

이종접합재 접합계면의 응력해석

오환섭*, 김시현**, 김성재**, 양인수#

Stress Analysis of Brazed Interface in Dissimilar Materials by BEM

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

ABSTRACT

In this study, stress analysis using Boundary Element Method (BEM) was carried to investigate stress distribution in the brazing joint between a Hardmetal and a HSS. The two models were proposed to analyze the stress singularity in the interfaces of the brazing joint. The material type, thickness of the filler metal and the length of the vertical brazing adhesive are considered in the BEM analysis. As results, the peak point of the stress is founded to be in the lower interface of the brazed joint. It should be noted that the maximum stress of the peak point is being affected by the thickness and length of the brazing joint.

Key Words : Dissimilar materials(이종재), Boundary element method(BEM, 경계요소법), Brazed interface(브레이징 접합계면), Filler metal(필러메탈), Singularity(특이성), Adhesive(접합제)

1. 서론

초경과 같은 세라믹 재료는 금속재료에 비해 내열성, 내마모성, 내식성이 뛰어나고, 열팽창성이 낮고, 열전도성이 높으며, 높은 압축강도를 갖는 장점으로 인해 절삭공구, 센서, 집적회로기판, 터빈 및 고강도와 내열성이 함께 요구되는 구조물에 금속재료 대신 널리 이용되고 있다.

이러한 세라믹 재료의 우수한 특성에도 불구하고, 취성이 강하며 가공이 어렵기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위하여 인성이 풍부한 금속과의 접합이 요구되며 최근에 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.^{1,2}

브레이징(Brazing) 접합형 앤드밀(Endmill)은 솔리드(Solid)형 앤드밀에 비해 정밀도가 낮음에도 불

구하고 절삭속도, 공구수명, 난삭재의 가공 등의 관점에서 생산원가를 절감 할 수 있으므로 고속가공용 절삭공구로 각광 받고 있다. 그러나 브레이징 접합 후 냉각되는 과정에서의 이종재간의 열팽창계수 차로 인한 접합 잔류응력^{3,5}과 고속 절삭가공 중에 가해지는 과도한 하중으로 인해 Pre-crack이 발생하고, Spring back으로 인한 인장력이 생길 수 있으며 이러한 현상들이 접합계면의 강도를 크게 저하시킬 수 있다. 특히, 브레이징 접합에 의해 생성된 두 곳의 접합계면은 이종접합이므로 계면에서 응력 불연속이 되고, 응력집중이 발생하는 등 접합 강도에 큰 영향 미칠 것으로 생각되므로 접합계면을 중심으로 필러메탈(Filler metal)의 종류와 두께 문제를 고려한 응력해석은 매우 중요한 의미를 갖는다.⁶⁻⁸

접수일: 2002년 10월 11일; 게재승인일: 2003년 4월 23일
* 경희대학교 테크노공학대학 기계산업시스템공학부
** 경희대학교 대학원 기계공학과
교신저자: 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소
Email: winkyo@kopec.co.kr, Tel: (031) 289-3679

따라서 세라믹과 금속 접합체의 파단강도를 정확하게 평가하기 위해서는 먼저 접합계면에서의 응력상태를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 접합계면에서의 응력상태를 평가하는 방법들로는 초음파법, X선 회절법 등의 실험적 평가법과 수치해석법 즉, 경계요소법^{5,9}과 유한요소법^{3,4} 등을 이용하여 간편하게 응력상태를 예측할 수 있는 방법이 있으며 접합계면의 응력해석에는 경계요소법이 가장 우수한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 브레이징 접합재의 접합계면의 강도평가를 목적으로 경계요소법을 이용하여 필러 메탈의 종류(물성)와 접합의 기하학적 인자를 변화시키면서 접합계면의 응력해석을 수행하여 이종재 계면의 접합강도 평가 시 예상되는 기초적 사항에 대해 고찰하고자 한다.

