

## 자연환기 벤틸레이터 형태에 따른 환기 특성

하 현 철<sup>†</sup> · 김 태 형

창원대학교 환경공학과

### Characteristics of Ventilation Efficiency for Various Gravity Ventilators

Hyun-Chul Ha<sup>†</sup> · Tae-Hyeung Kim

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

Natural ventilation is driven by pressure differences created at openings either(both) by the wind or(and) by temperature differences. In a hot and contaminated workplace, natural ventilation proves to be a realistic alternative as an energy conserving design strategy aimed at improving indoor thermal comfort and reducing airborne contaminant concentrations. Ventilation efficiency could be affected by various parameters, such as area of openings, wind velocity and incidence angle, temperature difference between inside and outside, and shape of ventilator. Especially, the shape of roof gravity ventilator might be one of influencing factors for the effective ventilation. The window type gravity ventilators

are frequently installed instead of general(standard) gravity ventilator. However, the ventilation efficiencies of them were not proved yet. In this study, general type ventilator and two window type ventilators were thus numerically tested. To compare the ventilation efficiency, airflow characteristics and mean age of air were predicted by using commercial CFD code, AIRPAK(Ver. 2.0) with various wind speeds, wind incidence angles, and temperature differences between the building floor and outdoor air.

**Key Words :** Natural ventilation, Gravity ventilator, Window type ventilator, Computational Fluid Dynamics

## I. 서 론

### 1. 연구배경

사업장에서 작업환경을 개선하기 위한 대책중 가장 손쉽게 적용할 수 있는 것이 공학적 대책인 환기시설을 설치하는 것이다. 산업환기(Industrial ventilation) 시설은 설치방법에 따라 전체환기(General ventilation)와 국소배기(Exhaust ventilation)로 대별되고, 전체환기는 송풍기 사용 유·무에 따라 강제환기(Forced ventilation)와 자연환기(Natural ventilation)로 구분한다

(ACGIH, 2001).

일반적으로 환기시설을 설치하고자 할 때 국소배기 시스템을 먼저 고려하는 것은 오염원에서 직접 유해물질을 배기시키기 때문에 작업자의 호흡영역을 보호해주고, 적은 배기 유량으로도 오염물질 농도 저감효과를 크게 기대할 수 있으며, 실험 및 경험에 의한 많은 설계 자료가 있어 설치 후 효율을 어느 정도 예상할 수 있는 장점이 있기 때문이다 (ACGIH, 2001 ; Burton, 1999 ; Heinsohn 1991). 하지만, 후드 설치로 인한 작업 방해, 후드에서 발생된 기류에 의한 제품 불량 발생 등의 문제

가 있고, 크레인 때문에 덕트를 설치할 수 없는 등 국소배기 시설이 가지는 문제점도 많은 실정이다.

전체환기는 후드나 덕트 등을 설치할 수 없는 곳이나, 유해물질의 발생 농도가 낮은 공장에 희석 환기(Dilution ventilation)를 위해 적용되고 있다. 강제환기의 경우 환기효율은 송풍기 용량과 송풍기 위치 그리고, 급기구 위치 등에 의해서 결정되고, 외부 기상조건에 큰 영향을 받지 않고 일정수준의 작업환경을 유지할 수 있는 장점이 있지만, 많은 배기유량에도 불구하고 작업자의 호흡영역을 보호해 주지 못하고 송풍기 가동에 따른 소음발생 및 높은 에너지 비용 등의 단점도 있다. 반면에 자연환기는 바람에 의한 풍력과

접수일 : 2002년 2월 22일, 채택일 : 2002년 4월 12일

<sup>†</sup> 교신저자 : 하현철(경남 창원시 사림동 창원대학교 환경공학과

Tel : 055-289-7587, Fax : 055-281-3011, E-mail : cfdace@hanmail.net)



작업장 내·외부 온도차에 의한 부력을 이용하기 때문에 유지비용과 소음 문제가 발생하지 않는 장점이 있어, 바람이 많이 부는 곳과 실내·외 온도차가 많은 공장에 적합한 환기 방식이다. 열원이 있는 경우 기류를 따라 오염물질도 상승하게 되는데, 자연환기구의 위치와 형태만 잘 선택한다면 오염물질 뿐만 아니라 뜨거운 공기도 효과적으로 배출하여 에너지 소모 없이 작업환경을 개선할 수 있는 방법이다. 하지만, 자연환기는 외기 및 작업장 내부 조건에 따라 환기량의 차이가 심하게 발생하는 문제가 있어 실내 오염물질의 농도를 일정하게 유지시킬 수 없는 단점이 있다. 이 때문에 자연환기는 오염물질을 배출시켜 작업환경을 개선하는 목적으로도 사용하고 있지만, 고온의 공기를 배기시켜 작업장 내부 온도 상승을 막는 냉각 목적으로 사용할 경우에도 효과가 뛰어나다 (ACGIH, 2001).

자연환기력을 높이기 위해서는 자연환기력을 발생시키는 풍력과 부력 조건뿐만 아니라 개구면 위치, 건물 형태 등 자연환기에 영향을 미치는 인자들에 대한 충분한 고려가 필요하다. 자연환기에 대한 기존 연구 결과를 살펴보면, 기본적으로 바람과 실내·외 온도차가 클수록 환기력은 증가하고(Awbi, 1991; Boulard et al., 1996; Boulard et al., 1997; Boulard et al., 1998; Papadakis et al., 1996; Yuguo et al., 2000; Yuguo & Anton, 2001) 2m/s 이상의 외기 풍속에서는 부력보다는 풍력이 환기력에 직접적인 영향을 주며, 0.5m/s 이하의 풍속에서는 부력이 주 영향인자로 작용하여 실내·외 온도차가 높을수록 환기력이 높아지는 것으로 나타났다. 그리고 외기 풍속이 0.5m/s~2m/s 범위에서는 부력과 풍력이 동시에 작용하지만 일반적으로 풍력이 더 크게 작용하였다(Kittas et al., 1996; Mistoritis et al., 1997(a); Papadakis et al., 1996).

개구면적 및 위치에 대한 연구결과를 살펴보면, 측면에 창문만 설치하는 것보다 창문과 지붕을 동시에 설치하면 측면으로 유입된 공기가 지붕으로 배기되는 기류흐름을 유지하면서 환기력이 증가되

는 것으로 나타났고, 보충공기가 유입되는 창문 개구면적이 넓을수록 환기량이 증가하는 경향을 보였다(Boulard et al., 1997; Gan, 2000; Kittas et al., 1996; Montero et al., 2001; Oca et al., 1999; Papadakis et al., 1996). 그 외, 환기량 변화에 직접적인 영향을 주는 인자로는 건물의 형태 및 지붕의 경사각(Kindangen et al., 1996; Munoz et al., 1999; Papakonstantinou et al., 2000; Riskowski et al., 1998; Teitel & Tanny, 1999; Yoon & Hoyano, 1998), 주변 건물 배치(Jozwiak et al., 1996) 실내 작업물체 배치(Boulard et al., 1997), 태양광의 세기(Yuguo et al., 2001) 등이 있었는데, 지붕의 경사각이 크면 굴뚝효과가 생기기 때문에 경사각이 낮은 것보다 환기 효율이 증가하였고, 건물 및 작업장 내 물체가 기류 흐름을 방해하지 않아야 환기력이 증가하는 것으로 나타났다.

