

COVID-19 실내 확산 방지를 위한 급배기 특성 CFD 분석 CFD Analysis of Air Supply and Exhaust Characteristics to Prevent Indoor Spread of COVID-19

설성훈* · 손창효* · 김영복** · 차승윤* · 박상찬* · 윤정인*†

Sung-Hoon Seol*, Chang-Hyo Son*, Young-Bok Kim**, Seung-Yun Cha*,
Sang-Chan Park* and Jung-In Yoon*†

(Received 8 December 2021, Revision received 27 December 2021, Accepted 27 December 2021)

Abstract : The outbreak of COVID-19 still seriously affects our daily lives despite the actions with governmental level to prevent the situation from getting worse. Among various infection routes of COVID-19, airborne spread needs to be carefully handled in the perspective of HVAC. In particular, cluster infection in multi-use facilities which unspecified number of people use is now the big issue. One of the most simple solution is to dilute virus pollution through the proper ventilation. Therefore, this study analyzes the effect of the location of diffusers and the ventilation rate on the indoor air distribution in the large space through a numerical method. The results show that the zigzag arrangement was the most suitable for ventilation because of its high average and minimum air velocity.

Key Words : COVID-19, Ventilation methods, Numerical analysis, Location of diffuser, Air velocity

1. 서 론

2019년 12월 중국 후베이성의 우한시에서 발생한
코로나바이러스감염증-19(coronavirus disease 2019,

*† 윤정인(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1099-3435) :
교수, 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
*설성훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9724-9707) :
조교수, 부경대학교 냉동공조공학과
*손창효(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) :
부교수, 부경대학교 냉동공조공학과
**김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) :
교수, 부경대학교 기계시스템공학과
*차승윤(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5733-1957) :
대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과
*박상찬(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6153-9793) :
대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

*† Jung-In Yoon(ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1099-3435)
: Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Pukyong National University.
E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
*Sung-Hoon Seol(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9724-9707)
: Assistant Professor, Department of Refrigeration and
Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University
*Chang-Hyo Son(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515)
: Associate Professor, Department of Refrigeration and Air-Cond
itioning Engineering, Pukyong National University.
**Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744)
: Professor, Department of Mechanical System Engineering,
Pukyong National University.
*Seung-Yun Cha(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5733-1957) :
Graduate student, Department of Refrigeration and
Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
*Sang-Chan Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6153-9793)
: Graduate student, Department of Refrigeration and
Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

COVID-19)에 의해 우리나라는 다양한 산업 분야에서 경제적으로 큰 피해를 입고 있다.¹⁻⁴⁾

다양한 문헌에서 언급된 바와 같이 코로나19는 우리 사회에 많은 악영향을 미치고 있으며, 감염병의 확산을 방지하기 위해 코로나19의 감염경로를 파악하는 것이 중요하다고 판단된다. 코로나19의 감염경로는 크게 세 가지로 알려져 있다. 첫 번째 경로는 큰 비말(재채기, 기침 또는 대화 중 방출되는 물방울과 입자)에 의한 전파, 두 번째 경로는 손 또는 신체의 직접 접촉 전파, 세 번째는 사람의 대변에서 경구(faecaloral)로의 전파로 알려져 있다⁵⁾.

이 중에서 첫 번째에 해당하는 비말감염은 불특정 다수의 사람들이 이용하는 다중이용시설에서 집단감염의 주요 감염경로로 판단된다. 다중이용시설의 경우 모임, 집회, 업무, 휴게 등의 목적으로 사람들의 왕래가 잦고 밀집도가 높으므로 바이러스 감염에 있어 최적의 환경이 된다.⁶⁾ 이러한 다중이용시설에서의 집단감염을 방지하기 위해서 적절한 환기설비를 통해 실내 공기의 질을 높게 유지하는 것이 필수적으로 요구된다.

