

〈논 문〉

세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성의 해석

김기성* · 김희송** · 정남용***

(1995년 10월 16일 접수)

Analysis of Stress Singularity on Ceramics/Metal Bonded Joints

K. S. Kim, H. S. Kim and N. Y. Chung

Key Words : Ceramics/Metal Bonded Joint(세라믹/금속 접합재), Stress Singularity(응력특이성), Residual Stress(잔류응력), Stress Distribution(응력분포), Interface Edge(계면단), Boundary Element Method(경계요소법)

Abstract

With increasing use of ceramics/metal bonded joints, It is required to analyze the residual stress distribution and stress singularity at an interface edge for its bonded joints. In this paper, the residual stress distribution and stress singularity index of the ceramics/metal bonded joints were analyzed by using 2-dimensional elastic boundary element method. The variations of residual stress distribution and stress singularity index are studied with changes for the combinations of ceramics/metal, thickness of interlayer and temperatures on 4-point bending specimens of ceramics/metal bonded joints.

1. 서 론

세라믹은 고강도, 내열성, 내마모성 및 내식성이 우수하지만 인성이 부족한 결점때문에 구조용 재료로 사용하기가 곤란하므로, 세라믹의 우수한 특성을 구조재료로 활용하기 위해서는 세라믹/금속 접합재의 사용이 불가피한 실정이고, 이에 대한 연구가 시급히 요망되고 있다. 세라믹과 금속접합은 일반적으로 인성이 큰 중간재를 삽입하여 고온에서 접합하기 때문에 냉각시 양 재료의 선팽창계수와 탄성계수의 차이로 접합계면단에서는 접합 잔류응력으로 인한 응력특이성이 발생하고, 이 접합 잔류응력특이성은 실제 작용하중에 의한 응력특이성과 중첩되어 접합강도에 큰 영향을 주게 된다.

최근 세라믹/금속 접합재의 잔류응력에 관한 많

은 연구결과가 보고^(1~4)되고 있지만, 응력특이성을 명확히 한 연구는 거의 없고, 강도평가방법도 미확립된 상태이다. 접합강도의 향상, 신뢰성의 확보 및 접합강도를 효과적으로 평가하기 위해서는 접합계면단의 접합 잔류응력에 대한 고정밀도의 응력해석이 우선되어야 하고, 이 응력해석 결과를 이용한 응력특이성의 해석이 매우 중요하다.^(5,6)

따라서, 본 연구에서는 세라믹/금속 접합재에 대한 강도평가법⁽⁷⁾을 확립하기 위하여 세라믹/금속 접합재의 체계적인 상호조합과 중간재의 영향 및 온도변화, 작용하중 등에 의한 접합 잔류응력의 분포^(8,9)와 응력특이성지수를 4점 굽힘시험편^(10,11)에 대해서 2차원 탄성 경계요소법을 이용하여 해석하고, 그 유효성을 검토하였다.

2. 접합 잔류응력의 BEM 해석

2.1 세라믹/금속 접합재의 모델설정

세라믹재료로는 질화규소(Si₃N₄)와 알루미늄나(Al₂

*회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

**회원, 단국대학교 기계공학과

***회원, 숭실대학교 기계공학과

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio, ν	Thermal expan. coef. $\alpha (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
Si ₃ N ₄	304	0.27	3.0
Al ₂ O ₃	359	0.22	7.5
STS304	193	0.30	16.5
SM45C	206	0.30	12.0
Cu	108	0.33	17.7

O₃)를 사용하고, 금속재료로는 오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 기계구조용 탄소강(SM45C)을 상호 접합하고 중간재료로는 구리(Cu)를 사용하였다.

각 재료에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

BEM 해석에 적용한 모델의 형상은 Fig. 1과 같고, 중간재의 두께(h)는 0, 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm로 변화시켰다.

또한, 온도변화 및 작용하중에 의한 응력특이성을 검토하기 위하여 접합조건은 각각의 온도를 300°C, 500°C, 800°C에서 10⁻⁵ torr의 진공상태로 10분간 유지하였으며, 이때 진공로의 승온속도는 5.3 °C/min 냉각속도는 5 °C/min가 되도록 하였다. 4점 굽힘하중은 20 N, 50 N, 100 N으로 변화시켜 가면서 해석을 실시하였다

2.2 BEM에 의한 2차원 접합 잔류응력

2차원 열탄성 기초이론에 의한 변형률과 응력의 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{bmatrix} = \frac{1}{E^*} \begin{bmatrix} 1 & -\nu^* \\ -\nu^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha^* \Delta T \\ \alpha^* \Delta T \end{bmatrix} \quad (1)$$

(plane stress)

여기서, E는 세로탄성계수, ν 는 푸아송비, α 는

선팅창계수, ΔT 는 온도차이고, $\epsilon t = \alpha^* \Delta T$ 는 열 변형률을 의미한다. 또한, 평면변형률 상태에서는 다음 식과 같이 된다.

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad \nu^* = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad \alpha^* = (1+\nu)\alpha \quad (2)$$

(plane strain)

Fig. 1에서 접합층의 두께 h=0일 때, 접합계면상의 임의의 점 O(0, y)에 있어서

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2 \\ v_1 + \alpha_1^* y \Delta T &= v_2 + \alpha_2^* y \Delta T \\ t_1 &= -t_2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, u, v는 각 재료의 x, y 방향에 대한 계면상의 변위이고, t는 포면력이다.

