

## Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가

김영석\* · 조흥수\*\* · 박춘달\*\* · 김영삼\*\*\* · 조원제\*\*\*

(2000년 9월 7일 접수)

## Evaluation of Tube Hydroformability

Y. S. Kim, H. S. Cho, C. D. Park, Y. S. Kim and Y. J. Jo

### Abstract

In this paper, the mechanical characteristics and fundamental mechanism of a roll-formed tube during the hydroforming process are investigated in order to obtain the early localization of the tube hydroforming skills which are the core production techniques for the super light weight and high safety of the car body. Also, the theoretical influences of the material variables and the processes on the formability in the tube hydroforming are studied. In addition, the techniques to evaluate the forming limit of the bulging process of a tube are developed.

**Key Words :** Tube Hydroforming Technology, Roll Forming, Forming Characteristic, Tube Hydroformability, Tube Bulge Forming Limit

### 1. 서 론

롤 포밍이나 압출 공정에 의해서 제조된 관재를 이용하는 관재 액압 성형기술(tube hydroforming, THF)은 관재의 내부에 액체를 매개로 높은 압력을 발생시켜 관재를 확장시켜 외부에 설치된 금형에 밀착시켜 원하는 단면형상으로 성형하는 기술로, 이 기술은 현재 자동차사가 직면하고 있는 차량의 경량화와 고품질(안전성 및 내구성) 확보에 대한 사회적인 요구를 충족시킬 수 있어 독일, 미국, 일본의 선진 자동차 업체에서는 이미 차체 프레임, 엔진 크래들, 배기 시스템, 시트 프레임, 라디에이터 프레임들에 활발히 적용되고 있다<sup>(1~4)</sup>.

최근 국내 자동차 업체들도 동 기술의 적극적인 도입과 국산화 기술개발을 추진중이나 기존의 관재 프레스 기술과는 달리 롤 포밍 관재의 재질특성, 액압에 의한 확장 성형한계, 금형과의 접촉에 의한 마찰특성, 굽힘과 같은 예비 성형공정 설계 및 최적 성형을 위한 관재 규격 그리고 최적 부하경로(내압-축압축 변위 선도)등에 대한 기술 축적이 거의 되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 국내 자동차사에서 도입 준비중인 THF 기술의 조기 안정화와 국산화 개발 지원을 목표로 개발중인 THF용 롤 포밍 관재에 대한 물성평가와 원형 관재로부터 사각관재로의 확장 성형공정에 대한 특성을 파악하였다. 또한 액압에 의한 확장 성형한계를 평가할

\* 경북대학교 공과대학 기계공학과  
\*\* 현대자동차  
\*\*\* 경북대학교 대학원 기계공학과

수 있는 기술을 개발하였고, 이론적 해석을 통해 성형성(주름과 파단)에 미치는 제반 물성 및 공정변수의 영향을 정량화 하였다.

## 2. 롤 포밍 관재의 기계적 특성

통상 THF에 사용되는 강관은 조관공정(코일→롤 포밍→ERW→sizing→용접부 열처리)에 의해서 제조된다. 조관공정에서 재료는 원주방향 및 길이방향으로 연신되어 가공경화 된다. 이들 연신율과 가공경화량은 롤 포밍 공정에서 롤의 배치 및 형상 등의 공정변수와 관재의 직경  $D$ 과 두께  $t$ 에 따라서 다르다. 또한 롤 포밍후의 ERW 용접공정에서 용접열 영향으로 용접부와 모재부의 기계적특성이 다르기 때문에 이들이 관재 액압 성형성에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 조관공정에서 기

계적 특성의 변화에 대한 데이터의 확보가 필요하다.

여기서는 다양한 두께와 직경비  $t/D$ 를 갖는 롤 포밍된 관재의 인장특성을 평가하여 코일상태의 관재에 대한 결과와 비교하여 조관공정에서의 재질 변화를 파악하였다. 또한 조관공정에서의 연신율에 대한 데이터와 용접부의 기계적 특성을 파악하여 관재 액압성형 공정에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 1(a)~(d)는 열연구조용 강관 SAPH41 (D114.3 2.6t)에 대해 KS13B 시편을 채취하여 인장실험에서 구한 용접부와 모재부 및 방향별 인장응력-변형률 선도를 나타낸다. Table 1은 인장실험에 의한 기계적 특성을 나타낸다.

조관재에 대해서는 전체적으로 길이방향으로는 용접부와 모재부의 특성에 큰 차이는 보이지 않는 반면, 용접부의 존재 유무에 관계없이 길이방향과 원주방향의 연

