

## 관재 하이드로 포밍에 의한 성형 공정의 실험적 연구

김성태\* · 임성언\*\* · 이택근\*\* · 김영석\*\*\*

(1999년 8월 16일 접수)

# Experimental Studies of the Forming Process for the Tubular Hydroforming Technology

S.T. Kim, S.E. Lim, T.K. Lee and Y.S. Kim

### Abstract

In this paper, we developed the hydroforming simulator which can apply an axial compressive force and high internal pressure to bulge a tube. Experimental studies have been performed to investigate the effect of each parameters such as internal pressure and axial compression stroke required for the forming of circular components. Under the improper forming conditions there were two forming failures. One was the axial buckling due to excessive axial compressive load and the other was the circumferential necking fracture due to relatively high internal pressure. A safe forming zone without any failures exists between these two extreme zones. Also the condition of forming failure such as fracture is examined throughout the theoretical analysis. This paper covers a brief overview of the mechanism of hydroforming process as well as the design of die and tools.

**Key Words** : Tube Hydro Forming Technology, Internal Pressure, Axial Compression Stroke, Forming Failure, Forming Limit Curve

### 1. 서 론

최근 관재 하이드로 포밍 기술은 자동차산업의 차체 경량화 및 부품의 가격절감의 시대적 요구에 의해 관심이 높아지고 있다. 이 신 기술은 현재 자동차산업이 직면하고 있는 경량화 및 고품질(안정성 및 내식성)확보에 대한 사회적 요구를 충족시킬 수 있고, 가격경쟁력이 뛰

어난 자동차를 생산하기 위한 방법으로 선진 자동차업체를 중심으로 널리 사용되고 있다. 유럽, 미국 및 일본의 자동차 업체는 이미 이 기술을 이용하여 차체 프레임, 각종 빔, 배기시스템 및 각종샤프트 등의 부품 양산화를 하고 있으나<sup>(1,2)</sup>, 국내 자동차 업계의 동 기술 개발은 매우 미비한 상태로서, 국산 자동차의 국제 경쟁력 강화를 위해 독자적인 관재 하이드로 포밍 기술확보가 절실히

\* 현대자동차 금형기술개발부

\*\* 경북대학교 기계공학부 대학원

\*\*\* 경북대학교 기계공학부

요구되고 있는 실정이다.<sup>(3)</sup>

관재 하이드로 포밍 기술은 기존의 관재를 이용한 프레스 성형 방법에 비해 액압에 의해 관재의 단면 형상을 자유롭게 가공할 수 있고 나아가 생산공정을 줄일 수가 있으며, 균일변형에 의한 재료의 가공경화 효과를 통해 보다 강성이 높은 부품을 생산할 수 있는 장점이 있다. 또한 프레스 가공제품에서와 같이 접합을 위한 용접공정이 생략되는 것에 의해 품질 및 치수정밀도 향상 등과 같은 추가적인 기대효과가 있다.<sup>(4,5,6)</sup>

관재의 프레스 성형기술과 마찬가지로 관재 하이드로 포밍 기술은 최적화를 위해 많은 공정변수 및 재료변수가 고려되어야 하지만, 실제 가공에서는 실험적, 이론적 자료가 충분하지 못해 어려움이 많은 실정이다.

본 연구에서는 이론적 고찰을 통해 관재 하이드로 포밍공정에서 내압에 의한 관재의 파단발생 조건에 대해서 해석하였고, 관재 하이드로 포밍 시뮬레이터를 개발하여<sup>(7,8)</sup> 원형 관재로부터 원형단면으로의 성형실험을 수행하여 관재의 하이드로 포밍 성형성에 영향을 미치는 성형인자 즉, 내압 및 축 압입량의 효과에 대한 고찰과 가공 불량(주름, 좌굴 및 파단) 발생현계에 대해 검토하였다.

