

판재의 드로우비드 성형시 비드표면처리와 비드형상이 인출 및 마찰특성에 미치는 효과

이동활 · 류종수 · 정우창* · 문영훈[†]

부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구소

*부산대학교 고장분석 및 신뢰성연구센터

Effect of Bead Surface Treatments and Bead Shapes on the Drawing and Friction Characteristics in Drawbead Forming of Sheet Metal

Dong-Hwal Lee, Jong-Soo Ryu, Woo-Chang Chung* and Young-Hoon Moon

School of Mechanical Engineering/ Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing,
Pusan National University, Busan 609-735

*Trouble Analysis and Reliability Research Center, Pusan National University, Busan 609-735

Abstract In sheet metal forming, drawbeads are often used to control uneven material flow, which may cause defects such as wrinkles, fractures, surface distortion and springback. Appropriate setting and adjusting of the drawbead force is one of the most important parameters in sheet forming process control. Therefore in this study, drawbead test was performed at various bead surface treatment conditions to clarify the frictional characteristics between sheet and drawbead. Furthermore, the differences in drawing force between circular and rectangular shape beads have also been measured to estimate the effectiveness of bead shape on the material flow control. The results show that drawing and friction characteristic were strongly influenced by surface treatments of bead and bead shapes.

(Received 31 January 2005; accepted 21 March 2005)

Key words: Drawing characteristic, Friction, Bead material, Bead surface treatment, Circular shape bead, Rectangular shape bead

1. 서 론

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

박판 성형시 발생하는 마찰에 영향을 미치는 인자들 중 소재적인 요인으로 표면 조도 및 경도를 포함한 여러 물성치들을 들 수 있겠고 공구의 기하학적 형상, 윤활상태, 편치속도, 블랭크 홀딩력 등도

영향을 미친다. 따라서 박판 성형 중에 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 무도금강판 대신에 부식에 저항력이 강한 다양한 표면 처리된 재료들을 개발하여 사용하게 되었고 이러한 과정에서 냉연(CR) 강판의 가공시에 야기되지 않았던 많은 문제점들이 나타나게 되었다.

박판재의 성형작업은 주로 금속편치와 다이와의 접촉성형에 의한 것이 대부분이므로 이러한 다이, 판재, 편치의 접촉에 직접 관련된 드로우비드는 성형건전성

[†]E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

에 직접 영향을 미치게 된다. 드로우비드에 관한 연구는 드로우비드 저항력과 인출시의 변형률을 구하는데 집중되어 왔으며 드로우비드에 대한 본격적인 연구는 1970년대 Nine[1]에 의해 시작되었다. Nine은 단일원형 드로우비드를 대상으로 인출력과 드로우비드부를 통과하는 소재의 상, 하부표면의 변형을 분포를 알아보았고, 마찰계수를 구하는 방법 등을 제안하였다.

근래 널리 이용되고 있는 박판 성형해석 프로그램에서 드로우비드 저항력은 해석 정확도에 크게 영향을 주기 때문에 신뢰도를 높이기 위해서 드로우비드 형상 및 조건별로 정확한 드로우비드 저항력을 구하기 위한 연구가 활발히 진행중이다[2-6].

본 논문에서는 여러 드로우비드의 공정인자들 중에서 일반적으로 가장 널리 사용되는 원형 비드에 대해 비드재질이 성형중 소재와 드로우비드 사이에서 발생하는 마찰에 미치는 영향을 평가하였으며, 실제 많이 사용되고 있는 원형비드와 사각비드를 대상으로 인출특성을 비교하였다.

2. 실험내용

2.1 실험 방법

본 실험에서는 Nine에 의해 고안된 원형단면을 갖는 고속 드로우비드 마찰시험기를 사용하여 주철(Iron)과 주강(Steel) 재질의 원형비드와 사각비드를 사용하였으며, 각 비드별로 미처리, 고주파 경화(Induction hardening), 크롬도금(Cr plating), 이온 질화(Ion nitriding), TD처리(Toyota diffusion process), TiCN코팅, TiN코팅, CrN코팅 등 8종류의 표면처리를 하여 그에 대한 드로우비드 저항력과 마찰계수에 미치는 공정인자의 영향을 파악하였다. 실험에 사용된 드로우비드 마찰시험기의 롤러비드부와 고정비드부를 Fig. 1에 나타내었다.

