

100

코팅막층의 접촉응력 해석에 관한 유한요소해석

김청균 · 오병택

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Contact Stress Analysis of the Coating Layer Using Finite Element Method

Chung Kyun Kim and Byoung-Taek Oh

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—Thin films and coating technologies are used for an enormous and diverse set of application including mechanical and automotive components. Many of these applications require the various properties which can be used for decreasing wear, friction and cost, and increasing the long life. The relationship between the load and the stress is usually nonlinear. The material is often apt to deform plastically under the low loads. Numerical method may be used for some simple problems of the coating. If the property of coating and base materials are inhomogeneous and the geometry is complex, the numerical method may be recommended. In this paper, the contact normal stress of the coating layer has been solved using finite element method.

Key Words—coating, FEM, stress, failure, contacting interface.

1. 서 론

코팅(Coating)은 표면처리 기술의 일종으로 코팅 내부의 모재(Substrate)를 외부의 위험 요소로부터 보호해 주는 역할을 수행하고 있다. 최근의 코팅은 모재를 보호할 뿐만 아니라 모재에 초박막의 코팅층을 설치함으로써 이질적인 다양한 성질을 요구하는 기계의 핵심 부품 개발에서 중요한 역할을 하고 있다. 코팅이 중요시 되는 이유는 코팅의 종류가 매우 다양하여 코팅을 선택할 폭이 넓다는 것 이외에도 다른 표면처리 방법과는 달리 모재의 성질을 변화시키지 않으면서 비교적 간단한 방법으로 사용자가 원하는 기능을 갖춘 기계부품을 제작할 수 있다는 점이다.

코팅의 기능에 영향을 미칠 수 있는 인자로는 코팅재와 모재의 기계적 물성치, 모재와의 결합력(Bonding strength), 코팅의 파손 메카니즘(Failure mechanism), 모재의 표면 거칠기, 코팅 방법 등 다양하다. 이런 인자들은 균일한 값을 갖는 것이 아니고, 같은 종류의 코팅 재료에서도 판이하게 달라진다. 코팅에 관련된 물성치를 얻어내는 실험적 방법에서도 반복적인 방법

을 통해서 통계적으로 얻어내는 것이 지금까지의 실험적 방법이었다. 코팅은 변수가 매우 다양하게 작용하기 때문에 측정이 용이하지 않았고, 접촉거동 측면에서 해석적인 방법도 몇가지의 간단한 경우에 대해서만 해석이 가능하다. 더욱이 이방성 재료(Inhomogeneous material)인 경우는 수치적 해석방법이 동원되기도 한다[1].

최근에는 코팅의 접촉특성을 규명하기 위하여 유한요소법이 사용되기 시작하였다. 본 연구에서도 유한요소법을 이용하여 코팅막층에서 일어나는 접촉응력 거동문제를 해석하고자 한다. 전술한 바와 같이 코팅의 접촉특성을 결정하는 여러 가지 중요한 변수들을 이용하여 코팅의 접촉응력 거동문제를 해석하고자 하며, 해석 결과를 실험적으로 측정된 기존의 결과와 비교하여 타당성을 검토하고자 한다.

2. 유한요소해석

2-1. 해석에 필요한 가정

코팅의 종류는 매우 다양하지만, 본 연구에서는 현

재 많이 사용되고 있는 WC-Ti, TiC-Steel, SiC-W와 같은 세라믹 코팅류의 접촉응력 해석에 중점을 두었고, 모델이 갖는 물성치도 세라믹 소재에 대한 것을 사용하였다.

코팅과 모재의 결합강도에 대해서는 접합계면(Contacting interface)에서 형성되는 결합력이 코팅재나 모재 자체의 강도를 초과하지 않는다고 보고 응력해석 결과를 볼 때, 결합이 파괴되는 기준은 코팅과 모재중에서 강한 재료쪽의 항복강도를 고려해야 한다. 물론 폭발접합(Explosive cladding)과 같은 것은 폭발력이 임계치 이상으로 강하게 되면 접합계면에 아주 강한 부산물층을 이루기도 하지만, 이런 경우를 제외한다면 위의 가정은 타당하다.

