

모델재료를 이용한 범용 플랜지의 레이디얼 압출 공정설계

이상돈*, 변성광⁺

(논문접수일 2008. 2. 11, 심사완료일 2008. 3. 14)

Design of the Radial Extrusion Process for the General-Purpose Flange Using Model Material

Sang-Don Lee*, Sung-Kwang Byon⁺

Abstract

This study is to compare and analyze the material flow, deformation characteristics, and forming load of flange by means of similitude experimental method of model material using plasticine. In order to find optimal forming conditions, prototype experiments were designed to investigate forming characteristics of general-purpose flange under various working conditions. As a result of prototype experiments, billet thickness and gap-height ratio was found to be the most influential experimental parameter in flange forming. Forming loads from prototype experiments were compared to the results of finite element analysis after conducting estimation of forming loads of real material. Results of prototype experiments based on model material techniques are expected to be used as a basic data of die design for the development of products and process.

Key Words : Model Material(모델제), Forming Conditions(성형조건), General-Purpose Flange(범용플랜지), Radial Extrusion(레이디얼 압출), Estimation of Forming Loads(성형하중예측)

1. 서론

최근 압출기술의 발전은 소재이용률의 증대, 공정단축, 소재의 정형(Net shaping) 및 준정형 가공을 실현하는 경제성이 높은 압출가공으로 점차 전환되어 가고 있다⁽¹⁾.

압출가공법 중 레이디얼 압출은 소재의 유동이 편치의 운동방향과 수직인 경우의 압출을 말하며 축 이음면, 튜브 부

품, 각종 형상의 플랜지 부품을 제조하는데 많이 이용되고 있다. 레이디얼 압출공정의 설계변수는 금형 설계를 고려하여 초기 빌렛의 형상, 갭 높이 및 다이코너반경, 유동상태에 따른 결함의 발생 여부, 소재의 다이 충전 정도, 성형하중, 윤활 등을 결정하는 것이 매우 중요하다⁽²⁾. 이와 같은 설계의 중요 인자를 파악하기 위하여 실제 금형을 제작하여 실소재를 이용하여 실험을 할 수도 있으나 많은 비용과 시간이 필요하며

* 동양공업전문대학 기계자동화공학부

+ 교신저자, 동양공업전문대학 기계자동화공학부 (skbyon@dytc.ac.kr)

주소: 152-714, 서울 구로구 고척동 62-160

이에 비해 모델재료기법은 비용이 절감되며 비교적 짧은 시간에 실제 공정을 예측할 수 있어 적절한 금형 및 공정설계를 위해서 많이 이용되고 있다⁽³⁾. 지금까지 주로 사용된 모델재료들은 플라스틱, 왁스, 진흙, 납 등으로 이들에 대한 많은 연구가 진행되어왔다⁽⁴⁾. 플라스틱은 유동 응력이 낮아 아크릴, 에폭시 등의 수지금형을 이용하여 실제 공정과 연관된 공정변수를 변화시켜 가며 실험할 수 있기 때문에 실제 공정상태의 규모의 실험에 비하여 경제적인 성형 실험이 가능하며 이 결과를 토대로 금형설계에 필요한 소성유동 및 변형특성을 실험적으로 예측할 수 있는 장점이 있다^(5,6).

상사재료 실험은 실소재 실험에서의 시간과 비용을 절약하기 위함으로 재료의 물성과 시험편의 조건이 상사하다면 대체로 일정한 기계적 성질을 나타내게 되는 상사법칙하에서 수행하는 것이며 이를 유한요소해석 결과와 비교·보완을 통해 실소재 실험과 상사재료 실험 간의 생길 수 있는 오차범위를 최소화하여 새로운 공정을 좀 더 정확하게 예측하기 위함이다.

본 연구에서는 금속 유동과 거동이 유사하다고 알려져 있고 성형성이 좋은 플라스틱을 이용하여 산업용으로 용도와 수요가 다양한 범용 플랜지를 중공의 빌렛을 적용하여 예비성형 공정을 거치지 않는 레이디얼 압출 공정으로 모델 상사 기법을 적용해 보았고 그 결과를 유한요소 해석결과와 비교하였다.

2. 상사조건

모델재료기법을 통해 실제 공정을 예측하기 위해서는 실소재와 플라스틱(주성분 : CaCo3, MgCo3) 사이에 상사조건이 유지되어야 하며, 이를 위해서는 소재들의 변형 응력 관계, 윤활조건, 금형의 탄성변형 및 열적 평형 등이 고려되어야 한다.

2.1 응력-변형률 관계 및 윤활조건

상온에서의 실험은 변형률 속도에 의한 영향을 무시할 수 있으며 또한 일정한 온도의 주변 환경에서 변형중의 소재 온도가 일정하다고 가정하면 응력은 단지 유효 변형률만의 함수로 간단히 표시할 수 있다. 실험에 사용된 재료의 유동 응력과 유효변형률의 관계식은 근사적으로 식 (1)과 같이 나타내어진다.

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

플라스틱의 응력과 변형률 특성을 결정하기 위해 직경 대 높이가 비가 1:1(30mm:30mm)인 원통 시편으로 압축시험을 하였고 별징 현상을 줄이기 위해 물비누와 이황화 몰리브덴(MoS2) 분말을 혼합한 윤활제(m≃0.1)로 상온에서 20mm/min의 일정 속도로 압하율 50%까지 압축하였다. 이 결과를 최소자승법으로 곡선 맞춤하여 정리한 플라스틱의 유동응력과 변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.1782 \bar{\epsilon}^{0.11} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

압출 실험에서 사용할 수 있는 윤활제는 매우 다양하나 실험에 사용된 윤활제는 물비누와 이황화 몰리브덴 분말을 혼합한 윤활제가 시편을 감은 랩핑 페이퍼와 마찰하는 조건으로 m≃0.1정도가 되며 이는 실제 공정의 마찰 조건과 같다^(7,8).

