제5회 압연심포지엄 / 이준정 편
한국소성가공학회 pp.83~90

자동차용 냉간압연재의 원형 드로우비드 성형시 강판 재질별 마찰특성에 관한 연구

김대현*, 이동활*, 김원태*, 문영훈*
정밀기계공학과, 부산대학교*

Study on the Friction Characteristics of Various Panels in Circular Drawbead Forming of Cold Rolled Steels for Automotive Parts

D. H. Kim*, W. T. Kim*, D. H. Lee* and Y. H. Moon*
Department of Mechanical & Precision Engineering, Pusan National University**

Abstract

The drawbead is one of the most important factors in sheet metal forming for automotive parts. So clarifying the friction characteristics between sheets and drawbead is essential to improve the formability of sheet metal. Therefore in this study, drawbead friction test was performed at various panels(cold rolled steel sheets, galvanized steel sheets, electrogalvanized coating steel sheets, electrogalvanized Zn-Fe alloy steel sheets and aluminum alloy steel sheets). Circular shape bead has been used for the test. The results show that friction and drawing characteristics were mainly influenced by the nature of zinc coating.

Key words : drawing characteristics, friction coeffient, cold rolled steel sheet, galvanized steel sheet, electrogalvanized steel sheet, aluminum alloy steel sheet, electrogalvanized Zn-Fe alloy steel sheet

1. 서 론

박판성형을 하는데 있어서 성형 중에 판재와 공구사이에 발생하는 마찰은 성형 건전성 및 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 특히 자동차 차체와 같은 복잡한 형상의 대형 패널을 성형할 때에는 주름(wrinkle)과 파단 및 탄성회복을 방지하고 강성을 증가시키기 위해 재료의 흐름을 제어하고 장력을 부가해 줄 수 있는 드로우비드의 설치는 필수적이다. 따라서 소재와 공구(비드) 사이의 마찰현상에 대해 명확히 규명하는 것은 제품의 성형성을 향상시키기 위한 필수불가결한 요소이다.

박판 성형시 발생하는 마찰에 영향을 미치는 인자들 중 소재 내적인 요인으로 표면 조도 및 경도를 포함한 여러 물성치들을 들 수 있겠고 공구의 기하학적 형상, 윤활상태, 펀치속도, 블랭크 홀딩력 등을 외적인 요인으로 들 수 있겠다. 마찰거동은 이러한 여러 내외적 요인들의 복합적 영향의 결과이므로 그 현상 역시 매우 복잡하고 다양하게 나타난다. 따라서 박판 성형중에 마찰에 영향을 미치는 모든 인자들을 마찰계수로 정량화 하는 것은 매우 어렵고 이러한 어려움으로 인해 지금까지의 마찰 연구는 비교적 간단한 실험을 통한 마찰의 정성적 특성 비교에 주안점을 두어 왔으나 이러한 것으로 복잡 다양한 마찰현상을 설명하기에는 많은 문제점들이 있다. 특히 최근의 자동차 산업이 발달함에 따라 철강업계와 자동차 회사에서는 종전에 많이 사용하던 냉연 무도금

강판 대신에 부식에 저항력이 강한 다양한 표면처리된 재료들을 개발하여 사용하게 되었고 이러한 과정에서 냉연(CR) 강판의 가공시에 야기되지 않았던 많은 문제점들이 나타나게 되었다.

