

RFID TAG 미세패턴 성형을 위한 공구혼 진동해석

김강은¹, 이봉구^{2*}, 최성주³

¹한국생산기술연구원 극한제조기술그룹, ²영남이공대학교 기계계열, ³한국기술교육대학교 기계공학부

Modal Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for RFID TAG Micro-pattern Forming

Kang-Eun Kim¹, Bong-Gu Lee^{2*}, Sung-Ju Choi³

¹Ultimate Manufacturing Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology

²Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University College

³Division of Mechanical Engineering, Korea University of Technology Education

요약 본 논문에서는 유한 요소법(FEM) 시뮬레이션을 사용하여 초음파 미세패턴 성형에 사용되는 초음파 공구혼을 이론적 연구와 유한요소해석을 통하여 조사 하였다. 이 방법은 FEM 해석으로 얻어진 초기 설계 추정치에 기초한다. 초음파 미세패턴 성형에 필요한 고유진동수와 공구 혼의 공진주파수를 유한요소해석을 통하여 예측하였다. ANSYS S/W를 이용한 FEM 분석은 초음파 혼의 진동모드 형상의 최적 설계기술로 공진 주파수를 예측하기 위해 사용하였다. 초음파 진동자에 전원이 공급되면, 초음파 진동자에 공급된 전기에너지가 기계적인 운동에너지로 변환되어 진동이 발생하게 된다. 초음파 공구혼의 종진동 에너지를 이용하여 절연시트위에 RFID TAG 패턴 성형을 하게 된다. 초음파 진동을 이용한 마이크로 단위의 형상정밀도 향상을 위해서는 공구혼의 종진동모드만을 이용하여 성형 해야 한다. 본 연구에서는 초음파 마이크로패턴 성형에 필요한 공구혼의 고유진동수 및 진동모드를 갖는 설계변수를 고찰하고, 유한요소해석 결과를 바탕으로 공구혼을 제작함으로써 마이크로패턴 성형에 응용하고자 한다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 RFID TAG의 미세패턴 성형을 위한 초음파 공구혼의 최적설계 및 제작에 반영하였다.

Abstract In this paper, the theoretical research and simulation using the Finite Element Method (FEM) to design and form a micro-pattern for an ultrasonic horn is described. The present method is based on an initial design estimate obtained by FEM analysis. The natural and resonant frequencies required for the ultrasonic tool horn used for forming the fine pattern were predicted by finite element analysis. FEM analysis using ANSYS S/W was used to predict the resonant frequency for the optimum technical design of the ultrasonic horn vibration mode shape. When electrical power is supplied to the ultrasonic transducer, it is converted into mechanical movement energy, leading to vibration. The RFID TAG becomes the pattern formed on the insulating sheet by using the longitudinal vibration energy of the ultrasonic tool horn. The FEM analysis result is then incorporated into the optimal design and manufacturing of the ultrasonic tool horn.

Keywords : FEM analysis, Miro-pattern Forming, Modal analysis. RFID TAG, Ultrasonic Tool Horn,

1. 서론

최근, 정보기술의 급속한 진보에 따라 다양한 전자 제품의 수요가 증가하고 있는 추세이며 디지털 전자기기의

초소형화, 고집적화, 저비용화, 다기능화, 그리고 경량화의 경향이 두드러지고 있다. 이러한 경향에 발맞추어 빠른 신호처리가 가능한 고성능 반도체 칩의 개발과 칩과 칩 또는 칩과 다른 주변 장치들 간의 상호 신호전달을

*Corresponding Author : Bong-Gu Lee(Yeungnam University College)

Tel: +82-10-9035-8344 email: positive@ync.ac.kr

Received October 31, 2016

Revised (1st November 22, 2016, 2nd December 7, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

위한 전자 패키지(Electronic package) 기술의 발전 또한 요구되고 있다. 그리고 정보화 사회가 다양성과 독창성을 추구하면서 급속하게 발달함에 따라 사물에 부착된 센서를 통하여 정보를 습득하고 관리하는 무선인식 기술인 RFID/USN(Ubiquitous Sensor Network)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. RFID/USN의 무선인식 기술은 바코드나 스마트카드와 같은 기존 인식장치보다 많은 기능을 가지고 있고, 전송율과 전력효율 등의 우수한 연구가 선행되고 있어 다양한 분야에서 구현되고 있다. 이와 같은 기술의 실용화 대응방안으로 RFID(Radio Frequency Identification) 기술이 제안되었다[1].

