도시 건축물 그림자효과에 의한 다중 반사도 변화와 도시지표면 열수지에 미치는 영향

이순환¹ · 안지숙² · 김상우² · 김해동^{3,*}

¹부산대학교 환경문제연구소, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

²국립수산물과학원, 619-705, 부산광역시 기장군 기장읍 사랑리 408-1

³계명대학교 지구환경학과, 704-701, 대구광역시 달서구 달구벌대로 2800

Multiple Albedo Variation Caused by the Shadow Effect of Urban Building and Its Impacts on the Urban Surface Heat Budget

Soon-Hwan Lee¹, Ji-Suk Ahn², Sang-Woo Kim², and Hae-Dong Kim^{3,*}

¹Institute for Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-715, Korea

³Department Global Environment, Keimyung University, Deagu 704-701, Korea

Abstract: In order to clarify the impact of variation of albedo on the atmospheric boundary layer caused by the density of building in urban areas, both satellite data analysis and numerical experiments were carried out. Utilized satellite data were multi-spectral visible data detected by the Korea Multi- Purpose Satellite -2 (KOMSAT-2), and the numerical models for the estimation of surface heat budget are Albedo Calculation Model (ACM) and Oregon State University Planetary Boundary Layer model (OSUPBL). In satellite data analysis, the estimated albedo in densely populated building area is lower than other regions by 17% at the maximum due to the shadow effect of skyscraper buildings. The surface temperature reached 43.5°C in the highly dense and tall building area and 37.4°C in the coarse density area of low buildings, respectively. However, the low albedo in densely integrated building area is not directly related to the increase of surface air temperature since the mechanical turbulence induced by the roughness of buildings is more critical in its impact than the decrease of albedo.

Keywords: albedo, planetary boundary layer, building shadow, turbulence, satellite data

요 약: 도심지 빌딩에 의한 그림자가 대기경계층에 미치는 영향을 파악하기 위하여 위성자료 분석과 수치실험을 실시하였다. 연구에 사용된 위성은 한국다목적위성(KOMSAT-2)의 가시자료이며, 수치모형은 다중반사도 계산을 위한 반사도 계산모형과 지표면 열수지를 계산하기 위한 오레건주립대학교 경계층 모형의 2가지이다. 위성자료 분석에서 고층빌딩이 밀집한 지역은 그렇지 못한 지역에 비하여 반사도가 최대 17% 낮게 산정되었다. 이는 건물의 그림자가 원인으로 작용한다. 그리고 반사도의 일변화는 태양고도에 따라 다르며, 정오에 가장 작은 값을 나타낸다. 건물 밀도가 높은 경우 지표면 온도가 43.5°C까지 상승하는데 비하여 건물 밀도가 낮은 지역의 경우 지표면 온도는 37.4°C까지 상승한다. 그러나 높은 빌딩에 따른 기계적 난류에 의하여 반사도에 의한 온도상승이 직접적으로 대기온도상승과 연결되지는 않는다.

주요어: 반사도, 대기경계층, 빌딩 그림자, 난류, 위성자료

서 론

도시지역 열섬에 따른 대기 열환경의 변화는 대기

질 악화와 전력수요의 증가 등 다양한 형태로 인간 활동에 악영향을 미친다. 따라서 최근 도시 열섬현상에 관한 발생기작과 이를 완화시키고자하는 연구가 지속적으로 이루어져 왔다(Martilli et al., 2002; Hamdi and Schayes, 2007; Han and Baik, 2008; 안지숙과 김해동, 2006; 이순환 외, 2008; Lee and

*Corresponding author: khk@kmu.ac.kr

Tel: 82-53-580-5749

Fax: 82-53-580-5749

Kim, 2008). 이러한 연구결과 도시열섬은 인간 활동에 의한 인공열, 다양한 형태의 지표환경과 종관적인 기상상태의 결합에 의하여 발생하며, 지표면 에너지 수지 불균형에 의하여 발생한다고 제시하고 있다. 그리고 지표면 열수지에 관련된 각종 기상변수의 정확한 연구 필요성을 제기하였다.

