

박판성형공정의 유한요소해석을 위한 드로우비드 전문모델 개발 (1부: 실험)

이재우* · 김영탁**

(1997년 8월 28일 접수)

Development of Drawbead Expert Models for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes (Part1: Experiment)

J.W. Lee and Y.T. Keum

Abstract

During the forming process of sheet metals, the drawbead in the die face controls a restraining force so that the sheet flows into the die cavity with tension. In order to investigate a drawbead restraining force and a pre-strain just after drawbeads, which are essential in the finite element analysis of forming processes, the friction test and drawing test are employed. The experiments performed with a circular bead, stepped bead, double circular bead, and circular-and-stepped bead in the various forming conditions and bead sizes show that the restraining force varies linearly with the blank holding force, bead radius, blank thickness, and friction, but the pre-strain nonlinearly does with them.

Key Words : Drawbead(드로우비드), Expert Model(전문모델), Sheet Metal Forming(박판성형), Friction Test(마찰실험), Drawing Test(인출실험)

1. 서론

자동차 차체와 같은 복잡한 형상의 대형 패널을 성형할 때, 주름과 파단을 방지하기 위하여 재료의 흐름을 제어할 필요가 있고 탄성복원 방지와 강성 증가를 위하여 장력을 주어야 한다. 이와 같은 재료 흐름의 제어와 장력 부가는 일반적으로 블랭크 홀더면에 위치한 드로우비드의 조정으로 얻어진다. 판재성형에서 사용되는 드로우비드는

종류가 다양하고 치수나 형상 변화에 따라 성형 및 인출 결과에 크게 영향을 줌으로, 금형 설계에서 최적의 드로우비드를 선정하는 것은 판재의 성형률을 향상시키기 위해 필수 불가결한 요소이며, 판재성형의 성패에 큰 영향을 끼치는 중요한 설계인자이다.

드로우비드에 관한 연구는 드로우비드 저항력과 인출시의 변형률을 구하는 데 집중되어 왔으며 이를 시대별로 간략하게 살펴 보면 다음과 같다. 드로우비드에 대한 본

* 한양대학교 대학원 (현재 삼성중공업 근무)
** 한양대학교 기계공학부

격적인 연구는 Nine⁽¹⁾에 의해 시작되었다. Nine은 드로우비드 저항력에 영향을 끼치는 여러 인자들을 조사하고 원형 비드를 대상으로 드로우비드 저항력과 드로우비드부를 통과하는 소재의 상, 하부 표면의 변형을 분포를 구하였다. Wang⁽²⁾은 원형 비드의 수학적 모델을 제시하고 곡률반경에 따른 굽힘, 미끄러짐, 되굽힘을 작용력의 모멘트 평형 조건을 도입하여 드로우비드 저항력을 계산하였다. Levy⁽³⁾는 기존의 Nine과 Wang의 드로우비드 저항력 실험 결과를^(2,4,5) 인용하고 가상일의 원리를 도입, 이방성과 변형률 속도의 영향을 고려하여 저항력을 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, Sanchez⁽⁶⁾ 등은 원형 비드부를 기하학적으로 둘러싸 가정하고 모델링하여 드로우비드 해석을 수행하였다. 또한, Stoughton은⁽⁷⁾ Nine의 실험을 바탕으로 재료의 굽힘 효과, 드로우비드 저항력, 블랭크 가압력 등을 마찰계수와 관련지어 연구하였다. Frubayashi 등은⁽⁸⁾ 공구 다이 모서리 부에서 재료가 변화하는 과정을 인장, 굽힘, 인장, 되굽힘의 과정으로 분리하여 벨트식과 관련지어 근사적으로 드로우비드 저항력과 변형률을 구한 바 있다.

국내에서는 김영석등이⁽⁹⁾ 드로우비드 마찰 및 인출 시험 기에서 윤활 및 표면처리에 따른 마찰계수와 인출특성을 연구한 바 있고, 서대교등이^(10~12) 원형, 사각형, 계단형 비드를 대상으로 인출 각도에 따른 인출 결과와 벨트식에 의한 해석 결과를 고찰하였다. 또한 김진무등은⁽¹³⁾ 딥드로잉 성형작업시 드로우비드의 유무 및 길이, 블랭크 가압력, 윤활 정도 등을 변화시켜 이들 변수들이 성형 공정에 미치는 영향을 고찰하였다.

