Pin-on-Flat Surface Test를 이용한 초고장력강판 스탬핑 금형의 정량적 스크래치 수명평가

최홍석¹ · 김성귀² · 김병민¹ · 고대철[#]

Quantitative Evaluation of Scratch Related Tool Life for Stamping of UHSS Using Pin-on-Flat Surface Test

H. S. Choi, S. G. Kim, B. M. Kim, D. C. Ko

(Received November 12, 2012 / Revised February 5, 2013 / Accepted February 6, 2013)

Abstract

When stamping ultra-high-strength steel (UHSS), the phenomenon of galling, which corresponds to a transfer of material from the sheet to the tool surface, occurs because of the high contact pressure between tool and workpiece. Galling leads to increased friction, unstable interface conditions, scratches on the sheet and the tool surfaces and, eventually, premature tool surface failures. Therefore, a simple and accurate evaluation method for tool scratching is necessary for the selection of tool material and coating, as well as for a better optimization of process conditions such as blank holder force and die radius. In this study, the pin-on-disc (PODT) and pin-on-flat surface (POFST) tests are conducted to quantitatively evaluate scratch-related tool life for stamping of UHSS. The variation of the friction coefficient is used as an indicator of scratch resulted from galling. The U-channel ironing test (UCIT) is performed in order to validate the results of the friction tests. This study shows that the POFST test provides a good quantitative estimation of tool life based on the occurrence of scratch.

Key Words : Pin-on-disc Test(PODT), Pin-on-flat Surface Test(POFST), Friction Coefficient, Galling, Ultra-high-strength Steel, Stamping

1. 서 론

최근 자동차의 경량화에 따른 연비 향상 및 충돌안전성을 확보하기 위하여 인장강도 780MPa급 이상의 초고장력강판(Ultra-high-strength steel)이 차체에 적용되고 있다[1, 2]. 그러나 이러한 강판을 스탬핑 공정에 적용할 경우, 소재의 높은 강도에 따른 금형의 손상이 문제시 되고 있다. 그 중에서도 특히, 성형 시 금형에 부가되는 높은 면압에 기인한 골링(Galling)이라는 응착마멸(Adhesive wear)

현상은 소재의 강도가 증가할수록 심하게 발생하며 금형과 소재 표면 모두에 과도한 스크래치를 발생시킨다[3].

금형과 소재 간에 미끄럼 접촉이 발생할 때, 높은 접촉 압력에 의해 상대적으로 연질인 소재의 미소한 입자(Fragment)가 경질의 금형 표면에 국부적으로 응착되어 스탬핑 공정에서 소재의 표면에 미세한 스크래치(Micro-scratch)를 발생시킨다. 금형과 소재 간의 미끄럼 길이가 증가함에 따라 응착된 입자는 성장하게 되며, 가공경화로 인해

1. 부산대학교 기계공학부
2. 부산대학교 부품소재산업협력연구소 그린수송시스템전공
Corresponding Author: Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National University, E-mail: dcko@pusan.ac.kr

Fig. 1 Photo of scratches on surfaces tool and product in stamping

높은 경도를 가지므로 소재 표면에 심한 스크래치 손상을 일으키게 된다. 또한 응착된 입자는 스탬핑 공정 중에 탈락하여 금형과 소재의 접촉면을 따라 미끄러지므로 금형 표면에도 스크래치를 발생시키게 된다. Fig. 1에 스크래치가 발생된 초고장력 강판의 스탬핑 금형 및 이에 따른 제품을 나타내었다. 이러한 경우, 금형의 재연마 작업이 필요하게 되며, 생산이 진행됨에 따라 금형을 조기에 교체해야 하는 문제점을 야기한다. 따라서 스크래치에 의한 금형의 수명을 향상시키기 위해 현장에서는 경질 코팅 및 윤활 처리를 실시하게 된다[4].

