

◆ 특집 ◆ 차세대 하이브리드 연삭시스템 개발

하이브리드 연삭시스템 초음파 공구 개발

Development of Ultrasonic Grinding Wheel for Hybrid Grinding System

김경태¹, 홍윤혁², 박경희³, 이석우¹, 최헌중², 최영재^{2,✉}
Kyeong Tae Kim¹, Yun Hyuck Hong², Kyung Hee Park³, Seok Woo Lee¹,
Hon Zong Choi², and Young Jae Choi^{2,✉}

¹ 한국생산기술연구원 충청권지역본부 (Chungcheong Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology)

² 한국생산기술연구원 IT 융합공정연구그룹 (IT Converged Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

³ 한국생산기술연구원 미래생산시스템연구그룹 (Future Manufacturing System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: youngjae@kitech.re.kr, Tel: +82-31-8040-6165

Manuscript received: 2013.9.30 / Accepted: 2013.10.21

Ultrasonic grinding system is that the ultrasonic vibration by ultrasonic actuator is applied on conventional grinding system during grinding process. The Ultrasonic vibration with a frequency of over 20kHz can reduce grinding forces and increase surface quality, material removal rate (MRR) and grinding wheel life. In addition, ultrasonic vibration assisted grinding can be used for the materials that are difficult to cut. In this paper, methodology for ultrasonic tools is studied based on finite element method, and in turn the ultrasonic tools are designed and fabricated. It is found that the ultrasonic tool can vibrate with a frequency of 20kHz and amplitude of 25 μ m. In order to verify the machining performance, the grinding experiment is performed on titanium alloy. By applying ultrasonic vibration, the grinding force and temperature are reduced and MRR is increased compared with the conventional grinding.

Key Words: Ultrasonic Vibration (초음파 진동), Ultrasonic Grinding (초음파 연삭), Ultrasonic Actuator (초음파 진동자), horn (공구 혼), Grinding Wheel (연삭 공구)

1. 서론

연삭시스템은 제품 표면의 마무리 공정에 사용되어 제품의 품질을 결정하는 핵심공정이며, 과거의 평면, 원통, 내·외경, 기어·나사 가공 등을 위한 범용 연삭기에서 전용 연삭시스템으로 변화하고 있다. 그리고 전용 연삭시스템은 다양화에 맞추어 다품종 소량생산과 신뢰성 높은 제품을 생산하기 위하여 고능률화 되어 가고 있다. 하이브리드 연삭시스템은 이러한 수요자 맞춤형 요구를 충족하고, 의료분야, 정밀가공분야, 항공분야 등과 같은 첨단산업에 사용되는 세라믹, 티타늄, 유리

같은 난삭재의 정밀 가공이 가능한 시스템이라고 할 수 있다. 본 시스템은 기존 연삭시스템의 성능 및 가공 특성 향상을 위하여 연삭시스템의 기능을 복합화하고, 일반적인 연삭시스템에 초음파 기술을 적용하는 등 새로운 개념의 공정과 지능화를 구현하고 있다.

초음파 기술을 적용한 가공시스템은 독일, 일본 그리고 미국과 같은 해외 선진국을 중심으로 개발되어 상용되고 있다. 상용화된 가공시스템은 수직형 5축 가공기에 초음파 진동자를 장착할 수 있는 구조이다. 그리고 공구의 직경이 대부분 10 mm 이하로 제품화되고 있으며 최대 80 mm까지

상용화되어 있다. 직경이 10 mm 이하인 제품들은 진동자가 종진동 모드로 진동하면서 공구의 수직 방향으로 전달하는 진동에너지의 효율이 높다. 그러나 직경이 80 mm 이상이 되면 진동자의 종진동 모드 구현이 어려워진다. 따라서 초음파 공구는 공구의 길이 대비 직경이 작을수록 초음파 에너지 측면에서 유리한 특성이 있다.^{1,3}

