

CFD를 이용한 피트의 지중열 모델 구축에 관한 연구

A Geothermal Model of Pit Area Using Computational Fluid Dynamics

민준기* 김정태**
Min, Joon Ki Kim, Jeong Tai

Abstract

This research has established CFD model on pit's cool-tube system through heat and air movement simulations, of which data was based on experimental and verification. This research work verified the effectiveness of the cool-tube system by analysing temperature, humidity and air current of the actually installed case. Also, we analysed heat transfer through air current simulation and the results are as followings. Firstly, we experiment on temperature, humidity and speed of air currents of the cool tube system with pit space during the month of May (spring). The average exterior temperature was 16.1°C, and 18.2°C for the pit, 24.7°C for the compressor room. Secondly, based on measured data of real case, we have analysed heat transfer through air current simulation and verified our proposed model. The actual measurement of average temperature of exhaust air of the pit's area is 19.7°C with tolerance of $-0.33^{\circ}\text{C} \sim -0.6^{\circ}\text{C}$ compared to above simulations. Thirdly, having verified air current simulation model with formation of 260,000 and 1,000,000 cells, we could get reasonable near values with 260,000 cells. Lastly, the next step of research would be focused on proposing the best possible pit's cool-tube system after analysis of heat transfer of the air current simulation based on verified CFD model.

키워드 : 피트, 지중열, 전산유체역학(CFD), 격자

Keywords : Pit, Geothermal, Computational Fluid Dynamics, Cell

1. 서론

친환경 건축물 설계를 진행하면서 최근 관심의 대상되는 항목은 에너지 절감 또는 자연에너지의 적극적인 이용이다. 이러한 것은 친환경 건축물의 요소기술 도입을 위한 조치이거나 친환경 건축물 인증을 취득한다거나 또한 법적인 조건을 충족하기위하여 필수적으로 신재생에너지 등을 설계 단계에서 적용을 검토하거나 진행하고 있다. 신재생에너지는 연구개발에 의해 확보가 가능하고 환경 친화적이며 고갈되지 않는 지속가능한 에너지 공급 체계를 확보한 것이다. 예를 들면, 신에너지로서는 수소, 연료전지, 석탄가스화 또는 액화가 있으며 재생에너지는 태양열, 태양광, 풍력, 바이오, 수력, 지열, 해양 및 폐기물 에너지가 있다. 당초에는 석유를 대체하는 에너지를 칭하는 것으로서 원자력 등을 포함한 의미로 사용되고 있었다. 국내에서는 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보

급 촉진법”에 의거 상기의 11가지 분야를 지정하고 지원하고 있다.

본 연구는 신재생에너지 중에서 지열을 효과적으로 이용하는 방안에 관한 연구이다. 지열은 겨울철에 따뜻하고 여름철에 시원한 지중의 연중 온도가 일정하게 유지하는 특징을 이용하는 원리이다. 건물의 지하 및 대지주변에 지열용 배관매설 또는 설비시스템과 연결하여 냉난방 열원 활용배관을 통해 물이나 공기를 매개체를 통한 열교환방식으로 지중에서 열원을 확보하는 방식이다.

유럽 및 일본 등 여러 선진국에서는 설계 초기 단계에서부터 건물의 에너지부하를 경감하거나 열원을 자연에너지 얻고자 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 국내에서는 자연에너지에 대한 적극적인 사용이 미미한 상태로 법적인 필요 조건만 충족하는 실정이다. 반면에 일부 국내 건축물에서는 지열을 이용한 공기가 매개체인 예냉 및 예열시스템인 쿨튜브시스템 또는 어스튜브시스템을 검토하거나 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서의 목적은 자연에너지이고 재생에너지인 지열을 이용한 에너지 기술의 기초연구를 진행하고자 한다. 지열은 연중 온도가

