[논문] 한국소성가공학회지(2002), 제11권 제3호
*Transactions of Materials Processing* **Vol. 11, No. 3, (2002)**

# 판재 액압성형 공정에서의 최적압력곡선에 관한 연구

심현보* · 양희태** · 서의권*** · 양동열****

(2002년 1월 17일 접수)

# A Study on the Optimal Pressure Curve for the Sheet Hydroforming

**H. B. Shim, H. T. Yang, E. K. Suh and D. Y. Yang,**

## Abstract

A simple method to derive an optimal pressure curve, characterized by initial pressure, final pressure and pressure path, has been proposed. The initial pressure has been determined from the condition to prevent recoiling phenomenon in the early stage, while the final pressure is from the FE analysis and pressure path is from the punch penetration volume. In order to realize the pressure curve, an open loop control system based on a proportional relief valve has been developed for the renovated CNC hydroforming press. Through the comparison of experiment and analysis, the predicted pressure curve has been verified optimal curve since no defect has been observed.

**Key Words** : Sheet Hydroforming, Optimal Pressure Curve, Open-Loop Control System

## 1. 서 론

하이드로포밍(hydroforming) 기술은 용접판재 (tailor welded blank)와 더불어 초경량 차체 개발(ultra light steel automotive body) 연구에 있어서 핵심 기술로 인정받고 있다. 하이드로포밍은 기름이나 물과 같은 유체를 압력매체로 하여 판재나 관재를 성형하는 기술로 성형압력 곡선이 공정의 성패에 큰 영향을 미치고 있다.

특히 판재 하이드로포밍 공정에서는 적정압력보다 성형압력이 낮을 경우 플랜지부분의 주름이 발생하고, 과도하게 높을 경우 펀치벽면에서 네킹현상이 발생된다. 성형도중의 압력 뿐만 아니라 초기압력도 영향을 미치는데 초기압력이 낮을 경우 판재의 들림 현상이 발생되어 공정이 불안정해지고 과도하게 높을 경우 펀치쇼울더 부위에서 찢어짐이 발생된다. 따라서 결함이 없는 제품을 생산하기 위해서는 압력곡선의 결정이 공정개발에서의 가장p 중요한 요소로 대두되고 있다.

Tirosh[1] 등은 축대칭 하이드로포밍에서의 적정압력곡선을 상계해법을 통하여 유도하였다. Yossifon[2] 등은 축대칭 하이드로포밍시의 주름 현상을 이론적으로 해석하

* 영남대학교 기계공학부
** 평화산업
*** 경북테크노파크
**** 한국과학기술원 기계공학부

였으며, Noh와 Yang[3~4]은 임의 형상의 단면을 가진 컵에 대한 하이드로포밍 성형시 균일두께 조건을 만족하는 동적 가용 속도장을 제안하고 이를 UBET로 해석하여 이로부터 최적 압력 곡선을 구하였다. Lee[5~6]등은 하이드로포밍 프레스의 동적 모델을 수학적으로 모델링하였으며 또한 매개 변수 검증과 시뮬레이션을 수행하였고, 하이드로포밍 프레스 성형실의 압력 제어기를 설계하는데 있어서 별도의 수학적 모델링이 요구되지 않는 CMAC를 이용한 학습 제어기를 제안하였다. Kim[7]은 하이드로포밍 공정을 대상으로 성형 작업이 진행됨에 따라 시스템의 동특성이 변화하여도 특별한 이득의 조정 없이 추종 제어 성능이 일정하게 유지되도록 퍼지(fuzzy)집합이론에 근거한 압력 제어기를 설계하였다.

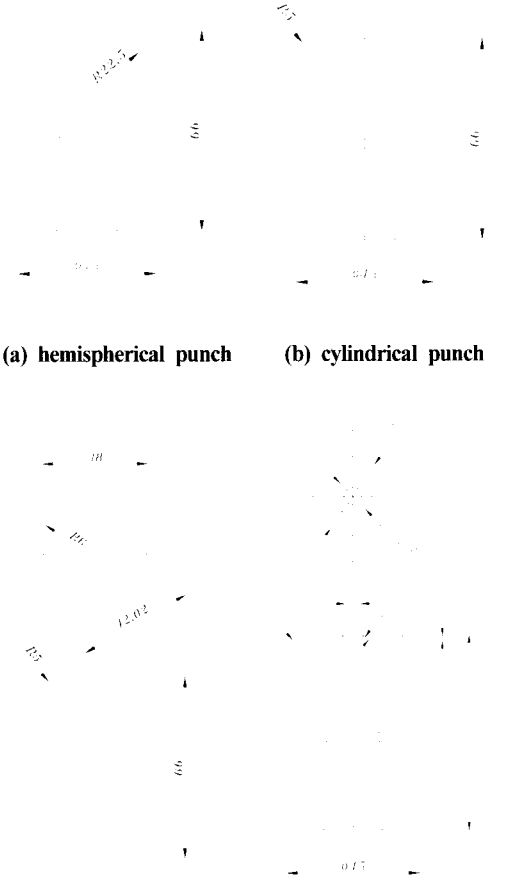
본 논문에서는 판재하이드로포밍의 최적압력곡선의 결정방법을 새롭게 제안하고 제안된 방법에 의해 결정된 압력곡선의 타당성을 실험을 통하여 검증하도록 한다.

