



태양복사열에 따른 지표면 온도와 열, 기류 환경 시뮬레이션 연구

CFD Simulations of the Ground Surface Temperature and Air Temperature, Air flow Coupled with Solar Radiation

이주희* · 김재권** · 윤재옥***

Lee, JuHee* · Kim, JaeGwon** · Yoon, JaeOck***

* Prof., Dr., Dept. of Computer Engineering, Hoseo University, Asan, South Korea (juhelee@hoseo.edu)

** Graduate Student, Ms, Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Asan, South Korea (chinese38@nate.com)

*** Corresponding author; Prof., Dr., Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Asan, South Korea (joy@hoseo.edu)

ABSTRACT

The thermal environment in a small city rapidly deteriorates due to the urbanization and overpopulation. It is important to understand and predict the thermal environment in a city area. The thermal environment is highly affected by the solar radiation and temperature distributions changing over time periodically. To predict the thermal environment precisely, the solar radiation calculation including radiation strength, incidence angle, and thermal radiation between building surface and ground should be considered. In this study, the computational domain includes various artificial structures such as building, ground, asphalt, brick and grass. To consider the solar radiation, the unsteady state numerical calculation is performed from sun rise to mid-day (2:00pm). The numerical methods consist of solar load and one dimensional heat conduction through the boundaries to reduce the computational load and improve the flexibility of the calculation.

KEYWORD

지표면온도,
태양 복사열,
열환경,
전산유체역학,
비정상상태

Surface Temperature,
Solar Radiation,
Thermal Environment,
Computational Fluid Dynamics,
Unsteady state

ACCEPTANCE INFO

Received December 19, 2013

Final revision received June 19, 2014

Accepted June 23, 2014

© 2014 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

도시의 열, 기류 환경은 건물이나 지표면 재료 등 도시 공간을 구성하는 요소들에 의해 크게 영향을 받는다. 열, 기류 환경에 영향을 주는 에너지는 태양 복사에너지이며, 이를 흡수하거나 반사하는 정도에 따라 크게 좌우된다. 태양 복사에너지에 의해 뜨거워진 지표면의 온도가 변화하는 중요한 원인으로는 대류와 지표면을 구성하는 재료의 열용량이다. 지표면 재료를 고려한 태양복사, 대류와 열용량에 따른 해석은 도시 열, 기류 환경 분석에 중요한 역할을 한다. 외부 열, 기류 환경 분석은 다년간의 실측연구가 이루어져야하나, 보다 합리적인 시뮬레이션 예측 기술인 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이용함으로써 짧은 시간에 유용한 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 지표면의 열용량을 고려하기 위하여 지표면 아래 공간을 전산해석을 위하여 격자를 만드는 대신 전도해석을 위한 비정상상태 1D-Subroutine을 적용한 CFD 시뮬레이션을 실시하였

다. 태양복사열에 따른 시간별 시뮬레이션을 하고, 지표면온도와 열과 기류 환경 해석방법을 도출하였다. 1D-Subroutine CFD 방법으로 지표면 재료에 따른 대안을 선정하고 열, 기류 환경을 예측하고자 한다.

1.2. 연구 범위 및 방법

중소도시인 A도시 중앙에 위치한 시청사 외부 공간의 하절기 열, 기류 환경 분석을 위해 CFD를 수행하였다. 기존 실측 연구의 공기 온도와 표면온도 측정 자료를 통해 CFD해석 결과를 검증하였다. 대안을 설정하여 보다 친환경적인 외부공간을 조성하고자 하였다. 본 연구에서는 CFD 수행 내용을 중심으로 결과를 분석하였다. 연구 범위 및 방법은 다음과 같다.

- 1) 지표면복사와 대류를 고려한 CFD해석 실시
- 2) 1차원 열전도방정식의 비정상상태 1D-Subroutine
- 3) 기존 연구인 실측결과와 CFD결과 비교 검증 실시
- 4) 지표면 재료 변화에 따른 대안별 시뮬레이션

2. CFD 시뮬레이션

2.1. 열 유동 시뮬레이션

외부 열, 기류 환경을 해석하기 위해서는 시간변화에 따른 태양복사의 변화를 고려해야 한다. 도시화가 진행됨에 따라 인공구조물, 건물, 도로에서 일어나는 복사에 의한 영향의 고려가 도심지 내 열 환경에 대한 예측, 평가의 신뢰도를 결정짓는 핵심이라 할 수 있다. 이를 위해서 일사, 대류, 전도, 복사가 동시에 반복적으로 수렴시켜 나가야 함으로 과다한 계산부하가 발생한다. 과다한 계산 부하를 줄이기 위해 유동해석을 수행하여 전체영역에서의 유동장을 계산하는 것이 필요하다.