본 연구에서는 유한요소법에 의한 박판 성형해석에서 정도를 높이고 수렴성을 높일 뿐만 아니라 현장에서 사용되고 있는 드로우비드를 쉽게 모델링할 수 있는 전문모델러 개발을 목표로 데이터베이스를 확보하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 먼저 원형비드, 이중 원형 비드, 계단형 비드, 그리고 원형-계단형 조합 비드에 대하여 마찰 및 인출실험을 실시하고 드로우비드 저항력과 비드인출시 변형률에 영향을 주는 비드변수와 성형공정 변수들을 조사하였다.

2. 드로우비드 설계

자동차 차체용 금형을 제작할 때 드로우비드 설치기준과 작업방법을 조사하였다. 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 드로우비드의 종류는 Table 1과 같다. 원형 비드

Table 1 Shapes and characteristics of the drawbeads used in industry

Drawbead	Characteristic	Shape and Dimension
Circular	1. single bead 2. controls the draw-ins. 3. strong local tension prevents wrinkling.	
	1. double bead 2. used when single bead does not have tension enough.	
Squared	1. used for stretch forming 2. stronger tension than a circular bead prevents draw-ins.	
Stepped	1. less locking than squared bead 2. helps blank usage.	
Circular-Stepped	needs more tension than single circular bead.	

는 대부분 드로우인이 발생하게 되며 적은 힘으로 스트레치 상태를 얻을 수 있을 때 소재의 이용률을 좋게 하기 위해 사용한다. 이중 원형 비드는 드로우비드 마모 방지를 위해 곡률을 크게 하고, 드로우비드 저항력 감소를 보완한 것이다. 원형비드는 먼저 반원형으로 가공하고, 드로우비드 높이를 줄여 타원형으로 가공하면서 적당한 드로우비드 저항력을 갖는 높이를 트라이아웃으로 찾는다. 그러나 사각 비드는 일반적으로 설계자가 드로우인이 없는 스트레치 상태를 원할 때 사용한다. 계단형비드는 사각비드와 원형비드와의 중간정도 부가장력으로 소재의 이용률을 좋게 하기 위한 때 사용한다.

금형 설계자는 기존의 도면을 참고하여 직관적으로 차체 종류별, 각 부위별로 드로우비드를 설치한다. 이것은 새로운 모델이라 하더라도 차체 종류별로는 형상에 큰 차이가 없고, 드로우비드는 작업현장에서 트라이아웃으로 결정하는 것이라는 인식 때문이다. 설계자가 가지고 있는 일반적인 설계기준을 정리하면 다음과 같다. (1) 외장재이며 단면 성형 깊이가 적은 부위에는 계단형 비드를 사용한다. (예:전면 본네트) (2) 외장재이며 단면 성형 깊이가 큰 부위에는 사각 비드를 설치하고, 사각 비드를 설치했을 때 파단의 위험이 있는 부위에는 이중 원형 비드를 설치한다. (예:후면 본네트) (3) 내장재이며 단면 성형 깊이가 큰 부위에는 이중 원형 비드를 사용하고, 단면 성형 깊이가 적은 부위에는 원형 비드를 설치한다. (예:전면 플로어, 후드) (4) 모서리부에는 원칙적으로 비드를 설치하지 않으나 유입이 많을 것으로 예상되어 주름의 위험이 있을 때는 원형 또는 계단형 비드를 설치한다.

차체 부위별로 설치된 드로우비드의 예를 살펴보면 다음과 같다. Fig.1은 후면 본네트 외장재의 드로우비드 배치도이다. x축상의 A부분에서 A'부분으로 갈수록 성형 깊이가 깊어 A부분에는 원형 비드와 계단형 비드를 설치하였고, A'부분에는 사각 비드를 설치하였다. 이때 A'부분에 사각 비드를 설치하였을 때 파단의 위험이 있는 경우에는 이중 원형 비드를 설치하기도 한다. y방향으로는 사각 비드를 설치하였으며 모서리부에서도 유입을 억제하기 위해 계단형 비드를 설치하였다.

