

# 점진적 팽창단조법에 의한 대형 노즐형제품의 성형공정 개발에 관한 실험적 연구

박치웅\*, 양동열\*, 이경훈\*\*, 은일상\*\*

\* : 한국과학기술원 정밀공학과

\*\* : 국방과학연구소

## An Experimental Study of Forming Process Development in Large Nozzle-Shaped Product Using the Incremental Forging Method for Expanding

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

\* : Department of Precision Engineering and Mechatronics, KAIST

\*\* : Agency for Defense Development

### ABSTRACT

In this paper, a new forming process of large-size forgings of converged nozzle-shape is developed by the experimental study using the incremental forging method and combined forming method. The development of the forming process is focused on the manufacturing of large-size forgings by the press with medium load capacity. Various related processes are proposed and modelling experiments using plasticine are carried out. Thus, the incremental forging method for expanding is recommended from the study of formability and forming load, etc. The selected process is then subjected to modelling experiments of lead and the design parameters such as preform for final process, die-width of the upper die and reduction amount of each stroke are determined. In order to verify the effectiveness of the selected process, 1/7 scale prototype experiment of the real material is carried out. Forgings of converged nozzle shape can be produced by the developed process within the limit loads and with the simple tools.

Key Words : Development of forming process, Incremental expanding method, Modelling experiment, Prototype experiments of real material, Large converged nozzle.

### 1. 서 론

연결부를 지닌 대형의 노즐형상 제품은 대형산업기에서 용기의 일부 및 추진체나 인공위성 발사대등에서 쓰이는 제품으로 지름이 1m에서 수m에 이르는 대형으로 제작

된다. 대형노즐형 제품은 제품자체의 강도, 정확한 치수 및 소요재료의 다수등도 중요한 요소이나, 크기에 따라 다르지만 제품을 만들기 위해서는 수만톤까지 필요하기 때문에 제품제조의 가능여부가 성형기의 능력에 의존하게 된다. 종래의 이같은 대형의 노즐형 제품을 제작하는 방법은 다음과 같이 알려지고 있다. 첫째로는 지름이 약 3000mm인 경우에 있어서는 소재를 누르기 작업한 후에, 열간 압연 과정으로 후판을 만든 뒤에, 접시형상으로서의 드로잉과정으로 중간성형체를 만들고, 냉간 스피이닝공정으로 형상을 완료한 후에 절삭공정을 마지막으로 행하여 제조하는 방법이다.<sup>[1]</sup> 이 방법은 압연기 및 대형 강력 스피이닝기계등을 한 공장내에 또는 한 국가내에 소유하고 있지 못하기 때문에 수량이 많지 않는 대형제품의 제조방식으로는 많은 소재의 이동이 이루어져야한다. 또한, 그러한 하중능력을 가지는 기계의 확보가 제품의 생산여부를 결정하게 된다. 그러나 본 연구에서는 중형급의 프레스 장비를 소유하고 있는 곳에서는 어디에서든지 제조가 가능하고 또한, 소유하고 있는 프레스의 능력에 맞게 공정변수를 조절함으로써 제품의 크기가 커지는 경우에 있어서도 제조가 가능하도록 하고자하는 것이다. 둘째로는 적당한 크기의 후판을 노즐외경의 변화에 맞는 실린더형 하부금형과 내부의 절단장치 및 맨드렐을 가지고 상부에는 노즐 내경에 대응하는 금형을 이용하여 성형하는 방법이 있다.<sup>[2]</sup> 이 방법은 본 연구에서 취급하고자하는 노즐경사부가 크고 연결부를 가지는 형상에 대해서는 많은 절삭가공이 소요되고 제품이 크기가 대형일 때에는 큰 하중능력을 가지는 성형기가 요구된다. 세번째로 적절한 예비성형체의 설계에 의하여 성형하는 방법<sup>[3]</sup>이 연구되었으나 이는 성형기 능력에 의해 제품크기가 제한된다. 따라서 노즐의 지름이 1m - 3m에 이르는 대형일 경우에도 5000톤 내외의 중형급의 힘을 보유한 성형기계로서도 성형이 가능한 방법을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서는 비교적 소형장비로써 대형 노즐형단조품의 제작이 가능한 새로운 성형공정을 개발하기 위해서 모델링재료를 이용한 실험적 방법에 의한 방법을 이용하였다. 새로운 공정개발은 비교적 소형 장비로써 대형 단조품의 제작이 가능하도록 하는데 초점을 맞추고서 이루어 졌다. 이를 위해 점진적 단조법을 도입하였다. 먼저 가능한 방법들을 제안하고, 각각의 공정 방법들에 대해서 플라스틱모델링 실험을 통하여 소성유동에 의한 성형성과 하중을 검토한 후에 사용 가능한 일반적 성형장비 및 하중능력, 그리고 성형성 등을 고려하여 적절한 공정방법을 선택하였다.

