

# 실내 미생물 안전을 위한 면역건물기술 인자들의 상호작용에 관한 연구

최 상 곤\* · 장 성 민\*\*

\*유한대학교 건축설비과 · \*\*조선이공대학 선박해양 · 기계과

## A Study of factor analysis of immune building system for microbiological safety

Sang-Gon Choi\* · Sung-Min Jang\*\*

\*Depat. of Bilding Services, Yuhan University ·

\*\*Dept. of Naval Architecture & Mechanics, Chosun College of Science & Tec.

### Abstract

In this study the real situation of apartment house in seoul is reproduced with multi-zone modeling program contam2.4. This model include immune building system(disinfection system) which is consist of dilution, Filter Technology and UVGI(ultra violet germicidal irradiation). In this study experiments design method used for estimating interaction of HRV air change rate, UVGI air change rate and UVGI grade. Result show that HRV air change rate and UVGI air change rate is most influence factor for remove rate. also Interaction of HRV air change rate and UVGI air change rate is ost influence factor for remove rate.

**Keywords : UVGI, Disinfection, Immune Building System**

### 1. 서 론

실내 미생물 안전을 위해 질병에 감염된 재실자로 인한 2차 감염을 방지할 수 있는 면역건물기술(Immune Building Technology)은 크게 필터기술(Filter Technology), 희석기술(Dilution Technology), UVGI 기술(Ultra Violet Germicidal Irradiation)의 세 가지 요소기술을 적절히 조합으로 이루어지며, 건물내부에서 발생하는 공기 중 미생물오염을 제어하여 실내의 미생물 안전을 도모할 수 있다. 이러한 면역건물기술은 실내 미생물 안전을 위해 안정적으로 설계되어야 한다.

면역건물기술의 안정적인 적용을 위해 필터의 등급, 희석을 위한 외기도입량, 살균을 위한 UVGI 등급 및 살균장치의 풍량이라는 4가지의 주요 구성·설계요소의 상호 보완적인 영향을 정량적으로 분석하고 적용할

필요가 있다. 이를 위하여 선행된 연구[1]에서 각각의 4가지의 주요 구성·설계요소 적용을 위한 인자분석을 하였다. 이 연구에서 구성요소 중 희석기술과 UVGI 기술이 큰 영향을 미치며, 필터기술은 중성능필터 이상이면 실내 미생물안전에 영향이 작은 요소인 것으로 나타났다. 따라서 중성능필터를 사용하고 희석기술과 UVGI 기술을 적절히 사용하면 된다는 결과를 보였다. 그러나 각각의 면역건물 기술은 독립적으로 작용하는 것이 아니라 각장치의 동작으로 서로 영향을 미치게 된다.

특히 희석을 위한 외기도입량, 살균을 위한 UVGI 등급 및 살균장치의 풍량이라는 3가지의 주요 구성·설계요소는 실제 적용할 경우 서로 조합되어 지고 상호간에 영향을 주게 되는 교호작용에 대한 분석이 좀 더 필요하다 할 것이다.

† 교신저자: 장성민, 광주광역시 동구 필문대로 309-1, 선박해양 · 기계과

M · P: 010-7931-3148, E-mail: twkjsm@cst.ac.kr

2012년 7월 20일 접수; 2012년 8월 30일 수정본 접수; 2012년 8월 30일 게재확정

본 논문에서는 이러한 설계요소의 상호작용을 알아보기 위하여 UVGI 살균장치와 HRV(Heat Recovery Ventilation)을 이용한 회색기술을 적용한 멀티존 시뮬레이션[2]에 대하여 실험계획법인 다구찌 이론을 도입하여 실내 미생물오염원 제거에 영향을 미치는 각각의 장치들의 교호작용에 대하여 망대특성을 이용하여 정량적으로 평가 할 수 있도록 하였다.

이를 위하여 실제 현재 거주인원이 주거하고 있는 공동주택을 대상으로 하여 실내에 전염성 질병이 걸린 사람이 실내공기를 오염시키는 미생물 오염 분포에 따라 CONTAM 2.4를 이용하여 실험계획법을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이러한 시뮬레이션의 결과를 분석하여 면역건물기술을 구성하는 각각의 장치들이 실내 미생물오염원 제거에 미치는 영향도에 따른 효율적인 설계 데이터를 도출할 수 있도록 하였다.

### 2. 실험계획법

다구찌의 실험계획법에서는 로버스트 설계를 하기 위해 잡음의 존재에 둔감하도록 파라미터의 수준을 결정하며, 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 방법보다 훨씬 적은 노력으로 파라미터의 최적화에 체계적이고 효율적인 방법론을 제공한다[4]. 본 연구에서는 면역건물기술이 실내미생물 제거에 영향을 미치는 인자와 그 교호작용을 분석하기 위해 수행되었다. 전염성 질병에 걸린 재실자는 오염균을 실내에 발생시켜 실내 미생물안전을 악화시키게 된다. 정도가 심각할수록 실내 감염균의 수가 증가하여 결과적으로 2차 감염을 일으키는 원인을 초래한다.

