

마찰 방법에 따른 핫스탬핑 마모 거동의 연구 동향

지민기¹ · 전태성^{2*}

¹인천대학교 기계공학과 석사과정생

²인천대학교 기계공학과 부교수

Review on the Wear behavior of the Hot Stamping Process with Respect to Friction Testing Methods

Min-Ki Ji¹ and Tea-Sung Jun^{2*}

¹M.S. Student, Department of Mechanical Engineering, Incheon National University

²Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Incheon National University

(Received November 17, 2020 ; Revised December 11, 2020 ; Accepted December 16, 2020)

Abstract – Hot stamping is an effective and suitable process widely used in automotive applications, though critical issues such as the transfer of the coating materials and build-up of these materials on tool surfaces have been encountered. Past researches figured out the resultant wear phenomenon using pin-on-disc and drawing (for example, strip drawing and deep drawing) methods to mimic the process and analyzed the wear behavior with respect to the influencing factors such as surface coating, load, and roughness. Although the pin-on-disc is a conventional and widely-used method, it presented a methodological limitation when simulating the hot stamping process by forming a new blank each time, and hence, a drawing-based friction method has been proposed and developed. Each drawing method applies loads in a different way, resulting in a different wear behavior. Notably, the deep drawing process is most similar to the hot stamping process compared to other drawing methods. In this paper we present a review of the friction testing methods mimicking the hot stamping process and the associated wear behavior. This can be helpful in presenting a step-by-step approach and different perspectives on the wear behavior in the hot stamping process.



© Korean Tribology Society 2020. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – hot stamping(핫스탬핑), wear(마모), high-temperature friction(고온 마찰), surface coating(표면 코팅), intermetallic compounds(금속간화합물)

1. 서 론

오늘날 자동차 수요량이 급증함에 따라 연비와 안전성

을 향상시키는 방법이 강구되고 있으며, 이를 위해 가벼우면서 인장강도 1 GPa 이상의 초고강도강(Ultra-High Strength Steel, UHSS)이 자동차 산업에 적용되고 있다 [1,2]. 소재뿐만 아니라 공정 측면에서도 자동차 산업의 생산성을 높이기 위한 연구가 계속되고 있으며 그 중심에는 핫스탬핑(혹은 핫프레스포밍) 공정이 있다 [3-6]. 핫스탬핑 공정은 자동차 산업에 1984년 보론강이 차체 구조물에 적용된 후 그 중요성이 강조되었다 [7]. 핫스탬핑 공

*Corresponding author: Tea-Sung Jun

Tel: +82-32-835-8034, Fax: +82-32-835-0793

E-mail: t.jun@inu.ac.kr

<http://orcid.org/0000-0002-4968-2431>

<https://orcid.org/0000-0002-6542-9137>(Min-Ki Ji)

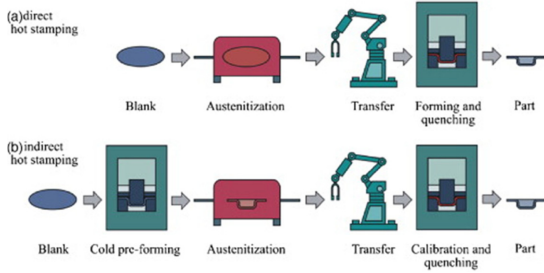


Fig. 1. Basic hot stamping process chains: (a) direct hot stamping, (b) indirect hot stamping[9].

정은 가열로를 이용하여 강판을 열처리한 후 성형기계에서 성형과 급랭을 동시에 시행하는 공정이며, 열처리 전 냉각 성형 유무에 따라 크게 직·간접 방식으로 분류된다[8]. Fig. 1은 직·간접 방식에 대한 핫스탬핑 공정의 모식도이다[9].

상온에서 페라이트와 펄라이트로 구성되어 낮은 물성치를 보이는 강판은 약 900~950°C 사이의 온도에서 열처리를 통해 오스테나이트 단상의 미세조직으로 변태된다[10]. 고온의 강판은 성형기로 이동하여 상대적으로 낮은 온도의 급랭에 의해 성형과 급랭이 동시에 이뤄진다. 급랭 시 강판의 미세조직은 오스테나이트에서 마르텐사이트로 변태되며 최종적으로 인장강도 1.5 GPa 이상의 초고강도강을 제작할 수 있다[9-12]. Fig. 2는 핫스탬핑 공정에 따른 모재의 미세조직을 나타낸 것이다[13].

Naderi et al.은 핫스탬핑 공정 후 마르텐사이트화 되는 보론강을 Table 2와 같이 정리하였다[14]. 나열한 보론강 중 현재 핫스탬핑 공정에서 일반적으로 사용되는 것은 22MnB5강이다. 22MnB5의 경우 페라이트와 펄라이트로 구성되어 있을 시 약 600 MPa 강도와 연성의 성질을 보인다. 이를 900~950°C사이 온도에서 3~10분간

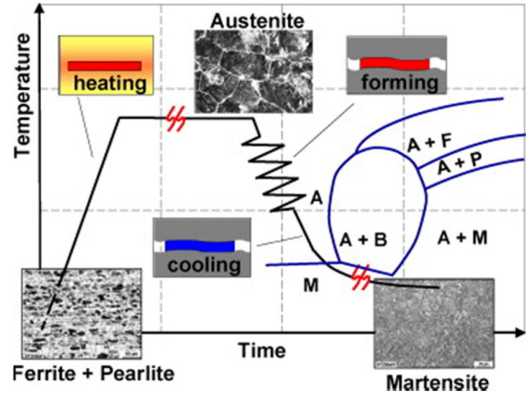


Fig. 2. Temperature vs. time diagram of the hot stamping process[13].

