

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 1, 2006

환기장치가 설치된 중학교 교실에서 탄산가스 농도변화 측정 및 모델링

강태욱*

*(주)LG전자(twkang@lge.com)

CO₂ Gas Concentration Measurement and Modeling at a Classroom with Ventilation System of Middle School in Pusan

Kang, Tae-Wook*

*LG Electronics Inc., Korea(twkang@lge.com)

Abstract

This study describes to analyze variation of carbon dioxide gas concentration by experimental and theoretical method according to the using patterns of ventilation system in a model classroom. Concentration of CO₂ gas varied by the occupancy and the ventilation systems are operating or not. More than 850 CMH ventilation system can maintain CO₂ gas concentration lower than 1,000 ppm along the class time and can be adopted the government guideline. Theoretical modeling of the concentration was performed at well-mixed ideal condition. Delays of concentration decay were shown at each case compared to actual.

Keywords : 환기(Ventilation), 농도(Concentration); 교실(Classroom), 탄산가스(Carbon dioxide)

기 호 설 명

Cs : 초기 탄산가스 농도(ppm)
Co : 외기의 탄산가스 농도(ppm)

C(t) : 시간 t에서의 농도(ppm)
Q : 환기량(m³/h)
Qv : 환기장치에 의한 환기량(m³/h, CMH)
Qn : 자연환기에 의한 환기량(m³/h)

접수일자:2006년 2월 6일, 심사완료일자:2006년 3월 21일

M : 실내에서 탄산가스 발생량(m³/h)
 V : 교실내의 체적(m³)
 t : 시간(mim)

1. 서 론

학교 교실에서는 학급당 30명 이상의 학생과 교사가 수업 및 방과 후 자율학습 등으로 하루 중 5시간에서 10 시간 이상 한정된 공간에서 공동생활을 하고 있기 때문에, 환기가 제대로 되지 않을 경우 혼탁해진 공기로 인해 재실자의 학습능률 저하는 물론 건강을 해치는 결과를 가져올 수 있다. 현재 초·중·고등학교 등의 교실에 대한 실내 공기 오염도 조사의 필요성이 강하게 대두되고 있으며 관리를 위한 필요설비가 법으로는 규정되어 있으나 실제로 환기장치 도입은 활발하게 이루어지지 않고 있으며 이에 대한 연구도 미진한 실정이므로 학교 교실의 실내 환경에 대한 정확한 측정과 평가가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구는 실제 학교 교실을 모델로 하여 실내 공기의 환기 상태를 평가하는데 지표로 사용되는 탄산가스의 농도를 측정하여 향후 학교 교실

의 공기질 개선을 위한 방안을 도출하고 모델링을 통한 예측값을 실험값과 비교하였다.

2. 이론해석

어떤 공간 내부에서 탄산가스가 발생되고 환기에 의해 발생된 가스의 농도를 희석할 때 실내의 탄산가스 농도 변화는 외기와 실내공기가 완전혼합 된다고 가정하여 다음과 같이 지수함수적으로 변화한다.^(1~4)

$$C(t) = C_0 + (C_s - C_0) e^{-\frac{Qt}{V3600}} + \frac{M}{Q} (1 - e^{-\frac{Qt}{V3600}}) \quad (1)$$

식에서 우변의 제 1항은 외기의 탄산가스 농도, 제 2항은 환기에 의한 초기농도의 감소, 제 3항은 오염물의 발생에 의한 농도의 증가를 나타낸다. 또 식 중의 Q/V는 환기횟수를 나타내며 1시간에 실내의 공기가 몇 번 바뀌는지를 나타낸다.

환기량(Q)는 환기장치에 의한 환기량(Qv) 이외에 창문과 벽체 등의 틈새를 통한 자연환기량(Qn)

