

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
 第10卷 第4號 1992年 12月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol.10 No.4, Dec., 1992

SM40C와 STS304 이종재료 마찰용접재의 파단특성 및 크랙전파특성의 연구

오 세 욱* · 허 정 원** · 유 재 환*** · 김 재 철****

**A Study on the Rupture and Crack Propagation Characteristics in the
 Material Friction-Welded with Heterogeneous Steels of SM40C and STS304**

S.W.Oh*, C.W.Hue**, J.W.Yoo***, J.C.Kim****

Key Words : Friction welded material(마찰용접재), HAZ(열영향부), Interface(용접면),
 Crack propagation rate(균열전파속도)

Abstract

The specimens of two base metals and material friction-welded with heterogeneous steels of SM40C and STS304 have been prepared and the characteristics of rupture and crack propagation of them have been examined.

In the friction-welded material, the width of HAZ is 3.0mm for STS304 and 3.4mm for SM40C. The hardness distribution in HAZ of SM40C is decreased gradually as being getting off interface, but that in HAZ of STS304 is decreased remarkably and the value of hardness becomes a little lower than that of the base metal in region of 1mm from interface and becomes a little higher than that of the base metal.

The tensile strength of the friction-welded material appeared a little lower than that of the base metal and rupture by tensile load is developed in HAZ of STS304 and the position of rupture is at region of low hardness(1mm from interface).

The crack propagation rates(da/dN) in both HAZ of the friction-welded material are a little higher

* 정회원, 동아대학교 기계과
 ** 정회원, 동아대학교 대학원 박사과정
 *** 비회원, 한국화재보험협회 부설 방재시설연구소
 **** 비회원, 마산전문대 산업안전관리과

than those in both base metals, but the differences are less except for the case of SM45C in low ΔK value.

It has been ascertained that the crack in the interface propagates selectively along the HAZ of SM40C and consequently the crack propagation rate is almost similar to that in the HAZ of SM40C.

1. 서론

마찰용접은 두 종류의 재료를 접촉하고 가압한 상태에서 접촉면을 상대운동시켜 마찰면을 용접이 가능한 온도에까지 도달하게 하고, 상대운동을 정지시키고 가압하여 용접하는 방법이다.

마찰용접법은 동종재료는 물론 이종재료의 접합에서도 좋은 성능을 보이며, 용접봉이나 용제를 사용하지 않는 등의 장점이 있어서, 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁻³⁾. 또한, 제품의 제작시간이 짧고 생산원가가 저렴하며, 고가품과 저가품의 이종 마찰용접에 의한 경제성이 향상되는 등의 이유로 마찰용접법은 각종 산업분야에 많이 적용되고 있으며, 특히 자동차공업, 공구제조업 등 대량생산을 위주로 하는 분야에서 차지하는 비중이 높아지고 있다⁴⁾.

동일재료의 마찰용접부는 기계적성질이 모재와 비슷하거나 더 좋은 결과값을 가질 수 있는 것으로 판명되었으며, 이것은 마찰용접 중에 발생하는 높은 온도와 소성변형에 의한 재결정현상을 통하여 용접부의 금속조직이 미세해지기 때문이다⁵⁾. 그러나 이종재료의 마찰용접부는 경계면에서 접합된 두 재료의 물리적, 기계적 성질이 급격히 변하는 불연속부분이

므로, 이 부분의 파괴는 재료 및 조직 상호간의 역학적구속효과로 인하여 동종재료의 마찰용접보다 훨씬 복잡한 양상을 갖는다. 이러한 문제에 대하여 현재까지의 연구는 주로 용접재의 인장강도^{1),2)}나 피로강도^{2),4)}에 집중되어 있고, 마찰용접재의 피로크랙전파속도 등과 같은 파괴역학적 연구는 거의 없는 실정이다.

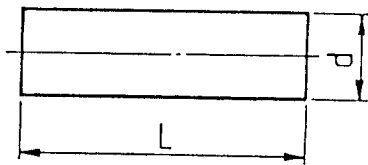
용접재는 모재와 강도는 동일하더라도 용접열의 영향으로 취성화되므로 단순히 인장성질만으로 신뢰성을 보장할 수 없다. 따라서 피로크랙 전파속도 및 전파거동 등 파괴역학적 특성을 조사할 필요가 있다. 이는 용접재의 종합적인 신뢰성을 확인하는 목적에 기초자료가 될 것으로 생각된다.

