

공장창호의 환기특성에 관한 연구

박승욱* · 김태형 · 하현철 · 허영빈

창원대학교 환경공학과

(2010년 8월 16일 접수; 2011년 3월 11일 수정; 2011년 4월 11일 채택)

A Study on Ventilation Characteristics of Industrial Windows

Cheng Xu Piao*, Tae Hyeung Kim, Hyun Chul Ha, Rong Bin Xu

Department of Environmental Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

(Manuscript received 16 August, 2010; revised 11 March, 2011; accepted 11 April, 2011)

Abstract

Industrial natural ventilation systems consist of gravity ventilator, the high/low windows and doors. Especially, the high windows play an important role in the industrial natural ventilation systems. Generally speaking, industrial high windows are divided into 3 types; louver type, 45° open type and 90° open type. This study was numerically and experimentally conducted. Three types of windows were tested to know the ventilation characteristics and estimate the ventilation efficiencies. Numerically, computational fluid dynamics software (AIR PAK Ver. 2.0) was used to observe the flow characteristics inside the industrial building and the concentration contours generated by the tracer gas method. Experimentally, the flow visualization technique and the tracer gas method were applied with the model building to characterize the flow pattern inside the model building and to estimate the ventilation efficiencies with the different windows. It was found that 90° open type window was most effective for the discharge of pollutants from the industrial building. On the other hand, the louver type window was found to be less effective than any other windows.

Key Words : Natural ventilation, High windows, Computational fluid dynamics, Tracer gas method, Industrial ventilation

1. 서론

공장의 자연환기는 기계적 시설이 필요 없이 지붕에 설치된 모니터, 건물벽체의 상부에 설치된 고창과 하부에 설치된 창호 그리고 출입문 등으로 진행되는 데 작업장 내외의 기온차이 즉 공기밀도 차이에 의한 대류와 바람에 의하여 이루어진다. 그 중에서 창호는 자연환기의 매우 중요한 인자로서 그 크기와 형태 등의 변화가 작업장 내부의 오염물질의 배출에 상당한

영향을 주게 된다.

일반적으로 대형작업장의 고창을 개폐하려면 수동 혹은 전동개폐장치를 추가하여야 하는데 이는 초기 투자비용이 증가되고 유지보수 비용이 추가되기 때문에 기후가 비교적 온화한 지역에 위치하고 있는 많은 공장들에서는 창호의 형태와 모양을 고정시켜 상시 개방된 상태에서 사용하는 경향이 많은데 동절기에도 예외가 아니다. 때문에 창호의 초기설계와 시공이 매우 중요하다. 초기설계와 시공이 작업장 내부의 환기에 불적절하면 수정과 변경이 어려워진다.

현재 한국남부의 많은 공장들에서 사용되고 있는 상시 개방형 고창의 형태를 살펴보면 주로 루버창, 45° 개방형, 90° 개방형 3가지인데 일반적인 경험에 의하면 루버창은 환기효율과 채광효과가 낮지만 빗물유입

*Corresponding author : Cheng Xu Piao, Department of Environmental Engineering Changwon National University, Changwon 641-773, Korea
Phone: +82-55-213-3745
E-mail: chengxu718@hanmail.net

방지효과는 우수하며 45°개방형은 루버창에 비해 환기효율과 채광효과가 다소 높고 빗물유입방지효과도 우수하기에 제일 많이 사용되는 편이다. 90°개방형은 근래 들어 일부 공장들에서 사용되고 있지만 비록 환기효율이 높고 채광효과도 좋지만 빗물유입에 대한 방지대책이 필요하다. 본 연구에서는 상술한 공장창호의 사용현황을 기본 바탕으로 컴퓨터시뮬레이션 방식과 실험방식을 통하여 위의 3가지 형태창호의 환기효율과 기류패턴을 비교, 분석하여 공장창호의 환기특성을 종합적으로 연구하는 것을 연구목적으로 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 크게 두 가지 방식으로 진행되는데 하나는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 창호형태별 환기량을 예측하고 오염물질의 농도변화를 추적하며 내부의 기류흐름을 분석하는 것이고 다른 하나는 모형실험을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 검증하는 것이다.

