

< 論 文 >

國產 異種鋼을 摩擦壓接한 경우의 疲勞舉動

—SM 45 C 와 SUS 304 材를 摩擦壓接한 경우—

宋 森 弘\* · 朴 明 果\*\*

(1987年 7月 30日 接受)

Fatigue Behavior of Friction Welded Material of Domestic Dissimilar Steels

—In Case of SM 45 C to SUS 304 Friction Welded Steel—

Sam Hong Song and Myung Gwa Park

**Key Words:** Friction Welding(摩擦壓接), Optimal Welding Condition(最適壓接條件), Micro-Artificial Hole(微小人工圓孔), Micro-Crack Propagation(微小크랙傳播), Stress Level(應力레벨)

Abstract

Domestic dissimilar structural steels, SM 45 C and SUS 304 were friction welded under optimal welding condition and the micro-artificial holes were drilled at SM 45 C base metal, SM 45 C HAZ, welded zone, SUS 304 HAZ, and SUS 304 base metal for fatigue behavior tests.

In this study, the fatigue limit and the behavior of micro-crack propagation, crack propagation rate, and its dependency on stress intensity factor under the low stress level and high stress level of bending stress have been investigated.

The results obtained are as follows.

- (1) The fatigue strength of the portion of SM45C B.M., SM 45 C HAZ, welded zone, SUS 304 HAZ and SUS 304 B.M. on notched friction welded specimens are 20 kgf/mm<sup>2</sup>, 32 kgf/mm<sup>2</sup>, 27 kgf/mm<sup>2</sup>, 29 kgf/mm<sup>2</sup>, and 29 kgf/mm<sup>2</sup>, respectively.
- (2) The fatigue strength of welded zone of unnotched and notched specimens are 32.5 kgf/mm<sup>2</sup>, and 27kgf/mm<sup>2</sup>, respectively.
- (3) Micro-crack initiation in the welded zone, HAZ, and each base metals occurs simultaneously in front and rear of micro-hole tips in the view of the rotational directions.
- (4) Fatigue crack propagates more slowly in the welded zone than in another portions of specimen, regardless of the magnitude of the stress level.
- (5) Fatigue crack propagation rates were plotted as a function of stress intensity range. The value of  $m$  in the equation  $da/dN=C(\Delta K)^m$  was found to range from 2.09~2.55 in this study.

\* 正會員, 高麗大學校 工科學科 機械工學科

\*\* 正會員, 韓國航空大學 航空機械工學科

1. 序 論

摩擦壓接法는 第2次 大戰中 독일에서 熱可塑性 樹脂의 熔接<sup>(1)</sup>에 適用한 것이 實用化의 始作이며, 그 後 1957~1958 년경 소련의 Vill<sup>(2)</sup>의 指導아래 金屬에 이 壓接法을 利用하것금 研究 開發되었다.

그 後 美國에서 Hollander<sup>(3)</sup>가 AISIS 4140 강과 SUS 304 를 토크와 업셋량을 변화시켜 壓接한 後 인장, 굽힘, 충격시험을하여 壓接 最適條件을 구하였고, Hazlett<sup>(4)</sup>는 SAE 1020 과 AISI 4130 鋼을 壓接壓力과 업셋량을 주로 변화시켜 壓接한 後 引張試驗 및 硬度試驗을 하여 熔着金屬部, 熱影響部 및 母材의 位置를 구하여 最高強度值를 구한 결과 오히려 最高強度值를 초과하면 強度가 저하된다고 하였다. 또 일본의 Hasui<sup>(5)</sup>는 순수한 Al과 S45C 탄소강을 加熱壓力, 업셋壓力, 加熱時間을 變化시켜 壓接한 後 引張強度 굽힘강도 壓接材의 조직을 조사한 결과 中間組織인 Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>가 생기지 않는 壓接條件이면 最適條件이 된다고 하였다. Oh<sup>(6)</sup>는 SUH 3-SUH 31 의 벨브재료를 壓接時間 10 초 以內로 단축한 결과 靜的 試驗結果가 良好하다고 하였다. Toshisuke<sup>(7)</sup>는 SUS 27 과 S 45 C 를 最適條件으로 壓接한 後 壓接材, 壓接한 後 700°C 1 시간 유지 空冷한 것과, 850°C 1 시간 유지후 空冷하여 引張試驗한 結果

引張強度는 거의 같고, 回轉굽힘 疲勞試驗을 하여 疲勞強度를 求한 結果 熱處理材와 非熱處理材는 1 kgf/mm<sup>2</sup>의 차이가 있다고 發表하였다. 그러나 이러한 結果들은 거의가 壓接한 경우의 靜的 強度에 對한 것이며 특히 壓接材의 피로크랙 發生 및 傳播擧動에 關한 研究는 壓接材의 여러가지 조직변화 때문에 研究가 미진한 상태이다.

本 研究에서는 國產 構造用鋼인 SM 45 C 와 SUS 304 材를 最高 強度值가 나타나는 壓接條件下<sup>(8,9)</sup>에서 壓接하여 兩材料의 熔着金屬部, 熱影響部, 各 母材部 소정의 장소에 微小圓孔을 加工한 試驗片을 토대로 疲勞크랙의 發生 및 傳播擧動을 應力 레벨의 高低를 고려하여 考察하였다.

