

실내공기오염 및 환기대책

Indoor Air Pollution and Ventilation System

이 정 재

J. J. Yee

한양대학교 건설연구소

선임연구원



- 1963년생
- 실내공기분포 수치시뮬레이션 및 환기설비 등에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

최근 에너지 절약을 위하여 건물의 단열성능 및 기밀성능이 향상되고 있어 자연환기가 어렵게 되고, 에너지 파동 이후 건물의 에너지 절약을 위한 방안으로 신선 외기도입량을 감소시키므로 실내공기질(Indoor Air Quality, 이하IAQ)을 더욱 악화시키고 있다. 따라서, 기계적 설비 등에 의하여 효율적으로 환기를 실시하지 않을 경우 실내 공기오염의 정도는 매우 심각한 문제가 될 수 있다.

실제로 환기를 적절하게 실시하지 않는 건물에서 재실자가 장시간 거주할 경우, 불쾌감을 느끼고 두통, 코, 목의 이물감, 기침, 피부의 건조나 가려움증, 현기증이나 구토, 피로감 등의 증상을 일으키는 빌딩병 증후군(Sick Building Syndrome, 이하SBS) 현상이 많이 발생하고 있어, IAQ에 관한 문제는 세계적인 관심을 갖는 분야가 되었다.

본 고에서는 실내발생 오염물의 특성 및 기준 등을 파악하고 실내공기질의 개선을 위한 방안으로서 환기에 대하여 검토하였다.

2. 실내발생 주요 오염물질의 특징 및 환경기준

2.1 실내공기오염 및 발생원

실내공기오염은 온도, 습도, 기류, 복사열 등의 온열환경요소와 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물 등의 가스성분 및 공기중에 떠다니는 부유분진, 각종 미생물 등의 오염물질요소 등의 제요소가 복합적으로 작용하여 진행된다.

실내공기오염의 진행과정을 구체적으로 살펴보면, 그림 1에서와 같이 먼저 재실자들이 작업환경하에서 산소를 마시고 탄산가스를 배출하고 있으며, 흡연 및 제활동을 하면서

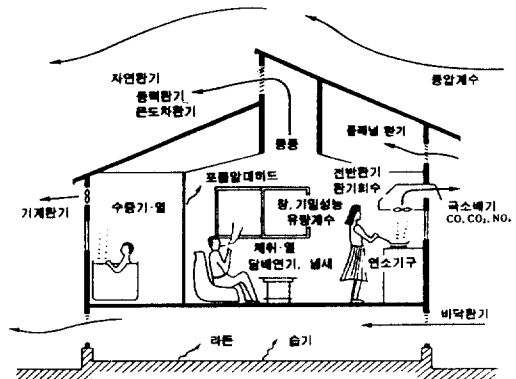


그림 1. 실내공기질 개요

많은 오염물질을 발생시키고 있다. 더우기 최근에는 새로운 건축자재가 개발 사용됨에 따라 포름알데히드(Formaldehyde), 석면(Asbestos), 라돈(Radon) 등과 같은 의외의 오염물질이 실내에 방출되고 있으며, 사무실내에서도 컴퓨터, 팩시밀리, 복사기 등의 사무기기 사용에 따라 다양한 오염물질이 발생되고 있다.

표 1은 실내에서 발생하는 주요 오염물질을 발생원에 따라 나타낸 것으로, 오염물질은 건물자체 뿐만 아니라, 사람의 몸, 사람의 활동 등에서 다양하게 발생하는 것을 알 수 있다.

표 1. 발생원에 따른 주요 실내오염물질

발 생 원		실내오염물질
인 체	호흡 재채기, 기침, 대화 피 부	CO ₂ , 수증기, 냄새 세균입자 피부조각, 비듬, 암모니아, 냄새
	의 류 화장품	섬유, 모래먼지, 세균, 곰팡이, 냄새 각종 미량물질
사 람 의 활 동	흡 연	분진, 타아르, 니코틴, 각종발암물질
	보행 등의 동작 연소기기 사무기기	모래먼지, 섬유류, 세균 CO ₂ , CO, NO ₂ , SO ₂ , 탄화수소, 매연, 냄새 암모니아, 오존, 용제류
건 축 자 재	합판류, 내화재	포름알데히드, 아스베스 토스, 유리섬유
	단열재, 시공 발생물	라돈, 접착제, 용제, 곰팡이, 세균
유 지 관 리	작업, 재료	모래먼지, 분진, 섬유세 제, 용제, 곰팡이, 세균

2.2 주요 실내오염물질의 특성

1) 이산화탄소(CO₂)

이산화탄소는 탄소의 완전 연소로 방출되는 무취, 무미, 무색의 기체이며, 실내에서는 주로 물질의 연소작용과 인체의 신진대사(호흡 등)에 의해 발생된다. 이산화탄소는 그 자체가 독성으로 문제가 되는 고농도는 일반환경에서는 존재하지 않으므로 일반적으로 인체에 무해한 것으로 판단된다.(표 2 참조).

일반적으로 이산화탄소는 실내공기의 환기 상태를 평가하는데 지표로 사용되며, 이는 이산화탄소 농도가 그 자체의 유해성 보다는 실

내공기의 오염정도가 이에 비례하여 증가한다는 설에 근거한 것이다. 우리나라를 비롯한 세계 각국에서는 대부분 실내 이산화탄소 농도를 0.01%(1000ppm)으로 규정하여 실내공기환경을 관리하고 있다. 이는 실내에서 이산화탄소의 발생이 주로 재실자들의 호흡에 의하여 발생하게 되므로, 실내의 종합적인 오염정도를 평가하는 척도로 사용될 수 있기 때문이다.

표 2. 이산화탄소 농도와 인체への 영향

농도(%)	인 체 에 의 영 향
0.1	호흡기, 순환기 등의 기능에 영향이 나타난다.
4	이명 현상, 두통, 혈압상승 등의 징후가 나타난다.
8~10	의식혼미, 경련 등을 일으켜 호흡이 멎는다.
20	중추장해를 일으키며, 생명이 위험해진다.

