

## 질화규소/금속 접합재에 대한 파괴기준 및 파괴거동

김기성\*                      김희송                      정남용  
(대유공업전문대학 기계과) (단국대학교 기계공학과) (숭실대학교 기계공학과)

### Fracture Criterion and Fracture Behavior in $Si_3N_4$ /Metal Bonded Joints

K. S. Kim (Daeyoo Tech. College) H. S. Kim (Dankook Univ.) N. Y. Chung (Soongsil Univ.)

#### Abstract

Recently, the uses of ceramic/metal bonded joints for structural materials have increased in various engineering fields such as automobiles, heat engines, and so on. A method of strength evaluation focussing on fracture criterion of mixed mode was investigated in  $Si_3N_4$ /metal bonded joint. Also, Fracture toughness tests of  $Si_3N_4$ /metal bonded joints with an interface crack were carried out and the stress intensity factors of these joints were analyzed by boundary element method. From the results, the fracture criterion and method of strength evaluation by the fracture toughness were proposed in  $Si_3N_4$ /metal bonded joints

**Keywords** : Interface Crack(계면균열), Mixed Mode(혼합모드) Boundary Element Method(경계요소법), Fracture Criterion(파괴기준), Fracture Toughness(파괴인성), Stress Intensity Factor(응력세기계수)

#### 1. 서 론

최근 신소재의 개발과 함께 이들의 응용분야를 확대시키기 위하여 금속간의 이종재 접합에 큰 관심이 집중되고 있다. 특히 구조용 파인 세라믹은 내열성, 내마모성, 내식성 등의 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 구조용 부재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있으나, 금속재료와는 달리 파괴거동이 취성파괴의 양상을 나타내기 때문에 신뢰성이 결여되어 실용화에 큰 어려움이 제기되고 있다. 따라서 세라믹을 가스 터빈 또는 터보 과급기(turbo-charger)와 같은 기계구조용 재료<sup>(1)</sup>나 산업용 기기의 부품으로 활용하기 위해서는 충격강도가 높고 인성이 풍부한 각종 금속 재료와의 접합이 불가피한 실정이다.

그러나 세라믹/금속 접합은 일반적으로 고온에서 이루어지기 때문에 냉각과정에서 열팽창계수 차이로 인하여 접합 계면단에서 잔류응력이 집중적으로 발생하게 되며<sup>(2~4)</sup> 이는 접합재의 강도를

저하시키는 요인이 되고 있다. 특히 세라믹/금속 접합재의 강도평가는 미소균열을 전제로 잔류응력을 고려한 파괴역학 인자의 해석이 필요하고, 이들 인자에 의한 정량적인 강도평가 방법의 확립이 요망된다.

그러나 세라믹/금속 접합재에 대한 파괴양상은 다양하고, 일반적으로 혼합모드 균열이 되므로, 그 파괴역학인자의 평가·해석도 곤란하다<sup>(5-6)</sup>.

또한 세라믹/금속 접합재에 대한 혼합모드 파괴기준도 설정되어 있지 않으므로 이에 대한 강도평가 방법도 제시되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 질화규소/금속 접합재에 대한 혼합모드 파괴기준의 설정에 초점을 맞추어 경계요소법을 이용하여 고정밀도의 응력해석을 실시한 후 파괴역학인자를 계산하였다. 또한 파괴인성시험을 실시하여 혼합모드 파괴기준의 설정 방법을 제시하고, 질화규소/금속 접합재에 대한 강도평가 방법과 파면해석을 통하여 파괴거동을 검토하였다.

## 2. 질화규소/금속 접합재의 파괴역학인자의 계산

### 2.1 해석모델 및 해석방법

세라믹/금속 접합재료의 계면균열에 대한 응력세기계수의 BEM 해석에 사용된 형상 및 치수는 Fig. 1과 같으며, 세라믹 재료로는 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)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.

