

세라믹/금속 접합재에 대한 정적강도의 파괴역학적 평가

김기성*, 김희송**, 정남용***

Evaluation of Static Strength Applying to Fracture Mechanics on Ceramic/Metal bonded Joint

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

Abstract

Recently, ceramic/metal bonded joints have led to increasing use of structural materials such as automobile, heat engine in various industries. In this paper, a method to analyze an interface crack under both residual stresses and applied loading was proposed, and some results of boundary element method(BEM) analysis were presented. Fracture toughness tests of ceramic/metals bonded joints with an interface crack were carried out, and the stress intensity factors of these joints were analyzed by BEM. Also crack propagation direction was simulated numerically by using BEM. Crack propagation angle was able to easily determine based on the maximum stress concept. The prediction of fracture strength by the fracture toughness of the ceramics/metals bonded joints was proposed.

Keywords : Ceramic/Metal Bonded Joints(세라믹/금속 접합재), Interface Crack(계면균열), Residual Stress(잔류응력), Boundary Element Method(경계요소법), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Crack Propagation Direction(균열진전방향), Fracture Toughness(파괴인성).

1. 서 론

세라믹은 고강도, 내마모성, 내식성 등의 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 구조용 부재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있으나 금속재료와는 달리 파괴거동이 취

성파괴의 양상을 나타내기 때문에 신뢰성이 결여되어 실용화에 큰 어려움이 있다. 따라서 세라믹을 가스 터빈 또는 터보 로터와 같은 기계구조용 재료⁽¹⁾로 유효하게 활용하기 위해서는 인성이 큰 금속과의 접합이 불가피한 실정이다. 그러나 세라믹/금속 접합은 일반적으로 고온

* 단국대학교 대학원 기계공학과
** 단국대학교 기계공학과
*** 숭실대학교 기계공학과

이종재료에 의한 계면균열이 존재할 경우 하중이 작용하면 파괴양상도 혼합모드 균열(mixed mode crack)로 되는 경우가 많으며 파괴형태도 다양하여 균열진전방향을 예측하기가 매우 곤란하다⁽⁷⁻⁹⁾. 따라서 이러한 균에서 이루어지기 때문에⁽²⁾ 냉각과정에서 열팽창계수 차이로 인하여 접합 계면단에서 잔류응력이 집중적으로 발생하게 되며⁽³⁻⁶⁾ 이는 접합재의 강도를 저하시키는 요인이 되고 있다. 특히 실제 구조물이나 기계부품 등온열에 대한 방향을 예측할 수 있다면 재료 및 구조물에 대한 신뢰성의 확보와 파괴의 방지 및 사전예방이 가능할 것으로 생각된다. 그러므로 본 연구에서는 세라믹/금속 접합재에 계면균열이 존재하는 경우 경계요소법을 이용하여 균열선단 응력장에 대한 고정밀도의 응력해석을 실시한 후 그 해석결과를 이용하여 파괴역학인자를 계산하고, 이들 인자에 의한 균열진전 방향의 예측 방법을 제안하며, 또한 정적강도 실험을 실시하여 세라믹/금속 접합재의 파괴인성에 의한 강도평가 방법과 파괴기준을 제안하고자 한다.

2. 세라믹/금속 접합재에 대한 계면균열의 해석

2.1 계면균열에 대한 응력세기계수의 결정

세라믹/금속 접합재료의 계면균열에 파괴역학 인자의 해석은 계면상의 BEM응력해석 결과를 이용하여 다음 식과 같이 균열선단으로 부터의 거리 r 로 외삽하여 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 구하였다⁽¹⁰⁾

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

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

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

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

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

여기서 ε 은 이종재료 정수이고, a 는 균열길이, G 는 전단탄성계수, ν 는 포와송비이고, F 는 무차원화 응력세기계수이다.

2.2 접합잔류응력에 의한 응력세기계수

계면균열이 존재할 때 접합잔류응력만에 의한 계면균열의 응력세기계수는 다음과 같이 정의 된다⁽¹¹⁾

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

여기서 res 는 접합잔류응력을 나타냄

2.3 작용하중과 접합 잔류응력의 중첩에 의한 응력세기계수

하중만이 작용하는 시험편에 대한 계면균열의 응력세기계수는 다음 식과 같다.