2) 일산화탄소(CO)

일산화탄소는 무색, 무취의 기체로 각종 유류, 석탄과 같은 탄소를 포함한 모든 물질의 불완전 연소과정에서 발생된다. 표 3에서 알 수 있듯이, 일산화탄소는 적은 농도로도 인체에 치명적인 영향을 주는 가스로, 최근 산업배기물, 차량의 증가에 의한 배기가스 등으로 인하여 대기의 일산화탄소 오염농도가 가중되고 있다. 실내에서는 연소기구로 사용하는 가스렌지, 커피포트 등의 사용에 의해 발생하며, 흡연에 의해서도 상당량 발생되고 있다. 특히 최근 건물의 기밀성 향상은 일산화탄소를 발생하기 쉬운 상태로 만들고 있다.

표 3. 일산화탄소 농도와 인체への 영향

농도(ppm)	폭로시간	인체への 영향
5	20분	신경계통의 반사작용 변화
30	8시간이상	시각, 정신기능 장애
200	2~4시간	앞머리 무거움, 가벼운 두통
500	2~4시간	강렬한 두통, 무기력, 시력장애, 허탈감
1,000	2~3시간	맥박상승, 경련을 수반하는 실신
2,000	1~2시간	사망

3) 분진

분진은 대기중에 부유하거나, 하강하는 미세한 고체상의 입자성 물질을 말하는 것으로, 그 농도뿐만 아니라, 크기, 형태, 단단함, 화학적 성질에 따라 인체에 미치는 영향이 달라진다고 알려져 있다. 실내에서 분진은 흡연 및 인간의 작업활동 등에 의해 주로 발생하며 최근 환기가 제대로 되지 않는 지하주차장, 지하상가 등이 일반화되면서 더욱 문제가 되고 있다. 표 4는 분진의 질량농도에 따른 인체에 영향을 나타낸 것이다.

표 4. 분진의 질량농도와 인체에의 영향

농도(mg / m ³)	인체에의 반응	비고
0.0025~0.05	기본적인 농도	0.1mg / m ³ 이상이면 사망율이 증가함
0.075~0.1	다수인이 만족하는 농도	
0.1~0.14	시정 감소	
0.15~0.2	다수인이 '더럽다'고 느끼게 되는 농도	
0.2 이상	다수인이 '아주 더럽다'고 느끼게 되는 농도	

4) 석면

일반적으로 아스베스토(asbestos)라 하면 석면을 말하는데, 이는 단축과 장축의 비가 1:3 이상인 선형의 분진을 말한다. 석면은 강한 침상구조로서 단열성, 흡음성, 절연성, 내화성, 내열성이 좋아서 주로 단열재나 흡음재 또는 내부 마감재료로 많이 사용되어 왔으나, 최근 석면의 유해성이 알려지면서 이에 대한 사용이 강력히 규제되고 있다. 미국에서는 석면을 산업계가 직면하고 있는 가장 위험한 발병물질로 구분하고 있으며, 석면을 취급하고 있는 산업장, 특히, 조선소에서 일하는 근로자의 경우 폐암에 의한 사망율이 매우 높은 것으로 보고되고 있다.

5) 라돈(Radon)

라돈은 방사성 기체로서 반감기 3.6일의 방사능 물질이다. 라돈은 방사선인 α붕괴에 의하여 라듐의 낭핵종(radon daughter)을 생성하며, 이 낭핵종은 기체가 아닌 미세한 입자로 먼지에 부착하여 폐에 흡입되어 폐포나 기관지에 부착해 α선을 방출하기 때문에 폐질환

의 발생율을 높이는 것으로 보고되고 있어, 최근 구미각국에서 이에 의한 실내공기오염이 중요시되고 있다.

6) 포름알데히드

포름알데히드(HCHO)는 무색의 수용성 기체로, 주로 실내에서 발생하는 오염물질로서 건축자재, 단열재, 가구, 가정용품 등의 주요 발생원이다. 포름알데히드 성분은 건축자재에 광범위하게 쓰이는 페놀계 단열재, 아스테이트계 단열재, 합판, 섬유, 가구 등의 접착제에 함유되어 있다. 포름알데히드가 함유된 건축자재는 수년동안 지속적으로 포름알데히드 기체를 실내로 방출하며 방출량은 시간에 비례하여 서서히 감소하고 특히, 습도가 높을 때 방출량이 증가하는 특성을 지닌다. 일반적으로 포름알데히드는 낮은 습도에서 단시간 노출되었을 때 눈, 코, 목 등에 가려움을 느끼고, 장시간 노출되었을 경우에는 기침, 구토, 어지러움, 두통, 불면증, 피부질환 등을 유발하는 휘발성 유기화합물(VOCs)의 일종이다.

7) 미생물

실내에서 미생물(박테리아, 바이러스, 균류)이 서식하고 있으며, 이러한 미생물들은 고습한 환경에서 증식을 하므로 환기가 불충분하고 질이 나쁜 공기가 재순환되는 경우에 농도가 증가하게 된다. 미생물은 전염성 질환이나 알레르기 반응을 유발하며 일반가정에서는 애완동물 및 내화재, 카펫 등에서도 쉽게 발견될 수 있다. 공중세균이 특히 문제가 되는 장소는 약품, 식품공장, 병원, 창고 등이다.

그외, 복사기, 공기청정기 등에서 발생하는 오존가스, 석탄이나 석유계의 연료를 사용할 때 발생하는 아황산가스, 담배연기 등의 오염물질이 있다.

2.3 실내공기환경 기준

실내공기오염은 심각하게 진행된 경우를 제외하고는 일반적으로 인지하기 어렵기 때문에, 오염의 규제기준을 정하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 그러나, 공기오염은 실제로

인체에 영향을 미치기 때문에 허용치(기준치)를 정해서 공기의 오염상태를 관리하는 것은 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 실내공기환경의 기준은 재실자의 건강과 안전의 관점에서 정하고 있으나, 실내환경에서는 재실자의 건강과 안전 외에도 쾌적성 및 작업의 능률성을 고려하여 기준을 제시할 필요가 있다. 실내환경의 쾌적성은 재실자에 대한 앙케이트 조사를 통해 조사되며, 앙케이트 조사시에는 실내공기환경의 물리적인 요소와 재실자의 심리적인 반응사이에 어떠한 상관관계를 갖는가 하는 문제도 조사되어야 한다. 따라서, 실내공기환경의 기준을 설정하기 위해서는 실내공기환경 전문가와 보건·의학전문가가 공동으로 참여하여 물리적으로에 대한 쾌적영역 설정, 앙케이트 조사 및 오염물질에 대한 인체의 반응조사 등에 관한 연구를 수행하여야 할 것으로 판단된다.

