

# 내압을 받는 튜브 리듀싱에 관한 연구

이 항 수\* · 양 동 열\*

## Study on the Tube Reducing Process Subject to Internal Pressure

Hang-Soo Lee\* and Dong-Yol Yang\*

### ABSTRACT

In axisymmetric tube reducing process for thin sheet metal tubes, the reduction ratio of diameter is an important factor in the process design. For very thin sheet metal tubes, tube reducing cannot be successfully employed due to wrinkling of the edge portion of a tube as well as due to buckling of its rest portion.

In the present study, thin sheet metal tubes are subjected to internal pressure during the tube reducing process in order to increase the forming limits. Analysis is made for the sound flow deformation in nonsteady tube reducing considering the normal anisotropy. Experiments are carried out for brass tubes. The present study is shown to give an effective guide line in designing the tube reducing process for very thin-walled sheet metal tubes. However, it is suggested that an analysis for instability should be made to design the process more effectively.

약어 및 기호 설명

$D_o$  : 원통부에서 다이의 직경

$F, G, H, L, M, N$  : 이방성을 나타내는 상수들

$n$  : 가공경화 지수 (workhardening exponent)

$P$  : 성형중 작용하는 내압 (internal press-

\* 한국과학기술원 생산공학과 (정회원)

ure)

$P_a$  : 성형 초기의 내압 (initial setting pressure)

$P_D$  : 다이와 소재의 접촉압력

$r, z$  : 중립면의 반경방향좌표 및  $z$ -축 좌표

$r_i, r_{i+1}, z_i, z_{i+1}$  :  $i$  번째와  $i+1$  번째 스텝 (step) 에서 중립면의  $r$ -축 좌표 및  $z$ -축 좌표

$R_o$  : 원통부에서 중립면의 반경

$R_D, R_C$  : 곡선부에서 다이 및 소재 중립면의 진입 곡률반경

$r_a, r_b, r_c, z_a, z_b, z_c$  :  $a, b, c$  점에서 중립면의  $r$ -축좌표 및  $z$ -축 좌표

$R$  : 랭크포오드 상수 (Lankford constant)

$\Delta S_o$  : 요소 (element) 의 초기 길이

$t_o, l_o$  : 소재관의 초기의 두께 및 길이

$\alpha$  : 다이의 반원추각 (Semi-cone angle)

$\alpha_{opt}$  : 최적 반원추각 (optimal semi-cone angle)

$\epsilon_\phi^p, \epsilon_\theta^p, \epsilon_r^p, \bar{\epsilon}^p$  : 종방향, 원주방향, 두께방향의 변형도 (strain) 성분 및 유효변형도

$d\epsilon_\phi^p, d\epsilon_\theta^p, d\epsilon_r^p, d\bar{\epsilon}^p$  : 종방향, 원주방향, 두께방향의 변형도증분 (strain increment) 및 유효 변형도증분 (effective strain increment)

$\mu$  : 다이와 소재의 접촉부분에서 마찰계수 (friction coefficient)

$\sigma_\phi, \sigma_\theta, \sigma_r, \bar{\sigma}$  : 종 (meridional) 방향, 원주 (circumferencial) 방향, 두께 방향의 응력성분 및 유효응력

$\varphi$  : 중립면의 수직선 (normal line) 과  $z$ -축과의 교각

$\varphi_i, \varphi_{i+1}$  :  $i$  번째와  $i+1$  번째 스텝에서 중립면의 수직선과  $z$ -축과의 교각

$\phi$  : FIG 2 에 표시된 원추형 부분에서 중립면의 수직선과  $z$ -축과의 교각

$\phi_b$  : FIG 2 에 표시된 'b' 점에서 중립면의 수직선과  $z$ -축과의 교각

## 1. 서 론

튜브 리듀싱은 FIG 1에서 보이는 제품을 프레스를 이용하여 성형시키는 공정중의 하나로 통상적으로 이용되고 있는 것은 내압을 가하지 않은 상태에서 관을 성형시키는 공정인데, 이 경우에는 주름 (Wrinkling)이 쉽게 발생하므로 얇은 재료에 대해서는 사용하기가 곤란하다. 즉, 내압이 없는 경우 튜브 리듀싱 공정은 직경에 비하여 두께가 두꺼운 경우에 한해서만 사용할 수 있다.

이 경우 내압을 가하게 되면, 압력은 주름현상이 발생하는 것을 억제하도록 작용하게 되므로 두께와 직경의 비가 작은 제품이라도 성형성이 향상되게 된다.

지금까지 튜브 리듀싱에 관련된 분야에 대한 연구는 실험 및 이론을 중심으로 행하여져 왔으며 그 성과는 가공조건의 설정을 위한 자료를 제공하는데 기여하였다.

튜브 리듀싱의 경우에서 목부분 까지만 성형한 것을 최종제품으로 쓰는 경우를 특히 노우징 (Nosing) 이라 부르는데, 이러한 노우징에 대하여 현재까지 연구된 내용은 다음과 같다.

M. Miyagawa, C.H. Back(1-2) 등은 두께를 반경의 함수로 가정하여 노우징율과 종방향 응력 (Meridional Stress) 에 대하여 조사하였으며, 실험을 통해 두께에 따르는 최적 반원추각 (Semi-Cone Angle) 과 한계노우징율에 대하여 정성적으로 조사한 바 있다.

근년의 연구 동향을 보면 K. Manabe, H. Nishimura(3-6) 등이 많은 연구를 진행하였는데, 이들은 축대칭 노우징에 대하여 성형하중과 성형한계에 영향을 미치는 제 인자들에 대한 조사를 하였다.

최근에 A. Fatnassi(7) 등은 비 축대칭 좌굴의 좌굴 양식과 성형 한계에 대하여 유한 요소법을 이용하여 해석한 바 있다.