도시열섬을 정확히 파악하기 위해서는 도시 내 큰 면적을 차지하는 콘크리트와 아스팔트 등 도시표면의 물리적 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 특히 지표면의 열수지에 직접적으로 영향을 미치는 반사도는 주간 도심 열섬강도를 결정하는 주요한 인자이다. 반사도는 태양복사에 의해 입사되는 에너지에 대한 반사되는 에너지의 비로, 지표면의 수분상태나 지형 기복에 따라 매우 복잡하게 나타난다. Grant et al. (2000)은 호주의 목초지를 대상으로 반사도를 정밀하게 측정하여, 태양의 고도에 따라 반사도가 달라지는 것을 밝혔으며, 진경옥 외(2009)는 위성반사도 측정에 사용되는 가시광선 및 적외선 광학센서의 보정에 지표면 수분상태가 주요한 요소임을 제시하였다.

일반적으로 도시지역은 다양한 기하학적인 구조를 가진 건물들이 복잡하게 분포하기 때문에 태양 복사 에너지의 반사도를 정확히 추정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 현재 대부분 기상학적인 연구에서는 단순한 회귀식에 위성 원격탐사 자료를 대입하여 추정된 반사도 자료를 이용한다. Yucel(2006)은 Moderate Resolution Imaging Spectoradiometer(MODIS)에서 추출된 반사도 자료를 중규모 모형인 MM5(The 5th generation Mesosocale Model)에 적용하여 나지와 초지 등 지표면 상태가 서로 다른 미국 중부지역의 기상장변화를 살펴보았다. 그리고 Tran et al.(2006)은 서울을 포함한 아시아 18개 대도시의 열섬을 모의하는데 MODIS 자료를 이용하였다. 이들은 고해상도 위성자료를 통하여 제시된 대도시 식생 분포와 지표면 온도를 분석하면서, 도시열섬의 변동성을 연구하기 위해서는 도시 지표면 열수지와 관련 기상요소의 정확한 추정이 우선적으로 선행되어야 한다고 제시하였다. 이순환 외(2007)는 위성자료에서 산출된 기상요소를 중규모 수치모델링에 적용하고, 한반도지역 해륙풍의 예측 정확도가 위성자료 동화에 의하여 향상됨을 보였다. 그리고 이종범 외(2009)는 MODIS에서 생성된 자료를 광화학모형에 적용하여 대기질과 대기오염 물질의 이동 예측 등 환경적인 요인에도 적용하였다.

그러나 이러한 연구는 도시지역의 건물 등 복잡한 지면기복에 의한 기하학적인 다중반사를 고려하지 않은 상태에서 도시의 반사도를 적용하였다. 실제 Grant et al.(2000)은 반사도의 일변화 관측을 통하여 1일 동안 최대 2배 정도 변화하고, 건축물이 복잡한 도심지에서는 반사도의 일변화가 더욱 크게 나타날 수 있을 것이라고 제시하였다. 따라서 본 연구는 다중 반사도 계산 모형을 이용하여 대구광역시의 고층 지역과 단층지역의 반사도를 추정하여 도심지 건물에 따른 반사도의 일변화를 정량적으로 평가하였다. 그리고 지표면 열수지 모형을 이용하여 건물의 요철에 따른 반사도 변화가 지표면 열수지에 미치는 영향을 평가하였다.

연구 자료 및 방법

본 연구는 다목적 실용위성(Korea Multi Purpose Satellite, KOMPSAT) 2호로부터 수신된 대구광역시 지역의 분광자료를 이용하여 반사도와 그림자의 분포를 산정하였다. KOMPSAT-2호는 2006년 7월 28일에 발사된 한국 다목적 인공위성으로 다중분광 카메라(Multispectral camera)를 탑재하고 있기 때문에 대규모 재난감시, 지리정보시스템 정보제작, 지도제작, 자원탐사에 주로 활용된다. 그리고 KOMSAT-2에는 1 m 해상도의 전색 채널 1개와 4 m 해상도의 분광채널 4개 등 총 5개의 센서가 탑재되어 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 KOMSAT-2의 가시 위성영상이다. 본 연구에 사용한 위성영상은 2007년 9월 27일 오전 11시 25분에 촬영한 대구광역시의 영상으로 기하학적인 왜곡을 제거하기 위하여 수치지도상의 기준점(Ground Control point)을 중심으로 기하보정을 실시하였다. 먼저 KOMSAT-2의 센서 중 각각 파장이 0.52-0.60, 0.63-0.69, 0.76-0.90 μm 인 분광밴드 2, 3, 4의 수치값을 이용하여 반사도를 계산하였으며, 아래식을 이용하여 반사도를 추정하였다(Sengoku et al., 1995).

$$A_p = \frac{[1 + 0.0167 \sin 2\pi(J - 93.5)/365]^2 \pi \Sigma R_i}{378.84 \sin \alpha} \quad (1)$$

여기서, A_p 는 위성반사도, J 는 줄리안데이, α 는 태양고도이며, R 는 각 밴드의 절대 방사량이다.

