

# 기술 동향

## 인발공정 개요 및 기술동향

이상곤<sup>1</sup> · 김병민<sup>2</sup>

1. 한국생산기술연구원 극한제조기술 연구실용화그룹

2. 부산대 기계공학부

## Trend and Technology of Drawing Process

S. K. Lee, B. M. Kim

1. Korea Institute of Industrial Technology

2. Pusan National University

### 1. 인 발

인발공정은 선재, 봉재 혹은 관재를 단면적이 작은 다이를 통과시킨 후 다이 출구쪽 소재를 잡아당겨 요구 단면형상의 길이가 긴 제품을 제조하는 대표적인 소성가공 공정 중 하나이다.

인발공정은 단조공정에 버금갈 정도로 오랜 역사를 가진 가공기술로 AD 200년경 로마 식민지와 AD 800~1000년의 노르웨이, 스웨덴 등에서 인발에 사용되었던 초기 형태의 다이가 발굴되기도 하였다. Fig. 1에서 보듯이 고대 인발가공에 사용되었던 다이는 철판에 여러 개의 구멍을 가공하여 사용하였으며, 사람의 힘으로 인발을 하였기 때문에 적용 소재 및 제품의 크기에 한계가 많았다.



Fig. 1 Ancient drawing process

인발공정을 통해 생산된 제품들은 자동차, 조선, 항공우주, 전기/전자, 해양 플랜트, 건설, 의료 등 모든 산업분야에 활발하게 사용되고 있으며 그 범위는 지속적으로 확대되고 있다. Fig. 2에 대표적인 적용현황을 나타내었다.



Fig. 2 Applications of drawn product

Table 1 Classification of drawing process

Classification	
Material	1) Solid drawing
	2) Tube drawing <ul style="list-style-type: none"> <li>① Hollow drawing</li> <li>② Mandrel drawing</li> </ul>
Product shape	1) Axisymmetric drawing
	2) Shape drawing
Dies	1) Drawing with dies
	2) Drawing with rolls
Drawing machine	1) Single pass drawing
	2) Multi pass drawing
Lubricant	1) Dry drawing
	2) Wet drawing

## 2. 인발공정 분류 및 인발 다이

### 2.1 인발공정 분류

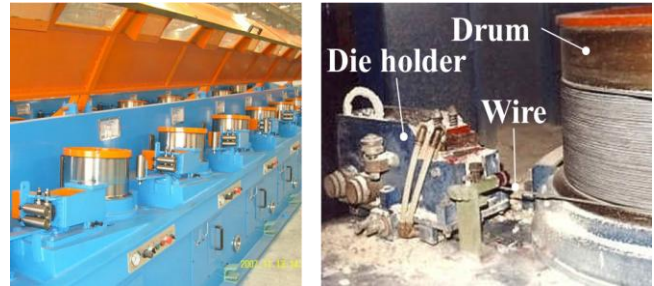
인발공정은 적용 소재, 제품의 형태, 다이 종류, 인발기 형태, 윤활제 적용 형태 등에 따라 Table 1과 같이 분류할 수 있다.

먼저 적용 소재의 형태에 따라 중실인발과 중공인발로 분류된다. 중실인발은 가장 일반적인 인발로 원형 혹은 이형(異形)인 선재 혹은 봉재가 사용되며, 중공인발은 속이 빈 관재를 적용한 인발이다. 중공인발은 다시 적용 툴(tool)의 형태에 따라 관재의 외경만 축소시키는 공(空)인발, 맨드렐을 이용하여 관재의 내/외경을 동시에 감소시키는 플러그 인발로 구분된다.

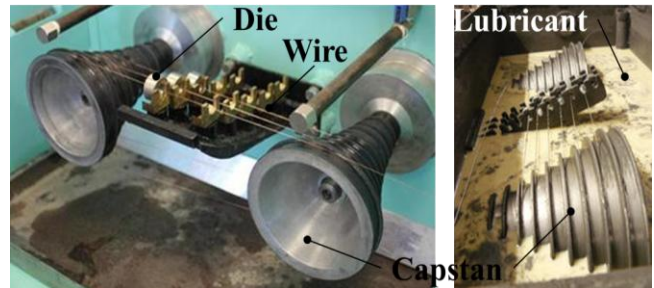
초기 소재 및 최종 제품의 단면형상에 따라 축대칭인발(axisymmetric drawing)과 형상인발(shape drawing)로 구분된다. 축대칭 인발은 원형소재를 이용하여 원형단면 제품을 성형하는 것이고, 형상인발은 임의단면 형상의 제품을 성형하는 공정이다.

적용 다이의 형태에 따라서는 일반 다이 인발과 롤 형태의 다이를 이용한 롤 다이 인발로 분류된다. 롤 다이 인발의 경우 압연공정과 동일한 형태의 가공으로 회전하는 롤 다이를 이용하기 때문에 인발하중이 상대적으로 작은 장점이 있다.

