

## 이종재 브레이징 계면에서의 균열거동해석 Analysis of Crack Behavior of dissimilar materials in Brazed Interface By BEM

오 환 섭 (경희대학교 기계·산업시스템 공학부 교수)  
김 시 현\*, 김 성 재 (경희대학교 대학원 기계공학과)

### ABSTRACT

Applications of Brazing in the studying fields such as High-Speed Machining are very increasing in various industry fields. Therefore, Applying to the fracture mechanics by numerical analysis method is very important to analyse the crack problem Dissimilar Materials in Brazed Interface. In this study, Stress intensity Factor (S.I.F) is analysed to investigate crack behavior on the crack tip of dissimilar materials in brazed interface such as a Hardmetal and a HSS by two dimensional(2-D) Boundary Element Method (BEM). Kelvin's solution was used as a fundamental solution in BEM analysis and stress extrapolation method was used to determine Stress Intensity Factor.

주요기술용어 : Dissimilar Materials(이종재), Boundary Element Method(경계요소법), Brazed Interface(브레이징 접합계면), Filler metal(삽입 금속), S.I.F(Stress Intensity Factor) 응력확대계수, HSS(고속도강), Hardmetal(초경합금)

### Nomenclature

$t$  : Filled Metal thickness  
 $W$  : The width of HSS  
 $r$  : Distance from the crack-tip to the extrapolation point  
 $E_1$  : Young's modulus of Hardmetal  
 $E_2$  : Young's modulus of HSS

$E_3$  : Young's modulus of Filled Metal  
 $F_1$  : Dimensionless S.I.F in Mode 1  
 $F_2$  : Dimensionless S.I.F in Mode 2  
 $F_i$  : Dimensionless S.I.F in Dissimilar Materials

### 1. 서론

세계금속가공분야에서 무역에 있어서의 경쟁력회복을 위해 생산성향상과 원가절감이 각 산업체의 주된 목표로 부각됨에 따라 보다 다각적인 부분 즉 기계요소, 우주항공, 원자력, 자동차산업 전반에 걸친 변화에 따른 제품의 정밀화, 기능의 다양화, 복합화에 대한 기술개발의 필요성이 야기되고 있던 중 이를 달성하기 위해 고속, 고능률 가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

역사적으로 불 때 초경과 같은 세라믹재료는 내열성, 내마모성, 내식성 등이 금속재료에 비해서 뛰어나고 저열팽창성, 고열전도성, 높은 압축강도 인해 절삭공구, 센서, 집적회로기판, 터빈, 고강도 및 내열성이 함께 요구되는 구조물에 금속재료대신 널리 이용되고 있다. 이러한 세라믹 재료의 우수한 특성에도 불구하고 취성적이며 가공이 어렵기 때문에 이 단점을 보완하기 위해 비교적 인성이 풍부한 금속과의 접합이 요구되며 이에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다.<sup>(3-5)</sup>

이종재의 접합에 관한 연구로서 Brazing 접합형 앤드밀은 초경합금과 고속도강 사이에 모재보다 저융점을 가지는 Ag계열 filler metal을 삽입하고 Brazing 접합을 통해 가공

된 것으로 solid형 엔드밀에 비해 낮은 정밀도에도 불구하고 절삭속도, 공구수명, 난삭재의 가공동 생산원가의 절감을 도모할 수 있으므로 고속가공 절삭공구로 각광을 받고 있다.

하지만 Brazing 접합 후 고온에서 실온으로 냉각되는 과정에서 열영향부에서의 응력이 집중될 것을 예상되며, 이러한 응력집중이 강도저하의 원인이 되어 열영향부의 변형 및 파괴가 일어날 것을 예측할 수 있다.

특히 Brazing에 의해 생성된 두 개의 접합계면은 모두 이중재 접합이므로 접합면에서의 응력특이성으로 인한 접합계면에 균열이 발생하는 원인이 되어서 접합계면에서 주로 파괴가 일어나게 된다. 결국 접합 강도는 접합계면과 그 주위의 접합층내의 균열에 의해 결정된다고 볼 수 있으므로 파괴역학적 평가법을 도입하게 되었다.<sup>(1-2, 8)</sup>

본 연구에서는 수치해석법 중 균열해석에 있어서 가장 우수한 경계요소법을 사용하여 브레이징접합 엔드밀의 접합 강도 평가를 목적으로 Filler metal의 종류와 접합의 기하학적인자 변화에 대한 이중재 브레이징 접합계면균열모델에서 균열선단에서의 응력확대계수의 거동을 검토하고자 한다.

