

## 다단 샤프트 제조용 크로스롤 금형 선단부의 형상설계에 관한 연구

김익삼\*

(1998년 12월 7일 접수)

### A Study on the Shape Design of the Forward Forming Region in Cross Rolling of Multi-Step Shaft

Ik-Sam Kim

#### Abstract

The Cross rolling between flat jaws, as a kind of hot forging, is the forming method to make the axisymmetric multi-step shaft by its rotation and pressure between flat jaws which move in opposite direction. The purpose of this study is to propose the optimal geometric data for shape development of the forward forming region. All data described on this paper are quantified by experiment from initial shape design to final shape development. As the result, proper geometric data are proved that length of the first forming area in the forward forming region is 1.5 times larger than circumference of work-piece and the progress angle changes 3 times smoothly.

**Key Words** : Cross Rolling Between Flat Jaws, Flat Jaw Type, Wedge Angle, Shoulder Angle, First Forming Area, Forward Forming Region

#### 1. 서론

해머를 이용한 샤프트의 제조방법은 예비성형체를 성형한 후에 최종 단조품으로 만듦으로서 원가절감 측면에서 소재 회수를 향상은 공정개선 및 예비성형체의 변경으로 소정의 성과를 가져 왔으나, 생산성 향상과 자동생산은 공정개선과 예비성형체의 변경만으로는 이루어지지 않으므로, 생산성의 향상을 도모하고 자동생산을 하기 위해서는 종래의 공법으로는 한계가 있다.

크로스롤링법은 하나 혹은 그 이상의 단을 갖는 축대칭의 샤프트를 제조하는 열간 단조방법의 일종으로 롤(roll)

또는 평형금형을 이용한 성형법이다.<sup>(1-2)</sup> 이 성형법은 해머에 비해 예비성형체 없이 단 한번에 최종 형상을 성형할 수 있으며, 생산성을 극대화 할 수 있고, 자동화가 용이하기 때문에 생산성 향상과 자동생산의 가능성 측면에서 주목을 받고 있다.

이러한 특징을 갖는 크로스롤링법의 원리는 1961년 체코슬로바키아에서 실용화에 도입된 이래로 일본·독일 등에서 연구가 거듭되어 왔다.

1976년 10월 일본 Ryosen社에서 롤을 사용하는 MCR-1000의 개발을 시작으로, 1992년 독일 Beche社에서 프로그램으로 운전되고 롤 또는 평형금형을 사용하

\* 영진전문대학 기계계열

는 크로스롤링 장비의 상업화가 이루어지게 되었다.<sup>(3-4)</sup>

크로스롤링 장비의 상업화에 따라 우리나라 산업체에서는 1993년 처음으로 독일 Beche社로부터 평형금형을 사용하는 크로스롤링 장비를 도입하여 샤프트의 개발을 착수하였다. 그 결과 소재 회수율 및 생산성의 향상으로 원가절감을 하는데 매우 유리하다는 점이 입증되어 샤프트류의 단조품은 점차적으로 이 제조공법으로 대체되었다.

크로스롤링법은 성형공정에 따라 두 개의 롤(roll) 간에 소재를 투입하여 성형하는 드럼형(round jaw type)과 두 개의 평형금형 사이에 소재를 투입하여 성형하는 평형(flat jaw type)으로 분류된다. 이 중 평형금형을 이용하는 성형법은 드럼형에 비해 금형제작이 쉬운 이점이 있기 때문에 이를 채택하였다.

그러나 이 경우 단을 갖는 샤프트의 개발에 있어 제품의 최대지름이 소재의 지름보다 큰 경우 성형부의 형상결정에 있어서 설계상의 문제점과 기하학적 형상개발의 난이점 때문에 설계단계에서부터 많은 시행착오를 겪어야 하는 실정이다.

평형금형은 선단부, 중간부, 선미부, 절단부로 나뉘어지며, 성형부는 1차, 2차, 3차 성형부로 구성된다(Fig. 4 참조). 이 중에서도 소재의 지름보다 제품의 지름을 크게 성형시키는 1차 성형부의 형상과 2차 성형부의 위치를 결정하는 선단부의 형상결정은 매우 중요하다. 따라서 본고에

서는 이 선단부의 기하학적 형상을 최적화하기 위한 방법을 제시한다.

## 2. 기하학적 형상의 금형설계

평형 크로스롤링법으로 제품을 성형하는 평형금형의 성형부는 1차, 2차, 3차 성형부로 구성되며, 각 성형부의 기하학적 형상은 이하에 기술하는 방법으로 설계하였다.

### 2.1 지름비에 따른 진행각 및 성형각의 선택

Fig. 1에서 이점쇄선부는 두 개의 제품을 동시에 성형하는 것을 나타내고, 숫자는 각 요소를 표시하고, 각 요소의 치수는 Table 1에 나타난 것과 같다.

Fig. 1은 본 실험을 위해 채택한 제품의 형상으로 자동차용 변속장치의 아웃풋 샤프트이다. 이 제품을 성형할 때의 특징은 금형 선단부에서 소재의 지름이 줄어들고, 소재의 지름보다 크게 성형되는 성형부를 가지기 때문에 실험 목적에 적합하여 이것을 선택하였다.

