

# 자동차용 냉간압연재의 드로우비드 성형시 비드 재질별 마찰특성에 관한 연구

이동철\*, 김원태\*, 문영훈\*  
정밀기계공학과, 부산대학교\*

## Study on the Friction Characteristics of Various Bead Materials in Drawbead Forming of Cold Rolled Steels for Automotive Parts

D. H. Lee\*, W. T. Kim\*, 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 bead materials(FC300, HC891, FCD550, HD700, HK600, HK700, SKD11) and surface treatment of beads(Base, induction hardening, Cr plating, ion nitriding, Toyoda diffusion process, TiCN, TiN, CrN). Circular shape bead has been used for the test. The results show that friction and drawing characteristics were mainly influenced by surface treatment.

**Key words** : drawing characteristics, friction coefficient, bead material, bead surface treatment

## 1. 서론

박판성형을 하는데 있어서 성형 중에 관재와 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 방법으로는 주로 금속편치와 다이와의 접촉성형에 의한 것이 대부분인 실정이다. 하지만 이러한 다이, 판재, 편치의 접촉에 의한 판재 성형시에는 접촉으로 인한 표면 불량 발생하여 이것을 줄이기 위한 액압성형, 가스성형, 폭발성형 등의 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 작응력의 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 비드의 재질이 박판 성형중 소재와 드로우비드 사이에서 발생하는 마찰에 미치는 영향을 평가하였다. 드로우비드 마찰시험기를 이용하여 스탬핑 공정에서 사용되어지는 7종류로 표면 처리된 7종류 재질의 비드를 이용하여 마찰실험을 수행함으로써 최적의 공정조건을 찾고자 한다.

## 2. 실험내용

### 2.1 실험방법

본 실험에서는 Nine에 의해 고안된 원형단면을 갖는 고속 드로우비드 마찰시험기를 사용하여 주철(iron)과 주강(steel) 재질의 원형비드를 사용하였으며, 각 비드별로 고주파 경화(induction hardening), 크롬도금(Cr plating), 이온질화(ion nitriding), TD 처리(Toyota diffusion process), TiCN, TiN, CrN 등 7종류의 표면처리를 하여 그에 대한 드로우비드 저항력과 마찰계수에 미치는 공정인자의 영향을 파악하였다. 실험에 사용된 드로우비드 마찰 시험기는 Fig. 1에 나타내었고 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 윤활유를 적당하게 도포한 후 시편의 한쪽 끝을 실험장치의 인장 척에 체결한다. 이후 시편을 비드로 가압하고 1000 mm/min의 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, HC891, FCD550, HD700과 주강 HK600, HK700, SKD11의 재질의 원형비드를 미처리, 주파 경화(induction hardening), 크롬도금(Cr plating), 이온질화(ion nitriding), TD 처리(Toyota diffusion process), TiCN, TiN, CrN의 표면처리를 한 비드를 각각 사용하였으며, Table 1에 비드 재질의 화학조성을 나타내었다. 두께 0.7mm~1.2mm의 냉연(CR) 강판, 합금화

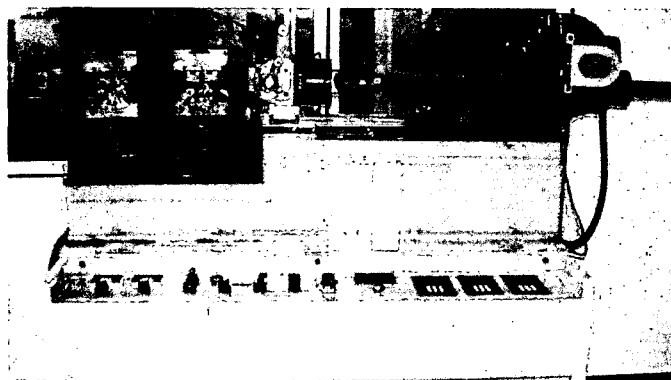


Fig. 1. Schematic view of drawbead tester

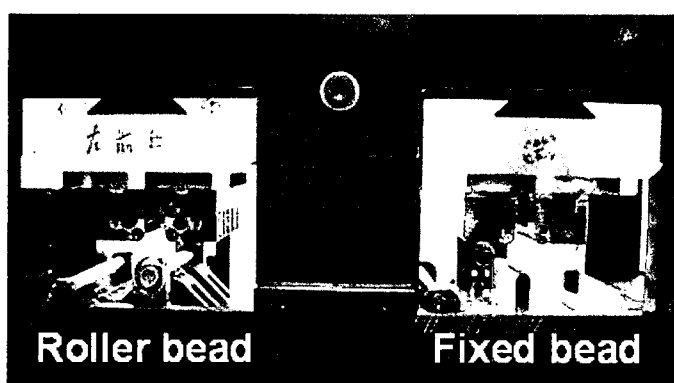


Fig. 2. Roller and fixed bead parts of drawbead tester

용융 아연도금(GA) 강판, 전기아연도금(EG) 강판 및 알루미늄(Al) 강판을 대상으로 실험을 하였다. 비드는 반경이 4.76mm이고 이 비드 반경은 통상 스탬핑 공정에서 사용되고 있는 드로우비드에 대한 대표적인 값으로 볼 수 있다. 구체적인 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of bead materials