2. 경계요소법의 이론 개요

2.1 경계요소법의 해석과정

선형 탄성체의 하중계의 평형방정식은

$$\sigma_{ij,j}^* + b_i^* = 0 \quad (1)$$

이다. 여기서, 체적력 b_i^* 는 $b_i^* = \Delta(p, q)e_i$, Δ 는 Dirac Delta 함수이다. 식 (1)에서 Betti의 상반정리를 이용해서 적분방정식을 유도한 다음 변위항 $U_{ij}(P, Q)$ 와 표면력항 $T_{ij}(P, Q)$ 는 기본해를 통한 기지의 양일 경우 내점 p의 변위를 구할 수 있고 내점 p를 경계상의 점 P로 가져가는 조작을 통해 다음과 같은 경계적분방정식을 구할 수 있다.

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

이중 재료에 대한 기본해로써 Hetenyi 해가 있으나 영역분할을 위해 Kelvin 해를 이용한다.¹⁰

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

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

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

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

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

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

2.2 BEM의 계면역학에의 적용

계면과 계면 혹은 계면과 계면이 교차하는 계면단에서는 일반적으로 응력이 무한대가 되는 소위 응력 특이성이 발생한다. 따라서 이 점이 파괴의 기점이 되므로 이종재의 강도평가에서는 이러한 응력 특이성을 정확히 평가 할 필요성이 대두된다.

이종접합재가 외력을 받는 경우 계면 근방의 응력을 σ_{ij} 는 계면단에서의 거리를 r이라 할 때 식 (5)와 같이 특이성이 생긴다.

$$\sigma_{ij} \propto \frac{1}{r^\lambda} \quad (5)$$

2차원 탄성론에 근거하면 특이성의 order λ 는 식 (6)의 특성 방정식에서 구할 수 있다.

$$D(\lambda: \theta_1, \theta_2, \alpha, \beta) = 0 \quad (6)$$

여기서 정의되는 재료상수는 Dunder's Parameter로

$$\alpha = \frac{\mu_1(k_2 + 1) - \mu_2(k_1 + 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)}, \quad \beta = \frac{\mu_1(k_2 - 1) - \mu_2(k_1 + 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)}$$

이다. $\theta_1 = -\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ 인 경우 $\lambda = 0.5 + i\varepsilon$ 가 되고,

이때 $\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(1-\beta)}{(1+\beta)}$ 가 되며, $\varepsilon = 0$ 인 경우는 균질재중의 균열과 같이 $1/\sqrt{r}$ 가 되지만, $\varepsilon \neq 0$ 인 경우는 진동 응력 특이성이 생긴다.

3. 수치해석모델

Fig. 1은 브레이징 접합된 엔드밀의 예를 표시한 것이다. 초경합금을 접합체로 하고 고속도강(HSS)부분을 피접합체로 하여 Ag계의 필러메탈로 접합되어 있음을 보여 준다.

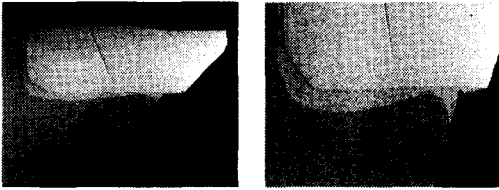


Fig. 1 Brazed interface of endmill

해석 모델은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 2가지로 선정 하였으며, 실측한 데이터를 바탕으로 단부가 존재하는 모델로 단순화하여 수치해석을 수행하였다. Model 1은 필러메탈의 두께와 탄성계수에 대한 영향을 살펴보기 위한 해석 모델이며, Model 2는 수직 접합부 길이에 대한 영향을 알아보기 위한 모델이다. 또한, 수치해석 시 수치해석의 정도와 계산의 효율성을 높이기 위해 등비수열로 요소분할 하였으며, 100N의 압축하중 조건에서 수치해석 하였다.

