

유공압 밸브스풀용 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접과 AE 평가

오세규, 장지훈*, 전태인, 박형동, 유인종
(부산수산대) (KIMM) (부산수산대) (부산주공) (동명전문대학)

Bar-to-bar similar friction welding of hydraulic or pneumatic valve spools and AE evaluation

S. K. Oh, J. H. Jang, T. E. Jeon, H. D. Park, I. J. Yoo

Abstract

The hydraulic or pneumatic valve spools become essential as the important components on the production of automatic hydraulic or pneumatic machineries as mechanical industry is developed rapidly. The machining precision is asked for manufacturing the valve spools. They could be unstable in the quality by the conventional arc welding and they have a lot of technical problems in manufacturing because their shapes are generally small. By the precision casting process such as lost wax process, the production cost will be increased. But by the friction welding technique, they will be able to be made without such problems.

Furthermore, there is a few study on friction welding of such hydraulic valve spool steels and in-process real-time weld quality evaluation technique by acoustic emission.

So that, the final purpose of this study is 1) the development of design and manufacturing technique of hydraulic or pneumatic valve spool by optimizing of friction welding, and 2) the development of in-process real-time weld quality evaluation technique by acoustic emission.

1. 서론

유공압 밸브스풀재로 이용되는 Cr-Mo강인 SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415 강봉을 사용하여 $\phi 24$ 봉대봉 동종재 마찰용접 최적 조건을 브레이크형 마찰용접 기계를 사용하여 실험적으로 구하였으며, Cr-Mo강의 봉대봉 동종재 마찰용접의 최적화를 위하여 이음부의 인장강도와 마찰용접 변수와의 정량적 상관식을 실험적으로 도출하였다. 한편 마찰용접 시험시 음향방출 시험을 수행하여, AE 누적총량과 마찰용접 변수, 마찰용접부의 인장강도와 AE 누적총량과의 정량적 상관성을 도출하였다. 그리고 용접재의 형상 및 지름이 마찰용접부의 인장강도와 AE 누적총량에 미치는 영향을 고찰하였으며, 마찰용접부의 인장파단면을 검토함으로써 용접품질을 확인하고, 표면경화 처리나 템퍼링 등을 통해 품질(강도 및 인성)을 보완할 수 있게 하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

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

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 of Cr-Mo Steels

Materials	Tensile strength σ (kgf/cm ²)	Yield strength σ_y (kgf/cm ²)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ψ (%)	Impact value (Charpy) (kgf·m/cm ²)	Hardness H _v	Heat treat
SNCM220	85	-	17	40	-	6	850-900°C Oil-Quenched 150-200°C Tempered Air cooling
SCM435	95	80	15	50	-	8	830-880°C Oil-Quenched 530-630°C Tempered
SACM645	1111	981	186	525	110	351	900°C Oil-Quenched 650°C × 1 hr Tempered
SCM415	85	-	16	40	-	300	850°C Oil-Quenched 200°C Tempered Air cooling

본 연구중 $\phi 24$ 마찰용접 시험에 쓰인 마찰용접기는 Toho TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type) 마찰용접기이고,

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

마찰용접의 최적화 실험을 위해서는 먼저 문헌을 통해

마찰가열압력(P_1), 엽셋압력(P_2)을 결정하여 몇가지 시도 실험을 수행한 후 용접조건을 선정하고, 엽셋시간(t_2)을 선택한 후에 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜서 실험한다. 마찰용접시 회전수는 2,000rpm으로 마찰용접을 수행하였다.

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R15-C 150kHz sensor)를 용접면에서 정지척(chuck) 방향으로 310mm 위치의 정지척 상에 부착하였다. 정지척상에 부착된 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 용접 시작부터 용접 완료까지에 검출된 초기 AE 누적량과 용접후 냉각기간 중에 검출된 후기 AE 누적량의 두가지로 분류할 수 있는데, 본 연구에서는 초기 AE 누적량과 용접부 인장강도의 상관성을 고려하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가열시간과 용접부 인장강도 및 인성과의 상관성

Fig. 1~4는 각각 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 동종재 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간(t_1 , sec)과 인장강도(σ_t , kgf/mm²), 그리고 마찰가열시간(t_1 , sec)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 확인되었다.

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 범위임을 나타내고 있다.

