^3 \quad (7)$$

여기서 M : 모멘트, P : 단위 압력, r : 모재의 반경

f : 마찰 효율 계수 (전형적인 마찰계수와 구별하기 위하여 효율마찰계수를 사용하였다.)

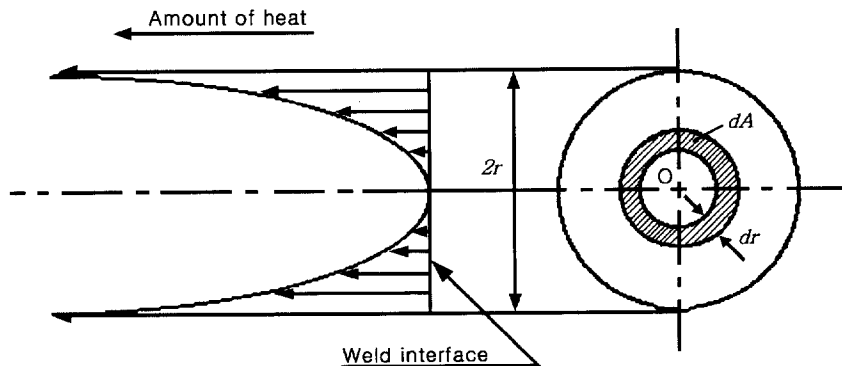


Fig. 2-3 Heat liberation diagram for friction welding

2. 3 AE 신호의 특성

유리가 깨어질 때와 같이 어떤 물체가 내부 또는 외부의 응력에 의해 파괴되면, 응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 독특한 소리를 내게 된다. 이러한 물체의 파괴 또는 변형시에 발생하는 소리는 인간의 귀로 들리는 것도 있지만, 발생하는 소리의 강도가 미약하거나 그 소리가 가지는 주파수 성분이 가청역을 벗어나는 경우에는 인간의 귀로는 감지할 수 없는 소리로 존재하게 된다. 오래 전부터 공학적 측면에서 이러한 소리라는 물리적 현상을 적극적으로 이용하려는 노력이 계속되어 왔으며, 음향방출법(acoustic emission)이라는 이름을 갖고 하나의 공학적 평가법으로 자리잡게 되었다. AE 신호가 탐지되기까지의 과정을 Fig. 2-4에 나타내었다.

일반적으로 AE는 재료 내에서의 스트레인 에너지의 급속한 방출로부터 일어나는 현상으로서 이 에너지의 일부는 재료의 표면에서 검출이 가능한 탄성파의 형태로 방출된다. AE의 주된 발원 기구(mechanism)는 재료에 미치는 기계적, 열적, 금속학적 원인에 기인될 수 있다. 마찰용접은 고온과 고압하에서 수

행되므로 결과적으로 압접면으로부터 재료의 대규모 소성 유동을 유발시켜 플래시(flash)를 형성케 하는데, 용접 사이클 중 마찰열과 다음의 단조작용이 끝난 후인 냉각기 동안의 상변태 중에 후기 AE가 발생하는 반면에 초기 AE마찰 용접 중에 회전수, 마찰압력, 마찰시간 등에 복합적으로 지배되는 단조작용의 기계적 응력과 이 때 발생하는 열응력에 의한 주된 소성변형과 용접면에서의 접합, 전위, 슬립, 파괴, 재결합 등 일련의 복잡한 과정과, 반복적 요인에 의해 수 초 사이에 발생된다.

고체내에서의 전위(dislocation)의 이동이나 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있는데, 전자의 경우는 연속형 신호를 후자의 경우에는 돌발형 신호를 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제로는 음향방출의 발생원은 대상재료의 특성에 의해 좌우된다.

공학적인 측면에서 본 AE신호는 신호의 강도 및 특징적인 주파수의 범위가 매우 광범위하다. 가청역 주파수 범위가 대략 수십 Hz에서 20kHz정도인 것에 비해서 AE연구에서 다루는 신호의 주파수 범위는 대상재료에 따라 매우 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

AE 매개변수인 event, count, energy, amplitude, duration, rise time, 쇠퇴시간 등이 있으며, AE 신호 탐지 원리를 Fig. 2-5에 나타내었다. 본 연구에서는 AE 카운트(count) 측정하여 분석하였다.

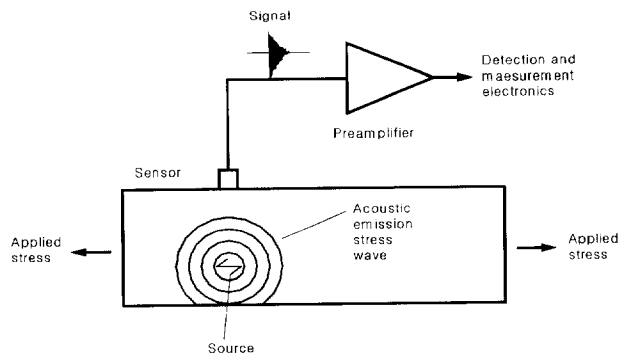


Fig. 2-4 Basic principle of the acoustic emission method

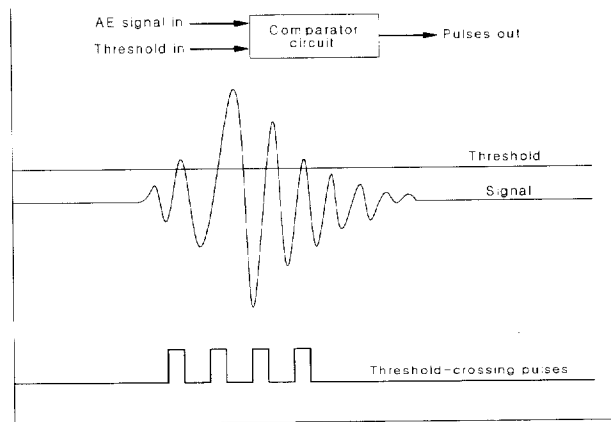


Fig. 2-5 Principle of AE signal detection and threshold-crossing counts

2. 4 초음파 감쇠계수

산업의 발달과 함께 모든 분야에서 비파괴검사가 제품의 품질관리의 하나로써 적용되고 있다. 초음파탐상검사란 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 불연속부를 검출하기 위해, 초음파를 재료에 전달시켜 검사하는 비파괴검사법의 일종이다. 음향에 의한 검사방법은 다음의 세 가지 방법이 시도되어 왔다^{7, 8)}.

- 공진법
- 투과법
- 펄스반사법

이중 최근에 와서는 에코에 의한 검사법 즉, 펄스반사법이 초음파탐상검사에 많이 이용되고 있다.

펄스 반사법은 제1차 세계대전시 잠수함을 발견하는 병기에 이용되기 시작한 방법으로, 전파에 의해 해저통신을 할 수 있는 레이더가 발명되었고, 레이더기술과 초음파와의 결합으로 초음파탐상법이 개발되었다. 비파괴 검사의 최종적인 목적은 재료 또는 부품 등이 사용 중에 파괴되는가 안 되는가의 여부를 판단하기 위해 결함의 유무, 결함의 크기 및 형태를 정확히 파악하는데 있듯이 초음파탐상검사도 주로 결함의 검출에 사용되어 왔으나 투과성이 낮은 X선법의 단점을 보완하기 위하여 잔류응력 측정에도 사용되고 있다.

재료내부에 초음파 펄스를 입사시킬 때 반사파(이하 에코)의 거동을 수신기의 브라운관에 도식적으로 나타내면 Fig. 2-6과 같다. 재료내부에 결함 등의 반사원이 없을 경우, 송신펄스의 저면반사파(backwall echo)는 표면과 저면에서 반사를 반복하기 때문에 여러 개의 저면에코만 관찰된다. 재료내부의 음속 C 가 일정하다고 가정하면 저면에코의 시간간격 Δt 는 빔진행 거리 $2L$ 을 전파하는데 필요한 시간이고, $C=2L/\Delta t$ 의 관계가 성립한다. 시험체의 판두께 L 을 모르는 경우 시험체의 음속을 알고 있으면 Δt 를 측정함으로써 L 을 구할 수 있다. 반대로 시험체 두께 L 을 알고 있을 때에는 Δt 를 측정함으로써 음속 C 를 구할 수 있다.

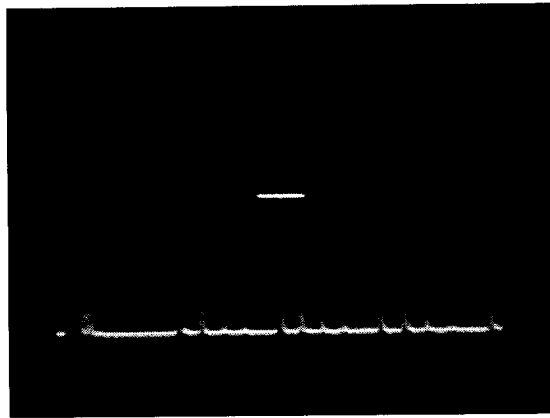


Fig. 2-6 The concept of pulse echo method

탐촉자로부터 재료내부에 초음파를 송신하였을 때 초음파에너지의 대부분은 경계면에서 반사되고 일부만 통과한다. 경계면에서의 음파의 반량은 두 매질의 음향임피던스(acoustic impedance)비에 의해 좌우되는데, 계면에서의 반사와 굴절현상은 초음파 탐상시험에서 결함 등의 검출에 있어 중요한 역할을 한다. 일반적으로 경계면에 초음파가 수직입사한 경우 초음파는 그곳에서 반사되는 성분과 통과하는 성분으로 나누어진다. 반사와 통과 비율은 경계면에 접하는 두 물질의 음향임피던스에 따라 결정된다.

