

고강도강판의 생산을 위한 프레스 금형 재료 및 마모특성 평가기술

김영석¹ · 박기철² · 남재복² · 이봉현³

1. 경북대학교, 2. 포스코 철강솔루션센터, 3. 자동차부품연구원 대구경북연구센터

Die Materials and their Wear Evaluation for Press Forming of High Strength Steels

Y. S. Kim, K. C. Park, J. B. Nam, B. H. Lee

1. Kyungpook National University, 2. POSCO Steel Solution Center, 3. KATECH Daegu Kyungpook Center

1. 서론

자동차의 경량화와 안전성 향상을 추구하기 위해 기기급의 고강도강판의 채용이 급증하면서 고강도강판의 프레스 가공상의 불량발생·과단과 형상불량 등- 문제점을 해결하기 위한 수단으로 유한요소 해석기술이 널리 채용되는 추세에 있다[1~4]. 저자들은 지난 2회에 걸친 해설을 통해 지금까지 개발된 고강도강판들의 기계적특성과 프레스 성형특성을 분석하여 고강도강판의 프레스 최적 성형을 위한 요소기술들을 제시한 바 있다[5,6].

고강도강판의 가공 시에는 기존의 연질강판의 가공과는 달리 금형의 마모가 심하기 때문에 기존 금형보다 내마모성과 강도가 높은 새로운 금형재료와 표면처리기술 (코팅)을 채용하거나 서보프레스의 도입 등과 같이 가공공정 개선이 요구되고 있다.[7,8] 이번 호에서는 고강도강판의 프레스 성형 시에 자주 문제가 되고 있는 금형의 마모와 마모에 따른 제품결함에 대해서 설명한다.

2. 금형의 손상을 고려한 가공조건

냉간 성형용 금형은 높은 경도, 높은 마모저항, 높은 압축강도 그리고 높은 연성을 가져야 한다. 높은

마모저항을 갖기 위해서는 금형 재료에 Cr, V, Mo, W 의 탄화물을 포함하고 있어야 한다. 그러나 탄화물이 너무 많으면 반복하중 하에서 응력이 크랙 가능 결함부위(노치, 슬래그 계재물, 예리한 코너 등)에 집중하여 피로크랙이 발생하기 쉽기 때문에 주의가 필요하다.

일반적으로 가공용 공구를 선정하기 위해서는 대상으로 하는 가공공정에서 발생할 수 있는 공구과손에 이르는 메커니즘을 파악하여야 한다. 통상 프레스 가공공정의 경우에 자주 발생하는 금형의 과손은 Fig. 1에서와 같이 마모(wear), 탈락(chipping), 파괴, 소착(galling), 응착마모(adhesive wear) 그리고 소성변형(plastic deformation) 등이 있다. 강판이 고강도화 할수록 금형의 손상은 더욱 증가한다.

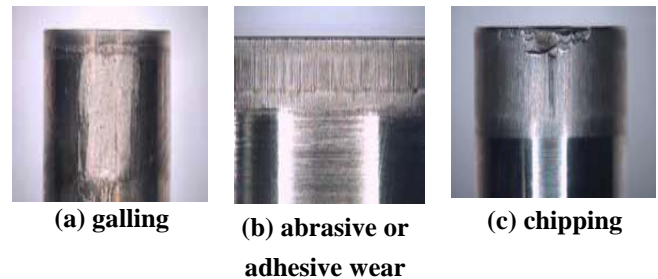


Fig. 1 Tool damages such as (a) galling, (b) abrasive or adhesive wear, and (c) chipping [9]

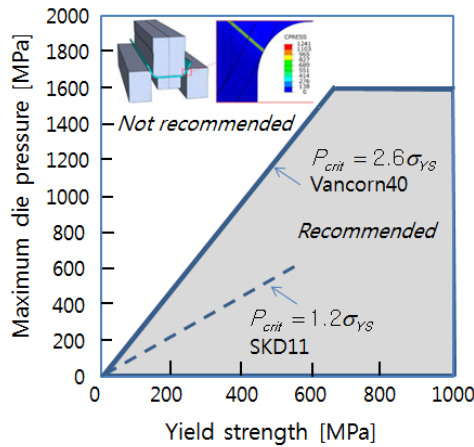


Fig. 2 Limit to guide the use of uncoated Vancorn 40 (3C-0.5Si-0.4Mn-3.2Mo-3.2W-8.5V) to form carbon steel (Inside figure shows computed die pressure distribution from FEM simulation of a U-bending application)[9]

소착은 금형과 재료 사이의 높은 접촉압력에 기인한다. Fig. 2에서와 같이 2.0mm 두께의 DP790MPa 재료를 U-벤딩하는 공정의 유한요소해석 결과로부터 소착의 한계압력은 1200MPa임을 알 수 있다.

통상 소착의 한계압력은 Vancorn40 초경합금 금형의 경우는 재료 항복응력의 약 2.6배, SKD11의 경우는 약 1.2배 정도라고 알려져 있다.

