

초고장력강판 성형용 냉간 프레스 금형의 Ti/Cr계 PVD코팅에 대한 마모 특성 평가

허재영¹ · 윤국태^{2,#} · 송재선³ · 강익수⁴ · 윤일채¹ · 박춘달⁵

Evaluation of Wear Characteristics on Ti/Cr PVD Coatings of Cold Press Die for the Forming of UHSS

J. Y. Heo, K. T. Youn, J. S. Song, I. S. Kang, I. C. Yoon, C. D. Park

(Received April 26, 2022 / Revised May 24, 2022 / Accepted June 17, 2022)

Abstract

The application of UHSS sheet is being expanded up to 50% to reduce the weight of automobiles and improve safety. However, due to the high strength and low elongation of the ultra-high tensile strength steel sheet, product defects such as spring back and mold defects such as cracks and chippings also occur. In this study, Pin/Ring on Disc and Spiral wear tests were conducted to evaluate the durability of Ti/Cr-coated molds for forming 1.2GPa grade UHSS sheets. Component analysis and thickness were measured for each coating layer, and hardness and adhesion were investigated to determine mechanical properties. Combining the results of various wear tests, it was found that the TiAlN coating had the best wear and sticking resistance.

Keywords: UHSS(Ultra High Strength Steel), PVD Coating, Pin/Spiral Wear Test, Ring Wear Test, Scratch Test

1. 서론

자동차 경량화와 안전성 향상을 위한 기가급의 초고장력 강판 적용이 종래에 약 20%에서 최근에는 50% 이상으로 더욱 확대되고 있다. 초고장력 강판은 높은 강도와 낮은 연신율로 실제 성형시 스프링백(springback), 주름(wrinkle)과 같은 성형 불량을 야기하고, 크랙(crack), 깨짐(chipping), 긁힘(scratch), 골링(galling) 등과 같이 금형의 표면결함도 유발한다[1].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 금형의 정밀연마, 도금, 코팅 등을 적용하여 금형의 표면 개질 특성을 개선하는 연구[2~3]와 서보프레스로 모션을 제어하여 마찰저항 및 금형의 응력을 감소시키는 연구[4~5] 등이 수행되어 왔다. 현재까지 보고된 코팅

에 대한 내구성 평가는 핀 또는 볼을 활용한 한가지 방식의 마모시험을 통한 평가[6~7]가 대부분이다. 초고장력강판을 성형하기 위해서는 금형과 판재 사이에 높은 접촉압력이 가해질 수 밖에 없어, 금형에 적용된 PVD 코팅에 대한 특성을 정확히 파악하기 위해서는 접촉방식에 따라 여러 타입의 마모시험을 통한 종합적인 평가가 필요하다.

본 연구에서는 자동차 차체에 많이 적용되고 있는 Trip 1180(1.0t) sheet를 성형하기 위한 코팅 금형의 내구성을 마모시험을 통하여 평가하였다. 코팅은 산업에서 적용되고 있는 Ti/Cr계 PVD 코팅을 실시하여 각 코팅층에 대한 성분분석, 두께 그리고 경도를 측정하였고, 모재와 코팅층 간의 접합력을 알아보기 위하여 밀착력을 측정하였다. 최종적으로 마모 메커니즘에 따라 점접촉 방식의 Pin on Disc 마모시험, 면접촉 방식의 Ring on Disc 마모시험, 새로운 면을 계속해서 마찰해 나가는 Spiral 방식의 마모시험을 수행하여 각 코팅에 대한 내구성을 평가하였다.

1. (재)대구기계부품연구원 첨단공구·가공사업단, 선임연구원

2. (재)대구기계부품연구원 소재부품연구본부, 책임연구원

3. (재)대구기계부품연구원 미래자동차사업단, 선임연구원

4. (재)대구기계부품연구원 첨단공구·가공사업단, 책임연구원

5. (재)대구기계부품연구원 기업성장지원본부, 수석연구원

Corresponding Author : Daegu Mechatronics & Materials Institute, Principal Researcher, E-mail:younkt@dmi.re.kr. ORCID: 0000-0003-1721-8252

2. 시험조건 및 평가방법

2.1 PVD 코팅 종류 및 코팅층 분석

시험에 적용된 PVD 코팅은 최근 산업에서 초고장력 강판을 성형하기 위하여 금형에 많이 적용하고 있는 Cr계 multi CrN 코팅 1종과 Ti계 TiAlN, CrAlTiN, sulfur+CrAlTiN, CrWTiN 코팅 4종을 선정하였다. 모재는 STD11 냉간공구강으로 동일하게 적용하였고 표면조도는 래핑 수준(Ra 0.02 μ m)으로 가공 후 코팅을 실시하였다. 각 시험편은 코팅층 두께 측정과 성분 분석 및 이온질화 유무 등을 확인하기 위하여 미세조직 분석을 실시하였으며, 시험편은 nital 3% etchant로 부식 후 주사전자현미경(SEM-EDS)을 통하여 코팅층의 layer 구성과 성분분석 그리고 두께를 측정하였다.

