

용접된 판재에 대한 원형 드로비드 성형 및 인출 특성

김홍종* · 허영무* · 김낙수** · 김현영*** · 서대교****

(1998년 12월 1일 접수)

Circular Drawbead Forming and Drawing Characteristics for Welded Sheets

Hong Jong Kim, Young Moo Heo, Nak Soo Kim, Heon Young Kim and Dae Gyo Seo

Abstract

Circular drawbead forming and drawing characteristics of CO₂ laser welded SPC1 blanks are investigated by experiments and numerical analysis. During the drawbead forming process, the distributions of major strain on upper and lower skins of the specimens are measured. During the drawing process, the drawing forces and the strain distributions are investigated. For the numerical analysis, DYNA3D and SGTAS, a developed rigid-plastic finite-element computer program are used. Numerical results predicted the deformation characteristics well in comparison with experiments. It is concluded that the strains and restraining forces during the forming and the drawing processes show different patterns according to the combination of welded blanks.

Key Words : Welded Sheet, Circular Drawbead, Strain Distribution, Restraining Force

1. 서론

편치와 다이에 의한 박판성형을 수행하기 위하여 금형 설계 시 용도에 따라 여러 가지 형태의 드로비드를 설치하게 된다. 이때 드로비드의 설치 목적은 판재의 유입 시 다이 사이의 마찰저항을 부분적으로 또는 용도에 따라 구분하여 증가시켜 줌으로써 성형될 판재 전체의 장력 조절이 이뤄져 결국, 판재 성형율을 최대한 향상시키는데 있다.

만일 드로비드 없이 박판재를 성형하기 위해서 소재 가압력을 주어야 하며 이에 따르는 부가 장력도 그 만큼 필요하게 된다. 실제 판재의 성형 시 대부분은 임의 형상단면 모양인 편치에 의해 성형되며, 이때 판재의 국부별 소

재유입을 드로비드 없이 적절히 조절함이란 대단히 어려운 일이다. 이와 같은 국부별 재료유입의 기타 방법에 비해 드로비드 설치에 의한 재료 유입조절방법은 손쉽게 드로비드를 제작, 설치할 수 있다는 점과, 유입되는 판재 전체의 미끄럼 저항의 균형을 이루게 하여 초기 블랭크 치수를 절약할 수 있는 경제적 측면의 장점도 있다.

최근에는 결합소재(Tailored Blank)방식이 적극 활용되고 있다. 결합소재방식은 재질이나 두께가 상이한 2매 이상 조합하여 레이저 또는 매쉬 심(mash seam)용접 등을 통해 하나로 일체화시킨 후 프레스 성형 공정을 통하여 부품을 제조하는 신기술로써 경량화, 원가절감, 강도 향상 등의 이점이 있다.

* 성균관대학교 대학원
** 서강대학교
*** 강원대학교
**** 성균관대학교

드로비드에 관한 연구는 1978년 H. D. Nine⁽¹⁾에 의한 단일 원형 드로비드(single circular bead)에 대한 연구를 시작해서 Wang⁽²⁾, B. S. Levy⁽³⁾등 많은 연구가 있었다.⁽⁴⁻⁸⁾

본 논문에서는 밴드타입 SPC1종을 CO₂ 레이저 용접한 판재를 원형 드로비드를 장착한 드로비드 실험장치에서 성형 및 인출 실험을 실시하였으며 이 결과를 FEM 해석 결과와 비교하였다. 또한 이 논문에서는 강-소성 유한요소 프로그램을 개발하여 박판성형 시 소재의 변화양상 및 변형률 분포를 예측하여 좀 더 좋은 성형조건을 찾을 수 있으리라 기대 된다.

2. 유한요소 수식화

본 연구에서는 원형드로비드에서의 성형특성을 알아보기 위하여 8절점의 브릭요소(brick element)를 사용하여 3차원 강-소성 유한요소 프로그램 SGTAS를 만들었다. 체적력과 관성력은 무시되었다. 따라서, 속도장과 응력장은 다음을 만족한다.

