

세라믹/금속접합재의 응력특이장 해석 및 강도평가

Singular Stress Field Analysis and Strength Evaluation in Ceramic/Metal Joints

박영철 · 한근조 · 김현수(동아대학교), 허선철(동아대학교 생산기술연구소), 강재욱(동아대학교 대학원)

ABSTRACT

Since the ceramic/metal joints is joined at high temperature, the residual stress will develop during when cooled from bonding temperature due to remarkable difference of thermal expansion coefficient between ceramic and metal. Moreover, the edge of jointed interface makes singular stress field in the ceramic/metal joints and this singular stress field much influences on the strength of joints. In this study, The influence of residual stress, mechanical load and repeat thermal cycle was estimated in the ceramic/metal joints. According to this influence, the change of singular stress field was analyzed and then strength test, X-ray measurement are performed.

1. 서 론

세라믹은 우수한 기계적특성을 지니고 있기 때문에 이미 집적회로기판, 압전소자, 센서, 절삭공구, 등에 실용화되고 있으며, 가스터빈, 터보과급기 등 경량, 고강도 및 내열성이 요구되어지는 구조물에 금속재료를 대신해서 세라믹의 적용이 활발히 검토되고 있다.

신소재로 주목받고 있는 세라믹은 내열성, 내마모성 및 내식성 등의 우수한 특성을 지니고 있는 반면, 가공이 어렵고 충격이나 인장력 등에 취약하기 때문에 일반 구조용 재료로서의 사용이 대단히 어렵다. 이러한 세라믹의 단점을 보완하기 위해 비교적 인성이 풍부한 금속과의 접합에 관한 연구가 많이 행해지고 있다.¹⁻²⁾

세라믹/금속접합재는 고온에서 접합되기 때문에 냉각 과정에서 양 재료의 열팽창계수의 차이로 인해 접합잔류응력이 발생하게 되어, 접합재의 강도를 크게 저하시킨다. 그러나, 접합재의 잔류응력의 크기와 분포를 정확히 파악하여 잔류응력을 완화시키는 방법에 관한 연구가 확립된다면, 접합재의 강도향상과 신뢰성을 충분히 확보할 수 있을 것이라 생각된다. 특히, 이종접합재의 경우 재료의 불연속성에 의해 접합계면에는 응력특이성이 발생하여 접합재의 강도에 지배적인 영향을 미치기 때문에, 접합강도를 효과적으로 평가하기 위해서는 접합잔류응력에 대한 연구가 우선되어져야 하며, 이에 따른 응력특이성의 해석³⁻⁴⁾이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 세라믹/금속접합재에 대한 강도평가법을 확립하기 위하여, 접합과정에서 발생하는 접합잔류응력과 서로 다른 온도조건에서 반복 열사이

클에 의한 잔류응력의 변화에 대해 검토하고, 그에 따른 응력특이성을 해석하였다. 또한, X선 응력측정 및 강도시험을 통해 접합재에 대한 강도평가를 하였다. 뿐만 아니라, 실구조물에서의 사용조건을 고려해서 기계적 부하가 가하여졌을 때, 기계적 부하에 따라 나타나는 응력재분포에 대하여 규명하였고, 이러한 응력재분포가 접합강도에 미치는 영향에 대하여 상세히 검토하였다.

2. 해석 및 실험방법

2.1 시험편과 접합방법

시험편은 동을 중간층으로 한 질화규소(Si₃N₄)와 오스테나이트계 스테인레스강(STS304)을 접합하여 제작하였으며, 시험편의 재료특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of specimen in room temperature

	Si ₃ N ₄	Cu	STS304
E(GPa)	304	108	193
ν	0.27	0.33	0.3
α (/K)	3.06×10^{-6}	17.7×10^{-6}	16.5×10^{-6}

접합시 열팽창계수의 차이로 인하여 발생하는 접합잔류응력을 완화시키기 위하여 두께 0.5 mm인 동관을 중간층으로 사용하였으며, 접합조건은 Table 2와 같고, 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

본 연구에서의 해석은 구조해석용 프로그램 ANSYS를 이용하여, 해칭된 영역에 대해 평면응력상태를 가정한 2차원 탄소성 유한요소해석(FEA)을 하였다.

