

〈論 文〉

HSS-Co와 SM55C 이중 마찰용접재의 피로강도에 관한 연구(1)

서창민* · 서덕영** · 이동재***

(1994년 8월 18일 접수)

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

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

Key Words : Friction Welding(마찰용접), Fatigue Strength(피로강도), HAZ(열영향부), FRWI
(마찰용접 경계면), Optimum Welding Condition(최적 마찰용접조건)

Abstract

This paper deals with the various mechanical properties and fatigue strength in the FRWI (friction welded interface) of high speed steel(HSS-Co) to SM55C through the tensile test, hardness test and fatigue test. The data of FRW specimens are also compared with those of the base materials(HSS-Co and SM55C steel). Three kinds of specimens used in this study are the friction welded joints, HSS-Co and SM55C carbon steel with circumferential notch, saw notch and smooth, respectively. It is confirmed that the applied welding conditions are optimum methods in order to minimize the heat affected zone(HAZ) and hardness distribution at the HAZ. The fatigue strengths at $N = 10^6$ cycles of smooth, circumferential notch and saw notch specimens in the FRW joints are about 299.2 MPa, 123.8 MPa and 247.5 MPa, respectively. The fatigue strength of the friction welded joints is almost equal to that of the SM55C carbon steel in the optimum welding conditions. The fatigue cracks initiated at the welded zone are propagated along the side of SM55C steel.

1. 서 론

마찰용접(friction welding, FRW)은 다른 용접법에 비해 기술적인 면과 경제적인 면에서 많은 잇점을 지니고 있다. 즉, 마찰용접은 재료를 용해시키는 일없이 고상 상태에서 압접(壓接)시키는 고상

용접법으로서 용융접합에서는 접합불가능한 고용용접 금속 및 이중금속 등의 용접에 이용되고 있다.

이 방법은 접합시키려는 모재(base metal)의 접합경계면에서 피접합재의 고속회전 마찰운동에 의해 발생하는 마찰열을 이용해서 급격히 접합면을 가열 가압하여 국부적으로 소성변형을 시켜 압접하는 방법이다.^(1~7)

즉, 값 비싼 단조나 주조 대신에 몇가지 간단한 형상의 부품들을 결합시키므로써 복잡한 제품의 단

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**두원공업전문대학 열냉동과

***경북대학교 대학원 기계공학과

순화에 따른 공정수를 감소시키고, 열영향부(HAZ)의 폭이 좁아 기계적 성질이 양호한 용접부를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또, 고가품과 저가품의 이종 마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성있는 제품의 대량생산, 자동화의 용이성, 에너지 고효율 및 省資源 등의 이점때문에 마찰용접을 산업발전에 적용하려는 연구가 활발하게 추진되고 있다.⁽⁸⁻¹³⁾

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 마찰용접조건을 적당히 선정하면 100%의 좋은 용접효율을 얻을 수 있다고 한다.⁽²⁰⁾ 그렇지만 인장시험 결과에 근거한 마찰용접부의 성능평가는 충분하지 못하고 위험한 경우가 있다고 설명하고 있다.⁽¹⁾

즉, 위의 여러 보고에서는 마찰용접조건과 인장강도간의 관계에 관하여 비슷한 연구결과를 얻은 것으로 보고되고 있지만 실용상 중요한 피로강도(fatigue strength)의 관점에서 이것을 평가하고, 또, 피로현상을 상세히 연구한 보고는 드물다. 한편, 정적 인장강도의 실험결과는 용접부의 피로강도에 대응하는 정확한 정보를 얻을 수 없으므로, 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용함은 물론 신뢰성 제고를 위해서 파괴역학(fracture mechanics)적 평가방법에 의한 용접부의 강도특성 파악과 충분한 데이터의 축적이 필요하다.⁽¹⁾

본 연구에서는 HSS-Co와 SM55C로 된 마찰용접재와 모재인 HSS-Co와 SM55C재에 인장강도와 피로강도의 저하를 크게 유발하는 대표적인 형태인 V형 노치와 톱날 노치를 가공한 두가지 노치 시험편과 노치가 없는 평활재로 각각 가공하여 동일한 조건으로 열처리한 후, 인장시험과 피로시험을 실시하여 기계적 성질, 피로특성 및 균열성장거동에

대한 특성을 조사하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시료는 HSS-Co재와 SM55C재이며 HSS-Co재는 SKH56종에 상당하는 재료로 Cr, W, Mo 성분이 많지만, 특히 Co성분을 강화시킨 특수공구용 재료인 고속도강이다.

마찰용접된 시험편은 연속 마찰용접기(TH25)를 사용하여 마찰용접협회에서 추천하는 Table 1과 같은 마찰용접조건에 준하여 실시하였다.

마찰용접과정은 HSS-Co 시험편을 1,600 rpm으로 회전시키고, 고정축에 SM55C를 장착하여 축방향의 가압력(P_1)을 가하여 발생한 마찰열에 의하여 접합면이 용접에 충분한 온도(단조온도보다 높은 용융점 적하온도)에 도달할 때에 회전을 정지시켰다.

마찰용접이 완료된 마찰용접재는 760°C에서 4시간동안 유지시킨후 냉각시켜 잔류응력을 제거시켰다. 또한 연구결과를 서로 비교 검토하기 위하여 두 모재도 마찰용접재의 열처리조건과 같이 열처리하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 60°인 V형 노치재와 톱과 깊이가 각각 1mm인 톱날 노치재 및 노치가 없는 평활재 등 3가지 종류의 인장시험편과 피로시험편을 각각 나타내었다. 시험편 가공이 끝난 후에는 마찰용접재와 두 모재는 서로간의 재료의 특성을 비교하기 위하여 통상의 HSS(high speed steel)의 열처리 사이클⁽¹⁶⁾과 같은 조건으로 시험편을 모두 열처리하였다, 이 과정 후에는 시험편의 평행부는 연마지 200번에서 1200번까지 연마하여 마무리 작업으로 호닝(honing) 처리하였다. 이때, 마찰용접 계면을 육안으로 판정하여 마찰용접 경계면(FRWI)에 노치의 가공위치를 정하였다.

