

이론적 방법과 유한요소해석이 융합된 커팅용 공구 혼의 설계에 관한 연구

이한창, 정진혁, 박충우, 오명석, 박명규, 이봉구*, 김창환
영남이공대학교 기계공학과

A Study on the Design of Tool Horn for Cutting Converged with Theoretical Method and FEA

Han-Chang Lee, Jin-Hyuk Jeong, Chung-Woo Park, Myung-Seok Oh,
Myung-Kyu Park, Bong-Gu Lee*, Chang-Hwan Kim
Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University College

요 약 본 연구에서는 초음파 진동에너지가 융합된 커팅용 공구 혼 제작에 대한 기초 연구 자료를 제작하고자 이론적 방법과 유한요소해석을 병행하여 설계하였다. 고 성능의 초음파 절단을 진행하기 위해서는 횡진동이 아닌 종진동으로만 진동해야 하며, 기계적 진동에너지를 효율적으로 전달하기 위해 출력부에 최대진폭이 발생해야 한다. 따라서 공구 혼은 발전기의 가진 주파수와 공구 혼의 고유주파수가 동일하게 설계되어야만 한다. 공구 혼을 공진설계하기 위해서는 1차원 파동방정식을 이용한 이론적 접근법과, 유한요소 해석결과를 설계모델에 반영하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 최초로 공구 혼의 대략적인 치수를 1차원 파동방정식을 통해 결정하고, 유한요소 해석 결과를 바탕으로 최적 모델을 선정하여 공구 혼의 최종 형상에 반영하였다. 이와 같은 내용을 실제 커팅용 공구 혼의 기초자료로 활용하고자 하며, 추후 제작 및 실험 데이터를 본 연구내용과 비교할 예정이다.

주제어 : 1차원 파동방정식, 공구 혼, 공진설계, 유한요소해석, 융합, 절단

Abstract In this study, the theoretical method and the finite element analysis were designed in parallel to fabricate basic research data on the production of tool horn for cutting machine with ultrasonic vibration energy. In order to perform high-performance ultrasonic cutting, it is necessary to vibrate only with longitudinal vibration instead of transverse vibration. In order to efficiently transmit the mechanical vibration energy, the maximum amplitude should be generated at the output portion. Therefore, the tool horn must be designed so that the excitation frequency of the oscillator and the natural frequency of the tool horn are the same. In order to design the resonance of the tool horn, there are a theoretical approach using the one-dimensional wave equation and a method of reflecting the finite element analysis result to the design model. In this study, the approximate dimensions of the tool horn are first determined through the one- Based on the results of the finite element analysis, the optimal model was selected and reflected in the final shape of the tool horn. We will use this information as the basic data of actual tool horn for cutting, and will compare the production and experimental data with the contents of this research.

Key Words : Convergence, Cutting, Finite Element Analysis, Resonance Design, Tool Horn, Ultrasonic Vibration

*Corresponding Author : Bong-Gu Lee(positive@ync.ac.kr)

Received March 14, 2018

Accepted June 20, 2018

Revised April 13, 2018

Published June 28, 2018

1. 서론

최근 산업의 발달과 함께 금속, 고무, 플라스틱, 목재, 음식 등 다양한 소재의 가공기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 고무, 플라스틱과 같은 소재의 가공은 전통적인 절삭공구를 사용하여 칩을 발생시키는 범용절삭가공으로 가공하기 어려운 문제점이 있기 때문에 레이저 가공, 이온빔 가공, 방전가공, 화학적 가공 등의 다양한 특수가공법에 의존하고 있다[1,2]. 그러나 이와 같은 특수가공법들은 각 공정의 특성에 따라 모든 소재에 적용되지 못하며, 많은 비용과 고가의 장비가 필요하다는 문제점을 가지고 있는 실정이다. 이들 특수가공법 중 초음파 가공법은 레이저 가공, 화학적 가공과는 다르게 친환경 기술로서 인체에 무해하며, 전기 신호를 받아 진동자를 구동시키는 발진기와 진동을 발생시키는 진동자, 종진동 모드로 공진되는 공구 혼으로만 구성되는 까닭에 비용측면에서도 매우 우수한 가공법이며 용접, 커팅, 세정 등 산업 전반에 유용하게 활용될 수 있는 가공법이다[3,4].

