

# 미세 다심선 정수압 압출 및 단선 무금형 신장 성형 기술

박훈재\*, 김창훈#

## Multi-Filament Hydrostatic Extrusion and Fine Wire Dieless Stretching Technology

Hoon-Jae Park\*, Chang-Hoon Kim#

### ABSTRACT

Multi-filament hydrostatic extrusion was developed as a fine wire manufacturing process and wire forming experiments were conducted. Also, single wire stretch forming process was proposed in the possibility of obtaining long wire with constant cross-section. In the multi filament extrusion since the workpiece, die and forming facility are in the macro forming circumstance, fine wire and fine hole structure with less than a few micrometer can be easily obtained. Although stretch forming does not use a die in order to avoid the friction problem between the workpiece and the die, it is necessary to have high level of technology to maintain cross-sectional shape and measure in longitudinal direction

**Key Words** : Muti-filament, Fine wire, Wire stretching, Hydrostatic extrusion

### 1. 서 론

현재 전 세계적으로 혁신적인 선진기술의 발달과 그에 따른 제품의 고급화 등의 요구에 따라 금속재료의 형상, 기능면에서의 기술적 요구도 복잡해지고 더욱 엄격한 특성을 요구하고 있는 실정이다. 이러한 요구에 대처하는 수단으로서 각각의 고유성질을 갖는 금속과 금속, 세라믹과 또는 고분자재료등과의 조합을 통한 재료의 미세 선재의 가공기술에 관한 연구가 주목받고 있다.

미세 선재 가공기술은 반도체산업, 우주·항공산업,

전기전자 산업 등에 절대적으로 필요한 극소형, 고기능 정밀부품소재를 제조하는 기술이다. 현재 국내 제조업의 대부분 미세 선재를 제조하는 성형방법은 Cold Wire Drawing으로 금형과 Pass Schedule 설계기술, 정밀금형가공기술, 금형의 마모에 의한 정밀도, 금형과 소재의 윤활기술 등을 고려한 수백 번의 인발 공정과 풀립처리공정을 통하여 단위세선 혹은 복합세선을 생산하고 있기에 생산효율 및 비용, 설비비 등의 측면에서 문제가 되고 있는 뿐 아니라 소재의 변형경화와 인발비(drawing ratio)의 감소로 인한 한계로 미세선재를 제조하기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 모든 산업에 있어서 부품이 고성능, 경박단소화에 따라 적용되는 소재도 극소, 극세화되고 있으며 현재 Magnet wire, 반도체용 lead wire(Cu 소재), 고직 접회로용 Au, Al bonding wire뿐만아니라 chip

\* 한국생산기술연구원 생산공정기술본부

# 교신저자 : 한국부품소재산업진흥원 기술개발본부

E-mail : kch@kmac.or.kr

inductor 등 소형 정밀 부품소재로서 수십  $\mu\text{m}$  이하의 미세 선재의 사용은 급증하고 있으며 향후 고부가가치용으로 기대되는 반도체용 정밀필터, 하이브리드 IC, 의료기기, 센서소자 등에 활용도는 매우 높을 것으로 예상된다. 이에 대응하기 위해서는 새로운 성형방법의 개발은 필수적이다.

본 연구에서는 보다 효율적이고 생산성이 있으며 고품질의 미세 선재를 제조하기 위한 새로운 성형방법의 개발을 목표로 하였다.

냉간 인발공정을 이용하여 미세 선재를 얻고자 할 때, 인발비의 한계로 수백 단계의 성형 공정과 열처리 공정이 필요하다<sup>[1-3]</sup>. 기존의 직접압출법과 간접압출법은 일회성 성형으로 직경을 크게 줄일 수 있고 길이 방향으로 균일한 선재를 얻을 수 있지만 세선의 성형에는 적용할 수 없다. 반면 정수압 압출 공정은 압력전달매체로 인해 소재와 용기내벽, 소재와 금형사이의 마찰이 최소화되고, 압출소재는 정수압 상태에서 압출되므로 금형내의 성형영역 외에는 좌굴이나 변형이 일어나지 않으므로 미세 선재 성형에 적용할 수 있다<sup>[4-6]</sup>.

