

## 준축대칭 제품의 냉간단조 공정설계 및 금형설계 자동화 시스템 개발

박종옥\*, 이준호\*, 정성윤\*, 김철\*\*, 김문생\*\*

### An Automated Process Planning and Die Design System for Quasi-axisymmetric Cold Forging Product

Jong-Ok Park\*, Joon-Ho Lee\*, Sung-Yuen Jung\*, Chul Kim\*\*, Moon-Saeng Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper deals with an automated computer-aided process planning and die design system by which designer can determine operation sequences even if they have a little experience in process planning and die design of quasi-axisymmetric cold forging product by cold former working. The approach to the system is based on knowledge-based rules and a process knowledge base consisting of design rules is built. Knowledge for the system is formulated from plasticity theories, empirical results and the empirical knowledge of field experts. Programs for the system have been written in AutoLISP for the AutoCAD using a personal computer. An attempt is made to link programs incorporating a number of expert design rules with the process variables obtained by commercial FEM softwares, DEFORM and ANSYS, to form a useful package. The system is composed of three main modules and five sub-modules. The process planning and die design module considers several factors, such as the complexities of preform geometry, punch and die profiles, specifications of available cold former, and the availability of standard parts. As the system using 2D geometry recognition is integrated with the technology of process planning, die design, and CAE analysis, the standardization of die parts for wheel bolt requiring cold forging process is possible. The developed system makes it possible to design and manufacture quasi-axisymmetric cold forging product more efficiently.

**Key Words** : Die Design(금형설계), Cold Former(냉간포머), Process Planning(공정설계)

#### 1. 서론

오늘날의 생산시스템에서는 산업계가 직면하고 있는 생산의 다양화, 합리화, 효율화, 숙련 기능인의 부족, 노동 가치관의 변화 등에 대처하기 위해 생산시스템의 자동화가 필연적인 과정이며, 이를

위해 컴퓨터 기술의 이용이 요구되어진다. 냉간단조제품의 공정설계에 컴퓨터를 응용한 최초의 연구발표는 Noack<sup>(1)</sup>이 1973년에 축대칭 냉간단조제품의 공정설계 및 비용계산을 위한 프로그램을 개발하면서 시작되었다. 1977년 Lengyel<sup>(2)</sup>은 컴퓨터를 이용하여 여러 가지 냉간단조 공정들중에서 최적의 공정을

접수 2001년 6월 5일

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

선정해 내는 방법을 제안했다. 1980년대에 들어 Badawy<sup>(3)</sup> 등은 간단한 축대칭 냉간단조품에 대한 공정설계 전문가시스템인 FORMNG를, Altan<sup>(4)</sup> 등은 업세팅 및 전방압출을 고려한 공정설계용 전문가 시스템 FORMEX를, Bariani<sup>(5)</sup> 등은 공정설계, 비용계산 및 다단계공시 작업시간을 예측하는 냉간단조 공정설계 전문가 시스템을 개발했다. 그러나, 이런 시스템들이 사용자의 요구를 충족시키기 위해서는 먼저 실제 생산현장에서 적용이 용이하고 비용이 저렴해야 하며, 기존의 개발된 시스템들과 인터페이스를 할 수 있도록 범용성이 있어야 한다. 또한 개선된 기술과 경험들이 쉽게 통합될 수 있도록 유연성(Flexibility)을 가져야 한다. 따라서 본 연구에서는 숙련된 기술자의 경험, 축적되어온 관련 연구결과, 소성가공이론, 유한요소해석을 통한 최적의 공정변수로 기술 지식베이스를 구축한 후, 컴퓨터를 이용한 준축대칭 제품의 냉간단조 공정 및 금형설계 자동화 시스템을 개발했다. 공정설계 모듈에서 자동으로 창출된 공정도면의 타당성을 소성가공 해석용 툴인 DEFORM을 이용하여 검증하였고, 산업체에서 행해지고 있는 공정설계의 해석결과와 비교하였으며 금형설계 모듈에서 자동으로 창출되는 금형도면에 따른 금형 강도의 평가를, 구조해석용 툴인 ANSYS로 금형의 안정성을 검토하였다. 개발된 시스템은 현장경험이 부족한 초보자라도 쉽게 공정 및 금형설계를 수행할 수 있고, 신규 모델의 준축대칭 제품의 냉간단조 공정 및 금형설계 시간을 단축시켜 수요자의 요구에 능동적으로 대처할 수 있다.

## 2. 시스템의 구성 및 작동원리

본 연구에서는 AutoCAD 환경하에서 수행되는 API(Application Programmer Interface)인 AutoLISP 언어를 이용하여 준축대칭 제품 제조를 위한 공정 및 금형설계 자동화 시스템을 구축했다. 시스템은 입력 및 형상처리 모듈, 공정설계 모듈, 금형설계 모듈로 구성되었으며, 이에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

사용자가 제품에 대한 치수 및 공차와 재질을 프로그래밍 대화 상자 기능(DCL : Dialog Control Language)을 통해 대화상자에 입력하면, 입력 및 형상처리 모듈에서는 제품을 자동으로 인식하고, 소

재의 물성치와 공정 설계시 요구되는 성형 한계치를 데이터베이스로부터 자동으로 추출하여 공정설계 모듈에 전달한다. 공정설계 모듈에서는 인식된 제품에 대해 소재직경을 계산하기 위한 기준이 되는 부분을 선택하여 공정설계규칙에 의해 가공 가능한 공정도면을 창출시키고, 그 결과를 금형설계 모듈에 넘긴다. 금형설계 모듈에서는 자동적으로 창출된 공정도면의 정보를 가지고 예비성형체 수정, 금형인서트 설계, 보강링 설계 부모들을 통하여 금형도면을 자동으로 창출시킨다. 시스템을 구성하는 각 모듈의 기능적인 설명을 아래에서 상세히 다루고자 한다.