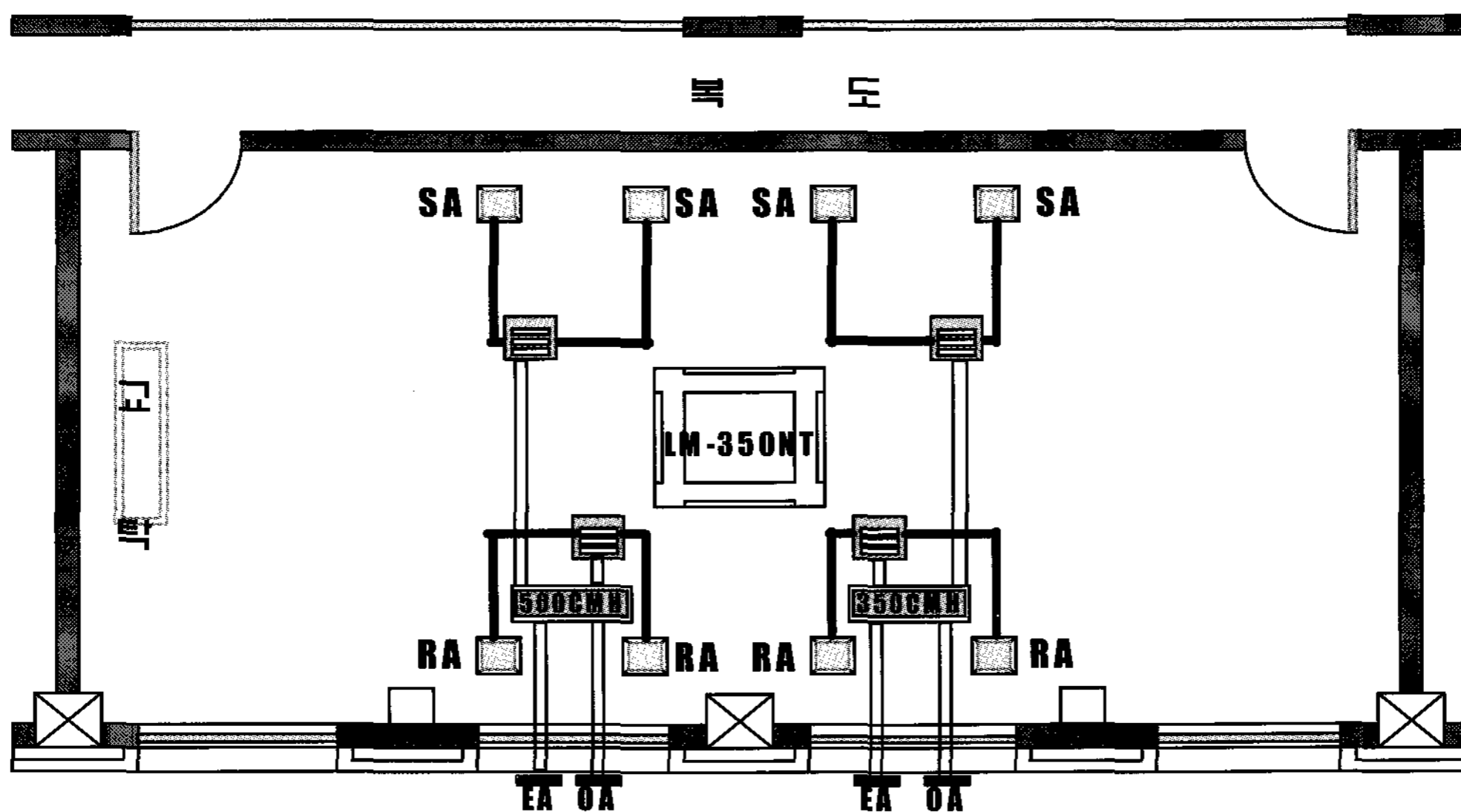


그림 1. 환기장치가 설치된 모습

을 포함한 값을 고려해야 한다. 자연환기량은 다음의 식으로 계산이 가능하다⁽⁵⁾.

$$Q_n(m^3/h) = 2.303 (V/t) \text{Log}_{10} (C_1 - C_0) / (C(t) - C_0) \quad (2)$$

연기서 t 는 제1회 때 측정시간부터 그 측정까지 경과시간(h)을, C_1 은 제1회 때의 측정시간의 실내 공기중의 탄산가스 농도(ppm)를 나타낸다.

한편 ASHRAE Standard 119-1988에서 실의 자연환기량에 따라서 건물의 등급을 분류하고 있는데 학교는 통상 0.5회 정도로 보통수준의 기밀도를 나타내는 것으로 보고되고 있다.^(6,7)

3. 실험장치 및 방법

그림은 부산 모 중학교 2학년 교실에 실험을 위한 환기장치가 설치된 모습이다. 천장형 냉난방 겸용 에어컨이 설치된 교실의 중앙 천장에 천장 매립형 환기장치와 환기장치에 덕트를 통하여 연결된 외기(OA)구와 배기(EA)구를 외벽에 설치하였다.