초음파를 이용한 커팅은 식품, 섬유, 고무, 합성수지 등 광범위한 재료의 가공에 활용될 수 있다. Fig. 1은 초음파 커팅 장치의 개요도를 나타낸 것으로, 발진기에서 생성된 전기적 에너지가 진동자를 통하여 기계적 진동에너지로 변환된다. 변환된 진동에너지는 공구 혼에 전달되어 공진에 의한 증폭작용으로 초음파 가공에 필요한 진동에너지를 구현하게 된다. 그러나 진동자의 가진 주파수와 공구 혼의 공진주파수가 일치하지 않을 경우, 공구 혼의 출력단에 초음파 커팅에 필요한 진동 에너지가 잘 전달되지 않기 때문에 공구 혼에 대한 공진설계가 필요 요구 된다[5,6].

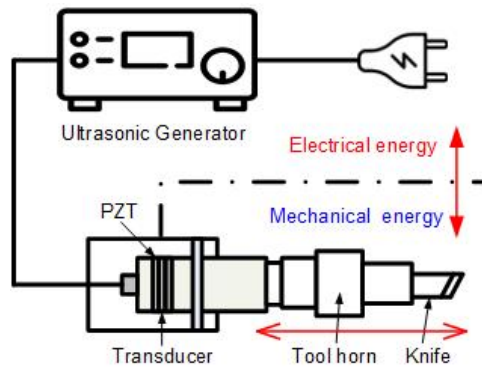


Fig. 1. Schematic of diagram ultrasonic system

따라서 본 연구에서는 40,000Hz 초음파 커팅기의 공구 혼을 40,000Hz의 주파수에서 공진하여 종진동 특성을 가질 수 있게 최적 형상설계 하였다.

2. 공구 혼 설계

2.1 스텝형 혼의 종진동

스텝형 혼의 일반적인 1차원파동방정식은 식 (1)과 같다.

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

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

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

스텝형 공구 혼의 경우 Fig. 2와 같이 입력 단 직경 (D_1), 출력 단 직경(D_2), 입력 단 길이(l_1), 출력 단 길이(l_2)의 4가지 설계변수에 따라 공진특성이 변화된다.

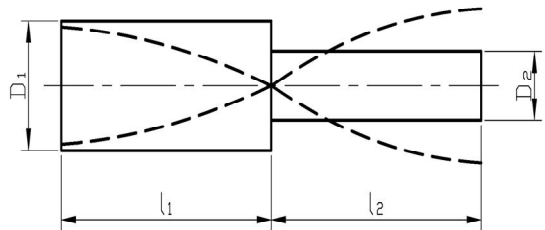


Fig. 2. Schematic of diagram ultrasonic system

공구 혼의 형상변화에 따른 진동 특성은 식 (3)과 같이 1차원 파동방정식을 통해 표현된다.

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

여기서, S : 봉의 단면적(mm²), u : 변위(mm)이다. 위의 파동방정식에 식 (2)를 대입하면 식 (4)과 같이 정리된다.

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

식 (4)형태의 방정식을 풀이하기 위해 변수분리법 $u(x, t) = F(x)G(t)$ 을 적용하였으며, 2개의 상미분 방정식 유도를 위해 좌변과 우변을 각각 x와 t에 대한 함수로 식 (5)와 같이 표현하였다.

$$\frac{\ddot{F}_x}{F_x} = \frac{\ddot{G}_1}{c^2 G_1} = -\alpha^2 \quad (5)$$

여기서 α 는 파동상수로서 식 (6)과 같이 표현된다.

