한국산업보건학회지, 제29권 제3호(2019) ISSN 2384-132X(Print) ISSN 2289-0564(Online)
Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2019: 29(3): 343-350
https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.343

Original Article

혼합계수(K-Factor) 증가에 따른 사업장의 환기 조건 및 효율 개선에 관한 연구

이윤호[1] · 이석원[2] · 이경호[2] · 김현욱[1,3*]

[1]가톨릭대학교 대학원 보건학과, [2]삼성전자 건강연구소, [3]가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실

An Experimental Study for the Improvement of Ventilation Conditions and Effectiveness in the Manufacturing Industry by Increasing the Mixing Factor (K-Factor)

Yun-ho Lee[1] · Seokwon Lee[2] · Kyoungho Lee[2] · Hyunwook Kim[1,3*]

[1]Department of Public Health, Graduate School, The Catholic University of Korea
[2]Samsung Health Research Institute, Samsung Electronics Co., Ltd.
[3]Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea

ABSTRACT

Objectives: This study aims to identify whether ventilation conditions and their effectiveness can be significantly improved in an experimental chamber by increasing the mixing factor (K-Factor).

Methods: In a chamber with a volume of 1 m^3, air velocity was measured at six different points with four roof fans in the upper part of the chamber being operated in order. The impact of the ventilation conditions was analyzed when the flow rates were increasing and the first inlet of the chamber was either open or closed. Smoke patterns were also observed at four corner points where ventilation was limited. Kruskal Wallis and Mann-Whitney tests were performed to compare air velocities measured in the chamber.

Results: The air velocities measured at only the third point increased significantly from 0.03±0.03 m/s (door open) and 0.05±0.06 m/s (door closed) with two fans, 0.08±0.08 m/s with three fans, and 0.09±0.09 m/s with four fans operating (p<0.05). However, air velocities at the four corner points did not significantly increase. Smoke patters also showed that the open inlet of the chamber had no effect on improvement of ventilation conditions and effectiveness.

Conclusions: In this study, the air velocities at six points in the chamber did not significantly increase despite the increase in the mixing factor and flow rates of ventilation in the controlled environment. Therefore, the inflow of outdoor air throughout an open inlet and installation of a forced ventilation system can potentially increase the indoor air velocity and improve ventilation condition without an increase in the mixing factor.

Key words: Experimental chamber, indoor air velocity, mixing factor, smoke pattern, ventilation condition

I. 서 론

국내 전기·전자, 조선, 정밀 화학 제조 산업 등이 발달함에 따라 작업자들은 대규모 옥내지역에 작업을 수행하기 위해 상주하는 시간이 증가하고 있다. 이에 따라 오염물질이 소량으로 누출되는 공정 설비나 시설이 실내에 설치되면서 산업안전보건 관점에서 전체환기의 중요성이 증대되고 있다(Kim *et al.*, 1999). 전체환기는 기본적으로 실내 작업공간에 존재하는 오염물질의 공기 중 농도를 법적 노출 기준 농도 이하로 희석시키거나

*Corresponding author: Hyunwook Kim, Tel: 02-2258-7363, E-mail: hwkim@catholic.ac.kr
Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea, 505 Banpo-dong, Seocho-gu, Seoul137-701 Korea
Received: August 20, 2019, Revised: September 16, 2019, Accepted: September 25, 2019
Yun-ho Lee http://orcid.org/0000-0002-5517-6260
Seokwon Lee https://orcid.org/0000-0001-6405-3150
Kyoungho Lee https://orcid.org/0000-0003-2353-2547
Hyunwook Kim https://orcid.org/0000-0002-1861-2529

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.

작업자에게 노출되기 이전 오염물질 자체를 제거하는 방향으로 설계하여야 한다. 특히 실내 작업환경의 온도 및 습도, 유해물질 발생 정도, 작업자의 인원 등을 반영해야 하며 화재, 폭발, 독성가스 누출 등 산업안전 · 보건 관리측면에서 발생 가능한 위험성을 사전에 효과적으로 예방해야 한다(Son *et al.*, 2001). 혼합계수는 전체환기 필요유량산출공식 (1)에 따라 유량을 결정하는데 중요한 인자로 작용한다(KOSHA, 2014).

$$Q = \frac{G}{C_g} \times K \quad (1)$$

Q: 필요유량; G: 오염물질 발생량; C_g: 일정시간 동안 가스 혹은 증기농도; K: 완전 혼합을 위한 혼합계수

일반적으로 혼합계수(K-Factor)는 1970년대 미국 공군에서 제시한 환기 조건에 따라 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 1에서 10까지 선정한다. 특히 환기조건이 '미흡(poor)' 혹은 '보통(fair)'인 경우 혼합계수를 각각 5에서 10 또는 2에서 5의 범위에서 선정하며 공기 공급 및 배출유량도 동일한 배수로 비례하여 증가되기 때문에 환기 효율이 취약한 지역을 충분히 개선할 수 있도록 제시한다(US Air Force, 1977). 이때 공기 유량이 최대 10배까지 확대되는 경우 환기 팬 및 관련 공급시설이 모두 확대됨을 의미한다(ACGIH, 2010) (Figure 1). 이렇게 ACGIH와 Sax에서 제시하는 혼합계수 '미흡(poor)'에 대한 범위가 5 ~ 11로 넓기 때문에 정확하게 결정하기 어렵고 연구자의 선택에 의해 결과가 달라질 수 있다(Crowl *et al.*, 2011). 따라서 혼합계수를 증가시켜 공기 유량을 증가시킬 때 환기조건이 '미흡'한 상태에서 취약지점에서 공기 유속이 얼마나 개선되는지 확인하면 혼합계수를 보다 효율적으로 결정할 수 있다.

