

다단포머-볼트류 공정 및 금형설계 자동화 시스템 개발

박철우*, 강정훈*, 이준호*, 김철#, 김문생**, 최재찬**

A Study of Automated Process Planning and Die Design for Multi Former-Bolt Products

Chul Woo Park*, Jung Hun Kang*, Joon Ho Lee*, Chul Kim#, Moon Saeng Kim** and Jae Chan Choi**

ABSTRACT

This paper deals with an automated computer-aided process planning and die design system with which designer can determine operation sequences even after only a little experience in process planning and die design of multi former-bolt products by multi-stage former working. The approach 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 AutoCAD with 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 four main 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 multi former, and the availability of standard parts. It can provide a flexible process based on either the reduction in the number of forming sequences by combining the possible two processes in sequence, or the reduction of deviation of the distribution and the level of the required forming loads by controlling the forming ratios. The system uses 2D geometry recognition and is integrated with the technology of process planning, die design, and CAE analysis. The standardization of die parts for multi former-bolt products requiring a cold forging process is described. The system developed makes it possible to design and manufacture multi former-bolt products more efficiently.

Key Words : Die Design(금형설계), Multi-Former(다단포머), Process Planning(공정설계), FEM(유한요소법), Hex Bolt(육각머리볼트)

1. 서론

오늘날의 생산시스템은 산업계가 직면하고 있는 생산의 다양화, 합리화, 효율화, 숙련 기능인의

2002년 11월 19일 접수
* 부산대학교 대학원
교신저자, 부산대학교 기계기술연구소
Email chulki@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2489
** 부산대학교 기계공학부

부족, 노동 가치관의 변화등에 대처하기 위해 자동화가 필연적인 과정이며, 이를 위해 컴퓨터 기술의 이용이 요구되어진다.

냉간단조품의 공정설계에 컴퓨터를 응용한 최초의 연구발표는 Noack¹이 1973년에 축대칭 냉간단조품의 공정설계 및 비용계산을 위한 프로그램을 개발하면서 시작되었다. 1977년 Lengyel²은 컴퓨터를 이용하여 여러 가지 냉간단조 공정들중에서 최적의 공정을 선정해 내는 방법을 제안했다. 1980년대에 들어 Badawy³ 등은 간단한 축대칭 냉간단조품에 대한 공정설계 전문가시스템인 FORMNG를, Altan⁴ 등은 업세팅 및 전방압출을 고려한 공정설계용 전문가 시스템 FORMEX를, Bariani⁵ 등은 공정설계, 비용계산 및 다단계공시 작업시간을 예측하는 냉간단조 공정설계 전문가 시스템을 개발했다.

본 연구에서는 숙련된 기술자의 경험, 축적되어 온 관련 연구결과, 소성가공이론, 유한요소해석을 통한 최적의 공정변수로 기술 지식베이스를 구축한 후, 컴퓨터를 이용한 볼트류 제품의 제조를 위하여 다단 포머에 의한 냉간단조 공정 및 금형설계 자동화 시스템을 개발했다. 개발된 시스템의 가공가능성 검사모듈에서는 설계규칙에 의해 창출될 수 있는 가공 가능한 공정도면을 창출하여 제품에 가장 적합한 공정을 선택한다. 공정설계모듈에서는 각 스테이지의 성형하중 편차를 줄이기 위하여 공정의 결합 및 분리를 수행한다. 금형 설계 모듈에서는 각 공정에 대하여 최적 분할 비, 최대허용내압, 간섭량, 반경 및 접선방향 응력 등의 필요한 최적의 설계변수값을 계산하여 이를 토대로 금형 도면을 자동적으로 창출시킨다. 창출된 공정 및 금형 도면의 타당성은 DEFORM 및 ANSYS로 검증하였다.

2. 시스템의 구성 및 작동원리

시스템은 입력 및 형상처리 모듈, 가공가능성 검사모듈, 공정설계모듈 및 금형설계모듈로 구성되었으며, 이에 대한 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 입력 및 형상처리 모듈

입력 및 형상처리모듈은 냉간 가공될 제품의 재질과 치수 및 공차를 사용자로 하여금 입력시키면, 제품의 형상데이터를 설계에 용이한 수치데이터로 변환시킨다.⁶

2.2 가공가능성 검사 모듈

가공가능성 검사모듈에서는 입력 및 형상처리 모듈에서 인식된 단조품 형상을 성형할 수 있는 소재의 직경을 정하고 각 소재직경에 따라 가공 가능한 공정도면들이 설계규칙에 의하여 창출된다. 이때 각 공정 단계마다 제품과 금형 사이에는 0.02~0.05의 클리어런스를 적용했으며 이는 각 공정중 제품의 원활한 로딩과 녹아웃을 위한 것이다. 공정 순서, 공정수, 성형하중, 중간단계의 기하학적 형상, 성형성, 변형률 등을 고려하여 창출된 도면들 가운데 제품에 적합한 공정설계 도면을 선택한다.

