

# 전자 패키징을 위한 다자유도 초음파 본딩 머신 개발 Design of Multi-DOF Ultrasonic Bonding Machine for Electronic Packaging

\*#손흥선<sup>1</sup>, 정영상<sup>1</sup>, 이창우<sup>1</sup>, 송준엽<sup>1</sup>

\*#Hungsun Son<sup>1</sup>(hson@kimm.re.kr), J. Y. Sang<sup>1</sup>, C.W. Lee<sup>1</sup>, J.H. Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 지능형 생산시스템 연구본부

Key words : Multi-DOF, ultrasonic horn, vibration, bonding, electrical packaging

## 1. 서론

다양한 기계 산업 분야 예를 들면, 접합, 용접, 세척 및 drilling 및 cutting 의 공작기계 등에서 고출력 초음파 장치들의 사용이 증가되는 추세이다. 특히, 전기전자 패키지 분야에서 초음파를 이용한 전자 부품의 접합은 저온 접합을 가능하게 하였다. 즉 초음파를 이용하게 되면 서로 다른 두 가지 금속의 접합에 있어서 두 금속의 녹는점보다 낮은 온도에서 접합이 가능하며 다른 접합 방법과는 다르게 접합된 부분의 형태를 제어하는데 효과적이다. 이와 더불어, 최근에는 전자기기의 소형화 및 경량화로 핵심부품인 IC의 고집적화, 미세피치화 및 다양한 형태에 효과적인 대응을 위하여 안정적이며 제어가 용이한 초음파 장치를 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

초음파 장치의 원리는 전기적 에너지를 기계적 진동 에너지로 바꾸는 장치로 기계적 재료 및 장치의 형태나 모양에 따라 시스템의 (고유)공명 주파수가 변화하게 되고 발생된 진동 주파수가 이 공명 주파수에 가까울수록 진폭이 커지게 된다. 즉 변환되는 에너지 효율이 최대를 이루기 위하여 장치의 원하는 주파수를 시스템의 공명 주파수와 일치시킴으로 초음파 장치의 출력을 최대화 하는 것이다. 따라서 초음파 장치의 성능을 최적화하기 위한 가장 핵심 요소는 시스템의 특성인 공명 주파수를 장비에서 요구하는 주파수와 일치시키는 것이다. 이를 위하여 과거에는 주로 실험적인 방법을 통하여 재료 및 형태를 결정하였으나 최근에는 유한요소법(FEM)과 같은 수치해석을 통하여 개발이 이루어 지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 FEM[2]을 이용하여 저온접합의 온도 특성을 높일 수 있는 40Khz의 고출력 초음파 접합 장치의 horn 디자인과 더불어 미세 피치를 갖는 다양한 형태의 IC 접합의 효과적인 대응을 위하여 2 차원 초음파 접합 장치 개발에 관해서 논의하고자 한다.

## 2. FEM을 이용한 초음파 혼 개발

일반적인 초음파 접합 장치는 크게 세 부분- Ultrasonic transducer, booster, sonotrode 로 구성되며 구동원리를 간단하게 설명하면 다음과 같다.

Ultrasonic Transducer 에서 기계적 진동이 발생되어 booster 로 진동이 전달되며 마지막으로 sonotrode 즉, 초음파 혼 끝 단으로 전달된 진동이 증폭되게 된다. 본 연구에서는 40Khz의 고출력 초음파 개발을 위하여 Transducer 는 4 개의 piezoelectric 링으로 구성되어 있고 각각의 양단에 Aluminum 블록으로 고정되어 pre-stress 된 상태로 설계되며 booster 는 structure steel 로 이루어져 높은 강성(stiffness)을 가지며 효과적인 진동의 전달과 더불어 개발된 초음파 모듈을 전체 시스템에 고정하는 링 타입의 flange 가 설계되었고 마지막으로 sonotrode 는 실험 제작의 편리함을 위하여 끝단부는 steel 로 body 부는 aluminum 으로 설계하여 재질에 따른 진동의 전달을 분석하며 진동 모드의 특성을 효과적으로 파악하였다. 또한 동일 transducer 의 진동 입력에 효과적인 horn 형태를 설계하기 위하여 2 가지 균일한 원통 형태의 horn(Design A)과 tapered horn(Design B)을 비교하였다. 아래 Table 1 은 2 가지 초음파 모듈에 사용된 공통된 재료의 특성을 나타낸다.

