

## 고압콘덴서용 단자핀의 냉간단조 공정설계

김흥석 · 윤재웅\* · 송중호\*\* · 문인석\*\*\*

### Cold Forging Process Design of a Terminal Pin for High-Voltage Capacitors

H.S. Kim, J.W. Youn, J.H. Song, and I.S. Moon

#### Abstract

A terminal pin, which is a part of high-voltage capacitors, has a head section of plate-shaped geometry with 0.8 thickness. The current manufacturing process, in which the head section is welded on the body part, has given wide deviations of part qualities such as geometrical accuracy, mechanical strength and electrical stability. In this paper, a cold forging process sequence was designed in order to produce the terminal pin as one piece. The plate-shaped head section requires an upsetting in the lateral direction of a cylindrical billet, which is followed by a blanking process. The deformed geometry of the upsetting, however, could not be predicted precisely by intuition since metal flows of an axial and a lateral direction of the cylindrical billet would occur simultaneously. Therefore, the geometry of the initial billet was determined by three dimensional finite element analysis in order to avoid defects in blanking process and intermediate forging processes were designed by applying design rules and two dimensional FE analysis. In addition, cold forging tryouts were conducted by using the die sets which were manufactured based on the designed process sequence.

**Key Words** : High-Voltage Capacitor, Terminal Pin, Cold Forging, Process Sequence Design, Three Dimensional Finite Element Analysis, Upsetting

#### 1. 서 론

고압 콘덴서는 고주파 전자기 발전회로의 핵심부품으로서 Fig. 1에 나타난 단자핀 2개가 내부에 삽입된다. 현재 국내에서 제작되고 있는 단자핀은 머리부와 몸통부를 별도로 성형한 후 용접하는 방법으로 생산되는데, 용

접 품질에 따라 제품의 형상정밀도와 기계적 강도, 전기적 안정성 등에 산포가 커져 불량률이 높게 된다. 이에 비해 냉간단조공정을 사용하여 일체형으로 생산할 경우 용접에 따른 품질불안 요인들을 모두 해소할 수 있을 뿐만 아니라 생산효율도 크게 증가시킬 수 있다.

일반적으로 다단계 성형을 요구하는 냉간단조품의 공정설계는 최종제품과 초기소재의 형상 비교를 통하여 중

\* 대구대학교 자동차, 산업, 기계공학부  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
\*\*\* (주)신영스틸텍

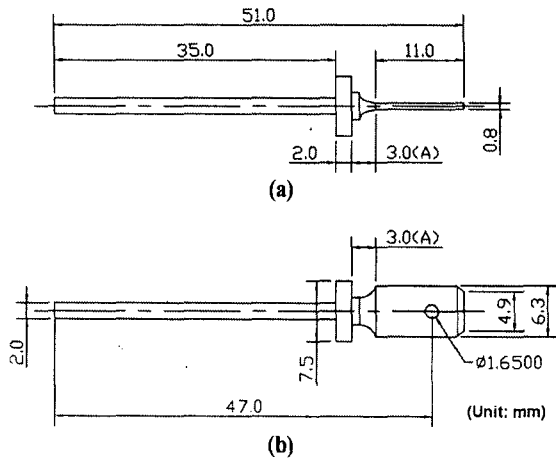


Fig. 1 Drawing of a terminal pin: (a) side view and (b) top view

간성형공정을 배치한 후에 각 단위공정에 대한 설계규칙을 적용하여 중간성형품의 세부치수를 결정하는 방식으로 진행된다.<sup>(1)</sup> 그러나 Fig. 1에 나타난 단자핀의 경우 얇은 사각형상의 머리부를 성형하기 위해서는 전단공정의 일종인 블랭킹(Blanking) 공정이 사용되어야 한다. 따라서 초기소재부터 최종제품까지 일정한 부피를 가정하는 냉간단조공정의 일반적인 설계법이 사용될 수 없으며, 초기소재의 부피를 결정하기 위해서는 블랭킹 공정이 전 단계의 중간 제품형상이 결정되어야 한다. 그러나 블랭킹의 전단계 공정은 원형단면 소재의 측면방향 업세팅(Upsetting)으로서 압축 시 원통형 소재에 대한 길이 방향과 폭방향의 재료유동이 동시에 발생하며, 마찰조건에 따라 상이한 형상으로 변형되기 때문에 업세팅 후의 제품 형상을 직관적으로 예측하는 것이 쉽지 않다.<sup>(2)</sup>

