

## 와이어 본딩용 초음파 공구혼 설계에 관한 연구

이봉구<sup>a\*</sup>, 오명석<sup>a</sup>, 마정범<sup>b</sup>

## Design of Ultrasonic Tool Horn for Wire Wedge Bonding

Bong-Gu Lee<sup>a\*</sup>, Myung-Seok Oh<sup>a</sup>, Jeong-Beom Ma<sup>b</sup><sup>a</sup> Division of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam College of Science & Technology,  
170 Hyeonchung-ro, Nam-gu, Daegu, 705-703, Republic of Korea<sup>b</sup> School of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, 445 Gyeongin-ro, Guro-gu, Seoul, 152-714, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	24	May	2013
Revised	24	July	2013
Accepted	25	July	2013

## Keywords:

Wire bonding  
Ultrasonic transducers  
Horn  
Finite element method (FEM)  
Capillary

## ABSTRACT

In this study, we investigated the design of a wire wedge bonding ultrasonic tool horn using finite element method (FEM) simulations. The proposed method is based on an initial design estimate obtained by FEM analysis. An ultrasonic excitation causes various vibrations of a transducer horn and capillary. A simulated ultrasonic transducer horn and resonator are then built and characterized experimentally using a laser interferometer and electrical impedance analyzer. The vibration characteristics and resonance frequencies close to the exciting frequency are identified using ANSYS. FEM analysis is developed to predict the resonance frequency of the ultrasonic horn and use it in the optimal design of an ultrasonic horn mode shape.

## 1. 서론

최근 스마트폰, 태블릿 PC 및 디지털 카메라 등의 고성능, 고기능성 전자기기들이 대중화되고, 수요가 급증하면서 전자 부품의 고속화 및 다기능화가 요구되고 있다. 이러한 전자부품의 미세화, 휴대성 증가 및 빠른 데이터 처리 속도 증가를 목적으로 패키징 기술의 고집적화와 미세 접합기술의 적용이 증가되고 있다. 미세 접합 기술로는 접합저항 및 레이저 용접, 초음파 용접 등이 있다. 이 중 초음파 접합기술은 접합부위에 일정한 압력을 가하면서 고주파 진동에너지를 접합부위에 가진하여 접합하는 접합공정이다. 접합부위에 진동에 의한 마찰 에너지는 두 접합면사이에서 상대적인 수평 혹은 수직 진동에 의한 발생하는 국부적인 마찰열에 의한 접합이 발생한다.

반도체 패키징 공정에서 반도체 칩과 외부회로를 연결하는 접속 방법으로 와이어 본딩(wire bonding)을 이용하는 방법, TAB (tape automated bonding) 기술을 이용하는 방법, 솔더 범프를 이용하는 플립 칩(flip chip bonding) 방법 등 크게 3가지로 나눌 수 있다. 이 중 와이어 본딩법은 알루미늄(Al) 금속패드에 금(Au), 구리(Cu) 와이어를 사용하여 칩의 전극과 리드 프레임을 연결하는 방법으로, 플립 칩 등의 미세 본딩용 금 볼 범프 형성에도 사용되며, 전자회로의 조립공정에 없어서는 안될 기술로 현재 주류를 이루고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 와이어 본딩에는 금 와이어를 사용하여 온도와 중량을 주면서 접합하는 열압착 방식(TCB: Thermo Compression Bonding)과 알루미늄 와이어를 사용하여 가벼운 중량으로 초음파 진동을 접합부에 주면서 연결하는 초음파 방식(USB: Ultrasonic Bonding)이 있다.

\* Corresponding author. Tel.: +82-53-650-9212

Fax: +82-53-625-0861

E-mail address: positive@ync.ac.kr (Bong-Gu Lee).

