

전방압출과 연계된 레이디얼압출의 성형특성에 관한 연구

장용석* · 황병복*

(1999년 12월 16일 접수)

A Study on the Forming Characteristics of Radial Extrusions Combined with Forward Extrusion

Y. S. Chang and B. B. Hwang

Abstract

This paper is concerned with the family of parts that generally feature a central hub with radial protrusions. Radial Extrusion is usually used in order to produce complex parts, which is combined with upsetting and/or forward and backward extrusion. Typical parts that fall into this category include cross pieces for universal joints, key-shaft type parts, tube fittings, and differential gears. In this paper, the forming characteristics of radial extrusion combined with forward extrusion is investigated by comparing the punch and mandrel loads. The design factors during radial extrusion combined with forward extrusion are applied to the simulation to see how much those factors have effect on the forming loads. The rigid-plastic FEM is applied to the simulation.

Key Words : Radial Extrusion, Forward Extrusion, Central Hub, Rigid-Plastic FEM

1. 서론

압출공정은 1700년대에 납과이프를 생산할 목적으로 처음 개발되었으며, 주로 챔버 안에서 원형 형태의 빌렛을 램을 통하여 압력을 가함으로써 소재를 다이 사이로 통과시켜 원하는 형태의 형상을 가공하는 공정이다. 다이는 원형 형상이외에도 목적에 따라 여러가지 형상이 사용된다. 압출에는 직접압출, 간접압출, 정수압압출, 중

격압출의 네 가지 기본 유형이 있다.⁽¹⁾ 또한, 압출의 독특한 형태로 레이디얼압출(radial extrusion)이 있다.

전방압출(forward extrusion)은 소재의 유동방향이 펀치의 운동방향과 같은 경우의 압출을 말하며, 후방압출(backward extrusion)은 소재의 유동방향이 펀치의 운동방향과 정반대인 경우의 압출을 말한다. 정수압압출(hydrostatic extrusion)은 챔버를 유체로 채우고 이를 통하여 빌렛에 압력을 전달하여 소재가 압출되도록 하는

* 인하대학교 자동화공학과

경우이며, 소재의 모든 부분에 일정한 압력을 가할 수 있는 장점이 있다. 충격압출(impact extrusion)은 후방압출과 유사하나, 펀치가 빠른 속도로 진행하여 소재에 충격을 가하고, 이로서 소재가 후방압출 되는 경우의 압출을 말한다.⁽²⁾ 레이디얼압출은 소재의 유동이 펀치의 운동방향과 수직인 경우의 압출을 말하며 보통 전방압출이나 후방압출 그리고 업셋팅과 결합하여 비교적 복잡한 형태의 부품을 생산하는데 사용된다. 레이디얼압출로 생산 가능한 부품으로는 일반적인 이음쇠, 특수한 기어부품, key-shaft 형태의 부품, 튜브 부품과 같이 복잡한 플랜지 형상을 가진 바퀴통 모양의 부품 등이 있다.⁽³⁻⁴⁾ 일반적인 단조에서와 마찬가지로 레이디얼압출에서도 여러 가지 설계변수(금형의 형상, 마찰 등)에 의하여 제품의 형상이나 성형하중이 변화하게 된다. 실제 실험으로 이러한 여러 가지 경우의 모든 설계자료를 확보한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

따라서, 본 논문에서는 강소성유한요소법⁽⁵⁻⁷⁾을 이용한 모의실험을 통하여 전방압출과 연계된 레이디얼 압출공정에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 설계 변수들 중 튜브의 지름과 다이 반경, 다이와 소재의 마찰 등을 변화시키면서 여러 가지 경우를 해석하였으며, 그 결과로서 이러한 변수들이 성형품의 형상 및 펀치와 맨드렐에 미치는 하중 및 압력 등을 비교·분석함으로써 전방압출과 연계된 레이디얼압출의 성형특성을 고찰하였다.

