

균열선단에 대한 고정밀도의 경계요소법 응력해석 결과를 이용하여 파괴역학 인자를 계산하였다. 또한 정적 파단장도 실험을 실시하여 세라믹과 금속 접합부에 대한 파괴응력, 파괴형태 및 파괴원인을 규명하고 세라믹 접합부재의 파괴역학적 강도평가 방법의 필요성을 검토하였다.

2. 세라믹 접합부재의 계면균열진전 형태 및 파괴역학인자의 결정

2.1 접합계면균열의 파괴역학인자의 결정

세라믹 접합부재의 계면균열에 대한 파괴역학인자의 해석은 접합계면상의 응력해석 결과를 이용하여 다음 식과 같이 균열선단으로부터의 거리 r 로 외삽하여 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 구한다.

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

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

$$Q = \epsilon \ln(r/2a) \quad (3)$$

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

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

여기서 ϵ 은 이종재료 정수이고, a 는 균열길이, G 는 전단탄성계수, ν 는 프와송비이고, F 는 무차원 응력세기계수이다

(1) 접합잔류응력에 의한 응력세기계수

접합계면균열이 존재할 때 접합잔류응력만에 의한 계면균열의 응력세기계수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 윗첨자 res 는 접합잔류응력을 나타낸다.

(2) 작용하중과 접합잔류응력의 중첩에 의한 응력세기계수

하중만이 작용하는 시험편에 대한 계면균열의 응력세기계수는 다음 식과 같다.

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

여기서 윗첨자 p 는 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.

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

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

$$K_1^T = K_1^{res} + K_1^p, \quad K_2^T = K_2^{res} + K_2^p \quad (9)$$

2.2 세라믹 접합부재의 계면균열 진전형태

실제의 세라믹/금속 접합과정에서 생기는 접합계면의 조직 및 형상은 복잡하지만 실제 구조물에 대한 균열진전 형태는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 계면단에서 직접 세라믹쪽으로 균열이 발생하는 경우와 계면을 따라 균열이 진전하는 경우, 계면을 따라 균열이 진전하다 세라믹쪽으로 균열이 굴절하는 3가지 파괴양상으로 분류할 수 있다⁽⁹⁾. 이들 대부분은 혼합모드 균열로 존재하므로 균열은 직진하지 않고 굴절하면서 진전한다. 이와 같은 세라믹 접합부재의 균열진전방향 및 경로를 예측하고, 파괴기준을 설정하기 위해서는 세라믹/금속 접합계면균열에 대한 파괴역학 인자의 해석이 무엇보다도 선행되어야 한다.

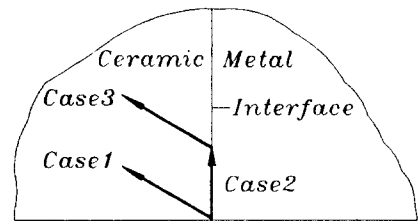


Fig. 1 Types of crack propagation path in ceramics/metal bonded joint

3. 응력세기계수의 BEM 해석

3.1 세라믹 접합부재의 해석 모델

세라믹/금속 접합재료의 계면균열에 대한 응력세기계수의 BEM 해석에 사용된 형상 및 치수는

Fig. 2와 같으며, 세라믹 재료로는 질화규소(Si_3N_4)와 알루미나(Al_2O_3)를 사용하고, 금속재료로는 오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 기계구조용 탄소강(SM45C)을 상호 접합하고 중간재로는 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 ν	Thermal expan.coef. ($\times 10^{-6}/^{\circ}C$)
Si_3N_4	304	0.27	3.0
Al_2O_3	359	0.22	7.5
STS304	193	0.30	16.5
SM45C	206	0.30	12.0
Cu	108	0.33	17.7

각 모델에 대해서는 영역분할법으로 등매개요소를 사용하였으며 전체 요소 분할수는 접합층이 없는 2개의 영역인 경우는 156개, 접합층이 있는 3개의 영역인 경우에는 262로 하였다. 특히 균열선단에는 특이요소와 서브요소를 사용하여 고정밀도의 해석이 이루어지도록 하였다.

