

축대칭 벌징형 하이드로포밍 공정에 대한
이론 및 실험적 연구

양 동열*, 최 선준**, 정 완진*

Theoretical and Experimental Study of the Axisymmetric Fluid
Pressure-Driven Hydroforming Process

Dong-Yol Yang*, Sun-Jun Choi**, Wan-Jin Chung*

ABSTRACT

The study is concerned with the theoretical and experimental investigation of axisymmetric fluid pressure-driven hydroforming of sheet metal by forming over the die cavity. The rigid-plastic finite element method is employed to calculate the stress and strain distribution. The effect of blank size and die radius is also studied in the finite element analysis. Experiments are carried out for hydroforming of cold-rolled steel sheets under various process conditions. The computational results are compared with the experimental results for the forming pressure vs. pole displacement relations and strain distributions. Comparison has shown that theoretical predictions by the finite element method are in good agreement with the experimental observations.

Thus, it is shown that the rigid-plastic finite element method is effectively used in the analysis of axisymmetric fluid pressure-driven hydroforming process.

* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

** 정회원, 현대정공(주)

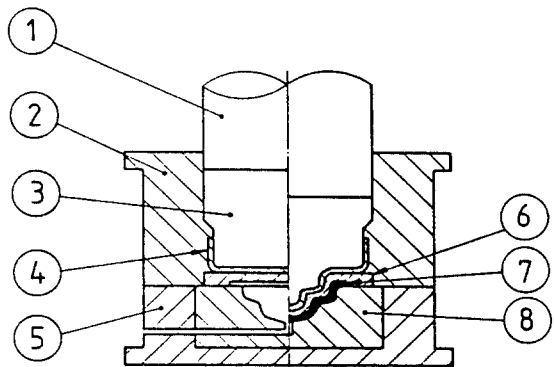
기호설명

- | | |
|--|---|
| A° : 변형전 면적 | $U, \Delta U$: 변위 및 수정변위 |
| h : 가공 경화율 (workhardening rate in slope) | $\bar{U}, \Delta \bar{U}$: 전체 절점변위 및 전체수정변위 |
| H : 형상함수 (shape function) | $U^{(m)}, U^{(n)}$: 한 요소내에서의 변위 및 절점변위 |
| p : 유체의 압력 | V° : 변형전 체적 |
| R : 수직이방성계수 (Lankford value) | v, w : r 및 z 방향의 변위 |
| R_d : 다이곡률반경 | β : 감속계수 |
| S_s : 시편의 반경 | ϵ : 매우 작은 양의 상수 |
| r_o, r : 변형전과 변형후의 r 좌표 | $\bar{\epsilon}, d\bar{\epsilon}$: 유효변형도 (effective strain) 및 유효변형도 증분 |
| s_o, s : 변형전과 변형후의 요소길이 | Φ : 전체 범함수 |
| t° : 변형전 시편의 두께 | $\phi^{(m)}$: 한 요소의 범함수 |
| t' : 국소좌표계 (local coordinate) | k : 큰 양의 상수 |
| t : 외력 | μ : Coulomb 마찰계수 |
| t^d, t^p : 금형의 반력 및 유체압력에 의한 외력 | $\bar{\sigma}$: 유효응력 (effective stress) |
| T : 좌표변환행렬 | |

1. 서론

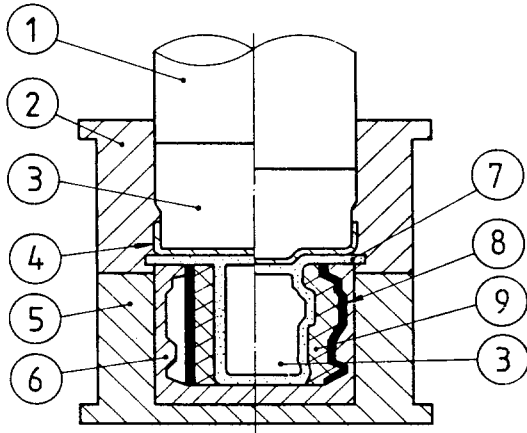
일반적인 프레스 작업으로 박판성형을 하려면 만 들고자 하는 형상에 따른 펀치와 다이가 필요하다. 그러나 하이드로포밍(hydroforming)에서는 펀치와 다이중 어느 하나를 압력유로 채워진 유체실(fluid chamber)로 대체한다. 하이드로포밍은 그 적용 형태에 따라 다음과 같이 두가지로 나눌 수 있다.

첫째의 경우에는 유체실이 펀치의 역할을 하는 경우로써 압력유와 고무판이 펀치대용으로 사용된다. 이 방법은 유체가 펀치 역할을 하는 벌징형 하이드로포밍 공정으로 음각이진 박판 성형품을 제작할 수 있다. Fig. 1-a에서와 같이 우선 압력유에 압력이 가해지면 이 압력이 고무판에 전해진다. 고무판에 가해진 압력에 의해 고무판과 접촉하고 있는 박판이 움직여 다이와 같은 모양으로 성형이 되는 데 박판의 크기와 모양, 그리고 다이의 반경등에 의해서 박판이 다이에 빨려 들어가는 양이 결정된다.



