



데이터센터 서버실의 항온항습기와 다공판 배치방식에 따른 기류 분포 분석

Analysis of Air Flow Distribution according to the Positions of Computer Room Air Conditioning and Perforated Plate in a Server Room of Data Center

정용호*

Jung, Yong-Ho*

* Dept. of Architectural Engineering, Chungwoon Univ., South Korea (coil@chungwoon.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: In most domestic data centers, a perforated panel or a grating panel is equally placed on the entire top surface at the same rate for cooling the server room. However, in such a supply system, there is a situation where cold air can not be supplied uniformly according to the supply distance due to the air velocity discharged from a CRAC (computer room air conditioning) unit. However, considering the cost and difficulty of repairing the existing system, it is practically the most effective way to raise the air-conditioning efficiency index by adjusting the aperture ratio of the perforated plate to form an even airflow distribution. **Method:** The cooperative effect of the uptake system using the perforated plate was analyzed for the bottom extraction method, and the feasibility of the improvement was analyzed through CFD analysis. **Result:** As a result of CFD simulations, the RCI_{HI} increased from 86.1% to 89.2% and the RCI_{LO} increased from 90.3% to 91.2% by 0.9%. Although it is possible to confirm the possibility of improving the efficiency of air conditioning in the simplest of the facilities related to the server room of the data center, the quantitative effect is not so high.

KEYWORD

데이터센터
다공판
실내 기류분포

Data Center
Perforated Plate
Indoor Airflow Distribution

ACCEPTANCE INFO

Received Jan 29, 2019
Final revision received Feb 7, 2019
Accepted Feb 12, 2019

© 2019 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

IT(Information Technology)환경의 발전과 더불어 클라우드 시스템 및 데이터통신 등의 처리를 위하여 데이터센터에 대한 수요가 급증하고 있는 추세에 있다. 데이터센터는 일반 건축물에 비하여 40 배 이상의 에너지를 소비하고 있는 것으로 조사되고 있다. 이는 데이터센터 내부에 설치되는 서버의 발열을 제어하기 위한 냉각열량이 대부분을 차지하며 전체 데이터센터의 운영에 필요한 에너지의 약 40%를 차지한다[1].

이에 따라 그린데이터센터 및 친환경 데이터센터에 대한 관심과 연구가 활발하게 진행되고 있으며 우리나라에서도 국가적인 차원에서 대책으로서 2012년 9월에는 그린데이터센터 구축 지침이 지정되었으며, 이 지침에서는 서버실의 장비계획 및 관리방안 등을 제시하고 있어 데이터센터 서버실의 계획에 효율적으로 활용할 있게 되었다[2]. 그럼에도 불구하고 데이터센터는 건설을 위한 초기투자 비용과 IT기술의 발전 속도에 따른 서버 교체 등의 비용뿐만 아니라 에너지 절감을 위한 시설의 개선비용 등이 막대하게 소요되므로 실질적인 개선 노력이 이루어지기 어려운 상황이다[3]. 따라서 기존

설비의 개선방안 중 기존시스템의 개보수 비용 및 난이도 등을 고려할 때 현장에서 간단하게 효율을 증대시킬 수 있는 방안을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존 시스템을 유지하면서 서버실 내부 공조효율 향상을 위한 방안으로서 상면에 설치되는 다공판의 개구율 조절을 제안하였다. 현재 국내 대부분의 데이터센터에서는 서버실의 냉각을 위하여 다공판(perforated panel) 또는 그레이팅 패널(grating panel)이 동일한 비율로 전체 상면에 균등하게 배치되고 있다.

그러나 전술한 바와 같은 형태의 하부플래넘 가압시스템에서는 CRAC (computer room air conditioning)유니트에서 토출되는 공기 속도의 영향으로 공급거리 따라 냉기가 균등하게 공급될 수 없는 상황이 발생하게 된다. 이에 대한 개선방안은 실질적으로 여러 가지 대안이 제시되고 있으나 기존시스템의 개보수 비용 및 난이도 등을 고려할 때 다공판의 개구율을 조정하여 균등한 기류분포를 형성함으로써 공조효율을 상승시키는 방안이 현실적으로 가장 적용 가능하며 경제적인 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 기존 데이터센터에서 운영하는 시스템 중 콜드 아일(cold aisle)과 핫 아일(hot aisle)로 구성된 바닥취출방식을 대상으로 다공판을 이용한 상향공급시스템의 공조효율이 분석되었고 CFD분석을 통하여 이에 대한 개선사항의 적용가능성이 분석되었다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 서울 목동에 위치한 기존 데이터센터의 테스트베드를 대상으로 서버실 내부의 온도분포와 기류속도 분포 등의 측정을 통하여 기존 다공판을 이용한 공급시스템의 문제점이 파악되었다. 기존 데이터센터의 서버실 현장 파악을 위하여 현장의 기류공급 특성은 서버실 상면 다공판에서의 토출속도를 중심으로 측정이 실시되었고 온도측정은 테스트베드에 설치된 EMS(energy management system)의 전송데이터를 추출하여 측정 결과가 확보되었다. 측정결과를 분석을 통하여 기존 시스템의 공조효율이 평가되었고, CFD를 이용하여 다공판의 개구를 조절을 통한 공조효율 개선 가능성이 분석되었다.

