

유공압 밸브 스푼용 강재의 봉대봉 이종재 마찰 용접 최적화와 용접강도 특성 및 AE 평가⁺

오 세 규* · 유 인 종** · 오 정 환*** · 박 형 동**** · 이 연 탁****
(96년 5월 30일 접수)

Optimization of Bar-to-Bar Dissimilar Friction Welding of Hydraulic Valve Spool Steel and the Weld Strength Properties and Its AE Evaluation

Sae-Kyoo Oh* · In-Jong Yoo** · Jung-Hwan Oh*** · Hyung-Dong Park**** · Yeon-Tack Lee****

Key Words : Fatigue strength (피로강도), Tensile strength (인장강도), Friction Welding (마찰용접), Nominal stress ratio (공칭응력비), AE evaluation (음향방출평가), PWHT (Post weld heat treatment, 용접후 열처리)

Abstract

Up to now, most of studies on mechanical properties in friction welded components are about tensile and bending strength. However the fatigue studies on the friction-welded components subjected to repeated stress are not available. The purposes of this study are the development of fundamental design and manufacturing technique of hydraulic valve spool by optimizing of friction welding, and the development of in-process real-time weld quality evaluation technique by acoustic emission for the bar-to-bar dissimilar friction welding of hydraulic valve spool steels.

1. 서 론

종래의 마찰용접에 의한 부품의 기계적 성질의 연구는 인성과 굽힘강도가 대부분을 차지했으며, 반복 응력이 작용하는 경우에 대해서는 자세한 연

구가 되어있지 않다. 그러나 반복 응력을 받는 마찰용접부품은 인성과 굽힘강도만으로는 성능 평가가 불충분하므로, 피로현상에 대하여 상세한 연구가 되어야만 용접부의 복합적인 응력에 대비할 수 있다.¹⁻⁶⁾

+ 이 연구는 1993년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 협력연구과제(과제번호: 93-10-00-05-3)의 결과중 일부임
* 부경대학교 공과대학 기계공학과
** 동명전문대학 기계공학과
*** 부경대학교 해양산업개발연구소
**** 부경대학교 대학원

본 연구는 반복하중을 받는 마찰용접부품의 피로수명과 이음효율에 미치는 용접조건에 의한 영향과 용접중에 발생하는 총 AE(acoustic emission)량과의 상관성을 실험적으로 그리고 정량적으로 규명코저하였다. 유공압 밸브 스펴재로 쓰이는 표면경화용 칩탄강 및 질화강인 SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415 강봉을 실험재료로 이용하여, ϕ 24 시편을 각각 봉대봉의 이종재(SCM415 \times SNCM220, SCM415 \times SACM645, SCM435 \times SNCM220, SCM435 \times SACM645)를 마찰용접하였다. 이때의 최적 마찰용접조건을 인장강도를 고려한 이음효율 100%이상되는 범위에서 결정하였으며, 마찰용접중의 음향방출시험 및 용접부의 편진 인장 피로시험을 수행하였다. 또한 용접변수와 용접품질과의 상관성, 용접 변수와 AE 누적총량과의 상관성을 정량적으로 해석하였다. 그리고 용접부의 경도분포, 미시조직, 파단면의 조사 및 표면경화 처리의 영향 등을 조사하고 용접품질의 실시간 평가·연구를 가능하게 하므로써, 본 연구결과가 다중 유압밸브 스펴의 봉대봉 이종재 마찰용접설계에 유용한 자료로 될 것이다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

본 연구에 사용된 재료는 표면 경화강인 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415이며, Table 1과 Table 2는 그의 화학조성과 기계적 성질 및 열처리 조건을 나타낸다.

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

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
SNCM220	0.23	0.26	0.77	0.01	0.015	0.49	0.49	0.17	0.04
SCM435	0.38	0.26	0.76	0.01	0.015	0.17	0.97	0.18	-
SACM645	0.42	0.29	0.39	0.012	0.012	0.08	1.55	0.22	1.03
SCM415	0.17	0.30	0.82	0.013	0.02	0.03	1.03	0.2	-

Table 2 Mechanical properties of Cr-Mo Steels

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area Ψ (%)	Hardness Hv	PWHT
SNCM220	622	17	40	225~255	①, ③
SCM 435	907	15	50	294~312	①, ③
SACM645	935	18.6	52.5	290~310	②, ③
SCM 415	505	16	40	293~314	①, ③

PWHT : Post weld heat treatment for case hardening
 ① : 900~920°C \times 250 min and 850°C \times 20min carburizing, 60°C oil cooling