BEM 해석에서는 재료 1과 재료 2, 또는 중간재를 각각 영역분할하고, 각 영역에 대한 계수행렬을 작성한 후, 계면상에서 식 (3)의 구속조건을 만족하도록 2개씩의 영역을 결합하여 해석하면, 열탄성 해석이 아닌 정탄성해석 프로그램을 사용하여도 계산이 가능하다.

2.3 세라믹/금속 접합재의 잔류응력 해석

세라믹/금속 접합재의 접합강도를 평가하기 위한 응력특이성지수의 해석은 접합 계면단에 대한 고정밀도의 응력해석이 우선되어야 한다. 본 연구에서는 Kelvin의 기본해를 이용한 2차원 BEM 탄성해석을 평면변형률 상태에서 실시하였다. 각 모델에 대해서 영역분할법으로 isoparametric요소를 사용하고, 전체 요소 분할수는 접합층이 없는 2개 영역의 경우는 144개, 접합층이 존재하는 3개 영역의 경우는 244개로 하였다. 특히 접합계면단에 대한 정밀한 응력분포를 해석하기 위하여 계면단 부근에는 sub요소를 사용하였다.

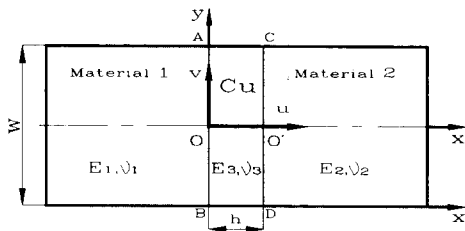


Fig. 1 Configuration of ceramics/metal bonded joint

2.3.1 접합층이 없는 경우(h=0)

접합층이 없고 온도차가 500°C로 일정할 때, 세라믹/금속 접합체의 상호조합에 대한 접합 잔류응력 만에 의한 수직 및 전단응력 분포를 x' 상에서 y방향으로의 거리에 따라 무차원 (r/W)하여 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 이때 각 잔류응력은 $\sigma_o = |E_1(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T|$ 로 무차원하여 표시하였다. 여기서, E_1 은 재료 1의 세로탄성계수, α_1 , α_2 는 각각 재료 1과 재료 2의 선팽창계수이고 ΔT 는 온도차이다. 각 응력분포는 계면단에서 상당히 집중되는 현상을 보여주고, 동일 온도에서 탄성계수의 비가 증가 함에 따라 수직 및 전단응력의 크기도 다소 증가하였다. 수직응력은 탄성계수의 비가 가장 큰 Al₂O₃/STS304 ($E_1/E_2=1.8601$)를 접합하였을 때 가장 크게 나타났고, 탄성계수의 비가 가장 작은 Si₃N₄/SM45C ($E_1/E_2=1.4757$)의 접합에서 가장 완화된 경향을 보이며 감소하였다. 전단응력은 이와 반대로 탄성계수의 비가 가장 작은 Si₃N₄/SM45C ($E_1/E_2=1.4757$)에서 제일 크게 나타났다.

Fig. 4는 4점 굽힘시험편의 형상과 치수, 시험방법을 도시한 것으로 P는 작용하중, h는 접합층의 두께이며 시험편의 높이는 3 mm, 하부 지지점간 거리는 30 mm, 상부 하중점간 거리 10 mm로 하였다. Fig. 5는 접합층의 두께 h=0일 경우 굽힘하중을 20 N으로 일정하게 작용시켰을 때 세라믹/금속 접합체의 상호조합에 대한 수직 및 전단응력 분포를 거리에 따라 무차원화하여 나타낸 것으로 온도차에 의한 응력분포 보다 하중에 의한 잔류응력 값이 크게 나타남을 알 수 있으며 수직 및 전단응력은 탄성계수의 비가 가장 큰 Al₂O₃/STS304의

접합의 경우에 가장 크게 나타났다. 이때 각 응력은 $\sigma_b=6M/BW^2$ 로 무차원하였으며 여기서, M은 굽힘모멘트, B는 시험편의 폭, W는 시험편의 높이이다.

또한 접합층이 없고 온도차가 500°C로 일정할 때, Fig. 4와 같이 4점 굽힘시험법에 의한 작용하중을 20 N, 50 N, 100 N으로 변화시켜 가면서 Si₃N₄/SM45C에 대한 접합 잔류응력과 작용하중의 중첩에 의한 수직 및 전단응력분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

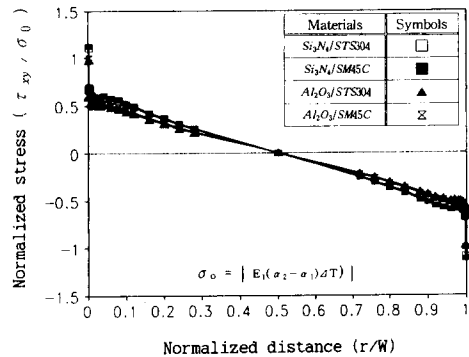


Fig. 3 Shear stress distribution at the interface of ceramics/metal bonded joint ($\Delta T=500^\circ\text{C}$)

