

## 금속/세라믹 계면 물성 분석

# Metal/ceramic Interface Mechanical Property Analysis

김 송 희\*      강 형 석\*\*  
Kim, Song-Hee    Kang, Hyung-Suk

---

### Abstract

The flexural strength from 3-point bend test and fatigue properties were measured to evaluate mechanical properties of metal/ceramic interface of the multilayer ceramic package produced through tape casting. From the results, the specimens with three electrode layers showed the highest strength. The temperature distribution with time during thermal cycle and thermal stresses with the change of electrode's shape have been estimated by mathematical modelling. Specimen affected by thermal shock, produced microcracks by the difference of thermal expansion coefficient. The results of tensile test and fatigue test showed the rupture at pin. The fact that the pin brazed specimens were always fractured at the pin proved the good bonding condition between pin and electrode.

**키워드 :** 다층 세라믹 패키지, 굽힘강도, 열충격, 인장시험, 피로시험, 열응력

**Keywords :** multilayer ceramic package, flexural strength, thermal shock, tensile test, fatigue test, thermal stress

---

### 1. 서론

패키지는 반도체를 보호하는 세라믹과 외부 전자 부품과의 전기적 연결 수단을 제공하는 금속으로 구성되어 있다. 이러한 패키지를 제조할 경우 세라믹의 제조 및 가공과 전극의 패턴 가공 등이 어려운 문제인데 특히 금속/세라믹 접합도 제조공정상 중요한 기술이다. 만약 동시 소성공정중 금속도체와 세라믹 사이에서 수축률 차이가 발생하면 휨과 함께 층간분리현상이 발생하므로 온도의 상승에 따른 수축률 변화를 일치시켜서[1] 금속/세라믹간 접합이 잘 이루어지도록 해야 한다. 그리고 핀을 세라믹에 브레이징하여 접합시킬 경우에도

브레이징재료의 세라믹에 대한 젖음성과 열응력이 중요 변수로 작용하게 되므로 재료의 선택도 적절해야 한다 [2, 3]다층 세라믹 패키지의 신뢰성과 안정성을 향상시키기 위해서는 세라믹/세라믹의 층간 결합상태, 세라믹/전극간의 결합상태, 가열냉각에 따른 열응력이 접합강도에 미치는 영향, 핀/전극/세라믹의 결합상태 등에 대한 보다 자세한 이해가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다층 세라믹 패키지의 열적 기계적 신뢰성 향상을 위하여 다음과 같은 연구를 행하였다. 전극 층수에 따른 세라믹 패키지 재료의 강도 평가, 열충격에 따른 강도의 변화, 전극의 형태에 따른 열응력의 크기와 급가열냉각시 세라믹 패키지 내부의 온도분포를 수학적으로 예측함으로써 보다 신뢰성 있는 다층 세라믹 패키지 개발에 기여하고자 하였다

---

\* 강원대학교 신소재공학과 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 기계공학과 교수, 공학박사

### 2. 실험방법

## 2.1 다층세라믹 패키지의 기계적 특성평가

전극이 인쇄된 패키지의 강도와 열충격 후의 강도를 조사하기 위해 굽힘시험을 실시하였으며 시험 후 파면조사를 통하여 전극과 세라믹 사이의 접합 상태를 조사하였다. 보통 다층 세라믹 패키지에는 전극이 회로형태로 인쇄되지만, 다층 세라믹 패키지에 있어 대표적 기계적 특성 평가를 위하여 본 실험에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직사각형 모양의 전극 패턴을 사용하였다. 소결된 시편에 대하여 굽힘시험을 하기위해 먼저 다이아몬드 커터를 사용하여 37.5(길이) × 3.6(폭) × 2.7(두께) mm 크기로 절단한후 절단면과 모서리를 다이아몬드 연마 휠과 연마지 cw 800, 1000, 1200으로 연마 및 연삭가공을 행하였다. 이렇게 가공한 시편에 대하여 상온에서 굽힘시험을 실시하였고 열을 가했을 때의 강도를 조사하기 위하여 열충격을 가하였다. 열충격은 600℃로 유지되는 로에 시편을 10분간 유지시켰다가 약 3분간 공기중에서 송풍기로 강제 급냉시키는 방식으로 반복 실시하였다. MTS사의 다이나믹 만능시험기를 이용하여 변위제어하에서 0.5mm/min의 속도로 굽힘강도측정을 행하였다.

