

# 이종마찰 접합계면부의 소성유동 방향성 및 강도 평가

오정국\*, 성백섭\*\*

## Plastic Flow Direction and Strength Evaluation of Dissimilar Friction Bonding Interface Joints

Jung-Kuk Oh\*, Back-Sub Sung\*\*

### ABSTRACT

Friction welding has many merits such as energy efficiency, simple processing, etc but difficult to obtain good weld at the welded interface and heat affected zone. To date, the continuum mechanics and fracture mechanics are utilized to analyze stresses at the interface and propagation of cracks.

In this study, STS304 and SM15C are selected because they can be differentiated distinctively from metallic point of view and crack can be observed easily. It is observed during friction welding that STS304, rotary part is hotter than SM15C, fixed part. The last fracture occurs around the center because the surface of fatigue fracture has smooth regions, due to the separation phenomenon in plastic flows layers and striation dimple pattern.

**Key Words** : Heat Affected Zone(열영향부), Bonding Interface(접합계면), Plastic Flow(소성유동)

### 1. 서론

설계기술이 고기능·고강도화 및 고속화·경량화를 지향하고 재료의 복합화가 진행됨에 따라 이종 재료의 접합기술은 현재 현저하게 진보하고 있다.<sup>(1~3)</sup> 마찰용접은 두 개의 용접할 재료를 맞대어 놓고 그 접촉면에 압력을 주면서 서로간의 상대운동에 의해 용접이 가능한 온도에까지 도달하게 하고, 상대운동을 정지시키고 가압하여 두 모재의 마찰면을 접합시키는 방식의 용접법으로 이종재료의 용접이 가능하고 열영향 부위가 좁으며 녹는 부위가 적다. 동종재의 마찰용접부는 기계적 성질이 모재와

비슷하거나 더 좋은 결과값을 가질 수 있는 것으로 판명되었으며, 이것은 마찰용접 중에 발생하는 높은 온도와 소성변형에 의한 재결정현상을 통하여 용접부의 금속조직이 미세해지기 때문이다.<sup>(4)</sup> 그러나 이종재의 마찰용접부는 접합계면에서 압접시 잔류응력이나 두 모재의 물리적, 기계적 성질이 급격히 변하는 불연속성 등으로 인한 응력특이성이 발생하게 된다.<sup>(5~8)</sup> 이러한 이유로 접합계면 균열 및 계면 근방 균열을 갖는 이종재의 파괴거동에 관한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다.

따라서 연구를 위해 냉간압연한 STS304와 SM15C를 마찰압접하고, 계면부의 균열강도를 평가

\*\* 2001년 10월 4일 접수  
\* 조선대학교 기계공학부  
\*\* 북포대학교 기계공학과

하기 위하여 접합계면과 계면근방에 미소 원공결함을 갖는 노치재에 대해 파괴역학적 관점에서 접합계면부를 강도평가하였으며, 접합계면을 중심으로 소성유동에 의한 층과 피로 파단면을 관찰하여 소성유동층에 의한 영향을 연구하였다.

2. 실험

실험에 사용된 시험편 재료는 일반적으로 내열 재료 많이 사용되는 냉간압연한 STS304와 기계구조용 탄소강인 SM15C를 사용하였다. Table 1과 Table 2는 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 나타내고 있다. 두 재료 모두 지름이 12mm인 환봉을 마찰 압접하기 위하여 마찰압접시편을 가공하였다. 압접시 소성유동으로 감소되는 길이의 변화를 고려하여 압접부의 평행부 길이는 STS304의 경우 약 10mm, SM15C의 경우는 약 15mm로 하였으며, 압접 후의 전체 평행부 길이는 약 10mm가 되도록 하였다. 또한, 압접부의 지름을  $\phi 10\text{mm}$ 하여 압접시 upset 압력으로 인한 압접시 Flash의 유동과 압접상태를 그대로 피로시험에 반영하기 위한 것으로 압접부의 Flash만 제거하고 연마하여 그대로 피로 시험에 사용하였다.

