

선외기 샤프트용 재료의 마찰용접에 관한 연구

오세규* · 이종환** · 배명주*** · 오명석****

Study on Friction Welding of SUS431 and SCM21 for External Shaft of Ship

S. K. Oh · J. H. Lee · M. J. Pae · M. S. Oh

Key words : Friction welding(마찰용접), Welding condition(용접조건), Optimization(최적화), Acoustic emission technigue(음향방출법), Weld strength(용접강도), Toughness(인성), AE cumulative counts(AE 누적총량), Quantitative relation ship(정량적 상관성), Real time nondestructive quality evaluation(품질의 실시간 비파괴 평가)

Abstract

A study on friction welding of stainless steel bar(SUS431) to chrome molybdenum steel bar (SCM21) was accomplished experimentally through analysis for relations among friction welding conditions, tension test, hardness test, microstructure test and acoustic emission test.

The results obtained are summarized as follows :

1. Through friction welding of SUS431 bar to SCM21 bar, the optimum welding condition by considering on strength and toughness was found to be the range of heating time of 3 ~ 5 sec when the number of rotating speed of 2000rpm, heating pressure of 10kgf/mm², and upsetting time of 4 sec.
2. Quantitative relationship was identified between heating time(T₁, sec) and tensile strength (σ, kgf/mm²) of the friction welded joint and the relation equation is

$$\sigma = 52.62T_1^{0.06}$$
3. Through AE test, quantitative relationship was confirmed between heating time(T₁, sec) and total AE(N, counts) during welding, and the relation is computed as follows ;

$$N = 30413.6e^{0.06T_1}$$
4. It was confirmed that the quantitative relationship exists between the tensile strength of the welded joints and AE cumulative counts. And the relation is computed as the following ;

* 부산수산대학교 공과대학

** 한독 부산직업훈련원

*** 부산수산대학교 대학원

**** 부산공업대학

$$\sigma = 16.37(\ln N) - 116.4$$

5. When ONZ=36500~41500 counts by OT₁Z=3~5sec, it was identified by experiment that the range of welded joint tensile strength is 55.6~57.7 kg/mm² whose joint efficiency is more than 100%, and it was experimentally confirmed that the real-time nondestructive quality(strength) evaluation for the friction welded joints could be possible by acoustic emission technique.

1. 서 론

마찰용접은 다른 용접보다 압접특성 및 경제성이 우수하므로 오늘날 각종 산업기계 부품생산에 있어서 이종재료의 용접에 널리 이용되고 있다^{1,2)}. 또한 제품의 제작시간이 짧고 생산원가가 저렴하며 고가품과 저가품의 이종 마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성이 좋은 제품의 대량생산 등에 마찰용접을 적용하려는 연구 노력이 많이 수행되고 있다^{3) 7)}.

본 연구는 선박의 선미 선외 추진축으로 이용되는 마르텐 사이트계 SUS431과 크롬몰리브덴강 SCM21의 두 재료를 강도향상과 재료절감의 목적을 위하여 마찰용접하였으며 이들 두 이종재료의 마찰용접부 강도와 파단특성을 조사하였고, 두 재료의 모재와 각각의 upset량, 인장흡수에너지, 연신율, 경도분포, 미세조직, 파단면 등을 조사하고 이들 이종 재료에 대한 강도와 인성을 고려한 마찰용접의 최적화를 달성하고자 하며, 마찰용접중에 발생하는 음향방출(acoustic emission)량 조사에 의해 용접강도와 AE량과의 정량적 상관성을 도출함으로써 용접품질의 실시간평가 제어가 가능하

게 하며, 이 연구결과가 실용화에 적용할 수 있는 기초자료가 되게 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 국내산인 SUS431과 SCM21이다. 두 재료 모두 지름이 ϕ 25 mm 인 환봉을 마찰용접을 하기 위하여 Fig.1(a)와 같이 마찰용접 시험편을 가공하여 마찰용접 실험을 수행하였고, 동시에 AE시험을 수행하였다. 특히 용접면은 선삭하였다. 두 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Fig.1(b)는 용접부의 인장강도와 인장흡수에너지를 알기 위한 시험편으로 KS규격(KSB 0801 14A)에 따라 선삭한 후 원통연삭 하였고 평행부 표면은 사포 600번에서 1500번까지 연마하여 폴리싱(polishing)하였다.

2-2 실험장치 및 시험방법

2-2-1 마찰용접시험

본 실험에서 SUS431과 SCM21을 마찰용접하

Table 1 Chemical composition of materials

(wt%)

Item Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS431	0.17	0.69	0.72	0.028	0.011	2.05	16.27
SCM21	0.146	0.31	0.83	0.03	0.027	0.03	1.129

Table 2 Mechanical properties of base materials

Item Materials	Tensile strength σ (kgf/mm ²)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ϕ (%)	Hardness (Hv)
SUS431	75.3	21.4	55	265
SCM21	53.2	30.5	60.5	159

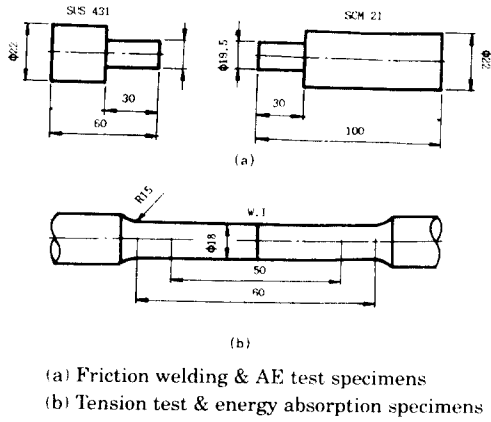


Fig. 1 Shape and dimension of test specimens (mm)

기 위하여 용접조건을 결정하기 위해 Fig.1(a)와 같이 가공한 시험편을, 문헌²⁾에 의해 구한 여러 실험조건 중에서 회전수(n) 2,000 rpm, 마찰가열압력(P₁) 10 kg/mm², 업셋압력(P₂) 15 kg/mm², 그리고 업셋시간(T₂) 4 sec를 일정하게 유지시키고 가열시간(T₁)을 1~10 sec사이에서 변화시키면서 용접작업을 수행하였다. 이들의 용접조건을 Table 3에 표시하였다.

