유한요소해석에 의한 DLC 코팅면의 마멸기구에 대한 연구

이준혁* · 박태조†

*경상대학교 대학원 기계항공공학부, 경상대학교 기계공학부 · 공학연구원

A Study on Wear Mechanism in Diamond-like Carbon Coated Surface by Finite Element Analysis

Jun-Hyuk Lee* and Tae-Jo Park†

*Graduate School, School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University
School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University

(Received August 25, 2013 ; Revised October 5, 2013 ; Accepted October 10, 2013)

Abstract – Various heat treatment and surface coating methods have been applied to machine parts. Nowadays, diamond-like carbon (DLC) coatings are widely used because of their excellent tribological characteristics. Despite the numerous studies on DLC-coated engineering surfaces, the exact wear mechanisms related to the coating thickness and elastic modulus have not been fully examined. In this study, a sliding contact problem between a small spherical hard particle and a DLC-coated steel surface is analyzed using a nonlinear finite element code, MARC. The maximum principal stress distributions and deformed surfaces are compared for different coating thicknesses and Young's modulus values. Plastically deformed surface shapes such as a groove and torus indicate that the most dominant wear mechanism for a DLC-coated surface is abrasive wear. Fatigue wear can also play a role in a case where the coating thickness is relatively large and the elastic modulus is high.

Key words – DLC (Diamond-like carbon), coating (코팅), contact analysis (접촉해석), abrasive wear (연삭마멸), fatigue wear (피로마멸)

1. 서 론

산업분야에서 사용되는 모든 기계부품은 다양한 형태의 마멸기구(Wear mechanism)에 의하여 표면이 손상되기에 점차 성능이 저하되거나 파손된다. 적절한 방법으로 상대운동면을 윤활시킴에도 불구하고 손상이 발생하는 원인중의 상당부분을 차지하는 연삭마멸(Abrasive wear)을 줄이기 위하여 열처리나 코팅(Coating)하고 있다. 특히, 연삭마멸의 저감에 가장 비용효율적인 방법인 코팅에는 TiN, TiC, Al₂O₃, 다이아몬드, DLC(Diamond-like carbon) 등과 같은 경질의 박막이 널리 적용되고 있다. 이 중에서 다이아몬드와 특성이 유사한 DLC는, 개

발초기에는 모재층과의 증착에 어려움이 있었으나, 현재는 코팅기술의 발전으로 나노(nano-), 마이크로(micro-) 단위의 아주 얇은 박막의 형성이 가능하여 매우 우수한 트라이볼로지(Tribology) 특성을 발휘하고 있다. 즉, DLC 코팅은 PVD(Physical vapor deposition) 방법으로 증착된 경질 코팅보다 내마모성이 높을 뿐만 아니라 티타늄이나 알루미늄 합금 등과 같은 다른 재료에 비해서 마찰 계수가 낮은 점이 중요한 장점 중의 하나이다. 기계부품에 DLC를 증착시키기 위하여 대부분 플라즈마를 이용한 화학증기 증착법(PACVD)을 사용하며 DLC 코팅층의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 금속이나 세라믹 요소를 도핑(Doping)하기도 한다[1]. 스크래치 테스트(Scratch test)나 로크웰(Rockwell) C 압입실험 등으로 코팅에서 가장 중요한 사항인 모재층과 코팅층간의 접합력

†Corresponding author : tjpark@gnu.ac.kr

을 평가함과 아울러 가장 취약한 부분이 경계층인지 소재의 내부인지를 파악하고 있다. 한편, 코팅 등의 방법으로 표면경도를 높게 처리하더라도 기계시스템 내부에서 발생한 마멸입자나 외부의 이물질이 윤활면 사이로 유입되면 연삭마멸이 발생할 수 있다[2]. 하지만 이것만으로는 일반적인 코팅층의 마멸기구를 설명하기에도 완전하지 않을 뿐만 아니라 상대적으로 최근에 적용되고 있는 DLC 코팅에서 미세입자가 코팅층의 손상에 미치는 영향에 대한 보다 상세한 연구가 요구된다.