**Table 1 Classification of attachment methods**

Wire bonding	Pressure	Temperature	Ultrasonic energy	Wire
Thermocompression	High	300-500°C	No	Au
Ultrasonic	Low	25°C	Yes	Au, Al
Thermosonic	Low	100-150°C	Yes	Au

현재 많이 이용되는 방식은 열압착 방식으로, 그 중에서도 네일 헤드(Nail head) 본딩 방식은 작은 면적에 연결하기 쉽고, 고속화 및 자동화에 적합하므로 널리 이용되고 있다. 네일 헤드 본딩은 머리카락 두께(약 100 μm)의 관 형태인 캐필러리(capillary)라고 하는 압착장치를 사용하여 캐필러리 상하운동에 따라 배선한다. 이 방식은 금 와이어의 끝을 녹여 금 볼을 만들므로, 볼 본딩이라고도 한다. 최근에는 열압착 방식과 초음파 방식을 병용하여 온도를 낮출 수 있는 초음파 병용 열압착 방식(TSB: Thermo sonic Bonding)을 채용하여 접착성을 개선하고 있다. 이러한 초음파 와이어 본딩 공정의 품질에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중에 하나로서 적용되는 트랜스듀서(Transducer) 혼의 특성, 파위, 주파수 등을 들 수 있다. 이에 따라 공구 혼 자체<sup>[2-4]</sup> 및 캐필러리<sup>[5]</sup>의 진동특성 등이 연구된 바 있다. 초음파 진동자의 재료로서 사용되는 압전 세라믹(Piezo ceramic)에서 가진되는 횡축 진동은 공구 혼을 지나면서 증폭되어 캐필러리에 전달되어지고, 이러한 고주파 진동을 이용하여 금 와이어를 실리콘 다이아 패키지의 패드에 접합하게 된다. 이때 혼의 공진주파수는 캐필러리 형상과 금 와이어 등의 영향을 받게 된다. 혼의 전기적 임피던스도 다양한 요인에 의해 함께 변화된다. 혼에 연결되어 있는 PLL (Phase locked loop) 초음파 가진기에서 이러한 공진 주파수와 임피던스의 변화를 지속적으로 피드백하여 보정함으로써 일정한 품질의 와이어 본딩이 이루어지도록 만들어 준다. 초음파 공구혼의 형상은 기계적 진동에너지가 접합하고자 하는 부분에 효율적으로 전달되고, 가진주파수에 맞게 공진이 발생하면서 원하는 진동의 증폭도를 얻을 수 있도록 설계되어야 하며, 또한 혼의 출력부에서 진폭의 균일도(Uniformity)와 응력 및 주파수 분리(Frequency separation) 등을 고려해야 한다<sup>[6]</sup>. 일반적으로 초음파 공구혼을 설계하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석방법을 사용하면 3차원 진동모드 및 변형을 계산할 수 있는 장점이 있으므로 널리 사용되고 있다. Amin<sup>[7]</sup>과 Lee<sup>[8]</sup> 등은 초음파 가공을 위한 혼의 형상을 설계하였고, Cardoni<sup>[9]</sup> 등은 초음파 절단을 위한 혼을 설계하였다. 유한요소법을 이용하여 Yim<sup>[10]</sup> 등은 와이어 본딩에 사용되는 혼의 형상을 설계하였고, Chang<sup>[11]</sup> 등은 초음파 드릴링에 사용되는 혼을 설계하였다. 초음파 혼의 설계를 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석 방법이 많이 사용되고 있지만, 수치해석 결과와 실험 결과 사이에 차이가 발생하는 경우도 있으므로 유의해야 한다. 또한, 혼의 형상이 진폭 균일도와 응력

에 미치는 영향에 대한 정량적이고 체계적인 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 초음파 공구혼을 ANSYS를 이용하여 모드해석을 시행하여 와이어 본딩에 필요한 진동모드와 응력분포 및 변형을 분석하였고, 실험적으로 이를 검증하고 확인하였다. 그리고 유한요소해석기법을 이용하여 초음파 공구혼 설계에 공진설계기법을 적용하여 코니칼 공구혼을 설계하였다.

