비등온 급기조건에서 환기방식에 따른 환기효율 특성에 관한 연구

이 재 근†, 강 태 욱*, 윤 석 구, 구 제 현, 한 정 균, 조 민 철*
부산대학교 기계공학과, *(주)LG전자

A Study on Ventilation Effectiveness in the Non-isothermal Supply using Mixing and Displacement Ventilation Systems

Jae-Keun Lee†, Tae-Wook Kang*, Suk-Goo Yoon, Jae-Hyun Ku, Jung-Gun Han, Min-Chul Cho*
Research Institute of Mechanical Technology, Department of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
*LG Electronics Inc., Changwon 641-713, Korea

(Received February 14, 2001 ; revision received April 16, 2001)

ABSTRACT: The objective of this research is to analyze the ventilation effectiveness in the non-isothermal air supply using mixing and displacement ventilation systems for indoor air quality control and management. In this study, a ventilation effectiveness is evaluated in a simplified model chamber using a tracer gas technique of CO_2 gas injected into a supply duct as a function of ventilation rates, supply/extract sites and cooling/heating air supply. The ventilation effectiveness decreased with increasing ventilation rate on the cooling and heating conditons. And the ventilation effectiveness of case 3 (down supply and upper extract) was better than that of case 1 (upper supply and upper extract) and case 2 (upper supply and down extract) with the cooling supply conditions. But for the heating supply air conditions, the ventilation effectiveness of case 2 was better than that of case 3 and case 1.

Key words: Ventilation effectiveness(환기효율), Room mean age(실평균 공기령), Non-isothermal supply(비등온 급기), Mixing ventilation(혼합환기), Displacement ventilation (변위환기), Air exchange rate(환기횟수)

기 호 설 명

C_e : 배기구에서 오염물질농도 [ppm]
T_s : 급기온도 [℃]
T_i : 실내 온도 [℃]
t : 시간 [sec]

그리스 문자

τ_n : 명목시간 상수 [sec]
ε_a : 환기효율 [%]
$\langle \tau \rangle$: 실평균 공기령 [sec]

† Corresponding author
Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-512-5236
E-mail address: jklee@hyowon.pusan.ac.kr

1. 서 론

실내에 거주하는 재실자에게 신선외기를 공급하고 실내에서 발생하는 오염물질을 효과적으로 제어하기 위해서 많이 사용하고 있는 것은 환기횟수에 의한 기계적 환기(mechanical ventilation) 시스템이다.[1,2] 그러나 환기횟수 증가에 따라 실내 공기질이 향상되는 것이 아니라, 급·배기구 위치, 급기구의 기류확산 성능, 급기온도, 외기도입량의 제어성능 등이 실내 환기효율에 영향을 미친다.[3-5]

실내 공기오염에 대한 제어방안으로 실내 공기오염의 발생원을 제거 또는 대체, 개선, 환기, 공기청정기 등에 의한 공기청정 등이 제안되고 있다. 환기는 실내 공기오염 제어방법 중 가장 중요한 사항으로 미국에서는 건물내 환기시설이 총 에너지 소비의 50~60%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히 급기온도를 달리함으로써 학교, 병원, 실험실, 일반주택 등의 실내 오염원을 효율적으로 제거하여 각 건물 특성에 알맞는 환기조건이 필요하다.[3,5-7]