3.2 마찰용접의 최적화

봉 대 봉 동종재 마찰용접의 이음부 강도 분포가 t_1 의 증가와 더불어 각각 100% 이상의 이음효율이거나 peak에 해당되는 점을 고려해 볼 때, 동종재 마찰용접의 최적조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Optimizing condition of FRW for each materials

Materials		SNCM220		SCM435	
Diameter(mm)		# 24	# 31.2	# 24	# 31.2
Welding condition	n(rpm)	2000	1600	2000	1600
	P_1 (kg/mm ²)	7	5	7	4
	P_2 (kg/mm ²)	10	10	10	8
	t_1 (sec)	6~10	11~15	8~12	22~27
	t_2 (sec)	5	4	5	4
Materials		SACM645		SCM415	
Diameter(mm)		# 24	# 31.2	# 24	# 31.2
Welding condition	n(rpm)	2000	1600	2000	1600
	P_1 (kg/mm ²)	7	4	7	4
	P_2 (kg/mm ²)	10	8	10	8
	t_1 (sec)	9~11	24~28	6~9	22~24
	t_2 (sec)	5	4	5	4

3.3 마찰용접시의 AE 누적총량과 용접부 인장강도의 상관성

3.3.1 가열시간과 AE 누적총량의 상관성

Fig. 5~Fig. 8은 각각 SNCM220, SCM435, SACM645 그리고 SCM415의 봉 대 봉 동종재 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간(t_1 , sec)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.

$$\text{SNCM220 } \phi 24 \quad N = -130.16 t_1^2 + 5209.71 t_1 + 27655.3 \quad (R^2 = 1.00) \quad (1)$$

$$\text{SNCM220 } \phi 31.2 \quad N = -234.23 t_1^2 + 7813.69 t_1 - 7178.6 \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

$$\text{SCM435 } \phi 24 \quad N = -322.55 t_1^2 + 8247.05 t_1 + 9274.8 \quad (R^2 = 0.99) \quad (3)$$

$$\text{SCM435 } \phi 31.2 \quad N = -59.29 t_1^2 + 4466.34 t_1 - 29103.6 \quad (R^2 = 1.00) \quad (4)$$

$$\text{SACM645 } \phi 24 \quad N = -225.28 t_1^2 + 7623.08 t_1 - 2927.5 \quad (R^2 = 0.99) \quad (5)$$

$$\text{SACM645 } \phi 31.2 \quad N = -58.70 t_1^2 + 4339.58 t_1 - 30107.6 \quad (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

$$\text{SCM415 } \phi 24 \quad N = -164.84 t_1^2 + 5536.46 t_1 + 27813.7 \quad (R^2 = 0.99) \quad (7)$$

$$\text{SCM415 } \phi 31.2 \quad N = -507.14 t_1^2 + 27278.60 t_1 - 301514.0 \quad (R^2 = 0.99) \quad (8)$$

Fig. 5~Fig. 8에서 각 재료에 대하여, 최적 t_1 의 범위($0t_1Z$)를 식(1)~(8)에 대입하여 구한 최적 AE 누적총량의 범위(ONZ)를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Optimum N zone for each materials

Materials	SNCM220		SCM435	
	# 24	# 31.2	# 24	# 31.2
Diameter(mm)	# 24	# 31.2	# 24	# 31.2
Optimum t_1 Zone(sec)	6~10	11~15	8~12	22~27
Optimum N Zone(counts)	54228 ~66736	50431 ~57326	54681 ~61786	40462 ~48268
Materials	SACM645		SCM415	
	# 24	# 31.2	# 24	# 31.2
Diameter(mm)	# 24	# 31.2	# 24	# 31.2
Optimum t_1 Zone(sec)	9~11	24~28	6~9	22~24
Optimum N Zone(counts)	47433 ~53668	40232 ~45361	55038 ~64290	53019 ~60893

3.3.2 AE 누적총량과 용접부 인장강도의 상관성

Fig. 9~Fig. 12는 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 봉 대 봉 동종재 마찰용접 이음부의 인장강도(σ_t , kgf/mm²)와 AE 누적총량(N, counts)의 상관관계를 조사한 결과이다. 이때 σ_t -N의 상관관계식은 최소자승법에 의하여 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SNCM220 } \phi 24 \quad \sigma_t = -1.767 \times 10^{-8} N^2 + 2.291 \times 10^{-3} N - 5.71 \quad (R^2 = 0.97) \quad (9)$$

$$\text{SNCM220 } \phi 31.2 \quad \sigma_t = -5.085 \times 10^{-8} N^2 + 5.428 \times 10^{-3} N - 87.22 \quad (R^2 = 0.99) \quad (10)$$

$$\text{SCM435 } \phi 24 \quad \sigma_t = -7.829 \times 10^{-8} N^2 + 9.063 \times 10^{-3} N - 167.86 \quad (R^2 = 0.97) \quad (11)$$

