

TRIP1180 판재의 냉간 스탬핑공정에서 금형강의 경도 특성에 따른 내마모성 평가

방준호^{1,2}, 배기현³, 송정환^{3,#}, 김흥기⁴, 이명규^{5,#}

Quantitative Evaluation of Wear Resistance of Stamping Tool with Respect to Hardness of Tool Materials in Cold Stamping of TRIP1180 Steel Sheets

J. H. Bang, G. Bae, J.H. Song, H.G. Kim, M.G. Lee

(Received April 22, 2022 / Revised May 12, 2022 / Accepted May 16, 2022)

Abstract

The purpose of this study was to quantitatively evaluate the influence of hardness of tool materials on wear resistance in the sheet metal forming process. Punches used in the wear test were made of STD-11 and K340 tool material, and the tempering temperature was set to 530 °C and 500 °C, respectively, to control the hardness of the tool materials. The punches mimic the shape of stamping tool of automotive body component to reflect its plastic deformation, and are designed to concentrate wear on the curvature region of punches. Progressive die and coil sheet were used to save time, cost, and raw sheet materials. By quantitatively measuring the wear depth of the punches, the wear behavior and mechanism of the punches were investigated, and characteristics of hardness and wear resistance according to tool materials and tempering temperatures were evaluated. Testing results indicate that the punch made of K340 tool steel with higher hardness had better wear resistance than that of STD-11 tool steel, and the hardness and wear resistance of tool steel were significantly impacted by the tempering temperature.

Keywords: Tool Wear, Cold Stamping, Progressive Die, Ultra High Strength Steel

1. 서론

최근 전기차나 수소차와 같은 친환경 자동차에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 이로 인해 배터리나 연료전지의 보호 및 승객의 안전성 확보를 위해 충돌성능 개선과, 주행거리 향상을 위한 차체 경량화 연구가 활발히 진행되고 있다. 차체 경량화는 차체의 경

량소재 적용을 통해 효과적으로 이뤄질 수 있다[1]. 차체의 경량소재는 알루미늄 합금(aluminum alloys), 마그네슘 합금(magnesium alloys), 초고강도강판(advanced high-strength steel, AHSS), 유리섬유 복합재(glass fiber composites), 탄소 섬유 강화 플라스틱(carbon-fiber reinforced composites, CFRP)을 가장 많이 사용하며, 그 중에서 초고강도강판이 가장 경제적이며 우수한 충돌 에너지 흡수 성능을 가진다[2-5]. 초고강도 강판의 성형은 기존 강판의 성형보다 높은 성형 반력으로 인해 예상보다 이른 금형 마모를 초래한다. 금형 마모는 금형의 유지보수 비용 증가, 제품 품질 저하, 생산성 감소와 같은 다양한 문제와 직결된다. 따라서 금형 마모는 초고강도강판의 성형공정에서 관리되어야 하는 중요한 요소이다.

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소, 학생연구원

2. 서울대학교 재료공학부, 박사과정

3. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소, 수석연구원

4. 포스코 철강솔루션마케팅실, 수석연구원

5. 서울대학교 재료공학부, 교수

Corresponding Author : ¹Korea Institute of Industrial Technology, Molding & Metal Forming R&D Department; ³Seoul National University & RIAM, Department of Materials Science and Engineering

E-mail: ¹jhsong@kitech.re.kr; ³myounglee@snu.ac.kr

ORCID : 0000-0002-5060-6102

성형공정에서 금형의 효율적인 관리를 위해 내마모성 향상을 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. Pereira 등은 성형공정에서 금형의 가공오차가 마모에 미치는 영향을 연구하였으며, 작은 형상 오차가 금형의 수명 저하에 상당히 많은 영향을 주는 것을 확인하였다. Podgornik와 Jerina은 금형의 표면 거칠기가 코팅 금형의 내마모성에 영향을 끼친다는 것을 밝혔다. Gonzalez-Pociño 등은 담금질(quenching), 뜨임(tempering), 질화처리(nitriding)와 같은 열처리 공정 온도 변화가 접촉 마모(adhesive wear)에 미치는 영향을 확인하였다. Ghiotti와 Bruschi 그리고 Cora 등은 성형공정을 모사한 마모실험법을 이용하여 다양한 코팅들의 내마모성을 비교하였다. 앞서 소개한 연구들은 다양한 금형 제작 변수들이 금형 마모에 미치는 영향을 확인하였으며 이들의 통제를 통해 효과적으로 내마모성을 향상시킬 수 있었다. 하지만 각 금형 변수들이 금형 마모에 미치는 영향을 정성적으로 상대비교 했으며, 실제 성형 공정의 소성 변형이 마모에 미치는 영향을 반영하지 않아 성형 금형의 마모 평가 및 예측에 적용하기 힘든 면이 있다[6-10].