RFID는 사물에 대한 정보를 담고 있는 TAG와 그 정보를 관독하는 리더 시스템으로 구분되며, TAG는 안테나와 TAG 칩 등으로 구성된다. 원거리에서 전자기파를 이용하는 UHF 대역 TAG 안테나는 공진 주파수 파장에 의해서 크기가 제약되며, 기존 다이폴 형태의 상용 TAG 안테나는 약 $15\text{cm}(\lambda/2)$ 의 크기를 가진다. 따라서 RFID가 다양한 분야에서 응용되기 위해서는 무엇보다 안테나의 소형화가 이루어져야 한다. 최근 소형 안테나에 대한 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고, 대부분의 소형 안테나는 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 생산 단가가 저렴해야 되는 TAG 안테나로 활용하기에는 많은 문제점이 존재한다[2-4].

RFID 시스템에서 안테나는 RFID TAG와 RFID Reader 사이에서 Data와 Energy를 주고받는 역할을 하기 때문에 RFID 기술 전체의 성능을 좌우하는 핵심요소로 발전하고 있다. 기존 미세패턴의 RFID TAG 안테나 제조 방식을 살펴보면 동도금과 에칭을 통한 방식과 인쇄전자 방식이 있지만 고가의 장비와 복잡한 공정으로 인하여 제조단가가 높고 환경유해물질의 배출로 인하여 정부에서는 규제를 강력히 하고 있는 실정이다. 일반적으로 현재 널리 사용되고 있는 13.56MHz RFID TAG 안테나의 미세패턴은 크게 카드형태, 직사각형, 원형 등 수많은 미세패턴들이 있다. 이러한 13.56MHz RFID TAG 안테나의 미세패턴을 구현하기 위한 많은 연구들이 진행되었고, 형태별, 기능별로 상당한 부분에 대해서도 상용화가 이루어지고 있는 상황이다[5,6]. 따라서, 본 연구에서는 13.56MHz RFID TAG 안테나의 미세패턴 성형이 가능한 초음파 미세패턴 제조시스템을 개발하고, 초음파 종진동을 이용하여 고분자 필름과 같은 절연 시트 층에 RFID TAG 안테나를 압입성형해서 ONE-Sheet Inlay

형태의 미세패턴 성형공정을 이용한 RFID TAG 안테나를 제조할 수 있는 초음파 미세패턴 성형기술을 개발하고자 한다. 즉 초음파 종진동을 이용하여 미세패턴성형 기술에 필요한 공구흔의 공진설계와 ANSYS를 이용하여 공구흔의 고유진동수와 진동모드를 갖는 초음파 공구흔의 설계변수를 고찰하고 해석 결과를 반영하여 공구흔을 제작함으로써 미세패턴 성형에 응용하고자 한다.

