

# 경사기능재료의 굽힘강도 평가에 관한 연구

송준희\*, 김홍건<sup>+</sup>

(논문접수일 2009. 10. 28, 심사완료일 2009. 11. 30)

## A Study on Evaluation of Bending Strength in FGM

Jun Hee Song\*, Hong Gun Kim<sup>+</sup>

### Abstract

Metal/ceramic composites structures have many attractive properties with great potential for applications that demand high stiffness as well as chemical and biological stability, thermal and electrical insulation. They are currently in use for mechanical and thermal protection in cutting tool and engine parts. Thus, determination of adhesive properties for coating part is one of the most important problems for the extension of the use of coated materials. In this work, bending strength of Functionally Graded Materials(FGM) are evaluated by means of bending strength tester. The graded layer according to the load condition showed the change of the bend strength.

**Key Words** : Metal(금속), Ceramic(세라믹), FGM(Functionally Graded Material, 기능경사재료), Composite(복합재료), Strength(강도)

## 1. 서론

재료의 작동 수명과 성능에 대한 많은 필요성에 의해 코팅 기술 혹은 복합재료가 재료의 수명을 연장하는데 사용되었다. 그러나 층간의 불연속적 특성으로 유발되는 응력 특이성은 균열을 야기시키고 복합 매개체는 탈락 유발이 쉽다. 그러므로 경사기능재료(FGM)이라고 불리는 개념은 응력 특이성을 제거하고 잔류응력을 완화시키며 결합강도를 높이는 데 응용되고 있다. 경사기능재료는 두께방향으로 체적 분율이 연속적으로 변화하여 제조된다<sup>(1-11)</sup>.

세라믹/금속과 같은 이종재료의 접합체는 내열성, 경량성, 내부식성, 내마모성 등 우수한 기계적 특성을 가지고 있는 세라믹의 응용을 확대시 접합강도 및 신뢰도가 높은 접합법 등을 개발하길 수 있는 중요 기술로 알려져 있다. 기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 금속과 세라믹 간의 접합은 주로 고온에서 계면반응에 의하여 이루어지기 때문에 금속과 세라믹의 열적, 기계적 특성의 차이가 접합을 어렵게 하는 인자로 보고된다. 세라믹/금속 접합체의 접합강도를 결정하는 요인은 접합과정에서 형성되는 접합 계면층의 기계적 특성 및 접합체에 잔존하게 되는 잔류응력으로 알려져 있다.

\* 전북대학교 기계설계공학부

+ 교신저자, 전주대학교 기계자동차공학과 (hkim@jj.ac.kr)  
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동3가 1200번지

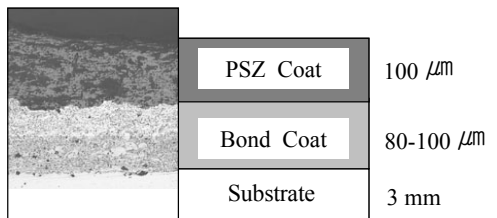
이제까지는 접합기술의 개선, 계면의 분석, 잔류응력의 평가 등을 주로 연구 발표되어 왔으나<sup>(12-14)</sup>, 세라믹/금속 이종재의 계면간의 접합강도를 직접 정량적으로 평가하는 것도 매우 중요한 자료가 된다.

따라서, 본 연구에서는 경사기능재료의 접합층으로 이루어진 복합재의 미세적인 구조변화를 알아본다. 그리고 이들 경사기능재료의 굽힘특성을 파악하고, 하중 부하의 방식에 따른 굽힘강도의 변화를 평가하고자 한다. 금속과 세라믹이 인장과 압축의 하중을 받을 때 상호 기계적 특성변화를 구해보고자 한다.