초음파 가공을 위한 공구는 20 kHz 이상의 주파수를 공급해주는 초음파 진동자에 장착되어 진동자와 동일한 주파수로 공진 가능한 구조로 설계되어야 한다. 따라서 공구의 공진 설계 기법이 중요한 핵심 기술이며 이러한 기술은 선진국을 중심으로 1960년대부터 연구가 이루어져 왔다. 공구의 공진 설계는 일반적으로 초음파 진동의 1/2 파장을 이용하며, 관련 이론 식과 더불어 최근에는 FEM (Finite Element Method)을 이용한 진동해석을 병행하여 설계가 이루어지고 있다.^{4,5} Ensminger 등은 1/2 파장을 이용한 종 방향 진동의 초음파 혼 설계에 대한 이론을 제시하였다.⁶ Akbari는 유한요소 기법을 이용하여 다양한 형상의 초음파 혼에 대한 공진 설계를 수행하였으며 형상을 최적화 하였다.⁷ 국내에서도 많은 연구들이 수행되었으며 이봉구 등은 ANSYS 소프트웨어의 solid 186 요소를 사용하여 초음파 혼의 최적 설계를 수행하였다. 그리고 설계된 초음파 혼을 제작하여 레이저 진동계 및 임피던스 측정 시스템을 사용하여 제품의 주파수, 진폭을 측정하였다.⁸ 또한 미세 패턴, 폴리싱 그리고 절삭 가공 공정 등에 쓰이는 다양한 초음파 공구들에 대한 연구가 이루어지고 있다.^{9,11}

본 연구는 일반 연삭시스템에 초음파 가공이 가능하도록 공구를 설계하고 제작하여 초음파 연삭의 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 20 kHz 주파수에서 종진동 방향으로 진동하는 직경이 30 mm 이하의 소형 연삭 공구와 100 mm 이상의 대형 연삭 공구를 FEM 기법을 이용하여 공진 설계를 하였다. 그리고 이를 실제 제작하여 초음파 진동의 발진을 측정하고 검증하고자 하였다. 또한 제작된 공구를 사용하여 초음파 연삭을 수행하고, 연삭력, MRR, 가공 온도 변화 등 여러 가지 가공 특성들을 일반 연삭과 비교하고자 하였다.

2. 초음파 가공 공구 개요 및 설계 이론

초음파 가공에서 사용되는 공구는 다음 Fig. 1 과 같이 초음파 진동자, 부스터(Booster), 공구 혼

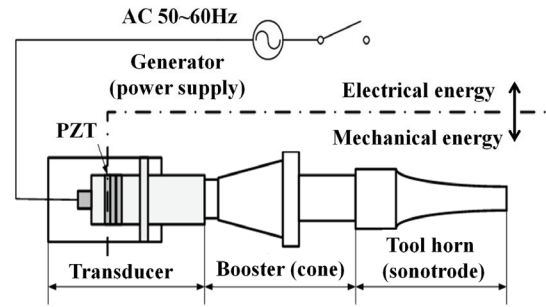


Fig. 1 Schematic of diagram ultrasonic tool assembly

(horn)으로 구성되어 있다. 이 중 초음파 진동자는 공구에 초음파 진동을 발생시키는 장치로써 전기 신호를 공급하면 진동이 발생하는 압전소자(PZT)를 적층시켜 볼트로 고정된 BLT (Bolt Langevin type Transducer)로 구성되어 있다. 압전 소자(PZT)를 적층시켜 볼트로 고정된 BLT는 볼트의 조임에 따라 가진 하는 주파수를 조정하며 본 연구에서는 20 kHz의 축 방향 종 진동을 발생시킬 수 있도록 하는 초음파 진동자를 사용하였다.⁸

초음파 진동자의 출력단에는 진동자와 같은 고유진동수를 가지는 부스터와 공구 혼을 부착하여 공진에 의해 초음파 가공에 필요한 진동 에너지를 얻는다. 초음파 공구 혼과 부스터는 초음파 진동 에너지가 들어오는 입력면과 출력면 사이의 거리가 초음파의 1/2 파장 혹은 두 배 파장에서 진폭이 최대가 된다. 따라서 종 진동 모드를 구현하는 경우 공구 혼 또는 부스터의 길이는 음파의 1/2 파장 길이를 예측하여 설계하는 것이 일반적이다. 초음파 진동자의 경우에는 압전 소자와 직접 고정되는 구조로써 혼 보다 짧은 1/4 파장을 계산하여 진폭이 최대가 되게 설계한다. 다음 제시된 식은 음파의 반 파장 길이가 적용되는 혼의 길이를 예측하는 식을 나타낸다. 여기서 c는 재질 내의 파동 전파 속도이며 f는 주파수를 의미한다.

