

## 절삭 공정의 공조 제어를 위한 유증기와 미세먼지 농도 간 관계 분석

이준희, 지영민, 권동우\*

한국전자기술연구원

{joonhee305, ym.ji, dwkwon\*}@keti.re.kr

## Analysis of the Relationship Between Oil Mist and Particulate Matter for Air handling Control in Cutting Processes.

Joohee Lee, Youngmin Ji and Dongwoo Kwon\*

Korea Electronics Technology Institute (KETI)

## 요 약

본 논문은 절삭 공정에서의 유증기와 미세먼지 농도 간 관계를 분석한 결과를 제시한다. 절삭 공정에서는 절삭유로 인한 유증기 냄새가 근무자들의 근무 환경 저하에 큰 영향을 준다. 기존에는 절삭유 냄새를 줄이기 위해 근무자의 경험에 의존하는 댐퍼 개도율 제어 방식을 사용한다. 그러나 절삭 공정에서는 온도가 품질에 많은 영향을 미치고, 그에 따른 에너지 사용량을 최적화하는 것이 중요하지만, 예측이 아닌 경험에 의존하는 방법은 공조기 운영에 있어서 시스템화와 최적화가 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 미세먼지 농도와 유증기의 관계를 분석하여 절삭유 냄새에 대한 정량적 평가 지표를 도출하고, 댐퍼 개도율 제어를 통한 냄새 수치의 민감도를 분석한 결과를 제시한다.

## I. 서론

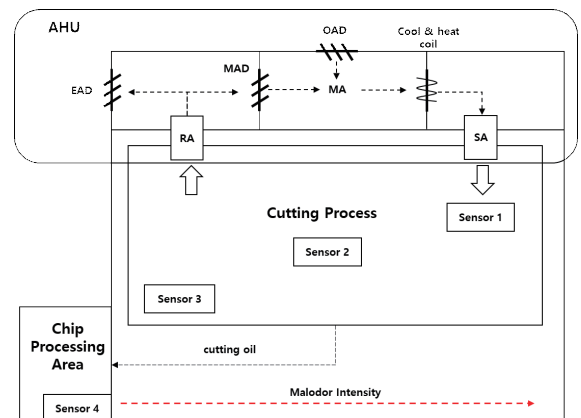
절삭 공정에서는 윤활성과 냉각 및 방청의 목적으로 절삭유를 사용하고 있다. 하지만 절삭유의 마찰열이나 부패로 인해 발생하는 악취 성분과 휘발성 유기 화합물(VOC, Volatile Organic Compounds)은 근무자들의 근무 환경을 저하시키는 원인으로 손꼽힌다.[1] 절삭 공장에서 공조기 운영의 목표는 품질을 위한 온도 유지, 에너지 사용량 최적화, 근무 환경 개선을 위한 절삭유의 냄새 절감이다. 항온이나 에너지 소비량은 센서를 통해 정량화된 계측으로 최적화가 가능하지만, 절삭유 냄새는 정량적 평가가 어렵다. 또한 절삭유 냄새와 연관성이 높은 VOC나 유증기 데이터를 계측하거나 활용하기 어려운 환경에서는 근무자들의 체감과 운영 경험에 의존하여 댐퍼 개도율을 제어하는 환기 방식을 사용한다. 이는 일정한 온도 유지나 에너지 사용량 최적화가 어려워진다는 문제점이 존재한다. 따라서 VOC나 유증기 센서를 활용하기 어려운 경우 미세먼지 센서를 활용하여 미세먼지 농도를 절삭유 냄새의 정량적 평가 지표의 대안으로 사용하는 방법을 연구하였다. 절삭유에서 발생하는 VOC의 주요 성분에는 Hexane, Pentane과 같은 유증기의 주요 성분들이 검출되며[1] 절삭 공정에서의 유증기의 구성은 주로 PM1이 40.1~66.0%, PM2.5-PM1이 16.1~41.3%, PM10-PM2.5이 16~13.7%으로, 공기 중 유증기 입자의 약 80%는 2.5 마이크로미터 미만의 크기를 가진 것으로 나타났다.[2] 기존 연구 결과를 토대로 미세먼지 센서는 유증기를 간접적으로 감지할 수 있다고 판단하였다. 본 논문에서는 미세먼지 센서를 통해 수집된 미세먼지 농도와 유증기와의 관계를 분석하고, 유증기로 인한 절삭유 냄새의 정량적 평가 지표인 냄새 수치를 도출한다. 또한 댐퍼 개도율 제어 실험을 통해 냄새 수치의 변화를 관찰한 실험 결과를 제시한다.