Table 1 Material properties

	Piezo Transducer	Aluminum Alloy	Structural Steel
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,800.0	2,770.0	7,850.0
Poisson's Ratio	0.34	0.33	0.3
Young's Modulus (Pa)	1.0×10 <sup>12</sup>	7.1×10 <sup>10</sup>	2.0×10 <sup>11</sup>
Thermal Expansion(1/°c)	8.0×10 <sup>-6</sup>	2.3×10 <sup>-5</sup>	1.2×10 <sup>-5</sup>

Figure 1 (a)와 (b)는 동일한 transducer 에서 서로 다른 진동 폭을 갖는 horn 의 끝 단을 비교하고 이를 이용하여 효과적인 설계를 하기 위한 각각의 초음파 장치의 설계 그림을 보여준다. 일반적으로 초음파 혼의 고유진동수는 단면적(지름)이 크고 길이가 짧아짐에 따라 커지는 경향을 가지며 또한 그림과 같이 tapered horn 은 원통의 균일한 단면을 갖는 혼보다 높은 공명 주파수를 가지며 적은 수의 고유진동 모드를 갖는 것으로 알려져 있다. 다음의 Table 2 는 각 초음파 모듈에 관한 세부 설계 인자를 나타낸다.

Table 2 Module information

Length/Diameter (mm)	Design A	Design B
Transducer	29.5/49.5	
Booster	33/58	
Sonotrode (horn tip)	25/33.8 (10/35.4)	25/35.6 (1/30)

Figure 1 (c)와 (d)는 각각의 디자인에 해당되는 길이 방향의 진동 모드 중 기계적 stress 전달의 주파수 해석 결과이다. 본 장치가 요구하는 주파수인 40khz 영역은 마지막 모드에 해당된다.

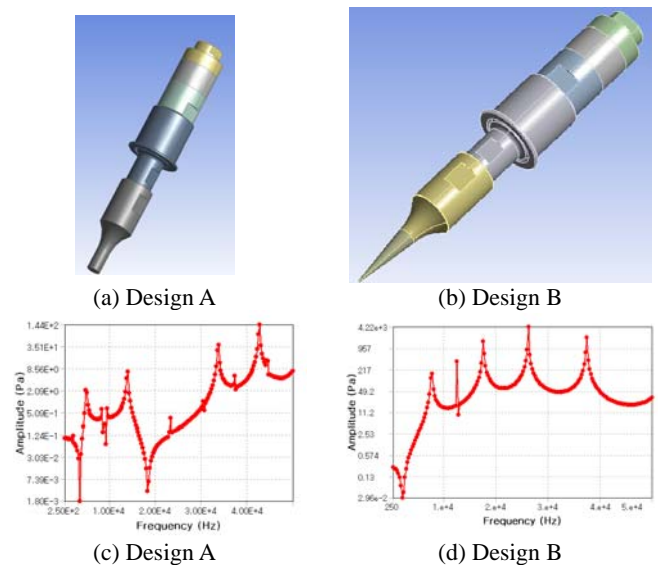


Fig. 1 다양한 형태 초음파 horns 의 효과

보이는 결과에서 같이 원통형의 경우 입력 주파수가 늘어남에 따라 진폭이 크게 변화하는 것을 알 수 있으나 tapered horn 형태의 경우 거의 일관적으로 변화되는 것을 알 수 있다. 또한, Maximum peak 는 원통형인 경우 42Khz 이고 tapered 형태인 경우 26KHz 이어서 원통형이

요구되는 주파수에 가깝다고 분석되지만 실제 tapered 형태의 마지막 모드 주파수인 39KHz의 주파수 응답 크기를 보면 균일 원통의 maximum peak 값보다 2.5 배 이상 큰 4KPa 것을 알 수 있다. 따라서 tapered horn이 균일한 원통형보다 낮은 형태임을 보여준다.

