

# 강제 네킹에 의한 금속 와이어 인발

허 유<sup>#</sup>, 김승훈<sup>\*</sup>, 김인석<sup>\*\*</sup>, 백영남<sup>\*\*\*</sup>

## Dieless Wire Drawing by Enforced Necking Method

You Huh<sup>#</sup>, Seung Hoon Kim<sup>\*</sup>, Ihn Seok Kim<sup>\*\*</sup> and Young Nam Paik<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

In modern industries, materials are required that possess multi-functional properties and at the same time flexibility in their shapes with structural stability. The major technology realizing this requirement consists of thinning metal wires and laying them with stable contact nodes. This research has dealt with a new method to manufacture thin wires by drawing without applying dies, but with introducing enforced necking, which enables to process multi-ends. Based on the new method, the process dynamics was modelled and its steady-state characteristics were analyzed. Results showed that the profiles of the material velocity in the drawing zone increased with a downward convex shape, while the cross-sectional area decreased with the shape of upward convex. The microwave heating turned out to be effective in wire drawing, but dependent on the input feeding direction. The variation in the diameters of the drawn wires was negatively affected by increasing the drawing ratio.

**Key Words** : metal wire (금속 와이어), drawing (인발), dies (다이), enforced necking (강제네킹), microwave heating (마이크로파 가열), process dynamics (공정 동역학), modelling (모델링), steady-state characteristics (정상상태 특성), diameter variation (직경 변동), drawing ratio (인발비)

### 기호설명

D.R. = drawing ratio

$A(t, x)$  = cross-sectional area of the wire processed at time  $t$  and position  $x$

$v(t, x)$  = velocity of the wire processed at time  $t$  and position  $x$

$T(t, x)$  = temperature of the wire processed at time  $t$  and position  $x$

$\rho$  = volume density of the wire

### 1. 서론

최근의 산업기술 발달과 함께 산업용 부품에 대한 기술적 요구는 만들어진 제품의 용도에 맞도록 다양한 기능을 만족시켜야 하는 복합 기능성과 함께 형상 변형이 용이한 유연 구조물을 필요로 하고 있다. 지금까지 재화를 생산하기 위하여 사용되는

접수일: 2006년 11월 13일; 게재승인일: 2007년 4월 30일

# 교신저자: 경희대학교 기계.산업시스템 공학부

E-mail: huhyou@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2516

\* 경희대학교 대학원 섬유공학과

\*\* 경희대학교 전자정보학부

\*\*\* 경희대학교 기계.산업시스템 공학부

재료의 형태는 분말형(powder), 입자형(granular form), 막대형 (rod form), 중공 실린더 형 (annularform), 평면형 (plate form) 등으로 주어지며, 특히, 단위 체적 당 많은 표면적이 요구되면, 표면에 굴곡을 부여하는 표면처리를 한다. 그러나 막대 또는 평면 모재에 표면처리를 하기보다 가늘고 긴 극세 와이어를 이용하여 표면적을 크게 하고, 더불어 와이어 표면에 다시 표면처리를 하여, 이를 원료로 한 구조화된 제품형상을 생산할 때, 표면적의 증가를 극대화 할 수 있다. 이렇게 표면적을 증가시키는 경우, 계면 접착력을 증가시키거나 보일러, 노(爐, furnace), 버너 등에서의 연소 효율과 열 전달 효율, 건조기 또는 텐터 등에서 열매체의 냉각을 증대시키는데 대단히 유용하게 활용될 수 있다. 더욱이 다양한 가전기기의 보급과 전파통신의 수요증대에 따라 전자파의 차폐성능은 기기들의 품질 평가에 중요한 요인으로 작용하고 있다. 이러한 전자파 문제를 해결하기 위해 금속 와이어를 이용하는 경우, 경량화, 소형화가 가능하며 동시에 대단위 구조물에도 차폐성을 쉽게 부여할 수 있다. 최근에는 금속섬유를 이용하여 전자파 간섭 (electromagnetic interference)을 억제하기 위한 연구가 이루어져서, Hanada 등은 스테인레스 강으로 이루어진 금속섬유 메쉬는 측정 방법과 메쉬 구조, 금속섬유의 구성에 따라 차폐효과가 다르게 나타남을 확인하였으며<sup>1</sup>, Huh 등은 금속 직물시료를 대상으로 TEM (Transverse Electro Magnetic) 전송매체법을 이용한 차폐특성 결과, 2 GHz 전후의 주파수 대역에서 차폐특성이 대단히 우수함을 확인하였다.<sup>2</sup> 또한, 극세 금속 와이어는 2차 가공처리 시, 유연형상 부여가 가능하다. 이런 유연 구조물은 미래형 전자/통신분야에서 사용 환경의 변화에도 구조적 형태 안정성이 있으며, 유연형상 변형이 요구되는 스마트형, 지능형, 또는 인체 부착형 제품에의 활용이 가능하다.

