

## 알베도 증가에 따른 도시 기온 하강 효과에 관한 수치연구

### Numerical Study on the Air Cooling Effect due to Increased Albedo in Urban Area

이현주 · 이귀옥<sup>1)</sup> · 이순환<sup>1)</sup> · 이화운<sup>1)\*</sup>  
국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과,  
<sup>1)</sup>부산대학교 지구환경시스템학부  
(2006년 7월 10일 접수, 2008년 7월 4일 채택)

Hyun-Ju Lee, Kwi Ok Lee<sup>1)</sup>, Soon Hwan Lee<sup>1)</sup> and Hwa Woon Lee<sup>1)\*</sup>  
*Environmental Cap System Research Department,  
National Institute of Environmental Research*  
<sup>1)</sup>*Department of Earth Environment System, Pusan National University*  
(Received 10 July 2006, accepted 4 July 2008)

#### Abstract

In order to clarify the influence of the change of urban surface albedo on mesoscale meteorological factors during the summertime, numerical experiments with various albedo of urban surface were carried out. Numerical model used in this study is PSU/NCAR MM5 V3.6.

As a result of the numerical simulation intended of Busan assumed the increase of albedo of roofs, buildings, or roads, the increase of albedo can make decrease radiation effect of surface, so that it caused drops in ambient air temperature from 0.5°C to 1°C on the average, and the downtown of Busan formed along the trough presented a substantial drop in ambient air temperature about 1.5°C.

Modeling studies suggest the increased surface albedo in urban area can reduce surface and air temperatures near the ground and affect related meteorological parameters such as winds and the depth of the mixed boundary layer.

**Key words** : MM5, Urban thermal environment, Albedo, High albedo materials

#### 1. 서 론

산업화와 도시화로 인한 인공 환경의 영향으로 지역대기환경이 급격히 변화하고 있으며, 많은 환경문제를 야기하고 있다. 도시로의 인구 집중, 지표 포장

율의 증가, 교통량 및 에너지 사용의 증가는 직·간접적으로 도시 기후에 영향을 끼쳐 도심의 기온이 주변 지역의 기온보다 높게 나타나는 도시열섬 현상(Urban Heat Island Effect)을 일으킨다(Landsberg *et al.*, 1981). 도시 지역 내 인공구조물의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트는 열의 발산 작용이 미약하며, 도시의 높은 건물은 일몰 후 지표 복사 에너지의 방출을 막아 복사냉각 효과를 감소시키는 요인으로 작

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

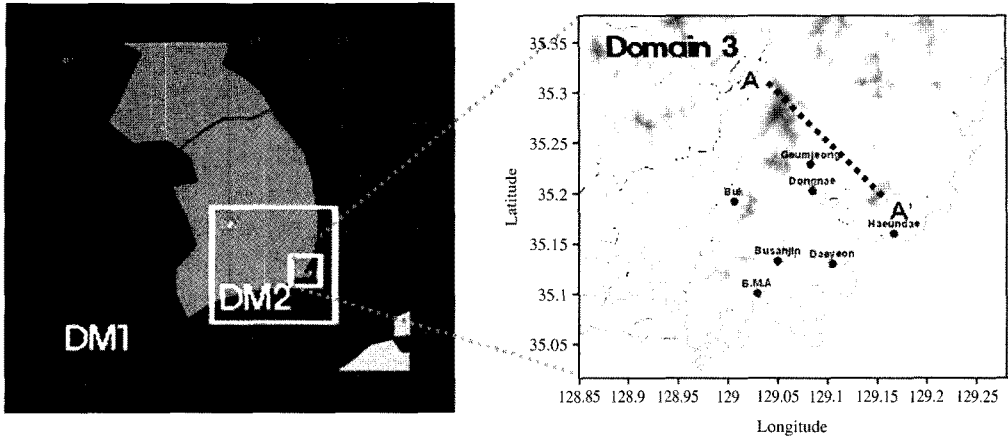


Fig. 1. Model domains used in this study and topography of finest domain.

용하여 지표의 온도를 높이는 역할을 하고 있다. 최근 도심지 내 빌딩 등 인공 구조물에 의한 인공열의 증가와 아스팔트화된 도로 등에 의한 잠열의 감소는 도심지 내 열환경을 변화시키고, 빈번하게 열대야와 열대일을 발생시키는 하나의 원인이 된다. 이러한 도시 열환경 변화는 불쾌감과 더불어 열에 의한 건강상의 피해를 가져오며, 냉방 시설에 대한 의존도를 증가시켜 결과적으로 도시 열환경의 악화를 초래하고 냉방에너지 소비를 더욱 증가시키는 악순환을 반복하게 된다.

도시화와 도시 팽창에 따른 도시 열환경에 관한 연구는 도시열섬 현상을 중심으로 Yamashita(1996), Gedzelman *et al.*(2003), 한영호 등(1993), 윤일희 등(1994)에 의해 기온 관측에 의한 열섬의 존재에 관한 연구, 열섬의 형성 원인 규명과 열섬 강도의 계절별, 월별 변화 등에 관한 연구가 진행되었을 뿐 도시 열섬의 저감방안과 열섬 완화대책에 대한 연구는 미비한 실정이다.