실내공기 중 미생물의 제거가 최대가 될수록 실내공기환경에 좋은 영향을 주므로 본 논문에서, 다구찌 실험계획법 이론을 적용함에 있어 손실함수는 망소특성으로 하였다. 실험 후 특성치인 실내미생물 생존율을 S/N비로 변환 하였다. S/N(Power of Signal/Power of Noise)비 값은 클수록 결과적으로 좋은 결과를 나타낸다. 따라서 S/N비의 값이 클수록 잡음에 둔감하다고 할 수 있으며 또한 로버스트 설계에 근접하다 할 수 있다.

반복적으로 측정된 데이터를  $y_1, y_2, \dots, y_n$ 라 할 때 MSD(mean squared deviation)는 아래와 같이 계산한다[5].

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 실험의 수,  $y_i$ 는  $i$ 차 실험에서 실험값

이다. 또한 식(1)은 성능 특성치인 미생물의 생존율의 목표값이 0이 되는 것을 목적으로 하므로 0으로부터의 MSD를 의미한다. 결과적으로 S/N비는 다음 식으로 표현된다.

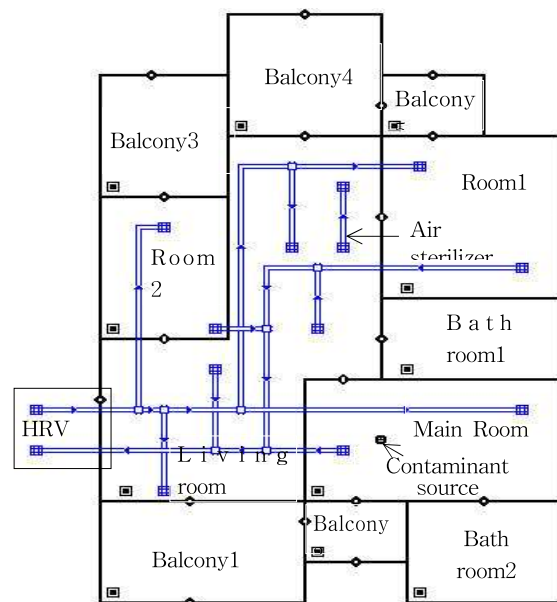
$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (2)$$

본 연구에서는 특성치인 미생물 제거율에 큰영향을 준다고 판단이 되는 HRV를 통한 외기도입량, UVGI Grade 그리고 살균장치의 풍량 등 3개의 인자를 고려 하였으며 각각의 인자에 대한 수준은 3수준으로 하여 27번의 실험수와 13개의 열의 수를 갖는  $L_{27}(3^{13})$  직교배열표를 적용하였다. 실험 후에 특성치로 선정된 미생물 제거율을 분석하였다.

### 3. 멀티존 모델

실험계획법을 적용하기위한 해석 모델을 설정하기 위하여 기존 연구[3]에서 사용했던 동일한 모델인 D사에서 시공한 공동주택의 멀티존 모델을 Figure 1에 나타내었다.

기존의 모델은 미생물 오염원의 경우 크랙이나 벽과 벽의 접합부를 통한 공기이동통로(Airflow path)에 의한 오염 확산은 매우 미약할 것이므로 벽을 통한 미생물 오염원의 확산은 없는 것으로 가정하였다. 이에 비해 상대적으로 미생물오염의 확산에 영향을 미칠 수 있는 문틈이나 창틈을 통한 미생물 오염원의 이동을 예측할 수 있도록 하였다.[2]



[Figure 1] Multi-zone base model

실제로 설치되어 있는 기계환기 장치(HRV)와 모델링을 위하여 구성 적용된 UVGI 모델을 대상으로 면역 건물(Immune Building) 기술에서 적용되는 4가지의 주요구성·설계요소를 모델링 하였다.[3]

<Table 1>에 모델의 구성에 필요한 실제 측정된 공동주택의 각 실의 실온, 바닥면적 및 각실의 체적을 나타내었다. Table 2에는 모델구성에 사용된 공동주택의 공기이동통로를 각각 나타내었다. 공기이동통로의 기밀도와 Leakage area는 ASHRAE 기준을 적용하도록 하였다.[6]

해석에 사용된 기계 환기장치의 준별 환기량과 덕트치수를 Table 3에 나타내었다. 환기량과 덕트치수는 실측된 데이터를 이용하였다.

