

환기효율에 관한 수치해석적 접근

Numerical Approach to Calculate Ventilation Effectiveness

한 화 택
H. T. Han
국민대학교



- 1957년생.
- 건축물에서의 열전달, 배관내의 수격현상, 실내기류해석 및 환기 등의 열환경 공학

1. 서 론

실내에 거주하는 사람에게 필요한 신선한 공기를 공급하고 실내에서 발생하는 여러가지 오염물질들을 제거하기 위해 적절한 환기가 이루어져야 한다. 환기는 벽체의 틈새를 통한 극간풍과 창문등을 통한 자연환기, 그리고 기계 송풍에 의한 강제환기가 있다. 1970년대의 오일쇼크 이후 첨가하여 벽면을 통한 열관류율을 감소시켜서 에너지의 손실을 최소화하려는 노력이 계속되어져 왔다. 그러나 단열재의 첨가로 인하여 실내의 고온 다습한 공기가 벽체로 확산되어 단열벽 내부에 응축됨으로써 벽 구조체의 수명단축은 물론 심한 경우 붕괴에 이르는 경우를 경험하였다. 미국, 캐나다 그리고 스칸디나비아 국가 등의 한냉 지대에 위치한 국가들에서는 벽면 내부의 결로현상을 줄이기 위하여 단열재의 실내 쪽 면에 수증기 막을 첨가하도록 규제하기 시작하였다. 이와같이 틈새공간의 밀봉과 수증기막의 첨가 등에 의한 건축물의 밀폐화는 에너지 절약 측면에서는 효과를 거두었지만 극간풍에 의한 자연환기가 격감하여 1980년대에 이르러서는 실내에서의 오염물질의 발생에 의한 실내 공기오염(indoor air pollution)

이 문제되기 시작하였고, 이와 관련하여 환기 부족으로 인한 여러가지 "sick building syndrome"이 보고되었다. 실내 공기의 질을 유지하기 위하여서는 신선외기의 강제유입이 필요하여 강제환기에 의존하게 되었다. 강제송풍에 의한 환기를 위하여서는 팬 구동 에너지가 소요되기 때문에 건물의 밀폐화에 의한 열 에너지의 절감과 비교하여 검토되어야 한다. 특히 극도의 청정을 요구하는 클린룸이나 생산 공정 중 유해한 오염 물질을 다량 발생시키는 작업장 내에서의 환기를 위한 막대한 송풍전력을 최소화하기 위해서는 보다 효과적인 환기가 이루어지도록 환기의 효율을 고려하여야 한다.

2. 본 론

2.1 환기 효율의 정의

그러면 어떻게 환기효율을 정의 할 것인가? 목적하는 환기의 효과를 어떻게 정량화하고 수치화할 것인가? ASHRAE등에서 환기효율을 측정하기 위한 위원회가 운영되고 있으나 아직 표준화된 정의가 없다. 단지 '환기효율은 재실 공간에서의 오염 정도를 나타내는 비율이다'라고 일반적인 정의를 하고 있다.⁽¹⁾ 환기효율은

실내에서 발생하는 오염물질을 얼마나 효율적으로 제거하느냐를 표시할 수 있어야 한다. 환기의 효율은 그 목적과 조건에 따라 여러가지 형태로 구분하여 생각할 수 있다.

- 정상상태의 효율 : 정상상태에서의 실내의 최대 또는 평균농도에 대한 배기농도의 비율로서 배기농도가 높으면 정상상태하에서의 오염물질의 제거능력이 우수하다고 본다.
- 비정상상태의 효율 : 초기 농도에 대한 임의의 시간후의 실내 농도로서 초기 농도로부터 출발하여 비정상상태하에서의 오염물질의 제거 능력을 나타낸다.
- 상대효율 : 실내의 위치에 따른 변화를 나타내며 실내공기의 확산과 관련되고 절대 농도와는 무관하다.
- 절대효율 : 이론치와 비교한 오염물의 제거 능력으로 농도의 절대 크기에 관련된다.

환기의 효율을 수치화하기 위해서는 결국 농도의 변화를 이용하는데 농도 자체의 크기를 이용하는 방법외에도 농도의 감소율이나 농도 곡선의 적분치등을 이용하는 방법 등이 있다.

1. 농도비를 이용한 정의 : 신선외기의 농도를 0으로 생각하였을 때 배기구에서의 농도 또는 초기 농도에 대한 실내최대 농도나 실내의 평균농도를 효율로 정의할 수 있다.
2. 농도의 감소율을 이용한 정의 : 농도의 감소율을 지수곡선으로 곡선 적합하여 지수함수의 지수에 해당하는 농도의 감소율을 이용하여 정의한다.
3. 오염물질의 체류량을 이용한 정의 : 오염물질이 실내에서 완전히 제거될 때까지 일정 기간 동안 실내에 체류한 오염물질의 시간에 대한 적분치로서 농도-시간 곡선의 아래 면적에 해당된다.

이와같은 환기효율을 결정짓기 위하여 직접 측정에 의한 방법과 간접적인 해석방법을 이용한다. 직접방법은 실제 건물이나 실험용 건축물에서 농도를 실제로 측정함으로써 환기가 얼마나 효율적으로 이루어지고 있는지를 측정한다. 간접방법은 파라메트릭 연구나 수치해석을 통하여 간접적으로 환기효율을 예측한다.