선택된 공정은 납의 모델실험에 의하여 최종적인 공정방안을 확립하였다. 확립된 공정에 대하여 실제재료를 사용한 실험을 수행하여 공정의 타당성을 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 모델재료

플라스틱신 및 납의 모델링 실험을 위하여 사용한 실험장치는 Shimadzu 사의 50톤 능력의 Instron에다 필요한 다이를 설치하여 사용하였다. 플라스틱신은 영국의 Peter Pan Playthings 社의 제품을 사용하였으며 그에 대한 물리적 성질등은 참고문헌<sup>[4-7]</sup>을 참고하였다. 본 연구에서 플라스틱신은 공정의 성형성을 평가하기 위하여 사용되어졌으며, 플라스틱신 모델링 실험을 위한 다이는 아크릴로 제작하여 변형양상을 쉽게 관찰할 수 있었다. 플라스틱신 실험에서 공정의 성형성 평가가 이루어진뒤에 선정된 공정에 대하여 납 모델링 실험을 수행하였다. 납 모델링 실험은 치수측정의 정확도가 요구될 때 많이 사용되어지는데 전가공 없이 사용하였으며 다이속도에 따른 변형

을 및 응력의 관계를 Fig.1에 나타내었다. 1/7의 길이 척도값을 고려하여 납의 유동응력과 AISI4130 유동응력과의 상사성 결과 하중의 비는 Fig.1과 실제재료의 응력-변형률관계<sup>[7]</sup>를 바탕으로하여 Table1에 나타내었다. Table 1의 수치는 납 모델링 실험에서의 하중추정을 위해 사용되었다. 실제 재료의 실험에서는 성형성의 평가를 더 심한 조건에서 행하기 위하여 AISI4130 보다도 성형성이 떨어지고 화학적, 기계적 성질이 유사한 AISI4340 을 선택하여 실험하였다. 실험은 실제 크기의 1/7모형으로하여 소재를 1000℃로 가열하고 다이틀 300-400℃되게 예열하여 무마찰 상태에서 행하였다.

### 3. 공정의 개발

#### 3.1 공정의 제안

대형 노즐형 제품의 공정을 개발하는 첫 단계로서 먼저 제품의 성형적 특징을 파악하고 다음으로 몇가지 가능한 공정을 제안하였다. 공정개발을 위해 선택된 것은 점진확대노즐로서 단조품의 형상 및 실험에서의 치수를 Fig.2에 나타내었다. 검게 칠한 부분이 최종적으로 요구되는 형상이며 괄호안의 숫자는 모델링실험을 위한 치수를 의미한다. 그리고 설명의 편의를 위하여 연결부 및 노즐부를 그림에서 지시한 대로 약속하였다. 이 형상의 특징은 i) 노즐부의 깊이가 깊고 ii)연결부에 체적이 집중되어 있으며 iii)노즐부가 관통되어 있다는 것이다.

성형을 위해서 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법은 점진적 단조방법에 의해서 평판을 만든 후 하중이 허용하는 범위까지 성형시키고 재가열 및 성형을 수회 반복하면서 최종 형상을 만드는 방법이다. 이 방법은 노즐부와 연결부의 변곡 경계영역에서 인장에 의한 파단이 일어나서 성형이 어려웠다. 이를 해결하기 위하여 여러벌의 다이로써 다단계로 성형시킬 수는 있으나 제품의 크기가 증대되면 프레스 능력의 제한을 받게 되기 때문에 대형의 노즐형 제품을 성형하는 방법으로는 적절하지 못한 것으로 판단된다. 두번째 방법은 Fig.3에 개략적으로 나타내었다. 이 방법을 편의상 점진단조 및 아이어닝방법(Incremental forging and ironing method)이라고 칭한다. 이 방법의 특징은 점진확대노즐의 연결부를 먼저 성형시키고 다음으로 노즐부를 성형시키는 것이다. 노즐부의 성형은 아이어닝 방법을 이용한 복합성형법이다. 세번째 방법은 앞방법과 반대로 노즐부를 먼저 성형시키고 연결부를 나중에 성형시키는 방법이다. 이에 대한 개괄도를 Fig.4에 나타내었다. 이 방법을 편의상 점진적 팽창 단조법(Incremental forging method for expanding)이라고 칭한다. 점진적 팽창단조법은 링단조에 의하여 노즐부를 성형시키고 난 후에 최종제품의 노즐부 내면형상과 동일한 원추형 다이를 사용하거나 또는 그 다이의 일부단면으로써 점진적으로 타격을 가하여 연결부를 성형시키는 방법이다.