* 주저자, 경희대학교 대학원 건축공학과 박사수료

** 교신저자, 경희대학교 건축공학과 교수 (jtkim@khu.ac.kr)

일정한 지중열을 이용하는 것으로 하절기에는 외기온도보다 낮아 냉방열원으로 활용하며 동절기에는 외기온도보다 높아 난방열원으로 활용하고 있다. 건물의 설비배관 및 유지관리를 위한 지중 피트(Pit)의 환기방식을 개선하여 피트내의 지중열 교환이 이루어져 하절기에는 외기온도보다 내려간 배기를 이용하여 인접한 콤프레샤실에 급기로 대체하여 냉방열원으로 활용한 사례를 연구대상으로 선정하였다.

본 연구에서는 첫째로 기존의 건물에 사용중인 피트의 지중열 이용사례를 연구대상으로 하여 온도, 습도 및 기류 등을 실측을 통하여 피트의 열분포의 실측값을 분석한다. 둘째로 지중열을 중심으로 CFD 모델을 구축한다. 셋째로 CFD 모델 구축시 셀(Cell)구성을 100만셀 그리고 26만셀 로 구분하여 구축한다. 마지막으로 실측값과 CFD 모델의 결과치에 대한 온도 분포를 분석하고 검증한다.

2. 연구 대상 건물 및 지중열 측정

2.1 연구 대상 건물의 개요

피트의 지중열 분포를 평가하고 CFD 모델을 구축하기 위한 전북지역에 2006년 준공된 Hp 할인매장의 주방 위생 배관 설치 및 유지관리를 위한 지중 피트를 연구 대상으로 하였다.

그림 1은 피트의 급기 및 배기 그리고 콤프레샤실의 급기 및 배기덕트 단면도이다. 피트의 지중열 이용은 외기를 피트의 급기로 유입하여 피트내의 지중열을 전도, 대류 등을 통하여 열교환이 이루어져 그 배기를 콤프레샤실의 급기로 활용하는 방식이다. 피트 규모는 길이 41m, 폭 10.9m, 높이 2.0m 내외이며 면적은 562㎡이다. 급기풍량은 정풍량으로 급기 3,600CMH, 배기 4,500CMH로 가동중이다. 구조물은 철근콘크리트로 구성되어 있다.

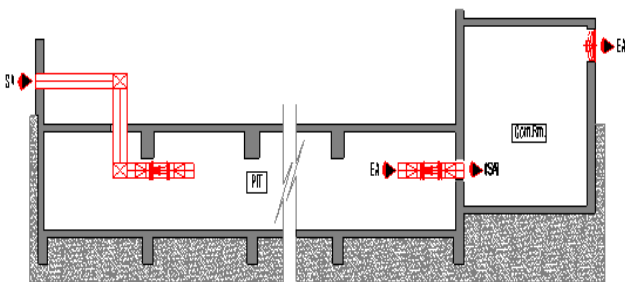


그림 1. 피트 & 콤프레샤실 환기덕트 단면도

2.2 지중열 측정

본 연구의 지중열 측정 목적은 Hp 할인매장 피트내의 급배기의 상태를 점검하고 피트내의 배기를 급기로 이용하는 콤프레샤실의 급기 및 배기 상태를 점검한다. 쿨튜브시스템의 활용 가능성을 검토하기 위하여 온도, 습도 및 기류 등을 5월 연속 48시간 이상 측정하여 기류시뮬레이션 분석을 위한 지중 피트 실측을 실시하였다.