기존에 수행된 연구에서 공기 연령 또는 공기 유속(air velocity)을 측정하여 환기효율을 평가하였고 이를 통해 최적의 환기 조건을 결정하였다(Chung & Derek 1998; Gobeau *et al.*, 2005; Gant *et al.*, 2006; Jung & Park 2007; Huang & Lin 2014). 다른 연구에서는 가시 유동화 실험을 통해 육안으로 관찰하였다(Jung *et al.*, 2013; Meisenzahl 2014; Meroney *et al.*, 2015). 환기 조건 및 효율에 영향을 미치는 인자로

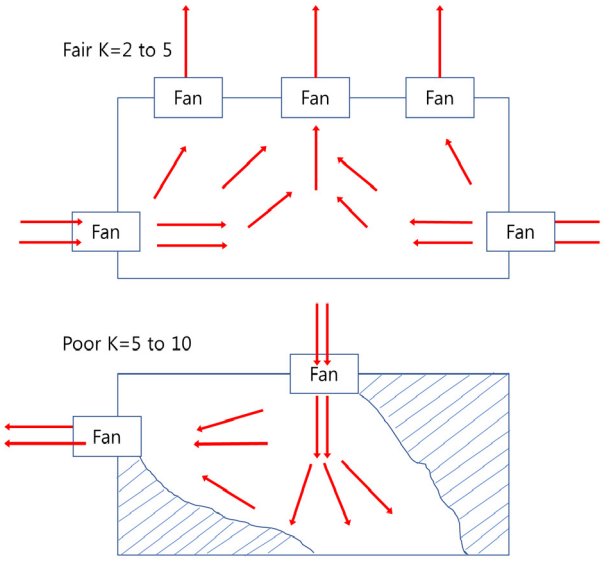

Figure 1. K-Factors of inlet and exhaust locations in Fair and Poor(ACGIH, 2010)

는 공기환기횟수, 평균공기연령, 환기효율정도, 오염물질농도, 실내 공기 환기 효율 등이 있고(Lim *et al.*, 2014), 환기 조건을 개선시키는 환경인자들로 온도, 개구부 개방, 환기설비용량, 강제 환기 장치의 사용, 공기 유입 설비의 사용 등이 알려져 있다(Gant *et al.*, 2006). Chou *et al.*(1998)은 창문 위치에 따른 공기 흐름의 변화를 비교하여 개구부 개방이 환기 조건에 미치는 영향을 확인하였고, Hajdukiewicz *et al.*(2013)은 공기 유속 측정값과 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 시뮬레이션 기법을 활용한 예측 값을 비교하였다. 그러나 혼합계수 선정 관련하여 발표된 실험 연구사례는 거의 없는 편이다. 따라서 전체환기로 챔버 모형 내 추적가스의 농도, 공기 유속 측정 및 가시 유동화 관찰 등 혼합계수 증가에 따른 환기 조건 및 효율 개선에 대한 조사가 필요하다.

본 연구의 목적은 혼합계수를 증가시켜 공기 유량을 높일 때 환기 취약 지점의 공기 유속이 증가하는지, 개구부 개방으로 인하여 공기 유속 증가에 어떤 영향을 미치는지를 확인하고 환기 조건 및 효율에 대한 개선방안을 확인하는 것이다. 이에 상세 목적은 다음과 같다. 첫째, 챔버 모형에서 혼합계수의 증가를 의미하는 상부 팬 가동 개수를 증가하여 공기 배출량을 높일 때 환기 취약지점의 공기 유속 증가 유무를 확인한다. 둘째, 혼합계수 증가 시 개구부의 개방이 공기 유속 증가에 영향을 미치는지 확인한다. 셋째, 가시 유동화 실험을 통

해 상부 팬 가동 시 연기가 이동하는 현상을 시각적으로 확인한다. 넷째, 공기 유입 개선 방안 실험을 통해 상부 팬 가동 시 개선 방안 효과에 대해서도 확인하고자 한다. 기존 문헌에서 제시한 혼합계수 선정에 대한 한계점을 확인하고 환기 조건이 미흡한 경우 공기 유속을 증가시키는 효과적인 방안을 모색하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상은 반도체 및 디스플레이 등 대규모 사업장의 제조 공정을 고려하여 국내 대학의 화재실험장(30 m × 25 m × 16 m)을 선정하였다. 이 실험장은 실내 상부 팬(800 m^3/min) 4개, 개구부(9 m × 21 m) 1개로 구성되어 있다(Figure 2). 또한 조선 제조 사업장에서 사용하는 하부 팬(각 420 m^3/min) 5개를 모형으로 제작하여 활용하였다(Baek *et al.*, 2004). 각 환기 팬 배출용량은 4 ACH(Air Change per Hour, ACH)으로 총 16 ACH 유량을 적용시켰다. 설비 입·출입을 위한 개구부가 있으며 일반적으로 닫힌 상태에서 환기되는 조건이었다. 환기시설은 4개의 상부 팬이 순차적으로 4, 8, 12, 16 ACH로 가동되며 자연 환기를 통해 외기가 유입되도록 설계하였다.

