



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

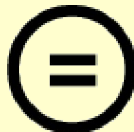
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

자동차 후진 기어용 축재의 이중
마찰용접에 관한 연구



2009년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계공학과

윤 성 필

공학석사 학위논문

자동차 후진 기어용 축재의 이중 마찰용접에 관한 연구



부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계공학과

윤 성 필

윤성필의 공학석사 학위논문을 인준함

2009년 2월



주 심 공학박사 김 영 식 인

위 원 공학박사 김 병 탁 인

위 원 공학박사 김 선 진 인

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	v
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	5
2.1 마찰용접의 원리 및 장단점	5
2.2 마찰열 발생에 대한 해석	10
2.3 AE 신호의 특성	13
2.4 초음파 감쇠계수	16
3. 시험편 및 실험방법	20
3.1 재료 및 시험편	20
3.2 실험장치 및 실험방법	24
4. 실험결과 및 고찰	30
4.1 SM45C-SF45 이중 마찰용접 최적화	30
4.1.1 용접조건과의 상관성	30
4.1.2 가열시간과 열셋량과의 상관성	33
4.1.3 용접변수와 강도의 상관성	36

4.1.4 가열시간과 충격에너지와의 상관성	41
4.1.5 용접부의 경도 분포	44
4.1.6 용접부의 조직 관찰	46
4.2 비파괴시험법에 의한 마찰용접 품질 평가	48
4.2.1 마찰용접시 AE누적총량과 가열시간과의 관계	48
4.2.2 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계	50
4.3 마찰용접 후열처리재의 강도 평가	52
4.3.1 후열처리재의 강도 특성	52
4.3.2 후열처리재의 경도 분포	54
4.3.3 후열처리재의 조직 관찰	56
5. 결 론	58
참고문헌	60
감사의 글	

A Study on the Dissimilar Friction Welding of Reverse Idle Gear Shaft Materials for Automobile

Seong-Pil Yoon

Department of Mechanical Engineering

Industrial Graduate School

Pukyong National University

Abstract

Friction welding (FRW) is a solid-state welding process that produces a weld under compressive force contact of workpieces rotating or moving relative to one another to produce heat and plastically displace material from the faying surfaces. The friction welding has been shown to have significant economic and technical advantages. Recently, according to industrial development, friction welding has been applied on various industries such as aerospace, ship, farm machines, automobile, and machine component fields, etc. 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 to check the weld quality, particularly in a production environment.

In this study, an experimental study was conducted not only to optimize the

dissimilar friction welding conditions for 20mm diameter solid bar in forging steel (KS SF45) to carbon steel (KS SM45C) of reverse idle gear shaft materials for automobile, but also to investigate the relationship between the weld parameters and the nondestructive coefficients, such as total 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, 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 the nondestructive coefficients, such as AE total 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 about 100% of the SF45 base metal under the condition of the heating time over 7(s). The total upset increases lineally with increasing the heating time. Optimal welding conditions were determined as follows; rotating speed, $n=2,000$ (rpm), heating pressure, $P_1=70$ (MPa), upsetting pressure, $P_2=140$ (MPa), heating time, $t_1=7$ (s) and upsetting time, $t_2=5$ (s) when the total upset length is 7.9(mm). Hardness distribution after PWHT shows HV700. All PWHT welded parts shows about 3 time higher hardness than as-welded material. The weld interface of dissimilar friction welded parts was strongly mixed to show a well-combined structure of macro-particles without particle growth or any defects.

Nomenclature

FRW	:	Friction welding
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_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 (%)
α	:	Ultrasonic attenuation coefficient (dB/mm)
P_O	:	Original pressure level at a source
P	:	Pressure level at second reference location
L	:	Distance of pulse travel
dB	:	Ultrasonic amplitude
σ_t	:	Tensile strength (MPa)
σ_y	:	Yield strength (MPa)
ε	:	Fracture strain (%)
φ	:	Reduction of area (%)
E	:	Impact energy ($kg \cdot m$)

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 우주, 항공, 선박, 농업기계, 자동차, 중장비, 기계부품 등 다양한 분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 고가품과 저가품의 이중재 용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성이 좋은 제품의 대량생산, 자동화의 용이성, 가공시간의 단축, 재료절약, 에너지의 고효율화 등에 마찰용접이 응용되고 있으며, 또한 이에 대한 적용과 응용에 대한 연구가 국내외적으로 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 잇점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 역사적으로 마찰을 이용한 접합방법은 부분적으로 오래 전부터 사용되어 왔으나, 공업적으로는 구소련에서 1954년 A.I.Chudikov가 선반을 개량해서 금속환봉의 마찰용접을 성공한 이래 괄목할 만한 성장을 이루었다¹⁾. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다^{2, 3)}. 마찰용접법에 대한 연구는 1957년 Vill⁴⁾에 의해 본격화된 후 이에 대한 연구 보고가 계속 증가⁵⁻¹²⁾하고 있으며 국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적조건의 결정과 응용 및 강도에 관한 연구가 보고되는 등 이종재료의 마찰용접에 관한 연구가 증가되고 있다¹³⁻¹⁶⁾. 그러나 마찰용접조건과 인장강도간의 관계에 관하여 많이 보고되고 있지만, 실용상 중요한 피로강도의 관점에서 이것을 평가하고, 또한 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 신뢰

성 있는 데이터의 축적이 필요하다.

한편, 마찰용접재에 대한 비파괴적 연구는 1969년 Adams¹⁷⁾에 의한 마찰용접 이음면의 결함을 찾기 위한 초음파 펄스를 송수신하는 방법을 이용한 연구와 Wang¹⁸⁾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 필요하다고 생각된다.

한편, 선진국의 모든 자동차 관련 업체가 마찰용접기에 의한 압접 대상품이 아무리 다종화 되어도 어떤 형태로든 마찰용접법을 도입하여 그들 압접품을 생산하고 있다. 현재에도 여러 이종 금속의 접합대상 부품에 성에너지 합리화의 대상으로서 마찰용접기의 도입에 적극적으로 참여하고 있는 실정이다.

자동차에서 변속기(Transmission)는 클러치와 추진축(Propeller shaft) 사이에 설치되어 엔진의 동력을 자동차의 주행상태에 알맞도록 엔진의 회전력을 증대시키거나 감소시켜 구동바퀴에 전달하는 역할을 하며, 자동차를 후진하게 하는 기능을 갖고 있는 장치이다. 즉, 자동차용 엔진은 회전방향이 일정하고 발생하는 토크는 실용회전 속도범위에서 거의 일정하다. 이것에 대해 차량의 주행조건은 정지로부터 출발, 저속주행으로부터 고속주행, 특히 후진 등 광범위하게 변화한다. 따라서 각 주행조건에 대응하여 엔진성능을 충분히 발휘하기 위하여 변속기가 이용되며 변속비를 변화시키는 것, 회전방향을 역전시키는 것(후진), 동력 전달을 하지 않는 상태를 만드는 것(중립)과 같은 기능을 수행한다. 변속기는 크게 자동변속기, 수동변속기, 반자동변속기, 무단변속기로 구분된다. 이중 수동변속기의 종류에는 전륜구동방식과 후륜구동방식으로 나뉘며 소형 및 중형 승용차에는 전륜구동방식이 많이 쓰인다. 변속기내부에는 엔진의 동력을 전달

하는 입력축, 기어에 의해 변속되어진 동력을 구동바퀴에 전달하는 출력축, 후진시 역전을 위한 후진기어축, 종감속장치 및 차동장치로 구성되며 본 연구에서 다루는 후진기어축은 차량의 종류 및 크기에 따라 다소 차이는 있지만 전륜구동형 변속기에는 꼭 필요한 요소이다.

자동차 후진기어용 축재는 단조재로서 한 중소기업체에서만 년 평균 생산개수는 60만개에 이르며 국내 완성차 5사에 납품되는 양은 내수 및 수출용 차량까지 더하면 수백만 개가 될 것이다. 하지만 Fig. 1-1의 형상에서 보듯이 열처리 및 가공공정이 어렵고 피로파괴에 따른 제품수명 저하 등의 문제점으로 인한 경제적 손실이 우려되는 실정이다. 따라서 이 문제해결 방안으로 생산업체와 협의하여, 종전의 단조품을 축 부분은 기계구조용 강재(SM45C)를 사용하고, 캠 형상 부분은 단조품(SF45)으로 대체하여 이중 금속간의 마찰용접제품의 대체 사용가능성을 고찰하는 것은 중요한 의미가 있다고 사료된다. 자동차 부품을 생산하는 방법으로서 마찰용접을 도입한 목적, 그 효과 및 압점 대상품은 매우 많지만, 본 연구에서 고려되는 단조품의 분할에 마찰 용접을 도입하려는 효과는 단조 비용의 저감, 수명향상, 가공 공정수의 저감 및 단조 양산 효과의 향상 등 많은 장점을 가지고 있다고 생각된다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 이들 두 이중 금속간의 마찰접합을 시행하여, 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 인성 등)과의 상관관계를 고찰하여 마찰용접 조건을 최적화하고자 하였다. 또한, 마찰용접시 음향방출시험을 병행하여 AE누적충량과 마찰용접의 변수, 특히 가열시간과 AE누적충량과의 상관관계를 검토하였고, 마찰용접재에 대한 초음파 감쇠계수를 구하여 감쇠계수가 마찰용접 변수에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 마지막으로, 최적 용접조건하에서 마찰용접을 수행한 후 실용적으로 중요한 고주파 열처리를 시행하여 고주파 열처리한 후열처리재(Post-welded heat treatment, PWHT)와 마찰용접재

(As-welded)와의 강도 특성 등을 비교 고찰하였다.

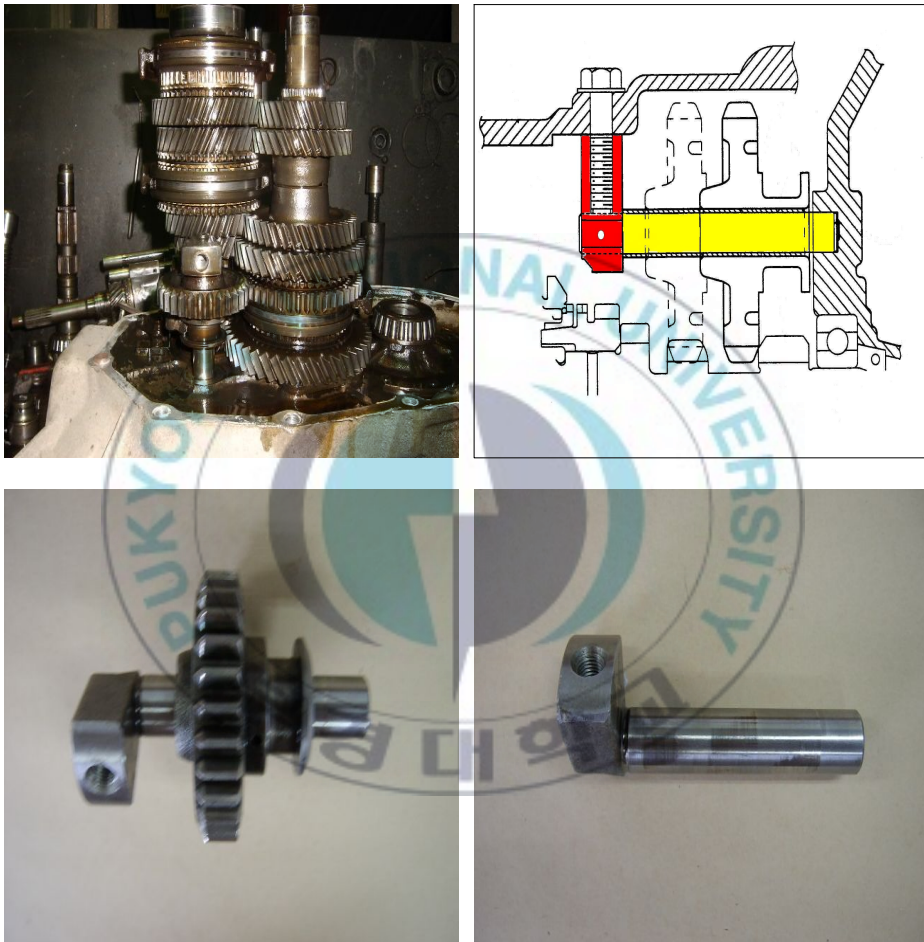


Fig. 1-1 Examples of shape for reverse idle gear shaft

2. 이론적 배경

2.1 마찰용접의 원리 및 장단점

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

재료의 많은 성질은 원자와 원자가 서로 결합하고 있는 힘에 대한 정보로부터 예측될 수 있다. 아마도 원자간의 결합에 대한 원리는 두 개의 고립된 원자가 무한히 먼 거리에서 가까워질 때, 원자간의 상호작용을 생각함으로써 잘 설명될 수 있을 것이다. 원자가 먼 거리에 떨어져 있을 때, 원자간의 상호작용은 미약하다. 그러나 원자가 서로 가까워질수록 상호 힘이 작용하며, 그 힘은 원자간 거리의 함수로 나타난다. 상호간에는 인력(Attractive force)과 반발력(Repulsive force)의 상반된 힘이 작용하며, 각각의 힘의 크기는 원자간의 거리의 함수로 표현된다. 인력 F_A 의 원인은 두 원자간의 결합 종류에 따라 다르며, 그 크기는 Fig. 2-1(a)에 나타낸 바와 같이 거리에 따라 다르다. 결국, 두 원자의 거리가 가까워져 외각 전자들이 서로 겹치기 시작하면 강한 반발력 F_R 이 작용하게 된다. 순수 원자간의 힘(F_N)은 이와 같은 인력과 반발력 성분의 합으로 나타난다.