2.1. 연구 Case 선정

창호의 환기량은 입구면적과 형태변경(유입계수 변화)에 비례하게 된다(Papadakis 등, 1996; Yuguo 등, 2000; Larsson 등, 2002; Per heiselberg 등, 2001). 창호의 형태변경에 따른 환기특성을 비교하기 위하여 본 연구에서는 현재 제일 보편적으로 사용되는 1 m, 2 단창호를 연구대상으로 선정하여 Fig. 1과 같이 루버형, 45°개방형, 90°개방으로 변화시켜 그들의 환기특성을 비교하여 보았다. 구체적인 규격은 Fig. 1에 상세히 소개되어 있다.

2.2. 컴퓨터 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 AIR PAK(Ver. 2.0)을 사용하였고 연산 방법으로 유한체적법을 사용하였다. 또한 수렴성을 좋게 하기 위하여 하향 이완법을 사용하여 수렴정도를 점검하였는데 잉여치 R값을 체크하여 잉여치가 10⁻³ 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

Fig. 2은 창호의 형태변경에 따른 환기효율을 평가하기 위하여 설정한 제어체적을 나타낸 것이다. 건물

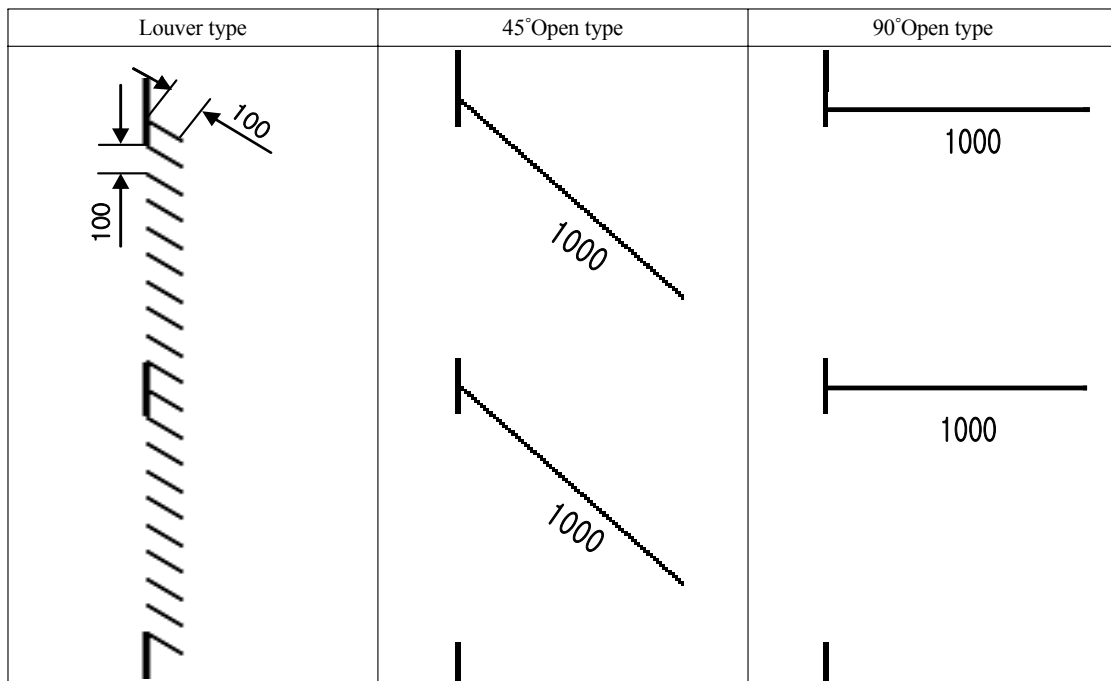


Fig. 1. Schematic diagram of three type windows.