Table 1 Friction welding condition

Welding materials	Rotating speed N (rpm)	Heating pressure P_1 , (MPa)	Upsetting pressure P_2 , (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Upsetting time t_2 (sec)
HSS-Co to SM55C	1600	39.2	196	15	3

* Welding diameter : $d=18$ mm

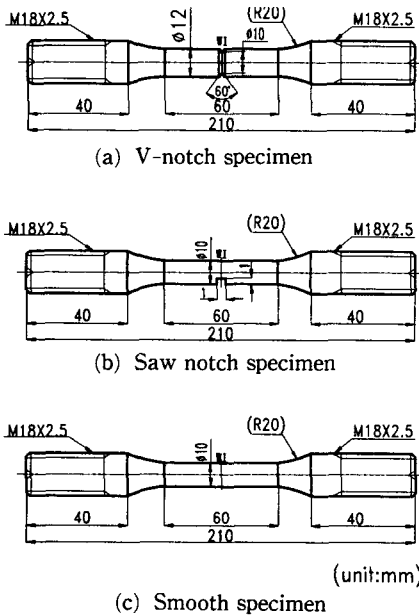


Fig. 1 Configuration of the tensile specimen

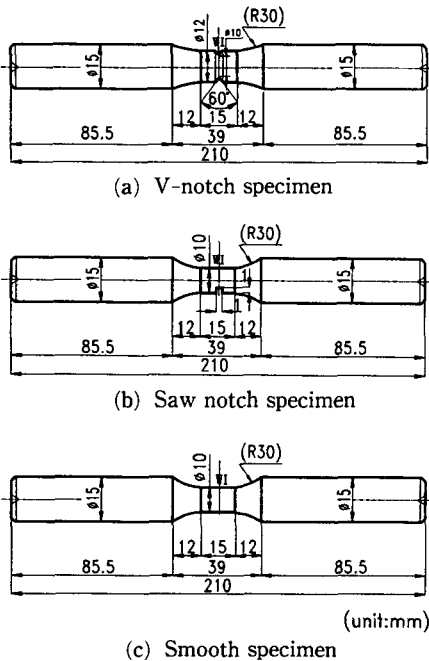


Fig. 2 Configuration of the rotary bending fatigue specimen

2.2 실험방법

두가지의 모재와 마찰용접재의 인장시험은 Instron (1342, 25T)을 사용하였으며, 인장속도는

약 2 mm/min으로 유지시켰다. 경도시험은 비커스 경도시험기를 사용하였다. 이때 하중 1kg, 시간 30초의 조건하에서 모재부와 용접 경계면 근처의 경도를 시험편의 용접 경계면 좌우 각각 5mm씩을 0.1~0.25 mm 간격으로 경도치를 측정하였다.

마찰용접 경계면상의 조직변화와 인장시험과 피로시험시의 파단면의 형태를 관찰하기 위하여 금속현미경과 주사식 전자현미경(SEM)을 이용하였다. 피로시험에는 오노식 회전굽힘 피로시험기(H5, 98 N·m, 3,450 rpm)를 사용하였다. 이때 피로균열은 예상되는 피로파단수명의 7~15%마다 시험기를 일시 중단시켜 레프리카(replica)로 채취, 보관하여 그 길이를 광학현미경으로 정밀하게 측정하였다. 이 피로균열의 자료를 파괴역학적으로 해석하여 마찰용접재와 모재의 특성을 비교 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접조건 선택

본 연구에서 사용된 Table 1의 마찰용접조건에서는 인장파단시켰을 때 마찰용접재간의 나이트가 육안으로 판단하여 생기지 않는 최적 마찰용접조건이었다. 여기서, Table 1 외의 여러가지 마찰조건으로 실시한 시험편의 인장시험에서 가장 양호한 최적조건을 본 연구에서 사용하였다. 이것에 관한 자료는 본 연구와의 흐름에 맞지 않으므로 다른 연구보고에 제시 할 예정이다.

이러한 최적 마찰용접조건은 FRW 평활재의 피로파단면 중심부를 x60배로 확대 촬영한 Fig. 3의 SEM 사진에서도 확인된다. 즉, 용접부 근처에서 마찰용접시 회전가압으로 인한 반응용상태의 금속유동 흔적인 나이트를 관찰할 수 있다. 최적 용접조건이 아니면 인장시험이나 피로시험에서 육안으로도 쉽게 큰 나이트를 관찰할 수 있지만, 본 연구의 최적 마찰용접에 의해 형성된 반응용상태의 금속은 엷해지고, 중심부분만 일부 남은 것을 SEM 관찰에서 확인할 수 있다.

마찰용접의 여러 조건중에 엷해압력 P₂는 마찰용접성능을 지배하는 중요한 인자이며, 최종 접합상태는 피로강도에 중요한 영향을 준다. 특히 P₁과 P₂가 높은 용접조건에서 마찰용접된 것은 Ogawa 등의 보고⁽¹⁾에 의하면 기계적 성질 및 피로강도가 큰 것으로 발표되고 있다.