자연환기는 영향 인자도 매우 많고 이들 인자들과 상호작용에 의해 환기량이 시시각각 변하는데, 특히 우리나라와 같이 사계절이 뚜렷한 경우 계절별 환기량 차이는 대단히 크게 나타날 수가 있다. 작업장 내부 조건이 동일하더라도 외기 온도가 낮은 겨울철에 여름철 보다 자연환기력이 큰데, 겨울철에 자연환기량이 너무 많으면 과도한 난방비가 소요되고, 여름철에 환기량이 너무 적으면 오염물질 정체와 작업장 내부 온도 상승으로 인한 냉방비가 소요되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 자연환기를 실시하고자 할 때는 실내·외 조건에 따라 환기량을 조절할 수 있도록 정밀한 제어를 할 수 있어야 충분한 효과를 거둘 수 있음에도 불구하고(Axley, 1999; Fordham, 2000) 현재 우리나라에는 자연환기력에 영향을 주는 인자에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

## 2. 연구 목적

자연환기를 실시하여 효과를 거두기 위해서는 각 영향인자들에 대한 충분한 연구와 자료가 있어야 하지만, 체계적인 연

구 부족으로 자료를 확보하기가 힘든 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 자연환기에 영향을 주는 무수한 인자 중에서 자연환기에 가장 기본이 되는 벤틸레이터 형태에 따른 기류 특성 및 환기 효율을 평가하고자 하였다. 지붕 벤틸레이터는 기류가 급·배기 되는 곳이기 때문에 자연환기 효율에 직접적인 영향을 줄 수 있고, 바람에 견뎌야 할 뿐만 아니라 방수 문제 등이 있어 설치비가 매우 고가인 구조물이다.

작업 공정에서 열과 오염물질이 동시에 발생하기 때문에 충분한 자연환기 효과를 거둘 수 있다고 판단되면 지붕에 벤틸레이터를 설치하는 것이 일반적이다. 벤틸레이터 형태가 환기 효율에 큰 영향을 주는 인자임에도 불구하고 작업장 내부에 열이 발생되기 때문에 벤틸레이터만 설치하면 환기 효율이 있다고 판단하여, 벤틸레이터 형태는 채광이나 회사 미관을 우선적으로 고려하여 선정하는 경우가 있다. 이렇게 설치된 벤틸레이터가 충분한 환기 효과를 거두지 못해 작업환경이 악화되면 작업환경 개선을 위해 막대한 비용을 들여서 지붕 송풍기 등을 추가로 설치하거나, 자연환기 시스템 개선 공사를 실시해야 한다. 이런 경우 처음부터 벤틸레이터 형태에 따른 환기 효율을 검토하여 자연환기 시스템을 설계하였다면 충분한 환기 효과를 가져올 수 있기 때문에 추가 공사에 따른 비용과 송풍기 설치에 따른 에너지 절감 효과를 거둘 수 있다.

본 연구에서는 자연환기에 대한 기본적인 연구의 일환으로 일반형 자연환기 벤틸레이터와 2가지 형태의 창문형 자연환기 벤틸레이터에 대한 환기 특성을 전산 유체 역학(CFD : Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 예측·평가하였다. 자연환기효율을 실험으로 평가할 경우에는 모형 제작뿐만 아니라 기상 조건을 모사하기 위해 매우 힘든 작업이 필요하지만, 전산유체역학을 이용할 경우 실내 조건은 물론 다양한 실외 기상조건도 재현해낼 수 있는 장점이 있다(Goodfellow and Tahti, 2001).

Figure 1은 공장 지붕에 설치된 일반형



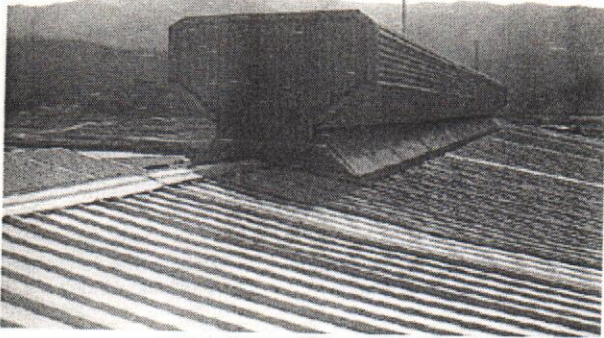


Figure 1. General gravity ventilator installed on the roof of a ship engine test room

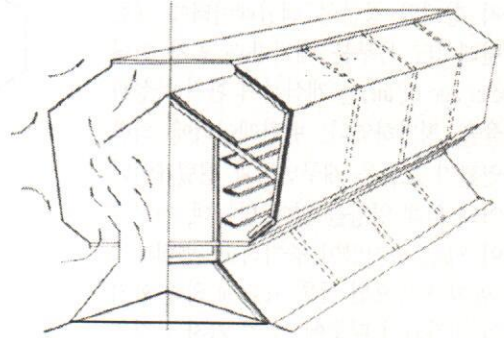


Figure 2. Schematic of general gravity ventilator

벤틸레이터의 모습이고, Figure 2는 일반형 벤틸레이터의 내부모습과 기류 흐름을 대략적으로 나타낸 것이다.

일반형 벤틸레이터의 경우 작업장 내부에 열원이 있는 경우에 많이 사용되고 있고, 환기량에 대한 설계 자료가 각 회사의 홍보자료에 제시되어 있으나 정확한 근거가 없는 실정이다.

창문형 벤틸레이터는 채광효과와 미관

상으로 좋기 때문에 많이 적용되고 있는 형태로 Figure 3과 Figure 4는 현장에 설치되어 있는 대표적인 들창형과 미닫이형 벤틸레이터의 모습이다. 창문형 벤틸레이터의 경우 기류 특성 및 환기 효율에 대한 자료가 없어 환기 효율을 전혀 예측하지 못하고 있다.

현장에 설치되어 있는 창문형 벤틸레이터의 기류를 평가해 보면 바람이 불어오는

쪽(Windward)의 창문에서 유입된 공기가 작업장 공기와 혼합되지 않고 바람이 불어 가는 쪽 (Lee-ward) 창문을 통해 바로 배출되는 이른바, 단회로(Short circuit) 현상이 발생되어 작업장 내부 공기가 원활하게 배기되지 못하고 정체되는 것을

볼 수 있지만, 그에 대한 체계적인 평가 자료가 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 벤틸레이터 형태별로 환기 특성과 환기량을 평가하여 벤틸레이터형태에 따른 환기 효율을 평가해 보고 자연환기 벤틸레이터 연구의 기본 자료로 활용하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 제어체적 및 벤틸레이터 모델

Figure 5는 본 연구에 사용된 제어체적을 나타낸 것이다. 건물 체적은  $50m \times 25m \times 9.5m(L \times W \times H)$ 이고, 계산을 위한 제어체적은  $100m \times 75m \times 25m(L \times W \times H)$ 이다. 개구면인 창문의 면적은 건축법에서 채광과 환기를 위해 바닥면적 1/20 이상으로 되어 있기 때문에(건축법시행령 제 51조 2항) 바닥면적( $50m \times 25m$ )의 1/20인  $62.5m^2$ 으로 설정하였고, 설치위치는 지상으로부터 1.5m 지점이다.

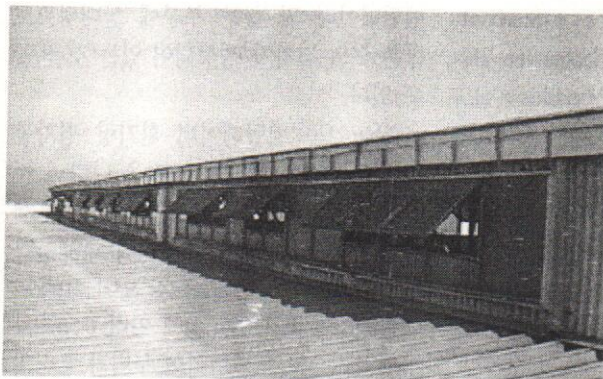


Figure 3. Window type (awning window) gravity ventilator installed on the roof of a melting shop



Figure 4. Window type (sliding window) gravity ventilator installed on the roof of a metal working shop

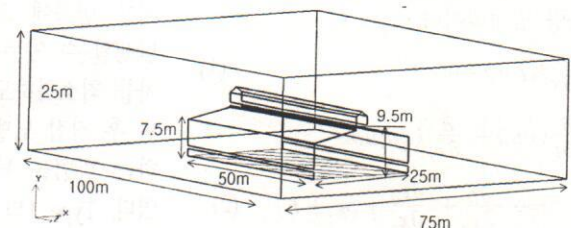


Figure 5. Control volume and model building



본 연구에서는 일반형 벤틸레이터와 2가지 형태의 창문형 벤틸레이터에 대한 벤틸레이터 목부분 배기량과 공기 연령(mean age of air)을 계산하여 환기 특성과 효율을 평가하였다. 벤틸레이터에 의한 자연환기 효율은 개구면적과 벤틸레이터 높이에 의해 영향을 많이 받는데, 개구면적이 크면 환기량이 증가하고, 벤틸레이터 높이가 높으면 굴뚝 효과에 의해 환기량이 증가되기 때문에 이 두 가지 규격을 동일하게 설정해야만 벤틸레이터 형태별 환기 특성을 정확하게 평가할 수 있다(Mistriotis et al., 1997(a); Shinsake et al., 1997).