따라서 본 논문에서는 3차원 유한요소해석<sup>(3)</sup>을 이용하여 원형단면 소재에 대한 측면방향 업세팅의 변형형상을 고찰하였으며, 블랭킹 공정에 요구되는 형상치수를 고려하여 중간성형품의 형상을 설계하였다. 설계된 중간성형품의 형상에 축대칭 제품의 냉간단조 설계규칙을 적용하여 블랭킹 이전의 성형공정을 설계하였으며, 2차원 유한요소해석을 통하여 설계된 공정을 검토하였다. 또한 설계된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 금형 및 성형장비를 제작하여 성형실험을 수행하였으며, 시제품에 대한 고찰을 통하여 개발된 성형공정의 유용성을 입증하였다.

## 2. 공정특성 분석 및 성형단계 구상

Fig. 1에 나타난 단자와 같이 제품은 지름이 2.0 mm

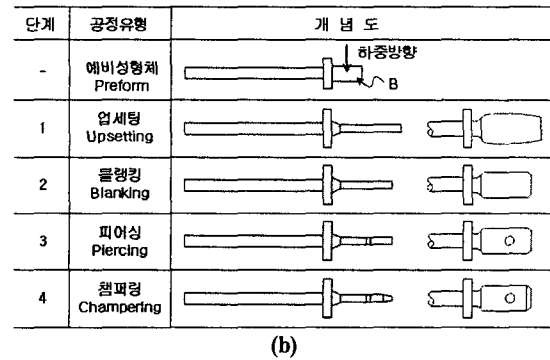
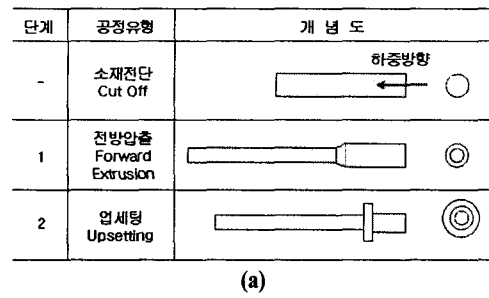


Fig. 2 Schematic diagram of process flow: (a) preform and (b) final forging stage

인 몸통부와 7.5 mm인 몸통부와 목부, 그리고 폭과 길이, 두께가 각각 6.3 mm, 11.0 mm, 0.8 mm인 판형상의 머리부로 이루어져 있다. Fig. 1의 'A'로 표시된 부분은 치수 미지정 부분으로서 길이가 3.0 mm를 만족한다면 성형특성에 따라 전체 형상이 무리스럽지 않은 범위 내에서 자유롭게 치수를 지정할 수 있다. 제품에 사용된 소재는 저탄소강인 S10C이며 성형 전에 인산염피막처리를 하여 윤활성을 향상시키고, 성형 후에는 구리-니켈-주석합금을 6~12 μm 두께로 도금처리 한다.

제품의 몸통부와 목부의 경우 축대칭 형상이기 때문에 일반 핀형상 제품에서와 같이 원통형 소재에 대한 축방향 가압을 통하여 성형이 가능하지만 머리부의 경우 판형상으로 만들기 위해서는 소재 측면에서의 가압이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 전체 성형공정을 축방향 가압이 수행되는 예비성형단계와 측면방향 가압이 수행되는 최종성형단계로 나누었다. 초기소재의 형상은 원통형으로 가정하였으며, 최종제품과의 형상비교를 통하여 대략적인 공정의 흐름을 구상할 수 있었다. 구상된 공정흐름의 개략도를 Fig. 2에 나타내었는데, 예비성형단계에서는 전방압출과 업세팅을 이용하여 몸통부와 목부를 성형하고, 최종성형단계에서는 측면방향 업세팅과 블랭킹, 피어싱(Piercing) 및 챔퍼링(Champering)을 수행하여 머리부를 성형한다. Fig. 2에 나타난 흐름도는 단지 개략적인

공정의 순서로서 세부적인 공정설계규칙을 적용하여 중간성형품의 최종치수가 결정되며, 필요할 경우 공정을 추가 또는 삭제하게 된다.

