

석사학위논문

휴대폰 부품 가공 CNC 공정에서의
에탄올 공기 중 농도 및 작업자
노출정도에 관한 연구

2017년

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
양 슬 기

석사학위논문
지도교수 박두용

휴대폰 부품 가공 CNC 공정에서의
에탄올 공기 중 농도 및 작업자
노출정도에 관한 연구

A Study on Airborne Ethanol Concentrations and Workers'
Exposure to Ethanol in a High-Speed CNC Milling Process
for Aluminium Parts for Smartphones

2016년 12월 일

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
양 슬 기

석사학위논문
지도교수 박두용

휴대폰 부품 가공 CNC 공정에서의
에탄올 공기 중 농도 및 작업자
노출정도에 관한 연구

A Study on Airborne Ethanol Concentrations and Workers'
Exposure to Ethanol in a High-Speed CNC Milling Process
for Aluminium Parts for Smartphones

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2016년 12월 일

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
양 슬 기

양 슬 기의 공학 석사학위 논문을 인준함

2016년 12월 일

심사위원장 윤주일 

심사위원 주창엽 

심사위원 박두용 

국 문 초 록

휴대폰 부품 가공 CNC 공정에서의 에탄올 공기 중 농도 및 작업자 노출정도에 관한 연구

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
양 슬 기

에탄올을 냉각제로 사용하는 국내 모 휴대폰 부품 제조 사업장의 CNC 가공 공정에서 공기 중 에탄올 농도 및 근로자 노출을 측정평가하였다. 측정일은 여름철인 2016년 8월 26일과 겨울철인 12월 27일이었다. 여름철에는 CNC 기기 27대가 가동 중이었고 겨울철에는 4대만이 가동 중이었다.

CNC 기기의 바로 앞에서 측정한 에탄올 농도는 2016년 8월 26일(여름, 27대 가동), 활성탄관으로 측정한 결과는 487 ± 203 ppm이었고, 확산식 시료채취기의 결과는 461 ± 178 ppm이었다. 12월 27일(겨울, 4대 가동)에는 활성탄관으로 측정한 결과는 569 ± 438 ppm이었고, 확산식 시료채취기로 측정한 결과는 531 ± 133 ppm이었다. 공장의 중간 통로인 CNC 라인 사이의 기둥에서 여름철에 활성탄관으로 측정한 결과는 283 ± 6 ppm, 확산식 시료채취기의 결과는 319 ± 44 ppm이었다. 겨울철(12월 27일)에는 확산식 시료채취기로 측정한 결과, 239 ± 38 ppm이었다. 겨울철에 가스검지관으로 CNC 기기의 바로 앞에서 측정한 에탄올 농도는 312 ± 47 ppm 으로 나타났다.

실험실에서 유리병에 알고 있는 공기시료를 제조하여 확산식 시료채취기의

측정정확도를 시험한 결과, 확산식 시료채취기 간의 변이는 1.0~4.6%로 낮았으며, 가스검지관과 비교한 결과 매우 유사한 결과를 보였다. 실험실에서 유리병에 알고 있는 공기시료를 제조하여 활성탄관법의 측정정확도를 시험한 결과 채취기간 변이는 1.6~3.3%로 낮았으며, 가스검지관과 비교한 결과, 약간의 오차가 발생하였다.

활성탄관의 탈착용매로 1% 2-butanol+CS₂를 사용할 경우 탈착효율은 90~98%로 나타났다. 확산식 시료채취기(3M OVM 3500)의 경우, 탈착용매로 1% 2-butanol+CS₂를 사용하면 탈착효율이 45~61%로 매우 낮았으며, 변이도 크게 나타났다. 반면 3M사에서 추천한 Acetonitrile을 사용할 경우 93~97%로 양호하게 나타났다.

【주요어】 에탄올, 냉각제, CNC 가공공정, 탈착효율, 확산식 시료채취기

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 연구 방법	4
제 1 절 연구대상 사업장 및 공정	4
제 2 절 측정 대상물질	5
제 3 절 측정방법	5
1) 대상 사업장의 공기 중 에탄올 시료채취	5
2) 측정법 정확도 비교를 위한 공기시료 제조 및 시료채취	6
3) 분석방법	6
가) 탈착	6
나) 분석	7
제 3 장 연구 결과	8
제 1 절 CNC 가공 공장의 공기 중 에탄올 농도	8
1) 사업장 및 공정개요	8
2) 측정개요 및 공장 가동 상황	9
3) 장소별 공기 중 에탄올 농도	11
4) 가스검지관의 측정결과(2016.12.27.)	16
5) 개인시료 측정 결과	18
제 2 절 공기 중 에탄올 농도 측정 방법 비교	20
1) 확산식 시료채취기와 가스검지관	20

2) 활성탄관과 가스검지관	23
3) 탈착용매의 종류와 양에 따른 탈착 효율	24
가) 확산식 시료채취기의 탈착효율	24
나) 활성탄관의 탈착효율	26
제 4 장 결 론	27
참 고 문 헌	28
ABSTRACT	29

표 목 차

〈표 1〉	가스크로마토그래피 분석조건	7
〈표 2〉	지역시료 측정결과(2016.08.26.)	13
〈표 3〉	지역시료 측정결과(2일차)	15
〈표 4〉	가스검지관 측정결과	17
〈표 5〉	확산식 시료채취기를 이용한 개인시료 측정결과	19
〈표 6〉	유리병의 에탄올 공기시료에 대한 확산식 시료채취기와 가스검지관의 측정결과	20
〈표 7〉	유리병의 에탄올 공기시료의 시간별 에탄올 농도	21
〈표 8〉	유리병의 에탄올 공기시료에 대한 확산식 시료채취기 측정결과	22
〈표 9〉	유리병의 에탄올 공기시료에 대한 활성탄관과 가스검지관 결과	23
〈표 10〉	유리병의 에탄올 공기시료에 대한 활성탄관 측정결과	23
〈표 11〉	탈착용매의 종류에 따른 확산식 시료채취기의 탈착 효율	25
〈표 12〉	탈착용매의 양에 따른 확산식 시료채취기의 탈착 효율	25
〈표 13〉	활성탄관의 탈착효율	26

그 립 목 차

[그림 1]	대상 사업장 CNC 기기 배치도	10
--------	-------------------	----

제 1 장 서 론

고용노동부에 의하면 2016년 1월 경기도 소재 모 전자부품 제조업체 2곳에서 일하던 파견 근로자 4명이 메틸알코올 급성 중독으로 시력 손상을 입은 사고가 발생하였다고 밝혔다(고용노동부 2016a). 보도 자료를 보면 사고가 난 곳은 스마트폰 부품을 가공하는 하청업체였고 사고를 당한 근로자는 파견근로자였다. 고용노동부의 보도 자료에 의하면 4건의 메탄올 중독사고가 발생했다.

첫 번째 건은 2016년 1월 16일, 29세의 여성근로자가 퇴근 후에 의식혼미와 시력이상 증상으로 A병원에 입원치료를 받았으나, 메탄올 중독으로 시신경이 손상되어 두 눈이 실명될 위기에 처해 있다고 했다. 두 번째 경우는 2016년 1월 22일, 29세의 남성근로자가 시력이상 증상을 보여 B병원에 입원하여 치료를 받고 퇴원했으나 역시 두 눈 모두 실명 위기에 있다고 했다. 세 번째 환자는 2016년 1월 26일 사고가 발생한 사업장을 대상으로 그 곳에서 일하는 모든 근로자에 대한 임시건강진단을 실시하던 중 20세의 남성 근로자가 시야결손 증상을 보여 추적조사 중이라고 하였다. 마지막 4번째 환자는 25세 남성으로 2015년 12월 30일, 시력이상 증상 등으로 C병원에 입원하여 2016년 2월 3일까지 치료를 받다가 2016년 2월 5일 D병원에 입원하여 치료를 받고 있으나 왼쪽 눈은 실명 상태에 있으며 오른쪽 눈은 시력 손상이 있는 상태라고 하였다. 이후 고용노동부는 2월 26일 추가로 보도 자료를 배포하여 비슷한 공정에서 추가로 메탄올 중독으로 실명의 위기에 처한 환자가 나타났다고 밝혔다(고용노동부 2016b).