본 연구에서는 성형공정에서 금형강의 경도 특성이 내마모성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 마모실험 대상인 펀치는 STD-11 과 K340 금형강으로 제작하였으며, 뜨임 온도를 530℃와 500℃로 달리하여 금형강의 경도를 조절하였다. 펀치는 차체 부품 성형공정의 금형 형상을 모사하여 설계하였으며, 프로그레시브 금형(Progressive die)을 이용하여 연속적이고 효율적인 실험이 가능하였다. 마모깊이를 정량적으로 측정하여 펀치의 마모거동과 마모 메커니즘을 평가하였으며 금형강종과 뜨임온도에 따른 경도 특성 및 내마모 특성을 정량적으로 비교하였다.

2. 마모실험 구성

2.1 펀치 설계

성형공정에서 접촉압력과 미끌림거리는 금형 마모수명에 주요한 영향을 주는 인자이다[11-12]. 금형 마모는 일반적으로 접촉압력과 미끌림거리가 집중적으로 작용하는 금형의 곡률부에서 발생한다. 곡률반경이 작을수록 더욱 높은 접촉압력이 금형면에 집중되기 때문에 마모에 취약하다. 따라서 마모실험 대상인 펀치는 자동차 부품의 성형공정에 사용하는

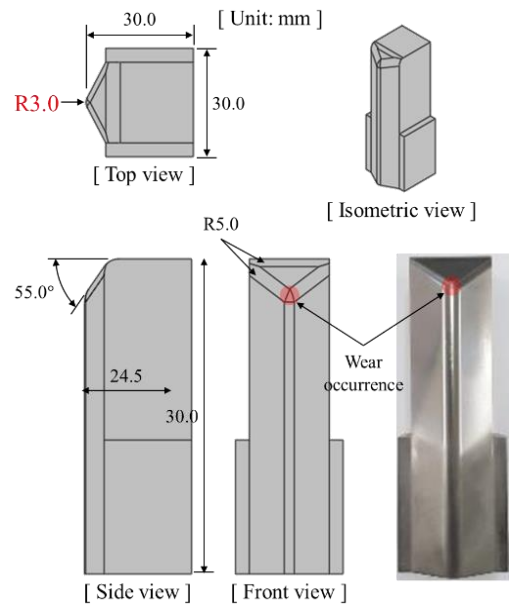
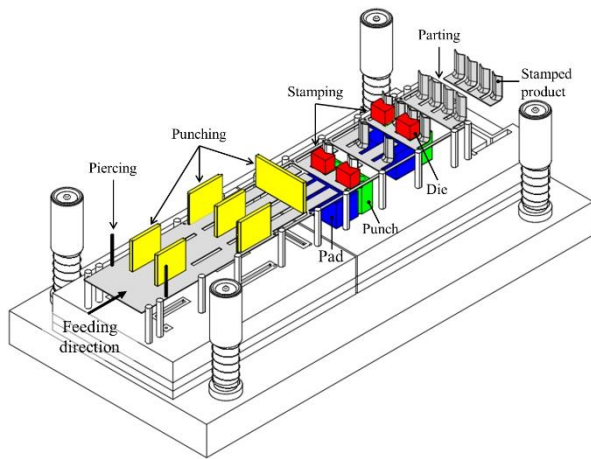


Fig. 1 Geometries and dimensions of punch with a radius of 3.0 mm and 5.5 mm [13]