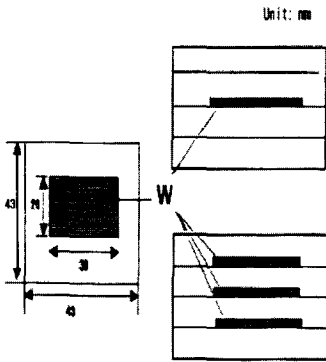


Fig. 1 Multilayer ceramic ackage schematic

## 2.2 핀의 인장시험과 피로시험

다층 세라믹 패키지에 브레이징된 핀의 접합상태를 평가하기 위하여 인장시험과 피로시험을 실시하였다. 인장시험에서는 본 연구를 통하여 제조한 일본 K사 제품의 접합상태를 평가하고 인장강도를 비교하였다. 시편을 Fig. 2와 같이 절단한 후, 자체 설계, 제작한 그림을 이용하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 만능시험기(MTS, model

810)을 이용하여 변위제어하에서 1 mm/min의 속도로 실시하였다. 피로시험은 반복하중을 가했을 때 핀과 세라믹의 접합면에서 파단이 발생하는지를 조사하기 위하여 실시하였으며 만능시험기를

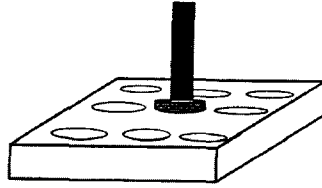


Fig. 2 Pull-out test specimen

이용하여 하중제어방법으로 핀의 인장강도의 60%~30%의 응력을 가하였으며, zero to tension 방식으로 주파수는 20Hz로 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열충격을 위한 가열시 온도분포 예측

시편에 열충격을 가하기 위하여 600℃로 유지된 로에 시편을 넣어서 10분간 열을 가한 다음 공기중에서 송풍기로 급랭시켰다. 본 고찰에서는 냉각된 시편을 다시 로내로 넣어서 가열하는 반복적인 과정에서 시편의 온도분포를 알아보고자 하였다. 열충격시 시편내부의 온도분포를 알아보기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

지배방정식(1)을 풀기위해 적용하는 경계조건들은 다음과 같다.

$$T(0, y, z, t) = T_0 \quad 0 < t, \quad 0 \leq y \leq l_2, \quad 0 \leq z < l_3 \quad (2)$$

$$T(l_1, y, z, t) = T_0 \quad 0 < t, \quad 0 \leq y \leq l_2, \quad 0 \leq z < l_3 \quad (3)$$

$$T(x, 0, z, t) = T_0 \quad 0 < t, \quad 0 \leq y \leq l_2, \quad 0 \leq z < l_3 \quad (4)$$

$$T(x, l_2, z, t) = T_0 \quad 0 < t, \quad 0 \leq y \leq l_2, \quad 0 \leq z < l_3 \quad (5)$$

$$T(x, y, 0, t) = T_0 \quad 0 < t, \quad 0 \leq x \leq l_1, \quad 0 \leq y \leq l_2 \quad (6)$$

$$T(x, y, l_3, t) = T_0 \quad 0 < t, \quad 0 \leq x \leq l_1, \quad 0 \leq y \leq l_2 \quad (7)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_1 \quad 0 \leq x \leq l_1, \quad 0 \leq y \leq l_2, \quad 0 \leq z \leq l_3 \quad (8)$$

지배방정식에 경계조건등을 적용하여 풀면 직육면체의 온도분포를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} N_{ijk} \cdot f_i(x) \cdot f_j(y) \cdot f_k(z) \cdot f_{ijk}(t) \quad (9)$$

여기서

$$N_n = \left[ \frac{8(T - T_0)}{i\pi k \pi^2} \cdot (1 - (-1)^n) \cdot (1 - (-1)^{2n}) \cdot (1 - (-1)^{4n}) \right] \quad (10)$$

$$f_i(x) = \sin\left(\frac{i\pi x}{l_1}\right) \quad (11)$$

$$f_j(y) = \sin\left(\frac{j\pi y}{l_2}\right) \quad (12)$$

$$f_k(z) = \sin\left(\frac{k\pi z}{l_3}\right) \quad (13)$$

$$f_{i,j,k}(t) = e^{-a\left(\frac{i^2\pi^2}{L_1^2} + \frac{j^2\pi^2}{L_2^2} + \frac{k^2\pi^2}{L_3^2}\right)t} \quad (14)$$

