

실험동물 사육실용 바이오 클린룸(BCR)의 급기 온도 및 풍속 변화 특성에 관한 수치해석적 연구

박 동 일, 정 광 섭^{**}, 김 영 일^{*}, 김 성 민
서울과학기술대학교 에너지환경대학원, *서울과학기술대학교 건축학부

A Study on the Variation of Airflow Velocity and Temperature upon the Design of Bio Clean Room(BCR) for Laboratory Animal Facilities by Numerical Simulation

Dongil Park, Kwangseop Chung^{**}, Youngil Kim^{*}, Sungmin Kim

Graduate School of energy and environment, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

^{*}School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received April 13, 2012; revision received June 1, 2012)

ABSTRACT: In this study, the analysis on the distribution of indoor airflow velocity and temperature by using numerical simulation has carried out to make fundamental data for establishing the optimum design of laboratory animal facilities. From the results, it was found that replacement of cage lacks, air supply and exhaust system, supply air temperature, supply air velocity affect to the optimum design of laboratory animal facilities as a important element.

Key words: Optimum design of laboratory animal facilities(실험동물 사육실의 최적설계), Supply air temperature(급기온도), Supply air velocity(급기속도)

기 호 설 명

CMH : 단위시간당 풍량 [m³/hr]
CFU : 집락형성단위
CLASS : 청정도 클래스

1. 서 론

클린룸이란 실내의 온도, 습도, 실내압, 조도, 소음 및 진동 등의 환경조건에서 발생하는 부유입자의 농도를 청정도의 기준 이내로 달성시킬 수 있는

실을 말하며, 크게 산업용 클린룸과 바이오 클린룸으로 나누어진다. 이와 같이 클린룸은 반도체 산업에서 중요한 시설일 뿐만 아니라 제약공장, 병원수술실, 식품공장, 유전공학실험실 등 일반적인 공기조화 공정이 필요한 모든 공간에 적용할 수 있다.

최근 중요성이 대두되고 있는 동물실험은 의학, 치의학, 약학, 수의학, 생물학 등의 여러 분야에서 행해지고 있으며, 인간의 건강과 생명연장을 위한 연구방법으로 많이 사용되고 있다. 이를 위해 실험에서 사용되는 동물의 유전학적 및 미생물학적인 품질뿐만 아니라 동물을 사육하는 환경요인에도 일정한 조건을 필요로 하게 되며, 연구, 시험, 제조 등의 목적에 이용되는 실험동물의 사육, 유지, 생산, 실험에 있어서는 바이오 클린룸이 필수적이다.

바이오클린룸의 하나인 실험동물사육실의 경우,

† Corresponding author

Tel.: +82-2-970-6561; fax: +82-2-974-1480

E-mail address: kschung@seoultech.ac.kr

동물에게 쾌적하고 위생적인 환경조건으로 유지시키기 위해서는, 동물에게 쾌적한 조건인 온도, 습도, 기류 및 공기청정도 등의 각종 요인에 따른 동물의 생리상태에 이상이 나타나지 않도록 시설의 상태를 유지해야 하고, 종합적인 감염발생 방지대책을 수립할 수 있어야 한다.

따라서 본 연구는 우선 실험동물 사육실의 형태 및 특성의 관한 기존의 연구들을 조사하여 환경기준치에 적합한 실험동물 사육실을 위한 설계요소인 급배기방식, 급기풍속, 배기면적에 따른 배기풍속, 배기구 위치를 도출하여 이를 실험변수로 활용하였다. 분석방법은 실험동물 사육실내의 급기풍속과 온도분포를 수치 시뮬레이션을 통해 구한 값과, 환경 기준치와의 비교를 통한 방법을 이용하였다. 실험동물 사육실의 급기구 및 배기구, 실내의 케이지 랙 등의 배치에 따른 기류 및 온도분포의 유동특성 해석은 급기구 및 배기구, 케이지 등의 배치계획, 급기온도 및 급기풍속의 파라미터들에 대한 최적설계방안을 제안하기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 수치 시뮬레이션 분석용 프로그램

본 연구에서는 실험동물 사육실의 수치 시뮬레이션 분석을 위하여 CFD 프로그램 중의 하나인 Phoenics를 사용하였다. CFD란, 비선형 미분 방정식 Navier-Stoke Equation을 FVM(Finite Volume Method)를 사용하여 이산화하여 변환된 대수 방정식을 수치 기법(numerical methods)의 알고리즘을 사용하여 유체 유동에 대해 분석하는 것으로써, 컴퓨터를 사용하여 공학 문제에서 유체와 기체의 상호작용을 수치 시뮬레이션하는 것을 의미한다.