## 2. 하이드로포밍 공정의 최적압력곡선

하이드로포밍공정의 압력곡선의 결정과정은 최초성형압력, 최종성형압력, 그리고 압력경로의 결정 등으로 나눌 수 있으며 이러한 값들은 소재의 물성, 공정조건, 블랭크 및 펀치의 모양 등과 같은 제반 공정인자들에 의해 결정된다.

하이드로포밍에 관한 기존의 연구결과[3~4]에서 하이드로포밍의 압력 곡선의 형태가 단조증가의 경향을 보이고 있으며, 또한 압력증가율도 점차 증가하는 경향을 보이고 있음을 보이고 있다. 성형도중의 펀치침투체적이 압력변화 경향과 유사하다는 점에 착안하여 압력곡선을 간단하게 펀치침투체적에 비례하는 것으로 가정하여 기존의 상계해법이나 UBET법과 같은 복잡한 방법을 사용하는 대신 간단한 방법으로 최적성형압력곡선을 결정하였다. 압력곡선의 결정 방법은 최초성형압력을 먼저 결정한 후 몇가지의 최종성형압력에 대하여 펀치의 진행에 따른 성형압력을 최종성형압력까지 펀치침투체적에 비례하여 증가하도록 하여 성형해석을 수행하고 성형해석 결과로부터 변형률 분포가 가장 우수한 최종성형압력을 찾아 이로부터 최적성형압력 곡선을 결정하였다.

본 연구에서 사용된 펀치의 모양은 Fig. 1에, 각각의 펀치에 사용된 블랭크의 크기는 Table 1에, Table 2는 인장시험을 통해 측정한 블랭크의 물성을 나타내고 있다. 직경 45mm인 반구형 펀치와 원통형펀치, 바닥에 요철이 있는 원통형 펀치의 경우 블랭크의 직경을 80mm, 90mm을 택하였는데 이는 드로잉비가 각각 1.78과 2.0에 해당하는 크기로 일반 드로잉 공정에 비하여 크게 택하였다. 단축의 길이가 38mm인 정육각형 펀치의 경우 블랭크의 직경을 72mm로 택하였다.



**(a) hemispherical punch** **(b) cylindrical punch**

**(c) hexagonal punch** **(d) concave bottomed punch**

**Fig. 1 Punch geometry used in the study**

**Table 1 Blank size and forming depth**

| punch shape | blank size (mm) | forming depth (mm) | drawing ratio |
|---|---|---|---|
| hemispherical punch | 80 | 22.5 | 1.78 |
| | 90 | 30 | 2 |
| cylindrical punch | 80 | 20 | 1.78 |
| | 90 | 25 | 2 |
| hexagonal punch | 72 | 12 | 1.71 |
| cylindrical punch with concave bottom | 80 | 20 | 1.78 |
| | 90 | 25 | 2 |

**Table 2 Material property of blank (SPC-1)**

| | |
|---|---|
| Young's modulus | $E = 2.21 \times 10^5$ MPa |
| Yield stress | Y = 176.1 MPa |
| Poisson's ratio | $\nu = 0.3$ |
| thickness | $t_0 = 0.80$ mm |
| strain-stress curve | $\overline{\sigma} = 466.0(\overline{\varepsilon} + 0.001)^{0.22}$ MPa |
| Lankford value | R = 1.37 |
| Coulomb friction coefficient | $\mu = 0.24$ (punch/sheet)<br>$\mu = 0.10$ (die/sheet) |

## 2.2 최초 성형 압력 설정

하이드로포밍 공정에서 특히 성형 초기에는 펀치 라운드와 다이 라운드 사이의 지지되지 않은 영역이 넓기 때문에 과다한 압력이 가해질 경우 소재의 찢어짐이 발생되기 쉽다. 반면 압력이 낮을 경우 소재를 다이에 밀착해 주는 힘이 작기 때문에 펀치가 진행함에 따라 소재의 들림 현상이 발생되어 공정을 불안정하게 할 수가 있다. 따라서 최적 압력 곡선의 결정 단계에서 최초 성형 압력의 설정은 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 소재의 들림 현상이 발생되지 않도록 하는 조건으로부터 최초 성형 압력의 하한값을 결정하였다.

