서버 컴퓨터의 발열량이 변화한 경우의 데이터센터 내의 기류 및 온도분포 특성에 대한 연구

A Study on the Distribution of Airflow and Temperature in a Data center under the Various Conditions of Heat Generation Rates of Server Computers

장현재(Hyun-Jae Chang)^{1*}, 김제영(Je-Young Kim)²

¹홍익대학교 건축공학부, ²홍익대학교 대학원 건축공학과

¹School of Architectural Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Republic of Korea

²Graduate School of Architectural Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Republic of Korea

(Received December 27, 2013; revision received January 31, 2014; Accepted: February 3, 2014)

Abstract On a large scale of data center, heat generation rates from sever computers occupy almost the entire cooling load of the building, and it is gradually increasing. The efficiency of air distribution system in data centers can be affected by heat generation rates of server computers. In this study, the distributions of airflow and temperature in a data center have been investigated by CFD simulations under various conditions of heat generation rates for server computers. From the results, air around the cold aisle which has high temperature flows tremendously into the cold aisle according to the increase of heat generation rates for server computers and the air temperature in the cold aisle becomes higher. The SHI (supply heat index) and RHI (return temperature index) show almost similar values to the cases study because the air inflow rates to server computers increase with the heat generation rates of server computers.

Key words Data center(데이터센터), Heat generation rates(발열량), CFD(전산유체역학)

† Corresponding author, E-mail: changhj@hongik.ac.kr

기호설명

δQ	: 다공성 판넬로부터 취출된 공기가 랙에 유입되기까지 취득한 열량 [kW]
Q	: 랙의 발열량 [kW]
T_r	: 냉방시스템의 리턴 온도 [°C]
T_s	: 냉방시스템의 급기온도 [°C]
ΔT_{equip}	: 랙에 유입되는 공기온도와 랙에서 취출되는 공기온도와의 차 [°C]
T_i	: 랙에 유입되는 공기온도 [°C]
$T_{max-rec}$	: 랙에 유입되는 공기의 최고 권장온도 [°C]
n	: 랙의 유입공기온도 측정점 수
$T_{max-all}$	: 랙에 유입되는 공기의 최고 허용온도 [°C]

1. 서 론

최근의 IT 산업의 성장에 힘입어 데이터센터가 중요한 시설로서 자리매김하고 있으며, 신사업분야로도 각광받고 있다. 데이터센터에는 수많은 서버 컴퓨터 등

이 설치되어 있기 때문에 내부 발열량이 매우 크며 일반 오피스 건물의 10~20배에 이른다. 스마트 폰 등에 의한 인터넷의 수요가 증가하면서 보다 고성능의 서버 컴퓨터가 설치되는 추세에 있으며 이에 따라 서버 컴퓨터의 발열량도 증가하고 있다(Fig. 1 참조).⁽¹⁾

대규모의 데이터센터는 서버 컴퓨터에 의한 내부 발열이 건물 전체 냉방부하의 대부분을 차지하며, 냉방부하량이 700~2,200 W/m²로서 매우 크기 때문에 겨울철에도 냉방 시스템을 가동하는 것이 일반적이다. 데이터센터의 공조방식은 냉풍의 공급방식에 따라 여러 가지로 분류⁽²⁾될 수 있으나 Fig. 2와 같이 항온항습기에 의해 냉각된 공기가 액세스 플로어 하부의 언더 플레넘(under plenum) 공간을 통해 콜드 아일(cold aisle)로 공급되어 서버 컴퓨터로 유입되고, 서버 컴퓨터로부터 취출된 더운 공기는 핫 아일(hot aisle)을 통해 천장속의 플레넘(ceiling plenum) 공간으로 유입되어 항온항습기로 되돌아가는 방식이 일반적으로 많이 적용되는 방식이다.

서버 컴퓨터의 발열량이 냉방부하의 대부분을 차지하는 데이터센터의 공조에서는 서버 발열량이 어느 정

Fig. 1 Uptime Institute power trend chart.⁽¹⁾

Fig. 2 Raised floor implementation using a dropped ceiling as a hot air return plenum.⁽²⁾

도인가에 따라 공조시스템의 급·배기 효율 등이 달라질 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 서버 컴퓨터의 발열량이 변화한 경우를 대상으로 하여 데이터센터 내의 기류 및 온도분포 특성을 CFD(computational fluid dynamics) 해석을 통해 고찰하고, 각 경우에 대한 공조시스템의 급·배기 효율을 공기분배 성능에 대한 지표를 이용하여 분석한다.