본 연구에서 사용된 Phoenics는 CHAM(Concentration Heat And Momentum Limited)사에서 1981년 8월에 개발한 최초의 상업용 전산유체역학용 프로그램 v3.6이다.

2.2 CFD 해석이론

CFD를 이용한 수치해석 방법은 클린룸 설계에 영향을 미치는 요소들을 반영하여 모형실험보다 경제적으로 결과를 얻을 수 있는 이점이 있어 상대적으로 효과적인 결과를 예측할 수 있으며 이를 적용한

평가가 점차 증가 추세에 있다.

본 평가에서는 이러한 CFD를 이용하여 실험동물 사육실내의 기류 및 온도분포에 관해 수치 시뮬레이션을 수행·분석하였으며, 대표적인 물리량 보존 법칙인 질량보존의 법칙과 운동량 보존의 법칙으로부터 도출한 다음 연립편미분 방정식을 지배 방정식으로 사용하였다. 일반적으로 열과 유체의 물리현상을 나타내는 지배방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식과 에너지 방정식이 있다. 난류모델은 온열 환경 및 기류해석에서 실용적으로 많이 사용하고 있는 standard k-epsilon 모델을 사용하였다.

- 연속 방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = m0d$$

- 운동량 방정식(Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

- 공기량 방정식(Age of air equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_l} + \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + S_c$$

- 난류 운동에너지 방정식(Turbulent kinetic energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G - \rho \epsilon$$

- 난류 운동에너지 소산율 방정식(Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$$

여기서,

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

Table 1 NASA standard of BCR clean class

Standard		NASA							
Clean Class		Particle		Bioelectronic Chip		Pressure	Temp.	Humidity	Air current
ISO (=JIS)	Standard Particle (0.5 μm/EA/ft ³)	Particle (μm)	particle number (EA/m ³)	Floating Bacteria	Air-borne Microorganisms (CFU/m ² /week)	(mmAq)	(°C)	(%)	(m/s) Rate of air Circulation
Class 5	100	0.5	3,500	3.5	12,900	≥ 1.3	Variable	40~45	Laminar flow type 0.45±0.1
		Over	Under	CFU	CFU Under				
Class 7	10,000	0.5	350,000	17.6	64,600	Over	Variable	40~45	Turbulent flow ≥ 20 time/hr
		Over	Under	CFU	CFU Under				
Class 8	100,000	0.5	35,00,000	88.4	323,000	Over	Variable	40~45	Turbulent flow ≥ 20 time/hr
		Over	Under	CFU	CFU Under				

Note) JIS B 9929-1989, NASA Standard(NHB 5340.2).

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

2.3 동물사육실 수치 시뮬레이션 분석 모델링

우선 동물사육실을 대상으로 한 수치 시뮬레이션 해석을 위하여 선정된 동물사육실의 실제도면을 기초로 하여 설계데이터와 동일하게 수치 시뮬레이션의 계산조건을 구성하였으며, 먼저 일반적으로 실험동물 사육실에서 사용하는 케이지랙의 배치방식인 양측복렬형에 청정도 CLASS 10,000인 난류방식을 적용하였다. Table 1에 클린룸의 국제규격을 나타내고 있다. Table 2에 실험동물 사육실의 수치 시뮬레이션을 위한 모델링 조건을 나타내고 있다.

급기구의 크기는 가로세로 0.62 m×0.62 m의 정방형 사각 디퓨저이며 유입기류의 기류풍향은 Y축-방향, 유입각은 0°, 배기구의 크기는 가로세로 3.8 m×0.5 m로 배기구의 가로부분을 케이지랙의 길이에 맞춰서 정하였고, 급배기방식은 케이지랙 뒤의 벽면쪽에 위치한 배기구로 배기하는 난류방식을 채택하였다. 급기구의 개수는 2개로 정하였으며, 급기구의 급기풍속은 0.39 m/s(1100 CMH), 케이지랙의 크기는 높이 1.8 m, 가로 0.6 m, 세로 3.8 m, 케이지랙의 배치는 양측 복렬형으로 급기온도는 24°C로 구성되었다.