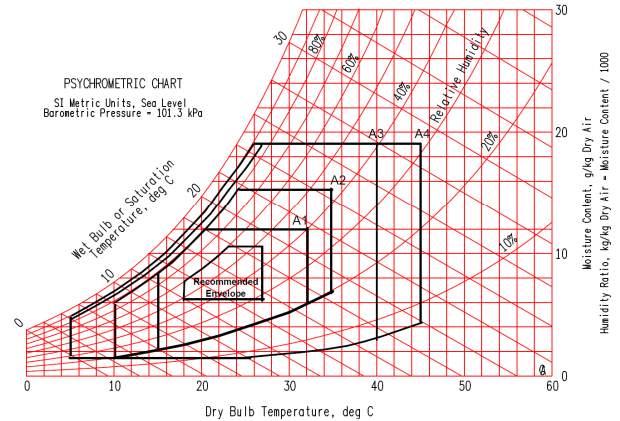


Fig. 1. Equipment environment specification(ASHRAE-TC 9.9, 2015)

2. 이론적 고찰

2.1. 데이터센터 서버의 환경 기준

Fig. 1.은 2015년 ASHRAE - TC 9.9에서 규정하고 있는 데이터센터 서버의 인입 건구온도 기준을 나타낸다. 국내에서 주로 적용되고 있는 서버실 기기의 환경기준인 class 1의 경우 서버 인입 건구온도의 권장(recommended)기준안은 18~27° C, 허용(allowable, A1 범위)기준안은 15~32° C로 제시하고 있다. 2008년 이후 서버 인입구의 열환경조건 기준은 서버 자체의 고온 환경에 대한 적응성 향상으로 인하여 점차 완화된 조건을 적용하는 추세에 있다[4].

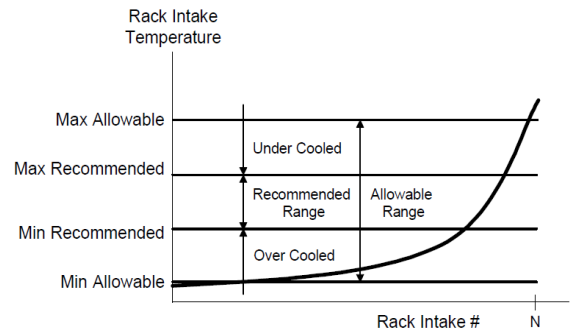


Fig. 2. Temperature range criteria for RCI calculation(ASHRAE-TC 9.9, 2015)

2.2. 데이터센터의 공조효율 평가 지표

공조효율 평가지표는 SHI/RHI(Supply Heat Index/Return Heat Index), RCI(Rack Cooling Index), RTI (Return Temperature Index) 및 β, BAL(Balance), CI(Capture Index) 등과 같이 다수의 연구자들에 의해 제안되어 왔다.

각각의 효율평가 기준과 방법은 전술한 바와 같이 이미 정립되어 있으나 실질적으로 데이터센터 서버실에서 최우선적으로 고려하여야 하는 평가지표는 서버의 안정성 확보를 위한 평가지표라 할 수 있다. 전술한 평가 지표 중 서버의 안정성과 직접적으로 관련한 지표는 RCI지표이다.

현재 국내외의 대규모 데이터센터는 대부분 class 1 이상의 기준으로 계획되고 있다. RCI는 서버룸의 설계기준 또는 지침에서 허용하는 온도범위를 기준으로 공조효율을 판단하는 지표이다. Fig. 1.에서 나타낸 바와 같이 ASHRAE-TC 9.9 class 1에서 제시되어 있는 서버 인입공기의 권장온도범위와 허용온도범위를 기준으로 권장온도를 초과하는 범위와 미달하는 범위의 비율을 산출하여 RCI_{HI}와 RCI_{LO}의 지표를 구할 수 있다. (식1), (식2)는 RCI의 연산식을 보여준다. 공조효율과는 별도로 IT장비의 보호측면에서 RCI는 권장온도보다 초과하여 높게 유지되는 것이 보다 큰 위험성을 갖는다. 따라서 RCI_{LO}보다는 RCI_{HI}가 데이터센터의 위험성과 효율성을 평가하는 지표가 된다. Table 1.과 같이 RCI의 등급은 91% 이상 유지될 때 효율성이 있다고 평가된다[5].