Bead materials	Chemical composition (wt, %)					
	C	Si	Mn	P	S	Mg
FC300	2.80~3.30	1.50~2.10	0.60~1.10	Max 0.15	Max 0.15	
FCD550	3.30~4.10	2.00~3.20	0.10~0.05	Max 0.05	Max 0.03	Max 0.03
HC891	2.80~3.30	1.80~2.25	0.75~1.05	Max 0.12	Max 0.12	
HD700	3.30~3.70	1.90~2.30	Max 0.60	Max 0.05	Max 0.03	Max 0.03
HK600	0.05~0.07	0.07~1.10	0.07~1.00	Max 0.03	Max 0.03	
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 Experimental condition of drawbead test

Bead material	Iron (FC300, FCD550, HC891, HD700) Steel (HK600, HK700, SKD11)
Bead surface treatment	Base, Induction hardening Cr plating Ion nitriding, TD process, TiN, TiCN, CrN
Bead size	9.52mm × 9.52mm × 78mm (W×H×L)
Sheet	CR steel sheet, GA steel sheet, EG steel sheet, Al alloy steel sheet
Specimen size	Width 45mm × Length 500mm
Lubricant	Extreme pressure additive oil
Clearance / Clamping depth	1.3mm / 9.52mm
Drawing Length	Roller bead 70mm / Fixed bead 70mm
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  $\mu$ 를 도출할 수 있다.<sup>(6)</sup>

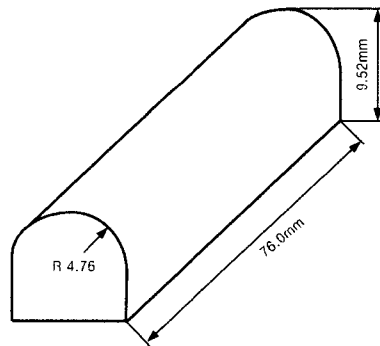


Fig. 3. Schematic view of circular bead

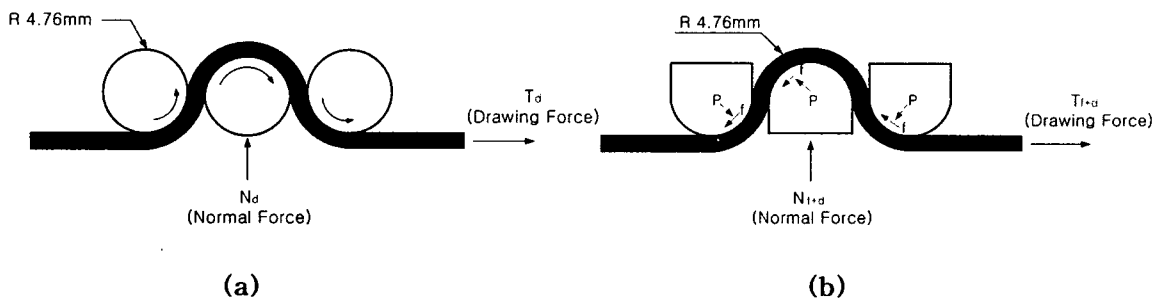


Fig. 4 Aspect touched between bead and sheet (a) roller bead (b) fixed bead

$$\mu = \frac{f}{p} = \frac{\frac{T_{f+d} - T_d}{l}}{\frac{N_{f+d}}{2r}} = \frac{2r(T_{f+d} - T_d)}{l \times N_{f+d}} = \frac{2r(T_{f+d} - T_d)}{2\pi r N_{f+d}} = \frac{T_{f+d} - T_d}{\pi N_{f+d}} \quad (1)$$

여기서,  $r$ 은 비드 반경이고  $p$ 는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 수직력(일정하다고 가정),  $T_i$ 는 드로우비드에서의 마찰하중이고,  $T_{f+d}$ 는 고정비드에서의 인출력,  $T_d$ 는 롤러비드에서의 인출력이다.  $l$ 은 접촉부 길이,  $f$ 는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 마찰력(일정하다고 가정)이고  $N_{f+d}$ 는 고정비드 사용시의 수직력(normal force)이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

