

브레이크 마스터 실린더의 피스톤 단조용 펀치 수명에 대한 질화물 코팅의 영향

최정묵¹ · 이종원² · 김민규² · 박준식[#]

Effect of Nitride Coatings on Lifetime of Cold Forging Dies for Piston of Brake Master Cylinders

J. M. Choi, J. W. Lee, M. K. Kim, J. S. Park

(Received July 19, 2016 / Revised August 30, 2016 / Accepted September 2, 2016)

Abstract

The plasma vapor coatings on two kinds of die steels have been carried out in order to identify the most optimized conditions. When TiN or TiAlN coatings were carried out on the substrates, the coating layer thicknesses were not significantly changed, and the optimized coating thickness was identified as ~ 5 μm . When the optimized coating conditions and stress analysis were applied to the primary piston dies for fabrication of aluminum cylinders, an extended life time of the die was observed. The methodology for extending the life time of dies was discussed in terms of microstructures and stress analysis.

Key Words : Forging Die, Physical Vapor Deposition, Nitride, Bond Strength

1. 서론

다양한 환경에서 금속의 고인성 특성을 유지하며 표면에 부가적인 기능성을 부여하기 위하여, 화학 증착법(CVD(chemical vapor deposition)), 물리 증착법(PVD(physical vapor deposition)), 플라즈마 열분사법(TBC(plasma thermal barrier coatings) 등 다양한 코팅법이 연구되어 왔다[1-3]. 다양한 코팅 방법 중 PVD는 아크, 열, 전자빔 등에 의하여 금속물질을 고진공의 플라즈마 분위기에서 활성화시킨 후 높은 가속에너지로 코팅대상재료에 충돌시키는 방법으로 잘 알려져 있다. 특히, PVD는 모재와 밀착력이 우수하고 균일한 증착이 가능하며, 두께조절이 쉬움으로 반복적으로 동일한 작동을 하는 금형의 수명 연장 과 성공적인 냉간 단조를 위하여 다양하게 사용되고 있다[1,2].

특히, 냉간단조에 사용하는 금형의 경우에는 다양하고 높은 압력이 작용하며, 같은 응력을 반복적으로 부가하게 됨으로 매우 높은 응력과 지속적이고 반복적인 응력에 대하여 저항할 수 있어야 함으로 경(hard)하고 밀착력이 매우 우수한 PVD 코팅이 수행되고 있다. 우수한 밀착력을 가지는 PVD코팅의 경우, 코팅의 두께와 코팅의 성분 및 코팅 프로세스의 건전성은 제조하려는 제품의 건전성과 매우 밀접한 관계가 있으므로 성공적인 냉간단조용 금형의 제작을 위하여는 모재의 성분과 더불어 코팅의 건전성이 매우 중요한 요소라고 할 수 있다[3~7].

본 연구에서는 알루미늄 소재의 자동차용 브레이크 마스터 실린더를 냉간단조로 제조하기 위하여 최적의 다이 선정과 이에 관한 금형의 PVD코팅을 수행하였으며 코팅 조건의 최적화를 도모하여 최적의 조건을 확립하고자 하였다.

1. (㉠)진합

2. 한밭대학교 신소재공학과

Corresponding Author : Hanbat National University, E-mail: jsphb@hanbat.ac.kr

Table 1 Comparison of selected die steel

Composition	C	Cr	Mo	V	Mn	Si
QCM8	1.5	0.8	0.5	0.4	0.5	0.3
CALDIE	0.7	5.0	2.3	0.5	0.5	0.2

