



CAE를 이용한 초음파 나이프 트랜스듀서 설계

송기혁^{a,*}, 김혜진^b, 성시명^b, 홍서연^c

Design of Ultrasonic Knife Transducer Using CAE

Ki-Hyeok Song^{a,*}, Hye-Jin Kim^b, Si-Myung Sung^b, Seo-Yeon Hong^c^a Department of Mold, Korea Polytechnics^b Department of Mechanical Engineering, Inha University^c Department of Metals and Materials Process Engineering, Inha University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 September 2023
Revised 29 September 2023
Accepted 5 October 2023

Keywords:

Ultrasonic
Transducer design
CAE
Cutting

ABSTRACT

This study aimed to design and verify ultrasonic knife modules, which have experienced a recent surge in demand. To this end, ultrasonic transducers and horns with longitudinal vibration characteristics of 40 kHz grounded in theoretical equations were designed. Subsequently, tensile experiments on materials were conducted and applied for precise wavelength analysis. Modal and harmonic response analysis using CAE was performed to predict vibration characteristics and natural frequencies for the designed ultrasonic knife. As a result of the analysis, the study revealed that the knife had an intrinsic frequency characteristic of about 38.1 kHz and vibrated in the axial direction. An ultrasonic knife, stemming from these findings, was manufactured and confirmed to achieve equivalent performance to the design, through resonance frequency analysis and vibration mode analysis.

1. 서론

초음파의 구동방식은 기구적 방법, 자왜소자를 활용한 방법 및 압전소자를 활용한 방법으로 구분되며 최근에는 압전소자를 활용한 구동 방식을 주로 활용하고 있다. 압전소자는 결정의 방향으로 응력이 가해지면 결정 구조에 변형이 발생하며 분극 현상이 발생한다. 이러한 분극현상은 음이온과 양이온의 상대적인 위치 변화를 유발하고 이로 인해 전압이 발생하게 되며 이러한 현상을 압전 효과라고 한다. 이를 역으로 이용하여 전압 인가를 통해 음이온과 양이온이 서로의 방향을 향해 이동시켜 기계적 변위가 발생하는 효과를 역압전효과라 하며 이는 압전소자를 이용한 초음파 진동을 발생시키는 기본 원리가 된다. 여기서 초음파 진동을 발전시키는

부분을 트랜스듀서라고 하며 이를 활용한 다양한 연구가 진행되고 있다^[1].

이러한 근래의 초음파 트랜스듀서에 대한 연구는 경도가 높거나 무른 세라믹, CFRP, 티타늄 및 복합소재와 같은 난삭 재료에 대한 가공 적용 가능성에 대한 연구가 주로 이뤄지고 있으며 초음파 가공의 경우 주로 회전 스피들들을 적용한 연구가 많이 이뤄지고 있다.

초음파 나이프는 의류 산업, 의료 산업, 식품 산업 등 다양한 산업 분야에서 무른 소재에 대한 정밀 절단의 용도로 활용되고 있으며 최근 자동차 산업 등에서 사출된 플라스틱 제품의 버(burr) 또는 플래쉬(flash) 등을 제거하는 용도로 그 사용이 확대되고 있다.

초음파 나이프는 초당 약 20 kHz에서 60 kHz의 진동을 통해 증폭된 커터 날 소재를 절단하며 커터 날의 진동을 통해 소재를

* Corresponding author. Tel.: +82-32-510-2226

E-mail address: khsong@kopo.ac.kr (Ki-Hyeok Song).

절단하므로 무른 소재의 절단을 가능하게 한다. 따라서 기존에 비해 절단면이 깨끗하며 작은 힘으로 소재의 절단이 가능하다.

하지만 이러한 수요 증가에도 불구하고 초음파 나이프에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CAE(computer aided engineering)를 활용한 초음파 나이프에 대한 설계 및 검증에 대한 연구를 수행하고자 한다.