본 연구는 냉·난방 급기조건에서 환기방식에 따른 환기효율 특성에 관한 것으로 환기횟수, 급·배기구 위치에 의한 환기방식, 급기온도와 실내 온도차를 변수로 하여 환기방식별 환기효율을 분석하고자 한다. 환기횟수는 실내 공간에서 많이 적용되고 있는 시간당 6회, 8회, 10회에 대해 환기실험을 실시하였으며, 본 연구 결과가 쾌적한 공기질 향상을 위해 여름 또는 겨울에 에어컨이 운전되는 실제 건물 내에서 환기방식에 따라 적용 가능성이 기대된다. 급·배기구의 위치는 혼합환기방식인 상부급기·상부배기와 상부급기·하부배기, 그리고 변위환기방식인 하부급기·상부배기에 따른 3가지 Case별로 하였으며, 급기온도와 실내 온도차는 −20, −10, −5, 5, 10, 20℃로 각각의 환기효율을 비교하여 최적환기조건을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 단순화된 축소 환기모형실의 구성도로서 가로 0.84 m, 세로 0.68 m, 높이 0.7 m의 아크릴로 제작하여 직사각형의 거주공간을 모형화하였다. 급기구와 배기구는 직경 40 mm의 원형으로 제작되었다. 모형에서 급기구는 측면 상단, 측면 하단에, 배기구는 반대편 측면 상단, 측면 하단에 설치하였고 급기구에는 급기된 공기의 확산효과를 높이기 위해 Grid를 설치하였다. 환기모형실 내부의 설정온도를 유지하기 위해 두께 50 mm의 단열재인 스티로폼으로 모형실을 단열하였으며 모형실 내부의 보정온도차는 ±1℃ 이하로 하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용될 급·배기구 위치 및 환기원리에 의한 환기방식을 나타낸 것으로

Table 1 Test conditions for the ventilation experiment

Parameters		Specifications
Chamber dimension (L×W×H)		0.84×0.68×0.7 m^3
Ventilation type	Case 1	Mixing ventilation
	Case 2	Mixing ventilation
	Case 3	Displacement ventilation
Supply and extract locations	Case 1	Upper supply / upper extract
	Case 2	Upper supply / down extract
	Case 3	Down supply / upper extract
ΔT (Supply air temperature − Indoor temperature)	Cooling	−20℃, −10℃, −5℃
	Heating	5℃, 10℃, 20℃
Air Change per Hour	6 ACH	6/hr
	8 ACH	8/hr
	10 ACH	10/hr
Tracer gas		CO_2
CO_2 Gas monitor		CASELLA, ICS-500

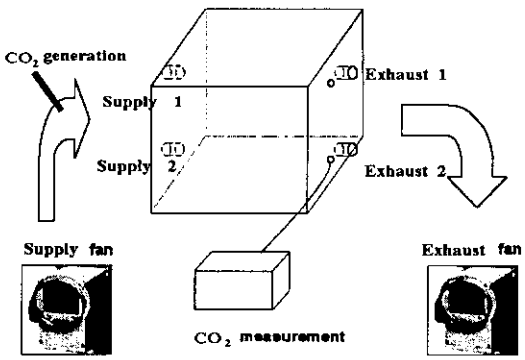


Fig. 1 Schematic diagram of model chamber.

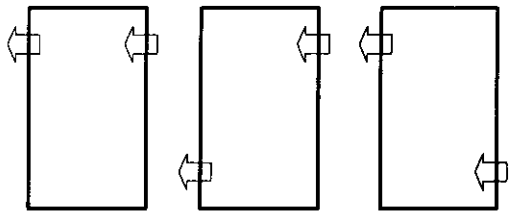


Fig. 2 Supply and extract conditions of the model chamber; (a) upper supply/upper extract, (b) upper supply/down extract, (c) down supply/upper extract.

서, Case 1과 Case 2는 혼합환기(mixing ventilation) 방식에 속하며 Case 3은 변위환기(displacement ventilation) 방식에 속한다. 환기량은 주택이나 사무실에서 많이 적용되고 있는 시간당 6회(6 ACH), 8회(8 ACH), 10회(10 ACH)로 하였다. 본 연구에서는 급·배기구 위치를 Fig. 2와 같이 3가지 유형으로 구분하여 실험을 수행하였다. 혼합환기방식인 Case 1은 급기구를 측면 상부에 배기구를 반대편 측면 상부에, Case 2는 급기구를 측면 상부에 배기구를 반대편 측면 하부에 설치하였다. 변위환기방식인 Case 3은 급기구를 측면 하부에 배기구를 반대편 측면 상부에 설치하였다.