코팅층의 경도는 초미소경도시험기(micro hardness tester)를 이용하여 측정하였으며, 다이아몬드 Vicker's Indenter로 코팅 표면에 하중 50g으로 loading time 10초, dwell time 10초 그리고 unloading time 10초 부가하였다. 이때, 압입시 모재의 영향을 최소화하고 압입흔의 길이 측정시 발생하는 측정오차를 줄이기 위하여 압입 깊이를 약 1 μ m 수준으로 코팅 두께의 약 1/5 두께만큼만 압입하였다.

모재와 코팅층간의 접합력을 알아보기 위하여 스크래치 시험을 실시하였으며, 시험조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Conditions of scratch test

Indenter type	Diamond Rockwell(Radius 200 μ m)
Begin load	1N
End load	100N
Loading rate	99 N/min
Scratch length	5 mm
Indenter feeding speed	5 mm/min

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 LC1은 acoustic emission이 처음 peak를 나타낼 때의 하중이며, LC2는 스크래치 트랙 내부 또는 측부에 크랙이 발생하거나 국부적인 미소 박리가 일어나는 하중이고, LC3은 코팅이 박리되어 떨어져 나가는 시점의 하중으로 본 연구에서는 LC3을 코팅과 금형 모재와의 밀착력으로 정의하였다.

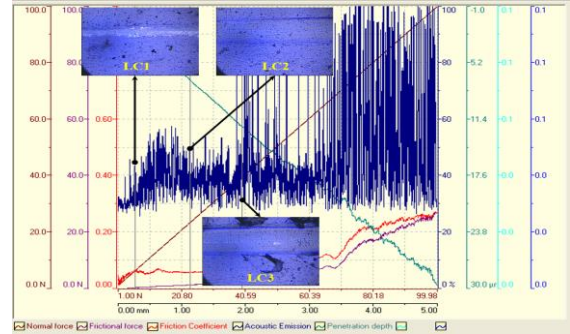


Fig. 1 Measuring points of scratch test

2.2 내구성 평가 방법

금형의 코팅 종류에 따른 내구성 평가를 위하여 Fig. 2의 마모시험기를 사용하여 Pin on Disc, Ring on Disc 그리고 Spiral 방식의 마모시험을 Table 2와 같은 조건으로 상온에서 수행하였다. 마모시험은 상부의 Pin/Ring으로 아래에 고정된 disc(sheet)에 일정한 하중을 가한 후 정해진 rpm과 직경, 시간으로 사이클을 그리며 반복하여 시험을 진행하였다.

일반적으로 프레스공법에서는 금형과 성형소재간의 접촉이 점과 선 그리고 면이 복합적으로 발생한다. 본 연구에서는 선접촉 상태의 구현이 어렵기 때문에 마모시험에서 흔히 사용되는 Pin on Disc (ASTM G99) 방식의 마모시험을 통하여 점접촉 상태를 모사하였고, 성형해석을 통해 도출된 결과[8]를 참고하여 하중을 설정하였다. 또한, 면접촉 상태를 구현하기 위하여 ring 형태로 상대재를 제작하여 각 코팅에 따른 내마모성을 비교 평가하였다.

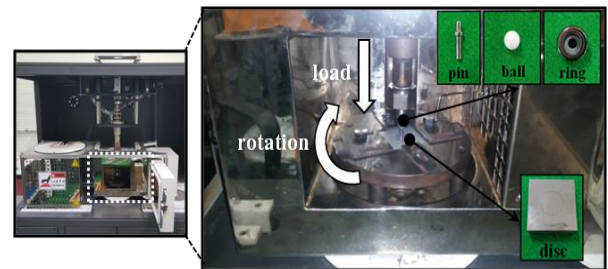


Fig. 2 Wear test equipment and operating principle

실제 프레스 성형공정에서는 하나의 판재를 성형한 후 새로운 판재로 계속 교체하면서 성형이 이루어지므로 새로운 면에 금형과 접촉하는 마모거동을 모사하기 위하여 Spiral 방식의 마모시험을 수행하였

다. Pin/Ring on Disc 방식의 마모시험은 동일 마모 트랙 위에 반복적으로 마모가 유도되지만 Spiral 방식의 마모시험은 pin이 disc의 새로운 면에 소용돌이(vortex) 형태로 마모가 유도되는 방식이다.

