

(論 文)

HSS-Co와 SM55C 이종 마찰용접재의 피로강도에 관한 연구(2)

서창민* · 서덕영** · 이동재***

(1994년 8월 18일 접수)

A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM55C Carbon Steel (II)

Chang-Min Suh, Duck-Young Suh and Dong-Jae Lee

Key Words : Friction Welding(마찰용접), Fracture Topography(파괴형태), Fractographic Analysis(파면해석), Fatigue Strength(피로강도), Inclusion(개재물), Micro Surface Fatigue Crack(미소표면 피로균열), FRWI(마찰용접 경계면)

Abstract

The fatigue strength and fracture topography in the friction welded interface of high speed steel(HSS-Co) to SM55C carbon steel have been investigated through the fatigue test, SEM fractograph and EDS(energydispersive spectrometer) analysis. Three kinds of specimens used in this research are the friction welded joints, HSS-Co and SM55C carbon steel with circumferential notch, saw notch and smooth, respectively. The notch sensitivity factor, η , of the friction welded joints is lower than that of the base materials, and that represents a superiority of the joint performance of FRW. Fracture topography of the FRW specimens with a notch showed a cleavage or brittle appearance, while that of the FRW smooth specimen appeared to be ductile. Furthermore, although fatigue crack likely initiated near the weld interface of the FRW smooth specimen, crack propagation continued into the HAZ of SM55C steel. Finally, fatigue fractures of the base materials were associated primarily with the inclusions located at the outer periphery of the specimen.

1. 서 론

동종 혹은 이종금속 등의 고상용접법으로서, 모재(base metal)의 접합경계면에서 피접합재의 고속

회전 마찰운동에 의해 발생하는 마찰열을 이용해서 급격히 접합면을 가열, 가압하여 국부적으로 소성 변형을 시켜 압접하는 마찰용접이 산업전반에 널리 이용됨에 따라, 최근 이에 대한 연구^(1~10)가 활발하다. 비록 접합모재의 용융점 차이에도 불구하고 접합면의 강도를 두 모재중 상대적으로 더 취약한 모재보다 개선시킬 수 있으며, 최근에는 두 모재보다 용접성이 더 좋은 중간 매개체를 이용한 3요소 마

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**두원공업전문대학 열냉동과

***경북대학교 대학원 기계공학과

찰용접(three-element friction welding)이 시도되어 기계적 특성을 향상시키는 물론, 마찰용접의 적용범위를 확장시킨 경우도 있다.⁽¹⁵⁾

그러나, 마찰용접을 실제의 기계부품에 적용할 경우, 그 접합부의 기계적 성질이 문제가 되며 종래의 연구에서는 용접효율을 평가할 때 인장강도와 굽힘시험에 의한 경우가 대부분이다. 인장강도에 대한 여러 보고에서 모재의 재질에 따른 최적 마찰용접조건을 선택은 용접효율을 극대화시킬 수 있다고 한다.^(4,7,14) 그렇지만 반복응력이 작용하는 경우에는 인장시험결과에 근거한 마찰용접부의 성능평가로는 불충분하며,⁽¹⁾ 인장강도와 마찰용접 조건과의 관계에 관한 연구와 병행해서 실용상 중요한 피로강도(fatigue strength)의 관점에서 이것을 평가하고, 또 피로현상을 상세히 연구하여 파괴역학(fracture mechanics)적 평가방법에 의한 용접부의 강도특성 파악과 함께 파괴파단면의 관찰 및 분석의 필요성이 대두되고 있다.^(1,2)

따라서, 저자 등⁽²⁾은 HSS-Co/SM55C 마찰용접재 시험편과 모재인 HSS-Co와 SM55C재만의 시험편을 각각 가공하여 통상의 HSS의 열처리방법⁽¹⁸⁾으로 열처리한 후, 인장시험과 피로시험을 실시하여 기계적 성질, 피로특성 및 균열성장거동에 대한 특성을 조사, 연구한 바 있다. 본 연구에서는 상기 연구의 연속과제로써 각 모재와 마찰용접재의 피로강도와 노치에 대한 응력집중 및 노치민감성을 정량화하고 SEM 및 EDS 분석에 의한 파괴파괴특성과 비금속 개재물의 영향 등을 조사하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시료는 HSS-Co재와 SM55C재이다. HSS-Co재는 SKH56종에 상당하는 재질로 Cr, W, Mo 성분이 많지만, 특히 Co성분을 강화시킨 특수공구용 재료인 고속도강이다.

마찰용접된 시험편은 연속 마찰용접기를 사용하여 일본마찰용접협회에서 추천하고 있는 다음과 같은 마찰용접조건에 준하여 실시하였다. 즉, 회전수(N)=1,600 rpm, 마찰 가압력(P_1)=39.2MPa, 단조 업셋가압력(P_2)=196MPa, 마찰가열시간(t_1)=15초와 단조 업셋시간(t_2)=3초이다. 위와 같은 방법으로 마찰용접이 완료된 재료는 760°C에서 4시간 동안 유지시킨 후 노냉시켜 잔류응력을 제거시켰으며 또한 연구결과를 서로 비교하기 위하여 두 가지

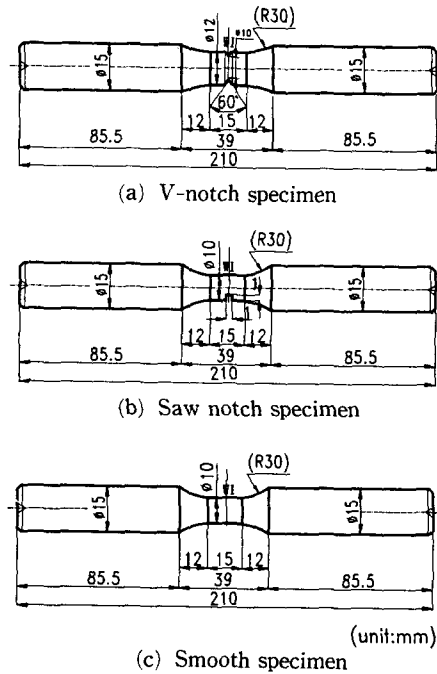


Fig. 1 Configuration of the rotary bending fatigue specimen

모재도 마찰용접재의 열처리조건과 동일하게 열처리하였다.