$$\text{Horn Length of 1/2 Wavelength } \ell = \frac{1}{2} \times \frac{c}{f} \quad (1)$$

부스터와 혼의 내부에는 진폭이 0이 되는 노드가 존재한다. 노드 주변에는 최대응력이 발생하므로 노드 지점에서의 응력 분포에 주의해야 한다. 또한 초음파 공구 혼은 다양한 형태가 존재한다. 대표적인 혼의 형태로는 스텝 형, 카테노이달 형, 익스포넨셜 형, 코니컬 형 등이 있다. 혼의 형상에

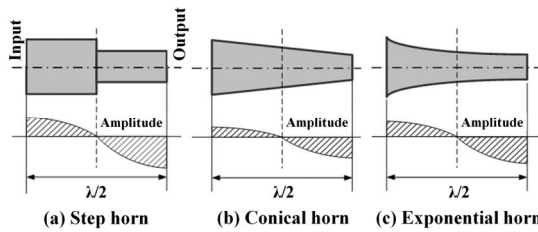


Fig. 2 Schematic of diagram ultrasonic horn and amplitude

따라서 각각의 진폭 확대율이 달라지게 되며 입력 단 대비 출력단 직경이 작고 형상이 단순할수록 진폭 확대율이 증가한다. 따라서 진폭 효율을 최대한 구현하기 위해서는 horn의 형상을 고려하여 설계하는 것이 중요하다. 위 Fig. 2는 초음파 공구의 진폭 분포와 대표적인 horn의 형상에 따른 진폭 분포를 나타내고 있다.⁸

3. 초음파 연삭 공구 설계 및 제작 검증

3.1 초음파 공구 horn 설계 제작

초음파 연삭 공구는 앞서 제시한 바와 같이 초음파 진동자에서 발생하는 진동 주파수와 일치하는 공진 주파수를 갖는 부스터, horn을 설계하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 식(1)을 바탕으로 20 kHz 주파수에서 중 진동이 발생하는 horn의 길이를 계산하였다. 이를 바탕으로 horn의 형상을 고려하여 3D 모델링을 수행하였다. 3D 모델을 이용하여 FEM의 Modal 해석을 수행하였고 그 결과 중진동 모드 주파수를 확인 및 최적 공진 상태를 선정하였다. horn의 재질은 스틸(S45C)로 선정하였다. 스틸 소재는 무게가 무거워 진동 에너지 손실이 있으나 연삭 입자 전착이 용이하기 때문에 선정하였다. 다음 Table 1은 설계 시 이용한 스틸 재질에 대한 물성치이다.

horn은 길이 방향의 빔(Beam) 형상의 구조를 가지고 있으므로 horn의 길이는 스틸 소재의 경우 식(1)에 의해 약 126 mm로 계산되었다. horn의 형상은 진폭을 고려하여 스텝형 형상과 익스포넨셜 형상이 혼합된 형태로 선정 하였다. horn에 대한 3D 모델 구성 후 스틸 소재로 FEM 해석을 수행하여 horn의 길이와 형상을 최적설계 하였다. 경계조건은 양단 자유 조건으로 하여 1차 중진동 모드가 20 kHz이고 출력단에서의 진폭의 비가 최대가 되도록 하였다. 해석 결과 각각의 horn은 모두 20 kHz의 주

Table 1 Mechanical properties of horn material

Material	Steel(S45C)
Density (g/cm ³)	7.85
Elastic Module (Gpa)	205
Poisson's ratio	0.29

Table 2 Ultrasonic horn design and performance evaluation

Diameter	Φ10	Φ20	Φ30
Horn length	130.8mm	130.5mm	128.2mm
Frequency	20.1kHz	20.2kHz	20.2kHz
Amplitude	20μm	13μm	5μm
FEM Simulation			
Prototype			

파수의 중 진동 모드를 갖는 것을 확인하였다.

설계가 완료된 horn의 성능을 평가하고 검증하기 위하여 실제 시제품을 제작하였다. 해석과 동일한 S45C 스틸 소재를 사용하였고 초음파 진동 주파수 측정과 진폭 측정을 통하여 성능평가를 실시하였다. 성능 평가는 비 접촉식 레이저 속도계와 오실로스코프를 이용하여 주파수와 진폭 측정을 수행하였다. Table 2에 FEM으로 설계, 제작된 horn과 성능평가 결과가 정리되어 있다.