성형 초기에는 펀치가 진행할 때 펀치라운드 부근에서 전단변형이 주로 이루어지기 때문에 식 (1)의 우변은 성형초기에 비지지 영역에서의 전단변형을 유발시킬 수 있는 힘이고, 좌변은 플랜지 영역에서 소재를 눌러주는 힘이 된다. 즉 식 (1)의 물리적인 의미는 플랜지에서 눌러주는 힘이 펀치력 보다 클 경우 안정적인 조건이 가능하다는 의미가 된다.

$$\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \times p_{\min} = \pi d t \times \frac{Y}{\sqrt{3}} \qquad (1)$$

여기서

D = 블랭크 직경

d = 소재가 펀치에 접하는 부분의 최대 직경

$p_{\min}$ = 최초성형압력의 하한값

Y = 소재의 항복 응력

t = 블랭크 두께

그런데 식(1)로부터 결정된 최초성형압력의 하한값은 최초성형압력으로 그대로 적용할 경우 단면이 원형인 경우는 큰 문제가 없으나 각이 진 단면의 경우 성형초기단계부터 주름이 발생되기 때문에 이를 막아주기 위해서 최초성형압력을 약간 증가시킬 필요가 있으며, 성형후 미세한 곡률이 있는 부분을 그대로 표현하기 위해서도 압력을 증가시켜 줄 필요가 있다. 즉 식(1)로부터 구해진 최초성형압력의 하한값에 제품의 형상에 따른 보정계수 $\beta$ 를 도입하여 최초성형압력을 결정하도록 한다.

$$p_{ini} = \beta \times p_{\min} \qquad (2)$$

여기서

$p_{ini}$ : 최초성형압력의 설정

$\beta$ = 제품의 형상에 따른 보정계수 ( $\beta \geq 1$ )

원형 단면의 경우 : $1 \leq \beta \leq 2$

각진 단면의 경우 : $2 \leq \beta \leq 3$

미세한 표현이 필요한 경우 : $4 \leq \beta \leq 5$

**Table 3 Min. initial pressure and initial pressure setting**

| punch shape | blank size (mm) | $p_{\min}$ (MPa) | $p_{ini}$ (MPa) |
|---|---|---|---|
| hemispherical punch | 80 | 0.52 | 1 |
| | 90 | 0.41 | 1 |
| cylindrical punch | 80 | 3.35 | 6 |
| | 90 | 2.41 | 3 |
| hexagonal punch | 72 | 4.00 | 8 |
| cylindrical punch with concave bottom | 80 | 3.35 | 15 |
| | 90 | 2.41 | 10 |

Table 3은 최초성형압력의 하한값과 실제로 설정한 최초성형압력을 나타내고 있는데 구형펀치나 원통의 펀치의 경우 단면이 구형이기 때문에 하한값과 실제설정치와 큰 차이가 없으나 육각형펀치의 경우 최초성형압력이 낮으면 모서리부분에서 접힘현상이 발생되기 때문에, 그리고 바닥에 요철이 있는 원통형 컵의 경우 성형 압력이 낮을 경우 성형 후 시편이 요철부분을 정확히 표현하지 못할 수 있어 이를 방지하기 위해 최초성형압력의 하한값보다 최초성형압력을 높게 설정하였다.

## 2.3 최종 성형 압력 설정

각각의 펀치와 블랭크 크기별 최대 성형 압력을 결정하기 위하여 각각의 경우에 대하여 Table 3과 같이 구해진 최초성형압력에 대해 몇 가지의 최종성형압력에 대하여 최초성형압력과 최종성형압력사이를 펀치침투체적

을 이용하여 압력을 보간하여 유한요소 해석을 수행하였고, 유한요소 해석 결과로부터 공정의 성패여부를 판별할 수 있었고, 공정이 성공적으로 이루어지는 조건 중 변형률 분포가 가장 양호하게 나타나는 것을 최종성형압력으로 결정하였다.

Table 4는 반구형 펀치로 블랭크 직경이 80mm인 경우에 최초 성형압력 1MPa로부터 성형깊이 22.5mm에서의 최대성형압력까지 구간을 펀치침투체적에 비례하도록 펀치변위에 대한 압력곡선을 설정한 후 해석을 통하여 변형모양과 변형률 분포를 구한 것인데 이때 최대압력을 20MPa에서부터 단계적으로 증가시키면서 경향을 파악한 것으로 해석결과로부터 최대성형압력이 21MPa 이하일 경우는 주름이 발생하고, 성형압력이 높으면 소재의 두께가 얇아지는 점을 고려하여 블랭크 직경이 80mm일 경우의 최대성형압력을 22MPa로 결정하였다.

Table 5는 블랭크 직경이 90mm인 경우에 대하여 앞서와 마찬가지 방법으로 두께변형률과 변형모양을 파악한 것인데 최대성형압력이 낮을 경우 주름발생, 과다하게 높을 경우는 파단이 발생되는 것으로 나타나 최종성형압력을 28 MPa로 결정하였다.

**Table 4 thickness strain (hemispherical, $\phi$80)**

| $p_{max}$ | max. strain (%) | min. strain (%) | note |
|---|---|---|---|
| 20 | 6.58 | - 8.20 | wrinkling |
| 21 | 6.51 | - 8.26 | wrinkling |
| 22 | 6.45 | - 8.33 | success |
| 23 | 6.34 | - 8.42 | success |
| 24 | 6.29 | - 8.52 | success |
| 25 | 6.23 | - 8.63 | success |
| 30 | 6.01 | - 9.29 | success |
| 35 | 5.76 | - 10.25 | success |

**Table 5 thickness strain (hemispherical, $\phi$90)**

| $p_{max}$ | max. strain (%) | min. strain (%) | note |
|---|---|---|---|
| 20 | 11.01 | - 12.51 | wrinkling |
| 25 | 8.97 | - 14.30 | wrinkling |
| 26 | 8.73 | - 14.80 | wrinkling |
| 27 | 8.60 | - 15.41 | wrinkling |
| 28 | 8.33 | - 16.02 | success |
| 29 | 8.12 | - 16.81 | success |
| 30 | 7.92 | - 17.81 | success |
| 35 | 6.01 | - 58.12 | fracture |
| 40 | 3.47 | - 85.11 | fracture |

마찬가지 방법으로 유한 요소 해석을 통하여 원통형, 육각형 및 바닥에 요철이 있는 원통형 컵의 성형 최대압력을 결정하였으며 이를 Table 6에 최초성형압력과 아울러 정리하였다.