즉,

$$F_N = F_A + F_R \quad (1)$$

F_N 도 Fig. 2-1(a)에서와 같이 원자간 거리의 함수이다. F_A 와 F_R 이 서로 균형을 이루어 같게 되면 순수 원자간의 힘은 없어지며, 따라서 $F_A + F_R = 0$ 에서 평

형 상태가 존재한다. Fig. 2-1(a)에서와 같이 두 원자의 중심은 평형거리 r_0 만큼 떨어져 있게 된다. Fig. 2-1(b)는 반발력, 인력, 순수의 위치에너지를 두 원자간 분리 거리의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 순수에너지 곡선은 두 에너지의 합이며 최저점을 가지고 있다. 평형 분리 거리 r_0 는 가장 최소의 위치에너지를 갖는 분리 거리에 해당된다. 이 원자간의 결합에너지(Bonding energy) E_0 는 Fig. 2-1(b)에서의 최저점에 해당하는 에너지인데, 이는 두 원자를 무한대로 분리시키기 위해 가해야 하는 에너지와 같다.

Fig. 2-1에서 인력과 반발력이 평형상태가 되는 지점으로 보다 더 근접시키는 방법이 마찰용접의 원리이고, 이러한 근접이 이루어지려면 재료가 소성 변형을 일으킬 수 있을 정도의 막대한 외력을 필요로 하게 되며, 동시에 변형 저항을 저하시켜 줌으로써 가능한데, 변형 저항을 저하시키는 데는 가열원을 필요로 한다. 이와 같이 마찰용접은 마찰열을 이용하여 변형저항을 줄이고 가압력에 의해 접촉면의 원자결합을 형성시킴으로써 이루어지는 결합이다.

Fig. 2-2는 마찰용접의 기본적인 기구(Mechanism)를 나타낸다³⁾. 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 가열됨으로써 접촉점이 확대되어 재료의 깊이 방향으로 열이 전도됨과 동시에 고온 영역이 발생하며, 고온 영역이 용접에 필요할 정도의 높은 온도(단조 온도 정도)로 확대될 때 회전을 급정지와 동시에 축 방향의 일정 엷셋압력을 일정 엷셋시간 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 연속 구동 마찰 용접법(Continuous drive friction welding)과 관성

마찰 용접법(Inertia friction welding)의 두 가지로 나눌 수 있는데 구소련, 일본, 유럽 등에서는 주로 연속 구동형을 사용하는 추세이고, 미국 등은 관성형을 사용하는 경향이 있으나 원리적인 면에서는 크게 차이를 볼 수 없으며 각각의 용접조건 설정이나, 재료의 선택에 약간의 장단점이 있다^{2) 3)}.

연속 구동 마찰용접법은 한쪽 재료를 모터 등에 의해 일정 속도로 마찰 시키면서 축 방향 압력을 가하고 미리 설정된 시간 또는 축방향 수축량에 이르게 되면 마찰운동을 중지시킨다. 이 때 압력을 그대로 유지하거나 추가 압력을 가하는 방법을 쓴다. 관성 마찰 용접법의 경우는 플라이휠의 크기에 의해 관성값을 선택하고 정해진 마찰운동에너지 즉, 정해진 마찰 운동 속도에 이르기 까지 마찰 시킨 후 구동장치와 플라이휠을 분리하고 축방향으로 응력을 가한다. 그 과정에서 마찰운동 속도가 낮아져 일정한 값이 되면 추가 압력을 가하거나 그대로 유지하는 방법으로 용접이 이루어진다.

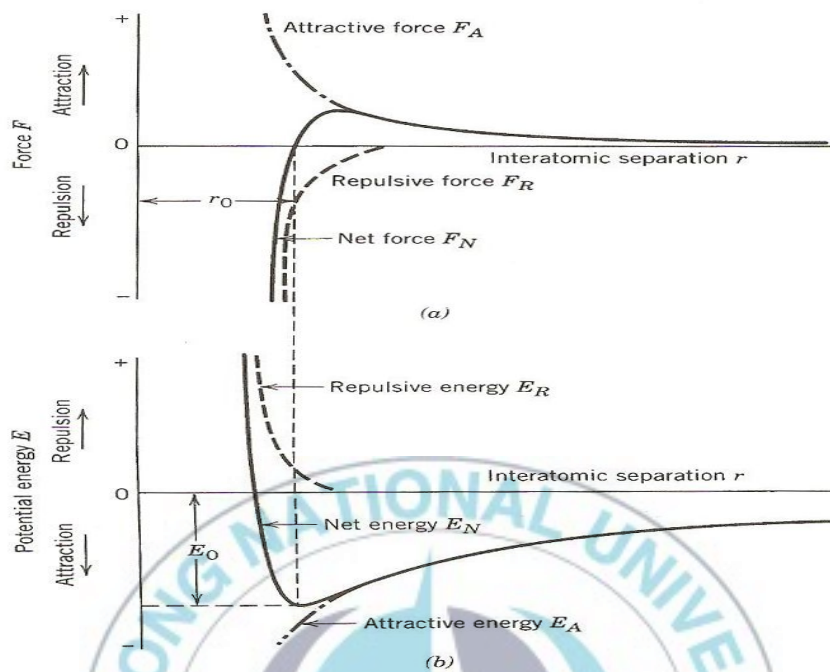


Fig. 2-1 Transformation of force and energy at the interatomic distance

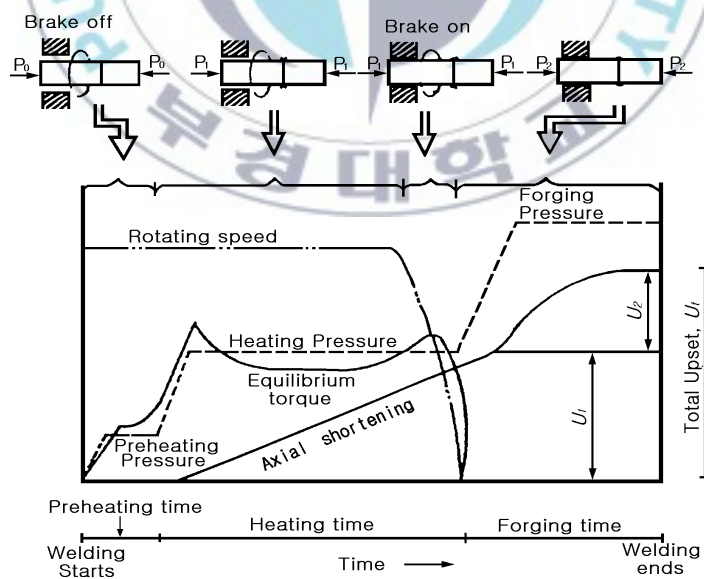


Fig. 2-2 Principles of friction welding (continuous drive type)

회전운동을 이용하는 마찰용접의 장점(Advantages)으로는 다음을 열거할 수 있다.

- 1) 용접시 용접 소모품(Filler material or shielding gases)이 불필요하다.
- 2) 계면 마찰에 의한 표면 오염층이 제거된다.
- 3) 열 영향부가 좁다.
- 4) 비철금속, 이종접합에 적당하다.
- 5) 빠른 용접시행이 가능하다(기존 대비 최소 2배에서 100배 정도의 용접시간 단축).
- 6) 용접 진행시 작업자에 의한 용접 에러 가능성이 없다.
- 7) 작업자의 숙련도와 관계없이 항상 같은 용접품질을 유지 할 수 있다.
- 8) 용접시 발생하는 유해한 가스 및 불쾌한 연기가 발생 하지 않아 배기구가 필요 없으며 쾌적한 작업 환경을 유지 할 수 있다.
- 9) 다양한 금속의 형상이나 사이즈의 용접이 가능하다.
- 10) 전 공정의 손쉬운 모니터링 및 데이터 저장에 용이하다.
- 11) 원가가 저렴하다.

한편, 마찰용접의 단점(Disadvantages)은 다음과 같다.

- 1) 너무 긴 것에 적용이 어렵다.
- 2) 용접부에 회전마찰을 일으킬 수 없는 경우 곤란하다.
- 3) 중량이 너무 큰 대상은 용접이 어렵다.
- 4) 열전도도는 좋고 강도가 약한 구리와 같은 경우 변형의 우려가 있다.
- 5) 용접대상의 한쪽은 축대칭이어야 하고 축을 중심으로 마찰운동이 가능해야 한다.

2. 2 마찰열 발생에 대한 해석

마찰용접에서 열 사이클은 표면에서 원자 결합의 파괴와 결합의 연속적인 과정으로 간주된다²⁰⁾. 마찰용접에서는 소성 저항을 줄이기 위한 마찰 발열량과 두 재료 표면의 원자끼리의 간격을 좁히기 위한 압력크기의 크기가 용접성에 주로 영향을 미친다고 알려져 있으나 더욱 더 중요한 것은 열 해방율이다. 마찰면의 발열량은 일정 압력하에서 시간이 경과하면 증가하게 된다. 재료는 일정온도에 이르면 소성변형을 일으키게 되고 압력에 의해서 플래시로 배출이 되며 이로 인하여 마찰면의 온도가 저하 된다. 이러한 온도의 저하는 소성변형에 대한 저항을 증가시키고 이로 인하여 고상태 용접에서 기계적 힘에 의해 접합 능력을 향상 시킨다²³⁾. 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.

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

따라서, 반경 r 의 위치에 대한 미소면적 dA 에 대한 마찰력 dF 는

$$dF = Pf2\pi r dr \quad (3)$$

$$= f \cdot dA = \mu P \times 2\pi r \times dr$$

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

$$dQ = Pfn4\pi^2 r^2 dr \quad (4)$$

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

$$Q = \int_0^r Pfn4\pi^2 r^2 dr \quad (5)$$

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.

$$Q = 2\pi M_t n \quad (6)$$

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.

$$dM = r \times dF = r \times dA \times P \times f = r \times 2\pi r \times dr \times P \times f \quad (7)$$

Fig. 2-3은 모재의 마찰면에서 반경방향의 열발생 분포가 포물선상으로 되는 것을 나타내고 있다. 여기서 f 는 마찰 효율 계수이며, 압력 P 는 마찰면에 균등

하게 분포하고 있는 것으로 하면 모멘트 M 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{2}{3} \pi P f r^3 \quad (8)$$

여기서 M : 모멘트

P : 단위 압력

r : 모재의 반경

f : 마찰 효율 계수

(전형적인 마찰계수와 구별하기 위하여 효율마찰계수를 사용함)

따라서, 이것에 대한 일 dN 은 회전수를 n 이라 하면

$$N = \frac{2}{3} \pi P f n r^3 \quad (9)$$

단위면적당 평균 일 N_{unit} 는

$$N_{unit} = \frac{2}{3} f P n r \quad (10)$$

로 주어진다.

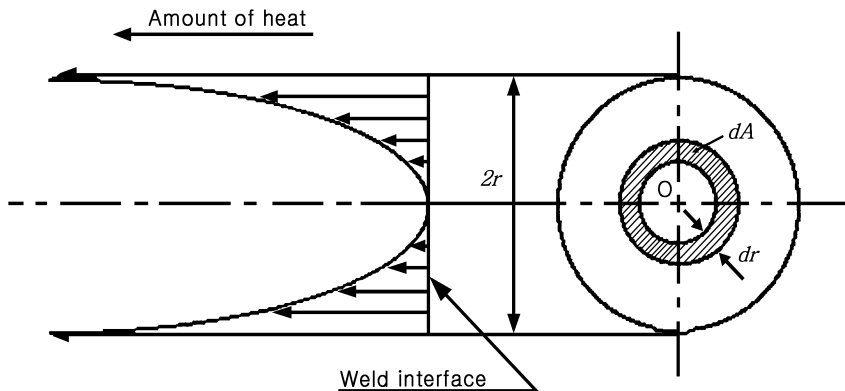


Fig. 2-3 Heat liberation diagram for friction welding

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 자리 잡게 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

형태로서 방출된다. AE의 주된 발원 기구(Mechanism)는 재료에 미치는 기계적, 열적, 금속학적 원인에 기인될 수 있다. 마찰용접은 고온과 고압하에서 수행되므로 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 AE마찰용접 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.

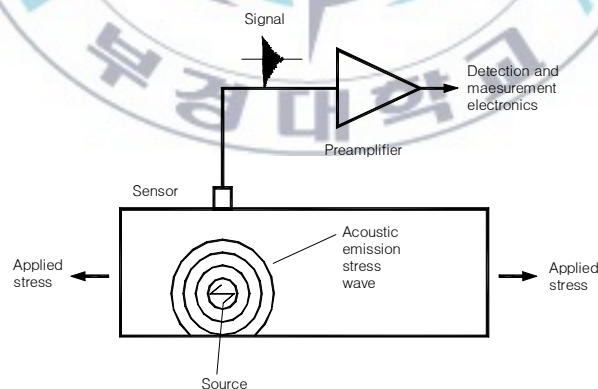


Fig. 2-4 Basic principle of the acoustic emission method

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 사건(Event), 횟수(Count), 에너지(Energy), 진폭(Amplitude), 지속시간(Duration time), 상승시간(Rise time), 감쇠시간(Attenuation time) 등이 있으며, AE신호 탐지 원리를 Fig. 2-5에 나타내었다. 본 연구에서는 AE카운트(Count)를 측정하여 분석하였다.

