

Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가

오 세 규*, 장 지 훈**, 장 흥 근**

* 부산수산대 공대 기계공학과

** 한국기계연구원 시험평가부

요 약 Cr-Mo강인 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415 강봉을 사용하여 $\phi 31.2$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접의 최적 조건을 실험적으로 구하였으며, 이를 위하여 이음부의 인장강도와 마찰용접 변수와의 정량적 상관식을 실험적으로 도출하였다. 한편 마찰용접시 음향방출시험을 병행하여, AE 누적총량과 마찰용접 변수, 마찰용접부의 인장강도와 AE 누적총량과의 정량적 상관성을 도출하였다. 그리고, 마찰용접부의 인장과 단면을 검토함으로써 용접품질을 확인하였다.

1. 서론

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

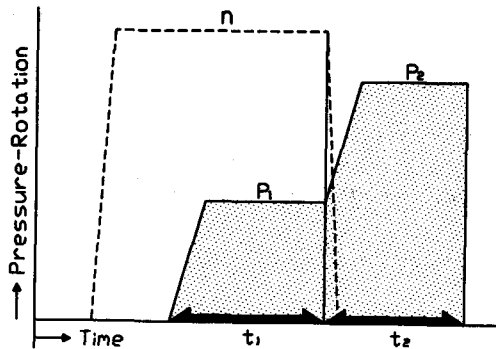
본 연구에서는 Cr-Mo강인 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415 강봉을 사용하여 $\phi 31.2$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접의 최적 조건을 실험적으로 구하였으며, 이를 위하여 이음부의 인장강도와 마찰용접 변수와의 정량적 상관식을 실험적으로 도출하였다. 한편 마찰용접시 음향방출 시험을 병행하여, AE 누적총량과 마찰용접 변수, 마찰용접부의 인장강도와 AE 누적총량과의 정량적 상관성을 도출하였다. 그리고, 마찰용접부의 인장과 단면을 검토함으로써 용접품질을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 마찰용접의 원리와 특성

마찰용접(friction welding)은 마찰압접이라고도 하며, 용접코자 하는 두 재료를 마찰용접기에 물려 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. 종래의 용융용접은 주위의 기체가 용융금속에 혼입되어 용접부위가 기포결함을 수반하지만, 마찰용접은 마찰열과 압력만으로 용접하므로 기존 용접방식의 결함을 제거하여 차세대 용접방식



- 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.

으로 각광받고 있다. 현재 실용되고 있는 마찰용접 방법에는 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, 기계부품, 각종밸브, 공구류 및 전기기계나 각종 산업기계의 부품 등에 사용되고 있다⁹⁾.

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 그 때 방출되는 탄성파”이다²⁾.

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 응력

이 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⁾.

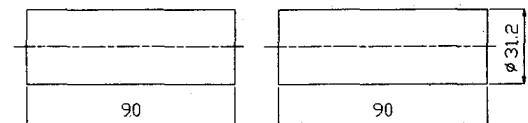
3. 실험 재료 및 방법

3.1. 실험 재료 및 시험편

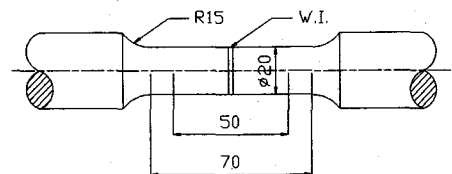
본 연구에 사용된 재료는 Cr-Mo계 합금강인 SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415이며, 그 화학조성과 기계적 성질 및 열처리조건은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

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	-	-



(a) Friction welding and Ae test specimens



(b) Specimens for FRW-AE test and tension test

Fig. 2. Specimens for FRW-AE test and tension test.

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

Materials	Tensile strength $\sigma_t(\text{kgf/mm}^2)$	Yield strength $\sigma_y(\text{kgf/mm}^2)$	Elongation $\epsilon(\%)$	Reduction of area $\psi(\%)$	Impact value (Charpy) I(kgf·m/cm ²)	Hardness H _B	Heat treat
SNM220	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 × 1 hr Tempered
SCM415	85	-	16	40	-	314	850°C Oil-Quenched 200°C Tempered Air cooling

한편, Fig. 2는 본 실험에 사용된 시험편의 형상으로서, (a)는 마찰용접 및 음향방출 시험편, (b)는 인장강도 및 인장 흡수에너지 시험편을 나타낸다.

