

이종재 브레이징 계면에서의 균열거동 해석

오환섭*, 김시현⁺, 김성재⁺, 양인수⁺

(논문접수일 2002. 10. 14, 심사완료일 2002. 11. 14)

Analysis of Crack Behavior of Brazed Interface in Dissimilar Materials using BEM

Hwan-Sup Oh*, Si-Hyun Kim⁺, Seong-Jae Kim⁺, In-Su Yang⁺

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(SIF) 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) BEM. Kelvin's solution was used as a fundamental solution in BEM analysis and stress extrapolation method was used to determine SIF.

Key Words : Dissimilar Materials(이종재), Boundary Element Method(경계요소법), Brazed Interface(브레이징 접합계면), Filler Metal(삽입금속), S.I.F.(Stress Intensity Factor, 응력확대계수), HSS(고속도강), Hardmetal(초경합금)

1. 서론

최근 산업 경쟁력 제고를 위한 생산성 향상과 원가절감이 각 기업체의 주요한 목표로 부각되고 있다. 이에 따라 기계요소, 자동차, 우주항공, 원자력, 화학플랜트 등 전 산업분야에서 제품의 고정밀화, 기능의 다양화, 복합화에 대응하는 기술개발의 필요성이 증대되고 있으며, 이러한 산업계의 요구에 부응하여 고속, 고능률 가공에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

세라믹 재료는 금속재에 비해서 내열성, 내마모성, 내식성 등이 뛰어나고, 낮은 열팽창성 및 높은 열전도성, 높은 압축강도를 갖기 때문에 절삭공구 및 센서, 집적회로기판, 강도와 내열성이 함께 요구되는 구조물 등에서 금속재료 대신 널리 쓰이고 있다. 이러한 세라믹의 우수한 특성에도 불구하고 취성과 가공이 곤란한 단점을 보완하기 위하여 비교적 인성이 풍부한 금속과의 접합이 요구되며 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다⁽¹⁻³⁾.

이종재의 접합에 관한 연구로서 브레이징(brazing) 접합

* 주저자, 경희대학교 기계산업시스템공학부 (shoh@khu.co.kr)

주소: 449-701 경기도 용인군 기흥읍 서천리 1번지

+ 경희대학교 대학원 기계공학과

형 엔드밀(endmill)은 초경합금과 고속도강 사이에 모재보다 저융점을 가지는 Ag계열 필러메탈(filler metal)을 삽입하고 브레이징 접합을 통해 가공된 것으로 솔리드(solid)형 엔드밀에 비해 낮은 정밀도에도 불구하고 절삭속도, 공구수명, 난삭재의 가공 등 생산원가의 절감을 도모 할 수 있으므로 고속가공의 절삭공구로 각광을 받고 있다.

그러나 브레이징 접합 후 고온에서 실온으로 냉각되는 과정에서 열영향부에서의 응력집중이 예상되며, 이러한 응력집중이 강도저하의 원인이 되어 열영향부에서 변형 및 파괴가 일어날 것으로 예측된다.

특히, 브레이징에 의해 생성된 두 개의 접합계면은 모두 이중재 접합이므로 접합면에서의 응력특이성⁽⁴⁾으로 인한 접합계면에 균열이 발생하는 원인이 되어서 주로 접합계면에서 파괴가 일어나게 된다. 결국 브레이징접합재의 접합 강도는 접합계면과 그 주위의 접합층 내의 균열에 의해 결정된다고 볼 수 있으므로 파괴역학적 평가법을 도입하게 되었다⁽⁵⁻⁸⁾.

본 연구에서는 수치해석법 중 균열해석에 가장 우수한 경계요소법을 사용하여 브레이징 접합 엔드밀의 접합 강도 평가 목적으로 필러메탈의 종류와 접합의 기하학적 인자 변화에 대한 이중재 브레이징 접합계면의 균열모델에서 균열 선단에서의 응력확대계수의 거동을 검토하고자 한다.