2.2 모델재료의 상사성 도출

유동응력과 변형률 관계식 $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ 에서 실소재(AISI 1010)에 적합한 K(강도계수)와 n(가공경화지수)를 대입하면 다음의 식 (3)으로 표현될 수 있다⁽⁹⁾.

$$\bar{\sigma} = 715.7 \bar{\epsilon}^{0.22} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

모델재료를 이용한 상사실험을 통하여 실소재의 성형하중을 구하기 위해 차원해석의 π -이론을 이용한 근사 상사이론⁽¹⁰⁾으로부터 실제 재료의 성형하중 값인 F_s 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = F_p \left(\frac{H_s}{H_p} \right)^2 \left(\frac{K_s \bar{\epsilon}_s^{n_s}}{K_p \bar{\epsilon}_a^{n_p}} \right) \quad (4)$$

여기서, F_p 는 모델재료의 성형하중이며, H_s , H_p 는 각각 실소재인 AISI 1010과 모델재료의 성형높이이다.

K_s , K_p 는 각각의 소성계수를, n_s , n_p 는 각각의 가공경화 지수를 나타낸다. 식 (4)를 이용하여 임의의 높이 감소율에 대한 모델재료의 성형하중 값 F_p 가 주어지면 그때의 실제 재료의 성형하중 값을 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험장비 구성 및 실험조건

시작 금형은 시편과 윤활 면을 갖는 다이와 펀치는 플라스틱 수지(PP)를 소재로 CNC가공하였고, 홀더 등의 다이세트는 목형으로 해서 높이 응력을 분산시키고 가공의 편의를

갖는 분할형태로 제작하였다. Fig. 1은 제작된 시작 금형의 모습을 나타낸 것이다. 시편은 소재내부의 변형양상을 통하여 소재유동을 파악할 수 있도록 흑색, 백색의 두 가지 플라스틱을 적층하는 형태로 제작하였다. 흑색과 백색의 물성을 비슷하게 만들기 위하여 반죽 전 각각을 소량 혼합하여 섞은 후 재료 내부에 기포가 남아 있지 않도록 약 2시간을 고무망치로 두드려 균질한 성질을 갖도록 하였다.

반죽을 마친 플라스틱은 Fig. 2의 형태로 자체 제작한 롤러 장치를 통해 두께 3.04mm의 동일한 판으로 만든 후 Fig. 3과 같은 파이프 형태의 칼날부위에 깨끗한 절단면을