#### 3.2 플라스틱 실험 및 공정의 선택

앞 절에서 기술되어진 세가지 방법중에서 첫번째 방법은 하중의 제한성 및 성형성의 문제가 우려되어 플라스틱 실험에서는 제외시키고 나머지 두가지 방법에 대하여 플라스틱의 실험을 행하였다.

점진확대 노즐의 연결부를 성형한 후 아이어닝으로 노즐부를 성형하는 단조방법은 초기시편을 업셋팅한 후에 펀칭에 의해서 중심부를 따내어 환형으로 만든다. 여기서

다음공정의 원활한 수행을 위해 환형의 내부직경이 매우 중요한 요소인데 수 차례의 반복실험을 행하여 외부직경이 약 105mm, 내부직경이 약 60mm정도가 가장 적절하였다. 링 모양의 플라스틱신을 분할 다이로써 상부다이의 회전에 의해 점진적인 성형을 가하여 연결부위를 성형시킨다. 이는 다음 공정인 아이어닝공정을 위한 예비성형체이다. 다음으로 펀치를 이용해서 아이어닝시켰다. 연결부와 노즐부의 적어지는 지점에서 소재의 양이 적은데다가 아이어닝의 비가 크기 때문에 수직방향으로의 힘인 인장력에 의해서 찢어지는 현상이 발견되었다. 이러한 실험결과가 Fig.5에 나타나 있다. 또한 찢어지지 않을 경우에 있어서도 노즐부 끝부분에서 몇 갈래로 갈라지는 현상을 관찰할 수 있었다. 다음으로 링 단조에 의해 노즐부를 성형한 후 점진적 팽창단조법에 의한 연결부의 성형방법을 실험하였다. 실험에서의 가정은 처음의 3작업인 업셋팅, 피어싱, 링단조가 가능한 것으로 하여 생략하였다. 링단조 작업은 현장작업자의 경험과 숙련도에 의존하는 실제 작업상의 문제이고, 이에 대한 연구결과<sup>[6]</sup>에서도 성형이 가능하고 하중에서의 제약없이 가능한 것으로 보고하고 있기 때문에 성형 가능하다는 가정을 설정하였다. 본 연구에서는 다음 단계인 점진적 팽창단조법을 위한 예비성형체로써, 링단조공정에 의한 성형품의 형상결정에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 하면 링단조 공정의 시방서를 작성하고 다이를 설계하는데도 중요할 것으로 기대된다. 따라서 점진확대노즐의 세번째로 제안된 성형방법인 점진적 팽창단조법에서는 최종제품을 성형하는 단계에 초점을 맞추고서 시행하였다. 상부다이는 최종제품의 내부 윗형상과 같은 원추형 모양이고, 하부다이는 노즐부를 포함하는 최종제품의 외곽형상을 따르고 있다. 이때 예비성형체의 연결부 형상은 체중제품의 체적과 단면상에서 균일하게 하였는데 그때 형상은 Fig.6(b)의 처음 그림과 같다. 성형된 형상을 관찰한 결과 노즐부와 연결부의 변곡영역에서 내부로 불룩하게 튀어나온 현상이 생겼음을 알 수 있다. 또한 변곡영역에서 노즐부쪽으로 조금 밀쪽에서 꺾어짐 현상이 나타나곤해서 Fig.6(a)과 같이 제품의 불량도 생기기도 하였다. 이러한 현상을 꺾어진 부위가 축중심으로 향하는 반경방향의 힘을 집중적으로 받아서 일어난 것으로 분석된다. 이의 해결을 위하여 원추형형상의 상부다이를 두께 25mm를 가지는 원추형의 단면부 다이를 점진적으로 회전하면서 성형하였다. 이러한 다이의 교체로 꺾어짐 현상을 줄일 수 있었던 것은 연결부의 재료유동을 노즐부로 흐르게 하던 것을 급힘의 효과를 더 많이 낼 수 있는 유동으로 전환되었기 때문에 가능한 것이었다. Fig.6(b)의 첫 예비 형상은 노즐부와 연결부의 변화되는 부분이 하부다이에 직접적으로 걸려지지 않음으로 해서 재료의 축방향 유동을 촉진시켜 연결부에서의 체적이 부족하고 노즐부가 지나치게 길게 나타난다. 이를 해결하기 위하여 예비성형체를 Fig.6(b)의 두번째 그림과 같이 수정하였다. 수정된 예비성형체에 대한 실험에서는 소재가 하부다이에 걸려지고 재료의 축방향 유동을 줄일 수 있었다. 상부다이를 분할 다이로 사용함으로써 가공시간이 길어짐에 따라 다이로 열손실의 문제는 있으나 하중의 측면에서 큰 장점을 지니고 있기 때문에 상부금형을 이용하여 점진적으로 성형하는 것이 유리하다고 판단된다. 전체적으로 제안된 두가지 공정인 점진단조 및 아이어닝 방법과 점진적 팽창단조법을 비교해보면 장비 및 하중의 제한성 측면에서는 두방법이 큰 문제점은 없었으나, 점진적 팽창단조법이 공정수에서는 늘어나나 성형성에 있어서는 뛰어났다. 따라서 분할된 상부다이를 사용한 점진적 팽창단조법을 점진확대 노즐의 성형을 위한 공정으로 선택하였다.

