유한요소해석을 이용한 초음파 진동 인발기 설계 및 제작

이경훈¹ · 김병민[#]

Design and Manufacture of Ultrasonic Vibration Drawing Tool

K. H. Lee, B. M. Kim

(Received August 16, 2010 / Revised September 18, 2010 / Accepted September 29, 2010)

Abstract

In ultrasonic vibration drawing, the drawing forces can be reduced by applying ultrasonically oscillating dies. Ultrasonic vibration drawing has been considered as a means of accommodating high-level drawing processes such as shaped wire, ultrafine wire, and the wire drawing operation in semidry or dry condition. Prior studies were attempted to analyze the mechanism of improved drawing performances, such as reduced drawing force and improved lubrication characteristic. However, researches on design rule for ultrasonic vibration drawing system are not yet carried out. The principal objectives of this work are to design a set of tooling capable to superimpose the oscillations and to observe by experiments the influence of the ultrasonic oscillations on the wire drawing.

Key Words : Ultrasonic Vibration, Wire Drawing, Tool Horn Design, Drawing Force, FE-Simulation

1. 서 론

인발가공은 선재, 봉재 및 관재 등의 일정한 단면을 가진 길이가 긴 제품을 생산하는데 이용되고 있다. 최근 단면형상 난이도가 높은 기계제품의 이형인발 및 티타늄 합금과 같은 난성형재의 인발가공 연구가 요구되고 있다. 기존에는 난드로잉 또는 이형인발 제품의 경우 주로 기계가공이나 열간 성형공정을 통해 생산하였다. 그러나 기계가공의 경우 생산성 및 기계적 성질 저하, 과도한 칩(Chip) 발생으로 인한 소재 손실 등의 문제가 있으며, 열간 성형의 경우 가열에 의한 과도한 에너지 소비 등의 문제가 있다. 냉간 인발공정을 통해 난드로잉 또는 이형인발 제품을 제조하면 정형가공(Net shape forming)이 가능해져서 소재 손실량 감소, 치수정도 향상, 공구비용 절감 및 대량생산 등의 장점이 있다[1].

축대칭 인발공정과는 달리 이형인발 및 난드로

잉재 가공에서는 인발력이 상대적으로 급격히 증가하여 금형의 마멸 및 응력집중 등이 국부적인 영역에서 발생하기 쉽다. 이는 제품치수 불량과 원인이 되며, 재료유동 및 금형 수명에도 영향을 미치기 때문에 제품의 정밀도, 경제성을 유지하기 위해 인발력 저감에 대한 연구가 요구된다[2].

최근 전자 및 반도체 부품, 항공기 및 자동차 분야 등에서 난성형재의 정밀가공기술 개발의 필요성이 요구됨에 따라 선진국에서는 초음파 진동을 이용한 성형 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 초음파 진동 성형법은 광학, 기계 및 전자 부품의 제조에 있어 높은 정밀도와 생산성을 가지며, 표면효과(Surface effect)와 부피효과(Volume effect)로 인해 소성공정에 적용 시 가공력을 저감할 수 있는 좋은 방안이 될 수 있다[3].

Garskii와 Efromov는 1953년에 초음파 진동 에너지가 금속에 미치는 영향에 대해 최초로 조사하였다. Blahs와 Langencker는 아연 단결정 및 다

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템
교신저자: 부산대학교 기계공학부,
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

결정 금속 인장시험의 인장시험에 초음파 진동을 가진하여 항복응력이 감소됨을 증명하였다[4]. Lehfeltd는 초음파 진동이 마찰력의 감소에 미치는 영향에 대해 연구하였다[5]. Masao Murakawa 와 Masahiko Jin이 신선 가공에서의 반경 방향 초음파 진동 다이의 유용성에 대한 연구를 진행하여 저 점도 윤활제를 사용한 인발 가공이 가능하도록 하였으며, 축방향 초음파 진동 다이를 적용한 인발 공정보다 임계가공속도가 증가할 수 있음을 증명하였다[6]. Masahiro Hayashi, Masahiko Jin 등이 FEM을 이용하여 초음파 진동 인발 공정을 해석하여 인발력과 응력-변형률 분포 등에서 향상된 인발 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는 명확한 결과를 얻었다[7]. 현재까지 초음파 진동에너지 활용한 소성가공, 특히 선재 인발에 관한 연구는 진동 진폭, 주파수, 인발속도 등이 성형하중에 미치는 영향에 대해 주로 이루어져 왔다. 하지만 초음파 진동 인발 공정을 위한 장치설계 확립 및 제작에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 유한요소해석과 평형상태의 과도장정식을 공진조건식으로 활용한 공구흔 설계이론에 기초하여 초음파 진동 인발 장치 설계방법을 정립하고 인발 공정에 초음파 진동에너지를 이용해 선재를 가공하는 장치를 제작하기 위해 수행되었다. 또한 알루미늄 선재에 대하여 초음파 진동 인발 실험을 하여 초음파 가진에 따른 인발력 감소효과를 검증하였다.

