

## 축대칭 열간 강단조의 피니셔 설계 시스템 개발

김대영\* · 박종진\*

(1998년 3월 6일 접수)

### Development of a Finisher Design System for Axisymmetric Hot Steel Forging

Dae Young Kim and Jong Jin Park

#### Abstract

A forging product, in general, is made through buster, blocker and finisher processes. The dies used in these processes are designed by experienced forging engineers. In the present study, an expert system is developed for the finisher die design of axisymmetric hot steel forging. It is a rule based system written in Fortran and AutoLISP, operating on a personal computer. In this paper, major rules considered in the system are summarized, and the capabilities of the system are examined through several examples.

**Key Words** : Finisher Die Design(피니셔 금형설계), Expert System(전문가 시스템), Hot Forging(열간단조), Steel Forging(강단조)

#### 1. 서론

일반적으로 단조품은 버스터, 블락커, 피니셔 공정을 거쳐 성형된다. 그 중 최종 단조품의 형상과 치수를 결정하는 피니셔공정에서 사용하는 금형은 기계가공품의 형상과 치수를 기본으로 하여 설계한다. 이러한 피니셔설계는 주로 숙련된 설계자의 경험과 판단에 의존하고 있다. 하지만 종종 잘못 설계된 금형으로 인하여 과대한 단조하중, 다이 마모, 금형파괴, 미충진, 유동결합 등의 문제가 발생되고 이러한 경우 재설계 및 이에 따른 금형의 재가공 등 경제적인 손실을 초래하게 된다. 또한 선진국에서는 숙련된 금형설계자들이 감소하고 우리나라에서는 설계경험이 부족

함으로 인하여 많은 경우 금형설계를 외국에 의존하고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 최소화하고 설계작업을 단 시간에 자동적으로 수행할 수 있는 전문가 시스템의 개발이 요구되고 있다.

전문가 시스템의 개발은 여러 분야에서 진행되고 있는데, 특히 공정설계 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 주로 CAD/CAM 및 인공지능(Artificial Intelligence ; AI)언어를 이용하여 지식베이스 시스템(Knowledge Based System ; KBS) 또는 규칙베이스 시스템(Rule Based System)에 기초한 전문가 시스템 개발이 주종을 이루고 있다.<sup>(1)</sup> 절삭가공에 관한 여러 CAPP(Computer Aided Process Planning) 시스템들도 개발되고 있다.<sup>(2)</sup>

\* 홍익대학교 기계공학과

절삭가공에 비해 여러 가지 복잡한 요소를 갖고 있는 소성 가공 분야에서는 Gokler<sup>(3)</sup> 등에 의한 열간 업셋 단조에 대한 공정순서 및 다이설계 시스템, Knight,<sup>(4)</sup> Bariani<sup>(5,6)</sup> 등에 의한 축대칭 다단 냉간단조의 지식베이스 시스템, Kim과 Altan<sup>(7)</sup> 등에 의한 다단 냉간 단조의 지식베이스 시스템 등이 있다. 국내의 김홍석<sup>(8)</sup>과 윤성만<sup>(9)</sup>도 냉간 단조 공정설계 시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 강을 소재로 하여 축대칭 열간단조시 피니셔 금형설계와 도면작성을 자동으로 수행하는 전문가시스템을 개발하였다. 열간단조 제품의 형상은 냉간단조와는 달리 기하학적 형상을 정식화된 도형으로 표현하기가 어렵다. 따라서 본 시스템에서는 제품의 형상을 AutoCAD 상에서 입력받아 도면요소 데이터베이스를 추출하고 각 포인트의 위치 관계로부터 형상을 인식하여 설계물을 적용하게 하였다. 이를 위하여 실무자의 경험과 문헌의 자료를 수합하여 피니셔설계에 필요한 변수들에 대한 정보를 수합하였고, DOS와 Windows 환경의 PC에서 AutoCAD와 연계하여 작동할 수 있도록 FORTRAN과 AutoLISP 언어를 사용하여 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 추후 유한요소해석 기술과 연계하여 축대칭 열간단조의 공정설계와 금형설계를 신속하게 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 아래에는 본 시스템의 개발에서 사용된 기본 개념과 피니셔 설계의 주요 변수에 대한 정보를 정리하였으며, 본 시스템을 사용하여 설계된 몇가지 피니셔 금형설계를 요약하였다.