2. 초음파 공구흔의 설계 및 해석

2.1 스텝형 혼 설계

스텝 혼의 일반적인 진동방정식은 식(2.1)과 같다.

$$\rho S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

여기서, ρ :봉의 밀도(kg/m³), S :봉의 단면적(mm²)

u : 변위(mm), t : 시간(sec), E : 탄성계수(MPa)

Fig.1의 스텝형 혼의 경우 식(2.1)의 일반해는 식(2.2)와 같다.

$$u_1(x,t) = \left(A \cos \frac{\omega}{C} x + B \cos \frac{\omega}{C} x \right) \sin(\omega t + \theta) \quad (2.2)$$

$$u_2(x,t) = \left(C \cos \frac{\omega}{C} x + D \cos \frac{\omega}{C} x \right) \sin(\omega t + \theta)$$

경계조건은 대단 면으로 부터 l_1 의 위치에 x축의 원점을 잡으면

$$x = -l_1 \rightarrow \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$x = 0 \rightarrow u_1 = u_2, \quad s_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = s_2 \frac{\partial u_2}{\partial x}$$

$$x = l_2 \rightarrow u_2 = u_3, \quad s_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = s_3 \frac{\partial u_3}{\partial x}$$

$$x = l_2 + l_3 \rightarrow \frac{\partial u_3}{\partial x} = 0$$

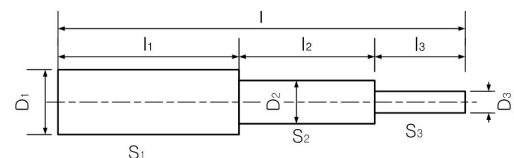


Fig. 1. Step horn design

이때 다음과 같은 공진조건 식은 식(2.4)와 같이 만들어진다.

$$\tan \alpha l = \frac{\frac{s_3}{s_1} \tan \alpha l_3 + \frac{s_2}{s_1} \tan \alpha l_2}{1 - \frac{s_3}{s_2} \tan \alpha l_2 \cdot \tan \alpha l_3} \quad (2.4)$$

$l_1 = \lambda/4$ 일 때, $x=0$ 의 점이 진동의 절점이 되기 때문에 공진조건이 되어 다음식이 얻어진다.

$$\tan \alpha l_2 \cdot \tan \alpha l_3 = \frac{s_2}{s_3} \quad (2.5)$$

입력 직선부의 길이는 반파장 공진에 의하여 $l_2 = \lambda/4$ 로 한다. 입력 단에서의 구동진폭을 u_1 이라고 제1직선부, 제2직선부 및 공구부에서의 진폭은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} -1 \leq x \leq 0 &\rightarrow u = -u_1 \sin \alpha x \\ 0 \leq x \leq l_2 &\rightarrow u = -u_1 \frac{s_1}{s_2} \sin \alpha x \\ l_2 \leq x \leq l_2 + l_3 & \\ u &= -u_1 \left[\left(\frac{s_1}{s_2} \sin^2 \alpha l_2 + \frac{s_1}{s_3} \cos^2 \alpha l_2 \right) \sin \alpha x - \left(\frac{s_1}{s_2} - \frac{s_2}{s_3} \right) \sin \alpha l_2 \cdot \cos \alpha l_2 \cdot \cos \alpha x \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.2 RFID TAG 성형용 초음파용착 공구horn 설계

초음파 용착에 사용되는 horn의 재질은 금속부재의 재료와 horn의 무게에 따라 선택되어야 하며, 강도와 경도가 horn 재료 선택의 중요한 변수가 된다. 모재의 재질이 horn보다 경도가 강하게 되면 성형에 사용되는 horn도 같이 가공이 되기 때문에 모재의 재질보다 경도가 높은 재료를 선택하는 것이 바람직하다. horn은 수지를 용착 할 수 있는 진폭을 얻도록 진동을 증폭시키고, 진동자에서 발생한 진동에너지가 용재에 전달한다. 따라서 초음파 horn의 출력 단에서 horn의 입력 면과 출력면 사이의 거리가 파장의 1/2일 때 진동자 출력단의 진폭이 최대가 되고, horn의 길이도 반파장 길이가 된다. 초음파 공구horn의 주요 기능은 사용자가 가공에 필요한 수준의 진폭을 얻을 수 있도록 진동을 증폭하고 진동자에서 발생한 진동에너지가 용재에 전달하는 역할을 한다. 초음파 공구 horn은 최대 증폭된 진폭으로 미세패턴에 필요한 진동энер지를 전달하는 역할로 미세패턴 공구의 치수와 형상은 작업물의 크기와