콜링과 같은 응착마멸에 의한 마찰특성 평가 및 이에 따른 소재의 스크래치 특성을 평가하기 위해 다양한 실험 방법들이 시도되고 있다. 스크래치를 유발하는 과도한 콜링(Severe galling)은 두 소재 간의 표면상태를 불안정하게 만들기 때문에 접촉면의 마찰계수를 상승시키는 원인이 된다. 따라서 주로 마찰계수의 급격한 증가를 기준으로 그 특성을 평가하는 경우가 많다. A. Gård 등 은 냉간 공구강종 별로 고장력 강판의 마찰시험을 통하여 분말 소재가 응착 방지에 유리함을 밝혔다[5]. B. Podgornik 등은 표면조도와 코팅 종류가 콜링에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 조도가 좋을수록 응착 발생이 지연됨을 실험적으로 평가하였다[6]. 한편, J. Eriksson 등은 고장력 강판과 PVD 코팅층 간의 마찰실험을 통하여 모재인 금형재의 경도가 높을수록 코팅층의 박리가 지연됨을 관찰하였으며, CrC/C 코팅이 응착마멸에 우수함을 밝혔다[7]. 이러한 연구들은 근본적으로 금형재 및 코팅의 관점에서 마찰특성 즉, 정성적인 특성을 주로 비교하였으므로, 이를 실제 스탬핑 공정에서의 마찰 거동과 일치시키기 어려우며, 또한 스크래치 발생으로 제한되는 금형수명을 예측하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 스탬핑 공정에서 금형의

Fig. 2 Test methods used in this study for the evaluation of scratch related tool life

정량적인 스크래치 수명을 예측하기 위하여 마찰 실험의 일종인 Pin-on-disc test(이하 PODT로 언급함)와 Pin-on-flat surface test(이하 POFST로 언급함)를 수행하였다. 스크래치에 관한 스탬핑 금형의 한계 수명은 과도한 콜링이 발생하는 미끄럼 길이로 판단하였으며, 콜링 발생시점을 평가하기 위해 마찰실험동안의 미끄럼 길이에 대한 마찰계수의 변화를 관찰하였다. 이러한 실험 결과를 실제 스탬핑 공정과 유사한 U-Channel Ironing Test(이하 UCIT로 언급함)에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증해 보았다.

2. 실험 방법

2.1 PODT 및 POFST

본 연구에서는 스크래치에 관한 금형수명을 평가하기 위한 마찰실험 방식으로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 PODT 및 POFST를 수행하였다. Fig. 2(a)의 PODT는 일반적인 회전식 마찰실험 방식으로 핀에 수직하중을 가한 후, 디스크 위의 트랙을 반복적으로 미끄럼 운동하는 방식이다. 한편, POFST는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 하중이 부가된 상태에서 한 방향으로 일정거리만큼의 미끄럼 운동 후, 핀의 하중을 제거한 상태로 원위치시킨다. 그 후, 미끄럼 수직 방향으로 일정거리만

Table 1 Surface characteristic of sheet and tool

	Sheet	Tool
Material	DP980, 1.6t	STD11
Hardness	Hv _{0.2} 230	HRc60~61
Roughness(Ra)	0.5±0.05 μ m	0.1±0.02 μ m

Table 2 Chemical compositions and material properties of DP980

Chemical composition (wt%)	C	Mn	Si	Mo	Cr
	0.11	2.5	0.35	0.05	0.5
	V	Ni	Cu	Fe	
	0.01	0.1	0.1	Bal.	
Material property	Young's modulus		Yield strength		
	207 GPa		730 MPa		
	Tensile strength		Flow stress		
	990 MPa		$\bar{\sigma} = 1434 \cdot \bar{\epsilon}^{0.11}$ MPa		

큼 오픈셋한 후 다시 미끄럼 운동을 진행하게 된다. 따라서 POFAST에서는 핀의 선단부가 항상 새로운 소재표면과 접촉하며 미끄럼 운동을 하게 된다.

2.3 시험편 제작 및 실험 조건

PODT 및 POFAST 마찰실험에 사용된 핀의 재질은 실제 초고장력강관의 스탬핑 시 금형의 수명을 증대시키기 위해 적용되고 있는 STD11이다. 핀의 표면조도 및 경도는 실제 스탬핑 금형조건과 유사하도록 Ra 0.1±0.02 μ m 수준으로 연마 및 HRc 60~61 수준으로 열처리하였다. 핀과 상대 미끄럼 운동을 하는 소재는 DP980을 이용하였으며, 실험에 사용된 금형재 및 소재의 표면특성을 Table 1에 나타내었으며, 소재의 성분 및 기계적 물성은 Table 2와 같다. 또한 마찰실험 시간을 단축시키기 위해 금형재로 제작된 핀의 표면에 별도의 코팅처리는 실시하지 않았다. PODT 및 POFAST 시, 핀에 추가되는 수직 하중은 실제 스탬핑 금형에서 나타나는 접촉압력을 반영할 수 있도록 Fig. 3과 같은 유한요소해석을 통해 결정하였다.