No.	DESCRIPTION	No.	DESCRIPTION
1	Piston	5	Die supporter
2	Cylinder	6	Wear pad
3	Active fluid	7	Work piece
4	Diaphragm	8	Die

Fig. 1-a



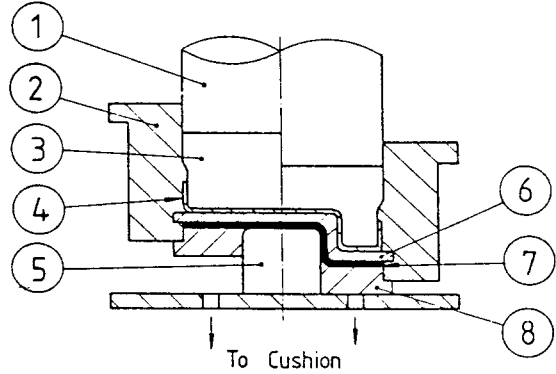
No.	DESCRIPTION	No.	DESCRIPTION
1	Piston	6	Die
2	Cylinder	7	Rubber
3	Active fluid	8	Work piece
4	Diaphragm	9	Rubber ring
5	Die supporter		

Fig1-b

이때 다이 반경에 비해 박판이 너무 작으면 블랭크 홀더 부분에 주름이 생기고 다이 반경에 비해 박판이 너무 크면 성형중에 찢어질 수 있다.

약간 변형된 경우로 Fig1-b와 같이 압력유로 가득 찬 고무자루가 원통형이나 사각형으로 생긴 시편안에 위치하고 시편 바깥에 성형하고자 하는 모양의 다이가 위치하여 압력을 받은 시편이 다이의 형상대로 성형되는 것으로 별칭형의 하이드로포밍이라 한다.

두번째의 경우는 Fig1-c에서와 같이 유체실이 다이역할을 하는 경우로써 고무판이 유연성이 있는 다이로써 사용된다. 이 경우는 유체실 내부의 압력을 조절할 수 있는 유압회로를 별도로 부착하여 성형중에 압력을 펀치의 행정에 따라 제어한다. 유체실내의 압력이 너무 낮으면 주름현상이 생기고 너무 높으면 찢어지는 경우가 생긴다. 또한 유체실 내의 압력조정으로 완성품의 두께 및 형상을 어느 정도 조절할 수 있다.



No.	DESCRIPTION	No.	DESCRIPTION
1	Piston	5	Punch
2	Cylinder	6	Wear pad
3	Active fluid	7	Work piece
4	Diaphragm	8	Draw ring

Fig1-c

하이드로포밍은 여러가지 박판 제품제작에 적용되고 있는 데 다음과 같은 장점이 있다. [1,2]

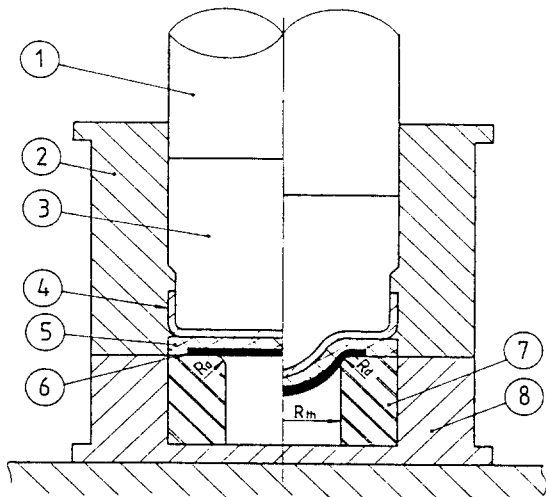
첫째 일반적인 프레스 성형법에서는 펀치와 다이 간의 공차가 엄격하여 제작상 어려울 뿐 아니라 제작비도 비싸지나 하이드로포밍 공정을 사용하면 공차를 고려할 필요가 없으므로 금형제작비가 절감되며 공정중에 금형이 집중하중을 받지 않으므로 하급재료도 사용가능하다.

둘째 일반적인 프레스 성형법으로 가공이 곤란한 형상의 제품도 가공할 수 있으며 재료가 국부적으로 집중하중이 걸리지 않으므로 완성품의 두께가 균일하여 기계적 성질이 양호하다.

이 성형 방법의 단점으로는 전 시편에 균등한 힘을 가해야 하므로 일반적인 성형법에서 사용되는 프레스보다 용량이 큰 프레스가 필요하며 작업속도가 느리고 압력을 제어하기 위한 추가적인 장비가 필요한 것이 지적된다.

