

공기청정기에 의한 실내기류 해석

한 재 오*, 김 영 생, 모 진 용, 이 재 권

(주)삼성전자 생활가전총괄 시스템가전(사) 공조개발

Analysis of Indoor Air-flow with Air Cleaners

Jae-Oh Han*, Young-Saeng Kim, Jin-Yong Mo, Jai-Kwon Lee

ABSTRACT: 본 연구는 공기청정기의 성능에 영향을 미치는 인자로서 흡입구, 배기구의 위치 및 형상, 그리고 실내 공간상 배치 등에 대해 수치해석에 의한 모사를 통하여 평가하였다. 해석 방법으로는 먼저 유동장을 해석한 후 고정된 유동장 내에서의 먼지 입자의 거동을 검토하였다. 배기구 위치에 의한 성능해석 결과는 배기구를 상면에 위치하게 할 경우 양 측면에 위치한 구조 보다 우수한 성능을 나타내었으며, 설치위치에 대한 성능해석 결과는 제한적이나 현관 옆에 설치 할 경우 해석된 두 가지 모델 모두 우수한 성능을 나타내었다.

Key words: Air cleaner(공기청정기), FVM(유한체적법), Path line(유적선)

1. 서 론

1.1 연구의 필요성 및 목적

본 연구는 실내 공간에 설치될 공기청정기의 구조 및 형상, 공간상 배치 등의 설계 인자들을 검토하고, 수치해석을 통하여 실내 기류 및 오염 물질의 거동을 해석하여 공기청정기의 성능을 향상시킬 수 있는 조건들을 찾고자 수행되었다.

대기오염에 관한 우리들의 의식은 높아졌지만, 삶의 약 90%에 해당하는 시간을 보내는 실내 공기 오염의 심각성에 대해서는 거의 인식하지 못하고 있는 실정이다. 미국 환경보호청(EPA)의 연구에 의하면, 실내 오염 물질의 농도가 실외에 비해 2~5배 가량 또 실내에서 활동 할 시에는 그

수치가 100배 이상 높아진다고 밝히면서 심각한 실내 공기오염 문제에 대해 경고하고 있다. 오염된 실내 공기는 거주자들의 질병을 유발하며, 특히 체중에 대한 호흡률이 높은 어린이들에게는 더욱 위험하다. 이러한 실내 공기오염을 막을 수 있는 효과적인 방법의 하나가 공기청정기이다. 공기청정기의 성능에 영향을 미치는 인자로는 흡배기구의 위치 및 형상, 실내 공간상의 배치 등을 들 수 있다. 이러한 인자들에 대한 영향은 실험이나 수치해석에 의한 모사(simulation)를 통하여 예측되고 평가될 수 있다.

본 연구에서는 범용 CFD 코드인 FLUENT를 사용하여 공기청정기가 설치된 실내 공간의 기류 해석 및 먼지 입자 등의 오염물질의 거동을 해석하고, 여러 결과들을 가시화하여 본 연구의 대상인 공기청정기의 설계에 도움이 되도록 하였다.

* (주) 삼성전자

Tel.: +82-31-200-6657; fax: +82-31-200-6416

E-mail address: jo.han@samsung.com

1.2 연구 내용

본 연구에서는 오염물로 먼지 입자를 대상으로 하였다. 공기청정기가 설치되어있는 실내 공간의 유동현상은 공기와 먼지 입자가 이동하는 이상유동이다. 하지만 먼지입자가 유동에 미치는 영향이 거의 없어, 먼지 유동장을 해석하고 고정된 유동장 내에서의 먼지 입자의 거동을 살펴 보았다.

먼저, 각 모델들의 경우를 해석하여 청정기의 흡입구 및 배출구에 의한 영향을 살펴보았다. 각 경우에 대표되는 먼지입자의 거동을 토대로 청정기의 성능을 예측하였다. 다음은 새로운 모델을 대상으로 실거주 환경을 모사하여 유동장을 해석하고, 공기청정기의 설치위치에 따른 영향을 분석하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 지배 방정식

본 연구에서 유동을 지배하는 보존 방정식은 다음과 같다.

$$1) \text{ 질량보존 : } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = S_m \quad (1)$$