Fig. 3에 B-pillar의 스탬핑 공정에서 금형에 작용하는 면압 분포에 관한 해석결과를 나타내었으며, 최대 압력이 작용하는 지점은 차체의 루프 쪽과 접합되는 상부측이며 그 값은 1140MPa 수준이다. 한편, 다이의 곡률부에 작용하는 접촉압력은 약 300MPa로 나타났다. 일반적으로 롤링에 의한 스

Fig. 3 Distribution of contact pressure on tool in stamping of B-pillar

크래치는 최대 접촉압력이 작용하는 표면에서 나타나므로 본 연구의 마찰실험에서 핀과 소재의 접촉면에 1140MPa의 접촉압력이 작용할 수 있도록 핀의 곡률부 형상을 고려하여 Hertzian 접촉 이론식으로부터 계산된 하중을 부가하였다[8].

PODT 및 POFAST에 의한 스크래치 수명의 평가는 마찰계수가 급격히 상승하여 유지되는 시점까지의 미끄럼 길이로 판단하였으며, 실험 후 금형재 및 소재 표면은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope) 및 EDX(Energy-dispersive X-ray spectroscopy)를 이용하여 분석하였다. 또한 이러한 스크래치 수명 평가 방법의 타당성을 검증하기 위하여 금형에 작용하는 면압을 고려한 UCIT를 실시하여 그 결과를 비교해 보았다.

3. PODT와 POFAST를 통한 스크래치 특성 평가

3.1 마찰계수 변화

Fig. 4에 접촉압력 1140 MPa 하에서 수행된 PODT 및 POFAST 후의 마찰계수-미끄럼 길이 선도를 나타내었다. PODT의 경우, 초기 마찰계수는 0.12 정도의 값을 나타내었으며, 미끄럼 길이 약 20mm 후 마찰계수가 급격히 증가하여 약 30mm 이후에는 0.4 이상의 높은 값을 보이고 있다. 한편, POFAST의 경우에는 미끄럼 길이 40mm까지 0.12~0.15 수준의 낮은 마찰계수를 나타내었으나, 40mm 이후 서서히 증가하여 약 80mm 미끄럼 길이에서 0.28 정도로 상승하였다. 이와 같은 마찰계수의 증가는 금형과 소재의 미끄럼 접촉동안 상대적으로 연한 소재의 입자가 경질의 금형재인 핀에 응착되어 마찰저항을 증가시키기 때문이다. 여기서 POFAST에 비해 PODT에서 마찰계수의 증가 시점이 빠른 이유는 PODT의 경우, 회전

Fig. 4 Friction coefficient vs. sliding length curves obtained from PODT and POFST

(a) pin (tool material)

(d) disc (sheet material)

Fig. 5 SEM observation of tool and sheet surface after sliding length of 40mm in PODT

해 동일한 판재 표면에서 미끄럼 접촉이 발생하기 때문으로 생각된다. 일단 두 재료 간에 미끄럼 접촉이 일어나면 원래 가지고 있던 소재의 표면조도가 변화되며, 이러한 표면에 다시 미끄럼 접촉이 일어나는 경우, 조도의 변화에 기인한 마찰계수의 상승이 일어나는 것으로 판단된다.