따라서 본 연구는 SM40C강과 STS304강의 두 재료를 마찰용접하여, 두 이종재료의 마찰용접부에서의 파단특성을 조사하였으며, 두 재료의 모재와 각각의 열영향부 및 용접면의 피로크랙전파속도를 조사하고 피로크랙전파특성을 구명하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 재료

시험편의 소재로 사용한 재료는 국내산 구조용 강



	STS304	SM40C
d	20	20
L	78.5	84.5

Fig. 1 Dimension and configuration of friction welding specimen

Table 1 Chemical compositions(wt. %)

	C	Mn	Si	P	Ni	Cr	Mo	Al
STS304	0.14	1.4	0.64	0.027	8.5	18.15	-	-
SM40C	0.38	0.63	0.05	0.017	0.05	0.33	0.02	0.028

재인 SM40C강과 STS304강이다. 두 재료 모두 지름이 $d=\phi 22$ 인 환봉을 마찰용접을 하기 위하여 Fig.1과 같이 마찰용접시편으로 가공하였다. 특히, 용접면은 선삭한 후 다듬질하였다.

두 재료의 화학적 성분은 Table. 1에 나타내었고, 기계적성질을 Table. 2에 표시하였다.

2.2. 마찰용접 및 시험편

마찰용접은 TH형 자동마찰용접기(THF 25HW)를 사용하였으며, SM40C강을 고정단으로 하고 STS304강을 회전시켜 압접하였다. 용접조건은 각종 문헌을 참고^{1),6)7)}하여 최적조건을 결정하였으며, 구체적인 용접조건을 Table. 3에 표시하였다. 용접재의 기계적 성질은 Table. 2에 모재와 함께 표시하였다.

피로 시험에 사용한 시험편의 형태와 치수를 Fig. 2에 표시하였다. 시험편은 선반가공 후 두 재료의 접합면이 중앙에 위치하도록 조정하여 중앙부를 평판의 형태로 밀링가공을 하였다.

2.3. 실험방법

용접부의 조직과 인장시험 및 피로시험의 파단형태를 관찰하기 위하여 금속 현미경을 이용하였으며, SM40C강의 조직을 관찰하기 위하여 사용한 에칭액은 나이탈 3% 용액이었고, STS304강의 조직을 관찰하기 위하여 사용한 에칭액은 글리세리디아(glyceredia; HNO₃ 10ml + HCl 15ml + glycerol 2ml)이었다. 경도분포는 비커스경도기를 사용하여 측정하였으며, 모재와 용접재의 기계적 성질은 만능재료시험기(INSTRON 1337, 15 tonf)를 사용하여 평가하였다.

피로크랙전파 시험에 앞선 피로 에크랙은 ASTM

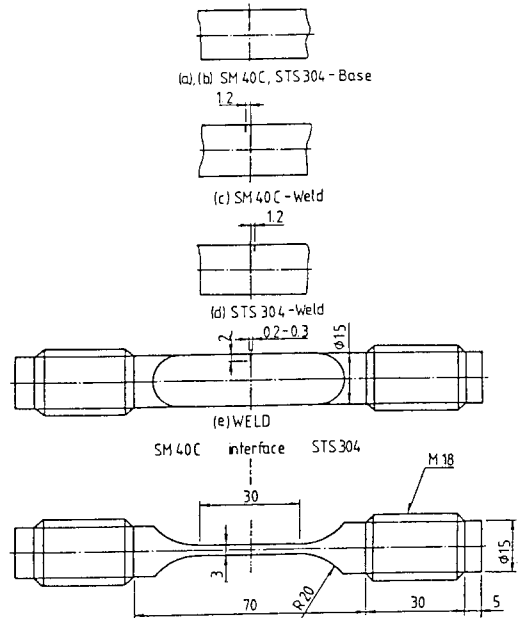


Fig.2 Dimension and configuration of fatigue test specimens for crack propagation rate

E647-89의 규정을 따라 도입하였으며, 피로에크랙을 약 1mm 도입하여 최종 크랙길이를 약 3mm로 조절하였다. 피로크랙전파 시험은 각 부분의 피로크랙전파 거동을 구명하기 위하여 Fig. 2와 같이 모재 2종류 및 용접재의 용접면과 두 재료의 열영향부 등, 5종류의 시험편을 사용하여 실시하였다. 모재는 평판부의 중앙부에, 용접재는 용접면 및 용접면에서 각각 1.2mm 떨어진 위치에 넓이가 $b=0.2\sim 0.3$ mm 되도록, 깊이 $d=2$ mm인 노치를 SEN(single edgy notch) 형태로 방전 가공하였다. 여기서 용접재 열영향부의 가공위치는 조직과 경도분포를 기준으로 평가한 열영향부(SM40

Table 2 Mechanical properties(KS 4호)

	tensile strength(MPa)	elongation (%)	reduction of area(%)	Hv
STS304	698.7	41.8	59.2	196
SM40C	724.6	24.8	46.5	205
Weld	671.3	30.4	50.3	-

Table 3 Friction welding condition

welding materials	rotating speed (rpm)	heating pressure (kgf/mm ²)	upsetting pressure (kgf/mm ²)	heating time (sec)	upsetting time (sec)	upsetting length (mm)
SM40C to STS304	3000	6	12	6	3	6

C : 3.4mm, STS304 : 3.0mm)에 포함되는 위치이다. 시험편의 표면은 사포 #100~#1200으로 폴리싱을 하고 알루미늄 파우더로 비광을 하였다.

