

## 강체인 구와 DLC 코팅면 사이의 압입 및 미끄럼 접촉해석: 지지층 두께의 영향

이준혁<sup>1</sup> · 박태조<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 대학원 기계항공공학부, <sup>2</sup>경상대학교 기계공학부 · 공학연구원

### Indentation and Sliding Contact Analysis between a Rigid Ball and DLC-Coated Steel Surface: Influence of Supporting Layer Thickness

JunHyuk Lee<sup>1</sup> and TaeJo Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University

(Received May 10, 2014 ; Revised June 24, 2014 ; Accepted June 25, 2014)

**Abstract** – Various heat-treated and surface coating methods are used to mitigate abrasion in sliding machine parts. The most cost effective of these methods involves hard coatings such as diamond-like carbon (DLC). DLC has various advantages, including a high level of hardness, low coefficient of friction, and low wear rate. In practice, a supporting layer is generally inserted between the DLC layer and the steel substrate to improve the load carrying capacity. In this study, an indentation and sliding contact problem involving a small, hard, spherical particle and a DLC-coated steel surface is modeled and analyzed using a nonlinear finite element code, MARC, to investigate the influence of the supporting layer thickness on the coating characteristics and the related coating failure mechanisms. The results show that the amount of plastic deformation and the maximum principal stress decrease with an increase in the supporting layer thickness. However, the probability of the high tensile stress within the coating layer causing a crack is greatly increased. Therefore, in the case of DLC coating with a supporting layer, fatigue wear can be another important cause of coating layer failure, together with the generally well-known abrasive wear.

**Keywords** – coating (코팅), DLC (Diamond-like carbon), supporting layer (지지층), sliding contact analysis (미끄럼 접촉해석), abrasive wear (연삭 마멸), fatigue wear (피로 마멸)

### 1. 서 론

상대운동하는 기계부품은 적절한 방법으로 윤활시킴에도 불구하고 다양한 형태의 마멸기구(Wear mechanism)에 의해서 표면이 손상되어 점차 성능이 저하되거나 파손된다. 윤활면이 마멸되는 원인 중에서 상당부분을 차지하는 연삭마멸(Abrasive wear)을 방지하기 위하여 기계부품은 침탄법, 질화법 등으로 표면경화하거나 경질

의 재료로 코팅(Coating)하는 등의 표면처리방법이 널리 적용되고 있다. 특히, 코팅은 연삭마멸의 저감에 처리비용 대비 효과가 가장 높은 방법으로 최근에는 다이아몬드(Diamond)와 유사한 특성을 지닌 DLC(Diamond-like carbon) 코팅이 각광받고 있다. 즉, 코팅기술의 발전으로 나노(nano-), 마이크로(micro-)미터 단위의 아주 얇은 두께로 증착이 가능한 DLC 코팅은 경질 코팅보다 내마모성, 내화학적, 경도 및 표면조도 등의 트라이볼로지(Tribology) 특성이 우수할 뿐만 아니라 다른 재료에 비해서 낮은 마찰계수를 지니고 있기에 다양한 기계부품에 널리 적용되고 있다. 그러나 단일 DLC 코팅

\*Corresponding author : tjpark@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1623, Fax: +82-55-772-1577

은 고하중이 작용하는 경우에는 하중지지능력 부족으로 코팅층에서 균열(Crack)이 발생할 수 있으며 코팅층이 두꺼워질 수록 표면이 거칠어지기 때문에 DLC의 트라이볼로지적 장점을 발휘할 수가 없다. 따라서 이와 같은 경우에는 하중지지뿐만 아니라 코팅층 표면에서 발생하는 균열의 전파를 억제하기 위하여 지지층(Supporting layer)을 DLC 코팅층 아래에 증착하거나 얇은 두께의 코팅을 반복적으로 증착하는 방법이 사용되고 있다. 한편, 기계시스템 내부에서 마멸입자가 발생하거나 외부의 이물질이 상대운동면 사이에 침투하면 코팅 등의 방법으로 표면경도를 높게 처리하더라도 연삭마멸이 발생할 수 있다[1]. 하지만 이것만으로 코팅에 관련된 마멸기구를 규명하기에는 완전하지 않으며, 최근에 널리 적용되고 있는 DLC로 코팅한 부품에서 미세입자가 코팅층의 손상에 미치는 영향에 대한 연구는 아주 부족한 실정이다.