Table 1. RCI classification

Rating	Ideal	Good	Acceptable	Poor
RCI(%)	100%	≥96%	91 ~ 95%	≤90%

$$RCI_{HI} = [1 - \frac{\sum (T_x - T_{max-rec}) T_x > T_{max-rec}}{(T_{max-all} - T_{max-rec}) \times n}] \times 100 \dots (식1)$$

여기서 T_x : 각 서버 인입구 평균온도(°C)
 n : 전체 서버 인입구 수
 $T_{max-rec}$: 가이드라인 또는 기준에서 추천하는 최고인입온도(°C)
 $T_{max-all}$: 가이드라인 또는 기준에서 허용하는 최고인입온도(°C)

$$RCI_{LO} = [1 - \frac{\sum (T_{min-rec} - T_x) T_x < T_{min-rec}}{(T_{min-rec} - T_{min-all}) \times n}] \times 100 \dots (식2)$$

여기서 T_x : 각 서버 인입구 평균온도(°C)
 n : 전체 서버 인입구 수
 $T_{min-rec}$: 가이드라인 또는 기준에서 추천하는 최저 인입온도(°C)
 $T_{min-all}$: 가이드라인 또는 기준에서 허용하는 최저 인입온도(°C)

데이터센터의 서버실 내부 공기분배시스템의 효율분석을 목적으로 한 실내 환경 지표는 일반적으로 습도의 영향보다는 건구온도와 기류분포에 중점을 두고 있다[6].

2.3. 포러스(Porous) 경계조건 적용

본 연구에서는 콜드 아일(cold aisle)의 바닥에 설치된 다공성 판넬(perforated tile)에서의 압력 강하를 재현하기 위해 포러스 경계조건을 사용하였다. 포러스 경계조건은 포러스 영역으로 설정한 곳에서의 유체의 흐름에 저항을 걸어 주는 것으로서, 지배방정식의 운동량 방정식에 운동량의 싱크(sink)를 추가하게 된다. 운동량의 싱크는 (식3)과 같은 생성항으로 나타낼 수 있다. 생성항은 두 개의 부분으로 구성되는데, (식1)의 우측 첫 번째 항인 점성 소실항과 우측 두 번째 항인 내부 소실항이다.

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j\right) \dots\dots\dots (식3)$$

여기서, S_i 는 x, y 및 z방향의 운동량 방정식에 대한 생성항을, $|v|$ 는 속도의 크기를 나타내며, D와 C는 규정된 매트릭스이다. 이 운동량의 싱크(sink)는 포러스존에서의 압력 구배에 영향을 미쳐 유체의 속도에 비례하여 압력 강하가 이루어지도록 한다. 균질한 포러스존에 대해서는 이를 단순화 하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j\right) \dots\dots\dots (식4)$$

여기서, α 는 침투율, C_2 는 내부 저항 요소를 나타내는 것으로서 D와 C를 각각 $1/\alpha$ 과 C_2 를 갖는 대각선 매트릭스로 단순화하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 CFD 분석을 위한 경계조건 설정 시 기존의 선행연구결과를 참고하여 다공성 판넬에서 z 방향의 압력강하 평균치가 타공율 40%인 경우 $\Delta P=5.2$ Pa, 타공율 30%인 경우 $\Delta P=9.3$ Pa이 되도록 선정하였다[7].

3. 현장 측정 및 결과 분석

3.1. 현장 측정 개요

측정대상 테스트베드는 서울 목동에 위치한 데이터센터를 선정하였으며 현재 운용중인 서버실의 일부를 구획하여 시공하였다. 기본적인 공조방식은 하부 플레넘(높이: 600mm)에 가압한 후, 바닥 취출구를 통하여 냉풍을 상향급기하고, 상부 천정공간을 리턴플레넘으로 활용하는 방식을 취하고 있다. 실내 최소환기를 위해서는 OA AHU를 이용하여 공급하는 방식이다. Fig. 5.는 EMS 시스템의 형상과 콘솔화면을 나타낸다. Fig. 6.과 Fig. 7.은 각각 온도센서의 부착형태와 다공판 기류 측정 장면을 나타낸다.