## 2. 피니셔 설계의 주요변수

축대칭 열간 강단조에서의 피니셔 설계에서 고려하여야 할 주요변수는 형분리선의 선택, 최소 리브와 최소 웹 두께, 드래프트 각, 코너 반경과 필렛반경, 플래쉬 크기, 단조하중등이다. 본 연구에서 개발한 시스템에서 사용한 이러한 변수들을 다음과 같이 요약하였다.<sup>(10,11)</sup>

### 2.1 형분리선

형분리선은 상부금형과 하부금형이 만나는 선이다. 단순한 축대칭 형상의 제품에는 직선으로 나타나는 경우가 보통이지만 복잡한 형상의 제품에서는 곡선으로 나타나는 경우도 있다. 형분리선의 위치를 적절하게 설계하려면 제품의 형상, 금속유동, 하중의 평형, 플래쉬, 단조하중 등을 고려하여야 한다. 본 시스템에서는 단조품 최외부의 상단, 하단은 물론 임의의 지점을 선택할 수 있도록 하였다.

### 2.2 최소 리브 두께와 최소 웹 두께

금형 가공시 리브의 공동부는 일반적으로 테이퍼형의 엔드밀을 사용하여 가공한다. 리브의 공동부가 너무 좁거나 또는 길어서 가공이 용이하지 않을 때는 인서트를 사용하여야 한다. 드래프트 각이 작은 리브의 경우에는 금형으로부터 단조품을 분리하기 위하여 녹아웃 장치를 사용

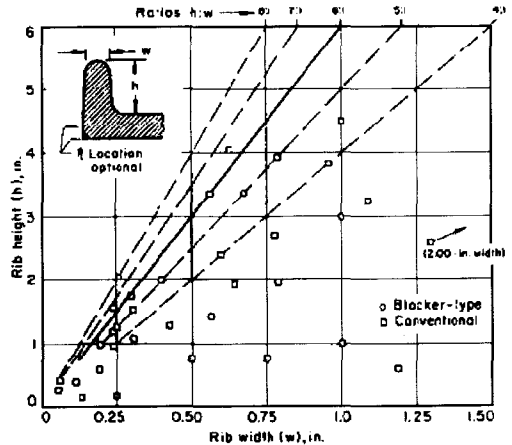


Fig. 1 Relationship between rib height(h) and rib width(w)

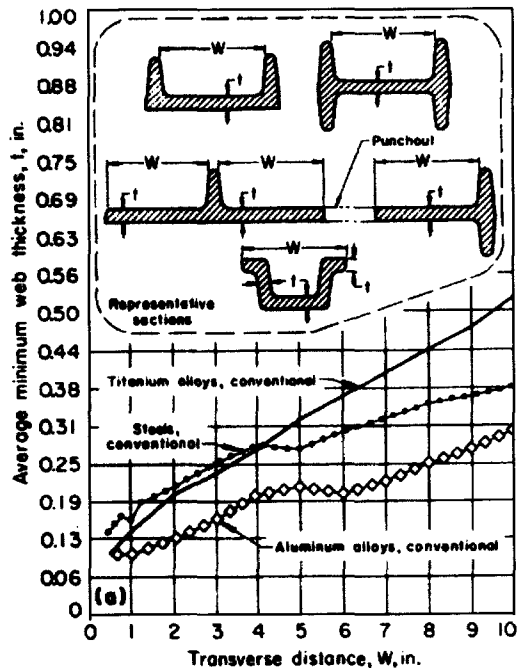


Fig. 2 Minimum web thickness(t) for web length(W)

