

층상형 비대칭성 복합재료의 탄성/소성 불일치가 접촉 균열의 개시에 미치는 영향

김상겸[†], 이기성^{*}
국민대학교 기계자동차공학부 기계설계 전공

Effect of Elastic/Plastic Mismatch on the Contact Crack Initiation in Asymmetric Layered Composite

Sang Kyum Kim[†] and Kee Sung Lee^{*}

Abstract

The role of elastic/plastic mismatch on the contact crack initiation is investigated for designing desirable surface-coated asymmetric layered composites. Various layered composites such as Si_3N_4 ceramics on Si_3N_4 +BN composite, soda-lime glass on various substrates with different elastic modulus 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 composites enables a direct correlation between the damage patterns and the stress distributions. Implications of these conclusions concerning the design of asymmetric layered composites indicate that the elastic modulus mismatch is one of the important parameter for designing layered composite to prevent the initiation of contact cracks.

Key Words: Elastic/Plastic Mismatch, Hertzian Indentation, Asymmetric Layered Composite

기호설명

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

1. 서론

비대칭적 층상형 복합재료(asymmetric layered composites)는 강도, 탄성계수 등의 특성이 서로 다른 소재가 층상형태로 결합되어 있는 구조로 이루어져 있다¹⁻³⁾. 이러한 비대칭적 층상구조는 외부환경과 매우 밀접한 관련이 있어서 바깥층은

외부환경에 견디기 쉽도록 단단하고 강하게 만들어져 있기 때문에 취성이 높은 경우가 많은데 예를 들면 절삭공구와 가스터빈용 내열코팅, 치아와 같은 생체 바이오 구조가 그 예이다. ³⁻⁶⁾

이러한 구조는 특히 공업적으로 사용될 때 외부 바깥층이 접촉에 의한 하중이나 응력, 충격이 가해지는 환경에 놓일 때가 많다. 때로는 외부층을 지지하는 층의 특성의 도움으로 외부하중을 분산시켜 균열을 억제하는 효과도 있을 수 있으나, 최적으로 설계되지 못하면 외부층과 지지층 간의 탄성/소성 불일치에 의하여 균열이 발생하여 코팅층의 박리가 일어나거나 지지층의 손상이 일어나는 경우가 많다. 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 이루어졌다⁷⁾. 그러나 기판 층의 영향에 의해 층이 파괴되는 수도 있으며⁸⁾, 비대칭성 층상

[†] 국민대학교 기계자동차공학부 기계설계 전공

^{*} 국민대학교 기계자동차공학부

E-mail : keeslee@kookmin.ac.kr

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

형 복합재료의 설계에 대한 계통적인 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 탄성계수가 서로 다른 다양한 금속, 세라믹, 폴리머, 세라믹복합재료를 지지층으로 선택하고 상대적으로 경질(hard)인 유리 또는 질화규소 세라믹을 코팅, 층간 탄성계수를 제어하여 비대칭적 층상형 복합재료의 설계인자로서 고려하였다. 층간 변형과 파괴를 유도하기 위해서는 구형압자(spherical indenter)를 이용한 헤르찌안 접촉시험법(Hertzian indentation)이 사용되었다⁹⁾. 이 방법은 Fig. 1과 같이 편평하고 경면 연마된 재료의 표면을 일정하중으로 탄성계수가 높고 단단한 구형압자로 눌러 재료 표면으로부터 접촉균열을 유도하는 방법으로, 층상형 복합재료의 평가에 이용되고 있다¹⁰⁾.

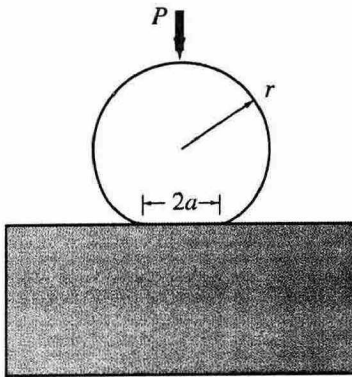


Fig. 1 Schematic diagram showing Hertzian indentation test.

2. 실험 방법

2.1 시험편 제작

비대칭적 층상형 구조를 제조하기 위해 각 층의 재료를 준비하고 적층한 후, 고온가압소결(Hot press)을 행하거나 접합하여, 계면이 강하게 결합된(strong interlayer) 이층 층상형 재료를 제조하였다. 각 층의 재료들은 상대적으로 미세한 크기의 분말인 α - Si_3N_4 (UBE-SN-E10, average particle size $0.3 \mu\text{m}$ Ube Industries America, NY)로부터 제조된 소결체, α - Si_3N_4 (UBE-SN-E3, average particle size $1 \mu\text{m}$, Ube Industries America, NY)와 5, 10, 20, 30 wt%의 BN분말(Aldrich Chemical, Milwaukee, WI)이 혼합

된 복합재료, 탄성계수가 $0.9 \sim 320 \text{ GPa}$ 의 범위 내에 있는 다양한 플라스틱, 유리, 다공성 알루미늄(Al_2O_3)와 셀리카(SiO_2) 세라믹스 소결체를 사용하였다.

