

티타늄합금 코팅된 자동차 부품의 마모특성 향상에 관한 연구

Study on the Improvement of wear properties of Automobile elements in Titanium alloy Coated

유환신*, 박형배**

Hwan-Shin Yu*, Hyung-Bae Park**

요 약

본 논문에서는 박막코팅기술의 공정은 고경도 박막과 질화층의 접합력을 높이기 위하여 적용하였다. 이 박막코팅기술은 프레스 금형에 사용되는 경도와 인성을 얻을 수 있는 복합 박막을 형성했다. 이러한 박막 코팅 생산 기술은 물리증착방법을 이용하여 진공 챔버의 진공도를 증가하고, 건파워의 투사율을 향상시켰다. 티타늄 합금 타겟은 각종 정밀가공 부품에 복합박막코팅기술 개발을 통하여 성능과 표면재질을 개선하였다.

Abstract

In this paper, The process of thin-film coating technology was applied to improve adhesion of the hardness thin film and nitride layer. This thin-film coating technology have formed composite thin-film to gain hardness and toughness used in press mold. The thin-film coating manufacturing technology increased vacuum present in the vacuum chamber and improved the throw ratio of the gun power using physical vapor deposition coating technology. Ti alloys target improved performance and surface material through the development of a composite film coating technology for various precision machining parts.

Key words : Thin-Film Coating Technology, Evaporation, Physical Vapor Deposition Coating Technology, Vacuum Arc Deposition

I. 서 론

박막제조 기술은 과학기술의 기반이 되는 기술이며 소재의 성능을 향상시키거나 소재에 부가적인 기능을 부여하는 표면처리 기술로서 소재의 표면에 다른 물질을 코팅하는 것을 의미하며 표면재질은 질화나 이온빔 조사 등을 통해 소재의 표면을 변화시켜 성능을 향상시키는 기술로서 박막제조 기술은 물리증착(Physical Vapor Deposition : PVD)와 화학증착

(Chemical Vapor Deposition : CVD)로 나누어 진공증착을 하는 기술로서 본 연구에서는 PVD 기술을 적용할 것[1]이다.

자동차 제작사 현대, 기아 GM 등 회사들의 고연비 실현을 위하여 차량의 경량화 추세에 일환으로 사용되는 강판을 590 Mpa급 이상의 고장력 강판 적용으로 금형의 교체 및 수선 주기가 단축되어 생산성저하 및 관리 비용이 증대되고 있는 추세로 전체적인 생산 비용이 증가되고 있다, 이런 문제점을 개선하기 위해

* 호원대학교 자동차기계공학과(Howon University)

** 경기과학기술대학교 자동차과(Gyeonggi college of science and technology)

· 제1저자(First Author): 유환신(Hwan-Shin Yu, Tel : +82-10-2394-5088, email : hsyu@howon.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 9월 12일 · 심사(수정)일자 : 2013년 9월 12일 (수정일자 : 2013년 10월 26일) · 게재일자 : 2013년 10월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.5.574>

여 금형재료의 개발과 PVD 장비를 이용한 고경도 박막층의 개발 중요성이 한층 대두되고 있는 실정[1]이다.

또한 절삭공구, 앤드밀, 화이트, 드릴공구 등 공구들의 수명향상을 위하여 그 공구의 사용 환경에 적합한 코팅 막 개발로 가공품의 정밀성 및 생산성 증대를 가져올 수 있는 방안으로 다원계 코팅 막질 개발이 필요하고, 기계 부품 중 스크류 볼 등 특수용도에 따라 내식성이 중요시되는 기계부품의 표면에 부식에 강한 금속을 플라즈마 증착 기술을 이용하여 수명향상 및 용도에 적합한 부품개발을 할 수 있다.

국내의 연구 동향으로는 진공아크 증착법과 다른 공정에 의해 증착된 MgO 박막에 대한 특성연구[2]와 아크로 증착된 TiN 박막의 특성연구[3], 그리고 거울형 자계 구조를 갖는 진공여과 아크증착법을 이용한 다이아몬드상 탄소 방박의 증착 및 물성분석 연구가 수행되고 있다[4].