## 2. 경계요소법의 이론 개요

### 2.1 경계요소법의 해석과정

선형탄성체의 하중계의 평형방정식

$$\sigma_{ij,i} + b_i = 0; b_i = \Delta(p, q)e_i \quad (1)$$

(1)식에서 Betti의 상반정리를 이용해서 적분방정식을 유도한 다음  $U_{ij}(P, Q)$ ,  $T_{ij}(P, Q)$ 의 기본해를 도입하여 내점 p를 경계상의 점P로 가져가는 특이적분을 통해서 다음과 같은 경계적분방정식을 구할 수 있다.

$$u_i(p) = \int_S [U_{ij}(p, Q)t_j(Q) - T_{ij}(p, Q)u_j(Q)]dS(Q) + \int_V \bar{b}_j(q)U_{ij}(p, q)dV(q) \quad (2)$$

이중재료에 대한 기본해로써 Hetenyi 해가 있으나 영역분할을 위해 Kelvin 해를 이용한다.<sup>(1,2)</sup>

식(2)를 2차원 8절점요소를 사용하여 이산

화과정을 통해 다음과 같은 대수방정식으로 변환 할수 있다.

$$\sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^8 U_{j(n,k)} \int_S T_{ij(P,(n,k))} M^k(\xi) j(\xi) d\xi = \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^8 t_{j(n,k)} \int_S U_{ij}(P, (n, k)) M^k(\xi) j(\xi) d\xi + C_{ij}(P) u_j(P) \quad (3)$$

N:요소수,  $M^k$ :형상함수,  $J$ :자코비안,

$\xi$ :요소내 정규좌표계

$C_{ij}$ 를 강제변위조건에 의해 구한후 정리하면 다음과 같은 모양이 된다.

$$[A]\{X\} = \{A\} \quad (4)$$

[A]:  $3 \times n_p$  차수의 비대칭 정방행렬,

{X}: 미지량, {A}: 기지량,  $n_p$ : 절점의 총수

### 2.2 계면 크랙 선단 근방의 변위와 응력

표면력 자유경계조건을 갖는 이중접합재 계면 크랙의 선단주위의 응력분포를 극좌표계로 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{r}} B_{\theta\theta}(\theta) \sin(a \ln \frac{r}{l}) + \frac{1}{\sqrt{r}} C_{\theta\theta}(\theta) \cos(a \ln \frac{r}{l}) \quad (5)$$

식(5)의 삼각 함수에  $\ln(r/l)$ 이 포함되어 있기 때문에 Fig. 1와 같이 진동응력이 나타나며,  $1/\sqrt{r}$ 항으로 인하여 특이 응력장이 됨을 알 수 있다.<sup>(9)</sup> 이러한 진동특이응력은 보통  $r/a$ 가  $10^{-2}$ 이하인 크랙선단 최근방에서 나타나므로 무시하여도 좋은 것으로 알려져 있으며, 따라서 크랙선단에서 조금만 떨어져지면 균질재 크랙과 같이  $1/\sqrt{r}$ 의 특이 응력분포를 이루게 된다. 또한  $\theta = 0^\circ$  상의 응력분포는 다음 식으로 된다.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = (K_1 + iK_2)(2\pi r)^{-1/2}(r/l)^{ia} \quad (6)$$

여기서  $K_1 + iK_2$ 가 계면 크랙 복소 응력확대계수이지만 균질재와 같이 크랙 모드에 따라서 분리할 수 있는 것이 아니며, 대칭하중을 받고 있다 하더라도  $K_1$ 과  $K_2$ 의 혼합 상태가 된다. 그리고 계면 크랙 크랙선단 근방 상대 변위  $\delta_y$ ,  $\delta_x$ 는 다음과 같은 식과 같이 표시된다.

$$\delta_y + i\delta_x = \frac{K_1 + iK_2}{2(1 + 2ia) + \cosh(a\pi)}$$

$$\left[ \frac{k_1+1}{\mu_1} \frac{k_2+1}{\mu_2} \right] \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \left( \frac{r}{l} \right)^{ia} \quad (7)$$

$$\delta_j = u_j(r, \pi) - u_j(r, -\pi) \quad (j=x, y) \quad (8)$$

위의 변위 분포도 역시  $(r/l)^{ia} = e^{ia \ln(r/l)}$  포함되어있기 때문에 (+)(-)로 진동하는 overlapping 현상이 발생한다.