선재를 적층해서 다심으로 압출할 경우에는 실제 성형시에 다루는 소재와 금형, 성형 장치 등의 성형 환경이 기존의 매크로 성형과 동일하게 된다. 이와 같이 반복적으로 적층된 시편은 매크로한 성형과정을 거친 후 선택적으로 소재를 제거함으로써 직경이 수  $\mu\text{m}$  이하의 극세사나 수  $\mu\text{m}$  이하의 구멍을 갖는 필터 형태의 구조물을 얻을 수 있다<sup>[7-9]</sup>.

열간 정수압 압출공정을 이용해서 적층 다심선재의 제조 가능성을 알아보기 위하여 알루미늄의 봉재를 구리 튜브에 삽입해서 단심소재를 육각형상으로 압출한 후 다시 적층해서 2, 3차 반복 압출실험을 수행함으로써 적층 다심선재의 압출 성형 특성을 알아보았다. 한편 단면 형상이 일정한 장선을 얻기 위한 방법으로 단선 스트레치 포밍 (stretch-forming)의 가능성을 타진해 보았다. 스트레치 포밍 (stretch-forming) 법은 단일 선재의 굽부를 가열한 상태에서 장력을 가하여, 인장변형이 연화된 부위에서 집중시킴으로써 단면을 줄이는 방법이다. 금형을 쓰지 않으므로 해서, 소재와 금형간 마찰에 의한 문제점을 피할 수 있으나, 길이방향으로 단면형상과 치수를 일정하게 유지하기 위해서는 고도의 제어기술이 필요하다.

## 2. 열간 정수압 다심선 압출

### 2.1 열간 정수압 압출

열간 정수압 압출법을 이용한 이종재료의 적층 다심선재의 제조공정은 Fig. 1과 같이 구리튜브에 알루미늄 봉재를 끼워 단심을 압출한 다음 구리튜브에 압출된 단심시편을 적층해서 압출하고, 다시 이 소재를 적층해서 압출함으로써 적층 다심선재를 얻는다. 여기서 다심선재의 적층 수는 19개와 37개로 실험하였다.

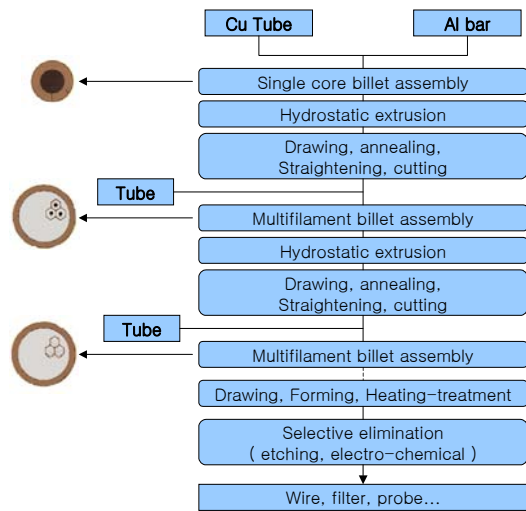


Fig. 1 Flow chart for repetitive bundle forming

본 실험에 사용된 압출기는 1.50GN 성형하중을 갖는 열간 정수압 압출기로 Fig. 2에 보이는 것과 같이 베드, 타이로드, 크로스헤드, punch로 구성되며, 타이로드 방식으로 일체화하였다. 압출금형의 형상과 압력 시일링의 형상을 Fig. 3에서 보여주고 있다.

원추형금형을 이용한 압출에서 압출각의 확대는 전단변형량의 증가를 가져오고 압출각의 감소는 마찰력의 증가를 일으키므로 압출각에는 최적값이 존재하게 된다. 본 저자들이 수행하였던 열간 정수압 압출에 관한 실험적 연구<sup>[4]</sup>로부터 최적값이 압출 반각 기준으로  $30^\circ$ 임이 알려져 있으며 이번 연구에서도 이 결과를 활용하였다. 압력매개체는 선형 저밀도 폴리 에틸렌(LLDPE)을 이용하였다. 압출시편과 컨테이너

의 가열온도는 320℃로 하였다. 이는 Clad 쌍을 이루고 있는 Cu와 Al의 확산이 일어나지 않도록 최대한 온도를 낮출 조건과, Al의 열간 성형이 원활 하게 되기 위한 온도 상승 조건을 동시에 만족시키기 위한 것으로 반복된 압접실험을 통하여 찾았다.



Fig. 2 Hot hydrostatic extruder



Fig. 3 Extrusion dies and seal rings.

