

# MART1470 판재 냉간 프레스 성형용 금형 코팅층의 마모량 비교

손민규<sup>1</sup> · 김세호<sup>2, #</sup>

## Comparison of Wear Amount of Surface Coating Layers on Dies for Cold-Stamped Products with MART1470

M. K. Son, S. H. Kim

(Received January 05, 2022 / Revised January 17, 2022 / Accepted January 18, 2022)

### Abstract

In this paper, wear characteristics of PVD coatings were compared on the die surface for cold stamping of MART1470 steel sheet with the finite element analysis and the pin-on-disc wear test. Three types of PVD coatings (CrN, TiAlCrN, and MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N) were considered for the tool surface made of STD11 material. The stamping process of an auto-body part was analyzed with the finite element method. Ranges of process variables for the wear test such as contact pressure, relative speed, and sliding distance were predicted from analysis results. In order to quantitatively analyze wear characteristics of each coating, the amount of wear was measured and compared according to process variables with the pin-on-disc wear test. The influence of each process variable was investigated and the wear characteristics of the three coating layers were quantitatively compared. It was confirmed that the wear characteristics of MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N coating were better than those of CrN and TiAlCrN. It was noted that the proposed prediction approach could predict and respond to the wear phenomenon occurring in the stamping process.

**Keywords:** Wear, PVD Coating, UHSS (Ultra high strength steel), Stamping Tool, Finite Element Analysis

## 1. 서 론

심화되는 연비 규제에 따라서 차체 구조물의 경량화를 위한 초고강도 강판의 적용으로 제품 성형 시 높은 판재 강도에 의하여 높은 접촉 하중이 발생한다. 이에 따라 금형 표면에 마모, 소착, 균열 등의 표면 결함이 발생하여 금형 내구성에 심각한 문제를 야기하게 된다. 금형 불량을 해결하기 위한 유지보수 기간에 따른 생산 지연 및 비용 증가와 성형 제품의 품질 문제가 발생하게 된다. 산업 현장에서 금형 내구의 문제점을 해결하기 위해 다양한 열처리 및 표면처리 기법을 이용하여 금형 표면 경도

의 향상 및 내마모성과 내균열성 향상을 시도하고 있다. 그러나 적합한 코팅의 선정 및 정량적인 마모 특성 분석은 어려운 과제이다.[1]

본 논문에서는 인장강도 1.5GPa급 초고강도강인 MART1470강판을 냉간성형하기 위한 자동차 부품 금형의 표면경도 및 내마모성 향상을 위하여 널리 사용되는 PVD(Physical Vapor Deposition) 방식의 코팅재 3종의 기초 특성분석을 수행하고 마모량을 정량적으로 비교하였다. 양산 성형조건에서 발생하는 마모 조건 도출을 위해 성형공정해석을 진행하고 마모에 영향을 끼치는 마모시험 변수의 범위를 도출하였다. 이를 바탕으로 마모시험 조건을 설정하고 pin-on-disc 시험을 진행하여 마모량 비교를 통한 내마모성 정량평가를 수행하였다.

1. ㈜삼보모토스 미래차기술연구소, 연구원

2. 대구대학교 기계공학부, 교수

# Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Daegu University, E-mail:mvksh@daegu.ac.kr

ORCID : 0000-0002-1535-3613

## 2. 연구 대상물 및 마모시험조건 도출

### 2.1 연구 대상물

본 논문에서는 자동차 차체부품인 센터 플로어 사이드 어퍼 멤버(center floor side upper member)를 대상으로 냉간성형 금형용 PVD 코팅의 마모특성 평가를 실시하였다. 해당 부품은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 승객실 하부에 위치한 대시(dash)의 하중지지 부재이다. 이 부재는 차량의 정면 충돌 시 승객을 보호하는 기능을 하므로 우수한 하중지지 능력을 가져야 하여 초고강도강으로 제작된다.