3.2. 현장 측정 결과 분석

Fig. 8은 9번 다공판(CRAC로부터 9번째 상면에 위치한 판넬)의 취출구 선단부와 종단부의 위치별 풍속을 나타낸 것이다. 9번 판넬의 경우 CRAC와의 거리를 충분히 확보하고 있음에도 판넬의 선단

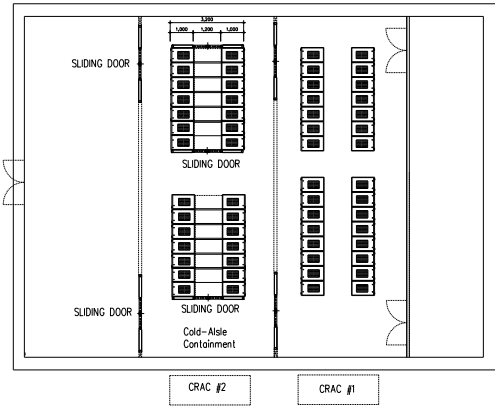


Fig. 3. Testbed plan for field measurement

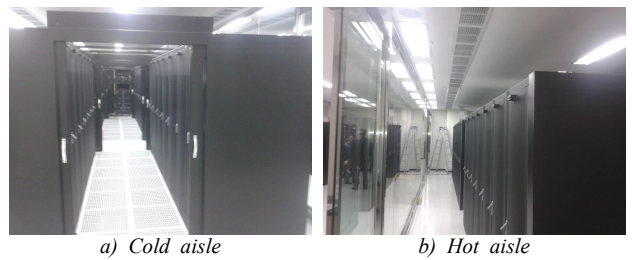


Fig. 4. Internal view of the testbed

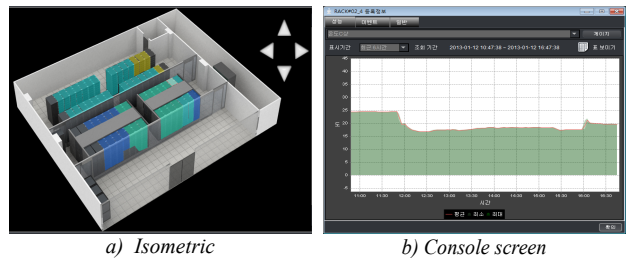


Fig. 5. EMS system

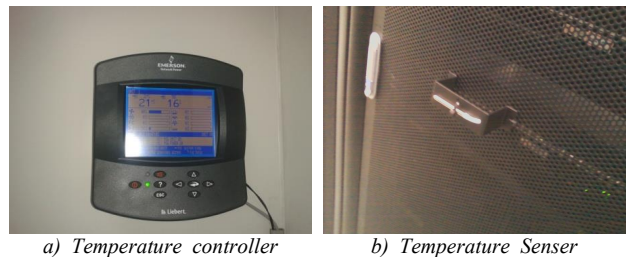


Fig. 6. Temperature controller and attached sensor

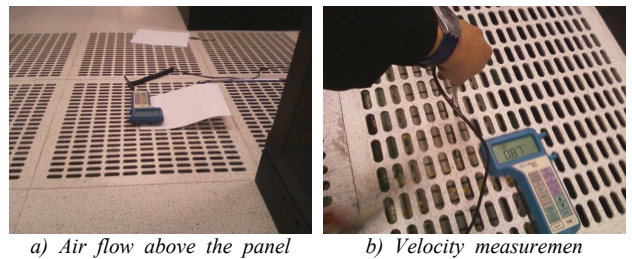


Fig. 7. Air flow measurement scene

부와 종단부의 속도는 $-0.94\sim 3.28$ m/s의 불균일한 분포를 나타냈다. 취출구의 선단부와 종단부의 차이가 크게 나타난 것은 취출구 자

체의 압력손실이 크게 작용하고 있음을 확인할 수 있었으며 CRAC로부터 공급된 냉풍이 실질적으로 콜드 아일의 상부까지 적절한 수준으로 공급되기 위한 개선방안이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 3.과 Fig. 4.는 각각 테스트베드의 평면과 내부 전경을 나타낸다. Fig. 5.는 서버 인입온도 데이터 수집을 위한 EMS 시스템의 Fig. 9.는 다공판의 위치별 평균 면풍속을 나타낸 것이다. 측정은 다공판의 표면으로부터 30cm 높이에서 측정되었다. 전반적으로 평균풍속은 0.84m/s의 분포를 나타내고 있었으며 바닥 위 30cm 이상의 경우 다공판의 수평거리에 따른 풍속에는 0.63~1.49m/s의 불균일한 분포를 나타내는 것으로 나타났다.

