

(논 문)

계단형 드로오비드에 의한 판재의 인출특성에 관한 연구

박원배* · 김창만** · 김낙수*** · 서대교**** · 전기찬*****

(1996년 1월 24일 접수)

A Study on the Drawing Characteristics of Sheet through Step Drawbead

Won-Bae Park, Chang-Man Kim, Nak-Soo Kim, Dae-Gyo Seo and Ki-Chan Chun

Abstract

The sheet formability can be improved by the optimum drawbeads installation because drawbeads can control the flow of the metal into the die cavity when the punch enters into the die opening. In this study, the drawing characteristics for step drawbead are analyzed by 2-D rigid-plastic FEM and also are measured experimentally. In addition, for the validity of FEM, theoretical results are compared with the experimental results. Especially, the drawbead restraining forces and the strain distributions of drawn specimens are obtained in both FEM and experiment. Also, the effects of the drawbead dimensions, drawing angles and blank holding forces on the drawing characteristics are investigated.

Key Words : Step Drawbead(계단형 드로오비드), Drawing Characteristics(인출 특성), Rigid-Plastic FEM(강소성 유한요소법), Restraining Forces (인출력), Strain Distributions(변형률분포), Drawing Angle(인출각도)

1. 서 론

드로오비드(drawbead)의 설치는 그 제작 및 설치가 용이하여 적절한 형상 및 치수의 드로오비드를 금형에 설치함으로써 재료에 적절한 부가장력을 주어 판재성형시 결함 억제와 스프링백(spring back)현상 감소, 그리고 미끄럼 저항의 균형을 이룰 수 있다.

드로오비드에 관한 연구는 1978년 H. D. Nine^[1]에 의한 단일원형비드(single circular bead)에 대

한 연구를 시작으로 해서 Wang⁽²⁾, B. S. Levy⁽³⁾등 많은 연구가 있었다.^(4~9)

구미 선진국에서는 산업 현장에서의 각종 금형 용도에 따른 다양한 종류의 드로오비드에 대한 표준화를 구축해 놓은 실정이나 국내에서는 국외의 활발한 연구에 비해 상대적으로 연구가 미비한 실정이다.

본 연구에서는 임의의 인출각도에 대한 인출 실험을 수행하였으며 2차원 강소성유한요소법으로 해석을 수행하고, 비드치수, 클리어런스(clearance) 및 블랭크가압력 등의 변화를 주며 이론 해석 및 인출 실험을 수행하였다.

2. 이론 해석

본 연구에서는 굽힘 효과를 고려할 수 있는 4절

*한국전력기술(주)

**대원전문대학교 기계설계학과

***서강대학교 기계공학과

****성균관대학교 기계설계학과

*****기아자동차(주)

점의 연속체 요소를 사용하였고, 재료의 변형은 평면 변형률 상태로 가정하였으며, 소재는 강소성재료(rigid-plastic material)로 생각하였다. 공구와 소재간의 접촉면에서는 쿨롬(coulomb)마찰법칙이 만족되며, 재료의 물성치 선도는 Swift식으로 근사화 하였다.

$$\bar{\sigma} = C(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$$

유한요소 구성방정식은 이산화과정후 텐서(tensor)형태의 식을 행렬식으로 바꾸고, Taylor 급수로 전개하여 선형화하여 정리하면 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{v}_{exact}) &= \Phi(\bar{v}_{guess} + \Delta\bar{v}) \\ &\cong \Phi(\bar{v}_{guess}) + \frac{\partial\Phi}{\partial\bar{v}}\bigg|_{\bar{v}_{guess}} \Delta\bar{v} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

이 식에서 반복적인 방법에 의해 속도 벡터를 구할 수 있다. 또한 수렴 여부는 아래의 식으로 판정하며,

$$\frac{|\Delta v^{i+1}|}{|\Delta v^i|} \leq \text{error norm} \quad (2)$$

다음과 같은 강성방정식(stiffness equation)으로 표시될 수 있다.

$$K^i \Delta\bar{v} = L^i \quad (3)$$

마찰력은 쿨롬 마찰법칙에 근거한 다음 식으로 모델링하였다.

$$f = -\mu b \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{|v_r|}{a}\right), \frac{v_r}{|v_r|} \quad (4)$$

3. 실험

본 실험에서 사용된 재료는 두께 0.7 mm의 자동차 프레스 성형용 판재로써 기존 강판에 비하여 성형성과 마찰특성이 우월한 아연 도금 유기 피막 강판(SPC 3J-3J/3J)을 사용하였으며, 그 기계적 성질은 Table 1과 같다.