환기설비에 대한 종래 연구를 살펴보면, Vong과 Abakr⁷⁾는 교실을 대상으로 환기시스템의 방식(Displacement ventilation system, Mixing ventilation system), 환기횟수, 배기구의 위치, 비말의 발생 위치를 변화시켰을 때 실내에서 발생한 비말의 거동을 수치해석을 통해 분석하였으며 그 결과, 치환 환기 방식(Displacement ventilation system)이 혼합 환기 방식(Mixing ventilation system)보다 더 뛰어난 환기 성능을 지녔으나 재실자가 더 많은 비말 입자에 노출된다는 사실을 보였다. Mičko et al.⁸⁾은 상부에서 공기가 급기되는 밀폐된 실에서 실의 중앙에서 오염물질이 발생할 때 배기구의 높이에 따른 영향을 수치적으로 분석하였으며, 상부에서 공기가 급기될 때 배기구의 위치가 바닥에 가까울수록 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있음을 보였다. Kang⁹⁾은 환기방식(1종, 2종, 3종)과 환기횟수, 급기구와 배기구의 위치 변화에 따른 환기효율을 실험적으로 연구하였다. 그 결과, 상부급기, 하부배기나 하부급기, 상부배기와 같은

급기된 공기가 실 전체를 가로질러 통과하는 경우 환기효율이 향상된다는 것을 보였으며, 2종 환기방식, 1종 환기방식, 3종 환기방식 순서로 환기효율이 높다는 사실을 밝혀냈다. Jung and Hong¹⁰⁾은 음압격리병실에서 재실 중인 환자가 기침을 할 때 배기구의 위치에 따른 비말의 거동을 수치적으로 분석하였으며, 화장실과 전실의 반대편 배기구에서 공기의 정체가 일어난다는 사실과 환자의 머리 근처 벽 하단부에 배기구를 설치하는 것이 감염 확산 방지에 효과적이라는 사실을 보였다. Kim and Hong¹¹⁾은 슬라이딩 문이 설치된 음압격리병실에서 병실의 출입구가 열리는 상황에서 격리병실(Isolation Room)과 전실(Anteroom)의 압력 차이와 배기구의 위치에 따른 오염공기 유출량을 수치적인 방법을 통해 분석하였다. 그 결과, 배기구가 문과 마주보는 벽에 설치된 경우가 측벽에 설치된 경우보다 오염공기의 확산이 더 잘 일어남과 동시에 격리실과 전실의 압력 차이가 커질수록 오염공기의 유출량 또한 커진다는 사실을 보였다. Kim et al.¹²⁾은 급기구와 배기구의 작동유무에 따른 실내의 온도 분포, 절대 습도, 실내 기류의 분포를 실험적으로 분석하였다.

종래의 연구를 통해 환기 방법과 특성에 따라 실내 기류 분포가 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 직선형 취출, 끝단 취출 중앙 취출 그리고 지그재그형 취출 방식의 실내 기류 분포를 CFD를 통해 분석하고자 한다. 또한 취출구 개수 변경을 통한 급배기량 변화를 관찰하여 효과적인 급배기구 설치에 대한 고찰을 목표로 한다.

2. CFD 해석 조건과 방법

본 연구의 CFD 해석을 위해 상용 프로그램인 Ansys Fluent를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 적용된 세 가지 방식의 급배기구의 배치를 나타내었다. 직선형 취출 방식의 경우 좌측 4개의 취출구를 급기구로 사용하며, 지그재그형 취출 방식은 좌우를 번갈아 가면서 좌측 2개, 우측 2개의 급기구를 가진다. 끝단 취출 방식은 실의 양 끝단

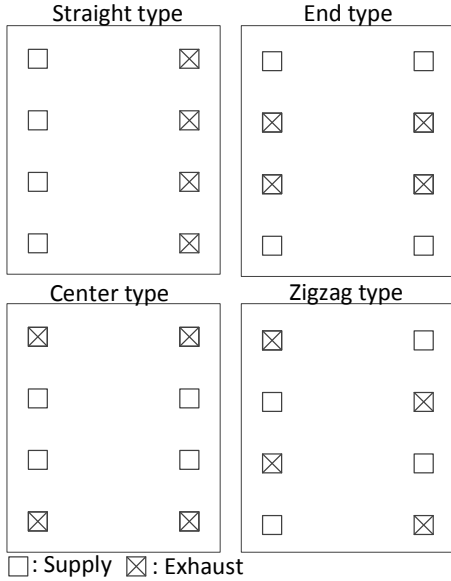


Fig. 1 Arrangement of supply and exhaust diffusers in four cases

에 급기구가 4개의 위치하며, 중앙에서 배기하는 형태를 가진다.