SUS431 환봉시험편을 마찰용접기의 회전부 유압척(hydraulic chuck)에 고정하여 2,000 rpm으로 회전시키고 SCM21 환봉시험편은 고정부 유압척에 고정 설치한다.

이때 축방향의 일정가열압력(P₁)을 일정가열시간(T₁)동안 가하여 발생한 마찰열에 의하여 접합면이 용접에 충분한 단조온도에 도달하게 되면 회전을 급정지시키고 동시에 축방향의 일정업셋압력(P₂)을 일정업셋시간(T₂)동안 가하여 용접행정을 완료한다.

(1) 마찰용접의 원리

일반적으로 마찰열의 발생은 바람직하지 않지만 예외적으로 마찰용접법은 마찰열을 이용하여

재료를 용접하는 것이다. 마찰용접은 두 종류의 재료를 접촉하고, 가압하에서 접촉면을 상대 마찰운동시켜 마찰면을 용접이 가능한 단조온도에까지 도달하게 하고 상대운동을 정지시키고 가압하여 용접을 하는 것이다³⁾.

일반 금속재료의 소성변형이 쉽게 일어나기 위해서는 재료의 변형저항을 저하시켜 주므로써 가능한데, 변형저항을 저하시키는데는 가열원을 필요로 한다.

이처럼 마찰용접은 마찰열을 이용하여 변형저항을 줄이고 가압력(upsetting pressure)으로 원자간 간격을 좁혀줌으로써 이루어지는 결합이다. 마찰용접은 동종재료는 물론 이종재료의 접합에서도 좋은 성능을 보이며 용접봉이나 용재를 사용하지 않는 등의 장점이 있다⁴⁾.

(2) 마찰용접 사이클

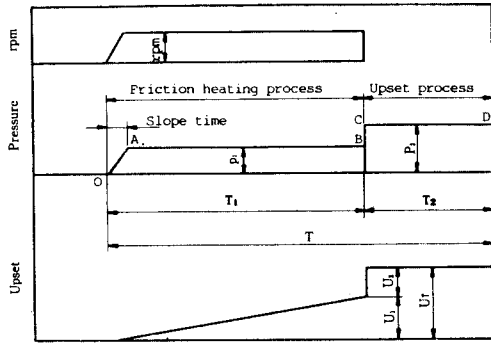
마찰용접법에는 두가지 방법이 있는데 한가지는 연속운전 마찰용접법(continuous drive type or brake type)이고 또 한가지는 관성 마찰용접법(inertia welding or flywheel friction welding)이다. 본 연구에서는 연속운전 마찰용접법을 택하여 실험을 수행하였다.

Fig.2는 연속운전 마찰용접기의 마찰용접 과정을 보여준다. Fig.2에서 정지부가 일정압력으로 회전부에 접촉되어 마찰가열되는 동안 회전부는 일정속도를 유지한다. 마찰가열과정이 끝나면 브레이크에 의하여 회전부는 급정지되면서 정지부는 마찰가열압력보다 높은 압력으로 일정시간동안 가압하게 된다.

본 실험에서는 SUS431과 SCM21의 적정 마찰용접조건을 결정하기 위하여 Table 3의 용접조건과 같이 변화시키면서 용접하였고, 회전수(n) 2,000 rpm, 마찰가열압력(P₁) 10 kg/mm², 업셋압력(P₂) 15 kg/mm², 그리고 업셋시간(T₂) 4 sec에서 우수한 용접성능을 나타내므로, 이 실험에서는

Table 3 Friction welding conditions

Welding materials	Rotating speed n(rpm)	Heating pressure P ₁ (kg/mm ²)	Upsetting pressure P ₂ (kg/mm ²)	Heating time T ₁ (sec)	Upsetting time T ₂ (sec)
SUS431 to SCM21	2,000	10	15	1 ~ 10	4



- P₁ : Frictional heating pressure
- P₂ : Upsetting pressure(kg/mm²)
- T₁ : Frictional heating time(sec)
- T₂ : Upsetting time(sec)
- T : Total welding time(sec)
- U₁ : Upset during heating time(mm)
- U₂ : Upset during upsetting time(mm)
- U_T : Total upset(mm)

Fig. 2 Schematic friction welding cycle
(Continuous drive brake type)

위와 같은 조건을 기초로 하여 가열시간(T₁)을 1~10 sec로 정해 수행하였다.

2-2-2 AE 시험

(1) AE의 원리

AE(acoustic emission)는 음의 방출로서 고체가 변형을 하여, 전위나 대규모의 소성유동 및 파괴가 일어날 때 해방된 에너지에 의해 발생된 탄성파로서 음이 방출되는 현상을 나타내며, AE는 재료의 소성변형, 파괴기구의 연구, 균열의 검출, 용접의 관리, 최대응력의 추정, 마찰용접강도와 품질의 실시간평가 등에 응용될 수 있으며, 특히 중요시되는 것은 설비안전, 안전성 확보는 물론 품질보증 확보에 응용되고 있다^{6,7,9)}.