강판을 펀칭하거나 블랭킹하면 절단된 단면은 Fig. 3(a)와 같이 처짐(rollover 또는 shear drop), 전단면(burnish 또는 shear zone), 파단면(fracture zone), 버(burr)로 나타내진다. Fig. 3(b)에서와 같이 연질인 알루미늄과 비교하면 강도가 높은 스테인레스의 경우가 전단면의 비중이 더 크며, 또한 다이간극(clearance)이 커질수록 처짐이 더 커지는 것을 알 수 있다. 같은 강종의 경우에는 강도가 높아질수록 전단면의 길이와 버 높이가 작아진다고 알려져 있다.

좋은 절단면은 재료의 신장 플랜지성 및 홀 확장성을 좋게 하는데 절단면의 품질은 펀칭 다이의 표면 품질과 다이간극의 크기와 밀접한 관련이 있다.

Fig. 4(a)은 블랭킹과 펀칭 공정에서 추천하고 있는 다이간극이다. 연질강판과 비교하면 고강도강판은 다이간극이 금형의 수명에 큰 영향을 미친다. 다이간극은 버의 형성에 큰 영향을 미치지 않지만 처짐과 파단면은 다이간극이 증가할수록 커진다. 그러나 그 크기는 연질강판의 경우보다 작다.

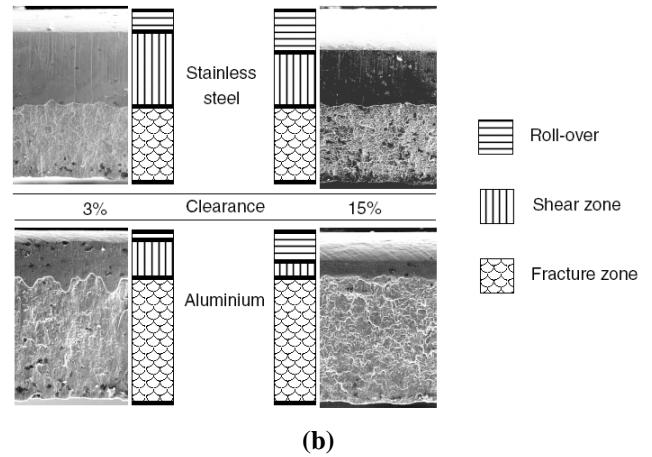
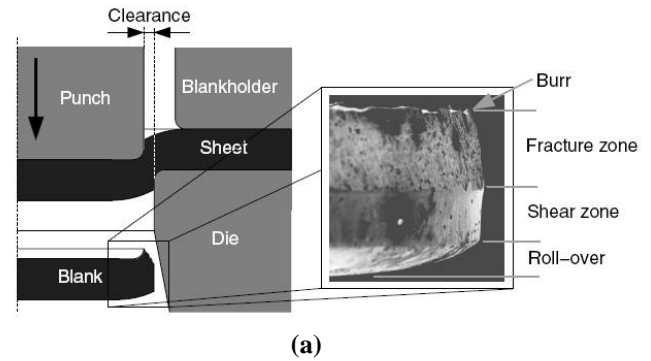


Fig. 3 (a) Appearance of a cut edge, (b) Different blanked edges for a stainless steel and an aluminium, blanked with two different clearances[Ref. Ad Goijaerts, Prediction of Ductile Fracture in Metal Blanking, Ph.D thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1999]

일반적으로 고강도강판의 경우는 펀칭과 블랭킹 사이의 다이간극이 큰 것이 금형의 소착 억제에 바람직하지만 너무 큰 다이간극은 재료를 굽힘변형시켜 처짐을 크게 하므로 절단면의 품질을 떨어뜨리게 된다. 이로 인해 오히려 신장 플랜지 혹은 홀 확장 공정 등의 후속공정에서 재료의 파단을 야기할 수 있다. 실용적으로는 간극(CL)과 재료 두께(t)의 비가 약 10%~12%가 적정한 것으로 알려져 있다.

Fig. 4(b)에 전단공정(shearing)에서 통상 상형펀치에 부여하는 전단각(shear angle)의 추천값을 나타내었다. 한편 고강도강판의 펀칭이나 블랭킹시에 발생하는 큰 소음을 줄이고 펀치의 부하를 줄이기 위해 통상 모따기 펀치(chamfered punch)를 사용한 베벨전단이 행해진다. 이때 모따기 값은 DP800 강판의

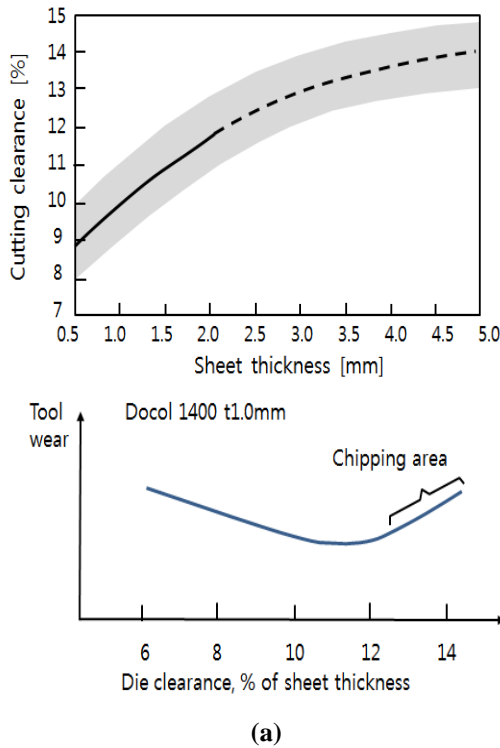


Fig. 4 (a) Recommended die clearance for blanking /punching advanced high strength steel sheets, (b) Recommended shear angle for advanced high strength steel sheets[9]

경우에 두께의 약 0.7배, 연질강판의 경우는 약 1.0~1.5 배 정도가 바람직하다.