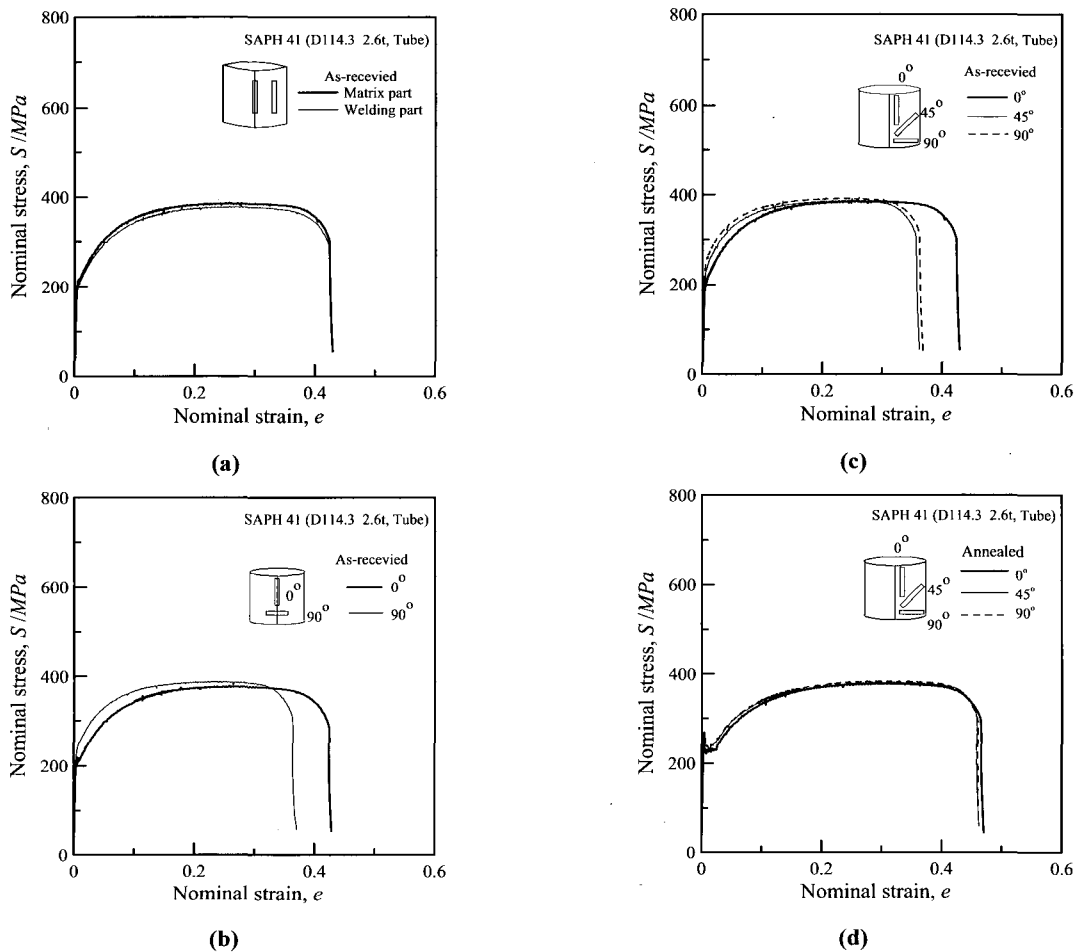


Fig. 1 The difference of mechanical properties of (a)-(b) welding part and matrix, (c)-(d) each direction

Table 1 The difference of mechanical properties of welding part and matrix

Specimen		Property	YS (MPa)	TS (MPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\epsilon_u$ (%)	n (10%-20%)	R (10%)	K (MPa)
As-received :SAPH 41 D114.3 2.6t	Matrix	0 °	201.1	387.6	33.8	26.7	0.254	0.86	707.7
		45 °	228.5	387.6	27.3	21.7	0.221	0.83	674.9
		90 °	251.3	393.5	27.6	23.6	0.214	0.85	677.9
	Weld	0 °	215.4	379.7	33.8	27.8	0.260	0.60	699.0
		90 °	236.7	389.3	28.3	22.2	0.215	0.87	671.7
Annealed :SAPH 41 D114.3 2.6t 600°C 40min	Matrix	0 °	229.9	381.6	37.9	35.6	0.293	0.67	732.9
		45 °	231.1	382.3	37.1	31.4	0.267	0.86	710.4
		90 °	242.4	384.9	37.1	31.0	0.281	1.20	728.3
	Weld	0 °	232.0	372.7	36.8	28.4	0.300	1.04	722.0
		90 °	234.1	383.8	29.7	27.2	0.297	0.94	740.8

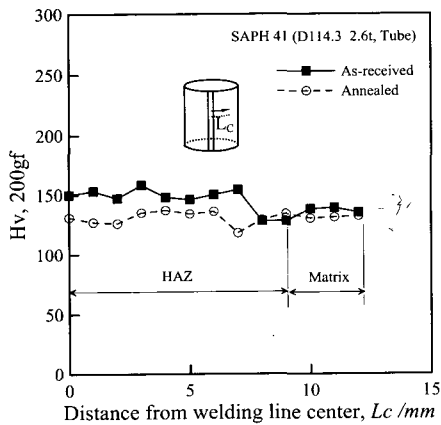


Fig. 2 Hardness distribution of tube

신율에서 약 6~7% 정도의 차이가 존재함을 알 수 있다 (Fig. 1(b),(c)). 그러나 조관공정에서 발생한 잔류응력을 풀립처리한 경우에는 길이방향과 원주방향에서 기계적 특성의 차이는 거의 존재하지 않는다(Fig. 1d). 따라서 관재 액압 성형공정에서 굽힘 예변형후 풀립처리가 일반적으로 사용되는 경우를 고려하면 액압 성형용 관재의 기계적 성질을 평가할 때는 관재의 길이방향의 특성값만으로 평가하여도 무방할 것으로 사료된다. 한편 Fig. 1(a)에서 용접부를 포함한 재료가 모재보다 약간 인장강도가 낮게 평가되고 있음을 알 수 있는데 이는 비록 Fig. 2에서와 같이 용접 열영향부(HAZ)의 경도가 높을

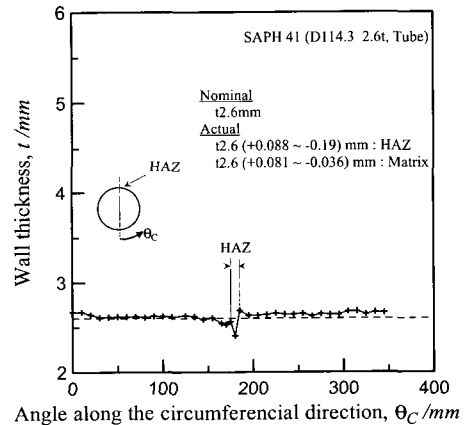


Fig. 3 Wall thickness distribution of tube

지라도 용접부는 용접비의 절삭으로 인해 모재보다 약간 재료두께가 얇아지는 것(Fig. 3)에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 4에 관재 액압 성형용으로 제조된 SPHT-1 관재 (D48.6 2.9t)에 대해서 조관공정에서의 관재 외표면에 직경 20mm의 원형 그리드를 마킹하여 측정된 길이 방향 및 원주방향 연신율을 나타내었다. 현재 국내 조관업체에는 액압 성형용이 아닌 일반 구조용 강관 제조를 위한 설비가 갖추어져 있기 때문에 조관공정에서 원주방향의 연신율이 목표값, 2%보다 커서 많은 재질의 열화가 예상된다. 조관 공정 중의 재료 연신율은 롤형상과패스 스

