

레이디얼압출의 성형특성에 관한 연구

이수형* · 황병복**

(1999년 7월 27일 접수)

A Study on the Forming Characteristics of Radial Extrusions

Soo-Hyung Lee and Beong-Bok Hwang

Abstract

This paper is concerned with the family of parts that generally feature a central hub with radial protrusions. As opposed to conventional forward and backward extrusion, in which the material flows in a direction parallel to that of the punch or die motion, the material flows perpendicular to the punch motion in radial extrusion. Three variants of radial extrusion of a collar or flange are investigated. Case I involves forcing a cylindrical billet against a flat die, Case II involves deformation against a stationary punch recessed in the lower die, and Case III involves both the upper and lower punches moving together toward the center of the billet. Extensive simulational work is performed with each case to see the process conditions in terms of forging load, balanced and symmetrical flow in the flange. Also, the effect of the gap size and die corner radii to the material flow are investigated. In this study, the forming characteristics of radial extrusion will be considered by comparing the forces, shapes etc. The design factors during radial extrusion are investigated by the rigid-plastic FEM simulation.

Key Words : Radial Extrusion, Central Hub, Material Flow, Gap Size, Corner Radius, Rigid-Plastic FEM

1. 서론

냉간압출은 성형공정의 한 형태로서 여러 가지 다양한 윤활제가 개발되면서 강(steel)에 대한 냉간압출이 가능하게 되었다. 또한, 편치나 다이등의 공구가격이 저렴해지고 수명이 늘어나면서 더욱더 발전해오고 있다. 특히, 냉간압출은 변형 및 마찰로 인한 발생열이 압출된 금속에 재결정을 일으키지 않는 한, 가공경화로 인해 기계적 성질

이 개선된다. 더욱이, 생산속도가 높고 비교적 가공비가 저렴하므로 주로 축대칭(axisymmetric) 모양의 튜브나 봉처럼 후속되는 절삭 또는 마무리 작업이 많이 필요하지 않은 생산품에 적용된다. 냉간압출은 종종 냉간단조(cold forging)와 혼용되어서 쓰이며 압출, 엽셋팅 또는 헤딩(heading), 코이닝(coining), 아이어닝(ironing)과 스웨이징(swaging) 등의 잘 알려진 성형과정들을 일컫기도 하며 이들 성형과정들은 대개 기계식 또는 유압식 프레스

* 인하대학교 자동화공학과 석사과정
** 인하대학교 자동화공학과 부교수

들에 의해 수행된다. 단순한 형상의 빌렛(billet)이나 슬러그(slug)로부터 시작하여 비교적 복잡한 형상의 최종생산품을 생산하기 위해서는 몇가지의 성형단계를 거치게 된다.⁽¹⁻⁴⁾

압출공정은 소재의 유동방향이 펀치의 방향과 같은 전방압출(forward extrusion), 소재의 유동방향이 펀치의 방향과 정반대인 후방압출(backward extrusion), 소재의 유동이 펀치의 방향과 수직인 레이디얼압출(radial extrusion)로 크게 분류할 수 있다. 이러한 레이디얼 압출공정에 의하여 일반적인 이음쇠, 튜브 부품, 특수한 기어부품 등을 생산하고 있다.⁽⁵⁻⁶⁾ 레이디얼 압출공정에서는 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⁽⁷⁻⁹⁾을 이용한 시뮬레이션을 통하여 레이디얼 압출공정에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 설계변수들 중 가장 중요한 변수로서 알려진 갭사이즈(gap size)와 다이코너반경(die corner radius), 다이와 소재의 마찰 등을 변화시키면서 여러 가지 경우를 해석하였다. 그 결과로 이러한 변수들이 성형품의 형상 및 펀치에 미치는 압력 등을 비교·분석함으로써 레이디얼압출의 성형특성을 고찰하였다.