## 2. 와이어 본딩용 공구혼 설계

초음파 혼의 설계에 고려해야 할 사항은 다음과 같다. (1) 공진이 발생하도록 혼의 길이를 결정하고, (2) 원하는 증폭도가 발생하면 서 혼에 발생하는 최대응력이 항복응력 이하가 되도록 혼의 입력면과 출력면의 크기를 결정하고, (3) 진폭균일도와 주파수 분리를 고려하여 설계한다<sup>[9]</sup>. 공구혼은 진동자로부터 나온 작은 진폭을 큰 진폭으로 증가시키는 역할 및 파동을 집중시킴으로써 가공 효율을 증가시키는 역할을 한다. 그러므로 혼은 가진기에서 발생하는 초음파를 효과적으로 캐필러리에 전달하기 위해서 가진기에 부착되는 혼은 직경과 길이가 혼의 고유진동수에 큰 영향을 미치게 되며, 전체 트랜스 듀서의 진동특성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이러한 공구혼의 진동특성은 공구혼 형상에 따라 변화되며, 가장 일반적으로 사용되는 혼의 형태는 단차형(step type), 코니칼형(conical type), 지수 함수형태(exponential type) 등으로 나눌 수 있다. 여러 형태의 공구혼들은 재료내의 파동전파속도 주기의 1/2지점에서 즉, 출력단측에 발생하는 최대 증폭을 와이어 본딩에 사용한다. 본 연구에서는 코니칼 혼을 사용하였으며 전체길이는 식 (1)과 같이 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$l = \frac{c}{2f} \tag{1}$$

여기서,  $c$ 는 파동속도(Wave speed)로서 식 (2)와 같이 밀도(Density)  $\rho$ 와 탄성계수(Elastic modulus)  $E$ 의 값에 따라 결정된다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2}$$

Fig. 1에 코니칼형 공구혼의 주요 사양을 도시하였다. 코니칼형의 공구혼의 경우 입력단 직경( $D_1$ ), 출력단 직경( $D_2$ ), 공구혼의 길이 등 설계변수에 따라 공진특성이 변화된다. 공구혼의 길이 및 직경의 변화, 즉 형상변화에 따른 진동특성의 변화는 Fig. 1과 같이 입력단에서 거리가  $x$ 인 점의 단면적을  $S$ , 봉의 Young 계수를  $E$ 라 하면, 1차원 파동 방정식은 (3)식과 같다.

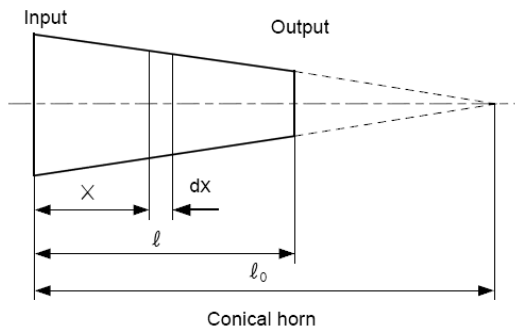


Fig. 1 Configuration and parameter of wedge tool horn

$$\rho S_x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left( S_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (3)$$

단, 여기서  $\rho$ :밀도,  $u$ :변위,  $t$ :시간이다. 상기 파동방정식에 식 (2)를 대입하면 식 (4)와 같이 정리된다.

$$S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c \frac{\partial}{\partial x} \left( S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Fig. 1과 같이 코니칼형 공구혼의 진동모드는 경계조건에 의하여  $x=0$ 과  $x=l$ 에서 미분값이 “0”이 되기 때문에

$$x=0, x=l \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

을 이용하여, 공진 조건식을 이끌어 내면 (5)식이 된다.

$$\tan \alpha l = \frac{\omega l c (D_1 - D_2)^2}{c^2 (D_1 - D_2)^2 + \omega^2 l^2 D_1 D_2} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 파동상수로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (6)$$

또 단면이 원형일 경우, 양단면적을  $S_1, S_2$ 라 하면

$$\tan \alpha l = \frac{\omega l c \left( \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} - 1 \right)^2}{c^2 \left( \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} - 1 \right)^2 + \omega^2 l^2 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}} \quad (7)$$

식 (7)이 된다. 여기서 파동상수  $\alpha$ 는 본 연구에서 사용되는 진동자

와 공구혼의 재질을 통해 결정된다. 따라서 공구혼의 고유진동수에 영향을 주는 변수를 입·출력단의 길이와 직경으로 구분할 수 있다. 즉 식 (1)을 통해 공구혼의 총 길이를 계산하고, 식 (7)을 통해 세부 치수를 결정할 수 있다<sup>[8]</sup>.