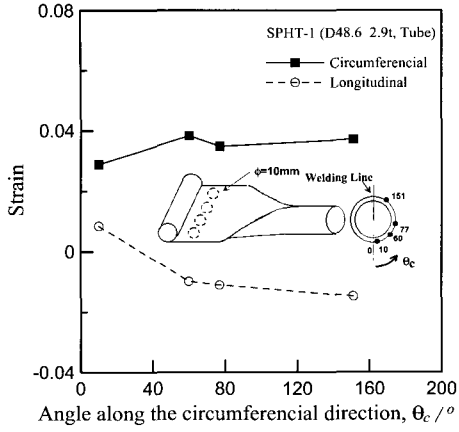
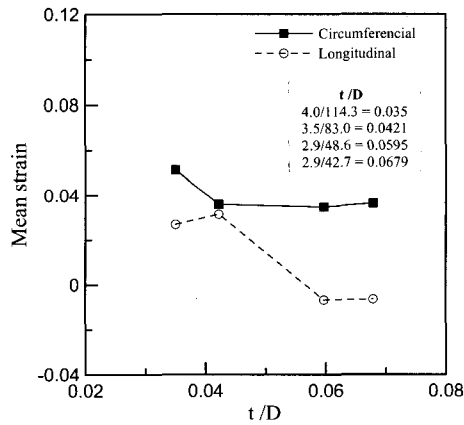
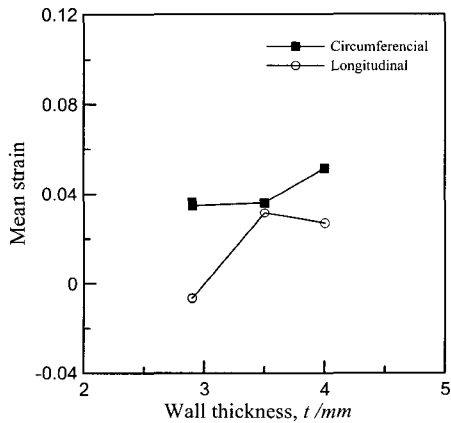


Fig. 4 Strain distribution of tube outside on roll forming process

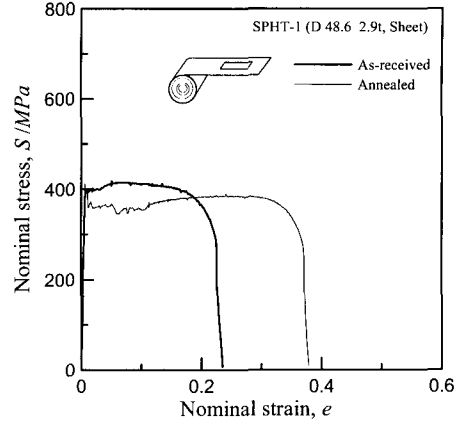


(a)

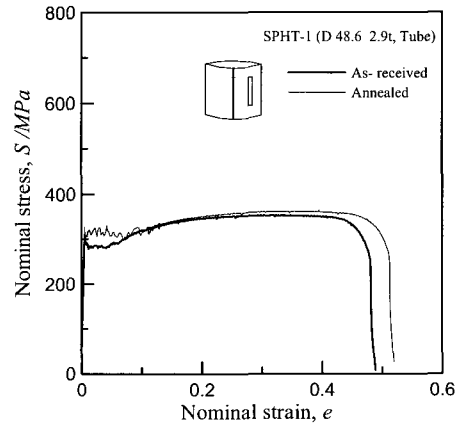


(b)

Fig. 5 Strain distribution about (a) rate of thickness and diameter  $t/D$ , (b) thickness  $t$



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of tension characteristic of (a) sheet and (b) tube

케줄에 따라서다른데, Fig. 5(a)와 (b)에 다양한 두께  $t$ 와 직경  $D$ 를 갖는관재에 대한 평균 연신율을 두께와 직경비  $t/D$ 와  $t$ 를 변수로 각각 나타내었다. Fig. 5(a)로부터  $t/D$ 가 작아질수록, 즉 동일한 직경의 경우에 원관의 두께가 얇아질수록 평균 연신율이 증가하고 있는데 이는 통상 알려진 기존의 결과와 상반된 것으로 이에 대해서는 좀더 많은 데이터의 확보를 통한 체계적인 고찰이 필요하다. 반면 두께  $t$ 만의 함수로 나타내 경우는 두께증가에 따라 평균 연신율이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a), (b) 및 Table 2는 조관 공정 중의 길이 방향 및 원주방향 변형이 재료의 기계적 특성의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 관재와 조관 공정 전의 코일 상태의 관재에 대한 인장실험 결과를 나타낸다. 예상과는 달리 조관 공정 후에 재료의 기계적 특성이 오히려

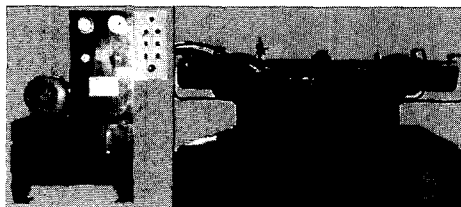
Table 2 Comparison of tension characteristic of sheet and tube

