

研究論文

유공압 밸브스풀용 Cr-Mo 강봉의 동종재 마찰용접과 AE평가

오세규* · 장지훈** · 장홍근**

Friction Welding of Cr-Mo Steel Bars for Hydraulic or Pneumatic Valve Spools and AE Evaluation

S. K. Oh*, J. H. Jang** and H. K. Jang**

Key Words : FRW(friction welding, 마찰용접), AE(acoustic emission, 음향방출), Optimum t_z zone(최적 t_z 범위), Friction heating time(마찰가열시간), Optimum N zone(최적 N 범위), Cumulative AE counts(누적 AE 총량), Tensile fracture surface(인장 파단면), Welding interface(W.I; 용접이음면)

Abstract

This study was performed to optimize friction welding conditions of Cr-Mo steel bars used for hydraulic or pneumatic valve spools and to realize the real-time evaluation of weld quality by acoustic emission method.

SNM220, SCM435, SACM645, and SCM415 steel bars were tested to find optimum conditions of friction welding. Quantitative equations which exhibit the relations of tensile strength, elongation, reduction of area and energy absorption with friction heating time were obtained by the experiment.

Acoustic emission was also performed in the friction welding process, and the real-time evaluation was enabled to find the optimum range of weld strength.

Finally, the strength and toughness of welded joints were interpreted by the SEM analysis of tensile fracture surfaces.

1. 서 론

주위의 기체가 용융금속에 혼입되어 용접부위가

기포결함을 수반하는 종래의 용융용접과는 달리, 마찰용접은 마찰열과 압력만으로 용접하므로 기존 용접방식의 결함을 제거하여 차세대 용접방식으로 각광받고 있는 용접법이다.

* 정회원, 부산수산대 기계공학과

** 정회원, 한국기계연구원 시험평가부

본 연구는 유공압 밸브스플용 재료인 Cr-Mo 강봉의 마찰용접 최적 조건을 구하고, 음향방출법(acoustic emission method)에 의해 이들 마찰용접 강도의 최적범위를 구할 수 있는 실시간 평가법을 개발하는 것을 목적으로 한다.

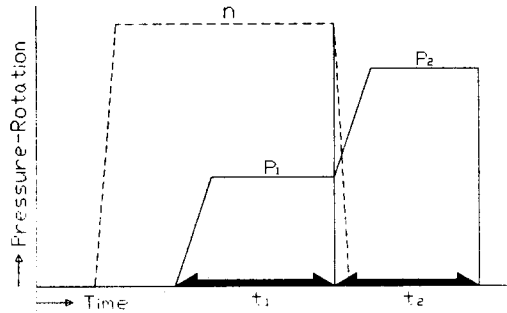
본 연구에서는 유공압 밸브스플재로 이용되는 Cr-Mo강인 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415 강봉을 사용하여 봉 대 봉 동종재 마찰용접 최적조건을 브레이크형 마찰용접기를 사용하여 실험적으로 구하였으며, 이를 위하여 이음부의 인장강도와 마찰용접 변수와의 정량적 상관식을 실험적으로 도출하였다. 한편 마찰용접시 음향방출 시험을 병행하여, AE 누적총량과 마찰용접 변수, 마찰용접부의 인장강도와 AE 누적총량과의 정량적 상관성을 도출하였다. 그리고 마찰용접부의 인장파단면을 검토함으로써 용접부의 성질을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 마찰용접의 원리와 특성

마찰용접(friction welding)은 마찰압접이라고도 하며, 용접코저 하는 두 재료를 마찰용접기에 돌려 한쪽은 고정시켜두고 다른 한쪽을 2,000rpm 정도의 고속으로 회전, 마찰시키면 그 마찰면이 접합에 충분한 온도(연강의 경우 1,200°C내외)에 도달하는데, 이때 순간적으로 회전을 멈추면서 강력한 기계적 힘으로 접합시키는 고상압접(固相壓接)방식이다. Fig. 1은 이러한 마찰용접 사이클을 보여준다.

마찰용접의 결합기구(bonding mechanism)는 부분적인 확산(diffusion)과 기계적 상호결합에 의하여 이루어지며, 마찰열을 이용하여 변형저항을 줄이고 가압력으로 원자간 간격을 좁혀 줌으로써 이루어지는 결합이다. 현재 실용되고 있는 마찰용접법에는 브레이크형과 플라이 휠형이 있으며, 원칙적으로 원형단면인 환봉이나 관의 접합에 한정되어 적용되지만, 최근엔 직선마찰용접(linear friction welding)이 개발되어 원형단면이 아닌 것도 가능하다. 응용분야는 자동차 부품, 기계 부품, 각종 밸브, 공구류 및 전기기계나 각종 산업기계의 부품 등에 사용되고 있다¹⁾.