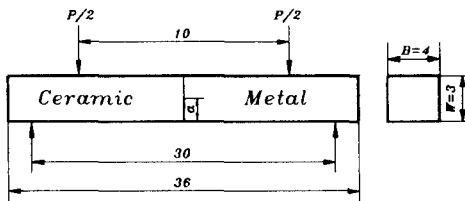


Fig. 2 Shape and dimension of ceramic/metal bonded joint

온도변화 및 작용하중에 의한 응력세기계수를 해석하기 위하여 시험편 중간재의 두께를 0.2mm, 초기균열 길이는 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 하였으며, 접합 온도차는 300 $^{\circ}C$, 500 $^{\circ}C$, 800 $^{\circ}C$ 로 하였다. 또한 4점 굽힘하중을 400N 가하면서 응력해석을 실시한 후, 외삽법에 의하여 균열선단에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 계산하였다.

3.2 세라믹/금속 접합계면균열에 대한 응력세기계수의 해석

(1) 접합층이 없는 경우

세라믹/금속 접합재에 대한 계면균열의 응력세기계수는 접합층이 없는 시험편에 대하여 접합온도차를 300 $^{\circ}C$, 500 $^{\circ}C$, 800 $^{\circ}C$ 로 하고, 균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시켰을 때 각 재료 조합에 따른 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

이때 온도차가 일정하고 균열길이가 증가할수록 세라믹/금속의 상호조합에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값은 감소하고 있으나, 균열길이를 일정하게 하고 온도차를 300 $^{\circ}C$, 500 $^{\circ}C$, 800 $^{\circ}C$ 로 증가시켰을 때 K_1 과 K_2 의 값은 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 K_1 에 비하여 K_2 의 값이 훨씬 크게 나타나고 있으므로 잔류응력만에 의한 응력세기계수는 K_2 의 값에 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 4점 굽힘하중을 400N로 일정하게 가하면서 균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시켰을 때 K_1 과 K_2 의 값을 나타내고 있다. 이때 균열길이가 증가함에 따라 K_1 과 K_2 의 값이 크게 증가하고 있으나, 잔류응력이 작용할 때와는 달리 K_2 의 값이 K_1 에 비하여 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 접합온도차와 작용하중을 동시에 고려하였을 때, 균열길이의 변화에 따른 K_1 과 K_2 의 값을 나타내고 있다. 이때 굽힘하중과 접합 온도차를 일정하게 유지하고 초기균열 길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 증가시키에 따라 K_2 의 값이 K_1 에 비하여 크게 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 굽힘하중과 균열길이를 일정하게 유지하고 온도차를 300 $^{\circ}C$, 500 $^{\circ}C$, 800 $^{\circ}C$ 로 변화시켰을 때, K_1 의 값은 미소하게 감소하나 K_2 의 값은 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Table 2 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints ($K: MPa\sqrt{m}$)

ΔT ($^{\circ}C$)	a (mm)	$Si_3N_4/STS304$		$Si_3N_4/SM45C$		$Al_2O_3/STS304$		$Al_2O_3/SM45C$	
		K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
300	0.5	-0.0468	-0.4747	-0.0272	-0.3302	-0.0415	-0.3496	-0.0195	-0.1912
	1	-0.0413	-0.4586	-0.0240	-0.3189	-0.0361	-0.3372	-0.0169	-0.1843
	1.5	-0.0299	-0.4007	-0.0208	-0.2815	-0.0313	-0.2974	-0.0146	-0.1626
500	0.5	-0.0773	-0.7904	-0.0450	-0.5500	-0.0686	-0.5822	-0.0324	-0.3184
	1	-0.0638	-0.7609	-0.0397	-0.5307	-0.0597	-0.5618	-0.0280	-0.3073
	1.5	-0.0493	-0.6669	-0.0345	-0.4687	-0.0518	-0.4952	-0.0243	-0.2707
800	0.5	-0.1214	-1.2603	-0.0709	-0.8785	-0.1087	-0.9299	-0.0515	-0.5090
	1	-0.1003	-1.2147	-0.0621	-0.8482	-0.0945	-0.8974	-0.0446	-0.4914
	1.5	-0.0776	-1.2620	-0.0544	-0.7484	-0.0820	-0.7916	-0.0386	-0.4313