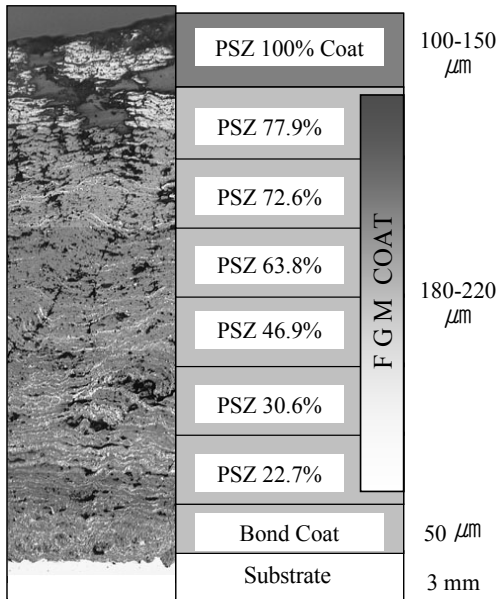
## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 고온용 구조재료로 사용되



(a) NFGM



(b) FGM

Fig. 1 Schematic of the geometry of the specimens

는 니켈기(Ni-based) 초합금 Inconel HX를 모재(3mm)로 하고 부분안정화 지르코니아(PSZ; partially stabilized zirconia) 분말을 세라믹 단열 코팅층으로 하였다. 또한 모재(substrate)와 단열 코팅층 사이의 물성치 차이를 줄이기 위해 NiCrAlY를 bond coat로 사용하였다.

금속 모재 위의 세라믹층은 폭발용사법(detonation gun spraying methods)을 사용하여 적층시켰다. 세라믹과 금속 단일층만으로 조성된 duplex 시험편(NFGM)은 NiCrAlY bond coat층이 약 80-100 $\mu$ m, PSZ 코팅층이 약 100 $\mu$ m 정도로 적층하여 제작하였다. 세라믹의 조성이 경사적으로 변하는 경사기능성 시험편은 금속 모재 위에 NiCrAlY bond 층(약 50 $\mu$ m)을 적층한 후, PSZ 조성 비율이 각각 22.7, 30.6, 46.9, 63.8, 72.6, 77.9 vol%의 분포로 금속과 혼합된 재료를 순차적으로 약 180-220 $\mu$ m 정도씩 적층하였다. 세라믹 단열층인 top coat로서는 PSZ를 약 100-150 $\mu$ m 정도 적층하여 제작하였다. Fig. 1은 시험편의 적층형상을 도식화하여 보여주고 있다.

경사기능성 복합재료의 굽힘강도를 구하기 위해서 4점 굽힘시험용 시험편을 제작하였다. 시료의 제작방법은 폭발용사에 의하여 제작되었으며, 종류로는 크게 duplex와 FGM이다. 사양은 아래 Table 1과 같다.

위의 표에서 보이는 것처럼 top coat와 bond coat는 모두 동일하며 경사층만이 서로 다른데, duplex재는 경사층이 없는 재료이고 FGMD는 FGML의 경사층을 2배로 한 것이다. 4점 굽힘시험에서 사용한 시험편은 40 $\times$ 4 $\times$ 두께mm<sup>3</sup>(두께는 시편마다 다름)의 차원으로 가공하였다.

### 2.2 실험장치 및 방법

4점 굽힘시험의 실험장치는 최대용량 2ton인 유압식 만능시험기(Instron 8500)를 이용하였으며 하중과 변위는 응용 프로그램인 Flaps plus를 사용하여 data를 저장하였다. 또한, crosshead 속도는 0.5mm/min이고 실온에서 작동하였다. 실험은 크게 2가지의 방법이며 하나는 세라믹(PSZ) 층

Table 1 Specimen specification

	PSZ (top coat)	FGM layer	Ni-base alloy (bond coat)
Duplex	600-700	-	60-100
FGML	600-700	500-600	60-100
FGMD	600-700	1000-1200	60-100

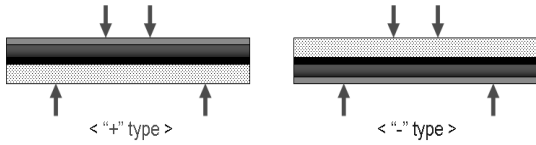


Fig. 2 Loading type of the bending specimens

을 위쪽으로 향하도록 하여 top coat부분이 압축응력을 받도록 한 것(‘+’ type)이며 다른 하나는 금속(substrate)부분이 위쪽으로 향하도록 하여 substrate가 압축응력을 받도록 한 (‘-’ type) 것이다. 즉, 세라믹인 PSZ 성분과 금속성분이 결합 하중으로 인해 인장과 압축의 역전된 하중조건에 대해서 파괴형태 및 강도를 비교하기 위함이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 4점 굽힘시험에 의한 하중-변위분포