Table 2 Conditions of abrasion test

Test type	Pin	Spiral	Ring
Condition			
Vertical load [kgf]	6	20	35
Test speed [rpm]	60	10	60
Sliding distance [m]	-	1.6	-
Test time [min]	60	-	60
Diameter [mm]	20	-	18
Pitch [mm]	-	1.0	-

2.2.1 점 접촉 마모시험

금형의 점접촉 상태에서 마모 거동을 알아보기 위하여 STD11을 모재로 pin을 제작한 후 코팅을 실시하였으며, Trip 1180(1.0t) 판재로 disc를 제작하여 Pin on Disc 마모시험과 새로운 면을 마찰해가는 마모 거동을 알아보기 위한 Spiral 마모시험을 수행하였다. 시험 후 Fig. 3과 같이 실체현미경으로 마모 면적(area)을 2차원적으로 측정하였고, 형상측정기로 Pin 첨단부의 마모 깊이(depth)를 측정하였다. 이때, Pin on Disc 마모시험의 경우 동일 트랙을 계속해서 마찰해가기 때문에 소착(sticking) 면적도 동시에 측정하여 비교 평가하였다. Spiral 마모시험은 마모 특성을 가속화하기 위하여 수직하중을 20kgf로 적용하였고, 나선 피치는 1mm, 회전반경은 R0~R22까지로 총 마모거리는 약 1.6m가 되도록 설정하여 각 코팅이 적용된 pin 한 개당 20회 반복 시험하였다.

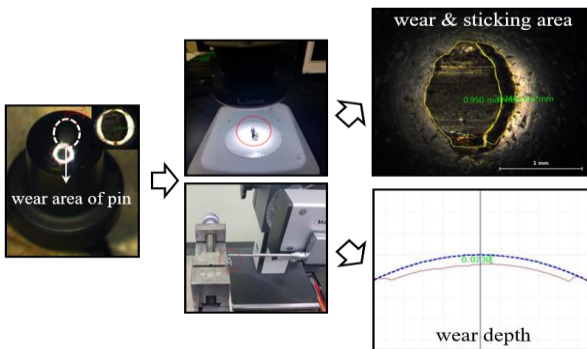


Fig. 3 Method for measuring wear area and depth of pin

2.2.2 면 접촉 마모시험

동일 판재에 대하여 금형의 면접촉 상태에서 마모 거동을 알아보기 위해 STD11 모재로 Fig. 4와 같이 ring을 제작하여 코팅을 실시한 후 Ring on Disc 마모시험을 수행하였다. 면접촉을 고려하여 수직하중을 35kgf로 상향하였고, 시험시간은 60분으로 고정하여 상온에서 실시하였다. 시험 중 접촉면에서 외부로 밀려나는 코팅 및 판재의 debris나 particle 등을 제거하기 위해 에어를 분사하며 시험을 수행하였다.

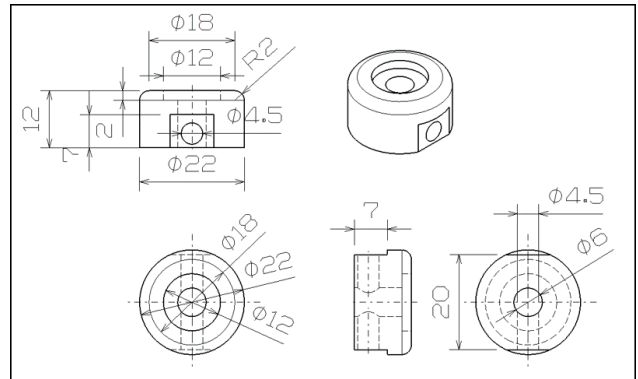


Fig. 4 Drawing of ring for ring on disc wear test

평가방법은 아래 Fig. 5에 나타난 바와 같이 마이크로형상 및 표면측정장비(InfiniteFocus, Alicona)를 이용하여 시험 전 ring의 내경부 저면을 기준으로 높이를 스캔하고, 시험 후 접촉면을 다시 스캔하여 동일 기준점에서 overlap하여 초기 높이 대비 마모와 골링에 대한 편차 정도를 나타낸 분율(fraction, %) 데이터로 비교 평가하였다. 이때 ring의 내경부 저면을 기준하여 높이를 측정한 초기값을 initial surface로 표시하였고, initial surface 선을 기준으로 분율이 왼쪽으로 이동하면 마모가 발생하고, 오른쪽으로 이동하면 골링이 발생한 것으로 정의하였다.

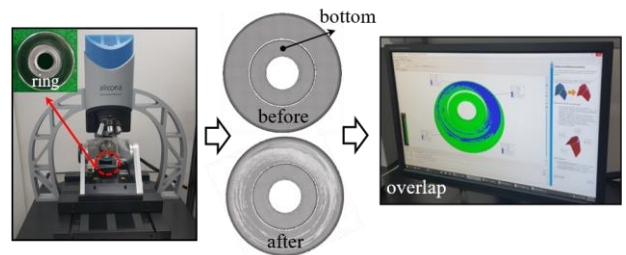


Fig. 5 Method for measuring wear and galling of ring

3. 결과 및 고찰

3.1 PVD 코팅층 분석

5종의 PVD 코팅에 대하여 SEM-EDS로 코팅층의 성분분석과 두께를 측정하였으며, 초미소경도시험기로 코팅층의 경도를 측정하였고, 스크래치시험을 통하여 모재와 코팅층 간의 밀착력을 측정하였다.

