

〈論 文〉

## 점진적 복합성형법을 이용한 대형 돔형 단조품의 공정개발

박치용\* · 양동열\* · 이경훈\*\* · 은일상\*\*\*

(1994년 1월 7일 접수)

### Process Development of the Large-Size Dome Shaped Forging-Products Using the Incremental and Combined Forming Method

C.Y. Park, D.Y. Yang, K.H. Lee and I.S. Eun

**Key Words :** Process Development(공정개발), Incremental Forging Method(점진적단조법), Combined Forming Method(복합단조법), Modelling Experiments of Plasticine and Lead(플라스티신 및 납의 모사실험), Dome-Shaped Forging-Product(돔형 단조품), Prototype Experiments(모의실험)

#### Abstract

In this paper, a new forming process of the large-size forgings within the limit of forming loads is developed by introducing the incremental forging method and combined forming method. For the development of the forming process, various related processes are proposed and modelling experiments of plasticine and corresponding numerical simulation are carried out. Thus, an optimal process considering the productivity and economical efficiency is recommended from the study of formability and forming loads, etc. The selected process is subjected to a modelling experiment of lead and 1/7 scale prototype experiment of the real material so as to verify the effectiveness of a selected process as well as to determine the design parameters. The developed process is then applied the forging product of dome shape. Dome-shaped forgings can be produced by the developed process within the limit loads and with the simple tools.

#### 기 호 설 명

$c$	: 비열 (N/mm. s. °K <sup>4</sup> )	$V$	: 가공체의 영역
$f_i, \Delta f_i$	: 표면력 성분 및 그 증분	$\Delta t$	: 비정상상태의 단계당 시간간격
$H'$	: 소재의 가공경화 및 변형률속도 경화 효과율	$\dot{\epsilon}_{ij}, \bar{\epsilon}$	: 변형률속도 성분 및 유효 변형률속도
$K^*$	: 벌칙상수	$\bar{\epsilon}$	: 유효 변형률
$k$	: 열전도계수 (N/s. °K)	$k$	: 변형에 의한 열발생률
$k^*$	: 변형에너지의 열발생 비율	$\theta$	: 증분항의 크기조절 계수
$q_n, Q_n$	: 경계표면에서의 열유동 및 열유동벡터	$\rho$	: 밀도 (kg/mm <sup>3</sup> )
$T, T$	: 절대온도 (°K) 및 온도 매트릭스	$\sigma_{ij}, \sigma'_{ij}$	: 응력 및 편차응력
		$\bar{\sigma}$	: 유효응력

\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

\*\*정회원, 국방과학연구소

\*\*\*국방과학연구소

#### 1. 서 론

항공우주산업 및 원자력 발전설비 등의 고부가가

치 산업에서 필수적으로 필요한 돔(dome)형상의 대형제품은 원자로 및 인공위성 등의 유도기관 추진체등에서 사용되고 있다. 대형 제품들의 일체화 및 고신뢰성의 제품이 요구됨에 따라 이에 대한 연구가 이루어진 바 있다.<sup>(1~4)</sup> 그러나 이러한 연구들은 허용 하중능력이 큰 장비를 보유하고 있는 경우에 맞게 공정이 이루어져 있기 때문에 용량이 큰 장비가 없는 경우에는 성형이 불가능하므로 이에 대한 적절한 대응이 요구된다. 따라서 적은 하중으로도 대형 단조품을 성형하기 위해서는 일반적인 단조공정이 아닌 새로운 성형공정을 개발해야 할 필요성이 있다. 본 연구는 비교적 소형장비로서 대형형상 단조품의 제작이 가능한 새로운 성형공정을 개발하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 점진적 단조공정법 및 복합성형기법을 도입한 점진적 복합성형법을 제안하고 이 방법에 의해서 대형 돔단조의 성형공정을 개발하였다. 본 논문의 구성은 먼저 기존의 방법 및 제안된 공정법의 평가, 확인을 위해 사용된 계산방법과 실험수행에 대해서 간단히 언급하였다. 다음으로는 새로운 공정의 필요성을 확인하였으며, 그 후에는 점진적성형법과 여러가지 성형법을 결합시킨 점진적 복합성형법을 제안하였다. 점진적 복합성형법에 의해서 제안된 각각의 공정 방법들에 대해서 유한요소법에 의한 해석 및 플라스티신 모델시험을 통하여 소성유동에 의한 성형성과 하중을 검토한 후에 장비의 효율적 사용 및 하중능력, 그리고 성형성 등을 고려하여 적절한 공정 방법을 선택하였다. 선택된 공정은 납의 모델실험에 의하여 최종적인 공정방안을 확립하였다. 확립된 공정으로 실제 재료를 사용하여 1/7로 축소된 제품을 열간에서 성형실험을 수행하여 공정을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 점진적 복합성형법이 적은 하중으로 대형의 제품을 성형할 수 있음을 보였다.

## 2. 이론계산 및 실험조건

공정개발을 위해서는 실험적, 해석적으로 가능한 방법들을 적절히 사용하거나 또는 동시에 사용하여 비교, 평가하였다. 본 연구에서는 폐쇄단조(closed die forging)에 의하거나 또는 이 방법의 개선된 방식으로 제한된 하중하에서 성형이 가능한 지의 평가 및 업셋팅과 평판화 공정에서 하중평가방법으로써 열간 유한요소법을 사용하였다. 본 논문에서

사용된 유한요소법 및 실험방법, 실험재료 등에 대하여 간략히 언급하면 다음과 같다.

### 2.1 유동 및 온도해석을 위한 유한요소법

본 논문에서 사용한 열간단조 공정의 해석은 점소성해석에다 온도해석을 목적으로 열역학적 이론을 도입한 열-점소성 해석방법을 이용하였다.<sup>(5)</sup>

소재의 탄성변형은 무시하며 등방성(isotropic)이고 von Mises 항복조건을 따르고, 변형중에 체적 변화는 없으며 금형은 완전강체로 가정하고 유도된 변분식은 다음과 같이 나타난다.<sup>(6)</sup>

$$\int_V (\bar{\sigma} + a\Delta t \dot{\epsilon} H') \delta \dot{\epsilon} dV + K^* \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \epsilon_v dV - \int_{S_f} (f_i + a\Delta f_i) \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서,  $K^*$ 는 벌칙상수이고,  $H'$ 는 소재의 가공경화 및 변형률속도 경화효과율이다. 식(1)의 변분식을 요소분할화하여 나타낸 뒤, 속도장을 보간함수를 이용하여 표현하면 비선형 연립방정식이 되는데 이로부터 속도장을 계산하였다.<sup>(6)</sup>

또한, 온도해석을 위해서는 열평형방정식<sup>(5)</sup>을 도입하였다.

$$kT_{,ii} - \rho c \dot{T} + \dot{k} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\dot{k} = k^* \bar{\sigma} \dot{\epsilon}$ 는 변형에 의한 열발생을 나타내며  $k^*$ 는 변형에너지가 열로 변화되는 비율이다. 열 평형방정식에 자유 표면에서의 대류 및 복사, 금형과 소재의 접촉면에서 전도 및 마찰열발생 등의 경계조건을 적용하여 변분식으로 나타내면 다음과 같다.<sup>(7,8)</sup>

$$\int_V kT_{,ii} \delta T_{,ii} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V k^* \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (3)$$

식(3)의 변분식을 요소분할화시킨 뒤 절점의 좌표, 온도 및 온도의 변화량을 보간함수로 표현한 후 정리하면 다음과 같은 간단한 벡터형으로 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$KT + C\dot{T} = Q_n \quad (4)$$

여기서,  $Q_n$ 은 경계표면에서 수직방향으로의 열유동 벡터이다.

