

## 응력특이성을 고려한 세라믹/금속 접합재의 정적강도평가

김기성\*, 김희송\*\*, 정남용\*\*\*

### Evaluation of Static Strength on Ceramic/Metal Bonded Joints Considering Stress Singularity

K. S. Kim\*, H. S. Kim\*\*, N. Y. Chung\*\*\*

#### Abstract

Recently, the cases of using bonded dissimilar materials which have each of the different components tend to increase for the purpose of developing new materials and using the special objects in the field of industry. Among the cases the strength evaluation of the joining materials of vehicle engine and the structural materials with ceramic/metal bonded joints becomes more important.

But the residual stress occurs, because the joining of ceramics and metals is performed in extremely high temperature. It becomes a dominant cause to reduce the strength of the ceramic/metal bonded joints.

In this paper, strength evaluation method of ceramic/metal bonded joints considering stress singularity was investigated by boundary element method and 4-point bending test. An advanced method of quantitative strength evaluation for ceramic/metal bonded joints is to be suggested.

Keywords : Ceramic/Metal Bonded Joint(세라믹/금속 접합이음), Residual Stress(잔류응력) Stress Singularity(응력특이성), Boundary Element Method(경계요소법), Strength Evaluation Method(강도평가방법), 4-Point Bending Test(4점 굽힘시험)

\* 단국대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 단국대학교 기계공학과  
\*\*\* 송실대학교 기계공학과

## 1. 서론

최근 첨단 산업 분야에서 신소재의 개발과 이들을 특수한 목적에 사용하기 위하여 재료의 성질이 다른 세라믹과 금속을 접합하여 사용하는 예가 날로 증가하는 추세이다. 특히 세라믹은 고온 강도와 열적특성 및 화학적 저항성이 우수하지만, 취성이 크고 인성이 부족한 결점을 가지고 있기 때문에 세라믹 자체로는 구조재료로<sup>(1)</sup> 사용할 수 없다.

현재 자동차 엔진재료로서 실용화 되고 있는 부품들은 피스톤 헤드, 밸브 시트와 로커 암, 그리고 내열부품으로는 가스 터빈의 브레이드<sup>(2)</sup> 등이 있으며 이들 부품들은 주로 세라믹과 금속을 접합하여 사용하므로 이들 접합재<sup>(3)</sup>에 대한 강도 평가 방법<sup>(4)</sup>을 확립하는 것은 매우 중요하다.

특히 세라믹/금속 접합은 일반적으로 인성이 큰 중간재를 삽입하여 고온에서 접합하기 때문에 냉각시 양 재료의 선팽창계수와 탄성계수의 차이로 인하여 접합 계면단에서는 잔류응력이 발생한다.

이러한 잔류응력은 접합재의 강도를 저하시키는 요인이 되고, 이 응력특이점은 파괴의 기점이 되므로 계면단 응력특이성을 고려한 접합강도의 평가가 유효한<sup>(5)</sup> 것으로 알려져 있다.

접합계면단에 대한 응력특이성의 해석을 유한요소법이나 경계요소법을 이용하여 해석한 연구 결과<sup>(6),(7)</sup> 보고되고 있지만, 이러한 결과를 접합강도 평가에 이용하기 위해서는 검토하여야 할 많은 문제점이 남아 있고, 아직 세라믹/금속 접합재에 대한 강도평가 방법이 확립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 응력특이성을 고려한 세라믹/금속 접합재에 대한 정적강도 평가방법을 확립하기 위하여 무균열재에 대한 응력특이성의 경계요소법(boundary element method : BEM)해석과 4점 굽힘시험을 이용한 정적강도 실험을 실시하여 세라믹/금속 접합재의 정량적인 강도평가 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 접합재의 응력특이성에 대한 BEM 해석

### 2.1 세라믹/금속 접합재의 수치해석 모델

세라믹 재료로는 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)를 사용하고, 금속

재료로는 오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 기계구조용 탄소강(SM45C)을 상호 접합하였으며, 중간재료는 구리(Cu)를 사용하였다. 각 재료에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )	Thermal expan. coef. $\alpha$ ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	304	0.27	3.0
STS304	193	0.30	16.5
SM45C	206	0.30	12.0
Cu	108	0.33	17.7

세라믹/금속 접합재의 접합강도를 평가하기 위하여 BEM해석에 사용된 모델 및 구속조건은 Fig. 1 과 같으며 각 모델에 대해서는 영역분할법으로 등매개 요소를 사용하였고, 전체 요소 분할수는 3개의 영역에서 262개로 하였다. 특히 균열선단에서는 서브요소와 특이요소를 사용하여 고정밀도로 해석하였다.