2. 초음파 진동 인발기 설계

2.1 초음파 진동 인발기 제원

초음파 진동 성형 장비는 Fig. 1 과 같이 발전기 (Power Supply), 진동자(Transducer), 부스터(Booster) 및 혼(Horn)으로 구성된다. 가진 주파수와 진동 진폭은 진동자, 부스터와 혼의 모양, 길이, 질량 등의 설계에 영향을 미친다. 따라서 초음파 진동 인발 장치를 설계하기 위해서는 선재 진동 인발 시 성형하중의 감소에 영향을 미치는 주파수와 진폭에 관한 정확한 정보가 필요하다. 일반적으로 금속 성형에 적용되는 가진 주파수 대역은 15~20 kHz 이며 진동 진폭은 1~20 μm 이다[7~9].

2.1.1 유한요소해석 조건

원형 선재의 인발공정 해석은 2 차원 축대칭 모델을 적용하여 상용 유한요소해석 S/W 인 ABAQUS

Fig. 1 Basic mechanisms of ultrasonic wire drawing

Fig. 2 FE-simulation model of ultrasonic vibration wire drawing

Ver. 6.9 로 수행하였다. 만능재료시험기(MTS, 10ton)를 이용해 확보한 Al1100 의 유효응력-변형률은 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 116.67\bar{\epsilon}^{-0.2196} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

유한요소해석은 일반적인 인발(Conventional drawing), 축방향 초음파 진동 인발(Axial ultrasonic vibration drawing, AUD)과 반경방향 초음파 진동 인발(Radial ultrasonic vibration drawing, RUD)에 대해 수행되었다. 해석에 사용된 재료는 탄소성체로 정의되었으며 금속은 강체로 가정하였다. Fig. 2 는 유한요소해석 모델을 나타내며 Table 1 은 ABAQUS Standard 를 이용한 해석 조건을 나타낸다. 초기소재 직경은 3mm 이며, 단면감소율은 약 6.6%이다. Table 2 는 초음파 진동 인발 공정의 진동 조건을 나타낸다. 축방향 및 반경방향 가진 주파수는 15kHz 이고 진폭은 1, 10 μm 이다. 초음파 진동 장비 특성상 주파수 대역을 변화시키는 것 보다 진

Table 1 Material properties and drawing conditions

Variables	Values
Wire drawing speed (V_d)	1-9000 mm/s
Wire material	Al1100
Young's modulus (E)	68.9 GPa
Yield strength (σ_Y)	40 MPa
Poisson's ratio	0.33
Diameter of wire (D_w)	3 mm
Diameter of die (D_d)	2.9 mm
Reduction (R)	6.6 %
Length of wire drawing (L)	8 mm
Half die angle(α)	6°
Friction coefficient (μ)	0.05

Table 2 Conditions of ultrasonic vibration

	Vibration direction	Frequency f , (kHz)	Amplitude α , (μm)
CD	None	None	None
AUD	Axial direction	15	1, 10
RUD	Radial direction	15	1, 10

폭의 크기를 조절하는 것이 더 용이하기 때문에 진폭을 변화시키는 유한요소해석을 수행하였다.