**Table 6 Pressure setting obtained from FE analysis**

| punch shape | blank size (mm) | $p_{ini}$ (MPA) | $p_{max}$ (MPA) |
|---|---|---|---|
| hemispherical | 80 | 1 | 22 |
| | 90 | 1 | 28 |
| cylindrical | 80 | 6 | 33 |
| | 90 | 3 | 35 |
| hexagonal | 72 | 8 | 41 |
| cylindrical with concave bottom | 80 | 15 | 40 |
| | 90 | 10 | 45 |

Fig. 2는 이상과 같은 방법으로 구한 반구형 컵의 최적 압력 곡선이며 블랭크 직경이 작을 경우가 블랭크 직경이 큰 경우에 비하여 최종성형압력은 낮지만 펀치 변위가 같을 경우 더 높은 압력을 요구하고 있다. 이 이유는 Table 1에 나타낸 바와 같이 블랭크 직경이 80mm인 경우는 성형깊이가 22.5mm 인데 비하여 블랭크 직경이 90mm인 경우는 성형깊이가 30mm로 다르기 때문이다. 나머지 경우도 반구형펀치에서와 마찬가지로 최초성형압력과 최종성형 압력사이를 펀치 침투체적으로부터 보간하여 사용한다.

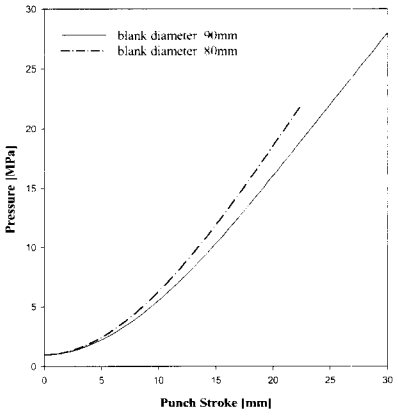



**Fig. 2 Optimal pressure curve (hemispherical cup)**

## 3. 하이드로포밍 실험 및 결과 고찰

### 3.1 실험 장치의 구성과 압력 곡선의 추종

전체 시스템은 성형부와 유압부, PC와 이에 연결되는 인터페이스 및 측정 장치로 구성되어 있다. Fig. 3은 실험에 사용한 CNC 하이드로포밍 프레스의 사진을, 그리고 Fig. 4는 제어 시스템의 개략도를 나타낸다.

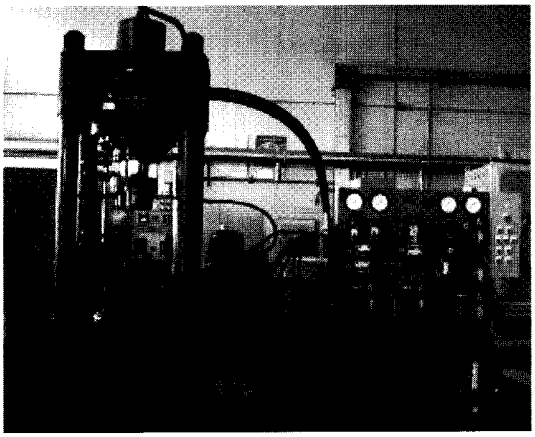


**Fig. 3 Front view of CNC hydroforming press**

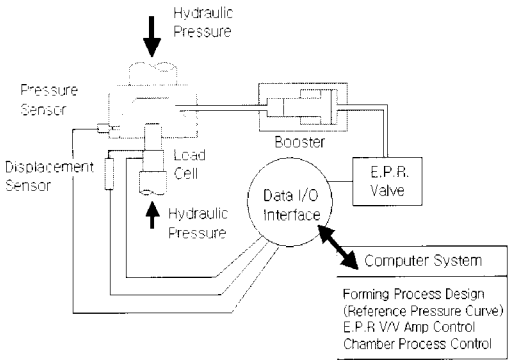



**Fig. 4 Schematic diagram of control system for hydroforming press**

비례 제어 릴리이프 밸브는 개회로 제어 시스템(open-loop control system)에 의해 제어가 이루어지며 센서에서 측정된 변위와 압력, 하중이 데이터 입출력 인터페이스를 통하여 PC로 보내진다. 입력 받은 변위 신호에 따라 프로그래밍된 알고리즘에 의하여 비례 제어 릴리이프 밸브(Model : Nachi, ER-G06-3-10)를 구동하기 위한 컨트롤러(Model : Nachi, EDC-PC6-AWZ-D2 -20)의 각 채널에 디지털 신호를 분배하도록 구성되어 있다. 6개의 각 채널에 설정된 전류에 해당하는 압력이 비례 제어 릴리이프 밸브에 설정이 되고 이 압력이 부스터(booster)의 입구측 압력이 된다. 이 압력은 부스터에 의해 승압되어 성형실에서 성형에 필요한 최종 압력으로 된다.

