

공공부문 전력절감과 그린IT구현을 위한 데이터센터 내 열유동해석

박상린*, 심장섭**, 송종철**, 문병주**, 박경우*
*호서대학교 기계공학과, **정보통신산업진흥원 정보서비스팀
e-mail : kpark@hoseo.edu

Flow and Thermal Analyses of Internet Data Center for Embodiment in Green IT

Sang-Lin Park*, Jang-Sup Shim**, Jong-Choul Song**,
Byong-Joo Moon**, Kyoung-Woo Park*
*Dept. of ME, Hoseo Univ, **Information Service Team, NIPA

요 약

최근 정보량의 급격한 증가로 데이터센터는 점차 대형화되고 있으며, 통합적으로 관리/운영되기 위해서는 전산실내 적절한 온도와 습도의 유지가 필수적이므로, 전산실내 에너지의 사용 효율을 극대화하기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 이 연구에서는 국내 공공부문의 대형 전산실을 모델로 선정하여 전산실 내 서버의 위치, 용량 그리고 냉각시스템 등을 고려하여 전산실내 열/유동특성을 수치적으로 규명함으로써, 에너지 효율 극대화를 추구하고 전력을 절감하여 저탄소 녹색성장과 그린IT 환경을 구축 하고자 한다. 이를 위하여 실제 측정된 환경 데이터를 바탕으로 전산유체역학(CFD)을 이용하여 3차원 비압축성, 정상상태의 열/유동특성을 예측한다. 또한 기존 및 개선된 전산실에 대한 비교 결과를 바탕으로 새로운 열/유동조건을 도출하며, 이를 통하여 전산실 운영에 필요한 에너지 효율향상 방안을 제안하고자 한다. 연구 결과, 전산실 천장의 냉기유입부분과 열기배출부분으로 나뉘어 냉복도와 온복도를 형성하며, 내부 서버와 기타 각종 장비들의 발열 등으로 부분적인 열섬(Thermal island)현상이 나타났다. 이러한 열섬현상을 줄이고, 전산실내 환경을 최적화하기 위하여 찬공기 유입부분의 속도, 배출구의 유량, 그리고 냉/온 복도의 역할 변경 등 여러 가지 가능한 매개변수에 대한 연구가 필수적이다. 또한, 서버에서 발생한 고온의 공기를 배출하는 것이 전산실 내 적절한 온도구현에 효과적이며, 열섬현상을 방지하기 위해서는 이 부분에 차가운 공기의 유입이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

1. 서론

최근 IT기술(Information Technology)의 급속한 발전은 필연적으로 관련 장비들의 성능 및 처리능력을 기하급수적으로 향상시키고 있으며, 동시에 급격한 정보량의 증가로 데이터센터(전산실)는 점차 대형화되고 있으며 통합적으로 관리/운영되고 있는 추세이다. 또한, 국내의 IT산업은 이미 세계 최고의 수준에 도달하였지만 이러한 기술을 관리/유지할 수 있는 환경 설계는 이를 만족시키지 못하고 있는 실정이다. 따라서 IT의 발전속도에 대응하여 전산실의 각 서버에서 필연적으로 발생하는 열을 보다 효과적으로 제어함으로써 효율적인 에너지 사용에 대한 연구가 절실한 실정이다.

전산실의 가장 중요한 요소는 열발생 장치인 IT 장비(서버)로서, 밀폐된 전산실 내부에 이러한 장비

가 안전하고 효율적으로 작동되기 위해서는 전산실내 적절한 온도와 습도 등의 유지와 같은 환경제어가 필수적이다. 즉, 전산실은 내부에 설치되는 IT장비/서버, 그리고 환경제어를 위한 기술이 상호 보완적인 관계가 확립되어야 비로소 최적의 전산실환경이 구축될 수 있을 것이다. 이러한 요구에 의해 지금까지 전산실내 에너지의 사용 효율을 극대화하기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다[1-3].

전산실 내 환경제어를 위해서는 실제 형상에 대한 실험을 수행하는 것이 타당하나, 실내 공기의 온도 및 습도 등을 측정하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 기계공학의 학문분야인 전산열유체(computational fluid dynamics/heat transfer, CFD/HT)를 이용하여 전 해석 영역에 대해 수 많은 개별적인 형상 및 작동변수들을 고려하여 수치적으로 해석하는 것이 바람직 할 것이다[4-5].