Fig. 1은 60°인 V형 노치재와 폭과 깊이가 각각 1mm인 톱날 노치재 및 노치가 없는 평활재 등 3가지 종류의 피로시험편을 나타내었다. 피로시험편의 평행부는 연마지 200번에서 1200번까지 연마한 후 통상의 HSS의 열처리방법⁽¹⁸⁾으로 열처리하였다. 이 열처리 후 마무리작업으로 호닝(honing) 처리하였다.

두가지의 모재와 마찰용접재의 피로시험은 오노식 회전굽힘 피로시험기(H5, 98 N·m, 3,450 rpm)를 사용하였다. 마찰용접 경계면상의 조직변화와 파괴파단면의 형태를 관찰하기 위하여 금속현미경과 주사식 전자현미경(SEM)을 이용하였으며, EDS(energy dispersive spectrometer)분석을 병행하였다. 피로균열은 예상되는 파괴파단수명의 7~15%마다 시험기를 일시 중단시켜 레프리카(replica)로 채취, 보관하여 그 길이를 광학현미경으로 정밀하게 측정하였다. 이 피로균열의 자료를 파괴역학적으로 해석하여 마찰용접재와 모재의 파괴파괴 특성을 비교, 검토하였다.

3. 피로시험 결과 및 고찰

3.1 시험편 재질에 따른 S-N곡선의 특성 및 수식화
본 연구에서 적용된 마찰용접조건은 인장과단시켰을 때 마찰용접재간의 나이트가 육안으로 판단하여 생기지 않았을 뿐만 아니라, 용접된 시험편의 경도분포가 통상의 마찰용접의 결과보고^(3,5)와는 달리 경도값이 크게 변화하는 경계면의 영역(50 μm)이 극히 작았다.⁽²⁾ 따라서, 마찰열에 의한 열영향부(HAZ)의 영역을 작게한 마찰용접재와 두가지 모재의 피로시험 결과로부터 얻은 최대 굽힘응력 σ_{max} 와 파단반복수 N_f 와의 관계를 동시에 나타낸 S-N곡선(Fig. 2)에서 각 시험편의 자료는 약간의 산포를 고려하여 실험결과의 정량적인 해석을 시도하였다.

이러한 2종류의 노치재는 평활시험편보다 피로강도가 상당히 큰 폭으로 감소함을 그림상에서 판단할 수 있다. 10^6 회 피로반복수 기준에서 마찰용접재의 평활재 피로강도는 299.2 MPa이고 V노치재와 톱날 노치재는 각각 123.8 MPa과 247.5 MPa이다.

아울러, HSS-Co재의 평활재의 10^6 회 피로강도는 약 774.6 MPa, V-노치재와 톱날 노치재는 각각 290.4 MPa와 268.5 MPa정도로써, 고강도 재료일수록 노치나 표면결함에 대한 응력집중의 영향이 커서 평활재에 비해 노치재의 피로강도가 크게 떨어짐을 그림에서 확인할 수 있다.

이것은 Table 1의 응력집중계수(α)의 수치가 가

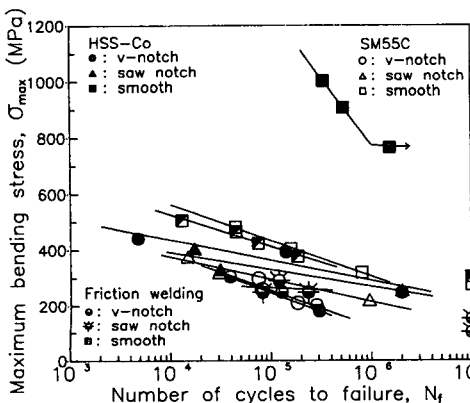


Fig. 2 Relation between maximum bending stress, σ_{max} and the number of cycles to failure, N_f

장 큰 데서도 잘 입증된다. 한편, HSS-Co재의 평활재의 10^6 회 피로강도가 약 774.6 MPa인데 비해 노치재인 경우에는 250~300MPa영역에 포함되었다. 평활재의 SM55C와 FRW재의 10^6 회 피로강도는 약 300MPa로 HSS-Co노치재와 비슷하고, V-노치재에서는 FRW재와 SM55C가 비슷한 피로강도를 나타내었다. 또, 톱날 노치재 경우는 FRW재, SM55C 및 HSS-Co재가 서로 비슷한 값을 가짐을 그림에서 비교하여 알 수 있다.

결국, Fig. 2에서 알 수 있듯이 피로강도와 파단 반복수 N_f 사이에는 다소 자료의 분산이 있지만 정량적인 상관관계가 존재하며 식(1)~(3)과 같은 실험식을 얻을 수가 있다. 여기서, N_f 에 10^6 회 피로수명을 대입하면 각 재료와 시험편 형상에 따른 10^6 회에서의 피로강도를 파악 할 수 있다.

