

스프링강(SUP9A)-SM25C의 이종재 마찰용접 피로특성에 관한 연구

정석주 · 이기중*†

서울산업대학교 기계설계학과 · 대전기능대학 컴퓨터응용기계과
(2001. 5. 8. 접수 / 2001. 9. 13. 채택)

A Study on Fatigue Characteristics of Dissimilar Spring Steel(SUP9A)-SM25C by Friction Welding

Suk-Choo Chung · Ki-Jung Lee*†

Department of Mechanical Design, Seoul National University of Technology

*Department of Computer Aided Machine, Taejon Polytechnic College

(Received May 8, 2001 / Accepted September 13, 2001)

Abstract : The friction-welding SM25C is a substitute for the spring steel that is utilized in the machinery, airplane, and automobile, etc. This substitution would provide reduction of material and weight of welding parts. From the result we found that the strength of the friction welded joint was 529~617MPa and the toughness was 1.2 times higher than that of the base metal. The optimal condition of friction welding was found as follows : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=68\text{MPa}$, $P_2=137\text{MPa}$, $t_2=2\text{sec}$, $t_1=2\sim 4\text{sec}$, Considering the strength, the hardness, and the reduction of area in the friction welding, the friction welding using SUP9A and SM25C was found to cause no problem in on-the-job application.

Key Word : friction welding, heat affected zone, heating pressure, heating time weld interface, micro structure, upsetting time, upsetting pressure

1. 서 론

최근 내식성, 내산화성 환경이나 고하중, 반복하중의 조건하에서 사용하는 특수강재질의 용접구조물에 있어서는 생산원가 절감 또는 경량화를 목적으로 특수강과 일반 탄소강과의 이종재료를 마찰용접(friction welding)하여 사용하는 경우가 늘어나고 있다.

마찰용접은 소재를 맞대어 가압한 상태에서 상대운동에 따르는 두 소재 사이의 마찰열과 가압력을 이용하여 소성접합유동을 일으키게 하는 금속접합 과정이기 때문에 다른 용접법에 비해 비교적 양호한 모재의 기계적 특성을 유지하면서 구조물의 무게와 제작비용을 절감시킬 수 있는 장점¹⁾을 가지고 있다.

이종재료의 마찰용접에 관한 연구는 1958년경 소

련의 VNIIESO²⁾에서 금속용접에 대한 것을 실용화한 후 각종 탄소강의 마찰용접을 중심으로 하여 많은 연구가 진행되었다. 그후 마찰용접에 대한 변수³⁾ 뿐만 아니라 벨브재료⁴⁾ SM25C의 마찰용접⁵⁾는 Inconel 713C와 SCM 440⁶⁾ 등 마찰용접에 대한 연구가 행해져 왔다.

그러나 철도차량 또는 자동차의 현가장치로 사용되고 있는 스프링강과 탄소강 이종재간의 마찰용접에 관한 연구는 용도상 동적인 조건하에서 실험을 실시하여야 됨에도 불구하고, 지금까지의 연구들은 주로 정적 기계적 특성 또는 용접후의 열처리에 따르는 재료조직의 변화 등을 실험하는 수준에 그치고 있기 때문에, 실제 응용제품의 품질과 용접조건과의 기술적인 상관관계를 예측하는 데에 상당한 불일치를 나타내고 있으며, 특수 마찰용접에 대한 연구가 계속 진행되고 있는 실정이다.⁷⁾

따라서 자동차용 현가장치에 사용되는 스프링강 SUP9A와 SM25C 이종재의 최적 마찰용접 조건을 설정하여, 마찰용접된 시험편들을 현장에서와 같은

†To whom correspondence should be addressed.
ks8386@tjpc.ac.kr

조건하에서 열처리한 후, 인장시험, 경도시험, 피로 시험 등의 실험결과를 통하여 이종재 접합부의 동적인 기계적 특성과 용접조건과의 상관관계를 도출하여 그 결과를 이종 용접부의 강도와 인성을 동시에 높일 수 있는 최적 마찰용접 조건과 탄소량이 마찰용접 조건에 미치는 영향을 파악하여 자동차의 현가장치에 스프링강을 대신하여 마찰용접한 SUP9A와 탄소구조강 SM25C를 후열처리하여 사용하여도 용접부의 신뢰성을 향상시키는데 큰 문제없다는 것을 분석하고자 하였다.