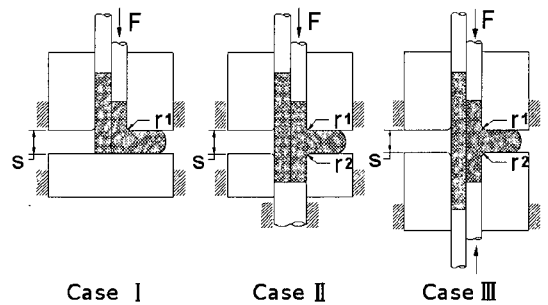
2. 레이디얼압출의 성형해석

본 논문의 연구방법은 크게 세 가지로 구분하였다. 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 실제 실험결과를 조사하여 같은 조건의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 레이디얼압출공정에서의 여러 가지 다양한 설계변수들 중 시뮬레이션에 적용할 설계변수로서 갭사이즈, 다이코너반경, 그리고 마찰 등을 설정하였다. 또한, 해석의 결과를 가지고 이러한 변수들이 성형품의 형상 및 펀치에 미치는 압력 등을 비교·분석하였다. 시뮬레이션은 강소성유한요소법으로 프로그램이 구성된 ALPID(Analysis of Large Plastic Incremental Deformation)⁽¹⁰⁾를 이용하였다.

2.1 레이디얼압출

레이디얼압출은 Fig. 1과 같이 3가지의 기본적인 공정으로 나누어진다.⁽¹¹⁻¹²⁾ 레이디얼압출로 성형된 이러한 부품들의 형상은 업세팅이나 전후방 압출에 의한 형상과 같다. Fig. 1의 각각의 그림에서 왼쪽은 성형전의 상태를, 오른쪽

쪽은 성형후의 형상을 나타낸다. 그림에서 Case I 은 평금형(하형)이 고정되어 있고 원통모양의 빌렛은 상부펀치에 의하여 압출이 이루어진다. Case II 는 그림과 같이 하부펀치가 고정되어 있으며 상부펀치만이 하강하여 압출이 이루어진다. Case III 는 빌렛의 중심을 향하여 동시에 움직이는 상·하펀치에 의하여 성형이 이루어진다. Fig. 2에 각각의 경우의 완성품의 모양을 도식적으로 나타내었다.



Case I with one die against a level tool surface
Case II with one die against a solid counter-die
Case III with counter-operating dies

Fig. 1 Variants of Radial Extrusion

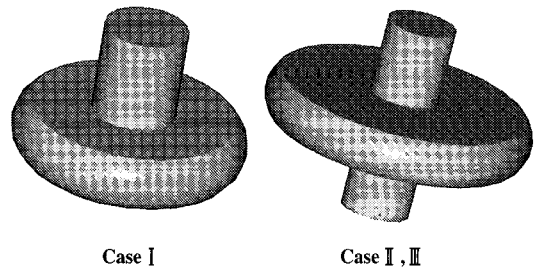


Fig. 2 Schematic configuration

2.2 실험과의 비교

강소성유한요소법을 이용한 해석의 타당성을 검증하기 위하여, 해석과 실험에 의한 성형하중을 비교하였다. 소재의 재원은 실험⁽¹³⁾과 같은 조건인 지름이 32.0(mm), 초기 상태에서 금형과의 접촉길이⁽¹²⁾가 40.0(mm)로 하였으며, 금형형상도 같은 조건으로 하였다. 빌렛의 재질은 AISI 1006 강재를 사용하고, 가공이 상온에서의 냉간압출 공정이므로 해석에 사용된 재료의 유동응력과 유효변형률의 관계식은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