### 3.3. 공정의 납실험 및 예비성형체

플라스티신 실험에 의해서 선정된 공정에 대해서 납 실험을 실시하였다. 납 실험의 초점은 i) 원추형 및 분할 상부다이에 따르는 유동의 변화 및 분할다이의 폭 결정 ii) 하중의 측정에 의해 실제하중의 측정 iii) 최종의 점진적 공정을 위한 중간성형체의 결정에 있다. 상부다이의 형상을 원추형과 분할다이의 폭이 15mm, 20mm, 25mm인 세가지 형태의 다이로써 실험하였다. 이 때 사용된 원추형 및 분할다이는 플라스티신 실험에서와 형상 및 치수가 같고 재료만 아크릴에서 철로 바뀌었는데 이는 Fig.7에서 보이고 있다. Fig.8은 원추형다이를 사용했을때 상부금형의 변위와 하중의 관계를 나타낸 그래프이다. 하부다이 밑면의 접촉면적이 증대하면서 갑자기 하중이 증대하다가 전면적이 접촉한 후에는 조금씩 증가한 후 최종성형에 달하였다. 다이속도를 0.5mm로 하중을 가했을 때 실제하중을 예측해 보면 900℃에서 약 9100톤 정도가 나온다. 그리고 분할다이의 폭이 각각 15mm, 20mm, 25mm일 때의 타격횟수, 타격깊이, 하중을 Table2에 각각 나타내었다.

최종성형 후 연결부 내부의 성형 형상을 관찰하면  $w=15\text{mm}$ 일 때에는 접힘(folding)이 발생하여 균일하지 못하였고  $w=20\text{mm}$ ,  $25\text{mm}$ 일 때에는 하중을 가할 시 누르는 양의 정확한 제어에 의해서 균일하게 성형할 수 있었다. 폭이 넓어짐으로 인해서 타격횟수의 양을 줄일 수 있었으며 하중에는 큰 차이를 나타내고 있지 않았다. 실제하중을 추정해 보았을 때 900℃에서 약 4100톤( $8.2 \times 495$ ) 정도였다. 그리고 최종적으로 연결부의 높이를 맞추기 위해서 누를 때에는 약 7.3 - 8.2톤 정도였다. 이와 같은 근거로 고려해볼 때 점진적 성형을 위한 하중은 약 4500톤 이하로도 충분히 성형가능한 것으로 사료되어진다.