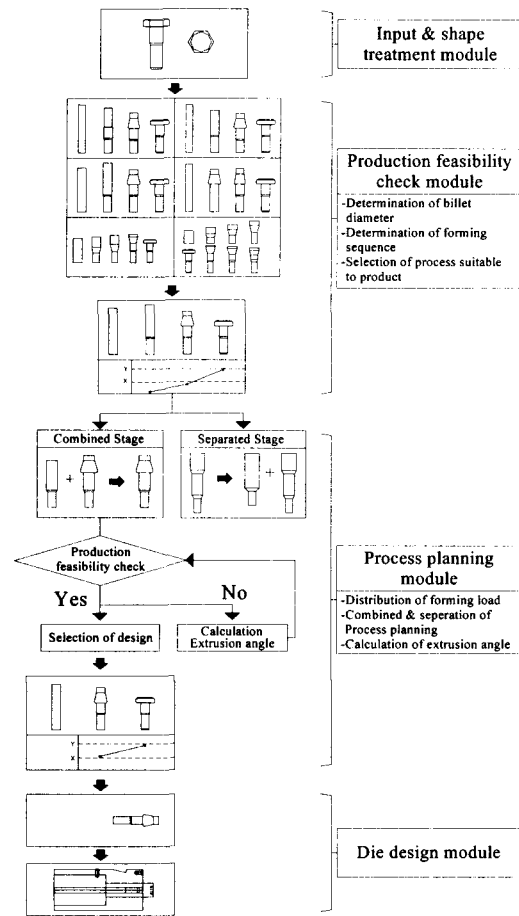


Fig. 1 Configuration of the system

2.3 공정설계 모듈

공정설계 모듈은 가공가능성 검사모듈에서 선택된 공정설계 도면에 대하여 각 공정의 성형하중 균일화를 위해 공정의 분리 또는 결합을 수행하는 모듈이다.⁷ 가공 가능성 검사모듈에서 선택된 공정의 성형하중 분포가 기준 하중영역[x, y]에서 벗어나는 공정에 대하여 높은 성형하중의 공정은 공정의 분리로 성형하중을 낮추고, 낮은 성형하중의 공정은 공정들을 결합하여 성형하중을 높이도록 하여 균형 잡힌 다단 포머의 공정설계를 수행한다. 결합 공정 수행시 성형의 가공가능성을 확인한 후 성형이 불가능한 경우에는 가공 가능한 압출각을 계산하여 가공이 가능하도록 하였다.

2.4 금형설계 모듈

금형설계 모듈에서는 공정설계 모듈에서 창출된 최종적인 공정의 형상 정보를 가지고 최적 분할비, 최대허용내압, 간섭량, 반경 및 접선방향 응력 등의 금형 설계에 필요한 최적의 설계변수값을 계산하여 이를 토대로 금형 도면을 자동적으로 창출시킨다.^{8,9}

3. 설계규칙

3.1 공정설계에 대한 규칙

- 규칙1) 소재직경은 임의의 단에 대해 가공이 편중되지 않도록 한다.
- 규칙2) 중간단계의 예비성형의 치수를 결정하려면 체적일정 법칙을 사용한다.
- 규칙3) 다음 단계의 형상이 성형되어야 하면 앞 단계의 예비성형품은 변형되는 영역과 변형되지 않는 영역으로 구성된다.
- 규칙4) 최종 제품의 단이 진 부품이면 일련의 작업순서에 의하여 생산되어야 하며 각 작업은 하나의 변형영역을 만든다.
- 규칙5) 다단 부품의 소재직경은 제품의 최대직경과 최소직경의 사이에 있다.
- 규칙6) 소재직경은 최종제품의 기계적 성질을 만족하며 제품이 생산될 수 있도록 선택한다.
- 규칙7) 가공공정 단축을 위하여 성형시에는 각 작업에서 한계변형률이 부품요소의 변형률보다 클때에는 부품요소의 변형률까지, 한계 변형률이 부품요소의 변형률보다 작을 때

- 에는 가능한 최대성형 한계까지 성형하며, 성형되지 못한 양은 다음 공정에서 수행한다.
- 규칙8) 중실제품에서 제일 작은 직경의 중실변형률(SS)이 한계구속변형률(LSTS)+2× 한계비구속변형률(LSOS)보다 크면 소재경을 줄여야 한다.
- 규칙9) 중실제품에서 제일 큰 직경의 업세팅직경비(ULDR)가 한계 업세팅 직경비(LULDR)보다 크면 소재경을 늘여야 한다.
- 규칙10) 다단제품이 중실 형상이면 압출과 업세팅의 결합으로 성형된다.
- 규칙11) 제품에서 제품경이 소재경보다 작으면 압출한다.
- 규칙12) 제품에서 제품경이 소재경보다 크면 업세팅한다.
- 규칙13) 제품에 내부 구멍이 있으면 캔 압출한다.
- 규칙14) 구속 전방압출에서 다이 벽면과 소재 사이의 간극(clearances)은 0.02~0.05mm이다.
- 규칙15) 중실부품의 공정순서는 먼저 압출공정을 하고 업세팅 공정을 한다.
- 규칙16) 나사부와 나사부 상단의 압출비가 18%이 하인 경우에는 전방압출과 예비업세팅을 동시에 수행할 수 있다.
- 규칙17) 재질에 따른 성형 한계값은 데이터베이스로부터 구한다.
- 규칙18) 중실변형률(SS)이 한계비구속변형률(LSOS)보다 작으면 비구속압출로 성형한다.
- 규칙19) 중실변형률(SS)이 한계비구속변형률(LSOS)보다 크고 한계구속 변형률(LSTS)보다 작으면 구속압출로 성형한다.
- 규칙20) 동시에 2단 구속압출은 다이의 마모를 고려하여 한번에 성형하지 않는다.
- 규칙21) 한번 구속압출이나 비구속압출을 받은 부분은 다음에 구속압출로 성형할 수 없다.
- 규칙22) SS가 LSTS+LSOS보다 작으면 먼저 LSTS까지 예비성형한 다음 비구속 압출로 작업을 완성한다.
- 규칙23) SS가 LSTS+LSOS+LSOS보다 작으면 먼저 LSTS까지 예비성형하고 그 다음 비구속 압출로 작업을 완성한다.
- 규칙24) 중실업세팅 길이대 직경비(ULDR)≤2.25이면 한번에 자유업 세팅된다.
- 규칙25) 2.25<ULDR≤4.5이고 중실업세팅 직경비(UDDR)≤1.3이면, 한번에 원통업세팅된다.