최종성형단계의 경우 최종제품의 형상과 동일한 치수로 머리부가 성형되도록 세부치수를 결정할 수 있지만, 예비성형단계의 경우 Fig. 2(b)의 'B'로 표시된 예비성형체 머리부의 형상이 결정되지 않았기 때문에 공정의 설계가 어렵다. 이는 블랭킹 공정 시 제거될 소재의 부피가 결정되지 않았기 때문에 초기소재의 형상설계가 불가능하기 때문이다. 따라서 초기소재의 형상과 예비성형단계의 설계를 위해서는 예비성형체 머리부의 형상결정이 선행되어야 하는데, 머리부의 형상에 따라 최종성형단계의 성형 품질이 좌우되므로 예비성형체의 형상설계는 전체공정설계의 핵심이라고 할 수 있다.

### 3. 예비성형체의 형상설계

#### 3.1 공정특성 및 설계기준

예비성형체 머리부의 형상결정을 위해서는 이후에 수행될 측면방향 업세팅 공정과 블랭킹 공정에 대한 특성이 고려되어야 한다. 측면방향 업세팅의 목적은 원형단면의 소재를 측면방향으로 압축시켜 블랭킹 공정에 적합한 판형상으로 성형하는데 있다. 본 제품에 대한 블랭킹 공정 시 가장 문제가 되는 것은 전단면에서 발생하는 버(Burr)로서 이후 피어싱 공정이나 챔퍼링 공정에서 금형에 손상을 입히거나 제품과 금형 사이에 침입하여 머리부의 평탄도를 악화시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 버의 발생을 억제하기 위하여 펀치와 금형 사이의 클리어런스(Clearance)를 정밀블랭킹(Fine Blanking) 수준인 0.5% 이내로 유지하였으며, 성형 시 소재의 진동 및 이동을 방지하기 위한 블랭크 홀더를 설치하였다. 설치된 블랭크홀더의 경우 일정량 이상의 여유폭이 제공되어야 소재의 지지가 충분하게 이루어져 전단면에서 버의 발생을 억제할 수 있다. 따라서 측면방향 업세팅에 의한 변형형상이 충분한 여유폭을 제공할 수 있도록 예비성형체의 머리부 형상이 설계되어야 한다.

블랭킹이나 피어싱과 같은 전단공정에서 제안되는 여유폭은 일반적으로 소재 두께의 1~1.5배 이상이다.<sup>(4-5)</sup> 그러나 본 제품의 경우 머리부의 두께에 비해 제품의 폭과 길이가 비교적 작으며 일반적인 전단공정과는 달리 원소재의 외곽이 직선면이 아니라 압축에 의한 배부름(Bulging)면이 형성될 것으로 예상되었기 때문에 제안된 값보다 큰 여유폭이 요구된다. 또한 길이방향 단부의 경우 폭방향에 비해 인선길이가 짧고 한쪽단만이 편측으로

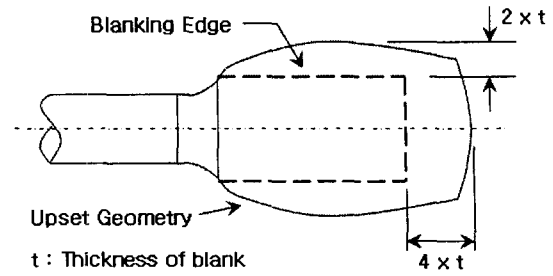


Fig. 3 Holding lengths of the blanking for the head

지지되기 때문에 폭방향에 비해 더 큰 여유폭이 제공되어야 할 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 폭방향과 길이방향에 대해 각각 소재두께의 2배와 4배로 여유폭을 설정하였다.

최종제품 머리부의 폭과 길이는 각각 6.3 mm와 11.0 mm이다. 그러나 최종성형단계의 마지막 공정인 챔퍼링에서 길이 0.8 mm 구간에 대해 10°의 각도로 소재두께가 감소하므로 약 0.15 mm의 길이 증가가 발생한다. 따라서 블랭킹 공정에 의한 머리부의 폭과 길이는 각각 6.3 mm와 10.85 mm가 되며, 소재두께가 0.8 mm임을 고려할 때 Fig. 3에 나타난 여유폭 관계에 따라 측면방향 업세팅에서의 목표치수는 폭과 길이에 대해 각각 9.5 mm와 14.05 mm가 된다.

