

유한요소법을 이용한 Coating Layer의 접촉응력 해석에 관한 연구

김칭균 · 오병택

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

A Study on the Contact Stress Analysis of the Coating Layer Using Finite Element Method

Chung-Kyun Kim · Oh Byoung Taek

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract

Films and coatings are used for an enormous and diverse set of applications including mechanical, electronic and optical devices, protection at high temperature, cutting tools enhancement and automotive use. Many of these applications require the various properties associated with inorganic and metallic / non-metallic materials; i.e., with ceramics. Therefore, a large number of coatings have been developed and used for a long time in the various fields, especially in mechanical one. As one of the mutual surface actions, the problems of contact stresses are complex. The relationship between load and stress are nonlinear. Besides, the material is often apt to deform plastically under low load. However, analytical solutions exist only for some simple problems. If a material has a complicated shape or inhomogeneous properties, numerical method must be used. In this paper, the analysis of the contact stress of the coating layer was solved, using the finite element method.

Key word : coating, FEM, stress, failure

1. 서론

코팅(Coating)은 표면처리(Surface treatment)의 일종으로서, 초기에는 주로 코팅 내부의 모재(Substrate)를 외부의 위험요소로부터 보호하는 역할로 사용되었으나 근래에는 모재의 보호뿐만 아니라 코팅막을 설치함으로써 요구되는 다양한 성질을 가진 기계의 구성품(Component)을 이루는데 중요한 역할을 하고 있다. 코팅이 중요시 되고 있는 이유는 종류가 매우 다양하여 코팅을 선택할 폭이 넓다는 것 이외에도 다른 표면처리방법과 달리 모재의 성질을 변화시키지 않고 비교적 간단한 방법으로 사용자가 원하는 기능을 갖춘 기계부품을 제작할 수 있다는 데 있다.

코팅의 기능에 영향을 미칠 수 있는 인자는 코팅재의 기계적 물성치, 모재와의 결합력(Bonding strength), 코팅의 파손 메카니즘(Failure Mechanism), 모재의 표면 거칠기, 코팅 방법 등 다양하다. 이런 인자들은 또한 항상 일정한 값을 갖는 것이 아니고, 같은 재료에도 상황에 따라 판이하게 달라지므로 코팅에 대해서 물성치를 얻어내는 실험적 방법에서도 반복적인 방법을 통해서 통계적으로 얻어내는 것이 지금까지의 실험적 방법이었다. 코팅은 변수가 다양하게 작용하기 때문에 측정이 용이하지 않고, 접촉거동 측면에서 해석적인 방법도 몇가지의 간단한 경우에 대해서만 해석이 가능하다. 더욱이 이방성재료(Inhomogeneous materials)인 경우는 수치해석적인 방법이 동원되기도 한다.

최근에는 코팅의 특성을 규명하는데 유한요소법이 사용되기도 하는데, 본 연구에서도 유한요소법을 이용하여 코팅의 접촉응력 거동문제를 해석하고자 한다. 진술한 바와 같이 코팅의 특성을 결정하는 여러 가지 중요한 변수들이 있지만 본 연구에서는, 코팅의 접촉응력 거동문제를 해석하고자 하며, 그 결과는 실험적으로 측정된 기존의 결과와 비교하여 타당성을 검토하고자 한다.

2. 유한요소해석

2-1. 해석에 필요한 가정

코팅의 종류는 매우 다양하지만, 본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있는 세라믹 코팅류에 중점을 두었고, 모델이 갖는 물성치도 세라믹 소재에 대한 것을 사용하였다.

코팅과 모재의 결합강도에 대해서는 접합계면(Interface)에서 형성되는 결합력이 코팅재나 모재 자체의 강도를 초과하지는 않는다고 보고 응력해석 결과를 볼 때, 결합이 파괴되는 기준은 코팅과 모재중에서 강한 재료쪽의 항복강도를 기준으로 하였다. 물론 폭발접합(Explosive cladding)과 같은 것은 폭발력이 임계치 이상으로 강하게 되면 접합면에 아주 강한 부산물층을 이루기도 하지만, 이런 경우를 제외한다면 위의 가정은 합당하다.

