

## 와이어 본딩용 초음파 혼의 진동 특성

김영우\* · 임 빛\* · 한대웅\* · 이승엽\*\*

\* 서강대학교 기계공학과

### Vibration Characteristics of a Wire-Bonding Ultrasonic Horn

Young Woo Kim\*, Vit Yim\*, Daewoong Han\* and Seung-Yop Lee\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received November 9, 2013 ; Revised January 14, 2014 ; Accepted January 29, 2014)

**Key Words:** Ultrasonic Wire Bonding Machine(초음파 용접기), Ultrasonic Horn(초음파 혼), Vibration Mode(진동 모드), Wire-Bonding(와이어 용접), Piezoelectric Actuator(압전 구동기)

**초록:** 본 논문은 상용화된 와이어 본딩용 초음파 혼 시스템에서 발생하는 와이어 본딩 불량률의 원인을 진동 해석을 통하여 파악하고자 한다. 먼저 링 형상의 압전 구동기와 초음파 혼 그리고 캐필러리 등 각 부품의 진동 특성과 136kHz의 가진 주파수 근처에서 발생하는 전체 초음파 혼 시스템의 주요 진동 모드들을 유한요소 해석을 이용하여 구하였다. 136kHz에서 공진되는 전체 트랜스듀서 시스템의 진동 모드가 종진동 모드가 아닌 굽힘 진동 모드임을 조화 가진 해석과 실험으로 확인하였다. 136kHz에서 발생하는 굽힘 진동 모드는 캐필러리 끝단의 움직임이 종방향 뿐만 아니라 좌우 횡방향으로도 큰 변위가 발생하기 때문에 정밀 작업 시 본딩 불량률의 원인이 될 수 있다. 가진 주파수 대역 근처인 119kHz에서 발생하는 종진동 모드는 캐필러리의 횡방향 진동이 감소하기 때문에 본딩 성능의 향상을 위해서 이러한 종진동 모드를 이용하도록 설계 변경이 필요함을 제시하였다.

**Abstract:** This study investigates the vibration characteristics of a wire-bonding piezoelectric transducer and ultrasonic horn for high-speed and precise welding. A ring-type piezoelectric stack actuator is excited at 136 kHz to vibrate a conical-type horn and capillary system. The nodal lines and amplification ratio of the ultrasonic horn are obtained using a theoretical analysis and FEM simulation. The vibration modes and frequencies close to the driving frequency are identified to evaluate the bonding performance of the current wire-bonder system. The FEM and experimental results show that the current wire-bonder system uses the bending mode of 136 kHz as the principal motion for bonding and that the transverse vibration of the capillary causes the bonding failure. Because the major longitudinal mode exists at 119 kHz, it is recommended that the design of the current wire-bonding system be modified to use the major longitudinal mode at the excitation frequency and to minimize the transverse vibration of capillary in order to improve the bonding performance.

### 1. 서론

초음파 혼을 이용한 와이어 본딩 장치는 초음파의 진동 에너지를 이용하여 전기 도체인 와이어를 회로 단자와 리드 프레임에 직접 접촉하는 기계 장치이다. 이 와이어 본딩 과정은 전기 스파크로 와이어 끝단을 녹여 구형으로 만든 후 그

위에 수직으로 접촉면에 내려주면서 압전 구동기에 특정 가진 주파수의 전압을 인가한다. 이 때 압전 구동기에서 발생하는 초음파 진동이 초음파 혼의 종진동 모드에 의해 증폭되며 캐필러리 끝단에서 구형의 와이어를 회로 단자에 문지르면서 접촉시킨다. 이와 같이 초음파 혼을 이용한 와이어 본딩은 고속 및 정밀 접합이 요구되는 휴대폰 등의 전자 통신기기 및 정밀 반도체 부품 등에 적용되고 있다.<sup>(1)</sup>

압전 구동기, 초음파 혼, 캐필러리 등 각 부품

† Corresponding Author, [sylee@sogang.ac.kr](mailto:sylee@sogang.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

및 전체 트랜스듀서 시스템의 진동 특성이 초음파 와이어 본딩 공정의 품질에 영향을 미치므로 각각의 부품 및 전체 시스템에 대한 다양한 진동 해석과 설계 방법들이 연구되어 왔다.

