

석사학위논문

CNC 가공 및 초음파 세척공정의
소음 주파수 특성과 노이즈 캔슬링
이어폰의 체감 차음효과에 관한 연구

2025년

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스템 공 학 과

산 업 위 생 공 학 전 공

지 준 용

석사학위논문
지도교수 김민구

CNC 가공 및 초음파 세척공정의
소음 주파수 특성과 노이즈 캔슬링
이어폰의 체감 차음효과에 관한 연구

A study on Noise Levels and Frequency
Characteristics of CNC Machining, Air Gun, and
Ultrasonic Cleaning Processes, and the Perceived
Attenuation Effect of Noise-Canceling Earphones

2024년 12월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

지 준 용

석사학위논문
지도교수 김민구

CNC 가공 및 초음파 세척공정의
소음 주파수 특성과 노이즈 캔슬링
이어폰의 체감 차음효과에 관한 연구

A study on Noise Levels and Frequency
Characteristics of CNC Machining, Air Gun, and
Ultrasonic Cleaning Processes, and the Perceived
Attenuation Effect of Noise-Canceling Earphones

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2024년 12월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스템 공 학 과

산 업 위 생 공 학 전 공

지 준 용

지준용의 공학 석사학위 논문을 인준함

2024년 12월 일

심사위원장 박 두 용 (인)

심 사 위 원 황 규 석 (인)

심 사 위 원 김 민 구 (인)

국 문 초 록

CNC 가공 및 초음파 세척공정의 소음 주파수 특성과 노이즈 캔슬링 이어폰의 체감 차음효과에 관한 연구

한 성 대 학 교 대 학 원
기 계 시 스템 공 학 과
산 업 위 생 공 학 전 공
지 준 용

본 연구는 CNC 가공 및 초음파 세척 공정에서 발생하는 소음에 대하여 소음원별 소음수준과 주파수 특성을 분석하였으며, 10명의 작업자를 대상으로 시판되는 노이즈 캔슬링 이어폰 2종과 귀마개 1종의 체감 차음효과를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

CNC 가공공정에서 측정한 CNC 기계의 공회전 소음은 79~80 dB, 연마작업이 이루어지는 동안 초음파 세척을 하는 작업은 83.5~88 dB 수준이었다. 소음원별로는 CNC 공회전 및 CNC 연마소음이 79~80 dB 수준으로 비슷했다. 한편 연마작업이 이루어지는 동안 직전에 연마된 제품을 고압공기 분사로 세척할 때 순간 소음이 최고 102 dB 정도 나타났다. 고압공기 분사세척 소음은 분사속도와 지속시간에 따라 변화가 컸다. 따라서 CNC 가공작업의 소음

(83~88 dB)은 대부분 고압공기 분사기의 소음으로 파악되었다. CNC 기계의 공회전과 연마소음의 주요 주파수 대역은 500~1 kHz로 75 dB 수준이었으며, 그 외의 주파수 대역에서는 63 dB이하로 전체 소음에 영향은 미미한 것으로 나타났다. 반면, 고압공기 분사 소음은 500 Hz에서 70 dB이었으나 주파수가 높아질수록 소음수준이 거의 직선상으로 증가하여 8 kHz에서는 92 dB, 12.5 kHz에서는 95 dB 수준인 것으로 나타났다.

초음파 세척공정의 소음수준은 80~93 dB로 변이가 컸다. 소음원별로 초음파 세척기는 80 dB 수준이었고, 고압공기 분사 세척소음이 최고 95~100 dB 수준인 것으로 나타났다. 즉 초음파 세척작업의 주요 소음원도 고압공기 분사기인 것으로 나타났다. 초음파 세척기 소음은 5 kHz까지 65 dB이하로 매우 낮았으며, 12.5 kHz 이상부터 소음수준이 증가하였지만 소음수준은 70~75 dB 수준으로 매우 낮은 수준이었다. 고압공기 분사 소음은 2 kHz부터 80 dB이상으로 나타났으며, 8 kHz에서는 85 dB, 12.5 kHz에서는 90 dB 수준으로 CNC 공정에서의 고압공기 분사소음과 비슷한 것으로 나타났다.

CNC 연마, 초음파 세척과 고압공기 분사 세척에서 노이즈캔슬링 기능 이어폰의 체감 차음효과 비교 결과 귀마개가 가장 우수한 것으로 나타났다. CNC 연마에서 상대점수는 귀마개 9.2점, 에어팟2 프로 8.0점, 버즈2 프로 7.4점이었으며, 초음파 세척 고압공기분사에서 상대점수는 귀마개 10점, 에어팟2 프로 6.4점, 버즈2 프로 7.0점이었다. 이것은 CNC 및 초음파 세척공정이 2 kHz이상의 고주파수 소음이기 때문인 것으로 보인다.

【주요어】 CNC 소음, 초음파 세척 소음, 연마소음, 주파수 특성, 노이즈 캔슬링 이어폰

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경 및 목적	1
제 2 장 연구방법	3
제 1 절 대상공정	3
제 2 절 소음원, 소음수준 및 주파수 측정방법	4
1) 소음 측정 장비	4
2) 소음원별 소음수준 추정	5
제 3 절 체감성능 평가 방법	6
1) 노이즈 캔슬링 이어폰 및 귀마개	6
2) 대상자 선정 및 실험방법	7
제 3 장 연구결과	8
제 1 절 CNC 가공 공정의 소음 수준	8
1) CNC 가공 공정	8
2) 초음파 세척 공정	9
3) CNC 가공 소음수준	11
4) 초음파 세척 소음 수준	15
제 2 절 CNC 가공 공정의 주파수 특성	17
1) CNC 가공	17
2) 초음파세척	18

제 3 절	소음원별 소음 및 주파수의 특성	20
1)	소음원별 고유 소음수준 및 주파수의 특성 파악	20
2)	CNC 가공의 주파수 특성	27
3)	초음파세척 작업의 소음 및 주파수 특성	30
4)	고압공기 분사 세척 작업의 소음 및 주파수 특성	33
제 4 절	귀마개 및 ANC(Active Noise Cancellation) 기능	
	이어폰의 체감성능평가	36
1)	CNC 연마에서의 체감성능평가	36
2)	초음파 세척, 고압공기분사기에서의 체감성능평가	49
제 4 장	결 론	63
참 고 문 헌	65
ABSTRACT	66

표 목 차

〈표 1〉 CNC 가공 및 초음파 세척 공정의 소음	4
〈표 2〉 실험대상 노이즈 캔슬링 이어폰	6
〈표 3〉 체감성능평가 실험의 이어폰 및 귀마개 착용 순서	7
〈표 4〉 CNC 가공 공정의 작업형태	10
〈표 5〉 CNC 가공 공정의 소음수준	12
〈표 6〉 CNC 가공 공정 소음수준 및 주파수 특성	19
〈표 7〉 고압공기 분사 세척 작업 소음 주파수별 소음수준	22
〈표 8〉 초음파세척 소음의 주파수별 소음수준	24
〈표 9〉 고압공기 분사 세척 소음의 주파수별 소음수준	26
〈표 10〉 CNC 연마 작업의 주파수별 소음수준	28
〈표 11〉 초음파세척 작업의 주파수별 소음수준	31
〈표 12〉 고압공기 분사 세척 작업의 주파수별 소음수준	34
〈표 13〉 귀마개 밀착도 검사 실시 결과	36
〈표 14〉 CNC 연마에서 실험자 ①의 장비 체감성능평가	39
〈표 15〉 CNC 연마에서 실험자 ②의 장비 체감성능평가	39
〈표 16〉 CNC 연마에서 실험자 ③의 장비 체감성능평가	40
〈표 17〉 CNC 연마에서 실험자 ④의 장비 체감성능평가	40
〈표 18〉 CNC 연마에서 실험자 ⑤의 장비 체감성능평가	41
〈표 19〉 CNC 연마에서 실험자 ⑥의 장비 체감성능평가	41
〈표 20〉 CNC 연마에서 실험자 ⑦의 장비 체감성능평가	42
〈표 21〉 CNC 연마에서 실험자 ⑧의 장비 체감성능평가	42
〈표 22〉 CNC 연마에서 실험자 ⑨의 장비 체감성능평가	43
〈표 23〉 CNC 연마에서 실험자 ⑩의 장비 체감성능평가	43
〈표 24〉 CNC 연마에서 1회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	45
〈표 25〉 CNC 연마에서 2회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	45

〈표 26〉 CNC 연마에서 3회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	46
〈표 27〉 CNC 연마에서 4회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	46
〈표 28〉 CNC 연마에서 5회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	47
〈표 29〉 CNC 연마에서 6회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	47
〈표 30〉 CNC 연마에서 전체 실험자의 장비 체감성능평가	48
〈표 31〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ① 장비 체감성능평가	50
〈표 32〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ② 장비 체감성능평가	51
〈표 33〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ③ 장비 체감성능평가	51
〈표 34〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ④ 장비 체감성능평가	52
〈표 35〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑤ 장비 체감성능평가	52
〈표 36〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑥ 장비 체감성능평가	53
〈표 37〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑦ 장비 체감성능평가	53
〈표 38〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑧ 장비 체감성능평가	54
〈표 39〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑨ 장비 체감성능평가	54
〈표 40〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑩ 장비 체감성능평가	55
〈표 41〉 고압공기분사, 초음파세척 1회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	57
〈표 42〉 고압공기분사, 초음파세척 2회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	57
〈표 43〉 고압공기분사, 초음파세척 3회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	58
〈표 44〉 고압공기분사, 초음파세척 4회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	58
〈표 45〉 고압공기분사, 초음파세척 5회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	59

〈표 46〉 고압공기분사, 초음파세척 6회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가	59
〈표 47〉 고압공기분사, 초음파세척에서 전체 실험자의 장비 체감성능평가	60
〈표 48〉 CNC연마와 고압공기분사, 초음파세척 작업의 종합체감성능평가 비교	62

그림 목 차

[그림 1] CNC 공회전의 소음구간.	13
[그림 2] CNC 연마 작업의 소음구간.	14
[그림 3] 고압공기 분사 작업의 소음구간.	14
[그림 4] 초음파 세척 작업의 소음구간.	15
[그림 5] 고압공기 분사 세척 작업의 소음구간.	16
[그림 6] CNC 가공 소음의 주파수 특성 비교.	17
[그림 7] 초음파 세척 소음의 주파수 특성 비교.	18
[그림 8] 고압공기 분사 세척 소음의 주파수 특성.	21
[그림 9] 초음파 세척 소음의 주파수 특성.	23
[그림 10] 고압공기 분사 세척 소음의 주파수 특성.	25
[그림 11] CNC 가공 소음원의 주파수 특성.	29
[그림 12] 초음파세척 소음원의 주파수 특성.	32
[그림 13] 작업별 고압공기분사기의 주파수 특성.	35

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

산업현장에서의 소음은 작업자의 건강과 생산성에 큰 영향을 미치는 중요한 유해인자 중 하나이다. 높은 소음에 장시간 노출될 경우, 일시적 또는 영구적인 청력 손실, 스트레스, 직무 만족도 저하와 같은 부작용이 발생할 수 있다. 소음으로부터 작업자를 보호하기 위해서는 작업장의 소음원을 제거하거나 소음수준을 노출기준 이하로 낮추어야 한다. 그러나 현실적으로 높은 소음이 발생하는 소음원을 제거하거나, 발생하는 소음수준을 낮추는 것은 쉽지 않다. 이러한 이유로 많은 사업장에서 소음으로부터 작업자의 청력을 보호하기 위해 귀마개(Earplug)나 귀덮개(Earmuff)같은 청력보호구를 착용하도록 하고 있다. 가장 흔하게 사용하는 청력보호구인 귀마개는 매우 현실적인 방안이지만 귓구멍에 빈틈이 거의 없도록 밀착시켜 착용해야 하므로 통증 및 불편감 등의 부작용이 있을 수 있으며, 무엇보다도 모든 소리를 차단하므로 듣고 싶은 소리를 듣지 못한다는 단점도 있다.

소음은 대기압의 변화를 통해 에너지가 전달되는 현상이다. 따라서 이론적으로 소리에 의한 대기압의 변화와 정반대되는 압력을 생성하면 대기압의 증감이 서로 상쇄되어 소리가 사라진다. 이것이 능동소음상쇄(Active Noise Cancellation, ANC)방법이다. 최근 이러한 기능이 들어 있는 노이즈 캔슬링 이어폰이 시판되고 있다. 노이즈 캔슬링 이어폰은 듣고자 하는 음 이외의 외부소음은 능동소음상쇄 방식으로 제거한다.

한편 소음을 제어하기 위해서는 소음의 주파수 특성이 중요하다. 능동소음상쇄에서는 특히 정확한 주파수의 파악이 중요하다. 노이즈 캔슬링의 원리가 외부 소음의 주파수를 분석하여 그에 상응하는 주파수의 음을 생성하여 정확히 한 주기 늦게 내보냄으로써 소리의 압력을 상쇄하는 것이므로 노이즈 캔슬링 이어폰의 성능은 소음의 주파수에 따라 다르다. 주파수가 높은 소리는

파장이 짧아서 이를 상쇄시키기 위한 소리를 생성하여 내보내기 어렵고 정확한 주기를 조절하기도 어렵다. 따라서 일반적으로 노이즈 캔슬링 이어폰은 높은 주파수의 소음보다는 낮은 주파수의 소음을 상쇄하는 것이 쉽다. 특히 시중에 시판되는 노이즈 캔슬링 이어폰은 주로 생활소음을 상쇄하도록 설계되었을 것으로 추정된다. 산업현장에서의 소음은 대부분 고주파인 경우가 많다. 따라서 노이즈 캔슬링 이어폰의 소음감쇄 효과가 낮을 수 있다.

다만 고주파수 용으로 특화된 산업용 노이즈 캔슬링 이어폰이 개발되면 고주파수의 소음에도 효과를 발휘할 수 있을 것이다. 노이즈 캔슬링 이어폰이 귀마개와 같은 효과가 있다면 사용 편의성이나 유해한 소음은 차단하고 특정 원하는 소리를 들을 수 있도록 하는 등 다양한 응용이 가능할 것이다.

본 연구는 제조업의 소음 중에서 전형적인 고주파수 소음인 고압 압축공기 분사 소음과 초음파 세척 소음이 있는 CNC 가공 공정에서 소음수준 및 주파수 특성을 분석하고, 이 공정에서의 작업자들을 대상으로 노이즈 캔슬링 이어폰의 체감성능을 평가하도록 하여, 향후 관련 연구에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

제 2 장 연구방법

제 1 절 대상공정

본 연구는 경기도 이천시에 소재한 반도체 장비부품을 가공하는 사업장의 CNC(Computer Numerical Control) 가공 공정과 초음파 세척 공정에서 발생하는 소음을 대상으로 하였다. 이 사업장에는 CNC 장비가 1.5~2m 간격으로 6대씩 5줄로 배치되어 있었다.