II. 실험방법

2.1. 시험편

본 실험에 사용한 용접소재는 자동차용 스프링강 SUP9A와 탄소구조강 SM25C와의 이종재료이며 이들 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

본 연구에서는 마찰용접의 조건을 설정하고 그에 따른 기계적 특성을 규명하기 위하여 봉대봉 이종재 마찰용접을 하였고 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타냈다. 이 그림의 (a)는 마찰용접 시험편, (b)는 인장 시험편, (c)는 피로시험편이다. 또한 Photo 1은 마찰용접한 후의 시험재의 형상으로서 가공하기 전의 형태를 나타낸 것이다. 시험편은 CNC선반에서 1차 가공하고 열처리한 후, 2차 가공은 원통 연삭기로 연삭한 후 시험편 크기의 오차를 줄이기 위해 샌드페이퍼로 연마하였다.

Table 1. Chemical composition of SUP9A and SM25C (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
SUP9A	0.61	0.25	0.81	0.021	0.025	0.82	-
SM25C	0.25	0.17	0.43	0.008	0.018	0.12	0.08

Table 2. Mechanical properties of SUP9A and SM25C

Item	Value	
	SUP9A	SM25C
Tensile strength(MPa)	1489	466
Yield strength(MPa)	1078	319
Elongation(%)	9	36
Reduction of area(%)	20	63
Hardness(HB)	363-429	138

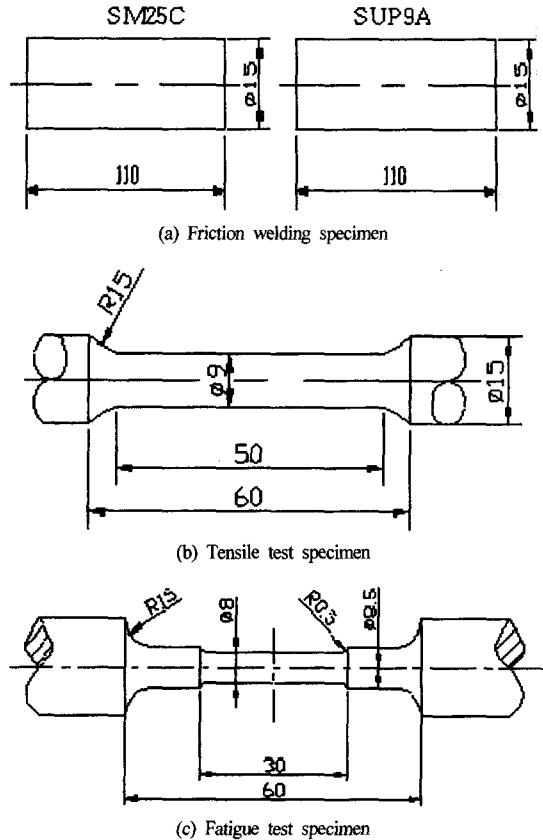


Fig. 1. Shape and dimension of specimen for friction welding tensile test and fatigue test