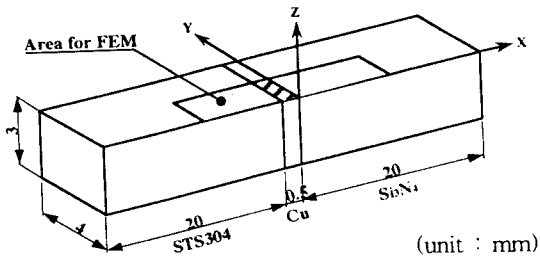


Fig. 1 Configuration of ceramic/metal joint specimen (unit : mm)

Table 2 Conditions of joining

Brazing filler	Ti-Ag-Cu
Temperature	1073K-1123K
Atmosphere	Vacuum, 1×10^{-5} torr
Interlayer	Cu (thickness 0.5mm)

Fig. 2는 해석에 이용된 요소분할을 나타내고 있으며, 응력이 집중되는 접합계면 근방의 요소는 세밀하게 분할하였다.



Fig. 2 Finite element model of ceramic/metal joint specimen

한편, 세라믹과 금속의 접합은 고온(1100℃)에서 수행하고, 이때 브레이징재(brazing filler)가 액체상태이므로 금속과 세라믹 모두 자유로이 열변형하여 응력이 발생하지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 브레이징재가 응고하여 강도를 갖기 시작하는 온도를 600℃로 하고, 이 온도로부터 실온(27℃)까지 냉각하는 경우에 대하여 해석을 하였다.

한편, Bogy⁵⁾ 등은 이중접합재의 경우 접합계면 단부근방에서는 잔류응력 σ_x 의 x방향 분포가 특이성을 나타낸다고 지적하였다. 이러한 응력특이성은 접합계면 근방에서 나타나며, X선에 의한 잔류응력의 측정이 어려우므로 이론적 해석을 통하여 검증해야 한다.

접합재의 계면단부에서의 계면수직방향 잔류응력 σ_x 의 x방향 분포가 응력특이성을 나타내는 표현식은 다음과 같다.

$$\sigma_x = Kx^{-\lambda}$$

여기서, K는 잔류응력 특이장의 강도이고, λ 는 특이성지수이다. 이와같은 응력특이장의 역학적 파라메타인 λ 와 K를 접합 및 반복 열사이클에 각각 적용하여 접합재의 강도를 평가하고, 접합잔류응력의 기계적 부하에 따른 응력특이장의 변화를 검토하였다.

2.2 기계적하중 부하에 대한 유한요소해석

세라믹/금속접합재의 응력해석에 있어서 중요하다 할 수 있는 실사용 상태에서의 접합계면 부근의 응력 상태를 정확히 파악하기 위하여, 인장부하에 의한 접합

계면에서의 응력분포에 대하여 검토하였다. 이때, 접합 잔류응력이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 있어 인장하중을 5 N에서 40 N으로 변화시켜가며 기계적 하중이 접합잔류응력에 미치는 영향을 검토하였다.

2.3 반복 열사이클에 대한 유한요소해석

일반 구조물에서 가장 광범위하게 접합재의 강도에 영향을 미치는 것은 열사이클 피로이기 때문에, 본 연구에서는 가열 및 유지시간은 동일한 조건하에서 열사이클 온도의 변화와 횟수의 증가에 따른 강도열화를 살펴보기 위하여, 접합 후 200℃, 300℃, 400℃, 500℃에서 상온까지 각각 1회, 3회, 5회, 7회, 10회의 반복 열사이클을 부가한 경우에 대해 해석을 하였다. 이때, 가열·냉각 온도 스텝(step)은 10℃씩으로 하였으며, 비정상 온도분포의 영향은 없는 것으로 가정하였다.

2.4 X선 잔류응력 측정 및 강도시험방법

접합재의 잔류응력 측정은 다결정재료에 있어서 국소부분의 잔류응력을 비파괴적인 방법으로 측정가능한 X선에 의해 잔류응력을 측정하였다.

X선에 의한 잔류응력 측정조건은 Table 3과 같고, 각 온도 200℃, 300℃, 400℃, 500℃에서 반복 열사이클을 부가한 후의 접합시험편에 대하여 잔류응력을 측정하였다.

Fig. 3은 JIS R1601에 준하여 접합부가 중앙에 위치하도록 하여 4점 굽힘시험을 한 모식도를 나타낸다.