건물의 옥상은 직사광선을 바로 접하기 때문에 한 여름에는 70~80°C까지 올라 건물 내부의 냉방효율을 저하시키는 원인이 되고 에너지 소비량도 증가시키는 요인이 되고 있다. 그리고 여름철 아스팔트로 포장된 도로의 표면 온도는 60°C에 달하며, 이는 야간에 낮 동안 축적된 열에 의해 대가나 주변 건축물 벽면을 가열하는 장파를 많이 발생시킨다. 일반적으로 토양의 표면 온도가 40°C 정도이기 때문에 포장된 표면과 건물 옥상의 고온화는 도시열섬의 한 원

인이라고 지적되고 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 주로 옥상 녹화사업과 도시 내 녹화사업이 주를 이루고 있지만 방수대책과 건물의 강도 문제로 개수 공사를 필요로 하는 경우도 많다. Taha(1997) 등은 도시의 시가지와 포장된 도로, 인공 구조물은 알베도가 낮아 많은 태양열을 받아들이고 많은 열을 저장하는 성질이 있기 때문에 지붕 및 도로 포장, 건물의 외벽을 밝은 색으로 교체하여 알베도를 높인다면 태양열 반사를 높이고 열 흡수를 줄여 도시 기온을 저감시킬 수 있다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 부산지역을 대상으로 도시 열섬을 저감시키기 위한 Cool communities의 전략 시나리오(Taha, 1997)를 바탕으로 MM5 수치모델을 통해 알베도의 증가에 따른 도시 기온의 저감 효과와 도시 기상장의 변화를 살펴보고자 하였다.

## 2. 연구 방법 및 모델의 구성

### 2.1 대상지역 및 실험 설계

본 연구의 대상지역인 부산은 한반도의 남단에 위치하며 그림 1에서 알 수 있듯이 해안을 따라 북북동에서 남남서로 길게 주거지역이 형성된 연안 도시이다. 서쪽에는 대규모 공업단지가 형성되어 있고 주요 도로와 상업 및 거주 지역이 남동-북서 방향으로 길게 위치한 산악 사이에 위치하는 것이 특징이다.

대표적인 대도시인 부산의 도시지표 알베도 변화

에 의해 도시기온이 어떻게 변화되고 정량적으로 얼마만큼의 도시열섬 완화 효과가 나타나는지 살펴보기 위해 토지이용자료는 중요하다. 본 연구에서 사용된 토지이용자료는 United State Geological Survey (USGS)에서 제공하는 24개의 등급별 지표면 토지이용자료를 적용하였다. 각 지표면 특성 자료는 토지이용형태에 따라 흡수도, 알베도, 거칠기 길이, 최대수분량 그리고 단위 용적당 지표면 열적 관성 등의 물리적 성질을 고정된 수치로 가지게 된다.

수치실험은 3가지 서로 다른 도시 알베도를 적용하여 도심지 알베도의 변화가 중규모 기상장에 미치는 영향을 보았다. 즉 USGS에서 제공한 24개의 토지이용 중 도시에 해당하는 코드 1번의 알베도를 3가지 다른 값을 적용하여 실시하였다.

연구에서 사용된 도심 알베도를 Taha (1997)이 제시한 포장도로와 빌딩지붕의 기본적인 값 0.25를 기준으로 0.18과 0.40으로 하여 수치실험을 실시하였다. 본 연구에서는 알베도를 제외한 기타 물리량은 USGS에서 제시된 물리량을 그대로 적용하였다. 전체적인 수치실험 설계는 표 1에 제시하였다.

Table 1. Experiment design.

Experiment	Albedo
Case 18	0.18
Case 25	0.25
Case 40	0.40

그림 2는 연구대상일인 2002년 8월 1일 0900LST와 1200LST의 지상 일기도를 나타낸 것이다. 사례일은 확장한 북태평양 고기압의 영향으로 한반도는 대체로 맑고, 강한 일사가 나타났으며 부산에서의 일 최고기온이 30°C 이상 기록되었다. 이러한 종관패턴은 북태평양 고기압의 확장에 의한 열대일의 전형형태이다(이귀옥 등, 2006). 수치실험은 2002년 07월 31일 0900LST부터 2002년 08월 02일 0900LST까지 총 48시간으로 하며 초기 24시간은 초기조건을 포함할 수 있으므로 분석은 둘째날 24시간에 대해서 실시하였다.

### 2.2 모델의 개요 및 구성

본 연구에서 사용된 수치모의 모델은 MM5 (5th generation Meoscale Model)로써 펜실베니아 주립대학과 미국 국립 대기연구소가 공동으로 개발한 후 지속적으로 개선되어 연구 및 현업에 많이 이용되고 있는 3차원 대기 역학 모델이다. 본 모형은 지형을 따르는 기압을 기준으로 한  $\sigma$ -좌표계의 비정수(Non-hydrostatic)방정식계를 사용하며 Arakawa-Lamb B staggered 격자망으로 구성되어 있다. 기상분석과 관측 자료(중관, 비중관)의 4차원자료동화(Four-Dimensional Data Assimilation, FDDA)가 가능하며, 다중격자방법으로 여러 개의 단방향이나 양방향으로의 동지격자를 사용할 수 있으며, 미시적 물리학에 관련된 여러 방법들을 선택적으로 사용 가능한 것이 특징이

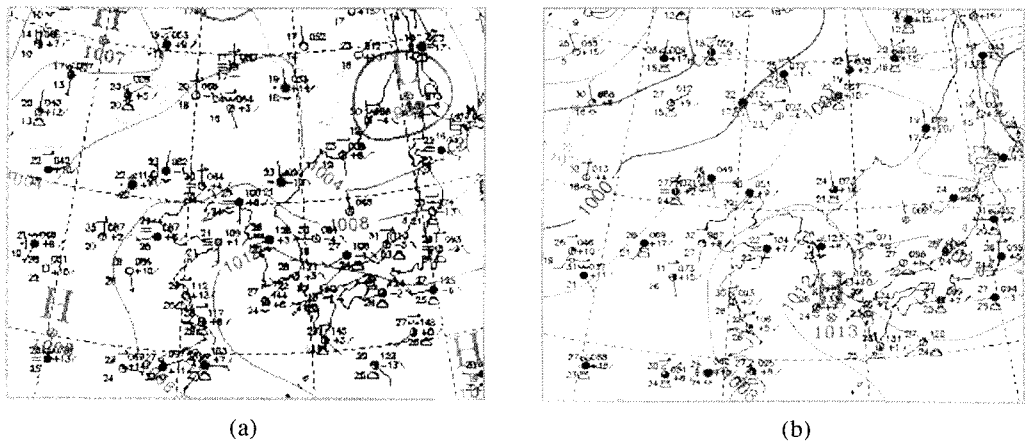


Fig. 2. Surface weather maps at (a) 0900LST and (b) 1200LST on 1 August 2002.