Michler & Blank[3]와 Lu 등[4]은 DLC로 코팅된 스틸면에 대한 압입실험과 FEM 해석결과를 하중(Loading)-제하중(Unloading) 곡선으로 비교하고 코팅 두께에 대한 코팅층 파괴하중과 모재층 소성발생하중 등을 추정하였다. Wei & Yang[5]은 모재층의 잔류응력과 거칠기에 따른 DLC 코팅의 기계적 특성을 미세 압입자에 의한 미끄럼 접촉문제로 해석하였다. Keunecke 등[6]과 Wei & Yen[7]은 모재에 DLC박막을 형성하는 방법에 따른 코팅의 특성을 실험적으로 연구하였다. Kim & Kim[8]은 하중과 미끄럼 속도에 따른 DLC와 WC/C의 마찰특성을 실험적으로 조사하였으며, Pettersson & Jacobson[9]은 미세하게 표면조직 가공된(Surface textured) 경계윤활(Boundary lubrication) 면을 DLC 코팅한 경우의 마찰 및 마멸 특성을 실험적으로 조사하였다. Holmberg 등[10]은 TiN과 DLC로 코팅한 마찰면의 트라이볼로지 특성을 조사하기 위하여 압입자를 사용한 스크래치 테스트 결과를 3D FEM 해석결과와 비교하였다. 본 논문의 저자[11]는 TiN으로 코팅된 실링면에서의 미세입자에 의한 미끄럼 접촉문제를 해석하였다. 이와 같이 DLC 코팅에 관련된 지금까지의 연구는 거의 대부분 실험적으로 수행되었을 뿐만 아니라 마멸기구에 대한 이해는 크게 부족한 실정이다. 특히 DLC 코팅층의 두께는 최대 수 μm 정도로 아주 얇기 때문에 미세입자의 작용으로 인한 코팅층의 마멸기구를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 FEM을 이용한 해석이 요구된다.

본 논문에서는 DLC로 코팅된 기계부품의 마멸기구에 미치는 영향을 조사하기 위하여 FEM S/W를 사용하여 미세입자와 코팅된 스틸면 사이에 대한 압입해석과 미끄럼 접촉해석을 수행하였다.

2. 해석 모델 및 방법

본 논문에서는 DLC로 코팅된 스틸면 위를 구형인

Fig. 1. 3D sliding contact model and applied boundary condition.

미세경질입자가 압입되어 미끄러지는 경우의 3차원 접촉문제를 비선형문제 해석용 FEM S/W인 MARC[12]를 사용하여 해석하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 격자계와 적용된 경계조건을 개략적으로 나타낸 그림으로 해석대상이 x-y평면에 대하여 대칭이므로 절반만 모델링하였다. 이때, 입자와 접촉하는 스틸면에는 격자를 매우 조밀하게 구성하였다. 해석에 사용된 격자종류는 3D Hex Full Integration 7로 전체격자의 수는 대략 6만개 정도이다. 접촉해석은 압입과 미끄럼의 2가지 경우로 다음과 같은 방법과 순서로 수행하였다. 먼저 압입해석은 하중과 제하중 단계로 진행되며, 미끄럼 해석은 입자가 압입된 상태에서 미끄러진 후에 제하중 되도록 설정하였다. 압입단계에서는 입자의 상단부에 -y방향으로 하중을 작용시키고 스틸면의 하단은 모든 방향으로 구속하였다. 미끄럼 단계에서는 스틸면의 우측부에 -x방향으로 변위를 설정하였으며, 입자는 좌·우 방향으로 구속하였다. 이때, 미세입자와 DLC 코팅된 스틸면은 접촉상태로 정의하고 마찰계수는 0.08로 설정하였다[10].

Table 1에는 해석에 사용된 재료의 주요물성치를 나타내었다. 여기서 구형입자는 강체(Rigid), 코팅층과 스

Table 1. Material properties.

	Material	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Yield Strength, GPa
Particle	Rigid	-	-	-
Coating	DLC	70	0.22	-
		320		
Shaft	Steel	200	0.3	1

틸면은 각각 선형 탄성(Linear elastic)과 탄성-완전소성(Elastic-perfect plastic)으로 거동한다고 가정하였다. 본 논문에서 사용된 미세입자의 직경은 $50\ \mu\text{m}$ 이고, 하중과 최대미끄럼거리의 각각 $200\ \text{mN}$ 과 $100\ \mu\text{m}$ 이며 코팅층의 두께는 $1, 2\ \mu\text{m}$ 의 2가지 경우이다. 미끄럼 해석에서는 접촉부에서 발생하는 과도한 변형으로 인하여 수렴되지 않는 경우를 피하기 위해 Time table[12]을 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2와 Fig. 3은 DLC 코팅의 탄성계수가 각각 $70, 320\ \text{GPa}$ 인 경우의 코팅층 두께에 따른 최대주응력의 분포를 나타낸 그림이다. 인장응력과 압축응력의 최대값은 입자와 코팅층의 접촉부 바깥쪽과 입자 아래의 모재층에서 각각 발생하였다. Fig. 2의 탄성계수가 낮은 DLC의 경우에는 코팅층이 쉽게 변형하기 때문에 코팅 두께의 영향이 상대적으로 작으며 최대인장응력과 최대압축응력은 각각 $2\ \text{GPa}$ 와 $1.8\ \text{GPa}$ 이다.

