

이종마찰압접 계면근방에서의 피로균열의 전파거동 및 해석 Analysis and Propagation Behavior of Dissimilar Friction Welded Materials for Fatigue Crack in around Interface

오환섭(경희대 기계공학과), 박경식*(경희대 대학원)

Hwan-Sup Oh(Kyung-Hee Univ.), Kyoung-Sik Park(Graduate School Kyung-Hee Univ.)

ABSTRACT

In this study, analysis for fatigue crack propagation behavior of interface and around interface under rotary bending stress. Though K values are nearly the same in around interface by BEM 2-D, fatigue crack propagated H.A.Z.

Around Interface crack propagation speed is $m=0.678$ in H.A.Z by Paris' law. In this case(friction welded materials: STS304, SM15C), fatigue crack growth is considered SM15C metal microstructure and elastic flow from this result. Result is more metal microstructure dependence than stress dependence by analysis(BEM 3-D, BEM 2-D) and fatigue crack propagation

Keywords : Rotary Bending Fatigue Testing(회전굽힘피로시험), Friction Welding(마찰압접), Dissimilar Material(이종재료), Interface(계면), Heat Affected Zone(열영향부), Fatigue Crack(피로균열), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Crack Propagation(크랙전파), BEM:Boundary Element Method(경계요소법)

1. 서론

마찰압접은 피접합물의 회전 마찰운동에 의하여 발생하는 기계적에너지(마찰열)로 마찰면을 가열하는 열에너지를 직접 이용하여 접합면을 급속히 가열하고 동시에 가압하여 접합면에 소성변형을 일으키며 접합하는 방법이다. 이 방법은 별도의 외부 에너지등이 불필요하게 되므로 에너지 효율이 높고, 공정의 간편성, 자동화의 용이성, 낮은 비용 등의 면에서 우수한 특징을 가지고 있다. 그러나 현재 이종마찰압접재의 기계적 성질⁽¹⁾, 피로강도⁽²⁾ 및 균열거동⁽³⁾ 등에 대한 연구가 있으나 종래의 탄성론 및 파괴역학의 관점에서 연구되어 해석이 불충분하므로 아직 체계적으로 충분한 해명이 되어있지 않다. 그래서 사용환경이 가혹한 조건이나 신뢰성이 요구되는 분야 등에는 적용이 지연되고 있는 실정이다.

이와 관련하여 이종마찰압접재의 정적응력하에서의 파괴거동에 관한 연구가 체계적으로 재조명되고있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 마찰압접의 특성을 유용하게 활용하기 위해서는 종래의 연속체역학을 바탕으로 한 파괴역학적 관점에서 탈피하여 계면역학의 입장에서 파괴거동을 규명하는, 즉 계면파괴에 의한 강도평가 방법이 확립이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이상의 관점에서 전보⁽⁶⁾에 이어 회전굽힘응력하에서 이종마찰압접재의 계면 및 계면근방에서 피로균열의 전파거동을 경계요소법(BEM:Boundary Element Method)을 이용하여 해석하고 냉간압연한 STS304와 SM15C의 마찰압접재의 접합계면 및 근방에서의 피로균열거동을 역학적, 금속조직학적 관점에서 검토하고자 한다.

2. 접합계면 및 근방균열의 응력해석

2.1 계면균열선단 근방의 변위와 응력

표면력 자유 경계조건을 갖는 이중재 계면 균열의 선단 주위의 응력분포를 극좌표계로 계략적으로 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{r}} B_{i(a)} \sin(\alpha \ln \frac{r}{l}) + \frac{1}{\sqrt{r}} C_{ij}(\theta) \cos(\alpha \ln \frac{r}{l}) \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

식 (1)의 삼각 함수에 $\ln(r/l)$ 이 포함되어 있기 때문에 진동응력을 나타낸다. $1/\sqrt{r}$ 항으로 인한 특이응력장이 됨을 알 수 있다. $\theta=0^\circ$ 상의 응력 분포는 다음식으로 된다.

$$\sigma_r + i\tau_{\theta r} = (K_1 - iK_2)(2\pi r)^{-1/2}(r/l)^{i\alpha} \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