경사기능성의 PSZ/Ni기 금속 복합재에 대해 굽힘강도를 구하기 위해서 4점 굽힘시험을 행하였다. 세라믹성분인 PSZ 부분이 인장응력과 압축응력의 조건하에서 서로 어떠한 거동을 나타내는 지를 조사하기 위해서 동일한 사양으로 2종류의 시험편을 준비하였다. 하중은 같은 시험조건으로 부하하였으며 PSZ부가 압축응력을 받고 금속부가 인장응력을 받는 상태가 ‘+’ type이고 반대로 PSZ부가 인장응력을 받고 금속부가 압축응력을 받는 상태가 ‘-’ type이라고 칭하였다.

Fig. 3은 duplex재의 하중과 변위를 나타낸 선도로서 빨간색의 data가 ‘+’ type의 조건이며, 파란색의 data가 ‘-’ type의 조건에서 실험한 것이다. 그림에서 보이는 바와같이 초기에는 모두 탄성적인 거동을 보이며 “+” type의 형태가 “-” type보다 더 높은 하중상태에 있다. 이는 일반적으로 세라믹이 압축응력에 강하고 인장응력에 약하다는 사실을 뒷받침하고 있는 현상이다. 두 곡선 모두 세라믹입자의 미소 파괴로 인한 serration현상이 나타나고 있다. 시험중 관찰한 것에 따르면 탄성구간내에서 세라믹층은 파단에 이르렀고, 비선형구간은 금속층의 소성력에 따른 영향이다. 최대하중은 “+” type이 116.65kgf이었고, “-” type은 86.88kgf이었다. 최대하중까지의 변형에너지를 비교하여도 “+” type이 “-” type보다 높음을 알 수 있다. 변형량 1.5mm이후는 세라믹층이 완전 파단되어 금속만의 소성변형 구간이므로 복합재에서는 큰 의미가 없다.

Fig. 4는 FGML재의 하중과 변위를 나타낸 선도로서 빨간색의 data가 ‘+’ type의 조건이며, 파란색의 data가 ‘-’ type

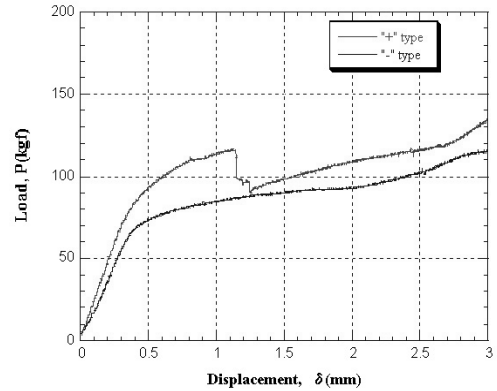


Fig. 3 Load-displacement curve in Duplex material

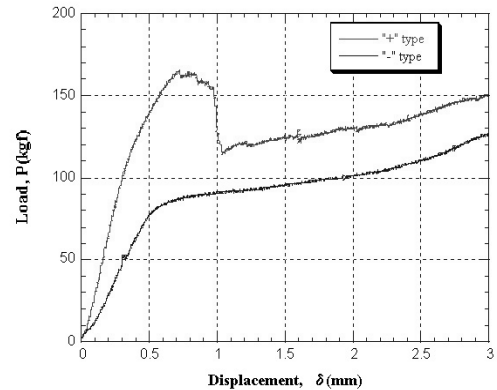


Fig. 4 Load-displacement curve in FGML material

의 조건에서 실험한 것이다. 그림에서 보이는 바와같이 초기에는 모두 탄성적인 거동을 보이며 “+” type의 형태가 “-” type보다 더 높은 하중상태에 있다. 두 곡선 모두 세라믹입자와 경사층 복합재의 미소 파괴로 인한 serration현상이 나타나고 있다. duplex재와 마찬가지로 탄성구간내에서 세라믹층은 파단에 이르렀고, 비선형구간의 초기는 경사층의 파괴가 지배적이고 그 후의 비선형영역은 substrate의 소성력에 따른 영향이다. 최대하중은 “+” type이 165.83kgf이었고, “-” type은 87.31kgf이었다. 두 형태의 최대하중까지 변형에너지를 비교하면 “+” type이 “-” type보다 높음을 알 수 있다.

