

〈論 文〉

## 유체압력이 제어되는 축대칭 하이드로포밍에 대한 강소성 유한요소해석

양동열\*, 권혁주\*\*, 정완진\*, 노태성\*\*\*

(1990年 1月 10日 接受)

### Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Axi-Symmetric Hydroforming with Controlled Pressure

Dong-Yol Yang, Hyock-Ju Kwon, Wan Jin Chung and Tae-Sung Noh

**Key Words :** Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성유한요소법), Axisymmetric Hydroforming(축대칭 액압성형), Controlled Pressure(제어되는 유체압력)

#### Abstract

The study is concerned with the analysis of axisymmetric hydroforming with controlled pressure by the rigid-plastic finite element method. The finite element method is employed to obtain the detailed information including the distribution of stresses and strains and geometry changes. Experiments are carried out for hydroforming of cold-rolled steel sheets with the developed CNC hydroforming press which is pressure-controlled according to the fluid pressure vs. stroke relationship given by the upper bound. Four types of punches are used for the experiments. The computed results are in good agreements with the experimental observation in geometric change and thickness variation. The present analysis permits the prediction of stresses, strains, geometric changes. The effects of Lankford value and workhardening exponent on thickness strains in hydroforming are also discussed. It is thus shown that the present method can be applied to the effective design of axisymmetric hydroforming processes.

#### 기 호 설 명

<p><math>A^0</math> : 변형전면적</p> <p><math>h</math> : 가공경화율(workhardening slope)</p> <p><math>H</math> : 형상함수(shape fuction)</p> <p><math>n</math> : 가공경화지수(workhardening exponent)</p> <p><math>p</math> : 유체의 압력</p> <p><math>R</math> : 수직이방성계수(Lankford value)</p> <p><math>R_s</math> : 시편의 반경</p>	<p><math>r_0, r</math> : 변형전과 변형후의 <math>r</math>좌표</p> <p><math>r_p</math> : 펀치의 반경</p> <p><math>s_0, s</math> : 변형전과 변형후의 요소길이</p> <p><math>t^0</math> : 변형전 시편의 두께</p> <p><math>t'</math> : 국소좌표계(local coordinate)</p> <p><math>t</math> : 외력</p> <p><math>t^a, t^p</math> : 금형의 반력 및 유체압력에 의한 외력</p> <p><math>T</math> : 좌표변환행렬</p> <p><math>U, \Delta U</math> : 변위 및 수정변위</p> <p><math>\bar{U}, \Delta \bar{U}</math> : 전체 절점변위 및 전체수정변위</p> <p><math>U^{(m)}, U^{(m)}</math> : 한 요소내에서의 변위 및 절점변위</p> <p><math>V^0</math> : 변형전체적</p>
---	---

\*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

\*\*정회원, 한국생산성본부 FA실

\*\*\*정회원, (주)대우

- $v, w$  :  $r$  및  $z$  방향의 변위
- $\beta$  : 감속계수
- $\epsilon$  : 매우 작은 양의 상수
- $\bar{\epsilon}, d\bar{\epsilon}$  : 유효변형도 (effective strain) 및 유효변형도 증분
- $\Phi$  : 전체 범함수
- $\phi^{(m)}$  : 한 요소의 범함수
- $k$  : 큰 양의 상수
- $\mu$  : Coulomb 마찰계수
- $\bar{\sigma}$  : 유효응력 (effective stress)

1. 서 론

박판금속으로부터 원통형, 다각통형등과 같은 밑바닥을 가진 용기를 만드는 공정은 여러 가지가 있는데 그 중 가장 기본적인 공정은 딥 드로잉(Fig. 1(a))이라 할 수 있다. 그러나 이 공정은 펀치 쇼울더(Punch shoulder)부분에서 결함이 발생할 가능성이 크기 때문에 테이퍼진(tapered)형상이나 기타 복잡한 형상의 제품성형에 있어서는 여러 번의 공정이 필요한 점이 있다. 이런 단점을 개선하기 위하여 성형시에 압력을 가하여 펀치 또는 다이에 붙게 함으로써 다이벽의 마찰력을 증가시켜 성형성을 증가시키는 방법이 효과적으로 사용되고 있다. 압력을 전달하는 매개체로는 고무나 유체등이 있는데 고무를 사용한 고무성형법(Fig. 1(b))은 박판금속의 성형시에 고무의 변형에 의한 압력의 손실이 크며, 구석부분까지 충분한 압력의 전달이 어렵고 압력의 조절이 곤란하므로 깊은 형상의 가공이나 복잡한 형상의 가공에는 적당하지 않다. 그러나, 고무대신 유체의 압력을 사용하면 이러한 결점이 제거되므로 액체의 압력을 이용하는 하이드로포밍공정이 개발되었다(Fig. 1(c)). 하이드로포밍공정은 딥 드로잉에 비하여 다음과 같은 특징을 지닌다.