평형 크로스롤링법에 있어서 소재의 지름은 제품의 성형을 좌우할 만큼 중요하다. 이것은 소재의 지름이 성형되는 요소의 지름비(소재의 지름 - 성형요소의 지름 / 소재의 지름)를 결정하기 때문이며, 이 지름비에 따라 진행각과 성형각이 결정되어 제품의 성형이 이루어지기 때문이다.

소재의 지름은 규격화(주문생산이 아닌)된 지름으로 제

Table 1 Dimensions of test-shaft

Element	NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	NO. 6	NO. 7	NO. 8	NO. 9
Diameter(mm)	φ24.4	φ28.9	φ30.4	φ34.2	φ37.4	φ43.9	φ39.4	φ62	φ32.4
Length(mm)	12	29	17.8	98.9	19	5.2	24.6	33.1	16.5

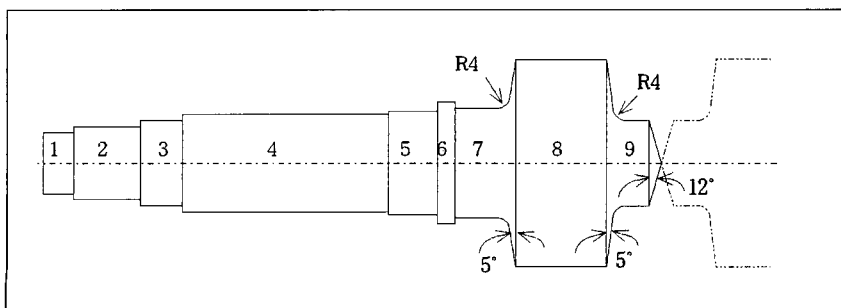


Fig. 1 Schematic diagrams of test-shaft

품의 최대지름에 근접한 것으로 가결정한 다음에 각 요소의 지름비가 성형 가능한 지름비( $\epsilon_d \leq 0.58$ ) 인지 확인하고, 사용할 소재의 지름을 결정한다.<sup>(4)</sup>

실험제품의 지름은 Table 1에서 최대 지름이  $\psi$  62mm 이므로, 소재의 지름을  $\psi$  60mm로 가결정한 다음에 소재의 지름에 대한 각 요소의 지름비를 계산하고, 진행각<sup>(4)</sup> 및 성형각<sup>(4)</sup>을 나타내면 Table 2와 같이 주어진다.

Table 2에 나타낸 지름비에서 요소 NO. 1의 지름비는  $\epsilon_d = 0.59$ 로 성형 가능한 지름비에 근접하고, 요소 NO. 8의 지름비는  $\epsilon_d = 1.04$ 로 소재의 지름보다 큰 경우로 지름을 증가시킬 체적을 확보하여 성형하면 될 것이고, 나머지 요소는  $\epsilon_d = 0.27 \sim 0.52$ 로 성형 가능한 범위 안에 들어오기 때문에 소재의 지름을  $\psi$  60 mm로 결정하였다.

평형 크로스롤링법의 금형형상 설계시 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

- (1) 성형되는 동안의 소재의 슬립(slip)
- (2) 성형부의 형상으로 인한 결함
- (3) 성형부의 체적 미달로 인한 결육 및 폭치수미달

특히, 이러한 사항들은 평형금형의 기초형상으로 결정되기 때문에 지름비( $\epsilon_d$ )와 진행각( $\beta$ ) 및 성형각( $\alpha$ ) 사이에는 밀접한 관계가 있다(Fig. 3 참조). 다음은 이론과 실험 결과로부터 얻은 경험적 사실을 논한다.

지름비( $\epsilon_d \leq 0.1$ )가 작을 경우, 진행각을 크게하고 ( $\beta = 10^\circ$ ) 성형각을 작게( $\alpha = 30^\circ$ )하면 성형시킬 체적은 적는데 진행각이 커 소재가 성형되는 것이 아니라, 성형각이 작아 소재의 체적을 밀어내기 전에 성형이 진행되므로 소재에 성형자국만 남기고 말 것이다.

**Table 2 Dimensions of elements**

Element	Ratio of dia. reduction	Wedge angle	Shoulder angle
NO. 1	0.59	10°	30°
NO. 2	0.52	10°	30°
NO. 3	0.49	10°	30°
NO. 4	0.43	10°	30°
NO. 5	0.38	9°	30°
NO. 6	0.27	6°	40°
NO. 7	0.34	8°	35°
NO. 8	1.04	-	-
NO. 9	0.46	10°	30°

**Table 3 Relationship between wedge angle and shoulder angle for the ratio of dia. reduction**

Ratio of dia. reduction( $\epsilon_d$ )	Wedge angle	Shoulder angle
$\epsilon_d \leq 0.1$	4°	45°
$0.1 < \epsilon_d \leq 0.2$	5°	45°
$0.2 < \epsilon_d \leq 0.3$	6°	40°
$0.3 < \epsilon_d \leq 0.35$	8°	35°
$0.35 < \epsilon_d \leq 0.4$	9°	30°
$0.4 < \epsilon_d \leq 0.45$	9.5°	30°
$0.45 < \epsilon_d$	10°	30°

반대로 지름비( $\epsilon_d \geq 0.45$ )가 클 경우, 진행각을 작게하고 ( $\beta = 4^\circ$ ) 성형각을 크게( $\alpha = 45^\circ$ ) 하면 성형시킬 체적은 많은데 진행각이 작아 소재가 성형되는 것이 아니라, 오히려 성형각이 크므로 소재를 잡아 당기는 성형력이 크게 작용하여 소재가 끊어지고 말 것이다.