초음파 혼은 출력부의 모양이 계단 형태로 줄어 들 때 변위 증폭 효과가 있으나 계단형은 응력 집중으로 인하여 고출력이 요구되는 곳에는 사용되지 못하며 지수 함수형이나 현수형 형태는 증폭비는 떨어지나 안전성이 상대적으로 우수하여 고출력이 요구되는 곳에 많이 사용되고 있다.<sup>(2,3)</sup> 이러한 초음파 혼을 설계하는 방법으로 혼의 평형 상태 파동 방정식을 이용하여 공진을 위한 도파관의 길이를 수학적으로 결정하는 연구가 진행되었고,<sup>(4)</sup> 유한요소법을 이용한 연구들이 진행되어 왔다.<sup>(5,6)</sup> 또한 증폭비를 높이면서 안정성 확보와 정밀 설계가 가능한 3단 형태의 혼의 특성을 수식적으로 도출한 연구가 진행되었다.<sup>(7)</sup> 최근에는 정밀 플립칩 접합용 초음파 혼에 위상 최적화 설계 기법을 적용한 연구가 수행되었다.<sup>(8)</sup>

현재 상용 제품으로 쓰이는 국내 S회사 와이어 본딩 장치가 고속 및 정밀 작업시 본딩 불량 발생하고 있는데 본 논문은 이 와이어 본딩 초음파 혼 시스템의 진동 특성을 이론적 해석과 유한요소해석 그리고 실험을 통하여 비교 분석하여 본딩 불량의 원인을 찾아서 설계 개선을 제시하는 것이 목적이다. 먼저 압전 구동기, 초음파 혼, 캐필러리에 대한 각 부품의 특성을 파악하고 전체 초음파 혼 트랜스듀서 시스템의 진동 특성을 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행하였고, 실제 와이어 본딩 시스템을 이용하여 실험적으로 검증하였다.

## 2. 부품 진동 특성

### 2.1 압전 구동기

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 와이어 본딩용 트

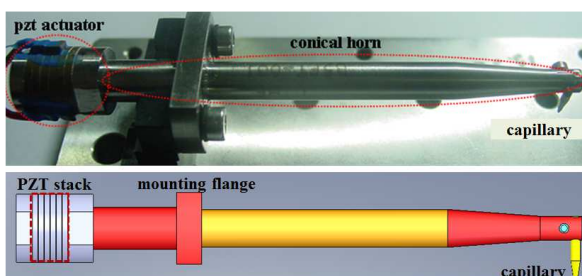


Fig. 1 Transducer horn system model

랜스듀서 모델을 보여준다. 전체 트랜스듀서 시스템은 압전 구동기 모듈, 원뿔형 혼, 캐필러리 그리고 마운틴 플랜지 등으로 구성된다. 압전 구동기는 일본 Shinkawa 회사 제품으로 링 형상의 압전소자가 6장으로 적층되고 각 층 사이에 전극 (electrode)이 삽입된 구조이다. 압전 구동기의 각 층은 링 형상이고 두께는 1mm의 벌크형이다. 전극은 0.05mm의 얇은 셀형으로서 철펠로 구성되어 있다. 압전 구동기 모듈은 구동기의 앞뒤에 질량과 볼트가 비대칭적으로 결합된 구조이다. 앞뒤의 질량은 각각 티타늄과 알루미늄이고 앞뒤로 체결된 볼트의 재료는 철이다. Table 1은 사용된 압전 구동기의 크기와 물성치를 나타낸다.

### 2.2 원뿔형 초음파 혼

초음파혼은 가진기에서 발생하는 초음파 진동을 효율적으로 캐필러리에 전달하기 위해 진폭비가 최대가 되도록 설계되어진다. 일반적으로 사용되는 혼의 형태는 원기둥형, 지수함수형, 원추형, 캐터노이드형, 계단형 등으로 나누어진다. 본 연구에서 사용되는 초음파 혼은 Fig. 2와 같이 3단 원뿔형 혼으로 구동기에서 가진된 초음파 진동이 혼을 통하여 종방향으로 증폭된다. 초음파 혼은 구동기의 입력에 대한 혼의 출력단에서의 변위 진폭비가 높아야 하고 초음파 혼을 고정시키는 마운틴 플랜지가 종진동 모드의 절점(nodal point)에 위치해야 한다.