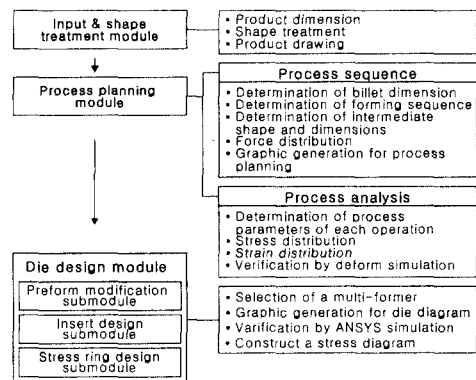


Fig. 1 Configuration of the system

### 2.1 입력 및 형상처리 모듈

#### 2.1.1 입력 부모들

입력 부모들은 냉간 가공될 제품의 재질과 치수 및 공차를 입력하는 모듈로서, 소재 리스트에서 사용자가 원하는 소재의 규격을 선택하면 하중 계산에 이용될 소재의 물성치와 공정설계시 요구되는 성형 한계치가 데이터 베이스로부터 자동으로 입력된다. 제품의 각 부분이 변수로 처리되어 화면상에 나타난 최종형상의 치수와 공차를 입력함에 따라 크기가 결정된다. 입력될 제품의 치수는 직경(diameter), 높이(height), 경사각(angle), 필렛반경(filet radius), 제품의 각 치수에 대한 + 공차량(positive tolerance) 및 - 공차량(negative tolerance)이다.

#### 2.1.2 형상처리 부모들

사용자가 제품의 치수를 입력시키면 형상처리

부모물에서는 제품의 형상 데이터를 설계에 용이한 수치 데이터로 변환시킨다. 변환된 수치 데이터로부터 형상에 관한 데이터를 찾아내어 각단의 변수 리스트를 구성한 후 자동적으로 인식한다.

**- 도면요소 표현**

DCL에 입력된 제품의 치수는 다음과 같은 도면요소표현을 갖는 직선(line)과 원호(arc)를 이용하여 제품단면의 외각형상을 표현한다. 단, 중심점은 도면요소가 원호인 경우이다.

("LINE" Sp Ep)

("ARC" Sp Ep Cp)

여기서, Sp(시작점):(xs ys zs), Ep(끝점):(xe ye ze), Cp(중심점):(xc yc zc)을 나타낸다.

**- 기본형상(basic geometry) 표현**

제품의 형상은 Fig. 2와 같이 중심부분인 외형과 중공부분인 내형으로 구분된다. 외형 및 내형의 높이에 따라 윗부분부터 단수번호를 지정한다.

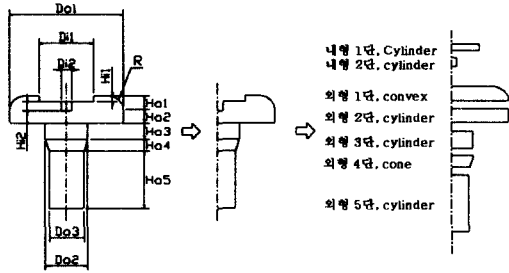


Fig. 2 Representation of basic geometry

제품단면은 원통(cylinder), 원추(cone), 오목원추(concave) 및 볼록원추(convex)이고 헤드부의 특수형상인 육각 볼트형(hexagon head bolt), 플랜지 볼트형(flange bolt) 등과 같은 형상의 리스트로 이루어졌으며, 각 단의 기본형상은 높이, 외경, 내경, 필렛/코너반경 및 오목/볼록원추반경 등의 기하학적 특성을 가진다.

도면요소표현을 통해 기본형상으로 변환되는 각단의 변수의 리스트는 다음과 같다.

(list n (bg h<sub>j</sub> d1<sub>j</sub> d2<sub>j</sub> r<sub>j</sub>))

여기서, n:외형단수, bg:각 단의 기본형상 (cy-원통, cn-원추, cc-오목원추, cv-볼록원추, hb-육각볼트형, fb-플랜지볼트형), h:높이, d1:상부직경, d2:하부 직경, r:필렛/코너 반경 및 오목/볼록 원추반경, j:단 이들은 규칙 및 데이터 베이스를 공유한 각 모듈에

서 프로그램을 수행시키기 위하여 사용된다.

**2.2 공정설계 모듈**

공정설계 모듈은 공정순서를 결정하는 모듈로서, 설계자동화를 위하여 기본형상표현으로 변환된 리스트를 다음과 같이 각 단의 형상리스트로 재구성한다.

(list n (bg h<sub>ij</sub> d1<sub>ij</sub> d2<sub>ij</sub> r<sub>ij</sub>))

여기서, n:외형단수, bg:각 단의 기본형상 (cy-원통, cn-원추, cc-오목원추, cv-볼록원추, hb-육각볼트형, fb-플랜지볼트형), h:높이, d1:상부직경, d2:하부 직경, r:필렛/코너 반경 및 오목/볼록 원추반경, i:공정, j:단

각 공정 단계마다 주어지는 공차와 예비업세팅시 원추형 예비성형체의 원추각을 입력하면, 이모듈에서는 기본 형상 표현에 의한 기하학적 특성과 공정설계 규칙을 이용하여 소재로부터 최종제품까지 결합이 없는 공정순서, 공정수, 중간단계의 기하학적 형상 및 작업 방법 등을 결정된 후 공정도면을 창출한다.

**2.3 금형설계 모듈**

금형설계를 위해서는 공정설계 모듈에서 작업한 최종적인 제품의 형상 정보가 필요하다. 제품의 형상 정보가 공정설계 모듈로부터 금형설계 모듈로 이동되어 금형설계를 수행하는 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 성형공정 중 금형설계의 대상이 되는 공정을 선택하여 해당 공정의 형상 정보를 읽고 새로운 작업 공간으로 읽어들이는 공정의 형상정보를 가져와 90° 회전시킨다. 그후 선택한 포머에 맞는 금형설계 및 보강링 설계를 자동으로 수행한다.

금형설계 모듈은 창출된 공정도면에 대해 예비성형체 수정 부모물, 금형인서트 설계 부모물, 보강링 설계 부모물을 통하여 최적 분할비, 최대허용내압, 간섭량, 반경 및 접선방향 응력등의 금형설계에 필요한 최적의 설계변수값 계산하여 이를 토대로 금형 도면을 자동적으로 창출시킨다. 금형설계 모듈을 구성하는 각 부모물의 기능적인 설명을 아래에서 다루고자 한다.