대상부품은 2단계의 공정으로 성형이 진행된다. 제1공정은 블랭크를 제작하기 위한 블랭킹과 피어싱 공정이며, 제2공정은 제품의 형상을 성형하는 폼(form) 공정이다.



Fig. 1 A center floor upper member assembly in the auto-body

### 2.2 성형해석 조건

마모시험의 주요 변수인 가압력, 상대속도, 미끄럼 범위 등 변수 선정을 위하여 실제 성형공정 시 금형 표면에서 발생하는 마모 조건의 예측이 필요하다. 본 논문에서는 성형공정의 유한요소해석을 수행하고 마모시험 시험변수의 조건이 되는 금형면과 블랭크의 사이의 접촉압력, 상대속도, 미끄럼 거리의 범위를 도출하였다. 이를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP V2017[2]을 활용하였다. 블랭크 소재는 인장강도 1.5GPa급 마르텐사이트강인 MART1470으로 초기 두께는 1mm이다. 항복함수는 평면이방성을 고려한 Hill's 1948 항복모델[3]을 사용하였다. 소재의 인장 압축 거동을 해석에 구현하기 위해 이동경화(kinematic hardening)식인 Yoshida-Uemori 모델[4]을 사용하였다. 해석에 활용한 기계적 물성과 이동경화모델의 계수는 각각 Table 1과 Table 2에 도시한 바와 같다.

Table 1 Mechanical properties of the MART1470

YS(MPa)	1179.72	FLD <sub>0</sub>	0.06
r <sub>0</sub>	0.73	K(MPa)	1967.85
r <sub>45</sub>	0.84	ε <sub>0</sub>	0.00109
r <sub>90</sub>	0.82	n	0.073

Table 2 Material parameters for Yoshida-Uemori model

a <sub>0</sub> (GPa)	0.197	b(GPa)	0.269	R <sub>sat</sub> (GPa)	0.097
C <sub>1</sub>	340.4	C <sub>2</sub>	340.4	m	144.7
ξ	22.07	E <sub>a</sub> (GPa)	160	E(GPa)	210

금형은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 다이, 패드, 펀치의 3개 부품으로 구성되어 있다. 초기 블랭크와 제품 형상을 Fig. 3에 도시하였다. 성형은 하형 패드에 패딩력을 부과하여 하형 패드-블랭크-상형 다이 간의 패딩을 실시한 후 하형 다이와 접촉하며 성형하는 방식으로 진행된다. 패딩력은 882kN, 성형속도는 398mm/s, 패드의 하강 행정은 190mm이다. 성형 공정해석은 소재의 주요 변형이 발생하는 제2공정인 폼 공정을 대상으로 진행하였다. 쿨롱 마찰계수는 금형과 블랭크간의 무윤활 조건으로 가정하여 0.12를 부과하였다.

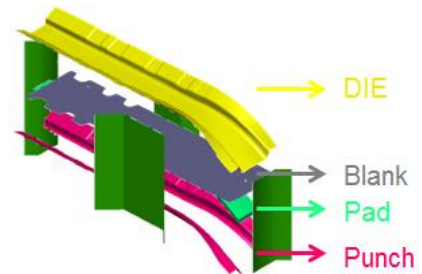


Fig. 2 Finite element model of the tools and the blank used for the stamping analysis

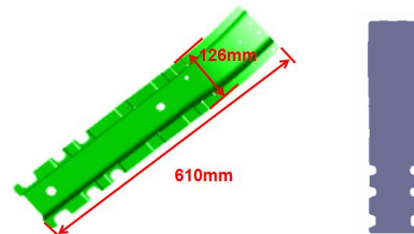


Fig. 3 Shape and dimension of the product and the initial blank

### 2.3 성형해석 결과

2.2 절의 해석 조건을 활용하여 성형공정의 유한 요소해석을 실시하고 마모시험에서 필요한 변수인 접촉압력  $p$ , 상대속도  $v$ , 1 행정당 미끄럼 거리  $L$ 의 범위를 도출하였다. Fig. 4에 도시한 바와 같이 변형이 집중되며 마모가 가장 심하게 발생할 것으로 예측되는 다이와 펀치 각각 1개소를 블랭크와 금형이 접촉하는 동안 측정하였다. 도출된 각 변수의 범위를 Table 3에 도시하였다.

