

세라믹스/金屬 接合界面에서의 破壞力學的 強度評價에 關한 研究

A study on the Fracture Mechanical Strength Evaluation in Joint Interface of Ceramics and Metal

(1995년 10월 20일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

최 병 기*
Byung-Ky Choi

ABSTRACT

Indentation fracture method and 4-point bending test are carried out to measure the residual stresses and the bending strength, and to investigate the mechanism of fracture mechanics in the bonded interface of ceramic and metal.

The results obtained are as follows;

- 1) The fracture patterns of bonded materials shows that the delamination fracture of interfaces is stably developed from the interfaces of ceramic/active metallic bonded materials at the specimen center, and the fracture is unstably generated through a refraction on the middle ceramic.
- 2) Distribution of residual stresses is quantitatively investigated on the ceramic side of bonded materials.
- 3) It is found that the residual stresses of interface vertical direction are concentrated on the bonded interface at the ceramic side.

1. 서 론

세라믹스는 우수한 내열성, 내식성, 내마모성 등을 갖고있기 때문에 넓은 용도의 신소재의 하나로 매우 각광을 받고있다^{1~3)}.

그러나 한편으로는 매우 취성을 갖는 성질때문에 구조용 재료로서의 응용은 기대한만큼 진척되

어있지 않다.

그래서 세라믹스를 단독으로 사용하는것 보다도 세라믹스의 장점을 살리고 단점인 취성을, 연성이 풍부한 금속으로 보완하여 이른바 세라믹스와 금속의 접합에 의한 구조부재 예로의 적용을 확대할 수단으로서 그 중요성이 높아가고 있다⁴⁾.

따라서 질화규소 소결체와 탄소강의 활성금속

* 조선대학교 기계공학과

접합법에 의한 브레이징은 구조용 세라믹스와 금속의 접합으로서 자동차용 터보충전기의 세라믹스로타와 내열강과의 접합부에 이미 실용화되고 있고 이들의 접합의 메카니즘에 관해서는 명확하게 밝혀지고 있으나 세라믹스와 금속의 열팽창계수의 불일치에 의한 잔류열응력의 발생은 현재에도 많은 문제가 되고 있는 실정이다⁵⁾.

접합 잔류응력은 일반적으로 동같은 연결금속을 접합부에 개재시켜 소성변형과 응력완화를 이용해서 잔류응력을 완화시키는 것을 시도하는 것이 행해지고 있다^{6~8)}.

본 연구에서도 응력완화층을 이용하고 있으나 그 효과나 잔류응력의 분포, 접합강도와와의 관련등에 관해서는 아직 명확하게 밝혀지지 않은 실정이다.

그러므로 접합계면에서의 파괴강도와 파괴메카니즘은 4점굽힘시험으로, 접합잔류응력의 평가는 I.F법을 이용하여 접합계면 부근에서의 크랙의 진전과 잔류응력의 분포와의 관계를 명확하게 하고자 한다.

2. 실험 방법

상압소결(常壓燒結)한 질화규소 Si_3N_4 와 Si_3N_4 의 단체끼리의 접합은 Ti-Ag-Cu계의 활성금속을 이용하여 $800^{\circ}C \sim 850^{\circ}C$ 의 고온과 진공(1×10^{-5} torr)중에서 브레이징 하였으며 Si_3N_4 와 기계구조용 탄소강 S45C의 접합은 Ti-Ag-Cu계의 활성금속을 이용하여 $800^{\circ}C \sim 850^{\circ}C$ 의 고온에서 무산소동의 얇은판을 끼워 진공(1×10^{-5} torr)중에서 브레이징 하였으며 그 접합재의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타냈다.