2.2 완전혼합과 비혼합

실내공기의 유동형태에 따라 실내에 존재하는 오염물질의 확산과 공기와의 혼합의 정도가 결정된다. 두가지 극단적인 경우인 완전혼합과 비혼합에 관한 예를 통하여 환기에 관련된 인자들을 고찰하고자 한다.

(1) 완전혼합(complete mixing)

실내의 공기유동이 비교적 활발하여 실내에서 발생하는 오염물질이 실내의 전공간으로 균일하게 확산된다. 그림 1에서와 같이 외부로부터 공급되는 신선외기도 실내공기와 완전하게 혼합이 이루어지며 배기구에서의 농도는 실내의 농도와 동일하다. 이러한 환기를 회석환기라고 한다.

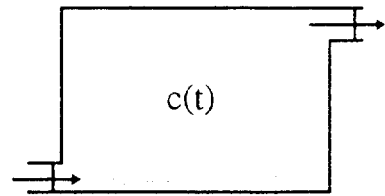


그림 1 완전혼합의 경우

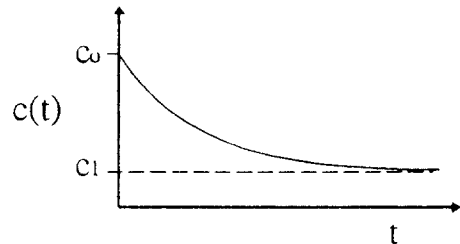


그림 2 완전혼합의 경우의 농도 감소 양상

완전혼합이 이루어지는 경우 실내의 농도분포는 균일하므로 질량보존의 법칙을 이용하여 다음과 같이 일차 미분방정식을 쉽게 구할 수 있다.

$$\rho V \frac{dc}{dt} = -\rho Q(c-c_\infty) + S \quad \dots\dots\dots(1)$$

좌변은 실내에 존재하는 오염물질의 질량 변화율을 나타내고 우변의 첫번째 항은 외기의 유입에 의한 회석율을 의미하며 두번째 항은

실내에서의 오염물질의 발생율을 나타낸다. 초기의 농도가 c_0 이고 외기의 농도가 c_∞ 라고 하면 그 해는 다음과 같이 구해진다.

$$c(t) = c_1 + (c_0 - c_1) e^{-(Q/V)t} \dots\dots\dots (2)$$

이를 개략적으로 나타내면 그림 2와 같다.

여기서 $c_1 = c_\infty + \frac{S}{\rho Q}$ 이고, S와 Q는 각각

시간당 오염물질 발생율과 체적공기유량이다. V는 실내체적이고 이를 체적공기유량으로 나눈값, 즉 V/Q 는 시간의 단위를 가지며 이를 명목시간상수라고 한다. 또 이의 역수를 공기교환율이라 한다.

현재 행하여지고 있는 대부분의 환기방식은 완전혼합의 가정하에서 행하여지고 있으며 여러가지의 환기표준이나 규격도 이 완전혼합의 가정하에서 만들어졌다고 할 수 있다. 이 경우에는 이론적으로 볼 때 주어진 실내체적에 대한 급기량, 즉 공기교환율에만 의존한다. 오염원의 위치나 급기구, 배기구의 위치등에 전혀 무관하므로 환기의 효율을 고려할 필요가 없다.

(2) 비혼합(non-mixing)

실내에서 발생한 오염물질과 실내공기의 혼

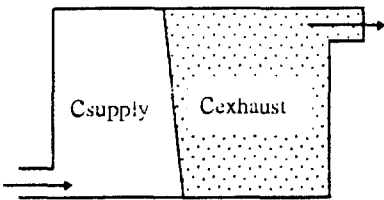
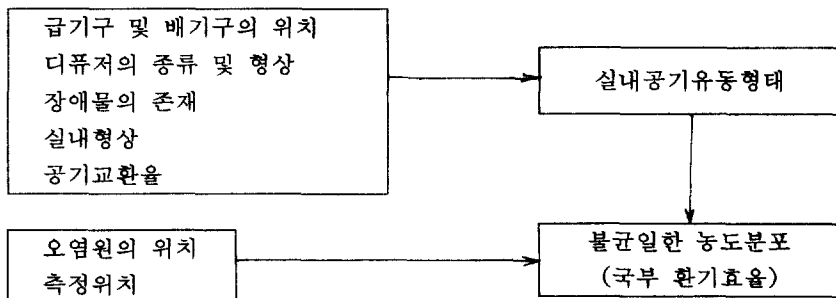


그림 3 비혼합의 경우

표 1 불완전혼합의 경우



합이 전혀 이루어지지 않으며 실내기류형태와 배기구의 위치에 따라 신선외기가 오염원과 무관하게 배기구를 통하여 그대로 배출되기도 하고(short-circuiting), 그림 3과 같이 신선외기가 오염된 공기를 효과적으로 배기구 쪽으로 밀어 내기도 한다(displacement).