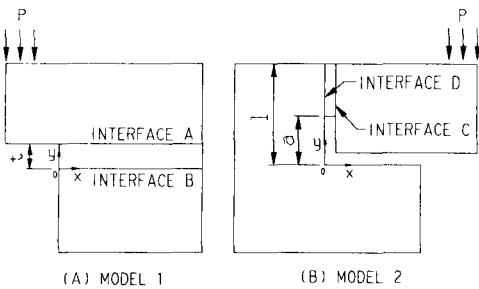


Fig. 2 Analysis model

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. 브레이징 접합계면에서의 BEM을 이용한 응력해석

4.1 필러메탈의 탄성계수 변화에 따른 접합계면의 응력해석

E_3 에 따른 접합계면의 응력분포를 알아보고자 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 응력을 해석하여 비교하였다. 수치해석 결과는 Fig. 3에서와 같이 E_3 가 증가할수록 B면에서는 peak가 형성되는 지점에서의 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 증가하였다. 한편 A면에서의 응력분포를 보면 Fig. 4에 나타난 바와 같이 B면과 같은 peak점은 발생하지 않고 계면끝단에서 응력특이성이 존재하였으며 E_3 가 증가할수록 응력은 끝단에서 $x=0.151$ 인 구간까지 증가하는 경향을 보였다.

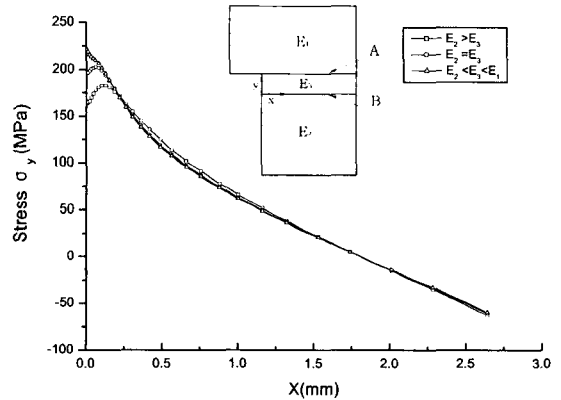


Fig. 3 σ_y distributions in the interface B by E_3 change

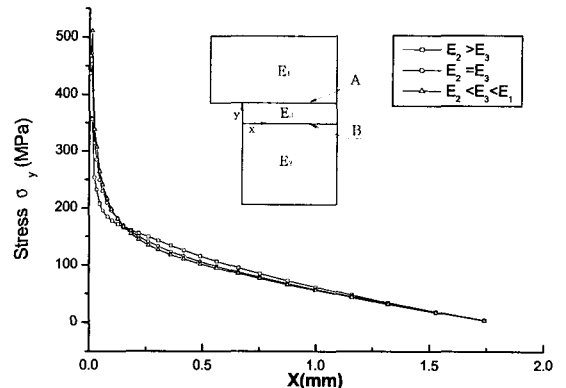


Fig. 4 σ_y distributions in the interface A by E_3 change

4.2 피접합체에 대한 접합체의 탄성계수비 변화에 따른 접합체면의 응력해석

E_1/E_2 가 1, 2.37, 5, 10, 100인 경우에 대해 각각의 응력을 해석하여 비교하였다. 수치해석 결과는 Fig.5와 같이 B면에서 E_1/E_2 가 증가할수록 Peak가 형성되는 지점에서의 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 4.1의 경향과는 달리 오히려 감소하였으며 각각 일정구간 내에서 E_1/E_2 가 증가할수록 응력분포는 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 그리고 Fig. 6과 같이 A면에서의 응력분포를 보면 peak점은 발생하지 않고 B면에서와 마찬가지로 E_1/E_2 가 증가할수록 일정한 구간까지 감소하다가 증가하는 경향 보였다. 또한 계면끝단에서 응력 특이성이 존재하였다.