한다. 하지만 인서트나 별도의 장치를 사용할 경우 생산비의 상승을 초래하므로 되도록 피하는 것이 좋다. 최소 리브의 두께는 리브의 높이에 의해 결정되는데 보통 높이 대 두께의 비가 8 : 1 이상일 경우는 특수 장치가 있는 금형이 필요하다. 따라서 최대 6 : 1을 넘지 않는 범위 내에서 설계하는 것이 바람직하다. 반면에 웨브는 얇은 평판형상의 부분으로서 보통 수평의 단조평면을 포함하고 있으나 구부러진 형상으로 나타나는 경우도 있다. 웨브는 다른 부분들을 연결하는 역할과 금형 공동부에 소재가 유동하는 통로 역할을 하므로 형분리선의 위치, 드래프트 각, 코너 반경과 필렛 반경, 리브의 치수와 함께 고려되어야 한다. 보통 얇은 웨브 부품은 많은 공정을 요구하므로 역시 피하는 것이 좋으며 최소 웨브의 두께는 웨브의 폭에 의하여 결정된다. Fig. 1에는 립의 높이와 폭의 관계를, Fig. 2에는 웹의 길이와 최소 두께의 관계를 나타내는 그래프를 도시하였다.<sup>(12)</sup>

### 2.3 드래프트 각

드래프트 각은 제품을 금형으로부터 쉽게 추출하기 위하여 필요하지만 과도한 드래프트 각은 금형의 가공비용과 재료손실을 증가시킨다. 단조품이 냉각함에 따라 반경 및 길이방향으로 수축하므로 안쪽의 드래프트 각은 바깥쪽 드래프트 각보다 크다. 일반단조 경우에는 안쪽 드래프트 각은 약 7~10°, 바깥쪽 드래프트 각은 3~7° 정도로 한다.

### 2.4 코너 반경과 필렛 반경

금형공동부 내에서 금속의 유동을 용이하게 하고 금형 마모를 감소시키기 위해서는 코너 및 필렛부에 반경을 두는 것이 필요하다. 코너 반경과 필렛 반경은 교차되는 면을 부드럽게 연결하여 소재유동을 용이하게 하여야 한다. 반경을 크게하면 마찰부위에서 응력이 낮아지고 따라서 금형수명이 길어진다. 코너 반경과 필렛 반경이 너무 작으면 금속유동이 원활하지 않아 미충진이 발생하거나 응력 집중과 반복열피로에 의하여 마모가 촉진되고 피로균열이 발생할 수도 있다.

코너 반경의 크기는 리브의 높이에 의존한다. 코너 반경은 단조제품의 정밀도를 결정하는 요소이다. 따라서 정밀 단조에 가까워질수록 작은 코너 반경을 사용한다. 하지만 단조성이 나쁜 소재일수록 큰 코너 반경이 요구되며 다이 싱킹(die sinking)도 단순화된다. 필렛 반경의 크기도 리브의 높이에 의존한다. 코너의 경우와 같이 필렛 반경도 단조제품의 정밀도를 결정한다. 큰 필렛은 블라커 단조에,

Table 1 Corner and fillet radii in steel hot forging

rib height(mm)		corner radius (mm)	fillet height(mm)	
above	below		conventional	precision
-	25	2	4	4
25	40	3	6	5
40	63	4	10	6
63	100	6	16	8
100	160	8	25	10
160	250	10	40	16

작은 필렛은 정밀 단조에 사용된다. 수평 필렛 반경은 필렛의 기계가공여부, 웹과의 거리, 웹의 형태 등에 의해 결정된다. Table 1에 코너 및 필렛 반경을 결정하기 위한 자료를 요약하였다.

