[논문] 한국소성가공학회지, 제 26 권 제 3 호, 2017
Transactions of Materials Processing, Vol.26, No.3, 2017
https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.3.137

초고강도강판 프레스성형용 금형의 CrN 코팅층 마모수명 예측

이정흠[1] · 배상범[2] · 윤국태[3] · 허재영[3] · 김세호[#] · 박춘달[3]

Wear Life Prediction of CrN Coating Layer on the Press Tool for Stamping the Ultra High Strength Steel Sheet

J. H. Lee, S. B. Bae, K. T. Youn, J. Y. Heo, S. H. Kim, C. D. Park
(Received December 27, 2016 / Revised April 5, 2017 / Accepted April 6, 2017)

Abstract

In this study, a wear test method was proposed to predict the wear life of the CrN layer coated on the surface of the press tools for manufacturing the auto-parts with ultra high strength steel (UHSS) with a tensile strength of 1.5 GPa. The pin-on-disc type wear test was carried out to confirm the feasibility and the reproducibility of the wear amount according to the test conditions such as the normal force, the sliding velocity, and the sliding speed. The test conditions were obtained from the finite element stamping analysis and the wear simulation. With the wear amount from the wear test, a prediction model of the wear depth in the CrN coating layer was proposed according to the test conditions with the design of experiments such as Taguchi method and the response surface method. The derived prediction model was then compared to the result of the Archard wear model, fully describing that the proposed model can effectively predict the wear life of the press tools for the auto-parts with UHSS.

Key Words : Ultra High Strength Steel (UHSS), CrN Coating, Wear Life, Wear Test, Prediction Model

1. 서 론

차량 경량화를 위한 초고강도 강판의 적용으로 제품 성형 시 높은 소재 강도와 낮은 연신율로 인해 성형성이 열화되며 스프링백(springback) 문제가 발생한다. 또한 소재의 높은 강도에 의해 금형에 큰 접촉압력이 발생한다. 금형에 표면결함을 유발하여 골링(galling), 긁힘(scratch), 깨짐(chipping), 크랙(crack) 등이 발생된다[1]. 금형의 결함은 금형 수명 저하와 직결되며 금형의 내구수명 감소, 제품의 품질 저하, 유지보수로 인한 시간 및 비용 증가 등의 문제를 초래한다. 이 문제를 해결하기 위해 산업 현장에서는 금형 표면의 경도와 내마모성, 내박리성 등의 향상을 목적으로 금형 표면에 열처리 및 이온질화처리, 표면처리를 실시하여 금형의 수명을 연장하고 성형제품의 품질을 향상시키고 있다[2].

본 논문에서는 인장강도 1.5GPa급 초고강도강판 소재를 적용한 차체부품의 성형용 프레스금형 표면에 사용되는 CrN 코팅층의 수명을 예측하였다. 이를 위해 성형공정해석 및 마모시험을 모사한 접촉 유한요소해석을 이용하여 마모시험의 조건을 도출하였다. 구하여진 조건에 따라 마모시험을 실시하고

1. ㈜대우공업 기술연구소
2. 대구대학교 대학원 기계공학과
3. 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Daegu University, E-mail:mvksh@daegu.ac.kr

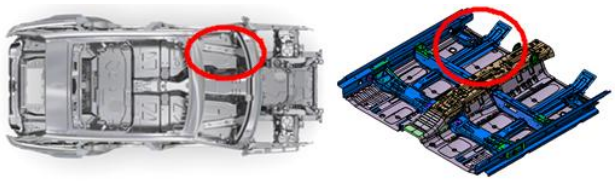


Fig. 1 A center floor module in the auto-body

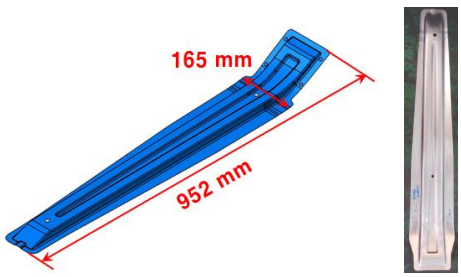


Fig. 2 Shape and dimension of the of the center floor side upper member

실험계획법 및 통계분석을 이용하여 CrN 코팅층의 마모예측식을 제안하였다.

