

SM45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구⁺

오세규* · 김부안* · 김선진* · 남상훈**

(1988년 5월 26일 접수)

A Study on Friction Welding of SM45C to SCM4 Steel Bars and the Fatigue Properties

Sae-Kyoo Oh, Bu-Ahn Kim, Seon-Jin Kim and Sang-Hoon Nam

Key Words : Friction Welding(마찰용접), Fatigue Properties(피로특성), Weld Interface(용접면), Notch Sensitivity Factor(노치민감계수), Stress Concentration Factor(응력집중계수), Fatigue Limit(피로한도)

Abstract

A study on friction welding of carbon steel bar (SM45C) to chrome molybdenum steel bar(SCM4) is examined experimentally through tensile test, hardness test, microstructure test and fatigue test.

So, this paper deals with optimizing the welding conditions and analyzing various mechanical properties about friction welds of SM45C to SCM4 steel bars.

The results obtained are summarized as follows ;

1) For friction welded joints of SM45C to SCM4 steel bars, the total upset(U) increases linearly with an increase of heating time(t_1) till 6 s.

2) The determined optimum welding conditions are heating time(t_1), 2s, upsetting time(t_2), 3 s, heating pressure(p_1), 4 kgf/mm^2 (39.2 MPa), upsetting pressure(p_2), 8 kgf/mm^2 (78.4 MPa) and rotating speed(N), 2,000 rpm when the total upset(U) is 3.4 mm, resulting in a computed relationship between the joint tensile strength σ_t (kgf/mm^2) and the total upset U (mm);

$$\sigma_t = 0.21 U^3 - 3.38 U^2 + 17.03 U + 66.00$$

3) As the elongation is increased more and more, the fracture position becomes away from weld interface and the fractures are similar to those of SM45C. Fracture is taken place on SM45C side.

4) The weld interface of two dissimilar materials is mixed strongly, and the heat affected zone is about 2.0 mm at SM45C while about 2.7 mm at SCM4 side. Therefore, the welded zone and heat affected zone are very narrow, comparing with those of the joints welded by the other welding

⁺ 1987年度 韓國海洋工學會 秋季學術大會發表(1987年 11月)

* 정회원, 부산수산대학 이공학부 박용기계공학과

** 정회원, 한국주택공사

methods.

5) The fatigue strengths at $N = 10^6$ cycles of SM45C, SCM4 and friction welded joints are $23\text{kgf/mm}^2(225.4\text{MPa})$, $33\text{kgf/mm}^2(220.5\text{MPa})$, and $22.5\text{kgf/mm}^2(220.5\text{MPa})$ respectively, and fracture at friction welded joint takes place at the side of SM45C.

6) The hardness of the friction weld interface is 3 times higher than that of base metal.

7) Fatigue strength of friction welded joint is higher than that of base metal.

8) Notch sensitivity factor of friction welded joint is lower than that of base metal.

1. 서 론

최근 전반적인 산업발전에 따라서 자동차, 운반 기계 및 각종 공구류 등 기계공업 분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 고가품과 저가품의 이중마찰 용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성이 좋은 제품의 대량 생산 등에 마찰용접을 적용하려는 연구 노력을 하고 있다¹⁾.

마찰용접법에 대한 연구는 1957년 Vill²⁾에 의해 본격화된 후 이에 대한 연구 보고가 계속 증가하고 있다^{3~10)}. 마찰용접법은 고상 용접법으로서 접합시키려는 두 모재(base metal)의 접합 경계면(interface)에서 기계적 상대 운동에 의해 마찰열을 발생시키고 이 열에 의해 재료의 단조온도 부근까지 온도가 상승하는 순간 압접하는 원리이다.

국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적 조건 결정과 응용 및 피로강도에 관한 연구가 Oh에 의해 보고되는 등 이중재료의 마찰용접에 관한 보고가 증가하고 있다^{4,7~11)}.

본 연구에서는 최근 터빈축과 날개의 접합 등에 이용되는 국산탄소강 SM45C와 내마모 내피로성 강 SCM4의 최적 마찰용접 조건결정 및 피로 특성을 연구 고찰하여 실용화에 적용할 수 있는 기초자료가 되도록 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 국산 탄소강 SM45C와 내열성과 내마모성 및 내피로성이 강한 SCM4(Cr—Mo)계 구조용 합금강이다.

그 화학적 성분은 Table 1과 같고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

마찰용접 시험을 위한 시험편은 모재를 Fig. 1(a)과 같은 형상 치수로 선삭 가공하였다.

Fig.1(b)는 용접 시험편의 강도를 알기 위한 인장시험편¹²⁾의 형상 치수로서 KS규격(KS B 0801 14A)에 따라 선삭후 연삭하고, 평행부 표면은 사포 600번에서 1200번까지 연마(polishing)하였다.

Fig.1(c)는 모재 및 용접 시험편의 피로 강도를 알기 위한 회전굽힘 피로 시험편의 형상 치수로서 선삭후 연삭하고, 평행부를 사포 600번에서 1200번까지 연마하여 시험편의 표면 거칠기의 영향을 최소로 하였다.