Komvopoulos[2]는 압입자(Indenter)의 압입깊이에 따른 코팅된 모재층의 소성변형 정도와 이의 발생위치를 FEM으로 해석하였다. Michler와 Blank[3]는 다이아몬드 압입자와 DLC코팅된 스틸면에 대한 FEM을 사용한 압입해석으로 코팅층의 파괴하중과 모재층에서의 소성발생하중 등을 추정하였다. Ronkainen 등[4]은 압입(Indentation) 및 스크래치(Scratch) 실험으로 스틸면 위에 증착된 코팅층의 파손형태와 파괴하중을 조사하였다. Wei와 Yang[5]은 DLC의 기계적 성질이 코팅층의 증착시에 발생하는 경계면에서의 잔류응력과 거칠기 등에 미치는 영향을 미끄럼 접촉문제로 해석하였다. Kim과 Kim[6]은 스크래치 실험으로 압입자에 가하는 하중과 이송속도에 따른 DLC와 WC/C의 마찰특성을 조사하였다. Holmberg 등[7-10]은 스크래치 실험결과와 FEM해석결과를 비교하여 최적화된 해석모델을 제시하고 TiN과 DLC 등의 코팅재질에 따른 마멸발생원인과 균열발생여부를 상세하게 연구하였다. Kot 등[11-12]은 압입 및 스크래치 실험으로 코팅층의 파손형태를 규명함과 아울러 단일코팅과 다중코팅에 대한 기계적 특성 비교를 통하여 새로운 형태의 코팅증착형상을 제시하였다. 특히, 다중코팅이 내부균열전파를 억제하는데 더욱 효과적이라는 결과를 보고하였다. 본 논문의 저자[13-14]는 FEM해석을 이용하여 TiN과 DLC로 코팅된 상대운동면에서의 미세입자에 의한 접촉문제를 각각 해석하였다. 이와 같이 지금까지의 DLC 코팅에 관련된 연구는 대부분 실험적으로 수행되었으며 미세입자에 의한 윤활면의 마멸기구에 대한 이해는 크게 부족

한 실정이다. 특히, 수  $\mu\text{m}$  정도로 아주 얇은 DLC 코팅층에 직경이 매우 작은 미세입자가 작용하면 코팅층에 국부적으로 높은 응력이 작용할 수 있다. 따라서 DLC코팅에서의 마멸기구를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 코팅층과 미세입자의 작용에 대한 상세한 접촉문제해석이 요구된다.

본 논문에서는 DLC로 코팅된 기계부품의 마멸에 영향을 미치는 인자들을 조사하여 최적의 코팅조건을 찾기 위한 연구의 일환으로 구형의 강체 입자와 DLC코팅층 아래에 지지층이 있는 스틸면에서의 압입 및 미끄럼접촉 문제를 FEM S/W인 MARC[15]를 사용하여 해석하였다.

## 2. 해석 모델 및 방법

코팅처리시에 중요한 사항은 모재와 코팅층 간의 접합력 향상과 함께 가장 취약한 부분이 경계면인지 소재내부인지를 파악하는 것이다. 실제에서는 이를 평가하기 위하여 스크래치 실험이나 로크웰(Rockwell) C 압입실험을 실시한다. 본 논문에서는 구형입자가 DLC로 코팅된 스틸면에 압입 및 미끄럼 접촉하는 경우의 문제를 3차원 FEM으로 해석하였다.

Fig. 1은 해석에 사용된 격자계와 경계조건을 개략적으로 나타낸 그림으로 해석대상이 x-y면에 대하여 대칭이기 때문에 전체형상에서 절반만 모델링하였다. 이때, 코팅두께가 아주 얇기 때문에 정확한 해석을 위하여 입자와 접촉하는 코팅표면에는 격자를 매우 조밀하게 구성하였다. 해석에 사용된 격자는 3D Hex Full Integration 7이며, 전체 격자의 수는 6만개 정도이다.

본 논문에서는 압입과 미끄럼의 2가지 경우로 나누어 접촉해석을 진행하였다. 먼저 압입해석은 입자의 상단부에 -y방향으로 하중을 작용시켰으며, 이때 스틸면의 하단은 모든 방향으로 구속하였다. 미끄럼 해석의

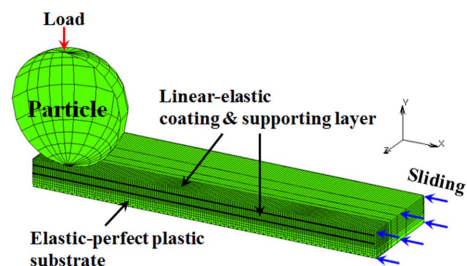


Fig. 1. Schematic of 3D contact model and applied boundary condition.