열처리 시 약 200 MPa 강도를 가지는 오스테나이트 단상으로 변태되며, 급랭을 거치면서 취성의 성질과 1500 MPa 이상의 강도를 띠는 마르텐사이트 상의 강판이 만들어 지게 된다[15].

핫스탬핑 공정은 고온에서의 열처리와 급랭이 시행되는 공정이기 때문에 모재를 그대로 성형할 시 부식과 산화에 매우 취약하다[16]. 이처럼 고 성형성 및 부식과 산화를 방지하기 위해 다양한 표면 코팅이 적용되어 왔으며 그 중 대표적인 것이 Al[17-20]과 Zn[21]를 이용한 코팅이다.

Al 표면 코팅은 크게 Si가 포함된 Al-Si 코팅[17,18]과 순수 Al[19,20] 코팅으로 나뉘며 핫스탬핑 조건의 열처리 후 도금층은 각각 Fig. 3과 같다. Al-Si 코팅의 경우 Al 코팅에 약 7~11% Si가 포함되며 이는 부식과 고온의 산화 측면에서 매우 적합한 코팅이다[15]. 핫스탬핑 공정에서 900°C 이상의 열처리 시 Fe와 Al은 급속히 반응하여 Fe-Al계 금속간화합물이 코팅층을 구성한다. 금속

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of the boron steels (wt%)[9,14]

Steel	Al	B	C	Cr	Mn	N	Ni	Si	Ti
20MnB5	0.04	0.001	0.16	0.23	1.05	-	0.01	0.4	0.034
22MnB5	0.03	0.002	0.23	0.16	1.18	0.005	0.12	0.22	0.04
27MnCrB5	0.03	0.002	0.25	0.34	1.24	0.004	0.01	0.21	0.042
37MnB4	0.03	0.001	0.33	0.19	0.81	0.006	0.02	0.31	0.046
Steel	Martensite temperature		Critical cooling rate in K/s		σ_{yield} As delivered	σ_{yield} Hot stamped	σ_{Tensile} As delivered	σ_{Tensile} Hot stamped	
20MnB5	450		30		505	967	637	1354	
22MnB5	410		27		457	1010	608	1478	
27MnCrB5	400		20		478	1097	638	1611	
37MnB4	350		14		580	1378	810	2040	

Table 2. Friction test parameters for hot stamping wear behaviour

Test condition	Tool coating	Specimen surface & test temperature	Tool roughness	Tool roughness & contact pressure	Heat treatment
Load	31 N	50 N	31 N	31 and 63 N	31 N
Temperature	800°C	40, 400 and 800°C	900°C	900°C	700 and 900°C
Stroke length	4 mm	1 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Frequency	12.5 Hz	50 Hz	12.5 Hz	12.5 Hz	12.5 Hz
Duration	30 s	20 min	30 s	30 s	30 s
Tool	PVD coating (AlCrN, TiAlN and DLC)	Plasma nitrided	Hot work tool steel	Hot work tool steel	Hot work tool steel
Specimen	Al-Si coated UHSS	Al-Si coated UHSS Hardened coated UHSS UHSS Hardened UHSS	Al-Si coated UHSS	Al-Si coated UHSS	Al-Si coated UHSS
Ref.	[30]	[31]	[32]	[33]	[34]

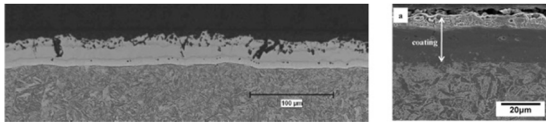


Fig. 3. Optical cross section of Usibor AluSi after austinitizing at 920°C for 6 min (left)[21] and Cross-sectional SEM micrographs of an aluminide coating, the coating consisting of Fe₃Al and FeAl after heating at 930°C for 10 min (right)[15].

간화합물 중 대표적인 것이 고 경도에 취성의 특성을 띠는 Fe₂Al₅상[22]이며 이는 코팅의 접착과 성형성에 단점으로 작용한다. Al과 Fe의 금속간 반응 중 Si는 Fe-Al계 금속간화합물 성장에 영향을 끼치며 코팅층의 특성을 변화시키는 결과를 초래한다. 성형성에서 단점으로 작용하는 Fe₂Al₅ 상을 줄이기 위한 방법으로 Si 첨가뿐만 아니라 순수 Al 코팅이 제안되었다[20]. Cho et al.은 Fe₂Al₅보다 성형과 부식 측면에서 저항성이 더 높은 Fe₃Al과 FeAl 상을 코팅층에 도입하였다. 약 4~7 μm의 얇은 합금화된 Al-Si 초기 코팅층을 950°C에서 5~10분간 열처리하는 방법으로 코팅층은 Fe₃Al과 FeAl 상만으로 구성된다. 해당 코팅층은 Al-Si 코팅층에 비해 고온에서 코팅층의 균열 측면에서는 강점이 있는 것으로 알려져 있으나 마모 측면에서는 연구가 필요한 실정이다[20].

