

유공압밸브스폴용 강재의 봉 대 봉 동종대 마찰용접의 최적화와 용접강도특성 및 AE품질 평가⁺

오 세 규* · 이 경 우** · 전 태 언*** · 오 명 석**** · 이 원 석*****
(96년 1월 22일 접수)

Optimization of Bar-to-Bar Similar Friction Welding of Hydraulic Valve Spool Steels and the Weld Strength Properties and its AE Evaluation

Sea-Kyoo Oh* · Kyung-Woo Lee** · Tae-Eun Jeon*** · Myeong-Suk Oh**** · Won-Suk Lee*****

Key Words : Acoustic emission(AE, 음향방출), Friction welding(FRW, 마찰용접), Flexure strength(항절강도), Welding condition(용접조건), Weld interface(WI, 용접경계면), Base metal(BM, 모재부), Heat affected zone(HAZ, 열영향부)

Abstract

In-process quality control and high reliability of the weld are the major concerns in applying friction welding to the economical and qualified mass-production. Experimental examinations and quantitative analysis were performed for the optimization of similar friction welding of hydraulic valve spool steels(SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415, ϕ 24). The quantitative correlations were found between the initial cumulative counts of acoustic emission(AE) occurring during plastic deformation periods of the welding and the fatigue life as well as weld strength and welding conditions. A real-time evaluation system was developed for the friction weld quality by AE.

1. 서 론

마찰용접효율을 평가할 때 인장강도와 굽힘시험

에 의한 연구가 대부분을 차지하고 있고 인장시험 결과에 근거한 마찰용접부의 성능 평가는 충분치 못하고 경우에 따라서는 위험할 수도 있다고 말하

+ 이 연구는 1993년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 협력연구과제(KOSEF 과제번호 : 93-10-00-05-3)의 결과 중 일부이며, 관계제위에 감사드립니다.

* 부산수산대학교 공과대학 기계공학과

** 부산공업대학교 기계설계학과

*** 부산수산대학교 공과대학

**** 부산공업대학교 금형공학과

***** 부산수산대학교 대학원 기계공학과

고 있다. 실용상 중요하게 취급되어야 하는 피로강도(fatigue strength)의 관점과 병행하여 마찰용접 부를 평가하여야 하고 이 피로시험에 관한 연구보고¹⁾는 많지 않다.

본 연구에서는 마찰용접의 최적화 기술개발과 더불어 마찰용접 실시간에 비파괴 검사법의 하나인 AE(acoustic emission)를 이용하여 유공압 밸브 스플에 적합한 강재인 SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415의 강도시험 및 피로시험을 각각 실시하여 그 상관관계에서 마찰용접의 최적화를 구하고 마찰용접과 함께 병행한 AE 시험에서 구한 AE 총량과 용접품질과의 상관성 및 재질의 탄소당량과 시험편의 크기에 따른 상관성을 규명하고자 한다. 또한 마찰용접부의 경도분포, 조직 및 피로파단면의 SEM 조사를 병행하고자 한다. 그리하여 본 연구가 유공압 밸브스플의 설계, 제작을 위한 마찰용접의 최적화 개발과 용접실시간에 AE에 의한 품질평가가 가능한 기술 개발에 기여하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 Cr-Mo계 합금강인

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

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	etc.
SNCM220	0.23	0.26	0.77	0.010	0.015	0.49	0.49	0.17	0.04	Bal.
SCM435	0.38	0.26	0.77	0.010	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	0.03	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	245	①, ③
SCM435	907	15	50	302	①, ③
SACM645	934	18.6	52.5	300	②, ③
SCM415	505	16	40	280	①, ③

PWHT : Postweld heat treatment for case hardening

① : 900~920°C×250min and 850°C×20min carburizing, 60°C oil cooling

② : 570°C×12hr nitriding, air cooling

③ : 180°C×120min tempering, air cooling

SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415이며, 그 화학조성과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

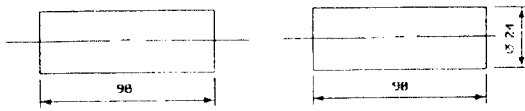
마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 마찰용접에 사용한 시험편의 형상과 이음부의 인장강도 및 인장 흡수에너지 시험에 사용한 시험편의 형상 및 치수를 각각 Fig.1에 나타내었다.