## 2. 이론

### 2.1 기초관계식

내압에 의한 축대칭 형상의 벌징가공에 있어서, 원주방향 응력을  $\sigma_\theta$ , 축방향 응력을  $\sigma_t$ , 두께방향 응력을  $\sigma_r$  라고 하자. 얇은 관재의 벌징가공에 대해서  $\sigma_r$ 는 매우 작아 무시되므로 ( $\sigma_r \approx 0$ ) Hill의 2차 이방성 항복조건식과 재료의 유동법칙으로부터 유효응력  $\bar{\sigma}$ 와 유효변형률 증분  $d\bar{\epsilon}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{1+R} [\sigma_t^2 + \sigma_\theta^2 + R(\sigma_t - \sigma_\theta)^2] \quad (1)$$

$$d\bar{\epsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{d\epsilon_t^2 + d\epsilon_\theta^2 + \frac{2R}{1+R} d\epsilon_t d\epsilon_\theta} \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 수직이방성 계수이고, 각 방향 변형률 증분은 다음과 같다.

$$d\epsilon_t = \frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \left[ \sigma_t - \frac{R}{1+R} \sigma_\theta \right] \quad (3)$$

$$d\epsilon_\theta = \frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \left[ \sigma_\theta - \frac{R}{1+R} \sigma_t \right] \quad (4)$$

$$d\epsilon_r = -\frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \frac{1}{1+R} [\sigma_t + \sigma_\theta] \quad (5)$$

여기서  $d\epsilon_t$ ,  $d\epsilon_\theta$  및  $d\epsilon_r$ 는 각각 축방향, 원주방향 그리고 두께방향 변형률 증분이다. 체적 일정조건은 다음과 같다.

$$d\epsilon_t + d\epsilon_\theta + d\epsilon_r = 0 \quad (6)$$

재료의 가공경화특성을 나타내는 응력-변형률 관계식은 다음의 멱경화법칙으로 표시된다고 가정한다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (7)$$

만약 관재의 벌징가공중에 주 응력비가 일정하다고 가정하면 주 변형률 증분비 또한 일정한 값을 가지게 된다.

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_\theta}, \quad \gamma = \frac{d\epsilon_t}{d\epsilon_\theta} = \frac{\alpha - \frac{R}{1+R}}{1 - \frac{R}{1+R} \alpha} \quad (8)$$

식(3), 식(4)와 식(1)의 관계로부터 원주방향 변형률 증분과 두께방향 변형률 증분은 다음과 같이 표현된다.

$$d\epsilon_\theta = \frac{1}{\sqrt{1+R}} \frac{1+R(1-\alpha)}{\sqrt{\alpha^2 + 1 + R(\alpha-1)^2}} d\bar{\epsilon} \quad (9)$$

$$d\epsilon_t = -\frac{1}{\sqrt{1+R}} \frac{1+\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2 + R(1-\alpha)^2}} d\bar{\epsilon} \quad (10)$$

여기서 원주방향 변형률과 두께방향 변형률은 각각  $\epsilon_\theta = \ln(r/r_0)$ 와  $\epsilon_t = \ln(t/t_0)$ 로 정의된다. 또한  $r_0$ 와  $t_0$ 는 성형전 관재반경과 두께이며,  $r$ 과  $t$ 는 성형중의 관재 반경과 두께이고  $t = t_0 \exp\{-(\gamma+1)\epsilon_\theta\}$ ,  $r = r_0 \exp(\epsilon_\theta)$  관계를 갖는다.

식(3)과 식(4)에  $\sigma_\theta = pr/t$  값을 대입하여 정리하면 관재에 작용하는 내압  $p$ 와 변형률 성분과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{p} = \frac{\bar{\sigma}}{\varepsilon} \frac{t}{r} \left[ \frac{\varepsilon_{\theta} + \frac{R}{1+R} \varepsilon_l}{1 - \left( \frac{R}{1+R} \right)^2} \right] \quad (11)$$

2.2 내압과 축압축이 작용하는 원관의 소성불안정(넉발생) 해석

내압  $p$ 에 의해 원주방향에 수직한 넉(파단)이 발생하기 위한 불안정 조건은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

$$dp = d\left(\frac{\sigma_{\theta} t}{r}\right) = 0 \quad (12)$$

식(12)를 정리하고 식(8)의 관계를 이용하면

$$\frac{d\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}} = (\gamma + 2)d\varepsilon_{\theta} \quad (13)$$

가 된다.

