

## 극세선 및 미세 튜브 압출 장치 개발

나경환\* · 박훈재\* · 김승수\* · 윤덕재\* · 최태훈\* · 김응주\* · 조남선\*

### Development of Hot Hydrostatic Extruder for Fine Wire and Tube

K. H. Na, H. J. Park, S. S. Kim, D. J. Yun, T. H. Choi, E. Z. Kim and N. S. Cho

#### Abstract

Hot hydrostatic extruder was developed. The main objective of the development is forming fine wire and tube. On account of effectiveness and high performance, the extruder was designed to have double action. Therefore the main cylinder and mandrel can be driven independently. To cope with severe condition of high temperature and pressure, wire-wound container equipped with heater was used. Sealing technique also is important in this process, so seal ring was made of super-elastic metal. Another key for successful forming is choice of proper pressure medium. Fine wire and tube produced by the extruder can be used in semiconductor industry and medicine.

**Key Words** : Fine Wire, Fine Tube, Hot Hydrostatic Extrusion, Double Acting Extruder.

#### 1. 서론

세선이나 튜브의 제작에는 압출법과 인발법이 이용되어 왔으며 인발공정은 인발비의 한계로 인해 여러 번의 공수가 필요하게 되고, 일회의 가공으로 큰 단면감소와 균일한 품질을 얻기 위해서는 압출공정이 유리하다. 압출법 중에서 정수압 압출 공정은 강력하게 구성된 용기 안에서 유체로 둘러싸인 소재가 유체의 압력이 임계점에 도달했을 때, 금형의 형상에 따라 성형되는 공정으로 봉재, 형재, 관재, 극세선 및 복합재 등의 정상상태 압출과 고속 압출을 가능하게 한다. 기존의 압출 공법과 비교한 정수압 압출 공정의 큰 특징은 압력전달매체로 인해 소재와 용기내벽, 소재와 금형 사이의 마찰이 최소화되

어 압출압력은 소재의 길이와 무관하며 따라서 비교적 긴 소재의 압출이 가능하다는 것이다. 그리고 소재는 정수압 상태에서 압출되므로 금형내의 성형영역 외에는 좌굴이나 변형이 일어나지 않으며 비직선 또는 코일(coil)형의 소재도 직선 압출이 가능하다.

소성가공에서 가공소재가 작아지면 체적력보다 표면력이 성형공정을 좌우하는 주된 요소가 되며 마찰력으로 나타나는 표면력의 최소화는 공정의 성패를 결정하는 관건이 되므로 마찰이 최소화되는 정수압 압출공정은 극세선이나 미세 튜브재의 제조에 적합한 공법이라 할 수 있다. 이 공정을 효과적으로 이용하기 위해서는 공정 중에 고압의 유체를 안전하게 저장하기 위한 강력한 용기의 설계 제작기술의 확보와 압출재의 발사(shooting)를 방

\* 한국생산기술연구원

지 하기 위한 정교한 펀치의 변위 제어가 요구되며, 압력전달매체의 양과 가압속도와의 부조화에 따른 고유의 결합(stick-slip 또는 bamboo effect)이 발생할 우려가 있으므로 공정설계와 운전경험이 매우 중요한 요인이 된다 또한 밀폐장치를 포함한 부속품들이 고압유체의 발생과 유지에 적합하도록 설계되고 제작되어야 한다.

정수압 압출공정은 주로 냉·온간 공정으로 응용되기 시작하였으나 연신율을 높여 파단 없이 일 회외의 공정으로 큰 단면감을 얻기 위해 열간공정으로 응용하려는 연구가 진행되어 최근에 들어서는 900℃정도까지 사용이 가능한 압력전달매체를 이용하여 공정의 응용범위를 확대시키고 있다.

## 2. 미세 압출용 프레스

개발된 미세 압출용 프레스는 극세선 압출 특히 미세 튜브 압출에 적합하도록 유압구동의 주 실린더를 관통하여 맨드렐을 독립적으로 구동시킬 수 있는 이중구동형식(double acting type)의 수직형 프레스이다. 프레스의 설계기준은 컨테이너 내경을 30mm내외로 할 때, 압출온도를 고려한 최대압출압력을 12,000bar로 설정하여 이 때 소요되는 압축력 90톤급으로 최대가압하중을 설정하였으며, 압출기 램의 속도는 최대 25mm/sec까지 가능하게 하였다.