Fig. 10.은 EMS 서버로부터 전송된 데이터를 기준으로 서버 인입 온도 분포를 나타낸 것이다. 랙 전면부에 설치한 온도센서 30개 중에러가 확인된 2개를 제외하고 28개의 온도데이터를 기준으로 분석하였다. 서버 인입온도는 테스트베드의 서버 트래픽이 일정한 조건으로 설정되어 있어 시계열적으로는 거의 변화가 없는 일정한 분포를 나타냈다. 28개 인입구의 온도 분포를 플로팅한 결과 Fig. 10.에 나타난 바와 같이 13.6~32.8℃의 분포를 나타냈다. 취출온도를 13℃에서 15℃로 변화시킨 경우 RCI_{HI} 는 97.5%에서 89.6%로 감소하였으며 RCI_{LO} 는 80.6%에서 94.4%로 상승하는 것으로 나타나 서로 상반되는 효과를 확인할 수 있었다. 이는 취출온도를 낮게 유지할 경우 서버의 안정성 측면에서 유리하나 과냉 및 에너지소비 측면에서 불리하게 되는 원론적 상황을 그대로 보여 주는 결과로서 취출온도에 의한 컨트롤은 공조효율 개선에 직접적인 효과를 기대하기 어려운 것으로 나타났다. 따라서 에너지 절감의 측면과 서버 안정성을 모두 고려한 최적 대안은 서버실의 형상 또는 기류 공급방식 등의 요소를 고려하여 실내 기류분포를 가능한 균일하게 조정할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단되었다. 특히 기류 공급이 불균일하게 되는 원인 중 하나로서는 CRAC과 서버 인입구의 물리적 위치 및 하부 급기에 의한 다공판의 불균일한 풍속 분포 등을 들 수 있을 것으로 사료된다.

4. 다공판 배치 CFD 분석

4.1. 시뮬레이션 개요

기존 데이터센터의 현장 측정을 통하여 공급공기 기류의 불균일 문제가 확인되었다. 특히 CRAC과 거리에 따라 원거리에 위치한 서버에 공급되는 풍량이 부족하게 되는 문제를 보완하기 위하여 강제적으로 근거리에 위치한 다공판의 압력손실을 증대시키는 방안이 제안되었다. CRAC과 근거리에 위치한 다공판의 개구율을 기존 40%보다 낮은 수준인 30%로 변경한 경우를 대상으로 SCRYU/Tetra(V.5.0)을 이용한 CFD 분석이 실시되었다.

Fig. 11.은 육안으로는 거의 구분하기 어려운 상태지만 기존 40% 개구율을 가진 다공판과 30%의 개구율을 가진 다공판을 나타낸 것이다. Table 3.은 30% 개구율을 가진 다공판의 설치 위치를 상대적으로 비교하여 나타낸 것이다. Table 4.는 시뮬레이션을 수행하기 위한 기본 경계조건을 나타낸다.