지금까지의 박판재의 성형작업 방법으로서는 주로 금속펀치와 다이와의 접촉성형에 의한 것이 대부분인 실정이다. 하지만 이러한 다이, 판재, 펀치의 접촉에 의한 판재 성형시에는 접촉으로 인한 표면 불량이 발생하여 이것을 줄이기 위한 액압성형, 가스성형, 폭발성형등의 연구가 최근에 활발히 진행 중에 있다. 드로우비드에 관한 연구는 드로우비드 저항력과 인출시의 변형률을 구하는데 집중되어 왔으며 이를 시대별로 간략하게 살펴보면 다음과 같다. 드로우비드에 대한 본격적인 연구는 1978년경 Nine에 의해 시작되었다. Nine은 단일원형 드로우비드를 대상으로 인출력과 드로우비드부를 통과하는 소재의 상, 하부표면의 변형률 분포를 알아보았고, 마찰계수를 구하는 방법 등을 제안하였다. Wang은 원형 비드의 수학적 모델을 제시하고 저항력을 유도하였다. 수학적 모델에서 곡률반경에 따른 굽힘, 미끄러짐, 되굽힘을 짝응력의 모멘트 평형 조건을 도입하여 드로우비드 저항력을 계산하였다.

Levy는 기존의 Nine과 Wang의 드로우비드 저항력과 실험결과를 인용하고 가상일의 원리를 도입, 이방성과 변형률 속도의 영향을 고려하여 저항력을 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, Weinmann 등은 원형 비드부를 기하학적으로 롤러(roller)라 가정하고 모델링 하여 드로우비드 해석을 수행하였다. 또한 Stoughton은 Nine의 실험을 바탕으로 재료의 굽힘 효과, 드로우비드 저항력, 블랭크 가압력 등을 마찰계수와 관련지어 연구하였다.

요즘 널리 이용되고 있는 박판 성형해석 프로그램에서 드로우비드 저항력은 해석 정확도에 크게 영향을 주기 때문에 신뢰도를 높이기 위해서 현재 현장에서 사용되고 있는 드로우비드 별로 정확한 드로우비드 저항력을 구하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

본 논문에서는 여러 드로우비드의 공정인자들중에서 일반적으로 가장 널리 사용되는 원형 비드에 대해 강판의 재질이 박판 성형중 소재와 드로우비드 사이에서 발생하는 마찰에 미치는 영향을 평가하였다. 드로우비드 마찰시험기를 이용하여 스탬핑 공정에서 사용되어지는 19종류의 도금 및 무도금 강판을 이용하여 마찰실험을 수행함으로써 최적의 공정조건을 찾고자 한다.

2. 실험내용

2.1 실험방법

본 실험에서는 Nine에 의해 고안된 원형단면을 갖는 고속 드로우비드 마찰시험기를 사용하여 냉연(CR) 강판, 합금화용융 아연도금(GA) 강판, 전기아연도금(EG) 강판, 이종전기도금(EGF) 강판, 유기피복(organic coating) 강판, 알루미늄(Al) 강판에 대한 드로우비드 저항력과 마찰계수에 미치는 공정인자의 영향을 파악하였다. 실험에 사용된 드로우비드 마찰 시험기는 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 드로우비드 마찰 시험기의 롤러비드부와 고정비드부를 Fig. 2에 나타내었다.

마찰 실험은 먼저 두께 0.7mm에서 1.2mm의 마찰시편을 코일의 압연방향으로 폭 45mm X 길이 500mm 크기로 전단하여 가장자리 버어(burr)를 제거하고 평가하려는 표면처리의 비드를 설치하고 시편의 한쪽 끝을 실험장치의 인장 척에 체결한다. 이후 시편을 비드로 가압하고 1000 mm/min 의 속도로 롤러비드와 고정비드를 각각 70mm 씩 드로잉하여 변위-하중 곡선을 획득한다. 이 곡선에서 드로잉 거리 40 ~ 60mm 에서 로드 셀에 의해 측정되어진 드로잉 하중 및 비드의 가압력을 측정하여 평균값을 취하였으며 실험의 편차를 줄이기 위해 2회 반복 실시하였다.