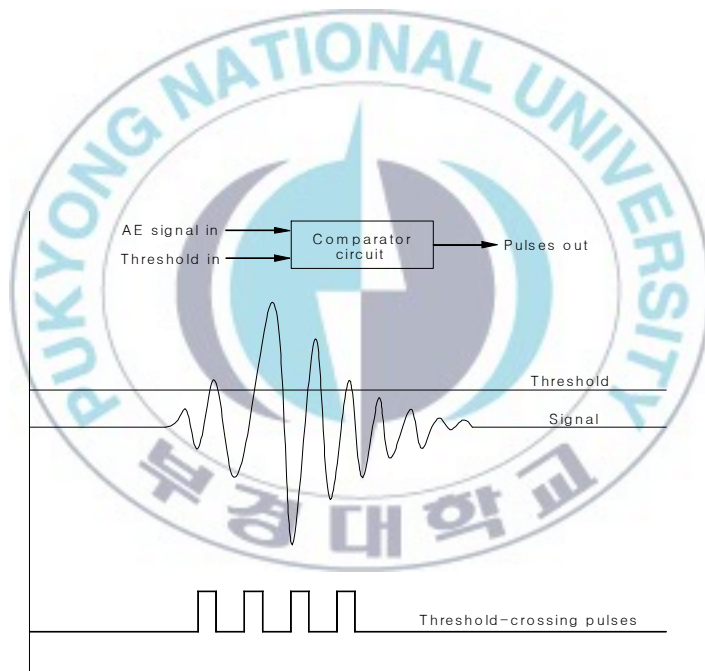


Fig. 2-5 Principle of AE signal detection and threshold-crossing counts

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^{17, 18)}.

- 공진법
- 투과법
- 펄스반사법

이중 에코에 의한 검사법인 펄스반사법이 초음파탐상법에 많이 이용되고 있다.

펄스반사법은 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.

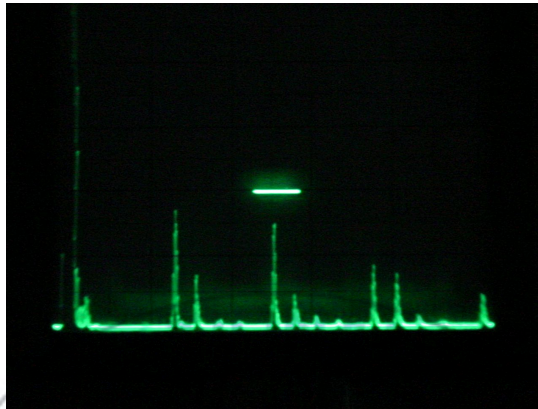


Fig. 2-6 Concept of pulse echo method

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 수직 입사한 경우 초음파는 그곳에서 반사되는 성분과 통과하는 성분으로 나누어진다. 반사와 통과의 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.

$$E = P^2 / Z \quad (11)$$

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)이나 음파의 현상에 있어서의 변화의 결과이다. 펄스 에너지의 손실은 기본적으로 빔의 확산(Beam spreading), 흡수(Absorption), 산란(Scattering)으로 설명할 수 있으며, 초음파 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 결보기 감쇠

감쇠(Attenuation)는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$P = P_0 e^{-\alpha L} \quad (12)$$

여기서, P_0 = 소스 혹은 다른 기준 위치에서의 최소음압

P = 거리 x만큼 전파 후의 음압

α = 감쇠계수

L = 음파의 전파 거리

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

$$SPL = 20 \log (P/P_0) \text{ dB} \quad (13)$$

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.

$$SPL_1 - SPL_2 = 20 \log (P_1/P_2) \text{ dB} \quad (14)$$

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

$$\alpha L = 20 \log (P_1/P_2) \text{ dB} \quad (15)$$

α 를 감쇠계수라 하며, 그 단위는 dB/mm 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 SM45C와 SF45 강재이며, 이들 재료는 강도와 인성, 내마모성에 중점을 둔 재료로 국내 G사의 제품을 사용하였다. 기계구조용 탄소강재(SM45C)는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, 열간단조재(SF45)는 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하며, 주로 일반기계, 자동차, 항공기 등의 축류, 치차류, 냉간단조품, 볼트류 등에 많이 이용된다. Table 3-1 및 Table 3-2에 본 연구에 사용한 SF45와 SM45C의 그 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

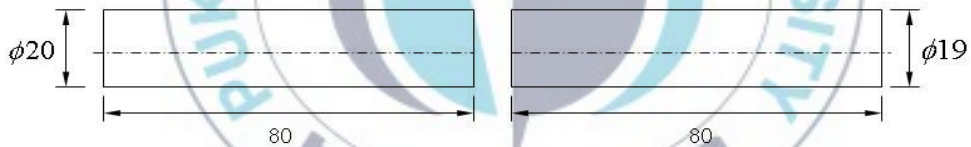
Table 3-1 Chemical composition of the materials (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
SF45	-	0.35	0.82	0.19	-	0.14	-	0.15	0.25	Bal.
SM45C	0.45	0.18	0.67	0.015	0.016	0.15	0.19	0.08	0.19	Bal.

Table 3-2 Mechanical properties of the materials

Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Elongation ε (%)	Hardness (HV)
SF45	695	400	47.2	26.2	170
SM45C	846	725	42.5	16.6	215

마찰용접 시험을 위한 시험편은 Fig. 3-1(a)와 같은 형상 및 치수로 가공하였다. Fig. 3-1(b)는 두 이종재료 모재의 형상 사진을 나타낸다. Fig. 3-1(c)는 두 이종재료의 마찰용접된 형상의 일례를 나타내며, 이들 시험편의 강도를 평가하기 위하여 Fig. 3-1(d)와 같은 인장 시험편의 형상 및 치수를 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 그리고 경도 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 시험편을 용접 계면부에서 좌우 15mm에서 절단한 후, 축방향 중심부를 따라서 와이어 절단(Wire cutting)하였다. 절단에 의한 열영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 충분히 적용하였고, 마운팅한 후 경면 연마하였다. Fig. 3-1(e)는 미세조직과 경도를 조사하기 위한 마운팅한 시험편을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 3-1(f)는 충격에너지를 구하기 위하여 ASTM E23-02에 준한 Charpy 충격 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.



(a) Shape and dimension of friction welding test specimens



SM45C

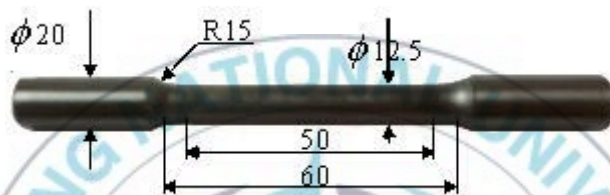
SF45

(b) Friction welding test specimens

Fig. 3-1 Shapes and dimensions of the test specimens (*continued*)



(c) Finish shape of friction welding

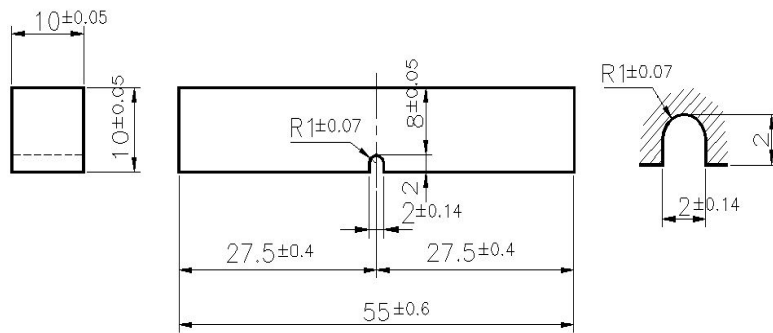


(d) Tensile test specimen



(e) Photograph showing section through friction welded joints

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



(f) Charpy impact test specimen

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 연속구동 브레이크형 (Continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료 치수로서 회전축은 $\phi 25$ mm이고 고정축은 $\phi 40$ mm이다. 그리고 이음부의 인장 강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (Model : KDU-50)로서 인장속도는 2 mm/min으로 각 모재와 용접재 및 고주파 열처리재를 각각 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model : MVK-H1, Akashi)을 사용하였으며, 시험조건은 하중 100g/10초의 0.5mm 등간격으로 조사하였다.



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^{19, 20)}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, 마찰용접재(As-welded)와 고주파 열처리재(PWHT)에 대한 강도 특성을 비교 검토하였다.

Table 3-3 Testing conditions of the dissimilar friction welding and the results

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	3	4	638	1.3
		50	100	5	5	658	2.5
		60	120	5	5	672	4.0
		70	140	5	5	694	5.8
2	2000	70	140	1	5	655	1.2
				3	5	658	2.6
				5	5	688	4.9
				7	5	696	7.9
				9	5	695	10.1

한편, 마찰용접시 발생하는 AE누적량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R15-C 150kHz sensor)를 사용하여 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 AE 발생원으로부터 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 원활히 전달되도록 하였다. 장치에 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 3-4는 본 연구에 사용한 AE장치와 파라미터 값들을 요약한 것이다.

한편, 마찰용접 조건에 대한 초음파 감쇠계수의 측정은 탐촉자 내의 압전재료에 적정 펄스전압을 가하여 진동(초음파)을 만들고 그 진동이 시험체 배면에서 반사되어오는 것을 압전재료가 전기적 신호로 바꾸어 CRT상으로 나타나게 하는 펄스 반사법 중에서 수직 탐상법으로 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.

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)

표준시험편은 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 입사하게 되면 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 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 검사를 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 Detector	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

용접재의 충격에너지를 구하기 위한 시험기는 Fig. 3-4와 같은 용량 30kg-cm의 샤르피형 충격시험기(Charphy type impact testing machine)를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 시험기는 그림에서와 같이 펜듈럼(Pendulum) 햄머, 펜듈럼 축이 부착되어 햄머가 단일 충격으로 시편을 파단 후 눈금판에 직접 충격치를 읽을 수 있는 구조로 되어 있다. 시험편의 가공은 마찰용접된 시험편의 접합면에 미리 기계 가공하여 도입한 U노치를 일치시켜서 ASTM E20-02 규격에 의하여 충격시험을 수행하였으며, 그 결과치는 다음 식에 의하여 구하였다.

$$E= WR(\cos\beta-\cos\alpha)$$

여기서, W 는 햄머의 중량(kg), R 은 회전중심에서 햄머 중심까지의 거리(m)이고 그리고 α 및 β 는 각각 지지각과 상승각을 나타낸다.



Fig. 3-2 Charphy type impact testing machine

한편 용접후열처리는 표면고주파 열처리를 다음과 같이 시행하였다. 먼저 최적조건에서 마찰용접한 시험편을 코일(Coil)형 고주파 가열장치에 의해 150KW의 고주파 전력, 주파수 100kHz로 850~900℃까지 10s간 급속 가열하여 급속 수냉한 다음 150℃에서 60분간 Tempering 처리한 후 공랭하여 미세조직을 균일하게 하였다. 이상과 같이 제작된 마찰용접 후열처리재에 대한 기계적 성질을 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4. 1 SM45C-SF45 이중 마찰용접 최적화

4. 1. 1 용접조건과의 상관성

Fig. 4-1은 앞장의 Table 3-3(Case 1)의 압력변화에 따른 인장강도 실험 결과를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 업셋압력(P_2)을 모든 조건에서 가열압력(P_1)의 2배의 압력으로 수행하였다¹⁹⁾. 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 $P_1=70\text{MPa}$, $P_2=140\text{MPa}$, $t_1=5\text{s}$, $t_2=5\text{s}$ 의 인장강도가 694MPa로 높게 나타났다. 이는 모재(SF45) 인장강도(693MPa)의 100%에 도달하는 결과이다. 또한 이 결과치는 타 문헌^{20, 21, 22)}의 결과와도 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적조건을 P_1 과 P_2 를 각각 70, 140(MPa), t_1 과 t_2 를 각각 5s로 결정하였다.