CNC 기계는 PROTH사의 PSRC-600S모델이며, 지름 30cm 원형 링 형태의 세라믹 제품을 연마하는데 사용하고 있었다. 세라믹 제품 1개를 연마하는데 걸리는 시간은 약 5~6분이었다. 세라믹 제품을 CNC 장비에 장착하고, 연마가 종료된 세라믹 제품을 꺼내고, 고압공기 분사기(Air gun)로 불순물을 제거하는 작업을 하고 있었다.

한편 초음파 세척은 연마 공정에 인접하여 설치된 초음파 세척기(신일초음파의 SG-D 모델)를 이용하여 연마된 세라믹 제품을 세척하고, 세척된 제품을 꺼낸 후에는 고압공기 분사기(Air gun)를 사용하여 세척 후 잔재물을 제거한다.

따라서 위의 공정에서 발생하는 소음은 CNC 기계의 공회전 소음, CNC 연마 소음, 고압공기 분사 소음 등이 있으며, 초음파 세척 공정에서는 초음파 세척 소음과 고압공기 분사 소음으로 나누어 볼 수 있다.

실제 현장에서 작업이 진행되는 동안에 발생하는 소음은 <표 1>에서 보는 바와 같다. CNC 가공 공정에서는 CNC 공회전 소음, CNC 연마 소음 그리고 CNC 공회전과 고압공기 분사가 합쳐진 소음이 발생하고 있었으며, 초음파 세척공정에서는 초음파 세척소음, 그리고 초음파 세척기의 공회전과 고압공기 분사가 합쳐진 소음이 발생하고 있었으므로 위의 5가지 소음을 측정하였다.

〈표 1〉 CNC 가공 및 초음파 세척 공정의 소음

작업	세부작업	소음원
CNC 가공	CNC 공회전	CNC 기계 가동음
	CNC 연마	CNC 기계 가동음 CNC 연마 소음
	고압공기 분사 세척	CNC 기계 가동음 고압공기 분사에 의한 소음
초음파세척	초음파 세척	초음파 세척음
	고압공기 분사 세척	CNC 연마 소음 고압공기 분사에 의한 소음

제 2 절 소음원, 소음수준 및 주파수 측정방법

1) 소음 측정 장비

소음측정에 사용한 장비는 CESVA의 SC-202제품으로 국제표준 IEC61672 (Class 2)와 미국 표준 ANSI S1.4431Type 2¹⁾에 해당하는 소음계이다. 소음의 측정 가능범위는 30.5 dB(A)~140.0dB(A)이며, 1/3 옥타브 밴드 주파수의 소음을 측정 할 수 있다. 측정 전 SVANTEK SV34 CALIBRATOR를 이용하여 교정을 실시하였다. 소음수준 및 주파수별 소음은 A특성, C특성, 1/3 옥타브 밴드별로 1초 마다 기록되었다.

소음원별 소음은 지시소음계를 소음원 방향으로 향하게 하고 삼각대를 이용하여 소음원 50 cm 이내로 설치하여 작업마다 10~13분 측정을 실시하였다. 지시소음계의 주파수 측정 범위는 25~20 kHz였다.

1) 음 측정 장치에 대한 전기음향 성능 규격

2) 소음원별 소음수준 추정

앞에서 설명한 바와 같이 현장에서 측정한 소음수준 및 주파수 특성은 다음과 같이 5가지였다.

- ① CNC 가공 공정에서의 CNC 공회전 소음
- ② CNC 가공 공정에서의 CNC 연마 소음
- ③ CNC 가공 공정에서의 고압공기 분사 세척 소음
- ④ 초음파 세척 공정에서의 초음파 세척 소음
- ⑤ 초음파 세척 공정에서의 고압공기 분사 소음

현장의 소음 측정결과에서 2개 이상의 소음원이 동시에 있는 경우, 다음과 같이 계산하여 각각의 소음원별 고유 소음수준과 주파수 특성을 파악하였다.

$$SPL_{Target} = 10 \log \left(10^{\frac{SPL_{Total}}{10}} - 10^{\frac{SPL_{Background}}{10}} \right) \quad [수식 1]$$

여기에서 SPL_{Target} : 특정 소음원의 소음수준

SPL_{Total} : 2개 이상의 합산 소음수준

$SPL_{Background}$: 배경이 되는 낮은 소음원의 소음수준

이와 같은 방법으로 CNC 가공 공정에서의 고압공기 분사 세척 소음, 초음파 세척 소음, 초음파 세척 공정에서의 고압공기 분사 세척 소음을 추정하였다.

제 3 절 체감성능 평가 방법

1) 노이즈 캔슬링 이어폰 및 귀마개

가) 노이즈 캔슬링 이어폰

본 연구에서는 연구의 대상 공정에서의 소음에 대하여 노이즈 캔슬링 이어폰의 차음효과에 대하여 알아보려고 하였다. 이를 위하여 시중에 널리 사용되고 있는 애플의 에어팟2 프로와 삼성전자의 버즈2 프로 등 2종의 노이즈 캔슬링 이어폰을 선정하였다.

위의 노이즈 캔슬링 이어폰을 선정한 이유는 2024년 2분기 무선이어폰의 시장점유율 1, 2위에 해당하는 제조사²⁾이며, 일상생활에서 가장 많은 사용이 있기 때문이다. 연구대상이 된 이어폰의 재원은 <표 2>와 같다.

<표 2> 실험대상 노이즈 캔슬링 이어폰

구분	이어폰 종류	
	에어팟2 프로	버즈2 프로
출시일	2022년 10월	2022년 8월
디자인 형태	커널형	커널형
마이크 갯수	유닛당 3개	유닛당 3개
크기	30.9 X 21.8 X 24mm	29.9 X 21.6 X 18.7mm
무게	5.4g	5.5g
기능	ANC (Active Noise Cancellation)	ANC (Active Noise Cancellation)

2) Canalsy, Worldwide TWS Shipments and growth Q2 2024.

나) 귀마개

노이즈 캔슬링 이어폰과의 차음효과를 상대적으로 비교하기 위한 귀마개는 3M사의 1100 폼타입 귀마개였다.

이 귀마개는 연구대상 사업장에서 사용하고 있던 것으로 작업자가 익숙하여 체감성능평가에 적합할 것으로 판단되었다.

2) 대상자 선정 및 실험방법

실험대상자는 CNC 가공 및 초음파 세척 공정의 작업자 중에서 특수건강진단 결과를 확인하여 소음 관련 질병의 유소견자나 요관찰자를 제외한 자 중에서 자발적 참여자 10명을 선정하였다.

체감성능(차음효과)은 2종의 노이즈 캔슬링 이어폰과 귀마개를 착용한 후, 실험대상자가 느끼는 차음효과를 상대적인 점수로 평가하도록 하였다.

체감성능평가를 위해 2가지 이어폰, 귀마개를 지급하여 각각 20~30분 내외로 착용하였다. 제품의 착용순서에 따라 체감성능평가가 달라 질 수 있으므로 각 실험 대상자마다 이어폰과 귀마개의 착용 순서를 변경하여 총 6회에 걸쳐 평가를 하였다. 장비의 착용 순서는 <표 3>과 같다.

2종의 이어폰과 귀마개를 차례로 착용 한 후 차음효과가 가장 높은 것을 10점 만점으로 하고, 나머지 2순위와 3순위의 제품에 대하여 상대적 점수를 부여하도록 하였다.

<표 3> 체감성능평가 실험의 이어폰 및 귀마개 착용 순서

구분	이어폰 및 귀마개 착용 순서
1회차	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개

제 3 장 연구결과

제 1 절 CNC 가공 공정의 소음 수준

1) CNC 가공 공정

본 연구 대상의 사업장은 금속제품 제조업으로 세라믹 제품의 표면을 가공하는 CNC 가공 공정과 가공 후 초음파 세척기를 이용한 세척 공정에서 발생하는 소음을 측정하였다. CNC 가공 공정은 크게 CNC 연마 작업과 연마 후 공기를 분사하여 가공된 제품에 부착된 불순물 등을 제거하는 고압공기 분사 세척 작업으로 <표 4>와 같이 구분된다.

가) CNC 연마 작업

CNC 연마 작업은 고속으로 회전하는 연마 휠로 세라믹 제품의 표면을 매끄럽게 가공하는 작업이다. CNC 가공 공정에는 30대의 CNC 기계가 1.5~2m 간격으로, 6대씩 5줄로 배치되어 있다. 가공 대상이 되는 세라믹 제품을 CNC 기계에 고정하면 내장된 프로그램에 의해 자동으로 표면이 연마되는 방식이다.

연마작업은 지름 30cm 원형 링 세라믹 제품을 CNC 기계에 장착 한 후, 프로그램을 셋팅하면 CNC 장비에 의하여 자동으로 가동된다. 따라서 작업자가 세라믹 제품을 CNC 기계에 장착한 후 CNC 기계의 슬라이딩 도어를 닫으면 CNC 기계에 의하여 자동으로 연마된다. 그동안 작업자는 그 다음에 연마 할 제품을 준비한다. 제품 1개당 연마시간은 약 2~3분 정도이다.

나) 고압공기 분사 세척 작업

CNC 연마가 끝난 제품은 고압공기 분사기(Air Gun)를 이용하여 불순물을 제거하는 세척작업을 한다. 고압공기 분사 세척작업은 연마가 완료된 제품에 가공유를 뿌려 불순물을 제거하고, 고압공기 분사기로 10~40초 동안 공기를 분사하여 CNC 기계 내부와 연마된 제품을 세척한다.

고압공기 분사 세척작업을 하는 동안 CNC 기계는 공회전 상태이다.

세라믹 제품을 고정하고 고압공기 분사기로 가공유를 제거하는 작업을 하나의 작업 사이클로 보았을 때 작업 당 5~6분이 소요되었다. 하나의 작업 사이클마다 고압공기분사기의 사용 횟수는 2~3회이며, 1회 당 10~40초 사용이 있었다.

2) 초음파 세척 공정

제품에 따라 세척을 위한 초음파 세척기를 사용하기도 하였다. 초음파 세척 작업<표 4>는 세라믹 제품을 세척조에 넣어 세척하는 작업과 세척된 세라믹 제품을 꺼내 고압공기분사기를 이용하여 표면 물기를 제거하는 작업이다.

가) 초음파 세척 작업

초음파세척 작업은 20k~40 kHz의 고주파를 사용하여 표면의 오염물질을 제거하는 세척 방식으로, 초음파 에너지가 물에 전달되며 미세 기포를 생성하고 기포가 터지며 세척효과를 내는 작업이다.

전원버튼을 눌러 초음파 세척기를 가동하고, 수조형식으로 된 세척기에 세라믹 제품을 넣고 30~60초 세척하고 제품을 꺼냈다.

나) 고압공기 분사 세척 작업

세척이 완료된 세라믹 제품을 수조에서 꺼낸 후 고압공기 분사기를 사용하여 10~40초 동안 물기를 제거하는 작업으로 1회 작업 시 6~10개의 제품을 세척하였다.

〈표 4〉 CNC 가공 공정의 작업형태

작업	작업구분	작업시간	작업내용
CNC 가공	CNC 연마	2~3분	CNC 기계에서 연마 휠을 이용하여 세라믹 제품의 표면을 연마하는 작업
	고압공기분사	10~40초	CNC 기계 내부와 제품의 불순물을 제거하기 위해 고압공기 분사기를 사용하는 작업 고압공기분사기 사용할 때 CNC 장비는 공회전 상태
초음파세척	초음파 세척	30~60초	세라믹 제품을 수조에 담가 세척하는 작업
	고압공기분사	10~40초	고압공기분사기를 이용하여 세라믹 제품에 물기를 제거하는 작업

3) CNC 가공 소음수준

30cm 원형 링 형태의 세라믹 제품을 장비에 장착하는 작업부터 연마 작업, 고압공기 분사기를 이용하여 장비와 제품에 불순물을 제거하는 작업까지 하나의 작업 사이클에서 발생하는 소음을 측정하기 위하여 10~13분 측정을 실시하였다. CNC 가공의 데이터는 4명의 작업자를 기준으로 동일한 지시소음계와 위치를 기준으로 측정을 하였다. 이 데이터를 ‘고압공기 분사 세척 작업’으로 분류하였다.

CNC 장비의 가동음을 측정하기 위해 모든 작업이 없는 휴식시간을 이용하여 CNC 장비의 가동음을 5~8분, 2회 측정하였다. 이 데이터를 ‘CNC 공회전 1~2’로 분류하였고 <표 5>와 같이 나타냈다.

소음수준을 분석하기 위해 CNC 가공의 측정데이터에서 각 작업의 데이터를 추출하여야 했다. 추출을 위해 먼저 측정된 데이터의 소음수준을 시간순으로 나타냈다. 소음수준을 시간순으로 나타낸 그래프에서 소음의 특성을 구분하여 데이터를 추출하였다. 추출한 데이터를 비교하기 위하여 현장에서 측정할 때 CNC 공회전, CNC 연마, 고압공기 분사 세척 작업의 타임라인을 작성한 자료를 활용하였다.