2.1.2 유한요소해석 결과 및 고찰

Fig. 3 은 초음파 진동 인발공정에서 금형과 선재의 기하학적인 상대운동 및 마찰력의 변화를 나타낸다. 일반적인 인발의 경우, 인발속도에 따라 선재가 이동하는 동안 고정된 금형은 소재와 항상 접촉 상태에 있다. 축방향 초음파 진동 인발의 경우, 금형이 사인곡선 형태로 축방향으로 진동하는 동안 인발 속도는 실제 인발속도 V_d 와 진동속도 $V_a(t)$ 의 합수로 표현된다. 만약 V_d 가 최대 진동속도($V_a(t)_{\max}=2\pi\alpha f$) 보다 느리다면, 인발 방향과 동일한 방향으로 금형이 진동할 때, 금형 어프로치(Approach, Apr.)부와 소재 사이에 간격이 발생하여 금형은 축방향으로 소재와 분리될 수 있을 것이다. 금형과 선재의 접촉 및 분리 메커니즘에 의해 윤활성능이 향상되거나 인발력이 감소할 것이다.

금형이 인발방향과 수직하게 사인곡선의 형태로 진동하는 반경방향 초음파 진동 인발의 경우, 인발 메커니즘은 레이디얼 단조(Radial forging)와 유사하다. 여기서 인발속도 V_d 는 한계인발속도

(a) Friction force during one oscillation

(b) geometrical movement of the drawing tool

Fig. 3 Comparison of wire drawing operation for AUD and RUD operations

$V_{CR}=V_r(t)_{\max}/\tan\alpha$ (여기서, $V_r(t)_{\max}=2\pi\alpha f$, α : 다이반각) 보다 느려야 한다. 이 때 금형 어프로치부와 베어링부에서 소재와 금형이 이격되고 축방향 초음파 진동 인발공정과는 달리 발생한 간격 사이로 윤활제가 유입된다. 이로 인해 인발공정 동안 발생하는 마찰력의 저감효과가 높아진다.

Fig. 4 는 일반적인 인발공정 해석 시 인발속도 V_d 에 따른 인발력 P 를 나타낸다. 인발력 P 는 $65\text{N}(\sigma=9.84\text{N/mm}^2)$ 으로 인발속도 V_d 에 관계없이 일정하였다.

Fig. 5는 축방향 초음파 진동 인발공정의 해석 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에 나타났듯이, 인발력은 $45\text{N}(\sigma=6.81\text{N/mm}^2)$ 에서 $70\text{N}(\sigma=10.59\text{N/mm}^2)$ 의 범위에서 나타났다. 한계인발속도 이하인 $V_d=10\text{ mm/s}$ 일 때, 초음파 진동주기($67\mu\text{s}$)에서 인발력은 변동을 거듭한다. Fig. 5(c)는 인발력이 변동하는 주기에

Fig. 4 Drawing force-time curve for conventional drawing

(c) Details of the fluctuation period ($V_d=10\text{mm/s}$)

Fig. 5 Drawing force-time curve for axial ultrasonic vibration drawing (amplitude= $1\mu\text{m}$)

대해 자세히 나타낸 것이다. 인발속도 $V_d=100\text{mm/s}$ 가 한계인발속도보다 빠른 경우 인발력의 변화를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 인발력은 $65\text{N}(\sigma=19.7\text{N/mm}^2)$ 으로 일반적인 인발공정 일 때와 동일하였다. 이것은 초음파 진동에 의한 인발력의 변동 및 감소 효과가 한계속도에 도달하여 사라졌기 때문이다.

반경방향 초음파 진동 인발공정의 유한요소해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 인발속도 $V_d=10\text{mm/s}$ 에서 인발력은 $35\text{N}(\sigma=5.30\text{N/mm}^2)$ 에서 $68\text{N}(\sigma=10.29\text{N/mm}^2)$ 의 범위에서 변동한다. 인발속도 $V_d=100\text{mm/s}$ 에서 인발력은 $43\text{N}(\sigma=6.51\text{N/mm}^2)$ 에서 $67.5\text{N}(\sigma=10.22\text{N/mm}^2)$ 의 범위에서 변동한다. 그러나 인발속도 $V_d=1000\text{mm/s}$ 에서 인발력은 $65\text{N}(\sigma=9.84\text{N/mm}^2)$ 으로 일반적인 인발공정 일 때와 동일하게 관찰되었다.