**2.3.1 예비성형체 수정 부모물**

예비성형체 수정 부모물은 창출된 공정설계 도면의 각 예비성형체를 선택하여 수정하는 모듈로서

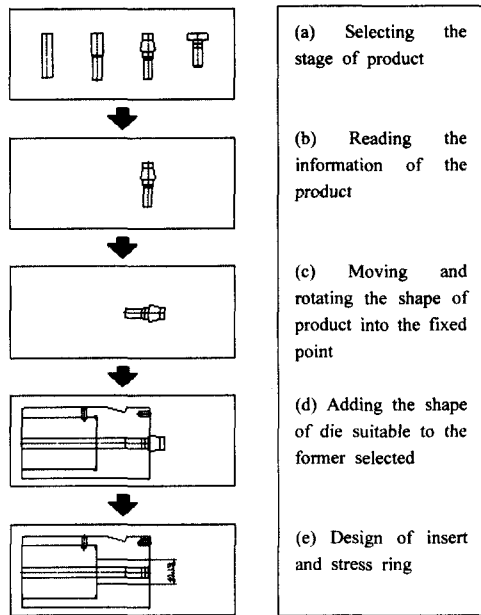


Fig. 3 Transference of shape information from the process planning module to the die design module

수정은 미소요소(단과 단 사이의 라운드량 등)에 국한된다.

### 2.3.2 금형인서트 설계 부모들

금형인서트 설계 부모들은 공정설계 모듈에서 창출된 공정도면에 대한 정보를 가지고 빠른 시간 내에 정확한 금형인서트를 설계하는 모듈이다. 금형인서트 설계를 위해 원하는 공정단계를 선택하면, 각 공정을 수행할 수 있는 다단 포머의 종류가 데이터 베이스로부터 제시되고, 이들 가운데 사용자가 원하는 포머를 선택하여 선택된 포머의 성능에 관한 값들과 제품의 외형치수들을 통해서 금형인서트를 설계한다.

### 2.3.3 보강링 설계 부모들<sup>(6,7)</sup>

보강링 설계 부모들은 금형 수명의 연장과 비용 절감을 위해 보강링을 설계하는 모듈로서, 사용자가 원하는 공정단계, 인서트의 내경, 보강링의 개수, 인서트와 보강링의 재질을 입력하면, 입력된 보강링의 개수와 재질에 따른 최적의 분할비, 인서트

의 내·외경, 반경 및 접선방향 응력, 최대허용내압과 간섭량을 자동적으로 계산한다.

## 3. 설계규칙

### 3.1 성형성 및 결함 판정조건에 대한 규칙

규칙1) 나사부와 나사부 상단의 압출비가 18%이하인 경우에는 전방압출과 예비업세팅을 동시에 수행할 수 있다.

규칙2) 재질에 따른 성형 한계값은 데이터 베이스로부터 구한다.

규칙3) 중실 변형률(SS)이 한계 비구속 변형(LSOS)보다 작으면 비구속압출로 성형한다.

### 3.2 공정순서 결정에 대한 규칙

규칙4) 결정된 소재직경으로부터 최종제품을 만들기 위해서 소재직경보다 작은 제품직경은 압출공정을 한다.

규칙5) 결정된 소재직경으로부터 최종제품을 만들기 위해서 소재직경보다 큰 제품직경은 업세팅공정을 한다.

규칙6) 중실제품의 성형순서는 압출공정, 업세팅공정이며, 규칙 1에 해당하는 경우는 이들을 동시에 성형한다.

규칙7) 중실 업세팅 직경비(ULDR) ≤ 한계 중실 업세팅 직경비(LULDR) 이거나 ULDR > LULDR이고 업세팅되어서 만들어질 직경이 소재직경의 1.3배를 초과하지 않으면 한번에 가공이 가능하나 준축대칭 볼트제품의 성형을 위해서는 예비 업세팅 공정을 거친다.

규칙8) ULDR > LULDR일 경우 업세팅되어서 만들어질 직경이 소재직경의 1.3배를 초과하지 않으면 한번에 가공이 되며, 그렇지 않으면 예비 업세팅공정이 필요하며 업세팅되는 길이가 직경의 2배가 되도록 한다. 예비 업세팅공정시 등가직경을 사용하며, 등가직경(ED)은 다음과 같이 계산된다.

$$ED = \sqrt[4]{\frac{d_0^4 + d_1^4}{2}}$$

여기서,  $d_0$  : 가공전 직경,  $d_1$  : 가공후 직경

규칙9) 중실비구속압출의 압력 및 하중계산식은 다음과 같다.

1) 슬래브법(  $\alpha < 45$  )

$$P_{so} = \sigma_{fm} \left[ \frac{\beta}{(\beta-1)} \cdot \left\{ \left[ \frac{d_0}{d_1} \right]^{2(\beta-1)} - 1 \right\} + \frac{2}{3} \alpha \right]$$

여기서,  $P_{so}$  : 압출압력,  $\phi$  : 주대수변형률,

$\phi_0, \phi_1$  : 전 가공에 의한 변형률,

$$\sigma_{fm} = \frac{1}{(\phi_0 - \phi_1)} \int_{\phi_1}^{\phi_0} \sigma_f \cdot d\phi \quad (\text{압출}),$$

$$\sigma_f = K(\phi_0 + \phi)^n \quad (\text{업세팅}),$$

$$\beta = (1 + \mu \cdot \cot \alpha) / (1 - \mu \cdot \tan \alpha)$$

2) 상계법(  $\alpha \geq 45$  )

$$P_{so} = \sigma_{fm} \left[ 2f(\alpha) \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + m \cdot \cot \alpha \cdot \ln \frac{d_0}{d_1} + m \frac{2L_d}{d_1} \right\} \right]$$

여기서,  $m$  : 원뿔면에서의 전단마찰계수,

$L_d$  : Die land 길이

규칙10) 증실 업세팅의 압력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P_u = \sigma_f \left( 1 + \mu \frac{d_i}{3l_1} \right)$$

여기서,  $\mu$  : 마찰계수

$l_1$  : 가공후 높이

$d_i$  : 업세팅후의 직경

3.3 보강링 설계에 관한 규칙

규칙11) 금형인서트의 재질이 보강링의 재질과 다른 경우의 설계계산식은 다음과 같다.