비드 시험편의 제작은 길이 600 mm, 폭 50 mm

의 크기로 동력 절단기를 이용하여 채취한 후 Photo-Grid법에 의해 시편의 선단 약 200 mm가량을 무늬 입힘 장치로 직경 $\phi 2.4$ mm 크기의 원형격자무늬를 입힌다.

비드시험장치는 S45C강으로 가공한 후 연마하였으며, 시편에 원형 격자무늬를 입히기 위하여 동경 시험기 제작소의 SS-900 type의 Rotary Printing Device와 Vacuum Printing Device를 사용하였다. 블랭크가압력은 Enerpac제품(모델: RC-256)의 25 ton용량의 유압잭을 이용하여 크기 조절이 가능하도록 하였으며, 시편의 인출 길이는 1/1000 mm의 디지털식 변위측정기(모델: LY-101)로 측정하였다.

인출된 시편의 길이 방향 대수 변형률은 PC와

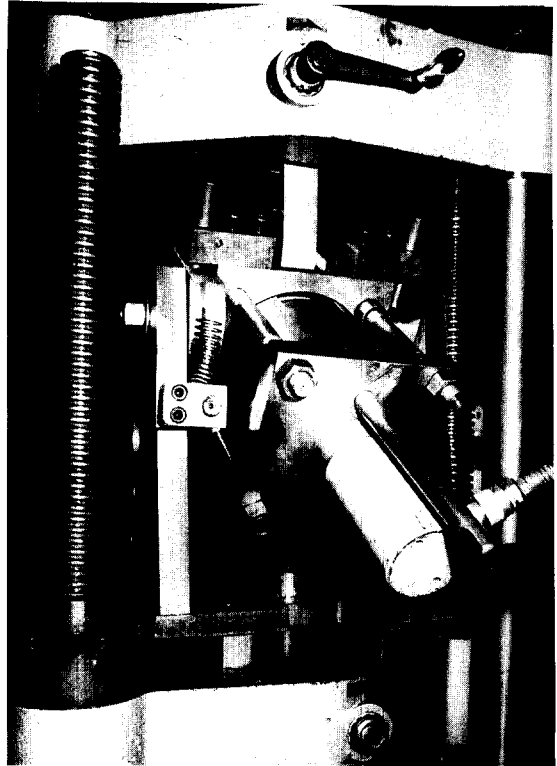


Fig. 1 Experimental apparatus for drawbead test

Table 1. Mechanical properties of specimen

Yield stress(Y)	Plastic coefficient(C)	Tensile strength(T. S.)	Strain-hardening exponent(n)
16.0 kgf/mm ²	47.765 kgf/mm ²	29.0 kgf/mm ²	0.25

연결된 TM-111 type의 공구 현미경(tool-microscope)을 사용하여 측정하였다.