Fig. 1은 S대 그린바이오 청정사육센터 실험동물 사육실 부분의 캐드도면을 나타내고 있다. 도면중의

실험동물 사육실 하나를 선정하여 케이지의 배치, 급기구, 배기구의 크기를 동일하게 구성하여 수치 시뮬레이션의 모델링을 하였으며, 우선 케이지랙을 양측 복렬형으로 배치한 상태에서, 급기풍속과 급기온도에 대한 기류속도와 온도분포의 차이를 파악하기 위해 수치시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 2는 Fig. 1의 도면에 근거하여 구성된 양측복

Table 2 Simulation condition of laboratory animal facilities

Division	Substance
Room size	4.9 m(w)×3.8 m(d)×2.7 m(h) = 51.3 m ³
Airing means	Turbulent flow
Cage Rack size	0.6 m(w)×3.8(d)×1.8 m(h) = 4.104 m ²
Air inlet size	0.62 m(w)×0.62 m(d) = 0.3844 m ²
Air supply capacity	1100 CMH
Air inlet wind speed	0.3974 m/s
The number of Air inlet	2EA
The number of Cage Rack	2EA
Air supply Temp.	24°C
Air outlet size	0.5 m(w)×3.8 m(d) = 1.9 m ²
The placement of Cage Rack	Both sides

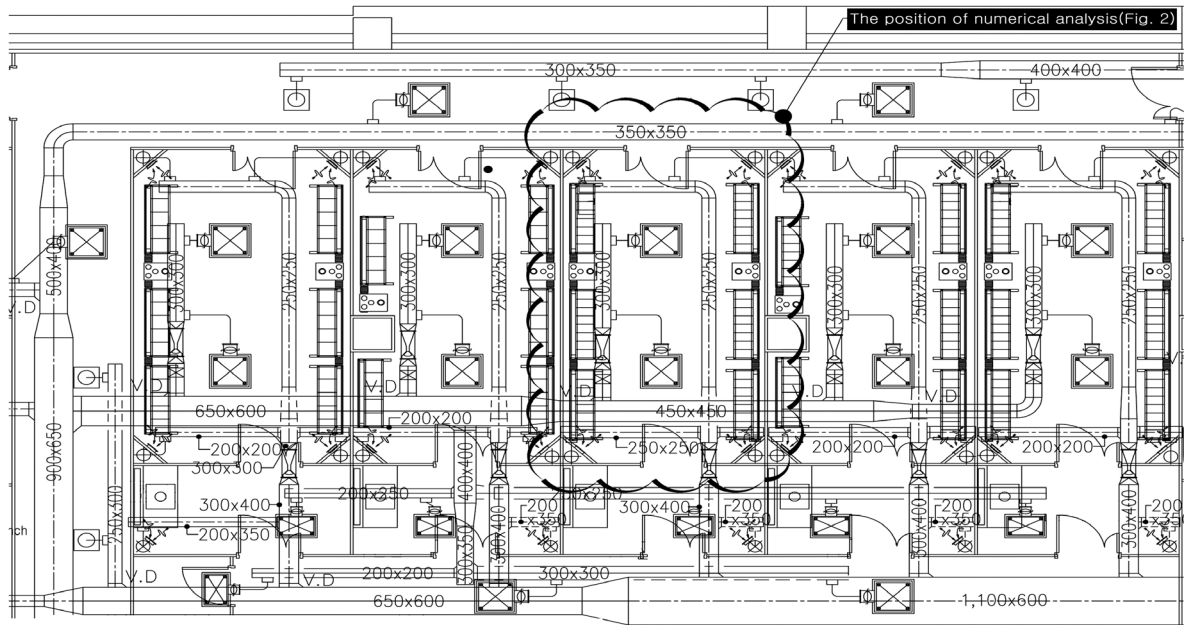


Fig. 1 The laboratory animal facilities floor plan of green biotechnology cleaner breeding center in S-univ.