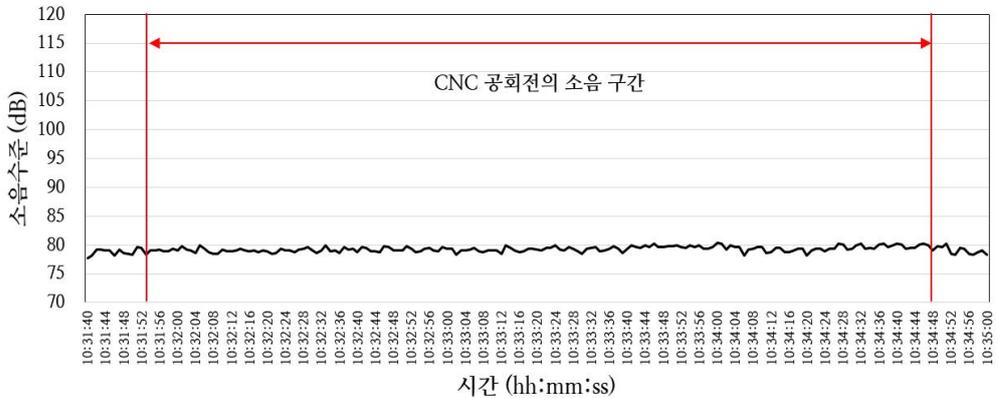
〈표 5〉 CNC 가공 공정의 소음수준

작업명	세부작업	반복	측정시간 (2024.11.26.)*	소음수준 (dB(A))	소음원
CNC 가공	CNC 공회전	1	10:30:37~10:35:00	79.1	
		2	10:35:26~10:43:37	79.6	
	CNC 연마 작업+ 고압공기 분사 세척 작업	1	09:34:19~09:45:10	83.5	CNC 기계 가동음
		2	09:46:19~09:59:27	83.0	CNC 연마 소음
		3	10:00:45~10:12:43	87.5	고압공기분사에 의한 소음
		4	10:13:12~10:23:32	86.6	
	초음파 세척 작업	1	10:25:25~10:30:28	80.0	
초음파 세척	초음파 세척 작업+ CNC 연마 작업+ 고압공기 분사 세척 작업	1	10:47:29~10:53:26	81.2	초음파 세척기 가동음
		2	10:58:03~10:59:12	83.6	고압공기분사에 의한 소음
		3	11:12:46~11:14:45	92.8	

*(2024.11.26.) 소음 측정 날짜

가) CNC 기계 공회전

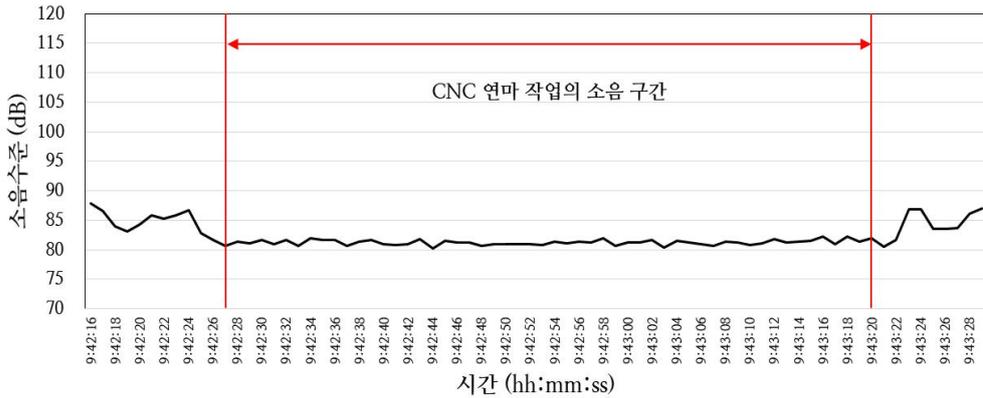
CNC 공회전[그림 1]의 소음수준은 ‘CNC 공회전 1~2’에서 데이터를 추출하였다. CNC 공회전의 최저 소음은 78.2 dB(A), 최고 소음은 80.4 dB(A), 소음수준은 79.2 dB(A) 이다.



[그림 1] CNC 공회전의 소음구간.

나) CNC 연마 작업

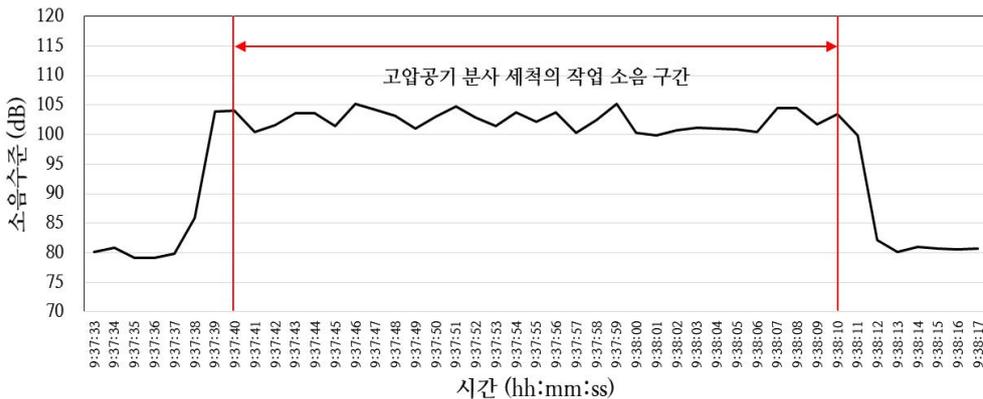
CNC 연마 작업[그림 2]의 소음수준은 ‘고압공기 분사 세척 작업’에서 데이터를 추출하였다. 연마를 할 때 소음특성은 일정한 소음수준으로 발생되었다. 소음수준을 시간순으로 나타낸 그래프에서 일정하게 발생하는 소음수준 시간의 데이터가 CNC 연마 작업의 소음일 것으로 판단하여 소음 데이터를 추출하였다. 추출 후 CNC 공회전의 소음과 혼동되지 않도록 작성된 타임라인을 비교하였다. CNC 연마 작업의 최저 소음은 78.5 dB(A), 최고 소음은 81.1 dB(A), 소음수준은 79.7 dB(A) 이다.



[그림 2] CNC 연마 작업의 소음구간.

다) 고압공기 분사 세척 작업

고압공기 분사 세척 작업[그림 3]의 소음수준은 ‘고압공기 분사 세척 작업’에서 데이터를 추출하였다. 고압공기 분사기의 소음은 연마, 공회전과 달리 순간적인 고소음의 소음수준이 발생된다. 소음수준이 높은 시간의 데이터가 고압공기 분사 세척 작업의 소음일 것으로 판단하여 데이터를 추출하였다. 고압공기 분사 세척작업의 최저 소음은 96.1 dB(A), 최고 소음은 102.7 dB(A), 소음수준은 99.7 dB(A) 이다.



[그림 3] 고압공기 분사 작업의 소음구간.

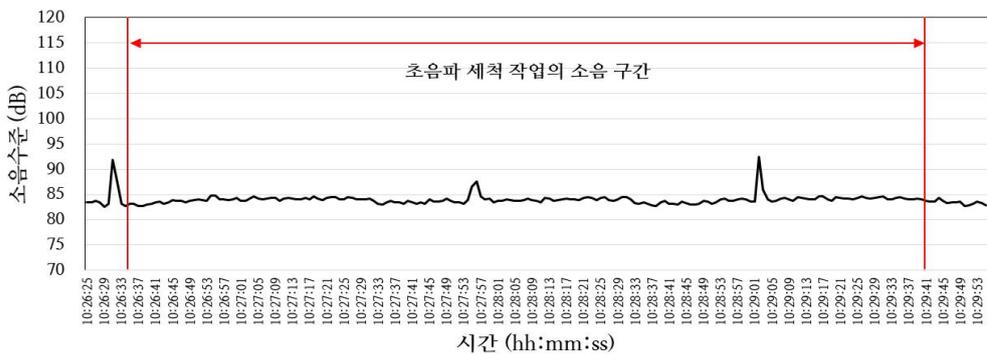
4) 초음파 세척 소음 수준

초음파 세척 작업의 소음원은 초음파 세척기의 가동음, 고압공기 분사기의 소음이다. 초음파 세척이 없을 때는 초음파 세척기의 전원을 가동하지 않으며, 세척을 할 때 작업자가 전원을 가동하고 작업을 한다.

작업을 위해 세척기를 가동하고, 제품을 세척하고 꺼내어 고압공기 분사기로 세라믹 제품의 물기 제거까지 하나의 작업 사이클에서 발생하는 모든 소음을 측정하기 위해 5~10분, 3회 측정하였다. 이 데이터를 ‘고압공기 분사 세척 작업’으로 분류하였다. 배경소음이 되는 초음파 세척기 가동음의 소음 데이터를 확보하기 위해 휴식시간 중 세척기를 가동하여 측정을 실시하였다. 이 데이터를 ‘초음파세척기’로 분류하였다. 다만, 휴식시간 초음파 세척기 가동음을 측정 할 때에는 CNC 기계의 가동음 ‘CNC 공회전 1~2’이 배경소음으로 측정되었고 <표 5>와 같이 나타났다.

가) 초음파 세척 작업

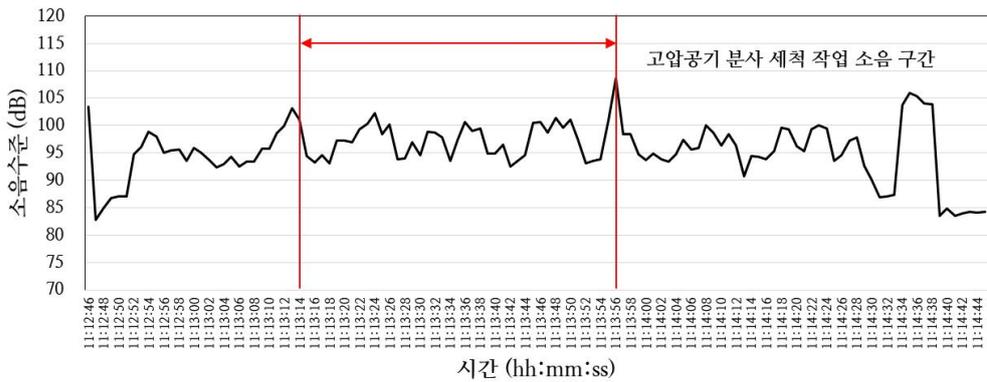
초음파 세척 작업 [그림 4]의 소음수준은 ‘초음파세척’에서 추출하였다. 이때, CNC 공회전의 소음이 배경소음으로 동시에 측정되었다. 초음파세척 작업의 최저 소음은 78.6 dB(A), 최고 소음은 81.8 dB(A), 소음수준은 79.9 dB(A)이다.



[그림 4] 초음파 세척 작업의 소음구간.

나) 고압공기 분사 세척 작업

고압공기 분사 세척 작업 [그림 5] 소음수준은 ‘고압공기 분사 세척 작업’에서 추출하였다. 고압공기분사기의 소음은 순간적인 고소음의 소음 수준이 발생하는 구간의 데이터를 추출하였다. 다만, 초음파세척에서 고압공기 분사기를 사용 할 때 주변에서는 CNC 연마작업이 동시에 이루어지고 있어 배경소음으로 동시에 측정되었다. 고압공기 분사 세척 작업의 최저 소음은 90.4 dB(A), 최고 소음 102.3 dB(A), 소음수준은 95.0 dB(A) 이다.



[그림 5] 고압공기 분사 세척 작업의 소음구간.

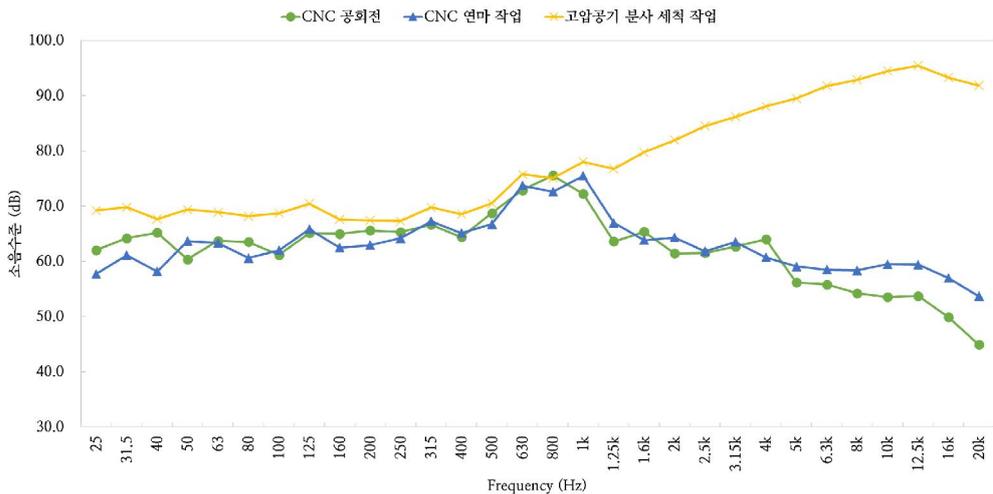
제 2 절 CNC 가공 공정의 주파수 특성

1) CNC 가공

CNC 가공 공정에서 추출된 데이터를 통해 소음수준과 주파수의 특성을 분석하여 <표 6>, [그림 6]과 같이 나타냈다. CNC 공회전에서 소음수준이 가장 높은 주파수는 800 Hz이다. 25~500 Hz에서 일정하게 소음수준이 유지되다 630~800 Hz에서 상승하였다. 이후 1k~20 kHz에서 높은 주파수로 갈수록 소음수준이 낮아졌다.

CNC 연마 작업에서 소음수준이 가장 높은 주파수는 1 kHz이다. 25~ 500 Hz에서 일정하게 소음수준이 유지되다 630~1 kHz에서 상승하였다. 이후 1.25 k~20 kHz에서 높은 주파수로 갈수록 소음수준이 낮아졌다. CNC 공회전과 CNC 연마는 비슷한 주파수 형태를 나타냈다.

CNC 고압공기 분사 세척 작업에서 소음수준이 가장 높은 주파수는 12.5 kHz이다. 25~500 Hz 주파수에서 일정하게 소음수준이 유지되다 630 Hz ~12.5 kHz에서 소음수준이 상승하였다. 이후 16 k~20 kHz에서 소음수준이 하강하였다.

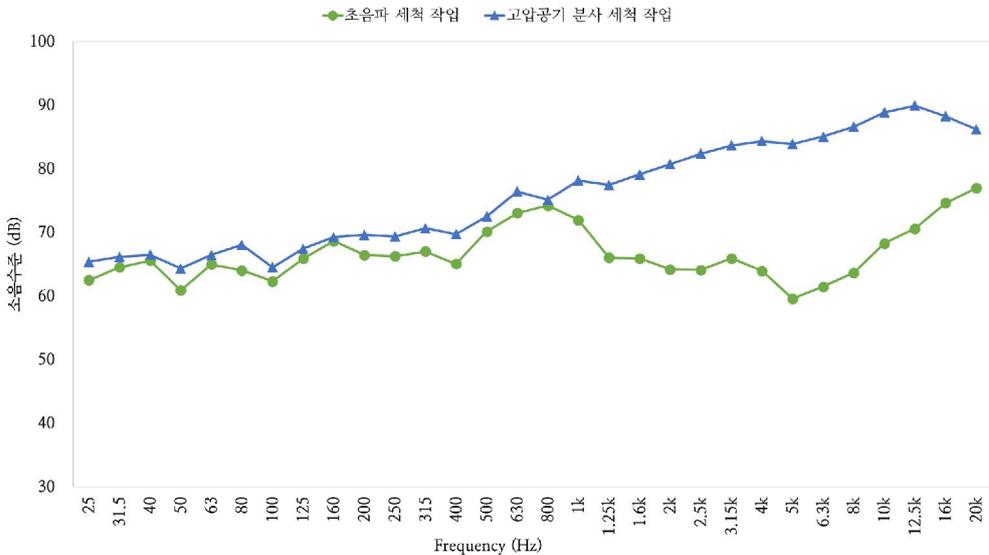


[그림 6] CNC 가공 소음의 주파수 특성 비교.