2. 전방압출과 연계된 레이디얼압출의 성형해석

본 논문의 연구방법은 크게 세 가지로 구분하였다. 첫째로, 모의실험의 타당성을 검증하기 위하여 실제 실험결과를 문헌을 통하여 조사한 후 실제실험과 모의실험의 결과를 비교하여, 모의실험의 타당성을 검증하였다. 둘째로, 전방압출과 연계된 레이디얼압출공정에서 조절 가능한 여러 가지 설계변수들 중, 모의실험에 적용한 설계변수로는 튜브의 지름과 다이 반경, 다이와 소재의 마찰 등을 설정하였다. 마지막으로, 이러한 해석의 결과를 바탕으로 설계 변수들이 성형품의 형상 및 펀치와 맨드렐에 미치는 하중 및 압력 등을 비교·분석하였다. 모의실험은 강소성 유한요소법 코드로 되어있는 ALPID(Analysis of Large Plastic Incremental Deformation)⁽⁸⁾를 사용하여 수행하였다.

2.1 전방압출과 연계된 레이디얼압출

레이디얼압출은 보통의 경우 전방압출이나 후방압출

그리고 업셋팅과 결합하여 복잡한 부품을 생산하는데 사용된다. 전방압출과 연계된 레이디얼압출은 전방압출과 레이디얼압출을 혼합한 형태이며, 레이디얼압출이 일어난 후 전방압출이 발생된다.(Fig. 1 참조)

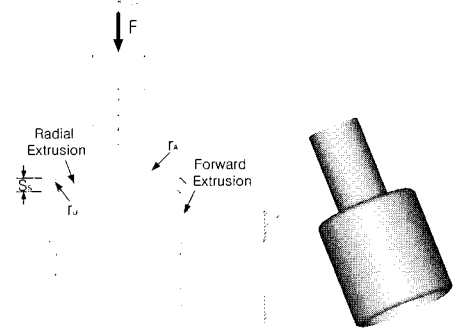


Fig. 1 Schematic configuration

Fig. 1은 본 논문에서 해석할 전방압출과 연계된 레이디얼압출을 도식적으로 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 펀치가 맨드렐(mandrel)에 수직으로 하강하면서 재료의 유동방향이 펀치의 운동방향에 수직방향으로 유동하는 레이디얼압출이 일어난다. 그리고 나서 다시 재료의 유동방향이 펀치의 운동방향에 평행한 방향으로 전방압출이 일어난다. 여기서, 상부펀치는 아래쪽으로 하강을 하고, 하부의 맨드렐은 그대로 고정되어 있다. 그림은 전형적인 레이디얼압출의 3가지 변형형태 중 평금형(하형)이 고정되어 있고 원통모양의 소재는 상부펀치에 의하여 압출이 이루어지는 Case 1⁽⁹⁻¹⁰⁾의 형태와 전방압출이 혼합된 형태를 나타내고 있다. 그림에서 S_5 는 레이디얼압출시 플랜지의 겹의 높이를 나타내며, r_A 는 다이의 곡률반경, r_c 는 전방압출이 시작되는 지점의 휨(deflection) 반경을 나타낸다. Fig. 1의 오른쪽 그림은 전방압출과 연계된 레이디얼압출에 의한 부품의 모양을 도식적으로 나타낸 것이다.

2.2 소재의 물성치

해석에 사용된 재료의 유동응력과 유효변형률의 관계식은 근사식으로 식 (1)과 같이 나타내어진다.⁽¹¹⁾

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서, K는 재료상수(material constant)이고, n은 가

공경화지수 혹은 변형경화지수라 한다. 시뮬레이션에 사용된 재료의 K 와 n 값을 알기 위한 방법으로는 실험적 방법⁽¹²⁾과 해석적 방법⁽¹³⁾이 있다. 본 논문에서는 해석적 방법을 토대로 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 K 와 n 의 값을 도출하였다.⁽¹³⁾

$$K = \sigma_y^{1-n} E^n \quad (2)$$

$$S_u = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (3)$$

여기서, σ_y 는 항복강도, E 는 탄성계수, S_u 는 인장강도이다. 이 세 가지의 값은 Metals Handbook⁽¹⁴⁾에서 참조하였다.