챔버 모형은 제조설비 크기를 12,000:1로 축소하여 총체적 1 m^3(1.2 m × 1.2 m × 0.7 m)이 되도록 10 mm 두께 아크릴판을 사용하여 상부 팬 4개를 챔버 내부에 설치하였다. 환기 팬의 모델명은 DFM 4010S이고 설계 유량의 스펙은 5.62 CFM(Cubic Feet per Minute)

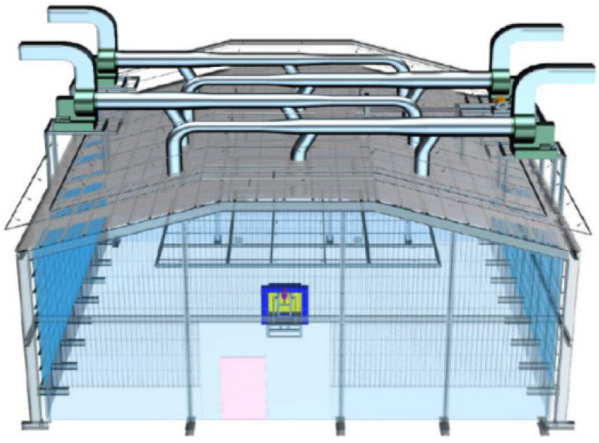

Figure 2. Ventilation Facility in Model with 4 × 800 m^3/min; 16ACH

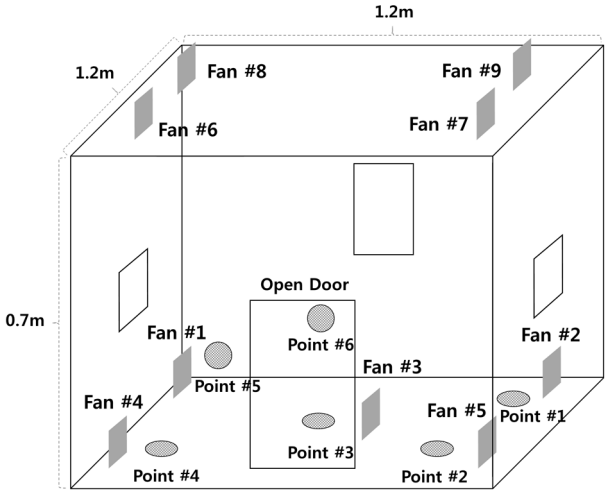

Figure 3. An experimental chamber and locations of fans installed inside the chamber

(=9.54 m^3/hr)이다. 상부 팬은 챔버 상부에 설치하였고 최대 4개 팬이 동시 가동 시 38.16 m^3/hr로 공기를 배출할 수 있다. 총 환기수는 약 38 ACH로 대상 설비 기준 16 ACH보다 환기 배수가 2.38배 크게 설계하였다(Figure 3).

최초 필요 유량을 상부 팬 1개 가동으로 적용하고 상부 팬이 2, 3, 4개로 증가하여 가동 시 혼합계수도 이에 따라 2, 3, 4배 증가하는 것을 가정하였다. 또한 실내 바닥 하부에 상부 팬과 동일한 제품으로 환기 팬을 5개 설치하였다. 본 연구의 초기 계획에서는 하부 팬을 각 시나리오별로 가동하여 내부 희석과 환기 영향을 검토하였으나, 최종적으로 환기조건 개선방안 확인을 위해 공기 유입 호스 설치 시 하부 팬에 설치하여 취약지점에서 공기가 외부로부터 내부로 유입되도록 적용하였다. 모든 상부 및 하부 팬들은 전기 패널 제어를 이용하여 순차적으로 가동하였다. 개구부는 가로와 세로 0.26 m × 0.42 m 크기로 나머지 3개 창문은 0.26 m × 0.26 m 크기로 설치하여 자연환기 조건을 적용시켰다. 본 연구는 정문 개구부만 폐쇄 및 개방한 상태로 상부 팬 강제 환기 시 개구부 개방에 따른 영향을 비교하였고 틈새 누설 이외 다른 조건을 고려하지 않았다.

2. 연구방법

1) 챔버 내 열선풍속계 측정 위치 및 방법

열선풍속계는 TSI-9515(미국 TSI)으로 측정하였다(Ha *et al.*, 1999). 공기 유속을 측정하기 위해 챔버의 벽면을 뚫어 측정기를 삽입하였다. 공기 유속 측정 방향