Table 3 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints ($K: MPa\sqrt{m}$)

P (N)	a (mm)	$Si_3N_4/STSS30$		$Si_3N_4/SM45C$		$Al_2O_3/STSS30$		$Al_2O_3/SM45C$	
		K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
400	0.5	2.0318	-0.0366	2.0323	-0.0447	2.0322	-0.0715	2.0327	-0.0365
	1	3.2009	-0.2051	3.2040	-0.1678	3.1965	-0.2279	3.2003	-0.1904
	1.5	5.0094	-0.4000	5.0109	-0.3305	4.9939	-0.4604	5.0033	-0.3893

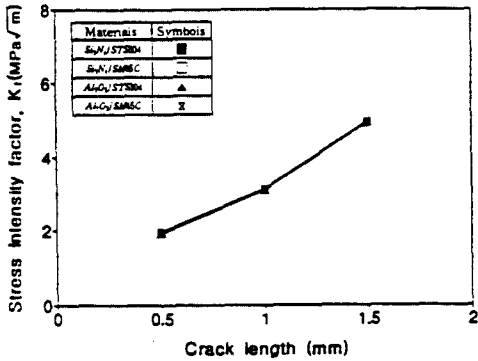


Fig. 3 Relationship between stress intensity factor(K_1) and normalized crack length ceramic/metal bonded joints ($P=400N, \Delta T=800^\circ C$)

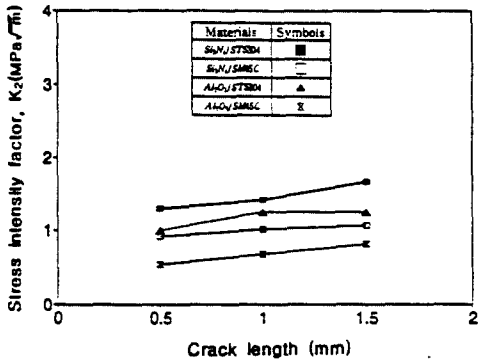


Fig. 4 Relationship between stress intensity factor(K_2) and normalized crack length ceramic/metal bonded joints ($P=400N, \Delta T=800^\circ C$)

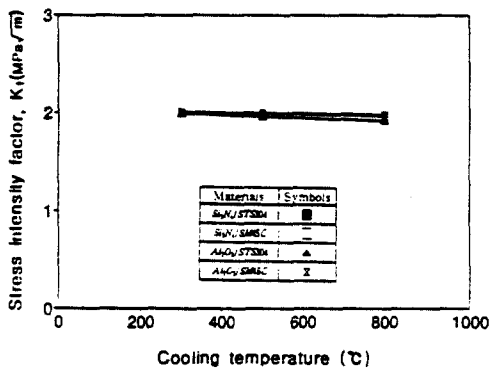


Fig. 5 Relationship between stress intensity factor(K_1) and normalized crack length ceramic/metal bonded joints ($P=400N, a=0.5mm$)

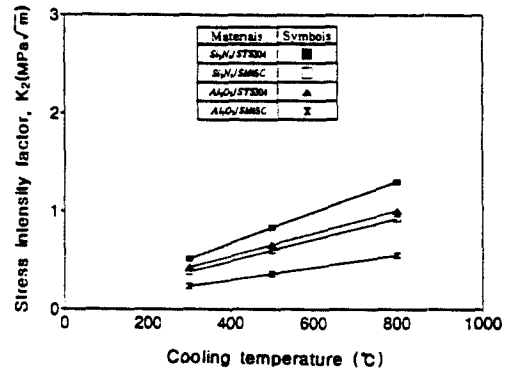


Fig. 6 Relationship between stress intensity factor(K_2) and normalized crack length ceramic/metal bonded joints ($P=400N, a=0.5mm$)

(2) 접합층이 존재하는 경우

Table 4는 접합층의 두께를 0.2mm로 일정하게 하고 접합 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로, 초기 균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시켰을 때, 각 재료조합에 대한 세라믹측 계면의 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값을 나타내고 있다.