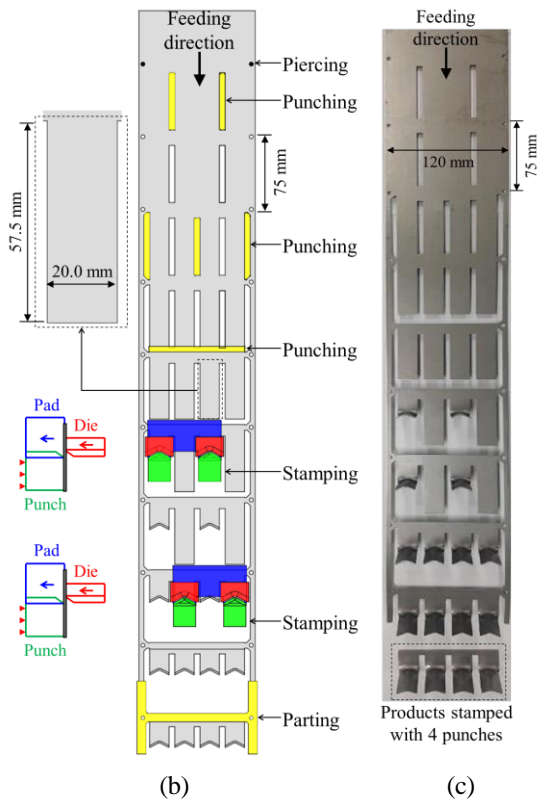
금형의 마모 취약부 형상을 참고하였다. 펀치는 Fig. 1 과 같이 블랭크를 성형할 때 접촉압력이 펀치의 곡률부에 집중하도록 설계하였으며 곡률 반경은 3.0 mm 이다. 펀치는 인서트 형태로 만들어 마모량 측정과 교환을 편리하게 하였다. 아이어닝(ironing)을 방지하기 위해 다이와 펀치 사이의 간격은 판재 두께인 1.2 mm 를 고려하여 10% 틈새(clearance)인 1.32 mm 로 설계하였으며 펀치 스트로크는 35.0 mm 이다. 펀치 형상에 대한 상세한 설명은 Bang 등 [13]의 논문을 참고하였다.

2.2 연속 마모실험 설계

판재의 냉간 성형공정의 금형 마모실험은 상당히 많은 시간, 판재, 그리고 인력이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 연속적이고 효율적인 마모실험이 가능하도록 프로그레시브 금형을 이용하였다. 프로그레시브 금형은 여러 세분화된 금속가공 공정을 하나의 동일한 금형에 포함시켜 설계하며 판재가 단계적으로 각 공정을 지나면서 최종 제품 형상을 가공한다. 따라서 일정한 작업속도로 연속적인 제품의 대량생산이 가능하기 때문에 본 연구에서는 프로그레시브 금형을 기계식 프레스에 장착하고 너비 120mm 의 코일을 연속적으로 피딩하여 마모실험을 수행하였다.



(a)



(b)

(c)

Fig. 2 Tool design for continuous wear test: (a) Design of progressive die; (b) Layout of metalworking operations; (c) steel strip [13]

프로그레시브 금형의 금속가공공정 레이아웃은 Fig. 2 (a)와 같다. 설계된 금속가공공정은 피어싱 (Piercing), 펀칭(Punching), 스탬핑(Stamping), 그리고 파팅(Parting)을 포함한다. 피어싱은 전단 금형을 이용하여 판재에 구멍을 뚫는 공정으로 이 구멍을 통

해 판재를 75 mm 의 일정한 간격으로 프로그레시브 금형에 공급한다. 펀칭은 전단 금형을 이용하여 가로와 세로가 각각 20.0 mm 와 57.5 mm 인 블랭크 형상을 만드는 공정이다. 스탬핑에서는 펀치가 블랭크와 접촉하고 성형하는 공정이며, 이 공정 중 펀치에 마모가 발생한다. 네 종류의 펀치가 동시에 가공하도록 설계하여 실험하는데 필요한 시간과 비용을 절감할 수 있었다. 파팅은 완성된 제품을 전단 금형을 이용하여 판재로부터 잘라내는 공정이다. 프레스 속도는 자동차 부품 성형 공정에서 일반적으로 사용하는 속도인 15 spm(strokes per minute)을 실험에 적용하였다. Fig. 2 (b)에 프로그레시브 금형의 금속가공공정을 모식화 하였으며, 실제 프로그레시브 금형을 통해 연속성형 된 샘플은 Fig. 2(c)와 같다. 시험설계에 관한 상세한 내용은 Bang 등 [13]의 논문을 참고하였다.