국내에서는 공기조화를 실시하는 건물의 실내공기 허용기준을 건축법 시행규칙에, 대기 에 관한 환경기준을 환경보존법에 정하고 있으며, 표 5에 이를 나타낸다.

표 5. 국내 실내공기환경 기준

구 분	실내공기환경	대 기 환 경
	건물법 / 공중 위생보건법	환경보전법
상대습도	40~70%	-
기 류	0.5%이하	-
부유분진 (TSP)	0.15[mg/m ³]이하	연평균치 0.15[mg/m ³]이하 24시간 평균치 0.3[mg/m ³]이하
일산화탄소 (CO)	10[ppm]이하	1개월 평균치 8[ppm]이하 8시간 평균치 20[ppm]이하
이산화탄소 (CO ₂)	1,000[ppm]이하	-
이산화질소 (NO ₂)	-	연평균치 0.05[ppm]이하 1시간 평균치 0.15[ppm]이하
오존 (O ₃)	-	연평균치 0.02[ppm]이하 1시간 평균치 0.1[ppm]이하
아황산가스 (SO ₂)	-	연평균치 0.05[ppm]이하 24시간 평균치 0.15[ppm]이하
탄화수소류 (THC)	-	연평균치 3[ppm]이하 1시간 평균치 10[ppm]이하

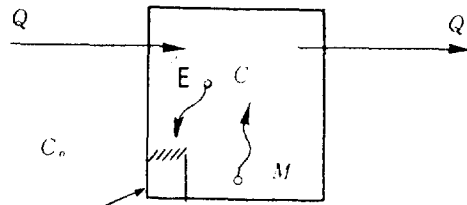
3. 실내공기오염과 환기

3.1 환기의 중요성

건물에서 실내의 오염된 공기를 신선한 외기와 교체하는 것을 환기라 하며, 신선외기가 실내의 오염물질과 완전히 혼합된다고 가정하면(즉, 一様擴散), 그림 2에서 실내오염물 농도분포는 균일하므로 질량보전의 법칙을 이용하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$V \frac{dc}{dt} = -Q(c - c_o) + M - E \quad (1)$$

- 여기서, V : 실내체적[m³]
 c, c_o : 실내오염물 농도 및 유입 공기 농도[mg/m³]
 Q : 환기량[m³/h]
 M : 오염물질 발생량[mg/h]
 E : 공기청정 장치 등에 의한 오염물질 제거량[mg/h]



공기청정기

그림 2. 완전확산에 근거한 실내농도 변화

상식의 물리적 의미를 살펴보면, 좌변은 시간에 따른 실내 오염물질의 변화를 나타내며, 우변 제1항은 유입공기에 의한 실내공기의 희석, 제2항은 실내에서의 오염물질 발생, 제3항은 공기청정 기술을 이용한 실내오염물질의 제거를 나타낸다.

건물에서 실내의 오염정도를 나타내는 지표로 각종 오염물질의 농도가 제시되어 있으며, 실내가 오염되었을 경우 오염물질의 농도레벨을 어떤 방법으로 낮추어야 하는가에 대해 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 식(1)로부터 기본적으로 실내공기의 오염농도를 제어하는 방안으로 크게 다음의 3가지 사항을 생각할 수 있다.

첫째, 우변 2항에서 알 수 있듯이 실내오염물 농도를 낮추기 위해 실내오염물의 발생원 자체를 제거 또는 줄이는 방안을 강구한다. 그러나 실내공기오염은 건축자재, 건물내에 놓여지는 각종의 기구 및 인간의 활동 등에 의해 진행되므로 오염원이 없는 공간을 만드는 것은 현실적으로 불가능하므로, 제어에 한계가 있다.

둘째, 우변 3항으로 부터, 실내의 오염물질을 공기청정 장치에 의하여 효율적으로 제거하는 방안이 필요하다. 현재 대부분의 건물에서는 공기조화 시스템이 설치되어 외기의 오염된 공기를 공조기의 에어필터를 거쳐 정화되어 실내로 공급되고 있으며, 실내로 재순환되는 공기에 대해서도 디퓨저 부분에 필터를 설치하여 정화시키고 있다. 더우기 최근에는 각종의 공기청정기가 개발되어 주택, 사무소 등에서 사용되고 있다.

세번째 방안으로는 우변 1항으로 부터 실내의 오염된 공기를 외부의 신선한 공기를 도입함으로써 희석시키는 환기가 필요하며, 환기는 실내공기의 제어 방법으로 가장 중요하고 효과적인 방법이라 할 수 있다.

환기에는 재실하는 인간에게 쾌적하고 안전한 공기환경을 유지하는 것을 목적으로 하는 인간환기(Human Ventilation)와 제품의 제조, 보전을 주목적으로 하는 프로세스환기(Process Ventilation)가 있다. 일반적인 건

축물의 환기는 인간환기이지만 공장 등에서는 양자가 병용되는 일이 많다. 또한 환기방식에는 그 구동력에 따라 공기의 밀도차 및 풍압이 구동력이 되어 발생하는 자연환기(Natural Ventilation) 방식과 환기팬이나 송풍기 등의 기계력을 이용하는 기계환기(Mechanical Ventilation) 방식이 있으며, 일반적으로 사무소 건물에서는 후자의 기계환기방식을 채택하여 강제적으로 환기를 실시하고 있다.

3.2 필요환기량

환기의 목적은 실내공기오염을 허용치 이하로 유지하기 위하여 실내로 깨끗한 공기를 공급하고 더러워진 공기를 실외로 배출시키는 데 있다. 이때, 실내공기의 오염레벨을 실내환경의 쾌적성 측면에서 바람직한 한도까지 낮추는데 필요한 외기도입량을 필요환기량(Ventilation Requirement)이라 한다.