2.3 시뮬레이션의 타당성 검토

본 논문에서의 강소성유한요소법을 이용한 해석의 타당성을 검증하기 위하여, 해석과 실험에 의한 성형하중을 비교하였다. 소재의 제원은 실험⁽¹⁵⁾과 같은 조건인 지름(d_0)이 16 mm, 초기 상태에서 소재의 높이가(h_0)가 70 mm인 초기소재를 사용하였으며, 금형 형상도 실험과 같은 조건으로 하였다. 빌렛의 재질은 실험에서와 마찬가지로 AA 6063 알루미늄 합금을 사용하였고, 가공이 상온에서의 냉간압출 공정이므로 해석에 사용된 재료의 유동응력과 유효변형률의 관계식은 앞서의 해석적 방법을 토대로 Power law에 따라 다음의 식으로 표현하였다.⁽¹⁶⁾

$$\bar{\sigma} = 138.0 \bar{\epsilon}^{0.145} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

소재와 금형 사이의 마찰은 냉간압출에서 비누로 완전 윤활할 때 일정한 전단마찰을 가정하여 마찰상수 값을 0.15로 가정하여 해석하였다.⁽¹⁷⁾ 공정에서 펀치의 행정거리(h_{st})는 40 mm로 하였다.

Fig. 2는 전방압출과 연계된 레이디얼압출의 초기상태와 해석후의 격자 상태 및 다이압력 분포를 보여준다. 다이압력이 가장 크게 작용되는 부분은 레이디얼압출이 시작되는 부근의 맨드릴상에 나타나며, 전문가에 의하여 제시되는 금형 손상을 방지할 수 있는 한계 다이압 이내인 것으로 나타났다.⁽¹⁸⁾ 그림에서 볼 수 있듯이 다이압분포중 전방압출이 일어나는 부분에서는 다이 벽면에 가해지는 압력이 거의 없음을 보여주고 있다. 레이디얼압출의 CASE I⁽¹⁹⁾의 경우 하부 다이의 중심 부분에 다이압이 많이 가해지는 것에 비해 전방압출과 연계된 레이디

얼압출의 경우는 오히려 하부 다이의 중심보다는 전방압출이 일어나기 직전 하부 다이(맨드릴)의 외각쪽에 다이압력이 많이 가해짐을 볼 수 있다.

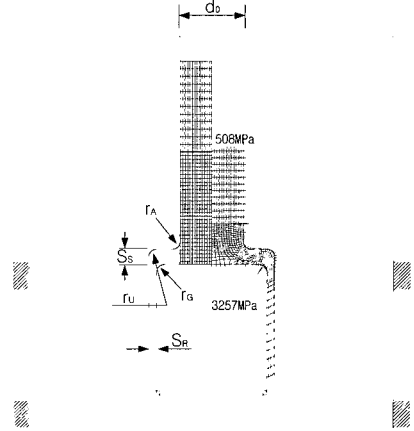


Fig. 2 Deformation patterns of Radial Extrusion combined with Forward Extrusion

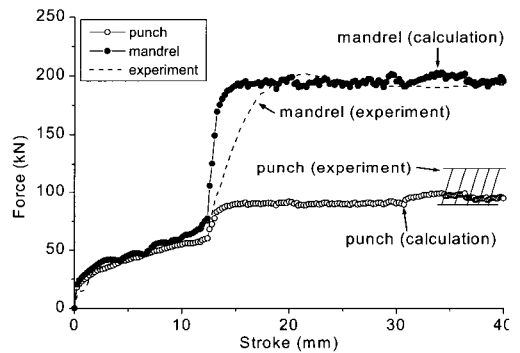


Fig. 3 Comparison of extrusion load between simulation and experiment⁽¹⁵⁾

Fig. 3은 실험과 시뮬레이션에 의한 하중-행정 선도를 나타내고 있다. 시뮬레이션과 실험의 성형하중은 그림에서 볼 수 있듯이 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 시뮬레이션에서 고려된 변수 외에 여러 가지 인자들로 인하여 조금씩 차이를 보이고 있으나 전체적으로 5% 이내의 오차 범위에 있는 것으로 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 맨드릴과 펀치의 하중은 처음에는 거의 같은 값을 가지고 증가하는데, 이것은 소재가 레이디얼압출이 일어나는 경우에 나타나는 현상이다. 하지만 펀치의 행정거리가 12.5mm에 이르러서 하중이 갑자기 증가하는 현상을 보이는 것은 전방압출이 시작되는 시점인 소재가 휨 영역(deflection area)에 도달할 때 나타나는 현상이다. 그림에서 빗금 친 부분은 실제실험에서 펀치에 작용