다이폭에 따른 유동과 최종형상 성형을 위한 중간성형체의 영향을 편리하게 설명하기 위하여 Fig.9와 같이 각 코너점을 a, b, -h와 1, 2 - 9로 표기하도록 한다. 플라스티신의 실험으로부터 중요하게 고려되어야 할, 최종형상의 최종치수 및 요구되는 사항은 i) 8부위가 내부반경방향으로 힘을 받아서 움푹들어가는 현상이 발견되므로  $d_6$ 의 확보가 요구되고 ii) 연결부의 밑면 길이 6-5가 확보되어야 하며 iii) 연결부 원추형상의  $d_3$ 의 확보를 위해서 타격깊이의 제어, iv) 내부가 움푹되어 나오는 현상의 감소( $d_2$ 의 감소)등으로 요약될 수 있다. 상부다이 또는 예비성형체의 형상에 따라서 이러한 요구조건들을 관찰하였다. Fig.10에는 7-8부위에서의 형상과 상부다이에 따른 주요치수들을 비교해 보았다. Fig.10과 같은 형상이 생기는 이유는 전술한 바와 같이 소재에 접촉되어 하중을 가하고 있는 상부와 하부다이의 접촉력에 의해서 모멘트의 힘이 찍어진 부위에서 축중심 내부로 발생하여 들어가는 현상이 일어나며 이러한 현상은 접촉면적이 커져서 단순한 연결부 굽힘의 효과가 적은 다이일수록 커짐을 볼 수 있다. 또, 축방향의 유동(h)도 마찬가지로 굽힘의 척도를 나타내는 중요한 결과로 작용된다. 따라서 폭이 적은 다이를 사용할수록 연결부 성형시 굽힘의 효과가 지배적으로 일어나게 할 수가 있다. 그러나, 지나치게 작으면 타격량이 많아져 가공시간이 길고 연결부 내부에 접힘이 발생할 수 있음을 고려해야 한다. 이때, 예비성형체의 형상은 g-f를 수평의 턱으로 두면 Fig.10의 효과가 뚜렷하게 나타나서 불량요인이 됨도 관찰되어졌다. 그래서 g-f를 경사지게 하였으며 6-5의 길이확보를 위해서는 e-d의 각도를 최대한 경사지게 하여야 하고 d-c의 적절한 길이 확보가 요구되어진다. 예비성형체 e점의 위치가 상부다이의 형상에 따라서 Fig.11과 같이 최종형상에서 나타났다. 곡선은 6점 부근의 모양이다. 또, a-h의 링단조에 의한

두께도 현장에서 성형가능한 두께를 정하여야 한다. 이와 같이 최종형상을 완전히 성형하기위한 여러가지 조건을 고려하여 예비성형체가 결정되어야 한다. 예비성형체의 형상 및 치수가 Fig.12에 나타나 있다. 성형성, 하중, 굽힘효과의 극대화 및 요구되는 치수(특히  $d_0$ , 6-5 등)등을 고려해 볼 때 적당한 다이폭은  $w=20-25mm$  가 적당한 것으로 사료된다. 결정된 다이폭( $w=20mm$ )과 예비성형체로써 최종제품을 성형하기 위하여 타격 패스(stroke pass)에 따르는 타격의 깊이를 다음 순서대로 하였다. [15mm => 8mm => 4mm => 3mm] 이때의 하중은 Table2와 비슷하거나 조금 작아서 문제가 되지 않으나 성형할 시에 타격의 총깊이를 잘 제어하여  $d_0$ 를 주의해서 확보해야 한다. 이상과 같은 조건과 작업 그리고 예비성형체를 이용하여 성형된 최종모양을 Fig.13에 나타나 있다. 이는 요구되는 모든 치수를 만족하고 있다.

### 3.4. 실제재료의 실험

납 모델링실험에 의해서 구해진 예비성형체와 금형의 크기로써 AISI4130강을 고온으로 가열하여 1/7의 축소모형으로 실제 실험을 행하였다. 실험시에 분할다이에 의해 누르는 양이 조금 모자라게하여 노즐경사부의 두께가 두꺼워 졌으나 납실험보다는 성형성이 우수하였다. 이에 대한 최종성형품의 형상 및 단면이 Fig.14에 나타나 있다. 또한 단면에서 단류선이 제품의 단면을 따라 뚜렷이 형성되었다. 제안된 성형공정 방법인 점진적 팽창단조법의 공정 타당성을 확인 하였다.

## 4. 결 론

본 연구는 종래의 길이 늘리기 및 반경늘리기 가공을 위한 링단조가공방법에다 분할원추형 금형을 이용한 점진적 팽창단조법을 첨가시켜 연결부를 지닌 대형 노즐형 제품을 적은 하중으로 효율적으로 성형하는 방법을 개발하는 것이다. 이를 위해 실험적 방법을 이용하였으며 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 점진확대 노즐에 대해서는 링 단조에 의한 중간성형체를 만든후에 점진적 단조에 의한 굽힘팽창작업으로 플라스틱인 및 납의 실험을 행하여 만족할 만한 결론을 얻었다.
2. 이 공정중에 필요한 변수로써 링 단조에 의한 중간 성형체의 크기 결정, 점진적 성형을 위한 상부다이의 폭 결정, 상부다이의 압하량 등의 효과를 납 모델링 실험을 이용하여 결정하였다.
3. 실제재료의 열간 모형실험을 행하여 공정의 타당성을 입증하였다.
4. 개발된 공정으로 대형노즐형단조품을 중형 성형기계로도 성형가능하게 하였다.