평형 크로스롤링법의 이론을 소개한 독일 Beche社의 연구기관인 Chemnitz 연구소의 B. Lorenz에 따르면 지름비( $\epsilon_d$ )에 따른 성형각( $\alpha$ )과 진행각( $\beta$ )의 관계는 Table 3과 같이 주어진다.<sup>(4)</sup>

Fig. 4의 금형의 구성과 형상에서 1차 성형부의 형상에서는 체적을 분배 시켜 나가야 하고, 3차 성형부의 형상에서는 성형이 완료되므로 Table 3의 지름비에 따른 진행각과 성형각을 적용하는 것은 적합하지 않다.

따라서 Fig. 4의 실험제품의 금형형상은 1차 성형부의 형상은 임의로  $\beta = 9^\circ, \alpha = 40^\circ$ 로 하고, 2차 성형부의 형상(요소 NO. 7~2를 성형하는 형상)은 금형 제작할 때 다르게 할 수 없으므로  $\beta = 10^\circ, \alpha = 30^\circ$ 로 하고, 3차 성형부의 형상은 축방향 성형이 필요 없으므로  $\beta = 2^\circ, \alpha = 45^\circ$ 로 결정하였다.

### 2.2 기하학적 성형부의 형상설계

평형 크로스롤링법은 서로 반대 방향으로 왕복운동을 하는 두 개의 평형금형 사이에 소재가 투입되어 성형되므로, 금형의 높이를 결정하는 것을 도시하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2는 평면금형 위에서 성형되는 하나의 요소가 성형되는 경우를 도시한 것이다. 여기서 금형의 높이 HN를 구하는 식은 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$HN = AH - \frac{DN}{2} \quad (1)$$

식(1)에서 AH는 툴홀더의 툴 접촉면에서 소재가 성형되는 중심까지의 거리, DN은 요소의 지름에 대한 신율을 적용한 지름이다.

Table 4에서 LN은 요소의 길이에 대한 신율을 적용한 금형의 폭이며, 식(1)로부터 각 요소에 대한 금형의 높이와 금형의 폭을 구하면 각 요소의 금형치수는 Table 4와 같이 구할 수 있다.

Table 4 Tool length of elements

Element	HN(mm)	LN(mm)
NO. 1	87.62	12.18
NO. 2	85.33	29.44
NO. 3	84.57	18.07
NO. 4	82.64	100.38
NO. 5	81.02	19.29
NO. 6	77.72	5.28
NO. 7	80.0	24.97
NO. 8	68.54	33.60
NO. 9	83.56	16.75

Fig. 3은 요소의 성형형상 모델이다. 여기서 P<sub>1</sub>은 소재가 성형을 시작하는 위치, P<sub>2</sub>는 금형의 테이퍼각(θ)이 종료되는 위치, KB<sub>1</sub>는 요소의 금형(제품)의 폭이다. 이 모델에서 요소의 성형이 종료되는 위치(P<sub>3</sub>)와 소재의 지름보다 크게 성형 시키기는 2차 성형부 시작위치(P<sub>4</sub>)는 기하학적인 의미에서 중요하다.

이 위치에 따라 소재의 지름보다 큰 요소의 성형이 좌우되기 때문이다.

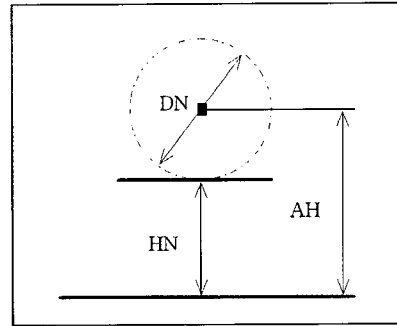


Fig. 2 Decision of tool height

Fig. 3에서 진행각과 성형각을 각각 β, α 라고 하면, θ는 진행각과 성형각에 의해 결정되는 금형의 테이퍼각이 된다. 금형의 테이퍼각은 Fig. 3의 기하학적인 형상에서 다음 식(2)의 관계가 있다.

$$\tan \theta = \sin \beta \tan \alpha \quad (2)$$

또한 소재의 지름 (d<sub>0</sub>)보다 작은 지름 (d<sub>i</sub>)으로 성형되는 금형높이를 h라 하면, 이때의 소재의 체적을 배분 시켜나가는 거리(x)는 Fig. 3의 기하학적 형상으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = \frac{h}{\sin \beta \tan \alpha} = \frac{1/2 \cdot \epsilon_v \cdot (d_0 - d_i)}{\sin \beta \tan \alpha} \quad (3)$$

식(3)의 h는 우항에 나타난 바와 같이 실제 제품 성형시 좌측금형과 우측금형에 의해서 성형되므로 1/2, 신율 ε<sub>v</sub>, 소재와 성형되는 제품의 지름차 (d<sub>0</sub> - d<sub>i</sub>)의 곱으로 표시할 수 있다.