본 연구에서는 박막코팅 기술의 하나인 PVD 기술을 적용하여 자동차 부품의 마모특성 향상에 대한 연구를 수행하였다.

II. 박막코팅 제조 기술 이론

2-1 고진공 압력으로 구성된 챔버 설계[5]

잔류 가스의 밀도가 매우 낮아서 영향이 매우 미미한 진공영역으로 보통 10⁻⁴~10⁻⁷mbar (7.5x10⁻⁷~7.5x10⁻³ torr) 정도의 진공영역을 말한다. 즉, 박막 진공증착 공정에서 고진공을 요구하는 중요한 물리적 개념은 재료 가스 분자의 “평균자유행로(Mean free path = MFP)”가 진공챔버의 크기보다 더 큰 조건을 만족해야 하기 때문에 MFP의 근사적인 값은 아래와 같다.

$$\text{평균 자유 행로 (MFP)} \approx \frac{0.0066}{p(\text{mbar})} (\text{cm}) \quad (1)$$

실제 고진공 영역의 챔버가 만들어지면 가스역학 이론에 의하여 거시적인 가스압력은 질량이 m(kg)인

분자의 평균제곱속도와 그 가스질량밀도의 곱에 의하여 다음 관계식으로 정의된다.

$$p = \frac{1}{3} \rho \langle V^2 \rangle \quad (\text{Pa}) \quad (2)$$

여기에서 가스분자의 질량밀도(ρ)는 가스수의 밀도(n)과 분자 질량(m)의 곱으로 정의된다.

$$p = \frac{1}{3} nm \langle V^2 \rangle \quad (\text{Pa}) \quad (3)$$

또한 서로 작용하는 힘이나 외부적인 위치에너지에 의한 영향이 없기 때문에 평균운동에너지는 $E = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$ 이고, 열역학적 에너지는 $E = \frac{3}{2} k T$ 이므로 평균제곱속도는 다음과 같다.

$$\langle v^2 \rangle = \frac{3kT}{m} (\text{m}^2/\text{s}^2) \quad (4)$$

여기에서 볼츠만 상수(Boltzman constant, 1.38x10²³ Joule/K)이고, T는 절대온도이다. 실제적으로 식(3)과 식(4)에 의하여 다음과 같은 압력을 얻을 수 있다.

$$p = nkT(\text{Pa}) \quad (5)$$

챔버 내의 절대압력은 가스분자의 밀도와 절대온도에 비례함을 알 수 있고, 실제적으로 온도의 상승은 챔버 압력에 영향을 주는 요소이다.

2-2 평균자유행로 및 투사율[5]

챔버 내 가스분자는 운동속도가 맥스웰분포함수를 만족하고, 평균충돌시간(Collision time, τ)는 평균 충돌 시간동안에 가스들이 운동하는 거리인 평균자유행로(λ)와 평균분자속도의 함수로 나타난다.

$$\tau = \frac{\lambda}{\langle v \rangle} \text{ (s)} \tag{6}$$

식(6)에서 평균분자속도는 맥스웰 속도분포함수를 고려한 운동역학이론에 의하여 다음과 같이 유도된다.

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8\pi T}{p m}} \text{ (m/s)} \tag{7}$$

여기서 식(5)와 식(7)에 의하여 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} p \pi (2r)^2} \text{ (m)} \tag{8}$$

식(8)이 평균자유행로와 압력의 곱으로 표현되면 일정한 값을 나타낼 것으로 예견할 수 있다. 그리고 그림1과 같이 입자의 분포확률은 단위시간당 충돌하는 분자의 수를 투사율(impingement rate or flux, J)라 정의하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{n \langle v \rangle}{4} = \frac{p}{\sqrt{2\pi m k T}} \text{ (분자수/m}^2\text{s)} \tag{9}$$

2-3 충돌 시 이온에너지와 스퍼터링율[6]

이온이 타겟에 충돌하여 타겟 표면 원자들을 떼어내는 장면으로 “하나의 양이온이 음극에 충돌할 때 표면에서 방출되는 원자의 수”에 의하여 스퍼터링율이 결정되는데 이온 하나당 타겟 원자 또는 타겟 분자를 몇 개나 떼어내는가를 말하며, 그림 2와 같이 나타난다.