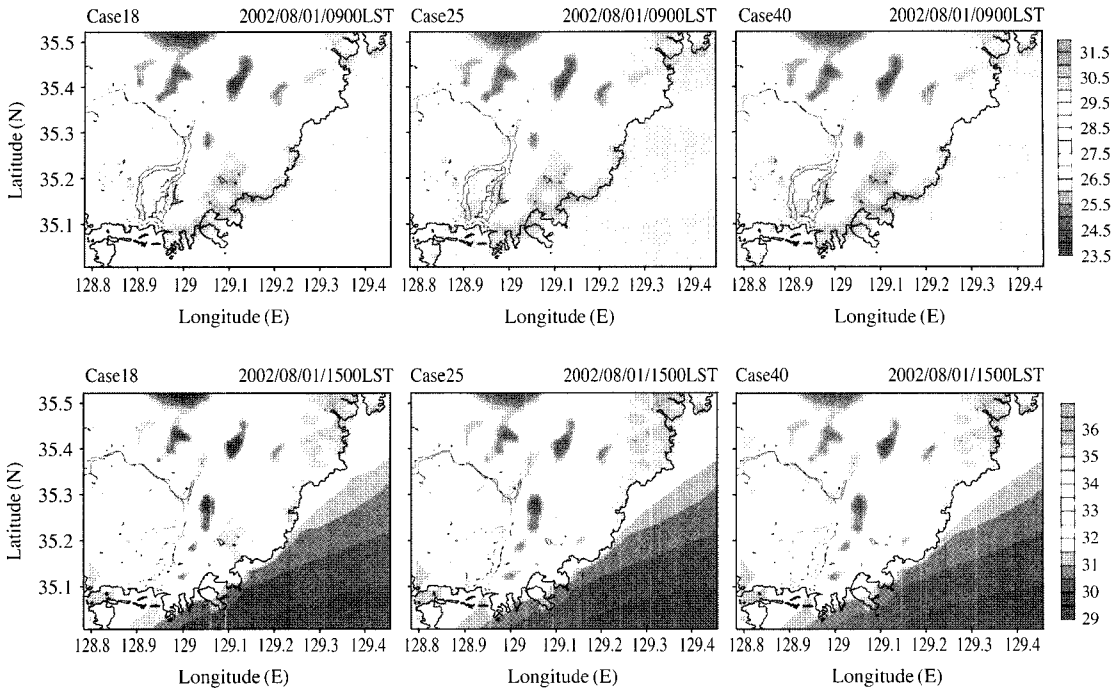


Fig. 3. The surface air temperature fields simulated by Case18, Case25 and Case40 at 0900LST and 1500LST.

다(Grell *et al.*, 1994).

본 모델에서 사용된 물리과정 중 복사과정은 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)을 사용하여 수증기, 이산화탄소, 오존에 의한 상세한 흡수 스펙트럼 효과를 고려하였으며, 대기 경계층에 대한 물리과정은 Hong and Pan (1996)에 의해 제안된 것으로 느낌열, 숨은열, 그리고 운동량에 대한 연직 플럭스를 계산하기 위해 비국지적 연직 확산을 고려하는 MRF (Medium-Range Forecast) scheme을 사용하였다. 미물리 과정은 Reisner II를 사용하였다. 지표면 물리 과정은 연직 5개층으로 결정하여 연직 확산 방정식을 통해 계산되어지는 온도를 사용하여 연직적으로 지표면 온도의 일변화를 빠르게 모의하는 열수지 방법을 선택하였다(Dudhia, 1996). 수치모의에 사용된 중규모 모델의 초기 및 경계입력 자료는 선정일의 3시간 단위 한국기상청의 중규모 분석자료인 RDAPS (Regional Data Analysis and Prediction System)를 사용하였으며, 지표 경계 입력 자료로는 3초 지형고도 자료와 USGS 30초 지형고도 자료를 이용하였다.

본 연구에서는 부산지역을 중심으로 수치모의를

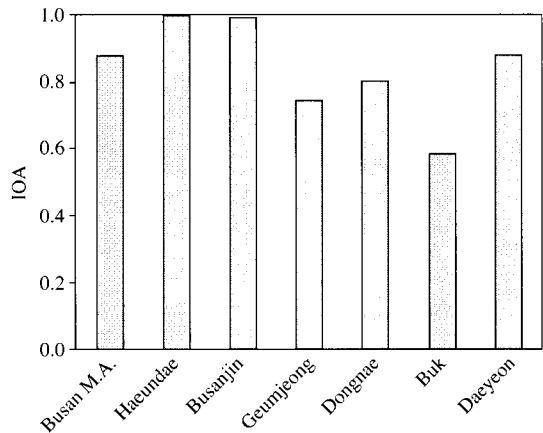


Fig. 4. The surface air temperature statistics calculated for experiment CASE25 in term of Index of Agreement.