마찰용접은 직접구동형, 습식 브레이크식 압접기를 사용하였으며, SM15C를 고정단으로 하고 STS304를 회전시켜 압접하였다. 본 실험에 사용된 마찰용접재의 압접조건은 Table 3에 표시하였으며 기계적 성질은 Table 2에 표시하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metal (Wt. %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SM15C	0.16	0.21	0.52	0.02	0.35	0.18	0.16
STS304	0.08	1.17	2.28	0.045	0.30	8.19	24.39

Table 2 Mechanical properties

Materials	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hv
SM15C	680.62	701.81	7.03	47.44	224
STS304	604.00	731.63	29.09	77.20	257

Table 3 Friction welding conditions

Preheating Pressure (MPa)	Preheating Time (sec)	Friction Pressure (MPa)	Friction Time (sec)	Upset Pressure (MPa)	Upset Time (sec)
45	2	125	0.7	150	2.5

회전굽힘피로시험에 사용된 시험편은 Fig. 1과 같이 1차로 선반에서 가공되었고 사포로 연마하였으며  $0.01\mu\text{m}$ 의 산화알루미나 파우더를 사용하였다.

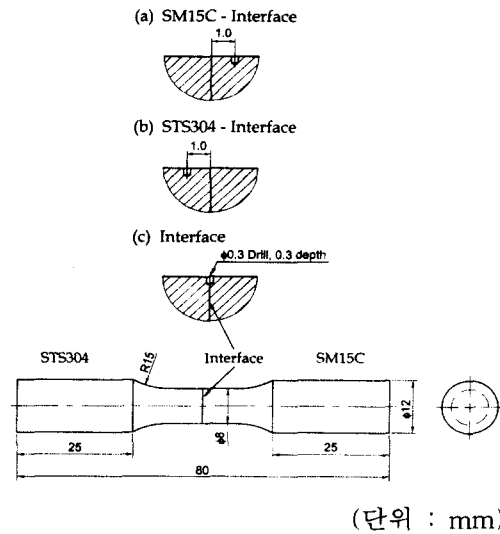


Fig. 1 Dimension and configuration of fatigue specimens

모재와 용접재의 기계적 성질은 만능재료시험기(Instron 4206, 15ton)을 사용하였고, 실험에 사용한 피로시험기는 오노식 회전굽힘피로시험기(Ono's type Rotary bending fatigue testing machine)이며 시험기의 최대굽힘모멘트는 10kg-m이다. 이중마찰압접재의 접합계면과 계면근방에서의 피로균열 발생 및 전파거동을 관찰하기 위해 마찰용접재의 계면 및 계면에서 각각 1.0mm 떨어진 위치에 고속 드릴링 머신을 사용하여 지름 0.3mm, 깊이 0.3mm인 미소 원공결함을 Fig. 1과 같이 가공하였다. 여기서 용접재의 계면근방의 미소 원공 가공위치는 금속조직과 경도분포를 기준으로 평가한 열영향부

(SM15C : 3.0mm, STS304 : 2.3mm)에 포함되는 위치이다. 또한 2000 ~ 5000Cycles마다 시험기를 정지시키고 하중을 제거한 다음 이동현미경을 설치한 후 접안이동측미계(OSM)를 부착하여 피로균열길이를 측정·관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 이종마찰압접재 계면부의 피로균열성장거동

이종마찰압접재를 각각 계면과 계면근방(SM15C측 1.0mm, STS304측 1.0mm)에 지름 0.3mm의 미소원공을 가공하여 미소원공 주위에 발생하는 피로균열이 주균열로 성장하여 최종 피로파단에 도달되는 거동을 관찰하였다.

Photo. 1은 계면에, Photo. 2는 SM15C측 1.0mm 위치에, Photo. 3은 STS304측 1.0mm 위치에 각각 미소원공결함을 가공하여 회전수 증가에 따른 피로균열전파거동을 대표적인 파단수명비에서 연속적으로 나타낸 것이다.

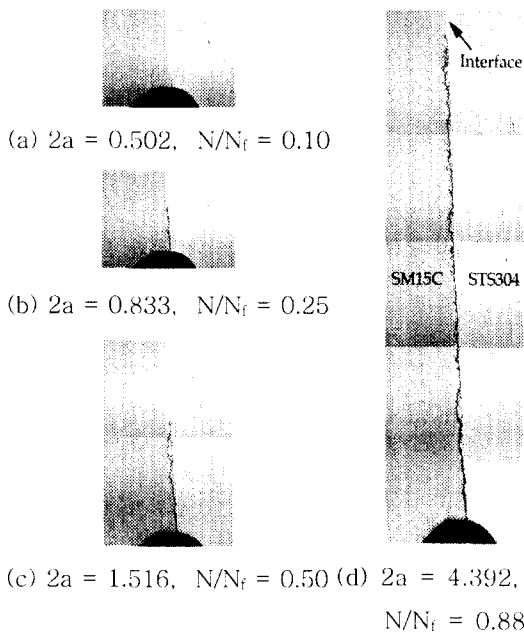


Photo. 1 Fatigue crack propagation in Interface (×100)