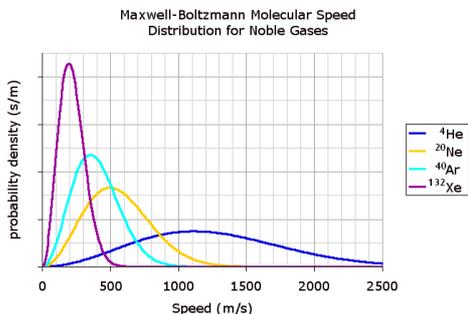


그림 1. 맥스웰분수함수에 따른 입자의 분포확률
Fig. 1. Probability density of Maxwell Molecular function

본 연구에서는 이온하나가 타겟표면의 원자를 몇 개를 떼어내는가가 중요하는데 이것은 충돌시에 나타나는 이온에너지와 스퍼터링율로서 그림3과 같이 표현할 수 있다.

실제 스퍼터링율(Sputtering Yield)에 영향을 주는 요인은 스퍼터링 시의 가속전압(V), 입사되는 이온의 종류, 입사각도, 타겟 재료의 종류, 타겟 재료의 결정구조가 있는데 이중에서도 가장 큰 영향을 주는것은 가속전압(V)이다.

이온이 타겟에 충돌하는 에너지는 음극 전압강하에서 나온다는 것을 착안하여 충돌 에너지를 최대로 증가하기 위하여 PVD 설비내부의 건과위를 최대한 고압으로 형성하도록 설계할 것이다.

III. 물리증착방법의 시스템 설계

3-1 물리증착방법(PVD)[7]

물리증착방법은 증발한 원자나 분자가 온도가 낮은 면에 응착하는 것으로서 응착이라 하여도 액체가 아닌 고체가 되는 경우로 한정한다. 증착작용은 크게 증발, 플라즈마, 스퍼터 작용, 활성가스도입으로 나눈다. 본 연구에서는 증발방식으로 진공증착방법인 물리증착방법(PVD)을 적용하였다.

진공증착은 III-V족 물질 합성과 연구를 위해 널리 사용되고 있지만, 스텝커버리지(Step Coverage)라고 불리는 기술적 문제점과 스퍼터링은 넓은 면적의 소스로 부터의 증착 때문에 웨이퍼에 증착된 막의 균열성이 있으므로 잘 사용되지 않으나 본 연구에서는 산업현장의 요구에 의해 자동차 부품에 대한 금형의 코팅을 위하여 도입하는데 목적을 두고서 개발하였다.

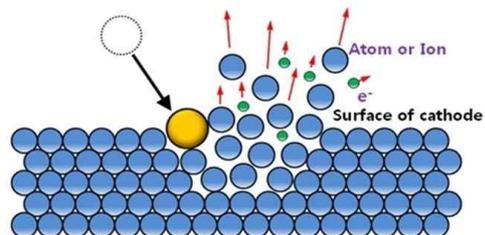


그림 2. 스퍼터 현상
Fig. 2. Sputter phenomena

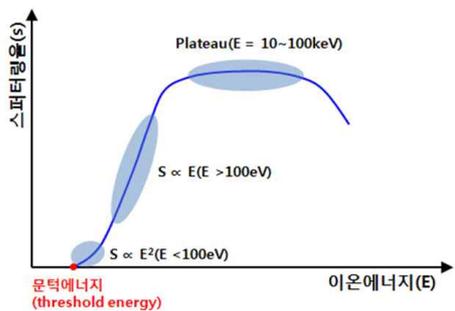


그림 3. 충돌 시 이온에너지와 스퍼터링의 관계도
 Fig. 3. The relationship of ion energy and sputtering in collision.

3-2 진공 챔버 구성

본 연구에서 고진공 챔버는 타겟의 분말을 분사하는 과정의 가장 주요한 환경중의 하나이다. 그러므로 그림 4와 같이 고진공 펌프를 이용하여 기존의 진공도 보다 20%의 진공도를 높여서 챔버 내부의 환경을 구성하였다.