첫째, 성형성이 좋기 때문에 성형깊이를 훨씬 크게 할 수 있으며 딥 드로잉에서 여러 공정을 거쳐야 되는 복잡한 모양의 제품도 단 1회의 공정으로 성형할 수 있다.

둘째, 성형되는 제품의 표면에 유체에 의한 균일 분포압력이 작용하므로 금형의 내마멸성이나 경도가 크게 필요하지 않다. 따라서 값싼 하급재료로 금형을 제작할 수 있게 되므로 금형비가 절감된다.

셋째, 딥드로잉공정의 경우 펀치와 다이 사이의 공차가 엄격하여 정밀한 금형제작이 요구되고 제작

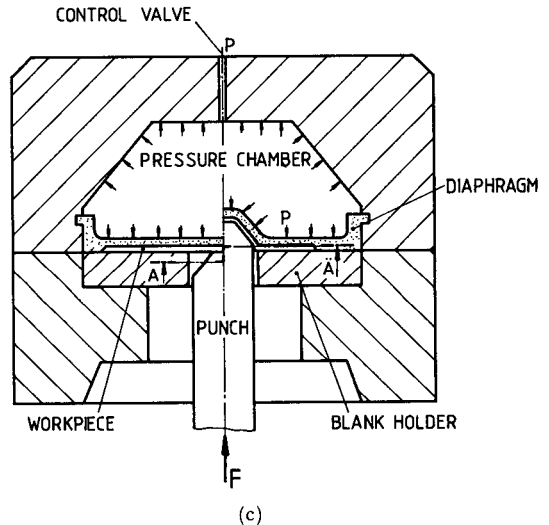
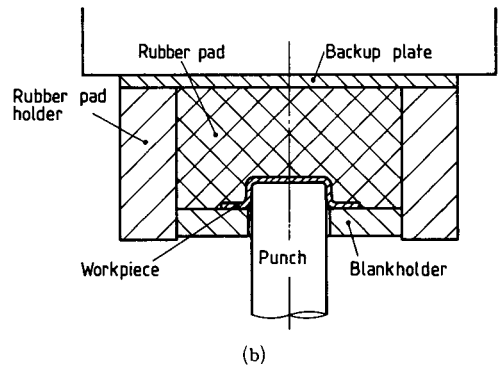
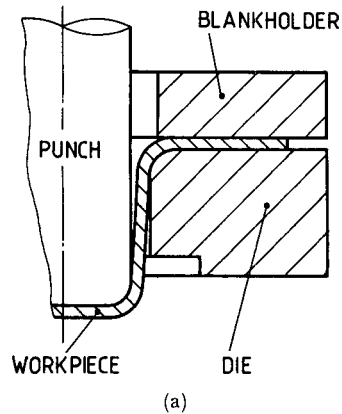


Fig. 1 (a) Deep drawing, (b) Rubber forming, (c) Hydroforming

기간도 오래 걸려 제작비가 고가이지만, 하이드로포밍공정의 경우는 펀치 또는 다이 중 한 가지만 필요하게 되므로 금형비가 절감된다.

네째, 딥 드로잉 공정은 성형 하중만을 필요로 하므로 용량이 작은 프레스를 사용할 수 있으나 하이드로포밍에 있어서는 블랭크홀더 부분에까지 압력을 작용시켜야 하므로 큰 용량의 프레스를 필요로 한다.

Tyrell<sup>(1)</sup>에 의해 비행기부품 생산에 적합하다고 소개된 이래 하이드로포밍 공정에 대한 연구는 주로 해석적인 방법에 의해 연구가 수행되었다. Tirosh등<sup>(2)</sup>은 축대칭 하이드로포밍 공정시 벽 두께가 균일한 제품을 얻기 위해서 필요한 펀치행정에 따른 적절한 압력곡선을 구하였다. 이 때 적정압력 곡선에 영향을 주는 주된 요인으로 가공경화지수 및 마찰상수 그리고 시편의 크기 등을 생각하여, 펀치행정에 대한 압력곡선을 이론적으로 유도하였다. Yossifon등<sup>(3)</sup>은 축대칭 하이드로포밍에 있어서 일반적인 딥 드로잉에서의 다이쇼울더에 해당되는 부분에 발생하기 쉬운 주름 현상(wrinkling)을 이론적으로 연구하였다. Yossifon과 Tirosh<sup>(4)</sup>는 시편의 수직이방성(normal anisotropy)을 고려하여 하이드로포밍의 불안정현상을 해석하였다. 지금까지 하이드로포밍에 대한 연구의 대부분은 Tirosh등의 논문<sup>(2)</sup>을 제외하고는 공정의 소개나 해석적인 방법에 의한 불안정현상의 해석에 치중되었다. 최근에 Noh와 Yang<sup>(5)</sup>은 임의의 3차원형상의 컵에 대한 하이드로포밍을 상계해법으로 해석하여 성형시 균일한 두께가 나올 수 있도록 하는 적정압력을 구하였다.