3. 금형의 마모평가

블랭킹, 펀칭과 같은 프레스 가공 시 공구의

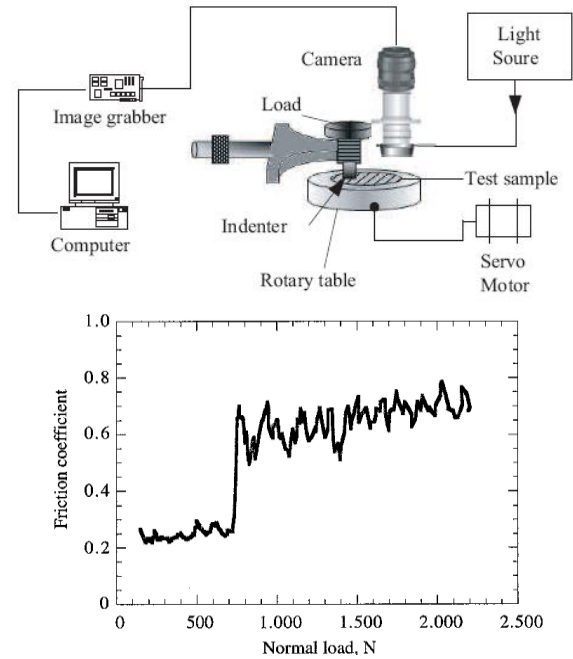


Fig. 5 Schematic view of Pin-On-Disc tribometer and friction coefficient variation according to the applied normal load[10]

마모와 소착 발생은 가공품의 품질을 떨어뜨리기 때문에 생산관리 측면에서도 공구의 마모와 공구수명 예측을 통해 적기에 공구를 교환할 필요가 있다. 프레스 가공 공정에서 공구의 마모는 접촉압력, 공구표면의 품질(거칠기), 표면개질처리(coating, 코팅), 윤활, 가공속도, 가공온도 등에 의존하는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 공구 및 재료의 마모를 평가하는 방법으로 ASTM 99에서 규정된 핀온디스크(pin-on-disc) 마모시험장치를 이용한다. 여기서는 끝 단의 직경이 2~10mm인 구형 핀(AISI 52, HV 838)를 직경 30~100mm인 회전하는 원판 위에서 일정한 하중으로 가압하여 슬립거리에 따라 마모량(마모체적)과 마찰력을 측정한다. ASTM G99의 시험장치와 화상처리기를 이용하여 재료의 마모량을 온라인으로 예측하기 위한 시스템과 실험 예를 Fig. 5에 나타내었다. 가압력이 작은 경우에는 일정한 마찰력이 작용하지만 가압력이 어떤 한계를 지나면 급속히 응착마모가 발생하여 마찰력이 크게 상승하고 심한 요동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 핀온디스크 마모시험에서는 가압력과 회전속도가 클수록 마찰계수가 작아지는 반면 마모율은 커지는 것으로 보고되고 있다[11].

이 실험에서 핀의 이론적 마모량은 $W_{pin} = \pi d^4 / (64r) [mm^3]$, 재료의 마모량은 $W_{material} = \pi R b^3 / (6r) [mm^3]$ 로 구해진다. 여기서 d 와 r 은 마모 흔적면의 직경(wear scar diameter)과 핀 끝단의 반경(pin end radius), R 은 마모 궤적 반경(wear track radius), b 는 마모 트랙 폭(wear track width)이다. 실제 실험에서 대상 재료의 마모량은 재료의 마모 전후의 중량을 측정하거나 3차원 형상측정기로 마모체적을 구하여 구한다.

한편 공구의 마모는 가공 중에 공구면상의 재료의 슬립거동과 공구에 작용하는 면압을 유한요소해석으로 구함으로써 정량적으로 예측할 수도 있다 [12,13]. 즉 공구의 마모량 w 는 응착마모에 적용되는 통상 Holm 과 Archard의 마모실험식[14], $W = CPl / \sigma_{ys}$, 을 사용하여 모든 유한요소에서 계산하고, 매 5000회 가공마다 계산된 마모량에 근거하여 공구 형상을 갱신하면 가공 중에 공구 마모를 모니터링 할 수 있다. 여기서 c 값은 접촉하고 있는 물질의 마모계수(coefficient of wear)로 5000회 가공실험을 수행하여 마모량을 측정하고 역산하여 구한다. ℓ 은 공구와 접하고 있는 재료의 마찰슬립거리이다. 한편 공구와 재료간의 접촉면적을 A , 마모깊이를 d_w , 마모량을 W 라고 하면 $d_w = W / A$, 마모율(wear rate)을 w 라고 하면 $w = W / \ell$, 비마모율(specific wear rate)를 W_s 라고 하면 $w_s = W / (Pl) = w / P$, $P = Ap$ 의 관계를 갖는다. Holm의 마모식은 마모량이 하중과 마찰거리의 곱에 비례하고 재료의 경도 H (Hv 또는 항복응력 σ_{ys})에 반비례하므로 w 가 $(Pl) / H$ 에 비례하는 경우에 대한 비례계수로 마모계수 C 를 도입한 것이다. 즉, $C = WH / (Pl)$.

