

도시 열환경 개선을 위한 국지순환풍의 역할에 관한 연구

박명희 · 정우식¹⁾ · 김해동^{2)*}

국립수산과학원, ¹⁾인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터, ²⁾계명대학교 환경대학
(2010년 8월 10일 접수; 2010년 8월 26일 수정; 2010년 9월 13일 채택)

The Role of Local Circulation for the Improvement on Urban Thermal Environment

Myong-Hee Park, Woo-Sik Jung¹⁾, Hae-Dong Kim^{2)*}

National fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹⁾Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

²⁾College of Environment, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Manuscript received 10 August, 2010; revised 26 August, 2010; accepted 13 September, 2010)

Abstract

In this study the AWS was installed in three areas to analyze creation and characteristics of local wind circulation through observation. According to the result, in night time when mountain wind is well developed showed temperature in A area located in Dalbigol valley and B area adjacent with the valley was lower than C area located in the lowland of the center of city by 1.5~4°C. The wind speed was also shown two times stronger than C area. In addition, in terms of wind direction, A and B areas showed east wind consistently according to topographic shapes of Dalbigol valley with high altitude and residential sites of lowland with low altitude.

Although the C area didn't show big changes in wind direction due to the effects of city structures, east wind is often seen so mountain wind from Dalbigol valley is found to have an effect at least. Through the analysis of temperature, wind speed, and wind direction, night time showed relatively cold mountain wind blew following Dalbigol valley, throughout residential sites and to the center of city with lowland. During the daytime, the temperature in the city with lowland and residential sites is constantly higher than A area located in Dalbigol valley, and strong wind speed following Dalbigol valley, and three areas have 200~300° of main wind direction, so west valley wind throughout the city with lowland and following Dalbigol is clearly formed.

Key Words : Local circulation, Valley wind

1. 서론

최근 도시화의 진행에 수반되어 도시가 고온화 되

는 도시열섬 현상이 사회적 문제로 대두되고 있다. 열섬은 도심부로의 인구, 교통망의 집중화, 인공폐열, 지표면 피복에 따른 녹지의 감소, 건물의 고층화에 따른 열용량 변화와 대기 순환 환경의 악화 등 여러 요인이 복합적으로 관여하여 발생된다(Lansberg, 1981; Yamashita, 1995; Kanno 등, 2001). 도시열섬의 완화는 온난화의 방지, 여름철 냉방에너지 이용 저감, 도시

*Corresponding author : Hae-Dong Kim, College of Environment, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-53-580-5930
E-mail: khd@kmu.ac.kr

의 생활환경 개선이라는 측면에서 요구되고 있지만 그것을 실현하는 일은 매우 어려운 일이다. 예로서, 일본 동경에서는 도심기온을 낮추기 위하여 동경에서 인공열이 가장 많이 배출되는 동경역을 중심으로 위치한 3개 구에서 배출되는 냉방 폐열을 동경만으로 수송하여 처리하는 프로젝트를 추진하고 있는데, 이 사업을 통해서 기대할 수 있는 기온저하 효과는 0.1℃ 내외에 이를 것이라고 한다. 그런데 0.1℃의 기온하강이 가지는 의미는 지구온난화 속도(약 0.74℃/100년)를 10년 이상 지연시키는 효과를 나타내는 것이기 때문에 이 프로젝트에 소요되는 4000여억원의 투자대비 효율을 생각해 보면 사업성이 매우 크고 경제성이 있다고 할 수 있다(Ichinosé, 2002).

이와 같이 다양한 여러 도시열섬 완화대책의 일환으로 도시계획 수립시 도심지 건물을 효율적으로 배치함으로써 바람을 활용하여 도시대기의 환기성을 극대화하는 대기개선대책이 독일과 일본 등 선진외국에서 활발하게 제기되고 있으며 도시가 위치한 지역의 지형적 특성을 고려하여 해당 지역에서 발달하는 국지풍의 순환을 이용하여 도시열섬을 억제하고 대기질을 개선하고자 하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다(Ichinosé, 1998). 해안에 위치한 일본의 고베 및 동경의 니혼바시, 중국의 상하이 등에서는 주간 해안으로부터 불어 들어오는 해풍을 도심지 내륙 안쪽까지 진행시켜 도심지 기온과 대기오염 농도를 낮출 수 있도록 도시구조를 개선하는 일에 노력하고 있다(Ichinosé, 1999; 一之瀬俊明, 1999; Mikami, 2005). 또한 내륙 분지에 위치한 독일의 프라이부르크와 슈투트가르트 및 일본의 나고야 등에서는 야간에 도시의 고지대 산지에서 저지대 도심지로 불어오는 차가운 산풍을 이용하여 야간의 도시열섬 현상을 억제하고 도시의 환기기능을 개선하여 대기질을 향상시키려는 노력을 하고 있다(日本環境省, 2001).

우리나라의 경우, 전 국토의 70%가 내륙산악 및 분지지역으로 이루어져 있고 이러한 내륙지역에 대구, 대전 등 대규모 도시들이 위치하고 있어 산곡풍과 같은 국지풍순환계를 이용한 도시환경개선이라는 방법적 적용은 그 효과가 매우 크게 나타날 수 있다. 즉, 우리나라의 내륙 대도시는 대부분 지형의 굴곡과 경사가 복잡한 경사지와 저지대의 형태를 가지고 있어 이

러한 특성으로 인해 유발되는 대표적 국지순환계인 산곡풍의 특성을 이용하여 주거공간의 친환경적 쾌적성을 개선할 수 있는 가능성이 매우 높다고 할 수 있는 것이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라의 대표적 내륙 분지형 대도시인 대구광역시를 대상으로 도심지에 위치한 앞산의 달비골 계곡과 이 일대에 위치한 주거단지를 대상으로 산곡풍의 발달과 그것이 유발하는 여름철 야간 기온 저감효과를 관측을 통하여 평가하고, 국지풍순환의 경로를 수치실험을 통하여 살펴보고자 하였다.