강소성 유한요소법은 계산과정중에 응력적분이 필요없고 큰 계산단계를 사용할 수 있으므로 탄소성유한요소법에 비해 계산시간이 적게 소요된다. 이러한 이유로 금속성형 공정의 해석에 강소성 해법이 널리 쓰이게 되었다. 강소성 해법은 Lee와 Kobayashi<sup>(6)</sup>가 최초로 수식화한 이후 복잡한 금속성형 공정해석에 성공적으로 적용되어 왔다. Kim 등<sup>(7)</sup>은 박판금속의 축대칭 성형시 해의 가공경화와 형상변화를 고려한 수식을 제안하였으며, 여러 가지 축대칭 박판성형 공정에 성공적으로 적용하였다.

본 연구에서는 축대칭 하이드로포밍 공정을 강소성 유한요소법을 이용하여 이론적으로 해석하여 응력분포, 변형도 분포등을 구하였다. CNC 하이드로포밍프레스를 이용하여 냉간 압연강판에 대하여 실험을 수행하고 수치해석결과와 비교하고 이로부터 하이드로포밍의 성형성에 대하여 논의하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 축대칭 강소성 유한요소법

Kim과 Kobayashi<sup>(7)</sup>는 축대칭 박판성형에 대하여 해의 유일성과 형상변화효과를 고려하여 다음과 같은 변분식을 유도하였다. 즉 모든 동적가용 변위장(kinematically admissible displacement field) 중에서 다음과 같은 범함수를 최소화하는 변위장이 정해이다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 - \Phi_2 \\ &= \int_{A_0} (\bar{\sigma} d\bar{\epsilon} + \frac{1}{2} h (d\bar{\epsilon})^2) t^0 dA - \int_{A_0} t^T U_i^0 dA \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

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

축대칭 박판공정을 해석하기 위해서 전체형상을  $n$  개의 축대칭 요소로 분할 하였다(Fig. 2). 한 요소 내에서 변위장은 다음 식과 같이 주어진다.

$$U^{(m)} = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \underline{H} \bar{U}^{(m)} \quad (2)$$

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

$$U^{(m)} = \begin{bmatrix} v_1 \\ w_1 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad \underline{H} = \begin{bmatrix} \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1-t'}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1+t'}{2} & 0 & \frac{1-t'}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

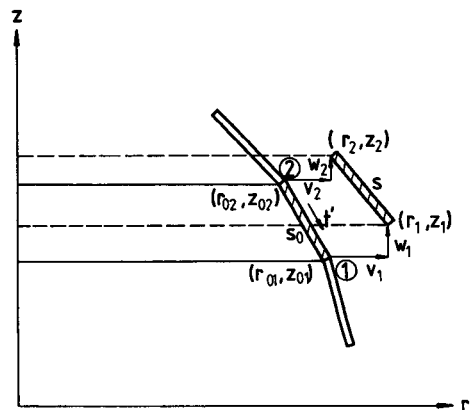


Fig. 2 Approximation of the sheet geometry by a series of conical frustra

이때 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

$$\phi_1^{(m)} = \int_{A^{(m)}} \left( \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} + \frac{1}{2} h (d\bar{\epsilon})^2 \right) t^0 dA,$$

$$\phi_2^{(m)} = \int_{A^{(m)}} t^T H U^{(m)} t^0 dA$$

여기서 유효응력  $\bar{\sigma}$ 와 유효변형도중분  $d\bar{\epsilon}$ 는 Hill<sup>(8)</sup>에 의하여 제안된 2차 항복 이론에 의하여 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

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

식 (4)의 범함수를 최소화하는 중분변위장을 다음 식과 같이 구한다.

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

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

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

여기서

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

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

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

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

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

## 2.2 하이드로포밍에의 적용

### (1) 외력경계조건

하이드로포밍에서 박판에 작용하는 외력으로는

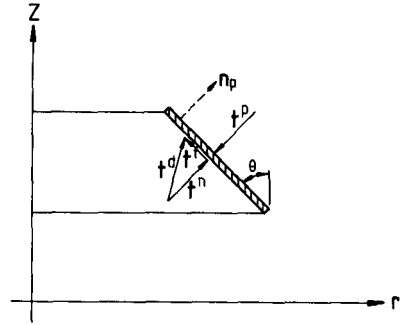


Fig. 3 Traction vectors on an element

유압에 의한 외력 그리고 박판과 금형 사이에서 작용하는 외력이 존재한다. Fig. 3에서 그 각각을  $t^p$ ,  $t^n$ 으로 표시하였는데  $t^n$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$t^n = t^n + t^s \quad (12)$$

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

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

여기서

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

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

$$\frac{\partial \phi_2^{(m)}}{\partial \bar{U}^{(m)}} = \int_{A^{(m)}} H^T t^p t^0 dA + t^n \quad (14)$$

하이드로포밍 공정의 유한요소해석시 변형후에 유압  $p$ 가 작용할 때 유압에 의한 외력은 다음과 같이 표시된다.

