

옥외 온열환경 평가시물레이션 기법의 개발

지용승*, 황효근*, 임종연*, 송두삼**

*성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과(itsmie@skku.edu),
*성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과(goldroot@skku.edu),
*성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과(reonheart@skku.edu),
**성균관대학교 건설환경시스템공학과(dssong@skku.edu)

Development of an assessment tool for outdoor thermal environment

Jee, Yong-Seung*, Hwang, Hyo-Keun*, Lim, Jong-Yeon*, Song, Doo-Sam**

*Dept. of Architecture Eng, Graduate School, Sungkyunkwan University(itsmie@skku.edu),
*Dept. of Architecture Eng, Graduate School, Sungkyunkwan University(goldroot@skku.edu),
*Dept. of Architecture Eng, Graduate School, Sungkyunkwan University(reonheart@skku.edu),
**Dept. of Architectural Eng, Sungkyunkwan University(dssong@skku.edu)

Abstract

Since most of the existing CFD simulation about thermal environment was limited as indoor environment, it is not appropriate to adopt the same method for external thermal environment, because the solar radiation highly affect the outdoor thermal environment. Thus, in case of assessing the outdoor thermal environment, the radiation calculation is very important. In this study, as a new method to evaluate the outdoor thermal environment, coupled simulation of convection and radiation will be proposed.

Keywords : Outdoor environment(옥외환경), Solar radiation(태양복사), CFD(전산유체해석)

1. 서론

1.1 옥외온열환경 해석의 필요성

삶의 질에 대한 관심이 늘어남에 따라 실내뿐만 아니라 옥외 온열환경에 대한 관심 또한 늘어나고 있다. 하지만, 급격한 도시화/산업화, 도시로의 인구집중에 따른 건물의 고층/고밀도화는 도심지 내의 녹지 및 수면의 감소를 야기하였으며, 이에 수반하는 기반시설 및 건물 등의 건설로 인하여 도심지내에서 생성된 열의 방출이 이루어지지 않아 도시 열섬 현상 등이 출

현하는 등 도시공간의 미기후는 점차 악화되고 있다.

따라서 대도시를 중심으로 미기후 완화에 대한 관심이 증가하고 있으며 옥외 온열환경에 대한 연구 또한 증가하고 있다.

옥외공간의 물리적 환경을 정확히 예측/평가하는 작업은 옥외 온열환경을 개선하고 거주자의 쾌적성을 보장하는데 있어서 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다.

1.2 연구의 목적 및 내용

CFD를 활용한 온열환경의 해석기법은 주로 실

내 환경을 대상으로 많은 연구가 이루어지고 있으나, 옥외공간의 경우 실내와는 다르게 복사환경이 매우 지배적이기 때문에, 대류해석이 주가 되는 CFD해석기법만으로 옥외공간의 물리적 특성을 평가/예측하는 것은 한계가 있다. 따라서 해외에서는 복사와 대류계산을 연성하여 옥외공간의 온열환경 특성을 규명하는 CFD해석기법에 관한 연구가 꾸준히 진행되어왔으나, 국내의 경우 아직 초보적인 단계라고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 대류·복사 연성시물레이션에 기초한 도심지 내 옥외공간의 온열환경 해석 기법을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 본 논문에서는 시물레이션의 개요에 대해 설명하고, 대류·복사연성 해석을 이용한 Case Study를 통해 옥외공간에서 복사열 교환에 대한 고려 유무가 계산 결과에 미치는 영향을 분석한다. 또한, 녹지율 증가가 옥외 온열환경에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 대류·복사 연성시물레이션

2.1 연성 시물레이션의 필요성

옥외공간에서는 태양복사의 영향이 온열환경을 형성하는데 지배적이기 때문에, 이러한 복사의 영향을 정확히 묘사하는 것이 옥외 온열환경의 예측/평가에 있어서 매우 중요하다. 즉, 옥외공간에서 태양복사에 의한 영향을 정확하게 산정할 수 있다는 것은 시물레이션 해석결과의 신뢰도를 결정짓는 핵심적인 내용이라 할 수 있다.

