

본 연구는 한국과학재단과 국민은행의 자금 및 한국금형기술(주)의 장비를 지원받아 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 쾌속 3차원 조형법과 유한요소해석을 연계한 소성가공 금형설계의 동시공학적인 접근방법

박근\*, 윤정환\*, 양동열\*, 조종래\*\*

### Concurrent Engineering Approach to the Die Design of Metal Forming Processes using Rapid Prototyping and Finite Element Analysis

K. Park\*, J. W. Yoon\*, D. Y. Yang\*, J. R. Cho\*\*

#### ABSTRACT

In this work, rapid prototyping and three-dimensional finite element analysis are simultaneously applied to the die design of metal forming processes. Rapid prototyping is a new prototyping technology which produces three-dimensional part models directly from CAD data and has been extensively applied to various manufacturing processes. There are many types of rapid prototyping systems due to their building principles and materials. In this work, Stereolithography Apparatus(SLA), which is the most widely used rapid prototyping system, is introduced to manufacture the die set. For general preparation of STL file, which is the standard input file of rapid prototyping system, mesh data which are used in describing the die surface in finite element analysis are translated so that rapid prototyping and finite element analysis are effectively connected. A die set for spider forging and a clover punch for deep drawing section are manufactured efficiently using SLA prototypes, and metal forming experiments are carried out using them. Comparing the result of experiments with that of analyses, the processes can be predicted and designed successfully.

**Key Words** : Rapid Prototyping(쾌속 3차원 조형법), Stereolithography Apparatus(광조형법), Metal Forming Process(소성가공), Finite Element Method(유한요소법), Concurrent Engineering(동시공학)

#### 1. 서론

오늘날 급격한 산업발전과 수요자의 다양한 기호에 따라 제품의 모델이 다양화되고 형상이 복잡해지고 있다. 또한 국내의 시장에서 제품의 개발기간과 시작기간의 단축이 요구되고 있으며 이에 따른 시장 도입시기 및 제품

개발의 납기 단축이 중요한 문제로 대두되었다. 특히 세계적으로 경쟁이 치열한 자동차, 가전, 항공, 전자산업 등의 분야에서 신속한 제품의 시작과 금형의 제작은 관련 산업체의 시급한 문제로 인식되고 있다. 따라서 제품의 다양성과 시작기간의 단축에 부응할 수 있는 시작 및 금형제작 방법의 기술혁신이 필요하게 되었으며 제품설계

\* 한국과학기술원 기계공학과(정회원)  
\*\* 한국해양대학교 기계공학과

및 개발의 동시공학적 추구가 필수적이다.

동시공학(Concurrent Engineering)이란 높은 품질과 저렴한 원가를 유지하고 동시에 고객의 욕구를 만족시키면서 새로운 제품을 성공적으로 생산할 수 있도록 가급적 제품개발의 초기 단계에서부터 회사의 모든 정보, 자원, 설계경험, 개발능력, 마케팅능력, 생산능력과 판매능력을 모으는 것으로 정의할 수 있으며, 이를 위해서는 제품의 개념, 설계와 생산을 포함하는 개발과정을 동시에 진행할 수 있어야 한다. 동시공학의 목적은 제품개발 기간을 단축시키고 제품의 신뢰도를 높이며 원가 절감을 이룩하는데 있으며, 현재 널리 사용되고 있는 컴퓨터에 의한 설계, 가공, 해석 및 생산의 종합화(CAD/CAM/CAE/CIM)와 직접적으로 연계하여 진행할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 소성가공 금형설계과정의 효율성 향상을 위해 최근 각광받고 있는 쾌속 3차원 조형법(Rapid Prototyping)과 3차원 유한요소해석을 연계한 동시공학 적 시도를 진행하였다. 쾌속 3차원 조형법은 제품을 높이에 따른 2차원 단면 데이터로 분할하여 각각의 단면을 제작하고 이를 적층함으로써 원하는 형상의 제품을 제작하는 시작품 생산방식이다.<sup>(1)</sup> 쾌속 3차원 조형법에는 사용 재료와 적층 방식에 따라 여러가지 공정이 개발되어 있는데 본 연구에서는 이중 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 SLA(Stereolithography Apparatus)를 사용하였다.

현재 미국, 일본 등의 선진국에서 SLA를 응용하여 자동차, 전자, 중공업, 의학 등 각종 분야에서 다양한 기술 개발에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다.<sup>(2,3)</sup> 최근들어 국내에서도 SLA 시스템을 응용한 금형제작기술 개발과 관련된 연구가 진행되고 있으며,<sup>(4,5)</sup> 이러한 추세는 앞으로도 계속될 전망이다. 본 연구에서는 유한요소 격자 데이터를 사용하여 SLA 시작품을 제작하고, 이를 응용하여 성형실험을 수행함으로써 실험과 해석결과를 비교하여 공정 설계에 반영하였다.