하기 위해서 경계조건 등으로 인한 계산 오차를 줄이기 위해서 대규모 영역부터 시작하여 관심 영역까지 계산하며 계산 영역 경계에서의 되먹임(feed-back)

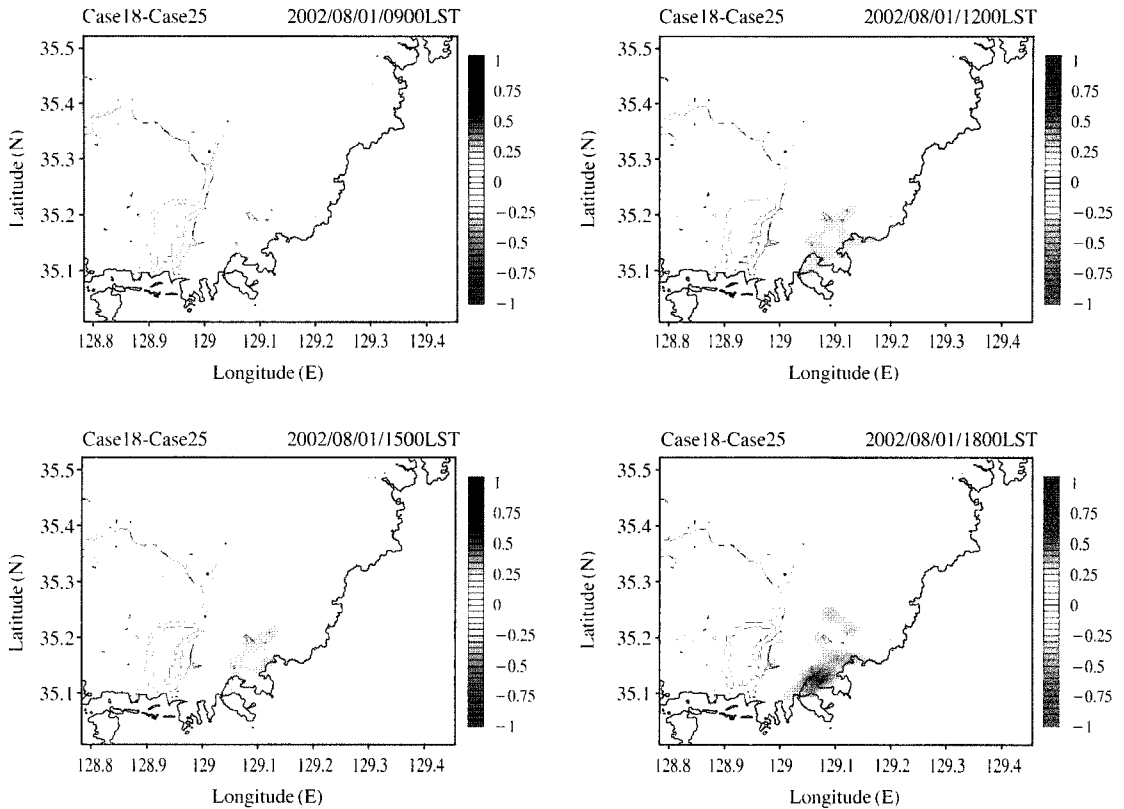


Fig. 5. Maps for surface air temperature difference between Case18 and Case25.

을 허용하는 쌍방 격자계를 이용하여, 1개의 모격자와 2개의 동지격자로 구성되며, 각각 9 km, 3 km, 1 km의 분해능으로 구성하였으며 연직층은 33개의 층으로 구성하였다.

### 3. 수치모의 결과

본 연구에서는 부산지역 도시 알베도 증가에 따른 도시 지역 온도장과 바람장의 변화와 도시열섬 완화 효과를 MM5 수치모형을 사용하여 살펴보았다. 그림 3은 각각의 0900LST와 1500LST의 수평 온도장을 나타내었다. 도시를 포함하는 내륙지역에서의 고온현상과 복잡한 지역으로 인한 기온 변동을 잘 묘사하고 있다. 그리고 시간에 관계없이 알베도가 낮은 경우 도심지 내에서 높은 온도를 나타낸다. 그림 4는 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)

에서 관측된 온도와 기준 계산이 되는 Case25의 온도를 비교한 것이다. 수치모형의 검증에는 Willmott (1981)에 의해 제안되어진 IOA(Index of Agreement)를 적용하였다. IOA의 값은 1에 가까울수록 예측값과 관측값이 일치하는 것을 나타낸다.

수치실험의 검증은 기상청이 관리하고 있는 부산 시내의 7개 지점을 대상으로 하였다. 북구를 제외한 전 지역에서 0.7 이상의 높은 정확도를 나타낸다. 북구의 경우 해륙풍과 중규모 바람장의 내륙이동이 빈번하기 때문에 정확도가 떨어지는 것으로 사료된다. 그러나 전체적으로 모델 결과값이 실제 관측값을 잘 묘사하고 있다.

알베도 증가에 따른 온도 변화를 더욱 자세히 살펴 보기 위해 그림 5와 그림 6에 Case18에 대한 Case25와 Case40의 온도 차이분포도를 나타내었다. 도시 지역의 알베도 증가로 인해 태양 에너지의 반사율을 높임으로써 도시 열환경에 직접적인 영향을 주고 있