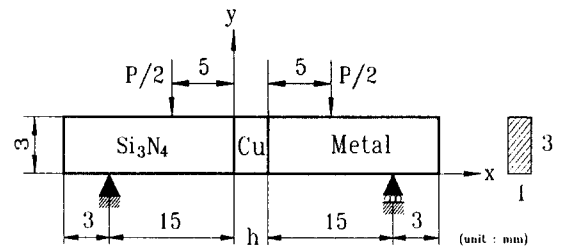


Fig. 1 Model of BEM analysis on ceramic/metal bonded joint

### 2.2 응력 특성방정식의 해석

Fig. 1에서 접합층의 두께(h)가 0인 경우에 대하여 응력특이성을 결정하는 특성방정식은 Bogy<sup>(8)</sup>에 의해 유도되었다. 계면단 근방의 응력장  $\sigma_{ij}$ 는 계면단으로부터의 거리 r에 의해 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma}{r^{1-\rho}} f_{ij}(\Phi) = \frac{\Gamma}{r^{\lambda}} f_{ij}(\Phi) \quad (1)$$

여기서  $\Gamma$ 는 응력특이성계수이고,  $f_{ij}(\Phi)$ 는 부하조건 및 형상에 의존하는 계수이다. 응력특이성지수  $\lambda$ 는 각 재료에 대한 조합특성에 의해 결정되는 상수이다.

응력특이성지수  $\lambda$ 가  $\lambda < 0$  또는  $\lambda > 1$ 이면 응력특이성이 소멸되는 수도 있다. 또한  $\lambda$ 가 복소수로 되는 경우 다음 식과 같은 진동특이성의 응력장으로 된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma}{r^{1-\xi}} [c_1 \cos(\eta \ln r) + c_2 \sin(\eta \ln r)] \quad (2)$$

여기서,  $p = \xi + i\eta$  이고, 이 응력특이성지수  $\lambda$ 는 다음 식과 같은 특성방정식으로부터 구해진다.

$$A\beta^2 + 2Ba\beta + Ca^2 - 2D\beta - 2Ea + F = 0 \quad (3)$$

$a, \beta$ 는 Dunders 파라미터이며 다음 식과 같이 나타낸다<sup>(8)</sup>.

$$\alpha = \frac{\mu_1(x_2+1) - \mu_2(x_1+1)}{\mu_1(x_2+1) + \mu_2(x_1+1)}$$

$$\beta = \frac{\mu_1(x_2-1) - \mu_2(x_1-1)}{\mu_1(x_2+1) + \mu_2(x_1+1)} \quad (4)$$

$$x_i = \begin{cases} 3 - 4\nu_i & (\text{평면변형률}) \\ \frac{3 - \nu_i}{1 + \nu_i} & (\text{평면응력}) \end{cases} \quad (i=1,2) \quad (5)$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}$$

여기서  $E_i$  : 세로탄성계수  
 $\mu_i$  : 전단탄성계수  
 $\nu_i$  : 포와송비

$$(6)$$

등은 외력부하가 작용할 때 잔류응력의 특이성은 다음식과 같이 표시할 수 있다<sup>(9)</sup>.

$$\alpha(\alpha - 2\beta) \leq 0 \quad (\text{equal, good pair}) ; \quad (7)$$

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

$$\alpha(\alpha - 2\beta) > 0 \quad (\text{bad pair}) ; \quad (8)$$

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

Equal pair 및 good pair에서  $\log r$ 의 대수형 잔류

응력 특이성이 존재하고, bad pair의 경우는  $r^{-\lambda}$ 와  $\log r$ 의 특이성이 공존하게 된다.

### 3. 응력특이성의 해석결과 및 고찰

세라믹/금속 접합재의 응력특이성지수를 계산하기 위하여 시험편의 상호조합에 대한 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 변화시켜가면서 응력해석을 실시하였다. 이때 중간재의 두께는 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm로 변화시키고, 4점 굽힘시험 하중을 20N, 50N, 100N을 가하면서 응력해석을 실시한 후 접합계면단에 대한 응력 특이성지수  $\lambda$ 를 계산하였다.

이때  $\lambda$ 는 계면단의 응력 분포가 무한대로 되는 경향이 있으므로 계면단에서의 거리  $r$ 에 대한  $\lambda$ 를 계산하였으며, 또한  $\lambda$ 에 대한 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 구하여 접합재의 파괴를 지배하는 정량적인 파괴인자로 활용하여 보다 효율적인 강도평가를 실시하고자 하였다.