이 연구에서는 국내 공공부문 대형 전산실을 모델로 선정하여 서버의 위치, 용량 그리고 냉각시스템 등을 고려하여 전산실내 열/유동특성을 수치적으로 규명함으로써, 에너지 효율의 극대화를 추구하고자 한다. 이를 위하여 실제 측정된 환경 데이터를 바탕으로 전산유체역학(CFD)을 이용하여 전산실 내부의 열/유동특성을 예측한다. 또한 기존 및 개선된 전산실에 대한 비교를 통해 효과적인 온/습도제어 방법을 도출하며, 이를 통하여 전산실 운영 시 에너지 효율향상 방안을 제시하며 전력절감을 통한 저탄소 녹색성장의 목적을 달성하고자 한다.

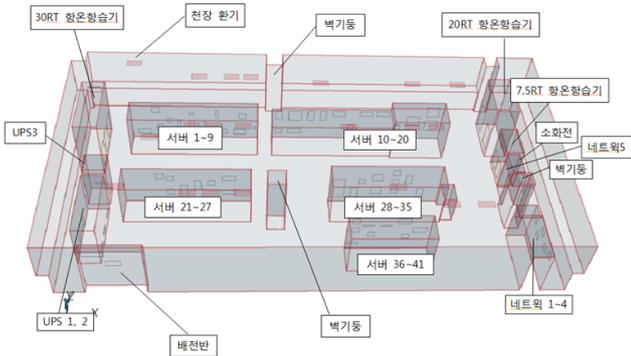
2. 이론해석

2.1 해석모델

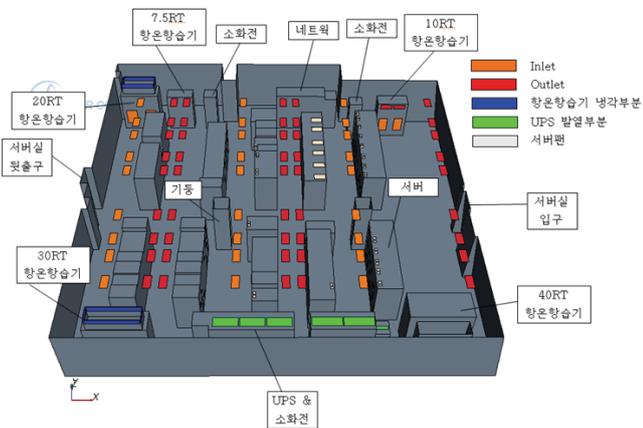
이 연구에서는 해석하고자 하는 전산실에 대한 개략도를 (그림 1)에 나타내었다. 이는 실제 형상으로서, 실내에 수 많은 서버가 존재하며, 벽면 근처에 향온향습기 등 냉각시스템이 설치되어 있다.

2.2. 지배방정식 및 해석방법

서버 위치/용량, 냉기 유입조건 및 온기 유출조건 등이 전산실 내부의 유동 및 온도분포에 미치는 영



(a) Existing server room



(b) Modified/extended server room

(그림 1) Schematic diagram of server room

향을 규명하기 위해서는 3차원, 정상상태, 비압축성 유체의 거동을 예측하여야 한다. 따라서 난류유동에 대한 지배방정식인 레이놀즈-평균 Navier-Stokes, 연속, 그리고 에너지방정식을 텐서형식으로 표현하면 다음과 같다

연속방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

여기서, $\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}$

$$\overline{\rho u_i u_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

식(2)에 나타난 $\overline{\rho u_i u_j}$ 및 μ_t 는 각각 레이놀즈응력 항 및 난류점성계수로서, 닫힌문제를 해결하기 위해 모델링을 수행하여야 하며, 이 연구에서는 간단한 형상에 대해 매우 잘 예측한다고 알려져 있는 아래의 표준 $k - \epsilon$ 모델을 적용한다.