직육면체 내의 온도분포를 나타내는 식(9)를 수치적으로 풀기 위하여 다음과 같은 데이터를 사용하였다

k (thermal conductivity)=0.3W/cm K for Alumina

$\rho$  (density) = 3.5 g/cm<sup>3</sup>

$c_p$  (specific heat) = 1.154 J/g K for 88% alumina at 500°C

$a = \frac{k}{\rho c_p}$ , thermal diffusivity)=0.0743 cm<sup>2</sup>/s

$l_1$  (x 방향 길이) = 3 cm

$l_2$  (y 방향 길이) = 0.24 cm

$l_3$  (z 방향 길이) = 0.32 cm

$T_0$  (로 내의 온도) = 600°C

$T_1$  (대기 온도) = 25°C

이와 같은 식을 이용하여 계산한 결과 Fig. 3과 같은 온도분포가 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 시편이 로내로 들어가면 시편내부의 온도가 0.3 sec 만에 로내의 온도인 600°C로 상승하는 것을 볼 수가 있다. 하지만 실제 열충격 시험에서는 냉각된 시편이 로내로 들어가면 로내의 온도는 약 587°C로 떨어지며 600°C로 승온하는데는 약 3분 가량이 소요되었다. 따라서 열충격시 송풍기에 의해 냉각된 시편이 로에 다시 들어가면 시편내부의 온도는 충분히 목표온도에 도달하고 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 굽힘강도 측정결과

전극이 인쇄된 시편에 대하여 modulus of rupture test를 실시해서 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 보는 바와 같이 전극층수가 증가할수록 강도가 증가하였는데 이는 유리질에 의해 전극층이 세라믹과 접합을 잘 이루고 전극입자가 유리질에 의해 젖으면서 조밀화되어 [4, 5] 강화역할을 한 것으로 사료된다. 전극층수의 유리질은 소결

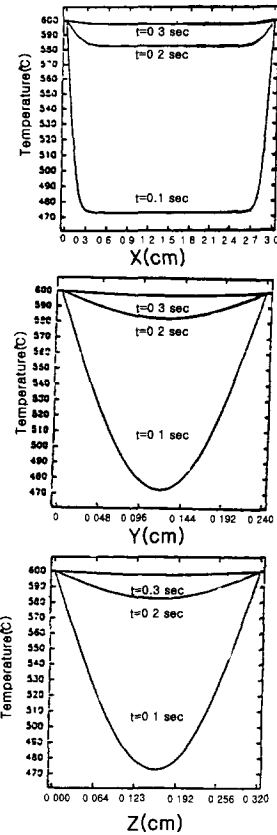


Fig. 3 Temperature profile of the specimen by thermal shock

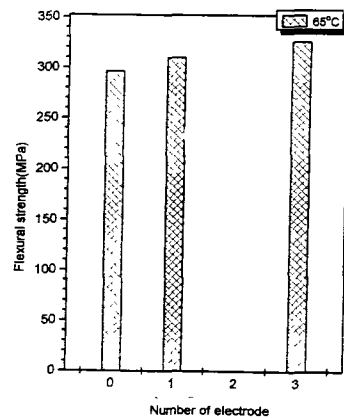
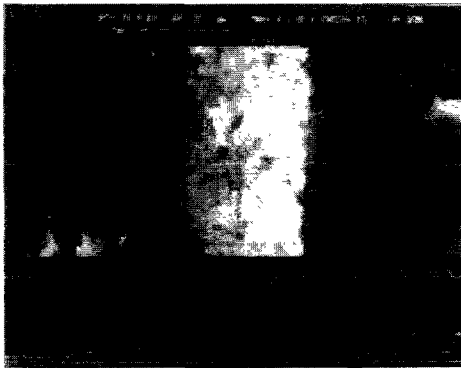
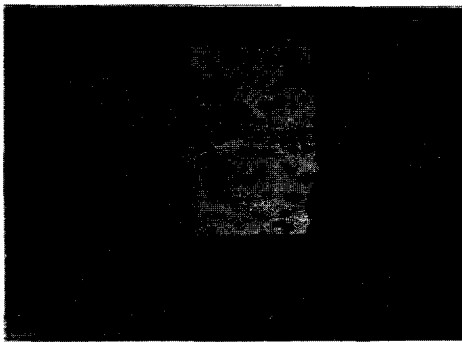