## 2. SLA 시작품의 제작 공정

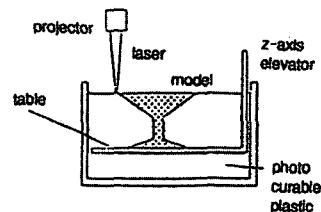
### 2.1 SLA 시스템의 원리

SLA는 특정 파장의 빛에 노출되면 액체상태에서 고체 상태로 경화되는 광경화수지(photosensitive polymer)와 레이저를 사용하여 원하는 형상을 제작하는 방법이다. 이는 1981년 미국 3D systems社에 의해 개발된 이후 실용화 연구를 거쳐 1988년에 본격적으로 보급되어 현재

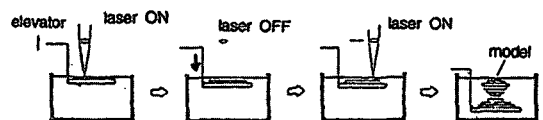
세계적으로 10여개의 회사에서 제작된 500여개의 장치가 보급되어 있다. 본 연구에서는 한국금형기술 주식회사에서 보유하고 있는 SLA-500 시스템(3D systems社 제품)을 사용하였다.

SLA는 레이저 및 컴퓨터, 광경화수지를 응용한 일종의 3차원 인쇄장치로 그 기본 원리는 원하는 3차원 형상의 단면을 높이에 따라 적층하여 입체 형상을 만든다는 점이다.<sup>(6)</sup> 여기서 광경화수지는 특정 파장의 레이저에 노출되면 액체상태에서 고체상태로 경화되는 특성을 갖고 있다. 원하는 제품의 형상을 CAD 시스템에서 3차원적으로 모델링하고 이를 유한한 얇은 층의 형태로 분할하여(소프트웨어적으로 가능) 분할된 단면정보에 따라 광경화수지를 적층하여 원하는 형상의 제품을 제작한다.

Fig. 1의 (a)는 SLA 시스템의 기본 구성을 나타낸다. 용기 안에는 액상의 광경화수지가 담겨 있고, 수직으로 이동가능한 테이블이 경화된 수지를 지지해주며 적층과정에 따라 높이를 변화시켜준다. 한편 상부의 레이저는 X-Y 평면내에서 단면의 형상에 따라 이동하며 표면의 수지를 경화시킨다. Fig. 1의 (b)는 광경화수지의 적층 과정을 나타낸다. 우선 테이블이 한 층의 두께만큼 아래로 이동하고 레이저가 상응하는 단면 형상에 따라 수평이동을 하며 한 층의 경화가 완성된다. 그 다음에 테이블이 한 층의 두께만큼 아래로 이동하고 전단계에서 경화된 수지 위에 새로운 단면이 경화되어 적층된다. 이러한 일련의 과정을 계속 반복해가며 원하는 3차원 형상의 제품을 완성한다.



(a) Schematic diagram of SLA system



(b) Three-dimensional building process

Fig. 1 SLA system

(a) Schematic diagram of SLA system

(b) three dimensional building process

SLA를 사용한 제품 제작 시간은 제품의 두께에 의해 좌우된다. 또한 한 층의 경화 두께에 따라 제작 시간이 달라지는데, 사용한 SLA 시스템은 한 층의 경화 두께를 0.125~0.5mm의 범위 내에서 조절할 수 있으며, 본 연구에서 제작한 제품의 경우 한 층의 경화 두께를 0.25mm로 설정하였다. 이러한 경우 10mm 두께를 경화시키는데 약 1시간 정도 소요되며, SLA 시스템의 규격이 허용하는 범위(500x500mm<sup>2</sup>)내에서 여러개의 제품을 한꺼번에 제작할 수 있어 매우 경제적이고, 특히 복잡한 형상의 제품을 제작할때 기계가공으로 제작하는 경우보다는 훨씬 빠르게 제작할 수 있다.

SLA 시스템을 이용한 시작품 제작은 기존의 기계가공에 의한 제품 제작공정과 비교해볼 때 공구가 들어갈 수 없는 복잡한 내부구조를 가진 제품도 한번의 공정으로 신속하게 제작할 수 있고 비접촉 가공이므로 공구의 교환 및 관리가 필요없어 야간 무인 운전이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 레이저를 사용함에 따라 장비가 비싸다는 단점이 있고 경화된 수지의 수축 및 변형, 표면의 계단형상 등에 의한 정밀도의 저하 등 극복해야할 문제점이 남아있다. 본 연구에서는 사상과 표면처리를 병행하여 시작품의 표면조도를 향상시켜<sup>(6)</sup> 금형 제작에 응용하였다.

### 2.2 유한요소 격자를 사용한 SLA 시작품 제작

현재 세계적으로 상당수의 CAD 소프트웨어가 통용되고 있다. 각각의 소프트웨어는 독자적인 데이터 구조를 갖고 있기 때문에 아직까지도 상호간의 호환성 유지를 위한 표준화 작업이 완벽하게 이루어지지 못한 상태이다. 이에 SLA를 비롯한 많은 패속 3차원 조형 시스템들은 제품의 표면을 삼각형군(triangular facet)으로 표현한 STL 화일을 표준 입력 화일로 사용하고 있으나 여기에는 별도의 화일 번역(translation)과정이 필요하게 된다. 현재 I-DEAS, CATIA, Pro-ENGINEER 등의 일부 상용 소프트웨어에는 이러한 기능이 지원되고 있으나,<sup>(2)</sup> 그렇지 못한 경우에는 화일 번역을 위한 추가적인 번거로움이 수반된다.