특히, 도심지에서 하절기 옥외 온열환경이 악화되고 있는 것은 도시화에 따른 인공적인 지표면과 건축물의 조성에 의한 것으로, 복사해석을 통해 이러한 도시 내 건물, 도로 등에서 발생하는 복사열 교환을 정확히 계산할 수 있다면, 시물레이션을 통한 옥외 온열환경 예측결과의 신뢰도를 상당히 높일 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 대류·복사 연성 시물레이션의 개요

그림 1에 외부 온열환경 해석을 위한 대류·복사 연성 시물레이션의 개요를 보이고 있다. 위 그림에서와 같이 먼저 외부환경의 복사열 교환 계산을 위한 경계조건을 설정하고, 복사계산을 실시

한다. 복사계산 결과인 지표면 및 벽 표면온도를 새로운 경계조건으로 하여 CFD계산을 통해 대류열 교환을 계산한다. CFD계산 결과를 바탕으로 복사계산을 다시 실시한다. 이러한 일련의 과정을 통해 보다 정확한 풍속, 온도, 복사온도, 습도 등의 외부환경에 대한 물리적 환경요소의 분포를 계산한다.

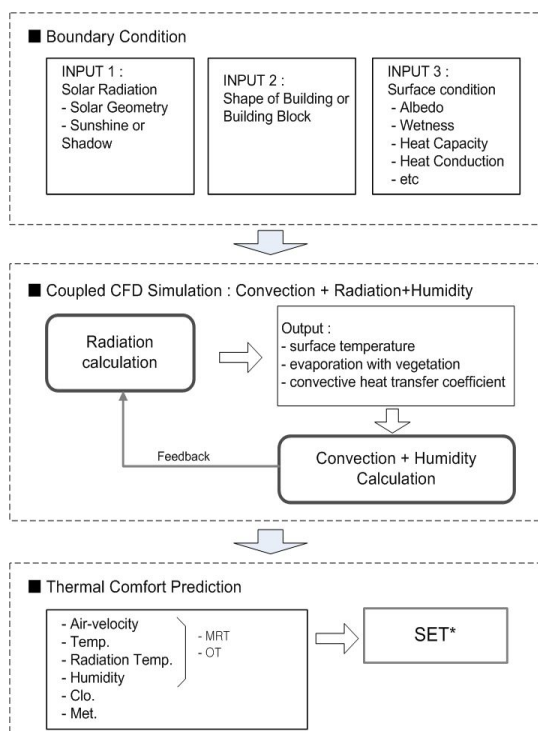


그림 1. 대류·복사 연성시물레이션의 개요

2.3 복사열 교환의 계산

지표면 및 건물 외표면의 표면온도는 시물레이션을 통해 외부 온열환경을 평가하는데 매우 중요한 물리량이다. 따라서 그림 2의 지표면이나 건물 외표면의 열, 습기 이동 해석은 외부 온열환경 해석에 있어서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

본 논문에서 제안되는 옥외온열환경 해석기법 상에서의 복사열 교환의 계산은 해석영역의 각 해석격자에 대해 식(1)로 정의되는 열수지식을 통해 표면온도 T_s 를 정의하는 과정이다.

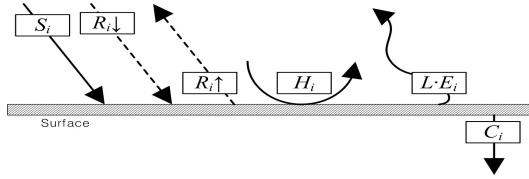


그림 3. 지표면/건물표면에서의 열수지 모델

$$S_i + R_i + H_i + C_i + L \cdot E_i = 0 \quad (1)$$

여기서,

S_i : 면요소 i 에 대한 일사 취득 에너지[W]

R_i : 전체 장파복사 취득에너지[W]

H_i : 대류열전달량 [W]

C_i : 건물 및 지중에 대한 전열량 [W/m^2]