#### 3.1 접합계면의 응력 해석

Fig. 2와 Fig. 3은  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 의 접합층의 두께( $h$ )를 0.2mm, 4점 굽힘시험편에 대한 작용하중을 20N으로 일정하게 유지하고, 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 변화시켰을 때 수직 및 전단응력의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 전단응력에 비하

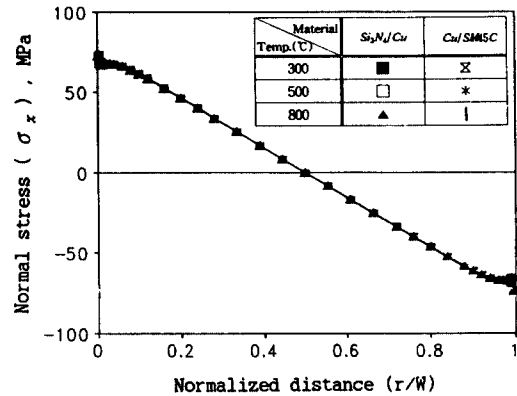


Fig. 2 Normal stress distributions at interfaces of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$  bonded joint ( $h=0.2\text{mm}$ ,  $P=20\text{N}$ )

여 수직응력의 값이 훨씬 크게 나타나고 있으며, 온도차이에 의한 수직응력의 값은 세라믹측 계면이나 금속측 계면에서 거의 변화가 없지만, 전단응력의 분포는 세라믹측 계면에서 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 잔류응력과 굽힘하중에 의한 응력이 중첩되므로써 응력집중 현상이 세라믹측 계면을 따라 가중되기 때문이다.

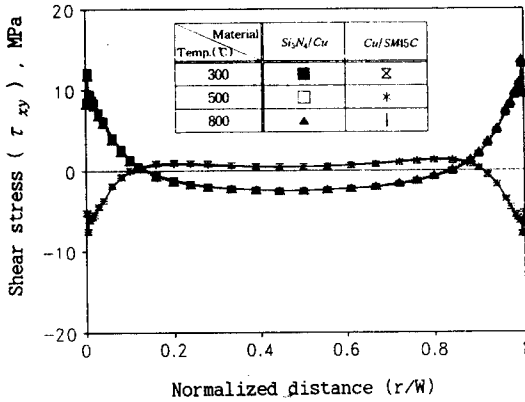


Fig. 3 Shear stress distributions at interfaces of  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  bonded joint ( $h=0.2mm, P=20N$ )

Fig. 4와 Fig. 5는 온도차를 500°C, 굽힘작용 하중을 20N으로 일정하게 하고, 접합층의 두께를 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm로 변화시켜 가면서 접합시킨

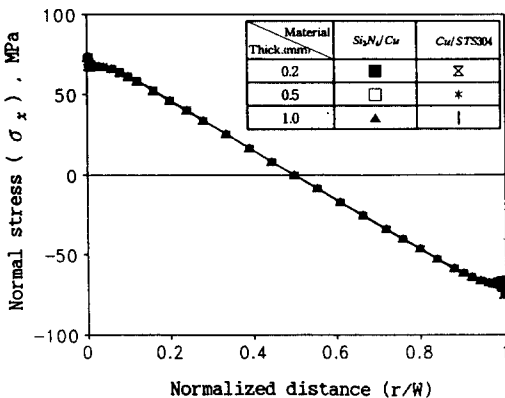


Fig. 4 Normal stress distributions at interfaces of  $Si_3N_4/Cu/STS304$  bonded joint ( $\Delta T=500^\circ C, P=20N$ )

$Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 시험편에 대한 수직 및 전단응력 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 수직응력의 값이 전단응력에 비하여 훨씬 크게 나타나고 있으며, 접합층의 두께변화에 의한 수직응력 값은 세라믹측 계면이나 금속측 계면에서는 차이가 없지만 전단응력의 경우에는 금속측 계면보다 세라믹측 계면에 크게 분포하고 있음을 알 수 있다.

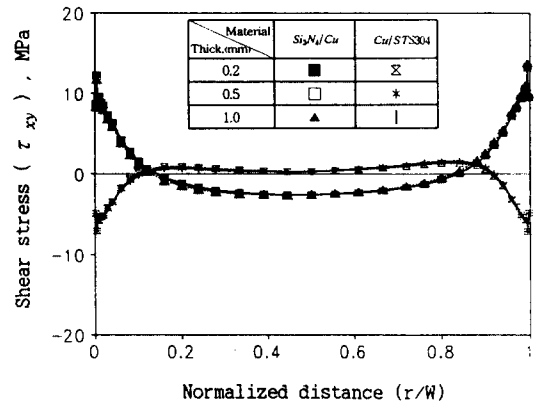


Fig. 4 Shear stress distributions at interfaces of  $Si_3N_4/Cu/STS304$  bonded joint ( $\Delta T=500^\circ C, P=20N$ )

### 3.2 계면단 응력특이성의 해석

Fig. 6은  $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 응력해석 결과인 Fig. 4와 Fig. 5를 이용하여 대수 그래프상에서 세라믹측 접합계면단 근방의 응력분포를 계면단에서의 거리  $r$ 에 따라 도시하여 그 기울기를 구한 응력특이성지수  $\lambda$ 의 계산 결과를 나타낸 것이다. 이때 계면단 근방에 대한 응력값을 취하는 방법에 따라  $\lambda$ 의 값이 변할 수 있으므로, 본 연구에서는 진동 부분을 제외한  $\log(r/W) = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ 범위에서<sup>(10)</sup> 계산하였다.