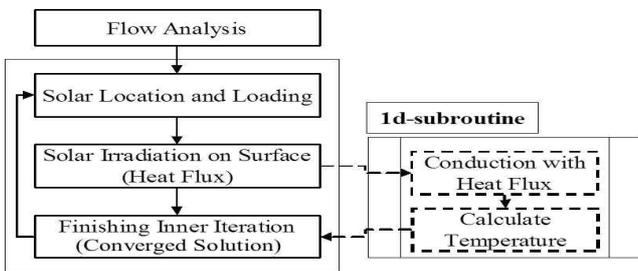


Fig. 1. Whole process of solar radiation interpretation

Fig. 1.은 열, 기류 환경 해석을 하기 위한 전체적인 과정을 나타낸 것이다. 태양복사에너지를 얻기 위해서는 지표면에 대한 태양의 고도와 방위각 그리고 지표면에 도달하는 복사에너지의 양을 계산한다. 맑은 날로 가정하여 계산을 수행한다. 지표면의 전도는 지표면을 따라 흐르는 열 흐름보다 표면에 수직인 전도에 의한 열 유동이 지배적이라고 가정한 것이다. 지표면아래의 유동은 지표면에 수직인 방향으로 에너지 전달이 발생하게 됨으로 1차원 비정상 열 유동(one dimensional unsteady heat transfer)이 된다. 지표면을 구성 재료에 따라 나누고 이 영역에 대한 태양복사를 고려한 1차원 비정상 열전달을 수행한다.

2.2. 복사 계산 및 고도와 방위각

ASHRAE 일사모델¹⁾은 직달 일사와 확산 일사로 이루어져 있다. 직달일사(direct radiation: q_{de})는 복사가 지구의 대기나 먼지에 의하여 산란되거나 흡수되지 않고 지표면에 직접 도달하는 것을 말한다. 확산일사(diffuse radiation: q_{dh})는 먼지나 대기에 의하여 분산되어 도달하는 일사로 그 방향성은 없다. 표면에서 받는 직달일사량은 그 면에 수직인 직달일사량으로 나타낼 수 있다. 수직인 표면에 도달하는 일사량(q_{radi})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{radi} = q_{de} + q_{dh} \quad (1)$$

$$q_{de} = D_N \cos \beta \quad (2)$$

$$q_{dh} = CD_N \quad (3)$$

$$D_N = A e^{-B/\sin \beta} \quad (4)$$

β : 고도, D_N : 연직직달일사량, C : 일사확산계수

A : 태양일사상수, B : 대기흡광계수

2.3. 고도와 방위각

임의의 방위를 갖는 직달 일사와 수평면 사이의 기하학적 관계는 태양의 고도(β : solar altitude)와 방위각(ϕ : solar azimuth angle)에 의해 결정 된다.

$$\sin \beta = \cosh \cos \delta \cos \phi + \sin \delta \sin \phi \quad (5)$$

$$\cos \phi = \frac{\sin \beta \sin \delta - \sin \delta}{\cos \beta \cos \delta} \quad (6)$$

수식 (5)과 (6)을 이용하여 태양의 고도와 방위각을 얻고 이로부터 맑은 날의 일사량을 구할 수 있다.

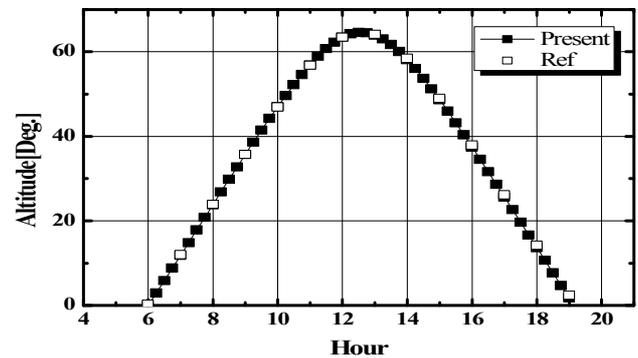


Fig. 2. Comparison of solar altitude

Fig. 2.는 위 수식의 고도와 한국천문연구원의 자료(<http://astro.kasi.re.kr>, 2012)를 비교한 것이다. 참고 값과 일치하는 것을 알 수 있었다.