식(1)의 관계를 이용하면 위식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = (\gamma + 2)d\varepsilon_{\theta} \quad (14)$$

따라서 식(9)을 식(14)에 대입하여 정리하면

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon} = \frac{\gamma + 2}{\sqrt{1+R}} \frac{1 + R(1-\alpha)}{\sqrt{1 + \alpha^2 + R(\alpha-1)^2}} \bar{\sigma} \quad (15)$$

식(7)의 응력-변형률 관계식을 식(15)에 대입하여 정리하면 넉 발생시 유효 변형률은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = \frac{n}{\gamma + 2} \frac{\sqrt{1+R}\sqrt{1 + \alpha^2 + R(1-\alpha)^2}}{1 + R(1-\alpha)} \quad (16)$$

따라서 식(9)에 식(16)을 대입하여 정리하면 넉발생시 원주방향 변형률을 다음과 같이 구할수 있다.

$$\varepsilon_{\theta, \max} = \frac{n}{\gamma + 2} \quad (17)$$

$\gamma$ 의 정의를 이용하면 식(17)은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{l, \max} + 2\varepsilon_{\theta, \max} = n \quad (18)$$

또한, 식(6), 식(17), 그리고 식(18)로부터 넉 발생시 두께방향 변형률은 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_{l, \max} = -\frac{\gamma + 1}{\gamma + 2} n \quad (19)$$

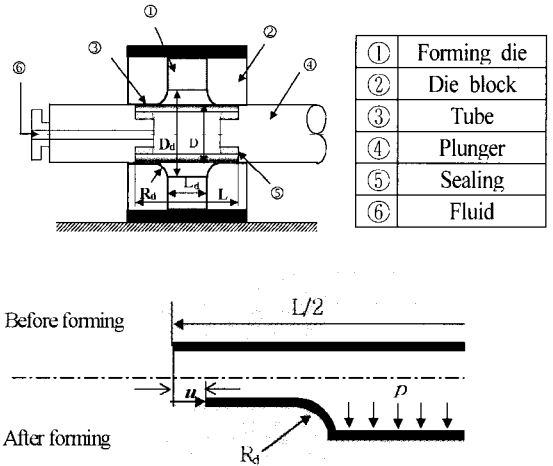


Fig. 1 Schematic diagram of die arrangement and concept of hydroforming process

이 식으로부터 주 변형률비가  $\gamma = -1$ 인 성형모드(forming mode), 즉  $\alpha = -1$ 일 때는 식(10)으로부터 두께방향 변형률  $\varepsilon_l = 0$ 가 됨을 알 수 있다. 이는  $\alpha = -1$ 인 변형모드에서는 이론적으로 성형과정중에 주름이 발생되지 않는 한 관재의 벽에서 두께가 얇아지지 않고 넉에 의한 파단이 발생되지 않는 것을 의미한다.

본 연구에서는 이론적으로 도출한 식(18) 대신 관재의 성형한계선(Forming Limit Curve, FLC)<sup>(9)</sup>을 도출하기 위한 장출 성형실험에서 구한 성형한계선의 하한 값인 FLC<sub>0</sub>를 이용한 다음의 식으로 관재의 파단 발생 한계를 평가하였다.

$$\varepsilon_l + 2\varepsilon_{\theta} = \ln(1 + 0.01FLC_0) , \quad \varepsilon_l \leq 0 \quad (20)$$

파단발생시 관재에 작용하는 내압(파단압력),  $p_{cr}$ 과 변형률성분과의 관계는 식(20)를 식(11)에 대입함으로써 구

할 수 있다.