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

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

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

### (2) 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 기하학적 경계조건을 만족시켜야 한다. 기하학적 경계조건을 만족시키기 위해 접촉절점에 대하여 국부좌표좌표계  $(\bar{r}, \bar{z})$ 를 Fig. 4와 같이 정의한다. 먼저 현재의 절점  $P$ 의 위치에 가장 가까운 금형표면 위의 위치  $\bar{Q}$ 를 구한다. 이 때 방향벡터  $e_{\bar{r}}, e_{\bar{z}}$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

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

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 좌표변환 행렬은 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 절점  $P$ 의  $\bar{Z}$ 방향의 수정변위  $\Delta U_{\bar{z}}(P)$ 를 금형표면 위의 점  $Q$ 의  $\bar{Z}$ 좌표  $\bar{z}(Q)$ 로 규정하여 유한요소 방정식의 해를 구한다. 매 반복계산마다 접촉절점에 대해 이와 같은 과정을 반복하여 기하학적 경계조건을 만족시킨다.

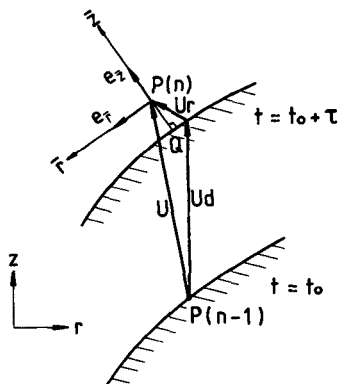


Fig. 4 Treatment of geometric boundary condition

### 3. 실험

실험장치로는 CNC 하이드로포밍 프레스를 사용하였다. CNC 하이드로포밍 프레스는 챔버내부의 압력을 상계해법으로 구한 펀치 높이에 대한 압력 곡선에 따라 제어하도록 설계되어 있다. 이때 펀치의 행정에 대한 압력은 펀치의 변위, 펀치의 모양, 금형과 시편사이의 마찰조건, 시편재료의 물성치에 따라 변화하게 된다. 이 장치의 전체적인 구성은 Fig. 5와 같다. 하이드로포밍 실험시 펀치의 행정을 포텐쇼미터(potentiometer)로 측정된 값과 챔버내의 압력을 압력 센서(pressure sensor)로 측정된 값을 컴퓨터로 보내면 미리 입력된 펀치와 행정에 대한 압력곡선에 따라 챔버 내부의 압력이 유지되도록 비례적분(PI) 제어방식으로 압력제어밸브가 제어된다.

시편의 소재는 냉간압연강판(SPC-1)을 사용하였고 단순인장시험으로부터 구한 응력 변형도 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 63.1 (\bar{\epsilon})^{0.28} (\text{kgf/mm}^2) \quad (20)$$

$R$ 값의 정의에서 판재의 압연방향에  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  되는 시편에 대하여  $R_0, R_{45}, R_{90}$ 을 얻었고  $R = (R_0 + R_{90} + 2R_{45})/4$ 로 평균하여  $R = 1.35$ 를 얻었다. 또 실험에 사용된 재료와 금형사이의 마찰계수를 측정하기 위하여 Lee등<sup>(9)</sup>에 의해 개발된 마찰계수 측정장치를 사용하였다. 이 장치는 고정된 드럼에

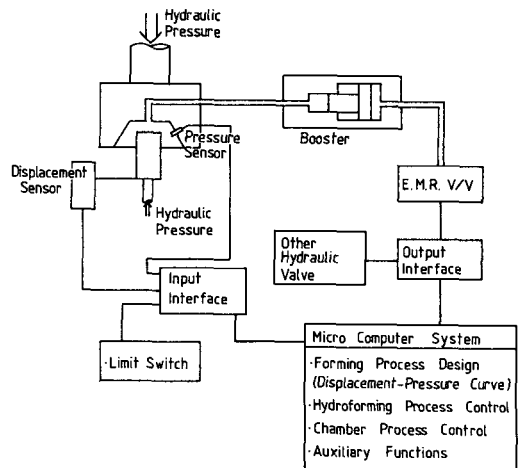


Fig. 5 Schematic diagrams of hydroforming press system

감겨 있는 띠 형상의 박판의 한 쪽을 고정시키고 반대쪽을 잡아 당기면 양 끝단에 걸리는 힘들의 비는 마찰계수와 접촉각의 함수로 표시된다. 이 장치에 폭 15mm의 띠형상의 시편을 부착시켜 재료시험기에 부착한 뒤 2mm/min의 속도로 당기면서 측정하여 마찰계수가 0.24임을 알았다. 펀치의 형상과 시편의 드로잉비의 변화에 대하여 이론과의 비교를 위해 하이드로포밍 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 펀치는 반구형 및 원통형, 그리고 15°와 20°의 테이퍼 각을 갖는 경사진 원추대형 등 4가지이다. 시편은 드로잉비 1.75 (61.25mm) 과 1.85 (64.75mm)의 두 가지를 사용하였다(Fig. 6).