UVGI 살균장치와 필터는 실제 공동주택에 설치된 기계 환기장치(HRV)에는 설치되어 있지 않지만 시물레이션을 위하여 거실에 UVGI 살균장치와 필터를 조합한 살균장치를 설치하여 모델링하였다. 식(3)에 모델의 지배방정식을 나타내었다.

$$\frac{dm_i^\alpha}{dt} = \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_j^\alpha) C_j^\alpha + G_i^\alpha + m_i \sum_\beta K^{\alpha, \beta} C_i^\beta - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_i^\alpha - R_i^\alpha C_i^\alpha \quad (3)$$

- 여기서,  $m_i$  : 존 i에서 공기의 질량, [kg]
- $ma_i$  : 존 i에서 오염원 a의 질량, [kg]
- $Ca_i$  : 존 i에서 오염원 a의 질량비율, [0~1]
- $Fi_j$  : 존 i에서 존 j로 흐르는 공기유량, [kg]
- $Ra_i$  : 존 i에서 오염원 a의 제거율, [0~1]
- $ka_\beta$  : 존 i에서 오염원 a와  $\beta$ 의 운동반응계수, [0~1]
- $C\beta_i$  : 존 i에서 오염원  $\beta$ 의 비율, [0~1]
- $Ga_i$  : 존 i에서 오염원 a의 발생량, [kg]

미생물의 모델은 실내에서 가장 흔하게 질병을 유발하는 Influenza를 대상으로 직경 0.1  $\mu m$ , 밀도의 경우는 Bratbak and Dundas[7]에 의해 제시된 1,100 kg/m<sup>3</sup>을 사용하도록 하였다.

필터 모델은 ASHRAE standard 52.2 의 MERV 등급(7)에 따라 중급필터이상인 MERV12~ MERV20 등급의 필터모델을 적용하였다.

UVGI의 모델은 단일 미생물의 군집에 대한 자외선 조사의 살균성능은 아래와 같이 식으로 나타낼 수 있다.[3]

$$\frac{N_t}{N_o} = \exp(-kE_{eff} \cdot \Delta t) = \exp(-k \cdot Dose) \quad (4)$$

여기서,  $E_{eff}$ 는 미생물이 받는 유효조사량 [ $\mu W/cm^2$ ],  $Dose$ 는  $E_{eff}$ 와 경과시간  $\Delta t$ 의 곱 [ $\mu W \cdot s /cm^2$ ]이며 위와 같이 정의하는 경우 시간 t 후의 미생물 생존율은 ( $N_t/N_o$ ) 이다.

<Table 1> Base source of multi-zone model

Zone	Temperature(°C)	Area (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Main room	25.7	12.21	30.525
Room1	24.9	6.21	15.525
Room2	24.9	5.94	14.85
Living room	23.9	23.28	58.2
Toilet1	22	3.22	8.05
Toilet2	21	1.92	4.8
Balcony1	21	5.7	14.25
Balcony2	22	3.5	8.75
Balcony3	21	3.3	8.25
Balcony4	22	5.2	13
Balcony5	21	2.4	6
Shaft1	20	1.6	4
Shaft2	20	1.2	3

<Table 2> Airflow path of multi-zone model

Air flow pass	Location	Leakage area (cm <sup>2</sup> /m)	Area (m <sup>2</sup> )	
Door	General	0.31	1.8	
	Balcony4~5	5.5	2.5	
	Balcony1~2		3.5	
	Livingroom~Balcony4		4.5	
	Livingroom~Balcony1		8	
	Front door	0.26	2.2	
Window	Room1~Balcony5	1.1	1.7	
	Room2~Balcony3		1.8	
	Main room~Balcony2		3.4	
	Ambt~Balcony3,5	0.67	1.8	
	Ambt~Balcony4		2.2	
	Ambt~Balcony2		0.72	3.4
	Ambt~Balcony1			7.4

<Table 3> Input data of mechanical ventilating system

Zone	Air flow rate (m <sup>3</sup> /h)		Duct diameter(mm)	
	inlet	outlet	inlet	outlet
Main room	21.37	21.37	100	100
Room1	10.87	10.87	100	100
Room2	10.4	10.4	100	100
Living room	20.37	20.37	100	100

UVGI 살균장치는 MERV등급과 동일하게 Grade를 나누어 UVGI12 ~ UVGI20 등급의 UVGI모형을 적용하였다.

오염원은 치명적인 질병을 대상으로 하면 매우 드문 경우이기 때문에 보편적인 감기에 걸린 보건자를 대상으로 하였다. 대상은 70kg의 남자, 호흡량이 13.33 L/min 인 경우로 감염으로 인해 오염균을 100 CFU/min으로 방출할 경우를 가정하여 모사하였다. 보건자의 재실에 따른 실내오염 특성변화를 확인하기 위하여 하루 종일 재실공간에서 움직이지 않는 경우를 모사하였다.