- n : rotation speed
- P₁ : heating pressure(kgf/mm²)
- P₂ : upsetting pressure(kgf/mm²)
- t₁ : heating time(sec)
- t₂ : upsetting time(sec)

Fig. 1 Cycle of friction welding process

2.2 음향방출의 특성 및 이론

음향방출은 재료의 변형과 동시에 그 재료에서 흘러나오는 탄성에너지이다. 이 새로운 비파괴 검사 기술은 1960년대 초 압력용기의 음향방출 모니터링에서 발견되었다. 엄격히 정의하면, 음향방출이란 재료 내부에 있는 발생원으로부터 에너지의 방출에 의해 일시적인 탄성파가 발생하는 현상, 또는 그때 방출되는 탄성파이다²⁾.

금속에서 음향방출의 발생원은 균열의 성장, 전위 이동, 입계 슬립, 파괴 등이다. 이러한 기구들은 재료에 하중이 가해질 때 일어나는 응답의 대표적 전형들이다. 음향방출 시험에서는 누설이나 캐비테이션, (베어링 등에서의) 마찰, 자구(磁區; magnetic domain)의 성장이나 재배열, 액화(液化)나 응고(凝固) 등의 검출도 가능하다. 이러한 발생원들은 응력이 가해진 재료의 기계적 변형에 기인한 전형적인 음향방출과 구별하여 2차 발생원 또는 의사(擬似) 발생원이라 부른다.

음향방출은 크게 2가지 측면에서 대부분의 다른 비파괴 검사와는 다르다. 음향방출은 재료 내부에서 발생하는-어떤 면에서는 자연 발생적인-에너지를 받는 수동적인 입장을 취하기 때문에 에너지의 입력이 필요치 않으며, 측정 대상체가 가동 상태에서도 측정이 가능하다²⁾.

Fig. 2는 돌발형 음향방출 신호의 대표적인 형태를 보여준다. 돌발형 음향방출은 비교적 간단한 파라미터로 표현할 수 있다. 이 돌발형 신호의 진폭

은 주변 잡음(background noise)에 비해 높고, 지속 시간(duration)은 수 μsec 에서 msec미만 정도로 짧다. 신호파형은 최대 진폭까지 급격히 상승하여 주변 잡음의 수준까지 지수함수적으로 소멸되는 감쇠 사인곡선의 형태이다. 음향방출의 모니터링은 일반적으로 연속적인 주변 잡음이 존재하는 가운

데 수행된다. 따라서, 이러한 파형 특성을 효과적인 정보로 이용하기 위해서 주변 잡음의 진폭보다 높은 수준의 문턱값(threshold)을 설정한다. 이 모델을 이용하여 Fig. 2에 나타난 파형 파라미터가 정의된다.

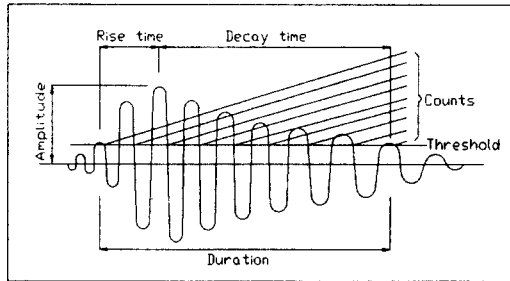


Fig. 2 Idealized representation of an acoustic emission signal

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 Cr-Mo계 합금강인 직경 24 mm, 길이 80 mm의 SNCM220, SCM435, SACM 645 및 SCM415이며, 그 화학조성과 기계적 성질 및 열처리 조건은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

한편, Fig. 3은 본 실험에 사용된 시험편의 형상으로서, (a)는 마찰용접 및 음향방출 시험편, (b)

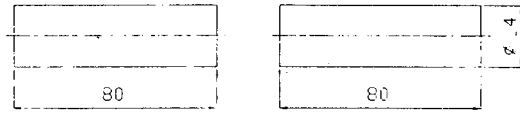
Table 1. Chemical composition of Cr-Mo Steels(wt%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu
SNCM220	0.18	0.23	0.69	0.020	0.013	0.40	0.51	0.16	—	0.14
SCM435	0.35	0.26	0.73	0.018	0.011	0.13	0.99	0.17	—	0.2
SACM645	0.47	0.28	0.31	0.021	—	—	1.38	0.17	1.092	—
SCM415	0.16	0.25	0.73	0.009	0.007	—	0.99	0.17	—	—