Fig.1(d)는 경도 및 조직 시험편으로 모재를 지름 12mm로 마찰 용접한 후 용접부를 좌우 5

Table 1 Chemical composition of materials

(wt. %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM 4	0.40	0.25	0.78	0.020	0.016	0.95	0.19
SM45C	0.45	0.32	0.73	0.030	0.030	-	-

Table 2 Mechanical properties of base materials

Materials	Tensile strength σ_t $\text{kgf/mm}^2(\text{MPa})$	Yield strength σ_y $\text{kgf/mm}^2(\text{MPa})$	Elongation ϵ (%)	Hardness Hk
SCM4	104.1(1,020,2)	87.0(852,6)	13.8	418
SM45C	86.3(845,7)	61.4(601,7)	15.4	330

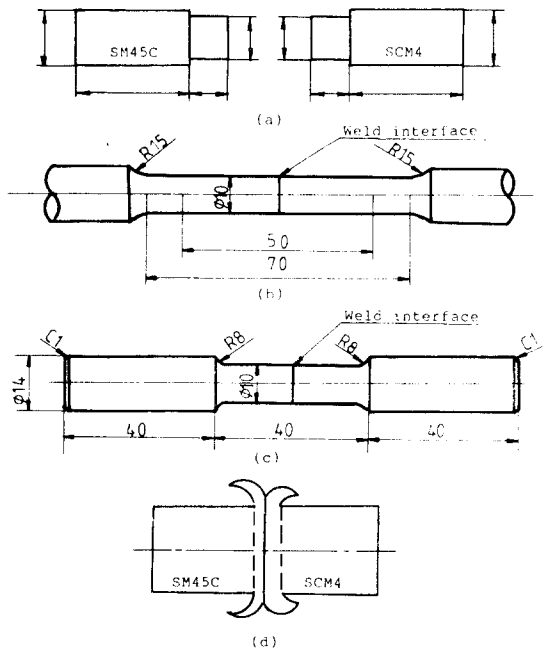


Fig. 1 Shape and dimension of test specimen
 (a) Welding test work pieces
 (b) Tension test specimen
 (c) Rotary bending fatigue test specimen
 (d) Hardness and microstructure specimen

mm로 절단하고, 또한 중심부를 따라서 절단하였다. 절단시 열영향을 최소로 줄이기 위하여 wire cutting 기계를 사용하였다.

Fig.2는 모재, 열영향부 및 접합경계면의 피로 강도를 비교하기 위해 노치가공한 회전 굽힘 피로 시험편의 형상으로 치수는 Fig.1(c)와 같고 노치부의 지름 d 는 8mm, 각도 60° , 모서리 반지름 ρ 는 0.75mm로 선반 가공하였다.

노치부를 사포 600번에서 1200번까지 연마하고 현미경으로 관찰하여 균일한 노치가 되도록 하였다. 60° , 1mm깊이의 V형노치를 모재 및 용접면에 가공하였다. 그리고 열영향부에서의 노치는 용접 경계면에서 1mm 떨어진 곳에 각각 가공하였다. 이때, 용접부를 3% 나이탈(nital) 용액으로 부식시켜 용접면과 열영향부를 구분하여 노치 가공 위치를 결정하였다.

2.2 실험 장치 및 실험 방법

2.2.1 마찰용접 시험

마찰용접에 사용한 시험기는 TH-25 continuous

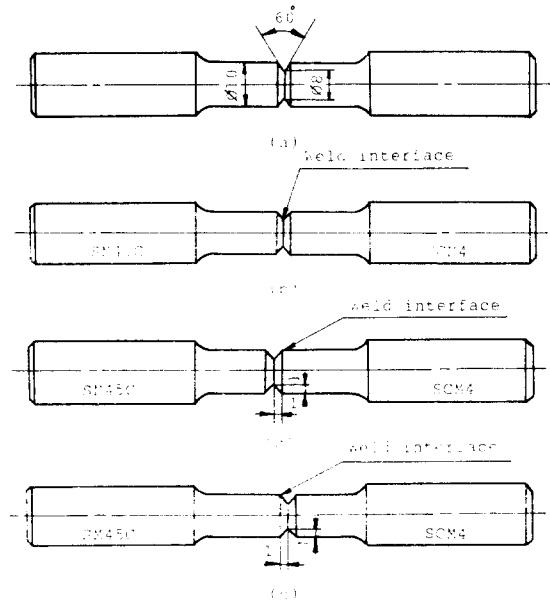


Fig. 2 Rotary bending fatigue test specimen with notch
 (a) Base metal notched specimen
 (b) Weld interface notched specimen
 (c) SM45C HAZ notched specimen
 (d) SCM4 HAZ notched specimen

drive brake type friction welding machine이다. 본실험에 사용된 시험편 SM45C와 SCM4의 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위하여 Fig.1(a)처럼 가공한 시험편을 회전수(N)=2,000rpm, 마찰가압력(p_1)=4kgf/mm²(39.2MPa), 업셋가압력(p_2)=8kgf/mm²(78.4MPa)로 일정하게 하여 가열시간(t_1)과 업셋시간(t_2)을 Table 3처럼 8개 조건으로 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다.