Fig. 6 Drawing force-time curve for radial ultrasonic vibration drawing (amplitude= $1\mu\text{m}$)

Fig. 7 Drawing force-time curve for axial ultrasonic vibration drawing (amplitude= $10\mu\text{m}$)

초음파 진동 인발공정에서 진폭의 변화가 인발력의 감소에 미치는 영향을 평가하기 위하여 앞선 해석에서 적용된 진폭보다 10 배가 큰 진폭 $10\mu\text{m}$ 를 적용한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 7과 8은 각각 축방향 및 반경방향 초음파 진동 인발 해석 시 인발속도 변화에 따른 인발력을 나타낸다. 진동 진폭이 증가함에 따라 인발력의 변동 폭이 증가하여 평균 인발력은 감소하였다.

이상의 결과들은 다음과 같이 요약될 수 있다. 축방향 및 반경방향 초음파 진동 인발공정에서 인발속도가 한계인발속도 이하일 때 인발력은 일반적인 인발공정에 비해 상대적으로 감소하였고 반경방향 초음파 진동 인발공정에서 더 큰 감소효과를 나타내었다. 가진 주파수를 15kHz 로 고정할 때, 인발속도가 감소하거나 진동 진폭이 증가할수록 인발력의 변동 폭이 증가하여 평균 인발력이

Fig. 8 Drawing force-time curve for radial ultrasonic vibration drawing(amplitude=10 μ m)

감소하였다. 하지만 인발속도가 임계속도에 도달하면 인발력의 파형은 일반적인 인발공정 해석에서 나타나는 형태와 유사하였다. 초음파 진동 진폭이 10 μ m인 경우 1 μ m에 비해 인발력의 감소폭이 크지만 높은 진폭으로 인해 재료 내부의 진동 응력 및 내부손실이 크기 때문에 공구흔이 파손될 우려가 있고 소재와 맞닿는 금형의 마멸량이 상대적으로 증가할 것으로 사료된다. 따라서 반경 방향 초음파 진동 인발공정 해석 시 일반적인 인발 공정에 비해 25%의 충분한 평균 인발력 감소 효과를 나타내는 진폭 1 μ m를 제작할 인발장치의 진동 진폭으로 선정하였다.

2.2 초음파 공구흔의 설계

진동자의 출력단에 같은 고유진동수의 부스터와 혼을 부착하여 공진에 의한 증폭작용으로 인발가공 시 필요한 진동에너지가 전달한다. 그러나 부스터와 공구흔의 고유 진동수가 진동자의 진동수와 일치하지 않는 경우에는 공구흔의 출력단에 가공에 필요한 초음파 진동이 전달되지 않기 때문에 공구흔에 대한 공진설계가 요구된다.

초음파 진동기에서 사용되는 대표적인 공구흔은 형상이 단순한 스텝형(step), 코니칼형(conical), 지수형(exponential) 등이 사용된다. 혼의 형태에 따른 진폭은 각 혼의 입력부와 출력부의 면적비가 일정하더라도 혼의 형태에 따라서 스텝형, 지

수형, 코니칼형으로 진폭확대율이 높다. 진폭비가 상대적으로 큰 스텝형 혼은 재료 내부의 진동응력과 내부손실이 크기 때문에 일반적으로 코니칼형 혼이 사용된다. 하지만 본 연구에서는 큰 성형 에너지가 요구되는 인발공정에 초음파 진동 에너지를 적용하였다[10]. 따라서 초음파 진동 인발 장치의 핵심 부분인 초음파 진동 공구흔을 스텝형으로 하여 공진조건식을 기초로 효과적으로 설계하고 혼의 형상과 치수를 결정하였다.

혼의 평형상태의 파동 방정식을 이용하여 공진을 위한 혼의 길이를 설계한 경우는 다음과 같다. Kang 등은 자왜형 초음파 트랜스듀서의 혼을 이론식으로 설계하였고, 그 타당성을 유한요소해석법을 이용해 검증하였다[11]. Eisner 는 혼의 평형상태 파동 방정식인 Webster 혼 방정식에 의해 혼을 설계하였다[12]. Lin 은 지수형 혼의 감쇠상수(decay constant)를 변화시켜서 축방향(Longitudinal) 진동과 비틀림(torsional) 진동이 동일한 주파수에서 발생하도록 longitudinal-torsional composite mode 지수형 혼을 설계하였고, 혼을 제작하여 설계의 타당성을 검증하였다[13].