3-3 플라즈마 방전 과정

전기적인 방전으로 인해 생기는 전하를 띤 양이온과 전자들의 집단을 플라즈마라고 하는데 즉, 제4의 물질상태를 유지하여 물질 중 가장 낮은 에너지 상태의 고체를 유지하게 한다. 그리고 열을 받아서 차츰 액체로 되고 그 다음에 기체로 전이를 일으켜서 기체에 더 큰 에너지를 받으면 이온화된 입자들이 전기적인 중성을 띄는 플라즈마 상태로 변환하면 이때에 챔버 내부로 공급한다.

3-4 아크박막 증착 방법[8]

건과위에 의해 생성된 고전기에너지를 이용하여 플라즈마를 형성하고 증발원(Target) 표면에 아크를 이용하여 금속 물질을 증발시킨 후 바이어스 전압을 가해 가속시켜 제품의 표면에 증착시키는 방법으로 성막속도가 빠르고 에너지가 가장 커서 밀착력이 우수하게 공정을 개선하였다.

수 마이크론의 직경으로 형성된 아크에 의하여 금속 코팅 재료가 증발되는 것으로 그림 6의 개념도와 같이 고진공 챔버 내부에 박막코팅을 원하는 자동차 부품소재 및 금형소재를 거치하고 지속적으로 증착하는 방법으로 본 연구에서는 아크박막 증착실험을 수행하였다.

본 아크박막 증착기술 방법에 도입된 플라즈마 방전과정의 순서는 전압을 인가하면 전자붕괴(Electron avalanche)를 통하여 1차 전지가 발생한다. 그리고 빠른 속도의 전자는 양극으로 흘러가고 무거운 (+) Ion 만 (-) 전극 쪽으로 서서히 이동으로 이온이 음극과 충돌하여 전자 방출(2차전자)하여 다시 충돌 원리로 구성하여 실험하였다.



그림 4. 고진공 박막코팅 시스템의 외형도
 Fig. 4. The appearance of the vacuum thin-film coating system.



그림 5. 1,2차 로타리 펌프 및 확산펌프의 외형도
 Fig. 5. The appearance of Rotary pump and diffusion pump.

표 1. PVD 설비의 성능

Table 1. The specification of PVD experimental

목 록	규 격
챔 버	∅950 * 1350H
로타리 펌프	3,000 L/min
확산 펌프	14,000 L/sec
BAIS Power	20 KW, 80A
Gun Power	DC70V, 200A
최대코팅용량	1,000 kg _f

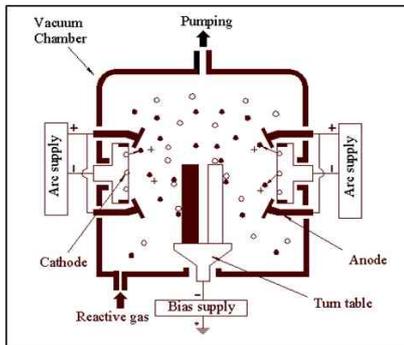


그림 6. 진공아크 박막 증착 방법
Fig. 6. The deposition method of Vacuum Arc thin-film.

IV. 실험 결과

본 연구에서 박막코팅 제조기술을 이용하여 자동차 부품의 마모 특성을 향상시키는 연구로서 실험에 사용되는 타겟은 티타늄에 알루미늄과 크롬을 첨가하는 방식으로 표 2와 같이 구성하여 실험을 수행하였다. 그림 7은 실제 고진공 챔버로서 자동차 부품소재와 금형에 실험한 결과물에 대한 이미지로서 진공 상태를 유지하여 고전압을 타겟에 인가하여 박막코팅을 한 결과이다.

본 실험에서 가장 중요한 물리적인 특성은 밀착력과 미세경도로서 그림9와 10과 같이 실험을 통하여 얻을 수 있었다. 타겟별로 나누어 합금의 비율에 따라 실험한 결과를 측정을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다. 우선 첫 번째로 티타늄에 알루미늄합금을 첨가한 타겟의 경우는 표3과 같이 미세경도, 표면 평활성, 밀착력에 대한 실험결과로서 알루미늄의 비율이 55%인 타겟이 성능 개선됨을 알 수 있었다.