Fig.2는 전면 플로어의 드로우비드 배치도이다. x축상의 A부분에서 단차가 심하고 성형 깊이가 깊은 부분이 가까이 있으므로 이중 원형 비드를, A'부분에서는 단차가 심하지 않으므로 원형 비드를 설치하며 y축상에서는 단차도 있고 단면 성형 깊이도 깊으므로 이중 원형 비드를 설치하였다. 모서리부인 B부분에는 성형 깊이가 깊은 부분

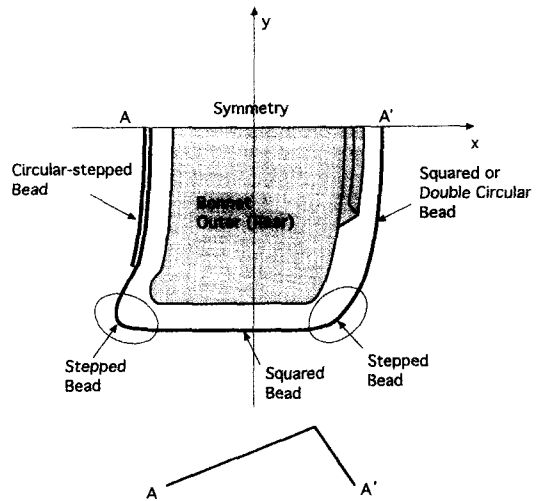


Fig. 1 Schematic diagram of drawbeads in bonnet outer draw panel (rear)

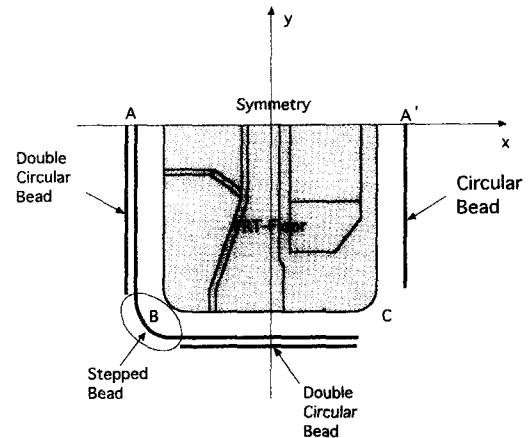


Fig. 2 Schematic diagram of drawbeads in front floor draw panel

이 가까이 있으므로 유입을 막기위해 계단형 비드를 설치하고 C부분에는 가까이에 성형 깊이가 깊은 부분이 없으므로 비드를 설치하지 않았다.

3. 실험

자동차 차체용 강판 SPC1(0.6t, 0.8t)를 드로우비드 인출특성을 규명하기 위한 일련의 실험들이 수행되었다. 박판의 물성치는 인장실험을 통하여, 박판과 비드금형간의 마찰계수는 드로우비드 마찰실험을 통하여, 그리고 드

로우비드 저항력과 비드인출시 변형률은 드로우비드 인출 실험을 통하여 얻었다.

3.1 드로우비드 마찰실험

본 연구에서는 Nine⁽¹⁾에 의해 고안된 드로우비드 마찰 시험 장치를 이용하여 박판과 비드사이의 마찰계수를 구하였다. 실험 장치는 산업과학기술 연구소가 보유하고 있는 고속 드로우비드 마찰 시험기(RIST-DBS)를⁽⁹⁾ 사용하였다(Fig.3 참조).

마찰계수는 고정 비드와 롤러 비드에서 각각 인출실험을 실시하여 구할 수 있다. 고정 비드를 이용한 경우 드로우비드 저항력 D_{f+d} 는 비드를 통과할 때의 소성변형에 의한 변형하중과 마찰하중을 모두 포함한 것이다. 한편, 롤러 비드에서 드로우비드 간격과 가압높이를 고정 비드와 같게 하고 인출하면 마찰의 영향을 무시할 수 있으므로 이때의 드로우비드 저항력 D_d 는 변형하중에만 해당한다. 따라서 고정 비드의 드로우비드 저항력에서 롤러 비드의 드로우비드 저항력을 빼면 마찰만에 의한 드로우비드 저항력이 얻어진다. 쿨롱 마찰법칙으로부터 마찰계수 μ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.⁽¹⁾

$$\mu = \frac{D_{f+d} - D_d}{\pi C_{f+d}} \quad (1)$$

여기서 C_{f+d} 는 고정 비드를 사용할 때의 블랭크 가압력이다.

본 연구의 마찰실험은 SPC1 강판 0.6t를 대상으로 방청유인 P-340N과 드로잉 윤활유인 BWD-610을 사용한 윤활조건과 무윤활 세 가지 경우에 대해 수행하였으며, SPC1 강판 0.8t에 대해서는 방청유인 P-340N를 도포한 경우와 무윤활의 경우에 대해서만 실험을 수행하였다. 또한 자동차 차체용 강판의 일종인 SPC3 강판과 알루미늄 합금의 일종인 스카이 알루미늄(SKY-AL TG25)에 대해서도 P-340N을 도포한 경우와 무윤활 경우의 마찰계수를 구하였다. 각 경우에 실험의 편차를 줄이기 위하여 3회 반복 실험을 실시하였으며 평균값을 구해 실험 대표값으로 하였다.