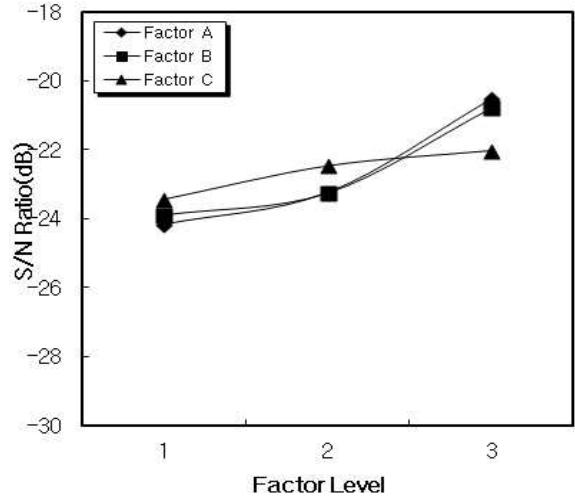
설치된 HRV와 UVGI 공기살균장치의 풍량변화와 살균력, 포집능력 등이 각각 변화할 경우 실내 미생물안전에 영향을 미치는 교호작용을 정량적으로 비교하기 위한 시뮬레이션 조건을 Table 4에 나타내었다. Table 4에 따른 시뮬레이션 수행 시 대상 모델은 실내 미생물의 확산을 위해 실내의 문을 전부 개방하는 것으로 하였다.

<Table 4> Simulation Condition

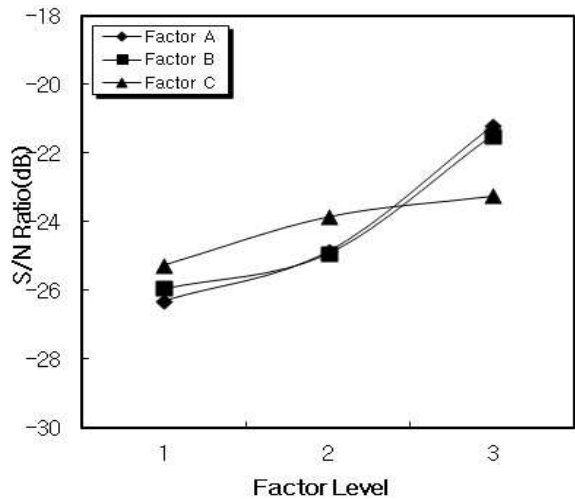
Instrument	Air change rate / grade		
	0.7	1	2
HRV (Out air)	0.7	1	2
UVGI air sterilizer	0.7	1	2
UVGI grade	12	15	20
MERV grade	12	15	20

#### 4. 결과 및 분석

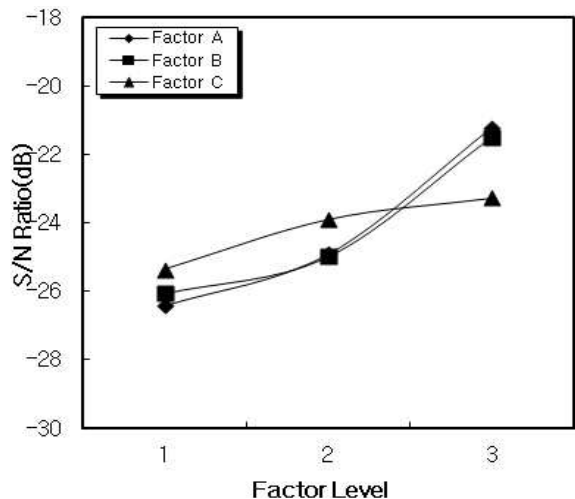
미생물을 제거하여 인간의 실내 환경을 개선하기 위한 기존 연구[1]에서 인자들에 관한 교호작용은 구체적으로 파악되지 않았다. 본 연구에서는 기존 연구에서 특성치에 주로 영향을 미친다고 파악된 인자를 도입하고 직교배열에 의한 배열을 개선[8]하여 특성치에 미치는 개별 인자 각각의 영향과 그 교호작용을 표현하고자 HRV를 통하여 도입하는 외기의 풍량을 factor A, UVGI 살균장치의 순환 공기풍량을 factor B, UVGI 등급을 factor C로 나타내고 각각의 인자와 교호작용 A×B, A×C, B×C의 결과를 S/N비를 분석하여 도출하였다. 시간 변화에 따른 실험 후, 특성치에 영향을 미치는 인자들에 대한 각각의 수준별 S/N비 값을 Figure 1~4에 나타내었다. Figure 2는 1시간동안 실험 후 획득한 데이터에 관한 결과로써 A(외기풍량), B(살균기풍량), C(UVGI Grade)인자들의 각 수준별 S/N비 값을 나타내고 있다.