Fig. 2. Effect of coating thickness on the maximum principal stress distribution: Young's modulus is $70\ \text{GPa}$.

Fig. 3. Effect of coating thickness on the maximum principal stress distribution: Young's modulus is $320\ \text{GPa}$.

이와는 달리 코팅의 탄성계수가 높고 두꺼우면 접촉표면 주변에서 최대 $7.5\ \text{GPa}$ 정도의 인장응력이, 접촉부 아래 모재층 내부와의 경계면에는 최대 $6\ \text{GPa}$ 정도의 압축응력이 각각 발생하는 등 코팅 두께의 영향이 상당히 크게 나타났다.

Fig. 4는 서로 다른 코팅 두께에서 코팅층의 탄성계수의 차이에 따른 하중-제하중 곡선을 나타낸 그림이다. 코팅 두께가 얇은 경우(Fig. 4(a))에는 탄성계수의 큰 차이에도 불구하고 모재의 소성변형 정도가 큰 차이를 나타내지 않는 것은 코팅층에서의 하중지지능력이 낮으므로 항복응력상태인 모재층의 면적이 넓기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 코팅층이 두꺼운 경우에는 코팅의 탄성계수에 따른 입자의 최대압입깊이 및 모재의 소성변형이 크게 감소하였다. 따라서 DLC의 탄성계수가 높고 이의 두께가 두꺼울수록 코팅층에서의 하중지지능력이 향상되므로 모재의 소성변형은 크게 줄어든다. 하지만 높은 압축/인장 응력이 반복적으로 작용할 경우에는 접촉표면 주변과 코팅층 내부에서는 피로에 의한 미세균열이 발생할

Fig. 4. Effect of coating thickness on penetration curve.

수 있으며 이는 코팅층의 손상을 초래할 것으로 예상된다[3].

Fig. 5에는 하중이 작용하는 상태에서 입자가 20 μm 미끄러진 경우에 대한 최대주응력의 분포를 코팅 두께별로 나타내었다. 코팅 두께가 얇은 경우에는 입자가 미끄러져 지나간 자리에 그루브(Groove)와 같이 함몰된 변형형상이 뚜렷하게 남았다. 그리고 입자 바로 뒤쪽의 코팅 표면에는 최대 3 GPa 정도의 인장응력이, 접촉부 아래의 모재층에는 최대 2 GPa 정도의 압축응력이 각각 발생하였다. 한편, 코팅층이 상대적으로 두꺼운 경우에는 접촉표면의 바깥쪽에서 최대인장응력이, 입자 아래의 접촉면에서 높은 압축응력이 각각 발생하였다. 또한 입자가 미끄러져 지나간 코팅층 내부에는 2.3 GPa 정도의 인장응력이 잔류하였다.

Fig. 5. Effect of coating thickness on maximum principal stress distribution after 20 μm sliding; Young's modulus is 70 GPa.

Fig. 6. Effect of coating thickness on maximum principal stress distribution after 20 μm sliding; Young's modulus is 320 GPa.

Fig. 7. Deformed DLC coated surface shapes after 100 μm sliding.

Fig. 6에는 Fig. 5와 코팅 두께는 동일하지만 탄성계수가 320 GPa인 경우에 대한 최대주응력 분포를 나타내었다. 이 결과, 접촉표면의 바깥쪽에서는 7~9 GPa 정도의 높은 인장응력이, 입자 아래의 접촉면과 모재층에서는 2.5~6 GPa 정도의 높은 압축응력이 각각 발생하였다. 특히, 입자가 미끄러져 지나간 코팅층 내부에는 4.5 GPa 정도의 아주 높은 잔류인장응력이 나타났으며, 이러한 크기의 잔류응력은 코팅층을 모재로부터 박리시키는 피로마멸(Fatigue wear)의 발생에 크게 기여할 것으로 추정된다.

Fig. 7은 미세입자의 미끄럼 거리에 따른 대칭면에서의 코팅면의 소성변형량을 코팅 두께와 이의 탄성계수에 대하여 나타낸 결과이다. Fig. 4의 결과와 유사하

게 코팅 두께가 얇은 경우에는 탄성계수의 차이에 따른 표면변형에는 큰 차이가 없지만 코팅층이 상대적으로 두껍고 탄성계수가 높을 경우에는 소성변형 정도가 크게 감소하였다. Fig. 5에서 고찰한 것과 같이 코팅층이 얇은 경우에는 입자가 미끄러져 지나간 자리에 그루브 형상의 표면변형과 함께 미끄러지는 입자 앞쪽의 표면은 상당히 밀려올라간 토러스(Torus) 형상으로 변형되었다. 따라서, 코팅 두께가 얇으면 미세입자에 의한 연삭마멸이 가장 지배적일 것으로 예측된다. 또한, 코팅층과 모재가 밀려 올라간 부분은 반복되는 입자의 미끄럼 접촉에 의해서 전단될 수 있으며, 이는 새로운 입자로 생성되어 코팅면을 마멸시킬 것으로 예상된다.