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

| Materials                      | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio $\nu$ | Thermal expan.coef. ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| 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  |

각 모델에 대해서는 Kelvin의 기본해를 사용한 2차원 탄성경계요소법을 이용하고, 3개의 영역분할로 전체 요소 분할수는 262로 하였다. 특히 균열선단에는 특이요소와 서브요소를 사용하여 고정밀도의 해석이 이루어 지도록 하였다.

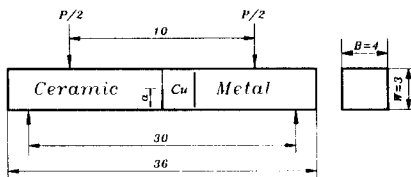


Fig. 1 Shape and dimension of ceramic/metal bonded joint

균열길이의 변화에 의한 응력세기계수를 해석하기 위하여 시험편 중간재의 두께를 0.2mm, 4점 굽힘하중을 0.4N, 접합 온도차를 800°C로 하고, 미소균열의 길이를 0.05mm에서 0.1mm까지 0.01mm간격으로 변화시켜 가면서 균열선단의 응력해석을 실시한 후, 진동 응력특이성이 발생하는 균열선단을 피하여 외삽법으로 응력세기계수 K<sub>1</sub>과 K<sub>2</sub>를 계산하였다.

### 2.2 접합계면균열의 파괴역학인자의 결정

질화규소와 금속 접합재의 계면균열에 대한 파괴역학 인자의 해석은 접합 계면상의 응력해석 결과를 이용하여 다음 식과 같이 균열선단으로부터의 거리 r로 외삽하여, 혼합모드 균열의 응력세기계수를 각 모드 성분으로 분리하여 구하였다.

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \cdot F_1 \quad (1)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \cdot F_2 \quad (2)$$

$$Q = \epsilon \ln(r/a) \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{k_1/G_1 + 1/G_2}{k_2/G_2 + 1/G_1} \right] \quad (4)$$

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

여기서  $\epsilon$ 은 이종재료 정수이고, a는 균열길이, G는 전단탄성계수,  $\nu$ 는 푸와송비이고, F는 무차원 응력세기계수이다

#### (1) 접합잔류응력에 의한 응력세기계수

접합계면균열이 존재할 때 접합잔류응력만에 의한 계면균열의 응력세기계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_y^{res} + i\tau_{xy}^{res} = \frac{K_1^{res} + iK_2^{res}}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r}{a} \right)^{ie} \quad (6)$$

여기서 윗첨자 res는 접합잔류응력을 나타낸다.

#### (2) 작용하중과 접합잔류응력의 중첩에 의한 응력세기계수

하중만이 작용하는 시험편에 대한 계면균열의 응력세기계수는 다음 식과 같다.

$$\sigma_y^p + i\tau_{xy}^p = \frac{K_1^p + iK_2^p}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r}{a} \right)^{ip} \quad (7)$$

여기서 윗첨자 p는 작용하중을 나타낸다.

또한 접합잔류응력이 존재하는 시험편에 외력이 작용하면 중첩의 원리에 의해서 계면균열의 응력세기계수는 식(6)과 식(7)로부터 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_y + i\tau_{xy} &= \sigma_y^{res} + \sigma_y^p + i\tau_{xy}^{res} + i\tau_{xy}^p \\ &= \frac{K_1^{res} + K_1^p + iK_2^{res} + iK_2^p}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r}{a} \right)^{ie} \end{aligned} \quad (8)$$

하중과 잔류응력장에 대한 계면균열의 응력세기 계수를 각각 구하여 이를 합산하면 중첩된 실제 응력세기계수  $K_1^T$ ,  $K_2^T$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$K_1^T = K_1^{Tres} + K_1^r, \quad K_2^T = K_2^{Tres} + K_2^r \quad (9)$$

### 3. 계면균열에 대한 응력세기계수의 해석결과

Fig. 1에 나타난 해석모델과 Table 1의 재료 물성치를 사용하여 질화규소/금속 접합재에 대한 미소계면균열의 응력세기계수를 경계요소법으로 해석하고, 그 결과를 나타내었다.

