

# 세라믹 소재 초음파 드릴링 가공을 위한 초음파 Horn의 최적 설계에 관한 연구

차승환\*, 양동호\*, 이상협\*, 이종찬\*<sup>#</sup>

\*금오공과대학교 기계공학과

## Optimal Design of Ultrasonic Horn for Ultrasonic Drilling Processing of Ceramic Material

Seung-hwan Cha\*, Dong-ho Yang\*, Sang-hyeop Lee\*, Jong-Chan Lee\*<sup>#</sup>

<sup>#</sup>School of Mechanical Engineering, KUMOH UNIV.

(Received 12 July 2022; received in revised form 11 August 2022; accepted 17 August 2022)

### ABSTRACT

Recently, there has been continuous technological development in the semiconductor industry, and semiconductor manufacturing technologies are being advanced and highly integrated. For this reason, ceramic material having excellent heat resistance, wear resistance, and conductivity are used as components in semiconductor manufacturing. Among them, the probe card's space transformer is used as ceramic material to prevent electronic signal noise during the electrical die sorting of semiconductor function testing. However, implementing a bulk-type space transformer with a thickness of 5.6 mm or more is challenging, and thus it is produced in a structure with a stacked ceramic film. The stacked space transformer has low productivity because it is difficult to ensure hole clogging and a precise shape. In this research, an ultrasonic horn is designed to manufacture a bulk-type ceramic space transformer through ultrasonic drilling. Vibration characteristics were analyzed according to the ultrasonic horn, and the natural frequency was measured.

**Keywords** : Ultrasonic Drilling(초음파 드릴링), Ultrasonic Horn(초음파 혼), Natural Frequency(고유진동수), Deformation(변형) Resonance(공진)

## 1. 서 론

최근 반도체 산업에서 지속적인 기술개발이 진행됨에 따라 반도체 제조기술의 고도화, 고집적화 등이 이뤄지고 있으며<sup>[1-2]</sup>, 반도체 제조 장비의 유지보수를

위해 반도체 제조 공정용 부품의 수요가 폭발적으로 증가하고 있는 추세이다. 반도체 산업에서 기술의 고도화로 인해 가혹한 제조 조건에서 뛰어난 내열성, 내식성, 내전도성을 가지며, 연속적인 반도체 제조 공정에서 부품의 변형을 최소화할 수 있는 세라믹 소재를 적용하고 있는데, 주로 세라믹 소재인 알루미늄이나 SiC 소재를 사용하고 있다<sup>[3]</sup>.

반도체 제조 공정 중 반도체에 전기적 신호를 주어

# Corresponding Author : [jclee@kumoh.ac.kr](mailto:jclee@kumoh.ac.kr)

Tel. : +82-54-478-7376, Fax: +82-54-478-7382

정상 반도체와 불량 반도체를 선별하는 EDS (Electrical Die Sorting) 공정에서 검사장비와 개별 칩의 테스트 신호를 전달하기 위해 Probe Card를 사용한다. 반도체 검사 공정을 Fig. 1에 나타내었다.

반도체 기능검사 공정에서 사용되는 Probe Card는 반도체 Wafer의 직경에 따라 8,000~70,000개의 Probe Tip이 개별 칩에 접촉되어 반도체 기능검사를 수행하고 이를 위해 Probe Card의 구조는 PCB(Printed Circuit Board) 어셈블리, 본체를 이루는 Space Transformer, 하측으로 배열된 다수개의 Probe Tip으로 구성된다. Probe Card의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

Probe Card의 본체인 Space Transformer는 테스트 신호 Noise 방지와 Probe Card의 변형을 방지하기 위해 기계적 특성과 내전도성이 뛰어난 세라믹 소재를 사용하며<sup>[3]</sup>, Probe Tip의 전극 연결을 위해 Wafer 크기에 따라 Probe Tip 수와 동일하게 8,000~70,000개의 Hole 가공이 필요하다. Space Transformer의 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

기계적 특성이 우수한 세라믹 소재로 제조되는 Space Transformer는 Probe Card의 전극 구성과 강성 확보를 위해 약 5.6mm 두께로 제조된다. 이를 Bulk Type으로 제조할 경우 대수 개의 Hole 가공에 소요되는 비용과 시간으로 인해 경제성이 낮아 얇은 세라믹 필름에 Hole 가공 후 적층하는 방식의 Space Transformer를 사용하고 있다.

세라믹 필름 적층 방식을 통해 제조된 Space Transformer의 경우 각 필름에 개별적으로 Hole 가공 진행 후 적층하는 방식이므로 각 필름의 Hole 위치를 정밀하게 맞춰 제작하기 어렵다. 또한, 필름 Bonding 시 접착제가 Hole로 유입되어 Hole 막힘의 문제가 발생할 수 있고 Space Transformer의 형상정밀도를 확보하기 어려운 문제가 발생하여 개선이 필요하다.

이를 개선하기 위해 Bulk Type 세라믹 소재를 초음파 가공을 통해 다수개의 Hole을 가공하여 Space Transformer를 개발하여 기존 적층 방식의 구조적 문제를 개선하고 공정의 단순화와 효율화를 이루고자 하였다.