3.2. 실험 장치

본 연구에서 사용된 마찰용접기는 국내 A사 산업 현장에서 사용되고 있는 연속구동 브레이크형인 Nitto FF-45II-C이다. 위 마찰용접기의 용량은 최대 취부 재료치수로서 회전축은 $\phi 50$ 이며, 고정축은 $\phi 80$ 이다.

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

3.3. 실험 방법

3.3.1. 마찰용접

마찰용접 최적화 실험을 위해서는 먼저 문헌⁵⁾을 통해 마찰가열압력(P_1), 업셋압력(P_2)을 결정하여 몇 가지 시도 실험을 수행한 후 용접조건을 선정하고, 업셋시간(t_2)을 선택한 후에 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜서 실험한다. 마찰용접시 회전수는 마찰용접기의 특성상 1,600rpm으로 하였다.

3.3.2. 마찰용접부의 강도 및 인성시험

이음부의 인장강도를 구하여 모재의 경우보다 우

수한 범위를 선정해서 최적 가열시간 t_1 을 결정하고, 인장 흡수에너지, 연신율, 단면 수축율을 구하여 인성을 조사한다. 한편 최소자승법에 의해 실험식을 계산하고 신뢰성을 검토하였다.

3.3.3. 음향방출시험

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R15-C 150kHz sensor)를 용접면에서 정지척(chuck) 방향으로 480mm 위치의 정지척상에 부착하였다. 정지척상에 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 냉각기간 중에 검출된 후기 AE 누적량의 두가지로 분류할 수 있는데^{6,7)}, 본 연구에서는 초기 AE 누적량과 용접부 인장강도와의 상관성을 고려하였다.

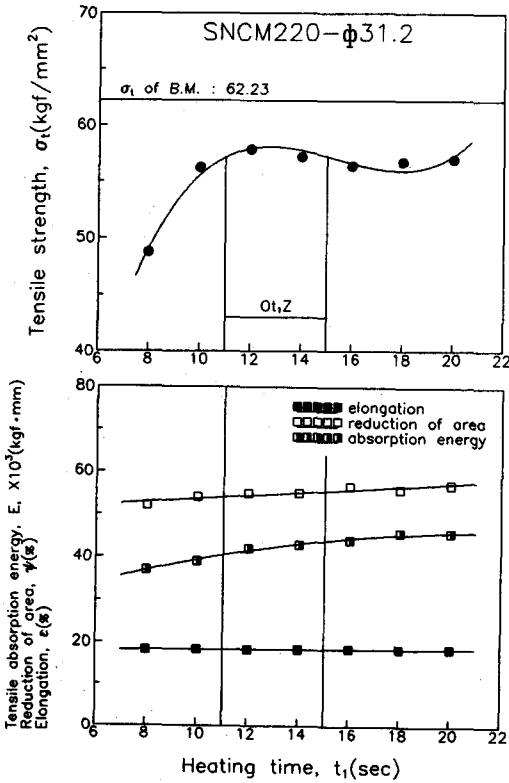


Fig. 3. σ_t vs t_1 and ϵ , ψ , E vs t_1 of FRW joints of SNCM220.

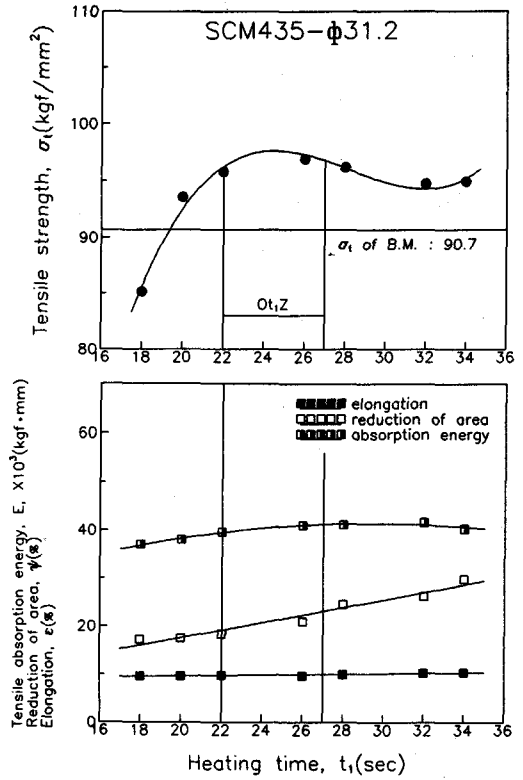


Fig. 4. σ_t vs t_1 and ϵ , ψ , E vs t_1 of FRW joints of SCM435.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 마찰용접의 최적화 해석

