

# 미생물 안전을 위한 승용차 실내 UVGI 살균기 설치에 관한 시뮬레이션 연구

최 상 곤\*

\*유한대학교 건축설비과

## A Study on simulation analysis of UVGI air sterilizer installation in a car for microbiological safety

Sang-Gon Choi\*

\*Dept. of Bilding Services, Yuhan University

### Abstract

The recent rise in SARS and bird flu infections around the world has raised the interest in studying the habits of air borne pathogens such as germs and viruses. In this study, simulations were carried out to predict the performance of UVGI air sterilizer at preventing airborne infections inside a car, based on the installation position and the removing effect of the UVGI air sterilizer. Simulation results showed that the UVGI air sterilizer was most effective when located at the rear side of the front seats. It was also showed that when the out-air mode and the UVGI air sterilizer were set to the highest capacity, the microbial safety levels were maintained in a car for 21 hours.

**Keywords :** CFD, Microbe transport, UVGI air sterilizer

### 1. 서 론

최근 중증 급성호흡기 증후군(SARS: severe acute respiratory syndrome)과 조류 독감의 세계적인 유행은 공기로 전파되는 질병의 광범위한 전파를 잘 보여주고 있다. 이러한 실내 부유 미생물에 의해 전파되는 질병은 보균자와 직접적인 접촉이 아닌, 감염자와 같은 공간에 머물기만 해도 공기로 전파된다는 점에서 그 심각함과 이를 방지하는 것 또한 매우 중요하다 할 것이다. 이러한 공기 중의 부유미생물에 의한 2차 감염을 막기 위하여서는 공기 중의 부유미생물의 유동을 파악하고 이를 적절히 제거할 수 있는 수단이 필요하게 된다.

이 연구는 교통수단 중 승용차에 보균자와 동승자들이 탑승한 경우, 감염을 방지하기 위한 수단으로 부유

미생물을 제거하는 실내 살균장치의 설치 및 살균장치의 성능예측을 위해 수행되었다. 실내 부유미생물의 확산에 관한 연구는 극히 제한적인 실증연구들로부터 시뮬레이션을 이용하는 연구까지 다양한 방법으로 이루어지고 있다. 실증 실험인 경우는 독성이 매우 높은 병원균을 실험에 직접 사용하여 실험을 수행하기가 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 기존의 연구들을 바탕으로 시뮬레이션을 통한 연구를 수행하였다. 기존의 연구들로, 2005년 실험실내에서 UV-C 살균기를 대상으로 부유미생물의 살균성능 실증 실험[1], 2006년 2D Multi-zone 시뮬레이션과 실증실험 병행 연구[2], 2009년 연구에서는 개인 사무공간에 대한 부유미생물에 대한 UV-C장치의 살균성능 실증 실험이 수행되었다[3].

\* Corresponding Author : Sang-gon, Chio. Yuhan College, Goean-dong, Sosa-gu,

Bucheon-si, Gyeonggi-do, DEPT. Building Services

M · P : 010-2981-4949, E-mail : tool007@yuhan.ac.kr

Received July 14, 2014; Revision Received September 17, 2014; Accepted September 20, 2014.

2010년의 연구에서는 앞선 연구들을 바탕으로 CFD(Computational Fluid Dynamic)를 이용하여 부유 미생물의 3D particle trace를 보였다[4]. 이 연구를 보강하기 위한 2012년 연구에서는 CFD 프로그램을 이용하여 공기유동에 따른 적절한 부유미생물의 거동을 보였다.[5] 이러한 연구들로부터 2013년 연구에서는 승용차 내부 부유 미생물 거동을 예측하기 위해 상용 CFD 프로그램인 CFX를 이용하여 실제 공기 중 부유 미생물의 거동을 예측 하였다[6].

이 연구에서는 앞선 연구들로부터의 결과들을 바탕으로 승용차 내부에 공기살균장치를 설치하는 경우에 대한 부유미생물의 제거 성능의 예측을 위하여 NIST에서 개발한 2D 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM과 상용 CFD 프로그램인 CFX를 이용하여 시뮬레이션 연구를 하였다.

연구를 위하여서는 모든 세단형 차종에 대해 살펴야 할 것이지만 자동차의 도면이 각 회사별 대외비이며, 세단형의 승용차 경우는 실내공간이 구조가 흡사하다고 판단하여 연구에 참여한 A사의 B승용차 모델을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구축하고 4명의 동승자 중 한명이 보균자인 경우 승용차의 공조 시스템을 이용하여 실내에 공기살균장치를 설치하는 경우에 대한 부유 미생물의 제거를 예측하였다.

## 2. 모델링

### 2.1 CFD 유동모델

CFD를 이용한 자동차 내부의 공기유동 모델은 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 모델링 기법을 사용하였다. RANS 모델의 비압축성유체의 지배 방정식은 다음과 같다[7].

