

편심압출굽힘가공법에 의한 사각형 단면을 가진 중공 튜브제품의 U형굽힘가공에 관한 연구

김진훈* · 진인태**

(1998년 7월 21일 접수)

A Study on the U-bending of Rectangular Hollow Tube by the Eccentric Extrusion and Bending Process

Jin Hoon Kim and In Tai Jin

Abstract

The eccentric extrusion and bending process for the forming of the curved rectangular hollow tube is newly developed. Generally, the bending process of hollow tube is the secondary process followed by the extrusion process of the hollow tube from the round billet. So, many defects such as wrinkling and the difference of wall thickness can be happened during the secondary bending process. In order to avoid the defects, the new process named as "the eccentric extrusion and bending process" is suggested and applied to the U-bending of rectangular hollow tube. In this paper, the kinematically admissible velocity field between the dies surface and the internal plug boundary surface is developed for the curving velocity. By the using of this curving velocity field, the curvature of extruded products can be calculated with the parameters such as eccentricity, dies length, friction constant, aspect ratio.

Key Words : Eccentric Extrusion and Bending Process(편심압출굽힘가공법), Bending(굽힘가공), Extrusion(압출), Upper Bound Analysis(상계법), Eccentricity(편심), Curvature(곡률), Rectangular Hollow Tube(사각관)

1. 서 론

각종 튜브제품의 주 용도는 고온 및 고압에 견딜 수 있고, 튜브 내외부의 열교환을 위한 전열관등과 기타 화학플랜트의 각종 배관으로 쓰인다. 그중 사각형단면을 가진 중공튜브는 같은 단면적을 갖는 원형단면보다 둘레가 길기 때문에 전열효과의 장점이 있으나 굽어진 튜브의 제작이

쉽지 않아 사용하기 어려운 단점이 있다.

또한, 구조용으로써 튜브 중공형제는 중실형제와 비교해서 같은 비틀림 각과 굽힘각을 기준으로 비교하여, 중량을 감소시킬 수 있어 飛行體등과 같이 경량화가 요구되는 곳에 사용될 수 있다. 그 중에서 굽은 사각형부재의 용도는 상기 강도효과를 유지하면서 곡률을 갖고 있어서 돔형 등의 판구조물에 보강재로써 이용이 가능하다.

* 부경대학원 기계공학과

** 부경대학교 기계, 자동차공학부

일반적인 중공튜브제품의 굽힘가공기술⁽¹⁾은 컴프레션 굽힘가공(Compression bending), 램 굽힘가공(Ram bending), 드로우 굽힘가공(Draw bending)등이 있고 제품성형시까지 열간압출→1차냉간가공→중간열처리→2차냉간가공(중간열처리, 튜브교정)→최종열처리의 공정을 거친다.

상기의 일반적 가공기술이외의 새로운 굽힘가공을 제안하기 위한 기초연구로써, 異形材의 압출가공 중에 발생하는 굽힘현상에 관하여 Jin⁽²⁻⁸⁾등은 T형채 및 사각형채등의 중실재의 단면을 가진 제품의 편심압출가공을 상계해법과 DEFORMTM-3D로 해석한 바 있다.

사각형단면을 갖는 중공튜브의 편심압출굽힘가공시 제품의 곡률을 예측하기 위해 유동장 내의 굽힘속도장을 구성하였다. 그리고 굽힘의 주변수인 중심편차량, 다이길이, 마찰상수, 형상비를 가공변수로 하여 굽힘곡률의 크기를 계산하였고, 굽힘현상에 대한 검증으로써 상용소프트웨어인 DEFORMTM-3D를 사용하였다.

본 논문에서는 중공튜브제품의 일반적 굽힘 가공법에서 발생할 수 있는 결함 즉, 주름발생 및 두께변화등을 제거하기 위해 압출과 동시에 굽힘을 행하여 압출공정과 굽힘공정을 한 공정으로 줄일 수 있는 편심압출굽힘가공법을 제안하고자 한다.

2. 중공소재의 편심압출 굽힘속도장 구성

2.1 3차원 동적가공 속도장 적합조건

Fig.1은 랜드부를 고려한 튜브성형을 위한 비축대칭 해석의 속도장구성을 위한 해석모델로써, 3차원 동적가공

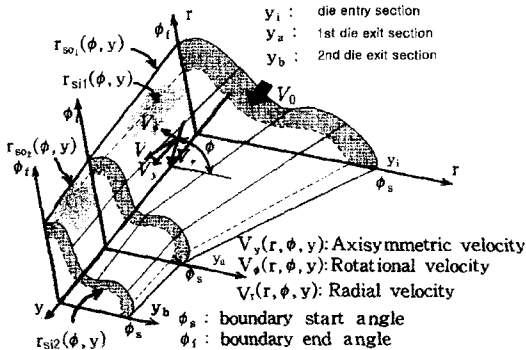


Fig. 1 Generalized analytical model of nonaxisymmetric extrusion with two stage and tube dies