의 체적은 200 m×50 m×25 m(L×W×H)이고 계산을 위한 제어체적은 250 m×100 m×40 m(L×W×H)이다. 고창은 지붕에서 2 m아래에 위치하고 있고 창문은 지면에서 1 m 높이에 위치하며 그 규격은 1 m의 표준규격 미닫이형태로서 50%개방되었다고 설정하였으며 출입문과 건물의 틈은 개구면으로 고려하지 않았다. 고창은 100%개방되어 사용되고 건물상부에 설치된 모니터는 표준형 배기모니터로 설정하였다. 건물의 중심라인에서 열원이 없는 오염물질이 발생한다고 가정하고 추적자 가스인 CO₂을 500 ppm를 발생시켰다. Fig. 2처럼 우측 벽체에서 유입기류를 형성시키고 바닥면을 제외한 기타면은 자유개방되었다고 가정한 후 유입기류의 속도를 1 m/s와 5 m/s로 각각 설정하여 모델링을 수행하였는데 격자수는 700000개 좌우이다.

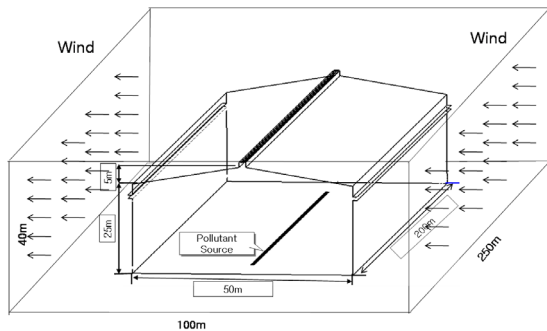


Fig. 2. Dimensions of control volume and model building.

2.3. 모형실험 방법

Fig. 3과 Fig. 4처럼 건물모형의 크기는 1000 mm×1000 mm×500 mm(L×W×H)이다. 내부의 기류흐름을 파악하기 위하여 전부 아크릴로 제작되었으며 고창은 사전에 루버형, 45°개방형, 90°개방형 세가지 형태로 만들어져 교체가 가능하게 하였으며 하부창문은 50%만 개방되게 하고 상부모니터는 그 구조형태를 일 반형 모니터 모양으로 제작되었다. 모형의 Side의 5 m 거리에 제트팬을 설치하여 인공외기를 조성하였는데 열선풍속계로 창호입구의 풍속을 0.5 m/s로 설정하였다.

건물모형 내부의 오염물질의 거동을 파악하기 위하여 연막발생기로 모형의 중부에서 가상오염물질인 연막을 일정한 량으로 발생시키면서 동영상 촬영을 통한 비교분석 방식으로 창호형태변화에 따른 건물내부의

기류흐름 변화와 오염물질의 배출상황을 파악하였다.

또한 건물모형 내부의 오염물질 농도변화를 정량적인 방법으로 비교분석하기 위하여 모형의 중부라인에서 2 L/min의 이산화탄소를 주입시키면서 모형건물의 좌측과 우측에서 이산화탄소 농도측정기(Gray Wolf Sensing Solutions system, Trumbull, USA)를 이용하여 창호의 형태변화에 따른 이산화 탄소의 농도변화를 측정하여 분석하였다.

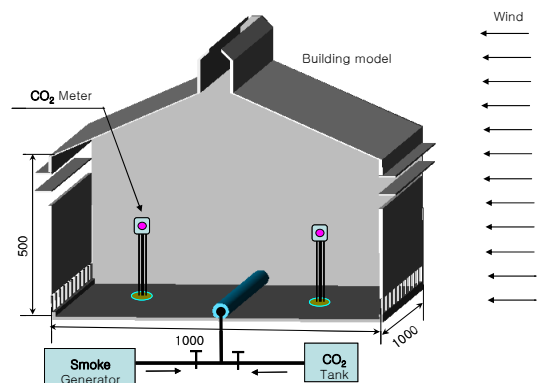


Fig. 3. Schematic diagram of experimental equipment.