피트 실측방법은 실측 범위, 측정기간 및 측정장비 등으로 다음과 같다. 실측범위는 피트관련 급기와 배기에 따른 온도, 습도 및 기류 등으로 한정하였다. 피트의 외기도입부의 온도 및 습도 그리고 피트 내의 급기와 배기에 따른 온도, 습도 및 기류속도를 측정하였다. 또한 콤프레샤실의 급기온도, 습도 및 기류를 측정하였다. 그림 2는 실측 대상인 피트 내부 전경이다. 그림 3은 피트내의 환기팬의 설치모습이다. 그림 4는 온도 및 습도계 설치



(a) 피트 전단부 전경 (b) 피트 후단부 전경

그림 2. 피트 내부 전경



(a) 피트의 급기팬 (b) 피트의 배기팬

그림 3. 피트의 환기팬 설치 모습

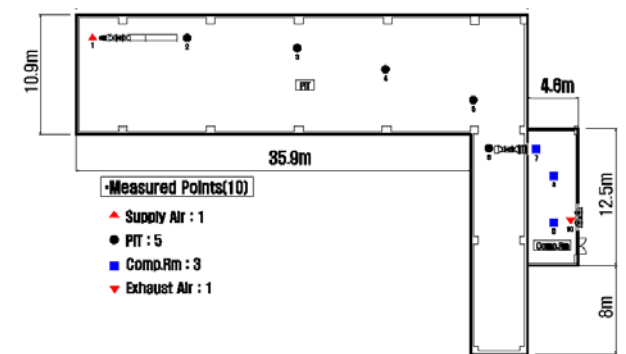


그림 4. 피트 & 콤프레샤실 온습도계 설치 위치

위치로 외기 측정점 1개, 피트내의 측정점 5개, 콤프레샤실 내의 측정점 4개, 총 10개이다. 현장 측정 기간은 2008년 5월 10일 14:00부터 5월 12일 14:00까지 30초 간격으로 온도, 습도의 측정 및 저장을 실시하였다. 그림 5와 그림 6은 피트와 콤프레샤실의 온도 및 습도를 측정하는 모습이다. 그림 7은 피트와 콤프레샤실의 기류 및 표면온도 측정 모습이다. 측정장비인 온습도계, 표면온도 측정계 및 기류측정계의 제원은 다음과 같다. 온습도계 :



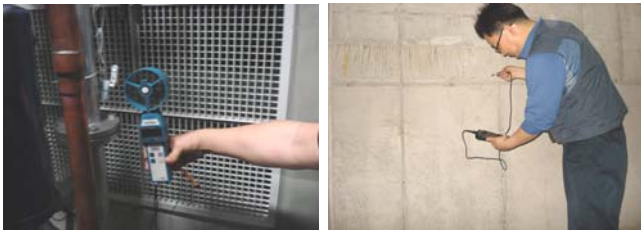
(a) 피트의 온습도계 (b) 피트의 온습도계

그림 5. 피트내의 온습도계 설치 모습



(a) 콤프레샤실의 온습도계 (b) 콤프레샤실의 온습도계

그림 6. 콤프레샤실의 온습도계 설치 모습



(a) 콤프레샤실의 기류측정 (b) 피트의 표면온도측정

그림 7. 기류측정 및 표면온도 측정 모습

Thermal Recorder, TR-72U, T&D Corp. Japan, 표면온도 측정계 : tesco 925, Testo AG Germany, 기류측정계 : Veloci Calc., TSI Inc. USA (그림 8, 그림 9 참조)



(a) 온습도계 전면 (b) 온습도계 후면

그림 8. 온습도계 전면 및 후면

또한 피트와 콤프레샤실에서 운영중인 환기팬 장비의 제원은 다음의 표 1과 같다.

본 연구의 현장에서 측정 한 온도 및 습도의 현장 측정 결과는 다음과 같이 나타났다. 다음의 그림 10, 그림 11은 5월 10일부터 5월 12일까지 측정 한 온도의 분포도이다.