시험응력은 평활재에 대한 S-N 선도상의 피로한도응력의 90%에 해당하는 256.8MPa로 설정하였다. 각 노치재의 초기 미시균열은 미소원공 주위에서 축에 수직방향으로 관찰되었으며, Photo. 1과 같이 계면에 미소원공결함을 가공한 경우 균열은 계면을 따라 성장함을 알 수 있었다.

SM15C측 1.0mm의 노치재에서 피로균열은 Photo. 2와 같이 계면쪽으로 성장하였고, 이는 마찰압접시 소성유동에 따른 금속조직의 영향이라 사료된다. 또한, 계면과 SM15C측 1.0mm 노치재의 경우 균열전과길이에 대한 파단수명비가 유사함을 보이며, STS304측 1.0mm 노치재의 경우 상당히 높은 파단수명비에서 균열성장이 개시되며 최종 피로파단은 미소원공부가 아닌 계면근방(SM15C측)에서 발생하였다.

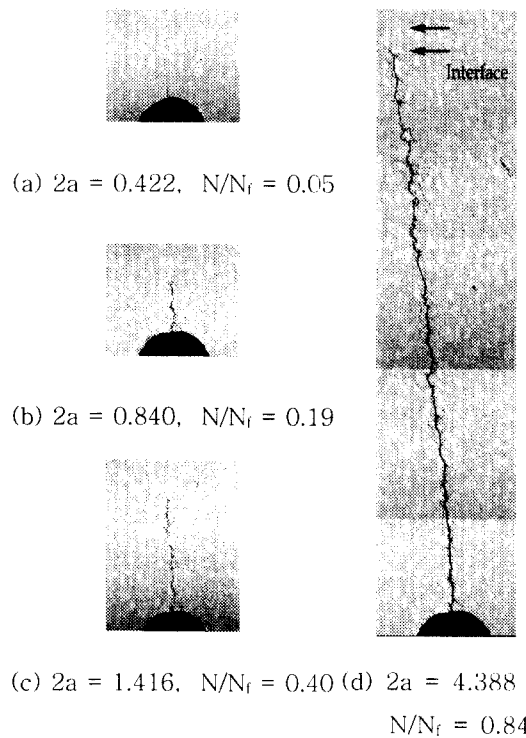


Photo. 2 Fatigue crack propagation in SM15C( ×100)

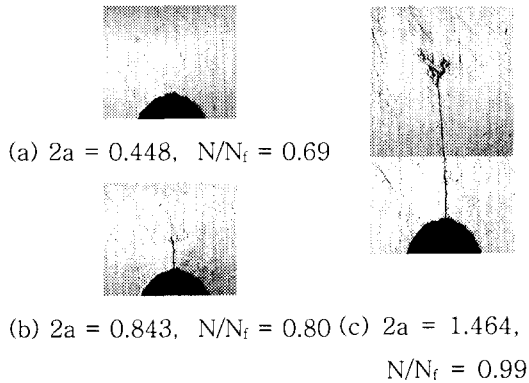


Photo. 3 Photographs of fatigue crack propagation in STS304( $\times 100$ )

### 3.2 이종마찰압접재 계면부의 피로균열전파속도

Fig. 2는 이종마찰압접재의 계면 및 계면근방에서의 피로균열전파속도와 표면 피로균열길이와의 관계를 나타낸 것이다. 이때 피로균열전파속도  $da/dN$ 은 7점 다항식근사법(Seven point incremental method)<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 계면 노치재와 SM15C측 1.0mm 노치재의 경우 불안정 성장구간인 0.8~1.0mm에서 균열단합 현상이 나타났으며 1.0mm 이상의 균열길이구간에서 시험편 기울기는 약 1.02~1.2 정도로 거의 기울기가 1인 직선으로 근사되었다. STS304측 1.0mm의 경우 균열진전은 대부분 불안정 성장구간에서 일어나며 각 조건에 대한 시험편 모두 초기 균열진전구간에는 균열단합 현상을 볼 수 있었다.