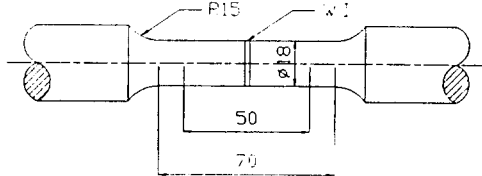
Table 2. Mechanical properties and condition of heat treatment of Cr-Mo Steels

Materials	Tensile strength σ_t (kgf/mm ²)	Yield strength σ_y (kgf/mm ²)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area Ψ (%)	Impact value (Charpy) I(kgf · m/cm ²)	Hardness H.	Heat treatment
SNCM220	85	—	17	40	—	185	850~900°C Oil-Quenched 150~200°C Tempered Air cooling
SCM435	95	80	15	50	—	314	830~880°C Oil-Quenched 530~630°C Tempered
SACM645	111.1	98.1	18.6	52.5	11.0	217	900°C Oil-Quenched 650°C × 1hr Tempered
SCM415	85	—	16	40	—	314	850°C Oil-Quenched 200°C Tempered Air cooling

는 인장강도 및 인장 흡수에너지 시험편을 나타낸다.



(a) Friction welding and AE test specimens



(b) Tension test and energy absorption test specimen

Fig. 3 Specimens for friction welding-AE and tension-energy absorption test

3.2 실험장치

본 연구에서 사용된 마찰용접기는 연속구동 브레이크형인 Toho TH-25이다. 위 마찰용접기의 용량은 최대 취부 재료치수로서 회전축은 $\phi 25$ 이며, 고정축은 $\phi 40$ 이다.

음향방출 시험에 사용된 시험기는 AE testing system(PAC, LOCAN-AT, 2 channel)이다.

3.3 실험방법

3.3.1 마찰용접

마찰용접 최적화 실험을 위해서는 먼저 문헌⁹⁾을 통해 마찰가열압력(P_1), 엷압력(P_2)을 결정하여 몇가지 시도 실험을 수행한 후 용접조건을 선정하고, 엷시간(t_e)을 선택한 후에 가열시간(t_h)을 다양하게 변화시켜서 실험한다. 마찰용접시 회전수는 마찰용접기의 특성상 2,000rpm으로 하였다.

3.3.2 마찰용접부의 강도 및 인성시험

이음부의 인장강도를 구하여 모재의 경우보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간 t_h 을 결정하고, 인장 흡수에너지, 연신율, 단면 수축율을 구하여 인성을 조사한다. 인장 흡수에너지는 인장시험시의 하중-변형을 선도 아래부분의 면적을 환산하여 구하였으며, 연신율과 단면 수축율은 직접 측정하였다. 한편 최소자승법에 의해 실험식을 계

산하고 신뢰성을 검토하였다.

3.3.3 음향방출 시험

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R15-C 150kHz sensor)를 용접면에서 정지척(chuck) 방향으로 310 mm 위치의 정지척 표면에 부착하였다. 정지척 표면에 부착한 변환기로부터 전달된 AE신호를 printer에 기록하여, 그 기록된 결과를 AE 누적총량의 형태로 표시하였다. 주파수 범위의 넓은 스펙트럼을 커버하는 광범위한 발원으로부터 AE 신호가 발생하기 때문에 고감도 변환기용 pre-amplifier와 함께 사용하였다. 한편, 외부소음을 제거하기 위해 마찰용접기를 공회전시키면서 AE 신호를 측정하여 threshold voltage를 1.0V로 설정하여 실험하였다.

용접시간에 대응한 AE 신호의 발생거동을 해석하기 위하여 AE 누적량을 용접 시작부터 용접 완료까지에 검출된 초기 AE 누적량과 용접후 냉각 기간중에 검출된 후기 AE 누적량의 두가지로 분류할 수 있는데^{4, 5)}, 본 연구에서는 초기 AE 누적량과 용접부 인장강도와의 상관성을 고려하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 마찰용접의 최적화 해석

Fig. 4~7은 각각 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간(t_h , sec)과 인장강도(σ_t , kgf/mm²), 그리고 마찰가열시간(t_h , sec)과 인성을 나타내는 연신률(ϵ , %), 단면수축률(Ψ , %), 인장 흡수에너지(E , kgf·mm)의 관계를 보여준다. 여기서 t_h 에 대한 σ_t 의 분포는 3차의 정량적 관계가 있음이 실험적으로 확인되었으며, 이는 Oh의 결과⁹⁾와 일치한다.