단심 압출시편은 외경 35mm, 내경 25mm인 순수 구리 튜브시편에 25mm 알루미늄(3003계 합금) 봉재를 삽입하였다. 단심 소재를 다심으로 적층하기 위한 튜브는 외경 35mm, 두께 1.4mm인 구리튜브를 이용하였다. 단심 압출소재를 적층하기 위해 압출제품 형상을 육각형으로 하였다. 임의의 평면공간을 가장 효율적으로 충전시킬 수 있는 도형이 육각형임은 기하학적으로 잘 알려진 사실이다. 육각 변의 크기는 압출시편의 최대 직경과 다심 적층 수를 고려해서 4.7mm와 6.4mm로 압출하였다. 시편의 끝단은 정수압 압출 시에 튜브와 다심 소재 사이로 압력매개체가 스

며들지 못하도록 밀폐하는 과정이 필요하다. 소재 뒷부분은 플러그를 접합하였고 앞부분은 금형의 원주 부분에 소재가 밀착될 수 있도록 스피닝 성형으로 으르렸다. 스피닝된 시편을 압출초기 압력을 유지하기 위해 원추형상의 금형각도와 동일하게 가공하였다.

## 2.2 다심선 압출 실험

Fig. 4에서는 단심소재로 압출된 시편을 보여주고 있으며, 압출된 단심선재를 19심재로 적층해서 1차 다심으로 압출된 시편은 Fig. 5와 같이 얻을 수 있었고, 압출된 시편을 다시 적층해서 압출된 2차 다심 선재는 Fig. 6과 같다. 단면 충전 효율이 높은 육각형을 선택하였음에도 불구하고 원통과 적층된 다심선재 사이에는 공백이 생기게 되지만 정수압에 의해 컨테이너 안에서 압출되기 전에 압착되어 사라짐을 확인할 수 있다.

Fig. 7에서는 19개를 단위로 3차에 걸쳐 압출을 반복한 결과 6859(19x19x19)개의 적층된 다심 선재를 얻었다.



Fig. 4 Cu/Al clad extrusion



Fig. 5 Fist bundle extrusion (19 filaments)

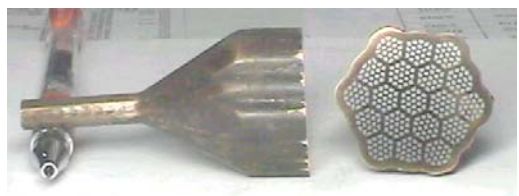


Fig. 6 Secend bundle extrusion (361 filaments)



Fig. 7 Section of 19x19 filament wire  
(width of filament : 33µm)

하나의 단심이 갖는 폭은 평균 33µm로 위치에 따라 형상이 왜곡된 것도 나타났다. 형상 왜곡의 원인은 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째는 마찰의 영향으로, 정수압 압출에서도 적으나마 존재하는 금형과 소재사이의 마찰 저항에 의한 것으로 중심부에서는 축 방향의 연신만 생기지만 외곽에서는 마찰에 의해 전단변형이 발생하는 것이다. 둘째 원인은 압출 소재와 금형의 육각형상 위상차로, 소재의 꼭지점 부분이 금형의 모서리부분으로 흐르지 않고 면쪽으로 지난 경우 형상이 찌그러지게 된다. 두 가지 원인 중 위상차의 영향이 매우 크므로 소재의 방향을 금형과 일치시키는 방안이 필요하다.

### 3. 단선 신장 성형

다심선재를 적층한 후 압출하여 미세 선재를 얻는 방법은 한 번에 다수의 선재를 성형할 수 있고, 미세 성형을 수행하는 중에도 다루기 편리한 정도의 크기

를 갖는 소재를 다룬다는 이점이 있다. 그 반면에 압출 공정의 특성상 압출 선재의 길이가 상대적으로 길지 않고, 선재 하나 하나의 형상을 제어할 수 없는 관계로 개개의 선재의 단면 형상이 왜곡 되는 단점이 있다. 수 km 정도의 장선이 필요한 경우나, 길이방향으로 단면형상이 일정해야만 하는 경우에는 다심선 압출법은 적용이 불가능하므로, 다시 인발법을 고려하지 않을 수 없는 것이다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 전통적인 인발법에는 한계가 엄연히 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로서 금형을 사용하지 않는 인발법을 고려해 볼 수 있다.