2. 연구 대상품 및 성형공정 개요

본 논문의 대상은 센터플로어 사이드 어퍼 멤버(center floor side upper member)로 Fig. 1에 도시한 바와 같이 차량의 승객석 아래에 위치한다. 본 부재는 정면 및 측면충돌 시 승객을 보호하는 중요한 기능을 하며 초고강도강으로 제작된다. Fig. 2에 제품의 형상 및 치수를 도시하였다[3].

본 부품은 2개 공정으로 성형이 이루어 진다. 제1공정(OP10)은 제품의 기본형상을 성형하는 폼(form) 공정이며 제2공정(OP20)은 캠 피어싱(cam piercing) 공정이다.

3. 마모시험조건 도출

금형 코팅층의 마모특성을 분석하고 수명을 예측하기 위해서는 실제 성형공정 중에 발생되는 상대속도, 접촉압력, 미끄럼거리를 도출하여 마모시험조건을 구성하여야 한다. 이를 위해 성형공정해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP 2G[4]를 이용하여 수행하였다. 해석결과로부터 블랭크와 금형 간의 상대속도, 접촉압력, 미끄럼거리를 도출하였다. 마모시험에서 부과하는 수직하중과 접촉압력의 관계를 도출하기 위하여 LS-DYNA V.971[5]를 이용한 마모시험의 해석을 수행하였다.

Table 1 Mechanical properties of the MART1470

YS(MPa)	1179.72	FLD_0	0.06
r_0	0.87	K(MPa)	1967.85
r_{45}	0.86	ε_0	0.00109
r_{90}	0.86	n	0.073

Table 2 Material parameters for Yoshida-Uemori model

α_0(GPa)	1.117	b(GPa)	0.27	R_{sat}(GPa)	0.091
C_1	210.87	C_2	210.87	m	109
ξ	55.78	E_a(GPa)	160	E(GPa)	207

3.1 재료 물성

소재는 두께 1.4mm인 인장강도 1.5GPa급 마르텐사이트 강인 MART1470으로 항복함수는 Hill의 1948 평면이방성 모델[6]을 사용하였다. 소재의 인장-압축 거동을 해석에 구현하기 위하여 이동경화(kinematic hardening) 이론 중 하나인 Yoshida-Uemori 모델[7]을 이용하였다. 해석에 사용된 기계적 물성과 이동경화 모델의 계수들을 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

3.2 성형해석 조건

성형공정해석은 금형에 가장 많은 하중이 가해지고 소재의 변형이 주로 발생하는 제1공정인 폼(form) 공정을 대상으로 실시하였다. 금형은 Fig. 4와 같이 펀치, 다이, 패드로 구성된다. 과도한 하중 예측을 방지하기 위해 금형 하사점으로부터 0.8mm 미성형하였다[3]. 블랭크를 변형체로 가정하여 BLT (Belytschko-Lin-Tsay) 쉘요소[8]를 사용하여 모델링하고, 요소 크기는 1mm로 균일하게 분할하였다. 요소의 두께방향 적분점의 수를 5개로 설정하였다. 성형속도와 패딩력은 각각 1m/s와 800kN을 부과하였으며, 금형의 행정거리는 40.2mm이다. 금형과 블랭크 간에는 무윤활 조건으로 가정하여 쿨롱 마찰계수를 0.12로 설정하였다.