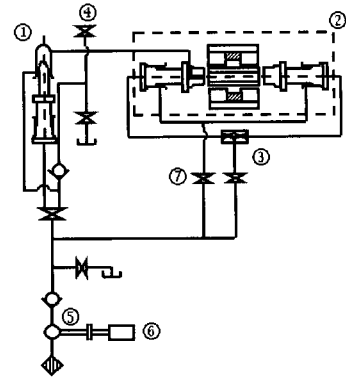
$$p_{cr} = \frac{\bar{\sigma}}{\varepsilon} \frac{t}{r} \left[ \frac{\ln(1 + 0.01FLC_0) + \frac{2+R}{1+R} \varepsilon_l}{1 - \left(\frac{R}{1+R}\right)^2} \right] \quad (21)$$

### 3. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 본 연구에서 사용한 관재 하이드로 포밍 시뮬레이터의 구조와 가공 공정의 개념을 나타낸 것이다. 관재 하이드로 포밍실험은 다음과 같은 순서로 순차적으로 수행하였다. 먼저 소정의 두께와 외경을 갖는 풀림처리된 원형 관재를 금형(die) 사이에 놓고, 상하 금형을 프레스 가압에 의해 체결한 후에 양쪽 플런저(plunger)를 관재의 양쪽 끝단이 봉인(sealing)되도록 전진시킨다. 가공유는 플런저의 중앙부를 관통하는 유로를 통해 관재 내부로 유입된다. 관재 내부의 잔류공기를 배기시킨 후 증압기를 작동시키면 플런저와 연결되어 있는 유압펌프를 통해 내압이 지속적으로 관내에 작용하여 관재의 벌징(bulging)가공이 일어나게 된다. 관재가 벌징가공되면서 축방향 길이가 짧아지므로 이를 보상하기 위해 양쪽의 플런저가 전진하면서 관재의 길이방향으로 축 압축력이 가해진다. 플런저의 축 압입량과 관내에 작용하는 내압은 관재가 외부의 금형에 완전히 밀착되도록 성형이 될 때까지 특정한 경로를 따라 작용하도록 한다. 관재가 원하는 금형 형상으로 성형이 된 후에는 관재 내부에 작용하고 있는 내압을 제거하고, 양쪽 플런저를 후퇴시켜 축 압축력도 제거한다. 한편 관재 내부에 고압이 발생될 때 관내 양쪽으로 가공유의 누수를 방지하기 위해 플런저 양 끝단은 우레탄 및 오링(o-ring)을 사용하여 봉인하였다.

Fig.2에 하이드로 포밍 시뮬레이터의 시스템 회로도를 나타내었다. 관재 내부에 작용하는 내압은 플런저와 연결된 증압기의 내압 조절밸브를 통해 조절된다. 또한 축방향 가압력은 플런저의 압력조절밸브를 통해 조절되고, 축압축 속도조절밸브를 통해 플런저의 변위가 제어된다. 증압기는 최대 100MPa까지 압력 제어가 가능하며 플런저의 축 방향변위는 최고 50mm까지 가능하도록 설계되었다.

Table 1에 금형과 원형 관재의 재원 및 규격을 나타내었다. 실험에서 사용된 재료는 기계 구조용 탄소 강관인 STKM 11A이다. 관재는 내외경 인발을 통해 두께를



①	Internal pressure intensifier
②	The main of hydroforming unit
③	Plunger pressure control valve
④	Internal pressure control valve
⑤	Pump
⑥	Motor
⑦	Axial compression speed control valve

Fig. 2 Hydraulic circuit of the hydroforming simulator

Table 1 The size of forming die and pipe

Pipe	$D$ /mm	40	
	$t$ /mm	1.2	
	$L$ /mm	300	
Forming die	Shape	Circular	Square
	$D_d$ /mm	60	63.6
	$L_d$ /mm	80	80
	$R_d$ /mm	10	10

1.2mm, 외경을 40mm로 가공되었으며, 조관공정에서의 심 용접부와 관재의 인발 가공에서 발생한 응력제거를 위해 600℃에서 40분동안 풀림 처리하였다. 풀림 처리 후 심 용접부의 재료물성의 불균일성의 영향을 무시할 수 있는 정도라고 가정하고 인장 시험편은 심 용접부를 포함하지 않는 관재영역으로 부터 길이방향에 평형하게 KS-13호 규격시험편을 채취하였고, 4회의 인장시험을 행한 후 평균을 통해 구한 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 또한 장출 성형실험에서 구한 성형한계선을 Fig.3에 나타내었다. 실험에서 구한 관재의 FLC<sub>0</sub>값은 30%이었다.