적용되는 인발기 종류에 의해 단패스 인발(single pass drawing)과 다단패스 인발(multi pass drawing)로



(a) Dry drawing process



(b) Wet drawing process

Fig. 3 Dry and wet drawing process

구분된다. 단패스 인발은 하나의 인발 다이로 제품을 가공하며 상대적으로 제품치수가 큰 경우에 주로 적용되는 공정이다. 이에 반해 다단패스 인발은 여러 개의 다이를 통과시켜 직경이 작은 선재를 가공하는 공정이다.

윤활제의 적용 형태에 따라서 건식인발(dry drawing)과 습식인발(wet drawing)로 구분된다. 두 인발 모두 한 공정으로 여러 개의 다이를 통과시켜 선재를 가공하는 다단패스 인발공정이다. Fig. 3에서 보듯이 건식인발의 경우 상대적으로 직경이 큰 선재를 가공할 때 적용되는 공정으로 다이가 장착되어 있는 다이 홀더에만 고체 혹은 액체 윤활제가 적용되어 선재와 다이 사이의 마찰을 감소시킨다. 반면, 습식인발의 경우 직경이 작은 선재를 가공할 때 적용되는 공정으로 선재와 다이 뿐만 아니라 선재를 잡아당기는 캡스탄(capstan)도 액체 윤활제에 잠긴 상태에서 공정이 이루어진다. 이로 인해 습식인발의 경우 선재와 다이 사이의 마찰특성뿐만 아니라, 선재와 선재가 2~3 회 정도 감겨있는 캡스탄 사이의 마찰특성도 매우 중요한 공정변수이다. 습식인발의 경우 윤활제에 완전히 잠긴 상태에서 공정이 진행되기 때문에 건식인발에 비해 선재의 냉각 효과가 뛰어나다. 따라서 인발속도가 상대적으로 빠르다.

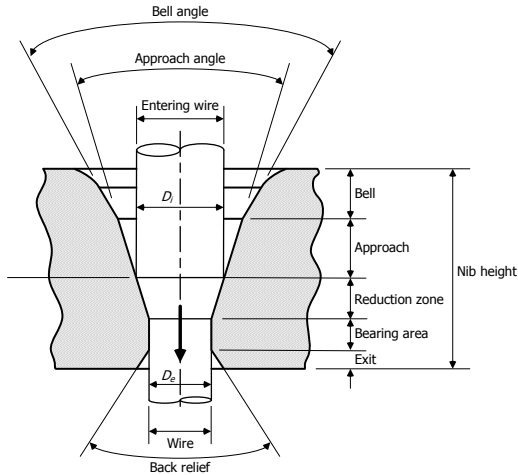


Fig. 4 Cross section of a typical drawing die

## 2.2 인발 다이

인발 다이는 인발 중 소재와 접촉하여 요구 치수 및 형상으로 가공하는 역할을 하는 닢(nib)과 닢을 지지하는 케이스(case)로 구성된다. Fig. 4에서 보듯이 닢은 벨(bell), 어프로치(approach), 리덕션 영역(reduction zone), 베어링(bearing)부, 백 릴리프(back relief), 그리고 출구부(exit)로 구성된다. 벨과 어프로치부는 실제 선재와 접촉이 일어나지는 않지만 윤활제가 다이 내부로 잘 유입되도록 하는 중요한 부분이다. 리덕션 영역은 실제 선재의 직경을 감소시키는 영역으로 인발 다이에서 가장 중요한 영역이다. 요구되는 품질을 가진 선재를 가공하기 위해서는 리덕션 영역의 설계가 매우 중요하다. 일반적으로 리덕션 영역의 각도는  $6\sim 16^\circ$ 로 설정하고 있다. 베어링부는 인발 시 최종 요구 치수 또는 형상을 결정하는 부분이다. 따라서, 정확한 직경과 길이, 그리고 마모상태 관리가 매우 중요하다. 베어링 길이가 지나치게 짧으면 최종 제품의 치수정도 및 진직도가 나빠지고, 과도하게 긴 경우에는 마찰길이 증가로 인해 인발 시 과도한 온도상승의 원인이 된다. 백 릴리프는 인발된 선재와 직접적인 접촉은 없으며 베어링부를 지지하고 베어링부의 크랙발생을 억제하는 역할을 한다.

## 3. 다단패스 인발공정 이론

단패스 인발공정은 타 소성가공 공정에 비해 상대적으로 소재의 변형 양상이 단순한 가공공정이다. 그러나, 선재 가공을 위한 인발은 수 패스에서 수

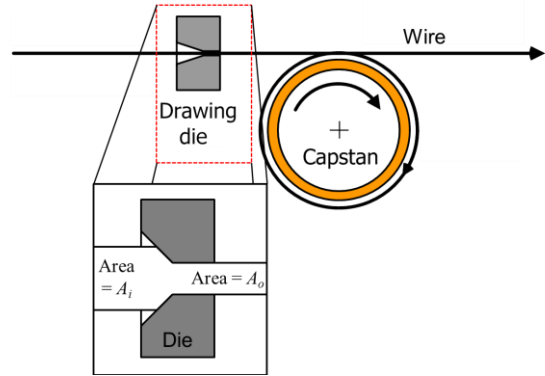


Fig. 5 Reduction in area

십 패스의 다단패스 공정으로 공정이 매우 복잡하다. 특히 인발속도가 매우 빠르기 때문에 부적절한 공정설계로 인해 인발 중 단선이 발생할 경우 공정 재개를 위해 많은 시간이 소요되기 때문에 생산성이 급격히 감소하게 된다. 따라서 단선 방지를 위한 공정설계가 매우 중요하다.