식(4)를 매시간 단계내에서, 어떤 증감시간  $t_0 = t_n + \theta \Delta t$ 에서  $T, \dot{T}$ 를 차분화하여 선형화시킨 뒤에 외연적방법(explicit method)으로 해석하였다. 변

형 및 열전달해석은 서로 비연계된 방법<sup>(9)</sup>을 사용하였고 열전달해석의 정확성을 높이기 위해서 매 변형단계마다 수번의 분할된 온도계산 단계(step)를 수행하였다.

2.2 모델링 및 실제 재료실험

열간단조 공정개발 과정에서 많이 사용되는 모델링 재료로서는 플라스틱인, 왁스, 납 등이 있는데 본 연구에서는 플라스틱인실험으로 성형성 및 하중을 검토하여 공정을 선택하는 평가자료로서 사용하였다. 또한 선택된 공정에 대하여 납실험을 통하여 공정의 타당성 및 설계변수 등을 결정하였다. 플라스틱인 및 납의 모델링실험은 Shimadzu의 Instron에서 수행하였으며 이는 속도 및 하중의 제어가 가능하고 50톤의 능력을 보유하고 있다. Fig. 1은 실험장치 및 플라스틱인의 실험장면을 보인 것이다. 실제재료의 축소형실험은 250톤의 유압프레스에서 실시하였다.

2.2.1 플라스틱인 및 납의 특성

본 연구에서 사용된 플라스틱인은 국내에서 쉽게 구할 수 있는 영국의 Peter Pan Playthings사의 제품으로 탄산칼슘을 주성분으로 하고 광물유, 탄산마그네슘, 염료 등을 섞어서 만든 점토계통의 물질로서 물에 불용성이며 온도에 큰 영향을 받고 있다.<sup>(10,11)</sup> 플라스틱인의 마찰에 관한 연구<sup>(12-14)</sup>는 CaCO<sub>3</sub>를 윤활제로 사용하는 것이 110°C 고온강의 무마찰조건과 비슷하다고 보고되고 있으며 널리 사용하고 있다. 본 연구에서도 이를 사용하였다.

실제 재료에 대한 모형실험의 유사성은 등온 및 준정적 상태아래에서 여러조건<sup>(14)</sup>이 만족되면 이론적으로 성립된다. 이러한 조건들은 상온의 플라스틱인과 고온의 강이 거의 일치한다고 보고하였다.<sup>(10,11)</sup> 실험시에 마찰조건을 동일하게 하고 소재에 대한 다이의 변형이 거의 없으며, 속도조건을 만족시킨다면 가공시의 변형하중을 예측할 수 있다. 이에 대한 유통도가 Fig. 2에 나타나 있다. 본 연구에서 사용되었던 AISI 4130의 온도의 변화에 따른 유통응력<sup>(15)</sup>과 길이 척도값( $K_L=1/7$ ) 및 플라스틱인의 유통응력에 대한 그래프<sup>(11)</sup>를 이용하여 하중 척도값을 계산하여 유통하중을 추정하였다.

플라스틱인은 변형이 되기 쉬워서 짧은 시간내에 적은 비용으로 실험을 행할 수가 있으나 치수를 정확하게 측정할 수 없고 온도에 따른 편차가 심해서

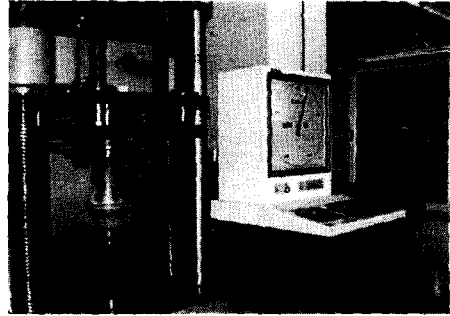


Fig. 1 Die set-up and Instron for the modelling experiments

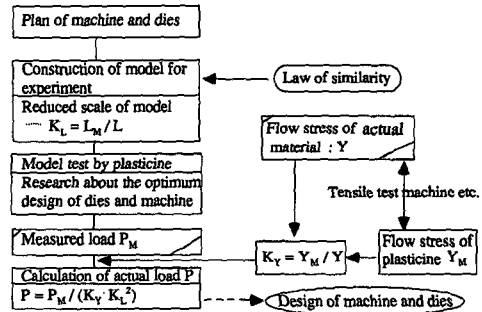


Fig. 2 General procedure of model test for predicting forming forces

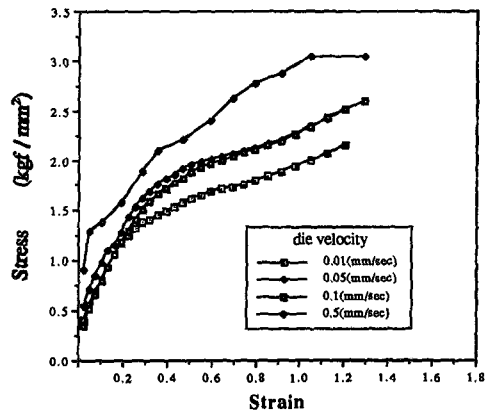


Fig. 3 Stress-strain curve of lead at various die velocities

실험시에 많은 유의를 요한다. 반면에 납의 모델링 실험은 측정의 정확도가 필요한 경우에 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 하중의 예측 및 설계변수의 결정을 위해서 납 모델링실험을 수행하였다. 납의 물리적 특성은 20°C의 상온에서 재결정이 일어나며 가공경로나 주석(Sb)의 양에 따라

서 아주 다른 성질을 나타내고 있으며, 또한 조직이 조대하여 균일 변형을 얻기가 힘든 단점을 가지고 있다. Hidehiko<sup>(16)</sup> 등은 주석의 양이 많을수록, 전가공을 많이 할수록 표면에서 발생하는 오렌지 필현상이 줄어들고 고온강과의 유사성이 증대한다고 보고하였다.

본 연구에 사용한 납 시편의 응력-변형률 관계를 Fig. 3에 다이의 속도에 따라서 나타내었다. 납 시편은 순납으로 전가공을 거치지 않은 것이기 때문에 가공경화지수는 대략 0.4정도의 값을 가졌다. 이는 실제 재료와 많은 편차를 나타내고 있다. 따라서 납실험에서의 하중 유사성은 일정한 변형률에 대한 값의 비교로써 행하였다.