렬형 실험동물 사육실의 시뮬레이션 모델링을 나타내고 있다. 실의 크기는 높이 2.7 m, 가로 4.9 m, 세로 3.8 m이며 실제적은 51.3 m³이다.

2.4 수치 시뮬레이션 분석방법

본 연구에서는 동물사육실의 온도, 풍속분포의 변화특성을 파악하기 위하여 수치 시뮬레이션을 통해 급기온도 및 풍속의 최적운전 조건을 분석하였다.

먼저 동물사육실의 운전조건을 파악하기 위해, 해석단면을 기준으로 하여 실험동물 사육실내의 기류

속도와 온도의 분포를 구했으며, 온도분포의 분석위치는 급기구에서 나오는 기류가 케이지랙에 닿는 지점의 안쪽 중간 바깥쪽 온도의 평균값으로 하여, 상부 중간부 하부 각각의 중간부분으로 선정하여 검토하였다.

Fig. 2는 바이오 클린룸인 실험동물 사육실내 케이지랙 부근의 온도 및 풍속분포의 해석위치를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

Table 4는 Table 3 실험조건 1의 경우로 동물사육실 급기구의 급기풍속을 0.39 m/s(1,100 CMH)로 고정시키고 취출온도를 22℃, 24℃, 26℃ 하였을 때 케이지랙 부근의 온도분포 해석결과를 수치로 나타내고 있으며, Table 5는 Table 3 실험조건 2의 경우로 급기온도는 24℃로 고정시키고 풍속을 변화시켰을 때의 케이지랙 부근 풍속분포의 해석결과를 수치로 나타내고 있다.

우선 동물 사육실내의 급기온도에 따른 차이를 보기 위해 22℃, 24℃, 26℃의 세 조건으로 기류를 공급하였을 때 동물 사육실내의 온도분포, 급기구에서의 급기풍속을 0.32 m/s(900 CMH), 0.39 m/s(1100 CMH), 0.46 m/s(1300 CMH)의 세 조건으로 공급하였을 때 기류속도 분포에 대한 수치시뮬레이션을 수행하였다.

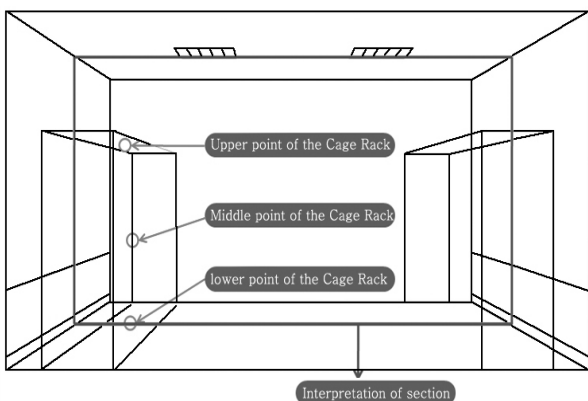


Fig. 2 The position of numerical analysis for supply air temperature, Wind speed around the cage rack.

Table 3 Simulation conditions

Division	The placement of Cage Rack	Airing means	Fixed Variables	Change Variables
Case 1	Both sides	Turbulent flow	Air inlet wind speed	Air supply Temp. (22, 24, 26°C)
Case 2			Air supply Temp.	Air inlet wind speed (0.32, 0.39, 0.46m/s)

Table 4 The results of temperature distribution depending on supply air temperature in laboratory animal facilities

The position of numerical analysis	Division	Air supply Temp.		
		22°C	24°C	26°C
	Upper point of the Cage Rack	21.08°C	23.94°C	25.92°C
	Middle point of the Cage Rack	20.81°C	23.9°C	25.79°C
	lower point of the Cage Rack	20.68°C	23.84°C	25.73°C

Fig. 3~Fig. 8은, S대 그린바이오 청정사육센터의 동물 사육실의 급배기방식을 난류방식으로 수치 시뮬레이션의 조건을 모델링한 후 Table 4, Table 5의 수치 시뮬레이션 분석결과를 그림으로 나타내고 있다. 급기구의 크기는 가로 0.62 m×세로 0.62 m이고, 급기구와 급기구 사이의 간격은 1.23 m이다. 배기구의 크기는 가로 3.8 m×세로 0.5 m이고 배기구의 위치는 마루바닥에서 0.1 m 떨어져있다.