2.4. 증발모델

증발산량을 예측하는 방법으로 기온에 기초한 방법(Richard, 1998)을 사용하여 잔디의 증발량을 산출하고 이로부터 증발 잠열을 계산하였다.

$$ET_0 = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{1/2} Ra \quad (7)$$

ET_0 : crop evapotranspiration [MJ / day]

Ra : extraterrestrial radiation [MJ/m²/day⁻¹]

식 (7)에서 얻어지는 증발량은 지표면의 온도에 비례함으로 계산을 단순화하기 위해 각 시간 증발량을 지표면의 온도에 비례하도록 하여 전체의 합이 하루 증발량이 되도록 하였다.

2.5. 서브루틴 검증

지표에 수직인 중력 방향으로의 1차원 열전도해석을 수행하는 1D-Subroutine의 정확성을 검증하기 위하여 지표면에 열전달(heat flux)이 있는 반무한평판(semi-infinity plate)에 대하여 비정

1) ASHARE, 2009, ASHRAE Handbook, Fundamentals 14 (SI Edition)

상열전달해석을 수행하였다.²⁾ 이때 밀도(ρ)는 $2000[kg/m^3]$, 열전도계수(k)는 $1.37[W/mK]$, 비열(c)은 $880 [J/kgK]$ 이다. 약 3000초가 지난후의 온도분포($T(x, t)$)를 나타내며 이론값은 다음과 같다.

$$T(x, t) - T_i = \frac{2q_0 \sqrt{\alpha t / \pi}}{k} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0 x}{k} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (8)$$

T_i : 초기온도(K), X : 지표면에서 지중거리(m)

α : 열확산율($\alpha = \frac{k}{\rho c}$), q_0 : 지표면 열량(W/m^2)

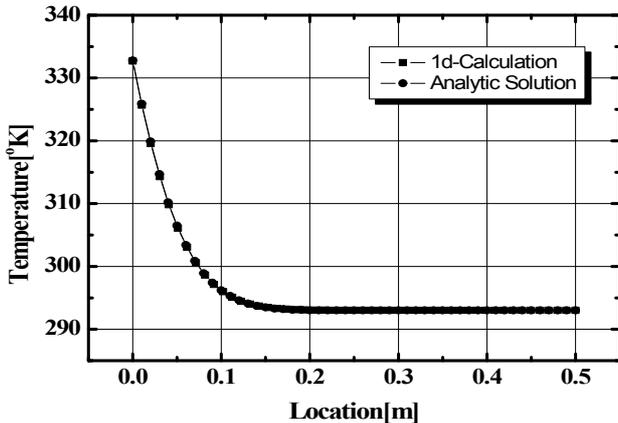


Fig. 3. Comparison of temperature distributions (1D-Subroutine validation)

Fig. 3.은 3000초가 지난 후의 온도를 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 수치해석과 해석 해(exact solution)는 일치하는 것을 알 수 있다. 서브루틴의 해석의 타당성을 알 수 있었다.

3. 열, 기류 환경 CFD해석 모델

3.1. 해석조건

비정상상태 1D-Subroutine을 적용하여 CFD해석을 진행하였다. 지표면의 두께는 본 연구의 8시간 계산에 표면의 온도변화 영향을 받지 않는 충분한 깊이(4m)까지 고려하여 계산을 수행하였다. 아스팔트, 벽돌, 잔디는 재료의 물성치를 적용하였고, 잔디의 경우 증발잠열을 고려하였다.

3.2. 해석대상

Fig. 4.는 A도시 시청사 주변의 위성사진이다. A도시 시청사 주변의 지표면은 아스팔트, 벽돌, 잔디 3가지의 바닥 재료로 구성되어 있다.

Fig. 5.는 해석대상의 도메인 영역($2500m \times 2000m \times 100m$)이다. Fig. 5.는 관심 영역의 격자 생성을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 격자는 외부 공간 해석에서 자주 사용되는 Trimmed Mesh를 사용하였고, 격자 개수는 110만개였다. Table1.과 같이 지표면은 아스팔트, 벽돌, 잔디로 나누어져 있다. 대안 설정으로 주차장의 아스팔트를 다른 재료로 변경시켜 실시하였다.



