

드로우비드 성형시 박판재 마찰계수 영향인자 해석

김원태¹, 이동환¹, 서만석², 문영훈[#]

Analysis on Parameters Affecting the Friction Coefficient in Drawbead Forming of Sheet Metal

W. T. Kim, D. H. Lee, M. S. Suh, Y. H. Moon

(Received February 4, 2005)

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 friction test with circular shape bead was performed at various sheets, lubricants(dry, three kinds of lubricants having different viscosities), bead materials and surface treatments of bead surface. The results obtained by drawbead friction test show that the friction and drawing characteristics of deforming panels were mainly influenced by strength of sheet, viscosity of lubricant and hardness of bead surface.

Key Words : Drawbead, Friction Coefficient, Sheet Metal, Surface Treatment, Lubricant

1. 서론

박판성형시 판재와 공구 사이에 발생하는 마찰은 성형 건전성 및 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 박판 성형시 발생하는 마찰 영향인자들로써는 박판 및 비드재의 표면조도 및 경도, 공구의 기하학적 형상, 윤활상태, 성형속도, 블랭크 홀딩력 등이 있는데, 이러한 인자들이 복합적으로 영향을 미치게 되므로 그 현상이 복잡하고 다양하게 나타난다[1]. 따라서 박판 성형시 마찰에 영향을 미치는 모든 인자들을 마찰계수로 정량 평가하는 것이 매우 어렵고, 이러한 어려움으로 인해 지금까지의 마찰연구는 비교적 간단한 실험을 통한 마찰의 정성적 특성 비교에 주안점을 두어왔다. 근래 자동차에 대한 품질요구

조건이 까다로워짐에 따라 철강업계와 자동차 회사에서는 종전에 많이 사용하던 냉연 무도금 강판 대신에 내부식 성능이 우수한 다양한 표면처리강판들을 개발하여 사용하게 되었고, 이러한 표면처리강판의 성형과정에서 냉연 무도금강판의 마찰특성과 다른 마찰특성들도 나타나게 되었다.

특히 자동차 차체와 같은 복잡한 형상의 대형패널을 성형할 때에는 주름, 파단 및 탄성회복을 방지하고 강성을 증가시키기 위해 드로우 비드를 사용하는데, 판재와 공구 사이의 마찰을 이용하여 재료의 흐름을 제어하고 장력을 부가해 줄 수 있는 드로우 비드 마찰특성의 정확한 이해는 박판 성형건전성 확보측면에서 매우 중요하다. 드로우 비드 마찰에 관한 연구[2~11]는 판재성형에 미치는 중요성 측면에서 다양한 연구가 진행되어왔다

1. 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구소

2. 현대자동차㈜ 프레스 금형부

교신저자 : 부산대학교 정밀기계공학과,

E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

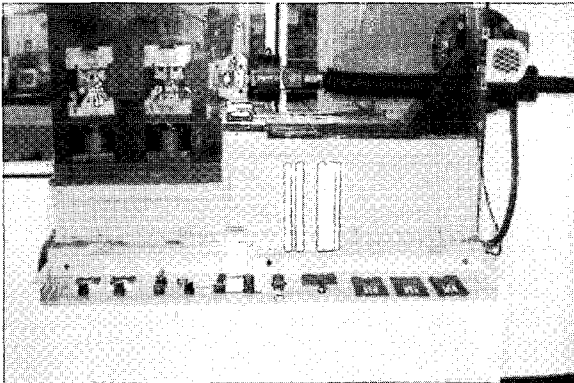


Fig. 1 Drawbead tester

Nine[2]은 단일원형 드로우비드를 대상으로 인출력과 드로우 비드부를 통과하는 소재의 상·하부 표면의 변형을 분포로부터 마찰계수를 구하는 방법을 제안하였다. Wang[3]은 원형 드로우비드의 수학적 모델을 제시하고 모멘트 평형조건을 도입하여 저항력을 유도한 바 있다. Triantafyllidis[4~5] 등은 드로우비드 마찰계수에 대한 해석적 모델을 유한요소해석에 적용시켜 드로우비드 성형시 박판의 변형현상을 구체적으로 연구하였다. 국내에서도 각종 도금강판을 비롯한 박판의 마찰특성을 연구하기 위해 드로우 비드 관련 연구가 진행된 바 있으며[6~8] 드로우 비드 성형공정에 대한 유한요소해석 및 해석적 모델을 이용한 박판공정의 최적화 연구가 수행되었다[9~11].