Fig. 4 The Change in flexural strength of sintered package as a function of the number of electrode



(a)



(b)

Fig. 5 EDAX analysis of sintered package about glass penetration

동안 세라믹쪽에서 발생한 유동성 유리질이 모세관 압력차로 인해 이동[6]한 것으로 사료된다 Fig. 5는 패키지에 대하여 EDAX 분석을 실시한 것으로 (a)에서 보는 바와 같이 전극층에서 Si가 관찰되었으며, (b)에서 보는 바와 같이 전극과 세라믹의 계면에서도 관찰되었다. 유리질로 채워진 알루미늄의 기공의 크기가 전극층의 기공보다 크다면 모세관 압력차로 인해 유리질의 이동이 일어나고,

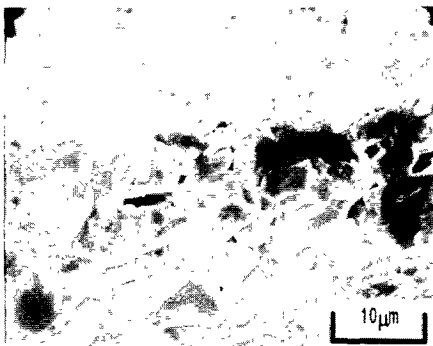


Fig. 6 SEM image of fracture surface

양쪽의 pore 크기가 같다면 온도나 로분위기에 의해 영향을 받을것으로 사료된다. [4] Fig. 6은 굽힘 시험한 시편의 파면을 SEM으로 관찰한 것으로 세라믹부분은 입계파괴와 입내파괴를 보이며 전극은 입계파괴를 보인다. 전극과 세라믹의 접합상태는 양호한 것으로 보인다. 전극이 인쇄된 시편에 열충격을 가한 후, 굽힘강도를 측정하려 하였는데, 열충격을 받던 일부 시편에서 파괴가 일어났다.

전극이 없는 시편의 경우 열충격시 파괴가 발생하지 않았으나 전극이 인쇄된 시편의 경우는 전극층이 넓게 인쇄되어 있어서 열충격동안 열팽창계수차이에 의한 열응력이 발생하여 파괴가 발생한 것으로 사료된다. 열충격 30 회만에 총 시편 개수의 1/6에서 파괴가 발생하였고 남은 시편에 다시 열충격을 30회 더 실시하여 총 60회의 열충격을 가하였을 때 25/42에서 파괴가 발생하였다. 측정 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 열충격을 가하지 않은 3층 전극시편의 강도는 326MPa이고 열충격을 30회 가한 시편의 강도는 평균 265MPa, 열충격을 60회 가한 시편의 경우 120MPa로 강도가 떨어지는 것을 볼수가 있다. 열충격을 받은 시편의 강도값은 열충격시 파괴된 시편의 개수와 측정된 시편의 개수를 고려하여 강도값을 환산한 것이다.

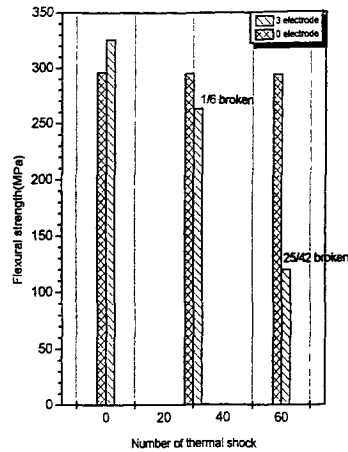


Fig. 7 The change in flexural strength of sintered package by thermal shock

### 3.3 열충격에 의한 열응력과 인장력, 전단력 계산

본 연구에서 실시했던 열충격 시험에서 시편들의 파괴가 발생하였다. 열팽창계수차이로 인해 발생한 열응력에 의해 파괴가 일어난 것으로 보고 본 고찰에서는 열충격시 발생하는 응력을 전극 형태별로 계산해 보았다. 단순 형태의 전극을 갖는