비례 제어 릴리이프 밸브 컨트롤러의 각 채널에 설정된 전류 값에 의해서 그 값에 해당되는 압력이 비례 제어 릴리이프 밸브에 설정되므로 이를 제어하기 위해서 도출된 압력 곡선을 6개의 부분으로 나누어 각각의 임계점에 대한 압력을 릴리이프 밸브의 각 채널에 압력에 해당하는 전류 값으로 설정하여 목적하는 압력 곡선을 추종하도록 하였다. 입력 전류 대 압력 특성의 관계는 비례 제어 릴리이프 밸브의 성능 곡선으로부터 얻었으며, 시스템의 동특성을 고려하기 위하여 펀치를 진행시키지 않은 상태에서 부스터의 입구측 압력을 조절했을 때 실제로 압력실에서 측정되는 압력의 관계를 구하여 이를 실제 실험에 적용하였다.

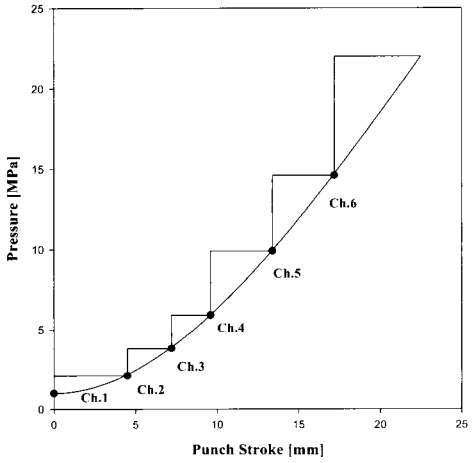



**Fig. 5 critical points of the reference pressure curve for the vale controller**

Fig. 5는 압력 곡선의 기울기가 유사한 구간을 6개로 나누어 각 구간의 경계점을 압력 제어의 임계점으로 설정한 예를 나타낸다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 임계점 구간 사이에서의 압력 변환 형태는 계단 입력(step input)이지만 하이드로포밍 프레스의 느린 응답성으로 실제 압력은 선형적으로 증가하는 형태를 나타낸다. 시스템의 느린 응답성을 역이용하여 선형적으로 증가하는 압력 형태를 얻을 수 있었다. 이 때 압력 곡선의 직선부는 등간격으로 분할하여 분할점을 임계점으로 설정하였다

### 3.2 성형 실험

실험에는 Fig. 1과 같은 반구형, 원통형, 육각형 그리고 바닥에 요철이 있는 원통형 펀치를 사용하였다. 제안한 최적 성형 압력 곡선의 적용 타당성을 확인하기 위하

여 하이드로포밍 프레스에서 실험을 수행하였다.

### 3.2.1 반구형 컵의 성형

Table 7은 Fig. 2와 같은 최적 압력 곡선을 구현하기 위해 비례 제어 릴리이프 밸브 컨트롤더의 각 채널에 설정한 전류를 나타낸다. Fig. 5에서 언급한 바와 같이 Table 7의 각 채널은 압력 곡선의 임계점을 나타낸다.

**Table 7 Current setting at controller**

| ch | $\phi$80 | | | $\phi$90 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | stroke [mm] | current [mA] | pressure [MPa] | stroke [mm] | current [mA] | pressure [MPa] |
| 1 | 0 | 100 | 2 | 0 | 100 | 2 |
| 2 | 4 | 110 | 3 | 4.5 | 115 | 3.5 |
| 3 | 6.1 | 120 | 5 | 7.3 | 130 | 5.5 |
| 4 | 8.9 | 150 | 9 | 9.6 | 145 | 8.5 |
| 5 | 12.5 | 207 | 13 | 13.4 | 207 | 13 |
| 6 | 16 | 323.5 | 22 | 17.2 | 405 | 28 |

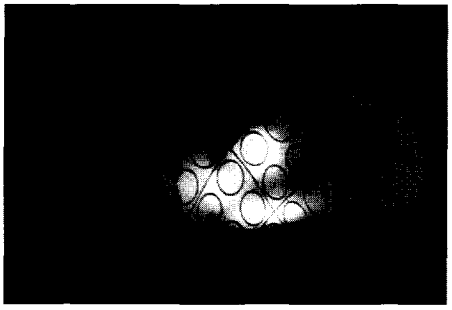


**Fig. 6 Deformed specimen ( $\phi$80)**

Fig. 6은 직경 80mm인 블랭크로 파단이나 주름이 없이 성공적으로 성형이 이루어진 시편의 모양을 보여주고 있다.