### 2.5 플래쉬

플래쉬는 길이 대 두께 비가 클수록 높은 압력을 받으며 유동에 대한 저항도 증가하게 된다. 플래쉬의 유동저항이 높으면 금형 공동부에 있는 재료에 높은 압력을 가하여 되어 금형공동부를 충전하기가 용이하게 되므로 플래쉬는 형단조시 재료의 유동을 결정하는 중요한 역할을 한다. 플래쉬의 두께가 두꺼우면 단조하중은 감소하나 소재의 손실량이 증가되고 반면에 두께가 얇으면 단조하중은 증가하나 손실량은 감소한다. 특히 열간에서 두께가 얇은 플래쉬는 몸체부보다 빨리 냉각되므로 유동응력이 증가하여 단조하중이 증가하고 금형손상이 발생할 수 있다. 금형내의 유동이 충분히 구속된 후에 여분의 재료는 플래쉬 외부에 있는 거터(gutter)로 유동되도록 한다. 거터는 단조하중을 필요이상으로 증가시키는 과도한 플래쉬가 생기지 않도록 하는 역할을 한다. 플래쉬의 두께는 단조품 최대 두께의 3% 정도로 하고 랜드부의 길이는 플래쉬 두께의 3배 정도로 하는 것이 보통이다. 최적의 플래쉬 치수를 계산하는 여러가지 식 중에서 본 연구에서는 다음과 같이 Vieregge가 제안한 재료의 직경  $d_o$ 와 높이  $h$ 에 따른 식을 선택하였다.<sup>(13)</sup>

$$s = 0.017d_o + \frac{1}{\sqrt{d_o + 5}} \tag{1}$$

$$\frac{b}{s} = \frac{30}{\sqrt{d_o \left\{ 1 + \frac{2d_o}{h} \right\}}} \tag{2}$$

여기서  $s$ 는 플래쉬 두께,  $b$ 는 플래쉬의 폭,  $d_p$ 는 재료의 외경이다.

### 2.6 단조하중

일반적으로 단조하중은  $F = \bar{\sigma} \cdot f(\mu) \cdot g(c)$ 로 표현되는데, 여기서  $\bar{\sigma}$ 는 유동응력이며  $f(\mu)$ 는 공구와 소재 표면 사이 마찰의 영향을 나타내는 항이고  $g(c)$ 는 소재형상의 영향을 나타내는 항이다. 유동응력은 온도, 변형률 속도, 변형률의 함수인데 본 연구에서는 강의 유동응력을 온도, 변형률, 변형률 속도, 탄소함량(wt%)의 함수로서 다음과 같은 식으로 나타내었다.<sup>(16)</sup>

$$\bar{\sigma} = 1.05 \exp(0.126 - 1.75C + 0.594C^2) + \bar{\epsilon}^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.13} \exp[(2851 + 2968C - 1120C^2)/T] \quad (3)$$

여기서  $T$ 는 절대온도,  $C$ 는 탄소함량이다.

이 식을 이용하여 단조하중을 구하기 위해서는 소재와 금형의 온도를 알아야하고 이 온도에서의 유동응력과 변형률속도를 알아야한다. 또한 플래쉬가 있는 경우에는 플래쉬의 폭과 길이도 알아야 한다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 형상의 단순화 작업을 거친 축대칭 디스크형상에 슬래브법을 사용하여 단조하중을 예측한 식을 사용하였다.<sup>(14)</sup> 그 중 Von Mises의 항복조건을 사용한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$F = \bar{\sigma} \pi \left[ \frac{a^2}{4} + \frac{d_c^3}{12\sqrt{3}h} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu}{8s} (a^3 - d_c^3) \right] \quad (4)$$

여기서  $h$ 는 플래쉬쪽으로 유동하는 금형내 소재의 평균

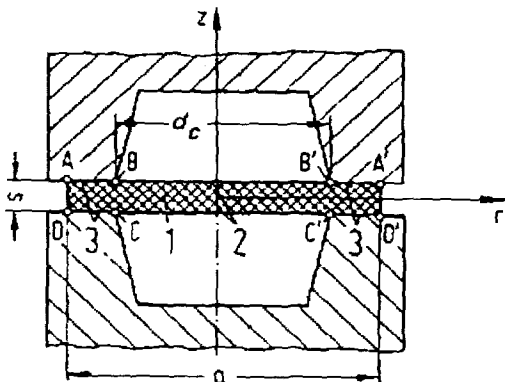


Fig. 3 Schematic representation of axisymmetric disk through shape simplification

두께이며 다음식으로 표현된다.

$$h = 0.8 \cdot s \cdot \left(\frac{D}{2s}\right)^{0.92} \quad (5)$$

그 외의 상수들은 Fig. 3에 나타나 있다.