시편을 A type, 회로 형태의 전극을 갖는 시편을 B type이라 하고 시편의 파괴를 발생시키는 힘은 z방향으로의 인장력에 대한 경우와 y 방향으로의 전단력에 의한 경우로 나누었다. A type의 경우 Fig 8 (a)와 같이 전극을 전면에 인쇄한 시편으로

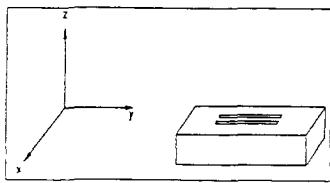
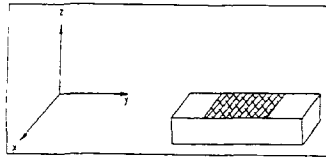
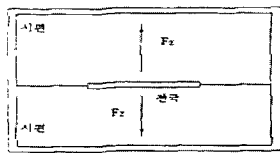
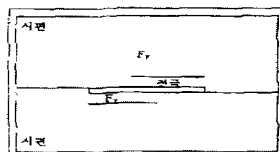


Fig 8 Types of printed electrode (a) A type (b) B type

세라믹 시편의 크기는 37.5(길이) × 37(폭) × 2.7(두께) mm이며 전극의 크기는 17.4(길이) × 3.7(폭) mm이며 전극의 탄성계수는 340 × 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup> ν는 0.2이다 먼저 Fig. 9 (a)에서 보는 바와 같이 z방향으로의 인장력에 의한 경우를 살펴보면 시편을 600℃로 가열시 x 방향으로의 자유롭게 늘어난다고 가정하고(σ<sub>x</sub>=0), y 방향으로 시편과



(a)



(b)

Fig. 9 Failure modes of specimen (a) mode I (b) mode II

전극의 변형률의 차이(Δε)에 의해 나타나는 σ<sub>y</sub>에 의한 효과와 전극의 z 방향으로의 변형률(ε<sub>z</sub>)로부터 인장력 Fz를 구한다 식 (15)를 이용하여 Table 1과 같은 전극의 변형률(ν와 z 동일)과 세라믹의 변형률을 구한다 식(16)을 이용하여 응력을 구하고 인장력과 전단력을 계산하였다

$$\epsilon = \alpha(\Delta T) \quad (15)$$

α 열팽창계수  
ΔT 온도변화

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x + \nu \Delta \epsilon) \quad (16)$$

(ν=0.2 : 텅스텐의 경우)

응력을 계산한 결과 σ<sub>z</sub>는 1 × 10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup> 이 응력을 이용하여 인장력을 계산하면 z방향으로의 인장력 F<sub>z</sub>=σ<sub>z</sub> × A<sub>z</sub> = 64 kN이다 그리고 Fig 9(b)와 같이 y방향으로의 전단력에 의한 경우 전단응력 τ = E × Δε 이고, 이 전단응력을 이용하여 전단력 F<sub>y</sub> 값을 구하면 F<sub>y</sub>=E × Δε × A<sub>y</sub> = 102 N 이다 B type의 경우 Fig 8 (b)와 같이 회로 형태와 비슷하게 전극을 가늘게 배열하였다 전극의 길이는 17.4 mm이고 전극의 폭은 0.5mm로 하였고 3개를 배열하였다 시편을 600℃로 가열시 x 방향으로의 시편과 전극의 변형률의 차이(Δε<sub>1</sub>)에 의한 σ<sub>x</sub>와, y 방향으로 시편과 전극의 변형률의 차이(ε<sub>2</sub>)에 의한 σ<sub>y</sub>에 의한 영향, 그리고 z방향으로의 전극의 변형률(ε<sub>z</sub>)로부터 인장력 F<sub>z</sub>를 구한다 A type과 마찬가지로 식 (15)를 이용하여 전극의 변형률 (x, y, z 방향으로 모두 동일)과 세라믹 시편의 변형률 (x 방향과 y 방향이 동일)을 구하면 Table 1과 같으며 식(17)을 이용하여 응력을 구한다

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-\nu-\nu^2)} (\nu \Delta \epsilon_x + \nu \Delta \epsilon_y - \nu \Delta \epsilon_z) \quad (17)$$