이때 Table 2는 질화규소와 금속의 접합층 두께를 0.2mm로 하고, 균열길이를 0.05mm에서 0.1mm까지 0.01mm간격으로 변화시켜 가면서, 접합온도차를 800℃로 하여 접합하였을 때, 질화규소측 계면에 대한 응력세기계수  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값을 나타내고 있다.

그리고 이와 같이 구한 응력세기계수  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값을 사용하여 균열길이가 0(무균열재)인 경우에 이를 외삽하여  $K$ 값을 결정하였다. 이때, 균열길이가 증가할수록 응력세기계수  $K_1$ 은 감소하나  $K_2$ 의 값은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$ 의 접합재가  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 의 접합재보다 응력세기계수  $K_1$ ,  $K_2$  값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 접합층의 두께가 0.2mm이고, 균열길이를 0.05mm에서 0.1mm까지 0.01mm간격으로 변화시킨 시험편에 4점 굽힘하중을 0.4N 작용시켰을 때, 질화규소측 계면에 대한 응력세기계수  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값을 나타내고 있다. 이때, 온도차이에 의한 응력세기계수  $K_1$ 보다 작용하중에 의한  $K_1$ 의 값이 월등히 크게 나타나고 있으며, 또한 균열길이가 증가할수록 응력세기계수  $K_1$ 의 값은 크게 증가하나  $K_2$ 의 값은 미소하게 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Table 4는 균열길이가 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1mm에 대하여, 중첩의 원리에 의해 접합온도차를 800℃, 4점 굽힘하중을 0.4N 작용하였을 때, 균열길이가 증가에 따른 질화규소측 응력세기  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값을 나타내고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$ 의 접합재와  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 의 접합재에 대한 Table 4의 수치해석 결과를 균열길이 변화에 대해서 응력세기계수  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값을 도시한 것이다. 균열길이가 증가함에 따라  $K_1$ 의 값은 크게 증가하나  $K_2$ 의 값은 미소하게 증가하고 있음을 알 수 있으며, 특히  $K_1$ 의 값은  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$ 의 접합재 보다  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 의 접합재에서 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 4의 수치해석 결과를 균열길이 변화에 대해서 응력세기계수의 비( $K_2/K_1$ )를 재료 조합의 형태로 도시한 것이다. 이때 균열길이가 증가함에 따라  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$  접합재의  $K_2/K_1$ 의 값은 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$  접합재의  $K_2/K_1$ 값이  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 의 접합재보다 큰 값을 나타내고 있으며, 또한 균열길이가 미소한 부분에서는  $K_2/K_1$ 의 값이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Stress intensity factors of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{metal}$  bonded joints ( $K: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

| $\Delta T$<br>(℃) | a<br>(mm) | $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$ |         | $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ |         |
|-------------------|-----------|---|---------|--|---------|
|                   |           | $K_1$   | $K_2$   | $K_1$  | $K_2$   |
| 800               | 0         | -0.4758   | -0.4658 | -0.2463  | -0.4323 |
|                   | 0.05      | -0.3838   | -0.5701 | -0.1699  | -0.5286 |
|                   | 0.06      | -0.3618   | -0.5923 | -0.1487  | -0.5506 |
|                   | 0.07      | -0.3413   | -0.6133 | -0.1298  | -0.5715 |
|                   | 0.08      | -0.3225   | -0.6344 | -0.1138  | -0.5916 |
|                   | 0.09      | -0.3052   | -0.6551 | -0.1001  | -0.6100 |
|                   | 0.1       | -0.2891   | -0.6752 | -0.0893  | -0.6266 |