Fig. 3 SEM fractograph showing the fracture surface of FRW smooth specimen ($\sigma_{max}=424MPa$, $N_f=7.44 \times 10^4$)

3.2 인장시험 결과

마찰용접시 마찰에 의하여 발생한 고열은 마찰경계면 부근의 금속을 반응상태로 변화시켜 접합시키므로, 그 부위의 기계적 성질의 변화가 예상된다. 따라서 Fig.1과 같은 KS 규격인 인장시험편

(제14호)으로 인장시험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4는 시험편 종류에 따른 σ - ϵ 선도를 개략적으로 비교검토하기 위하여 나타낸 것이다. 평활재의 인장시험 결과인 Fig.4(a)에서 SM55C재인 G재는 전형적인 탄소강의 σ - ϵ 선도를 나타내며, C재는 FRW된 평활재로 SM55C쪽에서 파단되었으므로 탄소강의 시험편인 G재와 비슷한 기계적인 특성을 나타내었다. 단, 낮은 응력레벨에서는 시험편을 칩킹(chucking)한 나사부의 부분적 파단으로 인한 지그재그의 그림이 나타났다.

B, D재는 FRW재 평활시험편의 일반적인 σ - ϵ 선도를 나타내며, FRW재로서 인장강도에는 큰 변함이 없지만 연신율이 탄소강 SM55C재보다 감소하여 파단시 에너지방출이 적음을 알 수 있다. 그리고 F재는 HSS-Co재의 인장시험의 곡선으로 인장강도는 높지만 연신율이 적음을 알 수 있고 T, S재는 F재와 동일한 HSS-Co재이지만 시험편을 칩킹한 나사부에서 파단되었고 인장강도가 저극히 낮다. 이와 같이 순수 HSS-Co재나 FRW재 중에는 노치민감도가 커서 직경이 작은 평활부보다 나사부에서 때때로 파단되었다. 따라서 인장강도의 분산 밴드가 대단히 넓게 나타났다.

Fig. 4(b)는 V-노치재의 σ - ϵ 선도를 개략적으로 비교하기 위하여 나타낸 것이다. I재는 SM55C재의 경우이고 L재는 FRW재의 경우로 SM55C쪽에서 파단되어 인장강도가 큰 경우이다. 이때 L재는 I재와 비슷한 기계적 특성을 나타내지만 FRW된

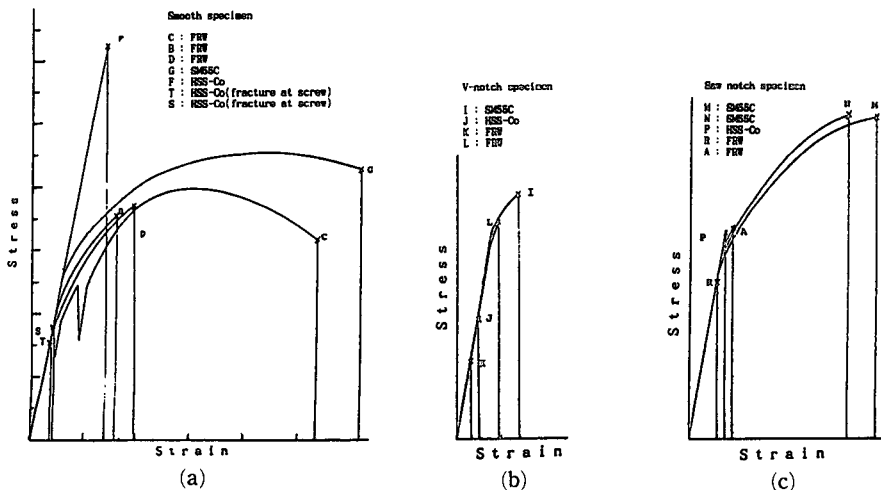


Fig. 4 Schematic comparison of monotonic stress-strain curves

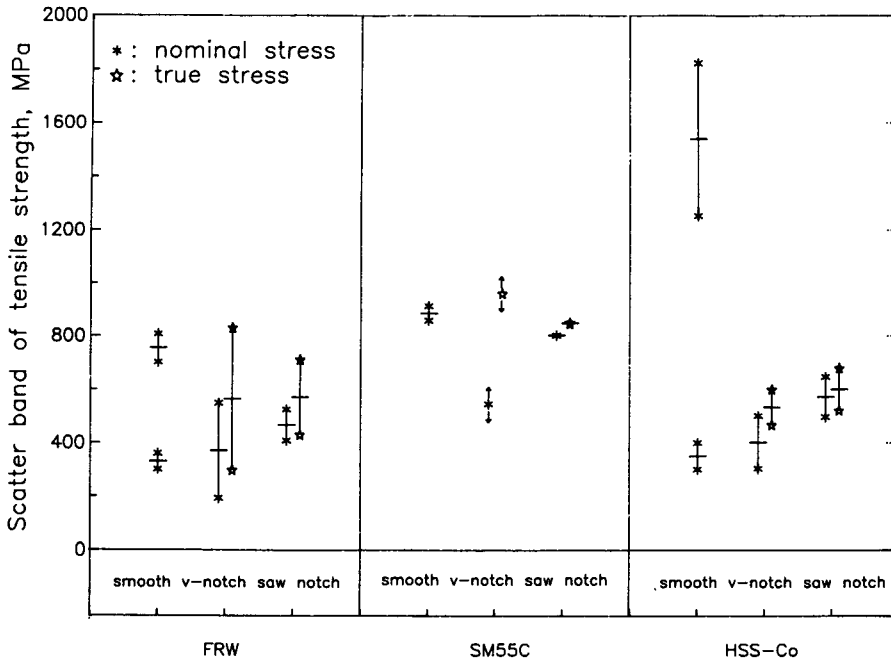


Fig. 5 Scatter band of tensile strength with the configuration of test specimen

K재의 경우는 FRW된 HSS-Co쪽으로 파단되어 인장강도가 작게 나타났다. 그리고 J재는 HSS-Co재의 경우로 인장강도가 역시 낮고 인성도 낮다.