일반형 벤틸레이터 규격은 벤틸레이터 제조 회사의 홍보자료에 제시된 설계 자료를 바탕으로 환기량을 예측한 정(2002)의 연구와 같은 규격으로 목부분 면적(neck area)을  $3\text{m}^2/\text{m}$ 으로 설정하였다. 일반형 벤틸레이터와 창문형 벤틸레이터의 환기효율을 서로 비교 가능하도록 하기 위하여 Figure 6과 Table 1에 나타난 바와 같이 동일한 목부분 면적과 개구면적을 설정하였다. Figure 6은 일반형 벤틸레이터와 창문형 벤틸레이터의 모습이고, Table 1은 벤틸레이터 형태별 목부분 면적과 개구면적을 정리한 것이다.

## 2. 수치해석

### 1) 기본 방정식 및 수치해석 방법

자연환기 벤틸레이터 배기유량 및 유동 특성을 해석하기 위해 상용 수치해석 프로그램인 AIRPAK(Ver 2.0)을 사용하였다. AIRPAK에서는 질량, 운동량, 에너지 수송은 Navier-Stokes 방정식의 해를 이용하여 구하고, 난류유동(Turbulent Flow)에 대해서는 별도의 난류 방정식을 이용해서 구한다. 식(1)은 연속 방정식이고, 식(2)는 운동량 방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

이산화 방법으로는 유한체적법(Finite

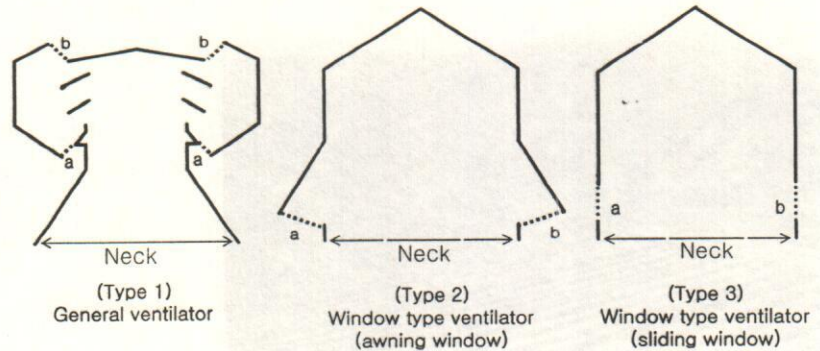


Figure 6. Configurations of three different ventilators

Table 1. Open and neck area for three different ventilators

Type	Open Area(m <sup>2</sup> /m)			Neck Area (m <sup>2</sup> /m)
	a	b	Total	
Type 1	0.28×2	0.42×2	1.4	3
Type 2, Type 3	0.7	0.7	1.4	

Volume Method)을 사용하였고, 유동장 해석을 위해서는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 이용하였다. 난류 방정식은 기존 연구에서 작업장 내부 기류 예측에 있어 정확도가 입증된 표준  $\kappa-\epsilon$  (Standard  $\kappa-\epsilon$ ) 모델을 사용하였다(Guohui et al., 1999; Shinsuke et al., 1997; Papadakis et al., 1996; Saraiva et al., 1999).

### 2) 경계 조건 및 해석 방법

벤틸레이터를 통해 유·출입되는 기류를 정확하게 예측하기 위해서는 벤틸레이터 부분에 대한 정확한 경계조건이 필요하다. 벤틸레이터에서 발생하는 압력손실은 모형실험으로 측정하는 방법도 있지만(Kato et al., 1997), 본 연구에서는 벤틸레이터의 기류가 흐르는 부분에 최소 4개 이상의 격자를 생성시켜 급격한 기류 변화에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하도록 한 후 직접 모델링하는 방법을 택하였다. Type 1의 경우 벤틸레이터

형상이 매우 복잡하여 약 16만여 개의 격자를 생성시켰고, Type 2는 13만여 개, Type 3은 11만 여 개의 격자를 생성시켜 수치해석을 실시하였다. Figure 7은 Type 1의 격자 생성 모습으로 기류변화가 심한 벤틸레이터 및 창문 부분에 상대적으로 많은 수의 격자가 생성되어 있는 것을 알 수 있다.

Table 2는 벤틸레이터 환기량 평가를 위해 사용된 수치해석 조건을 나타낸 것이다. 풍속 0~0.5m/s까지는 부력이 우세하고, 2m/s 이상에서는 풍력이 우세하다는 기존연구 결과(Papadakis et al., 1996; Mistriotis et al., 1997(a))에 따라 0.5m/s와 2m/s 조건으로 모델링하여 부력과 풍력의 영향을 알아보도록 하였다. 풍향은 건물을 중심으로 0°, 45°, 90°로 구분하였

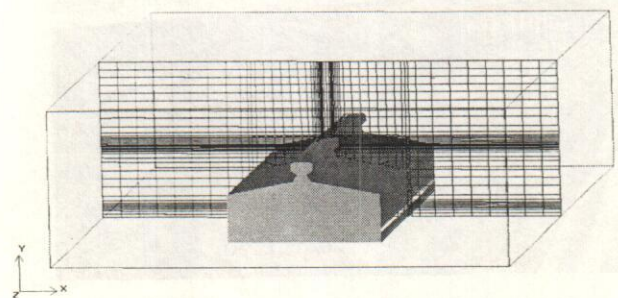


Figure 7. Mesh generation scheme



Table 2. Test variables and their conditions

Variables	Conditions
Temperature difference between floor and outdoor(°C)	0, 30
Wind speed(m/s)	0.5, 2
Wind incidence angle(degree)	0, 45, 90

다. 온도 조건은 바닥과 실외기 온도 차이를 0°C와 30°C로 설정하였다.

수치해석을 위한 경계조건(Boundary condition)은 바람이 불어오는 풍상 지역을 Inlet으로 두고 속도 경계 조건(Fixed velocity condition)을 주어 풍속을 변화시켰고 풍하 지역은 Outlet으로 두고 압력경계조건(Fixed pressure condition)을 주어 미지 변수들의 변화량을 고려하지 않았다. Figure 8과 같이 풍향이 0° 일 경우에는 West, 45° 일 경우에는 West와 South, 그리고 90° 일 경우에는 South를 Inlet condition으로 설정하였다. 온도 조건은 바닥면을 열원(Heat flux)조건으로 지정하여 0°C와 30°C로 설정하였다.