(1) 평형 방정식

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

(2) 경계조건

$$\begin{aligned} v_i &= v_i^* : \delta v_i = 0 \text{ on } S_u \\ t_i &= \sigma_{ij} n_j \text{ on } S_F \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 구성 방정식

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda}, \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\epsilon}} \sigma'_{ij} \quad (3)$$

(4) 적합 방정식

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\partial v_{i,j} + \partial v_{j,i}) \quad (4)$$

(5) 변형경화법칙

$$\sigma = C(\epsilon_o + \epsilon)^n (\dot{\epsilon}_o + \dot{\epsilon})^m \quad (5)$$

(6) 비압축성 조건

$$\dot{\epsilon}_{kk} = 0 \quad (6)$$

이상과 같은 가정들을 포함한 경계치의 약형은

$$\int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} dV - \int_{S_f} t_i^* \delta v_i dS = 0 \quad (7)$$

이 된다. 이 방정식을 이산화시키면

$$\begin{aligned} \Phi(v)^{(e)} &= \sum \Phi(v)^{(e)} \\ &= \sum_{e=1}^n \left[\left(\int_{V^{(e)}} \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} B^T D B dV + \int_{V^{(e)}} K C C^T dV \right) v_i^{(e)} \right. \\ &\quad \left. - \int_{S_f^{(e)}} k \underline{DN}^{(e)} H_C^{(e)} dS \right] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

인 비선형 방정식이 된다. 이를 간략하게 하면 다음과 같다.

$$\Phi(v) = \{ \underline{F}(v) + \underline{G} \} \cdot v - \underline{H}(v) = 0 \quad (9)$$

즉, $K(v) \cdot v = F$ 라는 강성방정식(stiffness equation)으로 표시될 수 있다.

위 (9)식은 직접 반복법(direct method)과 뉴턴 램슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구한다.

3. 실험

본 실험에서 사용된 재료는 SPC1종으로 두께 0.8 mm 무용접 판재와 두께가 0.8*0.8 mm, 0.8*1.6 mm 레이저 용접한 시편을 만들었다. 시편제작 시 레이저 용접을 위하여 용접면은 밀링으로 처리하였다. 먼저 용접의 신뢰성을 검토하기 위해 KS B 0801 제5호 시편을 만들어 용접라인과 수직방향으로 인장시험을 해 본 결과 용접부에서 조금 떨어진 부분에서 약 45° 방향으로 파단이 일어났다. 이는 용접부에 이상이 없으며, 용접부가 용접하지 않은 부분보다 강하다는 것을 나타낸다. 그리고 용접시편의 기계적 성질을 알아보기 위해 용접라인과 평행하게 KS B 0801 제5호 시편을 만들어 인장시험을 해 보았다. 얻어진 기계적 성질은 Table 1과 같다. 이 결과는 용접하지 않은 시편에 비해 항복강도와 인장강도가 각각 11%, 12% 높게 나타났다.

그리고 Fig. 1은 용접부와 그 주위를 마이크로 비커스 경도계로 경도를 측정 한 것이다.

비드 시편편의 치수는 Fig. 2와 같다. 또한 실험후 변형을 측정을 위하여 upper skin 과 lower skin 두 면에 무늬입힘 장치로 Ø2.4 mm 크기의 원형격자무늬를 입혔다.

Table 1 Mechanical properties of welded specimen

Material : SPC 1(0.8*1.6 Welded)	
Yield stress	27.139 kg _f /mm ²
Plastic coefficient(C)	59.454 kg _f /mm ²
Tensile strength	44.434 kg _f /mm ²
Strain hardening exponent(n)	0.2221

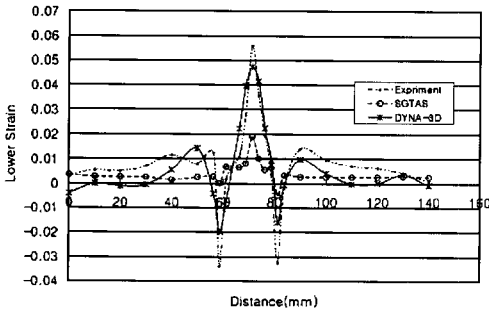


Fig. 1 Micro-Hardness Distribution of welded specimen (HAZ)