피로크랙전과 실험의 조건은 공칭응력이 $\sigma_n=120$ MPa이며, 일정하중 제어 방식으로 응력비가 $R=0.1$, 파형은 정현파, 주파수는 10Hz이었고, 환경조건은 상온 대기중이었다. 피로 예크랙 도입과 피로크랙전과 실험에서 균열길이의 측정에는 0.01mm까지 측정이 가능한 배율 25배인 이동식 망원현미경을 사용하였으며, 피로균열전과 실험에서는 약 0.2~0.3mm간격으로 크랙길이를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용접부의 조직

Photo.1은 용접된 용접부의 형태와 용접부를 중심으로 분포하는 조직을 나타낸다. STS304강이 SM40C강과 비교하여 고온강도가 높고 열전도가 낮은 등의 물리적인 성질¹⁾의 차이에 의하여, STS304 강 쪽의 플래쉬(flash)는 SM40C 강 쪽의 플래쉬보다 작게 나타났으며, 용접선은 다른 동일 재료의 마찰 용접과 다르게 STS304 강 쪽에서 오목형(U)을 형성하고 있는 것이 특징이다. 이는 송²⁾의 연구결과와 동일하다. 열영향부의 넓이는 두 재료가 모두 표면부보다 중앙부가 조금 넓게 나타났으며, 조직을 기준으로 평가한 열영향부의 평균값은 SM40C 강 쪽이 약 3.4mm이고, STS304 강 쪽은 3.0mm로 나타나서 STS304 강 쪽이 조금 좁았다. 이러한 경향은 SM45C 강과 STS304강 이종재료 마찰용접재의 인장강도를 평가한 송²⁾의 결과와 동일한 현상이다.

사진(a)와 (b)를 관찰하면 용접면의 경계에서는 두 재료가 국부적으로 기계적 혼합층을 이루고 있는데, 이는 용접중의 고온 상태에서 두 재료가 서로 혼합된다는 것을 알 수 있다. SM40C 강에서 모재부(e)는 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있고 HAZ(heat affected zone)부 (c)는 모재의 잔류 페라이트와 트루스타이트(troostite)로 구성되어 있으며, 사진(a)에서 용접면과 근접한 부분은 마르텐사이트조직으로 구성되어 있음이 관찰된다. STS304강에서 모재부(f)는 등축 오스테나이트 결정립과 풀림 쌍정(annealed twin)으로 구성되어 있고, HAZ부 (d)는 용접시에 발생하는 가열 및 냉각의 열영향에 의하여 모재의

결정립이 조대화된 상태이며, 사진(b)에서 용접면과 근접한 부분은 용체화처리한 조직과 비슷한 상태를 이루고 있다. 특히, STS304 강 쪽은 SM40C 강 쪽과는 달리 극심한 반지름방향의 소성유동이 발생하여 슬립선이 형성되어 있음이 관찰된다.

3.2. 용접부의 경도 분포

Fig. 3은 용접부를 중심으로 경도의 분포 상태를 나타낸 것이다. 경도시험의 조건은 하중이 1kgf 부하 시간을 15초로 하였고, 중심선과 원주부에서 깊이 1mm인 위치에서 측정하였으며, 각각 0.25mm 간격마다 3개소씩을 측정하여 평균값을 표시하였다.

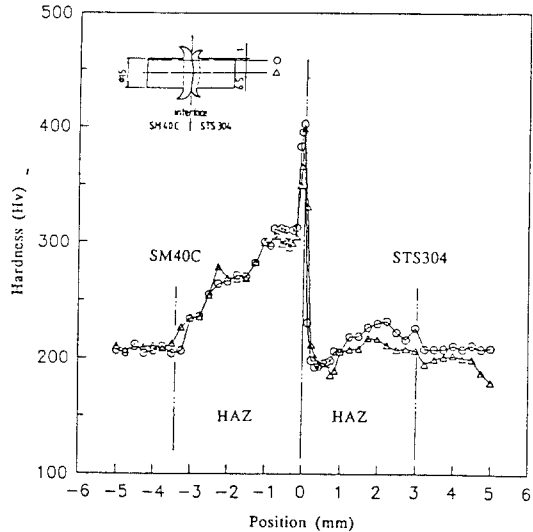


Fig.3 Hardness distribution near the weld interface of friction welding of SM40C and STS304 steels

두 재료의 열영향부는 SM40C 강이 약 3.4mm이었고 STS304 강이 약 3.0mm로 나타나서, 조직분포를 기준으로 평가한 결과와 일치하였다.