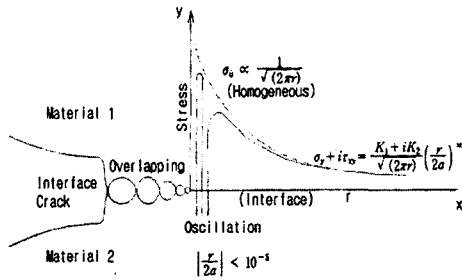


Fig. 1 Stress Property for the Crack Tip In the Dissimilar Materials

### 2.3 BEM의 수치 적분 효율화

#### 2.3.1 Sub 요소분할법

경계요소법에서는 경계적분방정식을 이산화할 때 Gauss적분하는 과정에서 다른 수치해석법과 달리 특이적분이 자주 발생한다. 해석대상 내부의 단위 작용점 p를 경계상의 점 P로 옮길 경우, P점과 Q점이 일치  $(r(p, Q) \rightarrow 0)$  할 때 기본해에서 발생하는 특이성 때문에 특이적분을 수행하게 되고 보다 정도 높은 특이적분을 수행하기 위해 Sub 요소로 분할하여 각 Sub요소마다 일반적인 수치 적분을 하는 방법이다.

#### 2.3.2 특이요소

해의 정도향상을 목적으로 크랙 근처의 응력장이 갖는 특이성을 표현하기 위해 Hellen과 Barsoum<sup>(10)</sup>이 제안한 특이요소를 사용하였다. 특이요소는 크랙선단에 접해 있는 2차원 3절점 요소의 중간 절점을 요소의 한 변의 1/2위치에 놓지 않고 1/4만큼 크랙선단 쪽으로 이동시킨 요소이다.<sup>(1-2)</sup>

### 2.4 응력확대계수의 결정

이종접합체의 계면균열에 대한 파괴역학인자의 해석은 계면균열에 대한 BEM 응력해석 결과를 이용하여 계면상의 응력분포를 구한 후, 다음 식과 같이 외삽에 의하여 응력확대계수를 구하였다.

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (9)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \quad (10)$$

$$Q = \epsilon \ln(r/l) \quad (11)$$

$$F1 = K_1 / \sigma \sqrt{\pi l} \quad F2 = K_2 / \sigma \sqrt{\pi l} \quad (12)$$

여기서, l은 균열길이로서 편축균열에서는 a, 중앙균열에서는 2a를 나타내며, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>는 접합 계면 균열에 대한 복소응력확대계수이다.

그 후, 식(13)를 이용하여 응력확대계수 K<sub>i</sub>와 이를  $\sigma \sqrt{\pi l}$ 로 무차원화 시켜 F<sub>i</sub>를 구한다.

$$K_i = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r (\sigma_y^2 + \tau_{xy}^2)} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad (13)$$

$$F_i = K_i / \sigma \sqrt{\pi l} \quad (14)$$

### 3. 수치해석 모델

Fig.2는 Brazing접합된 엔드밀을 예를 표시한 것이다. 초경합금을 접합재, 고속도강(HSS)부분을 피접합재로 하고 Ag계의 filler metal로 접합되어 있음을 보여 준다.

해석모델은 실측치를 바탕으로 하여 filler metal두께와 각 부재의 탄성계수비 변화에 따른 응력확대계수의 거동을 살펴보기 위해 Fig 3와 같은 단부가 존재하게 단순화시킨 모델을 채택하여 해석을 시행하였다. 각각을 3개의 영역으로 분할하고 전체요소수는 각각의 경우에 대해 209~248개로 하였다. 수치해석의 정도와 계산의 효율성을 높이기 위해 요소분할은 등비수열로 하였다.

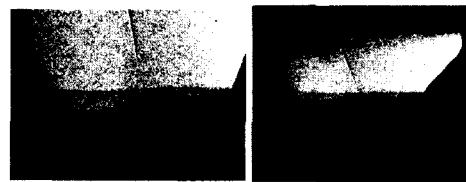


Fig. 2 Brazed Interface of Endmill

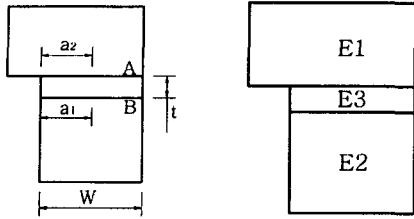


Fig. 3 BEM Analysis model

Material	Elastic modulus(Gpa)	Poisson's
Hard metal	490	0.22
HSS	207	0.3
Ag-Cu-Ti	83	0.36