매질1과 매질2의 음향임피던스가 다르기 때문에 초음파에너지로 생각하면 다음과 같다. 음압이 P 인 초음파의 단위면적당 에너지 E 는 다음식으로 표시된다.

$$E = P^2/Z$$

즉, 에너지는 초음파가 진행하는 매질에서 음압의 제곱에 비례하고 초음파가 전파하는 음향임피던스에 반비례한다.

한편, 재료를 전파하는 음파(acoustic wave)는 여러 가지 이유로 에너지의 손실을 가져온다. 에너지의 손실은 진폭의 손실(loss of amplitude)나 음파의 현상에 있어서의 변화의 결과이다. 펄스 에너지의 손실은 기본적으로 빔의 확산 (beam spreading), 흡수(absorption), 산란(scattering)으로 설명할 수 있으며, 초

음파 감쇠의 원인은 다음과 같은 것을 열거 할 수 있다.

- 결정입자 및 조직에 의한 산란
- 점성감쇠
- 전위운동에 의한 감쇠
- 강자성재료에서의 자벽의 운동에 의한 감쇠
- 잔류응력으로 인한 음장의 산란에 의한 겉보기 감쇠

감쇠(attenuation)는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$P = P_0 e^{-aL}$$

여기서, P_0 = 소스 혹은 다른 기준 위치에서의 최소음압

P = 거리 x 만큼 전파 후의 음압

a = 감쇠계수

L = 음파의 전파 거리

초음파 평가에 있어서 감쇠는 데시벨(dB)로 나타낸다. 전파하는 파의 상대적인 음압손실(SPL)은 다음과 같이 표현된다.

$$SPL = 20 \log (P/P_0) \text{ dB}$$

여기서, P 는 어떤 관측점에서의 초음파의 유효압력이고, P_0 는 초기 기준점에서의 이전 압력이다. 초음파의 경로에서의 두 점을 고려하면 점 1과 점2을 전파하는 사이의 음압의 손실은 다음과 같이 주어진다.

$$SPL_1 - SPL_2 = 20 \log (P_1/P_2) \text{ dB}$$

만일 거리 L 에 의해 분리하면, 감쇠계수 a 를 갖는 재료는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$aL = 20 \log (P_1/P_2) \text{ dB}$$

a 를 감쇠계수라 하며, 그 단위는 dB/m 이다. 재료의 감쇠계수는 주파수에 크게 의존하고 일반적으로 주파수가 높을수록 감쇠계수는 커진다.

3. 시험편 및 실험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 마찰용접 실험재료는 S45C와 SCM440 강재이며, 이들 재료의 강도와 인성, 내마모성에 중점을 두었고, 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, 항공기 등의 축류, 치차류, 냉간단조품, 볼트류 등에 이용된다. Table 3-1 및 Table 3-2에 SCM440과 S45C의 그 화학적 조성 및 기계적 성질을 각각 나타낸다.

Table 3-1 Chemical composition of materials (wt. %)

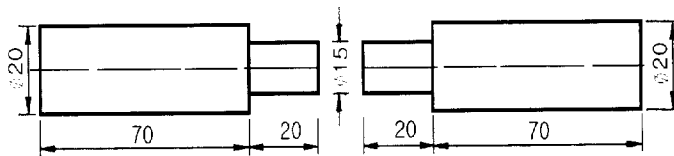
Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
SCM440	0.39	0.21	0.78	0.012	0.012	10.3	0.18	0.06	0.17
S45C	0.45	0.18	0.67	0.015	0.016	0.15	0.19	0.08	0.19

Table 3-2 Mechanical properties of materials

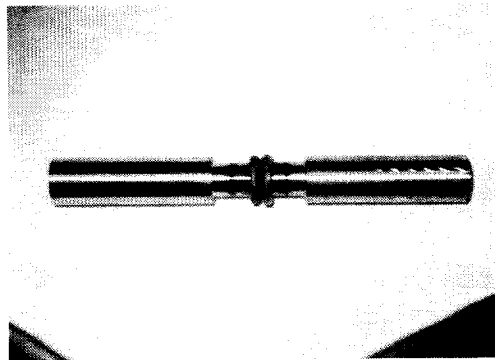
Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness Hv
SCM440	1029	799	32.6	13.6	270
S45C	749	672	42.7	16	238

마찰용접 시험을 위한 시험편은 Fig. 3-1(a)와 같은 형상 및 치수로 가공하였다. Fig. 3-1(b)는 두 이종재료의 마찰용접된 형상을 나타내며, 이들 시험편의 강도를 알기 위해 Fig. 3-1(c)와 같이 인장 시험편의 형상 및 치수로서 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 그리고 경도 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 후 용접부(직경 15mm)를 좌우 10mm로 절단하였고, 중심부를 따라서 절단(wire cutting)하였다. 절단시 열영향을 최소화 하기 위하여 절삭유를 듬뿍 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱하였으며, 이는 Fig. 3-1(d)와 같다.

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

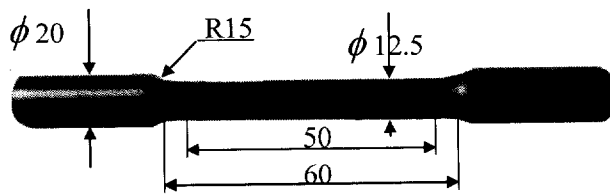


(a) Friction welding test specimens

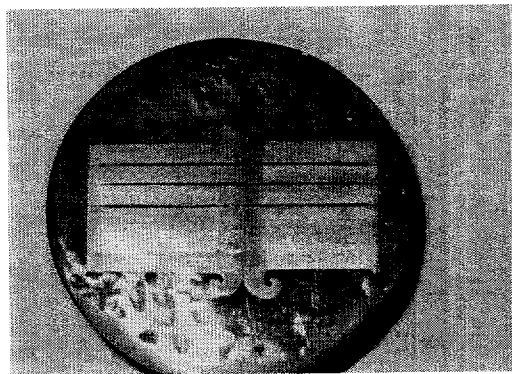


(b) Appearance of finished goods of friction welds

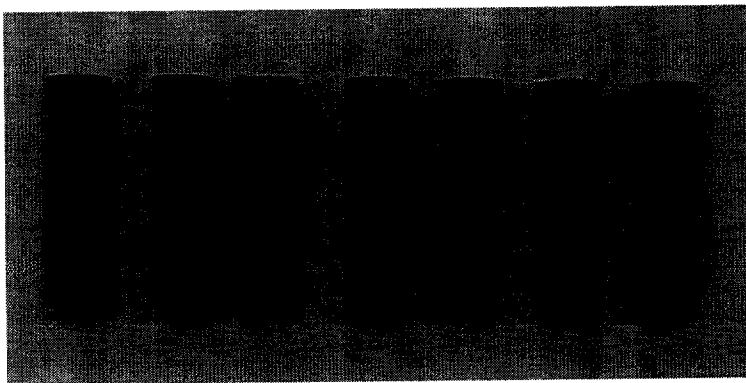
Fig. 3-1 Shape and dimension of test specimens (*continued*)



(c) Tensile test specimen of welded



(d) Photograph showing section through FRW specimen



(e) Photograph of specimens for measuring the attenuation coefficient

Fig. 3-1 Shape and dimension of test specimens (unit:mm)

3.2 실험장치 및 실험방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model: TOHO TH-25)는 Fig. 3-2와 같이 연속구동브레이크형 (continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은 $\phi 25$ mm이고 고정축은 $\phi 40$ mm이다. 그리고 이음부의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (Model : KDU-50)로서 인장속도는 2 mm/min으로 각 모재와 용접재 및 후열처리재를 각각 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기(Model : MVK-H1, Akashi)을 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g/10초의 0.5mm 등간격으로 조사하였고, 용접재와 후열처리재에 대한 경도분포를 3가지로 구분해서 비교 분석하였다.