예로써 직경이 58mm이고 두께가 0.3mm인 STS304 판재를 크랭크 프레스를 이용하여 평균속도 0.18m/s, 블랭크 홀더압력 3.3~3.5MPa하에서 직경 34.25mm인 펀치로 14mm까지 연속 성형하는 경우에 주철금형의 경도, 홀더압력, 마모율, 비마모율, 마모계수를 각각 계산한 값은 다음과 같다.[15] $Hv=135(kgf/mm^2)$, $p=20(MPa)$, $d_w / \ell = 0.52 \times 10^{-6}$, $w_s = 2.6 \times 10^{-8}(mm^2/N)$, $C = 3.5 \times 10^{-5}$. 본 계산에서 1회 가공에서 마모부의 슬립량이 12mm 이면 4000회 가공에서는 48m가 되는 것으로 추정한다(Fig. 6).

Fig. 6은 양단자유 조건하에서 두께 1mm의 SS400 강판을 전단가공 시에 다이의 마모를 유한요

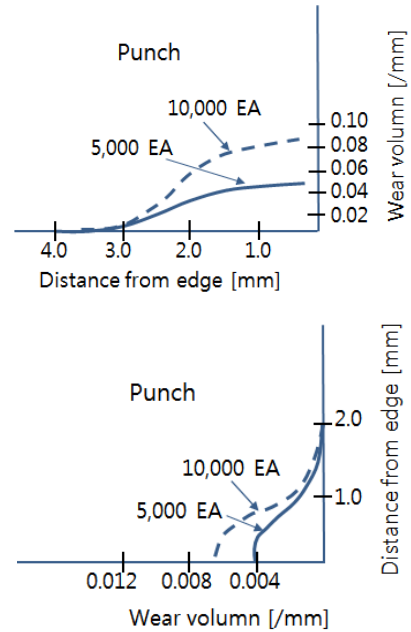


Fig. 6 Estimated tool wear from FEM simulation [12]

소해석하여 예측한 결과로, 블랭크와 펀치간의 상대적인 슬립이 많고 가공응력이 크게 작용하는 펀치의 밀면과 측면의 끝단(edge) 부분에 마모가 집중되고 있음을 알 수 있다. 특히 펀치 밀면에서의 마모는 측면에서의 마모보다 10배 정도 크고 측면과 비교하여 보다 넓게 마모가 일어나고 있음을 알 수 있다. 여기서는 $C = 2.722 \times 10^{-6}$, $\sigma_{ys} = 324.67(MPa)$, 간극은 두께의 10%, 마찰계수는 0.1을 사용하였다.

4. 금형 재료 및 코팅

금형재료는 크게 기계구조용 탄소강, 합금공구강, 고속도공구강으로 나눌 수 있으며 Table 1에 다양한 가공에 사용되고 있는 금형재료와 그 특징에 대해서 나타내었고, Table 2에는 대표적인 공구강의 열처리 조건과 합금조성(mass %)을 나타내었다.

금형용 강은 일반적으로 소재업체에서 구상화 풀림처리된 상태로 출하되고 있어 쉽게 가공할 수 있다. 이 상태의 조직은 연질인 페라이트(α 철) 중에 구상탄화물이 분산된 조직이기 때문에 가열하여 오스테나이트 조직으로 만들어 일부 탄화물을 고용시킨 후 담금질시켜 경질의 마르텐사이트로 변태시킨다. 이때 잔류되어 있던 탄화물은 내마모성을 증가시키는데 기여한다.

강판이 고강도화 할수록 프레스 가공용 금형의

Table 1 Tool steels for press forming of advanced high strength steel

Tool Material		KS	JIS	AISI	DIN	Property
Alloy tool steel	Structural type	SCM440	SCM440	4140	42CrMo4	Cr, Mo, V, W 등 합금원소 첨가 절삭공구, 내충격용 공구, 냉간금형, 열간금형
	Hot working type	STD61	SKD61	H13	X40CrMoV51	C: 0.32~0.42% 고온강도, 열충격 및 열피로 특성 우수
	Cold working type	STD11 STS3 STS93	SKD11 SKS3 SKS93	D2	X210Cr12	2C-12Cr-4V : 고합금공구강(다이싱강) 담금질 경화성, 내마모성 우수
High speed type		SKH51 SKH54 SKH3	SKH51 SKH54 SHK3	M2 M4 T4	S6-5-2 -	4Cr-5Mo-6W-2V(-10Co)(몰리브덴계) 0.7C-18W-4Cr-1V(텅스텐계) 내마모성, 내열성과 인성 우수(고속가공용 하이스강)
Structural carbon steel		SM45C	S45C	1045	CK45	C:0.6~1.5% 특별한 합금원소 무 첨가 담금질경화 필요

(주1) 화학성분의 영향: C이 높으면 담금질(quenching), 뜨임(tempering) 정도와 내마모성이 향상되나. 인성이 저하한다. 또한 Cr과 Mn은 담금질 경화성을 좋게 하고, W과 Mo은 고온강도와 경도를 향상시킨다. 한편 V과 Cr은 내마모성을 좋게 하고, Mo은 열처리변형을 최소화한다.