### 3. 피니셔 설계 시스템 구성

본 시스템은 지식베이스 시스템을 이용하여 강의 축대칭 형상에 대한 피니셔 설계를 자동으로 수행하는 시스템이며 형상 입-출력 부분은 AutoLISP을, 데이터베이스 및 피니셔를 적용 부분은 FORTRAN을 각각 사용하여 구성하였다. 본 시스템은 Fig. 4와 같이 구성되어 있다.

부 프로그램 1에서는 최종 기계가공 부분형상과 단조조건을 입력받는다. 사용자는 메뉴를 따라 단조 타입, 단조기 종류, 단조기 용량, 단조 소재, 소재 온도, 다이 온도, 마찰계수, 다이 속도를 입력할 수 있다. 기계가공도면 형상입력방법은 이미 저장된 도면 파일을 불러들이거나 사용자가 직접 도면화 하는 방법이 있으며, 도면요소 데이터베이스(x-y 좌표, 반경)를 에디터(editor)를 사용하여 직

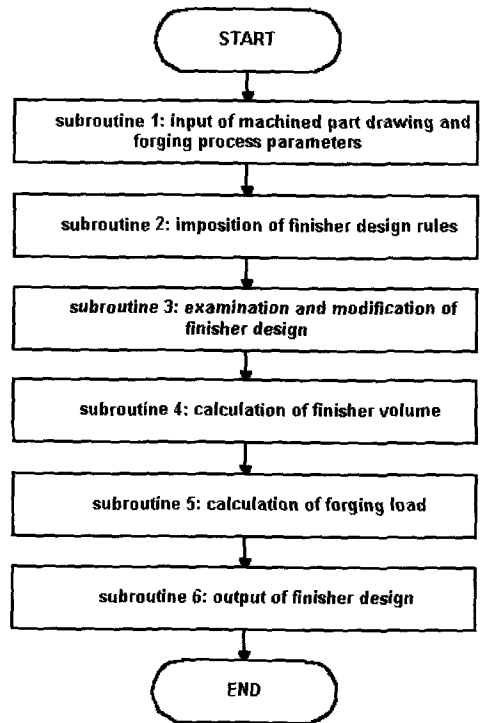


Fig. 4 Structure of finisher design system

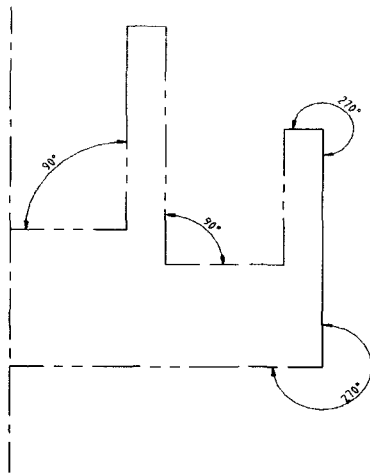


Fig. 5 Recognition of corner and fillet by angle examination ( $\theta < 180$ ; fillet,  $\theta > 180$ ; corner)