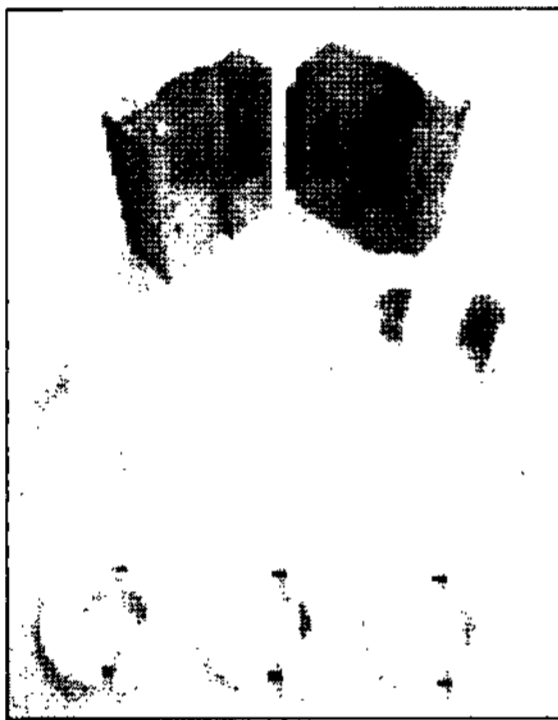


Fig. 1 Prototype die sets for experiments

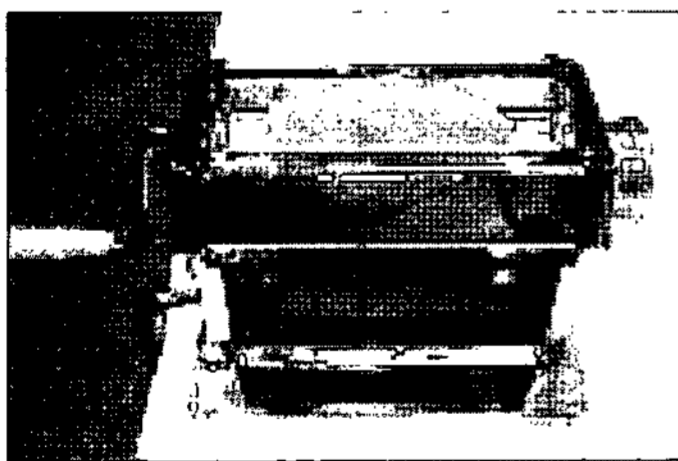


Fig. 2 Rolling device of model material

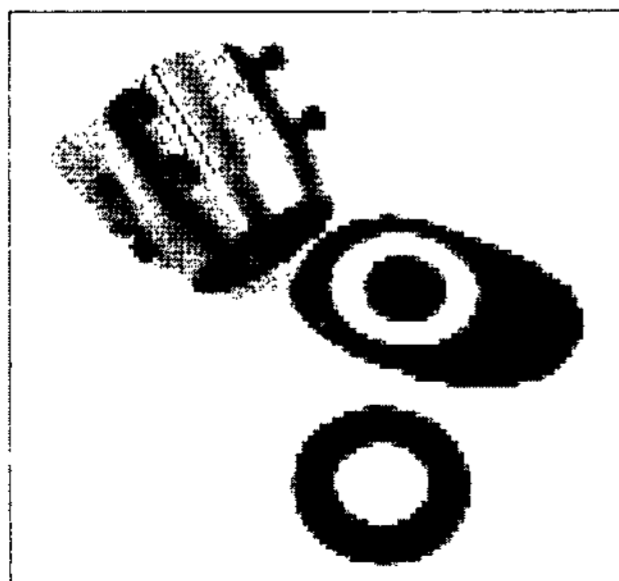


Fig. 3 Pipe shape Cutting device of model material

얻기 위하여 파우더를 소량 묻힌 후 잘라 내었다. 잘라낸 소재는 두 색을 번갈아 가며 적층하였고 적층면의 틈을 없애고 소재간의 완벽한 적층을 위하여 적층면 사이에 휘발유를 소량 도포하였다.

3.2 모사 성형실험

중공의 빌렛을 선정하여 예비성형 공정이 없는 단발 공정으로 레이디얼 압출을 모사 실험하였다. 시편의 크기는 범용 플랜지의 제품으로 널리 사용되는 ANSI CLASS 150 FLANGES의 Nominal 제품⁽¹¹⁾을 고려하여 관경이 서로 다른 세 가지로 제작하였으며, 성형실험은 만능시험기(Universal Testing Machine, 30kN)로 수행하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

시편은 랩핑 페이퍼를 천천히 감은 후 분할된 다이 안에 놓고, 물비누와 이황화 몰리브덴 분말을 혼합한 윤활제를 충분히 바른 다음 클램프 형식의 목형 바이스로 다이 세트를 고정시켜 Fig. 4와 같이 만능시험기에 설치하였다. 최종 변위는 고려된 갭 높이(s)에 따라 다이공동부의 볼륨량을 고려하여 설정하였고 일정한 속도로 변위를 증가시켰다.

Table 1 Condition of experiment

| Condition | Values | | |
|---------------------|----------------------------|-------|---|
| | O. D. | I. D. | H |
| Initial billet size | Ø60.5×Ø25.8×164.3(mm) | | |
| | Ø60.5×Ø31.8×164.3(mm) | | |
| | Ø60.5×Ø37.8×164.3(mm) | | |
| Face spot | Existence, Nonexistence | | |
| Gap height | 11.7, 15.7, 17.7, 19.7(mm) | | |
| Die-corner radius | 1, 3, 5(mm) | | |

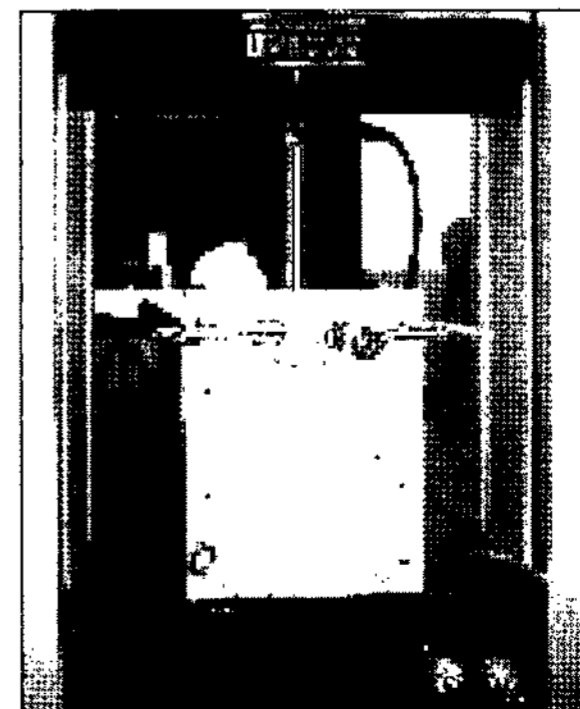


Fig. 4 Experimental set-up

실험변수 등은 만능시험기와 연결된 컴퓨터를 통하여 입력 또는 제어하였고 빌렛의 관경, 다이 스폿의 돌출 유·무, 갭 높이, 다이코너반경(r) 등을 실제 레이디얼 압출 가공이 가능한 범위 내에서 변환시켜 주었다.

4. 실험결과 및 고찰

실험변수들을 소재 유동 및 변형 양상과 성형하중에 대한 영향으로 나누어 분석하였다. 각각의 빌렛 관경과 갭 높이에 따른 하중상태는 실험으로부터 얻은 하중 값을 상사 식에 대입하여 실소재의 성형하중 값을 구하여 하중-행정 선도를 그려 하중의 변화를 살펴보았으며 또한 각각의 실험변수와 성형하중과의 관계를 유한요소 해석 결과와 비교·분석하였다. 모사 실험을 통해 얻어진 범용 플랜지 제품의 형상을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6은 갭 높이가 15.7mm로 일정하고 다이코너반경이 3mm일 때, 1/3변위지점, 2/3변위지점, 최종변위까지의 단면을 잘라 관찰한 모습이다. 소재는 공정초기에는 다이 바닥