메탄올 사고가 발생한 전자부품 제조업체는 최신 스마트폰 부품을 제조하는 중소규모 제조업체들이었다. 최근 스마트폰의 외형은 알루미늄 재질이 많고 방수 등의 기능과 매끄러운 표면처리를 위해 대부분 CNC 머신(Computerized Numerically Control Machine, 이하 ‘CNC’라 함)으로 가공한다. 이때 CNC 머신은 절삭용 드릴 플루우트(flute)의 회전속도가 분당 60,000회 정도인 고속 CNC 머신(high speed running machine)이며, 고속 CNC 머신의 냉각제(coolant)로는 에탄올을 사용하도록 권장하고 있다

(Datron Dynamics, Inc., 2010). 그러나 국내 CNC 제조업체나 사용업체에서는 사고가 발생하기 이전까지 대부분 공업용 알코올이라고 하는 메탄올을 사용한 것으로 알려졌다. 에탄올 대신 메탄올을 사용한 이유는 제품 생산이나 CNC 머신 작동에는 전혀 차이가 없는데, 메탄올이 에탄올의 약 절반에서 1/3정도 가격이기 때문이라고 한다. 이러한 사항은 본 연구를 하면서 측정한 사업주 면담을 통해서도 확인할 수 있었다.

고용노동부도 이번 사고의 원인을 알루미늄 절삭 과정에서 발생하는 열을 식히기 위해 절삭용제로 사용하는 메틸알코올로부터 발생된 공기 중 고농도의 메틸알코올 증기를 흡입하여 발생한 것으로 보고 있었다(고용노동부 2016a).

메탄올(또는 메틸알코올, 이하 ‘메탄올’이라 칭함)은 고농도에 노출되었을 때 의식불명이나 시신경 손상을 일으켜 실명에 이를 위험이 있다. 그러나 이번 사고가 발생하기 이전까지는 CNC 가공을 하는 사업장에서는 대부분 메탄올의 위험성에 대해서 인지하지 못하고 있었던 것으로 보인다. 심지어는 2016년 1차로 메탄올 중독이 발생한 이후 고용노동부와 한국산업안전보건공단에서 관련업체에 대한 일제 점검을 하고 메탄올 중독사고 예방을 위한 홍보를 했지만 그러한 와중에 또 다른 핸드폰 부품 생산 업체에서 메탄올 중독으로 유사한 사례가 발생하는 일이 벌어졌다.

2016년 2월 26일 고용노동부 보도 자료에 따르면 2016년 2월 22일, 경기도 부천에 소재한 한 병원에서 메틸알코올 중독 의심 사례가 발견되어 조사한 결과, 이 환자는 인천 남동구 소재 핸드폰 부품 가공업체에서 근무하던 28세 여성 근로자로 2월 17일, 시력장애, 의식혼미 등의 증상으로 병원에 입원한 후, 뇌경련, 뇌손상 및 시력이상 증상이 있는 것으로 진단되었으며 메탄올 중독으로 밝혀졌다(고용노동부 2016b).

이와 같은 메탄올 중독사고가 연이어 발생한 이후인 2016년 3월부터 초고속 CNC 머신을 이용한 휴대폰 부품 제조업체는 일제히 메탄올 사용을 금지하고 에탄올이나 새로운 대체 냉각제 - 예를 들어 Clean Cut이라는 상품명으로 개발된 냉각제 등- 또는 순수한 물 등으로 대체하였다고 한다. 메탄올 중독사고 이후, 고용노동부에서는 고속 CNC 머신을 이용한 휴대폰 부품 제

조업체는 2주마다 한 번씩 산업안전감독관이 방문하여 작업장을 확인하고 있다고 하며, 원청업체에서 메탄올 사용을 금지하도록 함에 따라 실제로 대부분의 업체에서 더 이상 메탄올 사용은 하지 않는 것으로 보인다. 그러나 고속 CNC 머신을 사용하여 휴대폰 부품을 가공하는 사업장에서는 이와 관련된 작업환경 연구를 하기 위한 작업환경측정이나 조사는 물론 면담조사조차 거부하기 때문에, 사고가 발생했음에도 불구하고 산업보건학적 현장조사는 매우 어렵다.

더구나 메탄올 중독사고 발생이후, 고속 CNC 머신을 이용한 알루미늄 가공 공정에서는 더 이상 메탄올을 사용하지 않기 때문에 이러한 공정에서 근로자의 메탄올 노출수준이나 공기 중 메탄올 발생 및 농도에 관한 연구를 진행하기 어려운 실정이다.

본 연구는 고속 CNC 머신으로 알루미늄을 가공하여 휴대폰 부품을 생산하는 업체에서 고속 CNC 머신의 냉각유로 에탄올을 사용할 때 근로자의 에탄올 노출수준과 작업장의 에탄올 발생 및 농도수준에 관한 조사와 연구를 실시한 것이다.

조사 대상 사업장도 사고가 발생한 사업장과 거의 유사한 CNC 머신과 부품 가공공정을 가지고 있으며 과거에는 냉각유로 메탄올을 사용했으나 더 이상 메탄올은 사용하지 않고 에탄올만 사용하고 있었다. 따라서 본 연구에서는 메탄올 농도를 측정하는 대신 현재 사용하고 있는 에탄올의 노출농도와 작업장의 공기 중 농도를 측정함으로써 간접적으로 과거의 메탄올 노출수준 등을 연구하는데 근거로 활용할 수도 있고, 현재의 에탄올 노출로 인한 문제점이나 안전성도 확인할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 본 연구대상의 공장은 경기도에 소재하고 있었으며, 공장관계자에 의하면 공장의 실내 천장 높이가 높아서 실내공간의 크기가 다른 공장에 비해 큰 편이고, 환기상태도 다른 공장에 비해 비교적 양호한 편이라고 하였다. 실제로 공장은 천장 높이가 높고 환기장치도 비교적 양호한 것으로 보였다. 그러나 사업장의 요구로 이러한 사항들은 자세히 조사할 수 없었고 제한된 시간 내에 CNC 머신 주위와 공장 내 공기 중 에탄올 시료와 근로자 노출수준을 평가하기 위한 시료만 채취할 수 있었다.

제 2 장 연구 방법

제 1 절 연구대상 사업장 및 공정

본 연구에서의 조사 대상 사업장은 경기도에 소재한 모 휴대폰 부품 가공 사업장이었다. 사업장 규모는 상시근로자가 사장을 포함하여 5명 이하로 소규모 사업장이었으나 고속 CNC 머신을 44대 보유하고 있었고, 생산직 근로자는 모두 파견업체로부터 파견된 파견근로자들이었다. 파견근로자 수는 수주 받은 물량에 따라 변동이 심하다고 했다.

CNC 머신은 국내 업체가 생산하여 납품한 고속 CNC 머신으로 대부분 밀폐되지 않고 개방되어 있었다. 다이아 커팅공정과 같은 특수 절삭가공을 하는 5대의 CNC 머신은 기계 전체가 밀폐되어 있었고 국소배기장치로 에탄올 증기를 배출하고 있었다. 작업자 위치 앞쪽에는 슬라이딩 도어가 달려 있어서 제품을 넣고 뺄 수 있도록 되어 있었지만, 작업을 하는 동안 슬라이딩 도어는 완전히 열어 놓은 상태였다.