Table 1은 시뮬레이션 분석의 조건을 나타내었다. 급배기구 배치의 효과를 분석하기 위해 각 케이스의 환기량은 6 ACH(Air changes per hour)로 고정하여 그에 맞게 풍속을 계산하여 경계조건으로 부여하였다. 3차원 공간의 기류 분포를 해석하여 결과를 분석하기 위해 특정 2차원 공간의 정의가 필요하며, 일반적인 성인 남성의 평균 신장에 근접한 바닥으로부터 1.7 m 높이에서 2차원 평면을 설정하였다.

급배기구 배치에 따른 기류 분포를 통해 상대적으로 효과적인 배치안을 결정하고, 이후에 급배기구 설치 개수의 영향을 분석하기 위해 기본 설정인 4개의 급기와 4개의 배기의 경우와 비교 대상인 3개의 급기와 3개의 배기로 구성된 케이스를 추가 분석하였다. 현재 가장 일반적으로 사용하는 환기방식은 MV(Mixing ventilation) 방식으로, 주로 천장 레벨에서 급기와 배기가 이루어져 실내 공기와 공급 공기의 혼합을 이루도록 한다. 이 방식의 경우, 혼합이 적절하게 이루어지는 것이

Table 1 Parameter of simulation

Parameter	Value	Unit
Floor area	104.42	m ²
Room volume	263.14	m ³
Standard ventilation rate	6	ACH
Number of supply diffusers	4	EA
Number of return diffusers	4	EA

환기의 효율과 연결되는 부분이므로 실내에서 균일하게 속도 분포가 이루어지는지 여부를 분석하는 것이 필요하다. 또한 전술한 바와 같이 천장에서 급기와 배기가 이루어지기 때문에 XZ평면의 기류 벡터의 해석 결과가 상승 기류를 보이는 경우가 효과적인 환기 방식으로 사료된다. 특히 현재의 COVID-19 등 실내 재실자로부터 방출되는 오염 입자의 효과적인 외부로의 배출을 이루기 위해서는 기류가 실내에 정체되어 순환하지 않고 상승하는 것이 효율적인 것으로 사료된다. 기류의 방향의 중요성은 오염원 배출과 관련한 Memarzadeh의 연구에서도 언급된 바 있다.¹³⁾ 해당 연구에 따르면, 상승 기류로 형성된 바이러스 입자의 분출은 천정으로부터의 급기에 의해 천정으로 배출이 제한되어 환기량을 12 ACH에서 16 ACH로 상승시킬수록 배출효율이 오히려 떨어지는 결과를 보였다.

참고로 상기 언급한 MV방식 이외에도 비교적 최근에는 DV(Displacement ventilation) 방식에 대한 관심이 늘어나고 있다. MV방식에서 신선한 공기를 기존의 재실 공기와 혼합하여 배출하는 것인데 반해 DV방식에서는 새로이 공급되는 신선 공기가 기존의 공기를 밀어내는 환기방식이다. 일반적으로 냉방에서 흔히 사용할 수 있는 이 방식은 공기가 실의 하부에서 공급되는 것이 특징적이다.¹⁴⁾

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 급기구와 배기구 배치에 기류 분포

Fig. 2~5는 네 가지 방식의 급배기구 배열의 실내 기류분포를 해석한 CFD 시뮬레이션 결과이다.

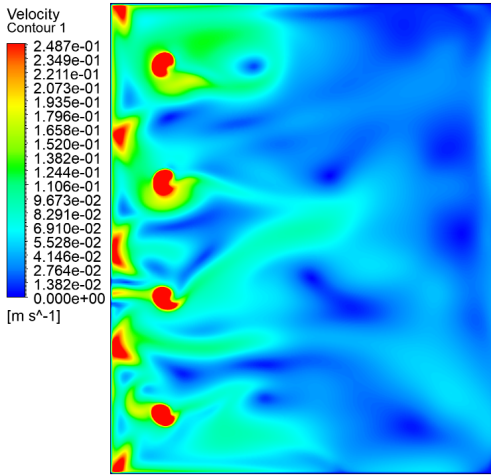


Fig. 2 Velocity contour of straight supply and exhaust arrangement (XZ plane)