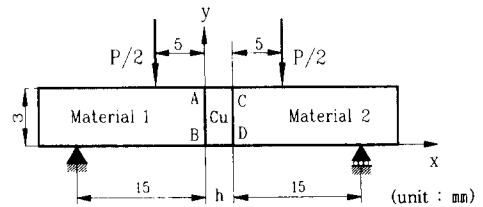


Fig. 4 4-Point bending specimen and its test method

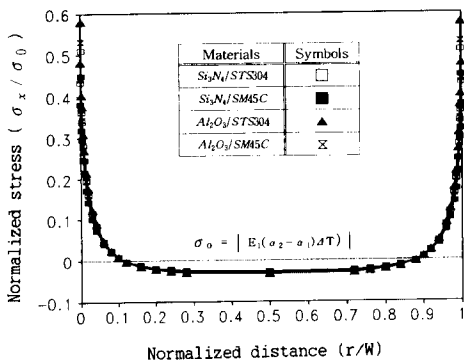


Fig. 2 Normal stress distribution at the interface of ceramics/metal bonded joint ($\Delta T=500^\circ\text{C}$)

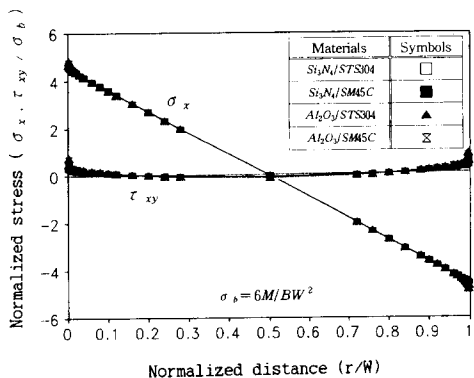


Fig. 5 Stress distribution at the interface of ceramics/metal bonded joint ($P=20\text{N}$)

Fig. 6은 작용하중이 증가할수록 수직응력이 급격하게 증가하는 현상을 보여주고 있으며, Fig. 7에서 4점 굽힘시험편에 대한 전단응력분포는 작용하중이 증가함에 따라 시험편의 중앙부분에서는 포물선에 가까운 응력분포를 보여주고, 계면단 근방

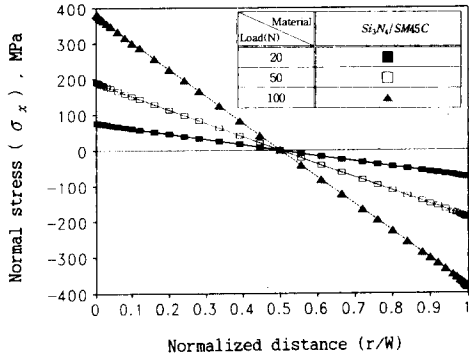


Fig. 6 Normal stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint ($\Delta T=500^\circ\text{C}$)

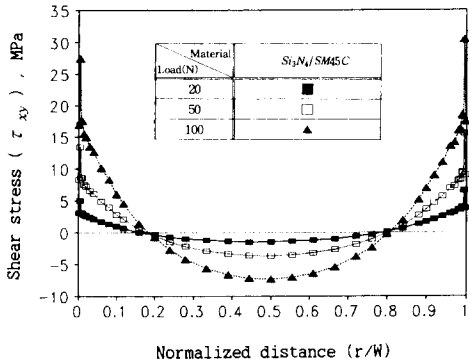


Fig. 7 Shear stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint ($\Delta T=500^\circ\text{C}$)

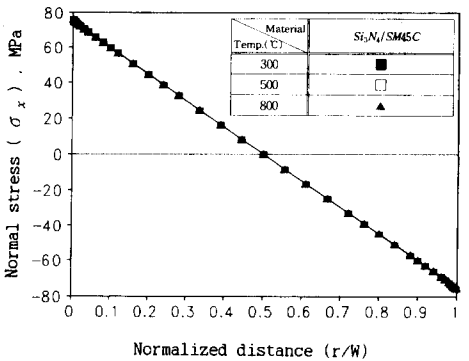


Fig. 8 Normal stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint ($P=20\text{ N}$)

에서는 응력이 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다.

또한, 굽힘하중을 20 N으로 일정하게 유지시키고, 접합온도를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시킬 때 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ 의 시험편에 대한 수직 및 전단응력분포를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 도시하였다.

각 응력분포는 접합잔류응력 만에 의한 것보다는 작용하중의 중첩에 의한 영향으로 계면단에서 상당히 집중되는 현상을 보여 주고 있으며 온도가 증가할수록 계면단 부근에서의 수직 및 전단응력은 다소 감소하는 경향을 나타내고, 하중이 증가할수록 수직 및 전단응력은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

2.3.2 접합층이 존재하는 경우

접합층의 두께(h)를 0.2 mm로 일정하게 유지하고, 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시킬 때, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 에 대한 수직 및 전단응력의 분포

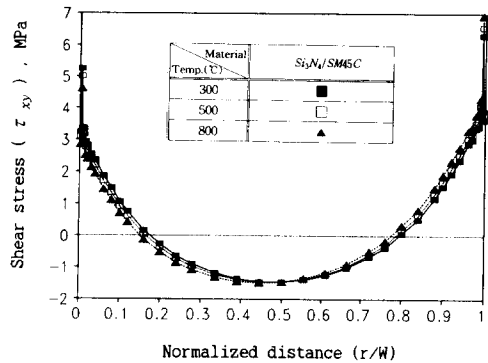


Fig. 9 Shear stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint ($P=20\text{ N}$)

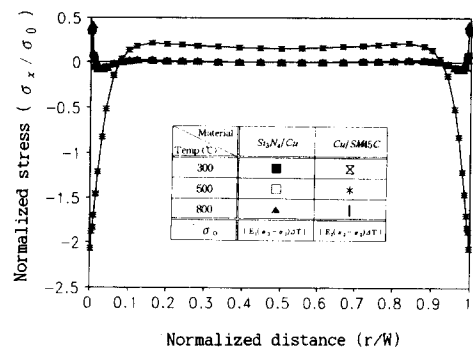


Fig. 10 Normal stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint ($h=0.2\text{ mm}$)

를 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 도시하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Fig. 1에서 세라믹측 계면 AB와 금속측 계면 CD에 대한 잔류응력을 도시한 것으로, 세라믹측 계면과 금속측 계면의 응력분포는 상당한 차이를 보여주고 있다. 그러나 온도변화에 따른 수직 및 전단응력의 변화는 접합계면단을 제외하고는 거의 없는 것을 알 수 있다.