**Table 1. Material properties**

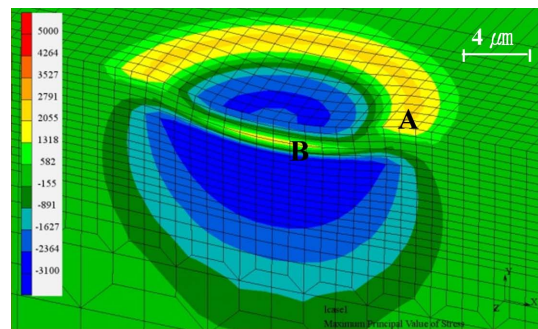
	Material	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Yield Strength, GPa
Particle	Rigid	-	-	-
Coating	DLC	70	0.22	-
Supporting layer	CrN	400	0.22	-
Substrate	Steel	200	0.3	2

경우에는 z 방향으로 구속된 입자 상단부에 -y 방향으로 하중을 작용시킨 다음 -x 방향으로 스틸면에 변위를 가하였다. 입자와 코팅면은 접촉상태로 정의하였으며, 접촉면에서의 마찰계수는 0.08로 참고문헌[7-8]과 동일하다. Table 1에는 해석에 사용된 재료의 물성치를 나타내었다. 구형인 미세입자는 강체(Rigid), 코팅층과 지지층은 선형탄성(Linear elastic), 스틸면은 탄성-완전소성(Elastic-perfect plastic)으로 각각 거동한다고 가정하였다. 실제의 코팅공정에서는 코팅층간의 접합력을 높이기 위하여 두께가 나노미터 단위로 극히 얇은 접합층(Adhesive layer)이 포함되지만 응력해석관점에서는 접합층의 영향이 크지 않으므로 본 논문에서는 이를 고려하지 않았다. 구형입자의 직경은 50 μm, 코팅층과 지지층의 최대두께는 모두 2 μm이며 입자에 작용하는 최대하중과 입자의 미끄럼 거리는 500 mN 과 100 μm이다. 해석에서 접촉하는 모든 영역에서 과도한 변형으로 인하여 수렴되지 않는 경우를 피하기 위하여 Time table[15]을 정의하였다.

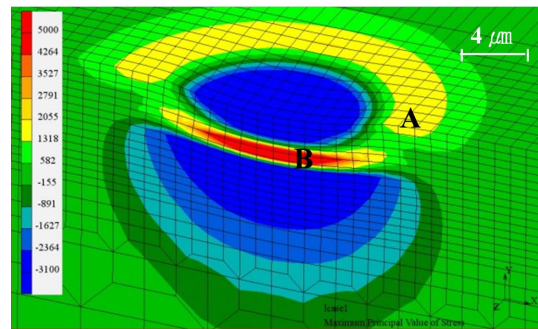
**3. 결과 및 고찰**

**3-1. 압입 해석**

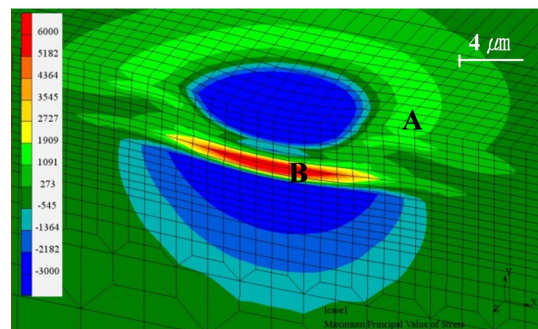
Fig. 2는 DLC 코팅층과 스틸면 사이에 경질의 지지층이 삽입된 경우에 이의 두께에 따른 최대응력의 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 DLC 코팅층의 두께는 2 μm이다. 입자와 코팅층의 접촉가장자리에는 인장응력이, 입자 아래의 코팅층 표면 및 모재층에서는 압축응력이 각각 발생하였다. 지지층 없이 DLC만으로 코팅한 경우에는 이의 탄성계수가 낮기 때문에 하중지 지능력이 매우 낮다. 따라서 입자의 압입에 의해서 코팅층이 쉽게 변형하며 코팅층 표면에서는 매우 높은 인장응력이 발생하였다(Fig. 2(a)). 반면에 경질의 지지층이 삽입된 경우에는 코팅층과 지지층의 물성차이로 인해서 지지층이 두꺼울 수록 코팅층 내부에서의 응력 불연속성은 증가하며, 지지층 내부와 지지층/모재의 경