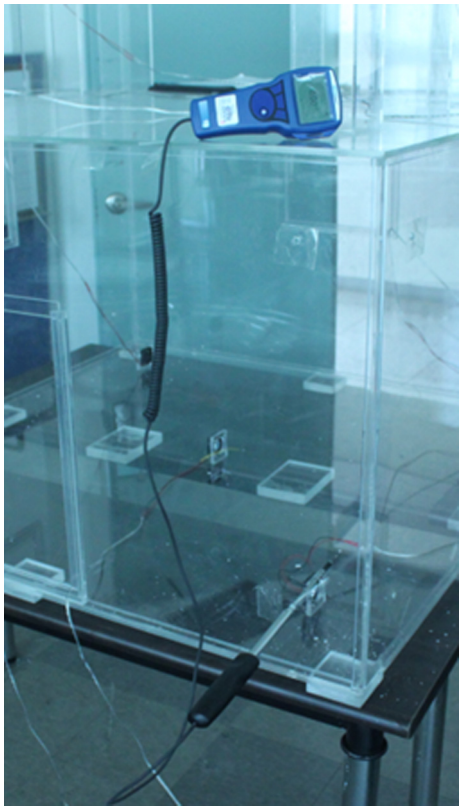

Figure 4. Measure points in the chamber

은 상부 팬의 유입 방향과 수직 방향으로 고정하고 하부 팬과 간섭 효과를 배제하기 위해 약 15 cm이상 거리를 두고 설치하였다. 챔버 내부로 풍속계 삽입 후 최소 30초 이상 공기 유속을 측정하였고 측정값에 변화가 없고 안정화된 후 10초간 유속을 측정하였다. 만일 측정값에 변동이 있는 경우 측정 범위를 기록한 후 중간값을 기록하였다. 각 환기 조건에 따라 열선풍속계를 해당 지점에서 원으로 표기된 바닥지점의 각 모서리 4곳과 바닥과 상부 중앙(지면으로부터 0.2 m) 지점에서 측정하였다. 환기 조건 개선 방안을 위한 실험에서는 공기 유입호스를 기존 하부 팬에 연결하여 외기를 내부로 유입하였을 때 환기 취약 지점인 각 모서리 4개 지점(1, 2, 4, 5번)과 환기가 우수한 지역으로 판단되는 챔버 내부의 중심부와 그 상부지점(3, 6번)에서 공기 유속을 측정하였다(Figure 3, Figure 4).

2) 각 시나리오 별 공기 유속 측정방법

공기 유속 측정은 개구부 개방유무, 상부 팬 가동을 조합하여 챔버 내부 6개 지점에서 실시하였다. 일정한 온도에서 하부 팬이 가동되지 않을 때 한 개, 중앙에 위치한 3번 팬을 포함하여 모서리 지역 환기 팬과 함께 최대 2개 팬이 가동하는 환경에서 개구부 개폐, 상부 팬 4개를 가동하는 시나리오를 조합하였다. 각 시나리오별 환기 취약 지점의 평균 공기 연령의 기준인 공기 유속을 각 지점 별로 측정하였다. 여섯 개 측정 위치에서 공기 유속을 측정하였으며, 낮은 공기 유속 측정값도 특이점을 확인할 수 있을 것으로 고려하여 결과값을 수집하였다.

3) 가시 유동화 관찰

가시 유동화 관찰은 상부 팬이 모두 가동하면서 개구부가 개방 또는 폐쇄 시 환기 취약지점, 연기 이동 경로, 개방된 개구부의 연기 이동 현상을 가시적으로 확인하였다. 챔버 모형 내부에 가시 유동화 장비를 설치하고 최초 1분에서 1분 30초까지 연기가 이동하는 현상과 희석 정도를 육안으로 관찰하였다. 또한, 환기 조건의 개선 방안 확인을 위해 챔버 모형 내부 공기 유입을 위한 호스를 설치하여 취약 지점에서의 공기 유속을 측정하여 개선 효과를 확인하였다.

4) 통계분석방법

실험 측정값의 통계 분석을 위해 유속이 0.0 m/s 인 경우 열선풍속계의 최저 가능측정치 0.01 m/s의 0.5배로 치환하여 0.005 m/s으로 설정하였다. 통계 분석 수행 시 측정값이 0.1 m/s 이하로 측정된 경우 대수정규분포를 만족하지 않아 비모수적(non-parametric)방법을 활용하여 순위(rank) 기준으로 분석을 실시하였다. 챔버 모형 내부에 설치된 상부 팬 가동에 따른 3개 이상 집단에서 공기 유속의 비교는 Kruskal-Wallis Test방법으로 분석하였고, 개구부 개방 혹은 폐쇄에 따른 2개 집단의 경우 Mann-Whitney Test를 실시하였다. 모든 통계분석에는 SAS Version 9.4(SAS, Inc., Cary, NC, USA)와 SPSS Version 23.0(SPSS Inc., Chicago, IL, U.S.A.)를 활용하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 상부 팬 가동 개수와 개구부 개폐 여부에 따른 공기 유속의 측정 결과

챔버 모형의 개구부 개방 혹은 폐쇄 시 상부 팬 4개를 순차적으로 증가시켜 가동하면서 6개 지점에서 공기 유속을 비교하였다(N=1,920). 상부 팬을 가동하지 않거나 1개만 가동된 경우 공기 유속은 유의하게 증가하지 않았

Table 1. Average velocity (m/s) at each point by the number of fans operated at the door