2.3 금형 및 판재 재료물성

이 연구에서는 두께가 1.2 mm 인 비도금 TRIP1180 판재를 사용하였다. 이방성 특성을 평가하기 위해 0°(RD), 45°(DD), 90°(TD)에 대해 ASTM E8 규격의 시편을 추출하였다. MTS810 만능시험기를 사용하여 0.025 mm/s 의 준정적 속도에서 실험을 수행하였다. 변형률은 ARAMIS Digital Image Correlation (DIC) system 을 이용하여 계산하였다. TRIP1180 1.2t 의 인장실험 결과는 Table 1 에서 확인할 수 있다.

Table 1 Tensile properties of TRIP1180 1.2t steel sheet [13]

YS (MPa)	933	
UTS (MPa)	1196	
Swift hardening law $\sigma = k(\epsilon_0 + \epsilon)^n$	k (MPa)	1584.6
	ϵ_0	0.0036
	n	0.0858
R-value	0°	0.7382
	45°	0.9786
	90°	0.8671

펀치는 POSCO 포항 제철소에서 만들어진 Steel Tool Die(STD)-11 금형강과, BÖHLER 사에서 만들어진 K340 금형강이 사용되었다. 마르텐자이트(martensite) 미세조직을 형성하여 금형강을 경화하기 위해 열처리를 수행하였다. STD-11 과 K340 금형강은 650, 850, 1030°C에서 각각 80, 120, 200 분씩 진공에서 경화(hardening)하고 공랭하였다.

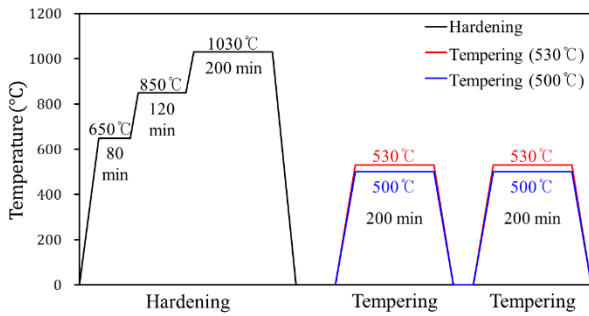


Fig. 3 Heat treatment conditions of hardening and tempering

Table 2 Chemical compositions of STD-11, K340, and TRIP1180 (wt%)

	STD-11	K340	TRIP1180
C	1.55	1.10	0.285
Si	0.26	0.90	1.61
Mn	0.30	0.40	2.15
Cr	11.36	8.30	-
Mo	0.81	2.10	-
V	0.20	0.50	-
P	-	-	0.018
S	-	-	0.001

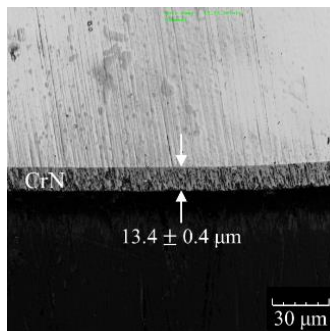


Fig. 4 Thickness of PVD CrN coating layer [13]

담금질을 통해 발생한 취성(brittleness)을 줄이기 위해, Fig. 3의 빨간선과 같이 530°C에서 200 분동안 두 번의 뜨임을 수행하였다. STD-11과 K340 금형강의 비커스 경도(Vickers hardness)는 0.1 kgf의 압입하중으로 측정되었으며 각각 $788.5 \pm 12.2 \text{ HV}_{0.1}$ 와 $831.3 \pm 14.4 \text{ HV}_{0.1}$ 이다. 또한, STD-11 금형강의 뜨임 온도조건에 따른 경도를 비교하기 위해 500°C에서 200 분동안 뜨임(파란선)을 하였으며, 530°C의 뜨임에서 보다 낮은 비커스 경도인 $724.5 \pm 33.7 \text{ HV}_{0.1}$ 이 측정되었다. TRIP1180, STD-11, K340의 화학 조성은 Table 2에 표기하였다.

