

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 전 · 후방 압출품의 냉간단조 공정설계

민 규 식\*, 최 종 웅\*\*, 최 재 찬\*\*\*, 김 병 민\*\*\*, 조 해 용\*\*\*\*

### Process Design in Cold Forging of the Backward and Forward Extruded Part

G.S. Min\*, J. Choi\*\*, J.C. Choi\*\*\*, B.M. Kim\*\*\* and H.Y. Cho\*\*\*\*

#### ABSTRACT

The process design of backward and forward extrusion of axisymmetric part has been studied in this paper. The important factors of cold forging process with complex geometry are the design of initial billet shape, the possibility of forming by one-stage operation and the determination of preform shapes, etc. Based on the systematic procedure of process sequence design, the forming operation of cold forged part is analyzed by the commercial finite element program, DEFORM. The design criteria are forming load, geometrical filling without defect and a sound distribution of effective strain in final product. It is noted that one step of preform operation is required to obtain the final product. Numerical result is compared with experimental one. It is found that the analyzed result is in good agreement with actual forming result.

**Key Words:** Cold Forging(냉간단조), Process Design(공정설계), Preform(예비성형체)

Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Backward and Forward(전후방압출)

#### 1. 서론

산업의 고기능화, 고효율화의 추세에 따라 다단 냉간단조품의 경우도 제조원가를 줄이기 위한 공정설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 냉간단조 공정설계에 있어서 가장 중요한 사항은 결함이 없는 제품을 성형하기 위한 예비성형 횟수 및 예비성형체의 결정 등이라 할 수 있다. 그러나 실제 현장에서는 대부분 경험적 지침, 설계자

의 직관 및 실험에 의한 시행 착오 등에 의하여 수행되므로 시간과 경비의 소요가 많아져 제품단가의 상승을 초래하게 된다. 따라서 새로운 제품의 생산을 위한 성형공정의 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여, 실제의 금형 및 공구의 제작 이전에 소재의 유동성, 금형내부의 채움 정도 그리고 성형하중 등과 같은 상세한 정보를 제공할 수 있는 방법들이 필요하다.

최근에는 컴퓨터와 수치기법의 발전으로 컴퓨터를 이용

\* 마산전문대학 자동차과, 정회원  
 \*\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과, 학생회원  
 \*\*\* 부산대학교 기계설계공학과, NSDM for ERC, 정회원  
 \*\*\*\* 충북대학교 정밀기계공학과, NSDM for ERC, 정회원

한 여러가지 기법들이 성형공정설계 및 금형설계에 활발히 이용되고 있다<sup>(1-4)</sup>. 경험적 지식과 문헌 등을 재 고찰하여 수립된 설계규칙을 이용한 성형공정 및 금형설계 시스템은 소재의 유동, 응력 및 변형률의 분포 등을 예측할 수가 없는 반면, 유한요소법을 이용한 시뮬레이션으로는 이와 같은 정보들을 상세히 제공할 수 있으며<sup>(5-12)</sup>, 또한 유한요소법의 가장 실제적인 적용 중의 하나가 다단계 성형 공정에 있어서의 공정설계이다.

그러나 유한요소법을 이용한 성형해석에 있어서 본 연구에서 수행하고자 하는 전방압출과 후방압출이 동시에 일어나는 상하 비대칭의 축대칭 부품에 대하여 단조 공정설계를 수행한 예는 없다. 이와 같은 복잡한 형상의 제품에 대해서는 한 단계 작업으로의 성형 가능성 및 예비 성형 공정의 필요성 등이 중요한 공정 변수이다. 따라서 일반적이고 체계적인 설계방법론을 근거로 상용 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM<sup>(13)</sup>을 이용하여 여러 가지 공정 변수에 대한 시뮬레이션 해석을 수행하여 최적의 공정 조건을 찾기 위하여, 먼저 성형공정에 적용 가능한 초기 소재를 선정하여 한 단계 작업으로 최종 단조형상의 성형 가능성을 검토하고, 한 단계 작업이 불가능한 경우 최종 단조 형상으로 성형하는 최소의 성형하중과 바람직한 변형률 분포를 얻을 수 있는 적절한 예비성형체를 예측하여 최종 단조형상을 성형하는 공정을 설계하고자 하였다. 또한 이러한 결과로부터 얻은 공정으로 실제로 제품을 성형하여 본 연구에서 제시한 공정설계의 타당성을 검증하였다.