### 3.3 피로균열 전파속도와 응력확대계수와와의 관계

이종마찰압접재 계면부에 대한 응력확대계수 범위를 결정하기 위하여 표면응력을 기준으로 한 응력확대계수와 균열의 형상을 고려한 표면균열의 3차원 응력확대계수를 각각 구한 후 비교·검토하였다.

Seikoku<sup>(9)</sup>는 회전굽힘응력일 때 미소원공의 가장자리에서 발생한 균열이 전파할 때 균열의 길이가 약 4mm까지는 응력진폭들과 무관하게 균열의 표면은 거의 반원에 가깝다고 하였으며, Song 등<sup>(10)</sup>은 회전굽힘응력하에서 원공 끝에서 발생한 균열전파길이의 약 4mm까지는 내부균열과 외부균열이

거의 1:1로 전파한다고 보고하였다. 또한, 연구대상의 균열길이가 원공의 반경 0.15mm보다 크므로 응력집중 영역을 벗어난 것으로 생각하여 응력확대계수를 다음식을 사용하였다.

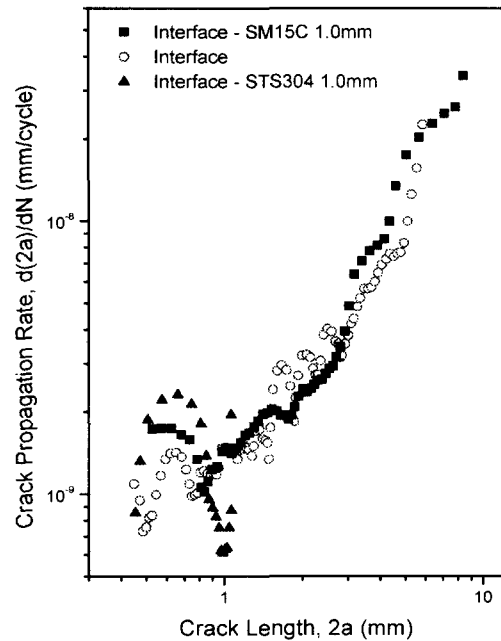


Fig. 2 Relation between crack propagation and crack length for friction weld of SM15C and STS304

$$\Delta K = \sigma_{\max} \sqrt{\pi(a_1 + b)} \quad (1)$$

또한, Park(11)은 회전굽힘을 받는 환봉재의 경우 균열의 형상을 고려한 표면균열의 3차원 응력확대계수  $K$ 를 다음과 같이 구하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a'} \times \frac{0.764r^3 + 0.88r^2a'}{r^3 + 3.96r^2a'} + \frac{2.362ra'^2 + 3.34a'^3}{5.24ra'^2 + 2.3a'^3} \quad (2)$$

Fig. 3와 Fig. 4는 각각 회전굽힘응력일 때의 표면균열을 2차원과 균열의 형상을 고려한 3차원의

로 도시한 것이며, 본 실험에서는 응력확대계수 범위에 대하여 표면균열길이를  $2a$ 로 정의하였으므로  $a$ 로 하여 응력확대계수를 구하였다.

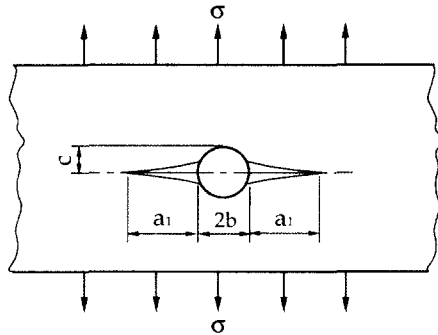


Fig. 3 The 2-D model of crack

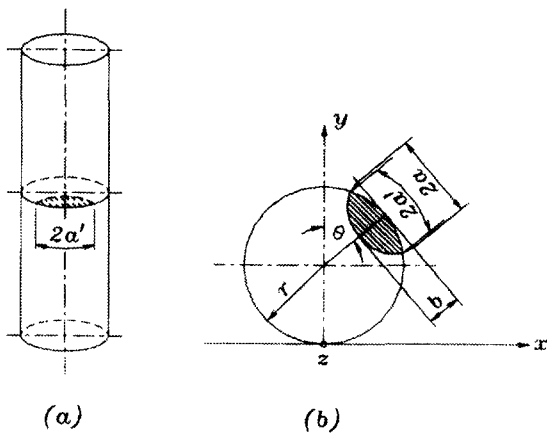


Fig. 4 The 3-D model of crack

Fig. 5와 Fig. 6은 피로균열 전파속도에 대한 각각 2차원 응력확대계수, 3차원 응력확대계수와와의 관계를 나타내었으며, 피로한도의 90%에 해당하는 응력레벨의 결과를 정리한 것으로 Paris 식은 안정성장구간에서 성립하므로 STS304 1.0mm의 경우는 제외하였으며, 그림에서와 같이 계면과 SM15C층 1.0mm의 경우 균열전파속도  $da/dN$ 과 응력확대계수  $\Delta K$ 와의 관계는 선형관계를 나타내고 있다.