2) 초음파세척

초음파세척 작업에서 소음수준이 가장 높은 주파수는 800 Hz, 20 kHz이다. 주파수의 형태<표 6>, [그림 7]는 25 Hz~400 Hz에서 일정하게 소음수준이 유지되다 800 Hz 까지 상승하였다. 이후, 5kHz 주파수에서 가장 낮은 소음수준을 나타내고 20 kHz 주파수까지 상승하였다.

고압공기 분사 세척 작업에서 소음수준이 가장 높은 주파수는 12.5 kHz이다. 25~400 Hz에서 일정하게 소음수준이 유지되다 500~12.5 kHz에서 높은 주파수로 갈수록 소음수준이 상승하였다. 12.5 kHz을 기점으로는 소음수준이 낮아졌다.



[그림 7] 초음파 세척 소음의 주파수 특성 비교.

〈표 6〉 CNC 가공 공정 소음수준 및 주파수 특성

작업	세부작업	소음수준 (dB(A))		주파수 특성	분석구간 (시간)
		범위	소음수준		
CNC 가공	① CNC 공회전	78.2~80.4	79.2	25~500 Hz 유지 630~800 Hz 상승 1k~20 kHz 하강	10:31:53 ~10:34:48
	② CNC 연마 작업	78.5~81.1	78.5	25~500 Hz 유지 630~800 Hz 상승 1k~20 kHz 하강	09:42:27 ~09:43:20
	③ 고압공기 분사 세척 작업	96.1~102.7	99.7	25~500 Hz 유지 643~12.5 kHz 상승 16k~20 kHz 하강	09:37:40 ~09:38:10
초음파세척	④ 초음파세척 작업	78.6~81.8	79.9	25~400 Hz 유지 400~800 Hz 상승 1k~5 kHz 하강 6.3k~20 kHz 상승	10:26:34 ~10:29:41
	⑤ 고압공기 분사 세척 작업	90.4~102.3	95.0	25~400 Hz 유지 500~12.5 kHz 상승 16k~20 kHz 하강	11:13:14 ~11:13:56

제 3 절 소음원별 소음 및 주파수의 특성

1) 소음원별 고유 소음수준 및 주파수의 특성 파악

CNC 가공, 초음파 세척에서 세부작업을 분류하고 지시소음계를 이용하여 세부작업의 소음과 주파수를 측정하였다.

CNC 공회전, CNC 연마작업, 초음파 세척작업 각각의 작업에서 최고소음과 최저소음의 차이는 2.2~3.2 dB로, 작업 중 소음수준의 변화가 없이 일정하게 발생하고 있는 것으로 나타났다.

CNC 공정과 초음파세척 공정에서 사용하는 고압공기 분사 세척 작업의 최고소음과 최저소음의 차이는 6.6~10.9 dB로 작업 중 소음수준의 변화가 큰 것으로 나타났다.

현장의 소음 측정결과에서 2개 이상의 소음원이 동시에 있는 경우가 있어 [수식 1]과 같이 계산하여 각각의 소음원별 고유 소음수준과 주파수 특성을 파악하였다.

$$SPL_{Target} = 10 \log \left(10^{\frac{SPL_{Total}}{10}} - 10^{\frac{SPL_{Background}}{10}} \right) \quad [수식 1]$$

여기에서 SPL_{Target} : 특정 소음원의 소음수준

SPL_{Total} : 2개 이상의 합산 소음수준

$SPL_{Background}$: 배경이 되는 낮은 소음원의 소음수준

이와 같은 방법으로 CNC 가공 공정에서의 고압공기 분사 세척 소음, 초음파 세척 소음, 초음파 세척 공정에서의 고압공기 분사 세척 소음을 추정하였다.

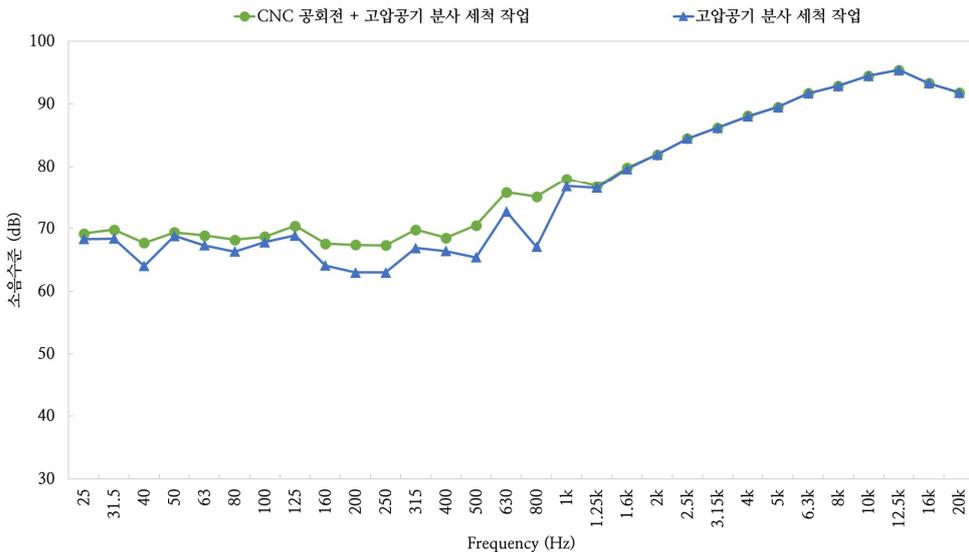
가) CNC 가공 고압공기 분사 세척 작업

연마 작업이 완료된 후 세라믹제품에 남아있는 불순물을 제거하기 위해 고압공기 분사기를 사용하였다. 고압공기분사기를 사용할 때의 CNC 기계는 공회전 상태였다. 고압공기 분사 세척 작업의 소음을 분석하기 위해서는 CNC 기계의 공회전이 없는 상태에서 소음측정을 실시하여야 하나, 공정에서 소음원의 별도 소음을 측정하기 어려웠다. 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준과 주파수를 파악하기 위하여 CNC 공회전의 소음을 제외하여 분석하였고 [그림 8], <표 7>과 같이 나타냈다.

고압공기 분사 세척 작업의 주파수 형태는 25~400 Hz에서 일정하게 소음수준을 유지하다 1 kHz 이후 고주파로 갈수록 소음수준이 높아졌다. 800 Hz에서 소음수준이 낮아진 이유는 배경음인 CNC 공회전의 주파수 특성에서 가장 높은 주파수인 800 Hz의 소음에 영향을 받아 소음수준이 낮아진 것으로 추정된다.

1.25 kHz부터 고주파로 갈수록 소음수준이 높은 것으로 보아 고압공기 분사 세척 작업의 소음은 고주파로 구성된 것을 알 수 있다.

소음수준은 배경소음 제거 전 102.1 dB, 제거 후 102.1 dB로 변화가 없었다.



[그림 8] 고압공기 분사 세척 소음의 주파수 특성.

〈표 7〉 고압공기 분사 세척 작업 소음 주파수별 소음수준(단위 : dB)

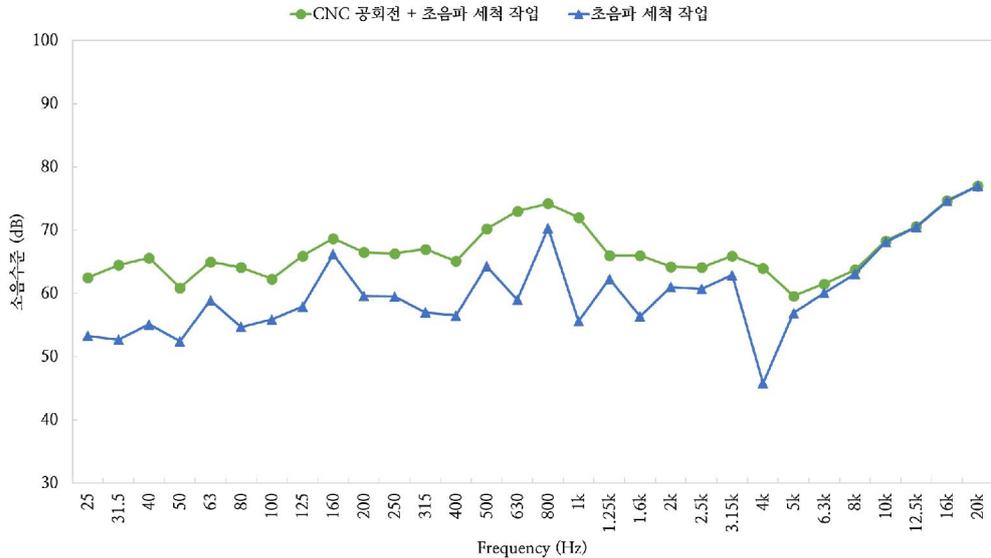
주파수 (Hz)	③ 고압공기 분사 세척 작업	① CNC 공회전	③-① 고압공기 분사 세척 작업
25	69.2	62.0	68.3
31.5	69.8	64.2	68.4
40	67.7	65.2	64.0
50	69.4	60.3	68.8
63	68.9	63.8	67.3
80	68.2	63.5	66.3
100	68.7	61.2	67.8
125	70.4	65.1	68.9
160	67.6	65.0	64.1
200	67.4	65.5	63.0
250	67.3	65.3	63.0
315	69.8	66.6	66.9
400	68.5	64.4	66.4
500	70.5	68.9	65.4
630	75.8	72.9	72.7
800	75.1	75.7	67.1
1k	78.0	72.1	76.8
1.25k	76.8	63.7	76.5
1.6k	79.8	65.4	79.6
2k	81.9	61.4	81.9
2.5k	84.5	61.5	84.5
3.15k	86.2	63.0	86.2
4k	88.1	63.9	88.0
5k	89.5	56.2	89.5
6.3k	91.7	55.9	91.7
8k	92.9	54.3	92.9
10k	94.5	53.5	94.5
12.5k	95.4	53.7	95.4
16k	93.3	49.9	93.3
20k	91.8	45.0	91.8
합계	102.1	81.2	102.1

나) 초음파세척기 공회전

제품에 따라 초음파세척 작업을 실시하였다. 세척기를 사용하지 않을 때는 전원을 끈 상태이며, 필요 할 때 전원을 켜 상태에서 세척을 하였다. 20 k~40 kHz의 고주파를 사용하여 표면의 오염물질을 제거하는 세척 방식으로 세척기를 가동 할 때 소음이 발생 되었다.

초음파세척 작업의 소음은 휴식시간 중 초음파세척기를 가동한 데이터를 이용하여 소음을 분석하였다. 이때, CNC 공회전의 소음이 배경소음으로 동시에 측정되어 CNC 공회전 소음을 제거하는 작업이 필요했다. 방법은 휴식시간 중 측정된 초음파세척 작업의 소음에서 CNC 공회전의 소음을 제거 하였고[그림 9], <표 8>과 같이 나타냈다.

CNC 공회전의 소음 제거 후 초음파 세척작업의 주파수 형태는 25~5 kHz에서 낮아졌으며, 6.3 kHz 이상 고주파로 갈수록 소음수준이 높아졌다. 소음수준은 CNC 공회전을 제거 전 83.8 dB에서 제거 후 81.2 dB으로 감소하였다.



[그림 9] 초음파 세척 소음의 주파수 특성.

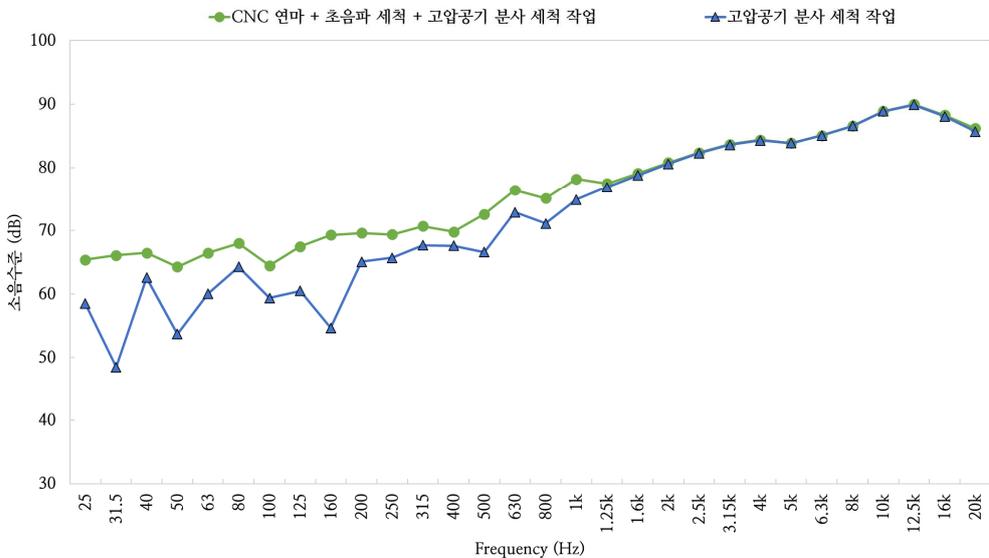
〈표 8〉 초음파세척 소음의 주파수별 소음수준(단위 : dB)

주파수 (Hz)	④ 초음파 세척 작업	① CNC 공회전	④-① 초음파 세척 작업
25	62.5	62.0	53.3
31.5	64.5	64.2	52.7
40	65.6	65.2	55.1
50	60.9	60.3	52.4
63	65.0	63.8	58.9
80	64.1	63.5	54.7
100	62.3	61.2	55.9
125	65.9	65.1	57.9
160	68.7	65.0	66.2
200	66.5	65.5	59.6
250	66.3	65.3	59.5
315	67.0	66.6	57.0
400	65.1	64.4	56.5
500	70.2	68.9	64.3
630	73.0	72.9	59.0
800	74.2	75.7	70.3
1k	72.0	72.1	55.6
1.25k	66.0	63.7	62.3
1.6k	66.0	65.4	56.4
2k	64.2	61.4	61.0
2.5k	64.1	61.5	60.7
3.15k	65.9	63.0	62.9
4k	64.0	63.9	45.8
5k	59.6	56.2	56.9
6.3k	61.5	55.9	60.1
8k	63.7	54.3	63.1
10k	68.3	53.5	68.1
12.5k	70.6	53.7	70.5
16k	74.7	49.9	74.6
20k	77.0	45.0	77.0
합계	83.8	81.2	81.2

다) 초음파세척 고압공기 분사 세척 작업

세척이 완료된 세라믹제품에 물기를 제거하기 위해 고압공기분사기를 사용하였다. 고압공기분사기를 사용할 때에는 초음파세척기는 가동상태였으며, 주변 CNC 기계가 가동되고 있는 상태였다. 초음파세척기에서 사용하는 고압공기 분사 세척 작업 소음을 분석하기 위하여 CNC 연마 작업과 초음파 세척 작업 소음을 제외하여 분석하였고, [그림 10], <표 9>와 같이 나타냈다.