2. 실험방법

코팅의 모재를 선정하기 위하여 일반적으로 알려진 금형강인 QCM8강과 CALDIE강을 선정하였으며 조성을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 전자빔을 이용하여 TiN, TiAlN 코팅 타겟을 플라즈마 분위기 내에서 활성화 하여 스퍼터링 반응을 통해 금형 재료에 코팅층을 형성하였다. 또한, 상기 금형소재를 이용하여 코팅 종류 및 코팅 증착 조건에 따라 코팅층의 형상 및 두께, 밀착력 등을 평가하였다. 일반적으로 스퍼터링 코팅의 시험 변수는 코팅시간, 코팅온도, 바이어스 전압 등이 있다. 이와 같이 많은 시험 변수들 중 본 과제 특성에 맞게 몇 가지 시험 변수 항목들을 사전 코팅 시험을 통해 고정변수로 설정하고 시험을 진행하였다. PVD 코팅의 일반적인 코팅온도는 500℃ 내외로 알려져 있으나, 금형강 모재의 열처리 조건에 영향을 주지 않는 코팅 온도로 설정하여야 특성 변화에 영향을 주지 않게 된다. 일반적으로 코팅온도가 증가하면 경도 값이 증가하는 것으로 알려져 있다. 이는 코팅 온도의 증가가 플라즈마 내의 활성화와 해리를 증가시켜 불순물의 분해, 탈착을 촉진시키며 Ti, Al과 N의 결합이 증가하기 때문이다. 하지만 상기에서 언급했듯이 코팅온도가 모재의 열처리 조건보다 증가할 경우, 모재 자체의 물성을 변화시켜 코팅층 박리현상이 나타날 수가 있다. 따라서, 본 과제의 최적 금형강 템퍼링 온도인 520℃이하의 온도에서 코팅 온도를 설정하여 금형강 모재에 영향을 주지 않는 온도조건인 450℃의 온도로 시험온도를 설정하여 시험을 진행하였다. 코팅은 시험편을 세척하여 초음파 세척기를 사용하여 알코올에서 15분간 시험편의 세척을 진행한 후에 코팅하여 모재의 건전성을 유지하였으며, 바이어스전압을 -100 V로 고정하여 시간의 변화에 따른 코팅층의 두께와 변화를 관찰하였다. 코팅시 고순도 질소 (99.999%)와 아르곤가스 (99.999%)의 혼합분위기에서 10⁻⁶ torr의 진공상태에서 증착을 실시하였고 금형강의 소재

는 코팅시험을 위하여 20×20×10mm의 두께로 제작하여 주사전자현미경으로 코팅시간에 따른 코팅층을 관찰하였다. 또한 코팅층의 경도측정을 위하여 0.05kgf의 하중으로 비커스 경도계를 사용하여 측정하였다. 또한, 압흔 관찰을 위하여 로크웰 경도계를 사용하여 150kgf의 하중으로 10초간 유지하여 코팅층의 압흔을 관찰하였다. 또한, 시험편의 성형해석은 AFDEX 3D 소프트웨어(software)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

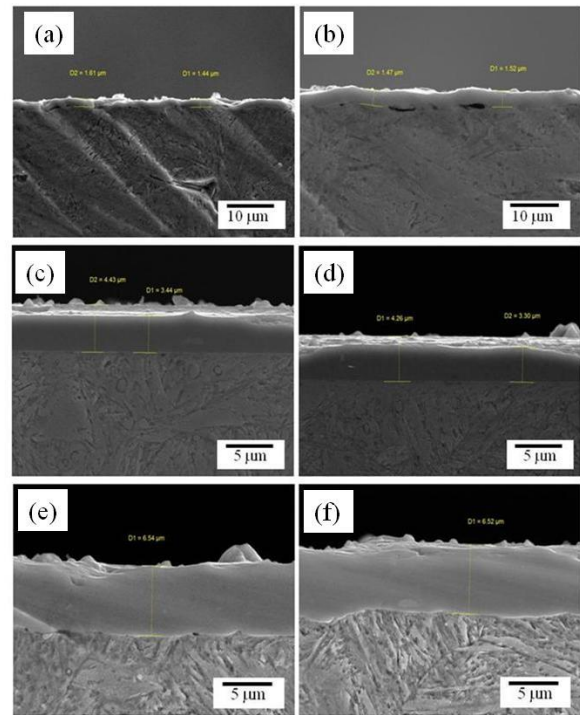


Fig. 1 SEM images of TiN (a, c and e) and TiAlN (b, d and f) coated QCM8 substrates for 30 min (a and b), 60 min (c and d) and 120 min (e and f)