이때, 온도차가 일정하고 균열길이가 증가할수록 세라믹측 계면의 응력세기계수 K_1, K_2 의 값은 미소하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 일정한 균열길이에 온도가 증가함에 따라 K_1 과 K_2 의 값은 증가하는 경향을 보이고 있다.

Table 5는 초기균열 길이가 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm인 시험편에 굽힘하중이 400N로 작용하였을 때, 세라믹측 계면에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값을 나타낸 것으로 균열길이가 증가할수록 K_1 과 K_2 의 값은 크게 증가하고, K_2 에 비하여 K_1 의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 접합층의 두께가 0.2mm, 접합 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시킨 세라믹/금속 접합재에 초기균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시키고 굽힘하중을 400N로 일정하게 작용시켰을 때 세라믹측 계면에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 나타내고 있다. 이때 접합 온도차와 굽힘하중을 일정하게 유지하면서 초기균열 길이를 증가시켰을 때, 균열길이가 증가함에 따라 K_1 은 큰 폭으로 증가하나 K_2 의 값은 미소하게 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 초기균열길이와 굽힘하중을 일정하게 하고, 접합 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시켰을 때 K_1 의 값은 미소하게 감소하나 K_2 의 값은 약간 증가하고 있음을 알 수 있다.

접합층이 존재하는 경우와 접합층이 존재하지

않는 경우를 비교하면 전체적으로 접합층이 존재할 때의 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값이 작게 나타나고 있다. 이는 중간재의 영향으로 접합계면에서의 응력이 많이 완화되었음을 알 수 있다.

Table 4 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints ($h=0.2\text{mm}$, ceramic side) [$K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]

ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	a (mm)	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$		$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{STS304}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{SM45C}$	
		K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
300	0.5	-0.0354	-0.3677	-0.0021	-0.2987	-0.0289	-0.2723	0.0060	-0.1987
	1	-0.0285	-0.3606	-0.0049	-0.2784	-0.0234	-0.2657	0.0014	-0.1787
	1.5	-0.0277	-0.3139	-0.0062	-0.2426	-0.0223	-0.2307	0.0002	-0.1560
500	0.5	-0.0585	-0.6120	-0.0031	-0.4968	-0.0479	-0.4534	0.0097	-0.3307
	1	-0.0471	-0.6000	-0.0079	-0.4628	-0.0387	-0.4424	0.0046	-0.2974
	1.5	-0.0458	-0.5224	-0.0101	-0.4036	-0.0369	-0.3847	0.0006	-0.2596
800	0.5	-0.0922	-0.9772	-0.0041	-0.7920	-0.0756	-0.7241	0.0170	-0.5176
	1	-0.0741	-0.9584	-0.0118	-0.7384	-0.0613	-0.7069	0.0044	-0.4745
	1.5	-0.0722	-0.8343	-0.0153	-0.6436	-0.0585	-0.6149	0.0001	-0.4142

Table 5 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints ($h=0.2\text{mm}$, ceramic side) [$K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]

P (N)	a (mm)	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{STS304}$		$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{STS304}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{SM45C}$	
		K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
400	0.5	1.7601	-0.0482	1.7384	-0.0379	1.6109	-0.0161	1.7285	-0.0327
	1	2.7402	-0.1746	2.7071	-0.1498	2.5079	-0.0437	2.6864	-0.1666
	1.5	4.3656	-0.3784	4.3169	-0.3350	4.0182	-0.1596	4.2853	-0.3809