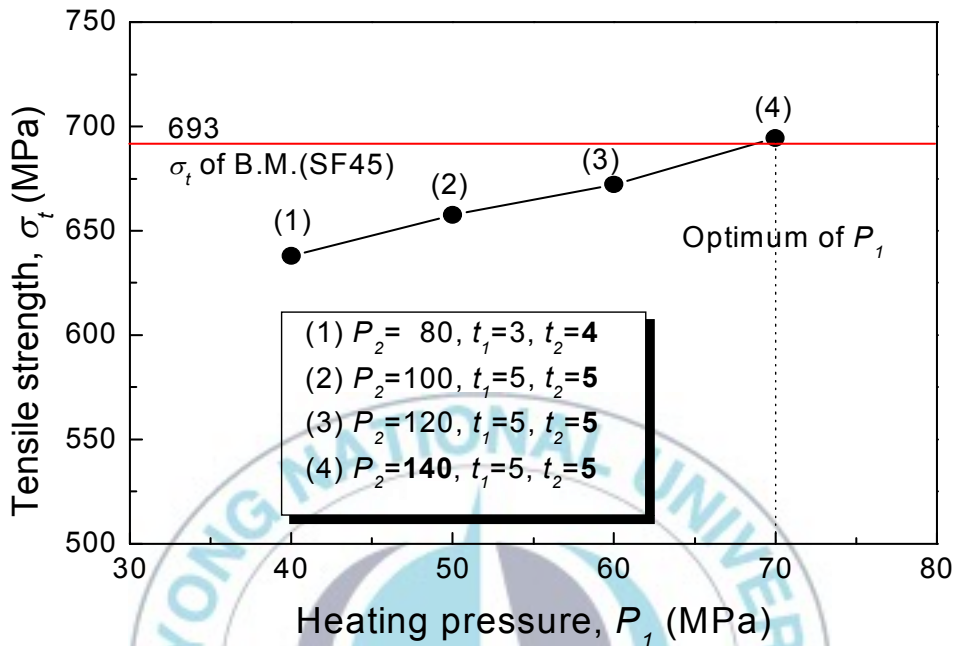


Fig. 4-1 Tensile strength versus welding heating pressures for SM45C-SF45

Fig. 4-2는 마찰용접에서 Table 3-3(Case 1)의 압력변화에 따른 총업셋량(U_T)과 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2)의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 보면 가열압력이 증가할수록 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 타의 실험 결과에서도 일반적으로 가열압력과 업셋량과의 사이에는 선형적인 증가 관계를 나타내는 결과가 많이 보고되고 있다. 여기서 가열압력(P_1)이 40MPa일 때, 총업셋량은 1.3mm로 나타났고, 50MPa일 때 2.5mm, 60MPa일 때 4mm, 70MPa일 때 5.8mm가 실험적으로 얻은 결과이다.

Fig. 4-3은 가열압력(P_1) 및 업셋압력(P_2)가 각각 70 및 140MPa일 때의 플래쉬(Flash) 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 플래쉬의 형상과 업셋량은 이종재료에 의하여 그 형상과 업셋량에 차이가 있음을 알 수 있다.

SF45의 재료가 더 많이 우산처럼 감기는 플래쉬 형상을 보여주고 있는데 이는 직경의 차이에 의한 영향도 있을 수 있으나, 고 마찰압력에 의한 온도 구배가 SF45측이 더 크기 때문이라고 사료된다. 플래쉬의 형상에 미치는 압력이나 회전수의 영향을 나타낸 결과가 AWS 문헌²⁴⁾에 나타나 있다.

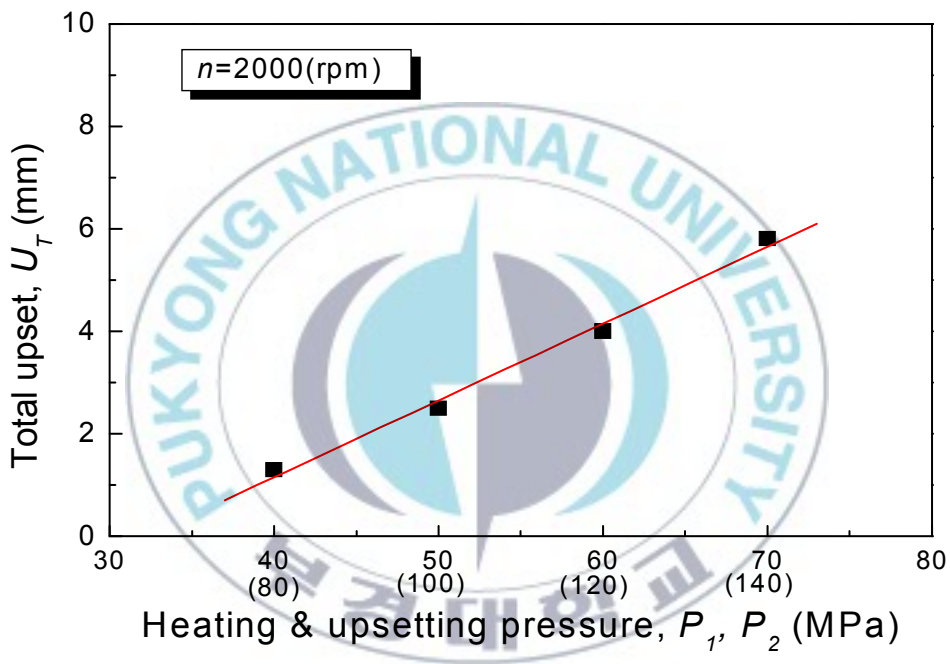


Fig. 4-2 Total upset versus welding pressures for SM45C-SF45



Fig. 4-3 Shape of the friction welded flash

4. 1. 2 가열시간과 업셋량과의 상관성

Fig. 4-4는 마찰용접에서 총업셋량(U_T)과 가열시간(t_1)의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 보면 가열시간이 증가할수록 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 타의 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형적인 증가관계를 나타내는 결과가 많이 보고되고 있다²¹⁾. 여기서 가열시간이 3초일 때, 총업셋량은 2.6mm로 나타났고, 7초일 때 7.9mm, 9초일 때 10.1mm가 실험적으로 얻은 결과이다. 따라서 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접 제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 매우 효율적인 방법이라고 판단된다.

본 실험 조건에서 얻은 U_T - t_1 의 실험적 상관관계식은 다음과 같다.

$$U_T = 1.13518 t_1 - 0.488, (r=0.99) \quad (16)$$

여기서 r 은 데이터의 커브피팅에서 상관계수(Coefficient of correlation)을 나타낸다. U_T - t_1 의 사이에는 좋은 양의 상관관계가 성립함을 알았다.

Fig. 4-5는 플래쉬의 형상에 미치는 가열시간의 영향을 나타낸 개략도이다. 즉, 가열시간이 증가하면 업셋량도 증가하고 플래쉬의 형상도 SF측에서 빨리 우산 모양의 형상으로 변함을 알 수 있다. 이는 동일한 가열압력에서 가열시간이 증가하면 온도구배가 가파르게 되어 이와 같은 형상으로 플래쉬가 형성되는 것으로 사료 된다²⁴⁾.

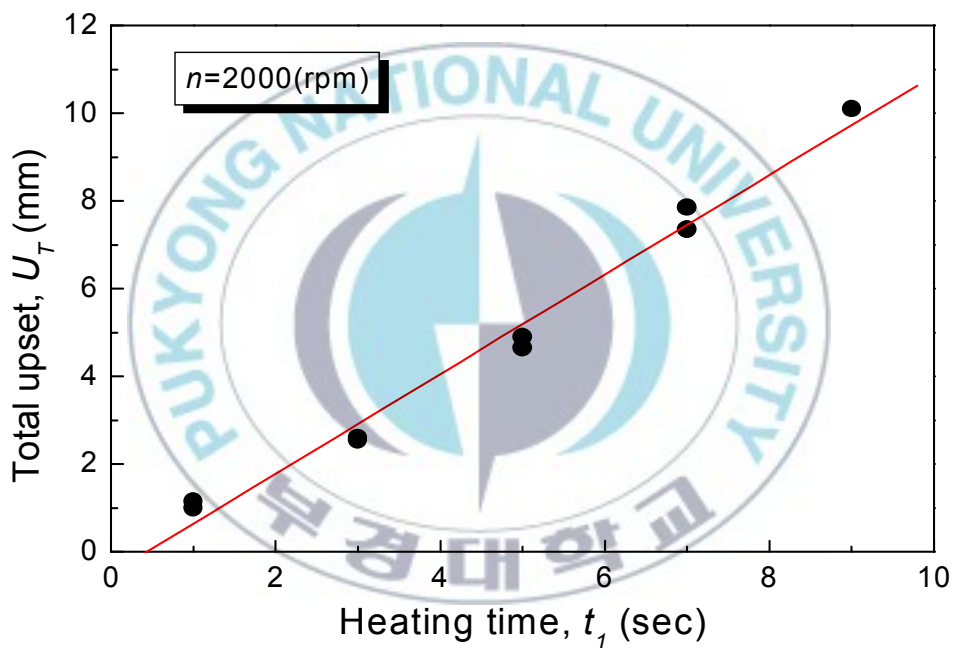


Fig. 4-4 Total upset versus heating time for SM45C-SF45



$t_1=1s$

$t_1=3s$

$t_1=5s$

$t_1=7s$

$t_1=9s$

Fig. 4-5 Effect of heating time on shape of the friction welded flash
 ($n=2000\text{rpm}$, $P_1=70\text{MPa}$, $P_2=140\text{MPa}$)

4. 1. 3 용접변수와 강도의 상관성

Fig. 4-6은 가열시간과 강도(인장, 항복)와의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 인장강도는 가열시간의 증가와 더불어 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 그리고 항복강도 또한 인장강도의 결과와 비슷한 경향을 보이며, 가열시간이 7초일 때 비교적 높게 나타났다. 따라서 최적조건을 강도적인 측면에서 고려해볼 때, 가열시간은 7초가 적합하다고 판단된다. 다만, 마찰용접시 건전한 접합(인장강도만을 중심으로)이 되는 최적조건은 범위는 비교적 넓은 범위임을 알 수 있었고, Fig. 4-1에서와 같이 비교적 높은 용접압력에서의 결과가 실험적으로 우수하였다. 이는 압력이 증가하면 엷셋량이 증가한다는 Fig. 4-2의 결과와도 일치한다.

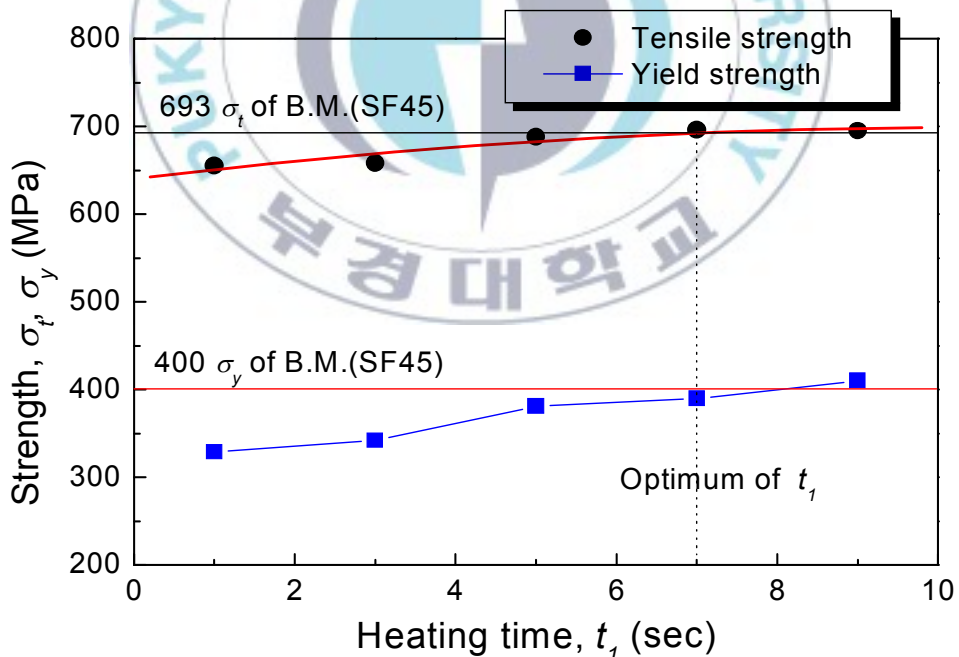


Fig. 4-6 Strengths versus heating time for SM45C-SF45

그래프에서 알 수 있듯이 가열시간이 1초와 3초일 때, 두 가지 강도가 비슷한 값으로 모재의 결과에 비해서 비교적 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 5초, 7초, 9초에 비해 용접입열량 부족에 따른 용접계면부 SF45재에서 다소 입계파괴 양상의 원인으로 생각된다. 또한 그래프 결과에서 보듯이 가열시간을 7초 이상으로 증가시켜 9초를 적용할 수도 있겠지만, 그래프에서 알 수 있듯이, 7초를 기준으로 9초부터는 인장강도가 다소 낮게 나타났다. 그러나 항복강도는 다소 낮으나, 인성 등을 고려해 볼 때 전체적으로 9초 이상에서는 저하될 것으로 생각되며, 또한 엷셋량이 10mm 이상으로 예측된다. 이러한 관점에서 엷셋량이 7.9mm인 7초일 때가 타 실험결과²⁶⁻²⁸⁾와 비교해서 적합하다고 판단된다.

Fig. 4-7은 총엷셋량과 각종 강도와와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서의 결과치는 Fig. 4-6과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 마찰용접시 엷셋량과 강도와도 좋은 상관성이 존재함을 알 수 있고, 엷셋량이 7.9mm(가열시간 7초)일 때 각 인장 강도 또한 비교적 높게 나타났기 때문에 7초가 적합한 용접조건이라 판단된다.