본 논문에서는 여러 드로우비드의 공정인자들 중에서 일반적으로 가장 널리 사용되는 원형비드에 대해 강판의 재질, 윤활유 점도, 비드재료 및 비드 표면처리가 박판 성형 중 소재와 드로우 비드 사이에서 발생하는 마찰에 미치는 영향도를 실험적으로 평가하였다.

2. 실험내용

2.1 드로우비드 성형 실험방법

본 실험에서는 마찰특성의 평가를 위해 Nine[2]에 의해 고안된 원형단면을 갖는 고속 드로우비드 마찰시험기를 사용하였는데 실험에 사용된 드로우비드 마찰 시험기를 Fig. 1에 나타내었다.

실험은 먼저 두께 0.7mm에서 1.2mm의 마찰시편을 코일의 압연방향으로 폭 45mm × 길이 500mm 크기로 단단하여 가장자리 버어(burr)를 제거하고 평가하려는 표면처리의 비드를 설치하고 윤활유

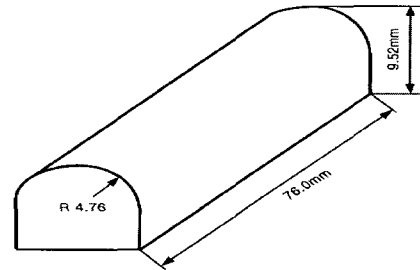


Fig. 2 Schematic drawing of circular bead

Table 1 Experimental condition for drawbead test

Bead size	9.52mm Width 9.52mm Height 76 mm Length
Specimen size	45mm Width 500mm Length 0.7(1.2)mm Thickness
Clearance	1.3mm
Clamping depth	9.52mm
Drawing length	Roller bead 70mm Fixed bead 70mm
Drawing speed	1000 mm/min

를 균일하게 도포한 후 시편의 한쪽 끝을 실험장치의 인장 척에 체결한다. 이후 시편을 비드로 가압하고 1000mm/min의 속도로 롤러비드와 고정비드를 각각 70mm씩 인출하여 변위-하중곡선을 얻는다.

이 곡선에서 인출 거리 40~60mm에서 로드 셀에 의해 측정된 인출 하중 및 비드의 가압력을 측정하여 평균값을 취하였으며 실험이 편차를 줄이기 위해 3회 반복 실시하였다.

비드반경은 통상 스탬핑 공정에서 사용되고 있는 4.76mm을 선정하여 Fig. 2와 같이 가공하였으며 사용한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

2.2 드로우비드 실험조건

실험에 사용한 판재는 판재성형용 소재로 많이 사용되고 있는 냉연(CR: Cold Rolled)강판, 합금화 용융아연도금강판(GA: Hot-dip Galvanized), 이중 전기도금강판(EGF: Electro-galvanized Zn-Fe Alloy), 알루미늄합금(AA: Aluminum Alloy) 판재를 대상으로 하였다. 윤활효과를 평가하기 위해 무윤활(Dry)과

점도가 각각 다른 일반세정유, 일반세정유에 드로잉성 향상유를 첨가한 드로잉 향상유 그리고 극압제를 첨가한 극압제 첨가유를 사용하였는데 Table 2 에 사용 윤활유의 특성을 나타내었다.

비드는 원형비드를 사용하였으며 Table 3 에 나타낸 비드 재질별로 고주파 경화(IH:Induction hardening), 크롬도금(CP: Cr plating) 처리를 하여 표면처리를

하지 않은 상태(BM: Base material)와 함께 비드를 가공하였다. 비드재의 내마모성은 Ball on Disc Type 의 마모시험기에 30N 의 하중과 120rpm 의 속도로 90 분간 마모시험 후 마모량을 측정하였다.

2.3 박판 경도, 인장 및 조도시험

박판재의 경도, 인장강도, 연신을 및 조도가 마찰특성에 미치는 효과를 알아보기 위해서 박판재에 대해 경도시험, 인장시험 및 조도시험을 실시하였다. 경도시험의 경우 강판의 압연 상부면을 대상으로 비커스 경도 시험기를 이용하여 측정하였으며 세 부위에서 측정된 값을 평균하여 대표값을 얻었다.

