

구형 인덴테이션 평가에 의한 비대칭적 층상형 세라믹 부품의 설계연구

이기성[†], 김태우*, 김철**
국민대학교 기계자동차공학부 기계설계 전공

The Optimum Design Study of Asymmetric Layered Ceramic Component by Spherical Indentation

Kee Sung Lee[†], Tae Woo Kim*, Chul Kim**

Key Words: Component Design (부품설계), Spherical Indentation(구형 인덴테이션), Layered Structures (층상구조)

Abstract

The optimum design against contact crack initiation is investigated to find major parameters in designing desirable surface-coated asymmetric layered components. Hard ceramic coated soft materials with various elastic modulus mismatch are prepared for the analysis. Spherical indentation is conducted for producing contact cracks from the surface or interface between the coating and the substrate layer. A finite element analysis of the stress fields in the loaded layer components enables a direct correlation between the damage patterns and the stress distributions. Implications concerning the design of asymmetric layered components indicate that the coating thickness and the elastic modulus mismatch are important parameters for designing layered component to prevent the initiation of contact cracks.

기호설명

P = 접촉하중, a = 접촉반경, r = 구형압자 반경, d = 코팅층 두께, E_c/E_s = 탄성계수차

1. 서 론

대나무, 보리, 옥수수, 연체동물의 껍질, 섬계의 이빨 등의 동, 식물에서 뿐만 아니라 우리 몸의 일부분인 뼈나 치아도 외부는 강하고 내부는 충격이 강한 비대칭적 층상구조(asymmetric layered

structure)로 이루어져 있다¹⁻³⁾. 이러한 비대칭적 층상구조들은 외부환경과 매우 밀접한 관련이 있어서 바깥층은 외부환경에 견디기 쉽도록 단단하고 강하게 만들어져 있고, 내부 층은 외부충격에 견딜 수 있도록 상대적으로 연질이며 파괴인성이 높은 구조를 하고 있어 궁극적으로 강도와 수명이 높은 구조를 이루고 있는 것이 특징이다⁴⁾.

이러한 구조에 기초하여 공업재료로서의 비대칭적 층상형 부품에 관심이 높아져 왔다. 최근 공업기술의 급격한 발전은 기계 및 소재산업, 에너지 환경산업, 우주항공산업, 바이오산업 등 다양한 분야의 발전이 이루어졌으며, 이러한 산업의 고도화에 따라 요구되는 부품의 특성은 고기능화, 초고강도화, 경량화, 고수명화가 요구되고 있기 때문에 이에 효율적으로 대처하기 위해서는 구조체의 설계연구가 수반되지 않으면 안 된다. 비대칭적 부품은 층상적 설계를 통해 위와 같은 요구에 부합할 수 있는 부품으로 최근 관심의 대

[†] 국민대학교 기계자동차공학부 기계설계 전공

E-mail : keeslee@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4834 FAX : (02)910-4839

* 국민대학교 기계자동차공학부 기계설계 전공

** 국민대학교 기계자동차공학부 기계설계 전공

상이 되고 있다⁵⁻⁸⁾.

이러한 비대칭적 층상형 부품에 있어서 문제점 중의 하나는 제조공정 도중이나 제조 직후 혹은 사용도중 층간이 박리되거나 층이 파괴되는 현상이다. 이러한 층간 혹은 층의 파괴현상은 층 내에 열적, 기계적인 내부응력이 존재할 때 일어날 수 있다. 지금까지 대부분의 층간 파괴연구는 주로 층간 열팽창계수 차에 의해 냉각 시 형성될 수 있는 잔류응력의 영향이나, 제조 후 약한 강도를 갖는 계면의 층간박리(interface delamination)에 의한 파괴현상에 관해 주로 이루어졌다⁹⁾. 그러나 기판 층의 영향에 의해 층이 파괴되는 수도 있으며¹⁰⁾, 비대칭적 층상형 부품의 설계에 대한 계통적인 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 상대적으로 연질(soft)인 기판층에 상대적으로 경질(hard)인 세라믹을 코팅하고 이 때 코팅층의 두께와 층간 탄성계수를 제어하여 비대칭적 층상부품의 설계인자로서 고려하였다. 층간 변형과 파괴를 유도하기 위해서는 구형압자(spherical indenter)를 이용한 헤르쩌안 접촉시험법(Hertzian indentation)이 사용되었다¹¹⁾. 이 방법은 Fig. 1과 같이 편평하고 경면 연마된 재료의 표면을 일정하중으로 탄성계수가 높고 단단한 구형압자로 눌러 재료 표면으로부터 접촉균열을 유도하는 방법으로, 층상형 부품의 평가에 이용되고 있다¹¹⁻¹⁴⁾.