Fig. 3~6은 각각 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간 (t_1 , s)과 인장강도 (σ_t , kgf/mm²), 그리고 마찰가열시간 (t_1 , s)과 인성을 나타내는 연신률 (ϵ , %), 단면수축률 (ψ , %), 인장 흡수에너지 (E, kgf·mm)의 관계를 보여준다. 여기서 t_1 에 대한 σ_t 의 분포는 3차의 정량적 관계가 있음이 실험적으로 확인되었으며, 이는 Oh의 결과⁸⁾와 일치한다.

이때 σ_t - t_1 의 상관식은 최소자승법에 의해 다음과 같이 계산되었다.

SNCM220 :

$$\sigma_t = 0.032 t_1^3 - 1.464 t_1^2 + 21.821 t_1 - 48.09 \quad (R^2 = 0.97) \dots (1)$$

SCM435 :

$$\sigma_t = 0.016 t_1^3 - 1.362 t_1^2 + 37.769 t_1 - 246.77 \quad (R^2 = 0.98) \dots (2)$$

SACM645 :

$$\sigma_t = 0.0075 t_1^3 - 0.676 t_1^2 + 19.889 t_1 - 89.06 \quad (R^2 = 0.99) \dots (3)$$

SCM415 :

$$\sigma_t = 0.135 t_1^3 - 9.754 t_1^2 + 234.42 t_1 - 1821.18 \quad (R^2 = 1.00) \dots (4)$$

여기서 R^2 은 기여율(coefficient of determination)이다.

한편, 인장강도가 가장 높게 나타나는 적정 t_1 의 범위에 대한 연신률 (ϵ), 단면수축률 (ψ), 인장 흡수에너지 (E)의 분포는 그림에서 알 수 있듯이 t_1 의 증가에 따라 1차 또는 2차의 형태로 대부분 증가하는 경향을 나타내며, 각각의 최적 t_1 의 범위에 대해 인성면에서 문제가 없는 양호한 범위를 나타내고 있다.

Fig. 3~6에서 SNCM220를 제외하고는 이음효율 100% 이상을 얻을 수 있었으며, SNCM220의 경우도 인장강도가 peak에 해당하고 이음효율 90% 이상을 얻을 수 있었다. 이상에서 고려해 볼 때, 각

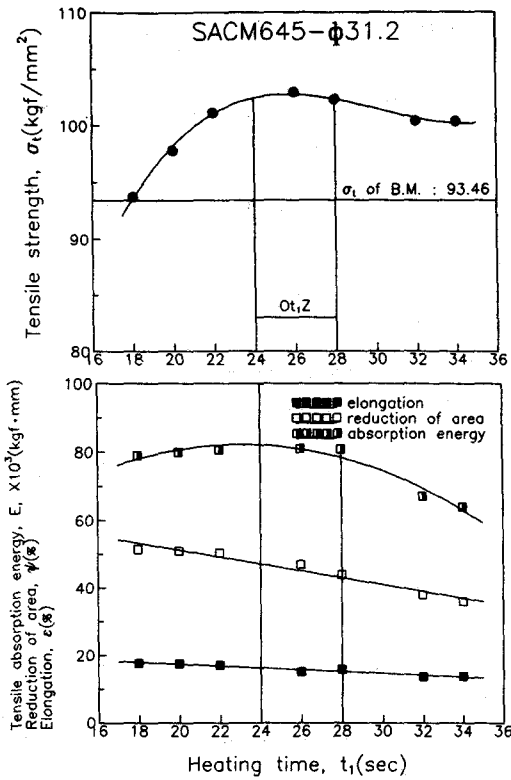


Fig. 5. σ_t vs t_1 and ϵ , Ψ , E vs t_1 of FRW joints of SACM645.