V-notch specimen

$$\sigma = 726.92 - 72.76 \log N_f$$

$$\sigma = 290.4 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (HSS-Co)} \quad (1a)$$

$$\sigma = 1202.98 - 189.01 \log N_f$$

$$\sigma = 109.0 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (SM55C)} \quad (1b)$$

$$\sigma = 905.48 - 130.28 \log N_f$$

$$\sigma = 123.8 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (FRW)} \quad (1c)$$

Saw notch specimen

$$\sigma = 635.13 - 61.11 \log N_f$$

$$\sigma = 268.5 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (HSS-Co)} \quad (2a)$$

$$\sigma = 696.12 - 80.23 \log N_f$$

$$\sigma = 214.7 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (SM55C)} \quad (2b)$$

$$\sigma = 348.45 - 16.82 \log N_f$$

$$\sigma = 247.5 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (FRW)} \quad (2c)$$

Smooth specimen

$$\sigma = 3653.28 - 479.78 \log N_f$$

$$\sigma = 774.6 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (HSS-Co)} \quad (3a)$$

$$\sigma = 1074.94 - 128.21 \log N_f$$

$$\sigma = 305.7 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (SM55C)} \quad (3b)$$

$$\sigma = 977.60 - 113.11 \log N_f$$

$$\sigma = 299.2 \text{ MPa (at } N_f = 1 \times 10^6 \text{) (FRW)} \quad (3c)$$

또한, Table 1에는 인장시험에서 얻은 자료⁽²⁾와 Fig. 2에서 얻은 피로시험 결과를 분석하여 각 시험편의 응력집중계수(stress concentration factor, α), 노치계수(notch factor, β) 및 노치민감도계수(notch sensitivity factor, η) 등을 구하여 정리한 것이다.⁽¹⁶⁾ 여기서, 노치계수 β 는 노치재의 피로강도에 대한 노치가 없는 평활재의 피로강도(10^6 회

Table 1 Results of test with notch types

Mat'l	Notch types	σ_t (MPa)	σ_w (MPa)	ρ (mm)	$(\epsilon_0)^{1/2}$ (mm) ^{1/2}	β	α	η
FRW	v	370.0 [562.7]	[123.8]	0.50	0.70 (0.40)	2.42	3.83 (3.22)	0.50 (0.44)
	Saw	481.4 [563.6]	247.5	0.25	0.46 (0.40)	1.21	1.40 (1.38)	0.53 (0.55)
	Smooth	753.6	299.2					
HSS-Co	v	303.4 [467.2]	[290.4]	0.50	0.82 (0.48)	2.67	4.60 (3.80)	0.46 (0.60)
	Saw	572.4 [600.6]	268.5	0.25	0.39 (0.38)	2.88	4.35 (4.31)	0.56 (0.57)
	Smooth	1538.2	774.6					
SM55C	v	546.0 [847.0]	[109.0]	0.50	0.42 (0.26)	2.80	3.87 (3.46)	0.63 (0.73)
	Saw	802.3 [960.9]	214.7	0.25	0.28 (0.21)	1.42	1.66 (1.60)	0.64 (0.70)
	Smooth	884.8	305.7					

[] : Strength of net area ; True strength
 () : Each value of net area
 σ_t : Tensile strength
 σ_w : Fatigue strength at $N=10^6$ cycles
 ρ : Radius of curvature at the root of notch

$(\epsilon_0)^{1/2}$: Inherent value for fatigue failure
 β : Notch factor
 α : Stress concentration factor
 η : Notch sensitivity factor

사이클)의 비를 나타낸다. 또, 응력집중계수는 실험에서 구해진 노치계수 β 를 이용하여 Neuber의 근사식 (4)에 의하여 구하였으며, 노치민감도계수 η 는 식(5)에 의하여 구하였다.⁽¹⁶⁾

$$\alpha = 1 + (\beta - 1) (1 + \sqrt{\epsilon_0 / \rho}) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1} \quad (5)$$

여기서

ρ : 노치선단의 곡률반경
 ϵ_0 : 피로파단에 필요한 영역의 고유치

Table 1에서 재료의 일반적인 경향, 즉 $\alpha \geq \beta \geq 1$, $0 < \eta < 1$ 임을 알 수 있으며 FRW재와 SM55C재의 α 값은 비슷하게 나타났다. 그러나 HSS-Co재의 α 가 상대적으로 조금 높게 나타난 것은 10^6 회 피로강도에서 구한 β 의 산포에 기인한 것으로 생각되

며 노치재의 응력집중에 의한 피로강도저하가 매우 큼을 반영하고 있다. 아울러, 마찰용접부위의 노치민감도계수 η 가 가장 낮은 반면, 모재의 경우는 상대적으로 높게 나타났다. 이는 마찰용접부의 노치민감성이 모재보다 낮기 때문에 마찰용접의 이음 성능이 우수함을 입증한다.



Fig. 3 Macrofractograph in SM55C specimen (smooth, $\sigma_{max}=482$ MPa, $N_f=4.4 \times 10^4$)

3.2 피로파단면의 관찰

본 장에서는 마찰용접재와 두 모재인 HSS-Co, SM55C재의 노치형상에 따른 피로시험편의 SEM 파단면 관찰과 EDS 분석을 통해 피로파괴 특성을 면밀히 조사하였다. Fig. 3은 SM55C재 평활재 파



(a) Inclusion



(b) Striation

Fig. 4 SEM fractographs in SM55C specimen (smooth, $\sigma_{max}=482$ MPa, $N_f=4.4 \times 10^4$)

단면의 사진이며 Fig. 4(a)는 Fig. 3의 SEM사진으로서, 그림과 같은 개재물을 균열의 발생의 위치에서 발견할 수 있었다.