2. 연구대상지역

대구에는 남쪽과 북쪽으로 앞산과 팔공산이 위치하고 동서 방향으로도 해발고도 수백 m의 산으로 둘러싸여 있는 우리나라의 대표적인 분지형 대도시이다. 이러한 지리적 특성으로 인하여 연중 바람이 약하고 기온의 연교차가 크며 대기질이 좋지 않다 다른 도시에 비하여 환경쾌적성이 낮은 것으로 알려져 있다(Kim, 2002). 그러나 식생이 우거진 산지 계곡지역 주변에 위치한 주거공간의 경우에는 산지와 주거단지 간에 산곡풍 순환구조가 형성되어 특히 야간에는 산풍의 영향으로 쾌적한 기후환경 조건이 형성되어 있는 것으로 알려져 있다(Koo 등, 2004). 대구에서는 이러한 국지순환풍의 발원지로서의 기능을 가지는 대표적인 장소 중의 지역이 앞산에 위치하며 진천천의 발원지 역할을 하고 있는 달비골 계곡지역이다. 달비골 계곡은 이곳에 인접한 상인동과 월성지역 일대와 국지풍 순환계를 형성하고 있는 것으로 알려져 있는데, 주간에는 저지대인 주거단지에서 생성된 고온의 오염된 공기가 달비골 계곡을 따라서 산정으로 불어 올라가고, 야간에는 야간복사냉각으로 산정에서 생성된 청정한 냉기류가 이곳 달비골 계곡으로 흘러 내려 저지대에 위치한 주거단지로 불어 나감으로써 여름철 야간기온을 낮추고 대기질을 개선하는 역할을 하고 있다(Koo, 2004).

달비골 계곡은 대덕산(해발 약 600 m)과 청룡산(해발 약 800 m) 사이에 존재하는 계곡인데 그 폭은 100 여m에 이른다. 계곡에는 연중 풍부한 수량의 계곡물

이 흐르고 있으며 키가 큰 나무들이 차지하는 면적비율이 매우 높다. 달비골 계곡의 입구에서 서쪽방향으로는 저지대를 따라서 대규모 아파트 주거단지가 발달해 있으며, 주거단지의 끝에는 대구 최대의 산업단지인 성서산업단지가 위치하고 있다.

3. 연구방법

3.1. 기상관측

조사 대상지역인 달비골 계곡은 대구의 남쪽을 둘러싸고 있는 비슬산(이 산의 대구도심지역 부분을 앞산이라고 지칭하고 있음)의 남서쪽에 자리 잡고 있는 계곡이다(Fig. 1(a))18). 기상관측은 Fig. 1(a)의 표시된 지역 내에 위치한 Fig 1(b)의 A와 B, 그리고 C의 3개 지점에서 수행되었다. 이들 관측 지점은 달비골 계곡과 저지대 주거단지 및 공단지역에 걸쳐 형성되는 국지풍순환계의 특성과 기류분석을 위해 최적의 장소로 판단되어 선정 한 지점들이다. A지점은 해발 120 m 인 달비골 계곡의 시작부분에 위치하고 있고 B지점은 A지점에서 직선거리로 862 m 떨어진 곳에 위치한 비둘기 아파트 단지 주변의 나대지로써 달비골 계곡으로 이어지는 저지대 주거단지에 위치하고 있으며 C지점은 주거단지 및 공단이 밀집한 저지대 도심지에 위치한 한국 SGI 불교 건물 옥상(지상 7 m 높이)이다.

본 연구에서는 2007년 8월 16일 ~ 17일 양일에 걸쳐서 앞서 설명한 세 지점에서 기상관측을 수행하였다. 연구대상일인 이날의 기상상태는 우리나라가 고기압의 중심에 위치해 있으며 종관규모의 바람이 약 1.5 m/s로 약하고, 평균 일조시간이 10시간 이상 지속되어 국지순환풍의 생성에 유리한 조건을 가진 쾌청한 상태를 나타내었다.

관측은 양일에 걸쳐서 24시간 연속으로 이루어졌다. A지점에는 AWS를 설치하여 시간대별 기온, 습도, 풍속, 풍향, 일사량 자료를 저장하고, 분석하였다. B지점에서는 지상관측과 지표관측을 동시에 수행하여, 시간대별 기온, 습도, 풍속, 풍향, 일사량의 자료를 얻어 분석하였으며 C지점에서는 주거 밀집지역 내의 건물옥상에서 관측을 수행하여 일사량, 기온, 습도, 풍향, 풍속의 시간대별 자료를 생산하고 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 이들 세 지점에서 관측된 요소 중에서 풍향, 풍속, 그리고 기온자료를 활용하여 달비골 계곡과 저지대 도심지를 걸쳐 형성되는 국지풍 순환계의 형성유무 및 특성을 분석하였다. 이들 지점에서 관측된 나머지 여러 지표면에서의 온도측정값과 상대습도 및 일사량 자료도 지면조건이 도심지 국지풍순환계에 미치는 효과를 파악하는데 향후 활용될 수 있을 것이다.

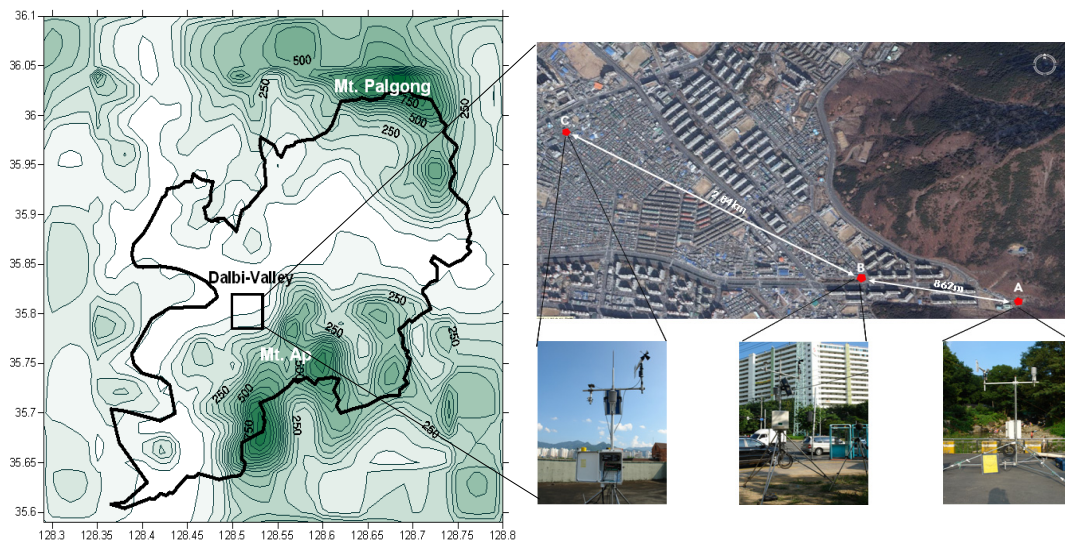


Fig. 1. The topographic map and locations of observation areas.