[Figure 2] S/N ratio response graphs for factor after 1 hour



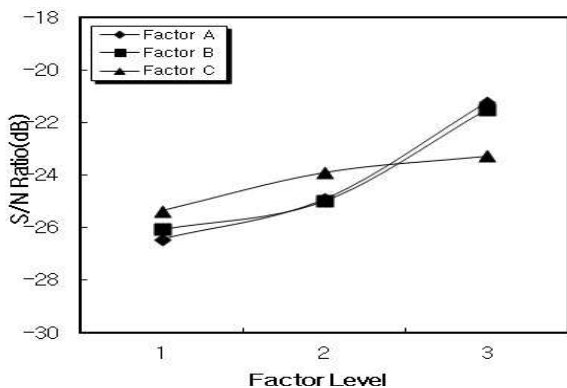
[Figure 3] S/N ratio response graphs for factor after 3 hours



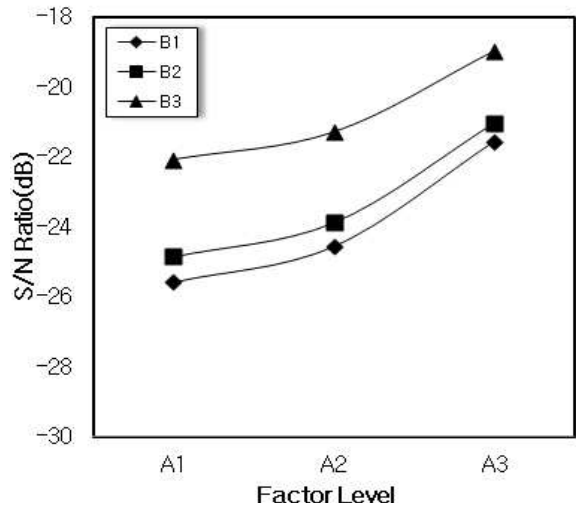
[Figure 4] S/N ratio response graphs for factor after 5 hours

각 수준에 따른 A(외기풍량), B(살균기풍량)인자의 기울기가 상대적으로 크고 유사하게 나타났으며 C(UVGI Grade)인자는 A(외기풍량), B(살균기풍량)인자와 비교하면 기울기가 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 실내 미생물 안전에 미치는 영향이 A(외기풍량), B(살균기풍량)인자가 C(UVGI Grade)인자보다 크게 작용한다는 것을 의미한다. 3~7시간동안 실험 후 획득한 데이터에 관한 결과는 Figure 3~5에 각각 나타내었다. 그 결과, Figure 1의 1시간 동안 실험 후 획득한 결과와 유사한 경향으로 나타났으나 S/N비 응답의 결과 값은 Figure 1의 결과보다 다소 작게 나타났다. 이것은 주거 환경에 존재하는 미생물의 제거는 짧은 1시간동안의 결과에서 효과가 있으며 시간이 경과하더라도 미생물 제거에 도움이 되지 않는다는 것을 의미한다. 모든 시간에 대한 실험 후 S/N비를 분석하여 나타난 공통점은 A(외기풍량), B(살균기풍량)인자가 미생물 제거에 가장 크게 영향을 미친다는 것이다. 그러므로 실내미생물 안전을 위해서는 인자 A, B의 제어가 가장 중요하다.

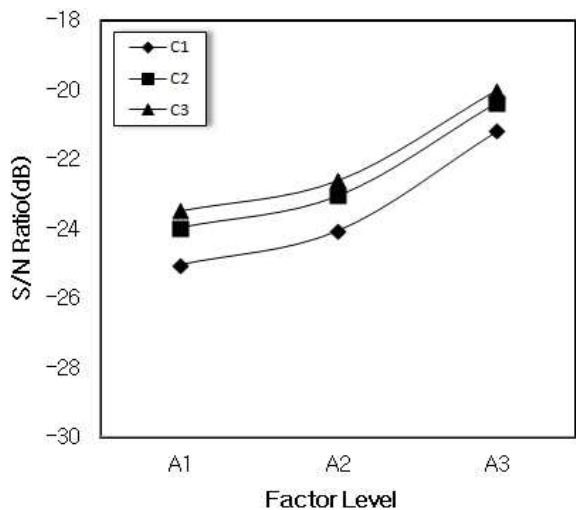
Figure 6 (a)~(c)는 실험에 적용된 인자들 간의 교호작용에 대한 결과를 1시간동안 실험 후 나타낸 것이다. (a)는 교호작용 A×B, (b)는 교호작용 A×C 그리고 (c)는 교호작용 B×C에 관한 결과를 나타내었다. 그 결과 미생물 제거를 위한 교호작용의 영향은 A(외기풍량), B(살균기풍량)인자에 관하여는 A3(외기풍량 2ACH) ×B3(살균기풍량 2ACH)의 결합이, 교호작용 A×C에 관하여는 A3(외기풍량 2ACH)×C3(UVGI 등급 20)의 결합이 그리고 교호작용 B×C에 관하여는 B3(살균기풍량 2ACH)×C3(UVGI 등급20)의 결합이 우선하는 것으로 나타났다. 교호작용의 영향에서는 S/N비 값이 가장 큰 A3(외기풍량 2ACH)×B3(살균기풍량 2ACH)의 결합이 다른 교호작용의 영향보다 미생물 제거에 영향을 가장 크게 미치는 것으로 나타났다.