Figure 2는 Fig. 1 (b)의 2개의 tapered horn을 서로 직교 형태로 부착시켜 2 차원 평면상에서 다양한 형태의 진동을 제어할 수 있는 초음파 장치 및 이에 대한 FEM 해석을 위한 Meshed 모델을 보여 준다. 두개의 초음파 장치 모듈의 끝 단에는 실제 전자 부품의 접합을 위한 얇은 평판을 부착하여 실제에 가깝도록 하여 시스템 전체의 고유 주파수 변화를 분석하였다.

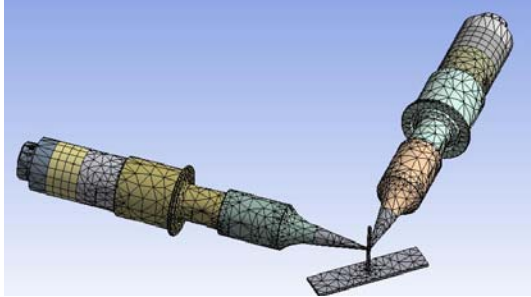


Fig. 2 이차원 초음파 모듈

Figure 3은 서로 직교하는 tapered horn의 transducer에서 혼의 방향과 동일한 종 방향으로 끝 단의 평판에 전달되는 stress에 관한 주파수 해석결과이다. 보는 바와 같이 단일 초음파 모듈과 비교 시 더욱더 많은 수의 진동모드를 가짐을 알 수 있다.

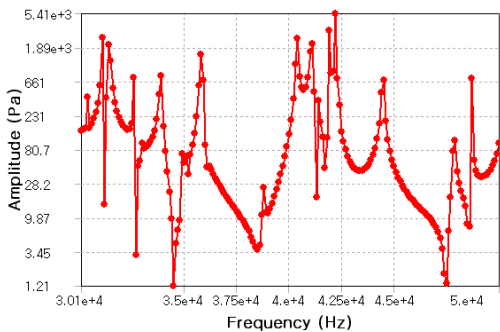


Fig. 3 2 차원 초음파 모듈의 주파수 응답

또한, 본 모듈의 maximum 고유 주파수는 42.2KHz에 발생하는 것으로 분석되며 그 크기는 5.4Kpa로 단일 모듈에서 전달되는 stress와 비교 시 그 크기가 증가된 것을 알 수 있는데 이것은 앞의 단일 모듈의 경우 tapered horn 끝 단에 주로 normal stress에 의한 진동이 전달되지만 이차원 초음파 모듈의 경우 끝 평판에 전달되는 stress에 단일 모듈에서의 normal stress와 더불어 shear stress도 전달되기 때문인 것으로 분석된다.

### 3. 이차원 초음파 모듈의 진동 특성

초음파 혼의 끝단에 전달되는 진동은 사인 함수나 코사인 함수와 같은 주기 함수로 표현이 가능하다. 이를 이용하면 Fig. 2에서와 같이 각각의 단일 초음파 모듈이 서로 수직의 형태로 결합되어 경우 발생하는 진동 또한 서로 수직을 이루게 되며 다음과 같이 vector 함수로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{F}(x, y) = a_1 \sin(\omega t) \hat{x} + a_2 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi) \hat{y} \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{F}(x, y) / a_1 = \left( \sin(\omega t) \hat{x} + A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi) \hat{y} \right) \quad (2)$$

여기서  $a$ 와  $\omega (= 2\pi f)$ 는 각각의 초음파 모듈에서 발생하는

진동의 크기 및 주파수를 나타내고 후자의  $\phi$ 는 두 초음파 진동에서 발생하는 초음파 진동의 상대적 위상차를 나타낸다. 또한  $\hat{x}$ 과  $\hat{y}$ 는 이차원 평면에서 직교 단위 vector를 나타낸다. 각각의 모듈이 동일한 크기의 진동을 발생시키며 단지 그 위상 차를 제어할 수 있다고 가정 한다면 위의 Eq. (2)은  $A=1$ 이 되어 단지 위상 차만의 함수가 된다.