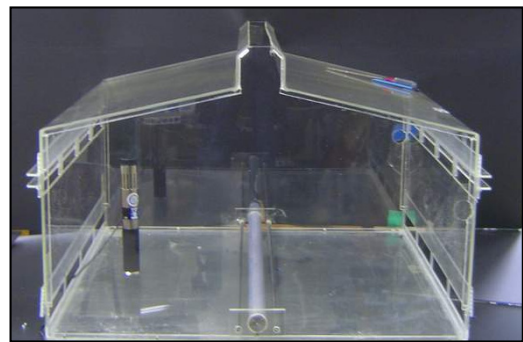


Fig. 4. Photograph of experimental equipment.

3. 결과 및 고찰

3.1. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

컴퓨터시뮬레이션을 통하여 창호형태에 따른 환기량을 예측하고 가상작업장 내부의 기류흐름을 파악하며 오염물질의 농도변화와 분포를 정량방식으로 분석함으로써 창호형태에 따른 환기특성을 예측하여 보았다.

3.1.1. 창호형태에 따른 가상작업장 내부의 기류흐름 및 환기량 변화

컴퓨터시뮬레이션을 통한 가상작업장 내부의 기류흐름을 살펴보면 루버형창호(Fig. 5)와 45°개방형(Fig. 6) 그리고 90°개방형 (Fig. 7)창호를 설치하였을 때의 내부의 기류흐름은 확연한 차이를 보이고 있다.

루버형 창호(Fig. 5)를 설치하였을 때 풍상방향의 고창과 하부창호에서 유입된 공기는 상부모니터와 풍하방향의 고창과 하부창호로 원활하게 배출되지 못하고 가상작업장 내부에서 큰 와류를 형성하는데 이러한 기류패턴에서는 작업장 내부에서 발생한 오염물질은 그 와류를 타고 회전하면서 희석되어 작업장 전체

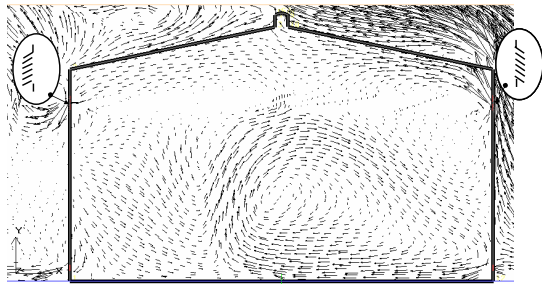


Fig. 5. The result of airflow pattern in the Louver type.

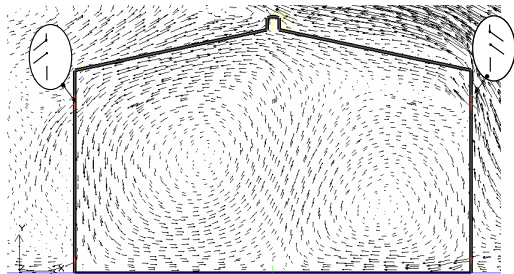


Fig. 6. The result of airflow pattern in the 45° open type.

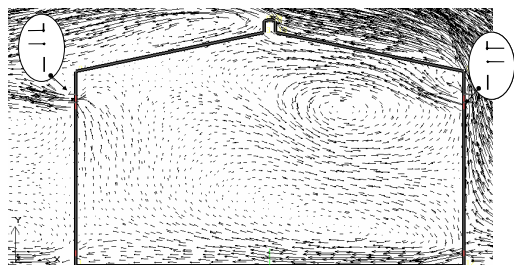


Fig. 7. The result of airflow pattern in the 90° open type.

를 오염시킬 것이다.