3.2 초음파 진동자 설계 제작

설계, 제작한 초음파 공구 horn은 공진 모드가 길이방향의 지배를 받기 때문에 1/2 파장의 길이를 유지해야 한다. 공구 horn을 초음파 진동자와 부스터 구조에 체결하면 전체적인 공구의 길이가 길어지게 되어 연삭 가공 시 회전 정밀도가 낮고 공구 강성이 취약한 문제점이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1/4 파장 길이를 적용하는 초음파 진동자를 공구와 일체형으로 설계하였다. 1/4 파장 설계는 식 (2)와 같이 기존 1/2 파장 설계 시 도출된 horn의 길이의 반 정도의 길이를 갖게 된다.

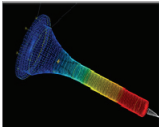

$$\text{Horn Length of 1/4 Wavelength } \ell = \frac{1}{4} \times \frac{c}{f} \quad (2)$$

horn의 재질은 티타늄(Ti6Al4V)을 사용하였다. 티타늄 소재는 가공이 어렵고 전착이 용이하지 않으

Table 3 Mechanical properties of actuator material

Material	Titanium(Ti6Al4V)
Density (g/cm ³)	4.43
Young's modulus (GPa)	113.85
Poisson's ratio	0.31

Table 4 Ultrasonic actuator design and performance evaluation

Diameter	Φ10	Horn length	130.8mm
Frequency	20.1kHz	Amplitude	25μm
FEM Simulation		Prototype	
			

나 혼의 강성을 유지하면서 무게가 가볍기 때문에 선정하였다. Table 3은 설계 시 이용한 스틸 재질에 대한 물성치이다.

식(2)에 의해 혼의 길이는 약 62mm로 계산되었다. 진동자의 형상은 익스포넨셜 형태를 적용한 원통 빔의 형태로 설계하였다. 압전소자가 체결되는 입력단 전체 면(Face)을 구속한 뒤 FEM 해석을 수행하여 진동자의 길이와 형상을 최적설계 하였다. 설계 완료 후 티타늄 소재를 이용하여 진동자를 제작하였다. 진동자의 압전소자는 직경 35mm 로써 총 4개를 적층 하였고 BLT 구조를 적용하였다. 제작품에 대하여 공구 혼과 같이 성능평가를 수행하였다. Table 4는 FEM 해석으로 설계, 제작된 초음파 진동자와 성능평가 결과가 정리되어 있다.

성능 평가 결과 진폭이 25 μm로 기존 초음파 혼에 비해 진폭의 크기가 향상되었다. 기존 초음파 혼의 경우 초음파 진동자에 체결되는 구조로써 체결 부위에서 진동 에너지 손실이 발생하게 된다. 그러나 본 제작품의 경우 초음파 진동자와 혼이 일체형으로 이루어져 있어 손실 없이 에너지가 보존 되므로 진폭 효율이 향상된 것으로 판단되었다. 또한 혼의 길이가 줄어들고 진동 효율이 증가함으로써 연삭 효율이 증가할 것으로 예상된다.

3.3 대형 초음파 혼 설계 제작

본 연구에서는 앞서 제시한 초음파 공구 외에 출력단의 직경이 100 mm 이상인 대형 초음파 혼에 대하여도 설계를 진행하였다. 중 방향 진동을 이용한 혼은 진동 모드가 길이방향의 지배를 받기

Table 5 Mechanical properties of large diameter horn material

Material	Aluminum
Density (g/cm ³)	2.7
Young's modulus (GPa)	71
Poisson's ratio	0.33

때문에 길이에 비해 출력단 직경이 커지게 되면 가진 효율이 줄어들게 된다. 또한 서론에서 언급한 해외의 사례에서도 최대 직경 80 mm의 혼을 사용하고 있으나 대형 공작물의 가공 효율을 높이기 위하여 직경이 큰 초음파 공구에 대한 관심이 늘어나고 있어 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 기존 초음파 공구의 출력단 직경을 200 mm로 설계하여 FEM 해석을 진행하였다. 또한 이를 제작하여 성능 평가를 수행하였다. 본 대형 초음파 혼은 스틸 혹은 티타늄으로 제작 시 무게에 의한 진동 에너지 손실이 발생하므로 경량 소재인 알루미늄을 선정하였다. 알루미늄은 연삭 입자 전착이 어려우므로 혼의 선단 외경에 전착을 위해 스틸 소재의 링을 장착하였다. Table 5는 설계 시 고려한 소재의 물성치를 나타내고 있다.