전체적인 경도분포를 관찰하면, 용접면(interface)에서 최고의 경도값이 나타나고, SM40C 강은 모재 쪽으로 갈수록 점차적으로 경도가 저하하여 모재의 경도값으로 수렴되는 거동을 보이는 것에 비하여, STS304강은 용접면에서 약 1mm범위까지 경도가 급속하게 저하하여 모재보다 낮은 경도값이 나타나고, 이후에는 다시 상승하여 모재보다 높은 경도값을 유지하고 다시 모재의 경도 값으로 수렴되는 거동을 보

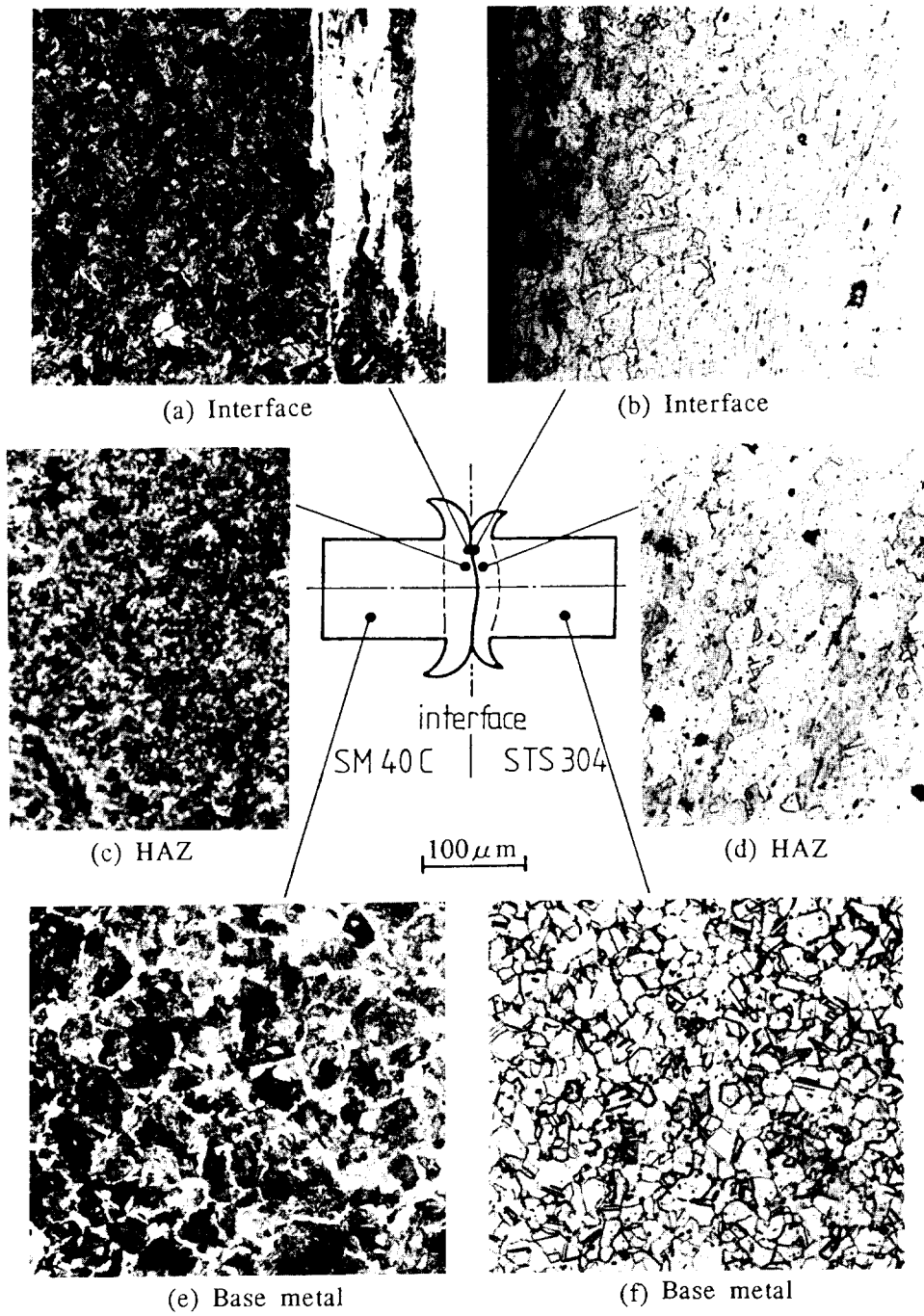
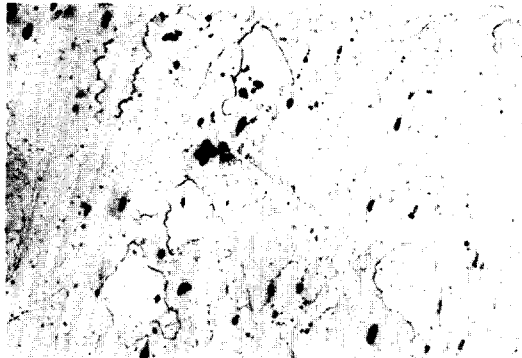