45°개방형 창호(Fig. 6)를 설치하였을 때에는 가상작업장 내부의 풍상방향과 풍하방향에서 각각 와류구역이 형성되는데 이러한 기류패턴에서는 작업장 내부에서 발생한 오염물질은 주로 풍하방향에서 회전하면서 희석되어 그 지역을 오염시킬 것이며 풍상방향에서는 주로 외부에서 유입된 공기가 회전하면서 상대적으로 높은 압력구역을 형성할 것이다.

90°개방형 (Fig. 7)은 풍상방향의 고창과 하부 창호에서 유입된 공기가 상부와 하부에서 동시에 회전하면서 비교적 높은 압력구역을 형성하는데 이는 풍하방향으로의 비교적 원활한 배기흐름을 형성하고 있다. 따라서 이러한 기류패턴에서는 작업장 내부의 오염물질을 풍하방향의 고창과 하부창호로 밀어내는데 매우 효과적인 기류흐름이다.

또한 상술한 세가지 형태에서 외기풍속을 1 m/s로 변경하였을 때 가상작업장 내부의 기류패턴을 살펴보면 기류속도는 변화가 있지만 전체적인 기류흐름의 패턴은 외기풍속 5 m/s일 때와 비슷한 양상을 보이고 있었다.

창호형태의 변화에 따른 환기량 산정결과(Fig. 8)를 살펴보면 90°개방형에서 45°개방형과 루버형으로 순차적으로 변화시킬 때의 환기량은 외기풍속에 관계없이 비슷한 저감추이를 보이지만 세부적으로 비교하여 볼 때 외기풍속 1 m/s에서 45°개방형과 루버형의 환기량은 90°개방형의 65%와 38%이고 외기풍속 5 m/s에서 45°개방형과 루버형의 환기량은 90°개방형의 76%와 51%로써 낮은 외기풍속에서 창호의 형태변화가 환기량 변화에 더욱 큰 영향을 준다는 것을 설명한다.

또한 외기유속이 5배 증가한다고 하여 환기량도 5배 증가하는 것이 아니고 창호의 형태에 따라 그 이상일수도 있고(루버형) 그 이하일수도 있다(90°개방형). 이는 건물 개구면을 통하여 유출, 유입되는 기류의 유량은 단순히 외기유속에 의하여 결정되는 것이 아니고 실내, 외의 압력차이(ΔP), 유입계수(C_d), 개구면적(A) 등에 의해 결정되는데 그 상관관계를 식(1)로 유량(Q)를 산정할 수 있다. 외기풍속의 변화는 압력차이(ΔP)를 유발하고 창호형태의 변화는 유입계수(C_d)의 변화를 유발한다. 따라서 환기량 산정결과는 단일인

자료의 설명과 수치해석이 불가능하며 반드시 여러 가지 인자를 종합하여 최종분석이 이루어져야 한다 (Hong 등, 2000; Goodfellow, 2001; 하, 2002).

$$Q = C_o A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

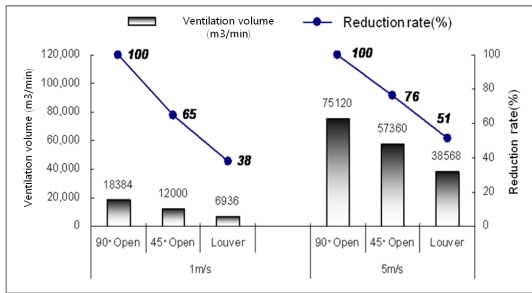


Fig. 8. The result of ventilation rate with different window types.