본 연구에서는 초음파 드릴링 가공을 통해 Bulk Type 세라믹 Space Transformer를 개발하고자 초음파 가공 Horn의 최적설계를 진행하였다. 연구의 내용은 초음파 Horn의 Slot 개수, Slot 간격, Slot 두께에 따라

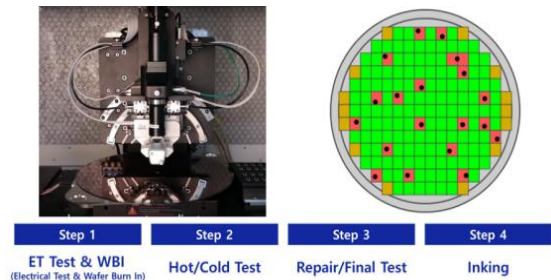


Fig. 1 Semiconductor electrical die sorting

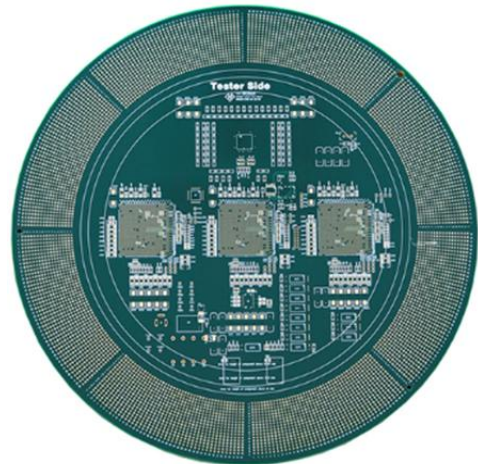


Fig. 2 Probe card for EDS process

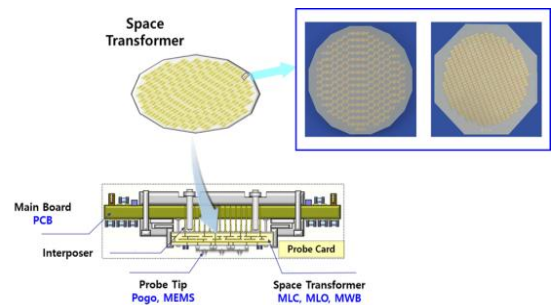


Fig. 3 Structure of probe card

구조해석을 실시하여 진동특성을 분석하였다. 해석 결과로 나타나는 공진형상을 확인하여 최적의 설계를 진행하고, 가속도 센서를 이용한 고유진동수를 측정 및 평가하여 구조해석의 신뢰성을 판단하였다<sup>[4]</sup>.

## 2. 초음파 Horn 진동 해석

### 2.1 실험 방법

본 연구에서는 초음파 드릴링 가공을 위한 초음파 Horn의 공진형상과 고유진동수 영역을 파악하기 위해 초음파 Horn의 설계를 진행하였다. 초음파 Horn의 설계 시 공진형상을 결정하는 Slot의 수, Slot의 간격, Slot의 두께를 조정하여 구조해석을 진행하였다.

초음파 Horn의 규격은 8인치 웨이퍼 검사장비용 Space Transformer 규격에 부합하도록 초음파 Horn의 크기를 220.8mm×220.8mm×112.3mm(WxDxH)를 기준으로 하였으며, 각각의 설계 조건을 변경하여 해석을 실시하고 진동 특성을 분석하였다.

3D 모델링은 Autodesk Inventor를 활용하였으며, 구조해석은 ANSYS Workbench를 활용하여 공진형상 분석과 고유진동수 영역을 확인하였다.

초음파 Horn의 재질은 가공성과 기계적 성질 등의 기계적 특성을 고려하여 Al 6061로 선정하였으며 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of Al6061

Items	Value	Unit
Density( $kg/m^3$ )	2.81	$g/cm^3$
Young's Modulus	71.7	GPa
Poisson's Ratio	0.33	-
Tensile Yield Strength	503	MPa

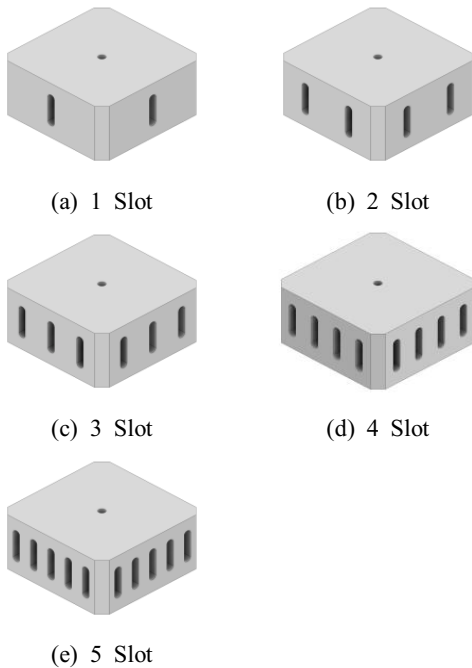


Fig. 4 Analysis model by number of slots

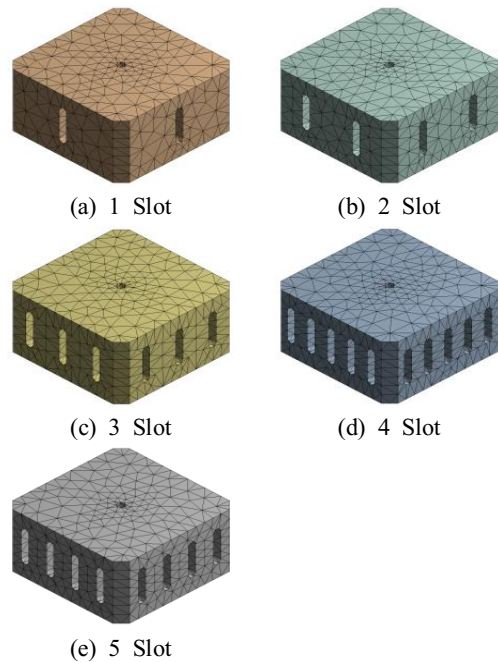


Fig. 5 Mesh shape according to number of slots

### 2.2 Slot 개수에 따른 진동해석 조건

초음파 Horn의 공진 특성을 파악하기 위해 초음파 Horn의 설계를 Fig. 4에 나타난 바와 같이 해석 모델을 구성하였으며, 진동해석을 진행하였다.