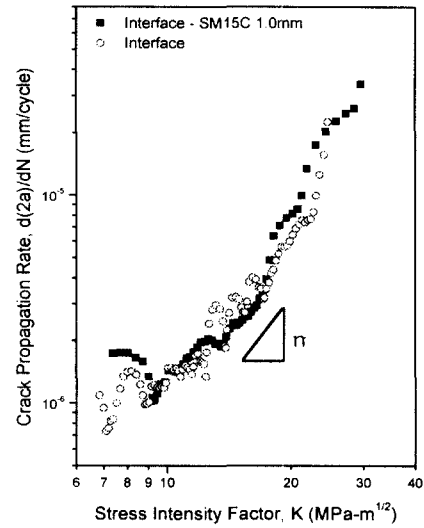


Fig. 5 Crack propagation rate versus stress intensity factor range for surface crack of 2-Dimension

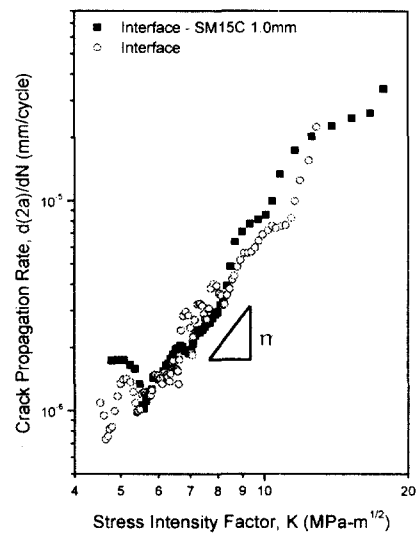
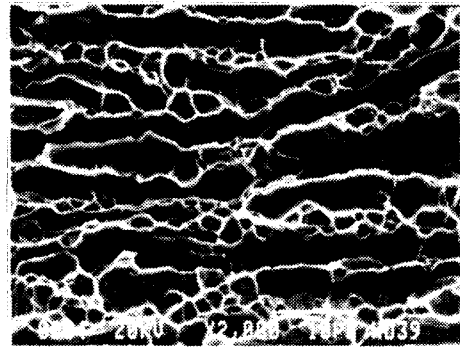


Fig. 6 Crack propagation rate versus stress intensity factor range for surface crack of 3-Dimension

#### 4. 파단면 고찰

Photo. 4는 이중마찰압접재의 계면근방(SM15C 부) 조직으로 마찰압접시 소성유동에 의한 조직의 유동을 보여주고 있다. Photo. 5에서는 계면근방의 피로파면으로 (a)는 취성 스트라이에이션과 소성유동에 따른 입계균열을 볼 수 있으며 다소 취성과단의 양상을 보인다. (b)는 원주방향으로 합체 성장된 덩풀이 나타나며, 전형적인 연성파면의 특성이 나타났다. Photo. 6과 Photo. 7은 각각 SM15C측 1.0mm의 미소원공 노치재와 계면에 미소원공을 가공한 노치재의 피로파면을 관찰한 것이다. 전체적인 파단양상은 중심부에서 취성파단이 일어났으며, 이것은 이중마찰압접재의 피로파단양상을 소성유동층의 영향으로 판단 된다.