Fig. 1은 본 연구에서 진행된 PVD 코팅된 QCM8 금형강의 단면을 나타낸다. 그림에서 보듯이, 코팅 시간이 증가할수록 코팅의 두께는 두꺼워짐을 알 수 있었고, 건전한 코팅층이 균일하게 모재위에 코팅됨을 알 수 있었다. 또한, 코팅재의 종류 (즉, TiN 혹은 TiAlN)에 따라 코팅층의 두께는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 시간에 따른 코팅층과 모재의 종류 즉, QCM8과 CALDIE에 따른 코팅층 두께의 변화를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보이는 바와

Table 2 Coating thickness with respect to coating time and substrate

No.	Substrate	Coating materials	Coating time (min)	Coating Thickness (μm)	Hardness (Hv)
1	QCM8	TiN	30	1.44	1380
2			60	3.58	2150
3			120	6.65	2221
4		TiAlN	30	1.52	1830
5			60	4.25	2730
6			120	6.52	3220
7	CALDIE	TiN	30	1.48	1360
8			60	4.26	2018
9			120	7.02	2156
10		TiAlN	30	1.56	1863
11			60	3.95	2787
12			120	6.75	3298

같이 코팅층의 두께는 일부의 편차는 있었지만, 시간의 증가에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었고 기지의 종류에 따라서 큰 편차는 보이지 않음을 알 수 있었다. 또한, Table 2에 보이듯이 TiN과 TiAlN의 경도를 파악하기 위하여 표면경도를 측정하였다. 표면 경도의 측정결과, 모재의 종류 보다는 코팅층의 종류에 따라 경도차이가 남을 알 수 있었다. 즉, TiAlN 층은 TiN보다 높은 경도를 나타낼 수 있었고, 이는 Al의 존재로 인한 격자의 고용효과로 인하여 높은 경도를 유지한다고 사료된다. 이러한 결과로부터, 고경도를 요구하는 금형부에 TiAlN 코팅을 적용하여 높은 경도를 금형에 부가할 수 있게 되며, 비교적 고경도를 요구하지 않은 부분에는 TiN 코팅을 적용하여 비용을 절감 할 수 있는 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

또한, 코팅층의 최적의 두께를 파악하기 위하여, 코팅층의 밀착력을 평가하였다. 코팅층의 밀착력과 코팅의 건전성 평가는 정성적으로 이를 파악하는 방법을 사용하여 평가하였다. 즉, 본 연구에서는 압흔 시험 방법으로 코팅층의 밀착력을 평가하였으며 압흔 시험을 위해 로크웰 경도기로 하중을 가하여

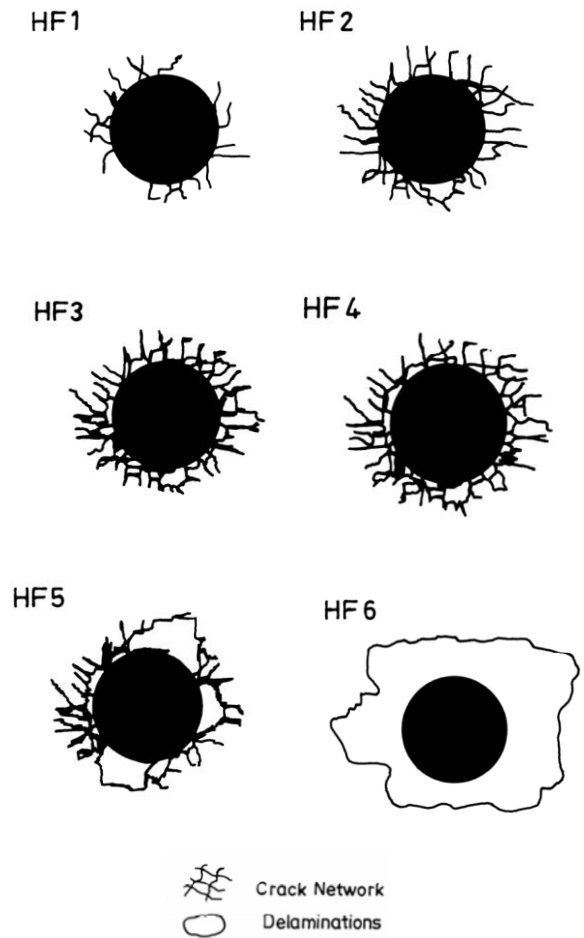


Fig. 2 Surface shape of interface after Rockwell hardness tests (Acceptable level: HF1~4. Poor level HF: 5~6) [7]

코팅층과 모재에까지 소성변형을 가하여 압흔 주위의 코팅층이 파괴되는 양상을 관찰하여 코팅층의 밀착력을 정성적으로 평가하였다[7].