CNC 머신의 냉각제로는 에탄올을 사용하고 있었다. 조사 대상 공장에서는 에탄올 이외에도 ‘클린컷(Clean Cut)’이라는 상품명인 냉각제를 사용하기도 하며, 물을 사용하기도 한다고 했다. 그러나 조사 당시 사용한 냉각제는 대부분 에탄올이었다.

냉각제 사용량은 기기 한 대당 적게는 하루 3~4L에서 많게는 하루 10L까지 사용한다. 이것은 제품의 종류와 요구되는 가공정밀도 및 품질수준에 따라 시간당 분사되는 냉각제의 양도 달라져야 하기 때문이다. 이에 따라 관리자가 CNC 머신 제어기로 CNC 머신마다의 에탄올 분사량을 조절한다.

공장 전체의 에탄올 소비량은 CNC 머신당 에탄올 소비량과 가동되는 CNC 머신의 숫자 그리고 가동시간 등에 의해 좌우된다.

근로자들의 작업시간이나 CNC 머신의 가동시간도 가공되는 물량이나 원청의 요구에 따라 수시로 달라지는데 예전에는 CNC 머신이 24시간 가동되었고 근로자들은 12시간씩 근무했다고 한다.

조사 당시 근무시간은 오전 7시 30분부터 오전 9시까지 기술자가 CNC 기

기를 세팅을 해 놓고, 파견근로자들은 오전 9시부터 오후 6시까지 작업을 하며, 매 2시간마다 10분씩 쉰다. 점심시간은 오후 1시에서 2시까지였다. 휴식 시간과 점심시간에는 CNC 기기의 작동을 일시적으로 멈춘다.

작업자 수는 작업물량에 따라 수시로 달라지며, 작업자들도 변동이 심하다고 한다. 조사 당시 대부분의 작업자는 방진마스크, 귀마개, 보안경을 착용하고 있었다. 작업 상황 및 내용에 따라 다르지만 보통 1명의 작업자가 여러 대의 CNC 기기를 작동하며 부품을 가공한다. CNC 기기는 자동으로 제품을 깎기 때문에 작업자의 업무는 가공될 부품을 CNC 머신에 넣어주고 가공된 후 제품을 꺼내는 단순한 반복 작업이다.

제 2 절 측정 대상물질

본 연구의 측정대상 물질은 공기 중 에탄올이었다. 우리나라의 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부고시 제2016-41호)에 고시된 에탄올의 시간가중평균노출기준(TWA)은 1,000 ppm으로 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health; NIOSH)과 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Hedalth Administration; OSHA, 2012)의 노출기준과 동일하다. 미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH)에서는 에탄올의 단시간노출기준(Short Term Exposure Limit; STEL)을 1,000ppm 으로 제안하고 있다.

제 3 절 측정방법

1) 대상 사업장의 공기 중 에탄올 시료채취

공기 중 에탄올 시료를 채취하기 위한 측정 및 분석 방법은 NIOSH METHOD 1400 및 3M사에서 제공하는 측정 및 분석지침을 기초로 하였으며, 확산식 시료채취기(3M OVM #3500, #3520)는 작업장 내 같은 지역

또는 동일한 작업자에게 두 개씩 부착시켜 약 한 시간씩 측정 하였다.

활성탄관(SKC 226-01)은 저유량 공기포집펌프(Gilian LFS-113DC)에 연결하여 지역시료를 채취하는 데 사용하였고, 유량 보정은 비누거품미터(Gilian Gilibrator 2)를 사용하였다.

가스검지관(Gastec, GV-100S)은 매뉴얼에 따라 현장에서 2분간 측정한 값을 기록한 뒤, 사업장 온도에 따른 온도보정을 해주었다.

2) 측정법 정확도 비교를 위한 공기시료 제조 및 시료채취

7.6 L 부피의 유리병 내부에 기류발생장치를 설치하고, 아크릴 덮개로 밀봉한 다음 미량주사기로 에탄올(Duksan, 99.9%)을 주입하여 알고 있는 농도를 만들었다. 아크릴 덮개에 구멍을 뚫어 활성탄관으로 시료를 채취하였고, 확산식 시료채취기는 미리 시료채취기를 유리병에 넣은 후 알고 있는 공기시료를 제조하였고 일정 시간 후 실험을 종료할 때, 확산식 시료채취기를 꺼냈다.

미량주사기로 에탄올을 주입할 때와, 가스검지관을 사용하여 유리병 내부의 농도를 확인할 때를 제외하고 측정이 이루어지는 동안에는 유리병 내부의 공기가 밖으로 빠져나오지 못하도록 모든 틈새를 파라필름과 찯농으로 밀폐하였다.

3) 분석방법

가) 탈착

활성탄관에 포집된 시료는 앞층과 뒷층을 따로 분리하여 1mL의 1% 2-butanol in CS₂ 용액에 각각 30분씩 탈착시켜 가스크로마토그래피로 분석하였다.

확산식 시료채취기는 NIOSH method의 활성탄관 탈착법과 동일하게 탈착용매로 1% 2-butanol in CS₂ , 1ml와 3M에서 제시한 Acetonitrile을 1 ml 를 사용하였다. 3M OVM 3500을 사용할 때 NIOSH에서 활성탄관의 탈착용

매로 제시한 1% 2-butanol in CS₂ 를 사용할 경우 탈착효율이 매우 낮았다. 모든 시료는 탈착효율 실험을 하고 이를 보정하였다.

나) 분석

탈착한 시료의 분석에는 불꽃 이온화 검출기(Flame Ionization Detector, FID)가 장착된 가스크로마토그래피(Agilent 6890)를 사용하였고, 가스크로마토그래피의 분석 조건은 <표 1>과 같다.

<표 1> 가스크로마토그래피 분석조건

Detector	FID(Flame Ionization Detector)
Column.	DB-WAX(20.0 m x 180 μ m x 0.18 μ m)
Injector Temp.	200 $^{\circ}$ C
Detector Temp.	250 $^{\circ}$ C
Split ratio	150:1
Carrier gas.	N ₂ , 1.0 mL/min
Injection volume	1 μ L

제 3 장 연구 결과

제 1 절 CNC 가공 공장의 공기 중 에탄올 농도

1) 사업장 및 공정개요

본 연구의 대상 사업장에서 가지고 있는 총 44대의 CNC 기기 배치도는 [그림 1]과 같다.

[그림 1]에서 A라인은 다이아 커팅공정, B, C, D 라인은 주로 1, 2차 가공 라인이며, E라인은 특수가공 공정으로 2대의 CNC 머신이 있었다.

A라인의 CNC 기기 5대는 품질관리를 위해 기기 전체가 커버로 밀폐되어 있고, 앞쪽에만 슬라이딩 도어가 있는 구조였다. 그 외의 나머지 CNC 기기는 커버가 없는 상태로 개방되어 있었다.

이 사업장에서 가공하는 제품은 알루미늄 재질의 스마트폰 부품이다. 부품 가공공정은 모두 CNC 가공공정으로, 알루미늄 조각을 깎는 순서에 따라 3~4개의 공정으로 나뉜다. 처음에는 앞면 1차 가공, 그 다음은 뒷면(현장에서 배면이라 함) 1차 가공, 그 다음은 2차 절삭을 한다. 이후 필요한 경우 특수가공을 하기도 한다. 마지막으로 알루미늄 판에서 가공된 작은 버튼을 잘라내는 공정으로 옆면을 매끄럽게 잘라내는 다이아 커팅 공정이 있다. 각 공정은 부품 종류 및 원청의 요구도에 따라 달라진다.