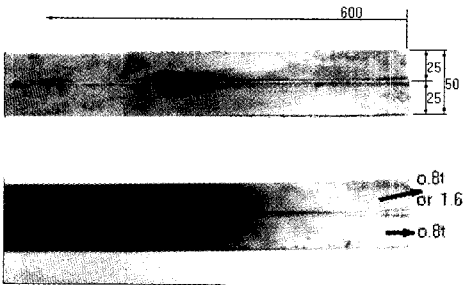


Fig. 2 Dimension and shape of Specimens

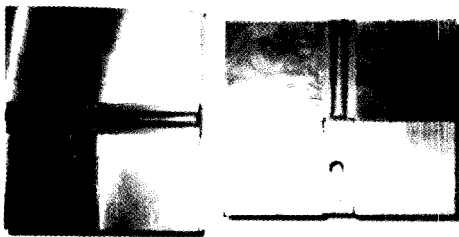


Fig. 3 Shape of upper die set

비드 시험장치는 S45C강으로 제작하였으며 Fig. 3과 같이 시편의 길이 방향으로 단차를 주었고 비드는 원형비

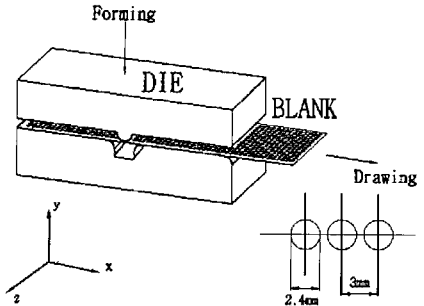


Fig. 4 Schematic view of two array single circular drawhead set

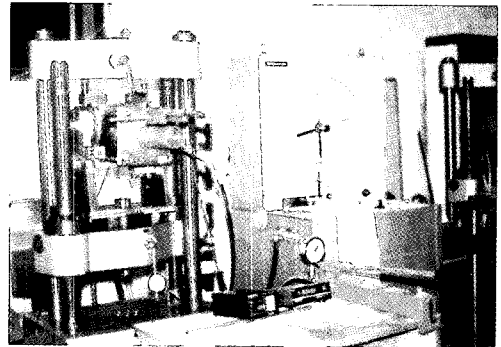


Fig. 5 Experimental apparatus for drawhead test

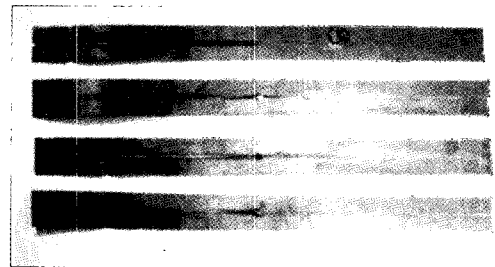


Fig. 6 Formed and drawn specimens

드를 사용하였으며 용접판개의 두께방향으로의 단차를 보정하기 위하여 높이가 다른 드로비드 두 개를 합체했다. 단일원형 드로비드의 반경은 5 mm이다. Fig. 4에서 제작된 비드 금형세트의 개략도를 보여주고 있다.

성형이나 인출된 시편의 변형률은 용접선을 따라서 3 mm 정도 떨어진 지점을 공구 현미경을 사용하여 측정하였다.

Fig. 5는 비드 시험장치를 보여주며, Fig. 6은 실험후의 시편을 보여주고 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 드로비드에서의 성형과 인출로 나누어서 연구를 수행하였다. 성형에서의 FEM해석은 개발한 SGTAS 와 상용코드인 DYNA3D로 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 상용프로그램의 해석을 위한 모델 생성 과정인 전처리과정(pre-processor)은 I-DEAS를 이용하여 모델링 했다.

두께가 0.8 mm인 무용접 시편과 두께가 0.8*0.8 mm 인 용접시편의 성형과정은 개발한 프로그램 SGTAS와 상용 프로그램 DYNA3D로 해석 하였고, 인출과정은 DYNA3D로써 해석하였다.

0.8*1.6 mm인 이중두께 용접시편의 성형, 인출과정은 DYNA3D로 해석하였다. DYNA-3D는 Belytschko-Tsay 4-node 쉘 요소를 사용하였다.