그림 3에 전형적인 건물의 환기시스템을 나타내나, 외기도입량의 증가는 실내의 공기오염을 외기에 의해 희석시킬 수 있어 실내공기의 오염레벨을 낮추는 측면에서는 좋으나, 공조기의 송풍동력 등이 증가되게 되므로 결국 건물에서의 에너지 소비가 많아지게 된다. 따라서 적절한 실내의 공기환경을 유지하면서 에너지를 절약할 수 있는 최적 외기 도입량의 설정이 필요하다.

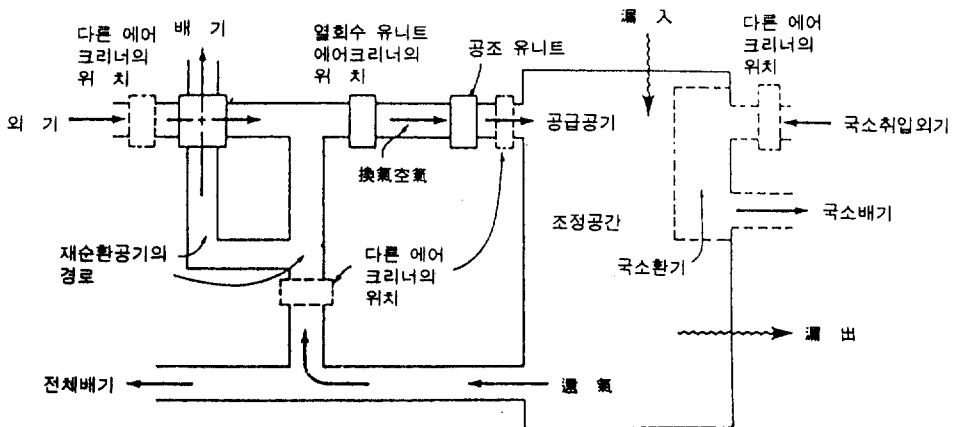


그림 3. 전형적인 환기시스템

필요환기량은 환기의 목적에 따라서 그 산정 방법이 달라지나, 본 고에서는 탄산가스 허용치에 의한 필요환기량 산정법에 대해서 설명한다.

식(1)에서 Q , M , c_0 은 일정하다고 가정하고 초기농도 $c=c_s(t=0)$ 로 하여 미분방정식을 풀면(단, $E=0$),

$$c=c_0+(c_s-c_0)e^{-\frac{Q}{V}t}+\frac{M}{Q}(1-e^{-\frac{Q}{V}t}) \quad (2)$$

로되고, 정상상태($t \rightarrow \infty$)에서 실내농도는 다음과 같다.

$$c=c_0+\frac{M}{Q} \quad (3)$$

식(3)으로부터, 실내공기 탄산가스 농도를 c 로 유지하기 위한 필요환기량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q=\frac{M}{c-c_0} \quad (4)$$

따라서, 필요환기량은 실내에서 발생하는 오염물질량, 실내로 유입되는 공기의 농도 및 실내 허용농도를 알면 산정할 수 있다.

3.3 적정 외기도입량 설정의 필요성

전술한 바와 같이 외기도입량(필요환기량)의 증가는 실내의 공기오염을 외기에 의해 희석시킬 수 있어 실내공기의 오염레벨을 낮추는 측면에서는 좋으나, 공조기의 송풍동력 등이 증가되게 되므로 에너지 소비량이 증가되게 된다. 따라서 적절한 실내의 공기환경을 유지하면서 에너지를 절약할 수 있는 적정 외기도입량의 설정이 필요하다.

일반적으로 건물에서 공조를 실시할 경우, 식(4)에 의하여 개략적으로 외기도입량을 설정하게 되고, 이에 따라 공조기를 운전하고 있다. 그러나, 실제로 외기도입량은 건물의 사용목적, 공조시스템의 설계 및 시공상태, 재실자 수 등에 따라 달라지게 되므로, 그 건물의 용도에 적합한 외기도입량의 설정이 필요하다.

표 6은 사무소건물의 냉방기간 중, 1인당 외기도입량을 20과 30[m³/h·人]으로 조절하였을 때 실내 오염물질의 변화를 측정한 값을 나타내고 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 1인당 외기도입량을 30[m³/h·人]로 설정하였을 경우 실내 공기환경요소의 대부분은 건축법규 기준치 이내로 유지되고 있으나, 1인당 외기도입량이 20[m³/h·人]인 경우의 실내 CO₂ 가스농도는 평균 1068.2[ppm]이며 최대 1280[ppm]까지 나타나 기준치를 초과하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 건물의 경우, 1인당 외기도입량은 30[m³/h·人] 전후가 적절할 것으로 판단되나, 용도가 다른 건물, 즉, 백화점, 병원 등에서 이와같은 공기환경을 유지하기 위해서는 더욱 많은(또는 적은) 외기도입량이 필요할 것이라고 생각된다. 따라서, 실내 공기질을 효율적으로 설계, 또는 관리하기 위해서는 건물의 용도에 적합한 외기도입량을 설정·공급하여야 하며, 이를 위해서는 각종의 건물에 있어서, 많은 측정과 분석을 통하여 용도별 적정 외기도입량을 설정하는 것이 필요하다.

표 6. 외기도입량과 오염물질

()안은 최소치와 최대치를 나타낸다.