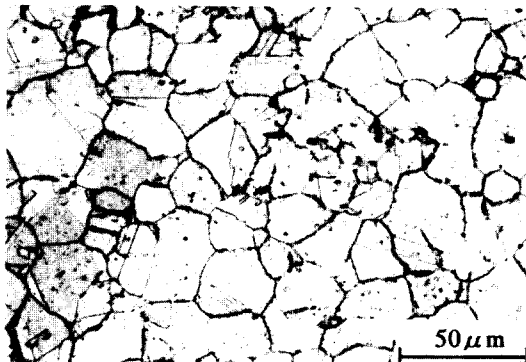
Photo.1 Microstructure in friction weld of SM40C and STS304 steels

이고 있다. 여기서 STS304 강의 용접면에서 1mm범위에서 발생하는 경도저하 현상은 3·1절에서 언급한 바와 같이 용접열에 의한 결정립의 조대화와 용체화처리의 효과 때문이라고 생각된다.

Photo. 2는 STS304강의 조직사진이며, (a)는 경도저하부 (b)는 모재의 조직을 나타낸다. 탄화물이 석출된 상태인 모재는 부식액에 의해 부식이 많이 생긴 것에 비하여, 용접면 부근의 경도저하부는 부식이



(a) HAZ region (solution treated zone)



(b) Base metal region

Photo.2 Microstructure of STS304 in friction weld of SM40C and STS304 SM40C

적게 생긴 것을 관찰할 수 있다. 경도저하부는 마찰시의 입열량에 의한 용체화처리의 효과로 인하여 석출된 탄화물이 재고용되어 순수한 오스테나이트조직이 형성되어 있다. 순수한 오스테나이트조직은 내식성이 우수하기 때문에 모재에 비하여 부식이 적게 생긴 것이 조직사진에서 확인되고, 반면에 경도와 강도가 낮아지는 특성이 있는데 그 결과가 경도 분포로 확인된다.

3.3. 용접재의 인장강도 성질

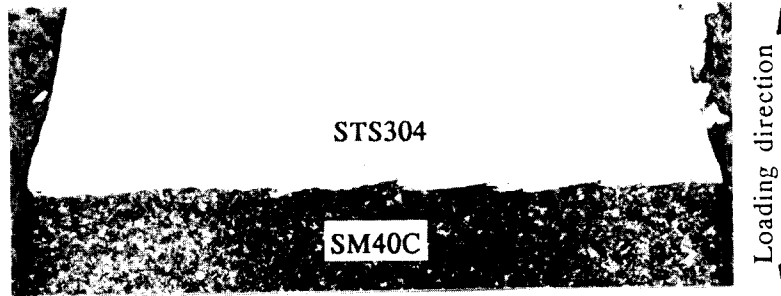
마찰용접시 마찰에 의한 입열량으로 인하여 마찰면 부근에서 급속조직들이 국부적으로 변화하고, 그 결과 각 부위의 기계적 성질이 달라질 것으로 생각된다.

Table. 4는 용접재 인장실험의 결과를 나타내었다. 표에서 나타낸 바와 같이 파단 위치는 모두 STS304 쪽이었다. 파단된 시험편을 관찰한 결과, 정확한 파단 위치는 조직과 경도 분포를 조사한 3·1절, 3·2절에서 언급한 경도가 급격히 저하하는 경도저하부임을 확인하였다.

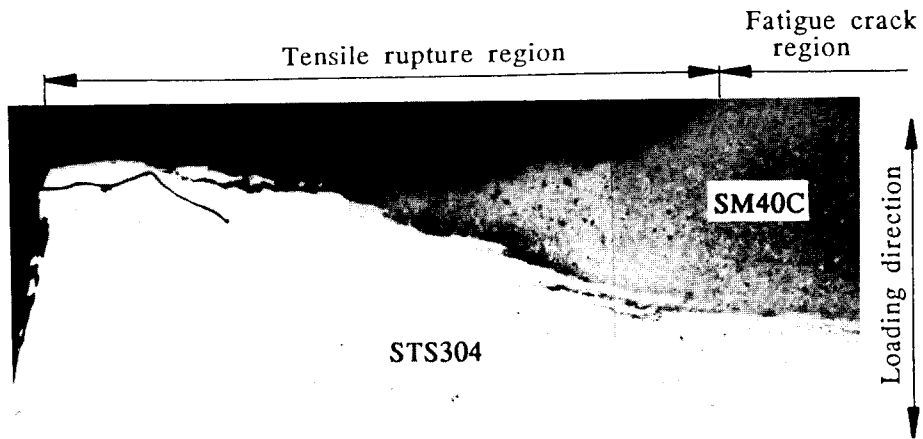
Photo. 3은 인장시험에 의하여 파단된 시험편들의 파면형태를 관찰한 사진이다. (a)는 파단면을 수직으로 절단한 면을 나타내고 있다. SM40C 강은 변형이 거의 생기지 않는 것에 비하여, STS304 강은 큰 변형이 생긴 것을 볼 수 있다. (b)는 SM40C강에 크랙을 발생시킨 후에 인장하여 파단된 파단면의 측면을 관찰한 대표적인 사진이다. 피로하중 하에서는 SM40C강에서 하중방향에 직각으로 크랙이 전파하지만 인장하중을 부하하면 파단경로가 변하면서 STS304 강으로 파단이 진행하고 결과적으로 STS304 강에서 최종파단이 발생됨을 관찰할 수 있다. 이는 3개의 시험편을 준비하여 실험하였으며, 모두 동일한 결과를 보였다. (c)는 파단이 시작된 시험편을 길이방향으로 절단한 사진이다. 표면의 용접면에서 시작된 파단이 역시 STS304강의