AE응용에는 1)사용전 검사, 2)사용중 검사, 3)가동중 검사의 3가지가 있는데, 본 연구에서는 용접중에 발생하는 AE량을 측정하여 그 방출 AE량에 따라 마찰용접강도와 품질(강도, 인성)을 평가할 수 있는 것은 용접조건인 회전수, 가열압, 가열시간, 가압시간 등 변수의 복합요인에 의한 기계적 응력과 열적 응력 결과에 의한 금속조직학적 접합의 특성을 AE법에 의해 검출 및 품질제어 할 수 있는 것이기 때문이다. 즉 용접계면에 가해진 온도에

의한 소성유동의 과소 정도와 가압된 에너지 공급의 과소 정도에 따라 마찰용접의 품질이 결정됨과 동시에 용접시점에서 종료까지의 AE 총량과 어떤 상관성이 존재함이 확인되어, 이러한 상관성 조사를 통하여 AE측정만으로 실시간에 품질을 평가할 수 있도록 AE와 용접품질이 실험적으로 구해진 data의 누적화가 됨으로써 AE에 의한 실시간 평가가 가능해질 것이다.

(2) FW에서 AE의 발생기구

일반적으로 AE의 발생기구는 재료내에서의 스트레인(strain)에너지의 급속한 방출로부터 얻어지는 현상으로서 이 에너지의 일부는 재료의 표면에서 검출이 가능한 탄성파의 형태로서 발원으로부터 방출된다.

AE의 주된 발생기구는 재료에 미치는 기계적, 열적, 금속적 원인에 기인될 수 있다. 마찰용접은 고압과 고온하에서 수행되므로 결과적으로 압접면으로부터 재료의 대규모 소성유동을 유발시켜 플래시(flash)를 형성케 하는데 용접 사이클 중 마찰열과 다음의 단조작업이 완료 후인 냉각기 동안의 상변태중에 후기 AE가 발생하는 반면에, 초기 AE는 마찰용접 중에 회전수, 압력, 시간 등에 복합적으로 지배되는 단조작용의 기계적 응력과 이때 발생하는 열응력에 의한 대규모의 주된 소성변형과 용접면에서의 접합, 전위, 슬립, 파괴, 재접합 등 일련의 복합적, 반복적 요인에 의해 불과 수초 사이에 발생되며 이는 Fig.3에서와 같은 실험결과

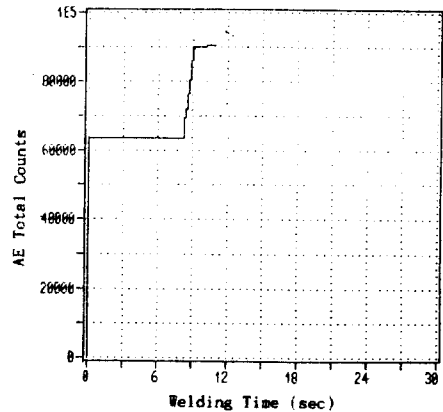


Fig. 3 Typical relation between AE total counts and heating time for friction welding of SUS431 and SCM21

에서 초기 AE검출과 해석이 가능하다.

(3) AE 실험장치

AE에 의한 용접 품질평가에 사용된 AE 시험기는 PAC사의 Acoustic Emission Testing System (Model LOCAN - AT, 2 channel)으로서 14 channel까지 확장이 가능하다. 마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여, 고감도 트랜스듀서(R15 c 150kHz sensor)를 용접면으로부터 마찰용접 기계의 정지척 방향으로 310 mm인 위치의 정지척 상에 부착하였고 Fig.4(a), (b)는 마찰용접기계로부터 트랜스듀서를 거쳐 연결된 AE측

정 분석시스템의 개략도를 나타낸다. 정지척상에 부착한 트랜스듀서로부터 전달된 AE신호는 printer 기록계에 기록되며, 그 기록결과는 단위 시간당 AE량 또는 AE의 누적총량의 형태로 표시될 수 있고, AE기기는 AE의 수로 표시될 수 있게 디지털 리드아웃을 갖추고 있다.

본 실험에서는 초기 AE량과 용접강도와의 상관 실험식을 도출하였다.

2 2 3 인장시험

인장시험에 사용된 인장시험기는 Toyo Bawldwin UTM - 25T이며, 인장속도는 2 mm/min 로 수행하였다.

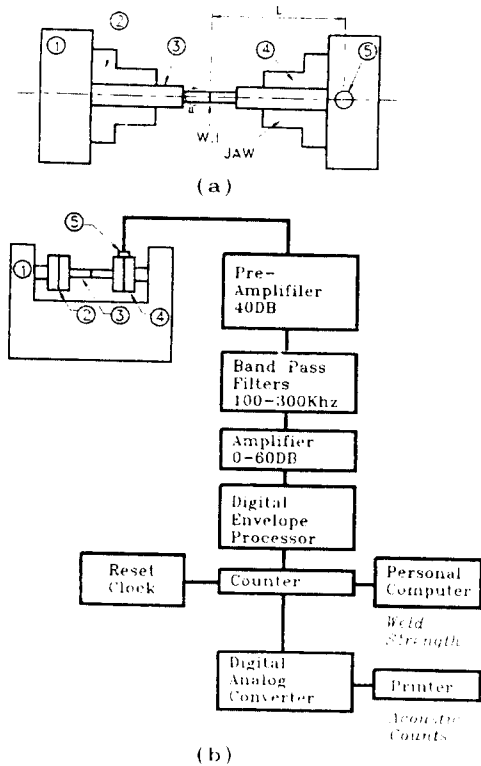
Table 3의 용접조건에 따라 마찰용접한 용접재 SUS431, SCM21을 Fig.1(b)와 같은 형태의 치수로 인장시험편을 가공한 후 인장시험을 수행하여 용접시험편의 인장강도를 마찰용접조건에 따라 조사함으로써 적정 마찰용접조건을 구하도록 하였다.