천장매립 덕트형 환기장치는 350 CMH, 500 CMH의 환기량을 가지는 환기장치를 사용하였고 재실인원은 교사를 포함하여 31명이다.(2005년 교육부 통계에서 교실당 평균학생수는 34.1명으로 지속적인 감소가 예측되고, 또한 OECD 국가 평균 학생수가 21.6명인 점을 고려하여 선정.) 창문형 환기장치의 경우 환기량 500 CMH, 1000 CMH이며 건물의 외측 창틀에 2 m 높이로 설치하였다. 외기의 탄산가스 농도는 학교가 도심에 위치하여 420~430 ppm으로 측정되었고 환기장치의 가동 여부에 따른 탄산가스의 농도변화를 측정하기 위해, 1교시는 환기장치를 가동하지 않은 상태에서 수업하여 실험이 시작되는 2교시의 초기 탄산가스 농도는 약 2,350 ppm 이었다. 실내에서 시간에 따른 탄산가스의 농도변화를 교실중앙 높이 1.1 m에서 실내오염 종합 측정장치(CASELLA,

ICS-500)로 측정하였으며 이 장치는 탄산가스 농도, 온습도 및 실내 기류를 동시에 분석할 수 있다. 비분산 적외선 분석기의 원리는 탄산가스의 적외선 흡수를 이용하여 시료 중에 포함되는 탄산가스의 농도를 측정하는 것이다.

측정범위는 0~3,000 ppm 이며 정도는 10 ppm으로 정밀 측정에 적합하다. 측정시간은 300 초 간격이다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 천장형 환기장치 운전시 탄산가스 농도

교육부의 학교보건법 시행규칙에서 규정하고 있는 환경위생기준에서 교실에 필요한 1인당 환기량은 21.6 CMH이며 교사를 포함한 31인 기준일 경우 최소 670 CMH의 환기량이 필요하다. 또한 이산화탄소에 대한 환경위생기준은 1,000 ppm이하로 규정하고 있다. 본 연구에서는 이를 참조하여 환기량 350 CMH, 500 CMH, 850 CMH에서 환기장치 가동 전 1시간과 가동 후 4 시간 동안의 탄산가스 농도를 측정하였다.

4.1.1 천장형 350 CMH 환기장치에 의한 실험

그림 2는 350 CMH 천장형 환기장치를 대상 교실에 설치하여 가동유무에 따른 탄산가스 농도를 나타낸 것이다. 초기 탄산가스 농도는 2,350 ppm에서 2교시 수업은 체육시간으로 재실인원이 없는 상태에서 측정하여 농도가 감소되었고 휴식 시간 10분 동안 학생들의 입실로 잠시 농도가 증가하다가 3교시는 영어시간으로 재실인원이 없고 환기장치 가동에 따른 효과로 농도가 1,000 ppm 이하로 감소됨을 알 수 있다. 4교시 수업부터 학생들의 입실로 농도의 급격한 증가를 보이다가 점심시간을 기점으로 감소하는 것으로 측정되었다. 이는 점심시간에 교실의 출입문과 창문 개방으로 외기가 교실내로 유입되었기 때문으로 파악되었다. 또한 점심시간 이후의 5교시 수업부터 다시

농도가 증가하였으나 환기장치의 가동으로 인해 초기치 보다 낮은 1,800 ppm이하를 유지하였으며, 환기장치 가동시 수업시간 평균 탄산가스 농도는 1,613 ppm으로 측정되었다.