Slot 개수에 따라 진동해석을 진행하기 위해 각 Modeling의 유한요소 생성을 진행하였으며, 유한요소 생성결과 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 각 Modeling에 대한 Nodes와 Elements를 Table 2에 나타내었다. 또한, Modal 해석조건을 초음파 영역인 19~21kHz로 한정하여 해석을 진행하였다.

**Table 2 Finite element generation result(number)**

Analytical model	Nodes	Elements
Slot 1	5,671	3,136
Slot 2	8,246	4,598
Slot 3	9,768	5,276
Slot 4	13,332	6,913
Slot 5	13,165	7,017

### 2.3 Slot 개수에 따른 진동해석결과

Slot 개수에 따른 초음파 Horn의 진동해석결과 Fig. 6과 같은 해석 결과를 얻을 수 있었다. 초음파 드릴링 가공에 적합한 초음파 Horn의 진동형상을 고려하여 Slot의 수에 따른 설계 조건을 최적화하였다. 본 연구에서 적용하고자 하는 초음파 드릴링은 19~21kHz의 초음파 영역에서 고유진동수를 가져야 하며, 주파수 부여 시 초음파 Horn의 상·하 변형을 이용하여 가공하는 가공 방법이다. 이에 따라 초음파 Horn의 공진형상이 상·하로 변형되는 조건을 확보할 수 있는 설계가 필수이다.

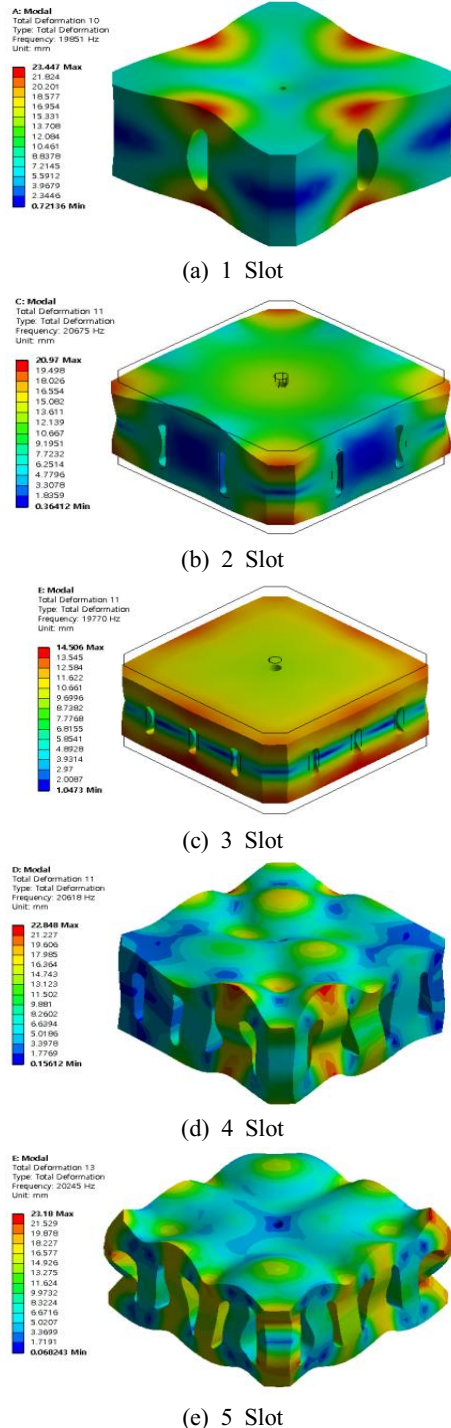
본 결과를 분석하였을 때, 초음파 가공에 적합한 공진형상을 보인 것은 3개의 Slot을 가진 모델로 판단되었다. 본 모델의 경우 비교적 균일하게 상·하로 압축, 팽창되는 형상을 나타내었다. 본 결과를 바탕으로 Slot 간 간격에 따라 해석을 진행하여 해석 경향을 분석하였다.

### 2.4 Slot 간격에 따른 진동해석 조건

초음파 Horn의 최적 설계를 진행하기 위해 Slot 간 간격에 따라 Horn의 모델링을 실시하였으며, Slot 간 간격을 30~70mm로 10mm의 차이를 두어 해석을 진행하였다. 본 진동해석에 사용된 초음파 Horn의 해석 모델에 대한 해석조건을 Table 3에 나타내었다.

### 2.5 Slot 간격에 따른 진동해석결과

Slot 간격에 따른 진동해석 결과 Slot 간격이 넓어 질수록 비교적 균일한 변형을 보이는 것을 확인하였으나, 70mm 이상의 조건에서는 중심부가 십자로 압축되는 형상을 보여 60mm가 최적의 공진형상으로