코팅층의 밀착력과 건전성은 로크웰 경도시험 후의 압흔을 통하여 Fig. 2와 같은 6단계의 수준으로 평가한다고 알려져 있다[8]. 즉, 압흔 후의 크랙이 점점 많아짐에 따라 HF 1 단계부터 HF 4단계까지 규정되며, 크랙과 더불어 코팅층이 모재와 박리되는 단계까지 도달하면 HF 5단계가 되며, 코팅층이 모재와 완전히 박리되는 단계가 되면 HF 6 단계로 규정하고 있다. 이 때 5, 6단계가 되면 코팅은 매우 안 좋은 상태로 규정하고 있다. 본 연구에서도 이러한 코팅층의 양상을 평가하기 위하여 코팅된 시험편의 로크웰 경도 압흔 평가법을 사용하였다.

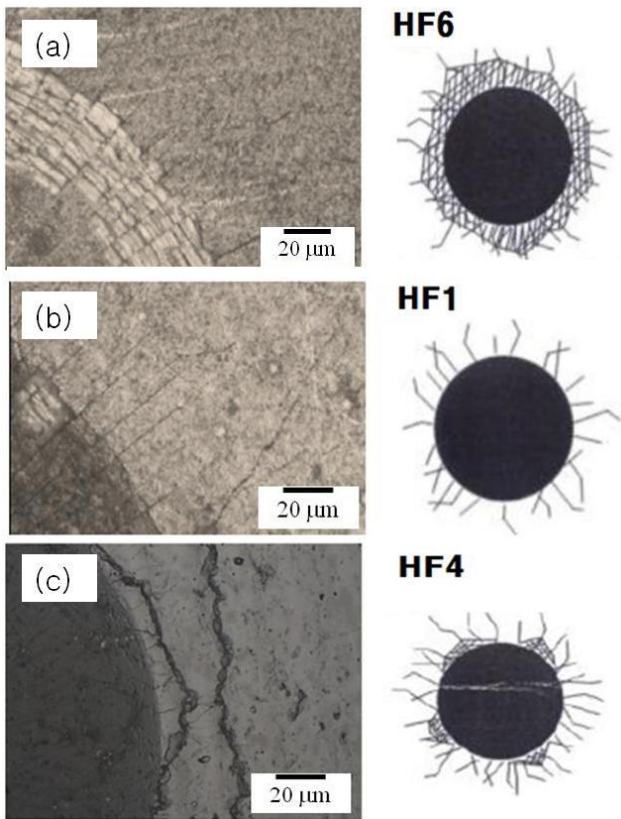


Fig. 3 Surface shape of interface after Rockwell hardness tests of TiN coated QCM8 with a coating duration (a) 30 min, (b) 60 min and (c) 120 min

본 연구에서는 Fig. 3에 나타내었듯이 QCM8 금형강의 TiN 코팅시간에 따른 로크웰 압흔을 관찰하였다. 코팅시간을 30분 동안 코팅된 시험편의 압흔을 관찰한 결과, 크랙과 더불어 표면의 박리현상이 나타났으므로 HF6 단계에 해당되는 압흔의 모습이 관찰되었다 (Fig. 3(a)). 한편, 코팅시간을 60분 동안 코팅된 시험편의 경우에는 표면에 미세한 크랙만 동반되는 HF1 단계의 크랙이 나타났다 (Fig. 3(b)). 마지막으로 120분 동안 코팅된 시험편의 경우에는 표면의 크랙과 더불어 일부의 박리가 관찰되는 HF4 단계의 압흔의 모습이 나타났다 (Fig. 3(c)). 이로부터, Fig. 3(a)와 같이 코팅층의 두께가 얇을 경우에는 하중이 상단부로 가해 졌을 경우 이를 저항하지 못하는 것으로 사료되며, 또한, Fig. 3(c)와 같이 코팅층의 두께가 두꺼울 경우에도 표면가 모재의 경도차이로 인하여 코팅층은 박리됨을 알 수 있었다. 따라서, 최적의 코팅조건은 60분을 코팅하였을 경우인 코팅의 두께가 $\sim 4 \mu\text{m}$ 일 경우 최적의 두께로 사료된다.

