

마모특성 및 유한요소해석을 이용한 프레스금형 손상 간접예측

전용준¹ · 김세호[#] · 윤국태² · 허영무¹ · 이태길³

Indirect Prediction of Surface Damage for a Press Die with Wear Characteristics and Finite Element Stamping Analysis

Y. J. Jeon, S. H. Kim, K. T. Yoon, Y. M. Heo, T. G. Lee

(Received November 18, 2013 / Revised December 19, 2013 / Accepted December 23, 2013)

Abstract

The damage level of the die surface was predicted by estimating the surface roughness with a finite element analysis and the wear characteristics. Wear and friction tests were conducted to compare the wear characteristics for three kinds of surface treatments – CrN, TiAlN and AlCrN coatings. A prediction model was derived from the surface roughness results with respect to contact pressure and sliding speed which were obtained from the wear test. Surface roughness values for the damage regions of the die surface were compared between the experiments and the prediction model, which shows fairly good agreement with each other.

Key Words : Press Die, Surface Damage, Wear Characteristics, Finite Element Stamping Analysis

1. 서 론

차량 경량화의 목적에 따라 소재의 고강도화가 급속하게 진행되고 있다. 고강도강 소재에서 발생하는 반력에 의해 금형의 손상이 일어나 금형의 수명이 감소하고 있으며, 제품의 표면품질과 치수 정밀도가 악화된다[1, 2] 프레스 성형공정 시 소재 유입 과정중 발생하는 마찰저항에 의한 금형의 마모가 금형손상의 가장 큰 원인이다. 금형마모에 의한 불량은 소착, 굽힘, 탈락, 크랙 등의 현상으로 크게 나눌 수 있다. 이와 같은 금형손상을 방지하기 위하여 금형 표면에 열처리 및 질화처리를 한 뒤 다른 원소의 표면층을 생성하는 표면처리(coating)를 실시하고 있다. 표면처리는 금형 모재 대비 표면경도를 높여 내마모성, 내박리성, 밀착성 등을 향상시키고 마

찰저항을 감소시켜 금형의 수명 및 제품의 품질을 향상시켜 주는 역할을 한다. 자동차 부품용 프레스 금형의 코팅소재에 따른 마모특성을 파악하는 연구는 금형수명을 간접적으로 예측하는데 중요한 기초 데이터를 제공한다.

본 논문에서는 자동차 부품용 프레스 성형공정에서 사용되는 금형의 마찰 및 마모특성을 시험으로부터 구하고, 얻어진 정보를 활용하여 제품 양산중인 프레스 금형의 표면수명을 표면거칠기를 사용하여 간접예측하였다. 마모시험의 접촉압력 및 미끄럼속력 조건을 이용하여 표면거칠기 예측식을 도출하였다. 금형손상이 집중적으로 발생하는 부위의 압력 및 속력 등 마모조건을 구하기 위하여 성형공정 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석에서 도출한 마모조건을 이용하여 해당부위의 표면거칠기를 예

1. 한국생산기술연구원 금형기술연구그룹

2. 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부

3. 대구대학교 대학원 기계공학과

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

측하였다. 예측식과 시험에서 얻은 표면거칠기를 비교하여 예측값의 정확성을 검증하였다.