2.2 실험 조건

비드는 주철 FC300, HC891과 주강 HK700, SKD11의 재질의 원형비드를 Cr 도금한 것과 이온질화 처리한 것, 미처리 한 것을 각각 사용하였으며, Table 1에 비드 재질의 화학조성을 나타내었다. 두께 0.7mm~1.2mm의 냉연(CR) 강판, 합금화용융 아연도금(GA) 강판, 전기아연도금(EG) 강판, 유기피복(organic coating) 및 알루미늄(Al) 강판을 대상으로 실험을 하였고 구체적인 강판

Fig. 1. Schematic view of drawbead tester

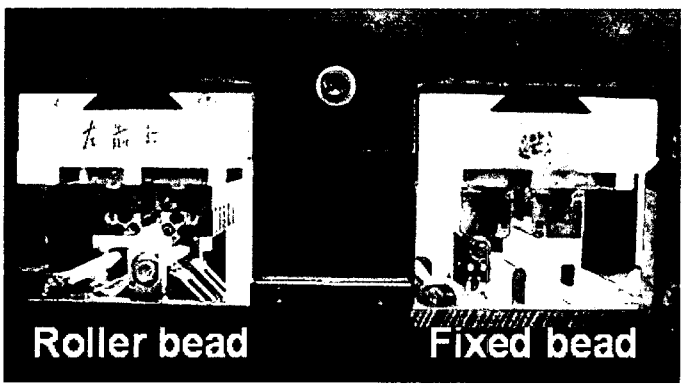


Fig. 2. Roller and fixed bead parts of drawbead tester

의 종류 및 두께는 Table 2에 나타내었다. 비드는 반경이 4.76mm이고 이 비드 반경은 통상 스탬핑 공정에서 사용되고 있는 드로우비드에 대한 대표적인 값으로 볼 수 있다. 구체적인 실험조건은 Table 3에 나타내었다.

Table1Chemicalcompositionofbeadmaterials

Bead materials	Chemical composition (wt, %)				
	C	Si	Mn	P	S
FC300	2.80~3.30	1.50~2.10	0.60~1.10	Max 0.15	Max 0.15
HC891	2.80~3.30	1.80~2.25	0.75~1.05	Max 0.12	Max 0.12
HK700	1.40~1.50	0.40~0.60	Max 0.60	Max 0.03	Max 0.03
SKD11	1.40~1.60	Max 0.40	Max 0.06	Max 0.03	Max 0.03

Table 2 List of sheets used in experiment

Coating type		Sheets	Thickness
CR		SPCC	0.7mm
		SPCD	0.7mm / 0.9mm
		SPCEN	0.7mm
		SPCUD	0.7mm
		SPRC35R	0.7mm
		SPRC35E	0.7mm
		TRIP60	1.0mm
GA		SGACC	1.0mm
		SGACEN	0.7mm / 1.0mm
		SGACUD	0.7mm
		SGARC35R	0.7mm
		SGARC35E	0.7mm
EG	EGF	EDZFRC35	0.7mm
		EDZFCEN	0.8mm
	Organic coating	RCNCEN	0.7mm
Al		GC45	1.2mm
		GC55	1.2mm

CR : Cold Rolled　　EG : Electrogalvanized Coating
GA : Hot-dip galvannealed　　EGF : Electrogalvanized Zn-Fe alloy

Table 3 Experimental condition of drawbead test

Bead material	Iron (FC300, HC891) Steel (HK700, SKD11)
Bead surface treatment	Base, Cr plating, Ion nitriding
Bead size	9.52 mm × 9.52 mm × 78 mm (W×H×L)
Specimen size	Width 45 mm × Length 500 mm
Clearance / Clamping depth	1.3 mm / 9.52 mm
Drawing Length	Roller bead 70 mm / Fixed bead 70 mm
Drawing speed	1000 mm/min

2.3 실험의 이론적 배경

Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 롤러비드와 고정비드에 의한 마찰실험을 수행할 때 고정비드는 소성변형에 의한 변형하중과 마찰하중을 모두 포함하는 반면, 롤러비드는 회전하기 때문에 마찰하중 없이 변형하중만 포함하게 된다. 그러므로 고정비드와 롤러비드에서 측정 되어진 하중의 차이를 이용하여 드로우비드의 마찰 저항력을 구할 수 있다. 이 마찰저항력과 쿨롬의 마찰법칙을 이용하여 다음과 같이 마찰계수 μ를 도출할 수 있다.