#### 3.2 측면방향 업세팅의 해석조건

해석에 사용된 금형과 소재의 형상을 Fig. 4에 나타내었는데, 공정의 대칭성에 따라 전체 형상의 1/4만을 고려하였다. 제품의 재질은 저탄소강인 S10C로서 (1)식으로 표현되는 응력-변형률식을 사용하였으며, 금형과 소재 간의 마찰상수는 인산염피막처리 및 단조용 윤활제를 사용할 경우의 조건인 0.16을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 713.1 \bar{\epsilon}^{0.22} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

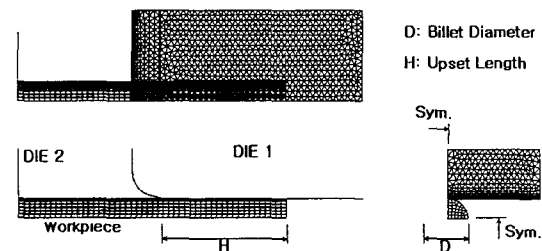


Fig. 4 Analysis model of a lateral-direction upsetting

본 연구에서는 초기소재의 지름과 업세팅이 수행되는 길이의 변화에 따른 변형형상을 고찰하기 위하여 소재의 지름 D와 업세팅 길이 H를 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석이 수행되어야 하는 소재 지름의 범위를 설정하기 위해 예비성형단계의 전방압출 및 업세팅 공정에 대한 설계규칙을 적용하였다. 전방압출에 대한 압출비는 (2)식으로 표현되는데, 일반적으로 성형이 가능한 압출비의 최대값은 75% 이다.<sup>(7)</sup>

$$\frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100(\%) = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \times 100(\%) \quad (2)$$

(2)식에서  $A_0$ 와  $D_0$ 는 각각 성형 전 소재의 단면적과

지름이고,  $A_1$ 과  $D_1$ 은 각각 성형 후의 소재 단면적과

지름이다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 본 제품에서는 초기소재에서 지름 2.0 mm인 몸통부가 전방압출되기 때문에 최대압출비를 고려할 때 (2)식에서 초기소재 지름의 최대값은 4.0 mm로 계산된다. 또한 업세팅의 경우 업세팅 후의 지름이 초기소재 지름의 2.5배를 초과할 경우 제품 표면에 연성과파괴에 의한 균열 발생의 위험이 있다.<sup>(7)</sup> 본 제품의 경우 초기소재에서 지름 7.5 mm의 목부가 업세팅되어야 하므로 초기소재 지름의 최소값은 3.0 mm가 된다. 따라서 사용가능한 초기소재의 지름 범위는 3.0 mm에서 4.0 mm인데, 이 구간에서는 원소재 코일을 지름 0.1 mm의 단위로 제공받을 수 있기 때문에 3.0 mm에서 4.0 mm까지 0.1 mm씩 증가되는 11개의 지름이 고려되어야 한다. 업세팅 길이의 경우 성형 전후의 길이 증가량을 예측하기 어렵기 때문에 8.0 mm에서 14.0 mm까지 0.5 mm 단위로 증가시켜 총 13개의 업세팅 길이를 설정하였다. 따라서 고려되어야 할 소재지름과 업세팅 길이는 총 143개의 조합이 된다.

### 3.3 해석결과 및 형상결정

전술한 바와 같이 고려되어야 할 소재지름 및 업세팅 길이의 조합이 많기 때문에 모든 경우에 대한 해석 수행 시 막대한 시간이 소요되어 공정설계가 비효율적이 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 소재지름 D와 업세팅 길이 H를 각각 가로축과 세로축 상에 배치한 후 해석결과에 따라 조건의 범위를 축소시키는 방법을 사용하였다. 이때 해석의 시작점은 설정된 범위의 중앙에 위치한 조건으로 설정하였다. Fig. 5에 나타