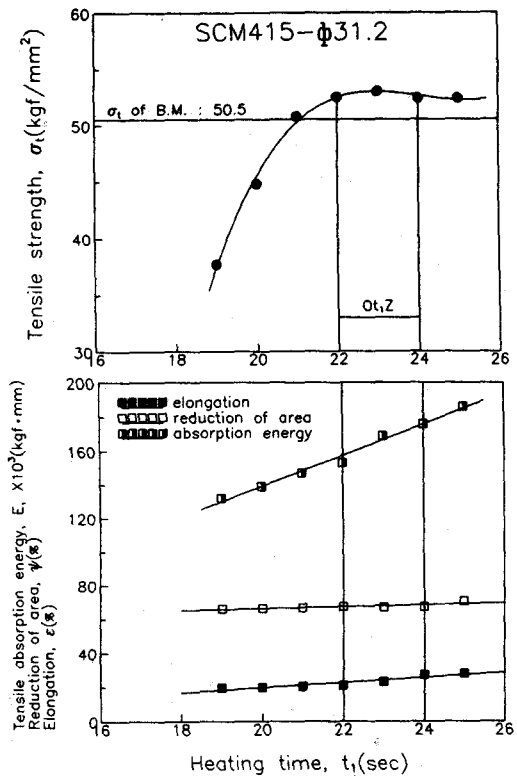


Fig. 6. σ_t vs t_1 and ϵ , Ψ , E vs t_1 of FRW joints of SCM415.

재료의 마찰용접 최적조건은 Table 3과 같다.

σ_t 에 의한 t_1 의 최적범위인 Ot₁Z(optimum t₁ zone)에 속한 용접부 인장강도의 모재에 대한 강도비를 다른 자료^{5,8)}와 비교해 볼때 본 실험의 결과가 우수하다고 할 수 있고 위의 용접조건도 알맞다고 할 수 있다.

Table 3. Optimizing condition of FRW for each materials

Materials		SNCM220	SCM435	SACM645	SCM415
Welding condition	n(rpm)	1600	1600	1600	1600
	P ₁ (kgf/mm ²)	5	4	4	4
	P ₂ (kgf/mm ²)	10	8	8	8
	t ₁ (sec)	11~15	22~27	24~28	22~24
	t ₂ (sec)	4	4	4	4

4. 2. 마찰용접시의 AE 누적총량과 용접부 인장강도의 상관성

4.2.1. 가열시간과 AE 누적총량의 상관성

Fig. 7~10은 각각 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간(t_1 , s)에 따른 AE 누적총량(N, counts)의 변화를 실험한 결과이다.

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

SNCM220 :
 $N = -234.23 t_1^2 + 7813.69 t_1 - 7178.6$ ($R^2=0.99$)(5)

SCM435 :
 $N = -59.29 t_1^2 + 4466.34 t_1 - 29103.6$ ($R^2=1.00$)(6)

SACM645 :
 $N = -58.70 t_1^2 + 4339.58 t_1 - 30107.6$ ($R^2=0.99$)(7)

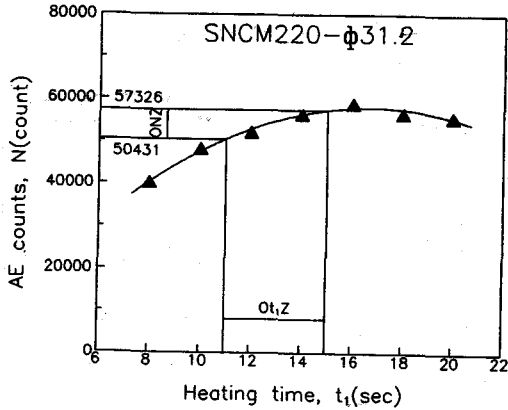


Fig. 7. N vs t_1 of FRW joints of SNCM220.