형상에 의해 결정되며 진동 출력 면에서 우수한 성능과 효율적인 에너지 전달을 위해 더욱 정확하고 정밀한 설계가 요구된다. Fig.2는 초음파 미세패턴용 공구horn의 설계과정을 나타낸 것으로, 유한요소법을 바탕으로 설계가공한 용착 공구horn의 성능은 해석결과와 어느 정도 차이가 발생하기 때문에 정확하게 용착 공구 horn을 조정하기 위해 수정가공을 하고 성능을 평가하는 과정을 여러 번 반복한다. 초음파 용착 공구 horn은 통상 반파장의 공명체로 그 재질은 일반적으로 개념적으로는 공구horn에서도 파동의 전파로 이해하여 공구horn의 무게에 영향이 없는 것 같으나 무게가 무거운 경우에는 공구horn의 부피도 커지며, 이는 내부 파동 전파 손실이 커진다는 것을 의미한다. 또한 공구horn의 단면비가 줄어들지 않을 경우에는 이로 인하여 출력단의 진폭이 원하는 만큼 나오지 않는 경우가 많다.

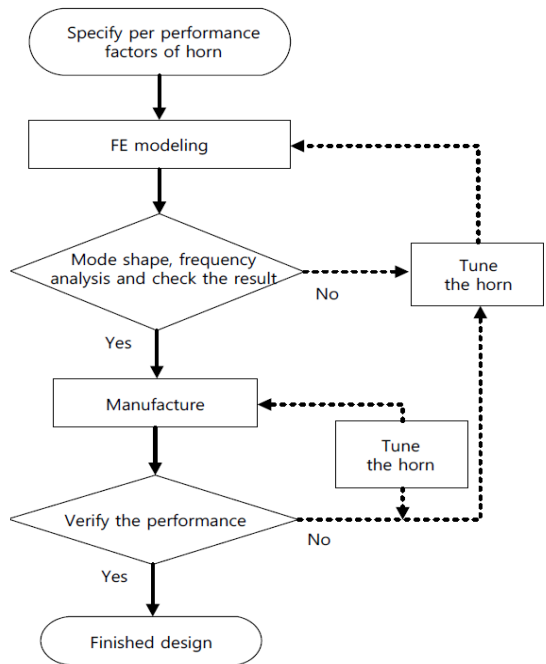


Fig. 2. Flowchart for the tool horn design

본 연구에서는 공구horn의 재료로 STD-11를 사용하였다. 그리고 편각코일 와이어를 용착하기 위해 가진 주파수를 60kHz 대역을 사용하였으며, 실험에 사용된 공구horn은 Table 1의 물성치를 나타내고 있다.

Table 1. The material properties of the tool horn

Material	STD-11 (60kHz)
Density(kg/m ³)	7,700
Modulus of Elasticity(GPa)	190
Poisson's Ratio	0.27

또한, 큰 진폭을 얻기 위해서는 강도가 강한 재료의 끝을 가늘게 만들어 이것을 진동자와 결합하고, 진동에너지를 소면적으로 집중시켜야 한다. 따라서 혼의 형상이 스텝 형일 때 출력 측에서 진폭확대율이 가장 크기 때문에 혼의 형상은 Fig. 3과 같이 설계하였다. 반파장 길이에서의 최대 진폭을 가지기 때문에 편각코일 와이어를 어느 위치에서도 일정하게 가압할 수 있도록 원형의 출력 단 모양으로 설계하였다. 혼의 직경은 압전소자(PZT)의 지름을 고려하여 60kHz 공구혼의 경우는 $\varnothing 15\text{mm}$ 로 설계하였다.