압출기의 구동부는 압출력을 주는 주실린더, 컨테이너의 이동을 위한 shifting 실린더, 주 램을 관통하여 독립적으로 이동하는 맨드렐 조정 실린더로 구성된다. 유압유니트는 강성, 신뢰성 및 소음·진동문제를 고려하여 설계하였으며 유압 유니트의 사용압력(working pressure)는 210 bar로 하였다. 고압 컨테이너는 강선적층방식으로 설계·제작하였으며 이를 위해 특수하게 고안된 강선적층장치를 이용하였다. 열간 압출을 위한 컨테이너의 가열은 적층강선 내부에 봉상의 삽입형 히터를 두었으며, 이 때 발생하는 열적 거동을 컨테이너 설계 시 고려되었다. 반복적인 압출하중을 지탱하고 압출하중 작용시에 프레임의 변형량을 최소화 하는데 초점을 두어 충분한 강성과 내구성을 갖게 하였다. 프레임은 bed, tie-rod, moving cross head, punch 및 전·후면 platen으로 구성되며, 비교적 가공이 용이한 solid bar형식의 tie-rod방식으로 일체화 하였다. 전·후면 platen의 평행도, platen hole의 중심도 및 bed sliding부의 수평도 등은 기계전체의 alignment를 좌우하므로 일체화된 가공과 중첩가공을 실시하였다. 밀폐구조는 열간 정수압 압출에 유리한 피스톤 형태로 선정하였으며 이 구조 하에서 압출 빌렛은 컨테이너의 전면으로 장입도 가능하며, 압력

전달매체도 상온에서 고체상태로 컨테이너 내로의 삽입이 가능하다. 금형부는 전용기계로서의 면모를 갖추기 위해 금형지지부와 일체로 설계하였고 장치자동화를 고려하여 압출재와 잔여압출빌렛의 분리는 비교적 충격이 작은 sawing을 이용하며, 금형교환이 용이한 구조를 갖추고 있다. 압출을 위한 빌렛가압부는 펀치, 로드셀 및 moving crosshead로 구성된다. 펀치는 최대압출하중에 의한 좌굴을 우선적으로 고려하였으며, 압출력 측정을 위한 로드셀은 온도와 습도를 고려한 내구성과 충분한 강성을 갖도록 하였다. 또한 펀치의 정밀한 변위제어를 위해 LVDT를 설치하였다. 설계·제작된 미세 압출용 프레스의 주요 규격은 Table 1에 나타내었다. 완성된 압출기의 외관은 Fig. 1에서 볼 수 있다.

Table 1 Specification of fine wire and tube extruder

Item		Specification
General	Extrusion force capacity	900 kN
	Maximum extrusion pressure	12.0 kbar
	Maximum punch speed	25 mm/sec
	Maximum billet diameter	25 mm
	Maximum billet length	200 mm
	Main frame type	4 column of tie rod
Hydraulic unit	Hydraulic power	40 kW
	Hydraulic working pressure	210 bar
	Pump delivery	50 l/min
	Tank capacity	250 l

## 3. 초고압 컨테이너

### 3.1 개요

정수압 압출공정의 기본원리가 초고압의 발생과 이를 유지시키는 것이므로 컨테이너부는 정수압 압출기의 핵심부라 할 수 있다. 본 연구에서는 컨테이너를 제작함에 있어 구조적, 기능적으로 가장 선진화된 기술인 강선적층방식을 채택하였다. 강선적층방식은 허용내압을 높이기 위해 pre-stress를 가하는 방법중의 하나인 다중벽 구조의 개념에서 한층 발전하여 일정한 폭과 두께를 갖는 강선에 인장력을 부여하여 원통의 외주에 감아나가는 방식이다. 이 방식은 다중링을 반경방향과 축방향으로