Fig. 1에서 $\phi 24$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접을 위한 시험편의 형상치수로서 (a)는 마찰용접 및 AE시험편, (b)는 인장시험편, (c)는 마찰용접부의 피로시험편의 형상 및 치수를 보여준다.

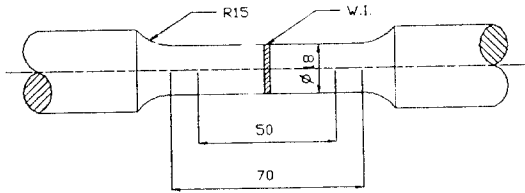
2.2 실험방법

마찰용접의 최적화 실험을 위해서는 먼저 문헌^{2~4)}을 통해 마찰가열압력(P_f), 엽셋압력(P_s)을 결정하여 몇 가지 실험을 수행한 후 용접조건을 선정하고, 엽셋시간(t_s)을 선택한 후에 마찰가열시간(t_f)을 다양하게 변화시켜서 실험한다. 마찰용접시 회전수는 2,000rpm으로 마찰용접을 수행하였다.

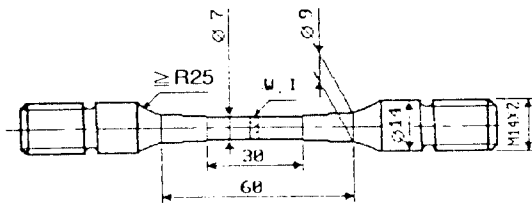
용접시간중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료 중에 검출된 초기 AE 누적량과 용접후 냉각기간 중에 검출된 후기 AE의 두 가지가 사용될 수 있는데^{5~8)}, 본



(a) Friction welding and AE test specimen



(b) Tension test specimen



(c) Fatigue test specimen

Fig. 1 Shapes & dimensions of test specimens of $\phi 24$ bar-to-bar friction welds(unit : mm)

연구에서는 초기 AE량과 용접강도와의 상관실험식을 만들기 위하여 전자에 관하여만 연구하였다.

정지척상에 부착한 센서로부터 전달된 AE신호를 프린터에 기록하여 그 기록된 결과를 AE의 누적총량의 형태로 표시 하였다.

모재의 피로 시편을 모재 인장강도를 참고로 하여 진폭비를 일정하게 유지시키면서 비교적 짧은 수명에서 파괴될 수 있도록 하기 위해 재료의 인장강도의 2/3정도 되는 높은 응력에서 첫 실험을 한 후 특정 사이클에서도 파괴가 일어나지 않는 응력에 도달할 때까지 실험응력을 감소시켜나가는 방법을 사용하였다.

여기서 5×10^4 사이클까지 견디는 피로강도를 기준으로 하여 각각의 가열시간 t_1 (sec)에 따른 피로수명 N_f (cycle)의 변화를 측정하였다.

유공압 밸브스플의 표면 내마모성을 유지하기 위하여 표면경도는 HRC 58~62(Hv 650~740), 연삭후 칩탄깊이는 0.2~0.4mm가 되어야 한다. 따라서 이를 확보하기 위하여 용접후 열처리 조건은 Table 2에서와 같이 SACM645는 질화처리($920^\circ\text{C} \times 250\text{min}$, $850^\circ\text{C} \times 20\text{min}$ 의 carburizing 후 60°C oil cooling), SNCM220, SCM435 및 SCM415는 칩탄처리($570^\circ\text{C} \times 12\text{hr}$ 의 nitriding 후 air cooling)를 수행하였고, 그 후 뜨임처리($180^\circ\text{C} \times 120\text{min}$ 의 tempering 후 air cooling)를 하였다. 그후 용접부의 경도분포는 열처리전(as-welded)과 열처리(PWHT)의 경우를 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 봉 대 봉 동종재 마찰용접의 최적화

3.1.1 용접변수와 용접품질(인장강도, 피로수명)과의 상관성

SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 모재로 본 실험에서 사용하고자 하는 저주기 사이클 (5×10^4)의 응력비(σ_f / σ_t)를 Fig. 2에 나타내었