2. 경계요소법(BEM)의 개요

2.1 BEM의 해석과정

선형탄성체의 이중계의 평형방정식

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

(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 기본해로서 Hetenyi 해가 있으나 영역 분할을 위해 Kelvin 해를 이용한다^(5,6).

식 (2)를 2차원 8절점 요소를 사용하여 이산화과정을 통해 다음과 같은 대수방정식으로 변환 할 수 있다.

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

여기서, N은 요소수, M^k 는 형상함수, J는 자코비안, ξ 는 요소내 정규좌표계이다.

C_{ij} 를 강제변위 조건에 의해 구한 후 정리하면 다음과 같은 모양이 된다.

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

여기서, [A]는 $3 \times n_p$ 차수의 비대칭 정방행렬이며, {X}는 미지량, {A}는 기지량, n_p 는 절점의 총수이다.

2.2 계면 균열 선단 근방의 변위와 응력

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

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

식 (5)의 삼각 함수에 $\ln(r/l)$ 이 포함되어 있기 때문에 Fig. 1과 같이 진동응력이 나타나며, $1/\sqrt{r}$ 항으로 인하여 특이 응력장이 됨을 알 수 있다⁽⁹⁾. 이러한 진동특이응력은 보통 r/a 가 10^{-7} 이하인 균열선단 최근방에서 나타나므로 무시하여도 좋은 것으로 알려져 있으며, 따라서 균열선단에서 조금만 떨어지면 균질재 균열과 같이 $1/\sqrt{r}$ 의 특이 응력 분포를 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, $K_1 + iK_2$ 는 계면균열의 복소응력확대계수이지만 균질재와 같이 균열 모드에 따라서 분리할 수 있는 것이

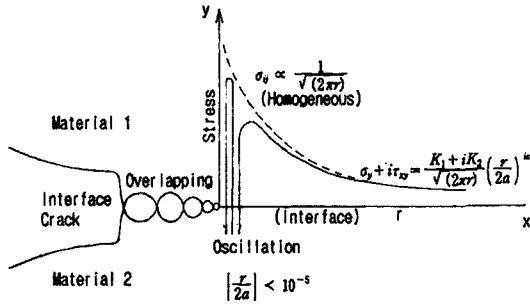


Fig. 1 Stress Property for the Crack Tip in the Dissimilar Material

아니며, 대칭하중을 받고 있다 하더라도 K_1 과 K_2 의 혼합 상태가 된다. 그리고 계면 균열선단 근방 상대 변위 δ_y, δ_x 는 다음과 같은 식과 같이 표시된다.

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

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

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

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

2.3 BEM의 수치 적분 효율화

2.3.1 서브(Sub)요소 분할법

경계요소법에서는 경계적분방정식을 이산화할 때 Gauss 적분과정에서 다른 수치해석법과 달리 특이적분이 자주 발생한다. 해석 대상 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 서브요소로 분할하여 각 서브요소마다 일반적인 수치 적분을 하는 방법이다.

2.3.2 특이요소

해의 정도 향상을 목적으로 균열 근처의 응력장이 갖는 특이성을 표현하기 위해 Hellen과 Bar-soum이 제안한 특이요소를 사용하였다⁽¹⁰⁾. 특이요소는 균열선단에 접해 있는 2

차원 3절점 요소의 중간 절점을 요소의 한 변의 1/2위치에 놓지 않고 1/4만큼 균열선단 쪽으로 이동시킨 요소이다^(5,6).

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.

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

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

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

$$F_1 = K_1 / \sigma \sqrt{\pi l}, \quad F_2 = K_2 / \sigma \sqrt{\pi l} \quad (12)$$

여기서, l 은 균열길이로서 편측균열에서는 a , 중앙균열에서는 $2a$ 를 나타내며, K_1, K_2 는 접합계면 균열에 대한 복소응력확대계수이다.