Fig. 4(c)는 톱날 노치재의 σ - ϵ 선도이다. SM55C재인 M, N재는 인장강도와 연신율이 큰 경우이며 톱날 노치의 영향이 적게 나타났다. 그러나 P재는 HSS-Co재의 경우로 인장강도와 인성이 SM55C재보다 낮게 나타나고 있다. A재와 R재는 FRW재의 경우로 R재는 인장강도와 인성이 다소 감소하고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 여러 자료중 인장강도를 서로 비교 검토하기 위하여 각 실험결과를 시험편별 및 형상별로 나타낸 것이다. 이 그림의 평활재 데이터에서는 HSS-Co재의 경우, 그 분산영역이 대단히 크음을 알 수 있다. 즉, 하단부의 데이터는 시험편을 칩킹한 나사부에서 파단된 경우를 나타낸 것으로 이러한 현상은 FRW재의 HSS-Co쪽에서 생겼다. 그러나 이러한 나사부의 파단을 제외하고는 FRW재의 인장강도는 SM55C와 비슷한 값을 가지면서 그 분산폭(scatter band)은 작다.

또, V-노치재와 톱날 노치재의 경우에는 HSS-Co와 FRW재 공히 서로 비슷한 형태의 분산폭을 가지므로써 FRW 노치재의 인장강도가 HSS-Co재의 노치에 대한 영향과 유사하였다.

또한 Fig. 5의 *로 표시한 데이터는 공칭응력(nominal stress)의 경우이고 진응력(true stress)인 ☆데이터보다 다소 아래쪽으로 분포되어 있다.

이와같이 마찰용접재는 대부분 마찰용접 접합면 근방에서 파괴하고 있으며, 노치재의 경우, 두 모재와 마찰용접재의 인장강도는 비슷하게 나타나고 있다.

3.3 경도시험 결과

Fig. 6은 본 연구의 마찰용접조건에서 용접된 시

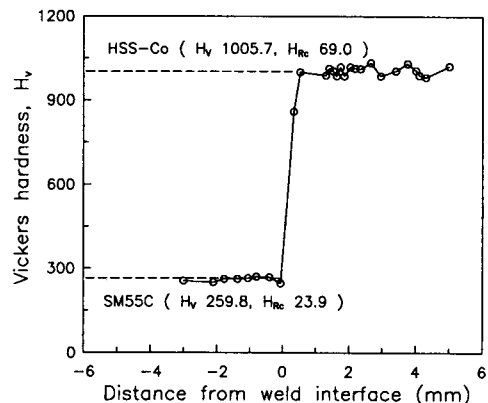


Fig. 6 Hardness distribution near the friction welded interface of HSS-Co and SM55C

험편의 경도 분포를 나타내고 있다. 이 그래프에서 용접경계면의 경도치는 SM55C의 낮은 경도치에서 HSS-Co의 높은 경도치 쪽으로 급변하는 경도분포를 나타내고 있으며 HSS-Co쪽에서 피크(peak)치를 나타냈다. 또한 통상의 마찰용접의 결과보고^(3,4)와는 달리 경도값이 크게 변화하는 경계면의 영역(약 $50\mu\text{m}$)이 극히 작음을 알 수 있다. 이러한 특징은 큰 압입력으로 마찰용접된 후 고온의 마찰열에 의한 반응용상태인 금속이 외부로 압입되어 열영향부가 적게 형성되었기 때문에 모재인 HSS-Co와 SM55C의 경도치가 바로 그래프상의 좁은 영역으로 나타났다. 또한 통상의 HSS의 열처리사이클⁽¹⁶⁾로 후열처리(post heat treatment)되었기 때문에 각 모재상태의 경도치의 변화도 적게 나타났다고 판단된다.

이 결과는 마찰가압력을 20~59 MPa까지, 압입압력을 39~88 MPa까지 각각 5단계로 변화시키면서 실험한 S35C강 동종 중공재 마찰용접의 연구에서도 압입압력을 크게 한 쪽이 경도변화의 폭이 좁다는 결과와 유사하다.⁽¹⁾

따라서, 본 연구에서 사용된 마찰용접 시험편은 위의 여러 데이터보다 단조 압입압력을 크게 하여 열영향부의 영역을 작게 하므로써 시험편의 기계적 성질 및 피로강도를 증가시킬 수 있다고 판단되어, 이 마찰용접조건에 대하여 설계와 실용적인 면에서 유익한 인장강도 및 피로강도를 조사, 연구하였다. 사실 기계적 성질과 경도치의 변화만으로는 반복하중하의 신뢰성을 평가하는 중요한 자료로는 부적합하며 피로시험의 결과만이 유일한 방법인 것으로 설명하고 있다.⁽⁶⁾

3.4 회전굽힘 피로시험 결과

3.4.1 비커스 경도치와 피로한도의 관계

일반적인 재료의 특성에서 평활재의 피로한도 σ_{wo} 와 인장강도 σ_t 와의 관계는 식(1)로 나타나며, 또 비커스 경도가 400이하일 때는 식(2)의 관계로 나타낼 수도 있다.⁽¹⁴⁾ 본 연구에 사용된 HSS-Co모재의 평활재시험편의 인장강도와 피로한도가 각각 1538, 774 MPa로서 관계식(1)의 범주에 포함된다. 그리고 식(2)는 SM55C재의 경우 피로한도 상한치를 나타낸다.

$$\sigma_{wo} \cong 0.5\sigma_t \quad (1)$$

$$\sigma_{wo} \cong 1.6 H_v \pm 0.1H_v, \quad H_v \leq 400 \quad (2)$$

3.4.2 시험편 재질에 따른 S-N곡선의 특성

Fig. 7(a~c)는 회전굽힘 피로시험기로 실험한 마찰용접재와 두가지 모재의 피로시험 결과로부터 얻은 최대 굽힘응력 σ_{max} 과 파단반복수 N_f 와의 관계를 나타내고 Fig. 7(d)는 이를 동시에 나타낸 S-N곡선으로서 약간의 데이터 산포를 고려한 정량적인 결과 및 해석을 시도하였다.