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

단차에서 곡률을 무시하면 공구 혼의 양 끝단과 단차면에서의 경계조건은 식 (7)~(10)과 같다.

$$x = 0, \quad \partial u_1 / \partial x = 0 \quad (7)$$

$$x = l_1, \quad u_1 = u_2 \quad (8)$$

$$x = l_1, \quad S_1(\partial u_1 / \partial x) = S_2(\partial u_2 / \partial x) \quad (9)$$

$$x = l, \quad \partial u_2 / \partial x = 0 \quad (10)$$

위의 경계조건식을 식 (5)에 적용하면 공구 혼의 공진 조건은 식 (11)과 같이 유도된다.

$$-\frac{\tan \alpha l_1}{\tan \alpha l_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (11)$$

여기서 파동상수 α 는 본 연구에서 사용하는 진동자와 공구 혼의 재질을 통해 결정된다[7,8]. 따라서 공구 혼의 고유 진동수에 영향을 주는 변수를 입력단의 길이, 직경 그리고 출력단의 길이와 직경으로 구분할 수 있다. 이 중, 출력단의 직경은 공구 혼에 부착되는 칼날의 크기를 고려하여 설계하고, 입력단의 직경은 진동자의 크기에 맞게 설계하였다. 즉, 식 (1)을 통해 공구 혼의 총 길이를 계산하고, 식 (11)을 통해 세부 형상 치수를 결정하였다.

2.2 공구 혼의 재질

공구 혼은 통상 반과장의 공명체로서 일반적인 알루미늄(Aluminium) 합금이나 티타늄(Titanium) 합금이 사용되고 있다. 그중에서도 티타늄 합금(Ti6Al4V)은 음향학적 성질 및 강도적 성질이 우수하기 때문에 공구 혼에 가장 적합한 재질이다[9,10].

따라서 공구 혼의 재질을 티타늄 합금으로 하였으며, 그 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Mechanical property of Ti6Al14V

Mechanical property	Value
Material Density(kg/m ³)	4430
Elastic modulus(GPa)	113.85
Poisson's ratio	0.31
Hardness(HRB)	334

2.3 공구 혼 형상 모델링

Fig. 3는 커팅용 공구 혼의 3D 모델링 형상이며, Fig. 4는 2D 도면과 상세치수를 나타낸 것이다. 초음파를 인가하는 입력부의 형상 치수는 초음파 진동자의 직경과 같은 15mm로 고정하였으며, 출력 단은 가공물과 커팅날의 크기를 고려하여 직경 8mm로 결정하였다. 또한 초음파에 의한 진폭이 영(zero)이 되는 노드 지점에 하우징과 구속할 수 있는 플랜지를 설계하였고, 급격한 형상 변화에 의해 발생할 수 있는 응력 집중 현상을 방지하기 위해 Round값을 부여 하였다. 공구 혼의 전장 치수인 l 은 1차원 파동방정식을 통해 63.132mm로 계산되었으나, 가공의 편의를 위해 63mm로 결정하였다. 또한 식 (11)에 의해 계산된 입력단의 길이와 출력단의 길이는 플랜지의 두께인 1mm를 제외한 각각 31.066mm, 31.066mm로 계산되었으나, 가공의 편의를 위해 각각 31mm로 결정하였다.

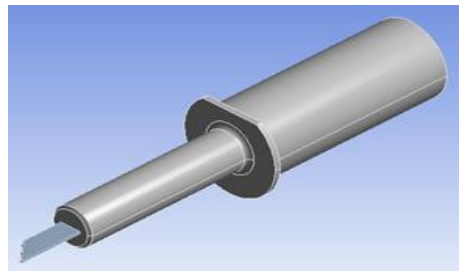
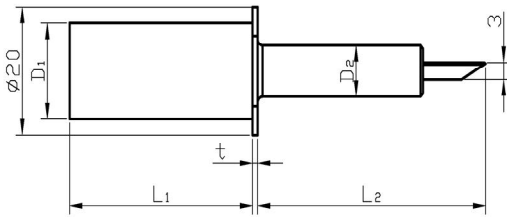


Fig. 3. Modeling of cutting horn



Parameter	L1	L2	D1	D2	t
Dimension (mm)	31	31	15	8	1

Fig. 4. Dimension of cutting horn

3. 유한요소해석

3.1 공진주파수 확인

1차원 파동방정식을 통해 얻어진 공구 혼 모델의 공진 주파수를 판단하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 진동 모달(Modal) 해석을 수행하였다[11].