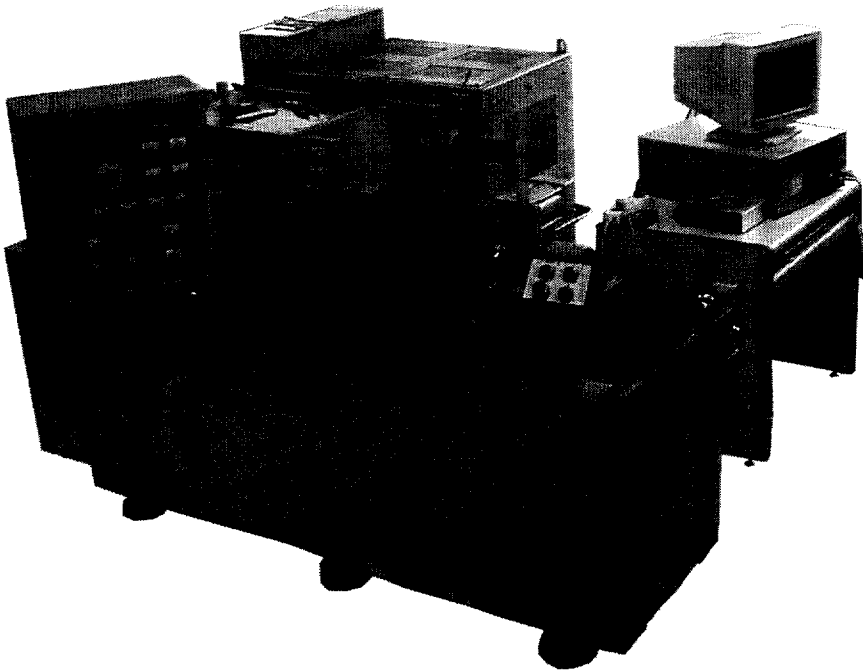


Fig. 3-2 Appearance of TOHO TH-25 friction welding machine

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 업셋압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 업셋시간(t_2) 등이다. 먼저 참고문헌^{9, 10)}을 통하여 Table 3-3의 조건으로 실험 후 가열압력 P_1 과 업셋압력 P_2 의 최적조건을 결정하였다. 그리고 이 조건을 기준으로 가열시간(t_1) 변화에 따른 최적조건과 총업셋량(U_T)의 변화를 조사하였다. 또한 2차 실험에서는 최적압력조건에서 가열시간(t_1)을 변화시켜 마찰용접 후, 후열처리를 시행하여 용접재와 후열처리재의 강도특성을 비교 검토하였다.

Table 3-3 Various condition of dissimilar friction welding

case	Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Upsetting pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (s)	Upsetting time t_2 (s)	Tensile strength σ_t (MPa)	Total upset U_T (mm)
1	2000	40	80	2	3	794	2.5
		60	100	4	5	806	5.5
		40	80	4	5	796	4.6
		60	100	4	5	808	5.7
2	2000	60	100	1~7	5		1.9~10

한편, 마찰용접시 발생하는 AE량을 측정하기 위해서는 고감도 변환기(R15-C 150kHz seonsor)를 Fig. 3-2와 같이 용접면에서 마찰용접기의 정지척 방향으로 170mm 위치의 정지척 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 통과하여 장치에 원활이 전달되도록 하였다. 장치

에 전달된 AE신호는 신호처리를 위하여 주증폭기에서 다시 40dB로 증폭하여 전체 시스템 이득(gain)을 80dB로 설정하였다. 또 외부 소음을 제거하기 위하여 한계전압(threshold voltage)을 1.0V로 설정하여 이 이상의 진폭을 가지는 AE 펄스(pulse)만을 신호처리 하였다. 용접 시간에 대응한 AE 신호의 발생거동을 해석하기 위하여 용접시작부터 용접완료까지에 검출된 초기 AE 누적량을 고려하였다. Table 3-4에 본 연구에 사용한 AE장치와 파라미터를 요약하였다.

Table 3-4 AE instrumentation and operating parameters

Transducers	PZ Type R-15 150kHz resonance frequency
Pre-amplifier	Model 1220A 40dB fixed gain 100-300kHz filter
Main-amplifier	40dB gain
Threshold voltage at comparator	1.0V (80dB : gain+threshold)

한편, 마찰용접 조건에 대한 초음파 감쇠계수의 측정은 탐촉자 내의 압전재료에 적정 펄스전압을 가하여 진동(초음파)를 만들고 그 진동이 시험체 배면에서 반사되어오는 것을 압전재료가 전기적 신호로 바꾸어 CRT상으로 나타나게 하는 펄스 반사법중에서 수직탐상법으로 측정하였으며, 또한 초음파의 산란 및 감쇠의 정밀한 측정을 위해서 탐촉자와 재료사이의 신호의 감소를 최대한 줄이기 위하여 접촉매질(couplant)을 사용하였으며, 표면의 조도를 개선하기 위해서 Sand Paper를 사용하여 측정 부위의 시험편 표면을 동일하게 연마하였다. 표준 시험편은 KS B 0831에 규정된 STB-A1을 사용하였으며 초음파의 발생과 수신을 위해서 Parametric사의 $\Phi 10$ 주파수 4MHz인 탐촉자를 사용하였으며, USK-7D 초음파 탐상기를 사용하여 초음파 파라미터를 측정하였다. 본 실험에 사용된 장비와 측정에 사용된 장치의 개략도를 Table 3-5 및 Fig. 3-3에 각각

나타내었다. Fig. 3-3에서와 같이 초음파가 탐촉자로부터 시편에 수직으로 입사하게되면 시험편의 표면, 배면에서 반사가 일어난다. 탐상기 화면에서 보면 세로축이 음압, 가로축이 음파가 이동한 거리가 된다. 따라서 표면에서 반사된 음파가 화면상에서 가장 왼쪽에 표시되고 다음 배면, 그 다음엔 표면에서 다시 반사가 일어나 시험편 내부를 한번 더 왕복한 파가 순서대로 표시된다. 본 실험에서는 초음파의 전파특성상 근거리 음장에서는 감쇠의 효과가 없고, 음압의 변화가 심하기 때문에 신호의 크기에 의존하는 결함의 분석이 정확하지 않으므로, 이 영역에서의 검사는 가능하면 피하기 위해서 두 번째와 세 번째 신호의 크기를 비교하여 감쇠계수를 측정하였다.

Table 3-5 Equipment for measurement of ultrasonic parameters

Equipment	Part Num.	Production
U.T Deterctor	USK-7D	KrautKramer
Oscilloscope	9310A	Lecory
Transducer	4MHz $\Phi 10$	Panametrics
U.T couplant	ZG-F	KrautKramer

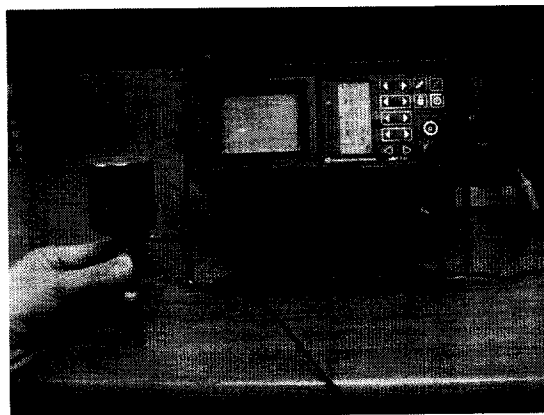


Fig. 3-3 Layout of ultrasonic attenuation equipment

4. 결과 및 고찰

4. 1 용접조건과의 상관성

Fig. 4-1은 앞장의 Table 3-3(Case 1)의 압력변화에 따른 인장강도 결과를 나타낸다. 이 그림에서 보면 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2)이 각각 40, 80(MPa)에 비해 60, 100(MPa)의 인장강도가 약 10(MPa) 정도 높게 나타났다. 또한 이 결과치는 타 문헌^{9, 10, 11)}의 결과와도 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적 조건은 P_1 과 P_2 를 각 60, 100(MPa)로 결정하였다.

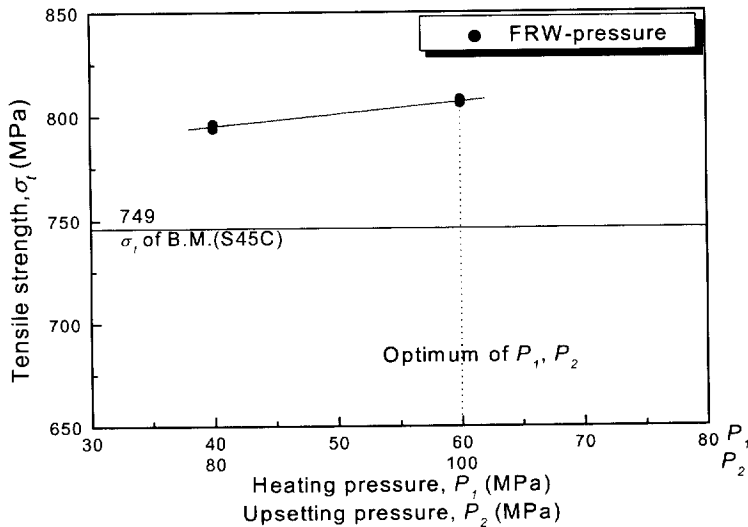


Fig. 4-1 Relationship between tensile strength and welding pressures in the as-welded of SCM440 to S45C

4.2 가열시간과 업셋량의 상관성

Fig. 4-2(a)는 마찰용접재(as-welded)의 각 업셋량(U_1 , U_2 , U_T)과 가열시간(t_1)의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 보면 가열시간이 증가할 수록 각 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 가열시간이 4초일 때, 총업셋량은 5.7mm로 나타났고, 7초일 때 10mm가 되었다. 따라서 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 매우 효율적인 방법이라고 판단된다. 그래프에서 U_1-t_1 , U_2-t_1 , U_T-t_1 의 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$U_1 = 0.966 t_1 + 0.144, (R^2=0.99) \quad (1)$$

$$U_2 = 0.350 t_1 + 0.40, (R^2=0.98) \quad (2)$$

$$U_T = 1.316 t_1 + 0.529, (R^2=0.99) \quad (3)$$

여기서 R^2 은 데이터의 커브피팅에서 기여율(determination coefficient)을 나타내며, 이 결과치는 신뢰성이 매우 높다고 할 수 있다.