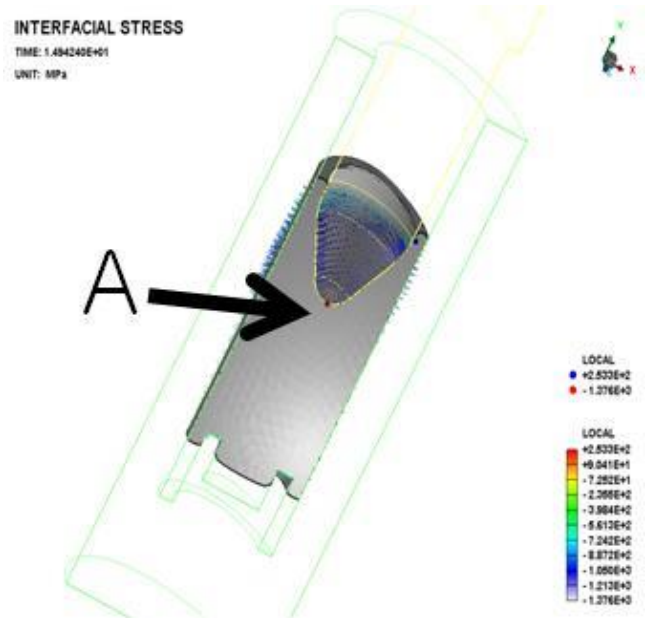


Fig. 4 Stress analysis of punch pin at the starting stage (Friction coefficient = 0.5)

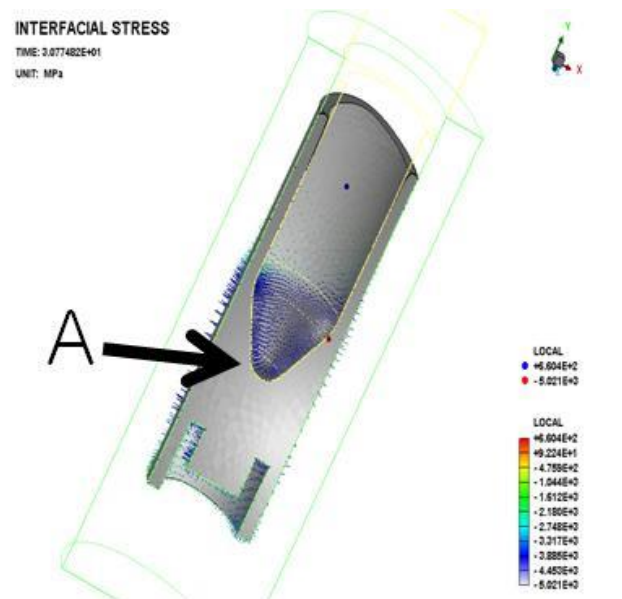


Fig. 5 Stress analysis of punch pin at the final stage (Friction coefficient = 0.5)

본 연구의 결과를 적용하기 위하여 자동차용 브레이크의 실린더 제조를 위한 냉간 단조용 다이에 본 결과를 적용하였다. 실제 금형은 다양한 형상과 많은 개수의 금형이 조립됨으로 알루미늄의 실린더 블록을 제조하기 위하여 사용된 금형 중 프라이머리 피스톤(primary piston)의 응력해석을 수행하였다.