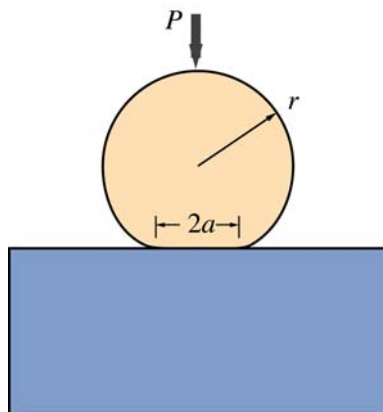


Fig. 1 Schematic diagram showing Hertzian indentation test.

2. 실험 방법

2.1 시험편 제작

비대칭적 층상형 부품의 각 층의 재료를 준비

하고 적층한 후, 고온가압소결(Hot press)을 행하거나 열처리하여, 계면이 강하게 결합된(strong interlayer) 이층 층상형 부품을 제조하였다. 각 층의 재료들은 상대적으로 미세한 크기의 분말인 α -Si₃N₄ (UBE-SN-E10, average particle size 0.3 μ m Ube Industries America, NY)로부터 제조된 소결체, 상대적으로 조대한 크기의 α -Si₃N₄ (UBE-SN-E3, average particle size 1 μ m, Ube Industries America, NY)로부터 제조된 소결체, 탄성계수가 0.9 ~ 132GPa의 범위 내에 있는 유리나 플라스틱을 사용하였다. 질화규소의 고온가압소결 시 소결을 촉진하기 위한 첨가제로써는 5 wt% Y₂O₃ (Fine Grade, H. C. Starck GmbH, Goslar, Germany), 2 wt% Al₂O₃(AKP 50, Sumitomo Chemical Co. Ltd., Tokyo, Japan), 그리고 1 wt% MgO (High Purity, Baikowski Co., N.C.)를 첨가하였다. 또 탄성계수 차이를 제어하기 위해 질화규소 분말에 BN (Aldrich Chemical, Milwaukee, WI)분말을 5, 10, 20, 30 wt% 첨가한 분말을 사용하여 소결체를 제조하였다.

소결체 시험편은 세라믹 혼합분말을 고온 가압하에서 열처리하여 제조하였다. 먼저 세라믹 분말을 24시간동안 프로필렌 병 내에서 이소프로판올 용액 및 알루미늄 불과 함께 혼합하였고, 건조하여 얻어진 응집체를 분쇄시킨 후 60 mesh의 체를 통하여 분말을 구상화시켰다. 얻어진 혼합분말은 직경 50 mm의 흑연몰드 내에서 1700°C~1730°C의 온도에서 소결하였다.

비대칭적 층상 시험편은 고온가압소결도중 코팅층 두께 1mm~2mm, 기판 층 두께 3.5mm를 갖도록 세라믹스 분말을 적층하여 소결시켰다. 반면 유리나 플라스틱을 기판층으로 사용한 경우는 질화규소 소결체를 위층에 적층시키고, 기판층에 사용된 재료의 연화온도보다 10°C~50°C 높은 온도에서 열처리하여 층상부품을 제조하였다.

제조된 시험편은 25 mm x 4 mm x 3 mm의 크기가 되도록 절단, 가공하였고 표면을 연마 및 1 μ m까지 폴리싱하여 코팅층의 두께가 250 ~ 1200 μ m가 되도록 제어하였다.

2.2 인덴테이션 평가 및 분석

접촉하중 하에서 비대칭적 층상형 부품의 손상 거동을 규명하고 적절한 설계인자를 제시하기 위해서 2.1절에서 제조된 각각의 시험편을 “bonded-specimen” 방법을 이용하여 시험편을 제작하였다. 이 방법은 동일한 25 mm x 4 mm x 3 mm의 크기를 갖는 막대모양의 시험편 2개를 준비한 후 접착제로 결합시켜 제조하는 방법이며 이 때 접착제의 두께가 10 μm 이하가 되도록 제어하였다. 제조된 층상시험편들의 표면을 경면 연마한 후 Fig. 1과 같이 $r = 1.98$ mm의 초경 구형 압자를 이용, 하중을 만능시험기(universal testing machine, Model 1122, Instron, Canton, U.S.A.) 내에서 $P = 4500$ N 까지 변화시키면서 시험편의 계면 중앙위치에 인덴테이션을 행하였다. 인덴테이션된 시험편의 접착제를 제거하여 분리시킨 후 시험편의 단면을 광학현미경 하에서 Nomarski contrast 하에서 관찰하여 부품의 손상거동을 고찰하였다.