Fig. 7은 압력곡선의 목표값과 실제 실험으로부터 얻은 압력값을 나타낸 것으로 실험치가 목표치에 비교적 비슷하게 추종하고 있으나 실험에 적용한 압력 제어 시스템이 개회로 제어 시스템이기 때문에 유압 시스템의 동특성에 의한 영향이나, 펀치가 압력실 안으로 침투함으로써 발생하는 추가적인 압력 발생 등과 같은 외란에 대해 오차등을 보상하기가 어려워 압력 곡선을 정확하게 추종하지는 않고 있다. 그렇지만 Fig. 5와 같은 방식의 계단형의 압력설정 방식으로도 하이드로포밍과 같은 비교적 속도가 느린 단조증가 경향의 압력곡선을 비교적 개회로 제어시스템으로도 만족할 만한 압력제어가 이루어 진다는 것을 확인할 수가 있어 비교적 저가의 압력제어 시스템의 구축 가능성을 발견할 수 있었다. Fig. 8은 성형후의 두께 변형률을 나타낸 것으로 유한요소해석 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있고, 두께변형률의 최소치가 10% 미만으로 나타나 비교적 양호하게 나타나 본 연구에서 제안하는 최적압력곡선의 설정방법이 타당한 것을 알 수 있다.

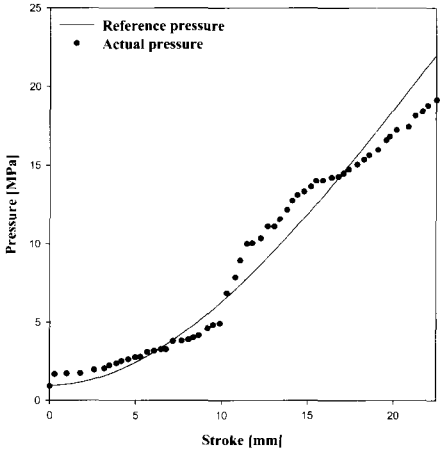



**Fig. 7 Pressure-stroke curve (hemispherical cup, $\phi$80)**

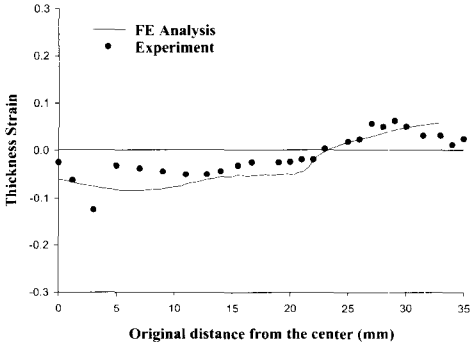



**Fig. 8 Thickness strain (hemispherical cup, $\phi$80)**

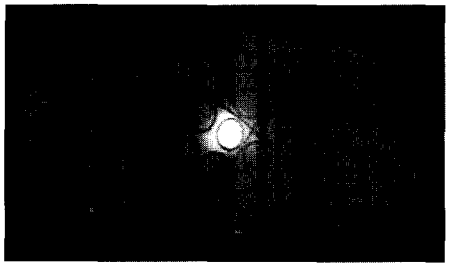


**Fig. 9 Failure due to insufficient pressure ( $\phi$80)**

Fig. 9는 압력설정이 불충분할 경우에 발생하는 불량 현상을 보여주는 것으로 이 시편은 최초성형압력 7MPa, 최종성형압력이 17MPa로 성형이 된 것으로 Table 6에서의 제시하는 공정조건인 최초성형압력 1MPa, 최종성형압력 22MPa보다 높은 상태에서 성형이 시작되었지만 최종성형압력이 낮아 찌그러짐이 발생된 것으로 최적압력곡선에서 벗어나면 불량이 발생되는 것을 확인하였다.

### 3.2.2 원통형 컵의 성형

원통형 컵의 경우 반구형 컵과 마찬가지로 블랭크 직경 80mm와 90mm로 성형하였다.

Fig. 10은 블랭크 직경이 80mm인 경우의 성형된 제품을 나타낸 것으로 소재의 이방성에 의해 약한 귀발생이 관측되었다. 실제 인장시험을 통해 측정한 이 소재의 이방성계수는 $R_0 = 1.60, R_{45} = 1.21, R_{90} = 1.46$으로 약간의 평면이방성을 보여주고 있다.

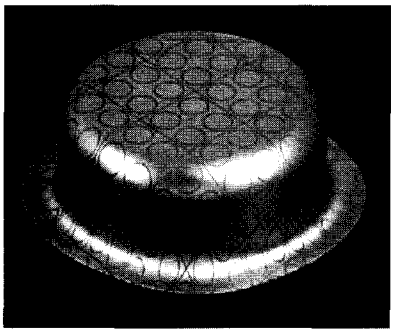


**Fig. 10 Deformed specimen ( $\phi$80)**

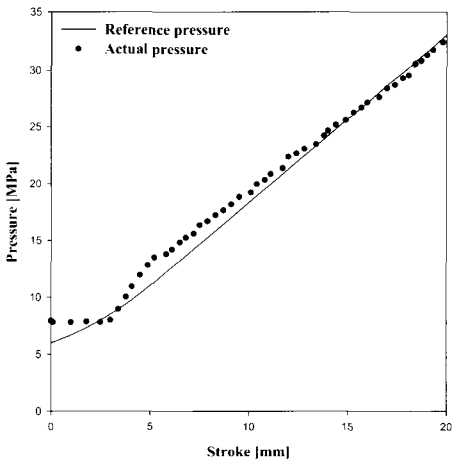



**Fig. 11 Pressure curve (cylindrical cup, $\phi$80)**

Fig. 11은 설정한 압력곡선과 성형중 실제로 작용하는 압력측정치를 비교한 것으로 압력 제어기가 압력 곡선의 직선부에서는 상당히 양호한 추종성을 보여주고 있다. Fig. 12은 두께변형률분포로 실험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있어 실제 압력이 목표치대로 잘 추종하고 있기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