3.2 표면관찰 결과

마찰계수의 상승원인을 분석하기 위해 PODT 및 POFST 후 금형재 및 소재의 표면을 주사전자

(a) pin (tool material)

(b) disc (sheet material)

Fig. 6 SEM observation of tool and sheet surfaces after sliding length of 10mm in POFST

현미경으로 관찰하였다. Fig. 5에 PODT에서 40mm 미끄럼 후의 금형재 및 소재 표면의 주사전자현미경 관찰 결과를 나타내었다. 금형재의 표면에 소재로부터 천이된 입자(Transferred fragment)에 의한 골링 현상을 Fig. 5(a)에서 확인할 수 있으며, 이러한 입자는 높은 압력을 받은 상태이기 때문에 미끄럼 도중 가공 경화되어 상당히 높은 경도를 나타낸다고 알려져 있다[9]. 따라서 높은 경도의 응착 입자는 미끄럼 접촉이 진행됨에 따라 소재의 표면조도를 변화시킬 뿐만 아니라 미끄럼 방향으로 스크래치를 발생시키게 된다. Fig. 5(b)의 소재 표면에 관한 관찰 결과에서도 나타나듯이, 작은 미끄럼 길이에서도 상당히 심한 응착마멸이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 표면조도는 초기 Ra 0.5 μ m에서 Ra 1.0 μ m 수준으로 크게 증가하였다.

Fig. 6은 10mm POFST 후의 금형재와 소재의 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 금형재의 표면에 미세한 응착 입자가 확인되었으며 Fig. 7의 EDX 분석 결과, 이는 소재로부터 천이된 Fe 입자로 나타났다. 한편, POFST에서 미끄럼 길이 초기단계에서는 거친 조도를 가진 판재의 표면이 금형에 의해 평탄화됨을 Fig. 6(b)에서 확인할 수 있다.

Fig. 7 Result of EDX analysis for adhesion particles shown in Fig. 6(a)

(a) pin (tool material)

(b) disc (sheet material)

Fig. 8 SEM observation of tool and sheet surfaces after sliding length of 80mm in POFST

80mm POFST 후의 금형재와 소재의 주사전자현미경 관찰 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에서 금형재에는 초기의 미소한 응착 입자가 미끄럼 길이가 진행됨에 따라 큰 입자로 성장한 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8(b)와 같이 소재의 표면에서 미끄럼 방향으로 스크래치가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 이는 미끄럼 길이가 증가함에 따라 성장한 경질의 응착 입자와의 미끄럼 접촉에 의해 나타난 결과로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 PODT 및 POFST 시, 골링의 발생에 따라 소재 표면에 스크래치가 발생하는 한계 미끄럼 길이는 각각 약 40mm, 80mm로 예측되었다.

Fig. 9 Experimental apparatus for UCIT

4. UCIT에 의한 스크래치 수명예측 결과의 검증

PODT 및 POFST에 의해 도출된 스크래치 수명예측 결과의 타당성을 검증하기 위하여 실제의 성형공정과 유사한 UCIT를 수행하였다. Fig. 9에 UCIT를 위한 금형 장치를 나타내었다. 금형은 다이, 펀치 및 소재 안착을 위한 플레이트 및 아이어닝을 조절을 위한 블록으로 구성되어 있다. PODT 및 POFST의 실험과 동일한 접촉압력을 UCIT 다이에 부여하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 아이어닝률을 12.5%로 결정하였으며, 이때 사용된 펀치와 다이 간의 클리어런스는 1.4mm이다. 금형재는 STD11이며, 1회 스트로크 시 미끄럼 접촉 길이는 70mm이다. 실험에 사용된 소재는 DP980이고, 400x25mm로 절단하여 실제 스탬핑 공정과 유사하게 항상 새로운 시편을 공급하여 UCIT를 수행하였다. UCIT 후 소재 및 금형재 표면의 스크래치 발생 유무를 관찰하여 PODT 및 POFST 실험결과와 타당성을 평가하였다.

Fig. 10은 UCIT 후의 금형과 소재의 표면을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 1회 UCIT 후 Fig. 10(a)와 같이 판재 표면에 스크래치가 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 2회 UCIT 후 판재의 표면에서 Fig. 10(b)와 같이 미끄럼 방향으로 과도한 스크래치가 발생하였다. 이는 Fig. 10(c)에서 관찰할 수 있듯이, 금형 표면에 소재로부터 찢어진 입자에 의한 과도한 응착이 발생된 것을 확인할 수 있고 이로 인해 판재 표면에 스크래치가 유발되는 것으로 판단할 수 있다. 또한 UCIT에서 2회의 실험결과 즉, 미끄럼 길이 140mm에서 소재 표면에 스크래치가 관찰되었으므로 PODT의