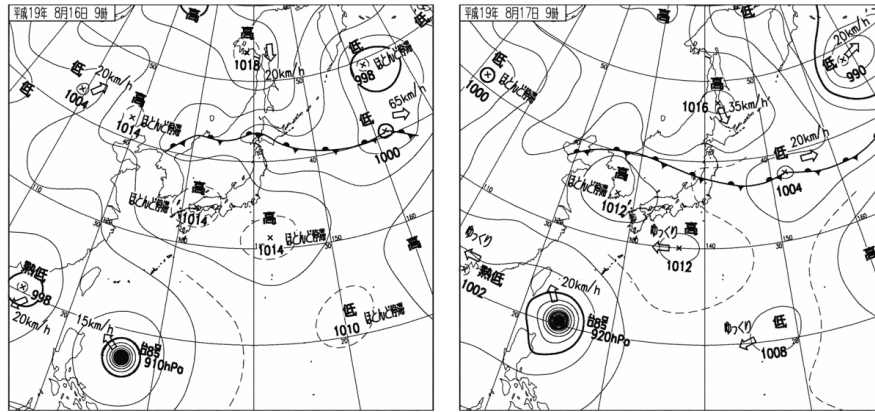


Fig. 2. Synoptic weather charts at 09LST on 16 August and on 17 August in 2007.

3.2. 국지풍 순환경로 파악을 위한 Envi-met 수치실험

본 연구에 사용된 전산유체역학모델인 Envi-met 모델은 독일의 Bochum 대학의 Michael Bruse(1998)에 의해 개발되었으며 본 연구에서는 2010년에 Update된 3.1 BETA 4 버전을 사용하였다. Envi-met 모델의 장점은 도시지역에 있어서의 지면, 건물, 식생 그리고 대기의 상호작용에 관한 미세규모 모델로서 뚜렷한 미세규모 기상 패턴을 만들어낸다는 점과 딱딱한 건물의 벽면체 뿐만 아니라 식생 등도 모델에 표현하여 직접 고려할 수 있다는 점이다.

Envi-met 모델의 구성은 대기모델, 식생모델, 토양 모델 그리고 지면과 건축물에 관한 식으로 이루어져 있다. 이 모델을 이용하여 아파트 단지의 기류분석 및 대기오염물질의 환기상태에 관한 연구(Jung, 2007)와 지면조건별로 지형의 풍하측에서의 바람강도 분석(Jung 등, 2006)과 같이 건물배치 및 지형에 따른 국지 바람분석 등의 연구를 통해 이 모델의 정확성 및 타당성에 대해 검증된 바 있다.

3.2.1. 수치실험 대상지역

도심지에서 복잡한 형태의 건물구성과 도로망에 따라 기류의 특성, 그리고 기온분포 특성을 자세히 살펴보기 위한 수치실험을 수행하였다.

수치실험 대상지역은 Fig. 1에 나타난 달비골 지역이며, 계산영역은 동서방향(x 방향)으로는 격자간격을 10 m로 하여 220 격자로 구성하였고 남북방향(y 방향)으로는 격자간격을 10 m로 하여 140 격자로 구성

하여 동서, 남북으로 각각 2200 m와 1400 m에 해당하는 지역을 대상으로 설정하였고 연직방향(z 방향)으로는 격자간격 15 m의 20 격자로 구성하였다.

Fig. 1에 나타난 달비골 지역의 구조물 및 식생분포를 10 m 간격으로 정보를 도출하여 Fig. 3과 같이 수치실험 입력자료를 구성하였다.

3.2.2. 수치실험 조건

대상지역에서 국지순환풍 경로의 공간분포 및 특성을 상세히 파악하기 위하여 실험대상일의 00LST와 12LST를 대상으로 수치실험을 각각 수행하였다. 초기 기상입력 자료는 달비골 계곡에 인접한 주거단지에 설치된 B지점의 기상관측자료를 사용하였다. B지점은 주야간에 걸쳐 저지대 도심지와 고지대인 달비골 계곡이 이어지는 연결선 상에 위치하고 있어 주야간의 풍계변화를 잘 살펴볼 수 있는 곳으로 판단하여 이 지점에서의 기상관측자료를 초기입력 자료로 사용하였다.

Table 1. Design of numerical simulations

CASE	Initial wind		Initial temperature(°C)
	Wind speed(m/s)	Wind direction(°)	
00 LST	0.8	135	27.2
12 LST	0.4	297	33.8

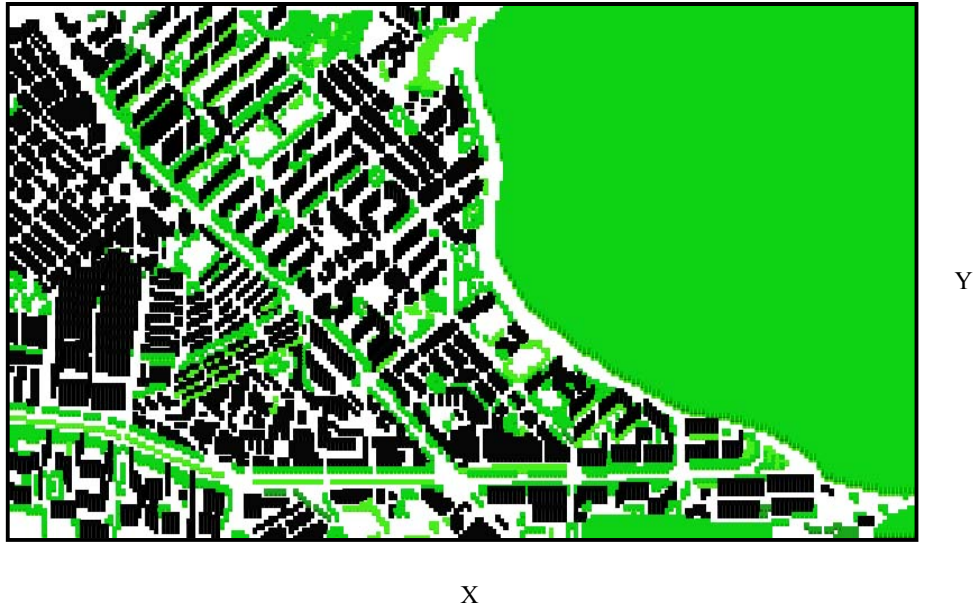


Fig. 3. Surface boundary outlines of Envi-met modelling.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지상의 기상일변화

4.1.1. 기온변화

Fig. 4는 A, B, C지점에서 관측된 시간대별 평균기온의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 B지점과 C지점의 경우, 주간시간대인 08시부터 16시까지 대체적으로 두 지점의 기온값이 유사한 기온값 및 변화 경향을 보이고 있고 A지점에서는 B, C지점에 비해 약 1~2°C 정도 낮은 기온을 나타내었다. 이러한 현상은 여름철 주간에는 아스팔트 및 콘크리트로 포장되어 있는 도심지에서의 지면온도가 식생으로 포장되어 있는 고지대 계곡지역의 지면온도에 비해 높고, 이로 인해 관측된 지면 부근 기온 또한 그림에서 보는 바와 같이 도심지 및 주거단지에 설치된 B, C지점에서의 기온이 달비골 계곡에 설치된 A지점에서의 기온보다 높게 나타난 것으로 판단할 수 있다. 또한 이 시간대에 B, C 두 지점에서의 기온값이 유사한 기온값을 보이며 B지점에서 약간 높은 기온값을 보이고 있는데, 이는 다음으로 설명할 수 있다. Fig. 2의 종관일기도를 보면 대구를 포