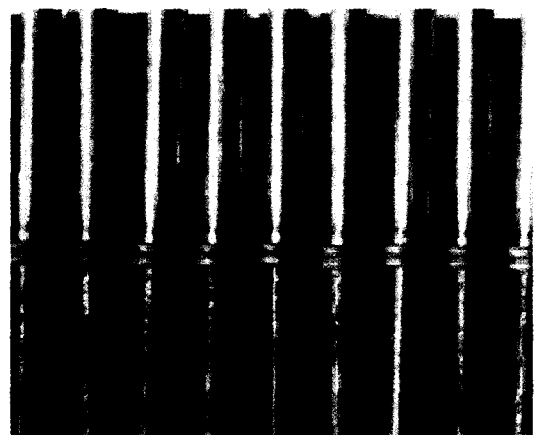


Photo 1. Specimens of friction welding

2.2. 열처리

마찰용접한 시험편을 열처리한 후 용접부의 인장 시험, 경도측정을 하였다. 열처리 시험편은 스프링

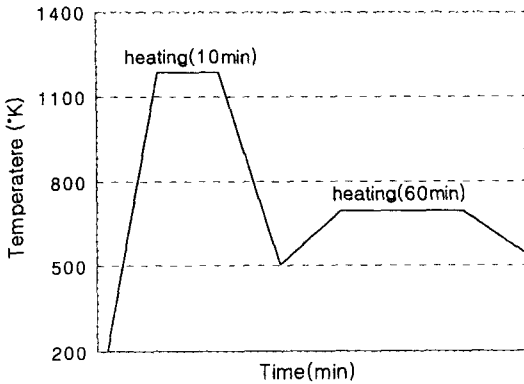


Fig. 2. Heat treatment cycle(quenching and tempering)

강(SUP9A)과 SM25C 이종재를 기계 가공한 후 산화 및 탈탄을 방지하기 위하여 진공중에서 현장에서와 같은 조건으로 Fig. 2와 같이 열처리하였다. 전기로 내의 온도를 1183°K까지 상승시킨 후 시험편을 10분 동안 노내에서 유지하고 기름 담금질한 후 693°K에서 60분간 가열한 후 출구부에서 냉각수로 상온까지 냉각시켰다.

2.3. 마찰용접 조건

마찰용접에 사용된 시험편은 스프링강(SUP9A)과 SM25C 이종재로서 마찰용접최적 조건을 조사하기 위하여 Table 3과 같이 회전수(n)를 고정하고 마찰압력(P₁), 업셀압력(P₂)을 결정하고, 예비실험을 통하여 업셀시간(t₂)을 선택한 후 마찰시간(t₁)을 변화시켰다.

2.4. 실험방법

이음부의 강도는 인장강도, 연신율, 단면수축률 등을 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정하여 최적마찰 시간(t₁)을 결정하였으며 인장시험은 만능재료시험기(UTM-30T)에서 인장속도 1mm/min으로 수행하였다.

열처리된 마찰용접재를 Mounting press 와 연마기에 의해 경도 시험편과 현미경 미세조직 검사용 시험편을 가공하였고, 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기를 이용하여 Load 200g, Running time 20 sec의 조건에서 시험편 깊이 3mm의 용접 경계면(Weld interface)과 W. I. 좌우 각각 5mm씩을 1mm 간격으로 측정하였다. 현미경 조직검사용의 시험편은 연마한 후 부식액으로는 알코올 95%, Nitric acid 5% 용액에 15초 동안 부식시키고, 물로 세척한 후 드라

Table 3. Friction welding condition

Material	Rotation n(rpm)	Heating pressure P ₁ (MPa)	Forging pressure P ₂ (MPa)	Friction time t ₁ (sec)	Forging time t ₂ (sec)
SUP9A& SM25C	2,000	68	137	1	2
				2	
				3	
				4	
				5	
				6	
				7	
				8-9	
				49	
		59	117		
68	137				
78	137				
88	147				
98	157				

이어서 신속하게 건조시켜 시험편을 완성시켰다. 피로시험에 사용한 피로시험기로는 오노식 회전 굽힘 피로시험기(Ono type rotary bending fatigue testing machine)로서, 회전수는 3,450rpm으로 하였으며, 피로시험은 상온에서 실시하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 이종재 마찰용접의 최적화

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(N), 마찰압력(P₁), 업셀압력(P₂), 마찰시간(t₁), 업셀시간(t₂) 등이며, 여기서 마찰용접 최적마찰압력 P₁과 최적 업셀압력 P₂를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌^{8~9)}과 실험데이터를 참고로 t₁과 t₂를 각각 3sec, 2sec로 하여 Table 3과 같은 조건으로 마찰용접을 하였다. Fig. 3은 P₁, P₂를 결정하기 위하여 t₁, t₂를 3sec, 2sec로 고정하고 마찰 용접한 용접재의 인장강도를 구한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 P₁, P₂가 각각 68MPa, 137MPa일 때 인장강도 가장 높았으며 이때의 인장강도는 598MPa이었다.