Fig. 4. The satellite photo of A city hall and the analysis area

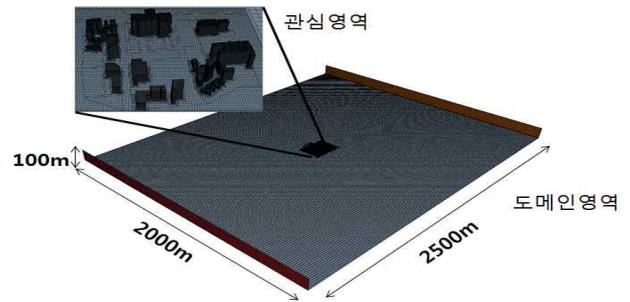


Fig. 5. The grid of Analysis area

Table 1. Surface material

Asphalt Area	Brick Area
Grass Area	Parking-Asphalt Area

3.3. 모델 개요 및 경계 조건

모델 해석은 STAR-CCM+ v402버전을 사용하였으며, 해석대상 영역을 모델링하였다. 일사해석에는 여름(8월 8일) 태양고도, 방위각, 물성치를 적용하였으며, 맑은날 비정상상태(Unsteady state)로 오전 6시부터 오후 2시까지 수행하였다. prism layer는 5개를 사용하였고, 0.5m의 두께를 주었다. 효율적인 계산을 위해 건물 주위는 조밀한 격자를 사용하였고, 관심 영역 밖은 큰 격자를 사용하였다. 입구의 경계조건은 충분히 발달된 유동을 가정하여 벽법칙에 따라 고도에 따른 속도 분포를 주었으며, K-Epsilon Turbulence 모델을 사용하였다. Table 2.는 경계조건이다.

지표면 재료별 열 특성을 1D-Subroutine을 적용하여 계산하였다. Table 3.은 적용된 지표면 재료의 물성이다.

2) J. P. HOLMAN, HEAT TRANSFER, McGraw-Hill Inc; 1992, p.172

Table 2. Boundary conditions

Domain Size		2500m × 2000m × 100m
Cell Type		Trimmed Mesh
Cell		1,100,000
Prevailing Wind Direction		East(A City summer main wind)
Inlet	Velocity	1.7m/s (Height : 10m) $\alpha=0.25$
	Temperature	Temperature profile(Table 4.) (6:00 26.1°C~ 14:00 33.5°C)
Outlet Condition		Pressure Outlet
Surface Condition		Asphalt, Brick, Grass
1D-Subroutine		Consider the solar azimuth and altitude, Apply the material property(Ref. Table 3.).

Table 3. Property of surface material

Material	ρ kg/m ³	C_p J/kgK	k W/mK	ϵ	Note
Asphalt	2120	920	0.698	0.96	
Brick	2050	960	1.0	0.81	
Grass	1500	1842	2.6	0.6	+Evap.
Soil	1500	1842	2.6	0.6	

3.4. 기후 입력조건

해석영역의 입력조건인 기후조건은 A도시의 2013년 8월 8일의 천안기상대 AWS데이터를 사용하였다. Table 4.는 A도시의 입력조건인 기후조건이다.

Table 4. Climate condition of analysis area

Climate condition	A City (2013. 08. 08)			
Temperature profile	6:00	26.1°C	11:00	32.4°C
	7:00	26.2°C	12:00	32.7°C
	8:00	27.4°C	13:00	33.1°C
	9:00	28.4°C	14:00	33.5°C
	10:00	30.1°C		
velocity	1.7m/s (1.5m height 1.07m/s)			
Wind direction	east			

4. CFD해석 결과 및 분석

4.1. 표면온도 예측 결과 및 분석

Table 5.는 시간별 해석영역의 표면온도 결과이다. 일사효과를 알아보기 위하여 오전 6시부터 오후 2시까지 10초 간격으로 2880 step을 계산을 수행하였다. 태양의 위치 이동은 건물 북서쪽에서 북동쪽으로 그림자가 생기는 것으로 확인할 수 있었다. 또한 지표면을 구성하는 마감 재료에 따라 아스팔트(59.7°C) > 벽돌(53.7°C) > 잔디(28.9°C)의 순서로 평균표면온도가 높게 나타났다.

4.2. 지상 1.5m 풍속, 기온 예측 결과 및 분석

Table 6.은 보행자 공간인 지상 1.5m에서 풍속과 기온 분포를 나타낸 것이다. “가” 영역에서 건물이 조밀하게 배치되어 유동 정체점이 생긴 것을 확인할 수 있었다. 유동 정체점에서 지표면에 뜨거워진 공기가 쉽게 빠져나가지 못하여 온도가 높아지는 것을 알 수 있었다. “나” 영역에서 동측에 위치한 2개의 건물 사이로 Venturi effect로 인해 건물 사이로 공기가 깔때기 모양으로 수

렴하여 주변은 0.5m/s이지만 1.4m/s로 풍속이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. “나” 영역 동쪽 공간의 높은 열이 바람으로 인하여 “나” 영역까지 영향을 미쳐 지상 1.5m 기온이 올라간 것으로 판단된다. 관심영역의 지상 1.5m 기온은 32°C~36°C의 분포를 나타내고 있었다.