실험을 통해 얻어진 마찰계수를 Table 2에 정리하였다. SPC1, SPC3의 경우에 무윤활 상태보다 방청유인 P-340N을 도포하였을 때 마찰계수가 더 크다는 것이 주목된다. 또한 SKY-AL TG25를 무윤활 상태에서 실험하였을 경우 표면의 끌림(Galling) 현상 때문에 시편이 손상되어 마찰계수를 구할 수 없었다. 그러나 SPC1과 SPC3

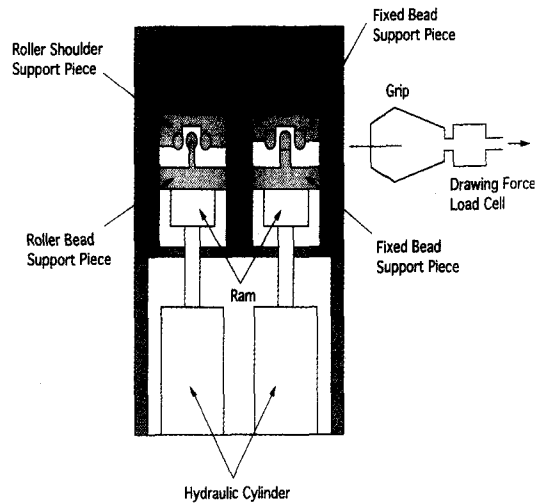


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus of drawbead friction tester

Table 2 Frictional coefficients for various lubrication conditions

Material	Thickness (mm)	Lubricant	Friction coefficient
SPC1	0.6	BWD-610	0.132
		P-340N	0.191
	0.8	DRY	0.171
		P-340N	0.183
SPC3	0.8	DRY	0.161
		P-340N	0.187
SKY-AL TG25	1.0	P-340N	0.198
		DRY	Failure

의 경우 P-340N을 도포한 경우의 마찰계수가 무윤활일 때의 마찰계수보다 0.02정도 크다는 사실로부터 무윤활 상태에서 SKY-AL TG25의 마찰계수는 P-340N을 도포한 경우의 마찰계수로부터 0.02를 뺀 0.18정도로 추정된다.

3.2 드로우비드 인출실험

드로우비드 인출실험은 원형 비드, 계단형 비드, 이중 원형 비드와 원형-계단형 조합 비드를 갖는 다이 세트를 제작하여 Fig.3의 마찰시험기에서 수행하였다. 드로우비드 다이 세트의 재질은 S45C이며, 표면을 열처리하여 내마모성을 갖게 하였다. Photo 1은 원형 비드와 이중 원형

비드 다이 세트의 사진이며 Photo 2는 계단형 비드와 원형-계단형 조합 비드 다이 세트의 사진이다.

원형 비드와 이중 원형 비드에 대하여 상형 비드는 폭은 12 mm, 높이는 6 mm, 4.5 mm, 3 mm, 2 mm의 4가지로 제작하였다. 하형 비드는 원형 비드를 위하여 홈전부 반경 R_s 를 3.8 mm와 4.5 mm의 2가지로 제작하였으며, 이중 원형 비드를 위하여 R_s 를 3.8 mm로 제작하였다. 상, 하형 비드 사이의 간격은 1.2 mm로서 일정하며 소재 인출시 걸림을 막기 위해 드로우비드 세트의 양 끝은 2 mm의 곡률반경을 갖도록 제작하였다(Fig.4와 Fig.5 참조).

계단형 비드에 대하여 상형 비드와 하형 비드는 견부 반경 R 을 3 mm, 4 mm의 2가지로 제작하였으며 상, 하형 비드 사이의 간격은 1.2 mm로 일정하게 하였고 높이는 6 mm로 하였다(Fig.6 참조).



Photo 1 Various die set with single/double circular drawbeads.