마찰용접 과정은 SCM4 용접시험편을 2,000rpm으로 회전시키고, 고정측에 SM45C를 장착하여 축방향의 가열가압력(p_1)을 가하여 발생한 마찰열에 의하여 접합면이 용접에 충분한 온도(단조 온도보다 높고 용융점 직하온도)에 도달할 때에 회전을 정지시킨다.

이때, 축방향의 업셋가압력(p_2)을 가하여 용접행정을 완료한다.

마찰용접기의 개략도는 Fig.3과 같고, Fig.4는 마찰용접의 과정을 나타낸 것이다.

2.2.2 인장 시험

인장시험에 사용된 인장 시험기는 Toyo Bawl-

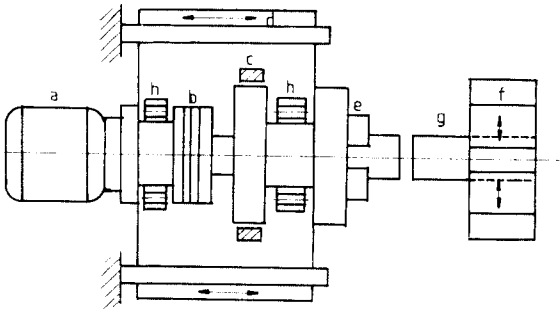


Fig. 3 Schematic mechanism of friction welding machine (Continuous drive brake type)
 a) Motor e) Hydraulic chuck
 b) Clutch f) Hydraulic chamber
 c) Brake g) Work piece
 d) Hydraulic cylinder h) Bearing

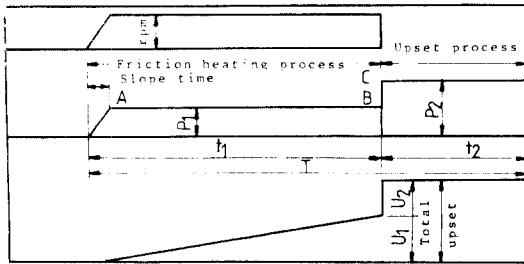


Fig. 4 Schematic friction welding cycle (Continuous drive brake type)
 p_1 : Frictional heating pressure(kgf/mm^2)
 p_2 : Upsetting pressure(kgf/mm^2)
 t_1 : Frictional heating time(s)
 t_2 : Upsetting pressure(s)
 T : Total welding time(s)
 U_1 : Upset during heating(mm)
 U_2 : Upset during upsetting(mm)

Table 3 Friction welding conditions

Welding materiaes	Rotating speed N (rpm)	Heating pressure p_1 , kgf/mm^2 (MPa)	Upsetting pressure p_2 , kgf/mm^2 (MPa)	Heating time t_1 (s)	Upsetting time t_2 (s)
SCM4 to SM45C	2,000	4(39.2)	8(78.4)	0.25	3
				0.5	
				1	
				2	
				3	
				4	
5					
6					

dwin UTM-25T이며, 인장속도는 $2mm/min$ 으로 수행하였다.

Table 3의 용접조건에 따라 마찰용접한 용접재와 모재 SM45C 및 SCM4를 Fig.1(b)와 같은 형상 치수로 인장시험편을 가공한 후 인장시험을 수행하여 용접시험편의 인장 강도와 연신율을 각 마찰용접 조건에 따라 조사함으로써 최적 마찰용접 조건을 구하도록 하였다.

2.2.3 경도 시험

경도시험기는 누프(Knoop) 미소 경도 시험기로서 최적 용접상태의 조건에서 용접한 시험편을 Fig.1(c)와 같이 가공하여 하중 20g, 시간 30s의 조건에서 시험편의 중심 및 깊이 3mm의 용접 경계면과 용접 경계면 좌우 각각 5mm씩을 0.25mm간격으로 경도치를 측정하였다.

2.2.4 현미경 조직 검사

현미경 조직검사를 하기 위한 시험편은 경도 시험편과 같이 최적 용접조건 상태의 것을 사용하였다. 부식방법은 SM45C는 3%의 나이탈 용액에 1분간, SCM4는 5분간 부식시킨 후 깨끗이 세척하였다.

조직검사는 용접 경계면, 열 영향부 및 모재부분으로 하였다.

2.2.5 회전굽힘 피로시험

본 실험에 사용한 회전굽힘 피로시험기는 Ono-type rotary bending fatigue testing machine이고, 그 능력은 최대 굽힘 모멘트 $20kgf \cdot m$ ($196 N \cdot m$), 매분 회전수는 $3,500rpm$ (60Hz 경우)이며, 고온실험도 가능하도록 온도 조절장치를 가진 가열로(heating furnace)가 부착되어 있다. 그 기구는 Fig.5와 같으며 부하 방식이 2점 지지, 2점

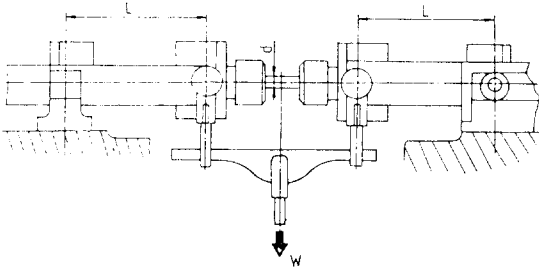


Fig. 5 Schematic mechanism of rotary bending fatigue testing machine(Model FTO-20H-01)

하중식의 중추 직각식인 균일 굽힘모멘트 형 (moment type)이다.