마찰 실험은 먼저 두께 0.7 mm, 0.8 mm 및 1.2 mm의 마찰시편을 코일의 입연방향으로 폭 45 mm×길이 500 mm 크기로 절단하여 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

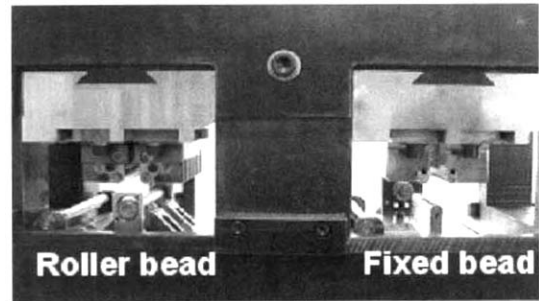


Fig. 1. Roller and fixed bead parts of drawbead tester.

각각 70 mm씩 인출(Drawing)하여 변위-하중 곡선을 얻는다. 이 곡선에서 인출거리 40~60 mm에서 로드 셀에 의해 측정된 인출하중 및 비드의 가압력을 측정하여 평균값을 취하였으며 실험의 편차를 줄이기 위해 2회 반복 실시하였다.

2.2 실험 조건

주철 FC300, HC891, FCD550, HD700과 주강 HK600, HK700, SKD11의 재질의 비드를 미처리(Base), 고주파경화(Induction hardening), 크롬도금(Cr plating), 이온 질화(Ion nitriding), TD처리(Toyota diffusion process), TiCN코팅, TiN코팅, CrN코팅의 표면처리를 한 원형비드와 사각비드를 각각 사용하였으며 Table 1에 비드 재질의 화학조성을 나타내었다. 판재는 SPEN냉연(CR)강판을 기준으로, 합금화용 용아연도금(GA)강판, 전기아연도금(EG) 강판 및 GC45알루미늄 판재를 대상으로 실험을 하였다. 비드의 반경은 4.76 mm이고 이 비드 반경은 통상 스탬핑 공정에서 사용되고 있는 드로우비드에 대한 대표적인 값으로 볼 수 있다. 구체적인 실험조건은 Table 2에 나타내었고 실험에서 사용된 롤러비드와 사각비드는 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 실험의 이론적 배경

Fig. 3에서 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 측정된 하중의 차이를 이용하여 드로우비드의 마찰저항력

Table 1. Chemical composition of bead materials bead

material	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 Coating, TiCN Coating, CrN Coating
Sheet	Cold rolled steel sheet (SPCEN, 0.7 mm) Hot-dip galvanized steel sheet (SGACEN, 0.7 mm) Electrogalvanized coating steel sheet (EDZFCEN, 0.8 mm) Aluminium alloy steel sheet (GC45, 1.2 mm)
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
Lubricant	Drawing oil (Viscosity at 40°C : 3.0 cSt)

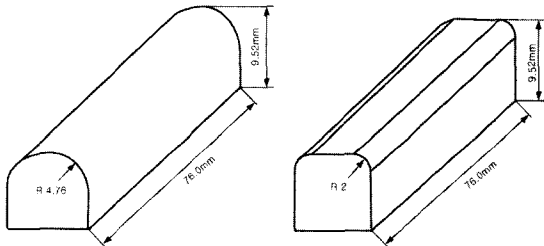


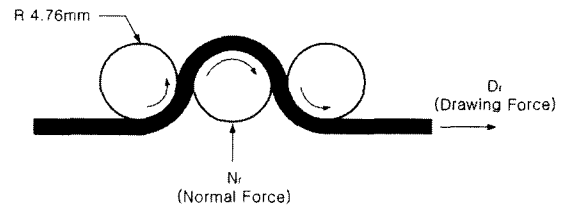
Fig. 2. Schematic view of circular and rectangular bead.

을 구할 수 있다. 이 마찰 저항력과 쿨롬(Coulomb)의 마찰법칙을 이용하여 다음과 같이 마찰계수 μ 를 도출할 수 있다.