SCM435 ϕ 31.2

$$\sigma_t = -5.693 \times 10^{-8} N^2 + 5.276 \times 10^{-3} N - 24.65 \quad (R^2=0.95) \quad (12)$$

SACM645 ϕ 24

$$\sigma_t = -2.907 \times 10^{-8} N^2 + 2.975 \times 10^{-3} N + 18.91 \quad (R^2=1.00) \quad (13)$$

SACM645 ϕ 31.2

$$\sigma_t = -4.180 \times 10^{-8} N^2 + 3.603 \times 10^{-3} N + 24.67 \quad (R^2=0.96) \quad (14)$$

SCM415 ϕ 24

$$\sigma_t = -2.582 \times 10^{-8} N^2 + 3.194 \times 10^{-3} N - 44.34 \quad (R^2=0.96) \quad (15)$$

SCM415 ϕ 31.2

$$\sigma_t = -2.632 \times 10^{-8} N^2 + 3.052 \times 10^{-3} N - 35.47 \quad (R^2=1.00) \quad (16)$$

Fig. 9~Fig. 12에서 각 재료에 대해, 최적 AE 누적총량의 범위(ONZ)일때 이 범위를 식(9)~(16)에 대입하여 최적 범위에서의 인장강도(σ_t)를 구하였다. 그리고 이 인장강도(σ_t)를 모재와 비교하여 이음효율을 구하고 이를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Bonding efficiency of FRW for each materials

Materials	SNM220		SCM435	
	ϕ 24	ϕ 31.2	ϕ 24	ϕ 31.2
σ_t of BM(kg/mm ²)	62.23	62.23	90.70	90.70
σ_t of ONZ(kg/mm ²)	66.54	66.82	93.21	95.63
Joint efficiency(%)	106.93	91.31	102.77	105.44

Materials	SACM645		SCM415	
	ϕ 24	ϕ 31.2	ϕ 24	ϕ 31.2
σ_t of BM(kg/mm ²)	93.46	93.46	50.50	50.50
σ_t of ONZ(kg/mm ²)	94.64	101.98	53.27	52.36
Joint efficiency(%)	101.26	109.12	105.49	103.68

또한 Fig. 9~Fig. 12과 식(9)~(16)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. 이는 Oh의 결과와 매우 일치한다.

4. 결 론

Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출에 의한 용접부 강도 평가에 관한 연구를 수행하기 위하여 봉 대 봉 동종재 마찰용접을 행하고, 마찰용접 최적화를 실험적으로 조사하였으며, 음향방출법에 의해 마찰용접 강도의 최적 범위를 구할 수 있는 AE 누적총량의 범위를 실험적으로 도출하고 정량화하였다.

1. SNM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 ϕ 24 봉 대 봉 동종재 마찰용접의 최적화 기술을 개발하였으며, 이음효율이 100% 이상이 되는 최적 용접조건을 실험적으로 구하여 도출하였다.

2. SNM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 ϕ 24 마찰용접부의 인장강도(σ_t)와 AE 누적총량(N)의 정량적 상관식을 도출하였고 이음효율 100% 이상이 되는 최적 N범위를 규명함으로써 마찰용접 실시간 중에 용접 품질을 비파괴적으로 검사할 수 있게 하였다.

참 고 문 헌

1) V.I.Vill, "Friction Welding of Metals", 1962, p.1-114

2) 오세규, 정순억, "최신 용접공학", 보성각, 1994, p.109-114

3) AWS, "Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding", 7th edition, Vol.1, 1981, p.153-220

4) R.K.Miller and P.McIntire, "Nondestructive Testing Handbook- Vol.5, Acoustic Emission Testing", 2nd edition, ASNT, 1987, p.11-44