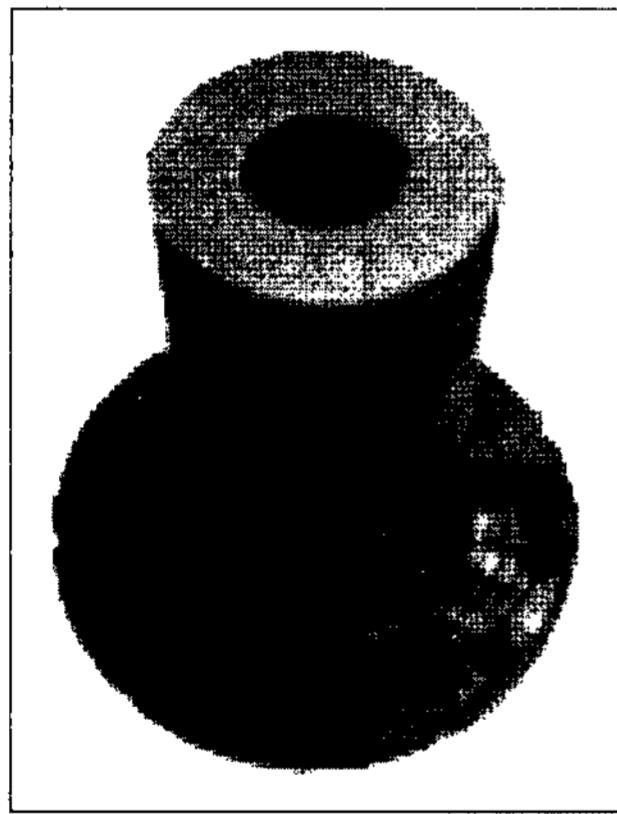


Fig. 5 Flange shape of prototype for experiments

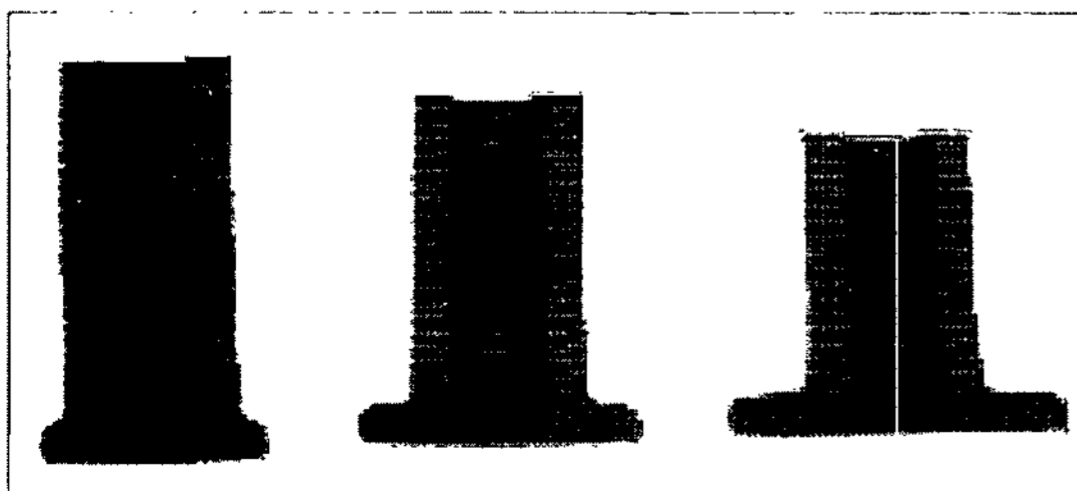


Fig. 6 Flow and deformation characteristics with displacement

면으로부터 다이코너반경을 따라 유동하다가 변위가 길어질수록 플랜지 직경 방향 위쪽으로 유동하는 양상을 보이고 있다.

4.1 다이 스폿(Die Spot) 플랜지부 성형형태

일반적으로 플랜지 하부는 플랜지부가 중공축 바닥면에서 일정 부분 간격을 두고 결합되어 있다. 본 연구에서는 실제 사용되고 있는 플랜지와 유사한 형태를 갖는 제품 성형이 가능한지를 실험을 통하여 고찰하기 위하여 코너반경 5mm, 관경 $\text{Ø}60.5 \times \text{Ø}31.8\text{mm}$, 갭 높이가 15.7mm인 링 형태의 다이 스폿(Die Spot) 금형을 제작하여 프레스 하부에 설치하여 성형 실험을 하였다. 프레스의 최대 행정(Stroke)은 53mm로 성형 중 소재는 Fig. 7에 보이는 것처럼 다이코너반경에 의해 플랜지 직경방향으로 유동하며 변형이 발생하였고, 플랜지 바닥 면은 다이 면과 분리되며 유동하는 형태를 보여 주었다. 이런 양상을 보이는 이유는 하부에 설치된 다이 스폿(Die Spot) 금형에 의하여 플랜지와 중공축 하부에 돌출된 부분(spot)이 소재 거동을 간섭하는 것으로 판단된다.