함한 영남지역일대에 서풍계열의 종관바람을 판단할 수 있으며 Fig. 6의 풍향시계열 관측 자료에도 주간에 전반적으로 지표면 저지대 도심지에서 연구대상지역의 동쪽에 위치한 고지대 달비골 계곡으로의 개략적인 풍계를 판단할 수 있다. 즉, 이 시간대에 세 지점에서의 풍향이 전반적으로 200°~300°에 집중되어 있는 것을 볼 수 있는데, 비록 그림에서 풍향의 변동성이 크게 나타나고 있지만, 도심지 건물군에 의한 풍향의 불규칙성을 고려할 때, 이 풍향각의 범위에서 바람이 집중되어 나타나고 있는 것을 보면, 종관일기도에서 판단할 수 있는 바와 같이 전반적으로 달비골 계곡의 남쪽과 서쪽, 그리고 북쪽에 위치한 도심지방향에서 달비골 계곡이 위치한 동쪽 방향으로 불어가는 서풍의 경향성으로 판단할 수 있다. 이 경우, 계곡에서 멀리 떨어진 C지점을 거쳐 동쪽으로 진행하는 서풍계열의 바람이 달비골 계곡으로 이어지는 B지점까지 약 2 km의 거리를 지나오는 동안 도심지 지면으로부터 열을 계속 공급받아 B지점에 도달한 공기는 C지점에 비해 좀 더 가열되거나 거의 유사한 정도의 기온값을 나타낸 것으로 볼 수 있다.

세 지점의 기온자료를 보면 A지점은 15시, B지점

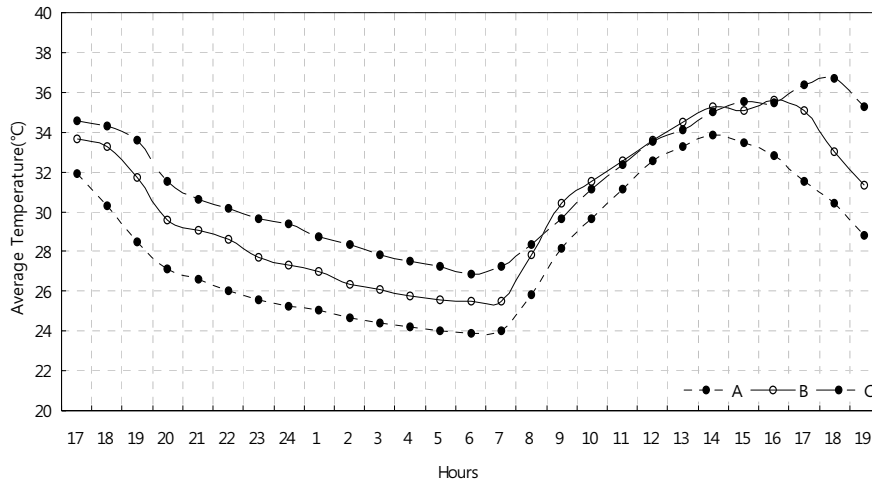


Fig. 4. Time variations of averaged air temperature at A, B and C points.

은 17시, C지점은 19시에 기온의 하강이 나타나고 있다. 이러한 현상은 Fig. 6의 풍향관측 자료를 통해 이해할 수 있는데, 그림에서 보는 바와 같이, A지점에서는 15시경에 풍향이 동풍계열의 바람인 산풍으로 급변하는 것을 알 수 있다. 즉, 15시부터 연구대상지역의 동쪽에 위치한 달비골 계곡에서 서쪽의 도심지 방향으로 바람이 불어가는 것으로 관측되었는데, 이때 상대적으로 낮은 기온의 달비골 계곡 바람이 서쪽으로 불어가면서 A지점의 기온하강을 야기한 것으로 분석할 수 있다. 또한 B지점의 경우에도 16시 30분경이 지나면서 풍향이 동풍계열로 급변하였고 이 또한 달비골 계곡에서 불어오는 바람에 의한 17시부터의 기온하강으로 판단할 수 있다. 그리고 C지점의 경우에는 풍향이 17시경부터 동풍계열의 바람으로 바뀌었지만 C지점은 달비골 계곡에서 비교적 멀리 떨어진 지리적 영향으로 동쪽에서 불어오는 낮은 기온의 바람이 C지점에 도달하는 과정에 기온이 높은 도심지를 지나면서 C지점에 도달한 시점에서의 기온하강 효과가 더디게 나타난 것으로 판단할 수 있다. 즉, Fig. 7의 풍속시계열에 나타난 바와 같이 16시 이후에 세 지점에 걸쳐 대략 0.5~1 m/s 내외의 매우 낮은 풍속이 나타나고 있고 이러한 느린 공기이동은 도심지를 거치면서 저온의 공기가 다시 가열되어 C지점에 도달하게 된다는 것으로 분석할 수 있다.

야간 시간대에 나타난 지점별 기온차는 다음으로 설명할 수 있다.

도심지의 경우에는 낮동안 가열된 아스팔트 및 콘크리트에서 배출되는 열량, 그리고 냉방에 의해 배출되는 열량 등에 의한 야간 기온 하강효과가 낮고 반면 인공열 배출이 거의 없는 식생이 밀집된 달비골 계곡 같은 산림지역은 기온 하강효과가 크게 나타난 것으로 판단할 수 있다. 또한 주간시간대에는 B지점과 C지점에서의 기온이 유사하게 나타난 것과 달리 야간 시간대에는 B지점이 C지점에 비해 낮은 기온을 보이는 것도 B지점이 상대적으로 달비골 계곡에 인접해 있는 영향으로 기온하강효과가 C지점보다 크게 나타난 것으로 분석할 수 있다. 즉, 앞산의 고지대에서 달비골 계곡을 따라 불어 내려오는 산풍이 저지대 도심지로 불어나가는 시간대는 일몰 후부터 다음 날 오전 10시경까지로 나타났으며 도심지에 위치한 C지점에 비해 달비골 계곡과 계곡 입구 부근 주거단지에 위치한 A, B지점에서의 풍속이 새벽으로 갈수록 뚜렷하게 강한 경향을 보였다. 또한 이 시간대의 기온을 보면 달비골 계곡인 A지점에 비해 도심지인 C지점에서의 기온은 약 3~4°C 높게 지속적으로 나타나고 있고 B지점 또한 A지점에 비해 약 1.5~2°C 높게 나타나고 있어 고지대 산지에서 형성된 차가운 공기가 야간 산풍에 의해 달비골 계곡을 따라 지속적으로 주거단지를