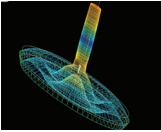
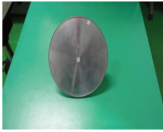
초음파 공구 혼은 출력단의 직경이 길이에 비해 크므로 1차 중 진동 모드에서는 20 kHz의 주파수를 구현할 수 없기에 2차 이상의 중 방향 진동 모드를 선정하여 진행되었다. 해석 경계 조건은 양단 자유 조건으로 FEM 혼의 길이 및 형상에 대한 최적 설계를 수행하였다.

시뮬레이션 결과 직경 200 mm 대형혼의 경우 3차 중 진동 모드에서 20 kHz를 구현할 수 있으며 이때 주파수는 20.866 kHz, 혼의 길이는 120 mm로 계산되었다. 또한 혼의 중앙 부분과 외경 부분의 진폭 비는 약 10~20%으로 계산되었다.

해석과 동일한 알루미늄 소재를 사용하여 혼을 제작하였고 혼의 중앙부분부터 실제 가공이 이루어지는 외경 부분까지 주파수와 진폭 측정을 수행하였다. 또한 시뮬레이션 결과에서 도출된 중앙 부분에서 바깥쪽 외경 부분까지의 진폭 비에 대한 분석이 이루어졌다.

혼의 성능 테스트 결과 측정 결과 FEM 해석 시 예측된 모드 주파수와 유사한 20.2 kHz에서 중 진동 3차 모드 발생하는 것으로 판단되며 중앙 대비 외경 방향의 진폭은 시뮬레이션과 유사하게 16%로 측정되었다. 다음 Table 6는 대형 초음파 혼에 대한 FEM 해석 결과 및 제작품과 성능평가 결과

Table 6 Large size ultrasonic horn design and performance evaluation

Diameter	Φ200	Horn length	120mm
Frequency	20.866kHz	Amplitude	0.5μm (Side point)
FEM Simulation		Prototype	
			

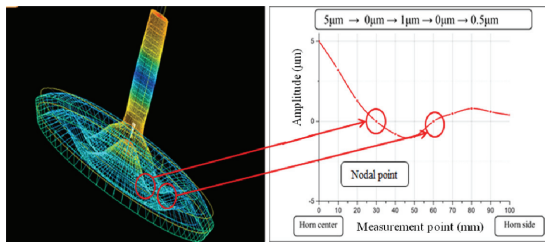


Fig. 3 Measurement point of large diameter horn and amplitude at measurement points

과가 정리되어 있다.

측정 결과를 바탕으로 혼의 중앙부분부터 외경까지의 진폭 비를 분석하였을 때 혼 중앙에서의 진폭이 약 5 μm이며 3차 중 진동 모드에서 생성되는 두 개의 노드 지점 (혼 중앙 30 mm, 60 mm 지점)에서 진폭이 0으로 측정되었고 혼 외경 부분에서 0.5 μm로 중앙에서 외경으로 갈수록 진폭이 감소하는 것을 확인하였다. 혼 외경의 진폭은 중앙 대비 10%의 크기를 갖는 것으로 측정되었으며 이는 시뮬레이션 결과와 일치하였다. Fig. 3은 측정 결과를 나타내고 있다.

그러나 대형 초음파 혼의 경우 출력단의 직경이 크기 때문에 실제 가공이 이루어지는 외경 부분에서의 진폭 효율이 낮다. 따라서 연삭 가공에 적용하기 어렵다. 이에 현재 혼의 진폭 효율을 높이는 개선 연구를 수행하고 있다.