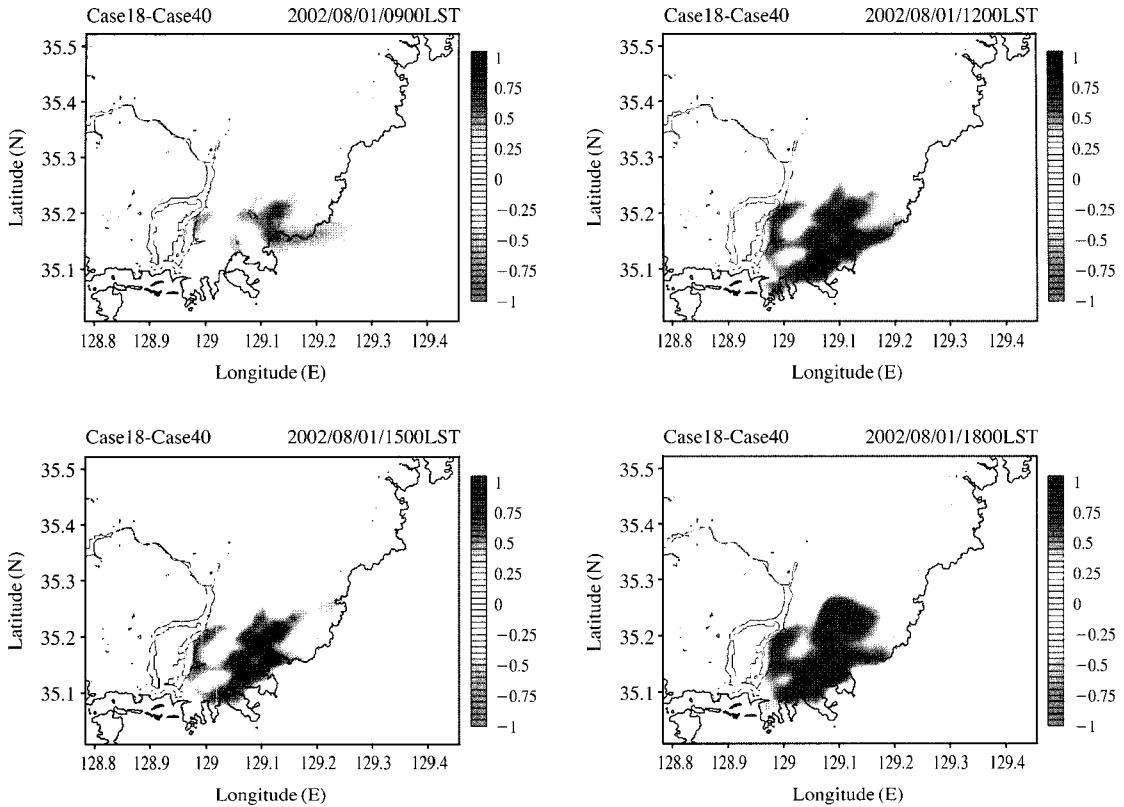


Fig. 6. Maps for surface air temperature difference between Case18 and Case40.

다는 것을 보여 주는 결과이다. 1800LST에 전체적으로 1°C 이상의 큰 기온차를 보이고 있는데, 이것은 1200LST와 1500LST는 낮 시간대로 일사가 가장 강하여 도시 냉각 효과도 가장 크게 나타날 것이라는 생각과 달리 1200LST와 1500LST의 경우 풍속 또한 강하여 알베도 증가에 의한 도시 냉각 효과를 저감시키는 것으로 나타났으며, 낮 시간대에 강한 풍속으로 인해 도시 후면에서도 바람의 이류에 의해 기온 저감 효과가 나타났다. 그림 7과 그림 8에 나타난 풍속의 차이분포도에서는 0900LST, 1200LST, 1500LST에 큰 기온차를 보인 것과는 달리 풍속의 변화는 그리 크게 나타나지 않았으나, 온도 차이분포도에서 1°C 이상의 큰 차이를 보인 1700LST와 1800LST에 부산진, 대연, 동래 등 도심지에서 0.1 m/s 정도의 풍속차를 보였다. 풍속은 열적 요인인 온도에 의해 변하긴 하지만 온도 변화가 풍속의 변화로 나타나기에는 다소 시간이 소요되며 온도 변화보다 풍속의 변화폭이

작기 때문이다.

도시지역의 알베도 증가에 따라 가장 큰 풍속의 약화가 나타났던 1700LST의 바람장(그림 9)을 살펴보면 각 Case 모두 남서계열의 종관풍이 우세한 가운데 Case40의 경우 풍속의 약화와 산에 의해 양분되어 형성되어 있는 시가지에 수렴지역이 나타났다. 특히 부산진지역은 Case18의 경우 남서풍계열의 강한 바람에 의해 지형적인 효과가 나타나지 않았지만, Case40의 경우 도시지역 알베도의 증가로 도심지와 외곽지역의 온도 경도의 감소로 인한 풍속의 약화로 지형효과가 강화됨으로써 수렴지역이 형성되어 나타났다.

부산의 내륙에 위치하고 있는 동래지점과 연안에 위치하고 있는 부산지방기상청에서의 알베도 변화에 따른 기온 및 풍속을 비교해봄으로써 바람에 의한 도시 기온 저감 효과를 살펴보았다(그림 10, 11). 도시지역의 지표 알베도의 변화에 의해 동래 지점에서