Table 3 Conditions for X-ray stress measurement

System	PSPC/PSF system (Rigaku)
Characteristic X-ray	Cu-K α
Diffraction planes	β -Si ₃ N ₄ (323)
Filter	Ni
Tube voltage	35kV
Tube current	40mA
Collimeter	ϕ 0.5mm
Method	Sin ² ψ iso-inclination method
Incident angle	$\psi = 0, 15, 25, 35, 40, 45$
Fixed time	300sec/1 ψ
Stress constant	-806.5 MPa/deg
Peak position	Parabola Peak top method

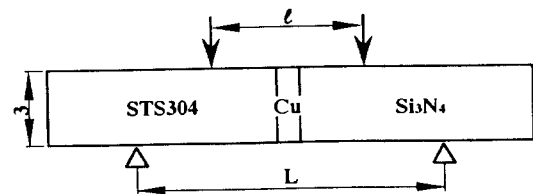


Fig. 3 Geometry of 4-point bending test specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 접합잔류응력에 의한 접합계면에서의 응력특이장

Fig. 4는 접합 후 세라믹측 계면단부에서 1 mm이내의 계면 수직방향 잔류응력 σ_x 의 분포를 나타내고 있으며, Fig. 5는 접합 후의 응력특이장을 나타내고 있다. 선형적 변화를 보이는 구간에서의 특이성지수 λ 와 응력특이장의 강도 K 는 각각 $\lambda=0.3043$, $K=22.3129$ 이다.

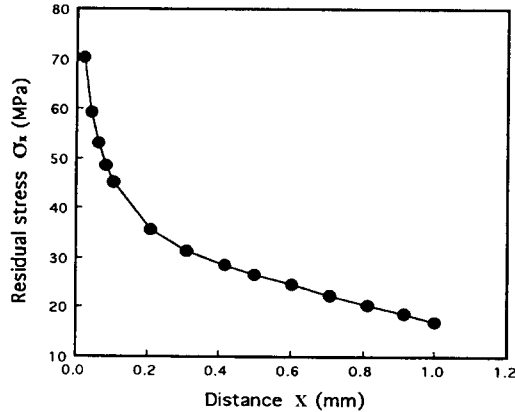


Fig. 4 Distribution of residual stress σ_x for the specimen along the edge line

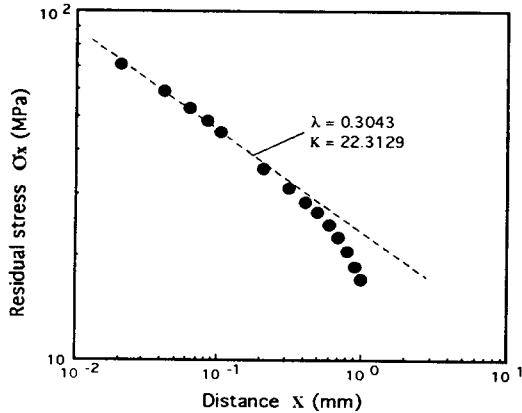


Fig. 5 Distribution of stress singularity index λ of the specimen along the edge line

3.2 기계적 부하에 의한 접합계면에서의 응력특이장

접합재를 실사용 상태로 가정하고, 인장력을 부하하는 경우에 대하여 접합잔류응력의 재분포 및 응력특이장에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 6은 접합잔류응력이 존재할 때와 존재하지 않을 때에 인장하중 5 N을 부하하였을 경우 응력특이장을 나타내고 있으며, Fig. 7은 접합잔류응력이 존재할 때와 존재하지 않을 때에 인장하중 40N을 부하하였을 경우를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 특이성지수 λ 값의 차이가 Fig. 6과 비교해 크게 줄어들었음

을 알 수 있다.

