

## 티타늄 박막을 증착시킨 알루미늄의 마모 특성에 관한 연구

### Tribological Properties of Aluminum Alloy with Titanium Thin Film

임성훈<sup>1</sup>, 김현지<sup>2</sup>, 김도현<sup>3</sup>, 허선철<sup>4\*</sup>

Sung-Hoon Im<sup>1</sup>, Hyun-Ji Kim<sup>2</sup>, Do-Hyeon Kim<sup>3</sup>, Sun-Chul Huh<sup>4\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Aluminium alloys have excellent strength and fatigue characteristics and are widely used as substitutes for steel in the aviation and ship automobile industries. Parts of the Al 7075 alloy used in the industry are subject to constant friction, damage and destruction at the contact surface between component and component. As a result, the need for functional materials suitable for specific applications is increasing. Surface coating technology is widely used to increase abrasion resistance and protect the material inside from the external environment. In this study, the abrasion resistance characteristics are considered when the DC magnetron sputtering power of the thin film is applied and the pressure is changed during the actual thin film deposition after argon is injected and plasma is formed. After that, the thickness of the thin film for each condition was measured, and the hardness was measured when the titanium thin film was formed. Then, the wear track was checked through the scanning electron microscope and the amount of wear was calculated. We have confirmed that abrasion resistance of Ti thin film decreases as deposition time increases and decreases when power is increased.

*Keywords : Wear property, DC magnetron sputtering, Deposition condition, Ti thin film*

- 
- |   |  |
|---|--|
| 1 임성훈, 한국폴리텍VII대학 컴퓨터응용기계과, 교수<br>E-mail: malgu21c@kopo.ac.kr | 1 Dept. of Computer Aided Machinery, Korea Polytechnic VII.                                      |
| 2 김현지, 순천제일대학교 제철산업과, 교수<br>E-mail: hjkimech@naver.com        | 2 Dept. of Steel Industry, Suncheon Jeil College.  |
| 3 김도현, 경상대학교 에너지기계공학과, 석사과정<br>E-mail: dhkim@gnu.ac.kr        | 3 Dept. of Energy and Mechanical Engineering, Graduate School of Gyeongsang National University. |
| 4* 허선철, 경상대학교 에너지기계공학과, 교수<br>E-mail: schuh@gnu.ac.kr         | 4* Dept. of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.                   |

## 1. 서론

최근 항공, 자동차 산업에서는 알루미늄, 티타늄, 마그네슘과 같은 금속에 대한 관심이 증가하고 있다. 알루미늄 합금은 높은 열전도성, 가공성, 비자기성을 특징으로 우주·항공용 소재, 자동차 새시, 휠, 브레이크 등에서 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 그 수요 또한 해마다 급격하게 증가하고 있다.[1,2]

하지만 상대적으로 낮은 경도와 강도를 가지는 알루미늄은 쉽게 마모되며, 내마모성, 내식성이 떨어져 부품의 성능이 저하되는 문제점이 있다. 접촉 운동을 하는 재료표면의 내마모성을 향상시키기 위한 방법 중 높은 강도, 내식성 또한 우수한 기계적 물성을 지니고 있는 티타늄 박막을 이용한 표면 코팅 기술은 내마모성 증가와 외부 환경으로부터 내부의 재료를 보호하기 위해 널리 사용되고 있다.[3-5]

표면 코팅의 대표적 기술로는 습식 도금, 물리적 증착, 화학적 증착, 원자층 증착 등이 있다.[6] 스퍼터링은 물리적 증착 방법의 하나로 진공에서 플라즈마를 이용하여 타겟 물질을 원하는 표면으로 이동시켜 코팅하는 방법이다.[7]

현재 각광을 받고 있는 티타늄 코팅의 특성과 내마모의 장점을 가지고 있는 티타늄 코팅재라도 상대 재료와의 극심한 마찰과 가혹한 작업환경 조건의 영향으로 마찰, 마모에 의한 문제가 수반된다. 따라서 티타늄 코팅이 기계부품의 마찰마모 특성에 미치는 영향에 관한 연구가 요구되고 있다.[8-10]

나노 스케일의 박막은 벌크한 재료가 갖는 특성과는 차이가 있으며, 이러한 박막의 특성은 기관에 도달한 흡착원자의 핵 성장으로부터 시작된다. 박막 특성은 기관, 증착장비와 공정변수에 따라 다른 성장 거동을 보이고, 벌크한 재료의 특성