지금까지 발표된 연구 결과들을 종합하면,  $t_o/D_o$  가 작은 경우 좌굴이 불가피하며 이에 대해 성형한계의 증가를 도모하기 위해서는 내

압을 작용시킨다든지 하는 새로운 방법의 도입이 필요하다. 그리고 내압이 작용하는 경우 이와 관련된 제반인자의 영향을 면밀히 분석하여 공정설계에 유용한 자료를 작성할 필요가 있다.

이러한 관점에서 본 논문은 튜브 리듀싱 공정의 정상상태 이전의 경우에 대하여 두께와 직경의 비, 반 원추각과 함께 내압이 성형한계에 미치는 영향을 조사하고, 적합한 가공조건을 찾는데 그 목적이 있다.

연구 범위로서는 정상상태에 도달하기 이전의 경우 즉, 선단의 평행부가 없는 성형범위에 대하여 첫째, 실험으로부터 성형한계와, 내압의 관계를 살펴 보았다. 둘째, 실험에서 구한 하중과 이론해석으로 구한 하중을 비교하고 또한 변형도분포를 비교함으로써 이론 해석의 타당성을 입증하고, 이 경우 응력성분의 분포 및 최대 응력 상태를 파악했다. 그리고 세째로 위에서 구한 응력상태로 주름 현상의 여부를 정성적으로 판단할 수 있게 했다.

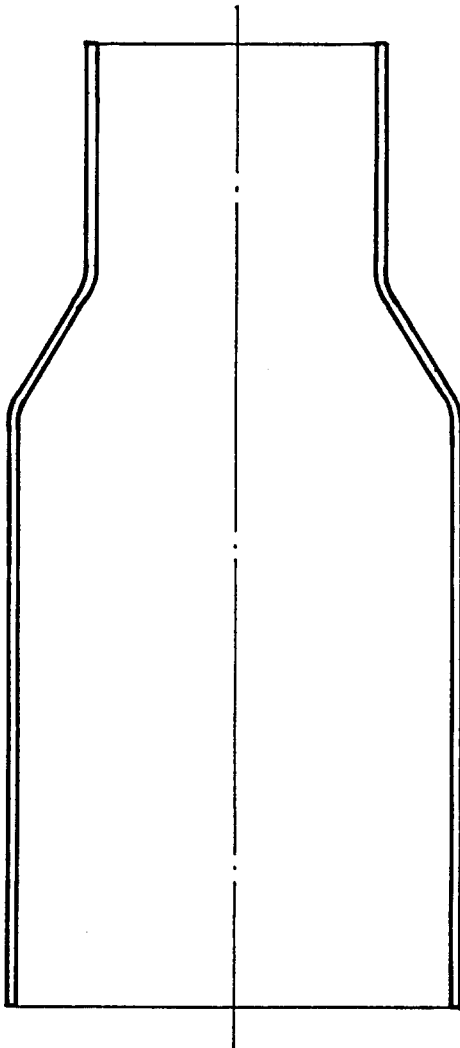


Fig. 1. Product shape after tube reducing.

## 2. 이 론 해 석

### 2.1 가정 및 제품의 형상

일반적으로 금속 성형을 해석하는 데에는 변형 영역들이 경계조건을 만족하는 범위 내에서 적당한 가정을 하여 실제 현상과 유사하면서도 간단한 모델을 설정하여야 하는데, 여기서는 다음과 같은 가정을 도입했다.

- 1) 재료의 탄성 변형을 무시한다.
- 2) 성형 도중에 불안정 (Instability) 현상은 일어나지 않는다.
- 3) 두께방향의 응력은 내압과 금형 접촉 압력의 평균값이다.
- 4) 재료는 가공경화재로서 유동응력 (flow stress;  $\bar{\sigma}$ )은 유효변형도 (effective strain;  $\bar{\epsilon}$ )에 의해서만 영향을 받는다. 즉,

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}) \dots\dots\dots (1)$$

- 5) 금형접촉 부분에서 마찰전단력은 마찰계수 ( $\mu$ )와 접촉압력 ( $p_D$ )에 의해 결정된다. 즉,

$$\tau = \mu p_D \dots\dots\dots (2)$$

본 논문에서 해석하고자 하는 비정상 상태의 튜브 리듀싱 공정을 위의 가정에 의해 단순화 시키면 FIG.2와 같은 해석모델을 얻을 수 있다.

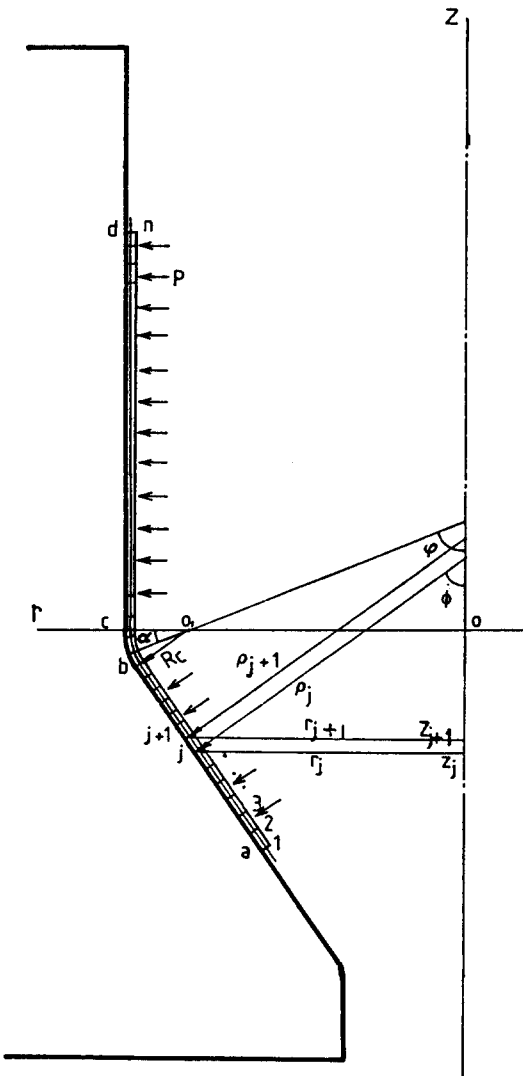


Fig. 2. Geometric configuration of analytic model.