공정의 개발이 성공적이었다고 하더라도 플라스틱과 납은 실제재료의 어느 특정온도에 대한 상사를 나타낸다. 따라서 열간작업에서 소재의 냉각에 대한 연구는 충분히 이뤄지지 못했다. 열의 문제를 포함한 실제적인 유동과 힘의 평가등이 연구되어야 할 것이다.

## 5. 참고 문헌

1. Karl H.S., 11th International Forgemasters Meeting, Terni/Spoleto, Italy, (1991), 1/6-6/6.
2. Moore C. H., Pat.NO.US4168619, Apr. 17(1978)

3. 조남춘, 이성호, 홍성식, 이종수, 소성가공학회지, 제2권 제3호(1993), pp.15-26.
4. Dudra S.P., Burte P. and Im Y.T., Research Memorandum 10203, 21m, The Ohio State Uni., (1988)
5. Kotaro Y., Hidehiko T., Tsuneo E., Shunji O., and Junichi I., MTB 91(1974), pp.1-11.
6. Tanaka M., Ono S. and Iwadata T., 116th AIME Annual Meeting(1987), Denver.
7. 이근안, 모델재료를 이용한 대형개방형단조품의 성형에 관한 연구, KAIST, (1992).
8. Nagasako H. and Ogawa H., 11th International Forgemasters Meeting, Italy, (1991), 1/10-6/10.

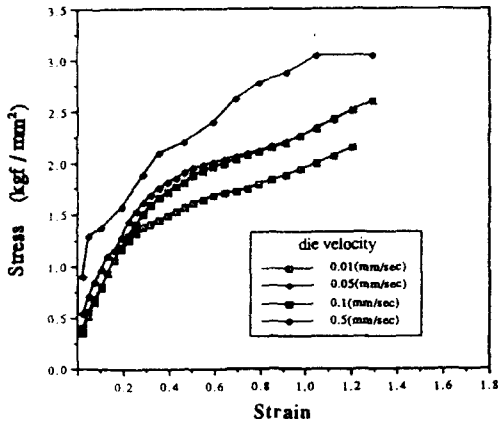


Fig.1. Stress-strain curve of lead at various die velocities.

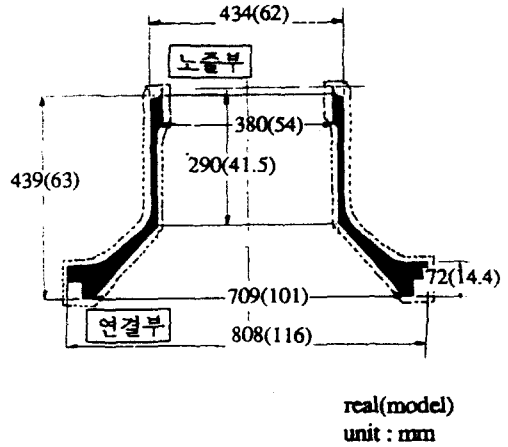


Fig.2. Schematic drawing of converged nozzle shaped forging and dimensions

Table. 1. Load scale factors for estimating the forming load in the lead modelling experiment

Steel (AIS 14130)	800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C
Lead (strain : 0.3)	26.6 kg/mm <sup>2</sup>	20.0	14.1	11.0	7.5
0.01 mm/s	924	695	490	382	261
0.05 "	825	620	437	341	233
0.10 "	758	570	402	313	214
0.50 "	658	495	349	272	186

