

뿌리산업 작업장내 총휘발성유기화합물류(TVOC) 실시간 노출감시체계 구축과 농도 분석

박종혁 · 김범수 · 강지욱 · 한수희 · 김경준*

포항공과대학교 창의IT융합공학과

Real-time TVOC Monitoring System and Measurement Analysis in Workplaces of Root Industry

Jong-Hyeok Park · Beom-Su Kim · Ji-Wook Kang · Soo-Hee Han · Kyung-Jun Kim*

Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

Objectives: This study analyzes TVOC concentrations in root industry workplaces in order to prevent probable occupational disease among workers. Root industry includes all the infrastructure of manufacturing, such as casting and molding.

Methods: Real-time TVOC sensors were deployed in three root industry workplaces. We measured TVOC concentrations with these sensors and analyzed the results using a data-analysis tool developed with Python 3.9.

Results: During the study period, the mean of the TVOC concentrations remained in an acceptable range, 0.30, 2.15, and 1.63 ppm across three workplaces. However, TVOC concentrations increased significantly at specific times, with respective maximum values of 4.98, 28.35, and 26.65 ppm for the three workplaces. Moreover, the analysis of hourly TVOC concentrations showed that during working hours or night shifts TVOC concentrations increased significantly to higher than twice the daily mean values. These results were scrutinized through classical decomposition results and autocorrelation indices, where seasonal graphs of the corresponding classical decomposition results showed that TVOC concentrations increased at a specific time. Trend graphs showed that TVOC concentrations vary by day.

Conclusions: Deploying a real-time TVOC sensor should be considered to reflect irregularly high TVOC concentrations in workplaces in the root industry. It is expected that the real-time TVOC sensor with the presented data analysis methodology can eradicate probable occupational diseases caused by detrimental gases.

Key words: Air condition, occupational disease, total volatile organic compounds, internet of things, root industry

I. 서 론


국내 철강관련 산업에서 특히 주조, 금형, 소성가공, 용접, 표면처리, 열처리 등 관련 공정기술을 활용하여 금속가공, 제품 제조에 관련된 산업을 뿌리산업(Root


Industry)으로 명명하고 있다. 정부는 '뿌리산업 진흥과 첨단화에 관한 법률' 제2조를 근거로 산업군 형성 및 진흥과 각종 규제 및 제도와 첨단화 정책을 시행하고 있다. 뿌리산업에 종사하는 작업자들은 미세먼지, 분진, 흙, 총휘발성유기화합물(total volatile organic


*Corresponding author: Kyung-Jun Kim, Tel: 010-3836-7655, E-mail: kimkj0408@postech.ac.kr


C5 office 316, 77, Cheongam-ro, Nam-gu, Pohang-si, Kyungsangbuk-do 37673


Received: December 2, 2022, Revised: December 18, 2022, Accepted: December 27, 2022

 Jong-Hyeok Park <http://orcid.org/0000-0003-0425-0958>

 Ji-Wook Kang <http://orcid.org/0000-0002-9262-5184>

 Kyung-Jun Kim <http://orcid.org/0000-0003-3078-1779>

 Beom-Su Kim <http://orcid.org/0000-0002-5656-7191>

 Soo-Hee Han <http://orcid.org/0000-0002-9831-3499>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

compound, TVOC), 고온, 소음 등 열악한 작업환경에 빈번하게 노출되어 직업병에 걸릴 위험이 있다(Proctor et al., 2014; Urbano et al., 2012; Hu et al., 2017; Hu et al., 2018; Hu et al., 2021; Jeong et al., 2018; Jia et al., 2020; Junaid et al., 2016). 직업병 문제를 예방하기 위해 산업안전보건법은 작업자가 유해인자에 노출이 우려되는 작업장 또는 작업공정에 대해 6개월에 1회 이상 정기적으로 작업환경측정을 규정하고 있지만 뿌리산업 현장의 경우 불규칙적으로 빈번하게 기준치 이상의 유해물질에 노출될 수 있어 제도의 한계가 존재한다. 예를 들어, 주조 공정은 고체 재료를 고열로 가열하여 녹이고 화학적인 조성을 첨가물질을 투입하여 변경하고 쇳물을 주형틀에 주입하여 다양한 형상을 만드는 반복적 상기의 공정이 발생하여 불규칙적으로 다량의 TVOC나 미세먼지 등 많은 유해물질이 발생한다. 그 외에도, 주조, 단조, 금형 등 대부분의 뿌리산업 내 여러 공정들은 단일 공장내에서 세부 공정으로 나뉘어져 있어 TVOC, 미세먼지, 흙 등 유해물질이 다양하게 발생하고 있고, 일시적으로 가스상 물질들의 노출농도의 총합이 허용 기준치에 도달한다. 하지만, 뿌리산업 현장작업자들은 실시간으로 작업환경 파악이 불가하여 여전히 열악한 작업환경에 빈번하게 노출된다(Phee et al., 2021; Chae et al., 2012). 이를 대비하기 위하여, 산업안전보건법은 산업안전보건위원회 또는 근로자대표의 요청이 있을 시 작업환경측정 결과에 대한 설명회를 개최하여 현장 실태를 현장작업자들과 공유하도록 하고 있지만 여전히 현장의 유해화학물질 누출 여부, 농도에 따른 작업 가능 여부 및 작업환경 적절성의 실시간 파악은 여전히 어려운 실정이다.