2. 마찰 및 마모시험

2.1 금형소재 및 표면처리

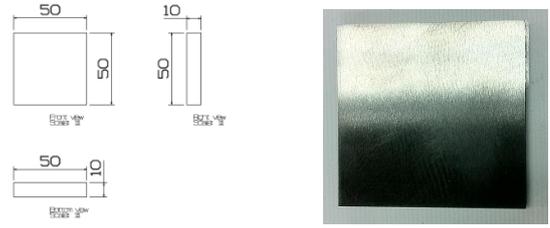
본 논문에서 고려한 금형소재는 냉간성형용 프레스 금형에 주로 사용되고 있는 합금 공구강인 STD11이다. 표면처리 방법으로 무처리, CrN, TiAlN, AlCrN 등 4종이 사용되었다. 표면처리를 위한 시험편 제작을 위하여 모재인 STD11 강종을 1차 밀링 가공 후 진공열처리를 실시하고, 열처리에 의하여 미소 변형된 시험편에 2차 사상작업을 실시하였다. 코팅작업 온도에서 변형이 발생하지 않도록 480~500°C의 온도범위에서 3회 뜨임(tempering) 처리를 하였다. 이후 표면경화 및 코팅층 밀착력 향상을 위한 이온 질화처리를 하였다. 최종적으로 아크 이온 플레이팅 증착법을 이용한 PVD 코팅을 실시하였다. 시험편에서의 표면거칠기 0.1 μ mR_a와 코팅두께 10 μ m 수준이 만족되도록 표면처리가 실시되었다. 시험편제작 이후 코팅층의 두께 측정, 성분 분석, 경도 측정 및 밀착력 시험 등의 기본성능 평가[3]를 통하여 프레스금형에 사용되는 표면처리의 성능을 만족하는 것을 확인하였다. 마찰 및 마모시험에 사용될 시험용 시험편의 형상을 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 도시하였다.

2.2 저하중 마모특성

표면처리에 따른 마모특성을 정량적으로 파악하기 위하여 마모시험기를 이용하여 스크래치 가속 표면 내구시험을 실시하였다. 다양한 하중 및 속력 조건을 부여하기 위하여 고하중용 및 저하중용 시험기를 별도로 사용하여 시험 및 내구성 분석을 수행하였다. 저하중 마모시험은 Fig. 3에 도시한 바와 같이 직선 왕복 미끄럼 운동을 하는 방법으로 진행된다. 저하중 마모시험은 50N의 수직하중을 가한 뒤 볼의 미끄럼 속력 0.12m/s과 15mm 왕복 행정 조건으로 마모거리 2,130m에 도달할 때까지 실시되었다. 시험이 끝난 후 마모된 시험편형상은 Fig. 4에 도시하였으며, Fig. 5에 도시한 바와 같이 무처리, TiAlN, CrN, AlCrN 순으로 마모량이 작게 나타났다.

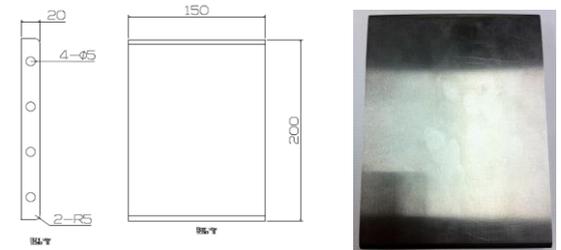
2.3 고하중 마모특성

고하중 마모시험은 Fig. 6 과 같은 ball-on-disc 방식



(a) dimension (b) fabricated specimen

Fig. 1 Schematic shape of the specimen for the wear test



(a) dimension (b) fabricated specimen

Fig. 2 Schematic shape of the tool for the friction test

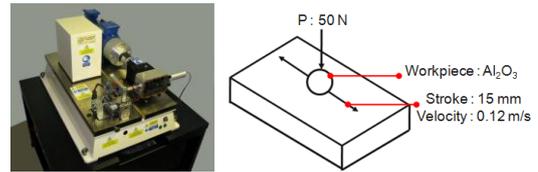
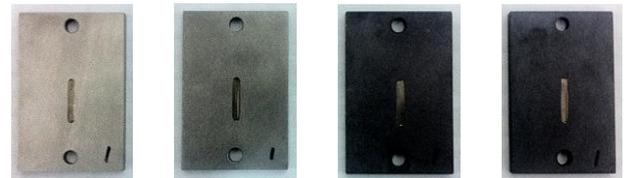