5) 정희돈, 권영각, 장래웅, "용접부 검사법으로서의 Acoustic Emission", 대한용접학회지, 11-2, 1993, p.1-12

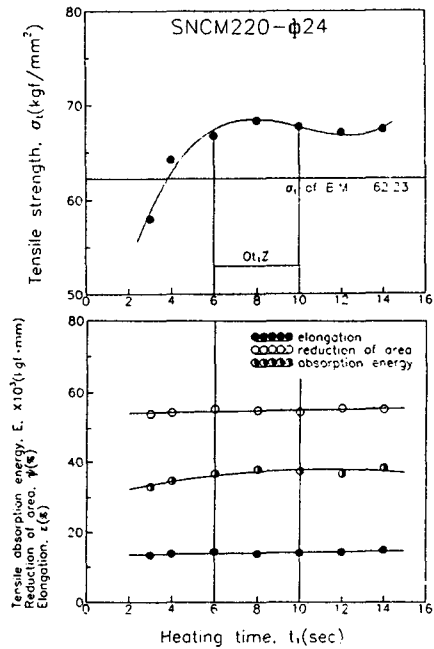


Fig. 1 σ_t Vs t_1 and ϵ , ψ , E Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SNM220 ϕ 24
Welding condition : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=7$, $P_2=10\text{kgf/mm}^2$, $t_2=5\text{sec}$

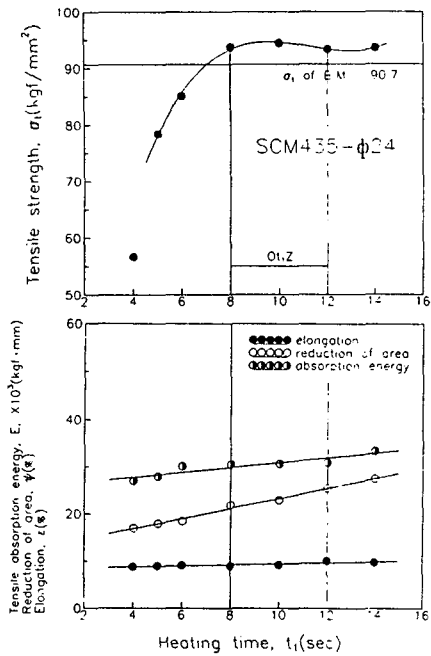


Fig. 2 σ_t Vs t_1 and ϵ , Ψ , E Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SCM435 ϕ 24

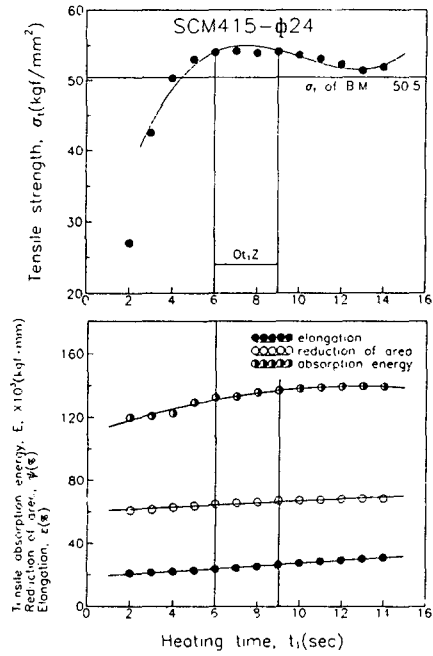


Fig. 4 σ_t Vs t_1 and ϵ , Ψ , E Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SCM415 ϕ 24

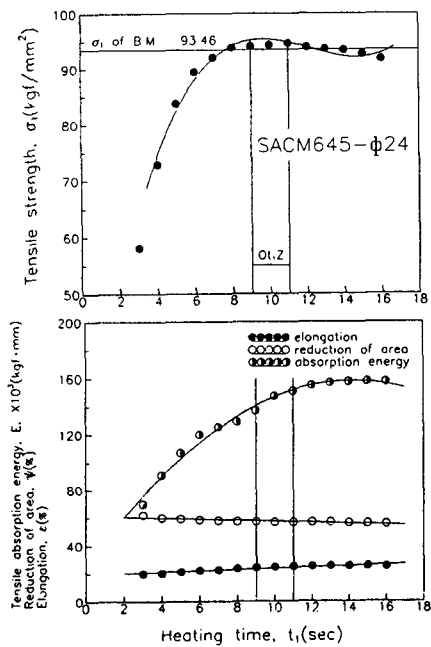


Fig. 3 σ_t Vs t_1 and ϵ , Ψ , E Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SACM645 ϕ 24