Table 3 Stress intensity factors of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{metal}$  bonded joints ( $K: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

| P<br>(N) | a<br>(mm) | $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$ |        | $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ |        |
|----------|-----------|---|--------|--|--------|
|          |           | $K_1$   | $K_2$  | $K_1$  | $K_2$  |
| 0.4      | 0         | 0.4079  | 0.0807 | 0.3989   | 0.0831 |
|          | 0.05      | 0.6190  | 0.0663 | 0.6086   | 0.0687 |
|          | 0.06      | 0.6650  | 0.0623 | 0.6582   | 0.0621 |
|          | 0.07      | 0.7110  | 0.0583 | 0.7036   | 0.0581 |
|          | 0.08      | 0.7587  | 0.0562 | 0.7466   | 0.0553 |
|          | 0.09      | 0.7946  | 0.0531 | 0.7868   | 0.0532 |
|          | 0.1       | 0.8324  | 0.0509 | 0.8237   | 0.0514 |

Table 4 Stress intensity factors of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/metal bonded joints (K: MPa√m)

| ΔT (°C) | P (N) | a (mm) | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Cu/STS304 |                |                                | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Cu/SM45C |                |                                |
|---------|-------|--------|---|----------------|--------------------------------|--|----------------|--------------------------------|
|         |       |        | K <sub>1</sub>                            | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub> | K <sub>1</sub>                           | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub> |
| 800     | 0.4   | 0      | -0.0678                                   | -0.3805        | -2.9410                        | 0.1526                                   | -0.3493        | -1.2798                        |
|         |       | 0.05   | 0.2352                                    | -0.5038        | -2.142                         | 0.4387                                   | -0.4599        | -1.048                         |
|         |       | 0.06   | 0.3032                                    | -0.5300        | -1.748                         | 0.5095                                   | -0.4885        | -0.959                         |
|         |       | 0.07   | 0.3697                                    | -0.5551        | -1.501                         | 0.5738                                   | -0.5134        | -0.895                         |
|         |       | 0.08   | 0.4362                                    | -0.5782        | -1.325                         | 0.6328                                   | -0.5363        | -0.848                         |
|         |       | 0.09   | 0.4894                                    | -0.6119        | -1.250                         | 0.6868                                   | -0.5568        | -0.811                         |
|         |       | 0.1    | 0.5433                                    | -0.6243        | -1.149                         | 0.7344                                   | -0.5752        | -0.783                         |