Churi는 초음파 스피들을 활용하여 티타늄 합금 소재에 대한 절삭 실험을 수행하였으며 초음파는 절삭력을 감소시키고 표면 조도에 영향을 미치지만 재료의 제거율에 미치는 영향은 미비하다는 결론을 내렸다^[2]. Geng은 초음파 스피들을 활용한 CFRP(carbon fiber reinforced plastics) 소재의 측면에 대한 밀링 가공 시 보다 향상된 가공 표면을 갖는 것을 확인하였다^[3].

Liu는 회전방식의 초음파 스피들을 활용한 절삭 실험을 통해 취성재료에 대한 절삭 시 실험 조건에 따른 절삭력에 대한 간접측정 모델을 제시하였다^[4]. Wang은 티타늄 합금 소재에 대한 초음파 연삭 시 초음파 절삭력이 감소하며 낮은 주파수의 초음파 연삭에 비해 고주파의 초음파 적용 시 향상된 표면 조도를 얻을 수 있음을 확인하였다^[5]. Sanda는 CFRP/Ti stack 소재에 초음파 드릴 가공을 통해 초음파 적용 시 낮은 절삭온도 및 절삭력 및 적은 박리 현상이 발생하는 것을 확인하였다^[6]. Maeng은 초음파 나이프를 활용하여 고분자 소재에 대한 절삭실험을 수행하였으며 최적 조건에서 절삭 시 발생하는 버에 대한 최소화가 가능하며 이를 통해 고분자 소재에 대한 적용 가능성을 확인하였다^[7].

2. CAE를 활용한 초음파 나이프 설계

2.1 초음파 나이프의 트랜스듀서 설계

초음파 발진 부인 트랜스듀서의 일반적 형태는 back mass와 front mass 사이에 압전소자가 위치하고 이를 볼트로 고정된 형태이며 이를 BLT(bolt-clamped Langevin transducer) 라고 한다. Fig. 1은 본 논문에서 적용하고자 하는 기본적인 혼의 형태이다. 기본적인 초음파 시스템의 구성은 진동 발진부인 트랜스듀서, 기계적 진동의 증폭 및 공구로 전달해주는 혼(horn)으로 구성된다. 여기서 λ 는 진동 모드에 대한 파장 길이로 혼의 길이를 이와 동일

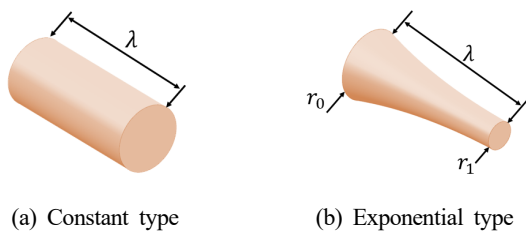


Fig. 1 Horn shape

하게 제작하게 되며 파장 길이는 다음의 수식에 의해 정의된다.

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{c}{\pi f} \sqrt{(2\pi)^2 + (\ln n)^2} \tag{2}$$

여기서

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, n = \frac{r_0}{r_1}$$

식 (1)은 constant type의 혼에 대한 파장 길이 식으로 f 는 선정된 주파수, E 는 소재의 탄성계수이며 ρ 는 소재의 밀도이다. 식 (2)는 exponential type의 혼에 대한 파장 길이 식으로 r_0 와 r_1 는 혼의 직경으로 Fig. 1의 (b)에 설명되어 있다^[8,9].

Fig. 2는 본 연구에서 설계한 초음파 나이프에 대한 기본 개념도이다. 초음파 나이프의 구성은 크게 BLT 타입의 트랜스듀서와 혼으로 구성 하였으며 혼의 끝에는 칼날을 고정하였다. BLT 타입의 트랜스듀서는 가운데에 전극과 압전소자를 교차로 겹쳐서 설치하고 이를 back mass와 front mass로 포개어 pre-load 볼트로 압축 구속 할 수 있도록 설계하였다. 또한 혼의 형상은 파동의 전달 시 직경이 작아지는 부분의 step 구조에 의해 파동의 상쇄로 인한 에너지손실을 최소화하고자 fillet 형상을 적용하였으며 이를 고려한 길이 계산을 위해 식 (1)과 (2)를 적용하여 설계하였다. 트랜스듀서의 공진 주파수는 초음파 절삭에 활용되는 40 kHz 주파수를 선정하였다. 초음파 주파수를 선정하고 이를 기반으로 설계하는 이유는 제작된 초음파 트랜스듀서의 공진주파수가 컨트롤러의 가진 주파수와 일치하지 않으면 저항으로 작용하여 발열 및 에너지 손실이 커지게 된다. 따라서 선정된 주파수에 맞는 트랜스듀서의 설계 및 컨트롤러 선정이 중요하다. Front mass와 back mass 소재는 진동에 대한 전달 특성이 좋고 피로강도가 높은 티타늄 합금