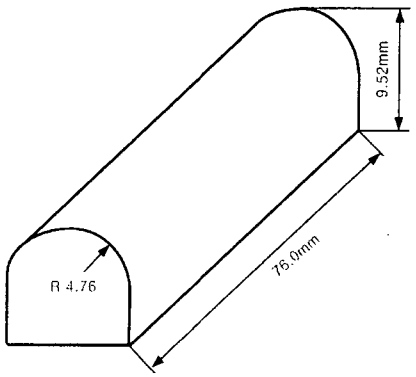


Fig. 3. Schematic view of circular bead

드로우비드 시험기에서 측정되는 마찰하중은 고정비드에서의 드로잉하중에서 롤러비드에서의 드로잉 하중을 제거한 값이 된다. 따라서 드로우비드에서의 마찰 하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_t = T_{f+d} - T_d \tag{1}$$

여기서, T_t는 드로우비드에서의 마찰하중이고, T_{f+d}는 고정비드에서의 인출력, T_d는 롤러비드에서의 인출력이다. Fig. 5에서 보는바와 같이 비드 접촉부의 전체 마찰력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = l \times f \tag{2}$$

여기서, μ_t는 비드 접촉부의 전체 마찰력, l은 접촉부 길이, f는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 마찰력(일정하다고 가정)이다.

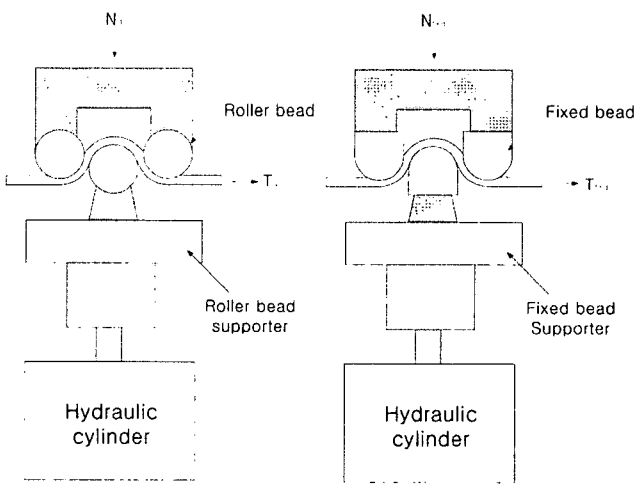
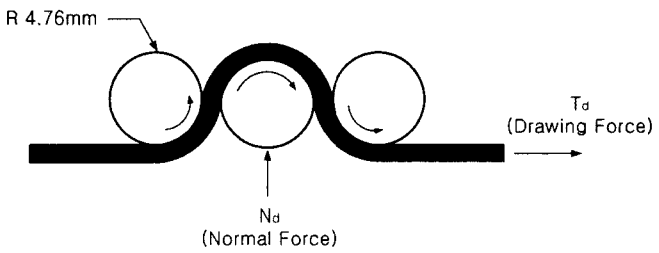
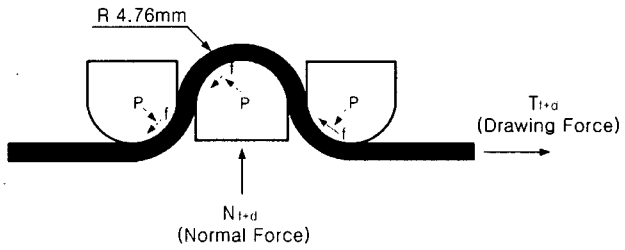


Fig. 4 Schematic of roller and fixed bead in drawbead simulation



(a)



(b)

Fig. 5 Aspect touched between bead and sheet (a) roller bead (b) fixed bead

식 (1)과 식 (2)는 동일해야 하므로,

$$T_{f+d} - T_d = l \times f \tag{3}$$

식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{T_{f+d} - T_d}{l} \tag{4}$$