(1) Continuity

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

(2) Momentum

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (v_{eff} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) + S_{U_i} \tag{2}$$

여기서,  $\rho$  : 공기밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$U_i$  :  $x_i$  방향 평균속도 [m/s]

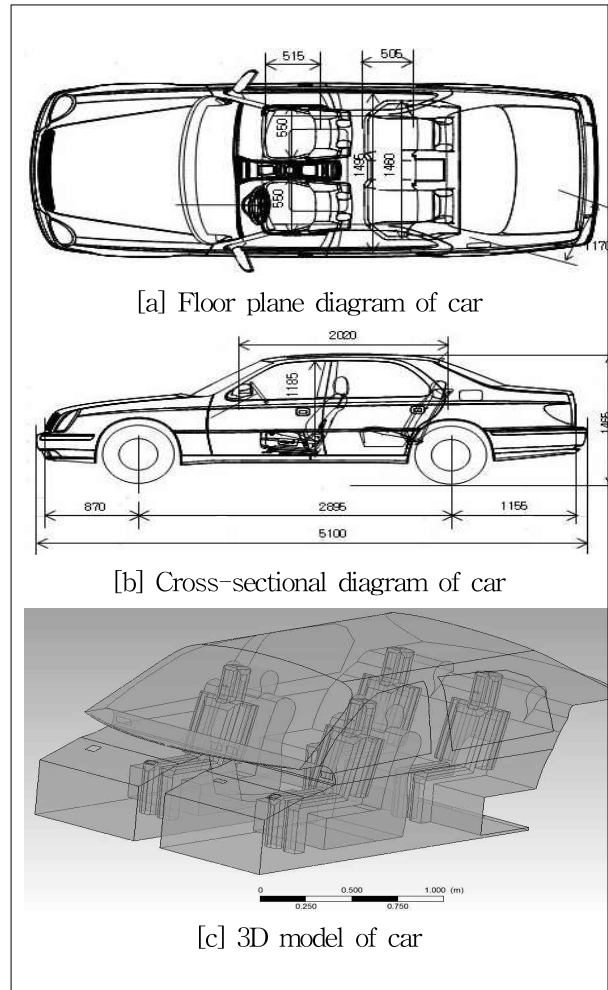
$t$  : 시간[s]

$v_{eff}$  : 점성계수 [Pa · s]

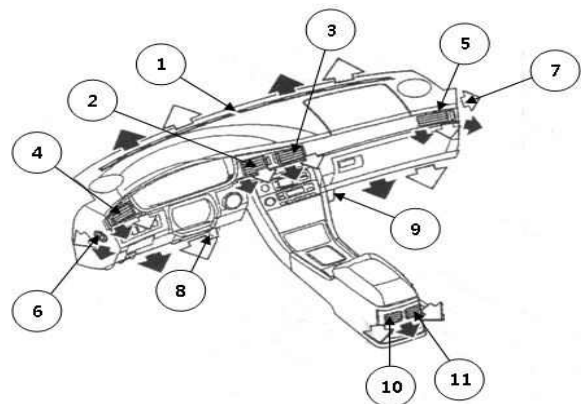
$S_{U_i}$  : source term

난류모델은 Standard k-ε을 적용하였다. Standard k-ε 모델로부터 와동점성( $v_e$ :eddy viscosity)은 다음과 같으며[6],

$$v_e = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$



[Figure 1] Diagram of car



[Figure 2] Diagram of ventilation diffuser

$C_\mu$ 는 난류계수(Turbulence model coefficient),  $k$ 는 난류운동에너지(Turbulence kinetic energy),  $\varepsilon$ 은 소멸율(Dissipation rate)로 일반적인 공간을 모사에 적절한 모델을 적용하였다.

[Figure 1]에 모델링을 위해 사용된 승용차의 계략도를 나타내었다. [Figure 2]에 실내에 설치된 자동차 공기조화 장치의 공기 토출구를 나타내고, <Table 1>에 각 토출구의 치수를 나타내었다.

[Figure 1]의 모델링에 사용된 승용차는 자가용으로 A사의 B모델로 현재 운행하는 모델이다. 이 승용차의 내부 공간을 3D CAD를 이용하여 모델링 하고 CFX의 Preprocess인 Design Modeler를 이용하여 내부유동과는 무관하거나 필요이상으로 복잡한 구조를 단순화 하였다.

[Figure 2]의 자동차급기는 <Table 1>의 토출구 크기를 적용하여 각각의 위치에서 공기를 급기 할 수 있도록 배치하였다.

## 2.2 Particle transport 모델

부유미생물 모델은 Influenza A virus를 대상으로 Virus를 Particle로 가정하였다. Particle 모델은 부유세균을 모델링하기 위하여 평균직경을 사용하여 구 형태로 가정함으로써 다음과 같이 유효직경을 나타낼 수 있다[8].

$$De = L \tag{5}$$

여기서, De : 유효직경, [microns]  
 L : 평균직경, [microns]

그러나, 종횡비가 3.5 보다 큰 경우의 수학적 접근은 Matteson과 Orr 이 1987년 실험적인 방법을 통하여 다음과 같이 나타내었다[6].

$$De = 0.285L \quad [Re < 2.0] \tag{6}$$

따라서 Influenza A virus를 대상으로한 Particle 모델은 0.098 $\mu$ m의 평균직경을 사용하였고, 밀도의 경우는 Bratbak and Dundas에 의해 제시된 1,100 kg/m<sup>3</sup>을 사용하도록 하였다[9].