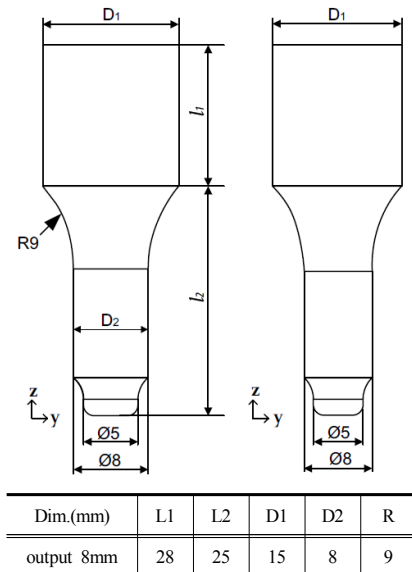
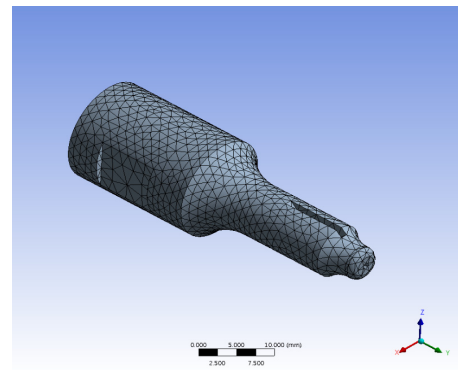
**Fig. 3.** Step horn design dimensions

Fig. 3에서와 같이 원통형 툴혼의 지름은 28mm이며 60kHz 공진의 길이의 경우도 공진 길이보다 조금 길게 56mm로 제작하여 종진동 모드를 발생시키는 최적의 초음파 공구혼의 설계치수를 Fig. 3에 제시하였다. 부스터와 체결되기 위해 혼의 시작부에 M6의 나사 부를 가지도록 설계되었으며, 혼의 출력 측의 팁은 혼의 전체 길이의 끝부분에 위치하게 하여 최대 진폭을 발생하도록 설계하였다. 1차원 파동방정식을 이용하여 계산된 혼의 형

상치수를 결정하였으며, 혼의 스텝 부분에서 발생하는 응력집중을 최소화시키기 위하여 R값을 9mm로 주었으며, 혼의 형상변수에 따라 혼의 고유진동수가 변화하므로, 가진 주파수인 60kHz의 고유진동수를 찾기 위해 모드해석을 하여 혼의 고유진동수와 진동모드를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

3. 초음파 용착 혼의 진동해석

본 연구에 사용된 액츄에이터 공구 혼은 원통형 스텝형 혼으로 공구혼 입력 단에는 압전 세라믹(PZT)을 적층시키고 볼트로 고정된 BLT(Bolt Langevin Transducer)를 사용하였다. 적층형 구조를 갖는 원통형 압전 액츄에이터에 공구 혼을 가진 할 때 가진 주파수는 액츄에이터의 길이방향 모드의 고유 진동수를 이용하게 된다. 이론적인 파동방정식을 통해 구한 공구혼 모델의 고유진동수인 60kHz를 판단하기 위해 설계된 스텝형 혼을



	60kHz
Nodes	22,309
Elements	12,767

Fig. 4. Horn for finite element analysis model

솔리드웍스에서 3D 모델링 한 후 상용 유한요소 해석 S/W인 ANSYS Workbench S/W를 사용하여 모드해석(Modal analysis)과 조화응답(Harmonic Response)해석을 하였다. Fig.4에 모드 해석을 수행하기 위한 스텝형 공구혼의 유한요소 해석모델을 도시하였고, 초음파 용착에 적합한 출력 단에서 진폭의 균일도와 증폭도가 일정하도록 하였다. 유한요소 모델은 해석의 신뢰도를 높이기 위해 3차원 사면체 요소(Tetrahedron element)를 사

용하였으며, 60kHz 유한요소로 생성된 모델을 Fig.4에 나타내었다. 경계조건은 공구흔이 진동자 및 증폭장치와 체결되어 있으나 체결된 부위에서 변위량(진폭)이 동일한 점을 고려하였으며, 초음파 용착에 사용되는 종진동 모드를 고려하여 Fig.5와 같이 X축 축방 향에 대하여 자유 상태(Free)로, Y축과 Z축 방향은 고정된(Fixed) 형태로 해석을 수행하여 가진 주파수가 각각 60kHz에 근접하고, 진폭이 최대가 되는 종진동 모드를 찾아 혼의 형상을 설계하도록 하였다.