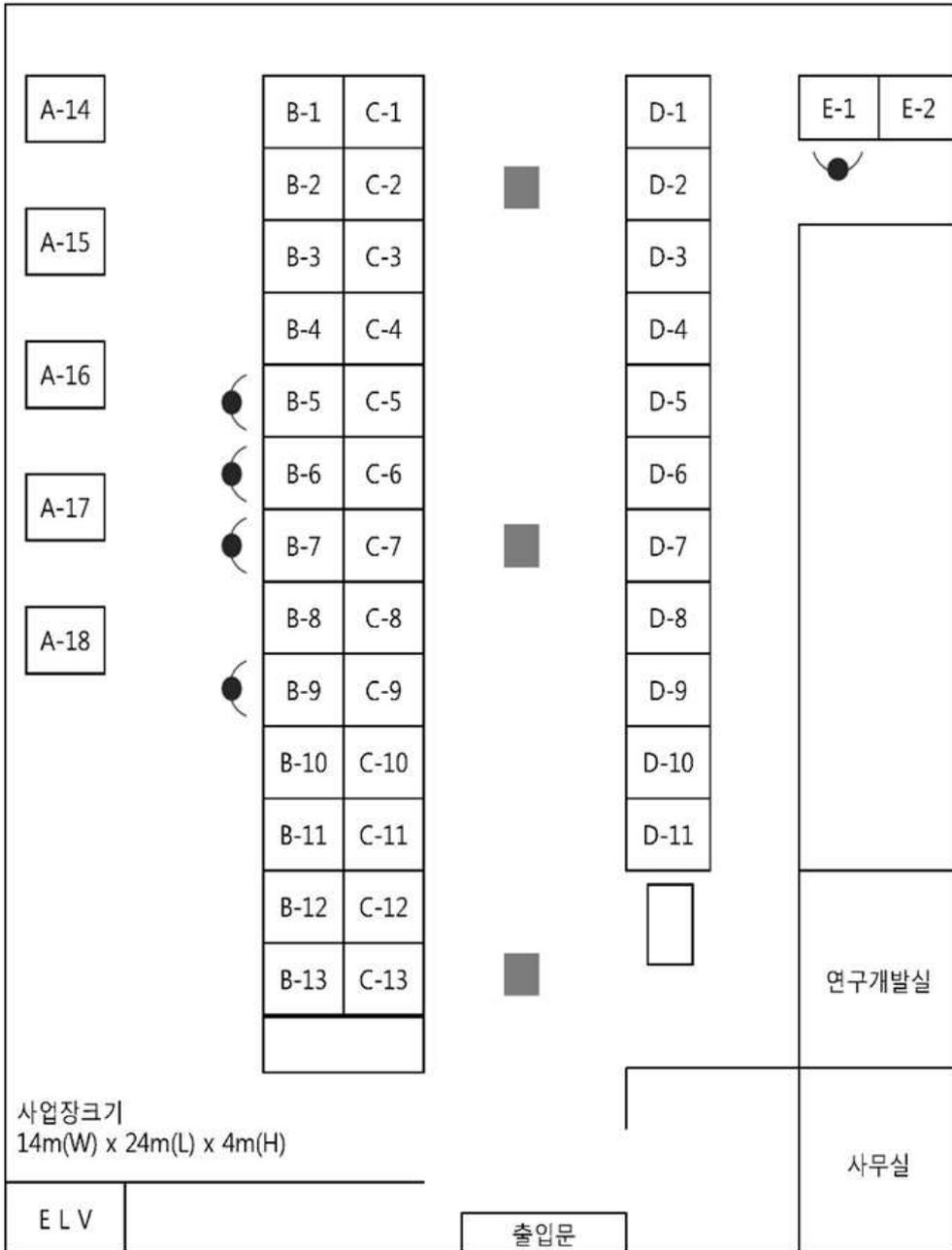
측정 당시 사업장에서 가공하고 있던 부품은 모 회사의 스마트폰의 옆면에 들어가는 알루미늄 재질의 버튼이었다. 냉각제는 100% 에탄올을 사용하고 0 있었다. 냉각제는 고속으로 회전하는 부분(flute라 불림)이 알루미늄 소재를 깎아내거나 연마할 때 발생하는 열을 제거하기 위해 고속회전체(flute)의 끝부분에 분사한다. 분사된 에탄올은 곧바로 증발하면서 마찰열을 흡수한다. 증발된 에탄올 증기는 국소배기장치에 의해 일부분이 제거되고 일부는 작업장 공기 중으로 확산된다.

2) 측정개요 및 공장 가동 상황

측정은 여름과 겨울에 각각 1일씩 이틀간 측정하였다. 1차 측정일은 2016년 8월 26일이었으며, 2차 측정은 2016년 12월 27일이었다.

1차 측정일인 8월 26일에는 총 27대의 CNC 머신이 가동 중이었다. A 라인의 다이아 커팅을 하는 CNC 머신은 1대 였고, B 라인에 5대 그리고 C, D라인 21대가 가동 중이었다. 냉각제로는 모두 에탄올을 사용하고 있었다. 당시 메탄올 중독사고 여파로 물량이 크게 감소했다고 한다. 많은 물량이 베트남 등 해외로 넘어가 국내에서 가공되는 물량이 크게 감소했기 때문이라고 하였다.

2차 측정일인 12월 27일에는 CNC 머신 6대만이 가동 중이었다. 알루미늄 부품을 위해 가동 중인 CNC 머신은 4대였고, 위치는 모두 B라인이었으며, 냉각제는 에탄올이었다. C-6과 E-1 기기 2대는 95%가 물이고 에탄올이 5% 미만 포함된 '클린 컷'이라는 상품명의 냉각제를 사용하고 있는 중이었다. 따라서 에탄올의 오염원이 되는 CNC 기기는 총 4대만이 가동되고 있었으므로 에탄올 농도가 평소보다는 훨씬 낮을 것으로 추정 되었다. 반면 2차 측정일인 12월 27일은 겨울이므로 창문을 모두 닫아 놓아 여름철인 8월 26일에 측정할 때보다 환기량이 크게 낮아 공장 내 에탄올 농도가 상승하는데 영향을 미쳤을 것으로 보였다.



[그림 1] 대상 사업장 CNC 기기 배치도.

3) 장소별 공기 중 에탄올 농도

2016년 8월 26일 확산식 시료채취기 및 활성탄관을 이용한 지역시료 측정 결과는 <표 2> 및 <표 3>과 같다.

CNC 기기 앞 쪽에서 작업자가 일을 할 때 기기와 작업자의 사이즘의 위치에서 작업에 방해가 되지 않도록 기기의 왼쪽 또는 오른쪽 낮은 칸막이에 시료채취기를 부착하여 측정한 에탄올 농도는 266~684 ppm으로 나타났다.

에탄올 농도의 노출기준 1,000 ppm을 초과하지는 않았지만 상당히 높은 수준의 에탄올 증기가 발산되고 있음을 알 수 있다. 측정 당시에는 한 여름으로 벽면의 창문이 모두 개방된 상태였고 작업장 중간 중간에 스탠드형 선풍기를 틀어 놓아 비교적 환기가 잘 되고 있었고, 작업장 내 기류도 상당히 있었던 점을 고려하면 이 정도의 농도수준은 매우 높은 것으로 보인다. 특히 2016년 초반 메탄올 중독사고가 나면서 고용노동부와 안전보건공단 그리고 원청까지 나서서 작업장을 점검하고 개선을 하도록 함에 따라 그 동안 국소배기시스템 일부 보강 등 여러 가지 개선대책을 마련해 왔지만 아직도 에탄올 농도가 상당히 높은 수준이었다.

