

## 이종 마찰용접재의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법

정 남 용<sup>1)</sup> · 박 철 희<sup>2)</sup>

숭실대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 현대기계기술학원<sup>2)</sup>

## An Evaluation Method of Fracture Toughness on Interface Crack in Friction Welded Dissimilar Materials

Nam Yong Chung<sup>1)</sup> · Cheol Hee Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

<sup>2)</sup>Hyundai Technical Institute, 157-487 Gwangmyung 4-dong, Gwangmyung-si, Gyeonggi 423-858, Korea

(Received 18 December 2006 / Accepted 29 January 2007)

**Abstract :** In this paper, an evaluation method of fracture toughness on interface cracks was investigated in friction welded dissimilar materials with interfacial edge cracks. To establish a reasonable strength evaluation method and fracture criterion, it is necessary to analyze stress intensity factor under the load and residual stress condition on friction welded interface between dissimilar materials. The friction welded specimens with an edged crack were prepared for analysis of stress intensity by using the boundary element method (BEM) and the fracture toughness. A quantitative fracture criterion for friction welded STS 304/ SM 45C with interface crack is suggested by using stress intensity factor,  $F$  and the results of fracture toughness experiment.

**Key words :** Friction welding(마찰용접), Fracture toughness(파괴인성), Residual stress(잔류응력), Boundary element method(경계요소법), Interface crack(계면크랙), Stress intensity factor(응력세기계수), Dissimilar materials(이종재료)

### 1. 서 론

마찰에 의한 국부재료의 용융으로 두 표면을 접합하는 마찰용접법은 별도의 열원이 필요하지 않은 장점과 공정의 간편성, 자동화의 용이성 및 경제성 등의 우수한 용접특성<sup>1)</sup>을 갖고 있기 때문에 산업분야에서 활용이 크게 증가하고 있다.<sup>2)</sup> 이종재료를 마찰용접에 의해 상호 접합할 경우 접합체는 단일재보다 특정부위에서 요구되는 적정 강도와 기계적 성질을 만족 시킬 수 있다. 마찰용접법이 높은 신뢰성을 가진 접합방법으로 활용되려면 접합 계면균열에 대한 정밀도 높은 응력해석과 이를 이용한 응력

세기계수의 계산에 의한 파괴인성의 평가가 매우 중요하다.<sup>3)</sup> 이종 마찰용접의 경우 마찰열전달,<sup>4)</sup> 고온크리프 수명예측,<sup>5)</sup> 기계적 성질 등의 연구가 있으나, 접합계면균열에 대한 응력세기계수의 정밀도 높은 계산방법 및 파괴인성의 평가방법은 아직 제시 되고 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 이종 마찰용접 접합체의 계면에 균열이 있는 경우 파괴인성의 평가 및 파괴기준의 설정방법을 제안하고자 한다. 스테인리스강 STS 304와 기계구조용 탄소강 SM 45C의 이종 마찰용접 시험편을 제작하고, 경계요소법(Boundary Element Method : BEM)에 의한 접합계면의 균열 선단의 응력세기계수 해석결과와 시험편의 파괴실험 결과를 토대로 이종 마찰용접재의

\*Corresponding author, E-mail: medep@hanmail.net

계면균열에 대한 파괴인성의 평가 방법을 제시하였다.

## 2. 시험편 제작

### 2.1 시험편의 재료와 형상

본 연구에 사용된 이중재 마찰용접 시험편의 재료는 열간압연 상태의 스테인리스강 STS 304(Material 1)과 기계구조용 탄소강 SM 45C(Material 2)이고, 지름 20 mm의 환봉을 브레이يك형 FF80-II-C Type의 마찰 용접기를 사용하여 용접하였다.

용접 후 형성된 덧살(flash)은 CNC 선반을 이용하여 선삭가공 하였고, 덧살이 제거된 후 시험편 형상을 Fig. 1(a)에 나타낸다. Fig. 1(a)의 환봉시험편으로부터 균열시험편을 제작하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 와이어컷팅기를 사용하여 축방향으로 두께 2 mm, 폭 17 mm씩 절단하여 Fig. 1(c)와 같은 편측 계면균열의 시험편을 제작하였다. 편측 계면균열길이는  $a = 4.5 \text{ mm}, 6 \text{ mm}, 9 \text{ mm}$ 로 하여 각각의 균열길이에 대해 3개씩 제작하였고, Fig. 1(c)는 완성된 시험편의 형상과 치수를 나타낸다. 또한, 접합계면균열에 대한 파괴인성을 균질재인 경우와 비교하기 위하여 STS 304와 SM 45C의 각각에 대한 균질시험편을 Fig. 1(c)와 동일한 치수로 제작하였고, Table 1은 시험편 재료의 기계적 성질을 나타낸다.