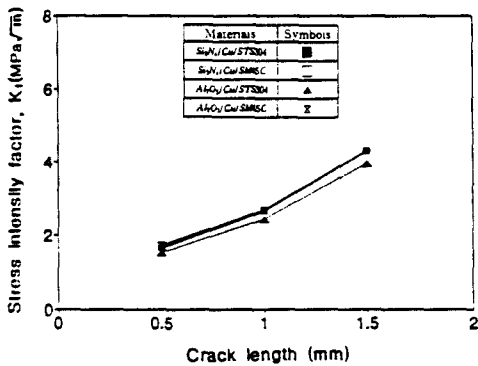


Fig. 7 Relationship between stress intensity factor(K_1) and normalized crack length ceramic/cu/metal bonded joints (ceramic side) ($h=0.2\text{mm}$, $P=400\text{N}$, $\Delta T=800^{\circ}\text{C}$)

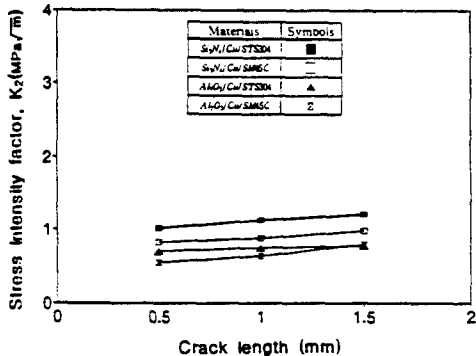


Fig. 8 Relationship between stress intensity factor(K_2) and normalized crack length ceramic/cu/metal bonded joints (ceramic side) ($h=0.2\text{mm}$, $P=400\text{N}$, $\Delta T=800^{\circ}\text{C}$)

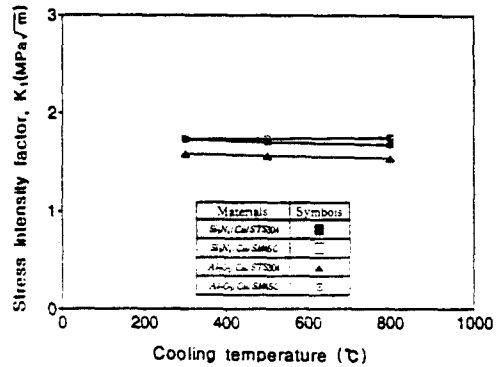


Fig. 9 Relationship between stress intensity factor(K_1) and normalized crack length ceramic/cu/metal bonded joints (ceramic side) ($h=0.2\text{mm}$, $P=400\text{N}$, $a=0.5\text{mm}$)

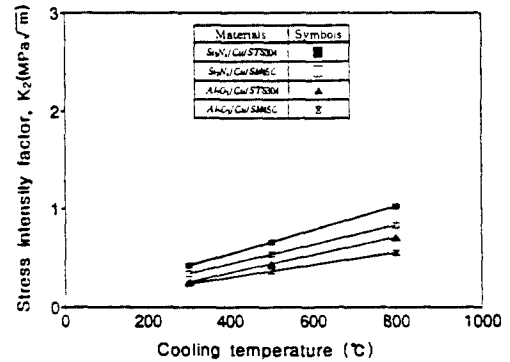


Fig. 10 Relationship between stress intensity factor(K_2) and normalized crack length ceramic/cu/metal bonded joints (ceramic side) ($h=0.2\text{mm}$, $P=400\text{N}$, $a=0.5\text{mm}$)