3.1.1 성분분석 및 두께 측정

각 코팅에 대한 성분분석과 두께 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, multi CrN은 약 1.3 μ m 두께의 코팅이 5 layer 다층구조로 총 6.5 μ m의 두께가 측정되었고, 성

분분석 결과 각 층 모두 CrN층으로 확인되었다. TiAlN은 약 5.5 μ m 두께의 단일 코팅층으로 확인되었으며, CrTiAlN은 top-layer가 12.9 μ m, inter-layer가 2.7 μ m 총 두께가 약 15.6 μ m로 두 layer의 주 성분은 CrTiAlN으로 확인되었다. CrWTiN은 약 2.0 μ m 수준의 Ti계 top-layer가 존재하였으며, 주 코팅층은 6.26 μ m 두께의 CrWTiN으로 확인되었다. sulfur+CrTiAlN의 경우 총 두께가 약 28.2 μ m로 top-layer에 약 18.8 μ m 두께의 sulfur가 첨가된 윤활층과 약 9.4 μ m 정도의 경질 코팅층이 확인되었으나 다른 코팅들과 다르게 모재에 질화층이 관찰되었고 확산층 깊이는 약 90 μ m 수준이었다.

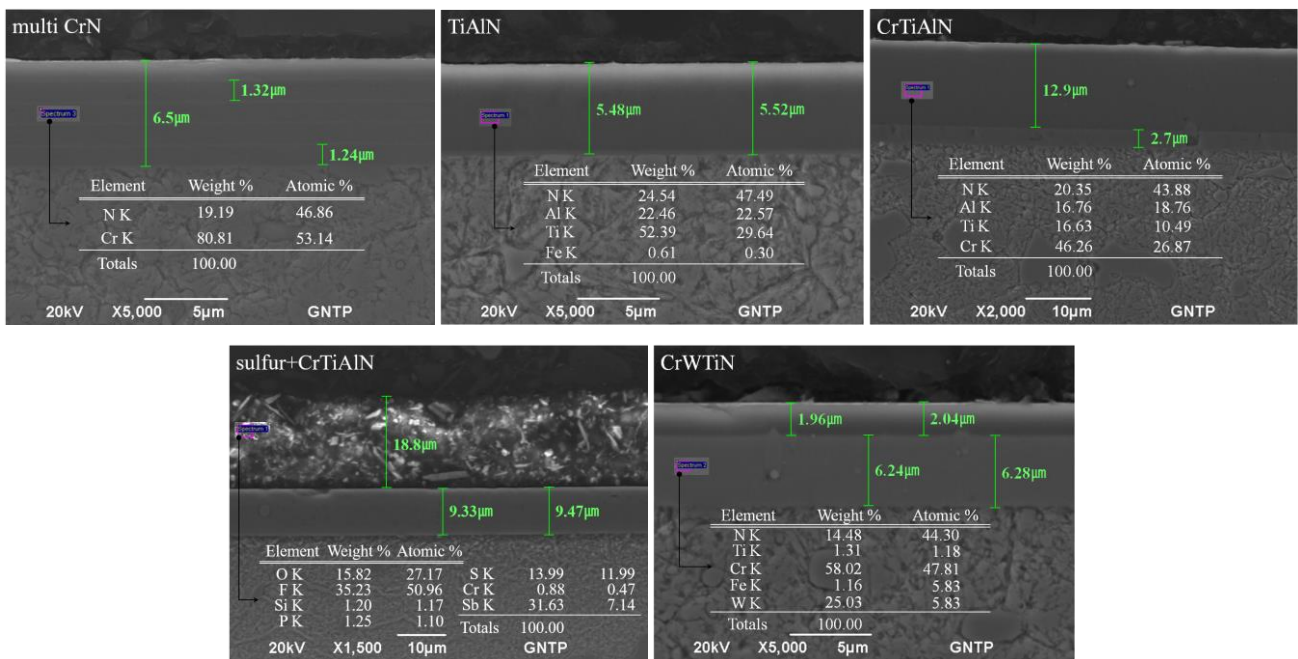


Fig. 6 Results of coating layer component and thickness

3.1.2 경도 측정

각 코팅층에 대한 경도 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 대부분의 코팅이 약 2000HV 이상으로 측정되었다. 특히, TiAlN, CrTiAlN, CrWTiN 코팅은 약 3000HV 이상으로 상당히 높은 경도 값이 측정된 반면 sulfur+CrTiAlN 코팅의 경우 약 1800HV로 상대적으로 낮게 측정되었다. 이는 최상층의 윤활층을 제거한 후 경도를 측정하였지만 측정 포인트 위치에 따라 국부적으로 잔존해 있는 미세한 윤활층이 영향을 미친 것으로 판단된다. multi CrN은 보고된 결과[9]인 약 2000HV와 유사한 2131HV로 나타났다.