Fig.5에서

L : 25(cm)

d : 시험편의 지름(cm)

W : 시험편에 가한 하중(kgf)

이라고 하면

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{16WL}{\pi d^3} = \frac{16 \times W \times 25}{\pi d^3} = \frac{400W}{\pi d^3} \\ &= \frac{127.32W}{d^3} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (1)$$

이 된다.

본 실험에서는 피로 응력을 식(1)에 의해 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접조건간의 상관성

최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해 Table 3의 조건대로 용접을 하였을 때 가열시간 t_1 (s)과 총 업셋량(total upset) U (mm)와의 상관관계 조사결과는 Fig.6과 같다.

여기서, 가열시간(t_1)과 총 업셋량(U)이 거의 직선적관계가 성립함을 알 수 있다.

3.2 총 업셋량과 인장강도 및 연신율의 상관성

Table 3의 마찰용접 조건에 따라 용접을 하여 총업셋량 U (mm)의 변화에 대한 용접재 인장강도 σ_t (kgf/mm², MPa)와 연신율 ϵ (%)의 상관관계는 Fig.7과 같다.

이 그래프에서는 U 가 약 1.5mm 이상에서 모

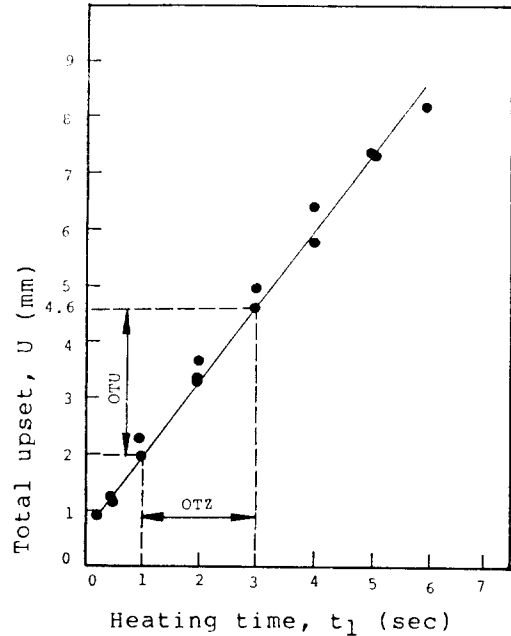


Fig. 6 Relationship between total upset and heating time in friction welding of SM45C to SCM4 steel bars

OTZ : optimum time zone

OTU : optimum upset zone

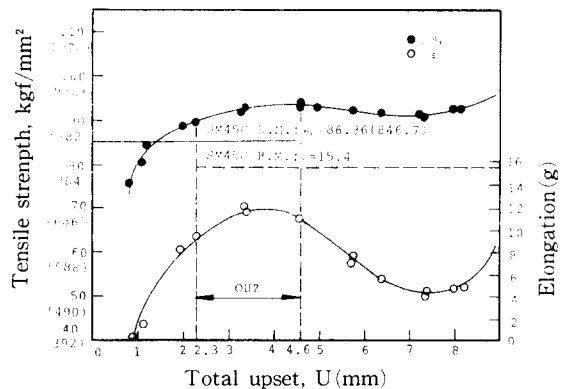


Fig. 7 Relationship between tensile strength and total upset relating to elongation in friction welding of SM45C to SCM4 steel bars (OUZ : optimum upset zone)

재 SM45C 보다 인장강도가 높음을 알 수 있다. 또 이음 효율이 100%를 넘고 연신율이 높게 나타나는 범위($\epsilon = 9\%$ 이상)는 U 가 2.3mm~4.6mm 영역임을 알 수 있다.

이 경우 SM45C와 SCM4의 마찰용접 이음 효율이 100%를 넘고, 연신율이 가장 높게 나타나는 최적마찰 용접조건은 U 가 3.4mm인 경우이다. 그 이유는 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고 연성이 높은 쪽이 유리하기 때문에 연신율이 가장 높은 쪽이 최적 마찰용접 조건이라고 생각된다.

또 U 가 3.4mm인 때는 Fig.6에서 $t_1=2s$ 임을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구에서 최적 마찰용접 조건은 $N=2,000rpm$, $p_1=4kgf/mm^2(38.2MPa)$, $p_2=8kgf/mm^2(78.4MPa)$, $t_1=2s$, $t_2=3s$, 이때 $U=3.4mm$ 로 결정지을 수 있다.

Fig.7에서 알 수 있듯이 용접부 인장강도 σ_t (kgf/mm^2)와 총 업셋량 U (mm) 그리고 연신율 ϵ (%)과 업셋량 U 사이에는 정량적인 상관성이 존재하며, 전산된 실험식은 다음과 같으며, 식들의 신뢰성은 기여율을 조사한 결과 95% 신뢰성이 확인되었다⁹⁾.

$$\sigma_t = 0.2U^3 - 3.34U^2 + 17.03U + 66.00 \quad (2)$$

$$\epsilon = 0.2U^3 - 3.34U^2 + 16.00U - 11.82 \quad (3)$$

인장시험시 파단은 SM45C 모재부에서 대부분 파단되었다.