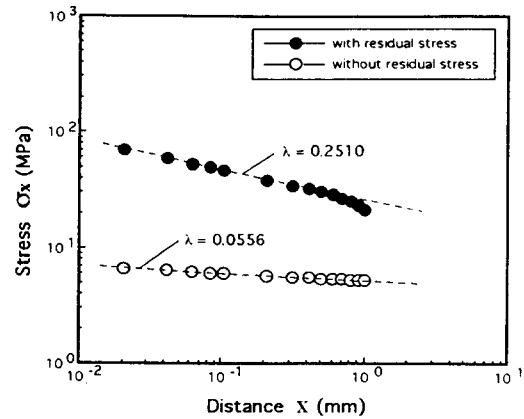


Fig. 6 Distribution of stress singularity index λ of the specimen along the edge line ($P=5N$)

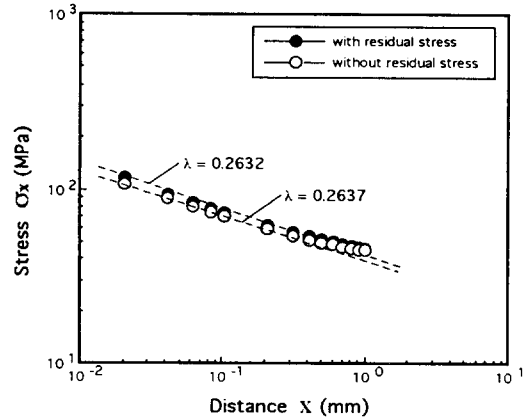


Fig. 7 Distribution of stress singularity index λ of the specimen along the edge line ($P=40N$)

Fig. 8은 이러한 인장하중의 증가에 따른 특이성지수

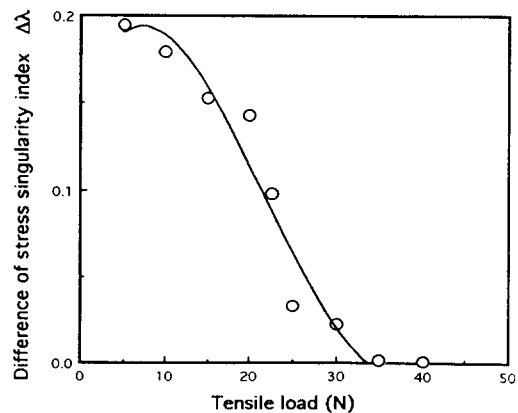


Fig. 8 The relation between tensile load and $\Delta\lambda$ of difference of stress singularity index

λ 의 변화를 검토하기 위해, 접합잔류응력이 존재하는 경우의 λ 값과 접합잔류응력이 존재하지 않는 경우의 λ 값의 차이를 $\Delta\lambda$ 로 하여 인장하중과의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 접합재에 가해진 인장하중이 증가함에 따라 $\Delta\lambda$ 가 감소하고 있으며, 이는 하중이 증가함에 따라 접합재에 대한 접합잔류응력의 영향이 급격히 줄어든다는 것을 나타내고 있다.

3.3 반복 열사이클에 의한 잔류응력 재분포 및 접합계면에서의 응력특이장

Fig. 9는 접합 후에 200°C에서 상온까지 1회, 3회, 5회, 7회, 10회의 반복 열사이클을 부하한 후, 세라믹층 계면단부에서의 응력특이장의 변화를 검토한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 열사이클 횟수가 증가할수록 특이성지수 λ 의 값이 증가하고 있다. 이러한 반복 열사이클 부하횟수와 각 열사이클 온도에 따른 특이성지수 λ 의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

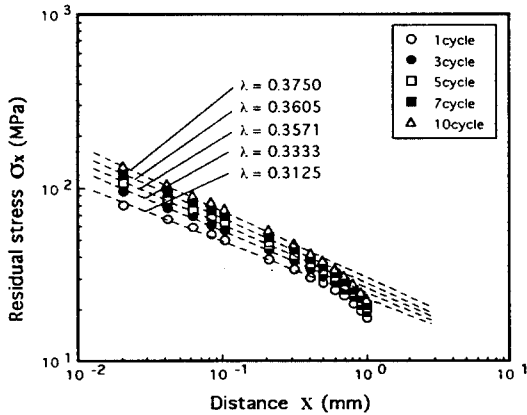


Fig. 9 Distribution of stress singularity index λ of the specimen along the edge line (200°C)

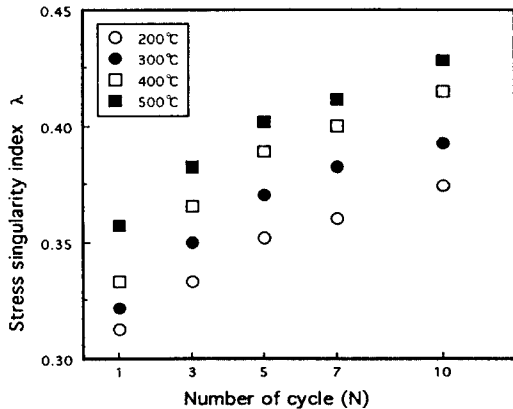


Fig. 10 Relation between thermal cycle and stress singularity index λ

그림에서 보는 바와 같이 열사이클 부하횟수의 증가

에 따라 λ 값은 선형적으로 증가하고 있으며, 열사이클 부하온도가 높을수록 큰 값을 나타내고 있다.