3.3 성형해석 결과

성형공정해석의 결과를 이용하여 금형과 소재 간의 접촉압력(p), 상대속도(v), 미끄럼거리(L)를 도출하였다. 금형과 소재간의 직접적인 접촉이 발생하는

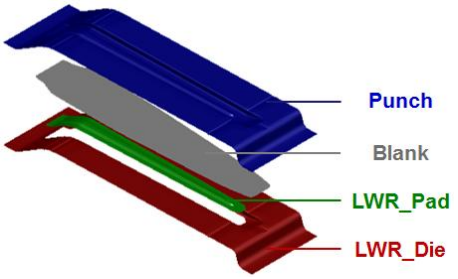
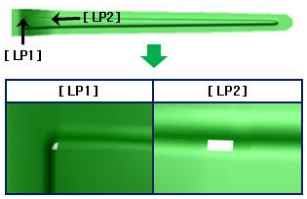
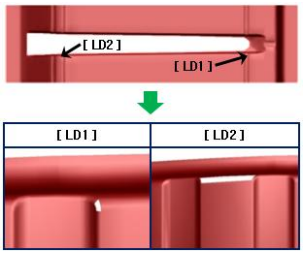


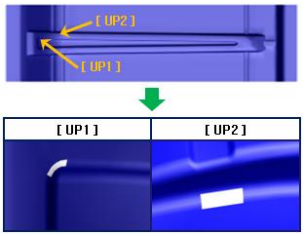
Fig. 4 Finite element model of the tools and the blank used for the stamping analysis



(a) lower pad



(b) lower die



(c) upper punch

Fig. 5 Measuring points for the process conditions during the stamping analysis

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

	Value range	Average value
p (GPa)	0.1~0.7	0.2
v (m/s)	0.1~1.0	0.55
L (mm)	0.5~11.43	-

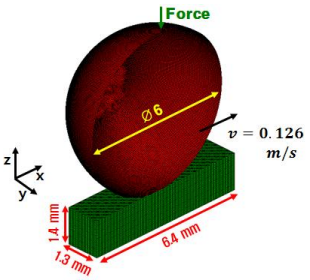


Fig. 6 Finite element model for the pin-on-disc type wear test

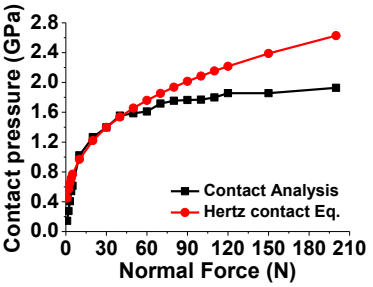


Fig. 7 Variation of the contact pressure according to the normal force in the wear test

시점만 고려하였고 Fig. 5와 같이 각 금형당 두 지점을 측정하였다. 접촉 압력은 측정 지점의 절점에서 발생되는 압력의 평균값으로부터 도출하였다. 상대속도는 블랭크 절점의 위치벡터를 이용하여 도출하였으며, 미끄럼거리는 상대속도를 시간에 대하여 적분하여 계산하였다. 해석에서 구한 3개 변수의 범위를 Table 3에 정리하였다.

3.4 접촉해석

본 논문에서 마모시험은 Fig. 6과 같이 금형강으로 제작된 핀에 수직하중을 가하고 상대재인 초고강도강판을 일정 속도로 미끄럼 운동하는 pin-on-disc 방식으로 실시한다. 접촉압력은 수직하중과의 관계를 도출하여 그에 따라 부과하여야 한다. 이를 위해 마모시험을 모사한 접촉해석을 수행하였다.

핀의 지름은 6mm이며 핀의 미끄럼 속도를 0.126 m/s로 부과하였다. 모델의 대칭성을 이용하여 1/2 모델로 해석을 수행하였다. 하중은 0~200N의 범위로 부과하여 하중에 따른 접촉압력의 변화를 도출하였다. 접촉해석 결과의 정확성을 검증하기 위하여 헤르츠(Hertz) 접촉이론[9]과 비교하여 Fig. 7에 도시하였다. 수직하중 40N 이상인 경우 오차가 다소 발생

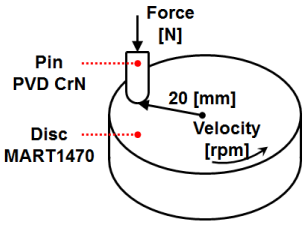
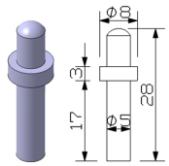