Fig. 7(a)는 V-노치를 가공한 시험편의 피로시험 결과를 재정리한 S-N곡선이다. 일반적으로 베어링의 피로한도가 10^6 사이클을 기준으로 하므로, 본 연구에서도 10^6 피로반복수 기준에서 보면 HSS-Co인 모재에 V-노치를 가공한 시험편의 피로강도가 290.4 MPa로서 가장 높게 나타났다. 그리고 용접 경계부에 V-노치를 가공한 마찰용접재와 SM55C인 모재의 것이 각각 123.8 MPa과 109 MPa 정도로 SM55C재나 마찰용접재의 V-노치 가공시험편의 피로강도는 거의 같음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 실시된 마찰용접조건은 전술한 바와 같이 SM55C재와 유사한 피로파괴의 형태를 가지므로 적절함을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 톱날노치를 가공한 시험편의 피로시험 결과를 3가지 시험편에 대하여 정리하여 비교한 것이다. 세가지 재료의 S-N선도는 상당히 유사함을 그림에서 판단할 수 있다. 즉 모재로 된 HSS-Co재가 268.5 MPa로서 가장 큰 10^6 피로강도를 가지고 SM55C재, 마찰용접재의 순으로 각각 214.7 MPa와 247.5 MPa 정도의 10^6 피로강도를 나타내고 있다.

이와 같이 기계적 성질의 큰 차이에도 불구하고 톱날노치를 가공한 피로시험편의 10^6 회 피로강도에는 큰 차이가 없음을 주목해야 할 중요한 결과가 된다. 기계적 성질과 충격치만으로 마찰용접재의 유효성을 평가하는 것 보다는 실제적인 조건에 적합한 실험방법에서 재료의 특성을 파악, 해석하므로써 문제점을 정확하게 처리, 해결할 수 있는 것이다. 결과적으로 HSS-Co재에 SM55C재를 마찰용접하였을때 10^6 회 피로강도에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

또한 Fig. 7(c)는 마찰용접재와 두 모재의 평활시험편의 S-N곡선을 나타내고 있다. 이 선도에서 보면 HSS-Co재의 10^6 회 피로강도가 약 774.6 MPa로 대단히 크다. 그리고 SM55C재와 마찰용접재의 피로강도는 각각 305.7 MPa과 299.2 MPa로 거의 같음을 알 수 있다.

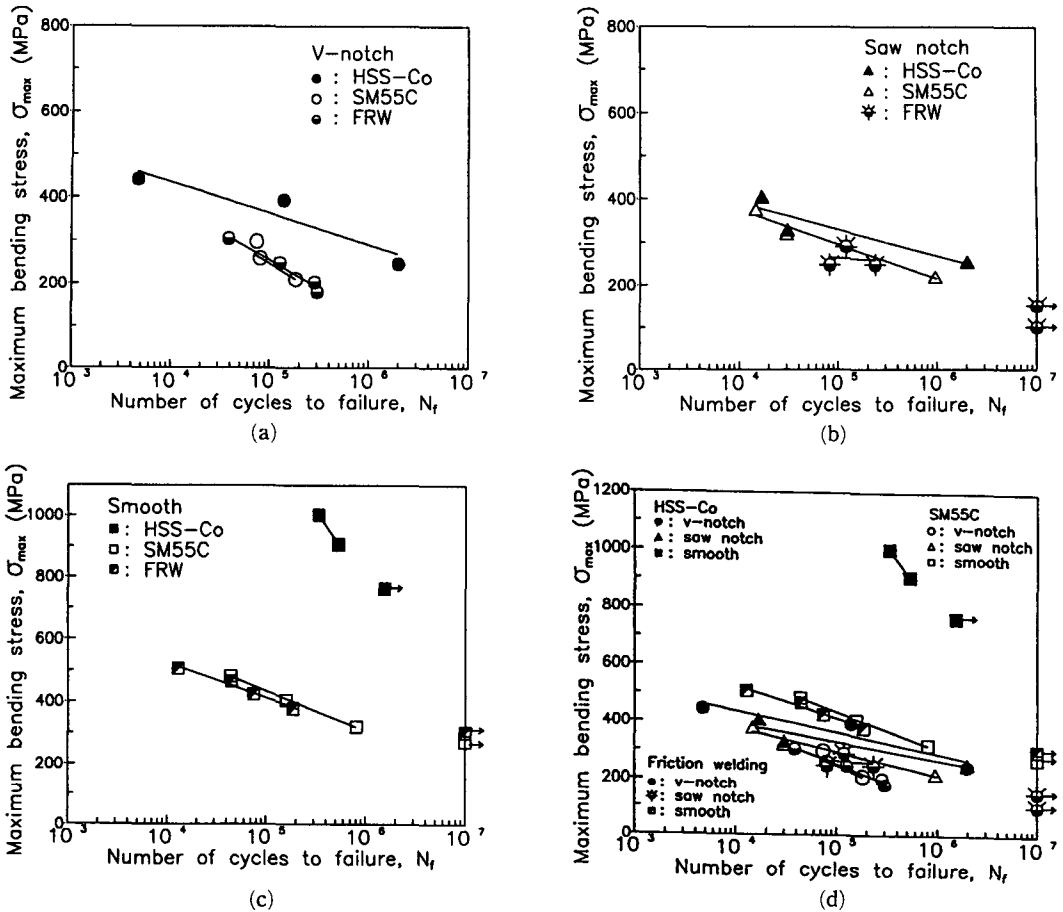


Fig. 7 Relation between maximum bending stress, σ_{max} and the number of cycles to failure, N_f