인장시험편은 KS B 0802 에 따라 제작하였으며 MTS 장비에 박판인장용 그림을 장착하여 실험하였다. 이를 통해 0.2% 오프셋 항복강도, 인장강도, 파단연신율을 구하였다. 조도측정은 강판의 압연 상부면을 세척하여 측정길이를 5mm 로 하여 평

Table 2 Lubricants used for the test

Lubricant	Type	Viscosity (40℃, cSt)	Specific gravity (15℃ / 4℃)
Lub. 1	Washing & rust preventive oil	2.7	0.808
Lub. 2	Drawing oil	3.0	0.812
Lub. 3	Extreme pressure additive oil	6.5	0.840

Table 3 Chemical composition of bead materials

Bead	Chemical composition (wt, %)					Hardness(HV)		
	C	Si	Mn	P(Max)	S(Max)	BM	IH	CP
Fc300	2.80~3.30	1.50~2.10	0.60~1.10	0.15	0.15-	330	647	860
HC891	2.80~3.30	1.80~2.25	0.75~1.05	0.12	0.12	300	637	849
FCD550	3.30~4.10	2.00~3.20	0.10~0.05	0.05	0.03	254	730	916
HK700	1.40~1.50	Max 0.40	Max 0.6	0.03	0.03	242	763	913

Table 4 Material properties of sheets used for the test

Class	Sheet	Thickness	Y.S. (MPa)	TS (MPa)	Hardness (HV)	%EL	Roughness	
							R _a (μ m)	R _z (μ m)
CR	SPCEN	0.7 mm	138.96	289.70	86.94	40.84	0.80	3.71
	SPRC35E	0.7 mm	203.53	361.59	107.93	34.07	0.71	4.10
	TRIP60	0.7 mm	377.57	603.29	185.21	27.91	0.74	3.26
GA	SGACEN	0.7mm	131.29	274.17	93.16	40.28	0.74	2.75
	SGARC35E	0.7 mm	204.40	355.15	104.80	34.43	0.69	3.27
EGF	EDZFCEN	0.7 mm	142.25	276.22	98.94	39.49	0.79	3.51
	EDZFRC35	0.7 mm	212.97	364.54	106.06	33.34	0.67	3.72
AA	GC45	1.2 mm	135.16	274.69	74.57	26.24	0.53	2.33
	GC55	1.2 mm	137.61	287.90	76.82	25.00	0.49	2.25

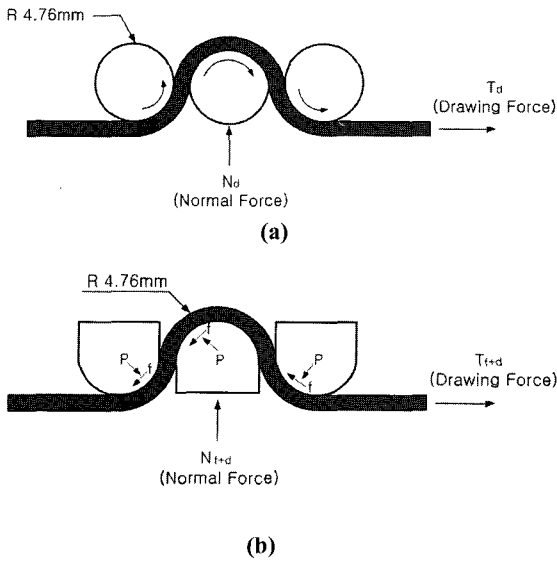


Fig. 3 Contact aspect between bead and sheet for (a) roller bead, and (b) fixed bead

균거칠기(R_a)값과 10 점 평균거칠기(R_z)값을 획득하였다. 시편의 편평도는 자체 프로그램으로 보정을 실시하여 정확한 값을 얻도록 하였다.

시험대상 판재로부터 얻어진 항복강도, 인장강도, 비커스경도, 연신율 및 조도를 Table 4에 나타내었다.

2.4 드로우 비드시험의 마찰계수

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 마찰 저항력을 구할 수 있으며 이 마찰 저항력과 쿨롬의 마찰법칙을 이용하여 마찰계수 μ 를 식(1)과 같이 구할 수 있다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 박판재질 효과

서로 다른 표면처리를 거친 비드재(FC300)를 이

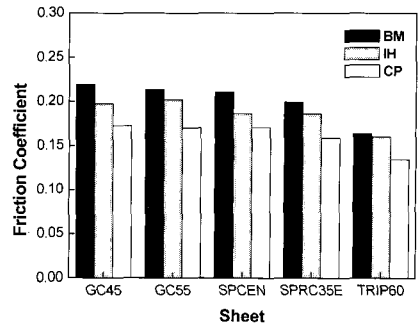


Fig. 4 Friction coefficients of various sheets at different bead conditions (FC300)