Fig. 4는 마찰 용접조건을 n=2000rpm, P₁=68MPa, P₂=137MPa, t₂=2sec로 일정하게 하고 변수 t₁을 변화

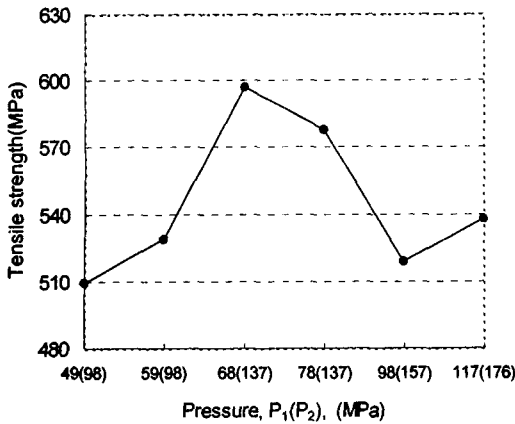


Fig. 3. Tensile strength vs. P_1, P_2 for the friction welded joint of SUP9A to SM25C

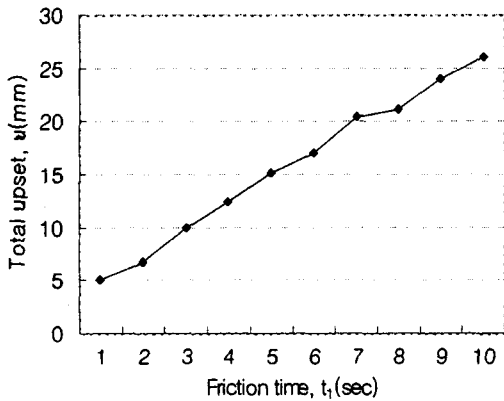


Fig. 4. Total upset vs. Friction time in friction welded joint of SUP9A to SM25C

시켜서 t_1 과 업셀량과의 관계를 조사한 결과이다. 이 그림으로부터 t_1 이 증가함에 따라 총 업셀량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 다른 실험과 동일한 경향을 나타내는 것으로^{10~11)} 이때의 총업셀량은 5~26mm이었다.

3.2. 마찰 용접부의 강도와 연성

마찰 용접재의 인장강도 σ_t 와 마찰시간 t_1 과의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 t_1 의 최적범위는 $t_1=2\sim4\text{sec}$ 이다.

이때 전열처리의 인장강도(σ_t)는 529~617MPa이며, 후열처리의 인장강도(σ_t)는 549~627MPa로서 열처리 실시 조건에 따른 인장강도는 큰 차이가 없었다. 이때 마찰 용접부의 인장강도, 즉 이음효율이 Table 2의 SM25C보다 높은 범위가 존재함으로써 최

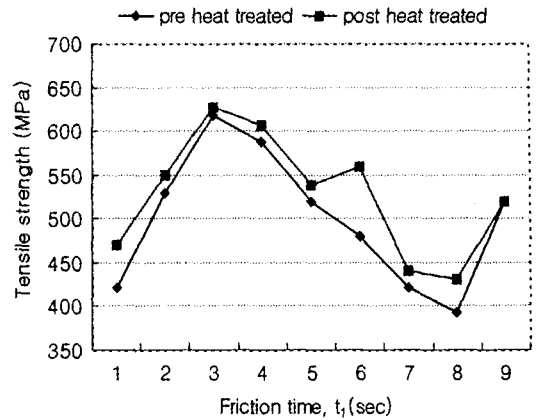


Fig. 5. Tensile strength vs. Heating time in friction welded joint of SUP9A to SM25C