2. 試驗片과 實驗方法

2.1 試驗片

實驗을 위한 試驗片 素材는 國產 ϕ 16 mm SM 45 C 와 SUS 304 材 丸棒材이며, 化學成分은 Table 1 과 같고 그 材料의 機械的 性質은 Table 2 와 같다. 두 材料들 各各 선삭한 다음 Toyoda 15 HA 브레이크형 摩擦 壓接機로 Table 3 과 같이 最高強度值<sup>(8-9)</sup>를 나타내는 壓接條件으로 壓接한 後, 平滑試驗片과 微小圓孔試片을 준비하였다. Table 3 의 壓接條件으로 壓接하였을

Table 1 Chemical composition of base metal(B.M.)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SM 45 C	0.48	0.29	0.69	0.034	0.016	0.05	0.11	0.01	0.09
SUS 304	0.08	0.42	1.39	0.059	0.013	8.04	18.05	—	—

Table 2 Mechanical properties

Materials	$\sigma_B$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)
SM 45 C	66.5	27.3	49.9
SUS 304	70.0	42.0	59.0
F.W.J.	64.0	11.7	18.3

경우 SM 45 C 의 壓接部는 約 0.8 mm, 熱影響部는 約 2.4 mm, SUS 304 의 경우는 壓接部가 約 0.3 mm, 熱影響部가 約 1.9 mm 이므로 ϕ 0.3 mm h=0.3 mm 의 微小圓孔을 Fig. 1 과 같이 加工할 수가 있었다. 이러한 微小圓孔을 加工할 경우 加工位置는 試驗片 各各에 부석시험을 行하고 소정의 위치를 현미경 관찰 및 指示 밀링머시인에서 디지털 지시계를 利用하여 精確하

Table 3 Welding conditions

Welder	Type	rpm	Heating press (kgf/mm <sup>2</sup> )	Upset press (kgf/mm <sup>2</sup> )	Heating time (sec)	Upset time (sec)
Toyoda Friction welder	F.W. 15 HA	3,000	8	22	10	2

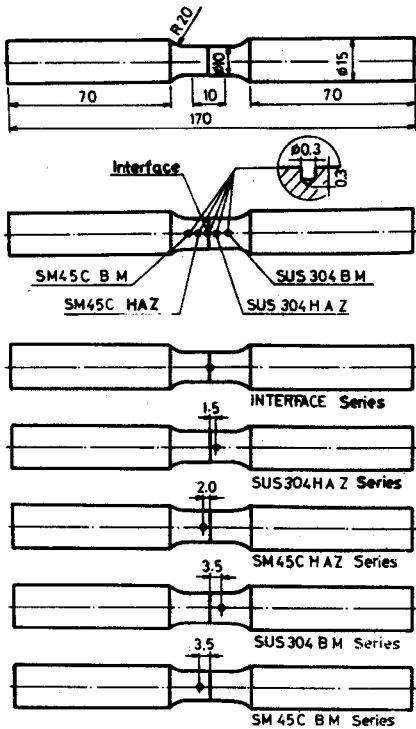


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen(notched)

게 定하였다. 圓孔 加工時에는 냉각액으로 충분히 냉각하였고 加工이 끝난 試片은 電解研磨에 의하여 그 表面을 1 μm 以下로 가볍게 研磨한 後 使用하였다.

2.2 實驗方法

試驗片의 平行部의 直徑은 1/100 mm 다이얼 버니어 캘리퍼스로 확인하고, 微小圓孔의 크기 直徑도가 확실한가를 확대경(100×)에서 조사하고 直徑도 및 金屬熔着部, 熱影響部, 母材의 위치가 타당하다고 認定되는 것만을 試驗片으로 선정 使用하였다. 疲勞限度의 결정은 10<sup>7</sup>의 반복수에 전디고 파손되지 않는 應力을 疲勞限度로 채택하고 疲勞限度의 부근에서는 0.5kgf/mm<sup>2</sup>의 응력레벨로 업다운(up-down)방법에 依하여 결정하였다. 또한 微小圓孔에 依한 斷面係數의 變化는 D=10 mm, d=h=0.3 mm인 경우에 단면계수의 저하율은 約 0.55%이므로 무시하였다. 疲勞舉動은 微小圓孔을 갖는 試驗片의 疲勞限度 曲線을 トレ로하여 低應力 및 高應力 레벨下에서 應力 반복수에 따라서 슬립 및 미시크랙의 發生, 크랙傳播舉動等을 조사하였다. 이때 表面 크랙舉動은 금속현미경을 통하여 연속적으

로 사진을 촬영한 후 그 사진을 확대분석하였다. 본 실험에 使用한 시험기는 小野型 회전굽힘 피로시험기 (Ono's type rotary bending fatigue testing machine 10 kg,m 3400 rpm)이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 摩擦壓接材의 疲勞限度舉動