속도장을 만족하기 위해서는 식(1)의 체적일정 법칙, 식(2)의 체적흐름의 일정조건, 식(3), (4)의 공구면상에서의 속도와 공구면 형상과의 적합조건, 그 외 강소성 경계 및 내부 전단면의 속도연속조건이 성립해야 한다.⁽⁹⁾

$$\frac{\partial V_r(r, \phi, y)}{\partial r} + \frac{V_r(r, \phi, y)}{r} + \frac{\partial V_y(r, \phi, y)}{\partial y} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_\phi(r, \phi, y)}{\partial \phi} = 0 \quad (1)$$

$$\int_{\phi_s}^{\phi_f} \int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} V_y(r, \phi, y) \cdot r \cdot dr \cdot d\phi = \int_{\phi_s}^{\phi_f} \int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} V_0 \cdot r \cdot dr \cdot d\phi \quad (2)$$

$$V_r(r_{si}(\phi, y), \phi, y) = V_y(r_{si}(\phi, y), \phi, y) \cdot \frac{\partial r_{si}(\phi, y)}{\partial y} + \frac{V_\phi(r_{si}(\phi, y), \phi, y)}{r_{si}(\phi, y)} \cdot \frac{\partial r_{si}(\phi, y)}{\partial \phi} \quad (3)$$

$$V_r(r_{so}(\phi, y), \phi, y) = V_y(r_{so}(\phi, y), \phi, y) \cdot \frac{\partial r_{so}(\phi, y)}{\partial y} + \frac{V_\phi(r_{so}(\phi, y), \phi, y)}{r_{so}(\phi, y)} \cdot \frac{\partial r_{so}(\phi, y)}{\partial \phi} \quad (4)$$

2.2 편심된 내부 프러그 표면형상과 외부 금형표면 형상

내부프러그 표면형상 $r_{si}(\phi, y)$ 은 랜드출구에서 프러그 단면형상 SPBI(ϕ)와 금형 입구에서 프러그 단면형상 ROPI(ϕ)를 Fig.2와 같이 금형 입구에서 구간 YA까지와 YA에서 YB의 금형출구 까지의 2단계로 나누어 선형으로 연결한 다음과 같은 방정식을 얻는다.

a) $0 < y \leq YA$

$$r_{si}(\phi, y) = \frac{SPAI(\phi) - ROPI(\phi)}{YA} y + ROPI(\phi) \quad (5-1)$$

b) $YA \leq y < YB$

$$r_{si}(\phi, y) = \left\{ \frac{SPBI(\phi) - SPAI(\phi)}{YB - YA} \right\} \cdot (y - YA) + SPAI(\phi) \quad (5-2)$$

금형표면형상 $r_{so}(\phi, y)$ 은 랜드출구 단면형상 SPB(ϕ)와 금형입구 단면형상 ROP(ϕ)를 2단계로 나누어 선형으로 연결하여 다음과 같은 방정식을 얻는다.

a) $0 < y \leq YA$

$$r_{so}(\phi, y) = \frac{SPA(\phi) - ROP(\phi)}{YA} + ROP(\phi) \quad (6-1)$$

b) $YA \leq y < YB$

$$r_{so}(\phi, y) = \left\{ \frac{SPB(\phi) - SPA(\phi)}{YB - YA} \right\} \cdot (y - YA) + SPA(\phi) \quad (6-2)$$

여기서, SPA(ϕ)와 SPAI(ϕ)는 각각 중간단계에서의 금형과 프로그의 형상이다.

2.3 소성유동장에서의 편차속도구배와 금형단면 중심의 이동궤적

편차속도 구배를 나타내는 비례상수 $Q(y)$ 의 경계조건은 $Q(0) = 0$ 이고, 금형의 입구단면에 압출방향 속도구배가 없는 강소성 경계면의 조건을 만족한다. 금형의 형상이 선형적으로 변하기 때문에 편차속도의 구배는 각구간에서의 y 의 일차함수 식 (7-1), (7-2)과 같이 표현된다.

a) $0 < y \leq YA$

$$Q(y) = \left(\frac{QA}{YA} \right) \cdot y \quad (7-1)$$

b) $YA \leq y < YB$

$$Q(y) = \left(\frac{QB - QA}{YB - YA} \right) \cdot (y - YA) + QA \quad (7-2)$$

또한, 금형중심의 이동궤적 $EC(y)$ 는 금형의 형상과 같이 선형적으로 변화하기 때문에 각구간에서의 일차함수식 식(8-1), (8-2)과 같다.