하이드로포밍의 세가지 종류 중에서 특히 별칭형 하이드로포밍 방법의 경우 축방향으로 힘을 가하여 성형하는 방법이 있다. [3-5] 이 경우에 대해서는

D. M. Woo[6]가 대칭적인 박판성형의 일반적인 해법에 의하여 우선 성형모양을 가정한 후 이 가정된 변위로부터 변형율을 구하고 소성이론식과 재료 특성식을 사용하여 응력을 구한 뒤 이 응력이 평형 방정식을 만족시키도록 계속 성형모양을 가정하여 이론적으로 해석하였다. 또한 유체실이 다이역할을 하는 경우가 유사한 공정으로 하이드로메카니컬 드로잉(hydromechanical drawing) [7]이나 다이에 있는 압력유가 딥 드로잉(deep-drawing)시 윤활제 역할을 하는 공정등[8]이 이론적으로 해석되었다. 그러나 Fig1-a와 같이 유체실이 유연성 있는 편치 역할을 하는 경우를 이론적으로 해석한 연구는 아직 알려진 바가 없다. 본 연구에서는 하이드로포밍 공정 중 유체실이 편치의 역할을 하는 경우의 이론적 해석의 첫 단계로 Fig2와 같이 축대칭 하이드로포밍 문제를 J. H. Kim[9]에 의해 제안된 축대칭강소성 유한요소법을 이용하여 이론적으로 해석하고 이에 따른 실험을 수행하여 그 결과를 비교검토하고자 한다.



No.	DESCRIPTION	No.	DESCRIPTION
1	Piston	5	Wear pad
2	Cylinder	6	Work piece
3	Active oil	7	Die
4	Rubber diaphragm	8	Die holder

Fig. 2

2. 이론해석

2.1 축대칭 강소성유한요소법

J. H. Kim[9]는 축대칭 박판성형에 대하여 해의 유일성과 형상변화 효과를 고려하여 다음과 같은 변분식을 유도하였다. 즉 모든 동적가용 변위장 (kinematically admissible displacement field) 중에서 다음과 같은 범함수를 최소화하는 변위장이 정해이다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \phi_1 - \phi_2 \\ &= \int_{A^0} \left(\sigma d\bar{\epsilon} + \frac{1}{2} h (d\bar{\epsilon})^2 \right) t^0 dA - \\ &\int_{A^0} \sigma^r U t^0 dA \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$t = \begin{bmatrix} t_r \\ t_z \end{bmatrix}$$

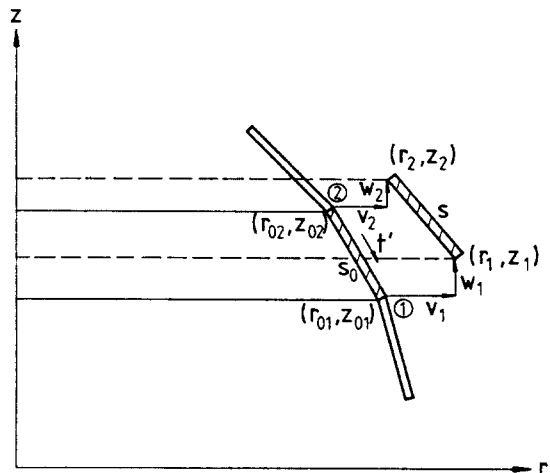


Fig. 3

축대칭박판공정을 해석하기 위해서 전체형상을 n 개의 축대칭 요소로 분할하였다 (Fig. 3). 한 요소 내에서 변위장은 다음 식과 같이 주어진다.

$$U^{(m)} = \begin{bmatrix} V \\ W \end{bmatrix} = H U^{(m)} \quad (2)$$

여기서 $U^{(m)}$ 은 절점변위이며 H 는 형상함수를 나타낸다.

$$U^{(m)} = \begin{bmatrix} V_1 \\ W_1 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1-t'}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1-t'}{2} \end{bmatrix}$$

이 때 각 요소의 범함수의 합이 전체 범함수가 된다.

$$\Phi = \sum_{m=1}^n \phi^{(m)} = \sum_{m=1}^n (\phi_1^{(m)} - \phi_2^{(m)}) \quad (4)$$

여기서

$$\phi_1^{(m)} = \int_{A^{(m)}} \left(\bar{\sigma} d\bar{\epsilon} + \frac{1}{2} h (d\bar{\epsilon})^2 \right) t^o dA,$$

$$\phi_2^{(m)} = \int_{A^{(m)}} t^T H U^{(m)} t^o dA$$

여기서 유효응력 $\bar{\sigma}$ 와 유효변형도증분 $d\bar{\epsilon}$ 는 Hill [10]에 의하여 제안된 2차 항복이론에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 - \frac{2R}{1+R} \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

$$d\bar{\epsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{d\epsilon_1^2 + \frac{2R}{1+R} d\epsilon_1 d\epsilon_2 + d\epsilon_2^2} \quad (6)$$

이 때 한 단계동안 변형율텐서(rate of deformation tensor)의 비가 일정한 비를 유지한다고 한다면 판재의 주변형도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon = \begin{bmatrix} d\epsilon_r \\ d\epsilon_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \frac{s}{s_0} \\ \ln \frac{r}{r_0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(4)의 범함수를 최소화하는 증분변위장을 다음 식과 같이 구한다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial U} = \sum_{m=1}^n \frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial U^{(m)}} = \sum_{m=1}^n \frac{\partial \phi_1^{(m)}}{\partial U^{(m)}} - \sum_{m=1}^n \frac{\partial \phi_2^{(m)}}{\partial U^{(m)}} = 0 \quad (8)$$