Fig. 4-2(b)는 용접재와 후열처리재의 업셋량(U_1 , U_2 , U_T)과 가열시간(t_1)과의 상관관계를 나타낸다. Fig. 4-2(a)와 같이 가열시간이 증가할 수록 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 가열시간이 4초일 때 총업셋량은 5.4mm, 5.7mm로 각각 나타났고, 7초일 때 9.8mm, 10mm가 되었다. 그래프에서 용접재와 후열처리재의 U_T-t_1 의 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$U_T = 1.312 t_1 + 0.429, (R^2=0.99) \quad (4)$$

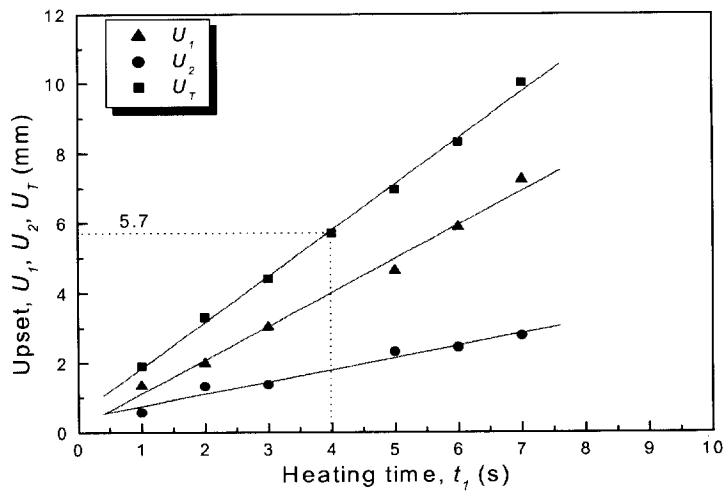


Fig. 4-2(a) Relationship between upset length and heating time in the as-welded of SCM440 to S45C

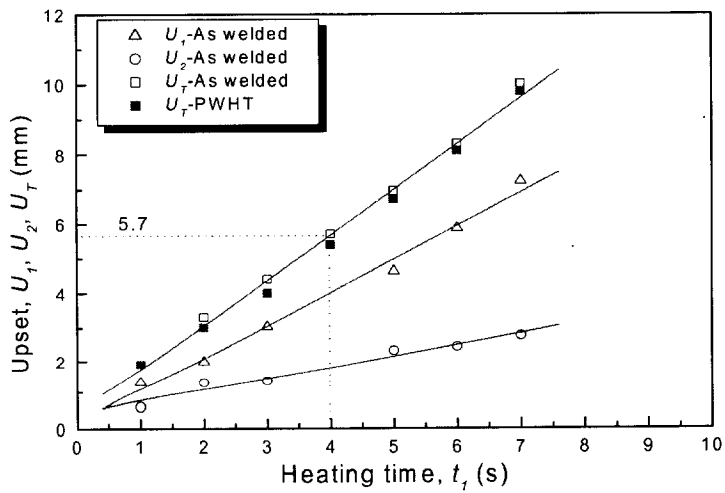


Fig. 4-2(b) Relationship between upset length and heating time in the as-welded and PWHT of SCM440 to S45C

4.3 용접변수와 강도의 상관성

Fig. 4-3(a)는 가열시간과 각종강도(인장, 항복, 파괴강도)와의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 인장강도는 S45C 모재의 인장강도(749MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났다. 그리고 항복강도와 파괴강도는 비슷한 경향을 보이며, 가열시간이 4초일 때 비교적 높게 나타났다. 따라서 최적조건을 강도적인 측면에서 고려해볼 때, 가열시간은 4초가 적합하다고 판단된다. 다만, 마찰용접시 건전한 접합(인장강도만을 중심으로)이 되는 최적조건의 범위는 비교적 넓었고, Fig. 4-1에서와 같이, 비교적 높은 용접압력에서의 결과가 실험적으로 우수하였다.

그림에서 특이한 사항은 가열시간이 1초일 때, 세 가지 강도가 비슷한 값으로 비교적 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 다른 조건에서는 S45C의 모재에서 연성파단인 반면에 1초에서는 용접계면에서 취성파단의 원인으로 생각된다.

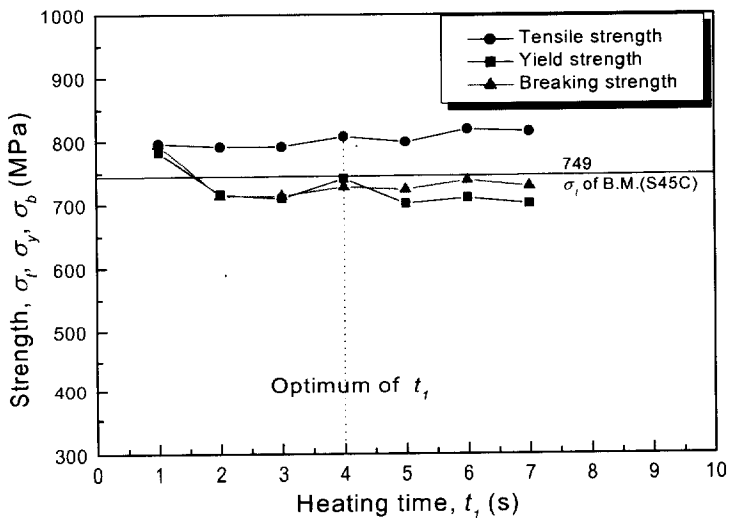


Fig. 4-3(a) Relationship between strength and heating time in the as-welded of SCM440 to S45C

Fig. 4-3(b)는 용접재와 후열처리재의 가열시간과 인장강도와의 관계를 비교하여 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 용접재의 경우, S45C 모재의 인장강도(749 MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났다. 또한 후열처리재의 경우에서도, S45C 모재의 인장강도(658 MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났다. 그리고 용접재와 후열처리재의 인장강도는 비슷한 경향으로 나타났으며, 용접재에 비해 후열처리재의 인장강도가 약 100 MPa이상 낮게 나타났다.

그림에서 특이한 사항은 가열시간이 4초일 때, 용접재의 인장강도(807.9 MPa)는 비교적 높게 나타났으나, 후열처리재의 인장강도(667.1 MPa)는 가장 낮게 나타났다. 하지만 모재의 인장강도에 비해 높게 나타나므로 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

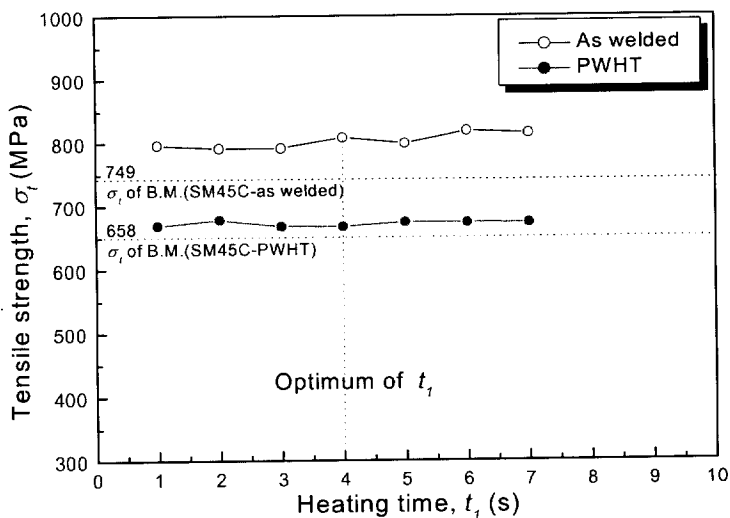


Fig. 4-3(b) Relationship between strength and heating time in the as-welded and PWHT of SCM440 to S45C

Fig. 4-4(a)는 총업셋량과 각종강도와의 관계를 나타낸다. 그림에서의 결과치는 Fig. 4-3(a)와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 마찰용접시 업셋량과 강도와의 상관성이 존재함을 알 수 있고, 업셋량이 5.7mm(가열시간 4초)일 때 각종강도 또한 비교적 높게 나타났기 때문에 4초가 적합하다고 판단된다.