本節에서는 우선 摩擦壓接하기 前에 各 材料의 疲勞限度와 壓接한 後의 疲勞限度를 比較 검토하고 또 壓接後의 各 部分에 微小圓孔을 加工한 試驗片의 S-N 曲線을 조사한 後 그것과 平滑材의 疲勞限度를 比較 검토하려고 한다. Fig. 2는 SM 45 C 材, SUS 304 材 및 SM 45 C 材와 SUS 304 材를 壓接한 壓接材의 S-N 曲線을 나타낸다. 疲勞限度는 各 各 27.5 kgf/mm<sup>2</sup>, 29.5 kgf/mm<sup>2</sup>와 32.5 kgf/mm<sup>2</sup>를 얻었다. 여기서 壓接한 材料의 疲勞限度는 SUS 304 母材에 比하여 約 10% 높다는 것을 알 수 있다. 壓接한 平滑試驗片의 疲勞強度가 上昇하는 이유는 壓接面부근의 경도가 증가하므로 회전굽힘 피로시험의 경우 시험편의 중앙에 최대굽힘 應력이 作用하고 스펜 200 mm로 하중을 가하므로 應력구배가 완만하다. 또 경화된 부분이 시험편 평행부 中央 부근에 한정되어 있으므로 경화되지 않은 부분이 파괴된다. 그러므로 壓接에 依한 硬度上昇이 疲勞強度의 增大에 기여한다고 生覺한다. 그리고 疲勞破壞는 SUS 熔着金屬部에 硬度가 低下(%)되는 곳이 나타나는 데 이곳에서 破壞가 되었다. 또 壓接한 後에 SM 45 C 母材部, SM 45 C 熱影響部, SM 45 C 及 SUS 304 材의 熔着金屬部, SUS 304 熱影響部 및 SUS 304 母材部에 微小圓孔을 加工한 材料의 S-N 曲線을 Fig. 3에 제시한다. 상술한 試驗片의 순서로 疲勞限度는 各 各 20 kgf/mm<sup>2</sup>, 32 kgf/mm<sup>2</sup>, 27 kgf/mm<sup>2</sup>, 29 kgf/mm<sup>2</sup> 및 29 kgf/mm<sup>2</sup>이다. 疲勞限度가 가장 높은 것은 SM 45 C 熱影響部材이고, 그 값이 제일 낮은 것은 SM 45 C 母材部이다. 한편 SUS 304 材인 경우는 熱影響部와 母材의 疲勞限度는 거의 同一하다. 한편 各 試驗片의 平滑材 疲勞限度와 微小圓孔을 加工한 notch材의 疲勞限度와를 比較하기 爲하여 Fig. 2 및 Fig. 3에서 各 各의 S-N 曲線을 추출 정리한 結果를 Fig. 4에 제시한다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 平滑材와 notch材의 疲勞限度 차이는 SM 45 C 材인 경우는 큰 차이를 보이나, SUS 304 材의 경우 Fig. 4(b)는 SM 45 C 材에 比하여 거의 차이가 없다. 그러나 Fig. 4(c)에 壓接한 材料의 平滑材와 notch材와의 疲勞限度는 SM 45 C 材와 같이

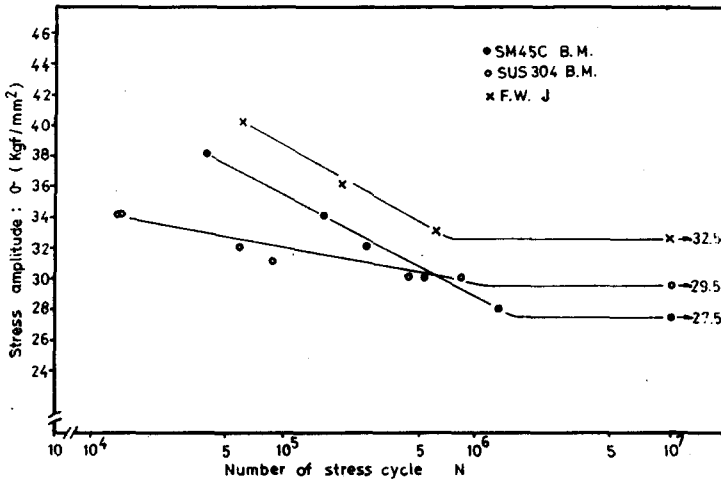


Fig. 2 S-N diagram (Smoothed specimens)

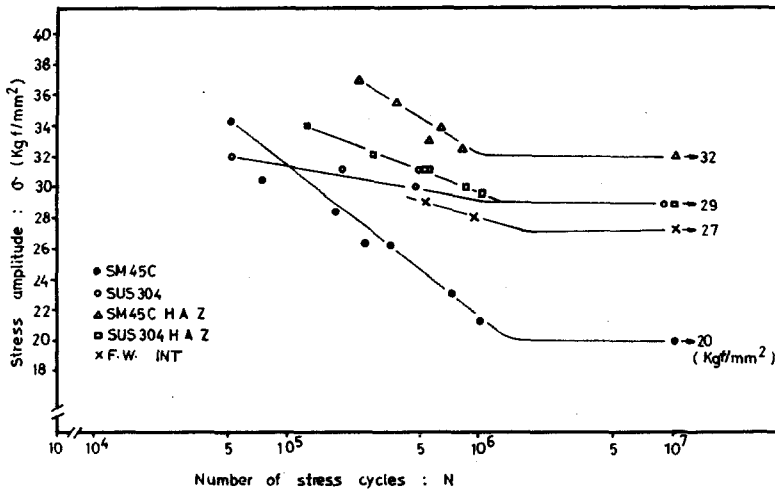


Fig. 3 S-N diagram (Notched specimen)

큰 차이는 없으나 약간의 차이를 볼 수 있다. 따라서 壓接한 材料라도 平滑材와 노치材 사이에는 노치 민감도가 존재하고 있음을 알 수 있다. 참고로 Table 4 에는 各 材料의 노치 민감도를 정리한 결과이다. 平滑材와 微小노치材의 S-N 曲線의 모양은 어느 것이든  $2 \times 10^6$  근방에서 변곡부(nose)가 형성되는 소위 일반적인 S-N 曲線 형태와 同一한 모양임을 알 수 있다.

3.2 熔着金屬部, 熱影響部, 各 母材部에 發生하는 疲勞크랙 擧動

本部에서는 SM 45 C 材, SM 45 C 熱影響部, SM 45 C 材와 SUS 304 熔着金屬部, SUS 304 熱影響部, SUS

304 母材部에  $d=0.3$  mm의 微小구멍을 加工한 各 試片에 關하여 微小圓孔 부위에서 發生하는 疲勞크랙을 관찰한 結果를 기술한다.