질화규소 층상 시험편은 세라믹 분말들을 상호 적층한 후 고온 가압 하에서 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 흑연 몰드 내에서 $1700 \sim 1730^\circ\text{C}$ 의 온도에서 소결하였다. 이 때 코팅층 두께는 $250 \mu\text{m}$, 지지층 두께는 3.5 mm가 되도록 제조하였다. 반면 유리나 플라스틱, 다공성 세라믹스 소결체를 지지층으로 사용한 경우는 두께 1-mm 또는 $150 \mu\text{m}$ 의 실험용 슬라이드 글라스를 에폭시 접착제(Harcos Chemicals, Bellesville, NJ, USA)로 접합시켜 층상형 복합재료를 제조하였다. 에폭시의 두께 h 는 약 $10 \mu\text{m}$ 의 범위가 되도록 제어하였으며 접합 후 24시간 이상 상온에 방치하여 고화시켰다.

2.2 구형 압입시험 평가 및 분석

접촉하중 하에서 비대칭적 층상형 복합재료의 손상거동을 규명하고 탄성/소성 불일치의 영향을 고찰하기 위해서 2.1절에서 제조된 각각의 시험편의 표면을 Fig. 1과 같이 $r = 1.98 \text{ mm}$ 또는 3.18 mm 의 초경 구형압자를 이용, 하중을 만능시험기(universal testing machine, Model 1122, Instron, Canton, U.S.A.) 내에서 $P = 0 \sim 4500 \text{ N}$ 까지 변화시키면서 압입시험을 행하였다. 압입 후 시험편의 표면 또는 측면에 형성된 균열(crack) 및 손상(damage)을 광학현미경으로 측정 및 관찰하였으며, 이 때 균열의 개시가 시작되는 하중을 실시간(in situ) 또는 압입시험 후 확인하거나 센서(acoustic emission sensor)를 이용해 측정하였다.

접촉응력 하에서의 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

Fig. 2는 탄성계수 차이가 각각 $E_c/E_s = 1.44, 2.00, 2.69$ 인 비대칭적 층상형 복합재료에서 일어난 접촉손상 특성을 보여주는 결과이다. 시험재료는 경질의 질화규소와 상대적으로 연질인 질화규소+질화붕소 복합재료가 층상형으로 결합된 재료이며, 모든 경우 일정한 하중 $P = 2000$ N에서 테스트 된 경우이고 동일한 반경 $r = 1.98$ mm의 초경 구를 이용하여 시험한 것이다. 세 가지 경우 모두 동일한 코팅층의 두께 $d = 250\mu\text{m}$ 를 갖고 있고, 단지 지지층의 탄성계수(elastic modulus mismatch)만이 차이가 있다. 사진에서와 같이 두 층간의 탄성계수 차이가 클수록 접촉과피 양상이 진전됨을 알 수 있다. 그림의 우측에는 FEM 분석결과를 같이 나타내었는데, 탄성계수의 불일치가 클수록 코팅층에 휨 응력(flexural stress)을 야기시켜 보다 진전된 손상거동을 나타낸 것으로 분석되었다.

다음 Fig. 3은 다양한 탄성계수를 갖는 층상의 재료 위에 두께 $d = 1$ mm로 동일한 슬라이드 유리를 접합시키고 $r = 3.18$ mm의 구형압자로 접촉하중을 인가하였을 때 층간계면에서 발생하는 방사성 균열 또는 표면에서 발생하는 원추균열의 임계하중을 측정하여, 탄성계수 차이에 대해 도시한 그래프이다. 이러한 그래프로부터 비대칭적 층상형 복합재료 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 B 와 C 는 dimension이 없는 상수이다. 그래프의 최적 fitting으로부터 $d = 1$ mm와 $\sigma_F = 110$ MPa의 값을 대입하면 각각 $B = 2.5$ 와 $C = 2.84$ 의 값이 얻어진다.