2.2.2 실제 재료의 실험

본 연구에서 돔형상 단조품의 소재는 AISI 4130이다. 그러나 실제 재료의 실험에서는 성형성의 평가를 더 심한 조건에서 행하기 위하여 AISI 4130보다도 성형성이 떨어지고 화학적, 물리적 성질이 유사한 AISI 4340을 선택하여 실험하였다. 실험에 사용된 다이는 납 모델링실험에서 사용한 다이와 동일한 치수 및 형상을 가진 열간단조용 다이를 사용하였다. 실제 크기의 1/7모형으로 하여 소재를 1000℃로 가열하고 다이를 300~400℃로 가열하여 무마찰 상태로 하여 실험을 수행하였다.

3. 폐쇄단조에 의한 성형공정 및 새로운 공정개발의 필요성

대형 돔형상 단조품의 한 예로써 Fig. 4와 같은 단조품 형상, 실제 크기 및 모델링실험에서의 크기 등을 사용하였다. Fig. 4에서 검게 칠한 부위가 최

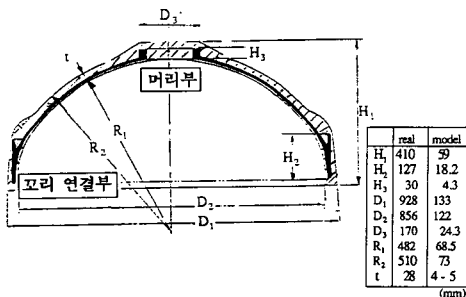


Fig. 4 Shape and dimensions of a dome-shaped forgings

종적으로 요구되는 제품인데 이 형상의 성형적 관점에서 특징을 고찰하는 것은 성형 공정개발의 첫 단계이다. 이 돔형상의 특징은 첫째, 머리부에서 타기관과의 연결을 위해 부피를 가지는 블럭이 있고, 작은 지름으로 뚫어진 구멍이 있으며 둘째, 꼬리 연결부에서 연결용 체결을 위한 두께보다 큰 체적을 가지는 돌기가 있다는 것이다. 특히 성형의 관점에서 본 중요한 특징은 셋째, 전체 크기(지름과 높이)에 비해서 돔의 두께가 굉장히 얇다는데 있다. 두께가 단조품인 경우에 지름의 약 1/31, 높이의 약 1/12라는 점이 성형에 있어서 큰 문제가 된다. 이러한 성형상의 문제를 안고 있는 형상에 대하여 폐쇄단조에 의해 제한된 하중에서 성형이 가능한지 또는 이의 수정에 의해서도 가능한지를 검토하고자 한다. 하중의 측면에서 본 성형가능성은 본 제품의 경우 10,000톤을 최대치로 설정하였다.

3.1 폐쇄단조에 의한 성형해석

Fig. 4에 나타난 도면과 같이 밀폐형 단조를 하면 어느 정도의 하중이 요구되는지를 유한요소법으로 계산하였다. 계산은 소재의 온도가 1000℃의 등온으로 가정하였고 이때의 초기 중량은 도면상에 나타난 황삭을 거친 후의 중량인 320 kg 이었다. 이때 초기형상 (a)과 최종형상 (b)을 Fig. 5에 나타내었다. 하중이 약 4,500톤 정도(Fig. 8(a))가 요구되어 하중 최대치를 크게 초과하였다. 따라서 예비성형체를 링(ring)형태로 수정하여 하중을 절감시킬 수 있는 방법을 모색하였다. Fig. 6에 링형태의 예비성형체 방법과 일반적인 밀폐형 단조공정을 비교하였다. 일반적인 밀폐형 단조법(Fig. 6(a))은 소재가 하부다이의 아래쪽에서 위쪽으로 유동이 일어나는 반면에 링형태의 예비성형체 방법은 소재가

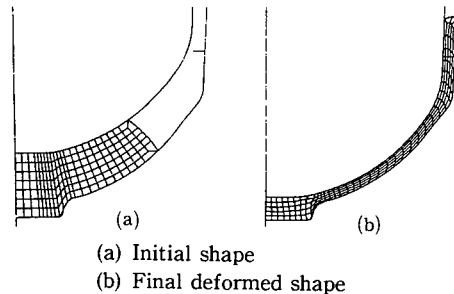
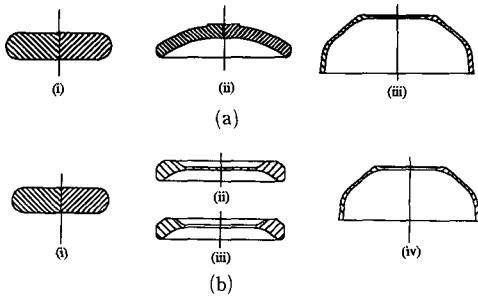


Fig. 5 FEM simulation for the method of closed die forging and forging load

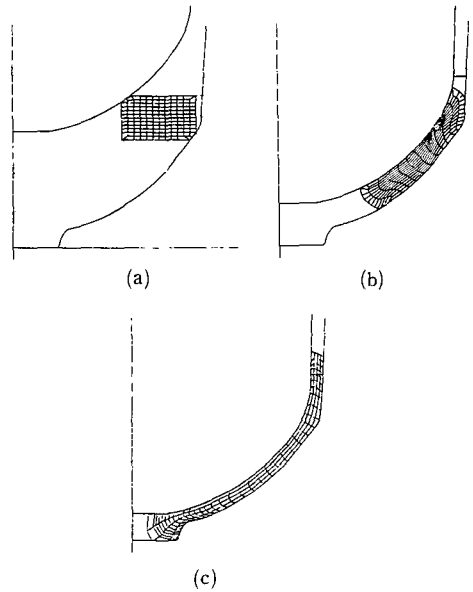


(a) Method of closed die forging  
(b) Ring type preform method

**Fig. 6** Schematic comparison of processes between the method of closed die forging and the ring type preform method

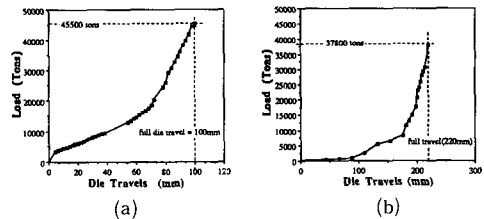
하부다이의 위쪽 적절한 위치에서 링형태 예비성형체가 있다가 상부다이의 하강과 함께 재료의 유동이 아래쪽으로 흘러서 채워진다. 이 방법은 상부다이의 운동과 재료의 유동방향이 동일하므로 마찰에 의한 힘을 줄이고 재료유동이 쉽게 일어나기 때문에 충분히 고려할만 하다고 생각되었다. 그래서 Fig. 5의 계산과 동일한 조건에서 유한요소 계산을 수행하였다. 이에 대한 해석의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이때 예비성형체의 위치 및 크기(지름과 높이)는 몇차례 반복계산으로 얻었다. 또한 예비성형체의 무게는 320 kg으로 일반적 폐쇄단조와 동일한 체적을 가진다. 실제 성형체는 설계에 따라 틀러지나 370~430 kg으로 상당히 많은 체적을 가진다. 따라서 하중의 정확한 계산에서는 차이가 있을 것으로 예상되지만 평가자료로서는 큰 오차가 없을 것으로 생각되어, 이러한 조건하에서의 계산 하중으로 평가기준을 삼았다. 또한, 플라스틱인실험을 수행하였는데 링형태의 예비성형체를 만든느 방법, 유동을 예측한 적절한 링의 내외부 반경의 결정 및 하부다이의 어느 지점에 놓아야 하는지를 정하기 위해서 반복실험을 하였다. 내부의 구멍은 원하는 제품에는 이상이 없으나 요구되는 크기 이하가 되어야 하고 정확히 중심위치에 오게 하여야 하는데 중심에서 벗어난 경우가 종종 발생하기도 하였다.