혼의 진폭 효율을 향상시키기 위하여 대형 혼의 초음파 진동 모드를 종 방향 모드가 아닌 반경 방향 모드로 변경하고 혼의 형상을 링(ring) 형상으로 변경하였다. 이는 혼의 직경이 크기 때문에 종 방향에 비해 반경 방향 모드의 영향이 크므로 진폭 효율이 증가할 것으로 판단되었기 때문이다. 그리고 진동 에너지를 보다 효율적으로 전달하기 위하여 다수의 초음파 진동자를 사용할 수 있는

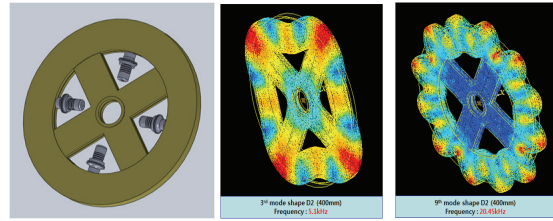


Fig. 4 Concept of redesigned large diameter horn and FEM simulation result

구조 설계를 진행하였다. Fig. 4는 현재 개선 작업이 진행 중에 있는 혼의 컨셉과 혼의 형상을 변경하였을 경우 발생하는 반경방향 모드에 대한 FEM 해석 결과이다.

본 개선 설계를 토대로 혼의 외경 진폭이 20 kHz 주파수에서 5 μm 이상 구현 가능하도록 초음파 공구 설계를 진행하였다. 이를 통해 향후 대형 공작물에 적용 가능한 초음파 공구를 개발할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

4. 초음파 공구를 이용한 연삭의 특성 분석

앞서 제작한 초음파 공구를 사용하여 초음파연삭 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 장비는 초음파 연삭 가공이 가능한 3축 CNC 가공 장비이고 톨 규격이 HSK-63이며 최대 10,000 RPM까지 회전 가능한 스피들이 장착되어 있다. 가공물은 난삭재인 Titanium (Ti6Al4V)을 사용하여 실험을 진행하였다. 공구는 직경이 10mm인 초음파 공구를 사용하였다. 앞에서 제작된 초음파 공구는 연삭 슛돌을 직접 적용하기 어려우므로 연삭 입자를 혼 출력단에 전착하여 연삭이 가능하도록 제작하였다. 연삭 입자는 Titanium 가공물의 연삭으로 적합한 CBN으로 선정하였다. 그리고 연삭 입자 크기는 60, 200, 325mesh로 선정하여 연삭 입자 크기에 따른 연삭력 비교 실험을 하였다. 가공 조건은 이송 속도와 공구 회전속도를 각각 20 mm/min와 4000 rpm으로 동일하게 하여 일반 연삭과 초음파 연삭을 병행하여 수행하였다. 초음파 연삭의 경우 공구 진동 조건은 주파수가 20 kHz에서 최대 진폭이 10 μm가 되도록 전용앰프를 설정하였다. 그리고 각각의 공정 수행 시 공구 동력계를 이용하여 가공 중에 발생하는 힘의 크기를 측정 비교하였다.

그 결과 제작한 초음파 공구를 사용하여 연삭을 수행할 경우 일반 연삭보다 연삭력이 감소하는

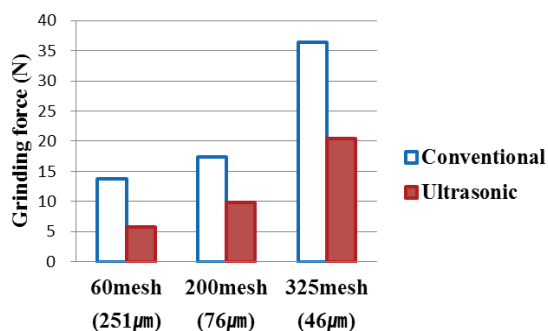


Fig. 5 Comparison of grinding force between conventional grinding and ultrasonic grinding at feed rate of 20mm/min and rotation speed of 4000rpm

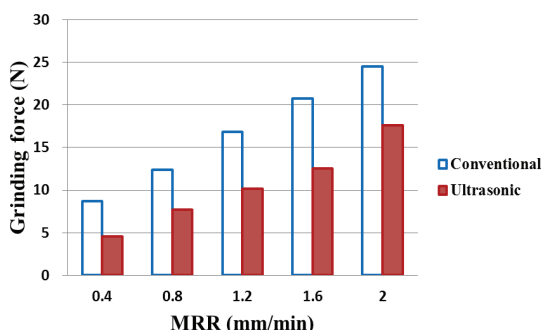


Fig. 6 Comparison of grinding force to MRR (the material removal rate)