특히 과거에는 메탄올을 사용했으므로 메탄올 농도라고 가정하면 266~684 ppm수준은 메탄올 노출기준 200 ppm을 모두 초과하는 수준이며, 최고 농도는 기준치의 3.4배에 이른다. 메탄올을 사용하든 에탄올을 사용하든 사용량이 비슷하다면 공기 중 농도는 거의 비슷한 수준일 것이라고 보인다.

다만 8월 26일에 측정한 시료는 활성탄관과 확산식 시료채취기(3M OVM 3500)를 사용하여 채취하였기에 두 시료를 같은 분석조건에서 분석하고자 탈착용액을 NIOSH method #1400에서 권고한대로 2-butanol과 CS₂ 를 1:99로 혼합한 용매 1 ml로 탈착하였다. 그러나 3M OVM 3500은 2-butanol과 CS₂ 를 1:99로 혼합한 용매로 탈착하면 탈착효율이 약 0.55 정도로 극히 낮아진다. 실제 제조사인 3M에서는 3M OVM 3500의 탈착용매로 acetonitrile을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 3M OVM 3500으로 탈착효율 실험용 시료를 제작하여 NIOSH method #1400에서 제시한 용매(2-butanol과 CS₂ 를 1:99로 혼합한 용매)와 3M이 제시한 acetonitrile로 동시에 분석을

실시하여 2-butanol과 CS₂ 를 1:99로 혼합한 용매의 탈착효율을 검증하였고 동시에 acetonitrile의 탈착효율도 구하여 비교해 보았다. 3M OVM 3500의 확산식 채취기는 2-butanol:CS₂ (1:99) 용매로 탈착할 때 효율은 농도별로 34~53%로 상당히 낮은 반면 acetonitrile로 탈착할 경우 탈착효율은 약 93% 이상으로 양호하였다.

모든 측정결과는 최종적으로 탈착효율을 보정하여 제시하였다.

D-3 기기 측면에서 채취한 두 개의 활성탄관 시료 중 하나의 시료에서 파과가 일어났고, 펌프도 오작동한 상태로 미루어 보았을 때, 실제 측정 결과는 파과가 일어나지 않은 시료와 농도 수준이 유사했을 것으로 추정된다.

에탄올 증기는 측정 위치나 측정 시점에 따른 농도 변화가 심하기 때문에, 근로자의 노출 수준을 정확히 파악하고자 할 때에는 시료 수와 채취 시간, 측정기기 부착 위치가 충분히 고려되어야 할 것이다.

〈표 2〉 지역시료 측정결과(2016.08.26.)

측정위치	측정시간	농도(ppm)				
		동시채취시료			AM±SD	
		1	2	3		
활성탄관법						
기기 앞	D-3	14:53~15:53(60min)	(328)*	713	-	713
	D-4	15:02~16:07(65min)	415	446	-	430±22
		16:09~17:09(60min)	282	357	-	320±53
					(N=3)	487±203
라인 C-D 사이 기둥		15:09~16:18(69min)	279	280	-	280±1
		16:22~17:12(50min)	268	305	-	286±26
						(N=2)
확산식 시료 채취기						
기기 앞	A-15	15:21~17:01(100min)	292	265	-	279±14
	D-3	14:55~15:55(60min)	411	339	-	375±36
	D-4	15:02~16:02(60min)	684	698	-	691±7
		16:16~17:13(57min)	489	508	-	499±10
					(N=4)	461±178
라인 C-D 사이 기둥		15:11~16:51(100min)	266	285	298	283±13
		16:14~17:11(57min)	349	373	382	368±14
		15:15~16:55(100min)	304	313	-	308±5
					(N=3)	319±44
사무실 입구		15:45~17:05(80min)	113	115	118	115±2

*펌프 오작동, 시료 파과

한편 2016년 12월 27일 측정한 장소별 메탄올 농도는 <표 3>과 같다. 이때는 제품을 생산하기 위해 정상적으로 가동시키고 있는 CNC 기기는 4 대였다.

기기 앞 작업자가 작업하는 위치와 공장 중간의 기둥에 부착한 장소시료에서 측정된 에탄올 농도는 201~1,203 ppm으로 나타났다. 2차 측정시 가동되는 CNC 기기는 4대에 불과했음에도 공기 중 에탄올 농도는 1차 측정당시 결과인 266~684 ppm과 유사하거나 더 높게 나타났다. 1차 측정 당시 가동되던 기기 수는 모두 27대로 2차 때의 약 7배였다. 아마도 1차 측정을 할 때는 여름이었고 2차 측정 때는 겨울이었기 때문에 환기에 의한 차이가 농도에 미친 영향이 매우 크지 않았나 생각된다.

2차 측정 때는 4대 밖에 가동되지 않았지만 공기 중 에탄올 농도는 노출기준 1000 ppm을 초과하는 것으로 나타났다.

이러한 결과로 미루어 볼 때 메탄올을 사용했을 당시 대부분의 CNC 공정에서 일하던 근로자의 노출농도는 메탄올 기준치 200 ppm을 크게 상회했을 것으로 추정된다.

동일한 조건의 환경에서 활성탄관과 확산식 시료채취기를 이용한 두 측정치 사이에 상관관계가 있는지 확인해 보고자 하였으나, 시료 채취 지점이 정확히 일치하지 않았기 때문에 두 개의 결과치를 비교하는 것은 어려웠다.

B-5, B-6 기기는 양 옆으로 투명한 플라스틱 칸막이가 덧대어져 있어 그 테두리에 활성탄관을 고정시켜 시료를 포집하였고, B-7은 칸막이가 덧대어져 있지 않아 에탄올이 분사되는 지점과 거의 비슷한 높이, 비슷한 깊이에서 시료를 포집 하였는데, 두 측정치 간의 차이가 3~4배 수준이었다.

〈표 3〉 지역시료 측정결과(2일차)

냉각제	측정위치	측정시간	농도(ppm)				
			동시채취시료			AM±SD	
			N1	N2	N3		
활성탄관법							
에탄올	기기 앞	B-5	16:21~16:51(30min)	303	326	-	315±16
			16:58~17:58(30min)	334	346	-	340±8
		B-6	17:03~17:33(30min)	396	397	-	396±0.5
			B-7	16:12~16:42(30min)	1203	1247	-
						(N=4) 569±483	
확산식 시료 채취기							
에탄올	기기 앞	B-5	11:43~12:43(60min)	377	411*	-	394±24
			14:47~15:47(60min)	523	534	-	528±8
		B-6	11:41~12:41(60min)	735	738*	-	736±3
			14:45~15:45(60min)	621	650	-	635±21
		B-7	11:45~12:45(60min)	636	716*	-	676±57
			14:45~15:45(60min)	398	432	-	415±24
		B-9	11:46~12:46(60min)	396	449*	-	422±37
			14:48~15:48(60min)	430	461	-	445±22
						(N=8) 531±133	
에탄올	라인 A-B 사이	14:49~15:49(60min)	267	277	280	275±6	
		12:02~13:02(60min)	242	-	-	242	
	라인 C-D 사이 기둥	14:53~15:53(61min)	197	201	-	199±3	
						(N=3) 239±38	
클린컷	E-1 기기 측면	11:36~12:36(60min)	120	120	-	120±0.2	
	C-6 기기 측면	12:00~13:00(60min)	179	-	-	179	
						(N=2) 150±42	

*3M Organic Vapor Monitor 3520

4) 가스검지관의 측정결과(2016.12.27.)