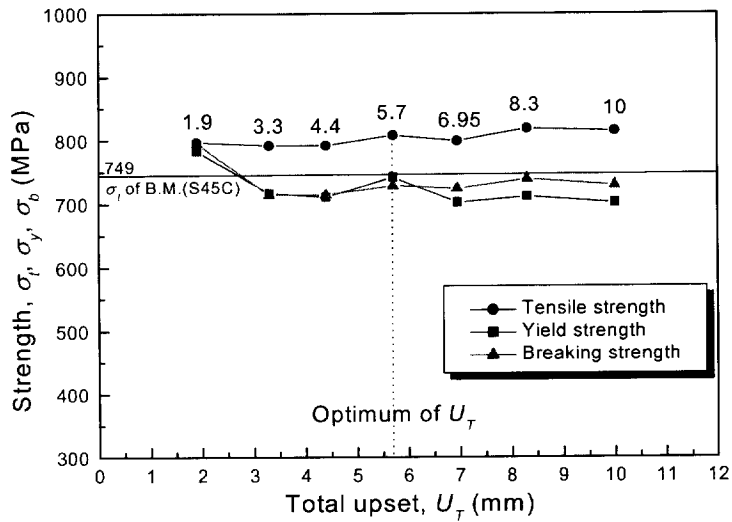


Fig. 4-4(a) Relationship between strength and total upset in the as-welded of SCM440 to S45C

Fig. 4-4(b)는 용접재와 후열처리재의 총업셋량과 인장강도와의 관계를 나타낸다. 그림에서의 결과치는 Fig. 4-3(b)과 비슷한 경향으로 나타났다. 여기서 가열시간이 4초일 때, 용접재의 총업셋량(5.7mm)은 비교적 높게 나타났으나, 후열처리재의 총업셋량(5.4mm)은 가장 낮게 나타났다.

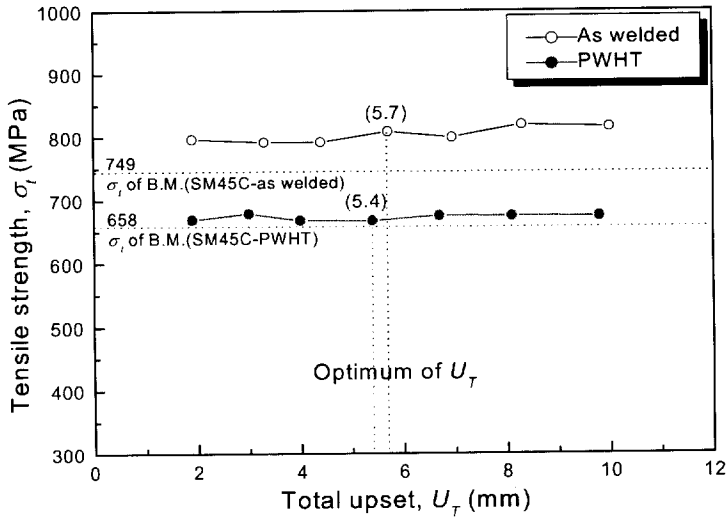


Fig. 4-4(b) Relationship between strength and total upset in the as-welded and PWHT of SCM440 to S45C

Fig. 4-5(a)는 가열시간과 인성(연신율, 단면수축율)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 가열시간이 2-7초인 경우, 연신율은 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 단면수축율도 약 19(%)로 비슷하지만 4초에서 33.4(%)로 높게 나타나고 있다. 따라서 앞에서 강도적인 측면과 더불어 최적조건을 연성적인 측면에서 고려해볼 때, 가열시간은 4초가 적합하다고 판단된다. 이는 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고, 연성이 높은 편이 우수하기 때문으로 사료된다.

그림에서 특이한 사항은 가열시간 1초에서 연성적 측면은 가장 낮게 나타났지만, 강도적인 측면은 비교적 높게 나타났다. 또한 타 조건에서는 S45C측 모

재에서 파단되었으나, 1초에서는 이와 달리 용접계면에서 취성파단 되었다. 파단양상은 일반적인 컵 앤 콘(cup and cone) 형태의 연성파단 양상으로 나타났다. 이는 가열시간이 비교적 짧기 때문에 용입불량의 원인으로 사료된다. 따라서 모든 조건에서 강도적인 측면과 인성적인 측면을 조합하여 고려해 볼 때, 가열시간이 2초 이하는 마찰용접 조건으로 타당하지 않다고 판단된다.

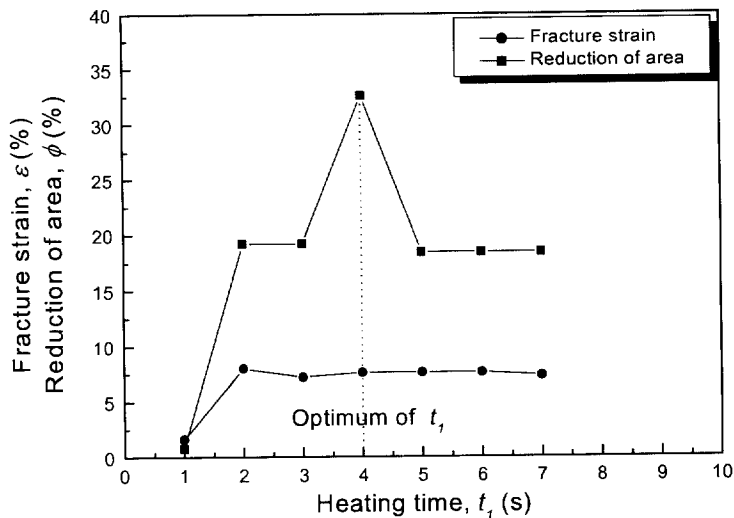


Fig. 4-5(a) Relationship between toughness and heating time in the as-welded of SCM440 to S45C

Fig. 4-5(b)는 용접재와 후열처리재의 가열시간과 연성과의 관계를 비교하여 나타낸다. 그림에서와 같이 후열처리재의 연신율과 단면수축율은 용접재에 비해 거의 두배 이상 높게 나타났다.

용접재의 결과를 보면, 연신율은 약 7(%)로 거의 비슷한 경향을 보이고 있고, 단면수축율도 약 19(%)로 비슷하지만 4초에서 33.4(%)로 높게 나타나고 있다. 이는 모재(S45C)의 연신율(16%), 단면수축율(42.7%)에 비해 훨씬 낮게 났다. 반면에 후열처리재는 연신율 약 19(%), 단면수축율 약 52(%)로 모재보다 높게 나타남을 알 수 있으며, 모든 용접조건에서 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

따라서 마찰용접 후열처리시 용접품질(인장강도, 인성)이 되는 최적조건의 범위는 넓었고, 용접재에 비해 모든 조건의 결과가 실험적으로 우수하였다.

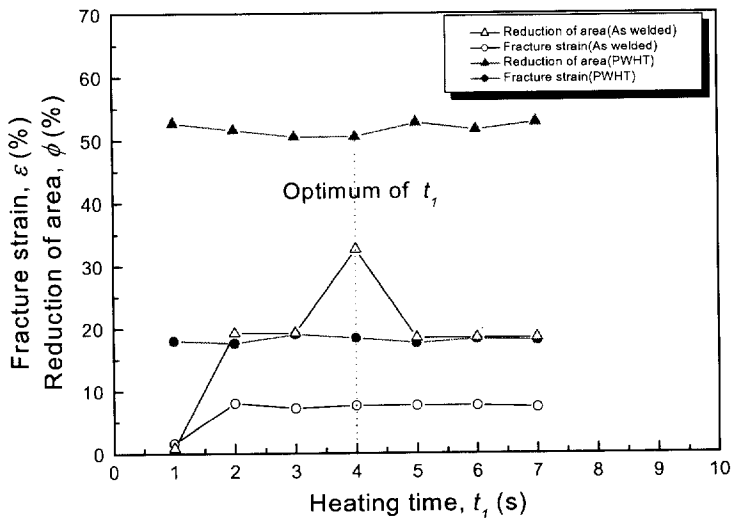


Fig. 4-5(b) Relationship between toughness and heating time in the as-welded and PWHT of SCM440 to S45C

4.4 용접부의 경도분포

Fig. 4-6(a)는 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편의 경도분포를 나타낸다. 경도측정은 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주부의 경도분포를 조사하기 위해 3가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경(15mm)의 중심부, 두 번째는 센터에서 2.5mm인 지점, 세 번째는 센터에서 5mm인 지점에서 각각 조사하였다.

그래프에서 보면 모재의 경도는 SCM440이 Hv 270으로 S45C의 Hv 238보다 다소 높은 편이며, 이들 재료의 용접계면(weld interface, W.I)의 경도는 Hv 430로서 두 재료의 모재보다 아주 높게 나타났다. 그리고 SCM440측 열영향부에서 최고의 경도값 (Hv 587)을 나타내고 있다. 그 이유는 용접경계면 부근에서 마찰

용접시 국부가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료된다^{5, 12)}. 이러한 용접부 경도의 peak는 용접후열처리로써 완화시킬 수 있다고 생각된다.