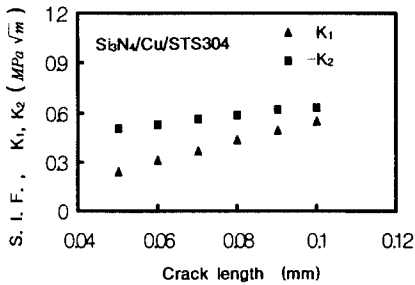


Fig. 2 Relation between S. I. F. and crack length

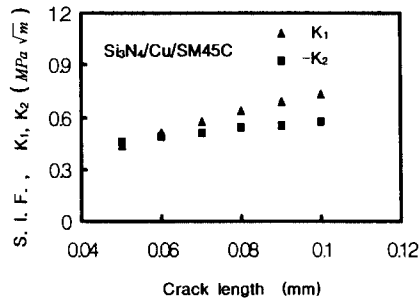


Fig. 3 Relation between S. I. F. and crack length

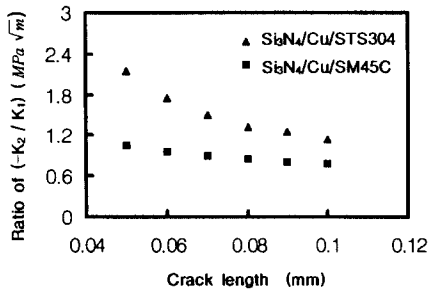


Fig. 4 Relation between K<sub>2</sub>/K<sub>1</sub> and crack length

## 4. 실험

### 4.1 시험편의 제작 및 실험 방법

본 실험에 사용된 세라믹 재료는 열간 가압 소결하여 만든 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)이고, 금속재료는 오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 구조용탄소강(SM45C)이며 이를 활성금속법으로 상호 접합하였다. 접합잔류응력을 완화시키기 위한 목적으로 사용된 중간재로는 전해동(Cu)을 사용하였고, 활성금속 브레이징 합금은 Cusil ABA를 이용하였다. 이때 접합조건은 10<sup>-5</sup> torr 이하의 진공상태에서 800°C로 10분간 유지하였으며, 승온속도 5.3°C/min, 냉각속도는 5°C/min이 되도록 하였다. 접합제에 대한 강도 및 파괴인성 실험은 각각 3개의 시험편에 대하여 4점 굽힘시험법으로 상온에서 측정하였다. 측정기기는 만능재료시험기(Instron 4206)를 사용하였으며, 이때 정적하중속도는 0.2mm/min 로 하였다.

### 4.2 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu/STS304의 파면형태를 나타낸 것이다. 이때 파괴가 일어나는 점이 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 중간재인 Cu의 계면단에서 발생되어 계면을 따라 균열이 진행된 후 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 쪽으로 굴절되는 형상을 나타내고 있다. 대부분 세라믹/금속 접합제에 대한 파괴형태는 이와 같은 양상을 보이고 있으며 이는 실험을 통하여 확인이 가능하였다.

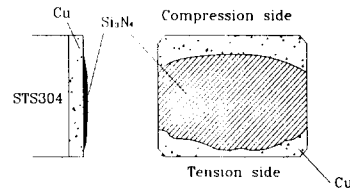
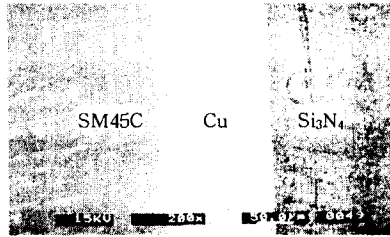


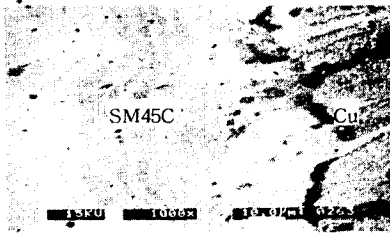
Fig. 5 Schematic illustrations of crack initiation sites and fracture pattern

Fig. 6(a),(b),(c)는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu/SM45C의 반응 접합면에 형성되는 반응층을 관찰하기 위하여 경계면을 3×4×4mm의 크기로 절단한 시험편에 30, 10, 6, 1 μm의 다이아몬드 현탁액을 사용하여 경면 연마기로 연마한 후, 용융 NaOH 용액에서 30~120초간 화학에칭 처리를 하여 주사현미경으로 관찰한 것이다. 이때 그림(a)는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu/SM45C 계면을 200배 확대하여 촬영한 것이며, 그림(b)와 그림(c)는

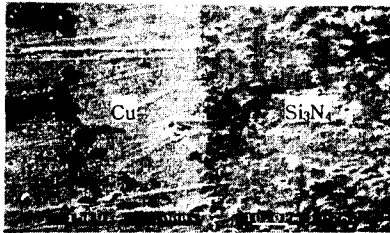
그림(a)에 대한 SM45C/Cu와 Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 계면을 1000배 확대하여 나타낸 것이다. 이때 접합온도가 새로 형성되는 반응물의 용융점보다 높은 경우 계면에서 액상이 형성되며 이는 질화규소와의 접촉을 향상시키고 또한 반응을 촉진 시키게 된다. 이와같은 화학반응은 세라믹과 금속의 접합재에서 관찰되는데 일반적인 브레이징의 경우 브레이징 온도에서 필러 메탈(filler metal)은 녹게된다



(a) Interface of SM45C/Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



(b) Interface of SM45C/Cu



(c) Interface of Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Fig. 6 SEM at the interface of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu/SM45C bonded joint

#### 4.2.1 질화규소/금속 접합재의 파괴인성 고찰

Table 5는 실험에서 구한 파단용력을 이용하여 질화규소/금속 접합재의 균열길이 변화와, 재료 상호조합에 대한 잔류응력과 작용하중 중첩에 의한 파괴인성치를 구하고 이것을 각 모드성분으로 분리한 응력세기계수의 BEM 해석결과를 나타낸 것이다. 이때 파괴인성치  $K_{Ic}$ 를 각 모드성분으로 분리하여  $K_{I1}$ ,  $K_{I2}$ 로 표시 하였다.