(주2) 첨가원소의 담금질성: B>Mn>Mo>P>Cr>Si>Ni>Cu

Table 2 Chemical compositions of tool steels and recommended temperature for heat treatment [16]

AISI	Quenching temperature(°C)	Tempering temperature(°C)	Hardness (HRC)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V
D2	1020~1040	150~200 520~530	>61 >56	1.5	0.3	0.4	12.0	-	1.0	0.3
M2	1190~1220	540~570	>63	0.85	0.3	4.2	6.5	5.3	2.1	
H13	1000~1050	550~650	<53	0.4	1.0	0.4	5.2	-	1.3	0.9

손상이 증가하여 전체적인 금형 코스트가 증가하는 추세이기 때문에 금형의 장수명화(長壽命化)를 위한 내 마모성이 우수한 금형재료를 개발하려는 연구가 수행되고 있다[16]. 일본의 히다치금속에서는 2006년에 뉴럴네트워크와 Thermo-Calc를 활용한 합금설계기술을 이용하여 590MPa 이상의 고강도강판의 가공에 적합한 SLD-MAGICTM (S-MAGICTM) 이란 고성능 냉간공구강 재료를 개발하였다. 이 재료는 0.5C-8Cr-3Mo-XN 조성을 갖고 500°C에서 뜨임처리하면 60~62HRC 경도를 가지며 SKD11 대비 내마모성, 피로강도, 열처리성(열처리시 치수변화가 거의 영에 가까움), 표면처리특성(코팅밀착성), 용접성과 피삭성이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 스웨덴의 SSAB

철강은 내마모성, 내소착성과 피로강도가 우수하며 소성변형 저항력이 큰 3.0C-4.5Cr-3.2Mo-3.7W-8.5V 조성의 분말하이스강인 Uddeholm Vancorn 40을 개발하였다[9].

이외에도 프레스 금형의 본체와 같이 크고 복잡한 형상의 주물성형이 가능하고 절삭가공이 용이한 회주철(FC300), 구상흑연주철(FCD550), 특수합금주철(HC891, HD700)과 매우 경한 탄화 W분말을 Co로 소결하여 제조하는 내마모성이 우수한 초경합금, 프라스틱 성형용 금형에 사용되는 석출경화강, 내충격성과 내마모성이 요구되는 트림 날 및 인서트에 사용되는 화염경화강(23F85), 일반구조용 압연강(SS41), 담금질성과 내식내열성을 향상시키 8% Cr 강, 고속

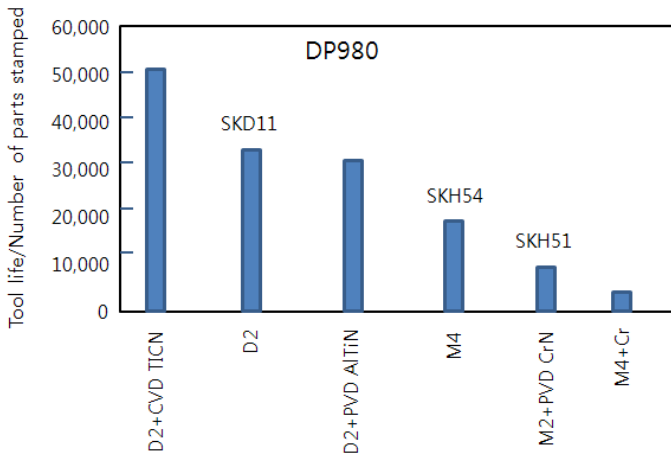


Fig. 7 Tool life of different coated tools for stamping of DP980 sheets [18]

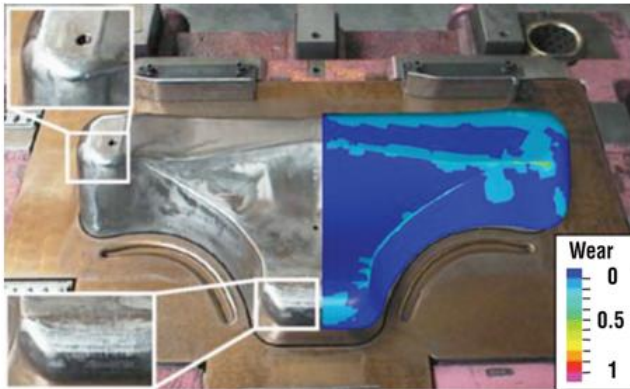


Fig. 8 FEA simulation compares to actual wear on a stamping punch [18]

도공구강의 정출 탄화물량을 낮추고 분포를 미세 분산시킨 매트릭스계 고속도강 등이 공구재료로 자주 사용되고 있다.