## 2. 공정조건 및 공정설계 순서

### 2.1 공정조건

본 연구의 유한요소 해석에 사용된 소재는 AI 2024이며, 이러한 소재에 대해 압축시험을 행하여 다음과 같은 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 357\bar{\epsilon}^{0.1588} \quad (\text{N/mm}^2)$$

소재와 금형 사이의 접촉면에서 마찰을 고려하기 위하여 마찰상수  $m$ 을 0.12로 하였으며, 축대칭 형상이므로 전체형상의 1/2만 해석하였다.

### 2.2 공정설계 순서

본 연구에서 축대칭 전후방 압출의 밀폐 단조품을 냉간

단조로 성형하기 위한 공정순서를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저, 제품의 기계도면으로부터 최소한의 기계가공을 요구하는 단조도면을 작성하고, 이러한 단조도면 형상으로 성형하기 위한 다양한 초기 소재 형상을 선정한다. 기존의 지식을 이용하여 여러 가지 초기 소재 형상의 물리적 타당성을 검증하고, 선정된 초기 소재 형상을 이용하여 단조도면 형상으로 시뮬레이션한다. 시뮬레이션 결과를 검토하여 결과에 만족하면 예비성형체가 필요없는 한 단계 작업만으로 충분한 공정임을 알 수 있고, 만족하지 못하면 한 단계 작업만으로 성형할 수 없다. 따라서 초기 소재 형상과 최종형상의 중간단계인 예비성형체를 예측한다. 초기 소재를 예측된 예비성형체 형상으로 성형한 후, 예비성형체를 최종형상으로 성형하는 공정을 거친다. 이때 성형하는 제품이 요구되는 조건을 만족시키지 못하면 예비성형체를 다시 예측하여 이것을 최종 형상으로 성형하는 과정을 반복한다. 즉, 금형내부의 채움이 양호하며 성형 하중이 작고 바람직한 변형률 분포를 얻을 수 있는

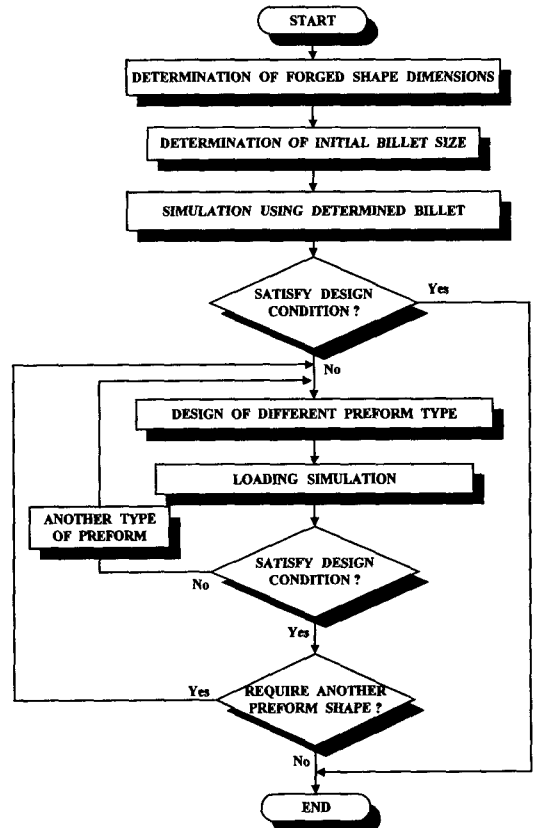


Fig. 1 The procedure of process design

가장 적절한 예비성형체 형상을 선정하여 최종제품으로 성형하는 것을 그 공정설계의 순서로 한다.

### 3. 제품의 공정설계

#### 3.1 단조도면의 작성

본 연구에서 공정설계를 수행하고자 하는 최종 제품의 기계도면은 Fig.2와 같이 업셋팅과 전후방 압출의 성형 공정을 동시에 요구하고 있으며, 축대칭이지만 상하 비대칭의 복잡한 형상이므로 냉간단조로서 기계도면의 형상대로 성형하는 것은 불가능하다는 것을 알 수 있으므로