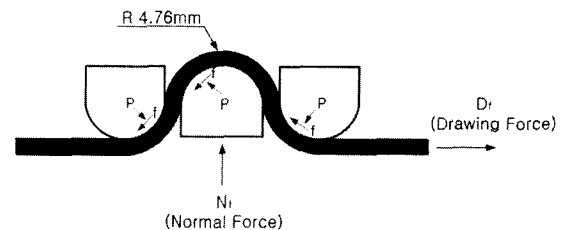
드로우비드 시험기에서 측정되는 마찰하중은 고정비드에서의 인출하중에서 롤러비드에서의 인출 하중을 제거한 값이 된다. 따라서 드로우비드에서의 마찰하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_t = T_{f+d} - T_d \quad (1)$$

여기서, T_t 는 드로우비드에서의 마찰 하중이고, T_{f+d} 는 고정비드에서의 인출력, T_d 는 롤러비드에서의



(a)



(b)

Fig. 3. Aspect touched between bead and sheet (a) roller bead and (b) fixed bead.

인출력이다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 비드 접촉부의 전체 마찰력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, μ_t 는 비드 접촉부의 전체 마찰력, l 은 접촉부 길이, f 는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 마찰력(일정하다고 가정)이다.

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 r 은 비드 반경이고 p 는 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.

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

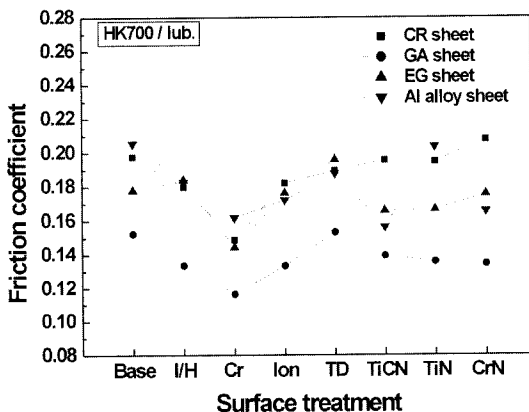


Fig. 4. Effect of bead surface treatment on friction coefficient for HK700.

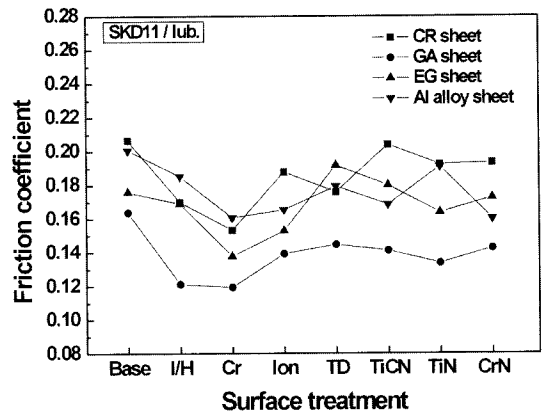


Fig. 5. Effect of bead surface treatment on friction coefficient for SKD11.

Fig. 3에서 접촉부의 총 길이를 하나의 원 둘레와 같다고 볼 수 있으므로 접촉부의 길이를 $l \approx 2\pi r$ 로 가정하고 쿨롬의 마찰법칙 $\mu = \frac{f}{p}$ 에 대입해 보면, 다음과 같은 식을 얻는다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비드 재질에 따른 마찰특성

원소재(미처리) 및 고주파 경화, 크롬도금, 이온질화, TD 처리, TiCN코팅, TiN코팅, CrN코팅 등 총

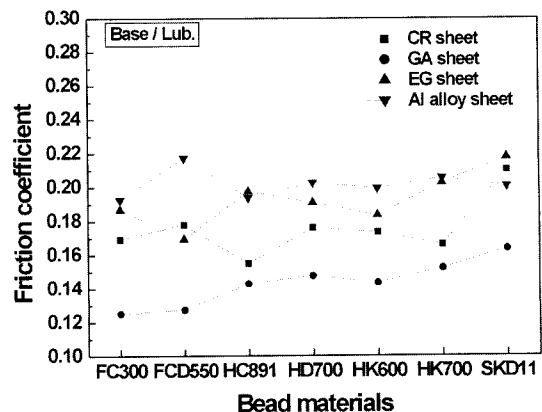


Fig. 6. Effect of bead materials on friction coefficient for BASE.