Fig. 7은 Fig. 6의 계산결과를 이용하여 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 구하는 방법을 나타낸 예이다. 식(1)를  $\Gamma$ 에 대한 식으로 나타낸 후, 이 식에서 거리  $r$ 에 따른  $\Gamma$ 의 값을 최소자승법으로 외삽하여  $\Gamma$ 의 값을 결정하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에 도시한 것과 같은 방법으로  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  접합재와  $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 접합재에 대한 세라믹측 계면( $Si_3N_4/Cu$ )의 응력특이

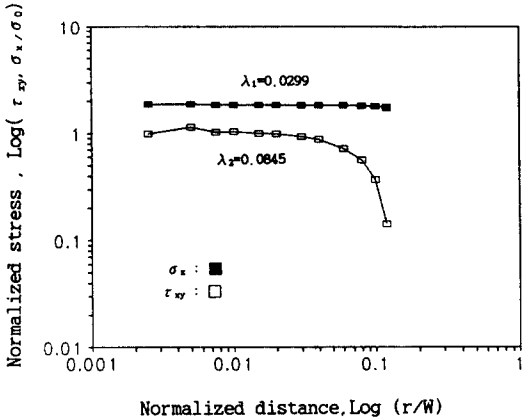


Fig. 6 Calculation of stress singularity index at interface edge of  $Si_3N_4/Cu/STS304$  bonded joint( $h=0.2mm, P=20N, T=800^\circ C$ )

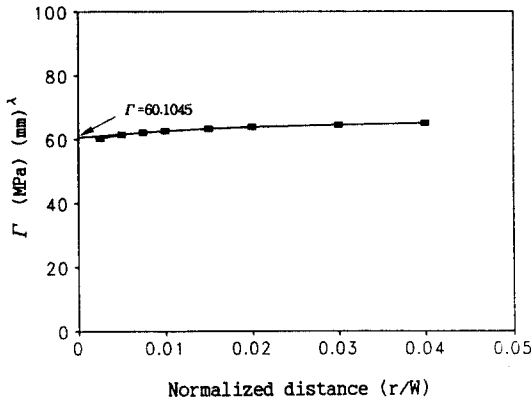


Fig. 7 Extrapolation of  $\Gamma$  for distance from the interface edges of  $Si_3N_4/Cu/STS304$  bonded joint( $h=0.2mm, P=20N, T=800^\circ C$ )

성지수와 응력특이성계수의 계산 결과를 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 표에 나타낸 바와 같이 접합층의 두께를 0.2mm, 온도차를 500℃로 일정하게 하고, 작용하중을 20N, 50N, 100N으로 증가시킴에 따라 수직응력성분에 의한  $\lambda_1$ 의 값은 거의 변화가 없으나, 전단응력에 의한  $\lambda_2$ 의 값은 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 이때 수직응력 성분에 의한  $\Gamma_1$ 과 전단응력

성분에 의한  $\Gamma_2$ 의 값은 하중이 증가할 수록 증가하며,  $\Gamma_2$ 에 비하여  $\Gamma_1$ 의 값이 훨씬 크게 나타나고 있다. 또한 작용하중을 20N, 온도차를 500℃로 일정하게 하고 접합층의 두께를 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm로 변화시켰을 때, 접합층의 두께가 증가함에 따라  $\lambda_1$ 의 값은 증가하나  $\lambda_2$ 의 경우 접합층의 두께가 0.5mm일 때 가장 작게 되고, 접합층의 두께가 0.2mm일 때 응력특이성계수  $\Gamma$ 의 값이 가장 큰 경향을 보이고 있다.

Table 2 Stress singularity index by BEM analysis( $Si_3N_4/Cu/SM45C$ )

Thickness (mm)	Load (N)	Temp. (°C)	Interface of Ceramic Side( $Si_3N_4/Cu$ )					
			$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\Gamma_1$	$\Gamma_2$	$\lambda$	$\Gamma$
0.2	20	300	0.0266	0.1084	61.0901	6.0401	0.1116	61.3879
		500	0.0267	0.1032	61.1035	6.3380	0.1066	61.4313
		800	0.0269	0.0952	61.1048	6.8161	0.0989	61.4838
0.5	20	500	0.0653	0.0820	54.2714	6.8830	0.1048	54.7061
1.0		500	0.0759	0.1557	54.4178	4.8102	0.1732	54.6299
0.2	50	500	0.0265	0.1108	148.5697	14.7611	0.1139	149.3011
	100	500	0.0266	0.1136	297.0534	28.7782	0.1167	298.4441

Table 3 Stress singularity index by BEM analysis( $Si_3N_4/Cu/STS304$ )