### 3. 초음파 공구혼 제작 및 진동 특성

본 실험에 사용되는 공구혼 재질은 초음파 공진특성이 우수한 티타늄 합금인 Ti6Al4V를 사용하였으며, 공구혼 출력단에 부착된 캐필러리(capillary)는 초경합금을 사용하여 초음파 진동의 전달 효율을 향상시켰다. 사용된 공구혼과 캐필러리의 주요 물성을 Table 2에 도시하였다. 본 연구에서 사용된 초음파 발전기의 기준주파수( $f$ )는 63 kHz이며, 식 (1)을 통해 공구혼의 총 길이는 125.2 mm로 계산되었다. 한편 초음파발전기 및 가공물의 치수를 고려하여 입력단의 직경은 9.6 mm, 출력단의 직경은 3.6 mm로 계산되었다.

본 연구에 사용된 압전 액츄에이터 공구혼은 코니칼형으로 Fig. 2에서 나타내고 있으며, 공구혼 입력단에는 압전 세라믹(PZT)을 적층시키고 볼트로 고정된 BLT (Bolt Langevin Transducer)를 사용하였다. 적층형 구조를 갖는 원통형 압전 액츄에이터에 공구혼을 가진할 때 가진주파수는 액츄에이터의 길이방향 모드의 고유진동수를 이용하게 된다.

이론적인 파동방정식을 통해 구한 공구혼 모델의 고유진동수를 판단하기 위해 설계된 코니칼혼을 Solidworks에서 모델링 한 후

Table 2 Mechanical property of material

Mechanical property	Horn	Capillary
	Titanium (Ti6Al4V)	Tungsten carbide (WC)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	4430	15700
Elastic modulus (GPa)	113.85	669.11
Poisson's ratio	0.342	0.24

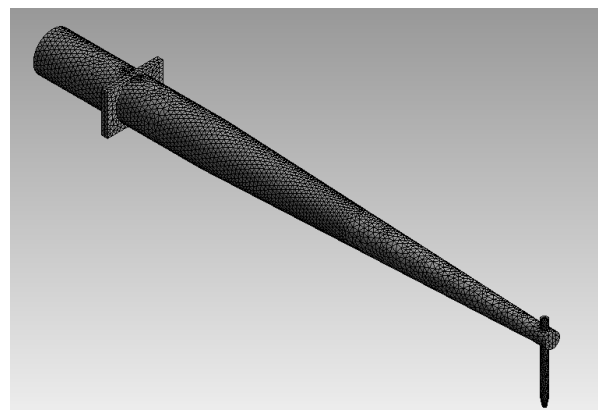


Fig. 2 FE model of a conical horn with capillary

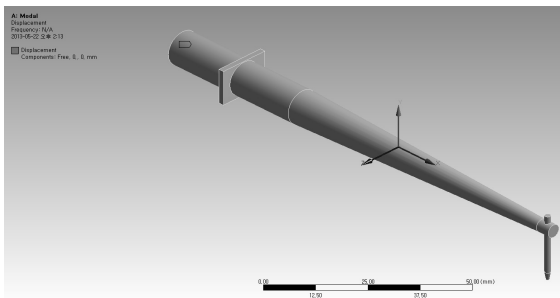
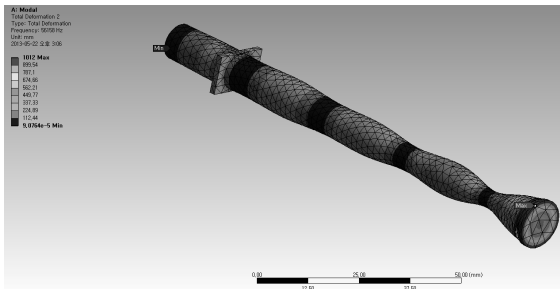
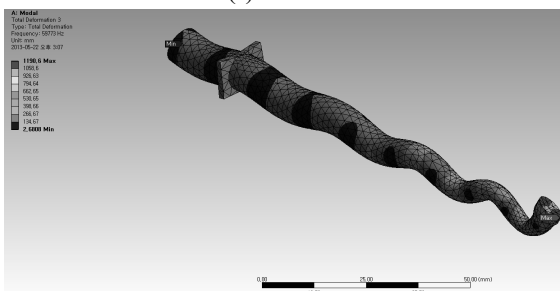