일반적으로 소성가공 공정해석을 위한 금형면 묘사방법은 매개변수 패치(parametric patch), 비매개변수 패치(non-parametric patch), 유한요소격자에 의한 방법으로 나뉘어 있다. 이중 매개변수 패치에 의한 방법은 CAD 데이터를 직접 사용할 수 있다는 장점이 있지만, 일반적으로 CAD 시스템마다 지원되는 곡면의 형식이 다를뿐 아니라 이의 전환이 쉽지 않아 그 적용성에 제한이 있고,

또한 복잡한 곡면의 경우 접촉처리시 많은 시간이 소요되어 해석의 효율성이 저하된다. 비매개변수 패치방법은 범용성 측면이나 접촉 처리시에는 유리하나, 매개변수 곡면에 Z-projection 한 후 이를 3차식의 함수로 내삽하여 금형면을 묘사하기 때문에 직벽을 가진 금형면을 묘사하는데는 적합하지 않다는 단점이 있다. 반면에 유한요소격자에 의한 방법은 CAD 데이터로부터 유한요소 격자 분할하는 작업에 다소 시간이 소요되고 정확한 금형면을 묘사하기 위해 많은 격자가 필요하지만, CAD 시스템의 종류에 제한되지 않는다는 장점이 있고, STL 화일로의 전환이 상대적으로 유리하다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 유한요소 격자 데이터를 사용한 STL 화일 작성 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 데이터의 호환성도 높일 뿐 아니라 유한요소해석과 SLA를 사용한 시작공정을 연계시켜준다는 장점이 있다. 이러한 작업을 위해서는 우선 STL 화일의 구성을 파악해야 하는데 그 기본 형식은 Fig. 2와 같다.<sup>(6)</sup> 여기서 NX, NY, NZ는 각각 삼각형 격자의 단위 직교 벡터를, X(i), Y(i), Z(i)는 꼭지점의 좌표를 나타낸다. 즉 3차원의 입체 형상을 삼각형 격자데이터만으로 표현하게 되므로, 별도의 CAD 모델이 없이 유한요소 격자만으로 STL 화일의 작성이 가능하게 된다.

```

SOLID <<WORK1>>
  FACET NORMAL   NX   NY   NZ
  OUTER LOOP
    VERTEX   X(1)  Y(1)  Z(1)
    VERTEX   X(2)  Y(2)  Z(2)
    VERTEX   X(3)  Y(3)  Z(3)
  ENDFACET
  (REPEATED...)
ENDSOLID <<WORK1>>
    
```

Fig. 2 Structure of a STL file

### 3. 유한요소해석의 수식화

본 연구에서는 소성가공 금형 및 공정설계를 위해 유한요소해석을 수행하였다. 우선 자동차의 동력전달용 부품인 스파이더(spider)의 열간단조 해석을 위해 3차원 열점소성 유한요소 해석결과를 사용하였고,<sup>(7)</sup> 박판성형 해석을 위해 강소성 유한요소해석을 사용한 디프드로잉 공

정해석을 수행하였다. 해석시 사용된 이론을 요약해보면 다음과 같다.

### 3.1 3차원 열점소성 유한요소해석

열간단조공정을 해석하기 위해 점소성이론에 바탕을 둔 열점소성 해석을 사용하였다.

이때 응력-변형을 관계식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{\partial E(\dot{\epsilon}_{ij})}{\partial \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (1)$$

여기서 E는 점소성 포텐셜(viscoplastic potential)을 의미한다. 윗 식에 변분정리를 적용하면 다음과 같은 범함수가 얻어진다.

$$\Phi = \int_V E(\dot{\epsilon}) dv - \int_{S_f} f_i v_i dS + K^* \int_V \frac{1}{2} (\dot{\epsilon}_v)^2 dV \quad (2)$$

여기서 K\*는 비압축성 조건을 고려하기 위한 벌칙상수이며 매우 큰 양의 값을 갖는다. 한편 변형중의 온도해석을 위해 다음과 같은 에너지 방정식을 사용하였다.

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

여기서  $q_n$ 은 경계표면에서 수직방향으로의 열유동 벡터(heat flux vector)이며 k는 열전도계수,  $\alpha$ 는 변형에너지가 열에너지로 변환되는 비율이며 본 연구에서는 0.9의 값을 사용하였다.<sup>(8)</sup>

또한 해석과정에서 3차원 격자 재구성을 위해 Body-fitted mapping 기법을 사용하였다. Body-fitted mapping은 Dirichlet 경계조건이 부과된 타원형 편미분 방정식을 수치적으로 풀어서 격자 재구성에 응용하는 방법으로,<sup>(7,9)</sup> 기본 원리는 다음과 같다.