LE_i : 식물의 증발산에 의한 잠열방산량[W]

복사장의 계산을 위해서는 각각의 표면간의 열이동을 정확하게 예측해야 하는데 이를 위해서는 각 복사면의 상호 위치관계를 정하는 형태계수의 도출이 중요하다. 본 해석기법에서는 Monte Carlo method를 이용한 형태계수 산출법을 이용했다¹⁾. Monte Carlo method를 통해 공간 내를 구성하는 각 면요소 i 로부터 방출되는 전체 에너지(N_{total}) 중에서 면요소 j 에 도달하는 에너지의 비율을 N_{ij} 라 하면, 식(2)의 형태계수 F_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_{ij} = N_{ij} / N_{total} \quad (2)$$

또한, 각 면요소에서 방출된 에너지는 방출면을 제외한 임의의 면에서 반사되어 천공을 포함한 면 요소에 흡수된다. 이때 천공 방향으로 반사된 태양광은 우주 공간에 방출되는 것으로 간주하고, 면 요소 i 에서 방출하여 면요소 j 에 흡수되는 일사 단파에너지 S_{Aij} 는 Gebhart의 흡수 계수 B_{ij} 를 이용해 다음 식(3)과 같이 계산 할 수 있다.²⁾

$$S_{Aij} = B_{ij} S_{Ri} \quad (3)$$

여기서,

S_{Ri} : 면요소 i 에서 반사되는 복사량 [W/m^2]

3. 대류·복사 연성시물레이션 기법을 활용한 외부 온열환경 해석

본 장에서는 대류·복사 연성 시물레이션 기법을 활용한 외부 온열환경 해석 예를 보여주고 있다. 검토 Case는 외부 온열환경 해석에 있어, 본 연구에서 제시하는 대류·복사 연성시물레이션 결과와 종래의 옥외공간 시물레이션의 대류계산만 실시한 경우와의 차이점을 분석한다. 아울러, 옥외공간에서의 녹지의 비율이 옥외 온열환경에 미치는 영향에 대해 검토하고자 한다.

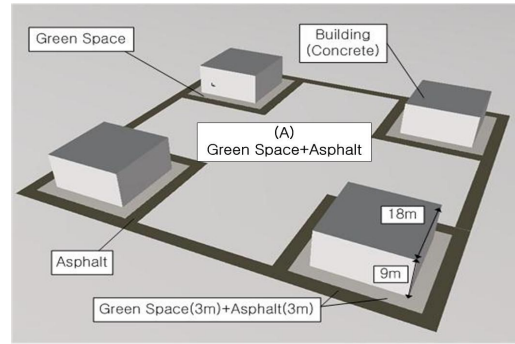


그림 3. 해석 공간

3.1 해석개요

해석 대상은 그림 3과 같이 비교적 간단한 옥외공간으로 설정하였다. 18m×18m×9m의 콘크리트 건물 4개동과 건물을 둘러싸고 있는 3m 폭의 녹지, 3m 폭의 아스팔트 도로로 구성되어 있으며, 해석 대상 중앙부(A영역)는 녹지와 아스팔트가 혼재되어 있는 공간으로 가정하였다.

Case 1은 대류해석만을 실시한 경우이고, Case 2, 3, 4, 5는 대류·복사 연성 계산을 실시한 경우이다. Case 2, 3, 4, 5는 A영역의 녹지율이 10%, 20%, 50%, 60%로 증가하는 경우에 해당한다.(표 1 참조)

3.2 시물레이션 조건

표 2에 각 시물레이션의 경계조건을 정리하였다. Case 1의 경계조건이 되는 각 지표면 마감에 따른 표면온도는 별도 연구에서 실시한 실측결과이다. Case 2, 3, 4, 5의 경계조건 값은 기존 문헌³⁾을 참고하여 입력하였으며, 또한 일사량은 모든 Case에서 동일하다.