Photo 2 Various die set with stepped/circular-stepped drawbeads

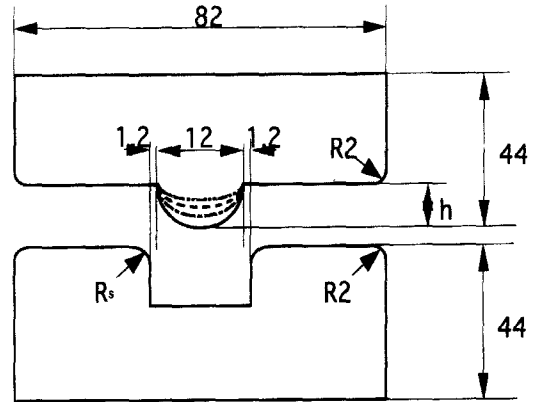


Fig. 4 Sectional view of a single circular bead die set

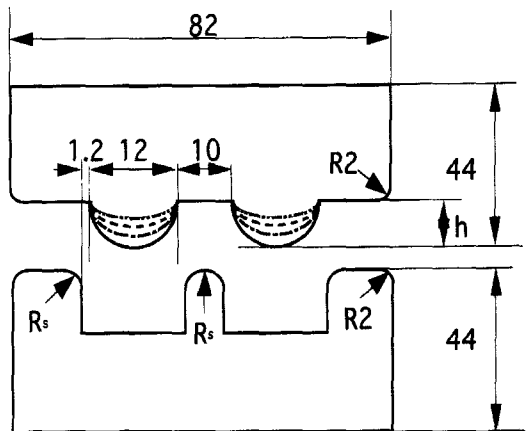


Fig. 5 Sectional view of a double circular bead die set

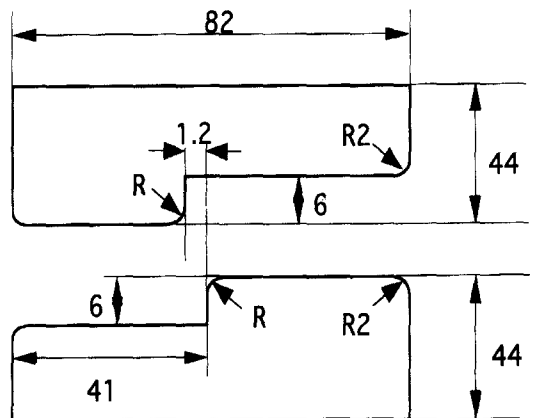


Fig. 6 Sectional view of a stepped bead die set

원형-계단형 조합 비드에 대하여서는 상형 비드에서 원형 비드의 폭을 12 mm, 높이는 3 mm, 6 mm의 2가지로 제작하였으며, 각 비드 높이에 대하여 계단형 비드의 곡률 반경은 3 mm, 4 mm의 2가지로 하였고 계단형 비드의 높이는 6 mm로 제작하였다(Fig.7 참조).

드로우비드 인출실험은 다음과 같은 방법으로 수행되었

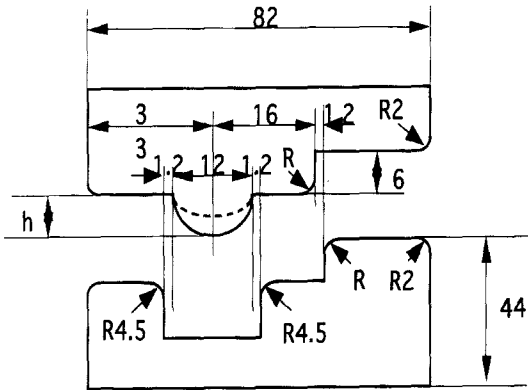


Fig. 7 Sectional view of a circular-stepped bead die set

다. 먼저, 마찰 시험기에서 고정 비드가 설치되는 부분에 제작한 드로우비드 세트를 설치하였다. 그리고 시편을 폭 45 mm, 길이 300 mm 크기로 절단하고 가장자리의 버어를 완전히 제거한 후 한쪽 끝을 시험기의 인장 척에 체결하였다. 유압 실린더에 의해 비드를 가압한 후 500 mm/min의 속도로 인출하여 인출하중-변위 곡선을 구하고, 인출하중이 정상상태에 달했을 때에 이 값을 드로우비드 저항력으로 하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 원형 비드

원형 비드에서 인출실험은 드로우비드의 높이를 2 mm, 3 mm, 4.5 mm, 6 mm로 변화시키면서 SPC1(0.6t)와 SPC1(0.8t)를 대상으로 방청유인 P-340N과 드로잉 윤활유인 BWD-610을 윤활제로 사용하여 실시하였다. 블랭크 가압력은 108.9 N/mm, 156.8 N/mm의 2가지 경우로 하였으며 하형 비드의 홈경부 반경도 3.8 mm, 4.5 mm의 두 가지 경우로 하였다. 이와 같은 서로 다른 실험

Table 3 Drawbead restraining force and bead-exit thinning for various forming condition and geometries of a single circular bead (Material : SPC1)