응력해석에 사용되는 몇 가지 인자의 값을 구하기 위해 구형압자의 크기 r , 가해진 접촉하중 P , 접촉반경 a 로부터 인덴테이션 응력(indentation stress, $P/\pi a^2$) 과 변형율(indentation strain, a/r)을 구하였다. 얻어진 응력-변형율 곡선으로부터 탄성계수(elastic modulus), 항복점(yield stress), 가공경화계수(strain hardening coefficient)의 값을 구하였다.

접촉응력하에서의 응력해석을 위한 FEM(Finite Element Modelling)분석을 위해 상용 package (Strand, G&D Computing, Sydney, Australia)를 사용하였다. 알고리즘은 특정반경하의 압자가 축에 대칭인 평면에 마찰 없이 접촉된다고 가정하였다. 구형 압자의 접촉 하에서의 주응력을 점으로 구성된 메시를 구성하여 계산한 후 응력등고선을 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

다음 Fig. 2는 탄성계수 차이가 각각 $E_c/E_s = 1.44, 2.00, 2.69$ 일 때 비대칭적 층상형 부품에서 일어난 접촉손상 특성을 보여주는 결과이다. 모든 경우 일정한 하중 $P = 2000$ N에서 테스트된 경우이고 동일한 반경 $r = 1.98$ mm의 초경 구를 이용하여 시험한 것이다. 세 가지 경우 모두 동

일한 코팅층의 두께 $d = 250\mu\text{m}$ 를 갖고 있고, 단지 탄성계수 차이(elastic modulus mismatch)만이 차이가 있다. 사진에서와 같이 층간의 탄성계수 차이가 클수록 접촉파괴 양상이 진전되었음을 알 수 있다. 특히 접촉응력에 의해 어떤 임계치 이상에서 재료의 표면에서 발생하는 원추형상의 균열이외에 층간 계면에 방사성 균열(radial crack)이 발생하였는데 이러한 균열특성은 단상(monolith) 재료에선 발견되지 않는 새로운 균열양상이다. 이러한 균열은 오른쪽 그림의 유한요소해석(FEM) 결과에 의하면 최대 인장응력 영역이 계면층 부근에 존재하게 되고, 그 다음으로 큰 인장응력 영역이 코팅층 표면의 접촉반경 바깥 부근에 위치하게 됨으로 일종의 휨 응력(flexural stress)이 코팅층에 작용하는데 기인한 것으로 분석된다. 즉 코팅층보다 상대적으로 연한(soft) 지지층에 기인해 휨 응력이 코팅층에 작용하여 방사성 균열이 발생하는 것으로, 이러한 방사성 균열은 외부에서는 검지(detect)되지 않기 때문에 매우 위험한 균열양상이라고 할 수 있다.

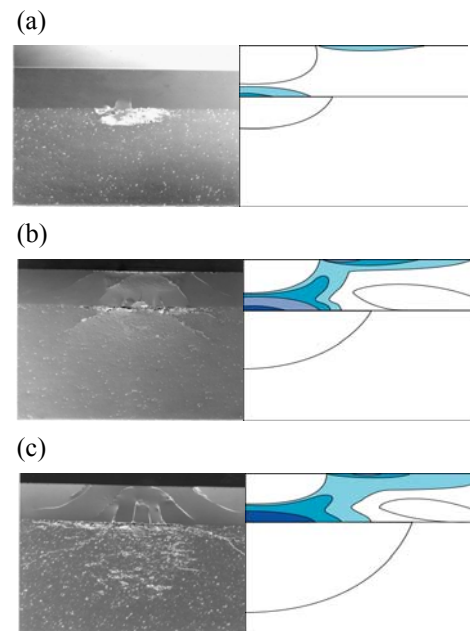


Fig. 2 Contact fracture and FEM analysis results in asymmetric layered components, coating thickness, $d = 250\mu\text{m}$ with elastic modulus mismatch, E_c/E_s ; (a) 1.44, (b) 2.00 and (c) 2.69. The contact force was applied using WC sphere $r = 1.98$ mm at $P = 2000$ N.