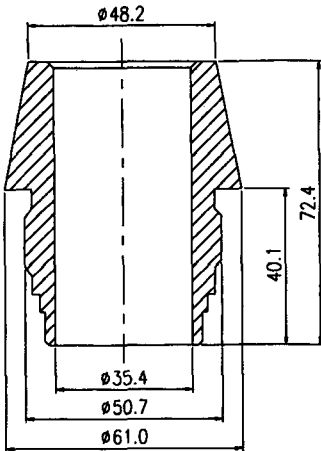


Fig. 2 A drawing of machined part

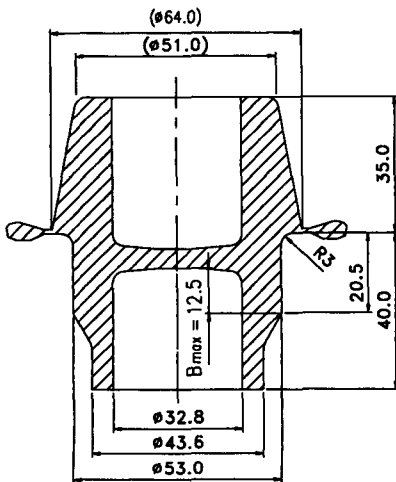


Fig. 3 A drawing of forged part

최소의 기계가공을 요구하는 단조도면이 필요하게 된다. Fig.3에는 단조 후 기계가공을 최소화시킬 수 있는 단조도면을 나타낸 것으로 상부쪽으로 후방압출이, 하부쪽으로 전방압출이 일어나는 공정이다. 외형 형상은 진원도를 맞추기 위한 최소한의 가공여유를 두었으며, 단조 공정의 완료 후에 남게 되는 상하 다이 경계부분의 소재는 피어싱(piercing) 작업이 요구되므로 피어싱 하중을 최소화하기 위하여 소재의 유동성을 고려하여 두께 5mm, 필렛 반경을 3mm로 하였다.

#### 3.2 초기 소재의 선정

일반적으로 냉간단조에서 초기 소재의 직경은 단조 하중을 최소화하고 변형을 분포를 균일하게 할 수 있도록 최종제품의 직경 중의 하나로 선택한다<sup>(1)</sup>. 따라서 본 연구에서는 단조도면으로부터 작업성을 고려하여 직경( $\phi$ ) 52mm의 초기 소재를 선정하였다. 단조도면에 의한 제품의 체적이 117350mm<sup>3</sup>이므로, 직경 52mm인 초기 소재에 대한 높이(h)는 플래쉬 양과 직경 대 높이의 관계로부터 좌굴이 발생하지 않는 조건<sup>(14)</sup>을 고려하여 56mm로 하였다.

#### 3.3 초기 소재의 시뮬레이션

한 단계 작업으로 최종 단조형상의 성형 가능성, 재료의 유동과 금형내부 채움의 경향 등을 알아보기 위하여 선정된 초기 소재로부터 최종 제품으로의 성형 시뮬레이션을 수행하였다. 초기 소재 52'×56의 실린더형 빌렛으로부터 성형 시뮬레이션의 진행 과정을 Fig.4에 나타내었다. 그림에서 공정이 진행됨에 따라 소재 유동이 상·하로

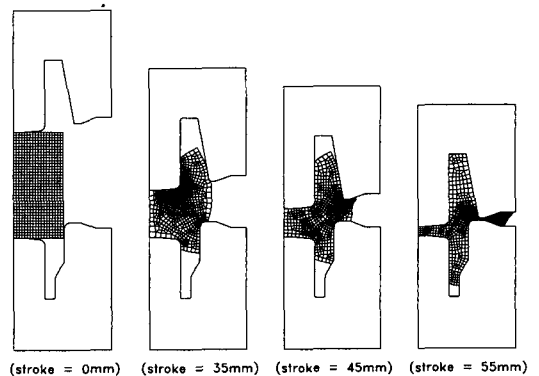


Fig. 4 Simulation of forging operation from initial billet to final product

동시에 일어나고 있으며, 업셋팅에 의한 배블림(barrelling) 현상 때문에 상 다이가 내려올 때 다이를 완전히 채우기 전에 소재는 플래쉬 부분으로 유동되어 캐비티(cavity) 채적이 부족하여 압출공정을 완료하지 못함을 알 수 있다. 즉, 반경방향으로의 유동량이 많기 때문에 전방 압출에서 금형내부를 완전히 충전시키지 못하는 결함이 발생한다. 따라서 초기 소재를 이용한 최종 제품까지의 시뮬레이션으로부터 한 단계 작업만으로 최종 단조도면 형상으로 성형하는 것은 불가능하며, 중간단계인 예비성형공정이 요구됨을 알 수 있다.