Table 3 Punches used in wear test with respect to tool materials and tempering temperatures

Punch number	Tool material	Tempering temperature
1 (reference)	STD-11	530°C
2	K340	530°C
3	STD-11	500°C

펀치 표면은 PVD(physical vapor deposition) 방법을 이용하여 CrN으로 도금하였다. CrN 코팅층의 두께는 Fig. 4와 같이 $13.4 \pm 0.4 \mu\text{m}$ 이며 광학현미경을 통해 측정하였다. 코팅층이 매우 얇기 때문에, 압입하중이 너무 크면 코팅만의 경도 측정이 어렵다. 따라서 금형강 경도의 영향은 무시하고 코팅 경도만 측정하기에 적합한 0.08 kgf를 사용하였다. CrN 코팅의 비커스 경도는 $2,105.9 \pm 15.5 \text{ HV}_{0.08}$ 이다.

2.4 실험 조건 및 마모깊이 측정

성형공정에서 금형 마모는 금형강의 경도특성에 의해 영향을 받는다. Table 3에 마모실험에 사용된 펀치의 제작 조건을 제시하였다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 금형강종 및 뜨임 온도에 따른 금형의 경도특성을 분석하기 위해 3가지 펀치를 제작하였으며, 각 펀치의 경도특성이 마모수명에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 모든 펀치는 곡률반경이 3.0 mm이며 CrN으로 코팅하였다. 펀치 1은 STD-11 금형강을 530°C의 온도에서 뜨임 처리하였다. 펀치 1은 금형강종 및 뜨임 온도 변수들이 금형 마모에 미치는 영향을 확인하기 위한 비교기준이 되었다. 금형강종 별 경도 특성이 내마모성에 미치는 영향을 평가하기 위해 K340 금형강으로 만들어진 펀치 2와 비교하였다. 펀치 3은 의도적으로 STD-11 금형강의 뜨임 온도를 500°C로 변경하여 금형강의 경도를 조절하였으며, 이를 통해 적절한 뜨임 온도의 중요성을 확인하였다.

판재 성형 중 발생하는 펀치 표면의 손상은 표면의 프로파일 변화로 이어진다. 따라서 펀치의 점진적인 마모거동을 분석하기 위해 실험 타수에 따른 마모 깊이를 정량적으로 측정하였다. 접촉압력과 미끌림거리가 집중적으로 작용하여 마모가 발생할 것으로 예상되는 펀치 곡률부 표면 프로파일을 접촉식 3차원 좌표 측정기(contact-type 3-dimensional coordinate measuring machine)를 이용하여 측정하였다. 구체적인 측정 조건 및 방법은 Bang 등 [13]의 논문을 참고하

였다. 실험 전의 펀치 표면 프로파일을 먼저 측정하였으며, 마모실험이 진행함에 따른 마모깊이 변화를 추적하기 위해 동일한 위치에서 표면 프로파일을 측정하였다. 마모실험 전과 후의 표면 프로파일의 차이를 통해 마모 깊이를 구하였다. 펀치는 표면 프로파일을 측정하기 위해 마모실험을 정지하고 펀치를 탈거해야 하는 번거로움이 있다. 짧은 주기로 측정하기에는 물리적 한계가 있기 때문에 동일하게 5,000, 10,000, 20,000 타수에서 측정하였으며, 펀치에 마모가 발생하면 실험을 중단하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마모깊이 측정을 통한 정량적 평가

판재 성형공정에서 금형의 마모는 성형된 제품 표면의 스크레치나 마모흔적을 통해 판별할 수 있다[14-15]. 따라서 마모실험은 성형된 제품의 표면에 스크레치나 마모흔적이 발견될 때까지 수행하였다. Fig. 5 는 마모실험 후 각 펀치와 제품의 표면 상태를 도시한다. 펀치 1, 2, 3 은 각각 16,500, 25,000, 11,000 타수까지 마모실험을 수행하였다. 모든 펀치에 대해, 제품 표면에 거친 스크레치가 발견되기 전은 펀치와의 접촉으로 인한 흔적이 보이지만 거칠지 않으며 좋은 표면 품질을 가진다. 하지만 제품 표면에 거친 스크레치가 발생했을 때 펀치 표면에도 거친 마모 흔적이 발견되었다. Fig. 5 (a)는 펀치 1의 마모실험 후 펀치와 제품의 표면상태를 도시하였다. 16,000 타 후 제품 표면에는 펀치와 접촉한 흔적이 보이지만, 거칠지 않고 좋은 표면 품질을 가진다. 16,500 타의 마모실험 후 펀치 1의 표면에는 마모 흔적이 발견되며 이로 인해 제품 표면에도 거친 스크레치가 발견된다. Fig. 5 (b)는 펀치 2의 마모실험