Thickness (mm)	BHF (N/mm)	μ	R_s (mm)	Bead Height	DBRF(mm)	Thinning(%)
0.6	108.9	0.191	3.8	2	51.50	3.05
				3	57.17	3.34
				4.5	72.79	7.23
				6	80.87	8.06
	156.8	0.191	3.8	2	68.19	3.54
				3	75.59	4.02
				4.5	86.99	8.52
				6	92.26	9.79
		0.132	3.8	2	64.95	2.37
				3	70.88	2.86
				4.5	80.61	5.16
				6	88.23	8.06
0.8	108.9	0.183	3.8	2	55.81	3.54
				3	61.31	4.30
				4.5	72.66	5.92
				6	79.51	7.69
	156.8	0.183	3.8	2	63.06	3.44
				3	74.30	4.59
				4.5	96.06	7.78
				6	108.59	9.97
		0.183	4.5	2	79.66	3.92
				3	94.86	5.45
				4.5	122.32	10.33
				6	127.74	11.40
0.183	4.5	2	73.85	2.47		
		3	86.10	4.02		
		4.5	104.81	8.24		
		6	127.61	11.66		

조건에서 수행한 실험의 결과를 Table 3에 정리하였다.

강판(0.6t)를 하형 비드의 홈견부 반경이 3.8 mm, 블랭크 가압력이 156.8 N/mm인 조건에서 윤활재를 달리고 인출하였을 때, 드로우비드 저항력과 비드 인출시 변형률은 드로우비드 높이가 커질수록 증가하였으며, 각 높이에 대하여 드로우비드 저항력은 마찰계수가 큰 방청유 P-340N을 도포한 경우가 마찰계수가 작은 BWD-610을 도포한 경우보다 더 크다.

하형 비드의 홈견부 반경이 3.8 mm이고 P-340N을 도포한 조건에서 블랭크 가압력과 박판 두께를 달리하여 인출하였을 때, 드로우비드 저항력(DBRF)과 비드 인출시 변형률(THINNING)은 드로우비드 높이가 커질수록 증가하였으며 각 높이에 대해 블랭크 가압력이 일정한 경우에는 박판 두께가 클수록, 박판 두께가 일정한 경우에는 블랭크 가압력이 클수록 더 크다. 특히, 비드 인출시 변형률은 드로우비드 높이가 낮을 때 배보다는 드로우비드 높이가 클 때 차이가 생긴다.

하형 비드의 홈견부 반경이 4.5 mm, 블랭크 가압력이 156.8 N/mm, 윤활재가 P-340N인 조건에서 박판 두께가 두꺼워짐에 따라 드로우비드 저항력(DBRF)과 비드 인출시 변형률(THINNING)이 커짐을 알 수 있다.

블랭크 가압력이 156.8 N/mm, 윤활재가 P-340N인 조건에서 박판 두께와 하형 비드의 홈견부 반경이 다를 때, 드로우비드 저항력(DBRF)과 비드 인출시 변형률(THINNING)은 박판 두께가 일정할 때는 하형 비드의 홈견부 반경이 작을 때, 하형 비드의 홈견부 반경이 일정할 경우에는 박판 두께가 클 때 더 크다.

4.2 계단형 비드

계단형 비드에서의 인출실험은 비드부의 곡률반경을 3 mm, 4 mm로 변화시키면서 SPC1(0.6t)와 SPC1(0.8t)를 대상으로 방청유인 P-340N을 도포한 경우와 윤활유인 BWD-610을 도포한 경우에 대하여 실시하였다. 블랭크 가압력은 110.0 N/mm, 181.8 N/mm의 두 가지 경우로 하였다. 이와 같은 실험조건에서 수행한 실험결과를 Table 4에 정리하였다.

박판 두께가 0.6 mm인 조건에서 블랭크 가압력과 윤활재를 달리하여 인출하였을 때, 드로우비드 저항력(DBRF)은 블랭크 가압력이 일정한 조건에서는 마찰계수가 클수록, 마찰계수가 일정한 조건에서는 블랭크 가압력이 클수록 증가한다. 변형률(THINNING)도 유사한 경향을 보이거나 블랭크 가압력이 낮은 경우에는 마찰계수에 따른 차이가 없었다.

P-340N을 도포한 조건에서 박판 두께와 블랭크 가압력을 달리하여 인출하였을 때는 드로우비드 저항력(DBRF)과 변형률(THINNING)은 박판 두께가 클수록, 블랭크 가압력이 클수록 증가한다.