### 2.2 실험방법

시험기는 인스트론형의 만능재료시험기(Model 4206)를 사용하였고, 로드셀은 용량 10 kN을 부착하여 접합면이 파단 될 때까지 인장시험을 실시하였다. 하중속도는 0.2 mm/min로 하여 서서히 하중을 가하면서 실험을 하였고, 균열개구변위 값의 검출을 위해 클립게이지(clip gage)를 사용하였으며, 측정한 실험값은 각각 3개의 시험편에 대한 평균값으로 하여 파괴인성값의 계산에 이용하였다.

## 3. 계면균열의 응력확대계수

### 3.1 해석모델

시험편에 대한 BEM 응력해석 모델은 Fig. 2와 같은 편측 계면균열을 갖는 맞대기 이음으로 하였다. Fig. 2(a)는 외부하중만이 작용할 때 이중 마찰용접

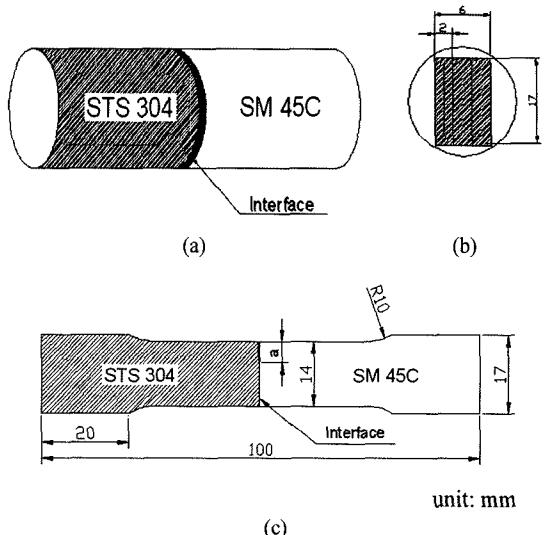


Fig. 1 Shape and dimension of friction welded specimen

Table 1 Mechanical properties of materials

Mechanical properties Materials	Young's modulus $E(\text{GPa})$	Poisson's ratio V	Coefficient of thermal expansion ( $1/\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
STS 304	193	0.3	$7.5 \times 10^{-6}$
SM 45C	205	0.3	$12 \times 10^{-6}$

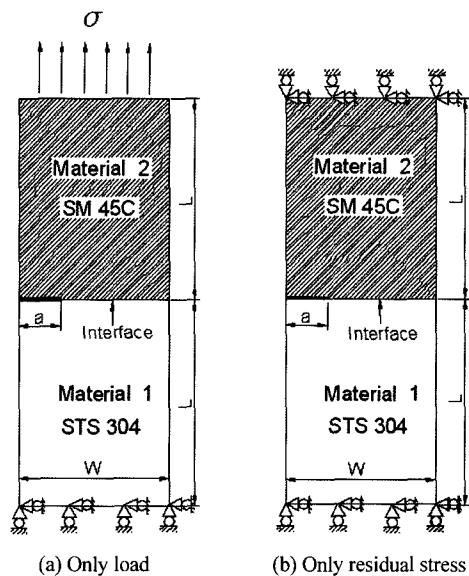


Fig. 2 BEM analysis models on interface crack the friction welded dissimilar materials

의 접합계면에 균열이 발생한 모델이며, Fig. 2(b)는 잔류응력만이 존재하는 경우의 해석 모델이다. 해

석모델에 대한 요소분할은 Fig. 2(a), (b)의 각 경우에 대해 영역수 2개씩으로 설정하여 전체요소수 160개로 분할하였다. 계면균열에 대한 정밀도 높은 응력 해석 결과를 얻기 위해 특이요소를 고려한 서브요소분할을 하였고, BEM 2차원 탄성해석프로그램을 사용하여 평면변형률 조건에서 응력세기계수를 구하고, 이를 파괴인성의 계산에 이용하였다. 본 연구에 사용된 BEM 2차원 탄성해석 프로그램은 이종 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성의 연구에서 응력세기계수의 해석에 대한 정밀도가 검증되었단다.<sup>3,6-9)</sup>

### 3.2 계면균열의 응력세기계수 계산

Fig. 3은 무한판에 편측균열이 존재하는 경우 균열선단에 대한 응력장을 나타낸 그림이다.