Table 2 Mechanical properties of STKM 11A pipe

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$7.8 \times 10^3$
E (GPa)	206
K (MPa)	534
$\sigma_y$ (MPa)	215
$n$	0.207
$R$	2.14
El (%)	30.7
$\nu$	0.3

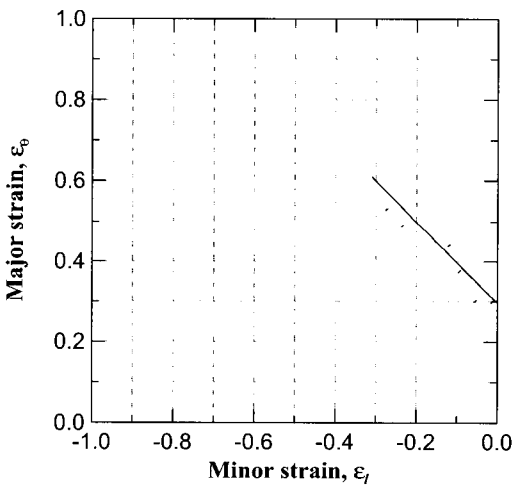


Fig. 3 Forming limit curve formability test

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig.4는 외경이 40mm인 관재로부터 외경이 60mm인 원형 형상으로 가공되는 순차적인 성형과정과 가공불량 예를 나타낸 것이다. 여기에서  $p$ 와  $u$ 는 각 단계에서의 내압과 축 압입량을 나타낸다. 성형이 진행됨에 따라 관재의 중앙부위가 먼저 벌징가공되고, 원형 급형 블록의 형상에 밀착될 때까지 점진적으로 성형이 계속됨을 알 수 있다.

관재 하이드로 포밍 공정 시 가장 중요하게 고려되어야 할 것은 내압과 축 압입량의 최적 부하경로를 찾는 것이다. 성형공정 중 축 압입량이 내압에 비해 상대적으로 너무 작은 경우에는 벌징되는 부분에 충분한 재료의 공급이 이루어지지 못해 원주방향으로 국부 박편화가 진

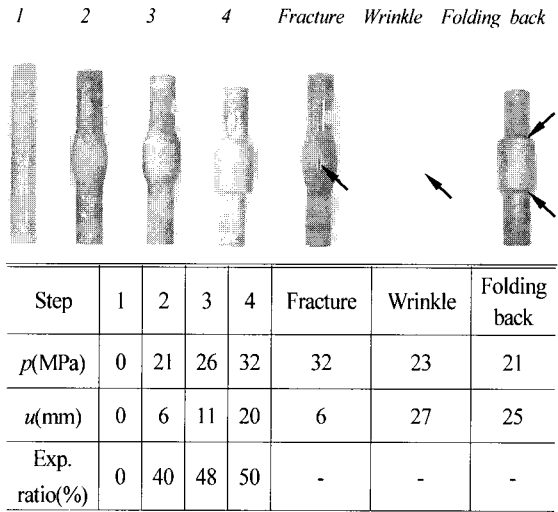


Fig. 4 Deformed shapes of circular tubes in sequences forming and various forming failures