1인당 외기도입량	온도 [°C]	상대습도 [%]	글로벌온도 [°C]	기류속도 [m/s]	부유분진 [mg/m ³]	CO가스 [ppm]	CO ₂ 가스 [ppm]	
20m ³ /h·人	실내	25.8 (24.6~27.8)	46.6 (37.0~60.0)	26.3 (25.7~26.8)	0.09 (0.02~0.25)	0.013 (0.002~0.034)	1.46 (0.60~1.90)	1068.2 (443.0~1280.0)
	외기	28.3 (25.6~29.4)	77.0 (67.0~88.0)	.	.	0.020 (0.018~0.022)	1.18 (0.80~1.70)	474.5 (397.0~507.0)
20m ³ /h·人	실내	26.4 (24.9~28.6)	53.3 (48.0~68)	26.6 (26.2~27.5)	0.07 (0.01~0.20)	0.012 (0.001~0.023)	1.24 (0.60~1.80)	772.5 (480.0~1000.0)
	외기	32.2 (30.1~34.8)	57.6 (49.0~63.0)	.	.	0.012 (0.006~0.019)	1.11 (0.70~1.60)	427.9 (385.0~453.0)

4. 환기에 의한 실내공기질 환경의 개선

4.1 환기와 환기효율

전 장에서는 실내오염물질의 유동을 완전확산에 근거하여 환기의 개념, 필요환기량 산정법 등에 대하여 고찰하였다. 현재 대부분의 환기방식은 완전확산의 가정에서 행해지고 있으며, 환기기준도 완전확산의 가정하에서 만들어 지고 있다. 그러나 이 경우 환기효과는 실내체적에 대한 환기량으로만 평가되고, 오염물의 발생위치 및 급·배기구 등의 위치에 따른 기류구조설계의 차이에 따른 환기효율은 평가되지 않는다.

그러나, 실제 오염물 농도분포는 오염물질이 기류에 의해 전송되는 것에 의해 생기게 되며, 오염물질의 공간적 편재에 의하여 불균등하게 확산된다. 이와 같은 불균등 확산장에서 오염물은 급·배기구 등의 위치, 공간의 형상, 환기방법 및 환기횟수, 벽면온도, 취출기류온도 등에 따른 기류구조가 형성되고, 이에 의해 농도분포가 불균일하게 확산되며 오염물의 발생위치에 따라서도 오염물질의 공간적 편재가 발생하게 되어, 공간의 위치에 따른 국부환기 효율을 고려하여야 한다.

환기효율을 정의할 때 Ventilation Effectiveness와 Air Change Rate로 구분하여 사용하고 있으나, 전자는 「실내의 오염된 공기를 얼마만큼 빨리 제거시킬 수 있는가」의 척도로, 후자는 「실내의 공기를 얼마만큼 효과적으로 환기시스템을 이용하여 신선공기와 교체시키는가」 하는 척도로 이용된다. 본 고에서는 Air Change Rate에 근거하여 환기효율을 개설한다.

환기효율을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 최근 여러가지 지표가 제안되고 있으며, 그 중 대표적인 방법이 공기연령(Age of Air)의 개념이다. 그림 4와 같이 1개의 급기팬과 1개의 배기팬을 가진 기계환기장치가 갖추어진 실에서, 공기의 局所平均年齡(Local Mean Age of Air, τ_p)은 공기가 급기구로부터 실내의 임의의 점 p에 도달하기 까지 걸리

는 평균시간으로 정의된다.

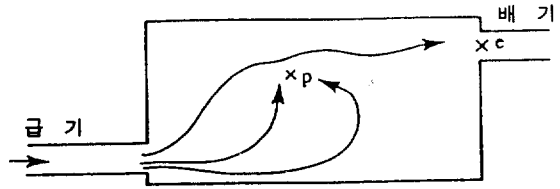


그림 4. 기계환기 및 공기연령

局所平均年齡은 측정방법에 따라 Pulse법, Step-Up법, Step-Down법의 3가지가 있으며, 각각의 연령 산정식은 다음과 같다.

$$\text{Pulse법} : \tau_p = \frac{\int_0^{\infty} t C_p(t) dt}{\int_0^{\infty} C_p(t) dt} \quad (5)$$

$$\text{Step-Up법} : \tau_p = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C_p(t)}{C_s}\right) dt \quad (6)$$

$$\text{Step-Down법} : \tau_p = \int_0^{\infty} \frac{C_p(t)}{C_0(t)} dt \quad (7)$$

여기서, $C_p(t)$: 시각 t , p 점의 트레서 가스 농도

C_s : 공급공기의 트레서 가스 농도

C_0 : 초기농도

식(5)~(7)에서 알 수 있듯이 국소평균연령을 산정하기 위해서는, 각각의 이론식이 적분형으로 표현되어 있기 때문에 공간 농도의 시간적인 변화, 즉 비정상 공간농도분포의 해석이 선행되어야 함을 알 수 있다.

4.2 수치해석에 의한 환기효율의 정량적 평가

식(5)~(7)에 의해 국소평균연령을 산정하여 환기효율을 정량적으로 평가하기 위해서는 먼저 실내기류에 관한 해석이 우선적으로 이루어져야 한다.

실내기류분포를 예측하기 위해서는 실내공기의 거동을 구해야만 하며, 유체의 지배방정식을 수치적으로 해석하여야 한다. 지배방정식에는 기류를 해석하는 연속방정식(운동량보존), Navier-Stokes 운동방정식(질량보존)과 물질농도를 구하는 농도방정식(移流擴散 方程式)이 있으며, 표준 k- ϵ 모델의 경우 기초방정

식은 식(8)~(12)과 같다.

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} \\ &= -\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\nu + \nu_i) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \epsilon \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \epsilon}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \epsilon) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial U_j C}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_C}) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $\nu_i = C_D \frac{k^2}{\epsilon}$,

$$P_k = t_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

$C_D=0.09, C_1=1.44, C_2=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3$

그림 6은 局所平均年齡의 계산을 위하여, 그림 5의 흡입구를 고정하고 취출구의 위치를 달리한 3종류의 계산모델을 대상으로 식(8)

~(11)에 나타낸 k-ε 모델을 이용하여 계산한 속도 Vector 분포를 나타낸다.

계산한 속도 Vector 분포를 이용하여 식(12)를 이용한 비정상 농도분포를 구하고 식(6)의 Step-Up법에 의한 局所平均年齡의 공간분포를 수치 시뮬레이션 하였다.

그림 7에 각 계산 모델에 대한 局所平均年齡의 공간분포를 나타내나, 주류역에서는 국소평균연령이 1이하를 나타내고 있으나, 순환역에서는 국소 평균연령이 3이상으로 나타나 신선공기가 도달하기 어려움을 나타내고 있다.

각 계산모델의 환기효율을 비교하면, 공간 평균연령이 취출구 1의 경우 2.21 취출구 2의 경우 3.18, 취출구 3의 경우가 6.00으로 나타나, 취출구 위치가 1, 2, 3의 순으로 환기효율이 좋음을 알 수 있다.