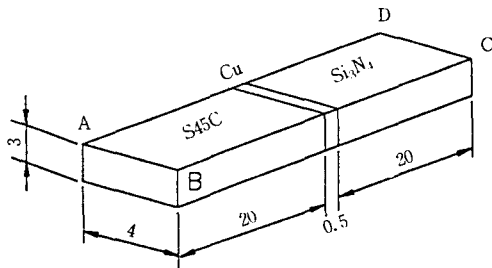


Fig. 1 Shape and dimension of specimen

강도평가 시험은 만능재료시험기(INSTRON MO : 1127형)를 사용하여 JIS 1601-1981에 준하여 실시했다.

하중방식은 4점굽힘으로 외스팬 30mm, 내스팬 10mm로 설정하였으며 변위속도는 0.5mm/min으로 서서히 제어하고 하중-변위 선도를 기록하면서 파단강도를 측정하였다.

한편 IF법에 의한 잔류응력 측정은 IF시료 표면을 다이아몬드 스톨로 연삭한 후 래핑(Lapping)에 의해 최대 표면조도 $0.6 \mu m$ 이하가 되도록 다듬질하여 비커스경도계로부터 접합계면에서 평행축상의 측정점과 접합 계면에서의 수직축상의 측정점의 위치는 Fig. 2와 같은 위치에서 각각 측정하였다.

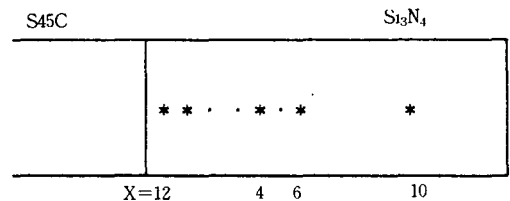


Fig. 2 Measurement location of IF method

이때 압입하중은 30Kg, 하중 유지시간은 30초동안 압입하였으며 압입속도는 0.07mm/sec로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 계면 파괴강도 및 파괴 메카니즘

Si_3N_4 의 단체와 Si_3N_4 와 S45C의 접합재의 굽힘 시험 결과를 Table 1 및 Table 2에 나타냈다.

Table 1 Bending test results of Si_3N_4

Specimen No	Max. Load(N)	Bending Strength(N/mm ²)	Max. Displacement(mm)	Fracture Route
A	1177	969	0.252	
B	1049	856	0.240	
C	1020	837	0.236	
D	1069	875	0.250	
E	1040	850	0.246	

여기에서 굽힘강도는 다음식에 의하여 계산하였다.

Table 2 Bending test results of Si₃N₄ and S45C

Specimen No	Max. Load(N)	Bending Strength(N/mm ²)	Max. Displacement(mm)	Fracture Route
a	373	345	0.131	interface (Si ₃ N ₄ side)
b	353	328	0.119	interface (Si ₃ N ₄ side)
c	412	346	0.120	interface
d	353	297	0.106	interface (Si ₃ N ₄ side)
e	373	316	0.115	interface (Si ₃ N ₄ side)

$$\sigma_b = 3P(L - \ell) / 2wt^2$$

σ_b : 4점굽힘강도

P : 과단하중

L : 하부 지점간 거리

ℓ : 상부 하중점간 거리

w : 시험편폭

t : 시험편 두께

세라믹스와 금속의 접합재의 파괴강도는 297N/mm²~346N/mm²의 범위이고 접합재로서 비교적 안정된 값이 얻어졌으나 Si₃N₄ 단체의 굽힘강도에 비교해서 약 35%의 낮은 값을 나타내고 있다.

한편, 접합재의 4점굽힘시험에 있어서 파괴기점과 파괴경로로서는 다음과 같이 생각할 수 있다.

- 1) 세라믹스와 활성금속 접합재의 계면
- 2) 활성금속 접합재와 중간 개재물의 계면(세라믹스쪽 또는 금속쪽)
- 3) 금속과 활성금속 접합재의 계면
- 4) 세라믹스
- 5) 중간개재물
- 6) 금속

그러나 실제로 관찰된 파괴기점과 파괴경로는 1), 4)뿐이었다.