위의 완전혼합의 개념을 이용한 환기시스템을 혼합환기(mixing system) 또는 희석환기(dilution system)라고 한다면 비혼합의 개념을 이용한 환기를 변위환기(displacement ventilation system)라고 하며, 스칸디나비아 국가들에서 시도되어지고 있고 실제로 좋은 성과를 보이고 있다.⁽²⁾

이 변위환기 시스템에서는 실내 바닥 부근의 터미널을 통하여 외기가 공급되며, 느린 속도(0.2~0.6m/s)로 급기되므로 대부분 층류를 이룬다. 또 급기의 온도는 실내온도 보다 다소 낮게 공급되므로 수직 방향으로의 온도 구배를 형성한다. 따라서 실내에서 가열되고 오염된 공기는 저질로 밀려서 위로 변위되며 천정의 배기구를 통하여 밖으로 배출된다. 실내에 존재하는 각종 열원에 의한 대류현상으로 가열되고 오염된 공기 입자의 상승이 자체적으로 촉진된다. 그러나 이러한 국부적인 열대류 유동은 온도에 의하여 성층화된 공기층을 교란시키지는 못한다. 이와 같은 변위환기 시스템은 완전혼합에 의한 희석환기에 비하여 이론적으로 두배의 환기효율을 보인다.

(3) 불완전혼합(incomplete mixing)

실제의 상황은 완전혼합과 비혼합의 중간형태인 불완전혼합이라 할 수 있다. 실제로 표 1에

도식적으로 나타낸 바와 같이 급기구의 위치 및 장애물의 존재, 그리고 실내의 형상등에 의하여 실내의 공기유동형태가 결정되며 이에 따라 혼합의 정도가 결정된다. 불완전혼합에서는 실내 기류형태와 오염원의 위치에 따라 부분적으로 농도의 불균일이 발생하므로 위치에 따른 국부 환기효율을 고려할 수 있다.

예를 들어 혼합이 완전하지 않은 경우에는 오염원의 위치에 따른 상대적인 배기구의 위치에 따라서 급기구에서의 신선외기가 그대로 배기구로 배출되기도 하고 위에서 설명한 변위환기의 장점을 이용할 수도 있다.

이와같은 실내공기의 혼합정도를 나타내기 위하여 미국 등지에서는 혼합계수(mixing factor)가 사용되기도 하는데 이 혼합계수는 실내에서의 농도 감소를 지수곡선으로 곡선적합하여 완전혼합이 이루어지는 경우에 1, 그리고 불혼합인 경우에 0이 되도록 정의한다. 그러나 혼합계수는 지수곡선으로 적합하는 과정에서 측정하는 시간의 길이에 따라 그 값이 변하는 등 일관성 있는 값을 얻기가 곤란하다.

2.3 실내공기유동의 해석

실내 공기의 혼합의 정도를 파악하여 환기효율을 결정짓기 위하여서는 실내 기류에 관한 해석이 우선적으로 이루어져야 한다. 실험을 통하여 몇몇 위치에서의 공기속도와 방향을 측정할 수는 있으나, 전 실내영역에 걸쳐서 공기속도를 측정하여 전체적인 유동장의 분포를 파악하기는 거의 불가능하다. 최근 전산 유체 역학의 발전에 힘입어 유체 유동의 해석을 위한 여러 가지 수치해석 방법과 난류 모델들이 개발되었고, 실내 공기의 유동 형태를 수치적으로 예측하기 위한 연구들이 많이 행하여 지고 있다. 초기에는 주로 2차원 유동의 해석을 통하여 정성적인 유동 형태의 이해에 초점이 맞추어져 있었으나, 컴퓨터의 급속한 발달로 인하여 3차원 해석도 가능하여 실제상황의 실내기류의 시뮬레이션도 가능하게 되었다.

실내기류의 해석은 제한체적 내의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 푸는 과정이다.

해석을 용이하게 하기 위하여 기본방정식들을 단순화하게 되는데, 주로 직각좌표계를 사용하며 속도가 그리 크지 않은 유동이기에 때문에 점성소산은 무시한다. 또 실내공기의 유동은 조건의 변화에 짧은 시간 내에 정상상태에 도달하므로 특별한 경우를 제외하고는 정상상태로 해석하여도 무방하다.

그러나 일반적으로 실내공기의 유동은 Reynolds수가 상당히 큰 유동이므로 난류유동으로 해석하는 것이 바람직하다. 난류형태의 유체 유동을 해석하기 위하여 난류모델들이 많이 개발되어져 왔다.⁽³⁾ 초기의 난류모델들은 주로 벽면 근처에서의 유동현상을 연구하기 위한 것이었는데, 모델에 따라서는 벽면근처의 유동 뿐만 아니라 와류가 있는 유동과 벽면으로부터 멀리 떨어져있는 영역에 대하여도 좋은 결과를 보인다. 난류모델의 종류는 다음과 같이 나누어 생각할 수 있다.

(1) 균일 난류점성모델(uniform turbulent viscosity model)

난류유동에서는 난류저항에 의하여 유체가 큰 점성을 가진 유체와 같이 운동량의 전파가 빠르다. 가장 단순한 모델인 층류형태의 유동해석의 연장으로 유체의 점성계수의 임의의 배수를 한 것을 난류 점성계수로 가정하여 전 해석 영역에 대하여 균일하게 적용한다. 이 방법은 층류유동의 해석과 동일하며 계산상의 Reynolds수가 감소하는 효과가 있기 때문에 해의 수렴의 안정성을 증진시킨다. 일정 배수는 유동형태에 따라 여러가지의 경험을 통하여 임의로 정하여야 한다. 그러나 결과는 난류점성계수가 위치에 따라 변하는 실제의 현상을 정확하게 묘사하지는 못한다.