지금까지 금속 와이어의 세선화 공정기술은 금속 와이어의 다양한 이용 가능성에도 불구하고 아직까지 체계화되어 있지 않은 상태이며, multi-step winding 법과 bundle drawing 법이 상용화된 기술이다. 이 방법은 다이(die)를 사용하는 공정 특성상 다이의 마모, 발열, 냉각 등에 의한 문제<sup>3,4</sup>가 수반되므로 생산성의 증대에 제약이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 인발다이의 설계<sup>5</sup>, 다이 재료와 윤활<sup>6-9</sup>에 대한 연구가 활발하다. 그러나 이러한 연구

는 다이와 모재 간에 발생하는 마찰 현상을 완화시킬 뿐이며, 근본적으로 해결하지 못한다. 한편, 근자에는 다이를 사용하지 않는 새로운 인발법<sup>10-12</sup>에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 새로운 인발법은 모재표면에서의 가열 불균일, 가열장치의 크기 등에 의하여 사용에 제약이 있다.

본 연구에서는 와이어를 세선화 할 수 있는 새로운 공정기술 개발을 위하여 와이어 모재의 한 위치에서 급격한 소성 변형을 일으키는 네킹(necking) 현상을 일으킴으로써 다이(die)를 사용하지 않는 인발공정을 개발하고, 공정 동역학 모델링과 실험을 통하여 실용 가능성을 확인해 보고자 한다.

## 2. 인발 공정 모델링

새로운 와이어 인발공정의 특성을 파악하기 위해서는 공정 동역학을 묘사하는 이론적 모델이 필요하다. 공정 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 금속 와이어의 단면은 원형이고,
- 2) 밀도는 일정하며,
- 3) 와이어의 변형은 축에 대하여 대칭이고,
- 4) 축 방향으로 균일하게 일어나며, 반경 방향은 무시한다.

이러한 가정 하에 Fig. 1에 주어진 바와 같이 원통 실린더로 나타낼 수 있는 와이어의 단면 변형 과정을 단면 변형이 일어나기 시작하는 가열 구간 시작위치에 원점을 놓고, 시각  $t$ , 원점으로부터의  $x$  만큼 떨어진 위치에 있는 두께  $dx$  의 제어부피 요소 (control volume)를 대상으로 실린더 좌표계로 나타낸다.

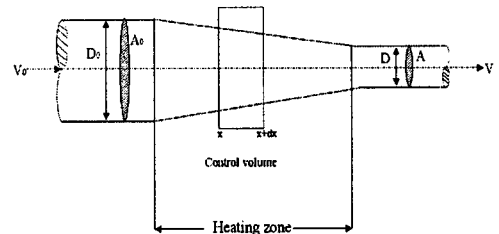


Fig. 1 Representation of the wire deformation

### 2.1 기본 방정식

#### 2.1.1 질량평형

위치  $x$ 의 단면을 통하여 들어오는 질량 유량 (mass flow rate)와 위치  $x+dx$ 의 단면을 통하여 나가는 질량 유량의 차이는 제어 부피요소에서의 질량 변화율로 나타낼 수 있으므로 질량 평형을 나타내는 연속방정식은

$$\frac{\partial[\rho \cdot A(t,x)]}{\partial t} = - \frac{\partial[\rho \cdot A(t,x) \cdot v(t,x)]}{\partial x} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다.

### 2.1.2 운동량 평형

운동량 평형은 앞의 질량 평형에서와 같이 제어 부피요소에 들어오는 운동량과 나가는 운동량, 그리고 표면력과 중력 작용의 차이는 제어 부피요소의 운동량의 변화, 즉 관성 운동량으로 주어진다.

위치  $x$ 의 면을 통하여 들어오는 금속 와이어의 시간당 운동량, 위치  $(x+dx)$ 의 면을 통하여 나가는 금속 와이어의 시간당 운동량, 그리고 위치  $x$  및  $(x+dx)$ 의 면에 작용하는 표면력  $f(t, \cdot)$ 에 의하여 제어 부피요소에서의 운동량의 변화율이 나타나므로 운동량 평형을 나타내는 운동 방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[\rho \cdot A(t,x) \cdot v(t,x)]}{\partial t} \\ & = - \frac{\partial[\rho \cdot A(t,x) \cdot v(t,x)^2]}{\partial x} - \frac{\partial[f(t,x) \cdot A(t,x)]}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

로 표현된다.