즉, 파괴는 전부 접합계면에서의 코너부를 기점으로 일어나고 있었으며 시험편 a, b, e는 파괴가 서서히 Si₃N₄ 측으로 진행되었으며 요철이 큰 파면을 드러내고 있었으나 시험편 d에서는 Si₃N₄ 측으로 파괴가 진행되어 a, b, e와 같은 파괴형태로 진행되었다.

계면강도가 세라믹스의 강도보다도 높으면 파괴기점은 세라믹스 또는 금속으로 되고 금속끼리의 접합에서는 용접부 강도는 모재강도보다도 높은 것이 요구된다. 그러나 세라믹스와 금속의 접합에서는

파괴기점이 시험편 c와 같이 세라믹스로 되는 경우에 강도는 극히 저하된다. 이것은 접합후의 절단 가공시에 세라믹스에 결함이 생기는 것이 원인이라 할 수 있다. 이와같이 파면의 형태의 차이가 굽힘강도의 저하에 영향을 미치고 있다고 생각된다. 이 영향을 제외하면 파괴의 기점은 세라믹스와 활성금속접합재의 계면으로 되었으며 그 후의 파괴경로는 이 계면과 세라믹스였다.

자세한 거시적 파면관찰에 의한 파괴기구를 모델화한 결과를 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 파괴는 세라믹스와 활성금속접합재의 계면의 선단에서 발생하고 계면은 박리(剝離)크랙이 진전하여 이속고 크랙은 각을 이루면서 세라믹스내에 굴절한 후의 파괴는 통상 세라믹스의 파괴와 같았다. 크랙은 만곡(灣曲)하여 분기(分岐)하고 접합계면에 다시 되돌아오는 것도 있었다. 중요한 것은 계면 박리파괴의 거리(a_{min})가 강도를 지배하고 있다는 사실이다. 박리파괴된 크랙전면의 가장자리는 만곡하여 Fig. 4와

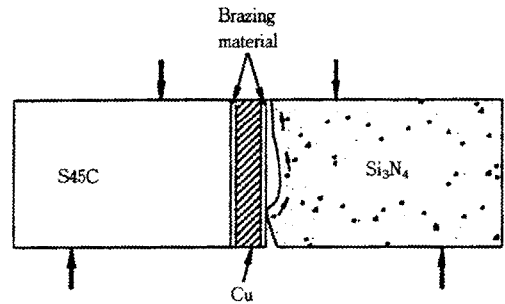


Fig. 3 Fracture route

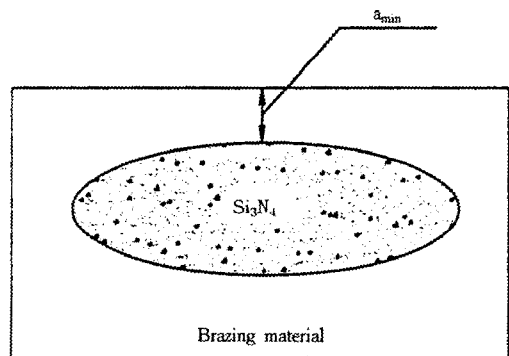


Fig. 4 Fracture mechanism of joint interface (fracture section)

같은 형상을 나타낸다.

이 거리까지 계면 파괴파괴가 하중 증가와 함께 진전하다가 즉 안정파괴되다가 부분적으로 세라믹스내에 굴절하여 세라믹스의 파괴인성에 도달해서는 불안정파괴에 이른다고 생각된다.

3.2 IF법에 의한 잔류응력 측정

세라믹스 표면에 생기는 버커스압자 및 크랙은 Fig. 5에 나타낸 바와 같은 형상이지만 X방향에 진전한 크랙Cx는 Y방향의 잔류응력 σ_y 의 영향을 받으며 Y방향에 진전한 크랙Cy는 X방향의 잔류응력 σ_x 의 영향을 받고 있다.