최근 중대재해처벌법이 시행되어 위와 같은 열악한 작업환경에 대한 산업안전 예방이 범국가적인 관심사항으로 대두되고 있다. 뿌리산업(주조, 금형, 소성가공, 용접, 접합, 표면처리, 열처리)의 열악한 작업환경을 고려한다면, 뿌리산업에서 TVOC로 부터 현장 작업자를 실시간으로 보호할 대안 마련이 필요하다. 그러나, 현재 직업병을 유발하는 TVOC(트리클로로에틸렌, 에틸벤젠 등)로부터 현장작업자를 보호할 마땅한 대안이 없는 실정이다(Ahn JJ, 2022; Kim et al., 2022). 이 문제의 해결을 위해, 뿌리산업 공정에 TVOC 등 유해화학물질 발생에 대한 실시간 현장 실태를 정확하고 신속하게 파악하는 것이 중요하다. 산업안전보건법은 TVOC에 해

당하는 VOCs 공기들을 명시함과 동시에 이들에 대한 노출기준을 규정하는 등 정기적인 산업현장의 실태 파악에 나서고 있지만, 상술했듯 주기가 긴 작업환경 측정이 작업장의 유해물질의 발생 정도나 작업자의 직업병 연관성 및 예방을 위한 사전조치 등에는 분명한 한계가 있다. 고용노동부 2009년 8월부터 유해인자13종(납 및 그 무기화합물, 니켈(불용성 무기화합물), 디메틸포름아미드, 벤젠, 2-브로모프로판, 석면, 6가크롬 화합물, 이황화탄소, 카드뮴 및 그 화합물, 톨루엔-2,4-디이소시아네이트, 트리클로로에틸렌, 포름알데히드, 노말헥산)에 대해 작업장 내 노출 정도를 허용 기준치 이하를 유지하도록 하는 '유해인자 허용기준제도'를 시행하고 있다. 국내의 경우 유해화학물질 노출 허용기준과 노출기준을 규정하고 있으며, 노출기준의 경우 작업환경 개선의 지표로만 활용될 뿐 사업주가 처벌을 받지 않는다(Phee et al., 2021). 산업의 발전과 생산제품의 고급화에 따라 새로운 화학물질의 사용이 증가하고 있어 새로운 직업병이 발생할 것으로 전망하고 있다. 또한 유해화학물질에 의한 중독, 폭발 등 사고와 화학물질에 의한 중독성 질환이 지속적으로 증가하고 있다. 또한 뿌리산업 등 관련분야 사업주와 근로자들 모두 화학물질의 건강 영향에 대한 정보의 부족과 관련 정보를 제공하기 위한 시스템을 보유하고 있지 않은 사업장이 대부분이다. 이상과 같은 한계점 때문에 현장 작업자들이 유해환경에 대해 정확한 정보를 제공받지 못하고 상시적으로 유해물질에 노출되고 있다(Kim, 2007). 이러한 단점 극복을 위해, 소규모 사업장을 대상으로 스마트 작업환경 관리 모델을 제안하였다. 이를 통해 사업주가 스스로 작업환경을 관리할 수 있게 하였다(An & Kim, 2021). 그러나 이 연구에서는 정확한 현장 유해가스 측정을 위한 가스별 센서 부재의 한계와 현장 상황 파악을 위해 스마트폰을 사용하여 유해 작업환경에 사용하기에는 무리가 있다. 이러한 현재의 산업안전보건법에 따른 작업환경 측정 작업법 발생하는 유해가스의 특성과 유해가스 별 센서, 통신환경 구축, 모니터링 및 분석, 사고 시 대응 시나리오와 시스템 유지관리 등 현장에 적용하기 위한 기존의 시스템 및 체계에는 현실적인 한계가 상존한다.

본 논문에서는 실시간 TVOC 측정장비를 이용하여 뿌리산업 현장의 다양한 유해물질의 농도, 발생주기 등의 실시간 데이터 분석을 실시한다. 실시간 TVOC 측정 장비로서 사물인터넷(internet of things, IoT) 센

서를 사용한다. IoT 센서는 기존의 가스포집형 혹은 가스 크로마토그래피를 사용하는 작업환경측정과는 달리 실시간으로 값을 측정할 수 있어 현장 실태 파악에 더욱 용이하다는 장점이 있다. 또한, 공간이나 근로자 활동 반경에 큰 제약을 주지 않고, 저비용 실시간으로 작업환경을 모니터링 할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 현재 산업안전보건법과 중대재해처벌법 등에 규정하고 있는 직업병을 예방하기 위한 시스템으로 사용할 수 있고, 뿌리산업 사업장의 유해화학물질 노출 감시체계 구축과 운용 방법 등에 대한 방안 마련에 활용될 수 있을 것으로 생각한다. 사업장의 유해가스 측정 시에는 문제가 없었지만, 뿌리산업의 특성상 유해화학물질이 일시적으로 기준치 이상 발생할 수 있고, 발생 유해화학물질에 일시적 혹은 빈번한 노출에 의해 중대한 사고가 발생하거나 직업병으로 이어질 수 있다. 뿌리산업 작업장 내 TVOC 등 유해화학물질의 노출감시체계 구축을 통해 작업에 따라 실시간 다르게 발생하는 유해화학물질의 변화 상태를 분석할 수 있다. 이를 통한 실시간 TVOC 농도 측정 및 분석결과는 제도적 관점에서는 현장 실태에 대한 제도의 보완책 마련에 도움을 줄 수 있을 것으로 보이고, 무엇보다도 사업장 관점에서는 중대재해처벌법에 명시된 직업병을 선제적으로 예방할 수 있는 대책 마련에 도움을 주고자 한다.