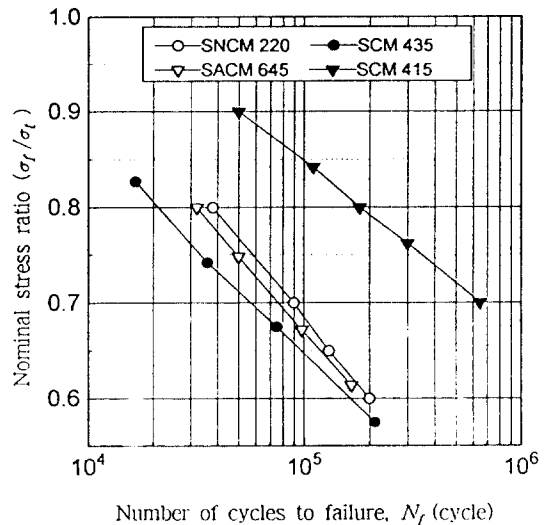


Fig. 2 Nominal stress ratio(fatigue strength at 5×10^4 cycles/tensile strength) of each material

다. 여기서 구한 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415에 대한 응력비(σ_f / σ_t)는 각각 77%, 72%, 74% 및 89%이다.

Fig. 3은 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 $\phi 24$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접 이음부의

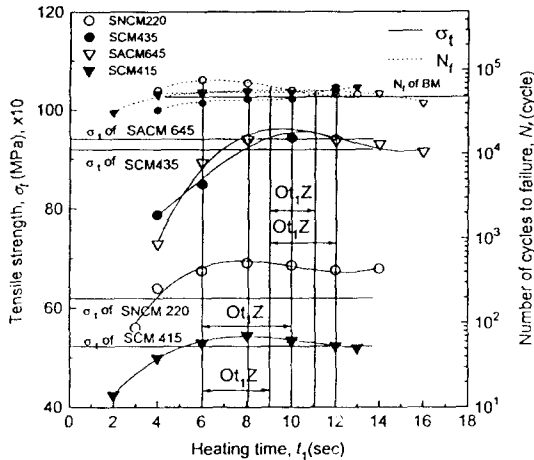


Fig. 3 σ_t Vs t_1 and N_f Vs t_1 of FRW joints of SNCM220($\sigma_f/\sigma_t=77\%$), SCM435($\sigma_f/\sigma_t=72\%$), SACM645($\sigma_f/\sigma_t=74\%$) and SCM415($\sigma_f/\sigma_t=89\%$)

Welding condition: $n=2,000$ rpm, $P_1=70$, $P_2=100$ MPa, $t_2 = 5$ sec $O_{t1}Z$: optimum heating time zone

에 대한 마찰가열시간 t_1 (sec)과 인장강도 σ_t (MPa), 마찰가열시간 t_1 (sec)과 피로수명 N_f (cycle)의 관계를 보여준다. 여기서 t_1 에 대한 σ_t 분포는 Oh의 결과⁹⁾와 일치하며, 마찰용접시간 t_1 의 변화에 따른 용접부와 모재의 인장강도 σ_t 및 피로수명 $N_f(5 \times 10^4)$ 를 서로 비교해 보면, 마찰용접시간(t_1)이 적합할 때에 SACM645의 용접부만 인장강도가 모재와 거의 같고 그외는 모두 모재보다 높다. 이때 용접부의 피로수명 N_f 는 모재의 수명 $N_f(5 \times 10^4)$ 보다 높거나 같은 정도로 나타났다.

결론적으로 이음효율이 100%이상이 되고 동시에 피로수명 역시 모재보다 더욱 우수한 마찰가열시간 t_1 의 최적 범위가 존재함이 확인되었고, 용접부의 인장강도와 피로수명을 고려할 때 SACM645

의 경우가 가장 우수하였다.