Fig. 3 Shape of the wear test with linear scratch type



(a) base-metal (b) CrN (c) TiAlN (d) AlCrN

Fig. 4 Specimen shapes after the wear test with linear scratch type

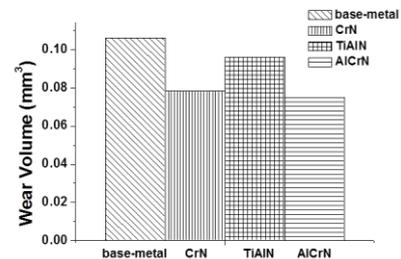


Fig. 5 Comparison of volume loss amount after the wear test with linear scratch type

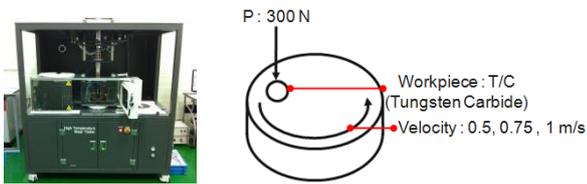


Fig. 6 Shape of the wear test with ball-on-disc type

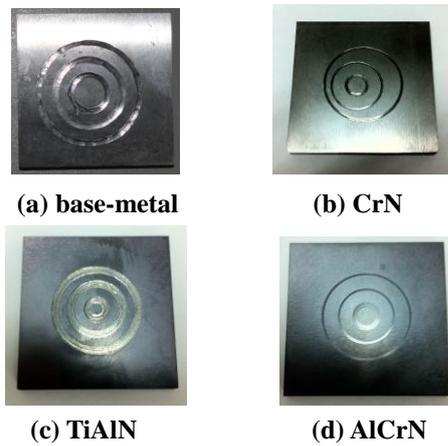


Fig. 7 Specimen shapes after the wear test with the ball-on-disc type

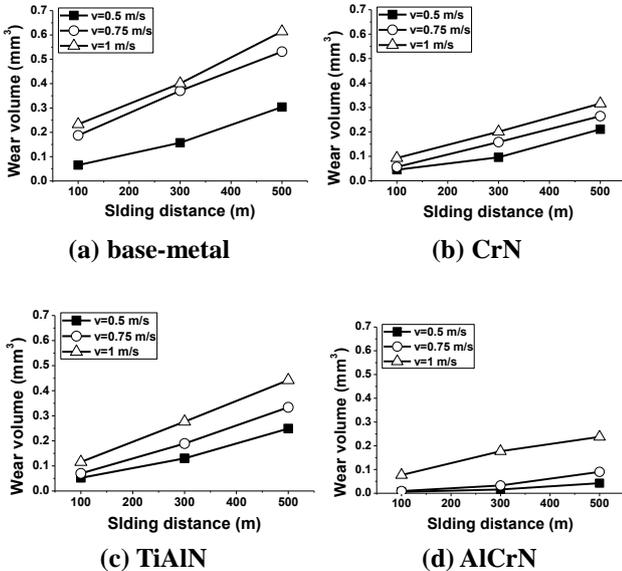


Fig. 8 Variation of the wear volume according to the sliding distance and the sliding speed

으로 수행되었으며, 상대재로 초경 텅스텐 카바이드 볼이 사용되었다. 시험은 100, 300, 500N 등 3종의 수직하중 및 0.5, 0.75, 1m/s의 접선 마모속력의 조건으로 실시되었다. 동일 조건에서 마모거리를 각각 100, 300, 500m 세가지 종류로 변경하면서 시험을 실시하