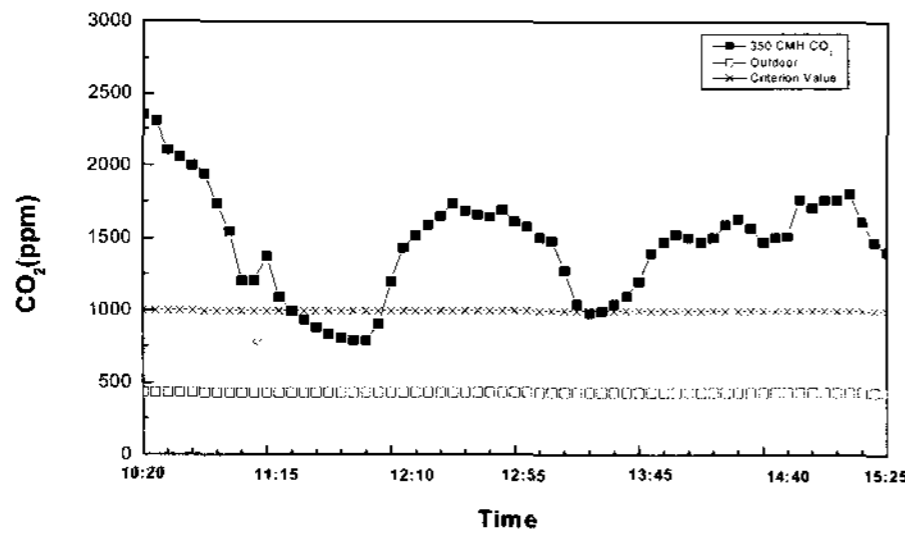


그림 2. 천장형 350 CMH 환기장치 실험결과

4.1.2 천장형 500 CMH 환기장치 실험

그림 3은 500 CMH 용량의 환기장치를 운전할 때 시간에 따른 환기장치의 가동유무에 따라 탄산가스 농도 변화를 나타낸 것이다. 초기 탄산가스 농도는 2,363 ppm로 측정되었다. 2교시 수업은 영어시간으로 재실인원이 없는 상태에서 측정하여 농도가 감소됨을 볼 수 있고 3, 4교시는 수업으로 농도가 증가되었으나 환기장치 가동에 따른 효과로 1,600 ppm이상으로 증가되지 않음을 알 수 있다. 점심시간에는 출입문과 창문의 개방으로 인해 외기가 교실내부로 유입되었고 또한 환기장치의 가동으로 4교시에 비해 탄산가스 농도가 낮아졌다가 다시 5교시 수업부터 농도가 증가하였으나 환기장치의 가동

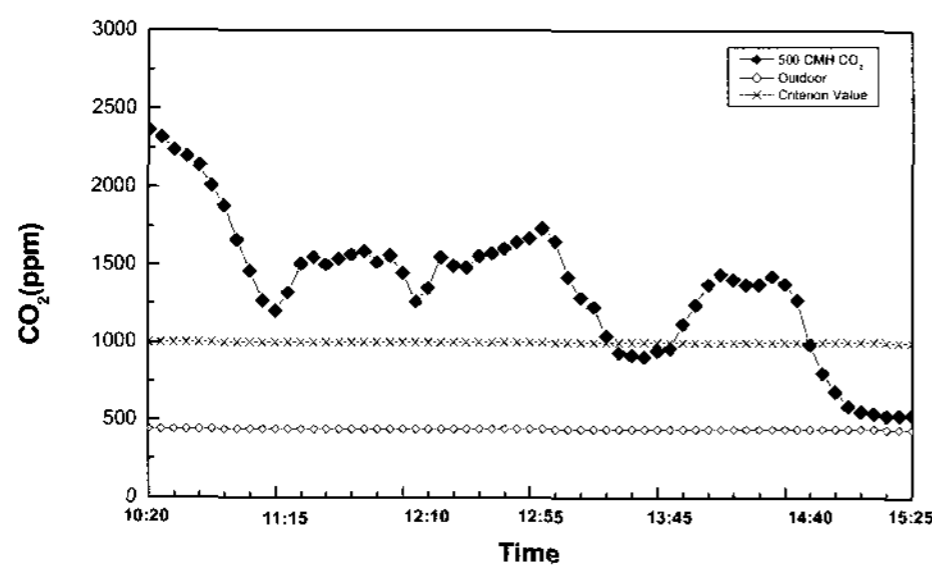


그림 3. 천장형 500 CMH 실험 결과

으로 인해 초기값보다 900 ppm정도가 낮은 1,500 ppm이하를 유지하였다. 6교시에는 체육수업으로 재실인원이 없어 농도가 550 ppm수준으로 낮아졌다. 재실인원이 있는 수업시간을 비교해볼 때 350 CMH 환기장치 보다 40 %정도 환기용량이 증가된 500 CMH 환기장치에서 수업시간 탄산가스농도는 약 120 ppm 감소됨을 알 수 있다.

4.1.3 천장형 850 CMH 환기장치에 의한 실험

그림 4는 350 CMH와 500 CMH 환기장치를 동시에 운전할 때 시간에 따른 환기장치의 가동유무에 따라 탄산가스 농도를 측정해본 것이다. 외기의 탄산가스농도는 426 ppm이었으며, 실험 초기 탄산가스 농도는 2,372 ppm로 측정되었다. 3, 4교시는 재실인원이 있는 상태에서의 수업으로 농도가 증가되었으나 환기장치 가동에 따른 효과로 농도가 1,400 ppm이상으로 증가되지 않음을 알 수 있다. 점심시간에는 출입문과 창문의 개방으로 인해 외부의 공기가 교실내부로 유입되었고 또한 환기장치의 가동으로 농도가 낮아졌다가 다시 5교시 수업부터 농도가 증가하였으나 환기장치의 가동으로 인해 농도는 초기보다 1,000 ppm 정도가 낮은 1,400 ppm 이하를 유지하였다. 재실인원이 있는 수업시간을 비교해볼 때 500 CMH 환기장치 보다 70 %정도 환기용량이 증가된 850 CMH 환기장치에서 탄산가스 농도는 약 180 ppm 정도 감소됨을 알 수 있다.