Table. 1 Properties of Materials

#### 4. Brazing접합계면에서의 BEM을 이용한 균열 거동 해석

##### 4.1 Filler metal의 탄성계수변화에 따른 응력 확대계수거동

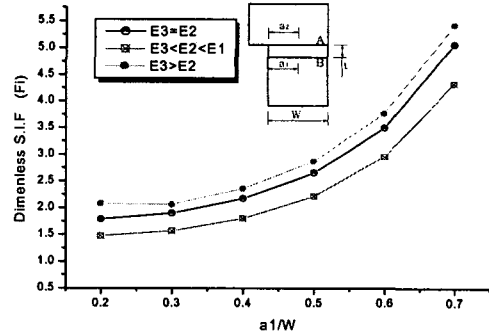
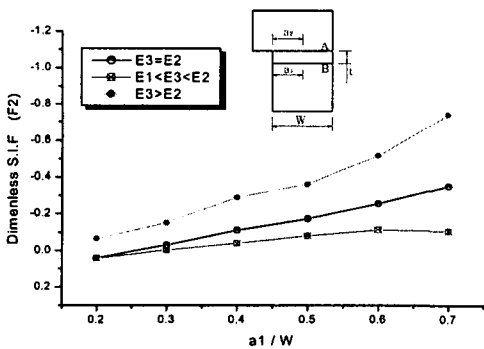
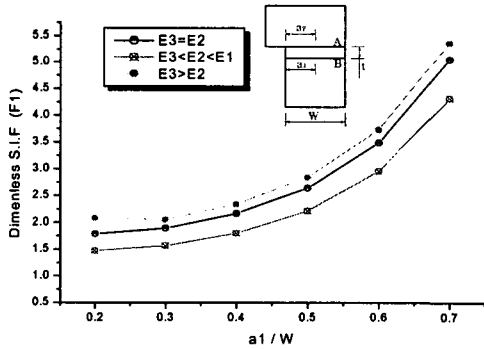


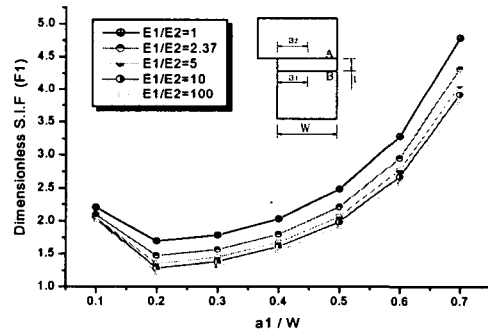
Fig. 4 Relationship between  $F_1, F_2, F_i$  and  $a_1/W$  for  $E_3$  change

$E_3$  에 따른 계면균열응력확대계수의 거동을 알아보고자  $E_3$ 를  $E_3 = E_2 < E_1, E_3 < E_2 < E_1, E_2 < E_3 < E_1$  일 경우에 대해 각각의  $F$  계산하여 비교하였다.

수치해석상 결과로서 균열길이의 비에 대한  $F_1, F_2, F_i$ 를 Fig. 4와 같이  $E_3$  변화에 따라 도시하였다.  $F_2$  은 균열길이가 증가할수록 감소하였고  $E_3$ 의 증가에 따라서도 전반적으로 감소하는 경향을 보여주었다.

$F_1$  은 균열길이가 증가함에 따라 증가하였다. 이에  $F_i$ 는  $F_1$ 의 영향으로 균열길이가 증가함에 따라 증가하였으며  $E_3$ , 즉 Filler metal의 탄성계수값이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

##### 4.2 피접합재에 대한 접합체의 탄성계수비 변화에 따른 응력확대계수거동



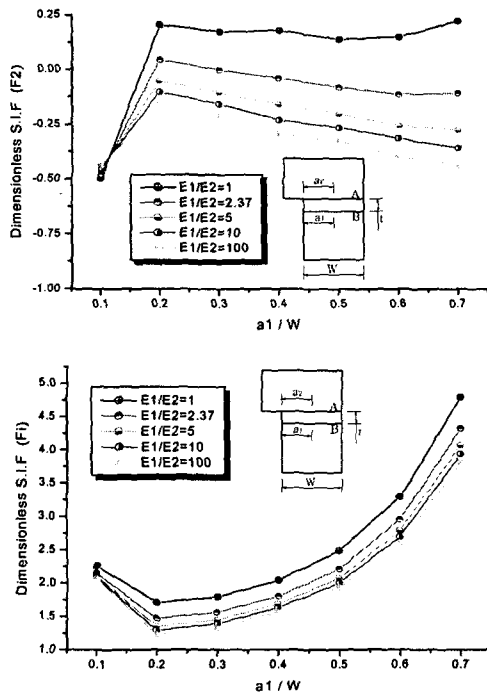


Fig. 5 Relationship between  $F_2$ ,  $F_i$  and  $a_1/W$  for  $E_1/E_2$  change