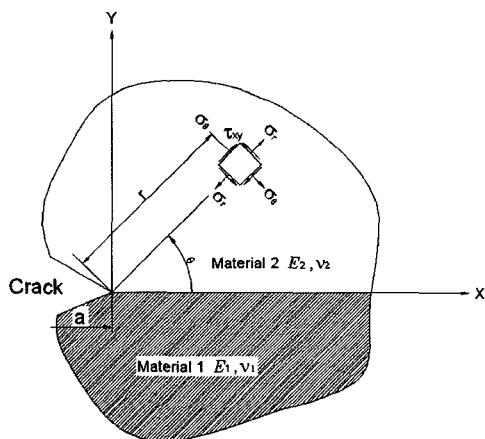


Fig. 3 Interfacial crack-tip stress field in the bonded dissimilar materials

$\theta=0^\circ$  일 때 균열선단에 대한 응력장은 다음 식으로 표시된다.<sup>10)</sup>

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{(K_1 + iK_2)}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r}{l} \right)^{ie} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{k_1 \mu_2 + \mu_1}{k_2 \mu_1 + \mu_2} \right] \quad (2)$$

$$k_i = \begin{cases} 3 - 4\nu_j & (\text{plane strain}) \\ \frac{3 - 4\nu_j}{1 + \nu_j} & (\text{plane stress}) \end{cases} \quad (j=1,2) \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 는 각각 수직 및 전단응력 성분을 나타내며,  $r$ 은 균열선단으로부터 임의의 거리이고,  $K_1$ ,  $K_2$ 는 계면균열의 혼합모드에 대한 복소 응력세기계수이다. 이 값들은 균질재의 균열 모드 I과 모드 II의 응력학대계수  $K_I$ ,  $K_{II}$ 와 다르고, 직접적인 대응은 되지 않는다.

또한,  $\epsilon$ 는 이종재료정수(Bimetallic constant)이고,  $\mu_j$ 는 각 재료의 전단탄성계수,  $\nu_j$ 는 푸아송의 비이며,  $l$ 은 기준길이로서 균열의 길이이다.<sup>9)</sup>

편측계면균열에 대한 응력세기계수는  $\theta=0^\circ$ 로 하고 균열길이  $a=3$  mm, 4.5 mm, 6 mm, 9 mm로 변화시켜가면서 외부하중과 잔류응력 각각에 대한 BEM 응력해석을 한 후 그 결과를 이용하여 식(4)에 의해 외삽으로  $K_1$ ,  $K_2$ 를 구한다음 식(5)에서 무차원화 하였다.

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (4)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q)$$

$$F_1 = K_1 / \sigma / \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

$$F_2 = K_2 / \sigma / \sqrt{\pi a}$$

$$Q = \epsilon \ln(r/a) \quad (6)$$

여기서,  $F_1$ 과  $F_2$ 는 수직응력과 전단응력성분에 대한 무차원 응력세기계수이다. Table 2는 Fig. 2(a), (b)의 해석모델과 Table 1의 재료상수를 사용한 STS 304/ SM 45C 마찰용접 접합면의 계면균열에 대한 응력세기계수를 해석하여, 외부하중과 잔류응력이 각각 작용할 때와 외부하중과 잔류응력이 중첩되었을 때의 계산결과를 나타내고,  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$  을 의미한다. Fig. 4는 온도차에 의한 잔류응력만을 고려한 경우 균열길이  $a/W$ 의 변화에 따른 응력세기계수의 변화를 나타내며,  $a/W$ 의 증가에 따라  $F_1$ 은 변화가 거의 없으나  $F_2$ 는 크게 증가한다. Fig. 5는 외부하중만이 작용할 경우와 잔류응력과 외부하중을 중첩시킨 경우  $a/W$ 의 변화에 따른  $F$ 의 변화를 나타내었다.  $a/W$ 가 작을 경우 중첩된 경우가 외부하중만이 작용할 경우보다  $F$ 는 크게 나타나지만,  $a/W$ 가 증가함에 따라 외부하중만이 작용할 경우와 중첩의