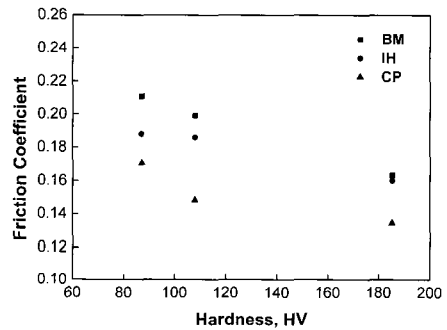
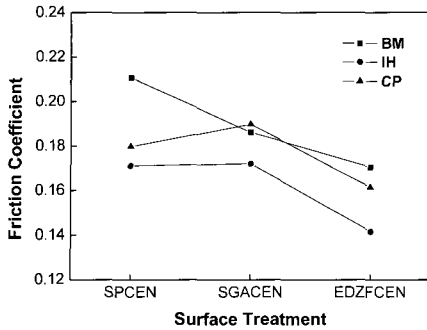


Fig. 5 Effect of hardness of sheet on the friction

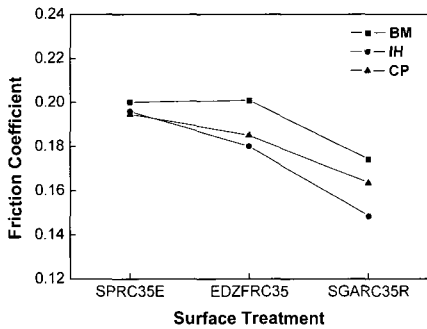
용하여 무윤활 조건에서 냉연(CR)강판과 알루미늄합금(AA) 판재를 대상으로 마찰계수를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 비드의 표면처리조건에 따라 차이를 보이기는 하지만 알루미늄합금 판재에 비해 냉연강판이 마찰계수가 낮게 나타났는데 이는 Table 4에서 보인 바와 같이 알루미늄합금 강판에 비해 냉연강판의 강도 및 경도가 더 높은 것에 우선적으로 기인한다. 특히 냉연강판 중에서는 TRIP강이 가장 낮은 마찰계수를 보였다.

Fig. 5는 냉연강판의 경도에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다. 비드의 표면처리조건에 따라 차이는 있지만 전체적으로 박판재의 경도가 클수록 마찰계수는 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 박판재의 R_a 값과 R_z 값이 마찰계수와 직접적인 상관성을 보이지는 않았는데, 이는 드로우비드 성형특성상 박판재의 강도에 의존하는 인출력이 마찰계수에 미치는 영향도가 워낙 크기 때문에 박판재의 조도효과는 뚜렷이 드러나지 않은 것으로 판단된다.

박판표면처리가 마찰계수의 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 SPCEN과 SPRC35E를 기지재



(a)

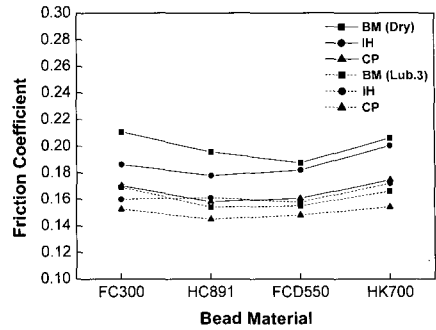


(b)

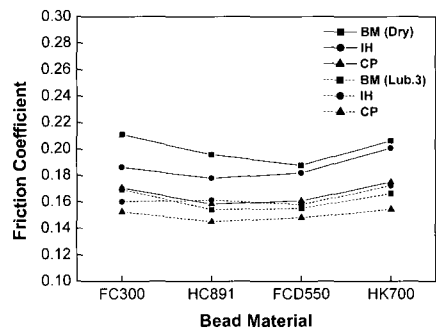
Fig. 6 Effect of surface coating on the friction coefficient: (a)SPCEN base, (b)SPRC35E base

로 하는 용융아연도금강판(SGACEN, SGARC35R)과 전기아연도금강판(EDZFCEN, EDZFC35)에 대한 마찰계수를 비드의 표면처리조건(BM, IH, CP) 별로 각각 측정하여 박판표면처리와 마찰계수의 관계를 평가하였다.