Fig. 11은 앞에서 구해진 λ 값을 응력특이장 수식에 적용시켜 응력특이장의 강도 K를 구하여 각 온도와 각 사이클에 따른 K값의 변화를 나타낸 것이다.

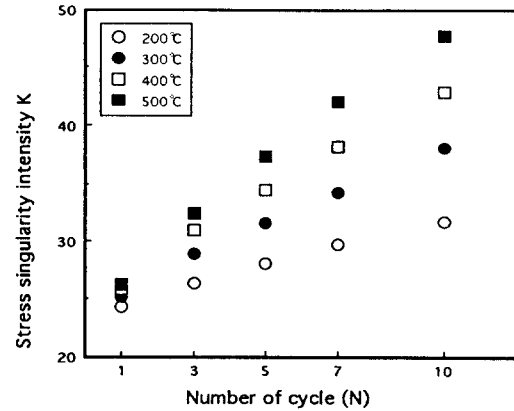


Fig. 11 Relation between thermal cycle and stress singularity intensity K

이와같이 특이성지수 λ 와 응력특이장의 강도 K의 증가는 세라믹층 계면단부에 응력을 더욱 집중시킴으로써, 접합재의 강도를 크게 저하시킬 것으로 생각된다.

3.4 잔류응력이 접합강도에 미치는 영향

Fig. 12는 X선 잔류응력 측정에 의하여 접합계면 근방에서 반복 열사이클 부하횟수에 따른 최대인장잔류응력값의 변화를 검토한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 열사이클 부하횟수에 따른 잔류응력의 변화는 200°C, 300°C, 400°C, 500°C의 모든 온도에서 열사이클 횟수가 증가할수록 잔류응력은 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 이와같이 반복 열사이클 횟수가 증가할수록 잔류응력이 감소하는 원인은 동물의 소성변형량의 증

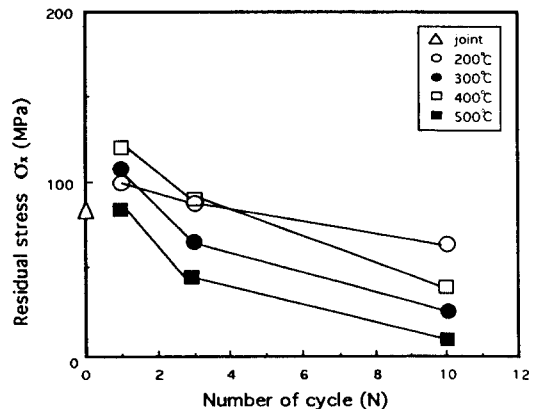


Fig. 12 Distribution of maximum tensile residual stress σ_x along the edge line at various thermal cycle

가와 더불어 브레이징재의 열화로 인하여 소성구속의 정도가 작아져 응력의 해방이 생기기 때문으로 생각되며, 이에 대한 연구는 브레이징재와 세라믹의 화학적 반응에 의한 석출물, 화합물 등의 조성과 병행해서 연구되어야 한다.

Fig. 13은 반복 열사이클 부하에 따른 파단강도의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 접합재의 파단강도는 열사이클 부하에 의하여 저하한다는 것을 알 수 있다. 이와같이 열사이클 부하에 의하여 접합재의 파단강도가 저하하는 원인에 대하여 고찰하여 보면, 1사이클의 경우에는 특이성지수 λ 가 열사이클 부하에 따라 증가하므로 이로 인하여 파단강도가 저하한다는 것을 알 수 있으며, 3사이클 이상 그리고 고온으로 갈수록 응력완화재로 사용된 브레이징재가 산화물, 석출물 등을 생성시켜 접합계면에서의 강도열화가 크게 일어나, 잔류응력의 완화작용보다도 오히려 크게 작용하기 때문에 파단강도가 저하한다고 생각된다.