### 3.1 단면 감소율

인발공정은 다이를 이용하여 단면적을 감소시키는 가공방법이다. Fig. 5에서 보듯이 인발공정에서 다이를 통과하기 전과 후의 단면적 차이를 백분율로 나타낸 값이 단면 감소율(reduction in area, RA)이다. 단면 감소율은 매우 중요한 공정인자로 다음의 식 (1)과 같이 계산된다.

$$RA[\%] = (1 - A_o / A_i) \times 100 \quad (1)$$

### 3.2 기계 감면율

다단패스 인발공정 시 인발속도는 선재를 당기는 캡스탄 혹은 드럼(drum)의 회전속도에 의존한다. 다단패스 인발 시 인발속도는 선재의 체적일정조건에 의해 패스가 진행됨에 따라 순차적으로 증가하기 때문에 캡스탄 혹은 드럼의 회전속도도 증가해야 한다. 기계 감면율(machine reduction, K)은 Fig. 6에서 보듯이 인발 다이 전후에 위치한 캡스탄의 회전속도 차이를 백분율로 나타낸 값이다.

$$K[\%] = (1 - U_i / U_{i+1}) \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $U_i$ 와  $U_{i+1}$ 은 인발 다이 전후 캡스탄 혹은 드럼의 회전속도이며,  $U_{i+1}$ 은 반드시  $U_i$ 보다 빨라야 한다.

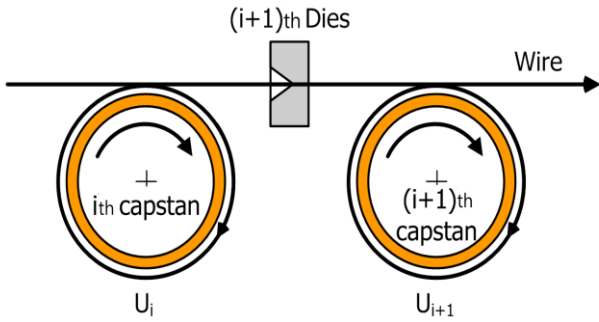


Fig. 6 Machine reduction of multi pass drawing

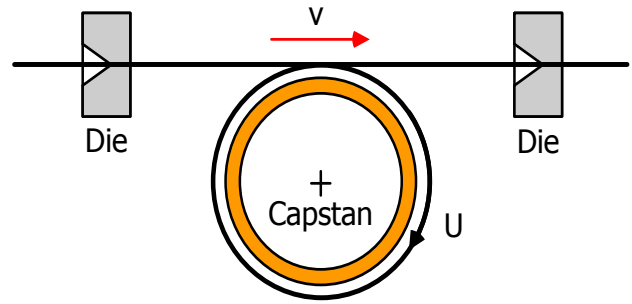


Fig. 8 Slip in wet drawing

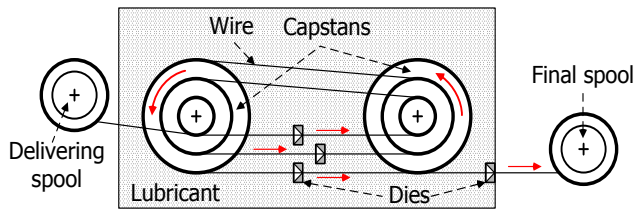


Fig. 7 Multi pass wet drawing process

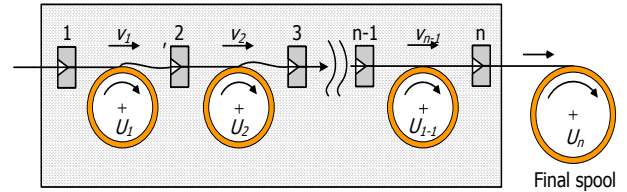


Fig. 9 Slip velocity rate

### 3.3 슬립율

전식 인발과 달리 Fig. 7에서 보듯이 습식 인발의 경우 선재와 다이, 캡스탄이 모두 윤활제에 잠긴 상태에서 인발이 이루어진다. 다이를 통과한 선재는 Fig. 8과 같이 회전하는 캡스탄에 수회 권취되어 있다. 일반적으로 캡스탄의 회전속도가 선재의 인발속도보다 빠르며, 선재와 캡스탄의 속도차를 슬립(slip, S)이라고 하며, 다음의 식(3)으로 계산된다.

$$S = U - v \quad (3)$$

여기서,  $U$ 는 캡스탄 회전속도,  $v$ 는 선재 인발속도이다.