미처리 및 고주파 경화, 크롬도금, 이온질화, TD처리, TiCN, TiN, CrN 등 총 8종류의 표면처리 조건에 대한 마찰계수의 변화를 Fig. 5에서 Fig. 10에 그래프로 나타내었다. 무윤활 상태와 가장 좋은 윤활효과를 나타낸 극압 첨가제에 대한 실험결과들을 대상으로 하였다. 강판 및 금형재질에 따라 약간의 차이가 있지만 무윤활 및 윤활상태 모두 전체적으로 크롬도금으로 표면처리 했을 때 가장 낮은 마찰계수를 나타냈다. 반면에 미처리 및 TD처리를 한 것은 비교적 높은 마찰특성을 보이고 있다. 나머지 표면처리들의 경우엔 크롬도금과 미처리 및 TD처리의 중간정도에서 거의 비슷한 마찰특성을 나타냈다.

Fig. 11에서 Fig. 14는 비드의 재질에 따른 마찰특성을 나타낸 그림으로 표면처리와 마찬가지로 무윤활 및 극압 첨가제에 대한 실험결과들을 대상으로 나타내었다. 그림에서 보듯이 비드재질에 따른 뚜렷한 마찰특성은 보이지 않는다.

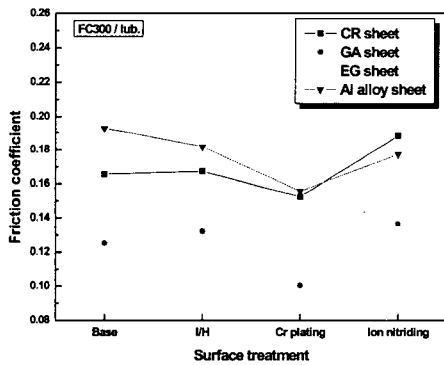


Fig. 5 Effect of bead surface treatment on coefficient for FC300 and Lub

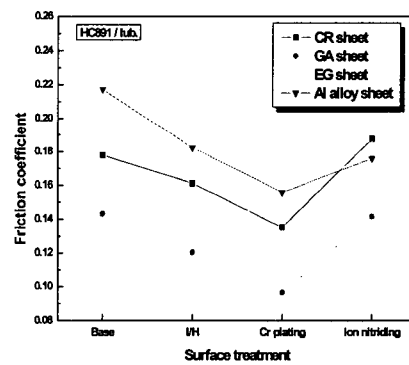


Fig. 6 Effect of bead surface treatment on coefficient for HC891 and Lub

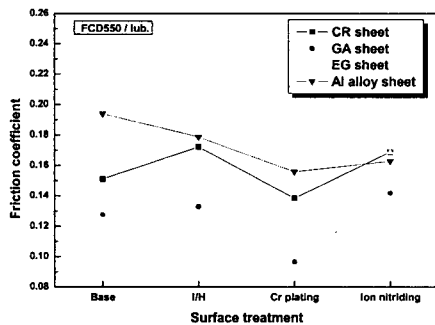


Fig. 7 Effect of bead surface treatment on coefficient for FCD550 and Lub

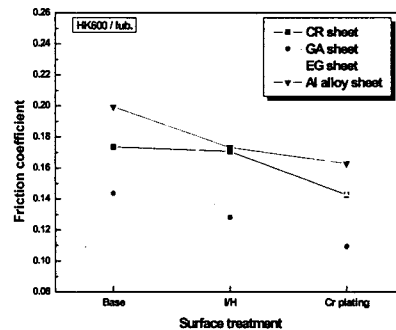


Fig. 8 Effect of bead surface treatment on coefficient for HK600 and Lub

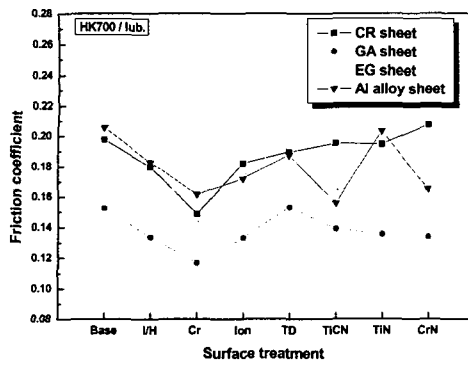


Fig. 9 Effect of bead surface treatment on coefficient for HK700 and Lub

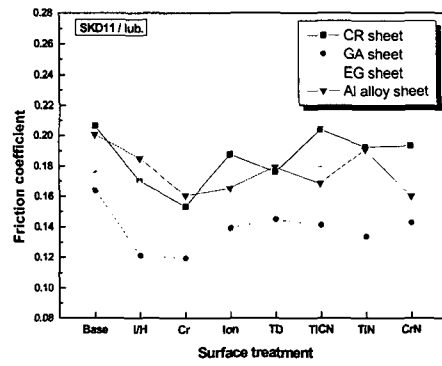


Fig. 10 Effect of bead surface treatment on coefficient for SKD11 and Lub

이상의 결과들로 볼 때, 마찰특성은 비드의 표면처리 및 재질에 따른 정도나 마모량보다는 강판의 조도와 비드의 조도 및 강판과 비드사이의 조도 차이에 의한 영향을 더 지배적으로 받는 것으로 사료된다. 또한, 일반적으로 재료의 표면 거칠기가 평활하다고 해서 마찰계수가 작다고 단정 지을 수는 없으며, 비드 재질의 표면과 도금층 표면의 거칠기의 상호관계에 의해 결정된다.