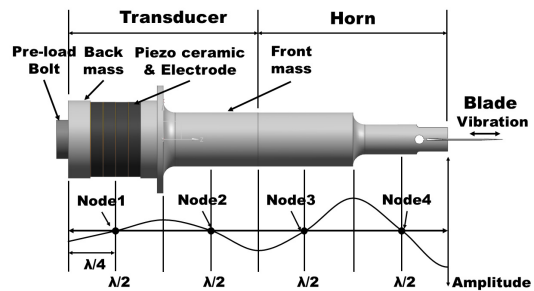


Fig. 2 Design concept for ultrasonic knife

인 Ti-6Al-4V을 적용하였다. 선정된 주파수와 소재를 기준으로 식 (1)과 (2)를 이용하여 1차 모드에 대한 파장의 길이 파장의 길이 $\lambda(=l)$ 를 구하였다. 설계된 초음파 나이프는 반파장($\lambda/2$) 길이에 따라 진폭이 증폭되며 node는 진폭이 없지만 최대 응력이 발생하는 지점이다. 계산된 파장 길이에 따른 초음파 커터의 설계는 블레이드 길이는 고려하지 않았으며 혼의 끝단을 기준으로 파장 길이를 적용하였다. 이는 중량이 매우 작고 길이가 짧은 블레이드로 인한 공진주파수 변화가 크지 않으며 컨트롤러의 발진 주파수 조정을 통하여 공진주파수를 제어할 수 있기 때문이다.

2.2 소재

초음파 발진 시 트랜스듀서와 혼은 수에서 수십 um의 진폭 특성의 고주파 진동을 지속적으로 반복하게 되며 이로 인해 소재에는 높은 반복 하중이 지속된다. 따라서 초음파 나이프 모듈의 소재는 진동 전달 특성뿐만 아니라 높은 피로 강도 특성도 좋아야 한다.

일반적으로 적용되는 소재는 알루미늄합금, 스테인리스 합금 및 티타늄 합금이 사용되며 본 연구에서는 진동 전달 특성이 좋으면서 피로강도 특성이 우수한 티타늄 합금 인 Ti-6Al-4V를 혼과 트랜스듀서의 front mass에 적용하였다. 또한 트랜스듀서에서 종진동 발생 시 Fig. 2의 노트1에서 좌우 방향으로 동일하게 생성되는데 이때 back mass로 발생하는 에너지는 전방으로 전달되는 에너지의 관점으로 봤을 때 손실 에너지 이므로 피에조소자에서 발생하는 모든 진동 에너지의 전방 유도가 필요하다. 따라서 back mass의 소재는 front mass보다 높은 진동 임피던스 특성을 가지는 소재의 선택이 필요하며 본 논문에서는 이를 위해 저탄소강을 back mass에 적용하였다.

앞선 식 (1)과 (2)에서 파장 길이를 구하기 위해서는 소재의 밀도와 탄성계수를 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 초음파 나이프 모듈의 주요 소재로 적용하고자하는 Ti-6Al-4V에 대한 인장 실험을 수행하였다. Fig. 3은 인장 시험 및 결과를 나타낸다. 인장