- 규칙26) $2.25 < ULDR \leq 4.5$ 이고 $UDDR > 1.3$ 이면, 예비
업세팅을 한 다음 원통업세팅된다.
- 규칙27) 2회 업세팅을 수행할 경우 1차 업세팅에서
원추형 예비성형체를 성형한다.
- 규칙28) $4.5 < ULDR \leq 6.5$ 이고 $UDDR \leq 1.3$ 이면, 한
번에 원통업세팅된다.
- 규칙29) $4.5 < ULDR \leq 6.5$ 이고 $UDDR > 1.3$ 이면, 2회
예비업세팅과 원통업세팅이 필요하다.
- 규칙30) 업세팅 성형후의 지름은 성형전 지름의 2.2
배를 초과하지 못한다.
- 규칙31) 동시에 양끝 단의 구속 전방압출은 결합가
공할 수 없다.
- 규칙32) 두 단계의 연속된 전방압출 공정의 경우
하단의 전방압출이 비구속으로 수행될 때
에 한하여 2단 동시압출을 사용한다.
- 규칙33) 다단 업세팅은 업셋비가 2.3보다 작은 경우
에 한하여 수행한다.
- 규칙34) 구속 전방압출과 업세팅은 결합가공할 수
없다.
- 규칙35) 예비업세팅과 원통업세팅은 결합가공할 수
없다.
- 규칙36) 비구속 전방압출과 업세팅이 결합가공이
면, 금형내 일정길이의 소재 구속부가 필요
하다.
- 규칙37) 전방압출과 후방압출이 연속으로 수행이
되며 두 공정이 모두 데이터베이스에 저장
되어 있는 소재의 제한 압출비내에서 성형
이 될 경우 결합압출을 사용하여 1회에 성
형한다.
- 규칙38) 각 공정의 기준 하중영역은 다음과 같다.

$$x = \left(\sum_{i=0}^N L_i \right) / N - \max(L_i) / 4$$

$$y = \left(\sum_{i=0}^N L_i \right) / N + \max(L_i) / 4$$

3.2 금형 설계에 관한 규칙

- 규칙39) 보강링의 개수를 결정하는 기준은 다음과
같다.
- 보강링 0개 : $P_{iopt} < 100 \text{ kgf/mm}^2$
 - 보강링 1개 : $100 \text{ kgf/mm}^2 \leq P_{iopt} < 160 \text{ kgf/mm}^2$
 - 보강링 2개 : $160 \text{ kgf/mm}^2 \leq P_{iopt} < 200 \text{ kgf/mm}^2$

- 규칙40) 금형인서트와 보강링의 재질이 다른 경우
즉, 금형인서트의 재질이 초경합금(W.C.)
이면, 다이 인서트가 인장응력에 취약하므
로 작업중에 금형인서트에 인장응력을 허
용하지 않는다.

- 규칙41) 금형인서트에 작용하는 하중에 따라서 설
계계산식은 다음과 같다.

▶ 최적분할비결정 :

- ① 금형인서트에 항복응력까지 작용할 때

$$\sigma_{sk} \cdot Q_k^2 = \sigma_{sl} \cdot Q_l^2$$

$$\text{여기서, } Q_1 = \sqrt[n]{\frac{Q}{\sum_{k=2}^n x_{k-1}}}$$

- ② 금형인서트에 압축만 작용할때
(예 인서트가 초경합금인 경우)

$$\sigma_{sk} \cdot Q_k^2 = P \cdot Q_l^2$$

$$\text{여기서, } Q_1 = \sqrt[n]{Q \frac{\sum_{k=2}^n \sigma_{sk}}{P^{n-1}}}$$

▶ 인서트가 일반 공구강일 때 :

$$\text{① } r_m = \sqrt{r_i \times r_0}$$

$$\text{② } P_2 = \frac{\sigma_{y2}}{2} \left[1 - \frac{r_m^2}{r_0^2} \right]$$

단, 여기서 σ_{y2} 는 보강링의 항복 강도이다.