### 2.1.3 에너지 평형

강제 네킹을 일으키는 공정에서는 시료의 온도에 따라 단면의 변형이 다르게 나타난다. 만일, 신선(wire drawing) 공정에서 시료가 발열반응을 일으키고, 에너지의 교환이 외부와 차단된 단열공정이고, 시료 단면내의 온도는 균일한 분포를 하며, 발열량은 제어부피요소의 질량에 비례한다고 가정하면, 제어부피요소에서 발생하는 발열량은 제어부피요소의 온도 상승으로 나타나게 된다. 따라서 제어부피요소가  $v(t,x)$ 의 속도를 가지고 움직인다면, 실도함수 (substantial derivative)에 의하여 에너지 평형 방정식은

$$q_0 = c \cdot \left( \frac{\partial T(t,x)}{\partial t} + v(t,x) \cdot \frac{\partial T(t,x)}{\partial x} \right) \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다 (단,  $c$ 는 비열,  $cal/(g \cdot K)$ ,  $q_0$ 는 단위 시간 당, 질량 당 발열량,  $cal/(g \cdot sec)$ , 을 나타냄).

### 2.2 구성 모델

다이(die)를 사용하지 않고 금속 와이어를 인발하는 공정은 인발을 위한 외력뿐만 아니라 가열에 의하여 소재의 열적 인장성을 이용하므로 힘과 변형과의 관계를 다루는 구성 방정식에 온도요인이 포함된다. 이를 위하여 본 연구에서는 아래에 주어진 바와 같이 온도보정 변형을 파라메타인 Zener-Hollomon parameter  $Z$ 를 도입하였다.<sup>12, 13</sup>

$$Z = e^{Q/RT(t,x)} \cdot \frac{\partial \epsilon(t,x)}{\partial t}$$

단,  $\epsilon$ 은 스트레인,  $Q$ 는 사용된 시료의 소성변형을 일으키는 활성화 에너지,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 절대온도를 나타낸다.

만일 시료를 인장시키기 위한 인장응력이 Zener-Hollomon parameter  $Z$ 값에 비례한다면, 구성 모델은

$$f(t,x) = -k \cdot e^{Q/RT(t,x)} \cdot \frac{\partial v(t,x)}{\partial x} \quad (4)$$

로 표현된다. 이때  $k$ 는 비례상수이다.

### 2.3 정상상태 모델 방정식

위에 주어진 기본 방정식 계, 식 (1)-(4)는 2변수 (시간과 축 방향으로의 위치)에 대한 단면적, 속도, 온도 분포에 대한 비선형 연립 방정식이므로 시간의 경과에 따라 공정상태가 변하는 일반적인 경우에 대한 시스템 특성을 찾기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 시간에 대한 상태의 변화가 나타나지 않는 정상상태를 대상으로 공정 특성을 살펴보았다.

정상상태에서는 모든 변수가 시간에 대하여 변화가 없으므로 운동 방정식 (2)와 구성 방정식 (4)로부터

$$\begin{aligned} & \frac{d(A(x) \cdot v(x)^2)}{dx} \\ & = \alpha \cdot \frac{d}{dx} [e^{Q/RT(x)} \cdot A(x) \cdot \frac{dv(x)}{dx}] \end{aligned}$$

로 나타낼 수 있다. (단,  $\alpha = \frac{k}{\rho}$ )

따라서 공정중의 시료 속도는

$$\frac{dv(x)}{dx} = \left[ \frac{v(x)^2}{\alpha} + \frac{K}{\alpha \cdot A(x)} \right] \cdot e^{-Q/RT(x)} \quad (5)$$

를 만족하며, 이때  $K$ 는 속도 경계조건에 의하여 결정되는 적분 상수이다.

에너지 방정식 (3)에 의하여 속도와 온도와의 관계는

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{q_0}{c \cdot v(x)} \quad (6)$$

으로 주어진다.

한편, 정상상태에서의 연속 방정식에 의하여 공정중의 시료 단면적은

$$\frac{dA(x)}{dx} = -\frac{v(x) \cdot A(x)}{\alpha} \cdot e^{-Q/RT(x)} - \frac{K}{\alpha \cdot v(x)} \cdot e^{-Q/RT(x)} \quad (7)$$

을 만족시켜야 한다.