그림자의 산출은 임계값(Thresholding)법을 사용하였다. 임계값법은 영상의 화소값들을 이용하여 히스

Fig. 1. Visible image detected by KOMSAT-2 at Daegu metropolitan in 28 July 2006. Rectangular indicated the target area for specific analysis.

토그램을 생성한 후 히스토그램의 밝기값에 임계값을 적용하여 그림자를 탐지한다. 그림자의 밝기는 대체로 낮은 값을 가지고 있기 때문에 히스토그램에서 낮은 밝기값을 가지는 영역을 설정해서 그림자 영역을 산출했다.

Fig. 2는 Fig. 1A 지역의 반사도와 그림자영역을 나타낸 것이다. 반사도 영상에서 4m급 고해상도 분광센서의 특성으로 인하여 지역적인 토지이용 특성이 잘 나타난다. 대구광역시를 남북으로 가르는 신천의 저 반사도가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 특히 고층건물군에 의하여 형성된 그림자 영역에서는 수면과 유사하게 매우 낮은 반사도를 보인다. 아파트와 고층빌딩 지역 등 그늘 면적률이 높은 지역은 반사도가 30-35%로 나타났다. 저층건물 지역에서는 45-50%로 나타났다. 반면 고층 건물의 옥상이나 운동경기장의 경우 55-65%의 높은 반사도가 나타났다. 이러한 차이는 인공구조물의 포장재질이나 색에 의한 것으로 판단된다.

이러한 지역적 특색을 더욱 자세히 파악하기 위하여 각각 고층과 저층건물이 밀집한 A(달서구 이곡동), B(서구 평리동) 영역의 가시광선, 반사도와 그림

자 밀도를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 높은 건물이 밀집한 A지역의 위성산출 반사도 중 0.3에서 0.4 영역의 고반사역은 전체면적의 58.9%로 낮은 건물역인 B지역의 86.9% 보다 크게 낮다. 그러나 저반사역인 0.2에서 0.3 영역은 A지역이 34%로 B지역 8.2% 보다 낮게 나타난다.

또한 A, B 영역 모두 저반사도가 일정한 선으로 나타나는데 이것은 도로주변을 따라 위치하는 건물에 의한 것으로 판단된다. 이러한 반사도 특징은 그림자의 분포와 매우 잘 일치한다. 그러므로 위성자료로부터 산출된 도시역의 반사도는 건물에 의해 영향을 받고, 특히 저건폐율과 고용적율로 특징지워지는 고층건물은 넓은 면적의 그늘을 형성하고, 이러한 그늘은 태양복사를 차단하여 반사도를 감소시키는 역할을 한다.

수치모델 및 실험 설계

반사도 계산 모형

도심지 건축물에 의한 반사도가 지표면 열수지에 미치는 영향을 파악하기 위하여 먼저 건물의 기하학

Fig. 2. Distribution of (a) shadow area and (b) albedo estimated by satellite image at A region shown in Fig. 1.

적인 구조를 고려한 3차원 다중 반사도의 일변화를 산정하여야 한다. 본 연구에서는 3차원 복합 반사도를 계산하기 위하여 일본 큐슈대학에서 개발한 다중 반사도 계산 모형인 Albedo Calculation Model (ACM)을 사용하였다(Chimklai et al., 2004). 이 모형은 빌딩의 높이 분포, 태양의 위치, 다중 반사, 그림자 효과 등을 고려하여 단위면적에 대한 반사도를 계산한다. ACM에서 전체반구를 9×10^4 의 조각으로 나누고, 이들 각조각과 모델의 격자를 연결하는 벡터를 산정하여 지표면에 위치하는 각 격자 중심에서의 천공율과 그림자 면적을 계산한다. 그리고 현재 이 모형은 웹베이스로 배포되고 있으며, 다양한 공학적

인 관측과 이론을 통하여 모델의 효용성이 검증되었다(Fortuniak, 2008; Hagishima and Tanimoto, 2005).