### 3.4 예비성형체 설계

금형내부의 채움이 양호하며 제품의 결함이 없고 바람직한 변형을 분포를 얻을 수 있는 적절한 예비성형체를 얻기 위하여 52'×56'인 초기 소재를 이용하여 예비성형체 설계를 수행하였다. 한단계 성형의 시뮬레이션 결과에서는 초기 소재로부터 최종 제품을 성형하는 데 있어서 반경방향의 소재 유동 때문에 압출공정을 완료할 수 없었으므로, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 피니쉬 공정(finish operation)에서의 성형시 플래쉬로 소재가 먼저 유동되는 배블림 현상이 일어나지 않도록 예비성형체를 설계하여야 한다. 즉, 구속 압출 형식의 예비성형체를 만들지 않으면 최종 제품의 성형이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 예비성형체의 아래 부분은 피니쉬 공정에서 예비성형체를 하다이에 안전하게 셋팅할 수 있는 형상으로 고려하였다.

52'×56'인 초기 소재로부터 예비성형체를 만들기 위해서는 Fig.4에서 나타난 바와 같이 소재가 플래쉬부로 유동되는 배블림 현상을 억제하기 위하여 측방 구속 압출 형식으로 하여야 한다. 따라서 Fig.5에 예비성형체의 형상을 종류에 따라 열거하였다. 이 그림과 같이 예비성형체의 외경은 예비성형체가 피니쉬 다이 내에 들어갈 수 있도록 그 값을 고정해야 하며, 그림에서와 같이 가운데 부분의 두께를 "A", 하부쪽으로는 전방 압출 길이를 "B", 그리고 상부쪽으로는 후방 압출 길이를 "C"라 두고, 하부 또는 상부쪽으로는 압출된 양에 따른 성형해석을 수행하여 최적의 예비성형체 형상을 찾고자 하였다. 여기서 "A"의 값은 배블림 현상이 최소로 되는 두께인 30mm로 고정하였으며, 이 값은 성형 해석을 통하여 찾아낸 결과이다. 예비성형체의 구분은 후방 압출량이 가장 많은 즉, "C"의 값이 가장 큰 예비성형체 ①에서부터, 전방 압출량이 가장 많은 즉, "B"의 값을 가장 큰 예비성형체 ⑥까지

세분하였다. 즉, 전·후방 압출의 정도에 따라서 최종 제품으로의 성형성을 향상시킬 수 있는 예비성형체를 찾고자 하였다.

Fig.6에는 이들 예비성형체를 성형하는 단조하중의 변화를 표시하는 것으로, 예비성형체 ①, ② 및 ③의 경우가 900kN 정도로 가장 작게 나타났으며, 예비성형체 ④~⑥의 경우는 1500~2000kN 정도로 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서 성형하고자 하는 제품의 경우에 있어서 전방압출 성형에 큰 하중이 필요하므로 이 방향의 압출량을 적게해야 성형하중이 작아짐을 알 수 있다. 즉, 상다이의 행정 20mm 부근에서 전방압출량이 많은 것일수록 성형하중이 크게 나타났다.

그리고 다이 채움은 예비성형체 6가지 경우의 모두에 대하여 양호하였으며, 변형을 분포 양상 또한 유사하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 예비성형체의 설계에 있어서는 단조 하중 측면으로부터 예비성형체 ①, ② 및 ③의 경우가 가장 양호한 예비성형체라는 결과를 얻을 수 있었다