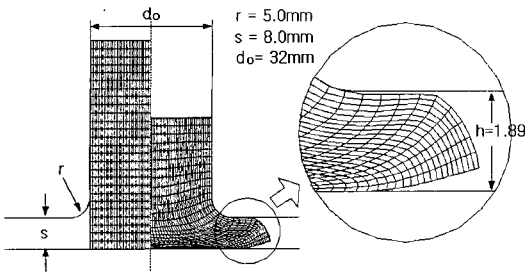


Fig. 3 Deformation patterns of Case I

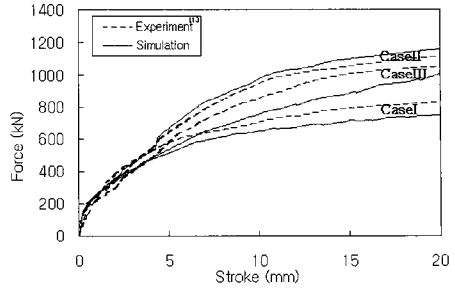


Fig. 5 Comparison of load between simulation and experiment

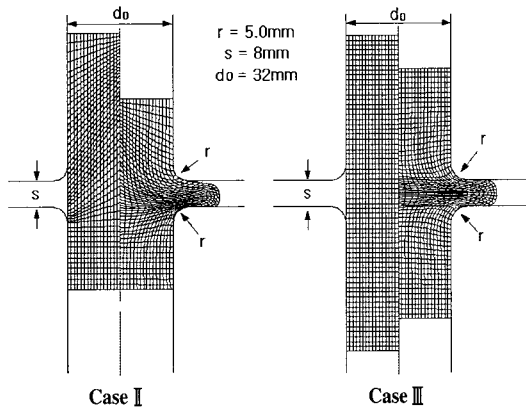


Fig. 4 Deformation patterns of Case II and Case III

$$\bar{\sigma} = 62.9 \bar{\epsilon}^{0.31} \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

소재와 금형 사이의 마찰은 비누윤활로 가정하여 마찰 인자를 0.1로 가정하여 해석하였다.⁽¹⁵⁾ 각각의 공정에서 행정거리(hst)는 모두 20 mm로 같다.

Fig. 3과 Fig. 4는 Case I, II, III의 실험⁽¹³⁾과 같은 조건으로 해석한 결과를 보여준다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 Case I의 경우 소재가 반경방향으로 유동하면서 끝 부분이 평금형에서 떨어지는 현상이 보인다. 실험과 시뮬레이션에 사용된 재원인 다이코너반경(r)이 5.0 mm, 갭사이즈(s)가 8 mm, 소재직경(d₀)가 32 mm인 경우 끝부분이 떨어진 높이(h)가 1.89 mm로 나타났다.

Case II와 Case III는 금형의 형상은 같으나 펀치의 운동이 서로 달라서 형상이 조금 다르게 나타났다.(Fig. 4) Case II는 상하비대칭적인 유동양상을 보였으며, Case III는 상하대칭적인 유동을 보였다.

Fig. 5에 실험⁽¹³⁾과 시뮬레이션의 하중-행정 선도를 비교하였다. 해석에서의 하중은 실험조건과의 미세한 차

이로 인하여 약간의 오차를 보이나 세 가지 경우 모두 10%의 오차범위 내에 있다. Case I과 Case III는 해석에 의한 하중이 실험에 의한 것보다 약간 낮은 경향을 보였으며, Case II는 실험에 의한 하중이 조금 낮게 나타났다. 또한, Case I의 경우는 Case III보다 금형에 접촉면적이 작기 때문에 마찰의 영향을 적게 받아 낮은 성형하중이 예측되며, 시뮬레이션 결과는 이와 같은 점을 확인시킨다. Case II의 경우는 비대칭적인 소재의 유동으로 인하여 Case III보다 하중이 크게 나타났다.

2.3 해석조건

레이디얼압출시에 소재의 종류, 갭사이즈, 스트로크, 다이코너반경에 따라 crack이 발생하며, 참고문헌⁽¹³⁾에서는 AISI1006의 경우 갭사이즈와 스트로크, 다이코너반경에 대하여 실험적인 Forming Limit를 제시하고 있다. s/d₀가 작을수록, hst/d₀가 클수록, r이 작을수록 crack이 발생한다. 본 논문에서는 참고문헌⁽¹³⁾의 실험적인 Forming Limit를 토대로 갭사이즈와 다이코너반경을 실제 공정에서 가능한 범위 내에서 여러 가지로 바꾸어 가며 여러 가지 경우를 해석하였다. 본격적인 해석에 사용된 소재도 AISI 1006 강재로 하였다. 각각의 공정에서 설계변수로는 다이코너반경(r), 갭사이즈(s)로 설정하여 해석하였으며, 해석에 사용된 소재의 직경(d₀)은 모든 경우에 다같이 16 mm로 하였다. 모든 경우에 행정거리(hst)는 20 mm로 일정하게 하였다. 본 해석에 적용된 설계변수를 표 1에 정리하였다.

Table 1 Design parameters used in analysis

Parameters	Values(mm)
Gap Size(s)	4, 5, 6, 8, 10, 12, 16
Corner Radius(r)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0

2.4 해석결과 및 고찰

가장 일반적인 형태인 CaseⅢ의 경우 설계변수의 변화에 따른 플랜지각(α), 플랜지곡률반경(r_F), 플랜지직경(d_1)과 행정하중을 주로 비교하였다. Case I에서는 소재의 끝부분이 금형에서 떨어진 높이(h)를 비교하였고, 비대칭유동을 보이는 Case II에서는 각각의 경우에 나타나는 비대칭률(asymmetric ratio)을 주로 비교·분석하였다.