대기경계층모형

ACM에서 계산된 건물에 의한 다중 반사와 그림자에 의한 복사에너지 변화가 대기 경계층에 미치는 영향을 파악하기 위하여 오레곤 주립대학교에서 개발한 1차원 지표-대기 결합 경계층 모형(Oregon State University one dimension Planetary Boundary Layer model, 이하 OSUPBL)을 사용하였다(Ek and Mahrt, 1991). 이 모형은 지표-대기 상호간의 물질 및 에너지 교환에 관한 연구에 적용되고 있으며, 자유 대기

Fig. 3. (a) Satellite image for visible band, (b) albedo and (c) shadow for densely populated building area (C region in Fig. 1).

의 역학과정 예측, 경계층 난류 혼합, 대기 복사전달, 지표면 열 및 수분수지, 지중열 전달 등의 과정을 포함한다. 현재 이 모형은 차세대 대기 역학 중규모 모형인 WRF(Weather and Research Forecasting)의 지표면 과정 모형으로 채택되어 다양한 경계층내 기류 및 열수지 해석연구에 적용되고 있다(이순환 외, 2008).

수치실험 설계

도심지의 건물 구조에 따른 다중 반사와 그림자가 지표면의 반사도 변화를 유도하는 것을 위성영상으로 확인하였으며 이들 변화가 대기 경계층에 미치는 영

향을 파악하기 위하여 수치실험을 실시하였다. 먼저 서로 다른 건물 구조에 대한 반사도 변화를 반사도 계산 모형인 ACM을 통하여 살펴보았다. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 도심 건축물군의 구조를 나타낸 것이다. ACM은 다양한 형태의 건축물과 도로의 구조를 적용할 수 있으나, 본 연구에서는 단위면적에 동일한 구조의 빌딩이 연속적으로 위치하고 있는 것을 산정하였다. 건물의 높이는 단위면적당 도로넓이와 건물의 높이의 비인 $WHR(=W/H_b)$ 로 나타낸다. 즉 이 값이 작을수록 높은 건물을 의미한다. 본 연구에서는 서로 다른 5가지 WHR 값을 설정하였는데 그 값은 각각 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0이다. 그리고 높

Fig. 4. Same as Fig. 3 except for sparsely populated building area (B area shown in Fig. 1).

이를 제외한 다른 요소는 동일하게 산정하였다. 빌딩의 면적은 두 경우 모두 일정한 40%로 설정하였다. 일반적으로 빌딩의 지붕과 벽면은 반사율이 높은 건축자재를 사용하기 때문에 이들의 반사율은 각각 0.4로 하고, 지면은 0.2로 설정하였다. 복사조건은 위성 측정시간인 2007년 9월 27일로 하고, 대구광역시의 태양 고도에 따른 반사도 변화를 계산하였다.

OSUPBL은 다양한 형태의 지면 상태를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 주로 도심지내의 다양한 건물들

에 대한 반사도 특성 분석이 주요한 목적이기 때문에 지표면 상태를 아스팔트 특성을 가진 나지로 설정하였다. 따라서 식생캐노피 층과 대기의 열적 교환은 상정하지 않았다. 그리고 식물의 뿌리에서의 흡수, 잎과 줄기에서의 증산, 식생에 의한 바람의 차단, 식생 캐노피에 의한 지면 직달일사의 차단 등도 없다고 가정하였다. 단지 도시표면과 대기의 열교환 환경만을 평가하였다.

대기 경계층변화에 미치는 영향을 분석하기 위한

Fig. 5. Schematic diagram of building distribution unit area in this study.

실험에서는 ACM에서 계산된 반사도의 일변화 값을 OSUPBL에 계산요소로 삽입을 하였다. 본 연구에서 WHR 값이 0.25인 높은 건물인 경우(case BU-HIGH)와 WHR 값이 2.0인 낮은 건물군을 상정한 경우(case BU-LOW)의 두 가지 수치실험을 실시하였다. 즉 건물의 높이는 case HB가 case LB 보다 4배 높게 하여, 이들 반사도 특성이 대기경계층에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 그리고 OSUPBL 내의 빌딩 모수화는 모형내의 거칠기 길이를 조절하여 설정하였다. 빌딩구조와 반사도 특성은 Table 1에 제시하였다. 도심지내 빌딩은 반사도 변화 뿐 아니라 역학적인 난류발생을 야기한다. 그러므로 반사도 변화와 동역학적인 특성을 구별하기 위하여, 낮은 빌딩군의 동역학적인 요소로 구성되어 있으면서, 높은 건물군의 반사도 특성을 가진 대조실험(case RoSEN)을 추가로 실시하였다.