2-2. 모델링

접촉모델은 강체의 구(Sphere)와 접촉하는 코팅막층에 Fig. 1에서 보여주는 것과 같은 경계조건을 사용하였고, 세분화된 유한요소망을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 해석에 사용한 프로그램은 비선형 프로그램인 MARC[2]를 사용하였다.

대칭성을 갖는 무한 평판에서 바닥면은 강체 모드를 방지하기 위해 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 바닥면의 가운데 한 질점(Node)을 모든 방향에 대해 고정시켰고, 나머지 바닥면은 x방향으로만 움직일 수 있도록 허용하였다. 위에서 코팅면을 눌러주는 구는 해석의 대상이 아닌 강체이고, 무한 평판인 코팅과 모재의 접합소재는 변형이 가능한 실제의 소재이다.

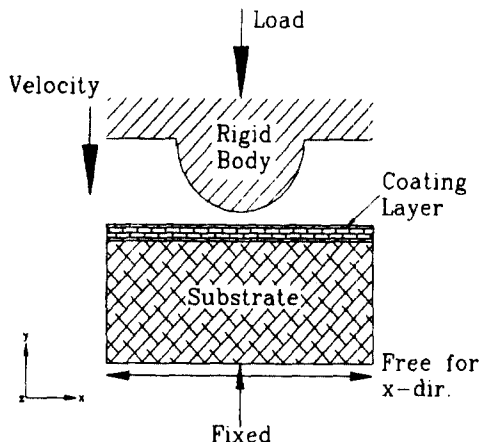


Fig. 1. Coating model and boundary conditions.

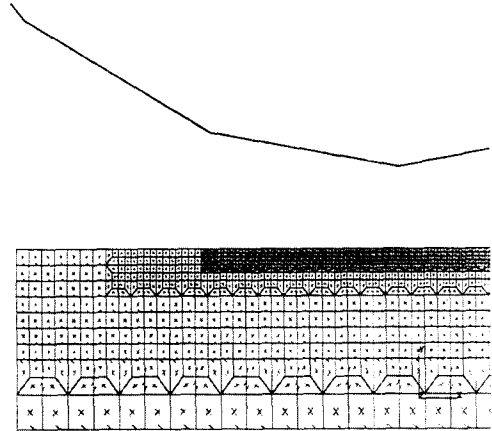


Fig. 2. Detailed meshes of a coating layer contact.

Table 1. Simulation data

No. of element	1,456
No. of node	4,594
Element mode	8 node, distorted quadrilateral second order, isoparametric element
Contact tolerance (m)	5×10^{-6}
Load (N)	100

Table 2. Material Properties [3]

Materials Properties	WC	TiC	SiC	Steel
Elastic Modulus ($\times 10^9$ N/m ²)	520	410	240	200
Poisson's ratio	0.24	0.24	0.14	0.3
Density (Kg/m ³)	10000	5800	3100	7900
Yield Strength ($\times 10^6$ N/M ²)	4100	5900	700	200

유한요소해석에 사용한 시뮬레이션 데이터는 Table 1과 같고, 모델링에 사용한 재료의 물성치는 Table 2에서 각각 주어진다.

3. 해석결과 및 고찰

해석에 사용한 코팅재질과 모재는 WC-Ti(Hard brittle coating on hard substrate), TiC-Steel(Hard brittle coating on ductile substrate), SiC-W(Relatively soft coating on ductile substrate)으로 구성되었다. 코팅과 모재의 접합계면에서 새로운 물성치를 가진 물질이 형성되지 않는다는 것은 코팅의 주된 접합 메커니즘(Bonding mechanism)이 기계적 접합이라는 가정하에 WC-Ti 모델에 대하여 계산된 접촉응력을 Fig. 3과 Fig. 4에서

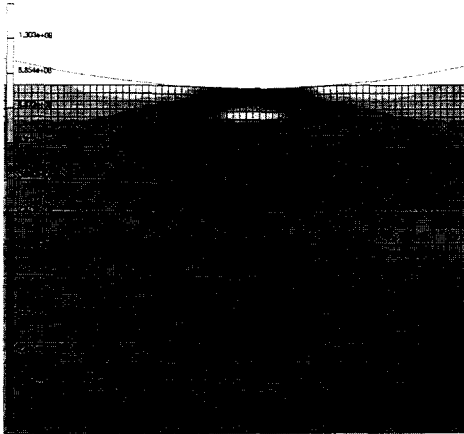


Fig. 3. Stress distributions of WC-Ti coating contact.