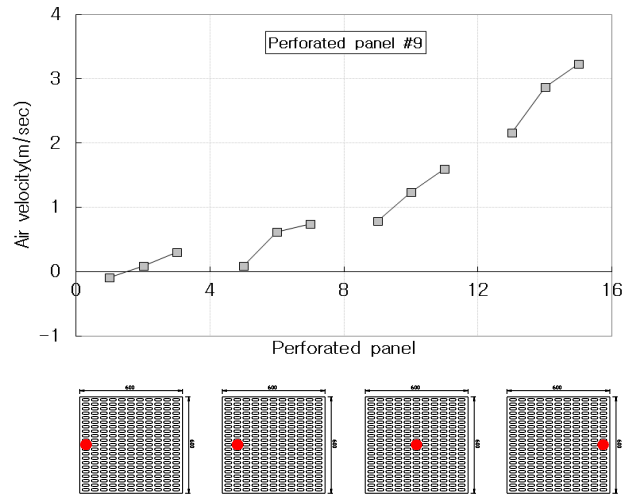


Fig. 8. Air velocity distribution at various locations

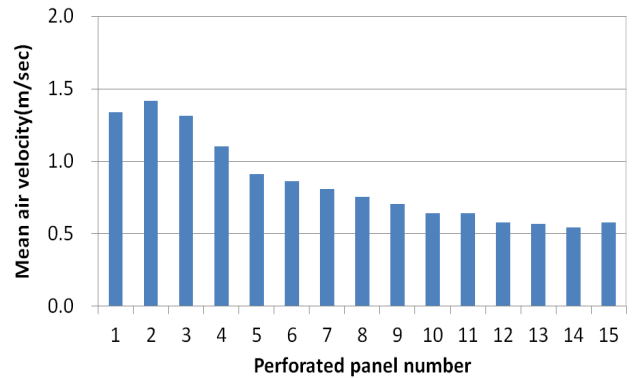


Fig. 9. Mean air velocity above the perforated panel

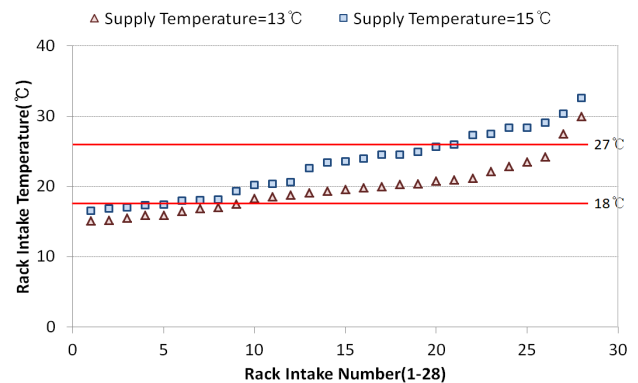


Fig. 10. Rack intake air temperature distribution

Table 2. RCI evaluation results for each case

Case	Description	RCI	Rating	Judgement
Case_1	Supply air temperature = 13°C	RCI_{HI}	97.5%	Good
		RCI_{LO}	80.6%	Poor
Case_2	Supply air temperature = 15°C	RCI_{HI}	89.6%	Poor
		RCI_{LO}	94.4%	Acceptable

해석 대상 공간은 Fig. 12.에 나타난 바와 같이 콜드 아일(cold aisle)을 중앙에 두고 좌우측에 랙이 각각 1 열씩 늘어선 형태로 구성하였다. 좌우 열은 각각 8대의 랙이 일렬로 늘어선 형태로 구성하였다. 핫 아일(hot aisle)의 양측 벽면은 대칭면(symmetry)으로 하였다. 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 수렴 판정은 연속법칙과 x, y, z 방향의 풍속, k 및 ε 의 잔차가 10⁻³ 이하, 에너지의 잔차가 10⁻⁶ 이하인 경우로 하였다.

Table 3. Modified perforation rate placement cases

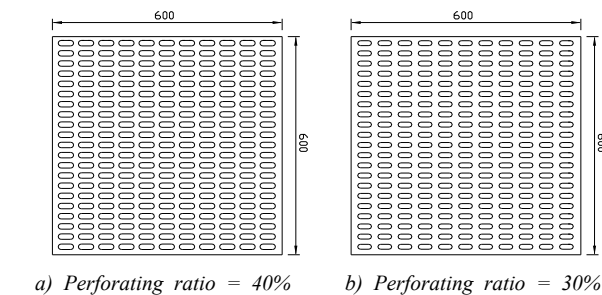
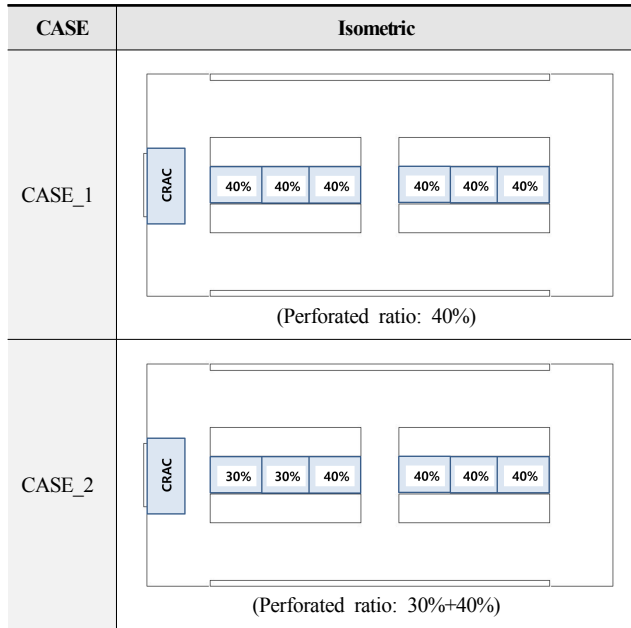


Fig. 11. Perforating panel for supply air to server room

4.2. 시뮬레이션 결과 분석

Fig. 13.은 각 CASE에 대한 서버인입구 부분의 속도분포와 온도 분포를 X-Z surface 상에 나타난 것이다. 전반적으로 CASE_1의 경우 CRAC와 근거리에서 위치한 공간에서 속도 분포가 높게 나타나고 있으나 상면에 개구율을 변화시킨 CASE_2의 경우 균일한 확산 효과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 동일하게 지정된 평면 상 온도분포의 경우 설치된 서버 중 최원단에 위치한 15번 랙 최상단부 서버의 인입 공기온도가 CASE_1에 비하여 CASE_2의 경우가 낮게 변화된 것을 확인할 수 있었다. 이는 CRAC로부터 공급된 공기가 근거리로 과다하게 공급되어 나타난 현상으로 추정할 수 있으며 근거리에서 위치한 다공판의 개구율을 조정함으로써 전반적인 기류의 분포를 조정할 수 있음이 확인되었다.