이때 σ_t - t_h 의 상관식은 최소자승법에 의해 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SNCM220} : \sigma_t = 0.036 t_h^3 - 1.080 t_h^2 + 10.364 t_h + 36.42 \quad (R^2 = 0.96) \quad (1)$$

$$\text{SCM435} : \sigma_t = 0.082 t_h^3 - 2.759 t_h^2 + 30.397 t_h - 15.03 \quad (R^2 = 1.00) \quad (2)$$

$$\text{SACM645} : \sigma_t = 0.050 t_h^3 - 1.815 t_h^2 + 21.127 t_h + 15.86 \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

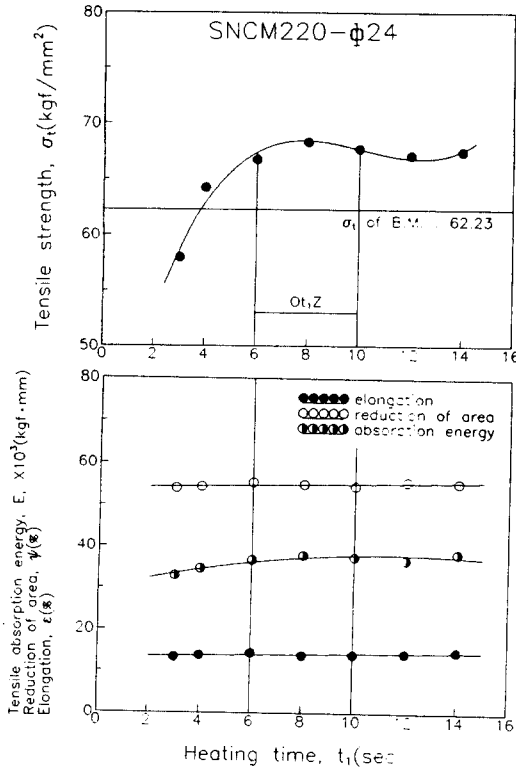


Fig. 4 Relationship of tensile strength vs heating time and elongation, reduction of area, energy absorption vs heating time of friction welding joints of SNCM220

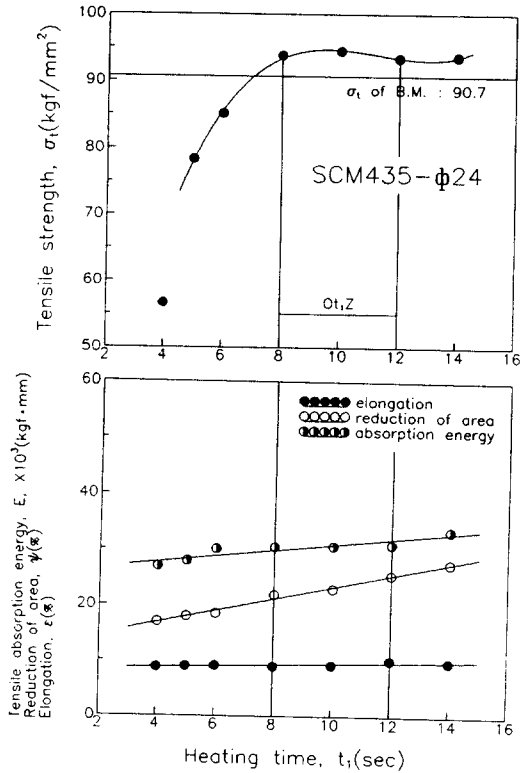


Fig. 5 Relationship of tensile strength vs heating time and elongation, reduction of area, energy absorption vs heating time of friction welding joints of SCM435

Table 3. Optimal conditions of FRW for studied steels

Materials		SNCM220	SCM435	SACM645	SCM415
Welding condition	n(rpm)	2000	2000	2000	2000
	P ₁ (kgf/mm ²)	7	7	7	7
	P ₂ (kgf/mm ²)	10	10	10	10
	t ₁ (sec)	6~10	8~12	9~11	6~9
	t ₂ (sec)	5	5	5	5

$$SCM415 : \sigma_t = 0.046 t_1^4 - 1.391 t_1^3 + 13.089 t_1^2 + 15.74 t_1 \quad (R^2 = 0.94) \quad (4)$$

여기서 R²은 기여율(coefficient of determination)이다.

한편, Fig. 4~7에서 인장강도가 가장 높게 나타나는 적정 t₁의 범위에 대한 연신률(ε), 단면수축률(Ψ), 인장 흡수에너지(E)의 분포는 그림에서 알 수 있듯이 t₁의 증가에 따라 1차 또는 2차의 형태로 대부분 증가하는 경향을 나타내며, 각각의 최적

t₁의 범위에 대해 인성면에서도 문제가 없는 범위임을 알 수가 있다.

Fig. 4~7에서 모든 경우에 이음효율 100% 이상을 얻을 수 있음을 고려해 볼 때, 각 재료의 마찰용접 최적조건은 Table 3과 같다.