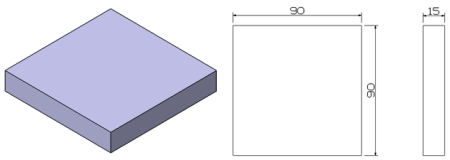
Fig. 8 Schematic shape of the pin-on-disc type wear test

Table 4 Experimental condition for the wear test

	Velocity (m/s)	Contact pressure (GPa)
Wear test	Max. 0.3	Min. 1.6
Stamping condition	0.1~1.0	0.1~0.7



(a) pin



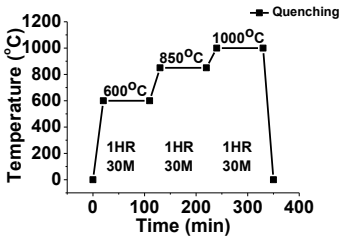
(b) dummy specimen

Fig. 9 Schematic shapes and dimensions of the fabricated specimens for the wear test

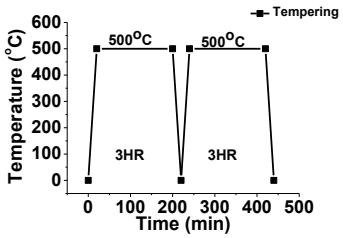
하며 하중과 접촉압력은 비선형적 관계를 나타냄을 알 수 있다. 성형공정해석에서 도출한 접촉하중 범위 0.1~0.7GPa에 해당하는 수직하중은 1~5N의 범위를 가짐을 확인하였다.

4. CrN 코팅층 마모시험

성형금형의 CrN 코팅층 마모수명을 예측하기 위해 마모시험을 실시하였다. 이를 위해 실제 금형 제작방법과 동일한 방법으로 핀 시험편을 제작하고 시험 변수가 마모량에 미치는 영향도를 분석하였다. 본 논문에서는 Fig. 8과 같이 1 pin-on-disc 방식으로 시험을 실시하였다. 제3장에서 도출한 성형공정에서의 변수 범위와 시험에서 활용한 범위를 Table 4에 비교하였다.



(a) quenching



(b) tempering

Fig.10 Procedure of the heat treatment of the specimen

4.1 마모시험편 준비

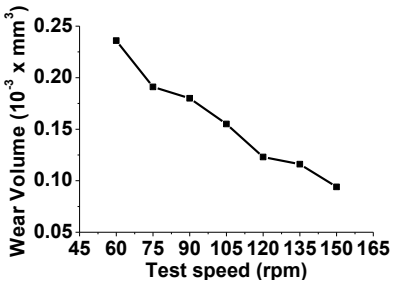
CrN 코팅층의 마모특성을 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 핀(pin)과 더미(dummy) 시험편을 제작하였다. Fig. 10의 열처리를 반영하여 STD11 소재에 진공열처리를 실시하고 이온 질화처리 및 PVD 코팅을 실시하였다. 더미시험편을 이용하여 코팅층의 밀착력 및 경도를 측정한 결과 각각 29N과 1630.07H_{it}으로 코팅층의 기준을 만족하였다. 핀과 더미 시험편 코팅층의 두께는 각각 10μm와 11μm로 측정되었다.

4.2 마모시험 결과

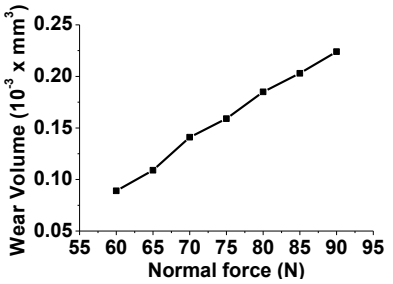
단일 변수가 코팅층 마모량에 미치는 영향을 분석하기 위해 Table 5와 같이 시험속도, 수직하중, 미끄럼거리 각각에 대하여 7가지 수준으로 1변수 연구를 수행하였다. 시험에서 사용한 기준변수는 60rpm, 60N, 60m 였다. 각각의 시험은 두 번씩 수행하여 평균 값을 적용하였으며 시험에서 얻어진 마모량 변화를 Fig. 11에 도시하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 시험속도가 증가할수록 마모량은 감소하였고, 수직하중과 미끄럼거리가 증가할수록 마모량은 증가하였다. 속도가 증가함에 따라 블랭크와