Table 4. Boundary conditions for CFD

Equipment		Specifications
Perforated tile	Size	600×600 (mm)
	Perforating ratio	CASE_1 40% CASE_2 30%+40%
CRAC	Air rate	45,000 CMH
	Supply air temperature	13°C
Server rack	Air rate	800 CMH
	Heat flux	2.5 kW/Rack
	Temperature difference	10°C

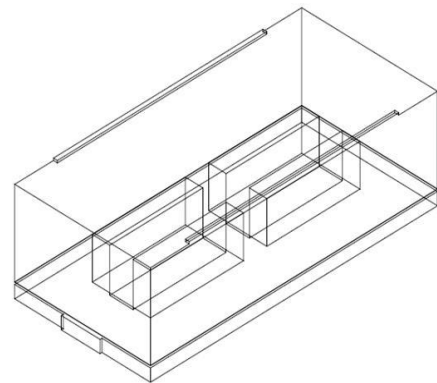


Fig. 12. Isometric 3D form for CFD simulation

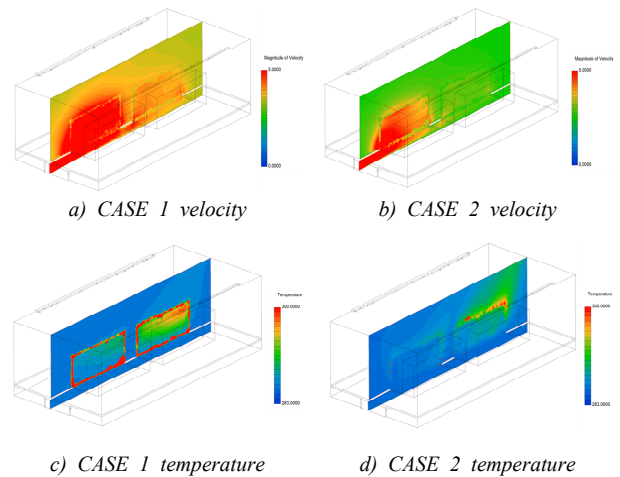


Fig. 13. CFD analysis results

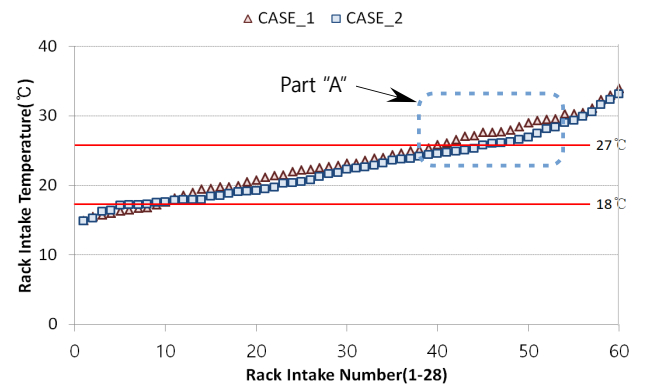


Fig. 14. Rack intake air temperature distribution by modified perforation rate panel placement

Table 5. RCI evaluation results for each case

Case	Description	RCI	Rating	Judgement
Case_1	Perforating ratio = 40%	RCI _{HI}	86.1%	Poor
		RCI _{LO}	90.3%	Acceptable
Case_2	Perforating ratio = 30% + 40%	RCI _{HI}	89.2%	Poor
		RCI _{LO}	91.2%	Acceptable

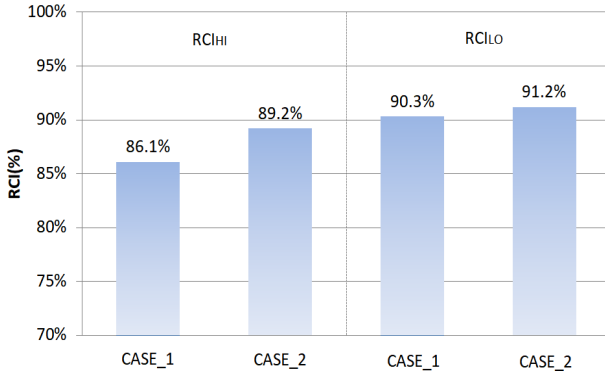


Fig. 15. RCI comparison of case 1 and case 2

Fig. 14.는 CASE_1, CASE_2의 서버 인입온도 분포를 나타낸 것이다. 랙 전면부에 설치한 온도센서는 가상적으로 전체 60개를 설치하는 것으로 설정하였다. 서버 인입온도는 정상 상태를 기준으로 한 시뮬레이션이므로 시계열적으로는 변화가 없는 일정한 분포를 나타냈다. 60개 인입구의 온도 분포를 플로팅한 결과 Fig. 14.에 나타난 바와 같이 16.3~33.6°C의 분포를 나타냈다. CASE_1과 비교하여 CASE_2의 경우 RCI_{HI}는 86.1%에서 89.2%로 3.1% 상승하였으며 RCI_{LO}의 경우도 90.3%에서 91.2%로 0.9% 상승하는 것으로 나타나 적용 효과를 확인할 수 있었다. 따라서 데이터센터의 서버실 관련 설비 중 가장 간단하게 공조효율을 높일 수 있는 가능성을 확인할 수 있었으나, 정량적 효과는 그다지 높지 않게 나타났다. 또한 본 연구에서 제안하는 방안은 기본적으로 CFD 시뮬레이션이 반드시 선제적으로 수행되어야 할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 현장 측정을 통하여 현황을 분석하였고, 개선사항 적용 가능성 검토를 위한 CFD를 실시하여 다음의 결과를 도출하였다.