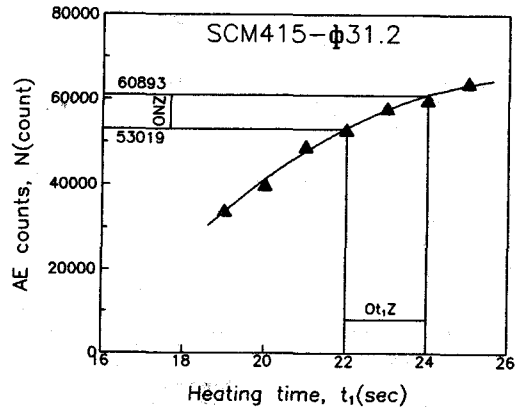


Fig. 10. N vs t_1 of FRW joints of SCM415.

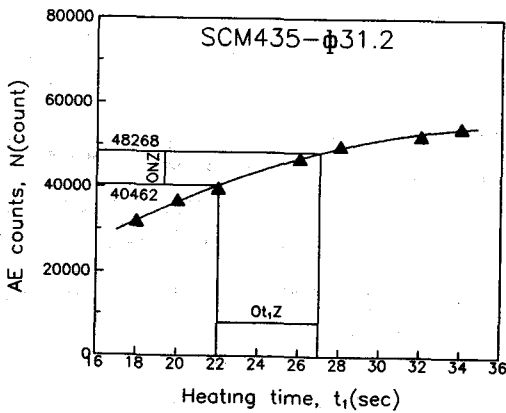


Fig. 8. N vs t_1 of FRW joints of SCM435.

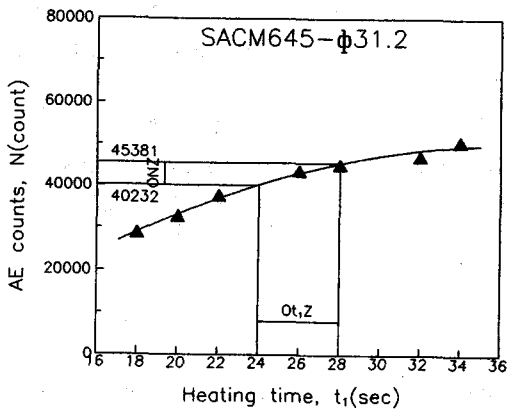


Fig. 9. N vs t_1 of FRW joints of SACM645.

SCM415 :

$$N = -507.14 t_1^2 + 27278.60 t_1 - 301514.0 \quad (R^2 = 0.99) \quad \dots(8)$$

4.2.2. AE 누적총량과 용접부 인장강도의 상관성

Fig. 11~14는 각 재료의 마찰용접 이음부에 대한 인장강도(σ_t , kgf/mm²)와 AE 누적총량(N, counts)의 상관관계를 조사한 결과이다.

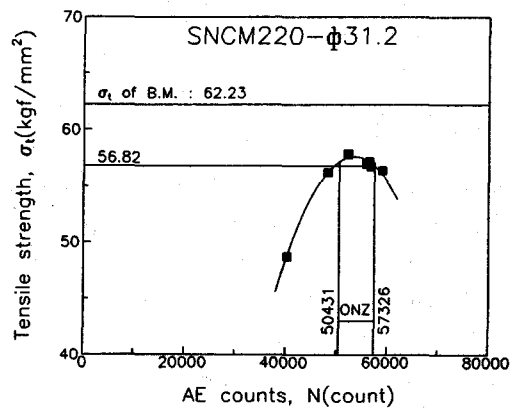


Fig. 11. σ_t Vs N of FRW joints of SNCM220.

이때 σ_t -N의 상관관계식은 최소자승법에 의하여 다음과 같이 계산되었다.

SNCM220 :

$$\sigma_t = -5.085 \times 10^{-8} N^2 + 5.428 \times 10^{-3} N - 87.22 \quad (R^2 = 0.99) \quad \dots(9)$$

SCM435 :

$$\sigma_t = -5.693 \times 10^{-8} N^2 + 5.276 \times 10^{-3} N - 24.65 \quad (R^2 = 0.95) \quad (10)$$

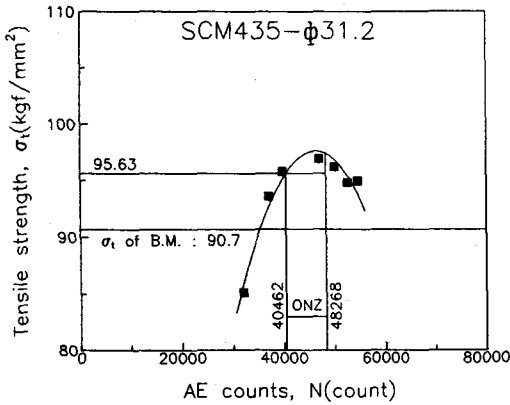


Fig. 12. σ_t vs N of FRW joints of SCM435.

