

이종재 브레이징 접합계면의 응력해석

오환섭(경희대학교 기계산업시스템공학부), 김시현*(경희대학교 대학원 기계공학과)
 김성재(경희대 대학원 기계공학과)

The Stress Analysis of Dissimilar Materials in Brazed Interface by BEM

Hwan-Sup Oh(Mech. Eng. Dept., KHU), Si-Hyun Kim(Mech. Eng. Dept of Graduate School, KHU)
 Seong-Jae Kim(Mech. Eng. Dept of Graduate School, KHU)

ABSTRACT

In this study, By employing two dimensional(2-D) Boundary Element Method(BEM) stress analysis was carried to investigate stress distributions on the brazing joint of a Hardmetal and a HSS. Two model was proposed to analyze stress singularity in brazed interface. The stress results from the BEM were considered influence of the kind of materials, thickness of filled metal and length of vertical brazing adhesive. From those obtained results, the peak point of stress was founded in the lower part of two interface was made by brazing. As the thickness and length changed, the maximum stress tended to change in the peak point.

Key Words : Dissimilar Materials(이종재), Boundary Element Method(경계요소법), Brazed Interface(브레이징 접합계면), Filler metal(삽입금속), Singularity(특이성), Adhesive(접합체)

1. 서론

역사적으로 볼 때 초경과 같은 세라믹재료는 내열성, 내마모성, 내식성 등이 금속재료에 비해서 뛰어나고 저 열팽창성, 고 열전도성, 높은 압축강도 인해 절삭공구, 센서, 집적회로기관, 터빈, 고강도 및 내열성이 함께 요구되는 구조물에 금속재료 대신 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.^(4,5)

Brazing접합형 엔드밀은 solid형 엔드밀에 비해 낮은 정밀도에도 불구하고 절삭속도, 공구수명, 난삭재의 가공등 생산원가의 절감을 도모할 수 있으므로 고속가공 절삭공구로 각광을 받고 있다.

하지만 Brazing 접합 후 고온에서 실온으로 냉각되는 과정에서 이종재료간의 열팽창계수의 차이로 인한 접합잔류응력^(1-3,6)과 고속절삭가공중 과도한 힘이 걸림으로 인해 Pre-crack이 발생하고 Spring back으로 인한 인장력이 생길 수 있으며 이러한 현상이 접합체의 접합계면강도를 크게 저하시킬 수

있다. 특히 Brazing에 의해 생성된 두 개의 접합계면은 모두 이종재접합이므로 접합면에서 응력은 불연속으로 되고 외부의 경계와 교차하는 접합면에서 응력집중현상으로 접합강도에 큰 영향 미칠 것으로 생각되어 filler metal의 종류와 두께 문제에 대한 응력해석은 중요하다.^(6,7,12)

따라서 세라믹/금속접합체의 파단강도를 정확히 하기 위해 접합계면에서의 응력상태를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 접합계면에서의 응력상태 평가방법은 초음파법, x선 회절법 등의 실험적평가법과 경계요소법^(8,9), 유한요소법⁽¹⁻³⁾등과 같은 간편하게 응력상태를 예측할 수 있는 수치해석적인 방법이 있으나 접합계면의 응력해석에는 BEM이 가장 우수한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 Brazing 접합형 엔드밀의 접합 강도 평가를 목적으로 filler metal의 종류(물성)와 접합의 기하학적인자를 변화시키고 BEM을 이용하여 filler metal을 중심으로 접합계면의 응력해석을 통하여 접합강도 평가시 예상되는 기초적 사항에 대해 고찰하고자한다.

2. 경계요소법의 이론 개요

2.1 경계요소법의 해석과정

선형탄성체의 하중계의 평형방정식

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

(1)식에서 Betti의 상반정리를 이용해서 적분방정식을 유도한 다음 $U_{ij}(P, Q), T_{ij}(P, Q)$ 는 기본해를 통한 기지의 양 일 경우 내점 p의 변위를 구할 수 있고 내점 p를 경계상의 점P로 가져가는 조작을 해서 다음과 같은 경계적분방정식을 구할 수 있다.

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

이종재료에 대한 기본해로써 Hetenyi 해가 있으나 영역분할을 위해 Kelvin 해를 이용한다.⁽¹³⁾

식(2)를 2차원 8절점요소를 사용하여 이산화과정을 통해 다음과 같은 대수방정식으로 변환 할수 있다.