2-2. 모델링

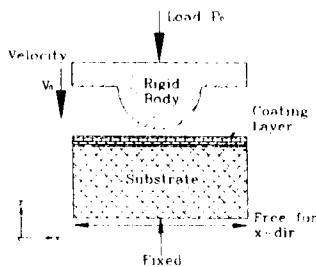


Fig.1 코팅재의 모델과 경계조건

본 연구에서 사용한 코팅재의 해석모델은 Fig. 1과 같고, 세분화된 유한 요소망은 Fig. 2에서 보여주고 있다.

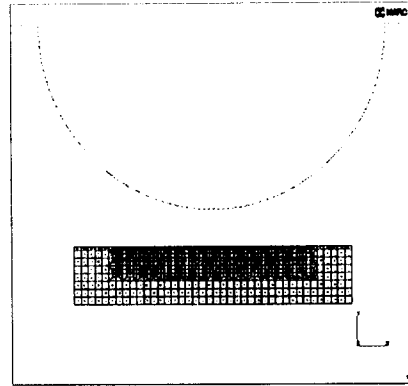


Fig.2 유한요소망 그림

접촉모델은 강체의 구(Sphere)형에 접촉하는 코팅막층을 Fig. 1에서 보여주는 것과 같은 경계조건으로 사용하였고, 해석에 사용한 프로그램은 비선형 해석용 프로그램인 MARC K6.1을, Pre/Post Processing에는 MENTAT 2.1을 각각 사용하였다.

Table 1. 유한 요소망 데이터.

요소의 갯수	1456
절점의 갯수	4594
요소의 종류	8-node, Distorted Quadrilateral Second order, Isoparametric element.
해석에서 접촉이 일어났다고 가정하는 거리 (m)	5×10^{-6}
사용 기준 하중(N)	100
사용 프로그램 (For analysis)	MARCK 6.1
사용 프로그램 (Pre/Post Processing)	MENTAT 2.1

경계조건으로는 대칭형 무한평판에서 바타면은 강체모드(rigid body mode)를 방지

하기 위해 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 바닥면의 가운데 한 질점(Node)을 모든 방향에 대해 고정시켰고, 나머지 바닥면은 x방향으로만 움직일 수 있다. 위에서 코팅면을 눌러주는 구는 해석의 중심대상이 아닌 강체이고, 나머지 코팅과 모재는 변형이 가능한 실제의 소재이다.

유한 요소망을 형성하는데 사용한 자료는 Table 1과 같고, 모델링에 사용한 재료의 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2. Material Properties.^[9]

재료 \ 물성치	WC	TiC	SiC	Steel
Elastic Modulus (10^9N/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 (10^6N/m^2)	4100	5900	700	200

3. 해석결과

해석 대상 모델은 코팅과 모재가 WC-Ti(Hard brittle coating on hard substrate), TiC-Steel(Hard brittle coating on ductile substrate), SiC-W(Relatively soft coating on hard brittle substrate)이다. 코팅과 모재의 접합계면에서 새로운 물성치를 가진 물질이 형성되지 않는다는 것과 주된 접합 메카니즘(Bonding mechanism)은 기계적 접합이라는 가정하에 WC-Ti 모델에 대하여 계산된 접촉응력은 Fig. 3과 Fig. 4에 보여지고 있다. Fig. 3은 Fig. 4의 전 단계로서 접촉면(Contact surface)의 아래 부분에서의 최대 응력이 발생하는 현상을 볼 수 있다. Fig. 4는 하중이 계속 주어지고 있는 과정으로 특이한 현상은 접합계면에서 접촉점

(Contact point)을 중심으로 접촉원 주위에서 접촉응력이 급격하게 변화됨을 알 수 있다.