표 1. 피트 및 콤프레샤실의 장비 제원

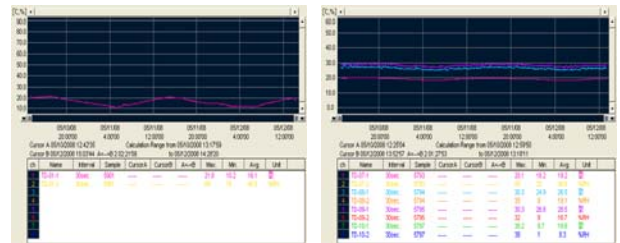
| 장비명 | 제원 |
|-----------|----------------------------|
| 피트 급기팬 | 3,600CMH, 20mmAq, 1Hp |
| 피트 배기팬 | 3,600CMH, 15mmAq, 1Hp |
| 콤프레샤실 배기팬 | 4,000CMH, 5mmAq, 220W*2 |
| 콤프레샤실 냉방기 | 26,000W, 13kW, 36.1A, R-22 |



(a) 표면온도계 (b) 기류측정기

그림 9. 표면온도계 및 기류측정기

다음의 표 2는 5월 10일 온도 측정 결과를 정리한 것으로 외기 최고온도 21.8℃, 피트 말단부의 최고온도는 19.4℃, 콤프레샤실의 최고온도는 30.3℃로 나타났다. 또한 피트 내부의 표면 온도 측정 결과는 바닥 표면온도 17.9℃~19.6℃, 중간벽체 표면온도 18.1℃~19.3℃, 천정 표면온도 18.2~20.3℃로 최저온도와 최고 온도의 차이는 2.4℃로 나타났다.



(a) 외기온도 분포 (b) 콤프레샤실 온도분포

그림 10. 외기 및 콤프레샤실의 온도분포

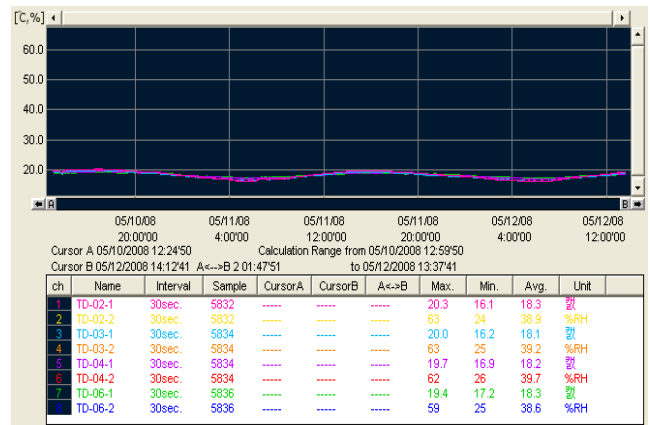


그림 11. 피트의 온도분포

피트 내부의 표면 온도 측정 결과는 바닥 표면온도 23.3℃~23.7℃, 중간벽체 표면온도 23.3℃~24.9℃, 천정 표면온도 24.1℃~24.5℃ 로 최저 온도와 최고 온도의 차이는 1.6℃로 나타났다.

피트 및 콤프레샤실의 기류속도 측정 결과는 피트 내의 급기 그릴에서 말단 부위까지 측정하여 7.6㎥, 3.0㎥, 1.1㎥, 0.2㎥ 로 나타났고, 콤프레샤실은 6.0㎥, 0.6㎥, 0.28㎥ 로 나타났으며 기류속도 측정위치는 온습도계의 측정위치와 동일하다.

표 2. 5월 온도 측정 결과 (℃)

| 구분 | 측정점 | 최대 | 최소 | 평균 |
|--------|-----|------|------|------|
| 외기(급기) | 1 | 21.8 | 10.2 | 16.1 |
| 피트 | 1 | 20.3 | 16.1 | 18.3 |
| | 2 | 20.0 | 16.2 | 18.1 |
| | 3 | 19.7 | 16.9 | 18.2 |
| | 4 | 19.8 | 17.3 | 18.4 |
| | 5 | 19.7 | 17.5 | 18.4 |
| 콤프레샤실 | 1 | 20.1 | 18.2 | 19.2 |
| | 2 | 30.3 | 24.9 | 26.5 |
| | 3 | 30.3 | 26.8 | 28.5 |