결과를 나타낸다. 25,000 타 후 제품 표면은 펀치와 접촉으로 인한 흔적이 보이지만 거칠지 않고 매끈한 것을 확인할 수 있다. 하지만 25,500 타의 마모실험 후 펀치 2의 표면에서 마모가 발견되며 이로 인해 제품 접촉면에서도 스크레치가 발견된다. Fig. 5 (c)는 500°C로 뜨임 처리한 펀치 3의 마모실험 결과이다. 10,500 타 후 제품 표면에는 어떠한 품질 결함도 없었다. 하지만 11,000 타 후 펀치 표면에 마모가 발생하였으며, 이로 인해 제품 표면에도 스크레치가 발생하였다.

Fig. 6 은 펀치들의 마모깊이 측정 결과이다. 제품 표면에 거친 스크레치가 발생하기 전에는 모든 펀치들의 마모깊이가 거의 없으며 편차는 측정오차 수준이다. 하지만, 제품 표면에 품질 결함이 발생한 후 펀치 마모깊이는 급격히 증가하는 것으로 보아 연삭 마모(abrasive wear)에 의해 마모가 발생한 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 (a)은 펀치 1의 마모깊이 측정 결과이다. 5,000 와 10,000 타 후 펀치 표면은 마모가 거의 발생하지 않았다. 하지만 16,500 타 후 마모는 81°에서 90° 사이에서 발생하였으며 최대 마모깊이는 88°에서 8.6 μm 이다. CrN 코팅층 두께가 약 13 μm 인 것을 고려하면 마모는 코팅층 이내에서 발생하였다. Fig. 6 (b)는 펀치 2의 마모실험 결과이다. 20,000 타까지 측정된 마모깊이는 거의 없었지만 25,500 타의 마모실험 후 84°에서 90° 사이에서 마모가 발생했다. 최대 마모깊이는 85°에서 CrN 코팅층의 두께보다 작은 8.7 μm 이다. Fig. 6 (c)는 펀치 3의 마모깊이 측정 결과이다. 10,000 타까지 마모가 거의 발생하지 않았다. 하지만 11,500 타 후 마모가 87°에서 90° 사이에서 급격히 증가하였다. 최대 마모깊이는 90°에서 24.0 μm 이며 CrN 코팅층보다 깊게 마모가 발생한 것을 알 수 있다.

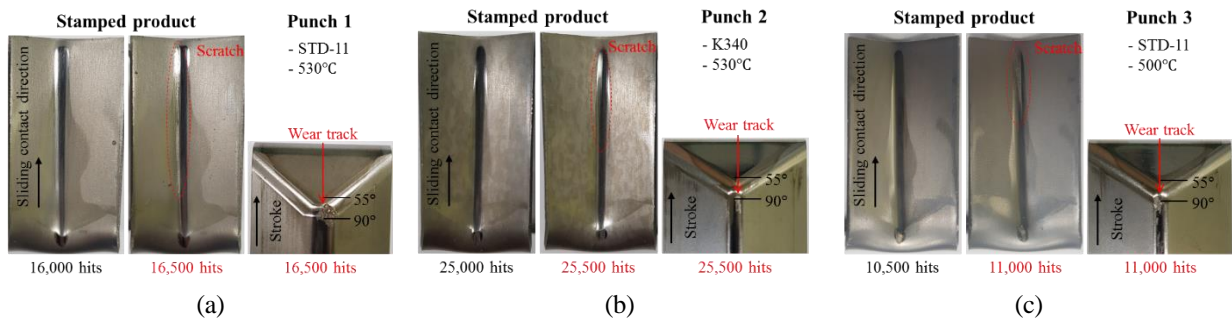


Fig. 5 Surface conditions of worn punches and scratched products after wear test: (a) Punch 1; (b) Punch 2[13]; (c) Punch 3