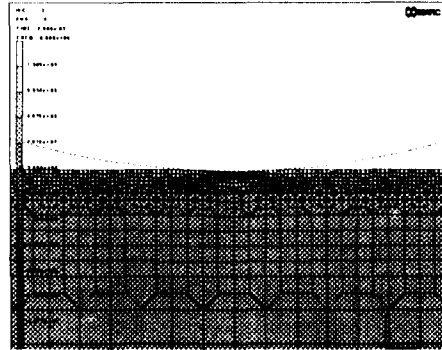


Fig. 3 WC-Ti의 응력집중 및 분포

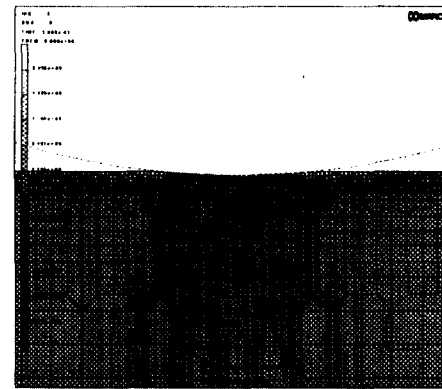


Fig. 4 WC-Ti의 응력 분포

Fig.5는 Fig. 4의 응력상태를 접촉면으로부터 접합면까지 응력을 경로분포(Path plot)로 나타낸 것인데, 접촉면적의 원주에 급격하게 변하는 응력성분은 얇은 코팅막에 치명적인 전단성분을 줄 수 있다.

또한, 같은 경로에 대해 각각 x방향과 y방향의 변위량을 나타낸 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다. 이로부터 알 수 있는 사실은 힘을 받고 있는 코팅막 내부의 한 지점에서 x방향 변형성분은 접합면이 접촉면 보

다 더 크고, y방향 변형성분은 거의 동일

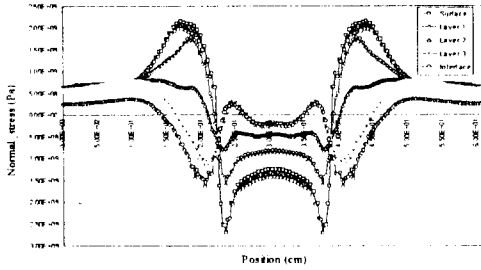


Fig. 5 WC-Ti에서의 응력분포

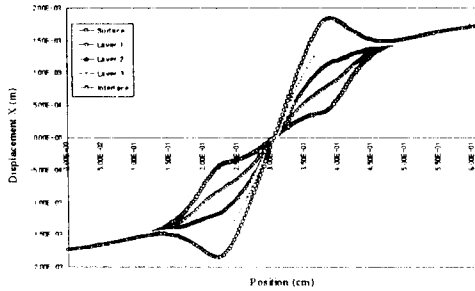


Fig. 6 WC-Ti에서의 x방향 변위

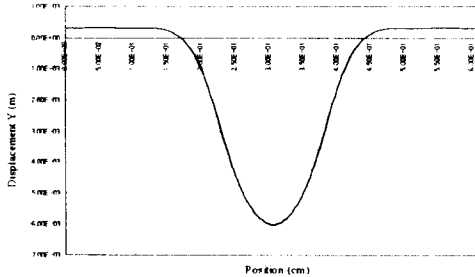


Fig. 7 WC-Ti에서의 y방향 변위

하다. 따라서 변형하는 막이 접합면을 따라 모재쪽으로는 변형이 일어날 수 없기 때문에 코팅 자체가 들어올려지듯 변형이 진행되어지다가(Debonding) 급히 한계치에 도달하게 되면 Fig. 8와 같은 파단이 일어난다.¹¹⁾

TiC-Steel 모델에 대한 응력분포도는 Fig. 9에 나타나 있는데, 특이한 점은 접촉 중심부분에 발생하는 고하중으로 인해 코팅(TiC)의 휨파단강도(약 1.4Pa)를 초과하

여 코팅에 전단이 발생한다는 것이다.