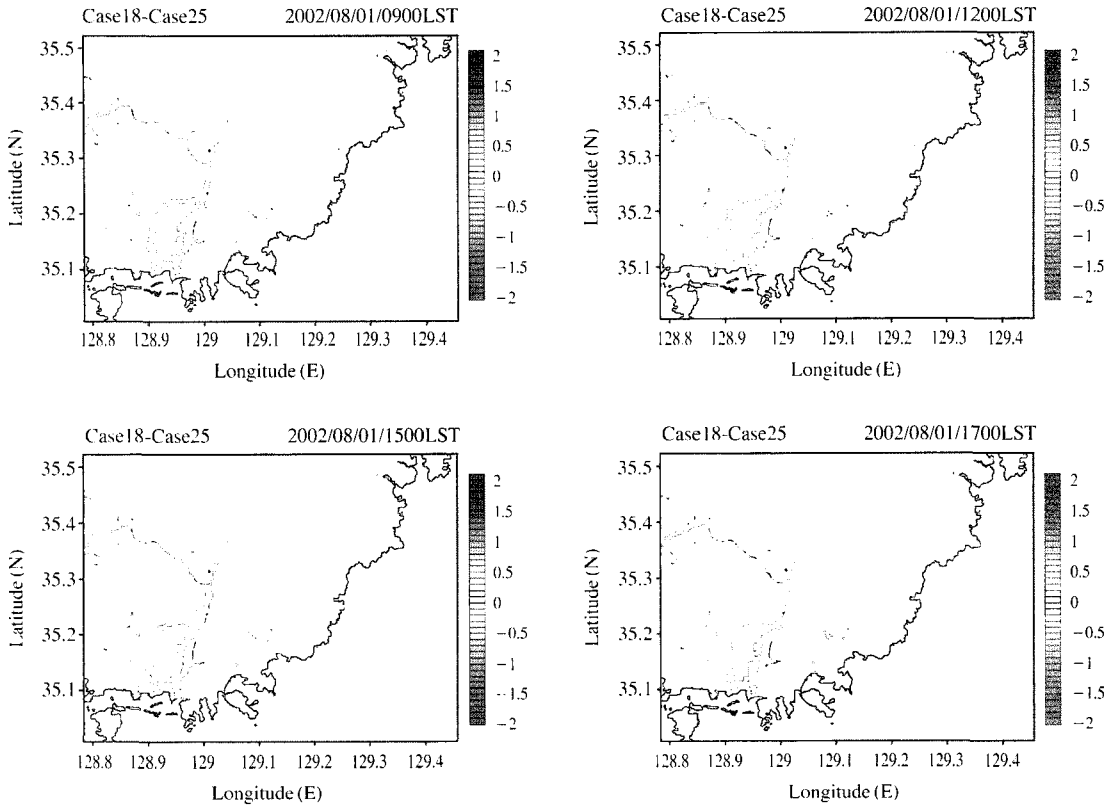


Fig. 7. Maps for surface wind speed difference between Case18 and Case25.

는 0.7°C 정도의 일 최고 기온의 저감을 가져왔으며, 이는 부산지방기상청의 0.65°C보다 큰 값이다. 동래 지점은 비교적 부산의 내륙에 위치하고 있어 도시 지표 알베도의 증가로 인한 도시 중심부의 찬 공기 효과가 이루어져 그 효과가 더해짐으로써 동래지점에서 부산지방기상청보다 더 큰 기온 저감효과를 가져온 것으로 보인다. 풍속의 변화에서는 연안에 위치하고 있는 부산지방기상청에서 해양의 영향으로 평균 풍속이 더 높게 나타났으며, 도시지역의 알베도 증가에 따른 풍속의 약화는 1600LST~1800LST 사이에 나타났으며, 풍속의 약화정도 또한 부산지방기상청에서 더 낮게 나타났다. 이는 부산지방기상청의 경우 연안에 위치하여 도시 열적인 요인보다 해풍의 영향이 더 큼으로 인해 풍속의 약화 폭이 작은 것으로 보인다.

연직 온위장의 변화는 그림 12에 나타내었다. 연직 단면은 부산 도심의 알베도 변화에 의한 도시 기온

저감 효과를 볼 수 있도록 그림 1의 A-A'과 같이 잘랐다. Case40의 경우 산사면에서 낮은 온위가 나타났으며, 이는 알베도 증가에 따라 냉각된 공기괴가 남서풍의 바람에 의해 이루어져 산사면에서 나타나는 것이다. Case18과 Case40의 연직 온위 차를 살펴보면 그리 크지는 않지만 도시지역에서 0.4K 정도의 차이를 보이고 있다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 북태평양 고기압의 영향으로 일 최고 기온이 30°C 이상이었던 2002년 08월 01일을 대상으로 도시지역의 지표알베도를 변화시켜 이에 따른 도시 기온 저감 효과와 국지 기상장의 영향을 살펴보았다.