a) $0 < y \leq YA$

$$EC(y) = \left(\frac{RE2 - RE1}{YA} \right) \cdot y + RE1 \quad (8-1)$$

b) $YA \leq y < YB$

$$EC(y) = \left(\frac{RE3 - RE2}{YB - YA} \right) \cdot (y - YA) + RE2 \quad (8-2)$$

2.4 유동장내에서의 굽힘속도장의 구성

금형 출구에 있어서 제품의 굽힘현상은 축방향속도가 균일하지 않고 선형적으로 편차 되어진 속도분포에 의해서 발생한다. 따라서 속도장 구성의 기본개념은 다음과 같다. 우선, 축방향 속도 $V_y(r, \phi, y)$ 을 식(9)과 같이 평균속도 $\bar{V}_y(y)$ 와 편차속도 $\Delta V_y(r, \phi, y)$ 로 나누어 생각할 수 있다.

$$V_y(r, \phi, y) = \bar{V}_y(y) + \Delta V_y(r, \phi, y) \quad (9)$$

체적 흐름 일정의 조건 식으로부터 평균속도 $\bar{V}_y(y)$ 는 식(10)과 같이 정식화될 수 있다.

$$\bar{V}_y(y) = V_0 \cdot \frac{\int_0^\pi \{r_{so}^2(\phi, y_i) - r_{si}^2(\phi, y_i)\} d\phi}{\int_0^\pi \{r_{so}^2(\phi, y) - r_{si}^2(\phi, y)\} d\phi} \quad (10)$$

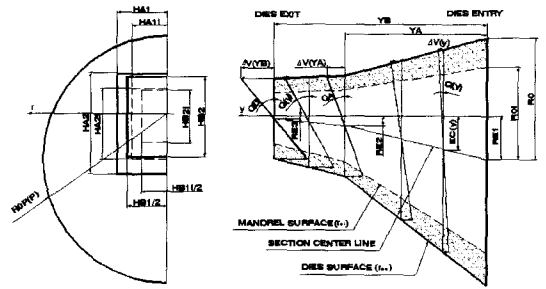


Fig. 2 Longitudinal velocity distribution at each stage

편차속도 $\Delta V_y(r, \phi, y)$ 의 분포는 중심으로부터 거리 $D(r, \phi, y)$ 와 비례상수 $Q(y)$ 의 함수의 곱에 의해 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta V_y(r, \phi, y) = D(r, \phi, y) \cdot Q(y) = \{r \cdot \cos \phi - EC(y)\} \cdot Q(y) \quad (11)$$

Fig.2를 보면, 이 편차속도 ΔV_y 는 축에 수직인 단면상에 대한 축방향속도의 편차를 나타낸다. 위의 식(11)에서 $EC(y)$ 는 금형 및 프로그단면 중심의 이동궤적이다. 금형 출구면상에 대한 이 편차속도의 분포가 제품에 굽힘을 발생시키게 된다. 이 경우 편차속도는 단면의 중심으로부터 선형적으로 변하는 분포형태를 가지게 되며, 또한 이 편차

속도의 평균속도는 식(12)을 만족하지 않으면 안 된다.

$$\frac{\int_0^\pi \int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} \Delta V_y(r, \phi, y) \cdot r \cdot dr \cdot d\phi}{\int_0^\pi \{r_{so}^2(\phi, y) - r_{si}^2(\phi, y)\} d\phi} = 0 \quad (12)$$

상기의 굽힘속도장을 얻기 위하여 3차원 동적가속속도 장으로부터 $V_r(r, \phi, y)$ 와 $V_\phi(r, \phi, y)$ 및 $\omega(\phi, y)$ 을 식(13), 식(14), 식(15)와 같이 구성하는 것이 가능하다.

$$V_r(r, \phi, y) = -\frac{r^2 - r_{si}^2(\phi, y)}{2r} \cdot \left\{ \frac{\partial \bar{V}_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} - \frac{\partial EC(y)}{\partial y} \cdot Q(y) - EC(y) \cdot \frac{\partial Q(y)}{\partial y} \right\} - \frac{r^3 - r_{si}^3(\phi, y)}{3r} \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{\partial Q(y)}{\partial y} + \frac{r_{si}(\phi, y)}{r} \left\{ V_y(r_{si}(\phi, y), \phi, y) \cdot \frac{\partial r_{si}(\phi, y)}{\partial y} + \frac{V_\phi(r_{si}(\phi, y), \phi, y)}{r_{si}(\phi, y)} \cdot \frac{\partial r_{si}(\phi, y)}{\partial y} \right\} \quad (13)$$

$$V_\phi(r, \phi, y) = r \cdot \omega(\phi, y) \quad (14)$$

$$\omega(\phi, y) = \frac{-1}{\int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} r dr} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \left\{ \int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} r \cdot \frac{\partial V_y(r, \phi, y)}{\partial y} dr + r_{so}(\phi, y) \cdot V_y(r_{so}(\phi, y), \phi, y) \cdot \frac{\partial r_{so}(\phi, y)}{\partial y} - r_{si}(\phi, y) \cdot V_y(r_{si}(\phi, y), \phi, y) \cdot \frac{\partial r_{si}(\phi, y)}{\partial y} \right\} d\phi \quad (15)$$