온도변화를 500°C로 일정하게 유지하고, 접합층의 두께를 변화시켜 가면서 Si₃N₄/Cu/SM45C를 접합시켰을 때, 세라믹측 계면 AB와 금속측 계면 CD에 대한 수직 및 전단응력의 분포를 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 도시하였다.

Fig. 12에서 접합층의 두께가 증가할수록 세라믹측 계면 AB와 금속측 계면 CD에 대한 수직응력은 세라믹측 계면에서보다 금속측 계면에서 많이 완화되는 것을 알 수 있다.

Fig. 13에서 접합층의 두께가 증가할수록 세라믹측 계면에 대한 전단응력의 변화는 적지만, 금속측

계면에서의 변화는 급격히 감소한다. 또한 탄성계수의 비가 감소함에 따라 금속측 계면에 대한 전단응력은 완화되지만, 세라믹측 계면에서는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

접합층의 두께(h)를 0.2 mm, 4점 굽힘시험편에 대한 작용하중을 20 N으로 일정하게 유지하고, 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시킬 때, Si₃N₄/Cu/SM45C 시험편에 대한 수직 및 전단응력의 분포를 Fig. 14와 Fig. 15에 각각 도시하였다.

접합잔류응력 반에 의한 경우에는 달리 전단응력에 의한 응력분포는 세라믹측 계면 AB에서 크게 나타나며, 수직응력의 응력분포는 세라믹측 계면과 금속측 계면이 거의 변화가 없었다. 이는 굽힘하중이 중첩되므로써 응력집중현상이 세라믹측 계면을 따라 가중됨을 알 수 있다. 이때 온도변화에 따른 수직 및 전단응력의 변화는 계면단 부근에서 미소하게 감소하였다. 또한 수치해석 결과 온도만에 의한 잔류응력에 비하여 순수 굽힘하중에 의한 응력

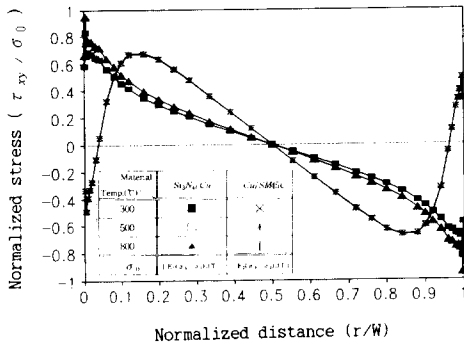


Fig. 11 Shear stress distribution at the interface of Si₃N₄/Cu/SM45C bonded joint (h=0.2 mm)

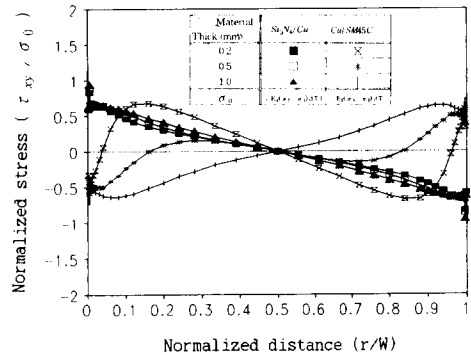


Fig. 13 Shear stress distribution at the interface of Si₃N₄/Cu/SM45C bonded joint (ΔT=500°C)

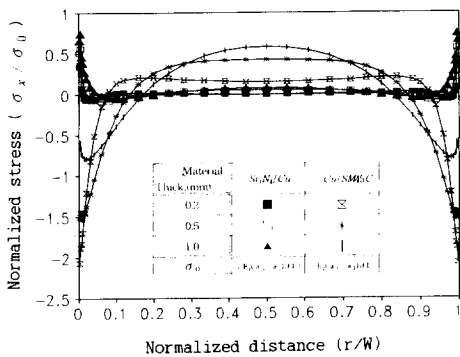


Fig. 12 Normal stress distribution at the interface of Si₃N₄/Cu/SM45C bonded joint (ΔT=500°C)

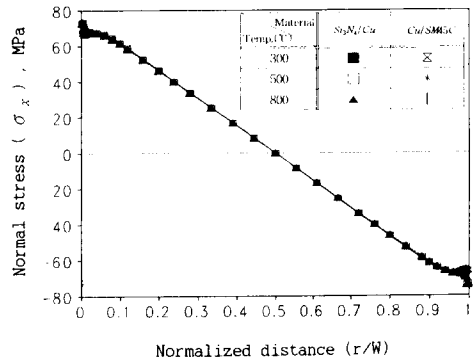


Fig. 14 Normal stress distribution at the interface of Si₃N₄/Cu/SM45C bonded joint (h=0.2 mm, P=20 N)

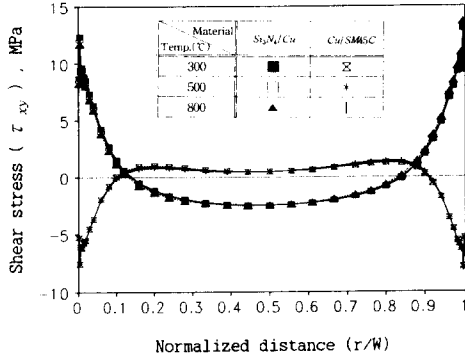


Fig. 15 Shear stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint ($h=0.2$ mm, $P=20$ N)