식(8)은 비선형이므로 Newton-Raphson 법을 이용하여 다음과 같이 선형화하여 반복계산에 의하여 해를 구한다.

$$K \Delta U = F - H \quad (9)$$

여기서

$$K = \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial \bar{U} \partial \bar{U}}, \quad F = \frac{\partial \phi_1}{\partial \bar{U}}, \quad H = \frac{\partial \phi_2}{\partial \bar{U}}$$

이 때 반복계산에서 변위 \bar{U} 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\bar{U} = \bar{U} + \beta \Delta \bar{U} \quad (10)$$

여기서 β 는 해의 발산을 막기 위한 감속계수로 0에서 1사이의 값을 가진다. 계산도중에 다음의 판정기준을 만족하면 해가 수렴한 것으로 간주하였다.

$$\frac{\|\Delta U\|}{\|U\|} < \epsilon \quad (11)$$

2-2 별징형 하이드로포밍에의 적용

2.2.1 외력경계조건

하이드로포밍에서 박판에 작용하는 외력으로는 유압에 의한 외력 그리고 박판과 금형 사이에서 작용하는 외력이 존재한다. Fig.4에서 그 각각을 t^p, t^d 으로 표시하였는데 t^d 는 다음과 같이 표시된다.

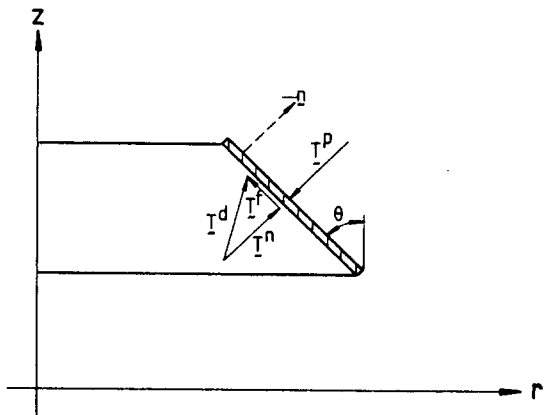


Fig. 4

$$t^d = t^n + t^f \quad (12)$$

여기서 t^n 은 금형에 수직방향인 반력이며 t^f 는 마찰력에 의한 금형표면에 접하는 방향의 반력이다. 수정된 Coulomb 마찰법칙에 따르면 다음 식과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$t^f = -\mu |t^n| \tan^{-1}(k |U_{\bar{r}}|) e_{\bar{r}} \quad (13)$$

여기서

$$U_{\bar{r}} = U_r - (U_r \cdot e_{\bar{z}}) e_{\bar{z}}$$

여기에서 $e_{\bar{r}}$ 는 박판이 금형에 대해 미끄러지는 방향이다. t^d 를 절점력으로 나타내면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial \phi_{\bar{m}}}{\partial U_{\bar{m}}} = \int_{A_{\bar{m}}} H^T t^p t^d dA + t^d \quad (14)$$

하이드로포밍공정의 유한요소해석시 변형후에 유압 p 가 작용할 때 유압에 의한 외력은 다음과 같이 표시된다.

$$t^p = -pn_p \quad (15)$$

여기서 n_p 는 요소평면에 수직이고 압력이 작용하는 방향을 향한 단위벡터이다. 식 (12)의 첫 항에 (13) 식을 대입하여 적분하면 다음과 같은 식을 얻는다. 여기서 θ 는 변형후에 요소가 r 축에 대해 이루는 각도이다.

$$\int_{A_{\bar{m}}} t^p H dA = -\frac{1}{3} P \pi S^{(m)} \begin{bmatrix} (2r_1 + r_2) \cos \theta \\ (2r_1 + r_2) \sin \theta \\ (r_1 + 2r_2) \cos \theta \\ (r_1 + 2r_2) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

2. 2. 2 기하학적 경계조건

박판금속성형은 소재와 금형사이의 접촉에 의해 성형이 이루어진다. 따라서 이러한 접촉조건을 가지는 박판성형을 수치적으로 해석하기 위해서는 적절한 접촉처리 방법이 필요하다. 접촉처리 방법에는 여러가지가 있으나 기하학적으로 경계조건을 처리하는 방법이 금속성형 해석에 널리 사용되고 있다. 금속성형의 수치해석에서 금형의 형상에 의한 기하학

적 경계조건을 만족시켜야 한다. 기하학적 경계조건을 만족시키기 위해 접촉절점에 대하여 국부좌표계 (\bar{r}, \bar{z}) 를 Fig. 5와 같이 정의한다. 먼저 현재의 절점 p 의 위치에 가장 가까운 금형표면위의 위치 Q 를 구한다. 이 때 방향벡터 $e_{\bar{r}}, e_{\bar{z}}$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