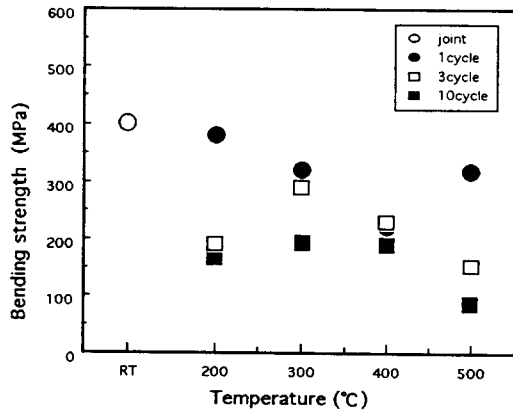


Fig. 13 Relation between bending strength and various thermal cycle temperature

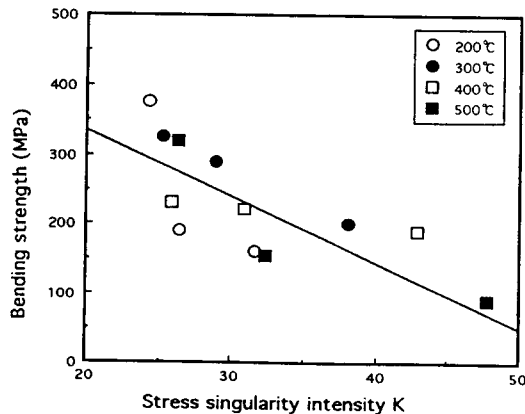


Fig. 14 Relation between bending strength and stress singularity intensity K

Fig. 14는 반복 열사이클 부하온도별로 나타낸 응력특

이장의 강도 K와 굽힘강도와 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 열사이클 부하온도에 있어 응력특이장의 강도 K가 증가할수록 굽힘강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와같이 열사이클의 부하에 의해 발생하는 잔류응력은 접합계면에서 응력특이장을 형성하고, 그 응력특이장을 평가할 수 있는 파라메타인 응력특이장 강도 K로서 접합재의 강도를 평가할 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

세라믹/금속접합재의 접합잔류응력 분포, 기계적 하중 및 반복 열사이클에 의한 응력재분포와 그에 따른 응력특이장의 변화를 해석하고, 접합재에 대한 X선 잔류응력측정 및 강도시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접합재의 접합계면에서는 잔류응력이 특이장을 형성하고, 특이성지수 λ 와 응력특이장의 강도 K로서 접합재의 강도를 평가할 수 있다.
2. 반복 열사이클에 의한 접합재의 잔류응력 분포형태는 변하지 않지만, 열사이클 부하온도 및 부하횟수가 증가할수록 최대인장잔류응력값이 증가하며, 특이성지수 λ 와 응력특이장의 강도 K도 증가한다.
3. 기계적 부하의 경우, 접합잔류응력이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우와의 특이성지수값의 차이인 $\Delta\lambda$ 가 인장하중의 증가에 따라 감소하므로, 접합잔류응력이 접합재의 강도에 미치는 영향이 줄어든다는 것을 알았다.
4. 열사이클 부하 횟수가 증가함에 따라 특이성지수 λ 와 응력특이장의 강도 K가 증가하여 접합재의 파단강도를 저하시킨다는 것을 강도시험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 古口日出男, 賀屋後曲, 失田敏, “セラミックスと金屬の接合部の熱應力解析”, 日本機械學會論文集(A篇), 55卷, 520號, pp. 2527~2532, 1989
2. 古口日出男, 賀屋俊典, 大谷幸廣, 失田敏夫, “セラミックスと金屬の接合部の信頼性評價”, 日本機械學會論文集(A篇), 55卷, 513號, pp. 1121~1125, 1989
3. 荒居善雄, 小林英男, “セラミックス/金屬接合殘留應力の彈塑性特異性に及ぼす接合体寸法の影響”, 日本機械學會論文集(A篇), 59卷, 559号, pp. 627~633, 1993
4. 羅芳毅, 小林英男, 佐藤拓哉, 朴榮哲, “セラミックス/金屬接合材殘留應力分布の有限要素解析”, 日本機械學會論文集(A篇), 60卷, 571號, pp. 742~747, 1994
5. D. B. Bogy, “Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading”, Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol. 35, pp. 460~468, 1968