(  $Q, Q_1, Q_2, Q_3$ 는 Fig. 4 참조)

· 최적분할직경비  $Q_1 = \sqrt{Q^2 + Q} \sqrt{1 + Q^2}$

· 최대 허용내압  $P_{iopt} = \frac{\sigma_{y2}}{(1 + 2Q_{1opt}^2)}$

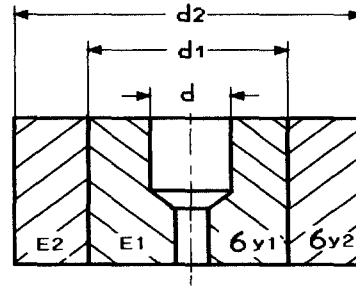
· 접촉면압

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{(1 + Q^2)(1 - Q_1^2)}{(1 - Q^2)(1 + Q_1^2)} \{ \sigma_{y2} (1 - Q_2^2) \}$$

· 공차

$$Z_1 = \left[ \frac{(1 - \nu_2)Q_2^2 + (1 + \nu_2)}{E_2(1 - Q_2^2)} + \frac{(1 - \nu_1) + (1 + \nu_1)Q_1^2}{E_1(1 - Q_1^2)} \right] P_1 d_1$$

규칙12) 축대칭 원통 부재에서 반경방향과 원주방



$$Q = \frac{d}{d_2}, Q_1 = \frac{d}{d_1}, Q_2 = \frac{d_1}{d_2}$$

$\sigma_{y1}$  : yield stress of insert

$\sigma_{y2}$  : yield stress of stress ring

Fig. 4 Die with stress ring

향의 응력계산식은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_0}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_i - p_0) r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2) r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_0}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_i - p_0) r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2) r^2}$$

여기서,  $r_1$  : 금형의 내경

$r_2$  : 금형의 외경

$\sigma_r$  : 반경방향 응력

$\sigma_\theta$  : 원주방향 응력

규칙13) 금형인서트와 보강링의 재질이 다른 경우 즉, 금형인서트의 재질이 초경합금(W.C.)이면, 다이인서트가 인장응력에 취약하므로 작업중에 금형인서트에 인장응력을 허용하지 않는다.

4. 시스템의 적용 및 고찰

육각머리볼트(hexagon head bolt), 플랜지볼트(flange bolt), 또는 각종 렌치볼트(wrench bolt) 등과 같이 준축대칭 형상의 헤드부와 필요에 따라 헤드부 아래단에 세레이션 가공을 하는 각종 준축대칭 제품들 가운데 본 연구에서는 현재 산업현장에서 생산중인 Fig. 5와 같은 재질이 S45C인 M18 휠 볼트 제품을 적용시켜 각 모듈에서 수행된 단조품 설계의 결과를 고찰하고자 한다.

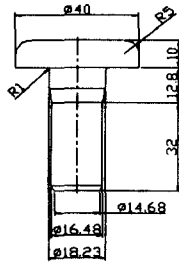


Fig. 5 A sample product

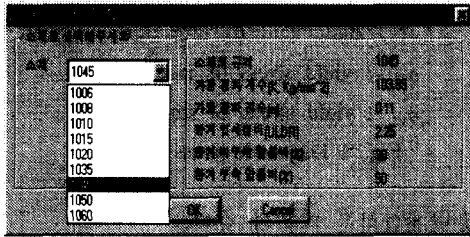
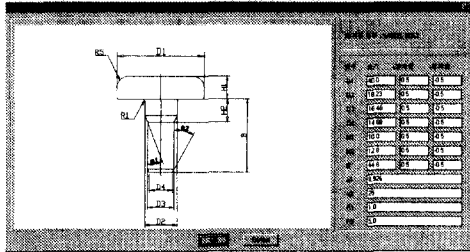


Fig. 6 Material selection of sample product



(a) Input of dimensions and tolerances of the sample product

(list n (bg h<sub>j</sub> d1<sub>j</sub> d2<sub>j</sub> r<sub>j</sub>))

(b) Form of basic geometry list

- (1 ("cv" 5.0 30.0 40.0 5.0))
- (2 ("cy" 5.0 40.0 40.0 0.0))
- (3 ("cc" 1.0 20.23 18.23 1.0))
- (4 ("cy" 6.8 18.23 18.23 0.0))
- (5 ("cn" 5.0 18.23 16.48 0.0))
- (6 ("cy" 30.7 16.48 16.48 0.0))
- (7 ("cn" 1.93 16.48 14.68 0.0))

(c) Basic geometry list of the sample product

Fig. 7 Results carried out in the input and shape treatment module

#### 4.1 입력 및 형상처리 모듈에의 적용

사용자가 AutoCAD상에서 Fig. 6과 같은 소재입력 대화상자로부터 소재를 선택하고 Fig. 7(a)의 최종제품 치수입력 대화상자에서 제품의 직경, 높이, 경사각, 필렛반경 및 공차량을 입력하면, 형상처리 모듈은 제품의 형상을 도면요소 표현을 통해 Fig. 7(b)와 같은 각 단의 기본형상 리스트로 변환하여 설계에 용이한 수치 데이터의 리스트를 인식하는데, 이를 Fig. 7(c)에 나타내었다.

#### 4.2 공정설계 모듈에의 적용

공정설계 모듈에서는 입력 및 형상처리 모듈에서 인식된 단조품의 형상과 관련된 각 치수들을 가지고 체적일정조건에 따라 소재직경을 계산한다. 소재직경이 결정되면 각단의 외부형상에 의한 체적에서 내부형상에 의한 체적을 감하여 각단의 체적계산을 수행하고 체적일정조건으로 변경된 직경 및 높이등을 계산할 수 있다. 이때 각 공정 단계마다 제품과 금형 사이에는 Fig. 8(a)와 같이 0.02~0.04의 클리어런스를 적용했으며 이는 각 공정중 제품의 원활한 로딩과 녹아웃을 위한 것이다. 공정설계의 현장 적용성을 높이기 위해 이와 같은 클리어런스의 부여가 필요하며, 각각의 공정에서 제품의 치수를 계산할 때 시스템은 이러한 클리어런스의 량을 감안하였다.

본 제품을 성형하기 위한 여러 공정들을 Fig. 9에 나타내었다. (a) 공정은  $\phi 16.48\text{mm}$ 인 최소직경 부위를 먼저 압출한 후  $\phi 18.23\text{mm}$ 인 중간직경 부위와 예비업세팅 부인 콘 형상부위를 동시에 업세팅해야 하므로 실제로 성형이 매우 어려운 공정이다. (b) 공정은 중간직경 부위를 먼저 구속압출한 후, 최소직경 부위를 압출하도록 되어있다. 여러 단의 압출이 요구될 때 1회 가공한계를 만족하는 제일 작은 직경부터 순차적으로 압출하는 것이 좋은데, 이는 가공경화에 의해 더 많은 성형압력이 요구되는 것을 막기 위함이다. (c) 공정은 현장의 설계전문가에 의한 공정설계 결과이며, (d) 공정이 개발된 시스템의 공정설계 모듈에서 수행한 결과이다.