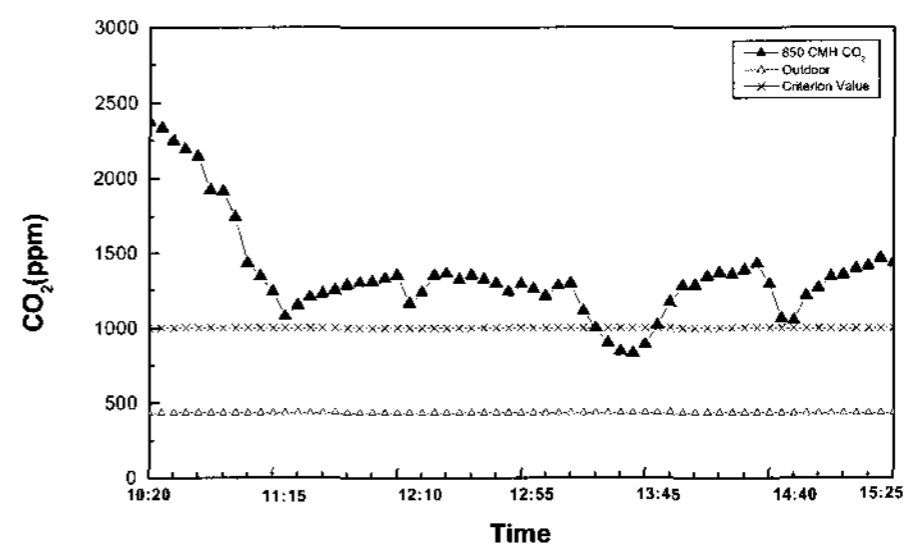


그림 4. 천장형 850 CMH 측정 결과

4.2 창문형 환기장치의 탄산가스 농도 측정

창문형 환기장치의 환기량이 500 CMH, 1,000 CMH 일 때 환기장치 가동 전 1시간과 가동 후 4시간 동안의 탄산가스 농도를 측정하여 그 결과를 분석하였다.

4.2.1 창문형 500 CMH 환기장치에 의한 실험

그림 5는 500 CMH 용량의 환기장치를 대상 교실에 설치하여 시간에 따른 환기장치의 가동유무에 따라 탄산가스농도를 나타낸 것이다. 실험 전 외기 탄산가스농도는 437 ppm이었으며, 실험이 종료된 오후의 탄산가스외기 농도는 446 ppm으로 다소 높게 측정되었다. 환기장치의 가동 유무에 따른 탄산가스농도의 변화를 측정하기 위해, 2교시 환기장치를 가동하지 않은 상태에서 초기 탄산가스농도는 2,275 ppm으로 측정되었다. 2교시 수업은 음악시간으로 재실인원이 없는 상태에서 측정하여 탄산가스농도가 감소됨을 볼 수 있고 휴식시간 10분간 학생들의 입실로 잠시 탄산가스농도가 증가하다가 3교시는 영어시간으로 재실인원이 없고 환기장치 가동에 따른 효과로 농도가 1,000 ppm이하로 감소됨을 알 수 있다. 4교시 수업부터 학생들의 입실로 약 1,800 ppm까지 증가하였고, 점심시간에는 출입문과 창문의 개방으로 인해 외기의 신선한 공기의 교실내부 유입과 환기장치의 가동으로 농도가 낮아졌다. 5교시 수업부터 탄산가스농도가 다시 증가하였으나 환기장치의 가동으로 인해 탄산가스농도는 초

기보다 낮은 1,700 ppm이하를 유지하였다. 같은 환기용량인 천장형 500 CMH 환기장치와 비교하여 보면 재실인원이 있는 경우의 탄산가스농도가 100 ppm 정도 높게 측정됨을 알 수 있다.

4.2.2 창문형 1,000 CMH 환기장치 실험

그림 6은 1,000 CMH 용량의 환기장치를 설치하여 시간에 따른 탄산가스 농도 변화를 측정한 것이다. 오전의 외기 탄산가스농도는 420 ppm이었으며, 실험이 종료된 오후의 탄산가스 외기 농도는 445 ppm으로 다소 높게 측정되었다. 이날은 학교의 오후 행사 계획이 있어 수업을 평소보다 25분 앞당겨 실시하였고 수업시간도 45분에서 40분으로 단축하였다. 이로 인하여 측정은 3 교시 환기장치를 가동하지 않은 상태에서부터 시작하였고 초기 탄산가스농도는 2,270 ppm으로 측정되었다. 3교시 수업은 체육시간으로 재실인원이 없는 상태에서 탄산가스 농도가 감소되었고 4교시는 영어시간으로 재실인원이 없고 환기장치 가동에 따른 효과로 농도가 530 ppm정도까지 감소됨을 알 수 있다. 점심시간에는 학생들의 입실로 농도가 다소 증가하였다가 교실문과 창문의 개방으로 인해 외기의 교실내부 유입과 환기장치의 가동으로 탄산가스농도가 다시 감소하는 것으로 측정되었다. 5교시 수업부터 탄산가스 농도가 증가하였으나 환기장치의 가동으로 인해 농도는 초기값보다 낮은 1,200 ppm이하로 측정되었