과 구분되는 성질을 갖게 되며, 수 나노 스케일 안에서는 미세한 특성 변화를 보인다. 이러한 특성 변화는 박막 증착 장비의 공정변수에 따라 미세구조와 표면 상태의 변화에 의해 결정되어지고, 이는 박막 재료의 기계 특성에 영향을 주게 된다.[11-13]

본 연구에서는 Al7075 소재에 DC 마그네트론 스퍼터링 공정으로 티타늄 박막을 증착하고, 인가 전력과 증착 압력을 변수로 했을 때 미세구조 특성 및 박막의 증착 형상을 확인하고 마모특성을 고찰하고자 한다.

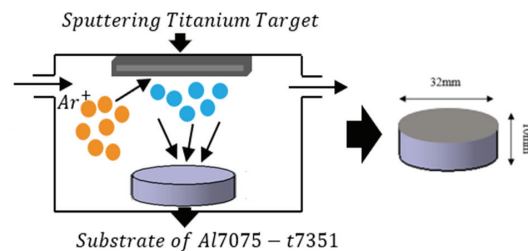


Fig. 1 Schematic of the DC magnetron sputtering process

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 시험편

실험에 사용된 시험편 Al7075-T7351 소재는 직경 32 mm 두께 10 mm의 디스크형으로 제작하였다. 마모 시험의 경우 표면 거칠기의 영향을 많이 받는 특성상 정밀 측정하기 위해 수직 수평 레벨기를 통해 수평을 유지하며 연마를 진행하였다. #800 연마지로 폴리싱 후 에틸알코올로 10분간 상온에서 초음파 세척하여 연마 작업 후의 잔여 불순물을 제거하였다. 가공된 재료의 표면 조도값

을 파악하기 위해 표면 조도측정기를 통하여 10회 측정하여 평균값을 낸 결과 0.35 $\mu$ m의 거칠기를 나타내었다.

## 2.2 DC Magnetron Sputtering

티타늄 박막의 증착에 사용된 마그네트론 스퍼터링 장치의 공정 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 스퍼터링 장치는 진공 챔버, 타겟 지지대, DC 전원 공급장치, 모재 지지대, 가스 주입장치로 구성되어 있다. 스퍼터링시 반응가스인 아르곤가스는 MFC(Mass Flow Controller)를 통해 챔버 내 불순물을 최대한 제거하기 위하여 초기진공도를 5.0 $\times 10^{-6}$  Torr로 설정, 기타 증착 조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Deposition conditions of Ti thin film

Deposition Method	DC magnetron sputtering
Target material	Titanium
Base pressure [Torr]	5.0 $\times 10^{-6}$
Working pressure [Torr]	2.0 $\times 10^{-3}$ , 3.0 $\times 10^{-3}$
Pressure gas	Ar
Power [W]	100, 200, 300
Deposition time [min]	30

챔버 내에 아르곤 가스와 같은 불활성기체를 넣고 고진공상태로 만든 후 음극에 전압을 가하면 방출된 전자들이 아르곤 기체와 충돌하여 아르곤이 이온화 되면서 전자를 방출하고 방출된 에너지로 인해 방전이 발생하여 플라즈마가 활성화된다. 이때 기체 원자의 운동에너지가 발생하여 반응성 및 치밀도가 증가하게 된다.

플라즈마 내의 아르곤이온은 큰 전위차에 의해 타겟의 표면과 충돌하고 중성의 타겟 원자들이 튀어나와 기판에 박막을 형성하기 때문에 정밀한 불

활성 아르곤 가스의 제어를 위하여 MFC를 이용하였다.

따라서 내마모성 향상을 위한 티타늄 박막의 최적 조건을 찾기 위해 증착시간을 30min으로 고정, 플라즈마 인가전력과 작업압력을 변수로 티타늄 박막 스퍼터링 실험을 진행하였다.

Table 2. Deposition conditions by different process

Applied power	100 [W]	200 [W]	300 [W]
2.0 $\times 10^{-3}$ [Torr]	A1	A2	A3
3.0 $\times 10^{-3}$ [Torr]	B1	B2	B3

## 2.3 마모 시험

마모시험은 PD-102형 마모시험기를 이용하여, 회전 원판식 디스크시험편을 회전시키는 동시에 위에서 압력을 가하는 건식 수직형 마모시험 방식으로 진행하였다.