2 2 4 경도시험

적정 용접조건으로 용접한 상태의 시험편을 가공하여 비커스 미소경도기에서 하중 300 g인 다이아몬드 추자를 사용하여 용접부의 경도분포를 조사하였다. 이때 측정위치는 시험편 외주부에서 2 mm 떨어진 위치의 용접접합면(W.I)에서 좌우 각각 10 mm씩을 0.25 mm 간격으로 경도치를 측정하였다.

2 2 5 현미경 조직검사

현미경 조직검사를 하기위한 시험편은 경도시험과 같이 적정 용접조건으로 용접한 상태의 것을 사용하였다. 부식방법으로는 SUS431은 10 ml HNO₃+30 ml HCl+30 ml Glycerol 용액에 수분간, SCM21은 나이탈(nital)용액에 수분간 부식시키고 깨끗이 세척한 후 드라이어(dryer)로 건조시켰다. 조직검사는 용접경계면, 열영향부 및 모재부분으로 하였다.



- ① Brake type friction welding machine
- ② Rotational chuck
- ③ Workpieces
- ④ Stationary chuck
- ⑤ Acoustic emission transducer

- (a) AE transducer location
- (b) Block diagram of AE monitoring equipment and computer aided strength evaluation)

Fig. 4 Schematic of AE analysis system during friction welding

3. 결과 및 고찰

3-1 마찰용접 조건간의 상관성

Table 3의 용접조건과 같이 변화시키면서 용접하였을 때 가열시간 $T_1(\text{sec})$ 과 가열업셋 $U_1(\text{mm})$, 총 업셋량 $U_T(\text{mm})$ 와의 상관관계를 실험한 결과는 Fig.5와 같다. Fig.5에서 가열시간 $T_1(\text{sec})$ 이 증가할수록 업셋량 U_1 , $U_T(\text{mm})$ 는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

최소사승법을 이용한 회귀해석법에 의하여 전산화한 식은 다음과 같다.

$$U_1 = 0.2 T_1^{1.67} \quad (1)$$

$$U_T = 0.67 T_1^{1.24} \quad (2)$$

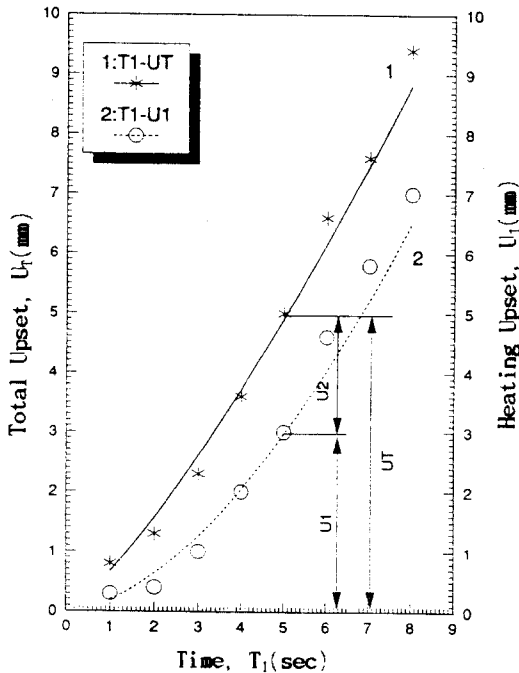


Fig. 5 Relation between total upset and heating time in friction welding of SUS431 bar to SCM21 bar
Welding Conditions : $n=2,000 \text{ rpm}$, $P_1=10 \text{ kg/mm}^2$, $T_1=1 \sim 10 \text{ sec}$, $P_2=15 \text{ kg/mm}^2$, $T_2=4 \text{ sec}$

3-2 마찰가열시간과 용접부 인장강도와 의 상관성

Fig.1(a)의 마찰용접 시험편에 대하여 Table 3과 같은 마찰용접조건 하에서 SUS431 과 SCM21을 용접한 결과, 가열시간(T_1)에 대한 용접부의 인장강도와 의 상관관계는 Fig.6과 같다. Fig.6의 그래프를 보면 인장강도가 7초에서 59 kg/mm^2 의 최고치를 나타낸 후 감소함을 보여주고 있고 모재 SCM21의 인장강도 53 kg/mm^2 보다 높게 나타난다.