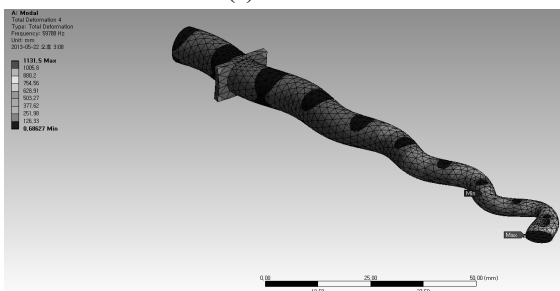
Fig. 3 Boundary conditions for modal analysis



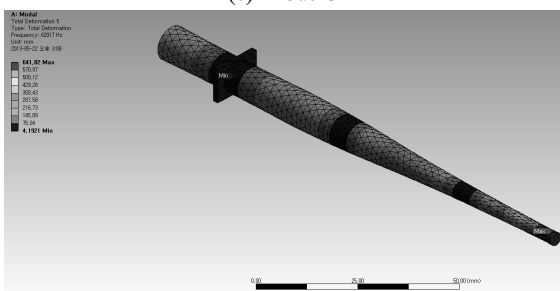
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

Fig. 4 Mode shapes for conical horn without capillary

해석은 상용 유한요소 해석 S/W인 ANSYS를 사용하여 모드해석 (Modal analysis)을 수행하였다. Fig. 2에 모드 해석을 수행하기 위한 코니칼형 공구혼의 해석모델을 도시하였고, 와이어 본딩에 적합한 출력단에서 진폭의 균일도와 증폭도가 일정하도록 하였다. 유한요소 모델은 해석의 신뢰도를 높이기 위해 3차원 사면체 요소 (Tetrahedron element)를 사용하였으며, 총요소의 개수는 11,594개이다. 경계조건은 공구혼은 진동자 및 증폭장치(Booster)와 체결되어 있으나 체결된 부위에서 변위량(진폭)이 동일한 점을 고려하였으며, 와이어 본딩에 사용되는 종진동 모드를 고려하여 Fig. 3과 같이 X축 방향에 대하여 자유상태(Free)로, Y축과 Z축 방향은 고정된(Fixed) 형태로 부과하였다.

모드해석의 유효범위는 진동자의 가진주파수가 63 kHz를 고려하여 55~71 kHz로 설정하였다. 모드추출 방법은 Block Lanczos법을 사용하여 모드차수는 10개로 와이어 본딩에 사용되는 종진동 모드만을 추출할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 선정된 코니칼형의 출력단에 캐필러리 장착유무에 따라 변하는 진동모드 해석을 비교 분석하여 실제 와이어 본딩에 사용되는 진동모드의 특성을 확인 할 수 있었다. Fig. 4에서 코니칼형 공구혼의 진동모드의 특성을 나타내었고, 각각의 고유 진동수를 Table 3에 요약 정리하였다.

모드 해석결과와 주요 진동모드를 살펴보면 횡진동(transverse vibration), 종진동(longitudinal vibration)의 다양한 모드가 해석 결과로 알 수 있었다. 해석결과 1~3차 진동 모드는 와이어 본딩시 가진 되는 종진동 모드가 아닌 횡진동 모드가 발생하여 캐필러리가 파괴되는 등 나쁜 영향을 미치게 되므로 종진동 모드가 필요로 하는 와이어 본딩에는 적합하지 않음을 알 수 있었다. 또한 해석결과 1~3차 진동모드의 고유 진동수 값은 기존 설계 목표인 63 kHz와는 56~59 kHz 상당한 차이를 보이고 있으며 와이어 본딩에 필요한 종진동 모드가 아닌 횡진동 모드의 발생으로 적합하지 않음을 해석결과를 통해 알 수 있다.