시험에 사용된 상대재는 직경이 12.7mm, 경도가 1400Hv인 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>) 볼을 사용하였고, 시료 표면에 볼을 접촉 회전시키는 Ball-on disk type으로 실험을 진행하였다. 실험조건은 Table 3과 같이 회전속도 60 RPM, 실험 시간 30분, 수직하중 2N으로 설정하여 동일한 조건에서 수행하였다. 마멸량을 측정하기 위하여 전자저울을 사용하여 마모시험 전, 후 각 10회 측정한 시편의 평균 무게를 기준으로 마멸량을 측정하고, SEM (Scanning Electron Microscope)을 이용해 마모 트랙을 관찰하였다.

마모시험 후 티타늄 박막 관찰을 위해 집속 이온빔 방식의 전자주사현미경 FIB-SEM (Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope)으로 표면 및 박막층 관찰을 수행하였다. FIB-SEM의 경우, SEM 내부에서 이온빔으로 시편을 가공하여

단면의 형상과 분포를 관찰 할 수 있다. FIB가공 시 티타늄 박막의 표면이 손상되는 것을 방지하기 위해 백금(Pt)코팅을 티타늄 시편 표면에 1회 실시하고, FIB 가공 후 시편의 티타늄 박막의 단면을 관찰하였다.

Table 3. Wear test conditions of Ti thin film

Materials [mm]	ZrO <sub>2</sub>
Diameter [mm]	12.7
Sliding speed [RPM]	60
Time [sec]	1800
Load [N]	2

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 티타늄 박막층 관찰

Fig. 2는 FIB-SEM으로 측정한 티타늄 박막의 두께 단면 형상 이미지이다. 가장 어둡게 나타난 아랫부분은 알루미늄 합금층이며, 티타늄 박막이 Pt 코팅층과 알루미늄 합금층 사이에 존재함을 확인

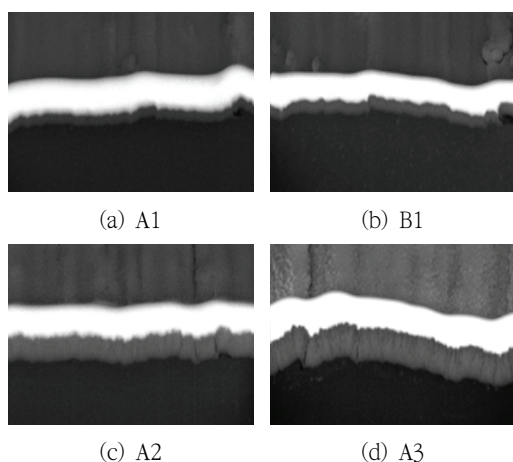


Fig. 2 FIB-SEM photograph of Ti thin film thickness

할 수 있다.

Fig. 2(a), (c), (d)를 통해 인가전력이 높아질수록 박막의 두께가 두꺼워짐을 확인하였다. 또한 Fig. 2(a)와 (b)를 비교하였을 때 동일한 인가전력 조건에서도 2Torr와 3Torr로 작업 압력을 높이면 박막 두께가 미세하게 두꺼워짐을 확인할 수 있다. 이는 인가전력과 작업압력의 변화가 티타늄 박막의 질을 결정하는데 중요한 역할을 수행함을 의미한다.

Fig. 3은 FIB 가공 후 B3시편의 티타늄 박막 단면을 EDS mapping을 통해 분석한 이미지이다. (a)는 조성분석 전 단면 이미지이고, EDS Mapping 분석을 통해 (b)는 티타늄 층, (c)는 Al층, (d)는 Pt층으로 성분이 분리되어 도포되는 것을 알 수 있다. 이때 PT층(Post Tension)은 이온빔으로 내부 가공 시 관찰하는 표면손상을 방지하기 위해 입힌 백금 코팅막 성분이 검출된 것이다. 성분분석 결과를 통해 알루미늄 합금 표면에 티타늄 박막이 균일하게 형성되어 있음을 확인하였다.