Fig. 8에 두가지 방법에 대해서 실험과 계산에 대한 하중을 나타내었는데 계산으로는 약 17%의 하중을 줄일 수 있으나 실험에서는 약 30%의 하중 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 계산에서 마찰계수의 정확한 값 및 마찰계수의 변화를 고



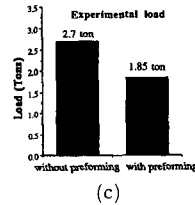
(a) Initial shape (preform weight : 320kg)  
(b) 80% reduction of height  
(c) Final deformed shape

**Fig. 7** Results of FEM simulation in the ring type preform method



(a)

(b)



(c)

(a) Load by the method of closed die forging  
(b) Load by the ring type preform method  
(c) Load in the plasticine modelling experiments

**Fig. 8** Comparison of forging loads between the method of closed die forging and the ring type preform method using FEM simulation and the plasticine modelling experiments

려하고 있지 못해서 일어난 것으로 사료된다. 소요 하중은 최대허용 하중 10,000톤을 훨씬 초과하므로 공정의 선택에는 불가능한 것으로 판명되고, 공정

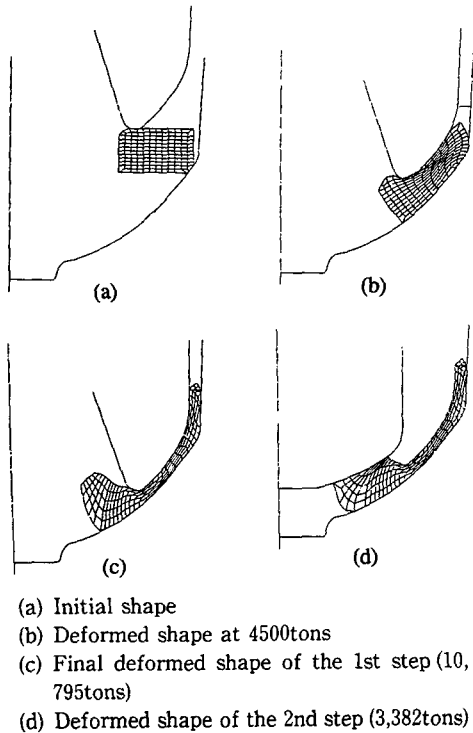


Fig. 9 FEM simulation of two step forging using ring preform

상에서 예비성형체의 설계여하에 따라 공정의 성사 여부가 결정되지만, 하중을 크게 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 폐쇄단조의 다음 방법으로 링형태의 예비성형체를 이용하여 2단계로 단조하는 방식을 계산하여 보았다. 이 방법은 링형태의 예비성형체 방법에서 상부다이를 접촉단면적의 비로써 분할하여 외부쪽 다이부터 한번씩 누르는 방법이다. 해석을 수행하여 하중이 10,000톤이 넘어가서 다시 외부쪽 다이의 면적을 줄여서 하여도 Fig. 9에 나타난 바와 같이 많은 하중이 필요하였다. 이 방법도 결국 하중의 문제로 공정의 선택은 유보시켰다. 이상과 같이 밀폐형 단조에 의한 방법으로는 제한된 하중아래에서 성형하기 위해서는 새로운 공정의 개발이 요구된다.

다음으로는 두께가 적음으로 인한 성형성의 한계, 하중의 제한성을 연구의 핵심문제로 선정하고 이의 해결을 위한 공정방안을 모색하였다.

### 3.2 점진적 복합성형법의 개발

점진적성형법은 적은 성형력으로 복잡한 형상의

성형품을 생산한 필요성이 있을 때 최종 성형품의 일부분에 해당하는 금형을 사용하여 순차적으로 또는 연속적인 하중을 가하여 소재의 유동이 순차적으로 일어나게 하는 성형방법을 말한다. 본 연구에서는 점진적 특징중 적은 하중, 단순한 형태의 금형이용 그리고 생산의 유연성 등을 최대한 활용할 수 있도록 최종형상의 부분형상을 갖는 금형으로 계속적 타격을 가하는 점진성형법을 제품의 공정개발에 적용하였다. 이와 함께 단조공정의 개발에 응용된 또 다른 방법은 복합성형법이다. 복합성형법이란 요구되어지는 제품에 적절하게 대응할 수 있는 여러가지 성형방법을 공정개발에 적용시켜 단조공정의 효율성을 향상시키는 기법을 말한다. 이러한 점진적성형법 및 복합성형법을 이용하여 폐쇄 단조로서는 하중의 제한성으로 인해 성형이 불가능한 대형 돔형상의 단조공정을 개발하였다.

## 4. 점진적 복합성형법에 의한 공정개발

### 4.1 공정의 제안 및 플라스틱인 모델링실험

폐쇄단조에 의해서는 최종제품의 크기가 제한된 하중을 초과함으로 인해 점진적 단조방법으로써 평판을 만든 후에 (i) 2단계로 최종단조하는 방법, (ii) 스피닝(spining)공정으로 최종형상을 갖도록 하는 방법, (iii) 드로잉(drawing)공정의 적용 등을 고려하였다.