3.1.2. 창호형태에 따른 가상작업장 내부의 오염물질 농도변화

외기풍속이 각각 1 m/s와 5 m/s 조건하에서 창호 형태의 변화에 따른 작업장 내부의 오염물질의 농도를 산정한 결과(Fig. 9)를 살펴보면 전체적으로 외기 풍속이 1 m/s에서 5 m/s로 증가할 때 오염물질의 농도는 신속히 저감되지만 동일한 풍속에서는 창호형태의 변화가 오염물질 농도변화에 주는 영향은 서로 다른 차이를 보이고 있다. 외기풍속 1 m/s에서는 창호형태가 90°개방형에서 45°개방형과 루버형으로 변화될 때 오염물질 농도는 각각 125%와 216% 증가되지만 외기풍속 5 m/s에서는 창호형태가 90°개방형에서 45°개방형과 루버형으로 변화될 때 오염물질 농도는 각각 100%와 150% 밖에 증가되지 않는다. 이는 낮은 외기 풍속에서는 높은 외기풍속에서 보다 창호의 형태변화가 오염물질 농도변화에 더욱 큰 영향을 준다는 것을 설명한다. 이는 앞에서 서술한 기류흐름 및 환기량 변화에 따른 결과와도 부합되는데 작업장 내부의 기류 패턴과 환기량 변화가 오염물질의 농도변화를 유발함을 증명한다.

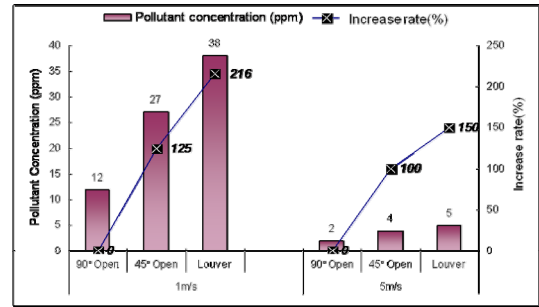


Fig. 9. The result of pollutant concentration with different window types.

3.2. 모형 실험 결과

비록 산업환기 분야에서뿐만 아니라 기타 분야에서도 전산유체역학(CFD)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다양한 연구를 진행하고 있지만 이는 중국적으로 복잡한 구조물 형태와 기후조건 등을 그대로 모사할 수는 없다. 때문에 우리는 컴퓨터시뮬레이션 방식으로 연구대상을 이상적인 조건하에서 모델링을 진행함과 동시에 모형실험 혹은 현장검증 방법으로 모델링 결과를 검증하게 된다.

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 바탕으로 축소모형을 제작한 후 실험을 진행하여 모델링 결과를 검증하였다. 모형시험 과정에 컴퓨터시뮬레이션 조건들을 완전히 재현하기 어렵기 때문에 모형실험 결과는 컴퓨터시뮬레이션 결과와 일치할 수 없다. 다만 모형실험 결과가 컴퓨터시뮬레이션 결과와 비교적 높은 상관도나 추이를 보이면 모델링 결과를 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.1. 연막실험을 통한 기류흐름 파악

0.5 m/s의 인공외기 조건하에서 가상오염물질인 연막을 모형 중, 하부에서 일정한 량으로 발생시키면서 동영상 촬영을 진행한 후 감속방영 방식으로 모형내부의 기류흐름을 분석하였다. 연막발생 후 10초 시간대에 동영상에서 캡 처한 사진(Fig. 10-상)과 기류흐름 분석결과(Fig. 10-하)를 살펴보면 컴퓨터시뮬레이션 기류흐름 결과와 매우 비슷한 양상을 보이고 있다. 루버형과 같이 오염물질의 확산경로가 모델링 결과와 실험결과가 차이를 보이는 것은 앞에서 서술한 바와 같이 낮은 외기풍속 조건에서 루버형은 환기량이 많