또 Fig. 4(b)와 같이 균열성장부에서는 피로파면의 특징인 연성줄무늬(striation)를 관찰할 수 있었다. 이러한 미소표면 피로균열이 5곳에서 발생하여 성장, 합체되어 파괴되는 형태이므로 Fig. 3과 같이 파단면상의 골극이 심하게 나타난다.

Fig. 5(a), (b)는 마찰용접재의 V-노치재 및 톱

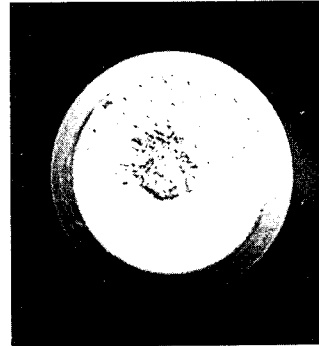
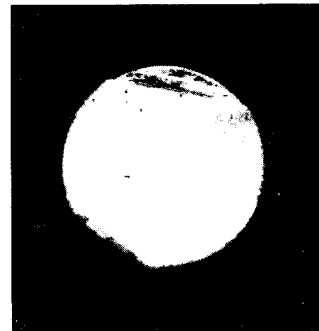
(a) V-notch ($\sigma_{max}=248$ MPa, $N_f=12.7 \times 10^4$)(b) Saw notch ($\sigma_{max}=248$ MPa, $N_f=24.4 \times 10^4$)(c) Smooth ($\sigma_{max}=424$ MPa, $N_f=7.44 \times 10^4$)

Fig. 5 Macrofractographs in friction welded specimen

날 노치채상의 피로파면을 나타내며, 평활재인 Fig. 5(c)와는 달리 응력이 집중되는 노치부에서 피로균열이 발생, 성장되어 파면 굴곡이 적은 비교적 평탄한 파단면을 보이고 있다.

Fig. 6(a)는 Fig. 5(b)의 파단면을 $\times 100$ 배 확대



(a) Cleavage fracture(saw notch, $\sigma_{\max}=248$ MPa, $N_f=24.4 \times 10^4$)



(b) Ductile fracture(smooth, $\sigma_{\max}=424$ MPa, $N_f=7.44 \times 10^4$)

Fig. 6 Typical microscopic appearance in friction welded specimen

한 SEM사진으로 물결(wave)무늬의 파면으로부터 피로균열이 일정한 방향으로 급속히 전파되고 있음을 판단할 수 있다.

그러나, Fig. 5(c)와 같은 평활재는 평활한 표면에서 발생된 다수의 미소한 표면균열이 발생, 성장하면서 서로 합체되어 파괴되므로 그 굴곡이 크게 나타나고, 탄소강이나 스테인리스강의 연구 결과와도 일치한다.⁽¹³⁾ 특히, Fig. 5(a)의 V-노치채와 같은 파단면에서는 중심부인 섬유영역(fibrous zone)이 그 옆의 방사형 전단영역(radial shear zone)보다 좁게 나타나는 특징이 있다. 이는 AISI 4340 강 파단면의 형상과 유사하다.

Fig. 6(b)는 마찰용접된 평활재의 피로파단면으로서 모재인 SM55C재에서 관찰되는 연성 피로파단면을 나타내고 있다. 이것은 용접경계면의 SM55C 쪽에서 발생한 미소균열이 피로크랙 전파속도가 상대적으로 조금 빠른 SM55C강 HAZ부를 따라 선택적으로 전파함을 보여준 저자 등⁽²⁾의 노치채의 결과와 유사하며, Fig. 10에서도 확인할 수 있다. 아울러, EDS에 의한 마찰용접부재의 기지(matrix)의 성분분석 결과는 Fig. 7에서처럼 Fe가 최대피크를 나타내고 다음이 O, V, Co순으로서, HSS-Co재 파면의 EDS 분석(Fig. 9 (a), (b))에서 나타난 성분과 비슷하여 두 모재의 구성성분이 혼합되어 있는 HAZ 영역임을 판단할 수 있다.

Fig. 8은 모재인 HSS-Co의 평활재($\sigma_{\max}=1,002$ MPa, $N_f=33.5 \times 10^4$)의 피로파단면의 형상을 나타내었다. 이 경우 보통 탄소강에서는 관찰할 수 없는 피로파면을 나타내며 시험편은 3부분으로 파괴되었다. 이 평활시험편은 양단 두 곳에서 피로균열이 발생, 성장하다가 시험편의 중앙부분이 분리되면서 취성파괴된 형태이다. 이 그림상의 숫자는 각 위치의 SEM 사진의 촬영장소와 SEM 사진의 번호를 나타내고 있다.

Fig. 8(a)는 HSS-Co재의 평활부의 표면균열 발생원을 SEM으로 $\times 300$ 배 확대촬영한 사진으로서, 미소피로균열은 화살표로 표시된 시험편 표면에 가깝게 형성된 금속간재물(金屬間介在物, metallic inclusion)에 의하여 발생된 것을 확인할 수 있다. 보통 강 of 균열발생이 약 $20\mu\text{m}$ 인 Y형태의 결정경계면에서 생기는 것⁽¹⁷⁾에 비하면 이 개재물의 횡방향 크기는 약 $129\mu\text{m}$ 로 대단히 큰 것이다.

또 Fig. 8(b)는 같은 파면상에서 관찰된 금속간재물을 $\times 500$ 배로 확대촬영한 경우이며, 폭이

94 μm 높이가 163 μm 나 되는 큰 Mo으로 된 개재물이다. 따라서, 이러한 큰 개재물의 존재가 응력 집중현상에 기인하여 피로균열이 발생, 전파가 용이하게 된다. 이 개재물의 EDS 분석결과가 Fig. 9(a)이며, 용점이 높고 내열성이 좋은 Mo (molybdenum, 용점 2,622 $^{\circ}\text{C}$)으로 주로 형성된

금속간 개재물임을 알 수 있다. 그리고 이 개재물 밖의 기지(matrix)의 성분을 EDS로 분석한 것이 Fig. 9(b)이며 Fig. 7과 같이 주로 Fe로 형성된 기지임을 알 수 있다.