Location	No fan				One fan†				Two fans‡				Three fans§				Four fans¶			
	Door closed		Door open		Door closed		Door open		Door closed		Door open		Door closed		Door open		Door closed		Door open	
	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD	N	AM±SD
Point 1	10	0.01±0.01	10	0.01±0.01	40	0.01±0.01	40	0.02±0.02	60	0.01±0.01	60	0.02±0.04	40	0.01±0.01	40	0.01±0.002	10	0.01±0.01	10	0.01±0.01
Point 2	10	0.01±0.01	10	0.01±0.00	40	0.02±0.02	40	0.01±0.01	60	0.02±0.02	60	0.01±0.01	40	0.02±0.03	40	0.03±0.16	10	0.03±0.04	10	0.02±0.02
Point 3	10	0.01±0.01	10	0.01±0.01	40	0.01±0.01	40	0.03±0.04	60	0.03±0.03	60	0.05±0.06	40	0.08±0.08	40	0.01±0.01	10	0.01±0.003	10	0.09±0.09
Point 4	10	0.01±0.004	10	0.01±0.002	40	0.01±0.01	40	0.01±0.01	60	0.02±0.02	60	0.02±0.02	40	0.01±0.01	40	0.02±0.03	10	0.01±0.004	10	0.03±0.04
Point 5	10	0.01±0.002	10	0.02±0.02	40	0.01±0.01	40	0.01±0.01	60	0.02±0.01	60	0.01±0.01	40	0.01±0.02	40	0.08±0.08	10	0.01±0.003	10	0.02±0.01
Point 6	10	0.01±0.003	10	0.03±0.04	40	0.01±0.003	40	0.01±0.01	60	0.02±0.03	60	0.01±0.004	40	0.02±0.01	40	0.01±0.01	10	0.01±0.003	10	0.01±0.01
Total	60	0.01±0.01	60	0.02±0.02	240	0.01±0.01	240	0.02±0.02	360	0.02±0.02	360	0.02±0.03	240	0.03±0.04	240	0.03±0.08	60	0.01±0.02	60	0.03±0.05
p-value	0.26		0.16		0.08		0.23		0.003* (3 point)		0.00* (3 point)		0.003* (3 point)		0.00* (2 and 5 points)		0.71		0.003* (3 and 6 points)	

* Statistically significant ($p<0.05$)
† One roof fan was operated (6, 7, 8, 9)
‡ Two fans are combined and operated (6&7,6&8,6&9,7&8,7&9,8&9)
§ Three fans are combined and operated (6&7&8, 6&7&9,6&8&9,7&8&9)
¶ Four fans are combined and operated (6&7&8&9)

다. 그러나 챔버 내부에 가동된 상부 팬 개수가 2개부터 4개까지 증가함에 따라 일부 지점에서 공기 유속이 증가하였다($p<0.05$). 상부 팬을 2개 가동한 경우 챔버 모형의 중심부에 위치한 3번 지점에서 공기 유속이 개구부 개방 시 0.03±0.03 m/s, 폐쇄 시 0.05±0.06 m/s으로 증가하였고, 상부 팬 개수를 3개로 증가시킨 경우 개구부 폐쇄 시 3번 지점에서 0.08±0.08 m/s, 개방 시 2번 지점에서 0.03±0.16 m/s, 5번 지점에서 0.08±0.08 m/s으로 증가하였다 ($p<0.05$). 상부 팬 개수를 4개로 증가시킨 경우 개구부 폐쇄 시 모든 지점에서 공기 유속이 증가하지 않았던 반면, 개구부 개방 시 3번 지점에서 0.09±0.09 m/s으로 유의하게 증가하였다. 따라서 혼합계수의 증가(즉, 가동된 상부 팬의 개수 증가)에 따른 환기 취약지점인 1,2,4 및 5번 지점에서 공기 유속이 증가하지 않아 공기 배출량 증가로 인한 환기 조건 개선에 영향을 나타내지 않았다(Table 1).

2. 가시 유동화 실험 시 관찰 결과

상부 팬 4개를 가동한 상태에서 개구부 개방 혹은 폐쇄 시 챔버 모형 외부에서 내부로 공기가 유입되는 가시 유동화 현상을 관찰하였다. 챔버 모형에 가동되는 상부 팬 통로를 통해 실내에서 실외로 연기가 이동하여 배출되고 있었다. 특히 상부 팬 상부에 있는 연기가 우선적으로 배출되었다(Figure 5). 또한 챔버 모형 내부 상부 팬가동시 3번과 6번 지점에서 환기 취약 지점에 정체되었던 공기가 상부 팬으로 바로 이동하지 않고 중앙부 상부에서 하부 지점으로 선형을 그리면서 연기가 이동하는 것이 관찰되었다(Figure 6). 챔버 내부 환기