Fig. 6.은 표면온도에 의한 지상 1.5m 높이 기온을 iso-surface로 표현한 것이다. 32.8°C 온도를 같은 면으로 그린 것으로 건물 외피의 열이 바람의 방향에 따라 공기온도에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 건물 옆으로 다른 건물들이 조밀하게 배치된 영역은 유동이 정체되어, 공기온도 또한 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 지상 1.5m의 기온은 근처의 지표면 온도와 바람의 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

Table 5. The hourly surface temperature

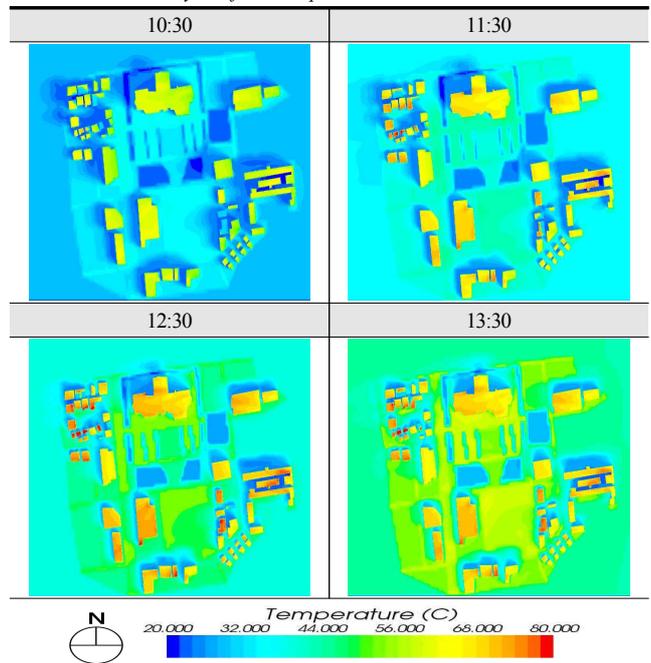
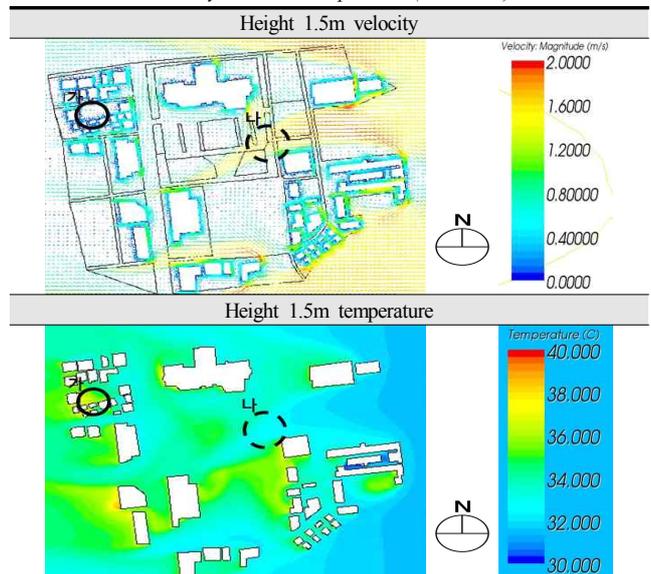


Table 6. Wind velocity and air temperature(GL+1.5m)



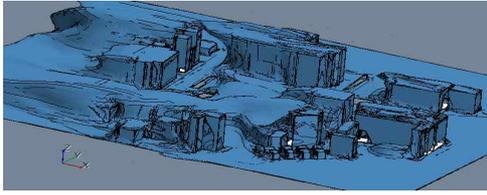


Fig. 6. Isosurface of air temperature 32.8°C

4.3. CFD 결과와 실측 결과 비교 분석

A도시 시청사 외부공간에서 2013년 8월 8일 실시된 실측연구 결과와 비교분석하였다. Table 7.과 같이 실측 아스팔트 표면온도는 51.8°C이며 CFD해석은 59.7°C로 나타났다. 아스팔트와 벽돌 CFD 해석 결과치가 실측보다 높게 나타난 것은 바람, 수목의 그림자효과가 맑은 날로 가정한 시뮬레이션 결과로 여겨진다. 실제로는 바람의 방향, 무풍, 수목 등 온도 영향인자들로 인하여 표면온도가 낮게 실측된 것으로 예상된다. 잔디 표면온도 실측치가 CFD해석치 보다 높게 나타난 것은 맑은 날로 가정하여 일사에 의한 증발량을 산정했기 때문으로 분석된다. Table 8.은 A도시 시청사 실측치와 CFD해석치 표면온도이다.