Thickness (mm)	Load (N)	Temp. (°C)	Interface of Ceramic Side( $Si_3N_4/Cu$ )					
			$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\Gamma_1$	$\Gamma_2$	$\lambda$	$\Gamma$
0.2	20	300	0.0296	0.1054	60.9276	6.1339	0.1095	61.2356
		500	0.0297	0.0972	60.1298	6.0124	0.1016	60.4296
		800	0.0299	0.0845	59.7756	6.2796	0.0896	60.1045
0.5	20	500	0.0657	0.0926	53.9550	6.0107	0.1136	54.2887
1.0		500	0.0676	0.1642	56.8981	4.5060	0.1776	56.9376
0.2	50	500	0.0295	0.1093	151.2354	14.4127	0.1132	151.1921
	100	500	0.0296	0.1133	302.7590	28.4269	0.1171	304.0906

Fig. 8과 Fig. 9는  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  접합체의 중간재 두께를 0.2mm, 작용하중을 20N으로 일정하게 유지하고, 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 변화시켰을 때 수직응력에 의한 응력특이성지수  $\lambda_1$ 과 전단응력에 의한 응력특이성지수  $\lambda_2$ 의 값을 식 (1)에 대입하여 얻은 응력특이성계수  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수직응력 성분만으로 구한 Fig.8은 응력특이성지수  $\lambda_1$ 이 증가할수록 응력특이성계수  $\Gamma_1$ 은 미소하게 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전단응력 성분만으로 나타낸

Fig. 9는 응력특이성지수  $\lambda_2$ 가 증가 함에 따라 응력특이성계수  $\Gamma_2$ 가 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

그러나 실제 접합에 있어서 수직응력 성분에 의한 박리현상은 접합재의 파괴에 직접적인 영향을 미치므로 수직응력과 전단응력 성분을 동시에 고려한 응력특이성계수  $\Gamma = \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2}$  를 사용하는 것이 더욱 합리적인 평가방법이라고 생각한다.

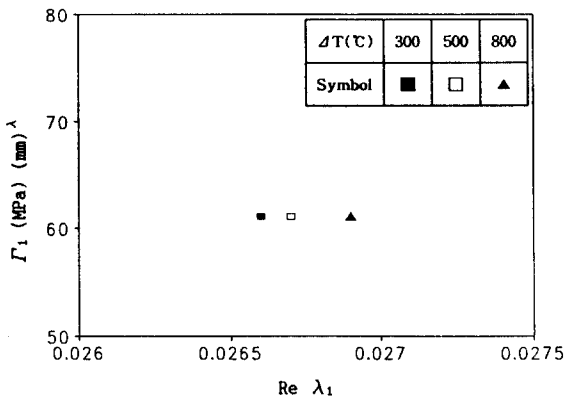


Fig. 8 Relationship between  $\lambda_1$  and  $\Gamma_1$  for the ceramic side of  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  bonded joint( $h=0.2mm, P=20N$ )

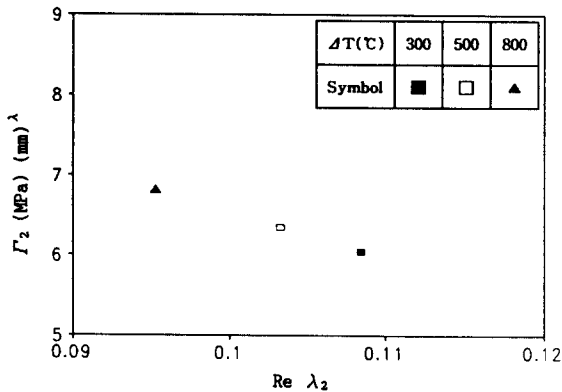


Fig. 8 Relationship between  $\lambda_2$  and  $\Gamma_2$  for the ceramic side of  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  bonded joint( $h=0.2mm, P=20N$ )

따라서 Fig. 10은 Fig. 8과 Fig. 9의 수직 및 전단 응력을 동시에 고려한 응력특이성지수  $\lambda$ 에 대한 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이  $\lambda$ 가 증가(접합온도차는 감소)함에 따라 응력특이성계수  $\Gamma$ 는 일정한 값으로 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다.

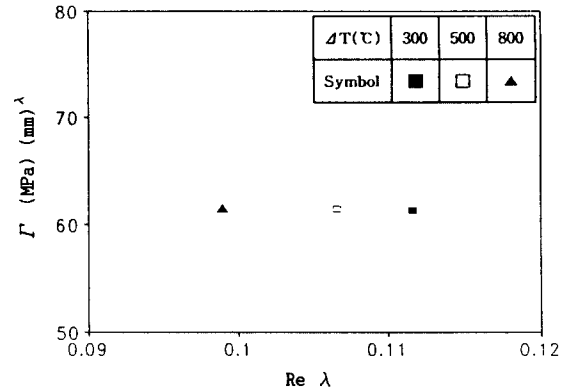


Fig. 10 Relationship between  $\lambda$  and  $\Gamma$  for the ceramic side of  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  bonded joint( $h=0.2mm, P=20N$ )