해석에서 구한 접촉압력을 마모 시험의 하중  $F$ 로 변환하기 위하여 기존연구[5]에서 수행한 접촉해석의 방법을 활용하였다. Fig. 5에 접촉압력과 수직하중의 관계를 도시하였다.

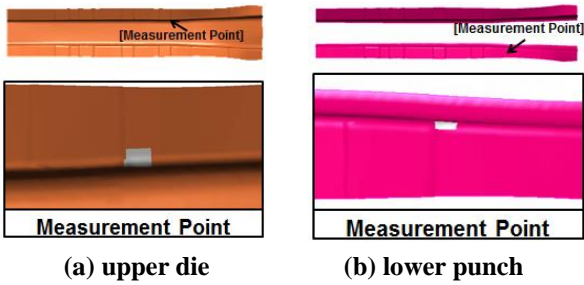


Fig. 4 Measurement points of tool parts during the stamping analysis

Table 3 Range of the contact conditions of stamping tools from the finite element stamping analysis

	Parameter range
$p$ (GPa)	0.1~0.45
$v$ (m/s)	0~0.22
$L$ (mm)	10.6

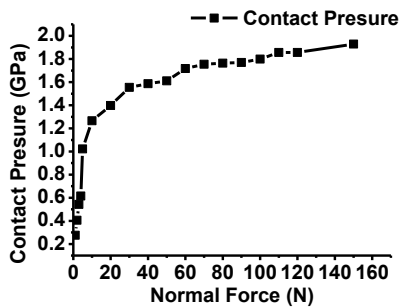
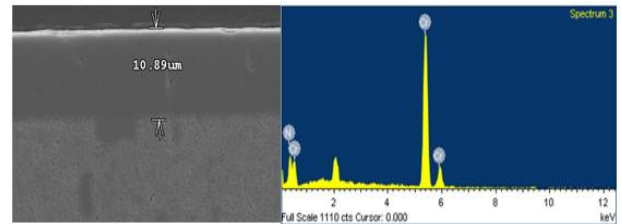


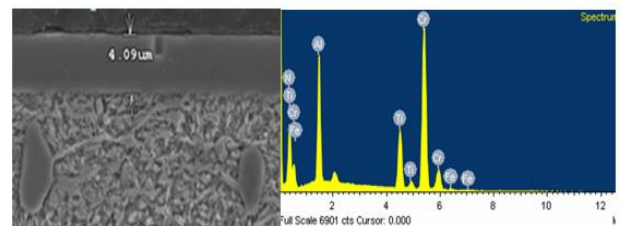
Fig. 5 Variation of the contact pressure according to the normal force in the wear test[5]