2.5 소성일

도출된 3차원 동적 가속속도장으로부터 변형률 속도가 구해지고 내부일 \dot{W}_i , 급형 입, 출구의 전단 변형일 \dot{W}_s , 마찰일 \dot{W}_f 및 전 소성일 \dot{W} 가 다음과 같이 산출된다.

$$\dot{W}_i = \int_{V_p} \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon} \cdot dV \quad (16)$$

$$\dot{W}_s = \int_s \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \bar{\sigma} \cdot \Delta V_s \cdot dS \quad (17)$$

$$\dot{W}_f = \int_f \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \bar{\sigma} \cdot \Delta V_f \cdot dA \quad (18)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (19)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 피가공재의 변형저항, $\dot{\epsilon}$ 는 상당변형을 속도, V_p 는 소성역, s 는 전단면, f 는 마찰경계면을 나타내고, ΔV_s , ΔV_f 는 각각 s , f 상에서의 상대 미끄럼 속도, m 는 마찰상수이며 dV 는 피가공재의 미소체적, dS 는 내부전단면상에서 미소 면적, dA 는 마찰면상에서 미소면적을 나타낸다.

Fig.3의 그림에서 내부 전단면에서의 상대 미끄럼 속도를 살펴보면 내부전단일률은 해석중심점에 대해서 사각형 튜브 내외부의 속도불연속면이 두 개가 생겨서 첫번째 전단면에서는 $\phi^*11 \sim \phi^*12$ 까지, 그리고 두번째 전단면은 $\phi^*21 \sim \phi^*22$ 까지 비틀어진 면을 형성함을 알 수 있다. 이때의 내부 전단면에서 속도 불연속량은 식(20)과 같이 표시된다.

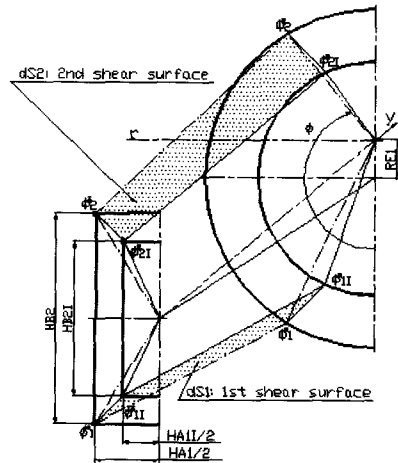


Fig. 3 Internal shear surface which varies with rectangular hollow tube shape

$$\Delta V_s(r, \phi_n^*, y) = \left| V_r(r, \phi_n^* + 0, y) - V_r(r, \phi_n^* - 0, y) \right| = \frac{\{r^2 - r_{si}^2(\phi_n, y)\} \cdot V_\phi(r, \phi_n, y)}{r^2 \cdot \{r_{so}^2(\phi_n, y) - r_{si}^2(\phi_n, y)\}} \cdot \left(\frac{y}{y_1} \right)$$

$$\left[r_{so}(\phi_n, y) \cdot \left\{ \frac{\partial SPA(n)(\phi_n)}{\partial \phi} - \frac{\partial SPA(n+1)(\phi_n)}{\partial \phi} \right\} - r_{si}(\phi_n, y) \cdot \left\{ \frac{\partial SPAI(n)(\phi_n)}{\partial \phi} - \frac{\partial SPAI(n+1)(\phi_n)}{\partial \phi} \right\} \right] \quad (20)$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 해석조건 및 금형 형상

Table 1의 해석조건에서 금형 입출구의 편심을 0~14 mm로, 금형의 길이를 20~80 mm로, 아스펙트비를 1~2.5로, 그리고 마찰상수를 0.4~0.8로 해석함을 보여 주고 있다. Fig.4는 상계해의 해석결과로 예상되는 제품