그 후, 식 (13)를 이용하여 응력확대계수 K_i 와 이를 $\sigma \sqrt{\pi l}$ 로 무차원화시켜 F_i 를 구한다.

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

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

3. 수치해석 모델

Fig. 2는 브레이징 접합된 엔드밀의 예를 표시한 것이다. 초경합금을 접합재, 고속도강 부분을 피접합재로 하고 Ag계의 필러메탈로 접합되어 있음을 보여 준다.

해석모델은 실측치를 바탕으로 하여 필러메탈 두께와 각 부재의 탄성계수비 변화에 따른 응력확대계수의 거동을 살펴보기 위해 Fig. 3과 같은 단부가 존재하게 단순화시킨 모

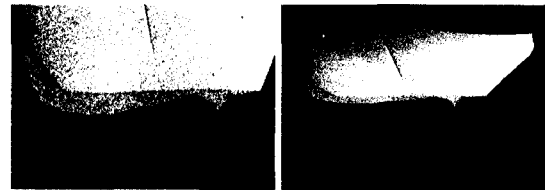


Fig. 2 Brazed Interface of Endmill

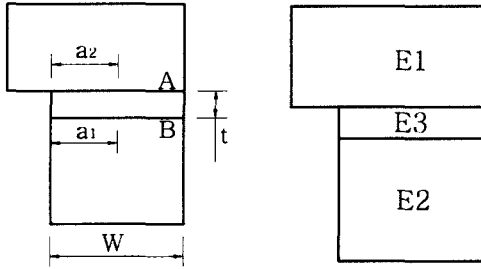


Fig. 3 BEM Analysis Model

델을 채택하고, Table 1의 기계적 물성치를 조건으로 수치 해석을 수행하였다. 여기서, A, B는 접합계면, a_1 과 a_2 는 B면과 A면에서의 균열길이, E_1, E_2, E_3 는 각 재료의 탄성 계수이며, 수치해석은 3개의 영역으로 분할하고, 전체 요소 수는 209~248개로 하였으며, 요소분할은 등비수열로 하였다.

Table 1 Properties of Materials

Materials	Elastic modulus(GPa)	Poisson's ratio
Hard metal	490	0.22
HSS	207	0.30
Ag-Cu-Ti	83	0.36

4. BRAZING 접합계면에서의 BEM을 이용한 균열거동 해석

4.1 필러메탈의 탄성계수변화에 따른 응력 확대계수거동

E_3 에 따른 계면균열 응력확대계수의 거동을알아보고자 E_3 를 $E_3 = E_2 < E_1, E_3 < E_2 < E_1, E_2 < E_3 < E_1$ 인 경우에 대해 각각의 F 를 계산하여 비교하였다. 수치해석상 결과로서 균열길이의 비에 대한 F_1, F_2, F_i 를 Fig. 4와 같이 E_3 의 변화에 따라 도시하였다. F_2 는 균열길이가 증가할수록 감소하였고, E_3 의 증가에 따라서도 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.

F_1 은 균열길이가 증가함에 따라 증가하였다. 이에 F_i 는 F_1 의 영향으로 균열길이가 증가함에 따라 증가하였으며, E_3 , 즉 필러메탈의 탄성계수 값이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

