

# 밸브스플용 강재의 봉대봉 이종재 마찰용접의 최적화와 피로강도 특성 및 AE평가

## Dissimilar Friction Welding of Hydraulic Valve Spool Steel Bar-to-Bar and The Fatigue Evaluation by AE

오세규, 이연탁\*, 오정환, 유인종, 장홍근  
(부산수대공대) (동명전문대학) (한국기계연구원)

### Abstract

This paper deals with the development of fundamental design and manufacturing technique of hydraulic valve spool by optimizing of friction welding, the development of in-process real-time weld quality evaluation technique by acoustic emission and the evaluation of the mechanical properties and the fatigue life about the bar-to-bar dissimilar friction welded hydraulic valve spool steels.

### 1. 서 론

본 연구에서는 피로하중을 받는 마찰용접부품의 피로수명과 이음효율에 미치는 용접조건에 영향을 발생시키는 총AE량과의 상관성을 실험적으로 그리고 정량적으로 규명코져하였다. 유공압 밸브스플재로 쓰이는 표면경화용 침탄강 및 질화강인 SNCM220, SCM435, SACM645, SCM415 강봉을 실험재로 이용하여,  $\phi 31.2$  시편을 이용하여 각각 봉 대 봉의 이종재를 마찰용접하였고, 이때의 최적 마찰용접조건을 인장강도와 피로수명을 고려한 이음효율 100%이상되는 범위에서 결정하였으며, 마찰용접중의 음향방출시험 및 용접부의 편진 인장 피로시험을 수행하였으며, 용접변수와 용접품질(피로수명, 인장강도)과의 상관성, 용접 변수와 AE 누적 총량과의 상관성을 정량적으로 해석함으로써 용접 품질의 실시간 평가·연구를 가능하게 하므로써, 본 연구결과가 다중 유압밸브 스플의 봉대봉 이종재 마찰 용접설계에 유용한 자료로 기여하게 하였다.

### 2. 실험재료 및 실험방법

#### 2.1 실험재료

본 연구에 사용된 재료는 표면 경화강인 SNCM 220, SCM435, SACM645, SCM415이며, Table 1과 Table 2는 각각 그 재료들의 화학조성과 기계적 성질 및 열처리조건을 나타낸다.

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	0.01	0.015	0.49	0.49	0.17	0.04	Bal.
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, $\sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of area $\Psi$ (%)	Hardness Hv	Heat treat for case Hardening
SNCM220	62.23	17	40	185	900-920°C 250 Min carburizing 850°C - 20Min oil cooling
SCM435	90.7	15	50	314	900-920°C 250 Min carburizing 850°C - 20Min oil cooling
SACM645	93.46	18.6	52.5	217	570°C - 12 Hr Nitriding Air cooling
SCM415	50.5	16	40	314	900-920°C 250 Min carburizing 850°C - 20Min oil cooling

#### 2.2 실험방법

##### 2.2.1 봉대봉 이종재의 마찰용접과 AE시험

봉대봉 이종재의 마찰용접의 최적화 실험조건을 구하기 위해서는 먼저 문헌을 통해 마찰가열압력 ( $P_1$ ), 압력( $P_2$ )을 결정하여 몇가지 예비 실험을 수행한 후 용접조건을 선정하고, 압력시간( $t_2$ )을 선택한 후에 가열시간( $t_1$ )을 다양하게 변화시켜서 실험한다.

한편, 마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R50-C 150kHz sensor)를 용접면에서 정지척(chuck) 방향으로 마찰용접기(Nitto FF-45II-C)의 440mm 위치의 정지척 상에 부착하였다.

##### 2.2.2 마찰 용접부의 편진 인장 피로 시험

Fig.1에서와 같이 저주기 편진인장 피로시험 (fatigue test)을 통하여  $5 \times 10^4$  사이클(cycle)을 기준하여 각각의 재료에 따른 시간 강도  $\sigma$ 를 구하고, 이 시간 강도  $\sigma$ 의 각 재료의 인장강도  $\sigma_t$ 에 대한

응력비  $\sigma/\sigma_t$ 를 Table 3에서와 같이 모재와 각 이종재 용접재에 대해 구한 것이다. 이 응력비에 따라 각 용접재에 대한 편진인장 피로시험을 수행하였다.