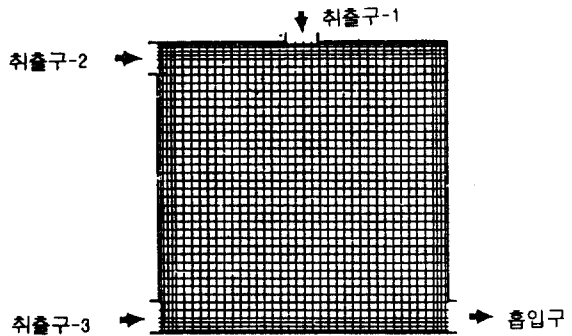


그림 5. 계산모델

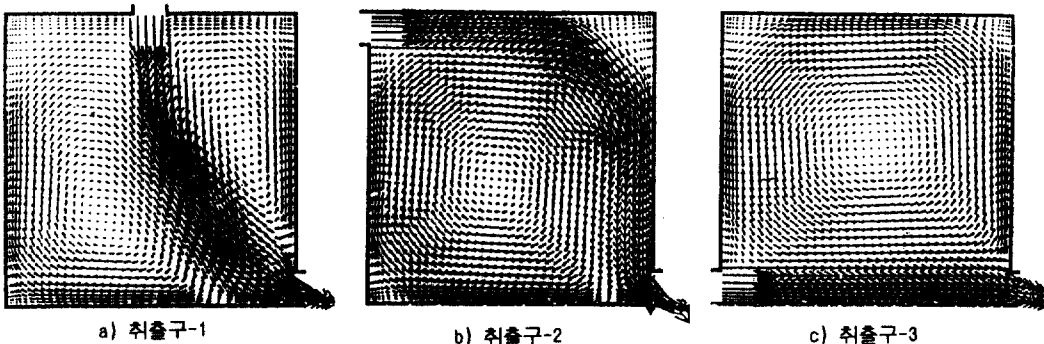


그림6. 계산속도벡터

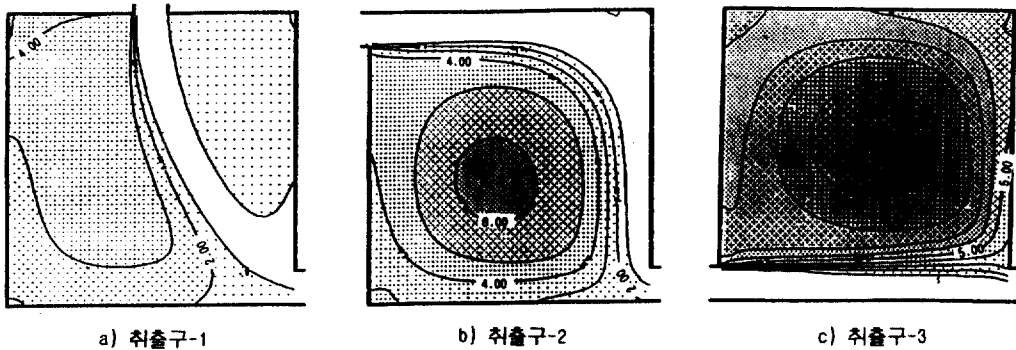


그림7. 국소평균연령의 공간분포

4.3 기류구조 설계에 의한 오염물질 최적제거방법

최근의 건물은 기밀성이 높아지고 환기횟수도 기밀성능에 대응하여 적어지고 있다. 또한, 거주자가 냉·난방시에 의식적으로 환기를 행하고 있음에도 불구하고 환기량의 부족이 주요 요인으로 추정되는 실내공기오염 및 結露 등의 피해가 발생하고 있다. 이런 문제의 대책으로 환기량을 증가시켜 실내 공기오염을 외기에 의해 稀釋시키는 방법이 가장 간편한 방법으로 생각될 수 있으나, 환기량의 증가는 실내 온열환경의 악화 및 냉·난방되어진 공기가 실외로 유출되는 결과를 초래하므로 에

너지 절약 및 쾌적성의 공존을 지향하는 최근의 건축설비의 요구와 역행하고 있다. 따라서, 될 수 있는 한 적은 환기량으로 거주역 부분의 오염레벨의 저하를 목적으로 하는 환기효율이 높은 환기방식의 개발이 필요하다.

그림 9와 그림 10은 환기방식의 차이가 실내에 발생하는 오염공기의 환산성상에 대하여 어느정도 영향을 미치는 가에 대해 검토한 것으로, 그림 8에 나타난 실내공간을 대상으로 표 7에 나타난 계산조건하에서 신선외기의 취출형태에 따른 오염물 확산분포를 수치계산하여 모형실험 결과와 비교한 예를 나타낸다.

표 7. 실험 조건

Case	Position of inlet	Velocity of contaminant (m/s)	Buoyancy effect (m/s ²)	Amount of ventilation (m ³ /h)	Reynolds number	Archimedes number
case-1	floor side	0.374	0.0	18	4287	0.0
case-2	floor side	0.374	1.79	18	4287	0.01548
case-3	ceiling side	0.374	0.0	18	4287	0.0
case-4	ceiling side	0.374	1.79	18	4287	0.01548

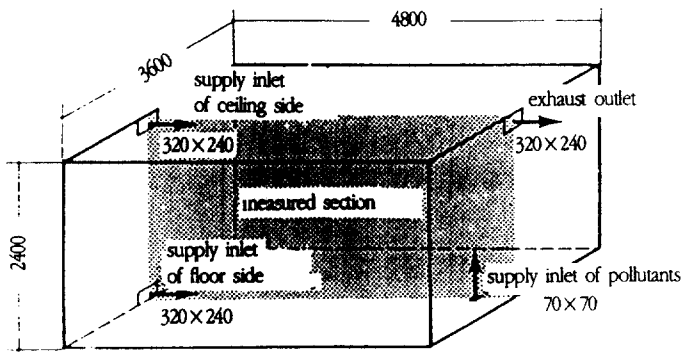


그림 8. 모델실 구성도(단위 : mm)