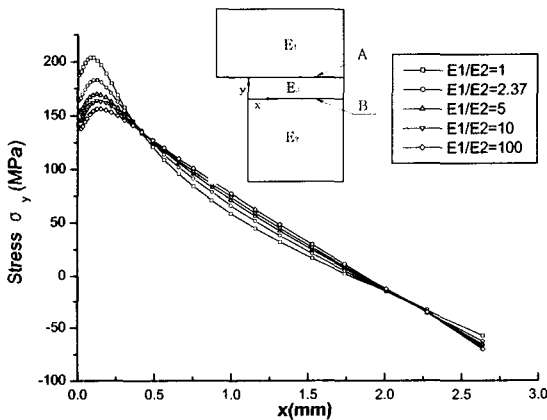


Fig. 5 σ_y distributions in the interface B by E_1/E_2

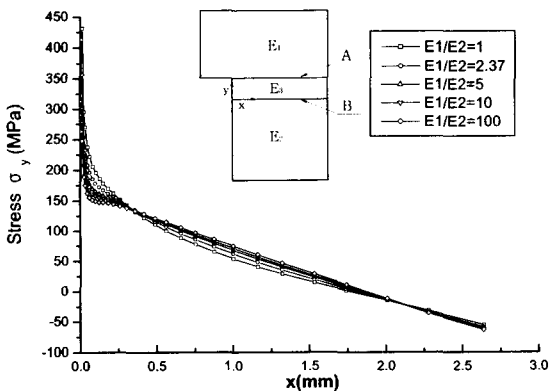


Fig. 6 σ_y distributions in the interface A by E_1/E_2

4.3 필러메탈의 두께 변화에 따른 접합체면에서의 응력해석

실측한 t 값 0.20을 기준으로 t 를 0.025, 0.1, 0.2, 0.3, 0.8, 1.6으로 변화시키면서 응력 해석하여 비교하였다.

수치해석 결과는 Fig. 7과 같이 B면에서 t 가 증가할수록 점차 완만한 곡선을 그리며 peak가 형성되는 지점에서의 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 감소하였으며 σ_{max} 되는 x 의 위치도 점차 증가함을 알 수 있었다. 한편, A면에서는 Fig. 8에서와 같이 t 가 증가할수록 σ_x, σ_y 응력은 peak점이 발생하는 구간은 생기지 않고 계면 끝단에서 응력특이성이 존재하며 두께 증가에 따라 미소한 감소를 보였다.

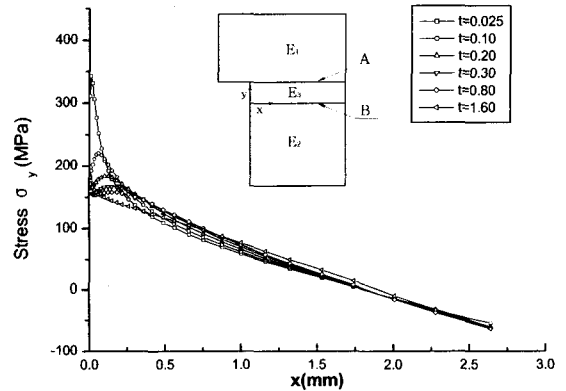


Fig. 7 σ_y distributions in the interface B by filler metal thickness

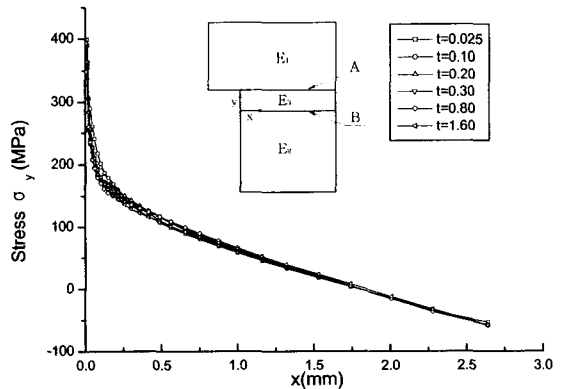


Fig. 8 σ_y distributions in the interface A by filler metal thickness

4.4 접합부 길이에 변화에 따른 접합계면에서의 응력해석

수직 접합부만 존재하는 경우 접합면의 길이 a/l 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6로 변화시키면서 수치 해석하여 비교하였다. Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 바와 같이 계면 C 및 D면의 $y=0.028253$ 인 지점에서 $(\sigma_y)_{max}$ 였으며, a/l 가 증가함에 따라 각각 음의 방향과 양의 방향으로 증가하였다. σ_x 는 a/l 는 0.1, 0.2, 0.3에서 $y=0$ 에서 거리 증가에 따른 응력분포는 상대적으로 완만하게 감소하였으나 a/l 가 증가할수록 y 가 증가함에 따라 급격히 감소하였다. D면에서의 σ_x 도 C면과 동일한 경향을 보였다.