▶ 인서트가 초경일 때 :

$$\text{① } r_m^4 = \frac{\sigma_{y1}}{\sigma_{y2}} \left[r_i^2 \times r_0^2 \right]$$

여기서, σ_{y1} 는 인서트의 항복강도이다.
 σ_{y2} 는 보강링의 항복강도이다.

$$\text{② } p_2 = \frac{\sigma_{y2}}{2} \left[1 - \frac{r_m^2}{r_0^2} \right]$$

$$\text{③ } \delta = \frac{2 \times r_m \times p_2}{E_{insetr}}$$

- 규칙42) 축대칭 원통 부재에서 반경방향과 원주방
향의 응력 계산식은 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
 σ_r : 반경방향 응력, σ_{θ} : 원주방향 응력

4. 시스템의 적용 및 고찰

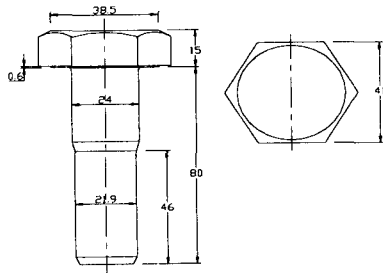
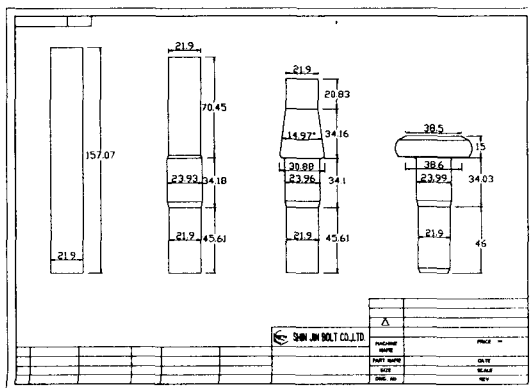


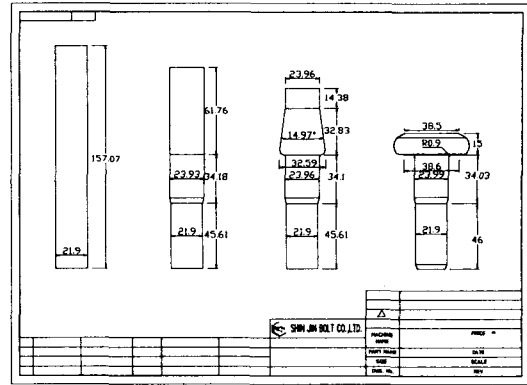
Fig. 2 A sample drawing of the hex bolt, M24

육각머리볼트(hexagon head bolt), 플랜지볼트(flange bolt), 또는 각종 렌치볼트(wrench bolt) 형상의 헤드부와 필요에 따라 헤드부 아래단에 세레이션 가공을 하는 각종 준축대칭 제품들 가운데 본 연구에서는 현재 산업현장에서 생산중인 재질이 S45C인 Fig. 2와 같은 육각머리볼트 제품을 개발된 시스템에 적용시켜 각 모듈에서 수행된 결과를 고찰하고자 한다.

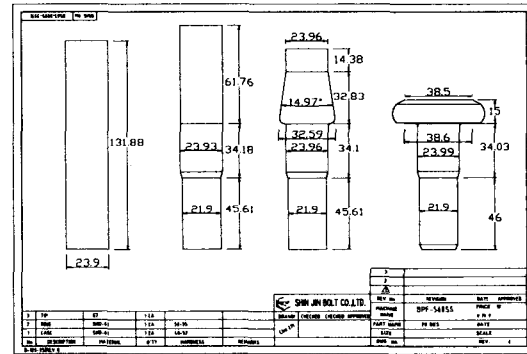
4.1 가공가능성 검사모듈에의 적용



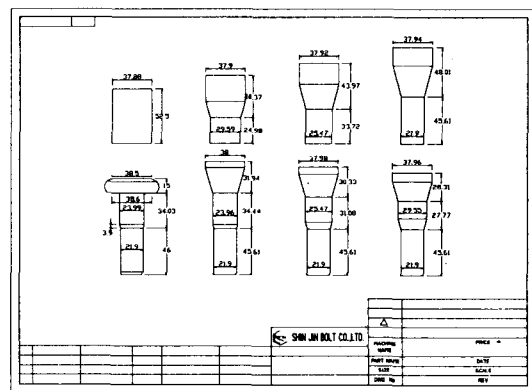
(a) In case of the billet diameter, 21.9mm



(b) In case of the billet diameter, 21.9mm



(c) In case of the billet diameter, 24mm



(d) In case of the billet diameter, 38mm

Fig. 3 Automated process planning drawings generated according to the design rules

입력 및 형상처리 모듈에서 입력된 M24 육각머리볼트의 소재직경을 결정하기 위하여 설계규칙

(1), (5), (6)에 의해 결정된 지름은 21.9mm, 24mm, 38mm이다. 결정된 소재직경에 대해서 설계규칙에 의해서 창출된 가공가능한 공정도면을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a) 공정은 소재직경을 제품의 작은 단의 직경 21.9mm로 설계규칙(12)에 의해 중간부분을 업세팅으로 성형하고, 설계규칙(12), (26), (27)에 의해 예비업세팅 및 업세팅 공정을 각각 수행하였다. 이러한 공정순서를 거친 제품은 나사의 아랫부분에는 변형이 일어나지 않아 가공경화 효과를 얻지 못하고, 나사 중간부분과 나사머리가 성형될 윗부분만 변형이 일어나 가공경화 효과를 얻게된다.¹⁰

Fig. 3(b) 공정은 소재직경 21.9mm로 설계규칙(12), (26), (27)에 의해서 3번의 업세팅 공정으로 이루어져 있다. Fig. 3(a)공정과 같이 나사의 중간과 윗부분에만 변형이 집중되는 가공이다.