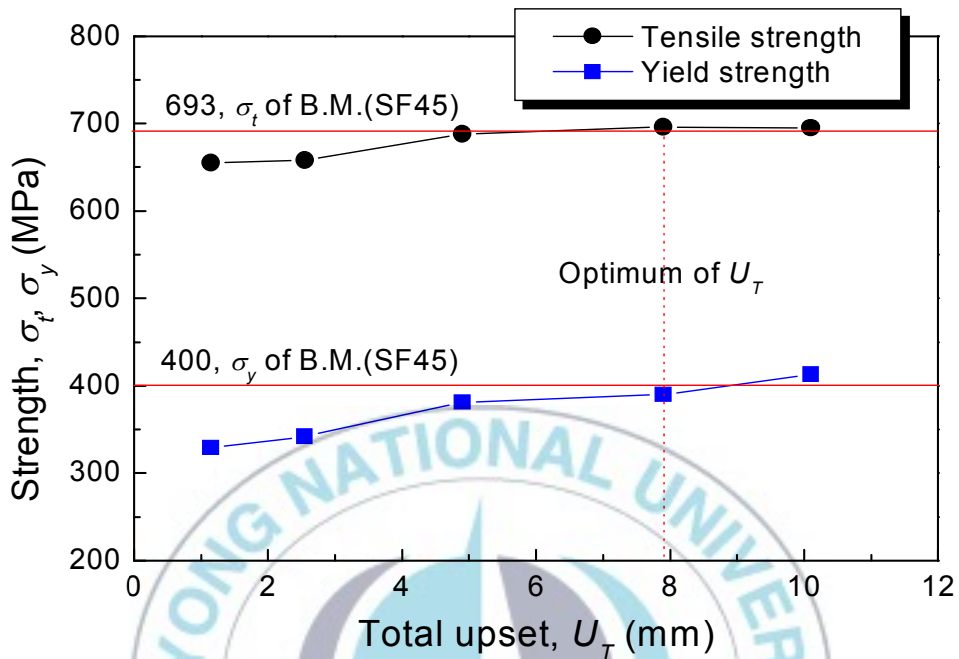


Fig. 4-7 Strengths versus total upset for SM45C-SF45

Fig. 4-8은 가열시간과 연성(연신율, 단면수축률)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 조건의 가열시간에서 연신율과 단면수축률의 결과가 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 연신율은 약 17(%)로 SM45C 모재(16.6%)의 결과와 비슷하게 나타났고, 단면수축률은 약 47(%)로 SF45 모재(47%)의 결과와 거의 비슷하게 나타났다. 따라서 앞에서 언급한 강도적인 측면과 더불어 최적조건을 연성적인 측면에서 고려해볼 때, 가열시간은 7초가 적합하다고 판단된다. 이는 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고, 연성이 높은 편이 우수하기 때문으로 사료된다.

또한 가열시간 1초 및 3초에서도 연성적 측면과 강도적인 측면에서 비교적 높게 나타났으며, 파단양상도 SF45 모재측에서 일반적인 컵 앤 콘(Cup and

cone) 형태의 연성파단 양상으로 나타났으나 가열시간이 비교적 짧기 때문에 용입 불량 등의 존재 가능성에 의한 품질 신뢰에는 무리가 있다고 사료된다.

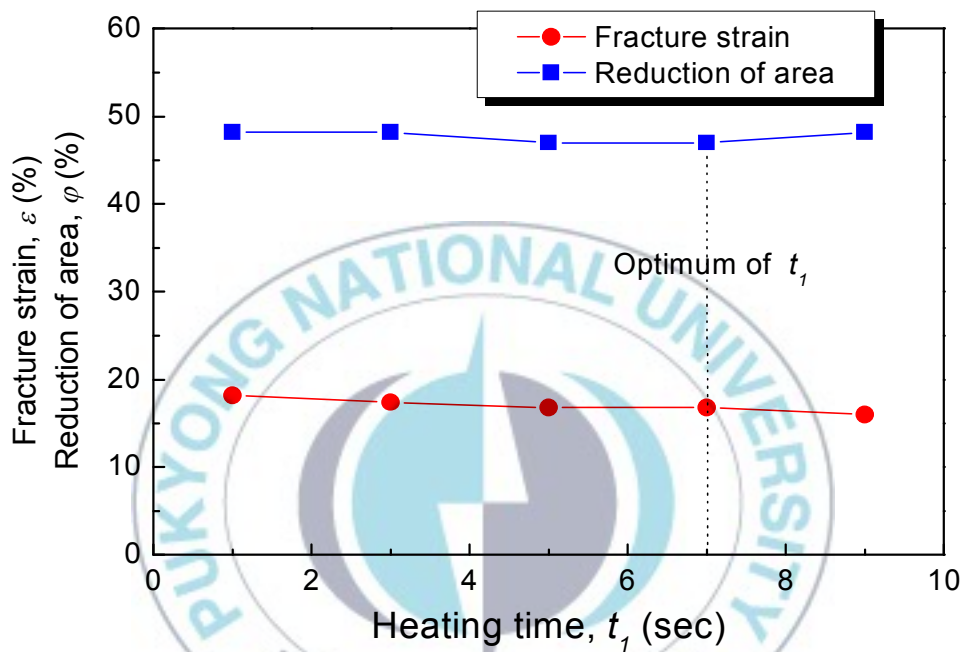


Fig. 4-8 Ductility versus heating time for SM45C-SF45

Fig. 4-9는 가열시간에 대한 인장 시험편의 거시적 파단 양상을 나타낸다. 각 가열시간에 대한 파단의 위치는 마찰용접부가 아닌 SF45의 모재 부분에서 파단 되었다. 이는 모든 가열시간에서 비교적 양호한 접합이 이루어 졌다고도 생각할 수 있지만, 열사이클을 받는 부분의 재료가 담금질 또는 이것에 가까운 상태로 되어 경화되어서 정적 인장강도가 향상된 것에 기인하는 것으로 부적당한 용접조건에서 제작된 부품에서도 경우에 따라서는 모재부에서 파단이 일어난다는 사실은 보고되고 있다²⁹⁾. 따라서 용접조건을 선정함에 있어서 특히 주의를 요한다.

용접부의 정확한 강도를 평가하기 위해서는 Notch 시험편 혹은 다른 시험적 방법의 고찰 등도 차후 연구의 한 분야라 사료된다.

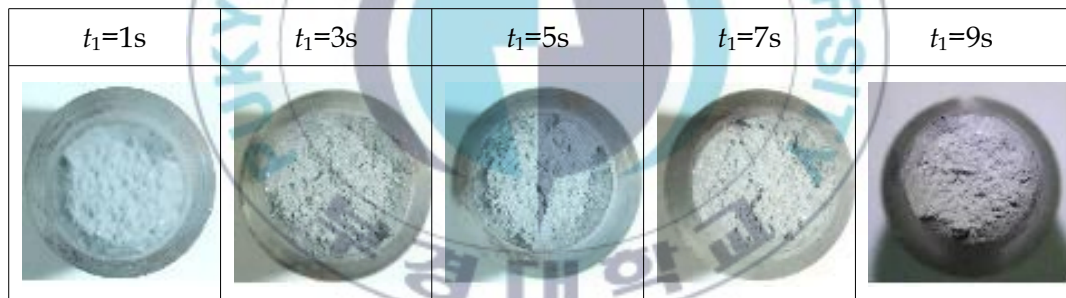


Fig. 4-9 Shape of macroscopic tensile fracture surface

4. 1. 4 가열시간과 충격에너지와의 상관성

Fig. 4-10은 가열시간과 충격에너지 값과의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SF45 모재의 충격에너지 값($5.3 \text{ kg} \cdot \text{m}$)에 비해 전체적으로 낮게 나타났으나, SM45C모재의 충격에너지 값($2.9 \text{ kg} \cdot \text{m}$)에 비해 1초와 3초를 제외하고는 높게 났다. 이와 같이 모재의 경우와 비교해서 살피충격치가 낮게 나타난 것은 충격시험에 대한 노치의 방향이 모재의 경우에는 미시조직에 직교해서 하중이 가해지고, 용접재의 경우에는 미시조직에 평행하게 하중이 작용했기 때문에 낮아졌다고 사료 된다³⁰⁾.

인장강도와 비교할 때 비슷한 경향으로 나타났으며, 마찰용접부의 충격에너지 값은 5초, 7초, 9초일 때 $3.8 \text{ kg} \cdot \text{m}$, $4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}$, $3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 로 7초일 때 최대값을 기록하였다. 이 값은 SF45 모재보다 낮으나 약 81%에 근접한 결과이다. SM45C를 기준으로 148%의 높은 결과를 얻었다. 충격에너지 등을 고려하여도 본 실험조건에서의 최적 가열시간은 7초가 적합할 것으로 판단된다.

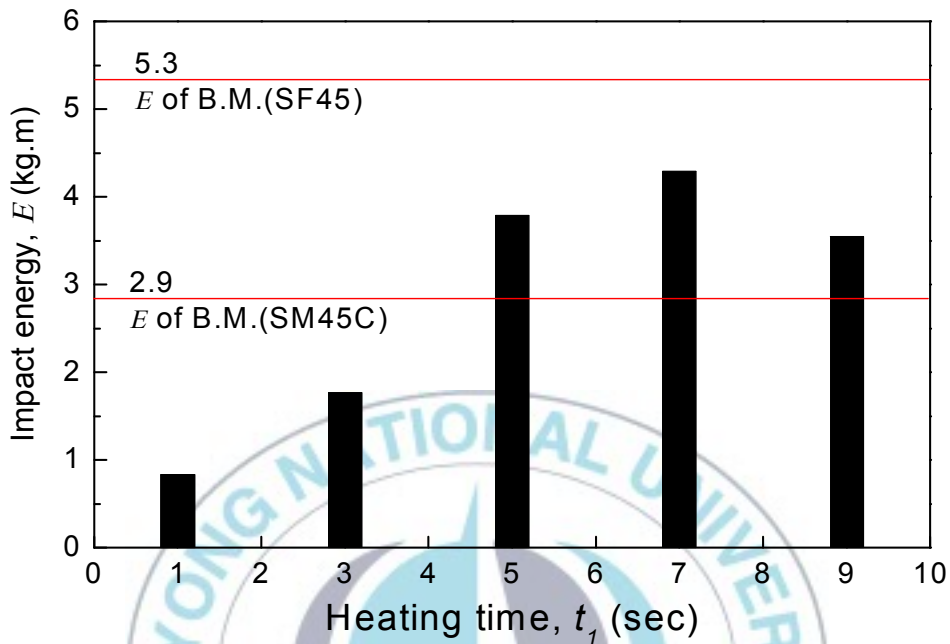


Fig. 4-10 Impact energy versus heating time for SM45C-SF45

Fig. 4-11은 U-노치 충격시험 후 파단면의 거시적 형상을 나타낸 것이다. 앞의 결과에서 알 수 있듯이 1초에서는 가열시간 부족에 의한 용입불량 등의 원인으로 접합경계부에서 불안정한 접합 양상을 나타내고 있음을 알 수 있고, 또한 3초에서도 다소 진전되었으나, 1초와 비슷한 결과를 보이고 있다. 반면에 가열시간 5초, 7초, 9초의 결과는 두 모재의 파단양상과 비슷하게 나타나고 있다. 이는 충격에너지 결과에서도 알 수 있듯이 우수한 용접조건에 의한 접합의 결과임을 시사해 준다.

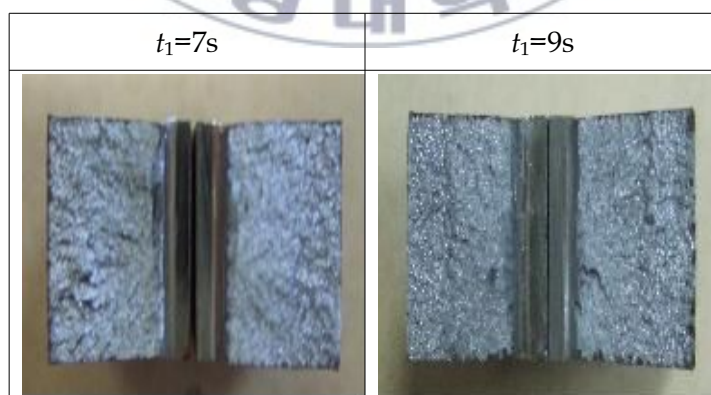
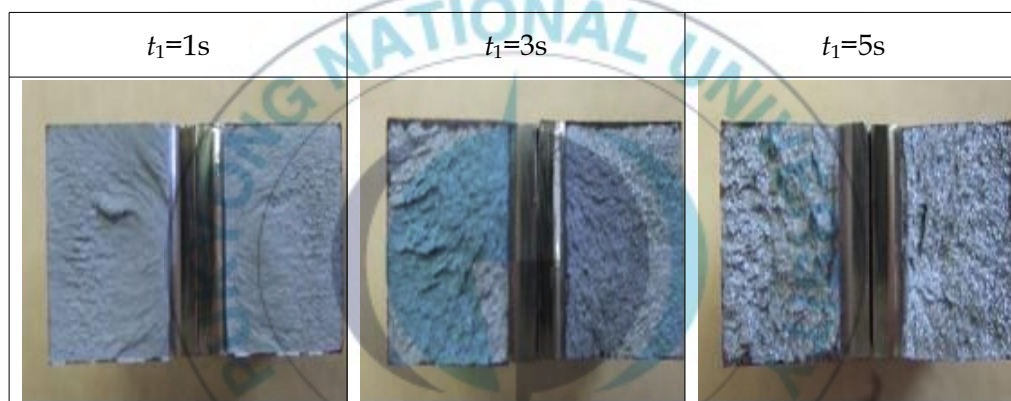
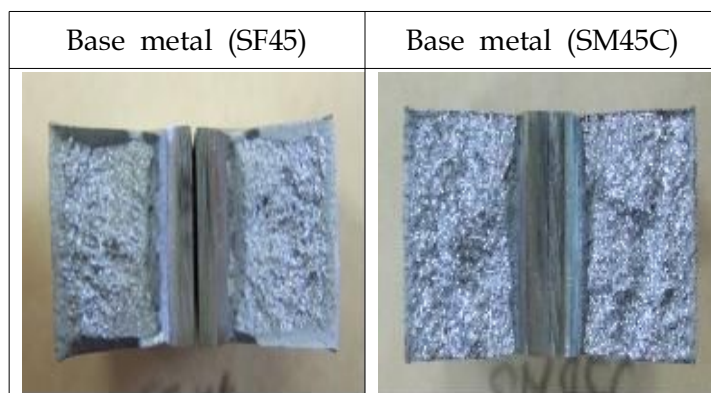


Fig. 4-11 Impact fracture surface for SM45C-SF45

4. 1. 5 용접부의 경도 분포

Fig. 4-12는 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편의 경도 분포를 나타낸다. 경도측정은 마이크로 비커스 경도시험기(하중 100g, 유지시간 10s)를 사용하여 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주부의 경도분포를 비교하기 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 SM45C이 HV 220으로 SF45의 HV 160보다 다소 높은 편이며, 이들 재료의 용접계면(Weld interface, W.I)의 경도는 약 HV 265로서 두 재료의 모재보다 아주 높게 나타났다. 이는 용접경계면 부근에서 마찰용접시 국부가열과 급랭 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료 된다^{15, 25)}. 이러한 용접부 경도의 Peak는 용접후열처리로써 완화시킬 수 있다고 생각된다.