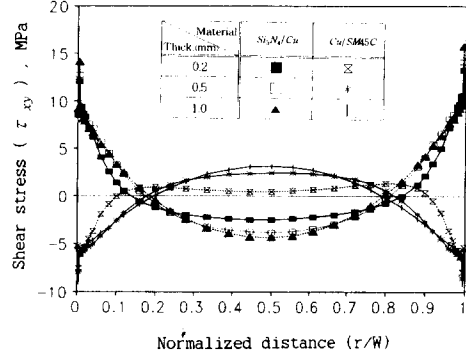


Fig. 17 Shear stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint ($\Delta T=500^\circ\text{C}$, $P=20$ N)

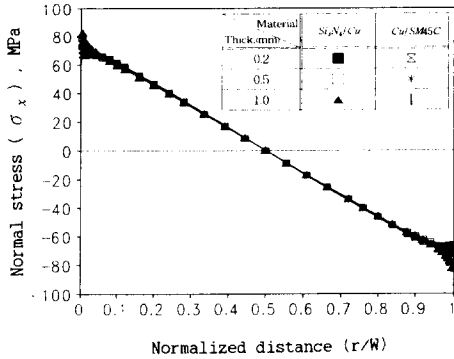


Fig. 16 Normal stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint ($\Delta T=500^\circ\text{C}$, $P=20$ N)

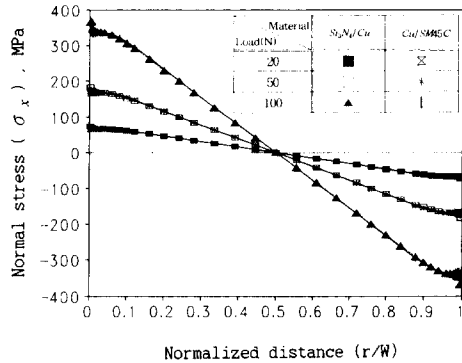


Fig. 18 Normal stress distribution at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint ($h=0.2$ mm, $\Delta T=500^\circ\text{C}$)

값이 월등히 크게 나타나므로 Fig. 14, Fig. 15에 나타난 응력분포는 순수 굽힘하중만에 의한 수직 및 전단응력의 응력분포와 경향이 같음을 알 수 있었다.

온도변화를 500°C , 굽힘하중을 20 N으로 일정하게 유지하고, 접합층의 두께를 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm로 변화시켜 가면서 접합시킨 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 시험편에 대한 세라믹측 계면과 금속측 계면에 대한 수직 및 전단응력의 분포를 Fig. 16과 Fig. 17에 각각 도시하였다.

Fig. 17에서는 금속측 계면에서보다 세라믹측 계면에서 전단응력 값이 크게 나타남을 알 수 있으며, 접합층의 두께가 증가할수록 세라믹측 계면과 금속측 계면에 대한 수직 및 전단응력이 계면단 부근에서는 복잡하게 증가됨을 알 수 있다.

온도차를 500°C , 접합층의 두께를 0.2 mm로 일

정하게 유지하고, 굽힘하중을 20 N, 50 N, 100 N으로 변화시켜 가면서 작용시킨 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 시험편에 대한 해석결과를 Fig. 18과 Fig. 19에 각각 도시하였다. 그림에서 작용하중이 증가할수록 세라믹측 계면과 금속측 계면에 대한 수직 및 전단응력이 급격히 증가됨을 알 수 있으며, 세라믹측 계면에서의 전단응력 값이 금속측 계면에서보다 훨씬 큰 폭으로 증가되는 경향을 보이고 있다. 이는 세라믹/금속 접합재에 대한 파괴는 세라믹측 계면을 따라 파괴 될 가능성을 암시하고 있다.

이와 같이 접합온도 만에 의한 접합계면단의 잔류응력분포가 매우 복잡하고, 가혹한 응력집중현상을 나타내는데, 여기에 작용하중이 중첩되면 응력집중 현상은 더욱 가중되어 예기치 않은 파괴를 이룰 우려가 있다.

따라서, 이러한 응력분포 현상을 충분히 고려하

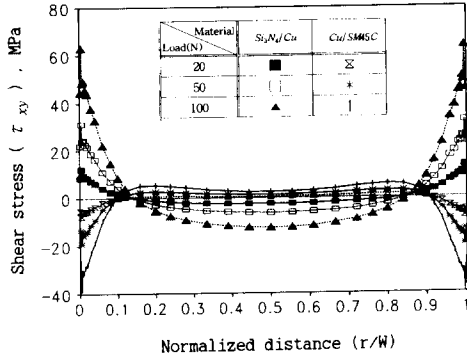


Fig. 19 Shear stress distribution at the interface of Si₃N₄/Cu/SM45C bonded joint (h=0.2 mm, ΔT=500°C)

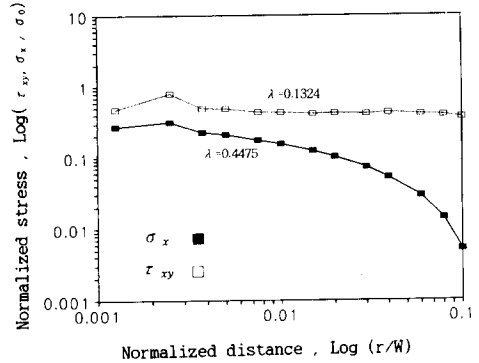


Fig. 20 Calculation of stress singularity index at a bonded interface edge

지 않고서는 세라믹/금속 접합재에 대한 접합강도의 효과적인 평가는 곤란하므로, 이러한 현상을 충분히 고려한 정량적이고, 효과적인 파괴지배인자에 의한 접합강도를 평가하기 위해서는 접합계면단의 응력특이성지수를 이용한 평가가 요망된다.