Fig. 5에 各 試片의 微小圓孔 주위에 發生한 疲勞크랙<sup>(10)</sup>의 例를 제시한다. 이와같은 미시 피로크랙의 發生型態는 (1) 微小圓孔 주위에 양쪽에서 동시에 發生하는 경우 (2) 微小圓孔 주위의 앞부분(試片의 最 前 방향을 기준으로)에서 우선 發生하고 그후 뒷 部分에 發生하는 경우, (3) 微小圓孔의 뒷부분에서 우선 發生하고 그후 앞부분에서 發生하는 경우로 나눌 수가 있는데 (1)의 경우가 지배적이다. 특히 壓接한 熔着金屬部에서의 疲勞크랙 發生은 微小圓孔의 양쪽에서 동

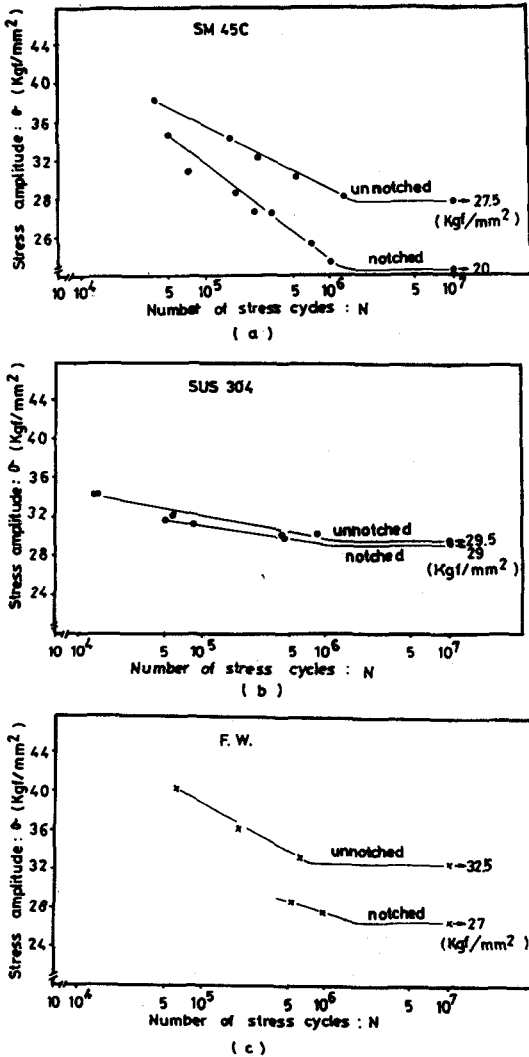


Fig. 4 S-N diagram for comparing unnotched specimen with notched specimen

시에 發生하는 경우가 대부분임을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 疲勞크랙 發生은 應力의 高低에 關係없이 거의 同一한 형태를 갖는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 6 에는 상술한 各 試驗片의 微小圓孔 주위에서 發生한 疲勞크랙의 傳播과정을 관찰한 일례를 나타낸다. 대체적으로 微小圓孔에서의 疲勞크랙 傳播는 微小구멍을 中心으로 대칭적인 크랙傳播 형태를 갖는다. 특히 壓接한 熔着金屬部의 그것은 다른 試驗片의 微小圓孔에서 發生 傳播하는 疲勞크랙보다 크랙의 굵기가 굵다는 것이 특징이다. 즉 피로크랙의 傳播가 進行됨에 따라 크랙열림현상이 다음을 관찰할 수 있었다.

이와같은 경향은 저응력 레벨에서 疲勞試驗을 행했을 경우보다 고응력 레벨에서 試驗을 행했을 경우에서 현저히 나타난다. 이와같은 SM 45 C 材와 SUS 304 材의 熔着金屬部 위에서의 피로크랙 전파형태 특징은 異種金屬의 壓接에 의하여 형성되는 熔着金屬部에서는 미세조직과 거친조직이 혼합하여 존재하며 거기에 일단 피로크랙이 전파하기 시작하면 材料의 저항응력이 균질조직인 경우에 비하여 低下되기 때문이라고 生覺하며 또한 異種金屬의 壓接경계이기 때문에 다른 시험편의 피로크랙의 굵기에 비하여 굵어지고 있다고 生覺한다. 이점에 대해서는 차후 구체적인 검토가 요망된다. Fig. 7, Fig. 8은 微小圓孔을 갖는 各 試驗片의 120% 및 200%의 應力레벨에서 측정된 微小크랙길이  $a$ 와 應力반복수  $N$ 의 關係를 나타낸 것이다.

우선 Fig. 7에서 피로크랙 전파는 SUS 304 母材, SM 45 C 熱影響部, SUS 304 熱影響部, SM 45 C와 SUS 304 材와의 熔着金屬部, SM 45 C 母材部, 試驗片 順으로 빠르다. SM 45 C 材와 熔着金屬部 試驗片의 疲勞크랙 傳播曲線은 다른 試驗片의 曲線에 比하여 경사가 완만하다는 것을 알 수 있다. 이와같은 결과는 疲勞限度의 120%에 해당하는 응력레벨에서의 결과이다. 한편 피로한도의 200%에 해당하는 응력레벨에서는 SUS 304의 母材와 熱影響部가 같은 사이클에서 피로크랙이 發生하여 傳播하며 그 나머지는 상술한 試驗片 順으로 疲勞크랙 傳播特性이 同一하나 疲勞크랙이 發生한 後 傳播하는 速度는 빠르고 그 曲線의 형태는 급한 경사를 갖는 것이 특징이다.