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

여기서 p 는 작용하중을 나타냄

또한 접합잔류응력이 존재하는 시험편에 외력이 작용하면 중첩의 원리에 의해서 계면균열선단에 대한 응력세기계수는 식(6)과 (7)로 부터 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

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

하중과 잔류응력장의 계면균열에 대한 응력세기계수를 각각 구하여 이를 합산하여 계산하면 실제 응력세기계수 K_1^T, K_2^T 는 다음 식과 같이 된다.

$$K_1^T = K_1^{res} + K_1^p, \quad K_2^T = K_2^{res} + iK_2^p \quad (9)$$

3 세라믹/금속 접합재에 대한 계면균열의 진전방향

3.1 세라믹/금속 접합재의 계면균열 진전형태

실제의 세라믹/금속 접합과정에서 생기는 접합계면의 조직 및 형상은 복잡하지만 실제 구조물에 대한 균열진전형태는 계면단에서 직접 세라믹쪽으로 균열이 발생되

는 경우와 계면을 따라 균열이 진전하는 경우, 계면을 따라 균열이 진전하다 세라믹쪽으로 균열이 굴절하는 경우와 같이 파괴양상을 3가지로 분류할 수 있다⁽¹²⁾. 이들 대부분은 혼합모드균열로 존재하므로 균열은 직진하지 않고 굴절하면서 진전한다. 이와 같은 균열의 진전방향 및 경로를 예측하기 위해서는 혼합모드의 파괴기준을 적용하여 이의 예측이 가능하다.

3.2 이종 접합재료의 계면균열의 응력장

Fig. 1과 같은 이종 접합재료에 대해서 극좌표로 표시된 응력성분은 다음 식과 같이 된다. 이 때 이종 접합재료의 파괴조건은 접선방향 최대응력($\sigma_{\theta, \max}$)설을 사용하였다⁽¹³⁾

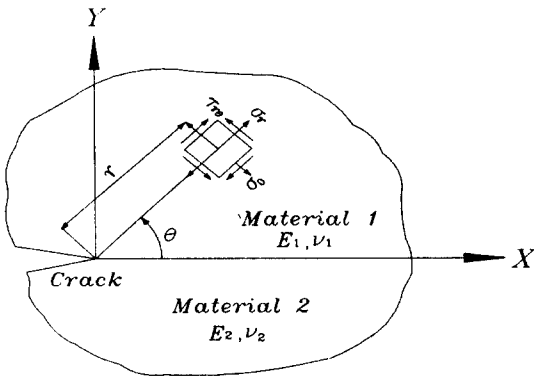


Fig. 1 Crack-tip polar coordinate and stress field in bonded dissimilar materials

$$\sigma_{\theta j} = \frac{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}}{2\sqrt{2\pi r} \cosh(\pi\epsilon)} [B(\theta, \epsilon, \gamma) \cos(\epsilon \ln \frac{r}{2a}) - C(\theta, \epsilon, \gamma) \sin(\epsilon \ln \frac{r}{2a})] \quad (10)$$

$$\tau_{\theta j} = \frac{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}}{2\sqrt{2\pi r} \cosh(\pi\epsilon)} [D(\theta, \epsilon, \gamma) \cos(\epsilon \ln \frac{r}{2a}) + F(\theta, \epsilon, \gamma) \sin(\epsilon \ln \frac{r}{2a})] \quad (11)$$

식 (10)에서 $\sigma_{\theta j}$ 가 최대가 되는 방향으로 균열이 진전하고, 이 때 균열진전방향 θ_0 는 다음 식에 의해 구하여진다.

$$\begin{aligned} & \epsilon W_1 [2 \cos(\frac{\theta_0}{2} + \gamma) - (\cos \theta_0 + 2\epsilon \sin \theta_0) \cos(\frac{\theta_0}{2} - \gamma)] \\ & + W_2 [-\sin(\frac{\theta_0}{2} + \gamma) + (\sin \theta_0 - 2\epsilon \cos \theta_0) \cos(\frac{\theta_0}{2} - \gamma) \\ & + \frac{1}{2} (\cos \theta_0 + 2\epsilon \sin \theta_0) \sin(\frac{\theta_0}{2} - \gamma)] \quad (12) \\ & - [\epsilon \cos(\frac{3}{2} \theta_0 + \gamma) + \frac{3}{2} \sin(\frac{3}{2} \theta_0 + \gamma)] / W_1 = 0 \end{aligned}$$

여기서

$$W_1 = e^{-\epsilon(\pi - \theta)}, \quad W_2 = e^{\epsilon(\pi + \theta)}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{K_2}{K_1} \right]$$

이종 접합재료의 계면균열에 대한 균열의 진전방향을 예측하는 식 (12)는 매우 복잡하기 때문에 이 식을 만족하는 θ_0 를 구하는 프로그램을 작성하여 균열진전방향을 결정하였다.