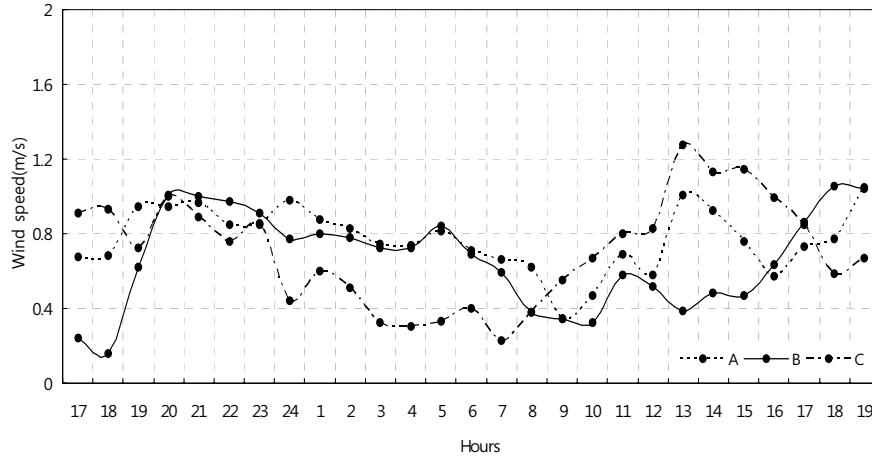


Fig. 5. Time variation of averaged wind speed at A, B and C points.

거쳐 저지대 도심지로 불어 나가고 있음을 알 수 있었다. C지점에서 이 시간대 기온이 지속적으로 다소 높게 나타난 것은 도심지에 형성된 구조물의 재질이 아스팔트와 콘크리트로 덮혀 있어 야간에도 온도가 상대적으로 높은 것과 이들 구조물이 공기의 흐름 측면에서도 장애로 작용하여 차가운 공기가 빨리 도심지로 흘러가지 못하는 것이 상대적으로 다른 두 지점에 비해 기온이 높게 나타난 것으로 분석할 수 있다.

4.1.2. 풍속 및 풍향변화

Fig. 5는 관측기간 동안 1시간 평균풍속의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 야간시간대를 보면 A지점과 B지점에서의 풍속값이 유사한 경향을 보이고 있으나 도심지 가운데 위치한 C지점에서의 풍속은 다른 두 지점에서의 풍속에 약한 풍속값을 보이고 있는데 특히, 24시부터 다음날 07시까지 A, B지점에 비해 약 50% 정도의 풍속값을 나타내고 있다. 이는 야간시간대에 고지대 산사면과 계곡과 같이 경사가 급한 지형에서는 야간시간대에 냉각된 공기가 지표부근으로 하강하여 경사지를 따라 저지대로 불어가기 때문으로, 달비골 계곡에 위치한 A지점과 이 지점에서 멀리 떨어진 B지점에서는 달비골 계곡을 통해 저지대 도심지로 불어 나가는 산풍의 영향으로 도심지에 위치한 C지점에 비해 높은 풍속을 나타내고 있는 것이

다. 또한 C지점은 A지점에서 약 2 km 이상 떨어진 저지대 도심지인 주거 밀집 지역에 위치하고 있어 야간에 지표부근으로 하강하여 지면을 따라 불어가는 바람이 이 지역에 밀집된 건물에 의해 흐름이 약화되어 그 결과 낮은 풍속이 나타난 것으로 분석할 수 있다.

주간시간대에는 일출시간대에 개활지 형태의 도심지를 불어가는 C지점에서 급격한 풍속의 상승이 나타났으며 A지점에서는 평지에 비해 고지대 경사면에서 더 크게 유발되는 수평기압경도 차이에 의해 경사면을 따라 산정상으로 불어 올라가는 곡풍의 빠른 발달로 이 지점에서 풍속이 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 세 지점에서의 시간별 풍향 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 야간시간대에는 A지점에서 동풍계열의 바람이 지속적으로 나타나고 있는데, 이는 야간에 냉각된 공기가 지표부근으로 하강하여 공기의 수렴역할을 하는 좁은 달비골 계곡을 따라 저지대 도심지로 지속적으로 불어 나가는 것을 나타내고 있는 것이다. B지점 또한 달비골 계곡을 통해 불어 나가는 공기가 이동하는 경로 상에 위치하고 있어 풍향은 다소 변화하였지만 균일한 형태의 풍향을 보여 야간에 달비골 계곡을 통해 불어 나가는 공기가 이 지점을 지속적으로 통과하고 있음을 알 수 있다. 이들 A지점과 B지점의 풍향관측결과에서 주목할 점은, 풍향이 어느 방향으로 불고 있느냐 하는 것보다는 야간

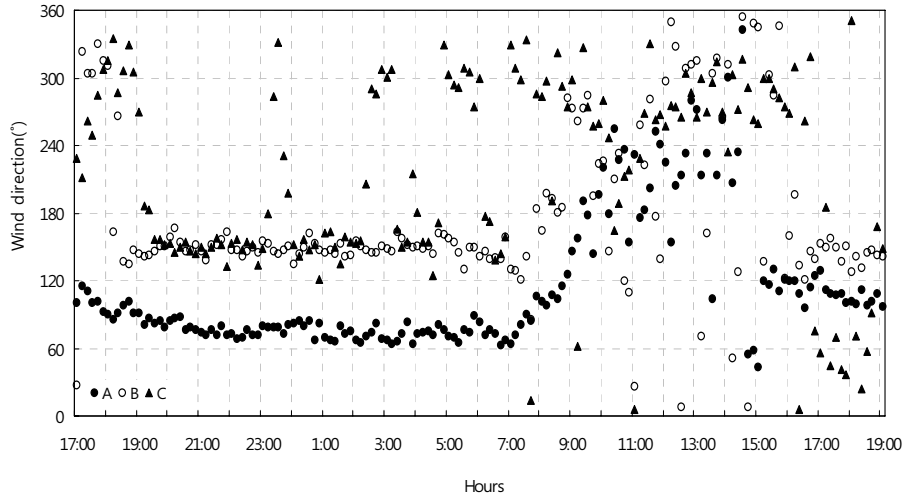


Fig. 6. Time variation of wind direction at A, B and C points.