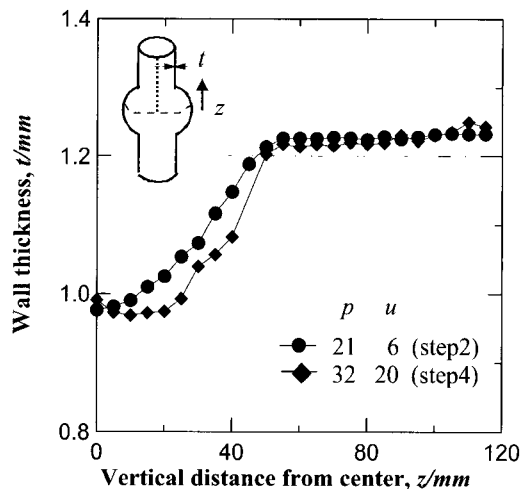


Fig. 5 Wall thickness distributions of the tubes along the axial direction

행된다. 이것은 곧 파단(fracture)으로 이어지게 된다. 이와 반대로 과도한 축 압입량이 관재에 작용하였을 때는 그림에서 보듯이 축방향으로 주름(wrinkle)이 발생하게 된다.

Fig.5는 원형 형상으로 가공된 관재의 축방향으로 측정된 두께 분포를 나타낸다. 축방향으로 작용하는 압축력의 영향으로 벌징가공되지 않은 부분의 두께가 성형 전 관재의 두께보다 두꺼워진 것을 확인 할 수 있다. 그러나 성형이 진행됨에 따라서(2단계 → 4단계) 벌징가공된 영역의 두께가 점차적으로 감소하여 중앙부

( $z=0$ )에서 최소값을 가진다. 4단계에서는 벌징가공된 관재가 금형 블록에 완전히 밀착되어 벌징가공된 영역의 두께분포는 거의 일정하게 최소의 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

Fig.6은 원형 형상으로 가공되는 관재의 길이방향으로 측정된 벌징가공된 반경방향의 형상 프로파일(profile)을 나타낸다. 변형초기에는 관재의 중심에서 벌징가공이 시작되고, 성형이 진행될수록 관재는 금형형상으로 성형되는 것을 알 수 있다. 벌징가공전에 관재의 외 표면에 직경 2.5mm의 원형 그리드를 예칭하고 온전한 성형(safe forming)완료 후 그리드의 변형률을 측정된 결과 관재의 원주방향 연신율은 약 50%정도인 것이 확인되었다. 이것은 Fig.3의 FLC<sub>0</sub>값으로부터 관재의 파단 연신율이 30.7%인 것에 반해 축압입의 효과로 관재의 가공성이 향상된 것을 의미한다. 이는 통상 관재가공에 있어서의 가공한계를 나타내는 성형한계선이 단축인장 예변형후 평면변형 상태 또는 2축인장 상태로 부하경로가 바뀌는 경우는 단순 비례부하 경로의 경우보다 가공성이 증가한다는 사실을 뒷받침하고 있다.

Fig.7은 원형 형상으로 가공된 관재에 대해서 다양한 내압-축 압입량의 부하경로 하에서 파단과 주름발생 영역을 나타낸 것이다. 그림으로부터 주름과 파단등 가공 불량 발생하지 않는 안전한 영역, 즉 Fig.4에서와 같이 온전한 성형이 이루어지는 부하경로는 파단과 주름발생 영역 사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 하지만 성형과정이 그림에서 빗금 친 영역 어느 쪽에라도 속하게 되면 파단, 주름 및 좌굴로 이어지게 된다.