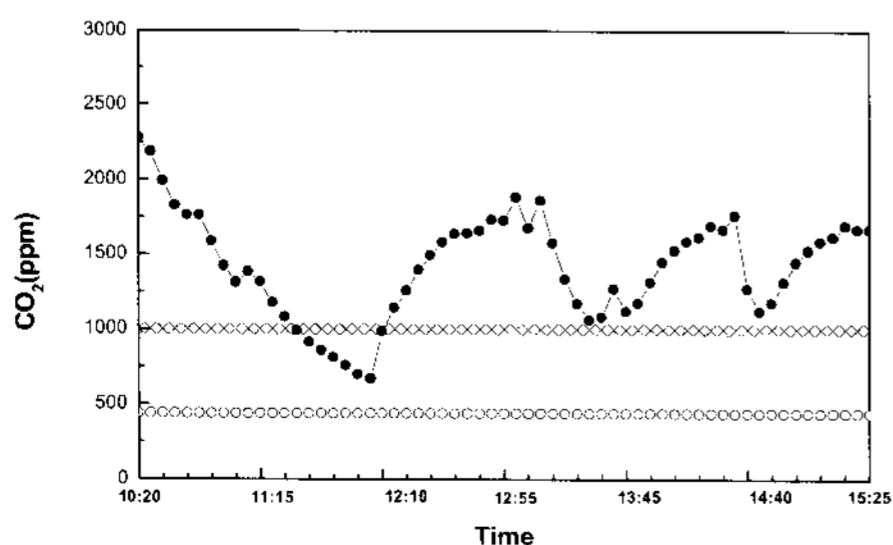


그림 5. 창문형 500 CMH 측정 결과

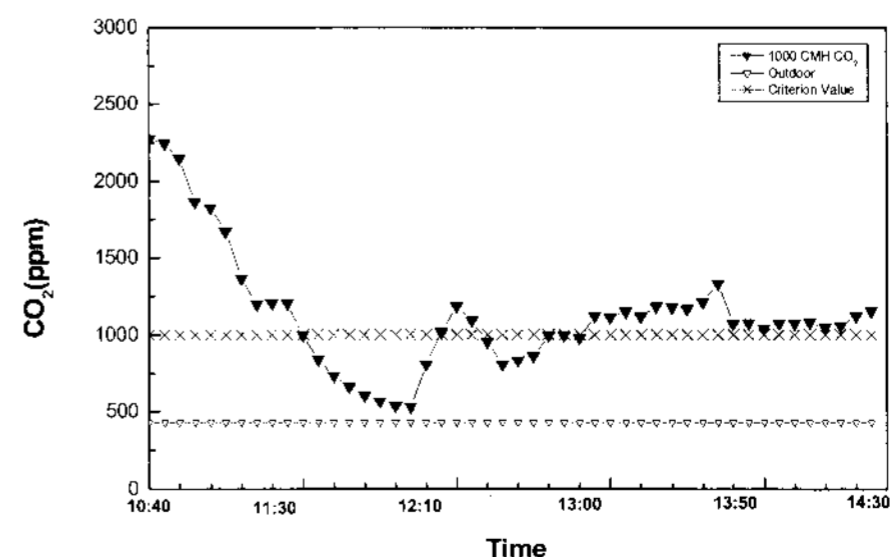


그림 6. 창문형 1,000 CMH 측정 결과

고, 6교시 수업 때에는 탄산가스농도가 더욱 낮아져 1,100 ppm이하를 유지하였다.

표 1에 환기조건별 실내 탄산가스 농도를 요약하여 나타내었다.

표 1. 교실내 탄산가스 농도 측정결과 종합

환기량 (CMH)	재실 인원 (명)	탄산가스 농도(ppm)					
		외기 평균	환기 장치 OFF	환기장치 ON			
				최대	수업 평균	전체 평균	
천장형	350	31	430	1,847	1,812	1,613	1,384
	500	30	440	1,953	1,735	1,490	1,249
	850	31	435	1,964	1,466	1,315	1,239
창문형	500	31	440	1,749	1,882	1,582	1,361
	1000	31	435	1,754	1,216	1,114	989

5. 실내 오염농도 모델링

창문형 500 CMH 및 천장형 850 CMH 용량의 환기장치를 기준으로 실내에서의 초기 농도 감소와 수업시 재실자에 의한 증가를 모델링 하였다. 이때 실내에서 탄산가스 발생량(M)은 KSF-2603에 규정된 1인당 탄산가스 발생량과 수업에 참석한 인원을 고려 산출하였다. 휴식시 성인의 탄산가스 발생량은 6.6 L/min이므로 중학생은 성인의 75%를 적용하여 4.95 L/min (0.297 CMH)을 적용하였다.