3. 유동성 지배방정식의 개요

본 연구에서 기류시물레이션을 위한 계산 영역은 여러 개의 영역으로 분할 된다. 이 분할된 모양을 격자라고 하며 각각의 작은 영역을 셀이라고 한다. 3차원일 경우 셀들은 보통육면체이거나 사면체의 형상을 가진다. 모든 물리량들은 이 셀들의 중심에 저장된다. 이렇게 각 셀의 체적에 보존법칙을 적용하기 때문에 이 방법을 유한체적법이라고 한다. 앞의 지배방정식을 유한 체적법에 의하여 이산화하여 다양한 모델들의 시물레이션을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 프로그램이라 하며 본 연구에는 Airpak 3.0(Fluent 6.3) CFD 프로그램의 Two-Equation(standard $k-\epsilon$) Turbulence 모델을 사용하였으며 적용한 수식은 다음과 같다.

μ_t : 관류점성도(Turbulent viscosity)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

여기서, ρ : 밀도(Density, kg/m³)
 C_μ : 상수(Constant, 0.09)
 k : 운동에너지(Kinetic Energy)
 ϵ : 소산율(Rate of dissipation)

4. CFD 모델 구축

4.1 모델 작업

본 연구의 기류시물레이션 작업을 위한 모델 작업은 Airpak3.0 의 3D 모델링 프로그램을 이용하여 구성하였으며 그 결과는 다음의 그림 12와 같다. 또한 기류시물레

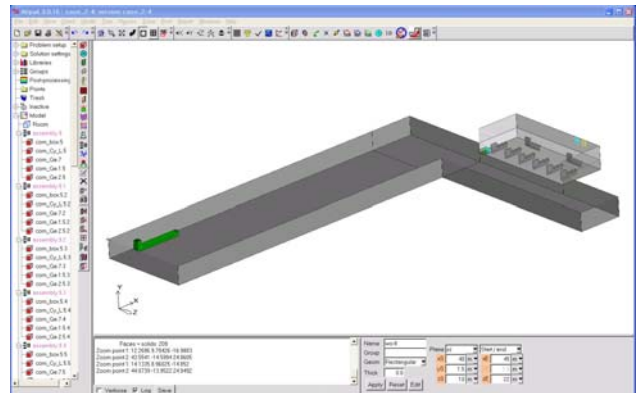


그림 12. CFD 작업을 위한 3D모델링

이션 작업을 진행하기 위해서는 3D 모델링후 격자형성(Mesh) 작업을 하여야 한다. 다음의 그림 13은 26만 격자 형성 모습이고 그림 14는 100만 격자형성 모습이다. 격자형성시에 크기 및 수량 선정 기준은 열전도가 활발하게 진행되어지는 구간에서는 격자를 더 조밀하게 형성

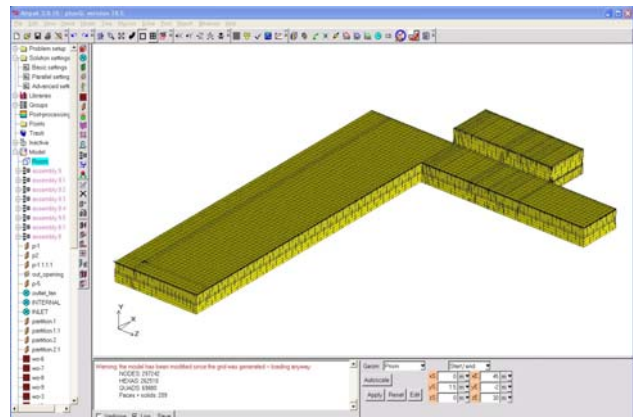


그림 13. 26만 격자형성(Mesh)