4. 응력세기계수의 BEM해석

4.1. 세라믹/금속 접합재의 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 중간재료는 구리(Cu)를 사용하였다. 각 재료에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

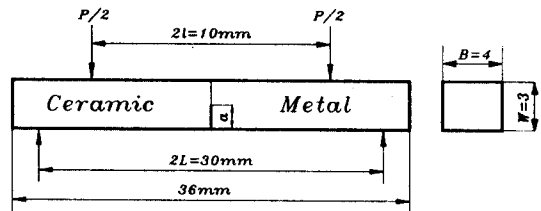


Fig. 2 Shape and dimension of ceramic/metal bonded joint

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expan. coef. ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
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 2개의 영역인 경우는 156개, 3개의 영역인 경우에는 262로 하였고, 특히 균열선단에는 특이요소와 서브요소를 사용하여 고정밀도로 해석하였다.

온도변화 및 작용하중에 의한 응력세기계수를 해석하기 위하여 시험편의 중간재의 두께를 0.2mm, 초기균열 길이는 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 하였으며, 접합 온도차는 300°C, 500°C, 800°C로 하였다. 또한 4점 굽힘하중은 400MPa을 가하면서 응력해석을 실시한 후, 외삽법에 의하여 균열선단에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 계산하였다.

4.2. 세라믹/금속 접합재의 응력세기계수 및 균열진전 방향의 예측

4.2.1 접합층이 없는 경우

접합층이 없고 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시켰을 때 각 재료조합에 따른 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값을 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°C, 500°C, 800°C로 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 있으며, 이는 잔류응력에 의한 응력세기계수는 K_2 의 값에 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 4점 굽힘하중을 400 N으로 일정하게 가하면서 균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시

켰을 때 K_1 과 K_2 의 값을 나타내고 있다. 이때 균열길이가 증가함에 따라 K_1 과 K_2 의 값은 크게 증가하고, 잔류응력이 작용할 때에는 달리 K_1 의 값이 K_2 에 비하여 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 접합온도차와 작용하중을 동시에 고려하였을 때, 균열길이의 변화에 따른 K_1 과 K_2 의 값과 초기 균열 진전각도 θ_0 를 나타내고 있다. 이때 굽힘하중과 접합 온도차를 일정하게 유지하고 초기균열 길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 증가시키기에 따라 K_1 과 K_2 의 값은 증가하는 경향을 보이고, 굽힘하중과 균열길이를 일정하게 유지하고 온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 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 : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

JT ($^{\circ}\text{C}$)	a (mm)	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{STS304}$		$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{STS304}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SM45C}$	
		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	-0.4566	-0.0230	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	-0.0666	-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	-1.2747	-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 : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

P (N)	a (mm)	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{STS304}$		$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{STS304}$		$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SM45C}$	
		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	3.1963	-0.2279	3.2003	-0.1904
	1.5	5.0094	0.4000	5.0109	-0.3305	4.9939	-0.4604	5.0033	-0.3893

Table 4 Stress intensity factor in ceramic/metal bonded joints [K : MPa√m]

P (N)	JT (°C)	a (mm)	Si ₃ N ₄ /STS304			Si ₃ N ₄ /SM45C			Al ₂ O ₃ /STS304			Al ₂ O ₃ /SM45C		
			K ₁	K ₂	θ ₀ (°)	K ₁	K ₂	θ ₀ (°)	K ₁	K ₂	θ ₀ (°)	K ₁	K ₂	θ ₀ (°)
300	300	0.5	1.985	-0.512	28.28	2.005	-0.375	27.85	1.991	-0.421	24.60	2.013	-0.228	14.58
		1	3.166	0.709	25.59	3.180	-0.487	18.61	3.160	0.565	21.74	3.183	-0.375	14.96
		1.5	4.975	0.800	19.80	4.990	-0.612	15.44	4.963	-0.758	19.21	4.989	-0.552	14.31
	500	0.5	1.955	-0.827	38.42	1.967	0.595	30.86	1.964	-0.634	33.62	2.001	-0.354	21.08
		1	3.137	0.966	31.85	3.164	-0.699	24.85	3.137	0.790	27.99	3.172	-0.497	19.12
		1.5	4.966	-1.057	24.87	4.977	-0.800	19.34	4.942	-0.936	25.09	4.876	-0.661	16.95
800	0.5	1.911	1.299	47.66	1.961	-0.923	40.29	1.924	-1.001	42.70	1.967	0.545	29.30	
	1	3.101	1.420	40.65	3.142	-1.016	32.45	3.102	-1.253	37.62	3.155	0.681	24.59	
	1.5	4.931	-1.682	31.12	4.957	-1.071	24.43	4.912	-1.252	28.23	4.961	-0.820	19.97	

Fig. 3은 작용하중을 400N, 온도차를 800℃로 일정하게 유지하고 균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 증가시켰을 때 균열길이의 증가에 따른 초기균열 진전각도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 균열길이가 증가함에 따라 초기균열 진전각도 θ₀는 감소하는 경향을 보여 주는데, 이는 초기균열 길이가 증가하면 세라믹 모재 쪽으로 균열이 진전한다는 것을 알 수 있다. 재료 조합에 따른 균열진전 각도의 변화는 Si₃N₄/STS304접합재의 경우에 제일 크게 나타났고 Al₂O₃/SM45C접합재 일 때 제일 작게 나타남을 알 수 있다.