Fig. 3에서 D는 xyz-공간(space)의 단순 연결된 영역(simply-connected region)이고, 이를 uvw-공간 R의 직사각형 영역으로 사상(mapping)시켜 임의의 형상에 대해 3차원 육면체 요소(hexahedral element)를 생성시킨다. 여기서 영역 D의 임의의 점 (x, y, z)은 영역 R의 한 점 (u, v, w)으로 사상되는데 이때 u, v, w는 다음 식의 편미분 방정식을 만족하는 해이다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 u &= f_1(u, v, w) \\ \nabla^2 v &= f_2(u, v, w) \\ \nabla^2 w &= f_3(u, v, w) \end{aligned} \quad (4)$$

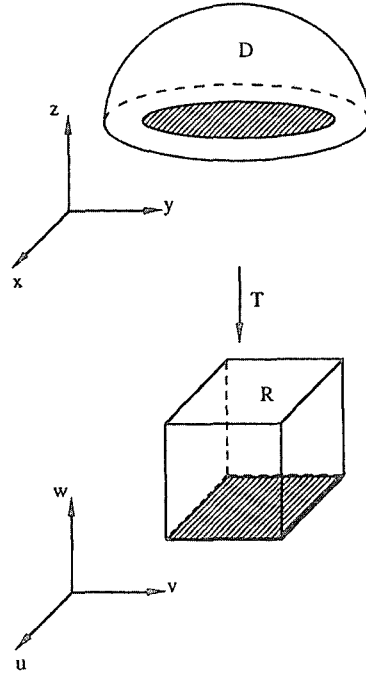


Fig. 3 Physical and transformed regions

여기서  $f_1, f_2, f_3$ 는 uvw-공간에서 정의되는 함수이며, 점간 간격(grid spacing)을 조절하는데 사용된다. 이러한 uvw-공간의 직육면체의 좌표계는 다음 식을 사용하여 구해진다.

$$\begin{aligned} &\alpha_{11}x_{uu} + 2\alpha_{12}x_{uv} + 2\alpha_{13}x_{uw} + \alpha_{22}x_{vv} + 2\alpha_{23}x_{vw} \\ &+ \alpha_{33}x_{ww} + J^2[f_1x_u + f_2x_v + f_3x_w] = 0 \\ &\alpha_{11}y_{uu} + 2\alpha_{12}y_{uv} + 2\alpha_{13}y_{uw} + \alpha_{22}y_{vv} + 2\alpha_{23}y_{vw} \quad (5) \\ &+ \alpha_{33}y_{ww} + J^2[f_1y_u + f_2y_v + f_3y_w] = 0 \\ &\alpha_{11}z_{uu} + 2\alpha_{12}z_{uv} + 2\alpha_{13}z_{uw} + \alpha_{22}z_{vv} + 2\alpha_{23}z_{vw} \\ &+ \alpha_{33}z_{ww} + J^2[f_1z_u + f_2z_v + f_3z_w] = 0 \end{aligned}$$

여기서

$$\alpha_{jk} = \sum_{m=1}^3 \beta_{mj} \beta_{mk} \quad (6)$$

이고, 이때  $\beta_{jk}$ 는 다음과 같은 행렬 M에서 (j, k)번째 요소의 여인자(cofactor)이다.

$$M = \begin{bmatrix} x_u & x_v & x_w \\ y_u & y_v & y_w \\ z_u & z_v & z_w \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한 Dirichlet 경계조건이 식 (5)에 부과되며, 이러한 방법으로 xyz-공간상의 임의의 점을 uvw-공간으로 사상시켜 격자 재구성을 수행한다.

### 3.2 박판성형공정을 위한 강소성유한요소 수식화

재료가  $t_0$ 에서  $t_0 + \tau$  까지 변형할때 응력장이 평형을 이루기 위한 필요충분조건은 가상일의 원리와 최소 에너지 경로 가정에 의해 다음과 같이 유도된다.<sup>(10)</sup>

$$\tau \delta W_{int} = \int_{A^0} \bar{\sigma} \delta(\Delta \bar{\epsilon}) t^0 dA^0 = \tau \delta W_{ext} \quad (8)$$

(8)식에서 시간  $\tau$ 동안 유효 변형을 증분은 주절점 좌표계에서 최소 에너지 경로 가정으로부터 (9)식과 같이 불변량의 함수로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 Hill의 신이방성이론을 사용하여 유효변형을 증분을 얻었다.<sup>(11)</sup>

$$\Delta \bar{\epsilon} = f(\phi_1, \phi_2) \quad (9)$$

본 연구에서는 박막요소의 장점을 유지하면서 굽힘효과를 고려할 수 있는, 절점 스프링을 기본으로 한 굽힘에너지가 보강된 박막요소(bending energy augmented membrane element ; BEAM)를 사용하였다.<sup>(12)</sup> 이것은 한단계 동안의 미소 변형을 가정하고 세절점의 상대변위 개념으로부터 구해진 회전강성행렬을 절점과 관련된 기존의 자유도로 표현하여 박막요소의 굽힘효과를 효율적으로 고려하는 방법으로 그 기본 원리는 다음과 같다.