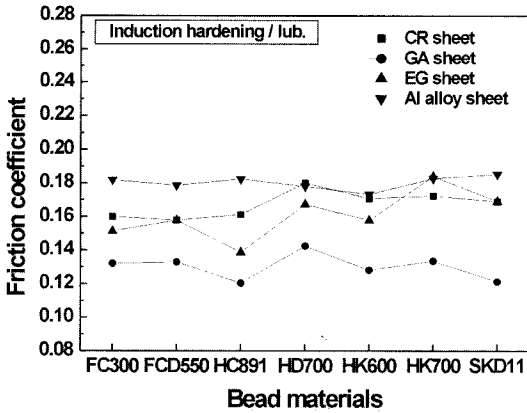


Fig. 7. Effect of bead materials on friction coefficient for induction hardening.

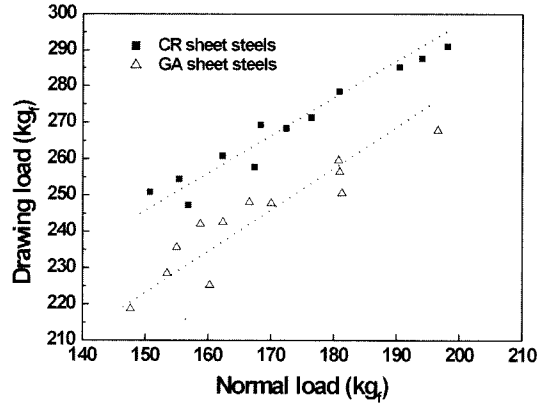


Fig. 10. Normal load vs. drawing load.

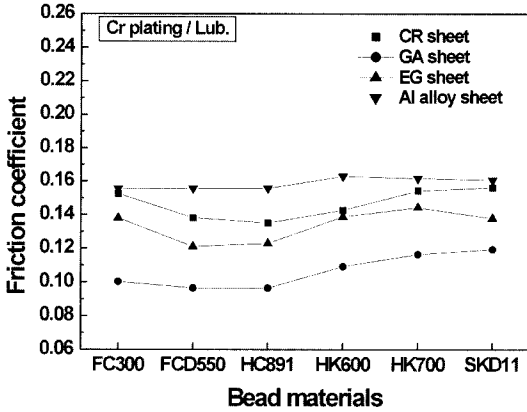


Fig. 8. Effect of bead materials on friction coefficient for Cr plating.

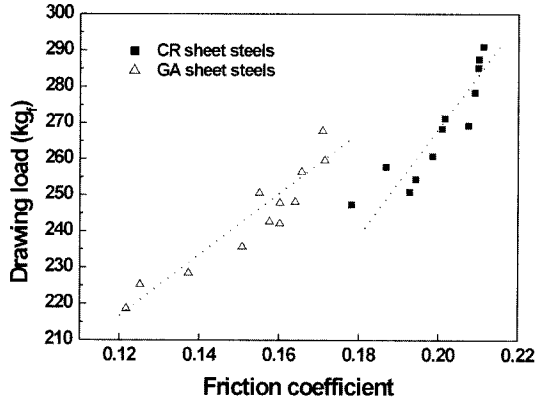


Fig. 11. Friction coefficient vs. drawing load.

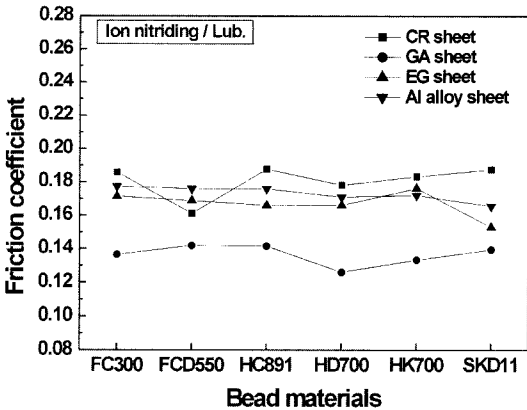


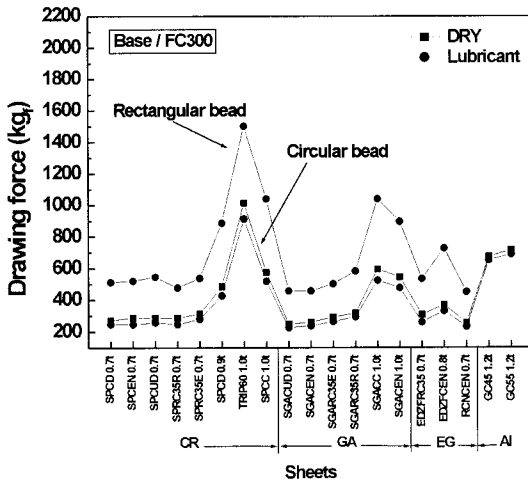
Fig. 9. Effect of bead materials on friction coefficient for ion nitriding.