부유세균 모델이 구형의 평균직경 0.098 $\mu$ m이고 밀도가 높지만 상대적으로 체적이 매우 작기 때문에 유동장내에서 질량을 가지는 Particle의 유동으로 정의 할 수 있다. 따라서 Particle의 이동 계산은 라그랑지안 기법(Lagrangian method)을 이용하여 수행 할 수 있다. Particle의 이동은 계

<Table 1> Diffusor size

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H (mm)	880	80	80	90	110	50	50	62	62	60	60
L (mm)	10	50	50	45	40	∅	∅	66	66	42	42

산시간  $\delta t$ 에 대하여 이동속도  $v_p=(dx_p/dt)$ 라 할 때 Particle의 이동은 다음과 같다.

$$x_{p_i}^n = x_{p_i}^0 + v_{p_i}^0 \delta t \tag{7}$$

여기서,  $x_{p_i}^0$ 는 초기위치,  $v_{p_i}^n$ 은 초기속도이다. 전방통합(forward integration)에서 Particle 속도는 다음의 momentum 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_{all} \tag{8}$$

여기서,  $F_{all}$ 은 Particle에 걸리는 모든 종류의 작용힘(Forces acting)이다. 작용힘들은 항력(Drag force), 부력(Buoyancy force), 양력(Lift force)들이다. 본 연구에서는 부유세균 모델이 구형의 평균직경 0.098 $\mu$ m로 브라운 운동에 의해 발생하는 힘(Brownian force)은 무시할 수 있을 만큼 매우 작게 발생할 것이므로 적용하지 아니한다[8].

## 2.3 운전자 및 동승자 모델

재실자 모델은 굴곡이나 옷 등에 대한 모사 보다는 인체발열과 오염원의 소스로서의 역할을 위하여 단순화 하였다. 보균자인 운전자의 경우는 70kg인 성인을 대상으로 호흡량인 11 l/min을 대상으로 1000개의 부유미생물을 입의 면적 0.005m<sup>2</sup>을 통하여 36.5℃의 온도를 가진 공기와 함께 공기 중으로 방출하는 것으로 하였다. 동승자의 경우는 운전자와 동일한 조건에서 호흡량인 11 l/min을 입에서 흡기하는 것으로 하였다. 모든 재실자는 앉아서 가벼운 사무를 하는 사람과 같은 인체발열량을 모델링 된 신체 표면적에 대하여 81 W/m<sup>2</sup>을 Heat flux 형태로 방출하는 것으로 하였다. 이 때 사람은 움직이지 않는 정자세를 유지하는 것으로 하였다.

### 2.4 UVGI 살균장치 모델

살균장치는 자외선 조사(UVGI : Ultra violet germicidal irradiation)를 이용하는 장치로서 Figure 3에 나타내었다. 단일 부유세균의 군집에 대한 자외선 조사(UVGI)의 성능은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[8].

$$\frac{N_t}{N_0} = \exp(-kE_{eff} \cdot \Delta t) = \exp(-k \cdot Dose) \quad (9)$$

- 여기서  $k$  : 부유세균의 표준율 상수 [ $cm^3/\mu W \cdot s$ ]
- $E_{eff}$  : 부유세균이 받는 유효조사량 [ $\mu W/cm^2$ ]
- $Dose$  :  $E_{eff}$ 와  $\Delta t$ 의 곱, 조사량 [ $\mu W \cdot s /cm^2$ ]

위와 같이 정의하는 경우 시간  $t$  후의 부유세균의 제거율은  $(1 - N_t/N_0)$ 으로 나타낼 수 있다. UVGI 모델은 제거 대상이 되는 부유세균에 대하여 일정한 효율을 나타내는 고정 살균율 모델로 하였다. 대상균에 대한 살균율은 UVGI16 등급으로 99.9%가 되도록 설계하였다. 살균장치는 자동차에 설치공간을 감안하여 운전석과 보조석 뒷부분에 삽입하여 설치하는 것으로 하고, 동작 풍량은 3stage와 같은 5 CMM으로 설정하였다.