4.2 빌렛의 관경에 따른 성형형태

Fig. 8은 갭 높이가 15.7mm로 일정하고 다이코너반경이 3mm일 때, 초기 빌렛의 관경($\text{Ø}60.5 \times \text{Ø}25.8\text{mm}$, $\text{Ø}60.5 \times$

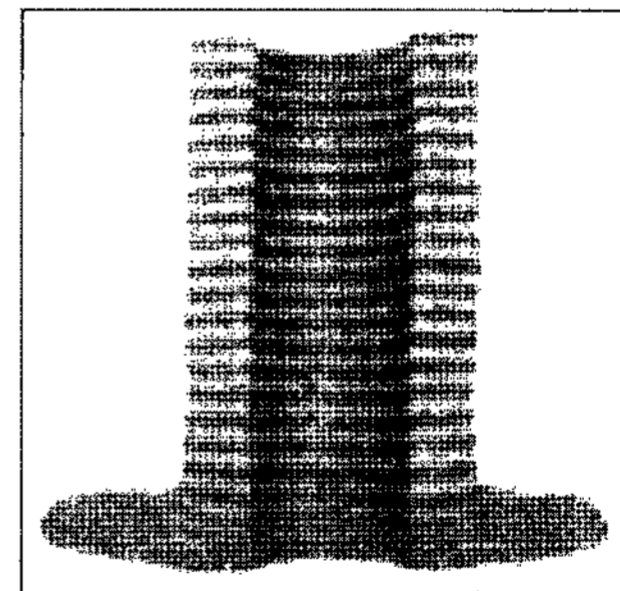


Fig. 7 Flow and deformation characteristics with die spot

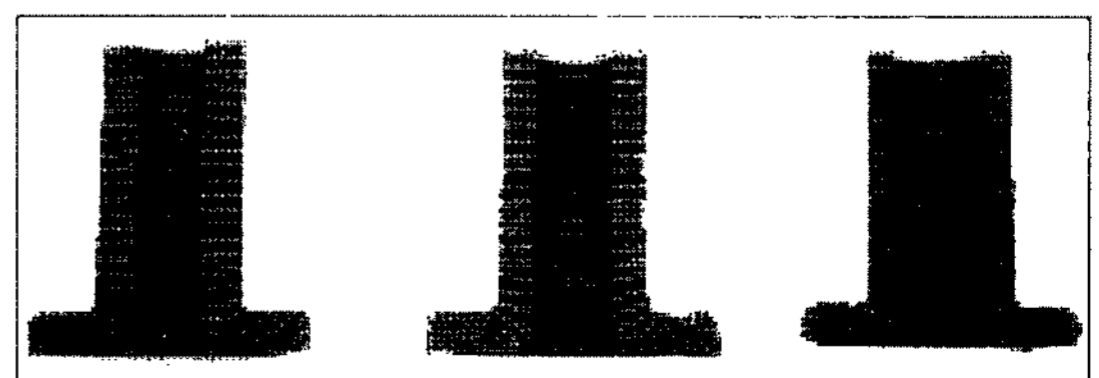
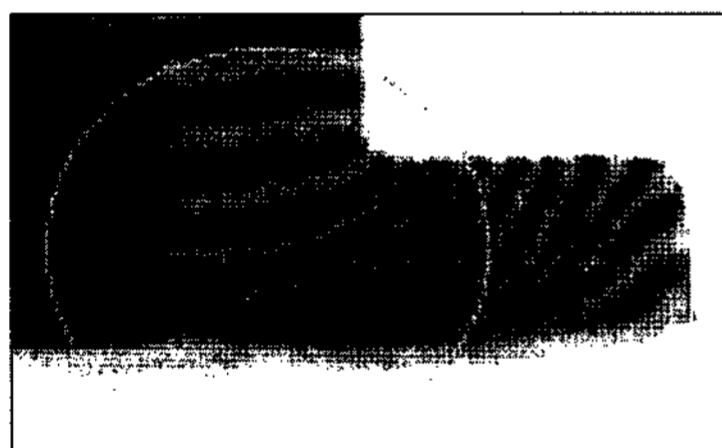


Fig. 8 Flow and deformation characteristics with billet thickness

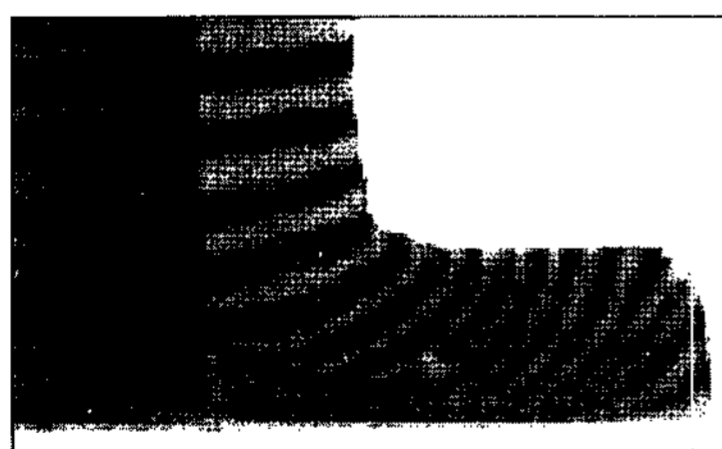
Ø31.8mm, Ø60.5×Ø37.8mm)에 따라 달라지는 실험 후의 소재유동 및 변형 양상을 보여주고 있으며 Fig. 9는 관경에 따라 달라지는 소재 유동 및 변형 양상을 플랜지 부분을 위주로 나타낸 것이다. 조건 중에서 관경과 가장 두꺼운 Ø60.5×Ø25.8mm의 경우는 플랜지 중심 바닥 면에서 소재의 압축변형이 매우 크게 나타났으며 하부다이 면과 접촉하며 다이에 붙어서 고착형태로 유동하는 양상을 보였다.

고착형태의 유동 양상은 갭 높이와 다이코너반경의 공정 변수를 다르게 했을 때도 별다른 영향을 미치지 못하였다.