### 3.3 熔着金屬部, 熱影響部, 各 母材部の 疲勞크랙 傳播速度

疲勞크랙 傳播速度를 어떤 反復回數에 成長한 크랙한 사이클당의 평균길기로 表示하면 다음식<sup>(11)</sup>과 같다.

$$\frac{da}{dN} \approx \frac{a_2 - a_1}{N_2 - N_1}$$

여기서  $a_1$ : 反復回數  $N_1$ 에 해당하는 크랙길이

$a_2$ : 反復回數  $N_2$ 에 해당하는 크랙길이이다.

각 단계에 대한 疲勞크랙 傳播速度  $\frac{da}{dN}$  원공 선단에서 부터 크랙단까지의 거리  $a - a_0(\mu m)$ 의 關係를 Fig. 9와 Fig. 10에 표시하였다.

Fig. 9는 疲勞限度의 120%에 해당하는 응력레벨에서 各 試驗片에 發生傳播하는 疲勞크랙 길이와 疲勞크랙 傳播速度와의 關係를 나타낸 것이고, Fig. 10은 疲勞限度의 200%에 해당하는 各 試驗片의 疲勞크랙 傳播速度와 疲勞크랙 길이와의 關係를 정리한 것이다. 疲

Table 4 Results of fatigue behaviors

Item Speci.	Form	D(mm)	d(mm)	d/D	$\sigma_w$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$\sigma_{max}=\alpha\sigma_w$	$\frac{\sigma_w}{\sigma_B}$	$\eta = \frac{\beta-1}{\alpha-1}$
SM 45 C B.M.	Unnotched	10	0	0	27.5	—	1	—	0.414	—
	Notched (d=h)	10	0.3	0.03	20.0	2.591	1.375	51.82	0.300	0.236
SM 45 C H.A.Z.	Unnotched	10	0	0	32.5	—	1	—	0.508	—
	Notched (d=h)	10	0.3	0.03	32.0	2.591	1.015	82.91	0.500	0.009
Int.	Unnotched	10	0	0	32.5	—	1	—	0.508	—
	Notched (d=h)	10	0.3	0.03	27	2.591	1.204	72.66	0.422	0.128
SUS 304 H.A.Z.	Unnotched	10	0	0	32.5	—	1	—	0.508	—
	Notched (d=h)	10	0.3	0.03	29	2.591	1.121	75.14	0.453	0.076
SUS 304 B.M.	Unnotched	10	0	0	29.5	—	1	—	0.421	—
	Notched (d=h)	10	0.3	0.03	29	2,591	1.017	75.14	0.414	0.011

$\sigma_w$ =Fatigue endurance  $\alpha$ =Stress concentration factor  $\beta$ =Notch factor  $\sigma_B$ =Tensile strength  
 $\eta$ =Notch sensitivity factor

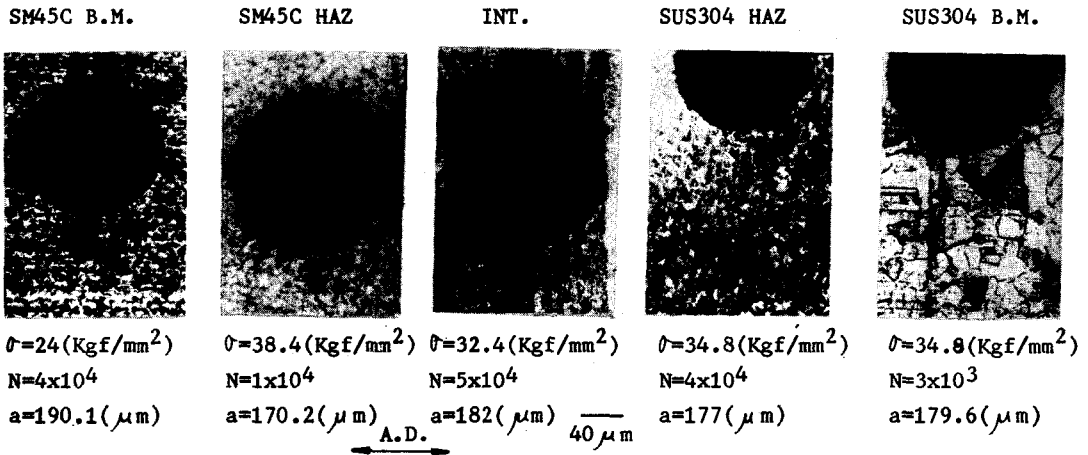


Fig. 5 Initial crack initiating at notch of friction welded joints under low stress level

勞限度의 120% (저응력레벨)에서의 疲勞크랙 傳播速度는 대체로 SUS 304 母材部, SM 45 C 熱影響部 SUS 304 熱影響部, SM 45 C와 SUS 304와의 熔着金屬部, SM 45 C 母材部の 試驗片 順으로 빠르다는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 나타나는 것과 같이 熔着金屬部 및 熱影響部の 傳播速度는 各 母材의 傳播速度와 完연히 구분이 되는 것을 알 수 있다. 이 현상은 疲勞限度의 200% (高壓力)에 해당하는 응력레벨에서도 더 뚜렷이 나타나고, 各 試片의 傳播速度變動은 低應力의 경우와 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 疲勞크랙 傳播速度는 低應力레벨의 그것보다 高應力레벨에서의 그것이

더 빠르다는 것을 알았다. 또한 熔着金屬部, 熱影響部에서 發生傳播하는 疲勞크랙 傳播과정에서는 一般 構造用 鋼材의 疲勞試驗에 관찰되는 잠복현상<sup>(11)</sup>은 관찰되지 않았다.