σ_t에 의한 t₁의 최적범위인 Ot,Z(optimum t₁ zone)에 속한 용접부 인장강도의 모체에 대한 강도비를 다른 자료^{3,6)}와 비교해 볼 때 본 실험의 결과가 우수하다고 할 수 있고 Table 3의 조건이 적정조건임을 알 수 있다.

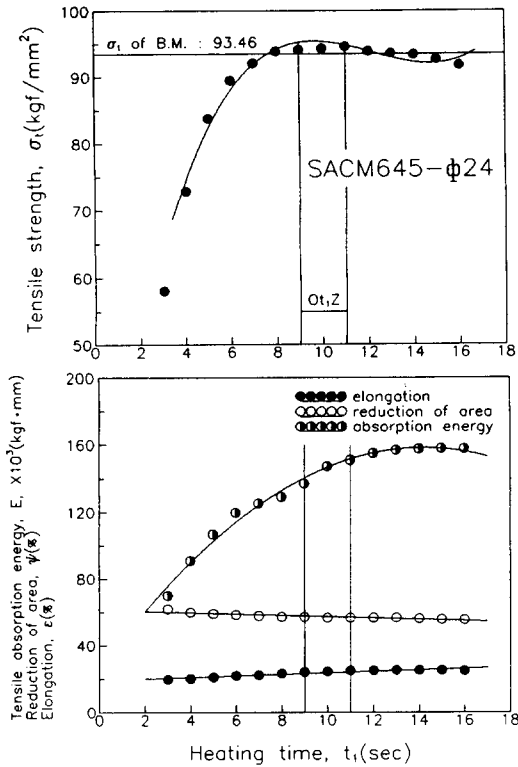


Fig. 6 Relationship of tensile strength vs heating time and elongation, reduction of area, energy absorption vs heating time of friction welding joints of SACM645

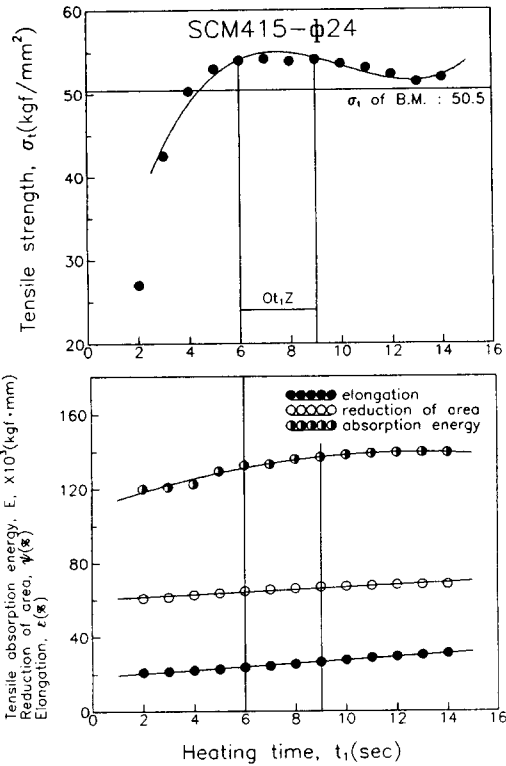


Fig. 7 Relationship of tensile strength vs heating time and elongation, reduction of area, energy absorption vs heating time of friction welding joints of SCM415

4.2 마찰용접시의 AE 누적총량과 용접부 인장강도의 상관성

4.2.1 가열시간과 AE 누적총량의 상관성

Fig. 8~11은 각각 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간(t_1 , sec)에 따른 AE 누적총량(N , counts)의 변화를 실험한 결과이다.

모든 경우에 있어서, N 은 t_1 에 대해 2차 곡선적인 관계를 나타내고 있으며, 이때 N - t_1 의 상관관계 실험식은 최소자승법에 의해서 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SNCM220} : N = -130.16 t_1^2 + 5209.71 t_1 + 27655.3 \quad (R^2 = 1.00) \quad (5)$$

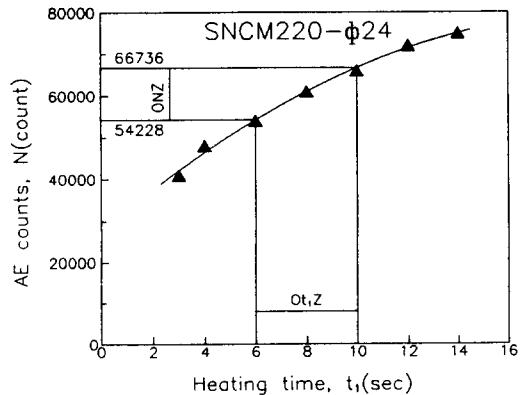


Fig. 8 Relationship of cumulative AE counts vs heating time of FRW joints of SNCM220