수렴도를 향상시키기 위해 하향 이완법(Under-relaxation)을 사용했으며, 반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 식(3)과 같이 정의된 잉여치(Residual)를 조사하여, 에너지를 제외한 종속변수에 대하여 잉여치는  $10^{-3}$ , 에너지는  $10^{-6}$  이하에 도달되면 수렴된 것으로 간주하였다.

$$R = \sum_{all\ domain} |\sum a_{nb} + b - a_p \phi_p| \quad (3)$$

### 3. 벤틸레이터 환기 효율 평가 방법

#### 1) 벤틸레이터 유출·입 기류 평가

자연환기용 벤틸레이터는 여러 가지 조건에 따라 벤틸레이터를 통해 기류가 유출·입되면서 환기와 냉각 효과를 가져오기 때문에, 벤틸레이터의 효과를 예측하기 위해서는 벤틸레이터 기류 흐름을 정확하게 알아야 할 필요가 있다. 오염물질 제거 목적으로 벤틸레이터를 설치할 경우 벤틸레이터 목 부분에서 기류가 유출되어 야만 작업장 내부 공기가 원활하게 배출되어 작업환경을 개선할 수 있다. 벤틸레이터를 통해 기류가 유입되면 작업장 상부에 정체되어 있던 오염물질을 희석시키는 효과도 있지만, 유입된 차가운 외부 공기에 의해 냉각된 오염물질이 작업장으로 하강하는 문제도 발생할 수 있다. 하지만, 단순히 열배기를 목적으로 벤틸레이터를 설치할 경우, 기류의 유출·입과 상관없이 유출·입량이 많아지면 충분한 냉각효과를 거둘 수 있다. 따라서 환기를 목적으로 할 경우 벤틸레이터를 통한 유입기류를 최소화시키면서 많은 양의 공기를 배기시켜야 되고, 냉각을 목적으로 할 경우에는 기류 방향에 상관없이 벤틸레이터를 통해 유출·입되는 기류의 양이 많아야 충분한 효과를 거둘 수 있다. 이처럼 벤틸레이터 목 부분 기류 형태에 따라 벤틸레이터 설치 목적이 달라질 수 있으므로 이

에 대한 엄밀한 고려가 있어야 된다.

벤틸레이터 기류 평가는 Figure 9와 같이 건물과 벤틸레이터가 연결된 목 부분에서 실시하였다.

X 방향으로 0.25m 간격으로 11지점, Z 방향으로 5m 간격으로 20 지점에 대한 Y 방향 유속을 측정하였다. Z 방향 각 지점에서 측정된 11개의 X 방향 측정값을 평균하여 벤틸레이터 길이 방향(Z)에 따른 유출·입 기류를 평가하였다.

#### 2) 작업장 내부 공기 연령(Mean age of air) 계산

벤틸레이터 형태별로 작업장 내부 공기 체류 시간을 평가하고자 작업장 내부 공기 연령을 계산하였다. 작업장 내부 공기 연령이 낮을 수록 벤틸레이터를 통한 기류 유·출입이 활발하게 진행되어 공기 교환 횟수가 많아 환기나 냉각 효과가 뛰어나다는 것을 의미한다. 그리고 공기 연령이 높다는 것은 벤틸레이터를 통한 공기 흐름이 활발하지 못해 작업장 내부에 기류가 정체되어 오염물질 배기 효율이 낮다는 것을 의미한다.

공기 연령은 건물 전체 높이에 대해 계산하지 않고 바닥에서 벽 높이인 7m 지점까지만 계산하였다. 7m 이상 지점은 벤틸레이터를 통과하는 기류에 영향을 많이 받고, 실제 이 부분의 공기 연령이 작업장 환경에 큰 영향을 주지 않기 때문에 실제 작업 공간을 대상으로 공기 연령을 계산하였다.

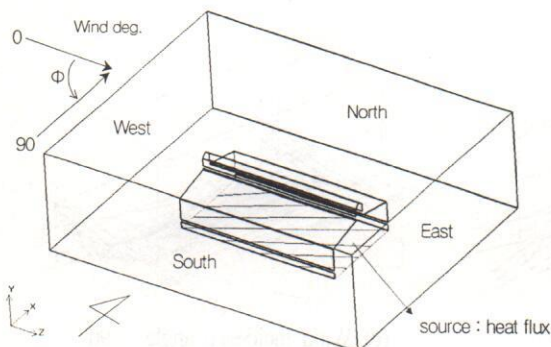


Figure 8. Boundary conditions for numerical simulations

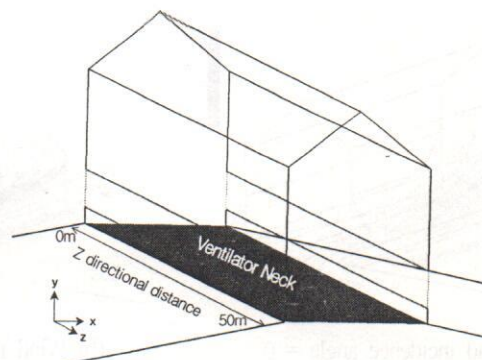
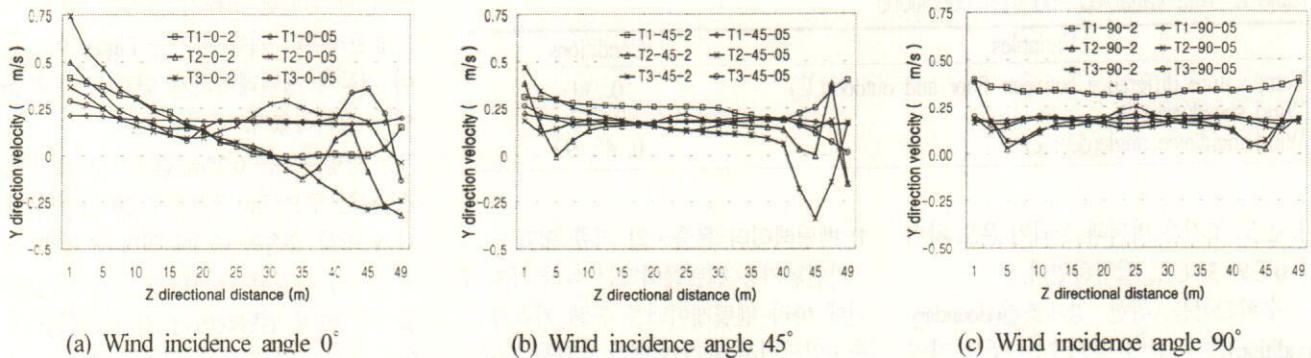


Figure 9. Measurement plane on the ventilator neck



Figure 10. Y direction velocity profiles on ventilator neck with various wind incidence angle ( $\Delta t=30^\circ\text{C}$ )

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 벤틸레이터 유출·입 기류 평가

##### 1) 비등온 조건

Figure 10은 작업장 내부에 열원이 존재할 경우 풍향과 풍속에 따른 각 형태별 벤틸레이터 목부분에서 Y 방향(연직방향) 속도를 측정된 결과이고(Figure 9참조), "T1-0-05"는 "Type 1 - 풍향  $0^\circ$  - 풍속 0.5m/s"를 의미한다.