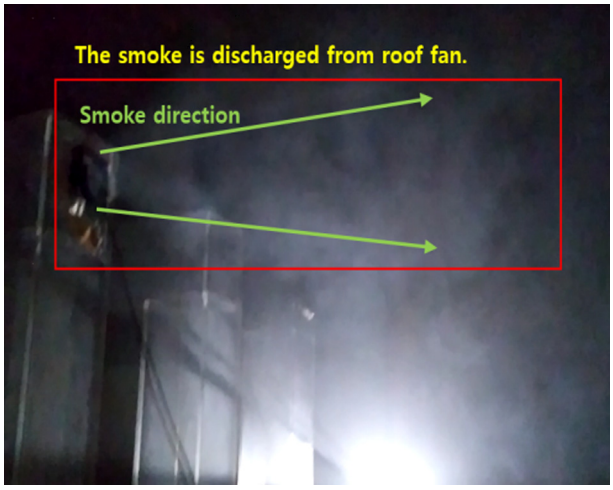

Figure 5. Smoke pattern from the roof fan in the chamber

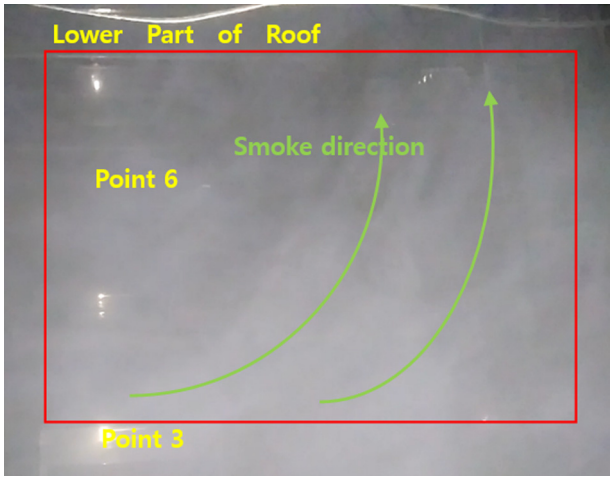

Figure 6. Smoke pattern at the middle parts (Points 3 and 6) of the chamber

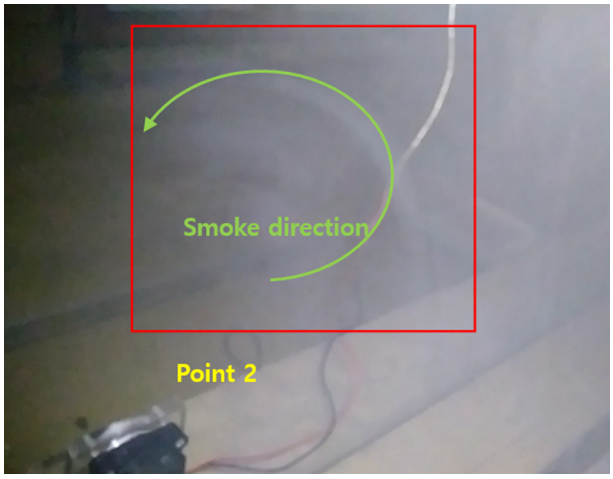

Figure 7. Smoke pattern at the corner part (Point 2) of the chamber

Figure 8. Smoke pattern observed while the door is open

취약지역인 2번 지점에서는 공기가 정체되면서 동시에 와류가 형성되는 것이 관찰되어 환기 취약지점에서는 공기가 상부 팬으로 선형으로 이동하지 않고 희석에 의해 완만하게 확산되는 현상을 보였다(Figure 7). 개구부 개방 시 외부에서 내부로 이동한 공기는 환기 취약지점을 거치지 않고 바로 이동하였고 상부 팬 가동 시 유입되는 공기는 중심부를 거쳐 외부로 배출되었다. 따라서 개구부의 개방 여부가 환기 취약지점에서 환기 조건 개선에는 큰 영향을 보이지 않았다(Figure 8).

3. 환기 조건 개선 방안 실험 시 관찰결과

개구부 개방 혹은 폐쇄, 상부 팬을 1개부터 4개까지 순차적으로 가동시킨 상태에서 공기 유입 호스를 연결하여 외기를 유입하였기 때문에 대부분 환기 취약지점에서의 평균 공기 유속은 외기를 강제 유입 시키기 이전보다 약 10~20배 증가하였다. 평균 공기 유속은 상부 팬 1개 가동하면서 개구부 폐쇄 시 0.13 m/s, 개방 시 0.22 m/s, 상부 팬 2개 가동조건에서 개구부 폐쇄 시 0.12 m/s, 개방 시 0.23 m/s, 상부 팬 3개 가동조건에서 개구부 폐쇄 시 0.11 m/s, 개방 시 0.23 m/s, 상부 팬 4개 가동조건에서 개구부 폐쇄 시 0.13 m/s, 개방 시 0.22 m/s으로 상부 팬 가동 개수가 증가함에 따라(즉, 혼합계수 증가로 인해) 평균 공기의 유속은 증가하지 않았으나 개구부 개방 혹은 폐쇄 여부에 따라 유속이 유의하게 증가하였다(p<0.05). 이 결과를 통해 혼합계수를 4 배 이상 증가시키더라도 환기 취약지점에서의 공기 유속은 증가하지 않았으며 외기의 유입 이외에는 추가 팬의 가동이 필요하지 않음을 확인하였다(Table 2).

Ⅳ. 고 찰

본 연구에서 혼합계수를 증가시킴에 따라 챔버 모형 내부 공기 유속에 어떠한 변화가 있는지 실험을 통해 확인하였다. 상부 팬 개수를 1개부터 4개까지 가동하였

Table 2. Average velocity (m/s) at each point after installing a flexible hose by the number of fans operated at the door

Location	No fan				One fan*				Two fans†				Three fans‡				Four fans§			
	Door closed		Door open		Door closed		Door open		Door closed		Door open		Door closed		Door open		Door closed		Door open	
	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM	N	AM
Point 1	1	0.15	1	0.14	4	0.18	4	0.20	6	0.16	6	0.25	4	0.14	4	0.23	1	0.18	1	0.25
Point 2	1	0.11	1	0.11	4	0.12	4	0.24	6	0.11	6	0.22	4	0.11	4	0.27	1	0.09	1	0.24
Point 4	1	0.15	1	0.15	4	0.17	4	0.28	6	0.17	6	0.28	4	0.16	4	0.27	1	0.20	1	0.27
Point 5	1	0.07	1	0.03	4	0.04	4	0.14	6	0.03	6	0.15	4	0.03	4	0.16	1	0.03	1	0.13
Total	4	0.12	4	0.10	16	0.13	16	0.22	24	0.12	24	0.23	16	0.11	16	0.23	4	0.13	4	0.22