## 2.2 기본방정식

### (a) 평형 방정식

축대칭 박판 성형에서의 미소요소에 대한 자유물체도 (free body diagram)는 FIG. 3과 같으며 이로부터 두께 방향 및 종 방향 (Meridional direction)의 평형 방정식을 식(3), 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\sigma_{t1} - \sigma_{t2}}{t} - \frac{\sigma_\theta}{\rho} - \frac{\sigma_\varphi}{R} = \theta \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{d(\sigma_\varphi t)}{dr} + \frac{t}{r} (\sigma_\varphi - \sigma_\theta) - \frac{\tau_1 - \tau_2}{\cos \varphi} = \theta \dots\dots\dots (4)$$

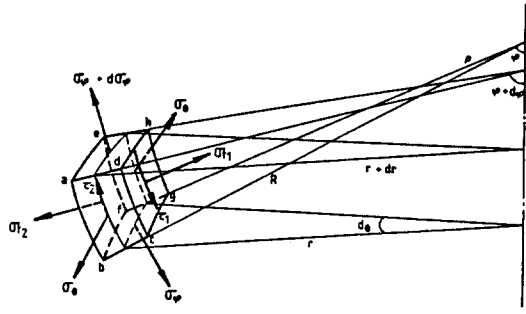


Fig. 3. Free body diagram of an infinitesimal element.

### (b) 이방성 소성 이론

이방성 재료에 관한 소성 이론은 여러 학자들에 의하여 조사되었는데 Hill의 이론이 비교적 간단하고 많은 사람들에 의해 널리 이용되고 있다. Hill은 전단응력 성분이 없는 경우에 이방성 항복 함수 (Anisotropic Yield Function)를 다음과 같이 제안하였다. (8)

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 1 \dots\dots\dots (5)$$

$f(\sigma_{ij})$ 를 소성포텐셜이라 하면 유동 법칙 (flow rule)은 다음과 같이 된다.

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \dots\dots\dots (6)$$

재료가 수직 이방성일 경우  $F=G$ 이며, 이방성을 나타내는  $R$ 값을 이용하여 유동 응력과 유효변형도를 식(7) 및 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2(2+R)} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2]}^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{d\varepsilon} = \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+2R)} [2(d\varepsilon_2^p)^2 + (1+R)(d\varepsilon_3^p)^2 + 2(d\varepsilon_2^p)(d\varepsilon_3^p)]}^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

또한 응력-변형도 증분의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$d\varepsilon_1^p = \frac{3}{2(2+R)} \frac{\bar{d\varepsilon}^p}{\bar{\sigma}} [(1+R)\sigma_1 - R\sigma_2 - \sigma_3]$$

$$d\varepsilon_2^p = \frac{3}{2(2+R)} \frac{\bar{d\varepsilon}^p}{\bar{\sigma}} [(1+R)\sigma_2 - R\sigma_1 - \sigma_3]$$

$$d\varepsilon_3^p = \frac{3}{2(2+R)} \frac{\bar{d\varepsilon}^p}{\bar{\sigma}} [(2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)] \dots\dots\dots (9)$$

혹은,

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \frac{2(2+R)}{3(1+2R)} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{d\varepsilon}^p} (2d\varepsilon_2^p + d\varepsilon_3^p)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{2(2+R)}{3(1+2R)} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{d\varepsilon}^p} (2d\varepsilon_2^p - R\varepsilon_3^p)$$

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \frac{2(2+R)}{3(1+2R)} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{d\varepsilon}^p} (2d\varepsilon_2^p + (1+R)d\varepsilon_3^p) \dots\dots\dots (10)$$

**2.3 튜브 리듀싱 공정의 해석**  
(Sound Flow Analysis)

축대칭 박판 튜브의 튜브리듀싱 공정에서 비정상 상태의 모델이 FIG.2에 있는데, 이것을 크게 세 가지 부분으로 나눌 수 있다. FIG.2

에서 *ab* 구간은 원추형부분이고, *bc* 구간은 곡선부, *cd* 구간은 원통부이다. 이 세부분은 기하학적 형상이 다르므로 구간별로 해석하여야 한다.

FIG.2에서 *b, c* 점의 기하학적 형상 및 성형 중의 경계조건을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_c &= 1/2(D_o - t_o) \\ z_c &= 0 \\ r_b &= D_o/2 - R_D + R_C \sin\phi \\ z_b &= -R_C \cos\phi \\ \sigma_\phi &= 0 \text{ (성형부 선단에서)} \\ d\varepsilon_b^p &= 0 \text{ (원통부에서)} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

또한 각 구간에서의 기하학적 형상과 경계조건으로부터 아래의 식들이 얻어진다.

a) 원통부  $R = \infty$

$$\begin{aligned} \sigma &= r_c \\ \sigma_{t1} &= -P \\ \sigma_{t2} &= -P_D \\ \tau_1 &= 0 \\ \tau_2 &= \mu P_D \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

b) 곡선부

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0 \\ \tau_2 &= \mu P_D \\ \sigma_{t1} &= -P \\ \sigma_{t2} &= -P_D \\ r &= \rho \cos\phi \\ R &= R_C \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

c) 원추형부  $R = \infty$

$$\begin{aligned} r &= \rho \cos\phi \\ \phi &= \phi \\ \tau_1 &= 0 \\ \tau_2 &= \mu P_D \\ \sigma_{t1} &= -P \\ \sigma_{t2} &= -P_D \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

이들 식과 함께 두께 방향 및 종방향의 평

형방정식을 얻을 수 있다.