기계환기량(Qv)는 장치의 공칭환기량을 기준으로 하였고, 자연환기량(Qn)은 ASHRAE Standard 119-1988 규격에서 증기밀로 가정하여 시간당 0.5 회 (85.05 CMH)를 기준으로 하였다.

5.1 창문형 500 CMH 모델링

그림 7은 창문형 500 CMH 제품이 설치되었을 경우 완전혼합을 가정하여 실내 농도를 모델링한 예측값을 측정값과 비교한 결과이다. 90분 운전시 실내 탄산가스 농도가 약 750 ppm으로 예측값에

접근하는 결과를 보였고, 측정치의 감소 추이를 보아 운전시간을 증가하면 더욱 예측값에 접근하는 결과가 기대된다. 실내에 재실자가 있는 농도 증가 구간에서는 실내의 농도는 실험치보다 낮게 예측되었다.

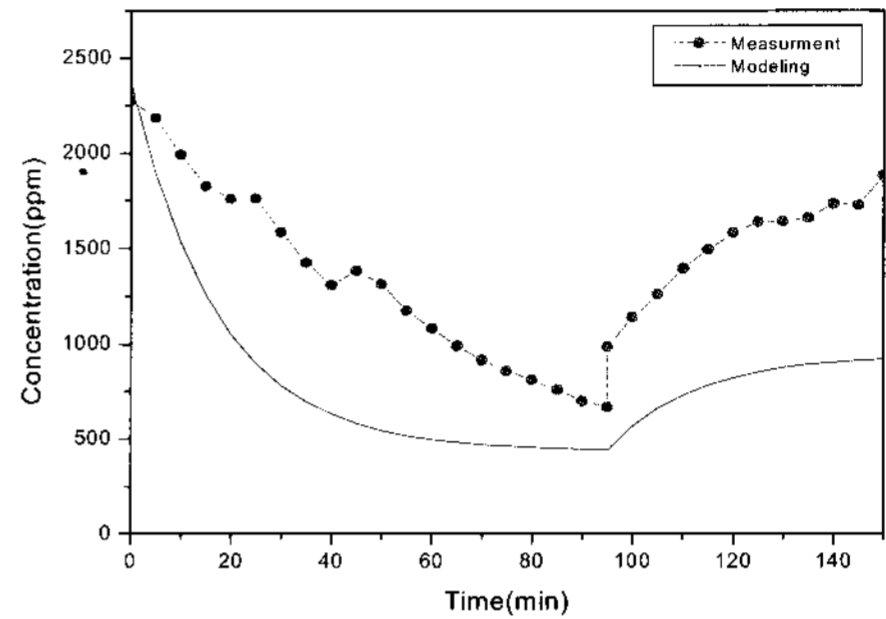


그림 7. 창문형 500 CMH 모델링

5.2 천장형 850 CMH 모델링

그림 8은 천장형 850 CMH 모델링 결과이다. 농도 감소 구간에서는 500 CMH 대비하여 예측치와 실측치 모두에서 실내 탄산가스 농도 감소가 빠르게 진행되고 재실자 입실 후 농도 증가 구간에서는 천천히 농도가 상승되는 결과를 보인다. 약 50분 운전한 후 실내농도 예측치는 약 500 ppm으로 실측치 약 1000 ppm 대비하여 차이를 보이고 있으나 초기 농도 감소 추세로 보아 운전시간이 증가할수록 예측치에 더욱 접근하는 결과를 보일 것이 예상된다. 이론치와 실측치의 차이가 발생하는 요인으로는 초기 농도를 상승시킨 상태에서 환기장치의 실제 환기효과가 실 전체에 잘 미치지 못하고 또한 실제로 제품의 환기량이 덕트 경로의 저항을 받아 환기량이 감소되어 초기의 농도 감쇄가 미흡하다. 실내의 흡입구와 배기구의 위치를 고려하여 완전혼합에 가까운 조건을 만들어 주고, 환기장치를 중심으로 한 급배기 덕트 경로의 저항을 줄여 환기장치에서 공급되는 공기의 풍량을 최대로 구현하면 실측한 탄산가스 농도가 모델링 결과에 더욱 근접할 것으로 기대된다.⁽⁸⁾