Fig. 1은 드로오비드 시험기를 보여주며, 이 장

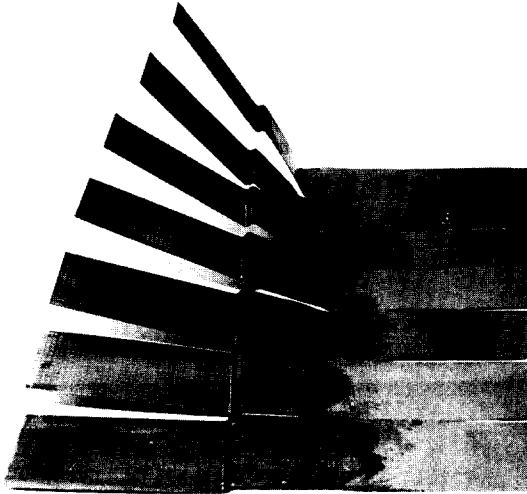


Fig. 2 Drawn specimens for drawing process of step drawbead

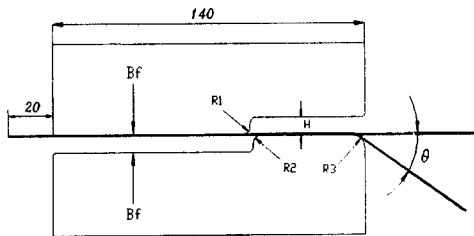


Fig. 3 Schematic view of step drawbead set

치는 인출 각도를 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 까지 임의로 조절할 수 있도록 설계되어 있다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용된 계단형 드로오비드 지그(jig) 형상 및 소재의 초기 형상을 보여준다.

드로오비드 인출 과정에서 인출 특성에 영향을 미치는 대표적 인자는 드로오비드의 형상, 치수, 블랭크가압력, 클리어런스 및 마찰계수 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이러한 인자들 중 몇 가지를 선택하여 그 영향을 고찰하였다.

Fig. 2는 인출 각도별로 인출된 시험편의 사진을 보여준다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 2차원 강소성 유한요소법에 의한 드로오비드 성형 및 인출 해석을 위해 Table 2와 같은 입력 값들을 바탕으로 IBM RS 6000 Workstation을 이용하였으며, 특히 Mesh는 4변형 4절점의 연속체 요소로써 인출 각도 0° 일 때 총절점 수 및 요소 수를 각각 543개와 360개로, 인출 각도가 30° 일 때는 각각 570개와 378개로 분할하였고 시편의 두께 방향에 대해서는 이중(2-layer)으로 요소를 분할하여 해석하였다. 마찰계수는 인출 각도가 증가할수록 그 값이 변할 가능성도 있으나 본 해석에서는 0.1로 일정하게 두었다.

Table 3은 드로오비드의 인출 특성에 영향을 주는 인자들(드로오비드 반경(R_1 , R_2), 공구 다이 모서리 반경(R_3), 블랭크가압력 및 인출각도 등)을 변화시켜 가며 실험을 하여 얻은 결과이다.

Table 2. Input data for calculation

Parameters	Data	
Friction coefficient (μ)	0.1	
Blank holding force	499.5Kg _f	
	666Kg _f	
Total number of elements	0°	360
	30°	378
Total number of nodal points	0°	543
	30°	570
Time increment (Δt)	0.2~0.3	
Error norm	0.00001	

Table 3. Experimental results of drawing test

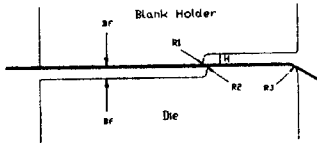
Step drawbead	Drawing angle	Drawbead dim. (mm) *H=6	Holding force (Kgf)	Restraining force (Kgf)	Strain (ϵ_{max})
	$\theta=0^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	420.7	0.110
			499.5	390	0.102
		R1=R2=3.5, R3=5	666	345	0.081
		R1=R2=2.5, R3=2.5	666	430	0.124
	$\theta=10^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	437.5	0.123
			499.5	410	0.111
		R1=R2=3.5, R3=5	666	380	0.087
	$\theta=20^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	477.5	0.132
			499.5	432.5	0.116
		R1=R2=3.5, R3=5	666	405	0.094
	$\theta=30^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	537.5	0.144
			499.5	482.5	0.124
R1=R2=3.5, R3=5		666	420	0.102	
$\theta=40^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	575	0.156	
		499.5	520	0.135	
	R1=R2=3.5, R3=5	666	452.5	0.112	
$\theta=50^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	605	0.167	
		499.5	550	0.145	
	R1=R2=3.5, R3=5	666	475	0.120	
$\theta=60^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	650	0.158	
		499.5	585	0.158	
	R1=R2=3.5, R3=5	666	502.5	0.129	
		R1=R2=2.5, R3=2.5	666	720	0.219