Table 4 Results of tension rest for fraction welded material

spec. No.	σ^T (MPa)	elongation(%)	reduction of area(%)	broken place
1	700.4	29.7	49.1	STS W.Z.
2	624.5	27.4	40.7	INT
3	648.2	32.4	56.3	STS W.Z.
4	694.7	30.6	52.2	STS W.Z.
5	685.2	31.8	53.2	STS W.Z.
Average	671	30.4	50.3	STS W.Z.



(a) section shape before tensile rupture



(b) final rupture after fatigue crack



(c) initial rupture after interface fracture

Photo.3 Photographs of fracture to examine fracture characteristics

경도저하부로 방향을 바꾸어 취약부를 따라 진행하는 경로를 명확히 확인할 수 있다. 따라서 용접재에서 인장강도가 가장 낮은 부위는 용접면에서 STS304 강으로 약 1mm 범위에 있는 경도저하부이며, 이 부분이 파괴의 기점이 된다.

3.4. 피로크랙전파속도 시험

Fig. 4는 STS304 강의 모재와 용접재의 열영향부(HAZ)에서 피로크랙전파속도 da/dN 을 응력확대계수 폭 ΔK 로 정리한 결과이다. 저 ΔK 범위에서 da/dN 은 두 재료가 거의 동일하게 유지되며, 고 ΔK 범위에서는 용접재가 조금 빠르게 나타난다.

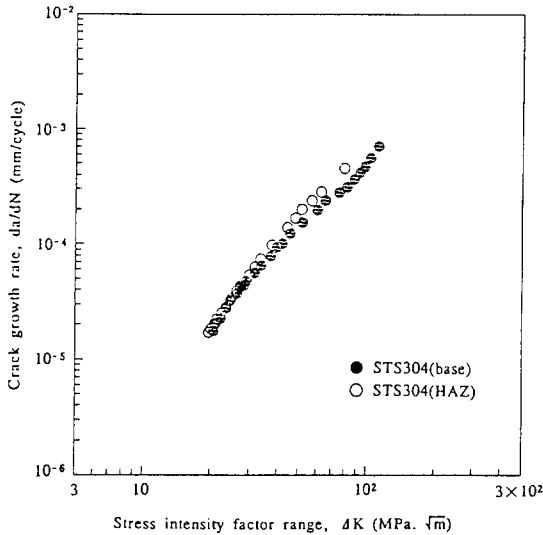


Fig.4 Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate in base metal and HAZ of STS304 of welded material with STS304 and SM40C steels

Fig. 5는 SM40C 강의 모재와 용접재의 HAZ부에서 da/dN 을 ΔK 로 정리한 것이다. STS304 강의 경우와 다르게 고 ΔK 범위에서 용접재의 da/dN 이 모재보다 조금 빠르게 나타났다. 이와 같이 STS304 강 및 SM40C 강 각각의 HAZ 부가 모재보다 피로크랙전파속도가 빠른 이유는, Fig. 3의 경도분포에서 알 수 있는 바와 같이 용접열에 의하여 열영향부의 경도가 증가되고 상대적으로 모재보다 취성화되었기 때문이다.