해석영역으로의 유입풍⁴⁾은 도시지역의 풍속프로파일을 적용하였으며, 기준풍속은 10m 높이에

서 3m/s로 설정하였다. CFD계산은 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하였다. 압력보정을 위한 알고리즘은 SIMPLE을 사용하였으며, 난류모델은 standard k-e 모델을 사용하였다.

표 1. 해석 Case

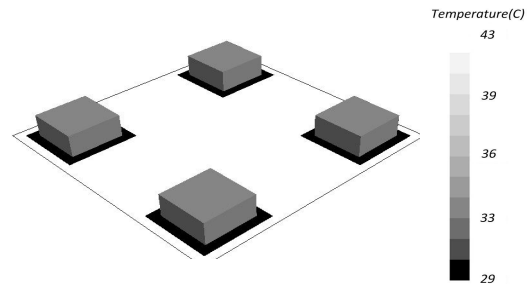
Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
대류해석	대류·복사 연성해석			
녹지	녹지	녹지	녹지	녹지
10%	10%	20%	50%	60%

표 2. Case 경계조건

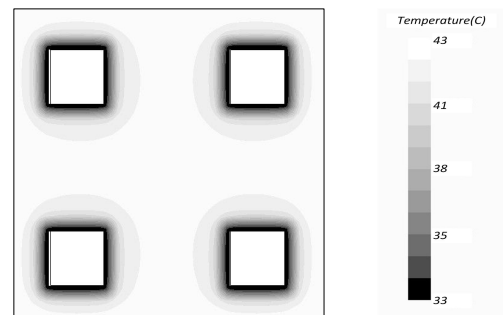
	Case 1	Case 2, 3, 4, 5	
	only CFD	CFD coupled with radiation calculation	
	surface temp. [°C]	albedo[-]	solar radiation [W/m ²]
Building (concrete)	33.5	0.25	750
Street (asphalt)	43.4	0.10	
Green space	29.7	0.35	

3.3 해석결과

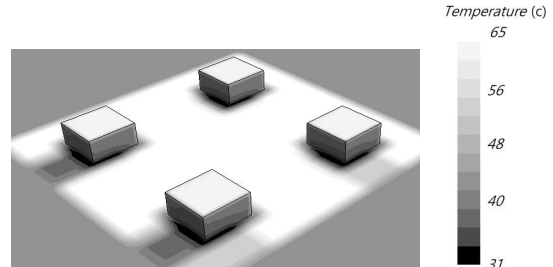
그림 4는 각 면사이의 복사열 교환의 계산유무에 따른 표면온도의 차이를 보여주는 해석결과이다. 그림 4의 (a), (b)는 복사열 교환을 고려하지 않은 대류계산만을 실시한 경우이며, (c), (d)는 복사열 교환을 고려한 계산결과이다. 그림 4의 (c), (d)에서는 (a), (b)와 달리 건물의 음영과 태양의 방위에 따른 태양복사의 영향이 반영되어 동일한 표면마감에서 대해서도 다양한 온도분포가 나타남을 확인할 수 있다. 그 차이는 특히 그림 4의 (b)와 (d)와 같이 1.5m높이의 기온분포에서도 나타난다. 그림 4에서 복사열 교환을 고려한 (c), (d)의 결과가 실제 옥외환경에서의 온열환경양상과 유사하게 나타난 것으로, 옥외 온열환경 해석에 있어서 일사의 영향, 즉, 복사열 교환을 계산하는 것이 얼마나 중요한지를 나타내는 결과이다. 그림 5는 복사열 교환 계산을 통해 산출된



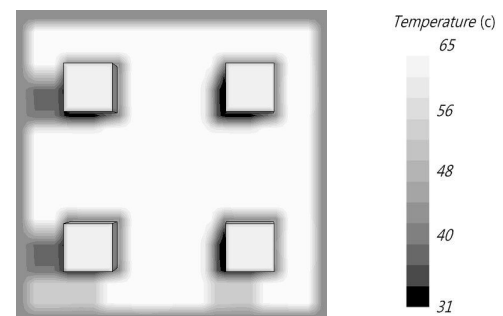
(a) Case 1 - 표면온도(대류계산만 실시)