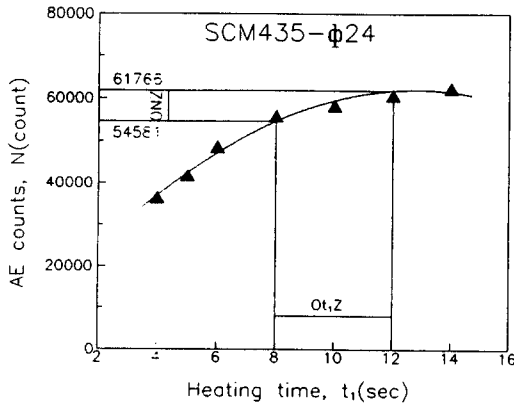


Fig. 9 Relationship of cumulative AE counts vs heating time of FRW joints of SCM435

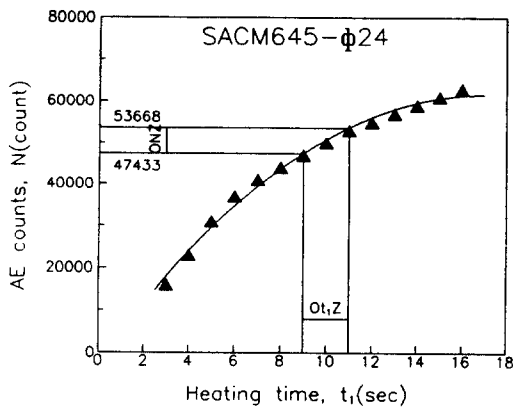


Fig. 10 Relationship of cumulative AE counts vs heating time of FRW joints of SCM645

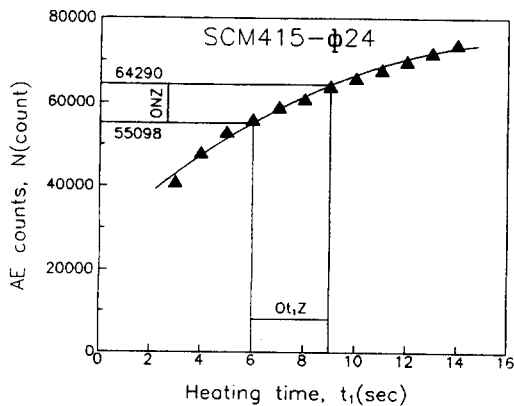


Fig. 11 Relationship of cumulative AE counts vs heating time of FRW joints of SCM415

$$\text{SCM435} : N = -322.55 t_1^2 + 8247.05 t_1 + 9274.8 \quad (6)$$

$(R^2=0.99)$

$$\text{SACM645} : N = -225.28 t_1^2 + 7623.08 t_1 - 2927.5 \quad (7)$$

$(R^2=0.99)$

$$\text{SCM415} : N = -164.84 t_1^2 + 5536.46 t_1 + 27813.7 \quad (8)$$

$(R^2=0.99)$

또한, Fig. 4~7에서 구했던 $O_t Z$ 의 최소 및 최대 t_1 값을 식(5)~(8)에 대입하여 구한 최적 AE 누적총량 범위인 ONZ(optimum N zone)를 각각 나타내었다.

4.2.2 AE 누적총량과 용접부 인장강도의 상관성

Fig. 12~15는 각 재료의 마찰용접 이음부에 대한 인장강도(σ_t , kgf/mm²)와 AE 누적총량(N, counts)의 상관관계를 조사한 결과이다.

이때 σ_t -N의 상관관계식은 최소자승법에 의하여 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SNCM220} : \sigma_t = -1.767 \times 10^{-8} N^2 + 2.291 \times 10^{-3} N - 5.71 \quad (9)$$

$(R^2=0.97)$

$$\text{SCM435} : \sigma_t = -7.829 \times 10^{-8} N^2 + 9.063 \times 10^{-3} N - 167.86 \quad (10)$$

$(R^2=0.97)$

$$\text{SACM645} : \sigma_t = -2.907 \times 10^{-8} N^2 + 2.975 \times 10^{-3} N + 18.91 \quad (11)$$

$(R^2=1.00)$

$$\text{SCM415} : \sigma_t = -2.582 \times 10^{-8} N^2 + 3.194 \times 10^{-3} N - 44.34 \quad (12)$$