Fig. 4는 드로오비드 반경(R_1, R_2)과 공구 다이 모서리 반경(R_3)을 각각 2.5 mm와 3.5 mm 및 2.5 mm와 5 mm로 바꿔 가며 실험하여 얻은 인출 각

도에 대한 인출력의 선도로써 인출 각도가 증가함에 따라 시험편이 공구 다이 모서리 부에서 굽힘 응력 (bending stress) 및 굽힘 되돌림 응력 (unbend-

ing stress)을 받아 인출력이 비교적 선형적으로 증가함을 보여주며, Fig. 5은 Fig. 4와 동일한 실험 조건에서의 인출 각도에 대한 최대 변형률을 나타낸 선도로 그 경향은 비교적 유사하다.

Fig. 6는 블랭크가압력이 인출력에 미치는 영향을 보여주는 선도로써 블랭크가압력이 커짐에 따라 인출력이 증가함을 보여주며, Fig. 7는 최대 변형률에 대한 선도로써 그 경향은 Fig. 6와 같다.

Fig. 8((a)-(d))은 인출 각도 0°일 때 재료가 비드로 가압되어 완전히 인출될 때까지의 과정을 보

여준다.

Fig. 9은 시험편이 드로오비드 형상으로 완전히 성형되었을 때, 즉 바인더랩(binder wrap)된 상태에서의 시편 상부 표면의 변형률 분포를 보여주는 선도로써 플랜지(flange) 부근에서는 표면 변형률이 거의 0으로 변형이 없으나 드로오비드부에서는 상부 표면이 R₁부근에서 압축 변형, R₂부근에서 인장 변형을 받으며 실험치와 해석치가 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 10은 드로오비드 형상으로 성형된 시험편을