낸 조건표의 경우 시작점은 S0로서 소재지름과 업세팅 길이가 각각 3.5 mm와 11.0 mm인 경우인데, 해석으로

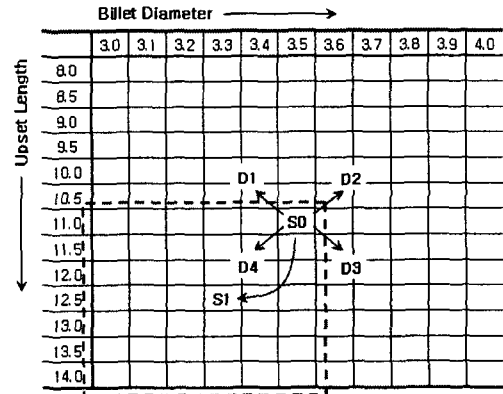
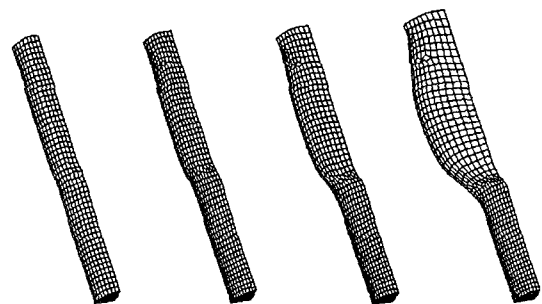


Fig. 5 Analysis cases and solution searching direction

낸 변형형상과 목표형상을 비교하면 이후의 해석 방향을 결정할 수 있다. 만일 해석으로 얻은 변형형상의 폭이 목표치보다 크고 길이는 목표치보다 작다면 초기소재의 지름은 감소해야 하고 업세팅 길이는 증가해야 하므로 해석은 D4 방향으로 진행되어야 한다. 따라서 해석범위는 그림에서 점선으로 표시된 사각형으로 축소되는데, 새로운 해석범위의 중앙부근에 위치한 조건 S1 대해 동일한 과정을 반복한다. 이러한 방법을 사용하면 해석 1회 수행 시 해석범위가 약 1/4 정도씩 축소되기 때문에 총 143개의 조합에 대하여 5~6회의 해석만으로 원하는 목표조건을 탐색할 수 있다.

이상의 방법을 사용하여 해석을 수행한 결과 목표형상에 가장 근접한 경우는 소재 지름과 업세팅 길이가 각각 3.4 mm와 11.0 mm인 경우임을 알 수 있었다. 이 경우에 제품의 폭과 길이는 각각 9.49 mm와 14.17 mm로서 설정된 목표치와 매우 근접함을 알 수 있었다. Fig. 6에 압하량에 따른 소재의 변형형상을 나타내었는데, 길이방향의 소재유동은 압축의 진행에 따라 비교적 일정하게



**Fig. 6 Upset geometries obtained by 3D FE analyses with strokes of 0.3, 0.6, 1.0, and 1.3 mm**  
 진행되지만 폭방향의 소재유동은 성형 후반부에 급속히 증가함을 알 수 있었다. 이상의 해석 결과를 통하여 목 표치를 만족하는 초기소재의 지름과 업세팅 길이를 결정 할 수 있었는데, 예비성형체 머리부의 지름은 해석에서 얻은 초기소재 지름과 동일한 3.4 mm로 설정하였으며, 머리부의 길이는 자유치수 지정부의 길이 3.0 mm를 더 하여 14.0 mm로 설정하였다.

#### 4. 전체 공정의 설계 및 시험성형

##### 4.1 예비성형단계의 공정설계

초기소재의 지름을 예비성형체 머리부의 지름 3.4 mm와 동일하게 설정할 경우 Fig. 2에 나타난 구상도에서와 같이 전방압출을 통하여 몸통부가 성형되며 업세팅을 통하여 접시모양의 목부가 성형된다. 예비성형체의 머리부 형상설계를 위한 유한요소해석 시 이미 한계 압출비와 업세팅 전후의 지름비를 고려하였기 때문에 각 단위공정에 대한 설계규칙의 검토는 불필요하다. 그러나 결정된 초기소재 지름 3.4 mm에 대하여 전방압출비와 업세팅 전후의 지름비를 계산하면 각각 65.4%와 2.2로서 한계범 위 내에 있음을 알 수 있다. 또한 업세팅 공정 시 금형으로 측면이 지지되지 않는 소재의 길이가 지름의 2.3 배를 초과할 경우 좌굴이 발생할 수 있는데, 본 제품의 경우 비구속지정부의 길이는 6.7 mm이며 소재 지름과의 비는 1.97로서 1회의 업세팅 공정으로 성형이 가능하리라 판단되었다. 그러나 본 제품의 경우 제품의 진직도와 동심도가 매우 중요하기 때문에 예비 업세팅 공정을 추가하여 총 2 회의 업세팅을 수행하였다.