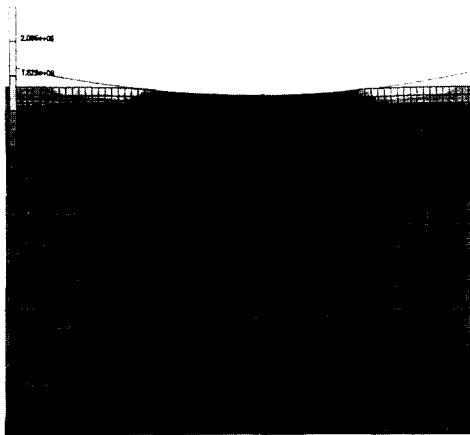


Fig. 4. Stress distributions of WC-Ti coating contact for the increased loading.

각각 보여주고 있다.

Fig. 3은 코팅막층의 접촉면(Contact surface) 바로 아래와 좌·우측의 접촉표면에서 최대 접촉응력 880 MPa이 대칭적으로 발생하는 현상을 볼 수 있다. Fig. 3의 접촉조건에 추가하여 하중을 계속 증가시키면 접합계면에서의 최대 접촉응력은 접촉점 바로 아래에서 발생하는 것이 아니라 최대 접촉응력이 접촉점의 좌·우측으로 확실하게 이동하며, 두배 이상 크게 발생된다.

Fig. 5는 Fig. 4의 접촉응력 결과를 접촉면(Contacting surface)으로부터 접합면(Bonded surface)까지 응력을 경로분포(Path plot)로 나타낸 것인데, 이 결과에 의하면 접촉면적의 원주를 따라서 급격하게 변하는

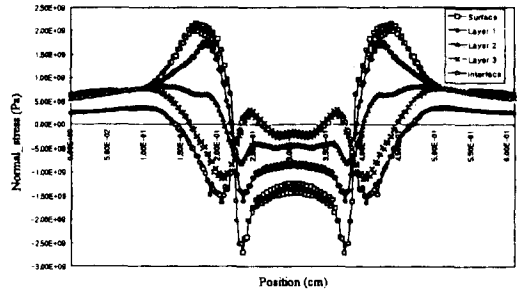


Fig. 5. Contact stress of WC-Ti coating layer along the contacting interface.

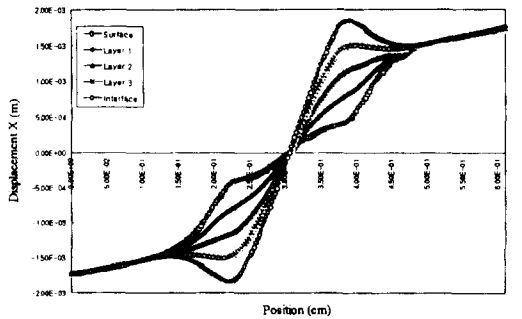


Fig. 6. Displacement of WC-Ti coating layer in the x direction.

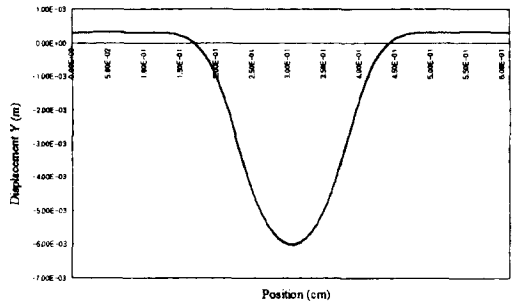


Fig. 7. Displacement of WC-Ti coating layer in the y direction.

응력성분은 얇은 코팅막에 치명적인 전단성분을 줄 수 있다. 이 결과에 의하면 코팅막의 표면에서는 인장응력이 크게 발생되고, 코팅막의 내부로 갈수록 압축응력이 걸리는 현상을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 같은 경로에 대해 x방향과 y방향에서 발생하는 변위량을 각각 나타낸 것으로, 접촉력을 받고 있는 코팅막 내부의 한 지점에서 x방향으로 발생하는 Fig. 6의 변형 성분은 접합면이 접촉면보다 더 크고, y방향의 변형 성분인 Fig. 7은 거의 동일하다. 따라서 코팅의 변

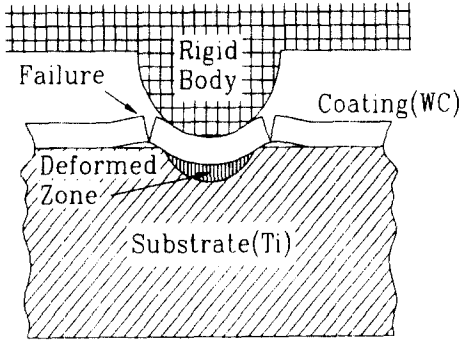


Fig. 8. Failure mode of WC-Ti coating layer [1].