Specimen		Property	YS (MPa)	TS (MPa)	$e_1$ (%)	$e_n$ (%)	n (10%-20%)	R (10%)	K (MPa)
Annealed : SPHT-1 600°C 40min	D48.6	Sheet	342.8	384.2	37.86	25.2	0.247	0.580	744.5
	2.9t	Tube	304.0	365.1	51.96	35.0	0.319	0.656	705.3
	D83.0	Sheet	328.7	355.9	45.43	27.7	0.223	0.768	621.6
	3.5t	Tube	300.4	357.2	54.52	37.5	0.326	0.857	751.5

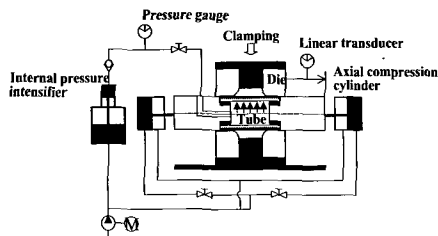
크게 향상되고 있음(항복강도의 저하, 전 연신율의 증가 등)을 알 수 있다. 이는 조관 공정에서 재료는 롤간의 반복적인 굽힘 변형이력에 의한 내외면의 불균일한 응력 분포 및 용접부 열처리 등에 의해 복잡한 변형거동을 경험하는 것과 코일 제조공정에서 코일 선단부의 재질열화 등이 복합적으로 기인한 것으로 생각된다. 조관 공정에서의 항복강도의 저하 또는 상승의 원인으로는 가공경화 및 배위상거 효과의 영향에 기인한다는 연구<sup>(5)</sup>가 있으나 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 체계적인 자료의 확보가 요구된다.

### 3. 관재 액압 성형 특성

관재 액압 성형공정은 프레스 공정과는 달리 밀폐된



(a)

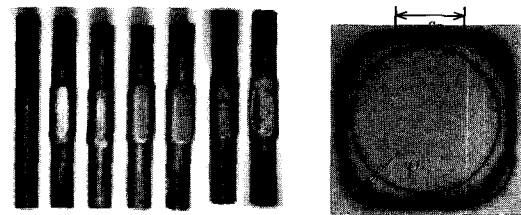


(b)

Fig. 7 (a) Photo and (b) outline of tube hydroforming simulator

금형내에서 이루어지기 때문에 성형중의 관재의 변형거동 파악이 어려운 점이 있어 공정의 최적 설계를 위해 유한요소해석과 같은 가상해석기술이 널리 적용되고 있다. 그러나 유한요소해석 결과의 신뢰도 확보를 위해서는 관재 액압 성형실험을 통한 관재액압 성형공정의 체계적인 이해와 여러 재료 및 공정 변수들의 영향에 대한 데이터의 확보가 중요하다. 또한 대부분의 THF 부품이 차체의 구조재나 충돌부재로 사용되고 있기 때문에 기존의 프레스 부품을 THF 부품으로 대체하기 위해서는 관재 액압 성형후 기계적 성질변화에 따른 각 부품의 성능 변화에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

여기서는 관재 액압성형 특성을 파악하기 위해 본 연구실에서 보유하고 있는 관재 액압성형 시뮬레이터<sup>(6)</sup>(Fig. 7)를 이용하여 구조용 강관 STKM11A (D40 1.2t)를 한변이 46mm인 정사각형 관재로 확장 성형하여 내압증가에 따른 관재의 변형거동을 파악하였다. 실험에서는 강관과



	1	2	3	4	5	6	7
Pressure : P(MPa)	10	20	28	35	40	24	49
Stroke : u(mm)	0	4	6	8	10	12	6
Radius : ρ (mm)	20	18	17	14	11		
Cont. Leng. : s(mm)	0	10	11	13	23		
	Safe Forming				Wrinkling		Bursting

Fig. 8 Forming process of circular tube

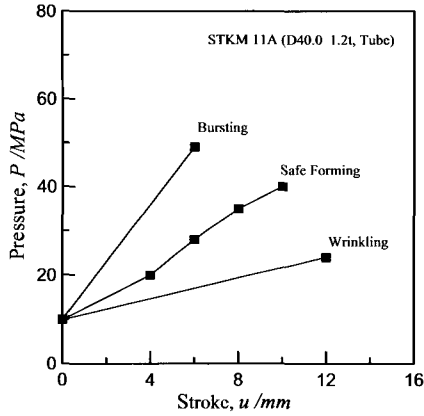


Fig. 9 Relationship between internal pressure and axial compression stroke

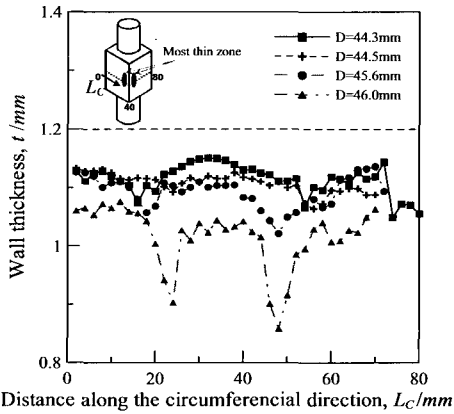


Fig. 10 Wall thickness distribution along the circumferential direction according to bulging rate

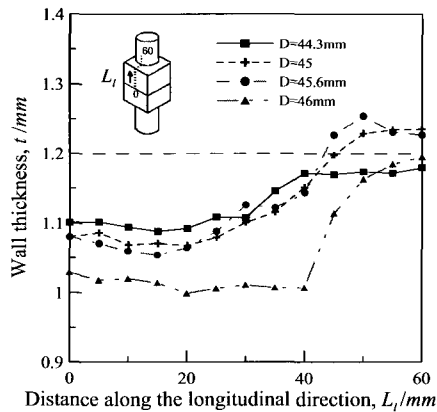


Fig. 11 Wall thickness distribution along the longitudinal direction according to bulging rate

금형의 접촉면에서 마찰을 줄이기 위하여 강관 외면과 금형에 유압 작동유를 도포하였다.