## 4. 실험

### 4.1 시험편의 제작 및 실험 방법

본 실험에 사용된 세라믹 재료는 질화규소( $Si_3N_4$ )이고, 금속 재료는 오오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 구조용탄소강(SM45C)이며 이를 활성금속법으로 상호 접합하였다. 중간재로는 0.2mm 두께의 순도 99.6% 이상의 전해동(Cu)을 사용하였고, 활성금속 브레이징 합금은 50 $\mu m$ 두께의 63.5Ag-34.5Cu-2Ti wt% 합금인 Cusil ABA(GTE Wesgo사)이다. 세라믹 접합표면은 거칠기가 1 $\mu m$ , 금속은 0.05 $\mu m$ 이하가 되도록 연마하였다. 중간재인 구리는 표면의 산화막을 제거하기 위하여 1200메시의 SiC를 사용하여 연삭하였다. 접합조건은 10<sup>-5</sup> torr 이하의 진공상태에서 800 $^{\circ}C$ 로 10분간 유지하였으며, 승온속도 5.3 $^{\circ}C/min$ , 냉각속도는 5 $^{\circ}C/min$ 이 되도록 하였다. 또한 접합된 시험편의 크기는 각각 3 $\times$ 4 $\times$ 18mm로 하였고, 접합재에 대한 강도실험은 각각 3개의 시험편에 대하여 4점 굽힘시험법

으로 상온에서 측정하였다. 시험기는 만능재료시험기 (Model : Instron 4206)를 사용하였으며, 이때 정적 하중 속도는 0.2mm/min 로 하였다.

또한  $Si_3N_4$ ,  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ ,  $Si_3N_4/Cu/STS304$ 에 대한 4점 굽힘시험편의 하중-변위 선도를 X-Y Recorder에 기록하여 비교하였다.

#### 4.2 실험결과와 고찰

세라믹/금속 접합체의 4점 굽힘시험에서 구한 하중과 변위 관계를 Fig. 11(a),(b),(c)에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 파단하중까지 하중-변위 선도는 선형적으로 변화하였다. 4점 굽힘시험편에 대한 굽힘강도  $\sigma_b$ 는 다음 식<sup>(11)</sup>을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_b = 3P(L-l) / 2wt^2 \quad (9)$$

여기에서

- P : 파단하중(N)      w : 시험편의 폭(mm)
- t : 시험편의 두께(mm)    L : 하부 지지점간 거리(mm)
- l : 상부 지지점간 거리(mm)

4점 굽힘시험 결과 질화규소( $Si_3N_4$ ) 자체의 최대 굽힘강도는 538MPa로 가장 크게 나타났으며,  $Si_3N_4/Cu/STS304$  접합체의 경우 접합강도는 217MPa이고,  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 의 접합강도는 242MPa로 나타났다.  $Si_3N_4/Cu/STS304$  접합체의 접합강도 보다  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  접합체의 접합강도가 크게 나타났음을 알 수 있으며, 이는 BEM해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12(a),(b),(c)는  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 의 파단면을 나타낸 것이고, Fig. 12(d),(e),(f)는  $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 파단면을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 파괴가 일어나는 점은 질화규소와 구리의 접합계면에서 발생하여 세라믹측 내부 방향으로 진전함을 알 수 있다. 이러한 파괴경로의 변화는 굽힘강도 실험시 접합체에 작용하는 하중에 의한 응력집중의 영향과 접합체내에 발생하는 잔류응력의 중첩효과로 금속측의 수축변형과 세라믹측의 취성에 의한 영향으로 생각된다. 또한 질화규소와 구리의 접합강도가 약할 때는 계면파괴가 일어나지만, 본 실험의 경우 세라믹 자체의 굽힘 취성파괴 강도가 접합강도 보다 약하기 때문에 세라믹 쪽으로 파괴가 지배적이었다.

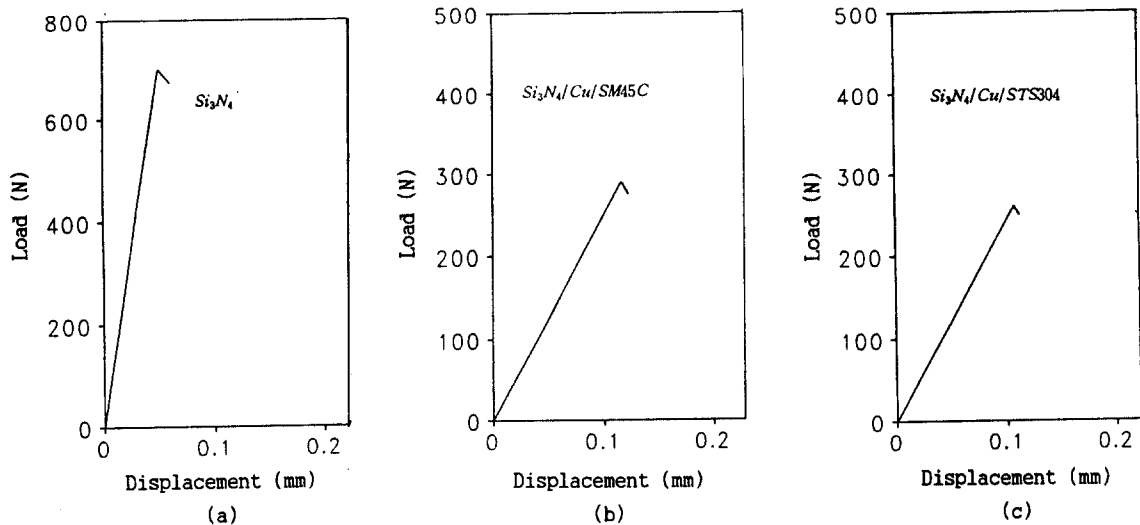
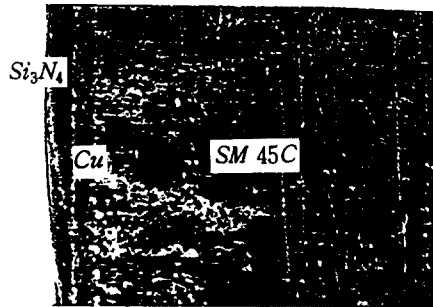