Fig. 5는 FGMD재의 하중과 변위를 나타낸 선도로서 빨간색의 data가 ‘+’ type의 조건이며, 파란색의 data가 ‘-’ type의 조건에서 실험한 것이다. 그림에서 보이는 바와같이 초기에는 모두 탄성적인 거동을 보이며 “+” type의 형태가

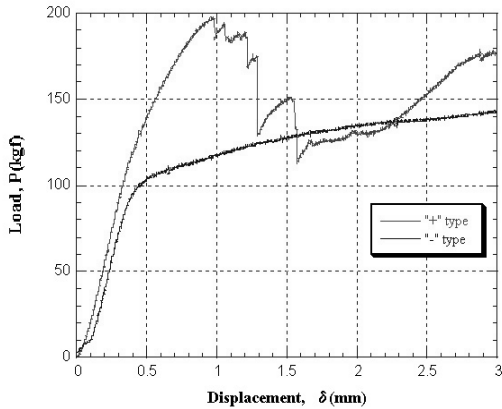


Fig. 5 Load-displacement curve in FGMD material

“-” type보다 더 높은 하중상태에 있다. 두 곡선 모두 세라믹 입자와 경사층 복합재의 미소 파괴로 인한 serration 현상이 나타나고 있다. FGML재와 마찬가지로 탄성구간내에서 세라믹층은 파단에 이르렀고, 비선형구간의 초기는 경사층의 파괴가 지배적이고 그 후의 비선형영역은 substrate의 소성력에 따른 영향이다. FGML에 비해 PSZ와 경사층이 두꺼워짐에 따라 serration 현상이 두드러지고 있다. 최대하중은 “+” type이 198.1kgf이었고, “-” type은 117.05kgf이었다. 두 형태의 최대하중까지 변형에너지를 비교하면 “+” type이 “-” type보다 높음을 알 수 있다.

### 3.2 기계적 성질의 평가 및 비교

본 절에서는 Fig. 3~5의 하중-변위선도를 바탕으로 굽힘강도( $\sigma_b$ )를 구하였다. 4점 굽힘시험에서 굽힘강도의 계산식은 일반적으로 금속 균일재에 적용하는 이론식을 사용하였으며 식 (1)에 나타내었다.

$$\text{굽힘강도} ; \sigma_b = \frac{3P(L-a)}{2bh^2} \quad (1)$$

- 여기서, L : lower span length (=30mm)
- a : upper span length (=10mm)
- b : specimen width
- h : specimen thickness
- P : maximum load

이와같은 계산식에 의해 구한 값들을 Table 2에 정리하였으며 비교를 용이하게 하기 위해서 Fig. 6에 막대그래프로

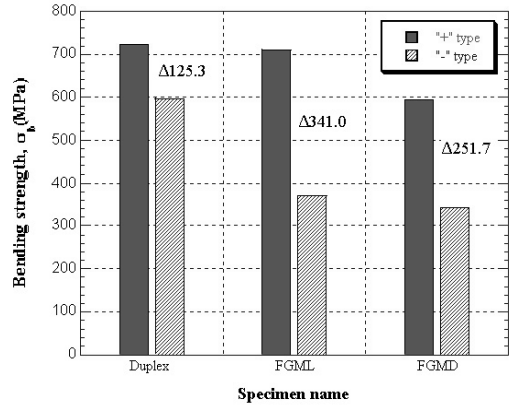


Fig. 6 Bending strength distribution by 4-point bend test

Table 2 Material properties

시험편 형태		최대하중 P <sub>max</sub> (kgf)	굽힘강도 O <sub>b</sub> (MPa)
Duplex	‘+’ type	116.65	720.8
	‘-’ type	86.88	595.5
FGML	‘+’ type	165.83	712.2
	‘-’ type	87.31	371.2
FGMD	‘+’ type	198.1	594.3
	‘-’ type	117.05	342.6

나타내었다.