- ρ : 밀도 [kg/m³]
- t : 시간 [sec]
- x_j : j 번째 좌표 [m]
(j=1이면 x, 2이면 y, 3이면 z)
- u_j : j 방향 속도 [m/sec]
- S_m : 질량 source 항 [kg/m³sec]

2) 운동량보존 :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

- p : 압력 [N/m²]
- μ : 유체의 점성계수 [Nsec/m²]
- g_i : 중력가속도 [m/sec²]
- S_i : 기타 body force
또는 momentum source [N/m³]

3) 스칼라보존 :

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (3)$$

- ϕ : 에너지, 난류 등의 스칼라 량
- Γ : 확산 계수
- S_ϕ : ϕ 의 source

본 연구에서 난류모델은 Standard k-ε 모델을 사용하였고, 정상상태 비압축성 유동해석을 수행하였다. 본 연구에서는 유한체적법(FVM)을 사용하는 범용 CFD 코드인 FLUENT를 사용하여 수치계산을 수행하였다.

2.2 먼지 입자의 거동 해석

먼지입자의 경우는 먼저 유동장을 계산하고, 계산된 유동장내에서 운동방정식을 적용하여 거동을 해석하였다.

입자상(Bio-Cube)의 운동방정식은 아래와 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } F_d = \frac{18\mu}{\rho D_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad Re = \frac{\rho D_p |u - u_p|}{\mu}$$

이고, 첨자 p 는 입자(particle)에 대한 값임을 의미한다. 식(4)는 직교좌표계에서 x 방향에 대한 식이다. 그리고 y좌표 및 z좌표에 대해서도 동일한 개념의 운동방정식이 적용된다.

먼지는 입자 상태의 오염 물질 중 아주 작은 고체 입자 상태의 떠다니는 부유물질을 의미한다. 직경이 10 μ m 이상인 먼지는 강하먼지라 하고, 10 μ m 이하의 먼지를 부유먼지라 칭한다. 입자 크기 0.5~5 μ m 범위의 먼지를 호흡성 먼지라 하며, 환경문제로 대두되고 있는 황사는 입자크기는 0.2~20 μ m 범위로서 강하먼지와 부유먼지를 모두 포함한다. 부유 물질의 입자크기를 Fig. 1에 비교하여 나타내었다. 대기환경기준이 되는 먼지는 크기가 10 μ m인 PM-10이다.

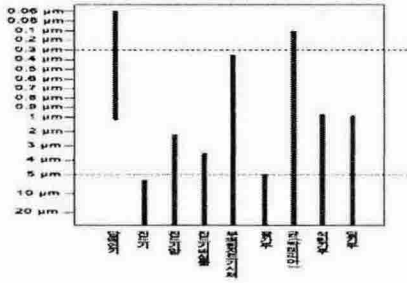


Fig. 1 부유 물질의 크기 비교

본 연구에서는 먼지크기 0.1, 1, 5, 10, 20 μ m의 각각의 경우 먼지 입자 100를 추적하여 배출 및 정착되는 개수와 평균배출시간 등을 해석하였다. 이때 먼지 입자의 밀도는 8g/cm³ 이다.

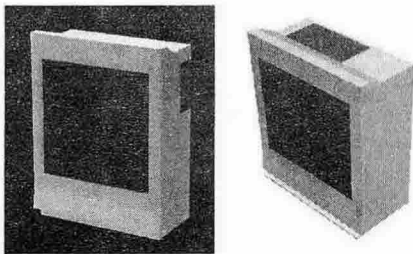
3. 계산결과 및 고찰

3.1 토출형상에 대한 해석 결과

3.1.1 해석 대상 및 계산조건

해석 대상인 공기청정기의 형상은 Fig. 2에 보이는 model 1, 2와 같이 양 측면에 배출구가 있는 형식과 상면에 있는 두 가지 구조이다. 해석 영역은 Fig. 3과 같이 공기청정기가 설치된 10평의 실내공간을 대상으로 하였으며, 초기 먼지입자의 위치를 나타내었다.

Model 1와 model 2의 경계조건들을 살펴보면, 전체 유량은 4.7m³/min, 배출구에서 속도는 3.37m/sec, 배출구 면적은 0.023227m² 이고, 흡입구 면적은 0.1054m² 로 동일한 조건이다.