모형은 전체 52개 층으로 이루어져 있으며, 최고 높이를 고도 6 km로 하였다. 그리고 지표면 가까운 부분의 열적인 변화가 급격하기 때문에 이를 정확히 분석하기 위하여 지표면에 가까울수록 연직격자를 조밀하게 설정하였다. 이때 최하층은 5 m로 두었으며, 지중은 2개 층으로 설정하였다. 수치실험의 초기 기상조건은 반사도 계산실험과 마찬가지로 위성관측이

이루어진 2007년 9월 27일에 포항 연직 관측 자료를 사용하였고, 수치적분은 총 96시간을 실시하였으며, 분석에는 초기치의 오차와 대기모형의 spin up 등을 고려하여 24시간 이후의 값을 이용하였다.

결 과

반사도의 일변화

Fig. 6은 ACM에서 계산된 5가지 지표면 건물구조에 따른 반사도의 일변화를 나타낸 것이다. 건물의 구조와 상관없이 수치모형에서 계산된 반사도는 0.3 미만으로 위성에서 관측한 반사도에 비하여 작은 값을 나타낸다. 이는 수치모형에 적용된 이상화된 건물 구조와 실제 복잡한 지형, 도로의 분포, 건축 구조의 차이에 의한 것이다. 또한 수치실험의 경우 매우 정교한 건물 구조가 반사도 계산에 반영되었으나, 위성 반사도의 경우, 위성해상도에 따라 일정지역의 통합된 반사도 값이 표출되기 때문에 수치실험과 관측의 차이가 발생한 것으로 사료된다. 그러나 본 연구는 건물의 구조가 다른 두 지역의 반사도 차이와 이들 차이가 대기에 미치는 영향에 중점을 두기 때문에 위성자료 보다 약간 낮게 모의된 반사도는 본 연구에서 크게 문제가 되지 않으리라 판단된다.

먼저 전체적인 경향성을 보면, 건물 높이와 관계없이 태양의 고도가 낮은 오전과 오후의 반사도가 높고, 한낮에 가장 낮은 반사도를 나타낸다. 태양고도가 높아질수록 지면과 빌딩면의 반사율이 감소한다. 이러한 반사도 경향성은 이전 연구에서 나타난 관측적인 자료 등과도 잘 일치한다(Grant et al., 2000). 그러나 이러한 반사도 일변화 경향성의 일치에도 불구하고, 정량적으로 건물의 구조에 따른 반사도의 차이가 뚜렷이 나타난다.

태양고도가 낮은 이른 아침과 늦은 오후의 경우,

Table 1. Design of numerical experiments for the estimation of surface energy budget

Factors	Case BU-HIGH	Case BU-LOW	Case RoSEN
A. Road width to building average height (WHR)	0.25	2	←
B. Ground coverage percentage by building (%)	40	←	←
C. Reflectance of roof (dimensionless)	0.4	←	←
D. Reflectance of road or ground (dimensionless)	0.2	←	←
E. Reflectance of wall (dimensionless)	0.4	←	←
F. Direct solar radiation fraction (dimensionless)	1	←	←
G. Roughness length in OSUID	2.5	0.1	←
H. TotalAlbedo	ACM calculation with WHR 0.25	ACM calculation with WHR 2	same as case BU-HIGH

Fig. 6. Diurnal variation of estimated albedo with various WHR.

빌딩 고도에 따른 반사율의 차이가 그리 크지 않다. 그러나 태양고도가 높은 정오에는 빌딩고도에 따른 반사율의 차이가 크게 나타난다. WHR값이 2.0인 낮은 건물의 경우 12시의 반사율이 0.256인데 비해, WHR 값이 0.25인 경우의 반사율이 0.211이다. 즉 건물의 높이가 4배 정도 차이가 날 때 반사율은 17% 정도 차이가 발생한다. 이러한 차이는 Fig. 3과 Fig. 4에서 관측된 바와 같이 그림자에 의한 반사율 감소에 따른 것이라고 판단된다. 특히 벽면반사의 관점에서 실제 빌딩의 벽면과 옥상은 유리 등 반사율이 높은 재질로 이루어지기 때문에 빌딩의 높이가 증가함에 따라 반사율이 높게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 실제 건물높이가 증가함에 따라 그림자의 면적이 증가하고 이것은 전체 반사율의 감소로 나타난다.