실험과 이론해석에 사용된 펀치높이 대 압력의 곡선은 Tirosh<sup>(2)</sup>에 의한 상계해법으로 구하였으며 Fig. 7과 Fig. 8에 펀치형상과 드로잉비에 따른 압력곡선을 나타내었다. 4가지 펀치형상에 대하여 각각 2가지 시편을 사용하여 총 8가지 경우에 대하여 실험과 계산이 수행되었다. 하이드로포밍 공정에서는 펀치의 행정에 따른 압력곡선이 중요한 역할을 하며 압력이 낮을 경우 플랜지(flange)부분에서 주름현상(wrinkling)이 발생하게 되고 초기의 압력이 너무 높으면 펀치 쇼울더 부분에서 찢어짐이 일어나며 성형 중 압력이 높아지게 되면 펀치 벽과 블랭크 홀더 사이의 연결부에서 넉킹(necking)이 일

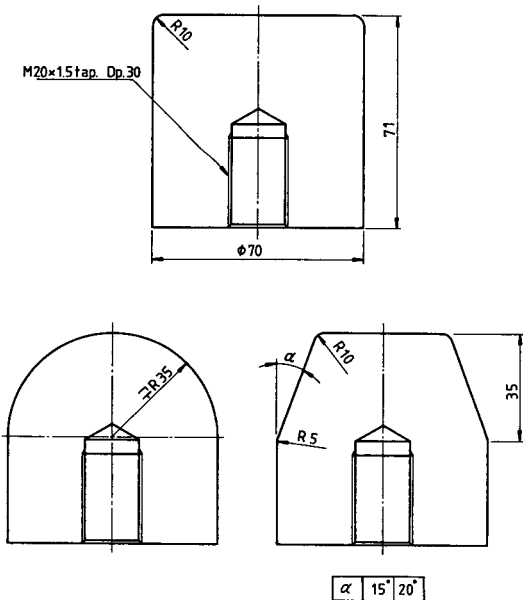


Fig. 6 Shape of punches

Shape	Type	D.R.
Hemisphere	————	1.75
	-----	1.85
Cylinder	————	1.75
	-----	1.85

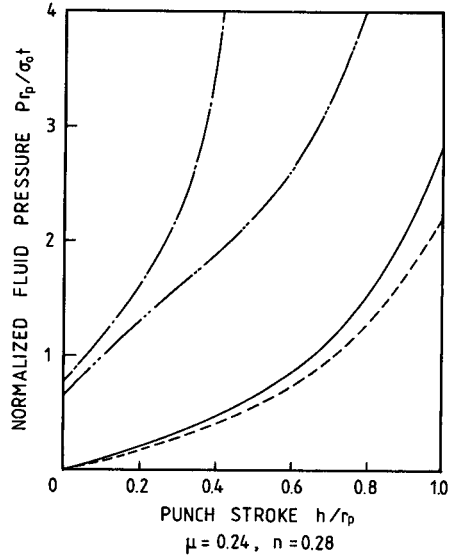


Fig. 7 Pressure vs. punch stroke relation used for hydroforming of hemispherical and cylindrical cups

$\alpha$	TYPE	D.R.
15°	————	1.75
	-----	1.85
20°	————	1.75
	-----	1.85

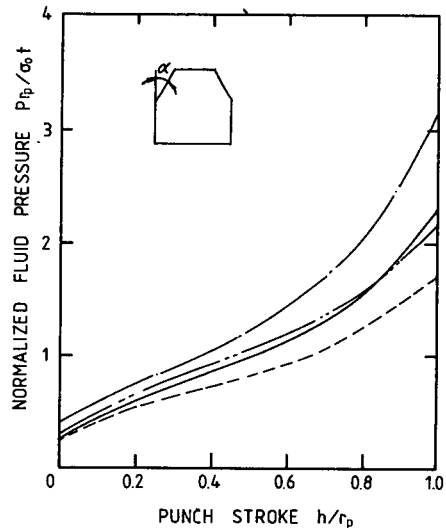
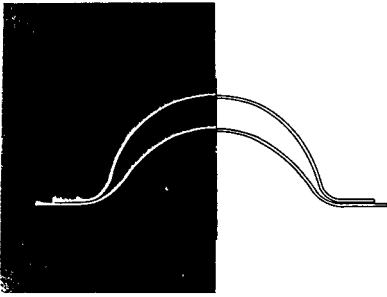


Fig. 8 Pressure vs. punch stroke relation used for hydroforming of tapered cups

어나게 된다. 본 실험에 사용된 하이드로포밍 프레스의 최대허용압력이 550kgf/mm<sup>2</sup>이며 이에 따라 펀치의 형상마다 성형높이를 조정하여 반구형 펀치에서는 35mm, 원통형 펀치에서는 20mm, 테이퍼진 원추대형 펀치에서는 28mm까지 성형하였다.