Fig. 4에서와 같이 한단계 동안의 미소 변형을 가정하면 세 절점의 변위에 대해 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\delta \theta = -\frac{1}{L_1} N_1 \cdot \Delta u_1 - \frac{1}{L_2} N_2 \cdot \Delta u_2 \quad (10)$$

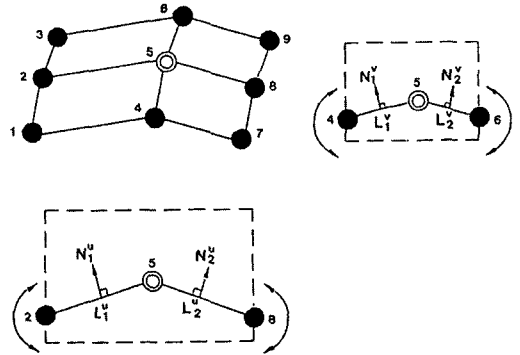


Fig. 4 Schematic description of BEAM element

여기서  $\Delta u_1$ 은 절점 2에 대한 절점 1의 상대변위 벡터이고,  $\Delta u_2$ 는 절점 2에 대한 절점 3의 상대변위 벡터이다.  $L_1, L_2, N_1, N_2$ 는 각각 두 요소의 길이와 수직 벡터를 나타낸다. 회전스프링이 절점 2에 보강되었을 때의 회전 강성을  $K_r$ 이라 하면, 절점 스프링에 의한 회전 굽힘 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta u_i = \frac{1}{2} K_r \delta \theta^2 \quad (11)$$

이식과 같은 세절점의 상대변위 개념으로 부터 구해진 회전 강성행렬은 세절점과 관련된 기존의 자유도로서 나타낼 수 있고, 전체 방정식 수에는 변함없이 된다.

## 4. 유한요소해석과 성형실험의 연계

앞장에서 언급한 유한요소해석의 수행을 위해서는 금형의 3차원적인 묘사가 필요하다. 본 장에서는 2.2절에서 언급한 바와 같이 해석시 사용한 금형 데이터로 SLA 시작금형을 제작하고 이를 이용한 성형실험과 유한요소해석 결과를 비교해보도록 하겠다.

### 4.1 스파이더 열간단조 공정

Fig. 5는 스파이더의 도면이다. Fig. 6은 초기 시편의 형상 및 치수를 나타낸 그림이고, 대칭성을 고려하여 이중 1/16 부분만을 해석하였다. 금형면은 퍼거슨 패치(Ferguson patch)를 사용하여 묘사하였고, Fig. 7에 금형 및 초기 시편의 격자를 나타내었다.

초기 시편의 온도는 1200℃로 설정했고, 금형은 400℃의 온도를 유지한다고 가정하였다. Table 1에 이때의

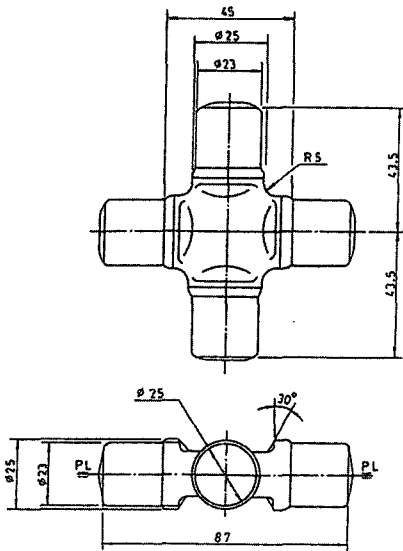


Fig. 5 Dimension and sectional view of a spider

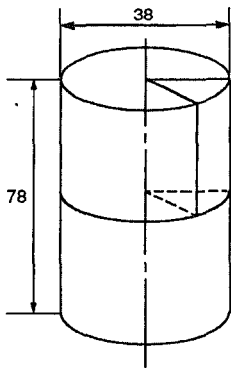


Fig. 6 Geometry of the billet

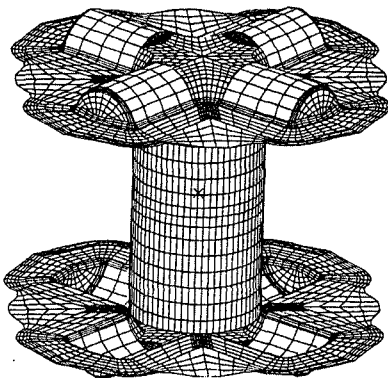


Fig. 7 Die configuration and initial mesh

열전달 특성을 나타내었다. 소재의 재질은 AISI4145이고 이때의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 4.059(\bar{\epsilon})^{0.1342} (\dot{\bar{\epsilon}})^{0.1093} \exp\left(\frac{4603.9}{T}\right) \quad (12)$$

Table 1. Heat transfer characteristics of AISI4145

Thermal conductivity	30.1 W/m K
Specific heat	883 J/kg K
Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Emissivity	0.75
Heat transfer coefficient	to the die: 7.5x10 <sup>-3</sup> W/m <sup>2</sup> K to the air: 6.0x10 <sup>-6</sup> W/m <sup>2</sup> K

이때 금형의 이동 속도는 100mm/sec이고 총 139단계(step)로 해석하였으며 해석 도중 18번의 격자 재구성을 수행하였다. Fig. 8은 유한요소해석을 통해 얻어진 단계별 성형 형상을 나타낸다.