최종제품의 형상에서 구한 체적,  $21932.0 \text{ mm}^3$ , 으로부터 실제로 현장에서 생산되는 공정과 비교검토를 위하여 소재 직경을  $\phi 19.68\text{mm}$ 로 결정했다. Fig. 8(b)와 같이 예비 업세팅시 원추형 예비 성형

체의 원추각 25° 를 입력한 후, 기본 형상 표현에 의한 기하학적 특성과 각 성형단계의 공정설계 규칙을 이용하여 자동으로 창출된 공정도면을 Fig. 10 에 나타내었다.

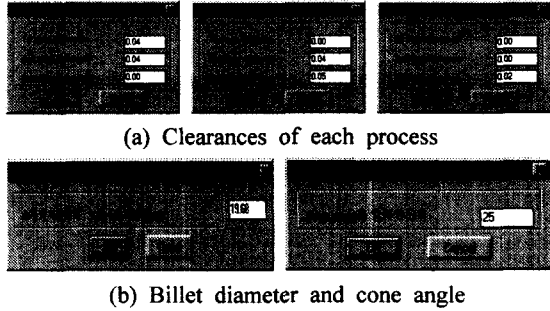


Fig. 8 The input data of the process planning module

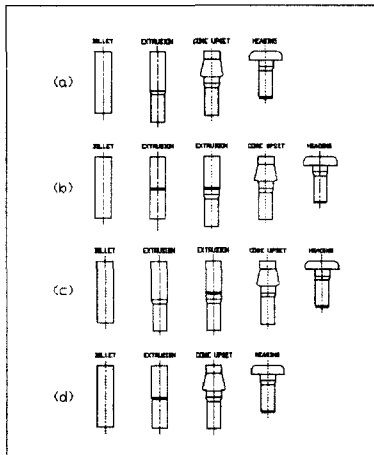


Fig. 9 Processes to form the wheel bolt

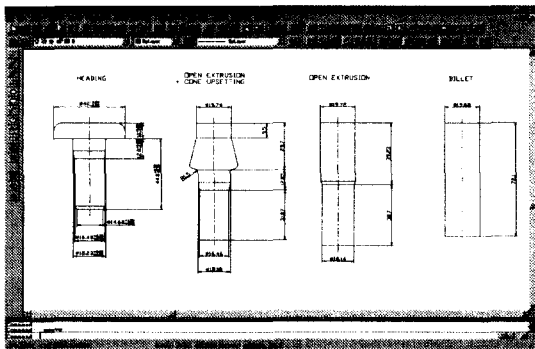


Fig. 10 An automatic process planning drawing generated in the process planning module

첫 번째 공정에서는 중실 변형률(SS)이 0.16으로 한계 비구속 변형률(LSOS) 0.357 보다 작으므로 설계규칙(2),(3), 그리고 (4)에 의하여 빌렛은 압출부의 직경이  $\phi$  18.14인 비구속 전방압출을 수행한다. 두 번째 공정에서는 설계규칙(1)과 (5)-(8)에 의하여 전방압출 부위의 압출비가 15%로서 소재 하부의 전방압출이 완료된 후 금형 내부에 재료가 충전됨으로써 발생한 지지력에 의해 소재 상부의 예비업세팅이 행해진다. 최종 공정에서 볼트의 헤드 부위가 업세팅 되는데, 일반적으로 볼트의 헤드부위는 강도를 높이기 위하여 변형률을 크게 함으로써 요구되는 기계적 성질을 갖게한다. 공정설계 모듈에서 창출된 공정도는 공차 및 기호 등이 기입되어 현장에서 바로 사용할 수 있는 설계도면으로, 설계시간의 단축과 공정수 및 시행착오의 감소를 가져올 수 있다.

개발된 시스템의 공정설계 모듈에서 창출된 공정설계의 타당성을 검증하기 위하여 DEFORM으로 각 공정에 대한 시뮬레이션을 수행했다. 특히, 두 번째 스테이지의 복합공정(전방압출 + 예비업세팅) 시 제품에 작용하는 응력분포와 소요하중 그래프를 Fig. 11에 나타내었고, 시뮬레이션의 결과 원활한 성형이 이루어짐을 확인할 수 있다. 설계규칙(9)와 (10)에 의하여 공정설계 모듈에서 계산한 성형하중값과 DEFORM 시뮬레이션 결과 계산된 성형하중값을 Table 1에 나타내었는데, 이들로부터 각각 계산된 값들이 잘 일치함을 알 수 있다.

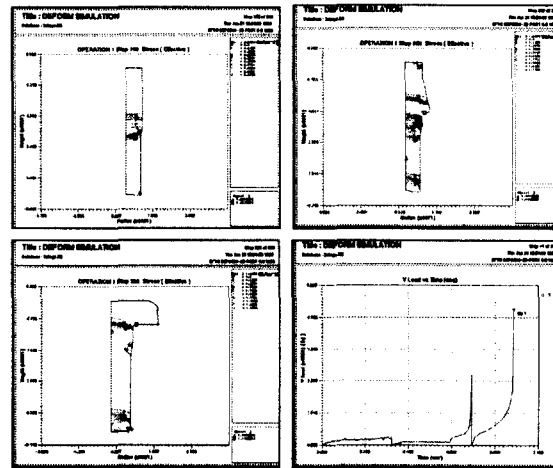


Fig. 11 Results of FEM Simulation(stress & forming load) for each stage

Table 1 Comparison of forming load calculated in the process planning module and DEFORM for the second stage [ton]

	the second stage
Process planning module	31.5
DEFORM simulation	23.0

또한 공정설계 경험이 풍부한 숙련된 설계자에 의해 실제로 현장에서 수행되고 있는 공정설계 도면을 Fig. 12에 나타내었는데, 이 모듈에서 자동으로 창출된 도면과 비교해 볼 때 현장에서 사용되고 있는 공정은 4단계로 개발된 시스템의 공정수보다 한 공정이 더 많음을 알 수 있다.

