

## 원추형 칼날을 활용한 초음파 절삭가공의 효율 개선

이정익\*, 강동성\*\*

\*교수, 인하공전, 기계공학부, 기계설계과

\*\*연구소장, (주)오엘테크

e-mail:jilee@inhac.ac.kr

## Improving Efficiency of Ultrasonic Cutting Processing Using Conical Blades

Jeong-Ick Lee\*, Dong-Sung Kang\*\*

\*Dept. of Mechanical Design, INHA Technical College

\*\*Oltech Company

### 요 약

여기에 요약을 작성한다. 본 연구는 투명 치아 교정기의 제작 공정에서 발생하는 절단 효율 저하 문제를 해결하기 위해 초음파 절삭 기술을 적용하고, 특히 원추형 칼날을 활용하여 절삭 품질과 효율을 개선하고자 하였다. 기존 공정은 수작업에 의존하여 품질 편차, 노동 강도, 공구 수명 단축 등의 문제가 발생하였다. 레이저 절단 기술도 시도되었으나 열영향부 발생, 유해 부산물 생성 등으로 한계가 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 초음파 진동(20~40kHz)을 이용한 무압 절단 방식을 도입하고, 실험계획법을 기반으로 최적 공정 조건을 확립하였다. 원추형 칼날을 적용한 초음파 절삭은 열 발생을 최소화하고 절삭면 품질을 향상시켰으며, 연속 가공에도 안정성을 확보하였다. 실험 결과, 기존 가위 절단 및 CO<sub>2</sub> 레이저 절단 대비 절삭 효율과 표면 품질이 우수하게 나타났으며, 자동화 공정 적용 가능성이 확인되었다. 본 연구는 투명 교정기 제조의 자동화·고효율화를 실현할 수 있는 핵심 기술로서 향후 치과 산업 및 정밀 가공 산업 전반으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 서론

어릴 치아 교정 기술은 심미성과 기능 개선을 동시에 추구하는 치료법으로 발전해 왔다. 특히 금속 브라켓을 이용한 전통적 교정 장치의 한계를 보완하기 위해 투명 교정 장치(clear aligners)가 급속히 확산되고 있다. 투명 교정기는 환자 맞춤형 제작을 통해 심미성과 편의성을 제공하나, 제조 공정에서 수작업 의존도가 높아 효율성이 떨어진다.

현재 제작 방식은 진공 성형 후 불필요한 부분을 절단·분리하는 과정에서 작업자가 가위를 사용한다. 이 과정에서 소재 손상, 불규칙한 절단면, 공구 고장 등의 문제가 빈번하다. 또한 환자 한 명당 수십 개의 교정기를 제작해야 하므로 노동력과 시간이 과도하게 소요된다. 따라서 자동화 기반의 절단 기술 도입이 시급하다.

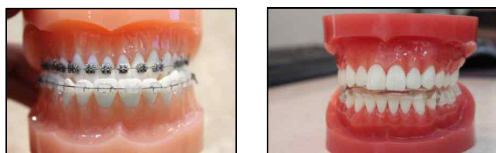
레이저 커팅은 대안으로 시도되었으나 고온에 따른 소재 변형, 유해 부산물 발생, 초기 투자 비용 부담으로 상용화에 어려움이 있었다. 이에 본 연구는 무압 절단이 가능하고 고정밀 가공에 적합한 초음파 절삭 기술에 주목하였다. 특히 원추형 칼날 구조를 활용해 기존 일자형 칼날의 한계(열 집중, 연속 가공 불가)를 극복하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 실험방법

본 연구에서는 초음파 커팅 시스템을 구축하고 공정 변수를 체계적으로 제어하여 절단 품질을 비교·분석하였다. 주요 공정 변수는 주파수(Hz), 진동 세기, 절삭 속도, 칼날 깊이 등이다. 실험계획법(Design of Experiments)을 적용하여 각 변수의 영향을 분석하고 최적 조건을 도출하였다.

비교 대상은 (a) 가위 절단, (b) CO<sub>2</sub> 레이저 절단, (c) 초음파 커팅(일자형 칼날), (d) 초음파 커팅(원추형 칼날)로 설정하였다.



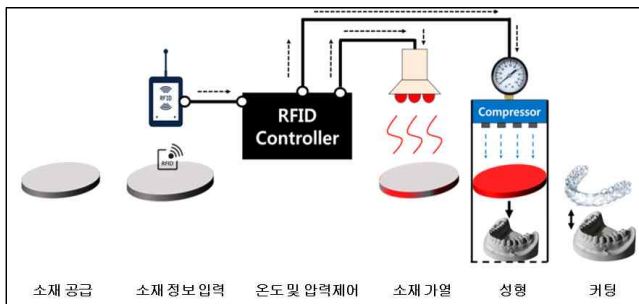
(a) 호선 방식 치아 교정기 (b) 투명 치아 교정기  
[그림 1] 치아 교정기 종류