것을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 일반 연삭과 초음파 연삭의 연삭력을 비교하기 위하여 동일 가공 조건에서 연삭 입자 크기에 따른 연삭력의 변화를 그래프로 정리한 것이다. 연삭력 변화 그래프는 일반 연삭에 비하여 초음파 연삭의 연삭력이 평균 약 48.4% 정도 감소하는 것을 보여주고 있다. 그리고 연삭 입자 크기가 커질수록 초음파 연삭의 연삭력 감소율이 커지는 것을 확인할 수 있었는데, 연삭 입자 크기가 80 mesh일 때 초음파 연삭의 연삭력이 57.7%로 가장 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 다음은 소재제거율에 따른 연삭력 변화를 비교하여 보았다. 그 결과 초음파 연삭은 동일한 소재제거율에서 일반 연삭보다 연삭력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6을 살펴보면 동일한 소재제거율에서 초음파 연삭이 일반 연삭에 비하여 평균 약 2배 정도 연삭력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 초음파 연삭을 할

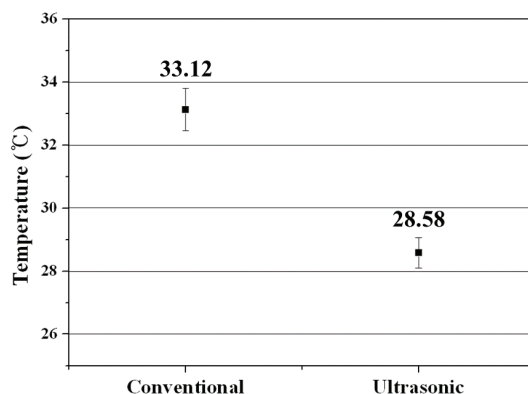


Fig. 7 Cutting temperature measured by thermocouple at rotation speed of 4000rpm and feed rate of 20mm/min

경우 일반 연삭보다 적은 가공 부하로 동일한 생산성을 기대할 수 있기 때문에 생산 효율이 최대 약 50% 향상될 것으로 기대된다.

이러한 초음파 연삭의 연삭력 감소 효과는 가공 부하를 줄여주기 때문에 공구의 마모가 감소되는 효과를 기대할 수 있다. 실제로 선행 연구된 논문을 보면 알루미나 소재를 다이아몬드로 전착된 공구로 마모 실험한 결과에서 일반 연삭보다 초음파 연삭의 공구 마모량이 감소하는 현상을 보여주고 있다.¹² 일반적으로 온도의 증가는 공구 소재의 경도를 크게 감소시키기 때문에 공구 마모를 촉진시키게 된다.¹³ Fig. 7은 일반 연삭과 초음파 연삭의 가공물 온도변화를 열화상 카메라로 측정된 결과이다. 측정은 동일한 가공 조건에서 5회 반복하여 측정하였다. 그 결과, 초음파 연삭이 일반 연삭 보다 온도가 평균 약 4.5°C 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 따라서 초음파 연삭을 할 경우 가공 중에 발생하는 온도가 감소하기 때문에 공구 마모가 감소할 것으로 기대할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 연삭 시스템의 가공 성능 향상을 위하여 공구에 초음파 진동을 적용하는 초음파 시스템에 대한 설계 기법, 공구 제작과 검증 그리고 초음파 연삭 가공 실험을 통한 초음파 효과 분석에 대한 연구 결과를 정리하였다.