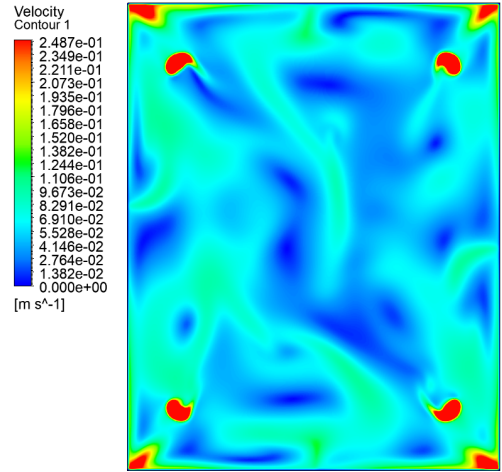


Fig. 3 Velocity contour of end supply and exhaust arrangement (XZ plane)

전술한 바와 같이 1.7 m 높이에서 XZ평면 위에 기류 분포를 나타내었다. 먼저, Fig. 2의 직선형 배열에서 눈에 띄는 기류 분포의 불균형을 볼 수 있었다. 공간을 반으로 나누어 생각할 때 토출이 이루어지는 좌측 1/3 정도의 공간에서 미풍 이상 수준(0.15 m/s)의 기류가 분포되어 있는데 반해 우측 2/3 가량은 상대적으로 기류가 원활하지 않음을 볼 수 있다. 이는 실내에서 발생하는 바이러스의 제거가 원활하지 않을 수 있음을 의미하여 올바르게 배기 배열로 해석된다.

Fig. 3~5에 나타나 있는 나머지 배열에서는 XZ 평면 상에 나타난 등고선으로는 눈에 띄는 기류의 불균형을 판단하기 어려워 최소 풍속, 평균 풍속, 그리고 YZ평면에서의 기류 벡터 분석이 필요하다.

Fig. 6은 0~1.7 m의 실내 공간 전체와 XZ평면 상의 1.7 m 지점에서의 평균 기류를 비교하고, Fig. 7은 이들에서의 최소 기류 값을 나타낸다. 0~1.7m의 범위에서 평균 유속은 지그재그 형태의 배치가 0.085 m/s로 가장 높은 형태를 보였다.

또한 Fig. 4에 나타난 바와 같이 최소 풍속은 지그재그 형태에서 0.00047 m/s로 가장 높은 형태를 보였다. 1.7 m에서의 최소 풍속은 지그재그 형태가 가장 낮은 경향을 보였으나 0~1.7 m의 범위 전체에서 최소 풍속을 고려한 경우, 최소 풍속이 가장 높은 것을 볼 수 있다.

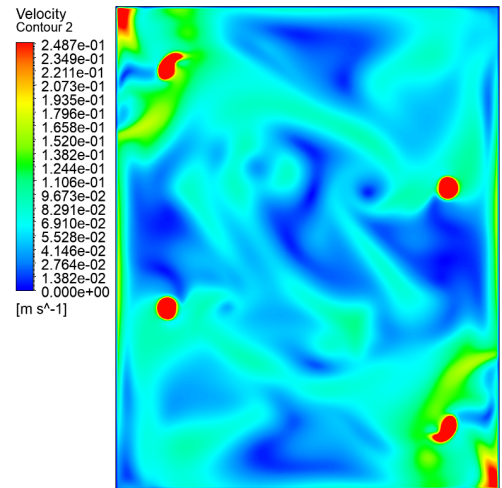


Fig. 4 Velocity contour of zigzag supply and exhaust arrangement (XZ plane)

또한 0~1.7 m 범위에서 평균 풍속도 최소 풍속과 마찬가지로 지그재그 형태가 가장 높은 모습을 보였다. 즉, 최소 풍속과 평균 풍속이 1.7 m 구간에서는 타 방식에 비해 작으나 0~1.7 m 범위에서는 높은 모습을 보이므로 지그재그 형태의 급배기 방식이 다른 급배기 방식에 비해 정체되는 구간이 적어 기류가 골고루 퍼진 것으로 판단된다.