#### 4.1.1 2단계 최종단조법

첫번째로 고려한 2단계 최종단조방법(two step final forging)은 점진적 단조에 의해 평판을 만드는 공정과 평판의 굽힘 및 소변형을 2단계로 하는 공정이 결합된 방법이다. 공정의 순서를 Fig. 10(a)에 개략적으로 나타내었다. 평판을 만드는 공정에 대해서는 다음에 나오는 공정에서 언급하고 평판의 굽힘 및 적은 변형을 가지는 사이징(sizing)의 2단계 공정에 대해서 플라스틱인(plasticine)실험의 결과 및 공정중에 일어났던 문제들을 알아보기로 한다. (iii) 및 (vi)의 공정에서 접촉면적이 넓어 앞절의 링형태 예비성형체를 이용한 2단계 단조방법과 비슷한 하중이 필요하였다. (iii)의 공정에서는 상부다이의 외곽끝부분에서 다이자극이 있었으나 곡률을 줌으로써 해결할 수 있었는데 (iii)공정이 끝난직 후 평판의 탄성회복이 약간 일어나는 것을 관찰할 수 있다. (vi)공정을 위해서 상부

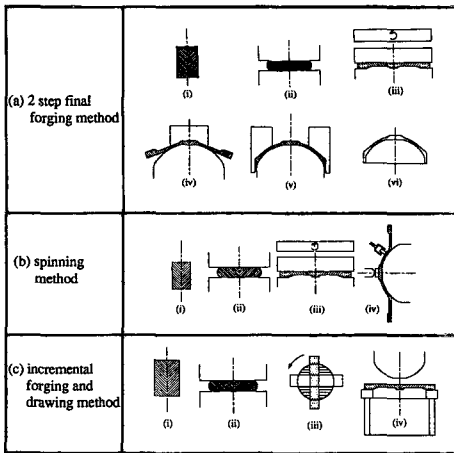


Fig. 10 Processes of proposed three incremental and combined forming methods

다이가 내려오면서 상부다이의 외각 지름같이 소재에 먼저 닿는 결함을 근본적으로 가지고 있다. 이를 피하기 위해서는 반드시 (iii), (vi)공정에서 어느 정도의 변형이 요구되는데 이는 하중초과의 문제를 유발시켰다. 그리고 탄성회복에 의한 머리부의 정확한 곡률을 얻는데에도 문제가 발생할 것으로 생각된다. 따라서 이 공정도 일단은 선택을 유보시키기로 하였다.

4.1.2 스피닝공정의 적용

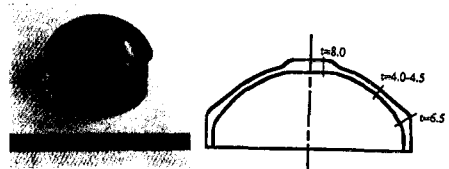
점진적 단조방법에 의한 평판의 성형과 스피닝공정(spining method)을 도입한 복합성형법으로 돔형상을 만드는 공정으로 Fig. 10 (b)에 개략도란 나타내었다. 스피닝공정의 적용에 대해서는 본 연구에서 장비의 제한성으로 인해 실험을 수행하지 못하였다. 실제 생산을 위한 공정에서도 대형에 적합한 스피닝기계의 확보가 전제되어야하기 때문에 일반적인 공정으로써는 제한된다. 그러나 이 방법은 스피닝 장비를 보유하고 있다면 충분히 고려할 수 있는 좋은 방법으로 생각된다.

4.1.3 점진적단조 및 드로잉

점진적단조방법과 드로잉(Incremental forging and drawing)을 적용시킨 복합성형법을 이용하여 돔을 만드는 공정으로 Fig. 10 (c)에 개략적으로 나타내었다. 점진적단조법은 업셋팅으로 누를 수 있는 양만큼 최대한 누른 뒤에 이를 다시 하중을 가하기에는 가용프레스의 능력을 벗어나기 때문에 단

면 분할다이스로 점진적으로 성형시킨다. 이러한 점진적 성형은 상부다이의 폭을 조절하여 하중을 필요한 만큼 조정할 수 있으며 원형의 모양을 만들 수 있다. 그러나 열간가공에서 소재의 열이 주로 하부다이스로 이동함으로 인해 소재의 온도가 급격히 낮아져서 가공하중을 증대시킬 수 있으므로 이에 대한 대비가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 점진적타격의 방법도 축을 중심으로 90°, 45° 등으로 돌리면서 한 패스를 가공하는 방법이 있는가 하면 좌측에서 우측으로 직선방향 이동하면서 한 패스를 타격한 후 다음 패스에서는 90° 회전시킨 방향으로 타격을 가하면서 가공하는 방법이 있다. 후자의 방법은 지름이 큰 디스크를 만들때 사용되어지고 있으며 이에 대한 실험 및 이론과의 비교연구도 이뤄진 바 있다.<sup>(4,17)</sup> 본 실험에서는 두가지 방법 모두를 행하였는데 거의 원형으로 만들 수 있었다. 실제 작업에서 두 방법중의 선택은 프레스의 조절능력에 따라서 선택하여 사용하면 될 것으로 생각된다. 다음으로 원형에 가까운 평판을 최종제품의 내부형상을 갖는 다이를 사용하여 드로잉시켰다. 이때 원형 평판의 지름은 약 170 mm 전후가 가장 좋은 제품을 얻을 수 있었다. 지름이 너무 크면 드로잉 힘을 너무 많이 받아서 도움의 머리부의 변형이 증대하여 파단되어질 우려성이 있으며, 반대로 너무 작으면 꼬리 연결부의 내부쪽에서 원하는 치수를 얻을 수 없다. 이와 같은 공정에서 최종성형품의 단면 및 각단면의 두께크기를 Fig. 11에 나타내었는데 요구되는 제품의 치수를 만족시키면서 성형하중도 크게 줄일 수 있었다. 플라스틱신의 실험결과로부터 점진적단조 및 드로잉에 의한 공정이 하중을 줄이면서 제품을 성공적으로 성형시킬 수 있었다.

이상과 같은 세가지의 점진적 복합성형법에 대해



(a) Final section shape  
(b) Thickness dimension

Fig. 11 Final section shape of a dome and thickness dimension (mm) in the plasticine modelling experiments

서 다음과 같은 판단기준을 근거로 하여 공정을 선택하였다.

- (i) 장비확보의 현실성 및 대형 제품의 물류유동이 최소인가?
- (ii) 보유하고 있는 장비내의 허용하중 범위내에서 성형이 가능한가?
- (iii) 여러번 실험했을 때 제품의 성공률이 높아서 공정을 신뢰할 수 있는가?
- (iv) 공정수를 절감시킬 수 있으며 다이의 제작비용이 저렴한가?

이상과 같은 여러가지 사항을 동시에 고려하여 점진적단조 및 드로잉에 의한 성형방법이 가장 적당한 것으로 선정되었다.

4.2 납의 모델링실험

대형등을 성형하는 방법으로 선정된 점진적단조 및 드로잉에 의한 성형법을 공정의 신뢰성 및 공정변수를 결정하기 위하여 납으로 실험을 수행하였다. 납의 모델링실험은 먼저 업셋팅공정, 평판화공정, 드로잉 공정의 순으로 행해졌고 각각의 공정에 대해서 다이의 수정 및 소재의 필요치수 등 설계변수들의 영향을 조사하였다.