NO. 9의 요소 성형이 종료되는 위치는 식(3)과 기하학적 형상으로부터 구하면 212 mm가 되고, NO. 8의 요소를 성형하기 위해 확보해야할 체적을 계산하면 6343 mm<sup>3</sup>이 되

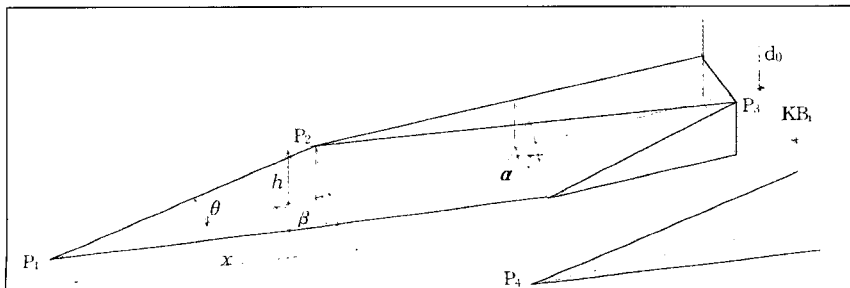


Fig. 3 Model of forming shape

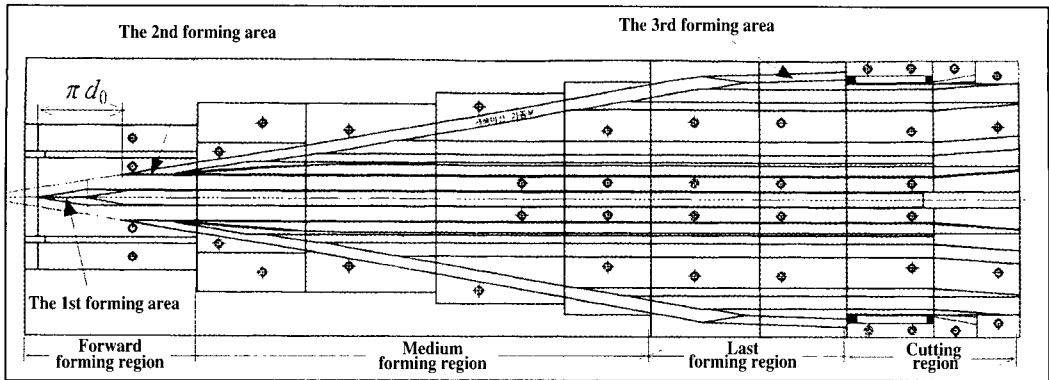


Fig. 4 Structure of test-shaft

므로 NO. 9의 요소 성형이 종료되는 위치에서 확보해야할 체적만큼 2차 성형부의 시작위치를 앞당겨야 할 것이다.

그러나 확보해야할 체적은 2차 성형부가 시작되는 위치에서 결정되므로, 이 위치에서 지름을 증가시키는 소재가 성형되는 단면적과 제품요소 축방향의 단면적과 같아야 한다. 실험제품의 경우 직경 차이가 작기 때문에 계산하면 차이가 적고, 1차 성형부의 길이는 좌우 금형에 의해 성형되므로  $\pi d_0/2$ 이면 되나, 완전한 형상으로 성형시키려면 소재가 한바퀴 회전하는  $\pi d_0$ 가 되어야 하므로 Fig. 4와 같이 설계하였다.

위에서 각 요소의 지름비에 따라 결정한 진행각 및 성형각, 각요소의 금형치수, 2차 성형이 시작되는 위치를 가지고 금형설계 형상을 작도하면 Fig. 4와 같다.

### 3. 설계결과와 검증

제품의 최대지름이 소재의 지름보다 크게 성형되는 금형 선단부의 형상개발에 있어 초기설계 단계에서부터 최종 형상의 개발까지 단계적 실험을 통하여 최적화된 기하학적 형상을 제시하고 검증하였다.

#### 3.1 실험장비 및 실험방법

Fig. 5는 평형 크로스롤링 장비의 외형을 나타낸다. 금형 홀더의 좌우 측에 부착된 평형금형은 유압 실린더가 구동할 때, 소재 측에 대하여 직각으로 움직인다. 그리고 평형금형 사이에 장입된 소재는 유압 실린더가 구동하여 금형의 성형부에 의하여 점차적으로 성형되며, 평형금형의 1회 왕복운동으로 한 개 혹은 그 이상의 샤프트를 제작할 수 있다.

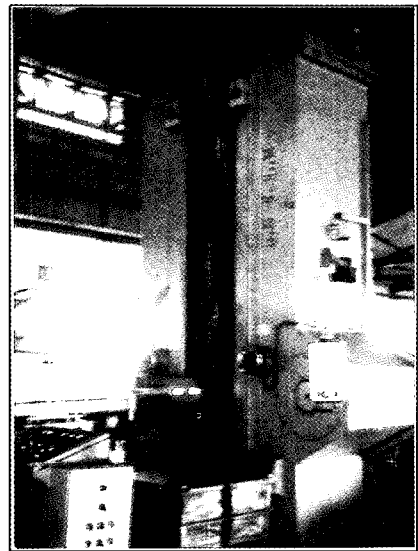


Fig. 5 Apparatus of cross rolling machine

Table 5 Specification of FBQ100

Item	Specification
Max. tool dimensions(mm)	2,700x630
Max. stroke(mm)	2700
Max. rolling speed(m/sec)	1
Min. cycle time(sec)	10
Main motor power(kw)	2×315
Tangential rolling force(kN)	315
Total weight(ton)	64

**Table 6 specification of test product**

Item	Weight
Weight of product(kg)	2.623
Weight of scrape(kg)	0.212
Weight of billet(kg)	5.25

제품의 형상에 대하여 적절한 형상의 금형을 사용하므로써 다양한 형상의 단을 갖는 샤프트를 제작할 수 있다. 만약 후미에 예리한 커터가 준비된 금형을 사용한다면 소재는 1회전으로 절단되므로, 자동적으로 제작할 수 있게 된다.