그리고 빌딩 등 구조물의 높이가 낮을 경우 반사도의 일변화가 매우 작게 나타나지만, 구조물의 고도가 높을 경우 반사도의 일변화가 크게 나타나는 경향이 있다. 이는 빌딩 구조물에 의한 그림자 면적의 일변화가 크기 때문으로 판단된다. 따라서 고층빌딩 등이 위치하는 국지적인 지역의 반사도는 반사율의 시간변화를 고려하여야 한다. 만약 수치모형을 이용한 대기경계층 실험에서 통상적으로 일정한 반사도 값을 적용한다면, 지표면에 유입되는 태양복사에너지를 과소 모의할 가능성이 있다.

건물 구조에 따른 대기 경계층의 변화

ACM에서 계산된 건물높이에 따른 반사도의 변화가 대기 경계층의 기상요소에 미치는 영향을 보기

Fig. 7. Temporal variation of surface temperature for three numerical experiments explained in Table 1.

위하여 대기경계층 모형을 이용하여 지표면 열수지에 관한 수치실험을 실시하였다. Fig. 7은 case BU-HIGH, case BU-LOW, case RoSEN에서 계산된 지표면 온도의 일변화를 나타낸 것이다. 먼저 지표면 온도를 보면, case BU-LOW의 경우, 최대 43.5도까지 상승하는 반면, case BU-HIGH는 이것보다 낮은 37.4도에 머문다. 열수지 방정식내 반사도 측면에서 보면, case BU-HIGH의 빌딩 반사도가 낮게 산정되었기 때문에 높은 지표면 온도가 예상된다. 그러나 수치실험에서는 반대로 case BU-HIGH에서 낮은 지표면 온도를 제시하였다. 이것은 반사도 변화에 의한 열변화보다 높은 건물에 다른 동역학적인 요소가 더욱 크게 작용했기 때문이다. 즉 건물 높이에 따른 역학적인 난류 생성이 더욱 활발하였기 때문에 case BU-HIGH의 지표면온도의 상승이 억제되었다.

그리고 작은 반사도를 가진 낮은 빌딩을 상정한 case RoSEN이 가장 높은 지표면 온도를 나타낸다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 낮은 반사도에 의하여 태양 복사에너지의 흡수율이 높고, 낮은 높이의 빌딩으로 구성되어 난류의 연직 확산이 작기 때문에 지표면 온도가 가장 높게 나타난다.

이러한 효과는 지상 기온에서도 영향을 미친다. Fig. 8은 세 가지 수치실험에서 계산된 고도 10m의 기온을 나타낸 것이다. 낮시간 동안의 지상부근 기온은 case BU-HIGH가 가장 높게 나타나며, case BU-LOW가 가장 낮게 나타난다. 이것은 Fig. 7에서 보여준 지상기온과 반대현상으로, 건물 높이에 따라 서로 다른 강도의 동적난류에 의한 것이다. case BU-LOW는 높은 지표면 온도에도 불구하고 낮은 열적

Fig. 8. Same as Fig. 7 except for air temperature.

연직 확산으로 인하여 case BU-HIGH보다 낮게 나타난다. 그리고 지표면 온도가 가장 높은 case RoSEN은 기온이 case BU-HIGH 보다는 낮고, case BU-LOW 보다는 높게 나타난다. 즉 비록 지표면 온도가 높다고 하더라도 연직 방향의 난류 확산이 작다면 기온의 상승을 기대할 수 없다. 반대로 연직 방향의 열적확산이 작기 때문에 더욱 높은 지표면 온도가 나타난다. 그러므로 지표면의 빌딩은 단순히 반사도 변화에 의한 열적인 요인 뿐 아니라 빌딩높이에 따른 난류 확산 등 동적인 요인을 동시에 고려하여야 한다.

이것을 정량적으로 분석하기 위하여 대기하층의 연직방향의 확산계수와 풍속을 살펴보았다. Table 2는 100 m, 500 m, 1 km의 수평 확산계수와 수평 풍속을 나타낸 것이다. 먼저 수평 확산계수는 모든 층에서 높은 빌딩을 고려한 case BU-HIGH가 높게 나타난다. 이는 높은 빌딩에 따른 거칠기 길이가 증가하여, 동역학적인 난류 생성이 용이하였기 때문으로 판단된다. 반면, 수평풍속은 case BU-HIGH에서 가장 작게 나타나는데, 이는 거칠기 길이 증가에 따른 기계적 난류 생성이 수평풍속 감소로 이어진 것이다. 그러므로 건축 구조물에 의한 거칠기 증가는 연직 방향의 열플럭스를 결정하는데 중요한 요인으로 작용한다고

Fig. 9. Diurnal variation of estimated sensible heat flux for case BU-HIGH, case BU-LOW and case RoSEN.