(2) Prandtl 혼합길이 모델(Prandtl mixing length model)

난류형태의 유동에 의하여 유체가 혼합하게 되는데 이 혼합의 정도를 혼합길이로서 표시한다. 혼합길이는 벽면이나 고체면으로부터의 거리의 함수로 나타내고 난류에 의한 Reynolds 응력항이 혼합길리와 평균속도구배에 비례한다고 가정한다. 이 산술모델은 적용이 용이하며

난류형태의 경계층을 잘 해석한다. 그러나 낮은 속도의 유체유동이나 특히 와류가 존재하는 유체영역 등에서는 적용에 한계가 있다.

(3) 2 방정식 모델(two-equation model)

난류 운동에너지와 난류에너지 소산률에 관한 미분방정식을 유도하여 Navier-Stokes 방정식과 연립하여 해석한다. 이에 이용되는 상수들과 보조식들은 연구자와 유동형태에 따라서 다르게 적용된다. 이러한 난류 해석을 위한 $k-\epsilon$ 에 관한 여러가지 모델들이 Patel⁽¹⁾에 의해 잘 비교되어져 있다. 2 방정식 모델은 계산상 수렴이 용이하지 않으므로 이완법을 이용하며 그에 따라 수렴해를 얻기 위하여 많은 계산시간이 소요된다. 그러나 결과로서 매우 상세한 유동형태를 얻을 수 있다.

2 방정식 모델에는 초기에 제안된 고 Reynolds 수 모델과 보완된 형태인 저 Reynolds 수 모델이 있다. Reynolds 수 모델은 높은 Reynolds 수 유동 즉 완전 난류영역에서는 좋은 결과를 보이나 낮은 Reynolds 수 유동이나 낮은 Reynolds 수 유동과 높은 Reynolds 수 유동이 공존하는 유동에서는 좋은 결과를 보이지 않는다. 저 Reynolds 수 난류 모델은 난류유동 뿐만 아니라 Reynolds 수가 낮은 층류와 천이유동 영역도 포함하여 적용될 수 있다. 저 Reynolds 수 난류 모델에서는 벽 함수가 불필요하기 때문에 많은 장애물들이 있을 수 있는 실내 공기 유동 해석에 유리하다.

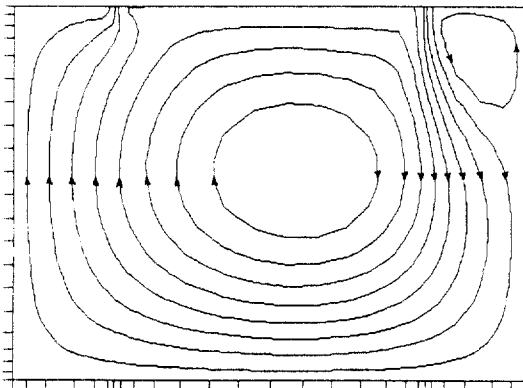


그림 4 실내공기 유동의 계산예

그림 4는 저 Reynolds 수 난류 모델을 이용하여 계산된 실내기류 해석 결과의 한 예를 보여주고 있다. 천정에 슬롯형의 급기구와 배기구와 위치하며 2차원으로 해석하였다. 급기구에서의 공기의 유속은 1.44m/s로서 공기교환을 92ACH 이며 시간상수는 39초이다.⁽⁴⁾

2.4 연령과 연령분포 함수

실내의 공기는 작은 유체 입자들로 구성되어 있다고 가정하고, 그 유체 입자들에 시간의 경과에 따라 연령(나이)을 부여한다. 즉, 실내 공기 입자의 연령(age)을 공기 입자가 급기구를 통하여 실내로 유입된 후 경과한 시간으로 정의하고 실내 체류 시간(resident time)은 공기 입자가 배기구를 통하여 외부로 빠져나갈 때의 공기입자의 연령이라 정의할 수 있다.^(5,6) 비유하여 설명하면, 급기구에서의 공기의 유입은 신생아의 탄생을 의미하며 여러 인생경로를 거쳐서 결국은 배기구를 통하여 죽음에 이른다(그림 5). 이 때의 나이를 수명이라 하고 공기 입자의 실내 체류시간에 해당된다. 실내 각 부분은 각기 연령이 다른 공기 입자들의 혼합으로 이루어져 있다고 생각하여 위치별 공기 입자들의 연령 분포를 정의할 수 있다. 이와 같은 공기입자들은 각 위치에서의 통계 누적 연령 분포(cumulative age distribution), $\Phi(\tau)$ 와 해당 연령 빈도 분포(age frequency distribution), $\phi(\tau)$ 에 의하여 특성지워진다. 누적 연령 분포는 총 공기 입자 중 연령이 τ 보다 작거나 같은 입자의 비율에 해당하며 무차원 수이다. 연령 빈도 함수는

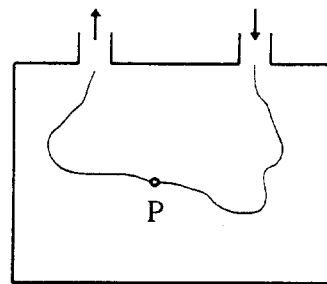


그림 5 연령의 정의

이 누적 연령 분포의 시간에 대한 미분된 함수로 각 연령의 빈도를 나타낸다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \phi(\tau) \text{ 또는 } \int_0^{\tau} \phi(\tau) d\tau = \Phi(\tau) \dots (3)$$

연령빈도함수와 누적연령함수는 일반적으로 그림 6과 같은 분포를 보인다. τ 가 0일 때와 무한대일 때의 연령빈도함수 값은 0이며 그 중간에서 최대값을 갖는다. 누적연령분포 함수는 τ 가 0일 때에 0이며 τ 의 증가와 더불어 단순 증가하여 무한대일 때에 함수값이 1이 된다.