축소 모형실의 온도를 조절하는 데 사용된 항온항습 환경공조챔버(H&C System, 3.0×4.0×3.0 m^3)는 온·습도범위로는 10~45℃, 10~90% RH로 가능하며 완전밀폐와 단열되어 있고, 냉동기만 가동했을 때는 −6℃까지 냉방이 가능하다.

2.2 환기효율 측정방법

환기효율은 실평균 공기령과 명목시간상수와의 비로 나타낸다. 실평균 공기령은 추적가스를 이용하여 평가하였고 사용된 추적가스는 이산화탄소(CO_2)를 사용하였다. 이산화탄소는 NO, SF_6, 프레온 등과 같이 많이 사용되고 있는 추적가스로서 체강방법(step-down)에 의한 환기량 결정에 많이 사용되며 대기중에서는 350~600 ppm 정도의 농도를 가진다.[5,7-8]

시간에 따른 추적가스의 농도측정에는 실내 오염 종합환경측정기(CASELLA, ICS-500)를 이용하였다. 측정방법은 적외선 분석기의 원리인 이산화탄소의 적외선 흡수를 이용하여 시료중에 포함되어 있는 이산화탄소 농도를 측정하는 것이다. 측정범위는 0~3,300 ppm이며 분석능력(resolution)은 1 ppm이고 측정 정밀도는 ±2%로 정밀측정에 적합하다.

추적가스를 이용한 공기령 평가에는 ASTM Standard E741-83의 체강방법을 사용하였다.[8] 체강방법은 모형실 전체의 추적가스농도를 일정하게 한 후 추적가스의 주입을 멈추고 환기장치를 작동시켜 시간에 따른 농도 감소를 측정하는 방법이다.

본 연구에 사용된 실험방법은 다음과 같다. 첫째, 각 설정온도에 따라 환경공조챔버에서 축소 모형실 내의 온도가 일정하게 유지되도록 냉방 및 난방을 한다. 둘째, 주입되는 추적가스가 모형실 내 공기와 고르게 혼합될 수 있도록 모형실 내에 소형 교반기 3개를 설치하여 밀폐된 상태에서 모형실 내 공기와 균질하게 혼합되도록 한다. 이때 측정기를 이용하여 공간적으로 균질한 상태가 확인될 때까지 운전시킨다. 셋째, 실험조건에 맞는 환기횟수로 설정한다. 넷째, 일정시간 간격으로 추적가스농도를 측정한다. 다섯째, 첫째에서 넷째까지의 순서를 반복하여 측정한다.

환기방식별 환기효율은 추적가스를 이용한 농도변화를 측정하여 식(1)과 식(2)를 이용하여 평가하였다. 외부의 신선공기를 실내 공간에 전달하는 능력을 나타내는 환기효율(ventilation effectiveness)은 실평균 공기령($\langle\tau\rangle$)에 대한 명목시간상수(nominal time constant)의 비로서 나타내며 본 연구에서는 Etheridge and Sandberg[3]가 제시한 환기효율식을 이용하여 환기효율(ε_a)을

구하였다. 명목시간상수(τ_n)는 실용적을 공급되는 공기유량으로 나눈 값으로 제어환기횟수의 역수이며 완전혼합일 경우의 실내 평균 공기령과 같다.[3,8-10]

$$\langle \tau \rangle = \frac{\int_0^\infty t C_e(t)\,dt}{\int_0^\infty C_e(t)\,dt} \quad (1)$$

$$\varepsilon_a = \tau_n / 2\langle \tau \rangle \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 환기횟수별 환기효율