본 연구에서 사용된 수치모형은 MM5이며 초기

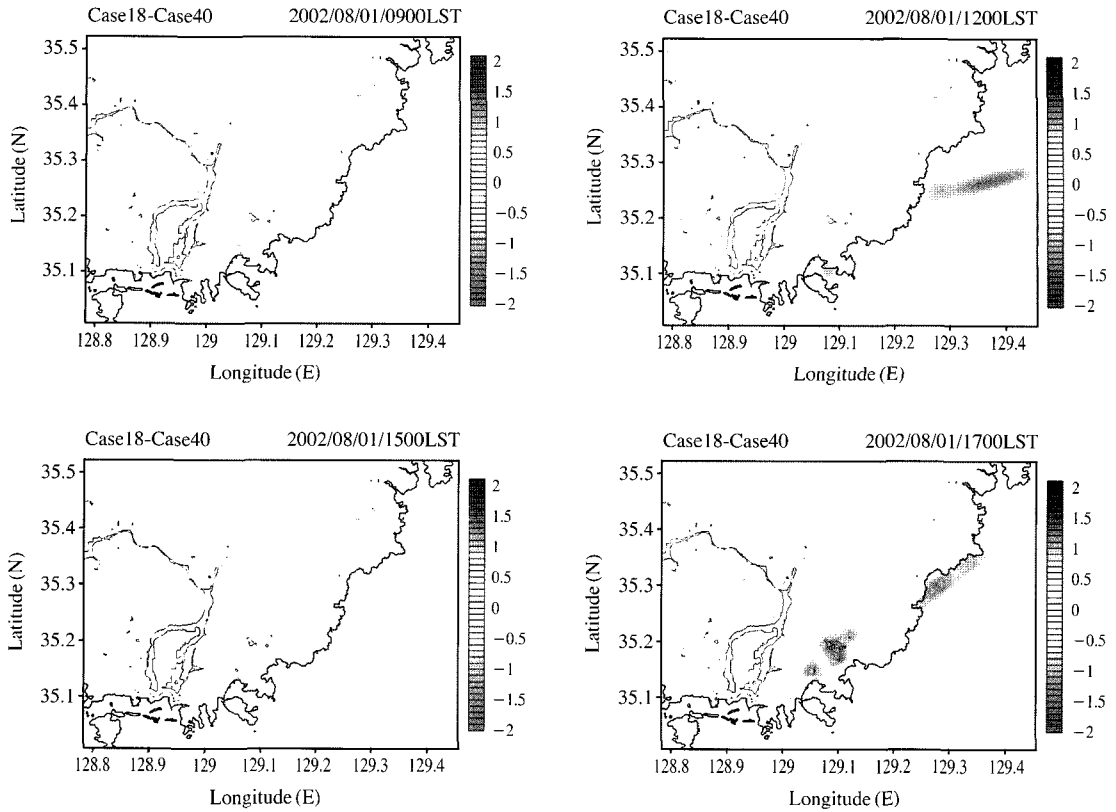


Fig. 8. Maps for surface wind speed difference between Case18 and Case40.

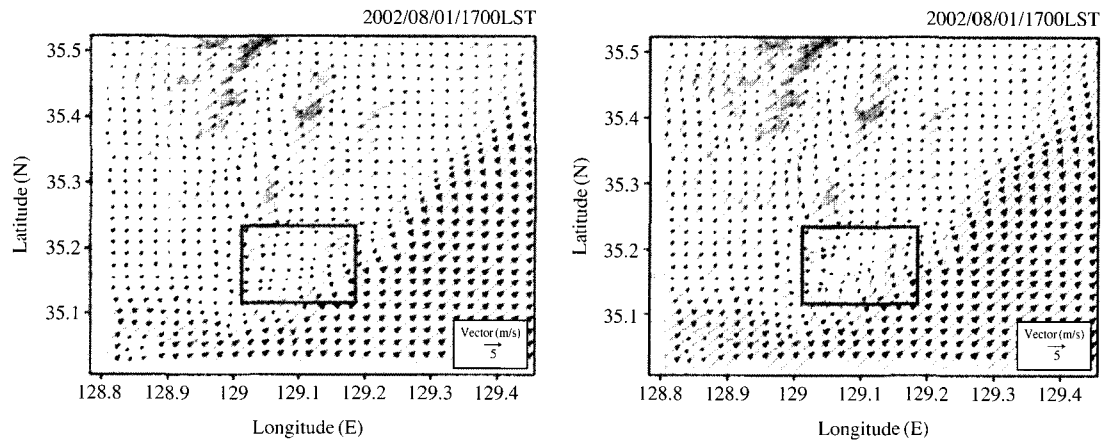


Fig. 9. The surface wind fields simulated by (a) Case18 and (b) Case40 at 1700LST.

및 경계조건은 한국기상청에서 제공하는 RDAPS를 사용하였다. 도시지역의 알베도를 0.18에서 0.25, 0.40

으로 변화시켜 수치모의 한 결과 전체적으로 알베도가 높은 경우 도심지 내의 기온 하강 효과는 시간에



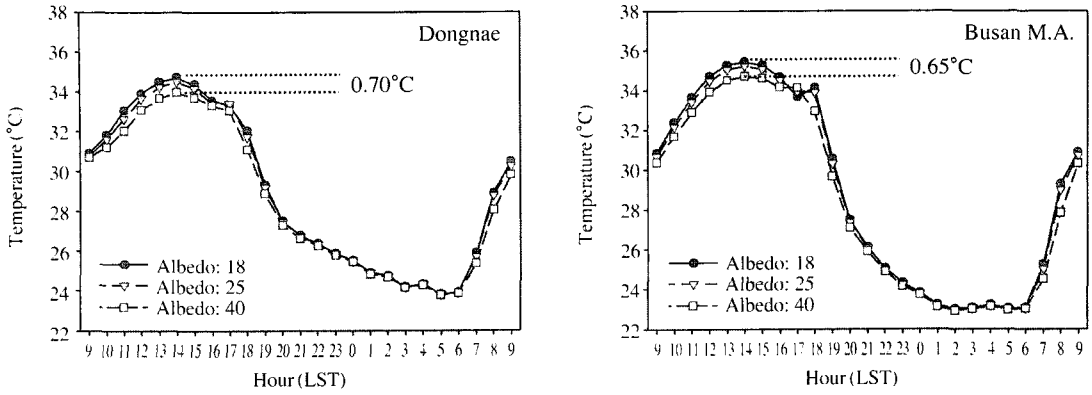


Fig. 10. Comparison of surface air temperatures at Dongnae and Busan M.A.

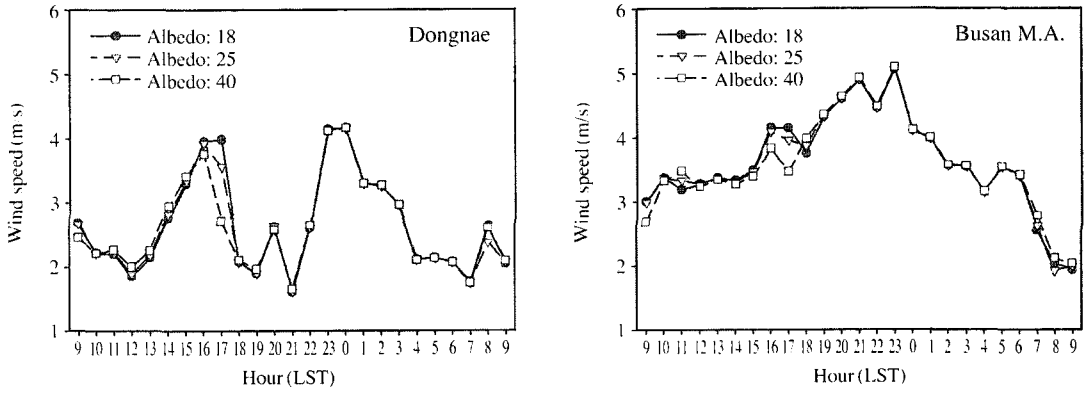


Fig. 11. Comparison of surface wind speeds at Dongnae and Busan M.A.