그 이유는 SM45C 모재가 SCM4 모재와 용접부의 인장강도보다 낮기 때문이라고 생각된다.

연신율이 높을 수록 용접면(weld interface)에서 떨어진 SM45C 모재부에서 파단되어 파단 양상은 SM45C와 같은 일반적인 컵 앤 콘(cup and cone)형태를 나타낸다. 그리고 연신율이 낮을수록 파단위치는 용접면에 가까워지고 취성 파괴양상을 보여준다.

그 이유는 연신율이 낮은 부분은 용접열의 과다 혹은 부족으로 인하여 용접부 부근에서 파단되며 취성 파괴양상을 보여준다고 생각된다.

3.3 용접부의 경도 분포조사

Fig.8은 최적 마찰용접 조건에서 마찰용접한 시험편의 경도 분포를 나타낸다. 이 그래프에서 보면 용접면(weld interface)에서 경도치가 최고임을 알 수 있다. 그 이유는 용접면 부근에서 마찰용접시 국부가열과 급냉 및 단조효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 또 경도치는 중심보다 원주부에 가까울수록 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 마찰용접시 원주 속도가 중심부

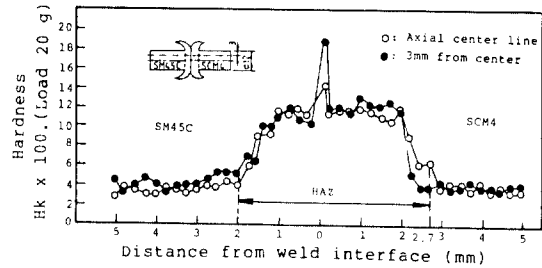


Fig. 8 Hardness distribution near the welded interface of friction-welded-joint of SM45C to SCM4 steel bars

Welding condition: $N=2,000rpm$, $p_1=4kgf/mm^2(39.2MPa)$, $p_2=8kgf/mm^2(78.4MPa)$, $t_1=2s$, $t_2=3s$

다 원주부에서 빠르기 때문에 마찰온도가 중심부보다 원주부가 훨씬 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달되고, 그러므로 원주부의 온도가 중심부보다 급격히 올라가서 냉각속도가 더욱 빠르고 담금질 효과가 크기 때문인 것으로 생각된다.

SM45C측의 경우 용접면에서 2mm까지는 경도치가 증가하나 그 이후는 감소하여 모재와 비슷하다. 그리고 SCM4측은 용접면에서 2.7mm까지는 경도치가 증가하나 그 이후는 감소하여 모재와 비슷하다. 그 이유는 마찰용접시 일어나는 열영향부의 영향 때문인 것으로 생각된다.

그림에서 관찰한 결과 용접부의 경도는 모재의 3배 이상으로 나타나고 이의 완화를 위하여 용접후 열처리가 필요하다.

3.4 용접부의 현미경 조직

Fig.9는 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편의 현미경 조직을 보여준다. 사진에서 알 수 있듯이 그 조직이 정상적이고 용접결함이 존재하지 않음을 알 수 있다.

용접면은 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자 성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 하고 있다.

SM45C측은 용접면에서 1.4mm 이상 떨어진 부분에서 모재의 조직이 나타난다. 열영향부에서는 마치 단조한 조직과 같은 미세 조직이 치밀하게 나타나고 있다. SCM4측은 용접면에서 2mm 이상 떨어진 부분에서 모재의 조직이 나타난다.

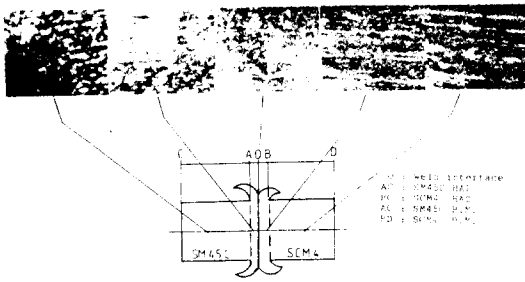


Fig. 9 Microstructures of base metal, HAZ and welded interface of friction welded joint of SM45C to SCM4 steel bars. x100 Welding condition : as that in Fig. 8

즉 용접부의 현미경조직 검사에서 미세조직의 폭이 SM45C측은 약 1.4mm, SCM4측은 약 2mm로 추정할 수 있다.

3.5 회전굽힘 피로 시험

Fig.10은 모재와 마찰용접재의 노치없는 시험편을 회전굽힘 피로시험기에서 피로시험한 결과로부터 얻은 S-N곡선이다.

이 그림에서 보면 SCM4 모재의 피로강도가 훨씬 높게 나타났다. 그리고 SM45C 모재와 마찰용접재는 비슷한 양상을 보여준다. 즉 $N=10^6$ cycles일 때의 피로강도는 SCM4 모재가 $33kgf/mm^2$ (323.4MPa)이고, SM45C 모재는 $23kgf/mm^2$ (225.4MPa), 마찰용접재는 $22.5kgf/mm^2$ (220.5MPa)임을 알 수 있다. 본실험에서는 SM45C 모재, SCM4모재, SM45C와 SCM4의 마찰용접재 및 노치 시험편의 피로강도를 상대적으로 비교 평가하기 위하여 일반적인 베어링의 피로 한도인 10^6 cycles를 기준으로 피로시험을 하였다.