$E_3$ 를 일정할 때  $E_1/E_2$ 에 따른 계면균열응력확대계수의 거동을 알아보려고  $E_1/E_2 = 1, 2.37, 5, 10, 100$ 에 대해 수치해석을 실시하였다. 수치해석상 결과로서 균열길이의 비에 대한  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_i$ 를 Fig. 5와 같이  $E_1/E_2$ 변화에 따라 도시하였다.  $F_2$ 는  $a_1/W=0.1$ 에서 균열길이 증가에 따라 가장 작은 값을 가지면서  $a_1/W=0.2$ 까지 증가하다가  $a_1/W=0.2$ 를 기점으로 다시 감소하는 경향을 보였다. 그리고  $E_1/E_2$ 가 증가할수록  $F_2$ 가 감소하였다. 여기서 피접합재의 탄성계수가 비교적 높은 경우 낮은 파괴특성을 나타내고  $a_1/W=0.1$ 에서 낮은  $F_2$ 는  $F_i$ 증가에 기여하고 있다는 사실을 알 수 있었다.  $F_i$ 는 균열길이가 증가함에 따라 증가하였다. 이에  $F_i$ 는  $F_1$ 의 영향으로  $a_1/W=0.2$ 까지 감소하다가 균열길이가 증가할수록 증가하고  $E_1/E_2$ 증가에 따라서는 감소하는 경향을 보였다.

이와 같이 균열의 길이가 짧은범위에서는 step notch 부분에서의 응력 집중으로 인한 영향이 크기 때문인 것으로 생각되며 균열이 진전할수록 크랙에 의한 지배를 받게되므로 점차 증가하는 경향을 보이게된다. 위의 결과와 같이  $F_i$ 는  $F_1$ 에 지배를 받게되므로 아래에서는  $F_1$ 의 거동은 생략하도록 하겠다.

#### 4.3 Filler Metal 두께변화에 따른 응력확대계수의 거동

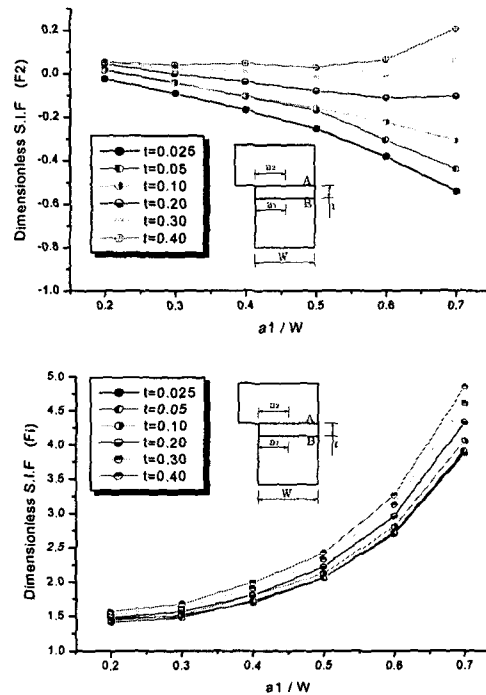


Fig. 6 Relationship between  $F_2$ ,  $F_i$  and  $a_1/W$  for  $t$  change

Filler Metal 두께변화에 대한 계면균열응력확대계수의 거동을 알아보려고  $t=0.025, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40$ 에 대한  $F$ 를 수치해석적으로 계산하였다. 수치해석상 결과로서 균열길이의 비에 대한  $F_2$ ,  $F_i$ 를 Fig.6과 Fig.7 같이  $t$ 변화에 따라 도시하였다. B면에서  $F_2$ 는  $t=0.025 \sim 0.1$ 구간에서는 균열길이 증가에 따라 감소하다가  $t=0.3$ 이상 값을 가지면  $a_1/W=0.5$ 를 기점으로 해서 증가하였다. 또한 Fig 8과

같이 A면에서  $F_2$ 는 균열길이 증가에 따라 점차로 급격히 증가하고  $t$ 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다.  $F_i$ 는 A,B면에서 균열길이 증가와  $t$ 증가에 따라 증가 하였으며 특히 A면에서  $F_2$ 의 영향으로  $t=0.3, 0.4$ 에서 높은  $F$ 값을 보였다.