* One roof fan was operated (6, 7, 8, 9)
† Two fans are combined and operated (6&7,6&8,6&9,7&8,7&9,8&9)
‡ Three fans are combined and operated (6&7&8, 6&7&9,6&8&9,7&8&9)
§ Four fans are combined and operated (6&7&8&9)

으나 환기가 취약한 일부 지점에서 공기 유속은 증가하지 않았다. 상부 팬을 2개 혹은 3개 가동시킨 조건에서 개구부 개방 시 일부 지점에서만 공기 유속이 증가하였고 상부 팬을 최대 4개까지 가동하였음에도 불구하고 공기 유속은 개선되지 않았다. 한편 가시 유동화 실험에서 환기가 취약한 4개 지점의 공기가 정체되거나 와류가 발생하였고 환기가 원활한 중심부로만 연기가 이동하는 현상을 관찰하였다. 또한 혼합계수 증가와는 상관없이 외기를 내부로 강제 유입시킨 경우 공기 유속이 약 10~20배 증가하였다. 따라서 기존문헌을 통해 예상한 결과와는 전혀 다른 결과를 확인하였다.

대규모 실내 사업장 천장에는 지붕 환기시설을 가동하고 있으나 추가 환기 팬이 설치되지 않은 경우 혼합계수를 증가시켜도 일부지역에서는 환기 조건 및 효율이 개선되지 않을 수 있다. 그리고 환기 조건 개선을 위해 개구부(창문 등)를 개방하면 일부 지점에서 환기 효율이 일부 개선될 수 있으나 배출량이 증가하면 오히려 악화될 가능성도 있다. 따라서 환기 취약 지점에 필요한 공기량을 직접 외기를 통해 공급한다면 환기를 개선시킬 수 있다. 이번 연구 결과를 토대로 실내 공기 유입량(Q_{in})과 배출량(Q_{out})이 유사하다고 가정할 경우 혼합계수를 증가시키면 환기 유량을 증가시킬 수 있다. 즉 위 조건을 만족하는 경우에 한하여 혼합계수 증가를 고려하는 것이 합리적인 개선 방안이 될 수 있다. 한편 기존 연구에서 혼합계수 결정시 고려하지 않은 요인으로 공기유입, 중간흐름, 배출로 이어지는 공기 순환경로인 공기채널링(air channeling)이 있다. 본 연구에서도 개구부 개방 시 환기 취약지점에 강제 환기 시설이나 개구부 위치 등 물리적인 환경 조건을 혼합계수 선정 시 추가로 고려해야만 했다. 이는 환기 효율을 결정할 수 있는 환경인자로 기존 문헌에서 이미 검토되었으나 혼합계수 선정 시 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 혼합계수 선정 시 공기채널링에 대해서도 추가로 검토되어야 할 것이다. 또한, 향후연구에서는 1개의 개구부와 3개의 창문의 개폐를 통해 자연 급기구 위치 및 크기 변화에 따른 환기 효율 개선 효과를 평가도 추가변수로 적용할 수 있다.

본 연구를 통해 국내 산업 안전・보건 분야에서는 최초로 혼합계수 증가에 따른 환기 조건을 챔버 실험 모형을 통해 확인하였다. 기존 문헌에서 알려진 것과 다르게 혼합계수 증가 시 환기량 증가로 인해 환기 취약지점에서 환기 조건이 개선되지 않음을 확인하였다. 이번 연구는 실험 모형을 활용하였기 때문에 추가 검증 등 연구가 더 필요하지만 혼합계수의 이론적 한계점을 확인하였고 실제 사업장에서 적용 가능성과 적절한 개선 방안이 무엇인지를 확인하였다. 최근 발표된 추적가스 농도를 측정한 연구 결과와는 다르게 챔버 모형 내부의 다양한 지점에서 공기 유속을 직접 측정하여 환기 정도를 판단하여 향후 전산유체역학(CFD) 시뮬레이션을 활용한 연구 결과와 비교 가능하다.

그러나 다음과 같은 제한점이 있다. 우선 챔버 모형을 활용한 실험 조건은 실제 작업 환경 조건과 다르게 환기 팬 용량 및 위치, 온・습도 등 다양한 환경 변수에도 차이가 있을 수 있다. 그래서 환경 변수를 조절하면서 실험 조건을 변경할 수 없어 실제 사업장에서 발생 가능한 시나리오를 그대로 재현할 수 없었다. 또한 선행연구에서는 추적가스(SF_6등)를 활용하여 환기조건 및 효율을 확인하였으나 이번 연구에서는 이를 활용하지 않았다. 이는 동일한 시스템에서 실험 조건을 일괄적으로 변경하면서 반복적으로 공기 중 농도를 동시에 측정할 수 없었기 때문이다. 향후 연구에서는 추적가스의 누출에 따른 농도의 변화의 측정으로 혼합계수의 한계점을 확인할 필요가 있다. 또한, 측정에 사용된 열선풍속계는 2차원으로 챔버 내부 기류 흐름은 3차원으로 각 지점마다 측정 방향에 따라 값이 변경될 가능성이 있다. 측정에 대한 일관성은 확보할 수 있지만, 공기 최고 유속을 측정할 수 있기 때문에 향후 연구에서는 가시 유동화 실험 결과에 따라 연기의 흐름이 주요하게 작용하는 방향으로 열선풍속계 측정 방향을 개별적으로 결정하는 것을 반영할 필요가 있다. 이러한 제한점에도 불구하고 챔버 모형 실험을 통해 대형 실내 사업장에서 혼합계수가 가지는 한계점과 환기 조건 및 효율에 대한 개선 방안을 확인하였다는데 큰 의의가 있다.