환기횟수는 실내에 공급되는 공기가 1시간에 교체되는 횟수를 말하며 일반적으로 학교건물에서는 시간당 6회의 환기횟수를 필요로 하며 사무실과 같은 실내 공간에서는 시간당 6회에서 10회 정도가 적당하다. 본 연구에서는 실제로 많이 적용되고 있는 환기횟수인 6회/hr, 8회/hr, 10회/hr에 대해 환기실험을 실시하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 냉 · 난방 급기조건인 −5℃와 5℃에서의 환기횟수에 따른 환기효율을 나타낸 것으로서 환기횟수가 증가할수록 환기효율은 감소함을 보였다. 냉방급기 −5℃에서는 환기횟수 증가에 따라 평균 5~15% 정도의 환기효율이 감소하였으며 난방 급기조건에서 환기횟수에 의한 환기효율 결과는 환기횟수 증가에 따라 평균 7% 정도의 환기효율 감소를 나타내었다. 냉방급기가 −20℃, −10℃, 그리고 난방급기가 10℃, 20℃인 경우에도 환기횟수가 증가할수록 환기효율이 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 실내의 유속이 빨라질수록 전체적으로 혼합(mixing)이 되지 못하며 국부적인 단락(short circuiting)현상이 생기는 것으로, 즉 환기횟수가 증가할수록 제어환기횟수를 따르지 못한다는 것을 나타낸다.

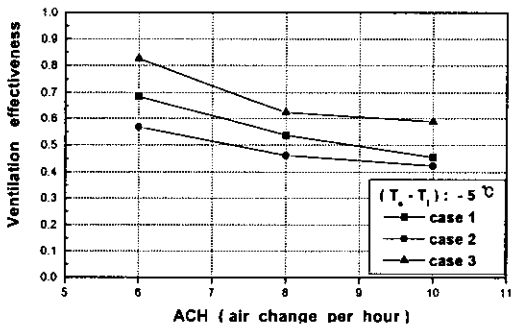


Fig. 3 Test result of ventilation effectiveness for the cooling supply air of −5℃.

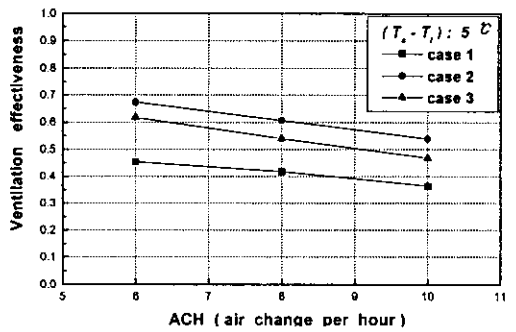


Fig. 4 Test result of ventilation effectiveness for the heating supply air of 5℃.

3.2 급/배기 위치별 환기효율

환기에 있어서 실내 공기의 흐름은 중요하다. 급 · 배기구의 위치변화는 실내 공기흐름을 변화시켜 환기상태를 변화시킨다.

본 연구에서는 급기구와 배기구의 위치에 의해 분류되는 혼합환기방식과 변위환기방식을 이용한 상부급기/상부배기(Case 1), 상부급기/하부배기(Case 2), 하부급기/상부배기(Case 3), 3가지로 바꾸어 가며 환기효율에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 5는 냉방급기조건인 −5℃에서의 급 · 배기구 위치에 따른 환기효율을 나타내는 것으로서

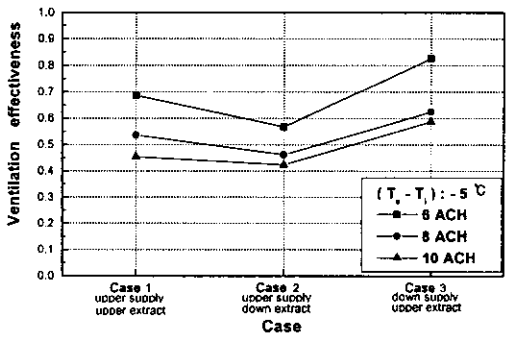


Fig. 5 Test result of ventilation effectiveness for the cooling supply air of −5℃.