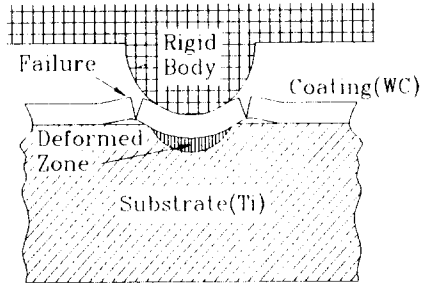


Fig. 8 WC-Ti의 파단 형상¹¹⁾

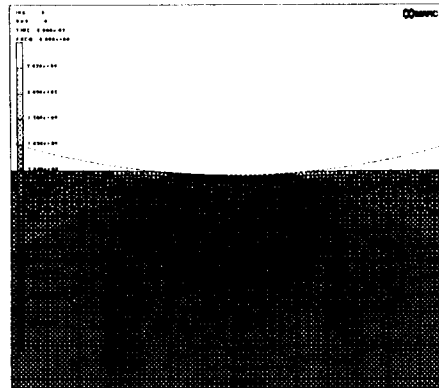


Fig. 9 TiC-Steel의 응력분포 및 변형

Fig. 10은 TiC-Steel 모델의 응력을 경로분포로 나타낸 것인데, Fig. 5에 비해 접촉원주 주변의 반력이 강하지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 모재가 연성재료이므로 WC-Ti 모델에서 Ti만큼 코팅을 지지해 주지 못하고 변형이 일어날 우려가 있다.

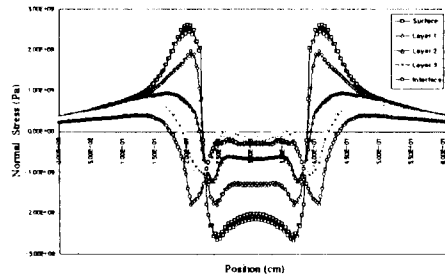


Fig. 10 TiC-Steel에서의 응력분포

Fig. 11과 Fig. 12에서 각각 x방향과 y방향에 대한 변형량을 나타낸 경로분포를 보면 Fig. 6에 비해 접합계면에서 x방향 변위가 완만해 지는 것을 볼 수 있다.

이것은 앞에서 실행한 WC-Ti 모델의 모재, Ti보다는 Ti-Steel의 모재인 강재(Steel)가 연성이 높으므로 코팅막 자체에서 일어나는 소성변형에 같은 방향으로 변형을 일으킬 수 있기 때문이다. 문제는 코팅이 취성이 강한 재료이므로 모재가 변형을 받아 들여도 자신의 성질 때문에 Fig. 13에서와 같은 파단이 일어난다.

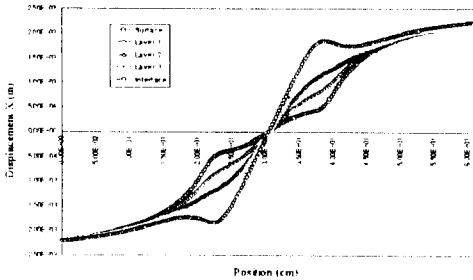


Fig. 11 TiC-Steel에서 x방향 변위

또한, y방향 변형량을 Fig. 7과 비교할 때, 접촉면 외부에서의 +y방향에 대한 변형량이 대단히 작다는 것을 알 수 있는데, 이러한 내용으로 WC-Ti 모델에서는, 응력 집중부위에서 굽힘에 의한 결합의 파괴(Debonding)가 일어날 가능성이 많고, TiC-Steel 모델에서는 모재가 연성이 강하여 만입부에서 취성 코팅이 전단항복응력에 도달할 수 있는 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