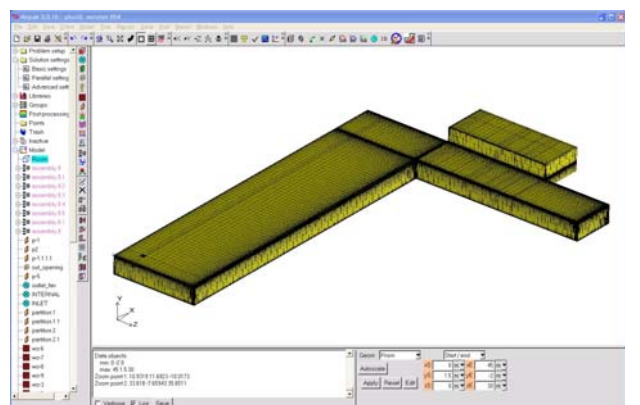


그림 14. 100만 격자형성(Mesh)

하여 결과에 대한 오차를 줄이는 방법으로 격자크기를 결정한다. 격자 규모가 커지면 오차가 줄어들지만 반면에 계산되는 시간은 비례적으로 장시간 소요되어 본 연구에서는 격자크기를 26만과 100만으로 비교하여 결과치를 평가하였다.

4.2 기류시뮬레이션 경계조건

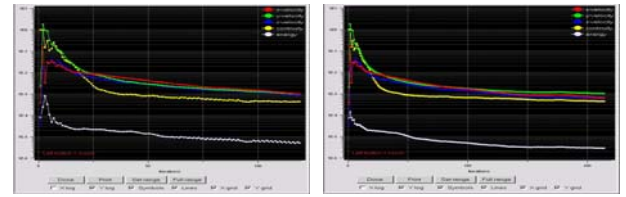
본 연구의 기류시뮬레이션 경계조건(표 3 참조)은 검증을 위한 5월 10일의 실측치 대비 기류시뮬레이션의 결과치 그리고 기류시뮬레이션(CFD) 프로그램 입력 조건을 만족하기 위하여 급기풍량과 배기풍량은 동일한 풍량으로 계산하였다. 요소 변수를 검증하기 위하여 풍량을 설계기준으로 최소 5,000CMH, 외기온도 5월은 21.8℃, 피트 내벽온도는 5월 천정부(19.25℃), 벽체부(18.7℃), 바닥부(18.7℃)로 설정하여 검증을 실시하였다. 지중온도는 측정값의 지중깊이에 따른 온도로서 상, 중, 하로 구분한 후 구해진 값의 평균값을 적용하였다. 또한 연구대상의 피트와 콤프레사실의 격자 설정값을 26만셀과 100만셀 조건으로 진행하였고 3차원 모델링에 입력조건 및 분석코드의 자체 계산 조건 등을 입력한 후 계산 값이 일정 오차 범위 내(1E-3)로 수렴 할 때까지 반복하여 계산하였다.

표 3. 기류시뮬레이션 경계조건

| 구분 | 경계조건 | |
|--------|--------------------|--------------------------------------|
| 실측자료 | 외기온도 | 5월 21.8(℃) |
| | 상대습도 | 50 %(기본값 적용) |
| | 급기 풍량 | 5,000CMH |
| | 콤프레사실 Cooling load | 9.6kW × 8ea (32%) |
| | Pit 내벽 표면온도 (℃) | 천정 : 19.25 벽부 : 18.7 바닥 : 18.7 |
| 피트 물성치 | 철근콘크리트 | k=0.58(W/m ² K) |
| 26만격자 | 단위격자 크기 | 0.5m |
| 100만격자 | | 기준 높이 : 0.001m 증가율 : 1.5 |

4.3 기류시뮬레이션 결과

본 연구의 기류시뮬레이션 열유동 해석에 있어서 격자의 형성은 매우 중요한 요소이며 다음의 그림 15는 오차의 범위를 최소화하기 위한 계산 1E-3 수렴곡선을 나타내는 계산 진행 화면이다. 계산 결과가 수렴되면 해석공간의 실측치와 동일한 위치의 온도분포를 수치화하였으며 그 결과는 그림 16부터 그림 19와 같다.