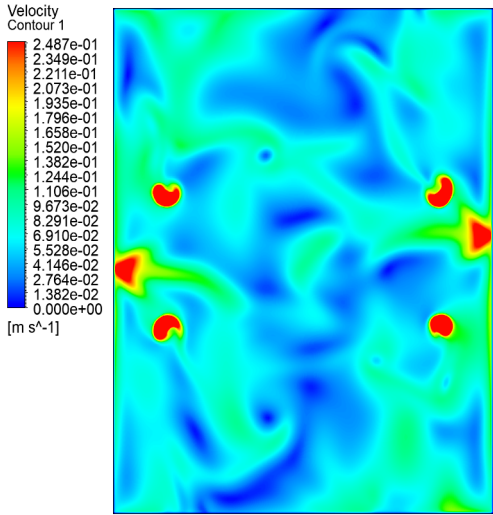


Fig. 5 Velocity contour of center supply and exhaust arrangement (XZ plane)

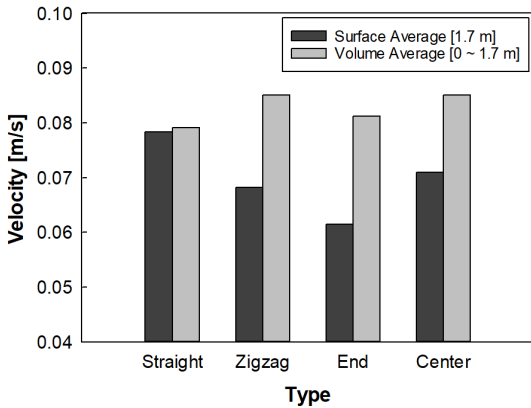


Fig. 6 Average velocity at target volume and 1.7 m XZ plane according to arrangement

Fig. 8은 끝단 취출방식의 YZ평면 위에 표시한 기류 벡터를 보여 준다. 바닥층에서의 공기 순환이 나타나며 상대적으로 수평한 흐름을 나타낸다. 바이러스를 포함하는 비말은 자체의 무게로 인해 아래로 가라앉으려는 힘이 작용한다. 따라서 상승 기류가 뚜렷할수록 배출되는 기류와 함께 바이러스 입자가 외부로 배출될 것으로 기대할 수 있다. 반면 수평한 실내 공기 흐름은 배출의 개념보다는 주위로의 전파로 해석할 수 있다.

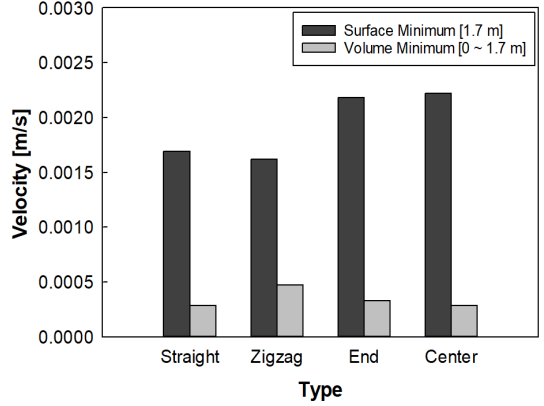


Fig. 7 Minimum velocity at target volume and 1.7 m XZ plane according to arrangement

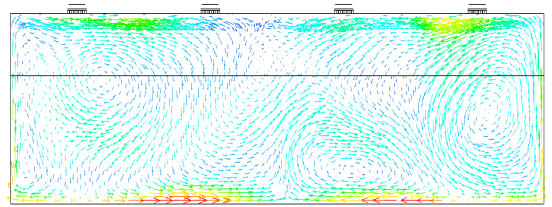


Fig. 8 Air flow vector described on YZ plane of end type arrangement

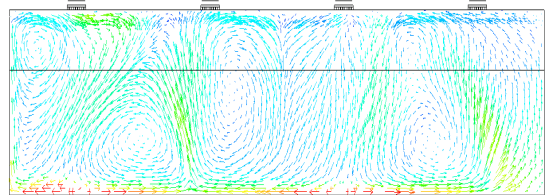


Fig. 9 Air flow vector described on YZ plane of zigzag type arrangement

Fig. 9는 지그재그 취출방식의 YZ평면 위에 표시한 기류 벡터를 나타낸다. 상대적으로 뚜렷한 상승 벡터에 의해서 상기 언급된 바와 같이 바이러스 등의 오염 물질의 원활한 배출을 기대할 수 있다.