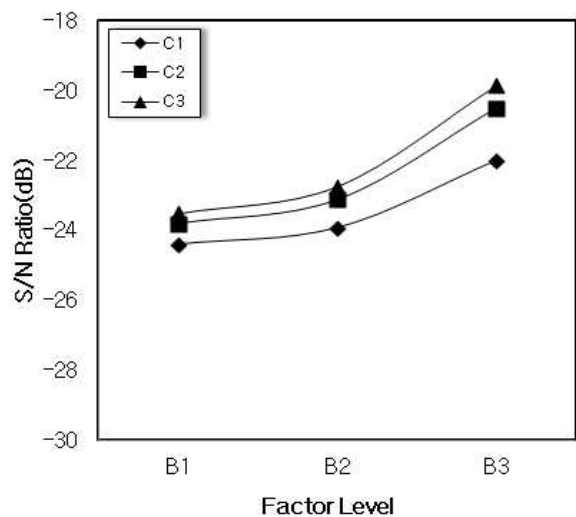
[Figure 5] S/N ratio response graphs for factor after 7 hours



(a) Interaction graphs for A×B

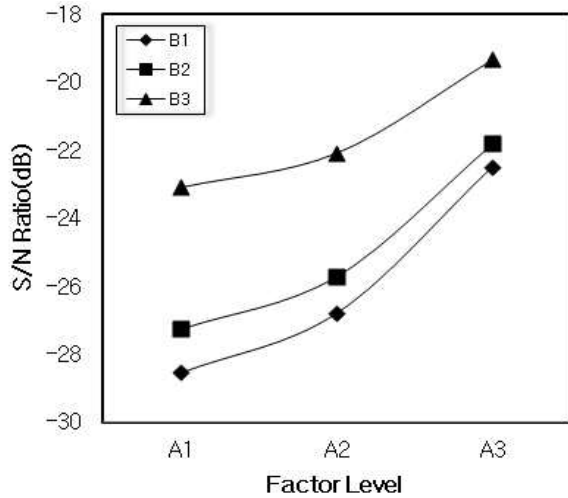


(b) Interaction graphs for A×C

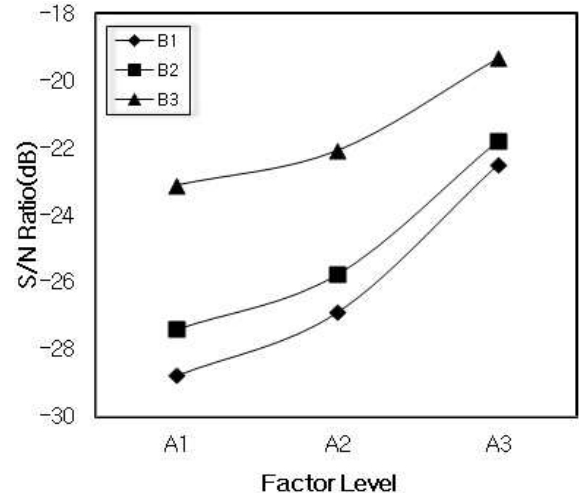


(c) Interaction graphs for B×C

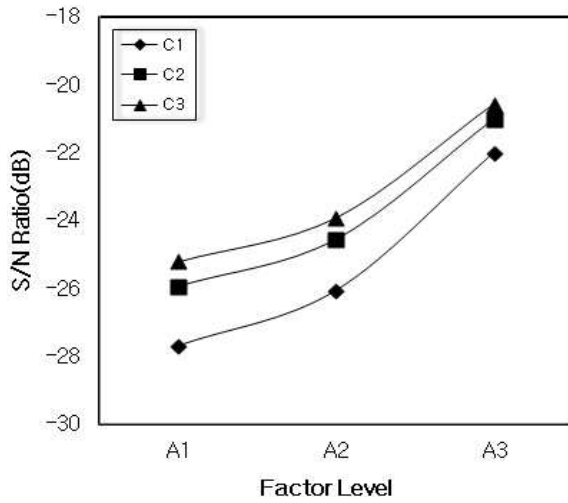
[Figure 6] S/N ratio response graphs for interaction of factors after 1 hour