$(R^2=0.96)$

Fig. 12~15에서 각 재료에 대해, 최적 AE 누적

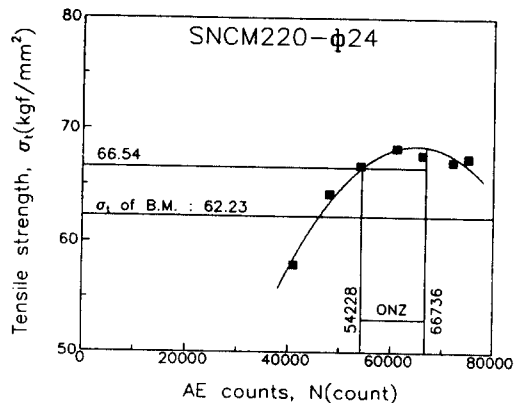


Fig. 12 Relationship of Tensile strength vs cumulative AE counts of FRW joints of SCM220

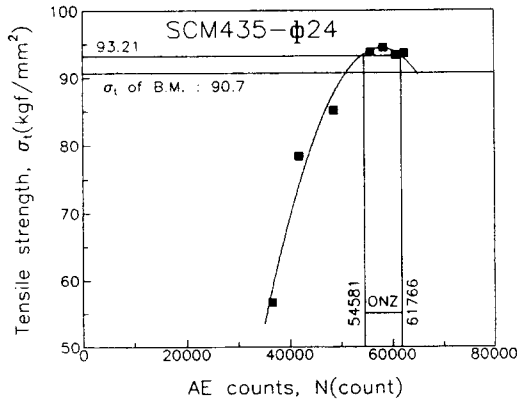


Fig. 13 Relationship of Tensile strength vs cumulative AE counts of FRW joints of SCM435

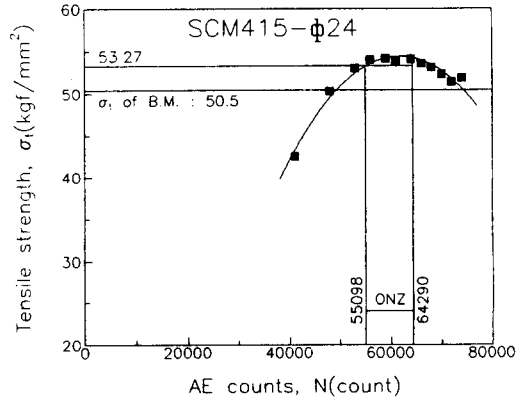


Fig. 15 Relationship of Tensile strength vs cumulative AE counts of FRW joints of SCM415

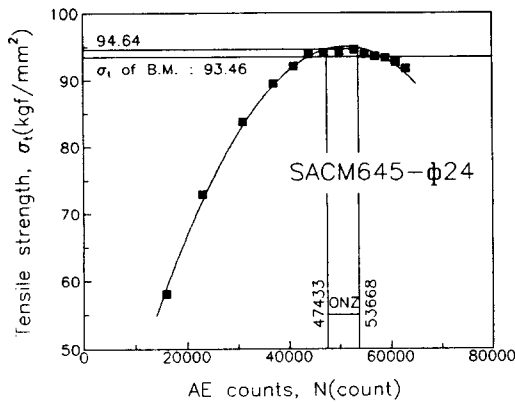


Fig. 14 Relationship of Tensile strength vs cumulative AE counts of FRW joints of SACM645

총량의 범위(ONZ)일때 N의 최소 및 최대치를 식 (9)~(12)에 대입하여 ONZ에서의 인장강도(σ_t)를 구하고, 이 인장강도(σ_t)의 최소값을 모재의 인장강도와 비교하여 이음효율을 구해서 이를 Table 4에 나타내었다.

SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 각 재료에 대해서, 최적 AE 누적총량 범위(ONZ)에서의 이음효율이 100% 이상이 되어 매우 만족스러

운 용접 품질임을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 12~15와 식(9)~(12)에서 알 수 있듯이 용접시작에서 완료시까지의 AE 누적총량(N)이 측정되면, 측정된 N값에 대한 인장강도(σ_t)가 곧바로 계산되어 그 용접이음부의 강도가 비파괴적으로 예측된다.

4.3 마찰용접부의 인장 파단면 조사

Fig. 16은 최적조건 내의 SNCM220 마찰용접부 인장파단면의 SEM사진이다. 이 경우, 모두 모재부의 인장파단부로서 많은 댐플(dimple)이 보이는 연성파단을 나타내고 있다. 인장파단부가 모두 용접이음면이 아닌 모재부의 파단인 점에서 볼 때, 아주 우수한 용접부가 얻어졌음을 알 수 있었으며, 마찰용접후 표면경화 처리와 같은 열처리를 통해 모재와 용접이음부의 표면경도 및 인성을 고려하여 적절한 템퍼링 처리를 하면 표면 내마모성 및 인성이 더욱 증가된 용접이음부가 될 것으로 기대된다.