3. 세라믹/금속 접합시험편에 대한 응력특이성

3.1 작용하중에 의한 응력특이성

잔류응력이 존재하지 않고, 작용하중 만에 의한 응력특이성지수는 다음 식과 같이 주어진다.⁽²⁾

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda}) \quad (4)$$

여기서, r 은 접합계면단으로부터의 거리이고, λ 는 응력특이성지수이다.

3.2 잔류응력의 특이성

이종접합재의 잔류응력은 등온 외력부하에 대한 응력특이성과는 다르게 Dunders 파라미터 α, β 가 다음 식으로 표시될 때, 잔류응력의 특이성은 다음과 같이 된다.⁽²⁾

$$\alpha(\alpha - 2\beta) \leq 0 : (\text{equal, good pair})$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\log r) \quad (5)$$

$$\alpha(\alpha - 2\beta) > 0 : (\text{bad pair})$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda}) + \sigma_{ij}(\log r) \quad (6)$$

등온 외력부하가 작용할 때, equal pair 및 good pair에서도 $\log r$ 의 대수형 잔류응력 특이성이 존재하고, bad pair의 경우는 $r^{-\lambda}$ 와 $\log r$ 의 특이성

이 공존하는 것을 보고하였다.⁽³⁾

3.3 잔류응력특이성의 해석

접합 잔류응력에 대한 BEM 해석결과를 이용하여 응력특이성지수 λ 를 계산하였다.

Fig. 20은 접합층이 존재하지 않을 때, 온도변화 500°C에 대한 수직 및 전단응력의 해석결과를 나타내는 Fig. 2와 Fig. 3을 이용하여 응력특이성지수 λ 를 구하는 방법을 대수그래프에 도시한 예이다. 계면단의 응력분포가 무한대로 되는 경향을 보이므로 계면단에서의 거리 r 에 대하여 응력을 외삽하여 그 기울기를 λ 로 하였다.

식 (5)와 식 (6)로부터 알 수 있듯이 전단응력에 의해서는 대수형 잔류응력특이성이 존재하므로 대수그래프상에서 기울기의 직선성이 잘 유지되고 있지만, 수직응력에 대해서는 $r^{-\lambda}$ 와 $\log r$ 이 공존하므로 대수그래프상에서 곡선적으로 변화하였다. 이 경우 계면단 근방에 대한 응력들을 외삽하여 기울기 λ 를 구하는 방법을 나타내고 있다. 이때 계면단 근방에 대한 응력값을 취하는 방법에 따라 λ 의 값은 임의성을 가지므로, 본 연구에서는 진동응력 부분을 제외한 $\log(r/W) = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ 범위에서 계산하였다. 접합층이 존재하는 경우도 동일한 방법으로 외삽하여 그 기울기 λ 를 계산하였다.

3.4 하중과 잔류응력의 중첩에 의한 응력특이성의 해석

Fig. 6~Fig. 9의 접합층이 없는 경우와 Fig. 14~Fig. 19의 접합층이 있는 경우의 작용하중 및 접

합 잔류응력의 중첩에 대한 BEM 응력해석 결과를 이용하여 응력특이성지수 λ 를 계산하였다. 응력특이성지수의 계산은 3.3절과 동일한 요령으로 하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 접합층이 없는 경우

세라믹/금속 접합체에 접합층이 존재하지 않을 때 응력특이성지수 λ 를 계산하고, 그 계산결과를 Table 2에 나타내었다. 세라믹/금속 접합체의 상호조합에 대한 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시키고, 4점 굽힘시험편의 굽힘하중을 20 N, 50 N, 100 N으로 작용시켰을 때, 수직 및 전단응력에 대한 응력특이성지수 $\lambda(\sigma_x)$ 와 $\lambda(\tau_{xy})$ 의 BEM 해석 결과를 나타내었다.

동일 재료의 4점 굽힘시험편에서 온도가 일정하고, 굽힘하중을 20 N, 50 N, 100 N으로 작용시켰을 때 수직 및 전단응력에 의한 응력특이성지수 λ 는 증가하며, 각 조합재료의 탄성계수의 비가 증가할수록 수직 및 전단응력에 의한 λ 도 증가하는 현상을 보여준다.

그러나 작용하중을 20 N, 접합온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시켰을 때 수직 및 전단응력에 대한 응력특이성지수 λ 는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

4.2 접합층이 존재하는 경우

세라믹/금속 접합체에 접합층이 존재할 때 접합

층의 두께(h)를 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm로 변화시키고, 온도변화는 300°C, 500°C, 800°C로 하며, 굽힘하중을 20 N, 50 N, 100 N으로 변화시킨 후, 세라믹측 계면 AB와 금속측 계면 CD에 대한 수직 및 전단응력에 의한 응력특이성지수 $\lambda(AB)$ 와 $\lambda(CD)$ 를 계산하여 그 결과를 Table 3과 Table 4에 각각 나타내었다.