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

N: 요소수, M^k : 형상함수, J : 자코비안,

ξ : 요소내 정규좌표계

C_{ij} 를 강제변위조건에 의해 구한후 정리하면 다음과 같은 모양이 된다. $[A]\{X\} = \{A\}$ (4)

$[A]$: $3 \times n_p$ 차수의 비대칭 정방행렬,

$\{X\}$: 미지량, $\{A\}$: 기지량, n_p : 절점의 총수

2.2 BEM의 계면역학에의 적용

계면과 계면 혹은 계면과 계면이 교차하는 계면단에서는 일반적으로 응력이 무한대가 되고 응력특이성이 발생한다. 이 점이 파괴기점과 강도저하를 초래할 수 있다. 이종접합재가 외력을 받는 경우 계면근방이 응력을 σ_{ij} 는 계면단에서 거리를 r이라할 때 다음과 같은 응력특이성이 생긴다.

$$\sigma_{ij} \propto \frac{1}{r^\lambda}$$

2차원탄성론에 근거하면 특이성의 order λ 는 다음 특이성방정식에서 구할수 있다.

$$D(\lambda; \theta_1, \theta_2, \alpha, \beta) = 0$$

여기서 정의되는 재료정수는 Dunder's Parameter로서

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

$$\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{2} \text{ 일 경우 } \lambda = 0.5 + i\epsilon \quad \epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(1-\beta)}{(1+\beta)}$$

$\epsilon=0$ 인 경우 균질재중 균열과 같이 $1/(r)^{1/2}$ 가 되지만 $\epsilon \neq 0$ 인 경우 진동응력특이성이 생긴다.

3. 수치해석모델

Fig.1은 Brazing접합된 endmill을 예를 표시한 것이다. 초경합금을 접합체, 고속도강(HSS)부분을 피접합체로 하고 Ag계의 filler metal로 접합되어 있음을 보여 준다.

해석모델은 실측치를 바탕으로 하여 단부가 존재하게 단순화시킨 모델을 채택하여 해석을 시행하였다. 단순화모델을 다음과 같은 2가지로 나누었다.

model 1은 filler metal 두께와 탄성계수에 대한 영향을 살펴보기 위한 것이고 model 2는 수직접합부 길이에 대한 영향을 알아보기 위한 것이며 수치해석의 정도와 계산을 효율성을 높이기 위해 요소분할은 등비수열로 하였다.

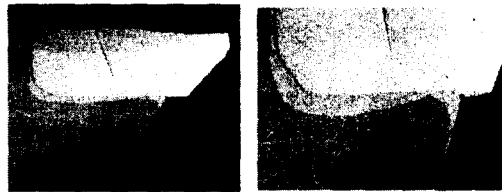


Fig. 1 Brazed Interface of Endmill

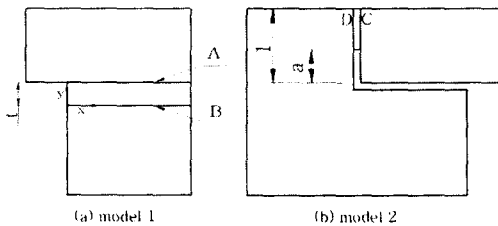


Fig. 2 Bem analysis model

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 응력해석

4.1 Filler metal의 탄성계수변화에 따른 접합계면의 응력해석

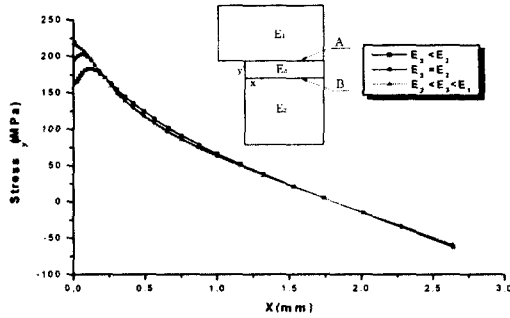


Fig. 3 σ_y distributions of E_3 change in the B interface

E_3 에 따른 접합계면의 응력분포를 알아보고자 E_3 를 $E_3 = E_2 < E_1$, $E_3 < E_2 < E_1$, $E_2 < E_3 < E_1$ 일 경우에 대해 각각의 응력을 해석하여 비교하였다. 수치해석상 결과는 Fig. 3과 같이 B면에서 E_3 가 증가할수록 peak가 형성되는 지점에서의 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 증가하였다.