시간대동안 지속적으로 균일한 풍향각의 바람이 불어가고 있다는 점이다. 또한 도시규모의 풍계에서는 종관바람장의 영향이 크고 매우 중요하지만 공간적으로 좁은 국지영역에서의 풍계에서는 이들 종관바람장의 영향보다는 해당지역에서의 지형적 조건과 도시구조물의 영향이 더 크고 직접적으로 작용한다는 점에 주목해야 한다. 즉, 비록 A지점과 B지점에서의 풍향각은 차이가 있지만 이들 두 지점에서는 야간에 경사면을 따라 불어 내려온 강한 산풍이 계곡이라는 지형적 영향으로 야간시간대 동안 지속적으로 균일한 바람으로 관측되었고 도심지 저지대에 위치한 C지점에서는 구조물의 영향으로 A, B지점과 달리 약하고 불균일한 바람이 관측되고 있는 점을 주목해야 한다. 이처럼 연구대상영역인 가로, 세로 약 1~2 km 영역 내에 위치한 이들 세 지점에서의 종관적 바람조건은 거의 동일하다는 점을 인식해 보면, 관측에서 나타난 바와 같이 좁은 공간 내에서도 다양한 풍계가 나타난다는 것을 통해 공간적으로 좁은 지역에서의 풍계분석에는 이처럼 국지적으로 형성, 소멸되는 산곡풍과 같은 국지순환계에 대한 파악이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

주간시간대의 바람에 대한 분석은 앞서 기온분석에서 설명한 바와 같이 비록 시간대별로, 지점별로 큰 변동성을 보이지만, 전반적으로 서풍계열의 바람이

많이 나타나는 것을 통해 주간에는 분지형 저지대인 주거지역에서 앞산 달비골 계곡방향으로 바람이 불고 (곡풍), 야간에는 달비골 계곡에서 분지형 저지대인 주거지역 쪽으로 바람이 분다(산풍)는 것을 확인할 수 있다.

이상에서 살펴본 기온, 풍속, 풍향의 관측결과를 분석해 볼 때, 국지순환풍의 발원지로서의 기능을 갖는 대표적인 장소 중의 한곳인 앞산에 위치하며 진천천의 발원지 역할을 하고 있는 달비골 계곡과 계곡 인근의 상인동과 월성지역 일대에서 국지순환풍이 형성되는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 국지순환풍이 야간에 고지대 산사면과 달비골 계곡을 따라 저지대 주거단지와 도심지로 불어 들어감으로써 도시 열환경 측면에서 도심지 기온저감과 대기질 측면에서 청정공기가 유입에 따른 도심지 대기오염개선효과를 함께 기대할 수 있다.

4.2. 수치모델 결과

이상에서 세 지점에서 관측된 기상자료를 바탕으로 저지대 도심지와 고지대 달비골계곡에 걸쳐 국지순환계의 형성과 특징에 대해서 시, 공간적으로 상세히 분석하여 보았다.

여기서는 앞서 설명한 Envi-Met 모델을 이용하여 연구대상지역 내에서 형성되는 상세한 기류흐름의 형

상을 알아보려고 하였다. 연구대상지역내에는 Fig. 1 과 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이, 저지대 도심지와 주거단지에 복잡 다양한 형태의 구조물이 형성되어 있고 이들 구조물 사이사이에 다양한 폭을 가진 도로망이 복잡하게 이어져 있다. 이처럼 복잡 다양한 지면 조건에서 주간과 야간에 기류가 어떠한 형태로 나타나고 있는지 수치모델을 이용하여 구체적으로 살펴보고자 하였다.

우선, 주간(12LST)시간대의 수치실험인 CASE I과 야간(00LST)시간대의 수치실험인 CASE II 에서의 초기조건은 Table 1에서 제시한 바와 같이 B지점에서 관측된 풍향, 풍속, 그리고 기온자료를 사용하였다. 이들 각각의 CASE 수치실험을 통해 도출된 결과들의 정확도 검증을 위해 세 지점에서 관측된 00LST와 12LST의 풍향, 풍속 자료와 수치실험에서 세 관측지점에 해당하는 지점에서의 풍향, 풍속자료를 각각 비교하였다(Table 2).

Table 2에서 보는 바와 같이 주간(12LST)의 경우, 전반적으로 지점별로 관측된 풍계특성을 수치실험에서 잘 나타내고 있다. 즉, 개활지인 저지대 도심의 C지점과 고지대 산사면으로 이어지는 달비골 계곡에 위치한 A지점에서의 풍속이 주거단지인 B지점에서의 풍속에 비해 강한 것을 알 수 있는데 이러한 경향은 관측결과에서도 동일하게 볼 수 있다. 또한 풍향을 보더라도 8월 19일의 종관일기도에서 분석한 바와 같이 세 지점에 걸쳐 서풍계열의 바람이 잘 나타나고 있다. 이러한 결과로 볼 때, 주간에 저지대 도심지를 거쳐 고지대 산사면에 위치한 달비골 계곡을 따라 고지대로 불어올라가는 서풍계열의 곡풍이 잘 묘사되고 있는 것으로 분석 할 수 있다. 다만, 달비골 계곡인 A지점

에서의 관측풍향(남서풍)과 계산된 풍향(북북서풍)에 다소 차이가 있는데, 이것은 본 연구의 수치실험 계산 영역에서 달비골계곡의 남쪽과 동쪽 지형이 많이 포함되지 못하여 남서방향에서 달비골 계곡으로 유입되는 남서풍계열의 바람과 동쪽으로 이어지는 달비골 계곡을 따라 산정상부로 불어 올라가는 서풍계열의 바람성분이 계산결과에 제대로 반영되지 못하여 북서풍 계열의 바람성분이 더 과도하게 표출된 결과로 판단된다. 하지만 이러한 원인에 의한 풍향각의 차이가 있다 하더라도 관측풍향과 계산풍향 모두가 서풍계열의 바람성분을 표현하고 있어, 달비골 계곡을 따라 산정상부로 불어 올라가는 국지순환풍인 서풍계열의 곡풍의 존재와 특성을 설명하는 데는 문제가 없을 것으로 판단된다.

이상에서 설명한 주간 풍계의 전반적 분포결과를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 그림을 보면 바람을 나타내는 벡터가 전영역에서 걸쳐 서풍계열의 바람이 전반적으로 표현되고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 도심지 구조물을 나타내는 검은색 건물 주변으로는 다양한 풍향의 벡터가 나타나고 있지만 계산영역의 동쪽에 위치한 저지대 도심지에서 주거단지를 지나 달비골 계곡 지역으로 서풍계열의 바람이 이어지고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)에 나타낸 풍향의 분포를 보더라도 관측결과에서도 보았듯이 서풍계열의 바람이 영역 전반에 걸쳐 잘 나타나고 있다. Fig. 7(c)는 풍속분포를 나타낸 그림이다. 그림을 보면 도심지의 도로와 앞산이 시작되는 경계지역을 따라 강한 풍속을 볼 수 있다.