**Fig. 6 Analysis model by number of slots**

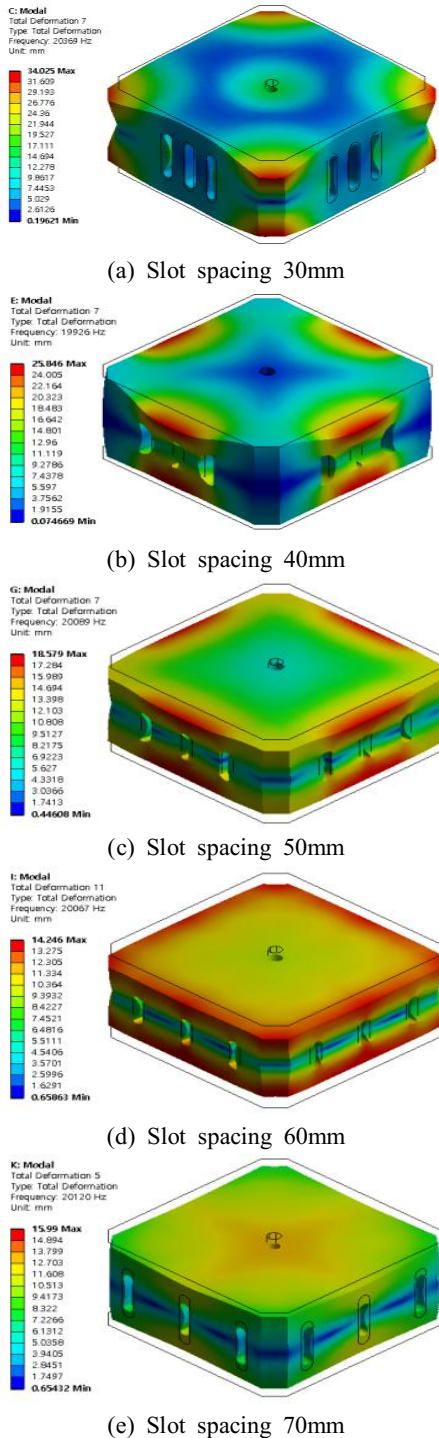


Fig. 7 Analysis result by slot spacing

Table 3 Analysis conditions according to slot spacing

Items	Value	Unit
Size(W×D×H)	220.8×220.8×112.3	mm
Chamfer	16	mm
Slot thickness	13.8	mm
Slot length	50	mm
Slot spacing	30~70	mm

Table 4 Analysis conditions according to slot Thickness

Items	Value	Unit
Size(W×D×H)	220.8×220.8×112.3	mm
Chamfer	16	mm
Slot thickness	8~17	mm
Slot length	50	mm
Slot spacing	60	mm

판단된다. Slot 간격에 따른 진동해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이에 따라, Slot 개수에 따른 해석 결과와 간격에 따른 결과를 종합하였을 때, Slot의 두께에 따른 해석 모델 생성 시 3개의 Slot과 Slot 간 간격이 60mm를 기준으로 진동해석을 진행하고자 한다.

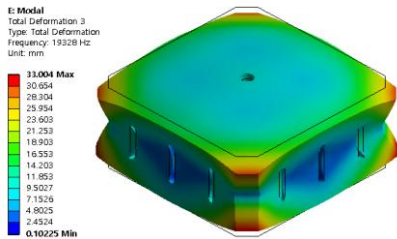
### 2.6 Slot 두께에 따른 진동해석조건

초음파 Horn의 Slot 두께에 따라 주파수에 응답하는 공진형상을 분석하여 경향을 분석하기 위해 초음파 Horn의 모델링을 실시하였으며, Slot의 두께를 8~17mm로 0.2mm의 간격을 두어 진동해석을 진행하였다.

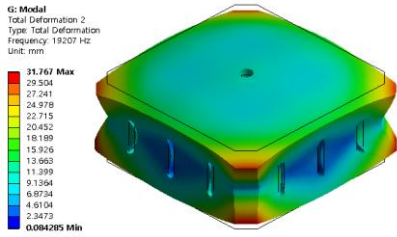
Slot 두께에 대한 설계 조건을 Table 4에 나타내었고, 본 모델링을 바탕으로 해석을 진행하였다. 해석에 부여된 조건은 기존 해석조건과 동일하게 초음파 영역에 해당하는 19~21kHz의 주파수 응답을 확인하였다.

### 2.7 Slot 두께에 따른 진동해석결과

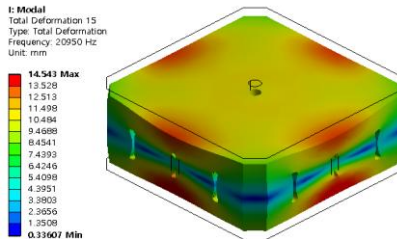
Slot 두께에 따른 진동해석 결과 Slot의 두께 8~9mm의 해석 모델에서 Horn의 모서리가 압축되는 형상을 보였으며, 10~11의 해석 모델에서 십자 형상