Fig. 7(a)는 원형 드로비드의 지그(jig) 형상 및 소재의 초기형상을 보여준다. Fig. 7 (b),(c),(d)는 SGTAS로

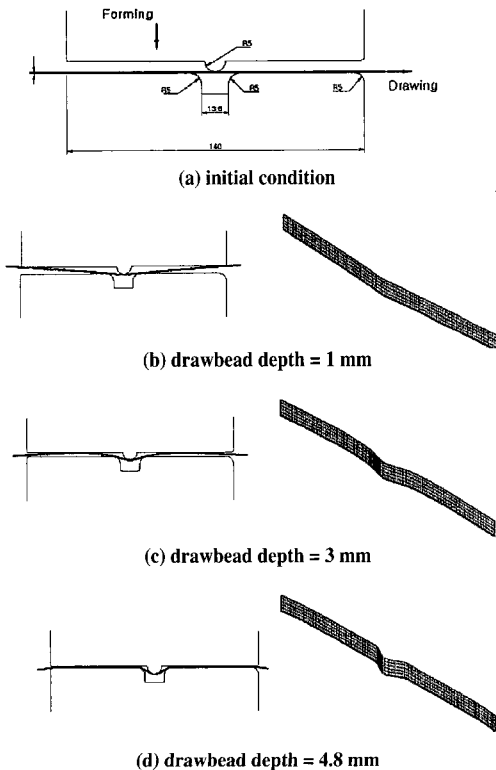


Fig. 7 Formed phenomena of 0.8*0.8 welded specimen for each forming depth

Table 2 Input data for calculation

Specimen	SGTAS		DYNA3D		
	NO	0.8	NO	0.8	0.8
Welded	*		*	*	
	0.8		0.8	1.6	
blank (node/element)	Brick element		Belytschko-Tsay shell element		
	1932	1932	671	671	690
	/800	/800	/600	/600	/630
	B · H · F(kgf)	300	400	300	400
Time Increment(s)	0.5		0.25		
Clearrance(mm)	1	1	1	1	2
Error Norm	0.0001				

해석한 각 단계별 시편의 형상을 나타내고 있다. 이들 형상들은 SGTAS에서 해석된 결과들을 별도로 개발된 AutoLISP 프로그램을 이용하여 AutoCAD에서 그려진 그림들이다. Fig. 7의 (b),(c),(d)의 왼쪽그림은 정면에서 급형과 블랭크의 형상을 나타낸 것이고, 오른쪽 그림은 블랭크의 3차원 형상이다. Table 2 에서는 SGTAS와 DYNA3D에서 해석을 위하여 사용된 입력 데이터들을 보여주고 있다.

4.1 성형 과정

Fig. 8 과 Fig. 9는 성형깊이(bead depth,앞으로 BD)가 4.8 mm일 때의 무 용접 시편에 대한 변형률을 lower skin과 upper skin에서의 값을 비교해서 나타낸 것이다. 여기서 upper skin은 드로비드 부위와 접촉하는 면이고 그 면의 변형률을 upper strain이라 표기하였으며, lower skin과 lower strain 은 그 반대를 의미한다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 드로비드 성형시 원형 드로비드와 접촉하는 부위에서의 upper skin 에서는 압축이 lower skin 에서는 인장이 발생하고 있으며, 드로비드 반대측에 위치한 하측 다이와 접촉하는 shoulder 부에서의 upper skin 에서는 인장이 lower skin 에서는 압축이 발생하고 있음을 알 수 있다. 실험결과와 해석결과는 서로

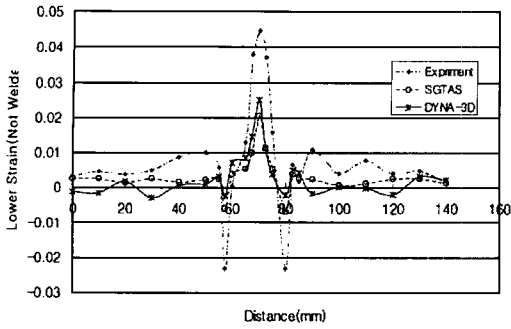


Fig. 8 Strain distribution on lower skin of specimen at BD=4.8 mm

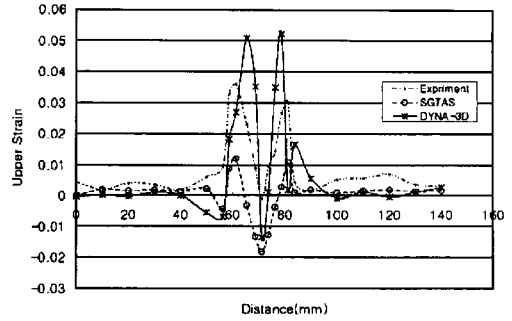


Fig. 11 Strain distribution on upper skin of 0.8*0.8 welded specimen at BD=4.8 mm