적용셀량 범위는 $t_1=2\sim4\text{sec}$ 가 매우 적합함을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 마찰시간 t_1 이 전·후열처리 마찰 용접재의 연신율 $\epsilon(\%)$, 단면 수축률 $\phi(\%)$ 에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 연신율 $\epsilon(\%)$ 과 단면 수축률 $\phi(\%)$ 은 $t_1=2\sim4\text{sec}$ 일 경우에 모재보다 약 1.3배 이상으로 증가해 연성면에서 큰 문제가 없는 양호한 결과가 얻어진다. 또한 후열처리한 마찰용접재가 전열처리한 경우 보다 연성이 더 높음을 알 수 있다.

3.3. 마찰 용접부의 경도분포

Fig. 8은 이종재 마찰 용접부의 전열처리재와 후열처리재의 경도를 나타낸 것으로 전열처리재의 경도값에는 Peak부가 존재하지만, 후열처리재의 경우

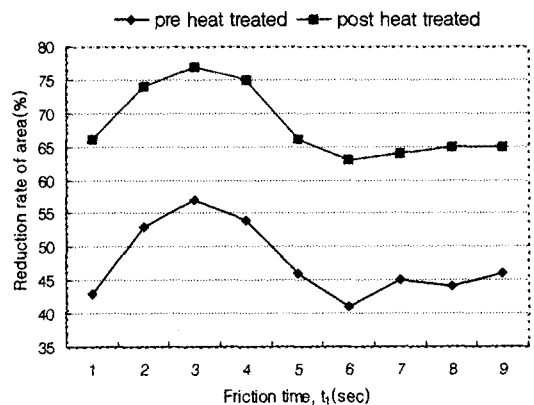


Fig. 6. Reduction of area vs. Heating time in friction welding of SUP9A to SM25C

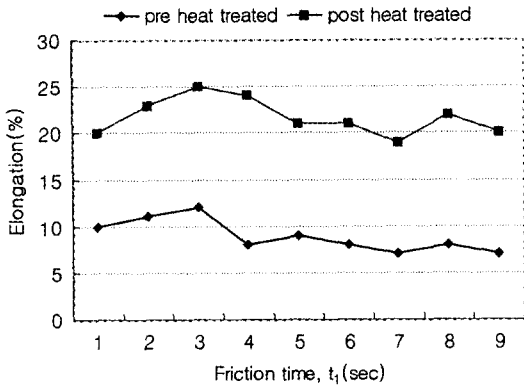


Fig. 7. Elongation vs. Heating time in friction welding of SUP9A to SM25C

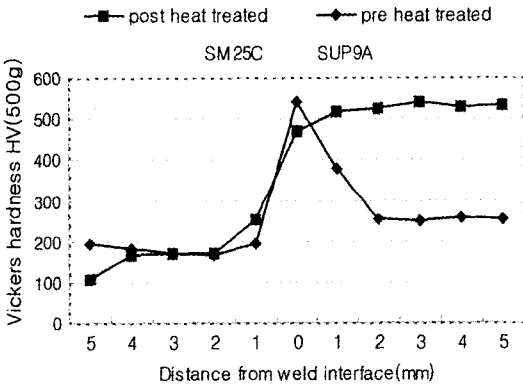


Fig. 8. Hardness distribution near the weld interface of friction-welded-joint of SUP9A to SM25C(welding condition : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=68\text{MPa}$, $P_2=137\text{MPa}$, $t_1=3\text{sec}$ $t_2=2\text{sec}$)

에는 Peak 부가 나타나지 않았다. 그 이유는 Fig. 2의 용접 후열처리에 의해 경도가 완화작용이 충분히 작용하였고 내부 응력이 제거되었기 때문이라 판단된다¹²⁾.

전열처리재의 경도값은 모재부에 비해 W. I. 부는 매우 높았으나, SM25C의 경우 전열처리 및 후열처리에 따른 경도값에는 거의 차이가 없었지만 SUP9A의 경우 후열처리인 경우에는 대체로 250Hv 정도지만 전열처리의 경우에는 500Hv 이상으로서 열처리 조건에 따라 경도차이가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이는 마찰압력과 열압력에 의해 조직이 미세화되었기 때문이다.