하는 하중이 빗금 친 부분에 분포함을 나타내며, 이 범위 내에서 시뮬레이션의 타당성이 검증된다고 할 수 있다.

2.4 해석조건

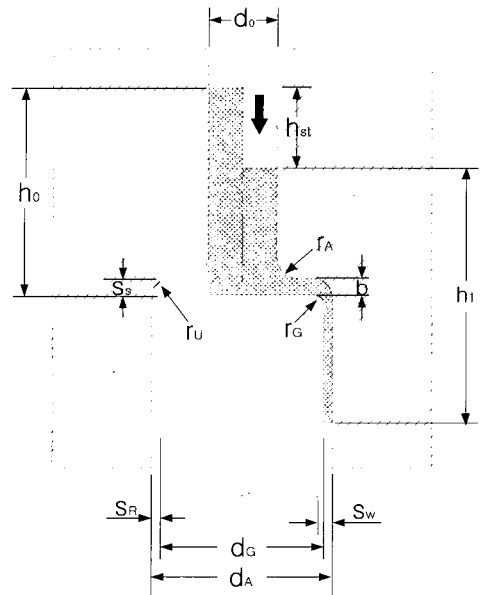
본 논문에서는 설계변수인 튜브의 지름과 다이코너반경, 그리고 마찰상수를 실제 공정의 가능한 범위 내에서 여러 가지로 변환시켜가며 시뮬레이션을 시도하였다. 해석에 사용된 소재는 AA 6063 알루미늄 합금을 사용하였다. 전방압출과 연계된 레이디얼압출의 설계변수로는 다이코너반경(r_A)과 튜브의 지름(d_A), 마찰상수(m)을 설정하여 해석하였으며, 해석에 사용된 소재의 직경은 모든 경우에 동일하게 16mm로 설정하였다. 여기서, 다이코너반경(r_A)과 휨 반경(r_U)은 같은 값을 적용하였다. 전방압출과 연계된 레이디얼압출의 전형적인 공정인자는 갭의 높이와 고리모양의 갭의 폭으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 또한, 레이디얼압출에서 갭의 높이는 이미 공정 전반에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 있다.⁽¹⁹⁾ 따라서 본 논문에서는 갭의 높이 외에 다른 설계변수들이 공정 전반에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다. 모든 시뮬레이션에서 행정거리(h_{st})는 25mm로 일정하게 하였다. 각각의 해석에 적용된 설계변수를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Design Parameters used in Simulation

Parameters	Values
Mandrel Diameter (d_A)	32mm, 34mm, 36mm, 38mm
Die Radius (r_A)	2mm, 3mm, 4mm, 5mm
Friction Factor (m)	0.1, 0.15, 0.25

2.5 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 해석에 사용된 전방압출과 연계된 레이디얼압출의 금형 형상을 나타내었다. 모든 시뮬레이션에 사용된 초기빌렛의 직경(d_0)은 16mm이고, 초기소재의 높이(h_0)는 70mm이다. 금형의 형상 중에 갭의 높이(S_s)는 4mm, 고리모양의 갭의 폭(S_R)은 2mm, 맨드릴의 곡률반경(r_G)은 2mm로 모든 시뮬레이션에 동일하게 적용하였다. 또한, 모든 경우에 각각의 펀치의 행정거리(h_{st})는 25mm이다.