a) 원통부

$$\frac{d(\sigma_\varphi t)}{dz} = \left( \frac{\sigma_\theta t}{r_c} - P \right) \dots\dots\dots (15)$$

b) 곡선부

$$\begin{aligned} \frac{d(\sigma_\varphi t)}{d\varphi} &= \frac{R_c \sigma_\theta t}{r} (\cos \varphi + \mu \sin \varphi) \\ &+ \sigma_\theta t \left( \mu \frac{R_c}{r} \cos \varphi \right) - \mu P R_c \\ &\dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

c) 원추형부

$$\begin{aligned} \frac{d(\sigma_\varphi t)}{dr} &= \frac{\sigma_\theta t}{r} (1 + \mu \tan \phi) - \frac{\sigma_\theta t}{r} \\ &- \frac{\mu p_D}{\cos \phi} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

또한 요소의 기하학적 적합성을 고려하면 다음과 같은 조건이 얻어진다.

a) 원통부

$$z_{j+1} = z_j + \frac{2t_o \Delta S_o}{t_j + t_{j+1}} \dots\dots\dots (18)$$

b) 곡선부

$$\begin{aligned} r_{j+1} &= r_j + 4 R_c \Delta S_o \cos \phi \left( \frac{t_o}{t_j + t_{j+1}} \right) \\ &\dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

c) 원추형부

$$\begin{aligned} r_{j+1} &= r_j + 4 r_o \Delta S_o \cos \left( \frac{\varphi_j + \varphi_{j+1}}{2} \right) \\ &\left( \frac{t_o}{t_j + t_{j+1}} \right) \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

여기서 하첨자  $j$ 는 이전의 절점을 나타내며  $j+1$ 은 현재의 절점을 나타낸다.

### 2.4 계산방법

재료의 두께가 얇으므로 두께 방향의 응력은 내압과 금형 접촉 압력의 평균값으로 취할 수 있다. 이로부터

$$\sigma_t = -P + \frac{\sigma_\theta t}{r} \sin \varphi + \frac{\sigma_\varphi t}{2R} \dots\dots\dots (21)$$

이고,  $\sigma_1 = \sigma_\varphi$ ,  $\sigma_2 = \sigma_\theta$ ,  $\sigma_3 = \sigma_t$ 라 하면 구성 방정식으로부터 아래와 같은 관계식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_\theta - \sigma_t &= d\Lambda (d\varepsilon_\theta^p - R d\varepsilon_\varphi^p) \\ \sigma_t - \sigma_\varphi &= d\Lambda (d\varepsilon_\theta^p + (1+R) d\varepsilon_\varphi^p) \dots\dots (22) \\ \sigma_\theta - \sigma_\varphi &= d\Lambda (2d\varepsilon_\theta^p + d\varepsilon_\varphi^p) \end{aligned}$$

여기서,

$$d\Lambda = \frac{2(2+R)}{3(1+2R)} \frac{\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} \dots\dots\dots (23)$$

이다.

식(21)과 식(22)를 연립하여 풀면 응력의 각방향 성분을 구할 수 있으며 두께방향의 힘의 평형관계로부터 금형접촉압력  $P_D$ 를 구할 수 있다.

본 연구에서는 아래의 방법으로 해석을 진행하였다.

초기 상태에서 유한한 갯수의 요소 (element)를 절점 (node)으로 나눈 뒤, 성형단계에 따라서 각 절점에 대하여 평형 방정식과 항복조건식, 기하학적 적합조건식, 응력-변형도의 관계 및 경계 조건 등을 만족시킴으로써 해를 구하였다.

재료의 유동응력 ( $\bar{\sigma}$ )은 유효 변형도 ( $\bar{\varepsilon}$ )에 의해서만 영향을 받는다고 가정하였고, 커브피팅 (Curve Fitting)의 어려움 때문에 편의상 두 구간으로 나누어 구했다.

유효변형도가 작은 앞 구간 ( $\bar{\varepsilon} < \varepsilon_s$ )에서는 식(24)를 적용하고, 유효 변형도가 큰 뒷 구간 ( $\bar{\varepsilon} > \varepsilon_s$ )에서는 식(25)를 적용시켜 유동 응력 ( $\sigma$ )을 구하였다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n, \theta < \bar{\varepsilon} < \varepsilon_s, \dots\dots\dots (24)$$

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_o + \bar{\varepsilon})^n, \bar{\varepsilon}_s < \bar{\varepsilon} \dots\dots\dots (25)$$

여기서  $\varepsilon_s$ 는 TABLE 1에 나타나 있다.

## 3. 실험

### 3.1 재료시험

튜브 리듀싱에 사용된 실험 소재는 두께가

0.6 mm 및 1.0 mm인 황동 (Brass) 관이다. 재료의 기계적 성질을 나타내는 응력-변형도의 관계를 알기 위해 인장 시험을 하였는데 이에 의한 유동응력-유효변형도의 관계를 TABLE 1에 나타내었다.

TABLE 1. 소재 ( 황동관 ) 의 재료특성

THICKNESS	RANGE	K (Kg f / mm)	$\epsilon_0$	n	R-value	$\epsilon_s$
0.6 mm	$\bar{\epsilon} < \epsilon_s$	1683	0.0	0.737	0.374	0.00984
	$\bar{\epsilon} > \epsilon_s$	64.26	0.001	0.0310		
1.0 mm	$\bar{\epsilon} < \epsilon_s$	1789	0.0	0.743	0.456	0.00852
	$\bar{\epsilon} > \epsilon_s$	59.30	0.002	0.0307		