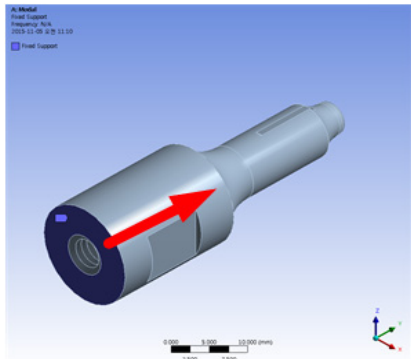


Fig. 5. Boundary conditions for modal analysis

Fig.6은 60kHz의 공구 혼에서 발생하는 다양한 진동 모드와 고유진동수를 가지는 혼의 모드 해석 결과이다. Table 2는 수치해석의 결과를 진동모드별 고유주파수를 결과이다.

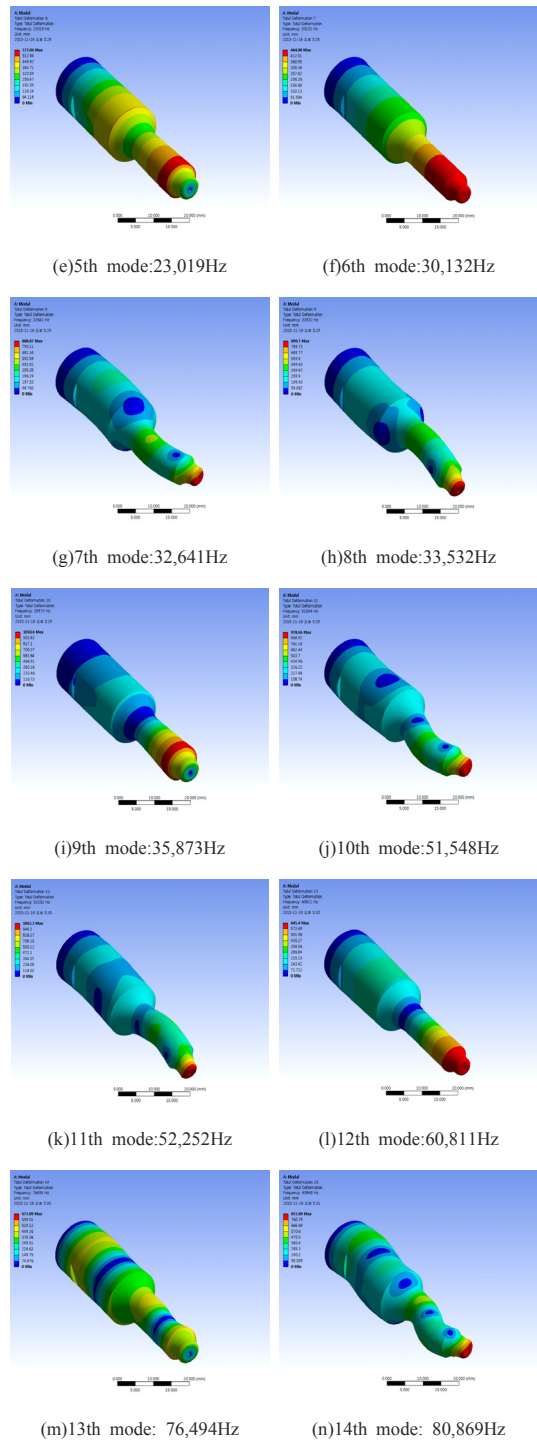
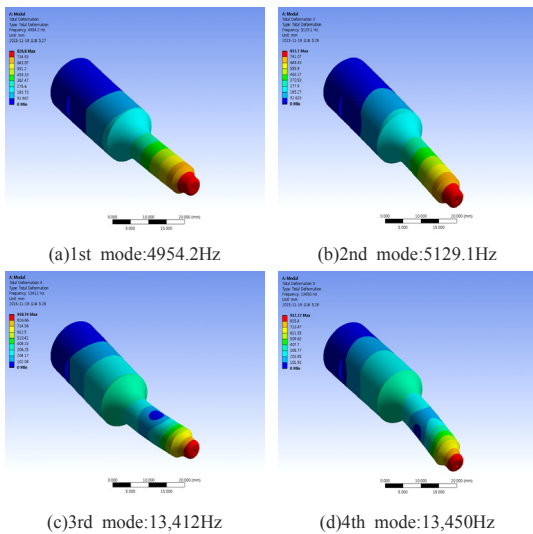