인장파단은 대부분 SCM21측에서 파단되었고 일부만이 SUS431 접합부 근방의 모재부에서 파단하여 대체로 양호한 접합이라 생각된다. 여기서 이음효율이 100%가 넘는 마찰가열시간의 범위는 스캐터를 고려하여 $T_1=2 \sim 6 \text{ sec}(\text{OT}1\text{Z})$ 로서 적정 범위가 대체로 넓은 것이 특징이다. 따라서 $\phi 19.5 \text{ mm}$ 의 SUS431과 SCM21의 선외기 샤프트용 재료의 마찰 용접 적정조건은 회전수 $n=2,000\text{rpm}$, 마찰가열압 $P_1=10 \text{ kg/mm}^2$, 단조가압력 $P_2=15 \text{ kg/mm}^2$, 마찰가열시간 $T_1=2 \sim 6 \text{ sec}$, 단조가압시간 $T_2=4 \text{ sec}$ 라 할 수 있다. 그런데 $T_1=2 \sim 6 \text{ sec}$

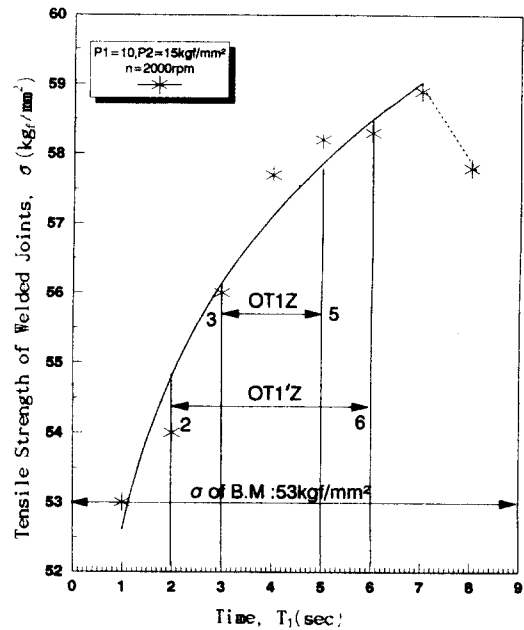


Fig. 6 Relation between heating time and tensile strength for the welded joints of SUS431 bar to SCM21 bar($\phi 19.5$)
Welding Condition : as in Table 3

사이에서의 마찰용접부의 인성은 고려할 필요가 있으므로 3-3에서 언급코져 한다.

마찰용접부의 인장강도 $\sigma(\text{kg}/\text{mm}^2)$ 와 마찰가열 시간 $T_1(\text{sec})$ 과의 사이에는 정량적 상관성이 존재하며 이때 그 실험식은 다음과 같이 전산되었다.

$$\sigma = 52.62 T_1^{0.06} \quad (3)$$

3-3 용접부 인성과 마찰가열시간과의 상관성

Table 3의 용접조건에 따라 SUS431과 SCM21을 용접할 때 가열시간에 대한 용접부의 인장흡수 에너지와의 상관관계는 Fig.7과 같다.

Fig.7에서 SUS431과 SCM21의 마찰용접재의 인장 흡수에너지의 그래프를 보면 가열시간 6초에서부터 증가하는 경향을 나타낸다. 인장흡수 에너지는 용접조건외의 증가에 따라 대체로 증가하는

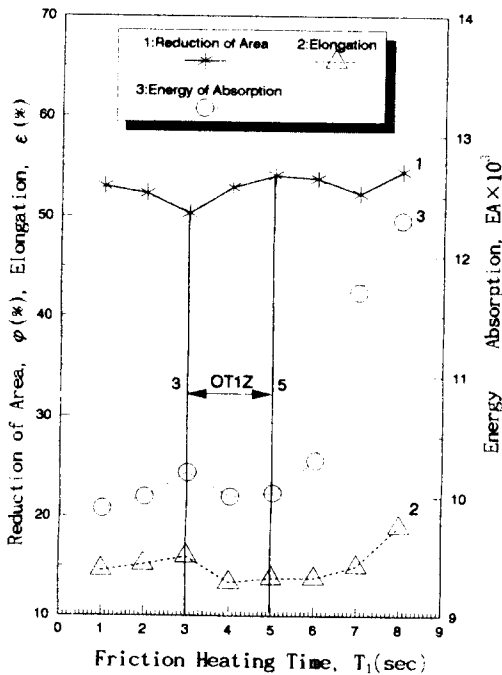


Fig. 7 Effect of frictional heating time on tensile energy absorption, reduction of area and elongation of welded joints SUS431 bar to SCM21 bar.

Welding Condition : as in Table 3

추세이다. 연신율과 단면수축율은 거의 일정하게 나타난다.

이상에서 알 수 있듯이 3-2에서 도출한 마찰용접 적정조건외의 마찰가열시간 $T_1 = 2 \sim 6 \text{ sec}$ (OT1Z, optimum T_1 zone)에서 인성을 고려할 때 큰 문제가 되는 것은 전혀 없다고 생각되며, 다만 스캐터를 고려하여 $T_1 = 3 \sim 5 \text{ sec}$ 의 경우가 가장 안전하다고 생각된다.

3-4 마찰가열시간과 AE총량과의 상관성

Fig.8은 Fig.6과 같은 용접조건하에서 Fig.1(a)와 같은 SUS431과 SCM21 시험편으로 마찰용접 중 AE 시험을 수행한 결과를 나타낸다.

Fig.8에서 OT1Z가 3~5 sec일때 총 AE량 N은 ONZ(optimum N zone) = 36,500 ~ 41,500임이 확인되었다. 이때 총 AE량(N counts)과 용접시간 T_1 (sec)사이의 N T_1 관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$N = 30413.6 e^{0.06T_1} \quad (4)$$

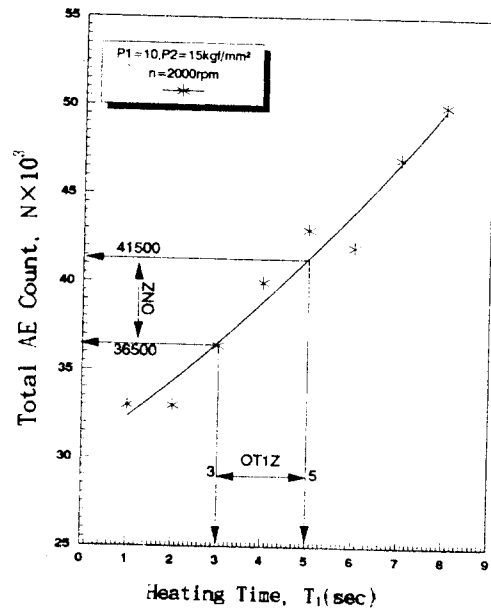


Fig. 8 N vs. T_1 in friction welding of SUS431 to SCM21

Welding condition : as in Table 3

3-5 용접강도 및 AE 총량과의 상관성

Table 3의 용접조건 $P_1=10, P_2=15 \text{ kgf/mm}^2$, $n=2000 \text{ rpm}$ 에서 SUS431과 SCM21을 용접할 때 용접강도 및 AE 총량과의 상관관계는 Fig.9와 같다.