3.2 풍량 변화에 따른 기류 분포

지그재그 배열의 급기 풍속은 유지시킨 채 급배기구 숫자를 6개로 감소시켜 전체 공기 순환량

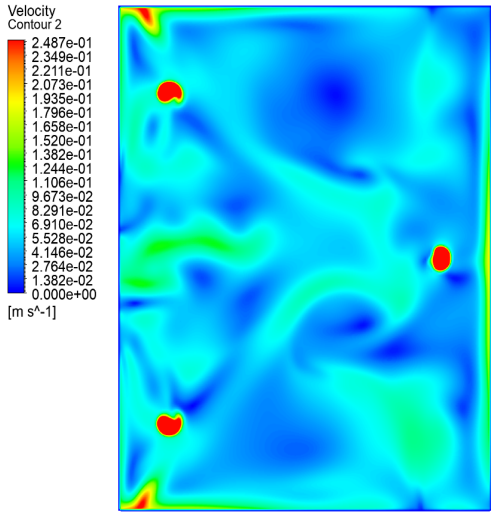


Fig. 10 Velocity contour of zigzag arrangement with 6 diffusers (XZ plane)

이 감소되었을 때의 기류분포의 해석은 Fig. 10에 나타난 바와 같다. 1.7 m 지점에서의 YZ평면 상의 속도 분포를 보면, 전체적으로 혼합이 이루어지고 있으며 오히려 급배기구의 숫자가 8개인 경우보다 유동이 정체된 구역이 다소 적음을 알 수 있다. 하지만, 각각 3 m와 6 m 지점에서의 YZ평면에서의 기류 벡터를 보여 주는 Fig. 11과 Fig. 12를 보면 명확한 차이를 발견할 수 있다.

X좌표 3 m 지점과 6 m 지점에서 기류의 차이를 일으키는 가장 큰 원인은 흡입과 토출 취출구의 조합이다. 3m 지점은 두 군데의 급기와 한 군데의 배기로 이루어져 있는 반면, 6 m 지점은 두 군데의 배기와 한 군데의 급기로 이루어진다. 앞서 나타난 급배기구의 개수가 8개인 경우는 대칭을 이루고 있어 3 m와 6 m 지점의 기류 분포에 큰 차이가 없었으나, 이 경우에는 급배기구의 불균형이 명확한 차이를 발생시킨다. 급기구가 하나밖에 없는 6 m 지점에서의 기류를 나타낸 Fig. 12에 나타난 바와 같이, 이 경우에는 전체적인 기류의 속도가 낮을 뿐 아니라 상승하는 기류가 상대적으로 적음을 알 수 있다. 이 경우, 같은 공간 안에서 바이러스 입자의 배출 불균형이 예상된다.

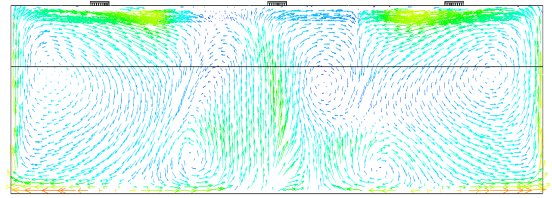


Fig. 11 Air flow vector described on YZ (at X=3 m) plane of zigzag type arrangement with 6 diffusers

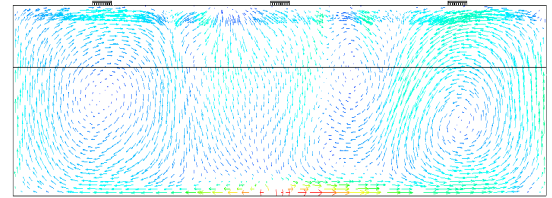


Fig. 12 Air flow vector described on YZ (at X=6 m) plane of zigzag type arrangement with 6 diffusers

4. 결 론

본 논문에서는 급배기구의 배치와 풍량에 따른 풍속에 대해 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 급배기구 배치에 따른 CFD 해석 결과를 속도 등고선에 나타내어 비교하고, 평균 풍속과 최소 풍속을 비교하였다. 그 결과, 지그재그 형태의 배치가 평균과 최소 풍속이 높고, YZ평면 상에서 상승 기류가 가장 강함을 확인하였다. 실내 공간의 양호한 기류 분포와 상승 기류는 실내 오염물의 원활한 배출로 이어질 것으로 기대된다.