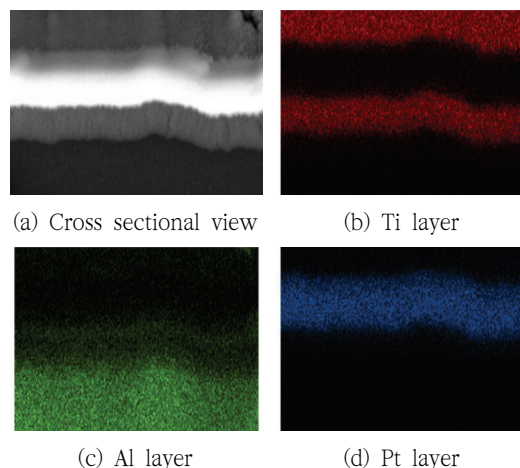


Fig. 3 Photograph of B3 specimen EDS image

### 3.2 Ti 박막의 표면 관찰

Fig. 4는 티타늄 박막의 미세구조 SEM 촬영 이미지이다. Fig. 4(a)와 (c)를 비교하면 인가전력이 증가할수록 티타늄 결정립의 크기가 커지고 미세구조가 거칠어지는 형상을 보였다. 또한 Fig. 4(c)와 (d)를 비교하면 작업압력이 높아질수록 박막층이 거칠고 입자 크기가 다양하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

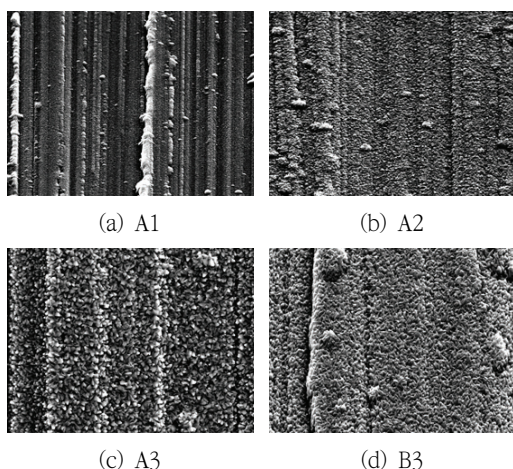


Fig. 4 SEM photographs of Ti thin films at each sputtering process (×20000)

Table 4. Experiment results of each specimen

Type	Thin film Thickness [um]	wear loss [mg]	wear track [mm]	Friction Coefficient
A 1	0.49	1.60	1.17	0.309
A 2	1.15	1.20	1.19	0.306
A 3	1.51	3.47	1.24	0.349
B 1	0.58	1.63	1.15	0.277
B 2	1.12	1.93	1.14	0.297
B 3	1.61	2.73	1.27	0.328
Base	-	0.807	1.30	0.340

### 3.3 마멸량 및 마모트랙 폭 측정 결과

티타늄 박막 조건별 실험 결과 및 모재의 실험 결과들을 Table 4에 정리하여 나타내었다. 마멸량 측정결과, 티타늄 코팅한 시편의 마멸량이 많고, 특히 티타늄 박막 두께가 두꺼울수록 마멸량도 많아졌다. AI의 마모 특성상 전반적으로 응착 마모의 형태를 띄게 되므로, 실제 마모가 일어난 후 표면에 응착된 마멸량까지 정확하게 측정할 수는 없다.

또한 AI은 원자번호 13번, 티타늄은 원자번호 22번으로, AI에 비해 상대적으로 무거운 티타늄이 증착되고 탈락될수록 무게 편차가 많이 발생하기 때문에 나타난 결과라 생각된다. 이는 티타늄 박막 두께가 가장 두꺼운 A3, B3시편의 마멸량이 가장 많은 것을 통해 짐작할 수 있다.

마모트랙의 폭은 시편을 4등분한 각 지점마다 트랙의 폭을 측정하고 평균으로 나타내었다. 그 결과, 인가전력이 증가할수록 폭도 점차 증가함을 알 수 있다. 티타늄 박막을 코팅한 시편 모두가 모재보다 트랙의 폭이 좁게 형성됨을 확인할 수 있으며, 이는 티타늄 박막 코팅을 통해 표면에서의 내마모성이 향상됨을 의미한다.