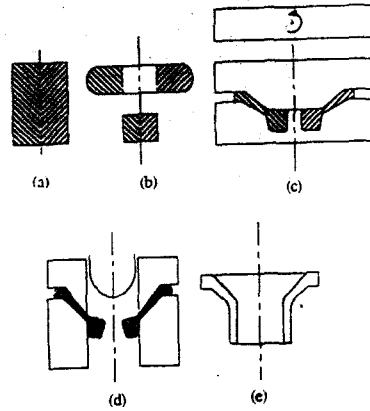


Fig.3. Processes of incremental forging and ironing method

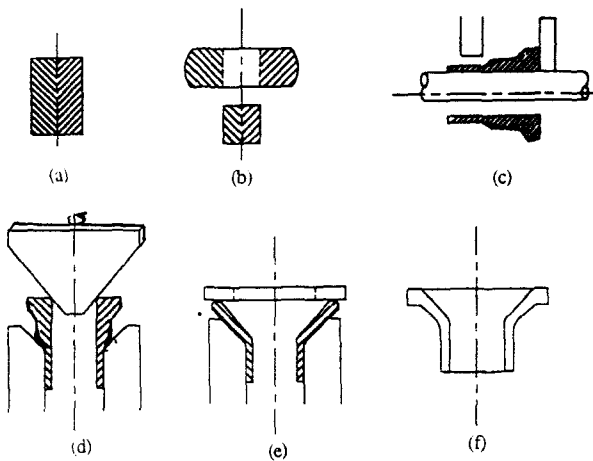


Fig.4. Processes of incremental forging method for expanding



Fig.5. Deformed shape of the converged nozzle using the incremental forging and ironing method in the plasticine modelling experiments.



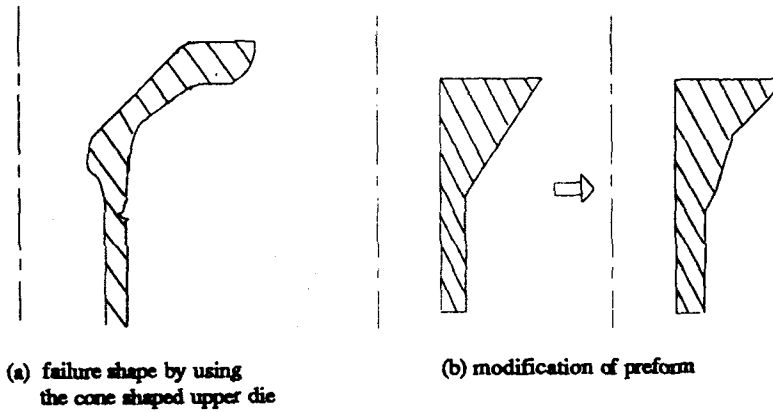


Fig.6. Failure shape by using the cone-shaped upper die and modification of preform for forming to use the incremental forging method for expanding

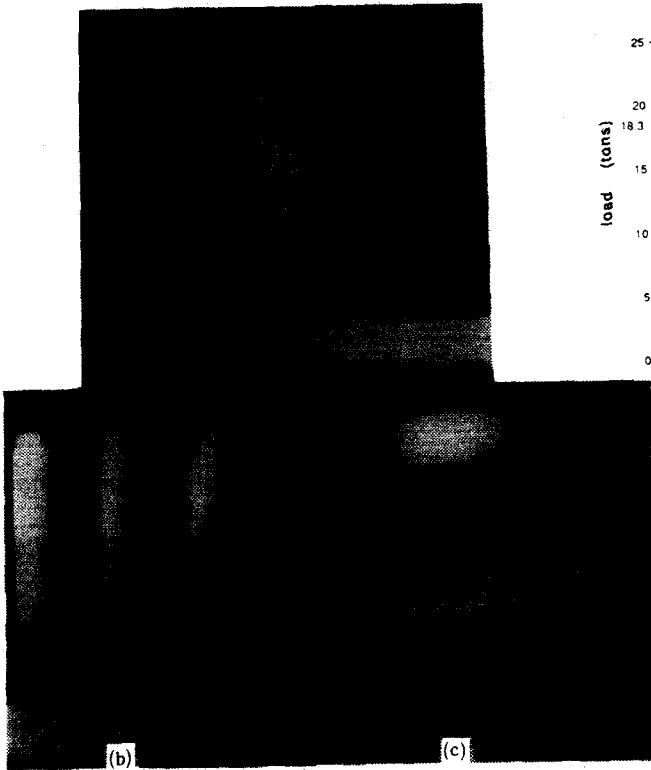


Fig.7. Dies for forming the converged nozzle using the incremental forging method for expanding in the lead experiments.  
 (a) cone-shaped upper die  
 (b) sectional dies for incremental expanding  
 (c) lower die

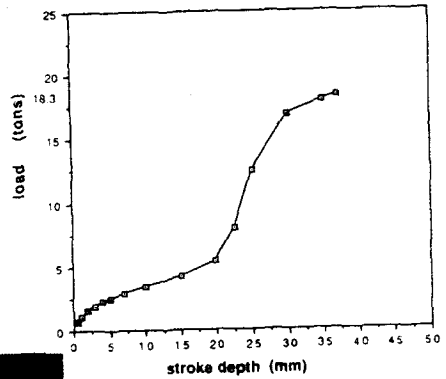


Fig.8. Load curve of the lead experiment with cone-shaped upper die by using the incremental forging method for expanding.