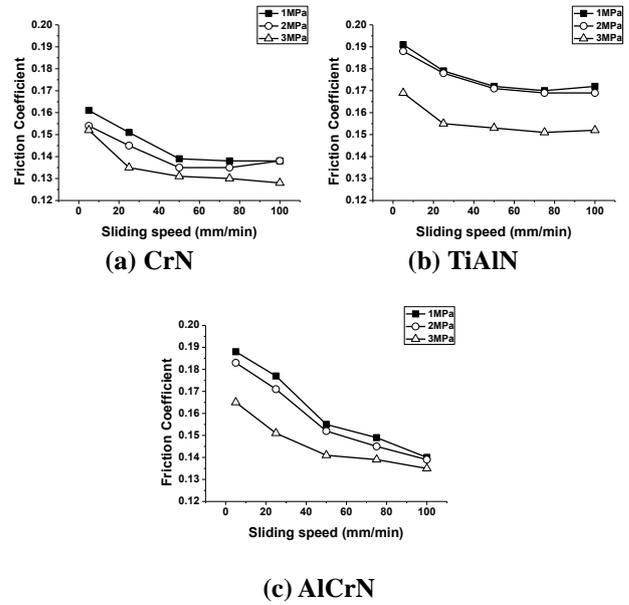


Fig. 9 Variation of Coulomb friction coefficients according to the contact pressure and the drawing speed

였다. 시험 후 표면 조도계를 이용하여 마모체적을 도출하고 표면처리에 따른 마모량의 측정을 수행하였다. 시험 후의 시편형상을 Fig. 7에 도시하였으며, Fig. 8에 각 코팅종류에 따라 속도 및 마모거리의 변화에 대한 마모량의 변화를 도시하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 마모거리 및 마모속력 증가에 따라 마모량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 저하중 마모시험과 동일하게 무처리 시편에서 가장 큰 마모량이 관찰되었으며, AlCrN 코팅의 경우가 내마모성이 가장 우수한 것으로 결론지을 수 있었다.

2.4 마찰특성

표면처리에 따른 금형과 소재간의 마찰특성을 실제 프레스 성형공정과 유사한 조건에서 파악하기 위해 편마찰 시험기를 이용하여 각 표면처리별 마찰 특성을 파악하였다. 다양한 인출속력 및 가압력의 조건 하에서 마찰 특성의 파악하고 쿨롱(Coulomb) 마찰계수를 도출하였으며, 공정조건에 따른 마찰계수 변화를 정량분석하였다. 도출된 마찰계수는 제 3장에 설명될 양산 프레스 부품의 성형공정 유한요소해석에 필요한 입력변수로 활용된다. 3종의 표면처리 금형과 SPRC440 강종으로 제작된 블랭크 사이의 마찰시험을 실시하였다. 인출속력을 5, 25, 50, 75, 100mm/min으로 부과하고, 가압력은 프레

스성형에서의 접촉압력 조건인 1, 2, 3 MPa 로 부과하여 마찰시험을 수행하였다. Fig. 9 에 각 조건과 도출된 쿨롱 마찰계수를 비교하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 TiAlN 코팅에서 가장 큰 마찰계수를 보였다. 이는 시편 인출 시 TiAlN 코팅층이 다른 코팅층에 비해 시편 표면돌기에 금힘이 쉽게 발생되어 마찰계수가 가장 크게 나타난다고 볼 수 있다. 마모시험 시 마모량이 가장 작은 AlCrN 코팅에 비해 CrN 코팅의 마찰계수가 낮게 나타난 것은 코팅층 밀착력 차이에 의한 것으로 유추된다.

3. 프레스 성형공정 및 해석조건

3.1 대상 금형

본 논문에서 금형의 수명예측 대상으로 선정한 부품은 Fig. 10에 도시한 차량용 카울 크로스바(cowl cross bar)의 브라켓류이다. 소재는 SPRC440으로 초기두께는 1.0mm 이다. 프레스 금형의 형상은 Fig. 11에 도시하였다. 본 금형에 제2장에서 수행한 마찰 및 마모시험에서 사용한 CrN 코팅과 동일한 조건의 표면처리를 실시하였다.