II. 연구방법

뿌리기업 현장 작업자들의 직업병 예방을 위해 TVOC 노출감시체계 구축을 통해 분야별 현장에서 실시간으로 발생하는 TVOC 데이터의 수집과 TVOC 농도를 분석하였다. 수집된 데이터를 기반으로 시간별, 일자별 TVOC 특성을 분석하여 직업병 관리를 위한 체계의 개발과 TVOC 농도 분석을 위한 방안을 제시하였다.

1. 연구대상 및 기간

본 연구에서는 강구조물 제작 작업장 한 곳(A 작업

장)과 뿌리산업 작업장 두 곳(압연(B 작업장), 금형(C 작업장))을 연구대상으로 선정하였다. 해당 작업장들은 공통적으로 높은 농도의 흠, 분진, VOCs 등 유해가스가 검출되는 환경이다. 각 유해가스들은 중대재해처벌법에 해당하는 중대한 직업병을 일으켜 작업자들을 사망, 장애를 일으키는 원인물질들이다. 이 유해가스의 농도들을 실시간 측정이 가능한 TVOC 센서를 설치하여 약 1개월간 조사를 하였다.

2. 연구 방법

TVOC 센서로 SVM30 모델을 사용하였고 구체적인 사양은 Table 1에 기술하였다. SVM30은 여러 금속산화물이 부착되어있는 메탈옥사이드 반도체 센서로서 TVOC를 측정할 때 사용된다(Choi et al., 2021). SVM30가 탐지할 수 있는 가스들은 TVOC, CO₂eq 총 두 가지이며, TVOC 기능을 통해 측정 가능한 VOC 가스들은 n-헥산, 에틸벤젠 등을 포함하여 공정에서 발생할 수 있는 VOC 가스들을 대부분 포함한다. TVOC 탐지는 0 ~ 60 ppm까지 측정이 가능하며 센서의 정확도는 $\pm 15\%$ 이다. 분해능은 2.008 ppm까지 0.001ppm 단위, 2.008 ~ 11.110 ppm까지는 0.006 ppm 단위, 11.110 ppm ~ 60.000 ppm까지는 0.032 ppm까지 측정이 가능하다. 센서 캘리브레이션(calibration) 문제는 SVM30 내부에 센서조정 메모리를 활용하여 사전에 유해 가스가 없는 환경에서 기준 캘리브레이션을 실시하였다.

IoT 시스템을 구성하기 위해 우리는 윈도우 10이 설치된 컴퓨터에 SVM30으로 구성된 보드를 휴대용 메모리(universal serial bus, USB)로 연결하였다. 이렇게 구성된 IoT 시스템을 각 작업장마다 1세트씩 설치하였다. 설치장소는 뿌리기업 작업장이 공정이나 물량 발주에 따라 공정이 다르고 가스 발생장소가 달라 측정에 어려움이 있는 상황을 고려하여 공통적으로 출입문에서 5 ~ 10 m 떨어진 구석진 곳에 설치를 하였고, 주요 공정과의 거리는 5 ~ 10 m로 흠, 분진, VOCs가 주

Table 1. TVOC sensor (SVM30) specification

Sensor name	Sensor type	Available gases	TVOC detection range	TVOC detection resolution
SVM30	Metal-oxide-semiconductor	TVOC, CO ₂ eq	0~60ppm	0-2.008ppm: 0.001ppm resolution; 2.008-11.110ppm: 0.006ppm resolution; 11.110ppm-60.000ppm: 0.032ppm resolution

로 발생하는 장소로 설정하였다. 구체적으로 A 작업장에서는 강구조물 제작과 관련된 공정에서 10 m 떨어진 곳에 설치하였다. B 작업장에서는 압연 가열공정에서 대략 8 m 떨어진 곳에 설치하였다. C 작업장에서는 금형과 관련된 여러 주요공정과 대략 5 m 떨어진 곳에 설치하였다. 측정 센서 설치 높이는 1.5 ~ 2.0 m로 선정하여 실제 작업자들이 TVOC를 흡입 가능한 환경을 분석하고자 하였다. 또한, 작업장의 출입구를 열어두는 환경을 요청하여 편향되지 않은 TVOC 농도를 측정하여 작업자의 안전 환경을 최대한 균형적으로 파악하고자 하였다. 측정기간은 30일로 산정하여 데이터를 수집, 분석하였다. 데이터 수집을 위해 센서는 10초에 한번 TVOC농도를 수집한다. 이 10초 단위 데이터들의 노이즈를 제거하기 위해 다시 1분 평균을 내어 분석을 진행하였다. 이 분석은 주요통계 요약, 고전적 분해, 자기상관계수 등 총 3가지로 구성이 되며 이 작업은 모두 Python(버전 3.9)를 통해 진행되었다. 주요통계 요약은 측정기간 동안 수집된 TVOC 값의 평균값, 표준편차값, 그리고 범위를 측정하는 것이다. 고전적 분해는 실측값을 주기적으로 반복되는 형태, 일관적으로 상승 혹은 하락하는 형태, 잡음 등 3가지의 그래프로 분해하여 볼 수 있는 방법이다. 다음으로 자기상관분석은 현재 시점의 데이터와 일정 시간 지연된 데이터의 상관관계를 분석하여 해당 실측값들이 주기성을 가지는지 판단할 수 있는 지표로서 활용 된다. 이 2가지 분석들은 앞서 직관적으로 확인했던 특정 시간대에 TVOC 농도가 더 높았던 관측 결과를 데이터 분석을 통해 더 면밀히 살펴볼 수 있는 지표가 된다.