HSS-Co재의 평활시험편의 피로강도가 대단히 크므로 재료의 성능을 크게 향상시킬 수 있다고 생각될 것이다. 그러나 Fig. 7(a), (b)에서 판단할 수 있는 바와 같이 HSS-Co재에 칼날이나 임의의 형상을 가공하게 되면 노치재가 되므로 마찰용접재나 SM55C재의 피로강도와 큰 차이가 없게 된다는 점에 유의해야 할 것이다. 즉, HSS-Co모재에 노치를 가공한 시험편의 피로강도가 마찰용접재와 SM55C모재와 거의 같을 정도로 낮은 것으로 보아 HSS-Co모재의 노치민감도가 높다는 것을 판단할 수 있다. 본 실험과 같이 최적 마찰용접조건일 때는 마찰용접부의 피로강도가 모재인 SM55C와 유사하며, 이와 같은 피로시험의 여러 결과는 마찰용접에 관한 다른 연구논문의 보고결과^(1,2)와 같은 경향을 나타낸 것이다. 이러한 재질과 시험편 형상에 따른 피로강도의 변화폭을 Fig. 8에 정리하였다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 마찰용접재의 평활재의 10^6 회 피로강도는 299.2 MPa이고 V-노치재와 톱날 노치재는 각각 123.8 MPa과 247.5 MPa이다. 따라서 V-노치재는 평활재보다 58.6% 감소하였고 톱날 노치재는 17.3% 감소하였다. 이와 같이 마찰용접된 HSS-Co재와 SM55C재의 절삭공구를 제작, 가공한다면 표면노치가 존재한 경우와 유사하므로 상당한 피로강도의 감소를 예상할 수 있다.

아울러, HSS-Co재의 10^6 회 피로반복수를 기준으로 한 평활재의 피로강도는 약 774.6 MPa, V-노치재와 톱날 노치재는 각각 약 290.4 MPa와 268.5 MPa정도이다. 따라서 평활재에 대한 V-노치재의 피로강도는 62.5%, 톱날 노치재는 65.3%로 크게 감소하였다.

그리고, SM55C재만의 피로시험 결과는 그림과 같이 평활재나 두 노치재의 경우나 피로강도의 측

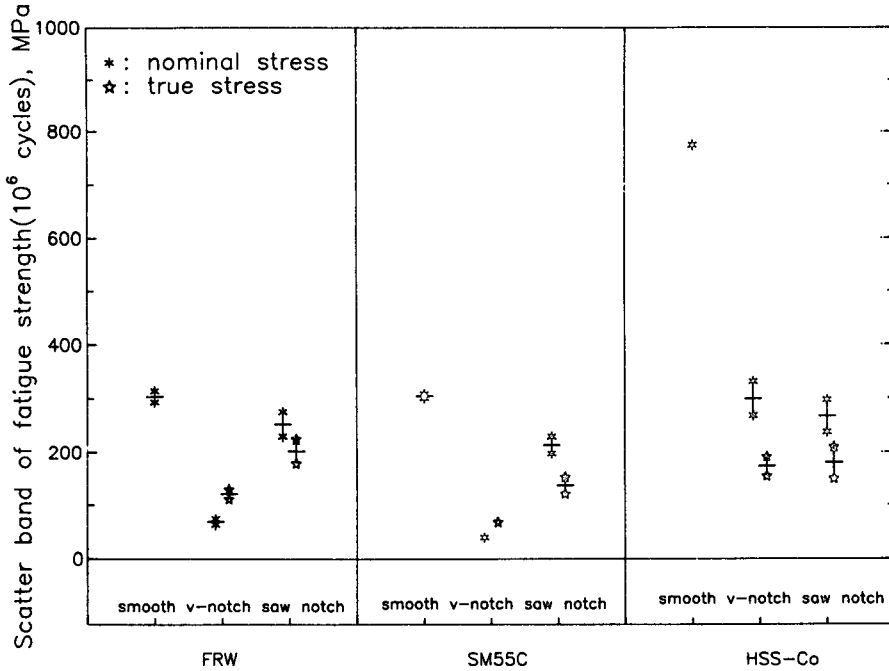


Fig. 8 Scatter band of fatigue strength (10⁶ cycles) with the configuration of test specimen

면에서는 앞서의 HSS-Co와 달리 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이 경우에도 10⁶회 피로반복수를 기준으로 한 피로강도는, 평활재는 305.7 MPa이고 V-노치재와 톱날 노치재는 각각 109 MPa와 214.7 MPa 정도이다. 따라서 평활재에 대한 V-노치재는 약 55.7%, 톱날 노치재는 약 29.8%정도 피로강도가 감소하였다.

또한, N=10⁶ 사이클에서의 평활재 피로강도는 HSS-Co 모재가 774.6 MPa로 가장 크고, SM55C 모재는 305.7 MPa, 마찰용접재는 299.2 MPa 이므로 마찰용접재의 피로강도는 SM55C재와 거의 같음을 알 수 있다. 이와같이 Co, W, Cr, Mo 등을 첨가시켜 재료의 강도를 높인 고강도의 재료는 평활재와 같이 무결함인 경우에는 피로강도가 크지만, 노치나 결함과 같은 응력집중부가 생기면 피로한도가 크게 감소하여 노치에 매우 민감한 재료 특성을 가짐을 알 수 있다.

특히, 회전굽힘 피로시험(R=-1)에서 마찰용접재의 파단은 피로강도가 낮은 SM55C측에서 대부분 일어났다. 그 이유는 최적 마찰용접조건에서 이종재를 마찰용접한 경우 마찰용접조건이 최적일 때의 피로파괴는 용접부보다는 두 이종재료중 피로강도가 약한 재료에서 일어나기 때문이다. 따라서,

본 실험 연구의 마찰용접조건은 적절한 것으로 판단된다.

위의 결과에서 고강도 재료일수록 노치나 표면결함에 대한 응력집중의 영향이 커서 평활재에 비해 노치재의 피로강도가 크게 떨어짐을 본 실험에서 확인할 수 있다. 이와 같은 피로시험의 여러 결과는 마찰용접에 관한 다른 연구결과^(1,2)와 비슷한 경향이다.