또한 비드에서의 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N_{f+d} = 2rp \tag{5}$$

여기서, r은 비드 반경이고 p는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 수직력(일정하다고 가정), N_{f+d}는 고정비드 사용시의 수직력(normal force)이다. 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{N_{f+d}}{2r} \tag{6}$$

Fig. 5에서 접촉부의 총 길이를 하나의 원 둘레와 같다고 볼 수 있으므로 접촉부의 길이를 $l \fallingdotseq 2\pi r$로 가정하고 쿨롬의 마찰법칙에 대입해보면, 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\mu = \frac{f}{p} = \frac{\frac{T_{f+d} - T_d}{l}}{\frac{N_{f+d}}{2r}} = \frac{2r(T_{f+d} - T_d)}{l \times N_{f+d}} = \frac{2r(T_{f+d} - T_d)}{2\pi r N_{f+d}} = \frac{T_{f+d} - T_d}{\pi N_{f+d}} \tag{7}$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 6부터 Fig. 9는 강판재질에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다. 비드 재질 및 표면처리, 강판두께 그리고 윤활유에 따라 약간의 차이는 있지만 전체적으로 무도금 강판에 비해 도금강판이 마찰계수가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 도금 강판의 경우 도금층이 일종의 고체 윤활제로 작용하여 무도금 강판보다 작은 마찰계수를 나타낸 것으로 보인다.

도금 강판 중에서도 합금화용융도금(GA) 강판이 전기도금(EG) 강판에 비해 낮은 마찰특성을 보였으며, 특히 합금화용융도금(GA) 강판 중에서는 SGACUD와 SGACEN 강판이 전기도금(EG) 강판에서는 유기피복 강판인 RCNCEN 강판이 가장 낮게 나왔다. 반면에 이종전기도금(EGF) 강판인 EDZFRC35와 EDZFCEN 강판은 도금 강판 중에서 비교적 높은 마찰계수를 나타냈다. 합금화용융도금(GA) 강판의 경우는 합금화 용융도금 후 조질압연(temper rolling)에 의해 표면을 균일하게 압하시켜 합금화 용융도금 후 아연 결정립 성장에 의해 거칠어진 표면을 균일하고 매끈하게 하고 도금 표면층에 적당한 경도를 부여하는 역할을하여 도금 결정립의 성장제어가 어려운 전기