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 속도, 단면적, 온도 분포 특성

인발비를 달리하며 정상상태의 시료 속도, 온도, 그리고 단면적 분포에 대한 방정식 (5), (6), (7)을 바탕으로 한 시뮬레이션 결과는 Fig. 2에 주어진다. 이때, 파라메타  $\alpha$ 는 주어진  $c, q_0$  하에서 속도 경계조건을 만족하도록 설정되었다.

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 시료의 속도는 가열구간 내에서 아래로 볼록한 비선형적 증가가 나타남을 알 수 있다. 이러한 속도 증가 형태는 단면적 분포 그림에서 (Fig. 2(b)) 위로 볼록한 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 온도는 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 위로 볼록한 형태의 증가를 나타내는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 인발비의 영향

금속선재 세선화 공정에서는 모델에서 나타나는 파라메타에 따라 시료의 속도, 단면적 그리고 온도의 분포가 영향을 받게 된다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 가열이 이루어지는 인발구간 내에서 인발비가 클수록 속도는 증가하는데, 구간의 경계에 따라 속도 증가의 기울기가 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 시료의 단면적은 감소하는데, 초기 가열 구간에서 인발비가 커짐에 따라 단면적 감소율이 커지며, 초기 구간을 지난 후에는 일정 기울기를 가지며 단면적이 감소한다.

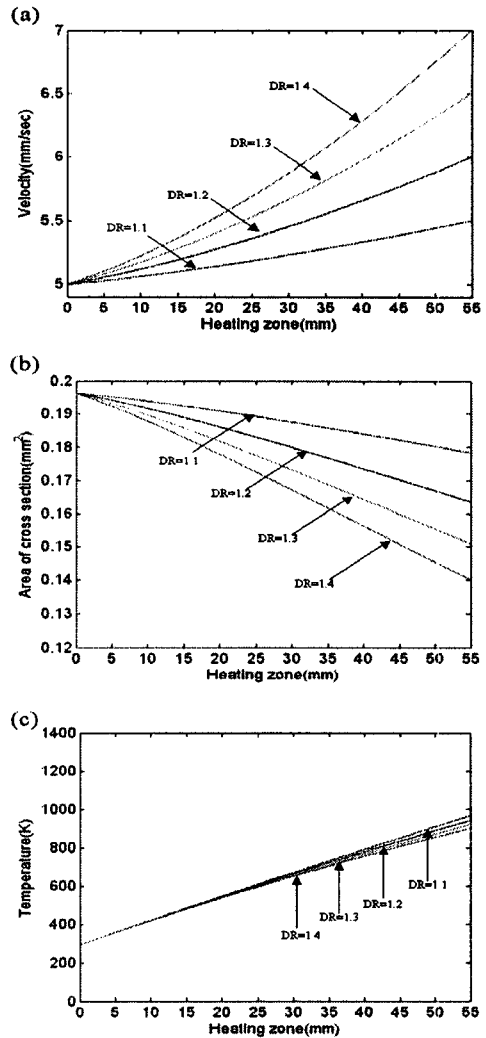


Fig. 2 The profiles of (a) the velocity, (b) the cross sectional area and (c) the temperature in the heating zone depending on draw ratio ( $v(0)=5$  mm/sec,  $A(0)=0.196$  mm<sup>2</sup>,  $T(0)=293$  K,  $q_0=0.9924$  J/(g sec),  $c=0.386$  J/(g K),  $C=Q/R=300$  K,  $\alpha = 9000$  mm<sup>2</sup>/sec)

### 4. 실험

#### 4.1 실험장치의 구성

본 연구에서는 기존의 선재가공과는 달리, 다이 (die)를 사용하지 않고 급격한 변형에 따른 단면 변화가 나타나는 현상, 즉, necking 현상을 유도함으로써 와이어 세선화를 얻을 수 있는 새로운 공

정기술을 개발하고자 하므로, 다이를 사용하지 않는 인발장비와 강제 네킹을 일으키기 위한 순간 가열장치가 필요하며, 그와 동시에 네킹 유도시 절단이 일어나지 않도록 정밀 변형을 제어하는 기술과 쿨링에 따른 물성 및 성능 변화를 다루는 재료 과학적 측면과 생산적 측면이 동시에 요구된다.