Zn 코팅은 Fig. 1b와 같이 냉간 성형을 시행하는 간접적인 핫스탬핑 공정에서 주로 사용되며 다른 코팅에 대비하여 성형성, 전기적 부식 등의 측면에서 강점을 보인다[23]. Zn 코팅은 크게 순수 Zn가 도금층에 분포되어 있는 Galvanized(GI) 코팅[20]과 GI 코팅을 480~520°C에서 추가적인 열처리를 통해 Zn-Fe계 합금이 분포되어

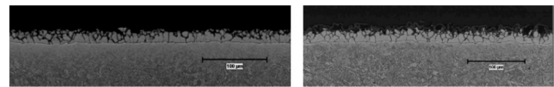


Fig. 4. Cross sectional images of Usibor GI after austinitizing at 870°C for 6 min and light shot blasting (left) and Usibor GA after austinitizing at 870°C for 6 min (right)[21].

있는 Galvannealed(GA) 코팅[20,24]으로 분류된다. Fig. 4는 열처리 후 GI와 GA 코팅의 단면부를 나타낸 것이다.

표면 코팅 처리는 공정 중 발생하는 부식과 산화 측면에서 이점이 있으나 마모에 대한 취약점 또한 공존한다. 핫스탬핑 공정에서 범용적으로 쓰이는 Al-Si 코팅의 용점은 약 577°C이며 이는 오스테나이트화 시키는 열처리 온도에 미치지 못하는 온도이다[15]. 열처리 후 액상의 성질을 띠는 Al-Si 코팅층은 가열로와 컨베이어 롤러에 접촉되어 장비에 손상을 일으킨다[25]. 더 나아가 금형과 접촉하는 성형 공정에서도 마모에 대한 문제점은 발생한다. 금형에 대비하여 고온인 강판은 성형과 금형을 동시에 겪으며, 강판은 금형 시 수축하게 되고 결과적으로 금형과 강판 간에 마찰이 발생하게 된다[26]. 금형 표면에는 접착 마모(Adhesive wear)가 발생하며 이는 금형의 수명을 단축시키는 결과로 작용한다. 국내에서는 이를 ‘소착’현상이라 정의하였으며 성형 후 이를 제거하기 위한 추가 비용을 유발한다는 것과 금형의 수명 단축 및 생산품의 품질 저하 등의 측면에서 해결해야 할 이슈로 인식되고 있다[27]. 고온에서의 환경과 처리 등은 마모 특성에 중요한 영향을 끼치며[28,29] 이를 바탕으로 핫스탬핑 공정에서 발생하는 마모에 대하여 근본

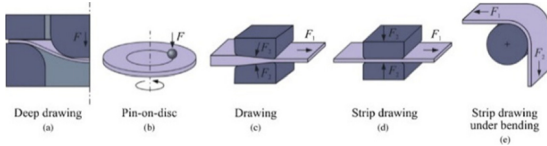


Fig. 5. Principle of the test methods for the evaluation of friction characteristics[9].

적인 해결 방법을 강구하기 위해 핫스탬핑 환경을 모사하는 연구가 활발히 이루어져 왔다.

Karbasian et al.은 Fig. 5와 같이 핫스탬핑 공정을 모사하기 위한 마찰 방법을 크게 5가지로 분류하여 정리하였다[9].

본 논문에서는 핫스탬핑 공정을 모사하기 위해서 앞서 나열한 방법들을 이용하여 마모 거동을 연구한 사례들을 고찰하고 이를 통하여 핫스탬핑 마모 거동에 대한 영향 인자 및 분석 방향성에 대해서 제시하고자 한다.

2. Pin-on-disc 방식

Pin-on-disc 방식은 일정한 트랙 혹은 주기로 반복되는 마찰 실험 방법이며 일반적으로 위쪽 금형과 아래쪽 관으로 구성되어 있다. Pelcastre et al.은 Pin-on-disc 방식을 이용하여 핫스탬핑 공정 시 발생하는 마모를 모사하였다. Fig. 6은 핫스탬핑 공정을 모사한 마찰 방법 및 마모 거동에 대해 나타낸 모식도이다[30].

Pelcastre et al.과 Hardell et al.은 핫스탬핑 공정을 모사한 Pin-on-disc를 토대로 금형 코팅[30], 소재의 조도[31], 금형의 조도[32,33] 및 열처리 조건[34]에 따라 Al-Si 도금강 소재의 마모 거동을 분석하였다. 각 실험의 조건은 Table 2와 같다.

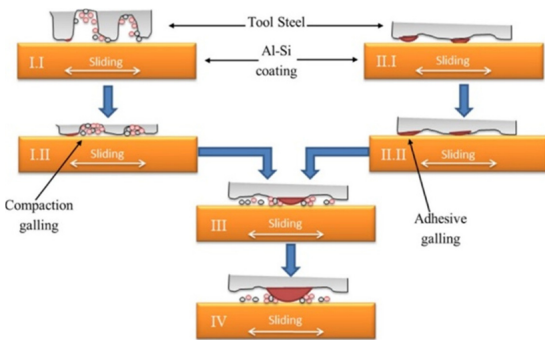


Fig. 6. Schematic representation of the galling mechanisms encountered during interaction between an uncoated tool steel and Al-Si coated UHSS[30].

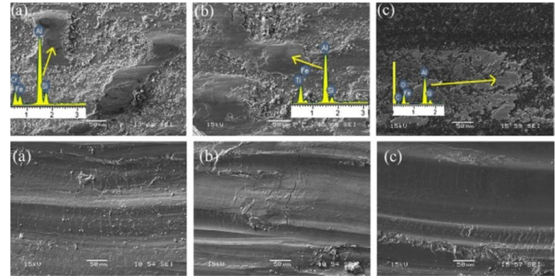


Fig. 7. SEM images of the coated tool steel (Upper) and worn surface of the Al-Si coated UHSS specimen (Lower) after the tribological tests: (a) AlCrN, (b) TiAlN and (c) DLC[30].