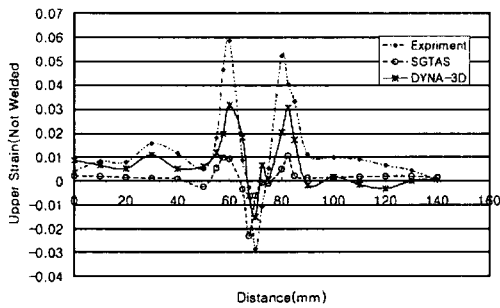


Fig. 9 Strain distribution on upper skin of specimen at BD=4.8 mm

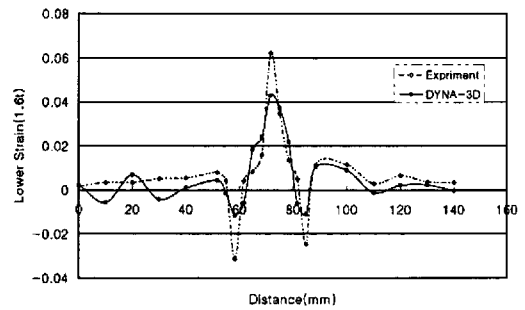


Fig. 12 Strain distribution on lower skin of 0.8*1.6 welded specimen at BD=4.8 mm

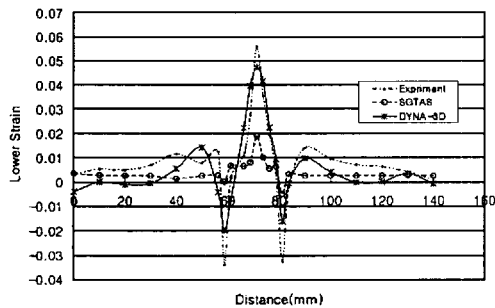


Fig. 10 Strain distribution on lower skin of 0.8*0.8 welded specimen at BD=4.8 mm

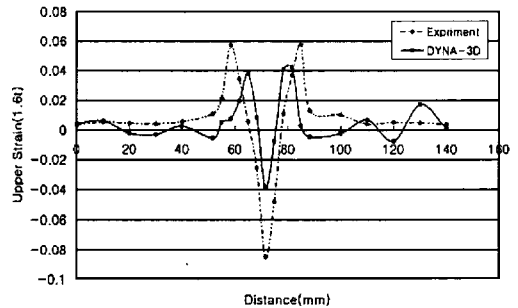


Fig. 13 Strain distribution on upper skin of 0.8*1.6 welded specimen at BD=4.8 mm

편차를 보이고 있다. 이 이유는 드로비드 내의 클리어런스, 마찰력 등의 작용에 의한 것이 실험과 해석에서의 적용이 실제와 동등하게 적용하기 어려움에 기인한다. 그렇지만 개발 프로그램인 SGTAS와 상용프로그램인 DYNA3D의 결과는 그 경향이 유사하게 나타나고 있어

본 연구에서 개발한 FEM 프로그램인 SGTAS를 이용하여 드로비드 성형과정을 해석하여 성형과정을 예측할 수 있다. Fig. 10, Fig. 11은 0.8 mm 두께를 가진 용접판재의 lower strain과 upper strain을 나타낸 것이다. 용접판재의 경우에도 드로비드 성형과정에서의 변형률 특성은

동일한 경향을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 12, Fig. 13 은 두께 0.8*1.6 용접판재의 두께 1.6 mm인 부분의 두 면에서의 변형률에 대한 선도들이다. 일반적으로 용접판재의 경우 드로비드와 접촉하는 부위에서의 변형률이 무용접판재에 비하여 더 크게 나타나고 있다.