또한 열영향부(Heat affected zone, HAZ)를 두 가지로 구분해서 보면, 시험편 중심부는 SM45C측 2.5mm+SF45측 3mm=5.5mm 이고, 센터에서 5mm인 지점은 SM45C측 3mm+SF45측 3.5mm=6.5mm 로 판단된다. 여기서 열영향부가 중심부보다 원주부가 크게 나타나고, 피크치의 경도치가 원주부에 가까울수록 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 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.

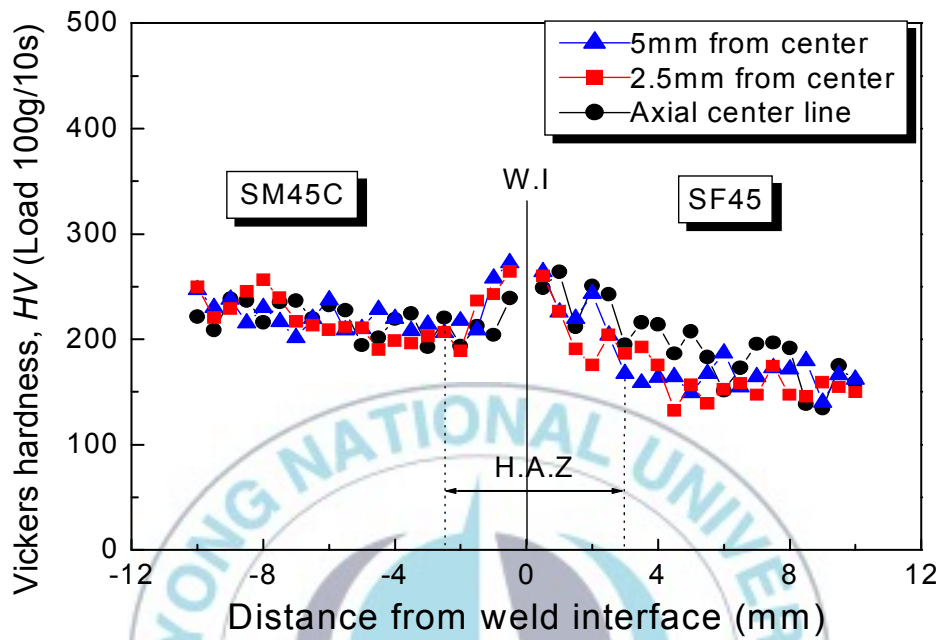


Fig. 4-12 Micro Virkers hardness distribution of SM45C-SF45

Welding conditions : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=70(\text{MPa})$, $P_2=140(\text{MPa})$, $t_1=7(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

4. 1. 6 용접부의 조직 관찰

Fig. 4-13은 최적조건에서 마찰용접한 시험편의 광학 현미경(OM) 조직을 나타낸다. 먼저 2%의 나이탈(Nital) 용액으로 에칭(Etching)하여, 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ) 및 모재부(B.M)를 각각 200배의 배율로 관찰하였다.

그림에서 용접계면(c) 부근에서 두 재료가 강렬히 혼합되어, 계면의 형태가 잘 구분이 되지 않게 나타난다. 이는 두 금속의 결정립이 재결정하여 더욱 미세화 되었으며, 아주 양호하게 접합되었음을 보여주고 있다.

SM45C 열영향부는 조대한 결정립 구조를 보이며, SM45C 모재부(BM)는 펄라이트(Pearlite)와 페라이트(Ferrite) 조직이 혼합되어 나타나고 있다. 따라서 최적조건에서 마찰용접한 용접부의 미세조직을 관찰한 결과는 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태임을 알 수 있었다. 그러나 마찰용접계면 및 열영향부의 적합한 평가를 위해서는 결정립의 미세화, 가공경화, 금속간 화합물, 변형률 완화, 상변태 등이 미세조직이나 정도에 다양하고 복잡한 영향을 미치기 때문에, 화학조성 및 열가공 이력 등에 대한 연구가 차후 더 필요하다고 생각된다.

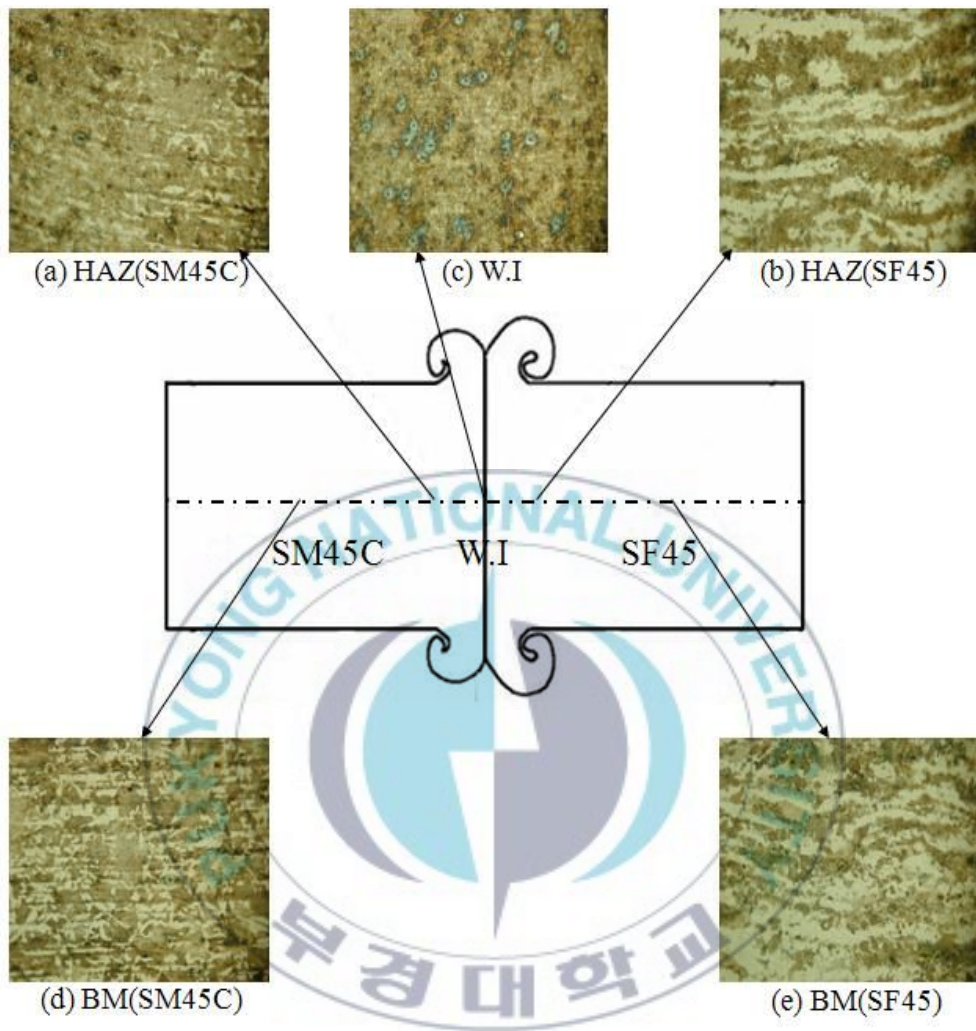


Fig. 4-13 Macro-structures of BM, HAZ and WI for SM45C-SF45(x200)

Welding conditions : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=70(\text{MPa})$, $P_2=140(\text{MPa})$, $t_1=7(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

4. 2 비파괴시험법에 의한 마찰용접 품질 평가

4. 2. 1 마찰용접시 AE누적총량과 가열시간과의 관계

Fig. 4-14는 이중 마찰용접에 대한 마찰용접 가열시간(Heating time)에 따른 AE누적총량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 마찰 가열시간과 AE누적총량과의 관계에는 확실한 상관성을 파악하기는 어렵지만, 현재의 실험 조건에서 전체적인 경향은 가열시간이 증가하면 AE누적총량도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 이에 대한 더 많은 실험과 추가 연구가 필요하다고 생각된다. 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 7초인 경우의 AE누적총량이 약 20300으로 나타났으며, 9초에서는 23700정도의 값을 보였다. 반면에 가열시간 1초에서는 AE누적총량이 2535로서 가장 낮은 값으로 나타났다. 이는 가열시간이 매우 적어서 AE를 발생시키는 인자의 영향이 부족하여 비교적 낮은 값이 얻어졌다고 판단된다. 그러나 재료의 물리적 량의 변화가 반드시 재료의 결함과 일치하지 않는다는 것과 재료내부의 이상이 반드시 전부의 물리량의 변화를 동반하지 않는다는 것에 주의할 필요가 있다²⁹⁾.

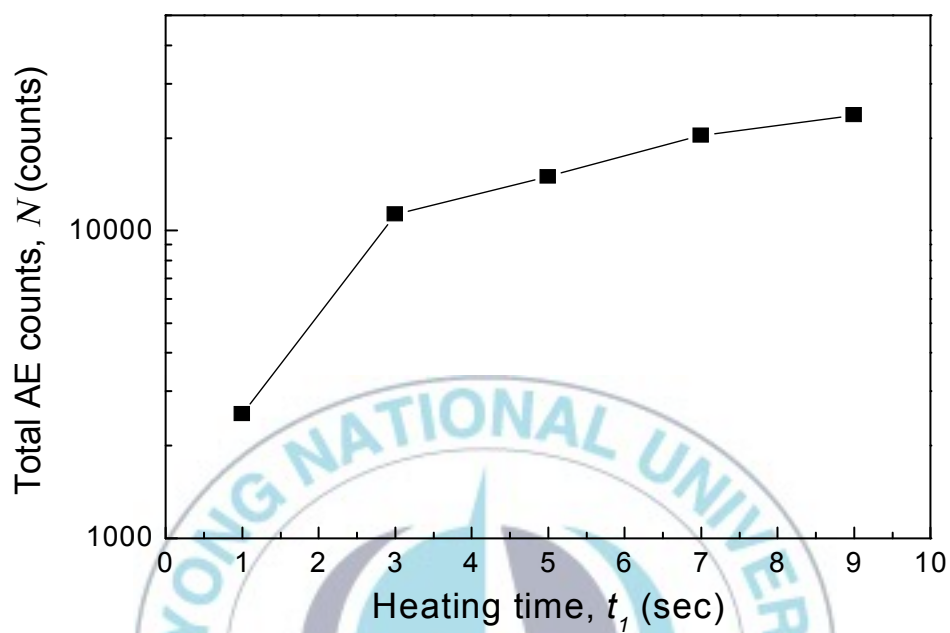


Fig. 4-14 AE total counts vs. heating time

4. 2. 2 초음파 감쇠계수와 가열시간과의 관계

Fig. 4-15는 본 연구에서 실험한 SM45C와 SF45의 이중 마찰용접재(As-welded)의 가열시간(t_1)이 초음파 감쇠계수(dB/mm)에 미치는 영향을 조사한 결과를 나타낸 것이다. 가열시간(1초, 3초, 5초, 7초, 9초) 각 조건별 5개의 초음파 감쇠계수 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 가열시간과 초음파 감쇠계수와의 관계에는 확실한 상관성이 존재한다고 결론짓기에는 무리가 있다. 따라서 정확한 평가를 위해서는 보다 많은 실험 데이터에 의한 고찰이 필요하다고 판단된다.

초음파 감쇠의 원인은 다음에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉, 결정 입자 및 조직에 의한 산란, 점성감쇠, 전위운동에 의한 감쇠, 강자성재료에서 자벽의 운동에 의한 감쇠, 잔류응력으로 인한 음장의 산란에 의한 결보기 감쇠 등을 들 수 있다³¹⁾. 일반 금속에서 결정립이 커질수록 초음파 속도는 감소하는 반면에 감쇠계수는 증가한다고 알려져 있다. 그래프에서 보면 최적의 마찰용접 조건으로 결정된 가열시간 7초인 경우에 5개의 초음파 감쇠계수 결과가 0.066, 0.069dB/mm로 두 가지의 값으로 나타났으며, 이는 가열시간의 조건 중에서 가장 스캐터가 적게 나타났다.