풍향이  $0^\circ$  일 때 2m/s의 바람이 불 경우에는 벤틸레이터 형태에 상관없이 풍상 방향인 0m 부근에서 빠른 속도로 배출되고, 풍하 방향인 50m 부근에서 배출 속도가 감소하거나 작업장 내부로 기류가 유입되고 있다. 반면 0.5m/s에서는 부력이 크게 작용하기 때문에 풍향에 따른 영향을 크게 받지 않기 때문에, 기류 변화가 크게 없는 것으로 나타났다. Type 1의 경우 외기에 벤틸레이터 목 부분 기류가 직

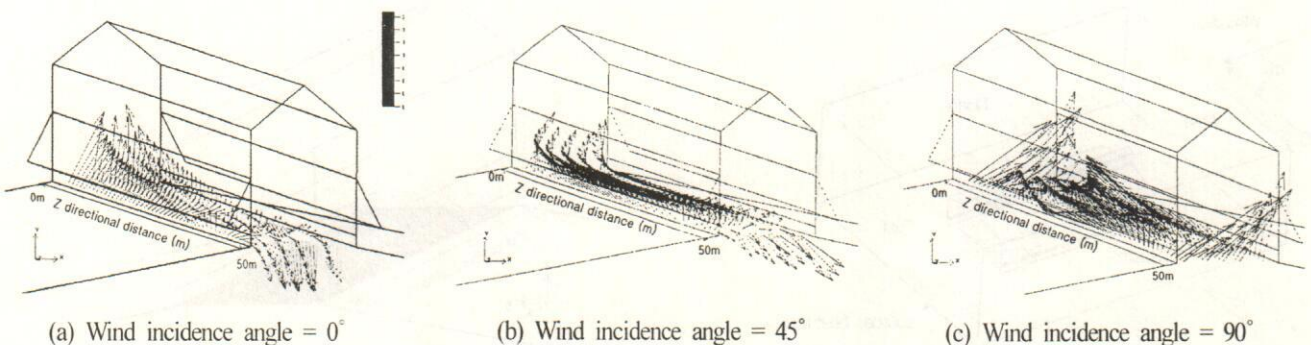
접 영향을 받지 않는 형태이기 때문에 2m/s에서도 풍하 방향에서 외부 기류가 유입되지 않는 반면, Type 2와 Type 3은 30m 이후 지점에서 벤틸레이터 목부분이 외기에 영향을 받아 유입기류가 형성되었다.

풍향  $45^\circ$  일 경우 풍속이 2m/s에서는 Type 2와 Type 3에서 외기 유입이 발생되지만 유입면적이 풍향  $0^\circ$  일 때보다는 크게 줄어들었다. 0.5m/s에서는 위치에 따른 기류 변화가 크게 발생하지 않아 풍향  $0^\circ$  와 큰 차이가 없었다.

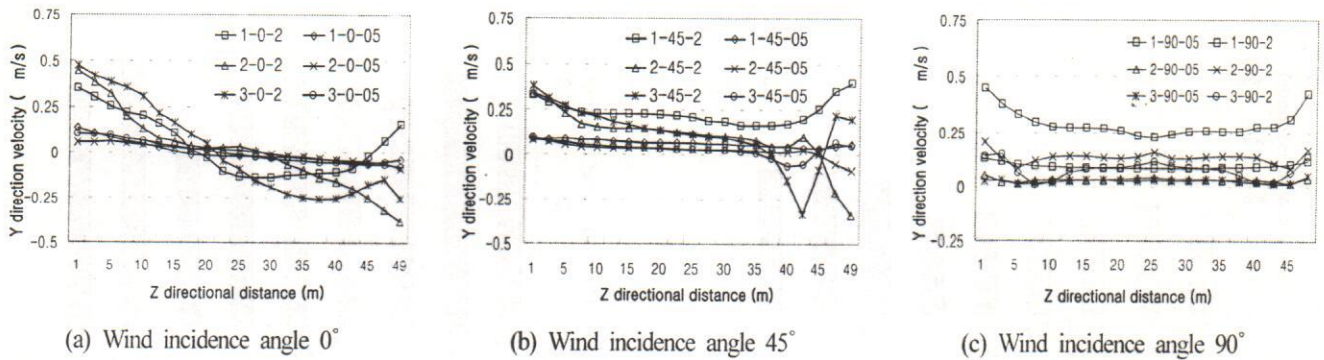
풍향  $90^\circ$  일 경우에는 벤틸레이터에서 외기가 유입되는 현상은 없고 기류 형태가 25m 지점을 중심으로 대칭형을 나타내고 있다. Type 2와 Type 3은 풍속이 0.5m/s에서 2m/s로 증가하더라도 배출 유속이 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 창문형으로 된 벤틸레이터의 경우 외부 기류가 직접적으로 벤틸레이터 목부분에 영향을 주는데, 풍속 2m/s일 때 벤틸레

이터 목부분에서 발생된 유입기류의 풍력이 온도차이에 의해 발생된 부력보다 크기 때문에 작업장 내부 기류가 원활하게 배기되지 못하고 있다. 하지만, 0.5m/s에서는 부력이 풍력보다 강하기 때문에 작업장 내부 기류가 원활하게 배기된다. 이 때문에 외기에 벤틸레이터 목부분 기류가 직접 영향을 받지 않는 Type 1은 풍속이 증가할수록 배기 유속이 증가되는데 반해 창문형 벤틸레이터에서는 풍속 변화에 따른 배기 유속 차이가 크게 나지 않고 있다.

작업장 내부에 열원이 있는 경우, 단순히 작업장 내부 온도를 저감하기 위한 냉각 목적일 경우에는 Type 2와 Type 3과 같이 작업장 내부 공기 배출도 많고, 외기 유입도 활발한 형태의 벤틸레이터가 적당하다. 하지만, 열과 함께 오염물질을 배기시키는 경우에는 외기가 유입되어 천장 근처 오염물질을 냉각시켜 작업장으로 재순환시키는 역효과를 가져올 수도 있기

Figure 11. Vector plots of airflow in the Type 2 ventilator neck with the different incidence angles with 2m/s of wind speed and  $\Delta t=30^\circ\text{C}$



Figure 12. Y direction velocity on ventilator neck with various wind incidence angle ( $\Delta t=0$ )

때문에 외기에 상관없이 작업장 내부 공기를 배출시키는 Type 1 형태가 적당할 것으로 판단된다.

Figure 11은 Type 2의 풍향에 따른 벤틸레이터 기류 벡터를 나타낸 것인데, Figure 10의 벤틸레이터 목부분 기류 그래프 결과와 같이 풍향  $0^\circ$  와  $45^\circ$  일 경우 50m 지점에서는 명확하게 외기가 작업장으로 유입되고 있지만,  $90^\circ$  에서는 0m와 50m 부근에서 빠른 속도로 배출되고, 중간지점에서는 배출이 활발하지 못한 것을 알 수 있다.

## 2) 등온 조건

Figure 12는 등온 조건에서 풍향과 풍속에 따른 각 형태별 벤틸레이터 목부분에서의 Y 방향 속도를 측정한 결과이다.

등온조건에서 자연환기력은 풍속의 변화에 많은 영향을 받게되는데, 일반적으로 풍속이 빠를수록 환기력이 증가하고, 건물과 나란한 방향으로 부는  $0^\circ$  보다  $45^\circ$  또는  $90^\circ$  일 경우에 환기력이 증가하는 것으로 알려져 있다(Riskowski et al., 1998).

풍향  $0^\circ$  인 경우에는 비등온 조건과 마찬가지로 풍상 방향인 0m 지점에서는 작업장 내부 공기가 배출되고, 풍하방향인 50m 부근에서는 외부 공기가 작업장으로 유입되고 있다. 풍속에 따른 유입 시작 지점은 0.5m/s일 때 30m지점이고, 2m/s에서는 20m로 유속이 빠를수록 유입 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 풍속이 0.5m/s 일 경우에는 풍력에 의한 영향이 크지 않

기 때문에 벤틸레이터 형태에 따른 기류 변화가 크게 나지 않고, Type 3의 경우 유출이 많이 될 뿐만 아니라 다른 형태에 비해서 상대적으로 유입도 많이 일어나는 것을 알 수 있다.

풍향  $45^\circ$  일 경우, Type 1은 풍속에 상관없이 작업장 내부 기류가 벤틸레이터를 통해 원활하게 배출되는 것을 알 수 있다. 하지만 Type 2와 Type 3의 경우 40m 이후 지점에서 풍향  $0^\circ$  와 마찬가지로 외부 기류가 작업장 내부로 유입되는 현상이 발생되고 있다. 비등온 조건과 마찬가지로 Type 1의 경우 벤틸레이터 목 부분의 기류가 외기에 직접적인 영향을 받지 않는 데 반해, Type 2와 Type 3의 경우 벤틸레이터 목부분이 외기에 직접적으로 영향을 받아 유입기류가 발생하는 것으로 나타났다.