[표 1] 초음파 절삭 실험의 주요 공정 변수

변수	범위	단위	비고
주파수	20-40	kHz	초음파 발생기
진동 세기	10-50	$\mu\text{m}$	칼날 진동 진폭
절삭 속도	5-50	mm/s	이송 속도
칼날 깊이	0.1-1.0	mm	투명 교정기 두께 기반

## 2.2 실험 결과 및 고찰

실험 결과, 가위 절단은 불규칙한 절단면과 높은 응력 집중으로 인한 소재 손상이 확인되었다. 레이저 절단은 정밀도는 우수하였으나 열영향부(HAZ) 형성과 유해 부산물 문제가 발생하였다. 초음파 커팅의 경우, 일자형 칼날은 일정 수준의 절단 품질을 확보했지만 열 집중으로 인해 폴리에틸렌 용융 현상이 나타났다. 반면 원추형 칼날은 열 발생을 효과적으로 억제하고 절삭면 품질을 크게 개선하였으며, 연속 작업 안정성이 뛰어났다.



[그림 2] 투명 교정 기기 제조 프로세스

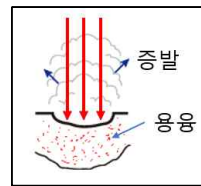
○ 초음파 커팅은 뼈, CFRP, 플라스틱, 식물, 식품 등을 절단하는데 이용되는 기술로 초음파 진동 블레이드가 약 20 ~ 40 KHz의 고주파 영역에서 진동을 하며 소재를 절단함. 이와 같은 고주파의 진동은 절단 표면의 마찰 저항을 줄여주는 효과를 발생시키며 블레이드의 절삭력을 증가시킨다.

○ 초음파 커팅은 소재 변형을 방지할 수 있는 무압 절단 기술임과 동시에 높은 절삭력을 바탕으로 고정밀, 고효율 가공이 가능한 커팅 기술임. 케익, 치즈와 같은 연성이 큰 식품 절단 시 높은 변형을 억제해 제품이 파손을 방지함. 인체 조직 절단 시 조직의 손상을 막기 위해 초음파 커팅 기술을 사용한다.

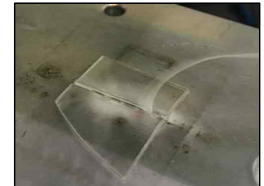
○ 기존의 투명 치아 교정 기기의 커팅은 초기 투자비용이 높아 국내 치공소에서는 대다수 수작업으로 이루어짐. 일부 레이저를 이용한 커팅이 연구되고 있으나 레이저 커팅 시 소재가 증발되어 인체에 해로운 부산물

을 발생시켜 교정 기기를 오염시킨다. 또한 레이저는 소재에 열영향부(Heat Affected Zone)를 발생시키고, 이는 시트의 기계적 물성을 변화시켜 원하는 교정력을 얻기 어려운 문제가 발생한다.

○ 투명 교정 기기 시트 커팅하는 방법으로는 수작업, 레이저 가공, 스핀들 가공이 있으나, 현재 국내에서는 수작업으로 작업이 진행되며 작업자에 따라 형태 및 크기가 달라져 품질의 문제가 있으며, 저가의 레이저 가공은 커팅 면의 품질이 저하되고 고가의 레이저는 초기 설치비용이 높은 문제가 발생한다.



(a) 소재의 거동



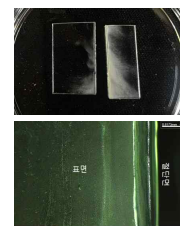
(b) 증기형태의 유해물질

[그림 3] 레이저 가공

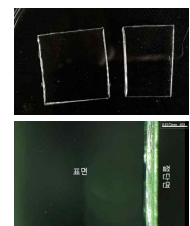
○ 본 연구에서는 투명 교정 기기 5축 커팅 시스템의 초음파 나이프를 사용해 절삭력을 극대화한 무압 절단 기술을 이용하여 폴리에틸렌 소재에 대한 초음파 커팅 공정 변수 최적화하는 방법에 대한 것으로 현재까지 국내외적으로 기술개발이 전무한 상태이다.

## 2.3 연구목표의 창의성·도전성

○ 레이저 커팅의 경우 레이저의 열적 영향에 의해 소재 절단면에 용융층이 두텁게 발생하며 증발된 증기가 소재 표면에 흡착되어 오염됨. 초음파 커팅의 경우 용융층이 얇고 표면이 매우 깔끔하게 절단된다.