### 3.4 疲勞크랙 傳播速度와 應力擴大係數와의 關係

回轉굽힘 응력일때 圓孔의 끝에서 發生한 크랙이 傳播할 때, 크랙의 길이가 약 4 mm까지는 應力진폭들과 무관하게 크랙의 표면은 거의 반원에 가깝다는 보고<sup>(12)</sup>가 있으므로 여기서도 약 4 mm까지는 내부크랙과 의

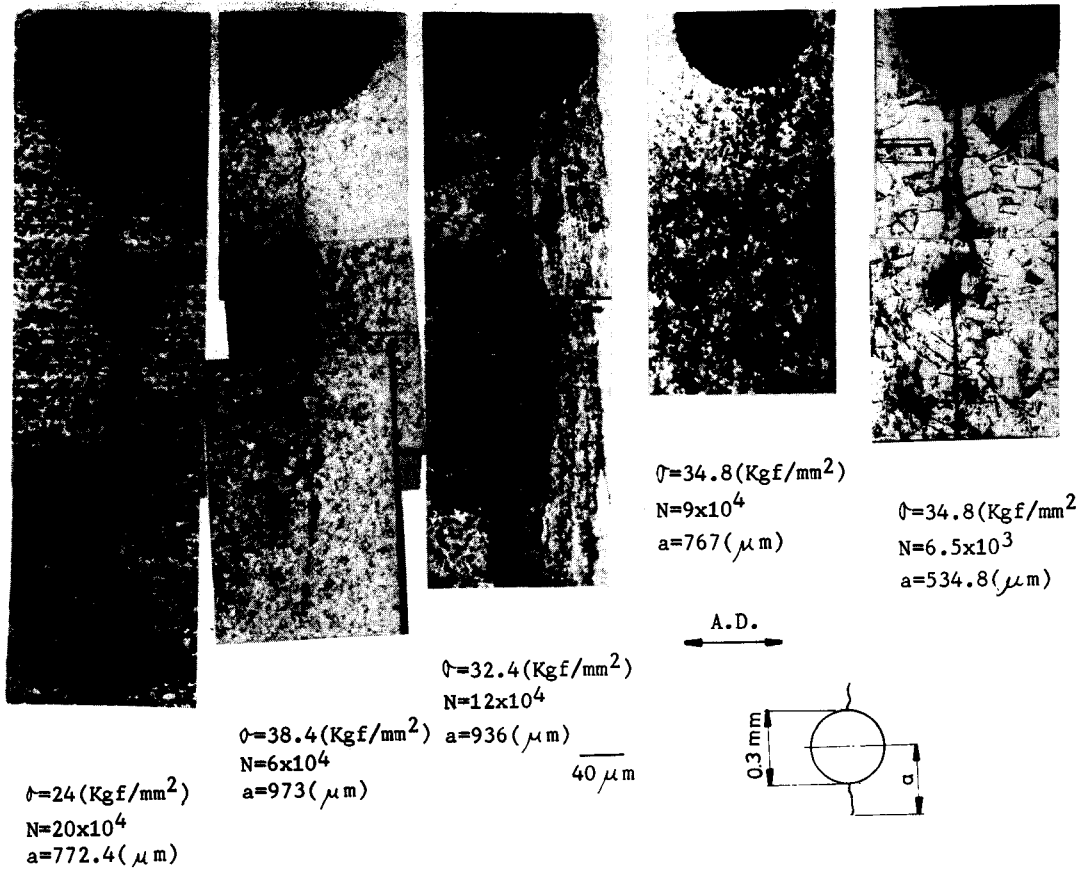


Fig. 6 Crack propagation at notch of friction welded joints under low stress level