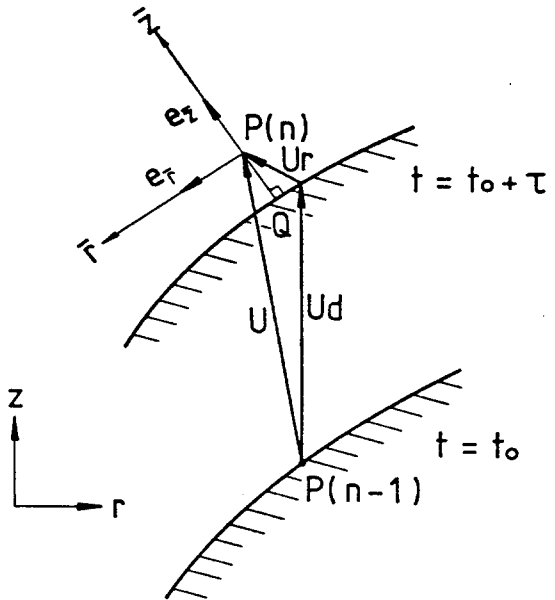


Fig. 5

$$e_{\bar{r}} = \frac{U_{\bar{r}}}{|U_{\bar{r}}|}, \quad e_{\bar{z}} = \frac{n(Q)}{|n(Q)|} \quad (17)$$

여기서

$$U_{\bar{r}} = U_r - (U_r \cdot e_{\bar{z}}) e_{\bar{z}}, \quad U_r = U - U_d$$

이며 $n(Q)$ 는 Q 에서의 금형 바깥방향으로의 수직 벡터이다. 이 때 좌표변환행렬은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\Delta U = T \Delta \bar{U} \quad (18)$$

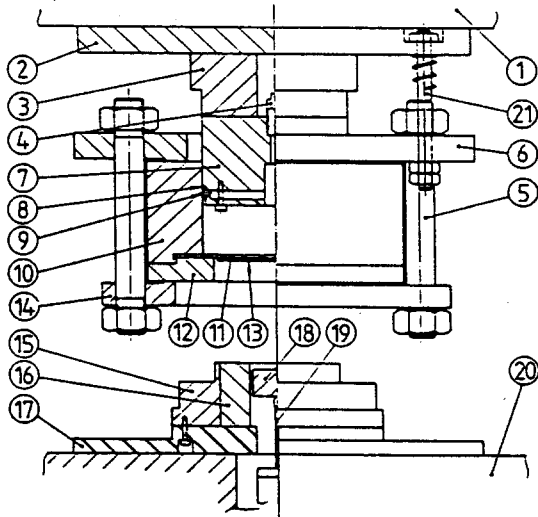
유한요소방정식 (9)를 좌표변환행렬을 이용하여 변환하여 다음식을 얻는다.

$$\bar{K} \Delta \bar{U} = \bar{H} - \bar{F} \quad (19)$$

여기서

$$\bar{K} = T^T K T, \quad \bar{H} - \bar{F} = T^T (H - F)$$

식(19)의 유한요소방정식에서 절점p의 Z 방향의 수평변위 $\Delta U_z(P)$ 를 균형표면 위의 점Q의 Z 좌표 $Z(Q)$ 로 규정하여 유한요소방정식의 해를 구한다. 매 반복계산마다 접촉절점에 대해 이와 같은 과정을 반복하여 기하학적 경계조건을 만족시킨다.



No	DESCRIPTION	No	DESCRIPTION	No	DESCRIPTION
1	Bolster	8	Back up ring	15	Die support
2	Snap head	9	Oil ring	16	Die
3	Piston head	10	Cylinder	17	Bolton plate
4	Pressure gauge	11	Diaphragm	18	Protective plate
5	Bolt	12	Body ring	19	Displacement transducer
6	Plate	13	Wear pad	20	Base plate
7	Piston	14	Ring plate	21	Support guide

Fig. 6

3. 실험

금속박판의 Hydroforming공정에 대한 수치해석과 비교하기 위하여 박판재료의 Hydroforming실험을 수행하였다. 실험은 400ton 유압프레스로 행하였다. 실험장치는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 프레스에 붙여 사용할 수 있도록 독립적인 장치로 만들었다. 이 장치는 세 부분으로 크게 나눌 수 있는데 프레스 볼스터(bolster)부분에 장착되어 압력을 가하는 피스톤(piston)부분과 압력용기 역할을 하는 실린더(cylinder)부분 그리고 프레스 밀판(base plate)에 장착되어 있는 다이(die)부분등으로 구성되어 있다.

피스톤 부분과 실린더 부분은 지지대로 연결되어 있어서 성형한후 피스톤 부분과 실린더부분이 동시에 위로 올라가 시편의 탈착을 용이하게 하였다. 고무판(rubber diaphragm)에 붙어 있는 마모판(wear plate)은 고무판을 보호함과 동시에 블랭크 홀더의 역할을 한다. 다이는 SBC45재질로 선반가공한 후 샌드 페이퍼로 표면을 깨끗이 하였고 클램핑(clamping)부의 다이반경이 3mm, 6mm, 9mm, 15mm인 4개를 가공하였다. 압력의 측정은 압전지 현상을 이용한 고압용압력 게이지를 사용하였고 변위측정은 strain gage형의 선형변위측정기를 사용하였다.