이상과 같은 과정을 통하여 설계된 예비성형공정을 Fig. 7에 나타내었으며, 2차원 유한요소해석을 통하여 얻은 소재의 변형 형상을 Fig. 8에 나타내었다. 유한요소해석을 통하여 성형하중과 유효변형률, 유효응력을 고찰한 결과 설계된 공정에 대해 무리없는 성형이 이루어지리라 판단하였다.

##### 4.2 최종성형단계의 공정설계

최종성형단계에서는 측면방향 업세팅 공정을 제외하면 제품의 최종형상과 동일한 치수를 갖는 외곽면과 구멍이 순차적으로 성형되며, 전반적으로는 Fig. 2에 나타난 공정 구상도에 대해 큰 수정없이 세부공정을 설계할 수 있었다. 따라서 최종성형단계는 측면방향 업세팅과 블랭킹, 피어싱 및 챔퍼링 공정으로 이루어지는 총 4 단계 공

이 된다.

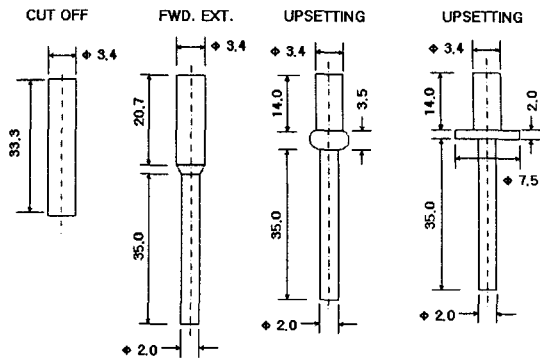


Fig. 7 Designed process sequence of the preform stage

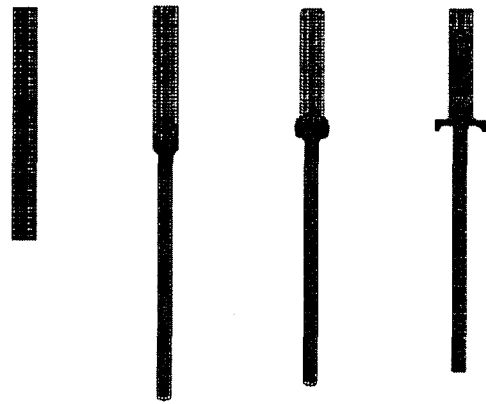


Fig. 8 Deformed shapes obtained by 2D FE analyses for the preform forging stage

##### 4.3 시험성형

설계된 공정에 대하여 금형 및 성형기를 제작하여 성형실험을 수행하였다. 본 제품의 경우 예비성형단계와 최종성형단계의 가압방향이 다르기 때문에 동일 프레스를 사용할 경우 중간성형품의 자동이송 메카니즘이 매우 복잡해지며 이송정밀도가 떨어지게 된다. 또한 전체 성형단계수가 비교적 많기 때문에 동일한 프레스를 사용하는 것보다 각각에 대하여 별도의 기계를 사용하는 것이 유리하리라 판단되었다. 따라서 예비성형단계에서는 고속생산이 가능한 다단포머(Multi-Stage Former)를 사용하여 성형을 수행하였으며, 최종성형단계에서는 유압으로 작동되는 전용 성형기를 별도로 제작하였다. Fig. 9에 금형이 장착된 상태의 전용 성형기를 나타내었으며, Fig. 10에 성형실험을 통하여 얻은 예비성형체와 측면 업세팅 수행 후의 중간성형품 및 최종제품의 형상을 나타내었