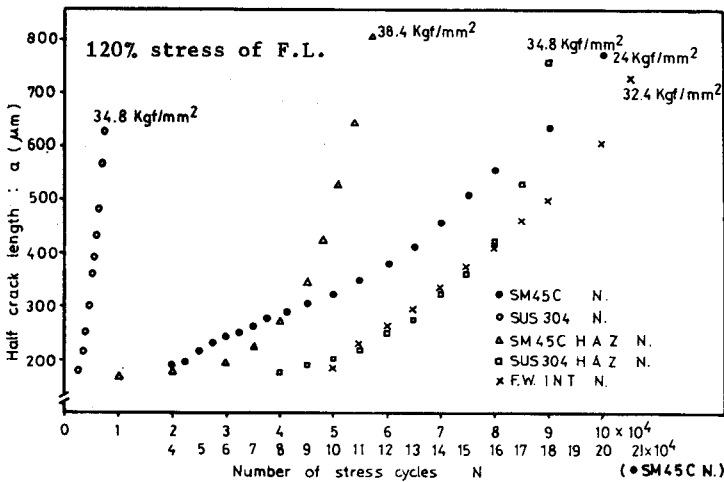


Fig. 7 Relation between crack propagation and number of stress cycles

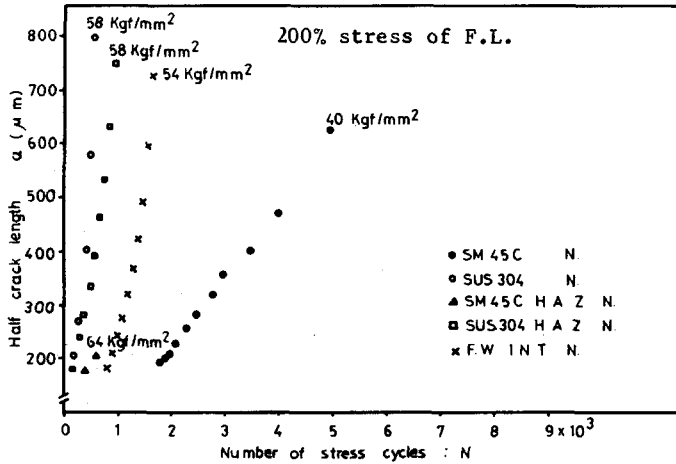


Fig. 8 Relation between crack propagation and number of stress cycles

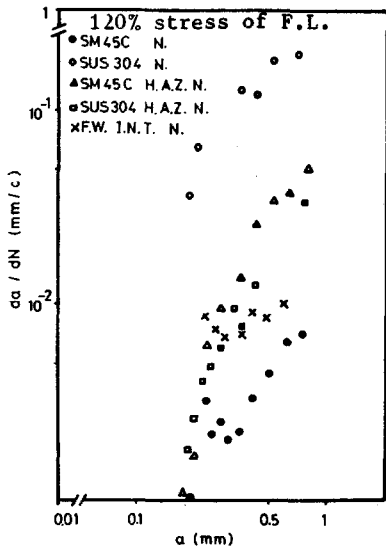


Fig. 9 Relation between the crack propagation rate and half crack length

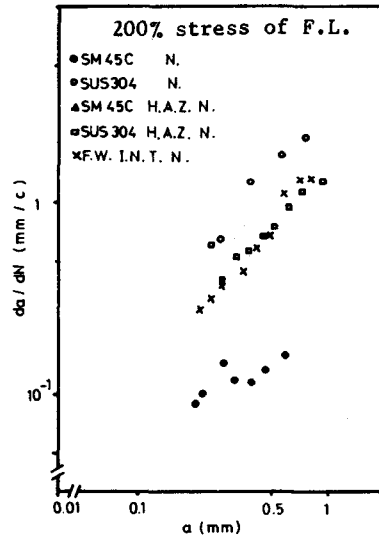


Fig. 10 Relation between the crack propagation rate and half crack length

부크레이크의 1:1로 같은 크기로 傳播 한다고 生覺했다. 또한 본 연구에서 대상으로 한 크랙길이는 圓孔의 半徑 0.15mm 보다 크므로 일단은 응력집중 영역은 벗어난 것으로 生覺하여 應力擴大係數로서는 편이상 西谷의 報告<sup>(12)</sup>와 같이  $K_1 = \sigma \sqrt{\pi(a_1 + b)}$  을 使用하기로 하였다(Fig. 11 참조). 그런데 회전굽힘 피로의 경우 應力擴大係數( $\Delta K$ )는 다음과 같다.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

여기서  $K$ 는 압축에서는 정의가 되지 않으므로  $R =$

-1인 경우  $K_{min} = 0$ 가 되어  $\Delta K = K_{max}$ 로 된다. 그래서 본 실험에 이용한 應力擴大係數는

$\Delta K = \sigma_{max} \sqrt{\pi(a_1 + b)}$  로 계산하였다. Fig. 12, Fig. 13에는 各試驗片의 疲勞크랙 傳播速度와 應力擴大係數와의 關係를 나타낸다.

Fig. 12는 疲勞限度의 120%에 해당하는 응력레벨에서의 결과를 정리한 것이고 Fig. 13은 疲勞限度의 200%에 해당하는 응력레벨에서의 결과이다.

크랙傳播速度  $\frac{da}{dN}$  과 應力擴大係數  $\Delta K$  와의 關係는



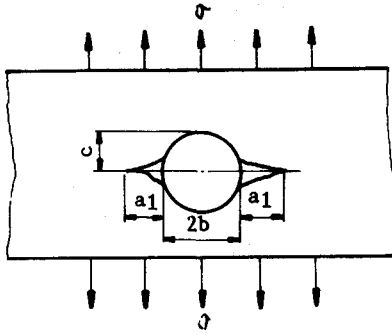


Fig. 11 The model of crack for stress intensity factor

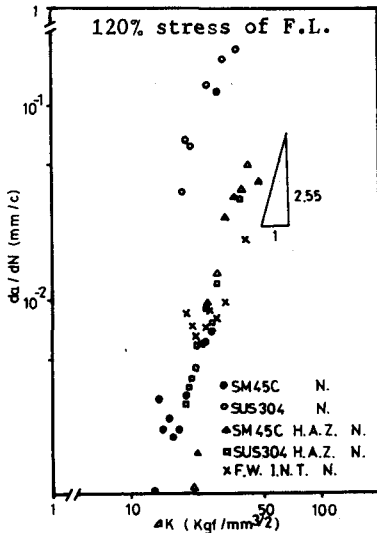


Fig. 12 Relation between the crack propagation rate and stress intensity factor

摩擦壓接材의 경우에도, 各 應力레벨에 對해서는 線形關係를 나타내고 있으므로,  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$  의 형식으로 定理해 보았다. Paris<sup>(14)</sup>는  $m=4$ 에서 實驗結果가 광범위하게 정리되는 4승 법칙을 제안한 바 있는데, 本實驗의 경우 低應力레벨에서의  $m$  값은 2.55, 高應力레벨에서의  $m$  값은 2.09이다. 따라서 摩擦壓接材인 경우 應力레벨의 高, 低에 關係없이  $m$ 의 값은 2.09~2.55라는 것을 알았다.