슬립은 캡스탄과 선재의 속도차에 의해 순(positive) 슬립( $S > 0$ ), 제로(zero) 슬립( $S = 0$ ), 그리고 역(negative) 슬립( $S < 0$ )으로 구분된다. 습식 다단패스 인발공정 시 잘못된 공정설계로 인하여 선재 속도가 더 빠른 역슬립이 발생할 경우 공정 중 단선이 발생하기 때문에 반드시 캡스탄의 회전속도는 선재 속도보다 빨라야 한다.

캡스탄 회전속도에 대한 슬립의 백분율을 슬립율(slip rate, SR)이라고 하며 다음의 식(4)로 표현된다.

$$SR[\%] = (1 - v/U) \times 100 \quad (4)$$

### 3.4 슬립속도율

슬립이 발생하는 다단패스 습식 인발공정에서 Fig. 9에서 보듯이 각 패스의 슬립에 대한 최종 권취 스펴(spool)의 회전속도에 대한 백분율을 슬립속도율(slip velocity rate,  $S_{vel}$ )이라고 하며, 특히 고탄소강 선재 인발 시 중요한 공정변수이다. 이전의 연구결과에 의하여 식(5)로 계산되는 슬립속도율을 적절하게 조절함으로써 인발 시 발생하는 선재의 단선율을 획기적으로 저감시킬 수 있다.

$$S_{vel}[\%] = (U_i - v_i) / U_n \times 100 \quad (5)$$

여기서,  $U_n$ 은 최종 권취 스펴의 회전속도이다.

### 3.5 역장력

역장력(backtension force)은 Fig. 10에서 보듯이 인발 다이의 입구부에서 인발방향과 반대방향으로 작용하는 힘이다. 역장력이 부가되면 다이의 면압이 감소하여 다이의 마모수명을 향상시키고, 선재의 변형이 상대적으로 균일해지는 장점이 있다. 그러나 지나친 역장력이 작용할 경우 다이 출구부에서 인발력이 과도하게 높아져 인발된 소재의 치수정도 저하 및 단선을 유발시킨다. 다단패스 습식 인발공정의 경우 슬립으로 인하여 역장력이 발생하며 적절한 역장력이 발생하도록 공정조건을 설정해야 한다.

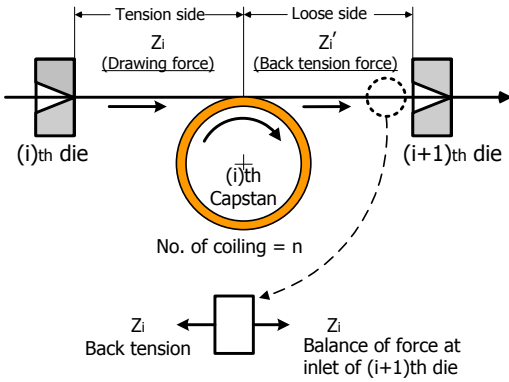


Fig.10 Backtension force

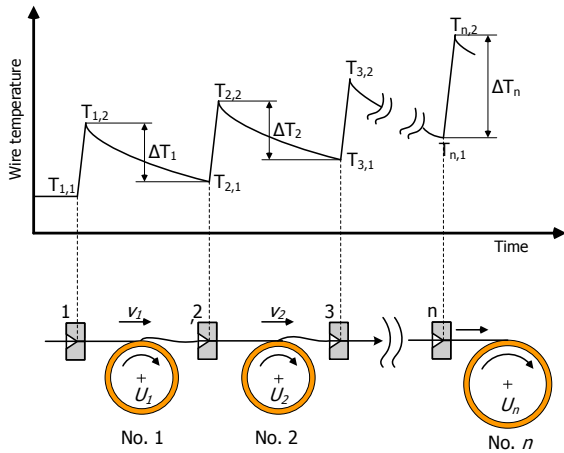


Fig.11 Wire temperatures in multi pass drawing

Table 2 Classification of drawing process

Type	Variable	1	2	3	4	5
Isothermal pass	Dia.(mm)	4.35	3.75	3.22	2.86	2.49
	RA(%)	39.2	26.1	25.9	22.1	24.2
Isopower pass	Dia.(mm)	4.37	3.59	3.05	2.64	2.49
	RA(%)	38.7	32.5	27.8	25.1	11.0
Isoreduction pass	Dia.(mm)	4.73	4.04	3.44	2.93	2.49
	RA(%)	28.1	27.1	27.5	27.5	27.8
Reverse tape pass	Dia.(mm)	5.02	4.50	3.73	3.08	2.49
	RA(%)	13.2	25.1	31.8	31.8	34.7