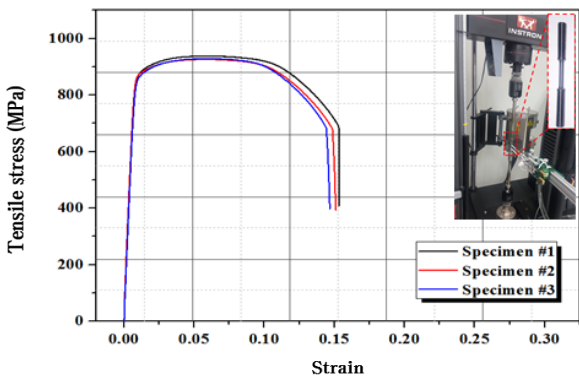


Fig. 3 Result of tensile test

Table 1 Material properties of transducer parts

Part	Piezo	Front mass	Back mass	Electrodes
Materials	PIC 181	Ti-6Al-4V	Low carbon steel	Copper
Young's modulus (Gpa)	70.4	113.683	179.18	115
Density (kg/m ³)	7800	4418	7723	8900
Poisson's rate	0.31	0.342	0.3	0.31
Wave velocity (m/s)	3005	5027	4816	3595

시험기는 Instron社의 universal testing machine으로 최대 100 kN의 하중 인가가 가능한 장비를 사용하였다. 인장 실험을 위해 총 3개의 시편을 제작하였으며 인장 실험을 통해 약 113.683 GPa의 탄성계수 값을 얻었다.

일반적으로 초음파 발진을 위해 사용되는 피에조소자의 소재는 티탄산지르콘산염(PZT)을 사용한다. 이를 사용하는 이유는 화학적으로 비활성이며 습도 등에 큰 영향을 받지 않기 때문이다. 이러한 PZT를 이용한 피에조 소자 제조 시 화학 조성의 조절을 통해 필요한 용도에 맞는 성능을 부여 할 수 있다. 본 연구에서는 PI Piezotechnology社의 PIC 181 재질의 피에조소자를 선정하였다. PIC 181은 높은 큐리 온도 특성과 기계적 품질 계수를 가지고 있으며 고 전력의 응용 분야에서 장시간 사용 시에도 안정적이다. 또한 우수한 탄성 특성과 높은 유전성을 가지고 있어 초음파 발진에 요구되는 피에조 소자 성능을 가진 소재이다.

Table 1은 초음파 나이프 모듈의 부품으로 사용되는 소재에 대한 물리적 특성 정보이다. Front mass와 horn 및 pre-stress bolt는 Ti-6Al-4V를 적용하였으며 전극은 구리를 적용하였다. 또한 back mass는 저탄소강을 적용하였으며 이들에 대한 탄성계수와 밀도 및 프아송 비는 인장실험, 관련 논문 및 소재회사에서 제공하는 재질 정보를 적용하였다^[8]. Table 2는 피에조 소자인 PIC 181의 외관 정보 및 재질 특성이다. 본 연구에서는 BLT 타입의 트랜스듀서를 적용하므로 외경 25 mm, 내경 10 mm 및 두께 4 mm의

Table 2 Specific parameter of PIC181

Inner dia.(mm)	10
Outer dia.(mm)	25
Thickness (mm)	4
Dielectric loss factor (Tanδ)	0.003
Relative permittivity ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)	1200
Mechanical quality factor (Q_m)	2000

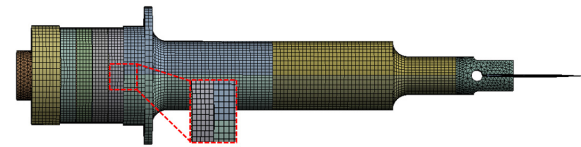
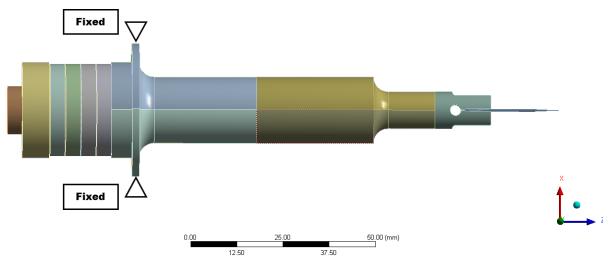


Fig. 4 Analysis model

링 형태 피에조소자를 적용하였다.