여기서 $K_1 + iK_2$ 가 계면 균열 복소응력확대계수이지만 균질재와 같이 균열모드에 따라서 분리할 수 있는 것은 아니다. 계면 균열 균열선단 근방 상대 변위 δ_y , δ_x 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\delta_y + i\delta_x = \frac{K_1 + iK_2}{2(1 + 2i\alpha) \cosh(\alpha \pi)} \left[\frac{k_1 + 1}{\mu_1} + \frac{k_2 + 1}{\mu_2} \right] \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{r}{l} \right)^{i\alpha} \cdot \cdot \cdot \quad (3)$$

$$\delta_y = u_j(r, \pi) - u_j(r, -\pi), \quad (j=x, y) \quad \cdot \cdot \cdot \quad (4)$$

위의 변위분포도 역시 $(r/l)^{i\alpha} = e^{i\alpha \ln(r/l)}$ 이 포함되어 있기 때문에 (+), (-)의 진동이 발생하는 오버랩현상이 발생한다.

2.2 계면균열의 응력확대계수 결정

경계요소법으로 경계상의 응력분포를 구한 다음, 응력확대계수 K_I 를 구한다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} 2\pi r \sqrt{\sigma_r^2 + \tau_{\theta r}^2} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} = K, \quad \cdot \cdot \cdot \quad (5)$$

균열면의 상대변위량을 이용하여 식(3)으로부터 다음의 식을 유도하여 응력확대계수 K_I 를 구할 수 있다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\delta_y^2 + \delta_x^2}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{1 + 4\alpha^2 \cosh^2(\alpha \pi)} \times \left[\frac{k_1 + 1}{\mu_1} + \frac{k_2 + 1}{\mu_2} \right] \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (6)$$

본 연구에서는 최소자승법에 의해 최소제곱회귀 직선을 토대로 절점의 여러 가지 조합의 경우의 상관 계수를 각각 산출하여 가장 우수한 상관성을 나타내는 조합의 외삽 결과로부터 응력확대계수를 결정하여 객관성을 높였다.

2-3 표면균열의 응력확대계수해석

회전굽힘을 받는 환봉재에 대한 균열의 형상을 고려한 표면균열의 응력확대계수 K 는 다음과 같이 표현된다.

$$K = F \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (7)$$

환봉재의 경우 a 는 a' 이다

또 F 는 $F=f(a, b, r)$ 의 인자로 구성 되어있으므로 형상계수 또는 무차원 응력확대계수의 의미를 갖는다. 균열선단에서의 K 가 일정한 균열면의 형상을 균열 성장 패턴으로 설정할 때 실험결과⁽⁷⁾와 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 균열면의 성장 패턴을 중심으로 한 F ⁽⁸⁾는 다음 식과 같다.

$$F = 1.8233 \left(\frac{b}{a} \right)^2 - 2.6598 \left(\frac{b}{a} \right) + 1.4485 \cdot \cdot \quad (8)$$

여기에서 b 는 (b/a) 와 (b/r) 의 관계식에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$b = \frac{1.125 a' r}{r + 1.13214 a'} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (9)$$

(8)과 식(9)에서 F 를 a' 와 r 의 함수로 표시하면

$$F = \frac{0.764 r^3 + 0.88 r^2 a' + 2.362 a'^2 + 3.34 a'^3}{r^3 + 3.96 r^2 a' + 5.24 r a'^2 + 2.3 a'^3} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (10)$$

가 된다. 따라서 회전굽힘 응력하에서 환봉재의 성장하는 표면 균열에 대한 응력확대계수⁽⁹⁾는

$$K = \sigma \sqrt{\pi a'} \times \left(\frac{0.764 r^3 + 0.88 r^2 a' + 2.362 a'^2 + 3.34 a'^3}{r^3 + 3.96 r^2 a' + 5.24 r a'^2 + 2.3 a'^3} \right) \quad \cdot \cdot \cdot \quad (11)$$

로 표시된다.

2.4 영역분할법을 이용한 접합계면해석

연구대상을 몇 개의 영역으로 분할하여 해석할 필요가 있는 경우, 이중재료가 접합된 문제의 해석에서는 각 물체마다 재료 상수를 바꾸어 해석하고, 분할된 영역에서 탄성계수 또는 기본해를 구분하는 것 이외에는 단일재와 동일하게 해석하면 된다. 또한, 각 영역에 대해서 독립적으로 경

계 적분방정식이 성립하고, 각 영역마다 이산화
를 하고, 적당한 결합 조건을 이용해서 1개의 연
립 방정식을 유도 하면 된다.