3.4. 마찰 용접부의 현미경조직

마찰용접 조건에 따른 용접재의 전열처리재와 후열처리재에 대하여 용접부와 열영향부 조직을 검사

SUP9A : SM25C

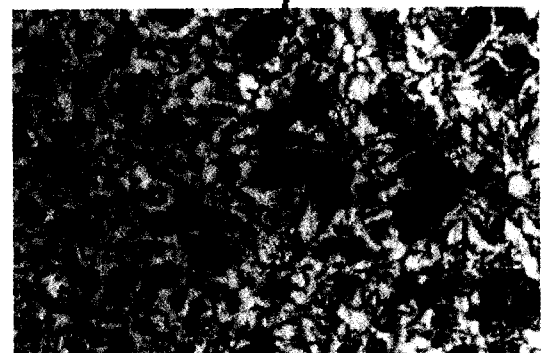
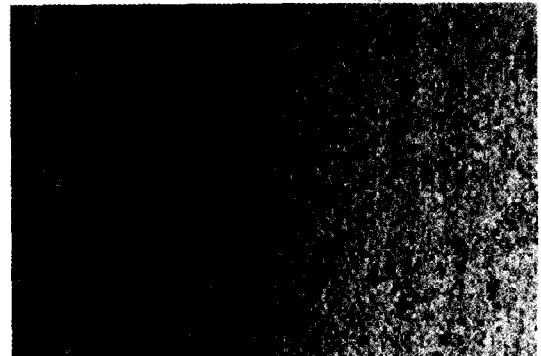
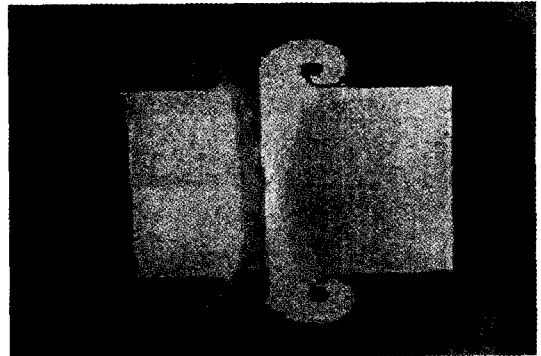


Photo 2. Microstructures of friction welded joint of SUP9A to SM25C(welding condition : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=68\text{MPa}$, $P_2=137\text{MPa}$, $t_1=3\text{sec}$, $t_2=2\text{sec}$; Pre heat treatment)

하기 위하여 W. I. 그 좌우 3mm 위치의 조직사진을 Photo 2와 Photo 3에 나타내었다. Photo 2는 전열처리재의 조직으로서 펄라이트와 페라이트조직이었고, Photo 3은 후열처리한 마찰 용접부의 조직으로서 담금질후의 조직은 마르텐사이트조직이었다.

3.5. 마찰 용접부의 피로특성

Fig. 9는 마찰용접조건을 $n=2000\text{rpm}$, $P_1=68\text{MPa}$,

SUP9A : SM25C

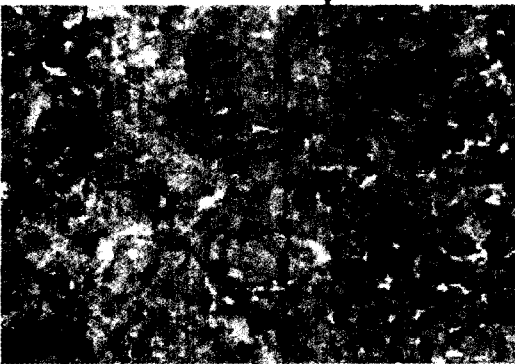
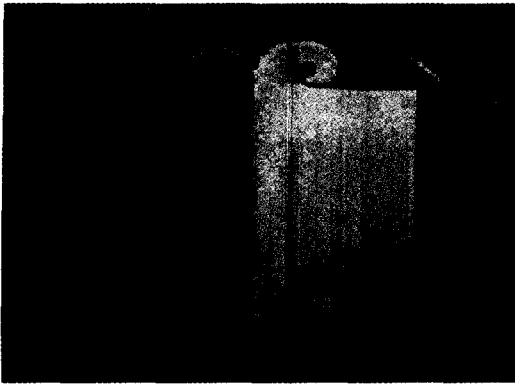