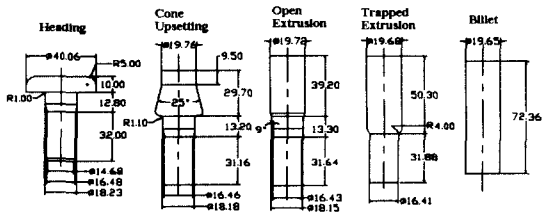


Fig. 12 A process planning drawing carried out in the actual workshop

### 4.3 금형설계 모듈에의 적용

#### 4.3.1 예비성형체 수정 부모모듈에의 적용

예비성형체 수정부모모듈은 공정설계 도면의 각 예비성형체를 선택하여 수정하는 모듈로서, 공정설계 모듈에서 창출된 공정설계 도면가운데 2번째 스테이지(전방압출 및 업세팅 공정)의 예비성형체에 대하여 헤드부의 코너반경 R 1.1을 R 1.5로 수정한 도면을 Fig. 13에 나타내었다.

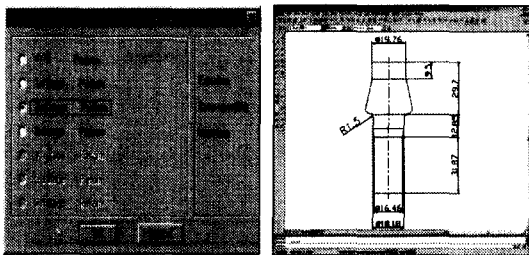


Fig. 13 The results carried out in the preform modification submodule

#### 4.3.2 금형인서트 설계 부모모듈에의 적용

2번째 스테이지(전방압출 및 업세팅 복합공정)의 금형인서트 설계를 수행하기 위하여 DCL창에서 2번째 스테이지를 선택하면, 이 공정을 수행할 수 있는 포머의 종류가 데이터 베이스로부터 Fig. 14와 같이 제시된다.

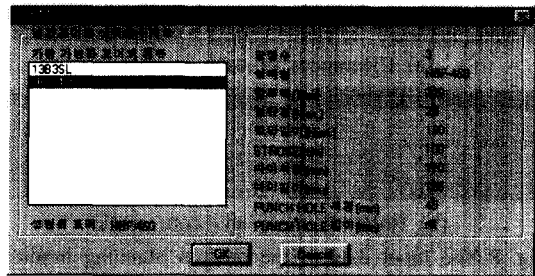
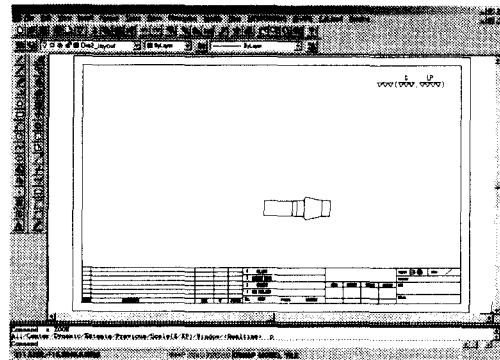
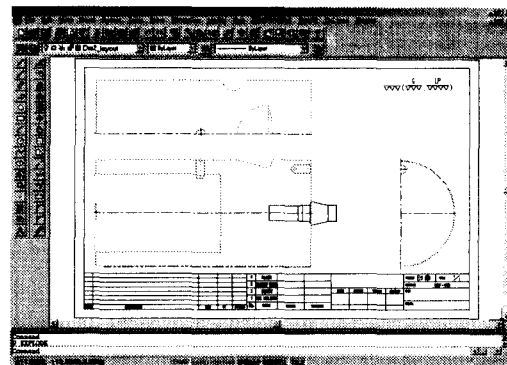


Fig. 14 User selection among formers available to the processes

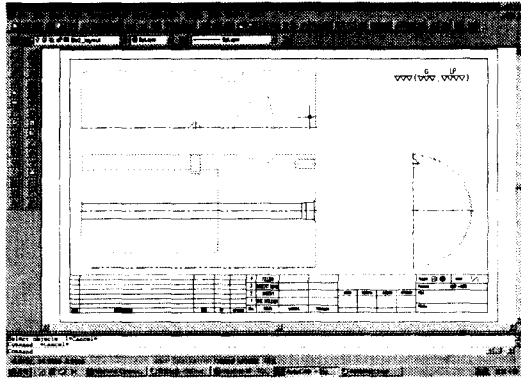


(a) Moving and rotating the shape of the process selected into the fixed point



(b) Adding the shape of die suitable to the former selected





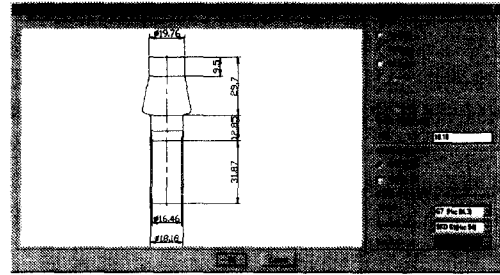
(c) Designing die insert and removing useless entities  
 Fig. 15 Results carried out in the die insert design submodule

이때 사용자가 포머(HBF 460)를 선택하면 공정 수, 설비명, 압조력, 절단경, 절단길이, 스트로크, 금형외경, 금형길이, 펀치 홀 직경, 펀치 홀 길이와 같은 포머의 성능에 관한 데이터가 데이터 베이스로부터 구해진다. 이를 토대로 이 부모에서 금형인서트 설계가 수행되기까지의 과정을 Fig. 15에 나타내었다. 공정설계 모듈에서 창출된 공정도면으로부터 두 번째 공정을 선택하여 Fig. 15(a)와 같이 선택된 공정의 제품 형상이 금형인서트 설계를 위한 새로운 도면 작업공간으로 이동되어 90° 만큼 회전되었다. 연이어 Fig. 15(b)와 같이 사용자가 선택한 포머의 치수 사양이 포함되어 있는 레이어(layer)가 제품 형상의 레이어 위에 추가되었다. 최종적으로 Fig. 15(c)에서처럼 금형인서트 설계가 수행되고 도면에서 불필요한 엔티티(entity)들이 제거된다.