Table 1 Material property of piezoelectric actuator

Dimension	Ring-type Piezo	Electrode
Outer Diameter	11.43 mm	11.43 mm
Inner Diameter	5.08 mm	5.08 mm
Thickness	1 mm	0.05 mm
Piezoelectric constant $d_{33}$	$1.1 \times 10^{-10} \text{m/V}$	-
Elastic compliance $s_{33}^E$	$1.55 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{V}$	-



Fig. 2 Configuration of a 3-step conical horn

3단 혼의 양쪽 직경을  $D_1$ 과  $D_2$ 라 하면 종진동 모드의 3개 부분 변위해  $U_i(x)$ 는 자유진동해석을 통해서 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$U_1(x) = U_0 \cos kx \quad (1)$$

$$U_2(x) = \frac{U_0}{1 - \alpha(x-l_1)} \times \left\{ -\left[ \frac{\alpha}{k} \cos kl_1 + \sin kl_1 \right] \times \sin k(x-l_1) + \cos kl_1 \cos k(x-l_1) \right\} \quad (2)$$

$$U_3(x) = \frac{A_1 U_0}{A_3 k} \left\{ \alpha^2 (l_2 \cos kl_2 - \frac{1}{k} \sin kl_2) \cos kl_1 - (1 - \alpha l_2) k \sin k(l_1 + l_2) - \alpha \sin kl_1 \sin kl_2 \right\} \times \sin k(x-l_1-l_2) + \frac{U_0}{1 - \alpha l_2} \left\{ \cos k(l_1 + l_2) - \frac{\alpha}{k} \cos kl_1 \sin kl_2 \right\} \times \cos k(x-l_1-l_2) \quad (3)$$

여기에서  $\alpha = (1 - D_2/D_1)/l_2$  이다. 본 연구에서 사용된 3단 초음파 혼의 재료는 티타늄이고 3단 각 부분의 크기는  $l_1=59.41$ ,  $l_2=15.19$ ,  $l_3=6.86$ ,  $D_1=6.35$ ,  $D_2=4.064$  mm이다.

### 3. 유한요소해석

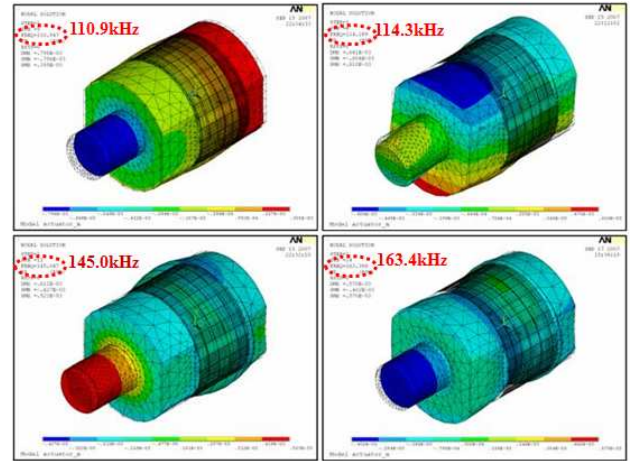
#### 3.1 압전 구동기 모듈

와이어 본딩은 압전 구동기에서 나온 구동 변위가 초음파 혼을 통하여 종방향으로 증폭되어 캐필러리를 목표 변위로 구동시켜야 한다. 따라서 구동기와 초음파 혼 그리고 캐필러리를 포함한 전체 트랜스듀서 모델에서 보면 압전 구동기 모듈이 현재의 가진 주파수인 136kHz로 구동될 때 구동기와 접한 초음파 혼의 끝단에 최대 힘과 변위를 전달해야 하고 초음파 혼에서 증폭된 종진동이 캐필러리 끝단에서 고속 마찰을 일으키도록 해야 한다.

압전 구동기 모듈은 구동기 앞뒤에 질량과 볼트가 비대칭적으로 결합된 구조이다. 앞뒤의 질량은 각각 티타늄과 알루미늄이고 앞뒤로 체결된 볼트는 철이다. Table 2와 같이 초음파 혼의 앞과 뒷부분에 연결되는 너트 부분과 스크류 재료의 물성치를 이용하여 양쪽 경계조건이 모두 자유단인 상태에서 ANSYS를 이용한 유한요소 해석을 수행하였다. 100 ~ 170kHz의 범위에서 고유 주파수와 진동 모드 형상을 살펴보았다. Fig. 3에서 보듯이 110.9, 145.0 그리고 163.4kHz에서 종방향 관련 모드가 발생하고 114.3kHz에서 굽힘 모드가 발생한다.