② : 570°C \times 12 hr nitriding, air cooling

③ : 180°C \times 120 min tempering, air cooling

2.2 실험방법

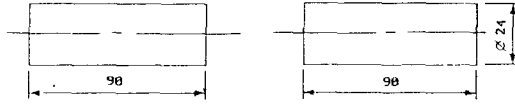
2.2.1 봉대봉 이종재의 마찰용접과 AE시험

Fig. 1은 본 연구에서 마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 마찰용접에 사용한 시험편의 형상과 이음부의 피로강도 시험에 사용한 시험편의 형상 및 치수를 각각 표시하고 있다. Fig. 1에서 (a)는 ϕ 24 봉대봉 이종재 마찰용접을 위한 시험편의 형상 치수로서 마찰용접 및 AE 시험편이고, (b)는 인장강도 시험편, (c)는 피로강도 시험편을 나타낸다. AE시험기는 AE 시험장치 (PAC, LOCAN, 2 channel)이고, 마찰용접재에 대한 편진 인장피로시험에 사용된 기기는 만능 동적 시험기 (Instron dynamic UTM)이다.

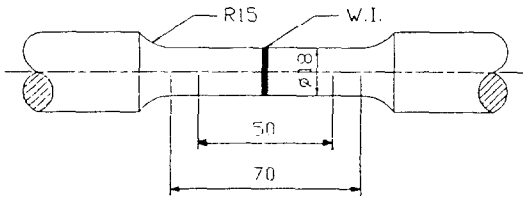
봉대봉 이종재의 마찰용접의 최적화 실험조건을 구하기 위해서는 먼저 문헌을 통해 마찰가열압력 (P_1), 업셋압력(P_2)을 결정하여 몇가지 예비 실험을 수행한 후 용접조건을 선정하고, 업셋시간(t_2)을 선택한 후에 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜서 실험한다. 마찰용접시 회전수는 2,000rpm으로 수행하였다.

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R50-C 150kHz 센서)를 용접면에서 정지척 방향으로 360mm 위치에 부착하였다. 정지척상에 부착한 변환기로부터 전달된 AE신호를 AE 시험장치로 받아 기록하고, 그 기록된 결과를 AE 누적총량의 형태로 표시하였다. 주파수 범

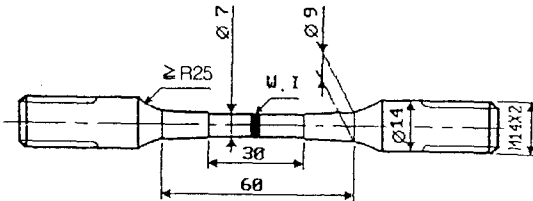
위의 넓은 스펙트럼을 커버하는 광범위한 발원(AE source)으로부터 AE 신호가 발생하기 때문에 고감도 변환기용 예비증폭기(pre-amplifier)와 함께 사용하였다. 한편, 시험시 문턱값(threshold)을 조절하여 외부소음을 제거하였다.



(a) Friction welding and AE test specimens of $\phi 24$ bar-to-bar



(b) Tension test specimen



(c) Fatigue test specimens

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

W.I. : weld interface

2.2.2 마찰 용접부의 편진 인장 피로 시험

Fig. 2에서와 같이 저주기 편진인장 피로시험(fatigue test)에서 5×10^4 사이클을 기준하여 각각의 재료에 따른 시간 강도 σ_f 를 구하고, 각 재료의 인장강도 σ_t 에 대한 응력비 σ_f/σ_t 를 Table 3에서와 같이 모재와 각 이종재 용접재에 대해 구한 것이다. 이 응력비에 따라 각 용접재에 대한 편진인장 피로시험을 수행하였다.

Table 3 Nominal stress ratio for each base metal and dissimilar welded joint

Base Metals	SCM415	SCM435	SNCM220	SACM645
Nominal stress ratio (σ_f/σ_t) (%)	89	72	77	74
Dissimilar welded joints (%)	SCM415×SNCM220	SCM415×SACM645	SCM435×SNCM220	SCM435×SACM645
Nominal stress ratio (σ_f/σ_t) (%)	89	89	77	74

σ_f : fatigue stress at 5×10^4 cycles, σ_t : tensile stress

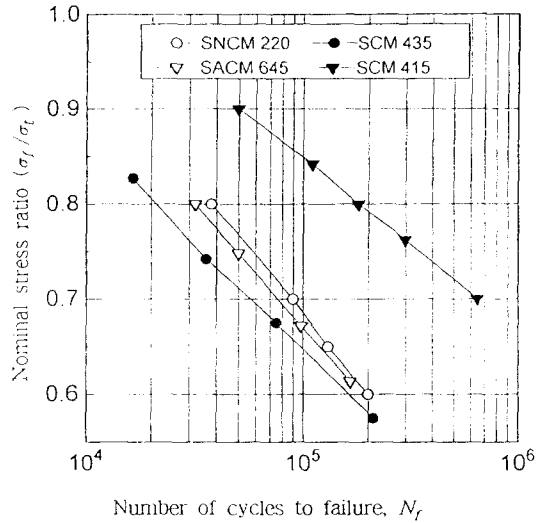


Fig. 2 Nominal stress ratio σ_f/σ_t (fatigue stress at 5×10^4 cycles/tensile stress) vs. number of cycles to failure N_f for fatigue test