본 연구에서는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 접합계면에 따른 방향에 비커스 대각선 방향을 맞추고 접합계면에 평행방향으로 진전한 크랙길이 $2C_y$ 로부터 접합계면에 수직방향의 잔류응력 σ_x 를 구하고 또 접합계면에 수직방향에 진전한 크랙길이 $2C_x$ 로부터 접합계면에 평행방향의 잔류응력 σ_y 를 구했다.

또한 하중을 점점올려 K_{IC} 값의 하중의 의존성을 조사했으나 하중에 관계없이 거의 같은 K_{IC} 값을 나타냈다.

파괴인성값 K_{IC} 의 계산은 다음에 나타낸 田中⁹⁾의 식을 이용하여 잔류응력값을 산출하였다.

$$K_{IC}' = XP/C^{3/2} \dots\dots\dots ①$$

P : 압입하중 (=294N), C : 압자 중심으로부터 크랙길이

$$X = 0.016(E/H)^{1/2} \dots\dots\dots ②$$

H : Vicker's 경도, E : 세라믹스의 영률 (=284GPa)

$$H = 1.8544P/(2a)^2 \dots\dots\dots ③$$

2a : 압자의 대각선 길이

$$K_{IC} = K_{IC}' + \sigma_R(C/\pi)^{1/2} \dots\dots\dots ④$$

K_{IC}' 와 K_{IC} 는 X방향(접합면에 수직방향), Y방향(접합면에 평행방향)에 대해서 구한 다음 X방향의 잔류응력 σ_R 을 구한결과 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10과 같았다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 잔류응력은 접합계면 근방에서 50MPa이상의 최대치를 나타내고 있으며 접합계면에서 멀어지게 되면 급격히 감소하면서 계면에서 약 4mm근방까지 다시 서서히 증가하다가 10mm이상에서는 거의 0에 가까운 값을 나타내고 있다.

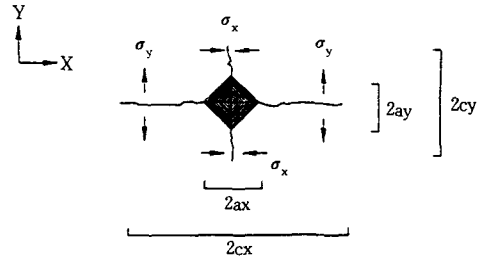


Fig. 5 Shape of Vicker's mark and crack direction

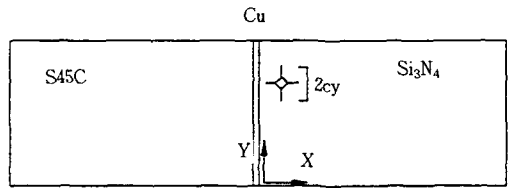


Fig. 6 Measurement direction

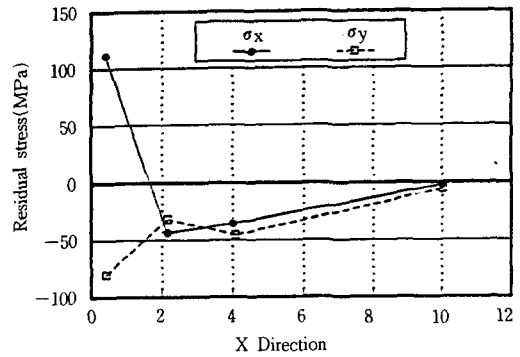


Fig. 7 Residual stress distribution (Sample, a)

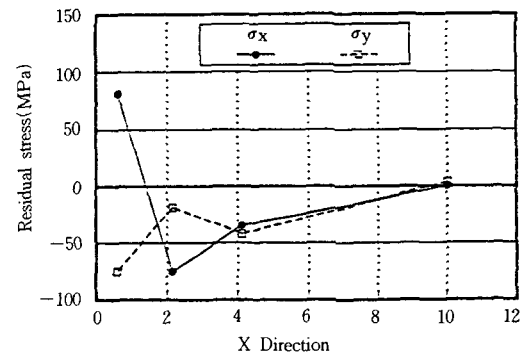


Fig. 8 Residual stress distribution (Sample, b)