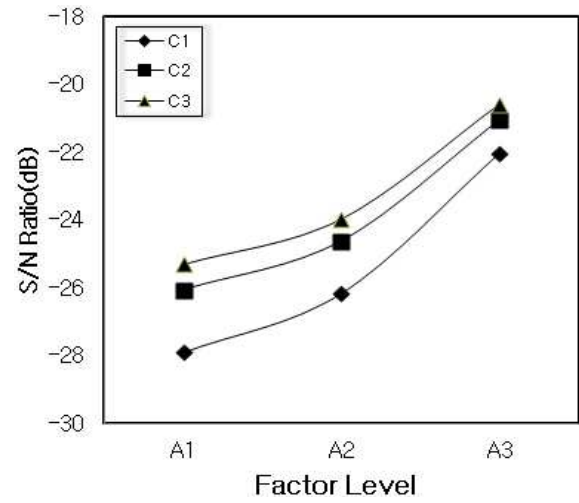
(a) Interaction graphs for AxB



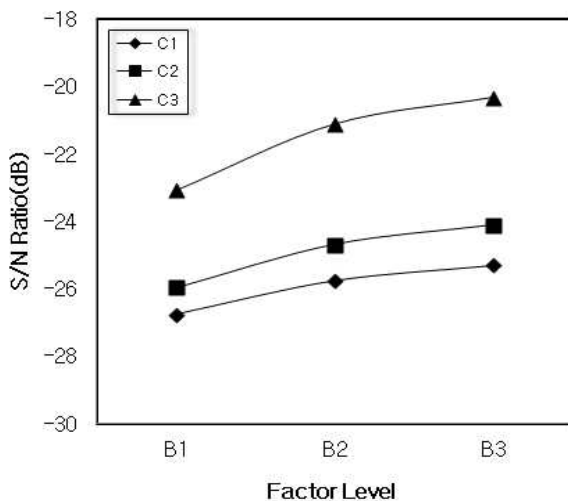
(a) Interaction graphs for AxB



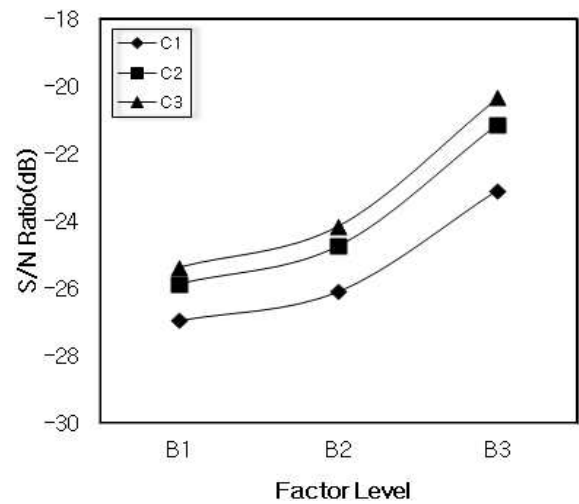
(b) Interaction graphs for AxC



(b) Interaction graphs for AxC



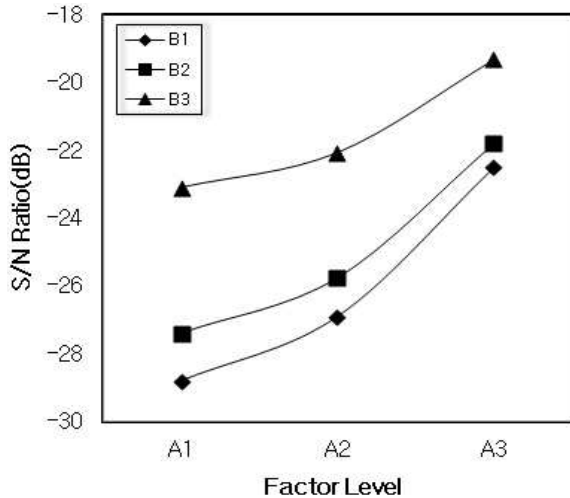
(c) Interaction graphs for BxC



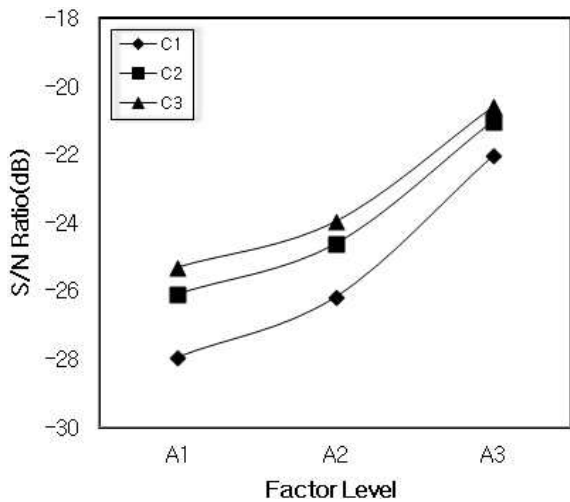
(c) Interaction graphs for BxC

[Figure 7] S/N ratio response graphs for interaction of factors after 3 hours

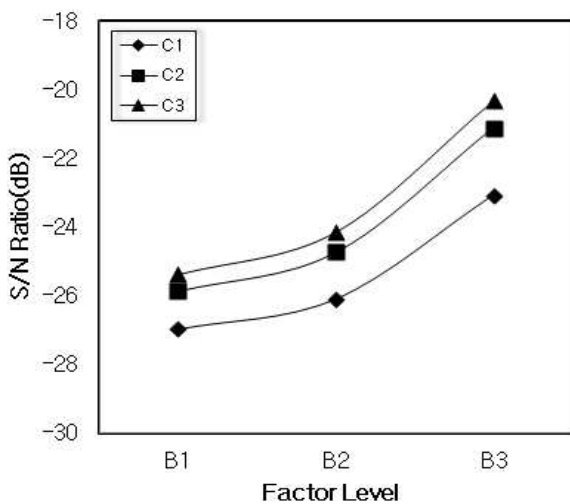
[Figure 8] S/N ratio response graphs for interaction of factors after 5 hours