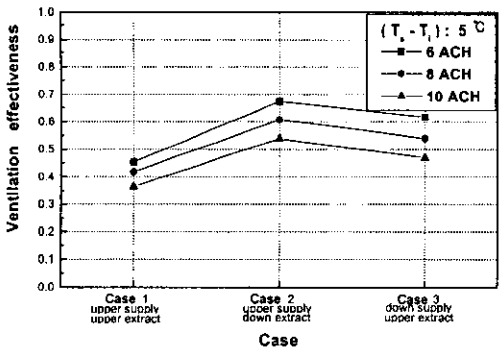


Fig. 6 Test result of ventilation effectiveness for the heating supply air of 5℃.

변위환기방식인 Case 3이 환기효율이 가장 높게 나타났으며 그 다음으로 혼합환기방식인 Case 1, Case 2로 높게 나타났다. 급·배기 위치별 환기방식에 따른 환기효율은 냉방급기조건에서 Case 3은 평균적으로 74%의 환기효율이 나타났고 Case 1은 평균적으로 61%, Case 2는 평균적으로 51%의 환기효율의 결과를 보였다. 냉방급기조건이 −20℃, −10℃에서도 같은 경향을 보였다.

Fig. 6은 난방급기조건인 5℃에서의 급·배기구 위치에 따른 환기효율을 나타내는 것으로서 혼합환기방식인 Case 2가 가장 환기효율이 좋았으며 Case 3, Case 1의 순으로 높게 나타났다. 급·배기 위치별 환기방식에 따른 환기효율은 냉방급기조건에서 Case 2는 평균적으로 58%의 환기효율이 나타났고, Case 3은 평균적으로 49%, Case 1은 평균적으로 39%의 환기효율의 결과를 보였다. 난방급기조건이 20℃, 10℃에서도 같은 경향을 보였다.

급·배기구 위치에 따른 실평균 공기령과 환기효율의 차이는 실내 유동형상에서 그 원인을 찾을 수 있다. 급·배기구 위치별로 실내 공기유동을 살펴보면 실내 공간에서 생길 수 있는 공기유동형상은 혼합유동(mixing), 단락유동(short circuiting), 변위유동(displacement), 일방향유동(piston)으로 크게 4가지로 나눌 수 있다.

혼합유동은 내부로 유입된 공기가 서로 잘 섞이어 전체적으로 혼합된 후 배출되는 유동으로서, 본 연구에서는 Case 1, Case 2의 경우 혼합유동으로 볼 수 있다. 혼합유동의 경우에 급기구와 배기구의 위치에 따라 유동의 주흐름과 연결이 되지 않는 흐름이 생기는 경우가 발생하는데 이때의 유동을 단락유동이라고 하며 환기효율을 저감시킨다.

변위유동은 주로 급기위치가 실내 공간의 하부에 위치하며 상부로 배기되는 형태를 가지는데 본 연구에서는 Case 3이 변위유동의 형태를 가진다. 변위유동의 경우 일반적으로 급기공기와 내부공기의 온도차를 많이 이용하며 공기유동은 혼합유동과는 달리 하부에서는 성층화에 의한 일방향 흐름이 발생하며 상부에서는 약간의 혼합유동이 발생한다.

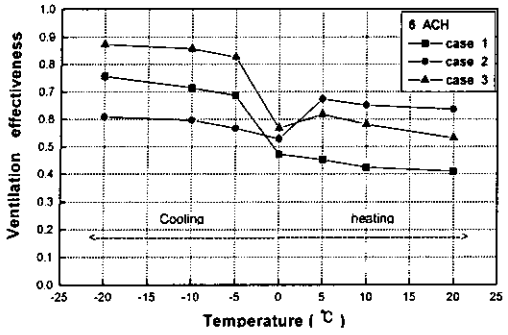
3.3 급기온도에 따른 환기효율

냉방급기조건에서 실내 취출기류의 특성 중 하나가 부력(positive buoyancy)효과이다. 급기된 기류가 주위의 실내 온도보다 낮을 경우 밀도차에 의해 급기된 기류를 아래로 끌어내리려는 힘을 부력효과라고 한다. 실내와 급기온도차가 크면 클수록 부력의 효과는 커지게 된다.