AE시험을 수행한 결과 AE 총량과 용접품질(강도)과의 상관관계를 실험적으로 구한 결과이다. Fig.9에서 $P_1=10, P_2=15 \text{ kgf/mm}^2$ 하에서 SUS431과 SCM21의 마찰용접시 ONZ가 36,500~41,500 counts이며 인장강도는 55.6~57.7 kgf/mm^2 로서 이음효율 100~101%를 기대할 수 있다.

이때 $\sigma - N$ 관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$\sigma = -116.4 + 16.37(\ln N) \quad (5)$$

여기서 AE의 count의 최적 ONZ 사이에 있는 용접조건일 때 최적의 강도를 구할 수 있다. 이는 마찰용접 실시간에 AE량의 측정만으로 용접부 강

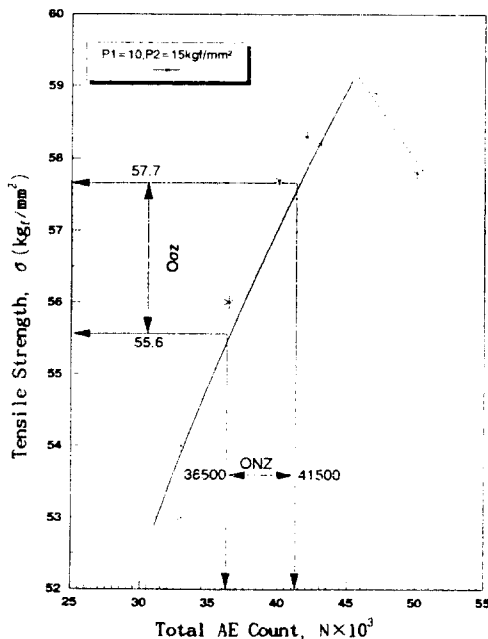


Fig. 9 σ vs. N in friction welding of SUS431 to SCM21
Welding Conditions : $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=10$, $P_2=15 \text{ kgf/mm}^2$, $T_1=1\sim 10 \text{ sec}$, $T_2=4 \text{ sec}$

도의 최적 여부를 비파괴적으로 평가할 수 있음을 뜻하며, 식(5)를 통하여 이를 정량적으로 규명할 수 있음을 뜻한다.

3-6 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 품질의 실시간평가에 관한 고찰

마찰용접 강도와 품질의 실시간평가를 통한 제품 신뢰성 향상법은 일반 비파괴검사 개념과는 다르다^{6,7,9}. AE에 의해 균열, 결함 등을 찾는 것이 아니고 마찰용접이 마찰 가열가압에 의한 금속의 대소성변형을 유발하며 압접에 의해 수행되기 때문에 이때의 가열압, 가열시간, 단조가압력, 가압시간, 회전수 등과 용접부 강도와 품질이 상관성이 있듯이 동시에 이때의 용접부에서 발생한 AE의 총량도 용접조건이나 용접부 강도와 품질이 정량적 상관성이 있음이 밝혀졌으므로^{9,7,9} 이에 본 연구의 AE와 마찰용접부 강도시험 결과는 용접강도와 품질의 무결함이 파괴시험을 거치지 않더라도 비파괴적으로 탐지하고 제어할 수 있는 새로운 방법이라 할 수 있다.

즉 적정 용접조건하에서 마찰용접 시작에서 종료까지의 AE량이 실시간에 검출되어 그 총량이 최적범위(ONZ)에 들어있으면 이때의 용접부 강도는 계획된 기대치인 최적 강도 범위가 됨을 비파괴적으로 실시간에 확인될 수 있게 되는 것을 알 수 있다.

3-7 마찰용접부의 경도분포와 미세조직 검사 및 파단면검사

3-7-1 마찰용접부의 경도분포검사

Fig.10은 최적 마찰용접 조건하에서 마찰용접한 시험편의 경도분포를 나타낸다. 이 그래프에서 보면 용접면(weld interface)에서 경도치가 최고이다. 그 이유는 용접면 부근에서 마찰용접시 국부가 열과 급냉 및 단조효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 또 경도치는 중심보다 원주부가 가까울수록 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 마찰용접의 원주속도가 중심부보다 원주부에서 빠르기 때문에 마찰온도가 중심부보다 원주부가 훨씬 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달되며, 원주부의 온도가 중앙부보다 급격히 올라가서 냉