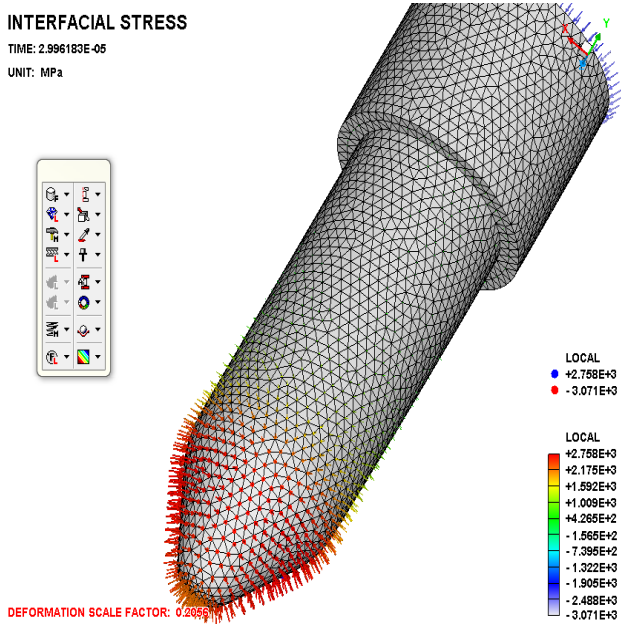


Fig. 6 Stress analysis of punch piston at the final stage (Friction coefficient = 0.5)

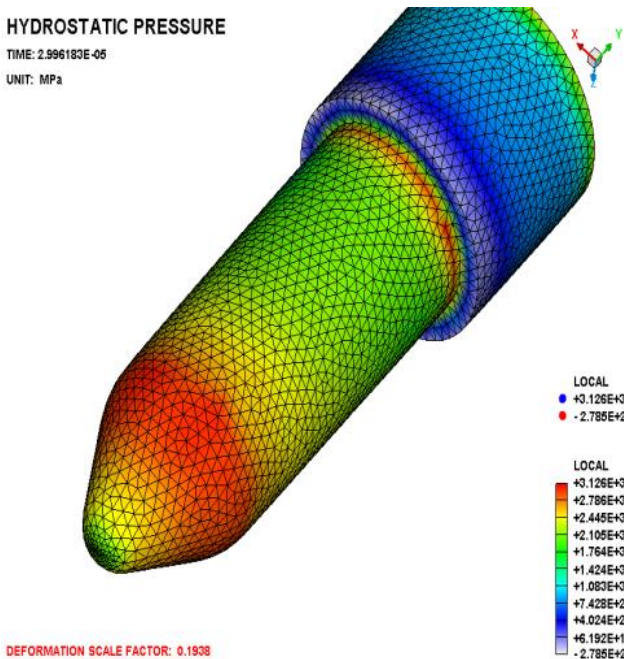


Fig. 7 Stress analysis of whole area of punch piston at the final stage (Friction coefficient = 0.5)

그리고 금형 해석을 통해 금형의 각 부위에 작용하는 하중의 형태와 양을 평가하여 금형 취약부를 개선하고자 하였다.

Fig. 4와 5는 펀치핀 (punch pin)의 초기 단계와 최



Fig. 8 Outlook of the primary punch after several ten thousands of forging times

종단계의 계면에서의 작용응력을 해석한 결과를 각각 나타내고 있다. 펀치핀은 예상했던 바와 같이 옆면의 응력보다는 알루미늄과 맞닿게 되는 계면부에서 가장 높은 응력이 부가됨을 알 수 있었다.

또한 성형시에 부가되는 Fig. 4와 5의 압력부하 조건을 검증하기 위하여 프라이머리 피스톤(Primary piston)의 부가 면압을 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 4와 5에서 나타내는 바와 같이 Fig. 6에서도 면압은 계면부분인 전단부에서 가장 높은 응력이 부가됨을 알 수 있었다.

또한, 모든 부분의 정수압을 분석한 결과, Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 프라이머리 피스톤의 전반부에서 가장 높은 응력이 부가되며 피스톤의 기둥부위에서도 응력이 부가됨을 알 수 있었다. 이러한 응력 분석과 상기의 코팅조건 최적화 분석을 통하여 프라이머리 피스톤은 상단부에 TiAlN 코팅을 60분 동안 수행하여 코팅을 수행하였다.