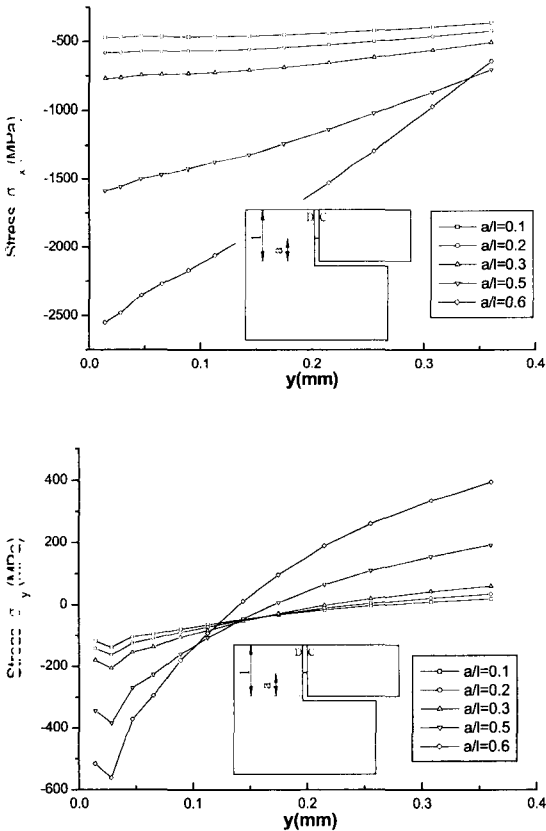


Fig. 9 σ_x, σ_y distributions in the interface C by joint length

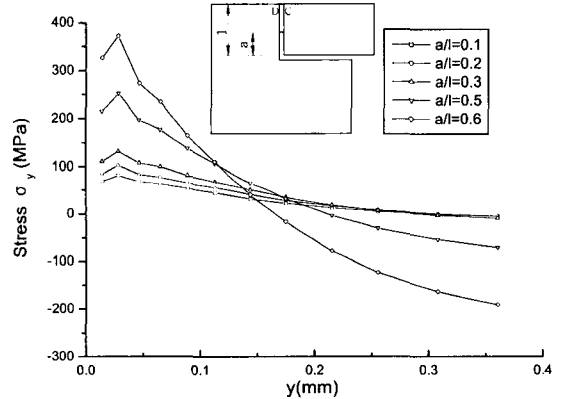
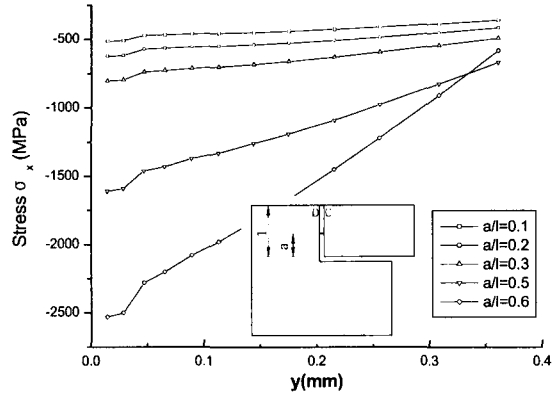


Fig. 10 σ_x, σ_y distributions in the interface D by joint length

5. 결론

엔드밀 날 끝단에 압축 하중이 작용할 때 필러 메탈의 종류(물성)와 접합의 기하학적 인자를 변화시키면서 경계요소법을 이용하여 브레이징 접합계면에서의 응력을 해석한 결과는 다음과 같다.