Fig. 7은 금형 코팅에 따른 금형과 시편의 마모 거동을 나타낸 것이다. DLC(Diamond Like Carbon) 코팅에 비해 AlCrN과 TiAlN의 경우 금형 표면에 접착 마모가 많이 발생한 것으로 정리하였으며 이는 화학적 반응에 기인된 것으로 판단하였다. AlCrN과 TiAlN 코팅에 포함된 Al은 핫스탬핑 공정 온도에서 용융되며 이는 화학적 반응을 촉진시키는 결과를 초래한다. 또한 Al은 소재의 표면 코팅인 Al-Si에도 포함되어 있어 그 반응은 보다 더 빠를 것으로 예상되었으며, 결과적으로 발생한 마모의 양이 차이가 났다. 접착 마모 발생 정도의 차이는 소재 표면에서도 확인할 수 있었으며 비교적 접착 마모의 발생이 적은 DLC 코팅에서 좀 더 매끄러운 듯한 마모가 발생하였다.

소재 표면의 조도, 코팅 및 실험 온도 조건에 따라 연구한 결과, 마모 측면에서 차이를 확인할 수 있었다[31]. Al-Si이 도금된 초고강도강의 경우 온도가 증가함에 따라 마찰 계수는 감소하였지만 소재의 마모는 증가하였으며 이는 저온에서 Al-Si 코팅의 덩어리들이 금형 표면에 접착되는 현상으로부터 비롯된 것으로 저자는 판단하였다. 무 코팅을 대상으로 한 금형의 경우 400°C까지는 온도에 따라 마모가 증가하였지만 800°C에서는 400°C의 경우와 크게 다르지 않았으며 Al-Si 코팅의 경우에는 온도에 따라 마모 또한 증가하는 것으로 정리하였다.

핫스탬핑 마모는 마찰 방향에도 영향을 받는 것으로 확인되었다. 해당 연구에서는 여러 종류의 연마지를 통해 금형 표면의 조도를 다르게 하여 마찰 방향과 함께 조건으로 삼아 마모 거동을 분석하였다[32]. 연마지를 통한 조도의 영향은 Fig. 8과 같이 마모의 차이를 심하게 일으키지 않는 것으로 확인되었다. 하지만 마찰 방향에 따라서는 유의미한 마모 거동의 차이를 보였다. 압력에 따라서는 압력이 클수록 접착 마모가 비교적 많이 발생

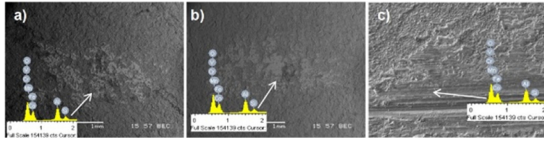


Fig. 8. Wear of discs slid against pin specimens: a) ground with #60 abrasive paper, b) coarse ground (parallel to surface lay) and c) coarse ground (perpendicular to surface lay)[32].

하는 것으로 정리하였다[33]. 또한 압력에 따라 마모 측면에 지배적으로 영향을 끼치는 인자가 다름을 확인하였으며, 비교적 작은 압력인 10 MPa의 경우 금형 조도에 따라 마모의 발생에서 차이가 있었다. 20 MPa의 경우 조도보다 금형의 경도가 마모에 좀 더 영향을 끼쳤으며 금형의 경도가 클수록 금형과 소재 간에 화합물이 생성되는 것을 줄이는데 효과적인 것으로 정리하였다.

열처리 조건에 따른 코팅층과 마모에 대한 연구에서는 열처리 온도를 700과 900°C, 목표 온도에 다다른 후 유지 시간을 0, 4, 20분으로 설정하였다[34]. 700°C에서 0분의 경우 코팅층에 아직 합금화가 되지 않은 Al과 Si가 확인이 되었으며 유지 시간이 길어질수록 코팅층에는 Fe_2Al_7 , Si , Fe_2Al_5 와 $FeAl_2$ 상들이 지배적으로 존재하였다. 900°C에서는 0분의 경우 700°C와 유사하게 Fe_2Al_7 , Si , Fe_2Al_5 와 $FeAl_2$ 상들이 존재하였으며 유지 시간이 길어짐에 따라 Fe_2Al_5Si , Fe_2Al_5 , $FeAl_2$ 상들이 지배적으로 존재하였다. 또한 700°C에서 보이지 않던 확산층(Diffusion layer)을 900°C에서 확인할 수 있었다. 마모 거동은 동일 유지 시간을 기준으로 700°C에서 비교적 많은 접착 마모가 발생하였으며 900°C의 경우 유지 시간에 따라 마모가 줄어드는 경향을 보였다.