그리고 표4는 티타늄에 크롬을 첨가하여 합금 타겟을 제작하여 실험한 결과로서 실제 크롬이 55%인 타겟이 성능 개선됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 가장 중요한 것은 진공챔버 내부의 진공도를 향상시키고 컨파워의 동력을 배가하여 투사율을 향상 시킴으로서 공정시간 단축 및 타겟으로 합금을 사용함으로써 밀착력과 미세경도를 향상시키는 성과를 가져왔다.

실제적으로 티타늄에 알루미늄과 크롬을 첨가하는 방식으로 티타늄 합금강으로 제작하여 표면의 평활성과 밀착력을 강화하기 위한 타겟을 제작하여 실제 미세경도, 표면 평활성, 밀착력을 검사한 결과 다른 타겟보다는 매우 향상됨을 알 수 있었다.

표 2. Ti에 Al과 Cr합금 비율표

Table 2. The ratio table of Ti alloy (Al and Cr)

타겟명	금속 (A)	금속(B)	합금비율(%)	
			금속(A)	금속(B)
TA_01	Ti	Al	45	55
TA_02	Ti	Al	50	50
TA_03	Ti	Al	55	45
TC_01	Ti	Cr	45	55
TC_02	Ti	Cr	50	50
TC_03	Ti	Cr	55	45



그림 7. Dash 부품의 자동차 금형
Fig. 7. Automobile Mold of Dash Parts.

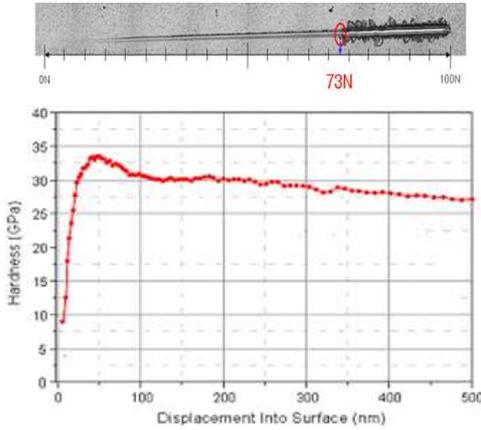


그림 8. 밀착력과 미세경도 실험결과
Fig. 8. The experimental result of adhesion and micro hardness.

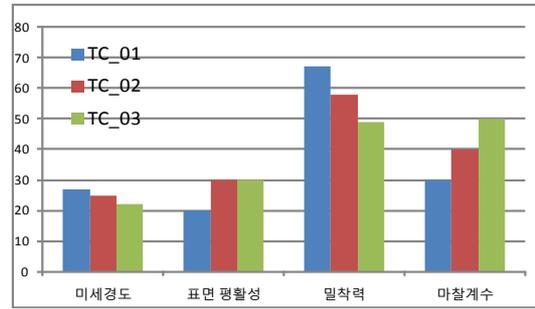


그림 10. 타겟(Ti+Cr)으로 실험한 상대적인 결과값
Fig. 10. The result of experiment using (Ti+Cr).

표 3. Ti에 Al 합금 타겟에서 실험결과
Table 3. The experimental result of Ti alloy (Ti+Al).

구분	단위	TA_01	TA_02	TA_03
미세경도	GPa	25	22	20
표면 평활성	μm	0.2	0.2	0.3
밀착력	N	65	52	45
마찰계수	-	0.2	0.5	0.5

표 4. Ti에 Cr합금 타겟에서 실험결과
Table 4. The experimental result of Ti alloy (Ti+Cr).

구분	단위	TC_01	TC_02	TC_03
미세경도	GPa	27	25	22
표면 평활성	μm	0.2	0.3	0.3
밀착력	N	67	58	49
마찰계수	-	0.3	0.4	0.5

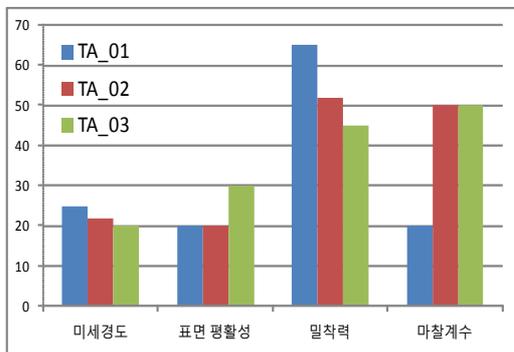


그림 9. 타겟(Ti+Al)으로 실험한 상대적인 결과값
Fig. 9 The result of experiment using (Ti+Al).