### 4. 인발공정 패스설계

#### 4.1 다단 선재 인발공정 패스 설계

다단 인발공정 패스는 인발기 특성, 적용 선재의 특성, 경제성 등을 고려하여 설계해야만 한다. 그러나

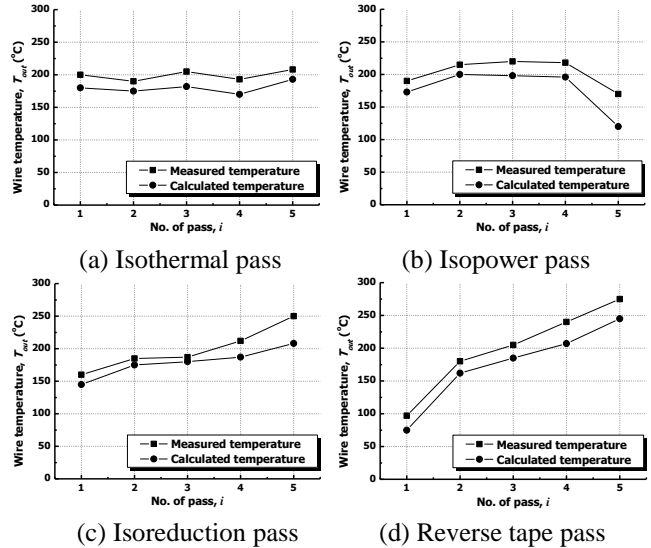


Fig.12 Wire temperatures at die exit according to the type of pass schedule

이러한 모든 특성을 동시에 만족하는 설계는 불가능하다. 초기에는 모든 패스의 단면감소율을 일정하게 설계하는 등단면감소율(Isoreduction)이 사용되었으며, 1970년대 초에는 각 패스의 인발동력을 균일하게 설정하는 등동력(Isopower) 패스설계가 적용되었다.

인발공정의 경우 생산성 향상을 위해 인발속도 향상이 매우 중요하다. 그러나, Fig. 11에서 알 수 있듯이 다단패스 인발의 경우 패스가 진행됨에 따라 인발속도 증가로 인해 선재 온도가 상승하게 된다. 따라서 기존의 패스 설계방법으로는 인발속도 향상에 한계가 있었다. 이를 극복하기 위하여 1970년대 말 일본에서 각 패스의 선재 온도를 최대한 균일하게 유지하기 위한 등은 패스설계가 제안되었으며, 국내에서도 활발한 연구가 진행되었다.

Table 2 에 초기직경 5.58 mm 탄소강 선재에 대한 다양한 패스설계방법 예를 나타내었으며, 각 방법에 대한 선재 온도분포를 Fig. 12 에 나타내었다. 등은패스설계의 경우 첫 패스의 단면감소율이 다소 높아 윤활층이 파괴될 우려가 있다. 따라서 첫 패스의 단면감소율을 별도 설정 후 등은패스로 설계하는 것이 효과적이다.

#### 4.2 다단 형상인발 공정 설계

형상인발공정은 Fig. 13에서 보듯이 인발된 제품의 단면이 원형이 아닌 임의의 형상으로 일반적으로

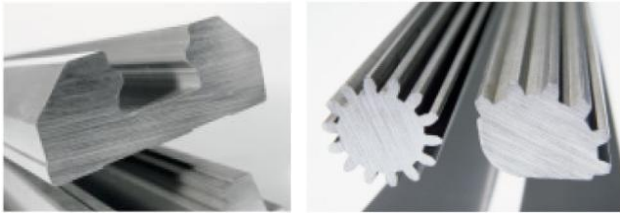


Fig. 13 Shape drawn products

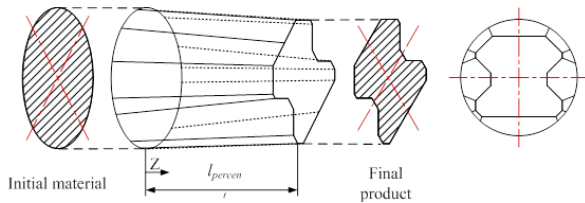


Fig.14 Virtual die

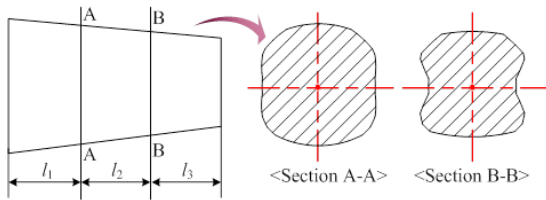


Fig.15 Divided sections of virtual die

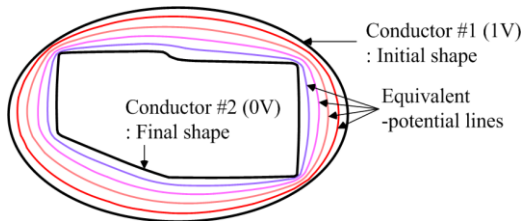


Fig.16 Concept of electric field analysis

2~3패스의 인발을 통해 최종제품을 성형한다.