풍향  $90^\circ$  일 경우, 형태별로 유입기류는 없지만, Type 1의 경우 풍속이 증가할수록 유출되는 유속의 증가가 가장 많았다. 반면 Type 2와 Type 3에서는 비등온 조건과 마찬가지로 외기가 0.5m/s에서 2m/s로 증가되어도 유출되는 유속은 크게 증가되지 않았다.

바람에 의한 풍력만 작용하는 등온조건인 경우 풍속이 빠를 때는 Type 1이 적당하지만, 풍속이 낮은 경우에는 형태별로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그리고, 비등온 조건과 마찬가지로, 일반형 벤틸레이터는 풍향에 상관없이 작업장 내부 공기가 배출되는 경향이 있고 오염물질 환기에 적합하고, 창문형 벤틸레이터는

기류 방향에 따라 유출·입 변화가 심한 것으로 나타나 냉각 목적에 적당할 것으로 판단된다.

비등온과 등온 조건 결과로 볼 때, 온도 차이가 많고 바람이 잘 부는 곳에서 오염 물질을 배출시키기 위한 목적일 때는 창문형 벤틸레이터보다는 일반형 벤틸레이터를 이용하는 것이 바람직하고, 냉각을 위한 목적일 경우에는 유출·입이 활발한 창문형이 적당한 것으로 판단된다.

## 2. 작업장 내부 공기연령(Mean age of air) 계산결과

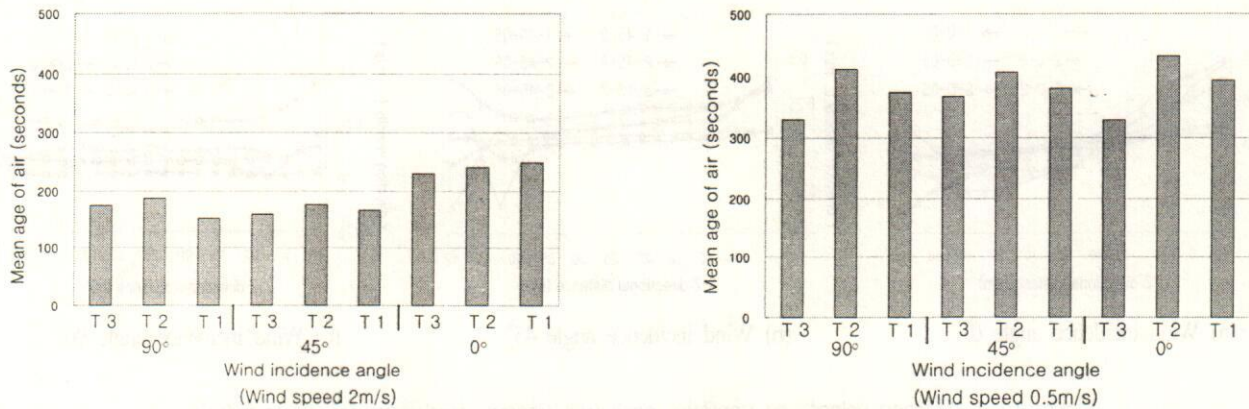
### 1) 비등온 조건

Figure 13은 비등온 조건일 경우 풍속에 따른 작업장 내부 평균 공기 연령을 계산한 결과이다. 풍력과 부력이 동시에 작용하는 풍속 2m/s인 경우가 부력이 지배적으로 작용하는 0.5m/s일 때보다 공기 연령이 훨씬 낮아 환기효율이 좋다는 것을 알 수 있다.

풍력에 의한 환기력이 지배적인 2m/s 이상에서는 벤틸레이터 형태별 공기 연령은 큰 차이가 없지만 풍향에 의한 영향은 있는 것으로 나타났다. 풍향이  $45^\circ$  와  $90^\circ$  일 때 공기연령은 벤틸레이터 형태에 상관없이 200초 이하이지만,  $0^\circ$  일 때는 모든 형태의 벤틸레이터가 200초를 초과하여 바람이 건물과 평행하게 불 경우에 환기효율이 상대적으로 낮아지는 것으로 나타났다.

0.5m/s에서는 풍력보다는 부력에 의해



Figure 13. Mean age of air in the building( $\Delta t=30^{\circ}\text{C}$ )

영향이 지배적인 영역답게 풍향 변화에 따른 공기 연령은 크게 차이 나지 않고, 벤틸레이터 형태에 따른 공기 연령 차이가 발생하고 있다.

Figure 13에서 살펴보면 같은 창문형 벤틸레이터임에도 불구하고 Type 3은 공기 연령이 낮아 환기 효율이 좋은데 반해, Type 2는 공기 연령이 높아 환기가 원활하지 못한 것을 알 수 있다. Figure 14는 비등온, 풍속 2m/s, 풍향 90° 일 때 Z 방향 25m 단면에서 Type 2와 Type 3의 벡터를 나타낸 것이다.

Type 2는 들창형 벤틸레이터이기 때문에 기류 유입이 원활하지 못하고, 벤틸레이터 내부에서 큰 와류가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 하지만, Type 3은 창문에 방해를 받지 않기 때문에 벤틸레이터로 유입된 기류가 벤틸레이터 내부에서 재순환하지 않고 작업장 내부 공기와 함께 반대편 개구면으로 쉽게 배출되는 것

을 볼 수 있다.

비등온 조건 결과에서 작업장 내부 공기 온도가 외부 보다 높은 경우라도 부력만 작용하는 경우(Wind speed 0.5m/s)보다는 부력과 풍력이 동시에 작용하는 경우(Wind speed 2m/s) 환기력이 월등히 높아지는 것을 알 수 있다. 풍력이 작용하는 곳의 환기 효율은 풍향에 영향을 많이 받기 때문에 주풍 방향을 고려하여 건물을 배치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고, 풍력이 크게 작용하지 않는 곳에서는 벤틸레이터 형태에 따라 환기 효율이 많이 변하기 때문에 환기 효율을 극대화하기 위해서는 벤틸레이터 형태를 신중하게 선택해야 할 것으로 판단된다.

## 2) 등온 조건

Figure 15는 등온 조건일 경우 풍속에 따른 작업장 내부 평균 공기 연령을 계산한 결과이다. 풍속에 상관없이 풍향이 45°

와 90° 일 때가 0° 일 때보다 공기 연령이 낮게 나타났다. 그리고 풍향 0°에서는 Type 1이 Type 2보다 환기 효율이 좋지 못하고, 전반적으로 Type 3의 공기 연령이 가장 낮은 것으로 나타났다. 등온인 경우 환기력은 풍속에 의존하므로 풍속 2m/s일 때보다 0.5m/s에서 공기 연령이 2배 이상 증가되어 작업장 내부 체류 시간이 길어지는 것을 알 수 있다.

실내·외 온도차이가 발생하지 않는 공장에서의 자연환기 효율은 풍향에 의해 결정되기 때문에 설치전에 주풍에 대한 정확한 자료를 입수하는 것이 필수적이다.