3.1.2 마찰용접의 최적화

Fig. 3은 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 봉 대 봉 동종재 마찰용접에서 마찰용접 이음부 인장강도분포가 회전수 n , 마찰가열압력 P_1 , 엽셋압력 P_2 및 엽셋시간 t_2 를 문헌자료에 의해 일정하게 하고^{2, 3, 9)}, 마찰가열시간 t_1 의 증가와 더불어 이음효율이 각각 100%이상(인장강도 σ_t 가 모재(BM, base metal)의 경우보다 높은 경우)이거나 피크(peak)에 해당하는 t_1 의 범위와 그리고 용접부의 피로수명 N_f 가 모재보다 더 우수한 t_1 의 범위를 실험적으로 구한 결과이다. 따라서 각 재료의 마찰용접 최적조건은 Table 3과 같이 결정할 수 있었다.

3.2 AE 총량과 피로수명 및 인장강도와 상관성

3.2.1 용접변수와 AE 총량과의 상관성

Fig. 4는 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 $\phi 24$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접 이음부에 대한 마찰가열시간 t_1 (sec)의 변화에 따른 AE 누적총량 N (count)의 변화를 실험한 결과이다. 이 결과를 보면 4개의 모든 재료의 마찰용접시 AE의 누적총량 N 이 t_1 에 대해 2차곡선적인 관계를 보여준다. Fig. 3 및 Table 3의 각 재료의 $O_{t1}Z$ (optimum t_1 zone)에 대한 ONZ (optimum N zone)는 Fig. 4에서 각각 54228~66736, 54581~61766, 47433~53668 및 55098~64290 counts임을 알 수 있다.

3.2.2 AE 총량과 용접품질(인장강도, 피로수명)과의 상관성

Fig. 5는 SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 $\phi 24$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접 이음부의 인장강도(σ_t , MPa)와 AE 누적총량(N , count), 피로수명(N_f , cycle)과 AE 누적총량(N , count)과의 상관관계를 조사한 결과이다. 이때 σ_t-N 및 N_f-N 의 상관관계식은 최소자승법에 의하여 다음과 같이 계산되었고, 그 신뢰성은 기여도(coefficient of determination) R^2 을 고려하여 95%이상임이 확인될 수 있다^{31~7)}.

Table 3 Optimizing condition of FRW for each material by considering on both joint efficiency and fatigue life efficiency

Materials		SNCM220	SCM435
Welding conditions	$n(\text{rpm})$	2000	2000
	$P_1(\text{MPa})$	70	70
	$P_2(\text{MPa})$	100	100
	$t_1(\text{sec})$	6~10	8~12
	$t_2(\text{sec})$	5	5
Materials		SACM645	SCM415
Welding conditions	$n(\text{rpm})$	2000	2000
	$P_1(\text{MPa})$	70	70
	$P_2(\text{MPa})$	100	100
	$t_1(\text{sec})$	9~11	6~9
	$t_2(\text{sec})$	5	5

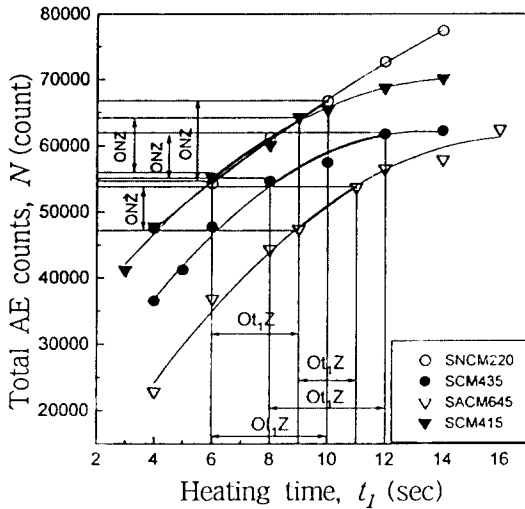


Fig. 4 N Vs t_1 of FRW joints of SNCM220($\sigma_f/\sigma_t=77\%$), SCM435($\sigma_f/\sigma_t=72\%$), SACM645($\sigma_f/\sigma_t=74\%$) and SCM415($\sigma_f/\sigma_t=89\%$)

Welding condition: $n=2,000$ rpm, $P_1=70$,
 $P_2=100$ MPa, $t_2 = 5$ sec
 ONZ: optimum N zone
 Ot₁Z: optimum t_1 zone