2.5 BEM 수치적분 효율화

2.5.1 Sub요소분할법

경계요소법에서는 경계적분방정식을 이산화할
때 Gauss적분하는 과정에서 다른 수치해석법과
달리 특이적분이 자주 발생한다. 이러한 특이 적
분을 정도 높게 수행하기 위한 방법으로 본 연구
에서는 Sub요소분할법을 사용하였다. Sub요소분
할법은 통상의 요소로 모상을 한 후, 특이점 P를
중심으로 해서 다시 몇 개의 Sub요소로 분할하
여 각 Sub요소마다 일반적인 수치 적분을 하는
방법으로 적분 정밀도를 크게 향상시킬 수 있었
다.

2.5.2 오차평가법

정제 적분방정식을 수치 계산 할 때 연립 방정
식을 푸는 시간에 비해 $[T_{ij}]$, $[U_{ij}]$ 행렬을
계산하는 시간이 월등히 많이 소모되므로 수치
적분의 효율화는 중요한 문제이다. 따라서, 각각
의 적분구간마다 적분 차수를 산출하여 서로 다
른 적분 차수로 적분하여 전 요소에 대해 일정한
오차를 허용하는 오차평가법을 사용하였다.

2.5.3 특이요소

균열 근처의 응력장이 갖는 특이성을 표현하기
위해 Hellen과 Barsoum⁽¹⁰⁾이 제안한 특이요소를
사용하였다. 특이요소는 균열선단에 접해 있는 2
차원 3절점 요소의 중간 절점을 요소의 한 변의
1/2 위치에 놓지 않고 1/4 만큼 균열선단 쪽으로
이동시킨 요소로서 2차원 중앙 관통 균열과 반타
원 표면 균열을 해석하여 엄밀해 및 기준해와 비
교한 결과 균열선단을 따라 특이요소를 사용할
경우 정도가 향상됨을 밝혔다. 따라서, 본 연구에
서도 특이요소를 적용하여 정도 향상을 할 수 있
었다.

2-6 BEM에 의한 탄성 해

본 연구에서 사용한 BEM 프로그램의 주요 특

징 및 수법을 살펴보면, 첫째, 응력형, 변위형, 응
력·변위 혼합형의 경계치 문제를 해석 할 수 있
으며, 둘째, 직각로 결합한 최대 10영역의 이중접
합재 문제의 해석 또는 영역분할법에 의한 해석
을 할 수 있다. 셋째, Sub요소 분할은 자동적으
로 행해지며 입력된 허용 오차 이내의 Gauss
point를 자동 계산한다. 넷째, 불연속적인 경계면
의 처리는 이중절점법과 적분과라메터법을 이용
하였다. 다섯째, 직접법중 특이직접법과 비특이직
접법의 해석을 할 수 있으며 최대 해석 능력은
영역 10개, 요소 250개, 절점이 약 800개이다.

2-7 해석 모델 및 해석방법

이종마찰압접재의 해석모델은 3개의 계면이 존
재하는 경우로 고려하여 접합계면, STS304와
SM15C의 base metal, 열영향부로 4개의 영역으
로 나누었으며 Kelvin 해를 기본해로 하는 2차원
경계요소법을 이용하여 고정도의 해석을 위해 영

Table 1. Mechanical and Physical properties

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio ν
Material 1	198	0.3
Material 2	208	0.3
Material 2	158	0.3
Material 2	147	0.3

역분할법으로 해석 하였다. Table 1은 각 영역의
E, ν 값을 나타낸다.

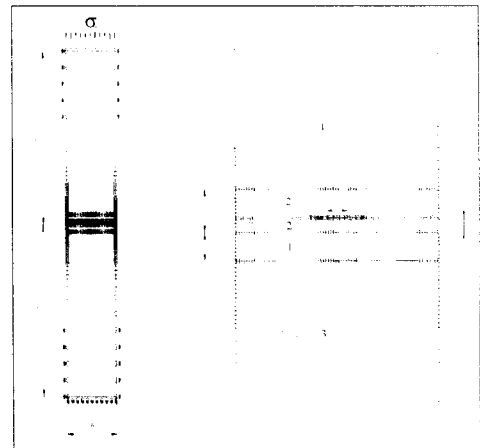


Fig. 1 Modeling for analysis by BEM 2-D

Fig. 1은 해석모델을 모델링한 것을 보여주고 있으며 균열 길이는 1mm로 하였으며 약 700개의 절점과 약 230개의 요소로 모델링하였으며 각 영역의 계면과 접합계면 및 균열은 고정도의 해석을 하기 위하여 더욱 세밀하게 요소를 나누었다.