다. 그림에 나타낸 바와 같이 설계된 공정을 이용하여

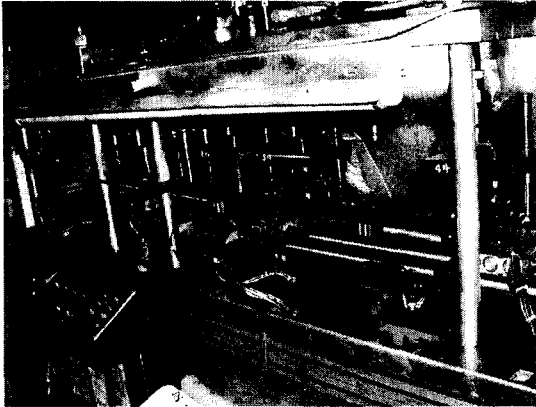


Fig. 9 The manufactured forming machine for the final forging stage

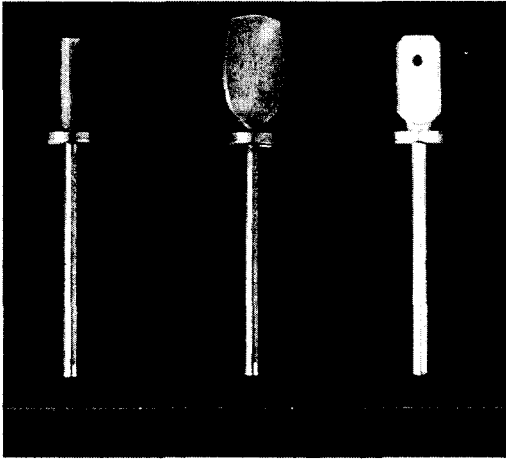


Fig. 10 The intermediate and final forging product of the terminal pin obtained by experiments

불량없이 의도한 변형형상을 얻을 수 있었다. 또한 고압 콘덴서용 단자핀에 적용되는 대표적인 시험기준을 Table 1에 나타내었는데, 시제품에 대한 치수측정 및 성능검사 결과 얻어진 시제품은 요구조건을 모두 만족함을 알 수 있었다.

Table 1 Required testing standards for a terminal pin

#### 4. 결론

본 논문에서는 고압콘덴서용 단자핀에 대한 일체형 냉간단조 성형공정의 설계를 통하여 머리부와 몸통부를 별도로 성형하여 용접하던 기존의 생산방식을 개선하였다.

properties	specifications
straightness	below 3/100 mm
tensile strength	above 15 kgf
capacitance	500 pF±25%
dielectric Loss	below 1.0%

단자핀의 경우 블랭킹을 통하여 머리부의 성형이 이루어 지는데, 소재의 일부가 제거되기 때문에 동일 체적을 가정하는 일반적인 편형상 제품의 설계방법을 적용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 원형단면 소재의 측면방향 업세팅 공정에 대한 3차원 유한요소해석을 통하여 예비성형체 형상을 결정하였으며, 전방압출 및 업세팅 공정에 대한 설계규칙을 적용하여 전체 단조공정을 설계하였다. 또한 금형과 성형기를 제작하여 성형실험을 수행함으로써 설계된 공정의 타당성을 검증하였으며, 치수측정 및 성능검사 결과 실험을 통하여 얻은 시제품이 고압 콘덴서용 단자핀의 요구성능을 모두 만족함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구에서 수행한 유한요소해석에는 한국과학기술원 전산재료성형실험실에서 공개한 CAMPform-2D 및 CAMPform-3D가 이용되었으며, 이에 프로그램의 사용을 허락해주신 임용택 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kim, H.S. and Im, Y.T., 1999, "An expert system for cold forging process design based on a depth-first search", J. Mater. Proc. Technol., Vol. 95, pp. 262~274.
- (2) 日本塑性加功學會, 1990, "鍛造-塑性加功技術シリーズ 4", コロナ社.
- (3) 광대영, 천재승, 김수영, 이근안, 임용택, 2000, "PC 기반 소성가공공정 해석시스템 개발", 한국소성가공학회지, 제9권, 제3호, pp. 233~241.
- (4) 김세환, 이은중, 2002, "금형일반", 대광서림.
- (5) Eary, D.F. and Reed, E.A., 1974, "Techniques of Pressworking Sheet Metal", Prentice-Hall.
- (6) National Machinery Co., 1985, "Part Shape Development and Tool Design for Multi-die Cold Forming", Tiffin.