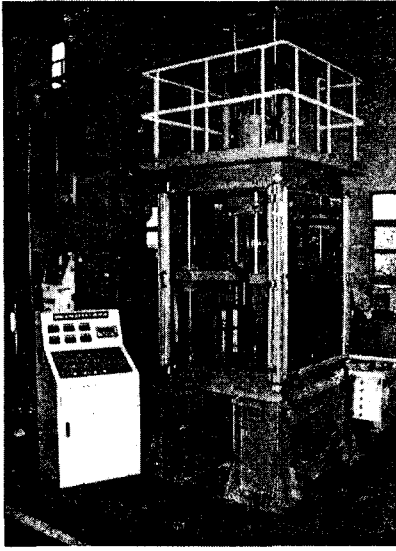


Fig. 1 Fine wire and tube extruder

유한개로 세분해서 계산된 권선력 즉 winding force를 제어하여 컨테이너 구조물의 응력분포를 최적화하여 안전도를 높이는 동시에 소형화를 이룩할 수 있는 획기적인 제작방식이다.

본 연구의 90Ton급 미세 정수압 압출용 프레스에 장착될 컨테이너의 상용내압은 열간압출을 감안하여 12,000bar로 설정하였다. 적층 전의 컨테이너는 내측 인서트(insert)와 그 외측에 라이너(liner)가 끼워맞춤되고 적층 시 강선의 이탈을 막기 위해 상하 플렌지와 라이너는 나사체결로 일체화 한다. 라이너의 외벽에 반원형태의 홈을 길이방향으로 두어 여기에 가열소자가(heating element) 카트리리지(cartridge) 형태로 설치된다. 이 라이너의 외벽에 강선이 적층되며, 적층이 완료되면 보호덮개가 씌어지고 강선의 끝은 보호덮개에 고정된다. 적층이 끝난 컨테이너는 bore에 내경 연삭가공이 행해지며 각종 attachment들과 bed면 위에서의 안내를 위한 flange가 tie rod로 체결되며 끝으로 tie rod의 외부에는 단열재로 감싼다.

### 3.2 컨테이너 설계

컨테이너는 안쪽에 끼워맞춤된 인서트와 라이너, 그리고 라이너의 외벽에 강선이 적층되는 구조를 갖고 있다. 컨테이너의 설계시 압출기의 가압가능하중과 최대압출압력에 따라 컨테이너bore의 직경이 결정되며 또한 밀폐요소, 금형부 및 각종 체결부에 따라 적층이 시작되는 liner의 외경이 정해진다.

인서트 내경이  $r_0$  외경이  $r_1$ 이고, 라이너 외경이

$r_2$  인 원통 주위에 강선을 적층을 고려한다. 임의의 반경  $r_i$ 에서 두께가  $\Delta r_i$ 인 강선에 인장응력  $T(i)$ 로 적층시에 접촉면압의 증분  $\Delta p_i$ 는 다음과 같다.

$$\Delta p_i = \frac{T(i)\Delta r_i}{r_i} \quad (1)$$

이  $i$ 번째 적층으로 발생한 면압증분  $\Delta p_i$ 는  $r = r_i$ 에서 외압증분으로 작용하고 이로 인한 원통부의 응력증분들은 식(2)와 (3)으로 구해진다.

$$\Delta \sigma_\theta(r)_i = -\frac{r_i}{r_i^2 - r_0^2} \left[ 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right] T(i)\Delta r_i \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_r(r)_i = -\frac{r_i}{r_i^2 - r_0^2} \left[ 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right] T(i)\Delta r_i \quad (3)$$

강선의  $n$ 번 적층으로 인한 원통부의 응력분포는 다음과 같다.

$$\sigma_\theta(r) = -\left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{r_i^2 - r_0^2} T(i)\Delta r_i \quad (4)$$

$$= -\left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) h \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{[r_2 + (i-1)]^2 - r_0^2} T(i)$$

$$\sigma_r(r) = -\left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{r_i^2 - r_0^2} T(i)\Delta r_i \quad (5)$$

$$= -\left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) h \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{[r_2 + (i-1)]^2 - r_0^2} T(i)$$