형상인발공정은 축대칭 인발공정과 달리 공정설계 시 각 패스의 감면을 뿐만 아니라 각 패스의 다이 단면형상 설계가 매우 중요하다.

형상인발공정 설계는 대부분 현장 숙련자의 노하우에 의존한 시행착오법으로 이루어졌으나, 최근 국내에서 보다 효과적인 공정설계방법들이 제안되고 있다.

Kim 등은 두 가지 단면형상 설계방법을 제안하였다. 첫 번째는 가상금형(virtual die)을 이용하는 방법으로, Fig. 14와 같이 초기 인발소재와 최종 인발제품단면을 연결하여 가상금형을 생성하였다. 생성된 가상금형을 패스 수를 고려하여 분할하면 중간 패스 다이 단면형상으로 활용 가능한 형상들이 추출

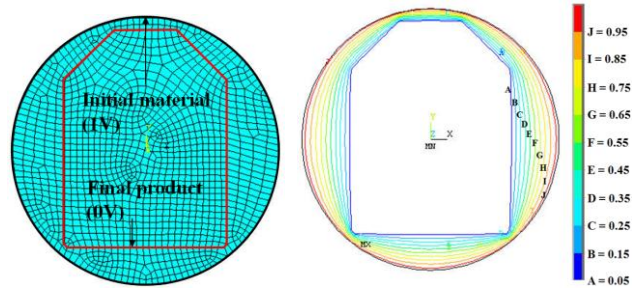


Fig.17 Electric field analysis of guide rail

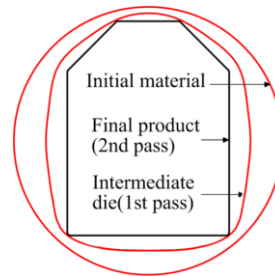


Fig.18 Designed intermediate die shape

되며, 이 형상들을 이용하여 중간 패스 다이 단면형상을 설계하는 방법이다. Fig. 15는 3패스로 인발되는 LM-guide 인발공정의 1번째와 2번째 패스 다이 단면형상설계에 활용한 예이다.

두 번째 방법은 전기장 해석을 이용한 설계방법이다. Fig. 16과 같이 두 개의 도체에 전류가 인가되면 두 도체 사이에 등전위선이 형성되며 전위장 내 생성된 등전위선은 두 도체 형상의 중간 형상들을 나타낸다. 각각의 등전위선에 대한 단면감소율을 계산한 후 적합한 단면감소율을 가진 등전위선을 중간 패스 단면형상으로 활용 가능하다.

Fig. 17과 Fig. 18은 2패스 인발공정으로 제조되는 리니어 가이드 레일(linear guide rail)에 대한 전기장 해석결과와 이를 이용하여 설계된 형상인발 중간패스 단면형상을 나타낸 것이다.

## 5. 최근 인발 기술동향

선재 인발공정의 생산성 향상을 위해서는 인발속도향상이 매우 중요하다. 최근 고탄소강선의 패스 설계 및 새로운 습식인발기 설계를 통해 인발속도를 최대 2배까지 향상시킬 수 있는 기술이 소개되었다. 또한 초음파 또는 기계진동을 응용함으로써 인발성 향상과 다이 마모저감을 위한 연구가 수행되었으며, Fig. 19와 같이 마이크로파 혹은 유도가열을

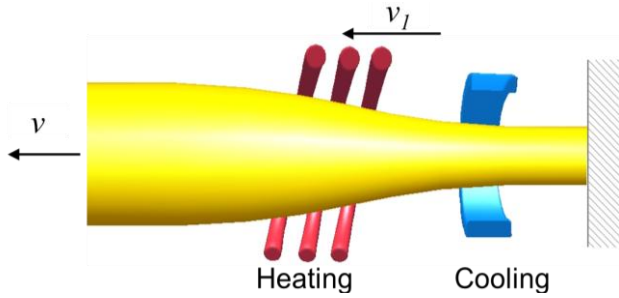


Fig.19 Dieless drawing



Fig.20 Medical wire and tube

이용한 열간가공원리를 이용한 다이리스(dieless) 인발기술들이 연구되고 있다.

금속 관재의 다이리스 인발에 관한 연구도 수행되고 있다. 인발속도와 가열폭 등이 변형률 속도와 인발 한계에 미치는 영향이 검토되었다. 최근에는 관재 인발의 경우 초소성재료가 적용된 마이크로 튜브 제조 기술, 스테인레스를 이용한 의료용 튜브(무통 주사 바늘) 테이퍼 가공기술도 연구되고 있다. 난가공 소재인 마그네슘 AZ31의 다이리스 인발 및 냉간 인발가공성에 대한 검토도 진행되었다.

Fig. 20에서 보듯이 Ni-Ti계 형상기억합금을 이용한 의료용 선재 및 튜브 제조를 위한 인발기술도 활발하게 연구되고 있다.