이런 금형 재료들을 그대로 사용하면 반복 가공에 따라 응착마모, 연삭마모, 부식마모 등 금형손상이 자주 발생하여 금형 수명이 단축된다. 금형손상을 방지하고 내소착(anti-galling) 특성을 좋게 하기 위해서는 금형표면을 열처리, 침탄 혹은 질화처리하거나 TiN, CrN, TiAlN 등의 경질피막을 도금처리(coating, 코팅)하여 표면경도를 높여 마찰특성과 내마모성을 향상시키는 방법이 널리 사용되고 있다[17].

PVD(Physical Vapor Deposition), CVD(Chemical Vapor Deposition)와 TD(Toyota Diffusion Coating Process)로 대표되는 TRD (thermal reactive diffusion) 등의 표면 처리 공정에서 일반적으로 고려해야 할 사항은 다음

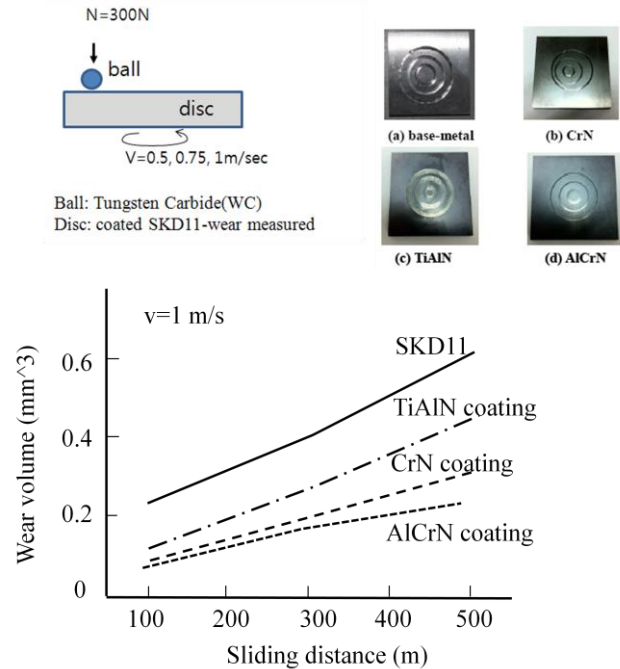


Fig. 9 Wear volume of different coating for the substrate material SKD11 [13]

과 같다. 도금할 모재의 경도를 가능한 도금층의 경도에 가깝게 미리 경화처리하고, 고온에서 행해지는 경우에 금형 재료의 산화와 탈탄을 억제하기 위해 진공 분위기를 이용하며, 금형 표면에 존재하는 기계가공 흔적은 응착마모의 원인이 되므로 가능한 연마가공하여 제거하는 것이 좋다. 통상 코팅되는 금형의 표면거칠기는 Ra<0.15um 정도가 바람직한 것으로 알려져 있다. SKD11 금형강의 PVD 도금처리 후에는 Ra가 0.07um 이내로 낮게 유지되어야 도금 밀착성과 내구성이 우수한 것으로 알려져 있다[19].

TRD와 CVD 표면처리는 주로 구멍 등을 갖거나 복잡한 금형형상의 모든 부위에서 균일한 코팅을 요구하는 경우에 주로 사용하며, 모재의 변태점을 넘는 1030°C 근방에서 코팅이 이루어지기 때문에 특히 뜨임처리 시의 금형 치수변화에 대한 제어가 중요하다.

Fig. 7은 DP980 강판을 다양한 금형 소재로 스탬핑 가공한 경우의 금형의 수명을 나타낸 것이다. D2(SKD11) 소재를 CVD TiCN 코팅한 금형이 PVD 코팅한 금형보다 우수한 금형 성능을 보이고 있으며 M4(SKH54), M2(SKH51) 소재는 도금유무와 상관없이 상대적으로 열세에 있음을 알 수 있다. 실제 금형의

Table 3 Coated properties and wear rate of tool steels [15, 17, 20]

Coating configuration	Substrate hardness (HRC)	Coating hardness (Hv)	Average surface roughness Ra before test (μm)	Specific wear rate ($\mu m^3 / N \cdot m$) $w_s = W / (Pl)$
TD coating	60.4		0.025	$4.223 \cdot 10^{-8}$
radical nitriding TiCN (PVD)	61.0		0.063	$1.844 \cdot 10^{-7}$
TiCN(PVD)	61.0		0.051	$1.099 \cdot 10^{-7}$
Multi-layered (TiC+TiCN+TiN)(CVD)	61.4		0.079	$4.353 \cdot 10^{-8}$
D2	61.0		0.292	$19.62 \cdot 10^{-8}$
Vancron 40	59.6		0.031	$2.625 \cdot 10^{-8}$
Nitriding	60-62	800		
CrN		1,800		
CrC		2,200		
TiN		2,400		
ZrTiN		2,500		
TiN/TiCN		3,200		
TiAlN		3,200		
AlTiN		3,400		