Table 2 BEM analysis results of nondimensional stress intensity factors for an edge crack

Nondimensional stress intensity factor ( $F_i = K_i / \sigma_y \sqrt{\pi a}$ )									
Only load			Only residual stress			Superposition			
$a/W$	$F_1$	$F_2$	$F$	$F_1$	$F_2$	$F$	$F_1$	$F_2$	$F$
0.21	1.485	0.003	1.485	0.0045	-0.329	0.329	1.489	-0.326	1.524
0.32	1.532	0.030	1.532	0.0019	-0.276	0.276	1.534	-0.246	1.554
0.43	1.746	0.055	1.747	0.0017	-0.215	0.215	1.747	-0.166	1.748
0.64	2.422	0.163	2.427	0.0004	-0.129	0.129	2.422	0.034	2.422

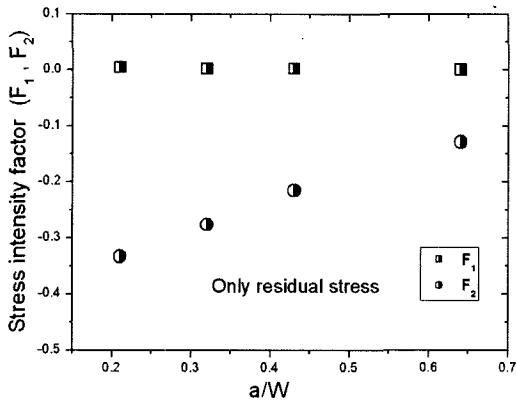


Fig. 4 Relation of stress intensity factors for an edge crack under only residual stress

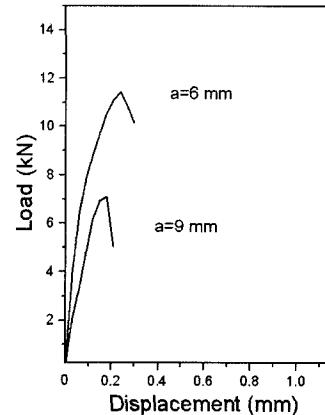


Fig. 6 Load-displacement diagram by fracture toughness experiment

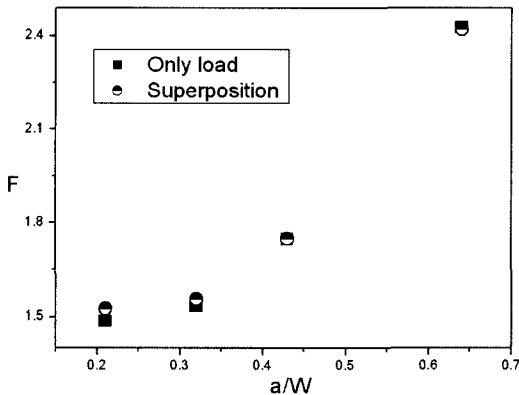


Fig. 5 Comparison of stress intensity factors for an edge crack under only load and superposition

경우  $F$  값은 차이가 없다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 파괴인성의 실험결과

###### 4.1.1 접합 계면균열의 경우

Fig. 6은 STS 304/SM 45C 이종 마찰용접 접합면

에서 편측 계면균열길이  $a = 6 \text{ mm}, 9 \text{ mm}$ 인 경우 파괴 인성실험결과에 의한 하중-변위선도이고, Table 3은 각 시험편에 대한 축방향의 최대파괴하중  $P_f$ 의 결과와 이 값으로부터 계산된 최대파괴응력  $\sigma_f$ 의 계산결과를 나타낸다.

각 시험편에 대한 축방향 균열발생 하중과 파괴하중은 거의 차이가 없으므로 Table 3에서 파괴응력  $\sigma_f$ 를 균열발생응력으로 간주하였다. 축방향의 최대파괴응력  $\sigma_f = P_f / (W \cdot t)$ 에서 구하였고,  $W$ 는 시험편의 폭,  $t$ 는 시험편의 두께이다.