(a) 0 μm



(b) 1 μm



(c) 2 μm

**Fig. 2. Maximum principal stress distribution with supporting layer thickness.**

계면에서는 높은 인장응력이 나타났다(Fig. 2(b), (c)).

Fig. 3은 최대응력이 발생하는 위치에서 지지층의

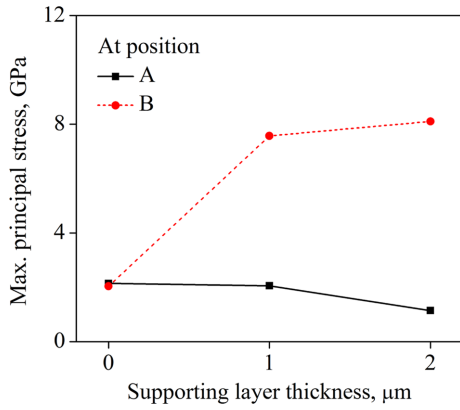


Fig. 3. Variation of maximum principal stress with supporting layer thickness.

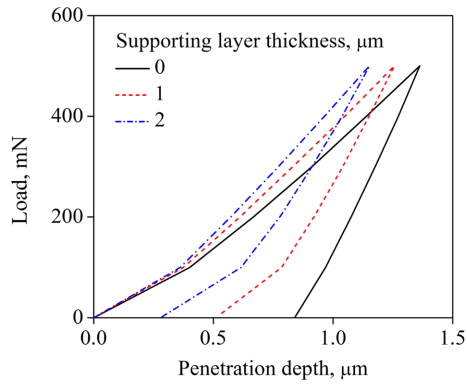
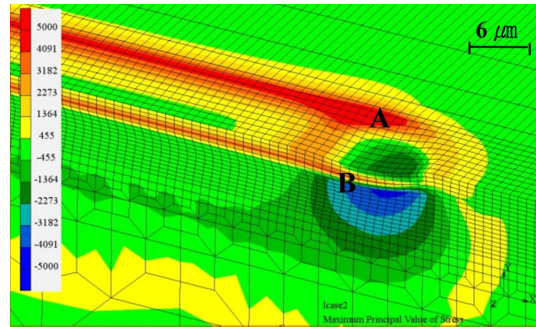


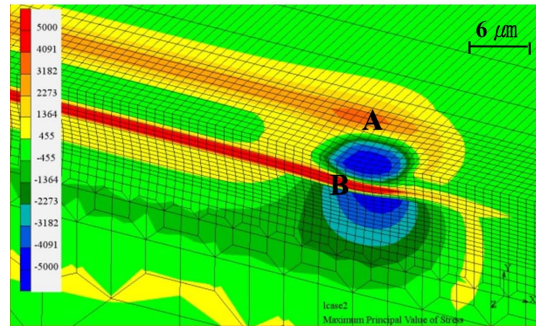
Fig. 4. Indentation curves with supporting layer thickness.

두께에 따른 최대주응력의 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 A와 B의 위치는 각각 입자와 코팅층 표면의 접촉가장자리와 지지층/모재의 경계면 주위이다(Fig. 2 참조). 지지층이 두꺼워질 수록 코팅층 표면의 접촉가장자리(A)에서 발생하는 인장응력은 2.1 GPa에서 1.8 GPa 정도로 소폭 감소하는 반면에 지지층/모재의 경계면 주위(B)에서의 내부응력은 2 GPa에서 8.2 GPa 정도로 크게 증가하였다.