$$(\sigma = k(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n)$$

### 3.2 튜브 리듀싱 실험

내압을 작용시킨 박판 튜브의 튜브 리듀싱

실험을 위해서는 시편을 구속시키는 콘테이너 (Container) 와 금형, 성형시 힘을 가해주는 편

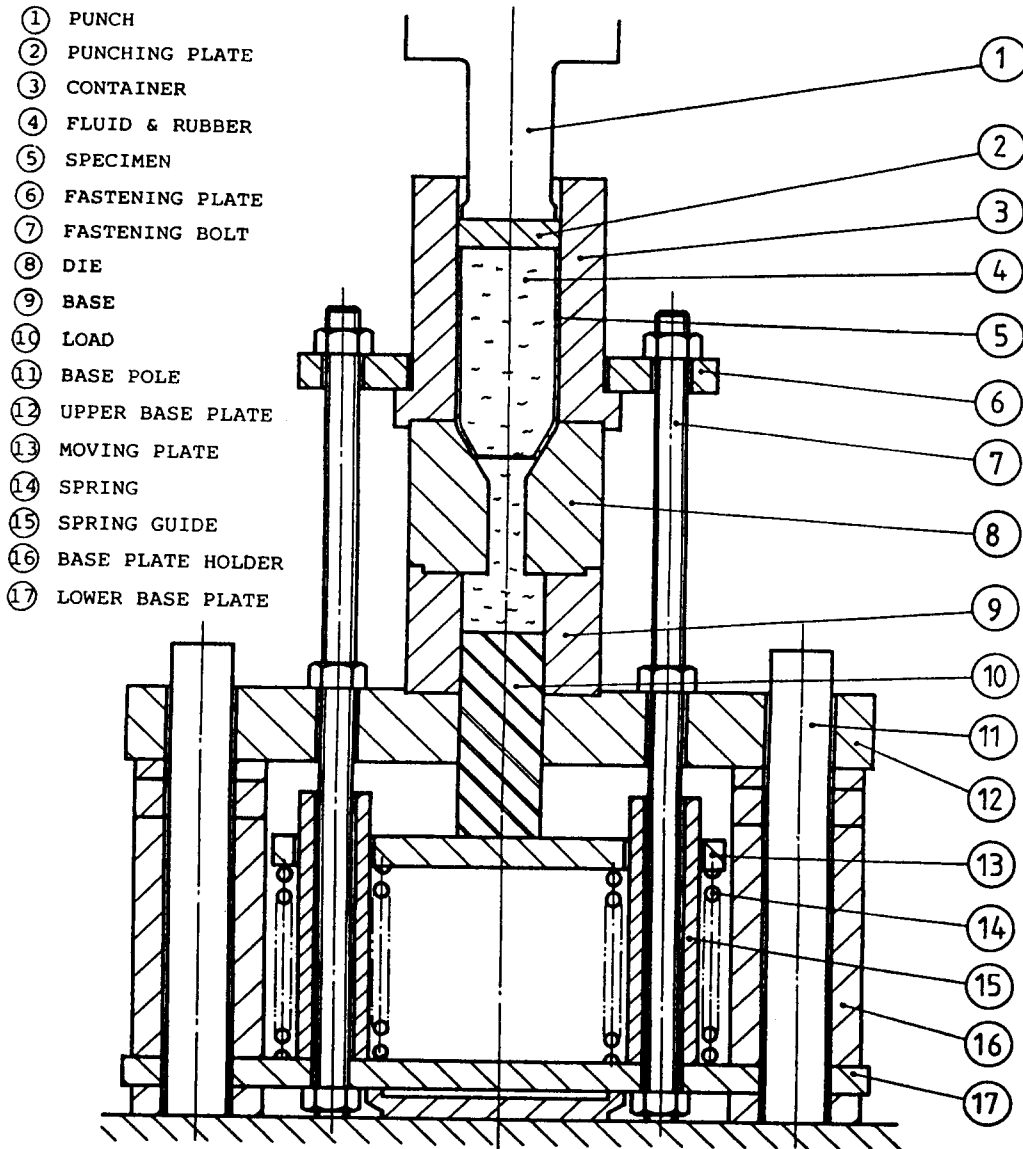


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup.

치 그리고 내압을 작용시키기 위한 장치가 필요하다.

내압을 작용시키는 방법은 실험실에서 간단히 행할 수 있는 방법으로 작은 고무알맹이와 점성이 매우 큰 그리이스를 섞어 시편 내부에 채워 넣은 후 하부에 스프링을 설치하고 편치 행정에 따라 스프링을 움직이게 하여 정수압을 얻는 방법을 취하였다.

본 논문에서 사용된 실험장치의 성형모식도가 FIG. 4에 나와 있다.

실험에서의 변수로서는 금형의 반원추각  $\alpha$  와 내압  $P$ , 그리고 재료의 두께를 채택하였다. 금형의 반원추각  $\alpha$ 는  $20^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ 의 세가지로 변화시켰으며, 직경이 모두 50.8 mm이고 두께가 0.6 mm와 1.0 mm인 두가지 재료를 사용했다. 내압의 경우 내압이 0 MPa인 상태와 성형을 시작할 때의 압력이 8.7 MPa 및 11.1 MPa인 경우에 대하여 실험하였다.

#### 4. 결과 및 토론

전술한 바와 같이 금속 박판으로 된 관의 튜브 리듀싱 공정의 성형한계에 큰 영향을 미치는 인자는 금형의 반원추각 ( $\alpha$ ), 두께와 직경의 비 ( $t_0/D_0$ ), 내압 ( $p$ ) 등인데, 실험을 통하여 성형한계 ( $K$ )와 이들 제 인자들과의 관계를 얻었는데, 이것을 FIG. 5에 나타내었다.

이 그림에서  $t_0/D_0$ 의 영향을 살펴보면  $t_0/D_0$ 가 커짐에 따라 성형한계는 현저한 증가를 보인다. 그리고 금형의 반원추각 역시 성형한계에 상당한 영향을 미치는데, 이로부터 최적 반원추각 ( $\alpha_{opt}$ ) 이 존재하는 것을 알 수 있다.

여기서 최적 반원추각은 성형량을 최대화 할 수 있는 원추형 부분의 경사각으로서 다른 인자들에 의해 약간씩 바뀌게 되나, 대체로  $20^\circ$  내지  $35^\circ$  사이에 존재하게 된다.