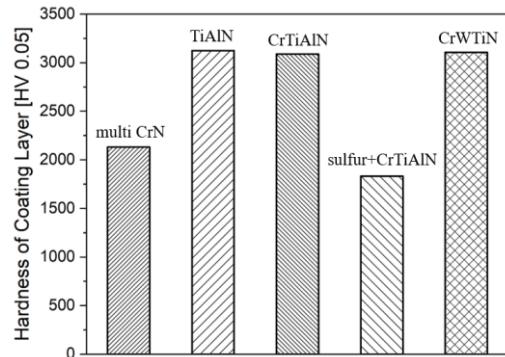


Fig. 7 Hardness results by coating type

3.1.3 밀착력 측정

각 코팅에 대한 밀착력을 알아보기 위하여 스크래치 시험 후 트랙을 관찰한 결과, 코팅이 박리되는 시점까지 트랙 내부나 측부에 크랙이 발생하기도 하였으며, 국부적으로 박리가 발생하기도 하였다. 크랙의 형태도 코팅에 따라 트랙 내부에 연성과괴 형태로 크랙이 발생하기도 하고, 측부에 취성과괴로 나타나기도 하였다.

코팅층이 박리되는 LC3에서도 코팅마다 다른 형태의 박리상태를 보이는데, TiAlN 및 sulfur+CrTiAlN의 경우 인텐터 스크래치 압흔 외부에서 주로 박리되는 형태이며, multi CrN, CrTiAlN, CrWTiN은 박리되는 면적이 상대적으로 넓고, 트랙 외부에서만 발생하는 것이 아니라 내부에서 측부까지 박리되는 모습도 파악할 수 있었다. 이는 박리가 시작되는 지점에서 측부를 지나 트랙 바깥지점까지의 코팅층이 하나의 덩어리 형태로 박리되어 나타나는 것으로 판단된다.

코팅층이 박리되는 시점의 하중인 LC3 값과 박리 형태를 Fig. 8에 나타내었으며, acoustic emission, frictional force, 하중 등을 종합적으로 분석한 결과 sulfur+CrTiAlN의 밀착력이 약 70N 이상으로 우수하였고, TiAlN과 CrWTiN 코팅이 약 37N으로 상대적으로 낮게 나타났다.

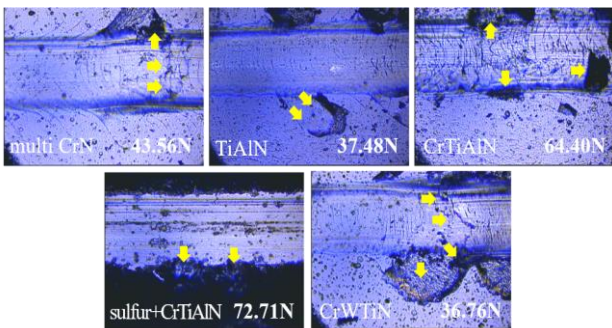


Fig. 8 Critical load(LC3) and indentation photograph for delamination

3.2 내구성 평가

PVD 코팅 5종에 대한 내구성은 Pin on Disc, Ring on Disc 그리고 Spiral 마모시험을 통하여 평가하였다. Pin on Disc 및 Spiral 마모시험은 시험 후 pin의 침단부 마모 및 소착 면적 그리고 깊이를 측정하여 비교하였고, Ring on Disc 마모시험은 마모 및 소착 등에

대한 편차 정도를 나타낸 분율로 내구성을 평가하였다.

3.2.1 Pin on Disc 마모시험

Pin on Disc 마모시험 후 pin 침단부를 확인한 결과 예상했던 바와 같이 마모부와 소착부로 구분되었으며, 이는 pin과 disc의 접촉점을 기준으로 미끄럼방향 앞쪽에서는 마모가 발생하고, 그 뒤로는 소착 또는 소재 유동에 의한 밀림 현상이 발생된 것으로 판단된다.

각 코팅별 pin의 마모 및 소착 면적 그리고 마모 깊이 측정 사진을 Fig. 9에 나타내었으며, 측정된 결과를 Fig. 10과 같이 비교하였다. 마모 면적은 TiAlN과 CrWTiN이 약 0.45mm²으로 적었고, 소착 면적은 TiAlN과 CrTiAlN이 약 0.14mm²으로 적었다. 따라서 TiAlN과 CrWTiN은 내마모성이 상대적으로 우수하고, TiAlN과 CrTiAlN은 내소착성면에서 우수한 것으로 판단된다. pin의 마모 깊이 측정 결과도 TiAlN이 3.8μm로 가장 적게 나타났으며, 종합적으로 TiAlN 코팅이 내마모 및 내소착성이 가장 우수한 것으로 판단된다. 즉, 마모특성은 단순 마모 면적만 고찰할 것이 아니라 마모 깊이 또는 감량 등 그리고 마모 외 소착 현상도 같이 고려되어야 한다.