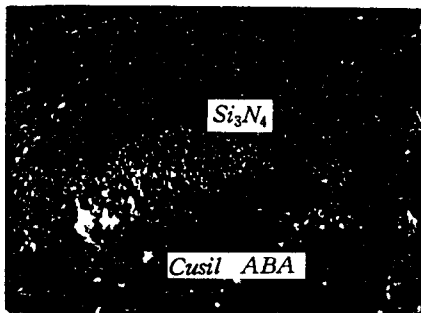
Fig. 11 4-point bending strength and displacement of Ceramic/metal bonded joint



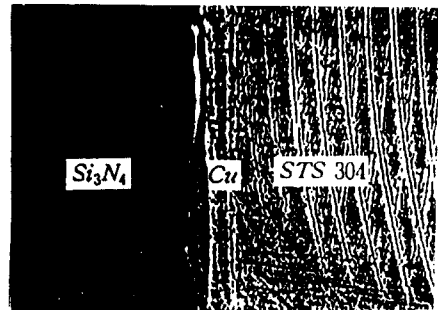
(a)  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  Joint  
(fracture shape)



(b)  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  Joint  
(fracture section of metal side)



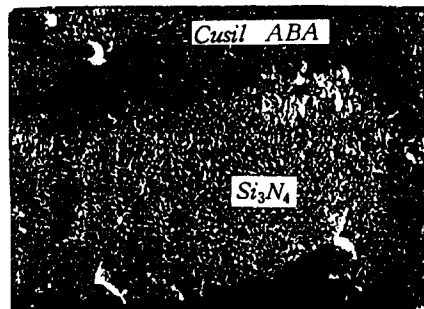
(c)  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  Joint  
(fracture section of ceramic side)



(d)  $Si_3N_4/Cu/STS304$  Joint  
(fracture shape)



(e)  $Si_3N_4/Cu/STS304$  Joint  
(fracture section of metal side)



(f)  $Si_3N_4/Cu/STS304$  Joint  
(fracture section of ceramic side)

Fig. 12 Optical micrograph of microstructure



### 5. 세라믹/금속 접합재의 강도 평가방법의 제안

Fig. 11에 도시한 실제 실험하중을 식 (9)에 대입하여 구한 최대굽힘 파괴응력  $\sigma_{max}$  은 시험편의 형상, 치수 및 부하조건에 의존하므로 이에 의존하지 않는 세라믹/금속 접합재의 파괴를 지배하는 정량적인 파괴인자의 사용이 보다 효과적이라 생각되어 응력특이성계수  $\Gamma$  를 사용하고자 한다. 식 (1)에 BEM해석에서 구한 응력  $\sigma_{BEM}$  를 대입하여 응력특이성계수  $\Gamma_{BEM}$ 과 실험에서 구한 최대 굽힘 파괴응력  $\sigma_{max}$ 을 대입하여 구한  $\Gamma_{cr}$  사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\Gamma_{cr} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{BEM}} \Gamma_{BEM} = \Psi \Gamma_{BEM} \quad (10)$$

현재 세라믹/금속 접합 시험방법은 Fig. 1과 같은 형상의 접합 방법만이 가능하므로<sup>(11)</sup> 하중점의 위치를 변화시킨 응력특이성 계수를 구하면,  $\Gamma_{BEM}$ 과  $\Gamma_{cr}$ 사이에는 식 (10)과 같이  $\Psi$ 배 만큼의 차이가 있다. 이때  $\Gamma_{BEM}$ 을  $\Psi$ 배 만큼 이동시키면  $\Gamma_{cr}$ 과 일치하여 Fig. 13과 같은 파괴기준이 설정된다. Fig. 13에서  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 와  $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 파괴 기준선은 하중 작용점의 위치를 변화시켜 BEM해석으로 구한 곡선이다.