3.2 금형 손상파악

Fig. 12에 표면처리를 하지 않은 금형으로 약 30만 회 성형한 후 생산된 제품을 도시하였으며, 코너 라운드 및 직벽부에 금힘 불량이 발생됨을 볼 수 있다. 소재가 플랜지부로부터 유입되면서 과도한 마찰에 의하여 금형의 다이 어깨부와 직벽부에 마모가 발생함을 보여준다. 마모에 의하여 저하된 금형 표면거칠기가 제품 표면을 손상시킨 것으로 유추할 수 있다. 이후 표면처리 금형에서도 유사한 경향의 표면손상이 일어날 것으로 예측된다.

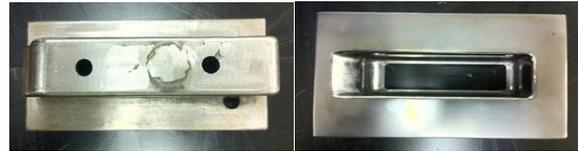
3.3 성형공정 유한요소해석 조건

대상부품 성형공정은 제1공정인 폼(Form) 공정과 제2공정인 피어싱 공정의 두단계로 나누어진다. 본 논문에서는 대부분의 마찰 및 마모가 집중되는 제1공정에 대해서만 해석을 수행하였다. Fig. 13에 제1공정의 개략도를 도시하였다.

인장시험에서 얻은 재료의 기계적 물성은 Table 1 과 같다. 해석을 위한 블랭크와 금형의 유한요소모델을 Fig. 14에 도시하였다. 블랭크 고정을 위한 패딩력은 2.04kN을 부과하였으며 상형의 하강속력은



Fig.10 Shape of the fabricated bracket part



(a) upper die (b) lower die

Fig.11 Shape of tools for manufacturing the bracket part



Fig.12 Scratch inferiorities during the stamping process of the bracket part

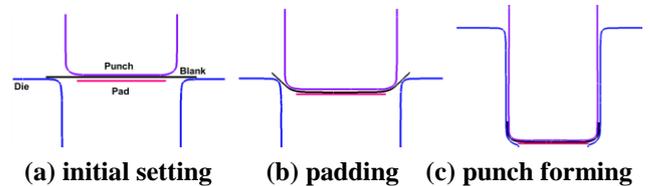


Fig.13 Schematic description of the deformation mechanism during the forming process

Table 1 Mechanical properties of the blank sheet

YS (MPa)	344.5	K (MPa)	718.4
UTS (MPa)	565.0	n	0.158
R_{avg}	1.15	ϵ_0	0.0096

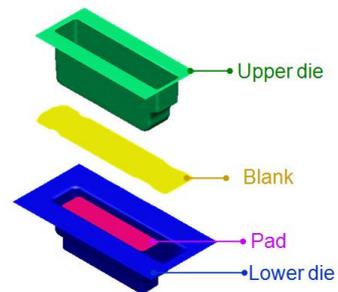


Fig.14 Finite element model for the stamping analysis of the bracket part

Table 2 Surface roughness with contact pressure and sliding speed obtained from the wear test

Contact pressure (GPa)	Sliding speed (m/s)	Sliding distance (m)	Roughness ($\mu\text{m}R_a$)
0.12	0.12	2130	1.9
0.7	0.5	100	0.86
		300	0.97
		500	1.35
	0.75	100	0.88
		300	1.55
		500	1.77
1.0	100	1.18	
	300	1.75	
	500	1.97	

성형시험과 동일한 0.387m/s를 사용하였다. 금형과 블랭크는 별도의 윤활을 하지 않았으며, 해석 시 마찰시험에서 얻은 쿨롱 마찰계수를 적용하였다. 성형 해석은 상용프로그램인 PAM-STAMP[4]를 사용하였다. 해석결과로부터 금형에 발생한 수직 접촉압력과 해당부위 블랭크의 상대 미끄럼 속력을 추출하여 금형손상 예측의 입력값으로 이용하였다.