Pelcastre et al.과 Hardell et al.의 핫스탬핑 마모에 대한 연구는 마모가 어떠한 한가지 조건에 국한된 것이 아닌 금형 코팅, 표면 조도 등 여러가지 영향에서 비롯된 결과물임을 시사하였다. 하지만 Fig. 6과 같이 Pin-on-disc 방식을 이용한 마찰 실험 초기 후에 아래쪽 판은 반복적인 마찰로 인해 마모가 발생한 상태이며 이를 위쪽 금형으로 마찰을 반복하는 것은 실제 마모 거동과는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다. 열처리 후 Al-Si 코팅은 Fig. 3과 같이 Fe-Al계 금속간화합물들이 코팅층을 구성한다. 해당 금속간화합물들은 기계적 특성이 각각 다르며[22], 이는 실제 금형과 마찰이 발생 시 표면에 존재하는 상에 따라 마모 거동이 다를 것으로 판단된다. 이처럼 매년 새로운 시편을 성형하는 핫스탬핑 공정을 모사하기에는 방법론적으로 한계가 있음이 판단된다[9].

3. Drawing 방식

핫스탬핑 공정을 모사하는데 있어 Pin-on-disc의 방법론적인 한계가 제시됨에 Fig. 5와 같이 Drawing 마찰 방법을 이용한 연구가 수행되었다. Drawing 방식은 압력 부하에 따라 Strip drawing, Drawing, Deep drawing, Strip drawing under bending 등으로 나뉜다.

Fig. 9는 Strip drawing 방식의 모식도이며 Venema et al.은 이를 토대로 핫스탬핑 마모의 메커니즘과 온도의 영향에 대해서 분석하였다[36,37]. Fig. 10은 모체가 오스테나이트 상이 되도록 930°C를 목표 온도로 6분간 열처리 후 700°C에서 마찰 실험을 한 금형 표면이다.

금형 표면에는 접착 마모와 연마 마모(Abrasive wear)가 복합적으로 발생하였다. 마찰이 시작되는 금형의 우측 부분에는 입자들에 의해 마찰 방향으로 끌린 자국을 근거로 연마 마모가 발생하였다고 판단하였으며 해당 구간 표면에는 입자들이 다소 존재하였다. 입자들은 Fe_2Al_5 상이 지배적이었으며 이는 경도 값이 크며 취성인 것으로 알려져 있다[38]. 실험이 반복되고 마찰 방향에 따라 입자들은 이동하게 되며 특정 부분에 축적물인 Compaction galling을 형성하게 된다. Compaction galling 이후에는 Normal adhesive wear와 복합적으로 발생한다고 정리하였다. 또한 Venema et al.은 마찰 실험의 온도에 따른 금형 표면 마모 거동을 연구하였으며 700°C에 비해 500°C에서 접착 마모가 지배적으로 발생하였다고 정리하였다[37]. Deng et al.은 접착 마모를 압력과 온도의 영향에

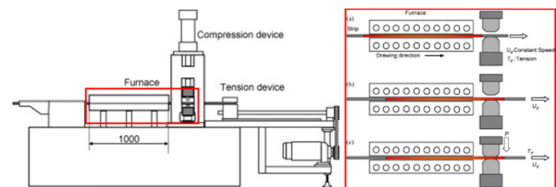


Fig. 9. Schematic representation of hot flat strip drawing test machine (left) and test method (right)[35].

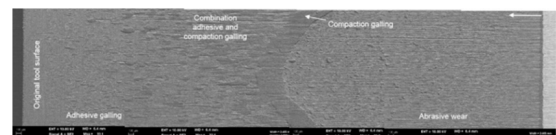


Fig. 10. Assembly of SEM images to show the topographic overview of the worn surface of the tooling, abrasive wear, compaction galling and normal adhesive galling after testing. White arrow in top right of figure shows drawing direction[36].

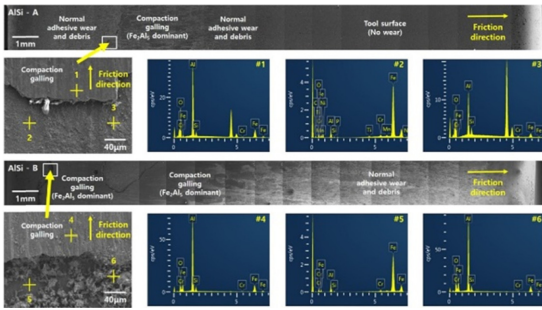


Fig. 11. SEM images showing wear behaviour of the right tool against Al-Si coated 22MnB5 after 15th friction test: (upper) AISi-A and (lower) AISi-B (The friction direction is left to right in this figure)[40].

대해서 정리하였으며 압력이 집중되는 부분에 접착 마모가 형성이 되었고 접착 마모의 정도는 압력보다 온도의 영향이 지배적인 것을 확인하였다[39].

Ji et al.은 22MnB5 강의 초기 Al-Si 도금층 두께에 따른 마찰 및 마모 거동에 대해서 정리하였으며 Fig. 11은 각 소재들을 대상으로 15번째 고온 마찰 실험 반복 후 금형 표면을 분석한 것이다[40].

AISI-A 소재는 초기 Al-Si 도금층 두께가 $19.6 \pm 7.3 \mu\text{m}$, AISi-B는 $29.3 \pm 6.3 \mu\text{m}$ 로 도금층 두께 영향에 대해 비교 분석하였다. 두 소재를 대상으로 한 금형 표면에는 Venema et al.의 결과와 유사하게 Compaction galling과 Normal adhesive wear가 발생하였으며 해당 마모들은 Fe_2Al_3 상이 지배적으로 존재하였다. AISi-A에 비해 B 소재를 대상으로 하였을 때 금형 마모가 전체적으로 발생하였으며 금형 무게 또한 초기 대비 A 소재는 고온 마찰을 15번 반복 후 10 mg, B 소재는 35 mg 증가한 수치들을 통해 B 소재에서 접착 마모가 비교적 많이 발생한 것으로 판단하였다. 저자는 두 소재 간의 마모량 차이를 열처리 후 도금층 상층부에 존재하는 산소 분포 정도로부터 기인된 표면 조도 값의 차이로 고온 마찰 후 금형 표면에 존재하는 Fe_2Al_3 입자들의 영향[41]인 것으로 정리하였다.