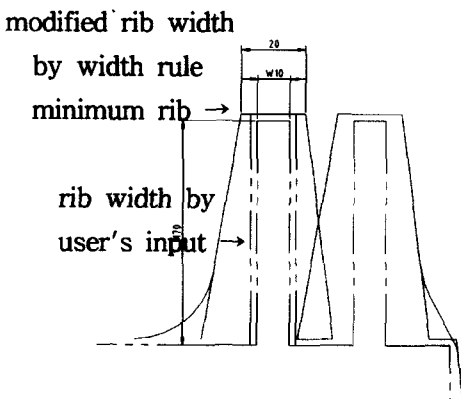


Fig. 6 Dimension modifications by minimum rib width rule

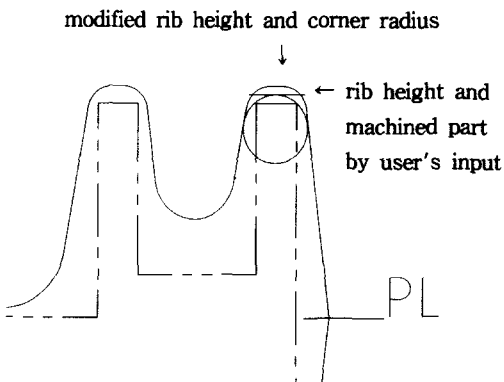


Fig. 7 Dimension modifications for an overlap between corner radius and machined part

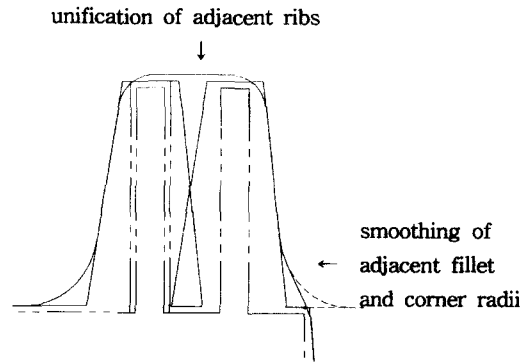


Fig. 8 Dimension modifications for overlap between ribs and between fillet and corner radii

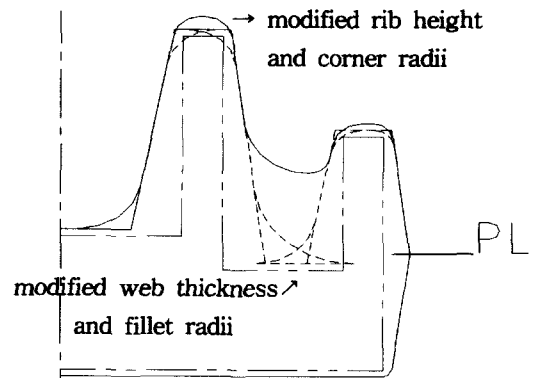


Fig. 9 Dimension modifications for overlap between corner radii and between fillet radii

접 작성하는 방법도 있다. 사용자가 도면화하여 기계가공 도면을 입력할 때는 형상의 절점수와 기계가공 여유 치수를 입력하고 형분리선의 위치를 선택하게 하였으며 형분리선의 위치는 윗 부분, 가운데 부분, 아랫 부분은 자동으로 인식할 수 있으며 사용자가 자유롭게 선택할 수 있게 구성하였다.

부 프로그램 2에서는 입력된 기계가공 형상에 기계가공 여유, 드래프트 각, 코너반경, 필렛반경 등 피니셔 룰을 적용시킨다. 이러한 피니셔 룰을 적용하기 위해서는 도면 요소 데이터베이스로부터 기계가공 부분의 형상을 인식하는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 두 직선의 사이 각( $\theta$ )을 벡터 내적을 통하여 구하고  $\theta > 180$ 인 경우는 코너 룰을,  $\theta < 180$ 인 경우에는 필렛 룰을 데이터베이스로부터 추출하여 적용하게 하였다. 그리고 Fig. 6와 같이 각각의 리브 높이 대 폭의 비를 계산하여

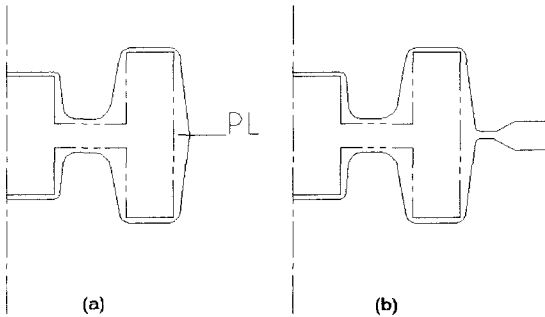


Fig. 10 Output of finisher design: (a) finisher design, (b) finisher die design

리브의 폭이 너무 좁은 경우에는 최소 리브 두께를 적용하여 리브의 폭을 증가시켰다.