### 2.5 자연제거 모델

낙하, 부착, 자연사멸 등의 자연제거율은 Deposition rate sink model을 이용하여 낙하율( $k_d$ )을 CFD 시뮬레이션의 Collected on walls의 결과로부터 값을 계산하여 사용하는 것으로 하였다. 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

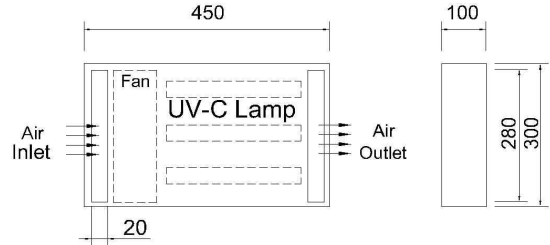
$$R_\alpha(t) = k_d V_z \rho_{air}(t) C_\alpha(t) \quad (10)$$

- 여기서  $R_\alpha$  : 시간  $t$ 에서 제거율 (kg/h)
- $k_d$  : 낙하율 (1/h)
- $V_z$  : 존의 체적 (L3)
- $\rho_{air}(t)$  : 시간  $t$ 에서 공기 밀도 (kg/L3)
- $C_\alpha(t)$  : 시간  $t$ 에서 오염 $\alpha$ 의 농도 (kg/kg)

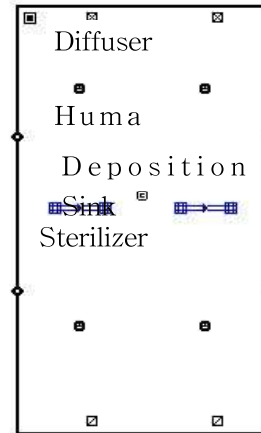
### 2.6 Multi-zone 모델

앞서 CFD 모델에 사용한 [Figure 1]의 승용차를 CONTAM을 이용한 Multi-zone 모델[2]을 도입하여 모델을 구축 하였다. 사용된 모델을 [Figure 4]에 나타

내었다. Multi-zone 모델에서는 앞서 2.1부터 2.5에 언급된 모델들이 2D의 Multi-zone 모델 방식으로 재구성 하였다. 결과를 확인하기 위한 부유미생물의 멀티존 시뮬레이션을 수행하기 위한 CONTAM에서의 오염원에 관한 지배 방정식을 다음에 나타내었다[2].



[Figure 3] UVGI sterilizer



[Figure 4] 2D model of car

$$\frac{dm_{\alpha,i}}{dt} = -R_{\alpha,i}C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j}C_{\alpha,i} + \sum_j F_{j,i}(1-\eta_{\alpha,j,i})C_{\alpha,j} + m_i \sum_\beta k_{\alpha,\beta}C_{\beta,i} + G_{\alpha,i} \quad (11)$$

- 여기서,  $m_{\alpha,i}$  : 존  $i$ 에서 오염원  $\alpha$ 의 질량 [kg]
- $m_i$  : 존  $i$ 에서 공기의 질량 [kg]
- $R_{\alpha,i}$  : 존  $i$ 에서 오염원  $\alpha$ 의 제거율, [0~1]
- $C_{\alpha,i}$  : 존  $i$ 에서 오염원  $\alpha$ 의 질량비율, [0~1]
- $C_{\beta,i}$  : 존  $i$ 에서 오염원  $\beta$ 의 질량비율, [0~1]
- $F_{i,j}$  : 존  $i$ 에서 존  $j$ 로 흐르는 공기유량 [kg]
- $F_{j,i}$  : 존  $j$ 에서 존  $i$ 로 흐르는 공기유량 [kg]
- $K_{\alpha,\beta}$  : 존  $i$ 에서 오염원  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 운동반응 계수
- $K_d$  : 낙하율 [1/h]
- $\eta_{\alpha,j,i}$  : 존  $i$ 에서 존  $j$ 로 흐를 때 제거율, [0~1]

## 2.7 모델 해석

3D 해석 모델을 설정하기 위하여 앞서 언급된 기법의 구체적인 내용과 격자 조건을 <Table 2>에 나타내었다. <Table 2>에서 보는 것과 같이 자동차의 내부공간의 격자의 수를 약 300만개로 일반적인 실내공간에 비하여 복잡한 내부구조를 가지기 때문에 경계(Boundary) 근처에서 격자의 최소 크기를 3mm, 실내공간에 간격이 넓은 곳에 최대크기 10mm로 배치하여 수렴도를 높이기 위하여 격자를 구성하도록 하였다.

인체발열 및 창을 통한 일사의 영향을 해석하기 위하여 에너지와 난류 모델을 적용하였다. 인체는 실내기류 분포에 최대한 영향이 적게 미치는 한도에서 단순화하여 나타내도록 하고, 인체 모든 표면에 부유미생물이 접촉하면 부착으로 인해 실내 공기 중에서 제거되는 것으로 하였다.

자동차 내부의 벽과 의자를 통하여 열출입이 없는 것으로 가정하였으며, 벽과 의자에 부유미생물이 접촉하는 경우에도 부착으로 인해 실내공기 중에서 제거되는 것으로 하였다.

유리창을 통한 일사는 실내에 직접 열전달되는 것으로 가정하였다. 이에 따라 인체 및 일사로 인한 부력항을 계산할 수 있도록 모델을 구성하였다.

Particle은 중력, 열해석에 의한 공기의 부력 및 Particle의 Buoyancy force, Lift force, Drag force 모델도 해석하도록 하였다.