회전굽힘 피로시험에서 마찰용접재의 파단은 피로강도가 낮은 SM45C측에서 일어났다. 그 이유는 이종재를 마찰용접할 경우 마찰용접 조건이 최적일 때는 피로파괴는 용접부보다는 두 이종재료 중 피로강도가 약한 재료에서 일어나며, 마찰용접 조건이 부적절한 경우 피로파괴는 용접부에서 일어난다. 따라서, 본 실험의 마찰 용접조건은 적절한 것으로 생각된다.

이 그림에서 SM45C 모재와 마찰용접재의 경우 약 5×10^6 cycles를 기점으로 하여 5×10^6 cycles전

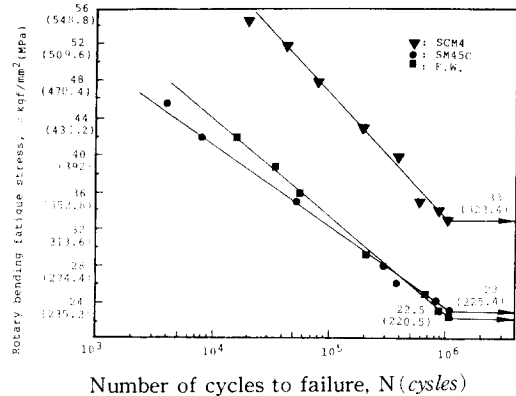


Fig. 10 S-N diagram of SM45C, SCM4 and friction welded-joint specimens by rotary bending fatigue test
Welding condition : as that in Fig.8

에는 마찰용접재의 피로강도가 SM45C 모재보다 높고 그 이후에는 SM45C 모재가 높은 양상을 보여준다.

Fig.10에서 알 수 있듯이 피로강도 σ_f (kgf/mm²)와 회전수 N (cycles) 사이에는 정량적인 상관관계가 존재하며 진산된 실험식은 다음과 같다. 식들의 기여율을 조사한 결과 모든 식들은 역시 95% 신뢰성이 있음이 확인되었다⁹⁾.

σ_f 는 약 10^6 cycle일 때의 시간강도를 피로한도로 본 경우이다.

SCM4 :

$$\sigma = 109.23 - 12.60 \log N \quad (4)$$

σ_f at 1.08×10^6 cycles = $33kgf/mm^2$ (323.4 MPa)

SM45C :

$$\sigma = 79.22 - 9.34 \log N \quad (5)$$

σ_f at 1.14×10^6 cycles = $23kgf/mm^2$ (225MPa)

Friction welded metal :

$$\sigma = 85.64 - 10.53 \log N \quad (6)$$

σ_f at 1.14×10^6 cycles = $22.5kgf/mm^2$ (220.5 MPa)

Fig.11은 모재, 용접면 그리고 열영향부에 Fig.2의 형태로 노치를 가공하여 회전굽힘 피로 시험기에서 피로시험한 결과로부터 얻은 S-N곡선이다. 이 그림에서 보면 SCM4의 HAZ부위에 노치를 가공한 시험편이 피로강도 ($N=10^6$ cycles)가 $46kgf/mm^2$ (450.8MPa)로서 가장 높게 나타났다. 그리고 용접부에 노치가공한 시험편,

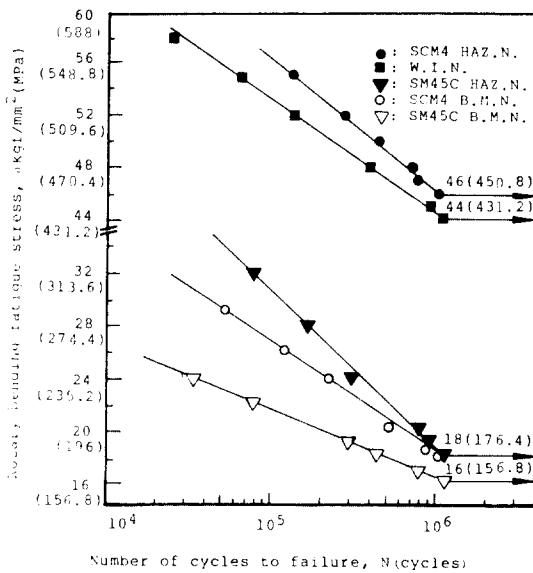


Fig. 11 S-N diagrams of notched specimens by rotary bending fatigue test
Welding condition : as that in Fig.8

SM45C의 HAZ 부위에 노치가공한 시험편, SCM4모재에 노치가공한 시험편 및 SM45C모재에 노치가공한 시험편의 순서대로 피로강도가 각각 44kgf/mm^2 (431.2MPa), 18kgf/mm^2 (176.4MPa), 16kgf/mm^2 (156.8MPa)이다. 위의 결과에서 SM45C 모재에 노치가공한 시험편의 피로강도가 낮은 것으로 보아 SCM4 모재의 노치민감도가 높다는 것을 추측할 수 있다. SM45C의 HAZ 부위에 노치가공한 시험편의 피로강도가 낮은 이유는 이웃한 마찰용접부위의 경한조직에 의하여 집중적인 노치영향을 받았기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.12는 노치없는 용접재와 HAZ부위 및 용접부에 노치가공한 시험편의 피로시험한 결과를 비교한 것이다.