초음파 세척 고압공기 분사 세척 작업의 주파수 형태는 고주파수로 갈수록 소음수준이 높아졌다. 25~1 kHz에서 소음수준이 낮아진 이유는 초음파 세척 작업에서 25~400 Hz 저주파의 낮은 소음수준의 영향을 받은 것으로 분석된다. 1 k~20 kHz에서는 고압공기 분사기의 소음특성을 그대로 반영하고 있다. 소음수준은 배경소음 제거 전 97.1 dB, 제거 후 96.8 dB으로 나타났다.



[그림 10] 고압공기 분사 세척 소음의 주파수 특성.

〈표 9〉 고압공기 분사 세척 소음의 주파수별 소음수준(단위 dB)

주파수 (Hz)	⑤ 고압공기 분사 세척 작업	② CNC 연마 작업	④ 초음파 세척 작업	⑤-(②+④) 고압공기 분사 세척 작업
25	65.4	57.7	62.5	58.5
31.5	66.1	61.1	64.5	48.5
40	66.5	58.1	65.6	62.6
50	64.3	63.6	60.9	53.7
63	66.5	63.3	65.0	60.1
80	68.0	60.5	64.1	64.3
100	64.5	62.0	62.3	59.4
125	67.5	65.8	65.9	60.5
160	69.3	62.5	68.7	54.7
200	69.6	62.9	66.5	65.1
250	69.4	64.2	66.3	65.7
315	70.7	67.3	67.0	67.7
400	69.8	65.1	65.1	67.6
500	72.6	66.7	70.2	66.6
630	76.4	73.7	73.0	72.9
800	75.1	72.6	74.2	71.1
1k	78.2	75.5	72.0	74.9
1.25k	77.5	67.0	66.0	76.9
1.6k	79.1	63.8	66.0	78.8
2k	80.8	64.3	64.2	80.6
2.5k	82.4	61.8	64.1	82.3
3.15k	83.7	63.5	65.9	83.6
4k	84.4	60.7	64.0	84.3
5k	83.9	59.1	59.6	83.9
6.3k	85.1	58.5	61.5	85.1
8k	86.6	58.3	63.7	86.6
10k	88.9	59.4	68.3	88.9
12.5k	90.0	59.4	70.6	89.9
16k	88.3	57.0	74.7	88.1
20k	86.2	53.7	77.0	85.7
합계	97.1	81.2	83.8	96.8

2) CNC 가공의 주파수 특성

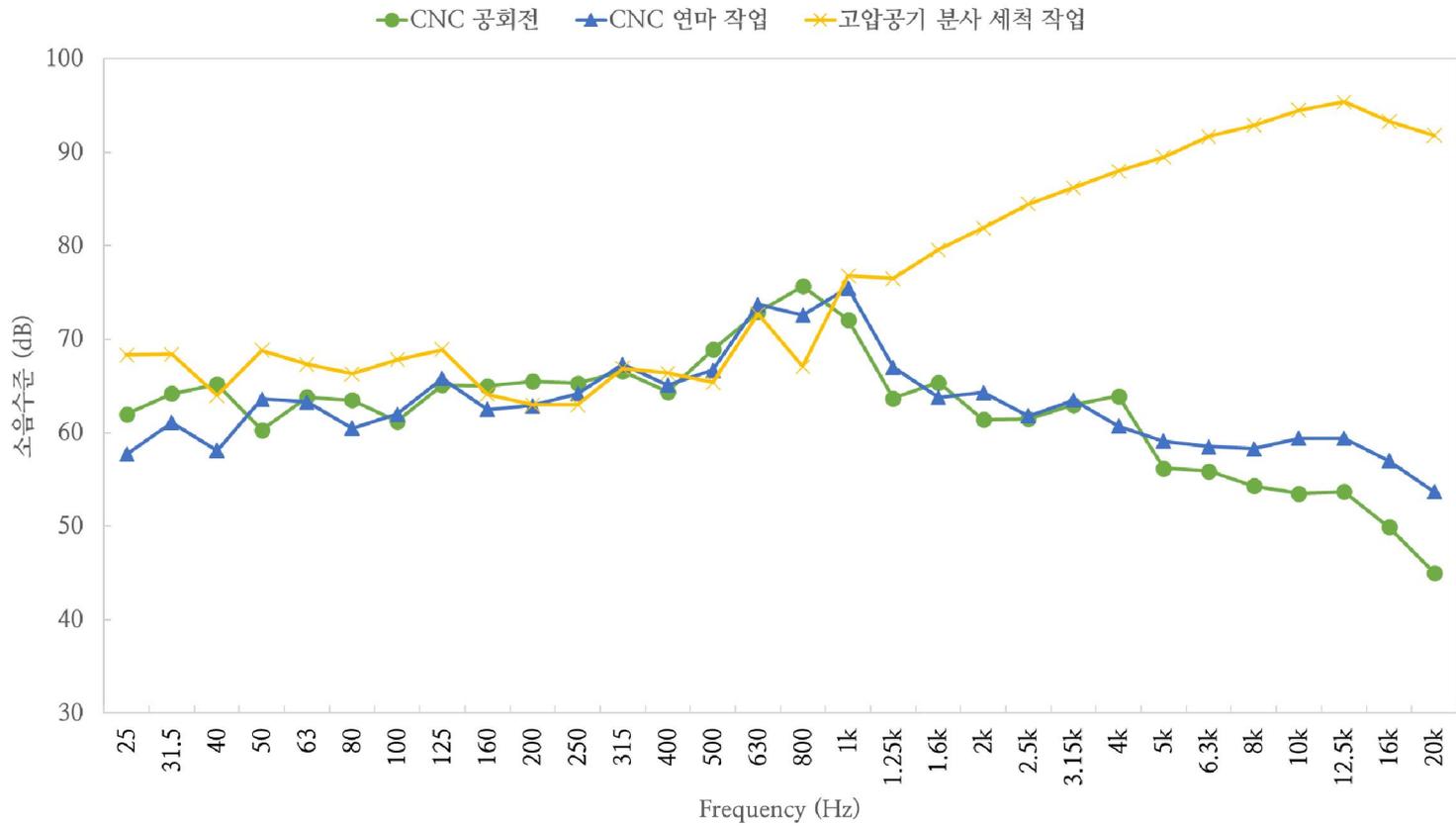
CNC 공회전, CNC 연마 작업 그리고 공회전 배경소음이 제거된 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준과 주파수를 <표 10>과 같이 분석하였다. 소음수준은 CNC 공회전 81.2 dB, CNC 연마 81.2 dB, CNC 고압공기분사 102 dB이다.

[그림 11]에서 1 kHz 이전까지 공회전, 연마 작업, 고압공기 분사 세척 작업의 소음 수준은 비슷하였다. 그러나 1 kHz 이후 공회전, 연마 작업과 고압공기 분사 세척 작업의 소음 차이가 10 dB 이상으로 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준이 높았다. 공회전과 고압공기 분사 세척 작업에서 가장 높은 소음수준의 차이를 나타낸 주파수는 20 kHz, 46.8 dB 이며, 연마 작업과 고압공기 분사 세척 작업에서 가장 높은 소음수준 차이를 나타낸 주파수는 20 kHz, 38.1 dB로 고주파에서 소음수준 차이가 높았다. 연마 작업과 공회전의 소음수준이 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준보다 높게 나온 주파수도 있었다. 공회전과 고압공기분사에서는 800 Hz, 8.6 dB, 연마 작업과 고압공기 분사 세척 작업 800 Hz, 5.5 dB로 공회전과 연마 작업의 중심주파수에서는 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준보다 높았다.

CNC 가공에서 소음수준이 가장 높은 주파수는 CNC 공회전 800 Hz, CNC 연마 작업 1 kHz, CNC 고압공기 분사 세척 작업 12.5 kHz이다.

〈표 10〉 CNC 연마 작업의 주파수별 소음수준(단위 : dB)

주파수 (Hz)	① CNC 공회전	② CNC 연마	③-① CNC 고압공기분사기
25	62	57.7	68.3
31.5	64.2	61.1	68.4
40	65.2	58.1	64
50	60.3	63.6	68.8
63	63.8	63.3	67.3
80	63.5	60.5	66.3
100	61.2	62	67.8
125	65.1	65.8	68.9
160	65	62.5	64.1
200	65.5	62.9	63
250	65.3	64.2	63
315	66.6	67.3	66.9
400	64.4	65.1	66.4
500	68.9	66.7	65.4
630	72.9	73.7	72.7
800	75.7	72.6	67.1
1k	72.1	75.5	76.8
1.25k	63.7	67	76.5
1.6k	65.4	63.8	79.6
2k	61.4	64.3	81.9
2.5k	61.5	61.8	84.5
3.15k	63	63.5	86.2
4k	63.9	60.7	88
5k	56.2	59.1	89.5
6.3k	55.9	58.5	91.7
8k	54.3	58.3	92.9
10k	53.5	59.4	94.5
12.5k	53.7	59.4	95.4
16k	49.9	57	93.3
20k	45	53.7	91.8
합계	81.2	81.2	102



[그림 11] CNC 가공 소음원의 주파수 특성.

3) 초음파세척 작업의 소음 및 주파수 특성

CNC 공회전 배경소음이 제거된 초음파 세척 작업과 CNC 연마, 초음파 세척 작업 배경소음이 제거된 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준<표 11>과 주파수[그림 12]를 분석하였다.

소음수준은 초음파 세척 작업 81.2 dB, 고압공기 분사 세척 작업 96.8 dB 이다.

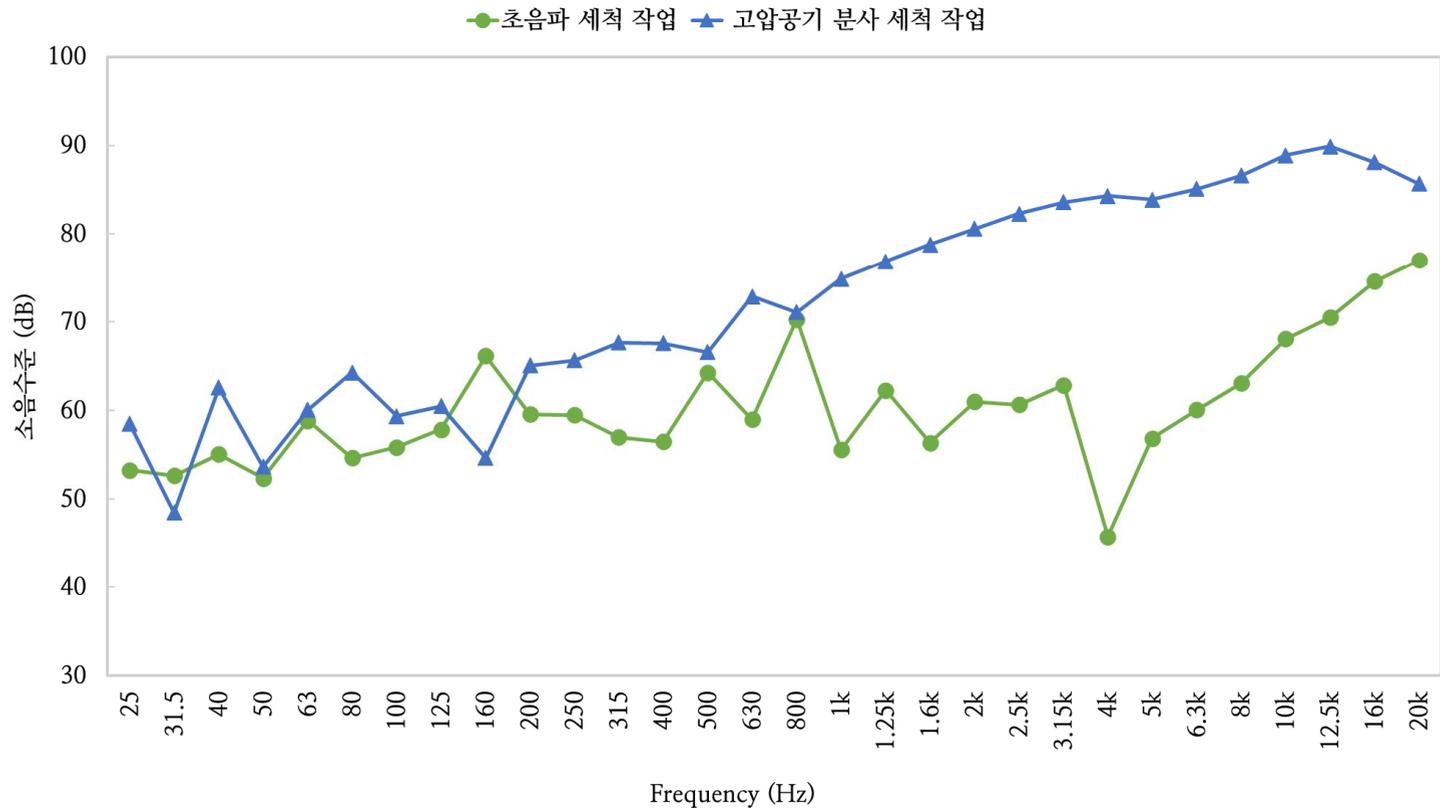
소음수준은 1 kHz 이후 초음파 세척 작업과 고압공기 분사 세척 작업의 차이가 10 dB 이상으로 고압공기 분사 세척 작업의 소음수준이 높았다. 초음파 세척 작업과 고압공기 분사 세척 작업에서 가장 높은 소음수준의 차이를 나타낸 주파수는 4 kHz, 38.5 dB 이며, 고압공기 분사 세척 작업 모든 주파수의 소음수준이 초음파 세척 작업의 소음수준보다 높았다.

초음파 세척의 가장 높은 소음수준을 나타낸 주파수는 초음파 세척 작업 16 kHz, 고압공기 분사 세척 작업 12.5 kHz이다.

초음파세척의 주파수 형태는 25~31.5 kHz에서 비슷한 소음수준을 나타내었으나, 160 Hz, 800 Hz 일부 주파수에서 높아졌으며, 4 kHz에서 가장 낮은 소음수준을 나타낸 후 고주파로 갈수록 소음수준이 높았다. 고압공기 분사 세척 작업의 주파수 형태는 저주파에서 고주파로 갈수록 소음수준이 높았다.