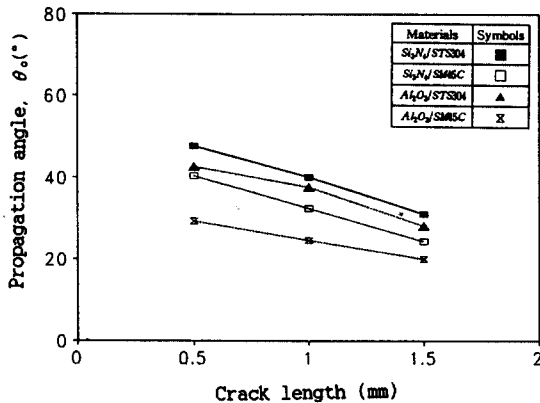


Fig. 3 Variation of crack propagation angle for interfacial crack in ceramic/metal bonded joint (P = 400N, ΔT = 800°C)

Fig. 4는 작용하중을 400N, 초기균열 길이를 0.5mm로 일정하게 하고 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 증가시켰을 때 온도차가 증가함에 따른 초기진전각도를 나타낸 것이다. 그림에서 온도차가 증가함에 따라 초기균열 진전각도는 증가하는 경향을 보여주는데, 이는 온도차가 증가하면 계면에 가까운 쪽으로 균열이 진전하고 있음을 알 수 있다.

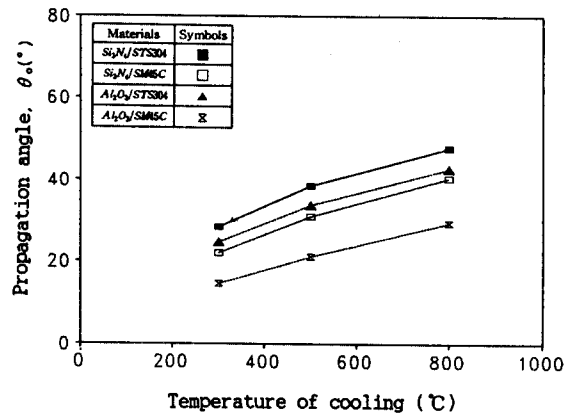


Fig. 4 Variation of crack propagation angle for interfacial crack in ceramic/metal bonded joint (P = 400N, a = 0.5mm)

4.2.2 접합층이 존재하는 경우

접합층이 존재하는 경우와 접합층이 존재하지 않는 경우를 비교하면 전체적으로 접합층이 존재할 때의 응력세기계수 K₁과 K₂의 값이 작게 나타나고 있다. 이는 중간재의 영향으로 접합계면에서의 응력이 많이 완화되었음을 알 수 있다.

Table 5는 접합층의 두께를 0.2mm로 일정하게 하고 접합 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로, 초기균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시켰을 때, 각 재료조합에 대한 세라믹측 계면의 응력세기계수 K₁과 K₂의 값을 나타내고 있다.

이때, 온도차가 일정하고 균열길이가 증가할수록 세라믹측 계면의 응력세기계수 K₁, K₂의 값은 미소하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 일정한 균열길이에 온도가 증가함에 따라 K₁과 K₂의 값은 증가하는 경향을

보이고 있다.

Table 6은 초기균열 길이가 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm인 시험편에 굽힘하중이 400N 작용하였을 때, 세라믹측 계면에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값 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.

Table 7은 접합층의 두께가 0.2mm, 접합 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 변화시킨 세라믹/금속 접합체에 초기균열길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시키고 굽힘하중을 400N으로 일정하게 작용시켰을 때 세라믹측 계면에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 , 초기균열 진전각도 θ_0 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. 또한 초기균열길이와 굽힘하중을 일정하게 하고, 접합 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 변화시켰을 때 K_1 의 값은 미소하게 감소하나 K_2 의 값은 약간 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 5 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints (h=0.2mm, ceramic side)

[K: $MPa \sqrt{m}$]

T (°C)	a (mm)	$Si_3N_4/Cu/STS304$		$Si_3N_4/Cu/SM5C$		$Al_2O_3/Cu/STS304$		$Al_2O_3/Cu/SM5C$	
		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	-0.2967	0.0289	-0.2723	0.0080	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	-0.4629	-0.0387	-0.4424	0.0046	-0.2974
	1.5	-0.0458	-0.5224	-0.0101	-0.4036	-0.0369	-0.3847	-0.0006	-0.2506
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	-0.4715
	1.5	-0.0722	0.8343	-0.0153	-0.6496	-0.0585	-0.6149	0.0001	-0.4142