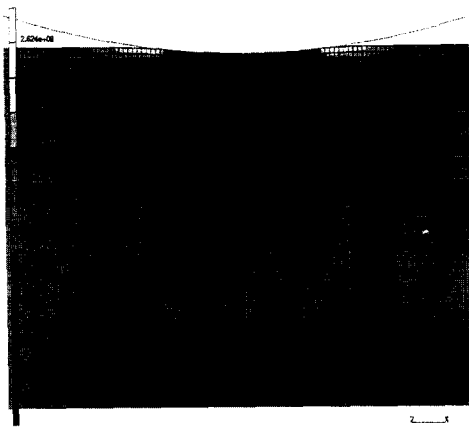


Fig. 9. Stress distribution of TiC-Steel coating layer along the contacting interface.

형하는 막이 접합면을 따라 모재쪽으로는 변형이 일어날 수 없기 때문에 코팅 자체가 들어올려지듯이 변형이 진행되다가(Debonding) 굽힘응력이 한계치에 도달하게 되면 Fig. 8과 같은 파단이 일어난다[1].

TiC-Steel 코팅 모델에 대한 응력 분포도는 Fig. 9에서 보여주고 있는데, 특이한 점은 고하중으로 인해 접촉 중심 부분에 발생하는 코팅(TiC)의 횡방향 파단강도를 초과하면서 코팅막에 전단이 발생한다는 것이다. Fig. 10은 TiC-Steel 모델의 응력을 경로분포로 나타낸 것인데, Fig. 5에 비하여 경향은 비슷하지만 접촉원 주변의 반력이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 모재가 연성재료이므로 WC-Ti 모델에서는 Ti만큼 코팅을 지지해 주지 못하므로 변형이 일어날 우려가 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 x방향과 y방향에서 발생하는 변형량을 각각 나타낸 결과로 경로분포를 보면 Fig. 6에 비해 접합 계면에서 x방향 변위가 완만해 지는

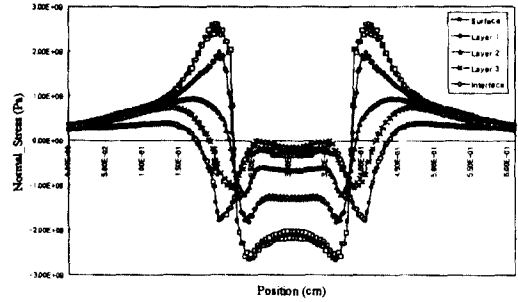


Fig. 10. Contact stress of TiC-Steel coating layer in the x direction.

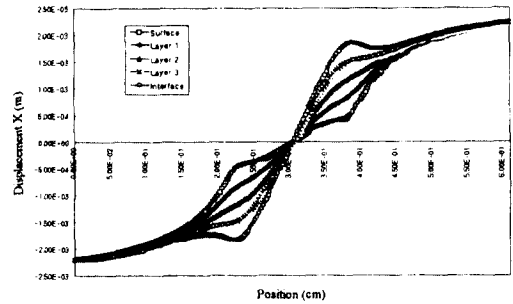


Fig. 11. Displacement of TiC-Steel coating layer in the x direction.

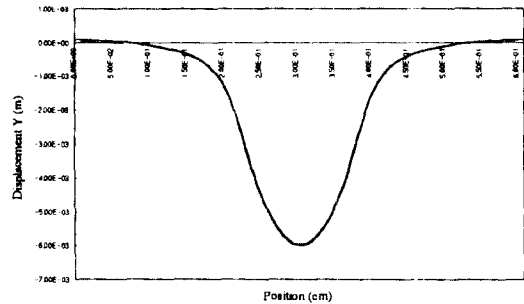


Fig. 12. Displacement of TiC-Steel coating layer in the y direction.