3 실험결과 및 고찰

3.1 봉대봉 이종재 마찰용접의 최적화

3.1.1 용접 변수와 용접 품질(인장강도, 피로수명)의 상관성

Fig. 3~Fig. 6은 용접재 SCM415 × SNCM220, SCM415 × SACM645, SCM435 × SNCM220, SCM435 × SACM645의 $\phi 24$ 봉대봉 이종재 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간 t_1 (sec)과 인

장강도 σ_t (MPa), 그리고 마찰가열시간 t_1 (sec)과 피로수명 N_f 와의 관계를 보여준다. 여기서 t_1 에 대한 σ_t 의 관계는 3차 함수적 정량관계가 있음이 실험적으로 확인되었으며, 이는 Oh의 결과⁷⁾와 일치한다. 그리고, t_1 에 대한 N_f 의 관계는 N_f 를 y축 대수 눈금으로 한 경우 $\log N_f$ 와 t_1 의 관계로서 3차 함수적 정량관계가 성립함이 확인되었다.

Table 4는 이종재 마찰 용접재의 O_tZ (optimum t_1 zone)에서의 이음부 인장강도의 모재인장강도에 대한 비율인 이음효율과 모재 피로수명 기준 5×10^4 에 대한 용접재의 피로수명 효율을 나타내며, 모두 100% 이상이거나 100%에 가까운 양호한 용접품질을 갖고 있음이 확인되었다. $\phi 24$ 의 SCM435 \times SACM645 용접재의 피로수명 효율이 76%로 낮았다.

Table 4 Joint efficiency and fatigue life efficiency of each dissimilar FRW joints

Dissimilar FRW joint	SCM415 \times SNCM220	SCM415 \times SACM645	SCM435 \times SNCM220	SCM435 \times SACM645
σ_t of B.M (MPa)	505	505	622	907
Av. σ_t at O_tZ (MPa)	632	563	627	935
Joint efficiency(%)	125	112	100.8	103
N_f of B.M (cycle)	5×10^4	5×10^4	5×10^4	5×10^4
Av. N_f at O_tZ (cycle)	50353	44336	68436	38324
Fatigue life efficiency (%)	100.7	88.6	136	76

Note : N_f = number of cycles to failure
B.M = base metal
Av. = average

3.1.2 봉대봉 이종재 마찰용접의 최적화

Fig. 3~Fig. 6에서 봉대봉 이종재 마찰용접의 이음부 강도 분포가 t_1 의 증가와 더불어 각각 100% 이상의 이음효율이거나 peak에 해당되는 점을 고려해 볼 때, $\phi 24$ 봉대봉 이종재 마찰용접의 최적조건은 Table 5와 같다.

Table 5 Optimum welding condition of FRW for each dissimilar FRW joint

Dissimilar FRW joints	SCM415 \times SNCM220	SCM415 \times SACM645	SCM435 \times SNCM220	SCM435 \times SACM645
n (rpm)	2000	2000	2000	2000
P_1 (MPa)	70	70	70	70
P_2 (MPa)	100	100	100	100
t_1 (sec)	4~7	3~5	5~8	3~6
t_2 (sec)	5	5	5	5

Fig. 3 ~ Fig. 6을 각각 비교해 보면, 다른 재료의 봉대봉 이종재 마찰용접의 경우와 같이 지름이 증가하면 입열량의 필요성 때문에 가열압력(P_1)과 엽셋압력(P_2)을 높이거나 마찰가열시간(t_1)을 길게할 필요가 있으며, 어느 경우에서도 이음효율 100% 이상을 얻을 수 있었다.

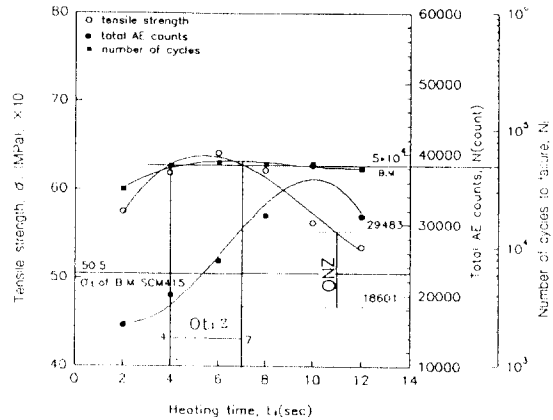


Fig. 3 σ_t vs. t_1 , N_f vs. t_1 and N vs. t_1 of bar-to-bar dissimilar FRW joints SCM415 \times SNCM220 ($\phi 24$) ($\sigma_t / \sigma_{t1} = 89\%$)
Welding condition : n=2,000 rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

σ_t 에 의한 t_1 의 최적범위인 O_tZ (optimum t_1 zone)에 속한 용접부 인장강도의 모재에 대한 강도 비를 다른 자료⁴⁾와 비교해 볼때 본 실험의 결과도

우수하다고 할 수 있고 위의 용접조건도 알맞다고 할 수 있다.