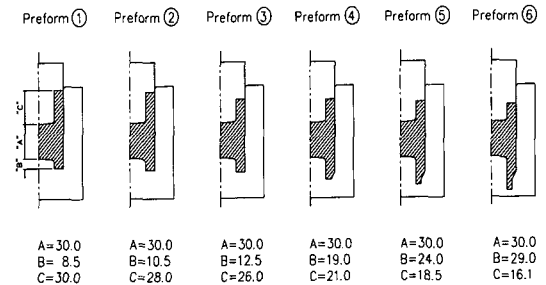


Fig. 5 Various shapes of preform

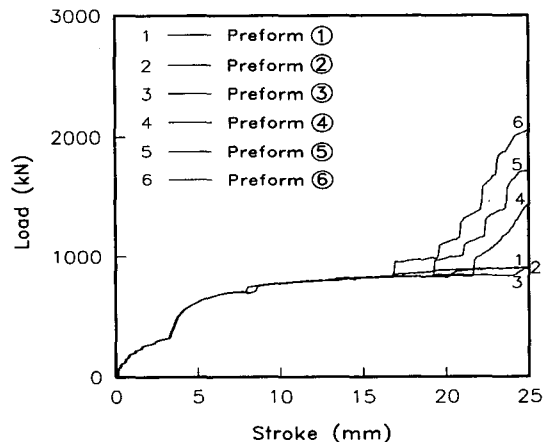


Fig. 6 Variations of forging load as preform dies with initial billet

3.5 최종 제품 성형의 시뮬레이션

앞 절에서 설계된 6가지 예비성형체 중에서 ①~③의 경우가 최적이었지만, 성형성을 검토하기 위하여 설계된 예비성형체 모두에 대하여 최종 제품으로 성형하는 시뮬레이션을 수행하였다.

앞에서의 6가지 예비성형체에 대하여 풀립 처리 후 최종 제품 형상으로 성형 했을 때의 변형률 분포를 Fig.7에 나타내었다. 여기서 제품 내부의 최대 변형률 크기는 6가지 경우 모두 2.0 수준으로 나타났으므로 최종 제품 성형 후에 크랙이 발생하지 않음을 알 수 있다<sup>(15)</sup>. 따라서 이들 예비성형체로부터 최종 제품을 성형하면 양호한 제품을 얻을 수 있다.

Fig.8에는 예비성형체로부터 최종 제품을 성형하기까지의 성형하중의 변화를 나타내었다. 성형 마지막 단계에서의 하중이 예비성형체 ③의 경우 3250kN으로 가장 작았으며, 예비성형체 ① 및 ②의 경우도 이와 유사한 4000kN 정도로 작은 값을 보이고 있다. 예비성형체 ④~⑥의 경우는 4000~5700kN 정도로 큰 하중을 보이고 있다. 따라서 최종 제품 성형의 경우도 예비성형체 성형의 경우와 마찬가지로 예비성형체 ①~③의 경우가 성형 하중이 작으므로 성형성이 양호한 것으로 나타났다. 또한 Fig.8에서도 Fig.6의 예비성형체 성형의 경우와 마찬가지로 제품의 성형시에는 전방압출에 큰 하중을 필요로 하므로 상다이의 행정 20mm 부근에서의 성형 하중은 전방압출량이 많은 것일수록 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