〈표 11〉 초음파세척 작업의 주파수별 소음수준 (단위 : dB)

주파수 (Hz)	④-① 초음파 세척 작업	⑤-(②+④) 고압공기 분사 세척 작업
25	53.3	58.5
31.5	52.7	48.5
40	55.1	62.6
50	52.4	53.7
63	58.9	60.1
80	54.7	64.3
100	55.9	59.4
125	57.9	60.5
160	66.2	54.7
200	59.6	65.1
250	59.5	65.7
315	57	67.7
400	56.5	67.6
500	64.3	66.6
630	59	72.9
800	70.3	71.1
1k	55.6	74.9
1,25k	62.3	76.9
1.6k	56.4	78.8
2k	61	80.6
2.5k	60.7	82.3
3.15k	62.9	83.6
4k	45.8	84.3
5k	56.9	83.9
6.3k	60.1	85.1
8k	63.1	86.6
10k	68.1	88.9
12.5k	70.5	89.9
16k	74.6	88.1
20k	77	85.7
합계	81.2	96.8



[그림 12] 초음파세척 소음원의 주파수 특성.

4) 고압공기 분사 세척 작업의 소음 및 주파수 특성

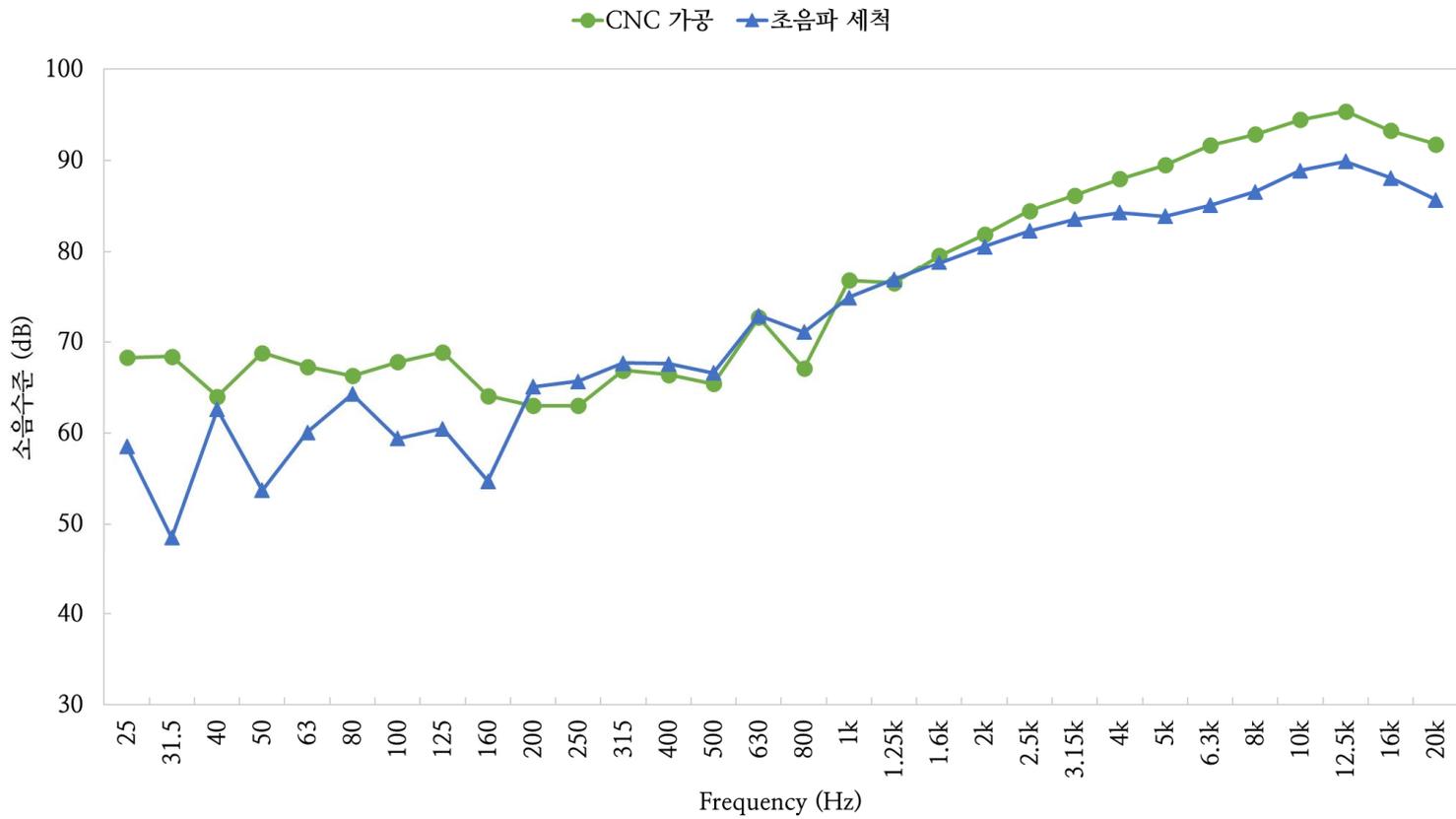
고압공기 분사 세척 작업은 동일한 형태의 에어건 노즐 사용, 동일한 제품에 고압공기를 분사하고 있다. 동일한 형태와 제품에 고압 공기를 분사 할 때, 소음수준과 주파수의 특성은 비슷한 형태를 나타낼 것으로 판단되어 비교하여 <표 12>, [그림 13]과 같이 나타냈다.

비교 대상이 된 소음원은 CNC 공회전 소음이 제거된 고압공기 분사 세척 작업(③-①), 초음파 세척 공정에서 CNC연마 작업과 초음파 세척 작업 소음이 제거된 고압공기 분사 세척 작업(⑤-(②+④))이다.

세 종류의 소음원 모두 소음수준이 가장 높은 주파수는 12.5 kHz 이었다. CNC 고압공기 분사 세척 작업의 주파수 형태에서 약간의 차이가 있으나 CNC 고압공기 분사 세척 작업(③-①), 고압공기 분사 세척 작업(⑤-(②+④)) 모두 같은 주파수 형태를 나타냈다.

〈표 12〉 고압공기 분사 세척 작업의 주파수별 소음수준(단위 : dB)

주파수 (Hz)	③-① CNC 고압공기 분사 세척 작업	⑤-(②+④) 고압공기 분사 세척 작업
25	68.3	58.5
31.5	68.4	48.5
40	64	62.6
50	68.8	53.7
63	67.3	60.1
80	66.3	64.3
100	67.8	59.4
125	68.9	60.5
160	64.1	54.7
200	63	65.1
250	63	65.7
315	66.9	67.7
400	66.4	67.6
500	65.4	66.6
630	72.7	72.9
800	67.1	71.1
1k	76.8	74.9
1.25k	76.5	76.9
1.6k	79.6	78.8
2k	81.9	80.6
2.5k	84.5	82.3
3.15k	86.2	83.6
4k	88	84.3
5k	89.5	83.9
6.3k	91.7	85.1
8k	92.9	86.6
10k	94.5	88.9
12.5k	95.4	89.9
16k	93.3	88.1
20k	91.8	85.7
합계	102	96.8



[그림 13] 작업별 고압공기분사기의 주파수 특성.

제 4 절 귀마개 및 ANC(Active Noise Cancellation) 기능 이어폰의 체감성능평가

귀마개와 ANC(Active Noise Cancellation) 기능 이어폰의 체감성능평가 조사 대상이 되는 작업은 CNC 연마 작업, 초음파세척과 고압공기분사 작업 두 가지이다. 연구 전 ANC 기능 이어폰을 직접 착용 한 후 초음파세척기 주변에 다가갔을 때와 고압공기분사기를 사용 할 때 ANC 기능 이어폰 내에서 기존 소음 추가적인 소음이 발생하는 것을 경험하게 되어 작업을 분리하여 성능을 평가 하였다. 체감성능평가는 개인별 체감성능평가, 회차별 체감성능평가, 종합체감성능평가 세 가지 방법으로 조사하였다. 실험 전 실험자의 귀마개 착용이 올바르게 되었는지에 대한 확인을 위하여 밀착도 검사를 실시하였고, 결과를 <표 13>과 같이 나타냈다.

<표 13> 귀마개 밀착도 검사 실시 결과

구분		실험자 ①	실험자 ②	실험자 ③	실험자 ④	실험자 ⑤
차음값 (dB)	왼쪽	22	12	17	17	17
	오른쪽	19	12	17	13	18
구분		실험자 ⑥	실험자 ⑦	실험자 ⑧	실험자 ⑨	실험자 ⑩
차음값 (dB)	왼쪽	19	20	12	14	21
	오른쪽	21	16	15	21	18

1) CNC 연마에서의 체감성능평가

가) CNC 연마 개인별 체감성능평가

개인별 체감성능평가 방법으로 귀마개와 ANC 기능 이어폰을 번갈아가며

착용한 후 순위를 정하였고, 1순위를 10점 2순위, 3순위를 상대적인 점수로 평가하였다. 장비의 착용 순서에 따라 결과 값이 달라 질 수 있을 것을 고려하여 1(귀마개)-2(에어팟2 프로)-3(버즈2 프로), 1-3-2, 2-1-3, 2-3-1, 3-1-2, 3-2-1의 순서로 실험자 1명당 6회, 총 10명의 실험자를 대상으로 결과를 평가하였다.

실험 시간은 회차별 장비를 연속적으로 착용하여야 실험자가 성능을 평가할 수 있을 것으로 판단되어 오전, 오후 휴식시간, 점심시간 등을 고려하여 장비 당 착용 시간은 20분에서 30분 이내로 교체하여 착용 하도록 실시하였다.

실험자 ①은 귀마개가 평균 9.3점으로 성능이 가장 높은 것으로 평가되었으며, 표준편차 0.5로 성능 대한 변동성은 가장 낮은 것으로 평가되었다. 2순위 에어팟2 프로는 평균 9.0점으로 버즈2 프로보다 높은 값으로 평가되었지만 표준편차 1.5로 변동성이 높은 것으로 평가 되었다. 3순위 버즈2 프로는 평균 7.7점 3순위로 <표 14>와 같이 평가되었다.

실험자 ②는 귀마개가 평균 10점으로 가장 높은 것으로 평가되었으며, 표준편차 0으로 변동성은 가장 낮은 것으로 평가되었다. 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로, 평균 7.8점, 7.7점, 표준편차 0.4, 0.5로 변동성 수준이 비슷한 것으로 <표 15>와 같이 평가되었다.

실험자 ③은 귀마개, 에어팟2 프로, 버즈2 프로 모두 9.5점으로 평가되었다. 다만, 귀마개와 버즈2 프로의 표준편차 0.5, 에어팟2 프로의 표준편차 0.8으로 에어팟2 프로의 변동성이 상대적으로 높은 것으로 <표 16>과 같이 평가되었다.

실험자 ④는 버즈2 프로가 9.3점으로 가장 높은 것으로 평가 되었으며, 표준편차 1.0으로 평가되었다. 2순위는 에어팟2 프로, 3순위는 귀마개로 평균 8.7점, 7.0점으로 성능에 차이가 있었지만, 각각의 표준편차 1.5, 0으로 에어팟2 프로가 상대적으로 변동성이 높은 것으로 <표 17>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑤는 버즈2 프로가 평균 9.7점으로 가장 높은 것으로 평가되었으며, 표준편차 0.5으로 평가되었다. 2순위는 귀마개, 3순위는 에어팟2 프로로 평균 9.5점, 9.3점, 표준편차 0.8, 0.5로 순위의 차이는 있으나 평균과 표준편차의

값이 근사치로 <표 18>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑥은 귀마개가 모든 회차에서 가장 높은 것으로 평가되었다. 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 각각의 평균 6.2점, 4.2점, 표준편차는 0.4로 동일한 값으로 <표 19>와 같이 평가되었다.

실험자 ⑦은 귀마개가 9.0점으로 가장 높은 것으로 평가 되었으나, 표준편차가 1.1로 변동성이 높은 것으로 평가되었다. 2순위는 에어팟2 프로로 평균 8.5점, 표준 1.6으로 변동성이 높은 것으로 평가되었다. 3순위인 버즈2 프로는 가장 낮은 평균인 4.8점이었으나, 표준편차 0.4로 변동성이 상대적으로 낮은 것으로 <표 20>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑧은 귀마개가 9.7점으로 선호도가 가장 높은 것으로 평가 되었으며, 표준편차 0.8로 평가되었다. 2순위는 에어팟2 프로, 3순위는 버즈2 프로로 각각의 평균은 6.7점, 5.0점으로 차이는 있으나, 표준편차 1.6, 0으로 에어팟2 프로가 상대적으로 변동성이 높은 것으로 <표 21>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑨는 귀마개가 8.7점으로 가장 높은 것으로 평가 되었으며, 표준편차 1.0으로 평가되었다. 2순위는 에어팟2 프로, 3순위는 버즈2 프로로 각각의 평균은 8.7점, 7.0점으로 차이는 있으나, 표준편차 2.1, 0.9로 버즈2 프로가 상대적으로 변동성이 높은 것으로 <표 22>와 같이 평가되었다.

실험자 ⑩은 귀마개와 에어팟2 프로로 평균 9.2점, 표준편차 1.0으로 같은 것으로 평가되었다. 3순위인 버즈2 프로는 평균 5.7점, 표준편차 0.5점으로 <표 23>과 같이 평가되었다.