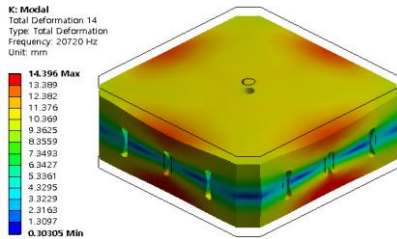
(a) Thickness 8mm



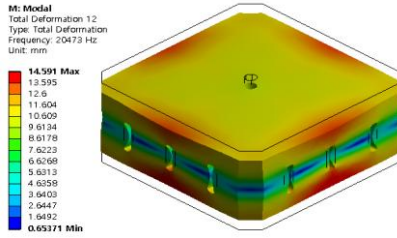
(b) Thickness 9mm



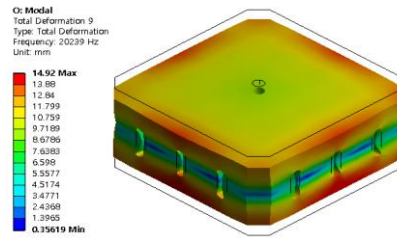
(c) Thickness 10mm



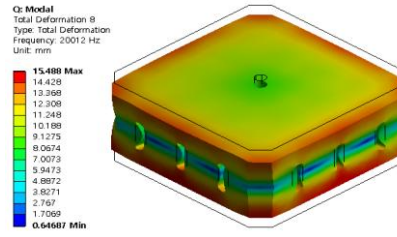
(d) Thickness 11mm



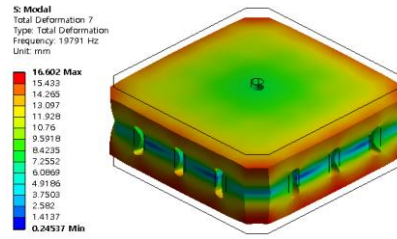
(e) Thickness 12mm



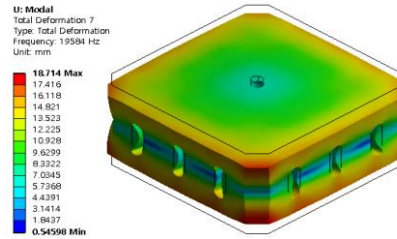
(f) Thickness 13mm



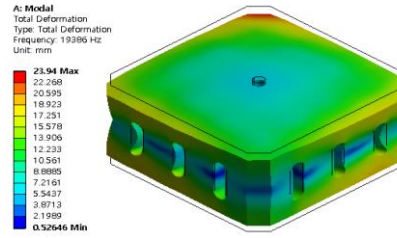
(g) Thickness 14mm



(h) Thickness 15mm



(i) Thickness 16mm



(j) Thickness 17mm

Fig. 8 Analysis result by slot spacing - 1

Fig. 9 Analysis result by slot spacing - 2

으로 중심부가 압축되는 결과를 나타내으며, 해석 결과를 Fig. 8~9에 나타내었다.

Slot 두께 12~15mm의 해석 모델에서는 비교적으로 균일하게 상·하로 압축되는 형상을 확인하였는데 해당 결과를 보았을 때 Slot 두께 14mm에서 가장 우수한 결과를 나타내는 것으로 확인되었다.

본 결과를 바탕으로 초음파 Horn의 해석 모델을 13~15mm의 범위에서 0.2mm 단위로 세분화하여 구조해석 한 결과 Slot 두께 Fig. 10과 같이 13.8mm가 가장 우수한 형상을 보이는 것으로 판단되었으며 해당 조건을 최적 Slot 두께로 판단하였다.

### 2.8 Slot 길이에 따른 진동해석조건

Slot 길이에 따른 초음파 영역 주파수에 응답하는 공진형상을 분석하기 위해 초음파 Horn의 모델링을 실시하였으며, Slot의 길이를 20~60mm까지 10mm씩 증가시켜 해석을 진행하였다.

Slot 길이에 대한 설계조건을 Table 5에 나타내었으며, 해석조건은 동일하게 부여하여 진동해석을 진행하였다.

기수행된 해석의 결과를 바탕으로 초음파 Horn의 설계에 반영하였으며, 본 결과를 바탕으로 최적 설계 조건을 판단하고자 한다.

### 2.9 Slot 길이에 따른 진동해석결과

Slot 길이에 따른 진동해석 결과 Slot 길이 50mm의 해석 모델에서 가장 우수한 형태의 상·하 진동형상을 보이는 것으로 확인하였다. 구조해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

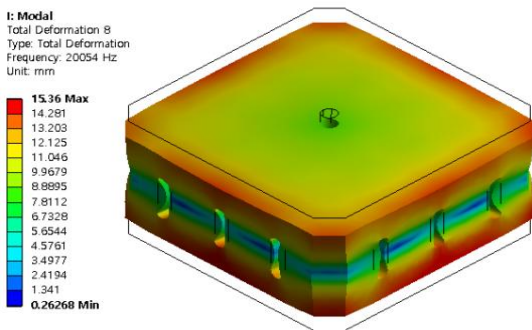


Fig. 10 Slot Thickness 13.8mm analysis results

Table 5 Analysis conditions according to slot Thickness

Items	Value	Unit
Size(WxDxH)	220.8×220.8×112.3	mm
Chamfer	16	mm
Slot thickness	13.8	mm
Slot length	20~60	mm
Slot spacing	60	mm

본 결과를 바탕으로 Slot 길이 50mm를 기준으로 1mm 단위로 해석 모델을 생성하여 진동해석을 진행하였을 때, 49~51mm가 우수한 특성을 보이는 것을 확인하였다. 그러나 Slot 길이 50mm의 조건에서 가장 우수한 특성을 보여 초음파 가공을 위한 초음파 Horn의 최적 모델로 판단되었다.

본 모델링을 바탕으로 조화해석을 통해 초음파 드릴링에서 작용하는 힘을 조건으로 부여하여 실제 가공환경에서 발생하는 변형을 분석하였다.

## 3. 초음파 Horn 조화해석

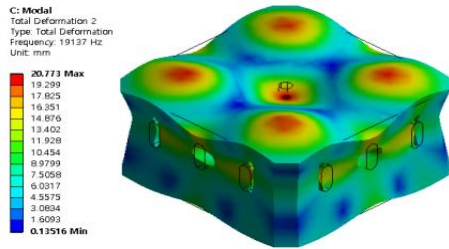
### 3.1 실험 방법

각 조건에 따라 설계된 초음파 Horn의 규격에 따라 3D Modeling을 실시하였으며, 해당 모델링을 바탕으로 유한요소 생성을 진행하였다. 본 해석에 사용된 초음파 Horn의 모델링은 하기의 Fig. 11에 나타내었으며, 기계적 물성은 Al 6061의 물성을 부여하여 해석을 진행하였다.