## II. 본론

## 2.1 공장 환경 정보

절삭 공정 내 절삭유의 흐름은 그림1과 같다. 절삭 설비들로부터 사용이 완료된 절삭유는 하단의 파이프를 통해 칩과 함께 칩 처리소로 이동하

게 된다. 칩 처리소 내에는 절삭유가 모이게 되며, 이에 따라 칩 처리소에서부터 절삭유 냄새가 심하게 나타난다. 공장 내 환기를 위한 공기 제어 시스템(AHU, Air Handling Unit)은 외기(OA, Out Air) 댐퍼, 배기(EA, Exhaust Air) 댐퍼, 혼합(MA, Mixing Air) 댐퍼, 환기(RA, Return Air) 팬, 급기(SA, Supply Air) 팬, 먼지 필터, 냉난방 코일 등으로 구성되어 있으며, 배기 댐퍼를 통해 빠져나간 공기량만큼 외기 댐퍼를 통해 다시 유입시켜 공기량을 일정하게 유지하는 식으로 동작한다. 공장의 넓은 면적을 관리하기 위해 공조기는 여러대로 운영되고 있다.

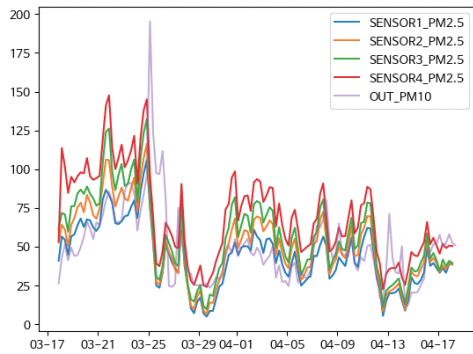


(그림 1) 공장 설비 도식화

## 2.2 미세먼지 센서 및 데이터 수집 정보

실내 미세먼지를 측정하기 위해 Web of Things(WoT) 기반 복합 환경 센서[3]를 사용하며 미세먼지 센서는 광 산란 방식의 센서인 PMS 7003을 탑재했다. 센서는 칩 처리소로부터 먼 순서부터 1, 2, 3, 4번 총 4개의 센서를 설치하였다. 실내 미세먼지 농도는 10초에 한 번씩 수집된다. 외부 미세먼지 농도는 AirKorea에서 제공하는 지역별 미세먼지 데이터를 활용하였으며 한 시간 주기로 데이터가 제공된다.

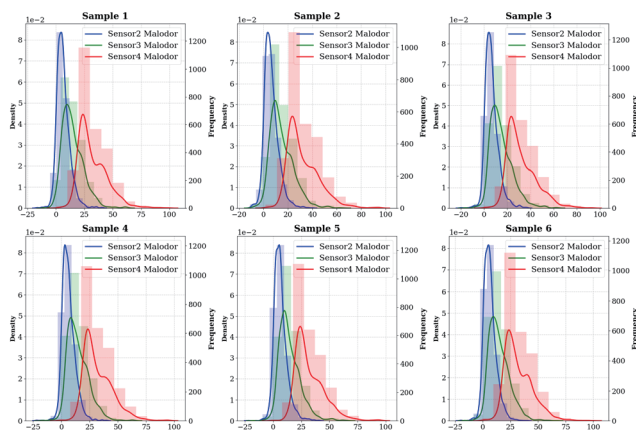
그림 2는 센서로 수집한 미세먼지 농도 간 차이와 외부 미세먼지 간 관계를 확인하기 위해 시각화한 그래프이다. 센서 1번부터 4번 순으로 미세먼지 농도가 뚜렷하게 높아지는 걸 통해 미세먼지 센서에서 유증기를 감지할 수 있고, 냄새가 많이 나는 곳일수록 미세먼지 농도가 높게 나타난다고 판단하였다. 또한 실내 미세먼지 농도는 외부 미세먼지 농도와 상관성이 높게 나타나는데, 이는 현장에서는 절삭유 냄새 절감을 위해 상시로 댐퍼 개도율을 일부 열어 환기하기 때문에 외기가 유입되어 발생한 결과라고 판단하였다.



(그림 2) 외부 미세먼지 및 실내 미세먼지 추이

2.3 냄새의 정량적 평가 지표 도출 및 위치별 냄새 수치의 분산 분석  
센서의 미세먼지 농도를 그대로 냄새 평가 지표로 사용하기엔 외부 미세먼지의 상관성이 높기 때문에 외부 미세먼지의 영향력을 최소화할 필요가 있다. 각 센서의 절대적인 미세먼지 농도 대신 상대적인 차이를 활용한다면 외부 미세먼지의 영향력을 줄이고, 공장 위치에 따른 냄새의 강도를 비교할 수 있다고 판단하였다. 절삭유 냄새 수치는 칩 처리소에서 가장 먼 1번 센서를 기준으로 2, 3, 4번과 1번 센서의 미세먼지 농도 차이로 한다. 냄새 수치에 대한 분포 분석을 통해 위치별로 유의미하게 차이가 있는지 분석하기 위해 분산 분석을 시행한다.