각각의 세 가지 변형결과의 최종 형상이 Fig. 6에 설명되어 있다. 각각의 그림의 왼쪽부분은 성형이 완벽하게 이루어져서 금형이 완전히 충전될 때 예상되는 모습이며, 오른쪽 부분은 실험과 시뮬레이션에서 실제로 얻어진 결과를 도식적으로 표현한 것이다. 실험⁽¹³⁾과 해석에서 모두 갭으로 빠져간간 소재가 축 방향과 일정한 각도 α 를 이루고 있는 것을 볼 수 있었다. 본 연구에서 CaseⅢ의 경우에 한해서 각각의 설계변수에 따라 변하는 플랜지각도(α)와 플랜지곡률반경(r_F)을 비교했다.

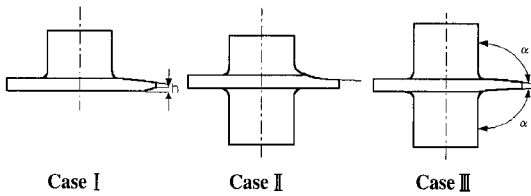


Fig. 6 Shape deviations of radial extrusion

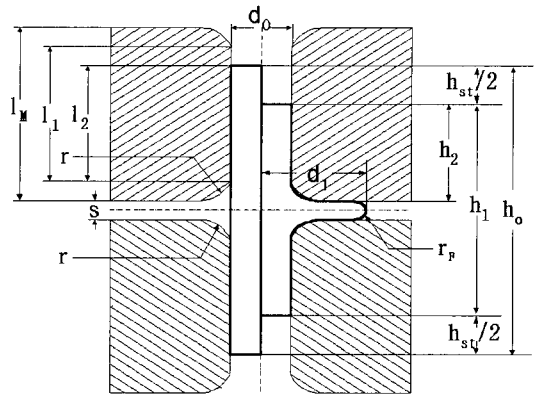
2.4.1 Case Ⅲ

해석에 사용된 금형의 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 모든 해석에서 금형의 깊이(die depth) l_M 은 50 mm이고, 금형과 재료의 마찰조건을 같게 하기 위하여 초기 상태에서 다이의 측면과 접촉하고 있는 빌렛의 길이(billet length) l_2 를 40 mm로 같게 하였다. 모든 경우에서 편치의 행정거리는 h_{st} 는 20 mm이다.

가장 먼저 마찰의 영향을 고려하기 위하여 여러 가지 마찰인자에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 8에 갭사이즈가 8 mm, 다이코너반경이 5 mm인 경우에 마찰인자를 0.1,

Table 2 Design parameters in Case Ⅲ

Parameters	Values(mm)
Gap Size(s)	4, 8, 12, 16
Corner Radius(r)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0



- l_M die height
- l_1 length of the cylindrical portion of the die bore
- l_2 blank length within the cylindrical portion of the die
- r die corner radius
- r_F flange radius
- h_0 blank length
- h_1 work piece length
- h_2 shank length
- s flange thickness, gap height
- d_0 blank diameter
- d_1 flange diameter
- h_{st} die stroke

Fig. 7 Radial extrusion die geometry

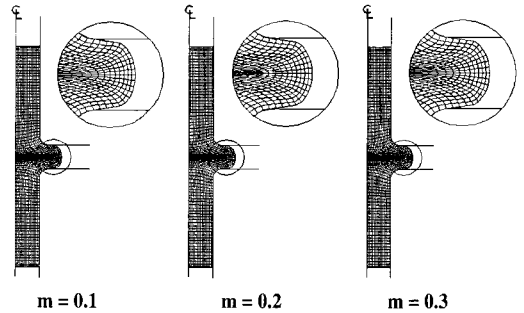


Fig. 8 Comparison of deformation patterns for different friction factors(m)

0.2, 0.3으로 바꾸어 가며 해석한 결과를 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 반경방향으로의 소재의 유동은 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 여러 가지 마찰인자에 대하여 성형하중도 큰 차이를 보이지 않아 마찰인자를 설계변수로 한 해석은 더 이상 시도하지 않았다. 이하 모든 경우에 마찰인자를 비누윤활로 가정하여 0.1로 해석하였다.⁽¹³⁾