<Table 3>에 2D와 3D모델을 해석하기 위한 경계조건(Boundary condition)을 나타내었다. 경계조건은 출구(Outlet)조건과 구조(Body)조건을 고정 조건으로 하고, 입구(Inlet)조건인 급기량을 바탕으로 4가지 경우를 대상으로 수행되었다.

출구조건은 자동차 외부조건인 대기압으로 압력차에 의한 배기로 가정하였다. 재실자는 약 70kg의 체중을 가진 남자의 평균체형 착석한 상태에서 움직이지 않는 경우 81 W/m<sup>2</sup>의 발열과 11 l/min의 호흡량을 가지는 것으로 가정하였다. 단 보균자는 호흡량에 따라 부유세균 1000개를 실내로 공급하고, 다른 동승자 3명의 경우는 호흡량에 따라 흡기하여 동승자의 입을 통하여 전파되는 부유세균의량을 측정할 수 있도록 하였다.

해석을 위한 변화조건인 급기는 자동차의 공조시스템을 수동 조작하는 것을 대상으로 1단(Stage)~4단(Stage)까지 조작하여 [Figure 2]에 나타난 취출구로 등배분하여 자동차 실내로 급기 되도록 하였다. 급기의 방향은 토출구의 법선방향으로 고정하고 급기구에 설치되어있는 풍향 조절 장치는 조작하지 않는 것으로

가정하였다. 공조시스템은 크게 순화모드와 외기도입모드의 두 가지 방법으로 가동되는 것으로 하였다. 순환모드의 경우 MERV12 등급의 Medium 필터가 설치

<Table 2> CFD Simulation condition

mesh	Tetra about 3,200,000 nodes min. size 3 mm max. size 10 mm
Fluid	Continuous fluid : Air (Ideal gas) Turbulence : Standard k-ε density difference Buoyancy turbulence : Production and dissipation Heat transfer : Thermal energy Thermal radiation : fluid dependent
Particle	Coupling : Fully coupled (Buoyancy force, lift force) Momentum transfer : Drag force : schiller nauman
wall	Slip wall Standard wall function

<Table 3> Boundary condition

Inlet	1 stage	2 CMM, temp.12°C
	2 stage	3.5 CMM, temp.12°C
	3 stage	5 CMM, temp.12°C
	4 stage	7 CMM, temp.12°C
Outlet	atmospheric pressure outlet Out air temp. 35°C	
body	infected person Mouth	11 l/min, exhalation Particle 1000 EA 309.5 K
	Other occupant Mouth	11 l/min, inhalation
	Humen	81 W/m <sup>2</sup> particle collect
	Windows	397 W/m <sup>2</sup> particle collect
	Chair	Isolated particle collect
	Wall	Isolated particle collect

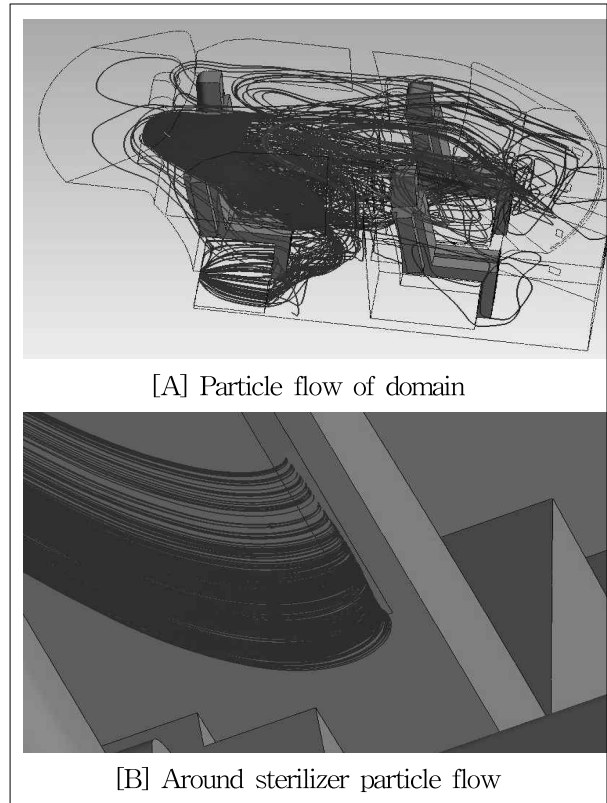
되어있고[2], 덕트나 장치에 부유미생물이 부착 등으로 자연제거 되는 것을 감안하여 자연제거 모델에서 추가적으로 부유미생물을 제거 한다고 가정하였다.