위의 식들을 바탕으로 증첩원리를 이용하고 여기에 가열 시 온도분포에 따른 영향, 경계조건 및 구속조건을 적용한 최적설계기법을 이용하여 적층수와 인장력을 결정한다. container를 구성하는 각 요소의 항복조건으로는 Tresca 항복조건을 적용하였으며, 신뢰도를 확보하기 위해 안전계수의 개념을 도입하였다. 부하압력과 예상되는 온도분포에서 인서트부는 그 안쪽벽에서 최대전단응력이 유발되며 설계기준은 이 안쪽벽에서 정수압 응력과 최대전단응력의 변동폭이 적정 피로수명을 고려한 설계값에 도달하도록 설정하였으며, 라이너와 강선부도 같은 설계척도를 적용하였다. Container의 중심에서 멀어질수록 bore에서의 부하압력이 유발시킨 원주응력과 반경응력의 차는 작아진다. 따라서 중심에서 멀어질수록 원주방향의 응력을 증가시켜 최대전단응력을 크게 해주는 동시에 중심방향으로는 압축응력을 가해 최대전단응력을 작게 해야 이득(gain)을 증가시킬 수 있다. 이는 라이너 외부에 감겨지는 강선의 인장력으로 제어가 가능하며, 강선의 적층수가 커짐에 따라 강선의 인장력을 증가시켜 원주응력과 반경응력의 차를 일정하게 유지시키는 것이 효과적이며 궁극적으로는 상용부하압력이 작용할 때 적층된 강

선충의 각각의 바깥면에서의 최대전단응력이 일정한 값에 도달할 때 동일한 용기의 dimension으로 최대의 이득을 얻을 수 있다. 설계된 컨테이너의 주요 규격은 표 2에서 나타내며 예상되는 응력분포는 Fig. 2에서 보여준다.

Table 2 Specification of extrusion container

No	Item	Specification
1	Insert inner radius( $r_0$ )	15 mm
2	Liner inner radius( $r_1$ )	25 mm
3	Liner outer radius( $r_2$ )	65 mm
4	Wire layer outer radius( $r_3$ )	142 mm
5	Working bore pressure( $P_w$ )	1,200 MPa
6	Fitting pressure of insert and liner( $P_i$ )	188 MPa
7	Number of low and layer of wound wire	88×203
8	Winding stress (minimum~maximum)	40 MPa~506MPa

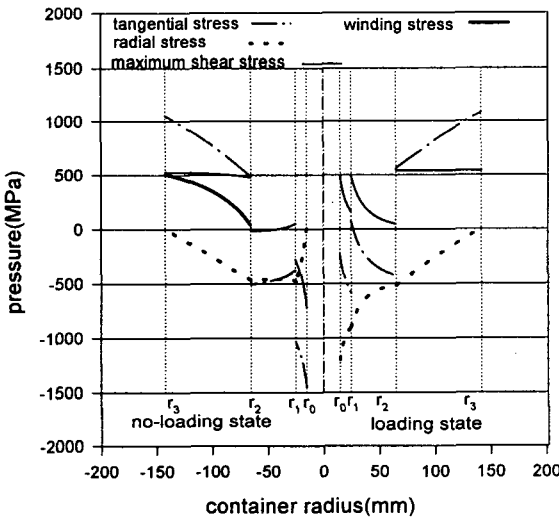


Fig. 2 Stress distribution of the container

### 3.3 컨테이너 제작

인서트와 라이너에 압입되고 플랜지로 고정되면 라이너의 외벽에 강선이 적층된다. 강선적층은 특수하게 고안된 적층장치로 행하는데 강선적층장치는 원통형상의 실린더의 외주에 설정된 가변장력으로 이송량과 감는 속도 등이 서로 관계를 갖고 어긋남이나 성김이 없이 감는 구동체계를 갖추어야 한다.

강선에 장력을 주는 방식은 magnetic brake가 부착된 driven roll과 이와 나란히 놓여진 idle roll주위에 강선의 폭을 고려한 홈이 파이게 된다. Bobbin에서 풀린 강선은 이 홈을 따라 driven roll과 idle roll에 번갈아 감긴다. 이 때 driven roll은 magnetic brake에 흘러주는 전류에 따라 부하 토오크가 변하며 이 토오크가 장력을 조절한다. 강선에 작용하는 장력은 또다른 idle roll에 부착된 로드셀로 감지하고, 강선의 상하이송은 가변속모터로 행하며 권선테이블의 회전수와 일정한 관계를 갖는다. 이는 강선의 폭과 이송피치에 따라 결정되며 각 구동부는 각종 모터와 감속기 및 센서들로 구성된다.