계산한 결과 응력은 1.16 × 10<sup>3</sup> N/m<sup>2</sup> 인장력 F<sub>z</sub>는 F<sub>z</sub>=σ<sub>z</sub> × A<sub>z</sub> = 101 kN (전극 1개당의 힘)이며 전극이 3개 일 경우 F<sub>z</sub> = 101 × 3 = 303 kN이다 ν

Table 1 Strain Produced by thermal shock in each type

Type	α(℃)	ΔT	ε = α · ΔT	Δε
A type	4.6 × 10 <sup>-6</sup> (W)	580℃	ε <sub>x,z</sub> = 2.668 × 10 <sup>-3</sup>	Δε <sub>x,y</sub> = 0.812 × 10 <sup>-3</sup>
	6 × 10 <sup>-6</sup> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		ε <sub>y</sub> = 3.48 × 10 <sup>-3</sup>	
Type	α(℃)	ΔT	ε	Δε
B type	4.6 × 10 <sup>-6</sup> (W)	580℃	ε <sub>x,z</sub> = 2.668 × 10 <sup>-3</sup>	Δε <sub>x,y</sub> = 0.812 × 10 <sup>-3</sup>
	6 × 10 <sup>-6</sup> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		ε <sub>x,y</sub> = 3.48 × 10 <sup>-3</sup>	

방향으로의 전단력에 의한 경우  $F_y = E \cdot \Delta \varepsilon \cdot A_y = 1.4 \text{ N}$  이다. 그러므로 전극이 3개일 경우  $F_y$ 를 계산해보면  $F_y = 1.4 \times 3 = 4.2 \text{ N}$ 이다. 따라서 2가지 경우의 값을 비교해 볼 때 열충격시 발생하는 응력에 의해 나타나는 인장력과 전단력이 전극이 전면 에 인쇄된 A type이 가늘게 인쇄된 B type보다 크므로 파괴가 일어날 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 핀인장시험과 피로시험결과

인장시험결과 양쪽 제품 모두 핀에서 파단이 발생하였다. 이로부터 핀의 인장강도를 얻었으며 인장강도는 본 연구 제품이 602MPa, 일본 K 사 제품의 경우 565MPa를 나타내었다. 본 연구 제품과 K사 제품을 비교해본 결과 본 연구 제품의 제조상태가 보다 양호함을 알 수 있었다. 반복하중에 대한 핀/세라믹 접합부의 거동을 조사하기 위해 피로시험을 실시한 결과는 Fig. 10과 같다. 먼저 핀 인장강도의 60%의 응력을 반복적으로 가하였으며 10만회만에 pin에서 파단이 발생하였다. 다시 인장강도의 50%의 응력을 가하였는데 41만회에 pin에서 파단이 발생하였다. 이와 같이 응력을

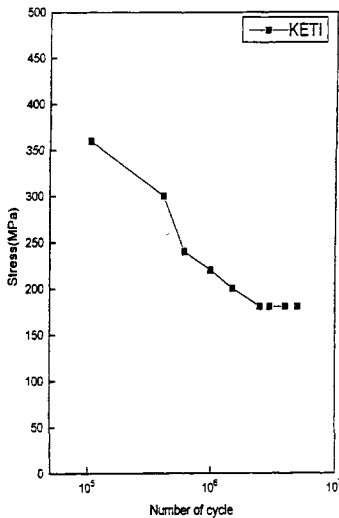
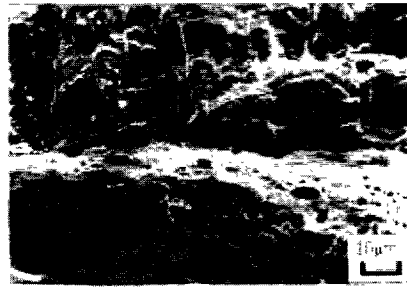
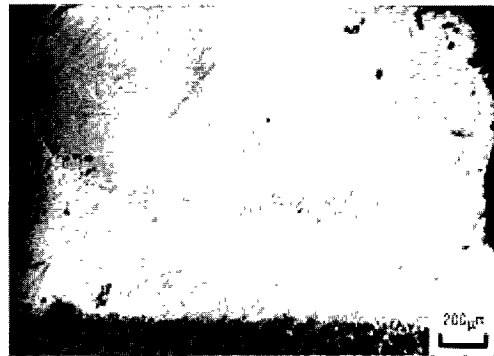