### 3. 결과 및 분석

우선 모델의 부유미생물의 유동과 살균기의 설치위치의 적정성을 검증하기 위하여 Figure 5에 3stage의 CFD의 결과를 나타내었다. [A]에는 감염자가 후방 좌측에 있을 경우에 감염자의 입에서 나온 부유미생물의 유동경로를 나타내었다. [B]에는 살균기 입구 주변에서의 부유미생물 유동경로를 나타내고 있다. CFD의 결과는 Collected on wall의 결과가 365개, Left domain의 결과가 612개, Exceed limit의 결과가 23개로 부유미생물의 벽이나 사람의 몸에 부착되는 경우, 살균기의 입구와 공기 출구로의 유동 및 잔류에 대하여 적절하게 모사된 것을 알 수 있다. 또한 살균기의 설치를 위하여 특별한 공간마련이 어려운 자동차의 현실을 고려하면 살균기의 위치를 운전석과 보조석 뒷면에 부착되는 경우 부유미생물을 적절히 살균기 입구로 유인할 수 있는 위치임을 알 수 있다.

[Figure 6]에 1stage의 풍량에서 부유미생물의 제거 결과들을 비교하여 나타내었다. 1시간 경과 후 잔류하는 부유미생물의 결과가 부유미생물의 제거가 전혀 없는 경우(Non)가 체적당 16000개, 자연제거 모델에 의해서만 제거되는 경우(Deposition)가 체적당 10106개, 필터로만 제거되는 경우(Filter)가 체적당 1937개, 차량내부의 공기가 공기조화시스템에 의해 전량 재순환하면서 자연제거와 필터에 의해 부유미생물이 제거되는 경우(Recirculation mode)가 체적당 1728개, 차량내부의 공기를 전부 배출하고 신선한외기를 도입하여 외기와 자연제거에 의해 부유미생물이 제거되는 경우(Outair mode)가 체적당 485개로 나타내었다. 결과는 자연제거 모델에 의해서 약 36.8%의 부유미생물이 제거되고, 필터에 의해서 통과하는 공기에서 약 87.8%가 제거되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 자동차실내에서 미생물유동에 의해 벽이나 사람 등에 접촉하거나 낙하하는 CFD의 Collected on wall의 결과가 평균 약 35%인 것과 MERV12 필터의 경우 실제 0.01 $\mu$ m의 Particle 제거 성능이 84.5%인 것을 감안한다면, 모델들이 적정하게 동작하여 실내의 부유미생물을 제거하는 것을 잘 모사하고 있음을 나타내고 있다.

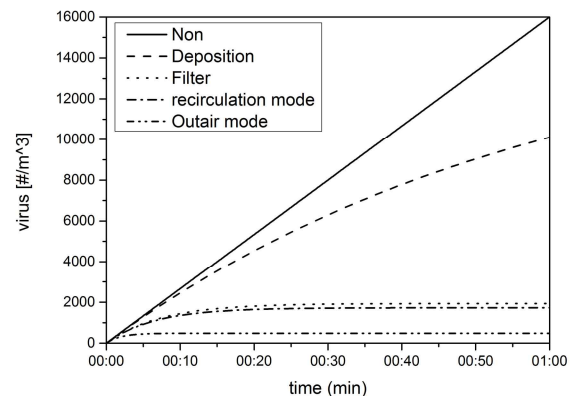
Figure 7에 자동차 내부의 공기를 재순환하는 경우의 결과를 나타내었다. 1시간이 경과하면 1stage는 체적당 1728개, 2stage는 체적당 1036개, 3stage는 체적당 739개,



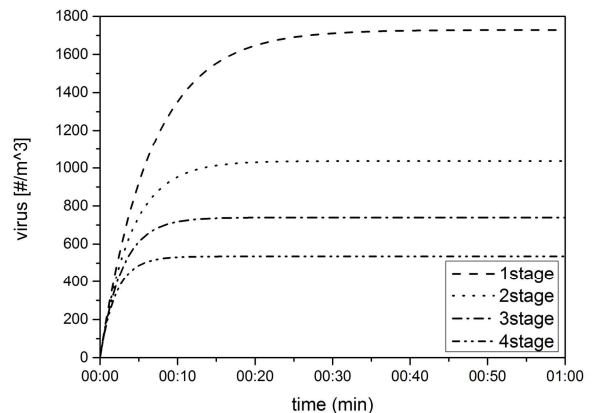
[A] Particle flow of domain

[B] Around sterilizer particle flow

[Figure 5] Result of CFD



[Figure 6] Result comparison in 1stage



[Figure 7] Result of air recirculation mode

4stage는 체적당 535개의 부유세균이 잔류하는 것을 나타냈다. 이러한 결과는 실험 대상인 Influenza A virus의 경우 감염률 50%인 ID50(Infection dose, 50%)이 790개 인 것을 감안한다면, 차량의 공기조화시스템으로 공기를 재순환시켜 설치된 필터만을 이용하여서는 1시간이 경과된 이후에는 실내부유미생물을 안전한 상태로 유지 못한다는 것을 알 수 있다.