Fig. 8은 원형 관재가 사각 관재로 점차 확장되어 가는 과정을 나타낸 것으로 내압이 점차 증가할 수록 원형 강관은 점차 확장되면서 외부의 다이에 접촉하고 금형 코너부에 재료가 점차 충전되어 가는 양상을 나타낸다. 참고로 내압이 과다한 경우에 발생하는 길이방향 파단형상과 축 압축력이 과다한 경우에 발생하는 좌굴형상을 함께 나타내었다. Fig. 9는 본 실험에 적용한 내압과 축 압축 변위 선도를 나타낸다.

Fig. 10과 11은 각각 확관에 따른 재료의 원주방향과 길이방향의 변형률을 측정된 것이다. 재료는 확관에 따라 원주방향으로 균일변형 하지만, 금형 접촉영역과 비접촉영역인 금형 코너부와의 경계에서 두께가 급격히 감소하고 있어 이 영역에서 파단 위험이 매우 높아지는 것을 알 수 있다. 한편 길이방향으로는 재료의 확관에 따라 금형과 접촉영역에서 두께가 균일하게 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 관재액압 성형성(formability)에 미치는 재료 및 공정변수의 영향

관재의 액압 성형시에는 기본적으로 고압에 의한 누유(sealing)문제뿐 아니라 과다한 내압에 의한 관재의 원주방향 파단 발생 또는 과다한 축 압축력(또는 축 압축 변위)에 의한 관재의 길이방향 좌굴 발생을 피하여 한다. 이들 성형불량-파단과 주름-을 피하고 성형이 가능한 영역내에서 관재를 확장·성형시키기 위해서는 성형불량 발생에 미치는 재료변수 및 공정변수의 영향에 대한 파악과 반복 실험 또는 유한요소해석과 같은 가상실험을 통하여 최적의 내압-축 압축 변위 선도에 대한 정보가 필요하다.

여기서는 원형관재가 원형으로 확장 성형되는 경우에 대한 이론적 해석을 통해 관재의 파단발생 한계 및 주름발생 한계에 미치는 재료 및 공정변수의 영향을 파악하여 THF 전용 관재 개발을 위한 기초자료를 확보하였다.

관재를 Hill의 평면등방성 재료에 대한 이방성 항복 조건식과  $\sigma = Ke^n$ 의 가공경화식에 따르는 재료라고 가정하면 원형관재가 원형으로 확장 될 때의 기초 식들은 다음과 같다.

- ① 등가응력

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

② 등가 변형률 증분 :

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

③ 구성식

$$d\epsilon_{ij} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (3)$$

④ 체적 일정 조건

$$d\epsilon_{ii} = 0 \quad (4)$$

관재의 성형한계로서 관재가 내압에 의해 원주방향으로 확장 될 때 원주방향으로 지지할 수 있는 하중이 최대가 되는 조건을 관재의 길이방향 파단발생 한계로 간주한다. 즉,

$$d(\sigma_\theta t) = 0, \quad \sigma_\theta = \frac{pr}{t} \quad (5)$$

이 식으로부터 파단발생 한계 압력  $p_{cr}$ 은 다음 식으로 나타내진다<sup>(1)</sup>.

$$p_{cr} = \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} \frac{t}{r} \left[ \frac{n - \frac{1}{R+1} \epsilon_l}{1 - \left(\frac{R}{1+R}\right)^2} \right] \quad (6)$$

또한 파다한 축 압축력에 의해 관재의 축방향으로 주름발생을 묘사하기 위한 기초 식은 다음과 같다.

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} - N_x \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{E_s t_0}{r_0^2} w = p \quad (7)$$

여기서  $N_x = t\sigma_l$ ,  $w$ 는 주름발생시의 반경방향의 변위이다. 이 식을 풀면 주름발생 한계 축응력  $(\sigma_l)_{cr}$ 은 다음 식으로 나타내진다<sup>(1)</sup>.

$$(\sigma_l)_{cr} = -A_c^n K \left[ \frac{1}{1+R} \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha^2} + R \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right)^2 \right\} \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (8)$$

식 (6)로부터 파단발생 한계 압력에 미치는 재료변수, 가공경화지수  $n$ 과 이방성계수  $R$ 의 영향을 각각 Fig. 12, Fig. 13에 나타내었다. 그림으로부터 재료의 가공경화지수가 커질수록 관재는 균일변형이 지속되어 파단발생 직전까지 보다 많이 확관시킬 수 있으며, 이방성계수가 커질수록 항복곡면에서 예상할 수 있듯이 파단발생 한계 압력이 커지는 것을 알 수 있다.