4. 실험

4.1 시험편의 제작 및 실험 방법

본 실험에 사용된 세라믹 재료는 고온고압 소결로(Astro, HP-3560, U.S.A)와 고온 분위기 소결로를 사용하여 BN분말을 내장한 흑연 몰드에 약 18g의 분말을 넣고 1900 $^{\circ}\text{C}$ 온도에서 30MPa의 압력으로 15분간 질소 분위기 하에서 열간 가압 소결하여 만든 질화규소(Si_3N_4)이고, 금속 재료는 오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 구조용탄소강(SM45C)이며 이를 활성금속법으로 상호 접합하였다. 접합간류응력을 완화시키기 위한 목적으로 사용된 중간재로는 0.2mm 두께의 순도 99.6% 이상의 전해동(Cu)을 사용하였고, 활성금속 브레이징 합금은 50 μm 두께의 63.5Ag-34.5Cu-2Ti wt% 합금인 Cusil ABA (GTE Wesgo Co.)를 이용하였다. 이때 세라믹의 접합 표면은 거칠기가 1 μm , 금속은 0.05 μm 이하가 되도록 다목적 절단연삭기(MX-833, Maruto, Japan)를 사용하여 연마하였다. 중간재인 구리는 표면의 산화막을 제거하기 위하여 1200메시의 SiC를 사용하여 연삭하였다. 이때 접합조건은 10^{-5} torr

이하의 진공상태에서 800℃로 10분간 유지하였으며, 승온속도 5.3℃/min, 냉각속도는 5℃/min이 되도록 하였다. 접합된 시험편의 크기는 각각 3×4×18mm로 하였고, 초기 계면균열 길이를 0.5mm, 1.0mm 균열폭은 0.15mm가 되도록 다이아몬드 브레이드를 사용하여 가공하였다. 접합재에 대한 강도 및 파괴인성 실험은 각각 3개의 시험편에 대하여 4점 굽힘시험법으로 상온에서 측정하였다. 측정기기는 만능재료시험기(Instron 4206)를 사용하였으며, 이때 정적하중 속도는 0.2mm/min 로 하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

4점 굽힘시험 결과 무균열재에 대한 Si₃N₄/Cu/STS304 접합재의 경우 접합강도는 217MPa이고, Si₃N₄/Cu/SM45C의 접합강도는 242MPa로 나타났다. Si₃N₄/Cu/STS304 접합재의 접합강도 보다 Si₃N₄/Cu/SM45C 접합재의 접합강도가 크게 나타났음을 알 수 있었다.

Table 6은 계면균열이 존재하는 세라믹/금속 접합시험편에 대한 정적파괴 강도 실험 결과를 나타낸 것이다. 이때 균열길이가 같을 때 Si₃N₄/Cu/SM45C의 접합재의 경우 파단하중이 Si₃N₄/Cu/STS304의 접합재보다 크게 나타났는데, 이는 수치해석 결과와 잘 일치하는 경향을 알 수 있다. 또한 Si₃N₄ 자체의 세라믹 만에 의한 파단강도보다 금속과 세라믹을 접합한 경우 인성의 증가로 파단강도가 더욱 향상됨을 알 수 있다.

Table 6. Experimental result of static fracture strength

Model	Crack length (mm)	P _{max} (N)	σ _{max} (MPa)
Si ₃ N ₄ /Cu/STS304	0.5	199.6	166.3
	1.0	188.7	157.3
Si ₃ N ₄ /Cu/SM45C	0.5	221.1	184.3
	1.0	212.2	176.8
Si ₃ N ₄	1.0	88.69	73.9

Fig. 11(a),(b)는 Si₃N₄/Cu/STS304의 파면형태를 입체적으로 나타낸 것이다. 이때 파괴가 일어나는 점이 Si₃N₄와 중간재인 Cu의 계면단에서 발생되어 계면을 따라 균열이 진전한 후 Si₃N₄ 쪽으로 굴절되는 형상을 나타내고 있다.