난류운동에너지(k) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ = \mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (3)$$

난류운동에너지 소산율(ϵ) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \\ + C_{\epsilon 3} \frac{\epsilon}{k} \mu_t P_B - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (4)$$

실험상수 및 함수는 참고문헌[6]에 잘 나타나 있다.

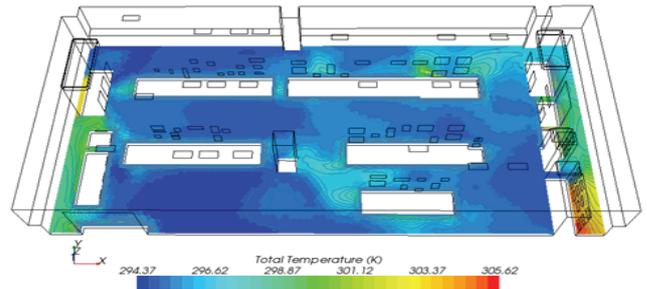
에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h - F_{h,j}) \\ = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j p) - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h \end{aligned} \quad (5)$$

CFD를 이용하여 전산실 내 열/유동특성을 규명하기 위하여, 약 50만개의 격자를 구성하였으며, 지배방정식은 상용코드인 STAR-CD 4.02[7]를 사용하여 계산하였다. 경계조건은 측정결과를 바탕으로 입/배출구의 속도와 온도 서버의 발열 온도와 팬의 속도를 고려하였으며, 기존 및 개선 후 전산실 내부 유동해석을 조건은 <표 1>에 요약하였다.

<표 1> Operating conditions

	Inlet vel. at ceiling	Inlet vel. at 10RT	Outlet vel. at ceiling
Case 1	14 m/s	15 m/s	-0.5 Pa
Case 2	10 m/s	12 m/s	
Case 3	8 m/s	9 m/s	
Case 4	14 m/s	15 m/s	0 Pa
Case 5			-1 Pa
Case 6	14 m/s	15 m/s	-0.5 Pa



(그림 2) Temperature distribution in server room

3. 결과 및 고찰

3.1 개선 전 전산실 내부 열/유동특성

개선전 전산실은 전체 180m²의 공간에 총 2,825 kWh/day의 전력을 사용하는 서버들이 배치되어 있으며, 30, 20, 7.5RT 향온습기의 작동으로 내부의 평균온도와 습도가 각각 약 24℃와 45%로 유지되고 있었으나, 해석 결과 다음과 같은 4가지 문제점이 나타났다.

- ① 낮은 천장
- ② 좌우 라인의 서로 다른 공기 배출구의 구성
- ③ 공간과 발열량에 비해 과한 향온습기의 가동
- ④ 고발열서버의 잘못된 배치

①과 ②는 기존전산실의 구조적 문제 때문에 발생한 사항으로 효율적인 공조에 방해가 되는 요인이 된다. 낮은 천장으로 인하여 서버의 높이가 높은 서버들의 발열이 천장으로 흐를 때 이 서버들이 유동 장애물이 되어 원활한 공기 흐름에 방해 요소가 되고 있다. 또한 전산실 내 온도분포를 나타낸 (그림2)에서 알 수 있듯이, 좌측라인에 비하여 우측라인의 공기 배출구는 불균일하게 구성이 되어져 있는데 이는 우측 천장부분의 기둥으로 인하여 덕트의 배치가 원활히 되어 있지 못하기 때문이다. 이로 인하여 우측라인은 부분적인 열섬현상(thermal island)과 함께 상대적으로 온도가 높게 분포가 된다. 따라서, 이러한 현상은 덕트라인과 공기 배출구의 균일한 배치를 통해 해결할 수 있다. 그리고 ③에 관해서는, 180m²의 공간에 총 2,825kWh/day의 정보시스템의 전력이 필요하게 되는데, 이는 전산실 에너지 효율화 지수인 PUE(power usage effectiveness) 와 DCIE(data center infrastructure efficiency)의 기준에 비하여 봤을 때 그 효율성은 떨어지는 것으로 나타났다. 이는, 향후 냉방능력에 사용되는 에너지양을 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 마지막으로 ④에서 언급 하였듯이, 고발열의 서버가 상대적으로 복도의 폭이 좁고 유동공간이 좁은 전산실 뒤쪽에 비효율적으로 배치가 되어 있다. 이로 인하여 뒤쪽부분에도 열섬현상이 발생하는 것으로 나타났다.