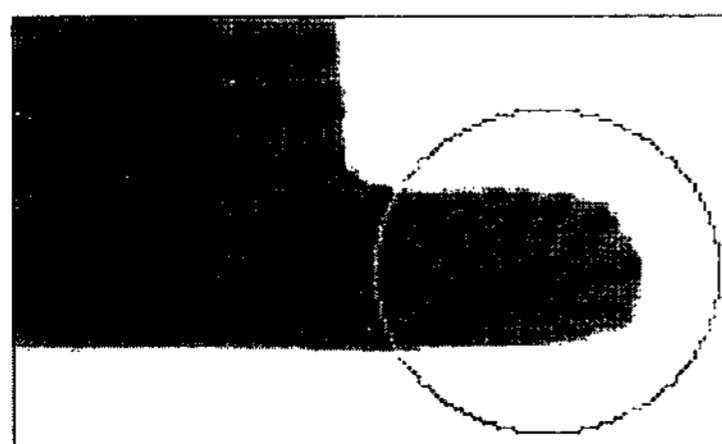
반면 관경이 가장 얇은 Ø60.5×Ø37.8mm의 경우에는 소재가 다이코너반경을 따라 유동하면서 플랜지 중심 바닥 면에서 소재의 압축변형이 상대적으로 적게 나타났으며 소재가 플랜지 끝단으로 이동할수록 다리와 분리되어 유동하였다. 분리형태의 유동양상은 갭 높이가 작을수록 다이코너반경은 클수록 분리가 커지는 것으로 나타났다. 관경과 갭 높



(a) Ø 60.5×Ø25.8mm



(b) Ø 60.5×Ø31.8mm



(c) Ø 60.5×Ø37.8mm

Fig. 9 Flow and deformation characteristics(billet thickness)

이의 상관관계가 소재 유동을 미치는 영향을 살펴보면 관경과 갭 높이의 비가 1:1에 근사 값에 가까울수록 소재는 플랜지 중심 바닥 면에서 고착형태로 유동하는 양상이 줄어들었고 플랜지 끝단으로의 원활한 유동을 보였으며 플랜지 끝단이 다이 면과 분리되는 양상도 적었다.

4.3 갭 높이, 다이코너반경에 따른 성형형태

다이 스폿이 없는 조건으로 ANSI CLASS 150 FLANGES 규격에서 고려된 11.7mm, 15.7mm, 17.7mm, 19.7mm의 플랜지 두께를 인서트 방식으로 시작 금형에 갭 높이를 주며 초기 빌렛의 관경에 따라 각각의 최종 변위까지 성형 실험을 수행하였다. Fig. 10은 다이코너반경이 3mm일 때 갭 높이에 따라 변화되는 실험 후의 소재유동 및 변형 양상을 보여주고 있다.

가장 작은 갭 높이인 11.7mm에서는 플랜지 바닥 면과 다리가 약간 분리되는 양상을 보였으며 갭 높이가 클수록 소재는 다이코너반경 부분을 완전히 채우지 못하는 상태에서 반경방향의 유동이 이루어졌다. 따라서 플랜지 윗면은 하부 접촉면에 비해 상대적으로 유동이 원활하여 고착형태로 성형이 이루어진다. 이러한 현상에 의해 고착형태의 성형에서는 갭 높이 중간부분의 플랜지 직경이 더 커지는 배럴링 현상이 나타났다. Fig. 11은 갭 높이가 17.7mm로 일정할 때 다이코너반경에 따라 달라지는 실험 후의 소재 유동 및 변형 양상을 보여주고 있다. 소재 유동 및 변형 양상을 살펴보면 다이코너반경에 의해 플랜지 직경방향으로 유동하며 변형이 발생하였고, 다이코너반경이 1mm일 때는 플랜지 직경방향으로 소재 유동이 원활하지 못했고 3mm와 5mm일 때 플랜지

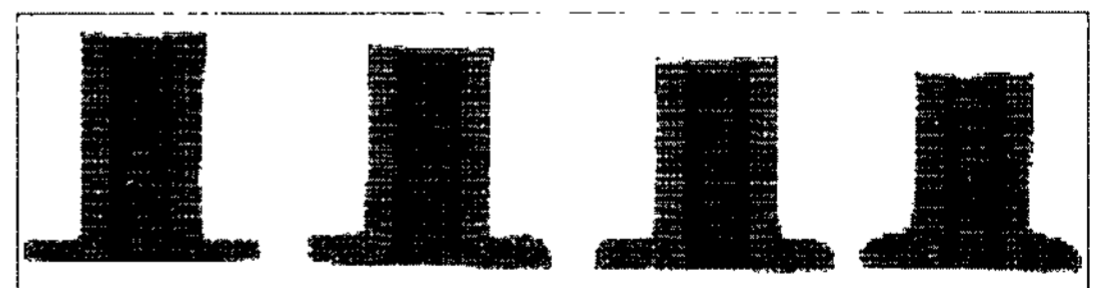


Fig. 10 Flow and deformation characteristics(gap height)



Fig. 11 Flow and deformation characteristics(die-corner radius)

직경 끝까지 소재는 원활하게 유동하는 것으로 나타났다.

갭 높이가 동일한 경우에는 다이코너반경이 클수록 플랜지 끝단이 다이 면과 분리되는 양상을 보였다. 넥 부분에서의 변형은 갭 높이와 다이코너반경의 실험변수와 관계없이 거의 일어나지 않았다.