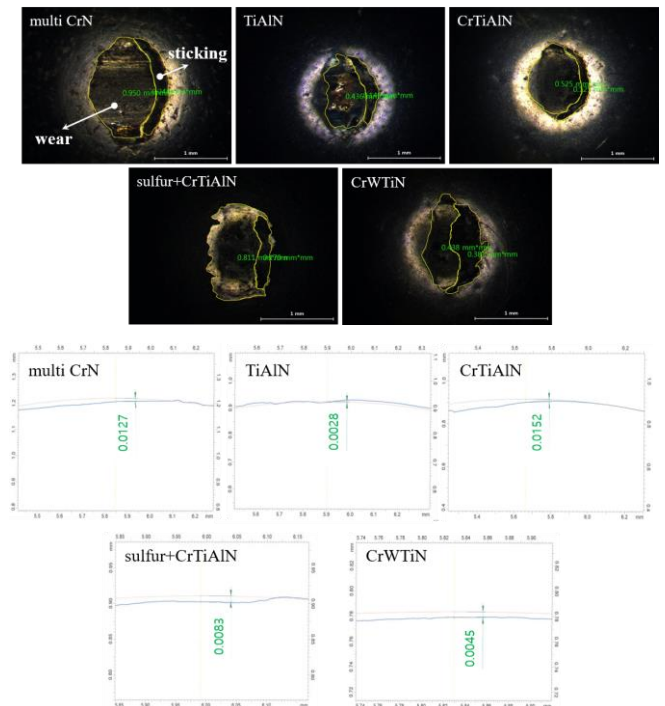


Fig. 9 A photograph of the wear area and sticking and depth measurement of pin

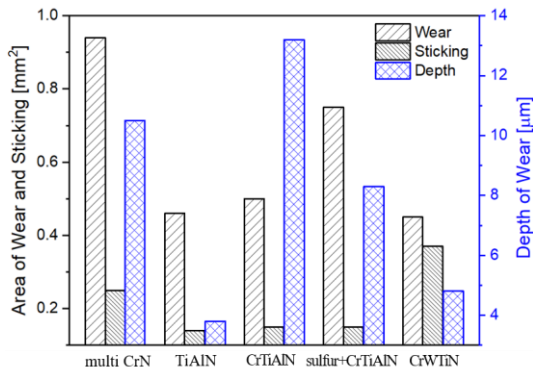


Fig. 10 Measurement results of area of wear, sticking and depth after pin on disc wear test

3.2.2 Ring on Disc 마모시험

Ring on Disc 마모시험 후 각 시편에 대한 3D 스캐닝을 실시하여 높이 편차를 분율로 확인한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. multi CrN의 경우 약 10µm 내외의 골링 현상이 접촉면상에 약 5% 정도 발생하였고, TiAlN은 마모와 골링이 동시에 보이며 약 10µm 내의 마모가 약 4%, 약 5µm 정도 골링이 약 5%, 약 10µm 상당의 골링이 약 10% 발생하였다. CrTiAlN은 약 5µm 정도의 마모면이 약 10% 정도,

약 10µm 마모면이 약 3% 정도로 나타났으며, sulfur+CrTiAlN은 윤활층 마모가 상대적으로 높게 나타나 약 30µm 정도까지 마모가 된 분율이 약 5~15% 수준까지 보여 두 코팅 시편은 마모 현상이 두드러지게 나타났다. 반면, CrWTiN은 주로 골링이 발생되어 약 5µm 정도의 골링면이 약 7% 정도 증가한 것을 확인하였다.

Ring on Disc 마모시험에 의한 각 코팅의 유효성을 평가한 결과 면접촉 마모거동에서는 multi CrN, TiAlN 그리고 CrWTiN을 적용하면 내마모성이 우수하고, CrTiAlN과 sulfur+CrTiAlN은 내소착성이 양호한 것으로 확인되었다.

마모면에 대한 시험 전, 후의 3D 스캐닝 표면 이미지와 두 이미지를 overlap 한 이미지를 Fig. 12에 나타내었다. 시험 전, 후 단차에 의한 contour 특성은 분율 측정 결과와 같이 명확하게 관찰되지 않지만 특정 부위에서 마모 또는 소착이 확인되었다. sulfur+CrTiAlN은 마모가 전면에서 고르게 발현되었고, CrWTiN의 경우 이미지상 소착이 상대적으로 많이 발생된 것으로 보이나 5µm 정도의 소착면이 약 7% 증가한 수준으로 비교적 양호한 결과를 보였다.