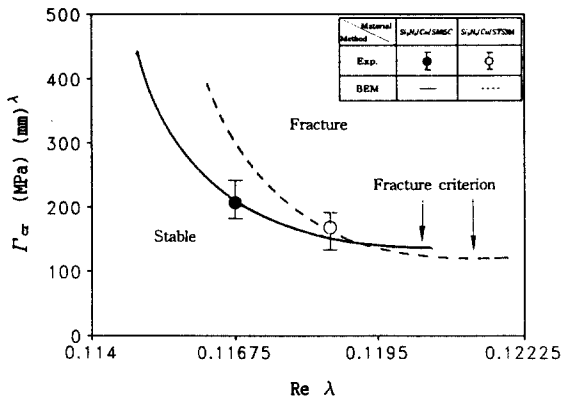


Fig. 13 Fracture criterion for the Ceramic/metal bonded joints

Fig. 13은 실수부 응력특이성지수  $Re \lambda$ 에 대한  $\Gamma_{cr}$ 을 도시한 것으로  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 와  $Si_3N_4/Cu/STS304$  접합재의 파괴를 결정짓는 파괴기준의 파악도 가능하고, 접합에 대한 고정밀도의 강도평가도 가능하므로 세라믹/금속 접합재에 대한 새로운 강도평가 방법으로 제안 하고자 한다.  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 와  $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 접합 시험편에 대하여 실제 작용하중에 의한  $\Gamma$ 와 파단하중에 대한  $\Gamma_{cr}$ 값을 비교함으로써 파괴 강도의 예측이 가능하다.

즉 세라믹/금속 접합재의 시험편에서 실제 작용하중에 의한  $\Gamma$ 와 파괴하중에 대한  $\Gamma_{cr}$ 의 값은 다음 식에 의해 결정된다

$$\Gamma \geq \Gamma_{cr} \quad (11)$$

위의 식에서 접합된 재료가 파괴되지 않고 안정되면  $\lambda$ 에 대한  $\Gamma$ 의 값이  $\Gamma_{cr}$ 의 선 아래에 있도록 해야 하고,  $\Gamma \geq \Gamma_{cr}$ 이면 접합재는 파괴된다. 이러한 파괴기준을 이용하여 세라믹/금속 접합 구조재에 대한 강도평가 및 파괴강도의 예측도 가능할 것으로 기대된다.

### 6. 결론

세라믹/금속 접합재에 대한 계면단 응력특이성의 BEM해석 및 4점 굽힘 시험에 의한 강도평가 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하중과 잔류응력이 중첩하는 응력특이성지수  $\lambda$ 를 사용하여 세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 계산하는 방법을 제시하였다.
2. 응력특이성계수에 의한 세라믹/금속 접합재의 정적 강도 평가방법과 파괴기준을 제안하였다.
3. 질화규소( $Si_3N_4$ ) 자체의 강도는 538MPa로 가장 크게 나타났고,  $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 의 접합강도는 242MPa,  $Si_3N_4/Cu/STS$ 의 접합강도는 217MPa로 질화규소( $Si_3N_4$ ) 자체의 강도 보다 작게 나타났음을 알 수 있었다.
4. 세라믹과 금속 접합의 파괴는 잔류응력이 크게 집중되는 세라믹측 계면에서부터 발생하여 세라믹측 내부쪽으로 진행되었으며 이러한 파괴경로는 BEM의 응력해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Reinhart, T. J., "Use of Structural Adhesives by the U.S Air Force", Adhesive Age, Vol. 10, No. 5, pp. 20-25, 1981.
2. 井出 正, "自動車用接着劑の動向", 日本接着協會誌, 第15卷 10號, pp. 476-482, 1979.
3. Pabst, R. F., "Adherence Properties of Metal-to-Ceramic Joints", J. Mat. Sci., No.15, pp. 188-196, 1980.
4. 小林英男, "セラミックス/金屬接合界面破壊のメカニズムとメカニクス", 日本機械學會論文集, 第60卷 577號, pp. 1913-1919, 1994.
5. Eedogan, F Shi, G. C., "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear", Trans. ASME, Dec. pp. 519-528, 1963
6. 小林英男, "セラミックス/金屬接合強度の力學的評價", 日本機械學會論文集, 第55卷 51號, pp. 750-755, 1989.
7. 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성의 해석", 대한기계학회논문집(A), 제20권 제10호, pp. 489-495, 1996.
8. Bogy, D. B., "The Plane Solution for Joined Dissimilar Elastic Semistrips under Tensions", J. Appl. Mech. Vol. 42, pp. 93-98, 1975.
9. 結城良治 外1人, "異材界面端の熱應力・残留應力の對數型應力特異性", 日本機械學會論文集 (A), 第58卷 556號, pp. 2394-2400, 1992.
10. 정남용, 김희송, 김기성, "세라믹/금속 접합재에 대한 잔류응력특이성의 해석", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 67-73, 1995.
11. JIS, "セラミックスの曲げ強さ試驗方法", R1601, pp. 275-276, 1981.