Fig. 3(c) 공정은 소재직경이 24mm로, 설계규칙(10), (11), (15), (18)에 의해서 17.5%의 압출비를 가지는 비구속압출로 성형하고 설계규칙(12), (26), (27)에 의하여 2회의 업세팅 공정으로 이루어져 있다. 설계규칙(18)에 의한 비구속압출을 수행하기 위하여 다이의 높이를 변화시키며 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 왼쪽 그림과 같이 소재를 구속하는 다이의 높이가 작은 경우, 펀치가 소재에 미치는 힘이 증가하면 소재는 어느 정도 압출된후 그림과 같이 배부름 현상이 발생한다. 오른쪽 그림은 다이가 소재를 비구속하는 부분이 9mm일때 배부름 현상이 발생하지 않음을 보여주고 있다.

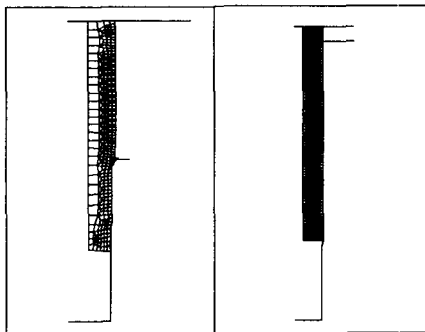


Fig. 4 Determination of the suitable die height for open extrusion

Fig. 3(d)공정은 설계규칙(5), (8), (9)에 의하여

110%의 압출비를 갖는 소재직경 37.88mm로 정했으며 설계규칙(7), (10), (11), (12), (18), (19), (21), (22), (23)에 의하여 6번의 압출공정과 설계규칙(12), (26), (27)에 의해서 업세팅공정으로 이루어져 있다. 여기서 6번의 압출공정은 50%의 구속압출과 30%의 비구속압출을 2번하여 제품의 아랫부분을 성형하고 중간부분을 성형하기 위하여 50%의 구속압출과 30%, 12%의 비구속압출과 마지막 업세팅공정으로 성형한다. 이 공정의 경우 성형한계까지 소재직경을 선택한 경우로 7번의 공정과 너무 많은 변형으로 인하여 제품에 결함이 발생할 소지가 있다. 설계규칙에 의하여 창출된 4종류의 공정을 비교할때 (c)공정은 (a), (b)공정과 달리 소재전체에서 변형을 일으키고 (d)공정과 비교해서 공정수가 적다. 이는 제한된 공정수를 가지는 단단포머류 금형에서 큰 장점으로 작용한다. (c)공정은 소재전체의 변형으로 가공경화 효과를 충분히 얻을 수 있고 제품의 강도 향상에도 기여하므로 육각머리볼트 제품에 적합한 공정으로 선택하였다.

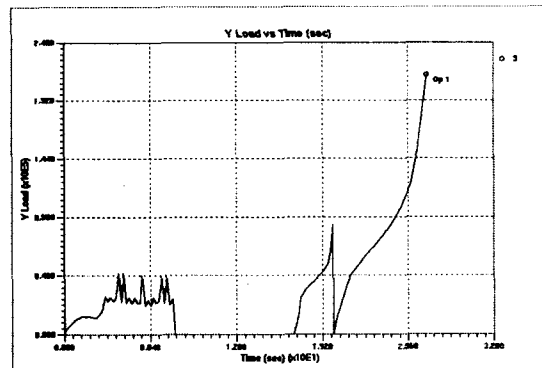


Fig. 5 Load distribution of billet diameter, 24mm

(c)공정의 DEFORM 해석결과 각 스테이지 하중을 Fig. 5에 나타내었다. 해석중 소재가 다이에 완전히 밀착하는 마지막 단계에서 하중이 비정상적으로 급격히 증가하는 현상이 발생하므로 공정의 98.7% 단계에 이를 때의 하중을 공정하중으로 선택했다.¹¹

4.2 공정설계 모듈에의 적용

가공가능성 검사모듈에서 선택된 Fig. 3(c)의 공정에 대한 Deform 해석결과를 토대로 각 공정 하중

분포를 살펴보면 마지막 업세팅 하중이 나머지 두 곳의 하중에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 이로 인하여 다단포머를 이용한 성형중에 편치의 기울어짐이 일어나 소재와 금형의 마찰이 증가하여 금형의 일부분에 응력이 집중되고, 금형의 마모로 제품 치수의 변화와 금형 수명이 감소된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 공정설계모듈에서는 압출과 예비업세팅공정을 결합한 결합공정을 수행했다. 이를 Fig. 6에 나타내었다.