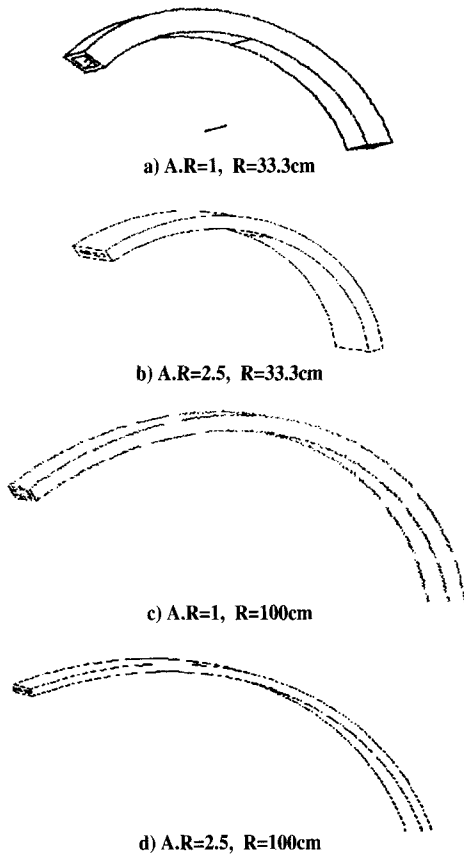


Fig. 4 The curved rectangular hollow tube after the eccentric extrusion and bending process

의 형태를 나타내고 있다.

Fig.5는 아스펙트비가 1, 편심이 14 mm일때의 금형과 내부 프러그의 형상이며, Fig.6은 아스펙트비가 2.5, 편심이 14 mm일 때의 금형과 내부 프러그의 형상을 각각 나타내고 있다.

Table 1 Initial condition of UBT analysis

Inlet speed (V0)	10mm/sec
Billet radius (R0)	40mm
Eccentricity (RE1)	0-14mm
Dies Length (YA)	20-80mm
Friction constant (m)	0.4-0.8
Land Length (L.L)	10mm
Reduction Area (R.A)	80%
Billet thickness (TR)	10mm
Product thickness(TB)	5 mm
Yield stress (Y)	120 N/mm2
Aspect ratio (A.R)	1 - 2.5

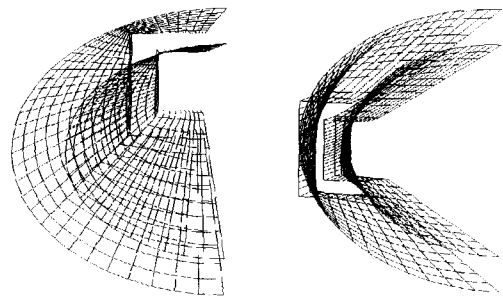


Fig. 5 Straight contour of dies & plug (A.R=1)

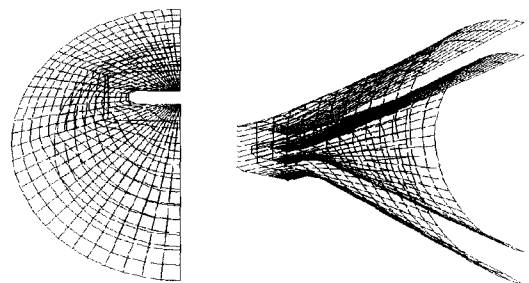


Fig. 6 Straight contour of dies & plug (A.R=2.5)

3.2 굽힘 속도장 해석결과

Fig.7은 금형과 프러그표면에서의 속도벡터를 3차원으로 보여주고 있으며, Fig.8은 중심편차량이 없는 경우의 금형면상에서의 속도를 등고선분포로 보여주고 있다. 이 경우에 금형출구면상에서의 축방향속도의 편차는 없고 제

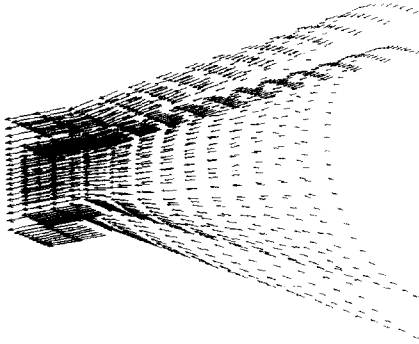


Fig. 7 Iso-view of vector plot on dies and plug's surface (RE1=14 mm)

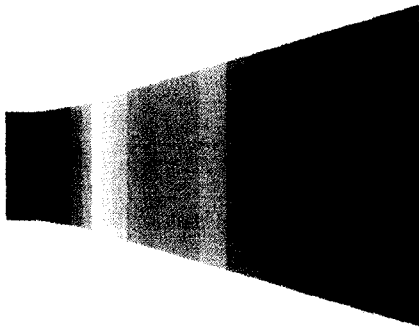


Fig. 8 Contour plot on tube dies surface (RE1=0 mm)