- b bottom thickness
- d_0 billet diameter
- d_A tube diameter
- d_G mandrel diameter
- h_0 billet height
- h_1 workpiece height
- h_{st} punch stroke
- $r_1=r_2=r_A$ die radius
- r_U deflection radius
- r_G mandrel radius
- S_s gap height
- S_R annular gap width
- S_W wall thickness

Fig. 4 Die Geometry used in Analysis

먼저 마찰의 영향을 고려하기 위한 해석을 수행하였다. Fig. 5에 다이코너반경(r_A)이 2mm이고, 튜브의 지름(d_A)이 32mm인 경우에 마찰상수를 0.1, 0.15, 0.25로 바꾸어 가며 시뮬레이션한 결과를 도시하였다. 펀치하중은 주로 금형 벽면의 마찰(die-wall friction)에 의해 영향을 받으며, 시뮬레이션의 결과에서 볼 수 있듯이 마찰의 영향이 크게 차이가 나지 않았다. 하지만, 맨드릴 하중은 레이디얼압출이 일어나는 동안에는 각각의 경우에 하중의 차이가 크지 않지만, 전방압출이 일어나는 펀치의 행정거리가 13mm 이상에서는 커다란 차이를 보이기 시작한다. 따라서, 설계변수가 마찰상수의 경우는 마찰상수가 커질수록 펀치하중에는 영향이 거의 없지만, 맨드릴 하중에는 일정한 비례관계가 생김을 알 수 있다.

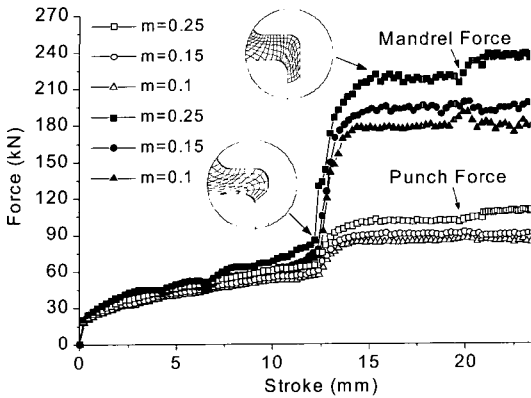
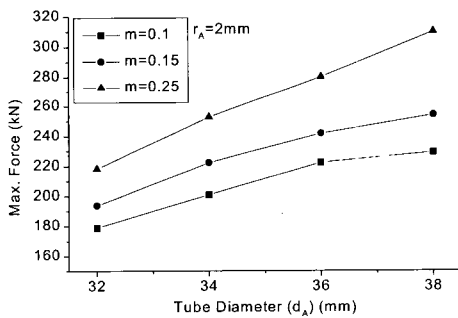


Fig. 5 Comparison of Load-Stroke relationship for Friction Factor

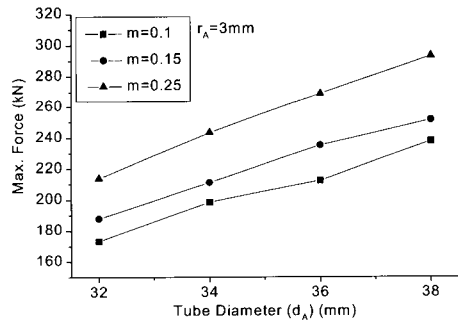
두 번째로 튜브의 지름(d_A)과 다이코너반경(r_A)의 변화에 따른 최대하중의 변화와 튜브의 지름과 마찰상수의 변화에 따른 최대하중의 변화를 알아보았다. Fig. 6의 (a)~(c)는 다이코너반경이 2mm~4mm의 각각의 경우에 대

해 튜브의 지름(d_A)과 마찰상수가 하중에 미치는 영향을 나타낸다. 각각의 그림에서 알 수 있듯이 튜브의 지름과 마찰상수는 하중에 비례적인 관계가 성립함을 알 수 있다. 또한, 다이코너반경이 작아질수록, 튜브의 지름이 커질수록 마찰상수의 영향은 점점 커짐을 알 수 있다. 그리고 일정한 튜브의 지름에서 마찰상수의 값은 그 값이 커질수록 하중의 값은 커지고 있음을 알 수 있다.