Table 5 Level of the test parameters for the wear test

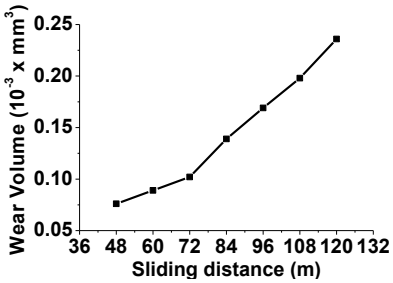
	Level of parameters
Test speed (rpm)	60, 75, 90, 105, 120, 135, 150
Normal force (N)	60, 65, 70, 75, 80, 85, 90
Sliding distance (m)	48, 60, 72, 84, 96, 108, 120



(a) test speed



(b) normal force



(c) sliding distance

Fig.11 Change of the wear volume according to the experimental conditions for the wear test

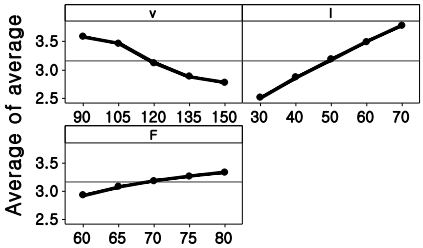
Table 6 Level of the design parameters for the Taguchi method

	Level of parameters				
Test speed (rpm)	90	105	120	135	150
Normal force (N)	60	65	70	75	80
Sliding distance (m)	30	40	50	60	70

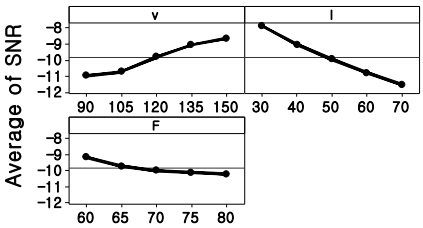
금형면 사이의 마찰계수가 감소하여 마모량이 감소한 것으로 추측되나, 보다 정확한 원인의 규명을 위해서는 추가연구가 필요한 것으로 보인다.

5. CrN 코팅층 마모예측

CrN 코팅층 수명예측을 위해 마모시험 결과를 활용하여 마모예측식을 도출하였다. 실험계획법(DOE:



(a) effect plot of average response



(b) effect plot of SNR ratio

Fig. 12 SN ratio and the average response according to the design variables

design of experiments)의 일종인 다구찌법을 이용하고 분산분석(ANOVA: analysis of variance)을 통해 추론된 값의 신뢰성을 분석하였으며 반응표면분석법(RSM: response surface method)을 이용하여 마모예측식을 제안하였다. 통계 분석은 MINITAB[10]을 이용하였다.

5.1 실험계획법을 통한 마모예측

수직하중, 시험속도, 미끄럼거리가 마모량에 미치는 영향과 기여도 순위 등을 분석하기 위해 Table 6에 도시한 변수 및 수준으로 $L_{25}(5^3)$ 직교배열표를 구성하고 마모시험을 실시하였다. 시험결과에서 얻어진 신호대 잡음비 및 평균값을 Fig. 12에 도시하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 마모량에 미치는 유의성은 미끄럼거리, 시험속도, 수직하중 순으로 나타났다. 분산분석의 일종인 일반선형모델을 이용하여 타당성을 확인한 결과 3가지 변수 모두 유의확률(p-value) 99%를 만족하였다.