이 그림에서 SCM4의 HAZ 부위에 노치가공한 시험편의 피로강도가 46kgf/mm^2 (450.8MPa)로서 노치없는 용접재의 경우보다 51% 높음을 알 수 있다. 용접부에 노치가공한 시험편의 피로강도는 44kgf/mm^2 (431.2MPa)로서 노치없는 용접재의 경우보다 49% 높음을 알 수 있다. 그리고 SM45C의 HAZ에 노치가공한 시험편의 피로강도는 18kgf/mm^2 (176.4MPa)로서 노치없는 용접재의 경우보다 25% 떨어진다. 그러나 노치가공한

SM45C 모재보다는 약 13% 높음을 알 수 있다. 즉, Fig.11, Fig.12에서 용접부 및 HAZ 부위의 피로강도는 SM45C와 SCM4모재의 경우보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 마찰용접에 관한 다른 연구논문에서 보고⁶⁻¹⁰⁾된 것처럼 본 실험에서도 최적 마찰용접 조건일 때 용접부 및 HAZ부위의 피로강도가 SM45C와 SCM4 모재보다 우수함을 알 수 있다. 그리고 고온실험에서도 비슷한 양상이 나타나는 것으로 보고되고 있다.¹⁰⁾

Fig.11에서 알 수 있듯이 피로강도 σ_f 와 회전수 N 사이에서는 정량적인 상관관계가 존재하며, 전산된 실험식은 다음과 같다. 이러한 모든 식들의 기여율을 조사한 결과 95%의 신뢰성이 확인되었다.

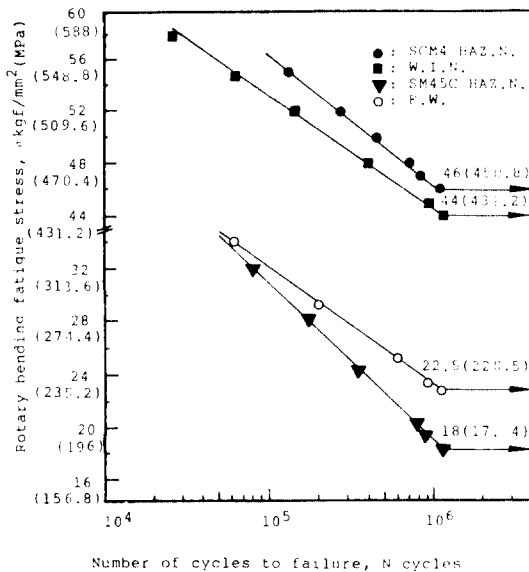


Fig. 12 S-N diagrams comparing notched specimen with unnotched specimens of friction welded joints by rotary bending fatigue test
Welding condition : as that in Fig.8

SCM4 HAZ notched :

$$\sigma = 106.66 - 10.02 \log N \quad (7)$$

$$\sigma_f \text{ at } 1.1 \times 10^6 \text{ cycles} = 46\text{kgf/mm}^2 \quad (450.8\text{MPa})$$

Weld interface notched :

$$\sigma = 93.64 - 8.12 \log N \quad (8)$$

$$\sigma_f \text{ at } 1.15 \times 10^6 \text{ cycles} = 44\text{kgf/mm}^2$$

(431.2MPa)

SM45C HAZ notched :

$$\sigma = 103.47 - 14.18 \log N \quad (9)$$

$$\sigma_f \text{ at } 1.12 \times 10^6 \text{ cycles} = 18 \text{ kgf/mm}^2$$

(176.4 MPa)

SCM4 B.M. notched :

$$\sigma = 78.42 - 8.70 \log N \quad (10)$$

$$\sigma_f \text{ at } 1.1 \times 10^6 \text{ cycles} = 18 \text{ kgf/mm}^2$$

(176.4 MPa)

SM45C B.M. notched :

$$\sigma = 48.66 - 5.42 \log N \quad (11)$$

$$\sigma_f \text{ at } 1.1 \times 10^6 \text{ cycles} = 16 \text{ kgf/mm}^2$$

(156.8 MPa)

Table 4에는 각 재료의 노치민감도를 정리한 결과이다. Table 4에서 SM45C HAZ 부위의 노치민감계수(η)가 가장 낮고, SCM4 모재의 노치민감계수가 가장 높게 나타난다. 즉, 용접부(SM45C HAZ)의 노치민감도가 모재보다 낮기 때문에 용접품질이 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

SM45C와 SCM4강의 마찰용접 최적 조건을 결정하기 위한 실험과 최적 조건에서의 경도시험, 조직검사 및 피로시험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 총 업셋량(U)은 마찰용접 가열시간(t_1)의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.