또한 내부에 가해준 압력이 성형 한계에 미치는 영향을 살펴 보면,  $t_0/D_0$ 가 0.02일 때는  $P=0\text{MPa}$ 에서와  $P=8.7\text{MPa}$ 에서 성형 한계가 거의 변화하지 않는다.  $t_0/D_0$ 가 0.012

일 때는 그림에서 보는 바와 같이  $P=0\text{MPa}$  및  $P=8.7\text{MPa}$ 에서 적합한 반 원추각을 가진 금형을 사용했을 때, 최대 직경감소율이 약 15%에서 약 20% 정도로 상당히 향상된 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터  $t_0/D_0$ 가 클 때는 성형한계에 대한 압력의 영향이 비교적 적으나,  $t_0/D_0$ 가 작을 때는 압력의 영향이 상당히 크다고 할 수 있다.

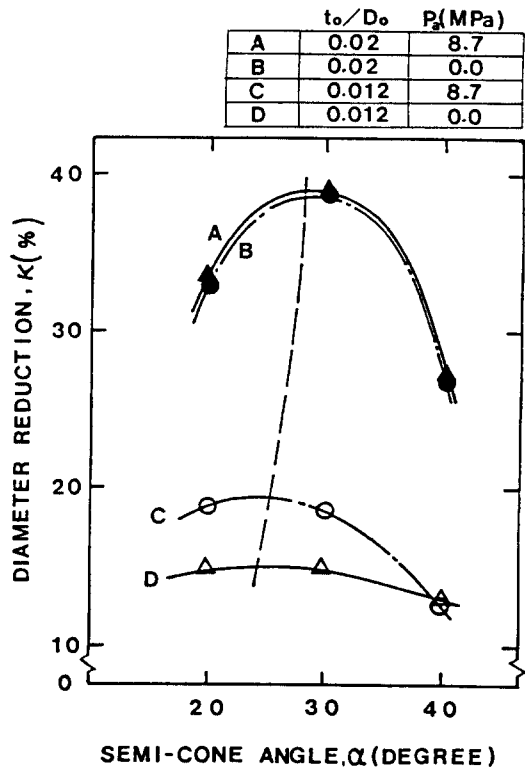


Fig. 5. Experimental forming limit diagram with respect to thickness to diameter ( $t_0/D_0$ ), semi-cone angle ( $\alpha$ ), internal pressure ( $P_0$ ).

위에서 설명한 성형 한계를 지배하는 불안정 현상으로는

- i) 성형부 선단의 주름 (wrinkling) 현상 : A
  - ii) 원통부의 좌굴 (buckling) 현상 : B
- 등이 있는데, FIG. 6은 이러한 불안정 현상들



의 모습들을 보여 준다.



(a) (b)

Fig. 6. Two types of instability occurring in tube reducing.

성형 한계를 지배하는 위의 불안정 현상들과 반원추각, 두께와 직경의 비 및 내압의 관계를 TABLE 2에서 비교하였다.

TABLE 2. 반원추각 (semi-cone angle  $\alpha$ ), 내압, 두께와 직경의 비와 관련한 불안정 현상의 모델

SEMI- CONE ANGLE, ( $\alpha$ )	INITIAL, SETTING PRESS- URE, Pa (MPa)	FAILURE MODEL	
		$t_o = 0.6\text{mm}$	$t_o = 1.0\text{mm}$
20	0	A	B
	11.1	A	B
30	0	A	B A
	11.1	A	B
40	0	A	A
	11.1	A	A

성형부 선단의 주름현상은 주로, 두께와 직경의 비가 비교적 작은 경우 발생하며, 두께와 직경의 비가 비교적 큰 경우라도 반원추각이 큰 경우에는 발생한다. 원통부의 좌굴 현상은 두께와 직경의 비가 비교적 큰 경우에 발생하는데, 두께와 직경의 비가 작은 경우라 할지라도 작용하는 내압이 높을 경우 원통부에 좌굴 현상이 발생한다.

이와 같은 결과로써 직경감소율을 최대화하기 위해서는 성형부 선단의 주름 현상과 원통부의 좌굴 현상이 발생하지 않는 적합한 성형 조건을 구할 필요가 있음을 보여준다.

한편 이론해석의 타당성을 확인하기 위하여 펀치행정과 하중의 관계 및 변형도 분포에 대하여 실험치와 이론치를 FIG.7, FIG.8, FIG.9 및 FIG.10에서 비교하였다.

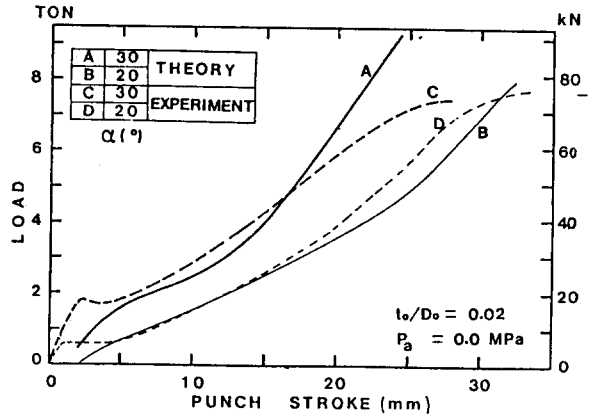


Fig. 7. Comparison of forming load between theory and experiment for various semi-cone angles.

FIG.7은  $P=0\text{MPa}$  이고  $t_o/D_o=0.02$ 인 경우 급형의 반원추각  $\alpha$ 가 변할 때, 펀치 행정과 하중의 관계에 대하여 이론치와 실험치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 및 말기 상태를 제외한 대부분의 영역에서 실험치와 이론치가 비교적 일치하는 것을 알 수 있다. 초기상태에서 실험치와 이론치가 많은 차이를 보이고 있는 것은 급힘(Bending)에 의한 영향을 이론에서는 고려하지 못한 때문이다.