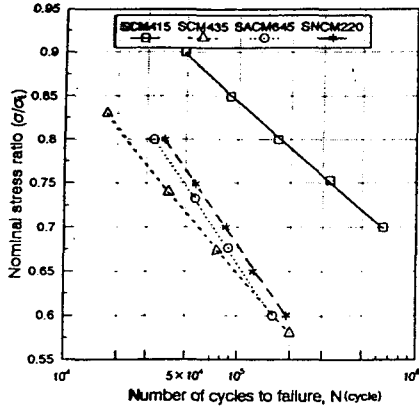


Fig. 1 Nominal stress ratio for fatigue test

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

Materials	SCM415	SCM435	SNCM220	SACM645
Nominal stress ratio ( $\sigma/\sigma_t$ )	89(%)	72(%)	77(%)	74(%)
Nominal stress ratio ( $\sigma/\sigma_t$ )	SCM415 × SNCM220	SCM415 × SACM220	SCM435 × SNCM220	SCM435 × SNCM645
	89(%)	89(%)	77(%)	74(%)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 AE 총량과 용접품질(인장강도, 피로수명)과의 상관성 도출

Fig. 2~Fig. 5는 용접재 SCM415×SNCM220, SCM415×SACM645, SCM435×SNCM 220, SCM 435×SACM645의  $\phi 31.2$  봉 대 봉 이종재 마찰용접 이음부의 인장강도( $\sigma_t$ , kgf/mm<sup>2</sup>)와 AE 총량(N, counts) 및 인장강도( $\sigma_t$ )와 피로수명( $N_f$ , cycle)과의 상관관계를 조사한 결과이다. 이때  $\sigma_t$ -N과  $N_f$ -N의 상관관계식은 최소자승법에 의하여 다음과 같이 계산되었다. 이때  $N_f$ 는 log로 취하였다.

$$\begin{aligned} \text{SCM415} \times \text{SNCM220 } \phi 31.2 : \\ \sigma_t = 1.083 \times 10^{-12} N^3 - 1.265 \times 10^{-11} N^2 + 0.004 N + 0.56 \quad (1) \\ \log N_f = 2.7843 N^3 - 3.1443 N^2 + 0.0001 N + 3.2243 \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SCM415} \times \text{SACM645 } \phi 31.2 : \\ \sigma_t = 7.297 \times 10^{-14} N^3 - 1.537 \times 10^{-8} N^2 + 0.00091 N - 33.182 \quad (3) \\ \log N_f = 4.0104 N^3 - 7.5397 N^2 + 4.3861 N + 3.8996 \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SCM435} \times \text{SNCM220 } \phi 31.2 : \\ \sigma_t = 2.624 \times 10^{-14} N^3 - 6.09 \times 10^{-9} N^2 + 0.00041 N + 51.40 \quad (5) \\ \log N_f = -1.5054 N^3 + 1.5106 N^2 + 5.1775 N + 4.5284 \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SCM435} \times \text{SACM645 } \phi 31.2 : \\ \sigma_t = 1.593 \times 10^{-14} N^3 - 5.295 \times 10^{-9} N^2 + 0.0005 N + 82.529 \quad (7) \\ \log N_f = -9.0696 N^3 + 1.3324 N^2 - 5.794 N + 5.3803 \quad (8) \end{aligned}$$

Fig. 2~Fig. 5에서 각 용접재에 대해, 앞에서 구한  $\sigma_t$ -N에 대한 최적 AE 총량의 범위(ONZ)일 때 이 범위를 식(1)~식(8)에 대입하여 최적 범위에서의 인장강도( $\sigma_t$ ) 및 피로수명( $N_f$ )을 구하였다. 그리고 이 인장강도( $\sigma_t$ )를 모재와 비교하여 이음효율을 구하고 또한 피로수명효율을 구하여 이를 Table 4에 나타내었다.

결론적으로 용접시작에서 종료까지 발생한 AE총량의 측정만으로 이음효율 100%, 피로수명효율 100%내외의 우수한 용접 품질( $\sigma_t$ ,  $N_f$ )을 실시간에 평가 예측할수 있음이 확인되었다.

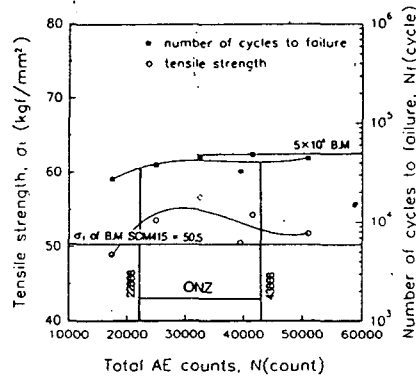


Fig. 2  $\sigma_t$  vs. AE and  $N_f$  vs. AE for  $\phi 31.2$  bar-to-bar friction welding of SCM415×SNCM220  
Welding cond. :  $n=1340\text{rpm}$ ,  $P_1=5$ ,  $P_2=10\text{kgf/mm}^2$ ,  $t_2=6\text{sec}$