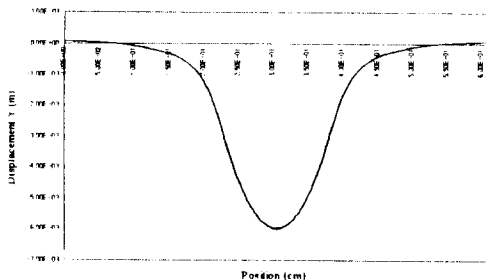


Fig. 12 TiC-Steel에서 y방향 변위

따라서 TiC-Steel 모델의 파단은 Fig. 13과 같은 형상으로 해석할 수 있으며, 주된 파단 성분은 모재의 연성으로 인한 취성 코팅의 전단응력 때문이다.

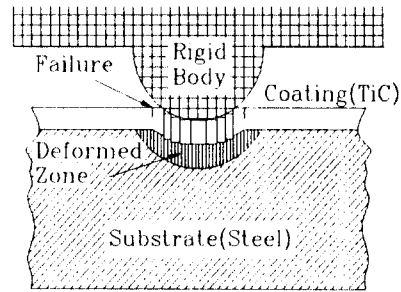


Fig. 13 TiC-Steel에서의 파단형상¹¹⁾

4. 결론

코팅소재에 있어서 운동 경향은 다양하지만, 접촉문제는 접촉물의 만입형태, 코팅과 모재의 기계적 불성치 등에 의해 결정된다. 본 연구에서 진행되어진 첫 번째 모델(WC-Ti)은 집중하중하에서의 콘(Cone)형태의 만입형태(Indentation shape)를 갖는 단일취성재료(Homogeneous brittle solid)의 파손과 유사하다. 특히 하중상태에 있는 후막코팅(Thick coating)에서 두드러지게 나타난다. 따라서, 이런 성질의 코팅모델은 표면경도가 높은 반면, 표면에 수직으로 작용하는 집중하중에 약한 특징이 있으므로 미끄럼 부위에서 내마모성 코팅재로 적합할 것이다. 특히, 미끄럼운동에 의한 피로(Fatigue)에 대한 접합계면(interface)에서의 결합강도(Bonding strength) 초과여부에 주의해야 할 것이다.

두 번째 모델(TiC-Steel)은 코팅이 강도면에서는 우수하나 이를 지지해 주는 모재가 연성이면 집중하중을 받는 코팅부에서 모재의 변형으로 인한 인장응력이 발생하고, 이로 인해 취성이 강한 코팅에 인장응력에 의한 크랙이 진전되는 모델이므로,

모재의 강도를 벗어나지 않는 하중범위에서 사용하는 소재에 대해, 모재 보호용으로 적합할 것이다.

참고문헌

- [1] Jaroslav Menčík, "Mechanics of Components with Treated or Coated Surfaces", Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [2] Lech Pawlowski, "The Science and Engineering of Thermal Spraying Coatings", John Wiley & Sons, 1995
- [3] John B. Wachtman and Richard A. Haber, "Ceramic Films and Coatings", Noyes Publications, 1993.
- [4] P. William Lee, "Ceramics" Reinhold Publishing , pp.1-24, 1961
- [5] "MARC User's Manual", Version K.6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
- [6] A. Matthews & Materials Engineering Center Harwell Laboratory, "Advanced Coating : a Handbook of Surface Engineering", Blackie, pp.278-340, 1991.
- [7] H. Benkreira, "Thin Film Coating", Royal Society of Chemistry, 1993.
- [8] Robert B. Ross, "Metallic Materials Specification Handbook", 3rd ed., E. & F. N. Spon, pp. 178-205, 596-614, 1980.
- [9] Mel M. Schwartz, "Handbook of Structural Ceramics", McGraw-Hill, Inc., pp.1.1-1.22, 1992.