고탄소강 인발 시 선재의 대변형률 영역의 유효응력-변형률 관계도출 및 선재의 온도영향을 고려한 잔류응력 평가에 관한 연구도 수행되었다. 다만패스 선재 인발의 경우 일반적으로 변형률이 1.0 이상의 대변형이기 때문에 초기 선재의 단순 인장시험으로는 대변형률 영역의 정확한 유효응력-변형률 관계도출이 곤란하다. 따라서 보다 정확한 잔류응력 예측을 위한 대변형률 영역의 유효응력-변형률 관계를 도출하였으며, 이를 이용하여 인발 선재의 잔류응력을 평가하였다.

형상인발공정의 경우 최근 경량화를 위해 중공소재를 이용한 형상인발 연구가 국내에서 수행되고 있다. 중공소재 형상인발의 경우 중실소재에 비해

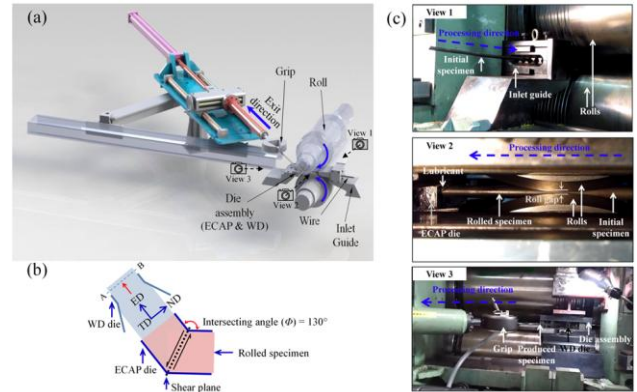


Fig.21 Continuous hybrid process

최종제품의 요구치수 확보가 매우 어렵지만 LM-guide의 경우 40% 이상의 경량화 효과가 있기 때문에 획기적인 생산비용 절감이 가능하다.

최근에는 인발 선재의 기계적 물성치 향상을 위한 새로운 제조방법으로 강소성 가공법(severe plastic deformation, SPD)이 소개되었다. 특히, Hwang 등은 Fig. 21과 같이 압연, ECAP 및 인발공정이 결합된 연속 하이브리드(continuous hybrid) 공정을 제안하였다.

## 6. 맺음말

인발공정은 역사가 아주 오랜 가공기술로 최근에 많은 이슈가 되고 있는 다양한 특수 성형기술에 비해 많은 연구가 수행되고 있지는 않지만 인발장치, 다이 및 윤활제, 적용 소재 등에 대한 일부 연구들이 수행되고 있다.

최근 고부가가치 인발제품으로 혈관 삽입용 스텔인레스 의료용 관재, 태양전지나 LED에 사용되는 실리콘 웨이퍼나 사파이어의 슬라이스 가공에 사용되는 와이어, 표면에 다이아몬드 입자를 전착시킨 절단 와이어, 화학기계의 필터로 사용되는 직경 20 μm 이하의 메쉬(mesh)용 와이어, NbTi 재질의 초전도 와이어 등이 각광받고 있다.

국내의 경우 일부 대기업 및 중견기업에서 인발 분야를 핵심사업으로 수행하고 있으며, 적극적인 연구개발을 진행하고 있다. 그러나 기업 이외 인발분야를 전문적으로 연구하는 기관이 부족한 실정이다. 물론 일부 대학에서 활발한 연구가 진행되고 있지만, 향후 국내 인발산업의 고부가가치화를 위해서는 보다 적극적인 연구개발이 필요하며, 향후 관련 연구자들이 인발분야에 많은 관심을 갖기를 기대해 본다.