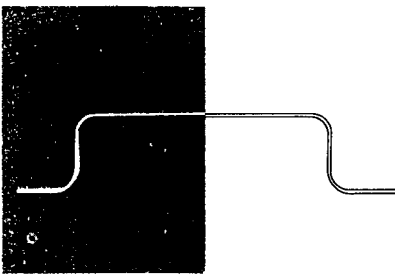
4. 결과 및 토론

Fig. 9와 Fig. 10은 실제 성형된 제품과 이론해석



D.R.	Punch height	Outer Radius	
		Theory	Experiment
1.75	25	56.7	55.9
	35	51.9	51.1
1.85	25	61.1	60.7
	35	56.6	56.3

Fig. 9 Comparison of deformed configuration between experiment and theory in hydroforming of hemispherical cups



D. R.	Punch height	Outer Radius	
		Theory	Experiment
1.75	20	48.58	48.2
1.85	20	56.34	56.0

Fig. 10 Comparison of deformed configuration between experiment and theory in hydroforming of cylindrical cups

에 의해 구해진 형상을 비교한 것이다. 성형후의 형상과 플랜지의 바깥 반경이 실험과 거의 일치한다. Fig. 11에서는 드로잉비 1.75와 1.85인 경우에 대하여 두께 변형도 분포를 비교 하였으며 실험과 이론이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 11에

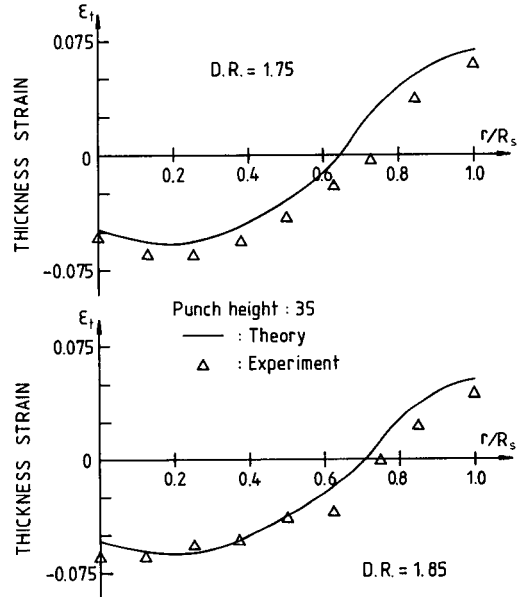


Fig. 11 Thickness strain distribution for hydroforming of hemispherical cups

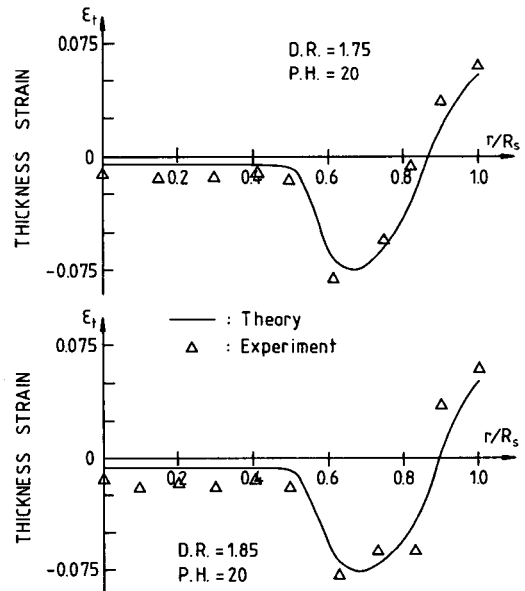


Fig. 12 Thickness strain distribution for hydroforming of cylindrical cups

나타낸 두께 변형도는  $-0.075$ 에서  $0.075$ 까지의 작은 영역에서의 분포를 보이고 있다. 이는 일반적으로 딥 드로잉에 비해 훨씬 균일한 두께 변형도 분포이다.