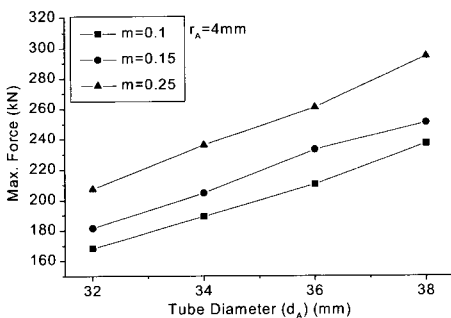
Fig. 6의 (d)는 마찰상수가 0.25인 상태에서 튜브의 지름(d_A)과 다이코너반경(r_A)이 하중에 미치는 영향을 나타낸다. 마찰상수가 0.1, 0.15의 경우는 마찰상수가 0.25인 경우와 같은 경향을 보이기 때문에 본 논문에는 나타나지 않았다. 그림에서 볼 수 있듯이 튜브의 지름(d_A)이 커질수록 최대하중(맨드릴 하중)이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 하지만, 펀치하중은 기울기의 변화가 별로 없는 것으로 보아 그 값이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한, 일정한 튜브의 지름에서 다이코너반경은 그 값이 작을수록 최대하중의 값은 약간 커지며, 펀치하중의 경우도 같은 양상을 보임을 알 수 있다. 따라서, 다이코너반경은 본 논문의 설계변수 중에서 성형하중에 가장



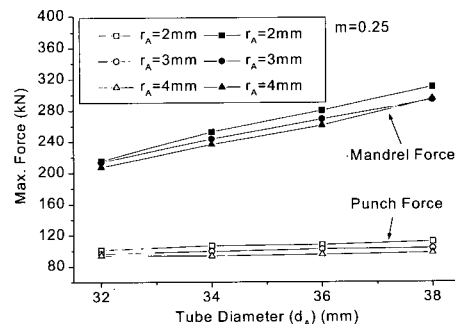
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Effect of Friction Factor, Die Radius and Tube Diameter on Force Requirement (a) $r_A=2\text{mm}$ (b) $r_A=3\text{mm}$ (c) $r_A=4\text{mm}$ (d) $m=0.25$

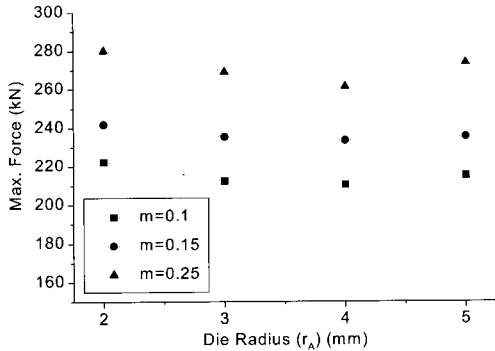


Fig. 7 Effect of Friction Factor and Die Radius on Force Requirement

영향을 미치지 않음을 알 수 있다

Fig. 7은 튜브의 지름이 36mm로 일정할 때 다이코너 반경과 마찰상수의 값을 변화시킬 때 공정중 최대하중의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 다이코너 반경(r_A)이 커질수록 최대하중은 점차 감소하는 추세를 보이고 있다. 하지만 그 크기의 폭은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 다이코너반경은 공정최대하중에 그리 큰 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 또한, 일정한 다이코너반경(r_A)하에서 마찰상수(m)가 커질수록 공정최대하중이 커짐을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 전방압출과 연계된 레이디얼압출공정의 여러 가지 설계 변수들 중에서 다이코너반경과 튜브의 지름, 마찰상수의 값을 변화시켜 이 변수들이 맨드렐 하중과 펀치하중 등에 미치는 영향을 비교·분석했으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 마찰상수가 커질수록 펀치하중에는 영향이 미미하지만, 맨드렐 하중에는 상대적으로 커다란 영향을 미친다.
- (2) 튜브의 지름이 커질수록, 마찰상수가 커질수록 공정최대하중의 값은 크다. 또한, 튜브의 지름이 커질수록, 다이코너반경이 작을수록 공정최대하중의 값은 크다.
- (3) 다이코너반경이 커질수록 공정최대하중은 점차 감소하는 추세를 보이고 있다. 하지만 그 크기의 폭이 그리 크지 않음을 알 수 있다.
- (4) 다이코너반경이 작을수록, 마찰상수가 커질수록 상대적으로 큰 하중을 요구한다.
- (5) 본 논문의 설계변수 중에서 튜브의 지름이 공정최대하

중에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 다음으로는 마찰상수가 큰 영향을 보였다. 하지만 다이코너반경은 다른 인자에 비하여 거의 영향이 없다고 판단된다.