Fig. 6은 용접부 주위의 피로크랙전파속도를 비교

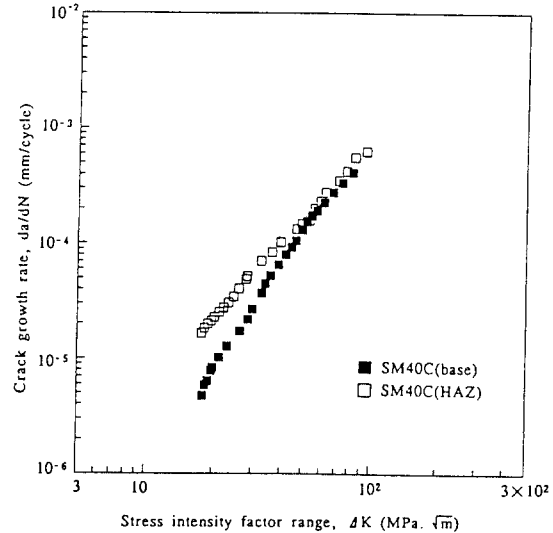


Fig.5 Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate in base metal and HAZ of SM40C welded material with STS304 and SM40C steels

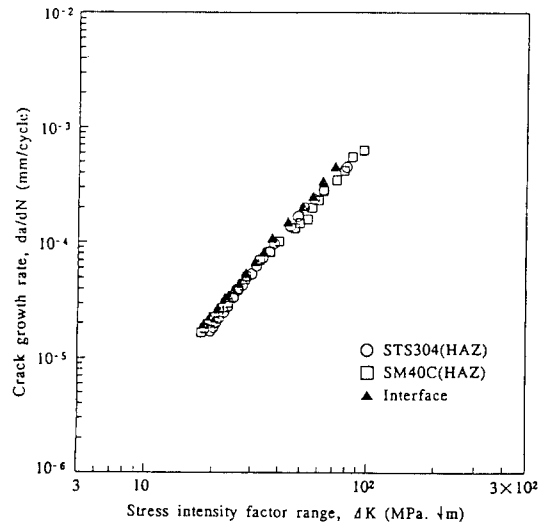


Fig.6 Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate in interface and HAZ of SM40C welded material with STS304 and SM40C steels

하기 위하여, 용접면과 두 HAZ부의 da/dN 을 ΔK 로 정리한 결과이다. 용접부는 용접면을 비롯하여 두 HAZ 부가 모두 거의 동일한 da/dN 을 보인다.

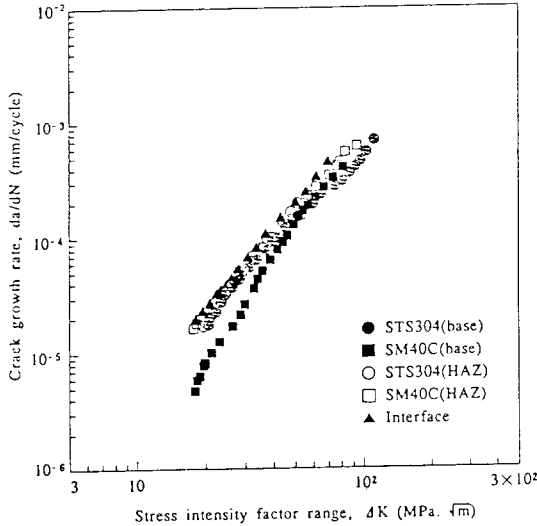


Fig.7 Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate in all specimens of base metal, HAZ and interface

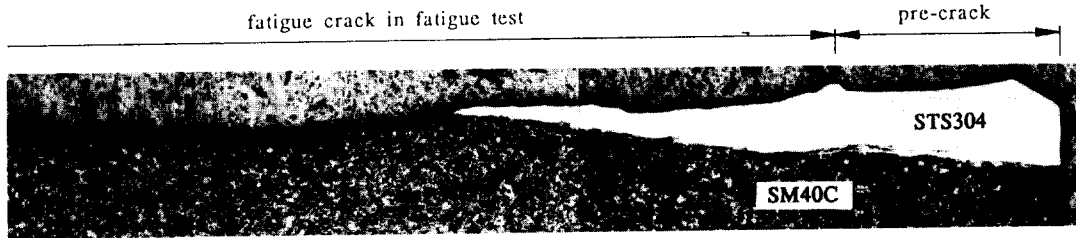
Fig. 7은 모든 재료에서 da/dN을 ΔK로 정리한 결과이다. 대체적으로 용접재의 da/dN이 조금 빠르기는 하지만 큰 차이가 없고, 저 ΔK 범위에서 SM45C 강 모재부를 제외하면 모든 재료의 da/dN은 거의 동일한 결과를 보였다. 위의 결과에서, 이중 마찰용접재의

피로크랙전파에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다.