HK700과 SKD11의 경우를 예를들어 Fig. 4와 Fig. 5에 그래프로 나타내었다. 강판 및 금형재질에 따라 약간의 차이는 있지만, 전체적으로 크롬도금으로 표면처리 했을 때 가장 낮은 마찰계수가 나타났다. 반면에 원소재(미처리) 및 TD처리를 한 것은 비교적 높은 마찰특성을 보이고 있다. 나머지 표면처리들의 경우엔 크롬도금과 미처리 및 TD처리의 중간정도의 값을 가지며 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다.

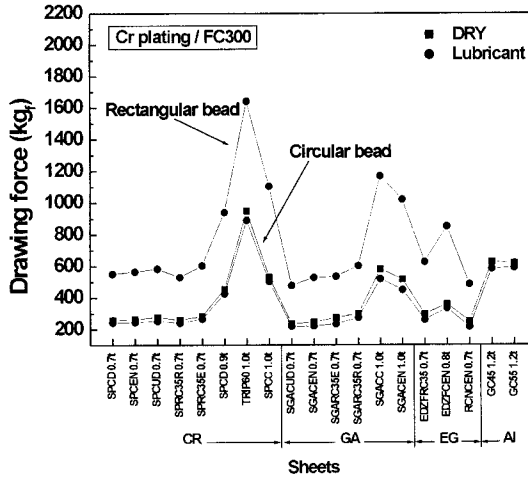
Fig. 6에서 Fig. 9는 비드의 재질에 따른 마찰특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 비드재질에 따라서는 뚜렷한 마찰특성을 보이지 않는다.

이상의 결과로부터, 박판성형시 드로우비드 재질 및 표면처리는 박판소재의 강도에 대응한 금형의 내마모성 및 표면조도 측면에서 중요한 인자일 수 있으나 전반적인 마찰특성에 미치는 효과는 2차적인 인자임을 알 수 있다. 식 (7)에 나타난 마찰계수의

8종류의 표면처리 조건에 대한 마찰계수의 변화를



(a)



(b)

Fig. 12. Drawing force of circular and rectangular bead in various viscosity for (a) FC300 and BASE (b) FC300 and Cr plating.

계산식에서도 알 수 있듯이, 드로우비드 성형시 마찰계수에 영향을 미치는 가장 지배적인 인자는 인출력이며 이는 박판소재의 변형저항(강도)에 가장 크게 의존한다.

Fig. 10과 Fig. 11은 냉연(CR) 강판과 합금화 용융도금(GA) 강판에 대한 인출하중과 마찰계수와의 상관관계를 나타내었다. 모든 경우에 마찰계수와 가압하중에 대해 인출 하중이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

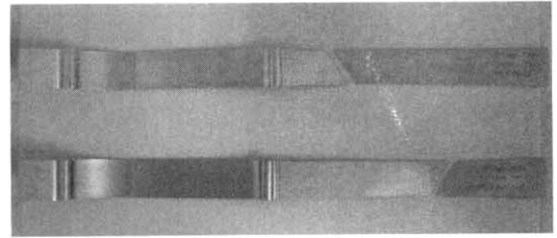


Fig. 13. Fracture view of aluminum steel sheets(GC45 thickness 1.2 mm) for rectangular bead.

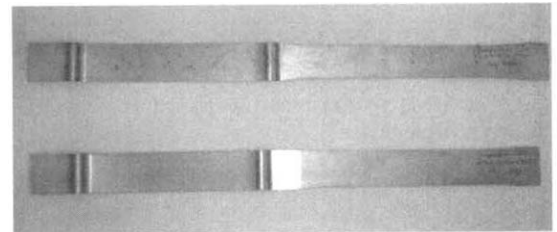


Fig. 14. Necking view of GA steel sheets(SGACEN thickness 0.7 mm) for rectangular bead.