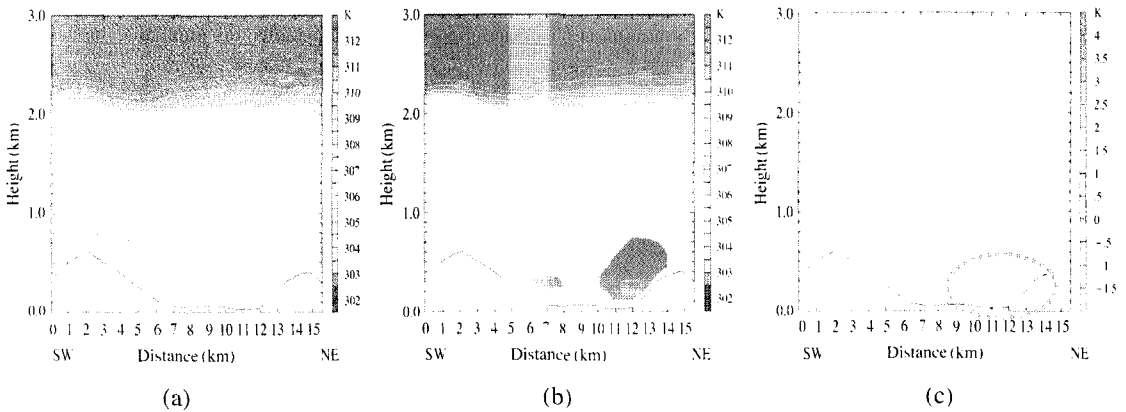


Fig. 12. The potential temperature fields simulated by Case18 (a) and Case40 (b) at 2002/08/01/1500LST and the difference (c) of potential temperature ( $\Delta_{(Case18-Case40)}$ ).

관계없이 뚜렷이 나타났다. 특히 1700LST에서 가장 큰 기상 인자의 변화를 나타내었고, 기온은 하강하고 풍속의 약화로 인한 지형적 효과의 증가로 수렴지역이 달라졌다. 부산의 중심부에 위치하고 있는 동래지점에서 연안에 위치하고 있는 부산지방기상청지점보다 도시 알베도 변화에 의한 기상요소의 변화 폭이 크게 나타났다. 이는 부산의 경우 도시 중심부에서 높게 나타나는 도시고온화와 도시열섬 현상을 도시 지역의 알베도를 증가시킴으로써 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

도시 내 빌딩 및 도로의 재질개선은 지표면 알베도의 증가를 가져오고, 이는 지표면 열수지를 변화시켜, 낮 동안의 도심 내 온도 하강 효과를 가져 올 수 있다. 이러한 기온 하강 효과는 도심지 내 인간 생활 환경을 쾌적하게 만드는 요인이 될 수 있다. 또한 도심지의 온도가 낮아지면 부산지역과 같은 연안지역에 있어서는 해륙의 온도차에 의해 발생하는 해풍의 유입속도를 감소시킴으로써 부산지역의 해륙풍순환에도 영향을 미칠 것으로 생각된다. 그러므로 도시지역의 지표알베도 변화는 도시지역의 기온뿐만 아니라 국지 순환계측면에서도 중요하다.

따라서 본 연구의 결과를 이용하여 도로 포장재와 빌딩 벽면 및 옥상에 알베도가 높은 재료를 도입함으로써 실질적인 도시 열환경을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- 윤일희, 민경덕, 김경익(1994) 대구 지역의 기상 특성 연구 및 대기 확산 모델의개발: II. 도시 열섬 특성에 관한 사례 연구, 한국기상학회지, 30(2), 30-313.
- 이귀옥, 이현주, 이화운(2006) 부산지역의 하계 도시열환경의 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 16(2), 593-602.
- 한영호, 김보현, 이동인(1993) 부산지역 도심지의 열섬현상과 기온변화에 관한 연구, 한국기상학회지, 29(3), 205-216.
- Dudhia, J. (1996) A multi-layer soil temperature model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, 22-24, July 1996, Boulder, Colorado, 49-50.
- Gedzelman, S.D., S. Austin, R. Cermak, N. Stefano, S. Partridge, S. uesenberry, and D.A. Robinson (2003) Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City, Theoretical and Applied Climatology, 75, 29-42.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1994) A Description of the Fifth Generation Pen State/NCAR Mesoscale Model, NCAR Tec Note.
- Hong, S.Y. and H.L. Pan (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a mediumrange forecast model, Monthly Weather Review, 124, 2322-2339.
- Landsberg, H.E. (1981) The Urban Climate. Academic Press, New York.
- Taha, H. (1997) Urban climates and heat islands, albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, Energy & Buildings, Special Issue on Urban Heat Islands, 25(2), 99-103.
- Willmott, C.J. (1981) On the validation of models, Physical Geography, 2, 168-194.
- Yamashita, S. (1996) Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric trams in Metropolitan Tokyo, Atmospheric Environment, 30(3), 429-435.