III. 연구결과

1. TVOC 농도 측정결과

연구기간 동안 세 개의 뿌리산업 작업장에서 측정된 실시간 TVOC 농도를 Figures 1(a.i), 1(b.ii), 1(c.iii)로 나타내었다. 측정기간 동안의 TVOC 농도의 평균값, 표준편차, 그리고 범위는 Table 2와 같다. 연구기간 동안의 TVOC 농도 평균값은 A 사업장에서는 0.30 ppm, B 사업장에서 2.15 ppm, 그리고 C 사업장에서는 1.63 ppm으로 관측되었다. 그리고, 관측된 TVOC 농도 표준편차는 A 사업장에서 0.24 ppm, B 사업장에서 3.46 ppm, C 사업장에서 2.41 ppm으로 다소 높은 값이 관측되었다. 각 사업장에서 관측된 TVOC 농

도범위는 A 사업장에서는 0.01~4.98 ppm으로 낮은 값이 관측되었지만, B 사업장에서는 0.07~28.35 ppm 그리고 C 사업장에서는 0.01~26.65 ppm으로 높은 TVOC 값이 관측되었다.

Table 3은 TVOC 농도의 시간별 평균값을 나타낸다. A 작업장에서는 근무시간대인 10:00~14:00에 수치값(0.33 ppm이상)이 평균값(0.30 ppm)을 상회하였다. 그리고, B 작업장에서는 야간근무 시간대인 18:00~20:00에 수치값(4.68 ppm)이 가장 높았고 이는 해당 작업장의 TVOC 평균값(2.15 ppm)의 두 배를 상회하는 값이다. 마지막으로 C 작업장에서도 야간, 새벽 근무 시간대인 19:00~06:00에 평균값을 최대 두 배를 상회하였다. 이 결과로 작업장마다 TVOC 농도가 높게 검출되는 시간대가 유의미하게 존재한다는 것을 파악할 수 있다.

2. 농도 분석

Figure 1과 Tables 2, 3은 특정 작업시간대의 TVOC의 평균이 TVOC 총 평균값보다 유의미하게 높다는 것을 보여준다. 이 연구결과를 조금 더 면밀히 분석하기 위하여 우리는 고전적 분해(Figure 1)와 자기상관분석(Figures 3)을 실시하였다. 먼저, Figure 1은 연구기간 동안 관측된 TVOC 농도의 고전적 분해 결과를 나타낸다. 구체적으로 관측된 TVOC 농도(actual)는 총 3가지 패턴으로 분해된다. 주기적으로 반복되는 패턴(seasonal), 일관적으로 상승 혹은 하락하는 패턴(trend), 그리고 노이즈 패턴(residual). 이 세 가지 패턴을 합치면 원래의 그래프로 만들어진다. 주기적으로 반복되는 패턴(Figure 2)을 살펴봤을 때, 다음의 결과를 관측할 수 있었다. Figure 2a) A 작업장에서는 09:00~11:00와 13:00~15:00에 TVOC 값이 상승한다, Figure 2b) B 작업장에서는 19:00~22:00에 TVOC 값이 상승한다, Figure 2c) C 작업장에서는 20:00~06:00에 TVOC값이 상승한다. 이는 앞서 내린 관측결과와 동일하게 특정 작업시간대에 유의미한 TVOC 농도의 상승이 있었다는 것을 의미한다. 또한, Figure 1에서 일관적으로 상승 혹은 하락하는 패턴을 봤을 때, 일자별로 농도의 추세가 다름을 알 수 있다. 이를 보면 일자별 TVOC 농도의 일관성이 달라질 수 있음을 의미한다.

그리고, Figure 3은 Figure 1에서 관측된 TVOC 농도에 대한 자기상관계수를 나타낸다. 자기상관계수가 1에 가까우면 주기성을 가지는 것을 의미하는데 A, B, C 작업장들 모두 높은 자기상관계수를 가지므로 꽤나 높은