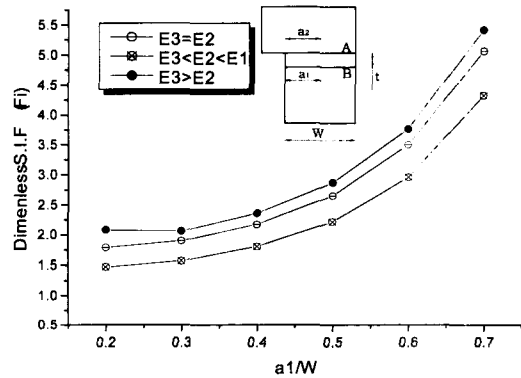
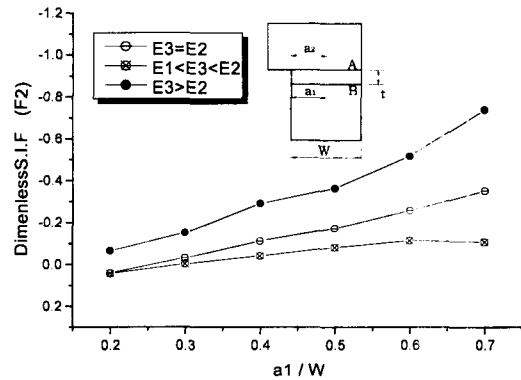
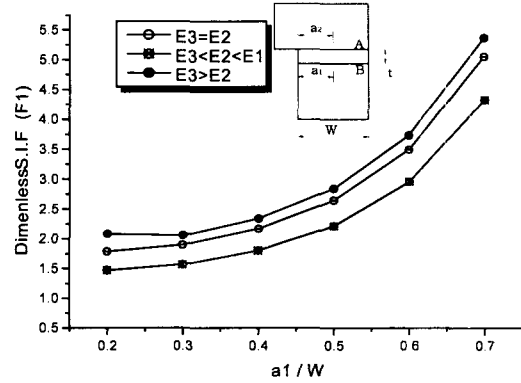


Fig. 4 Relationship between F_1, F_2, F_i and a_1/W for E_3 Change

4.2 피접합재에 대한 접합체의 탄성계수비 변화에 따른 응력확대계수거동

E_3 가 일정할 때 E_1/E_2 에 따른 계면균열응력확대계수의 거동을 알아보기 위하여 E_1/E_2 가 1, 2.37, 5, 10, 100인 경우에 대해 수치해석을 실시하였다. 수치해석의 결과로서