3.4.3 인장강도에 대한 피로강도비

Fig. 9(a), (b)는 HSS-Co재와 FRW재 피로시험편의 S-N선도인 Fig. 7을 인장강도 σ_t 에 대하여 무차원화시킨 결과를 정리한 것이다. 이 그림에서 인장강도에 의하여 피로강도가 무차원화되었으므로 Fig. 7의 자료보다 평활재와 노치재사이의 데이터 간격이 거의 없어지고 좁은 영역내로 많은 결과를 정리할 수 있었다.

특히, Fig. 9(a)의 HSS-Co재의 V-노치재와 평활재의 데이터들이 반전하여 비슷한 영역내에 모이는 특성을 나타내었다. 아울러 Fig. 9(b)의 FRW재의 경우는 피로강도의 인장강도에 대한 응력비의 특성이 Ogawa의 연구보고⁽¹⁾와 유사한 결과이며, 평활재의 경우 그 비가 0.4이상으로서 일반적으로

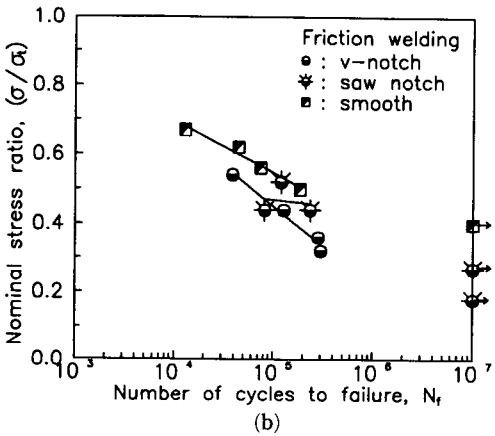
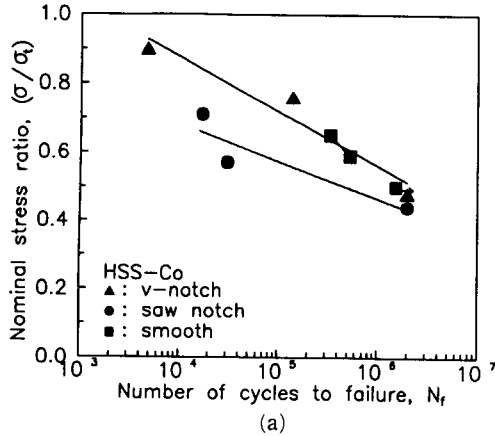


Fig. 9 Nominal stress ratio vs the number of cycles to failure

식(1)의 관계를 고려하면 본 연구의 마찰용접이 최적 마찰용접조건인 것으로 평가할 수 있다.

3.4.4 피로균열의 파괴역학적 해석

반복응력이 작용하고 있는 부재에 사용되고 있는 마찰용접재의 파괴는 정적인 인장강도보다는 피로 파괴에 의하여 생기는 일이 많다. 본 연구에서는 우선 마찰용접 경계면의 피로균열거동에 관하여 조사하고 용접부의 금속조직과의 상관관계에 대하여 검토하였다.

Fig. 10(a)는 마찰용접재와 SM55C재의 톱날노치 시험편의 표면균열길기와 반복수와의 관계인 a-N선도를 나타낸 것으로서 피로균열의 원활한 전파에 의한 파단 특성을 보임을 알 수 있다. 또한 Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 그래프를 파단반복수에 대한 피로 수명비(N/N_f)로 재정리한 것이다.

그리고, Fig.10(a)의 그림을 이용하여 균열의 전

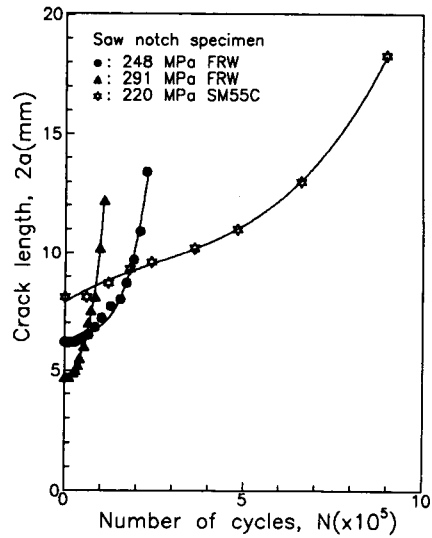


Fig. 10 (a) Relation between crack length, 2a and number of cycles, N

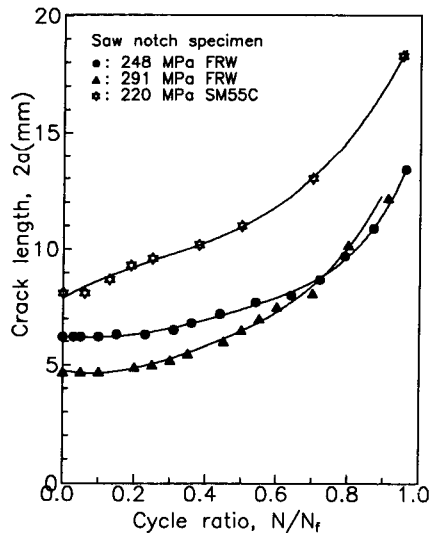


Fig. 10 (b) Relation between crack length, 2a and cycle ratio, N/N_f

파속도 da/dN와 응력확대계수 ΔK와의 관계를 SM55C모재와 비교하여 나타낸 것이 Fig. 11이다. 여기서, ΔK값은 반타원 표면균열이 있는 환봉시험편에서의 응력확대계수에 대한 白鳥 등⁽¹⁵⁾의 해석결과를 이용하여 산출했다.