예를 들면 내마모성이 높은 세라믹 층이 상대적으로 약한 금속층 위에 코팅될 경우 접촉응력 하에서의 설계인자들이 적절히 제어하지 않으면 계면층에서 균열이 발생할 수 있고, 이러한 균열은 외부에서 전혀 보이지 않기 때문에 어느 날 갑자기 부품의 파손이 일어날 수 있으므로 매우 위험한 손상양상이라고 할 수 있겠다.

Fig. 3은 탄성계수 차이 $E_c/E_s = 2.69$ 로 고정시킨 동일한 부품에 대하여 코팅층의 두께만을 $d = 250\mu\text{m}$ μm 로 다르게 하였을 때 비대칭적 층상형 부품에 형성된 접촉손상특성을 관찰한 광학현미경 사진이다. 사진에서와 같이 두 층간에 탄성계수 차이가 클 경우 코팅층 두께의 제어가 매우 중요하며, 이는 오른쪽 FEM 분석에 의하면 최대인장응력 영역이 계면층에서 코팅층 표면으로 이동된데 기인한 것이다. 이와 같이 탄성계수 차이와 코팅층의 두께가 층상재료의 파괴를 지배하는 두 가지 중요한 인자라는 것을 Fig. 2와 Fig. 3의 접촉손상특성결과와 FEM 분석결과로부터 알 수 있다.

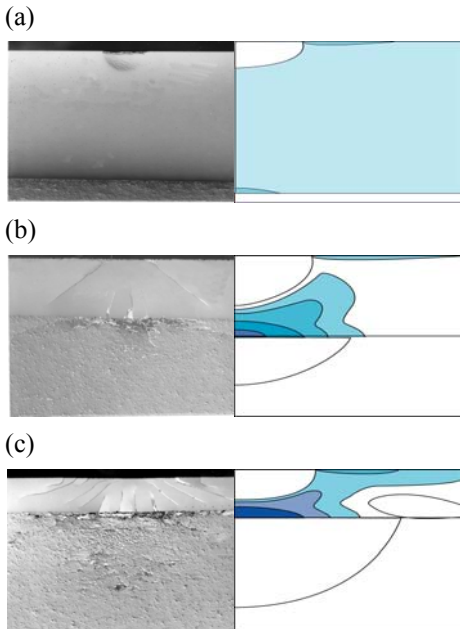


Fig. 3 Contact fracture and FEM analysis results in asymmetric layered components, $E_c/E_s = 2.69$, with coating thickness, d ; (a) $1200\mu\text{m}$ (b) $400\mu\text{m}$ μm The contact force was applied using WC sphere $r = 1.98 \text{ mm}$ at $P = 2000 \text{ N}$.

다음 Fig. 4는 다양한 탄성계수를 갖는 층상의 부품 위에 동일한 질화규소 세라믹이 동일한 두께 $d = 250\mu\text{m}$ 로 동일하게 코팅되었을 때 층간 계면에서 발생하는 균열의 임계하중을 측정하여, 층상형 부품의 탄성계수 차이에 대해 도시한 그래프이다. 이러한 그래프로부터 비대칭적 부품의 설계에 유용한 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$P_c = B\sigma_F d^2 / \log(CE_c/E_s) \quad (1)$$

여기서 σ_F 는 코팅층의 강도이며 B와 C는 dimension이 없는 상수이다. 그래프의 최적 fitting 으로부터 $d = 250 \mu\text{m}$ 와 $F = 900 \text{ MPa}$ 의 값을 대입하면 각각 $B = 3.378$ 와 $C = 0.891$ 의 값이 얻어진다.

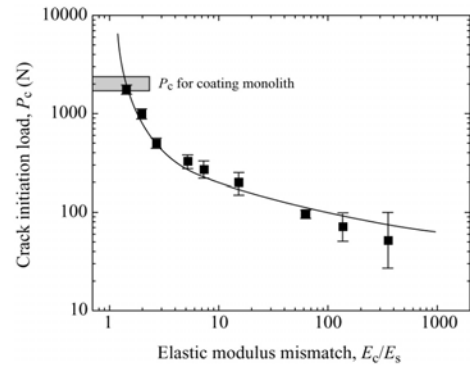


Fig. 4 Plot of critical loads for contact crack produced using WC sphere radius $r = 1.98 \text{ mm}$ versus E_c/E_s for Si_3N_4 coatings on various substrate of different elastic modulus.