Fig. 6. Step horn vibration mode shapes (60kHz)

Table 2. Tool horn frequency and vibration mode

Mode	Horn	60kHz tool horn	vibration mode
1		4954.2	Longitudinal
2		5129.1	Longitudinal
3		13,412	Longitudinal+twist
4		13,450	Longitudinal+twist
5		23,019	transverse
6		30,132	Longitudinal
7		32,641	twist
8		33,532	twist
9		35,873	transverse
10		51,548	twist
11		52,252	twist
12		60,811	Longitudinal(4~5 μ m)
13		76,494	transverse
14		80,869	twist

모드 해석의 결과, Fig. 6와 같이 1, 2, 6, 12차 모드에서 종진동 모드가 발생하였고, 본 연구에서 초음파 진동을 이용한 미세패턴 성형을 위한 공구흔의 고유주파수가 60kHz이므로 12차 모드인 60,811Hz의 고유주파수가 나타나고 있음을 해석을 결과를 통하여 확인할 수 있다. 60,811Hz의 각각의 고유주파수가 발생하는 경우에 공구흔의 출력 단에서 최대 진폭이 나타나고 있음을 확인 할 수 있다. 최적 설계한 흔의 입력 면을 60kHz로 가진했을 때 출력 단 부분에서 진폭변화를 보기 위해 흔의 양끝면의 나사구멍에 실린더 구속을 지정하고, 진동에너지를 입력부에 흔의 입력 면에 전달되는 부스터 출력 면에 기계적인 힘을 설정하여 하모닉 해석을 하였다. Fig. 7은 진동해석으로 얻은 공구흔의 길이로 설계된 흔의 입력면에 가진 주파수인 60kHz의 주파수를 가진 하였을 때 출력면의 주파수 응답을 알아보기 위해 주파수 조화응답(Harmonic Response) 해석을 수행하여 나타낸 그래프이며, 이는 모달(Modal) 해석 결과와 동일하게 고유진동수 62,500Hz에서 초음파 용착에 필요한 공구흔 출력단에서 최대 진폭을 나타나고 있음을 보여준다. 조화응답 해석 결과 가진주파수가 60kHz라고 해서 공구흔의 출력단에 60kHz가 나와야하는 것은 아니다. 진동자의 파워앰프에서 일정 영역내에서는 공진이 되게 되어 있어 앰프자체에서도 가진주파수를 가변 할 수 있게 되어 있다.

조화응답(Harmonic Response) 해석을 통해 나타난 주파수와 진폭결과 역시 60kHz 부근에서 초음파 가진에 따른 RAID TAG 미세패턴이 이루어지는 공구흔의 출력단 가장 큰 진폭의 변화를 보이면 진동함을 확인하였다.