기존의 연구<sup>(15)</sup>에서 피니셔 롤 적용시 몇 가지 오류가 발생하는 것이 확인되었는데 이를 정리하면 첫째는 Fig. 7과 같이 큰 코너반경의 적용으로 인하여 기계가공 부분과 겹치는 경우이고 둘째는 Fig. 8과 같이 립 사이의 간격이 너무 좁아 드래프트 각 적용시 립이 서로 겹치는 경우이다. 마지막으로 Fig. 9와 같이 코너-코너, 필렛-필렛, 코너-필렛 반경이 서로 겹치는 경우이다. 부 프로그램 3은 피니셔 설계시 이러한 오류를 검토하고 수정하는 프로그램이다.

부 프로그램 4와 5에서는 피니셔의 체적 및 성형하중을 계산한다. 피니셔의 체적을 계산할 때는 먼저 피니셔의 형상을 함수화하고 미세 링요소로 나눈 후, 각각의 체적을 계산하여 더하는 방법을 사용하였으며 성형하중은 식(5)를 사용하여 유동응력을 구하고 식(6)을 사용하여 하중을 구하였다. 또한 식(1), (2)를 사용하여 계산된 플래쉬의 두께와 폭을 출력하고 사용자가 수정할 수 있게 하였다. Fig. 10은 피니셔 설계 결과를 AutoCAD 상에 출력시킨 것이다. 피니셔 설계 결과는 (a)의 피니셔 형상만 나타내는 형태와 (b)의 피니셔와 플래쉬를 포함한 형태로 출력할 수 있다. 부 프로그램 6은 단조설계 결과를 AutoCAD 상에 출력시키는 프로그램으로 AutoLISP으로 구성하였다.

본 연구에서 개발한 시스템을 사용하여 여섯가지의 대표적인 기계가공도면에 적용하여 얻은 단조설계 결과를 Fig 11에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 여섯가지 경우에 대하여 모두 성공적으로 수행되는 것을 알 수 있다.