실험에 사용된 재료는 0.8mm두께의 냉간압연된 강판으로 단순인장실험으로부터 구해진 유효변형률-유효응력곡선은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 53.96 \epsilon^{0.197} \text{ Kg f/mm}^2 \quad (20)$$

또 이때 구해진 수직이방성계수 R은 1.463이다. 시편은 박판재료를 박판절단기(shearing machine)으로 외곽을 원형에 가깝게 가공한 후 선반에서 정확한 치수로 가공하였다. 시편의 반경은 45mm, 50mm, 55mm의 세가지를 사용하였다. 마모판과 시편 사이 그리고 다이와 시편 사이에는 윤활제로 grease를 사용하였다. 다이와 시편사이의 마찰계수는 C. H. Lee 등(11)의 마찰계수 측정장치를 사용하여 측정된 결과 0.14를 얻었다.

4. 결과 및 토론

Fig. 7은 시편반경이 45mm이고 다이등근부분반경이 9mm인 조건에서 극점의 높이가 같게 성형된 하이 드로포밍과 딥 드로잉의 이론해석결과를 변형형상에 대해 서로 비교한 것이다. 이 때 딥 드로잉시의 조건은 펀치반경이 20mm이고 블랭크 홀딩력은 500kgf로 하였다. 펀치와 시편사이의 마찰계수는 마찰 측정 장치에서 구한 0.14를 이용하였다. Deep-Darwin g시의 변형형상은 펀치와 다이사이의 부분이 약간 안쪽으로 굽은 형상이 되는 데 비해 Hydroforming의 경우에는 균일한 압력이 전 시편에 작용하므로 바깥쪽으로 굽은 형상이 됨을 알 수 있다. 위와 같은 조건하에서 두께변형도를 Fig. 8에서 비교하였다.

이 계산결과로부터 Deep-Drawing시는 펀치에 마찰이 존재하면 극점에서 약간 벗어난 지점에서 두께가 가장 얇아지나 하이드로포밍의 경우는 극점에서 두께가 가장 얇아지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 보면 두께의 변화율에 대한 최대치가 하이드로포밍의 경우가 완화되어 있음을 알 수 있다.

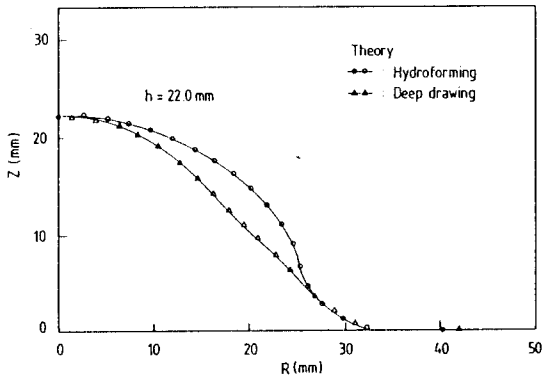


Fig. 7

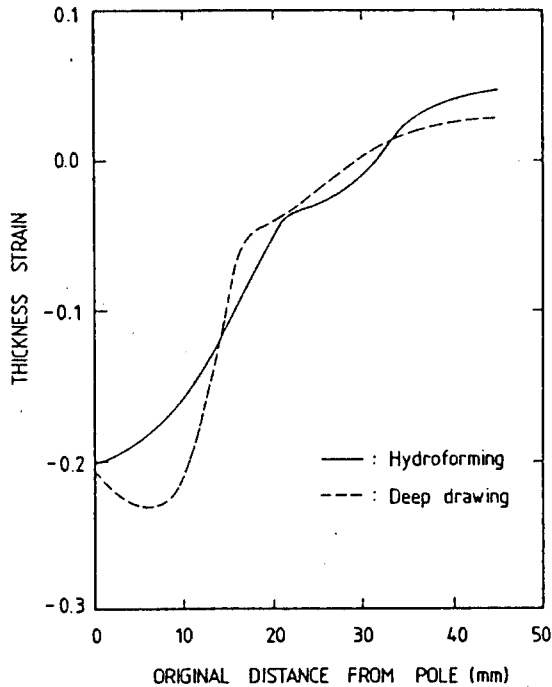


Fig. 8

Fig. 9는 시편의 반경에 따라 압력에 대한 극점의 변위의 변화를 보여 준다. 시편의 반경은 45mm, 50mm, 55mm 세가지를 사용하였는데 반경이 크면 같은 압력하에서 극점의 변위가 작은 것을 알 수 있다.