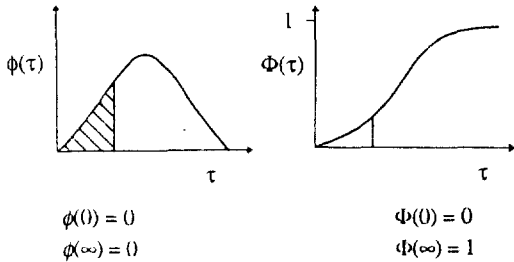


그림 6 연령빈도함수와 누적연령함수

이러한 연령빈도함수의 시간에 대한 모멘트를 다음과 같이 고려할 수 있다.

영차 모멘트 : $\mu^{(0)} = \int_0^{\infty} \phi(\tau) d\tau = 1 \dots (4)$

일차 모멘트 : $\mu^{(1)} = \int_0^{\infty} \tau \phi(\tau) d\tau$
 $= \int_0^{\infty} (1 - \Phi(\tau)) d\tau \dots (5)$

이차 모멘트 : $\mu^{(2)} = \int_0^{\infty} \tau^2 \phi(\tau) d\tau$
 $= \sigma^2 + (\mu^{(1)})^2 \dots (6)$

여기서 $\mu^{(1)}$ 는 평균연령이고 σ^2 는 평방편차이다. 이 중에서 특히 일차 모멘트는 특별한 의미를 가지며 이는 공기입자의 국부평균연령(local mean age)에 해당되고 식(5)에서와 같이 누적연령함수를 이용하여 구할 수도 있다. 이와 같은 공기 입자의 연령과 연령 분포 함수 등에 관한 개념을 이용하여 국부 평균 연령등의 환기 효율과의 연관관계를 고려할 수 있다.

이와 같은 평균연령과 연령분포를 구하는 방법으로 유체의 입자들의 운동을 통계적으로 구하는 Lagrangian 방법과 연령과 오염물 농도와의 관계를 이용하는 Eulerian 방법을 생각할 수 있다.

(1) Lagrangian 방법

위의 정의에 따라서 유체입자의 평균연령과 연령분포를 구할 수 있다. 즉 급기구를 통하여 유입되는 유체 입자들이 실내의 임의의 위치까지 도달하는데 걸리는 시간을 구한다. 난류유동에서는 입자들이 무작위운동을 하게 되는데 각기 다른 경로를 통하여 실내의 임의의 위치에 도달한 입자들을 통계적으로 처리함으로써 연령분포와 평균연령 등을 얻을 수 있다. 이 방법을 이용하면 가스 형태의 오염물질 뿐만 아니라 질량이 있는 분진 등의 고체 입자 등의 체적과 통계적 분포를 구할 수 있다. 통계적 처리가 가능하기 위해서는 수천 내지 수만의 입자에 대하여 계산을 수행하여야 한다.

(2) Eulerian 방법

연령과 오염물 농도와의 관계를 이론적으로 고찰함으로써 농도분포를 수치적으로 해석하여 연령과 연령분포 등을 농도분포로부터 간접적으로 구할 수 있다. 농도분포는 오염물질의 질량보존방정식을 해석함으로써 구할 수 있다. 공기 중에서의 오염물의 확산계수는 층류유동일 때는 물성치에 해당하며 난류유동일 때는 난류점성계수와 비유일 난류 Schmidt수를 가정함으로써 구한다. 이 Eulerian 방법은 실험을 통하여 환기효율을 결정하는 데에도 이용될 수 있다. 즉 평균연령 등의 환기효율의 직접적인 측정은 곤란하므로, 실내의 임의의 위치에서의 시간에 변화에 따른 농도의 변화를 측정함으로써 환기효율을 구한다. 본 글에서는 연령과 농도와의 관계를 이용하여 환기효율을 계산하는 Eulerian 방법에 관하여 설명하고자 한다.

2.5 오염물질의 주입방법

농도와 연령과의 관계는 오염물질의 주입방법에 따라 바뀌므로 여러가지 형태의 주입방법을 고찰할 필요가 있다. 실험적으로 이용되는

주입방법은 다음과 같은 세가지 방법이 있다.

(1) 펄스(pulse)방법

오염원을 짧은 시간동안 발생시키는 방법으로 오염원의 위치에 대한 상대적인 측정위치에 따라서 다소 지연되어 농도의 상승이 관측된다. 농도의 최대치에 도달한 후 감소하여 시간이 충분히 지나면 각 위치에서의 농도는 다시 초기상태로 복귀된다(그림 7).

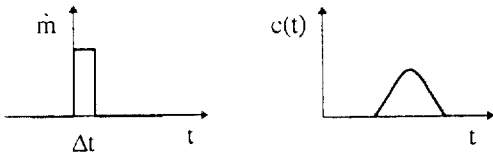


그림 7 펄스 방법에서의 오염물질 발생양상과 측정되는 농도양상

(2) 체승(step-up)방법

오염원을 발생시키기 시작하여 일정한 수준으로 계속 유지시키는 방법으로 오염원의 위치에 대한 상대적인 측정위치에 따라서 다소 지연되어 농도가 상승하기 시작한다. 시간이 충분히 지나면 농도는 오염발생에 의한 정상상태에 도달한다(그림 8).