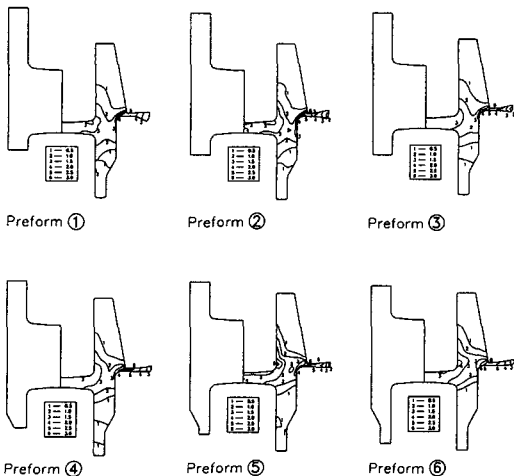


Fig.7 Distributions of effective strain for each preform shapes

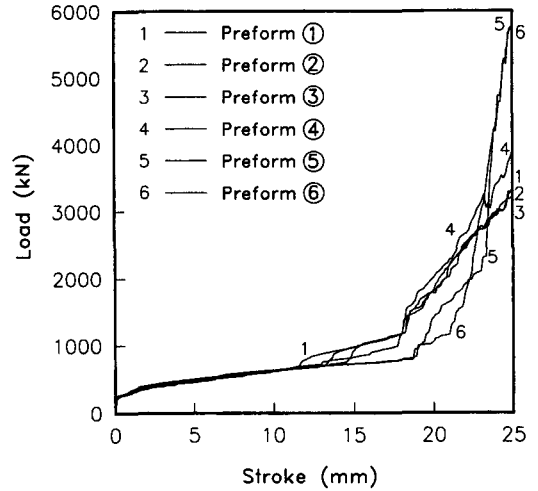


Fig.8 Variations of forging load as finisher die with each preform

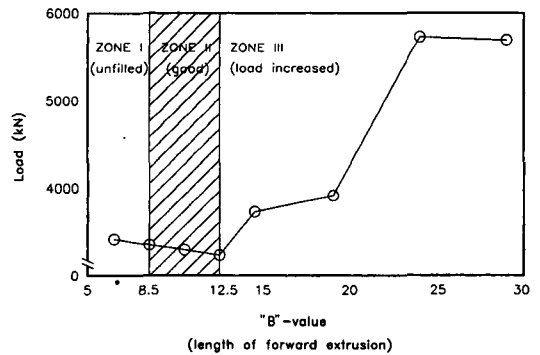


Fig.9 Comparison of final forging load with various preform shapes in forward extruded length

이러한 결과로부터 성형하중에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 전방압출량 "B"임을 알 수 있으므로, 예비성형체의 전방압출량에 따라 최종 제품을 성형하는 데 필요한 성형 마지막 단계에서의 하중을 Fig.9에 비교하였다. 이 그림으로부터, 전방압출량 "B"의 값을 좁은 단면적의 직전까지의 치수인 12.5mm로 정한 예비성형체 ③의 경우가 최종 제품의 성형 하중이 작다는 것을 알 수 있다. 또한 성형하중의 경향을 자세히 관찰하기 위하여 "B"의 값이 6.5mm 및 14.5mm에 대해서 추가 해석하였다. 그리고 "B"=8.5의 경우는 예비성형체 ①의 경우이며, "B"=10.5의 경우는 예비성형체 ②, "B"=12.5의 경우는 예비성형체 ③, "B"=19.0의 경우는 예비성형체 ④,

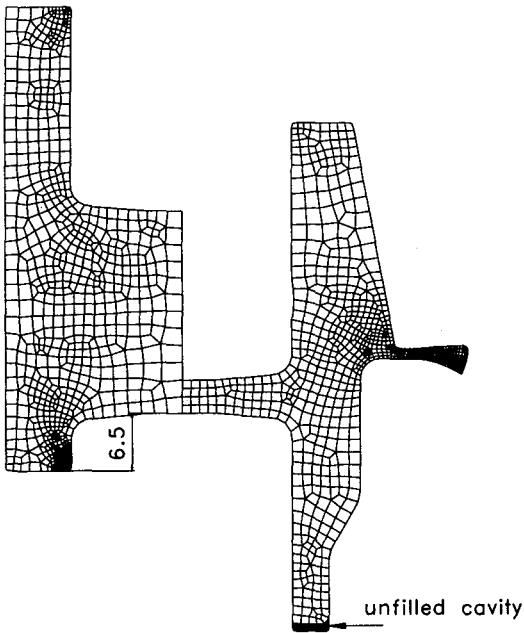
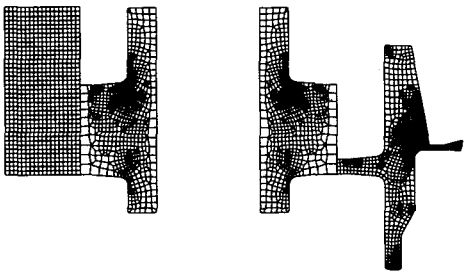
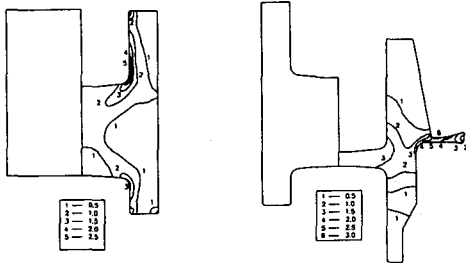


Fig. 10 Simulation of die filling with the preform of 6.5mm forward extruded length



(a) mesh system of simulation results



(b) distribution of effective strain of simulation results

Fig. 11 Mesh system and distribution of effective strain in optimal design process ("B" $=$ 12.5mm)

"B" $=$ 24.0의 경우는 예비성형체 ⑤, 그리고 "B" $=$ 29.0의 경우는 예비성형체 ⑥을 각각 의미하고 있다. Fig.9의 Zone I에서의 경우 최종 제품의 성형시 다이 하부쪽이 완전히 채워지지 않았으며, 그 경향을 "B" $=$ 6.5mm인 예비성형체에 대해 추가로 해석하여 Fig.10에 나타내었다. Zone III에서는 예비성형체 및 최종 제품의 성형하중이 크게 나타났다. 그러나 Zone II에서는 예비성형체 및 최종제품의 성형하중이 동시에 작게 나타났으며, 다이 채움도 양호하였다. 이 영역 중에서도 하부쪽으로는 압출량이 12.5mm 일 때 성형하중이 3223kN으로 최소로 됨을 알 수 있다.