2. 연구 방법

2.1 대상공간의 설정

본 연구에서는 서버 컴퓨터의 발열량이 변화한 경우의 데이터센터 내의 기류 및 온도분포 특성에 대한 검토를 위해 CFD 해석을 이용한다. CFD 해석을 위한 대상공간을 Fig. 3에 나타낸다. 해석 대상공간은 콜드 아일(폭 : 1.2 m)을 중심으로 좌우에 각각 1열씩 랙이 늘어선 형태로 구성하였다. 좌우열의 랙은 CRAC로부터 7대와 8대의 랙이 연속적으로 배치되도록 구성하였다(랙의 구성 상세는 Fig. 4 참조). 랙의 배기쪽에 면한 핫 아일은 0.9 m 폭으로 설치되나, 본 연구에서는 좌우의 핫 아일에 면한 벽면을 대칭면으로 처리하였으며 이에 따라 좌우 핫 아일의 폭은 그 절반인 0.45 m로 설정하였다. 콜드 아일의 바닥은 다공성 판넬(perforated

Fig. 3 Composition of data center for CFD analysis.

Fig. 4 Simplified model of server rack.

tile)로 이루어져 있으며, CRAC으로부터 공급된 냉각 공기가 다공성 판넬을 통하여 콜드 아일로 취출되게 된다. 서버 컴퓨터로부터 핫 아일로 배출된 더운 공기는 핫 아일 상부에 설치된 천장 배기구를 통해 천장 플레넘으로 유입되어 CRAC으로 되돌아간다.

2.2 CFD 해석의 경계조건

CFD 해석을 위한 경계조건을 Table 1에 나타낸다. 본 연구에서는 서버 컴퓨터의 발열량을 독립변수로 하고

Table 1 Boundary conditions

Cases	Heat generation rates	ΔT^*	Air flow rate ratio of server to supply air	Supply air temperature ^{**}	Supply air volume ^{***}
Case A	3 kW/rack	10 °C	0.58	13 °C	45,600 CMH
Case B	4 kW/rack	10 °C	0.77	13 °C	45,600 CMH
Case C	5 kW/rack	10 °C	0.96	13 °C	45,600 CMH
Case D	6 kW/rack	10 °C	1.15	13 °C	45,600 CMH
Case E	7 kW/rack	10 °C	1.35	13 °C	45,600 CMH
Case F	8 kW/rack	10 °C	1.54	13 °C	45,600 CMH

* Temperature difference between outlet and inlet of server computer.

** Supply air temperature of CRAC.

*** Supply air volume of CRAC.

(a) Case A(3 kW/rack)

(d) Case D(6 kW/rack)

(b) Case B(4 kW/rack)

(e) Case E(7 kW/rack)

(c) Case C(5 kW/rack)

(f) Case F(8 kW/rack)

Fig. 5 Distribution of air flow at a vertical section including cold aisle.

있으며, 랙당 발열량을 3 kW에서 8 kW까지 1 kW씩 증가시킨 경우를 대상으로 검토한다. 랙당 발열량이 변화한 경우에도 서버 컴퓨터의 냉각을 위한 유입 및 유출공기의 온도차는 10 °C가 되도록 컴퓨터의 유입 및 유출공기량을 조절하였다.

본 연구의 CFD 해석에서는 액세스 플로어 하부공간의

재현이 데이터센터 내부의 환경 특성에 미치는 영향을 고려하여 Under floor plenum과 Ceiling plenum을 해석 대상에 포함시켰으며, 콜드 아일의 바닥재로 사용되는 다공성 타일에 대해서는 포러스(porous) 경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다.^(3, 4) 포러스 경계조건은 포러스 영역으로 설정한 곳에서의 유체의 흐름에 저항을

걸어 주는 것으로서, 지배방정식의 운동량 방정식에 운동량의 싱크(sink)를 추가하게 된다. 즉, 다공성 판넬에 의한 압력손실을 반영하게 된다. 해석 프로그램은 상용 프로그램인 FLUENT 14.5를 이용하였으며, 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델⁽³⁾을 사용하였다. 수렴 판정은 연속 법칙과 x, y, z 방향의 풍속, k 및 ϵ 의 잔차가 10^{-3} 이하, 에너지의 잔차가 10^{-6} 이하인 경우로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 콜드 아일의 기류분포