Table 2. Comparison of the observed with calculated wind speed and wind direction

	CASE I				CASE II			
	Wind speed (m/s)		Wind direction (degree)		Wind speed (m/s)		Wind direction (degree)	
	OBS	CAL	OBS	CAL	OBS	CAL	OBS	CAL
A site	0.6	0.6	225	291	1.1	0.8	82	124
B site	0.4	0.5	297	284	0.7	0.5	135	123
C site	0.8	0.6	257	270	1.0	0.7	152	132

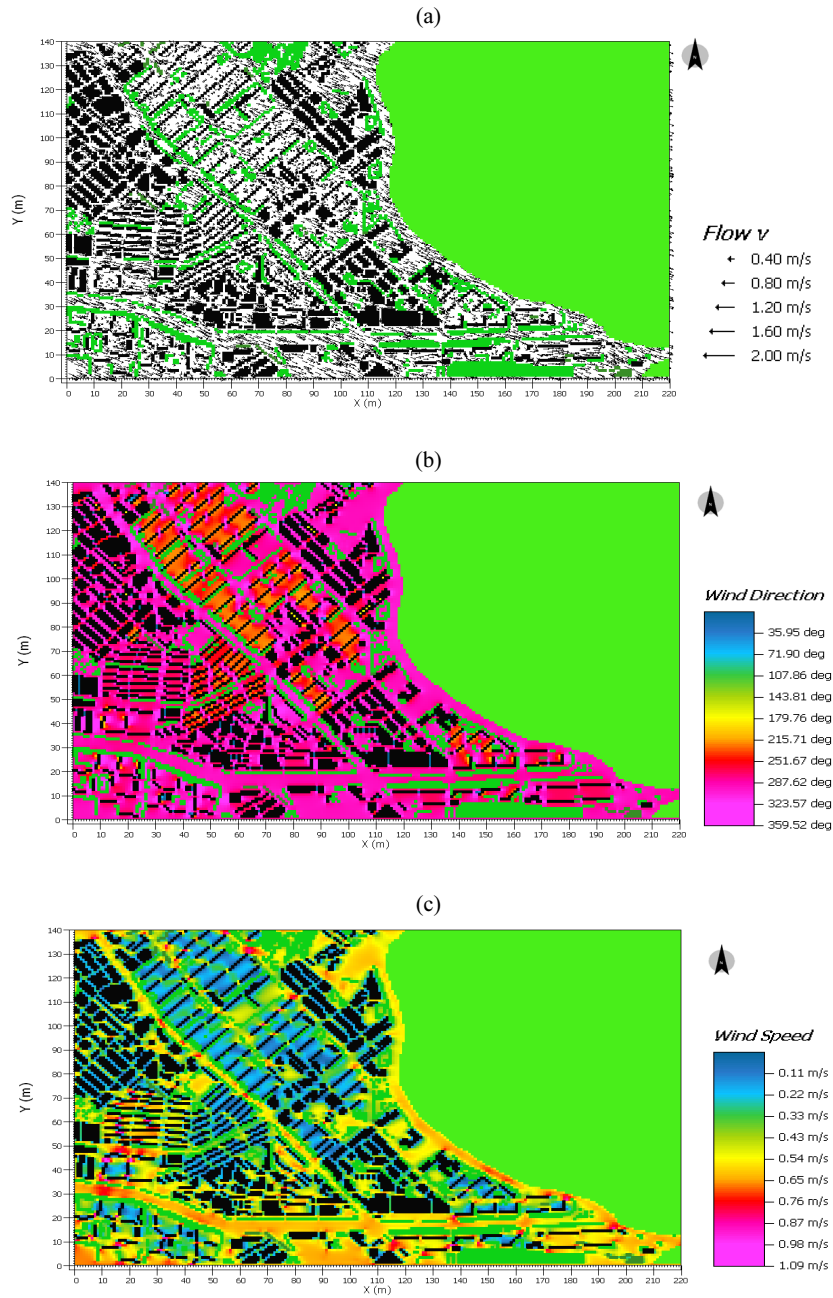


Fig. 7. Horizontal wind distributions of day case. ((a)wind vector, (b)wind direction, (c) wind speed)