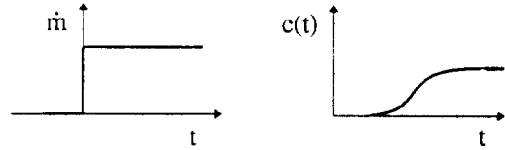


그림 8 체승방법에서의 오염물질 발생양상과 측정되는 농도양상

(3) 체강(step-down)방법

체승방법의 역으로서, 오염원을 일정한 수준으로 발생시키다가 갑자기 발생을 중지시키는 방법이다. 당분간 일정한 오염원에 의한 정상상태의 농도로 지속되다가 서서히 농도가 감소하기 시작한다. 시간이 충분히 지나면 농도는 오염원이 없는 경우에 대한 정상상태에 도달한다(그림 9).

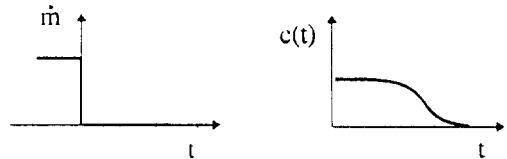


그림 9 체강방법에서의 오염물질 발생양상과 측정되는 농도양상

표 2 세가지의 다른 주입방법에 대한 연령분포와 농도와의 관계

발생위치→	급기구	실내
측정위치→	실내	배기구
(주입방법)		
1. 펄스방법 $m[m']$	$\Phi_p(\tau) = \frac{c_p(\tau)}{\int_0^{\infty} c_p(t) dt} = \frac{c_p(\tau)}{(m/Q)}$	$f(\tau) = \frac{c_e(\tau)}{\int_0^{\infty} c_e(t) dt} = \frac{c_e(\tau)}{(m/Q)}$
2. 체승방법 $\dot{m}[m's]$	$\Phi_p(\tau) = \frac{c_p(\tau)}{c_p(\infty)} = \frac{c_p(\tau)}{(m/Q)}$	$F(\tau) = \frac{c_e(\tau)}{c_e(\infty)} = \frac{c_e(\tau)}{(m/Q)}$
3. 체강방법	$1 - \Phi_p(\tau) = \frac{c_p(\tau)}{c_p(0)}$	$1 - F(\tau) = \frac{c_e(\tau)}{c_e(0)}$
입자밀도→	P 점에서의 공기의 입자밀도	배기구에서의 오염물질의 입자밀도

2.6 연령과 농도와와의 관계

위의 세가지 주입방식에 대하여 실내에서의 연령분포함수와 농도와와의 관계를 표 2에서와 같이 나타낼 수 있다. 도표의 첫번째 열은 급기구에서 주입되고 실내의 한점 P에서 측정된 경우이며 측정된 농도 $c_p(t)$ 와 급기구에서 들어오는 공기의 누적 연령분포 또는 해당 연령 빈도 분포와의 관계를 보여주며, 두번째 열은 실내에서 한점에서 주입되고 배기구에서 측정하는 경우에 배기구에서 측정된 농도 $c_p(t)$ 와 배기구를 빠져나가는 오염물질의 누적 연령분포 또는 해당 연령 빈도 분포와의 관계를 보여준다. 펄스 방식으로 주입될 때 측정되는 농도의 변화는 연령빈도함수에 비례하며 체송방식에서는 농도의 변화는 누적연령분포에 비례한다. 체강방식에서는 체송방식의 역에 해당하며 누적 연령분포는 초기농도에서 시간의 변화에 따른 농도변화를 텐 값에 비례한다.

2.7 비정상 상태의 농도 분포

환기효율의 수치해석에서 위의 어느 주입방식을 사용하여도 동일한 환기효율에 관한 결과를 얻어야 한다. 개념적으로 체강방식이 우리가 목표로 하고 있는 환기효율, 즉 얼마나 효율적으로 실내의 오염물질을 제거하느냐와 잘 일치된다고 할 수 있다. 따라서 본 글에서는 이 방법을 이용하여 농도변화를 설명하고자 한다. 오염물질의 질량 보존 법칙을 이용하여 다음과 같은 비정상 상태의 농도 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(D + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial c}{\partial y} \right] \dots\dots\dots(7)$$

여기서 D 는 공기 내에서의 오염 물질의 분자 운동에 의한 확산 계수이며, v_T 는 난류유동에 의한 난류 동점성계수이고 Sc_T 는 난류 Schmidt수로서 난류 동점성계수와 농도확산계수와 의 비를 나타낸다.

속도분포의 해석에 관해서는 앞에서 이미 언급하였고, 실내에서의 속도 분포는 정상적이며

농도의 변화에 대하여 영향을 받지 않는다고 가정한다. 체강방식을 적용하여 초기에 실내의 농도는 균일하고 오염원이 존재하지 않으며, 벽면은 밀봉되어 벽면과 교체면을 따라 농도의 구배가 영이 되도록 한다. 농도방정식은 선형이므로 초기 농도를 1.0으로 하고 외기의 농도가 영이 되도록 무차원화하여도 무방하다. 비정상 상태의 수치해석을 하기 위해서는 농도 변화가 심한 계산 초기에 시간 증분을 작게 취하고 차츰 시간 증분을 증가시켜서 계산을 수행한다.