또한 Fig. 8(c), (d)는 피로균열의 전파속도가 대단히 빠른 영역에서 관찰된 전형적인 취성파면을

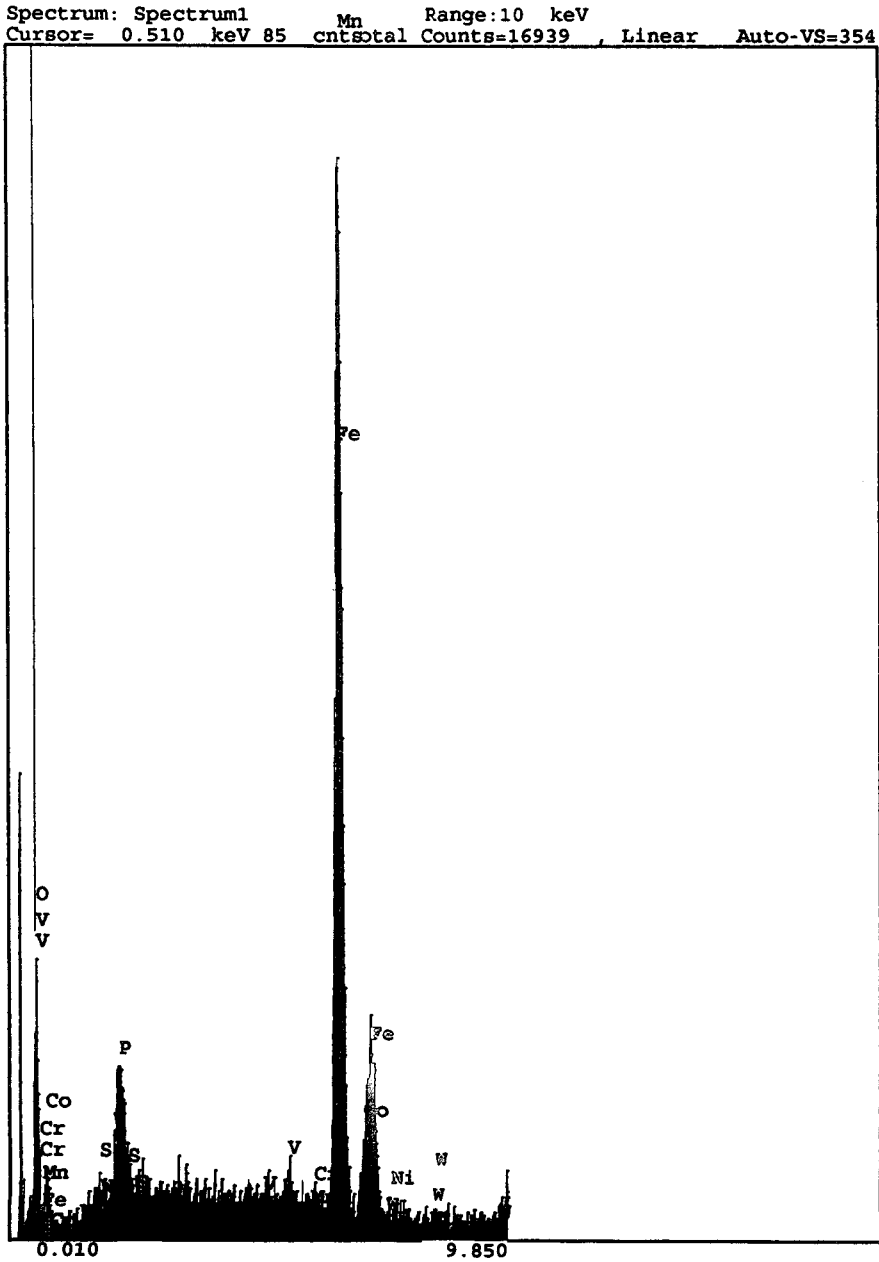


Fig. 7 EDS analysis for Fig.6(b) in friction welded specimen(smooth, $\sigma_{\text{max}}=424\text{ MPa}$, $N_f=7.44 \times 10^4$)