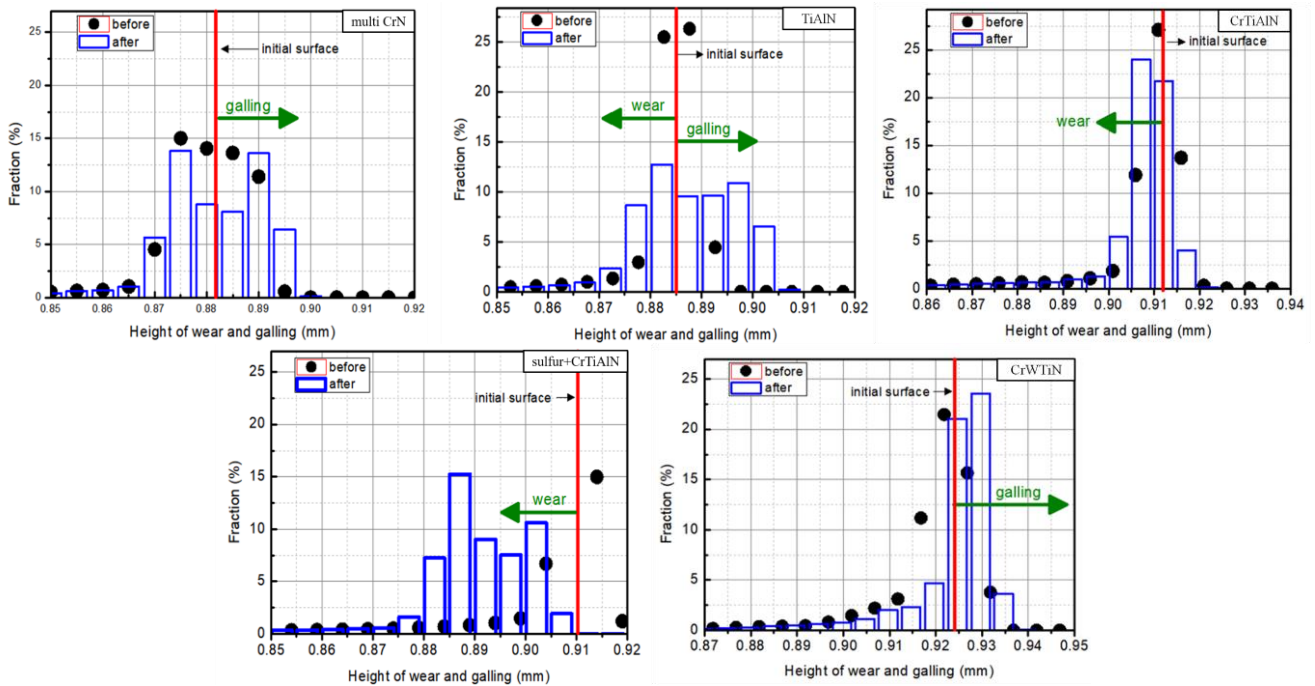


Fig. 11 Galling and wear fraction after ring on disc wear test

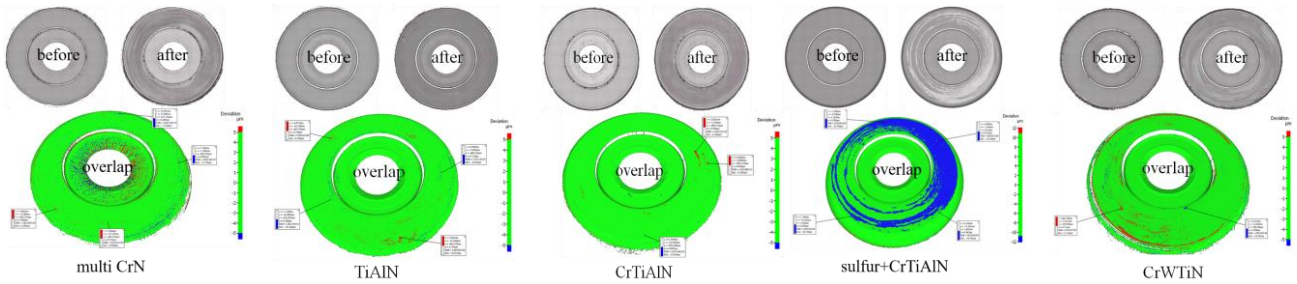


Fig. 12 Overlap images of before and after ring on disc wear test

3.2.3 Spiral 마모시험

Spiral 마모시험 후 pin의 첨단부 마모 면적과 깊이 측정 결과를 Fig. 13에 나타내었고, Fig. 14는 시험 후 소용돌이 형태의 마모흔이 발생된 disc 사진이다. 마모 면적 측정 결과 TiAlN, CrTiAlN, CrWTiN이 약 0.1mm²으로 적은 반면, multi CrN과 sulfur+CrTiAlN은 약 0.4mm²으로 상대적으로 크게 나타났다. 마모 깊이는 TiAlN이 3.4μm 로 가장 적어 Pin on Disc 마모 시험과 유사한 결과로 TiAlN 코팅의 내마모성이 가장 우수하다는 것을 재확인하였다. sulfur+CrTiAlN 코팅은 내소착성은 우수하였으나 낮은 경도의 윤활층이 쉽게 마모 및 탈락됨에 따라 마모 면적과 깊이가 모두 높게 나타났다.