그림 10은 시간 변화에 따른 실내 농도 분포의 변화를 보여 주고 있다. 체강 방식이 시작되어 초기에 균일한 농도 분포($c=1.0$)를 갖는 실내로 신선 외기 ($c=0.0$)가 주입되면서 급기구 바로 인접구역에서 급격한 농도감소가 일어난다. 차츰 신선외기가 전 실내로 공급되면서 전체적인 실내농도가 감소되며 실내 중앙의 큰 와류 순환 영역내에서 농도의 최대치가 발생된다.

2.8 국부 농도 감소율과 국부 평균연령

(1) 국부 농도 감소율(local decay rate)

체강방식에서 완전혼합이 이루어지면 실내의 농도는 지수적으로 감소된다. 실내 공기의 혼합이 완전하지 못할 경우에는 시간에 따른 농도의 변화가 위치에 따라 다르며 농도 감소율도 일정하지 않다. 특히 체강방식의 초기에 농도의 변화는 위치에 따라 상당한 차이가 있다. 앞 절에서 계산한 각 위치에서의 시간 변화에 따라 농도 변화를 반로그 그래프에 그리면 직선 형태로 주어지지 않는다. 각 격자점에서의 $\ln[c(t)/c_0]$ 대 시간에 대한 변화를 $-\lambda t$ 의 직선식으로 최소사승법(least square fitting)을 이용하여 국부 농도감소율을 구한다.

$$c(t) = c_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{여기서 } \lambda = -\frac{1}{t} \ln \left[\frac{c(t)}{c_0} \right]$$

(2) 국부 평균 연령(local mean age)

실내의 각 위치에서의 국부 평균 연령(local mean age)은 앞에서 설명한 바와 같이 연령 분포의 일차 모멘트로서 연령 빈도 함수를 연

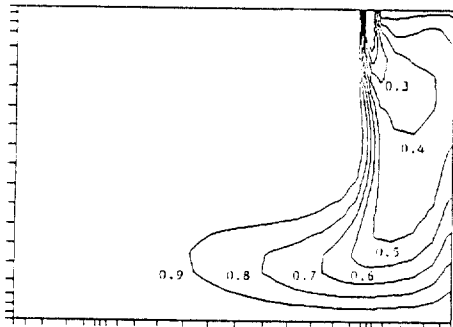
령으로 가중하여 평균함으로써 구할 수 있고, 또한 누적 연령 분포를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \int_0^{\infty} \phi(\tau) \cdot \tau \, d\tau \\ &= \int_0^{\infty} (1 - \Phi(\tau)) \, d\tau \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

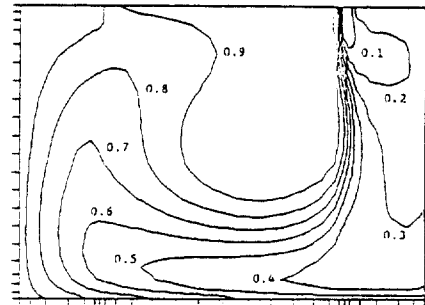
체강 방식에서 $(1 - \Phi(\tau))$ 의 분포는 초기 농도로 무차원화된 농도 분포와 같으므로 (표 2) 국부평균연령은 시간에 따른 감소 곡선의 적분치 즉 시간대 농도 곡선의 아래 면적에 해당된다.

$$\mu_0 = \frac{\int_0^{\infty} c(t) \, dt}{c_0} \quad \dots\dots\dots(10)$$

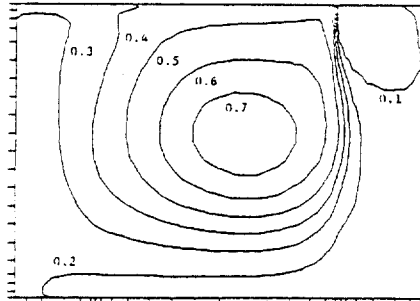
그림 11은 위에서 계산한 비정상상태의 농도의 변화를 몇몇 위치에서 시간의 함수형태로 나타낸다. 초기의 비정상성만 소멸되면 위치에 무관하게 일정한 농도감소율을 보인다. 즉 농도감소율로는 위치에 따른 상대적 환기효율을 나타내는 것은 불가능하다. 직선식으로 곡선적합한 결과는 곡선적합한 시간의 범위에 영향을 받는다. 비정상성의 소멸 후의 농도 감소율과 완전혼합의 가정하에서의 농도감소율과 비교함으로써 절대 환기효율을 고려할 수 있다. 또 국부평균연령은 위 그래프의 아래 면적을 적분을 통하여 각 점에서 구한다. 전 실내 구간에 걸쳐 이와 같이 하여 계산한 농도감소율과 국부평균연령의 분포가 그림 12와 13에 각각 그려져 있다.