2) 마찰용접재의 인장강도 σ_t (kgf/mm^2)는

SM45C 모재의 경우보다 높은 영역이 존재하며, 연신율 ϵ (%)을 고려한 최적 용접조건은 다음과 같다.

$$N = 2,000 \text{ rpm}, p_1 = 4 \text{ kgf/mm}^2 (39.4 \text{ MPa}),$$

$$t_1 = 2 \text{ s}, p_2 = 8 \text{ kgf/mm}^2 (78.4 \text{ MPa}), t_2 = 3 \text{ s}$$

이때, 총 업셋량(U) = 3.4mm이며,

이들의 상관관계 실험식은

$$\sigma_t = 0.2U^3 - 3.34U^2 + 17.03U - 66.00$$

$$\epsilon = 0.2U^3 - 3.34U^2 + 16.00U - 11.82$$

이다.

3) 연신율이 증가할 수록 인장시험편의 파단위치가 용접면에서 멀어지며, 파단면은 SM45C모재와 비슷하고, 인장시험시 파단은 SM45C측에서 일어난다.

4) 용접면에서 두 이종재료가 강력히 혼합하였고 열영향부는 SM45C가 1.4mm, SCM4가 2mm 정도로 타용접재에 비하여 매우 낮다.

5) $N = 10^6$ cycles때의 피로강도는 SM45C의 경우 약 23 kgf/mm^2 (225.4MPa), SCM4는 약 33 kgf/mm^2 (323.4MPa), 용접재는 약 22.5 kgf/mm^2 (220.5MPa)이다. 그리고 SM45C와 용접재의 피로강도가 비슷한 값을 가지며, 피로파단은 용접재의 경우 SM45C에서 발생하였다.

6) 용접부의 조직검사 결과 아무런 결함이 발견되지 않았으며, 용접부의 경도는 모재의 3배 이상으로 나타나, 이의 완화를 위하여 용접후 열처리가 필요하다.

7) 용접부의 피로강도는 모재의 피로강도보다 우수하게 나타났다.

Table 4 Results of fatigue strength test

Speci.	Item	Notch in Fig.2	Tensile strength σ_t kgf/mm^2 (MPa)	Fatigue strength at $N = 10^6$ cycles σ_f kgf/mm^2 (MPa)	α	β	η
SM45C	B.M.	Unnotched	86.4 (846.7)	23 (225.4)	1.27	1.44	1.63
		Notched	109.6 (1,074.1)	16 (156.8)			
SM45C	HAZ	Unnotched	92.3 (904.5)	22.5 (220.5)	1.20	1.25	1.25
		Notched	110.6 (1,083.9)	18 (176.6)			
Weld inter.		Unnotched	-	-	-	-	-
		Notched	117.0 (1,146.6)	44 (431.2)			
SCM4	HAZ	Unnotched	-	-	-	-	-
		Notched	127.9 (1,253.4)	46 (450.8)			
SCM4	B.M.	Unnotched	104.1 (1,020.2)	33 (323.4)	1.17	1.83	4.88
		Notched	121.3 (1,188.7)	18 (176.4)			

α = Stress concentration factor, β = Notch factor, η = Notch sensitivity factor

8) 노치민감계수는 용접부가 모재보다 낮게 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) Oh, S.K., "Application of Friction Welding to Parts of Industrial Machinery", 한국박용기 관학회지, 제10권, p.34-42, 1986
- 2) Vill, V. I., "Friction Welding of Metals", Svarochnoe Prorjvodsto, 3, p. 20-22, 1962
- 3) Tasaki, Y. and N. Nakayma, "Friction Welding of Ni-based Super Alloyed Nitriding Steel", J. Proc. Mech. Mar., 36, p. 707-711, 1970
- 4) Oh, S.K., "Study on Friction Welding of Valve Materials SUH3-SUH31", J. Korean Soc. Mech-Engr., 14, p. 221-232, 1974
- 5) 마찰압접 연구회, "마찰압접", 코로나사, p. 46, 145-150, 184, 1979
- 6) Okita, K. and W. Kishimoto, "Studies on Friction Welding of SUS304 Austenitic Stainless Steel(Report I)", J. Weld. Soc., 48, p. 991-995, 1979
- 7) Oh, S.K., S.D. Han and U.J. Lim, "Effects of Postweld Aging Treatment on Rotary Bending Fatigue Strength of Friction Welded Joints at Elevated Temperature", J. Korea Society of Marine Engineers. Vol.7, No.2, p. 36-49, 1983
- 8) Oh, S.K. K.Y. Lee and H.J. Kim, "A Study on Fatigue Strength of Friction-Welded Heat-Resisting Steels at High Temperature (I)", Proc. KSME. June, p. 130-138, 1980
- 9) Oh, S.K., "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Technique", Ph. D. Thesis, Keio University, Part I, p. 27-42, 73-84, p. 85-98, p. 122-134, 1981
- 10) Um, D.S. and S.W. Kang, "Study on Fatigue Strength of Friction Welded S20C and SUS27B", J. SNAK, Vol. 8, p. 13-24, 1971
- 11) Hasui, A "Friction Welding Aluminum and Carbon Steel", JSME, Vol.46, No.12 p. 858-862, 1977