1) $E_2 < E_1, E_3 < E_1$ 의 조건에서 E_3 가 증가함에 따라 B면에서의 응력 분포 거동은 peak를 형성하면서 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 증가하였다. A면에서는 peak점은 발생하지 않고 계면 끝단에서 응력특이성이 존재하였으며, E_3 가 증가할수록 응력은 끝단에서 $x=0.151$ 인 구간까지 증가하는 경향을 보였다.

2) E_3 가 일정하고 B면에서 E_1/E_2 가 증가할수록 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 감소하고, 각 면에서의 응력분포

는 E_1/E_2 가 증가함에 따라 일정한 구간까지 감소하다가 증가하는 경향을 보였다.

3) 필러메탈의 두께가 증가함에 따라 B면에서는 $(\sigma_x, \sigma_y)_{\max}$ 가 감소하였으며, A면에서는 peak가 생기지 않고 계면 끝단에 응력특이성이 존재하였으며 미소한 감소 경향을 보였다.

4) 수직 접합부만 존재하는 경우 C, D면에서의 $(\sigma_y)_{\max}$ 는 a/l가 증가함에 따라 각각 음의 방향과 양의 방향으로 증가하였으며 σ_x 는 음의 방향으로 증가 하였다.

참고문헌

1. Park, S. W., "Joining of Ceramics/Metal using Active Metal Brazing," Bulletin of the Korean Institute of Metals & Materials, Vol. 5, No. 2, 1992.
2. Dov Sherman, "The Mechanical Behavior of Layed Brazded Metal/Ceramic Composites," Materials Letters 33, pp. 255-260, 1998.
3. Park, Y. C., Oh, S. W., Hue, S. C., Cho, Y. B., "Evaluation of Strength and Residual Stress in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS 304}$ Joint," Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 18, No. 1, pp. 101-112, 1994.
4. Lee, S. J., Jeong, M. Y., Lee, D. G., Koo, H. H., "High Temperature Flexural Strengths of the Ceramic-Metal Brazed Joints," Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 20, No. 2, pp. 520-528, 1996.
5. Ryoji Yuuki, Jin-Quan Xu, Siegfried Schmauder, "Simple Method to Analyze the Residual Thermal Stress of Dissimilar Materials and Some Applications," Seminar Material of Institute of Industrial Science of Univ. of Tokyo(Course 173), pp. 85-91, 1992.
6. Zhiyon He, Liping Ding "Investigation on Ag-Cu-Sn Brazing Filler Metals," Materials Chemistry and Physics 49, pp. 1-6, 1997.
7. Kim, J. H., Yoo, Y. C., "Brazing of Si_3N_4 and Ni-Cr Steel with Ag-Cu-Zr Braze Alloy," Journal of the Korean Institute of Metals & Materials, Vol. 34, No. 2, 1996.
8. Lee, W. C., Kang, C. S., "Effect of Brazing Variables on Interfacial Reaction and Bonding Strength of Alumina-Steel Joints," Journal of the Korean Institute of Metals & Materials, Vol. 29, No. 4, 1991.
9. Jin-Quan Xu, Ryoji Yuuki, "Boundary Element Elastic Analysis of Residual Stress in three Dimensional Joints Bonded with Dissimilar Materials," Seminar Material of Institute of Industrial Science of Univ. of Tokyo(Course 173), pp. 109-111, 1992.
10. Yang, I. S., Oh, H. S., "Impact of Cracks At and Around Interface of Dissimilar Materials," Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 7, No. 1, pp. 277-283, 1999.
11. ASM Handbook, "Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," Metals Handbook Vol. 2, 10th Edition, ASM International, pp. 699-719, 1990.
12. Oh, H. S., Kim, S. H., Kim, S. J., Yang, I. S., "Analysis of Crack Behavior of Brazed Interface in Dissimilar Materials using BEM," Transactions of the Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 91-97, 2002.
13. Milton C. Shaw, Metal Cutting Principles, Oxford University Press, pp. 363, 1984.