Fig. 12(a),(b),(c)는 Si₃N₄/Cu/SM45C의 반응 접합 계면에 형성되는 반응층을 관찰하기 위하여 경계면을 3×4×4mm의 크기로 절단한 시험편에 30, 10, 6, 1 μm의 다이아몬드 현탁액을 사용하여 경면연

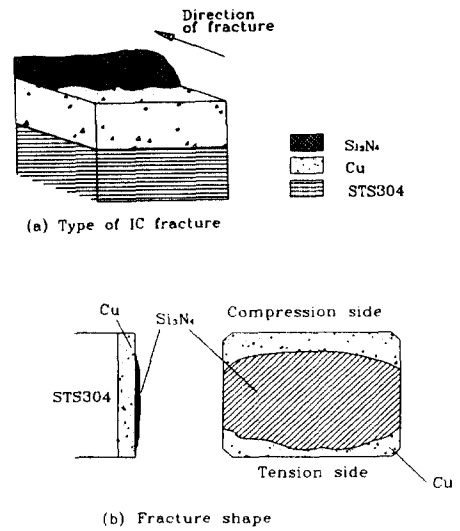
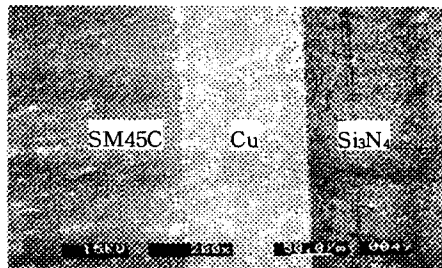


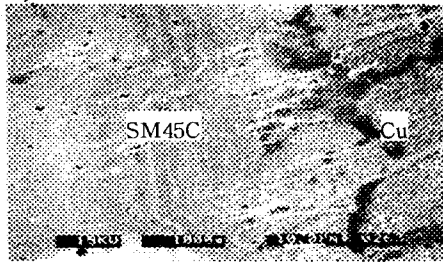
Fig. 11 Schematic illustrations of crack initiation sites and fracture pattern

마기로 연마한 후, 용융 NaOH 용액에서 30~120초간 화학에칭 처리를 하여 주사현미경으로 관찰한 것이다. 이때 그림(a)는 Si₃N₄/Cu/SM45C 계면을 200배 확대하여 촬영한 것이며, 그림(b)와 그림(c)는 그림(a)에 대한 SM45C/Cu와 Cu/Si₃N₄의 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.

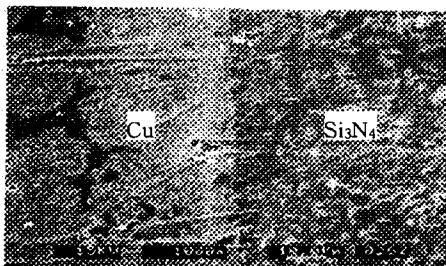
Fig. 13(a),(b),(c)는 무균열재에 대한 4점굽힘강도를 측정한 후 Si₃N₄/Cu/SM45C의 파단면과 균열진전 경로를 광학현미경(Nikon Co., Measure Scope 20, Japan)을 이용하여 찍은 사진을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 파괴가 일어나는 점은 질화규소와 구리의 접합계면에서 발생하여 세라믹측 내부 방향으로 진전함을 알 수 있다. 이러한 파괴경로의 변화는 굽힘강도 실험시 접합재에 작용하는 하중에 의한 응력집중의 영향과 접합재내에 발생하는 잔류응력의 중첩효과로 금속측의 수축변형과 세라믹측의 취성에 의한 영향으로 생각된다. 또한 질화규소와 구리의 접합강도가 약할 때는 계면 파괴가 일어나지만, 본 실험의 경우 세라믹 자체의 굽힘 취성파괴 강도가 접합강도 보다 약하기 때문에 세라믹 쪽으로의 파괴가 지배적이었다.