Bobbin의 교체시 강선의 연결부는 Butt flash welding으로 연결하며 연결부는 표면 grinding과 annealing을 행한다. 또한 적층시 적층방향이 바뀌는 부분 즉 상단과 하단부의 적층 결손이 발생하는 부분에는 강선 spacer로 채운다.

강선의 적층이 완료되면 적층부의 외부에 반 원통 모양으로 된 두 개의 덮개가 씌어지며 강선의 끝단은 덮개부에 bolt로 고정된다. 제작된 컨테이너의 조립도를 Fig. 3에서 보여준다.

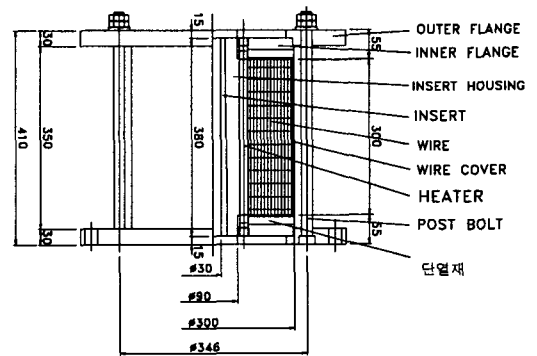


Fig. 3 Structure of hot hydrostatic extrusion container

## 4. 정수압 압출실험

### 4.1 금형 및 밀폐

정수압 압출용 금형은 공정의 특성상 컨테이너 bore 내로 삽입된 상태에서 소재가 압출되기 때문에 금형의 크기가 작아지고 구조도 비교적 간단하여 재료 소모와 가공비의 측면에서 재래식 압출금형에 비해 유리하다. 그러나 정수압 압출의 가장 큰 특징인 컨테이너 내에서 초고압의 발생과 유지를 위해서는 결함이 없는 표면구조와 특수한 밀폐장치의 첨가가 요구된다.

금형의 설계 및 제작기술은 금형의 수명, 압출재의 결합 유무 및 압출압력 등에 영향을 미친다. 금형의 재료로는 고온에서 인장 및 압축강도가 높고 내마모성도 비교적 우수한 내열 공구강 소재로 하여 기계가공과 열처리공정을 거쳐 방전가공으로 미세구멍을 얻는다. 압출시 소재와 금형의 bearing면 사이의 마찰을 최소화하기 위하여 금형의 bearing면은 다이아몬드 분말로 래핑가공한다. 압출금형의 형상은 원추형으로 적절한 금형각으로 추천된 60°에서 100°사이의 원추각을 갖으며 금형은 입구에서 출구까지 직선으로 이어지고 출구부위에 약간의 랜드부를 두고 3° 내외의 여유각으로 벌어진단다.

극세선 압출을 위해 금형을 제작하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

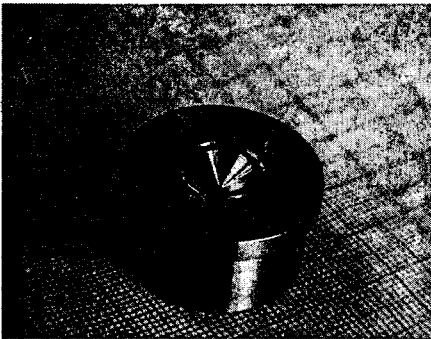


Fig. 4 Die for fine wire extrusion (extrusion diameter : 20 $\mu$ m)

컨테이너 bore에서 초고압의 발생과 유지를 위해 특수한 밀폐구조가 요구된다. 밀폐가 요구되는 부위들을 금형과 컨테이너 사이의 정적 밀폐부와 펀치와 컨테이너 사이의 동적 밀폐부이다. 금형과 컨테이너사이의 밀폐는 금형의 외경치수와 컨테이너의 내경치수로 그 틈새를 조절하고 고리형태의 한 쌍의 밀폐요소인 miter-ring을 삽입한다. 금형과 컨테이너 사이의 틈새는 금형 외경의 1/2000정도가 적절하며 밀폐요소의 재료로는 팽창률이 우수하고 고온, 고압하에서도 충분한 강도를 갖는 Ni-Ti초탄성 합금을 사용한다. 또한 램프 컨테이너 사이의 동적밀폐는 램프 밀폐요소를 삽입시키고 너트로 압착하여 고정시키거나 밀폐재가 장착된 dummy block을 이용한다.