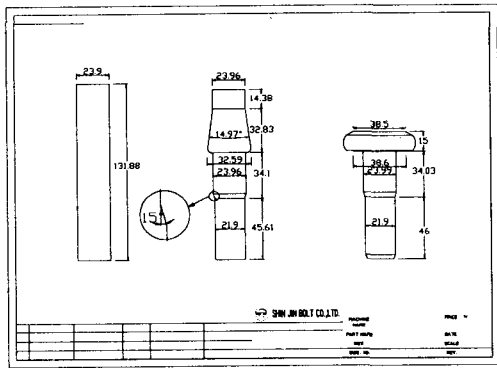


Fig. 6 Combined process of the extrusion and the pre-upsetting processes from the process planning drawing in Fig. 3(c)

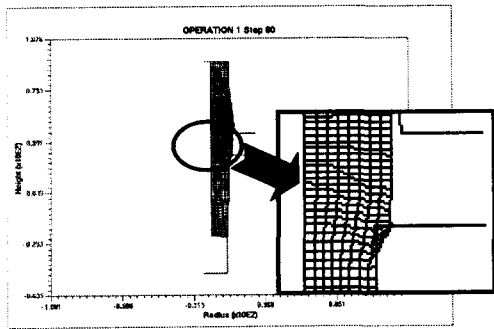


Fig. 7 Infeasibility of the combined process due to buckling

성형하중이 낮은 압출과 예비업세팅을 결합한 결합공정에 대하여 가공가능성을 수행한 결과 Fig. 7에서처럼 배부름 현상이 발생했다. 이는 압출 성형하중이 서서히 증가하다가 어느 순간에 예비업세팅 하중보다 커지면 예비업세팅이 시작되기 때문이

다. 그러므로 압출시 성형하중을 더욱 줄이기 위해 압출각을 기존의 15°에서 줄여가며 시뮬레이션을 수행하여 압출각이 6°일 때 성형가능한 결합공정이 이루어지는 것을 알 수 있었고 그때의 결합공정도면을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 9는 압출각을 6°로 하여 수행된 결합공정의 하중선도를 나타낸 것이다.

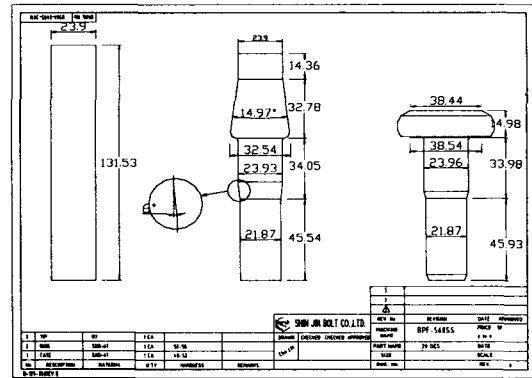


Fig. 8 The feasible combined process drawing without buckling

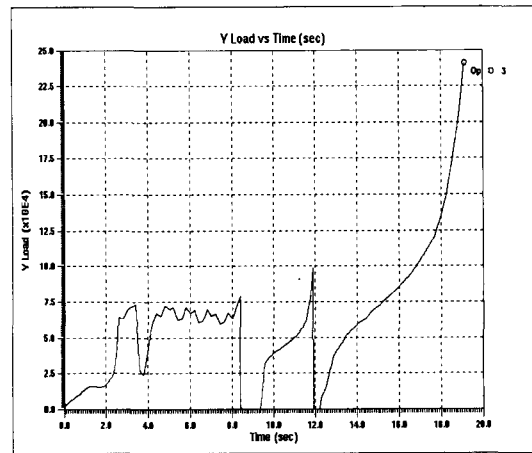


Fig. 9 Load Distribution of combined process

Fig. 10은 가공가능성 검사모듈에서 창출된 여러 도면중 가장 적합한 공정으로 선택된 Fig. 3(c)의 성형하중과 압출각이 6°인 결합공정도면의 성형하중을 비교한 것으로 Fig. 3(c)의 공정은 점선으로 표시된 설계규칙(38)의 기준하중영역에 크게 벗어나

고 있으나 압출과 예비업세팅을 결합한 Fig. 8의 결합공정은 기준하중영역에 근접함을 알 수 있다.

또한 업세팅 공정을 통하여 6°의 압출각을 제품의 최종형상 각도 15°로 성형해야 하므로 결합공정을 갖는 업세팅 공정에서의 성형하중이 공정설계 규칙에 의하여 창출된 업세팅 공정보다 하중이 높음을 알 수 있다.

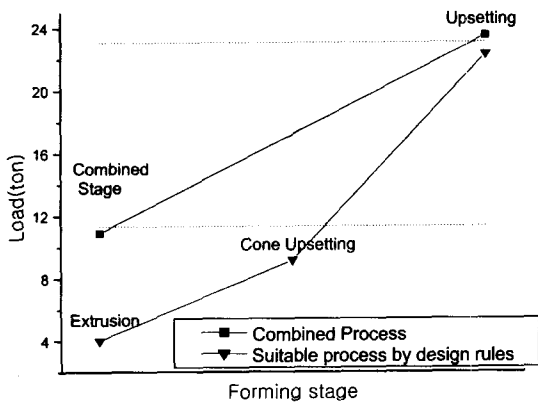


Fig. 10 Comparison of deviation of the forming load distribution from the forming loads ranges