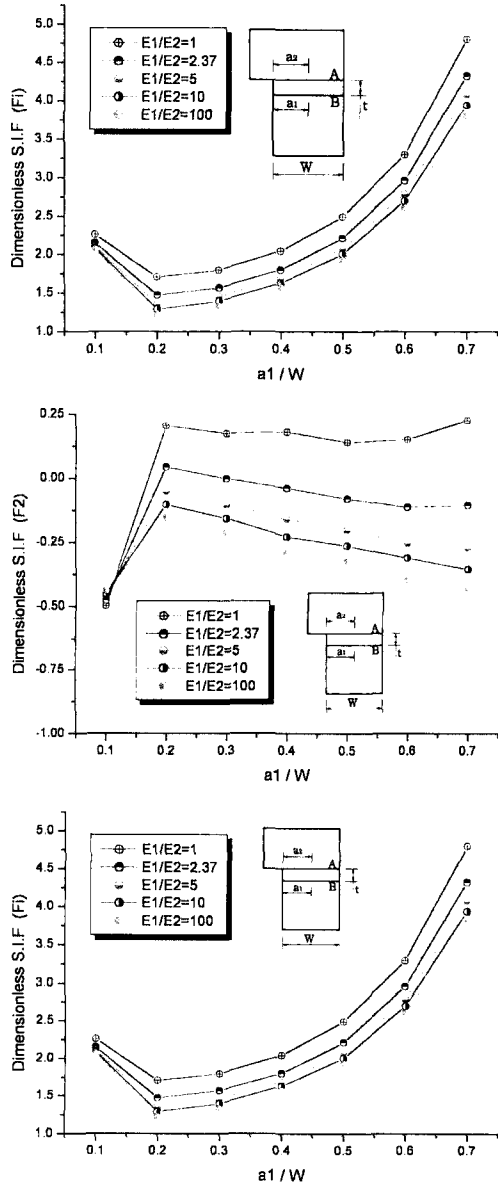


Fig. 5 Relationship between F_2, F_i and a_1/W for E_1/E_2 Change

Fig. 5와 같이 균열길이에 대한 F_1, F_2, F_i 를 E_1/E_2 의 변화에 따라 도시하였다. F_2 은 $a_1/W=0.1$ 에서 균열길이의 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 경우는 낮은 파괴특성을 나타내고, $a_1/W=0.1$ 에서 낮은 F_2 는 F_i 의 증가에 기여하고 있다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 F_i 는 균열길이가 증가함에 따라 증가하였다. 이에 F_i 는 F_1 의 영향으로 $a_1/W=0.2$ 까지 감소하다가 균열길이가 증가 할수록 증가하고 E_1/E_2 의 증가에 따라서는 감소하는 경향을 보였다.

이상과 같은 F_1, F_2, F_i 의 특성은 균열의 길이가 짧은 범위에서는 step notch 부분에서의 응력 집중으로 인한 영향이 크기 때문인 것으로 생각되며 균열이 진전할수록 균열에 의한 지배를 받게 되므로 점차 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 이상과 같이 F_i 는 F_1 의 지배를 받게 되므로 다음 절부터 F_1 의 거동에 대한 고찰은 생략하기로 한다.