2.3 CAE를 활용한 성능 예측

모달 해석(modal analysis)은 고유진동수 해석(natural frequency analysis)으로 구조물의 고유진동수를 구하고 이에 따른 형상모드를 파악하여 설계된 구조의 공진여부 및 진동으로 인한 형상의 변형인 진동모드를 예측하는 해석이다. 조화응답해석(harmonic response analysis)은 일정한 주파수로 가진 하였을 때 각각의 가진 주파수에 대한 가속도, 속도 및 변위를 예측할 수 있는 해석이다.

따라서 식 (1)과 (2)를 통해 설계된 초음파 나이프 시스템의 혼 및 트랜스듀서에 대한 진동 특성 및 공진주파수를 분석하기 위한 모달 및 조화응답 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모듈은 Ansys社의 Workbench를 사용하였으며 먼저 모달 해석을 통해 설계된 초음파 나이프 모듈의 공진주파수 특성을 예측하였다. 초음파 진동에서는 설계된 공진 주파수에서 원하는 가진 방향으로 종진동하는 진동 모드로 설계되는 것이 중요하며 모달 해석을 통해 이를 분석하였다.

Fig. 4(a)는 해석을 위한 초음파 나이프 모듈의 3D 모델 및 경계 조건이다. 설계된 초음파 나이프 모듈은 하우징에 고정되며 고정부에 fixed 구속 조건을 부여하였다.

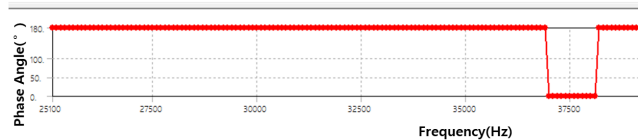
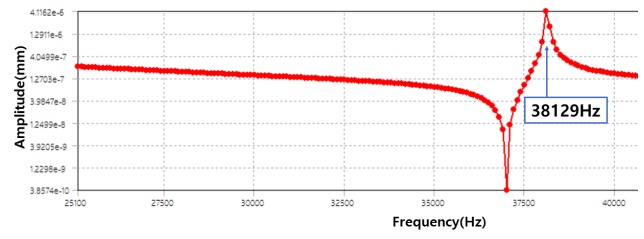
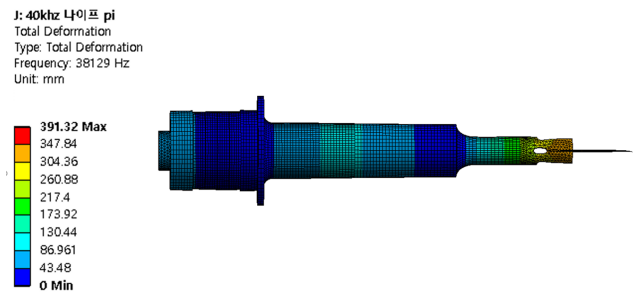
Fig. 4(b)는 초음파 나이프 모듈의 유한요소모델이다. 메시(mesh)의 타입은 해석 정확도를 향상시키기 위해 축 회전 대칭형상에 적용 가능한 sweep 메시를 적용하였으며 메시의 크기는 전극은 얇은 두께를 고려하여 0.5 mm를 적용하였고 나머지 파트들은 1 mm를 적용하였다.

Table 3은 생성된 메시 정보로 총 91,271개의 요소와 374,842개의 노드로 구성되었다.

Fig. 5(a)는 모달 해석 결과로 약 38.1 kHz의 공진주파수에서

Table 3 Result of mesh

Mesh type		Sweep method
Mesh size (mm)	Electrode	0.5
	Others	1.0
Nodes (ea)		374842
Elements (ea)		91271



(b) Harmonic response with frequency

Fig. 5 Result of analysis

종진동이 발생하는 것으로 예측되었다. 본 연구에서 초음파 나이프의 공진주파수는 40 kHz로 선정하고 설계하였으며 설계 주파수 대비 1.9 kHz의 오차가 발생하였는데 이는 설계에서는 소재 및 재료 가공 형상에 따라 변경되는 공구 인 나이프 길이를 고려하지 않고 설계하였으며 이로 인해 λ의 길이가 길어져 공진주파수가 낮아졌을 것으로 판단되었다. 하지만 이는 초음파 트랜스듀서 컨트롤러에서 제어 가능한 오차 수준으로 문제가 되지 않을 것으로 판단되었다.