이는 용접부가 모재에 비하여 드로비드 성형에 대하여 더욱 크게 저항을 하여 그 주변의 모재의 변형이 더욱 크게 나타난 것으로 생각된다.

4.2 인출 과정

드로비드 인출과정에서 인출특성에 영향을 미치는 대표적인 인자는 드로비드의 형상, 치수, 블랭크 가압력, 클리어런스 및 마찰계수 등이 있다.

인출과정은 Fig. 4에서처럼 먼저 성형(Forming)을 4.8 mm정도 한 후에 인출(Drawing)을 하였다.

인출과정에 대한 해석은 무용접판재, 용접판재에 대하여 DYNA3D로써 해석하여 그 결과를 검토하였다.

Fig. 14는 인출길이(drawing length, 앞으로 DL)가 140 mm일 때의 무용접 시편의 두께변형률 분포이다.

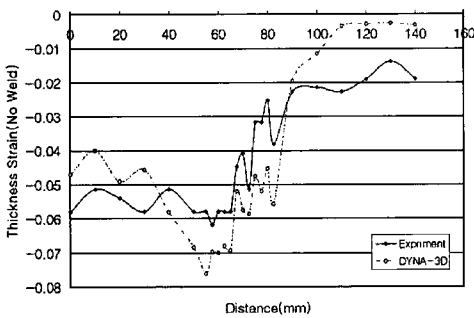


Fig. 14 Thickness strain distribution of one piece specimen at DL=140 mm

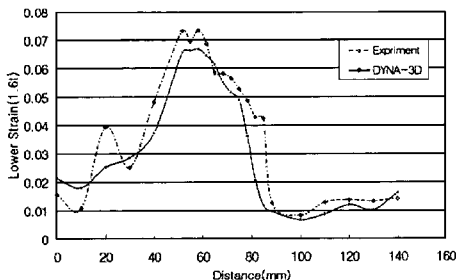


Fig. 15 Strain distribution on lower skin of 0.8*1.6 welded specimen at DL=50 mm

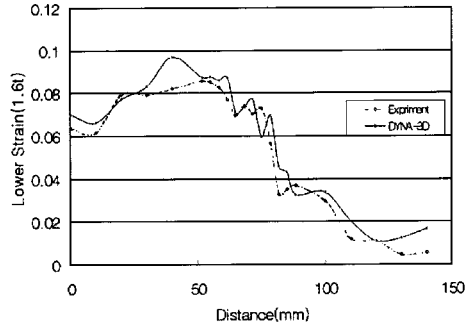
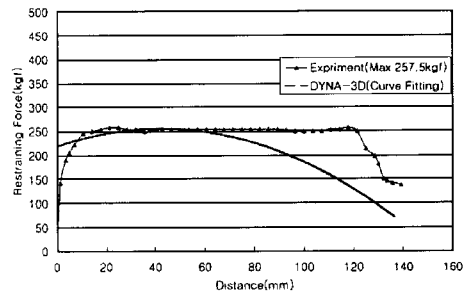
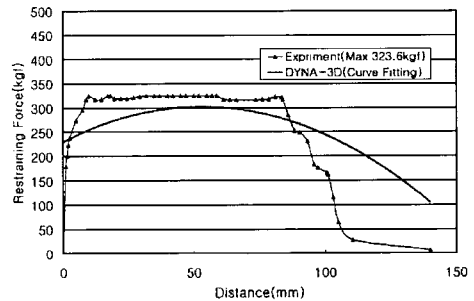


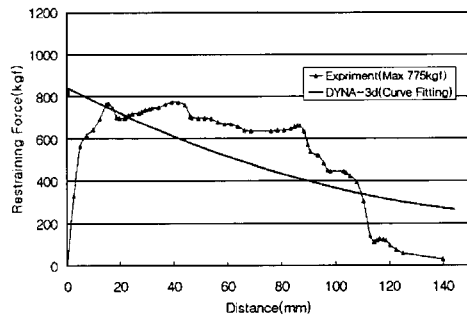
Fig. 16 Strain distribution on lower skin of 0.8*1.6 welded specimen at DL=140 mm