단선 미세 선재를 제조하기 위해 기존의 금형을 이용한 냉간 인발 성형 방법 대신 소재를 국부 가열한 후 인장력을 가해 성형하는 것이 무금형 인발(Dieless wire drawing) 법이다. 무금형 신선을 일회의 공정안에서 연속적으로 수행할 수 있는 공정을 개발하였다. 금형을 사용하지 않기 때문에 얻어지는 마찰력의 감소는 이 공정의 큰 장점이다. 그러나 변형을 구속하지 않고 국부적으로 소재를 연화시킨 상태에서 인장력에 의존하여 신선이 이루어질 때, 불안정한 변형 mode는 일회에 얻을 수 있는 단면감소율에 한계를 갖는다. 선재의 직경이 작아질 수록 그러한 영향은 더 크게 나타나게 된다. 결국 공정수의 증가가 불가피한 것이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 세선에 적용할 수 있는 무금형 연속 신선 공정을 고안하였다.

세선 무금형 연속 신선 공정의 기본적인 발상은 아래 그림에서 확인할 수 있다. 한 쌍의 capstan에 선재를 감은 상태에서 선속도차가 발생하도록 축을 회전시키면 변위를 구속한 상태의 인장력이 wire에 가해진다.

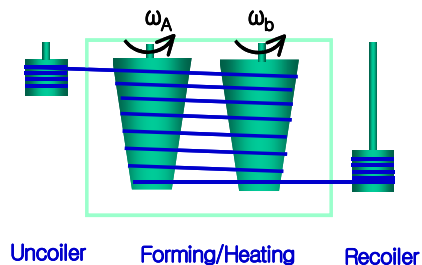


Fig. 8 Principle of successive dieless wire stretching

선재가 양쪽의 capstan에 교대로 감기는 구조가 축 방향으로 여러번 반복될 수 있으므로 연속적인 신선이 가능하다. 좌측의 backup roll을 떠난 선재는 변형 구간에서 늘어난 후 stretching roll에 더 빠른 속도로 감기게 되고 다시 backup roll의 다음 단계로 공급되는 과정이 반복되는 것이다.

### 3.1 Kinematics

무금형 연속 신선은 근본적으로 소재를 인장 mode로 변형시키는 것으로, 한 step에서 나타나는 운동학적 관계만을 떼어 놓고 살펴보면 다음과 같이 문제를 단순화할 수 있다.

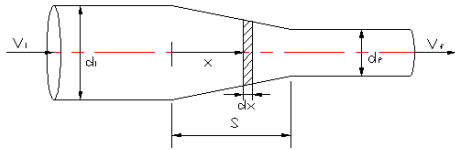


Fig. 9 Kinematics of wire stretching

인장력에 의해 길이가 늘어나게 되면 wire의 단면은 감소하고 속도는 증가하게 된다. 즉, 변형 중 질량이 보존(밀도가 일정한 조건하에서 체적 불변)되므로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$a_i v_i = a_f v_f = const. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_f}{v_i} &= \frac{a_i}{a_f} \\ &= \frac{d_i^2}{d_f^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 단면적  
이때 진변형률(true strain)은 성형 전후 단면비로부터 구해질 수 있다.

$$\epsilon = \ln \frac{a_i}{a_f} = \ln \frac{v_f}{v_i} \quad (3)$$

변형률 속도(strain rate)는 변형구간내 속도 변화가 일정하다고 가정할 때 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{dv}{dx} \\ &= \frac{v_f - v_i}{s} \end{aligned} \quad (4)$$

체적이 일정하게 유지된다는 조건으로부터 면적 감소율은 성형 전후 선속도와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{a_i - a_f}{a_i} \\ &= 1 - \frac{a_f}{a_i} \\ &= 1 - \frac{v_i}{v_f} \end{aligned} \quad (5)$$

선재의 단면에 가해지는 신장하중이 다음과 같을 때,

$$F = \sigma a \quad (6)$$

인장 변형이 안정적으로 이루어질 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{F} &= 0 \\ \dot{\sigma} a + \sigma \dot{a} &= 0 \\ \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} + \frac{\dot{a}}{a} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

이 조건은 신선중 선재의 끊어짐이 발생하지 않기 위한 조건이며, 공정 변수 선정 시에 위의 조건이 만족되도록 해야 한다.

### 3.2 세선 무금형 연속 신선 실험

미세 선재를 금형 없이 인장력만을 이용하여 성형하는 기술에 있어서, 성형력을 부여하는 capstan과 소재를 불활성 분위기에서 일정하게 가열할 수 있는 heating chamber가 핵심이다.