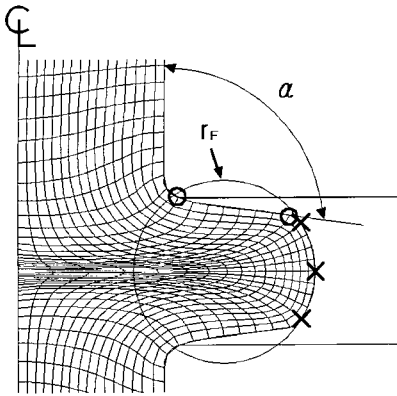


Fig. 9 Method for determination of r_F and α

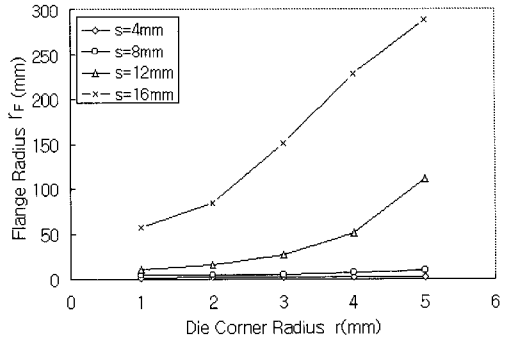


Fig. 11 Effect of gap size(s) and die corner radius(r) on flange radius(r_F)

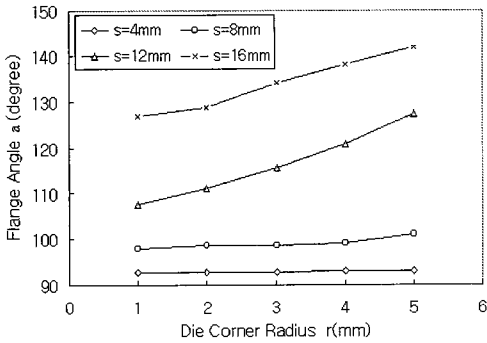


Fig. 10 Effect of gap size(s) and die corner radius(r) on flange angle(α)

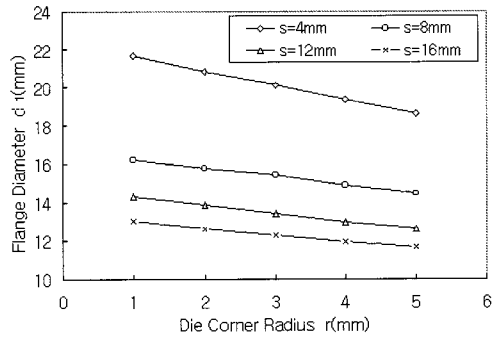


Fig. 12 Effect of gap size(s) and die corner radius(r) on flange diameter(d_1)

해석결과에서 플랜지각도(α)와 플랜지곡률반경(r_F)을 구하려면 측정기준이 필요하다. 여기에서는 α 와 r_F 를 측정하는 방법이 Fig. 9에 나와 있다. r_F 는 중앙을 지나는 점과 아래위의 4번째에 위치한 세 점(\times marked)을 지나는 원의 반경으로 측정하였으며, α 는 성형후 금형에서 떨어진 첫 번째 점(marked)과 성형전 금형에 접촉하고 있는 최하위점(marked)의 연장선이 축방향과 이루는 각으로 측정하였다.

Fig. 10은 다이코너반경과 갭사이즈가 플랜지각에 미치는 영향을 보여 준다. 일정한 다이코너반경에서 갭사이즈가 클수록 플랜지각이 커지는 경향을 볼 수 있다. 갭이 특정한 높이($s=12$ mm) 이상에서는 다이코너반경이 커질수록 플랜지각도 커지나, 갭의 높이가 낮은 경우에는 갭사이즈가 플랜지각에는 별다른 영향을 끼치지 못한다. 갭의 높이 $s=16$ mm인 경우에 행정거리가 20 mm에 이르러

서 소재의 압출이 본격적으로 시작되므로 플랜지각이 매우 크게 나타났다.

플랜지곡률반경(r_F)과 다이코너반경(r), 갭사이즈(s)의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 갭사이즈가 특정한 높이($s=12$ mm) 이상에서는 다이코너반경이 클수록 플랜지곡률반경이 크게 형성되는 것을 볼 수 있으나 갭사이즈가 작을 때($s=4, 8$ mm)에는 큰 차이가 나지 않는다. 다이코너반경이 일정한 경우 갭사이즈가 클수록 플랜지곡률반경이 크게 형성되는 것을 알 수 있다.