FIG.8은  $P=0\text{MPa}$  이고  $\alpha=30^\circ$ 인 경우에 대하여  $t_o/D_o$ 의 변화에 따른 펀치행정과 하중과의 관계를 나타낸다. FIG.7에서와 마찬가지로

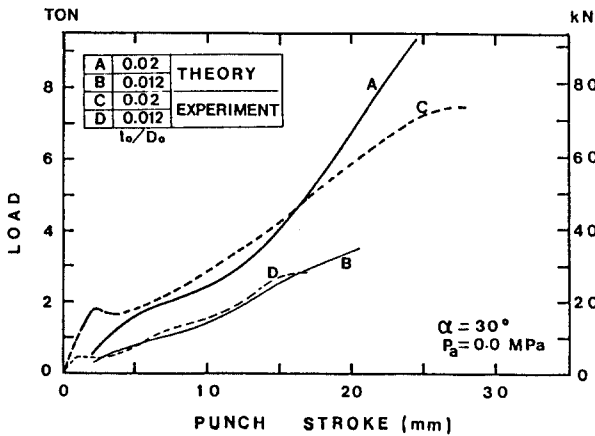


Fig. 8. Comparison of forming load between theory and experiment for various thickness to diameter ratios.

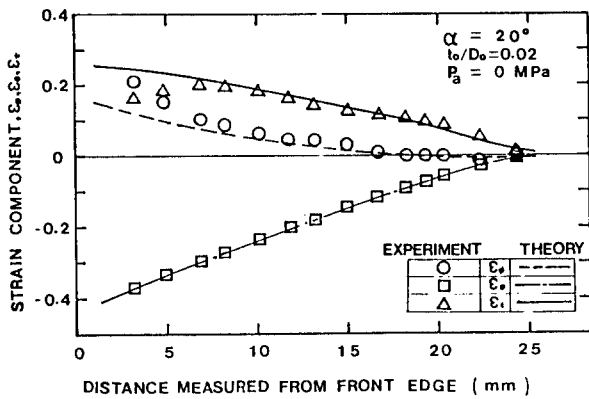


Fig. 9. Distribution of each component of strain along the distance measured from the front edge. (initial thickness of material: 1.0 mm)

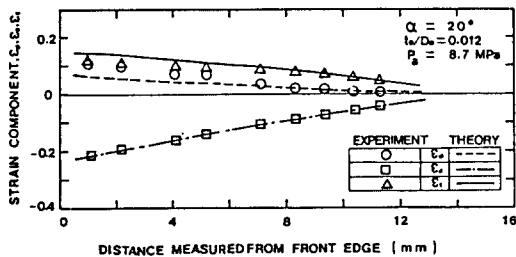


Fig. 10. Distribution of each component of strain along the distance measured from the front edge. (initial thickness of material: 0.6 mm)

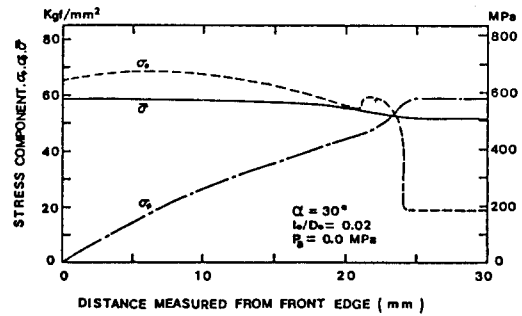


Fig. 11. Distribution of stress component along the distance measured from the front edge.

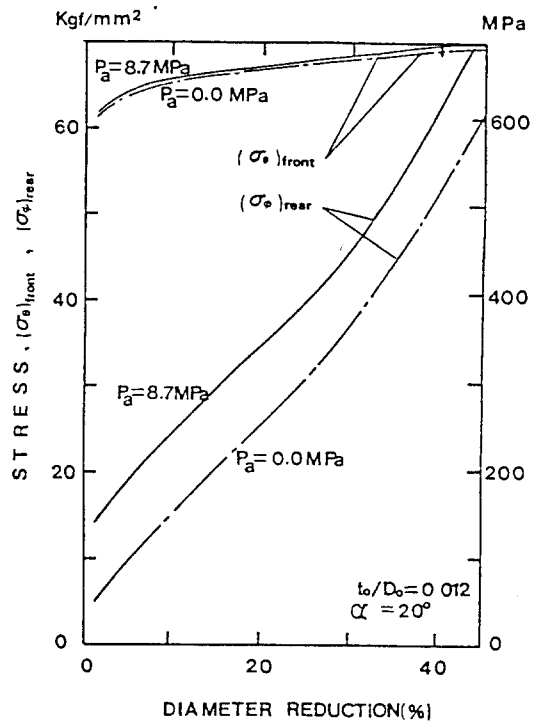


Fig. 12. Variation of circumferential stress (at front edge:  $(\sigma_\theta)_{front}$ ) and meridional stress (at rear edge:  $(\sigma_r)_{rear}$ ) with respect to diameter reduction.

지로 성형초기에 이론치와 실험치가 많은 차이를 보이는데, 이는 굽힘에 의한 영향을 고려하지 못한 때문이다.  $t_0/D_0 = 0.012$  인 경우에  $t_0$

$/D_0 = 0.02$ 인 경우보다 실험치와 이론치가 보다 잘 일치하는 것은, 두께가 얇으므로 굽힘에 의한 영향이 작기 때문이다. 이러한 점들을 고려해 보면 대부분의 성형 영역에서 실험치와 이론치가 대체로 일치하고 있다.

FIG.9는  $\alpha = 20^\circ$  이고  $t_0/D_0 = 0.02$ ,  $P = 0\text{MPa}$ 인 경우 직경감소율 ( $k = 1 - r_a/r_0$ )이 33%일 때, 원추형 부분의 선단으로부터의 거리에 따르는 변형도의 분포를 나타낸다. 이 그림은 성형부 선단부분을 제외한 대부분의 영역에서 실험치와 이론치가 비교적 일치하는 것을 보여 주고 있다. 성형 선단부에서는 경계 조건이 이론에서 가정한 것과 같지 않기 때문에 차이가 많이 나는 것으로 사료된다.