$K_{Ic} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \cdot F_1$ ,  $K_{IIc} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \cdot F_2$  식에서 각각 계산하였고, 또한 무차원화 응력세기계수  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ 로 하였다.

Table 5 Experimental result of fracture toughness  $K_{Ic}$  : MPa  $\sqrt{m}$

| Model                                     | a/W   | $K_{I1}^{res}$ | $K_{I2}^{res}$ | $K_{I1}^p$ | $K_{I2}^p$ | $K_{Ic}^1$ | $K_{Ic}^2$ | Kc     |
|---|-------|----------------|----------------|------------|------------|------------|------------|--------|
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Cu/STS304 | 0     | -0.3838        | -0.5701        | 0.7690     | 0.0087     | 0.3852     | -0.6665    | 0.7661 |
|   | 0.167 | -0.0922        | -0.9772        | 0.2190     | -0.0060    | 0.1268     | -0.9832    | 0.9913 |
|   | 0.333 | -0.0741        | -0.9584        | 0.3231     | -0.0206    | 0.2490     | -0.9790    | 1.0086 |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Cu/SM45C  | 0     | -0.1699        | -0.5286        | 0.9191     | 0.0104     | 0.7492     | -0.6162    | 0.7383 |
|   | 0.167 | -0.0041        | -0.7920        | 0.2398     | -0.0053    | 0.2357     | -0.7973    | 0.8314 |
|   | 0.333 | -0.0118        | -0.7384        | 0.3588     | -0.0199    | 0.3470     | -0.7583    | 0.8337 |

Fig. 7과 Fig. 8은 실험결과를 균열길이 비에 대하여 파괴인성치  $K_{Ic}$ 를 재료조합에 따른 변화를 나타낸 것으로, 각각의 시험편 3개에 대한 데이터의 최대값과 최소값을 표시하였고 그 평균값을 기호로 나타내어 실험값의 편차를 쉽게 알 수 있게 하였다. 이때 균열길이 비가 증가함에 따라 파괴인성치  $K_{Ic}$ 의 값은 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu/STS304의 접합재가 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu/SM45C 접합재보다 파괴인성치가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

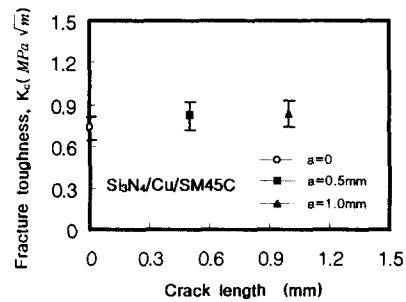


Fig. 7 Relation between fracture toughness,  $K_{Ic}$  and crack length

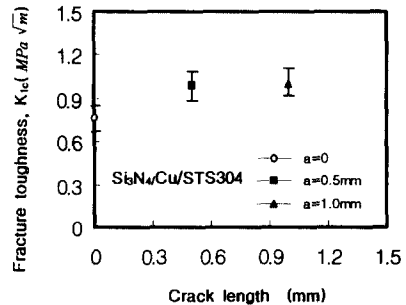


Fig. 8 Relation between fracture toughness,  $K_{Ic}$  and crack length

#### 4.2.2 질화규소/금속 접합재에 대한 혼합모드의 파괴기준

계면균열이 존재하는 질화규소/금속 접합재에 대한 파괴인성의 실험결과에 의해 혼합모드 파괴기준은 Fig. 7과 Fig. 8로부터 다음의 방법이 고려되어진다. 순수모드 I의 파괴인성치를  $K_{IC}$ , 순수모드 II의 파괴인성치를  $K_{2C}$ 라 하면, 다음과 같은 타원식을 제안한다.

$$\left[ \frac{K_1}{K_{IC}} \right]^2 + \left[ \frac{K_2}{K_{2C}} \right]^2 \geq 1 \quad (10)$$

따라서 세라믹/금속 접합재를 안전하게 사용하려면, Fig. 9에서 타원선의 아래에 있도록 응력을 제한할 필요가 있고, 작용응력이 타원선 이상이 되면 접착부재는 파괴되는 것을 판정할 수 있다.