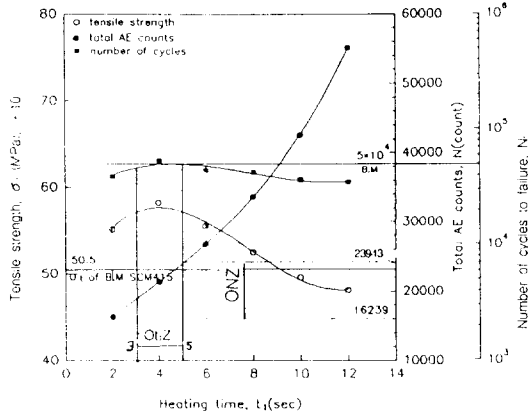


Fig. 4 σ_t vs. t_1 , N_f vs. t_1 and N vs. t_1 of bar-to-bar dissimilar FRW joints SCM415 \times SACM645 ($\phi 24$) ($\sigma_f/\sigma_t = 89\%$)
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$,
 $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

SCM435 \times SACM645 $\phi 24$:

$$N = 14.39t_1^3 - 1131.90t_1^2 + 22398.52t_1 + 2168.33 \quad (4)$$

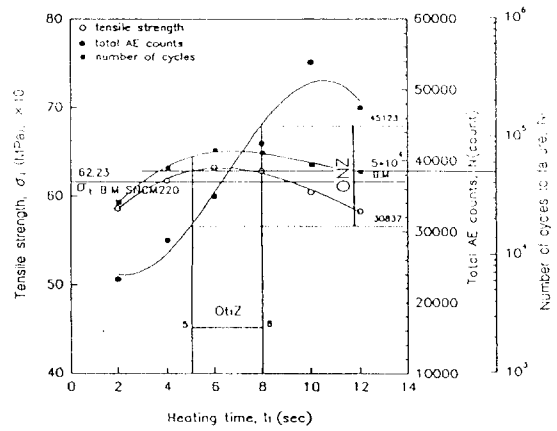


Fig. 5 σ_t vs. t_1 , N_f vs. t_1 and N vs. t_1 of bar-to-bar dissimilar FRW joints SCM435 \times SACM645 ($\phi 24$) ($\sigma_f/\sigma_t = 77\%$)
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$,
 $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

3.2 AE 총량과 용접품질(인장강도, 피로수명)과의 상관성

3.2.1 용접 변수와 AE 누적총량과의 상관성에 관한 실험적, 정량적 해석

Fig. 3~Fig. 6은 각각 SCM415 \times SNCM220, SCM415 \times SACM645, SCM435 \times SNCM220, SCM435 \times SACM645의 $\phi 24$ 봉 대 봉 이종재 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간 t_1 (sec)에 따른 AE 총량(N , counts)의 변화를 실험한 결과이다.

모든 경우에 있어서, N 은 t_1 에 대해 3차 곡선적인 관계를 나타내고 있으며, 이때 $N-t_1$ 의 상관관계 실험식은 최소자승법에 의해서 다음과 같이 계산되었다.

SCM415 \times SNCM220 $\phi 24$:

$$N = -88.98t_1^3 + 1651.68t_1^2 - 6266.04t_1 + 22933.33 \quad (1)$$

SCM415 \times SACM645 $\phi 24$:

$$N = 20.66t_1^3 - 205.00t_1^2 + 3197.25t_1 + 10499.66 \quad (2)$$

SCM435 \times SNCM220 $\phi 24$:

$$N = -97.529t_1^3 + 1875.62t_1^2 - 7039.93t_1 + 31338 \quad (3)$$

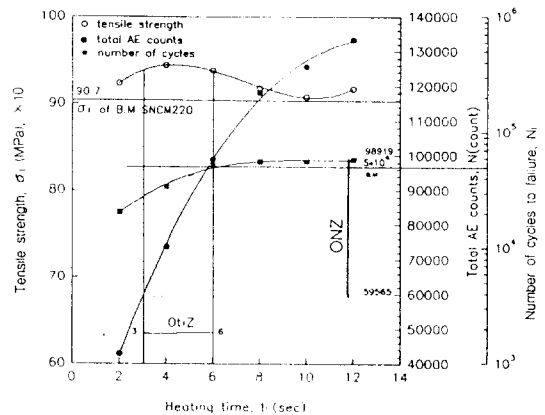


Fig. 6 σ_t vs. t_1 , N_f vs. t_1 and N vs. t_1 of bar-to-bar dissimilar FRW joints SCM435 \times SACM645 ($\phi 24$) ($\sigma_f/\sigma_t = 74\%$)
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$,
 $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