4. 2. 1절에서도 언급하였듯이, 재료의 물리량 변화가 반드시 재료의 결함과 일치하지 않다는 것에 주의할 필요가 있다. 따라서 용접법에 의해서 발생하는 결함의 성질이나 종류를 잘 이해하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

이상의 고찰에서와 같이 마찰용접재의 품질평가를 위한 비파괴평가법으로 AE법에 의한 실시간 품질평가와 초음파법에 의한 품질평가 가능성은 어느 정도 확인되었으나, 정량적인 평가를 위해서는 추가 실험과 이론적 연구가 필요하다고 사료 된다.

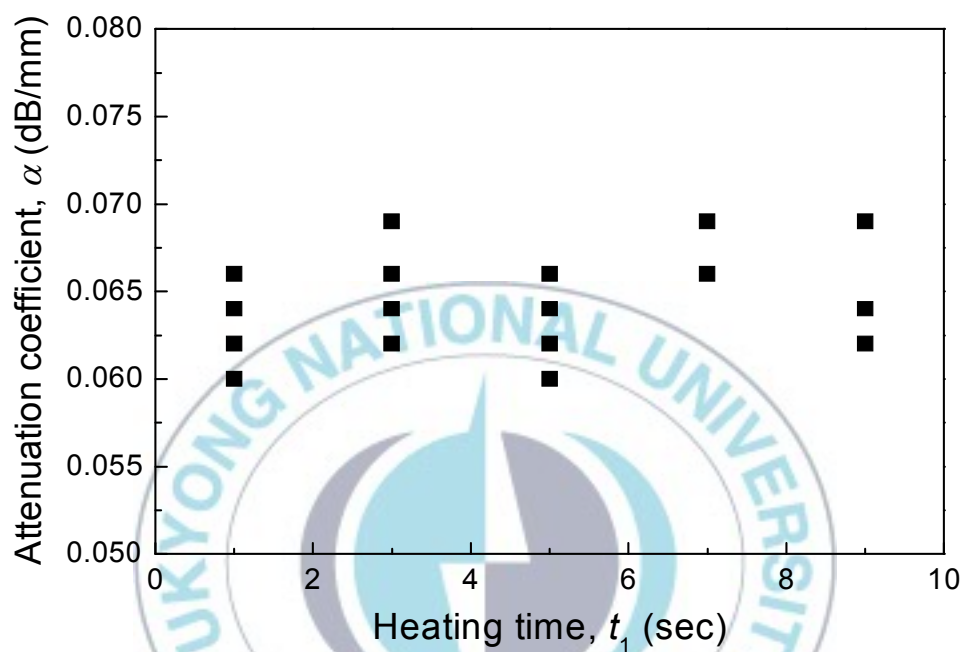


Fig. 4-15 Ultrasonic attenuation coefficient vs. heating time

4. 3 마찰용접 후열처리재의 강도 평가

4. 3. 1 후열처리재의 강도 특성

Fig. 4-16은 각 재료의 조건(BM, As-welded, PWHT)에 따른 강도(인장, 항복) 특성을 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 SF45 모재(SF45 BM)의 인장강도는 693MPa이며, 최적 마찰용접조건(가열시간 7초)에서의 용접재(As-Welded)는 696MPa, 표면고주파 열처리를 시행하여 연마한 후열처리재(PWHT)는 980MPa로 각각 나타났다. 또한 SF45 모재의 항복강도는 400MPa, 용접재는 390MPa에 비해 후열처리재는 574MPa로서 약 170MPa 이상 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 강도적인 측면에서 고려해 볼 때 후열처리를 시행한 재료가 우수함을 실험적으로 확인할 수 있다.

Fig. 4-17은 각 재료의 조건(BM, As-welded, PWHT)과 연성(연신율, 단면수축률)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 후열처리재의 연성치의 결과가 매우 낮게 나타남을 알 수 있다. 구체적인 결과치를 보면, 연신율은 SF45모재 26%, 용접재 16.6%, 후열처리재 2.7%로 나타났다. 또한 단면수축률은 SF45모재 47.2%, 용접재 47%, 후열처리재 2.8%의 결과로 나타났다. 따라서 후열처리재에 대한 연성적인 측면에서 고려해볼 때, 두 조건에 비해 연성치가 매우 낮게 나타났으며, 이는 표면 고주파 열처리의 영향에 따른 마찰용접부의 취성과파단의 원인으로 판단된다.

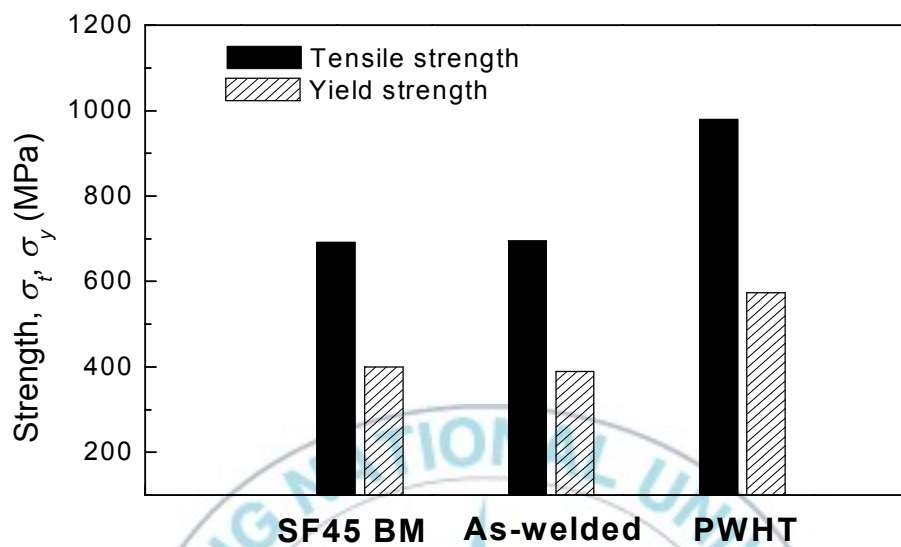


Fig. 4-16 Relationship between strength and material conditions

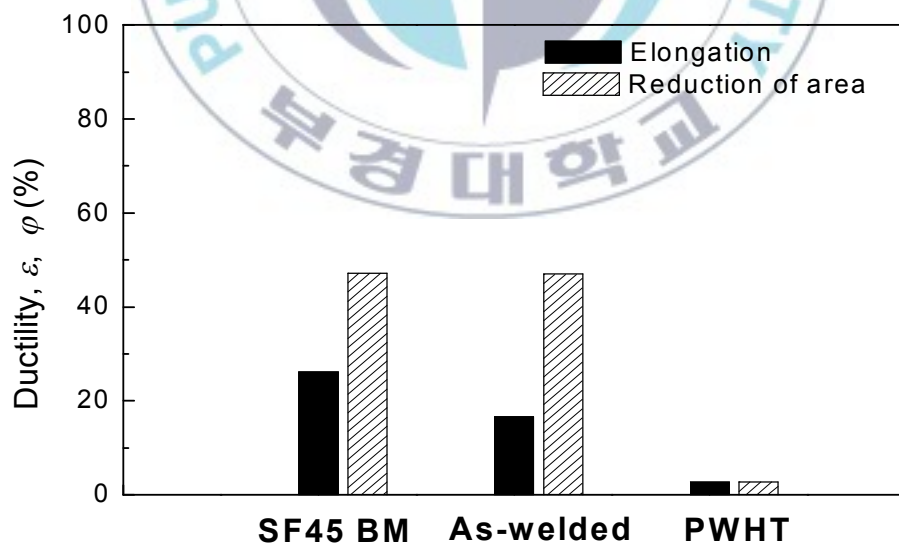


Fig. 4-17 Relationship between ductility and material conditions

4. 3. 2 후열처리재의 경도 분포

Fig. 4-18은 최적 마찰용접 조건[$n=2000(\text{rpm})$, $P_1=70(\text{MPa})$, $P_2=140(\text{MPa})$, $t_1=7(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$]에서 후열처리재(PWHT)의 경도분포를 용접재(As-welded)와 비교하여 나타낸다.

후열처리재의 경도측정은 마이크로 비커스 경도시험기(하중 300g, 유지시간 10s)를 사용하여 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주부의 경도분포를 비교하기 위해 2가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경(15mm)의 중심부, 두 번째는 센터에서 3mm인 지점에서 각각 조사하였다. 이는 표면고주파 열처리 후 시험편 제작의 어려움 때문에 용접재와 같이 센터에서 5mm인 지점에서의 측정은 생략하였다.

그래프에서 보면 후열처리재의 경도 값은 세 가지 부분(열영향부, SM45C 측, SF45 측)이 약 HV 700으로 비슷한 경향으로 나타났다. 앞에서 언급한 바와 같이 용접재의 경도 값은 SM45C의 경우 HV 220, SF45의 경우 HV 160에 비해서 3배 이상 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞의 인장강도에서 비교한 바와 같이, 용접후열처리에 의한 연성치는 저하된 반면에 강도 값의 상승에 따른 동일 결과로 판단된다.

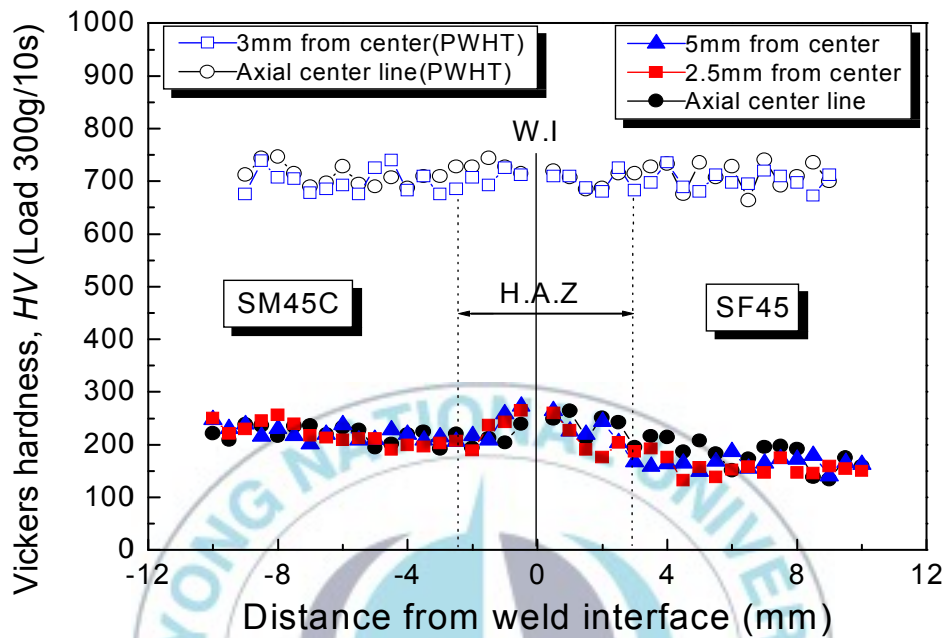


Fig. 4-18 Micro Virkers hardness distribution of SM45C-SF45 (PWHT)

Welding conditions : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=70(\text{MPa})$, $P_2=140(\text{MPa})$, $t_1=7(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

4. 3. 3 후열처리재의 조직 관찰

Fig. 4-19는 최적조건에서 마찰용접재(As-welded)에 대한 후열처리(PWHT)를 시행한 시험편의 광학 현미경(OM) 조직을 나타낸다. 먼저 2%의 나이탈(Nital) 용액으로 에칭(Etching)하여, 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ) 및 모재부(B.M)를 각각 200배의 배율로 관찰하였다.

4. 1. 6 절에서와 같이 용접계면(c) 부근에서 두 재료가 강렬히 혼합되어, 계면의 형태가 잘 구분이 되지 않게 나타난다. 이는 두 금속의 결정립이 마찰용접시 재결정하여 더욱 미세화 되었으며, 아주 양호하게 접합되었음을 보여주고 있다.

또한 두 이종재의 접합부 및 모재의 조직이 Tempered Martensite의 조직으로 모든 부분이 거의 비슷한 양상으로 나타나고 있다. 이는 최적조건에서 마찰용접재에 의한 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상이며, 후열처리에 의한 한층 양호한 상태임을 재확인할 수 있었다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이, 마찰용접부의 접합특성을 평가하기 위해서는 결정립의 미세화, 가공경화, 금속간 화합물, 변형률완화, 상변태 등에 대한 추가 연구가 필요하다고 생각된다.