4.3 이중 원형 비드

이중 원형 비드에서의 인출실험은 드로우비드 높이를 2 mm, 3 mm, 4.5 mm, 6 mm로 변화시키면서 SPC1(0.6t)를 대상으로 P-340N과 BWD-610을 윤활재로 사용하여 실시하였다. 블랭크 가압력은 156.8 N/mm로 고정하였고 하형 비드의 홈견부 반경도 3.8mm로 일정하게 하였다. Table 5는 이와 같은 비드치수들과 윤활조건으로

Table 4 Drawbead restraining force and bead-exit thinning for various forming conditions and geometries of a stepped bead (Material : SPC1)

Thickness (mm)	BHF (N/mm)	μ	Bead radius (mm)	DBRF(mm)	Thinning (%)
0.6	110	0.191	3	77.37	8.14
			4	63.60	5.57
		0.132	3	66.63	8.25
			4	55.78	5.57
	181.8	0.191	3	103.94	9.82
			4	87.09	6.46
		0.132	3	80.47	8.57
			4	71.37	6.25
0.8	110	0.191	3	120.76	10.04
			4	87.60	6.92
	181.8	0.191	3	144.96	11.84
			4	113.02	8.11

실험한 결과를 정리한 것이다.

마찰계수가 큰 경우가 작은 경우보다 드로우비드 저항력(DBRF)과 변형률(THINNING)이 크다. 특기할 것은 비드 인출시 변형률은 드로우비드 높이가 커질수록 드로우비드 높이에 따른 기울기가 눈에 띄게 완만해진다는 것이다.

4.4 원형-계단형 조합 비드

원형-계단형 조합 비드에 대한 실험은 SPC1(0.6t)를 대상으로 실시하였다. 계단형 비드부의 곡률반경은 3 mm, 4 mm의 두 가지로 하였으며 각 경우에 대해 원형 비드의 드로우비드 높이는 3 mm, 6 mm의 두가지로 하였다. 윤활조건은 P-340N과 BWD-610의 두가지 경우로, 블랭크 가압력은 230.2 N/mm, 344.1 N/mm인 조건에서 실시하였다. 이와 같은 실험조건에서 수행한 결과는 Table 6과 같다. 그러나 P-340N을 도포하고 블랭크 가압력이 344.1 N/mm로 한 경우에는 재료에 파단이

일어나 결과를 얻지 못하였다.

블랭크 가압력이 230.2 N/mm인 경우에 원형 비드의 드로우비드 높이와 윤활재를 달리하면 드로우비드 저항력(DBRF)은 원형 비드의 높이가 일정할 때는 마찰계수가 큰 경우에, 마찰계수가 일정할 때는 원형 비드의 높이가 큰 경우에 증가한다. 비드 인출시 변형률(THINNING)에서도 비슷한 경향을 나타내나 원형 비드의 높이가 3 mm인 경우에는 마찰계수에 따른 영향이 적다.

BWD-610을 도포한 경우, 원형 비드의 높이와 블랭크 가압력을 달리하면 블랭크 가압력이 클수록 드로우비드 저항력(DBRF)과 변형률(THINNING)이 커진다.

5. 결 론

본 연구에서는 박판을 드로우비드를 통과하는데 필요한 드로우비드 저항력과 드로우비드를 통과한 후에 박판이 갖

Table 5 Drawbead restraining force and bead-exit thinning for various forming conditions and geometries of a double circular bead (Material : SPC1)

Thickness (mm)	BHF (N/mm)	μ	R_s (mm)	Bead Height	DBRF(mm)	Thinning(%)
0.6	156.8	0.191	3.8	2	77.24	5.64
				3	89.89	9.06
				4.5	105.46	13.93
				6	122.46	14.79
		0.132	3.8	2	66.92	5.07
				3	82.81	8.52
				4.5	98.43	11.57
				6	103.13	12.28

Table 6 Drawbead restraining force and bead-exit thinning for various forming conditions and geometries of a circular-stepped bead (Material : SPC1)

Thickness (mm)	BHF (N/mm)	μ	h (mm)	Bead radius	DBRF(mm)	Thinning(%)	
0.6	230.2	0.191	3	3	131.53	14.29	
				4	120.05	10.38	
			6	3	157.60	20.18	
				4	136.71	16.36	
		0.132	3	3	116.65	13.55	
				4	104.24	9.74	
			6	3	134.58	17.86	
				4	121.85	14.18	
	344.1	0.132	3	3	3	141.16	15.96
					4	135.61	11.57
				6	3	164.15	22.12
					4	150.83	17.20

는 변형률에 대한 실험을 다양한 성형조건하에서 수행하였다. 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 원형비드와 이중원형비드의 경우에 드로우비드 저항력과 비드인출시 변형률은 비드의 높이가 클수록, 홈경부 반경이 작을수록, 블랭크 가압력이 클수록, 마찰계수가 클수록, 그리고 소재두께가 두꺼울수록 증가한다.