(a) model 1(측면) (b) model 2(상면)

Fig. 2 해석모델의 형상

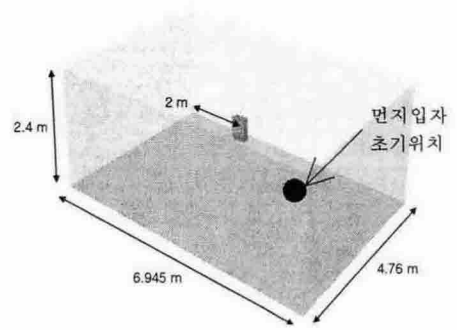


Fig. 3 해석영역과 초기 먼지위치

3.1.2 계산 결과 및 고찰

Model 1, 2의 계산결과 중 공기청정기로부터 토출된 공기의 궤적을 보여주는 유적선(pathline)을 Fig. 4, 5에 나타내었다. 위의 결과에서 기존의 두가지 모델에서 유동장의 계산결과를 분석해보면 model 2의 경우가 model 1에 비하여 흡입구로 유도되는 와류형성이 양호하였다.

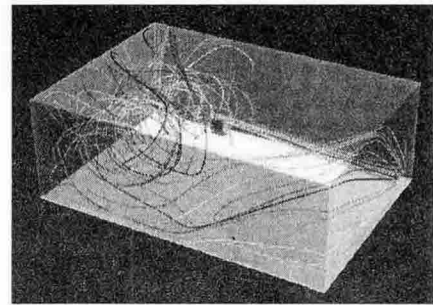


Fig. 4 공기의 Pathline (model 1)

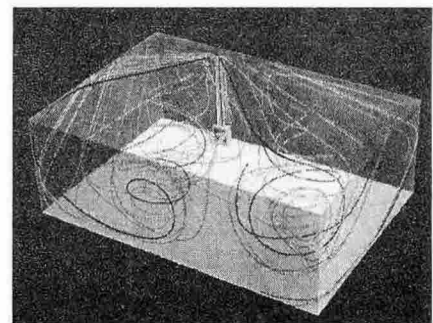


Fig. 5 공기의 Pathline (model 2)

Table 1과 Table 2는 model 1와 model 2의 각 입자 크기별 거동을 정리하였다. 각 Table에서 escape은 흡입구로 들어오는 입자의 개수이고, trap은 바닥에 점착되는 입자의 수를 나타낸다. Table 1에서 보는 바와 같이 model 1의 경우는 $5\mu\text{m}$ 이상의 입자는 모두 점착되어 흡입이 되지 않는 것을 볼 수 있고, Table 2에서와 같이 model 2의 경우는 $20\mu\text{m}$ 인 경우에 입자가 모두 점착되고, 그 이하의 size에서는 먼지입자의 흡입이 존재한다.

Table 1과 Table 2는 먼지 입자 100개 당 배출 되거나 바닥 및 거실 가구에 점착(trap)되는 개수를 나타낸다. 먼지입자의 거동을 살펴 볼 때, model 2의 경우가 먼지 제거 성능이 우수 할 것으로 사료된다. 이러한 결과의 원인은 앞에서 설명한 바와 같이 model 2의 경우가 먼지 입자를 공기청정기 흡입구로 유도하는 와류를 잘 형성시키고 있기 때문으로 판단된다.

Table 1 먼지 입자의 거동 (model 1)

입자 Size (μm)	escape	trap	incomplete
0.1	1	0	99
1	63	30	7
5	0	100	0
10	0	100	0
20	0	100	0

Table 2 먼지 입자의 거동 (model 2)

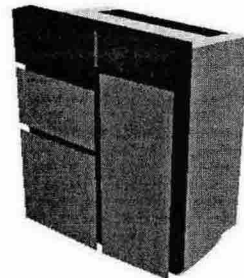
입자 Size (μm)	escape	trap	incomplete
0.1	61	9	30
1	90	6	4
5	31	69	0
10	42	58	0
20	0	100	0

3.2 모델형상 및 설치위치에 대한 해석 결과

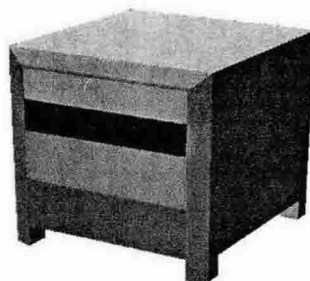
3.2.1 해석 대상 및 계산조건

형상 및 설치위치에 대하여는 Fig. 6 (a), (b)에 보이는 바와 같이 일반적인 공기청정기 구조인 전면으로 흡입되어 상면으로 토출되는 stand type 모델과 바닥면으로 흡입되어 전면으로 토출되는 table type 모델을 대상으로 해석을 수행하였다. 해석영역은 Fig. 7의 40평형대의 아파트 거실과 같은 12평의 실거주 실내공간을 모사하여 계산하였다.