Fig. 9 에 나타난 스텝형 혼의 공진조건식을 구하기 위한 혼의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(A(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2)$$

여기서, ρ : 봉의 밀도(kg/m³)
 $A(x)$: 봉의 단면적(mm²)
 u : 변위(mm)
 t : 시간(sec)
 E : 탄성계수(MPa)

식 (2)의 일반해는 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

여기서, $c = \sqrt{E/\rho}$
 이 방정식들의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$u_1(x,t) = \left(A \cos \frac{w}{c} x + B \sin \frac{w}{c} x \right) \sin(wt + \theta) \quad (4)$$

$$u_2(x,t) = \left(C \cos \frac{w}{c} x + D \sin \frac{w}{c} x \right) \sin(wt + \theta) \quad (5)$$

식 (3)에 다음의 경계조건을 이용하면

$$x=0: \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0$$

$$x=l_1: u_1 = u_2, \quad A_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = A_2 \frac{\partial u_2}{\partial x}$$

$$x=l_1+l_2: \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0$$

다음과 같은 공진조건식을 얻을 수 있다.

$$\tan \alpha l = \frac{\frac{A_2}{A_1} \tan \alpha l_2 + \tan \alpha \frac{l_1}{2}}{1 - \frac{A_2}{A_1} \tan \alpha \frac{l_1}{2} \tan \alpha l_2} \quad (6)$$

여기서, $l_1 = \lambda/4$ 이고, $x=l_1$ 의 점이 진동의 절점(Node)이 되므로 식 (6)에서 다음의 공진조건식을 구할 수 있다.

$$\tan \alpha \frac{l_1}{2} \cdot \tan \alpha l_2 = \frac{A_1}{A_2} \quad (7)$$

여기서, $\alpha = w/c$ 이다.

또한, 공구혼의 공진주파수는 재료 및 l_1 의 길이가 정해지면 $\lambda = c/f$ 를 이용해 간단히 구할 수 있다. 즉,

$$f = \frac{c}{4l_1} \quad (8)$$

식 (8)이 된다.

초음파 용접 및 미세 가공기에 주로 사용되는 공구혼의 재질은 티타늄 합금, 알루미늄 합금 이나 듀랄루민 합금이다. 본 연구에서는 티타늄 합금을 초음파 공구 혼의 소재로 선정하였다. 티타늄 합금은 높은 강도와 경도를 가지며, 초음파 진동자가 진동함에 따라 공구 혼의 부피 변화가 적어 재료 내부의 초음파 진동의 전달손실이 작다.

공구혼의 길이와 재질이 결정됨에 따라 식(8)을 이용해 초음파 공구혼의 공진주파수를 결정할 수 있다. 그러나 본 연구의 경우 초음파 진동 인발기의 발진기에서 부여되는 가진 주파수는 15kHz로 고정되어 있기 때문에 공구혼의 길이를 조정해야 한다.

Fig. 10에 본 연구에서 사용된 스텝형 초음파 진동 혼의 도면을 나타내었다. 혼의 길이는 식 (8)을 이용하여 170mm로 결정하였으며 혼의 재질 및 기계적 성질은 Table 3에 나타내었다.

Fig. 9 Step horn (Solid type)

Fig.10 Horn geometries in ultrasonic vibration Step horn(Solid type)

Table 3 Mechanical properties of horn material

Material	Mechanical properties			
	Density (g/cm ³)	Elastic Modulus (GPa)	Hardness (HRB)	Poisson's ratio
Titanium (Ti6Al4V)	4.43	113.85	334	0.31

Fig.11 Structure and die configuration of radial ultrasonic vibration drawing

3. 초음파 진동 인발기 제작 및 인발실험

3.1 초음파 진동 인발 시스템의 구성

Fig. 11에 초음파 진동 인발기의 개략도를 나타내었으며 Fig. 12에 초음파 진동 인발기의 구성과 각 부분의 진동 진폭, 응력분포를 나타내었다. 발