Figure 4 (a)는 설계된 40KHz의 transducer에 의해 끝 단에 전달되는 진동에 의한 평판 변위의 변화량을 나타내며 Fig. 4 (b), (c)와 (d)는 위상차 ( $\phi=0, 45, 90$ 도)에 따라 제어할 수 있는 진동의 형상을 나타낸다. 그림과 같이 이차원 초음파의 경우 단일 초음파에서와 같은 직선 형태의 진동 뿐만 아니라 원형 및 타원 형태의 진동을 제어할 수 있다.

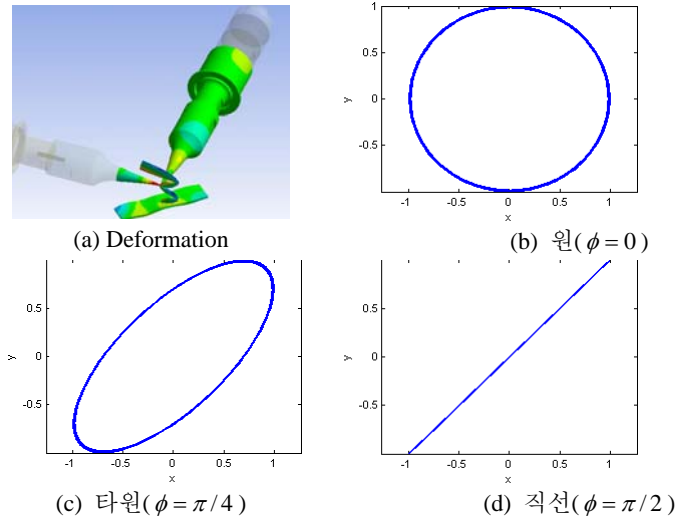


Fig. 4 이차원 초음파 장치의 진동

### 4. 결론

본 논문에서는 초음파의 혼의 효과적인 디자인을 위하여 FEM을 이용하였으며 이를 증명하기 위하여 두 가지 서로 다른 형태인 (1)균일한 원통형, (2) tapered 형태의 초음파 혼의 끝 단에 전달되는 stress의 주파수 응답을 통하여 고유수를 분석하였다. 또한 설계된 단일 초음파 모듈을 이용하여 이차원 평면의 진동을 제어할 수 있는 다자유도 초음파 모듈을 설계하였고 이에 대한 고유 주파수 특성 및 이를 이용하여 제어 가능한 다양한 형태의 진동을 시뮬레이션 하였다. 설계된 2 차원 초음파 장치는 기존 다양한 형태의 IC 접합에 있어서 초음파 접합에서의 문제점인 비 균일 평탄도를 보완하고 제품의 Liability를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### 후기

본 논문에서 제안된 단일 tapered 초음파 모듈은 Fig. 5에서 같이 실제 제작되어 40KHz의 공명 주파수를 가짐을 확인하고 더 나아가 2 차원 초음파 접합 장치를 개발하여 다양한 형태의 진동을 제어함으로써 저온 및 미세 패턴의 IC에 적용할 예정이다.



Fig. 5 단일 초음파 모듈

### 참고문헌

1. 신연의, 고영욱, "전기전자분야에서의 국내 접합기술 현황 및 전망", J. of KWS, Vol. 20 No.5, Oct. 2002, pp. 42-51.
2. Lorenzo Parrini, "New techniques for the design of advanced ultrasonic transducers for wire bonding", IEEE Trans. On Electronics Packagng Manuf. 2003, pp 37-45.