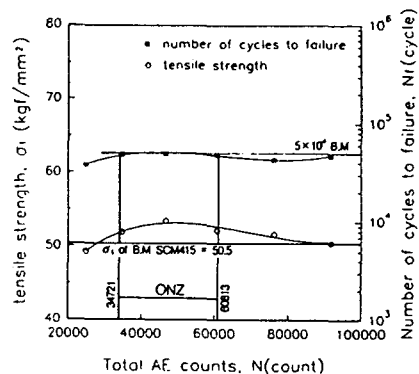


Fig. 3  $\sigma_t$  vs. N and  $N_f$  vs. N for  $\phi 31.2$  bar-to-bar friction welding of SCM415×SACM645  
Welding cond.: same as those in Fig. 2

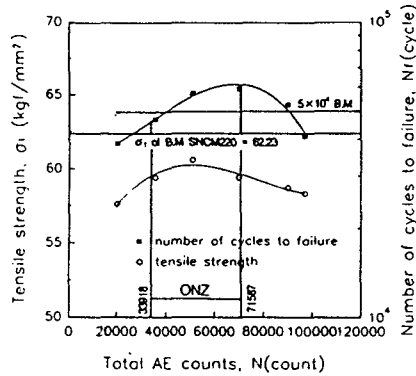


Fig. 4  $\sigma_t$  vs. AE and  $N_f$  vs. AE for  $\phi 31.2$  bar-to-bar friction welding of SCM435×SNCM220  
Welding cond.: same as those in Fig. 2

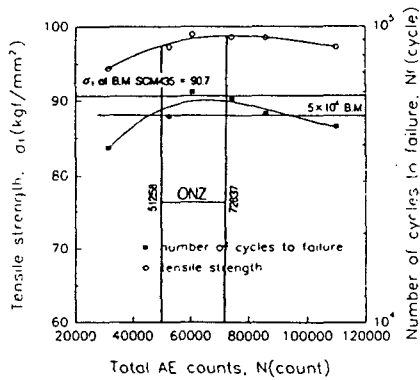


Fig. 5  $\sigma_t$  vs. N and  $N_f$  vs. N for  $\phi 31.2$  bar-to-bar friction welding of SCM435×SACM645  
Welding cond.: same as those in Fig. 2

3.2 봉대봉 이종재 마찰용접시의 재질(탄소당량)과 시험편 크기가 용접 품질에 미치는 영향

Fig. 6은  $\sigma_t$ , N 및  $N_f$ 를 대수축으로 취하여  $\sigma_t$  ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )와  $Ceq(\%)$ ,  $N(\text{count})$ 과  $Ceq(\%)$ ,  $N_f(\text{cycle})$ 와  $Ceq(\%)$ 의 상관관계를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모두 탄소당량  $Ceq$ 가 증가함에 따라  $\sigma_t$ , N,  $N_f$  등도 완만하게 증가하는 추세이나, 다만  $N_f$ 는 완만하게 감소하는데, 이는 질량효과 때문인 것으로 생각된다.  $\sigma_t$ - $Ceq$ ,  $N$ - $Ceq$ ,  $N_f$ - $Ceq$ 의 상관관계는 2차 함수적 상관성을 가지며, 그 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

Dissimilar FRW joints of  $\phi 31.2$  :  
 $\log \sigma_t = 12.394Ceq^2 - 13.349Ceq + 5.352$  (9)

$$\log N = 20.444Ceq^2 - 20.7263Ceq + 9.6134 \quad (10)$$

$$\log N_f = -10.9194Ceq^2 + 11.9875Ceq + 1.4587 \quad (11)$$

결과적으로 이종재 마찰용접재의 재질을 나타내는 탄소당량( $Ceq$ )에 따라 이음부의 인장강도  $\sigma_t$ , 용접중의 총 AE량 N, 용접재의 피로수명  $N_f$  등을 예측평가할 수 있음이 확인되었다.