Deng et al.은 Drawing 방식으로 Strip drawing과 비교하여 실제 공정 환경과 좀 더 유사한 마찰 및 마모 거동을 연구하였다[42]. Fig. 12는 Drawing 방법에서 사용된 금형의 모식도와 실제 형상, 마모량을 분석한 것이다.

Deng et al.은 초기 하중 값에 따라 압력 분포 범위가 다른 것을 확인하였으며 동일한 하중에도 Fig. 12와 같이 금형의 위치 및 마찰 거리에 따라 마모량과 마찰 계수가 다른 것을 정리하였다. 이는 Drawing 방식에서 압력 수치와 형상에 따른 압력 분포가 마모 거동에 영향을

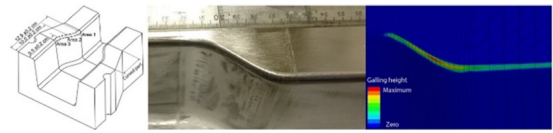


Fig. 12. The positions of severe galling in the curved part of the upper tool (left) and comparison of the measured and calculated galling in the upper tool of the full-scale press hardening experiment (right)[42].

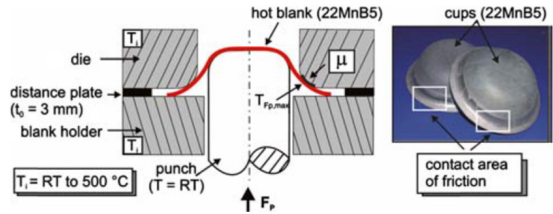


Fig. 13. Schematic sketch of the experimental setup of the cup deep drawing test (left) and two drawn cups at elevated temperatures with the contact areas of the main friction between blank and tool pointed out (right)[44].

끼치는 것을 시사한다.

Deep drawing은 다른 마찰 방법들에 비해 핫스탬핑 공정의 실제 환경과 가장 유사한 것으로 알려져 있으며 [9,43] 해당 방법의 모식도는 Fig. 13과 같다.

Geiger et al.은 Deep drawing 방식을 이용하여 핫스탬핑 공정의 고온 마찰 계수를 강판의 온도에 따라 비교 분석하였다[44]. Deep drawing을 통한 고온 마찰 계수는 금형과 강판의 온도가 증가함에 따라 감소하였으며 금형의 반지름 또한 마찰 계수 측면에서 변수로 작용하는 것을 확인하였다. Geiger et al.은 이와 같은 현상을 열전달계수(heat transfer coefficient) 측면에서 해석하였으며 강판에 가하는 금형의 접촉 압력에 따라 변화되는 열전달계수를 통해 압력 또한 핫스탬핑 공정에 대해 영향을 끼치는 것을 시사하였다. Mori et al.은 Deep drawing을 통해 초고강도강을 가열 온도에 따라 성형하였으며 성형 후 소재 표면에는 산화물이 형성되었고 가열 온도가 증가함에 따라 소재의 무게가 증가한 결과를 통해 온도에 따른 핫스탬핑 마모를 정량적으로 정리하였다[45]. 이를 토대로 핫스탬핑 공정에서 생산성과 성형성을 향상시키기 위해 온도 측면에서의 방법들이 연구되고 있다 [46,47]. 그 밖의 Strip drawing under bending 방법 등은 현재까지 핫스탬핑 공정 마모에 적용된 사례를 찾아보기 힘든 실정이다.

핫스탬핑 공정을 모사하기 위한 Drawing 방법은 가하는 압력에 따라 세분화되며 마모에 영향을 끼치는 인자

들도 시행된 연구들을 통해 다른 것을 확인할 수 있다. 이에 해당하는 대표적인 인자가 압력이며, Strip drawing 방법에서는 마모에 대해 온도보다 영향력이 적은 것으로 알려져 있으나 다른 Drawing 방법에서는 지배적인 영향을 끼치는 것으로 정리하였다. 영향 인자가 비교적 적은 Strip drawing 방법을 통해 마찰과 마모 거동 측면에서의 급형과 강관 간에 기본적인 반응을 확인할 수 있으며, Drawing과 Deep drawing 방법에서는 압력과 온도 외에 실제 공정에서 변수로 작용하는 인자들을 제시한다. 이는 핫스탬핑 공정에서 발생하는 마모에 대해 단계적 접근과 다양한 관점에서의 이해가 필요함을 시사한다.

4. 결 론

자동차 산업에서 핫스탬핑 공정에 대한 관심이 급증함에 따라 공정에서 발생하는 마모에 대한 연구가 다양하게 발표되었다. 저자들은 핫스탬핑 공정의 마모를 모사하기 위하여 다양한 마찰 실험 방법을 도입하였으며 결과로 영향 인자들을 제시하였다. 마모 거동에 대한 초기 연구에는 Pin-on-disc 형식의 왕복 마찰 운동을 적용하였지만 매번 새로운 강관을 성형하는 핫스탬핑 공정을 모사하는데 방법론적인 한계점이 제시되며 이후에는 Drawing 방법들이 주목받기 시작하였다.