3.2 원형비드와 사각비드의 인출력 경향 및 상호관계

원형비드와 사각비드의 인출력 경향 및 상호관계를 알아보기 위해 다양한 소재에 대해서 드로우비드 실험을 행하여 얻어진 인출력을 Fig. 12에 나타내었다.

사각비드의 경우에는 접촉 면적이 불균일하고 원형비드에 비해 매우 큰 하중이 발생하였다. 이로 인해 데이터의 산포(scattering)가 원형비드에 비해 크게 나타났으며 또한 사각비드의 경우 롤러비드와 모양이 다르기 때문에 각 강판의 정확한 변형하중을 반영할 수 없었다. 그래서 Nine에 의해 제안된 마찰계수 식을 적용할 경우 변형하중이 과소평가되어 마찰계수가 크게 나오는 문제점이 발생하였다. 그래서 재현성이 높고 데이터가 정확한 원형비드를 기준으로 실험을 수행한 후 원형비드의 인출력과 사각비드의 인출력을 비교하여 사각비드의 마찰경향을 분석하였으며, 사각비드의 무윤향의 경우에는 데이터의 산포가 너무 크게 발생하여 비교대상에서 제외시켰다.

무윤향과 윤향에 따라 전체적으로 원형비드와 사각비드의 인출력 경향이 일치함을 알 수 있다. 그러므로 사각비드의 경우, 각 공정인자에 따른 마찰특성이

원형비드와 같음을 유추할 수 있다. 또한 원형비드의 인출력보다 약 1.5~2배 정도의 차이를 보이고 있어 그만큼 재료를 잡아주는 힘이 사각비드가 큼을 알 수 있다.

그리고 TRIP60과 SGACEN(Thickness; 1.0 mm), SGACC(Thickness; 1.0 mm)의 경우에는 낮은 마찰계수를 가짐에도 불구하고 다른 강판에 비교하여 높은 인출력을 나타내는 것은 높은 항복응력과 재료두께 차이에 기인한 것이다[5].

Fig. 13과 Fig. 14는 사각비드 마찰 실험시 파단이 일어난 알루미늄(Al) 강판과 네킹(Necking)이 발생한 일부 합금화용용도금(GA) 강판의 사진이다. 알루미늄(Al) 강판인 GC45와 GC55의 경우, 두께와 높은 항복응력으로 인해 사각비드의 곡면을 슬립하지 못하여 과도한 마찰작용으로 시편에 네킹이 발생하여 결국엔 파단이 일어났으며 모든 사각비드에서 발생하였다.

4. 결 론

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

(1) 비드를 크롬(Cr) 도금으로 표면처리 했을 때 모든 경우에서 가장 낮은 마찰계수를 나타내었다.

(2) 미처리 및 TD처리를 했을 때 마찰계수가 높게 나타났다.

(3) 비드 재질에 따른 마찰계수의 영향은 특이한 경향을 파악하지 못하였는데, 이는 드로우비드 성형시 마찰계수의 지배적인 영향인자인 인출력에 미치는 박판소재의 변형저항 영향도가 월등히 크기 때문이다.

(4) 원형비드와 사각비드의 인출력 경향은 거의 일치하였으며, 사각비드의 인출력은 원형비드에 비해 약 1.5~2배 정도로 크게 나타났다.

참고문헌

1. H.D.Nine, 1978, Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Mechanics of sheet metal forging, (1978)179.
2. M. Samuel, 2002, Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 122(2002)94.
3. N. M. Wang, 1981, A Mathematical Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Journal of Applied Metal Working, (1981)185.
4. 김영석, 남재복, 최원집, 1990, 자동차용 표면처리강판의 마찰특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 14, 6(1990)1474.
5. 김영탁, 김준환, 차지혜, 2002, 3차원 박판성형공정 유한요소해석용 드로우비드 모델, 한국소성가공학회지, 11, 5(2002)394.
6. 박중세, 김승호, 허 훈, 2002, 박판 성형공정에서의 등가 경계조건 계산을 위한 드로우비드 성형의 탄소성 유한요소 해석 - Part I: 등가경계조건 계산, 한국소성가공학회지, 11, 6(2002)503.