현재 다이를 사용하는 단선 다단 인발법에서는 공정 조건을 잘 제어할 경우에 500 $\mu$ m~100 $\mu$ m단위 까지 생산 가능하여 상용화 되어있으나, 단위 인발 단계에서 다이를 사용하여 0.01 정도의 극정변형을 일으키므로 높은 비용과 제한된 용도로 인하여 실용화에는 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 다루고자 하는 강제 네킹법에서는 무한 길이 형태의 세선 와이어를 단위 인발 단계에서의 인발비 1.4까지 가능하도록 개발 목표를 설정하여 새로운 기계장치의 구성을 Fig. 3에 주어진 바와 같이 크게 세 부분으로 구성하였다.

① 시료의 공급 및 권취 제어부 : 시료가 절단이 일어나지 않는 범위에서 정확한 공급/권취 및 장력의 제어를 위하여 장력 측정장치와 권취를 구동시키는 개별 서보모터를 컴퓨터 제어 시스템으로써 통제한다.

② 인발 및 생산속도 제어부 : 디스크의 회전비로서 인발력을 생성하고 가열부에서의 순간 가열에너지에 의해 강제 네킹을 유도한다. 그러나 시료의 단면적의 감소와 동시에 길이의 증가가 일어나게 되므로 이때 시료와 디스크 표면에서 마찰과 미끄러짐이 발생된다. 이는 정밀함을 요구하는 인발력의 제어에 큰 문제가 된다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 본 연구에서는 실험적으로 인발 디스크 형상에 있어서 다단계의 diameter를 시료의 신장비와 비례하도록 증가시킴과 동시에 시료를 다단계 형상의 디스크에 감아올림으로서 이러한 문제를 해결하고자 한다.

③ 가열부 : 강제 네킹이 일어나도록 순간가열을 하기 위하여 마이크로파 가열법 (microwave heating method)을 이용한다.

Fig. 4는 Fig. 3에 따라 제작된 본 연구의 실험용 장치를 보여준다. 인발 디스크 (a)는 캡스탄 (capstan)이라고 불리며, 직경이 서로 다른 다층 원판의 적층된 모양을 하고 있으며, 원주 표면은 마모에 강한 세라믹 재료로 코팅이 이루어져 있다. 인발 캡스탄은 속도 제어형 모터에 의하여 구동되며, 인발비는 벨트-풀리 기구로 이루어진 연속 가

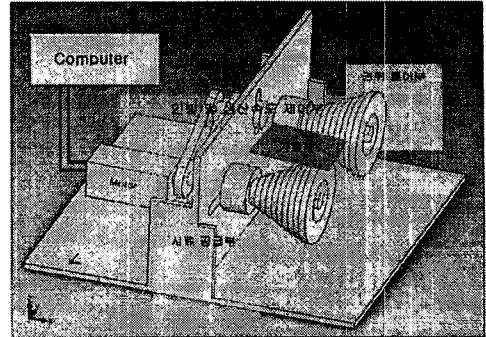


Fig. 3 Construction of the dieless wire drawing system designed for the experiment

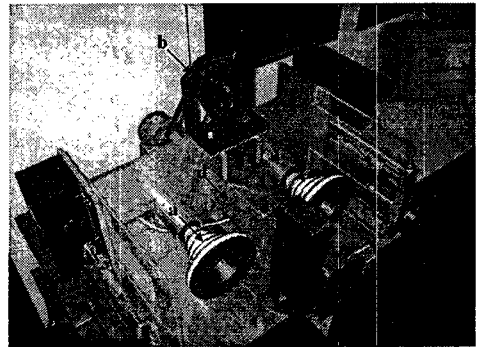


Fig. 4 Photograph of the dieless wire drawing system using microwave

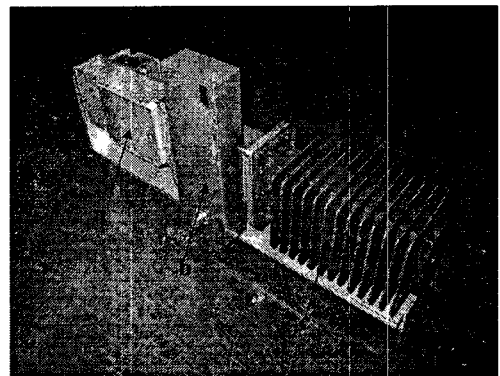


Fig. 5 Photograph of the heating device consisting of (a) the microwave generator, (b) attenuator, and (c) absorber

변 기어장치(b)에 의하여 조절된다. 시료의 공급 및 권취부(c)는 기어링으로 연결되어 있으며, 컴퓨터에 의하여 속도가 주어진다. 가열장치(d)는 두 축의 겹

스탄 사이에 설치되어 있다.