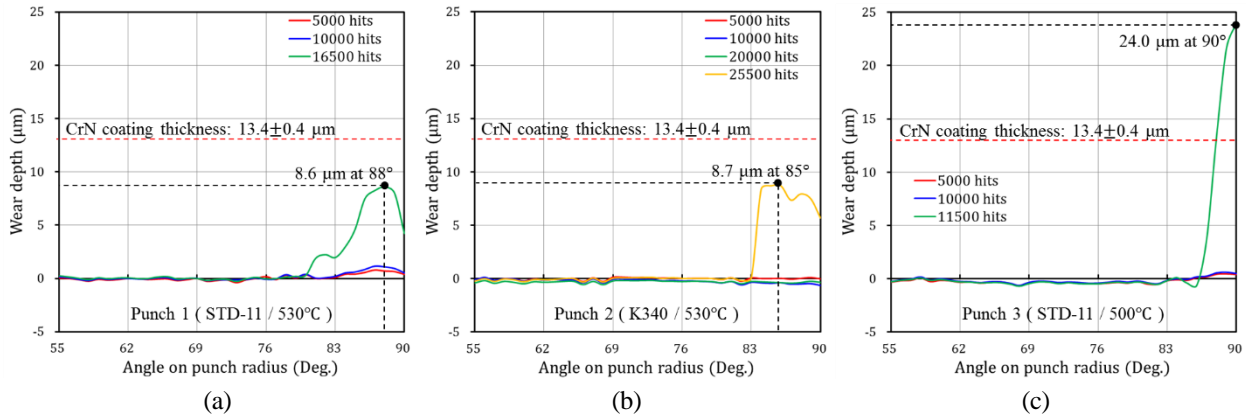


Fig. 6 Wear depth of punches with respect to stamping hits: (a) Punch 1; (b) Punch 2[13]; (c) Punch 3

3.2 금형강종에 따른 정량적 평가

금형 강종에 따른 내마모성을 분석하기 위해 펀치 1(STD-11)과 펀치 2(K340)를 비교하였다. K340의 경도($831.3 \pm 14.4 \text{ HV}_{0.1}$)가 STD-11의 경도($788.5 \pm 12.2 \text{ HV}_{0.1}$)보다 더 크기 때문에 펀치 2(K340)가 펀치 1(STD-11)보다 9,000 타 더 성형할 수 있었으며 내마모성이 55% 향상하였다.

금형강의 뜨임 온도에 따른 금형강 경도 및 내마모성을 평가하기 위해, 펀치 1(530°C)과 펀치 3(500°C)을 비교하였다. 500°C 로 뜨임 처리된 STD-11 금형강의 경도($724.5 \pm 33.7 \text{ HV}_{0.1}$)가 530°C 로 뜨임 처리된 STD-11 금형강의 경도($788.5 \pm 12.2 \text{ HV}_{0.1}$)보다 낮기 때문에, 펀치 3(500°C)이 펀치 1(530°C)보다 5,500 타 먼저 마모가 발생하였다. 이는 내마모성이 33.3% 감소한 결과이다. 따라서 뜨임 온도 또한 스템핑 금형의 내마모성에 중요한 인자이며, 적절한 뜨임 온도의 선정이 필요하다.

펀치는 마모깊이를 측정하기 위해 마모실험을 중단하고 펀치를 탈거해야 하는 번거로움이 있어서 짧은 주기로 마모깊이를 측정하기 힘들다. 따라서 펀치의 마모가 발생하기 직전의 마모깊이를 알기 힘들다. 제품의 경우는 마모실험의 중단 없이 성형된 제품을 추출할 수 있어 500 타 주기로 제품을 확보할 수 있었다. 제품 표면의 결함이 발생하기 500 타 전까지도 좋은 제품 표면 품질을 보이기 때문에 펀치도 마모가 발생하지 않은 것으로 추론되며 펀치 마모는 급격히 발생한 것으로 간주된다.

펀치 1, 펀치 2의 경우 코팅층 내의 마모가 발생했지만 제품 표면에 거친 스크레치를 만들었다. 비록 코팅층이 다 벗겨지지 않았더라도 펀치의 마모가 시작되면