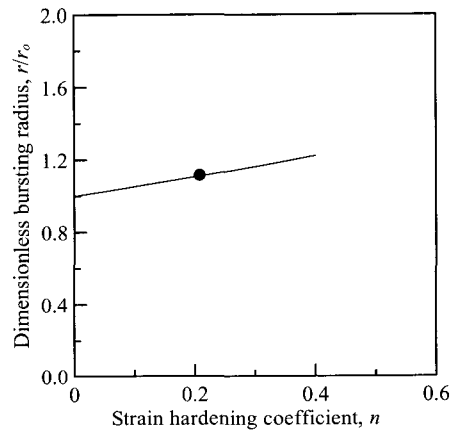


Fig. 12 Influence of strain hardening coefficient  $n$  on bursting limit radius

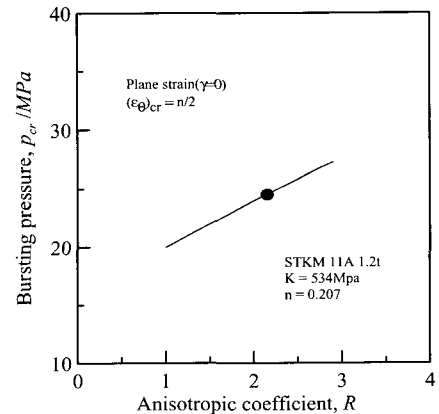


Fig. 13 Influence of anisotropic parameter  $R$  on bursting limit pressure

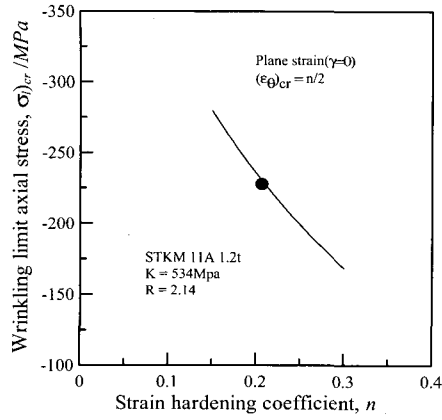


Fig. 14 Influence of strain hardening coefficient  $n$  on wrinkling limit axial stress

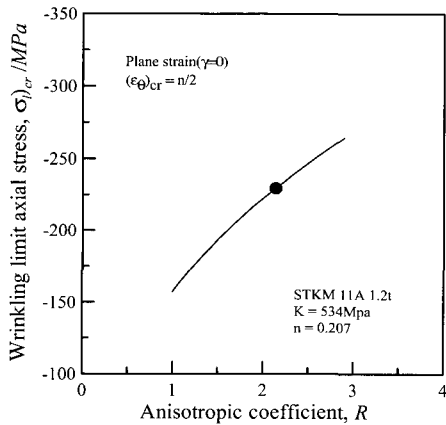


Fig. 15 Influence of anisotropic parameter  $R$  on wrinkling limit axial stress

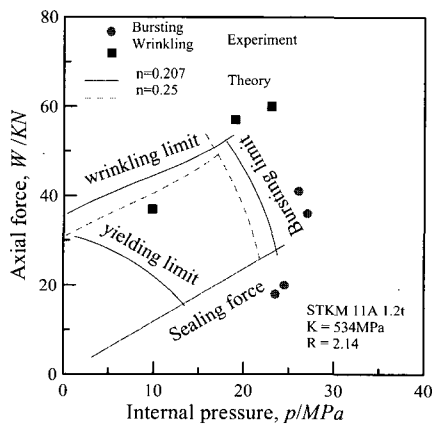


Fig. 16 Influence of strain hardening coefficient  $n$  for safe forming area

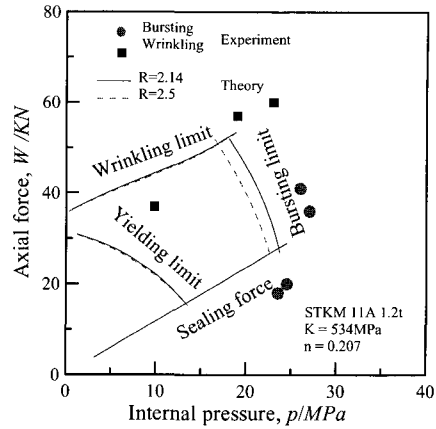


Fig. 17 Influence of anisotropic parameter  $R$  for safe forming area

식 (8)로부터 주름발생 한계 축응력에 미치는 재료 변수, 가공경화지수  $n$ 과 이방성계수  $R$ 의 영향을 각각 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. 주름발생 한계 축 응력은 가공경화지수가 커질수록 작아지며, 이방성계수가 커질수록 커지는 것을 알 수 있다.

내압과 축 압축력 선도에서 불량발생 없이 안전 성형이 가능한 영역에 대한 가공경화지수와 이방성계수의 영향에 대한 해석결과를 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었고 실험결과와 비교하였다. 해석결과는 특히 파 단발생 한계를 실험결과보다 낮게 평가하고 있으나 전체적으로 안전 성형영역을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 가공경화지수와 이방성계수의 변화에 대한 안전성형 여부에 비교하면 가공경화지수가 이방성계수 보다 안전 성형영역에 크게 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다.

### 5. 액압에 의한 확관 성형한계 도출

현재 국내 강관업체의 조관공정은 THF 전용 관재를 만들기 위한 공정이 아니고 대부분은 구조용 강관을 제조하기 위한 공정이다. 따라서 조관공정에서 많은 연신율 발생에 따른 가공경화가 야기되어 관재의 항복강도가 크게 높아지며 파단 연신율은 크게 떨어지는 등 코일상태와 관재상태의 기계적 특성에 상당한 차이를 보인다. 그러나 조관공정에서의 구조용 강관의 경우는 연신율에 따른 가공경화는 규격상에는 큰 문제가 되지 않는다. 반면 조관→굽힘 예변형→확관 성형을 받는 THF 전용 관재를 제조하기 위해서