Table 7. CFD Results of CASE 1

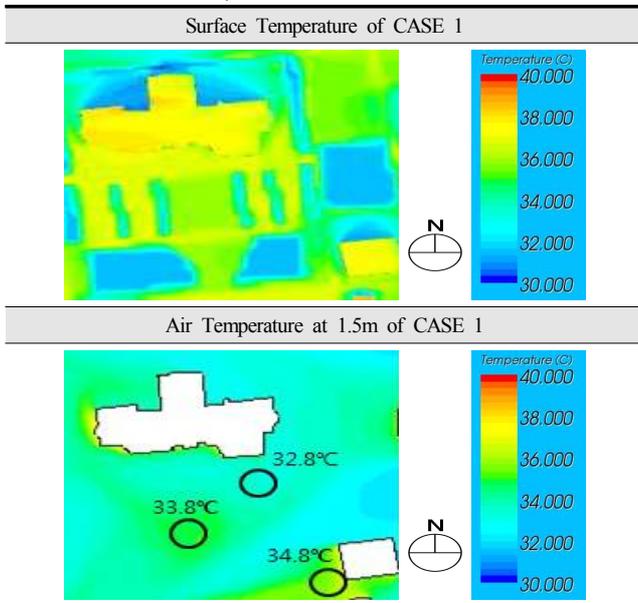


Table 8. The surface temperature from CFD and measurement

Material	Measurement ³⁾ (°C)	CFD(°C)
Asphalt	51.8	59.7
Brick	50.5	53.7
Grass	31.5	28.9

Table 9.에서는 지상 1.5m에서 실측 기온과 CFD해석 결과인 기온을 비교하였다. 실측치와 CFD해석 결과치 사이에 적은 차이가 있었으나 유사한 경향을 보였다.

3) Kim, JeaGwon, Yoon, JaeOck, The Field Measurements of Thermal and Wind Environment at Medium-Size City Hall Outdoor Open Space, The Journal of Research Institute for Engineering & Technology Hoseo University, Chungnam, Korea, 2013, Vol.32, No. 2, p.109-119

실측치와 CFD해석 결과를 비교하면, 표면온도는 CFD해석결과가 높게 나타났지만 지상 1.5m 기온은 실측치가 조금 높게 나타난 것을 알 수 있었다. 변화 경향이 유사하여 CFD를 이용한 대안 분석이 가능하리라 판단된다.

Table 9. The air temperature of GL+1.5m from CFD and measurement (°C)

Material	measurement	CFD
Asphalt	36.7	34.7
Brick	35.5	33.8
Grass	33.9	32.4

5. 대안 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1. 열, 기류 환경에 대한 대안

도시 열섬현상을 줄이기 위하여 아스팔트였던 A시 시청사 주차장 지표면을 잔디벽돌이나 잔디로 바꾸는 방안을 도입하였다. 해석 조건은 앞의 Table 2, Table 3 조건과 동일하며 바닥 재료 물성치를 적용한 1D-Subroutine을 사용하여 시뮬레이션 하였다. Table10.은 열환경 해석과 대안을 설명한 것이다. 아스팔트로 되어 있는 주차장을 친환경재료로 바꾸어 대안을 정하였다. CASE 1은 현 상황인 기본해석이고, 2가지 대안인 잔디벽돌 CASE 2, 주차장 지역을 모두 잔디로 한 CASE 3을 설정하였다. 잔디벽돌은 잔디가 50%, 벽돌 50% 인 경우이다.