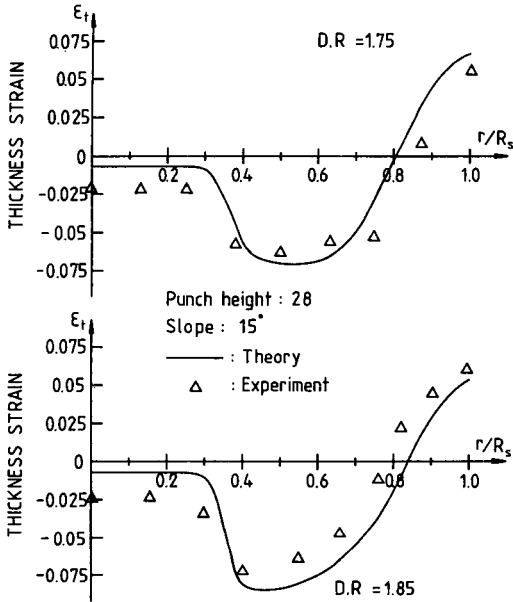


Fig. 13 Thickness strain distribution for hydroforming of 15 tapered cups

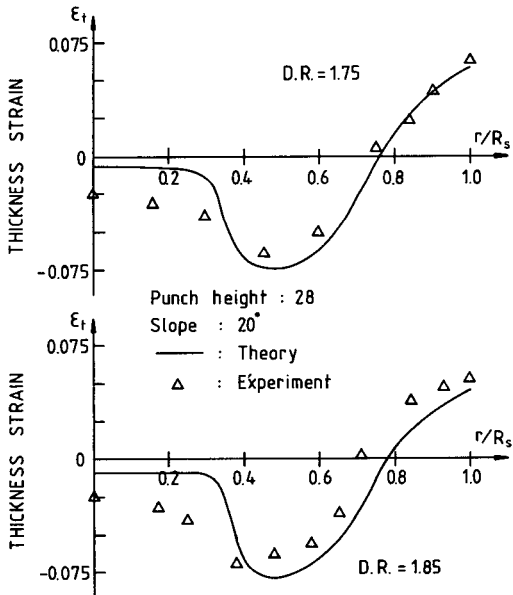
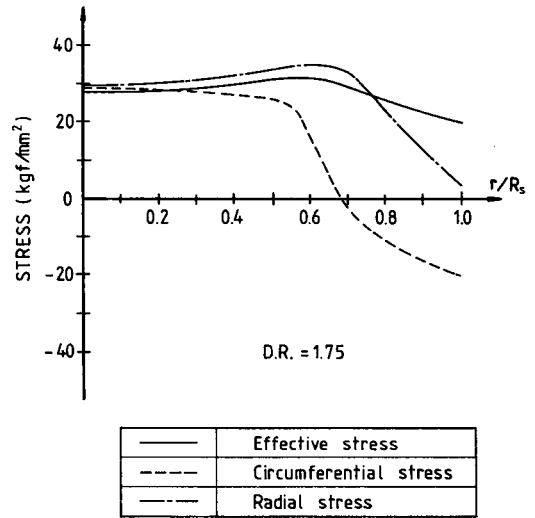
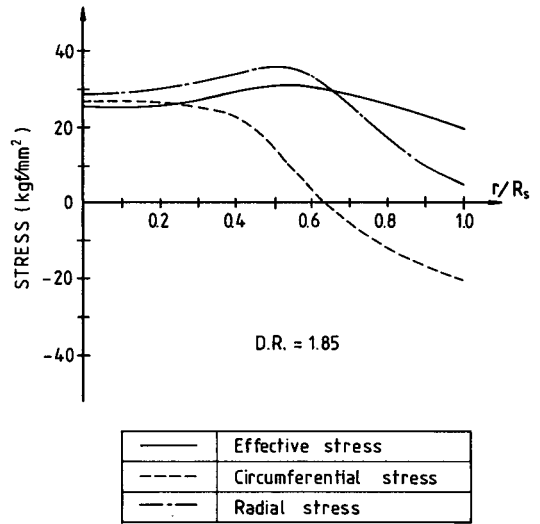


Fig. 14 Thickness strain distribution for hydroforming of 20 tapered cups

Fig. 12는 원통형, Fig. 13과 Fig. 14는 원추대형 컵 성형시의 두께 변형도의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12에서 펀치 윗면에 붙은 부분은 거의 변형이 없어 펀치에 붙은 부분은 펀치와 함께 강제운동을 한다는 상계해법의 가정이 타당성이 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 13과 Fig. 14는 경사각도가 각각  $15^\circ$ 와  $20^\circ$ 인 경사진 원추대형컵에 대한 두께변형도 분포이며 실험과 이론해석 결과가 유사한 경향을



(a)



(b)

Fig. 15 Stress distribution for hydroforming of hemispherical cup (a) drawing ratio,  $D.R. = 1.75$ , (b) drawing ratio,  $D.R. = 1.85$



보이고 있다. Fig. 13과 Fig. 14 모두 다이쇼올더 부분에서 두께 변형도가 음(negative)으로 절대값이 가장 크게 나타나 변형중 네킹이 일어날 가능성이 다른 부분에 비해 높다는 것을 알 수 있다. 이는 실험에 의해 나타나는 공정중의 네킹 부위와도 일치하는 것이며 이론해석에 의해서도 네킹 부위를 예측할 수 있게 해 준다. 그러나 두께 변형도가 가장 큰 다이쇼올더 부분에서도 두께 변형도가 0.075 정도의 작은 범위에 머물러 성형성이 좋다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 경사각도가 15°인 원추대형컵 성형시 드로잉비가 각각 1.75과 1.85인 경우에 이론적으로 구한 응력분포를 나타낸 것이다. 덩 드로잉시 급격한 응력변화를 보이고 특히 다이 쇼올더 부근에 응력의 집중현상이 일어나는 데 비해 하이드로포밍시에는 비교적 균일한 응력분포를 보이며 이것이 하이드로포밍의 성형성을 향상시키는 근본적인 요인이 된다. 또한 다이쇼올더 부위에서 반경방향 인장 응력과 유효응력이 가장 크고 반경방향 응력과 원주방향 응력의 차이가 가장 큰 차이를 보여 전술한 공정중의 다이쇼올더 부근에서의 네킹현상의 원인이 된다고 생각된다.