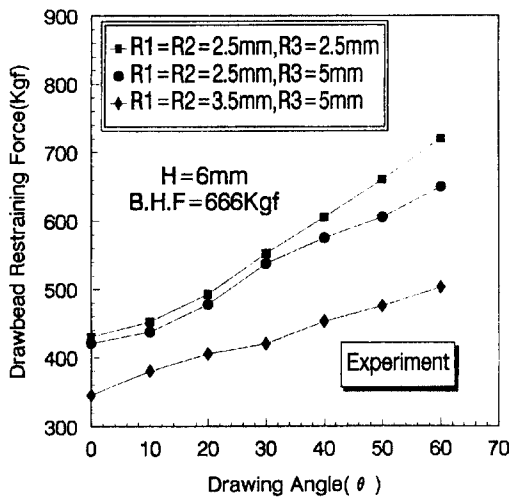


Fig. 4 Drawbead restraining force vs. drawing angle for different R₁, R₂ and R₃

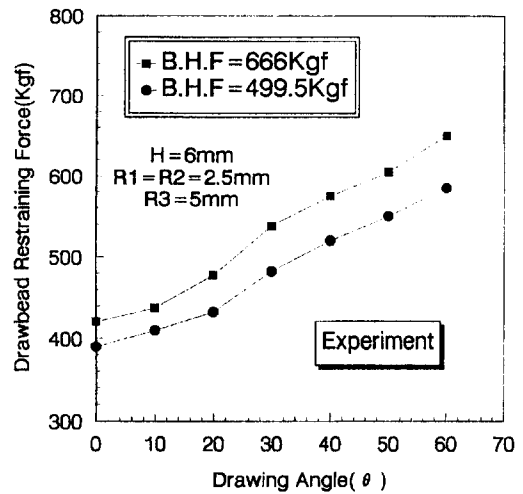


Fig. 6 Drawbead restraining force vs. drawing angle for different B. H. F

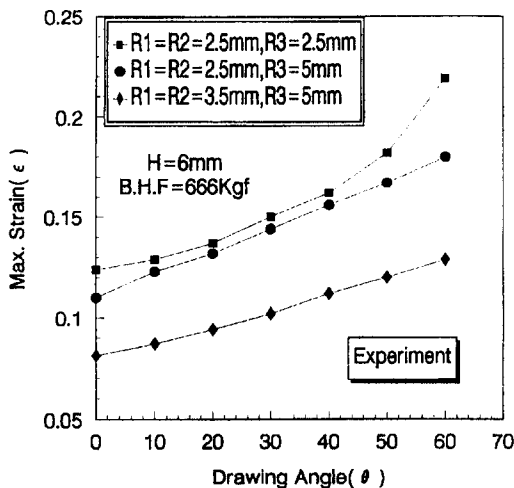


Fig. 5 Maximum strain vs. drawing angle for different R₁, R₂ and R₃

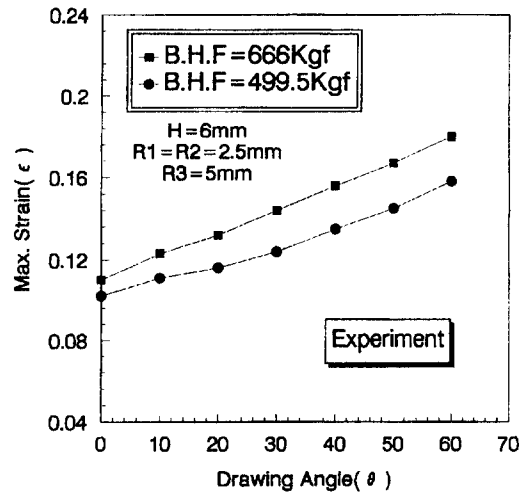


Fig. 7 Maximum strain vs. drawing angle for different B. H. F

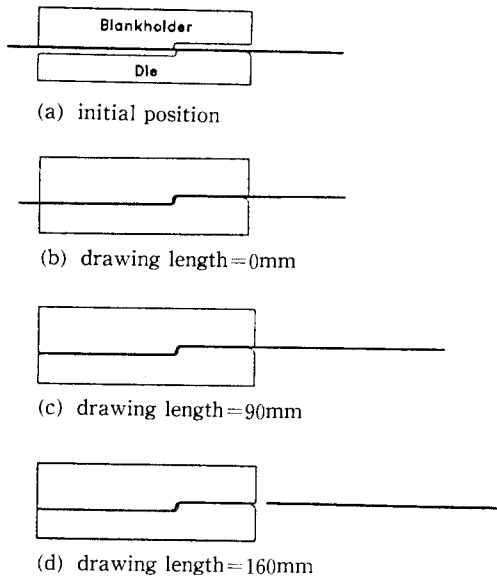


Fig. 8 Drawn phenomena of specimen for each drawing length by drawing angle 0°

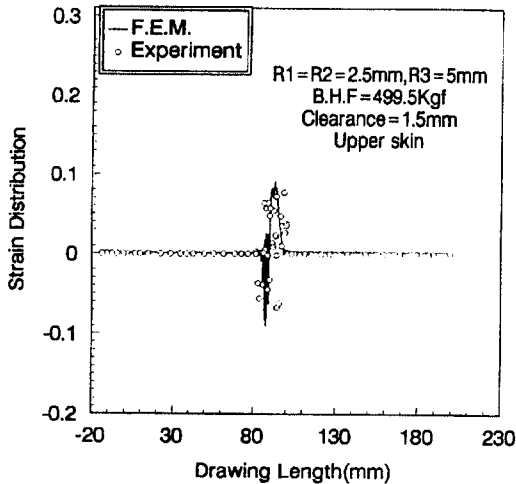


Fig. 9 Strain distribution of upper skin for binder-wrap

인출 길이 160 mm로 완전히 인출하였을 때 상부 표면에 대한 변형률 분포를 나타내는 선도로 실험 및 이론 결과를 보여주며 시험편이 드로오비드부를 통과했을 때 가장 큰 폭으로 변형률이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11는 인출 각도를 0°로하여 시험편을 160 mm로 인출하였을 때 시험편의 전반적인 인출력의 경향을 보여주는 선도로써 초기에 인출력이 급격히