할 수 있다.

Fig. 9는 3가지 수치실험에서 계산된 현열플럭스의 일변화이다. 세 가지 실험 중 지표면 온도가 가장 낮게 나타난 case BU-HIGH의 현열플럭스가 가장 크다. 이것은 지표면 현열플럭스를 결정하는 요인 중의 하나인 확산계수의 차이에 의한 것이다. 앞서 Table 2에서 살펴본 바와 같이 지표면 마찰에 의한 확산계수가 크게 나타나기 때문에 상방 현열플럭스가 크게 나타난다. 그러나 지표면 온도가 가장 높은 case RoSEN의 현열플럭스는 case BU-HIGH 보다 낮게 나타난다. 두 실험의 반사율은 동일하게 설정되어 있기 때문에, 두 실험상의 유일한 차이는 거칠기 길이이다. 따라서 거칠기 길이에 따른 연직 확산계수가 서로 다른 현열플럭스의 시간변화를 유도하였다고 볼 수 있다.

이러한 현열플럭스의 차이에 따른 연직 온위분포를 살펴보기 위하여, 세 가지 실험에서 계산된 15시의 연직 온위분포를 Fig. 10에 나타내었다. 세 실험 모두 연직 혼합층의 발달이 뚜렷하게 나타났다. 지표면 온도가 가장 높지만 연직 현열플럭스가 가장 낮은 case BU-LOW의 혼합고가 가장 낮다. 이것은 혼합층

Table 2. Estimated atmospheric diffusion and wind velocity at 100 m, 500 m and 1 km for each case

Hight	Element	Case BU-High	Case BU-LOW	Case RoSEN
100 m	Diffusion (m^2/s)	6.58	5.75	6.16
	velocity (m/s)	3.69	4.89	4.85
500 m	Diffusion (m^2/s)	43.53	34.22	39.06
	velocity (m/s)	4.28	5.08	4.98
1000 m	Diffusion (m^2/s)	64.02	46.4	55.64
	velocity (m/s)	4.54	5.15	5.04

Fig. 10. Vertical distribution of calculated potential temperature for each numerical experiment.

의 고도는 단순히 지표면 온도에 의하여 결정되는 것이 아니고, 연직 확산 계수, 현열플럭스 등 다양한 요소에 의하여 복합적으로 나타난다는 것을 의미한다. 따라서 빌딩구조물이 대기 경계층 발달에 미치는 영향은 단순한 그림자 등에 의한 열적 요인 뿐 아니라 건축물 구조에 따른 동역학적인 요인을 동시에 고려하여야 한다.

결 론

도시발달에 따른 건축물의 밀도 변화가 대기 경계층에 미치는 영향을 위성자료 분석과 수치실험을 통하여 살펴보았다. 본 연구에 사용된 위성자료는 2007년 9월 27일 대구광역시 지역을 촬영한 KOMPSAT-2의 복합 영상이며, 기상요소산정을 위한 수치모형은 건물구조에 따른 다중 반사도를 산정하는 반사도 계산 모형(ACM)과 산정된 반사도에 따른 경계층 기상요소의 변화를 산출하는 대기경계층 모형(OSUPBL)의 2가지이다.

위성자료 분석에서 고반사역인 반사도 0.3에서 0.4의 값이 고층건물이 밀집한 지역과 그렇지 못한 지역에서 각각 58.9%, 86.9%로 나타났다. 특히 고층건물에 의한 그림자가 지역 반사도를 감소시키는 역할을 한다.

이러한 반사도 감소는 기하학적인 건물구조를 고려한 반사도 계산 실험에서도 동일한 경향성을 나타낸다. 전체적인 반사도의 일변화는 오전과 오후에 크게 나타나며, 정오에 가장 낮게 나타난다. 그리고 고밀도 저건폐율의 건물일수록 정오의 반사도 감소가 크

게 나타난다. 이러한 경향성은 위성자료 분석결과와 잘 일치한다.