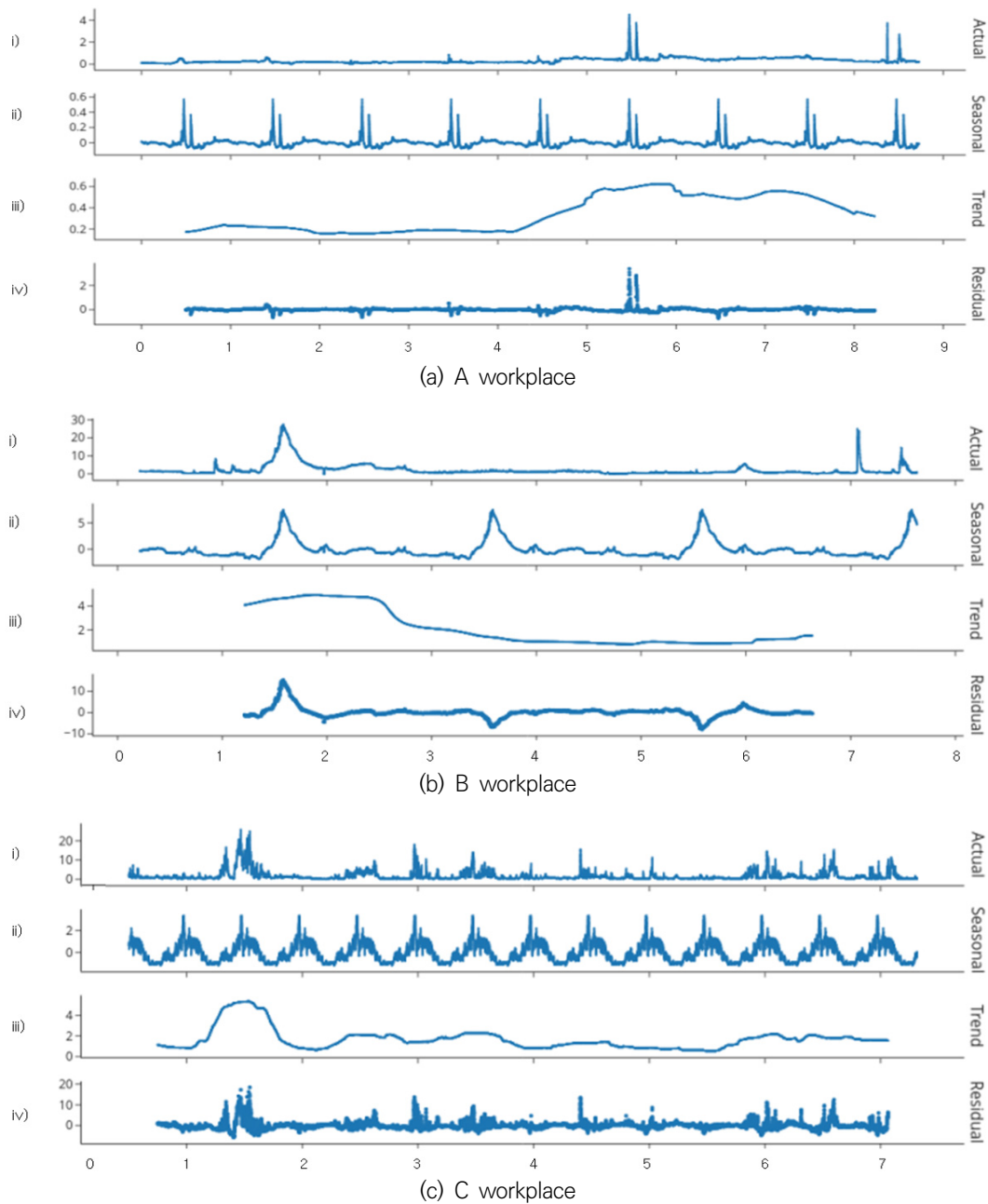


Figure 1. Classical decomposition results at each monitoring site. The X-axis denotes day. The Y-axis denotes ppm of TVOC. The actual graph represents real-time TVOC values in ppm over the measurement period. The seasonal graph denotes the extracted periodic pattern from the actual TVOC value. The trend graph shows the long term rise and fall observed in the actual TVOC value. The residual graph means residual noise excluded from the seasonal and trend graphs.

Table 2. Mean, standard deviation, and range of TVOC concentrations by industrial classification

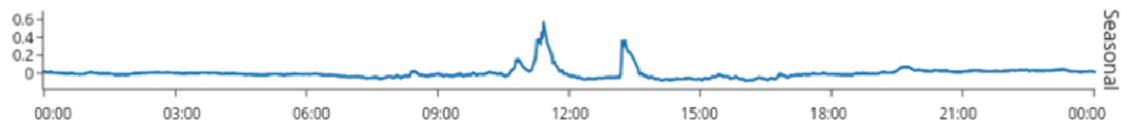
(Unit : ppm)

	Workplace A	Workplace B	Workplace C
Mean	0.30	2.15	1.63
Standard deviation	0.24	3.46	2.41
Range (min.-max.)	0.01~4.98	0.07~28.35	0.01~26.65

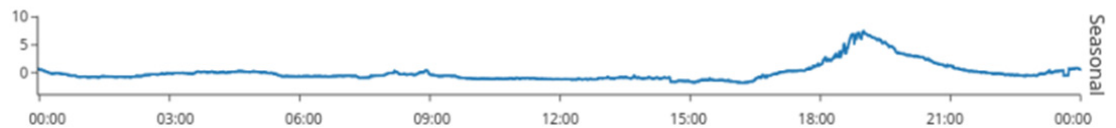
Table 3. Hourly averaged TVOC concentrations during the measurement period by industrial classification

(Unit : ppm)

Time	Workplace A	Workplace B	Workplace C
00:00	0.30	2.21	2.64
01:00	0.29	1.74	2.59
02:00	0.30	1.88	2.33
03:00	0.31	2.19	2.47
04:00	0.30	2.30	2.40
05:00	0.29	1.89	2.19
06:00	0.28	1.58	1.37
07:00	0.31	1.16	1.15
08:00	0.31	1.06	0.81
09:00	0.30	0.74	0.70
10:00	0.36	0.69	0.66
11:00	0.43	1.11	0.70
12:00	0.33	1.71	0.66
13:00	0.37	1.73	0.60
14:00	0.36	0.88	1.14
15:00	0.30	0.99	1.16
16:00	0.25	1.22	1.37
17:00	0.28	3.11	1.14
18:00	0.30	5.94	1.21
19:00	0.34	5.88	2.04
20:00	0.33	4.68	1.86
21:00	0.33	2.80	2.27
22:00	0.32	2.06	3.49
23:00	0.32	2.72	2.42
Daily Max	0.43	5.94	3.49