이러한 실험장치는 제품의 지름 100 mm, 길이 630 mm 까지 성형할 수 있는 독일 Beche社의 평형 크로스롤링 장비로, 실제작업에 있어서 주로 사용되는 스트로크는 2500 mm이고, 사이클 타임은 제품에 따라 다르나 사용하는 범위는 11~14초이다.

독일 Beche社의 평형 크로스롤링 장비의 주요사양은 Table 5와 같이 주어진다.

금형에 사용된 재질은 열간 금형용 재질인 STD61종을 사용하였으며, 열처리 후 경도는 HRC 45~48로 하였다. 또한 성형각을 이루는 성형부 측면은 슬립을 방지하기 위하여 0.6~0.8 mm 깊이의 거친면을 만들어 사용하였다.

실험에 사용된 소재는  $\phi 60 \times 236.5 = 5.25$  kg의 원형 소재를 사용하였으며, Table 1에서 각 요소의 체적을 계산하여 구한 제품중량과 스크랩의 중량은 가열로 인한 스케일 손실을 2%를 적용하였으며, 실험시 한번에 제품을 두 개씩 성형시키므로 소재의 중량은 제품의 중량의 2 배가 되며, 실험 소재의 각 항목의 중량은 Table 6과 같다.

또한 실험에 사용된 재질은 실제 자동차에 장착되는 구조용 합금강(ASCM17H1)을 사용하였으며, 이 재질의 특성은 유사 재질에 비해 몰리브덴(Mo)이 많아서 인장강도가 좋고, 굽힘강도가 우수한 것으로 알려져 있으며, 화

학적 성분 및 기계적 성질은 Table 7에 제시한다.<sup>(5)</sup>

평형 크로스롤링법에 있어서 소재의 지름이 감소하는 요소와 소재의 지름보다 커지는 요소를 성형할 수 있는 금형 선단부에서 실제로 열간 상태에서 어떻게 이루어지는 지 알아보고, 금형 선단부의 기하학적 형상을 구하기 위해 초기설계 단계에서 최종형상 개발까지 단계적으로 실험을 실시하였으며, 본 연구를 안정적으로 행하기 위하여 선단부에 있어서 기하학적 형상의 연구를 병행하였다.

실험조건은 단조온도 1180°, 성형속도는 최대속도인  $V=1$  m/sec로 하였으며, 금형 선단부에 있어서 1차 성형부의 기하학적 형상은 각 단계별로 실험하였다.

### 3.2 실험결과 및 고찰

#### 3.2.1 제 1 단계 실험

Fig. 6 (a)의 초기의 금형설계 형상은 실험제품의 요소 NO. 9와 요소 NO. 8(대단부)를 성형할 수 있는 금형 선단부의 기하학적 형상(1차 성형부)으로  $\beta=9^\circ, \alpha=40^\circ, \theta=7.5^\circ$  를 갖고, 길이는 소재의 원둘레인  $\pi d_0$  가지는 금형설계 형상을 나타낸다.

Fig. 6의 (b)는 초기의 금형설계 형상으로 실험한 제품의 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 6 (b)의 실험 후 제품형상에서 보는바와 같이 대단부(요소 NO. 8)의 왼쪽 모서리 전둘레에 반경 8 mm 정도의 결육과 오른쪽 모서리에 5 mm 정도의 결육이 발생되었고, 제품폭의 치수가 테이퍼 형상으로 2 mm나 미달되었다.

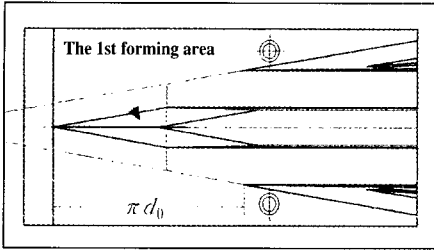
이것은 1차 성형부 형상 ( $\beta=9^\circ, \alpha=40^\circ$ )이 크므로, 1차 성형부에서 체적 변화량이 커서, 성형부의 양쪽으로 체적이 급하게 밀려나갈 때 1차 성형부 형상에 체적이 밀착되어 성형이 이루어지지 않고, 슬립이 발생하면서 성형이 제대로 이루어지지 않아 발생된 것으로 사료되었다.

Fig. 7의 (a)는 1차 성형부에서 소재의 성형과정 형상을 표시한 것이다. 1차 성형부에서 (A)의 형상으로 성형

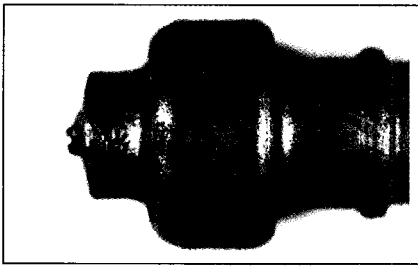
**Table 7 Chemical composition and mechanical properties of test-shaft**