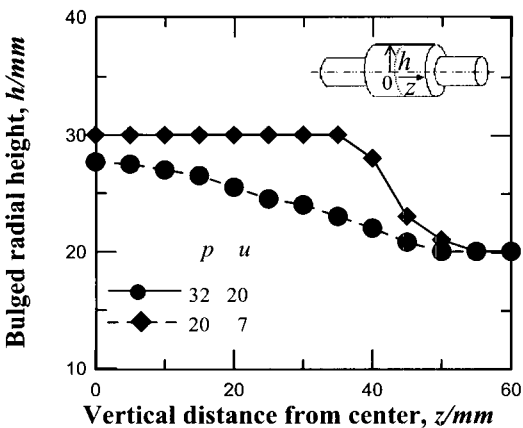


Fig. 6 Bulged radial heights of the tubes measured along the horizontal distance

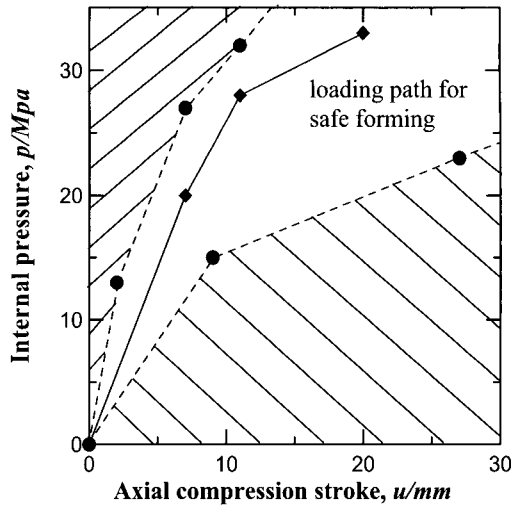


Fig. 7 Relationship between internal pressure and axial compression stroke

Fig.8은 주 변형률비가  $\gamma=0$ ,  $\gamma=-1/2$ ,  $\gamma=-1$ 인 성형모드에 대해서 이론식(11)로부터 구한 성형압력과 원주방향 변형률과의 관계를 나타낸다.  $\gamma=0$ 은 평면변형률 상태의 경우이고  $\gamma=-1/2$ 는 단축인장 상태의 경우이다. 그리고  $\gamma=-1$ 은 두께변형률이 0가 되는 가장 이상적인 성형모드로 순수전단 상태의 경우이다. 그림으로부터 각 성형모드에 대해서 성형압력은 원주방향 변형률이 증가하면 급격히 증가하여 최대값에 달하고 그 후 점차 감소한다. 특히 평면변형 상태의 경우가 최대값에 달한 후에 압력감소가 심한 것을 알 수 있다. 변형률비가 0,  $-1/2$  및  $-1$ 로 변화함에 따라 벌징성형에 필요한 압력이 전체적으로 낮아지고, 압력이 최대가 될 때의 원주방향 변형률 값은 증가하고 있음을 알 수 있다. 성형모드가  $\gamma=-1$ 인 경우에는 다른 두 성형모드와는 달리 압력이 최대가 되는 변형률 값이 명확하지 않다.

압력에 의해 관재의 벌지변형이 제어되는 하이드로 포밍 공정에서는 압력이 최대가 되는 점에서 불안정 현상이 일어나므로 성형압력이 최대값에 달하기 전까지의 영역범위내에서만 성형이 가능하다. 따라서  $\gamma=-1$ 인 성형모드에서는 넥이 발생하기 전까지 원주방향으로 가장 크게 팽창시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

한편,  $\gamma=0$ 와  $\gamma=-1/2$ 인 성형모드에서는 이방성 계수가 큰 값을 가질수록 성형압력이 높아지는 반면  $\gamma=-1$ 에서는 약간 감소하는 경향을 보인다.

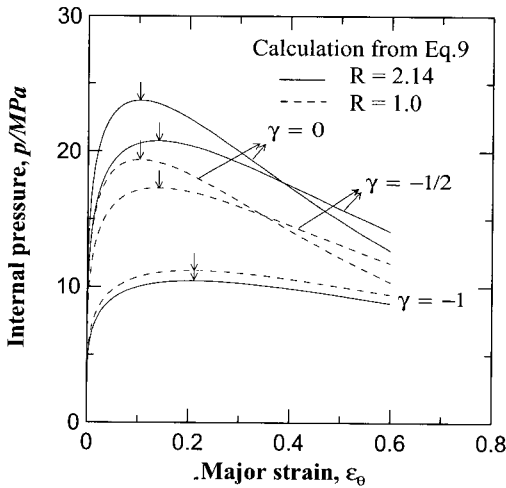


Fig. 8 Relationships between internal pressure and major strain for different forming modes and anisotropic parameters