(a) Not welded specimen



(b) 0.8*0.8mm welded specimen



(c) 0.8*1.6mm welded specimen

Fig. 17 Restraining forces up to drawing length = 140 mm

Fig. 15는 인출길이가 50 mm일 때의 0.8*1.6용접시편 중 두께 1.6 mm부분의 lower strain 분포를 나타낸 것이다. Fig. 16은 인출길이 140 mm일 때의 0.8*1.6용접시편의 두께 1.6 mm부분의 lower strain 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 14에서 두께변형률은 인장력이 작용한 결과 인출 길이에 걸쳐서 음의 값을 보여주고 있으며 해석의 경우보다 실험의 결과 값이 적게 나타나는 경향을 보였다.

Fig. 15, 16을 검토하여 보면 드로비드 성형과정에서 형성된 변형률이 실험장치를 빠져나오면서 드로비드 인출길이 변화에 대하여 변화하고 있음을 알 수 있다. 또한 인출이 계속 진행되면서 그 값이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17의 (a), (b), (c)는 세 종류의 시편들 각각에 대하여 인출길이에 따른 인출력(Restraining Forces)을 비교한 것이다. 비교를 위해 DYNA3D의 인출력의 해석결과는 커브 핏팅(curve fitting)된 것이다. 무용접판재의 경우 드로비드를 통과할 때 인출력이 거의 일정하게 유지되고 있으나 용접판재의 경우 드로비드를 통과하면서 인출력이 더욱 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 용접판재의 두께비가 커질수록 인출력도 실험한 경우와 해석한 경우 모두 증가하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원형 드로비드에 의한 용접된 박판재의 성형과 인출특성을 실험과 FEM프로그램을 통한 해석 결과와 비교하였다. 유한요소 프로그램인 SGTAS를 개발하여 무용접 판재 및 동일 두께 조합 용접판재의 경우에 대하여 드로비드에서의 성형 특성에 대하여 소재의 변형형상 및 변형률을 구하여 보았다. 무용접 판재의 인출과정과 이종 두께 조합 용접판재에 대한 성형과정 및 인출과정은 상용프로그램인 DYNA3D를 사용하여 실험과 비교해 보았고, 단차 문제 등을 고려하여 해석한 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 성형시 드로비드 부와 그 주위의 변형률이 크게 나타났고, 플랜지부는 큰 변화가 없었다. 실험 치와 해석 치의 차이는 크지 않았다.

(2) 동일두께 조합 용접판재의 경우 드로비드 성형 및 인출과정에서 무용접판재와 유사한 결과 특성을 보인다. 따라서 동일두께의 용접판재에서의 드로비드 성형 및 인출 특성은 모재를 통하여 예측 가능하다.

(3) 인출시 실험과 FEM해석에서 드로비드 부를 통과한 시편 부위의 변형률 값이 크게 나타났으며, 실험치와 해석

치가 다소차이는 보이나 그 경향은 비교적 일치하였다.

(4) 인출력은 무용접판재의 경우와 동일두께 조합 용접판재의 경우 일정한 경향을 보였으나 두께 조합차가 커질수록 그 편차도 증가한다.

(5) 용접판재의 드로비드 성형 및 인출 시에는 용접판재의 두께차이를 단차 드로비드를 사용하여 변형률의 변화를 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- (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) 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 905410 533 4, pp.681~685.
- (5) 김영석, 김기수, 1991, "드로비드의 마찰구속에 관한 연구(1)". 대한기계학회지, 추계학술대회 논문집
- (6) 박원배, 김창만, 김낙수, 서대교, 전기찬, 1996, "계단형 드로비드에 의한 판재의 인출특성에 관한 연구". 한국소성가공학회지 제5권 제2호, pp.130~137.
- (7) C.M. Kim, Y.S. Im, Y.M. Heo, N.S. Kim, G.C. Jun, D.G. Seo, 1997, "Finite-element analysis and experimental verification for drawbead drawing processes", J. of Materials Processing Technology 72, pp.188 ~ 194.
- (8) 이재우, 금영탁, 1998, "박판성형공정의 유한요소해석을 위한 드로비드 전문모델 개발(1부:실험, 제2부:모델링)", 한국소성가공학회지, 제7권 제1호, pp.3~22.