(a) 26만 1E-3 수렴곡선 결과 (b) 100만 1E-3 수렴 결과
그림 15. 계산 진행 화면 (Residuals Window)

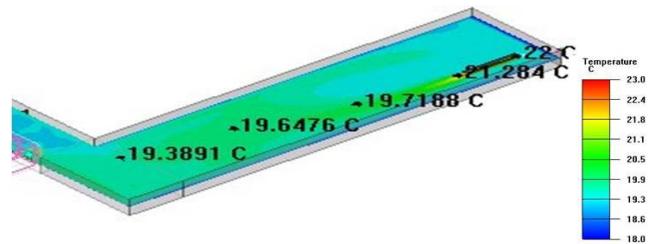


그림 16. 26만셀의 피트 온도 분포

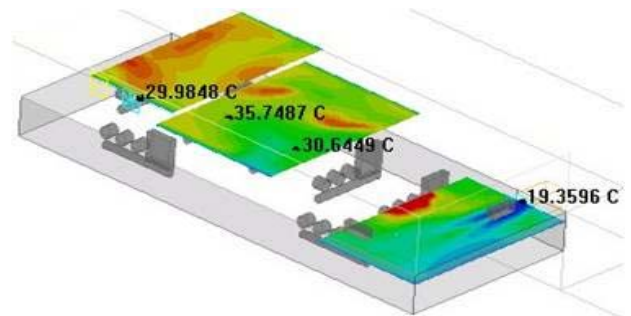


그림 17. 26만셀의 콤프레사실 온도 분포

기류시뮬레이션 열유동 해석에 있어서 격자의 형성은 매우 중요한 해석 요소이다. 피트 배기 부근 온도분포로서 26만셀의 경우 19.39℃, 100만셀의 경우 19.42℃로 0.03℃ 차이로 분석되었다. 또한 콤프레사실 급기 부근 온도분포는 26만셀의 경우 19.36℃, 100만셀의 경우 18.78℃로 0.58℃ 차이로 분석되었다. 실측값에 의한 시뮬레이션 결과 지하층의 피트 면적이 크기 때문에 격자 형성의 정밀함에 따른 변수가 영향이 미미하게 작용하였다. 다음의 표 4는 실측치와 시뮬레이션 결과치이다.

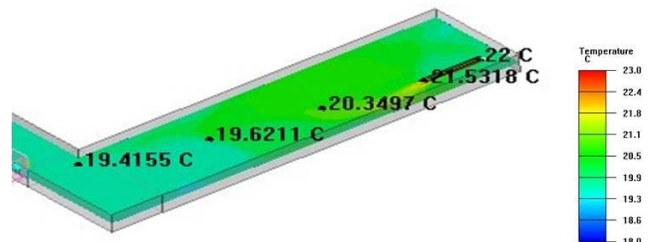


그림 18. 100만셀의 피트 온도분포

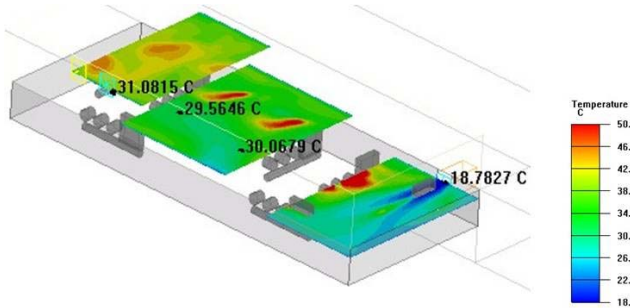


그림 19. 100만셀의 콤프레사실 온도분포

표 4. 실측치와 기류시뮬레이션 결과치, °C

| 구분 | 측정점 | 실측치 | 26만셀 | 100만셀 |
|-------|-----|------|-------|-------|
| 외기 | 1 | 21.8 | - | - |
| 피트 | 1 | 20.3 | 21.26 | 21.53 |
| | 2 | 20.0 | 19.72 | 20.35 |
| | 3 | 19.7 | 19.64 | 19.62 |
| | 4 | 19.8 | 19.39 | 19.42 |
| | 5 | 19.7 | 19.37 | 19.10 |
| 콤프레사실 | 1 | 20.1 | 19.36 | 18.78 |
| | 2 | 30.3 | 30.64 | 30.07 |
| | 3 | 30.3 | 35.75 | 29.56 |