1) 현장 측정 결과 CRAC과 다공판의 수평거리에 따른 풍속에는 0.63~1.49m/s의 불균일한 분포를 나타내는 것으로 나타나 취출구의 압력손실이 크게 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 2) 취출 온도조건을 13°C에서 15°C로 변경한 경우 RCI_{HI}는 97.5%에서 89.6%로 감소하였으며 RCI_{LO}는 80.6%에서 94.4%로 상승하는 것으로 나타났다.

3) 바닥면 다공판의 개구율을 조정하여 CFD 시뮬레이션을 실시한 결과 RCI_{HI}는 86.1%에서 89.2%로 3.1% 상승하였으며 RCI_{LO}의 경우도 90.3%에서 91.2%로 0.9% 상승하는 것으로 나타나 적용 효과를 확인할 수 있었다.

4) 데이터센터의 서버실 관련 설비 중 가장 간단하게 공조효율을 높일 수 있는 가능성을 확인할 수 있었으나, 정량적 효과는 그다지 높게 나타나지 않았다.

데이터센터는 일반 건축물에 비해 에너지 소모량이 막대하므로 에너지 절감기술의 적용에 따른 효과가 크게 나타나는 것이 일반적이다. 추후 요소기술의 적극적 개발 및 적용에 대한 연구를 지속적으로 실시할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 2016년도 청운대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었습니다.

Reference

- [1] Jinkyun Cho, Yundeok Kim, Improving energy efficiency of dedicated cooling system and its contribution towards meeting an energy-optimized data center, Applied Energy, Vol.165, 1 March 2016, pp.967-982
- [2] 방송통신위원회 국립전파연구원, 그린 데이터 센터 구축 지침, 방송통신표준 KCS.KO-09.0065, 2012.9.7. // (Korea Communications Commission National Radio Research Agency, Guideline for Establishment of Green Data Center, Korea Communications Standard KCS.KO-09.0065, 2012.9.7.)
- [3] 한국IT서비스산업협회, 데이터센터 산업 육성을 위한 기반조성 연구조사, 미래창조과학부 방송통신정책연구 15-진흥-003, 2015 // (Korea Information Technology Service Industry Association, A foundation research for the data center industry development, Ministry of Science, ICT and Future Planning, Research on broadcasting communication policy 15-Promotion-003, 2015)
- [4] 조진균, 박병용, 정용대, 데이터센터 공조 냉각시스템 효율평가 위한 정량적 성능지표도출 및 모니터링 방법, 설비공학논문집, 제30권, 제 12호, 2018, pp.620-630 // (Cho, Jin-kyun, Park, Beung-yong, Jeong, Yong-dae, Evaluation Metrics of Thermal Management in Data Centers Based on Energy Efficiency Measurement Assessment for Cooling Systems, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Korea, Vol.30, No.12, 2018, pp.620-630)
- [5] 조진균, 김병선, 최적 IT 환경제어를 위한 데이터센터의 냉각시스템 및 공기분배시스템 계획에 관한 연구 - 사례분석을 중심으로, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제24권 제2호, 2008, pp.313-320 // (Cho, Jin-Kyun, Kim, Byung-Seon, The Cooling and Air Distribution Systems for the Optimal IT Environment Control in the (Internet) Data Center, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol.24, No.2, 2008, pp.313-320)
- [6] 조진균, 박우평, 신승호, 고밀도 데이터센터의 에너지 저감을 위한 공조효율 평가방법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제29권 제6호, 2013, pp.287-296 // (Cho, Jin-Kyun, Park, Woo-Pyoung, Shin, Seung-Ho, A Study on Evaluation of Air Management System's Cooling Efficiency for Energy Savings in High-Density Data Centers, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol.29, No.6, 2013, pp.287-296)
- [7] 장현재, 정용호, 서장후, 포러스 (Porous) 경계조건을 이용한 데이터센터의 기류 및 온도분포 해석 방법에 대한 연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제7권 제4호, 2013, pp.289-294 // (Chang, Hyun-Jae, Jung, Yong-Ho, Seo, Jang-Hoo, A Study on the Methodology of Simulation on the Distribution of Airflow and Temperature in a Data Center by Utilizing Porous Boundary Condition, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol.7, No.4, 2013, pp.289-294)