### 3. 코팅층 분석

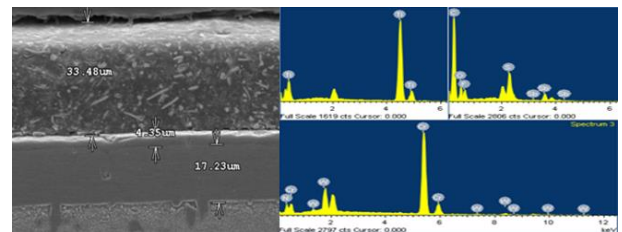
본 논문에서는 CrN, TiAlCrN, MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N 3종의 PVD 코팅에 관한 분석을 실시하였다. Fig. 6에 도시한 바와 같이 각 코팅층의 SEM-EDX 분석 결과를 도시하였다. 2원계 CrN 코팅은 두께 10.9 $\mu$ m인 단일층으로 구성되어 있으며, 4원계 TiAlCrN 코팅은 두께 4.1 $\mu$ m인 단일층으로 구성된 것으로 분석되었다. 반면 다원계 MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N 코팅은 두께 55 $\mu$ m인 3개의 층으로 구성되어 있다. 외층은 연질층으로 Mo, S 등의 원소로 구성되어 초기 마모 발생시 윤활역할을 하여 마모 감소에 영향을 끼칠 것으로 보이며 두께는 약 33.5 $\mu$ m이다. 중층은 두께 4.4 $\mu$ m인 초경질 Ti 원소로 구성되어 있다. 내층은 두께 17.2 $\mu$ m이며, Cr, W, N로 구성된 코팅층으로 2원계 코팅성분인 CrN에 W를 첨가하여 내마모성을 더 높인 코팅으로 분석되었다. 각 코팅층의 두께, 밀착력과 경도 등 기본 마모 특성값을 Table 4에 비교하여 도시하였다.



(a) CrN



(b) TiAlCrN



(c) MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N

Fig. 6 Measurement of the thickness and chemical composition of the coating layers with SEM-EDX

**Table 4 Basic wear characteristics of the coating layers**

	CrN	TiAlCrN	MoS <sub>2</sub> TiCr(W)N
Thickness (μm)	10	4	55
Scratch force (N)	30	36	52
Hardness (Hv)	1800	2400	3600 (w/o outer layer)

**Table 5 Level of the test parameters for the wear test**

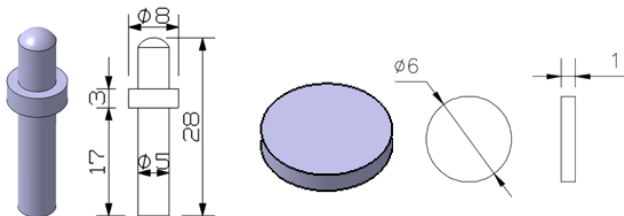
	Level of test parameters
Test speed (rpm)	150, 200, 250, 300, 350, 400, 450
Contact force (N)	1, 2, 3, 4, 5, 6
Sliding distance (m)	200, 250, 300, 350, 400, 450

## 4. 코팅층 마모 시험

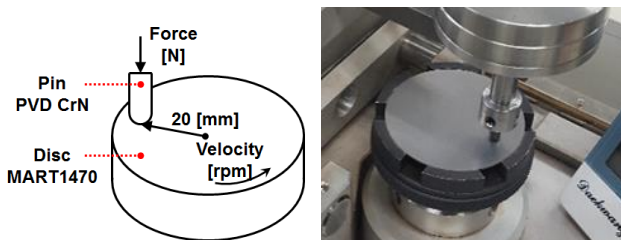
### 4.1 마모 시험 조건

코팅층의 마모특성을 분석하기 위하여 양산 금형의 열처리 및 표면처리 과정과 동일한 조건으로 시험편을 제작하여야 한다. 본 논문에서는 Fig. 7 과 같이 마모 실험용 핀을 제작하였다. 금형소재인 합금공구강 STD11 소재에 온도 600°C, 860°C, 1000°C 순으로 각각 1.5 시간씩 승온하여 담금질하였으며, 고온 뜨임을 500°C에서 3 시간씩 2 회 실시하였다. 열처리 결과 금형강 소재의 경도는 58.3HRC 로 측정되었다. 이후 진공 열처리와 질화처리 및 PVD 코팅을 실시하여 금형의 제작 과정과 동일하게 열처리 및 표면처리를 실시하였다. 디스크는 MART1470 소재로 제작하였으며, 지름 6mm 의 원형으로 절단하여 제작하였다.