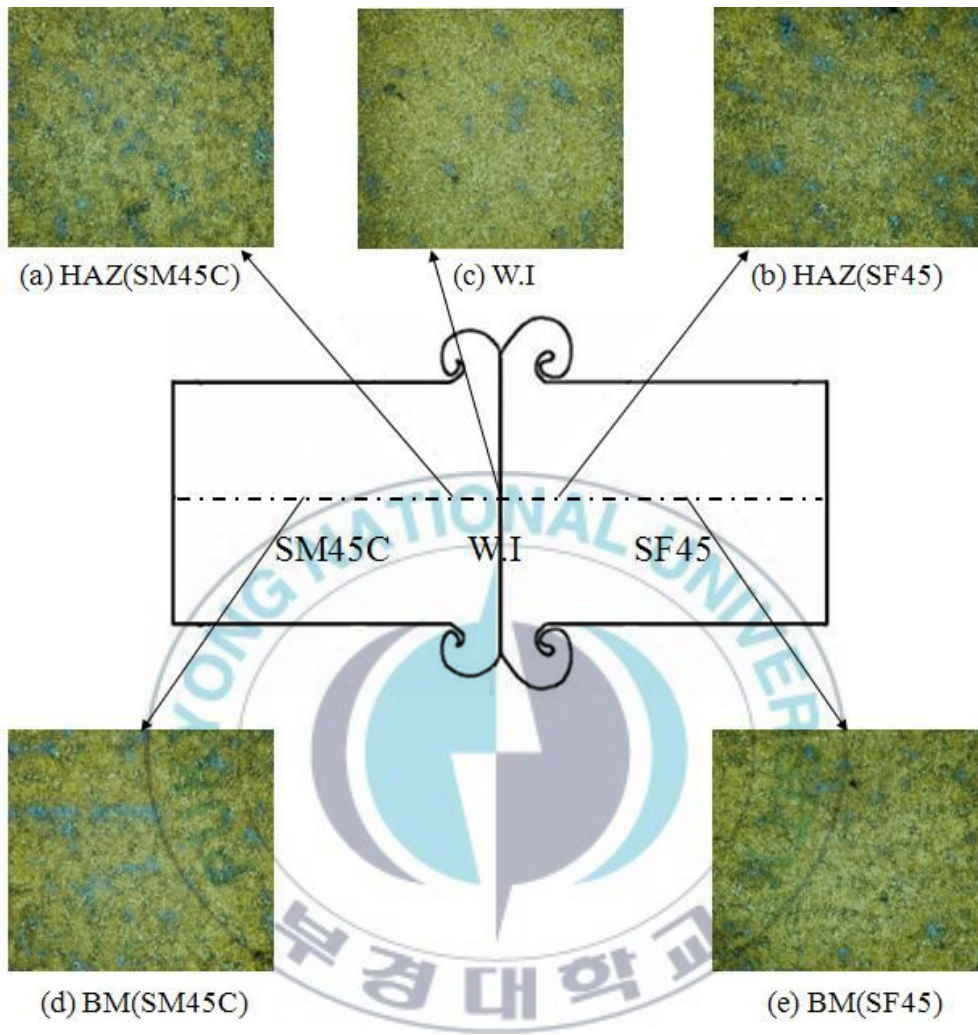


Fig. 4-19 Macro-structures of BM, HAZ and WI for SM45C-SF45 (PWHT, x200)
Welding conditions : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=70(\text{MPa})$, $P_2=140(\text{MPa})$, $t_1=7(\text{s})$, $t_2=5(\text{s})$

5. 결 론

자동차 후진 기어용 축에 사용되는 단조품 SF45재와 SM45C재의 이중마찰용접시험을 수행하여 기계적 성질과 경도분포 등을 고찰하여 마찰용접최적화와 비파괴적 품질평가 및 용접후 열처리재의 강도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SM45C와 SF45의 접합재 강도가 모재와 비슷한 이중재 마찰용접 적용이 가능함을 알 수 있었고, 본 연구의 개발로 종전의 단조품에 비해 재료의 기계가공에 따른 공정수 및 재료 절감의 효과가 기대된다.
2. 엷셋량과 가열시간과의 사이에는 좋은 양의 상관관계($r=0.99$)가 성립함을 알 수 있었다. 따라서 마찰용접과정에서 엷셋길이를 조절하여 용접제품의 길이 치수 정밀도 등을 요구할 경우에 효율적으로 적용할 수 있음을 알았다. 또한 모든 용접조건에서 용접부의 접합효율이 모재와 비슷한 결과를 보였으나, 용접재의 강도, 연성 및 인성(충격에너지)을 고려한 최적 마찰용접조건은 다음과 같이 결정되었다.

$$n=2,000(\text{rpm}), P_1=70(\text{MPa}), P_2=140(\text{MPa}), t_1=7(\text{s}), t_2=5(\text{s})$$

3. 모재의 경도는 SM45C이 HV 220으로 SF45의 HV 160보다 다소 높은 편이며, 이들 재료의 용접계면의 경도는 약 HV 265로서 두 재료의 모재보다 아주 높게 나타났다. 또한 후열처리재의 경도값은 약 HV 700으로 전체가 비슷한 경향으로 나타났으며, 용접재에 비해서 3배 이상 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 용접후열처리에 의한 연성치는 저하된 반면에 강도값의 상승에 따른 결과로 판단된다.

4. 최적조건에서 마찰용접한 용접부의 미세조직을 관찰한 결과는 두 이종재가 강렬히 혼합하여 결정립이 재결정하여 더욱 미세화 되었으며, 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 형성하여 아주 양호한 접합상태임을 알 수 있었다.
5. 최적의 마찰용접조건으로 결정된 가열시간 7초인 경우의 AE총 누적량이 약 20300으로 나타났으며, 전반적인 경향은 가열시간이 증가함에 따라 AE총 누적량이 증가함을 알 수 있었다. 마찰 가열시간과 초음파 감쇠계수와의 상관관계는 나타나지 않았으나, 정확한 품질 평가를 위해서는 더 많은 실험 데이터에 의한 고찰이 필요하다고 사료된다.
6. 마찰용접 후열처리재의 강도는 전반적으로 용접재보다 우수한 결과를 보였다. 따라서 실용적인 관점에서 이종마찰용접에 의한 자동차 후진 기어용 제품의 생산이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Tylecote R.F. : The Solid Phase Welding of Materials, Edward Anorld Ltd., pp. 256-257, 1968.
- (2) 대한용접학회, “용접 · 접합편람”, pp. 663-664, 1998.
- (3) AWS, “Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding”, 7th edition, Vol. 1, pp. 153-220, 1981.
- (4) Vill, V. I, “Friction Welding of Metals”, Svarochnoe Prorjvodsto, 3, pp. 20-22, 1962.
- (5) Tasaki, Y. and N. Nakayma, “Friction Welding of Ni-based Super Alloyed Nitriding Steel”, J. Proc. Mech. Mar., 36, pp. 707-711, 1970.
- (6) S.K. Oh, “Study on Friction Welding of Valve Materials SUH3-SUH31”, J. Korean Soc. Mech-Engr., 14, pp. 221-232, 1974.
- (7) 마찰압접 연구회. “마찰압접”, コロナ사, pp. 46, 145-150, 184, 1979.
- (8) Okita, K. and W. Kishimoto, “Studies on Friction Welding of SUS304 Austenitic Stainless Steel(Report I)”, J. Weld. Soc., 48 pp. 991-995, 1979.
- (9) S.K. Oh, S.D. Han and U.J. Lim, “Effects of Postweld Aging Treatment on Rotary Bending Fatigue Strength of Friction Welded Joints at Elevated Temperature”, J. Korea Society of Marine Engineers. Vol.7, No.2, pp. 36-49, 1983.
- (10) S.K. Oh, K.Y. Lee and H.J. Kim, “A Study on Fatigue Strength of Friction Welded Heat-Resisting Steels at High Temperature (I)”, Proc. KSME. June, pp. 130-138, 1980.
- (11) S.K. Oh, “Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and

- In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Technique", Ph. D. Thesis, Keio University, Part I, pp. 27-42, 73-84, pp. 85-98, pp. 122-134, 1981.
- (12) D.S. Um and S.W. Kang, "Study on Fatigue Strength of Friction Welded S20C and SUS27B", J. SNAK, Vol. 8, pp. 13-24, 1971.
- (13) H.S. Jeong and T. Shinoda, "Fundamental and Basic Application of Friction Welding", Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 1-12, 1997.
- (14) S.B. Kang and T.K. Min, "A Study on the Friction Weldability of Carbon Steel(S45C) to Aluminum Alloy(A6063)", Journal of KWS, Vol. 16, No. 2, pp. 153-220, 1988.
- (15) S.K. Oh, Y.S. Kong, I.J. Yoo and I.S. Kim, "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, 2000.
- (16) 오세규, 김동조, "초음파법에 의한 이종재료 마찰용접강도 해석법의 개발", 한국해양공학회지, 제2권, 제1호, pp. 135-149, 1988.
- (17) Adams D. F. and Taylor S. K., "Detection of Faults in Friction Welded Studs by Ultrasonics", Welding and Metal Fabrication, pp. 412-421, 1969.
- (18) Wang K. K. and Ahmed S., "Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar Metal Friction Welds", Fourth North American Metal Working Research Conference Proceedings, pp. 384-389, 1976.
- (19) JIS Z 3607, "탄소강의 마찰압접 작업 표준", 일본규격협회, 1994.
- (20) 변권수, "자동차 Shock Absorber용 강재의 이종재 마찰용접의 최적화와

- 실시간 AE 평가에 관한 연구”, 부경대학교 공학석사학위논문, pp. 21-24, 2000.
- (21) 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈, “SM45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제2권, 제2호, pp. 312-321, 1988.
- (22) 오세규, 장홍근, 장지훈, “Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가”, 한국비파괴 검사학회지, 제15권, 제4호, pp. 511-519, 1995.
- (23) 임형택, 민택기, “Ni-Cr-Mo과 SM45C의 摩擦熔接特性에 관한 研究”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 16, No. 6, pp. 31, 2007.
- (24) AWS, “Welding handbook”, 6th ed. Sec. 3A, American Welding Soc., 1970.
- (25) H.S. Cho and S.J. Suh, “FrictionWelding of Inconel 713C and SCM440”, Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 78-84, 1997.
- (26) S.J. Kim, Y.S. Kong and S.W. Kwon, “Reliability Assessment on Thickness Effect in Fatigue Crack Growth”, Advances in Fracture and Strength, Key Engineering Materials, Vols. 297-300, pp.1913-1918, 2005.
- (27) 공유식, 김선진, “이중 마찰용접 강봉재의 후열처리에 따른 기계적 특성”, 대한기계학회논문집 A권, 제30권, 제4호, pp. 402-408, 2006.
- (28) 권상우, 공유식, 김선진, “Alloy718 마찰접합조건의 최적화와 비파괴평가”, 한국해양공학회지, 제22권, 제1호 pp.53-57, 2008.
- (29) 마찰압접협회, “마찰압접기술”, 일간공업신문사, 2006.
- (30) 오가와, “S45C탄소강 마찰압접계수의 충격강도에 대해서”, 마찰압접협회 자료, No. 163, 1980.
- (31) Bray D.E, Stanley R.K, “Nondestructive Evaluation”, CRC Press, 1997.

감사의 글

오늘의 이 결실을 맺기까지 정말 많은 분들의 도움에 진심으로 감사를 드립니다. 먼저 대학원 생활동안 직장이란 핑계로 공부에 소홀한 저를 처음부터 한결같은 관심과 가르침으로 이 자리까지 서게 해주신 김선진 지도교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리며 항상 건강하시고 행복하시길 기원합니다. 또한, 바쁘신 가운데 최종논문이 완성되기까지 심사해주시고 조언과 충고를 해주신 김영식 교수님과 김병탁 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

아울러 학위과정동안 부족한 저에게 많은 도움을 주시고 저를 바른길로 이끌어 주신 공유식 교수님께 정말 깊은 감사를 드립니다. 또한 AE 실험에 도움을 주신 동의대학교 이진경 교수님께도 감사드립니다.

대학원 생활동안 직장 또한 소홀이 했지만 항상 옆에서 응원해 주고 격려를 해주신 기아자동차 부산서비스센터 정비2반 반원들에게 한없이 죄송한 마음과 깊은 감사를 드립니다. 그리고 실험재료 및 시편가공에 도움을 주신 (주)기수정밀의 전중수 사장님께도 감사의 말씀을 전합니다.

그리고 항상 곁에서 변함없는 믿음과 사랑으로 지켜봐주신 아버지, 어머니, 뒤에서 항상 응원해준 여동생 지은이에게 감사의 마음을 전합니다. 학교생활이 재미있고 유익한 시간임을 알게 해준 SMARE 연구실의 정원택 선생님, 상우형님, 영진선배, 성웅이, 혁용이, 익희, 상훈이, 재영이에게 너무나 고맙다고 전하고 싶습니다.

끝으로 지면을 통해 거론되지 못한 여러 은사님들과 선·후배님에게도 감사의 뜻을 전합니다.

2009년 2월

윤 성 필 올림

부 기

본 연구에서는 정적 강도 측면에서의 고찰만 행한 것으로서 실제 자동차 후진 기어용 축재의 사용 환경을 고려한 동적 피로강도 특성의 평가가 차후 더 필요하지만, 본 이중마찰용접 기술이 현장에서 적용된다고 한다면 다음과 같은 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

부기 1. 이중마찰용접의 적용에 대한 기대효과

	종 래	마찰용접적용	차	비 고
재료비	1,000원	800원	200원	
가공시간 (가공비)	180분	120분	100원	
계			300원	연60만개 제품생산시 연간1억8천만원 절감

부기 2. 마찰용접기 적용시 투자 및 소요 경비 예상

	초기투자	적용시 경비	계	비 고
마찰용접기	8천만원	30초	8천만원	적용시 8개월 후 투자 이익 효과 발생
소요시간		100만원/년	100만원	
전기료 기기관리비 등		50만원/년	50만원	
계	8천만원	150만원/년		