(b) STS304

Photo. 5 SEM fractographs around interface

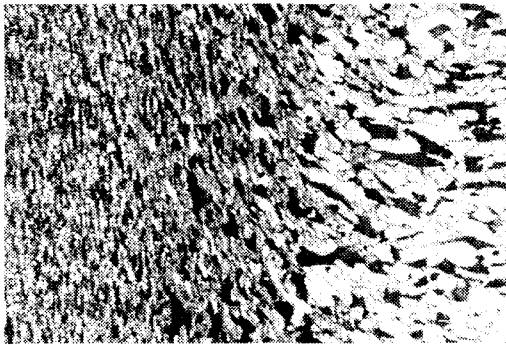
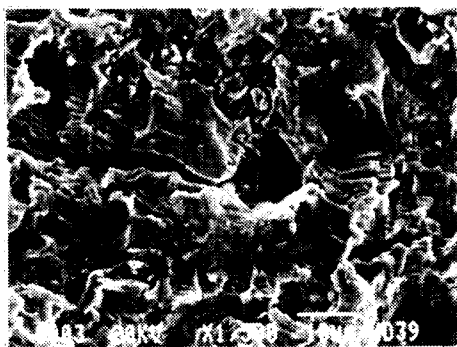
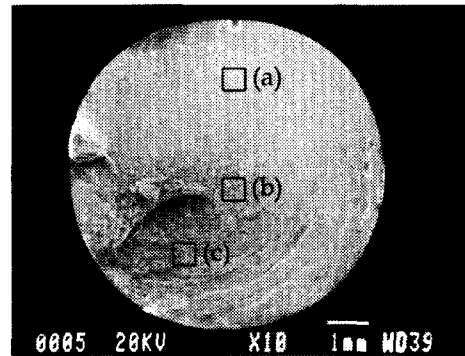
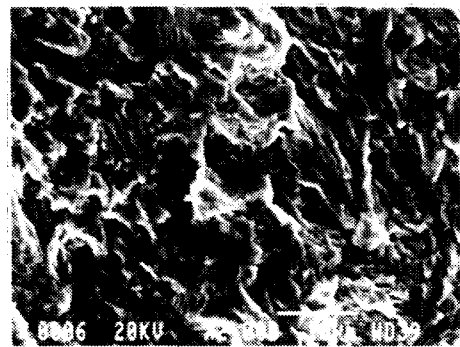


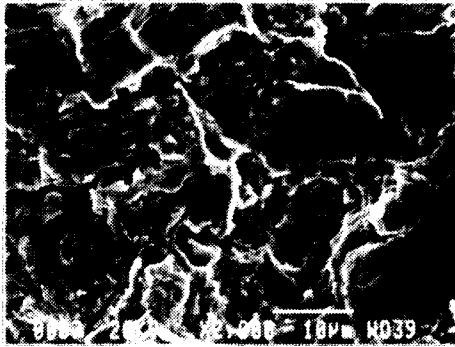
Photo. 4 Plastic flow on around Interface of Friction Welded Materials(×200)



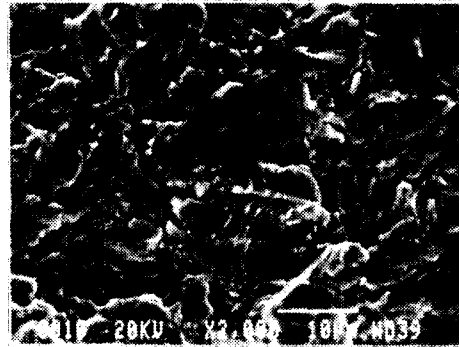
(a) SM15C



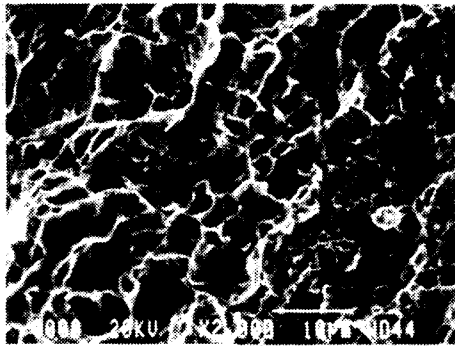
(a)



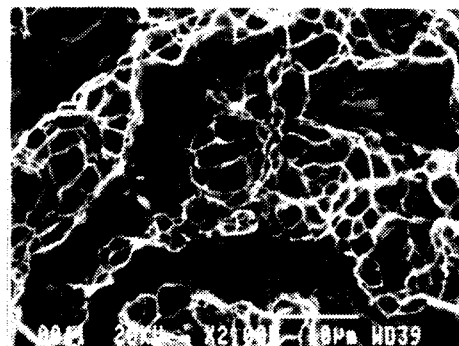
(b)



(a)