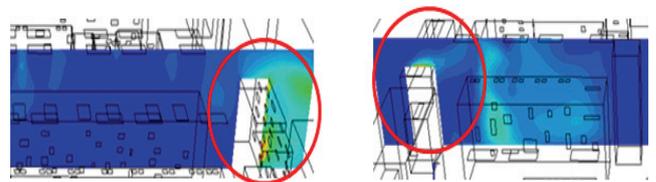
이상과 같이, 이 연구의 대상인 전산실은 과도한 에너지 사용과 건축물의 구조적인 제약으로 효율적인 전산실 운영이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

3.2 개선 후 전산실 내부 열/유동특성

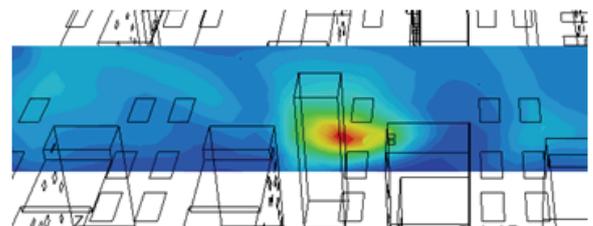
기본적으로, 개선 후 전산실은 서버의 앞면은 천장으로부터 찬공기가 유입되는 냉복도와 열을 방출하는 서버 뒷면에 발열 부위를 서로 마주보게 하여 온복도로 형성하게끔 서버를 배치하였다.

전산실의 면적은 330m²로 확장되면서 3개기관 전산실이 통합되고 이에 따라 서버의 수는 30개가 늘어나 총3,456 kWh/day의 전력을 사용한다. 통합 재배치전의 3개기관 전산실 전력사용량은 4,375 kWh/day로 측정되었다. 그리하여 기존전산실의 향온습 능력에 7.5RT 향온습기를 제외하고 40RT, 10RT 향온습기를 추가로 설치하여 운용하였다.

해석결과, 개선된 전산실은 최적의 환경조건인 실내온도 21~24℃ (294K~297K)를 만족하지만, (그림 3)과 같이 부분적인 열섬현상이 발생한다. 따라서 개선된 전산실 내부의 열섬현상을 줄이고 확실한 향온습 효과를 얻기 위해서는 적절한 유량을 갖는 통풍구 설치 등 개선안이 수립되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 이 연구의 결과로 평균 하루 전력량 919 kWh (21%) 절감 효과를 얻을 수 있었으며,



(a) near network equipments



(b) near pillar at central passage

(그림3) Thermal island phenomena in server room

이는 연간 약1,778만원의 에너지비용 절감효과를 가져왔으며 연간 186톤의 CO₂배출량 감소에 기여할 것으로 예상된다.

3.3. 매개변수 연구(parametric study)

설계변수가 전산실 성능에 미치는 영향을 평가하고, 최적의 환경조건을 규명하기 위해서 매개변수 연구를 수행한다. <표 2>는 <표 1>의 6가지 조건에 대한 평균온도 및 최고온도를 비교하여 나타낸 표이다. 표에서 보는 바와 같이, 전산실 내부의 평균온도는 천장 배출구의 유출속도를 빠르게 한(-1 Pa) Case 5가 가장 낮게 예측되었는데, 이는 유출유속의 증가가 전산실내부의 온도유지에 가장 중요한 인자임을 의미한다. 또한, 열섬현상이 발생하는 구간에서는 냉기의 빠른 유입이 열섬현상을 완화시켜 주는데, 이는 냉기가 발열량을 감소시키는 것이 아니라, 발열현상을 강제대류(forced convection)에 의해 효과적으로 분산시켜 주기 때문이다.

(그림 4)는 냉 및 온복도의 역할을 반대로 하였을 때 Case 1에 대한 Case 6의 온도분포를 나타낸 그림이다. 온복도(hot zone)에서 천장으로부터 냉기가 유입되는 Case 6은 온기를 배출하는 Case 1에 비해 전반적으로 높은 온도분포를 보이고 있다. 이는 서버에서 발생한 고온의 열이 자연대류에 의해 상승하는 반면, 강제대류에 의한 차가운 공기가 서로 충돌하면서 온도의 정체현상이 발생하기 때문이다.