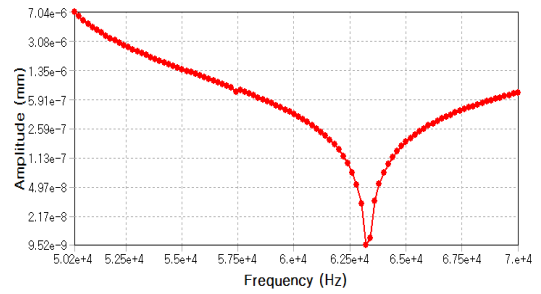


Fig. 7. 60kHz tool horn harmonic vibration response curve

3. 결론

본 논문에서는 초음파 종진동 모드를 이용한 RFID TAG의 초음파 미세패턴 성형을 위한 기초 연구를 수행하였으며, 특히 가공에 필요한 진동특성 구현을 위한 초음파 공구흔의 설계에 관해 연구하였다. 초음파 공구흔의 파동방정식인 이론적인 접근방법과 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS S/W를 이용한 진동 모달 해석을 병행하여 초음파 진동을 이용한 용착에 필요한 공진주파수인 60kHz와 공구흔의 출력단에 최대 진폭이 발생시킬 수 있는 스텝형 공구흔의 형상설계에 관한 연구를 수행하였다. 이론적 파동방정식을 통해 흔의 직경은 압전소자(PZT)의 지름을 고려하여 60kHz 공구흔의 경우는 \varnothing 15mm로 설계하였다. Fig. 3에서와 같이 원통형 툴흔의 지름은 28mm이며 60kHz 공진의 길이의 경우도 공진 길이보다 조금 길게 56mm로 제작하여 종진동 모드를 발생시키는 최적의 초음파 공구흔의 설계치수를 제시하였다. 수치해석 방법을 이용한 공진설계기법으로 개발된 60kHz의 종진동모드를 이용한 공구흔의 출력단 부분에서 형성되는 4~5 μ m 진폭의 초음파 마찰열은 절연 시트지와 접촉면에서 진폭과 같은 가압 깊이에 이르러 용착이 가능한 정상상태의 온도에 도달함을 알 수 있었다. 상기 연구결과를 토대로 향후 초음파 미세패턴 성형을 위한 공구흔의 형상설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] D. W. Engels and S. E. Sarma, "The Reader Collision Problem", *IEEE International Conference on Systems*,

Man and Cybernetics, vol. 3, no. 6, October, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1176117>

- [2] K. Finkenzeller. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. John Wiley and Sons, 2nd edition, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470868023>
- [3] H. D. Foltz, J. S. McLean, G. Crook, "Diskloaded Monopoles with Parallel Strip Elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 1894-1896. Dec., 1998. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/8.743844>
- [4] J. A. Dobbins, R. L. Rogers, "Folded conical helix antenna, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 1777-1781, DEC., 2001. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.982460>
- [5] K. K. Paek, B. K. Ju, "Market and Technology Trends in RFID, Polymer science and technology", vol. 17, no. 1, pp. 25, Feb., 2006.
- [6] Huault, G., "How Did They Do That? Play Tag With RFID Manufacturers, Retailers, Shipping Companies, and even Government Officials are Either using or Implementing The use of RFID Tags to Better Identify, Track, and Manage Products. We show you how RFID tags work", *SMART COMPUTING*, vol. 15, no. 4, 2004.
- [7] Y. S. Seo, "A Study on Micro Structure Imprinting System using Ultrasonic Vibration Energy", Seoul National University of Science and technology. 2012.

김 강 은(Kang-Eun kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1998년 2월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

기계설계, 자동화, 소음진동

이 봉 구(Bong-Gu Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2003년 7월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2009년 3월 ~ 2012년 2월 : 대림대학교 기계설계 교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 교수

<관심분야>

초정밀 가공, CAD/CAM, 복합가공

최 성 주(Sung-Ju Choi)

[정회원]



- 1981년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

제조공정 자동화, Virtual Instrument 응용