#### 4.3.3 보강링 설계 부모들에의 적용

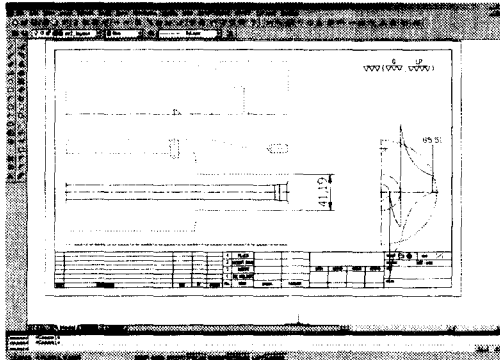
2번째 스테이지의 보강링 설계를 위해 공정단계, "2nd stage", 2번째 스테이지의 인서트내경, "φ 18.18", 보강링의 개수, "2개", 인서트와 보강링의 재질을 각각 "G7(Hrc 84)", "SKD61(Hrc 54)"로 선택하면, 이 모듈에서는 금형인서트 설계부모에서 창출된 인서트 설계도면으로부터 받은 정보와 보강링 설계규칙(11)을 이용하여 보강링 설계를 수행하는데 이를 Fig. 16에 나타내었다.

설계규칙(11)에 의하여 금형의 최적분할 직경비, 최대 허용내압, 간섭량, 접촉면압, 반경 및 접선 방향 응력들을 구한다. 최적분할 직경비( $Q_1=0.44$ ,



(a) Input data for designing stress ring

변수명	단위	값	변수명	단위	값
외경	mm	18.18	내경	mm	15.46
두께	mm	1.36	재료		SKD61
개수		2	공정		2nd stage
인서트내경	mm	18.18	인서트재질		G7
인서트외경	mm	18.18	인서트길이	mm	18.18
인서트두께	mm	1.36	인서트각도	deg	90
인서트재료		G7	인서트공정		2nd stage
인서트공정		2nd stage	인서트설계		인서트설계



(b) The design variables and die drawing in second stage

Fig. 16 Results carried out in the stress ring design submodule

$Q_2=0.37$ )로 인서트의 외경( $d_1=41.19\text{mm}$ )에서의 간섭량( $0.18\text{mm}$ )을 계산했다. 또한 최대 허용내압( $P_{1opt}=107.94\text{Kg/mm}^2$ )과 접촉면압( $P_1=46.07\text{Kg/mm}^2$ )을 구했다. 이들로부터 설계규칙(12)를 이용하여 인서트와 보강링에 각각 작용하는 반경방향과 접선방향의 응력들을 계산할 수 있다. 최대 허용내압과 접촉면압이 작용할 때 인서트 내경에 걸리는 반경방향과 접선방향 응력( $\sigma_r=-107.94$ ,  $\sigma_\theta=0$ ), 인서트 외경에 걸리는 각 응력( $\sigma_r=-64.49$ ,  $\sigma_\theta=-43.46$ ), 보강링 내경에 걸리는 각 응력( $\sigma_r=-64.49$ ,  $\sigma_\theta=85.51$ ), 보강링 외경에 걸리는 각 응력( $\sigma_r=0$ ,  $\sigma_\theta$

=21.03이 계산되어 Fig. 16 (a)와 같이 출력되었다. 최적분할비에 따른 최대허용압력이 공정설계모듈에서 계산된 금형내압보다 작으면 보강링의 수를 늘리거나 금형재질을 바꾸어야 하는데, 금형설계 모듈에서 창출된 금형 도면에 대한 최대허용내압은 107.94 (kg/mm<sup>2</sup>)로, 공정설계모듈에서 구한 금형내압 60(kg/mm<sup>2</sup>)보다 크므로 창출된 금형도면에 대한 금형강도는 안전함을 알 수 있다.

금형설계모듈에서 계산된 최대허용내압과 공정설계모듈에서 구한 금형내압을 금형설계모듈에서 창출된 금형의 인서트 내경에 각각 작용시켰을 때 인서트 및 보강링에서의 반경방향과 접선방향 응력값을 Fig. 17에 나타내었는데 이는 설계규칙 (13)의 내용을 잘 만족시키고 있다.

보강링 설계 부모모듈에서 창출된 금형 도면의 타당성을 검증하기 위하여, ANSYS를 이용한 유한요소해석을 통하여 금형의 강도 평가를 수행하였다. 우선 Fig. 18(a)와 같이 DEFORM에서 2번째 스테이지의 최종 단계를 선택한 다음 금형의 메쉬(mesh)를 나누고 금형의 밀면을 Y방향으로 고정하도록 경계조건(boundary condition)을 적용한 후, Interpolate Forces 기능을 사용하여 재료로부터 금형으로 전달되는 하중값들을 구했다. 그 다음 금형의 물성치를 입력하고 유한요소해석을 수행하여 Postprocessor에서 인서트의 Keypoint 좌표, 그 포인트에서의 X,Y방향 하중값, 그리고 인서트의 외각형상 등의 Data를 추출하여 생성된 파일을 Fig. 18(c)와 같이 ANSYS 해석을 위한 입력용 로그파일로 재구성했다. 이를 ANSYS에서 읽어들이면 인서트의 형상 모델링과 하중값의 입력이 완료된다. Fig. 18(b)와 같이 최종적으로 보강링을 모델링한 다음, 인서트와 보강링은 억지끼워박음(press fitting)된 상태이므로, 이 두면의 경계조건을 contact pair로 설정하고 해석을 수행했다.

우선 DEFORM 시뮬레이션으로부터 구한 소재 압력을 금형설계모듈에서 창출된 금형의 인서트에 적용했을때 반경방향의 응력과 접선방향의 응력분포를 Fig. 19에 나타내었다. Tresca의 항복조건에 의하면, 절점에서 반경방향 응력이 -63.17 [kg/mm<sup>2</sup>], 접선 방향 응력이 -56.57 [kg/mm<sup>2</sup>]로서, 인서트 'G7(Hrc 84)'의 항복강도 296 [kg/mm<sup>2</sup>]보다 낮음을 알 수 있다. 사용자는 개발된 시스템을 사용하여 제품의 수량에 따라 금형인서트와 보강링의 적절한

재질을 선택함으로써 금형의 비용을 절감시킬 수 있다. 또한 이 모듈에서는 금형의 총조립도를 출력시키는데 이를 Fig. 20에 나타내었다.