다이코너반경(r), 갭사이즈(s)가 플랜지직경(d_1)에 미치는 영향을 Fig. 12에 나타내었다. 다이코너반경이 일정한 경우 갭사이즈가 작을수록 플랜지직경이 크게 형성된다. 또한, 갭사이즈가 같을 경우에는 다이코너반경이 작을수록 플랜지직경이 크게 형성되는 것을 알 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 다이코너반경 보다는 갭사이즈가 플랜지직경

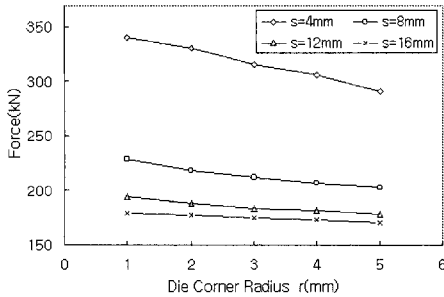


Fig. 13 Effect of gap size(s) and die corner radius(r) on force requirement

에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다.

다이코너반경 (r), 갭사이즈(s)가 하중에 미치는 영향을 Fig. 13에 나타내었다. 일정한 다이코너반경에서는 갭 사이즈가 작을수록 큰 하중을 요구한다. 또한, 갭 사이즈가 같을 경우에는 다이코너반경이 작을수록 큰 성형하중을 요구한다. 갭 사이즈가 클 때는 다이코너반경의 변화에 따른 하중의 변화가 적으나, 갭 사이즈가 작을 때는 다이코너 반경에 관계없이 매우 큰 하중이 필요한 것을 볼 수 있다. 그러므로 갭 사이즈는 성형하중에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 된다고 볼 수 있다.

2.4.2 Case I

Case I의 경우에는 소재의 끝부분이 금형에서 떨어지는 현상을 중점적으로 분석하였다. Case I의 해석에 사용된 설계변수를 표 3에 나타내었다.

Case III와 마찬가지로 먼저 마찰의 영향을 고려하기 위해 여러 가지 마찰인자에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 14에 갭 사이즈가 8 mm, 다이코너반경이 5 mm인 경우에 마찰인자를 0.1, 0.2, 0.3으로 바꾸어 가며 해석한 결과를 도시하였다. 그림과 같이 반경방향으로의 소재의 유동은 마찰인자의 변화에 따라 조금의 차이를 보인다. 마찰 인자가 커질수록 평균형에 인접한 소재의 유동이 원활하지 못한 것을 볼 수 있다. 소재의 끝이 금형에서 떨어지는 높이(h)는 마찰인자가 커질수록 조금씩 낮아지는 경향을

Table 3 Design parameters in Case I

Parameters	Values(mm)
Gap Size(s)	4, 5, 6, 8
Corner Radius(r)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0

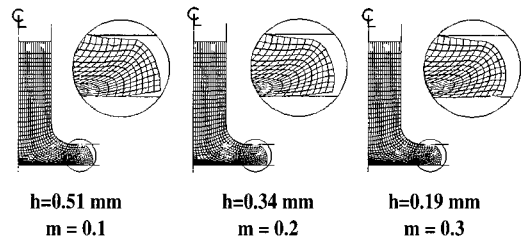


Fig. 14 Comparison of deformation patterns for different friction factors(m)

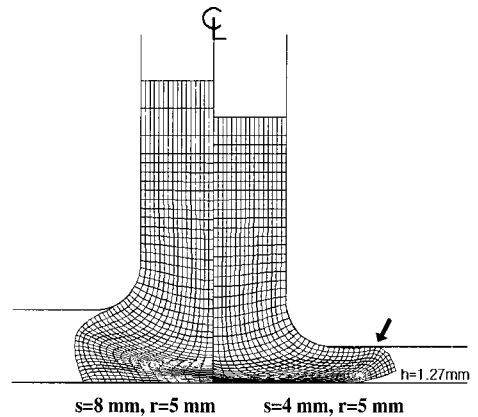


Fig. 15 Deformation patterns of Case I

보였다. 그러나 소재의 끝부분이 금형에서 떨어진 높이 (h)에 미치는 마찰의 영향은 갭 사이즈와 다이코너반경의 영향에 비하여 극히 미미하므로 설계변수에서는 제외하였다. 이하 모든 경우에 마찰인자를 비누윤활로 가정하여 0.1로 해석하였다.