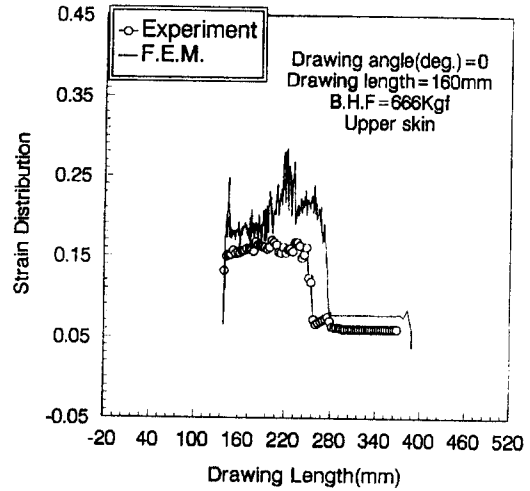


Fig. 10 Strain distribution of upper skin for 160mm drawn specimen by drawing angle 0°

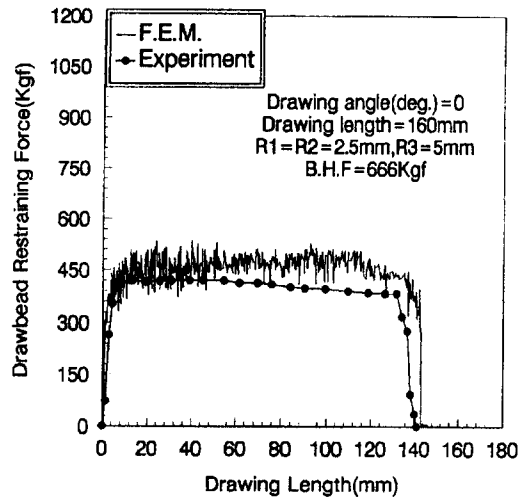


Fig. 11 Drawbead restraining force vs. drawing length by drawing angle 0°

증가하여 그 이후에는 거의 최대인출력에 근접한 힘으로 유지되다가 인출 길이 약 130 mm부근에서 인출력이 급격히 하락하면서 시험편이 인출됨을 보여준다.

Fig. 12은 인출 각도 30°일 때 드로오비드가압부 터 재료가 인출되어 가는 과정을 보여준다.

Fig. 13은 인출 각도 30°일 때 시험편이 완전히 비드성형된 상태에서 인출 길이 약 120 mm까지 인출되었을 때의 인출 시험편의 상부 표면 변형률 분포에 대한 이론 결과이며 드로오비드부를 통과한 시험편부

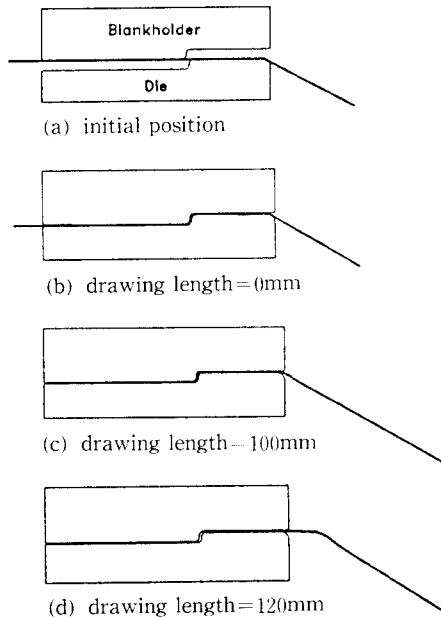


Fig. 12 Drawn phenomena of specimen for each drawing length by drawing angle 30°

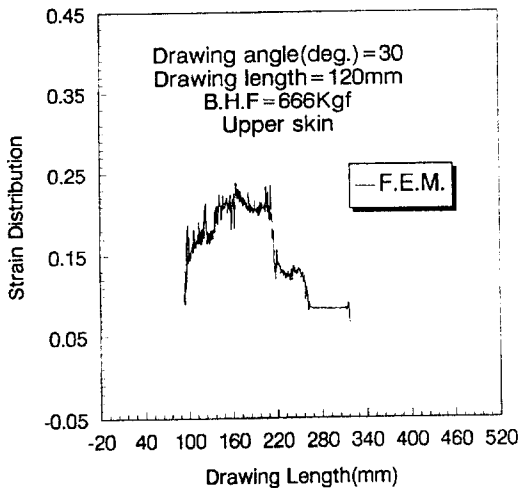


Fig. 13 Strain distribution of upper skin for 120mm drawn specimen by drawing angle 30°

위의 평균적인 변형률 값이 약 0.2정도로 인출 각도 0° 의 경우에 비해 그 값이 약 0.03정도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 14는 인출 각도 30° , 인출 길이 120mm로 하였을 때의 인출력의 경향을 나타내며 인출 각도 0° 일 때와 유사한 형상을 보인다.