Fig. 3~Fig. 6에서 각 용접재에 대한, 최적 t_1 의 범위($O_{t_1}Z$)를 식(1)~식(4)에 대입하여 구한 최적

AE총량의 범위(ONZ)를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Optimum N zone for each materials

Materials	SCM415× SNCM220	SCM415× SACM645	SCM435× SNCM220	SCM435× SACM645
Optimum t_1 Zone(sec)	4~7	3~5	5~8	3~6
Optimum N Zone(counts)	18601 ~29483	16239 ~23943	30837 ~45123	59565 ~98919

3.2.2 AE 총량과 용접품질(인장강도, 피로수명)과의 상관성 도출

Fig. 7~Fig. 10는 용접재 SCM415 × SNCM220, SCM415 × SACM645, SCM435 × SNCM220, SCM 435 × SACM645의 $\phi 24$ 봉대봉 이중재 마찰용접 이음부의 인장강도(σ_t , MPa)와 AE 총량(N, counts) 및 인장강도(σ_t)와 피로수명(N_f , cycle)과의 상관관계를 조사한 결과이다.

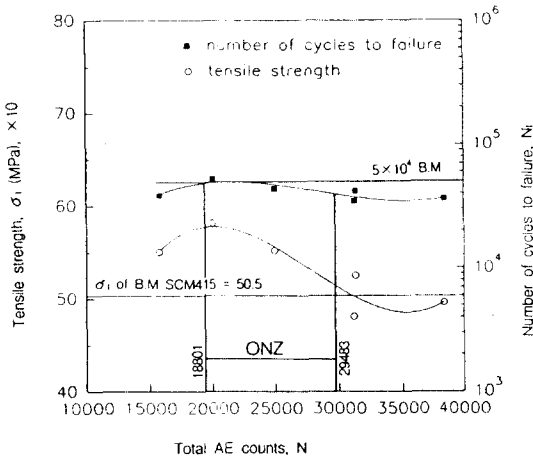


Fig. 7 σ_t vs. AE and N_f vs. AE for $\phi 24$ bar-to-bar friction welding of SCM415 × SNCM220

Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

Fig. 7~Fig. 10에서 각 용접재에 대해, 앞에서 구한 $O_{t_1}Z$ (Optimum t_1 zone)에 대한 최적 AE 총량의 범위(ONZ)일때 최적 범위에서의 인장강도(σ_t) 및 피로수명(N_f)을 구하였다. 그리고 이 인장

강도(σ_t)를 모재와 비교하여 이음효율을 구하고 또한 피로수명효율을 구하여 이를 Table 7에 나타내었다.

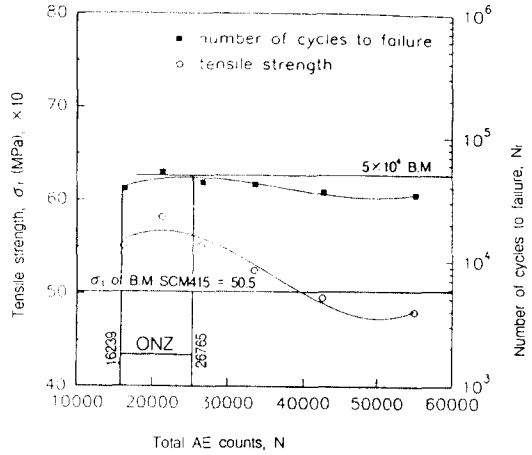


Fig. 8 σ_t vs. AE and N_f vs. AE for $\phi 24$ bar-to-bar friction welding of SCM415 × SACM645

Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

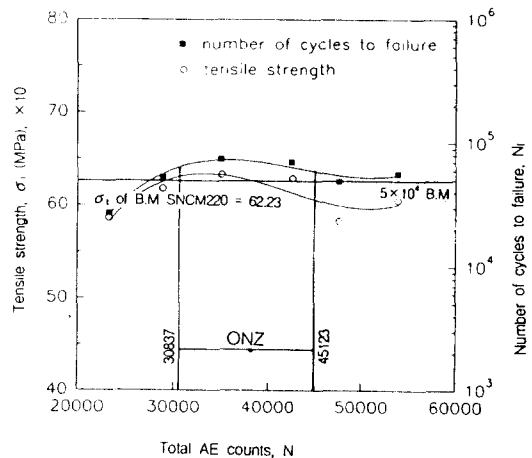


Fig. 9 σ_t vs. AE and N_f vs. AE for $\phi 24$ bar-to-bar friction welding of SCM435 × SNCM220

Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

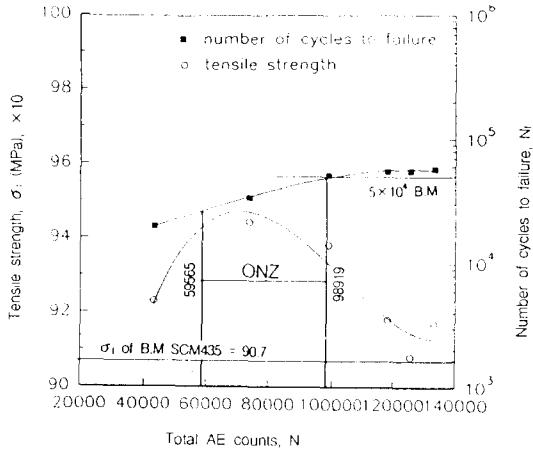


Fig. 10 σ_t vs. AE and N_f vs. AE for $\phi 24$ bar-to-bar friction welding of SCM435 \times SACM645
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

결론적으로 Fig. 7~Fig. 10과 Table 7에서 용접 시작에서 종료까지 발생한 AE총량의 측정만으로 이음효율 100%, 피로수명효율 100%내외의 우수한 용접 품질(σ_t , N_f)을 실시간에 평가 예측할수 있음이 확인되었다.

Table 7 Bonding efficiency and fatigue life efficiency at ONZ of each dissimilar FRW joint

Dissimilar FRW joint	SCM415 \times SNCM220	SCM415 \times SACM645	SCM435 \times SNCM220	SCM435 \times SACM645
σ_t of B.M (MPa)	505	505	622	907
σ_t at ONZ (MPa)	632	563	627	935
Joint efficiency(%)	125	112	100.8	103
N_f of B.M (cycle)	5×10^1	5×10^1	5×10^1	5×10^1
N_f at ONZ (cycle)	50353	44336	68436	38324
Fatigue life efficiency (%)	100.7	88.6	136	76

3.3 재질(탄소당량)이 용접 품질에 미치는 영향

본 연구에서 사용된 재료의 지름은 $\phi 24$ mm로서

재질을 나타내는 탄소당량 Ceq(carbon equivalent)이 피로수명 N_f 와 AE 총량 N에 미치는 영향을 고찰하였다. 탄소당량과 지름크기가 증가하면 용접계면이 단조온도에 달하도록 일열량이 증가되어야하므로 용접조건인 회전수, 압력, 가열시간 또는 가열열셋량 등의 값을 증가시켜야 하는데 이때 용접 후의 강도나 용접중 AE량에도 이러한 지름 및 재료의 형상이 큰 영향을 미칠것임으로 이에 관한 조사를 하고져 한다.

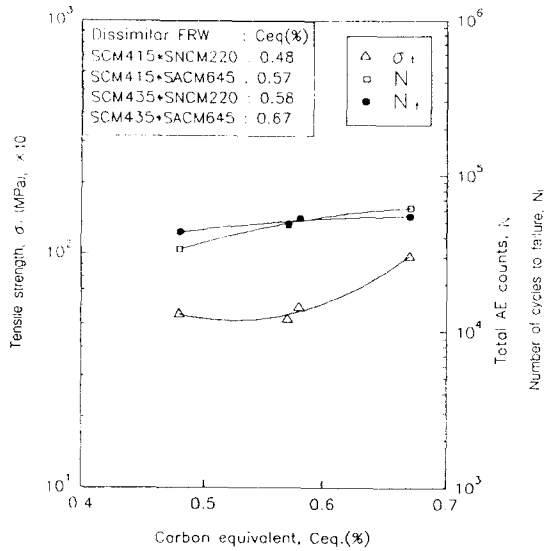


Fig. 11 σ_t vs. Ceq, N vs. Ceq and N_f vs. Ceq of dissimilar FRW joints of $\phi 24$ in diameter
Welding cond.: $n=2000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec

Fig. 11는 σ_t , N 및 N_f 를 대수축으로 취하여 σ_t (MPa)와 Ceq(%), N(count)과 Ceq(%), N_f (cycle)와 Ceq(%의 상관관계를 그래프로 나타낸 것이다. 각 이종재 마찰용접재의 Ceq를 각각 아래식^{8,9)}에 의해 구하여 그 평균을 취하였다. 그림에서 알 수 있듯이 모두 탄소당량 Ceq가 증가함에 따라 σ_t , N, N_f 등도 완만하게 증가하는 추세이다. 이때 실험데이터의 커브 피팅(curve fitting)은 95%신뢰성이 확인되었고⁷⁾, 실험결과와 반복성(재현성)도 확인할 수 있었다.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Cu}{40} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (5)$$

3.4 경도분포, 미시조직 및 피로 파단면의 조사

유공압 밸브 스프링재인 표면경화용 강재를 표면 경도 H_{RC} 58~62, 경화깊이 0.2~0.4mm(연삭후)되게 침탄강 및 질화강에 대해 각각 침탄처리한 후 뜨임처리를 하였다.