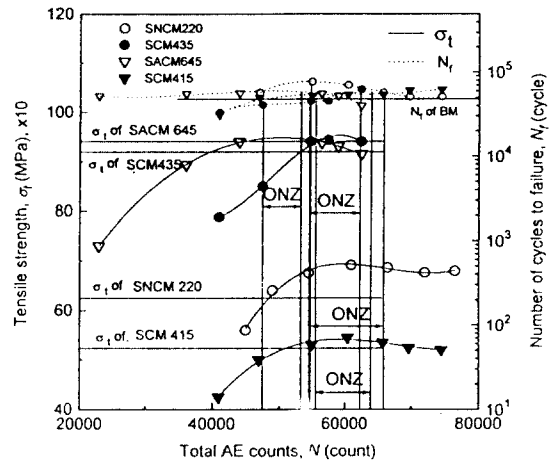


Fig. 5 σ_t Vs N and N_f Vs N of FRW joints of SNCM220($\sigma_f/\sigma_t=77\%$), SCM435($\sigma_f/\sigma_t=72\%$), SACM645($\sigma_f/\sigma_t=74\%$) and SCM415($\sigma_f/\sigma_t=89\%$)

Welding condition: $n=2,000$ rpm, $P_1=70$,
 $P_2=100$ MPa, $t_1 = 6\sim 12$, $t_2 = 5$ sec

SNCM220

$$\sigma_t = -1.767 \times 10^{-8} N^2 + 2.291 \times 10^3 N - 5.71$$

$$(R^2=0.97)$$

$$N_f = -4.25 \times 10^{-5} N^2 + 5.67 \times N - 121461.3 \quad (1)$$

SCM435

$$\sigma_t = -7.829 \times 10^8 N^2 + 9.063 \times 10^3 N - 167.86$$

$$(R^2=0.97)$$

$$N_f = 8.55 N^3 - 0.0014 N^2 - 75.44 N - 1312443 \quad (2)$$

SACM645

$$\sigma_t = -2.907 \times 10^8 N^2 + 2.975 \times 10^3 N + 18.91$$

$$(R^2=1.00)$$

$$N_f = -8.399 \times 10^{-6} N^2 + 0.7747 N + 38565.6 \quad (3)$$

SCM415

$$\sigma_t = -2.582 \times 10^8 N^2 + 3.194 \times 10^3 N - 44.34$$

$$(R^2=0.96)$$

$$N_f = 0.000275 N^2 + 21.77 N - 36131.5 \quad (4)$$

Fig. 5에서 각 재료의 동종마찰용접재에 대해, 최적 AE 누적총량 N 의 범위(ONZ)일 때 이음부 인장강도(σ_t)와 피로수명(N_f)을 구하고, 이 인장강도(σ_t)와 피로수명(N_f)을 모재의 경우와 비교하여 이음효율과 피로수명효율을 구하였으며, 이를 해석한 결과를 Table 4에 알기 쉽게 정리하여 나타내었다.

Fig. 5와 Table 4에서 알 수 있듯이 각 재료에 대해서, 최적 AE 누적총량 범위(ONZ)에서의 이음효율이 100% 이상이 되고, 피로강도에서 보면 모든 용접재에서 피로수명 효율이 100% 이상이 됨을 알 수 있다. 특히 106.9%의 이음효율을 갖는 SNCM220 동종마찰용접재의 경우에 가장 높은 피로수명 효율(116.2%)을 나타내고 있다.

따라서 Fig. 5와 식 (1)~(4)에서 알 수 있듯이

용접시작에서 완료시 까지의 AE 누적총량(N)이 측정되면, 측정된 N 값에 대한 마찰용접부의 인장강도(σ_t)가 곧바로 계산되고, 또한 피로수명(N_f)도 알 수 있어서, 그 용접이음부의 강도와 피로수명이 AE에 의하여 비파괴적으로 용접실시간에 예측될 수 있음이 확인되었다.

3.3 경도분포, 피로파단면의 조사 및 표면 경화 처리의 영향

3.3.1 경도분포와 미시조직 및 표면 경화 처리의 영향

SNCM220, SCM435, SACM645 및 SCM415의 최적조건하에서 용접된 동종재 마찰용접재의 용접부에 대한 미소 비커스 경도(Vickers hardness)를 0.5mm 간격으로 용접부에서 부터 열영향부, 모재부 근처까지 측정하였다. Fig. 6에 그 경도분포 조사 결과를 보여준다. 대부분의 재료의 경우 마찰용접계면에서 최고의 경도이고, 열영향부에서 높은 경도가 나타나며 마찰용접계면에서 멀어질 수록 모재의 경도값과 근사하게 되고 있다.