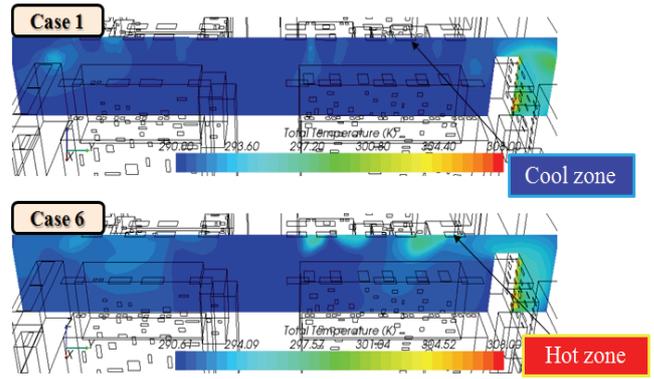
4. 결론

에너지 효율 극대화를 위해 전산실 내 열/유동 특성을 수치적으로 규명하였다. 연구 결과, 전산실 내부의 온도유지 및 에너지 효율은 찬공기의 유입 유량(유속)과 서버에서 발생된 열의 배출 속도에 의

<표 2> Comparison of thermal characteristics for various operating conditions

	Average Temp.	Maximum Temp.	Comments*
Case1	291.68	311.87	- Basement condition
Case2	291.78	311.92	- Decrease in V_{in} - Increase in T_a and T_{max} by 0.1 K and 0.05K
Case3	291.85	311.99	- Additional decrease in V_{in} - Increase in T_a and T_{max} by 0.27 K and 0.12K
Case4	291.72	312.01	- Decrease in V_{out} (Hot zone) - Increase in T_a and T_{max}
Case5	290.96	311.81	- Increase in V_{out} (Hot zone) - Increase in temperature
Case6	293.31	310.06	- Inverse role of hot and cold zones - Increase T_a , decrease T_{max}

* Reference : Existing server room(Case 1), Unit : [K]



(그림.4) Temperature distributions for Case 6

해 주로 영향을 받는다. 그리고 전산실 내 열섬현상의 제거 및 향온 향습기의 성능 저하를 방지하기는 찬공기가 유입될 수 있는 소형 환기구(ventilation)가 필요하다는 것을 알 수 있었다. Case 2와 Case 3의 결과를 비교하여 보면, 냉기의 유속감소가 실내 온도분포에 미치는 영향은 미비하다 이는 전산실 운영을 위해서는 적어도 어느 정도의 에너지 절약이 가능하다는 사실을 시사한다. 향후, 사계절변화에 따른 외기의 연돌효과, 다양한 에너지 손실의 분석, 전산실 구조 등 설계변수 확장을 통한 해석 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] N. Rasmussen, 2003, Calculation Total Cooling Requirements for Data Centers, White Paper #25, APC, pp. 4-6.
 [2] M. K. Patterson, R. Steinbrecher, S. Montgomery, 2005, Comparing Data Center & Computer Thermal Design, ASHRAE Journal, April 2005, 38-42.
 [3] 조진균, 김병선, 2007, 최적 IT 환경제어를 위한 데이터센터의 냉각시스템 및 공기분배시스템 계획에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제24권, 제2호, pp.313-320.
 [4] K. Park, D. H. Choi, K. S. Lee, 2004, Optimum design of plate heat exchanger with staggered pin arrays, Numerical Heat Transfer Part A, Vol.45, pp.347-361.
 [5] K. Park, D. H. Choi, and K. S. Lee, 2004, Numerical shape optimization for high performance of a heat sink with pin-fins, Numerical Heat Transfer Part A, Vol.46, pp.909-927.
 [6] W. Rodi, 1984, Turbulence models and their applications in hydraulics - a state-art-of review, Book Publication of International Association for Hydraulic Research, Delft, Netherlands.
 [7] STAR-CD v3.15 Methodology, 2001.