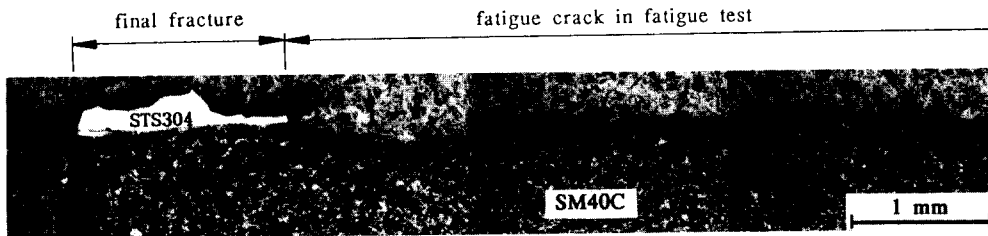
3.5. 용접면(interface)의 크랙전파속도

용접면(interface)에서의 크랙전파속도는 전체적으로 가장 빠르게 나타나고 있지만, SM40C강의 HAZ부의 속도와 거의 동일한 속도를 보이고 있다. 이는 용접면에 가공한 노치에서 크랙이 발생하고, 균열이 일정정도 전파한 후에는 SM40C 쪽으로 전파경로를 변경하여 용접면을 따라 전파함으로써, 결과적으로 SM40C HAZ부를 따라 전파하기 때문이다.

Photo. 4는 용접면에 노치를 가공한 시험편의 전체구간에서 크랙전파 경로를 보여주는 사진이다. 노치에서 STS304 강쪽으로 균열이 최초로 발생(initiation)되어 일정한 길이까지 용접면에 근접하여 STS304 강 쪽으로 용접면을 따라 크랙이 전파하지만, Fig. 6의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 결과적으로 STS304 강에 비해서 상대적으로 da/dN이 빨라 크랙전파가 용이한 SM45C 강쪽으로 경로를 변경하여 용접면을 따라 계속 전파함으로써, 급속 파단에 이르고 있음을 보이고 있다. 특히 앞의 3·1절과 3·2절에서 언급한 인장 결과와 동일하게, 급속파단은 정도가 낮은 STS 304강에서 최종파단이 발생되고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 용접면에서의 크랙전파는 SM40C 강쪽에서



(a) fatigue crack propagation region



(b) final region to fracture

Photo.4 Photographs of crack propagation path and final fracture

용접면을 따라 선택적으로 전파함을 확인할 수 있으며, 결과적으로 용접면의 피로크랙전파속도는 SM40C강 HAZ부의 피로크랙전파속도와 비슷하게 나타났다.

선택적으로 전파함을 확인할 수 있으며, 결과적으로 용접면의 피로크랙전파속도는 SM40C강 HAZ부와 거의 비슷하게 나타났다.

4. 결 론

SM40C강과 STS304강의 이종재료를 마찰용접하여, 용접재 및 모재의 파단 특성과 피로크랙전파특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용접재에서 조직과 경도를 기준으로 평가한 HAZ부의 넓이는 STS304 강은 3.0mm, SM45C강은 3.4mm이었다. SM40C 강 의 경도분포는 최고 경도값을 보이는 용접면에서 점차로 감소하는 형태를 나타내는 반면에, STS304강 쪽의 경도 분포는 용접면에서 약 1mm범위 이내에서 급격한 경도저하를 보이고 다시 회복하는 상이한 형태를 나타내었다.
- 2) 용접재에서 인장강도는 두 모재의 인장강도보다 조금 낮게 나타났고, 이 경우 인장파단은 STS304강 쪽에서 발생하였으며, 위치는 용접면에서 약 1mm범위인 경도저하 영역이었다.
- 3) 용접재에서 두 재료 HAZ부의 피로크랙전파속도는 두 재료 모재부의 피로크랙전파속도에 비해서 약간 빨랐지만 저 응력확대계수폭 범위에서 SM45C의 경우를 제외하면 전체적으로 큰 차이가 없이 비슷한 속도를 나타내었다.
- 4) 용접면에서 발생한 크랙은 피로크랙전파속도가 상대적으로 조금 빠른 SM40C강의 HAZ부를 따라

참 고 문 헌

- 1) 송삼홍, 박명파 : 이종강의 마찰용접시 압접시간 변화에 따른 강도 거동, 대한기계학회논문집, 제11권, 제5호, (1987), pp.762~771
- 2) 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈 : SM45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구, 한국해양공학학회논문집, 제2권, 1호, (1988), pp.312~321
- 3) 나석주, Jurgen Ruge : 이성재료·마찰용접부의 기계적성질검사, 대한기계학회논문집, 제8권, 제1호, (1984), pp.41~47
- 4) 오세규 : SUH3-SUH31 밸브재료의 마찰용접의 연구, 대한기계학회논문집, 제14권, (1974), pp. 221~232
- 5) 오세규 : 산업기계 관련부품을 대상으로 한 마찰용접의 응용, 한국박용기관학회지, 제10권, 제1호, (1986), pp.34~42, 1986
- 6) 정세희 : 마찰용접부의 Strain 집중과 피로강도, 대한기계학회논문집, 제15권, 제4호(1975), pp. 390~397
- 7) S.Yamada : Movement of C, Cr and Ni in SUS27 and S45C welded by friction welding, JSME, Vol. 49, No.564, (1966), pp.49~60