Fig. 3~Fig. 5는 동물 사육실의 급기풍속을 0.39 m/s (1100 CMH)로 고정시키고 급기온도를 22°C, 24°C, 26°C로 하였을 때 케이지랙 부근의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 6~Fig. 8은 취출온도 24°C를 고정시키고 급기풍속을 0.32 m/s(900 CMH), 0.39 m/s (1100 CMH), 0.46 m/s(1300 CMH)의 세가지 경우로 공급하였을 때, 케이지 랙의 상부, 중간, 하부에서 해석한 풍속분포를 나타내고 있다.

Fig. 3는 운전조건에서 급기풍속을 0.39 m/s로 고정시키고, 급기온도를 22°C로 변화를 하였을 때 케이지 상부온도 21.08°C 케이지 중간부온도 20.81°C, 케이지 하부온도 20.68°C로 나타내고 있다.

Fig. 4는 급기온도를 24°C로 하였을 때는 케이지 랙 상부온도 23.94°C 케이지 중간부온도 23.9°C, 케이지 하부온도 23.8°C이고, Fig. 5은 급기온도를 26°C로 하였을 경우, 케이지 랙 상부온도는 25.9°C, 케이지 랙 중간부온도 25.79°C, 케이지 랙 하부온도 25.73°C를 나타냈다.

급기온도를 각각 22°C, 24°C, 26°C로 각각 변화시켜 기류를 공급해본 결과, 케이지랙에 전달되는 온도는 급기 온도와 거의 비슷한 온도로 급기되는 것을 알 수 있었고, NIH에서 규정한 동물사육실 환경

적합 기준치 23±3°C에 적정범위 안에 들어가는 것을 알 수 있었다. 따라서 급기온도를 22°C의 낮은 온도로 설정하는 것이 실험 동물 사육실의 환경에 영향을 미치지 않으며 성에너지의 효과가 있다고 판단된다.

Fig. 6~Fig. 8은 운전조건 중 급기온도를 24°C로 고정시키고 풍속을 변화시켰을 때의 케이지랙부근의 풍속분포를 나타내고 있다.

급기풍속이 0.32 m/s(900 CMH)의 경우는, 급기구에서 멀어질수록 점차 급기풍속이 감소하면서 케이지 상부속도 0.17 m/s, 케이지 중간속도 0.15 m/s, 케이지 하부속도 0.13 m/s를 나타내고 있다. 따라서 NIH에서 규정한 동물 사육실 환경적합 풍속기준치¹⁾인 0.13~0.18 m/s 범위 안에 들어가 케이지랙 부근의 풍속분포는 적절하다고 할 수 있다.

급기풍속이 0.39 m/s(1100 CMH)의 경우, 케이지 랙 상부속도 0.18 m/s, 케이지랙 중간부속도 0.16 m/s, 케이지랙 하부속도는 0.13 m/s를 나타내었고, 급기속도가 0.46 m/s(1300 CMH)의 경우, 케이지랙의 상부속도 0.25 m/s, 케이지랙 중간부속도 0.22 m/s, 케이지랙 하부속도 0.19 m/s와 같은 풍속분포의 결과를 얻을 수 있었다.

공급속도가 0.32 m/s(900 CMH), 0.39 m/s(1100 CMH)의 경우는 케이지랙부근에서 기류속도가 환경적합 기준치인 0.13~0.18 m/s로 만족하였지만, 급기풍속이 0.46 m/s(1300 CMH)의 경우는 케이지랙 부근에서 최대 기준치 0.18 m/s를 초과 하여, 급기풍

1) 동물실험을 위한생물안전시설의 이해, p.29, NITR (국립독성연구원).