분산분석 결과를 바탕으로 반응표면분석을 실시하여 식(1)과 같이 시험속도(v), 미끄럼거리(L), 수직하중(F)를 변수로 하는 마모깊이 d의 선형 예측식을 구성하였다. 여기서 마모깊이, 시험속도, 미끄럼거리, 수직하중의 단위는 각각 μm, rpm, mm, N이다.

$$d = 1.9085 - 0.0148v + 0.0321L + 0.0203F \quad (1)$$

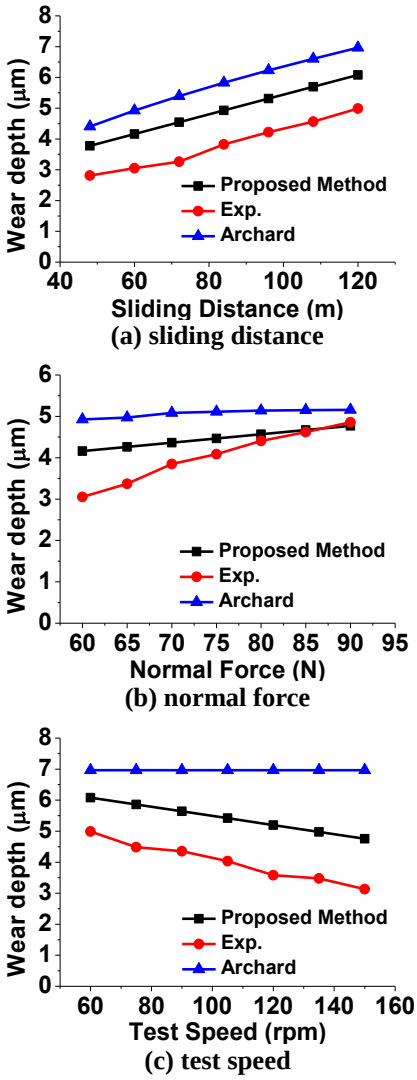


Fig.13 Comparison of the wear depth among the experiment and wear prediction models

성형해석결과에서 얻어진 접촉조건 중 가장 가혹한 조건인 시험속도 500rpm과 수직하중 5N을 부과하고 코팅층 두께를 10μm로 가정하였을 때 제안된 마모예측식을 활용하여 코팅층 수명을 예측하였다. 미끄럼거리가 약 480m에서 완전마모가 발생하여 성형 1회당 미끄럼 거리가 12mm임을 고려할 때 약 40,000회로 수명이 예측되었다.

5.2 Archard 마모 모델

Archard 마모 모델[11]은 마모계수를 이용하여 마모체적 V를 산출하여 마모수명을 예측하는 일반적인 예측식으로 식(2)와 같이 표현된다. 여기서, K는 시험결과에서 계산되는 마모계수, H는 표면경도, p는 수직압력, L은 미끄럼거리이다.

$$V = \frac{KpL}{3H} \tag{2}$$

Archard 마모 모델과 본 논문에서 제안한 예측식과의 가장 큰 차이는 속도 변수의 고려 유무이다. 시험결과를 이용하여 K 값은 $1.15602 \times 10^{-8} mm^2$, 수직압력 p는 700MPa, 표면경도 H는 $1630H_{it}$를 적용하여 수명예측을 실시하였다. 그 결과 약 570m에서 코팅층이 완전 마모 되었으며 성형 1회당 12mm의 미끄럼거리를 고려하였을 때 47,500회로 코팅층 수명이 예측되었다.

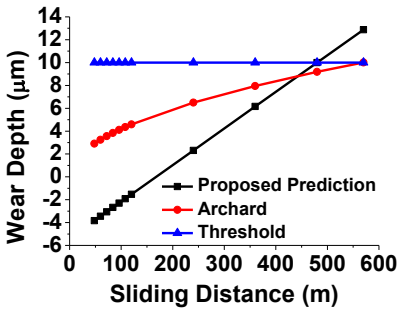


Fig.14 Change of the wear depth of coating layer from the wear prediction

5.3 수명예측 비교

수명예측식의 예측정도를 비교하기 위해 제4장에서 실시된 마모시험 결과를 Fig. 13에 제안된 수명예측식과 Archard 마모 모델의 수명예측을 비교하였다. 두 예측식 모두 경향은 유사하지만 본 논문에서 제안한 수명예측식이 시험값과 오차가 더 작으며 마모 깊이 변화의 기울기 또한 더 유사하다. 또한, Archard 모델의 경우 시험속도의 영향이 무시되어 동일 압력과 미끄럼거리에서 동일한 마모량을 예측하는 반면 제안된 예측식은 시험과 잘 일치하는 경향을 보인다.