#### 4.2 미세 압출

정수압 압출이 유체속에서 소재를 변형시키는 공정이므로 공정특성상 빌렛의 길이나 형상의 제약을 덜 받는다. 극세선의 경우 수십 $\mu$ m의 선재를 얻기 위해서는 압출

비 10,000정도의 단면감소를 얻을 수 있다면 초기시편의 직경은 수 mm이어야한다. 이를 직선 시편으로 하였을 때 단위 lot가 큰 제품을 얻기 위해서는 시편의 길이가 매우 길어야하고 이를 만족시키기 위해서는 길이가 긴 컨테이너를 갖춘 압출장비가 요구되는데 이는 현실적으로 실현이 불가능하다. 따라서 정수압 압출 만의 특성을 활용하여 Fig. 5와 같이 코일형의 빌렛을 이용한다.

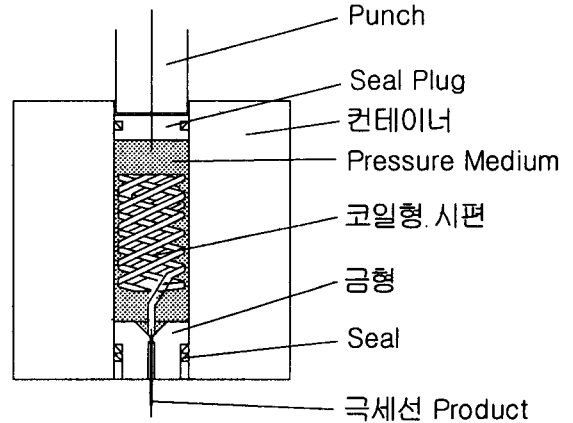


Fig. 5 Principle of fine wire extrusion

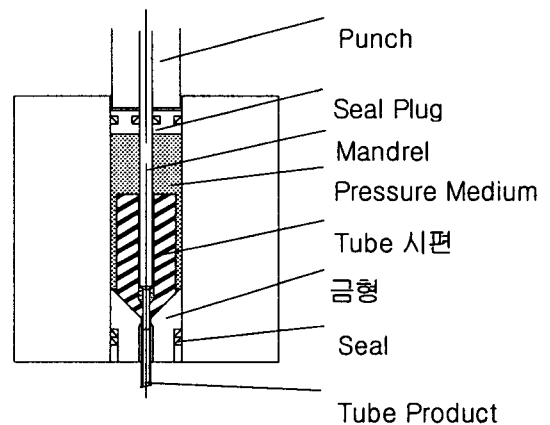


Fig. 6 Principle of fine tube extrusion

압출비를 고려한 적절한 소경을 갖는 선재를 압출 시 비틀림을 감안한 곡률로 여러 겹을 중첩시켜 감은 후 컨테이너에 장입하면 컨테이너 bore의 공간 대부분을 활용할 수 있어 배취(batch)형식으로는 비교적 생산성이 양호한 공정을 구현할 수 있다. 코일형 빌렛은 bobbin형태와 self-standing형태가 있으며 공간 활용도 측면에서 self-standing 형태가 유리하다. 처음 압출이 시작될 코

일형 빌렛의 선단은 애칭으로 직경을 축소하여 금형을 통과시킨 후 컨테이너 내로 안내된다. 컨테이너 내에 압력전달매체가 채워지고 펀치로 가압하여 일정 압력에 도달하면 압출이 시작된다. 극세선 압출에서는 빌렛의 shooting 현상을 방지하기 위한 펀치의 정밀한 변위제어가 곤란하므로 빌렛의 끝단은 매듭을 만들어 빌렛의 끝단이 금형을 통과하지 못하게 한다. 극세선 압출은 일회의 공정으로 큰 단면감소를 얻을 목적으로 수행하며 그로 인해 금형 출구를 빠져 나오는 압출재의 속도가 매우 빠르게 되므로 이를 감아내기 위한 정교한 권선장치가 요구된다. 권선장치는 장력조정부, 안내롤 및 spooler로 구성되며 극세선의 진직도를 유지할 정도의 장력을 부여해 압출공정에 약간의 드로잉(drawing)공정이 부가된다. 시제품은 구리 극세 선재를 우선적으로 제작하며 점차 금이나 은과 같은 귀금속류로 확대하여 적용한다.