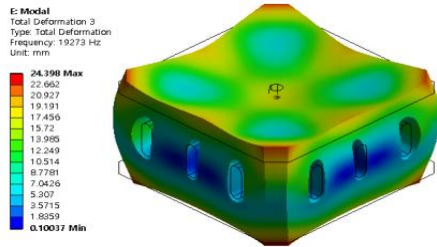
### 3.2 유한요소 생성 및 경계조건

초음파 Horn의 유한요소 생성결과 Node 11,132개, Elements 6,875개로 생성된 것을 확인하였다. 경계조건의 경우 초음파 영역에서 공진형상을 파악하기 위해 19~21kHz 사이의 공유진동수 분석 영역을 설정하였고 가공 중 발생하는 힘 100N을 반력방향으로 부여하여 조화해석을 실시하였다.

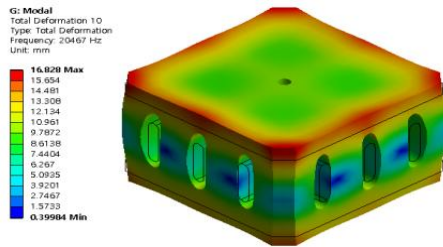
초음파 Horn의 3D Modeling을 Fig. 12에 나타내었으며, 유한요소 생성 및 경계조건에 대해 Fig. 12~14에 나타내었다.



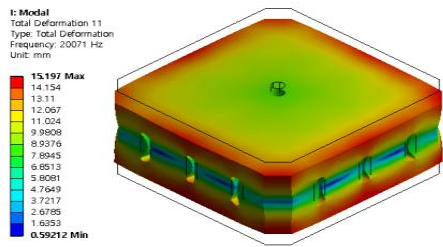
(a) Slot length 20mm



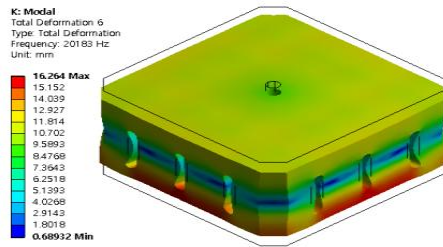
(b) Slot length 30mm



(c) Slot length 40mm



(d) Slot length 50mm



(e) Slot length 60mm

Fig. 11 Analysis result by slot length

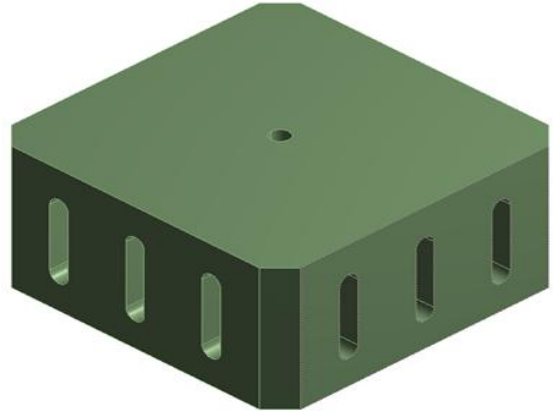


Fig. 12 Ultrasonic waves horn 3D modeling

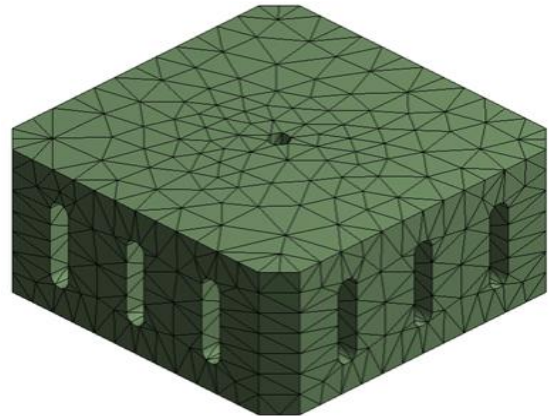


Fig. 13 Ultrasonic waves horn meshing

V: Harmonic Response  
Force  
Frequency: 19000 Hz  
Force: 100. N  
Components: 0,100,0. N