해석 조건들을 살펴보면, 전체 유량은 7CMM로 동일하나 stand type의 배출구 면적은 0.023m^2 , 배출구에서 속도는 5.02m/sec 이고, table type의 배출구 면적은 0.037m^2 , 배출구에서 속도는 3.13m/sec 으로 형상과 배출유속에 다소 차이가 있으며, 설치 위치는 12평형 거실에서 현관 옆과 소파 옆, 2곳을 대상으로 해석을 수행하였다.



(a) stand type 모델



(b) table type 모델

Fig. 6 해석모델 형상

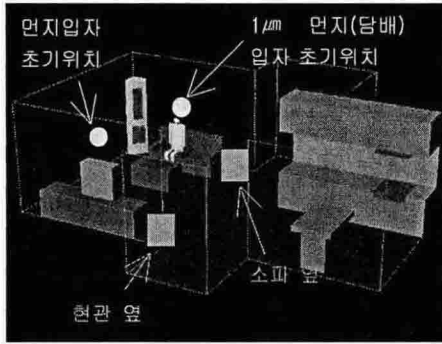


Fig. 7 해석 영역 및 설치 위치, 먼지입자의 초기위치

또한, Fig. 7에 초기 먼지 입자(0.1, 0.5, 5, 10, 20 μ m)의 위치를 나타내었고 그 위치는 창문에서 0.9m 안쪽, 1.2m 높이이다. 그리고 담배연기로 가정하는 1 μ m의 먼지입자의 초기위치는, 사람 머리위치로서 소파중앙에서 1.4m 높이이다.

3.2.2 계산 결과 및 고찰

Stand type 모델의 계산결과 중 실내공간에서의 공기의 궤적을 Fig. 8, 9에 나타내었으며, 먼지입자 100개당 배출되거나 바닥 및 거실 가구에 점착(trap)되는 개수와 평균 배출시간을 Table 3, 4에 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 설치 위치 두 경우에 10 μ m이하의 부유먼지가 공기청정기로 흡입되는 것을 알 수 있다. 현관 옆에 설치하는 경우가 우수한 성능을 나타내었다.

Table type 모델의 계산결과 중 실내공간에서의 공기의 궤적을 Fig. 10, 11에 나타내었으며, Table 7과 Table 8은 먼지 입자 100개 당 배출

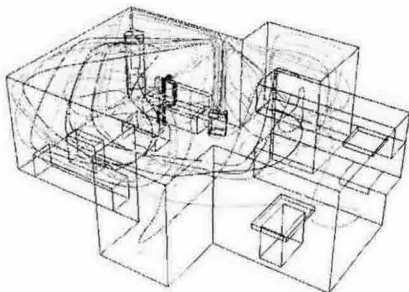


Fig. 8 실내 기류의 pathline (소파 옆)

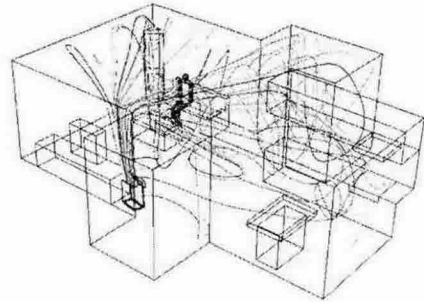


Fig. 9 실내 기류의 pathline (현관 옆)

Table 3 먼지 입자의 거동 (소파 옆)

먼지 입자	설치 위치 (소파 옆)			평균 배출 시간(sec)
	Escape	Trap	In-complete	
0.1 μ m	57	43	0	699
0.5 μ m	61	38	1	537
1 μ m	48	51	1	821
5 μ m	19	79	2	265
10 μ m	67	33	0	44
20 μ m	0	100	0	-

Table 4 먼지 입자의 거동 (현관 옆)