해석의 경계조건은 공구 혼 모델을 3차원 육면체 요소(hexahedral element)를 사용한 정규격자로 구현하였으며, Elements는 3,176개이고, Nodes는 5,416개이다. 또한 Fig. 5와 같이 공구 혼의 입력 단에 변위 구속조건을 부여하였고, 축 방향(Z Axis)으로만 자유도를 구속하였다.

해석의 주파수 범위는 발전기의 가진 주파수인 40,000 Hz를 고려하여 30,000~50,000Hz로 설정하였으며, 모드 차수는 10개로 설정하여 범위 내에 발생하는 진동모드 중 연구에 필요한 진동모드만을 추출할 수 있도록 하였다 [12,13].

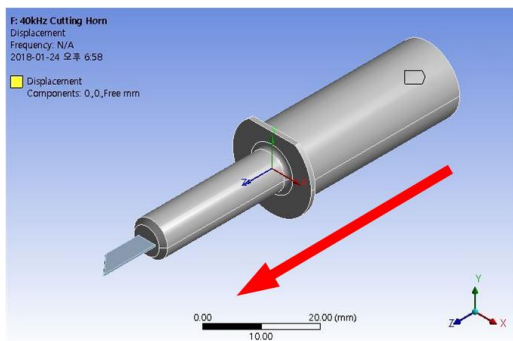


Fig. 5. Boundary conditions for modal analysis

Fig. 6은 해석결과를 보여주는데, 3차 모드에서 가진 주파수인 40,000Hz에 근접하는 38,707Hz의 공진주파수를 얻을 수 있었으며, 초음파 커팅에 필요한 종진동 모드 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 최초 설계 목표치인 40,000Hz와 1,293Hz의 차이를 보였다. 여기서 발생한 공진주파수 값의 오차는 단차부에 형성된 곡률, 공구 혼에 부착된 칼날, 노드 포인트에 형성된 플랜지와 같이 기본 공구 혼 형상에서 추가된 형상변화 요소로 인해 발생된 것으로 판단된다. 따라서 이론적 접근법으로 얻어진 공구 혼의 성능을 개선해야 한다.

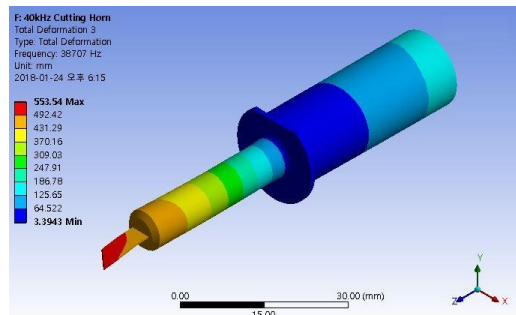


Fig. 6. Vibration mode shape for cutting horn

3.2 최적형상 도출을 위한 설계변경

설계변경에서는 최적 형상을 도출하기 위하여 입력단의 길이를 31mm로 고정된 상태에서 출력부 길이를 Fig. 7과 같이 형상변수 a로 설정하였다. 설계모델은 형상변수 a를 31mm에서 29mm까지 0.5mm 간격으로 변화시켜 가며 모달 해석을 진행하였고, 이중 최적모델을 선정하여 설계에 대입하였다. Table. 2는 각기 다른 공구 혼 모델에 따른 공진주파수와 진동 모드 특성을 나타낸 것으로, Fig. 8에 그래프로 정리하였다.