Fig. 8은 상단부에 코팅된 프라이머리 피스톤 다이의 수만회 냉간단조후의 형상으로서 초기의 형상을 그대로 유지함을 알 수 있고, 지속적인 사용이 가능한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 코팅의 최적화와 금형의 응력분석을 통하여 장수명의 금형 사용에 대한 최적화 방안 에 대하여 논의하였다. 추후 사용된 금형의 표면 및 단조특성에 대하여 보고를 하겠지만, 본 논문에서 제시한 바와 같은 방법론적으로 금형코팅을 수행한 다면 장수명 금형사용에 대한 최적화 방안을 도출해 낼 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 코팅과 금형의 수명에 대한 방법론적인 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할

수 있었다.

(1) PVD 코팅의 TiN과 TiAlN 코팅을 QCM8과 CALDIE 금형강 모체에 코팅을 수행하였을 경우, 모재나 코팅재와는 코팅층의 두께에 큰 편차를 나타내지 않았고, TiAlN코팅의 경도는 TiN코팅층 보다 높게 나타났다.

(2) 코팅층을 시간별로 분석한 결과, 30분 혹은 120분 코팅을 수행하면 HF지수로 4이하의 수준을 나타내어 건전한 코팅층이 나타나지 않았지만, 60분을 수행한 결과, HF지수로 1의 수준을 나타내어 우수한 밀착력을 가진 코팅층을 얻을 수 있었고, 코팅층의 두께는 약 5 μ m을 얻을 수 있었다.

(3) 본 연구에서 도출한 코팅의 조건을 자동차용 브레이크 실린더 제작을 위한 프라이머리 피스톤(primary piston) 금형에 적용하고 응력해석을 수행한 결과, 금형은 수만회의 냉간단조 후에도 초기의 형상을 유지할 수 있었으므로 본 연구에서 제시한 조건은 장수명의 금형사용의 최적화 연구에 반드시 동반되어야 하는 연구라고 사료된다.

REFERENCES

- [1] M. Tkadletz, N. Schalk, R. Daniel, J. Keckes, C. Czettl, C. Mitterer, 2016, Advanced Characterization Methods for Wear Resistant Hard Coatings: A Review on Recent Progress, Surf. Coat. Technol., Vol. 285, No. 11, pp. 31~46.
- [2] J. Bouquerel, B. Diawara, A. Dubois, M. Dubar, J.-B. Vogt, D. Najjar, 2015, Investigations of the Microstructural Response to a Cold Forging Process of the 6082-T6 Alloy, Mater. Des., Vol. 68, No. 12, pp. 245~258.
- [3] J. Y. Kim, S. J. Kim, S. T. Chung, S. Ahn, 2015, A Study of STS 316 L Threaded Elbow Fitting Fabrication by Metal Injection Molding, Tran. Mater. Process., Vol. 24, No. 2, pp. 121~129.
- [4] M. Kathrein, C. Michotte, M. Penoy, P. Polcik, C. Mitterer, 2005, Multifunctional Multi-component PVD Coatings for Cutting Tools, Surf. Coat. Technol., Vol. 200, No.3, pp. 1867~1871.
- [5] H. W. Jeon, J. H. Yoon, J. H. Lee, B. M. Kim, 2014, Plate Forging Process Design for an Under-drive Brake Piston in Automatic Transmission, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 2, pp. 88~94.
- [6] B. Wang, G. R. Bourne, A. L. Korenyi-Both, A. K. Monroe, S. P. Midson, M. J. Kaufman, 2016, Method to Evaluate the Adhesion Behavior of Aluminum-based Alloys on Various Materials and Coatings for Lube-free Die Casting, J. Mater. Process. Technol., Vol. 237, No. 3, pp. 386~393.
- [7] S. I. Lee, D. H. Choi, J. H. Lee, 2015, Hot Forging of an Engine Piston using Control Cooling, Trans. Mater. Process., Vol.24, No. 6, pp. 411~417.
- [8] B. Ramamoorthy, B. C. Yeldose, 2009, An Investigation into the Adhesion Strength of Diamond Like Carbon Multilayer Coating (DLC/TiN/Ti/Cu/Ni), Intell. Inf. Manag., Vol. 1, No. 1, pp. 179~194.