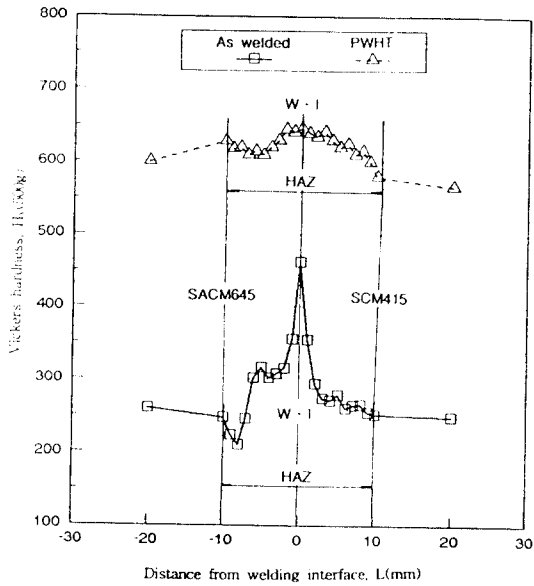
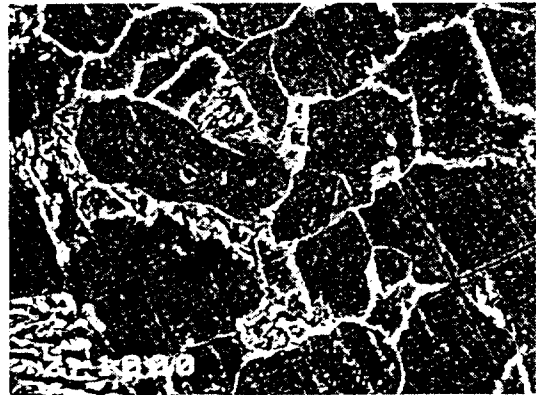


Fig. 12 Hardness distribution near the weld interface of dissimilar friction welded joints of SCM415×SNCM220

Fig. 12는 마찰용접직후(as welded)와 표면경화처리(PWHT)를 했을 때의 이중재 마찰용접재(최적조건하의 마찰 용접재)의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ), 모재부(B.M)의 경도분포를 1mm간격으로 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 용접직후의 경도는 계면(W.I) 근처에 봉우리(peak)가 있고 HAZ와 B.M경계부에 골(valley)이 있어 경도의 불균일성을 나타내고, 용접후 열처리(PWHT)와 뜨임처리의 경우에는 WI부근에 다소 낮아진 경도의 peak가 있으나 HAZ로 가면서 완만하게 경도가 낮아져 안정성있는 경도 분포를 나타

내며, 동시에 밸브스프링의 경도치인 Hv 650~740 (H_{RC} 58~62) 에 모두 만족하게 도달하였다.

Fig. 13은 최적조건하에서의 용접직후 (as welded) 모재부(B.M) 및 열영향부(HAZ) 에 대한 미시조직 사진이다. (a)는 페라이트와 오스테나이트 조직으로서 마찰용접열에 전혀 영향을 받지 않은 모재부 미시조직이다. 그런데 (b)는 마찰용접에 의한 열영향으로 유담금질과 같은 영향을 받아 열영향부는 페라이트 + 베이나이트 + 마르텐사이트의 조직으로 되어 있어서 경화의 영향을 받았음이 확인되었다. 그러나, 최적조건하에서 용접된 용접재이므로 용접결함은 미시조직적으로도 전혀 발견되지 않았다.



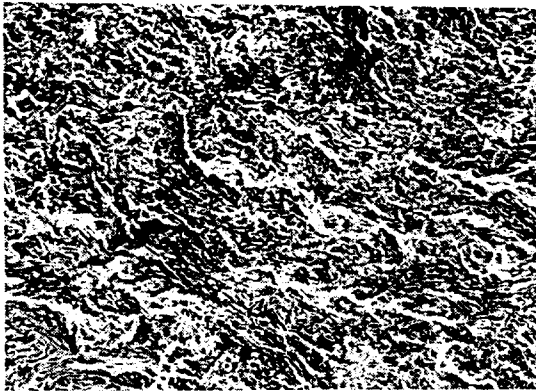
(a) Base metal (SCM435)