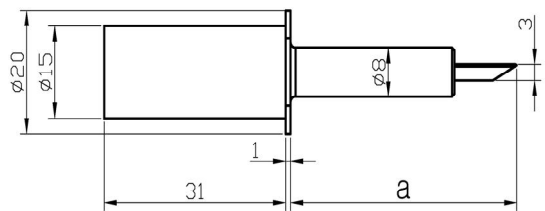


Fig. 7. Setting Dimensional Parameter (output length)

Table 2. Natural Frequency of horns

Mode	Frequency (Hz)				
	31.0mm	30.5mm	30.0mm	29.5mm	29.0mm
1	21,820	21,852	21,823	21,808	22,220
2	37,784	38,601	38,742	38,801	38,852
3	38,950	39,680	40,012	40,141	41,100
4	44,570	45,575	45,801	45,922	46,011
5	45,202	46,123	46,161	46,155	46,225

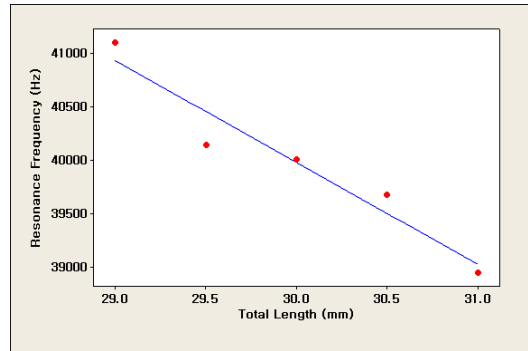


Fig. 9. Change of the natural frequency with an increase of cutting horn output length

$$f_r = -952.2a + 68543 \text{ (Hz)} \quad (12)$$

여기서 f_r 는 종진동 모드 (3차 모드)에 해당하는 공진주파수를 의미하여, 상기 회귀식에서 결정계수(R^2)값은 0.932로 계산되었다. 식 (12)를 이용하여 공진주파수 40,000Hz를 만족하는 공구 혼의 출력단 길이는 29.975mm로 계산되었다. 계산 결과를 바탕으로 공구 혼 출력단의 길이를 30mm로 결정하였다.

Fig. 10은 최종 설계된 모델의 진동 모달 해석 결과를 나타낸 것이다. 그 결과, 발진기의 가진 주파수인 40,000 Hz와 12Hz의 차이로 공진하며 종진동 모드(3차 모드) 특성을 띄는 것을 알 수 있었다.

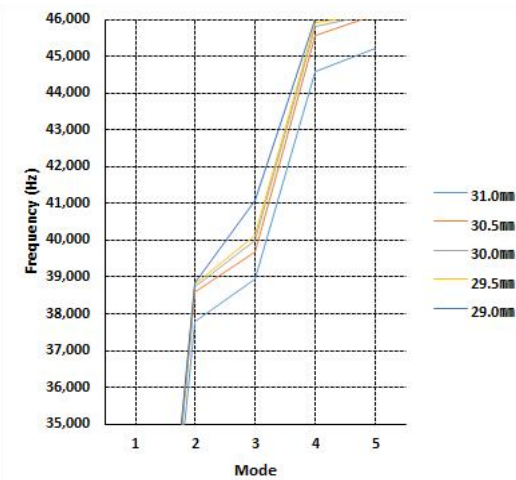


Fig. 8. A Graph of the horn's nature frequency

공구 혼 모델의 a 치수를 점차 줄여가며 해석한 결과, 출력 단 30mm 모델의 3차 진동 모드에서 공진주파수가 40,012Hz로 가진 주파수인 40,000Hz와 거의 일치하는 최적 형상임을 알 수 있으며, a치수의 변화에 따른 공구 혼의 질량, 즉 밀도의 변화로 공진주파수 값이 달라짐을 식 (2)를 통해 알 수 있다.

Fig. 9에 형상변수인 a의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 도시하였는데, a의 길이증가에 따라 공진주파수 값이 선형적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 9의 그래프를 기준으로 선형 회귀식을 계산하면 식 (12)와 같다. 이를 통해 공구 혼의 a치수와 공진주파수 간의 관계를 밝혀낼 수 있었다.