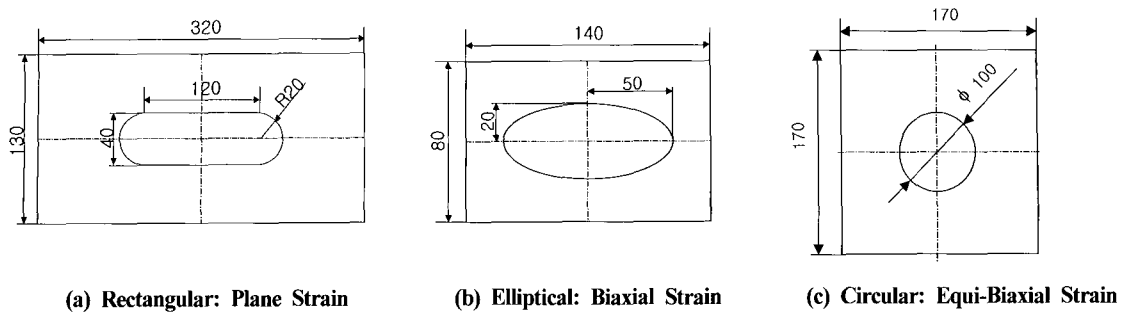


Fig. 18 Die shapes for variable proportional strain path

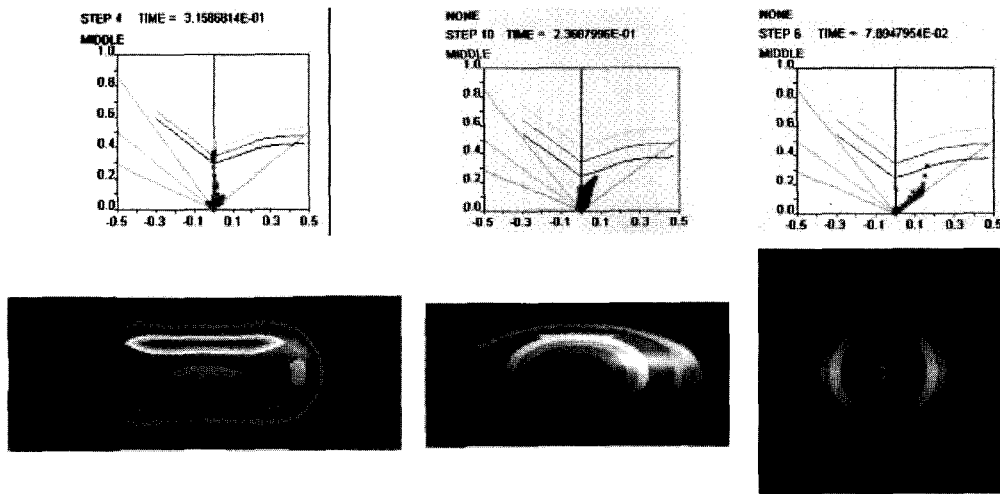


Fig. 19 FEM results for variable proportional strain path

는 조관공정에서 재료의 연신율을 가능한 적게하여 재료 내부손상을 최소로 하는 것이 굽힘 예변형과 확관 성형공정에서 필요한 연신을 확보와 성형불량을 줄이는 차원에서 바람직하다. THF전용 관재를 제조하기 위한 전용 조관공정이 확립되면 코일 상태와 관재 상태의 기계적 특성의 차이는 그리 크지 않을 것이다.

다양한 직경과 두께를 갖는 관재를 기존의 관재 확관실험(tube bulge test)을 통하여 액압 확관 성형한계(tube bulge forming limit)를 평가하려면 많은 굽형셋트와 실험에 많은 수고가 요구된다. 그러나 THF 전용 조관공정에서 제조된 관재는 코일상태와 관재상태에서의 기계적 특성의 차이가 크지 않으므로 관재상태에서 확관실험을 통한 확관 성형한계 평가를 관재 상태에서 액압 장출실험을 통한 액압 장출 성형한계(sheet hydrostretch forming limit) 평가로 대신할 수 있다. 관재 상태에서는 액압 장출 성형한계를

평가하는 방법은 다양한 직경과 두께의 관재를 하나의 굽형셋트에서 실험이 가능하다는 장점이 있다.

Fig. 18에 관재의 액압 장출실험을 통해 성형한계도(forming limit diagram, FLD)를 도출하기 위해서 다양한 비례변형경로(평면변형, 2축인장, 등 2축인장)를 만들기 위한 굽형형상을 나타내었다. 이들 굽형형상은 동적양형 대변형 유한요소 프로그램인 LS-Dynaform을 이용하여 최적화 하였다. Fig. 19에 각각의 굽형형상에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 유한요소해석 결과를 이용하여 실제 제작된 굽형형상을 Fig. 20에 나타내었고, 실제 액압 장출실험을 수행하여 성형된 관재의 형상을 Fig. 21에 나타내었다. 액압 장출실험을 통해 관재의 성형한계를 측정하기 위해 미리 관재에 2.54mm의 원을 마킹하고 성형실험으로 시편이 파단된 후의 변형된 원들의 변형률을 측정하여 양의 영역의 성형한계를 구하고, 음의 변형률에 대해서는 Hill의 국부 neck 발생이론을 적용하여 주 변형률 좌표상에 성형한계도를 완성하였다.

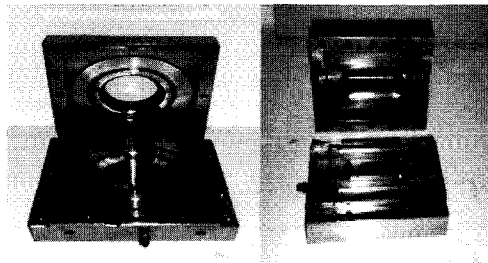
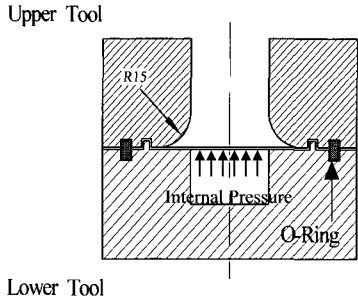