## REFERENCES

- [1] K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Book Company, New York. pp.14.1~14.37.
- [2] Jpn. Soc. Technol. Plast, 1990, Drawing Process, Corona. pp. 1~249.
- [3] S. Hollinger, E. Depraetere, O. Giroux, 2003, Wear Mechanism of Tungsten Carbide Dies During Wet Drawing of Steel Tyre Cords, WEAR, Vol. 255, pp. 1291~1299.
- [4] P. Schade, 2006, Wire Drawing Failures and Tungsten Fracture Phenomena, Int. J. Refrac. Metals & Hard Mater., Vol. 24, pp. 332~337.
- [5] S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt% C steel wire, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, pp. 776~783.
- [6] S. K. Lee, D.C. Ko, B. M. Kim, 2009, Pass Schedule of Wire Drawing Process to Prevent Delamination for High Strength Steel Cord Wire, Mater. Des. Vol. 30, No. 8, pp. 2919~2927.
- [7] P. Phelan, J. Brandon, M. Hillery, 2001, Numerical Modeling of Defect Formation on Copper Wire Surface during The Wire Drawing Process, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C, Vol. 215, pp. 237~246.
- [8] A. Geleji, 1960, Bildsame Forming der Metalle in Rechnung und Versuch (in German), Akademie-Verlag GmbH, Berlin.
- [9] H. H. Jo, S. K. Lee, M. A. Kim, B. M. Kim, 2002. Pass Design Ssystem in The Dry Wire Drawing Process of High Carbon Steel. J. Eng. Manuf. Part B, Vol. 216, pp. 365~373.
- [10] T. Shiyuki, K. Ishimoto, 2014, Development of High-strength Steel Wire Rod for Bridge Cable Wire with 1870MPa Strength, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 55, pp. 287~291.
- [11] T. Sakurai, 2014, Production of High Dimensional Accuracy Smaller Diameter Wire Rods, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 55, pp. 292~296.
- [12] K. Yoshida, 2014, Advanced inTechnology of Copper Wire Drawing, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 55, pp. 297~300.
- [13] M. Asakawa, 2014, Trends in Wire Drawing Technology, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 55, pp. 306~310.
- [14] drawing process of high carbon steel. J. Eng. Manuf. Part B 216, 365~373.
- [15] M. P. Staiger, A. Brownrig, P. D. Hodgson, C. H. J. Davies, 2004, Multistage Strain Aging of Low-carbon Steels, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 364, pp. 35~47.
- [16] G. Meseha, Jun. 2005, Recent Advances in Wiredrawing Machine Design and Manufacturing, Wire J. Int., pp. 56~59.
- [17] M. A. Kim, S. K. Lee, B. M. Kim, 2003, Analysis of Multi-pass Wet Wire Drawing Process and Pass Redesign, Key Eng. Mater., Vols. 233~236, pp. 383~388.
- [18] S. K. Lee, B. M. Kim, 2005, Analysis of Multi-pass Wet Wire Drawing Process and Its Application, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 8, pp. 689~695
- [19] S. K Lee, 2008, An Innovative Process Design of Multi-pass Wire Drawing Process, Pusan Nat. Univ., Busan, pp. 1~210.
- [20] S. K. Lee, M. S. Jeong, B. M. Kim, 2013, Die Shape Design of Tube Drawing Process using FE Analysis and Optimization Method, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 66, pp. 381~392.
- [21] S. M. Kim, S. K. Lee, C. J. Lee, B. M. Kim, S. B. Lee, M. S. Jeong, 2012, Innovative Process Design of Multistage Shape Drawing for Precision Guide Rail, Steel Res. Int., Special Ed.: Metal Forming 2012, pp. 483~486.
- [22] K. H. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2012, Advanced Simulation of Die Wear Caused by Wire Vibrations during Wire-drawing Process, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 22, pp. 1723~1731.
- [23] S. K. Lee, D. W. Kim, M. S. Jeong, B. M. Kim, 2012, Evaluation of Aaxial Surface Residual Stress in 0.82-wt% Carbon Steel Wire during Multi-pass Drawing Process Considering Heat Generation, Mater. Des., Vol. 2012, pp. 363~371.
- [24] S. K. Lee, J. E. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim, 2012, Design of Intermediate Die Shape of Multistage Profile Drawing for Linear Motion Guide, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 24, No. 12, pp. 2539~2544.



- [25] A. Serquis, L. Civale, D. L. Hammon, X. Z. Liao, 2003, Hot Isostatic Pressing of Powder in Tube  $MgB_2$  wires, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 17, pp. 2847~2849.
- [26] M. Zelin, 2002, Microstructure Evolution in Pearlitic Steels during Wire Drawing, *Acta Mater.*, Vol. 50, No. 17, pp. 4431~4447.
- [27] P. Tieman, 2014, Dieless Drawing of Bars, Rods, Tubes, and Wires, *Compr. Mater. Process.*, Vol. 3, pp. 149~157.
- [28] S. K. Hwang, H. M. Baek, I. H. Son, Y. T. Im, C. M. Bae, 2013, The Effect of Microstructure and Texture Evolution on Mechanical Properties of Low-Carbon Steel Processed by the Continuous Hybrid Process, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 579, pp. 118~125.
- [29] Y. Huh, B. K. Ha, J. S. Kim, 2010, Dieless Drawing Steel Wires using a Dielectric Heating Method and Modeling the Process Dynamics, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, No. 13, pp. 1702~1708.
- [30] S. K. Hwang, H. M. Baek, J. W. Lee, I. H. Son, Y. T. Im, C. M. Bae, 2014, The Effect of Microstructure and Texture Evolution on Mechanical Properties of Low Carbon Steel in a Non-circular Drawing Sequence, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 2, pp. 318~325.
- [31] M. Palengat, G. Chagnon, D. Favier, H. Louche, C. Linardon, C. Plaideau, 2013, Cold Drawing of 316L Stainless Steel Thin-walled Tubes: Experiments and Finite Element Analysis, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 70, pp. 69~78.
- [32] T. Furushima, K. Manabe, 2011, Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials: Methods and Applications, Woodhead Publishing, Tokyo, pp. 327~360.
- [33] S. H. Kim, K. H. Lee, S. M. Kim, S. J. Kim, B. M. Kim, 2013, Symp. on Extrusion and Drawing, Korean Soc. Technol. Plast., Busan, Korea, p. 42.