각속도가 더욱 빠르고 담금질 효과가 크기 때문이

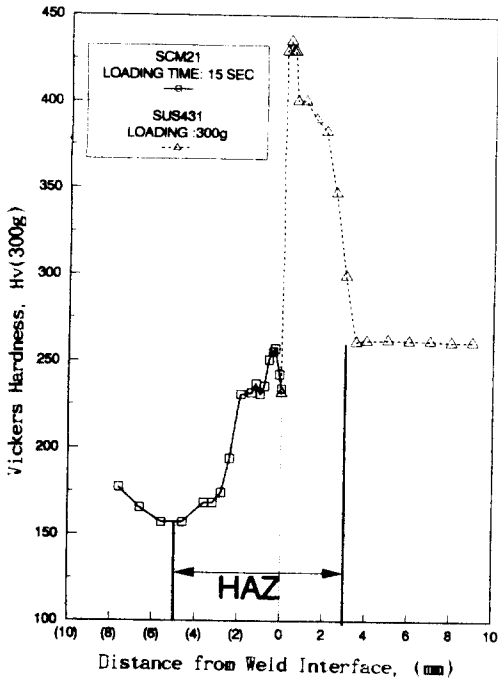


Fig. 10 Hardness distribution near the welded interface of friction welded joint of SUS431 to SCM21 steel bars
 Welding Cond. : $n=2,000$ rpm, $P_1=10$ kgf/mm², $P_2=15$ kgf/mm², $T_1=5$ sec, $T_2=4$ sec

라고 생각된다. SUS431쪽의 경우 용접면에서 3 mm까지는 경도치가 증가하나 그 이후는 감소하여 모재와 비슷하다. 그리고 SCM21은 용접면에서 5 mm까지는 경도치가 증가하나, 그 이후는 감소하여 모재와 비슷하다. 그 이유는 마찰용접시 일어나는 열영향부의 영향 때문인 것으로 생각된다.

3 7-2 마찰용접부의 미세조직검사

Fig.11은 마찰가열시간과 용접부와 열영향부(HAZ)조직을 검사코져 중심축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접면(W.I) 좌우 10 mm부근의 조직사진이다. 인장파단은 대부분 이 SCM21 모재 측에서 파단되므로 HAZ부와 W.I부의 미세조직결합은 없다고 생각된다. 전반적으로 열처리 후의 조직은 sorbite상태로 나타나 있다. 그러나 마찰가열시간의 변화에 따라 HAZ부와 W.I부분의 조직이 조금씩 상이하다. 용접시 시험편내부에 생긴 내부응력을 줄이고 용접표면 경계부의 플래쉬(flash)코너의 노치효과를 줄이고져 열처리를 Fig. 3의 조건으로 실시하였는데 Fig.11에서 보는바와 같이 W.I와 HAZ부는 같은 sorbite 조직이지만 W.I에 따라 원주방향으로 약간의 금속이동의 흐름(metal flow)을 볼 수 있다. 따라서 용접부는 모재에 비해 미세한 결정립을 가진 조직으로 되며 조직상에도 아주 양호함을 나타내고 있다.

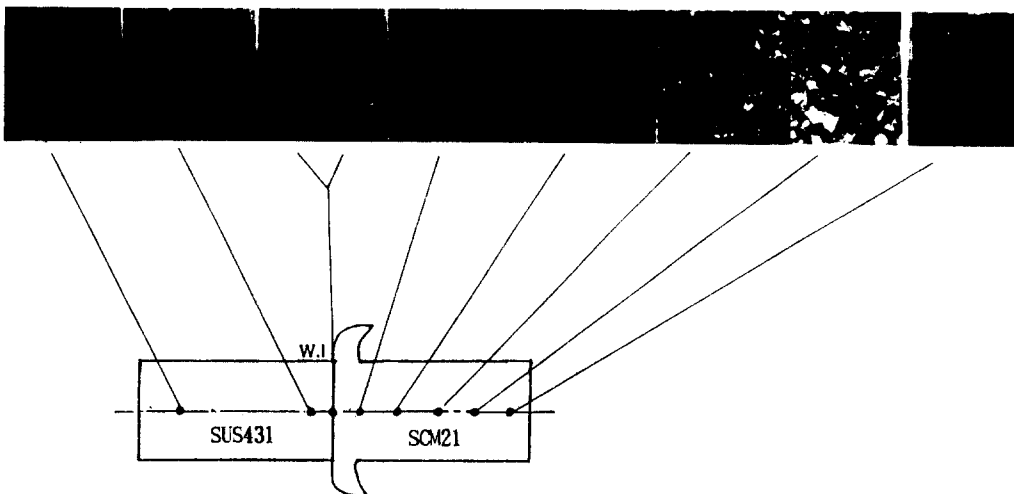


Fig. 11 Micro structures of B. M., HAZ and welded interface of friction welded joint of SUS431 to SCM21 steel bars
 Welding Cond. : $n=2,000$ rpm, $P_1=10$ kgf/mm², $T_1=5$ sec, $P_2=15$ kgf/mm², $T_2=4$ sec

3-7-3. 마찰용접부의 파단면검사

Fig.12는 Table 3의 마찰용접조건인 회전수 $N=2,000$ rpm, 마찰가열압력 $P_1=10$ kg/mm², 엷셋가열압력 $P_2=15$ kg/mm², 마찰가열시간 $T_1=5$ sec, 엷셋시간 $T_2=4$ sec로 SUS431과 SCM21을 마찰용접한 용접부의 인장파단면에 대한 마크로(macro)사진 및 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한 마이크로(micro)사진이다.