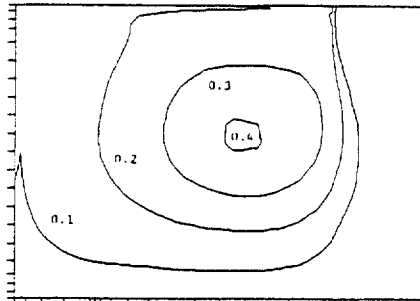
(a) 10 s



(b) 20 s



(c) 50 s



(d) 100 s

그림 10 시간에 따른 농도변화의 계산에

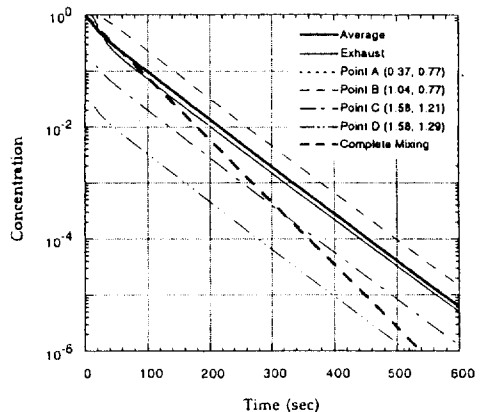


그림 11 농도-시간 곡선의 계산에

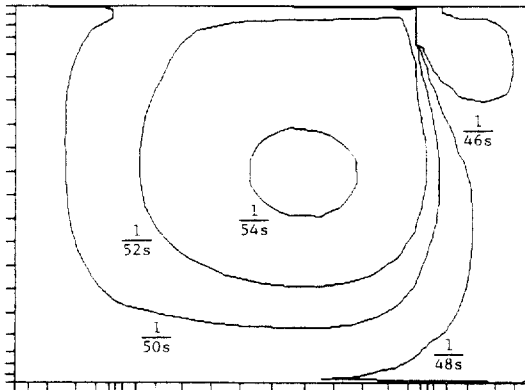


그림 12 국부농도감소율의 계산에

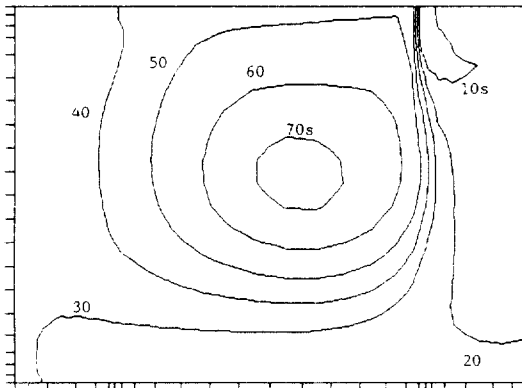


그림 13 국부평균연령의 계산에

3. 결 론

본 글에서는 실내공간에서의 환기효율에 관련된 일반적 사항들을 살펴 보았고 실내의 난류 유동 형태를 계산하여 비정상상태의 농도분포의 변화를 계산하는 과정을 설명하였다. 또 농도의 시간에 따른 변화를 이용하여 국부 평균 연령 및 국부 농도 감소율 등의 환기효율을 수치적으로 해석하는 환기 효율의 정량적 접근 방법을 제시하였다. 환기 효율의 예측을 위한 본 수치적 접근 방법과 이론적 배경을 이용하여 실제 환기 계통의 효율적인 설계에 응용될 수 있으리라 본다.

- 국부환기효율은 농도의 절대량 자체만으로

는 표현이 불가능하며 농도의 시간변화에 따른 변화로부터 국부적인 농도의 감소율이나 국부 평균연령을 이용하여 표현이 가능하다. 또 농도곡선의 적분으로 구해지는 국부평균 연령이 지수곡선의 곡선적합에 의한 국부 농도감소율보다 농도변화에 관한 정보를 종합적으로 포함하고 있어서 국부적인 환기효율을 보다 잘 표현한다고 할 수 있다.

- 전체환기효율은 실내의 최대 농도 또는 평균농도에 근거하여 배기구에서의 농도와 비교함으로써 전체 환기 시스템의 효율을 나타낼 수 있다. 또 위의 국부평균연령을 전 실내공간에 걸쳐서 평균함으로써 전체 평균연령을 구하고 이를 완전혼합시의 시간상수와를의 비를 이용하여 전체 환기효율로 표시할 수도 있다. 이 평균연령과 명목 시간상수의 비를 공기확산계수라고 하는데 이를 환기시스템의 설계에 응용할 수 있다. 공기확산계수는 완전혼합의 경우는 100%이며 비혼합의 경우 변위환기에서는 200%이다.
- 공기유동형태에 따라 국부적으로 환기의 효율의 변화가 심하게 나타날 수 있으며 이와 같은 경우에는 완전혼합의 가정하에서의 설계방식이 그대로 사용되어서는 안 된다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE 62-1991, 1991, ASHRAE Standard, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
2. Hörz, T., and Danielsson, P-O, 1987, "Displacement Ventilation", 8th AIVC Conference, Ventilation Technology-Research and Application, Überlingen, Federal Republic of Germany.
3. Jones, W.P., and Launder, B.E., 1973, "The Calculation of Low-Reynolds Number Phenomena with a Two-Equation Model of Turbulence", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.16, pp.1119-1130.

4. Kuehn, T.H., Ramsey, J.W., Han, H., Perkovich, M., and Corpron, M., 1991, "Experimental Study of Airflow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half-Scale Office Building", Proc. 3rd Int. Symposium on Ventilation for Contaminant Control.
5. Sandberg, M., 1983, "Ventilation Efficiency as a Guide to Design", ASHRAE Trans., Vol.89, Pt. 2B, pp.455-479.
6. Sandberg, M., 1981, "What is Ventilation Efficiency", Building and Environment, Vol.16, No.2, pp.123-135.