Fig. 5는 접합층이 존재하는 경우 접합층의 두께를 0.2mm, 접합 온도차를 800℃, 4점 굽힘하중을 400N으로 일정하게 유지하고 초기균열 길이를 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm로 변화시킬 때, 각 재료조합의 균열길이 비에 대한 초기균열 진전각도를 나타낸 것으로 초기균열 길이가 증가하면 초기균열 진전각도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 균열길이가 증가하면 세라믹 모재쪽을 따라 파괴가 일어날 수 있음을 암시하고 있다.

Table 6 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints (h=0.2mm, ceramic side)

[K: $MPa \sqrt{m}$]

P (N)	a (mm)	$Si_3N_4/Cu/STS304$		$Si_3N_4/Cu/SM5C$		$Al_2O_3/Cu/STS304$		$Al_2O_3/Cu/SM5C$	
		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	-0.1736	2.7071	-0.1498	2.5079	0.0437	2.6864	-0.1866
	1.5	1.3656	0.3784	4.3189	0.3350	4.0182	-0.1506	4.2853	-0.3809

Table 7 Stress intensity factors of ceramic/metal bonded joints (h=0.2mm, ceramic side)

[K: $MPa \sqrt{m}$]

P (N)	T (°C)	a (mm)	$Si_3N_4/Cu/STS304$			$Si_3N_4/Cu/SM5C$			$Al_2O_3/Cu/STS304$			$Al_2O_3/Cu/SM5C$		
			K_1	K_2	$\theta_0 (^\circ)$	K_1	K_2	$\theta_0 (^\circ)$	K_1	K_2	$\theta_0 (^\circ)$	K_1	K_2	$\theta_0 (^\circ)$
400	300	0.5	1.725	-0.416	29.37	1.736	-0.337	25.47	1.582	-0.256	22.74	1.736	-0.231	19.85
		1	2.772	-0.535	25.78	2.702	-0.428	22.26	2.485	-0.309	18.90	2.688	-0.345	19.33
		1.5	4.338	0.692	22.27	4.310	-0.578	19.67	3.996	-0.330	15.89	4.286	-0.537	18.98
	500	0.5	1.702	0.660	38.51	1.735	-0.535	34.03	1.563	-0.437	32.37	1.738	-0.363	27.01
		1	2.693	0.775	32.70	2.699	-0.613	28.26	2.469	-0.486	25.96	2.691	-0.464	23.74
		1.5	4.320	0.901	36.74	4.307	-0.739	23.42	3.981	-0.544	20.20	4.286	-0.641	21.50
800	0.5	1.668	-1.025	47.06	1.734	-0.830	42.52	1.535	-0.708	41.97	1.746	-0.550	34.66	
	1	2.666	1.133	40.27	2.695	-0.888	35.34	2.447	-0.731	34.14	2.691	-0.641	29.37	
	1.5	4.293	-1.213	32.35	4.302	-0.979	28.30	3.960	-0.775	25.85	4.285	-0.785	24.95	

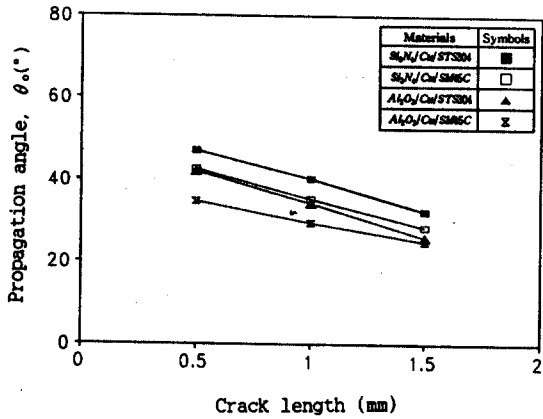


Fig. 5 Variation of crack propagation angle for interfacial crack in ceramics/metal bonded joint (ceramic side)
(h = 0.2mm, P = 400N, ΔT = 800℃)

Fig. 6은 접합층이 존재하는 경우 접합층의 두께를 0.2mm, 초기균열 길이를 0.5mm, 굽힘하중을 400N으로 일정하게 유지하고 접합 온도차를 300℃, 500℃, 800℃로 변화시킬 때, 각 재료조합의 온도변화에 대한 초기균열 진전각도를 나타낸 것으로 접합온도차가 증가할수록 초기균열 진전각도는 증가하는 경향을 보이고 있