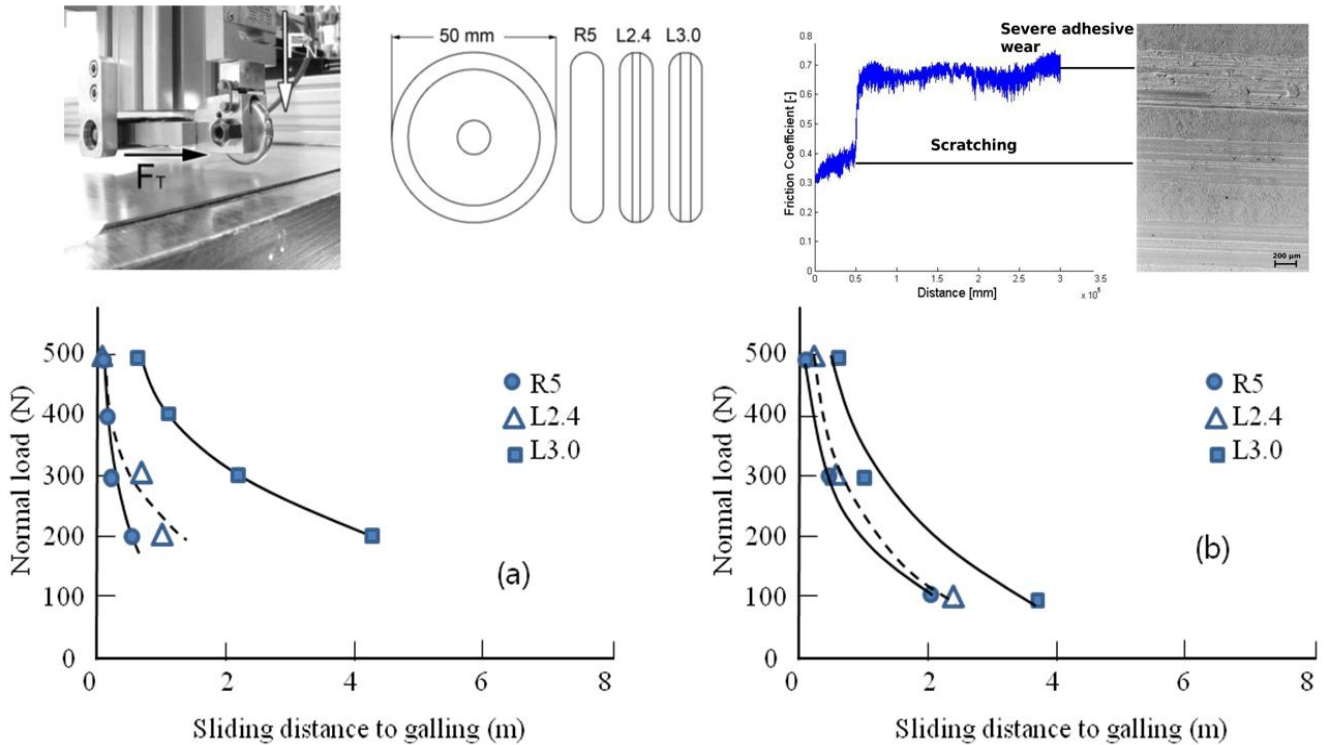


Fig.10 Critical sliding distance to galling vs. normal load for (a) the Docol 1200M (σ_{YP} :1120MPa) and (b) the DC01 (σ_{YP} :193MPa) sheet grade using SOFS wear tester[20]

마모와 유한요소해석에서 Archard의 마모모델로부터 예측한 결과에 대한 비교를 Fig. 8에 나타내었다. 유한요소해석 결과는 실제 금형의 코너부위에서 마모가 많이 발생하는 현상을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 볼온디스크 마모실험을 통해 D2 소재에 코팅한 코팅의 종류에 따라 마모량(마모 체적)의 차이를 보인 것이다. 슬립거리에 따라 마모량이 증가하고 마모량은 코팅하지 않은 SKD11의 경우가 가장 크며 AICrN의 경우가 가장 적다는 것을 알 수 있다.

Table 3에는 AISI D2 금형 소재를 이용하여 DP600 판재의 마모시험에서 측정된 코팅별 비마모율을 나타내었다[20]. TD 코팅과 CVD로 다중 코팅한 경우가 PVD 코팅 처리한 경우보다 비마모율이 적다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 두 종류의 강판을 대상으로 공구(분말소결재, S290PM (HRC62))에 소착이 발생할 때까지 슬립거리에 대한 가압하중의 영향을 나타내었다. 접촉압력이 낮을수록 소착이 발생할 때 까지의 슬립거리가 커지는 것을 알 수 있다.

이 마모시험에서는 공구가 항상 동일한 재료의 표면과 접촉하는 마모시험법인 Pin-on-Disc test (ASTM G99)의 단점을 개선하여 공구가 항상 새로운 재료와 접촉하도록 한 Slider-On-Flat-Surface (SOFS) 마모시험기를 이용하였다.