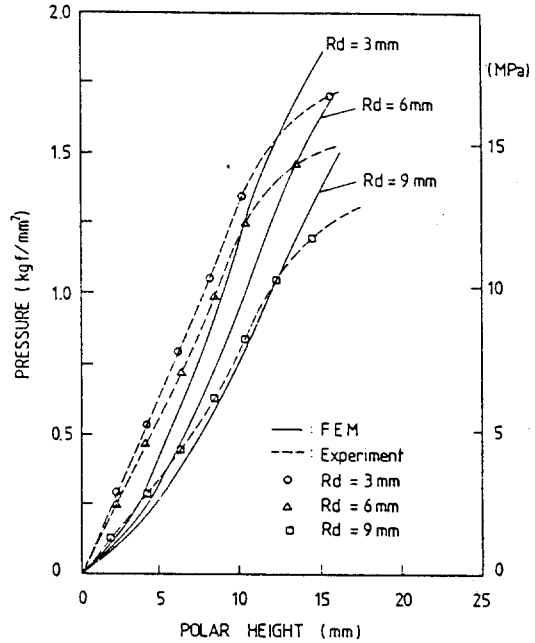


Fig. 9

이 때 압력이 작을 때는 시편반경의 영향이 거의 나타나지 않으나 압력이 커지면 시편반경의 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 초기에는 계산결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있지만 압력이 어느 정도 커지면 실험결과와 매우 다른 양상을 나타낸다. 이는 실험에서는 압력이 그 정도에 이르면 주름현상(wrinkling)이 발생하며 이를 본 이론해석에서는 고려하지 못한 것이 주요인이라고 생각된다. 또한 실제의 경우 마찰계수가 장소에 따라 다르고 다이 라운드 부근에서 마찰계수가 측정치보다 증가할 수 있으리라 판단된다. 클램핑부의 다이반경의 변화에 따른 압력에 대한 극점거리의 관계가 Fig. 10에 나타나 있다. 계산과 실험 둘 다 다이반경이 클수록 같은 압력에 대하여 극점변위가 큰 것을 알 수 있다. 반경이 비교적 작은 경우에 ($Rd=3mm, 6mm$) 굽힘효과가

있으리라 생각되나 본 연구에서는 막막모형(Membrane element model)을 사용하였기 때문에 얼마간의 오차가 있으리라고 여겨진다.

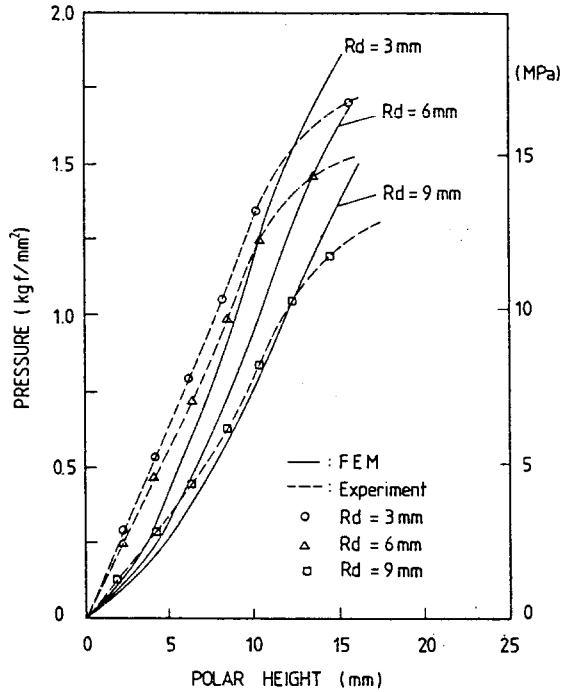


Fig. 10

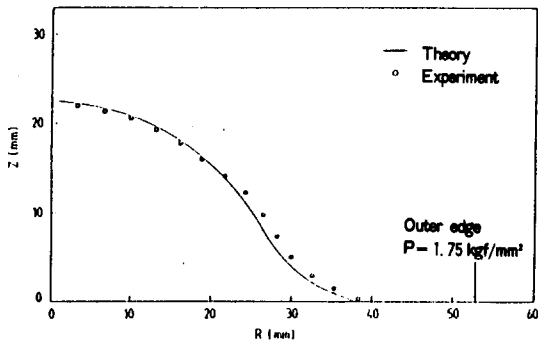


Fig. 11

Fig. 11은 성형압력이 1.75 kgf/mm^2 인 경우에 변형 형상에 대해 이론해석결과와 실험을 서로 비교한 것인데 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 12(a, b, c)에서는 극점변위가 20.95 mm 일때 반경방향, 원주방향 및 두께방향의 변형도 분포를 각각 비교 하였는데 해석결과와 실험결과가 서로 경향과 크기에 있어서 대체