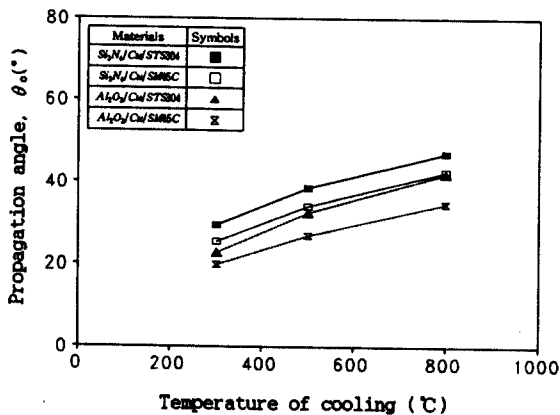


Fig. 6 Variation of crack propagation angle for interfacial crack in ceramics/metal bonded joint (ceramic side)
(h=0.2mm, P=400MPa, a=0.5 mm)

다. 이는 온도가 증가함에 따라 접합계면에 가까운 쪽으로 균열이 진행되고 있음을 알 수 있다. 이때 접합층이 존재하지 않은 경우 Al₂O₃/STS304의 접합재가 Si₃N₄/SM45C의 접합재보다 초기균열 진전각도가 크게 나타나고 있으나, 접합층이 존재하는 경우에는 Si₃N₄/Cu/SM45C의 접합재가 Al₂O₃/Cu/STS304의 접합재보다 초기균열 진전각도가 크게 나타나고 있다.

5. 세라믹/금속 접합재의 파괴인성 평가

5.1 시험편의 제작 및 실험 방법

본 실험에 사용된 세라믹 재료는 질화규소(Si₃N₄)이고, 금속 재료는 오오스테나이트계의 스테인레스강(STS304)과 구조용 탄소강(SM45C)이며 이를 활성금속법으로 상호 접합하였다. 중간재로는 0.2mm 두께의 순도 99.6% 이상의 전해동(Cu)을 사용하였고, 활성금속 브레이징 합금은 50μm두께의 63.5Ag-34.5Cu-2Ti wt% 합금인 Cusil ABA(GTE Wesgo사)이다. 세라믹 접합표면의 거칠기는 1μm, 금속은 0.05μm이하가 되도록 연마하였다. 중간재인 구리는 표면의 산화막을 제거하기 위하여 1200메시의 SiC를 사용하여 연삭하였다. 접합조건은 10⁻⁵ torr 이하의 진공상태에서 830℃로 10분간 유지한 후 상온이 될 때까지 노냉하였다. 이때, 승온속도는 5.3℃/min, 냉각속도는 5℃/min로 하였다. 또한 접합된 시험편에 초기 계면균열 길이를 0.5mm, 1.0mm 균열폭은 0.15mm가 되도록 다이아몬드 브레이드를 사용하여 가공하였다. 계면균열이 존재하는 세라믹/금속 접합재에 대한 파괴인성 시험은 각각 3개의 시험편에 대하여 4점 굽힘시험법으로 상온에서 측정하였다. 시험기는 만능재료시험기(Model : Instron 4206)를 사용하였으며, 이때 정적하중 속도는 0.2mm/min 로 하였다.

5.2 실험결과 및 고찰

Table 8은 계면균열이 존재하는 세라믹/금속 접합시험편에 대한 파괴인성의 시험 결과를 나타낸 것으로 파단하중 및 파단응력을 나타내었다.

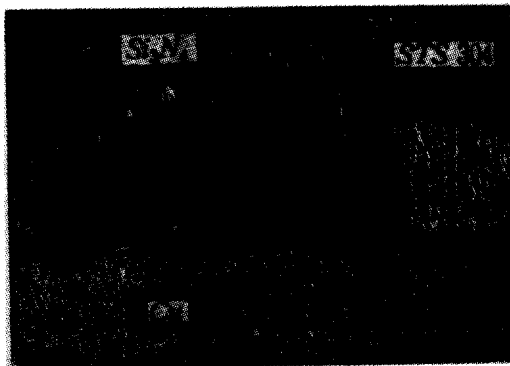
이때 균열길이가 같을 때 Si₃N₄/Cu/SM45C의 접합재의 경우 파단하중이 Si₃N₄/Cu/STS304의 접합재보다 크게 나타남을 알 수 있었으며 이는 수치해석 결과와 같

은 경향을 나타내고 있다. 또한 질화규소 자체의 세라믹
만에 의한 파단강도보다 금속과 세라믹을 접합한 경우
인성의 증가로 파단강도가 더욱 향상됨을 알 수 있었다.