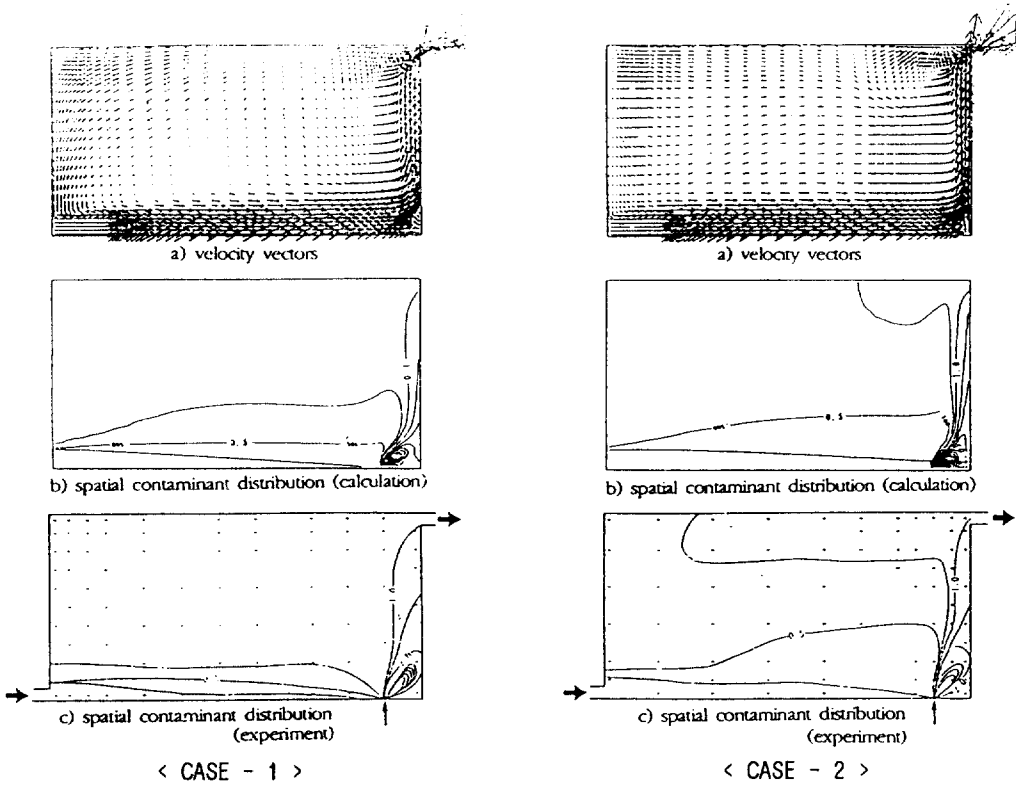


그림 9. 바닥면 급기 조건의 결과

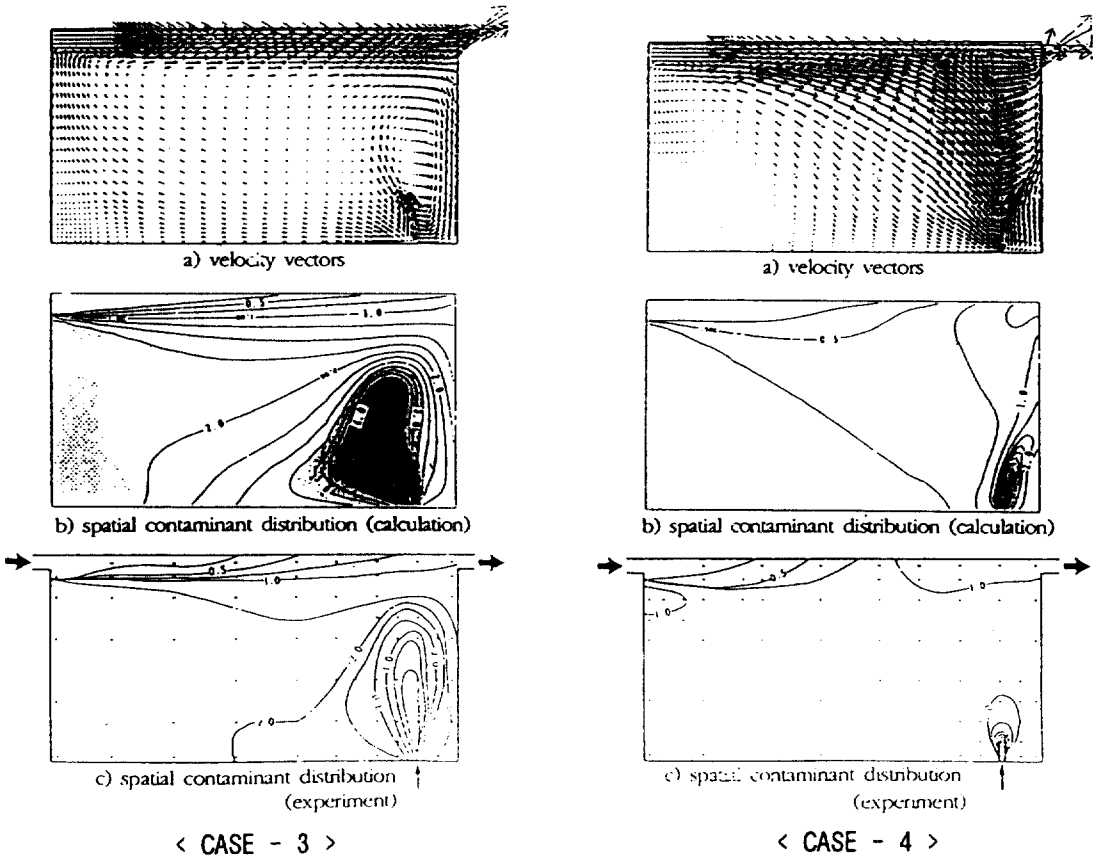


그림 10. 천정면 급기 조건의 결과

그림 9는 바닥면 급기 조건의 기류결과, 농도분포의 결과 및 측정결과를 나타낸 것으로 실험결과에 나타낸 (+)는 농도 측정점을 표시한 것으로, 농도는 각 측정점의 시간평균 농도를 배기구 농도로 무차원화 한 것이다. 따라서 농도가 1.0 이상으로 나타나는 영역은 기류의 정체에 의해 신선공기에 의한 희석효율이 떨어지는 영역이라고 판단된다.