작업환경 측정결과는 정확도도 중요하지만 현장성과 신속성도 중요하다. 작업장에서 노출농도를 알고 싶거나 특정 장소 또는 특정 공정에서의 노출농도를 파악하고자 할 때는 더욱 그러하다.

그런 의미에서 가스검지관은 매우 유용하다. 이러한 점에 착안하여 12월 27일 측정 시에는 활성탄관과 확산식 시료채취기로 시료를 채취하는 동안 각 장소에서 가스검지관을 이용하여 공기 중 에탄올 농도를 측정하였다.

전체 21개의 가스검지관 측정결과 중 에탄올을 냉각제로 사용하는 CNC 기기 앞에서 측정한 공기 중 에탄올 농도의 평균은 312 ± 47 ppm으로 나타났다. 가동 되고 있는 CNC 기기의 작업자 뒤쪽 통로에서 측정한 결과의 평균은 302 ± 11 ppm이었으며, 같은 라인의 비가동 CNC기기 앞에서 측정한 결과는 그보다 낮은 229 ± 6 ppm이었다.

비가동 라인 사이의 통로에서 측정한 결과는 171 ± 8 ppm 이었으며, 같은 라인의 CNC 기기 앞에서 측정한 결과는 그보다 낮은 109 ± 7 ppm 이었다.

측정 당시 에탄올 증기 발생원으로부터 가장 멀리 떨어진 지점인 작업장 입구에서의 평균농도는 78 ± 39 ppm이었다.

〈표 4〉 가스검지관 측정결과

측정위치	측정시간	에탄올농도(ppm)	
	CNC B-5	17:07	300
	CNC B-5	12:15	238
	CNC B-6	14:30	251
	CNC B-6	14:58	375
가동 CNC	CNC B-6	12:21	333
기기 앞	CNC B-7	14:37	300
	CNC B-7	12:18	375
	CNC B-9	14:43	313
	CNC B-9	12:11	320
	(N=9)	312±47	
	라인 A, B 사이	12:23	313
가동 CNC 기기	라인 A, B 사이	15:04	300
뒤쪽 통로	CNC B-6 뒤	16:40	292
	(N=3)	302±11	
가동 CNC 기기	CNC B-1	14:46	225
옆 비가동 기기쪽	CNC B-11	16:35	233
	(N=2)	229±6	
비가동 CNC 라인	라인 C	12:32	177
사이	라인 C, D 사이	17:19	165
	(N=2)	171±8	
	CNC C-8	14:53	117
비가동 CNC 기기	CNC D-2	14:56	105
앞	CNC E-1	12:28	105
	(N=3)	109±7	
	사무실 입구	17:14	50
사무실(장) 입구	사업장 입구	15:15	105
	(N=2)	78±39	

5) 개인시료 측정 결과

확산식 시료채취기를 이용한 개인시료 측정 결과는 <표 5>와 같다.

에탄올이 냉각제로 분사되는 CNC 기기를 직접 사용하는 근로자 그룹의 평균 노출 농도는 307 ppm이었고, 근로자 개인시료 중 가장 높은 측정 결과는 419 ppm으로 노출기준의 약 40%에 해당되는 수준이었다.

관리자를 제외한 전체 근로자가 방진 마스크를 착용한 상태로 작업을 하기 때문에 실제 근로자의 호흡기를 통해 노출되는 에탄올 농도는 더 낮은 수준일 것으로 추정된다.

클린컷 혼합액을 냉각제로 사용하는 CNC 기기 사용자의 경우 측정 당시 오염원으로부터 가장 멀리 떨어진 지점에서 작업을 하고 있었으며, 평균 노출 농도는 159 ppm으로 나타났다.

제품의 불량 검사 및 기기 세팅 등 관리직에 종사하는 그룹의 평균 노출 농도는 1차 측정시 238 ppm, 2차 측정시 213 ppm으로 에탄올이 냉각제로 분무되는 CNC 기기 사용자 그룹보다는 낮고, 에탄올 증기 발생원으로부터 멀리 떨어진 작업자의 평균 노출 농도보다는 높은 수준이었다. 관리자 C의 경우 수거 시 양쪽 모니터가 긴 머리카락에 가려져 있어 측정 결과가 과소평가 된 것으로 추정되며, 관리자 그룹의 평균 노출농도에서 제외시켰다.

동일 시간 동일 근로자에게서 채취한 두 개 시료의 대부분은 농도 값이 일치하지 않았으며, 적게는 0.5 ppm에서 많게는 21 ppm까지의 차이를 보였다.

동일 위치 동일 근로자에게서 채취한 두 개의 시료도 측정 시점에 따라 적게는 15 ppm에서 많게는 165 ppm까지의 차이를 보였는데, 이는 측정 당일 관리자가 샘플 작업중인 제품을 수시로 확인하며 에탄올 분무량을 CNC 제어기로 조절했기 때문으로 추정된다.

측정 결과 3M OVM 3520 모델의 아래층 패드에서 에탄올이 검출된 시료는 없었으며, 3500 모니터와 3520 모니터 간에 유의한 차이는 확인 할 수 없었다.

〈표 5〉 확산식 시료채취기를 이용한 개인시료 측정결과

측정위치	측정시간	측정결과				
		동시채취	시료	AM±SD		
		1	2			
1차 측정 (2016.08.26.)						
관리자	관리자 A	15:50~17:10(80min)	238	-	238	
2차 측정 (2016.12.27.)						
CNC 작업자	B-5 작업자	11:43~12:50(60min)	296	309*	303±9	
	B-6 작업자	11:51~12:51(60min)	398	419	408±15	
		14:29~15:29(60min)	253	271	262±13	
	B-7 작업자	11:52~12:52(60min)	382	373*	378±6	
		14:32~15:32(60min)	279	295	287±11	
	B-9 작업자	11:54~12:54(60min)	273*	281	277±6	
		14:33~15:33(60min)	243	259	251±11	
				(N=7)		307±62
	관리자	관리자 A	14:54~15:54(60min)	208	218	213±7
관리자 B		11:47~12:47(60min)	209	211	210±0.9	
		14:51~15:51(60min)	224	-	224	
관리자 D		11:59~12:59(60min)	204	-	204	
			(N=4)		213±8.4	
에탄올free CNC 작업자	E-1 작업자	11:49~12:49(60min)	147	163*	155±11	
	(Clean Cut사용)***	14:39~15:39(60min)	163	163	163±0.4	
					(N=2)	159±8.0

* 시료채취기 : 3M Organic Vapor Monitor 3520

** 작업자의 긴 머리카락에 모니터가 가려져 측정값이 과소평가 됨

*** 냉각제로 에탄올이 거의 함유되지 않은 'CleanCut'이라는 제품사용

제 2 절 공기 중 에탄올 농도 측정 방법 비교

1) 확산식 시료채취기와 가스검지관

공기 중 에탄올 농도를 측정함에 있어 측정기기에 따른 차이를 확인하기 위해, 밀폐된 유리병 내부를 알고 있는 정적인 상태의 농도로 만들고, 확산식 시료채취기와 가스검지관을 이용하여 시료를 채취하였다. 유리병의 부피는 7.6 L였고, 초기 농도를 300 ppm수준으로 만들기 위해 계산된 에탄올 4.3 mg을 미량주사기로 주입하였다.

유리병 안에는 소형 팬이 작동하여 공기를 잘 섞어 주었다. 에탄올이 모두 증발하고 공기가 잘 섞였다고 판단된 약 2분 후 가스검지관으로 에탄올을 측정한 결과 270 ppm이었다. 확산식 시료채취기로 60분간 시료를 채취하였다. 60분 후 가스검지관을 삽입하여 측정한 농도는 65 ppm이었다.

이 실험결과는 <표 6>에서 보는 바와 같다.