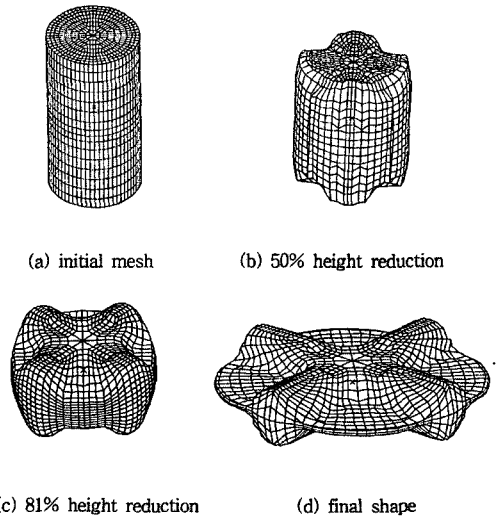


Fig. 8 Deformed shape at each stage

한편 해석시 사용된 금형의 CAD 데이터를 상용 소프트웨어인 I-DEAS를 사용하여 유한요소 격자를 작성하였고(Fig. 9), 2.2절에서 언급한 과정을 거쳐 SLA 수치금형을 제작하였으며 이를 이용하여 플라스틱을 사용한 모델실험을 수행하였다. 플라스틱은 일반적으로 고온에서의 금속의 유동과 흡사하다고 알려져 열간단조의 모

사실함에 많이 사용되고 있으며, 사용된 광경화성 수지 (XB5154)는 아크릴계열의 고분자수지로 기계적 성질이 우수하여 플라스틱인 성형을 위한 수지금형으로 적합하다.<sup>4)</sup>

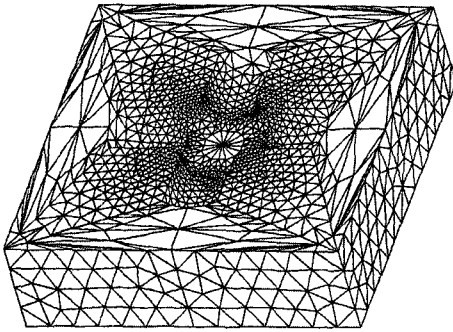


Fig. 9 FE mesh of the die (spider)

Fig. 10은 실험에 사용된 장치로 금형 사이에 원통형의 초기 시편을 장착하여 실험을 수행하였으며, Fig. 11에 단계별 변형형상의 모델실험 결과를 나타내었다. 이를 Fig. 8의 결과와 비교해보면 해석결과와 잘 일치하고 있어 실제의 공정에서도 이와 유사한 변형 형상이 일어날 것으로 예측된다. 또한 최종 단계에서 소재가 금형을 완전히 충만하여 만족스러운 성형이 이루어졌다고 판단된다.

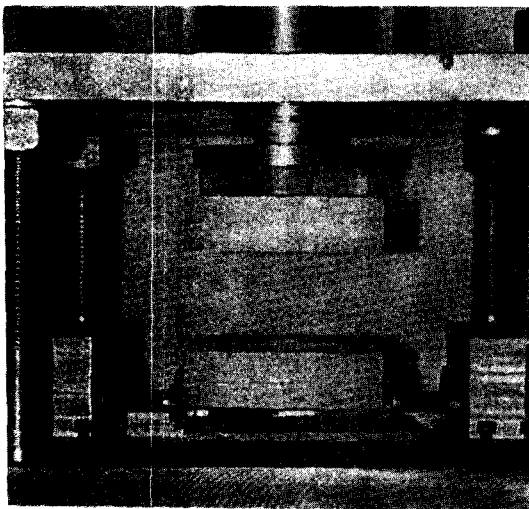
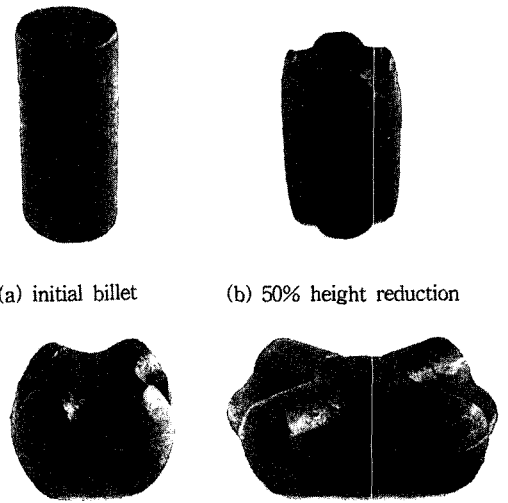