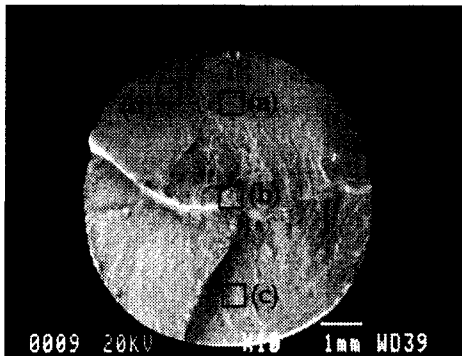


(c)

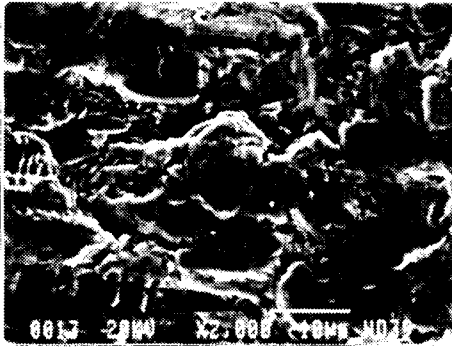


(b)

Photo. 6 SEM fractographs of friction welded metal on SM15C 1.0mm-notch



(c)



(d)

Photo. 7 SEM fractographs of friction welded metal on interface-notch

### 5. 결론

냉간압연한 STS304와 SM15C를 마찰압접하여 회전굽힘피로시험을 통해 이종마찰압접재의 접합 계면과 계면근방에서의 피로균열발생 및 전파거동 특성을 비교검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이종마찰압접재의 피로균열 전파거동은 계면과 SM15C측 1.0mm의 경우 거의 유사함을 보였으며, STS304측 1.0mm의 경우 계면 및 SM15C측에 미세한 슬립선(slip line)의 발생으로 미소위공부에서의 균열성장 필요에너지가 저하되었음을 알 수 있다.

2. 이종마찰압접재에 대한 피로균열전파속도와 응력확대계수의 관계는 계면과 SM15C측 1.0mm의 경우 안정성장구간영역에서 선형적으로 나타났다.

3. 이종마찰압접재의 피로파괴는 단종재의 파단과는 상이하게 중심부에서 파단이 일어났으며, 그 양상은 SM15C측에 가까울수록 소성유동성 방향에 따른 취성스트라이에이션(striation)이 나타나고 STS304측에 가까울수록 딴플(dimple)의 형성 및 합체로 인한 연성파단에 가까운 특성을 보였다.

### 참고문헌

1. 오환섭, 오정국, 박준건, 박경식, "이종마찰압접재의 계면파괴거동," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. II, pp. 604~610, 1997.
2. 오세욱, 허정원, 유재환, 김재철, "SM40C와 STS304 이종재료 마찰용접재의 파단특성 및 크랙전파특성의 연구," 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp. 230~239, 1992.
3. Lu, M. C., and Erdogan, F., "Stress Intensity Factors in two bonded Elastic Layers Containing Cracks Perpendicular to and on the Interface-II. Solution And Results," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 3, pp. 507~528, 1983.
4. 나석주, Jurgen Ruge, "이성재료 · 마찰용접부의 기계적성질 검사," 대한기계학회, 제8권, 제1호, pp. 41~47, 1984.
5. 李相龍, "非貫通 圓孔 缺陷材에 있어서 짧은 龜裂의 非線型 舉動 및 크랙成長에 關한 研究," 高麗大學校 碩士學位論文, 1992.
6. 이현우, 김주환, 김현재, "용접 토우부의 국부적 변형률 측정을 통한 용접부의 정적 과하중에 따른 피로강도의 변화 평가," 한국정밀공학회지 제18권 제6호, pp. 59~66, 2001.
7. 송삼홍, 이정무, "혼합모드 하중에서의 STS304의 피로균열 전파거동," 한국정밀공학회지 제18권 제9호, pp. 131~139, 2001.
8. Annual Books of ASTM Standards, Vol. 0301, E647-88, "Standard test method for measurement of Fatigue Crack Growth Rates," p. 328, 1976.
9. 西谷弘信, "ぎ裂閉口現像と疲勞ぎ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, 1975.
10. 송삼홍, 박명과, "國産 異種鋼을 摩擦壓接한 경우의 疲勞舉動(SM45C와 SUS304材를 摩擦壓接한 경우)," 大韓機械學會論文, 第11卷, 第6號, pp. 953~962, 1987.
11. 박철휘, "境界要素法을 利用한 表面龜裂의 應力擴大係數解析 및 壽命豫測," 慶熙大學校 博士學位論文, 1997.