4.3 금형설계 모듈에의 적용

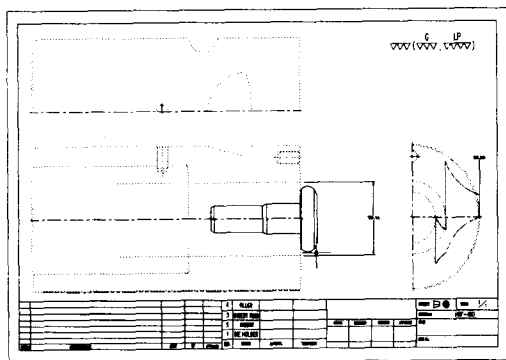


Fig. 11 Results carried out in the die design module

공정설계모듈에서 창출된 결합공정 도면으로부터 2번째 업세팅공정의 금형설계를 수행하기 위하여 DCL창에서 2번째 스테이지를 선택하고, 공정을 수행할 포머의 종류를 선택하면 공정수, 설비명, 압조력, 절단경, 절단길이, 스트로크, 금형외경, 금형

길이, 펀치 홀 직경, 펀치 홀 길이와 같은 포머의 성능에 관한 데이터가 데이터 베이스로부터 구해지고 금형 인서트 설계를 위한 새로운 작업공간으로 이동되어 포머의 치수가 작업도면에 추가되어 금형 인서트 설계가 수행되어진다. 위의 과정을 거쳐 자동으로 창출된 금형 도면을 Fig. 11에 나타내었고, 금형의 총조립도를 Fig. 12에 나타내었다. 금형의 보강링 설계는 인서트 설계도면으로부터 받은 정보와 설계규칙을 이용하여 수행된다. 설계규칙(39)에 의하여 보강링의 개수는 1개이고 인서트 내경은 $\phi 23.99\text{mm}$, 인서트와 보강링의 재질은 G7(Hrc 84), SKD61(Hrc 54)이다. 설계규칙(41)에 의하여 최대분할 직경비($Q_1=0.404$, $Q_2=0.54$), 인서트의 외경($d_1=59.446\text{mm}$), 최대 허용내압($P_{iopt}=113.08\text{Kgf/mm}^2$)과 접촉내압($P_1=53.1\text{Kgf/mm}^2$)을 계산하였다. 설계규칙(42)에 의하여 접촉내압이 작용한 상태에서 최대허용내압과 작용내압이 인서트에 작용할 때 금형의 인서트와 보강링에서의 반경방향과 접선방향의 응력들을 계산할수 있으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

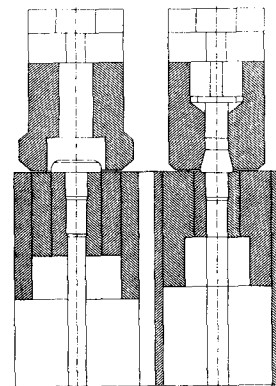


Fig. 12 Total assembly drawing generated in the die design module

Fig. 13에서 인서트와 보강링 사이에 접촉면압이 작용한 상태에서 인서트에 내압이 작용할 때 금형의 인서트에서는 압축상태에 있어야 하는데 이는 설계규칙(40)과 일치한다. 최대허용내압이 작용할 경우 인서트내경에서의 응력은 $\sigma_r = -113.08\text{Kgf/mm}^2$, $\sigma_\theta = 0$, 인서트 외경에서의 응력은 $\sigma_r = -66.789\text{Kgf/mm}^2$, $\sigma_\theta = -48.778\text{Kgf/mm}^2$, 보강링 내경에서의 응력은 $\sigma_r = -66.789\text{Kgf/mm}^2$, $\sigma_\theta = 121.894\text{Kgf/mm}^2$, 보강링 외

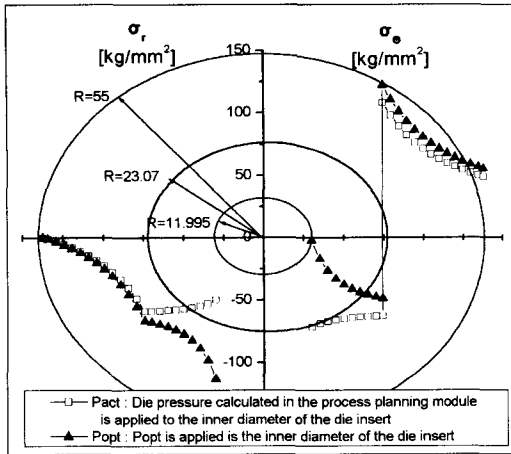


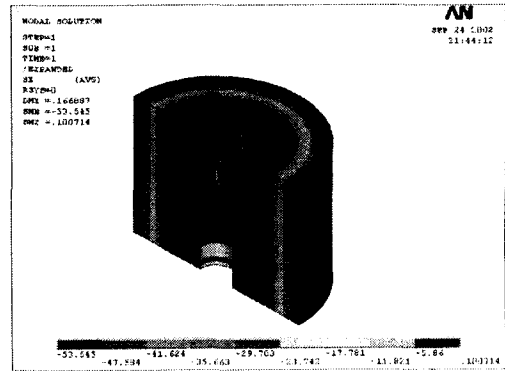
Fig. 13 Stress distribution of the die insert and the stress ring by P_{opt} or P_{act}

경에서의 응력은 $\sigma_r=0$, $\sigma_\theta=55.105\text{Kgf/mm}^2$ 이다.