**Table 2** Material property of the actuator module

Parts	Material	Young's Modulus (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio
Back Nut	Aluminum 7075 -T6	71.5	2.81	0.33
Horn Body / Front Nut	Titanium Ti-6AL-4V	113	4.43	0.342
Resonator	Piezo	73	7.7	0.25
Preload Screw	Steel	205	7.85	0.33



**Fig. 3** Vibration modes of a piezo actuator module

#### 3.2 초음파 혼

3단 원뿔형 초음파 혼의 종진동 모드들을 자유진동 결과 (1)-(3)과 유한요소해석으로 구하였다. 종진동 모드는 33.8, 65.3, 92.8, 122.1, 153.5 kHz 등의 순서로 고유진동수를 갖는다.

원뿔형 혼의 설계에서 중요한 것은 즉 압전 구동기와 연결된 초음파 혼의 입력부와 캐필러리가 연결된 출력부의 종방향 진폭비가 최대가 되어야 하며 고정단인 마운트 플랜지의 위치가 모드 형상의 절점에 위치하여야 한다. 본 와이어 본딩 시스템은 122.1kHz의 종진동 모드가 관련되므로 Fig. 4는 이 주파수에서 초음파 혼의 입력부 대한 출력부의 진폭비를 보여준다. 압전구동기에 구한 변위 0.356mm를 입력으로 하는 초음파 혼의 진동 모드 형상에 대한 이론값과 유한요소해석 결과를 나타내었다. 진폭비의 유한요소 해석 결과는 1.66이며 종진동 모드의 첫 번째 절점위치는 10.39mm이다.

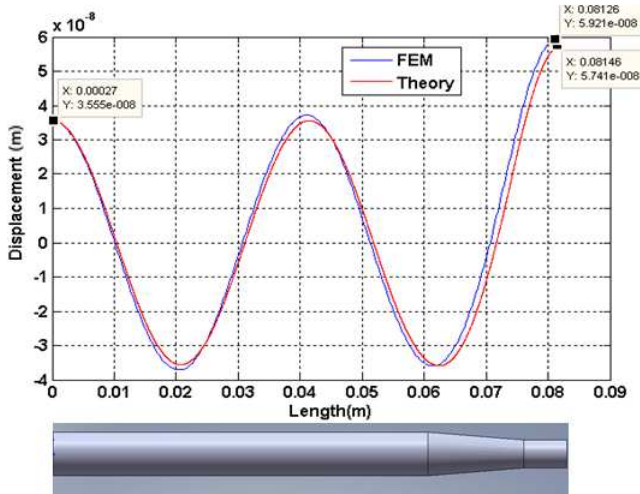


Fig. 4 Mode shape of the 4th longitudinal vibration mode with 122.1 kHz

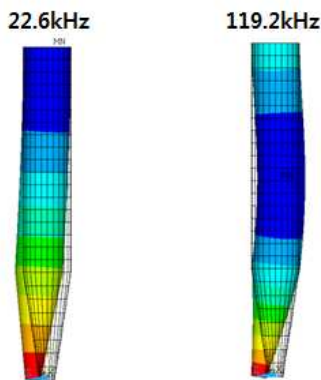


Fig. 5 Bending vibrations of capillary: 1st mode at 22.6 kHz and 2nd mode at 119.2.3kHz.

3.3 캐필러리

초음파 혼은 길이 방향의 종방향 진동이 캐필러리의 운동에 가장 큰 영향을 미치나 원뿔형 혼 끝단에 수직으로 장착된 캐필러리는 굽힘 모드가 직접적으로 관련된다.

Fig. 5는 캐필러리를 외팔보의 경계 조건으로 해석한 고유주파수와 진동 모드를 보여준다. 캐필러리의 재료는 세라믹이고 캐필러리를 혼에 연결시키는 볼트는 철이다. 첫 번째 굽힘 모드 고유진동수는 22.6 kHz이고 두 번째 굽힘 모드 고유진동수가 119.2 kHz에서 나타나며 종진동 모드는 168 kHz에서 나타난다. 119.2 kHz의 굽힘 진동 모드가 가진 주파수 영역 근처에서 나타나므로 이 진동 모드는 전체 와이어 본딩 시스템에 직접적인 영향을 줄 수 있다.