A면에서의 응력분포를 보면 B면에서와 같은 peak점은 발생하지 않고 E_3 가 증가할수록 응력은 $x=0.151$ 인 구간까지 증가하는 경향을 보였으며 $E_3 = E_2 < E_1$, $E_3 < E_2 < E_1$ 의 응력은 동일한 값을 유지했다.

4.2 피접합체에 대한 접합체의 탄성계수비 변화에 따른 접합계면의 응력해석

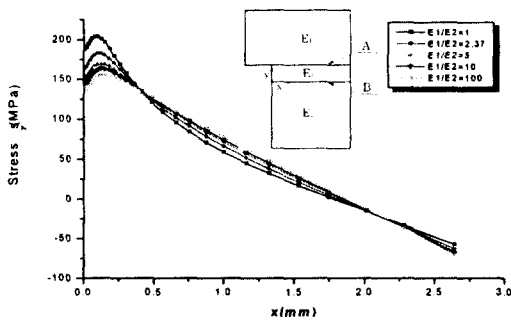


Fig. 4 σ_y distributions of E_1/E_2 change in the B interface

$E_1/E_2=1, 2.37, 5, 10, 100$ 에 대한 경우에 대해 각각의 응력을 해석하여 비교하였다. 수치해석결과는 Fig. 4와 같이 B면에서 E_1/E_2 가 증가할수록 Peak가 형성되는 지점에서의 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 4.1절의 경향과는 달리 오히려 감소하였으며 각각 일정구간내에서 E_1/E_2 가 증가할수록 응력분포는 감소하다가 증가하는 경향을 보였다.

A면에서의 응력분포를 보면 peak점은 발생하지 않고 B면에서와 마찬가지로 E_1/E_2 가 증가할수록 일정한 구간까지 감소하다가 증가하는 경향 보였다.

4.3 Filler Metal 두께변화에 따른 접합계면에서의 응력

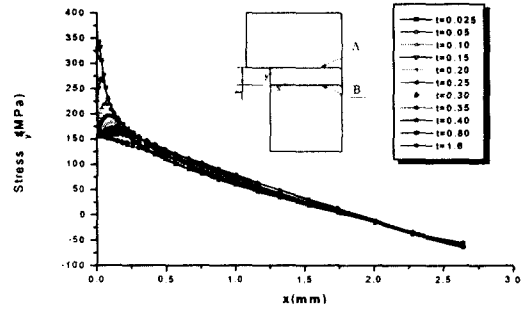


Fig. 5 σ_y distributions of filler metal Thickness change in the B interface

실측한 $t = 0.20$ 을 기준으로 $t = 0.025, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40$ 으로 변화시키면서 응력을 해석하여 비교하였다.

수치해석결과는 Fig. 5와 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.

A면에서는 t 가 증가할수록 σ_x, σ_y 응력은 peak점이 발생하는 구간은 생기지 않고 미소한 감소를 보였다.

4.4 접합부 길이에 변화에 따른 접합계면에서의 응력해석

수직접합부만 존재하는 경우 접합면의 길이 $a/l = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6$ 로 변화시키면서 응력을 해석하여 비교하였다. Fig 6와 같이 C,D면에서 $y=0.028253$ 인 지점에서 $(\sigma_y)_{max}$ 였으며 a/l 가 증가함에 따라 각각 음의 방향과 양의방향으로 증가하였다. σ_x 는 $a/l = 0.1, 0.2, 0.3$ 에서 $y=0$ 에서 거리 중

가에 따른 응력분포는 상대적으로 완만하게 감소하였으나 a/l 가 증가할수록 y 가 증가함에 따라 급격히 감소하였다. D면에서 σ_x 도 C면과 동일한 경향을 보였다.