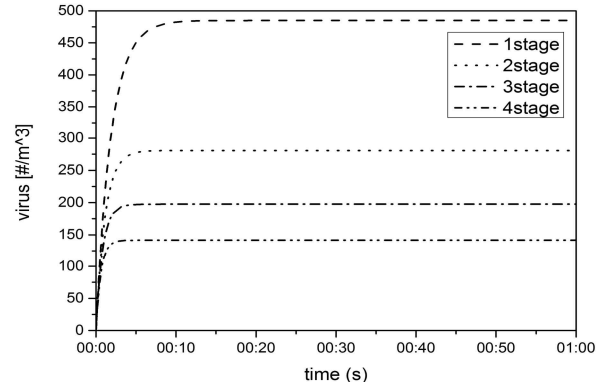
[Figure 8]에 자동차 내부의 공기를 전부 배기하고 외기를 도입하는 경우의 결과를 나타내었다. 공기조화시스템을 통하여 전외기방식으로 운전하는 경우 1시간 경과 후 부유미생물의 잔류량은 1stage는 체적당 485개, 2stage는 체적당 281개, 3stage는 체적당 198개, 4stage는 체적당 142개의 부유세균이 잔류하는 것을 나타냈다. 이러한 결과는 차량의 공기조화시스템을 전외기방식으로 운전하는 경우 공기의 재순환을 통하여 부유미생물이 다시 차량 내부로 유입되지 않기 때문에 공기를 재순환시켜 설치된 필터만을 이용하는 경우보다 상당히 효과적으로 부유미생물을 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 내부순환모드보다는 전외기모드가 실내미생물안전을 유지하기 위하여서는 상대적으로 효과적인 것을 알 수 있다.

[Figure 9]에 자동차 내부에 공기살균장치를 설치하여 가동하고 공기를 재순환시키는 경우의 결과를 나타내었다. 1시간 경과 후 1stage의 풍량으로 운전하는 경우 잔류 부유미생물은 체적당 95개, 2stage는 체적당 약 91개, 3stage는 체적당 88개, 4stage는 체적당 84개의 부유세균이 잔류하는 것을 나타냈다. 공기살균장치를 자동차 내부에 설치하고 가동하면 모든 경우 체적당 100개 이하의 부유미생물 잔류량을 나타내는 것을 알 수 있다. 살균기를 설치하는 경우가 동일한 조건에서 부유미생물 제거성능을 85%에서 95%까지 높일 수 있는 것으로 나타났다.

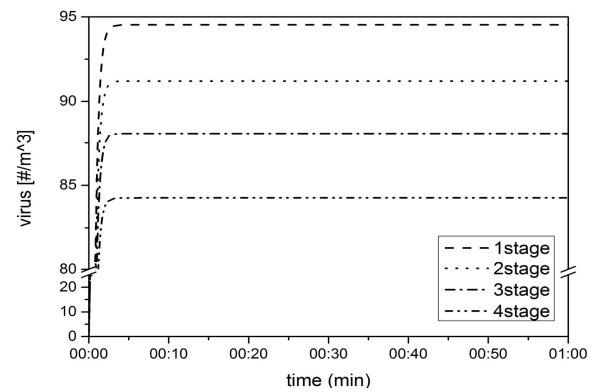
[Figure 10]에 자동차 내부에 공기살균장치를 설치하여 가동하고 전외기방식으로 운전하는 경우는 1시간 이후의 잔유량이 1stage는 체적당 83개, 2stage는 체적당 74개, 3stage는 체적당 66개, 4stage는 체적당 59개의 부유세균이 잔류하는 것을 나타냈다. 이러한 결과는 동일한 조건에서 살균기를 설치하고 재순환모드로 운전하는 경우보다 실내 부유미생물 제거 성능이 15%에서 30%까지 성능이 높아지는 것을 알 수 있다.

<Table 2>에는 동승자가 1시간동안 감염자와 동승하는 경우 호흡에 따른 잔류한 부유미생물 흡입량을 나타내었다.

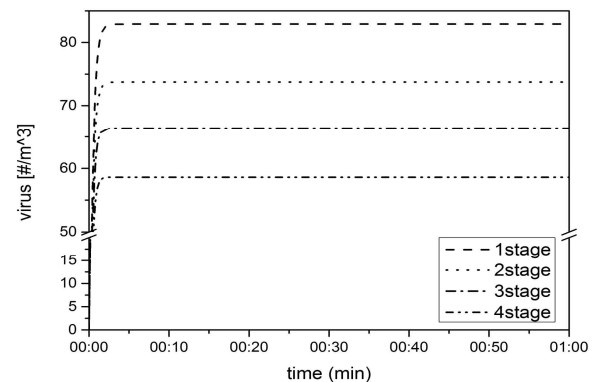
재순환모드의 경우는 살균기를 설치하지 않으면 최소 흡입량이 시간당 353개로 3시간 이후면 ID50 이상인 1059개를 흡입하게 된다. 살균기를 설치하는 경우라면



[Figure 8] Result of outair mode



[Figure 9] Result of air recirculation mode with sterilizer



[Figure 10] Result of outair mode with sterilizer

<Table 2> Exposure result

mode	1stage	2stage	3stage	4stage
outair	320	185	131	94
outair with sterilizer	55	49	44	39
recirculation	1140	684	488	353
recirculation with sterilizer	62	60	58	55

최대흡입량이 시간당 62개로 13시간 이후에 ID50 이상인 806개의 미생물을 흡입하게 된다.