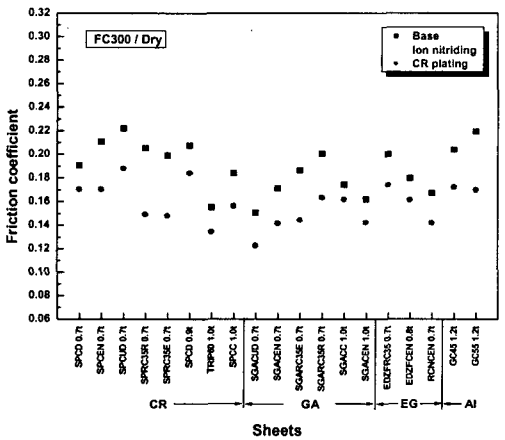


Fig. 6 Effect of coating on coefficient for FC300 and DRY

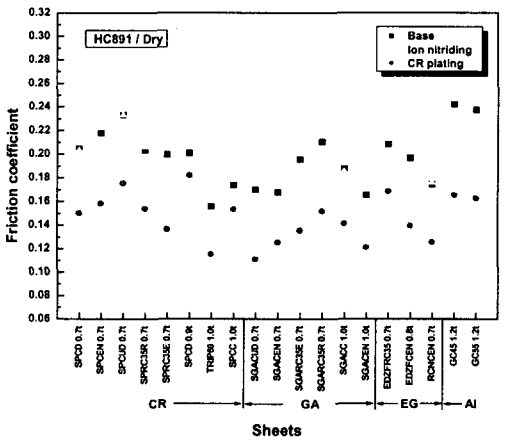


Fig. 7 Effect of coating on coefficient for HC891 and DRY

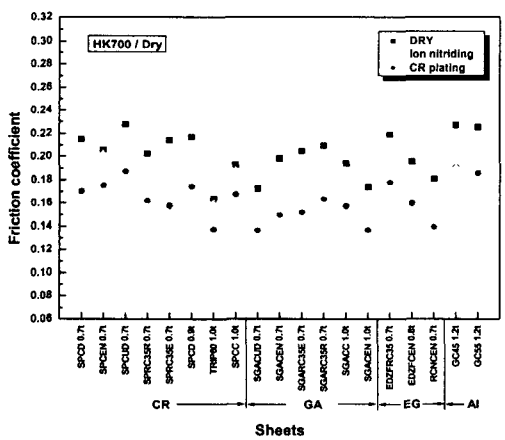


Fig. 8 Effect of coating on coefficient for HK700 and DRY

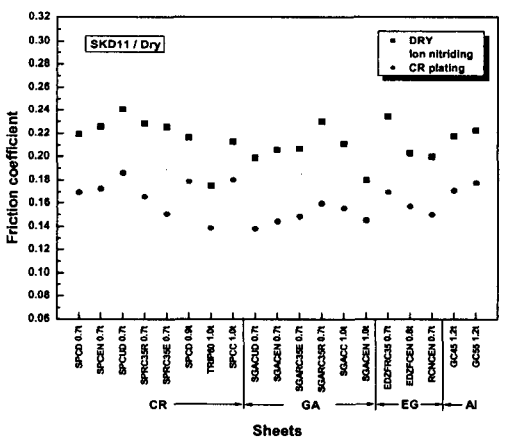


Fig. 9 Effect of coating on coefficient for SKD11 and DRY

도금(EG) 강판보다 마찰특성에 유리한 균일한 표면 거칠기($Rmax$=6.50~7.05m, Ra=0.71~0.82m) 및 경도를 얻기 때문에 좋은 마찰 및 윤활특성을 나타낸다. 따라서 코일의 길이방향 및 폭 방향으로 균일한 표면특성은 도금강판의 마찰 및 윤활특성을 향상시키고 임의의 코일에서 시편의 채취위치에 관계없이 균일한 마찰특성이 얻어지는 효과가 있다.

무도금 강판인 냉연(CR) 강판 중에서는 TRIP강이 다른 무도금 강판들에 비해 비교적 매우 낮은 마찰계수를 보였으며, 알루미늄(Al) 강판은 전반적으로 높은 마찰경향을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 판재 성형시 중요한 역할을 하는 드로우비드의 여러 공정인자들 중에서 강판재질이 마찰계수에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 도금강판이 무도금 강판에 비해 마찰계수가 감소하는 경향을 보였다.

(2) 도금강판 중에서도 합금화용융도금(GA) 강판과 유기피복 강판이 이종전기도금(EGF) 강판보다 마찰계수가 더 낮은 경향을 보였다.

(2) 냉연(CR) 강판 중에서는 TRIP강이 마찰계수가 가장 낮았으며, 알루미늄 강판은 전체적으로 높은 마찰계수를 나타냈다.

참고문헌

1. H. D. Nine, Mechanics of sheet metal forming, pp. 179-211(1978)
2. M. Samuel, Journal of Materials Processing Technology, vol. 122, pp. 94-103(2002)
3. N. M. Wang, Journal of Applied Metal Working, pp. 185-192(1981)
4. J. A. Schey, Journal of Materials Processing Technology, vol. 57, pp. 146-154(1996)
5. Z. L. Zhang, L. Chen, Journal of Materials Processing Technology, vol. 63, pp. 144-147(1997)
6. L. R. Sanchez, K. J. Weinmann, 15th IDDRG, pp. 217-226(1998)