Fig.12는 파단면의 마크로(macro)사진으로 좌측이 SUS431, 우측이 SCM21이고 SUS431 외주부의 회전면을 따라 10 mm 폭으로 마찰력이 크게 작용하여 다량의 SCM21파편이 부착되어 있거나 SCM21의 모재 일부가 SUS431에 부착되어 접합면에서 파단되지 않고 SCM21의 모재의 열영향부(HAZ)에서 파단되어 용접접합면(W.I)의 결합력은 양호함을 알 수 있다. 또, Fig.12의 SCM21측 파단면의 SEM상을 보면 상부의 일부는 SUS431의 파단면이고 하부의 대부분이 SCM21측 파단면으로 SCM21측에서 미세적인 딴플(dimple)을 형성하여 소성변형에 의한 연성파괴 형태를 나타내었고,

이 딴플중의 일부는 재료중에 존재 하는 불순물, 혹은 집합시 약간의 이물질과 같은 스트레인(strain)의 불연속 부분으로 생각되는 홈 형태의 미소공동(micro void)을 부분적으로 극소량으로 형성하고 있어, 부분적인 취성과파단 형태를 보이고 있다. 앞으로 이러한 취성과파단이 나타나는 SUS부와 SCM부가 발생되지 않고 전체적으로 연성파단이 일어날 수 있도록 할 수 있다면 강도와 인성을 더욱 높일 수 있으리라 생각된다.

4. 결 론

내식성 및 내열성과 기계적성질이 우수한 SUS431과 용접성이 좋고 고온강도가 큰 표면경화용 구조용강 SCM21과의 마찰용접에 대한 집합기구(mechanism)와 용접성을 검토하고 더 높은 합금강도를 얻기 위해 이중재료의 마찰용접시험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 마찰용접시험과 인장강도시험 등을 통하여 강도와 인성(연신율, 단면 수축율, 인장 흡수에너지)을 고려한 ϕ 19.5 mm의 SUS431과 SCM21의 마찰용접 최적조건은 회전수 2,000 rpm, 마찰가열압 10 kg/mm², 단조가압력 15 kg/mm², 단조가압시간 4 sec를 일정하게 유지했을 때 마찰가열시간의 범위가 3~5 sec였다.

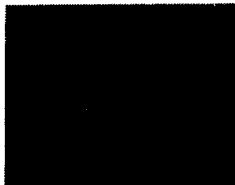
2. 마찰용접부의 인장강도(σ , kg/mm²)와 마찰가열시간(T_1 , sec)과의 사이에는 정량적 상관성이 확인되었으며, 그 실험식은 다음과 같다.

$$\sigma = 52.62 T_1^{0.06}$$

3. AE시험을 통하여 마찰가열시간(T_1 , sec)과 용접시간중의 총 AE량(N , counts)과의 사이에는 정량적 상관성이 성립하며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$N = 30413.6 e^{0.06T_1}$$

4. 마찰용접시험중 AE시험과 용접부 인장강도시험을 통하여, 용접부강도(σ , kg/mm²)와 용접시간중의 총 AE량(N , counts)사이에는 정량적 상관관계가 있음을 알 수 있고, 그 관계식은 다음과 같다.



(a) Macroscopic tensile - fracture surface



(b) Microscopic fracture surface by SEM

Fig. 12 Macroscopic tensile fracture surface and tensile fractured fractograph of SUS431-SCM21 friction welded joint
Welding Cond. : $n=2,000$ rpm, $P_1=10$ kg/mm², $P_2=15$ kg/mm², $T_1=5$ sec, $T_2=4$ sec

$$\sigma = -116.4 + 16.37(\ln N)$$

5. 총AE량이 ONZ=36,500~41,500 counts일 때 최적 마찰가열시간이 OT₁Z=3~5 sec로서 용접부의 인장강도는 이음효율 100%가 넘는 55.6~57.7 kgf/mm²의 범위임이 실험적으로 규명되었으며, AE량의 실시간 검사만으로 마찰용접부의 강도의 비파괴적 실시간평가가 가능하게 되었다.

참고문헌

- 1) Oh, S.K.(1974) : Study on friction welding of valve materials SUS3 SUH31. J. Korean.Soc. Mech. Eng., 14, p. 221 - 232.
- 2) 摩撻熔接硏究會(1979) : 摩撻熔接, コロナ社, p. 46, 145 - 150, 184
- 3) Vill, V. I.(1962) : Friction welding of metals. Svarochoe proizvodstvo, 3, P. 19 - 23.
- 4) Oh, S.K., S.D. Han and U. J. Lim(1983) : Effects of postweld aging treatment on rotary bending fatigue strength of friction welded joints at high temperature. J.Korea Society of Marine Engineers, vol. 7, No. 2, p. 36 - 49.
- 5) Oh, S.K., K.Y. Lee and H.J. Kim(1980) : A study on fatigue strength of friction welded heat - resisting steels at high temperature(1). Proc. KSME June, p.130 - 138.
- 6) 吳世奎(1982) : 어쿠우스틱 에밋션법에 의한 摩撻熔接強度 解析(1), 大韓機械學會誌, 22(3), p.757 - 766
- 7) 오세규, 임우조, 김형자 (1985) : 摩撻 熔接 機械의 自動生産 品質制御 실시간 評價, 大韓機械學會 論文集, 9(6), P757 - 766
- 8) Oh, S. K(1986) : Application of friction welding to parts of industrial machinery. 한국박용기관학회지, 제10호, P. 34 - 32.
- 9) Oh..S.K.(1982) : Studies on strength analysis of friction welded joints and inprocess monitoring of the welding using acoustic emission technique. Ph. D. thesis, Keio University, Part 1, p. 27 - 42, p. 73 - 84, p. 85 - 98, p. 122 - 134.
- 10) Um, D.S. and S.W. Kang(1971) : Study on fatigue strength of friction welding S20C and SUS27B. J. SNAK, 8, p. 13 - 24.