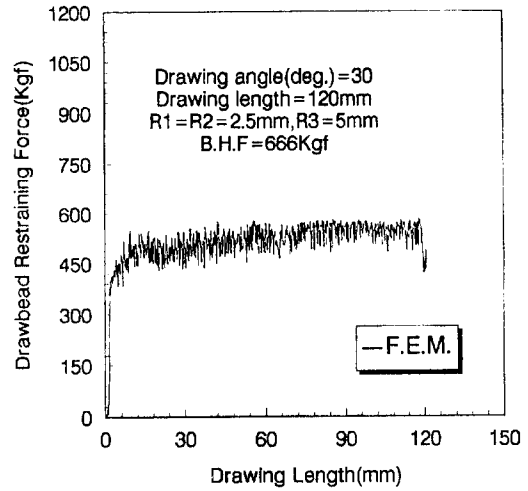


Fig. 14 Drawbead restraining force vs. drawing length by drawing angle 30°

5. 결 론

본 연구에서는 계단형 드로오비드를 대상으로 2차원 강소성 유한 요소 해석 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 드로오비드 인출력은 공구 다이 모서리 반경 (R_3)에 비해 드로오비드 반경 (R_1, R_2)이 예리해질수록 크게 증가하였으며, 또한 블랭크가압력이 커질수록 증가함을 알 수 있었다.

(2) 시험편을 블랭크가압력에 의해 드로오비드 형상으로 상형하였을 때 프랜지부의 시편 상부 표면에서 변형률이 0으로 변형이 거의 없었고 비드부에서 변형이 비교적 크게 일어났다.

(3) 실험과 강소성 유한 요소 해석에서 동일하게 비드부를 통과한 시편 부위의 변형률값이 크게 나타났으며, 또한 실험치와 해석치가 다소 차이를 보이나 그 경향은 비교적 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 (과제 번호 : 93-10-00-04-3)의 지원과 기아자동차(주)의 협력에 의하여 수행 중에 있으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H. D. Nine, 1978, "Drawbead Forces in Sheet

- Metal Forming”, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, pp. 179~211.
- (2) Neng Ming 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, 1983, “Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang”, *J. of Applied Metal Working*, Vol. 3, No. 1, pp. 38~44.
- (4) J. M. Yellup, M. J. Painter, 1985, “The Prediction of Strip Shape and Restraining Force for Shallow Drawbead Systems”, *J. of Applied Metal Working*, Vol. 4, No. 1, pp. 30~38.
- (5) N. Triantafyllidis, G. Grab, S. K. Samanta, B. Maker, 1987, “An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming : Part II - Experimental Verification”, *J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 109, pp. 164~170.
- (6) S. Ujihara, T. Sakamoto, T. Furubayashi, 1988, “Simulation of Forming Severity on Autobody Panels Using a CAD System - Analysis of Drawbead and Its Control”, 15th IDDRG. Proc., pp. 243~250.
- (7) 小嶋, 正康, 1993, “圓筒絞り荷重特性に及ぼす絞りビードの影響 - 薄板のプレス 成形におけるフランジの絞りビード拘束に関する研究 I”, *Journal of the JSTP*, Vol. 34, No. 392, pp. 1009~1014.
- (8) H. Ike, 1994, “Evaluation of Sliding Characteristics of Coated Steel Sheets by L-Type Drawbead Simulator”, *Journal of the JSTP*, Vol. 35, No. 397, pp. 145~151.
- (9) B. D. Carleer, M. F. M. Louwes & J. Huetink, 1995, “Modelling of drawbeads in 3D finite element simulations of the deep drawing process”, *Simulation of Materials Processing*, ISBN 90 5410 553 4, pp. 681~685.