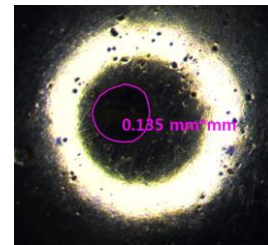
2.3절에서 도출한 마모 시험을 위한 각 시험변수의 범위를 적용하여 각 변수가 마모 깊이에 미치는 영향을 파악하였다. Table 5에 정리한 바와 같이 수직



**Fig. 7 Schematic shapes and dimensions of the fabricated specimens for the wear test**



**Fig. 8 Schematic shape of the pin-on-disc type wear test**



**Fig. 9 Measured wear area from stereoscopic microscope**

하중과 미끄럼 거리는 6 개의 수준, 상대속도는 7 개의 수준으로 시험 조건을 설정하였으며, 각 시험의 기준 변수는 수직하중 6N, 상대속도 0.314m/s, 미끄럼 거리 450m 로 설정하였다. 시험은 2 회씩 진행하였으며 측정된 마모 깊이의 평균값을 결과로 도출하였다.

마모시험은 Fig. 8 에 도시한 바와 같이 pin-on-disc 타입의 시험기를 활용하여 실시하였다. 시험 후 핀의 마모 깊이를 측정하기 위하여 공구현미경을 활용하여 Fig. 9 와 같이 마모된 영역의 면적을 측정하였다. 도출된 마모영역을 입체 구로 가정하였다. 공구 현미경에서 측정된 마모 형상을 원으로 근사하고 원의 면적을 활용하여 마모 깊이를 계산하였다.

### 4.2 마모 시험 결과

각 시험조건에 따른 코팅층의 마모 깊이를 비교하여 마모특성을 정량화하였다. Fig. 10 에 도시한 바와 같이 마모량은 수직하중이 증가할수록 증가하고, 상대속도가 증가할수록 감소하며, 미끄럼거리가 증가할수록 증가하는 결과를 보였다. 상대속도가 증가할수록 마모량이 감소하는 경향은 마찰계수가 감소하여 발생한 결과라고 판단된다. 미끄럼 거리에 대한 마모 깊이는 선형적으로 비례하는 것으로 측정되었다. 각 시험인자의 변화에 따른 PVD 코팅별 마모 경향은 모두 동일하였다.

마모량은 세 코팅층 중 MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N 이 가장 큰 값을 보였으나 이는 저하중에서 윤활층의 역할을