(a) A workplace

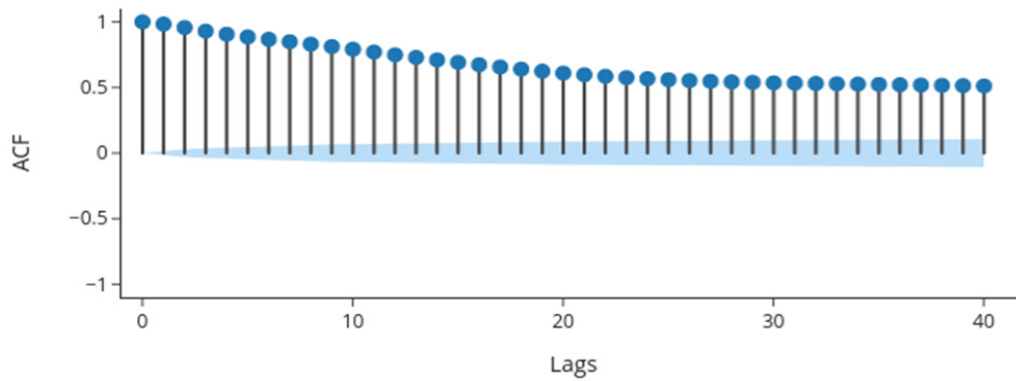


(b) B workplace

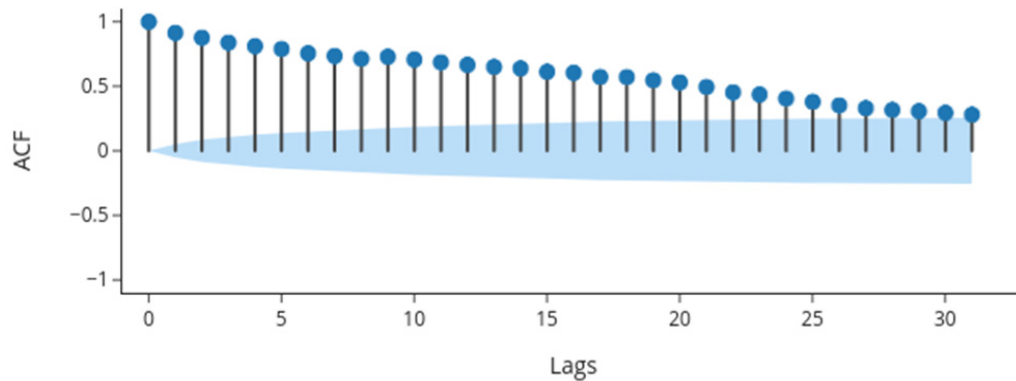


(c) C workplace

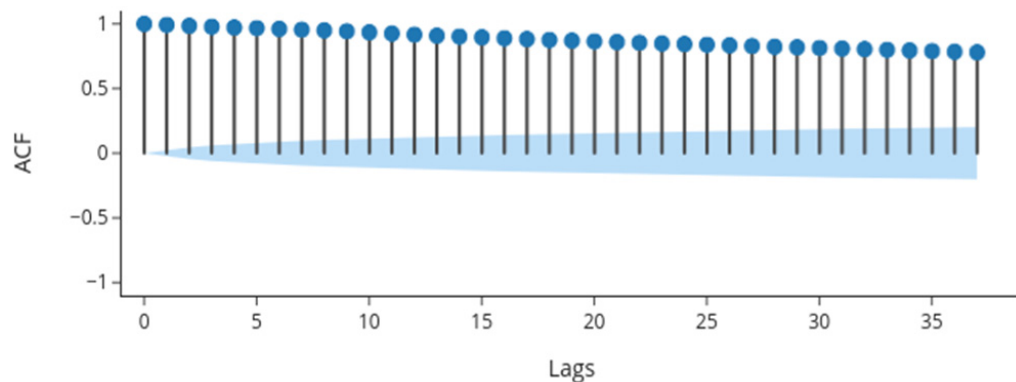
Figure 2. 1-Day pattern of season graph at each of monitoring sites. X-axis denotes hour. Y-axis represents the seasonal TVOC values of ppm.



(a) A workplace



(b) B workplace



(c) C workplace

Figure 3. Autocorrelation factor of actual TVOC values. X denotes lags of data. Y represents an autocorrelation factor ranged from 0 to 1. The blue shaded region means 95% confidence intervals. If the autocorrelation factor is inside the shaded region, the autocorrelation factor are not considered to be statistically significant and noisy. Otherwise, the autocorrelation factor is thought to be significant and auto-correlated.