Table 4는 실험에서 얻은 축방향 파괴응력  $\sigma_f$ 와 Table 2의 무차원 응력세기계수  $F_1, F_2, F$ 의 결과를 이용하여식 (7)에 의해 각 모드성분으로 분리된 파괴인성 값  $K_{1c}, K_{2c}$ 와 축방향 파괴인성  $K_c$ 를 계산한 결과이다.

$$\begin{aligned} K_{1c} &= \sigma_f \sqrt{\pi a} \cdot F_1 \\ K_{2c} &= \sigma_f \sqrt{\pi a} \cdot F_2 \\ K_c &= \sigma_f \sqrt{\pi a} \cdot F \end{aligned} \quad (7)$$

Table 3 Experimental fracture strength on interface of friction welded STS 304/SM 45C

Specimen No.	Crack length ( $a : \text{mm}$ )	Specimen width ( $W : \text{mm}$ )	Specimen thickness ( $t : \text{mm}$ )	Fracture load ( $P_f : \text{N}$ )	Fracture stress ( $\sigma_f : \text{MPa}$ )
1	4.5	14	2	13127	468.8
2	6	14	2	11074	395.5
3	9	14	2	7121	254.3

Table 4 Fracture toughness on interface of friction welded STS 304/SM 45C

Specimen no.	$a/W$	Only load					
		$F_1$	$F_2$	$F$	$K_{1c}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_{2c}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_c(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
1	0.32	1.532	0.030	1.532	85.47	1.67	85.49
2	0.43	1.746	0.055	1.747	94.60	2.98	94.65
3	0.64	2.422	0.163	2.427	103.47	6.96	103.7
Superposition							
Specimen no.	$a/W$	$F_1$	$F_2$	$F$	$K_{1c}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_{2c}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_c(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
1	0.32	1.534	-0.246	1.554	85.58	13.72	86.67
2	0.43	1.747	-0.166	1.748	94.66	8.99	95.09
3	0.64	2.422	0.034	2.422	103.47	1.45	103.48

#### 4.1.2 균질재의 경우

STS 304와 SM 45C의 균질재가 이종 접합계면으로 형성되었을 때 파괴인성의 변화를 파악하기 위해 Fig. 1의 이종재 접합계면균열시험편과 같은 크기의 시험편에 균열길이  $a$ 의 조건이 동일한 균질재시험편을 제작하여 실험 하였다. Fig. 7의 (a), (b)는 균질재 균열시험편의 형상과 해석모델을 나타낸다. Table 5는 각각의 균질재에 대한 축방향의 최대파괴하중  $P_f$ 의 결과와 이 값으로부터 계산된 최대 파괴

응력  $\sigma_f$ 의 계산결과를 나타낸다. Table 6은 수치해석에 의한 응력세기계수  $F_j$ 의 결과를 이용하여 파괴인성값  $K_c$ 를 구한 결과를 나타낸다. 균질재의 경우 모드 II인 전단응력성분은 없으므로 모드 I 값만 존재한다.

#### 4.2 파괴인성의 비교

Fig. 8은 STS 304/ SM 45C의 이종 접합계면과 STS 304, SM 45C 각각의 균질재에 대한 파괴인성값

Table 5 Experimental fracture strength on edge crack of homogeneous materials

Specimen No.	Crack length ( $a : \text{mm}$ )	Specimen width ( $W : \text{mm}$ )	Specimen thickness ( $t : \text{mm}$ )	SM 45C		STS 304	
				Fracture load ( $P_f : \text{N}$ )	Fracture stress ( $\sigma_f : \text{MPa}$ )	Fracture load ( $P_f : \text{N}$ )	Fracture stress ( $\sigma_f : \text{MPa}$ )
1	4.5	14	2	8134	290.5	9849	351.8
2	6	14	2	3053	109.04	8253	294.8
3	9	14	2	1539	59.96	5576	199.1

Table 6 Fracture toughness on edge crack of homogeneous materials

Specimen No.	$a/W$	Only load		STS 304	
		$F_j$	$K_c(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$F_j$	$K_c(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
1	0.32	1.504	51.95	1.503	62.87
2	0.43	1.771	26.51	1.77	71.65
3	0.64	2.436	22.51	2.441	81.59