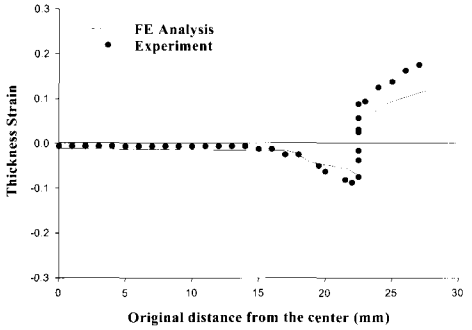
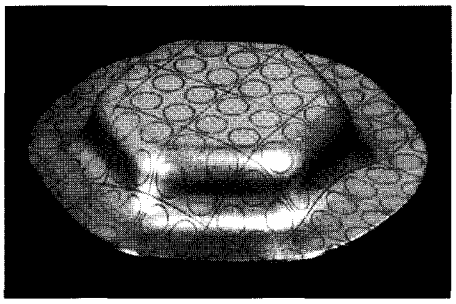



**Fig. 12 Thickness strain (cylindrical cup, $\phi$80)**



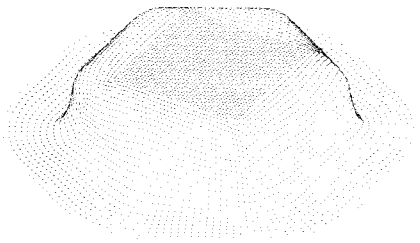


**Fig. 13 Deformed specimen ( $\phi$72)**

### 3.2.3 육각형 컵의 성형

Fig. 13은 블랭크 크기가 $\phi$72인 원형블랭크로 성형한 성형후의 시편모습과 유한요소 해석결과를 나타낸다. 펀치의 기하학적 모양으로 인해서 반구형 컵이나 원통형 컵에서 발생하는 귀발생 현상은 관측되지 않고 있다. 앞서의 형상과 달리 육각형 컵의 경우에는 펀치벽면의 모

서리부위에서 급격하게 굽힘이 이루어지기 때문에 공정이 불안정해져 성형 깊이를 크게 할 수 없었고, 또한 실제로 제품을 성공적으로 성형하기 위해서는 모서리 부분에서 충분한 신장이 일어나도록 성형 초기 압력을 크게 해주어야 한다는 것을 유한 요소 해석과 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

Fig. 14는 압력이 부적절하여 주름이 발생된 시편의 모습을 보여주는데 실제로 이 시편을 성형하면서 측정된 압력은 최초압력 2MPa, 최종압력 25MPa로 Table 6에서 제시하는 압력값인 최초압력 8MPa, 최종압력 41MPa보다 낮았기 때문에 얻어진 결과이다. 따라서 하이드로포밍 공정에서 최적압력곡선을 유지하지 못할 경우 불량이 발생되는 것을 확인할 수 있다.

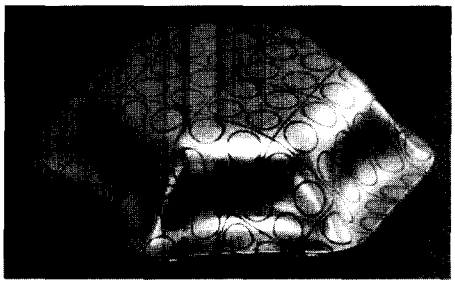


**Fig. 14 Wrinkling due to insufficient pressure (hexagonal cup)**

### 3.2.4 바닥에 요철이 있는 원통형 컵의 성형

Fig. 15는 블랭크 크기 80mm인 경우 성형된 후의 시편의 모양을 나타내고 있는데 원통형 컵에서와 마찬가지로 귀발생이 나타났다. 바닥에 요철이 있는 제품은 일반적인 스탬핑 공정에서는 한번에 성형이 어려운 편이지만 하이드로포밍 공정에서는 압력의 작용에 의해 소재가 펀치 바닥 부분의 요철에 밀착함으로써 성형이 가능함을 실험을 통하여 확인하였다.