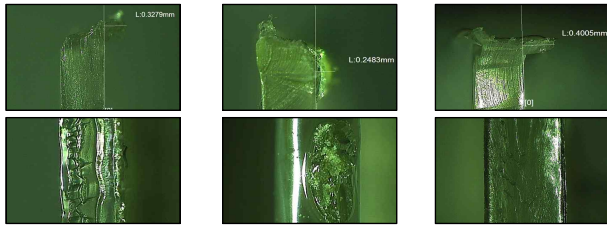
(a) CO2 레이저 커팅



(b) 초음파 커팅

[그림 4] 폴리에틸렌의 커팅

○ 초음파 커팅 시 초음파 나이프에 발생하는 열로 인해 폴리에틸렌 일부가 용융되는 현상 발생. 이는 초음파 모듈의 주파수(Hz) 및 파워, 가공 속도 등의 공정조건의 변경을 통해 문제점을 해결할 예정이다.



(a) 가위 (b) CO2 레이저 커팅 (c) 초음파 커팅

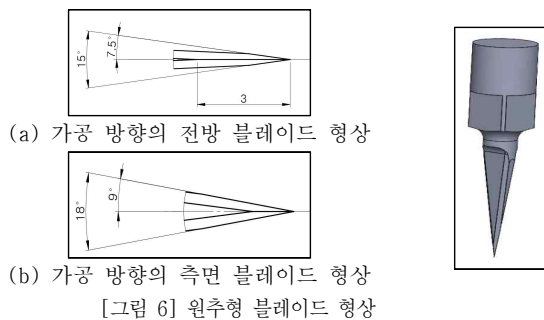
[그림 5] 폴리에틸렌의 커팅

○ 선행되어 있는 지식재산권 중 1건만 투명 교정 시트를 절단하는 방법으로 등록되어 있으며, 그 외의 특허는 투명 교정 시트 제조 공정 특허와 초음파 절단 기술, 레이저 절단 기술로 분석되었다.

○ 가장 핵심적인 특허인 투명교정 시트 레이저 절단 특허는 고가의 펄스 레이저를 사용하여 투명 교정 시트의 절단이 효율적으로 이루어지지만 레이저 모듈이 고가이며, 단일 재질에만 특화되어 있으며 폴리카보네이트 등의 재질을 적용할 경우 물성이 변하기 때문에 레이저 모듈을 변경해야하는 큰 문제점이 있다.

○ 초음파 커팅을 적용한 투명 교정 시트 제조 기술은 레이저 커팅의 유해성과 2차 후가공이 불필요하며, 수작업인 가위 작업보다 표면이 매끄러운 장점이 있다.

○ 본 연구의 차별성은 기존 초음파 커팅의 블레이드 형태는 일자 형태이며, 초음파 전달 시 블레이드 끝단에 고열이 발생하여 플라스틱 계열의 소재에는 연속 작업이 불가능한 상태였으나, 제안하고자 하는 블레이드는 원추형 형태로 초음파 전달 시 열 발생이 최소화되며 초음파 진동이 극대화 되어 커팅 표면이 우수하다.



(a) 가공 방향의 전방 블레이드 형상

(b) 가공 방향의 측면 블레이드 형상

[그림 6] 원추형 블레이드 형상

### 3. 결론 및 향후 연구

본 연구는 투명 교정기 제작 공정의 효율성을 개선하기 위해 원추형 칼날 기반 초음파 절삭 기술을 적용하였다. 실험을 통해 해당 기술이 기존 수작업 및 레이저 절단 공정 대비 절삭 효율, 절단면 품질, 자동화 가능성 측면에서 뛰어난 성과를 보임을 확인하였다. 따라서 향후 투명 교정기 제작의 완전 자동화 실현에 핵심

적인 기술로 평가된다.

향후 연구 과제는 다음과 같다:

1. 다양한 소재(PE, PETG 등)에 대한 반복 실험과 대규모 임상 적용 검증.
2. 5축 가공기와 연계된 초음파 스펜들 모듈 개발.
3. 공정 자동화 장비의 경제성 및 산업 현장 적용성 분석.
4. 치과 교정 외 의료·식품·정밀 가공 산업으로 기술 확장 가능성 검토.

이러한 후속 연구를 통해 초음파 기반 절삭 기술은 치과 산업의 생산성 혁신뿐 아니라 정밀 가공 전반에서 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] Mohamed, A. Equivalent circuits of solid horns undergoing longitudinal vibration. J. Acoust. Soc. Am, 38, 862-866. 1965년
- [2] 谷腰欣司, “초음파와 그 사용법”, 이종락 역, 도서출판 세화 pp.48-52, 1997년
- [3] 전재영, “PETG수지 상업화, NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS” 한국화학공학회, Vol. 20, No.5, pp.564-567, 2002년
- [4] Nad', M. Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies. 2010년
- [5] Sanda, A., Arriola, I., Navas, V. G., Bengoetxea, I., & Gonzalo, O. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti6Al4V. Journal of Manufacturing Processes, 22, 169-176. 2016년
- [6] Hye-Min Maeng, Han-Bit Choi, Dong-Wook Lim, Chan-Il Park, Dong-Seong. Optimization Experiment of Burr Height by Ultrasonic Cutting Machining. Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 30(4), 332-337. 2021년