연속적인 신선이 가능하기 위해서는 직경이 점진적으로 커지는 한 쌍의 원추형 capstan을 이용한다. 나란히 배치된 capstan에 wire를 번갈아 감되 점진적으로 외경이 큰 쪽으로 wire를 유도해 길이가 늘어나도록 한다. 연속 신선용 capstan의 외경 변화는 매 단계에서 얻을 수 있는 성형 한계와 변형 안전성(stability)으로부터 결정된다.



각 step별 wire의 단면감소율을 일정하게 할 경우 매 단계의 wire의 단면( $a_n$ )과 직경( $d_n$ )의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_n &= (1 - \rho) a_{n-1} \\ &= (1 - \rho)^n a_0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$d_n = \sqrt{(1 - \rho)^n} d_0 \quad (9)$$

여기서 n은 step 번호

선재의 단면이 감소하게 되면 선재 양쪽의 선속도 차이가 발생하게 되며, 두 축을 이루는 capstan에 접하는 위치에서 wire는 다음과 같은 선속도 비를 갖게 된다.

$$\frac{v_{A_n}}{v_{B_n}} = (1 - \rho) \quad (10)$$

여기서 A, B는 축의 index

이러한 선속도 차는 capstan의 외경, 축의 회전속도와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{v_{A_n}}{v_{B_n}} = \frac{R_{A_n} \omega_A}{R_{B_n} \omega_B} \quad (11)$$

$$\frac{R_{A_n}}{R_{B_n}} = (1 - \rho) \frac{\omega_B}{\omega_A} \quad (12)$$

여기서  $\omega$ 는 축의 각속도, R은 capstan의 외경 두 축의 회전 속도가 주어지면 위 식으로부터 각 step에서 두 capstan의 외경이 결정된다.

한 capstan 내에서 성형 step별 지름은 신장성형에 의해 늘어난 길이가 치짐없이 모두 capstan에 감길 조건으로부터 구해지며 다음과 같이 등비 수열로 나타난다.

$$R_{X_n} = \frac{R_{X_0}}{(1 - \rho)^n}, \quad (X = A \text{ or } B) \quad (13)$$

이상으로 유도된 식들로부터 capstan 설계에 필요한 치수들을 모두 구할 수 있게 된다.

열간에서 연속 신선이 가능하도록 가열장치를 설계, 제작하였다. 열원으로는 적외선 heater를 사용하

였으며 불활성 분위기를 만들어 주기 위해 성형 capstan과 wire를 둘러 싸는 구조를 택하였다. 가열온도는 상온에서 800℃까지 제어가 가능하도록 하여 재결정 온도가 다른 여러 소재의 신선에 적용할 수 있도록 하였다.

선재의 산화는 산화막을 제거하기 위한 후속공정을 부가시킬 뿐 아니라 소재를 불균일한 상태로 만들어 신선중 단선을 일으킨다. 소재의 결정립과 결정립 사이 경계에서 산화물의 침투 깊이가 상대적으로 깊게 진행되고 이 부분이 notch로 작용하여 crack의 시점이 된다. 그러므로 미세 선재의 열간 신선 공정에서는 불활성 분위기 조성이 매우 중요하다. 불활성 기체로는 Ar을 이용하여 가열된 상태의 wire가 산화되는 것이 방지되도록 하였다. 신선중 바깥쪽 공기가 스며드는 것을 막기 위해 heating chamber 내의 압력이 외부 대기압보다 항상 높은 값을 유지하도록 압력 차계를 이용하였다.

Capstan사이 wire가 신장력을 받고있는 부분에서 변형이 이루어질 수 있게, 해당 부분의 온도가 상대적으로 높도록 열원을 배치하였다. Heating chamber를 연신기 구조체와 절연시킴으로써 축방향 열전도로 인한 축과 bearing의 손상을 막았다.



Fig. 10 Successive dieless wire stretching machine

연속 무금형 신선장치는 소재공급부, 신선부, 회수부로 구성된다. 위 사진에서 보면 좌측에 소재 공급부(unwinder)가 위치하고 있다. 소재 공급시에는 일정장력이 소재공급방향 반대로 작용(back tension)하게 되며 적정장력이 유지되도록 dancing roll을 이용하여

제어하였다. 가운데 위치한 신선부는 가열과 불활성 분위기 조성을 위해 다른 구성체로부터 절연되어 있으며 일정 속도로 회전하는 두 축에 원추형의 연신용 capstan 한쌍이 조립되어진다.