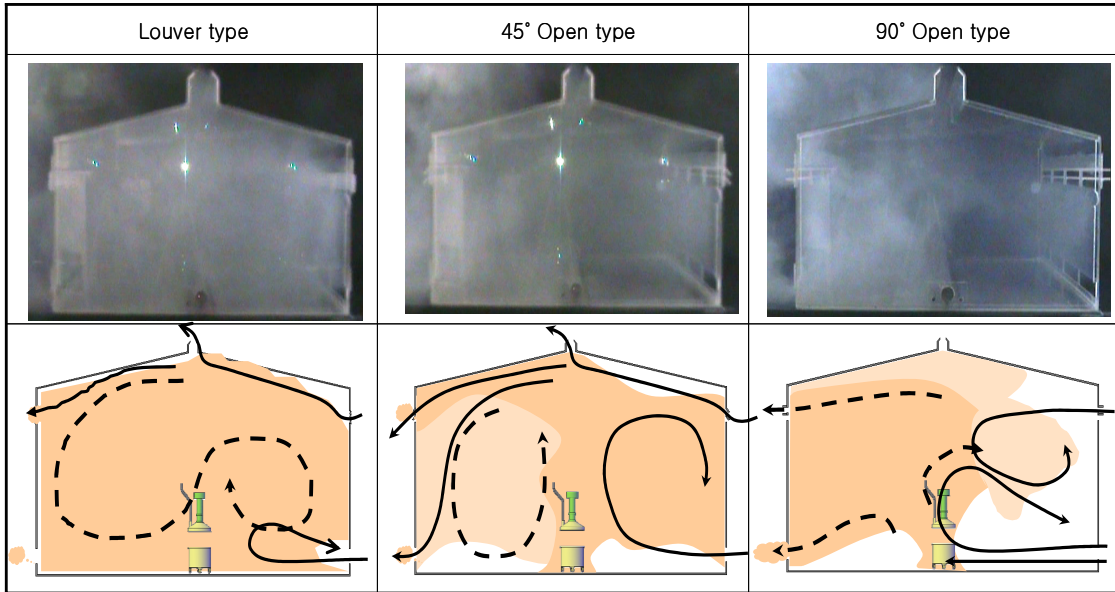


Fig. 10. Experimental result of airflow pattern with different window types.

이 줄어들기 때문에 외기 풍속이 0.5 m/s까지 줄었을 때 유입기류가 가상오염물질인 연막을 일정한 기류패턴을 형성할 수 있게 유도하지 못하기 때문이다. 이와 같이 비록 두 가지 방식의 결과가 부분적인 차이는 보이지만 전반적인 기류패턴과 오염물질의 농도분포(연막의 농도분포)는 비슷하다고 할 수 있다.

3.2.2. 모형내부 이산화탄소농도 측정결과

연막주입 위치에 2 L/min의 이산화탄소를 주입하면서 풍상방향과 풍하방향에서 동시에 이산화탄소의 농도를 측정하고 측정결과를 평균하여 이를 모형내부의 오염물질 농도로 확정하였다. 창호형태를 변경하면서

실험한 후 정리하여 그래프한 결과(Fig. 11)를 살펴보면 90°개방형이 45°개방형으로 전환할 때 오염물질은 79% 증가하였고 루버형으로 전환할 때에는 오염물질이 140% 증가하였다. 이런 경향은 컴퓨터시뮬레이션 결과에서도 비슷하게 나타났는데 이는 90°개방형이 우수한 환기성능을 보유하고 있음을 실험적인 방식으로 증명한 것이다.

4. 결론

세가지 형태의 자연환기용 창호 즉 루버형, 45°개방형, 90°개방형을 연구대상으로 선정하여 컴퓨터시뮬레이션 방법과 실험적인 방법을 이용하여 가상작업장 내부의 기류흐름을 파악하고 가상오염물질의 농도변화를 비교하는 과정을 통하여 각자의 환기특성을 연구하였다.