본 실험에서는 원형 및 사각비드 형상으로 인한 기하학적인 문제로 인해 마찰면(곡률부분)에 대한 비드의 조도측정을 하지 못해 조도에 대한 영향을 분석하지 않았다.

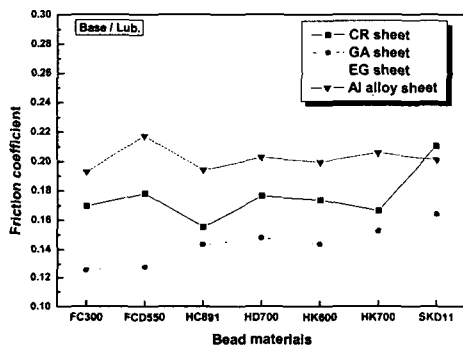


Fig. 11 Effect of bead materials on coefficient for BASE and Lub

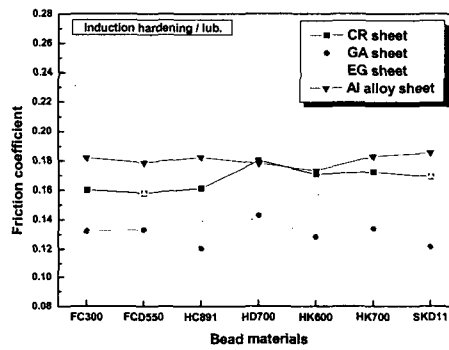


Fig. 12 Effect of bead materials on coefficient for induction hardening and Lub

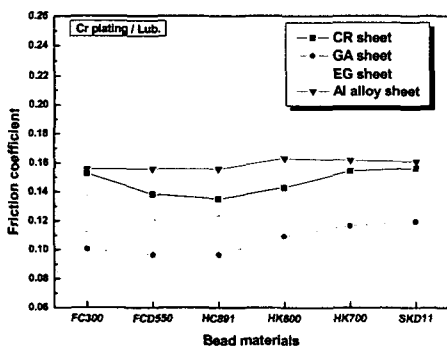


Fig. 13 Effect of bead materials on coefficient for Cr plating and Lub

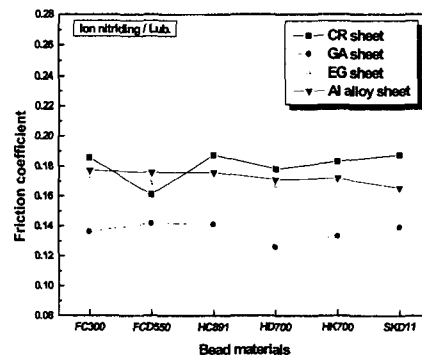


Fig. 14 Effect of bead materials on coefficient for ion nitriding and Lub

## 4. 결론

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

- (1) 비드를 크롬 도금으로 표면처리 했을때 가장 낮은 마찰계수를 나타내었다.
- (2) 미처리 및 TD 처리를 했을 때 마찰계수가 높게 나타났다.
- (3) 비드 재질에 따른 마찰계수의 영향은 거의 없었다.

## 참고문헌

1. H. D. Nine, Mechanics of sheet metal forming, pp. 179-211(1978)
2. N. M. Wang, Journal of Applied Metal Working, pp. 185-192(1981)
3. J. A. Schey, Journal of Materials Processing Technology, vol. 57, pp. 146-154(1996)
4. Z. L. Zhang, L. Chen, Journal of Materials Processing Technology, vol. 63, pp. 144-147(1997)
5. L. R. Sanchez, K. J. Weinmann, 15th IDDRG, pp. 217-226(1998)
6. D. W. Kim, W. T. Kim, D. H. Lee, Y. H. Moon, The 5th Rolling Symposium, 2004