<표 14> CNC 연마에서 실험자 ①의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	9.0	10.0	7.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	7.0	8.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	9.0	10.0	8.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	9.0	10.0	7.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	7.0	9.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	9.0	10.0	7.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	9.3	9.0	7.7	
표준 편차 (SD)	0.5	1.5	0.8	-

<표 15> CNC 연마에서 실험자 ②의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	7.0	7.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	8.0	7.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	10.0	8.0	8.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	10.0	8.0	8.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	8.0	8.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	8.0	8.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	10.0	7.8	7.7	
표준 편차 (SD)	0.0	0.4	0.5	-

<표 16> CNC 연마에서 실험자 ③의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	10.0	10.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	10.0	10.0	10.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	9.0	9.0	10.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	9.0	10.0	9.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	9.0	10.0	9.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	10.0	8.0	9.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	9.5	9.5	9.5	
표준 편차 (SD)	0.5	0.8	0.5	-

<표 17> CNC 연마에서 실험자 ④의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	7.0	10.0	9.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	7.0	10.0	8.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	7.0	10.0	8.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	7.0	8.0	10.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	7.0	7.0	10.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	7.0	7.0	10.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	7.0	8.7	9.2	
표준 편차 (SD)	0.0	1.5	1.0	-

〈표 18〉 CNC 연마에서 실험자 ⑤의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	10.0	10.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
2회차	10.0	10.0	10.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
3회차	9.0	9.0	10.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
4회차	10.0	9.0	9.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
5회차	10.0	9.0	9.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
6회차	8.0	9.0	10.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
평균 (M)	9.5	9.3	9.7	
표준 편차 (SD)	0.8	0.5	0.5	-

〈표 19〉 CNC 연마에서 실험자 ⑥의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	4.0	6.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	4.0	7.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	10.0	4.0	6.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	10.0	4.0	6.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	5.0	6.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	4.0	6.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	10.0	4.2	6.2	
표준 편차 (SD)	0.0	0.4	0.4	-

〈표 20〉 CNC 연마에서 실험자 ⑦의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	7.0	4.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	8.0	10.0	5.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	8.0	10.0	5.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	8.0	10.0	5.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	7.0	5.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	7.0	5.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	9.0	8.5	4.8	
표준 편차 (SD)	1.1	1.6	0.4	-

〈표 21〉 CNC 연마에서 실험자 ⑧의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	6.0	5.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	8.0	10.0	5.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	10.0	6.0	5.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	10.0	6.0	5.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	10.0	6.0	5.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	10.0	6.0	5.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	9.7	6.7	5.0	
표준 편차 (SD)	0.8	1.6	0.0	-

〈표 22〉 CNC 연마에서 실험자 ⑨의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	8.0	6.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	9.0	7.0	10.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	8.0	6.0	10.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	10.0	8.0	6.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	8.0	7.0	10.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	8.0	6.0	10.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	8.8	7.0	8.7	
표준 편차 (SD)	1.0	0.9	2.1	-

〈표 23〉 CNC 연마에서 실험자 ⑩의 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	8.0	6.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
2회차	10.0	9.0	6.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
3회차	10.0	8.0	5.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
4회차	8.0	10.0	6.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
5회차	8.0	10.0	5.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
6회차	9.0	10.0	6.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
평균 (M)	9.2	9.2	5.7	
표준 편차 (SD)	1.0	1.0	0.5	-

나) CNC 연마 회차별 체감성능평가

CNC 연마에서 회차별 체감성능평가는 실험자 10명의 결과를 1~6회차로 나타냈다. 1회차 실험결과 평균 9.6점으로 귀마개가 가장 높았다. 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 평균 8.0점, 7.0점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 1.0으로 변동성이 낮은 것으로 평가되었으나 에어팟2 프로와 버즈2 프로의 편차는 2.1로 변동성이 높은 것으로 <표 24>와 같이 평가되었다.

2회차 실험결과 평균 9.2점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 8.5점, 7.6점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 1.1로 편차가 높지 않은 것으로 평가되었으나 에어팟2 프로와 버즈2 프로의 표준편차는 2로 변동성이 높은 것으로 <표 25>와 같이 평가되었다.

3회차 실험결과 평균 9.0점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며, 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 8.0점, 7.5점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 1.1, 2순위, 3순위의 표준편차는 2.1로 변동성이 높은 것으로 <표 26>과 같이 평가되었다.

4회차 실험결과 평균 9.1점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며, 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 8.3점, 7.1점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 1.1, 2순위 2.0, 3순위 1.8로 1순위인 귀마개에 비하여 변동성이 상대적으로 높은 것으로 <표 27>과 같이 평가되었다.

5회차 실험결과 평균 9.2점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며, 2순위, 3순위는 7.6점으로 동일한 점수로 평가되었다. 1순위의 표준편차는 1.1, 에어팟2 프로는 1.6, 버즈2 프로는 2.1로 체감성능평가에 대한 점수는 같으나 버즈2 프로가 상대적으로 변동성이 높은 것으로 <표 28>과 같이 평가되었다.

6회차 실험결과 평균 9.1로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 7.5점과 7.6점으로 평가되었다. 1순위 표준편차는 1.1, 2순위의 표준편차는 2.1, 3순위의 표준편차는 1.9, 1순위보다 2순위, 3순위 변동성이 상대적으로 높은 것으로 <표 29>와 같이 평가되었다.

〈표 24〉 CNC 연마에서 1회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	9.0	10.0	7.0
②	10.0	7.0	7.0
③	10.0	10.0	10.0
④	7.0	10.0	9.0
⑤	10.0	10.0	10.0
⑥	10.0	4.0	6.0
⑦	10.0	7.0	4.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	10.0	8.0	6.0
⑩	10.0	8.0	6.0
평균 (M)	9.6	8.0	7.0
표준편차 (SD)	1.0	2.1	2.1

〈표 25〉 CNC 연마에서 2회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	7.0	8.0
②	10.0	8.0	7.0
③	10.0	10.0	10.0
④	7.0	10.0	8.0
⑤	10.0	10.0	10.0
⑥	10.0	4.0	7.0
⑦	8.0	10.0	5.0
⑧	8.0	10.0	5.0
⑨	9.0	7.0	10.0
⑩	10.0	9.0	6.0
평균 (M)	9.2	8.5	7.6
표준편차 (SD)	1.1	2.0	2.0

〈표 26〉 CNC 연마에서 3회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	9.0	10.0	8.0
②	10.0	8.0	8.0
③	9.0	9.0	10.0
④	7.0	10.0	8.0
⑤	9.0	9.0	10.0
⑥	10.0	4.0	6.0
⑦	8.0	10.0	5.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	8.0	6.0	10.0
⑩	10.0	8.0	5.0
평균 (M)	9.0	8.0	7.5
표준편차 (SD)	1.1	2.1	2.1

〈표 27〉 CNC 연마에서 4회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	9.0	10.0	7.0
②	10.0	8.0	8.0
③	9.0	10.0	9.0
④	7.0	8.0	10.0
⑤	10.0	9.0	9.0
⑥	10.0	4.0	6.0
⑦	8.0	10.0	5.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	10.0	8.0	6.0
⑩	8.0	10.0	6.0
평균 (M)	9.1	8.3	7.1
표준편차 (SD)	1.1	2.0	1.8

〈표 28〉 CNC 연마에서 5회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	7.0	9.0
②	10.0	8.0	8.0
③	9.0	10.0	9.0
④	7.0	7.0	10.0
⑤	10.0	9.0	9.0
⑥	10.0	5.0	6.0
⑦	10.0	7.0	5.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	8.0	7.0	10.0
⑩	8.0	10.0	5.0
평균 (M)	9.2	7.6	7.6
표준편차 (SD)	1.1	1.6	2.1

〈표 29〉 CNC 연마에서 6회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	9.0	10.0	7.0
②	10.0	8.0	8.0
③	10.0	8.0	9.0
④	7.0	7.0	10.0
⑤	8.0	9.0	10.0
⑥	10.0	4.0	6.0
⑦	10.0	7.0	5.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	8.0	6.0	10.0
⑩	9.0	10.0	6.0
평균 (M)	9.1	7.5	7.6
표준편차 (SD)	1.1	1.9	2.1

다) CNC 연마 종합 체감성능평가

종합 체감성능평가는 실험자 10명의 회차별 체감성능평가를 종합하였다. 실험 결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었다. 평균 9.2점, 표준편차는 0.2로 평가되었다. 2순위는 에어팟2 프로 평균 8.0점, 표준편차 0.4, 3순위는 버즈2 프로로 평균 7.4점, 표준편차 0.3으로 평가되었다. 각 장비의 표준 편차는 낮은 수준을 나타내어 평균값의 신뢰도에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었으며 그 결과는 <표 30>과 같다.

<표 30> CNC 연마에서 전체 실험자의 장비 체감성능평가

회차	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
1회차	9.6	8.0	7.0
2회차	9.2	8.5	7.6
3회차	9.0	8.0	7.5
4회차	9.1	8.3	7.1
5회차	9.2	7.6	7.6
6회차	9.1	7.5	7.6
평균 (M)	9.2	8.0	7.4
표준편차 (SD)	0.2	0.4	0.3

2) 초음파 세척, 고압공기분사기에서의 체감성능평가

가) 초음파 세척, 고압공기분사기 작업 개인별 체감성능평가

실험자 ①의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 7.6점, 7.0점으로 평가 되었다, 표준편차는 귀마개 0, 버즈2 프로 1.0, 에어팟2 프로 0.6으로 <표 31>과 같이 평가되었다.

실험자 ②의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 평균 7.8점, 7.7점으로 평가되었다. 표준편차는 귀마개 0, 에어팟2 프로 0.4, 버즈2 프로로 <표 32>와 같이 평가되었다.

실험자 ③의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 9.0점, 8.0점으로 평가되었다. 표준편차는 3가지 장비 모두 0으로 <표 33>과 같이 평가되었다.

실험자 ④의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 8.3점, 7.0점으로 평가되었다. 표준편차는 귀마개와 에어팟2 프로 0, 버즈2 프로로 <표 34>와 같이 평가되었다.

실험자 ⑤의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 9.0점, 8.0점으로 평가되었다. 표준편차는 3가지 장비 모두 0으로 <표 35>와 같이 평가되었다.

실험자 ⑥의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 5.0점, 2.0점으로 평가되었다. 표준편차는 3가지 장비 모두 0으로 <표 36>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑦의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 평균 5.0점, 3.0점으로 평가되었다. 표준편차는 3가지 장비 모두 0으로 <표 37>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑧의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며

평균 10점, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 평균 5.8점, 5.5점으로 평가되었다. 표준편차는 귀마개는 0, 에어팟2 프로 0.4, 버즈2 프로 0.5점으로 <표 38>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑨의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가 되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 7.7점, 6.3점으로 평가되었다. 표준편차는 귀마개 0, 버즈2 프로 0.8, 에어팟2 프로 6 0.8로 <표 39>과 같이 평가되었다.

실험자 ⑩의 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었으며 평균 10점, 2순위, 3순위는 에어팟2 프로, 버즈2 프로로 평균 7.0점, 6.5점으로 평가되었다. 표준편차는 귀마개, 에어팟2 프로 0, 버즈2 프로 0.5점으로 <표 40>과 같이 평가되었다.

<표 31> 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ① 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	6.0	8.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	8.0	6.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	10.0	7.0	8.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	10.0	7.0	8.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	7.0	9.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	7.0	8.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	10.0	7.0	7.8	
표준 편차 (SD)	0.0	0.6	1.0	-

〈표 32〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ② 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	7.0	7.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	8.0	7.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	10.0	8.0	8.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	10.0	8.0	8.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	8.0	8.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	8.0	8.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	10.0	7.8	7.7	
표준 편차 (SD)	0.0	0.4	0.5	-

〈표 33〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ③ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	8.0	9.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	10.0	8.0	9.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	10.0	8.0	9.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	10.0	8.0	9.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	10.0	8.0	9.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	10.0	8.0	9.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	10.0	8.0	9.0	
표준 편차 (SD)	0.0	0.0	0.0	-

〈표 34〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ④ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	7.0	9.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	10.0	7.0	9.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	10.0	7.0	8.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	10.0	7.0	8.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	10.0	7.0	8.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	10.0	7.0	8.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	10.0	7.0	8.3	
표준 편차 (SD)	0.0	0.0	0.5	-

〈표 35〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑤ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	8.0	9.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
2회차	10.0	8.0	9.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
3회차	10.0	8.0	9.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
4회차	10.0	8.0	9.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
5회차	10.0	8.0	9.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
6회차	10.0	8.0	9.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
평균 (M)	10.0	8.0	9.0	
표준 편차 (SD)	0.0	0.0	0.0	-

〈표 36〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑥ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	2.0	5.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	2.0	5.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	10.0	2.0	5.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	10.0	2.0	5.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	2.0	5.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	2.0	5.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	10.0	2.0	5.0	
표준 편차 (SD)	0.0	0.0	0.0	

〈표 37〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑦ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	5.0	3.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
2회차	10.0	5.0	3.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
3회차	10.0	5.0	3.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
4회차	10.0	5.0	3.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
5회차	10.0	5.0	3.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
6회차	10.0	5.0	3.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
평균 (M)	10.0	5.0	3.0	
표준 편차 (SD)	0.0	0.0	0.0	-

〈표 38〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑧ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	6.0	5.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	10.0	6.0	5.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	10.0	6.0	5.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	10.0	5.0	6.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	10.0	6.0	6.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	10.0	6.0	6.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	10.0	5.8	5.5	
표준 편차 (SD)	0.0	0.4	0.5	-

〈표 39〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑨ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	6.0	8.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
2회차	10.0	6.0	8.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
3회차	10.0	6.0	8.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
4회차	10.0	8.0	6.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
5회차	10.0	6.0	8.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
6회차	10.0	6.0	8.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
평균 (M)	10.0	6.3	7.7	
표준 편차 (SD)	0.0	0.8	0.8	-

〈표 40〉 고압공기분사, 초음파세척에서 실험자 ⑩ 장비 체감성능평가

회차	장비			실험 순서
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	
1회차	10.0	7.0	6.0	버즈2 프로 - 귀마개 - 에어팟2 프로
2회차	10.0	7.0	7.0	귀마개 - 에어팟2 프로 - 버즈2 프로
3회차	10.0	7.0	6.0	에어팟2 프로 - 버즈2 프로 - 귀마개
4회차	10.0	7.0	6.0	버즈2 프로 - 에어팟2 프로 - 귀마개
5회차	10.0	7.0	7.0	귀마개 - 버즈2 프로 - 에어팟2 프로
6회차	10.0	7.0	7.0	에어팟2 프로 - 귀마개 - 버즈2 프로
평균 (M)	10.0	7.0	6.5	-
표준 편차 (SD)	0.0	0.0	0.5	-

나) 초음파 세척, 고압공기분사 회차별 체감성능평가

고압공기분사, 초음파세척에서 회차별 체감성능평가는 실험자 10명의 결과를 1~6회차로 나타냈다. 1회차 실험결과는 평균 10점으로 귀마개가 가장 높았다. 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 6.9점, 6.2점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 0으로 변동성이 없었으나, 버즈2 프로와 에어팟2 프로의 편차는 1.8과 2.1로 변동성이 높은 것으로 〈표 41〉과 같이 평가되었다.

2회차 실험결과 평균 10점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 6.8점, 6.5점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 0으로 변동성이 없었으나 버즈2 프로, 에어팟2 프로의 표준 편차는 2.0과 1.9로 변동성이 높은 것으로 〈표 42〉과 같이 평가되었다.

3회차 실험결과 평균 10점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 6.9점, 6.4점으로 평가되었다.

1순위인 귀마개의 표준편차는 0으로 변동성이 없었으나 버즈2 프로, 에어팟2 프로의 표준편차는 2.0과 1.8로 변동성이 높은 것으로 <표 43>과 같이 평가되었다.

4회차 실험결과 평균 10점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 6.8점, 6.5점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 0으로 변동성이 없었으나 버즈2 프로, 에어팟2 프로의 표준편차는 1.9와 2.0로 변동성이 높은 것으로 <표 44>와 같이 평가되었다.

5회차 실험결과 평균 10점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 7.2점, 6.4점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 0으로 변동성이 없었으나 버즈2 프로, 에어팟2 프로의 표준편차는 2.0과 1.8로 변동성이 높은 것으로 <표 45>와 같이 평가되었다.