그림 9은 case-1에서 오염물질은 방면에 부착한 기류중에 방출되고 있으므로 고농도 부분은 오염물 취출구에서 부터 상류의 배기구 부분에 이르는 비교적 협소한 영역으로 국한된다. 전체적으로 오염물이 효과적으로 제거되어 있으므로 실 대부분의 농도는 0.5~1.0으로 나타나며, 실내의 오염정도는 비교적 경

미하다.

한편, 그림 9의 case-2에서 오염물 분포는 바닥면 우측의 우각 부분에서는 case-1과 큰 차를 보이고 있지 않으나, 우측 상부 부분에서 배기구로 유출되지 않는 농도의 일부가 급기구 방향으로 확산되는 위상을 나타내고 있다. 이 경우 천정 부근에서 고농도, 바닥면 부분에서 저농도를 나타내는 일종의 밀도 성층형(成層型) 분포를 보이고 있으나, 이는 기류구조가 수평기류타월형으로 변화하였기 때문에 그 결과로서 연직방향의 농도확산이 저해된 것으로 추정된다.

전체적으로 바닥면 급기 조건의 결과는 급기구로 부터의 분류(噴流)의 영향으로 분류가 통과하는 바닥면 부분은 저농도로 되며, 고농

도 부분은 오염물 취출구에서 기류를 따라 배기구에 이르는 영역으로 국한되어 오염물이 효과적으로 제거되는 결과를 보였다.

한편, 그림 10은 천정면 급기조건에 대한 결과를 나타낸 것으로 그림 10의 case-3에서 바닥면의 속도가 오염물 취출속도보다 현저하게 작으므로 오염물 취출구로부터의 상향기류는 천정면 부근까지 도달하고, 천정면과 바닥면의 분류와 같이 시계방향의 작은 또 하나의 순환기류를 형성하며, 실 전체에 커다란 시계방향의 순환기류를 형성하고 있다.

그림 10은 case-4는 오염물에 부력이 작용하는 결과를 나타낸 것으로, 이 조건은 고온 실내에 저온공기를 급기하는 것에 상당하므로 기류계산 결과는 천정부근의 분류가 급격히 강하하여 오염물 취출구에서의 상승기류를 반대측 벽쪽으로 억제하는 양상을 보인다. 또한, 부력의 영향으로 그림 10의 case-3에 나타난 시계방향의 순환기류는 명확하지 않게 되고, 기류 패턴이 대폭적으로 변화한다.

오염물 농도분포는 이 기류의 영향을 받아, 오염물 취출구 부분의 고농도 영역이 급기구 방향으로 거의 확산하고 있지 않으므로, 고농도 영역은 오염물 분출영역에서 배기구에 이르는 벽면 부분으로 한정된다. 따라서, 실내 대부분의 농도는 배기구 평균농도보다 낮게 된다. 실험결과에서도 실내농도가 부력이 작용하지 않는 경우보다 저하되는 점은 일치하나, 오염물 취출 상부에서 계산과 부분적으로 상이한 분포의 경향을 보이고 있다.

결론적으로 오염물의 발생위치, 배기구 위치가 일정해도 급기구 위치에 따라 오염물의 농도분포는 크게 달라질 수 있으며, 본 검토 대상의 경우는 바닥면에 급기구를 설치하는 편이 오염물을 효과적으로 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 고에서는 실내공기질 환경의 개선을 목적으로, 실내발생 오염물의 특성 및 기준 등

을 파악하고 실내공기질의 개선을 위한 방안으로서 환기에 대하여 검토하였다.

실내공기의 오염을 방지하기 위해서는 전술한 바와 같이 실내공기 오염물질을 파악하여 근본적으로 그 발생원을 제거하거나, 실내에서 발생하는 오염물질을 공기조화설비 등을 이용한 환기를 실시하여 희석시키는 등의 대책이 필요하다. 그러나 이와 같은 대책만으로는 깨끗한 실내공기환경을 유지시킬 수 없으며, 건물의 재실자, 건물주, 관리인, 건축설계자, 건축자재 생산업자 및 정부기관 등에서 실내공기오염의 중요성을 인식하고, 각자 실내공기질 개선을 위하여 맡은 책임을 다할 때 깨끗하고 쾌적한 실내 공기환경이 유지될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 김윤신, 실내환경과학, 민음사, 1994.
- 2) 李政宰외: 부력이 작용하는 오염물질의 제거에 관한 수치계산과 실험, 한국인간온열환경학회지, 제1권, 제1호, pp. 73~79, 1994. 6.
- 3) 日本建築學會, 建築環境工學用教材 環境編, 技報堂, 1988.
- 4) 須山 熹美, 換氣效率指標に關する ASHRAE Standard Draft について, 換氣效率の評價手法について, 1993. 東京
- 5) 松本 博, 加藤 光男, 居室模型を用いた換氣效率の測定に關する基礎實驗, 換氣效率の評價手法について, 1993. 東京
- 6) 加藤 信介, 室内氣流 シミュレーションに基づく換氣效率分布の解析, 換氣效率の評價手法について, 1993. 東京.
- 7) 赤林 伸, 事務所ビルの換氣效率に關する基礎的研究, 換氣效率の評價手法について, 1993. 東京.
- 8) Sandberg, M. and Skaret, E.: Air Change and Ventilation Efficiency-New aids for HVAC designers.
- 9) Sandberg, M. and Sjoberg, M., The use of moments for assessing air quality in

- ventilated rooms. *Building and Environment*, Vol. 18, 1983.
- 10) Maldonado, E.A.B. and Woods, J.E, Ventilation Efficiency as a means of characterising air distribution in a building for indoor air quality evaluation. *Ashrae Transactions* 83 vol. 89
- 11) J.J.Yee, et. al, Highly Accurate and Non-Oscillatory Finite-Difference Approximation Method for Convection Diffusion Equation, Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. pp. 143~152, 1993. 10.
- 12) Viollet, P, The modeling of turbulent recirculating flows for the purpose of reactor thermalhydraulic analysis, *Nuclear Engineering and Design*, pp. 365~377, 1987.