주기성을 가지는 것으로 파악되었다. Figures 3a, 3c가 나타난 것처럼 A와 C 작업장들에서는 데이터가 30 포인트 넘게 지연이 되어도 자기상관계수가 그림자 영역을 벗어나며 0.5를 넘는 것을 볼 수 있다. 이는 A와

C 작업장에서 관측되는 TVOC의 값이 높은 주기성을 띄며 정상성을 띄는 것을 의미한다. 반면, B 작업장에서는 데이터가 지연될수록 0.5 이하로 다소 낮은 자기상관계수가 관측되었다. 이는 B 작업장에서 관측되는

주기성 그래프는 신뢰가 A와 C 작업장에 비해서는 부족하다는 것을 의미한다. Figure 1에서 A, B, C 작업장들에서의 하루 단위로 패턴을 살펴봤을 때 특정 시간대에 TVOC농도가 상승하는 것을 관측할 수 있었던 것과 결부시켜, 이 결과 또한 특정 작업시간대에 규칙적으로 TVOC 농도의 변화가 있다는 것을 의미한다.

이 2가지 농도분석을 통해 뿌리산업 작업장 내 TVOC 실측값이 특정주기를 통해 반복하는 특성을 가짐을 확인하였다. 이 반복은 공장불문 작업자들이 활동하는 시간대에 지속적으로 이루어진 것을 확인하였다. 또한, 시간 및 일자별로 TVOC 농도가 달라질 수 있음을 확인할 수 있어 유의미한 분석결과를 얻었다.

IV. 고 찰

작업환경측정은 작업장에서의 유해요인을 측정하여 작업자들의 직업병을 예방하는 것에 목적이 있다. 하지만, 작업환경측정의 반기별 측정 및 특정 유해화학물질 인자에 대해 제한된 가스 측정만으로는 작업장 환경의 실태 파악이 어려울 뿐만 아니라, 기준치 이하의 농도에 노출되는 빈도, 시간 등을 특정하기 어려운 점이 있었다. 이에 본 논문은 작업장의 환경을 실시간으로 파악해보고 해당 환경의 데이터들을 면밀히 분석해보았다. 연구 결과, 시간별, 일자별에 따라 TVOC 농도가 달라질 수 있다는 것을 파악하였다. 이러한 특징은 하루 주기로 꾸준히 나타났으며 실행한 주기성 분석결과 하루마다 특정시간대의 농도가 특히 높은 것을 파악할 수 있었다. 또한 일자별로 농도의 추세가 달라지는 것도 관측할 수 있었다.

실험 결과를 토대로 기존의 주기가 긴 작업환경측정을 보완하는 실시간 작업환경측정에 대한 도입이 필요하다고 판단된다. 기존의 제도로는 이러한 시간별, 일자별에 따라 달라지는 유해가스 농도의 추세를 관측하기 어렵기 때문이다. 기존의 제도에 더해 실시간 작업환경 측정 시스템을 도입할 수 있다면 작업장들의 TVOC정보를 실시간으로 데이터화하여 저장 및 분석할 수 있어 현장의 상태를 조금 더 면밀히 파악할 수 있을 것이다. 더불어, 웨어러블 기기와 같은 실시간 작업환경측정이 가능한 기기를 작업자가 착용 시, 유해화학물질 허용 기준치 이상 농도 노출시 작업자들에게 휴식을 권장하는 등 관련 제도의 보완 등을 고려해볼 수 있을 것이다. 이렇게 기존의 제도에 실시간 작업환경측정 체계가 보

완된다면, 작업자가 자율적으로 직업병 관리가 가능하고 뿌리산업 분야 직업병이 현저하게 감소할 것으로 생각한다.

시간별, 일자별 농도가 달라지는 실험 결과도 기존 작업환경측정 내의 유해가스 농도의 경계를 보완하는데 도움이 될 것이다. 기존의 엮앤다운 방식에 추가적으로 작업장 내에서 시간 및 일자별 평균들과 주기적인 특성을 분석하고 문제가 발생했을 시 이를 보완하도록 하는 제도가 필요할 것 같다. 이러면 제도적으로 최 대한의 직업병 예방이 가능할 것이라고 판단된다.

V. 결 론

국내 뿌리산업 작업장들에 대한 실시간 TVOC 농도를 측정하고 이에 대한 주기성 분석을 통해 시간별, 일자별 평균 추세를 파악해보고 현 제도에 대한 고찰을 실시하였다. 실시간 TVOC 농도는 작업장들의 특정 시간대에 증가하는 경향을 보였다. 예를 들어, 작업시간이나 야간근무 시간대에 평소 시간 대비 많은 양의 TVOC가 검출되었다. 그리고 일자별 TVOC 농도 또한 추세가 달라지는 것을 확인하였다. 특히 특정 시기를 이후로 TVOC의 평균이 증가하거나 감소할 수 있다는 것을 관측하였다.

이 실험 결과를 토대로, 실시간 작업환경측정이 가능한 기기를 작업자에게 착용 시, 기준치 이상 유해화학물질 노출시 제도적으로 현장 작업자들에게 휴식을 취할 수 있는 제도를 마련할 수 있을 것이다. 보완된 제도와 함께 작업자가 자율적으로 시간별, 일자별 TVOC 특성을 분석할 수 있고 스스로 직업병 관리가 가능함으로써 유의미한 직업병 감소가 관측될 것이라고 판단된다. 또한, 기존의 엮앤다운 방식은 현장 상황에 현실적으로 맞지 않기 때문에 시간 및 일자별 평균들과 주기적인 특성을 보완이 되어야 한다고 생각된다. 추가적으로 뿌리산업 작업장 TVOC 노출 감시체계 구축을 통해 현장 작업자의 TVOC 노출로 인한 사고의 사전 예방과 직업병 발병으로 이어지는 악순환 예방에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. 2022-0-00120,

작업장 내 미세먼지 등 공기질의 유해성 및 작업가능여부 판단을 위한 작업자의 통합 웨어러블 디바이스 핵심 기술 개발)과 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행 연구임(No. NRF-2022R1I1A1A01066264, 차세대 AIoT 디바이스 연결성 보장을 위한 6G LiFi 네트워킹 기술 연구).