본 해설에서 기술한 많은 연구결과들에서 알 수 있듯이 모든 가공조건에서 최적인 금형재료와 코팅방법(표면개질처리)은 존재하지 않으며 사용하는 금형재료, 코팅방법 그리고 가공조건(온도, 윤활, 슬립속도 등)에 따라 적절한 조합을 찾아야 한다[17].

5. 결론

차량의 경량화와 고 안전화를 지향하기 위해 냉연 및 열연 고강도강판의 채용이 증가하고 있다. 이에 따라 기존의 프레스 금형 소재들도 고강도 소재가 개발되고 있으며 또한 금형 내구성능을 향상시키기 위해 TiAlN 등과 같은 고경도의 박막 코팅기술이 속속 도입되고 있다. 그러나 아직까지 고강도 강판의 프레스 금형에 대한 기술이 축적되어 있지 않아 프레스 현장에서 자주 가공불량과 금형파손 등의 문제점들이 보고되고 있다.

본 해설에서는 프레스 현장에서 금형 기술자들에게 지침이 될 수 있는 기술을 제공하기 위해 기존 금형강 및 개발되고 있는 금형강의 종류, 코팅종류별 내마모 특성 그리고 금형의 마모특성을 평가하기 위한 기존의 기술들을 소개하였다.

프레스 가공된 고강도 강판의 접합을 위한 용접 및 본딩 기술 등에 대해서는 다음 호에 설명하기로 한다.

후 기

연구는 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2014R1A2A2A01005903).

REFERENCES

- [1] M. S. E. Billur, T. Altan, Challenges in Forming Advanced High Strength Steels, <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/634.pdf>
- [2] J. B. Nam, 2013, Development of New Auto Steels and Application Technology, China Automotive Steel Conference, World Steel/CISA
- [3] A. A. Konieczny, 2003, Advanced High Strength Steels-Formability, U.S. Steel Automotive center, MI, American Iron and Steel Institute, (www.autosteel.org)
- [4] <http://www.worldautosteel.org/projects/ahss-guidelines/>
- [5] Y. S. Kim, S. H. Yang, S. H. Oh, J. B. Nam, 2014, Mechanical Properties of High Strength Steel Sheets and Its usage for Lightweight Vehicles, Trans. Mater. Process. Vol. 23, No. 7, pp. 453~464.
- [6] Y. S. Kim, C. I. Kim, J. B. Nam, S. H. Yang, 2014, Press Forming Characteristics and Recent Forming Technologies of High Strength Steel Sheets, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 5, pp. 323~334.
- [7] A. Yoshitake, K. Yasuda, 2011, Vision of Application Technologies for High Strength Steel Sheets Supporting Automobile Weight Reduction, J. Japan Soc. Tech. Plasticity, Vol.52, No. 606, pp. 766~771.
- [8] H. S. Choi, B. M. Kim, P. G. Suh, C. G. Kang, D. C. Ko, 2012, Qualitative Evaluation of Scratch Related Service Life of Stamping Tool for Ultra High Strength

- Steel using Friction Test, Proc. Korean Soc. Technol. Plasticity Spring Conf., pp.153~156.
- [9] http://www.uddeholm.com/files/Tooling_solutions.pdf
- [10] J. Zhang, 2008, Detection and Monitoring of Wear using Imaging Method, Ph.D thesis, Univ. Twente
- [11] O. N. Cora, M. Koc, 2009, Experimental Investigations on Wear Resistance Characteristics of Alternative Die Materials for Stamping of Advanced-high Strength Steels (AHSS), Int. J. Machine Tools Manuf., Vol. 49, pp.897-905.
- [12] M. Murakawa, M. Shima, 2004, Wear and life of shearing tool, J. Japan Soc. Tech Plasticity, Vol.45, No. 520, pp. 295~299.
- [13] 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. 2, pp. 29~34.
- [14] J. F. Archard, 1953, Contact and Rubbing of Flat Surface, J. Appl. Phys., Vol.24, No. 8, pp. 981~988.
- [15] T. Mizuno, 2004, Wear Rate and Friction Coefficient of Tools in Metal Forming, J. Japan Soc. Tech Plasticity, Vol. 45, No. 520, pp. 315~319
- [16] B. Kubota, 2002, Recent Trend for Tool Development -Multiscale Alloy Design of Tool Materials, J. Japan Soc. Tech Plasticity, Vol. 53, No. 62, pp. 10~16.
- [17] O. N. Cora, K. Namiki, M. Koc, 2009, Wear Performance Assessment of Alternative Stamping Die Materials Utilizing a Novel Test System, Wear, Vol. 267, pp. 1123~1129.
- [18] D. Young, T. Mulholland, M. Klein, 2009, Investigation of Tooling Durability for Advanced High Strength Steel, Presentation at the Seminar on Great Design in Steel, Livonia, MI.
- [19] T.G.Lee, A study on the dimensional change of STD11 die material in heat treatment and the optimum work condition of PVD die coating, MS Thesis, Kyungpook National University, 2007.
- [20] F. W. Lindvall, 2011, On Tool Steel, Surface Preparation, Contact Geometry and Wear in Sheet Metal Forming. Ph.D thesis, Karlstad University.