3.4 전체 트랜스듀서 모델

와이어 본더 전체 시스템에서는 압전 구동기로

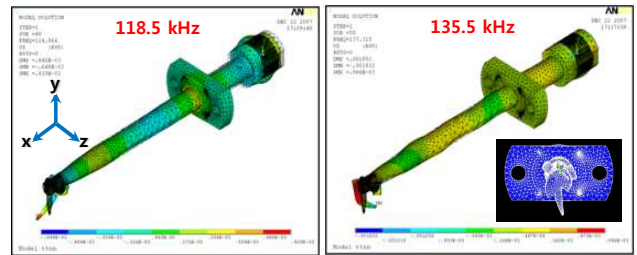


Fig. 6 The mode shapes of longitudinal and coupled vibrations at 118.5 and 135.5 kHz

가진된 초음파 진동이 혼을 통하여 증폭되어 최종적으로 캐필러리 끝단의 진동을 일으킨다. 압전 구동기 모듈, 초음파 혼, 마운틴 플랜지 그리고 캐필러리를 포함한 전체 모델에 대한 ANSYS를 이용한 모드 해석을 수행하였다. 마운틴 플랜지의 물성치는 초음파 혼과 동일한 티타늄이며 마운틴 플랜지의 2개의 볼트 결합부를 고정된 경계조건으로 하고 각 부품들의 결합부는 서로 완전히 결합된 고정단 조건으로 해서 유한요소해석을 수행하였다.

관심 주파수 영역인 100 ~ 150kHz에서 각각 118.48kHz와 135.53kHz의 주요 진동 모드가 2개 나타난다. Fig. 6에 나타난 2개 고유 주파수에 해당하는 진동 모드 형상을 살펴보면 118.48kHz 주파수는 x축 방향 종진동 모드이나 가진 주파수 근처인 135.5kHz에서는 예상과 다르게 굽힘 진동 모드가 발생함을 알 수 있다. Fig. 6의 오른쪽 아래 그림은 y-z축 평면의 모드 형상을 보여준다. 캐필러리에 관련된 모드 형상을 살펴보면 135.5 kHz에서 캐필러리가 종방향 진동뿐만 아니라 비틀림 진동이 다른 주파수의 진동 모드에 비해서 상대적으로 크게 나타나는데 이는 굽힘 모드의 주 진동에 비틀림 진동이 섞여서 발생하기 때문이다.

136 kHz 가진 주파수 근처에서 나타나는 전체 시스템의 주 진동 모드가 길이 방향으로 움직이는 종진동 모드가 아닌 굽힘 모드이기 때문에 이 모드가 와이어 본딩 성능에 미치는 영향을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 전체 모델에 대해서 조화가진 유한요소해석을 수행하였다. 압전 구동기의 분극 방향에 따라 0~10V의 정현파 전압을 80kHz부터 180kHz 까지 가진하여 종방향(x축)과 횡방향(z축)에 주파수응답 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞선 전체 시스템 해석 결과와 유사하게 118.5kHz와 135.5kHz에서 종방향과 횡방향으로 모두 공진이 발생함을 알 수 있다.

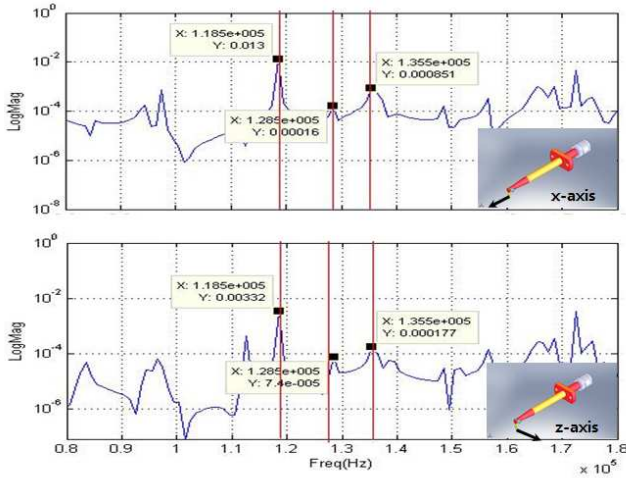


Fig. 7 Simulated frequency response plots at the capillary in x-axis and z-axis directions