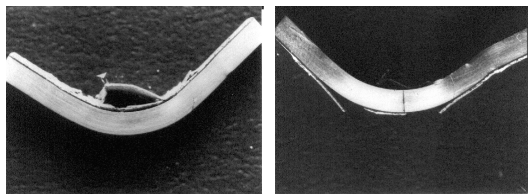
Fig. 6는 굽힘강도를 나타낸 것으로 빨간색이 ‘+’ type, 파란색이 ‘-’ type의 조건이다. 금속재료에 대한 굽힘이론식을 적용하여 복합재에서는 오차가 있으며 duplex, FGML, FGMD재의 순서로 굽힘강도가 작아지며, PSZ층이 압축응력을 받는 ‘+’ type에서 인장응력을 받는 ‘-’ type보다 강도가 높았다. 본 재료계에서 굽힘강도를 계산하는 인자중 두께가 duplex, FGML, FGMD재의 순서로 두껍다. 따라서 최대하중이 duplex, FGML, FGMD의 순서로 높아짐에도 불구하고 굽힘강도는 duplex재보다 FGM재가 낮게 평가되는 것이다. 즉, 복합재료이기 때문에 PSZ와 경사층을 모두 동일한 두께로 고려해야 상대적인 강도 비교를 할 수 있을 것이다. 그러므로, 비교적 세라믹 층들이 강도에 영향을 덜 끼치며 금속 substrate가 지배적인 강도를 차지하는 ‘-’ type과 세라믹층이 강도에 영향을 많이 준 ‘+’ type과의 강도차이를 비

교하는 것이 본 재료계에서는 유효하다고 판단된다. 그림에 서처럼 duplex는 125.3MPa, FGML은 341.0MPa, FGMD는 251.7MPa로 경사층을 도입한 FGM쪽에서 duplex보다 강도차이가 크고 경사층을 도입하더라도 두께가 두꺼워지면 오히려 강도가 저하한다는 사실을 보여주고 있다. 이러한 모든 결과를 종합해 볼 때, 기계적 성질이 우수한 것으로는 세라믹계 성분은 압축응력의 상태이고 금속계 성분은 인장응력의 상태로 경사기능재료를 구조물에 적용하는 것이 바람직함을 증명하고 있다.

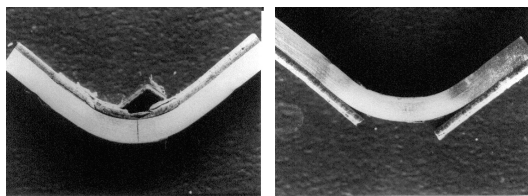
### 3.3 단면 관찰

금속과 세라믹으로 구성되는 이중 복합재료의 부하방식에 따른 영향을 알아보기 위해서 4점 굽힘시험 후에 시험편을 거시적으로 파괴의 형태를 관찰하였다.

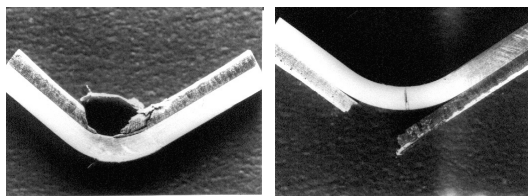
Fig. 7(a)는 duplex재에 대한 ‘+’ type과 ‘-’ type의 시험편을 거시적으로 찍은 사진이다. PSZ부는 굽힘하중으로 으깨지거나 크랙이 진전해 있으며 탈락과 계면에서 파단이 발생하였다.



(a) Duplex(‘+’/‘-’ type)



(b) FGML(‘+’/‘-’ type)



(c) FGMD(‘+’/‘-’ type)

Fig. 7 Photograph of fracture shape after bend test

Fig. 7(b)는 FGML재에 대한 ‘+’ type과 ‘-’ type의 시험편을 거시적으로 찍은 사진이다. ‘+’ type에서 PSZ부는 탈락되고 경사층에서는 길이방향의 크랙들이 다수 관찰되며 계면을 따라 크랙이 진전해 있었다. 그러나, ‘-’ type에서는 두께방향의 수직크랙과 계면에서만 파단이 발생하였다.