또한 Fig. 17은 최적조건 내의 SACM645 마찰용접부 인장파단면의 SEM사진을 보여준다. 사진과 같이 인장파단면에서는 벽개면과 댐플이 동시에

Table 4. Bonding efficiency of FRW for studied steels

Materials	SNCM220	SCM435	SACM645	SCM415
σ_t of B.M(kgf/mm ²)	62.23	90.70	93.46	50.50
σ_t of ONZ(kgf/mm ²)	66.54	93.21	94.64	53.27
Joint efficiency(%)	106.9	102.8	101.3	105.5

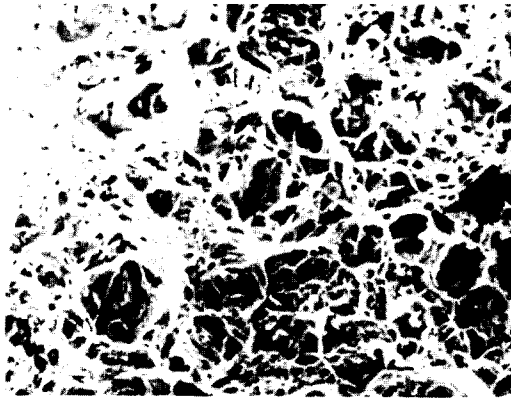


Fig. 16 Fracture surface of SNCM220 friction welding joints in optimum zone by SEM (×1000)

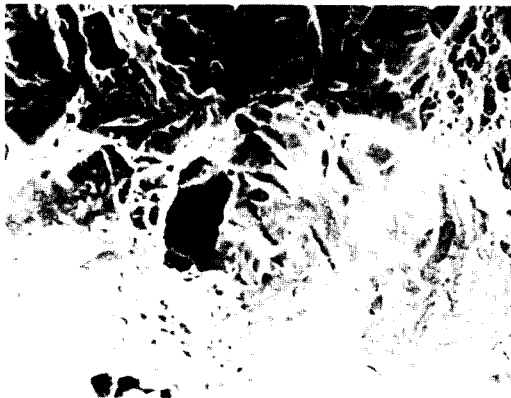


Fig. 17 Fracture surface of SNCM645 friction welding joints in optimum zone by SEM (×1000)

나타나는 점에서 강도와 인성을 동시에 갖춘 이음 부가 얻어졌음을 알 수 있다. SACM645는 마찰용접부의 강도가 가장 높았으며, 마찰용접후 템퍼링 처리를 거치면 강도와 인성이 상당히 높을 것으로 기대된다.

5. 결 론

Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출에 의한 평가에 관한 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415 강봉의 동종재 마찰용접 최적 조건을 실험적으로 구하여 도출하였다.
- 2) SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의

마찰용접부의 인장강도(σ_t)와 AE 누적충량(N)의 정량적 상관식을 도출하였고, 최적 N범위를 구명함으로써 마찰용접 실시간 중에 용접품질을 비파괴적으로 검사할 수 있게 하였다.

3) 최적 조건하에서 용접된 마찰용접부의 인장파단면을 검토하여 용접부의 성질을 확인한 결과, 파단부의 연성이 풍부함을 알 수 있었으며, 표면경화 처리나 템퍼링과 같은 열처리를 통해 우수한 용접품질을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 '93 협력연구과제인 "다중 유공압 밸브스풀 제작의 마찰용접 표준화 및 AE법에 의한 품질 실시간 평가의 데이터베이스 시스템 개발"에 관한 연구의 일부이며, 관계제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 천두희, 이병훈, 김대훈, 황선효, "마찰용접기의 개발과 적용", 대한용접학회지, 제5권, 1987 p. 2-15
2. R.K.Miller and P.McIntire, "Nondestructive Testing Handbook-Vol.5, Acoustic Emission Testing", 2nd edition, ASNT, 1987, p. 11-44
3. 日本摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, 1979, p. 46, 145-150, 184
4. S.K.Oh, "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transactions of KSME, Vol.7, No.2, 1983, p. 226-232, (In English)
5. 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한기계학회지, 제22권, 제3호, 1982, p. 184-190,202
6. S.K.Oh, "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques", Ph.D. Thesis, Graduate School, Keio University, Japan, 1982, p. 1-314, (In English).
7. V.I.Vill, "Friction Welding of Metals", 1962, p. 1-114
8. 오세규, 장지훈, 김현필, 이경우, 박형동, "Cr-Mo계 봉 대 봉 동종재 마찰용접시의 AE와 용

- 접 강도의 상관성에 관한 연구”, 대한용접학회 '94 춘계 강연 논문집, 1994, p. 211-214
9. 오세규, 오정환, 전태연, 김경균, 오명석, “AE에 의한 소형 밸브스플 마찰용접 품질의 실시간 평가”, 대한용접학회지, Vol.12, No.2, 1994, p. 97-107