(b) Case 1 - 기온분포 (높이1.5m, 대류계산만실시)

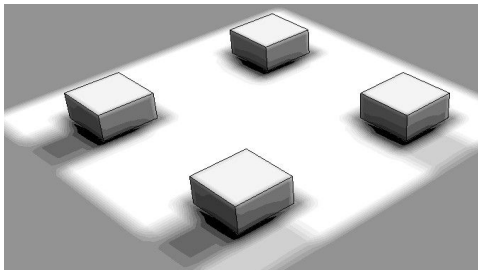


(c) case 2 - 표면온도(대류·복사 연성계산)

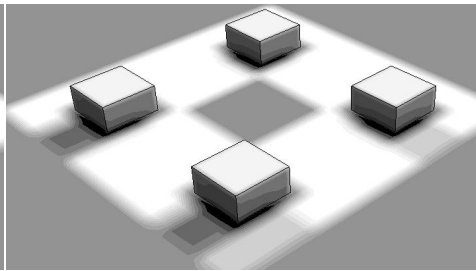


(d) case 2 - 기온분포 (높이1.5m, 대류·복사 연성계산)

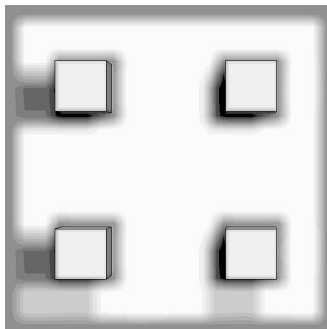
그림 4. 복사열 교환 고려 유무에 따른 표면온도 및 온도분포



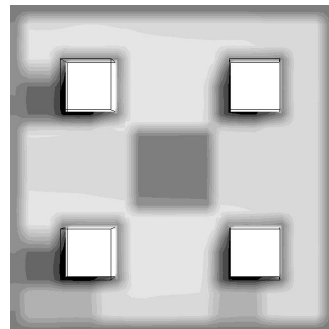
(a) Case 2 - 표면온도



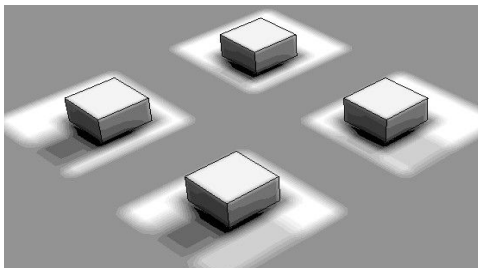
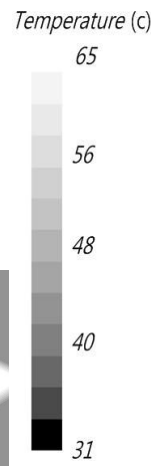
(c) Case 3 - 표면온도



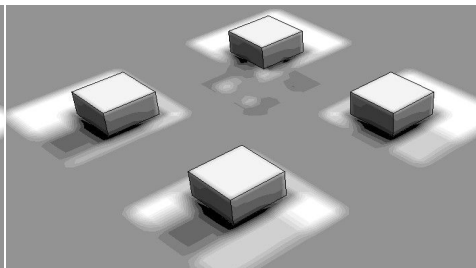
(b) Case 2 - 기온분포(높이1.5m)



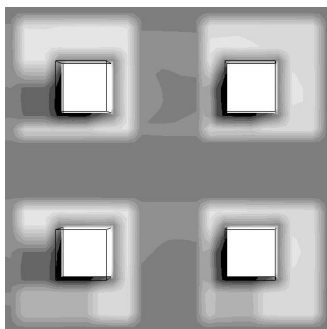
(d) Case 3 - 기온분포(높이1.5m)



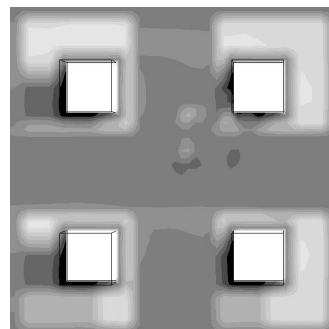
(e) Case 4 - 표면온도



(g) Case 5 - 표면온도



(f) Case 4 - 기온분포(높이1.5m)



(h) Case 5 - 기온분포(높이1.5m)

그림 5. 단지내 녹지율 변화와 표면온도 및 공기온도(1.5m)에 미치는 영향

결과로, 녹지의 증가에 따른 표면온도 차이와 1.5m높이에서의 공기온도분포 차이를 나타낸다.