미세 튜브 압출공정은 Fig. 6에서 개략적으로 보여준다. 미세 튜브 압출용 빌렛은 원통형 빌렛 중앙부에 맨드렐 shank부가 통과할 수 있는 구멍을 뚫고, 압출이 개시되는 선단부는 맨드렐 tip부에 맞게 구멍을 가공한다. 이 때 선단부의 가장 끝부분에서는 초기밀폐를 위해 구멍을 관통시키지 않고 막힌 상태로 둔다. 금형과 빌렛이 컨테이너 내에 삽입되고 압력매체를 채운 후 동적밀폐를 위한 seal plug인 dummy block이 장입된다. 이 때 맨드렐이 seal plug와 빌렛을 관통하여 맨드렐 tip부분이 금형의 랜드부까지 이동하여 고정되고 펀치가 하강하여 seal plug를 밀면 컨테이너 bore내의 압력이 상승하여 압출이 개시된다. 펀치가 정해진 위치까지 도달하여 압출을 완료하면 펀치와 맨드렐이 초기 위치로 복귀하고 압출재는 절단되어 straightening공정으로 곧게 편다. 미세 튜브 압출의 대상소재는 내과의료용 미세관이나 혈관 확장용 튜브재 등으로 이용할 수 있는 Ti-Ni 초탄성합금으로 하며 큰 압출비를 얻기 위해 800℃ 이상의 고온에서 수행한다.

## 5. 결론

본 연구에서 압출기 프레임, double acting 실린더, 컨테이너 및 stem assembly를 포함한 90톤급의 미세 압출용 열간 정수압 공정 설비를 설계·제작하였으며, 이를 이용하여 귀금속류 극세선 및 초탄성합금 미세 튜브의 압출 실험 연구를 수행할 수 있는 토대를 마련하였다. Bore의 내경이 30mm인 열간 압출용 컨테이너의 설계와 제작에 있어서 wire-winding기법을 선정하여 특수하게 고안된 강선 적층장치를 이용하여 피아노 강선을 적층하

여 컨테이너의 소형화와 안전에 대한 신뢰도를 확보하였다. 컨테이너를 신속히 가열하고 단열효과를 극대화하며 보수와 유지를 용이하게 하기 위한 방안으로 컨테이너 라이너에 열선 cartridge를 삽입하는 가열방식을 개발하였으며, 이를 통해 성형온도를 보다 정밀하게 제어할 수 있는 시스템이 구축되었다. 열간 정수압 압출공정에서 압출비 및 압출온도 등의 실험조건에 대한 공정변수의 파악을 위해, 내열 그리스를 이용하여 구리 및 Ti합금을 소재의 열간 정수압 압출실험을 수행하고 있으며, 향후 귀금속류를 비롯한 고부가 첨단소재의 미세 성형 기술 개발에 점차적으로 확대 적용한다.

## 후 기

본 연구는 산업자원의 차세대신기술개발사업 중 Milli-Structure 생산기술개발사업의 일환으로 이루어졌음을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

- (1) T.Matsushita and K.Kita, 1988, "Development of a Multi-type Extrusion press", 4th International Aluminium Extrusion Technology, Vol I, pp. 281 ~ 291.
- (2) Wilson, W.R.D. 1985, Hydrostatic Extrusion(Theory and Applications), Section 3 Lubrication I ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, pp. 41 ~ 71.
- (3) Pugh, H.L.L.D. 1989, "Hydrostatic Extrusion", Cu 1986-COPPER TOMORROW. Technology-Product -Research, Conference Paper, pp. 67 ~ 83.
- (4) Matsusita, T., Yamazaki, T., Arimura, K. and Noguchi, M. 1991, "Commercially Pure Titanium", KOBELCO Technology Review, No.12.
- (5) Yasunori Saotome, 1997, "Microforming and Fabrication of Micromachines with Amorphous Alloys", Proc. the 3rd Int. Micromachine Symposium, pp.29~31
- (6) Yasunori Saotome and Akihisa Inoue, 2000, "New Amorphous Alloys as Micromaterials and the Processing Technologies", Proc. IEEE the 13th Annual Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems 2000, pp.288 ~ 292.