또한 열영향부 (heat affected zone, HAZ)를 두가지로 구분해서 보면, 시험편 중심부는 SCM440측 3.0mm+S45C측 2.3mm=5.3mm 이고, 센터에서 5mm인 지점은 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. 그 이유는 마찰용접시 원주속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이로 인해 마찰온도가 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달된다. 따라서 원주부의 온도가 중심부보다 급격히 상승함에 따라 냉각속도가 더욱 빠르게 되어 담금질 효과가 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 참고로 플래시(flash)부의 경도분포는 SCM440측 안쪽이 Hv 753, 바깥쪽이 Hv 595 이며, S45C측 안쪽이 Hv 496, 바깥쪽이 Hv 430으로 나타났다.

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 이중재간 접합성에 따른 특성이라 생각되며, 이는 후열처리를 통해 규명할 필요가 있겠다.

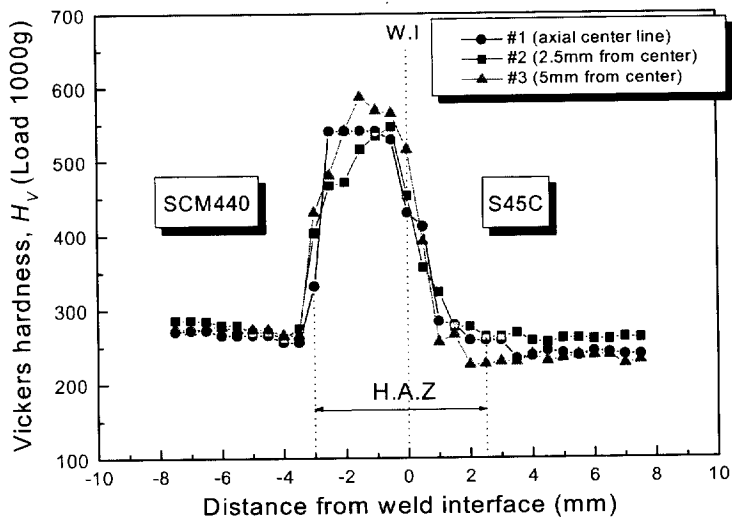


Fig. 4-6(a) Hardness distribution near the weld interface in the as-welded of SCM440 to S45C

Welding condition : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=60(\text{MPa})$, $P_2=100(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

Fig. 4-6(b)는 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편의 경도와 이를 후열처리 한 경도분포를 비교하여 나타내었다. 경도 측정은 Fig. 4-6(a)과 동일하게 조사하였다.

Fig. 4-6(a)에서 논의한 바와 같이 용접재의 경우, 열영향부의 경도분포가 용접계면을 기준으로 피크치를 나타내고 있다. 따라서 용접후열처리를 시행하여 경도분포를 조사한 결과, 그림에서와 같이 용접부의 피크치가 모재의 경도치 이하로 완화됨을 알 수 있다. 이는 용접시에 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 완전히 제거되었음을 의미한다.

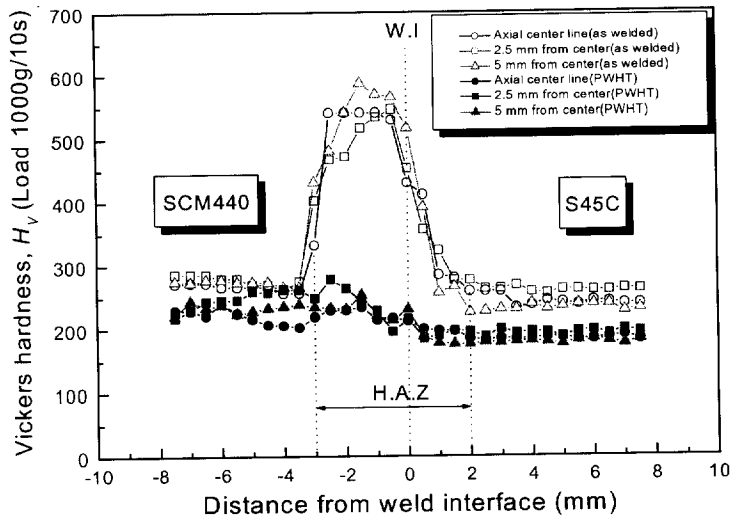


Fig. 4-6(b) Hardness distribution near the weld interface of as-welded and PWHT

Welding condition: $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=60(\text{MPa})$, $P_2=100(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

4.5 용접부의 조직검사

Fig. 4-7(a)는 최적조건에서 마찰용접한 시험편의 현미경 조직을 나타낸다. 먼저 2%의 나이탈(nital) 용액으로 에칭(etching)하여, 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ) 및 모재부(B.M)로 각각 200배로 확대 관찰하였다.

그림에서 용접계면(a)은 두 재료가 강렬히 혼합되어, 계면의 형태가 단조롭고 직선상에 가깝게 나타났다. (b)는 S45C 열영향부로 조대한 결정립 구조이며, (c)와(d)는 S45C 모재부로 펄라이트(Pearlite)와 페라이트(Ferrite, 백색으로 표시되는 부분) 조직이 혼합되어 나타나고 있고, (e)는 S45C flash부를 나타내고 있다.

또한 그림 (f)는 SCM440 열영향부로써 마치 단조한 조직과 같은 치밀한 미세조직을 나타내며, (g)는 SCM440 열영향부와 모재의 경계부분으로써 미세한

솔바이트(Sorbite, tempered martensite)조직을 보이고 있다. (h)는 SCM440 모재부로 마르텐사이트(Martensite) 조직을 나타내고 있고, (i)는 SCM440 flash부로서 S45C flash부에 비해 원주방향으로 금속이동의 흐름(metal flow)을 볼 수 있다.

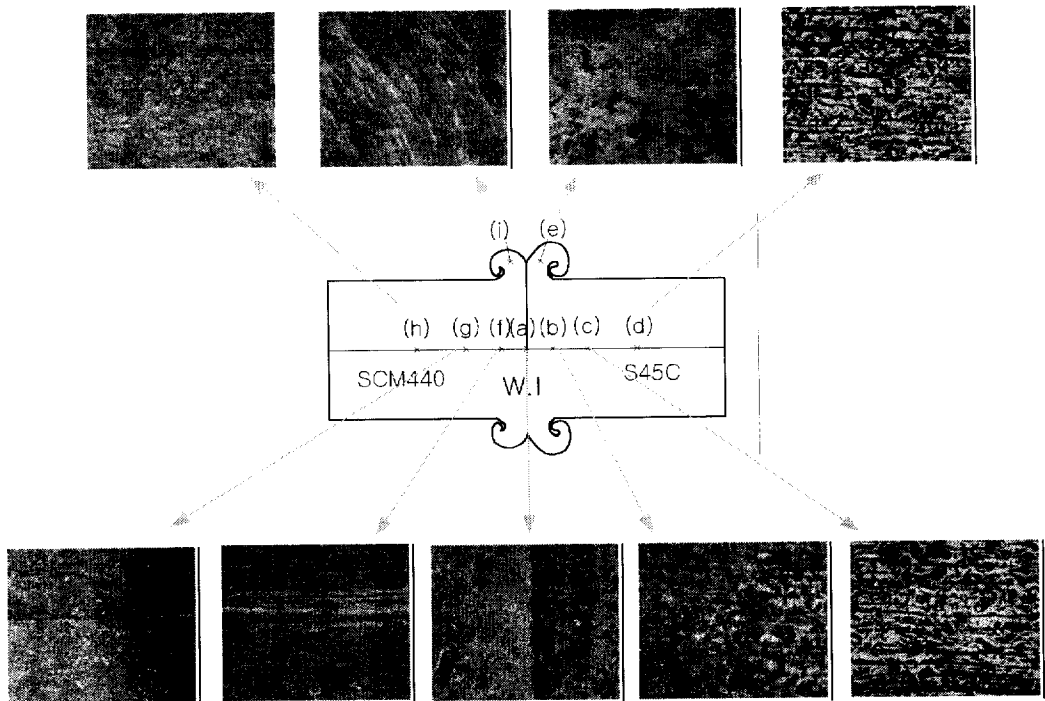


Fig. 4-7(a) Microstructure base metal, HAZ and weld interface in the as-welded of SCM440 to S45C($\times 200$)

Welding condition : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=60(\text{MPa})$, $P_2=100(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

Fig. 4-7(b)는 최적조건에서 용접후열처리한 시험편의 현미경 조직을 나타내고 있다. 조직검사는 Fig. 4-7(a)와 동일한 조건으로 확대 관찰하였다.

용접계면부는 이종재료의 모재조직입자가 압접 중에 고온상태에서 서로 혼합되어 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 볼 수 있다. S45C의 경우 계면으

로부터 약 3.0mm 떨어진 곳에서 모재 조직인 페라이트와 펄라이트가 나타나고, 열영향부는 모재의 페라이트가 아주 미세화되어 협소하게 나타나고 있다. 반면에 SCM440의 경우 계면으로부터 약 2.3mm 떨어진 곳에서 슬바이트 조직이 나타나고, 플래쉬는 반지름방향의 소성유동이 발생하여 슬립선이 형성되어 있음이 관찰되었다. 결과적으로 전 용접부는 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 매우 양호한 상태임을 알 수 있다.