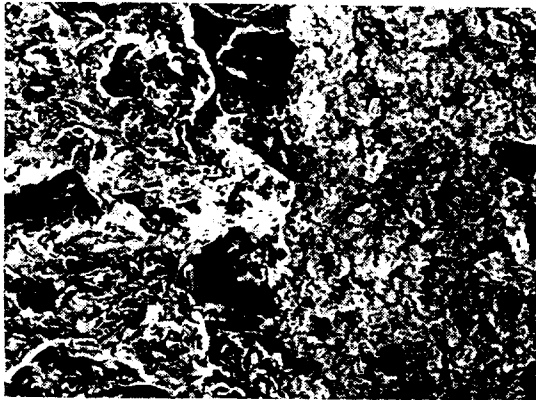
(b) HAZ (SCM435)

Fig. 13 Micro structure of dissimilar FRW joint (as welded) SCM435×SACM645 (×1000)

Fig. 14는 최적조건하에서 마찰용접된 것으로서 SCM435×SACM645(φ24) 이종재 마찰용접재(열처리 전의 상태)의 편진피로파단된 파단면을 (a)는 200배, (b)는 500배 확대 촬영한 SEM 파단면 사진이다. 그림 (a)는 SCM435 모재의 경우로서 최초 연성파단을 보이는 비치마크(beach mark, striation)를 나타내고 있고 피로파단 방향으로 물결모양을 보이며 피로파단이 진전됨을 보이고 있



(a) Base metal (SCM435)



(b) HAZ (SCM435)

Fig. 14 Fractographs of tension-tension fatigue fracture of dissimilar friction welded joint SCM435×SACM645 by SEM ($\sigma/\sigma_f=90\%$, 3Hz, $N_f=40200$ cycles) ($\times 10,000$)
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_1=5$ sec, $t_2=5$ sec

다. 그림 (b)는 용접재의 SCM435측 HAZ 파단면으로서 연성파단면과 벽개 파단면의 경계부분의 SEM 파단면을 나타내며, 연성파단 부분(왼쪽)은 미세한 덩플이 많이 보이며, 벽개파단을 일으킨(오른쪽) 부분은 소수의 덩플이 나타나 있다.

4. 결 론

표면경화용 강재의 이종재 봉대봉(φ24) 마찰용접(SCM415 × SNCM220, SCM415 × SACM645, SCM435 × SNCM220, SCM 435 × SACM645)에 대한 최적화와 AE 평가 및 탄소당량에 대한 용접부의 피로수명, 강도 및 AE와의 상관관계를 조사하는 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 마찰용접품질(이음부의 인장강도, 피로수명)과 마찰가열시간과의 상관실험식을 정량적으로 도출하여 이음효율과 피로수명효율이 100%내외가 되는 최적가열시간 범위(ot_{12})를 구하였고, 본 이종재 봉대봉 마찰용접의 최적화 기술을 개발하였다.
- 2) 이종재 마찰용접재의 탄소당량 증가에 따른 이음부 강도, AE총량 및 피로수명 증감을 정량적으로 규명하여 탄소당량에 의한 재 특성 예측이 가능하게 하였다.
- 3) 용접후 표면경화와 뜨임처리의 열처리에 의하여 용접부의 경도 불균일 특성을 균일안정 분포 양상으로 밸브스플 표면 경도치로 상승시킬 수 있었다. 최적 조건하에서 마찰용접된 용접부의 조직과 용접부 피로파단부 조사에서 용접결함은 발견되지 않았다.

5. 참고문헌

- 1) 오세규 “최신 용접공학”, 보성각, pp.109-114, 1994
- 2) R.K.Miller and P.McIntire, “Nondestructive Testing Handbook- Vol.5, Acoustic Emission Testing”, 2nd edition, ASNT, pp.11-44, 1987
- 3) 오세규, 장지훈, 배명주, 전태연, “밸브스플재 봉대봉 마찰용접에서 가열시간이 이음강도

- 와 AE 특성에 미치는 영향”, 한국해양공학회 '94 추계 강연 논문집, pp.71-75, 1994.
- 4) 日本摩擦壓接研究會, “摩擦壓接”, コロナ社, pp.46, 145-150, 184, 1979
- 5) S.K. Oh, K.K. Wang, G.R. Reif, “In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques,” Proc. of 63rd Annual American Welding Society Convention in Kansas, USA, Tech. Sess.5, Apr. Welding Journal of American Welding Society, Welding Research Supplement, Vol.61, No.9, pp.312-316, 1982
- 6) 오세규, “어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)”, 대한기계학회지, 제22권, 제3호, pp.184-190, 202, 1982
- 7) 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, Keio University, Japan, 1982
- 8) 나석주, 김성주, “강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향-동종강에 대하여”, 대한용접학회지, 제3권, 제2호, pp.1-9, 1985
- 9) 나석주, 양영수, “강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향-탄소강과 고속도강에 대하여”, 대한용접학회지, 제4권, 제3호, pp.32-42, 1986