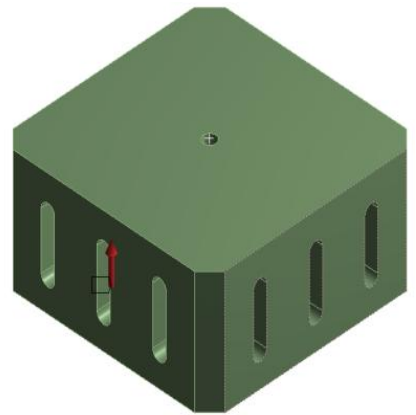


Fig. 14 Boundary conditions



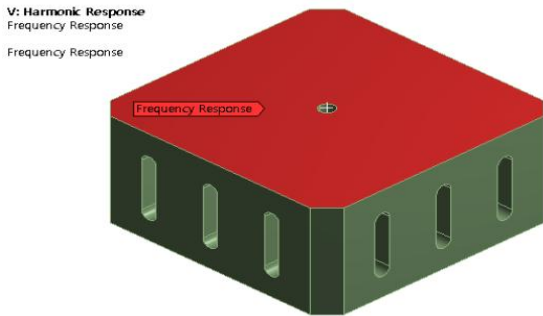


Fig. 15 Frequency response condition

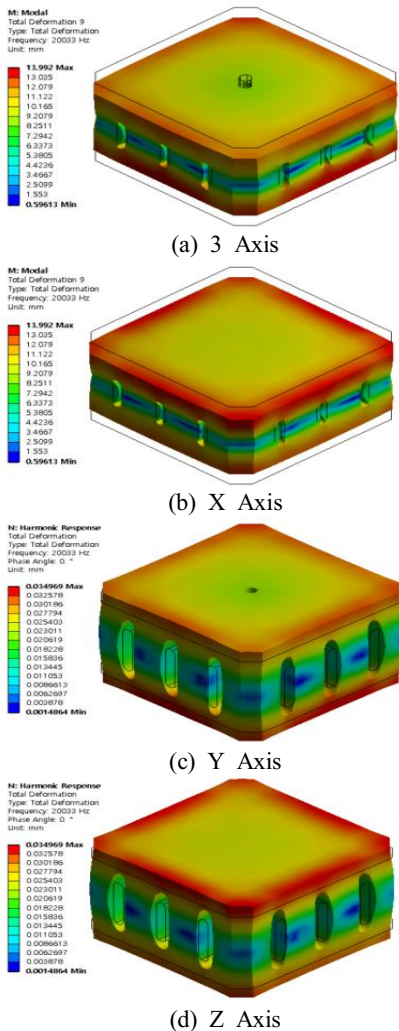


Fig. 16 Harmonic analysis results

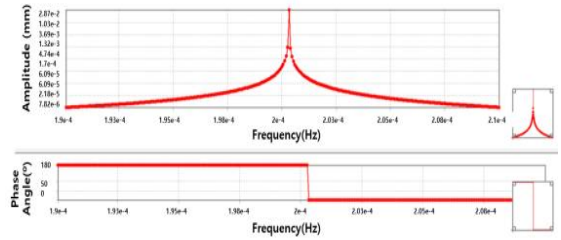


Fig. 17 Frequency response results

### 3.3 조화해석 결과

초음파 Horn의 조화해석 후 Fig. 16과 같이 3축 변형과 각 축에 따른 변형 형상을 분석하였을 때, 초음파 드릴링에서 요구되는 상·하 변형 형상을 충족한 것으로 판단되며, Fig. 17의 주파수 응답 결과를 보았을 때, 공진이 발생하는 주파수는 20,033Hz로 초음파 영역에 해당하는 것으로 파악되었다.

## 4. 고유진동수 평가

### 4.1 실험방법

Space Transformer 초음파 가공용 Horn의 해석 결과의 신뢰성 분석과 고유진동수 분석을 통한 공진 영역을 파악하기 위해 3축 가속도센서와 임팩트 해머를 이용한 초음파 Horn의 고유진동수 평가를 실시하였다.

초음파 가공 Horn 제작 시 해석에 적용하였던 Al 6061 소재를 최적 설계에 맞춰 가공을 진행하였으며, Fig. 18과 같이 초음파 가공용 Horn의 제작을 완료하였다. 고유진동수 평가를 위한 진동 측정을 위해 실험 환경을 Fig. 19과 같이 구성하였다. Space Transformer 초음파 가공용 Horn의 고유진동수 측정을 위해 초음파 영역에서 주파수 측정이 가능하도록 3축 가속도센서의 Sampling rate를 51,200으로 설정하여 최대 25,600Hz까지 측정하였으며, 정확한 주파수영역을 파악하기 위해 Block size를 12,800으로 설정하여 0.5Hz 단위의 주파수로 Data 측정이 가능하도록 설정하였다.

### 4.2 고유진동수 측정 결과

고유진동수 측정 결과 20,304.5Hz에서 Z축의

Magnitude가 3,500(m/s<sup>2</sup>)/N으로 가장 크게 나타났으며, Y축에서 2,200(m/s<sup>2</sup>)/N, X축에서 1,017(m/s<sup>2</sup>)/N로 나타났다.

CAE 해석의 신뢰성을 판단하기 위해 고유진동수 측정 실험 Data의 오차를 비교하였을 때, CAE 해석에서 상·하 진동형상을 보이는 주파수는 20,033Hz로 나타났으며, 고유진동수 측정 결과는 20,304.5Hz로 확인되었다. CAE 해석과 고유진동수 측정 Data와의 오차는 약 1.38% 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 두 Data의 오차는 고유진동수 측정 실험환경에 의한 차이로 보이며, 오차율을 보았을 때 CAE 해석과 실험 결과가 큰 차이를 보이지 않아 CAE 해석을 통한 최적 설계가 가능한 것으로 판단된다.

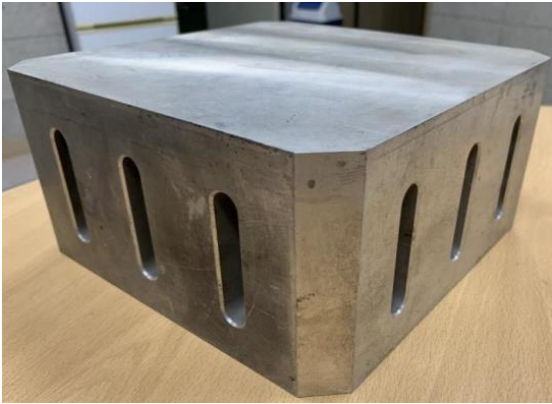
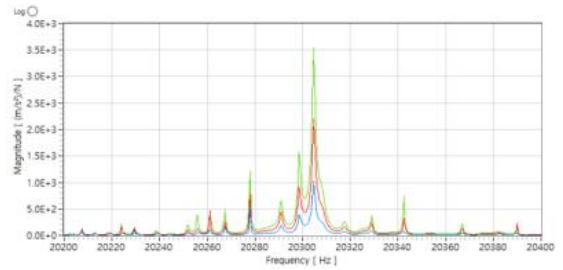