Fig. 7(c)는 FGMD재에 대한 ‘+’ type과 ‘-’ type의 시험편을 거시적으로 찍은 사진이다. ‘+’ type에서 PSZ부는 탈락되고 경사층에서는 길이방향으로 크랙이 진전하다가 두께 방향으로 크랙이 편향되어 파단되었다. 그러나, ‘-’ type에서는 두께방향으로 편향된 수직크랙과 계면에서 큰 파단이 발생하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 경사기능성의 PSZ/Ni기 복합재에 대해 굽힘특성을 구하기 위해서 4점 굽힘시험을 행하였다. PSZ 및 경사층이 인장응력과 압축응력의 상태하에서 어떤 특성을 나타내는 지 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) PSZ층이 압축응력상태(‘+’ type)와 인장응력상태(‘-’ type)일 때의 하중-변위는 전혀 다르게 거동하였고 압축응력의 상태가 더 높은 최대하중을 나타내었다.
- (2) PSZ와 Ni기 합금의 이중성분으로 구성된 분산상의 구조로 인해 하중-변위곡선에서 세레이션(serration) 현상이 발생하였고 연성과 취성의 혼합된 파괴형태를 보였다.
- (3) Duplex, FGML, FGMD재료에서 굽힘강도의 상대적인 비교에서 duplex재보다는 FGM재료가 우수한 특성을 나타냈다. 따라서 구조물의 적용에서 세라믹성분쪽은 압축하중의 상태로 하고 금속쪽은 인장하중에 놓이게 하며 경사층을 도입하면 굽힘하중에 더 견딜 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 파면관찰에서 Duplex재는 계면에서 주로 파단되었으며, FGM재는 경사층으로도 크랙이 진전되어 재료를 파괴시키는데 더 많은 에너지가 소요되므로 더 좋은 파괴강도를 가짐을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Chung, Y. L. and Chen, W. T., 2007, “Bending behavior of FGM-coated and FGM-undercoated plates with two simply supported opposite edges and two free edges,” *Composite Structures*, Vol. 81, pp.

- 157~167.
- (2) Niino, A. and Maeda, S., 1990, "Recent development status of functionally gradient materials," *ISIJ Int.*, Vol. 35, pp. 699~703.
  - (3) Chi, S. H. and Chung, Y. L., 2002, "Cracking in sigmoid functionally graded coating," *J Mech.*, Vol. 18, pp. 41~53.
  - (4) Bao, G. and Wang, L., 1995, "Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings," *Int J Solids Struct.*, Vol. 32, pp. 2853~2871.
  - (5) Chi, S. H. and Chung, Y. L., 2003, "Cracking in coating-substrate composites of multi-layered and sigmoid FGM coatings," *Eng Fract Mech.*, Vol. 70, pp. 1227~1243.
  - (6) Jin, Z. H. and Noda, N., 1994, "Crack tip singular fields in nonhomogeneous materials," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 61, pp. 738~740.
  - (7) Jin, Z. H. and Paulino, G. H., 2001, "Transient thermal stress analysis of an edge crack in a functionally graded material," *Int J. Frac.*, Vol. 107, pp. 73~98.
  - (8) Kesler, O., Finot, M., Suresh, S., and Sampath, S., 1997, "Determination of processing induced stresses and properties of layered and graded coatings: experimental method and results for Plasma sprayed Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Acta. Mater.*, Vol. 45, pp. 3123~3134.
  - (9) Obata, Y. and Noda, N., 1996, "Optimum material design for functionally gradient material plate," *Arch Appl Mech.*, Vol. 66, pp. 581~589.
  - (10) Praveen, G. N. and Reddy, J. N., 1998, "Nonlinear transient thermoelastic analysis of functionally graded ceramic-metal plates," *Int J. Solids Struct.*, Vol. 35, pp. 4457~4476.
  - (11) Kim, H. G., 2003, "Stress Analysis of a Discontinuous Composite Using Mechanics of Materials Approach," *KSMTE*, Vol. 12, No. 4, pp. 63~69.
  - (12) Shaw, M. C., 1998, "The effects of strength probabilistics on the fracture mode of ceramic/metal multilayers," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 49~74.
  - (13) Lee, S. B. and Kim, J. H., 1997, "Finite-element analysis and X-ray measurement of the residual stresses of ceramic/metal joints," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 67, pp. 167~172.
  - (14) Kohnle, C. O. and Schmauder, M. S., 2002, "Elastic and plastic fracture energies of metal/ceramic joints," *Computational Materials Science*, Vol. 25, pp. 272~277.