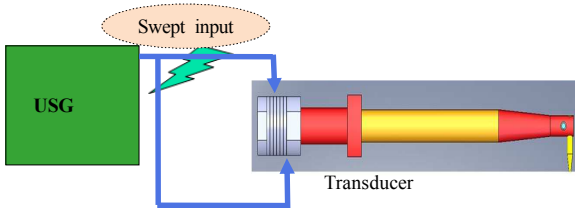


Fig. 8 Experiment setup for the current and impedance measurement

4. 실험 및 고찰

유한요소해석에서 구한 결과를 실험적으로 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 USG(Ultrasonic Generator) 장비를 사용하여 가진 주파수에 대한 어드미턴스(admittance), 임피던스(impedance), 전류와 위상(phase) 특성을 측정하였다. USG 장비는 본 와이어본더 장비를 생산하는 S회사에서 특화하여 제작한 장비로서 입력 주파수에 따른 다양한 동특성을 측정할 수 있는 장비이다. 컴퓨터에 저장된 USG 제어기에서 가진 신호를 USG 장비를 통하여 구동기 모듈에 인가시켜주고 이 신호를 다시 받아서 데이터를 출력하게 된다. 실제 작업 조건과 같이 마운틴 플랜지의 두 홀과 뒷면이 고정된 경계조건하에서 실험을 수행하였다.

Fig. 9의 결과와 같이 118.7kHz와 135.4kHz에서 급격히 임피던스가 감소하고 어드미턴스와 전류가 순간적으로 증가하는 현상이 나타난다. 이 주파수 영역에서 위상의 급격한 변화가 일어나기 때문에 공진이 일어나는 주파수임을 알 수 있다. 이 공진 주파수는 앞 절에서 유한요소법을 이용

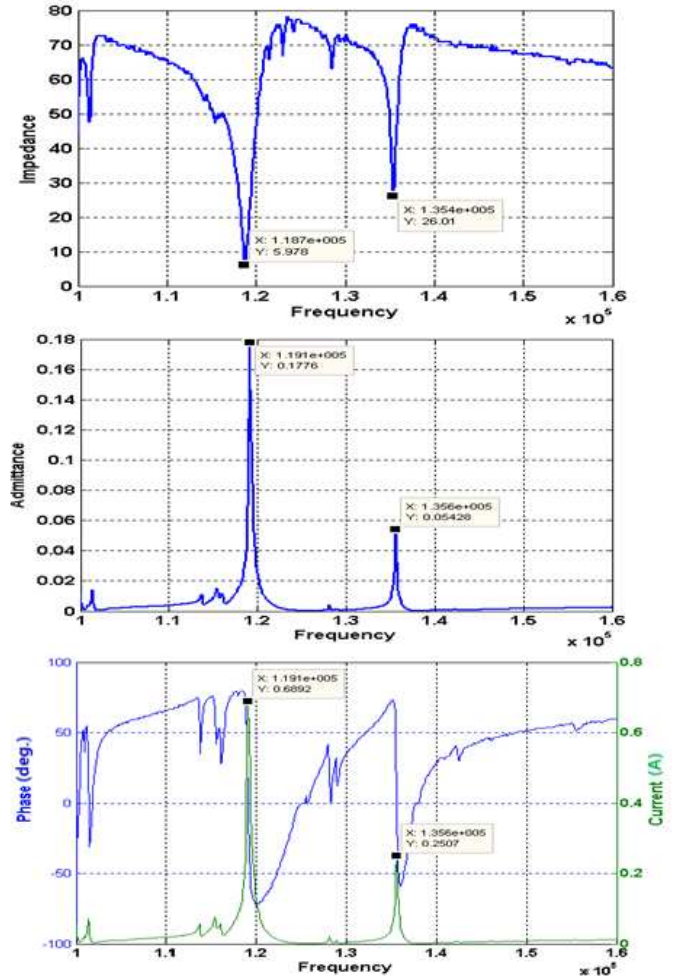


Fig. 9 Impedance, admittance, current and phase plots for input frequency using USG

하여 구한 118.5kHz와 135.5kHz와 상당히 일치한다.