Fig. 20 Photo and outline of the die for variable proportional strain path

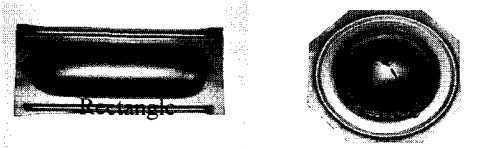


Fig. 21 Deformed specimen by hydrostretch forming experiment

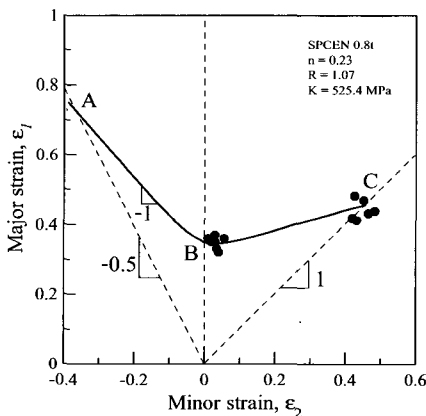


Fig. 22 Forming limit diagram for proportional strain path

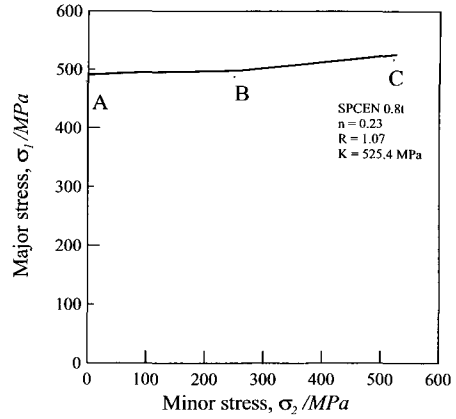


Fig. 23 Forming limit stress diagram (FLSD)

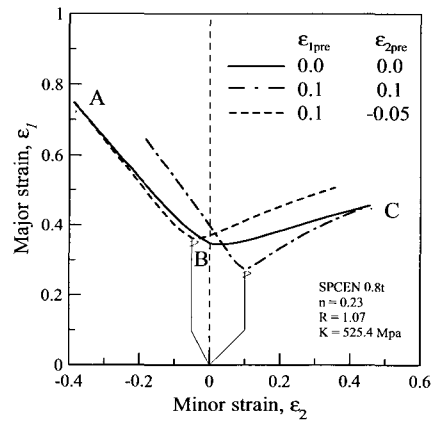


Fig. 24 FLD for proportional strain path change from FLSD

Fig. 22에 실험에서 구한 비례변형 경로에 대한 성형 한계도를 나타내었다. 판재 액압 장출 성형 실험을 통해 확보된 주 변형을 좌표상의 성형한계도(FLD)는 비례부 하경로에 대한 것으로 일반적으로 판재 액압 성형공정에서와 같이 급형 예변형후 확장성형을 받는 경우에 대해서는 적용하기 곤란하다. 따라서 변형경로 변화에 대한 성형한계도에 대한 정보가 필요한데 최근 관심을 받고있는 성형한계응력선도(forming limit stress diagram, FLSD) 개념<sup>(7)</sup>을 이용하면 쉽게 예변형의 영향을 고려한 성형한계도를 쉽게 도출할 수 있다. FLSD 개념을 도입하여 다음 식의 관계를 이용하여 Fig. 23에 성형한계도

$$\sigma_{1,2} = \frac{\bar{\sigma}}{2} \left( \frac{1+R}{\epsilon} \right) \left[ (\epsilon_1 + \epsilon_2) \pm \left( \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{1+2R} \right) \right] \quad (9)$$

를 주 응력 좌표상에 성형한계응력으로 표시하였다. 주 응력 좌표상에 나타난 성형한계응력은 변형경로의 변화에 무관하게 모든 데이터가 그림에서와 같이 거의 한직선 상에 존재한다<sup>(7)</sup>고 알려져 있기 때문에 이 성질을 이용하면 역으로 변형경로의 변화에 대한 성형한계도를 도출할 수 있다. Fig. 24는 Fig. 23의 FLSD로부터 구한 변형경로 변화에 대한 FLD이다. FLSD 개념을 이용하면 관재 액압 성형공정에서와 같이 급힘 예변형후 액압에 의한 확장성형을 받는 경우에 변화하는 변형경로에 대응한 성형한계도를 쉽게 도출할 수 있는 장점이 있다.

그러나 본 연구에서와 같이 관재 액압 장출 성형한계를 이용하여 관재의 액압 확장 성형한계를 대신 평가하는 방법을 채택하기 위해서는 다양한 관재에 대한 데이터 검증이 필요하다.

## 6. 결론

초경량·고안전 차체 개발을 위한 핵심 생산기술인 관재 액압 성형기술의 조기 국산화 개발을 위한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 관재 액압 성형용 롤 포밍 관재의 기계적 특성과 관재 액압 성형공정의 기본 기구를 파악하였다.
- (2) 관재의 액압 성형성에 미치는 재료변수 및 공정변수의 영향을 이론적으로 검토하였다.
- (3) 관재 확장 성형한계를 평가할 수 있는 기술을 개발하였다.

## 후 기

본 연구는 (주)현대자동차의 G7 과제 연구비와 2000년도 두뇌한국 21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 김성태, 박춘달, 임성언, 김영석, 2000, "원형 관재의 하이드로 포밍공정에서의 성형성 평가", 한국소성가공학회 제3회 박관성형 심포지엄 논문집, p. 59.
- (2) F. Dohmann and C. Hart, 1997, "Tube hydroforming-research and practical application", J. Mater. Proc. Tech., Vol.71, p. 174.
- (3) M. Ahmed and M.S.J. Hashimi, 1997, "Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components", J. Mater. Proc. Tech., Vol.64, p. 9.
- (4) S.-D. Liu, D. Meuleman, and K. Thompson, 1998, "Analytical and experimental examination of tubular hydroforming limits", SAE technical paper, No.980449.
- (5) 박기종, 조열래, 1998, "강관용 소재의 조관후 재질특성에 미치는 바우싱거 효과의 영향", 대한금속학회지, Vol.36, No.11, p. 1777.
- (6) 김성태, 임성언, 이택근, 김영석, 2000, "관재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구", 한국소성가공학회지, Vol.9, No.1, p. 35.
- (7) J. Gronostajski, 1984, "Sheet metal forming-limits for complex strain paths", J. Mach. Working Technology, Vol.10, p. 349.