Fig. 10 S-N curve of pin/ceramic package interface



(a)



(b)

Fig. 11 Micrographs of fatigue test specimen

(a) fatigue fractured surface

(b) pin/ceramic bonded region

줄여 가면서 시험을 하였으나 계속 pin에서 파단이 발생하였다. 인장강도의 30%의 응력을 가하였을 때 250만회 이상에서 파단이 발생하였고 이 응력을 피로한으로 보고 피로시험을 중단하였다. 핀을 세라믹에 브레이징하여 접합시킨 경우 접합부에 결함이 있다면 반복적으로 가해지는 하중에 의해 결함이 성장하여 접합부에서 파단이 일어날 것으로 예상하였으나 피로시험 결과 핀에서 파단이 발생하였다. Fig. 11은 인장강도의 30%의 응력을 가한 시편을 관찰한 것으로 (a)는 피로파괴를 일으킨 부분을 SEM으로 관찰하였다. 파면을 보면 피로시험에 흔히 나타나는 물결무늬가 보이며 마지막 파단부분에서는 연성의 덩골파괴를 보인다. (b)는 피로시험의 핀 접합부분을 광학현미경으로 관찰한 것으로 균열이 발생하지 않았다. 즉 피로시험이 접합부위에 아무런 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었고 접합상태가 양호함을 확인하였다.

## 5. 결론

전극이 인쇄된 다층 세라믹 패키지와 브레이징을 통하여 핀을 접합시킨 패키지에 대한 금속/세라믹 계면물성분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다

1 전극층의 수가 다르게 인쇄된 패키지의 강도 시험 결과 전극층의 수가 증가할수록 강도가 증가하였으며 유리질에 의해 조밀화된 전극층이 강화 역할을 한 것으로 사료된다.

2 열충격시 열응력 분포상태를 알아보기 위하여 진극 형태별로 계산해 본 결과 열충격시 발생하는 응력에 의해 나타나는 인장력과 전단력이 전극이 가늘게 인쇄된 시편보다 전면에 인쇄된 시편이 크므로 파괴가 일어날 가능성이 높다는 것을 알았다. 전극 패턴 설계시 필요이상 넓은 폭을 갖도록 전극을 설계하는 것은 오히려 열충격시 큰 전단응력을 발생시켜 신뢰성이 떨어진다.

3 핀과 세라믹 사이의 접합상태를 평가하기 위하여 핀을 브레이징한 시편에 인장시험과 피로시험을 실시하였으며 그 결과 접합부위가 아닌 핀에서 파단이 발생하였다. 결국 핀/세라믹의 접합상태가 양호하다는 것을 알 수 있었고 인장강도의 30%응력에서 피로한이 나타나는 핀의 피로수명-응력 곡선을 얻었다

## 참 고 문 헌

- [1] 이동주, "반도체 패키지용세라믹스", 월간세라믹스, 3월호, 1992
- [2] 장병록, 유연철, "금속/세라믹 접합기술", 대한금속학회회보, Vol.4, No.1, 1991
- [3] 김기환 외 3 인, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/STS304 스테인레스강의 브레이징에 의한 계면접합", 대한금속학회지, Vol.31, No.3, pp 388-397, 1993.
- [4] M.E. Tentyman, "High-Temperature Metallizing I. The Mechanism of glass Migration in the production of Metal-Ceramic Seals", *J. Mater Sci.*, 10 pp 765-776, 1975.
- [5] Gesa Behrens and Arthur H Heuer, "Microstructural characterization of cofired tungsten-metallized high-alumina electronic substrates", *J Am. Ceram Soc.*, 75[10] pp 2815-2824, 1992
- [6] ME Twentyman, P Poper, "High-Temperature Metallizing, Part 2. The Effect of Seals to debased Aluminas", *J. Mater Sci.*, 10 pp.777-790, 1975.

- [7] John G. Pepin and Wilham Borland, "Electrode-based causes of delaminations in Multilayer Ceramic Capacitors", *J Am Ceram Soc.*, 72[12] pp.2287-2291, 1989
- [8] 김문생 외 4인 공역, "재료역학", 청문각 pp 279-295, 1992
- [9] 최종술, 권숙인, 김송희 공역, "금속강도학", 희중당, 1993