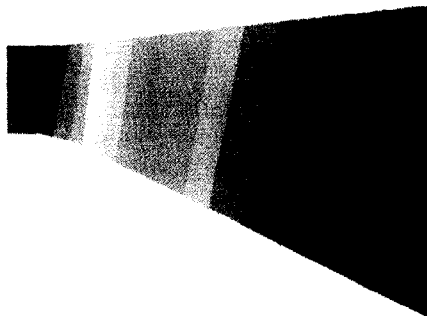


Fig. 9 Contour plot on tube dies surface (RE1=14 mm)

품의 굽힘현상은 발생하지 않는다. Fig.9는 금형출구단면에서의 중심편차량이 14 mm인 경우의 속도를 등고선 분포로 보여주고 있으며, 금형 출구단면의 축방향 속도가 편차되어 압출가공중에 굽힘현상이 발생하는 등고선 분포를 나타낸다. Fig.8, Fig.9에서 보듯이 편심이 굽힘발생의 원인임을 알 수가 있다.

3.3 중심편차량에 따른 튜브의 굽힘곡률과 압출압력

Fig.10은 편심에 따른 소재에 가해지는 압출압력으로써, 중심편차량이 크면 클수록 압출압력이 증가함을 보여주고 있고, Fig.11은 그에 따른 튜브의 굽힘곡률을 보여주고 있으며, 편심이 증가하면 굽힘곡률도 크게되어 굽힘곡률의 크기는 편심의 크기와 관련 있음을 알 수 있다.

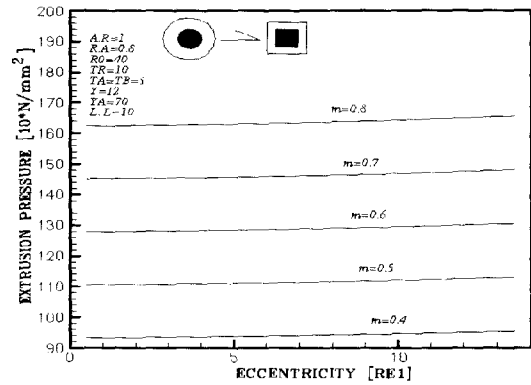


Fig. 10 The relation of eccentricity and extrusion pressure ($m=0.4 \sim 0.8$)

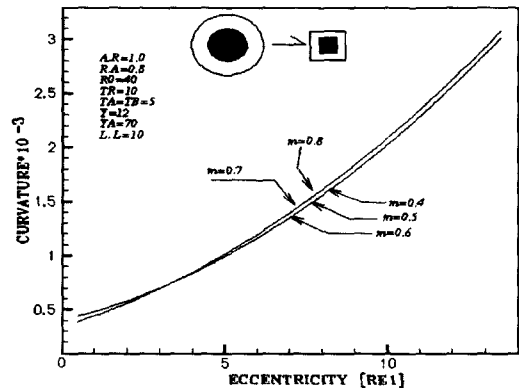


Fig. 11 The relation of eccentricity and product curvature ($m=0.4 \sim 0.8$)

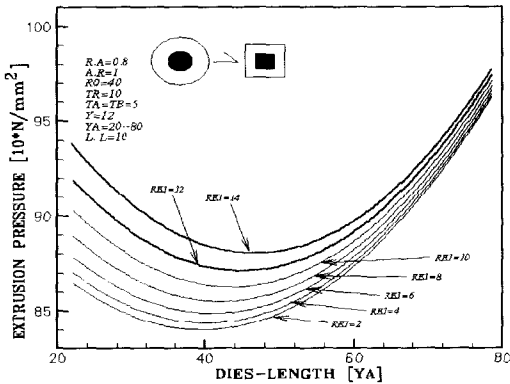


Fig. 12 The relation of dies length and extrusion p- ressure (RE1=0~14)

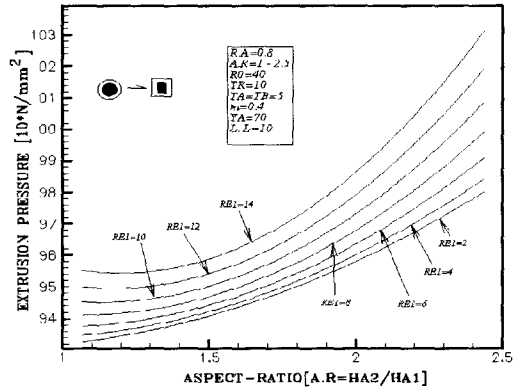


Fig. 14 The relation of aspect-ratio and extrusion pressure (RE1=0~14)

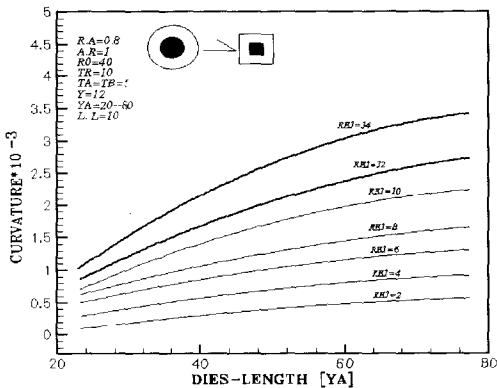


Fig. 13 The relation of dies length and product curvature (RE1=0~14)