용접후 열처리하는 앞의 실험방법에서 언급한 바와 같이 SACM645는 질화처리, SCM415, SCM435 및 SNCM220은 침탄처리를 하여 Fig. 6에서와 같이 표면경도 HRC 58~62(Hv 650~740) 이상을 얻을 수 있었다. 열처리재에 대해서는 경도의 피크(peak)부가 나타나지 않고 격심한 경도의 완화가 된 것은 Table 2에서와 같은 용접 후열처리(PWHT)에

Table 4 Joint and fatigue life efficiencies of FRW joints by considering on σ_t and N_f according to total AE counts at ONZ

Materials	SNCM220	SCM435	SACM645	SCM415
ONZ (count)	54228 ~ 66736	54581 ~ 61766	47433 ~ 53668	55098 ~ 64290
σ_t of BM (MPa)	622	907	935	505
σ_t of welds at ONZ (MPa)	665	932	946	533
Joint efficiency (%)	106.9	102.8	101.3	105.5
N_f of BM (cycle)	5×10^1	5×10^1	5×10^1	5×10^1
N_f of welds at ONZ (cycle)	5.81×10^1	5.8×10^1	5.6×10^1	5.4×10^1
Fatigue life efficiency (%) of welds	116.2	116.0	112.0	108.0

MB : base metal, ONZ : optimum N zone, FRW : friction welding

의해 용접부의 내부 응력이 제거되었기 때문이라고 생각된다. 그러나, SACM 645 및 SCM435의 경우는 용접부의 경도와 모재부의 경도 차이가 용접재의 경우에 비해 크게 나타남으로 용접후 열처리의 조건 개선에 대해 차후 검토할 필요가 있다.

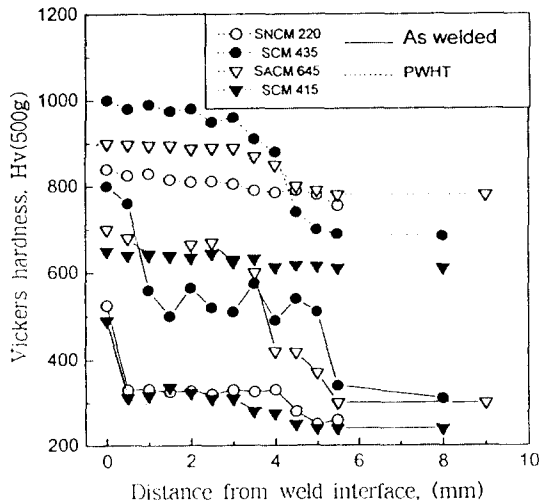
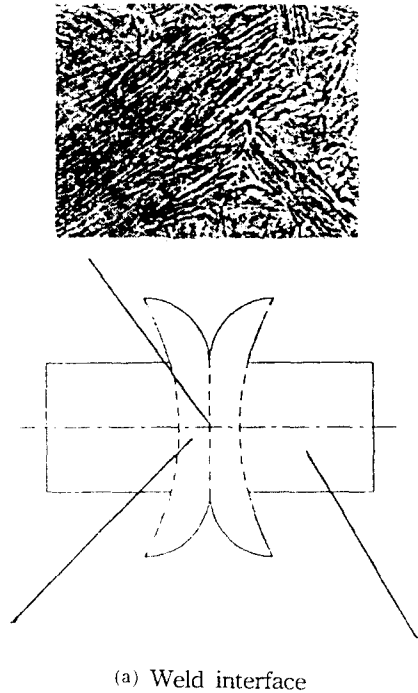


Fig. 6 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of SNCM220, SCM435, SACM645 and SCM415 bar to bar at each optimum welding condition
Welding condition : $n = 2,000$ rpm, $P_1 = 70$, $P_2 = 100$ MPa, $t_1 = 8$ (SNCM220), 10 (SCM435), 10 (SACM645), 7 (SCM415), $t_2 = 5$ sec