본 와이어본더 트랜스듀서는 136kHz로 가진되기 때문에 이 가진 주파수와 근접한 118.7kHz에서 공진이 일어나는 것은 본딩 성능에 영향을 줄 수 있다. 또한 118.7kHz의 어드미턴스 값이 135.4kHz에서는 값보다 크게 측정되었으므로 입력 에너지의 분산 및 불필요한 진동 등으로 인해서 와이어 본딩 성능에 영향을 줄 수 있다. 그러나 임피던스, 어드미턴스 그리고 전류 측정만을 가지고는 와이어 본더의 캐필러리 끝단에서 실제로 일어나는 변위를 파악할 수 없다. 따라서 Fig. 10과 같은 실험 장치를 구성하여 함수 발생기로 구동기를 정현파 가진하고, 캐필러리 끝단에 종방향과 횡방향의 진동 변위를 측정하였다.

캐필러리 끝단에 반사막을 붙여 비접촉 레이저 센서인 Polytec LDV(Laser Doppler Vibrometer)

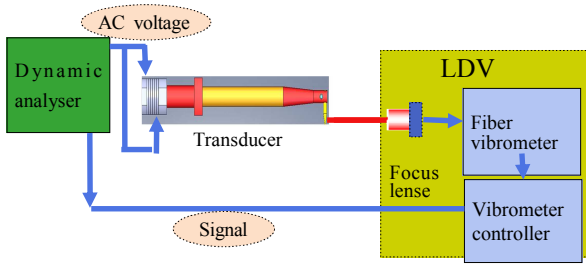


Fig. 10 Experimental setup for the displacement measurement at the capillary

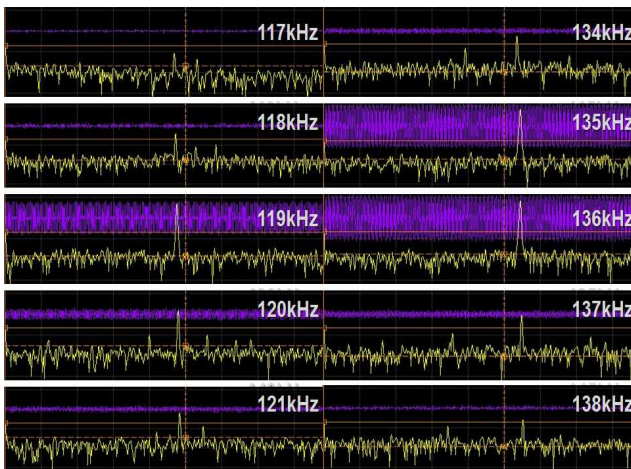


Fig. 11 Experimental time data (up) and FFT plots (down) at the capillary excited around 118kHz and 136kHz

OFV-2200H를 사용하여 변위를 측정하였다. Fig. 11은 관심 있는 주파수 대역인 119kHz와 136kHz 주변에서 다양한 가진 주파수에 대해서 캐필러리의 종방향 변위를 측정 한 시간 데이터(보라색)와 FFT(Fast Fourier Transform) 결과(노란색)를 동시에 나타내었다. 예상한 대로 119kHz와 136kHz의 2개 주파수에서 공진이 일어남을 확인하였다. 136kHz에서 발생하는 공진의 최대 진폭이 119kHz의 공진에서의 진폭보다 더 크게 발생함을 알 수 있다. 이 결과는 119kHz에서 더 큰 진폭을 갖는 3.4 절의 조화가진 유한요소해석 결과와는 상이한데 그 이유는 여러 부품들로 구성된 결합부들에서 실제 경계조건들과 유한요소해석 조건들과 차이를 비롯하여 다양한 오차 원인에 기인한다고 볼 수 있다.

각 주파수에서 분당 성능에 미치는 실제적인 영향을 살펴보기 위해 캐필러리의 2차원 운동 궤적을 실험적으로 구하였다. 트랜스듀서 시스템을 119kHz와 136kHz로 가진할 때 캐필러리 끝단에서의 종방향(x축)과 횡방향(z축) 진동 변위를 측

Table 4 Comparison of the maximum displacements at capillary

Exciting Frequency	Measurement Axis	Maximum displacement ( $\mu\text{m}$ )
136kHz	X	0.062
	Z	0.0232
119kHz	X	0.0228
	Z	0.008