V. 결 론

박막코팅기술의 공정기술을 통하여 고경도 박막과 질화층과의 접합력을 높이는 inter layer 개발하고, 프레스 금형에 적합한 고경도 및 인성을 가지는 복합막을 개발하였다.

PVD 코팅 기술을 이용한 내마모성이 향상된 복합 박막코팅 기술 개발을 통하여 각종 정밀가공 부품에 대한 표면 재질 개선 및 성능 향상되었다.

실제 합금 타겟을 사용하여 PVD 코팅한 결과 다음과 같이 물리적인 특성을 얻을 수 있었다.

실제 박막코팅기술을 적용하여 inter layer층을 형성 시에 가장 중요한 것은 타겟으로 본 논문에서는 Ti에 Al과 Cr를 첨가하여 제작하는 것으로 제작하였고 그 결과에서 PVD 코팅 결과 Ti에 Al합금인 경우에는 Al이 55%인 경우에 물리적 특성이 우수한 것으로 나타났다, 또한 Ti에 Cr합금을 한 경우에도 Cr이 55%인 경우에 물리적 특성이 우수한 것으로 나타났다.

이것은 실제 일반 타겟 보다는 합금의 타겟이 우수하다는 것이 증명되었고 향후 생산성 향상을 위하여 타겟 제작 시에 사용할 것이다. 그리고 현재 검증된 타겟을 활용하여 성능향상을 통한 경쟁력을 높이고 차후에 소형기 개발을 통한 소형제품에 도입하는 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 호원대학교 교내 학술연구비에 의해 조성된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

Reference

- [1] Jae-In Jung, Ji-Sun Yang, "Trend and Prospect of Thin Film Processing Technology", *Journal of the Korean Magnetics Society*, vol. 21, no. 5, pp. 185-191, 2011.
- [2] Eun-Sung Lee, Jong-Kuk Kim, Sung-Hun Lee, Gun-Hwan Lee, "Comparison of characteristics of MgO films deposited by vacuum arc method with other methods", *Journal of the Korean Vacuum Society*, vol. 12, no. 2, pp. 112-117, Oct. 2003.
- [3] Sung-Hun Jang, Ji-Hun Jang, "Properties of TiAlN Films Deposited by Cathodic Arc Method", *The center of RIST*, Vol. 24, No.4, pp. 207-211, 2010.
- [4] Chan-Kun Park, Hyun-Suk Um, Su-Hyung Park, "Deposition of DLC film by using an FCVA system with a magnetic mirror and characterization of its material properties", *The Korean institute of Electrical Engineers*, pp. 1717-1719, 2000.
- [5] Myung-Bok Lee, Jung-Hee Lee, "Introduction of Vacuum Surface Analysis Techniques", *Du Yang Sa*, pp. 23-46.
- [6] Hong-Bae Kim, "Thin-Film Engineering", *Su-Hun*, pp.149-240.
- [7] Guido Vergnano, "The influence of Macro particles on PVD Coatings", *VDM*, pp. 44-87.
- [8] Ho-Yung Kun, Kil-Gu Kang, Kang-Ho Song, "Introduction to Metal Surface Treatment Technology", *Su-Hun*, pp. 195-320.

박 형 배 (Hyung-Bae Park)



1993년 2월 : 서울과학기술대학교
기계공학과(공학사)

1996년 2월 : 홍익대학교 기계공학
(공학석사)

2003년 8월 : 홍익대학교 기계공학
(공학박사)

관심분야 : 자동차 전기전자제어,

유압 시스템 제어

유 환 신 (Hwan-Shin Yu)



1993년 2월 : 동국대학교 전자공학과
(공학사)

2001년 2월 : 국민대학교 자동차공학
(공학석사)

2006년 2월 : 국민대학교 자동차공학
(공학박사)

관심분야 : car electronics