Fig. 5는 코니칼 공구혼의 출력단에 캐필러리를 부착한 공구혼을 모델링 하여 고유 진동수와 진동모드를 해석한 결과를 나타내었다. 본딩이 일어나는 캐필러리 끝단에서 최대 변위량(진폭)이 발생하는 것으로, 가진주파수 63 kHz에 대하여 캐필러리가 장착된 코니칼 공구혼의 와이어 본딩에 적합함을 해석결과를 통해 알 수 있었다. 해석결과 종진동 일때의 고유진동수 값은 62,666 Hz로서 기

Table 3 Modal analysis of the conical horn without capillary

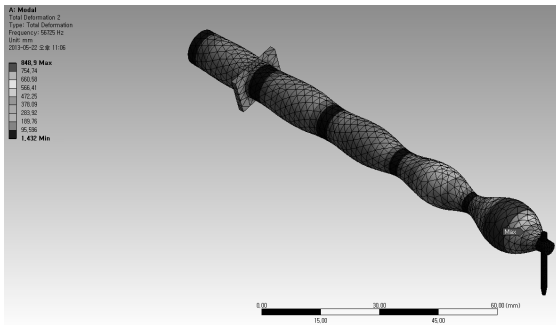
Mode	Natural frequency	Vibration mode
1st-(a)	56,158 Hz	Transverse (radial)
2nd-(b)	59,773 Hz	Transverse (vertical)
3rd-(c)	59,788 Hz	Transverse (horizontal)
4th-(d)	62,017 Hz	Longitudinal

존 설계 목표인 63 kHz와는 334 Hz 차이를 Table 4를 통하여 확인할 수 있다. 여기서 발생한 고유진동수 값의 오차는 와이어 본딩장치에 고정되는 마운팅 플랜지(Mounting Flange), 진동자와 공구혼 체결을 위한 입력축 절단부, 종진동 모드가 축방향으로 원활하게 전달되어 오다가 공구끝단에 90°로 수직하게 장착된 캐필러리와 같은 형상변화 요소로 인하여 발생된 것으로 판단된다.

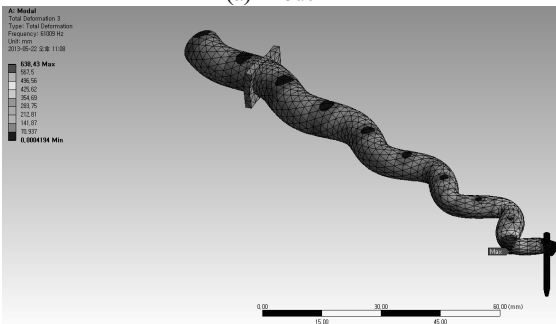
유한요소해석을 이용한 초음파 공진설계기법을 통하여 제작된 코니칼형 공구혼을 실제 상용화된 와이어 본딩 장비(WEST BOND, INC)에 장착하여 Fig. 6과 같이 와이어 본딩 장비를 구현하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 길이방향 진동모드를 발생시키는 압전 액츄에이터 모듈, 변위 증폭 및 진동전달의 역할을 하는 공구혼과 진동모드의 절점(Nodal point)에 위치하여 트랜스 듀서를 헤드에 장착시키는 역할을 하는 마운팅 플랜지, 그리고 실제 와이어를 본딩하는 부분인 캐필러리 등으로 구성된 와이어 본딩 장비를 제작하였다. 소형 와이어 본딩 장비에 초음파 코니칼 혼을 장착하여 PCB 기판의 리드프레임과 와이어가 압착된 상태에서 초음파 진동을 부과함으로써 원활한 와이어 본딩이 이루어 질 수 있도록 고안하였다.