컴퓨터시뮬레이션을 통한 가상작업장 내부의 기류흐름 결과를 살펴보면 루버형 고창의 환기효과가 제일 낮고 90°개방형의 환기효과가 제일 우수하다. 그것은 90°개방형은 풍상방향의 고창과 하부 창호에서 유입된 공기가 상부와 하부에서 동시에 회전하면서 비교적 높은 압력구역을 형성하기에 다른 두 가지 형태

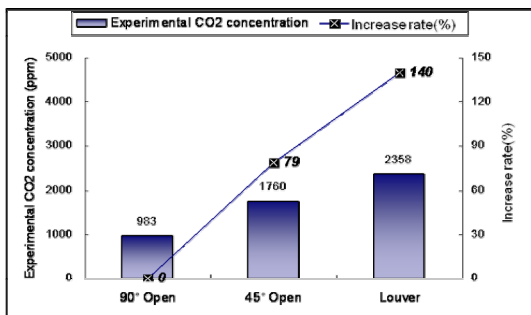


Fig. 11. Experimental result of pollutants concentration.

에 비해 쉽게 오염물질을 풍하방향으로 밀어내기 때문이다. 환기량 산정결과 루버형은 90°개방형에 비해 저속(1 m/s)에서는 38%저하되고 고속(5 m/s)에서는 51% 저하된다. 가상작업장 내부의 오염물질의 농도 분포는 환기량 변화에 직접적인 영향을 미치는데 루버형은 90°개방형에 비해 외기풍속 1 m/s에서는 216% 증가하고 외기풍속 5 m/s에서는 150% 증가한다. 즉 환기량과 오염물질농도 사이에는 반비례 관계를 형성하여 환기량 변화가 내부의 오염물질의 농도변화를 유도함을 알 수 있다.

모형실험 결과를 살펴보면 모형내부에 발생시킨 가상오염물질인 연막의 배출경로와 배출량은 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 아주 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉 루버형과 45°개방형은 연막이 내부에서 크고 작은 와류를 형성하면서 배출이 원활하게 이루어 지지만 90°개방형에서는 연막이 풍하방향의 고창과 하부창호로 아주 원활하게 배출됨을 볼 수 있었으며 내부가상 오염물질인 이산화탄소의 농도도 루버형 창호에서 제일 높았는데 90°개방형 창호에 비해 140% 높았다. 이러한 양상은 컴퓨터시뮬레이션의 결과를 입증해 주고 있다.

하지만 여기에서 유의하여야 할 점은 비록 90°개방형 창호는 루버형 창호와 45°개방형 창호에 비해 환기효율이 높고 작업장 내부의 기류흐름이 오염물질 배출에 유리한 형태이지만 이 형태의 창호는 외기에 의한 빗물유입 방지에 취약하다. 따라서 환기효과를 높이려는 목적으로 90°개방형 고창을 사용할 때 반드시 빗물유입을 염두에 두고 상응한 방지대책을 강구해야 한다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 창원대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김태형, 하현철, 박승철, 2006, 한국산업위생학회지, 16(4), 364-374.
- 하현철, 2002, 자연환기 벤틸레이터 환기효율 평가 및 환기량 산정, 창원대학교, 1-4.
- Goodfellow, H., Esko, T., 2001, Industrial Ventilation Design Guidebook, Academic Press., 1029-1056.
- Hong, T., Chou, S. K., Bong, T. Y., 2000, Building Simulation: An Over View of Developments and Information Sources, Building and Environment, 35, 347-361.
- Ilpo, K., Arto, S., Seppo, E., 1996, The Effect of Contaminant on Worker Exposure on the Near-wake Region, Annals of Occupational Hygiene, 40(5), 511-523.
- Larsson, U., Mashfegh, B., 2002, Experimental Investigation of Draught from Well-Insulated Windows, Building and Environment., 37, 1073-1082.
- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J., Boulard, T., 1996, Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings, J. Agric. Engine Res., 63, 219-228.
- Per, H., Kjeld, S., Peter, V. N., 2001, Characteristics of Airflow from Open Windows, Building and Environment, 36, 859-869.
- Yuguo, L., Delsante, A., Symons, J., 2000, Prediction of Natural Ventilation in Buildings with large Openings, Building and Environment, 36, 59-71.