(6) 설계변수에 따라 맨드렐 하중의 경우 일정한 비례관계가 나타나지만, 펀치하중의 경우는 모든 경우에 비슷한 값이 나타나고 있다. 따라서 펀치하중은 튜브의 지름이나 겹의 폭(gap width)에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

(7) 펀치와 맨드렐 하중은 레이디얼압출이 진행되는 동안에는 거의 비슷한 값을 보이지만, 소재가 전방압출이 시작되는 힘 영역(deflection area)에 도달할 때 급격한 증가를 보인다. 이때, 맨드렐 하중의 증가량이 펀치하중보다 월등히 높게 나타난다.

후 기

본 연구는 1998년도 인하대학교의 R.A. 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) S. Kalpakjian, 1991, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison-Wesley Pub. Co., Inc., Korean Edition, pp.314~325.
- (2) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford Univ. Press, pp.8~25.
- (3) R. Geiger, W. Schätzle, 1983, "Basics and Application of radial Extrusion," Fundamentals of Metal Forming Technique-State and Trends, Proceedings of the International Symposium, Stuttgart, West Germany, October 13-14, pp.139~161.
- (4) R. Geiger, 1987, "State of the Art and Development Trends in Cold Forging Technology," Proc. of Adv. Tech. of Plasticity Conf., Tokyo, Japan, Vol 1, pp.469~477.
- (5) K. Lange, M. Herrmann, P. Keck and M. Wilhel m, 1991, "Application of an elasto-plastic finite element code to the simulation of metal forming processes," J. of Materials Processing Technology, Vol. 27, p.239.
- (6) M. J. Saran, 1991, "Comparison of elastic-plastic implicit FEM simulations in sheet forming applicat

- ions,” J. of Materials Processing Technology, Vol. 27, p.279.
- (7) J. H. Cheng and N. Kikuchi, 1985, “An analysis of metal forming processes using large deformation elastic plastic formulations,” Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 49, p.71.
- (8) S. I. Oh, G. D. Lahoti and T. Altan, 1981, “ALPID - A General Purpose FEM Program for Metal Forming,” Proceedings of NAMRC IX, State College, Pennsylvania.
- (9) W. Schätzle, 1987, “Radial Extrusion of Flanges on Steel Cylindrical Workpieces,” Technical Report 93, Institute for Metal Forming, Univ. of Stuttgart, Springer, Berlin, West Germany.
- (10) W. Schätzle, 1984, “Transverse Extrusion of a Collar on Solid Steel Bodies,” Wire, 34/2, pp.71~74.
- (11) S. Kalpakjian, 1992, Manufacturing Processes for Engineering Material, Addison-Wesley Pub. Co. Inc.
- (12) E. Paul DeGarmo, 1967, Materials and Processes in Manufacturing, Macmillan Pub. Co., Inc., pp.27~34.
- (13) J. Datsko, 1966, Material Properties and Manufacturing Processes, Malloy Inc., Ann Arbor, Michigan, pp.31~36.
- (14) The Materials Information Society, Metals Handbooks, vol. 2 tenth edition, pp.104~105.
- (15) J. A. Pale and T. Altan, 1989, “Development of Equipment and Capabilities for Investigation of the Multi-Action Forming of Complex Parts,” Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, pp. 8~14.
- (16) Air Force Material Laboratory, 1973, “Forming Equipment, Materials, and Practices,” Metal and Ceramics Information Center, p.164.
- (17) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford Univ. Press, pp.30~33.
- (18) T. Huziyoshi, 1989, Die & Moulding, Daily Tech. press, Tokyo, Japan, pp.446~447.
- (19) S. H. Lee, 1999, “Forming Characteristics of Radial Extrusions,” Master Dissertation, Inha Graduate School, Incheon, Korea, pp.20~51.