Figure 13과 Figure 15를 비교해 보면, 풍속 2m/s에서는 온도 조건에 상관없이 공기 연령이 크게 차이 나지 않는 것을 알 수 있다. 비록 바닥면과 외기 온도 차이가 30°C라 하더라도 풍속 2m/s에서는 바람에 의한 영향이 지배적으로 작용한 것을 알

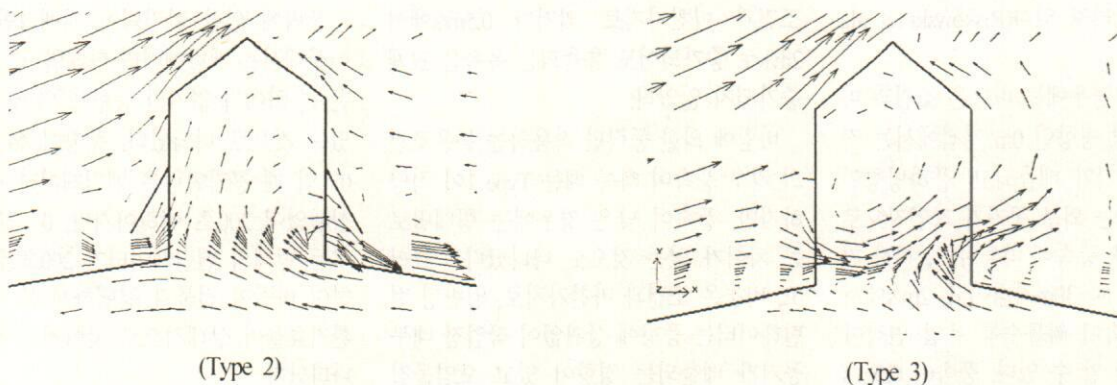


Figure 14. Vectors and velocity contour in the ventilator(wind speed 2m/s, Z=25m)



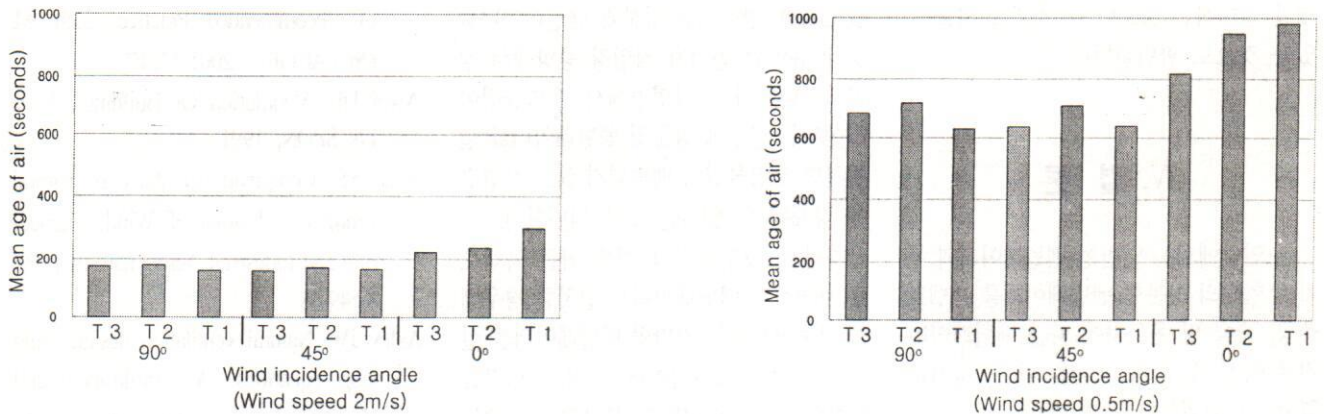


Figure 15. Mean age of air in the building( $\Delta t=0$ )

수 있다. 하지만, 풍속 0.5m/s에서는 등온 조건이 비등온 조건보다 2배정도 공기 연령이 높은 것으로 나타나, 바람이 적은 지역에서는 충분한 실내·외 온도차가 있어야만 효율적인 자연환기를 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3) 높이에 따른 공기 연령 분포

Figure 16은 비등온 조건, 풍속 2m/s, 풍향 90° 일 때 길이 방향 25m 지점의 공기 연령 분포를 나타낸 것이다.

Figure 13과 Figure 15에서 살펴보면 각 조건에서 벤틸레이터 형태별 평균 공기연령은 큰 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 하지만, 25m 단면에 대한 공기 연령을 살펴보면 벤틸레이터 형태에 따라 높이별 공기 연령의 차이가 많은 것을 알 수 있다.

Type 1을 보면, 창문으로 유입된 기류가 벤틸레이터를 통해 배출되지만, 바람이

유입되는 창쪽 벽면(왼쪽)에서 정체대가 나타나면서 작업장 전체의 평균 공기연령을 높이고 있는 것을 알 수 있다. 하지만, 창문과 벤틸레이터 사이에 원활한 공기 흐름이 유지되면서 공장 가운데에 정체대가 형성되지 않아 오염물질이 발생하더라도 작업장 중앙에 정체되지 않고 작업장 밖으로 쉽게 배출될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Type 2와 Type 3에서는 작업장 중앙에 220초 이상의 정체대가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 창문과 벤틸레이터에서 유입된 외부 기류가 작업장 중앙에서 정체대를 형성하기 때문에 창문과 벤틸레이터에서는 공기 연령이 낮고, 작업장 중앙에는 공기 연령이 높게 나타났다. 오염물질을 제거하기 위해 Type 2와 Type 3과 같은 창문형 벤틸레이터를 설치했을 경우, 창문을 통해 유입된 기류가 벤틸레이터를 통해 배출되는 것이 아니라 창문과

벤틸레이터를 통해 기류가 유입되면서 오염물질이 배기되지 못하고 작업장에 정체될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 특히, Type 3에 비해 Type 2에서 정체가 훨씬 심각하게 일어나는 것을 알 수 있는데, 이는 Figure 14에서 설명했듯이 벤틸레이터 형태에 따른 기류차이에 의해 발생하는 현상인 것을 알 수 있다.

작업장 전체 평균 공기 연령에서는 큰 차이가 없지만 작업장 높이에 따른 공기 연령 차이는 많다. 따라서, 작업장 내부에서 발생된 오염물질을 배출하기 위한 목적으로 벤틸레이터를 설치할 경우 작업장 중앙에서 정체대가 형성되지 않는 일반형 벤틸레이터가 적당하다. 그리고, 냉각을 위한 목적으로 벤틸레이터를 설치할 경우에는 온도가 낮은 외기의 유·출입만 활발하면 충분한 효과를 거둘 수 있으므로 창문형을 사용해도 큰 문제는 없지만, 미단이형 벤틸레이터를 설치하는 것이 들창

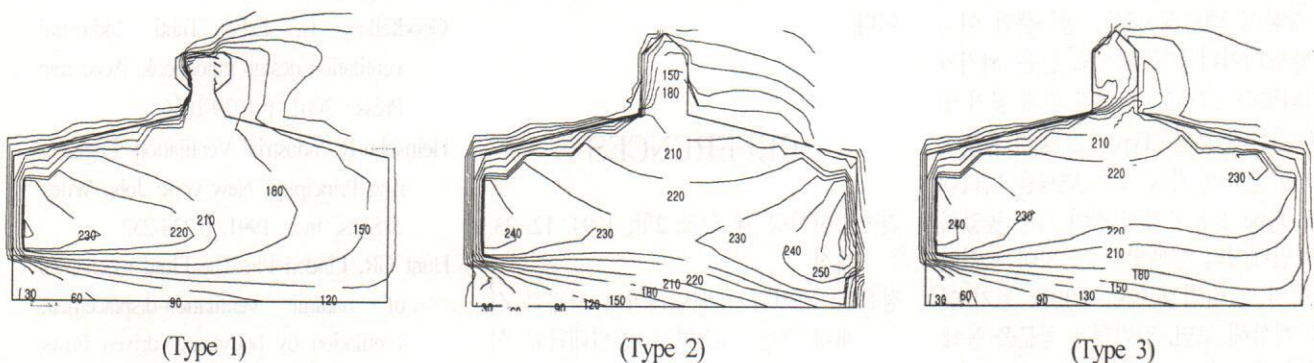


Figure 16. Distribution of mean age of air in the building with different ventilator type (2m/s of wind speed,  $\Delta t=30^\circ\text{C}$  and  $Z=25\text{m}$ )



형을 설치하는 것보다 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 일반형 벤틀레이터와 두 가지 형태의 창문형 벤틀레이터를 모델로 풍향, 풍속 및 온도차에 따른 벤틀레이터 기류 특성 및 환기 효율을 비교·평가하였고, 그 결과는 다음과 같다.