Table 3과 Table 4에 나타낸 바와 같이 접합층의 두께를 0.2 mm, 굽힘하중을 20 N으로 일정하게 작용시키고, 접합온도 차가 300°C, 500°C, 800°C로 변화할 때 세라믹/금속 접합체의 상호조합에 대한 응력특이성지수 λ 는 세라믹측 계면과 금속측 계면에 따라 상당히 큰 차이를 나타내고 있으며, 세라믹측 계면에 대한 λ 의 값이 훨씬 크게 나타났다. 온도가 증가할수록 세라믹측 계면과 금속측 계면에서 전단응력에 의한 응력특이성지수 λ 는 감소하지만, 수직응력에 의한 λ 는 세라믹측 계면에서는 증가하고 금속측 계면에서는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

또한 온도변화를 500°C, 굽힘하중을 20 N으로 일정하게 작용시키고, 접합층의 두께를 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm로 하였을 때 세라믹측 계면에서의 λ 의 값이 금속측 계면값 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이때 수직응력에 의한 응력특이성지수 λ 는 세라믹측 계면은 물론 금속측 계면에서도 증가하는 경향을 보이고 있지만, 전단응력에 의한 응력특이성지수 λ 는 접합층의 두께를 0.5 mm로 하였을 때 가장 작게 나타났다.

그리고 접합층의 두께를 0.2 mm, 온도변화를

Table 2 Stress singularity index by BEM analysis

Temp. (°C)	Load (N)	Si ₃ N ₄ /STS304		Si ₃ N ₄ /SM45C		Al ₂ O ₃ /STS304		Al ₂ O ₃ /SM45C	
		$\lambda(\sigma_x)$	$\lambda(\tau_{xy})$	$\lambda(\sigma_x)$	$\lambda(\tau_{xy})$	$\lambda(\sigma_x)$	$\lambda(\tau_{xy})$	$\lambda(\sigma_x)$	$\lambda(\tau_{xy})$
300	0	0.4024	0.0375	0.4047	0.0339	0.4182	0.0516	0.4214	0.0470
500		0.4026	0.0376	0.4047	0.0340	0.4186	0.0519	0.4239	0.0471
800		0.4037	0.0378	0.4048	0.0343	0.4189	0.0519	0.4242	0.0472
300	20	0.0171	0.2406	0.0152	0.2370	0.0274	0.2752	0.0248	0.2766
500		0.0166	0.2355	0.0149	0.2337	0.0270	0.2752	0.0246	0.2752
800		0.0158	0.2270	0.0143	0.2284	0.0263	0.2683	0.0242	0.2731
500	50	0.0172	0.2429	0.0151	0.2383	0.0279	0.2766	0.0249	0.2767
500	100	0.0177	0.2453	0.0158	0.2405	0.0278	0.2777	0.0250	0.2776

500°C로 일정하게 유지하고, 압힘하중을 20 N, 50 N, 100 N으로 작용시켰을 때 하중이 증가함에 따라 세라믹층 계면과 금속층 계면에서의 전단응력에 의한 응력특이성지수 λ 는 증가하지만, 수직응력에

의한 λ 는 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 세라믹/금속 접합재의 4점 굽힘시험편에 대한 접합재의 상호조합 방법, 접합층의 유무, 접합층의 두께변화, 냉각온

Table 3 Stress singularity index by BEM analysis(σ_x/σ_o)

Thickness (mm)	Load (N)	Temp. (°C)	Si ₃ N ₄ /Cu/STS304		Si ₃ N ₄ /Cu/SM45C		Al ₂ O ₃ /Cu/STS304		Al ₂ O ₃ /Cu/SM45C	
			λ (AB)	λ (CD)	λ (AB)	λ (CD)	λ (AB)	λ (CD)	λ (AB)	λ (CD)
0.2	0	300	1.1501	0.3483	4.0200	0.2371	1.1551	0.3586	1.2684	0.4653
		500	1.1528	0.3477	3.7891	0.2366	1.1540	0.3586	1.2668	0.3993
		800	1.1462	0.3500	3.5353	0.2384	1.1488	0.3596	1.2683	0.4004
0.5	0	500	1.1118	0.7222	3.5175	0.1003	1.8250	0.1704	2.4849	0.0632
1.0		500	0.8769	0.0629	1.2765	0.0868	0.9050	0.0159	1.5248	0.1957
0.2		20	300	0.0296	0.0128	0.0266	0.0112	0.0413	0.0215	0.0390
	500		0.0297	0.0125	0.0267	0.0110	0.0423	0.0213	0.0391	0.2009
	800		0.0299	0.0121	0.0269	0.0105	0.0424	0.0209	0.0392	0.0198
0.5	20	500	0.0657	0.0319	0.0653	0.0349	0.0796	0.0299	0.0791	0.0328
1.0			0.0676	0.0393	0.0759	0.0434	0.0801	0.0406	0.0801	0.0437
0.2	50	500	0.0295	0.0124	0.0265	0.0113	0.0421	0.0217	0.0388	0.0203
	100		0.0296	0.0130	0.0266	0.0114	0.0422	0.0219	0.0391	0.0206

Table 4 Stress singularity index by BEM analysis(τ_{xy}/σ_o)