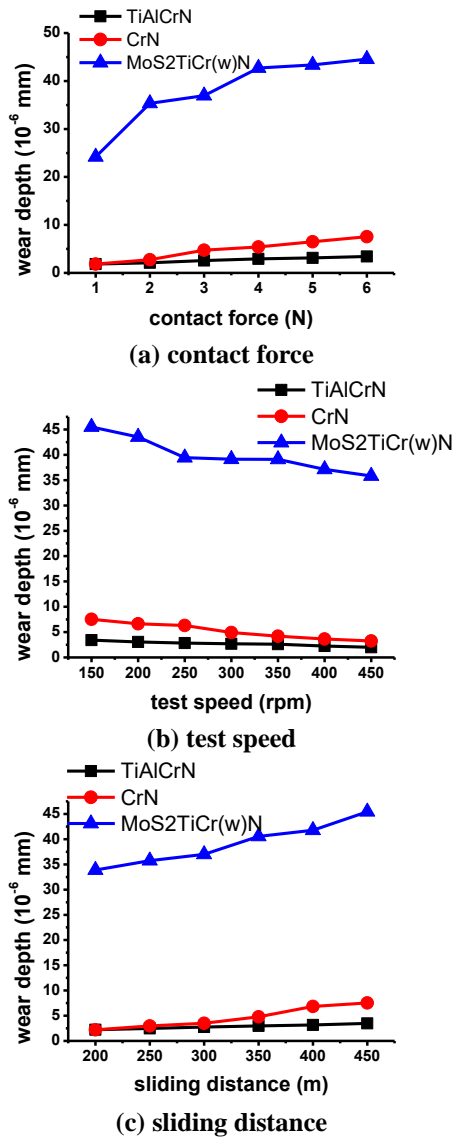


Fig. 10 Comparison of wear depth according to experimental parameters

하는 연질 외층의 마모로 인한 현상으로 보인다. Fig. 11 에 도시한 것과 같이 잔류 코팅층을 고려할 경우 다른 소재 대비 MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N 의 코팅층 두께가 가장 크며 코팅의 중층과 내층의 경도가 상대적으로 높은 것을 감안할 때 MoS<sub>2</sub>TiCr(W)N 의 경우 내마모성이 가장 우수할 것으로 예측되었다. CrN 의 경우 남아 있는 코팅 깊이가 TiAlCrN 보다 더 크게 나타났지만 미끄럼 거리에 따른 마모 비율이 매우 높아 초고강도강 성형의 마모 조건에서는 성형 타수가 증가할 경우 다른 코팅층보다 코팅의 박리가 더 빨리 일어날 가능성이 높다고 예상된다.

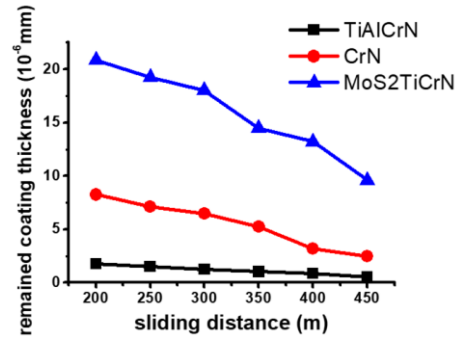


Fig. 11 Comparison of depth of remained coating thickness according to the sliding distance

### 4.3 마모 예측식 도출

코팅층 소재에 따른 마모특성을 정량화하기 위하여 마모 깊이의 예측식을 Lee 등[5]이 제안한 방법을 활용하여 구하였다. 실험계획법의 일종인 다구찌법을 이용하고 분산분석(ANOVA: analysis of variance)과 회귀분석을 통해 시험변수에 대한 코팅층 마모량의 반응표면을 도출하였다. 분석은 통계분석 프로그램인 MINITAB[6]을 활용하였다. 수직하중과 상대속도가 시험변수가 마모량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 6 에 도시한 수준으로 직교 배열표를 구성하고 조건에 따라 마모시험을 실시하였다. 미끄럼 거리의 경우 마모량과 비례하는 관계를 가지는 것으로 파악되어 500m 고정값을 부과하였다.

분산분석을 실시하고 이를 바탕으로 반응표면분석을 수행하였으며, 각 코팅층 소재별로 얻어진 반응표면을 Fig. 12 에 도시하였다. 또한 식(1)~식(3)에 각각 CrN, TiAlCrN, MoS<sub>2</sub>Ti(W)N 의 마모예측식을 구하였다. 여기서 마모량, 시험속도, 미끄럼거리, 수직하중의 단위는 각각 mm<sup>3</sup>, rpm, mm, N 이다.

Table 6 Level of the test parameters for the prediction of the wear volume

	Level of parameters				
	250	300	350	400	450
Test speed(rpm)	250	300	350	400	450
Normal force(N)	1	2	3	4	5
Sliding distance(m)	500				