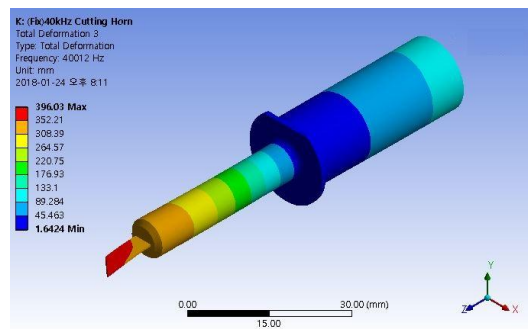


Fig. 10. Vibration mode shape for optimal cutting horn

또한, Fig. 11과 같이 최적설계 된 공구 혼에 대한 조화응답 해석을 실시하였다. 해석은 0Hz에서 70,000Hz까지 300간격으로 입력된 주파수를 초음파 커팅이 이루어지는

커팅 날 끝부분에서 진폭을 측정하였고, 그 결과 공진주파수 값과 근사한 40,000Hz에서 가장 큰 진폭의 변화를 관찰할 수 있었다[14,15].

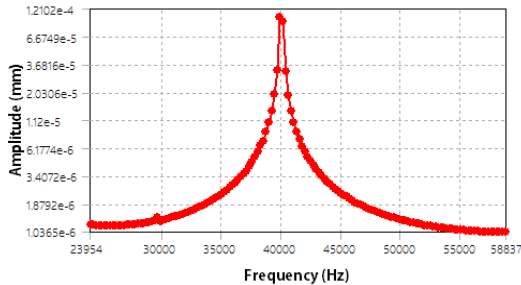


Fig. 11. Cutting horn harmonic vibration response

4. 결론

본 연구에서는 초음파 진동을 이용한 커팅기의 공구 혼 설계에 대한 기초연구를 수행하였으며, 특히 원하는 공진주파수 값을 구현하기 위해 유한요소 해석을 진행하였다.

- 1) 이론적인 접근방법과 유한요소 해석을 병행하여 초음파 발전기의 가진 주파수와 공진하는 초음파 공구 혼의 설계에 대한 연구를 수행하였다.
- 2) 1차원 파동방정식을 이용하여 공구 혼의 설계를 진행하였다. 이러한 공구 혼의 진동 모달 해석결과, 가진 주파수인 40,000Hz와 1,293Hz의 차이를 보이며 공진하는 것을 알 수 있었고, 이는 곡률, 플랜지 등 기존 스텝형 공구 혼의 형상과 다른 요소들이 추가되어 발생한 것이라 사료된다.
- 3) 공구 혼의 길이변화에 따른 진동 모달 해석을 실시하였고, 결과를 바탕으로 회귀분석을 진행하여 공구 혼의 길이 0.5mm증가 시 공진주파수가 476.1Hz 만큼 감소하는 것을 알아내었다.
- 4) 지정된 설계변수를 바탕으로 공구 혼의 설계를 진행하였을 때, 설계변수의 적정 값은 30mm이며, 최적 설계된 모델의 공진주파수는 40,012Hz로, 가진 주파수인 40,000Hz와 12Hz의 차이를 내며 공진하는 것을 알 수 있었다.
- 5) 최적설계 모델에 대해 조화응답 해석을 실시하였다. 그 결과 공진주파수 값과 근사한 40,000Hz에서

가장 큰 진폭의 변화를 관찰할 수 있었다.

연구결과를 향후 다양한 공구 혼의 제작에 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 추후 커팅용 혼의 실제 제작이 가능함을 알 수 있었다.