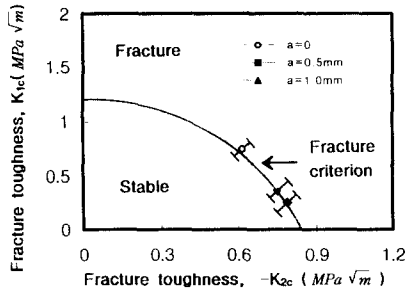


Fig. 9 Fracture criterion of mixed mode in  $Si_3N_4/Cu/SM45C$  bonded joints

본 실험에서 얻어진 질화규소/금속 접합재에 대한 파괴기준은 모드II 성분의 지배영역은 대체적으로 매우 적고 모드I 성분이 지배하는 영역이 크기 때문에 박리현상에 강한 파괴기준을 보여준다. 이러한 현상은 세라믹과 금속 접합과 같이 재료의 성질이 다른 이종재료의 상호조합에 따른 기계적 성질의 차이로 응력상태가 매우 복잡하게 변화하여 접합강도에도 큰 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다. 또한 본 실험에서 얻어진 질화규소/금속 접합재의 파괴기준은 세라믹과 금속을 접합하여 사용하는 각종 구조물을 안전하게 사용할 수 있는지의 판정이 가능하고, 파괴강도의 예측 및 강도평가방법의 확립도 가능할 것이다.

## 5. 결 론

질화규소/금속 접합재에 계면균열이 존재하

는 경우 정적 파괴강도를 정량적으로 평가할 수 있는 혼합모드 파괴기준을 설정하기 위하여 응력세기계수의 경계요소법해석과 파괴인성 실험을 실시한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 질화규소/금속 접합재에 계면균열이 존재하는 경우 균열길이의 변화에 대한 고정밀도의 응력세기계수의 BEM해석이 가능하였고, 그 변화 관계를 검토하였다.
- (2) 질화규소/금속 접합재 계면균열에 대한 파괴인성의 실험방법과 혼합모드 성분의 분리에 의한 파괴인성치를 계산하였다.
- (3) 질화규소/금속 접합재에 대한 혼합모드 파괴기준의 설정 방법과 이에 대한 파괴기준을 제안하였다.
- (4) 질화규소/금속 접합재의 파면형태와 파면해석을 통하여 질화규소 접합부재의 미세파괴기구를 규명하였다.
- (5) 본 연구에서 얻어진 파괴기준의 설정방법은 각종 세라믹과 금속 접합부재의 파괴기준은 물론 파괴강도의 예측 및 강도평가에도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- (1) Rainhart, T. J., "Use of Structural Adhesives by the U.S Air Force", Adhesive Age, Vol 10, No. 5, pp. 20-25, 1981
- (2) 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성의 해석", 대한기계학회논문집 (A), 제20권 제10호, pp. 3058-3067, 1996.
- (3) Yuuki, R., "Logarithmic Singularity on Thermal or the Interface Edge Point of Bonded Dissimilar Materials," JSME, Vol. 58, No. 556, pp. 2394~2400, 1992.
- (4) Seo, K., Kusaka, M., "Study on the Thermal Stress at Ceramics-Metal Joint," JSME, Vol. 55, No. 510, pp. 312~317, 1989.
- (5) Bogoy, D. B., "The Plane Solution for Jointed Dissimilar Elastic Semistrips Under Tension," Journal of Applied Mechanics, Vol. 42, pp. 93~98, 1975.
- (6) 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한 정적강도평가", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 제II권, pp. 489-495, 1996.