### 4.2 고주파 가열 및 흡수장치

고주파를 이용한 가열을 위해서 본 연구에서는 시중에서 상용화 된 마이크로 오븐에서 사용되는 고주파 발생장치(a)를 사용하였으며, 마이크로파의 세기를 측정하기 위한 감쇠기 (attenuator)(b), 그리고 전자파 흡수장치(c)를 설치하였다. Fig. 5는 실험을 위하여 제작된 가열 및 전자파 흡수관을 보여준다. 전자파 발생을 위하여 사용된 마그네트론의 출력은 1 kW, 발생된 주파수는 2.4 GHz 이다.

### 4.3 실험조건

위에 주어진 실험 장치에 시료를 가열부에 공급하고 인발하려면 출력부의 시료 인출 속도는 입력속도보다 커야 한다. 입력속도와 인출 속도를 각각  $V_1, V_2$  라 하고, 시료의 입력 직경을  $d_1$ , 출력 직경을  $d_2$ , 입력 단면적을  $A_1$ , 출력 단면적을  $A_2$ 라 하면

$$A_2 \cdot V_2 = A_1 \cdot V_1 \text{ 또는 } V_2 \cdot d_2^2 = V_1 \cdot d_1^2$$

이다. 따라서 인발비를  $D.R.$  이라고 하면

$$D.R. = \frac{V_2}{V_1} = \frac{A_1}{A_2}$$

이므로 직경 감소비  $R_d$ 와 단면적 감소비  $R_a$  는

$$R_d = 1 - \frac{1}{\sqrt{D.R.}}, R_a = 1 - \frac{1}{D.R.}$$

로 나타낼 수 있다.

인발 실험을 위한 시료는 시중에서 판매하는

Table 1 Specifications of the material used

Material	Copper
Mean diameter ( $\mu\text{m}$ )	500
CV(%)	1.85

Table 2 Experimental conditions for the dieless drawing

Initial velocity ( $V_1$ )	5 mm/sec
Initial diameter of the wire ( $d_1$ )	0.5 mm
Initial cross sectional area ( $A_1$ )	0.196 $\text{mm}^2$
Draw ratio	1.1~1.4

0.5 mm 직경의 구리(Copper) 와이어를 사용하였다. Table 1은 시료의 사양을 보여준다. 인발조건은 Table 2에 주어진 바와 같다.

## 5. 결과 및 토의

### 5.1 가열부에서의 전자파 에너지 분포

고주파를 이용한 가열에서는 고주파의 발생에 대한 시료의 이동이 이루어지는 상대적 위치와 방향이 중요하다. 만일 시료의 반향과 전자파의 전파 방향이 서로 수직을 이루면 가열 효과가 현저히 저하된다. 따라서 본 연구에서는 가열부에서의 전자파 에너지 분포를 시뮬레이션하여 시료의 공급위치와 방향을 설정하였다. Fig. 6은 가열부 내의 전자파 에너지 분포 시뮬레이션 결과를 보여준다.

시뮬레이션에 의하면 전자파는 전자파 흡수부 방향으로 전파되어 가며, 에너지 분포는 둥근 모서리의 사각형 실린더가 반복되는 모습을 가지며, 내부 실린더는 외부 실린더보다 에너지 강도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 시료는 Fig. 7에 주어진 바와 같이 에너지 분포 실린더 중에서 마그네트론을 포함하는 첫 번째 에너지 분포 실린더를 통과하

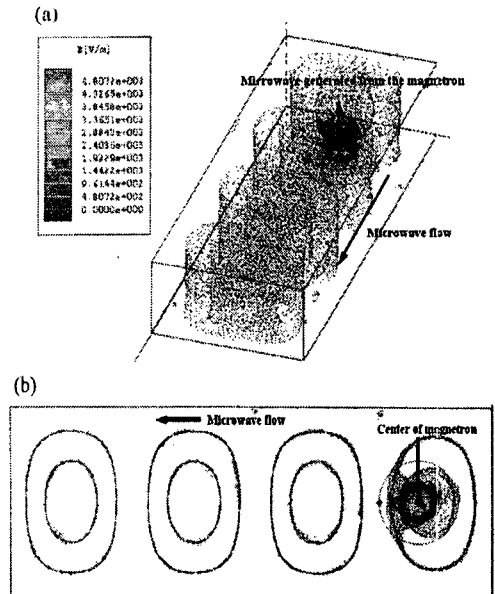


Fig. 6 The simulation result for the energy distribution in the microwave chamber (a:3-dimensional view, b:cross-sectional view)