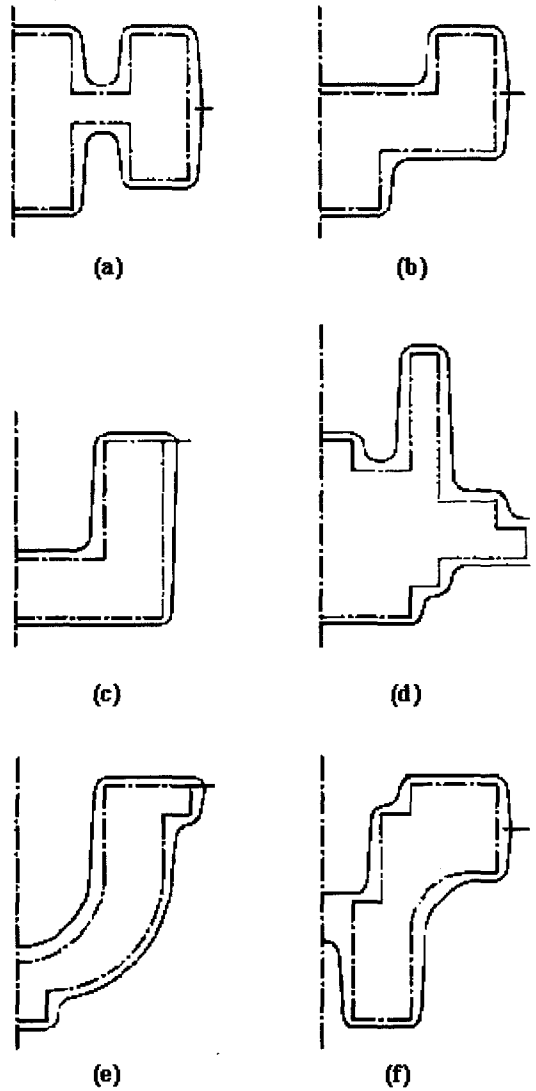


Fig. 11 Several examples of finisher designs from the developed system: (a) simple shape A, (b) simple shape B, (c) simple shape with parting line at the top, (d) complex shape, (e) cup shape with parting line at the top, (f) hollow complex shape

#### 4. 결 론

본 연구에서는 강의 축대칭 열간단조시 피니셔 설계를 자동적으로 수행하는 전문가 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 기계가공도면으로부터 단조도면을 자동적으로 작성하는 룰 베이스 시스템이다. 이 시스템에 사용된 단조설

계 들은 현장경험자의 조언과 문헌조사를 통하여 수합하였고, 단조를 적용시 발생하는 오류들을 프로그램 상에서 자동으로 판단하여 수정할 수 있게 하였다. 이 시스템을 대표적인 여섯가지의 기계가공도면에 적용시킨 결과 단조설계가 성공적으로 수행되는 것을 알 수 있었다. 향후 이 시스템의 타당성을 검증하고 보완하기 위해서는 현장도면과 비교하는 과정을 거쳐야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) 주용선, 냉간 중실형 다단압출 및 업세팅에 대한 전문가시스템 구축 및 개발에 관한 연구, 충남대학교 석사학위논문, 1994.
- (2) 김형섭, 퍼스널컴퓨터를 이용한 냉간단조 공정설계 및 금형설계의 자동화 시스템에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, 1990.
- (3) Gokler, M. I., Dean, T. A. and Knight, W. A., 1983, "Computer Aided Die Design for Upset Forging Machines", Proc. 11th NAMRC, pp. 217~223.
- (4) Davison, T. P. and Knight, W. A., 1984, "Computer Aided Process Design for Cold Forging Operations", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 551~556.
- (5) Bariani, P. and Knight, W. A., 1987, "Computer Aided Cold Forging Process Design: Determination of Machine Setting Conditions", Annals of CIRP, Vol. 34/1, pp. 245~248.
- (6) Bariani, P., Benuzzi, E. and Knight, W. A., 1987, "Computer Aided Design of Multi-Stage Cold Forging Process: Load Peaks and Strain Distribution Evaluation", Annals of CIRP, Vol. 36/1, pp. 145~148.
- (7) Kim, H. K. and Altan, T., 1992, "Computer Aided Part and Processing-Sequence Design in Cold Forging", J. of Materials Processing Technology, Vol. 33, pp. 57~74
- (8) 김홍석, 1994, 축대칭형 제품의 냉간단조 공정설계용 전문가시스템 개발, 한국과학기술원 석사학위논문.
- (9) 윤성만, 1992, 지식베이스 시스템을 이용한 중실 원형 제품의 냉간단조 공정설계, 서울대학교 석사학위논문.
- (10) 단조기술연구소, 1991, 단조기술 핸드북, 세화출판사.
- (11) Kalpakjian, S., 1991, Manufacturing Processes for Engineering Materials, ADDISON WESLEY.
- (12) Sheridan, S. A., 1972, Forging Design Handbook, ASM.
- (13) Lange, K., 1985, Handbook of Metal forming, McGraw Hill.
- (14) Schltes, T., Sevenler K. and Altan, T., 1981, Prediction of Forging Load and Stresses Using a Programmable Calculator, Topical Report No.4, Battelle Columbus Laboratories.
- (15) 김대영, 박종진, 1997, "열간단조의 자동설계", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 171~174.
- (16) 권오준, 이경중, private communication.