REFERENCES

- [1] B. G. Lee, K. L. Kim & K. E. Kim. (2008). Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM. *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 17(6), 63-70.
- [2] Y. S. Seo & K. Park. (2010). Design and Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for Direct Pattern Forming. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 609-610.
- [3] J. S. Seo, Y. J. Lee, J. W. Kim & D. S. Park. (2013). Design Improvement and Performance Evaluation of 20kHz Horn for Ultrasonic Cutting. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 12(5), 135-140.
- [4] J. S. Seo, Y. J. Lee, S. Y. Beak & D. S. Park. (2012). Prediction of Crack Initiation and Design of 40kHz Blade Horn for Ultrasonic Cutting. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21(5), 784-789.
- [5] W. Y. Park, H. S. Jang, J. H. Kim & D. S. Park. (2012). Design of Tool for Food Cutting with Ultrasonic Waves. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 11(3), 80-85.
- [6] J. S. Seo. (2009). Design for Optimal Horn using Analysis system of Ultrasonic vibration frequency. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 256-260.
- [7] Y. S. Seo & K. Park. (2011). Finite Element Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for Pattern Forming. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(3), 363-369.
- [8] K. H. Lee & B. M. Kim. (2010). Design and Manufacture of Ultrasonic Vibration Drawing Tool. *Transactions of Materials Processing*, 19(6), 363-371.
- [9] E. M. Kim, H. S. Jang, S. A. Kim, J. S. Seo & D. S. Park. (2010). A study on Vibration Analysis and shape design of Ultrasonic metal welding Tool Horn. *Society for Computational Design and Engineering*, 520-523.
- [10] H. C. Lee, et al. (2017). A Study on Resonance Design

Technique of Tool Horn for Ultrasonic Cutting Machine, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 225-227.

- [11] K. E. Kim, B. G. Lee & S. J. Choi. (2016). Modal Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for RFID TAG Micro-pattern Forming, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 17(12), 652-658.
- [12] K. W. Kang. (2014). Vibration Fatigue Analysis of Spot Welded Component considering Change of Stiffness due to Fatigue Damage, *Journal of the Korea Convergence Society*, 5(1), 1-8.
- [13] B. G. Lee, M. S. Oh & J. B. Ma. (2013). Design of Ultrasonic Tool Horn for Wire Wedge Bonding, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22(4), 717-722.
- [14] J. S. Seo, S. M. Jang & S. Y. Beck. (2012). One-wavelength Ultrasonic Horn Design for Ultrasonic Machining of Mobile Phone Battery Terminal Welding, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21(1), 70-75.
- [15] H. S. Jang, W. Y. Park & D. S. Park. (2011). Design and analysis of Ultrasonic metal welding tool horn, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 1232-1236.

이 한 창(Lee, Han Chang) [정회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계공학과(공학학사) 학생
- 관심분야 : 특수가공, 기계설계
- E-Mail : lhc517@ync.ac.kr

정 진 혁(Jeong, Jin Hyuk) [정회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계공학과(공학학사) 학생
- 관심분야 : CAD/CAM, CAE, 특수가공
- E-Mail : game4615@ync.ac.kr

박 충 우(Park, Chung Woo) [정회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계공학과(공학학사) 학생
- 관심분야 : 기계설계, 특수가공
- E-Mail : pcwool23@ync.ac.kr

오 명 석(Oh, Myung Seok) [정회원]



- 1984년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학석사)
- 2003년 2월 : 영남대학교 기계공학과(공학박사)
- 1985년 5월 ~ 1995년 2월 : 현대자동차(주) 제품개발연구소
- 1995년 2월 : 영남이공대학교 기계계열 교수
- 관심분야 : 정밀가공, 환경친화기계가공
- E-Mail : msoh@ync.ac.kr

박 명 규(Park, Myung Kyu) [정회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학박사)
- 1992년 12월 ~ 1996년 12월 : 한국원자력연구원 연구원
- 2004년 5월 ~ 2007년 3월 : 대구전략산업기획단 선임 연구원
- 2007년 4월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 교수
- 관심분야 : 산업기계, 탄소섬유복합재
- E-Mail : mkp@ync.ac.kr

이 봉 구(Lee, Bong Gu)

[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
- E-Mail : positive@ync.ac.kr

김 창 환(Kim, Chang Hwan)

[정회원]



- 2011년 2월 : 경북대학교 대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2014년 8월 : 경북대학교 대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2015년 3월 ~ 2017년 2월 : 부산과학기술대학교 기계계열 조교수
- 2017년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 조교수
- 관심분야 : 금형, 레이저 가공, Bio Optics
- E-Mail : chkim@ync.ac.kr