또한 계면을 포함한 계면 및 계면근방의 응력확대계수 및 해석을 위해서 계속적으로 파단이 되는 부분인¹⁶⁾ SM15C 열영향부에 계면상의 균열이 존재하는 경우와 계면으로부터 1.5mm까지 0.25mm씩 증가하여 해석하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3-1 이중마찰압접재의 S-N Curve

Fig. 2는 STS304와 SM15C 이중마찰압접재에 피로하중을 가하여 얻은 S-N 곡선이다. 시간강도영역에서 응력과 파단수명에 대한 직선식은

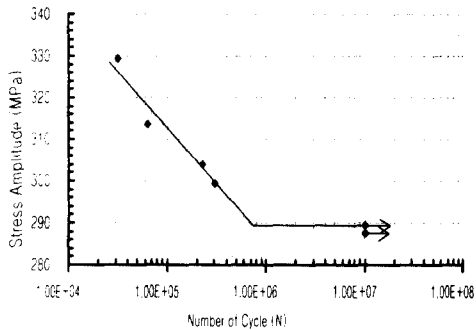


Fig. 2 Diagram of S-N curve

$\sigma_a = b - a \log_{10} N$ 으로 표시되며 $b=451$, $a=27.6$ 이다. 또 S-N 곡선의 특징은 일반 단일재 (SM15C)의 S-N곡선과 비교할 때 단일재의 S-N 선도는 유한수명영역에서 곡선인데 비하여 이중마찰압접재는 직선이고, 또 변곡점(nose point)도 일반적으로 $(1 \sim 2) \times 10^6$ 회전수명의 범위에 존재하는 것에 비해 이중마찰압접재의 경우 약 $(7 \sim 8 \times 10^7)$ 회전수명에 있는 것이다.

3-2 응력레벨에 따른 계면주위의 발생거동

Fig. 3은 회전굽힘피로시험에서 응력에 따른 계면에서 부터 파단거리를 나타내주고 있으며 시편의

경도치가 낮은 SM15C에서 파단이 생긴다. 특히 응력이 낮아질수록 피로한도에 가까워 질수록 파

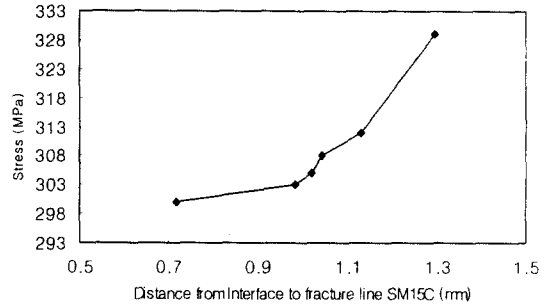


Fig. 3 Relationship between stress and fracture line of SM15C

단위치는 계면에 가깝게 된다.

3-3 계면근방에서 피로균열발생 및 전파거동

회전굽힘응력을 298MPa에서 계면상, 계면으로부터 0.7, 1.42, 1.98, 3.8mm에 미소원공을 가공하여 크랙전파를 관찰한 결과 Fig. 4의 SM15C에서 최저경도치를 보이는 곳(약 0.7mm)에 가공한 미소원공의 균열이 집중적으로 진전하는 것이 관

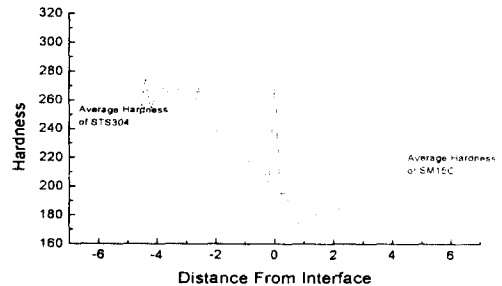


Fig. 4 Hardness distribution of friction welded specimen by Micro-Vickers hardness

찰되었다. Fig. 5는 미소원공에서 균열이 전파하는 그림을 보여준다. Fig. 5는 Fig. 4에서 관찰한 최저경도치를 나타내는 부분인 계면으로부터 약 0.7mm 떨어진 미소원공으로서 이 미소원공만이 균열이 진전하여 파단으로 이어졌다. 이것은 금속조직학적으로 최소경도치를 나타내는 SM15C H.A.Z에서 파단되는 것이 관찰되었다.