4. 금형손상 간접예측

4.1 표면거칠기 예측모델 구성

제2장의 마모시험 결과와 해석에서 얻은 마모조건을 이용하여 금형 표면손상의 간접 예측을 실시하였다. 일반적으로 코팅층 박리 등 손상의 육안검사를 통하여 금형의 표면손상 여부를 결정하게 되나 정확한 박리시점을 찾는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 표면손상을 예측할 수 있는 간접인자로 표면거칠기를 이용하였다. 표면거칠기는 미끄럼 속도, 접촉압력, 재질, 소재경도, 윤활 등 많은 인자의 영향을 받으나, 프레스 금형의 마모특성에 가장 큰 영향을 주며 시험에서 구하기 가장 용이한 인자가 미끄럼 속도 및 접촉압력이다. 본 논문에서는 표면거칠기 값을 미끄럼 속도 및 접촉압력에 따라 식(1)과 같은 예측근사식으로 구성하였다.

$$R_a = R_a(P, v) \tag{1}$$

여기서, R_a , P , v 는 각각 평균 표면거칠기, 접촉면의 수직 접촉압력 및 블랭크의 미끄럼 속도이다. 마모

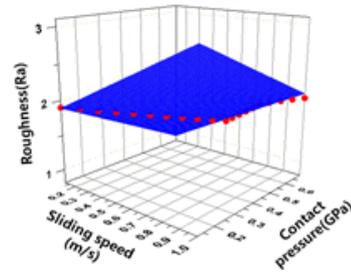


Fig.15 Fitted response surface of the roughness according to the sliding speed and the contact pressure

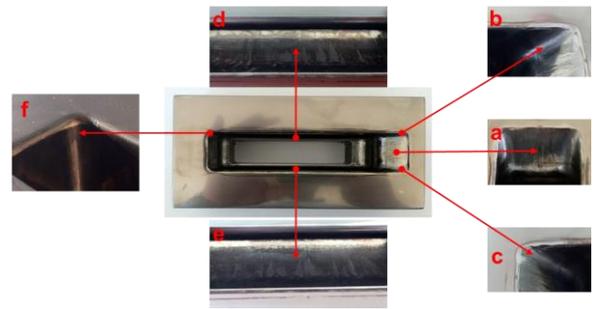


Fig.16 Measurement regions for the surface roughness of the die

시험의 입력조건인 미끄럼 속도 및 접촉압력에 따라 구하여진 표면거칠기를 Table 2 에 도시하였다. 여기서, 유한요소 접촉해석으로 마모시험을 모사하고 접촉부위의 수직압력을 도출하여 사용하였다. Fig. 15 와 같이 내삽을 통하여 식(1)을 다변함수로 가정하여 식(2)로 표현된 회귀식을 도출하였다. 도출된 식은 해석에서 계산된 접촉압력 및 미끄럼 속력을 대입하여 표면거칠기를 예측하는데 사용된다.

$$R_a = 1.30384v - 1.75158P + 1.94657 \tag{2}$$

4.2 금형 손상파악

금형 주요 손상부위의 표면거칠기를 정량화하기 위하여 표면 조도계를 이용하여 Fig. 16에 도시한 6개 부위의 중심선 평균거칠기 값을 측정하였다. CrN 표면처리된 금형으로 브라켓 제품을 약 10만회 생산 후 측정을 실시하였다. Table 3에 측정부위의 손상 형태와 표면거칠기 측정결과를 도시하였다.

4.3 금형 표면거칠기 예측

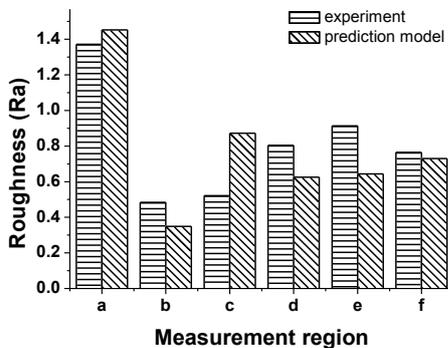
도출된 표면거칠기 예측식을 이용하여 금형에서

Table 3 Surface roughness values measured at the damaged regions of die

Measurement region	Roughness (μmR_a)	Damage modes
a	1.372	Scratch, Sticking
b	0.484	Scratch
c	0.522	Scratch
d	0.804	Scratch
e	0.914	Scratch
f	0.765	Scratch