Fig. 4는 두께 $d = 150\mu\text{m}$ 로 동일한 슬라이드 유리를, 상대적으로 탄성계수가 큰 값을 갖는 알루미늄이나 세라믹스와 탄성계수가 작은 값을 갖는 실리카 세라믹스에 각각 접합하고 $r = 3.18$ mm의 구형압자로 $P = 150$ N의 접촉하중을 인가하였을 때 표면에 형성된 링균열의 직경을 복합재료의 탄성계수에 대해 도시한 그래프이다. 이 결과는 외부 층에 대한 지지층의 탄성계수의 상대

적 크기가 중요함을 암시한다.

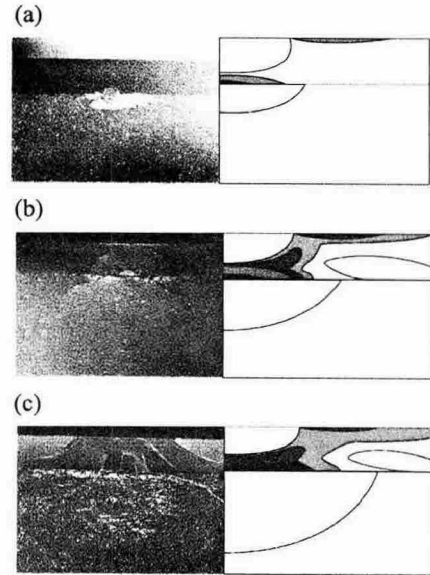


Fig. 2 Contact fracture and FEM analysis results in asymmetric layered composites, coating thickness, $d = 250\mu\text{m}$, with elastic modulus mismatch, E_c/E_s ; (a) 1.44, (b) 2.00 and (c) 2.69. The contact force was applied using WC sphere $r = 1.98$ mm at $P = 2000$ N.

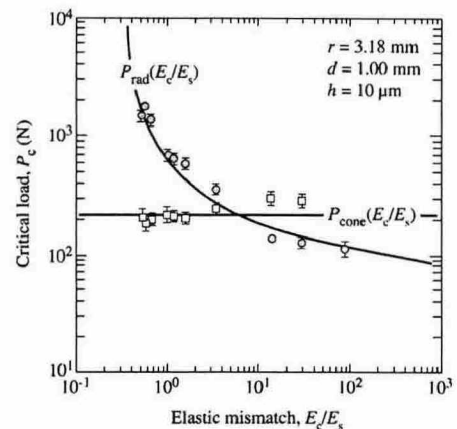
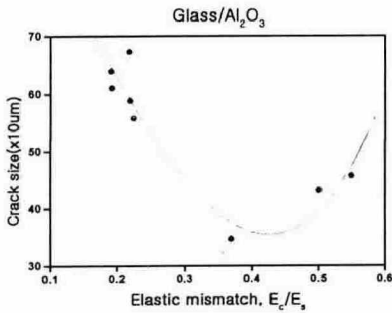


Fig. 3 Plot of critical loads for contact crack produced using WC sphere radius $r = 3.18$ mm versus E_c/E_s for soda-lime glass coatings on various substrate of different elastic modulus.

(a)



(b)

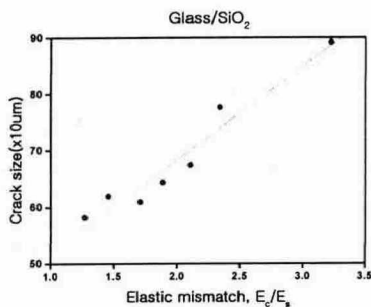


Fig. 4 Plot of critical loads for ring crack produced using WC sphere radius $r = 3.18$ mm at load $P = 150$ N as a function of E_c/E_s for soda-lime glass coatings on (a) porous alumina and (b) porous silica.

4. 결론

탄성계수가 서로 다른 층상형 복합재료를 제조하여 층 간의 탄성/소성 불일치가 접촉응력 하에서 일어나는 균열의 개시와 전파에 끼치는 영향을 살펴보았다. 본 연구 결과, 층간 탄성계수 불일치가 증가할수록 코팅층에 휨 응력이 작용하여 상대적으로 낮은 하중 하에서 방사성 균열의 개시를 일으켰으며, 이 때 발생하는 접촉균열의 개시하중을 재료강도, 코팅층두께, 층간불일치의 함수로 나타내었고, 외부 층에 대한 지지층의 탄성계수의 상대적 크기가 균열전파에 영향을 미칠 가능성이 있음을 발견하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원

에 의하여 연구되었기에 감사드립니다.
(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) 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.
- (8) 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.
- (9) Lawn B. R., 1995, "Indentation of Ceramics with Spheres : A Century after Hertz," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 8, pp. 1977 ~ 1994.
- (10) 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.