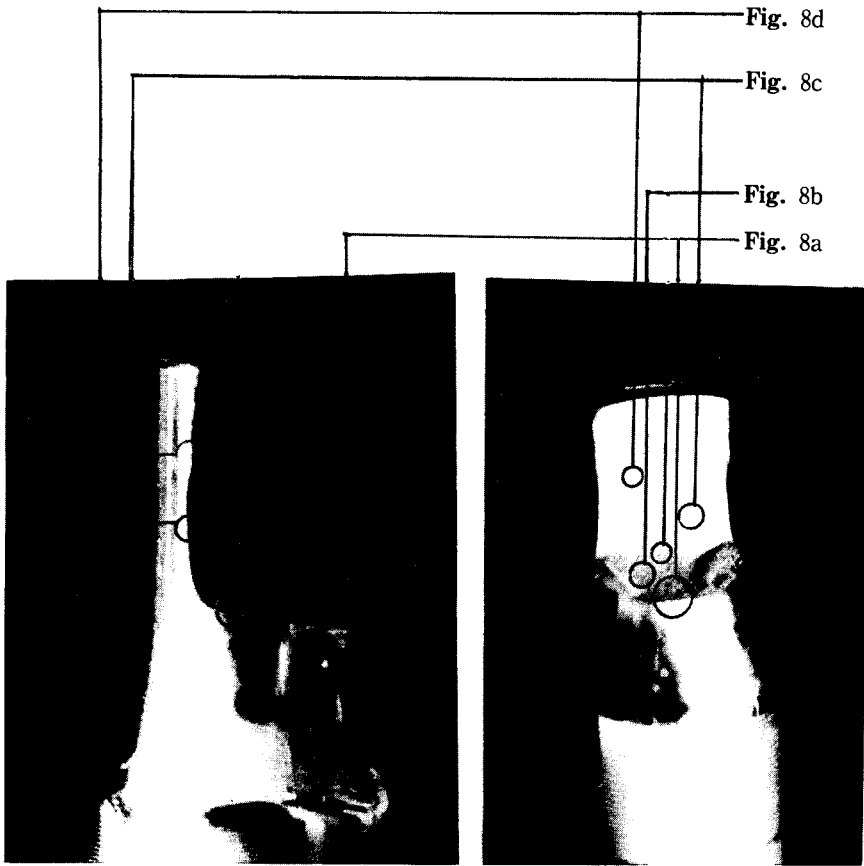


Fig. 8(a) SEM fractograph showing a crack initiation site



Fig. 8(b) SEM fractograph showing cluster of Mo inclusion

Fig. 8 Continued

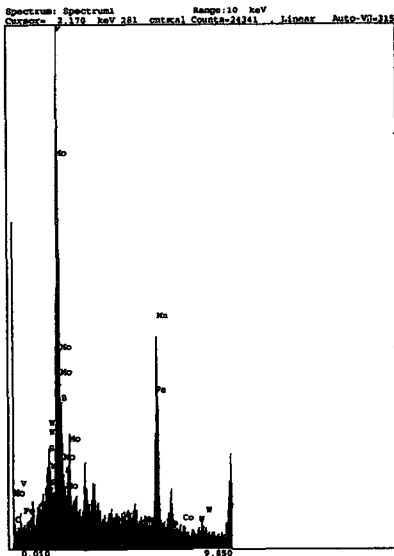


Fig. 8(c) Typical microscopic appearance of brittle fracture

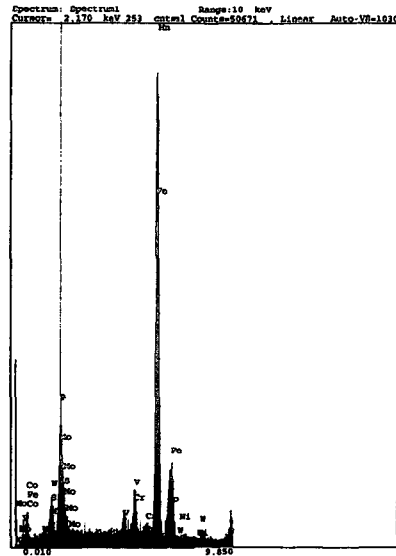


Fig. 8(d) Cluster of inclusions contributing to brittle fracture

Fig. 8 Macrofractographs in HSS-Co specimen (smooth, $\sigma_{max}=1,002$ MPa, $N_f=33,5 \times 10^4$)



(a) Mo inclusion



(b) Matrix

Fig. 9 EDS analysis for Fig. 8(b) in HSS-Co specimen (smooth, $\sigma_{max}=1,002$ MPa, $N_f=33,5 \times 10^4$)

나타내고 있으며, 많은 수의 Mo개재물 덩어리 (cluster of inclusions)가 취성파괴 되었음을 관찰할 수 있다.

이와같이, Fig. 8과 같은 파괴양식은 특수 금속

원소로 기지를 강화시킨 고강도강 (high strength steel)의 피로파괴에서 생기는 대표적인 특징이며, 시험편 표면상에 존재가능한 금속간 개재물의 영향으로 인한 취성파괴의 형태이다.⁽¹¹⁾

3.3 마찰용접 평활재의 피로균열전파 특성

Fig. 10은 FRW재 ($\sigma_{max}=377$ MPa, $N_f=18.5 \times 10^4$)의 평활표면상에서 발생, 성장, 합체되는 미소 표면피로균열(micro surface fatigue crack)의 거동을 피로시험중에 채취, 보관한 레프리카에서 현

미경으로 확대, 촬영하여 연결시킨 사진이다.

이 사진에서 재질의 강도가 큰 HSS-Co보다는 재질이 연한 SM55C재의 용접 경계면 근처의 결정 입계에서 발생한 미소피로균열이 성장하여 다른 인접된 균열과 합체되면서 결국 시험편이 피로파단하