### 3.4 마찰계수 측정 결과

마모시험을 진행한 30분 동안 측정된 마찰계수를 평균하여 Table 5에 정리하였다. 모재의 마찰계수가 약 0.34로 나타났으며, 인가전력이 300W 인 A3, B3 시편을 제외한 모든 시편의 마찰계수가 모재보다 낮게 나타났다. 인가전력이 낮을 경우, 박막의 두께가 얇아 AI과 증착이 잘 이루어져서 마모시험 시 쉽게 탈락되지 않으나 두께가 두꺼워질수록 각 소재의 무게 차이로 인해 결합력이

떨어지기 때문이라 생각된다.

또한 작동압력이 2Torr에서 3Torr로 높아짐에 따라 마찰계수가 낮아지는 결과가 도출된다. 이는 작동압력이 높아짐에 따라 전자 이동속도가 증가하여 동일 두께로 증착이 이루어지면서도 티타늄 기판이 더욱 단단하게 형성된다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 마모시험을 진행한 30분간 측정된 마찰계수를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 실제 실험 데이터에서 노이즈를 제거하고 1차방정식으로 풀어낸 그래프로써 기울기 차이와 데이터의 증감을 토대로 분석할 수 있다.

Table 4를 토대로 가장 결과가 좋은 시편(B1)과 결과가 좋지 않은 시편(A3)을 선정하고 모재와 비교하였다. 모재는 시간에 따라 마찰계수가 증가하는 경향을 보이나, B1 시편은 시간에 따라 큰 변화 없이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 마찰계수가 가장 낮아 내마모성이 가장 좋음을 알 수 있다.

### 3.5 마모트랙 관찰 결과

Fig. 6은 마모 실험 후 티타늄 박막 표면에 형성된 마모 트랙의 SEM 분석 결과이다. (a) B1의 시편의 마모트랙 폭은 1.15mm로 트랙의 폭이 비교적 좁게 형성되어있으며, (b) 모재 시편의 마모트랙 폭은 1.3mm로 측정되었다.

트랙이 좁게 형성된 (a) B1시편의 경우 응착마모와 표면 피로 마모의 형태를 모두 나타내며, (b) 모재의 경우 응착마모와 절삭마모의 형태를 보인다. 응착마모는 마모 발생 시 연한 소재가 파편으로 떨어져 나와 응착된 형태를 말하며, 표면 피로 마모는 반복적인 상대운동 시 표면과 표면아래에 크랙을 형성하고 있다. 또한 절삭마모는 연한 표면이 마모로 인해 절삭되어 트랙 형상으로 표면층이 제거된 형태이다.

이러한 결과를 바탕으로 #800으로 가공한 경우, 티타늄 박막 두께가 얇은 B1시편이 마찰계수와 마멸량이 작고 마모트랙의 폭이 좁게 형성됨에 따라 내마모성이 가장 우수하다고 판단된다.

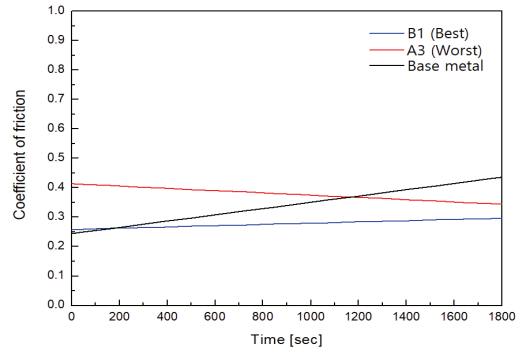


Fig. 5 Graph of friction coefficient for best case and worst case

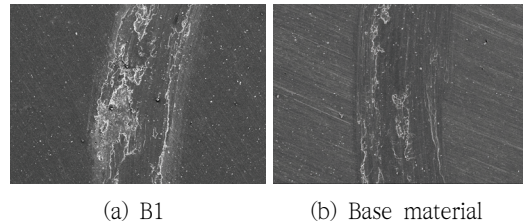


Fig. 6 SEM photographs of wear track (x30)

## 4. 결론

본 연구에서는 Al7075-T7351 알루미늄 소재에 #800 조건으로 연마 후 DC 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 티타늄 박막을 코팅하고 마모특성을 관찰하였다.

- 1) 티타늄 박막 관찰 결과, 각 조건마다 박막이 잘 증착됨을 확인하였다. 또한 작동압력과

인가전력이 높아질수록 박막의 두께가 두꺼워짐을 알 수 있었다.