마모예측식의 적용가능성을 확인하기 위하여 Fig. 14에 미끄럼 거리에 따른 마모 깊이의 관계를 도시하였다. 제안한 예측식(1)은 상수항의 존재로 인하여 초기 마모량이 예측되는 문제점이 있으며, 일정구간에서 마모량이 음수를 갖는 문제점이 발생한다. 실제 성형공정에서 도출되는 시험조건과 상이한 조건의 마모시험을 이용하여 마모예측식을 구성하였기 때문으로 판단된다. 이의 해결을 위해서 마모시험의

속도를 증가시키고 압력을 감소시킨 조건 하에서 추가시험 및 보정이 필요하다. 실제 성형공정을 반영한 추가시험을 실시하여 예측식을 구성하면 예측식의 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한, Fig. 11(c)에 도시한 바와 같이 마모량이 미끄럼거리에 비례한다는 것을 가정하고 상수항을 포함하지 않는 조건으로 예측식을 보정한다면 마모량이 음수인 문제점을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 인장강도 1.5GPa급 초고강도강판을 소재로 성형되는 차체 부품용 프레스금형의 CrN 코팅층 수명예측을 위한 수명예측식을 제안하고 적용 가능성을 분석하였다. 본 논문에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 1.5GPa급 초고강도강판을 소재로 성형되는 프레스금형의 CrN 코팅층 수명예측을 위해 성형공정 해석을 실시하여 마모관련 변수의 범위를 도출하였다. 접촉압력, 상대속도, 미끄럼 거리의 범위는 각각 0.1~0.7GPa, 0.1~1.0m/s, 0.5~12mm였다.

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

(3) 실험계획법을 이용하여 CrN 코팅층의 마모량에 영향을 미치는 기여도를 분석한 결과 미끄럼거리, 시험속도, 수직하중 순이었다. 분산분석과 회귀분석을 통해 마모시험 결과에 기반한 선형 마모수명예측식을 제안하였다.

(4) 제안된 예측식과 Archard 마모 모델을 이용하여 1.5GPa급 초고강도강판 차체부품용 성형금형의 CrN 코팅층 수명예측을 실시한 결과 속도를 고려하지 않은 Archard 마모 모델은 47,500회, 속도를 고려하는 제안된 예측식은 40,000회의 수명을 예측하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업핵심기술개발사업 수행의 결과입니다.

REFERENCES

[1] P. Carlsson, 2005, Surface Engineering in Sheet Metal Forming, Ph.D. Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.

[2] Y. J. Jeon, S. H. Kim, K. T. Yoon, Y. M. Heo, T. G. Lee, 2014, Indirect Prediction of Surface Damage for a Press Die with Wear Characteristics and Finite Element Stamping Analysis, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 1, pp. 29~34.

[3] K. H. Kang, 2015, Design Guideline with the Structural Analysis of the Press Die for Stamping an Auto-part with Ultra High Strength Steel of 1.5GPa UTS-grade, M. S. Thesis, Daegu University, Gyeong-buk, Korea.

[4] ESI Group, 2012, PAM-STAMP™, User's Manual.

[5] LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, Vol. 2, Material Models, Ver. 971.

[6] 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.

[7] 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.

[8] T. Belytschko, J. I. Lin, C. Tsay, 1984, Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 42, No. 2, pp. 225~251.

[9] H. Hertz, 1881, Über die Berührung fester Elastischer Körper, Journal Reine und Angewandte Mathematik., Vol. 92, pp. 156~171.

[10] MINITAB, 2004, Minitab Release 14 Manual.

[11] J. F. Archard, 1953, Contact and Rubbing of Flat Surface, J. Appl. Phys., Vol. 24, No. 8, pp. 981~988.

[12] 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.