Fig. 16은 이론적으로 구한 가공경화지수  $n$ 과 수

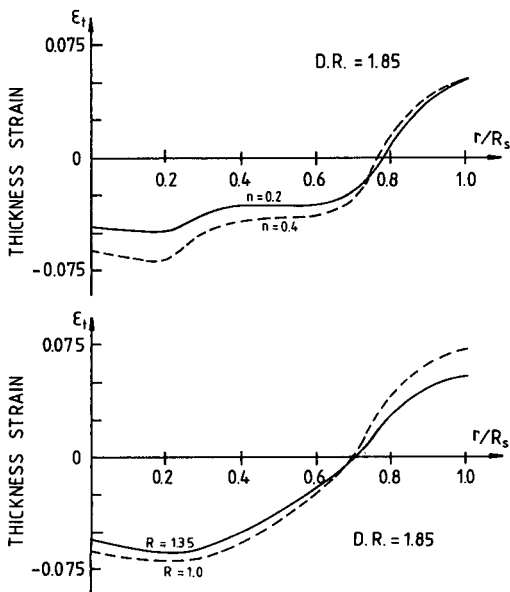


Fig. 16 Effects of workhardening exponent and Lankford value on thickness strain distribution for hydroforming of hemispherical cups

직이방성계수  $R$ 값의 영향을 나타낸 것이다.  $n$ 값이 커질수록 두께가 더 얇아진다. 또  $R$ 값이 작아질수록 두께가 더 얇아지는 것을 알 수 있으며 이 사실은  $R$ 값의 정의와 일치한다.

### 5. 결 론

축대칭 하이드로포밍 공정을 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 이에 따른 하이드로포밍 실험을 수행하여 비교한 결과 유한요소법을 이용한 해석의 타당성을 확인하였다. 이론해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 이론해석과 실험에 의하여 얻어진 두께변형도의 분포가 잘 일치하였으며 두께변형도의 크기가 작은 범위에 분포하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 해석에 사용한 상계해법으로부터 구해진 압력곡선에 사용한 균일두께의 가정이 적절한 것을 알 수 있었다.

(2) 응력분포를 구한 결과 비교적 균일한 분포를 나타내었다. 이로부터 하이드로포밍 공정의 성형성이 향상될 수 있는 이유를 찾을 수 있었다.

(3) 두께변형도분포에 대한 물질상수의 영향을 고찰하였다.

본 연구에서는 네킹이나 주름 현상등 불안정 현상이 발생하는 순간을 예측할 수 없었다. 앞으로 불안정 현상에 대한 연구가 진행되어 변형해석과 결합되어야 하이드로포밍 공정의 보다 정확한 성형성예측이 가능하리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Tyrell, J.F. 1956, "Forming Sheet Metals Components for Aircraft", Metal Progress, pp. 110~112.
- (2) Tirosh, J. Yossifon, S. Eshel, R. and Betzur, A. 1977. "Hydroforming Process for Uniform Wall Thickness Products", Trans. ASME, J. Engr. for Ind., Vol. 99, pp. 685~690.
- (3) Yossifon, S. Tirosh, J. and Kochani, E. 1984, "On Suppression of Plastic Buckling in Hydroforming Process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, pp. 389~402.
- (4) Yossifon, S. Tirosh, J. 1985, "Rupture Instability in Hydroforming Deep Drawing Process", Int. J. Mech. Sci., Vol 27, pp. 559~570.
- (5) Noh, T.S. and Yang, D.Y. 1987, "An Analysis of Hydroforming of Regular Polygonal Boxes", Int. J.

- Mech. Sci., Vol. 29, pp. 139~148.
- (6) Lee, C.H. and Kobayashi, S. 1973, "New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", Thans. ASME, J. Engr. for Ind., Vol. 95, pp. 865~873.
- (7) Kim, J.H. Oh, S.I. and Kobayashi, S. 1978, "Analysis of Stretching of Sheets with Hemispherical Punch", Int. J. Mech. Tool DEs. Res., Vol. 5, pp. 209~226.
- (8) Hill, R. 1950, "Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press.
- (9) Lee, C.H. Shim, H.B. and Yang, D.Y. 1988, "Determination of Frictional Coefficient for Sheet Metal Working and Its Application to Stretch Forming", Proceedings of 6th International Congress on Experimental Mechanics and Manufacturers Exhibit, Portland Oregon, pp. 71~76.