콜드 아일 중앙 단면에서의 기류분포를 Fig. 5에 나타낸다. CRAC의 공급풍량에 의해 콜드 아일의 다공성 판넬에서 취출되는 기류속도의 분포는 CRAC에 가까운 곳은 0.2 m/s 이하로 느린 풍속을 나타내고 CRAC로부터 멀어질수록 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 랙당 발열량이 증가할수록 콜드 아일 좌우의 공기가 콜

드 아일 중앙쪽으로 보다 깊숙이 유입되며, 유입되는 공기의 기류속도도 점차 빨라지는 경향을 나타낸다. 이는 콜드 아일의 다공성 타일로부터 취출되는 기류에 주변 기류가 유입되는 효과와 더불어 Table 1에 나타난 바와 같이 랙당 발열량이 3 kW(Case A)에서 8 kW(Case F)로 증가함에 따라 CRAC에서 공급되는 풍량에 대한 서버 컴퓨터의 유입풍량의 비가 0.58에서 1.54로 증가하는데 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

3.2 콜드 아일의 온도분포

콜드 아일의 중앙 단면에서의 온도분포를 Fig. 6에 나타낸다. 같은 단면에서의 기류분포에 의해 온도분포도 영향을 받아 콜드 아일 좌우측의 상대적으로 고온인 공기가 콜드 아일쪽으로 유입되며, 랙의 상부로 갈수록 고온 영역이 확대되고 있다. 콜드 아일의 다공성 타일에서의 취출기류의 영향이 온도분포에 반영되어 우측의 랙(CRAC에 가까운 쪽의 랙)보다는 좌측의 랙(CRAC

(a) Case A(3 kW/rack)

(d) Case D(6 kW/rack)

(b) Case B(4 kW/rack)

(e) Case E(7 kW/rack)

(c) Case C(5 kW/rack)

(f) Case F(8 kW/rack)

Fig. 6 Distribution of temperature at a vertical section including cold aisle.

에서 먼 쪽의 랙)에서 CRAC의 공기 공급온도인 13℃의 영역이 더 넓게 관찰된다.

랙당 발열량이 증가할수록 주변의 상대적으로 고온인 공기가 좌우측 콜드 아일의 중앙부로 깊숙이 유입되어 CRAC 공급 공기온도보다 10℃ 이상 높은 23℃ 이상의 영역이 좌우측 랙 열의 좌우측 상부에 나타난다. 이러한 결과는 CRAC의 공급 공기온도를 높일 경우, ASHRAE에서 정한 서버 유입온도의 상한치인 27℃를 초과하는 영역이 더 넓어질 수 있음을 의미한다.

3.3 랙 열 중앙부의 기류분포

콜드 아일과 핫 아일을 포함하는 랙 열 중앙 단면에서의 기류분포를 Fig. 7에 나타낸다. 랙당 발열량이 3 kW인 경우(Case A)는 콜드 아일의 다공성 타일에서 취출되는 기류가 콜드 아일의 상부로 바이패스(Bypass)되는 성분이 많지만, 발열량이 증가할수록 CRAC의 공급풍량에 대한 서버 컴퓨터의 유입 풍량비가 증가함에 따라

바이패스 성분이 작아지는 경향을 나타낸다. 그러나 풍량비가 1을 초과하는 경우(Case D~F)에도 핫 아일로 부터 랙의 상부를 지나 콜드 아일로 재유입되는 기류는 관찰되지 않는다.