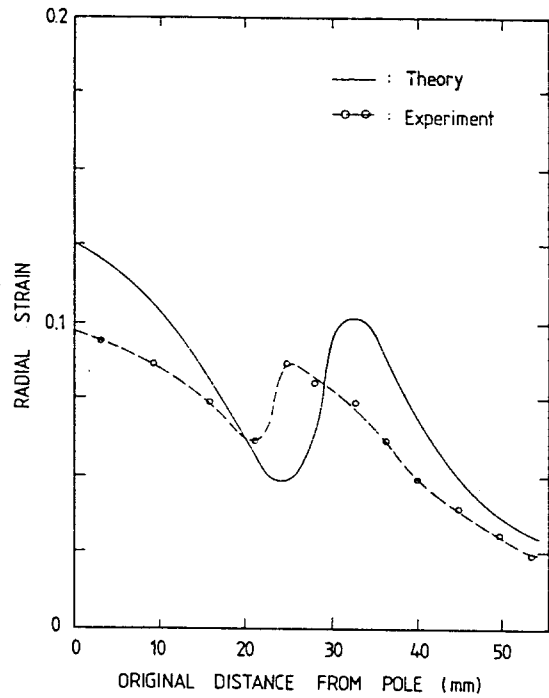


Fig. 12-a

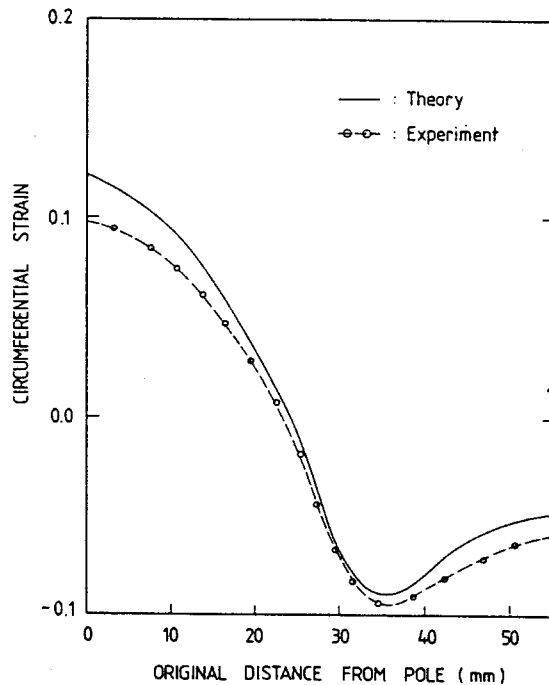


Fig. 12-b

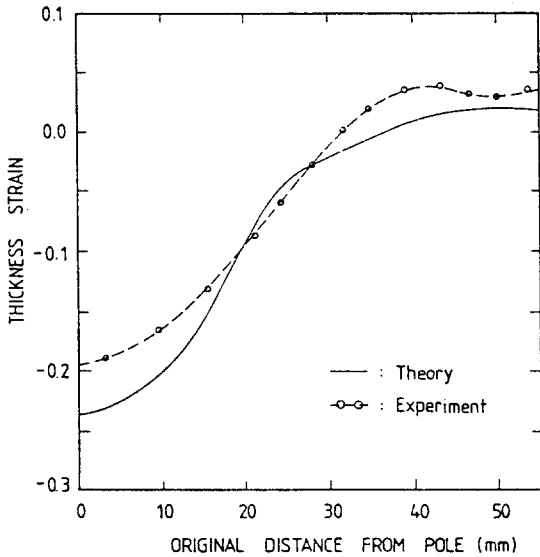


Fig. 12-c

로 잘 일치 하는 편이나 중심부에서 약간의 오차를 보이고 있다. 이러한 오차는 보다 실제에 가까운 주물현상의 고려, 마찰계수와 유한요소 모형의 개선에 의해 최소화 시킬 수 있을 것으로 보여진다.

5. 결론

박판금속의 축대칭 벌징형 하이드로포밍 공정을 강소성유한요소법으로 해석하였으며 이에 따른 실험을 수행하여 이론계산결과와 실험결과를 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 유체압력과 극점변위와 변형형상 그리고 변형도 분포등에 대하여 계산결과와 실험결과를 비교한 결과 성형의 초기부분에서는 비교적 좋은 결과를 얻었다.

2. 하이드로포밍시 압력에 대한 극점변위의 진행은 시편의 반경이 작을수록 또 클램프부에서의 다이반경이 클수록 커진다.

따라서 성형초기에 대해서는 본 이론해석이 유용한 변형예측방법이 될 수 있음을 알 수 있다. 압력이 어느 정도에 이르면 주물현상이 발생하며 이후의 변형형상을 정확히 예측하기 위해서는 이를 고려할 수 있는 해석방법이 요구된다. 또한 마찰계수를 보다

정확히 고려하고 굽힘효과를 고려할 수 있도록 유한요소 모형의 개선도 필요한 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. A. A. vezzani, 1964, "Manual of instruction for die design", SME
2. Verson Co., 1982, "Version hydroforming process"
3. D. M. Woo, 1978, "Development of a bulge process", Sheet Metal Industries, Vol. 55, pp. 623-634
4. M. M. Al-Makky and D. M. Woo, 1983, "Bulge forming of hollow-ware", Sheet Metal Industries, Feb., pp. 111-113
5. T. Ueba, 1983, "Differential gear casings for automobiles by liquid bulge forming process", Part 1-2, Sheet Metal Industries, March, pp. 181-185, April, pp. 220-224
6. D. M. Woo, 1973, "Tube bulging under internal pressure and axial force", J. of Engineering Materials and Technology, Oct., pp. 219-223
7. E. Buerk, 1967, "Hydro-mechanical drawings", Sheet Metal Industries, Vol. 44, pp. 182-188
8. Y. Kagusa, N. Nozaki and K. Kondo, 1961, "Pressure lubricated deep drawing", Part 1-2, Bull. of JSME, Vol. 4, pp. 394-405
9. J. H. Kim, 1976, "Analysis of sheet metal forming", Ph. D. dissertation, Univ. of California, Berkeley
10. R. Hill, 1950, "Mathematical theory of plasticity", Oxford Univ. Press
11. C. H. Lee, H. B. Shim and D. Y. Yang, 1988, "Determination of Frictional

Coefficient for Sheet Metal Working and
its Application to Stretch Forming",

Proc. 6th Int. Cong. on Experimental
Mechanics, pp.71-76