Table 4 Predicted values of surface roughness with the finite element analysis

Measurement region	Sliding speed (m/s)	Contact pressure (GPa)	Roughness (μmR_a)
a	0.499	0.659	1.453
b	0.42	1.225	0.349
c	0.37	0.889	0.872
d	0.20	0.904	0.625
e	0.26	0.934	0.644
f	0.26	0.888	0.730

**Fig.17** Comparison of the surface roughness between the experiment and the prediction model

의 표면거칠기를 간접예측하였다. 해석 수행 후 금형 손상부위의 미끄럼 속도 및 수직방향 접촉압력을 도출하고 식(2)에 대입하여 Table 4와 같이 표면거칠기 값을 예측하였다. 해석에서 얻어진 금형 표면거칠기 예측값과 측정값을 Fig. 17에 정량적으로 비교하였다. 시험결과 대비 예측값에 최소 3.74%, 최대 67.1%의 오차가 발생했다. 측정영역 c를 제외하고는 모두 20% 내외의 오차를 보이고 있으며, 대체적으로 잘 일치하는 경향을 보였다. 접촉압력과 속력의 함수로 표현된 간단한 근사식을 통해서도 합리적인 예측결과를 보임을 확인하였으며, 추후 실

제적인 인자의 고려를 통하여 예측식의 정확도를 향상시킬 수 있는 가능성이 있음을 입증하였다.

5. 결론

본 논문에서는 마모시험에서 얻은 정보와 유한요소법을 적용하여 자동차 부품용 프레스금형의 수명을 간접적으로 예측하였다. 3종의 표면처리가 실시된 금형표면의 마모시험 및 마찰시험을 수행하고, 각 표면처리 상태의 내구성을 상대 비교하였다. 구하여진 마모 및 마찰 데이터를 활용하여 CrN 코팅이 실시된 금형표면의 거칠기를 미끄럼 속력과 접촉압력의 함수로 근사하였으며, 근사식을 이용하여 금형 각 손상부위의 표면거칠기를 예측하였다. 시험에서 얻은 표면거칠기 값과 비교한 결과 정성적으로 잘 일치하였으며, 대부분 정량적으로 20% 이내의 예측정확도를 보였다. 금형수명과 표면거칠기를 직접적으로 연관지어 예측하는 것은 여전히 어려운 일이나 양산금형 표면손상 및 수명예측을 위한 기본적인 데이터로 활용할 수 있는 가능성을 보였다 고 판단된다.

REFERENCES

- [1] Z. Wang, H. Kubota, D. Xue, Q. Lin, M. Okamura, 2006, Galling Behavior in Square Cup Drawing of High-tensile-strength Steel, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 47, No. 549, pp. 988~992.
- [2] H. S. Choi, S. G. Kim, B. M. Kim, D. C. Ko, 2013, Quantitative Evaluation of Scratch Related Tool Life for Stamping of UHSS Using Pin-on-Flat Surface Test, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 2, pp. 86~92.
- [3] Y. J. Jeon, 2011, A Study on the Prediction of Tool Damage according to the Surface Treatment in the Press Stamping Process, M. S. Thesis, Graduate School, Daegu University, Gyeongbuk, Korea.
- [4] ESI Group, PAM-STAMP™ User's Manual, 2010.
- [5] J. F. Archard, 1953, Contacts and Rubbing of Flat Surface. J. of Appl. Phys., Vol. 24, No. 8, p. 981-988.
- [6] N. J. Kim, Y. T. Keum, 2013, Experimental Determination of Friction Characteristics for Advanced High Strength Steel Sheets, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 4, pp. 223~228.