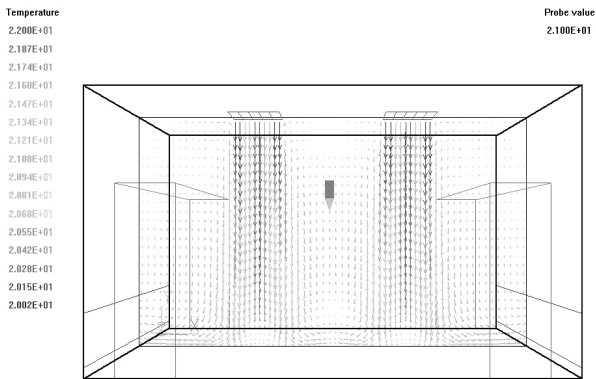


Fig. 3 Temperature distribution in laboratory animal facilities on supply air temperature 22°C.

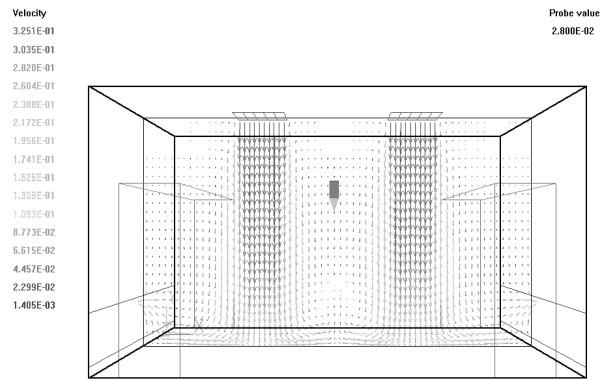


Fig. 6 Wind speed distribution in laboratory animal facilities on wind speed 0.32 m/s (900 CMH).

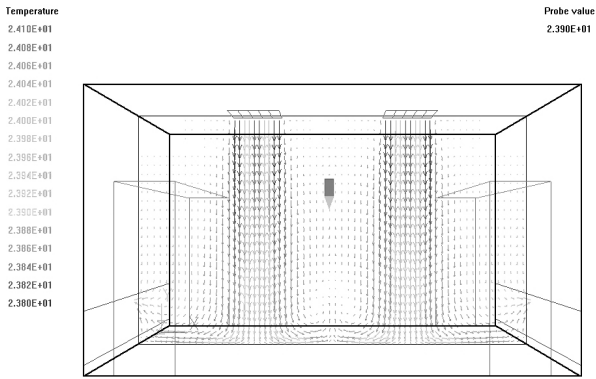


Fig. 4 Temperature distribution in laboratory animal facilities on supply air temperature 24°C.

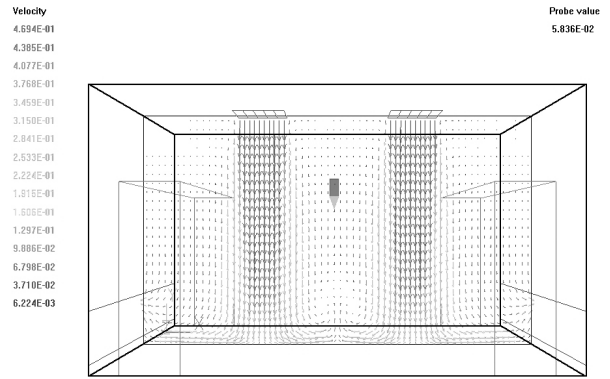


Fig. 7 Wind speed distribution in laboratory animal facilities on wind speed 0.39 m/s(1100 CMH).

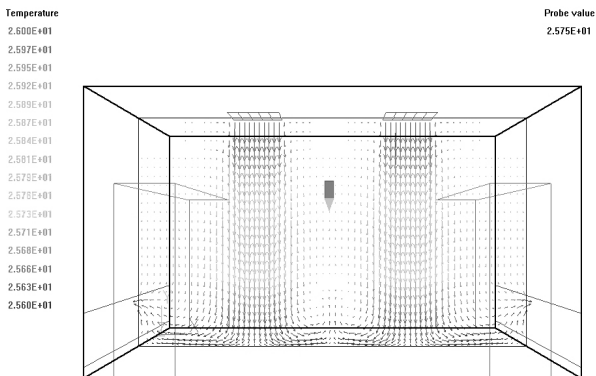


Fig. 5 Temperature distribution in laboratory animal facilities on supply air temperature 26°C.