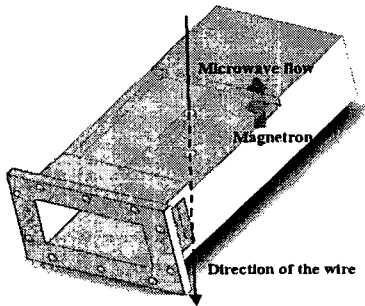


Fig. 7 Specimen feeding direction and magnetron set in the heating chamber

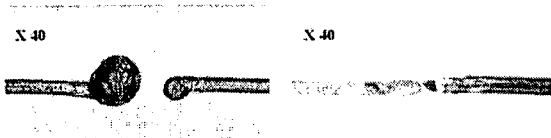


Fig. 8 Photographs showing the wire melting and breakage

며, 공급 방향은 실린더의 축과 나란하도록 설정하였다. Fig. 8은 이러한 설계에 따라 시료의 가열 효과를 실험한 결과를 보여준다. 이에 의하면 시료가 가열에 의하여 용융되어 절단된 것을 볼 수 있다.

### 5.2 가열구간 내 직경 분포

금속 와이어가 가열인발 중에 일으키는 단면적의 변화를 측정하기 위하여 레이저 비임에 의한 직경 측정장치를 이용하였다. 이를 위하여 Table 2에 주어진 조건 하에서 인발비를 1.2로 주었을 때, 정상상태 인발공정 중에 마이크로파 발진 장치의 전

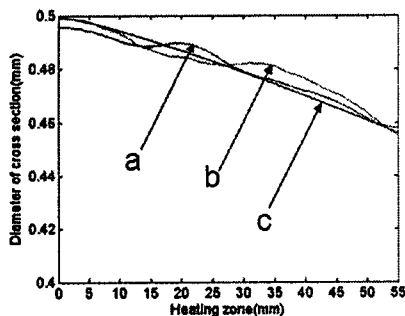


Fig. 9 Profiles of the wire diameter drawn with D.R. of 1.2 (a,b: experimental results, c: simulation result)

원과 시료의 공급 및 권취를 급정지시키고, 인발구간 내에서 놓여진 시료를 채취하여 굵기를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 9와 같다.

금속 와이어는 인발구간 내에서 약간의 굵기 변동을 보이며 가늘어지며, 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다.

### 5.3 인발효과

인발공정에서는 사용된 모재가 금속과 같이 강도가 크고, 탄성을 지니고 있으면, 시료의 탄성 변형과 함께 캡스탄 표면에서의 미끄럼이 발생하지 않도록 와이어의 정확한 파지가 대단히 중요하다. 본 연구에서는 직경 0.5mm인 와이어를 속도 5 mm/sec로 공급하고, 인발비를 각각 1.1, 1.2, 1.3, 1.4로 변화시키며 와이어를 인발하고, 가공된 와이어의 직경을 측정하였다. Fig. 10에는 마이크로파 가열이 주어지는 실험용 인발장치를 이용하여 생산된 와이어를 보여준다. 각 조건에서 생산된 시료의 직경은 Table 3에 주어진 바와 같다. 인발비의 증가에 따라 시료 와이어의 직경이 감소하지만, 직경의 변동은 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 시료 직경의

Table 3 Wire diameters according to draw ratios

Classification	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
D.R. <sub>mech</sub> ( $V_2/V_1$ )	1	1.1	1.2	1.3	1.4
$D_{mean}$ (mm)	0.5	0.478	0.459	0.439	0.424
CV% of diameter	1.85	2.21	3.72	4.44	4.27
D.R. <sub>actual</sub>	1	1.094	1.187	1.297	1.391

D.R.<sub>actual</sub>: actual draw ratio, D.R.<sub>mech</sub>: mechanical draw ratio,  $D_{mean}$ : mean diameter of the drawn wire

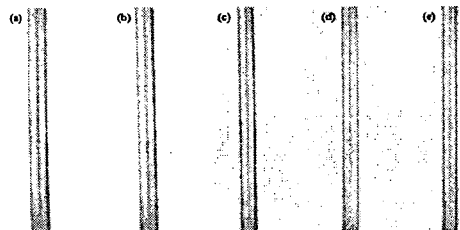


Fig. 10 Photographs of the wire processed (X 40) (a) initial copper, (b) drawn copper (DR=1.1), (c) drawn copper (DR=1.2), (d) drawn copper (DR=1.3), (e) drawn copper (DR=1.4)