6회차 실험결과 평균 10점으로 귀마개가 가장 높은 값을 나타냈으며 2순위, 3순위는 버즈2 프로, 에어팟2 프로로 평균 7.1점, 6.4점으로 평가되었다. 1순위인 귀마개의 표준편차는 0으로 변동성이 없었으나 버즈2 프로, 에어팟2 프로의 표준편차는 1.9와 1.8로 변동성이 높은 것으로 <표 46>과 같이 평가되었다.

〈표 41〉 고압공기분사, 초음파세척 1회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	6.0	8.0
②	10.0	7.0	7.0
③	10.0	8.0	9.0
④	10.0	7.0	9.0
⑤	10.0	8.0	9.0
⑥	10.0	2.0	5.0
⑦	10.0	5.0	3.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	10.0	6.0	8.0
⑩	10.0	7.0	6.0
평균 (M)	10.0	6.2	6.9
표준편차 (SD)	0.0	1.8	2.1

〈표 42〉 고압공기분사, 초음파세척 2회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	8.0	6.0
②	10.0	8.0	7.0
③	10.0	8.0	9.0
④	10.0	7.0	9.0
⑤	10.0	8.0	9.0
⑥	10.0	2.0	5.0
⑦	10.0	5.0	3.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	10.0	6.0	8.0
⑩	10.0	7.0	7.0
평균 (M)	10.0	6.5	6.8
표준편차 (SD)	0.0	1.9	2.0

〈표 43〉 고압공기분사, 초음파세척 3회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	7.0	8.0
②	10.0	8.0	8.0
③	10.0	8.0	9.0
④	10.0	7.0	8.0
⑤	10.0	8.0	9.0
⑥	10.0	2.0	5.0
⑦	10.0	5.0	3.0
⑧	10.0	6.0	5.0
⑨	10.0	6.0	8.0
⑩	10.0	7.0	6.0
평균 (M)	10.0	6.4	6.9
표준편차 (SD)	0.0	1.8	2.0

〈표 44〉 고압공기분사, 초음파세척 4회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	7.0	8.0
②	10.0	8.0	8.0
③	10.0	8.0	9.0
④	10.0	7.0	8.0
⑤	10.0	8.0	9.0
⑥	10.0	2.0	5.0
⑦	10.0	5.0	3.0
⑧	10.0	5.0	6.0
⑨	10.0	8.0	6.0
⑩	10.0	7.0	6.0
평균 (M)	10.0	6.5	6.8
표준편차 (SD)	0.0	2.0	1.9

〈표 45〉 고압공기분사, 초음파세척 5회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	7.0	9.0
②	10.0	8.0	8.0
③	10.0	8.0	9.0
④	10.0	7.0	8.0
⑤	10.0	8.0	9.0
⑥	10.0	2.0	5.0
⑦	10.0	5.0	3.0
⑧	10.0	6.0	6.0
⑨	10.0	6.0	8.0
⑩	10.0	7.0	7.0
평균 (M)	10.0	6.4	7.2
표준편차 (SD)	0.0	1.8	2.0

〈표 46〉 고압공기분사, 초음파세척 6회차 귀마개 및 ANC 이어폰의 체감성능평가

실험자	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
①	10.0	7.0	8.0
②	10.0	8.0	8.0
③	10.0	8.0	9.0
④	10.0	7.0	8.0
⑤	10.0	8.0	9.0
⑥	10.0	2.0	5.0
⑦	10.0	5.0	3.0
⑧	10.0	6.0	6.0
⑨	10.0	6.0	8.0
⑩	10.0	7.0	7.0
평균 (M)	10.0	6.4	7.1
표준편차 (SD)	0.0	1.8	1.9

다) 초음파세척, 고압공기분사 종합 체감성능평가

종합 체감성능평가는 실험자 10명의 회차별 체감성능평가를 종합하였다. 실험결과 귀마개가 1순위로 가장 높은 성능으로 평가되었다. 평균 10점, 표준편차는 0으로 평가되었다. 2순위는 버즈2 프로 평균 7.0점, 표준편차 0.2, 3순위는 에어팟2 프로로 평균 6.4점, 표준편차 0.1으로 평가되었다. 각 장비의 표준 편차는 비슷한 수준을 나타내어 평균값의 신뢰도에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었으며 그 결과는 <표 47>과 같다.

<표 47> 고압공기분사, 초음파세척에서 전체 실험자의 장비 체감성능평가

회차	장비		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
1회차	10.0	6.2	6.9
2회차	10.0	6.5	6.8
3회차	10.0	6.4	6.9
4회차	10.0	6.5	6.8
5회차	10.0	6.4	7.2
6회차	10.0	6.4	7.1
평균 (M)	10.0	6.4	7.0
표준편차 (SD)	0.0	0.1	0.2

라) CNC연마작업, 고압공기분사, 초음파세척의 종합체감성능평가 비교

CNC연마작업과 고압공기분사, 초음파 세척작업의 체감성능평가의 비교를 위해<표 48>로 나타냈다. 작업별 귀마개, ANC 기능 이어폰의 성능을 평균과 표준편차로 비교하였다.

귀마개는 CNC 연마작업과 고압공기분사, 초음파 세척작업 두 작업에서 성

능이 가장 높다고 평가되었다. 고압공기분사, 초음파 세척작업에서는 모든 실험자가 모든 회차에서 귀마개를 1순위인 10점으로 가장 높게 평가하였다.

에어팟2 프로는 CNC연마작업에서 8.0점으로 2순위, 고압공기분사기, 초음파 세척작업에서는 6.4점으로 3순위로 평가하였다.

버즈2 프로는 CNC연마작업에서 7.4점으로 3순위, 고압공기분사기, 초음파 세척작업에서는 7.0점으로 2순위로 평가하였다.

〈표 48〉 CNC연마와 고압공기분사, 초음파세척 작업의 종합체감성능평가 비교

장비	CNC 연마			고압공기분사기, 초음파 세척		
	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로	귀마개	에어팟2 프로	버즈2 프로
1회차	9.6	8.0	7.0	10.0	6.2	6.9
2회차	9.2	8.5	7.6	10.0	6.5	6.8
3회차	9.0	8.0	7.5	10.0	6.4	6.9
4회차	9.1	8.3	7.1	10.0	6.5	6.8
5회차	9.2	7.6	7.6	10.0	6.4	7.2
6회차	9.1	7.5	7.6	10.0	6.4	7.1
평균 (M)	9.2	8.0	7.4	10.0	6.4	7.0
표준편차 (SD)	0.2	0.4	0.3	0.0	0.1	0.2

제 4 장 결 론

본 연구는 CNC 가공 및 초음파 세척 공정에서 발생하는 소음을 측정하여 소음수준과 주파수 특성을 분석하였으며, 합산된 소음으로부터 각 배경 소음원의 소음을 차감하여 각 소음원별로 소음수준과 주파수 특성을 분석하였다. CNC 가공공정에서는 CNC 공회전 소음, 세라믹 제품을 연마하기 위한 연마 소음, 그리고 불순물 제거를 위한 고압공기 분사 소음이 있었으며, 초음파 세척 공정에는 초음파 세척소음, 물기를 제거하기 위해 사용하는 고압공기 분사 소음이 있었다.

본 사업장의 작업자 10명을 대상으로 시판되는 노이즈 캔슬링 이어폰 2종에 대하여 기존에 착용해 왔던 귀마개와 비교하여 체감 소음차음 효과를 측정하여 주파수별 효과를 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. CNC 가공공정에서 측정한 CNC 기계의 공회전 소음은 79~80 dB, 연마작업이 이루어지는 동안 초음파 세척을 하는 작업은 83.5~88 dB 수준이었다. 이것을 소음원별로 분리하여 본 결과, CNC 공회전 소음은 변화가 없었으며, 연마기에 의해 제품이 연마될 때 소음은 CNC 공회전 소음과 비슷한 79~80 dB 수준이었다. 이것은 연마기의 문이 닫힌 상태로 연마가 이루어지며, 연마속도 등으로 소음이 크게 발생하지 않기 때문이었다. 한편 연마작업이 이루어지는 동안 직전에 연마된 제품을 고압공기 분사로 세척할 때 순간 소음이 최고 102dB 정도 나타났다. 고압공기 분사세척 소음은 분사속도와 지속시간에 따라 변화가 컸다. 즉, CNC 가공작업에서의 측정한 83~88 dB 소음의 소음원은 고압공기 분사세척 소음임을 알 수 있었다.

2. CNC 가공공정에서 측정한 소음을 1/3 옥타브 밴드 주파수 분석을 실시한 결과, CNC 기계의 공회전과 연마소음의 주요 주파수 대역은 500~1 kHz로 75 dB 수준이었으며, 1.25~4 kHz의 주파수 대역에서는 62~63 dB, 5 kHz 이상에서는 55 dB이하로 전체 소음에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면, 고압공기 분사 소음은 500 Hz에서 70 dB이었으나 주파수가 높

아질수록 소음수준이 거의 직선상으로 증가하여 8 kHz에서는 92 dB, 12.5 kHz에서는 95 dB 수준인 것으로 나타났다.

3. 초음파 세척공정의 소음수준은 80~93 dB로 변이가 컸다. 소음원별로 소음수준을 파악한 결과, 초음파 세척기에 의한 초음파 세척작업은 80 dB 수준이었고, 여기에서도 고압공기 분사 세척 작업의 경우 순간 소음이 95~100 dB수준인 것으로 나타났다. 즉 초음파 세척작업의 소음수준을 좌우하는 주 소음원도 고압공기 분사음인 것으로 나타났다.

4. 초음파 세척공정의 소음원별 주파수별 소음을 분석한 결과, 초음파 세척기에 의한 소음은 5 kHz까지 65 dB이하로 매우 낮았으며, 12.5 kHz 이상부터 소음수준이 증가하였지만 소음수준은 70~75 dB 수준으로 매우 낮은 수준이었다. 여기에서도 고압공기 분사기의 고압공기 분사 소음이 고주파 영역에서 소음수준이 높게 나타났다. 2 kHz부터 80 dB이상으로 나타났으며, 8 kHz에서는 85 dB, 12.5 kHz에서는 90 dB 수준으로 CNC 공정에서의 고압공기 분사소음과 비슷한 것으로 나타났다.

5. CNC 연마, 초음파 세척과 고압공기 분사 세척에서 노이즈캔슬링 기능 이어폰의 체감 차음효과 비교 결과 귀마개가 가장 우수한 것으로 나타났다. CNC 연마에서 상대점수는 귀마개 9.2점, 에어팟2 프로 8.0점, 버즈2 프로 7.4점이었으며, 초음파 세척 고압공기분사에서 상대점수는 귀마개 10점, 에어팟2 프로 6.4점, 버즈2 프로 7.0점이었다. 이것은 CNC 및 초음파 세척공정이 20 kHz이상의 고주파수 소음이기 때문인 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 김종현, 김형석, 신명훈. (2022). Active noise cancelling을 활용한 보청기 폐쇄효과 제거. 『2022년 대한전자공학회 하계학술대회 논문집』, 1702-1706.
- 성준호. (2014). “소방차량 및 소방장비로부터 발생하는 소음의 크기 및 주파수 특성에 관하나 연구”. 한성대학교 대학원 석사학위 논문
- 소신주, 곽대영. (2023). 사용성평가 비교를 통한 노이즈 캔슬링 헤드폰 개선 방향 제안. 『한국디자인문화학회』, Vol 29, No.4, 214-227.
- 이동원, 진경업, 김성진, 이강윤. (2020). 5.8Ghz 대역의 DSRC용 밴드 튜닝이 가능한 노이즈 캔슬링 LNA 설계. 『2020년 대한전자공학회 하계 학술대회 논문집』, 197-199.

2. 국외문헌

- Built-in. (2024). "How Does Noise Cancelling Work?".
<https://builtin.com/hardware/how-does-noise-cancelling-work>
- Canalys. (2024). “Worldwide TWS Shipments and growth Q2 2024”.
<https://www.canalys.com/newsroom/global-smart-personal-audio-market-q2-2024>

ABSTRACT

A study on Noise Levels and Frequency Characteristics of CNC Machining, Air Gun, and Ultrasonic Cleaning Processes, and the Perceived Attenuation Effect of Noise-Canceling Earphones

Ji, Jun-Yong

Major in Industrial Hygiene Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University

This study analyzed the noise levels and frequency characteristics of noise sources generated during CNC machining and ultrasonic cleaning processes. Additionally, the perceived noise attenuation effects of two commercially available noise-canceling earphones and one type of earplug were measured with 10 workers, yielding the following results.

The idle noise of CNC machines measured during the CNC machining process ranged from 79 to 80 dB, while noise levels during ultrasonic cleaning and grinding operations ranged from 83.5 to 88 dB. The noise levels of CNC idle and grinding operations were similar, both around 79–80 dB. However, during grinding operations, momentary noise levels of

up to 102 dB were observed when products were cleaned using high-pressure air jets. The noise from high-pressure air jets varied significantly depending on the jet speed and duration. Thus, the majority of the noise (83–88 dB) in CNC machining was attributed to the high-pressure air jets. The primary frequency band of CNC idle and grinding noise was between 500 and 1 kHz, with noise levels around 75 dB. Outside this range, the noise levels were below 63 dB and had little impact on overall noise. In contrast, high-pressure air jet noise increased linearly with frequency, reaching 92 dB at 8 kHz and 95 dB at 12.5 kHz.

The noise levels of the ultrasonic cleaning process ranged from 80 to 93 dB, with significant variation. Among the noise sources, the ultrasonic cleaning machine noise was around 80 dB, while high-pressure air jet noise reached 95–100 dB. This indicates that the main noise source in ultrasonic cleaning was also the high-pressure air jets. Ultrasonic cleaning machine noise was very low, remaining under 65 dB up to 5000 Hz. While noise levels increased above 12.5 kHz, they remained low, between 70 and 75 dB. High-pressure air jet noise exceeded 80 dB from 2 kHz, reaching 85 dB at 8 kHz and 90 dB at 12.5 kHz, similar to the high-pressure air jet noise in the CNC process.

In comparing the perceived noise attenuation effects of noise-canceling earphones and earplugs across CNC grinding, ultrasonic cleaning, and high-pressure air jet cleaning, earplugs were found to be the most effective. Relative scores for CNC grinding were 9.2 for earplugs, 8.0 for AirPods Pro 2, and 7.4 for Galaxy Buds 2 Pro. For ultrasonic cleaning and high-pressure air jet cleaning, the relative scores were 10 for earplugs, 6.4 for AirPods Pro 2, and 7.0 for Galaxy Buds 2 Pro. These results suggest that the high-frequency noise above 2 kHz generated in CNC and ultrasonic cleaning processes likely affected the performance of

the noise-canceling devices.

【Key words】 CNC noise, ultrasonic cleaning noise, grinding noise, frequency characteristics, noise-canceling earphones