두 축이 같은 방향으로 회전하는 구조를 채택하였으므로 소재 공급부에서 들어온 wire는 11차 걸기 방식으로 한 쌍의 capstan에 번갈아가며 감긴다. 아래 사진에서 연속 신선기에 선재가 감기는 과정을 보여 주고 있다.

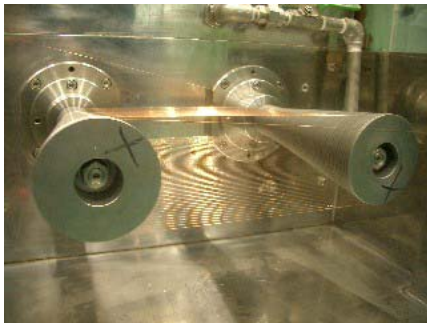


Fig. 11 Successive dieless wire drawing

위의 사진에서는 직경 0.14mm인 Cu 선의 무금형 신선 과정을 보여주고 있다. 각 단계별 면적감소율을 1.5%로 일정하게 유지하고 50 step에 걸쳐 선재를 성형하게 된다.

#### 4. 결 론

소형 정밀 부품의 소재로서 활용될 수 있는 미세선재 생산을 위한 성형기술을 새로이 고안하고 그 가능성을 실험적으로 증명해 보였다.

열간 정수압 압출 기술과 Clad적층 기술을 병합하여 직경 수십  $\mu\text{m}$  미세선재, 7000여개로 구성된 multi filament 선재를 성형할 수 있었다. 이러한 다심선재는 고기능 촉매, 필터, 섬유 등에 활용 가능하다. 정수압 압출을 이용함으로써 표면 마찰의 영향이 최소화되어 비교적 고른 형상으로 구성된 적층 다심선재를 얻을 수 있었다. 실제 성형시에 다루는 소재와 금형, 성형 장치 등의 성형 환경이 기존의 매크로 성형과 동일하게 되므로 미세 성형시 발생하는 어려움을 회피할 수 있다.

연속 신장 성형 공정을 개발하여 금형 없이 장선을 연속적으로 생산할 수 있는 기법을 제시하였다. 0.1mm 수준의 직경과 수 km의 길이를 갖는 단일 장선 생산에 적합함을 실험적으로 보였다. 이러한 단선은 반도체 bonding wire, inductor 소재 등의 인발을 위한 중간 소재로서 기존 인발공정 수를 획기적으로 줄일 수 있을 것이다. 금형을 쓰지 않으므로 미세 성형시 문제가 되는 마찰 문제를 피할 수 있으나, 길이 방향으로 단면형상과 치수를 일정하게 유지하기위해 고도의 제어기술 수반되어야 한다.

#### 참고문헌

1. Li, Yonggang, "Dieless laser drawing of fine metal wires", J. of Materials Processing Technology, Vol.123, pp.451-458, 2002.
2. Wengenroth, Walter, "Theoretical and experimental investigations into dieless drawing", Steel research, Vol.72, pp.402-405, 2001.
3. Symmons, G.R., "Performance comparison of polymer fluids in die-less wire drawing", J. of Materials Processing Technology, Vol.43, pp.13-20, 1994.
4. 박훈재, 윤덕재, 나경환, 조남선, "정수압 압출기 개발", 1993년도 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.44-49, 1993.
5. 김승수, 박훈재, 윤덕재, 임성주, 최태훈, 나경환, "극세선 압출기술 개발", 2001년도 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.97-101, 2001.
6. 김창훈, 김시영, "구리-알루미늄 클래드 봉의 정수압 압출특성연구", 해양안전학회지, Vol.5, No.2, 1999.
7. T. Matsushita and K. Kita, "Development of a Multi-type Extrusion press", 4th International Aluminium Extrusion Technology, Vol.I, pp.281-291, 1988.
8. Wilson, W. R. D., Hydrostatic Extrusion (Theory and Applications), Lubrication in hydrostatic extrusion, Elsevier applied science publishers, pp.41-71, 1985.
9. Pugh, H.L.I.D., "Hydrostatic Extrusion", Cu 1986-COPPER TOMORROW Technology-Product-Research Conference, pp.67-83, 1989.