<표 6> 유리병의 에탄올 공기시료에 대한 확산식 시료채취기와 가스검지관의 측정결과

확산식 시료채취기 측정결과 (ppm) (측정시간 60분)					가스검지관 (ppm)	
N=4					초기농도 ($C_{t=2}$)	종료농도 ($C_{t=60}$)
				AM±SD		
152	150	149	146	149.3±2.9	270	65
RSD 1.9%					$C_{t=0}$ 및 $C_{t=60}$ 로 추정한 $Q' = -0.184$	
					$C_{t=0}$ 및 $C_{t=60}$ 까지 평균농도 149.2 ppm	

유리병 내의 에탄올 농도를 2분 후에 가스검지관으로 측정한 결과인 270 ppm과 60분후에 측정한 에탄올 농도, 65 ppm을 가지고 다음 식을 이용하여 에탄올의 제거율(Q')을 계산한 결과 -0.184 L/min였다.

$$\ln \frac{C_1}{C_0} = - \frac{Q'(m^3/min)}{V(m^3)} \cdot \Delta t(\min) \dots\dots\dots \text{식<1>}$$

이를 바탕으로 60분 동안 유리병내의 에탄올 농도를 계산한 결과는 <표 7>과 같다. 이의 평균농도는 149.2 ppm이었다. 확산식 시료채취기로 측정된 결과는 149.3 ppm으로 놀라울 만큼 똑같이 나타났다.

<표 7> 유리병의 에탄올 공기시료의 시간별 에탄올 농도

Δt (min)	t 시간 후의 농도(ppm)	Δt (min)	t 시간 후의 농도(ppm)	Δt (min)	t 시간 후의 농도(ppm)	Δt (min)	t 시간 후의 농도(ppm)
C ₀	300						
1	283	16	191	31	132	46	92
2	270	17	187	32	129	47	89
3	263	18	182	33	126	48	87
4	257	19	178	34	123	49	85
5	251	20	174	35	120	50	83
6	245	21	169	36	117	51	81
7	239	22	165	37	114	52	79
8	233	23	161	38	112	53	77
9	227	24	157	39	109	54	75
10	222	25	154	40	106	55	73
11	216	26	150	41	104	56	72
12	211	27	146	42	101	57	70
13	206	28	143	43	99	58	68
14	201	29	139	44	96	59	67
15	196	30	136	45	94	60	65
						평균	149.2

〈표 8〉은 위와 같은 조건에서 확산식 시료채취기로 측정된 같은 시료군 내에서
 서의 차이를 확인하기 위해 동일한 실험을 세 번 반복한 결과이다. SD 값이
 각각 1.7 ppm, 4.2 ppm, 7.7 ppm으로 나타났다.

〈표 8〉 유리병의 에탄올 공기시료에 대한 확산식 시료채취기 측정결과

에탄올 주입량 (mg)	채취 시간 (min)	1차실험	2차실험	3차실험
		농도 (ppm)	농도 (ppm)	농도 (ppm)
4.3	60	168	156	158
		168	167	151
		171	174	153
		167	168	148
AM±SD		168±1.7	166±7.7	152±4.2
RSD		1.0%	4.6%	2.8%

탈착용매는 2 mL의 1% 2-butanol in CS₂ 를 사용 하였고, 위 결과 값은
 평균 탈착효율(0.54)을 보정하여 나타낸 것이다.

검지관을 사용하지 않을 경우, 60분 동안 채취한 시료의 평균 농도는 165
 ppm이어야 한다. 1차, 2차 실험 결과는 각각 168 ppm, 166 ppm으로 이론
 값과 거의 유사한 농도 수준 이었고, 3차 실험 결과는 152 ppm으로 나타났다.

측정된 농도가 이론값보다 높게 측정된 이유에는 미량주사기로 에탄올을
 주입할 때 계산한 양보다 더 많이 주입했거나, 실제 시료 채취 시간이 1분만
 적게 평가 되어도 평균 농도가 약 3ppm 높아지는 점 등을 생각해 볼 수 있
 다.

2) 활성탄관과 가스검지관

확산식 시료채취기와 동일한 방법으로 활성탄관과 가스검지관을 이용하여 측정된 실험 결과는 <표 9>와 같다. 펌프 사용으로 인한 압력이 시료 채취에 방해가 되지 않도록 아크릴 덮개에 작은 구멍을 열어놓은 상태로 실험하였다.

<표 9> 유리병의 에탄올 공기시료에 대한 활성탄관과 가스검지관 결과

실험	활성탄관 측정결과 (ppm) (시료채취시간 30분)						가스검지관 (ppm)	
	(N=4)				AM±SD	RSD	초기농도 (C _{t=0})	종료농도 (C _{t=30})
1	191	189	184	184	187±3.4	1.8%	340	120
2	171	177	177	176	175±2.8	1.6%	270	100
3	186	196	201	196	195±6.5	3.3%	260	100

에탄올이 계산된 양만큼 정확히 주입 되었고, 측정이 종료 될 때까지 별다른 손실이 없었다면, 각 펌프의 유량을 0.05 L/min으로 계산 시 측정 결과 평균 농도는 207 ppm이었을 것이다. 세 번의 실험 결과 모두 이론값보다 낮은 수준의 농도로 측정 되었는데, 이는 앞서 이야기한 이유에서 비롯된 결과일 것이다.

<표 10> 유리병의 에탄올 공기시료에 대한 활성탄관 측정결과

에탄올 주입량(mg)	채취시간 (min)	동시 채취 시료 (ppm)				AM±SD
		1	2	3	4	
4.3	50	106	105	105	106	106±0.9
		112	111	114	117	113±2.6

<표 10>은 위와 같은 조건에서 활성탄관으로 포집한 같은 시료군 내에서의 차이를 확인하기 위해 동일한 실험을 두 번 반복한 결과이다. SD 값이 각각 0.9 ppm, 2.6 ppm으로 나타났다.

검지관을 사용하지 않을 경우, 50분 동안 채취한 시료의 평균 농도는 168 ppm이어야 한다.

그러나 실제 측정 결과 평균 농도는 106 ppm 및 117 ppm으로 유독 낮은 수준의 결과가 나타났는데 이는 실험 당시 유리병의 덮개로 쓰였던 아크릴판에 타이콘 튜브가 들어갈 수 있도록 제작한 구멍의 사이즈가 튜브의 직경보다 크거나 같은 정도여서, 시료가 포집되는 50분 동안 에탄올 증기가 밖으로 빠져나갈 수 있는 공간이 충분했을 것으로 추정된다.

3) 탈착용매의 종류와 양에 따른 탈착 효율

가) 확산식 시료채취기의 탈착효율

확산식 시료채취기의 탈착효율 실험 결과는 <표 11>, <표 12>와 같다.

3M사에서 제안하는 탈착용매인 Acetonitrile의 탈착 효율은 주입량(1 mL, 2 mL)에 상관없이 0.93 이상의 탈착효율을 갖는 반면, 일반적인 탈착용매로 사용되는 CS₂ (1% 2-butanol)의 탈착 효율은 주입량에 따라, 측정 농도에 따라 변동이 심한 편이었다.

본 연구에서 확산식 시료채취기를 사용하여 측정한 공기 중 에탄올 농도는 3개 수준(에탄올 주입량 0.7 mg, 1.4 mg, 3.7 mg) 농도의 평균 탈착효율로 모두 보정된 값이다.