FIG.10은  $\alpha = 20^\circ$ ,  $t_0/D_0 = 0.012$ ,  $P = 8.7\text{MPa}$ 의 조건하에서 직경감소율이 20%일 때, 선단으로부터의 거리에 따르는 변형도 분포를 나타낸다. 이 그림은 대부분의 영역에서 이론치와 실험치가 일치하는 것을 보여 준다.

FIG.11은  $P = 0\text{MPa}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $t_0/D_0 = 0.02$ 인 경우 선단에서부터의 거리에 따른 유동 응력, 원주방향의 압축응력, 종방향의 압축응력 등의 분포를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 원주 방향 응력은 원추형 부분에서 매우 크며, 선단으로부터의 거리에 따라 서서히 감소한다. 종방향 응력은 선단으로부터의 거리에 따라 거의 비례하여 증가하며, 유동 응력은 거의 변화가 없다. 원통부에서는 응력 성분의 크기가 거의 변화하지 않는다.

FIG.12는  $t_0/D_0 = 0.012$ 인 시편을 반 원추각이  $20^\circ$ 인 금형으로 성형시킬 때, 성형 과정 중 압력의 변화에 따르는 선단의 원주 방향 응력과 원통부의 종방향 응력의 변화를 나타낸다.

성형부 선단의 원주 방향 응력은 성형 초기부터 그 크기가 상당히 크며 성형 중에는 서서히 증가한다. 성형부 선단의 원주 방향 응력은 선단부의 주름현상과 밀접한 관계가 있다.

그러나 선단부의 주름 현상은 내압이 작용할 때 발생이 억제된다. 그림에서  $P = 0\text{MPa}$ 일 때 원주방향 응력은 거의 변하지 않고 있는데, 이

는 다른 조건이 같을 경우 내압을 높이면 성형 한계를 향상시킬 수 있음을 말해 주며 실험결과 역시 이를 뒷받침해 준다.

원통부에서의 종방향 응력은 성형이 진행됨에 따라 증가하는 율이 상당히 크다. 압력에 대해서는  $P = 0\text{MPa}$ 일 때보다  $P_a = 8.7\text{MPa}$ 일 때 훨씬 커지는 것을 볼 수 있다. 즉, 압력에 대하여 민감하며 그 크기도 커진다.

이상을 종합하면  $t_0/D_0$ 가 작을 경우 압력이 작용하지 않을 때는 선단부에서 쉽게 원주방향의 주름현상이 생길 수 있으며, 원통부에 좌굴이 생기지 않는 범위에서 압력을 최대로 하면 최대의 직경감소율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

주름 현상을 배제하기 위해 압력을 가했을 때의 성형 한계의 해석은 앞으로 연구해야 할 과제이다.

#### 4. 결 론

1. 박판의 튜브리듀싱 공정의 경우 비정상상태에 해당하는 성형범위에 대하여 이론해석을 하여 변형도분포, 응력분포, 금형접촉압력 및 하중을 구하였다.

2. 황동관을 소재로 한 실험을 통하여 성형 한계에 대한 반원추각, 두께와 직경의 비, 내압 등의 영향을 고찰했고, 최적 반원추각이 보통  $20^\circ$  내지  $35^\circ$  사이에 존재함을 밝혔다.

그리고 두께와 직경의 비가 커짐에 따라 성형한계가 현저하게 증가함을 보였으며, 두께와 직경의 비가 작은 경우 내압이 커짐에 따라 성형한계가 상당히 증가하는 것을 보였다.

3. 불안정 현상의 양식에 대하여 금형의 반원추각, 두께와 직경의 비, 내압의 영향을 고찰함으로써 성형부의 주름현상은 주로 반원추각이 클 때 및 두께와 직경의 비가 작을 때 발생하며, 원통부의 좌굴현상은 주로 두께와 직경의 비가 클 때 및 반원추각이 작을 때 생기고 두께와 직경의 비가 작더라도 높은 압력이 작용할 경우 생기는 것을 실험을 통해 확인했

다.

4. 이론해석을 통해 구한 하중과 변형도 분포를 실험치와 비교한 결과 비교적 좋은 일치를 보였으며, 이로써 이론 해석의 타당성을 입증했다.

5. 성형 선단부의 원주방향응력과 원통부의 종방향응력에 대한 압력의 영향을 고찰하였다.

### REFERENCES

1. M. Miyagawa and C.H. Back, "The Buckling of the Cylindrical Shells under Uniaxial Compression and Nose Forming", J. of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.3, pp.397-405, 1962.
2. M. Miyagawa and C.H. Back, "An Experimental Investigation on Formability of Nosing of Circular Cylindrical Shells", J. of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.4, pp.163-170, 1963.
3. K. Manabe and H. Nishimura, "Forming Loads and Forming Limits in Conical Nosing of Tubes: Study on Nosing and Flaring of Tubes I", J. of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.23, pp. 335-342, 1982.
4. K. Manabe and H. Nishimura, "An Experimental Study on Stress and Strain Distributions in Conical Nosing of Tubes: Study on the Nosing and Flaring of Tubes II", J. of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.23, pp.451-457, 1982.
5. K. Manabe and H. Nishimura, "Analysis of Stress and Forming Loads in Conical Nosing of Tubes: Study on the Nosing and Flaring of Tubes III", J. of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.23, pp.650-657, 1982.
6. K. Manabe and H. Nishimura, "Analysis of Deformation Behavior in Nosing of Tubes: Study on the Nosing and Flaring of Tubes IV", J. of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.23, pp.878-885, 1982.
7. A. Fatnassi, Y. Tomita and A. Shindo, "Non-Axisymmetric Buckling Behavior of Elastic-Plastic Circular Tubes subjected to a Nosing Operation", International J. of Mechanical Science, vol.27, pp.643-651, 1985.
8. R. Hill, Plasticity, Oxford University Press, 1960.