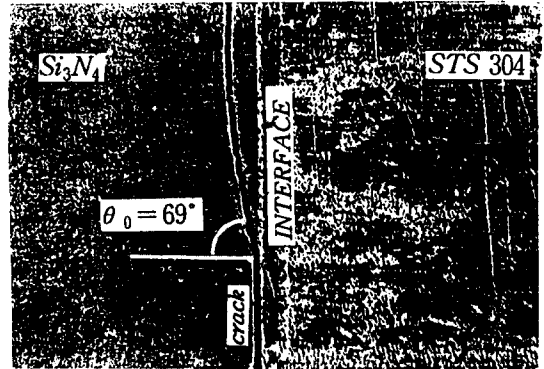
Table 8 Experimental result of static fracture strength

Model	Crack length(mm)	P_{max} (N)	σ_{max} (MPa)
$Si_3N_4/Cu/STS304$	0.5	199.6	166.3
	1.0	188.7	157.3
$Si_3N_4/Cu/SM45C$	0.5	221.1	184.3
	1.0	212.2	176.8
Si_3N_4	1.0	88.69	73.9

Fig. 7(a).(b)는 균열길이가 1.0mm인 $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 세라믹측 계면의 파단면과 균열진전 경로를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 파괴가 일어나는 점은 질화규소와 구리의 접합계면에서 발생하여 세라믹측 내부 방향으로 진전함을 알 수 있었다. 이때 초기균열 진전각도는 69° 를 나타내고 있으며 이는 수치해석의 결과와 거의 같음을 알 수 있었다. 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 계면파괴가 일어나지만, 본 실험의 경우 세라믹 자체의 굽힘 취성파괴 강도가 접합강도 보다 약하기 때문에 세라믹 쪽으로의 파괴가 지배적이었다.



(a) Fracture surface of Si_3N_4



(b) Crack propagation path

Fig. 7 Crack propagation path and fracture surface by experiment in ceramics/metal bonded joint

Table 9는 실험에서 구한 파단응력을 이용하여 세라믹/금속 접합재의 균열길이 비와 세라믹과 금속 상호조합에 대한 시험편의 접합 잔류응력과 작용하중의 중첩에 의한 파괴인성치를 구하고 이것을 각 모드성분에 대한 응력세기계수의 BEM 해석결과로 분리하여 정리한 결과를 나타낸 것이다. Table 9의 결과로부터 $Si_3N_4/Cu/STS304$ 와 $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 의 접합에서 균열길이의 비가 증가할수록 잔류응력에 의한 K_1 과 K_2 의 값은 감소하는 경향을 보이고 있으며 K_1 에 비하여 K_2 의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 작용하중에 대해서는 균열길이의 비가 증가할수록 K_1 과 K_2 의 값이 증가되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 잔류응력에 의한 응력세기계수와는 달리 K_1 의 값에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 잔류응력과 작용하중을 중첩한 결과 균열길이가 증가함에 따라 K_1 의 값은 크게 증가하나 K_2 의 값은 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있으며, 균열진전 방향은 세라믹 모재쪽으로 진행되고 있음을 알 수 있다.

균열길이가 같을 때 $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 접합재 보다 $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 접합재의 경우 잔류응력에 의한 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 값은 작게 나타나고, 잔류응력과 작용하중을 중첩한 경우 $Si_3N_4/Cu/SM45C$ 의 접합재에서 K_1 의 값은 $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 접합재에서 보다 크고, K_2 의 값은 작음을 알 수 있다. 또한 초기균열 진전각도는 $Si_3N_4/Cu/STS304$ 의 접합재가 $Si_3N_4/Cu/$

SM45C의 접합재 보다 큰 각도를 유지하며 계면에 가까운 쪽으로 균열이 진전함을 알 수 있다.

Table 9 Experimental result of fracture toughness (K: MPa√m)

Model	a/W	K_{Ic}^{ns}	K_{IIc}^{ns}	K_{Ic}^p	K_{IIc}^p	K_{Ic}^T	K_{IIc}^T	Kc	θ_n (°)
Si ₃ N ₄ /Cu/STS304	0.167	-0.0922	-0.9772	0.2190	-0.0060	0.1268	-0.9832	0.9913	68.109
	0.333	-0.0741	-0.9584	0.3231	-0.0206	0.2190	-0.9790	1.0086	66.916
Si ₃ N ₄ /Cu/SM45C	0.167	-0.0041	0.7920	0.2398	-0.0053	0.2457	-0.7973	0.8314	65.214
	0.333	-0.0118	0.7384	0.3588	0.0199	0.3470	-0.7583	0.8337	62.538