모달 해석을 통해 설계된 주파수에서 종진동모드가 발생하는 것을 확인하였으며 이를 기반으로 각 주파수에 따른 조화응답 해석을 수행하였다. 주파수는 25 kHz에서 45 kHz까지 100 Hz 단위로 가진되도록 설정하였으며 종진동 방향에 대한 가진에 따른 변위를 분석하였다. Fig. 5(b)는 조화응답해석 결과로 x축은 주파수를 나타내고 y축은 증폭 값을 나타내는데 해석 결과 설계된 38.1 kHz에서 가장 높은 증폭 값을 가지는 것으로 분석되었다.

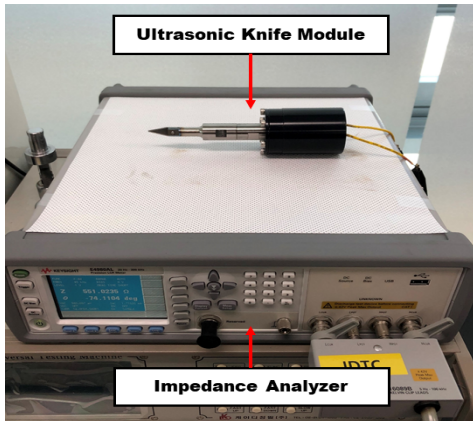


Fig. 6 Measurement of admittance for transducer

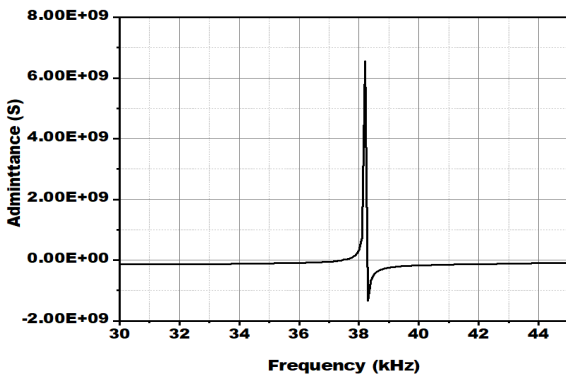


Fig. 7 Measurement result of admittance

따라서 모달 해석과 조화응답해석을 통해 설계된 초음파 나이프가 요구되는 진동의 특성을 가지는 것을 예측할 수 있었다.

3. 성능 분석

3.1 공진주파수 분석

제작된 초음파 나이프의 트랜스듀서 및 혼에 대한 공진주파수 분석을 위해 어드미턴스(admittance) 측정 및 분석을 하였다. 어드미턴스는 임피던스(impedance)의 역수이다. 임피던스는 매질 내의 파동 전파(propagation) 또는 전기의 흐름을 방해하는 정도를 나타내며 임피던스의 역수인 어드미턴스는 전기 또는 전파의 흐르기 쉬운 정도를 나타내는 값이다. 따라서 제작된 초음파 나이프의 트랜스듀서에 대한 주파수별 임피던스 측정 후 역수 값인 어드미턴스 값으로 분석 시 가장 높은 값을 가지는 주파수가 시스템의 공진주파수이다.

Fig. 6은 제작된 초음파 나이프와 임피던스 측정기이다. 제작된 초음파 나이프의 트랜스듀서는 하우징에 고정되어 사용되므로 고정 설치된 상태로 준비하였다. 임피던스 측정에 사용된 측정기는 Keysight Technologies社의 E4980AL 모델을 사용하였다.