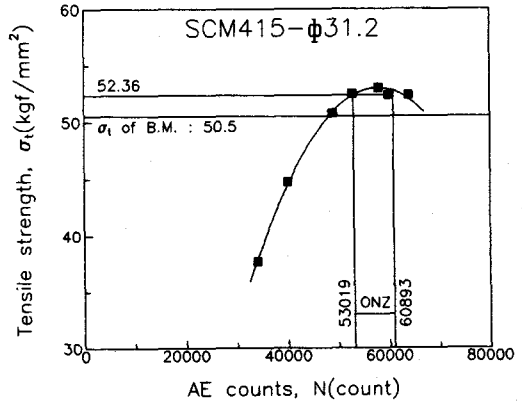


Fig. 14. σ_t vs N of FRW joints of SCM415.

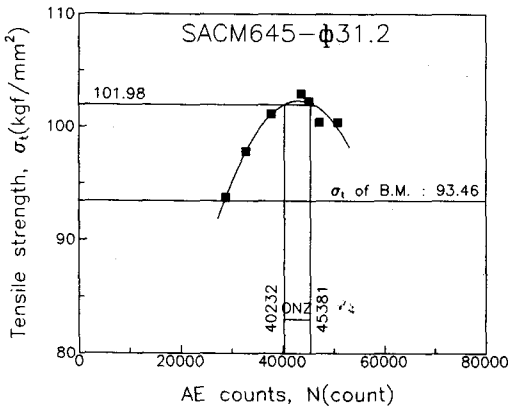


Fig. 13. σ_t vs N of FRW joints of SACM645.

SACM645 :

$$\sigma_t = -4.180 \times 10^{-8} N^2 + 3.603 \times 10^{-3} N + 24.67 \quad (R^2=0.96) \quad (11)$$

SCM415 :

$$\sigma_t = -2.632 \times 10^{-8} N^2 + 3.052 \times 10^{-3} N - 35.47 \quad (R^2=1.00) \quad (12)$$

Fig. 11~14에서 각 재료에 대해, 최적 AE 누적총량 범위의 범위(ONZ)일때 이 범위를 식(9)~(12)에 대입하여 최적 범위에서의 인장강도(σ_t)를 구하고, 이 인장강도(σ_t)를 모재와 비교하여 이음효율을 구해서 이를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Bonding efficiency of FRW for each materials

Materials	SNM220	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)	56.82	95.63	101.98	52.36
Joint efficiency (%)	91.3	105.4	109.1	103.7

SNM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 각 재료에 대해서, 최적 AE 누적총량 범위(ONZ)에서의 이음효율이 100% 이상이 되고, SNM220의 경우는 91.3%가 되어 매우 만족스러운 용접 품질임을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 11~14와 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. 15는 최적조건 내의 SNM220 마찰용접부 인장파단면의 SEM사진이다. 이 경우, 모두 모재부의 인장파단부로서 많은 딩플(dimple)이 보이는 연성파단을 나타내고 있다. 인장파단부가 모두 용접이음면이 아닌 모재부의 파단인 점에서 볼 때, 아주

우수한 용접부가 얻어졌음을 알 수 있었으며, 마찰 용접후 표면경화 처리와 같은 열처리를 통해 모재와 용접이음부의 표면경도 및 인성을 고려하여 적절한 템퍼링 처리를 하여 표면 내마모성 및 인성이 더욱 증가된 용접이음부가 될 것으로 기대된다.