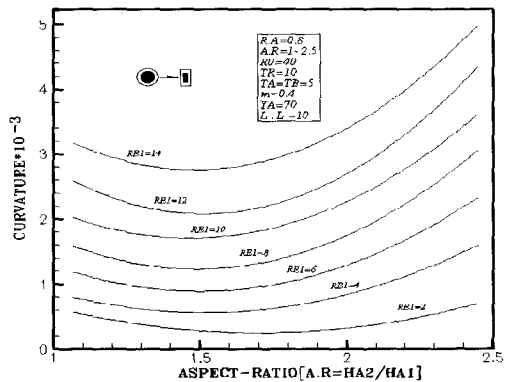


Fig. 15 The relation of aspect-ratio and product curvature (RE1=0~14)

3.4 금형길이에 따른 튜브의 굽힘곡률과 압출압력

Fig.12는 금형길이에 따른 압출압력을 나타내고 있는데 금형길이가 아주 짧거나 길수록 압출압력이 증가하나 그 중간 범위에서는 많이 작아 짐을 알 수 있다. 그 이유는 금형의 길이가 짧을 경우에 금형내부에 소재의 급격한 변형 때문인 것으로 볼 수 있다. 그리고 금형의 길이가 길 경우에는 급격한 변형은 없으나 금형과 소재의 마찰이 심함으로 해서 압력이 다시 증가하는 것으로 보여진다. Fig.13은 같은 조건하에서 금형길이에 따른 굽힘곡률을 보여주고 있는데 같은 편심인 경우에는 금형 길이가 길수록 굽힘곡률이 큼을 알 수 있다.

3.5 아스펙트 비에 따른 튜브의 굽힘곡률과 압출압력

Fig.14는 형상비에 따른 압출압력을 나타내는 결과로

편심에 따라 형상비(1~2.5)가 크면 클수록 압출압력이 증가하고있는 것을 보여주고 있으며, 형상비가 클 경우에 사각단면의 폭이 좁아짐으로 해서 소재의 변형이 크기 때문에 압력이 증가함을 알 수 있다. Fig.15는 같은 조건하에서 해석한 형상비에 따른 굽힘곡률을 보여주고 있는데, 출구단면의 형상비를 변화시켰을 경우에도 압출제품의 굽힘곡률의 크기가 달라짐을 알 수 있다.

3.6 마찰상수에 따른 튜브의 굽힘곡률과 압출압력

Fig. 16은 마찰상수에 따른 압출압력을 나타내는 결과로 금형길이에 따라 마찰상수가 크면 클수록 압출압력은 증가하고, Fig. 17에서 처럼 굽힘곡률도 마찰상수가 크면 증가함을 알 수 있는데 이처럼 마찰상수도 제품의 굽힘곡률에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

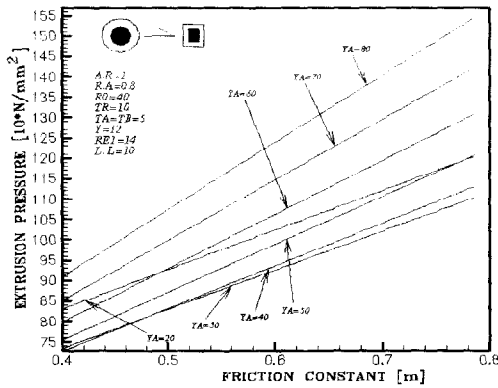


Fig. 16 The relation of friction-constant and extrusion pressure (YA=20~80)

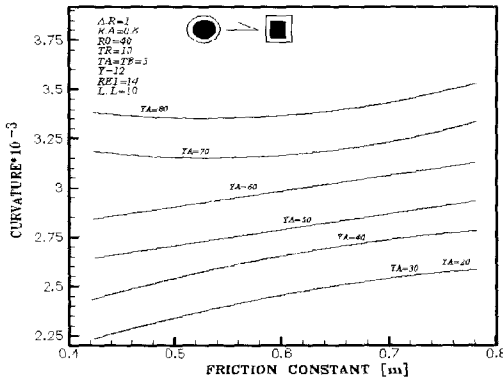


Fig. 17 The relation of friction-constant and product curvature (YA=20~80)

4. DEFORM™-3D에 의한 사각형 단면을 가진 중공 튜브의 편심압출굽힘가공 굽힘해석

Table.2는 DEFORM™-3D 시뮬레이션을 위한 초기입력조건으로써, 금형출구측 형상의 편심으로 인한 제품의 굽힘에 대해서 상계체에 의한 결과를 DEFORM™-3D 시뮬레이션 해석에서도 확인 할 수 있었다. Fig.18, 19는 Table.2의 해석조건을 사용한 4각형 튜브 U형편심압출굽힘가공 시뮬레이션 결과를 보여준다. 금형출구 단면의 편심에 의해서 굽힘이 발생함을 알 수 있다.