진기(Powder supply)의 Input power는 50~60Hz, 110V이며, Output power는 1.2kW, 15kHz이다. 초음파 진동자(Transducer)는 압전 세라믹(PZT)을 적층시키고 볼트로 고정된 BLT(Bolt Langevin type Transducer)를 사용하였다. 진동자와 부스터의 접촉면, 부스터와 혼의 접촉면은 진동에 의한 응력 집중을 방지하기 위하여 응력재료의 위치에 설정되어 있다. 부스터의 중앙 부위에 노드(Node)가 형성되고 이 지점은 초음파 진동 시스템의 지지점으로 활용되어 시스템에 맞는 지그를 제작하여 연결시킨다[13].

3.2 초음파 진동 인발 실험

본 연구에서 제작한 초음파 진동 인발기의 인발력 감소효과를 검증하기 위해 일반적인 인발 실험 및 반경방향 초음파 진동 인발 실험을 수행하였다. 이는 초음파 진동 인발 유한요소해석 결과와 비교되었다.

실험에 적용된 소재는 Al 1100 이며, 유한요소해석 조건과 동일하게 초기직경은 3mm 이고 길이는 20mm 이다. 인발 전에 소재가 다이스를 통해 만능재료시험기(MTS, 10ton)의 유압 지그에 충분히 물릴 수 있도록 포인팅(pointing) 및 인산염 피막처리 후 인발을 실시하였다. 인발 금형 또한 유한요소해석 조건과 동일한 베어링 길이 0.9mm, 다이반각 6°로 제작되었다. 일반적으로 인발금형의 코어부는 초경합금을 사용해 제작하지만 초경합금의 경우 극도로 높은 탄성계수와 밀도로 인해 초음파 진동이 소재에 정확히 전달되지 않는다. 초음파 진동 성형 시 금형 재질은 주로 세라믹 이나 공구강이 이용되며 본 실험에서는 SKD11 을 사용해 금형을 제작하였다. 금형은 고정치구를 제작하여 공구혼의 끝단부와 체결하였으며, 금형을 통과한 소재를 유압지그에 물린 다음 인발을 실시하였다.

Fig.12 Variation of amplitude and mechanical stress for processing transducer

Fig.13 Experiment of ultrasonic vibration wire drawing process

Fig. 13 은 초음파 진동 인발공정의 유한요소해석 및 혼의 평형상태 파동방정식 의해 설계 및 제작된 초음파 진동 인발 시스템을 나타낸 것이다. 초음파는 인발력의 감소에 가장 큰 영향을 미치는 반경방향으로 가진 되었으며 주파수와 진폭은 성형해석과 동일한 15kHz 와 1 μ m 이다.

4. 실험결과 및 토론

본 연구에서는 초음파 진동 인발공정의 유한요소해석을 통해 초음파 진동 시스템에 필요한 가진 주파수와 진동 진폭을 선정하였고 평형상태의 파동방정식을 적용한 공진조건식으로 설계된 공구혼을 초음파 진동 인발기 제작에 사용하였다. 제작된 초음파 진동 시스템을 이용한 인발실험을 통해 초음파 가진의 효과를 검증하였다. 이상의 초음파 진동 인발 장치의 설계방법을 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 15는 일반적인 인발공정 및 반경방향 초음파 진동 인발공정 시 성형해석 및 실험 결과를 인발력-시간 그래프로 나타낸 것이다. 일반적인 인발 공정에 대한 실험결과, 인발력은 65N이고 성형해석과 경향이 잘 일치함을 알 수 있다. 반경방향 초음파 진동 인발 실험 시 일반적인 인발 실험에 비해 18% 정도 감소한 평균 인발력이 나타나며 성형해석결과보다 다소 높게 평가되고 있다. 이는 초음파 가진 중 다이 케이스(Die case)에 혼 또는 금형의 측면부가 접촉되어 초음파가 분산됨에 따라 가진 효과가 감소했기 때문이다.