그림 3은 약 한 달 동안의 냄새 수치를 5분 단위 평균으로 다운샘플링을 한 9,008개의 표본을 bootstrapping 기법을 활용해 30%의 데이터를 복원 추출하여 6개의 샘플로 재구성한 뒤 분포를 시각화한 그래프이다.



(그림 3) 샘플 별 냄새 수치 분포

각 샘플을 분석해 보면 센서별 냄새 수치는 한쪽으로 치우쳐진 분포 모양을 하고 있으며, 사피로 정규성 검정을 통해 냄새 수치들이 정규분포가 아님을 확인하였다. 따라서 크루스칼-왈리스 검정과 U-Test(맨휘튼 검정)을 시행해 미세먼지 센서를 통해 절삭유 냄새를 정량적으로 계측할 수 있는지를 분산 분석을 통해 검증한다.

표1은 각 샘플의 검정 결과이다. 모든 샘플의 크루스칼-왈리스 검정은 p-value가 0.05 미만으로 나타나 세 분포가 같다는 귀무가설을 기각하여 최소 하나의 분포는 유의하게 다르다는 결과를 얻었다. 또한 실내에 있는 2, 3번 센서의 냄새 수치 간 U-Test를 시행하였고, 모든 샘플의 p-value가 0.05 미만으로 나타나 2, 3번 냄새 수치가 동일한 분포라는 귀무가설을 기각하여 유의미한 차이가 있음을 확인하였다. 따라서 외부 미세먼지 농도의 영향력을 최소화하기 위해 도출해낸 실내 미세먼지 농도 차이 기반 냄새 수치는 냄새의 강도에 따라 유의미하게 차이가 난다는 결론을 얻을 수 있었다. 위 분석을 통해 미세먼지 센서를 통해 절삭유 냄새를 정량적으로 계측이 가능함을 확인하였다.

(표 1) 샘플 별 분산 분석 결과

Test Name	K.W Test		U-Test	
Result	FV	PV	FV	PV
sample1	922.5	4.75e-201	3059476	6.70e-25
sample2	899.2	5.39e-196	3070025	4.46e-24
sample3	895.1	4.26e-195	309678	1.66e-22
sample4	915.5	1.51e-199	3078545	2.01e-23
sample5	921.7	6.94e-201	3087296	9.26e-23
sample6	922.1	5.81e-201	3080406	2.79e-23

### III. 결론

본 논문에서는 절삭 공정의 절삭유 냄새 절감을 위한 유증기와 미세먼지 농도 간 관계를 분석하였다. 공장 내 절삭유 처리 방법에 의해 칩 처리소와의 거리에 비례해 냄새의 강도가 다르게 나타나고, 미세먼지 농도도 냄새가 강할수록 높게 나타났다. 외부 미세먼지 농도의 영향력을 최소화하기 위해 1번 센서를 기준으로 다른 센서들과의 상대적인 차이를 통해 냄새에 대한 정량적 평가 지표를 도출하였다. 분산 분석을 통해 냄새 강도에 따라 냄새 수치가 유의하게 차이가 있음을 검증했고, 따라서 미세먼지 센서를 통해 절삭유 냄새를 정량적으로 계측이 가능함을 확인하였다. 또한 실증 환경에서 댐퍼 개도율 제어를 통해 냄새 수치가 민감하게 반응하는지 분석을 진행했다. 하지만 현장의 넓은 면적 대비 공조기를 전체 중 일부만 제어했다는 점과 절삭 작업 후의 처리 과정에서 발생한 유증기가 인접한 센서에 영향을 미쳐 미세먼지 농도에 왜곡이 발생하는 등 현장의 통제 불가능한 변수들로 인해 일관적인 결과를 얻지 못했다. 향후 연구에서는 다양한 환경과 조건을 고려해 미세먼지와 유증기 간 관계를 모델링하고 절삭유 냄새 절감을 위한 방안을 계속해서 연구할 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00441420)

### 참 고 문 헌

- [1] M. An, S. Park and C. Shin, "The Research of Odor and VOC Emitted in the Metal-working", Journal of Korean Society of Environmental Technology, vol. 8, no. 4, pp. 272-277, 2007
- [2] Y. Li et al. "The influence of ventilation modes on oil mist particles diffusion in a machining workshop", Heliyon, vol. 10, no. 5, 2024
- [3] D. Kwon et al. "Development of Web-of-Things Standard Protocol-based Complex Environmental Sensor Device with High Availability Support", the Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 49, no. 03, 2024