Fig. 10 Experimental setup for plasticine forging



(a) initial billet (b) 50% height reduction  
(c) 81% height reduction (d) final shape

Fig. 11 Deformed shape at each stage

#### 4.2 클로바형 디프 드로잉(deep drawing) 공정

클로바형 펀치의 장축은 60mm, 단축은 40mm이고, 다이의 장축은 62.5mm, 단축은 42.5mm이다. 그리고 펀치목(punch shoulder)과 다이목(die shoulder)에서의 종방향의 곡률반경은 모두 5mm이다. Fig. 12에 유한요소해석을 위한 금형의 형상을 나타내었다. 여기서 금형면은 선형 삼각형 격자를 사용하여 묘사하였고, 이를 사

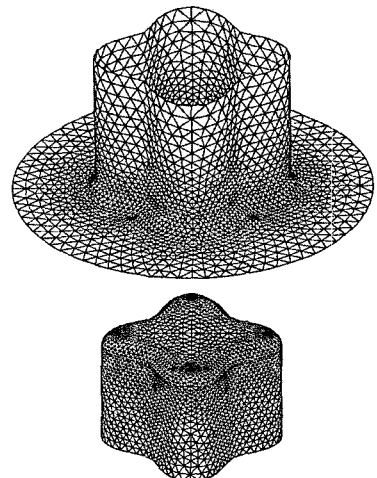


Fig. 12 FE mesh of the punch and die(clover)

용하여 STL 화일로의 전환이 가능하다.

해석은 대칭성을 고려하여 전체의 1/4 부분에 대해서만 수행하였다. 소재는 냉연 강판(cold-rolled steel)을 사용하였으며, 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 60.71(\bar{\epsilon})^{0.216} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (13)$$

Fig. 13은 각각 초기시편의 격자와 중간단계 및 최종단계에서의 변형 형상이다. 여기서 초기시편의 지름은 95mm이고 두께는 0.7mm이다. 수직이방성 계수는 1.66이며, 마찰계수는 0.24로 가정하였다.

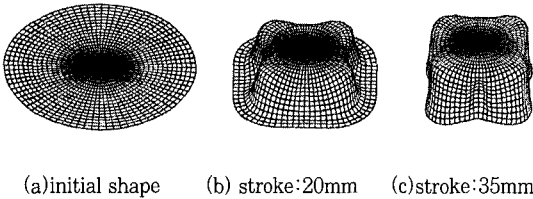


Fig.13 Deformed shape at each stage

한편 작성된 STL 화일을 사용하여 펀치의 SLA 시작품을 제작하고 이를 사용하여 철틀이 함유된 에폭시 수지(RT-432)로 펀치를 제작하였다. 이 수지는 기계적 성질이 우수하고 내마모성이 뛰어나 두께가 얇은 박판성형용 펀치로 사용이 가능하다(Table 2). Fig. 14는 원래의 강재 펀치와 SLA 시작품, 그리고 이를 사용하여 제작된 에폭시 펀치이다.

Table 2. Mechanical property of RT-432

Compressive strength	10 - 12 kgf/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	6- 8 kgf/mm <sup>2</sup>
Impact strength	4.5 - 5.5 kgf/mm <sup>2</sup>

Fig. 15는 실험시 사용한 150톤 유압 프레스와 장착된 금형세트이고 여기서 블랭크홀딩력의 조절을 위해 스프링형태의 블랭크를 사용하였다. Fig. 16은 단계별 성형형상으로 Fig. 13의 결과와 비교해볼 때 형상이 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 최종단계에서도 에폭시 펀치 및 재료의 파단이 일어나지 않아 제안된 방법에 의한 성형이 성공적으로 이루어진 것으로 판단된다.