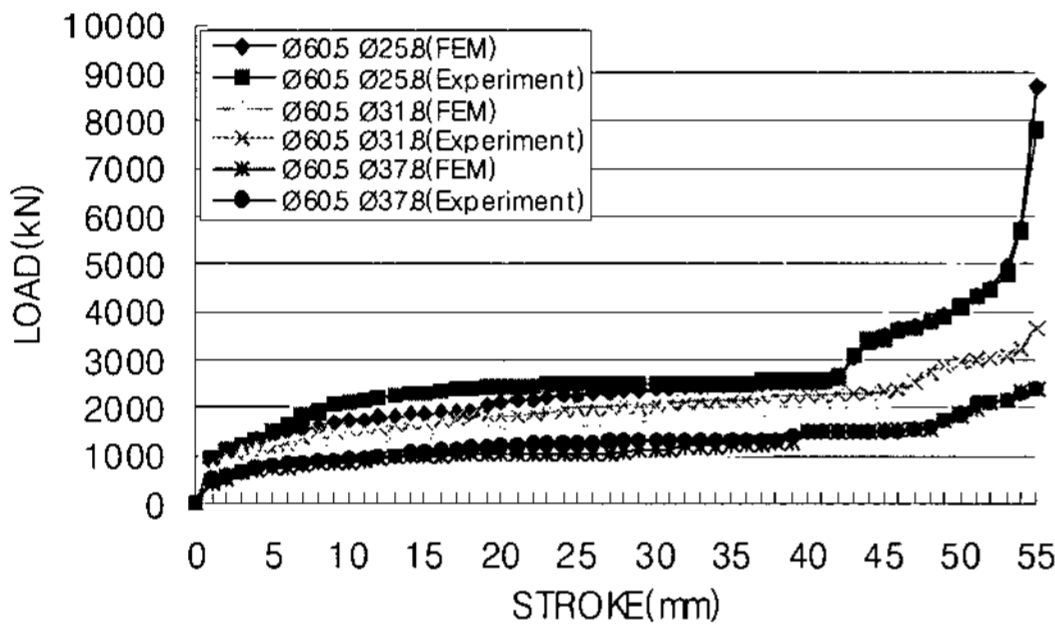
4.4 실험변수와 성형하중과의 관계

모델재료를 이용한 상사실험을 통하여 얻은 성형하중을 근사 상사이론에 대입하여 실소재의 하중을 예측하였고, 실

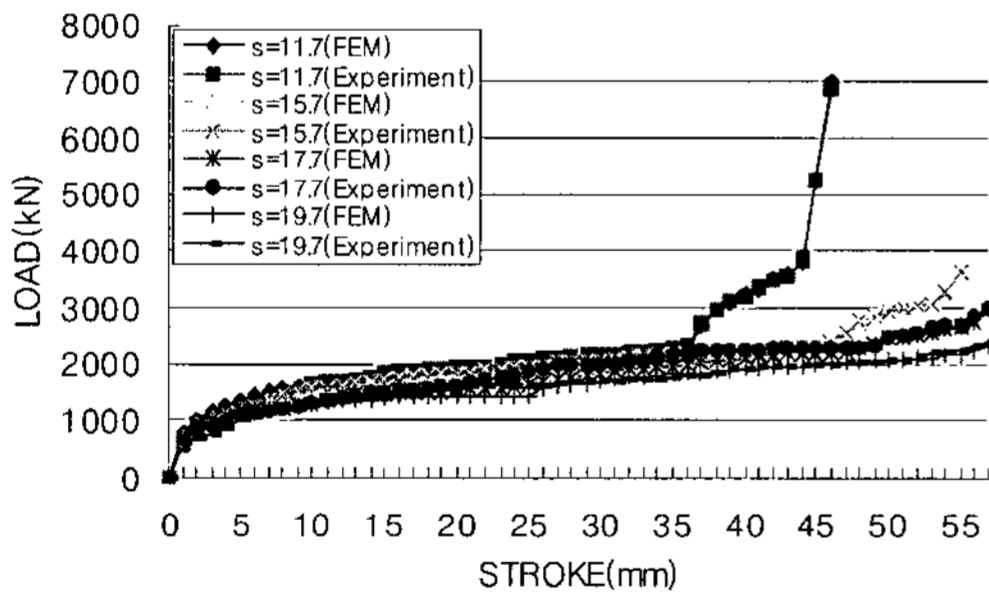
험과 동일한 조건으로 강소성 유한요소코드로 되어 있는 ALPID(Analysis of Large Incremental Deformation)를 이용하여 유한요소 해석을 수행하여 상사실험결과와 비교하였다. 상사실험을 통하여 얻은 예측 하중과 유한요소 해석을 통해 얻은 성형하중을 비교한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

성형하중은 빌렛 관경이 두꺼울수록, 갭 높이가 작을수록, 다이코너반경이 작을수록 커지는 양상을 보였으며 다이 공동부의 소재 충전이 마무리되는 최종 스트로크 부근에서 급격하게 증가하는 경향을 보였다. Fig. 12의 (a), (b), (c)에서 보는 바와 같이 다이코너반경보다는 빌렛 관경과 갭 높이의 비가 성형하중에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 상사실험을 통한 예측 하중과 유한요소 해석의 성형하중 값은 비교적 유사한 경향을 보였으나 예측하중에서 높이 감소율에 따라 다소 높은 값을 보여주고 있다.