것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 실행한 WC-Ti 모델의 모재, Ti보다는 Ti-Steel의 모재인 강재가 연성이 높으므로 코팅막 자체에서 일어나는 소성변형과 같은 방향으로 변형을 일으킬 수 있기 때문이다. 문제는 코팅이 취성이 강한 재료이므로 모재가 변형을 받아들여도 세라믹 자신의 성질 때문에 Fig. 13에서와 같은 파단이 일어난다. 또한, y방향의 변형량을 Fig. 7과 비교할 때, 접촉면 외부에서의 y방향에 대한 변형량이

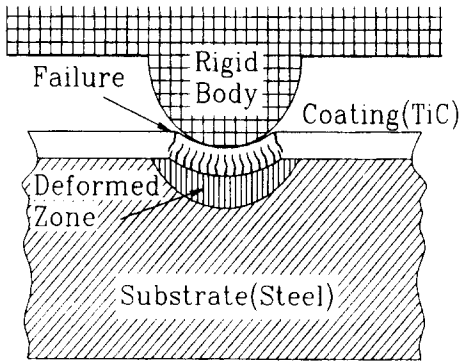


Fig. 13. Failure mode of TiC-Steel coating layer [1].

대단히 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 해석 결과로 볼 때 WC-Ti와 같은 취성 모델에서는 응력이 집중되는 부위에서 굽힘에 의한 결합의 파괴(Debonding failure)가 일어날 가능성이 많고, TiC-Steel 모델에서는 모재가 연성이 강하여 만입부에서 취성 코팅이 전단 항복응력에 도달할 수 있는 가능성이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 TiC-Steel 모델의 파손은 Fig. 13과 같은 파단 모델로 해석할 수 있으며, 파단의 주요 파라메타는 모재의 연성으로 인한 취성 코팅의 전단응력 때문이다.

즉, 코팅의 모재가 취성이 강한 경우는 모재가 소성 변형 에너지를 충분히 흡수하지 못하므로 접촉과 접합이 이루어지는 코팅막층의 계면 부근에서 집중응력을 받게되어 코팅막층은 파괴가 발생한다. 그러나 코팅의 모재가 연성이 강할 경우는 변형에너지의 대부분을 모재에서 흡수하므로 코팅막층에는 비교적 균일한 응력을 받게되므로 Fig. 13에서 보여주는 것과 같이 접촉응력이 비교적 균일하게 분산되면서 코팅막층의 파손이 진행된다.

4. 결 론

코팅소재에서 접촉거동 문제는 접촉물의 만입형태

(Indentation shape), 코팅과 모재의 기계적 물성치 등에 의해 결정된다. 본 연구에서 해석한 첫 번째 모델(WC-Ti)은 집중 하중하에서 콘(Cone) 형태의 만입을 갖는 단일 취성재료(Homogeneous brittle solid)의 파손과 유사하고, 특히 집중하중을 받는 후막코팅(Thick coating)에서 두드러지게 나타난다. 따라서, 이런 성질의 코팅모델은 표면강도가 높은 반면, 표면에 수직으로 작용하는 집중하중에는 약한 특징이 있으므로 미끄럼 마찰 부위에서의 내마멸성 코팅이 적합할 것이다. 미끄럼 마찰 운동을 하는 접합계면에서 피로에 의한 결합강도의 초과 여부에 주의해야 할 것이다.

두 번째 모델(TiC-Steel)은 코팅이 강도면에서 우수하고, 이를 지지해 주는 모재가 연성이면 집중하중을 받는 코팅부분에서 모재의 변형으로 인한 인장응력이 발생하고, 이로 인해 취성이 강한 코팅에 인장응력에 의한 크랙이 진전된다. Ti-Steel 모델은 모재의 강도를 벗어나지 않는 하중범위에서 사용하는 소재에 대해 모재 보호용으로 적합하다.

후 기

이 논문은 1997년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Jaroslav Mencik, "Mechanics of Components with Treated or Coated Surfaces," Kluwer Academic Pub., 1995.
2. "MARC User's Manual," Version K.6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
3. Mel M. Schwartz, "Handbook of Structural Ceramics," McGraw-Hill, pp.1.1-1.22, 1992.