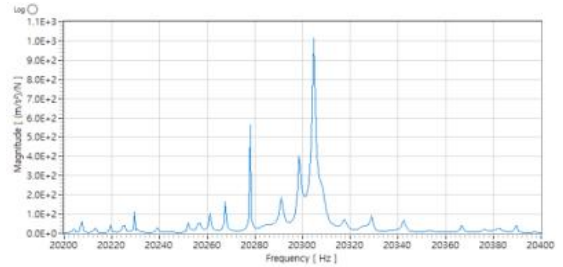
Fig. 18 Manufactured ultrasonic waves horn



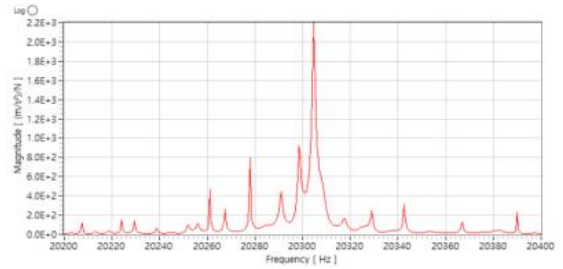
Fig. 19 Configuring the experimental environment



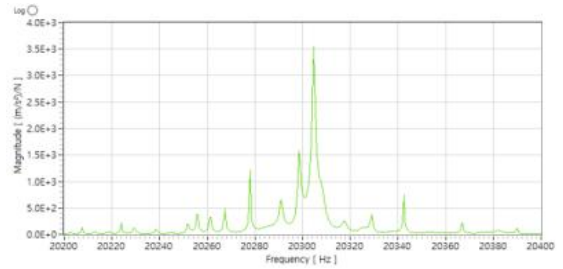
(a) 3 Axis



(b) X Axis



(c) Y Axis



(d) Z Axis

Fig. 20 Natural frequency measurement results

본 실험 결과를 분석하였을 때, 20,250에서 20,350Hz를 초음파 Horn에 부여하였을 때 Z축에서 발생하는 진동의 힘이 가장 크기 때문에 상·하 변형이 필요한 초음파 가공에서 우수한 가공성을 확보할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

1. Space Transformer 초음파 드릴링 가공을 위한 최적 설계 시 초음파 Horn의 Slot 개수, 간격에 따라 진동형상이 큰 폭으로 차이나는 것을 확인하였으며, 진동해석 결과 Slot 개수 3개일 때, 초음파 가공에 적합한 상·하 변형을 보여 Slot 개수 3개를 최적 설계로 판단하였다.
2. Slot 간격에 따른 진동해석 시 Slot 간격이 증가함에 따라 점차 균일한 변형량을 보이는 것을 확인하였으며, Slot 간격이 70mm 이상일 경우 점차 중심부의 변형량이 많아져 불균일한 상·하 진동형상을 보이는 것으로 보았을 때 Slot 간격 60mm가 최적 설계로 판단되었다.
3. 설계된 초음파 Horn의 Modeling을 이용하여 실제 가공환경과 유사한 해석조건을 부여하여 조화해석을 진행하였을 때, 균일한 상·하 진동형상을 나타내는 것으로 확인되었으며, 공진이 발생하는 주파수는 20,033Hz로 19~21kHz의 초음파 영역대로 확인되어 최적 설계가 원활히 진행된 것으로 판단되었다.
4. 해석의 신뢰성을 검토하고 실제 가공에 적합한 지 판단하기 위해 3축 가속도센서를 활용한 고유진동수를 측정된 결과 20,304.5Hz에서 가장 큰 변형이 발생할 것으로 예측하였으며, 이는 진동해석과 조화해석에서 나타난 초음파 영역과 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다.
5. CAE 해석과 고유진동수 측정 오차율은 약 1.38% 정도로 큰 차이를 보이지 않아 CAE 해석 결과가 신뢰성을 확보할 수 있다고 판단하였으며, 초음파 Horn 설계 시 CAE 해석 결과를 바탕으로 최적 설계가 가능할 것으로 판단되었다.
6. 본 연구를 통해 제조된 초음파 가공용 Horn을 통해 가공성을 판단하기 위한 초음파 드릴링 가공실험이 필요할 것으로 판단되며, 초음파 가공 실험 시 초음파 가공용 Pin의 소재와 형상, Slurry 원료, 비율 등을 최적화할 경우 우수한 정밀도를 확보할 수 있는 초음파 드릴링이 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비를 지원받아 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Jang, S. H., Lee, S. W., Choi, H. Z. and Lee, S. K., "The Geometric Machining Mechanism of Ultrasonic Drilling", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22 No. 4, pp. 76-83, 2005.
2. Jang, H. S., Park, Y. W. and Park, D. S., "Design and Weldability Verification of the 40kHz Horn for Ultrasonic Metal Welding", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 55-60, 2013.
3. Choi, S. J., Kim, J. S., Shin, J. H. and Youn, J. W., Evaluation of the Machinability of Diamond Drills for High-hardness Ceramics, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 28, No. 2, pp. 79-85, 2019.
4. Kang, J. P., "Study on the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 55-63, 1991.
5. Kim, J. S., Kim, J. W., Kim, I. J. and Seo, J. W., Analysis of Optimum Design of Stepped Bar Horn for 20kHz Metal Ultrasonic Welding, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 20 No. 3, pp. 94-101, 2019.
6. Kim, Y. W., Yim, V., Han, D. W. and Lee, S. Y. Vibration Characteristics of a Wire-Bonding Ultrasonic Horn, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 38 No. 2, pp. 227-233, 2014.
7. Seo, J. S., Kim, J. W. and Park, D. S., Design Improvement and Performance Evaluation of 20kHz Horn for Ultrasonic Cutting, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 135-140, 2013.