이상의 실험 결과로부터 본 연구에서 제시한 설계방법에 의해 제작된 초음파 진동 시스템을

선재 인발가공에 적용 시 성형하중이 감소함을 확인하였으며 초음파 진동 시스템 설계방법의 타당성을 검증하였다. 제시된 설계방법은 인발공정과 다른 소성 공정에 초음파 진동 적용 시 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

Fig.14 Design and manufacture of ultrasonic vibration drawing equipment

Fig.15 Drawing force diagrams for CD and RUD analyzed by FEM and experiment (frequency 15kHz, amplitude 1μm)

5. 결론

본 연구에서는 초음파 진동 인발 장치 설계방법을 제시하였고, 반경방향 초음파 진동 인발 실험 장치를 제작 후 실험을 통하여 설계의 타당성을 검증하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 가진 주파수가 15kHz로 일정한 초음파 진동 인발공정시, 인발속도가 감소하거나 진동 진폭이 증가할수록 평균 인발력은 감소하였다. 하지만 높은 진폭의 경우 재료 내부의 진동응력 및 내부손실이 크기 때문에 혼이 파손될 우려가 있어 인발 장치의 진폭은 1μm로 설계하였다.

(2) 평형상태의 파동방정식을 적용한 공진조건식을 이용해 Ti6Al4V 재질인 초음파 공구혼의 길이를 170mm로 설계하였다.

(3) 초음파 진동 인발공정의 유한요소해석 및 공구혼의 공진조건식을 통해 초음파 진동 성형시스템 설계방법을 제시하였다.

(4) 제시된 설계방법을 이용하여 낮은 성형하중으로 알루미늄 선재를 생산할 수 있는 초음파 진동 인발 장치를 제작하였다. 초음파 진동 성형시스템의 설계방법은 선재 인발 공정뿐만 아니라 다양한 금속 소성 공정에 적용 가능할 것으로 판단된다.

(5) 인발 실험결과, 일반적인 인발 및 반경방향 초음파 진동 인발 공정에서 인발력은 성형해석결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 초음파 진동 가진에 따라 18%의 평균 인발력 감소를 보였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합분야(NC RC)(2010-0008-277)와 한국연구재단(NRF-2009-K20 601000004-09E0100-00410)으로부터 지원 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Kobayashi, 1998, The present situation of cold drawn special section, J. JSTP, Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.
- [2] Failure analysis and prevention, Metal Handbook, 8th ed., Vol. 10, ASM Handbook.

- [3] C. E. Winsper, G. R. Dawson, D. H. Sansome, 1970, An introduction to the mechanics of oscillatory metalworking, *Met. Mater.*, pp. 158~162.
- [4] F. Blaha, B. Langeneker, 1959, Plastizitätsuntersuchungen von metallkristallen in ultraschallfeld, *Acta Metallurgica*, Vol. 7, Issue 2, pp. 93~100.
- [5] R. Pohlman, E. Lehfeldt, 1966, Influence of ultrasonic vibration on metallic friction, *Ultrasonics*, Vol. 4, pp. 178~185.
- [6] M. Murakawa, M. Jin, 2001, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 113, pp. 81~86.
- [7] M. Hayashi, M. Jin, S. Thipprakmas, M. Murakawa, J. C. Hung, Y. C. Tsai, C. H. Hung, 2003, Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method(FEM), *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 140, pp. 30~35.
- [8] K. Siegert, A. Mock, 1996, Wire drawing with ultrasonically oscillating dies. *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 60, pp. 657~660.
- [9] J. C. Hung, C. Hung, 2005, The influence of ultrasonic-vibration on hot upsetting of aluminum alloy, *Ultrasonics*, Vol. 43, pp. 692~698.
- [10] B. G. Lee, K. L. Kim, K. E. Kim, 2008, Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM, *Trans. Kor. Soc. Machine Tool Eng.*,
- [11] K. J. Kang, Y. R. Roh, 2001, Design and construction of the acoustic horn for magnetostrictive ultrasonic transducer, *J. Acoust. Soc. Kor.*, Vol. 20, pp. 57~65.
- [12] E. Eisner, 1961, Complete solutions of the Webster horn equation, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 41, pp. 1126~1146.
- [13] S. Lin, 1996, Study on the longitudinal-torsional composite mode exponential ultrasonic horns, *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 757~762.
- [14] C. H. Kim, 2007, A study on the motion of the levitated object in ultrasonic near-field acoustic levitation, PhD thesis, KAIST.