이 그림에서 마찰용접재의 전 ΔK 영역에서 마찰용접재의 경우가 SM55C모재의 경우에 비하여 빠른 전파특성을 나타내고 있다. 즉, FRW재의 피로균열전파곡선의 기울기가 모재보다 급하게 나타

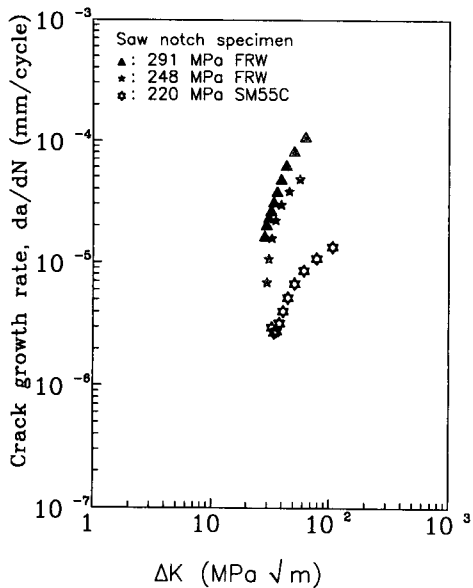


Fig. 11 Crack growth rate vs stress intensity factor range

났다. 이와같은 경향은 STS304/SM40C강의 용접재의 피로특성과 유사하다.⁽¹⁰⁾

또한, SM55C 강재의 HAZ부가 모재보다 피로크랙전파속도가 빠르다. 이것은 Fig. 6의 경도분포에서 알 수 있는 바와 같이 마찰열에 의한 열영향부 영역(약 $50\mu\text{m}$)의 입경(grain size)이 상대적으로 모재보다 조대화되었기 때문이다. 따라서, 용접계면에 가공한 노치에서 크랙이 발생하여 열영향부의 SM55C 쪽으로 전파하였다.

아울러, 마찰용접재의 경우 접합면에 생기는 마찰열에 의한 급속한 국부가열과 큰 소성변형에 의한 용접이므로, 본 연구에서는 이에 따른 영향과 잔류응력 제거를 위하여 통상의 HSS 열처리 방법으로 실시된 열처리 과정을 거치므로 이 영향을 거의 무시할 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

HSS-Co에 SM55C강을 마찰용접한 마찰용접재와 두 모재 HSS-Co재 및 SM55C재에 평활재, V-노치재 및 톱날 노치를 가공한 시험편의 인장시험과 경도시험, 조직검사, 피로시험 등의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장강도와 피로강도가 대단히 큰 HSS-Co

재에 칼날과 같은 형상을 가공하게 되면 노치재가 되므로 노치재의 경우, 두 모재와 마찰용접재의 피로강도에는 큰 차이가 없었다. 즉 고강도 재료의 피로강도는 노치나 표면결함에 대단히 민감하여 평활재에 비하여 그 값이 크게 떨어짐을 알았다. 즉, 평활재의 경우, 피로한도가 대단히 큰 HSS-Co와 SM55C가 최적 마찰용접조건 하에서 행한 FRW재의 피로강도는 모재인 SM55C재와 비슷하였다.

(2) 10^6 회 피로반복수를 기준으로 한 마찰용접재의 평활재 피로강도는 약 299.2 MPa이고 V-노치재와 톱날 노치재는 각각 123.8 MPa과 247.5 MPa이다. 따라서 V노치재는 평활재보다 58.6% 감소하였고 톱날 노치재는 17.3% 감소하였다.

(3) HSS-Co재에서 10^6 회 피로반복수를 기준으로 한 평활재의 피로강도는 약 774.6 MPa이고 V-노치재와 톱날 노치재는 각각 약 290.4 MPa와 268.5 MPa이다. 따라서 평활재에 대한 V노치재의 피로강도는 62.5%, 톱날 노치재는 65.3%정도 크게 감소하였다.

(4) 용접 경계면 근처에서 발생한 크랙은 피로크랙전파속도가 상대적으로 조금 빠른 열영향부의 SM55C 탄소강 쪽으로 크랙이 전파함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구에 있어 시험편 제작에 협조하여 주신 한국 OSG주식회사와 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) 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.
- (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) Okita, K., Fukuchi, Y. and Aritoshi, M., etc, 1990, "Resistance to Fracture of Friction Welded Joints,(Friction Welded Joints of S45C)," *J. of Material Science, Japan*, 39-445, pp.1431~1437.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈, 1988, "SM45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구," 한국해양공학회논문집, 제2권, 제2호, pp. 312~321.
- (8) 송삼홍, 박명과, 1987, "이종강의 마찰용접시 압접시간 변화에 따른 강도 거동," 대한기계학회 논문집, 제11권, 제5호, pp. 762~771.
- (9) Okita, K. and Kishimoto W., 1979, "Studies on Friction Welding of SUS304 Austenitic Stainless Steel(Report I)," *J. Weld. Soc., Japan*, 48, pp. 991~995.
- (10) 오세욱, 허정원, 유재환, 김재철, 1992, "SM40C와 STS304 이종재료 마찰용접재의 과단 특성 및 크랙전파특성의 연구," 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp. 230~239.
- (11) 나석주, 양영수, 1986, "강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향—탄소강과 고속도강에 대하여," 대한용접학회지, 제8권, 제3호, pp. 32~42.
- (12) Oh, S. K., Han S. D and Lim, U. J. 1983, "Effects of Postweld Aging Treatment of Rotary Bending Fatigue Strength of Friction Welded Joints at Elevated Temperature," *J. Korea Society of Marine Engineers*, 7-2, pp. 36-49.
- (13) 정세희, 1975, 마찰용접부의 Strain 집중과 피로강도, "대한기계학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 390~397.
- (14) 村上敬宜, 1993, "微小缺陷と介在物の影響," 養賢堂, pp. 7~8.
- (15) 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.
- (16) 서창민, 1994, "기계재료," 원창출판사, p. 190.