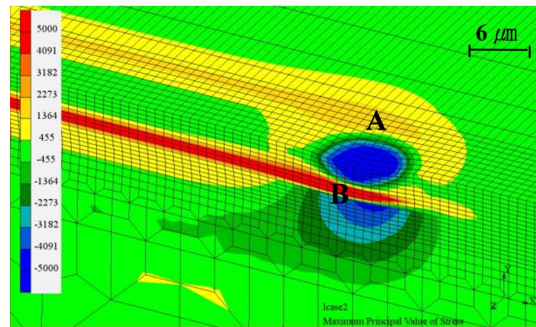
Fig. 4는 지지층의 두께에 따른 하중(Loading)-제하중(Unloading) 곡선을 나타낸 것으로 지지층의 두께가 증가할수록 최대 압입깊이와 모재층의 소성변형량은 크게 감소하였다. 따라서 지지층을 두껍게 하는 것이 표면에서의 소성변형을 줄임과 동시에 코팅층 표면에서의 균열발생확률도 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 반면에, 지지층 내부에서는 균열이 발생할 가능성이 증가할 뿐만 아니라 코팅층 내부에서의 응력불연속성으로



(a) 0  $\mu\text{m}$



(b) 1  $\mu\text{m}$



(c) 2  $\mu\text{m}$

Fig. 5. Maximum principal stress distribution with supporting layer thickness after 100  $\mu\text{m}$  sliding.

인해서 반복응력이 작용하는 경우에는 피로에 의해서 코팅층이 손상될 수 있을 것으로 예상된다[13].

3-2. 미끄럼 해석

Fig. 5~Fig. 7은 입자가 압입된 상태에서 100  $\mu\text{m}$ 미끄러진 경우에 대한 결과들이다. Fig. 5는 지지층의 두께에 따른 최대주응력의 분포를 나타낸 그림이다. 지지층이 없는 단일 DLC 코팅의 경우에는 코팅층의 낮은 하중지지능력으로 인해서 입자가 미끄러져 지나간

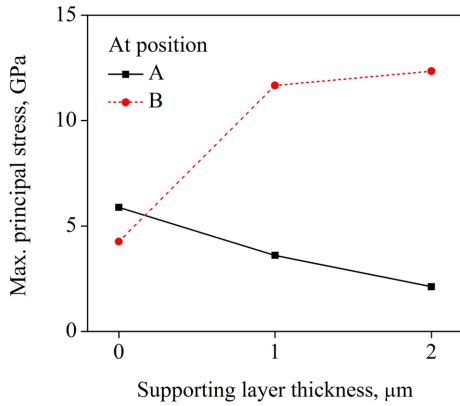


Fig. 6. Variation of maximum principal stress with supporting layer thickness after 100 μm sliding.

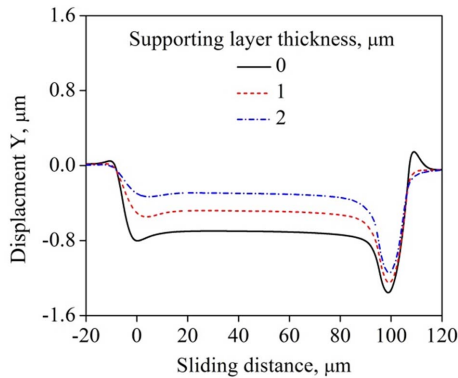


Fig. 7. Surface deformation depths with supporting layer thickness after 100 μm sliding.

자리에 그루브(Groove) 형상의 소성변형이 남으며, 그루브 가장자리에는 높은 인장응력이 발생하였다. 이와는 달리 지지층이 삽입된 경우에는 높은 인장응력이 지지층 내부와 지지층/모재의 경계면에서 발생하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 지지층의 두께에 따른 최대주응력과 모재층의 소성변형량을 각각 나타낸 결과이다. 여기서, 최대주응력이 발생하는 위치 A, B는 Fig. 2에서와 유사하게 각각 코팅층 표면의 그루브 가장자리와 지지층/모재의 경계면 주위이다. 지지층이 두꺼워질수록 코팅층의 하중지지능력이 증가하므로 코팅표면의 변형은 크게 감소하였다. 이로 인해서 코팅층 표면에서의 잔류인장응력은 지지층이 없는 경우의 6 GPa에서 2.5 GPa정도로 크게 감소하였다. 즉, 지지층이 두꺼울수록 코팅층 표면에서 균열이 발생할 가능성은 감소할 것으로 예상된다. 반면에 지지층이 두꺼울수록

경질의 지지층 내부 및 지지층/모재의 경계면에서 12.5 GPa정도의 높은 인장잔류응력이 나타났다. 따라서, 입자가 반복적으로 코팅면에서 미끄럼 접촉하는 경우에는 잔류응력에 의한 코팅층의 피로마멸(Fatigue wear) 또는 모재면과의 사이에서 박리현상(Delamination)에 의해서 코팅층에 손상이 발생할 것으로 추정된다[12].