갭 사이즈에 따른 소재의 유동현상을 Fig. 15에 각각 나타내었다. 여러 가지 해석을 수행한 결과 갭 사이즈가 8 mm(그림의 왼쪽) 이상에서는 소재가 갭으로 충분히 빠져 나가지 못하여 재료가 소재에서 떨어지는 현상을 보이지 않았다. 갭 사이즈가 4 mm(그림의 오른쪽)에서는 갭으로 빠져나간 플랜지 부위가 다시 금형에 붙는 현상(♣)을 보였다. 따라서, 이러한 경우에는 금형에서 소재가 떨어지는 높이(h)는 비교대상에서 제외하였다. 다이코너반경에 따라서 소재가 떨어지는 높이 h는 일정한 갭 사이즈일 때 다이 코너반경이 작을수록 크게 나타났으며, 갭 사이즈 4 mm, 다이코너반경 5 mm인 경우 h=1.27 mm로 나타났다.

소재의 끝부분이 금형에서 떨어지는 높이에 대한 다이 코너반경과 갭 사이즈의 영향을 Fig. 16에 나타내었다. 갭

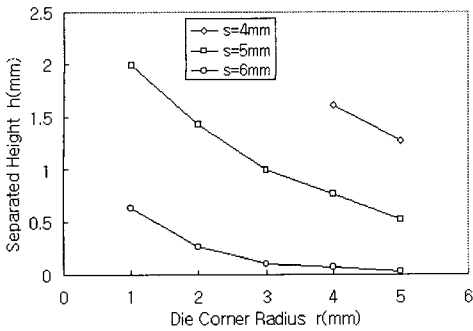


Fig. 16 Effect of Gap Size and Die Corner Radius on Flange Angle

사이즈와 다이코너반경이 작을수록 금형에서 떨어지는 높이(h)는 커진다. 하지만, 갭사이즈가 4 mm이고 다이코너반경이 4 mm 이하일 때 앞서 설명한 바와 같이 소재가 금형에 다시 붙는 현상을 보여 정확한 비교자료가 되지 못하므로 제외하였다.

2.4.3 Case II

Case II의 경우에는 Case III와는 다르게 소재가 상하 비대칭으로 유동하므로 각각의 경우에 비대칭율(asymmetric ratio)을 비교·분석하였다. Case II의 해석에 사용된 설계변수를 표 4에 나타내었다.

비대칭율(asymmetric ratio)은 Fig. 17에서와 같이 설정하였다. 갭으로 빠져나간 소재의 정점을 기준으로 갭의 상하단의 거리를 각각 h_1 , h_2 로 정하고 $h_1 : h_2$ 를 비대칭율로 설정하였다. 비대칭율이 1인 경우 상하대칭이며, 1에서 차이가 많이 날수록 비대칭성이 큰 것으로 본다. Case II에서는 상부편치만이 하부로 이동하므로 소재의 유동이 하부로 치우쳐 모든 경우에 비대칭율이 1보다 크게 나타났다.

다이코너반경과 갭사이즈에 따른 비대칭율의 변화를 Fig. 18에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 갭사이즈의 비대칭율에 대한 영향은 일정한 경향을 나타내지는 않는다. 하지만, 다이코너반경은 비대칭율에 일정한 경향으