4.3 필러메탈의 두께변화에 따른 응력확대계수의 거동

필러메탈의 두께변화에 대한 계면균열 응력확대계수의 거동을 알아보기 위하여 실측한 두께 0.20을 기준으로 t 가 0.025,

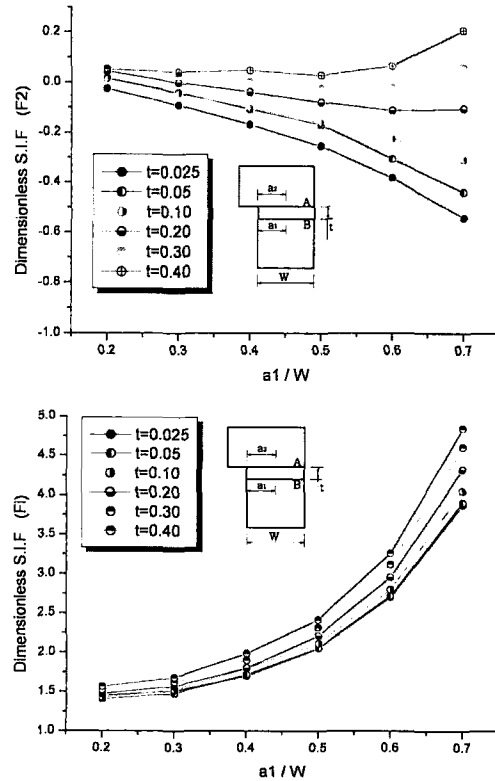


Fig. 6 Relationship between, F_2, F_i and a_1/W for t Change

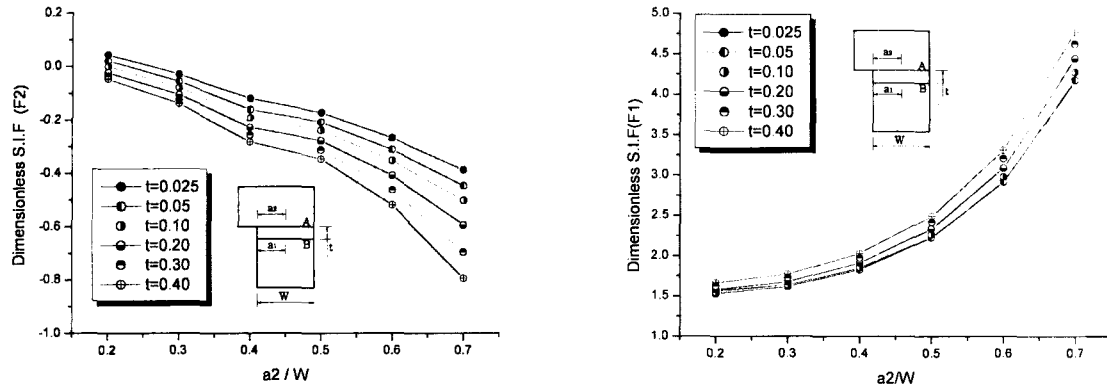


Fig. 7 Relationship between, F_2 , F_i and a_2/W for t Change

0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40인 경우에 대해 F 를 수치해석적으로 계산하였다. 수치해석상 결과로서 균열길이비에 대한 F_2 , F_i 를 Fig. 6과 Fig. 7에 필러메탈의 두께 t 의 변화에 따라 도시하였다. B면에서 F_2 는 t 가 0.025에서 0.1인 범위에서는 균열길이 증가에 따라 감소하다가 t 가 0.3이상의 값을 가지면 a_1/W 는 0.5를 기점으로 해서 t 가 0.2, 0.3, 0.4일 때 F_2 가 증가하였다. 또한 Fig 7과 같이 A면에서 F_2 는 균열길이 증가에 따라 급격히 증가하고, t 의 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다. F_i 는 A, B면에서 균열길이와 t 의 증가에 따라 증가하였다.

5. 결론

경계요소법을 이용하여 엔드밀의 브레이징 접합 강도평가를 목적으로 필러메탈의 종류와 기하학적인자의 변화에 따른 접합계면 균열의 응력확대계수의 거동을 검토한 결과 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모든 경우에 대해 이중재 무차원 응력확대계수 F_i 는 균열길이에 대해 증가하는 경향을 보였으며 F_2 는 감소하는 경향을 보였다. 또한, 작은 균열에서는 응력집중의 영향으로 F_i 가 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 필러메탈의 탄성계수 E_3 가 변하는 경우 F_2 는 E_3 의 증가와 균열길이의 증가에 따라 모두 감소하였고, 무차원 응력확대계수 F_i 는 E_3 의 증가와 균열길이의 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 보였다.

- (3) 필러메탈의 탄성계수 E_3 가 일정하고 탄성계수비 E_1/E_2 가 증가할 경우, 계면 B에서 무차원 응력확대계수는 E_1/E_2 의 증가에 따라 증가하였다.
- (4) 필러메탈의 두께 t 가 증가할 경우 무차원 응력확대계수 F_i 는 증가하였으며, 계면 A에서 t 가 0.3과 0.4일 때 보다 큰 F_i 를 가졌다.

Nomenclature

- t : Filled Metal Thickness
- W : 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 Filler Metal
- F_1 : Dimensionless SIF in Mode 1
- F_2 : Dimensionless SIF in Mode 2
- F_i : Dimensionless SIF in Dissimilar Materials

참고 문헌

- (1) 이수정 외 3인, "세라믹/금속브레이징 접합조인트의 고온접합강도에 관한연구", 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제2호, pp. 520~528, 1996.

- (2) Sherman, "The mechanical behavior of layed brazed metal/ceramic composites", *Materials Letters*, Vol. 33, pp. 255~260, 1998.
- (3) 朴相奩, "활성금속 브레이징 방법에 의한 세라믹스/금속접합기술", *大韓金屬學會報*, 제5권, 제2호, 1992.
- (4) 오환섭 외 2인, "이종재 브레이징 접합계면에서의 균열거동해석", *한국공작기계학회 추계학술대회 논문집*, pp. 454~458, 2001.
- (5) 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* pp. 55~510, 1989.
- (6) 오환섭, 양인수, "계면 및 계면주위 균열간섭거동", *한국자동차공학회논문집*, Vol. 7, 제1호, pp. 277~283, 1999.
- (7) 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(코스173)*, pp. 115~121, 1992.
- (8) 오환섭, 김시현, 김성재, "이종재 브레이징 접합계면의 응력해석", *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 769~772, 2001.
- (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 Engg.* 10, pp. 25~37, 1976.
- (11) Milton C. Shaw, "Metal Cutting Principles" Oxford University Press, New York, pp.363, 1984.
- (12) 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.