Fig. 6의 경향을 볼 때 용융아연도금강판(SGACEN, SGARC35R)의 마찰계수가 동일 시험조건인 전기아연도금강판(EDZFCEN, EDZFC35)에 비해 마찰계수가 낮게 나타났다. 전기아연도금강판은 전해법에 의해 강판기지에 아연피복을 입히게 되므로, 용융아연도금강판에 비해 도금부착량이 적고 균일하며 도금처리온도가 상온에 가까워 지지원판의 재질특성이 유지될 수 있는 반면 용융아연도금강판은 도금시 고온에 노출되므로 지지원판이 다소 연화되는 경향이 있다. Table 4에 보인 강도, 경도 및 조도시험결과를 보면 용융아연도금강판이 전기아연도금강판에 비해 적은 양이지만 낮은 강도를 가짐에도 불구하고 낮은 마찰계수를 갖는 것은 비교 강종의 강도수준이 비슷한 상태에서 본 시험재료의 용융아연도금강판의 표면



(a)



(b)

Fig. 7 Friction coefficients at different bead materials : (a) SPCEN, (b) GC45

조도가 낮았기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 비드 재질효과

서로 다른 표면처리를 거친 4종류의 비드재를 이용하여 냉연(CR)강판과 알루미늄합금(AA) 판재를 대상으로 마찰계수를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 윤활조건이 비드 표면상태의 민감도에 미치는 효과를 평가하기 위해 무윤활 조건과 윤활성이 우수한 윤활제인 Lub. 3을 이용한 시험을 병행하였다.

두 종류의 박판재 모두에서 비드재의 종류 및 표면처리조건에 따라 마찰계수의 차이가 관찰되었으며 전체적으로 윤활조건에서의 비드표면처리 조건별 마찰계수의 변화가 무윤활의 경우에 비해 줄어들었으며 이는 윤활조건이 비드표면상태의 민감도를 감소시키기 때문으로 판단된다.

비드의 기계적 성질이 드로우비드 저항력과 마찰계수에 미치는 영향도를 평가하기 위해 비드재를 대상으로 비커스 경도시험과 별도로 내마모시험을 실시하였으며 그 결과가 Table 3 과 Fig. 8 에

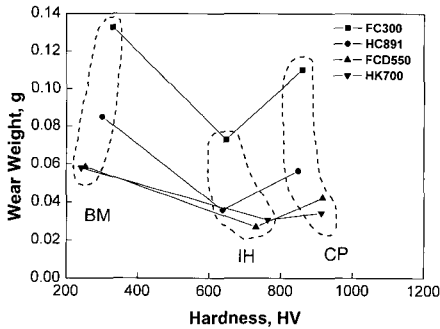


Fig. 8 Relationship between surface hardness and wear weight for various bead materials

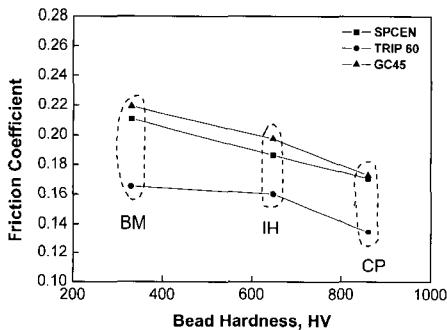


Fig. 9 Effect of bead surface hardness on the friction coefficient

나타나 있다.

Fig. 8의 결과를 보면 모든 비드재에 대해서 크롬도금(CP) 처리를 한 경우 단단하고 밀도가 높은 도금층 때문에 경도가 고주파 경화(IH)에 비해 높은 반면 내마모성은 작음을 알 수 있으며, 표면처리를 하지 않은 상태(BM)에서 경도 및 내마모성이 가장 낮았다. 비드의 경도가 마찰계수에 미치는 영향을 평가하기 위해, 무윤활 조건에서 서로 다른 표면처리를 거친 비드재(FC300)를 이용하여 냉연강판과 알루미늄합금판재를 대상으로 마찰계수를 측정할 결과를 Fig. 9에 나타내었는데, 판재에 따라 정도의 차이는 있지만 비드재 표면경도의 증가와 함께 마찰계수가 감소하는 경향을 뚜렷이 보이는 반면 마모량과의 상관성은 낮게 나타났다.