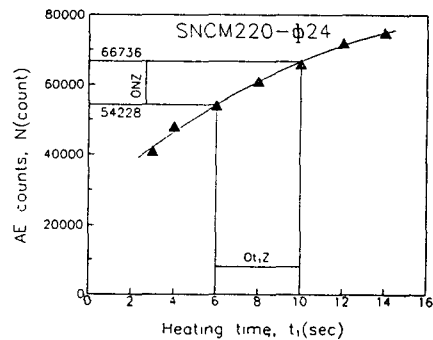


Fig. 5 N Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SNCM220 ϕ 24

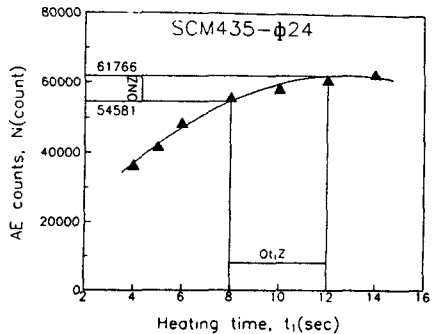


Fig. 6 N Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SCM435 ϕ 24

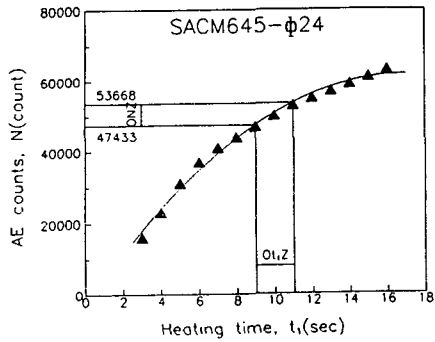


Fig. 7 N Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SACM645 ϕ 24

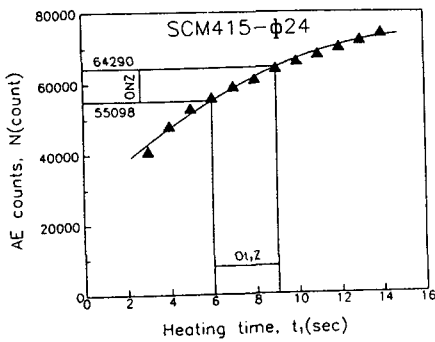


Fig. 8 N Vs t_1 of bar-to-bar similar FRW joints of SCM415 ϕ 24

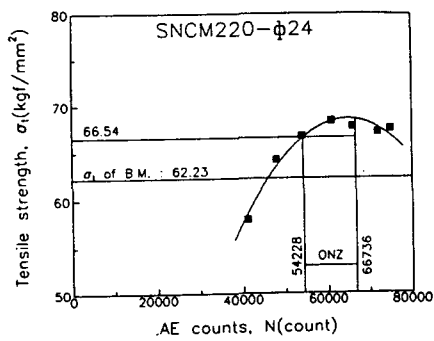


Fig. 9 σ_t Vs N of bar-to-bar similar FRW joints of SNCM220 ϕ 24
Welding condition : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=7$,
 $P_2=10\text{kgf/mm}^2$, $t_2=5\text{sec}$

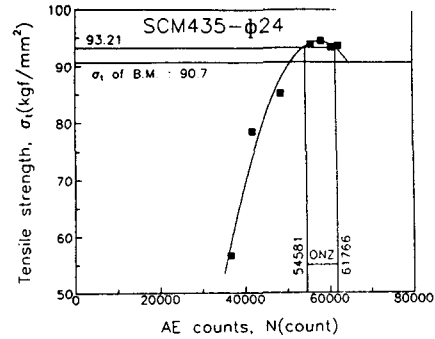


Fig. 10 σ_t Vs N of bar-to-bar similar FRW joints of SCM435 ϕ 24

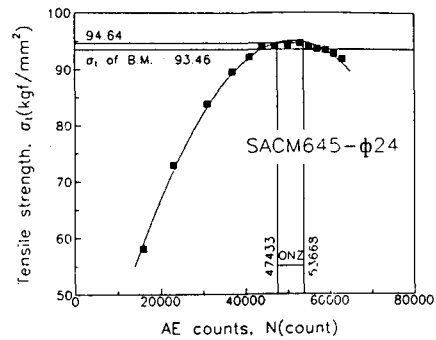


Fig. 11 σ_t Vs N of bar-to-bar similar FRW joints of SACM645 ϕ 24

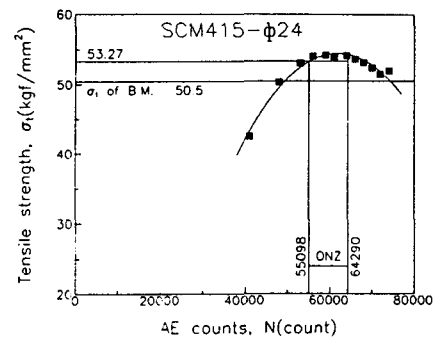


Fig. 12 σ_t Vs N of bar-to-bar similar FRW joints of SCM415 ϕ 24