2) 급배기구 숫자를 8개에서 6개로 감소시켜 풍량을 줄인 경우, X 지점에 따라 YZ평면에 나타난 기류가 크게 달라졌다. 이는 급기와 배기구 숫자가 균형을 이루고 있지 않아 나타나는 특징이다. 실내에 정체되는 구간 없이 원활한 오염입자의 배출을 위해서는 급기구와 배기구의 배열이 균형을 이루는 것이 중요하다.

후 기

이 논문은 2021학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었음.

Author contributions

S. H. Seol; Conceptualization, Writing-original draft. C. H. Son; Methodology, Validation. Y. B. Kim; Supervision. S. Y. Cha; Investigation. S. C. Park; Visualization. J. I. Yoon; Project administration, Writing-review & editing.

References

1. J. U. Joo, S. C. Roh and J. J. Yoon, 2021, "The economic loss caused by the spread of COVID-19 to the Seoul area", Policy report, Vol. 332, The Seoul Institute.
2. T. K. Kim, E. M. Kim, H. C. Chung, N. H. Chung and C. M. Koo, 2021, "Covid-19 damage assessment for the hotel industry : A case of a hotel in Myeong-dong", International Journal of Tourism and Hospitality Research, Vol. 35, No. 7, pp. 215-228.
(<https://doi.org/10.21298/IJTHR.2021.7.35.7.215>)
3. C. H. Kim and H. B. Lee, 2020, "COVID-19 and the Future of the Automotive Industry : Focusing on the Korean automobile industry", Vol. 20, No. 3, pp. 75-84.
4. J. P. Lim, 2020, "Crisis management and challenges of the air transport industry caused by COVID-19", International Journal of Tourism and Hospitality Research, Vol. 34, No. 7, pp. 139-154.
(<https://doi.org/10.21298/IJTHR.2020.7.34.7.139>)
5. J. G. Cho, 2020, "Facility system operation plan to prevent the spread of novel coronavirus disease (COVID-19)", Magazine of the SAREK, Vol. 49, No. 4, pp. 60-64.
6. J. W. Kim and C. S. Kim, 2020, "A Case Study on the Mass Infection of Multi-use Facilities", Proceeding of Annual Autumn Conference of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 27, No. 2, pp. 38-39.
7. Y. L. Vong and Y. A. Abakr, 2021, "Numerical study of the impact of ventilation system on the spread of infectious aerosol transport in a classroom", The university of Nottingham.
8. Pavol Mičkoa, Andrej Kapjora, Martin Vantúcha and Šimon Kuba, 2021, "Influence of location of exhaust diffusers on the transport of air particles in the operating room", Transportation Research Procedia 55, pp. 538-543.
(DOI:10.1016/j.trpro.2021.07.019)
9. T. W. Kang, 2006, "An Experimental Analysis of Ventilation Effectiveness using Tracer Gas", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 260-266.
10. M. J. Jung and J. K. Hong, 2019, "A Numerical Study on Cough Particle Dispersion and Deposition According to the Location of Exhaust Air Diffuser in Airborne Infection Isolation Room", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 31, No. 12, pp. 559-567
(<https://doi.org/10.6110/KJACR.2019.31.12.559>)
11. J. Y. Kim and J. K. Hong, 2020, "A Numerical Analysis on Contaminant Air Leakage According to Pressure Difference and Exhaust Location of Negative Pressure Isolation Room", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 1-12.
(<https://doi.org/10.6110/KJACR.2020.32.1.001>)
12. Y. S. Kim, C. S. Yi, D. C. Lee, H. M. Jeong and H. S. Chung, 2014, "A Study on the Ventilation Method for a Factory with a Sealed Structure", Journal of the Korean Society for

- Power System Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 159-165.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.6.159>)
13. F. Memarzadeh, 2011, "Improved Strategy to Control Aerosol-Transmitted Infections in a Hospital Suite", ASHRAE Transactions.
 14. H. Qian and X. Zheng, 2018, "Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings", Journal of Thoracic Disease, Vol. 10, No. 19, pp. 2295-2304. (DOI:10.21037/jtd.2018.01.24.)
 15. J. W. Lee and Y. S. Kim, 2005, "A Study on the Airflow distribution in office building with Air Conditioning system", Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 1, pp. 435-438.