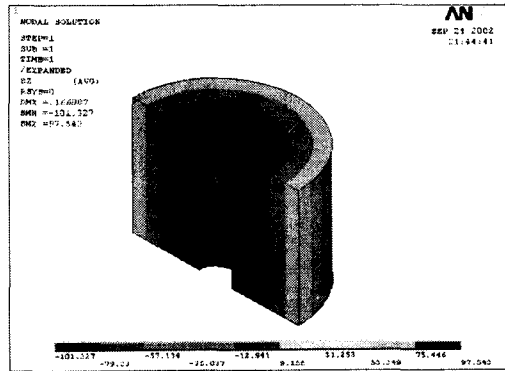
설계규칙에 의하여 계산된 금형 설계 도면의 타당성을 검증하기 위하여 ANSYS를 이용한 유한요소해석으로 금형의 강도평가를 수행하였다. 우선 성형성 평가에 사용된 DEFORM 데이터를 가지고 Interpolate Forces 기능을 이용하여 소재로부터 금형에 전달되는 하중값 들을 추출하여 ANSYS의 좌표 값과 하중값으로 변환하여 강도해석을 수행한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. ANSYS 해석결과에 의하면 인서트의 반경방향 응력(-53.545Kgf/mm²), 접선방향 응력(-101.327Kgf/mm²)이 인서트에 압축 응력인 상태로 작용하므로 설계규칙(40)을 잘 만족하고 있다. 최적분할비에 따른 최대허용내압이 금형내압보다 작으면 보강링의 수를 늘리거나 금형재질을 바꾸어야 하지만 최대허용내압이 금형내압보다 크고, 설계규칙 (40)에서와 같이 최대허용내압이 작용했을 때 인서트의 내경에 인장응력이 작용하지 않으므로 금형이 안전함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 소성가공이론, 산업체 설계전문가들의 경험 지식과 유한요소해석을 통한 최적의 공정변수를 토대로 다단 포머에 의한 볼트류 제품의 냉간단조 성형을 위한 공정 및 금형설계자동화 시스템을 구축했다. 개발된 시스템의 특징은 다음과 같다.



(a) Distribution of the radial stress



(b) Distribution of the tangential stress

Fig. 14 Stress distribution of the die insert and the stress ring by ANSYS simulation for the second stage

1. 다단 포머에 의한 볼트류 제품의 냉간 단조 성형 시 공정에 필요한 설계규칙과 경험을 체계적으로 정량화 시켰다.
2. 가공가능성 검사모듈에서는 설계규칙에 의해 가공가능한 공정도면을 자동적으로 창출시킬 수 있다.
3. 공정설계모듈에서는 각 공정의 하중 편차를 줄이기 위해 결합 및 분리 공정을 수행하여 균형 잡힌 성형하중으로 공정을 수행할 수 있고 결합공정인 경우에는 성형가능성을 체크한 후, 성형이 불가능할 시 성형 가능한 최적의 압출각을 계산하여 성형이 가능하도록 하였다.

4. 금형설계 모듈에서는 각 공정에 대하여 최적 분할비, 최대허용 내압, 간섭량, 반경 및 접선방향 응력을 계산하여 각 공정에 대한 금형설계 도면을 자동적으로 창출시킬 수 있다.

11. Victor Vazquez, Daniel Hannan, Taylan Altan, "Tool life in cold forging - an example of design improvement to increase service life," *Journal of Materials Processing Technology* 98, pp. 90-96, 2000.

참고문헌

1. Noack, P., "Computer-Aided Determination of Operation Sequence and Costs in Cold Forging of Rotation-Symmetric Workpieces," *SME Technical Paper (MF 73-141)*, 1973.
2. Lengyel, B., Venkatasubramanian, T. V., "Optimization in the Cold Forging of Steel," *Proc. 18th MTDR Conf.*, pp. 153-157, 1977.
3. Badawy, A. A., Kuhlmann, D. J., Raghupathi, P. S. and Altan, T., "Computer-Aided Design of Multi-stage Forging Operations for Round Parts," *J. Mech. Work. Technology*, Vol. 11, pp. 259-274, 1985.
4. Sevenler, K., Raghupathi, P. S. and Altan, T., "Forming-Sequence Design for Multistage Cold Forging," *J. Mech. Work. Technology*, Vol. 14-2, pp. 121-136, 1987.
5. Bariani, P., Knight, W. A., "Computer Aided Cold Forging Process Design. A Knowledge-Based System Approach for Forming Sequence Generation," *Ann. CIRP*, Vol. 37, pp. 243-246, 1988.
6. 박종욱, 이준호, 정성윤, 김철, 김문생, "준축대칭 제품의 냉간단조 공정설계 및 금형설계 자동화 시스템 개발," *한국정밀공학회지*, Vol. 19, No. 1, pp. 107-118, 2002.
7. 김홍석, 임용택, "재설계 기능을 갖는 냉간단조 공정설계용 전문가시스템 개발," *대한기계학회 논문집*, Vol. 18, No 8, pp. 2039-2052, 1994.
8. International Cold Forging Group, "Calculation Methods for Cold Forging Tools," No. 5/82, 1983.
9. Howard H. Kuhn, "Optimum Die Design for Powder Compaction," *The International Journal of Powder Technology*, Vol. 14, pp. 259-275, 1978.
10. 이충효, "성형실험을 통한 냉간단조 공정의 단축 유한요소 시뮬레이션," *한국소성가공학회지*, 제6권, 제5호, pp. 395-399, 1997.