전외기모드의 경우는 살균기를 설치하지 않아도 초기 1시간에 최소 흡입량이 4stage에서 94개를 흡입하게 되어 상대적으로 우수한 실내미생물 제거성능을 보인다. 이 경우 9시간 후에 ID50 이상인 846개의 미생물을 흡입하게 된다. 1시간 이후 1stage에서 최대 흡입량인 320개를 흡입하는 경우 3시간 후에 ID50 이상인 960개의 미생물을 흡입하게 된다. 살균기를 설치하는 경우 1시간 이후 최대 흡입량인 1stage에서 55개로 15시간 이후에 ID50 이상인 825개의 미생물을 흡입하게 된다. 최소 흡입량인 4stage경우는 39개로 21시간 이후에 ID50 이상인 819개의 미생물을 흡입하게 된다.

이러한 결과로 부터 살균장치를 설치하는 경우 최대 21시간, 최소 13시간 동안 자동차실내에 미생물 안전을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다. 전외기모드에서는 살균장치가 없어도 부유미생물 제거성능이 높아 최소 3시간에서 최대 9시간 동안 자동차실내에 미생물 안전을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 자동차 내부의 공기감염을 일으키는 부유 미생물 안전을 위하여 미생물의 거동을 예측하기 위해 CFD 상용프로그램인 CFX와 NIST에서 개발된 Multizone 프로그램인 CONTAM 이용하여 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 시뮬레이션은 1단(stage)~4단(stage)으로 풍량을 조절하여 재순환모드와 전외기모드에 대한 살균기성능에 관하여 연구하였다. 각 모드와 살균기를 설치하는 경우에 대한 살균기성능을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) CFD의 결과로부터 운전석과 보조석 뒷부분에 삽입하여 설치한 살균기는 실내부유미생물을 유동을 유도하여 살균하는데 적절한 위치에 설치된 것으로 나타났다.
- 2) 자동차 실내 부유미생물의 제거성능은 전외기모드+살균기>재순환모드+살균기>전외기모드>재순환모드 순으로 나타났다.
- 3) 재순환모드의 경우는 2시간 정도면 모든 풍량에서 ID50 이상의 부유미생물을 흡입하게 된다. 전외기모드에서는 최소 풍량에서 3시간 최대 풍량에서 9시간 정도면 ID50 이상의 부유미생물을 흡입하게 된다. 전외기모드+살균기에서는 최소 풍량에서 13시간 최대 풍량에서 21시간 이후에 도면 ID50 이상의 부

유미생물을 흡입하게 된다.

이러한 결과들로부터 세단형 승용차에 보균자가 동승하는 경우 공조장치의 동작에 따라 최소 2시간에서 21시간 까지 실내 미생물안전을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 동승자가 보균자인 경우를 인식할 수 없는 경우가 아니라면 최소한 전외기모드의 최대풍량을 사용하거나 살균장치를 작동시키는 것이 동승자로부터의 공기를 통한 2차 감염을 방지할 수 있는 방법인 것을 알 수 있다.

#### 5. References

- [1] S. G. Choi, J. K. Hong, 2005, The study on the performance estimation of UVC air sterilizer for preventing transmission of air borne contagion ,v.17n.6. , Journal of SAREK
- [2] S. G. Choi, W. H. Lee, J. K. Hong, 2006, A Study on the Multizone Modeling for Preventing Transmission of Air Borne Contagion , v.18 n.11., Journal of SAREK
- [3] K. b. Jeong, S. G. Choi, 2009, UV Immune System of Personalized Space, v.21n.01 , Journal of SAREK
- [4] S. G. Choi, 2010, A Study of air Sterilization System in Personalized Office Using Simulation, v.22n.06 , Journal of SAREK
- [5] S. G. Choi, 2012, A Study on CFD analysis of indoor microbe transport for microbiological safety, v.14, n.3, Journal of the Korea Safety Management and Science
- [6] S. G. Choi, 2012, A Study on CFD analysis of indoor airborne microbe transport in car for microbiological safety, v.15, n.4, Journal of the Korea Safety Management and Science
- [7] ANSYS Inc., CFX Uer's Guide, 2011, ANSYS Inc
- [8] Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., Whittam D. L., Severin, B.F., Whittam,T.S., Mathematical modelling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection, Quantitative Microbiology 2, 249-270, 2000.
- [9] Bratbak, G. A., Dundas, I. 1984. Bacterial dry matter content and biomass estimations. Appl. Environ. Microbiol., 48, 755-757.



## 저자 소개

### 최 상 곤



경원대학교 건축설비과 학사, 석사, 박사 취득. 현재 유한대학교 건축설비과 교수로 근무 중.

관심분야 : 공기조화, 실내 공기 미생물 환경, UVGI, 신재생 에너지, 플랜트 설비 등

주소: 경기도 부천시 소사구 괴안동 185-34, 유한대학교 건축설비과