Table 10. The Cases of CFD

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Parking Area Material	Asphalt	grass-brick	grass
Ground Materials	Asphalt, brick, grass	grass-brick, asphalt, brick, grass	Asphalt, brick, grass

5.2. 대안별 결과 및 분석

Table 11.은 A시 시청사 주차장 표면을 잔디벽돌로 바꾼 후인 CASE 2의 지표면 온도와 지상 1.5m의 기온 분포이다. 실측 조건과 동일한 현 상황의 기본해석 CASE 1 지표면 온도는 59.7°C이었다. CASE 2의 경우 34.3°C로 나타나 잔디벽돌 설치로 인한 지표면 온도는 약 25.4°C 저감 되는 효과가 있었다. 잔디벽돌을 적용함으로써 도시의 온도를 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 12.는 주차장 지표면을 모두 녹지화 시킨 경우로 CASE 3 해석 결과이다. CASE 1 지표면 온도가 59.7°C로 나타났고 지표면을 녹지로 설정한 대안으로 해석한 결과 28.9°C로 나타나 녹지면적 증가로 인해 지표면 온도가 약 30.8°C 저감되는 효과가 있었다. 녹지면적을 늘림으로써 도시의 표면 온도를 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.

지상 1.5m 기온은 기존해석 CASE 1과 비교할 때 CASE 2 기온은 1.7°C 낮게 나타났다. CASE 1에서 CASE 3로 되면 기온은 2.3°C 낮게 나타났다. 지상 1.5m 공기 온도인 기온은 지역에 따라 큰 변화가 없는 경우도 있었다. Fig.6.과 같이 지표면 열이 이동되는 것을 확인할 수 있었다. Table13.은 시뮬레이션 표면온도와 지상 1.5m 기온이다.

Table 11. The CFD results of CASE 2

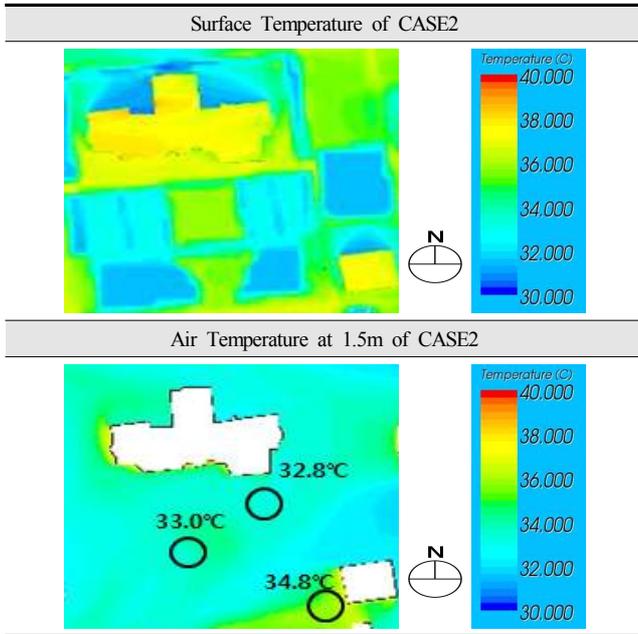


Table 12. The CFD results of CASE 3

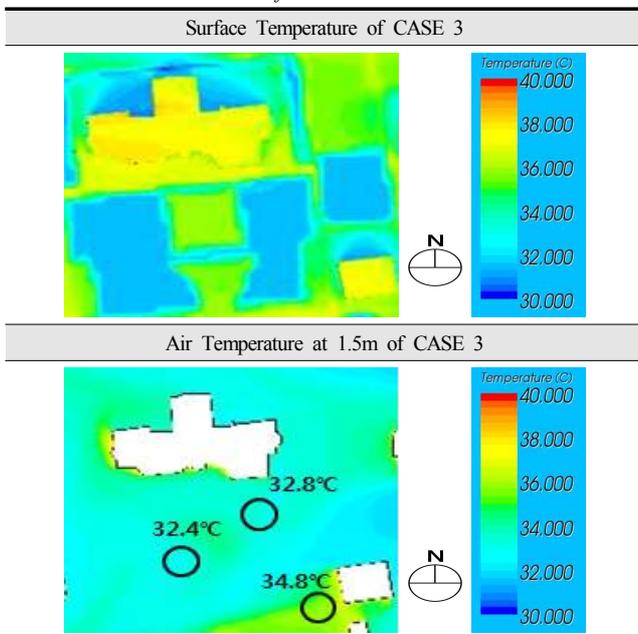


Table 13. The CFD results of Surface temperature and air temperature at 1.5m (°C)

Parking Area	CASE 1 (Asphalt)	CASE 2 (Grass-brick)	CASE 3 (Grass)
Surface Temperature	59.7	34.3	28.9
Air Temperature at 1.5m	34.7	33.0	32.4

6. 결론

일사 효과를 고려하기 위하여 1D-Subroutine을 적용한 CFD 시뮬레이션을 실시하였다. 지표면온도와 태양복사열에 따른 시간별

열, 기류 환경 해석결과는 다음과 같다.