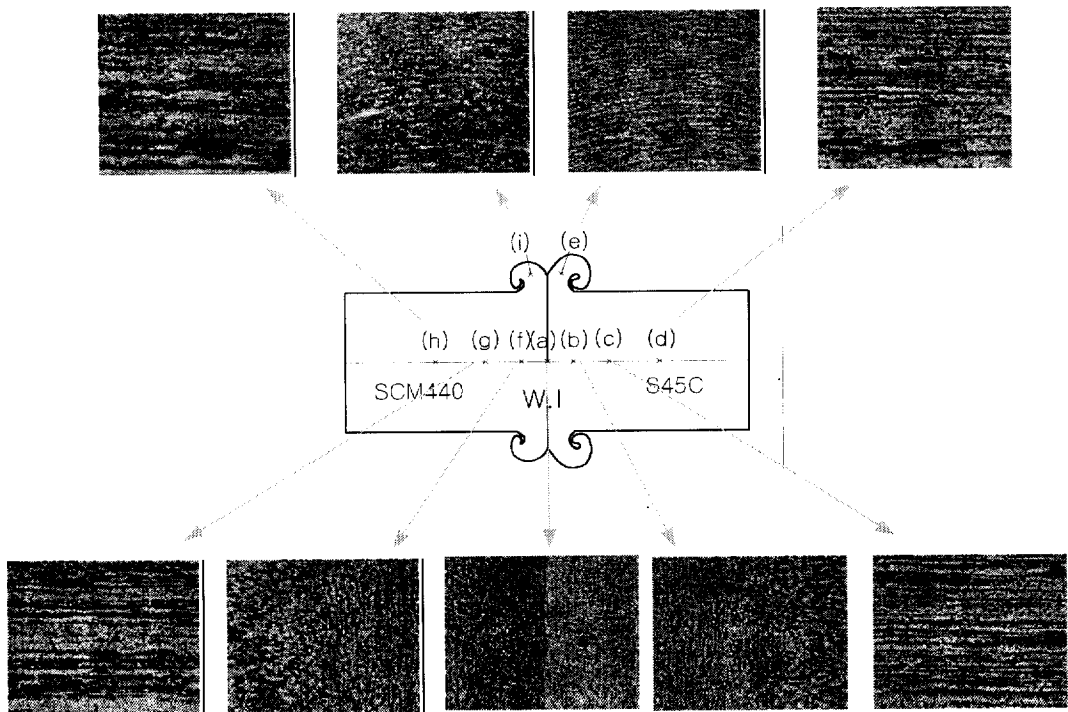


Fig. 4-7(b) Microstructure base metal, HAZ and weld interface of PWHT of SCM440 to S45C($\times 200$)

Welding condition : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=60(\text{MPa})$, $P_2=100(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

4. 6 마찰용접시 AE누적 총량과 가열시간과의 관계

Fig. 4-8은 SCM440과 S45C의 이중 마찰용접에 대한 마찰용접 가열시간 (heating time)에 따른 AE누적총량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 마찰 가열시간과 AE누적총량과의 관계에는 확실한 상관성이 보이지 않았다. 그러나 전체적인 경향으로는 가열시간이 증가하면 증가하는 경향이 보여지고 있으나 좀더 이에 대한 연구가 필요하다고 본다. 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 4초인 경우의 AE총 누적량이 30,000정도로 가장 낮은 값을 보였다. 이는 가열시간중에 AE를 발생하는 인자의 영향이 적어 양호한 용접이 이루어지고 있음을 시사해준다고 할 수 있다. 일례로 가열시간 4초인 경우의 용접시간과 AE카운트수, 누적총량 및 진폭과의 결과를 Fig. 4-9, 4-10, 4-11에 각각 나타낸다.

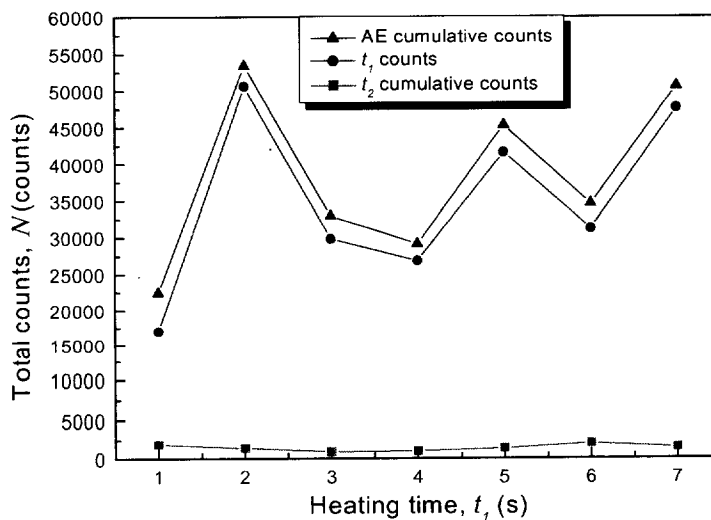


Fig. 4-8 AE total counts vs. heating time

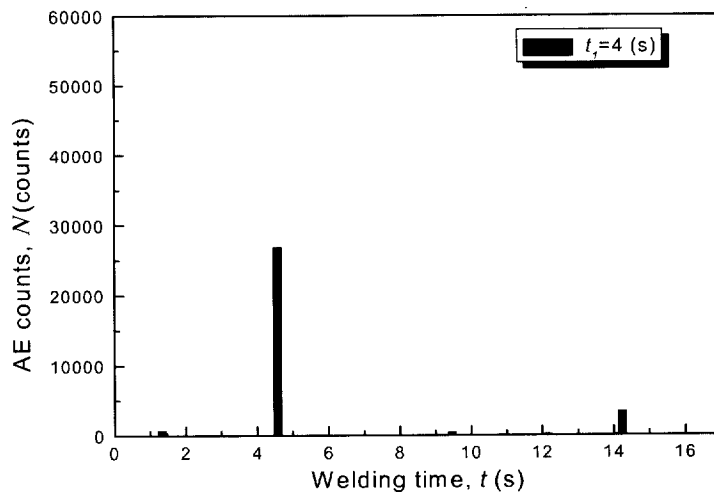


Fig. 4-9 AE counts, N vs. welding time, t

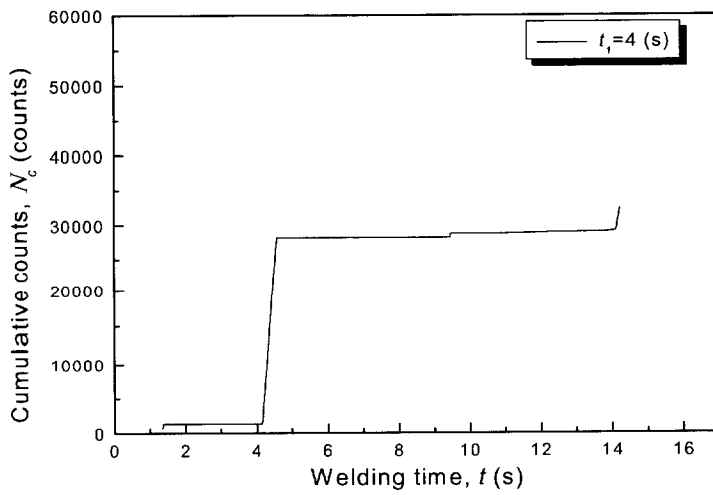


Fig. 4-10 AE cumulative counts, N vs. welding time, t

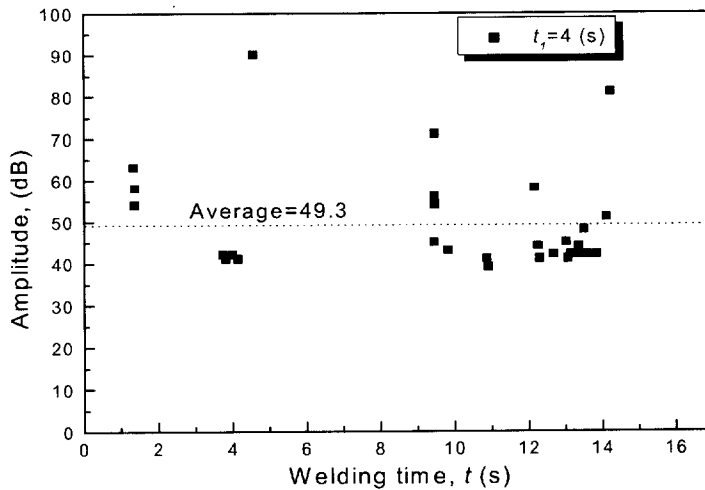


Fig. 4-11 AE amplitude, dB vs. welding time, t

4. 7 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계

Fig. 4-12는 본 연구에서 실험한 SCM440과 S45C의 이중 마찰용접재 (as-welded)의 가열시간(t_1)과 초음파 감쇠계수(dB/m)와의 변화를 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 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. 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 4초인 경우에 초음파 감쇠계수가 가장 적은 값을 나타냈으며, 이는 AE의 결과와 비슷한 경향을 얻었다.