Fig. 8은 세라믹/금속 접합재의 상호조합에 따른 균열길이의 변화에 대한 파괴인성치를 나타낸 그림이다. 이때 파괴인성치 $K_c = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F$ 의 식에서 구하였고, $K_{Ic} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F_1$, $K_{IIc} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F_2$ 에서 각각 계산하였다. 또한 무차원화 응력세기계수 $F = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2)}$ 로 하였다. 그림에서와 같이 Si₃N₄/Cu/SM45C의 접합재보다 Si₃N₄/Cu/STS304의 접합재에서 파괴인성치가 크게 나타났다. 동일 접합재에 대한 파괴특성을 알기 위해서는 혼합모드 성분의 분리에 의한 파괴기구의 해석이 필요하지만 실험상의 제약 조건 때문에 많은 어려움이 있으므로 이에 대한 해석은 계속 연구를 통하여 규명하고자 한다.

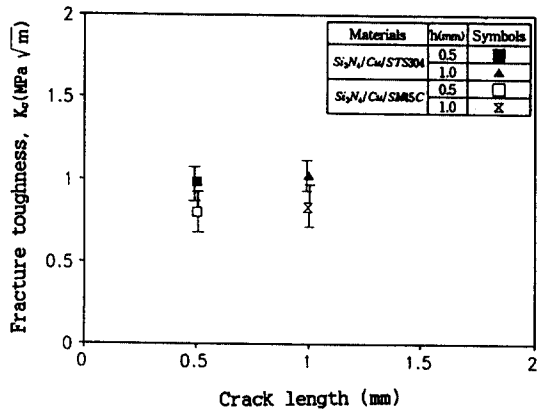


Fig. 8 Fracture toughness Kc for crack length of ceramics/metal bonded joint(ceramic side)

6. 결 론

세라믹/금속 접합재에 계면균열이 존재하는 경우 초기 균열 진전각도를 예측하기 위하여 경계요소법에 의한 응력세기계수의 해석과 파괴인성 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 계면균열이 존재하는 세라믹/금속 접합재에 대한 잔류응력과 하중의 증첩에 의한 고정밀도의 응력세기계수를 해석하고, 이들의 상호관계를 비교·검토하였다.
2. 세라믹/금속 접합재의 잔류응력과 작용하중의 증첩에 의한 계면균열의 초기균열 진전방향을 수치시물레이션으로 예측하고, 이를 실험적으로 검증하였다.
3. 세라믹/금속 접합재의 계면균열에 대한 파괴인성의 시험방법과 파괴인성치를 구하는 방법을 제시하고, 그 결과를 상호 비교·검토하였다.
4. 경계요소법에 의한 수치해석과 파괴인성 시험을 통하여 계면균열이 존재하는 각종 세라믹/금속 접합구조에 대한 파괴강도의 예측 및 강도평가에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

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. Pabst, R. F., "Adherence Properties of Metal-to-Ceramic Joints", J. Mat. Sci., No.15, pp. 188-196, 1980.
3. Kobayashi, H., "Mechanism and Mechanics of Interface Fracture in Ceramic/Metal Joint", JSME, Vol. 60, No. 577, pp. 1913~1919, 1994.
4. 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한 정적강도평가", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 제II권, pp. 489-495, 1996.
5. Seo, K., "Study on the Thermal Stress at Ceramics-Metal Joint", JSME, Vol. 55, No. 510, pp. 312~317, 1989.
6. 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합재에 대한

- 응력특이성의 해석” ,대한기계학회논문집(A), 제20권 제10호, pp. 3058-3067, 1996.
7. Willis, J. R., “Fracture Mechanics of Interfacial Cracks”, *J. of Mech. Phys. Solids*, Vol. 19, pp. 353~368, 1971.
 8. Qu, J., Bassani, J. L., “Cracks on Bimaterial and Bicrystal Interface”, *Int. J. of Frac. Mech.* Vol. 37, No. 4, pp. 417~433, 1989.
 9. Erdogan, F., Shi, G. C., “On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear”, *Trans. ASME*, Dec. pp. 519~528, 1963.
 10. 結城, 喜, “異材界面龜裂の應力擴大係數の境界要素彈性解析”, *日本機械學會論文集 A*, 55卷 510 號, pp. 340~347, 1989.
 11. Miyazaki, N. 外 3人, “境界要素法による界面き裂の應力擴大係數 解析”, *日本機械學會論文集 A*, 57卷 541 號, pp. 2063~2069, 1991.
 12. Yuuki, R., Xu, J. Q., “Simulation Analysis of Fracture in Ceramic/Metal Bonded Joint”, *JSME*, Vol. 60, No. 579, pp. 2514~2551, 1994.
 13. Yuuki, R., Xu, J. Q., “Stress Based Criterion for an Interface Crack Kinking out of the Interface in dissimilar materials”, *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 41, No. 5, pp. 635~644, 1992.