대류·복사 연성계산을 실행한 그림 5에서는 각 격자의 먼 요소에서 알베도/형태계수/흡수계수 등의 설정치에 따라 장/단파복사량 등이 계산되어, 일사의 의한 영향이 표면온도에 반영된 것이다. 그림 5에서 녹지면이 10%인 Case 2에 비해, 녹지율을 20%, 50%, 60%로 증가한 경우, 지표면 평균온도를 각각 1℃, 4℃, 5℃정도 낮추는 결과를 나타내었다. 아울러 지표면으로부터 1.5m 높이의 평균 공기온도는 녹지율이 20%, 50%, 60%로 증가함에 따라 각각 3.7℃, 4.5℃, 4.7℃의 온도 저하 결과를 나타냈다.

4. 결론

옥외공간은 실내와는 달리 복사환경이 온열환경에 미치는 영향이 크기 때문에, 대류해석이 주가되는 종래의 CFD계산을 옥외공간에 적용할 경우 온열환경에 대한 정밀한 예측/평가에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 태양복사의 영향이 강한 옥외공간에서의 복사환경이 예측 가능한 틀을 작성하여, 이를 기존의 CFD를 기초로 한 대류시물레이션과 연성한 옥외온열환경 평가수법을 개발하였다.

본 논문에서는 대류·복사 연성시물레이션에 개요를 설명하고, Case Study를 통해 종래의 대류계산을 통한 온도장 해석결과와 본 논문에서 제시하고 있는 대류·복사 연성시물레이션을 통해 해석된 온도장 결과의 비교를 통해 시물레이션을 통해 외부 온열환경을 실제와 근접하게 예측하기 위해서는 복사계산이 매우 중요함을 확인할 수 있었다. 아울러 대류·복사 연성시물레이션을 통해 옥외공간에서 지표면 녹지율의 증가가 지표면 및 공기온도 분포에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

추후에는 본 연구를 통해 개발된 대류·복사 연성시물레이션 틀을 실측치와의 비교검증을 통해 시물레이션의 정밀도를 향상시키고, 실제 녹지

증가에 따른 쾌적성을 평가하여 녹지공간의 최적 설계에 대하여 연구하고자 한다.

후 기

본 연구는 성균관대학교를 통한 교육과학기술부/한국과학재단 세계적 연구중심대학 연구과제(R33-10027) 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Kazuya et al, Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation, Energy and Buildings, Vol. 36, No. 8, p.p. 771-779, 2004
2. 吉田 伸治, 連成數値解析による屋外溫熱環境の評價と最適設計法に関する研究, 博士論文, 東京大學大學院博, 2000
3. Rayner, J, Dynamic climatology : basis in mathematics and physics. Wiley-Blackwell, 2000
4. Yogesh Jaluria, Computational Heat Transfer (Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences), 2nd Ed, Taylor & Francis, p. 364, 2002
5. 홍원화 외,, 토지이용상태에 따른 도시 기온 특성과 열 환경 시물레이션, 대한건축학회 논문집, 23권 9호, 2007
6. Yoshida et al, Influence of Green Area Ratio on outdoor thermal environment with coupled simulation of convection, radiation and moisture transport, J. Archit. Plann. Environ. Eng. AIJ. No.529, 77-84, 2000
7. Mochida et al, Optimization of Tree Canopy Model for CFD Prediction of Wind Environment at Pedestrian Level, Journal of Wind Engineering, Vol. 108, pp. 561-564