5. 결론

사각형 단면을 가진 중공 튜브를 U형굽힘가공하기 위하

Table 2 Initial condition of DEFORM™-3D simulation

Inlet speed (V0)	24.5mm/sec
Billet radius (R0)	40mm
Eccentricity (RE1)	4.12mm
Dies Length (YA)	70mm
Friction constant (m)	0.4
Land Length (L.L)	10mm
Reduction Area (R.A)	80%
Billet thickness (TR)	10mm
Product thickness (TB)	5mm
Aspect Ratio (A.R)	1

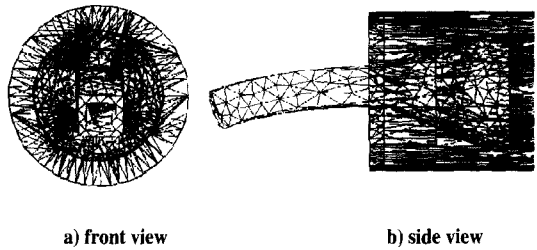


Fig. 18 Result of DEFORM™-3D (RE1=4, A.R=1)

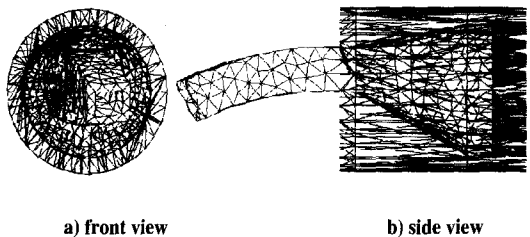


Fig. 19 Result of DEFORM™-3D (RE1=12, A.R=1)

여 압출과 굽힘을 동시에 가공할 수 있는 편심압출굽힘가공법을 개발하였다.

(1) 이 방법은 편심된 내부 프러그와 편심된 금형표면 사이의 소성유동장에서 편차속도가 발생하도록 원형 튜브 단면의 금형 입구에서 사각형 튜브 단면의 출구면에 이르는 표면형상을 등각으로 연결하여 설계되어져 있다.

(2) 이때 굽힘 곡률의 조정은 편심의 크기, 다이길이, 마찰조건, 형상비등을 고려하여 결정할 수 있다.

(3) 이 가공법에 대한 검증으로써 상용소프트웨어인 DEFORM™-3D를 사용하여 편심이 굽힘발생의 주된 원인임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) J.Gillanders, 1984, "Pipe and Tube Bending Manual", Gulf Publishing Company, Houston, pp.16~62.
- (2) 진인태, 1995, "원형제품의 압출가공시 제품의 굽힘 현상에 관한 연구", 부산공업대학교 논문집, 제37집, pp.371~380.
- (3) 木内 學, 陳仁泰, 1996, "押出しT形の曲がり 豫測", 塑性加工, Vol.37, No.426, pp.711.
- (4) 진인태, 최재찬, 1997, "사각형 단면의 편심 압출시 제품의 굽힘현상에 관한 연구", 한국소성가공학회지, Vol.6, No.1, pp.46~52.
- (5) 김진훈, 김한봉, 진인태, 1997, "곡봉의 편심압출가공에 대하여 상계굽힘해석과 DEFORM™-3D에 의한 굽힘해석비교", 한국소성가공학회 97추계학술대회논문집, pp.45~48.
- (6) 김한봉, 김진훈, 진인태, 1997, "굽은 T형제품의 편심 압출 가공에 대한 상계 굽힘 해석과 DEFORM™-3D에 의한 굽힘해석비교", 한국소성가공학회 97추계학술대회논문집, pp.49~52.
- (7) 김진훈, 진인태, 1997, "평다이를 사용한 편심압출 가공에서의 비유동영역의 형상과 굽힘속도분포에 관한 상계해석", 한국소성가공학회, Vol .7, No.2, pp.177~185.
- (8) 진철호, 박대운, 진인태, 1998, "압출다이의 랜드부 형상에 따른 압출제품의 비틀림과 굽힘현상해석", 한국소성가공학회 98추계학술대회논문집, pp.254~257.
- (9) 木内 學, 星野 倫彦, 飯島 茂男, 1989, "押出し加工における非正常變形の解析", 塑性加工, Vol.30, No.336, pp.43~50.