#### 4. 結 論

國產 構造用 鋼인 SM 45 C와 SUS 304 材에 最高 強度值를 얻을 수 있는 摩擦壓接 條件으로 壓接한 後 SM 45 C 母材, SM 45 C 熱影響部, SM 45 C와 SUS 304

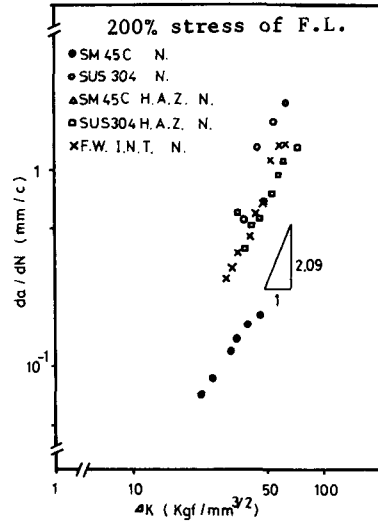


Fig. 13 Relation between the crack propagation rate and stress intensity factor

와의 熔着金屬部, SUS 304 熱影響部 및 SUS 304 母材에 各各  $\phi 0.3$  mm 微小圓孔을 加工하여 各 試驗片에 내구한도를 구하고, 내구한도의 120% 應力인 低應力레벨과 내구한도의 200% 應力인 高應力下에서 크랙의 發生舉動, 피로크랙의 傳播舉動, 傳播速度舉動 및 應力擴大係數의 의존성에 對하여 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 摩擦壓接한 노치시편 SM 45 C 母材部, SM 45 C 熱影響部, SM 45 C와 SUS 304의 熔着金屬部, SUS 304 熱影響部, SUS 304 母材부의 疲勞限度는 各各 20 kgf/mm<sup>2</sup>, 32 kgf/mm<sup>2</sup>, 27 kgf/mm<sup>2</sup>, 29 kgf/mm<sup>2</sup>, 29 kgf/mm<sup>2</sup>이다.

(2) SM 45 C와 SUS 304를 壓接한 壓接熔着部の 平滑材 및 微小 노치재의 疲勞限度는 各各 32.5 kgf/mm<sup>2</sup>, 27 kgf/mm<sup>2</sup>이다.

(3) 熔着金屬部, 熱影響部 各 母材部에 發生하는 疲勞크랙의 發生形態는

첫째, 微小圓孔의 주위의 양쪽에서 동시에 發生하는 경우.

둘째, 微小圓孔 주위의 앞부분에서 우선 發生하고 그 후 뒷부분에서 發生하는 경우.

셋째, 微小圓孔 주위의 뒷부분에서 우선 發生하고 그 후 앞부분에서 發生하는 경우로 分類하고 있고 어느 試片이나 첫째의 경우가 支配的이다.

(4) 熔着金屬部の 疲勞크랙 傳播曲線은 應力레벨의

高, 低에 關係없이 다른 시편의 그것보다 완만하다.

(5) 疲勞크랙 傳播速度를 應力擴大係數로 정리해 본 결과로는  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$  식의  $m$  값은 本實驗 範圍內에서는 2.09~2.55가 되고 있다.

### 後 記

本 研究는 1986年度 후반기 韓國科學財團 研究費에 의하여 수행되었으므로 關係 諸位에 感謝 드립니다.

### 參 考 文 獻

- (1) Toshisuke, S., 1965, "Study on Welding Conditions for Steel by Friction Welding", JSWE, Vol. 34, No. 8, pp. 794~800.
- (2) Vill, V.I., 1962, "Friction Welding of Metals, American Welding Society, Inc. N.Y.
- (3) Hollander, M.B., 1963, "Friction Welding Parameter Analysis", Welding Research Supplement, No. 11, pp. 494~501.
- (4) Hazlett, T.H., 1962, "Properties of Friction Welding Plain Carbon and Low Alloy Steels", Welding Research Supplement, No. 2, pp. 49~52.
- (5) Hasui, A., 1977, "Friction Welding of Aluminium and Carbon Steel", JSWE, Vol. 46, No. 12, pp. 858~862.
- (6) Oh, S.K., 1974, "Study on Friction Welding of Valve Materials", KSME, Vol. 14, No. 3, pp. 221~231.
- (7) Toshisuke, S., 1966, "Movement of C. Cr. and Ni. in SUS 27 and S 45 C Welded by Friction Welding and Mechanical Properties of the Joint", JSWE, Vol. 35, No. 6, pp. 429~438.
- (8) Song, S.H., Park, M.G., 1986, "Behavior of Strength and Friction Welding of Dissimilar Steels", APCS, 2nd. Conf. pp. 287~292.
- (9) Song, S.H., Park, M.G., 1987, "The Behavior of Strength on Friction Welding of Dissimilar Steels by Various Heating Time", KSME, Vol. 11, No. 5, pp. 762~771.
- (10) Nisitani, H., 1985, "Evaluation of Fatigue Life for Crack Initiation and Fracture of Notched Specimens", JSME, Vol. 51, No. 462, pp. 558~562.
- (11) Nagai, K., 1969, "On the Fatigue Crack Propagation in Structural[Steels(I)]", JSWE, Vol. 38, No. 11, pp. 1242~1248.
- (12) 西谷弘信, 1975, "き裂閉口現象と疲勞き裂傳ば舉動に及ぼす平均應力の影響", 日本機械學會論文集, Vol. 539, p. 1964.
- (13) Newman, J.C., 1971, "An Improved Method of Collocation for the Stress Analysis of Cracked Plates with Various Shaped Boundaries", NASA Technical Note, D-6379.
- (14) Paris, P.C., 1964, "The Fracture Mechanics Approach to Fatigue", Fatigue-An Interdisciplinary Approach, Syracuse Univ. Press, p. 107.
- (15) Song, S.H., Oh, W.S., 1985, "Behavior of Fatigue Crack Propagation from Surface Flaw", KSME, Vol. 9, No. 2, pp. 120~157.
- (16) Fisher, J.W., 1973, "Fatigue Crack Growth in Welded Beams", Pergamon Press, Printed in Great Britain, Vol. 5, pp. 415~429.