1) 일사를 고려한 CFD해석 결과, 건물이 조밀하게 배치되어 있는 지역에서는 유동 정체점이 생겼고 뜨거워진 공기가 빠져나가지 못해 높은 온도 분포를 나타내고 있었다. 비정상상태 CFD 결과 건물 북서측에서 북동측으로 그림자가 생기는 것으로 태양 움직임을 확인할 수 있었다.

2) 동측에 위치한 2개의 건물 사이로 Venturi effect로 인해 건물 사이로 공기가 깔때기 모양으로 수렴하여 주변은 0.5m/s이지만 1.4m/s로 풍속이 증가 하였다.

3) CFD해석 아스팔트 표면온도는 59.7°C이고, 실측치는 51.8°C로 나타났다. CFD해석 표면온도가 아스팔트, 벽돌에서 높게 나타났다. CFD해석이 실측보다 높게 나타난 것은 수목 그림자효과가 없었기 때문으로 분석된다. 실측 표면온도와 CFD해석 표면온도는 유사한 경향을 나타내었다.

4) 지상 1.5m 기온은 실측에서 아스팔트(36.7°C) > 벽돌(35.5°C) > 잔디(33.9°C)로 나타났고, CFD해석에서 아스팔트(34.7°C) > 벽돌(33.8°C) > 잔디(32.4°C)로 실측 기온보다 CFD 기온이 낮게 나타났으나 경향은 유사하였다.

5) CASE 1 실제 상황은 59.7°C, 주차장 지역을 잔디벽돌 적용한 CASE 2는 34.3°C, 전부 잔디로 한 CASE 3은 28.9°C이었다. 각각 25.4°C, 30.8°C의 온도저감 효과가 있었다.

6) 도시 외부공간은 대부분 아스팔트 및 콘크리트로 포장되어 있다. CFD해석 결과 지표면 재료에 따라서 온도의 변화가 큰 것으로 나타났다. 도시의 고온현상을 저감시키기 위해서는 아스팔트 및 콘크리트 포장보다는 녹지면적 증가 및 잔디블럭 설치로 표면온도를 저감시키는 방법이 좋을 것이라 판단된다.

7) CFD해석을 통해 해석 결과와 실측 결과가 거의 유사한 경향을 나타내는 것으로 파악되었다. 1D-Subroutine을 적용한 CFD해석을 통해 외부공간의 시간별 온도 예측이 가능할 것이라 사료된다.

References

- [1] ASHARE Handbook, Fundamentals (SI Edition), 2005
- [2] STAR-CCM+ v4.02, Methodology, Computational Fluid Dynamics Co, London U. K., 2008
- [3] 전미영, Unsteady state CFD 시뮬레이션을 이용한 여름철 공동주택 외부공간의 온열환경 및 쾌적성 평가, 한국생태환경건축학회, 2010 / (Jeonmiyoung. Evaluation of the Thermal Environment and Comfort in Apartment complex using Unsteady-state CFD simulation. Korea institute of Ecological Architecture and Environment. 2010, p.67-73)
- [4] 김주수, 박화란, 하절기 아파트 단지의 열환경 실측과 CFD를 이용한 해석방법 검증에 관한 연구, 대한건축학회, 2010 / (Kimjusu. Analysis of Outdoor Thermal Environment in Space Arrangement of Apartment Complex in Summer by Actual Measurement and CFD Simulation. Architectural Institute of Korea. 2010, p.335-342)
- [5] 남선영, 윤재욱, 아산시 주거지역과 도심지역의 동절기 기후요소 실측 비교연구, 한국생태환경건축학회, 2009 / (Namsunyoung. The Comparisons field measurements of Winter Climate element between Commercial areas and Residential areas. Korea institute of Ecological Architecture and Environment. 2009, p.225-230)
- [6] 김재권, 윤재욱, 중소도시 시청사 외부공간의 지표 재료에 따른 열, 기류 환경 실측 분석, 호서대 공업기술연구 논문집, 2013 / (KimJeaGwon, YoonJaeOck, The Field Measurements of Thermal and Wind Environment at Medium-Size City Hall Outdoor Open Space, The Journal of Research Institute for Engineering & Technology Hoseo University, Chungnam, Korea, 2013, Vol.32, No. 2, p.109-119)