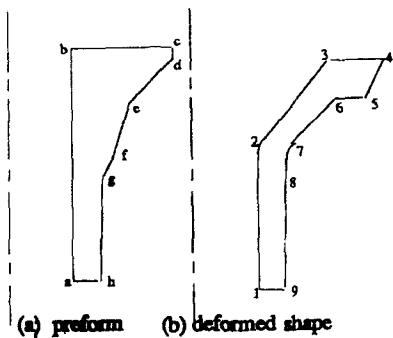


Fig.9. Corner points of preform and deformed shape

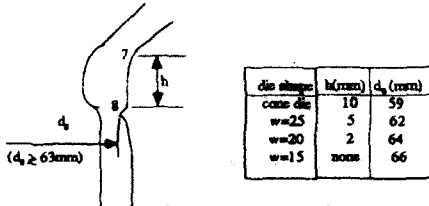


Fig.10. Variation of corner shape with respect to shape and width of upper die

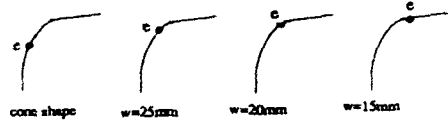


Fig.11. Variation of the position of point e with respect to the upper die shape at the final deformed product

Table.2. Effects of upper die width in the incremental forging method for expanding

die width (mm)	stroke pass	stroke횟수 (회)	길이 (mm)	하중 (tons)
w=15 mm	1	8	10.0	1.3 - 1.6
	2	8	10.0	2.4 - 2.5
	3	12	10.1	4.4 - 4.6
	4	16	10.0	6.1 - 6.4
w=20	1	4	10.0	1.3 - 1.5
	2	6	10.0	2.4 - 2.5
	3	8	10.0	4.5 - 4.7
	4	8	10.0	6.8 - 7.1
w=25	1	4	10.0	1.45 - 1.6
	2	6	10.0	2.4 - 2.57
	3	6	10.0	4.5 - 5.0
	4	8	8.0	6.95 - 7.2

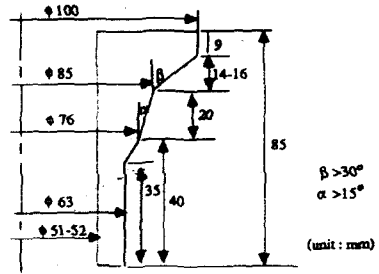


Fig.12 Drawing of preform shape.

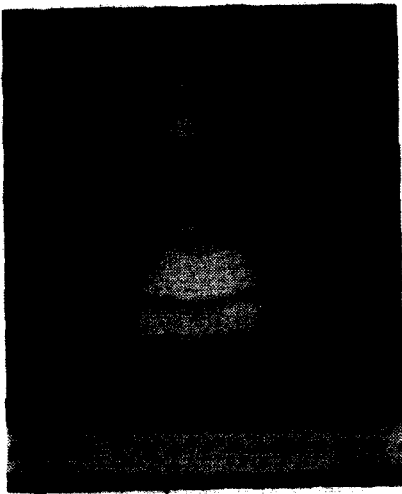


Fig.13. Final shape of the converged nozzle in the lead experiments.

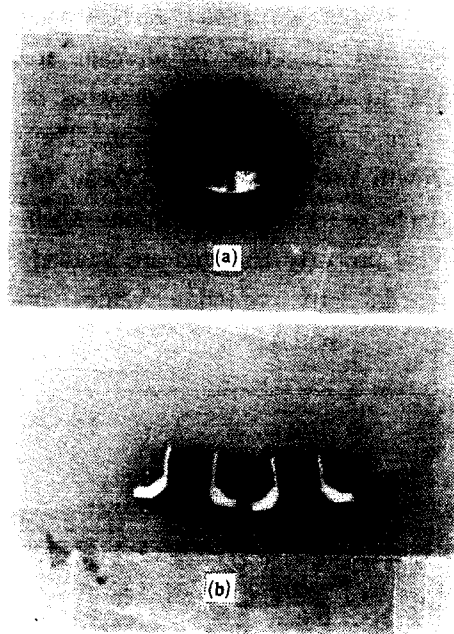


Fig.14. Deformed shape and sectional view in the prototyping experiments of the real material.  
(a) deformed shape  
(b) sectional view