4.2.1 업셋팅공정

업셋팅공정은 평판화공정의 원활한 작업을 위해서 제품의 결함이 가지않는 범위내에서 허용할 수 있는 최대하중을 사용하여 많은 양을 눌러야 한다. 75% 까지 눌렀을때 하중 그래프를 Fig. 12에 보이는데 75% 에서 약 20톤 정도였다. 이는 납의 압축시험(Fig. 3)에서 변형률 1.3일 때 척도값 및 실제 재료의 1000℃ 유동응력을 고려하면 4570톤에 해당한다. 그리고 Fig. 13은 열유동을 고려한 열간 FEM 계산에 의해 얻어진 업셋팅의 하중곡선이다. 온도에 따라 큰 차이를 나타내고 있으나 75%까지는 10,000톤 허용 능력의 프레스에서 충분히 가능한 가공으로 생각된다. 그리고 다이의 예열에 의하여 더 많이 누를 수 있다면 8,000~8,500톤의 하중 능력까지 늘려서 되도록이면 평판화작업 시간을 줄일 수 있으면 더욱 좋을 것이다. 문제가 되는 것은 많은 변형량에 의해 자유표면에서 균열이 열려되는데 이는 납 및 플라스틱인 실험에서는 발견되지 않았다. 업셋팅시에 하부다이를 평면으로 실험한 것과, 등의 머리부 돌기를 성형 하기 위해 형상을 가지는 하부다이를 사용한 것과의 하중차이는 거의

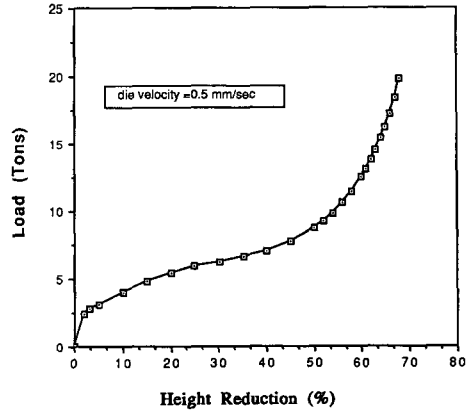


Fig. 12 Load of the upsetting process in the lead modelling experiments

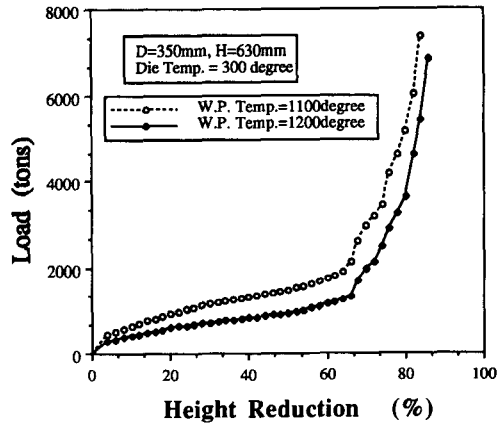


Fig. 13 Load curve of the upsetting process with respect to temperature by the FEM simulation

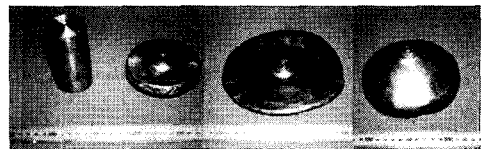


Fig. 14 Shape of each stage using the incremental forging and drawing method in the lead modelling experiments

없었다. 따라서 평판화 과정에서 머리부 돌기를 성형하지 않고 업셋팅공정에서 성형시켰다. Fig. 14에서 초기시편 및 업셋팅 후의 시편을 나타내었는데 돌기부의 형상이 뚜렷이 성형됨을 볼 수 있다.

4.2.2 평판화공정

선택된 점진적성형 및 드로잉공정에서 가장 중요



한 공정 중의 하나로써 연구의 초점은 허용하중을 벗어나지 않는 범위내에서 상부다이 폭을 최대한 크게 할 수 있도록 하여야 한다는 것이다. 상부다이의 폭 크기에 의해서 점진적인 타격회수를 줄일 수 있고 가공시간을 절약하여 소재의 냉각을 최대한 줄일 수 있기 때문이다. 평판화공정은 업셋팅공정에서 높이 감소율이 75% ( $h=22\text{ mm}$ )인 시편을 이용하여 실험을 수행하였다.

평판화작업에서 중요하게 고려되어야 할 사항은 총 타격회수의 최소화, 타격깊이의 적절한 조합, 최대하중의 제한성, 타격깊이가 깊어짐에 따른 평판 굽힘현상의 방지 등이다. 타격의 총 회수는 폭이 40 mm 일때는 28번 정도, 폭이 60 mm 일때는 18번 정도 타격을 가하면 이루어졌다. 평판화 작업에서는 효율적인 가용프레스의 능력을 고려하여 최대 하중을 4500톤을 상한선으로 정하였고, 납실험에 의한 하중예측은 측정된 유효변형률이 1.3이고, 다이속도가 0.5 mm/sec일 때 실험의 측정비를 고려하여 실제 가공온도에 따라서 결정하였다.

실험과 분석을 통하여 평판화공정에서 추천되어지는 공정변수 및 주의할 사항은 다음과 같다.

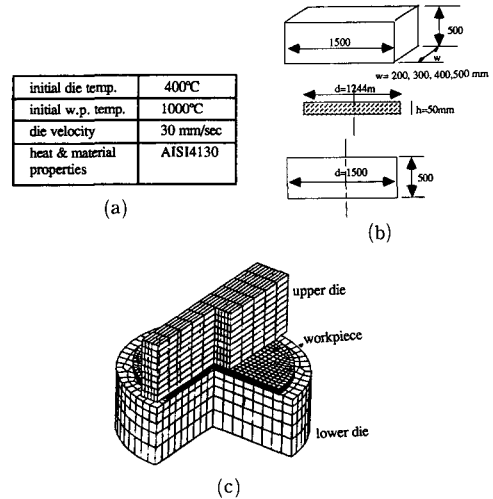
(i) 업셋팅의 양은 80% 이상이 추천된다.

(ii)  $w=40\text{ mm}$  다이로써 제한된 하중(실제하중 4500톤)에서의 작업은 소재온도가  $900^{\circ}\text{C}$  이상을 항상 유지해야 가능하다. 이때 타격깊이는  $8- > 4- > 2- > 1\text{ mm}$ 로 한다.

(iii)  $w=60\text{ mm}$ 의 다이로 제한된 하중에서의 작업은 소재온도가  $1000^{\circ}\text{C}$  이상을 항상 유지시켜야 하고 그렇지 않으면 재가열이 필요하다. 이때 타격깊이는  $6- > 5(4)- > (2)- > 1\text{ mm}$ 로 한다.

(iv) 매 패스의 첫, 두번째 타격깊이는 실제보다  $0.2\sim 0.3\text{ mm}$  적게 누른다.