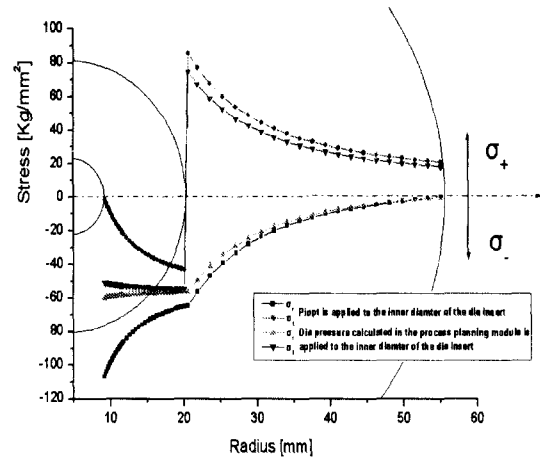
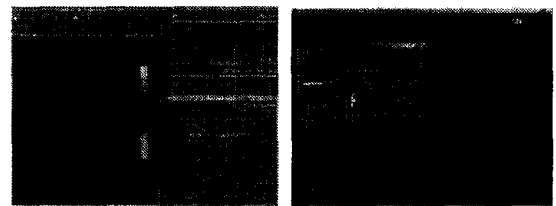


Fig. 17 Stress distribution of the die insert and the stress ring by  $P_{1opt}$  or die pressure



(a) Interpolated forces from part to insert (b) Die modeling & inputted value of load

KEYPOINT	X	Y	Z	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	2.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	3.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	4.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	5.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	6.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	7.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	8.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	9.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	10.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	11.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	12.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	13.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	14.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	15.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	16.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	17.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	18.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	19.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	20.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	21.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	22.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	23.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	24.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	25.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
27	26.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
28	27.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
29	28.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
30	29.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

(c) Extracted data from the result of DEFORM simulation

Fig. 18 The procedure of ANSYS simulation using the result of DEFORM simulation

### 5. 결론

본 연구에서는 소성가공 이론, 산업체 설계전문가들의 경험적 지식과 유한요소해석을 통한 최적의 공정변수를 토대로 다단 포머에 의한 준축대칭 제품의 냉간단조 성형을 위한 공정 및 금형설계 자동화 시스템을 구축했다. 본 시스템의 특징은 다음과 같다.

1) 다단 포머에 의한 준축대칭 제품의 냉간단조 성형시 공정 및 금형설계에 필요한 설계규칙과 경험을 체계적으로 정량화하였다.

2) 공정설계 모듈에서는 필렛/코너반경을 포함하는 단면의 기본형상의 기하학적 특성과 설계규칙을 이용하여 소재로부터 최종제품까지 결함이 없는 공정순서, 공정수, 중간단계의 기하학적 형상 및 작업방법 등이 포함된 공정도면을 자동으로 창출시킬 수 있다.

3) 금형설계 모듈에서는 창출된 공정설계 도면의 정보를 가지고, 금형도면을 자동으로 창출시킬 수 있다.

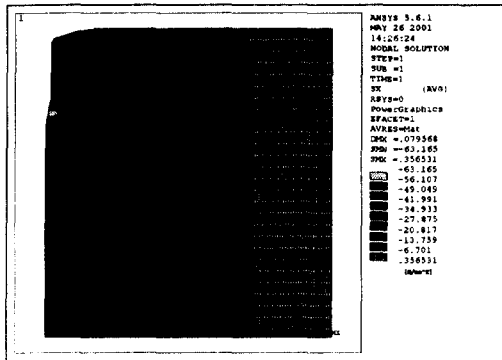
본 시스템의 개발을 통하여 공정 및 금형설계의 표준화가 이루어져서 공정 및 금형설계 시간의 단축, 시행착오 감소 및 미숙련자의 설계 가능에 의한 생산성 향상을 가져올 수 있다. 또한 현장에서 필요한 기술과 경험을 정량화하고 설계절차를 정식화시킴으로써 설계지침의 표준화를 이룰 수 있고 초보자의 교육에 쉽게 활용될 수 있다. 개발된 시스템은 AutoCAD 환경에서 구현됨으로서 시스템의 결과를 다른 CAE 소프트웨어 및 CAM 가공용 소프트웨어와 원활한 연결을 할 수 있다.

### 후 기

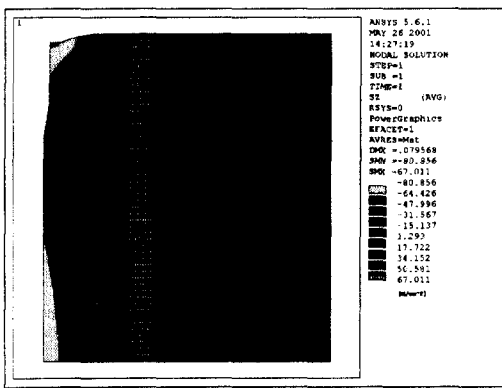
본 연구는 부산대학교 기계공학부를 통한 연구력 강화사업의 지원에 의한 연구의 일부분입니다.

### 참고 문헌

1. P. Noack, "Computer-Aided Determination of Operation Sequence and Costs in Cold Forging of Rotation-Symmetric Workpieces," SME Technical Paper (MF 73-141), 1973.



(a) Distribution of radial stress



(b) Distribution of tangential stress

Fig. 19 Stress distribution of the die insert and the stress ring of the second stage by ANSYS simulation

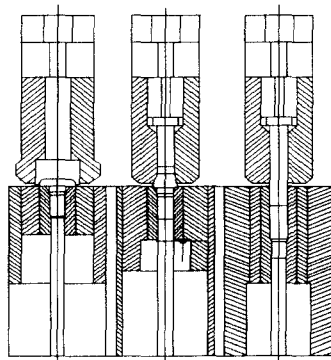


Fig. 20 Total assembly drawing generated in the die design module

2. B. Lengyel, T. V. Venkatasubramanian, "Optimization in the Cold Forging of Steel," Proc. 18th MTDR Conf., pp. 153-157, 1977.
3. A. A. Badawy, D. J. Kuhlmann, P. S. Raghupathi and T. Altan, "Computer-Aided Design of Multistage Forging Operations for Round Parts," J.Mech. Work. Technology, 11, pp. 259-274, 1985.
4. K. Sevenler, P. S. Raghupathi and T. Altan, "Forming-Sequence Design for Multistage Cold Forging," J. Mech. Work. Technology, 14-2, pp. 121-136, 1987.
5. P. Bariani, W. A. Knight, "Computer Aided Cold Forging Process Design "A Knowledge-Based System Approach for Forming Sequence Generation," Ann, CIRP, 37, pp. 243-246, 1988.
6. International Cold Forging Group, "Calculation Methods for Cold Forging Tools," No. 5/82, 1983.
7. Howard H. Kuhn, "Optimum Die Design for Powder Compaction," The International Journal of Powder Technology, vol.14, pp. 259-275, 1978.