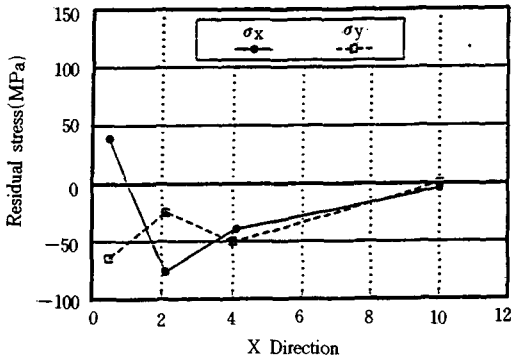


Fig. 9 Residual stress distribution (Sample, c)

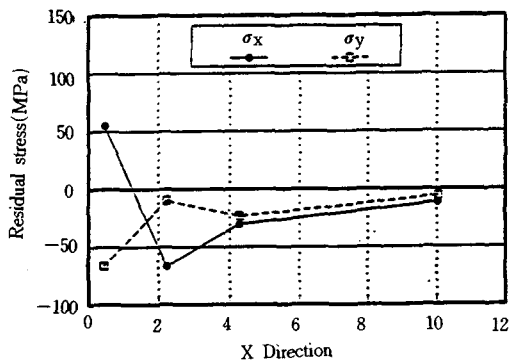


Fig. 10 Residual stress distribution (Sample, d)

4. 결 론

세라믹스와 금속의 접합계면에서 굽힘강도 및 IF 법에 의한 잔류응력을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 접합재의 파괴의 형태는 시험편 중앙부의 세라믹스/활성금속 접합재 계면을 기점으로 계면 박리파괴가 안정성장으로 진전하여 세라믹스내에 굴절해서 불안정 파괴됨을 알 수 있다.
- 2) 접합재의 세라믹스측의 잔류응력 분포를 정량적으로 밝혔다.

- 3) 세라믹스측의 계면 수직방향의 잔류응력은 접합 계면에 집중한다.

참 고 문 헌

- 1) 須賀唯知, “セラミックス接合工学”, 日刊工業新聞社, pp. 239~279, 1990.
- 2) H. Kobayashi, “Mechanics Approach to Fracture Strength of Ceramics/Metal Joints”, J. Jap. Mech. Engo, Vol. 55, No. 512, pp. 750~755, 1989.
- 3) 結城良治, “界面の力学”, 培風館, pp. 1~32, 52~65, 85~97, 1993.
- 4) H. Kobayashi, “Evaluation of Ceramics/Metal Joints with Defect”, J. Jap. Mech. Eng., Vol. 57, No. 535, pp. 518~521, 1991.
- 5) M. Kurita, “Residual Stress Distribution of Silicon Nitride Joined to Carbon Steel”, J. Jap. Mech. Eng., Vol. 56, No. 524, pp. 978~983, 1990.
- 6) N. Miyahara, “Fracture Toughness Evaluation of Five Structural Ceramic Materials by Various Testing Methods”, J. Jap. Mech. Eng., Vol. 57, No. 538, pp. 1326~1333, 1991.
- 7) Y. Ebihara, “Evaluation of Strength Characteristics of Ceramics/Metal Joints”, J. Jap. Mech. Eng., Vol. 57, No. 541, pp. 2036~2041, 1991.
- 8) T. Suga, “stress Concentration and Interfacial Failure in Metal-Ceramic Bonding”, Trans. Jap. Inst. Metals, Vol. 25, No. 5, pp. 419~423, 1986.
- 9) K. Tanaka, “Evaluation of Elastic/Plastic Indentation Stress to Determine Fracture Toughness”, J. Jap. Inst. Metals, Vol. 48, No. 12, pp. 1157~1162, 1984.