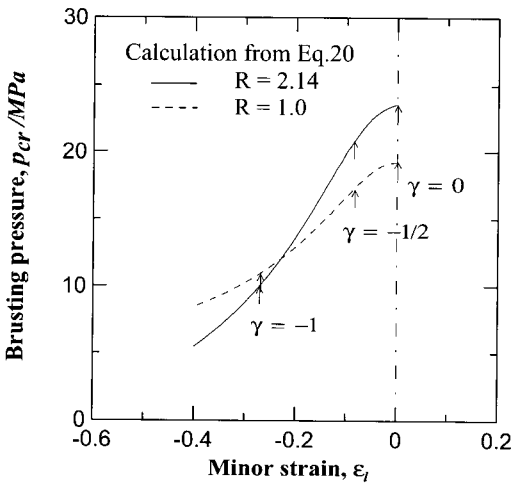


Fig. 9 Relationship between bursting pressure and minor strain for different anisotropic parameters

이는 관재 하이드로 포밍 공정에서의 이방성 항복곡면을 고찰해보면 알 수 있다. 즉,  $\gamma = -1$ 인 성형모드에서는 이방성계수가 커짐에 따라 항복곡면상에서의 항복강도는 낮아지지만,  $\gamma = 0$  및  $\gamma = -1/2$ 의 성형모드에서는 오히려 항복곡면상의 항복강도는 증가하므로 소성 변형을 하기 위해서는 보다 큰 하중이 요구되는 것으로 해석할 수 있다.

Fig.9은 이론식(21)로부터 구한 축방향 변형률과 파단

압력과의 관계를 보여준다. 여기서 파단압력은  $\gamma = 0$  ( $\epsilon_1 = 0$ ), 즉 평면변형률 상태하에서가 최대가 되며, 축방향 변형률이 증가할수록 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 이방성 계수가 큰 값을 가질수록 파단압력은 급격하게 감소한다. 한편  $\gamma = -1/2$ 인 성형모드에 대해서는 이방성 계수 값이 클수록 파단압력이 높지만,  $\gamma = -1$ 인 성형모드에 대해서는 오히려 낮게 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 개발된 관재 하이드로 포밍 시뮬레이터를 이용하여 원형 관재로부터 원형 형상으로 가공된 관재의 성형성 평가를 위한 실험을 수행하였다. 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축 압입량과 내압의 경로에 따라서 파단, 주름 및 좌굴 등의 가공불량이 일어날 수 있으므로 축 압입량과 내압경로의 적절한 선택이 필요하다.
- (2) 원형 관재로부터 원형 형상으로 가공된 관재는 성형 후 일정한 두께분포를 보이고 있다.
- (3) 축 압입은 소재의 가공성을 향상시키는데 기여한다.

## 참고 문헌

- (1) T.Uchikawa, S.Fuchizawa, A.Shirayori and M.Narazaki, 1997, "Bulge forming of copper tubes under internal pressure and axial compression using closed die", Proc. of the 48th Japanese Joint Conf. for JSTP, pp. 365~366.
- (2) F.Dohmann and C.Hartl, 1997, "Tube hydroforming -research and practical application", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 71, pp. 174~186.
- (3) 오수익, 전병희, 1999 "Tube hydroforming을 위한 성형인자 연구", 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 논문집, pp. 32~36.
- (4) M.Ahmed and M.S.J. Hashimi, 1997, "Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 64, pp. 9~23.
- (5) F.J.Lenz. and D.Hoffmann, 1997, "Application of hydroforming for body-in-white", IBEC '97 Body Assembly & Manufacturing, pp. 120~128.

- (6) MAhmetoglu, K.Sutter, and T.Altan, 1998, "Tube hydroforming - current research, applications and need for training" , J. JSTP, Vol. 39, No. 453, pp. 43~48.
- (7) J.S.Park, J.H.Kim, C.D.Park and Y.S.Kim, 1999 "Development of hydroforming simulator for thin walled tube" , Proc. of the Japanese Spring Conf. for JSTP, pp. 235~236.
- (8) 김영석, 1999, 특허출원중.
- (9) 김영석, 1999, 소성역학-이론과 응용, 경북대 기계공학부.