먼지 입자	설치 위치(현관 옆)			평균 배출 시간(sec)
	Escape	Trap	In-complete	
0.1 μ m	86	13	1	702
0.5 μ m	82	18	0	782
1 μ m	44	53	3	782
5 μ m	20	80	0	455
10 μ m	79	21	0	80
20 μ m	70	30	0	23

되거나 바닥 및 거실 가구에 점착(trap)되는 개수와 평균 배출시간을 나타낸다. Table에서 보는 바와 같이 설치 위치가 다른 두 경우 모두에서 5 μ m이하의 부유먼지가 공기청정기로 흡입되는 것을 알 수 있다. 이 모델의 경우도 stand type과 같이 현관 옆에 설치하는 경우가 전체적으로 먼지제거 효율이 양호하게 나타났다.

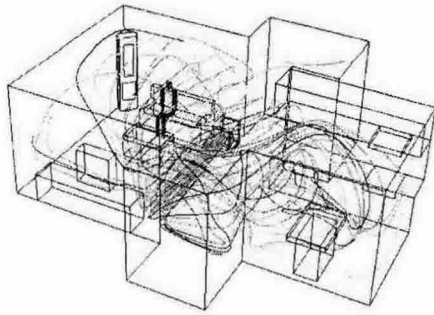


Fig. 10 실내 기류의 pathline (소파 옆)

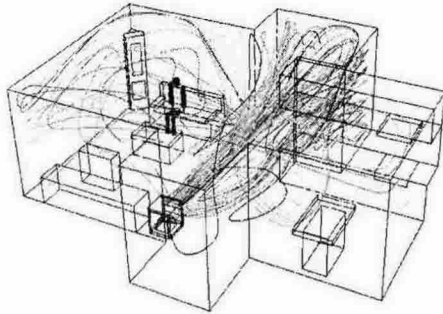


Fig. 11 실내 기류의 pathline (현관 옆)

Table 5 먼지 입자의 거동 (소파 옆)

먼지입자	공기 청정기 설치 위치(소파옆)			
	Escape	Trap	In-complete	평균 배출 시간(sec)
0.1 μm	54	44	2	905
0.5 μm	37	58	5	965
1 μm	88	10	2	152
5 μm	0	100	0	-
10 μm	0	100	0	-
20 μm	0	100	0	-

4. 결론

본 연구에서는 먼저 공기청정기의 형상 및 구조, 특히 흡입구 및 배출구에 의한 영향을 살펴 보았다. 다음 단계로 서로 다른 모델들을 대상으로 공기청정기의 설치 위치에 따른 영향을 분석 하였다. 각각의 경우에 먼지 입자의 거동을 토대로 청정기의 성능을 예측하였다. 본 연구의 해석 결과로부터 아래의 결론을 얻을 수 있었으며,

Table 6 먼지 입자의 거동 (현관 옆)

먼지입자	공기 청정기 설치 위치(현관 옆)			
	Escape	Trap	In-complete	평균 배출 시간(sec)
0.1 μm	99	1	0	202
0.5 μm	97	3	0	158
1 μm	51	44	5	651
5 μm	20	80	0	120
10 μm	0	100	0	136
20 μm	0	100	0	-

연구결과를 향후 공기청정기의 설계 시와 공간 배치 등의 기준 설정 시에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

(1) 배출구 형상에 대한 해석 결과, 먼지입자의 거동을 살펴볼 때, model 2의 경우가 먼지 제거 성능이 우수할 것으로 사료된다. 그 원인은 먼지 입자를 공기청정기 흡입구로 유도하는 와류를 잘 형성시키고 있기 때문으로 판단된다.

(2) Stand type 모델의 경우는, 10μm 이하의 부유 먼지가 공기청정기로 흡입되었다. 먼지 입자의 거동 해석결과로 판단해 볼 때 현관 옆에 설치하는 경우가 우수한 성능을 나타내었다.

(3) Table type 모델의 계산결과를 살펴보면, 5 μm 이하의 부유 먼지가 공기청정기로 흡입되었다. 현관 옆에 설치하는 경우가 전체적으로 먼지 제거 효율이 좀 더 양호하게 나타났다.

후 기

본 연구는 '공기청정기에 의한 실내기류 해석'이라는 과제로 ATES(주) CFD Engineering 사업부와 진행한 산학 결과자료임.

참고문헌

1. S. V. Patankar, 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing.
2. Fluent 6 User's Manual, Fluent Inc.Kim, 2002.