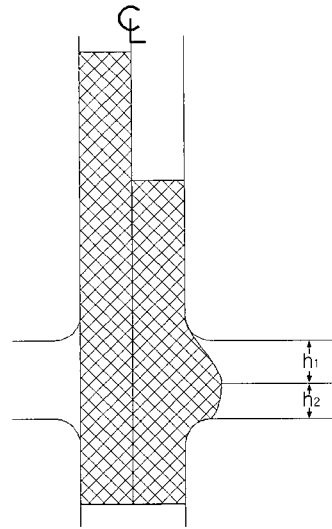


Fig. 17 Method for determination of asymmetric ratio

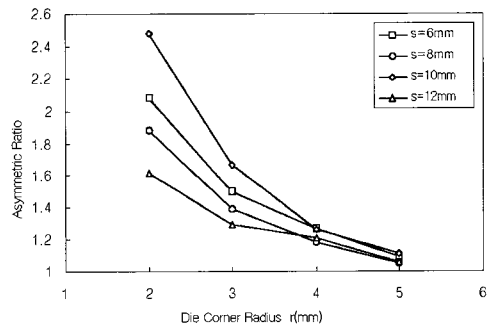


Fig. 18 Effect of gap size(s) and die corner radius(r) on asymmetric ratio

로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다이코너반경이 커질수록 비대칭율은 감소하며, 다이코너반경이 5 mm일 때 비대칭율은 모두 1에 가깝게 나타났다. 즉, 다이코너반경이 5 mm일 때는 갭에서의 소재의 유동은 거의 상하대칭적으로 나타났다.

3. 결론

본 논문에서는 레이디얼압출의 여러 가지 설계변수들 중 다이코너반경과 갭사이즈를 변화시켜 이러한 변수들이 성형하중, 플랜지각, 플랜지곡률반경, 플랜지직경, 소재의 끝부분이 다이에서 떨어진 높이, 그리고 비대칭율 등에 미치는

Table 4 Design parameters in Case II

Parameters	Values(mm)
Gap Size(s)	6, 8, 10, 12
Corner Radius(r)	2.0, 3.0, 4.0, 5.0,

영향을 비교·분석했으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 갱사이즈와 다이코너반경이 클수록 플랜지각과 플랜지곡률반경이 크게 나타났다.

(2) 갱사이즈와 다이코너반경이 작을수록 플랜지 직경이 커지고 성형하중이 크며, 성형하중에 대해서는 다이코너반경에 비해 갱사이즈의 영향이 지배적이다.

(3) Case I의 경우 소재가 유동함에 따라 소재의 끝부분이 소재에서 떨어지는 현상을 보였으나, 갱사이즈가 아주 큰 경우 소재의 끝이 금형에서 떨어지지 않았으며, 갱사이즈가 너무 작은 경우에는 금형에서 분리되었던 소재가 다시 금형에 붙는 현상이 나타났다. 갱사이즈와 다이코너반경이 작을수록 소재의 끝이 다이에서 떨어지는 높이가 크게 나타났다.

(4) Case II의 경우에는 비대칭적인 소재의 유동현상으로 인해 Case III의 경우보다 하중이 크게 나타났으며, 갱사이즈와는 관계없이 다이코너반경이 작을수록 비대칭성이 커지는 현상을 보였다.

(5) 대부분의 경우에서 마찰은 다른 설계변수에 비하여 성형하중이나 소재의 유동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 인하대학교의 R.A. 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegal, 1983, "Metal Forming: Fundamentals and Applications," American Society for Metals, pp. 231~233.
- (2) American Society For Metals, 1975, Source Book on Forming, Library of Congress Cataloging in Publication Data, pp. 35~341.
- (3) N. S. Kim, Y. T. Lim and J. T. Jin, 1995, Manufacturing Processes for Engineering Metals, Pando Press, 2nd Edition, pp. 320~321.
- (4) T. Reinikainen, A. S. Korhonen(1), K. Andersson, S. Kivivuori, 1993, "Computer Aided Modeling of a New Copper Extrusion Process," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1.
- (5) R. Geiger, W. Sch tzele, 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.
- (6) 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.
- (7) K. Lange, M. Herrmann, P. Keck and M. Wilhelm, 1991, "Application of an elasto-plastic finite element code to the simulation of metal forming processes," J. Material Processing Technology, Vol. 27, p. 239.
- (8) M. J. Saran, 1991, "Comparison of elastic-plastic implicit FEM simulations in sheet forming applications," J. Materials Processing Technology, Vol. 27, p. 279.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) W. Sch tzele, 1987, "Radial Extrusion of Flanges on Steel Cylindrical Workpieces," Technical Report 93, Institute for Metal Forming, University of Stuttgart, Springer, Berlin, West Germany.
- (12) W. Sch tzele, 1984, "Transverse Extrusion of a Collar on Solid Steel Bodies," Wire, 34/2, pp. 71~74.
- (13) 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.
- (14) Air Force Material Laboratory, 1973, "Forming Equipment, Materials, and Practices," Metal and Ceramics Information Center, p.164.
- (15) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, pp. 30~33.