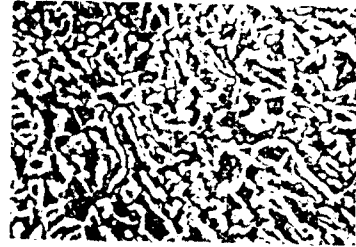
3.3.2 용접부의 미시 조직 검사

마찰용접부의 열 영향으로 인한 조직의 변화를 검사하기 위하여, 최적조건에서 용접된 질화강인 SACM645(0.42% C, 0.68% CE)의 용접부에 대하여 용접계면부, 열영향부, 모재부를 1000배 확대하여 그 미시조직을 Fig. 7에 나타내었다.

용접계면부에서는 치밀한 마르텐사이트 조직이 보이고 있고, 열영향부는 다소의 베이나이트, 마르텐사이트 및 미세한 탄화물(Fe_3C)과 입자성장의 흔적이 보이며, 모재부에서는 페라이트와 오스테나이트의 조직으로 되어 있음이 조사되었다. 용접부의 어느 곳에서도 미시조직적 용접결함을 발견할 수 없었다.



(a) Weld interface



(b) HAZ



(c) Base metal

Fig. 7 Microstructure of SACM645-friction-welded-joint($\times 1000$)
Welding condition(optimum) : $n = 2,000$ rpm, $P_1 = 70$, $P_2 = 100$ MPa, $t_1 = 10$, $t_2 = 5$ sec

4. 결 론

유공압 벨브스폴용인 표면경화용 강재의 봉 대 봉 동종재 마찰용접의 용접부 인장강도와 피로수명을 고려한 최적화 연구와 AE에 의한 용접실시간의 품질평가에 관한 연구의 중요결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 마찰용접이 시작후 종료까지의 AE누적 총량의 실시간 검출이 가능하였으며, 이 AE총량은 마찰용접조건 및 용접부 품질(인장강도, 피로수명)과 정량적 상관성이 있었다.

(2) 최적마찰 가열시간의 범위는 용접부의 이음 효율 100%이상을 고려한 경우 보다 피로수명 효율 100%이상을 고려한 경우가 더욱 넓게 나타났다.

(3) 유공압 벨브스폴용 강재의 봉 대 봉 동종재 마찰용접의 용접부 인장강도(이음효율 100%이상)와 피로수명(수명효율 100%이상)을 고려한 최적화 기술이 개발되었다.

(4) 용접시작에서 용접종료까지 측정된 AE 누적 총량에 의해 용접 품질(용접부 인장강도, 피로수명)을 평가 제어할 수 있는 기술이 개발되었고, 용접조건, 용접부 인장강도, 피로수명, AE 누적총량간의 상관 실험식은 모두 95% 신뢰성이 확인되었다.

참 고 문 헌

1) Um, D.S. and S.W. Kang, "Study on Fatigue Strength of Friction Welding of S20C and SUS27B", J. SNAK, Vol.8, PP.13-24, 1971
 2) 日本摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, PP.46,

145-150, 184, 1979
 3) 오세규, 오명석, 전태언, 오정환, "FW에 의한 ϕ 32 유압벨브스폴의 개발과 AE에 의한 실시간 품질평가에 관한연구", 대한기계학회 '93 추계 강연논문집, PP.618-624, 1993
 4) 오세규, 김동조, "이종강관 마찰용접의 소성변형 중에 발생된 초기 AE량이 용접품질제어에 미치는 영향에 관한 연구" 대한용접학회지, 제1-2권, 제2호, PP.69-75, 1983
 5) Oh, S.K., K.K. Wang, and G.R. Reif, "In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques", Proc. of 63rd Annual American Welding Society Convention on Kansas, USA, Tech. Sess. 5, Apr., Welding Journal of AWS, Welding Research Supplement, Vol. 61, No. 9, PP. 312-316, 1982
 6) Oh, S.K., "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, PP.1~314, 1982
 7) Oh, S.K., "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transaction of KSME, Vol.7. No.2, PP.226~232, 1983
 8) 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한기계학회지, 제 22권, 제 3호, PP.184~190, 202, 1982