Fig.10 Photo of tool and sheet surface after UCIT

스크래치 발생에 관한 한계 미끄럼 길이인 40mm 보다 상당히 지연된 결과를 나타내는 반면에, POFST의 한계 미끄럼 길이인 80mm 이후의 마찰 계수 증가 시점과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

따라서 이러한 결과로부터 PODT보다 POFST에 의한 스크래치 수명 평가가 보다 더 신뢰성이 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 결과는 실제 스탬핑 금형의 스크래치에 관한 한계수명을 결정하기 위해 POFST를 이용하여 금형과 소재 간의 최대 접촉압력 하에서 극심한 골링이 발생하는 한계 미끄럼 길이를 평가하고, 이러한 한계 미끄럼 길이를 실제 스탬핑 공정의 1회 스트로크에 대한 미끄럼 길이로 나누면 소재에 스크래치가 발생하는 한계 타수를 결정하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 차체 경량화 및 충돌성능 향상을 위해 확대 적용되고 있는 초고장력강판 스탬핑 금형의 스크래치 수명을 평가하기 위하여

PODT(Pin-on-disc test), POFST(Pin-on-flat surface test) 및 UCIT(U-Channel Ironing Test)를 수행하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 스탬핑 공정에서 발생하는 면압을 고려하여 PODT와 POFST를 수행하였으며, PODT의 경우 동일한 마찰면과의 미끄럼 접촉으로 인한 판재 표면의 상태 변화로 매우 짧은 40mm의 미끄럼 길이에서 마찰계수의 증가가 일어났다.

(2) 항상 새로운 면과 미끄럼 접촉하는 POFST의 경우, 약 80mm 정도의 미끄럼 길이에서 마찰 계수가 증가하였으며, 주사전자현미경 관찰한 결과, 금형재 표면에 과도한 응착입자가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

(3) UCIT를 이용하여 PODT 및 POFST에 의해 도출된 스크래치에 관한 한계 미끄럼 길이를 검증해 본 결과, POFST에 의한 한계 미끄럼 길이의 예측이 보다 실제 스탬핑 공정과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

(4) 실제 스탬핑 금형의 스크래치에 관한 한계 수명은 POFST를 이용하여 금형과 소재 간의 최대 접촉압력 하에서 극심한 골링이 발생하는 한계 미끄럼 길이로 평가할 수 있으며, 이러한 한계 미끄럼 길이를 스탬핑 공정의 1회 스트로크에 대한 미끄럼 길이로 나누면 소재에 스크래치가 발생하는 한계 타수를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2012R1A1A4A01012787)

참 고 문 헌

- [1] C. H. Suh, H. D. Shin, Y. C. Jung, C. D. Park, Y. H. Lim, Y. S. Kim, 2009, A Study on the Forming Process of Stair Type Side Sill for Automobile using DP780, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 8, pp. 601~606.
- [2] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.

- [3] 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.
- [4] M. Nilsson, M. Olsson, 2011, Tribological Testing of Some Potential PVD and CVD Coatings for Steel Wire Drawing Dies, Wear, Vol. 273, No. 1, pp. 55~59.
- [5] A. Gård, P. Krakhmalev, J. Bergström, 2009, Wear Mechanism in Galling: Cold Work Tool Materials Sliding Against High-strength Carbon Steel Sheets, Tribol. Lett., Vol. 33, No. 1, pp. 45~53.
- [6] B. Podgornik, S. Hogmark, O. Sandberg, 2004, Influence of Surface Roughness and Coating Type on the Galling Properties of Coated Forming Tool Steel, Surf. Coat. Technol., Vol. 184, No. 2-3, pp. 338~348.
- [7] J. Eriksson, M. Olsson, 2011, Tribological Testing of Commercial CrN, (Ti, Al)N and CrC/C PVD Coatings: Evaluation of Galling and Wear Characteristics Against Different High Strength Steels, Surf. Coat. Technol., Vol. 205, No. 16, pp. 4045~4051.
- [8] A. C. Fischer-Cripps, 2001, Nanoindentation, Springer-Verlag, New York, Inc., pp. 1~7.
- [9] E. Schedin, 1994, Galling Mechanisms in Sheet Forming Operations, Wear, Vol. 179, No. 1-2, pp. 123~128.