3.3 윤활효과

드로우비드 성형시 박판재와 비드사이의 윤활조건이 마찰특성에 미치는 효과를 평가하기 위해

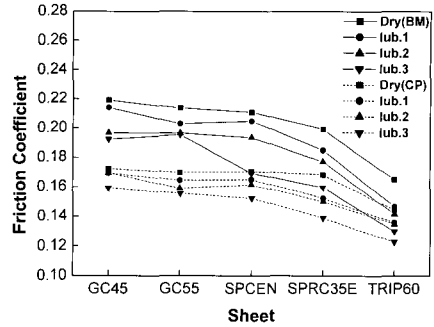


Fig.10 Effect of lubricant on the friction coefficient

Table 2에 나타난 윤활제를 이용하여 시험을 실시하였다. 표면처리를 하지 않은 상태(BM)와 크롬도금(CP) 처리를 한 비드재(FC300)를 이용하여 냉연(CR)강판과 알루미늄합금(AA) 판재를 대상으로 윤활조건을 변화시키면서 마찰계수를 측정한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

강판 및 비드의 재질과 표면처리의 변화에 따라 약간의 차이는 있지만 전체적으로 윤활유의 점도가 증가할수록 마찰계수가 감소하는 경향을 보인다. 윤활유의 점도가 낮은 윤활유 1과 윤활유 2에 비해 극압제가 첨가된 윤활유 3이 가장 우수한 윤활특성을 보였다. 이것은 시편에 윤활유를 도포하고 마찰실험을 할 때 응집력이 약한 저점도유의 경우, 동일한 면압에 대하여 응집력이 강한 고점도유보다 쉽게 유체 윤활상태가 파괴되어 경계 윤활상태로 변하게 되므로 마찰계수가 높게 나오고 반면에 고점도유의 경우, 저점도유에 비하여 지속적으로 윤활작용을 할 수 있기 때문에 마찰계수를 낮추게 되는 것으로 판단된다.

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) 냉연강판이 알루미늄 강판에 비해 마찰계수가 낮게 나타났으며 냉연강판의 경우 강도 및 경도가 높을수록 마찰계수는 낮았으며 강판의 조도는 상대적으로 마찰계수에 큰 영향을 미치지 않았다.

(2) 동일수준의 강도를 갖는 기지재를 용융아연

도금한 강판이 전기아연도금한 강판에 비해 낮은 마찰계수를 보인 것은 용융도금강판의 낮은 표면 조도에 기인한다.

(3) 비드의 표면처리에 따른 경도값이 증가할수록 마찰계수는 감소하는 경향을 보였으며, 윤활시 비드재질에 대한 마찰계수의 민감도는 감소하였다.

(4) 윤활유의 점도가 증가할수록 마찰계수는 감소하는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] Z. L. Zhang, L. Chen, 1997, Study of the friction characteristics of lubricants and their affecting factors during drawing, *Journal of Materials Processing Technology* 63, pp. 144~147.
- [2] H. D. Nine, 1978, Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, pp. 179~211.
- [3] N. M. Wang, 1981, A Mathematical Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, *Journal of Applied Metal Working*, pp. 185~192.
- [4] N. Triantafyllidis, B. Maker, S.K. Samanta, 1986, An analysis of drawbeads in sheet metal forming: Part I-Problem formulation, *Journal of Engineering Materials and Technology* 108, pp. 321~327.
- [5] B. Maker, S. K. Samanta, G.. Grab, N. Triantafyllidis 1987, An analysis of drawbeads in sheet metal forming: Part II-Experimental verification, *Journal of Engineering Materials and Technology* 109, pp. 164~170.
- [6] 권재욱, 김인수, 이동녕, 1992, 각종 도금강판의 신장 성형시 마찰계수 측정, *한국소성가공학회지*, 제 1 권, 제 1 호, pp. 75~86.
- [7] 김창만, 서대교, 1995, 드로우비드에 관한 국내의 연구동향, *한국소성가공학회지*, 제 4 권, 제 4 호, pp. 295~301.
- [8] 김영석, 남재복, 최원집, 1990, 자동차용 표면처리강판의 마찰특성에 관한 연구, *대한기계학회논문집*, 제 14 권, 제 6 호, pp. 1474~1486.
- [9] 금영탁, 김준환, 차지혜, 2002, 3 차원 박판성형 공정 유한요소해석용 드로우비드 모델, *한국소성가공학회지*, 제 11 권, 제 5 호, pp. 394~404
- [10] 박종세, 김승호, 허 훈, 2002, 박판 성형공정에서의 등가 경계조건 계산을 위한 드로우비드 성형의 탄소성 유한요소 해석- Part I : 등가경계조건 계산”, *한국소성가공학회지*, 제 11 권, 호, pp. 503~512.
- [11] M.Samuel, 2002, Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology* 122, pp. 94~103.