Chemical compositions (%)	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Nonmetallic inclusion
	0.15-0.21	0.15-0.35	0.55-0.90	MAX. 0.03	MAX. 0.03	MAX. 0.25	0.85-1.25	0.15-0.35	MAX. 0.03	MAX. 0.20%
Mechanical properties	Tensile stress (kg/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)		Reduction of area (%)		Value of impact energy (kg · m/cm <sup>2</sup> )		Hardness (H <sub>R</sub> C)	
	90 over		15 over		40 over		6 over		21.8~33.4	

된 소재가 1차 성형부의 형상을 따라 점차적으로 성형되는 것이 아니라, (B)의 형상으로 바로 성형된다. 이것은



(a) Design shape



(b) Product shape

Fig. 6 Experiment of the first-step

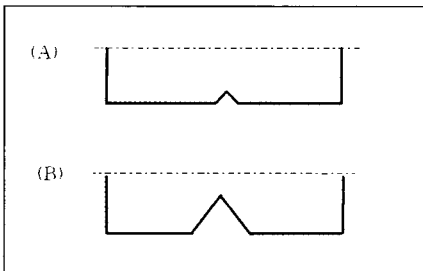


Fig. 7 (a) Forming process

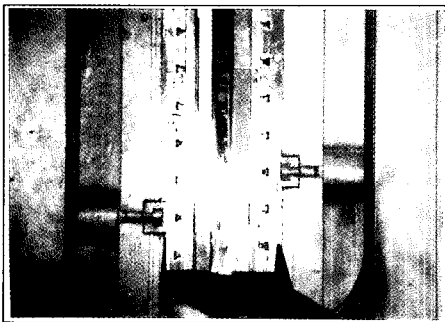


Fig. 7 (b) Situation of slipping under forming

좌측 금형과 우측 금형에 의해서 성형이 이루어지므로 즉 (A)의 형상위치에서  $\pi d_0/2$  위치만큼 떨어진 곳에서 성형이 이루어지기 때문이다.

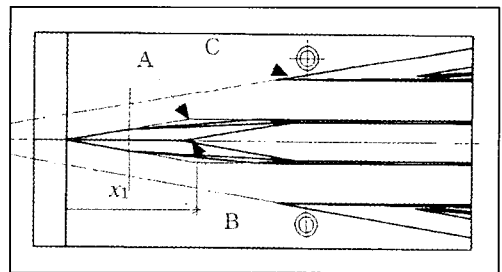
소재의 성형과정과 같이 조금 성형된 형상이 갑자기 많이 성형된 형상으로 만들기 때문에 소재를 좌우로 잡아당기는 결과를 가져와 대단부의 결육 및 폭 치수 미달의 원인으로 사료되었다.

Fig. 7의 (b)는 금형 선단부에서 소재가 슬립되는 현상을 나타낸 것으로, 낙하되는 작은 불꽃은 가열로 인한 스케일로 슬립현상이 심한 금형 선단부의 위치에서 많이 떨어지는 것을 알 수 있다.

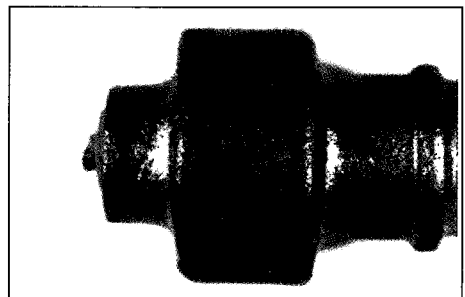
### 3.2.2 제 2 단계 실험

2단계 실험에서는 Fig. 6의 (b) 실험 후 제품형상에서 발생한 결육과 폭치수 미달의 해결 방안으로 결육의 원인이 되는 Fig. 8의 (a)와 같이 A부를 제거하여, 체적을 궁극의 목적대로 성형부에 밀착시켜 나가면서 성형이 이루어질 수 있도록 금형설계 형상을 2중각 형상으로 변경하였다.

Fig. 8의 (a)에서 금형 선단부의 1차 성형부에  $x_1$ 의 1/2



(a) Design shape



(b) Product shape

Fig. 8 Experiment of the second-step

지점에서 뒤쪽으로  $\beta=4.5^\circ$ ,  $\alpha=75^\circ$ 로 1차 성형부의 금형설계를 변경한 것이다. 이것은 B지점의 형상은  $\pi d_0/2$  앞 지점에서 성형된 형상이 B지점의 형상으로 되고, B지점에서 성형된 형상은 B지점에서  $\pi d_0/2$  후인 지점에서 성형되기 때문이다.

그러나 1차 성형부에 있어  $\theta=7.5^\circ$ 는 변함이 없다. 단지 추가 가공으로 인한 모서리 부위(성형각  $\alpha=45^\circ$ 와  $\alpha=75^\circ$ 가 만나는 곳)는 그라인더로 연삭하여 각진 부위를 제거하였다.

Fig. 8 (b)의 결과는 2중각 형상으로 설계변경한 형상대로 금형을 수정하여 실험한 제품의 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 8 (b)의 실험 후 제품형상은 대단부(요소 NO. 8)의 왼쪽 모서리 전둘레에 반경 4~5 mm 정도의 결육과 오른쪽 모서리에 반경 3 mm 정도의 결육이 발생되었고, 폭치수는 0.6 mm 미달되었으나, 초기의 설계상태에서의 결육 보다는 많이 줄었다. 이것은 성형부의 초기의 설계된 상태가 컸다는 것을 의미함과 동시에 성형부의 형상을 어떻게 가져가느냐에 따라 결육의 양상이 달라진다는 것을 의미한다.