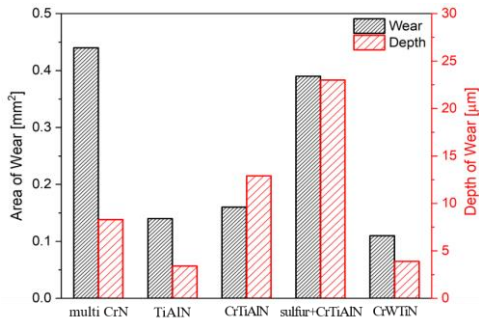


Fig. 13 Results of area and wear depth after spiral wear test

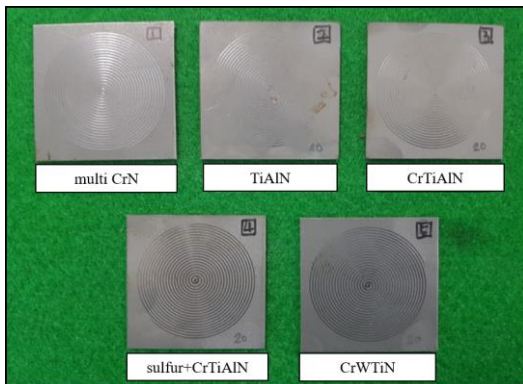


Fig. 14 Wear track of disc after spiral wear tests

4. 결론

본 연구에서는 실제 금형과 강판소재에서 발생가능한 마찰마모 메커니즘을 고려하여 점접촉과 면접촉 하의 마모시험을 고려하고, 마모 및 성형소재 소착 현상에 대한 평가 적정성을 검토하였다. 이를 위해 1.2GPa급 초고장력강판 성형용 금형의 수명향상을 목적으로 적용 가능한 PVD 코팅 5종에 대하여 코팅층의 특성 평가와 다양한 방식의 내구성 평가를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 5종의 PVD 코팅에 대하여 코팅층 성분 분석, 두께, 경도 그리고 스크래치시험을 통해 밀착력을 평가하여 모재와 코팅층간의 접합력 등의 코팅 특성을 분석하였으며, 그 결과 TiAlN, CrTiAlN, CrWTiN의 코팅이 경도가 상대적으로 높게 나타났으며, 밀착력은 sulfur+CrTiAlN 코팅이 높게 나타났다.

(2) Pin on Disc 및 Spiral 마모시험 결과 마모특성이 유사하게 나타났으며, TiAlN 및 CrWTiN 코팅이 내마모 및 내소착 특성이 우수한 것으로 나타났다.

(3) Ring on Disc 마모시험 결과 내마모성은 multi CrN, TiAlN 그리고 CrWTiN 우수하고, 내소착성은 CrTiAlN과 sulfur+CrTiAlN이 양호하였다.

(4) Pin on Disc 및 Spiral과 같이 점접촉에 의한 평가방식으로는 마모 또는 소착의 경향 파악이 다소 어려웠으나, Ring on Disc 마모시험으로 정성·정량적인 비교분석이 가능하였다. 또한 내마모성과 내소착성의 종합적 검토결과 비교 대상 PVD코팅층 중 TiAlN이 가장 우수한 것으로 나타났다.

(5) 본 연구를 통하여 Pin on Disc 및 Spiral 마모시험에 의한 점접촉 형태와 Ring on Disc 마모시험의 면접촉 방식으로 각 PVD 코팅층의 유효성 분석을 실시하였으며, 단순 마모 깊이와 마모 폭 등에 의한 상대비교에 의한 내구성 평가방법 보다는 실제 환

경에서 발생될 수 있는 마모와 소착 거동에 대한 다양한 분석이 요구됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구의 일부는 WC300 R&D지원사업(#S2315965)와 소재부품기술개발사업(#20004983)으로 수행된 결과입니다.

REFERENCES

- [1] P. Carlsson, 2005, Surface Engineering in Sheet Metal Forming, Ph D. Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden, pp. 9~10.
- [2] S. S. Han, 2020, Study of Tool Surface Texture Directionality Effect on Frictional Behavior of Sheet Metal Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 29, No. 2, pp.113~117.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.2.113>
- [3] 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.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.111>
- [4] J. S. Song, K. T. Youn, J. Y. Heo, C. D. Park, Y. H. Kim, 2018, Effect of Slide Motion Control and Friction Characteristics on Formability of UHSS, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 2, pp.107~114.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.2.107>
- [5] 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.
- [6] X. Yang, Y Hu, Y Zheng, D. J. Politis, L. Wang, 2019, 38th Int. Deep Drawing Research Group Annual Conf. (X Yang et al) *Mater. Sci. Eng.*, London, pp. 1~7.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/651/1/011001>
- [7] M. S. Kim, S. M. Kang, D. W. Kim, S. H. Kim, 2009, TiN and CrN Coating for the Increase of Abrasive Resistance of Extrusion Mold for Aluminium, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, Vol. 42, No. 6, pp. 272~275.
<https://doi.org/10.5695/jkise.2009.42.6.272>
- [8] J. H. Jin, J. W. Kim, K. H. Kim, S. Y. Yoon, 2005, The Effect of Si Content on the Tribological Behaviors of Ti-Al-Si-N Coating Layers, *J. Kor. Ceram. Soc.*, Vol. 42, No. 273, pp.88~93.
<https://doi.org/10.4191/kcers.2005.42.2.088>
- [9] J. H. Lee, S. B. Bae, K. T. Youn, J. Y. Heo, S. H. Kim, C. D. Park, 2017, Wear Life Prediction of CrN Coating Layer on the Press Tool for Stamping the UHSS, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 26, No. 3, pp.137~143.
<https://doi.org/10.5228/kstp.2017.26.3.137>