$$V_{CrN} = 2.45 \times 10^{-5} - 1.71 \times 10^{-4}v + 0.097F \quad (1)$$

$$V_{TiAlN} = 8.05 \times 10^{-5} - 7.74 \times 10^{-5}v + 0.0079F \quad (2)$$

$$V_{MoS_2TiCrN} = 0.012 - 6.78 \times 10^{-7}v + 1.59F \quad (3)$$

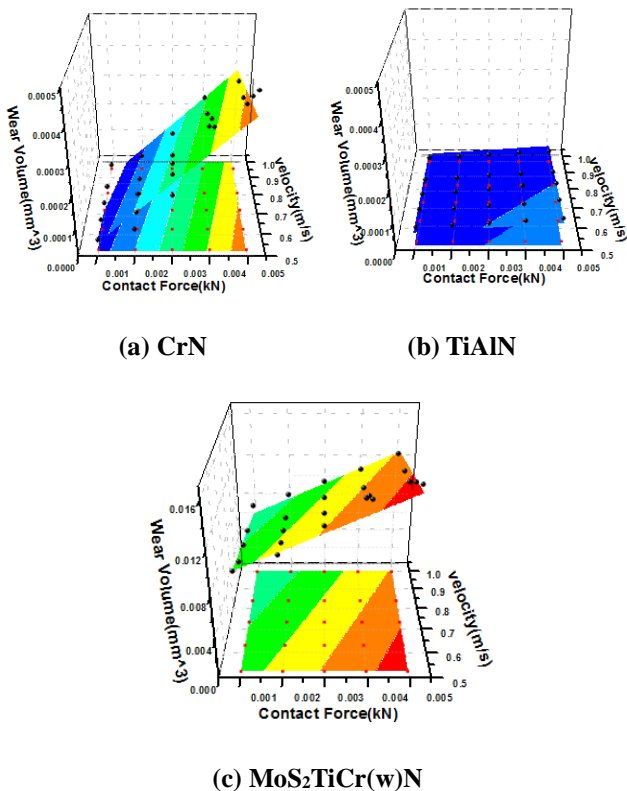


Fig. 12 Response surfaces for the prediction of the wear volume of coating layers

## 5. 결론

본 논문에서는 인장강도 1.5GPa 급 초고강도강판을 소재로 성형되는 차체 부품용 프레스금형의 코팅층의 시험 인자별 마모 경향을 정량적으로 비교하였다. 본 논문에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 1.5GPa 급 초고강도강판을 소재로 성형되는 프레스금형의 코팅층 수명예측을 위해 성형공정해석을 실시하여 마모 변수의 범위를 도출하였다. 도출된 접촉압력, 상대속도, 미끄럼 거리의 범위는 각각 0.1~0.45GPa, 0~0.22m/s, 10.6mm 였다.

(2) 마모시험을 실시하여 각 변수들이 마모량에 미치는 영향을 분석하였다. 수직하중과 미끄럼거리가 증가할수록 마모량은 증가하였다. 시험속도가 증가하면 마모량이 감소하는 현상이 발생하였으며, 마모량 예측 시 시험속도의 영향이 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

(3) PVD 코팅인 CrN, TiAlCrN, MoS<sub>2</sub>TiCr(w)N 3종에 대한 내마모성 비교를 위해 마모 깊이를 정량적으로 비교하였다. 2 원계인 CrN 코팅에 비해 다원계 코팅의 내마모성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

(4) 성형 제품의 고강도화에 따라 다원계 코팅을 적용할 경우 양산 성형조건을 고려한 코팅층의 마모특성 예측이 필요하며, 이에 따라 금형면 코팅 박리 등을 사전에 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원한 산업핵심기술개발사업 수행의 결과입니다.

## REFERENCES

- [1] P. Carlsson, 2005, Surface Engineering in Sheet Metal Forming, Ph.D. Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- [2] ESI Group, 2017.0, PAM-STAMP™, User's Manual.
- [3] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
- [4] F. Yoshida, T. Uemori, 2002, A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Workhardening Stagnation, Int. J. Plast., Vol. 18, No. 5-6, pp. 661~686. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00050-X)
- [5] J. H. Lee, S. B. Bae, K. T. Yoon, J. Y. Heo, S. H. Kim, C. D. Park, 2017, Wear Life Prediction of CrN Coating Layer on the Press Tool for Stamping the Ultra High Strength Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 26, No. 3. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.3.137>
- [6] MINITAB, 2004, Minitab Release 14 Manual.
- [7] J. H. Lee, 2016, A Study on the Wear Test Method to Predict the Wear Life of CrN Coating on the Press Tools for Stamped Products with Ultra High Strength Steel, M. S. Thesis, Daegu University, Gyeongbuk, Korea.