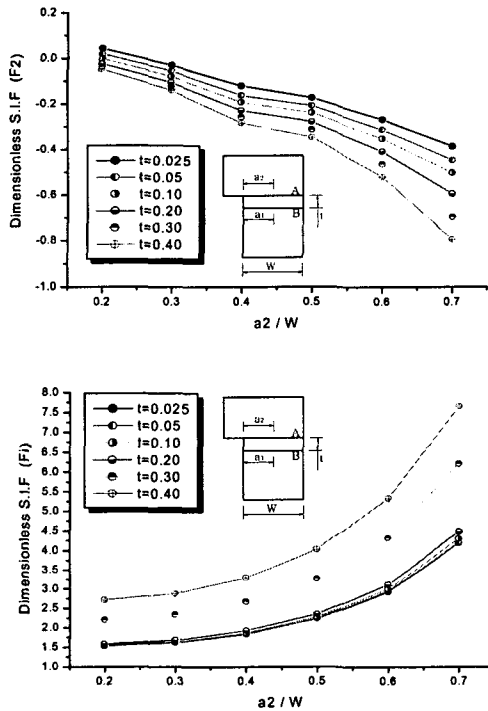


Fig. 7 Relationship between,  $F_2$ ,  $F_i$  and  $a_2/W$  for  $t$  change

### 5. 결론

경계요소법(BEM)을 이용하여 엔드밀의 브레이징접합 강도평가를 목적으로 Filler Metal의 종류와 기학적인자의 변화에 따른 접합계면 균열의 응력확대계수의 거동을 검토한 결과 얻어진내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 모든 경우에 대해 이중재 무차원 응력확대계수  $F_i$ 는 균열길이에 대해 증가하는 경향을 보였으며  $F_2$ 는 감소하는 경향을 보였다. 또 작은 균열에서는 응력집중의 영향으로  $F_i$  증가 하는 것을 알 수 있었다.

2)  $E_3$  변화하는 경우  $F_2$ 는  $E_3$ 증가와 균열길이 증가에 따라 모두 감소하였고  $F_i$ 는  $E_3$ 증가와 균열길이증가에 따라 모두 증가하는 경향을 보였다.

3)  $E_3$ 가 일정하고 B면에서  $E_1/E_2$  증가할 경우  $F_i$ 는  $E_1/E_2$ 증가에 따라 증가하였다.

4) filler metal의 두께가 증가할 경우  $F_i$ 는  $t$ 가 증가함에 따라 증가하였으며 A면에서  $t=0.3, 0.4$ 일 때 보다 큰  $F_i$ 를 가졌다.

### 참고문헌

1. 結城 良治, 曹相鳳 "異材界面き裂の應力擴大係數の境界要素解析"日本機械學會論文集 55,510,1989
2. 오환섭, 양인수 "계면 및 계면주위 균열간섭거동" 한국자동차공학회논문집, Vol. 7 제 1호. pp. 277-283 1999.
3. 이수정, 정명영, 이대길, 구형희, "세라믹/금속브레이징 접합조인트의 고온접합강도에 관한 연구, 대한기계학회논문집(A) 제20권 제2호, pp. 520-528, 1996
4. 朴相奘 "활성금속 브레이징 방법에 의한 세라믹스/금속접합기술" 大韓金屬學會報 제5권 제2호 1992. 6
5. Dov Sherman "The mechanical behavior of layered brazed metal/ceramic composites" Materials Letters 33. pp. 255-260 1998.
6. ASM International Handbook Committee, "Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials", Metals handbook Vol 2. 10th Edition, ASM International, pp.699-719, 1990
7. Milton C.Shaw, "Metal Cutting Principles " Oxford University Press, New York, pp.363
8. 結城 良治, 許金泉, "界面き裂の力學" 東大生研セミナーテキスト, pp 115-121.
9. Erdogan, F., "Stress Distribution in Bonded Dissim. Mater. with Cracks", J. Appl. Mech., pp. 87-403, 1963
10. Roshdy S.Barsoum, " On the Use of Iso-parametric Finite Elements In Linear Fracture Mechanics" Int. J. Num. Method in Eng. 10, pp. 25-37, 1976