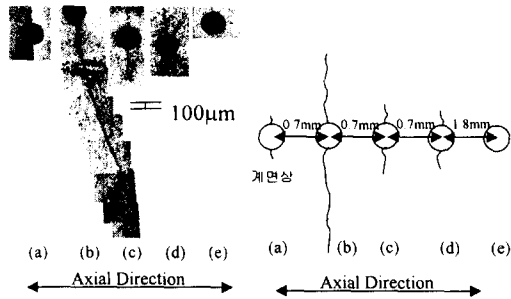


Fig. 5 Crack propagation from variable length of Interface ($\sigma = 298\text{MPa}$, $N = 48000$)

3-4 계면근방균열의 응력확대계수 및 강도평가

이종마찰압접재의 인장시험과 회전굽힘시험에서 균열은 주로 SM15C 재의 열영향부에서 발생하고 파단부는 계면을 중심으로 0.5~1.5의 범위이다. 또 관찰된 균열은 SM15C재의 열영향부에서 관찰되었으므로 접합계면이 계면 근방에 발생하는 균열에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 계면주위 균열의 응력해석을 행하였다.

계면 근방 균열에 대한 응력해석은 $h/a = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ 의 7가지 경우에 대해 해석하였다.

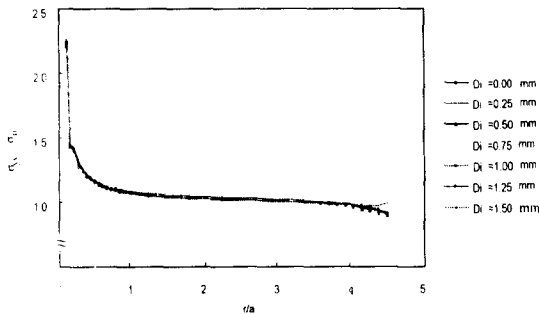


Fig. 6 Stress singularity near crack tip

Fig. 6은 균열선단에서의 응력특이성을 표시한 것으로 t/a 와는 무관하게 균열선단의 응력특이성이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 계면근방균열의 평가방법의 타당성의 확립을 목적으로 계면균열의 응력확대계수 K_i 와 균열재의 무한평판내의 중앙균열에 대한 $\sigma_\infty \sqrt{\pi a}$ 로서 무차원화하여 표시된 것이다. 여기서 알 수 있듯

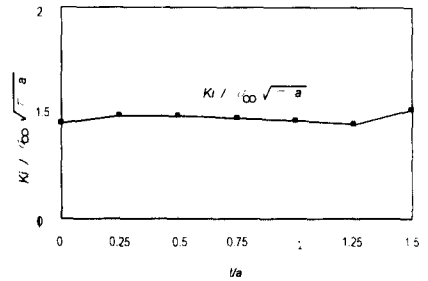


Fig. 7 Stress Intensity Factor near Interface

이 접합계면근방의 균열의 경우 $\frac{t}{a} \ll 1$ 인 범위 즉 $\frac{t}{a} < 0.01$ 의 아계면균열을 제외하면 Fig. 7에서

알수 있듯이 $\frac{K_i}{\sigma_\infty \sqrt{\pi a}}$ 는 약 1.474정도이다. 따라서 아계면균열 이상인 범위에 존재하는 계면균열의 응력확대계수 K_i 는 동종재의 균열에 대한 응력확대계수 K 를 적용해도 타당함을 알 수 있다.

또 이와같은 결과는 계면근방균열에 대한 결과에서도 $\frac{t}{a} = 0.01 \sim 1.0$ 인 범위의 계면근방에 존재하는 균열에 대해서는 동종재의 응력확대계수 K 의 타당성을 제시하는데서도 찾아볼 수 있다. 따라서 본 실험에서와 같은 이종마찰압접재의 계면근방과 피문제에 환봉재의 3차원 표면균열에 대한 응력확대계수 K 의 (11)식을 사용할 수 있다.