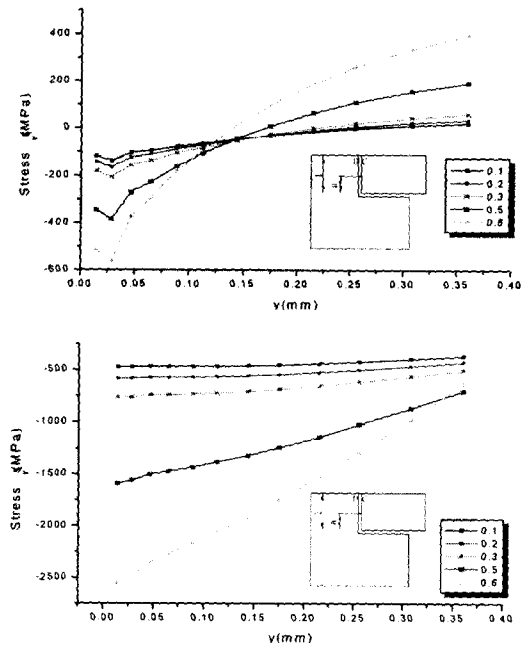


Fig. 6 σ_y distributions of each joint-length change in the C interface

5. 결론

엔드밀 날 끝단에 압축분포하중이 작용할 때 filler metal의 종류(물성)와 접합의 기하학적인자를 변화시키면서 Bem을 통해 Brazing접합계면의 응력해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) $E_2 < E_1, E_3 < E_1$ 의 조건에서 E_3 증가에 따라 B면의 응력은 peak를 형성하면서 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 증가하였다. A면은 E_3 가 증가할수록 응력은 $x=0.151$ 구간까지 증가하는 경향을 보였으며 $E_3 = E_2 < E_1, E_3 < E_2 < E_1$ 의 응력은 동일한 값을 유지했다.
- 2) E_3 가 일정하고 B면에서 E_1/E_2 증가할수록, $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 감소하고 각 면에서의 응력분포가 모두 E_1/E_2 가 증가함에 따라 일정한 구간까지 감소하다가 증가하는 경향을 보였다.
- 3) filler metal의 두께가 증가함에 따라 B면에서의 $(\sigma_x, \sigma_y)_{max}$ 가 감소하고 A면에서는 peak가 생기지 않고 미소한 감소를 보였다.

- 4) 수직접합부만 존재할 경우 C,D면에서 $(\sigma_y)_{max}$ 는 a/l 가 증가함에 따라 각각 음의 방향과 양의방향로 증가하였으며 σ_x 은 음의 방향으로 증가하였다.

참고문헌

1. 박영철, 오세옥, 허선철, 조용배, " $Si_3N_4/SUS304$ 접합재의 잔류응력 및 강도평가", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제1호, pp 101-112 1994.
2. 허장옥, 小林英男, "세라믹/금속접합잔류응력 3차원과 2차원 유한요소해석의 비교" 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 656-661. 1995
3. 이수정, 정명영, 이대길, 구형희, " 세라믹/금속 브레이징 접합조인트의 고온접합강도에 관한연구, 대한기계학회논문집(A) 제20권 제2호, pp. 520-528, 1996
4. 朴相奭 "활성금속 브레이징 방법에 의한 세라믹스/ 금속접합기술" 大韓金屬學會報 제5권 제2호 1992. 6
5. Dov Sherman "The mechanical behavior of layed brazed metal/ceramic composites" Materials Letters 33. pp. 255-260 1998.
6. Zhiyon He, Liping Ding "Investigation on Ag-Cu-Sn Brazing filler Metals" Materials Chemistry and Physics 49. 1-6. 1997
7. 이종현, 류연철 "Ag-Cu-Zr합금에 의한 Si_3N_4 /니켈크롬강의 브레이징" 대한금속학회지 Vol. 34, No. 2, 1996.
8. 結城 良治, 許 金泉, Siefried schmauder "異材接合 残留熱應力のBEMによる簡易解析法とその應用" 東大生研セミナーテキスト, pp 85-91
9. 結城 良治, 許 金泉, "3次元異材接合の接合残留應力のBEM 弾性解析" 東大生研セミナーテキスト, pp 109-1117.
10. 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
11. Milton C. Shaw, "Metal Cutting Principles " Oxford University Press, New York, pp.363
12. 이우천, 강춘식 "알루미늄-강 접합부의 계면 반응과 접합강도에 대한 브레이징 변수의 영향" 대한금속학회지 Vol. 29, No. 4. 1991
13. 오환섭, 양인수, 이정우 "계면 및 계면주위 균열간섭거동" 한국자동차공학회추계학술논문집, Vol. 1 pp. 145-150 1996.