References

- Ahn JJ. Occupational and environmental safety issues in South Korea and their implications for health experts. *Korea Occup Safety & Health Agency* 2022;48:19-27 (<https://doi.org/10.5668/JEHS.2022.48.1.19>)
- An WJ, Kim KY. A proposal of a smart work environmental management service model for small business. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2021;31(2): 128-137 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2021.31.2.128>)
- Chae HJ, Kim BG, Kim HC, Lee MY, Leem JH. Multiple chemical sensitivity. *Korea J Occup Environ Med* 2012; 23(4):328-338
- Choi SJ, Jeong JY, Im SG, Lim DS, Koh DH et al. Chung EK. Standardization of work environment measurement information for constructing exposure surveillance system. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019;29(3):322-334 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.322>)
- Choi CY, Jung HW, Cho JH. An ensemble method for missing data of environmental sensor considering univariate and multivariate characteristics. *Sensors* 2021;21(7595):0-22 (<https://doi.org/10.3390/s21227595>)
- Hu G, Wang T, Liu J, Chen Z, Zhong L et al. Serum protein expression profiling and bioinformatics analysis in workers occupationally exposed to chromium (VI). *Toxicol Lett* 2017;277:76-83 (<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2017.05.026>)
- Hu G, Li P, Cui X, Li Y, Zhang J et al. Cr(VI)-induced methylation and down-regulation of DNA repair genes and its association with markers of genetic damage in workers and 16HBE cells. *Environ Pollut* 2018;238:833-843 (<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.046>)
- Hu G, Long C, Hu L, Xu BP, Chen T et al. Circulating lead modifies hexavalent chromium-induced genetic damage in a chromate-exposed population: An epidemiological study. *Science of the Total Environment* 2021;752:14182 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141824>)
- Jeong EG, Ha GC. Development of occupational and industrial health guide and occupational health summary for manufacturing plan. *Occupational Safety and Health Research Institute Research.*; 2018. p. 190-443
- Jia J, Li T, Yao C, Chen J, Feng L et al. Circulating differential miRNAs profiling and expression in hexavalent chromium exposed electroplating workers. *Chemosphere* 2020;260:127546 (<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127546>)
- Junaid M, Hashmi MZ, Malik RN. Evaluating levels and health risk of heavy metals in exposed workers from surgical instrument manufacturing industries of Sialkot, Pakistan. *Environ Sci Pollut Res Int* 2016; 23(18):18010-26 (<https://doi.org/10.1007/s11356-016-6849-0>)
- Kim JM. A study on the improvement of reasonable working environment measurement cycle. Report on korea industrial hygiene association 2007;1:424
- Kim W, Kim YK, You YS, Jung KH, Choi WJ et al. Development of an IoT smart sensor for detecting gaseous materials. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2022;32(1):78-88 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2022.32.1.78>)
- Park SH, Park HD, Jang MY, Ro JW, Cho HU. Development of a GC-MS automatic analysis program to provide information on exposure to chemical substances. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2021;31(1):1-12 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2021.31.1.1>)
- Phee YG, Kim SW, Ha KC. Comparison of notation items for chemical occupational exposure limits. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2021;31(1):1-12 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2020.30.2.226>)
- Proctor PM, Suh M, Campleman SL, Thompson CM. Assessment of the mode of action for hexavalent chromium-induced lung cancer following inhalation exposures. *Toxicology* 2014;325:160-179 (<https://doi.org/10.1016/j.tox.2014.08.009>)
- Urbano AM, Ferreira LM, Alpoim MC. Molecular and cellular mechanisms of hexavalent chromium-induced lung cancer: an updated perspective. *Curr Drug Metabol* 2012;13:284-305
- Joshi R, Gyllensten IC. Changes in daily measures of blood pressure and heart rate improve weight-based detection of heart failure deterioration in patients on telemonitoring. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2019;23(3):1041-1048 (<https://doi.org/10.1109/JBHI.2019.2918888>)

- doi.org/10.1109/JBHI.2018.2856916)
- Sarmah SS. An efficient IoT-based patient monitoring and heart disease prediction system using deep learning modified neural network. IEEE Access, 2020;8:135784-135797 (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007561>)
- Srigboh RK, Basu N, Stephens J, Asampong E, Perkins M et al. Multiple elemental exposures amongst workers at the Agbogbloshie electronic waste (e-waste) site in Ghana. Chemosphere 2016;164: 68-74 (<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.089>)
- Su TY, Pan CH, Hsu YT, Lai CH. Effects of heavy metal exposure on shipyard welders: A cautionary note for

8-Hydroxy-2'-Deoxyguanosine. Int J Environ Res Public Health 2019;16(23):4813 (<https://doi.org/10.3390/ijerph16234813>)

Tsuchiyama T, Tazaki A, Hossain MM, Yajima I, Ahsan N et al. Increased levels of renal damage biomarkers caused by excess exposure to trivalent chromium in workers in tanneries. Environmental Research 2020;188:109770 (<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109770>)

<저자정보>

박종혁(대학원생), 김범수(대학원생), 강지옥(대학원생), 한수희(교수), 김경준(교수)