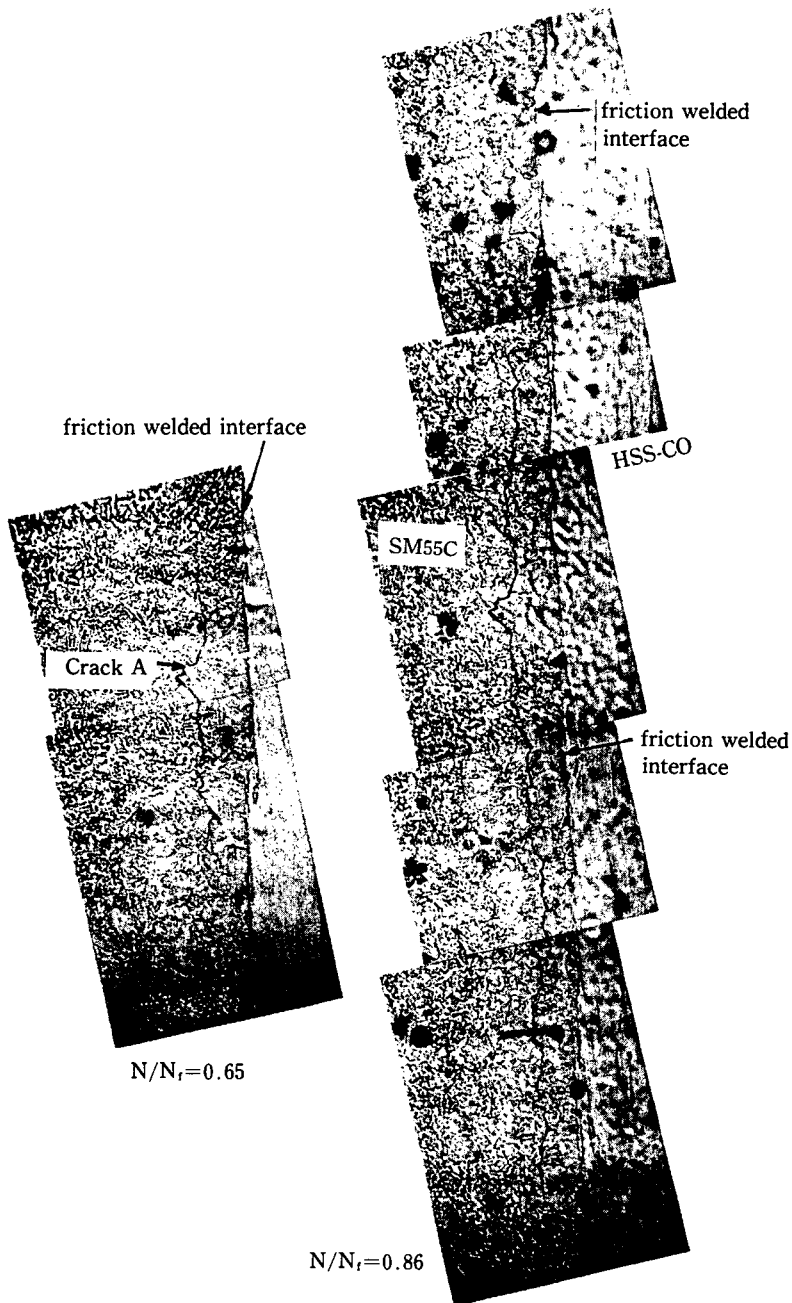


Fig. 10 Photomicrographs showing the initiation and propagation behavior of microcracks initiated on the surface near the friction welded interface(smooth, $\sigma_{max}=377$ MPa, $N_f=18.5 \times 10^4$)

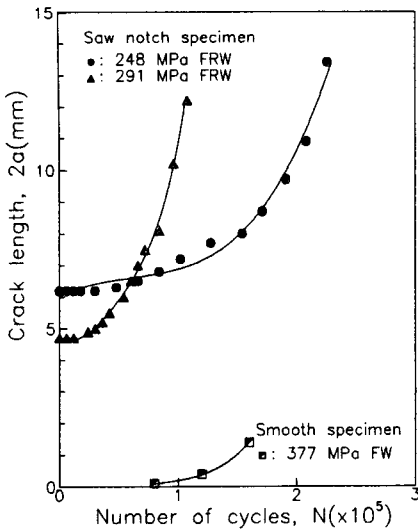


Fig. 11 Relation between crack length, 2a and number of cycles, N

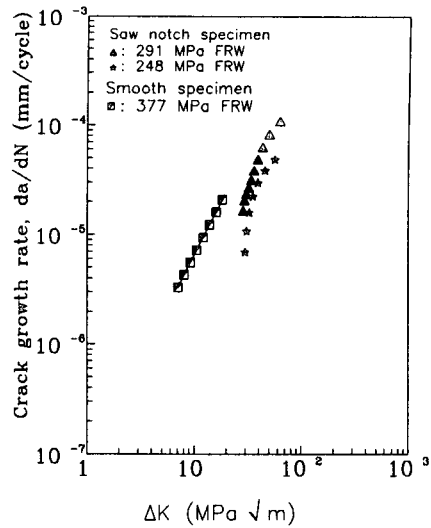


Fig. 12 Crack growth rate vs stress intensity factor range

게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 다수의 미소 표면피로균열의 발생, 성장, 합체에 의한 피로파면은 Fig. 5(c)와 같이 그 파단면의 굴곡이 심하게 나타났다.

Fig. 10의 균열 A는 수명비(N/N_t) 43%일 때 0.095 mm이고, 65%에서 0.430 mm, 86%일 때 1.355 mm로 측정되었다. 본 연구에서는 Fig. 10과 같은 미소표면피로균열의 성장거동을 파괴역학적으로 조사하여 FW 노치재의 균열성장거동과 비교, 해석하였다.

Fig. 11은 마찰용접재와 SM55C재 시험편의 a-N 선도로서, 피로균열의 원활한 전파에 이은 파단 특성을 보임을 알 수 있다. 특히, FRW 평활재의 피로균열길이는 약 1.355 mm에서 인접균열과 합체되어 급격히 파단에 이르렀다. 이 그림을 이용하여 균열의 전파속도 da/dN 와 응력확대계수 ΔK 와의 관계를 톱날 노치재와 비교하여 나타낸 것이 Fig. 12이다. 여기서, ΔK 값은 반타원 표면균열이 있는 환봉시험편에서의 응력확대계수에 대한 白鳥 등⁽¹²⁾의 해석결과를 이용하여 산출하였다. 이 그림에서 마찰용접 평활재와 노치재의 경우, 비슷한 피로크랙전파 기울기로 보이고 있으며, 마찰용접 평활재와 SM55C모재의 균열성장속도가 유사한 특징을 보이고 있다.