4. 결론

경도가 높은 세라믹스가 코팅된 비대칭적 층상형 부품의 접촉응력하에서의 주요한 설계변수로서 코팅층의 두께와 탄성계수 불일치 특성이 중요함을 본 연구를 통해서 제시할 수 있었으며, 설계변수 간의 관계식을 도출하였다.

(1) 층간 탄성계수 불일치가 증가할수록 코팅층에 휩 응력이 작용하여 상대적으로 낮은 하중 하에서 방사성 균열의 개시를 일으켰다.

(2) 탄성계수 불일치에 기인한 파괴양상은 휨응력을 완화시킬 수 있도록 두껍게 코팅되었을 때 방지되었다.

(3) 층간 불일치가 존재하는 비대칭적 층상형 부품에 있어서의 균열의 개시하중을 재료강도, 코팅층두께, 층간불일치의 함수로 나타내었다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-003-D00002)

참고문헌

- (1) Amada, S., 1995, "Hierarchical Functionally Gradient Structures of Bamboo, Barley, and Corn," *MRS Bull.*, Jan., pp. 35 ~ 36.
- (2) Laraia, V. J., and Heuer, A. H., 1989, "Novel Composite Microstructure and Mechanical Behavior of Mollusk Shell," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 72, No. 11, pp. 2177 ~ 2179.
- (3) Lawn, B. R., Deng, Y., and Thomson, V. P., 2001, "Use of Contact Testing in the Characterization and Design of All-Ceramic Crownlike Layer Structure : A Review," *The J. Prosthetic Dentistry*, Vol. 86, No. 5, pp. 495 ~ 510.
- (4) Chan, H. M., 1997, "Layered Ceramics : Processing and Mechanical Behavior," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol. 27, pp. 249 ~ 282.
- (5) Guler, M. A., and Erdogan, F., 2004, "Contact Mechanics of Graded Coatings," *Int. J. of Solids and Struct.*, Vol. 41, No. 14, pp. 3865 ~ 3889.
- (6) Beele, W., Marijnsen, G., and Lieshout, A., 1999, "The Evolution of Thermal Barrier Coatings - Status and Upcoming Solutions for Today's Key Issues," *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 120 ~ 121, pp. 61 ~ 67.
- (7) Beltsios, K., Soterakou, E., Kanellopoulos N., and Tsangaris, G., 2001, "Fabrication of Gas-Separating Asymmetric Ceramic Membranes Through Combination of LB Deposition of Oligomeric or Polymeric Precursors and Plasma Treatment," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. C15, No. 1 ~ 2, pp. 257 ~ 259.
- (8) Silva, P. L., Santos, J. D., Monteiro, F. J., and Knowles J. C., 1998, "Adhesion and Microstructural Characterization of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite/Glass Ceramic Coatings onto Ti-6Al-4V Substrates," *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 102, No. 3, pp. 191 ~ 196.
- (9) Evans, A. G., and Hutchinson, J. W., 1984, "On the Mechanics of Delamination and Spalling in Compressed Films," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 20, No. 5, pp. 455 ~ 466.
- (10) Knight, J. C., Page, T. F., and Hutchings, I. M., 1989, "The Influence of Substrate Hardness on the Response of TiN-Coated Steels to Surface Deformation," *Thin Solid Films*, Vol. 177, pp. 117 ~ 132.
- (11) Lawn B. R., 1995, "Indentation of Ceramics with Spheres : A Century after Hertz," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 8, pp. 1977 ~ 1994.
- (12) Pajares, A., Wei, L., Lawn, B. R., Padture, N. P., and Berndt, C. C., 1996, "Mechanical Characterization of Plasma Sprayed Ceramic Coatings on Metal Substrates by Contact Testing," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A208, pp. 158 ~ 165.
- (13) Lee, K. S., Park, J. Y., Kim, W. J., Lee, M. Y., Jung, C. H., and Hong, G. W., 2000, "Effect of Soft Substrate on the Indentation Damage in Silicon Carbide Deposited on Graphite," *J. Mater. Sci.*, Vol. 35, pp. 2769 ~ 2777.
- (14) Lee, K. S., 2003, "Damage Tolerance in Hardly Coated Layer Structure with Modest Elastic Modulus Mismatch," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1638 ~ 1649.