- 2) 마멸량은 Al 소재 특성상 응착 마모 형상을 가지므로 정확하게 측정할 수 없다. 또한 티타늄이 Al보다 무겁기 때문에 티타늄 박막이 두꺼울수록 마멸량도 많은 것으로 나타났다.
- 3) 작동압력이 높아짐에 따라 마찰계수가 낮아지는 결과가 도출된다. 이는 작동압력이 높아짐에 따라 전자 이동속도가 증가하여 동일 두께로 증착이 이루어지면서도 티타늄 기판이 더욱 단단하게 형성된다는 것을 의미한다.
- 4) 티타늄 박막 증착 시, 모재보다 마찰계수가 낮아지는 경향을 확인하였다. 전체 시험조건 중 가장 내마모성이 향상된 시편은 인가전력 100W에서 작동압력  $3.0 \times 10^{-3}$  Torr 조건으로 박막을 증착한 B1 시편으로 나타났다.

위 결과를 바탕으로 티타늄 박막을 증착한 Al 합금 소재의 내마모성 향상 가능성을 확인하였으며, 향후 증착시간 및 다양한 실험조건을 추가하여 티타늄 박막 증착조건을 최적화 하는데 활용할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No.2018R1A5A5A05022883) 연구지원비에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] S. M. Moon, "Anodic Oxidation Treatment Methods of Metals," Journal of the Korean Institute of Surface Engineering, vol. 51, no. 1, pp. 1-10, (2018).
- [2] C. H. Hyun, "A Study on the Improvement in Corrosion Resistance of High Strength Brass Alloy Propeller for Small Ship," Ph.D thesis, Cheju National University, (2005).
- [3] J. S. Kim, "Tendency of PVD Coating Technology on Metal Cutting Tools," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 18, no. 8, pp. 11-17, (2001).
- [4] J. Y. Lee, D. J. Oh, H. J. Kim and C. H. Chung, "Mechanical Properties of TiN Coated Tilm with Various Coating Thickness on Titanium Alloy," The Journal of Korean Academy of Prosthodontics, vol. 45, no. 5, pp. 675-686, (2007).
- [5] H. S. Yu and H. B. Park, "Study on the Improvement of Wear Properties of Automobile Elements in Titanium Alloy Coated," The Journal of Advanced Navigation Technology vol. 17, no. 5, pp. 574-580, (2013).
- [6] H. S. Sang, "Ceramics Coating," Journal of Korean Society of Industrial Application, vol. 1. no. 2, pp. 3-10, (1998).
- [7] Y. J. Kang, J. H. Back, H. Park and Y. R. Cho, "Measurement of Intrinsic Hardness of Deposited Chromium Thin Films by Nanoindentation Method and Influencing Factors," Korean Journal of Metals and Materials, vol 58, no. 3, pp. 207-215, (2020).
- [8] 송민아, 양지훈, 박혜선, 정재훈, 정재인 : 경사 코팅법으로 제조된 TiN 다층 박막의 특성, 한국진공학회 학술발표회초록집, vol. 41, pp. 270, (2011).
- [9] S. Y. Chun, "A Comparative Study of Super Hard TiN Coatings Deposited by DC and Inductively Coupled Pplasma Magnetron Sputtering," Journal of the Korean Institute of

- Surface Engineering, vol. 46, no. 2, pp. 55-60, (2013).
- [10] J. H. Jang, S. H. Tak, Q. Zhang, Z. Xu and S. K. Lyu, "Effect of the Ti-series Coating on the Friction and Wear Characteristics of SCM415 Steel," Tribology and Lubricants, vol. 26, no. 3, pp. 162-166, (2010).
- [11] S. M. Oh, "Tribological Characteristics of TiC, TiN Coating for PVD Method with Automotive Structural Materials," Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society, vol. 8, no. 3, pp. 432-436, (2007).
- [12] J. H. Jang, Z. Xu, H. J. Kim, N. K. Kim and S. K. Lyu, "A Study on the Coating Characteristics of SCM415 Steel," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 10, no. 2, pp. 117-123, (2011).
- [13] S. G. Son, "Nano Coatig Technology," Fiber Technology and Industry, vol. 13, no. 3, pp. 166-179, (2009).
- 
- (접수: 2021.03.08. 수정: 2021.03.28. 게재확정: 2021.04.02.)