이상과 같은 결과로 예비성형체의 형상은 하부쪽에서의 압출량을 12.5mm로 하는 것이 최종 제품의 성형하중이 가장 작다는 결과를 얻었으며, 예비성형체를 성형하기 위한 성형하중 또한 900kN으로 가장 작은 값으로 나타났다. 따라서 Fig.11에는 이러한 최적의 예비성형체에 대한 해석 결과를 나타낸 것으로, 다이 채움 정도가 양호하며 변형률 분포 양상은 다른 예비성형체와 유사한 것을 알 수 있다.

Fig.12는 예비성형체의 성형 후 풀림 처리의 영향을 관찰하기 위한 그림으로 어닐링 처리를 하지 않은 경우와 어닐링 처리를 한 경우의 변형률 분포를 보여주고 있다.

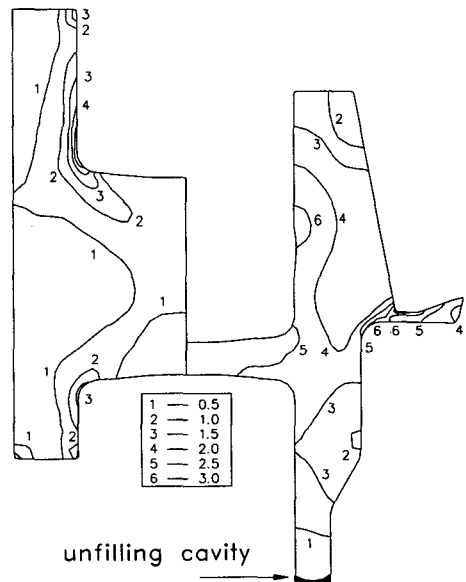


Fig. 12 Distribution of effective strain in case of non-annealed preform

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 풀림 처리를 하지 않은 경우의 최대 변형률은 3.0 수준으로 국부적으로 큰 변형률이 발생하였으며 이러한 영역에서는 크랙 발생의 가능성이 존재함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 취급하는 최종 제품의 성형에 있어서 예비성형체를 성형한 후에는 반드시 풀림 처리를 거쳐야 됨을 알 수 있다.

이상과 같은 강소성 유한요소 시뮬레이션 결과로부터, 축대칭 전후방 압출품의 냉간단조를 위한 최적의 성형 공정은 Fig.13과 같다.