이상의 결과에서 DLC로 코팅된 스틸면은 코팅의 일반적인 손상원인으로 이해되는 연삭마멸 뿐만 아니라 두께가 두꺼울 경우에는 코팅층에서의 잔류응력으로 인한 피로마멸도 관여할 것으로 예상된다. 따라서, DLC 코팅에서는 두께와 탄성계수의 선정이 아주 중요하며, 본 연구의 결과가 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 논문에서는 DLC로 코팅된 윤활면과 미세입자와의 3차원 미끄럼 접촉문제를 상용 FEM 소프트웨어를 사용하여 해석하였다. 이 결과, DLC의 두께가 얇은 경우에는 경질입자에 의해서 코팅면은 그루브와 토러스 형상으로 소성변형되고 표면에는 높은 인장응력이 발생하였다. DLC의 탄성계수가 높고 코팅이 두꺼운 경우에는 코팅면 뿐만 아니라 코팅층 내부에서도 높은 인장잔류응력이 발생하였다. 따라서 DLC의 두께가 얇은 경우 코팅층의 손상에 연삭마멸이 지배적이지만 두꺼운 경우에는 잔류응력으로 인한 피로마멸에 의해서도 손상될 것으로 추정된다. 따라서 본 논문에서 사용한 해석 방법과 결과는 DLC 코팅조건의 최적화에 기여할 수 있을 것으로 예상되며, 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 BK21플러스사업과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0014650).

References

- [1] Bhushan, B., Principles and Applications of Tribology, John Wiley & Sons, 1999.
- [2] Müller, H. K. and Nau, B. S., Fluid Sealing Technology - Principles and Applications, Marcel Dekker, 1998.
- [3] Michler, J. and Blank, E., "Analysis of Coating Fracture and Substrate Plasticity Induced by Spherical Indentors: Diamond and Diamond-like Carbon Layers on Steel Substrates," *Thin Solid Films*, Vol. 381, pp. 119-134, 2001.
- [4] Lu, Y. C., Kurapati, S. N. V. R. K. and Yang, F., "Finite Element Analysis of Deep Indentation by a Spherical Indenter," *J. of Materials Science*, Vol. 43, pp. 6331-6336, 2008.
- [5] Wei, C. and Yang, J. F., "A Finite Element Analysis of the Effects of Residual Stress, Substrate Roughness and Non-uniform Stress Distribution on the Mechanical Properties of Diamond-like Carbon Films," *Diamond & Related Materials*, Vol. 20, pp. 839-844, 2011.
- [6] Keunecke, M., Weigel, K., Bewilogua, K., Cremer, R. and Fuss, H. G., "Preparation and Comparison of a-C:H Coatings Using Reactive Sputter Techniques," *Thin Solid Films*, Vol. 518, No. 5, pp. 1465-1469, 2009.
- [7] Wei, C. and Yen, J. Y., "Effect of Film Thickness and Interlayer on the Adhesion Strength of Diamond like Carbon Films on Different Substrates," *Diamond and Related Materials*, Vol. 16, pp. 1325-1330, 2007.
- [8] Kim, D. W. and Kim, K. W., "Friction Characteristics of DLC and WC/C," *J. of KSTLE*, Vol. 27, No. 6, pp. 308-313, 2011.
- [9] Pettersson, U. and Jacobson, S., "Friction and Wear Properties of micro Textured DLC Coated Surfaces in Boundary Lubricated Sliding," *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 3, pp. 553-559, 2004.
- [10] Holmberg, K., Ronkainen, H., Laukkanen, A., Wallin, K., Erdemir, A. and Eryilmaz, O., "Tribological Analysis of TiN and DLC Coated Contacts by 3D FEM Modelling and Stress Simulation," *Wear*, Vol. 264, No. 9-10, pp. 887-884, 2008.
- [11] Park, T. J. and Lee, J. H., "Sliding Contact Analysis of Spherical Particle between Rubber Seal and Coated Steel Counterface," *J. of KSTLE*, Vol. 28, No. 6, pp. 283-288, 2012.
- [12] MSC, "MSC. MARC/MENTAT 2012r1 User's Guide," A-E, 2012.