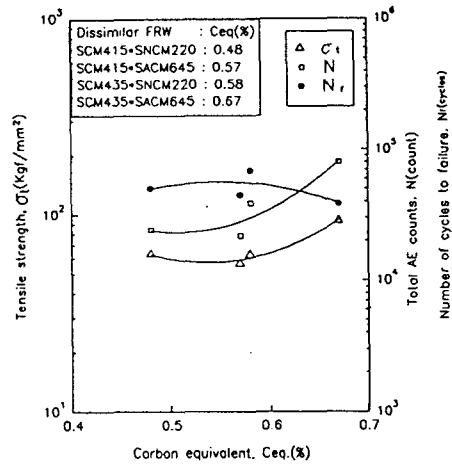


Fig. 6  $\sigma_t$  vs.  $Ceq$ , N vs.  $Ceq$  and  $N_f$  vs.  $Ceq$  of dissimilar FRW joints of  $\phi 31.2$  in diameter  
Welding cond.:  $n=1340\text{rpm}$ ,  $P_1=5$ ,  $P_2=10\text{kgf}/\text{mm}^2$ ,  $t_2=6\text{sec}$

#### 4. 결 론

유공압 밸브스플용으로서 표면경화용 강제인 SCM415×SNCM220, SCM415×SACM645, SCM435×SNCM220, SCM435×SACM645의 이종재 봉대봉 마찰용접에 대한 최적화와 AE 평가 및 탄소당량에 대한 용접부의 피로수명, 강도 및 AE와의 상관관계를 조사하는 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 마찰용접의 시간조정법과 업셋조정법의 어느 것에도 이용될 수 있는 총업셋량과 가열시간과의 상관성을 정량적으로 구하였다.
- 2) 마찰용접품질(이음부의 인장강도, 피로수명)과 마찰가열시간과의 상관실험식을 정량적으로 도출하여 이음효율과 피로수명효율이 100%내외가 되는 최적가열시간 범위( $ot_{12}$ )를 구하였다.
- 3) 용접시작에서 종료까지의 AE총량과 이음부 강도 및 피로수명과의 상관성을 정량적으로 도출 하므로써 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가

가 가능하게 하였다.

4)이종재 마찰용접재의 탄소당량 증가에 따른 이음부 강도, AE총량 및 피로수명 증감을 정량적으로 규명하여 탄소당량에 의한 재 특성 예측이 가능하게 하였다.

#### 5. 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- 1)AWS, "Welding Handbook-Vol.3 Welding Processes, 8th edition, chap.23 Friction Welding, 1991, p.740-763
- 2)R.K.Miller and P.McIntire, "Nondestructive Testing Handbook- Vol.5, Acoustic Emission Testing", 2nd edition, ASNT, 1987, p.11-44
- 3)정희돈, 권영각, 장래웅, "용접부 검사법으로서의 Acoustic Emission", 대한용접학회지, 11-2, 1993, p.1-12
- 4)오세규, 장지훈, 김현필, 이경우, 박형동, "Cr-Mo계 봉 대 봉 동종재 마찰용접시의 AE와 용접강도의 상관성에 관한 연구", 대한용접학회 '94 춘계강연 논문집, 1994, p.211-214
- 5)오세규, 장지훈, 배명주, 전태인, "벨브스플재 봉 대 봉 마찰용접에서 가열시간이 이음강도와 AE 특성에 미치는 영향", 한국해양공학회 '94 추계 강연 논문집, 1994, p.
- 6)오세규, 배명주, 오명석, 박일동, 유인중, "유공압 벨브스플용 재료의 관 대 봉 마찰용접과 AE에 관한 연구", 한국해양공학회 '94 춘계 강연 논문집, 1994, p.177-181
- 7)오세규, 오정환, 전태인, 김경균, 오명석, "AE에 의한 소형 벨브스플 마찰용접 품질의 실시간 평가", 대한용접학회지, Vol.12, No.2, 1994, p.97-107
- 8)日本摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, 1979, p.46,145-150,184.
- 9)日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會20年誌", 1984, p.1-106.
- 10)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, 1982, p.312-316, (In English)
- 11)吳世奎, 林祐助, 金亨資, "摩擦熔接機械의 自動生産 品質制御 實時間 評價", 大韓機械學會 論文集, 第9券 第6號, 1985, p.757-766.
- 12)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)
- 13)오세규, 김동조, "이종강관 마찰용접의 소성변형 중에 발생된 초기 AE량이 용접품질제어에 미치는 영향에 관한 연구", 대한용접학회지, 제1-2권, 제2호, 1983, p.69-75
- 14)오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한기계학회지, 제22권, 제3호, 1982, p.184-190, 202
- 15)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).
- 16)나석주, 김성주, "강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향 - 동종강에 대하여", 대한용접학회지, 3-2, 1985, p.1-9
- 17)나석주, 양영수, "강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향 - 탄소강과 고속도강에 대하여", 대한용접학회지, 4-3, 1986, p.32-42