Photo 3. Microstructures of friction-welded joint of SUP9A to SM25C(welding condition : n=2000rpm, P₁=68MPa, P₂=137MPa, t₂=2sec, t₁=3sec ; Post heat treatment)

P₂=137MPa, t₁=3sec, t₂=2sec로 하여 스프링강 SUP9A와 SM25C를 마찰 용접한 경우의 최적조건하에서 피로시험 결과를 나타낸 것이다.

응력상태는 진폭과 주기가 수시로 변화하는 응력상태를 평활선이나 작은 응력 단계의 집합으로 취급해도 실용상 오차는 없는 것으로 가정하고 실험

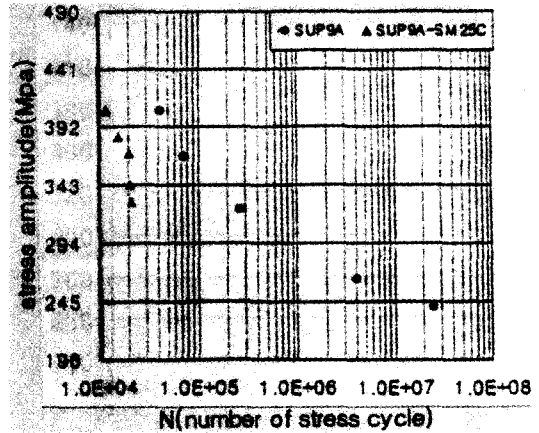


Fig. 9. S-N curve of unheat treated specimen

하였다. 데이터의 정리 방법은 시험기를 회전시켜 파괴되었을 때의 회전수(N)를 구하고 피로 한도(σ_L)는 시험편 8~10개를 사용하여Stair-Case법¹³⁾에 의해 결정하였고, 이것을 토대로 해서 피로 한도 곡선(S-N curve)을 작성하였으며, 응력을 증가 또는 감소시켜 회전 굽힘 응력으로 피로 한도까지 측정하였다.¹⁴⁾

본 실험에서의 피로 한도 곡선의 기울기(응력(σ) 회전수(N))는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 전열처리재의 스프링강(SUP9A)은 피로강도가 240MPa일 때 반복수가 2.45E+07cycles이다. 마찰 용접한 스프링강(SUP9A)과 SM25C는 열처리전에 피로강도를 구하는 것은 큰 의미가 없었기 때문에 2.17E+04cycles까지 실험하였다.

Fig. 10에 도시된 후열처리재의 스프링강(SUP9A)은 피로강도가 412MPa일 때 반복수가 4.12E+06cycles

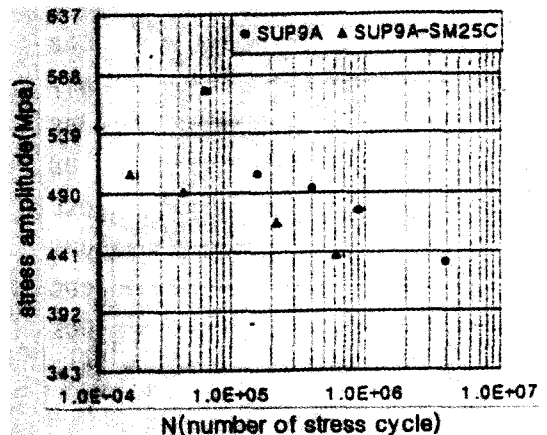


Fig. 10. S-N curve of heat treated specimen

이며, 마찰용접한 SUP9A와 SM25C는 피로강도가 438 MPa일 때 반복수가 $6.16E+05$ cycles로 나타났다. 또한 후열처리재의 스프링강(SUP9A) 내구한도는 412MPa 이고, SUP9A와 SM25C의 용접재는 438MPa로 마찰 용접재의 내구한도가 6% 높게 나타났으며, 이에 마찰용접한 스프링강(SUP9A)과 SM25C는 고응력부가 아닌 저응력부에 사용한다면 스프링강(SUP9A)의 대체 가능한 소재로 원재료비의 절감을 충분히 할 수 있다고 판단되었다.