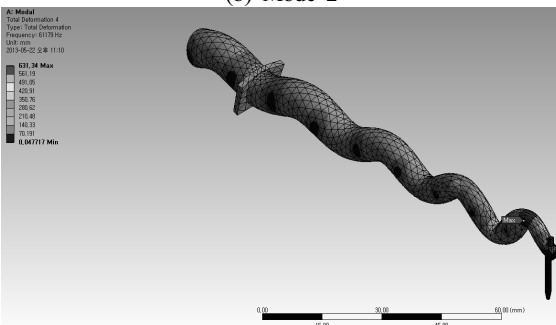
Fig. 7은 본 연구에서 계산된 설계사양을 기준으로 제작된 코니



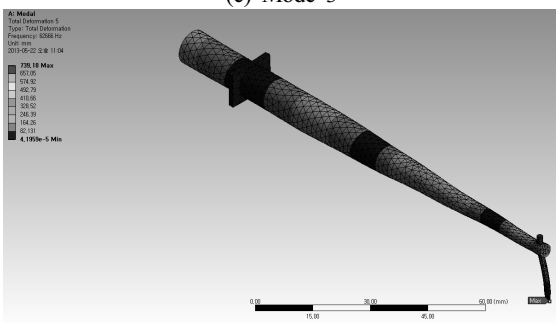
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

Fig. 5 Mode shapes for conical horn with capillary

Table 4 Modal analysis of the conical horn with capillary

Mode	Natural frequency	Vibration mode
1st-(a)	56,725 Hz	Transverse (radial)
2nd-(b)	61,009 Hz	Transverse (horizontal)
3rd-(c)	61,179 Hz	Transverse (vertical)
4th-(d)	62,666 Hz	Longitudinal