또한, 용접후열처리재(PWHT)의 경우에 대한 초음파 감쇠계수(dB/m)와 가열 시간(t_1)과의 관계를 Fig. 4-13에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 용접후열처리재(PWHT)의 경우도 용접재의 경우와 비슷한 결과를 보였다. 즉, 마찰 가열 시간과 초음파 감쇠계수와의 관계에는 확실한 상관성이 보이지 않았으나, 용접후열처리재(PWHT)의 경우에도 감쇠계수는 가열시간의 증가와 더불어 감소하다가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이 경우는 가열시간이 3초에서 가장 낮은 값을 보였다.

한편, 마찰가열시간 4초인 경우에 있어서 용접재(as-welded)와 후열처리재(PWHT)의 초음파 감쇠계수는 각각 51.30 및 48.29dB/m로 용접후열처리에 의해 5.87%로 감소하였다.

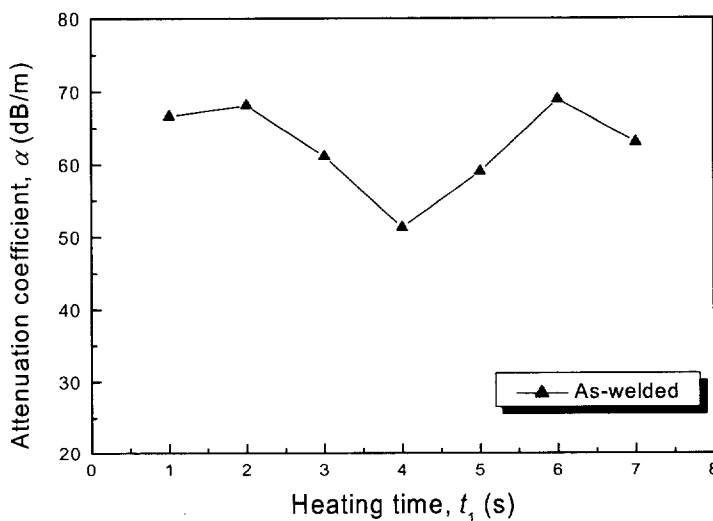


Fig. 4-12 Ultrasonic attenuation coefficient vs. heating time(as-welded)

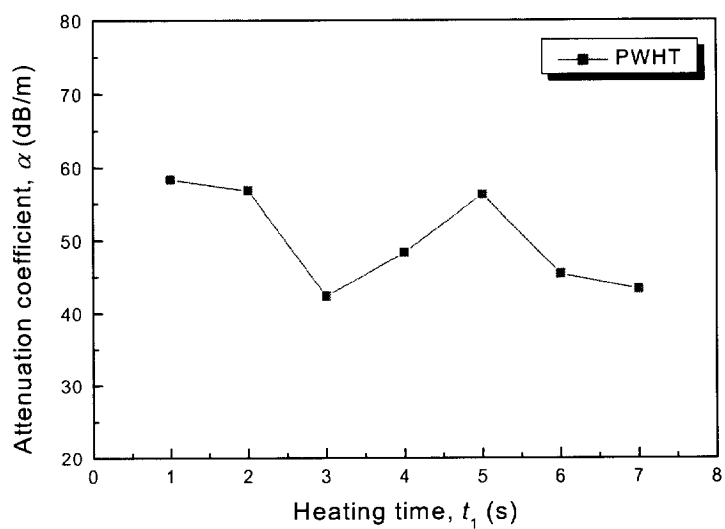


Fig. 4-13 Ultrasonic attenuation coefficient vs. heating time(PWHT)

5. 결 론

각종 축 재료 등에 사용되는 SCM440과 S45C의 이중재 마찰용접시험을 수행하여, 용접재와 후열처리재의 기계적 특성 및 비파괴적 평가에 관한 연구를 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SCM440과 S45C의 이음부 강도가 모재보다 양호한 이중재 용접이 가능하게 되어, 재료의 기계가공에 따른 공정수 및 재료 절감이 가능하다.
2. 가열시간에 대한 업셋량(U_1 , U_2 , U_T)을 구할 수 있었고, 이는 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 경우에 효율적인 방법이라고 판단된다.
3. 용접재에 비해 후열처리재의 연성치가 두배 이상 높았고, 모든 용접조건에서 거의 비슷한 경향의 연성치를 나타냈으며, 용접재에 비해 모든 조건의 결과가 실험적으로 우수하였다.
4. 마찰용접재의 용접계면의 경도는 Hv 430로서 두 재료의 모재에 비해 아주 높게 나타났고, SCM440측 열영향부에서 최고의 경도값(Hv 587)을 나타내는 등의 경도 피크치를 보인 반면, 후열처리재의 경도는 용접재에서 나타나는 피크치가 모재의 경도치 이하로 완화됨으로써 용접시 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 완화되었음을 확인하였다.
5. 최적조건에서 마찰용접한 용접부의 미세조직을 관찰한 결과는 두 이중재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태임을 알 수 있었다.
6. 마찰 가열시간과 AE누적총량과의 관계에는 확실한 상관성이 보이지 않았다. 그러나 가열시간 4초인 경우의 AE총 누적량이 30,000 카운트 정도로 가장 낮은 값을 보였다.
7. 초음파 감쇠계수와 마찰 가열시간과의 관계(As-welded/PWHT)는 확실한 상관성은 보이지 않았으나, 가열시간 4초인 경우에 최소의 감쇠계수 값을 보였다.

참 고 문 헌

- (1) 대한용접학회, 1998, “용접 · 접합편람”, pp. 663~664.
- (2) AWS, 1981, “Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding”, 7th edition, Vol. 1, pp. 153~220.
- (3) H. S. Jeong and T. Shinoda, 1997, “Fundamental and Basic Application of Friction Welding”, Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 1~12.
- (4) S. B. Kang and T. K. Min, 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) S. K. Oh, Y. S. Kong, I. J. Yoo and I. S. Kim, 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.
- (6) 오세규, 김동조, 1988, “초음파법에 의한 이종재료 마찰용접강도 해석법의 개발”, 한국해양공학회지, 제2권, 제1호, pp. 135~149.
- (7) D. F. Adams and S. K. Taylor, 1969, “Detection of Faults in Friction Welded Studs by Ultrasonics”, Welding and Metal Fabrication, pp. 412~421.
- (8) K. K. Wang and S. Ahmed, 1976, “Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar Metal Friction Welds”, Fourth North American Metal Working Research Conference Proceedings, pp. 384~389.
- (9) 변권수, 2000, “자동차 Shock Absorber용 강재의 이종재 마찰용접의 최적화와 실시간 AE 평가에 관한 연구”, 부경대학교 공학석사학위논문, pp. 21~24.
- (10) 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈, 1988, “S45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제2권, 제2호, pp. 312~321.
- (11) 오세규, 장홍근, 장지훈, 1995, “Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가”, 한국비파괴 검사학회지, 제15권, 제4호, pp. 511~519.
- (12) H. S. Cho and S. J. Suh, 1997, “FrictionWelding of Inconel 713C and SCM440”, Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 78~84.

감사의 글

오늘의 결실이 있기까지 많은 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사를 드립니다. 처음부터 한결같은 모습으로 저를 지켜봐 주시고, 진정한 학문이 무엇인지를 깨닫게 해주신 지도교수 김선진 박사님께 깊은 감사의 말씀을 드리며, 늘 행복하시길 기원합니다. 또한, 바쁘신 가운데 최종논문이 완성되기까지 심사해 주시고, 지도편달 해 주신 오명석 교수님과 김영식 교수님, 그리고 기계공학과 모든 교수님들께도 진심으로 감사를 드립니다.

아울러 학위과정동안 저의 생활과 연구에 있어 세심한 도움을 주시고, 많은 조언과 깊은 관심으로 형님처럼 도와주신 공유식 박사님께도 깊은 감사의 마음을 드립니다. 진학문제로 고민하고 있는 저에게 계속적인 학문의 길을 안내해 주신 포항1대학 이상열 교수님께도 깊은 감사의 마음을 드립니다. 오랜 시간 동안 수학 할 수 있도록 저의 빈자리를 때 꾸어 주신 한동직업전문학교 교직원들께도 감사의 말씀을 드립니다.

저를 이 세상에 있게 해주시고, 오늘의 제가 있기까지 곁에서 항상 변함없는 사랑과 헌신, 그리고 눈물로 보살펴 주신 아버지, 어머니께 이 영광을 드리고 싶습니다. 또한 부족한 저에게 항상 무한한 성원을 보내주시고 언제나 사랑으로 격려해주신 장인, 장모님께도 깊은 감사의 마음을 드립니다. 그리고 형님, 형수, 누님, 자형들께도 이 기쁨과 감사의 마음을 전하며, 주말조차도 함께 놀아주지 못한 아빠는 사랑하는 아들·딸 장상, 수민에게 항상 미안했다.

직장과 학업으로 가장으로서의 소홀함에도 불구하고 따뜻한 눈으로 묵묵히 지켜보며, 아픔과 기쁨을 함께해준 사랑하는 아내 박미숙에게 한없는 고마움을 전하며, 이 작은 결실을 함께 나누고 싶습니다.

끝으로 지면을 통하여 거론되지 못한 여러 친지, 은사님, 선·후배들에게도 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

2005년 2월

정원택 올림