〈표 11〉 탈착용매의 종류에 따른 확산식 시료채취기의 탈착 효율

에탄올 주입량(mg)	에탄올 검출량(mg)		탈착효율(Mean ± SD)	
	탈착용매		탈착용매	
	Acetonitrile	CS ₂ (1% 2-butanol)	Acetonitrile	CS ₂ (1% 2-butanol)
0.7	0.65	0.43	0.93 ± 0.02 2.0%	0.61 ± 0.01
	0.68	0.44		
	0.66	0.43		
3.7	3.57	1.75	0.96 ± 0.00 0.4%	0.47 ± 0.00
	3.59	1.75		
	3.56	1.74		
7.4	7.26	3.28	0.97 ± 0.01 0.9%	0.45 ± 0.01
	7.13	3.31		
	7.20	3.36		

〈표 12〉 탈착용매의 양에 따른 확산식 시료채취기의 탈착 효율

에탄올 주입량(mg)	탈착용매 양(mL)	에탄올 검출량(mg)		탈착효율(Mean ± SD)	
		탈착용매		탈착용매	
		Acetonitrile	CS ₂ (1% 2-butanol)	Acetonitrile	CS ₂ (1% 2-butanol)
1.4	1.0	1.31	0.46	0.93 ± 0.01	0.34 ± 0.01
		1.33	0.49		
		1.34	0.49		
		1.30	0.50		
		1.31	0.49		
	2.0	1.34	0.75	0.93 ± 0.01	0.54 ± 0.01
		1.31	0.79		
		1.32	0.76		
		1.33	0.76		
		1.35	0.77		

나) 활성탄관의 탈착효율

활성탄관의 탈착효율 실험 결과는 <표 13>과 같다.

본 연구에서 활성탄관을 사용하여 측정된 공기 중 에탄올 농도는 3개 수준 농도의 평균 탈착효율로 모두 보정된 값이다.

<표 13> 활성탄관의 탈착효율

탈착용매 및 양(mL)	에탄올 주입량(mg)	에탄올 검출량(mg)	탈착효율(Mean ± SD)
	0.55	0.55 0.53 0.55	0.98 ± 0.02
CS ₂ (1% 2-butanol) 2.0 mL	2.84	2.53 2.60 2.57	0.90 ± 0.01
	5.68	5.40 5.27 5.41	0.94 ± 0.01

제 4 장 결 론

에탄올을 냉각제로 사용하는 국내 모 휴대폰 부품 제조 사업장의 CNC 가공 공정에서 작업장의 공기 중 에탄올 농도 및 CNC 가공 근로자 및 관리자의 노출농도를 평가한 결과는 다음과 같다. 측정일은 여름철인 2016년 8월 26일과 겨울철인 12월 27일이었다. 여름철인 8월 26일은 CNC 기기 27대가 가동 중이었고 겨울철인 12월 27일에는 4대만이 가동 중이었다.

1. CNC 기기의 바로 앞에서 측정한 에탄올 농도는 여름철인 2016년 8월 26일(기기 27대 가동), 활성탄관으로 측정한 결과는 487 ± 203 ppm이었고, 확산식 시료채취기의 결과는 461 ± 178 ppm이었다. 겨울철인 12월 27일(기기 4대 가동)에는 활성탄관으로 측정한 결과는 569 ± 438 ppm이었고, 확산식 시료채취기로 측정한 결과는 531 ± 133 ppm이었다

2. 공장의 중간 통로인 CNC 기기가 연달아 설치된 라인과 라인 사이의 기둥에서 측정한 에탄올 농도는 여름철(8월 26일)에 활성탄관으로 측정한 결과는 283 ± 6 ppm, 확산식 시료채취기의 결과는 319 ± 44 ppm이었다. 이었다. 겨울철(12월 27일)에는 확산식 시료채취기로 측정한 결과, 239 ± 38 ppm이었다.

3. 겨울철인 12월 27일 가스검지관으로 CNC 기기의 바로 앞에서 측정한 에탄올 농도는 319 ± 44 ppm, 관리자 위치에서는 213 ± 8.4 ppm으로 나타났다.

4. 실험실에서 유리병에 알고 있는 공기시료를 제조하여 확산식 시료채취기의 측정정확도를 시험한 결과 채취기간 변이는 1.0~4.6%로 낮았으며, 가스검지관과 비교한 결과 매우 유사하게 나타났다.

5. 실험실에서 유리병에 알고 있는 공기시료를 제조하여 활성탄관법의 측정정확도를 시험한 결과, 시료채취기간의 변이는 1.6~3.3%로 낮았으며, 가스검지관과 비교한 결과, 약간의 오차가 발생하였다.

6. 활성탄관의 탈착용매로 1% 2-butanol+CS₂를 사용할 경우 탈착효율은 90~98%로 나타났다. 확산식 시료채취기(3M OVM 3500)의 경우, 탈착용매로 1% 2-butanol+CS₂를 사용하면 탈착효율이 45~61%로 매우 낮고 변이가 큰 것으로 나타났다. 반면 3M사에서 추천한 Acetonitrile을 사용할 경우 93~97%로 양호하게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

고용노동부. (2016). 『화학물질 및 물리적인자의 노출기준(노동부고시 제2016-41호』. 경기: 고용노동부.

고용노동부. (2016a). 보도자료 -고용부, 메틸알코올 중독 사업장 전면작업중지 및 집중감독 실시, 2016.2.5.

<http://news.molab.go.kr/newshome/mtnmain.php?mtnkey=articleview&mkey=scatelist&mkey2=26&aid=6395>

고용노동부. (2016b). 보도자료 -핸드폰 부품업체에서 메틸알코올 중독 환자 추가(1명) 발생, 2016.2.26. 고용노동부

<http://news.molab.go.kr/newshome/mtnmain.php?mtnkey=articleview&mkey=scatelist&mkey2=26&aid=6446>

2. 국외문헌

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). (2016). *TLVs and BEIs*. ACGIH.

Datron Dynamics, Inc. (2010). *Micromachining with Ethanol Coolant Reduces Costs and Answers Environmental Concerns*.

<http://www.gorcomm.com/pr/Micromachining%20with%20Ethanol%20Coolant%20FINAL.doc>

ABSTRACT

A Study on Airborne Ethanol Concentrations and Workers' Exposure to Ethanol in a High-Speed CNC Milling Machine Process for Aluminium Parts for Smartphones

Yang, Seul Kee

Major in Industrial Hygiene Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University

Airborne concentrations of ethanol were evaluated in a Computerized Numerical Control milling processing where ethanol was used as coolant in a manufacturing industry for aluminium parts of smartphones. The field measurements were conducted on 26th August 2016 (Summer) while 27 CNC machine were being operated and 27th December 2016 (Winter) while only 4 machine were being operated.

Airborne concentrations of ethanol at the front of CNC machine was 487 ± 203 ppm (by charcoal tube), and 461 ± 178 ppm (by passive sampler) in summer, and 569 ± 438 ppm (charcoal tube method) and 531 ± 133 ppm (passive sampler method) in winter. In the center are between the CNC lines, the airborne ethanol was 283 ± 6 ppm (by charcoal tube) and 319 ± 44 ppm (by passive sampler) in summer, and

239±38 ppm(by passive sampler) in winter. Ethanol concentrations by Gas Detector tubes were 312±47 ppm at the front of CNC machine in winter.

Inter-samplers variations ranged in 1.0~4.6% among passive samplers taken ethanol using a glass bottle (a static known concentration air sample) in the laboratory. The inter-samples variations of charcoal tubes were 1.6~3.3%. Gas detector tubes showed fairly accurate measurement results.

Desorption efficiency(DE) using 1% 2-butanol+CS₂ was 90~98% for charcoal tubes but 45~61% for 3M badge (3M OVM #3500). However, DE using acetonitrile which was recommended by 3M was 93~97% for 3 M badge.

【Keywords】 ethanol, coolant, CNC process, Desorption efficiency, passive sampler