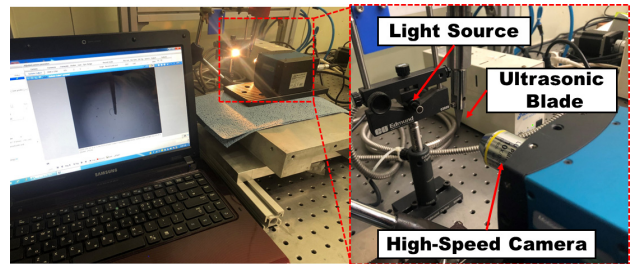
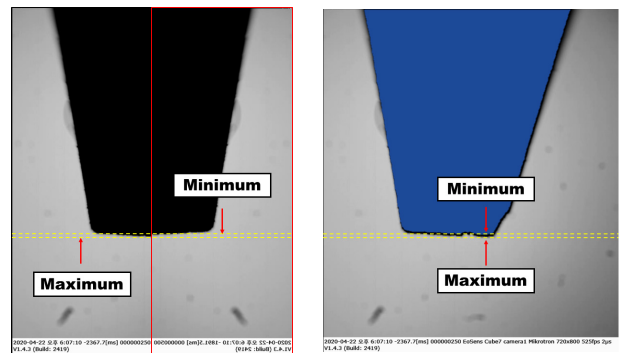


Fig. 8 Measurement system

Table 4 Specification for high-speed camera

CMOS sensor	1,696 (H) × 1,710 (V) pixel active area 19.27 mm (diagonal) 13.57 (H) × 13.68 (V) mm
Pixel size	Micro lenses 8 × 8 μm
Image speed	200,000 fps
Shutter	2 μs



(a) Maximum point

(b) Minimum point

Fig. 9 Measurement result of admittance

Fig. 7은 주파수에 따른 임피던스 측정 결과를 어드미턴스 값으로 변환한 결과로 어드미턴스 값이 최대가 되는 주파수 지점 f_m 은 38.1 kHz로 분석되었으며 이는 모달 해석 결과와 동일한 결과로 해석 결과가 타당함을 알 수 있다.

3.2 진동 모드 분석

종진동 모드의 특성을 갖도록 설계 및 제작된 초음파 나이프 모듈에 대한 진동 모드 분석을 위해 초고속 카메라를 활용하여 진동 시의 형상을 측정하였다. Fig. 8은 측정 실험 시스템 구축 모습이다. 사용된 초고속 카메라는 Motion BLITZ社의 EoSens Cube7이며 Table 4는 초고속 카메라 성능이다. 셔터의 최소 속도는 2 μs 및 최대 200,000 fps의 성능을 가지고 있으며 40 kHz의 진동 특성을 가지고 있는 초음파 나이프의 진동 주기는 25 μs로 진동에 대한 모드 분석이 가능한 성능이다.

측정 이미지에 대한 분석은 최소 변위 지점의 이미지와 최대 변위 지점의 이미지를 이진화 처리하여 비교 분석을 통한 종진동 모드에

대한 분석을 수행하였다. Fig. 9(a)는 최대 변위와 최소 변위에 대한 좌측 절반 이미지를 비교한 것으로 최소 변위의 좌측 절반 이미지를 대칭 처리 하여 최대 변위의 우측에 위치시켜 비교하였다. Fig. 9(b)는 최소 변위 측정 이미지를 이진화 처리 후 파랑색으로 변환하여 최대 변위 지점 이미지와 겹쳐 진동 방향을 분석한 결과이다. 이를 통해 설계된 종진동 방향의 초음파 진동을 하는 것을 확인할 수 있었으며 설계 및 해석 결과가 타당함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 근래 사용 수요가 증가하고 있는 초음파 나이프 모듈 설계 및 검증에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 이론퓌 기반의 40 kHz의 종진동 특성을 가지는 초음파 트랜스듀서 및 혼을 설계하였으며 정확한 λ 분석을 위해 소재에 대한 인장 실험을 수행하고 적용하였다.

설계된 초음파 나이프에 대한 진동 특성 및 고유진동수 예측을 위해 CAE를 활용한 모달 및 조화응답해석을 수행하였다. 모달 해석 결과를 통해 약 38.1 kHz의 고유진동수 특성을 가지는 것으로 예측되었으며 주파수에 따른 조화응답해석 결과를 기반으로 약 38.1 kHz에서 축 방향으로 가장 큰 증폭 값을 가지는 결과를 통해 종진동하는 것을 확인하였다. 설계된 고유진동수 40 kHz에 비해 약 1.9 kHz의 주파수 오차 값은 나이프 길이를 고려하지 않아 생긴 오차일 것으로 예측되었으며 오차 값은 초음파 트랜스듀서 컨트roller에서 제어 가능한 오차 값으로 문제가 없을 것으로 판단되었다. 이를 기반으로 설계된 초음파 나이프를 제작하였으며 공진 주파수 분석 및 진동 모드 분석을 하였다.