마찰 방법에 따라 마모 거동에 영향을 끼치는 인자가 조금씩 차이가 있었으나 온도와 압력은 공통적으로 주목을 받았다. 그 외에도 소재의 도금층, 표면 조도, 산화물, 공정 조건 등이 거론되었으며 이는 마모를 다양한 관점에서 해석해야 한다는 바를 시사한다. 그러나 아직까지 각 인자들에 대한 개별적인 영향은 연구되었으나 실제 공정과 같이 이러한 영향 인자들이 한곳에 복합적으로 작용하는 현상에 대해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 포스코의 지원을 받아 이루어졌음.

References

- [1] Mega, T., Hasegawa, K., Kawabe, H., "Ultra high-strength steel sheets for bodies, reinforcement parts, and seat frame parts of automobile: Ultra high-strength steel sheets leading to great improvement in crashworthiness", *JFE Tech. Rep.* 4, pp.38-43, 2004.
- [2] Takagi, S., Toji, Y., Yoshino, M., Hasegawa, K., "Hydrogen embrittlement resistance evaluation of ultra high strength steel sheets for automobiles", *ISIJ international*, 52, pp.316-322, 2012.
- [3] Norrbottens Jaernverk AB, *Manufacturing a hardened steel article*, UK Patent No. 1,490,535, 1973.
- [4] Akerstrom, P., *Modelling and simulation of hot stamping*, Luleå tekniska universitet, Sweden, 2006.
- [5] Chang, Y., Mengm, Z. H., Liang, Y. I. N. G., Li, X. D., Ning, M. A., & Ping, H. U., "Influence of hot press forming techniques on properties of vehicle high strength steels", *J. Iron. Steel. Res. Int.*, 18, pp.59-63, 2011.
- [6] Lee, M. G., Kim, S. J., Han, H. N., & Jeong, W. C., "Application of hot press forming process to manufacture and automotive part and its finite element analysis considering phase transformation pasticity", *Int. J. Mech. Sci.*, 51, pp.888-898, 2009.
- [7] Berglund, G., "The history of hardening of boron steel in northern Sweden", "1st international conference on hot sheet metal forming of high-performance steel", Kassel, Germany, October 2008.
- [8] Merklein, M., Lechler, J., & Stoehr, T., "Characterization of tribological and thermal properties of metallic coatings for hot stamping boron-manganese steels", "Proceedings of the 7th international conference coatings in manufacturing engineering", Chalkidiki, Greece, October 2008.
- [9] Karbasian, H., & Tekkaya, A. E., "A review on hot stamping", *J. Mater. Process. Technol.*, 210, pp.2103-2118, 2010.
- [10] Turetta, A., Bruschi, S., & Ghiotti, A., "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations", *J. Mater. Process. Technol.*, 177, pp.396-400, 2006.
- [11] Kwon, K. Y., Kim, N. H., & Kang, C. G., "The effect of cooling rate on mechanical properties of 22mnb5 steel sheet during hot press forming", *Open J. Adv. Mater. Res.*, 264, pp.241-247, 2011.
- [12] Merklein, M., Lechler, J., & Geiger, M., "Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5", *CIRP Annals*, 55, pp.229-232, 2006.
- [13] Bariani, P. F., Bruschi, S., Ghiotti, A., & Turetta, A., "Testing formability in the hot stamping of HSS", *CIRP Annals*, 57, pp.265-268, 2008.
- [14] Naderi, M., & Bleck, W., *Hot stamping of ultra high strength steels*, Lehrstuhl und Institut für Eisenhüttenkunde, Germany, 2008.
- [15] Fan, D. W., & De Cooman, B. C., "State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts", *Steel. Res. Int.*, 83, pp.412-433, 2012.
- [16] Yao, Z., Ma, F., Liu, Q., Zhao, F., Li, F., Lin, J., & Song, W., High temperature oxidation resistance and