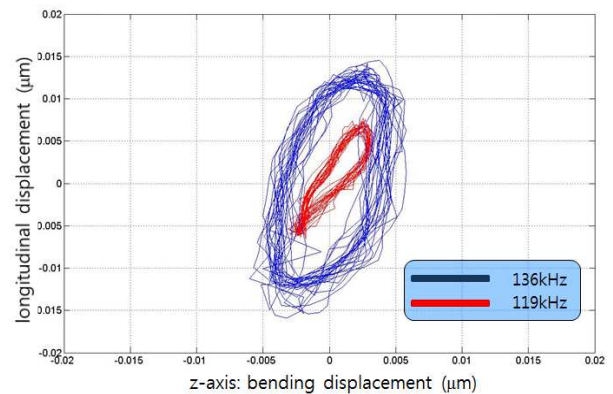


Fig. 12 Experimental results of the 2 dimensional displacement trajectories

정하여 캐필러리의 2차원 변위 궤적을 Fig 12에서 나타내었고 또한 종방향과 횡방향 최대 변위를 Table 4에 나타내었다. 119kHz에서는 캐필러리 끝단의 궤적이 직선형에 가깝지만 136kHz에서는 타원형에 가까운 궤적을 보이고 있다.

Fig. 12의 결과로부터 136 kHz에서 캐필러리 2차원 변위가 최대가 되지만 종방향 뿐만 아니라 횡방향 변위가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 3.4절의 Fig. 6의 모드 형상에서 보는 바와 같이 136kHz에서 공진이 일어날 때 캐필러리가 횡방향 비틀림 진동이 크게 나타나기 때문이다. 와이어 본딩 특성상 이러한 횡방향 진동은 와이어 본딩 성능에 영향을 주어서 고속 및 정밀 작업시 불량률을 야기한다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 이론적 해석과 유한요소해석 그리고 실제 부품을 이용한 실험을 통하여 상용화된 와이어 본딩의 초음파 혼 트랜스듀서 시스템의 진동 특성을 비교 분석하여 136kHz로 가진되는 현재 모델의 와이어 본딩 불량률 원인을 제시하였다. 압전구동기, 초음파 혼 그리고 캐필러리를

포함한 전체 트랜스듀서 모델에 대해서 119 kHz와 136 kHz에서 공진이 발생함을 유한요소해석과 실험을 통해서 확인하였다. 그러나 현재 가진 주파수인 136 kHz에서는 예상했던 종진동 모드가 아닌 굽힘모드의 진동이 발생한다. LDV를 이용한 변위 실험을 통해서 136kHz에서 종방향뿐만 아니라 횡방향 진동이 상대적으로 많이 발생함으로써 고속 및 정밀 본딩 작업시 발생하는 불량 의 주된 원인이 됨을 파악하였다.

현재 발생하는 초음파 혼의 와이어 본딩 불량을 개선하기 위해서는 첫째로 가진 주파수에서 초음파 혼 시스템이 굽힘 모드가 아닌 순수한 종진동 모드로 가진되도록 설계 변경이 이루어져야 하고 둘째로 공진시 캐필러리의 횡방향 진동을 최소화하도록 구조적인 개선이 이루어져야 한다.

## 후 기

본 논문은 2012년도 미래창조과학부 재원의 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업(과제 번호-2012-055325)이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, E. M. and Jang, H. S. Park, D. S., 2010, "A Horn of Half-wave Design and Manufacture for Ultrasonic Metal Welding," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 6, pp. 790~796.
- (2) Watanabe, Y., 1992, "A Longitudinal-Flexural Complex-Mode Ultrasonic High-Power Transducer System with One-Dimensional Construction," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 32, pp. 2430~2434.
- (3) Amin, S. G., Ahmed, M. H. M. and Youssef, H.A., 1995, "Computer-Aided Design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining using Finite-Element Analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, pp. 254~260.
- (4) Elsner, E., 1996, "Complete Solution of the Webster Horn Equation," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 41, pp. 1126~1138.
- (5) Seo, J. S., Jang, S. M. and Beck, S. Y., 2012, "One-wavelength Ultrasonic Horn Design for Ultrasonic Machining of Mobile Phone Battery Terminal Welding," *Transactions of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 70~75.
- (6) Lee, B. G., Kim, K. L., and Kim, K. E., 2008, "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 63~70.
- (7) Kang, K and Roh, Y., 2001, "Design and Construction of the Acoustic Horn for Magnetostrictive Ultrasonic Transducer," *The journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 20, pp. 57~65.
- (8) Ha, C. Y. and Lee, S. I., 2013, "2D and 3D Topology Optimization with Target Frequency and Modes of Ultrasonic Horn for Flip-chip Bonding," *Transactions of the KSNVE*, Vol. 23, No. 1, pp. 84~91.