IV. 결 론

스프링강(SUP9A)과 SM25C의 이종재를 여러 가지 용접조건하에서 마찰 용접하여 현장적용 열처리 조건과 동일하게 한 후 기계적 성질을 실험적으로 분석한 결과 마찰용접의 최적화에 따른 연구결과는 다음과 같다.

1) 스프링강(SUP9A)과 SM25C와의 마찰용접부 후열처리의 인장강도, 연신율, 연성이 모재보다 1.3 배 이상으로서 이음효율을 고려한 이종재 마찰용접의 최적조건은 다음과 같다.

$n=2000$ rpm, $P_1=68$ MPa, $P_2=137$ MPa, $t_2=2$ sec, $t_1=2\sim 4$ sec

2) 마찰 용접부의 경도 분포는 후열처리에 의해 균일한 경도분포를 얻을 수 있었다.

3) 후열처리재의 스프링강(SUP9A) 내구한도는 412 MPa이고, SUP9A와 SM25C의 용접재는 438MPa로 마찰용접재의 내구한도가 6% 높게 나타났다.

4) 마찰 용접한 SUP9A와 SM25C는 고응력부가 아닌 저응력부에 대체 가능한 소재로 원재료비의 절감을 충분히 할 수 있다고 판단되었다.

감사의 글 : 본 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) D. E. Spindler, "What Industry Needs to Know about Friction Welding", Welding Journal March, pp. 37~42, 1994.
- 2) V. I. Vill, "Friction Welding of Metals" AWS, pp. 2~21, 1962.
- 3) M. B. Hollander, "Friction Welding Parametor analysis", W.R.S, pp. 495~501, 1963.
- 4) S. K. Oh, "Study on Friction welding of valve Materials", K.S.M.E, pp. 221~231, 1974.
- 5) T. K. Min, "SM25C의 마찰용접에서 용접면에 가공된 홀의 영향에 관한 연구", Research Institute of Industrial Technology, Vol. 14, No 1. pp. 35~ 41, 1999.
- 6) H. Cho, "Inconel 713C와 SCM 440의 마찰용접" 대한용접학회지, Vol. 15, No. 6, pp. 78~84. 1997.
- 7) C. R. G. Ellis, "Friction Welding, where industry uses it, Welding Design and Fabrication", pp. 78 ~81, Aug, 1981.
- 8) I. F. Squie, "Thermal and Mechanical Characteristics of Friction Welding Mild Steel", British Welding Journal, Nov, pp. 625~657, 1966.
- 9) D. Schober, and S. Buchholz, Reibschweissen des Werkstoffes 37 Mnsi, Schweisstechnik(Berlin), pp. 455~456, 1974.
- 10) 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 摩擦熔接 강도해석(1)", 大韓機械學會誌, Vol. 22, No. 3, pp. 184~190, 202, 1982.
- 11) S. K. Oh and K. K. Wang, "Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic in Friction Weld", J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp. 22~33, 1983.
- 12) はね技術學會, "はね" 丸善, 第3版, pp. 432~434, pp. 540, 1982.
- 13) 日本金屬表面技術學會, 金屬表面技術便覽, 丸善, pp. 1396~1405, 1960.
- 14) C. S. Choo, 대한기계학회논문집, "SS41재의 피로크랙 傳達速度에 미치는 용접 잔류응력의 영향에 관한 연구", Vol. 12, No. 3, pp. 472~480, 1988.