즉, FRW 평활재의 피로균열전파 곡선의 기울기는 SM55C모재와 비슷하게 나타났다. 이와같은 경

향은 FRW 평활재와 SM55C모재의 SEM 파단면 분석을 통한 피로파괴 특성의 유사성에서도 관찰할 수 있다. 이는 용접면에서 발생한 크랙은 피로크랙 전파속도가 상대적으로 조금 빠른 SM55C강의 HAZ부를 따라 전파함을 보여준 저자 등⁽²⁾의 연구 보고와 일치한다.

4. 결 론

HSS-Co에 SM55C강을 마찰용접한 마찰용접재와 두 모재 HSS-Co재 및 SM55C재에 평활재, V-노치재 및 톱날노치를 가공한 시험편의 피로시험, 파면검사, EDS 분석 등의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마찰용접부위의 노치민감도계수 η 가 모재의 경우보다 상대적으로 낮게 나타나므로 마찰용접의 이음성능이 우수하였다.
- (2) 고강도 재료일수록 노치나 표면결함의 응력 집중에 의한 피로강도 저하가 매우 큼을 α 의 수치에서 확인되었다.
- (3) FRW 평활재의 피로파괴거동은 평활표면에서 발생한 다수의 미소 표면피로균열이 성장, 합체되어 파단되는 형태로서 모재인 SM55C재의 연성 피로파면의 특징과 유사하다. 따라서, 노치재의 용접경계면 근처에서 발생한 크랙은 피로크랙전파속도가 상대적으로 조금 빠른 SM55C강의 HAZ부를

따라 전파한다는 연구결과와 일치한다. 이는 SEM 파단면 관찰과 EDS분석에 의한 파괴형태의 비교, 검토에서도 확인할 수 있었다.

(4) 마찰용접재의 평활재와 노치재의 파괴형태(fracture topography)는 연성과 취성파괴의 특성을 각각 나타내었다.

후 기

본 연구에 있어 시험편 제작에 협조하여 주신 한국 OSG 주식회사와 아산공업에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Ogawa, K., Nakayama, H., Ohue, Y. and Hasui, A., 1988, "Fatigue Strength Characteristics of S35C/S35C Friction Welded Tubular Butt Joints," *J. of Material Science*, Japan, 37-421, pp. 1209~1265.
- (2) 서창민, 서덕영, 이동재, 1995, "HSS-Co와 SM55C 이중 마찰용접재의 피로강도에 관한 연구(I)," 대한기계학회논문집 제19권, 제4호, pp. 0~0.
- (3) Okita, K., Fukuchi, Y. and Aritoshi, M., 1989, "Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Welded Butt Joints of Free Cutting Stainless Steel," *J. of Material Science*, Japan, 38-432, pp. 1033~1039.
- (4) 運井 淳, 島貞夫, 衣川純一, 1968, "摩擦壓接現象について, 摩擦壓接の研究(4報)," 金屬材料技術研究所 研究報告, 11-2, pp. 203~222.
- (5) Okita, K., Fukuchi, Y., and Aritoshi, M. et al., 1990, "Resistance to Fracture of Friction Welded Joints, (Friction Welded Joints of S45C)," *J. of Material Science*, Japan, 39-445, pp. 1431~1437.
- (6) Kagaya, C., Kato, M., Yashima, A., Kawaguchi, Y. and Egami, N., 1991, "Ductile-Brittle Transition Characteristics of S15CK/S15CK Friction Welded Butt Joint," *J. of Material Science*, Japan, 40-455, pp. 1023~1028.
- (7) Shioya, T., Yamada, S. and Kuzuya, Y., 1965, "Study on Mechanical Properties of Friction Welded S20C and S45C," *J. Weld. Soc.*, Japan, 34-11, pp. 1197~1203.
- (8) 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈, 1988, "SM45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구," 한국해양공학회논문집, 제2권, 제2호, pp. 312~321.
- (9) 오세욱, 허정원, 유재환, 김재철, 1992, "SM40C와 STS304 이중재료 마찰 용접재의 파단특성 및 크랙전파특성의 연구," 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp. 230~239.
- (10) 정세희, 1975, "마찰용접부의 Strain 집중과 피로강도," 대한기계학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 390~397.
- (11) 村上敬宣, 1993, "微小缺陷と介在物の影響," 養賢堂, pp. 7~8.
- (12) 白鳥正樹, 三好俊良, 酒井義明, 張 光榮, 1987, "任意分布力を受ける表面龜裂の應力擴大係數の解析," 日本機械學會論文集(A), 53-488, pp. 779~785.
- (13) 서창민, 1985, "인장 축하중 피로에 의한 미소표면균열의 발생 성장거동," 대한기계학회논문집, 제9권, 제1호, pp. 1~9.
- (14) Baeslack III, W.A. and Hagey, K.S., 1988, "Inertia Friction Welding of Rapidly Solidified Powder Metallurgy Aluminum," *J. of Welding Research*, pp. 139~149.
- (15) Sassani, F. and Neelam. J.R., 1988, "Friction Welding of Incompatible Materials," *J. of Welding Research*, pp. 264~270.
- (16) 西田正孝, 1978, "應力集中," 森北出版社, pp. 47~96.
- (17) Suh, C.M. and Kitagawa, H. 1987, "Crack Growth Behaviour of Fatigue Microcrack in Carbon Steel," *Fatigue Fract. Engng Mater. Stuct.*, Vol. 9, No. 6, pp. 409~424.
- (18) 서창민, 1994, "기계재료," 원창출판사, p. 190.