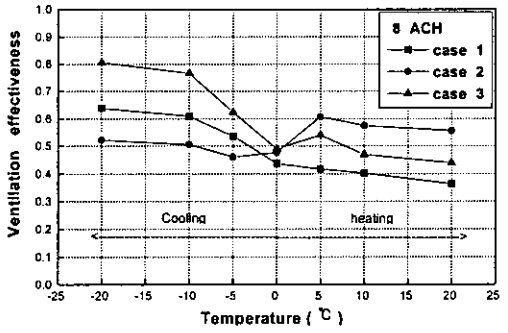
실내로 급기되는 공기가 실내 온도보다 높을 경우 상대적으로 밀도가 실내 공기보다 낮기 때문에 급기된 공기는 상부로 상승하려는 속성인 부력(negative buoyancy)을 가진다. 급기된 기류가 실내 온도보다 낮으면 낮을수록 이러한 부력은 커지게 된다. Fig. 7은 각각의 급기온도를 달리하여 환기횟수와 급/배기별 위치에 대한 환기효율의 결과를 나타낸다. 냉방급기조건은 실내 온도와 급기온도의 차이에 의한 온도로서 −20℃, −10℃, −5℃, 0℃, 5℃, 10℃, 20℃ 조건으로 했으며 급기구 위치로는 혼합환기방식의 측면 상부급기와 변위환기방식의 측면 하부급기로, 환기횟수로는 6 ACH, 8 ACH, 10 ACH로 급기시켰을 때의 환기효율에 대한 결과를 분석하였다.

냉방급기인 경우 온도차가 클수록 환기효율이 증가하며 −20℃인 경우 평균 환기효율은 66%이었고, −10℃인 경우는 63%, −5℃인 경우는 57%의 평균 환기효율이 나타났다.

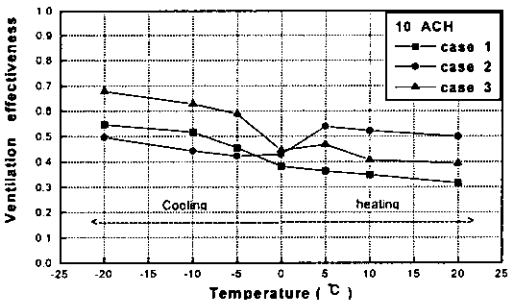
실내 공간온도와 취출공기의 온도차가 발생했을 때는 그에 대한 기류의 특성을 고려하지 않으면 안된다. 그림에서 보듯이 급기온도가 −20℃에서 변위환기방식인 Case 3이 가장 우수한 환기효율의 결과를 보여주고 있고, Case 2가 좋지 않은 환기효율의 결과를 보여준다. Case 3인 경우 하부로 급기된 공기는 실내 공기와의 밀도 차이



(a) 6 ACH



(b) 8 ACH



(c) 10 ACH

Fig. 7 Ventilation effectiveness as a function of temperatures with different of air exchange rates.

에 의해 바닥에 전체적으로 균일하게 깔리어 상부로 천천히 상승하여 실내 오염공기를 밀어내며 배기구가 있는 상부에서는 조금 혼합이 일어나면서 실외로 배출된다. Case 2인 경우 배기구가 하부에 위치해 있어서 급기온도에 의한 부력효과의 영향으로 다른 Case보다 배기구로의 공기유동이 바로 연결되기 때문에 환기효율이 낮다고 볼 수 있다. 그리고 Case 1은 배기구가 측면 상부에 있지만 부력효과에 의해 급기된 공기는 거주역까지 하강을 하여 다시 배기구인 상부로 이동하기 때문에 Case 2보다 환기효율이 좋다.