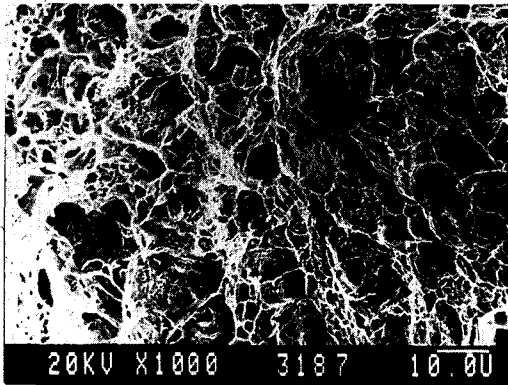


Fig. 15. Fracture surface of SNCM220 FRW joints in optimum zone by SEM($\times 1000$).

또한 Fig. 16은 최적조건 내의 SACM645 마찰용접부 인장파단면의 SEM사진을 보여준다. 사진과 같이 인장파단면에서는 벽개면과 딩플이 동시에 나타나는 점에서 강도와 인성을 동시에 갖춘 이음부가 얻어졌음을 알 수 있다. SACM645는 마찰용접부의 강도가 가장 높았으며, 마찰용접후 템퍼링 처리를 거치면 강도와 인성이 상당히 높을 것으로 기대된다.

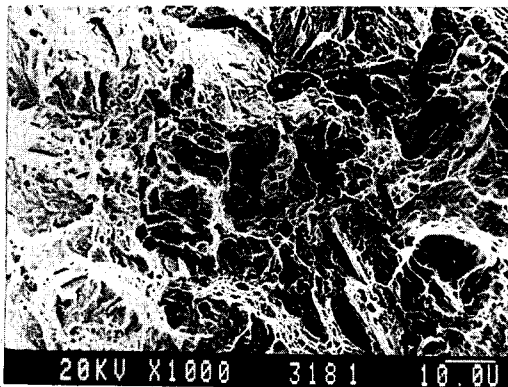


Fig. 16. Fracture surface of SACM645 FRW joints in optimum zone by SEM($\times 1000$).

어느 경우에도나 최적조건(optimum zone)에서의 파단면 SEM사진에서 알 수 있듯이 dimple이 더욱 풍부하여 인성이 우수함을 알 수 있다.

5. 결론

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

1) SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415 강종의 동종재 마찰용접의 최적조건을 실험적으로 구하여 도출하였다.

2) SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 마찰용접부의 인장강도(σ_t)와 AE 누적총량(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.

후기

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

참고 문헌

- 1) V. I. Vill, "Friction Welding of Metals", (1962), pp. 1-114.
- 2) R. K. Miller and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook Vol. 5, Acoustic Emission Testing", 2nd edition, ASNT, (1987), pp. 11-44.
- 3) 오세규, 장지훈, 김현필, 이경우, 박형동, "Cr-Mo 계 봉 대 봉 동종재 마찰용접시의 AE와 용접강도의 상관성에 관한 연구", 대한용접학회 '94 춘

- 계 강연 논문집, (1994), pp. 211-214.
- 4) 오세규, 오정환, 전태언, 김경균, 오명석, "AE에 의한 소형 벨브스플 마찰용접 품질의 실시간 평가", 대한용접학회지, Vol. 12, No. 2, (1994), pp. 97-107.
- 5) 日本摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, (1979), pp. 46, 145-150, 184.
- 6) S. K. Oh, "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transactions of KSME, Vol. 7, No. 2, (In English) (1983), pp. 226-232.
- 7) 오세규, "어코우스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한기계학회지, 제22권, 제3호, (1982), pp. 184-190, 202.
- 8) 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,) pp. 1-314 (In English).
- 9) 천두희, 이병훈, 김대훈, 황선효, "마찰용접기의 개발과 적용", 대한용접학회지, 제5권, (1987), pp. 2-15.

Optimization of Friction Welding of Cr-Mo Steels and Real-Time Nondestructive Evaluation by Acoustic Emission Method

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

* National Fisheries University of Pusan

** Korea Institute Machinery & Metals

Abstract The purposes of this study are 1) to develop optimum FRW technique of SNCM220, SCM435, SACM645 and SCM415 bar-to-bar similar friction welding, 2) to develop in-process real-time weld quality nondestructive evaluation technique by acoustic emission method, and 3) to certify of weld quality by inspection of tensile fracture surface on friction welded joints.

(Received : May 18, 1995)