Fig. 8 (a)에서 A부를 제거한 것은 체적을 키우는 2차 성형부(C)를 앞으로 당겨 성형하는 효과가 있는데도 불구하고, 대단부(요소 NO. 8)의 체적이 부족하다는 것은 2중각 형상의 성형부가 아직 체적 변화량이 커서, 양쪽으로 체적이 급하게 밀려 나감으로 인해 2중각 형상 성형부에서도 슬립이 발생하면서 성형이 제대로 이루어지지 않아 발생된 것으로 사료된다.

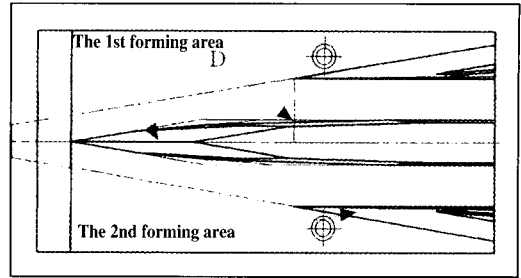
### 3.2.3. 제 3 단계 실험

3단계 실험에서는 Fig. 9의 (a)와 같이 1차 성형부를 한번 더 제거하여, 더욱더 성형부에 밀착시켜 나가면서 성형이 이루어질 수 있도록 금형설계 형상을 3중각 형상으로 변경하였다.

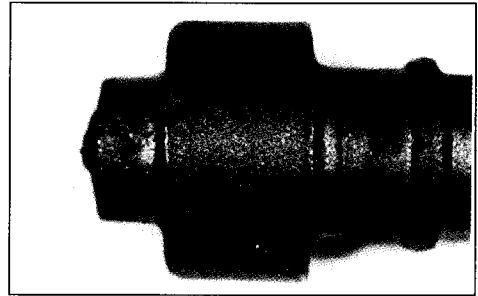
Fig. 9의 (a)는 금형 선단부의 2차 성형부 시작위치와 동일한 위치(D)에서 1차 성형부에 추가로  $\alpha=80^\circ$ ,  $\beta=1.5^\circ$ 로 금형설계를 변경한 것이다. 이렇게 변경한 것은 1차 성형부 형상에 2중각을 준 상태가 아직 커서, 2차 성형이 시작되는 위치에서 지름을 증가시킬 체적이 확보하고 성형되는 소재의 단면적을 확인하기 위해서이다.

Fig. 9 (b)의 실험 후 제품형상은 대단부(요소 NO. 8)의 왼쪽 모서리에 반경 3~4 mm의 부분적인 결육이 발생되었으나 오른쪽은 결육이 발생되지 않았고, 폭의 치수도 만족했다. 이 실험에서 3중각 형상의 금형형상으로부터 제품성형 가능성을 처음 확인하였다.

또한 금형형상을 연구하기 위해서 1차 성형부 시작위



(a) Design shape



(b) Product shape

Fig. 9 Experiment of the third-step

치에서  $\beta=7.5^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ 로 추가가공을 실시하여 실험하고,  $\beta=6^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ 로 한번 더 추가가공을 실시하여 실험해 보았지만, 1차 성형부의 시작형상이 폭이 좁고 뾰족하여 제품개발에는 진전이 없었고, 오히려 처음에는 요소 NO. 9의 표면에, 나중에는 요소 NO. 8의 표면에 결함(crack)이 발생되었다.

이상의 실험과 금형형상의 연구를 통하여 금형 선단부에 있어서 1차 성형부의 기하학적 형상과 2차 성형부의 형상을 어떻게 해야 하는지 알았다.

첫째, 성형되는 요소에 소재의 지름보다 큰 요소가 있는 경우, 성형부의 길이는 소재의 원 둘레인  $\pi d_0$ 로 하는 것은 짧다는 것을 알았다.

둘째, Fig. 8 (a)의 A부 제거 효과와 3중각 형상의 실험에서 선단부의 1차 성형부 형상은 중간부의 2차 성형부 형상과는 다르다는 것을 알았다.

셋째, 소재의 성형이 시작되는 1차 성형부 위치에서의 성형부 폭은 넓어야 한다.

넷째, 1차와 2차 성형부의 금형의 테이퍼각으로 형성되는 날카로운 모서리는 제거되어야 한다. 날카로운 모서리는 제품형상에 결함(crack)으로 나타나는 경우가 있기 때문이다.



3.2.4 제 4 단계 실험

1단계에서 3단계까지의 실험결과와 금형형상의 연구로부터, 금형 선단부의 1차 성형부 형상을 3중각의 형태로 길이는 소재 원둘레의 1.5배인  $1.5\pi d_0$  로 만들기 위해서, 금형 선단부의 앞부분을 100 mm 잘라내고, 200 mm 의 새 금형을 추가하는 형태의 금형을 설계하고 새로 제작 하였다.

Fig. 10은 3중각 형상으로 새로 설계한 금형형상으로 금형 선단부의 설계치는 다음과 같다.

첫째, 1차 성형부의 길이는 소재 원둘레의 1.5배인  $1.5\pi d_0$  로 하고, 시작 형상은  $\beta=9^\circ$ ,  $\alpha=40^\circ$  로하고 진행 각의 폭이 8mm되는 지점(a) 까지 하였다.