표면 프로파일의 불균일로 인해 제품의 품질에 악영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 TRIP1180 1.2t 판재의 냉간성형 공정에서 금형강의 경도 특성에 따른 내마모성을 정량적으로 평가하였다. 마모실험에 사용된 펀치의 금형강은 경도가 다른 STD-11과 K340이며, 뜨임 온도를 달리하여 금형강의 경도를 조절하였다. 성형공정의 금형 마모실험은 상당히 많은 시간, 판재, 그리고 인력이 필요하기 때문에 대량의 마모실험이 가능하도록 Bang 등[13]이 제안한 프로그래시브 금형을 이용하여 실험을 수행하였다. 모든 펀치의 마모실험 결과에 대해, 제품에 거친 스크레치가 발생하기 전에는 마모깊이가 거의 없지만, 제품 표면에 품질 결함이 발생했을 때 펀치 마모깊이는 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 경도가 더 높은 K340 금형강으로 만들어진 펀치가 STD-11의 펀치보다 더 나은 내마모성을 보였으며 뜨임 온도에 따른 금형강의 경도 및 내마모성의 차이를 확인하였다. 이를 통해 금형의 설계단계에서 내마모성의 향상을 위한 적절한 금형강 및 뜨임 온도의 선정이 중요한 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기본사업과 산업통상자원부 R&D 지원(과제번호 20013403)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Y. Li, Z. Lin, A. Jiang, G. Chen, 2003, Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body, *Mater. Des.*, Vol. 24, pp. 177~182.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00021-9)
- [2] A. Jambor, M. Beyer, 1997, New cars—new materials, *Mater. Des.*, Vol. 18, pp. 203~209.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(97\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00049-6)
- [3] S. S. Cheon, D. G. Lee, K. S. Jeong, 1997, Composite side door impact beams for passenger cars, *Compos. Struct.*, Vol. 38, pp. 29~39.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00058-5)
- [4] A. I. Taub, A. A. Luo, 2015, Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications, *MRS Bull.*, Vol. 40, pp. 1045~1054.
<https://doi.org/10.1557/mrs.2015.268>
- [5] H. Safari, H. Nahvi, M. Esfahanian, 2018, Improving automotive crashworthiness using advanced high strength steels, *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 23, pp. 645~659.
<https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1389624>
- [6] M. P. Pereira, M. Weiss, B. F. Rolfe, T. B. Hilditch, 2013, The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 66, pp. 44~53.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.11.001>
- [7] B. Podgornik, J. Jerina, 2012, Surface topography effect on galling resistance of coated and uncoated tool steel, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 206, pp. 2792~2800.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.041>
- [8] A. Gonzalez-Pociño, F. Alvarez-Antolin, J. Asensio-Lozano, 2019, Improvement of adhesive wear behavior by variable heat treatment of a tool steel for sheet metal forming, *Materials*, Vol. 12, pp. 2831.
<https://doi.org/10.3390/ma12172831>
- [9] A. Ghiotti, S. Bruschi, 2011, Tribological behaviour of DLC coatings for sheet metal forming tools, *Wear*, Vol. 271, pp. 2454~2458.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.043>
- [10] Ö. N. Cora, K. Namiki, M. Koç, 2009, Wear performance assessment of alternative stamping die materials utilizing a novel test system. *Wear*, Vol. 267, pp. 1123~1129.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.111>
- [11] J. Bang, N. Park, J. Song, H. G. Kim, G. Bae, M. G. Lee, 2021, Tool wear prediction in the forming of automotive DP980 steel sheet using statistical sensitivity analysis and accelerated U-bending based wear test. *Metals*, Vol. 11, pp. 306.
<https://doi.org/10.3390/met11020306>
- [12] M. P. Pereira, W. Yan, B. F. Rolfe, 2010, Sliding distance, contact pressure and wear in sheet metal stamping, *Wear*, Vol. 268, pp. 1275~1284.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.01.020>
- [13] J. Bang, M. Kim, J. Song, H. G. Kim, G. Bae, M. G. Lee, 2022, Quantitative evaluation of tool wear in cold stamping of ultra-high strength steel sheets. *Metal and Mat. Int.* (Accept)
- [14] M. Liljengren, K. Kjellsson, T. Johansson, N. Asnafi, 2006, *Int. Deep Drawing Research Group 2006 Conf.*(eds. A. D. Santos, A. B. D. Rocha), Inst. De Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Porto, Portugal, p. 597~604.
- [15] O. Sandberg, P. Å. Bustad, B. Carlsson, M. Fällström, T. Johansson, 2004, *Int. Conf. on Recent Advances in Manufacture and Use of Tools and Dies and Stamping of Steel Sheets* (ed. N. Asnafi), Volvo Car Corporation, Olofström, Sweden, p. 151~170.