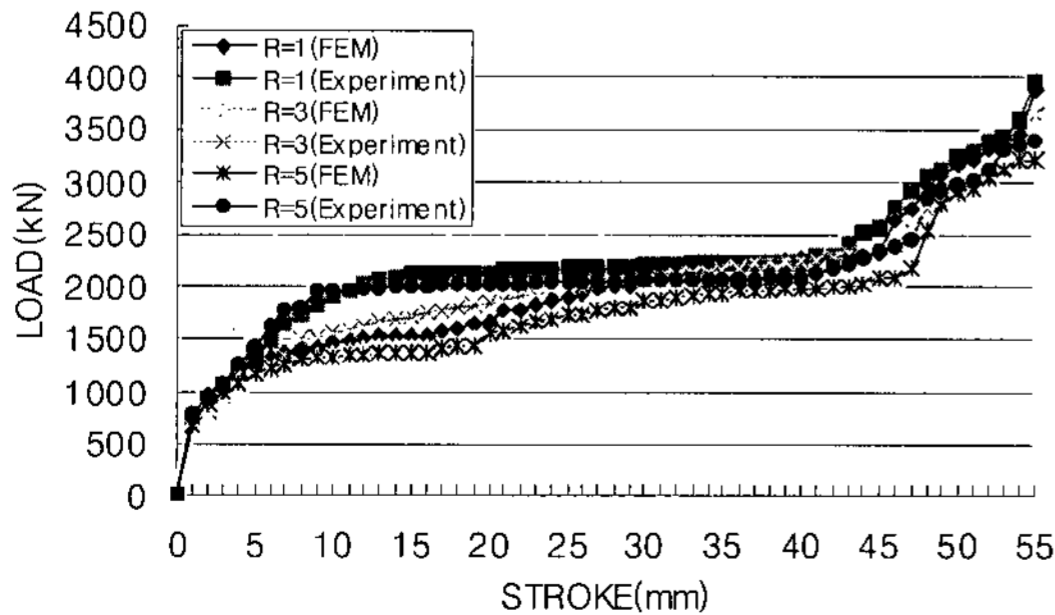
이 차이는 실험적인 오차와 압출과정 시 증가되는 마찰계수, 시작 금형재료의 탄성변형 및 열적평형을 고려하지 않았기 때문인 것으로 예측되며⁽¹²⁾ 따라서 실험적인 오차는 레이디얼 압출 공정 시 증가되는 마찰 및 다이재료의 탄성변형을 고려한 상사조건 보완이 이루어져야 좀 더 정확한 하중 예측이 가능할 것으로 판단된다.



(a) Effect of billet thickness(H=15.7, R=3)



(b) Effect of gap heights(Ø60.5×Ø31.8, R=3)



(c) Effect of die corner radius(Ø60.5×Ø31.8, H=15.7)

Fig. 12 Comparison of load-stroke curves

5. 결론

본 논문에서는 중공 빌렛을 이용한 단공정의 레이디얼 압출로 범용 플랜지의 모델재료 실험을 통하여 소재변형 양상과 성형하중을 예측하는 실험결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 범용 플랜지의 레이디얼 압출공정에서 다이코너반경보다는 빌렛 관경과 갭 높이의 비가 성형하중에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
- (2) 빌렛 관경과 갭 높이의 비가 1:1에 근사한 값을 가질수록 소재는 다이 면과의 고착, 분리가 적어 원활한 소재 유동과 변형 형태를 보이며 이를 다른 실험 변수들과 조절하여 범용 플랜지의 형상을 만족시키는 제품을 성형할 수 있다.
- (3) 유한요소 해석 결과는 실험결과와 비교적 유사한 경향을 보였으며 본 연구의 결과는 상용제품 개발을 위한 금형설계의 기초 자료로 활용가능성을 보여 주었다.
- (4) 제시한 모델재료 상사기법은 레이디얼 압출 공정뿐만 아니라 다른 공정의 제품 개발 시 변형 양상과 성형하중 예측을 통한 공정개발에 응용될 수 있다.

후 기

본 논문은 2007년도 동양공업전문대학 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kwon, H. H., 2001, "Failure Analysis of Cold Extrusion Die for the Helical Gear," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 2, pp. 79~88.
- (2) Ko, B. D., Choi, H. J., Jang, D. H., and Hwang, B. B., 2003, "Material Flow and surface Expansion in Radial-Backward Extrusion," *Transactions of Material Processing*, Vol. 12, No. 3, pp. 251~258.
- (3) T. Wanheim et al., 1984, "Physical Modelling of Plastic Working Process," *Advanced Technology of Plasticity*, pp. 984~996.
- (4) Wanheim. T., Maegaard, V., and Danckert, J., 1984, "The Physical Modelling of Plastic Working Processes," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 984.
- (5) Bodnar, R. L., Ronemus, D. C., Bramfitt, B. L., and Shah, D. C., 1986, "Physical Modelling of Hot-Deformation Processes - Using Plasticine," *Trans. ISS.*, pp. 35~46.
- (6) Hidehiko, T., Yoshiharu, T. and Junichi, I., 1984, "Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, pp. 1003~1008.
- (7) Lee, J. H., Kim, Y. H., Bae, W. B. and Lee, W. H., 1993, "A Study on Development of Model Materials Showing Similar Flow Characteristics of Hot Mild Steel at Various Temperature," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 1161~1171.
- (8) Meidert, M., Knoerr, M., Westphal, K., and Altan, T., 1992, "Numerical and Physical Modelling of Cold Forging of Bevel Gears," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 33, pp. 75~93.
- (9) Altan, T., Oh S. I., and Gegel, H. L., 1983, "Metal Forming," *American Society for Metals*, pp. 56.
- (10) Wanheimand, T. and Danckert, J., 1987, "Combined physical and Numerical Modelling of Metal Forming Process," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 29~36.
- (11) Korea flange co., Ltd: KOFCO, 2006, Flange catalog II(foreign standards), pp. 48.
- (12) Kobayashi, S., OH, S. L., and Altan, T., 1989, *Metal Forming and The Finite-Element Method*, Oxford University Press, New York; pp. 92~93, pp. 121~122.