Fig. 16은 펀치를 진행시키지 않고 최초성형압력만 가했을 때 소재가 펀치의 바닥면 모양으로 예비 성형된 모습을, 그리고 Fig. 17은 $\phi$90의 블랭크로 성형된 시편의 모양을, 그리고 Fig. 18은 두께분포를 비교한 것인데 실험과 해석결과가 대체로 잘 일치하고 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 판재 하이드로포밍시 주름이나 파단이 없는 제품 성형을 위한 최적 압력 곡선의 결정방법을 제안하였고 아울러 판재하이드로포밍기의 압력제어시스템을 개발하였다. 최적압력곡선은 판재의 초기불안정조건으로부터 최초성형압력을 구하고 이로부터 최종성형 압력까지 펀치침투체적에 비례하도록 하여 성형해석을 수행하고 성형해석 결과로부터 최적압력곡선을 유도하였다. 본 연구에서 개발된 방법의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 수행하였으며 실험결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

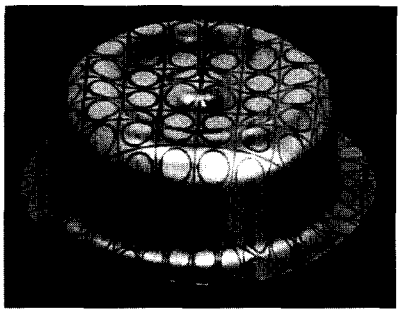


**Fig. 15 Deformed shape ( $\phi$80)**

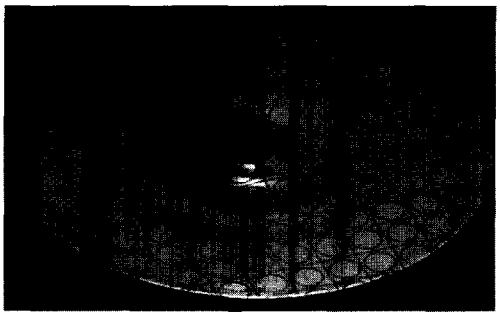


**Fig. 16 Pre-deformation of blank due to initial pressure**

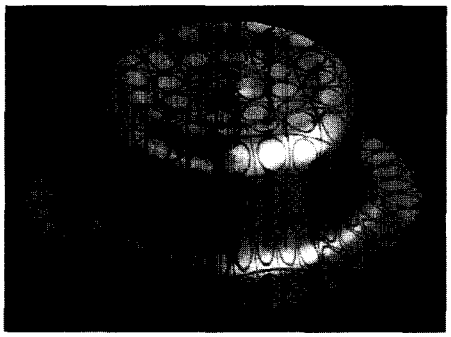


**Fig. 17 Deformed shape ( $\phi$90)**

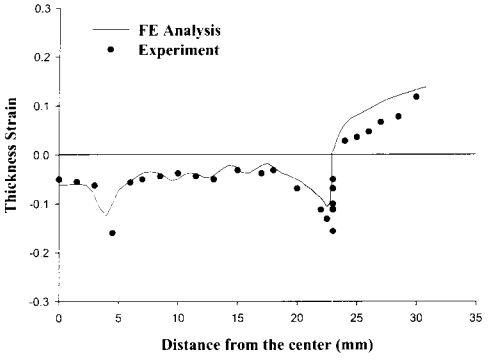



**Fig. 18 Thickness strain distribution (cylindrical cup with concave bottom, $\phi 90$)**

(1) 최적압력곡선을 결정하는 간단한 방법을 제안하였고 이 방법에 의해 결정된 압력곡선이 하이드로포밍 공정에 성공적으로 적용됨을 실험을 통하여 확인하였다.

(2) 비례제어 릴리프밸브를 채택한 개회로 압력제어시스템을 개발하였으며 실험결과 목표치에 양호하게 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 드로잉비가 큰 경우에도 하이드로포밍공정에서는 성공적으로 성형이 이루어짐을 알 수 있었다.

(4) 서보밸브대신 비교적 가격이 저렴한 비례제어릴리프밸브를 채택한 압력제어시스템이 하이드로포밍공정의 제어에 성공적으로 적용이 이루어짐에 따라 저가의 장비 개발가능성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌 한국21사업과 2001학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의하여 지원되었으며, 본 연구를 위해 장비를 기증하여 주신 한국과학기술원장님께 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) J. Tirosh, S.Yossifon, R. Eshel and A. Betzur, 1977, "Hydroforming process for Uniform Wall Thickness Products", Trans. ASME, J. Engr. for Ind., Vol. 99, pp. 685~690.

(2) S.Yossifon, J. Tirosh and E. Kochani, 1984, "On Suppression of Plastic Buckling in Hydroforming Process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, pp. 389~402.

(3) T. S. Noh and D. Y. Yang, 1987, "Analysis of Hydroforming of Regular polygonal Boxes", Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, pp. 139~148.

(4) T. S. Noh and D. Y. Yang, 1998, "A General Formulation for Hydroforming of Arbitrarily Shaped Boxes and Its Application to Hydroforming of an Elliptic-Circular Box", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, pp. 481~488.

(5) 이우호, 조형석, 1999, "하이드로포밍 공정의 동특성 해석 및 시뮬레이션", 한국정밀공학회지 제16권 제11호, pp. 122~132.

(6) 이우호, 조형석, 2000, "CMAC 제어 기법을 이용한 하이드로포밍 공정의 압력 제어기 설계", 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제6권 제3호, pp. 329~337.

(7) M. J. Kim, 1991, "A Fuzzy based Pressure Tracki -ng Controller Design for Hydroforming Process", Korea Advanced Institute of Science and Technolo -gy, Ph.D dissertation.