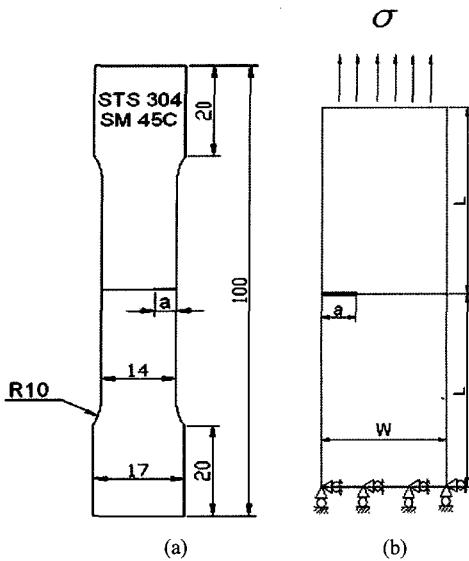


Fig. 7 Shape of specimen and BEM analysis models on edge crack of homogeneous materials

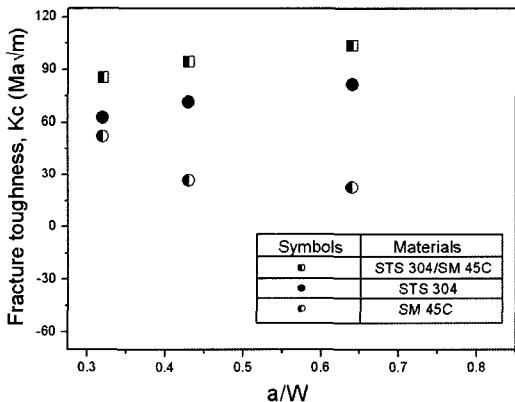


Fig. 8 Comparison of fracture toughness on edge crack for homogeneous materials and dissimilar materials

의 결과를  $a/W$ 의 변화에 따라 나타낸 것이다. 용접부 이종 접합계면의 파괴인성은 균질재 STS 304와 SM 45C의 파괴인성 값보다 크며, 균열길이가 증가할수록 STS 304/SM 45C 접합계면균열의 경우와 균질재 STS 304의 파괴인성은 증가하지만 SM 45C의 균질재는 감소하는 경향을 나타낸다.

#### 4.3 이종 마찰용접계면의 파괴기준

실험결과와 BEM 수치해석결과를 이용하여 각 모드 성분으로 분리되어 계산된  $K_{lc}$ 와  $K_{2c}$  값은 이종재료의 상호조합에 의한 재료 물성치와 기계적

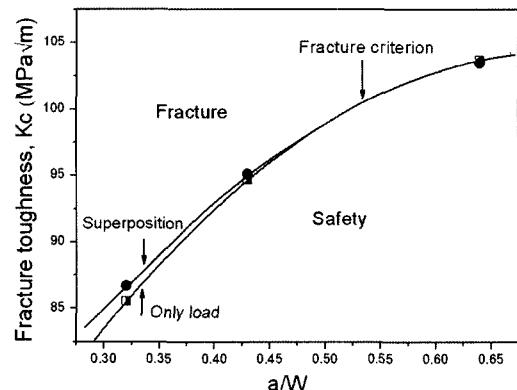


Fig. 9 Fracture criterion of superposition and only load on interface crack in friction welded STS 304/SM 45C

성질의 차이, 이들의 친화력에 의한 계면특성에 따른 복잡한 응력상태의 변화 및 파괴기구의 차이로 나타난다.  $K_{lc}$ 와  $K_{2c}$  값의 차가 크지 않을 경우  $K_{lc}$ ,  $K_{2c}$ 를 동시에 나타내는 파괴기준을 설정<sup>3)</sup>하는 것이 유용하지만,  $K_{lc}$ 와  $K_{2c}$  값의 차가 아주 클 경우는  $K_c$  값으로 파괴기준을 설정하는 것이 유용하다. 본 연구는 Table 4의 결과와 같이 STS 304/SM 45C 이종 접합계면 균열에 대한  $K_{lc}$ 와  $K_{2c}$  값의 차가 크므로  $K_c$ 를 이용한 파괴기준선을 설정하기로 한다. Fig. 9 는  $K_c$ 값을 근거로 하여 파괴기준을 나타낸 것이며, 균열길이가 작을 경우는 외부하중과 잔류응력이 중첩된 경우가 순수 외부하중만이 작용할 때 보다 파괴인성은 증가하고, 균열길이가 증가할수록 잔류응력의 영향은 소멸되어 무시할 수 있다. 임의의 균열길이를 갖는 용접계면에 실제 작용하중에 의한 파괴인성 값이 파괴기준선 아래에 위치 할 경우 이종 마찰 용접재는 안전하지만, 파괴기준선 위에 오게 되면 계면 균열은 진전하면서 파괴를 초래한다.