##### 1. 풍향에 의한 영향

벤틀레이터 형태에 상관없이 풍향에 의한 영향이 매우 크기 때문에 벤틀레이터를 통한 자연환기 효율을 높이기 위해서는 벤틀레이터를 설치하고자 하는 공장의 주풍을 측정하여 풍향이 45° 또는 90°를 유지할 수 있도록 건물 방향을 설계해야 한다.

##### 2. 풍력과 부력의 영향

외기조건이 비슷할 경우 등온조건보다는 부력이 작용하는 비등온 조건의 환기 효율이 높은 것으로 나타났고, 같은 온도 조건에서는 풍속이 빠를수록 환기 효율이 높게 나타났다.

##### 3. 벤틀레이터 형태에 따른 환기 특성

벤틀레이터 목부분 기류를 평가해 보면, 일반형 벤틀레이터는 창문으로 외기가 유입되어 벤틀레이터를 통해 배출되었고, 창문형 벤틀레이터는 창문뿐만 아니라 벤틀레이터를 통해서도 많은 외기가 유입되었다. 그리고, 작업장 전체 공기 연령을 계산해 보면 Type 3이 공기 유출·입이 활발하여 가장 낮은 연령을 나타내었고, Type 2가 공기 연령이 가장 높았지만 벤틀레이터 형태별로 큰 차이는 없었다. 하지만, 작업장 높이에 따른 공기 연령을 계산해 보면, 일반형은 창문을 통해 유입된 공기가 벤틀레이터로 배출되기 때문에 작업장 중앙에 정체대가 형성되지

않았지만, 창문형은 창문과 벤틀레이터를 통해 유입된 공기가 작업장 중앙에서 정체되었다. 이는 작업장에서 오염물질이 발생하는 공정에 창문형 벤틀레이터를 설치하면 오염물질이 배출되지 않고 작업장에 정체될 수 있다는 것을 의미한다.

따라서, 오염물질 환기를 위한 목적으로 자연환기 벤틀레이터를 설치할 경우에는 창문형보다는 일반형 벤틀레이터를 설치하는 것이 효과적이다. 그리고, 냉각을 목적으로 벤틀레이터를 설치할 경우에는 작업장 전체 공기 연령이 가장 낮은 미단이 창문형이 적당한 것으로 나타났다.

건물의 자연환기는 벤틀레이터 형태도 중요하지만, 창문의 위치, 주변 건물의 배치, 건물의 재질, 작업장 내부 공간 배치 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 그에 대한 충분한 고려가 있어야 한다. 자연환기 벤틀레이터 배기유량을 최대로 유지하기 위해서는 급기 공기를 충분히 공급해 주어야 한다. 자연환기에 있어 급기구는 창문, 출입문 및 건물 틈새로 유입되는 침기(infiltration) 등이 있다. 날씨가 따뜻한 늦봄부터 초가을까지는 창문을 열어두기 때문에 급기량 부족에 따른 배기유량 감소 현상을 고려하지 않아도 되지만, 창문과 출입문을 닫아두는 겨울에는 급기량 부족에 따른 환기량 감소 문제가 발생할 수 있다.

창문의 위치가 부적절할 경우 작업장 내부 상승 공기의 흐름을 방해할 수 있기 때문에 창문의 위치는 환기 효율뿐만 아니라 작업장 내부 온도변화에도 관련이 있어 설치 위치에 대한 신중한 고려가 있어야 하고, 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

#### REFERENCES

- 건축법시행령 제 51조 2항; 1994. 12. 23. 개정
- 정유진. 자연환기 벤틀레이터 최적화 설계에 관한 기초연구, 창원대학교 석사학위논문; 2002. (2-3쪽)
- ACGIH. Industrial Ventilation - A Manual of Recommended Practice, 25th ed. Ohio:ACGIH.; 2001.2-2.17
- Awbi HB. Ventilation Of Buildings, E & FN SPON, 1991
- Ayad SS. Computational study of natural ventilation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1999; 82:49-68
- Axley JW. Natural ventilation design using loop equations. Air Infiltration and Ventilation Centre 20th Annual Conference. 1999
- Boulard T, Kittas C, Papadakis G, Mermier M. Pressure field and airflow at the opening of a naturally ventilated greenhouse. J. Agric. Engng Res 1998; 71:93-102
- Boulard T, Feuilloley P, Kittas C. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. J. Agric. Engng Res 1997; 67: 249-266
- Boulard T, Meneses JF, Mermier M, Papadakis G. The mechanisms involved in the natural ventilation on greenhouses. Agricultural and Forest Meteorology 1996; 79:61-77
- Burton D. Hemeon's Plant and Process Ventilation, 3rd ed. Washington; Lewis Publi. ;1999. p.165-188,
- Fordham M. Natural Ventilation. Renewable Energy 2000; 19:17-37
- Gan G. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation. Energy and buildings 2000; 31:65-73
- Goodfellow H, Esko Tahti. Industrial ventilation design guidebook. Academic Press.; 2001. p.1029-1056
- Heinsohn R. Industrial Ventilation- Engineering Principles. New york; John Wiley & Sons, Inc.; 1991. p.228-232
- Hunt GR, Linden PF. The Fluid mechanics of natural ventilation-displacement ventilation by buoyancy -driven flows assisted by wind. Building and Environment 1999; 34:707-720



- Jozwiak R, Kacprzyk J, Zuranski JA. Influence of wind direction and natural ventilation of apartment building. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1996; 60:167-176
- Kittas C, Boulard T, Mermire M, Papadakis G. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. J. Agric. Engng Res 1996; 65:37-49
- Kindangen J, Krauss G, Depecker P. Effects of roof shape on wind induced air motion inside building. Building and Environment 1997; 32:1-11
- Mistriotis A(a), Picuno P, and Bot GPA. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. Agricultural and Forest Meteorology 1997; 85:217-228
- Mistriotis A(b), Arcidiacono C, Picuno P, Bot, Scarascia-Mugnozza. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds. Agricultural and Forest Meteorology 1997; 88:121-135
- Montero JI, Anton A, Kamaruddin R, Bailey BJ. Analysis of thermally driven ventilation in tunnel greenhouses using small scale models. J. Agric. Engng Res 2001; 79 :213-222,
- Munoz P, Montero JI, Anton A, Ginfrida F. Effect on inside proof screens and roof openings on greenhouse ventilation. J. Agric. Engng Res 1999; 73:171-179
- Oca J, Montero JI, Anton A, Crespo D. A Method for studying natural ventilation by thermal effects in a tunnel greenhouse using laboratory-scale models. J. Agric. Engng Res 1999; 72:93-104
- Papadakis G, Mermier M, Meneses J, Boulard T. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. J. agric. Engng Res 1996; 63:219-228
- Papakonstantinou KA, Kiranoudis CT, Markatos NC. Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated building. Energy and buildings 2000; 33:41-48
- Riskowski GL, Ford SE, Mankell KO. Laboratory measurements of wind effects on ridge vent performance. ASHRAE TRANSACTIONS 1998 V. 104, Pt. 1.
- Saraiva, Marques J, Silva, Fernando. Atmospheric turbulence influence on natural ventilation -air change rates. LNEC - NDA, Av. do Brasil 101, 1999
- Shinsake K, Shuzo M, Takeo T, Tomochika G. Chained analysis of wind tunnel test and CFD on cross ventilation of large-scale market building. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1997; 67&68:573-587
- Teitel M. and Tanny J. Natural ventilation of greenhouses-experiments and model,. Agricultural and Forest Meteorology 1999; 96:59-70
- Yoon SH, Hoyano A. Passive ventilation system that incorporates a pitched roof constructed of breathing walls for use in a passive solar house. Solar Energy 1998; 64: Nos 4-6, 189-195
- Yuguo Li, Angelo Delsante. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. Building and Environment 2001; 36:59-71
- Yuguo Li, Delsante A, Symons J. Prediction of natural ventilation in buildings with large openings. Building and Environment 2000; 35:191-206