- mechanical properties of uncoated ultrahigh-strength steel 22MnB5, *Proceedings of the FISITA 2012 world automotive congress*, pp. 67-78. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. (ISBN: 978-3-642-33738-3)
- [17] Jenner, F., Walter, M. E., Iyengar, R. M., & Hughes, R., "Evolution of phases, microstructure, and surface roughness during heat treatment of aluminized low carbon steel", *Metall. Mater. Trans. A.*, 41, pp.1554-1563, 2010.
- [18] Suehiro, M., Maki, J., Kusumi, K., Ohgami, M., & Miyakoshi, T., "Properties of aluminized steels for hot-forming", *SAE Tech. Pap.*, 2003.
- [19] Fan, D. W., & De Cooman, B. C., "Formation of an aluminide coating on hot stamped steel", *ISIJ International*, 50, pp.1716-1718, 2010.
- [20] Cho, Y. R., Kim, T. H., Park, S. H., & Baek, E. R., *Aluminum-Plated Steel Sheet Having Superior Corrosion Resistance, Hot Press Formed Product Using the Same, and Method for Production Thereof*, US patent No. 2,377,965, 2011.
- [21] Dosdat, L., Petitjean, J., Vietoris, T., & Clauzeau, O., "Corrosion resistance of different metallic coatings on press-hardened steels for automotive", *Steel Res. Int.*, 82, pp.726-733, 2011.
- [22] Kobayashi, S., & Takou, T., "Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment", *Mater. Sci. Eng. A*, 338, pp.44-53, 2002.
- [23] Fleischanderl, M., *Patent Application Publication*, US Patent No. 0,256,808, 2007.
- [24] Imai, K., Yoshikawa, Y., Toki, T., Nishibata, T., Uematsu, K., Uchihara, M., & Takayama, T., "South East Asia Iron Steel Inst", *South East Asia Iron Steel Inst. Q.*, 34, 2005.
- [25] Hardell, J., *Tribology of hot forming tool and high strength steels*, PhD Thesis, Luleå tekniska universitet, Sweden, 2009.
- [26] Hardell, J., Pelcastre, L., & Prakash, B., "High-temperature friction and wear characteristics of hardened ultra-high-strength boron steel", *P. I. Mech. Eng. J-J. Eng.*, 224, pp.1139-1151, 2010.
- [27] B. K. Choi, H. S. Son, and H. G. Kim, "Characteristics of AlSi coated material for hot press forming process", "*KSAE Annual Conf.*", Incheon, Korea, 2009.
- [28] S.Y. Choe, Narguess Nematı and D.E. Kim, "A Study on Wear Properties of Alloys in High Temperature Condition", *Tribol. Lubr.*, 35, No.1, pp.24-29, 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.1.24>
- [29] Choongho Sangseong, Jun-Suek Ro, Young-Sik Pyoun and Auezhan Amanov, "Effects of High-temperature UNSM Treatment on Wear Resistance of Ti-6Al-4V Alloy Prepared by Selective Laser Melting", *Tribol. Lubr.*, 36, pp.47-54, 2020, <https://doi.org/10.9725/10.9725/kts.2020.36.1.47>
- [30] Pelcastre, L., Hardell, J., & Prakash, B., "Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al-Si coated ultra-high strength steel at elevated temperature", *Tribol. Int.*, 67, pp.263-271, 2013.
- [31] Hardell, J., Pelcastre, L., & Prakash, B., "High-temperature friction and wear characteristics of hardened ultra-high-strength boron steel", *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 224, pp.1139-1151, 2010.
- [32] Pelcastre, L., Hardell, J. & Prakash, B., "Influence of tool steel surface topography on galling during hot forming of Al-Si coated ultra high-strength steels", "NORDTRIB 2012", *Trondheim, Norway*, June, 2012.
- [33] Pelcastre, L., Hardell, J., & Prakash, B., "Investigations into the occurrence of galling during hot forming of Al-Si-coated high-strength steel", *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 225, pp.487-498, 2011.
- [34] Pelcastre, L., Hardell, J., Rolland, A., & Prakash, B., "Influence of microstructural evolution of Al-Si coated UHSS on its tribological behaviour against tool steel at elevated temperatures", *J. Mater. Process. Technol.*, 228, pp.117-124, 2016.
- [35] Yanagida, A., Kurihara, T., & Azushima, A., "Development of tribo-simulator for hot stamping", *J. Mater. Process. Technol.*, 210, pp.456-460, 2010.
- [36] Venema, J., Hazrati, J., Matthewe, D. T. A., Stegeman, R. A., & Van Den Boogaard, A. H., "The effects of temperature on friction and wear mechanisms during direct press hardening of Al-Si coated ultra-high strength steel", *Wear*, 406, pp.149-155, 2018.
- [37] Venema, J., Matthews, D. T. A., Hazrati, J., Wormann, J., & van den Boogaard, A. H., "Friction and wear mechanisms during hot stamping of AlSi coated press hardening steel", *Wear*, 380, pp.137-145, 2017.
- [38] Yousaf, M., Iqbal, J., & Ajmal, M., "Variables affecting growth and morphology of the intermetallic layer (Fe₂Al₅)", *Mater. Charact.*, 62, pp.517-525, 2011.
- [39] Deng, L., Pelcastre, L., Hardell, J., Prakash, B., & Oldenburg, M., "Experimental evaluation of galling under press hardening conditions", *Tribol. Lett.*, 66, pp.93, 2018.
- [40] Ji, M., K., Son, H., Oh, J., Kim, S., Kim, K., & Jun, T. S., "Effects of Al-Si Coating Thickness on 22MnB5 in Hot Stamping Wear", *Korean J. Met. Mater.*, 58, pp.573-582, 2020.
- [41] Kisakado, T., "The influence of surface roughness on abrasive wear", *Wear*, 41, pp.179-190, 1977.
- [42] Deng, L., Pelcastre, L., Hardell, J., Prakash, B., & Oldenburg, M., "Numerical investigation of galling in a press hardening experiment with AlSi-coated workpieces", *Eng. Fail. Anal.*, 99, pp.85-96, 2019.
- [43] Stoehr, T., Merklein, M., & Lechler, J., "Determination of frictional and thermal characteristics for hot

- stamping with respect to a numerical process design”, “1st international conference on hot sheet metal forming of high-performance steel”, Kassel, Germany, October, 2008.
- [44] Geiger, M., Merklein, M., & lechler, J., “Determination of tribological conditions within hot stamping”, *Prod. Eng.*, 2, pp.269, 2008.
- [45] Mori, K., Maki, S., & Tanaka, Y., “Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating”, *CIRP Annals*, 54, pp.209-212, 2005.
- [46] Maeno, T., Mori, K. I., & Nagai, T., “Improvement in formability by control of temperature in hot stamping of ultra-high strength steel parts”, *CIRP Annals*, 63, pp.301-304, 2014.
- [47] Maeno, T., Mori, K. I., & Fujimoto, M., “Improvements in productivity and formability by water and die quenching in hot stamping of ultra-high strength steel parts”, *CIRP Annals*, 64, pp.281-284, 2015.