상부 다이폭의 결정은 평판화공정에서 매우 중요한 설계변수이기 때문에 유한요소법을 이용하여 Fig. 15와 같이 3차원 계산을 수행하였다. 계산은 평판화시킬 때의 하중을 알기위한 것이므로 평판 및 소재의 형상을 근사화시켜 수행하였고, 계산에 사용된 평판의 크기는 지름이 1244 mm 이고 분할된 다이폭은 200~500 mm로 변화시켜 가면서 수행하였다. 이때 다이의 초기온도는  $400^{\circ}\text{C}$  이고 소재는  $1000^{\circ}\text{C}$ 로 가정하고서 계산하여 납실험과 비교하였다. Fig. 16에 나타난 바와 같이 실험에서 사용한 40 mm(실제치수 280 mm), 60 mm(420 mm)에서의 값과 잘 일치하고 있다. 이를 근거로



(a) Computational conditions  
(b) Dimension of the workpiece and the dies  
(c) 3D mesh system

Fig. 15 3D FEM simulation for determining the upper die width in the flattening process

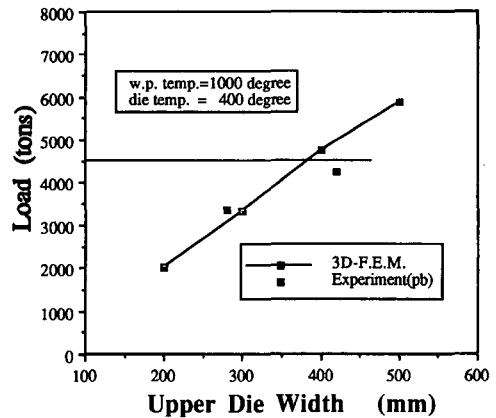


Fig. 16 Comparison of the flattening load between the lead modelling experiments and 3D FEM simulation

하여 280 mm, 420 mm의 두가지 종류의 다이를 가지고서 평판화공정을 수행할 때 제한된 하중(4500톤)에서 소재의 온도를 어느 정도까지 유지해야 하는가를 알기 위하여, 소재의 온도를  $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜가면서 Fig. 15의 계산을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 17에 나타내었는데 제한된 하중하에서 다이폭에 따른 온도의 상관관계를 알 수 있었다. 이 결과는 납실험에서 추정된 다이폭에 따른 소재의 유지온도 결정과 잘 일치하고 있다.

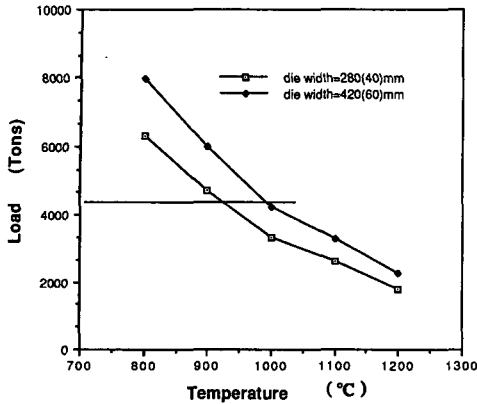


Fig. 17 Variation of flattening load with respect to working temperature

4.2.3 드로잉공정

드로잉 (drawing) 공정에서 중요한 것은 드로잉 하기 위한 원형 평판의 지름크기와 평판의 바깥쪽 면에서 결함이 없어야 한다는 것이다. 지름이 170~180 mm 이면 요구되어지는 제품의 치수를 얻을 수 있었다. 평판이 지름이 180 mm 이상으로 크면 등의 바깥쪽 면에서 인장력을 크게 받아 평판의 두께가 변하는 지점에서 찢어짐이 발생할 우려가 있으며, 평판에서의 미세한 결함에 의해서도 찢어짐이 발생하였다. 특히 납의 모델링실험에서는 납 조직의 균일화, 치밀화된 조직을 갖고 있지 못하기 때문에 결함이 종종 발생되어 실패한 경우가 많이 있었다. 그리고 평판화공정의 하부다이스에서 평판 높이를 변하게 하는 곳에서의 곡률을 충분히 확보해야 할 필요성이 있었다. 드로잉 공정시의 하중은

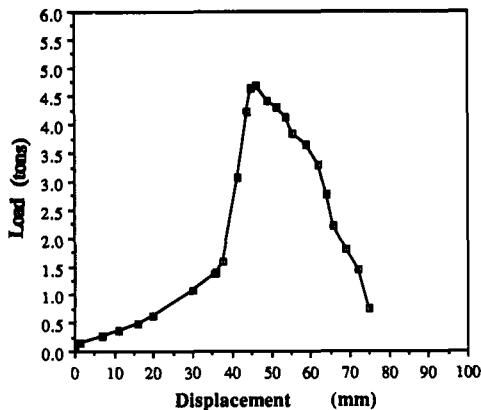
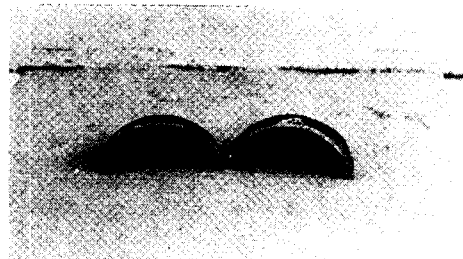


Fig. 18 Load of drawing in the lead modelling experiments

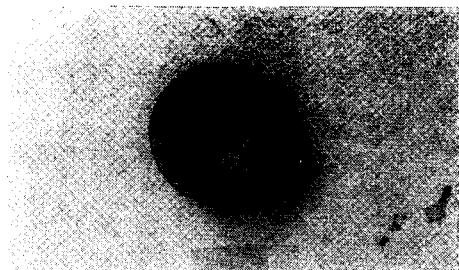
Fig. 18에 나타나 있는데 최대하중이 4.8톤으로 이는 실험중의 속도 0.1 mm/sec 에서 납의 변형률을 0.3으로 할때 가공온도 800°C 에서 3640톤, 900°C 에서 2740톤, 1000°C 에서 1930톤 정도로 하중에 의한 성형제한성은 없는 것으로 나타났다. 평판의 지름이 167~174 mm 이고 두께가 9.4 mm 인 것을 사용하여 드로잉시켰을 때의 모델링제품은 Fig. 14 (d)와 같이 나왔다. 드로잉공정은 소재의 결함이나 성형상의 결함이 없고 원형평판의 지름이 적당해야 하므로 (d=175 mm 를 추천) 원형판을 드로잉 하기 직전에 지름을 정확히 맞추는 황삭의 절삭이 필요할 수도 있다.

5. 실제 재료의 실험

점진적 복합성형법에 의한 대형등의 성형공정으로써 제안된 점진적단조 및 드로잉법에 의한 성형법이 납 모델링실험으로 공정의 신뢰성을 어느정도 확보할 수 있었다. 그러나 실제 생산에 들어가기 전에 실제 재료의 축소모델로서 성형평가를 함으로써 제안된 공정을 확립할 수 있게 되기때문에 실제 재료실험을 수행하였다. 실제 재료인 AISI 4130과 소재성질이 거의 동일하고 성형성이 더 나쁜 AISI



(a) Sectional shape of the final product



(b) Circularity of a dome

Fig. 19 Final section shape and circularity of a dome in the semi-prototype experiments