V. 결 론

본 연구를 통해 챔버 모형 내부에 설치된 상부 팬을 가동하여 혼합계수를 증가시키거나 개구부를 개방하더라도 환기 취약 지점에서 공기 유속이 증가하지 않음을 확인하였다. 따라서 혼합계수 선정 시 강제 환기시스템을 자연환기와 함께 고려하여 설계함으로써 혼합계수의 증가 없이도 환기효율을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 산업 안전・보건 관리 측면에서 최적의 혼합계수 선정에 따른 환기 조건의 효율 개선을 통해 설비

투자 및 운영 비용을 상당 부분 감소시킬 것으로 기대된다. 향후 챔버 모형을 활용한 실험 측정값과 전산유체역학(CFD) 시뮬레이션기법을 활용한 예측 값을 비교 분석하여 혼합계수의 증가 혹은 감소 등 다양한 시나리오를 적용했을 때 환기 조건 및 효율이 얼마나 개선되는지를 확인하는 추가 연구의 수행이 필요하다.

References

America Conference of Governmental Industrial Hygienists. Industrial ventilation A Manual of recommended Practice for Design 27th edition. ACGIH 2010;4-5; 4-1-5-34

Baek UG, Pea YG, Kim BN, Kim BG. The study of Concept for Effective Ventilation Condition in the Site - Shipbuilding Site Welding Process. KOSHA 2004

Chen F, Chen H, Xie J, Shu Z, Mao J. Air Distribution in room ventilated by fabric air dispersion system. *Build Environ* 2011;46: 2021-9

Chou P, Chiang C, Chuah Y, Wang W. Effects of Window Position on the Air Flow Distribution in a Cross-Ventilated Residential Bedroom. *INDOOR BUILT ENVIRON* 1998; 7:301-7

Chung I, Derek D. Using numerical simulation to predict ventilation efficiency in a model room. *ENERG BUILDINGS* 1998; 28:43-50

Crowl D, Louvar J. Chemical Process Safety Fundamentals with Applications 3rd Edition. Prentice Hall 2011; 103-9

Gao J, Zhao J, Li X, Gao F. Evaluation of a Zonal Model for Large Enclosures Using Computational Fluid Dynamics. *J ASIAN ARCHIT BUILD* 2007; 6:379-85

Gant S, Kelsey A, Gobeau N. Factors Influencing the Indoor Transport of Contaminants and modeling implications. Health &Safety Laboratory 2006

Gobeau N, Lea C, Kelsey A, Saunders J. Investigation of the factors Influencing pesticide distribution in naturally-ventilated buildings. Health & Safety Laboratory 2005

Ha HC, Kim TH, Kim JC, Shim GJ, Kim et al. Survey on Operation and Maintenance of Hot - wire Anemometers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1999; 9:123-33

Hajdukiewicz M, Geron M, Keane M. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments, *Build Environ* 2013;59:290-302

Huang CH, Lin PY. Influence of spatial layout on airflow field and particle distribution on the workspace of a factory, *Build Environ* 2014;71:212-22

International Electric Code. 60079-10-1 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive Gas atmospheres. 2009

Jung JH, Park DJ, Ha HC, Lee JH, Hwang SM et al. Risk Assessment of NG Facility for reviewing the electrical area classification. KOSHA 2013

Jung UG, Park HH. The study of Concept for Effective Ventilation Condition in the Site - Electronic Cleanroom Process. KOSHA 2007

Kim TH, Kim HW, Park DU, Baek NW. Industrial Ventilation, Shingwang, 1999. ISBN: 89-7069-470-6.

KOSHA. Guidelines of Industrial Ventilation W-1-2014. KOSHA 2014

Lim ES, Kazuhide I, Mats S. Performance evaluation of contaminant removal and air quality control for local ventilation systems using the ventilation index Net Escape Velocity. Build Environ 2014; 79:78-89

Meisenzahl I. Vortex Ventilation in the Laboratory Environment. *J Occup Environ Hyg* 2014; 11:672-9

Meroney R, Hill D, Derickson R, Stroup J, Weber K, Garrett P. CFD Simulation of ventilation and smoke movement in a large military firing range. *J WIND ENG IND AEROD* 2015; 136:12-22

Son BS, Park JA, Kim MC, Byun SH, Park SC et al. Industrial Ventilation - Theory and Practice. Donghwa Technology 2001

US Air Force. AFOSH Standard 161.2. 1977

<저자정보>

이윤호(수석연구원), 이석원(책임연구원),
이경호(수석연구원), 김현욱(교수)