#### 4. 결 론

본 논문에서는 입자에 의한 코팅면의 마멸기구를 정확하게 규명하여 최적의 코팅조건을 도출하기 위한 연구의 일환으로 강체의 구형입자와 지지층이 삽입된 DLC 코팅면에 대한 압입 및 미끄럼 접촉문제를 3차원 FEM으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. DLC 코팅층과 스틸면 사이에 삽입된 경질의 지지층이 두꺼울 수록 하중지지능력이 향상되어 스틸면의 소성변형과 코팅층 표면에서 발생하는 인장응력이 크게 감소하였다.
2. 코팅층 내부에서의 응력분포는 불연속적이며, 지지층/모재의 경계면 주위에서 높은 잔류인장응력이 발생하였다.
3. 지지층이 삽입된 DLC코팅에서는 입자에 의한 연삭마멸 보다 코팅층 내부의 균열에 의한 손상이나 박리현상, 반복된 응력작용에 따른 피로마멸의 영향으로 코팅층이 손상될 수 있음을 구체적으로 제시하였다.

따라서 본 논문에서 사용한 해석방법과 결과는 다양한 형태의 코팅에 대한 최적설계에도 사용될 수 있을 것으로 기대되며 추가적인 연구가 요구된다.

#### Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업[10042662]과 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0014650).

#### References

[1] Bhushan, B., Principles and Applications of Tribology, John Wiley & Sons, 1999.  
 [2] Komvopoulos, K., "Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Indented Layered Media", *Trans. ASME, J. Tribol.*, Vol. 111, 1989. (430-439)

- [3] Michler, J., 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, 2001. (119-134)
- [4] Ronkainen, H., Koskinen, J., Varjus, S., Holmberg, K., "Load-Carrying Capacity Evaluation of Coating/Substrate Systems for Hydrogen-Free and Hydrogenated Diamond-like Carbon Films", *Tribol. Lett.*, Vol. 6, 1999. (63-73)
- [5] Wei, C., 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", *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 20, 2011. (839-844)
- [6] Kim, D. W., Kim, K. W., "Friction Characteristics of DLC and WC/C", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 27, No. 6, 2011. (308-313)
- [7] Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., Koskinen, J., "Tribological Contact Analysis of a Rigid Ball Sliding on a Hard Coated Surface Part I: Modelling Stresses and Strains", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, 2006. (3793-3809)
- [8] Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., Koskinen, J., "Tribological Contact Analysis of a Rigid Ball Sliding on a Hard Coated Surface Part II: Material Deformations, Influence of Coating Thickness and Young's Modulus", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, 2006. (3810-3823)
- [9] Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., Koskinen, J., "Tribological Contact Analysis of a Rigid Ball Sliding on a Hard Coated Surface Part III: Fracture Toughness Calculation and Influence of Residual Stresses", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, 2006. (3824-3844)
- [10] Holmberg, K., Ronkainen, H., Laukkanen, A., Wallin, K., Erdemir, A., Eryilmaz, O., "Tribological Analysis of TiN and DLC Coated Contacts by 3D FEM Modelling and Stress Simulation", *Wear*, Vol. 264, No. 9-10, 2008. (887-884)
- [11] Kot, M., Rakowski, W., Lackner, J. M., Major, L., "Analysis of Spherical Indentations of Coating-substrate Systems: Experiments and Finite Element Modeling", *Mater. Des.*, Vol. 43, 2013. (99-111)
- [12] Kot, M., Major, L., Lackner, J., "The Tribological Phenomena of a New Type of TiN/a-C:H Multilayer Coatings", *Mater. Des.*, Vol. 51, 2013. (280-286)
- [13] Park, T. J., Lee, J. H., "Sliding Contact Analysis of Spherical Particle between Rubber Seal and Coated Steel Counterface", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 6, 2012. (283-288)
- [14] Lee, J. H., Park, T. J. "A Study on Wear Mechanism in Diamond-like Carbon Coated Surface by Finite Element Analysis", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 6, 2013. (366-371)
- [15] MSC, "MSC. MARC/MENTAT 2012r1 User's Guide", A-E, 2012.