Thickness (mm)	Load (N)	Temp. (°C)	Si ₃ N ₄ /Cu/STS304		Si ₃ N ₄ /Cu/SM45C		Al ₂ O ₃ /Cu/STS304		Al ₂ O ₃ /Cu/SM45C	
			λ (AB)	λ (CD)	λ (AB)	λ (CD)	λ (AB)	λ (CD)	λ (AB)	λ (CD)
0.2	0	300	0.0226	1.6580	0.0513	0.3833	0.0393	2.7531	0.5651	0.2510
		500	0.0233	1.6252	0.0512	0.3860	0.0393	2.7330	0.7868	0.5691
		800	0.0233	1.6423	0.0513	0.4454	0.0400	0.9400	0.0790	0.5754
0.5	0	500	0.0255	0.4414	0.0211	0.0955	0.0397	0.2285	0.0221	0.0687
1.0		500	0.0596	0.3707	0.0452	0.7199	0.0755	0.2498	0.0567	0.1257
0.2	20	300	0.1054	0.0996	0.1084	0.1040	0.1185	0.1226	0.1214	0.1257
		500	0.0972	0.0855	0.1032	0.0932	0.1151	0.1128	0.1183	0.1190
		800	0.0845	0.0626	0.0952	0.0756	0.1064	0.0972	0.1136	0.1084
0.5	20	500	0.0926	0.0364	0.0820	0.0463	0.1027	0.0146	0.1024	0.0305
1.0			0.1642	0.1337	0.1557	0.1460	0.1843	0.1305	0.1828	0.1413
0.2	50	500	0.1093	0.1073	0.1108	0.1092	0.1230	0.1275	0.1232	0.1293
	100		0.1133	0.1145	0.1136	0.1138	0.1256	0.1323	0.1249	0.1316

도의 변화, 굽힘하중의 변화 등에 따라 각 재료의 접합계면단의 응력특이성은 매우 복잡하게 변화한다.

이와 같은 응력특이성을 고려한 세라믹/금속 접합체에 대한 접합강도의 정량적이고, 효과적인 평가방법 및 실험수법의 확립이 가능할 것으로 기대된다.

5. 결 론

세라믹/금속 접합체의 강도평가법을 확립하기 위한 기초연구로서 세라믹/금속 접합체의 4점 굽힘시험편에 대한 접합체의 상호조합방법, 중간재의 두께변화, 냉각온도변화 및 굽힘하중의 변화에 따른 접합계면단에 대한 잔류응력과 잔류응력특이성을 BEM 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세라믹/금속 접합체의 4점 굽힘시험편에 대하여 접합온도에 의한 고정밀도의 BEM 잔류응력 해석과 굽힘하중의 중첩에 의한 접합계면단에 대한 응력해석이 가능하였다.

(2) 접합 잔류응력과 굽힘작용하중의 중첩에 의한 BEM응력해석 결과를 이용한 접합계면단에서의 응력특이성지수 λ 를 구하는 방법을 제안하고, 접합체의 종류, 접합체의 두께변화, 온도변화 및 굽힘하중의 중첩에 따른 λ 의 상호관계를 명백히 하였다.

(3) 접합 잔류응력에 대한 응력특이성은 $r^{-\lambda}$ 와 $\log r$ 의 향이 공존하므로 응력특이성지수 λ 의 결정에는 임의성이 존재하고 있기 때문에, 이에 대한 λ 의 결정방법을 제안하였다.

(4) 접합 잔류응력과 작용하중의 중첩에 의한 접합 계면단의 응력특이성지수를 사용하여 세라믹/금속 접합체에 대한 정량적인 강도평가가 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Kobayashi, H., 1994, "Mechanism and Mechanics of Interface Fracture in Ceramic/

Metal Joint," *JSME*, Vol. 60, No. 577, pp. 1913~1919.

(2) Bogy, D.B., 1975, "The Plane Solution for Jointed Dissimilar Elastic Semistrips Under Tension," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 42, pp. 93~98.

(3) Yuuki, R., 1992, "Logarithmic Singularity on Thermal or the Interface Edge Point of Bonded Dissimilar Materials," *JSME*, Vol. 58, No. 556, pp. 2394~2400.

(4) Seo, K. and Kusaka, M., 1989 "Study on the Thermal Stress at Ceramics-Metal Joint," *JSME*, Vol. 55, No. 510, pp. 312~317.

(5) 정남용, 오봉택, 1994, "이종재 경사이음의 접합계면단에 대한 응력특이성계수의 해석" 대한 기계학회 추계학술대회논문집, pp. 409~412.

(6) 정남용, 김희승, 김기성, 1995, "세라믹/금속 접합체에 대한 잔류응력특이성의 해석," 한국자동차공학회, 1995년도 춘계학술대회논문집, *SAE Paper No. 953873*, pp. 67~73.

(7) Kobayashi, H., Arai, Y. and Nikamura, H., 1989, "Mechanics Approach to Fracture Strength of Ceramics/Metal Joint," *JSME*, Vol. 55, No. 512, pp. 750~756.

(8) Luo, F., 1994, "FEM Analysis of Thermal Cycle Effect on Residual Stresses of Ceramic/Metal Joints," *JSME*, Vol. 60, No. 569, pp. 59~64.

(9) Arai, Y., 1993, "Influence of Size of Joint on Elastic-Plastic Singularity of Residual Stresses Ceramic-Metal Joints," *JSME*, Vol. 59, No. 559, pp. 627~633.

(10) Yuuki, R., 1994, "Simulation Analysis of Fracture in Ceramic/Metal Bonded Joints," *JSME*, Vol. 60, No. 579, pp. 2544~2552

(11) Park, Y. C. and Luo, F., 1994, "Effect of Single Thermal Cycle on Residual Stress of Ceramic/Metal Joints," *JSME*, Vol. 60, No. 574, pp. 1371~1378