높은 건축물에 의한 저반사도 특성이 열수지 측면의 지표면 온도 상승을 유도하지는 않는다. 이것은 높은 건축물에 의한 거칠기 길이의 증가로 인하여 연직 방향의 열적 난류확산이 증가하기 때문이다. 반대로 높은 건축물은 대기 기온의 상승을 유도한다. 즉 높은 건축물의 그림자에 따른 반사도의 감소는 열수지적으로 지표면 및 대기 온도를 상승시키는 역할을 하지만, 그에 비례하여 거칠기 길이 변화에 따른 동역학적인 효과 역시 강화되기 때문에 지표면 온도가 상대적으로 낮게 나타난다.

위성자료 분석과 수치실험에서 고밀도 고층 건물군에 따른 반사도 특성이 명확하게 나타나지만, 이들 특성이 대기경계층에 직접적으로 나타나지 않는다. 따라서 복잡한 도심지에서의 대기 경계층내 기상요소를 정확히 산정하기 위해서는 빌딩구조물 그림자에 따른 열적인 요인 뿐 아니라 구조물에 의해 야기되는 동역학적인 요인을 동시에 고려하여야 한다. 그리고 본 연구는 매우 이상적인 구조의 건축물을 대상으로 반사도를 산정하고 1차원적인 대기 경계층 수치실험을 실시하였으나, 향후 실제 지역을 대상으로 한 3차원 유체역학 실험 등을 통하여 실질적인 특성을 살펴볼 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구지원사업 (KRF-2008-313-C00937)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 안지숙, 김해동, 2006, 대구지역의 기상조건에 따른 도시열섬강도의 계절별 변화 특성. 한국환경과학회지, 15, 527-532.
- 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 2007, 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료동화의 관계분석. 한국대기환경학회지, 23, 653-665.
- 이순환, 김인수, 김해동, 2008, 도로 포장 기술 개선에 따른 대기 경계층의 열 변화에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 24, 551-561.
- 이종범, 김재철, 천태훈, 2009, 위성자료를 이용한 MM5 4차원자료동화가 광화학모델의 정확도에 미치는 영향 고찰. 한국대기환경학회지, 25, 264-274.
- 진정욱, 주광혁, 양근호, 2009, 지구관측용 가시광선 및 적

- 외선 위성센서의 검보정 연구 동향. 항공우주산업기술 동향, 7, 89-96.
- Chimklai, P., Hagishima, A., and Tanimoto, J., 2004, A computer system to support Albedo Calculation in urban areas. *Building and Environment*, 39, 1213-1221.
- Ek, M. and Mahrt, L., 1991, OSU PBL model user' guide. Oregon State University, 117 p.
- Fortuniak, K., 2008, Numerical estimation of the effective albedo of an urban canyon. *Theoretical Applied Climatology*, 91, 245-258.
- Grant, I.F., Prata, A.J., and Cechet, R.P., 2000, The impact of the diurnal variation of albedo on remote sensing of the daily mean albedo of grassland. *Journal of Applied Meteorology*, 39, 231-244.
- Hamdi, R. and Schayes, G., 2007, Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology*, 28, 973-982.
- Hagishima, A. and Tanimoto, J., 2005, Investigations of urban surface conditions for urban canopy model. *Building and Environment*, 40, 1638-1650.
- Han, J.Y. and Baik, J.J., 2008, A Theoretical and Numerical Study of Urban Heat Island-Induced Circulation and Convection. *Journal of Atmospheric Science*, 65, 1859-1877.
- Lee, S.H. and Kim, H.D., 2008, Effects of regional warming due to urbanization on daytime local circulations in a complex basin of the Daegu Metropolitan Area, Korea. *Journal of Applied Meteorology and Climate*, 47, 1427-1441.
- Martilli, A., Clappier, A., and Rotach, M.W., 2002, An urban surface exchange parameterization for meso-scale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 261-304.
- Sengoku, A., Cheng, M.K., and Schuts, B.E., 1995, Anisotropic reflection effect on satellite, Ajisai. *Journal of Geodesy*, 70, 140-145.
- Tran, H., Uchihama, D., Ochi, S., and Yasuoka, Y., 2006, Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, 34-48.
- Yucel, I., 2006, Effects of implementing MODIS land cover and albedo in MM5 at two contrasting U.S. regions. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 1043-1060.

2010년 9월 28일 접수
 2010년 11월 16일 수정원고 접수
 2010년 12월 1일 채택