5. 결론

본 연구에서는 지중에 설치된 피트에서 지중열을 이용한 일종의 쿨튜브시스템에 대한 도입된 실제사례를 대상으로 온도, 습도 및 기류를 실측하였고 CFD 모델을 구축하였으며 결론은 다음과 같다.

첫째, 기존에 사용하고 있는 지중열 피트에 대한 실측 결과 피트 배기측 온도가 외기 온도보다 2.1°C 낮게 측정되었으며 냉방을 위한 외기온도 저감효과가 나타났으며 하절기에는 저감효과가 더욱더 높아질 것으로 예상된다.

둘째, CFD 기류시뮬레이션은 26만셀과 100만셀을 형성하여 진행하였다. 실측치 대비 26만셀의 결과치에서 피트의 온도차는 최고 0.96°C, 최소 0.06°C 이며, 실측치 대비 100만셀의 결과치에서 피트의 온도차는 최고 1.23°C, 최소 0.08°C 이고 26만셀 대비 100만셀에서 피트의 온도차는 최고 0.63°C, 최소 0.02°C 로 나타났다.

셋째, 외기가 피트의 급기팬을 통하여 지중열교환후 외기온도 저감효과를 통하여 예냉효과를 실현하는 부근에서의 온도 결과로서 실측치 대비 26만셀에서 온도차는 0.33°C 이며 실측치 대비 100만셀에서 온도차는 0.6°C 이고 26만셀 대비 100만셀에서 온도차는 0.27°C로 나타났다.

상기의 결과로 지중 피트의 CFD 기류시뮬레이션을 이용하여 검증을 위한 실측값 대비 CFD 모델을 구축하였다. 또한 격자형성을 26만셀과 100만셀을 각각 형성하고 기류

시뮬레이션을 진행한 결과 지중열 교환이 충분히 이루어진 피트의 배기 부근에서 유사한 온도차를 형성한다.

추후 상기의 연구대상 또는 유사한 대안에 대한 지중열 이용을 위한 최적모델 구축에 활용하기를 바란다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R11-2008-098-00000-0).

참고문헌

1. 민준기, 김정태, 신선물류센터 냉동설비의 원격자동제어 성능 향상 사례연구, 한국생태환경건축학회 추계학술발표대회 논문집, pp.115-118, 2006.11
2. 서일환 외, 습식공기정화기의 설치에 따른 강제환기식 돈사의 환기 효율성 분석을 위한 CFD 모델 개발, 서울대학교 대기환경 및 시설환경공학 연구세미나, 2007.11
3. 이상엽 외, Thermal Labyrinth 적용을 통한 건물 에너지 절감 효과 분석, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 1281-1286, 2005. 손원득 외, 지열을 이용한 공조외기부하저감 시스템에 관한 연구, 설비공학회 논문집, 제16권 제12호 pp. 1218-1226, 2004.12
4. J. K. Min, S. U. Suel and K. S. Kim, CFD Model of Pit's Cooltube System for Reducing Effect of Fresh Air & Saving Building Energy Consumption, SET2008, Vol. 1, pp.1033-1040, 2008.08(Proceeding)
5. ATES, Airpak 3.0 Manual. 2008.05

투고(접수)일자: 2008년 9월 16일

심사일자: 2008년 9월 19일

게재확정일자: 2008년 10월 21일