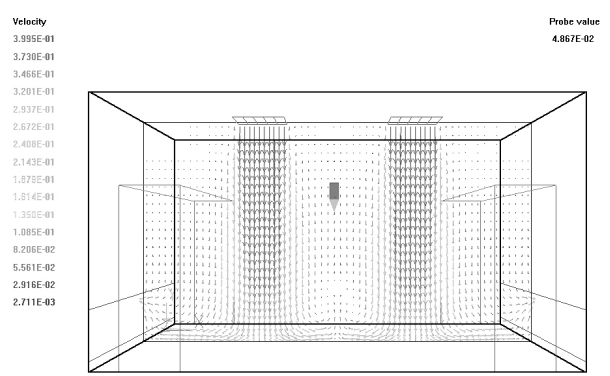


Fig. 8 Wind speed distribution in laboratory animal facilities on wind speed 0.46 m/s(1300 CMH).

속 0.46 m/s의 경우, 적합하지 못한 풍속분포의 결과 값을 얻을 수 있었다.

따라서 급기풍속(풍량)이 증가하면 실내 세균농도

를 감소시키는 역할을 하지만 케이지랙 부근의 기류속도를 증가시켜 바람직하지 않은 결과를 초래할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 동물 사육실의 급배기 방식은 난류방식, 실내의 케이지랙의 배치는 양측 복렬형으로 고정하였을 경우, 기류속도 및 온도분포의 분석을 통하여, 급기온도 및 급기속도가 실험동물 사육실의 환경에 미치는 영향을 파악하였으며, 최적설계 방안을 제시하기 위하여 실험동물 사육실의 온도, 풍속분포의 수치 시뮬레이션을 통해 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동물 사육실의 케이지랙의 배치형태를 양측복렬형으로 배치하였을 경우, 급기풍속이 직접 케이지랙 부근에 전달됨에 따라, 급기풍속 0.32 m/s(900 CMH), 0.39 m/s(1100 CMH)의 경우는 케이지랙 하부, 중부, 상부에서 NIH 환경적합치 실내풍속 범위인 0.13~0.18 m/s 범위 안에 포함되는 것을 알 수 있었으나, 반면 급기풍속 0.46 m/s(1300 CMH)의 경우는 환경적합 실내풍속범위를 벗어나는 결과를 얻었다.

(2) 동물 사육실의 실내와 케이지랙 부근의 온도분포의 경우, 급기구의 급기온도로 부터의 영향을 파악하기 위해 급기풍속을 고정하고 급기온도를 각각 22℃, 24℃, 26℃로 변화시켰으나, 이 범위에서는 모두 NIH 환경기준치인 24±1℃의 값을 만족시키는 것을 알 수 있었으며, 성에너지지를 위해서는 낮은 온도를 사용하는 것이 경제적이라고 판단된다.

(3) 동물 사육실의 기류방식이 난류방식인 경우, 실험 동물 사육실의 온도분포는 급기온도 22℃, 24℃, 26℃의 세 가지 경우 모두 동물에게 적합한 조건으로 나타났다. 급기풍속의 차이에 있어서는 급기풍속 0.46 m/s(1300 CMH)일 때를 제외하고는 0.32 m/s(900 CMH), 0.39 m/s(1100 CMH)일 경우는 NIH에 적합한 풍속범위안에 들어가는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 기류속도의 증가는 전도, 대류에 의한 체

열발산(증발)을 촉진함으로, 특히 단위중량당의 체 표면적이 큰 동물에서 기류속도의 영향에 충분히 주의할 필요가 있다.

따라서 본 실험의 결과로부터 실험동물 사육실내의 기류 분포와 온도분포는 최적설계의 중요한 설계요소라는 것을 파악하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Fundamental of animal research facilities, National institute of toxicological research, 2005.
2. Animal research facilities of GLP laboratory, national institute of toxicological research, 1996.
3. Guide line for animal research facilities, Japan architecture association, 1996.
4. The guide for the care and use of laboratory animals, NRC, 1996.
5. Guide line for animal care and breeding, 2000.
6. HVAC for animal research facilities, 2000.
7. GLP for animal research facilities, 1998.
8. Korea animal research facilities, 2006.
9. Guide line of laboratory for bio safety, 2006
10. Understanding of bio safety facilities for animal research.
11. Japan animal research facilities.
12. Considering for clean class and optimizing air change of clean room, 2008.