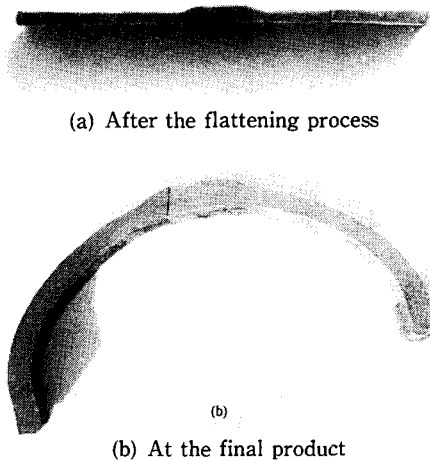


Fig. 20 Metal flow line of section

4340을 사용하여 모델링실험과 동일한 크기(1/7 축소형)로써 열간실험을 수행하였다. 납실험에서 사용한 다이클 사용하였고 1000℃로 가열하여 실험하였다. 실제 소재의 실험이 플라스틱이나 납의 모델링실험보다 더 성형성이 좋음을 관찰할 수 있었다. 특히 납 모델링실험에서 드로잉시에 중심부 찢어짐이 일어나곤 했으나 실소재의 실험에서는 찢어짐이 일어나지 않았다. 이는 납 모델링실험에서 얻어진 설계변수들을 사용하였고 또한 열간상태의 실재료가 납보다 성형성이 양호하기 때문으로 판단된다. 최종 성형품의 단면형상에서도 만족할 만한 치수를 얻을 수 있었고 진원도 등에서도 Fig. 19에서 보는 바와 같이 좋은 제품을 얻을 수 있었다. 또한 평판화시킨 후 및 최종 성형후의 단면조직을 관찰한 결과 Fig. 20에서 볼 수 있는 바와 같이 뚜렷한 단류선을 볼 수 있었으며, 단조효과를 충분히 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

공정개발은 첫째로 폐쇄단조 및 그 방법의 수정으로 성형이 가능한 지를 평가하고 새로운 성형공정의 필요성을 인지한 후 점진적 복합성형법을 개념적으로 확립하고 가능한 방법들을 제안하여 각 공정을 평가하였다. 세번째로 신뢰성있는 실험을 통하여 공정을 확인하고 공정변수 및 설계변수들을 수정하면서 공정을 확립하였다. 본 연구에서는 돛형의 대형 단조품에 대해서 위의 공정개발과정을

따라 보유장비의 현실성과 제안된 하중의 범위내에서 성형할 수 있는 공정을 개발하였다.

(1) 돛형의 성형공정을 업셋팅공정, 평판화공정, 드로잉 공정으로 하여 플라스틱, 납 및 실제 재료로 행하여 만족할 만한 결과를 얻었다.

(2) 공정중에 필요한 변수로서 평판화 공정중에 다이폭, 소재온도, 타격깊이, 허용하중 등에 관한 영향을 조사하여 적절한 값들을 제안하였다.

(3) 드로잉공정에서 평판지름이 175 mm 여야 한다.

(4) 제안된 방법에 의한 공정시에 플라스틱, 납, 실제재료의 순으로 성형성이 더 좋아짐을 관찰할 수 있었다.

대형 돛형상의 단조품에 대해서 제안된 성형공정 방법에 의해 만족할 만한 결과를 얻었지만 결함이 없는 완전한 생산과 생산성향상을 위해서는 공정중에 일어나는 소재의 냉각에 대한 연구와 소재의 가열회수를 줄일 수 있는 방안 및 제품의 물성평가 등이 계속되어야 할 것으로 생각된다. 하지만 본 연구에서 제안된 방법은 다이의 형상이 간단하여 비용을 절감시킬 수 있어서 경제적인 생산공정방법이고, 연구에서 수행한 제품보다 지름이 더 커지는 경우나 형상이 조금씩 변화되는 경우에 있어서도 하중의 제한성을 크게 받지 않고 유연하게 적용시킬 수 있기 때문에 대형돛 뿐만 아니라 원추형실린더 및 노즐형캡 등의 대형제품 성형공정에 적절히 응용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- (1) Krummel, C. H. and Thompson, O. N., 1978, "Space Shuttle Solid Rocket Motor Metal Case Component," *AIAA/SAE 14th Joint Propulsion Conference*, Las Vegas, Nev./July 25~27.
- (2) Kapp, J. R., Thiokol, Corp., 1978, "Design, Fabrication and Test of the Space Shuttle Solid Rocket Booster Motor Case," *AIAA/SAE 14th Joint Propulsion Conference*, Las Vegas, Nev./July 25~27.
- (3) Karl, H. S., 1991, "Manufacture and Properties of Ultra-High Strength Steel Preformed Parts for the Solid Propellant Booster Cases of the Ariane 5 Launch Missile," *11th International Forgemasters Meeting*, Terni/Spoletto, Italy, 11/

- 14 June, 1/6~6/6.
- (4) Reid, E. A. 1967, "Forging Methods and Tooling for Production of Large Forgings," *The 4th International Forgemasters's Meeting*, Sheffield, England, September, pp. 1~57.
- (5) Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1980, "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer-I: Theoretical Considerations," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 22, pp. 699~705.
- (6) Yoon, J. H. and Yang, D. Y., 1988, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Three-Dimensional Forging by Considering Friction on Considering Friction on Continuous Curved Dies with Initial Guess Generation," *Int. J. of Mech. Sci.*, Vol. 30, No. 12, pp. 887~898.
- (7) 박치용, 조종래, 양동열, 1990, "열간 반경 단조의 2차원 유한요소해석," 대한기계학회논문집, 제14권 제5호, pp. 1166~1180.
- (8) Cho, J. R., Park, C. Y. and Yang, D. Y., 1993 Investigation of the Cogging Process by Three-Dimensional Thermo-Viscoplastic Finite Element Analysis, *Proc Instn Mech Engrs.*, Vol. 26, pp. 277~286.
- (9) 조종래, 박치용, 천명식, 윤정호, 양동열, 1990, "2차원 열간단조에서의 변형과 온도의 연계해석과 비연계해석 비교," 대한기계학회논문집, 제14권 제4호, pp. 839~849.
- (10) Peter Pan Playthings LTD., *Technical Specification Catalog*.
- (11) 畑村洋太郎, 1977, "플라스티신을 이용한 모델링 實驗法," 第11回 塑性加工學 講座-5, pp. 1~20.
- (12) Kotaro, Y., Hidehiko, T., Tsuneo, E., Shunji, O. and Junichi, I., 1974, "A Study of Simulative Model Test for Metal Forming Using Plastine," *MTB* 91, July, pp. 1~11.
- (13) Dudra Stephen, P., Burte, P. and Im, Y. T., 1988, "Physical Modeling Technique with Plasticine of Metal Forming Processes," *Research Memorandum*, The Ohio State University, March.
- (14) 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.
- (15) 이근안, 1992, "모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구," MS Thesis, KAIST.
- (16) Hidehiko, T., Yoshiharu, T. and Junichi, I., 1984, "Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II, pp. 1003~1008.
- (17) Floc'h, A. LE, Wey, E. and Jacomet S., 1987, "Deformation Estimation of Open-die Forged Heavy Disc And Comparison with and Industrial One.," *Physical Modelling of Metalworking Processes*, Edited by E. Erman and S. L. Semia-tion, pp. 81~102.