(a) Interaction graphs for A×B



(b) Interaction graphs for A×C



(c) Interaction graphs for B×C

[Figure 9] S/N ratio response graphs for interaction of factors after 7 hours

Figure 7~9는 3, 5, 7시간동안 실험 후 인자들 간의 교호작용에 대한 결과를 나타낸 것이다. 모든 실험시간 동안 미생물 제거에 우선하는 결합은 A3×B3, A3×C3, B3×C3의 결합으로 나타나 1시간 동안 실험 후 나타난 교호작용의 결과와 동일하다. 그리고 3~7시간까지 실험시간이 증가함에도 교호작용에 대한 S/N비의 응답 결과 값은 Figure 2의 결과보다 다소 작게 나타났다. 이것은 주거 환경에 존재하는 미생물의 제거에 각 인자들의 역할과 교호작용에 대한 영향이 상대적으로 짧은 1시간동안에 효과가 크고 최고의 제거율에 도달한 이후에는 시간이 경과하더라도 미생물 제거에 도움이 되지 않음을 의미한다.

### 5. 결론

본 연구는 면역건물기술에 영향을 주는 인자와 인자 간의 교호작용을 파악하기 위해 다구제 실험계획법을 적용한 것으로 면역건물기술의 발전을 위해 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험에 적용된 인자 중 미생물 제거에 영향을 크게 주는 인자는 A(외기풍량), B(살균기풍량)인 것으로 나타났다.
- 2) 실험시간이 증가하여도 미생물의 제거는 더 증가되지 않는다. 따라서 상대적으로 짧은 1시간 동안의 실내미생물 안전을 충분히 도모할 수 있으며 긴 시간을 가동할 필요가 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 교호작용의 영향에서도 마찬가지이다.
- 3) 각각의 교호작용에 관하여는 A3(외기풍량 2ACH) ×B3(살균기풍량 2ACH) 의 결합이 미생물 제거에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 실험시간이 증가하여도 달라지지 않는다.

따라서, 실내미생물 안전을 위한 면역건물기술의 적용에 있어 얻어진 결과들로부터 외기풍량>UVGI 풍량>UVGI 등급>필터 등급 순으로 미생물제거에 영향을 미치며, 영향이 가장 적은 필터등급이 MERV12 등급 이상의 중성능 필터를 사용하면 외기풍량, UVGI 풍량, UVGI 등급 순으로 높게 유지하면 된다. 좀 더 나아가 UVGI등급도 12등급이상으로 유지하고, 외기풍량과 UVGI 풍량을 최대로하면 1시간 가동으로 실내 미생물안전을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또 외기풍량과 살균기풍량의 교호작용이 가장 큰 영향을



미치므로 에너지절약 등의 이유로 외기풍량의 증가가 어려워지는 경우 상대적으로 외기풍량이 줄어든 만큼 UVGI 풍량을 증가시키는 방식으로 설계 및 적용하면 된다는 결과를 얻을 수 있었다.

## 6. 참 고 문 헌

- [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, K. S. Park, Y. S. Yoon, J. K. Hong, 2006, The study on the performance of air sterilization of multistoried apartment by the multizone modeling. Summer conference of SAREK . pp. 319 - 324
- [3] S. G. Choi, H. w. Lee, J. K. Hong, 2006, The study on the multizone modeling for preventing transmission of air borne contagion. Summer conference of SAREK . pp. 429 - 435
- [4] W.H.Yang, Y.S.Tamg., 1998, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," Journal of Materials Processing Technology 84, pp122-129
- [5] Vance, J. M., 1988, "Rotordynamics of Turbomachinery," John Wiley & Sons, Inc., NewYork,
- [6] ASHRAE, ASHRAE Handbook 1997. American Society Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,Inc., Atlanta, GA. Chapter25.
- [7] Bratbak, G. A., Dundas, I. 1984. "Bacterial dry matter content and biomass estimations." Appl. Environ. Microbiol., 48, 755-757.
- [8] P. Y. CHAO, Y. D. HWANG, 1997, "An improved Taguchi's method in design of experiments for milling CFRP composite," INT. J. PROD. RES, Vol. 35, No. 1, pp. 51-66.

## 저 자 소 개

### 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

### 장 성 민



인하대학교 대학원 기계공학과 박사 취득. 현재 조선이공대학교 선박해양·기계과 교수로 재직 중  
관심분야 : 실험계획법, 정밀절삭 가공, CAD/CAM, 강도설계 등

주소: 광주광역시 동구 필문대로 309-1 조선이공대학교 선박해양·기계과