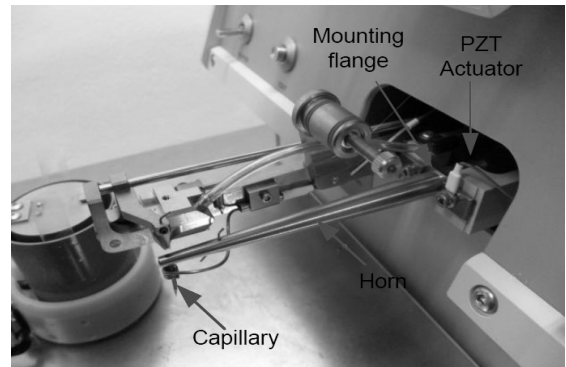


Fig. 6 Fabricated prototypes and wire bonding actuator

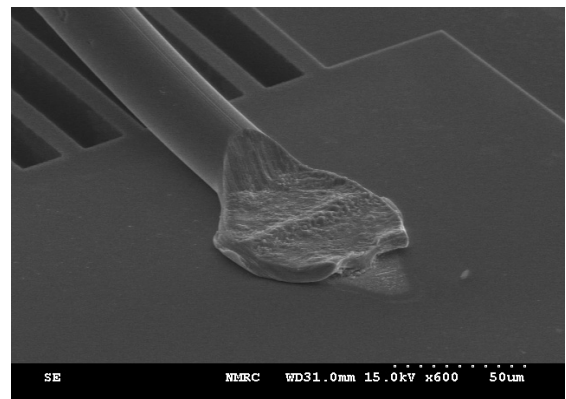


Fig. 7 SEM image of a wire bonding

칼 공구흔에 캐필러리를 장착하여 실제 PCB 기판위에 금(Au) 와이어를 이용하여 와이어 본딩 실험 결과를 전자현미경(SEM)으로 도시하였다. 와이어 본딩 실험은 상온에서 수행하였고, 가압시 하중은 15 gf로 설정하였다. 특히 와이어 본딩 공정이 초음파의 미세 진동에 의한 공구흔 표면과 모재와의 경계면에 마찰열과 캐필러리의 압력을 가하여 와이어 본딩 시험을 수행한 결과 아래 그림처럼 모재와 와이어의 접합이 양호하게 이루어 졌음을 알 수 있다. 향후 지속적인 실험을 통하여 최적의 접합조건을 찾는 실험을 수행할 예정이다. 이처럼 본 연구에서 파동방정식을 통한 초음파 공구흔의 이론식을 바탕으로 공구흔의 형상치수를 결정하였고, 결정된 형상치수에 따라 초음파 공구흔을 제작하여 진동특성을 유한요소 해석의 모드해석을 통하여 와이어 본딩에 적합한 진동모드를 예측하고 와이어 본딩 실험을 통하여 검증하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상용화된 초음파 와이어 본딩에서 사용되는 초음파 진동 코니칼형 공구흔을 이론적인 접근방법으로 형상치수를 결정하고, 유한요소 프로그램인 Ansys를 사용하여 모드해석을 통하여 와이어 본딩에 필요한 진동특성을 밝혀내고, 제작된 와이어 본딩 장비를 이용하여 실험을 통하여 확인하였다. 진동모드 해석 결과 코니칼 공구흔의 캐필러리를 장착한 상태에서 다양한 공진 주파수와 모드형을 발견하였다. 실험에 사용된 초음파 발전기의 인가된 가진 주파수인 63 kHz가 유한요소해석을 통한 공진설계를 통하여 제작된 공구흔의 끝단에 장착된 캐필러리에서 와이어 본딩에 사용되는 길이방향 종진동 모드가 62,666 Hz에서 최대 변위량(진폭)이 4차 종진동 모드로 나타났다. 제작된 코니칼 공구흔을 통해 PCB기판위에 리드프레임에 골드와이어를 이용하여 와이어 본딩 실험을 실시하였다. 와이어 본딩 실험 결과 모재와 와이어의 접합이 양호하게 이루어 졌음을 알 수 있었다. 향후 다양한 형태의 공구흔 형상설계에 적용 할 수 있으며, 나아가서는 와이어 본딩 공정의 최적화를 통하여 기존 와이어 본딩 공정기술을 한층 발전시킬 수 있을 것으로 전망된다.

#### References

- [1] Kim, K. S., Chang, E. G., Shin, Y. E., 1998, Study on the Bonding Pad Lift Failure in Wire Bonding, Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. 11:12 1079-1083.
- [2] McBrearty, M., Kim, L. H., Bilgutay, N. M., 1988, Analysis of Impedance Loading in Ultrasonic Transducer Systems, Proceedings, Ultrasonics Symposium, 497-502.
- [3] Lin, S., Zhang, F., 1994, Study of Vibrational Characteristics for Piezoelectric Sandwich Ultrasonic Transducer, Ultrasonic 32:1 39-42.
- [4] Or, S. W., Chan, H. L. W., Lo, V. C., Yuen, C. W., 1998, Dynamic of an Ultrasonic Transducer used for Wire Bonding, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 45:6 1453-1460.
- [5] Hu, C. M., Guo, N. Q., Ling, S. F., 1998, The Vibration Characteristics of Capillary in Wire Bonder, IEEE/CMPT 45:6 202-205.
- [6] Seah, K. H. W., Wong, Y. S., Lee, L. C., 1993, Design of Tool Holders for Ultrasonic Machining using FEM, Journal of Materials Processing Technology, 37:1 801-816.
- [7] Amin, S. G., Ahmed, M. H. M., Youssef, H. A. 1995, Computer Aided Design of Acoustic Horns for Ultrasonic using Finite-Element Analysis, Journal of Materials Processing Technology, 55:3 254-260.
- [8] Lee, B. G., Kim, K. L., Kim, K. E., 2008, Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining using FEM, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 17:6 63-70.
- [9] Cardoni, A., Lucas, M., 2002, Enhanced Vibration Performance of Ultrasonic Block Horns, Ultrasonics, 40:1 365-369
- [10] Yim, V., Han, D., Lee, S. Y., Kang, K., An, G., Kim, K., 2007, Vibration Characteristics of a Wire-bonding Transducer Horn, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 40 583-588.
- [11] Chang, Z., Sherrit, S., Bao, X., Bar-Cohen, Y., 2004, Design and Analysis of Ultrasonic Horn for USDC, Proceedings of the SPIE Smart Structure and Materials, 320-326.