(a) Interface of SM45C/Cu/Si₃N₄

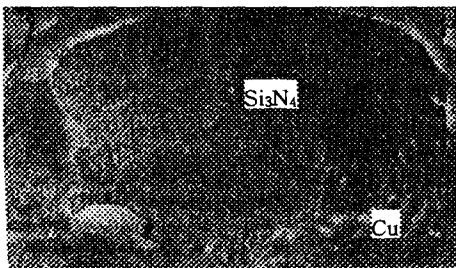


(b) Interface of SM45C/Cu

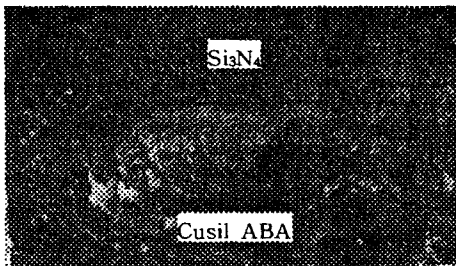


(c) Interface of Cu/Si₃N₄

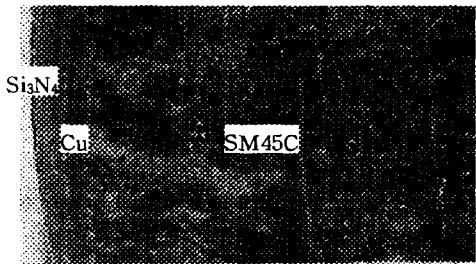
Fig. 12 SEM at the interface of Si₃N₄/Cu/SM45C bonded joint



(a) Si₃N₄/Cu/SM45C Joint
(fracture section of metal side)



(b) Si₃N₄/Cu/SM45C Joint
(fracture section of ceramic side)



(c) Si₃N₄/Cu/SM45C Joint
(fracture shape)

Fig. 13 Optical micrograph of microstructure

5. 결 론

본 연구를 위해 수행된 BEM 수치해석과 정적 파괴강도 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 세라믹/금속 접합계면균열재에 대한 접합잔류 응력과 하중의 중첩에 의한 고정밀도의 응력세기계수를 해석하고, 이들의 상호관계를 비교·검토하였다.
2. 세라믹과 금속 접합부재의 파괴는 잔류응력이 크게 집중되는 세라믹측 계면으로부터 발생하여 세라믹측 내부쪽으로 진행되었으며 이러한 파괴경로는 BEM의 응력해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.
3. 세라믹 자체의 파괴강도 보다 세라믹과 금속 접합부재의 파괴강도가 훨씬 증가하는 것을 실험적으로 검증하였고, 이들의 파괴형태와 파면해석을 통하여 세라믹 접합부재의 미세파괴 기구를 규명하였다.
4. 파괴역학 인자를 적용한 세라믹 접합부재의 계면균열에 대한 균열진전 경로의 예측, 파괴 기준 및 접합강도 평가방법의 확립이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Okabe, N., "Reliability Estimation and Analysis of the Strength for the Development of Ceramic materials and the Application Technology", JSME(A), Vol. 61, No. 589, pp. 1864-1870, 1995.
- (2) Min-cheol, Chu. and Sato, S., "Effect of Microstructure on Fracture Stress and Fracture Toughness of Silicon Nitride", JSME(A), Vol. 61 No. 585, pp. 933-939, 1995.

- (3) Reinhart, T. J., "Use of Structural Adhesives by the U.S Air Force", *Adhesive Age*, Vol. 10, No. 5, pp. 20-25, 1981.
- (4) 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성의 해석", *대한기계학회논문집 (A)*, 제20권 제10호, pp. 3058-3067, 1996.
- (5) Yuuki, R., "Logarithmic Singularity on Thermal or the Interface Edge Point of Bonded Dissimilar Materials," *JSME*, Vol. 58, No. 556, pp. 2394~2400, 1992.
- (6) Seo, K., Kusaka., M, "Study on the Thermal Stress at Ceramics-Metal Joint," *JSME*, Vol. 55, No. 510, pp. 312~317, 1989.
- (7) Bogy, D. B., "The Plane Solution for Jointed Dissimilar Elastic Semistrips Under Tension," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 42, pp. 93~98, 1975.
- (8) 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한 정적강도평가", *한국자동차공학회 춘계 학술대회 논문집*, 제II권, pp. 489-495, 1996.
- (9) 結城, 許金泉, "セラミックス/金屬接合材の破壊のシミュレーション解析", *日本機械學會論文集(A)*, Vol. 60, No. 579, pp. 2544-2552, 1994.