실제 측정치는 계산 결과보다 크게 나타났으며, 따라서 실제 인발비는 기계적 인발비보다 작았다. 이는 금속 와이어가 가지는 탄성과 고강성, 그리고 캡스탠 표면에서의 와이어 미끄러짐에 기인하는 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 가열부가 주어지는 인발공정에서 와이어 변형을 나타내는 수학적 모델을 구하여, 정상상태에서 인발구간 내에서의 와이어 속도, 단면적, 그리고 온도의 분포를 시뮬레이션하고, 실험을 통하여 새로운 가열 인발법의 유효성을 찾아보았다.

모델을 바탕으로 정상상태에서 이루어진 시뮬레이션 결과, 실험결과와 잘 일치하였으며, 시료의 속도분포는 인발이 진행됨에 따라 아래로 볼록한 형태로 증가하며, 반면에 시료의 단면적은 위로 볼록한 형태로 감소하였다.

마이크로파 가열 인발실험을 해 본 결과, 마이크로파 가열에서는 시료의 공급방향에 따라 가열 효율이 크게 달라지며, 전자파 에너지 분포에 대한 시뮬레이션 결과, 시료는 마그네트론의 설치 방향과 나란하도록 공급하는 것이 효과적이었다.

다이를 사용하지 않고 마이크로파 가열에 의한 강제 네킹을 이용한 인발은 금속 와이어 세션화에 유효하게 이용될 수 있음을 확인하였으며, 인발된 시료의 직경의 변동은 인발비가 커짐에 따라 증가하였다.

## 후 기

이 연구는 2004년도 경희대학교 학술지원에 의한 결과이며, 동 대학의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Hanada, E., Takano, K., Matsumura, K., Hoshino, Y., Nishimura, T., Hyoudou, K., Watanabe, Y. and Nose, Y., "Electromagnetic Attenuation with Stainless-steel Fiber Mesh," IEEE EMC Society Newsletter, The Winter 2003 Issue, pp. 21-26, 2003.
- Huh, Y., Kim, M. H., Kim, I. S. and Paik, Y. N., "Electronic Shielding Effectiveness of the Structure with Long -shape Aperture," Proceedings of KSPE spring conference 2003, 03S192, 2003.
- Persson, L. and Enghag, P., "Basic principles of wire drawing," Wire Ind.(UK), Vol. 63, No. 10, pp. 727-733, 1996.
- Kim, T. H., Kim, B. M. and Choi, J. C., "Prediction of die wear in the wire drawing process," J. of Materials Processing Technology, Vol. 65, No. 1/3, pp. 11-17, 1997.
- Yoshida, A. and Nakamura, T., "Developments in diamond wire drawing dies," Wire Ind.(UK), Vol. 66(781), No. 1, pp. 37-44, 1999.
- Lo, S. W. and Lu, Y. H., "Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate," J. of Materials Processing Technology, Vol. 123, No. 2, pp. 212-218, 2002.
- Enghag, P. and Persson, L., "An overview of wire-drawing dies and die-working technology," Wire Ind.(UK), Vol. 66(783), No. 3, pp. 197-205, 1999.
- Hillery, M. T. and McCabe, V. J., "Wire drawing at elevated temperatures using different die materials and lubricants," J. of Materials Processing Technology, Vol. 55, No. 2, pp. 53-57, 1995.
- Hashmi, M. S. J., Symmons, G. R. and Parvinmehr, H., "A novel technique of wire drawing," J. of Mech. Eng. Sci., Vol. 24, No. 1, pp. 1-4, 1982.
- Li, Y., Quick, N. R. and Kar, A., "Dieless laser drawing of fine metal wires," J. of Materials Processing Technology, Vol. 123, No. 3, pp. 451-458, 2002.
- Kawaguchi, Y., Katsube, K., Murahashi, M. and Yamada, Y., "Applications of dieless drawing to Ti-Ni wire drawing and tapered steel wire manufacturing," Wire J. Int., Vol. 24, No. 12, pp. 53-58, 1991.
- Tiernan, P. and Hillery, M. T., "An investigation of the dieless drawing method for the production of mild steel wire," Wire J. Int., Vol. 32, No. 12, pp. 94-100, 1999.
- Liu, X., Wang, L. and Zhang, L., "Modeling of damage on materials during hot deformation based on the Zener-Hollomen parameter," RARE METALS, Vol. 23, No. 1, pp. 88-92, 2004.