3.4 랙 열 중앙부의 온도분포

콜드 아일과 핫 아일을 포함하는 랙 열 중앙 단면에서의 온도분포를 Fig. 8에 나타낸다. 랙당 발열량이 3 kW인 경우(Case A)는 콜드 아일의 다공성 타일에서 취출되는 13℃의 영역이 랙의 상부를 지나는 지점까지 나타나지만, 랙당 발열량이 증가할수록 콜드 아일의 다공성 타일쪽으로 점점 줄어들고 있다. 이는 Fig. 5에서 나타난 바와 같은 랙 열의 좌우측면에서 유입되는 상대적으로 고온인 공기의 영향 때문인 것으로 사료된다. 또한 랙당 발열량이 증가할수록 핫 아일의 고온 영역이 랙 상부에서 콜드 아일의 상부쪽으로 점차 확대되어 가고 있다. 이는 서버 컴퓨터의 발열량 증가와 함께

(a) Case A(3 kW/rack)

(d) Case D(6 kW/rack)

(b) Case B(4 kW/rack)

(e) Case E(7 kW/rack)

(c) Case C(5 kW/rack)

(f) Case F(8 kW/rack)

Fig. 7 Distribution of air flow at a vertical section including cold aisle and hot aisle.

Fig. 8 Distribution of temperature at a vertical section including cold aisle and hot aisle.

서버 컴퓨터 냉각을 위한 유입 및 유출공기량이 증가하게 되기 때문에 사료된다.

3.5 공기 분배 성능

서버 컴퓨터의 발열량이 증가한 경우의 공기 분배 성능을 SHI(supply heat index), RHI(return heat index), RTI(return temperature index) 및 RCI(rack cooling index) 지표를 이용하여 검토한다.

SHI^(5, 6)와 RHI^(5, 6)는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$SHI = \left(\frac{\delta Q}{Q + \delta Q} \right) \quad (1)$$

$$RHI = \left(\frac{Q}{Q + \delta Q} \right) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)로부터 SHI와 RHI의 합은 반드시 “1”이 되어야 한다.

검토대상 케이스의 SHI 및 RHI를 Fig. 9에 나타낸다.

SHI는 전체적으로 0.19 내외의 값을 나타내며, Case A의 SHI는 0.17로서 검토대상 케이스 중 가장 낮은 값을 나타내나 큰 차이는 아니다. SHI가 검토대상 케이스에서 전체적으로 비슷한 값을 나타내는 것은 Fig. 5 및 Fig. 7에서와 같이 랙의 발열량(Q)이 증가할수록 서버 컴퓨터의 유입 공기량이 커지게 됨에 따라 콜드 아일 주변의 상대적으로 고온인 공기의 유입량이 증가하게

Fig. 9 Air distribution performance by SHI and RHI.

되고, 이에 따라 δQ 가 비례적으로 커지게 되기 때문에 사료된다. 이에 대한 결과로서 RHI도 거의 균일한 결과를 나타낸다.

4. 결 론

서버 컴퓨터의 발열량이 변화한 경우를 대상으로 하여 CFD 해석을 통해 검토한 데이터센터 내의 기류 및 온도분포 특성을 정리하면 다음과 같다.

(1) 랙당 발열량이 증가할수록 콜드 아일 주변의 상대적으로 고온인 공기가 콜드 아일쪽으로 유입되는 양이 증가하며, 이로 인해 콜드 아일의 온도가 높아지는 경향을 나타낸다.

(2) 랙당 발열량이 증가할수록 서버 컴퓨터의 유입 풍량비가 증가하여 콜드 아일에서 바이패스되는 성분이 작아지는 경향을 나타낸다.

(3) 랙당 발열량이 증가함에 따라 콜드 아일 주변의 상대적으로 고온인 공기의 유입량도 비례적으로 증가하여 SHI와 RHI는 검토 케이스 전체를 통해 큰 차이를 나타내지 않는다.

후 기

본 연구는 2012년도 국토해양부 첨단도시개발사업의

연구비지원(과제번호 : 14CHUD-C062125-01-000000)에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. Datacom equipment power trends and cooling applications, ASHRAE, 2012, p. 34.
2. Datacom Equipment Power Trends and Cooling Applications, 2012, ASHRAE, pp. 29-39.
3. Chang, H. J., Jung, Y. H., and Seo, J. H., 2013, A study on the methodology of simulation on the distribution of airflow and temperature in a data center by utilizing porous boundary condition, J. of KIAEBS, KIAEBS, pp. 289-294.
4. ANSYS FLUENT MANUAL, ANSYS.
5. Sharma, R. K., Bash, C. E., and Patel, C. D., 2002, Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large scale data centers, Proceedings of AIAA 2002-3091, American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference.
6. Cho, J. K. and Kim, B. S., 2011, Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in highdensity data centers, Energy and Buildings, pp. 2145-2135.