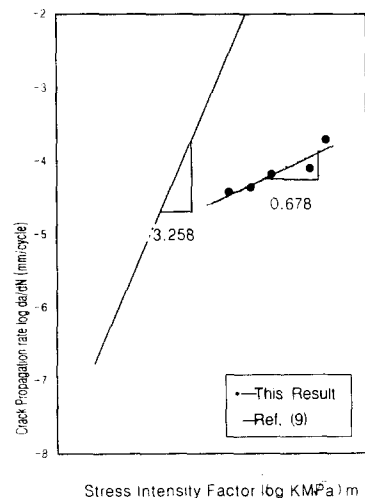


Fig. 8 Relation between crack propagation rate and S.I.F

Fig. 8은 균열전파에 대한 본 실험 결과이며 단종재와의 비교한 그림이다. 회전굽힘응력하에서 환봉재의 3차원 표면균열의 전파거동은 Paris의 균열전파법칙을 적용하면 $da/dN = C K^m$ 으로 표현되며 이때 $C=0.0037$ $m=0.678$ 이다.

4. 결론

회전굽힘응력하에서 이중마찰압접재의 계면 및 계면근방에서 피로균열의 전파거동을 경계요소법(BEM:Boundary Element Method)을 이용하여 해석하고 냉간압연한 STS304와 SM15C의 마찰압접재의 접합계면 및 근방에서의 피로균열거동을 역학적, 금속조직학적 관점에서 검토한 결과 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) STS304재와 SM15C재의 이중마찰압접재는 피로파단이 접합계면보다는 계면에서 0.7mm 떨어진 열영향부에서 피로균열이 전파되어 파단되며 약 0.7mm는 최소경도치를 나타내는 부분이다.
- (2) 피로파단위치는 BEM해석결과 K의 값이 일정하지만 파단위치가 접합계면근방이라는 점에 응력 의존성 보다는 금속조직 의존성이 크다고 판단된다.
- (3) 접합계면주위의 크랙전파속도는 Paris의 법칙을 기준으로 해석하면 모재의 경우 $m=3.258$ 인데 비해 계면근방 열영향부내의 파단위치내에서는 $m=0.678$ 임을 알았다.
- (4) 이와같은 이상의 결과로부터 모재에 비해 마찰압접시 접합계면에서 열영향부의 조직과 접합시 소성유동층의 영향으로 K의 값에 관계없이 최저 경도치를 보이는 열영향부에서 피로균열이 성장하여 파단하는 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Okita, K., Fukuchi, Y., Aritoshi, M., Nakayama, H., Itoga, K., 1990. Resistance to

Fracture of Friction Welded Joints, J. of Metals, Vol. 39, No. 445, pp. 1431~1437

- (2) K. Okita, Y. Fukuchi, M. Aritoshi, Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Welded Butt Joints of Freecutting Stainless Steel, J. of Metals, Vol. 1.38, No. 432, pp. 1035~1039
- (3) 박명파, 1987, 마찰압접한 이중구조용강의 강도 및 피로파괴거동에 대한 연구, 경희대학교 박사학위 논문.
- (4) 오환섭, 오정국, 박준건, 1997, 이중마찰압접재의 정적 인장하중 하에서의 파괴거동, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 247~252
- (5) 오환섭, 오정국, 박준건, 허민구, 1996, STS304와 SM15C 이중마찰용접재의 변형 및 파괴거동, 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 161~166.
- (6) 오환섭, 오정국, 박경식, 1998, 이중마찰압접재의 접합계면 및 계면근방에서의 피로균열거동, 한국공작기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 287~292
- (7) Ding-zong Feng, Qi-chao Hong, 1992. Investigation of Surface Crack Opening Displacement and Its Application in Pressure Vessels and Piping, International Journal for Pressure Vessels Piping, Vol. 52, No. 2, pp. 227~239.
- (8) 오환섭, 이병권, 박철휘, 1998, 회전굽힘응력하에서 환봉재의 미소표면균열의 성장거동해석, 대한기계학회 논문집 A권 제22권 1호, pp. 160~169
- (9) 오환섭, 박철휘, 박재석, 1998, 회전굽힘응력하에서 표면균열을 갖는 환봉재의 응력확대계수 및 수명예측, 한국자동차공학회 춘계학술대회 Vol II. pp. 781~78611
- (10) Roshdy S. Barsoum, 1976, On the Use of Isoparametric Finite elements In Linear Fracture mechanics, Int. j. Num. Method in Eng, 10, pp 25~37