(2) 계단형비드의 경우에 드로우비드 저항력과 비드인출시 변형률은 비드의 반경이 작을수록, 블랭크 가압력이 클수록, 마찰계수가 클수록, 그리고 소재두께가 두꺼울수록 증가한다.

(3) 원형-계단형 조합비드의 경우에 드로우비드 저항력과 비드인출시 변형률은 원형비드의 높이가 클수록, 계단형비드의 반경이 작을수록, 블랭크 가압력이 클수록, 마찰계수가 클수록 증가한다.

이상과 같은 실험결과로 드로우비드의 제원과 여러 가지 성형조건이 박판성형공정을 유한요소해석할 때 경계조건으로 정의하는 드로우비드 저항력과 인출시 변형률에 미치는 영향이 규명되어, 2부에서 소개되는 드로우비드의 전문모델을 기술할 수 있는 기반을 마련하였다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME96-E-36)에 의하여 연구 되었습니다. 아울러 본 연구결과에 이르기까지 실험지원을 해준 산업과학연구소 한수식박사, 박기철씨, 김정철씨에게, 그리고 비드설계기준과 트라이아웃에 관하여 많은 토의를 해준 기아모텍(주)의 이종문씨, 정효상씨, 윤재관씨에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H. D. Nine, 1978, "Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", *Mechanics of Sheet Metal Forming*, pp. 179~211.
- (2) N. M. Wang, 1982, "A Mathematical Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", *J. of Applied Metal Working*, Vol. 2, No. 3, pp. 193~199.
- (3) B. S. Levy, 1982, "Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang", *J. Applied Metal Working*, Vol. 3, No. 1.

- (4) H. D. Nine, 1982, "New Drawbead Concepts for Sheet Metal Forming", *J. Applied Metal Working*, Vol. 2, No. 3, pp. 185~192.
- (5) H. D. Nine, 1982, "The Applicability of Coulomb's Friction Law to Drawbeads in Sheet Metal Forming", *J. Applied Metal Working*, Vol. 2, No. 3
- (6) L. R. Sanchez and K. J. Weinmann, 1988, "A General Computer Model for Plane Strain Sheet Flow and its Application to Flow between Circular Drawbeads", *15th IDDRG*, pp. 217~226.
- (7) T. B. Stoughton, 1988, "Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", *15th IDDRG*, pp. 205~215.
- (8) T. Frubayashi, S. Ujihara and T. Sakamoto, 1988, "Simulation of Forming Severity on Autobody Panels Using a CAD system - Analysis of Drawbead and its Control", *15th IDDRG*, pp. 243~250.
- (9) 김영석, 김기수, 1991, "드로우비드의 마찰구속에 관한 연구 (I)", *대한기계학회지, 추계학술대회 논문집*, pp. 120~124.
- (10) 김창만, 임영석, 이항수, 전기찬, 서대교, 1994, "단일 원형비드 및 환저비드의 인출 특성에 관한 연구", *한국소성가공학회지*, Vol. 3, No. 4, pp. 454~467.
- (11) 박원배, 김창만, 전기찬, 서대교, 1995, "사각형 드로우비드 인출 특성에 관한 실험적 연구", *한국소성가공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 170~177.
- (12) 박원배, 김창만, 전기찬, 김낙수, 서대교, 1995, "계단형 드로우비드의 인출특성에 관한 유한요소해석 및 실험", *한국소성가공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 128~135.
- (13) 김진무, 유호영, 고대림, 1995, "드로우비드가 판재성형에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 240~245.
- (14) T. Sakamoto, S. Ujihara and T. Furubayashi, 1988 "自動車用 パネルの 成形性豫測と 絞ビド 役割", *日本塑性加工學會紙*, Vol. 30, No. 337, pp. 206~211.
- (15) N. M. Wang and V. C. Shah, 1991, "Drawbead Design and Performance", *J. of Material Shaping Technology*, pp. 21~26.
- (16) 전기찬, 1993, *박판금속의 성형 - 이론과 실제*, 반도출판사.