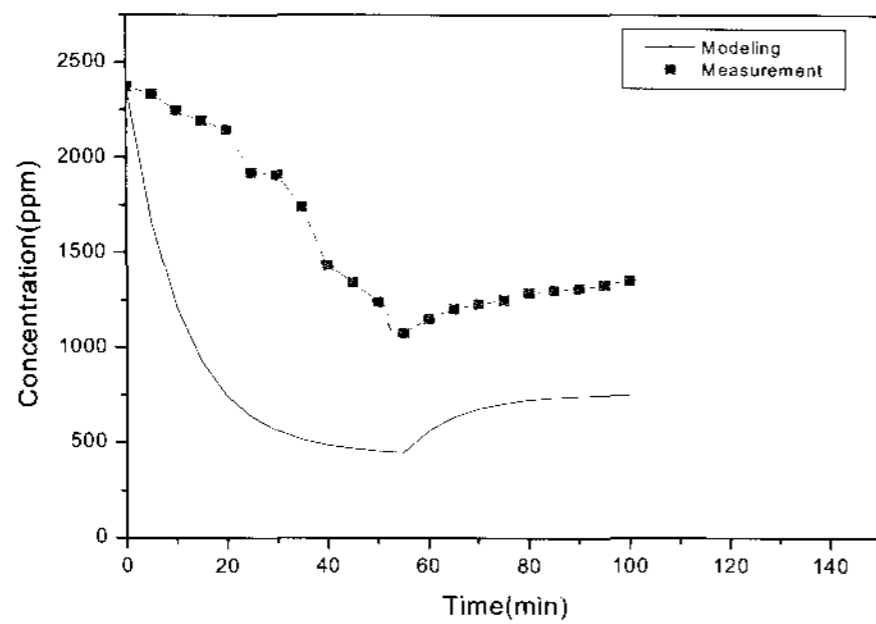


그림 8. 천장형 850 CMH 모델링

6. 결 론

재실자가 있는 실제 중학교 교실을 모델로 하여 실내 공기의 환기 상태를 평가하는데 지표로 사용되는 탄산가스의 농도의 시간에 따른 변화를 측정하여 향후 학교 교실의 공기질 개선을 위한 방안을 도출하고 모델링을 통한 예측값을 실험값과 비교하였는데 그 결과는 다음과 같다.

1) 천장형 환기장치 가동시 350 CMH의 환기량의 경우 수업시간의 평균 탄산가스농도는 가동하지 않았을 때와 비교하여 약 230 ppm 낮아졌고, 모든 측정시간의 평균 탄산가스농도와 비교하면 460 ppm 정도 낮아졌다.

500 CMH 천장형인 경우 각각 약 460 ppm과 700 ppm의 탄산가스 농도가 감소하였고, 850 CMH 용량의 천장형 제품의 경우 각각 약 650 ppm 및 720 ppm의 탄산가스 농도 감소가 나타났다.

2) 창문형 환기장치를 가동하였을 경우 환기량 500 CMH일 때 최대 탄산가스농도는 1,882 ppm이고 수업시간의 평균값은 1,582 ppm, 모든 측정시간의 평균값은 1,361 ppm이었다. 환기량 1,000 CMH인 창문형 환기장치를 가동하였을 경우 최대 탄산가스농도는 1,216 ppm이고 수업시간의 평균값은 1,114 ppm, 모든 측정시간의 평균값은 989 ppm이었다.

3) 실내 농도가 감소하는 구간에서는 실측값은 시간이 경과함에 따라 완전혼합을 가정한 이론적 예측값에 접근하는 결과를 보였고 덕트 경로의 압력손실을 줄이고 입출구 위치를 적절하게 선정하는 것이 중요하다. 재실자에 의해서 실내 오염농도가 상승하는 경우는 전반적으로 유사한 농도 변화 형태를 보였다.

참 고 문 헌

1. 환경공학 교과서 편찬위원회, 1996, "환경공학 교과서" 일본 장국사
2. 강태욱 외 1, 2005, Analysis of Ventilation Performance Using a Model Chamber, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 29, No. 7, pp. 736~743, 2005.11
3. 강태욱, 2005, 환기에 의한 실내 부유입자 제거 특성에 관한 연구, 태양에너지학회 논문집, Vol 25, No.4, 2005.12
4. P. J. Drivas, P. G. Simmonds, and F. H. Shair, "Experimental Characterization of Ventilation Systems in Building" Environmental Science Technology, Vol. 6, No 7. 1972
5. 한국공업규격, KSF-2603
6. ASHRAE Standard 119-1988, American society of heating, ventilating and air-conditioning engineers.
7. 김상희, 최석용, 김용경, 이정재, 2005, "신축 교실의 친환경 도료 사용유무에 따른 실내공기질 평가", 대한설비공학회 2005 하계 학술발표대회 논문집 pp. 115~120
8. 조현욱, 강태욱, 장태현, 2004, "실내 공기질 개선을 위한 환기기술" Proceedings The 5th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology 용평리조트, 2004. 7. 1~3