앞서 제시한 연구 내용에 대한 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 초음파 진동을 적용한 공구 혼에 대한 초음파 설계를 관련 이론식과 FEM 해석을 통한 설계 기법을 제시하고 이를 적용하여 직경 10 mm, 20 mm, 30 mm, 200 mm, 300 mm의 다양한 혼을 설계 제작하였다
2. 제작된 초음파 공구 혼에 대하여 성능평가를 수행한 결과 직경 30 mm 이하의 공구에서 약 20 kHz 주파수에서 최대 20 μ m의 진폭이 발생하는 것을 확인하였으며 시뮬레이션 결과와 같이 1차 종진동 모드가 발생하는 것으로 판단하였다.
3. 또한 초음파 진동자를 공구 혼 일체형으로 하여 설계, 제작하였다. 공구의 길이를 절반으로 줄이면서 동일한 초음파 성능을 낼 수 있는 1/4 파장 설계 기법을 적용하였고 20.8 kHz 주파수에서 최대 진폭 25 μ m의 성능을 확인하였다.
4. 출력단 직경 200 mm인 대형 초음파 혼의 설계, 제작 및 평가를 수행하였다. 평가 결과 종진동 2차 모드에서 약 20 kHz 주파수와 혼 중앙 5 μ m, 혼 외경 0.5 μ m의 진폭이 측정되었다. 대형 초음파 공구에 종진동 모드를 이용하여 가진 가능하도록 설계 제작한 점에서 의미가 있는 것으로 판단되었다.
5. 제작된 초음파 공구를 이용하여 연삭 입자 크기별로 연삭력 분석을 수행하였다. 그 결과 연삭력이 평균 약 48.4% 감소하는 것을 확인하였고, 연삭 입자 크기가 가장 큰 80 mesh일 때 최대 57.7% 까지 감소하는 것을 확인하였다. 그리고 초음파 가공을 수행하면 동일 MRR에서 연삭력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 일반 연삭 가공 대비 초음파 연삭 가공의 생산 효율이 최대 50% 향상될 것으로 예상된다. 온도 측면에서도 초음파 연삭 가공이 평균 약 4.5 $^{\circ}$ C 정도 온도가 감소하는 것을 확인하였고 이를 통하여 공구 마모가 감소될 것으로 기대된다.

그러나 초음파를 적용한 공구는 연삭 입자 마모 시 드레싱이 불가하여 공구 전체를 교환해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 현재 연삭 입자 전착 부위에 대한 교체가 가능한 공구 교환 방식의 분리형 혼을 개발 중에 있다. 또한 직경 100 mm 이상의 혼에 대하여도 진폭 효율을 개선할 수 있는 새로운 모델을 설계 중에 있으며 제작 후 테스트를 통하여 향후 적용 가능하도록 연구를 진행 중에 있다

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업원천기술개발사업의 “차세대 하이브리드 연삭시스템 개발” 과제로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. DMG MORI SEIKI, “ULTRASONIC/LASERTEC,” <http://www.dmgmoriseiki.com>
2. ORII & MEC, “ULTRASONIC EQUIPMENT,” <http://www.oriimec.co.jp>
3. SONIC MILL, “MACHINE SALES,” <http://www.sonicmill.com>
4. Amin, S. G., Ahmed, M. H. M., and Youssef, H. A., “Computer-aided Design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining using Finite-Element Analysis,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, No. 3-4, pp. 254-260, 1995.
5. Lee, B. G., Kim K. L., and Kim K. E., “Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM,” *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 63-70, 2008.
6. Ensminger, D., “Solid Cone in Longitudinal Half-Wave Resonance,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 32, No. 2, pp. 194-196, 1960.
7. Akbari, J., Borzoie, H., and Mamduhi, M. H., “Study on Ultrasonic Vibration Effects on Grinding Process of Alumina Ceramic (Al₂O₃),” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 41, pp. 785-789, 2008.
8. Lee, B. G., Kim, K. L., and Kim, K. E., “Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM,” *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 63-70, 2008.
9. Jung, W., Ra, J., and Park, K., “Design Optimization of Ultrasonic Horn for Micro-Pattern Replication,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 12, pp. 2195-2201, 2012
10. Park, B. G., Kim, S. C., Moon, H. H., Lee, C. H., and Kang, Y. S., “The Polishing Characteristics and Development of Ultrasonic Polishing System through Horn Analysis,” *Transactions of the Korean Society*

- of Machine Tool Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 53-60, 2004.
11. Kang, J. P., "A Study of the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 8, No. 3, pp. 55-63, 1991.
 12. Park, K. H., Kim, K. T., Hong, Y. H., Choi, H. Z., and Choi, Y. J., "Study on Effect of Ultrasonic Vibration in Machining of Alumina Ceramic," Key Engineering Materials, Vol. 516, pp. 311-316, 2012.
 13. Park, K. H. and Kwon, P., "Flank Wear of Multi-layer Coated Tool and Wear Prediction using Abrasive Wear Model," Proc. of ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2009.