공진주파수는 초음파 트랜스듀서의 주파수별 임피던스 측정 및 어드미턴스 분석을 수행하였으며 약 38.1 kHz에서 가장 큰 어드미턴스 값을 가졌으며 이는 모달 해석의 공진 주파수와 동일한 결과 값으로 해석의 결과가 타당한 것으로 분석되었다.

진동모드는 초고속카메라를 통해 진동 시 최대 변위 지점과 최소 변위 지점에 대한 이미지 측정 후 비교를 하였으며 이를 통해 축 방향으로 진동하는 것을 확인하였으며 해석의 결과와 같음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 초음파 나이프에 대한 설계 및 검증 방법을 제시하였으며 추후 이를 활용한 절삭에 대한 성능에 대한 연구가 지속적으로 필요하다.

References

[1] Jordan, T., L., Ounaies, Z., 2001, Piezoelectric Ceramics Characterization, NASA/CR-2001-211225 ICASE Report,

<<https://webharvest.gov/peth04/20041102031020/http://techrpports.larc.nasa.gov/icase/2001/icase-2001-28.pdf>>.

- [2] Churi, N. J., Pei, Z. J., Treadwell, C., 2006, Rotary Ultrasonic Machining of Titanium Alloy: Effects of Machining Variables, *Mach. Sci. Technol.*, 10:3 301-321, <https://doi.org/10.1080/10910340600902124>.
- [3] Geng, D., Zhang, D., Xu, Y., He, F., Liu, D., Duan, Z., 2015, Rotary Ultrasonic Elliptical Machining for Side Milling of CFRP: Tool Performance and Surface Integrity, *Ultrasonics*, 59 128-137, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.006>.
- [4] Liu, D., Cong, W. L., Pei, Z. J., Tang, Y., 2012, A Cutting Force Model for Rotary Ultrasonic Machining of Brittle Materials, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 52:1 77-84, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.006>.
- [5] Wang, Y., Lin, B., Cao, X., Wang, S., 2014, An Experimental Investigation of System Matching in Ultrasonic Vibration Assisted Grinding for Titanium, *J. Mater. Process. Technol.*, 214:9 1871-1878, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.001>.
- [6] Sanda, A., Arriola, I., Navas, V. G., Bengoetxea, I., Gonzalo, O., 2016, Ultrasonically Assisted Drilling of Carbon Fibre Reinforced Plastics and Ti6Al4V, *J. Manuf. Process.*, 22 169-176, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.003>.
- [7] Maeng, H. M., Choi, H. B., Lim, D. W., Park, C. I., Kang, D. S., 2021, Optimization Experiment of Burr Height by Ultrasonic Cutting Machining, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 30:4 332-337, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.332>.
- [8] Stanasel, I., Ardelean, F., 2010, The Parametric Design of the Ultrasonic Exponential Horns, *Nonconventional Technologies Review*, 14:4 54-58.
- [9] Al-Budairi, H. D., 2012, Design and Analysis of Ultrasonic Horns Operating in Longitudinal and Torsional Vibration, Doctorate Thesis, University of Glasgow, The United Kingdom.



Ki-Hyeok Song

Professor in the Department of Mold Design, Korea Polytechnics. His research interest is Manufacturing System.

E-mail: khsong@kopo.ac.kr



Hye-Jin Kim

Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. Her research interest is CAD/CAM and Optimization.

E-mail: roal8888@gmail.com



Si-Myung Sung

Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Manufacturing System.

E-mail: ssm225@kopo.ac.kr



Seo-Yeon Hong

Ph.D. Student in the Department of Metals and Materials Process Engineering, Inha University. Her research interest is Injection Mold.

E-mail: yoohwa9k@kopo.ac.kr