둘째, 3중각 형상은 2차 성형부의 시작위치에서 확보 하는 체적을 계산하여 1차 성형부의 위치(b)에  $\beta=1.5^\circ$ ,  $\alpha=80^\circ$  로 길이는  $1.5\pi d_0$  앞선 위치(c)까지 하였다.

셋째, 2중각 형상은 1차 성형부의 시작형상과 3중각 형상을  $\beta=3^\circ$ ,  $\alpha=65^\circ$  로 하였다.

넷째, 1차 성형부의 금형의 테이퍼각은  $\theta=6.5^\circ$  가 되고, 성형부의 날카로운 모서리는 연삭하였다.

위의 조건으로 제작한 금형으로 실험한 결과, Fig. 10 (b)의 제품형상과 같이 소재의 지름이 감소하는 요소(NO. 9)와 소재의 지름보다 커지는 요소(NO. 8)를 성형

Table 8 Data of forward forming region for the step

Step	Shape & length of forming area	Wedge angle	Shoulder angle	Taper angle
The 1st step	Initial shape $\pi d_0$	$9^\circ$	$40^\circ$	$7.5^\circ$
The 2nd step	Double steps angle $\pi d_0$	$9^\circ$ $4.5^\circ$	$40^\circ$ $75^\circ$	$7.5^\circ$
The 3rd step	Triple steps angle $\pi d_0$	$9^\circ$ $4.5^\circ$ $1.5^\circ$	$40^\circ$ $75^\circ$ $80^\circ$	$7.5^\circ$
The 4th step	Triple steps angle $1.5\pi d_0$	$9^\circ$ $3^\circ$ $1.5^\circ$	$40^\circ$ $65^\circ$ $80^\circ$	$6.5^\circ$

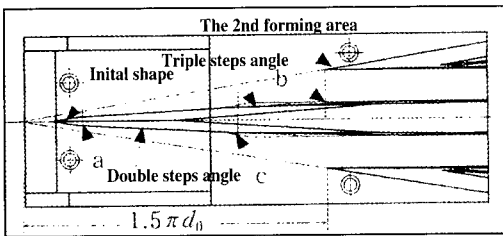
시키는데 성공할 수 있었다.

금형 선단부의 기하학적 형상을 개발하기까지의 실험 데이터를 Table 8에 나타낸다.

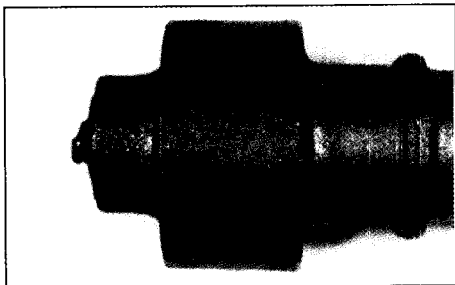
4. 결론

단을 갖는 원형 샤프트의 크로스롤링 성형에 사용되는 평형금형은 높은 성형 효율성이 있으나, 금형 선단부의 형상 결정에 있어 설계상의 문제점과 기하학적 형상개발의 난이점 때문에 설계 단계에서부터 많은 시행착오를 겪어야 하는 실정이다. 본고에서는 특히, 제품의 최대지름이 소재의 지름보다 크게 성형되는 금형 선단부에 있어 1차 성형부의 기하학적 형상을 구하기 위해 초기설계 단계에서부터 최종 형상의 개발까지 단계적 실험을 통하여 최적화된 선단부의 기하학적 형상을 제시하고 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 1차 성형부의 길이는 소재 원둘레의 1.5배 이상 되어야 한다.
- (2) 1차 성형부의 시작형상은 진행각  $\beta=8\sim 10^\circ$ , 성형각  $\alpha=40^\circ$ , 진행각의 폭은 8~10 mm 정도가 적당하다.
- (3) 3중각의 형상은 진행각  $\beta=1\sim 2^\circ$ , 성형각  $\alpha=75\sim 80^\circ$  정도로 결정한다. 단, 2중각 형상까지의 길이는 소재 원둘레의  $1/2\sim 2/3$ 인  $1/2\sim 2/3\pi d_0$  정도로 한다.
- (4) 2중각의 형상은 진행각  $\beta=3\sim 5^\circ$  금형의 테이퍼각



(a) Design shape



(b) Product shape

Fig. 10 Developed design and shape

$\theta=5\sim7$ 정도로 1차 성형부의 형상은 완만해야한다. 그리고 금형의 테이퍼각에 형성되어 있는 날카로운 모서리는 제거되어야 한다.

(5) 2차 성형부의 위치에서 소재가 성형되는 단면적과 제품요소 축방향의 단면적은 같아야 한다.

### 참고문헌

- (1) 社団法人 鍛造技術研究所(韓國), 鍛造技術 핸드북, 도서출판 세화, 1991, pp. 447~458.
- (2) Ryoichi Takahashi, et al ; Improvement of Material Yield in the Forging Process by Using a Cross Rolling Pre-form, 日産技報, 1984, pp. 210~216.
- (3) Hidehiko, et al ; Cross Roll Method for the Production of Axi-Symmetrical Step Shaft, Proceedings of the 2nd International Conference on Rotary Metalworking Processes, 1892-10, pp. 9~20.
- (4) Beche & Grohs GmbH, B. Lorenz, Cross Rolling Between Flat Jaws, 1993, pp. 1~57.
- (5) 三菱自動車(株), 材料規格(ES-X50510), 1985, pp. 1~6.