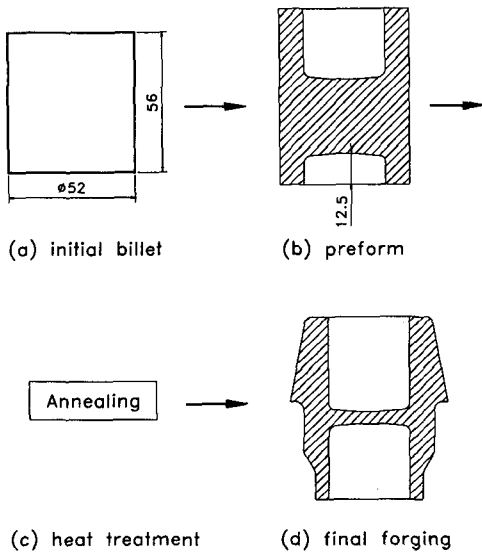


Fig. 13 Optimal forming process of cold forging

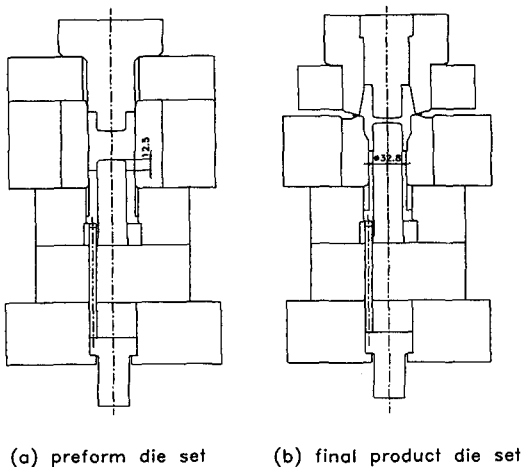


Fig. 14 Schematic illustrations of die set to form the product

#### 4. 제품의 성형

이상에서 서술한 공정설계의 흐름도에 따라 실제 예비성형체를 제작하고 이것을 성형하기 위하여 Fig.14와 같이 예비성형체용 금형과 피니쉬 다이의 구조를 각각 구성하였다. 제품을 성형하기 위한 프레스는 300톤 유압 프레스를 사용하였으며, 이 때 램 속도는 10mm/min로 하였다. Fig.15에는 성형 결과품에 대한 사진으로 공정설계의 결과와 같이 크랙이 없는 양호한 제품이 성형되었으며, 실험결과는 해석결과와 잘 일치하였다.



Fig. 15 Photograph of final product

#### 5. 결론

유한요소법을 이용한 체계적이고 일반적인 설계방법론을 근거로 축대칭 전·후방 압출품의 냉간단조 공정설계를 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제품의 다이 채움을 양호하게 하기 위해서는 배불림 현상 때문에 한 단계의 성형으로는 불가능하며, 배불림 현상을 억제하도록 하는 축방 구속 압출품의 예비성형체를 사용하는 2단계 공정으로 성형해야 한다.
2. 초기소재의 직경을 먼저 결정하고, 상부 및 하부의 압출량을 공정설계 변수로 하여 바람직한 변형을 분포와 단조하중 등을 고려하여 최종 제품의 성형에 필요한 가장 적절한 예비성형체를 설계하였다.

3. 본 연구에서 성형하고자 하는 냉간단조품의 단조를 위해서는 하부쪽의 압출량이 12.5mm의 값을 갖는 예비성형체를 취하는 것이 예비성형체의 성형하중 및 최종 제품의 성형하중이 공히 작게 나타났다. 따라서 이러한 예비성형용 금형으로 예비성형체를 성형하고, 이것을 어닐링 과정을 거친 후 최종단조도면 형상으로 성형하는 공정이 가장 적절함을 알 수 있었다.

4. 이상의 연구결과로부터 얻은 최적의 공정설계를 이용하여 실제 성형한 결과는 해석결과와 잘 일치하였다.

### 참 고 문 헌

1. Sevenler, K., Raghupati, P.S. and Altan, T., "Fogming Sequence Design for Multistage Cold Forging", *J. of Mech. Work. Tech.*, Vol.14, pp.121-135., 1987.
2. Osakada, K., Kado, T. and Yang, G.B., "Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forging", *Annals of the CIRP*, Vol.37, No.1, pp.239-242, 1988.
3. Bariani, P. and Knight, W., "Computer-Aided Cold -Forging Process Design : A Knowledge Based System Approach to Forming Sequence Generation", *Annals of the CIRP*, Vol.37, No.1, pp.243-246., 1988.
4. Vemuri, K.R., Oh, S.I. and Altan, T., "BID : A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.29, No.4, pp.505-518., 1989.
5. Park, J.J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.23, No.1, pp.71-79., 1983.
6. Hwang, S.M. and Kobayashi, S., "Preform Design in Disk Forging", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.26, No.3, pp.231-243., 1986.
7. Yang, D.Y. and Kim, K.H., "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Ring Rolling", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.30, No.8, pp.571-580., 1988.
8. Kang, B.S., Kim, N.S. and Kobayashi, S., "Computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.30, No.1, pp.43-52., 1990.
9. Kim, N.S. and Kobayashi, S., "Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the Finite Element Method", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.30, No.2, pp.243-268., 1990.
10. Kang, B.S. and Kobayashi, S., "Preform Design in Ring Rolling Processes by the Three-Dimensional Finite Element Method", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.31, No.1, pp.139-151., 1991.
11. Kang, B.S., "Process Sequence Design in a Heading Process", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.27, pp.213-226., 1991.
12. Altan, T. and Knoerr, M., "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.35, pp.275-302., 1992.
13. Zienkiewicz, O.C., "The Finite Element Method", 3rd Edition, McGraw-Hill, UK., 1977.
14. American Society for Metals, "Metals Handbook 8th Edition", ASM, Metals Park, Ohio 44073, Vol.4, p.485., 1969.
15. S.Kobayashi and C.H.Lee, "Deformation Circular Cylinders", *Proc. North American Metalworking Research Conference*, Vol.1, p.185, 1973.