결국, 이종재료의 접합이 가능한 마찰용접의 경우 이와 같은 파괴기준을 이용하여 접합체에 대한 파괴기준의 설정, 파괴강도의 예측, 파괴강도의 평가 및 안정성 예측이 가능할 것으로 기대된다.

#### 5. 결 론

이종마찰용접에 의한 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법을 제안하기 위하여 STS 304 / SM 45C 용접시험편 제작 및 경계요소법을 이용한

응력세기계수의 해석과 파괴인성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 마찰용접 된 STS 304/SM 45C의 이종 접합계면과 균질재 STS 304, SM 45C에 편측 계면균열이 존재할 때 균열길이의 변화에 따른 정밀도 높은 응력 및 응력세기계수를 해석하고, 이들의 결과를 상호 비교 검토하였다.
- 2) 이종 마찰용접재의 접합면에 계면균열이 존재할 경우 파괴인성의 실험방법과 파괴인성 결과를 이용한 파괴기준의 설정방법 및 접합강도의 평가방법을 제시하였다.
- 3) 마찰용접된 STS 304/ SM 45C의 이종 접합계면의 파괴인성은 STS 304, SM 45C의 각 재료가 균질재의 경우보다 증가한다.
- 4) STS 304/ SM 45C 이종 마찰용접재의 접합계면의 파괴인성은 균열길이가 작을수록 잔류응력의 영향은 크며 균열길이가 증가할수록 잔류응력의 영향은 무시할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

## References

- 1) D. Suigeng, Y. Junhui and F. Li, "Application of a Closed-Loop Control System to Friction Welding," Mechanical Science and Technology, Vol.23, No.3, pp.300-302, 2004.
- 2) M. Sahin, "Simulation of Friction Welding Using a Developed Computer Program," J. of Materials Processing Technology, pp.153-154, pp.1011-1018, 2004.
- 3) N. Y. Chung and C. H. Song, "Establishment of Fracture Criteria for Mixed Mode in Bonded Dissimilar Materials with an Crack Emanating from an Edge Semicircular Hole," J. of KSME, Vol.25, No.6, pp.907-915, 2001.
- 4) S. Y. Lee and B. S. Yun, "Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM 45C," J. of KSMTE, Vol.10, No.1, pp.65-70, 2001.
- 5) S. K. Oh, "High Temperature Creep Life Prediction of Friction Welded Joints by Initial Strain Method and the AE Evaluation," J. of KSOE, Vol.11, No.4, pp.40-80, 1997.
- 6) N. Y. Chung, R. Yukki, H. Ishikawa and S. Nakano, "Fracture Criterion of Mixed Mode in Adhesively Bonded Joints," Material, Vol.39, No.443, pp.635-644, 1992.
- 7) N. Y. Chung and C. H. Song, "Prediction of Propagation Path for the Interface Crack in Bonded Dissimilar Materials," Transactions of KASE, Vol.4, No.3, pp.112-121, 1996.
- 8) N. Y. Chung, M. D. Lee and S. G. Kang, "Analyses of Stress Intensity Factors and Evaluation of Fracture Toughness in Adhesively Bonded DCB Joints," Transactions of KSME, Vol.24, No.6, pp.1547-1556, 2000.
- 9) N. Y. Chung, "An Evaluation Method of Fracture Toughness on Interface Cracks in Bonded Dissimilar Materials," Transactions of KSAE, Vol. 11, No.4, pp.110-116, 2003.
- 10) R. Yuuki and J. Q. Xu, "Stress Based Criteria for an Interface Crack Kinking Out of the Interface in Dissimilar Materials," Eng. Frac. Mech., Vol.41, No.5, pp.635-644, 1992.