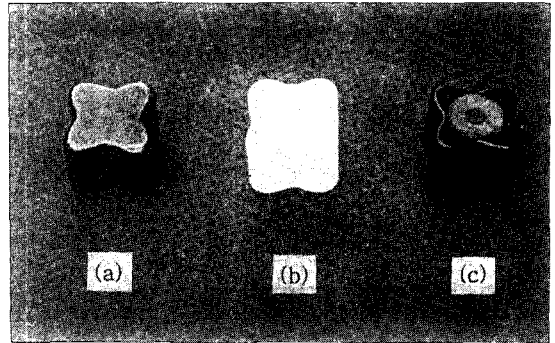


Fig.14 Clover punch products  
(a) steel punch (b) SLA prototype (c) Epoxy punch

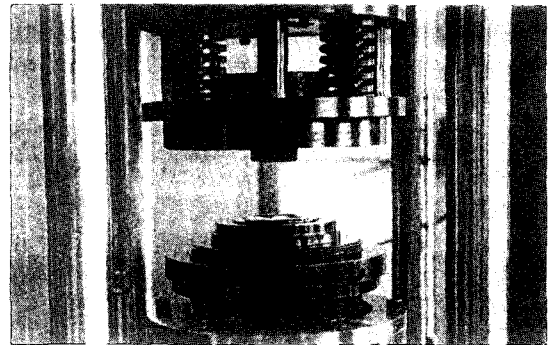


Fig. 15 Experimental setup for deep drawing

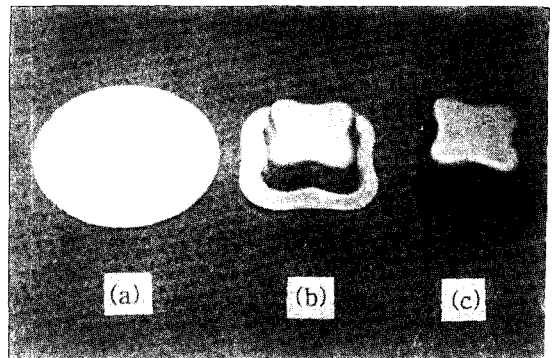


Fig. 16 Deformed shape at each stage  
(a) initial shape (b) stroke:20mm (c) stroke:35mm

## 5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석과 고속 3차원 조형법을 응용한 실험적 방법을 연계하여 소성가공 금형설계에 동시공학적으로 적용하였다. 이러한 연구결과를 종합적으로 정리해보면 다음과 같다.



(1) SLA 시스템을 도입하여 기본 원리 및 특성을 고찰하고, 유한요소격자를 사용하여 별도의 CAD 모델링 없이 STL 화일을 작성하여 SLA 시작품을 제작할 수 있는 시스템을 구축하였다.

(2) 스파이더의 열간단조 공정의 설계를 위해 3차원 열접소성 유한요소해석을 수행하였고, 유한요소 격자로부터 SLA로 수치금형을 제작하여 플라스틱인 모델실험을 수행하여 결과를 비교하였다.

(3) 클로바형의 디프 드로잉 공정의 설계를 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였고, 펀치의 격자 데이터를 사용하여 제작된 SLA 시작품을 사용하여 예폭시 펀치를 제작하였으며, 제작된 금형으로 실험을 수행하고 해석결과와 비교하였다.

이상으로 본 연구에서는 해석과 실험결과에서 얻어지는 변형 형상과 금형 층만 여부 등을 비교하여 공정을 예측할 수 있었다. 이밖에도 계측 기술과 연계하여 변형을 및 응력분포, 성형하중, 금형의 파손 여부 등을 실험적으로 측정하고, 이러한 결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 보다 다각적인 공정의 설계가 가능할 것으로 전망된다.

### 참 고 문 헌

1. 양동열, "쾌속 3차원 조형법의 소개와 쾌속 금형제작에의 응용", 쾌속 3차원 조형 및 금형기술혁신 심포지움, pp. 1-14, 1995.
2. 丸谷洋二, "광조형 시스템의 기초, 현황, 문제점", 型技術, Vol. 5, No. 12, pp. 2-7, 1992.
3. D. Deitz, "Stereolithography Automates Prototyping", Mechanical Engineering, Vol. 112, Feb., pp. 34-43, 1992.
4. 박근, 신민철, 양동열, 조종래, 김종수, "모델재료와 SLA 시금형을 이용한 터빈 블레이드 열간단조 공정의 모사실험", 한국소성가공학회지 제 4권 제 4호, pp. 335-344, 1995.
5. 박근, 이상찬, 정준호, 양동열, 윤재륜, "쾌속 3차원 조형법을 이용한 시작기술 및 시작금형 제작기술 개발", 대한기계학회논문집(A) 제 20권 제 5

- 호, pp. 1582-1589, 1996.
6. W. J. Lee, Y. H. Lee and Y. S. Hong, "Geometric Conversion Procedure for Rapid Prototyping System", J. of Design and Manufacturing, Vol. 2, pp. 83-92, 1992.
7. D. Y. Yang, J. R. Cho and N. K. Lee, "3-D Finite Element Simulation of Complicated Hot Forging Processes using a New Remeshing Scheme Based on Body-Fitted Mapping Technique", ICTP, pp.1255-1260, 1993
8. R. Hill, "New Horizon in the Mechanics of Solids", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 5, 1, pp.66, 1956
9. C. W. Mastin and J. F. Thompson, "Transformation of Three-Dimensional Regions onto Rectangular Regions by Elliptic Systems", Numer. Meth., Vol. 29, pp. 397, 1978.
10. J. W. Yoon, I. S. Song, D. Y. Yang, K. Chung, and F. Barlat, "Finite Element Method for Sheet Forming Based on an Anisotropic Strain-rate Potential and the Convected Coordinate system", Int. J. Mech. Sci, Vol. 37, No. 7, pp. 733-752, 1995.
11. W. J. Chung, Y. J. Kim, and D. Y. Yang, "Rigid-plastic Finite Element Analysis of Hydrostatic Bulging of Elliptic Diaphragms using Hill's New Yield Criterion", Int. J. Mech. Sci, Vol. 31, pp. 193, 1989.
12. D. J. Yoo, I. S. Song, D. Y. Yang, and J.H. Lee, "Rigid-plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes using Continuous Contact Treatment and Membrane Elements Incorporating Bending Effect", Int. J. Mech. Sci., Vol. 36, No. 6, pp. 513-546, 1994.