난방급기인 경우 온도차가 클수록 환기효율이 감소하며 20℃인 경우 평균 환기효율은 46%이었고, 10℃인 경우는 48%, 5℃인 경우는 52%의 평균 환기효율이 나타났다. 환기효율은 온도차가 5℃인 경우가 가장 환기효율이 뛰어났으며, 급·배기구 위치는 Case 2, Case 3, Case 1의 순으로 환기효율이 뛰어났다. Case 2인 경우, 상부에서 급기된 공기는 천장 벽면을 따라 반대측 벽면으로 기류가 이동하게 된다. 온도차 및 취출속도가 상대적으로 작으면 벽면에 부착할려는 코안다 효과(coanda effect)도 적어진다. Case 1인 경우 아주 좋지 않은 급·배기구 위치로서 급기구에서 급기된 공기는 벽면을 따라서 그대로 배기구로 빠져나가는 단락현상이 일어난다. 중간 형태인 Case 3은 하부에서 급기된 공기가 밀도차에 의해 상부로 상승한다. 온도차가 클수록 실내 오염물질과 혼합이 잘 안되고 수직으로 상부로 상승하는 정도가 커지고 천정에 도착한 신선외기가 상부 천정을 따라서 배기구로 배출된다.

4. 결 론

본 연구는 쾌적한 공기질을 유지하기 위한 환기특성에 관한 연구로, 모형실을 이용하여 급·배기위치 및 환기횟수(6회/h, 8회/h, 10회/h), 그리고 급기온도를 변수로 하여 실험적으로 실평균 공기령을 이용한 환기효율을 분석하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 환기횟수에 의한 환기효율 결과는 냉·난방 급기조건에서 모두 환기횟수 증가에 따라 환기효율은 감소하였다. 이는 실내 유속이 크므로 전체적으로 혼합되지 못하고 국부적인 단락현상으로 인한 결과로 분석된다.

(2) 급·배기 위치별로 환기방식에 따른 환기효율은 냉방급기조건에서 Case 3(하부급기/상부배기)>Case 1(상부급기/상부배기)>Case 2(상부급기/하부배기)의 순으로 환기효율이 나타났으며, 난방급기조건에서는 Case 2>Case 3>Case 1의 순으로 환기효율이 나타났다. 이는 변위유동 및 혼합유동 특성에 의한 실내 유동양상으로 인한 것으로 분석된다.

(3) 급기온도조건별 환기효율 결과로는 난방급기인 경우 온도차가 클수록 환기효율이 감소하였고 냉방급기인 경우 온도차가 클수록 환기효율은 증가하였다. 이는 실내의 온도차에 의한 부력효과에 기인하는 것으로 분석된다.

참고문헌

1. ASHRAE, 1997, ASHRAE Handbook Fundamentals, Atlanta, U.S.A.
2. ASHRAE Standard 62-1989, 1989, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Antlanta, Ga.
3. Etheridge, D. and Sandberg, M., 1996, Building Ventilation Theory and Measurement, Johnwiley & Sons.
4. ASHRAE Standard 129-1997, 1997, Measuring air Change effectiveness.
5. Lee, J. K., Kang, T, W., Lee, K. G., Cho, M. C., Shin, J. H., Kim, S. C., Koo, J. H. and Lee, J. H., 2000, An Experimental Study of Ventilation Effectiveness in Mechanical Ventilation Systems using a Tracer Gas Method, KSME International Journal, Vol. 14, No. 11, pp. 1286-1295.
6. Cho, M. C., Jung, J. H., Koo, J. H., Lee, J. K., Kang, T. W., Seo, Y. I. and Lee, K. G., 1999, A Study of Ventilation Effectiveness with Three Type Mechanical Ventilation Systems Using Tracer Gas, Proceeding of the SAREK '99 Winter Annual Conference (Ⅱ), pp. 328-332.
7. Han, H. T., 1999, On the definition of ventilaton effectiveness, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 39-45.
8. ASTM Standard 741-83, Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution.
9. Cho, M. C., 2000, Ventilation Characteristics of Three Type Mechanical Ventilation Systems using a Model Chamber, MS thesis, Pusan National University, Pusan, Korea.
10. Yoon, S. G., 2001, A Study on Ventilation Effectiveness in the Non-isothermal Supply using Mixing and Displacement Ventilation Systems, MS thesis, Pusan National University, Pusan, Korea.