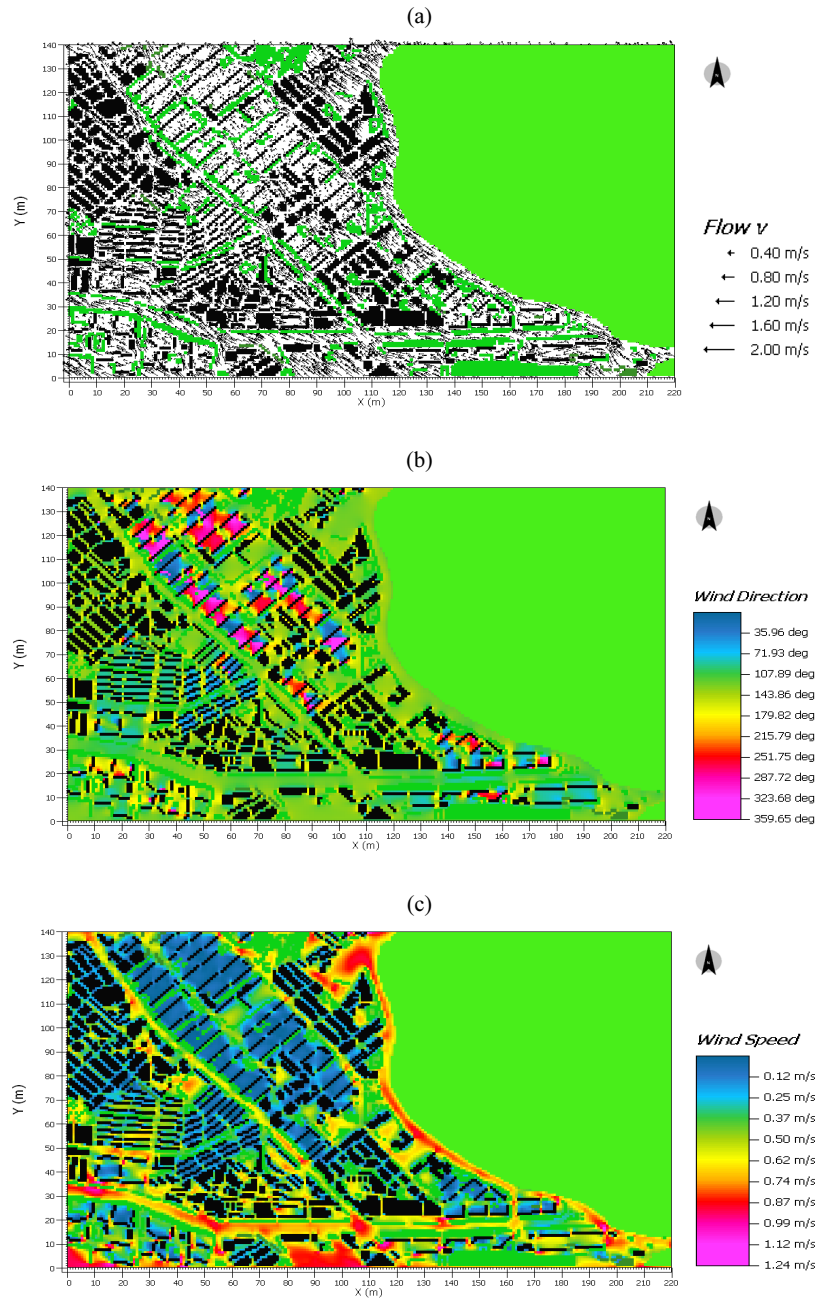


Fig. 8. Same as Fig. 7, except for night case.

Table 2를 보면 야간(00LST)에도, 주간과 마찬가지로 지점별 풍계의 특성을 수치실험에서 잘 나타내고 있는데 야간에 산사면을 따라 달비골 계곡으로 불어 내려가는 A지점에서 비교적 강한 풍속을 수치실험의 결과에서도 볼 수 있으며 세 지점 모두 관측된 남동풍 계열의 바람도 잘 나타내고 있다. 즉, 야간에 산정상 일대에서 복사냉각 된 공기가 달비골 계곡이 위치한 좁은 경사면을 따라 불어 내려오면서 비교적 강한 동풍계열의 바람이 A지점에 형성되고 이 바람이 주거단지를 지나 도심지로 불어 나가는 과정을 관측과 수치실험에서 나타내고 있는 것이다. 다만, A지점에서 관측된 풍향과 계산된 풍향에 다소 차이가 나타나고 있는데 이 또한 앞서 주간의 설명에서 언급한 바와 같이 달비골 계곡과 이어지는 동쪽의 고지대 계곡지형이 계산영역에 적게 포함되어 그 결과로 동쪽에서 불어 내려오는 산풍의 강도가 과소평가되어 실제와 다르게 남서풍 계열의 바람으로 편향된 결과가 나타난 것으로 판단된다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이, 야간에 앞산에 위치한 달비골 계곡을 통해 불어 내려오는 동풍계열의 바람을 수치모델이 잘 묘사하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8(a)는 00LST의 바람분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 야간에 달비골 계곡지역에서 시작되는 동풍 및 남동풍계열의 지점별 관측결과에서와 같이 영역 전반에 걸쳐 형성되어 있음을 알 수 있다. 풍향분포를 나타낸 Fig. 8(b)를 보더라도 동풍 및 남동풍 계열이 바람이 균일하게 분포하고 있다. 풍속분포를 나타낸 Fig. 8(c)를 보면 주간과 마찬가지로 도로와 앞산 경계를 따라 강한 풍속분포를 알 수 있고 특히, 도심지의 건물군 일대에서는 구조물의 배치와 형태에 따른 바람의 정체지역이 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있는데 이 지역에서는 대기정체에 따른 대기질의 악화가 심화될 수 있어 도심지 대기환경에 악영향을 미칠 가능성이 높다.

5. 결론

우리나라의 대표적인 내륙 분지형 도시인 대구의 도심에 위치한 앞산에서 발달한 계곡인 달비골과 이 부근에 위치한 주거단지를 대상으로 산곡풍의 발달과

그것이 유발하는 여름철 야간 기온 저감효과를 관측을 통하여 평가하고, 국지풍순환의 경로를 수치실험을 통하여 살펴보았다.

먼저, 국지풍순환계의 형성과 그 특징을 관측을 통해 분석하기 위해 세 지점에 AWS를 설치하여 분석한 결과, 산풍이 잘 발달하는 야간시간대에는 달비골 계곡에 위치한 A지점과 계곡 인근에 위치한 B지점에서의 기온이 도심지 저지대에 위치한 C지점에 비해 약 1.5~4°C 정도 낮게 나타났으며, 풍속 또한 C지점에 비해 2배 정도 강하게 나타났다. 또한 풍향을 보더라도 고도가 높은 달비골 계곡과 고도가 낮은 저지대의 주거단지 및 도심지가 형성되어 있는 지형적 형상으로 A지점과 B지점에서 동풍계열의 바람이 균일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 비록 C지점에서는 도심지 구조물의 영향으로 풍향의 변동성이 크게 나타난 것으로 판단되지만 그래도 동풍계열의 바람이 다수 나타나고 있어 달비골 계곡을 통해 불어나오는 산풍이 적게나마 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 기온, 풍속, 풍향의 관측결과 분석을 통해 야간 시간대에는 상대적으로 차가운 산풍이 달비골 계곡을 따라 주거단지를 거쳐 저지대의 도심지로 불어나가고 있는 것을 알 수 있었다. 주간에도 저지대 도심지와 주거단지에서의 기온이 달비골 계곡에 위치한 A지점에 비해 지속적으로 높은 것과 달비골 계곡을 따라 흐르는 강한 풍속, 그리고 세 지점에서의 주풍향이 200~300° 인 점을 볼 때 저지대 도심지를 지나 달비골 계곡으로 흐르는 서풍계열의 곡풍이 뚜렷이 형성되고 있음을 알 수 있었다.

이러한 관측결과를 바탕으로 연구대상지역내에서 형성되는 기류의 형상을 상세하고 구체적으로 살펴보기 위하여 Envi-Met 수치모델을 이용하여 살펴본 결과, 전반적으로 주간에는 곡풍인 서풍계열의 바람이, 야간에는 산풍인 동풍계열의 바람이 연구대상영역 전반에 형성되어 있음을 알 수 있었다. 또한 도심지로 갈수록 복잡 다양한 구조물의 영향으로 기류의 정체에 따른 풍속의 약화와 개활지 도로를 따라 산풍과 곡풍이 잘 흐르고 있음을 알 수 있었다. 이러한 수치실험을 통해 도시내 바람길 확보와 도시 대기질 개선이라는 측면에서 도시구조 계획이 얼마나 큰 영향을 미칠 수 있는지를 간접적으로 알 수 있었다.

이상의 관측자료 분석하고 수치실험을 통해 도시 내 소규모 지역에서 국지순환풍이 뚜렷이 형성되고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 향후, 도시내 열섬현상 완화와 도시 대기질 개선이라는 정책추진에 있어 도시 내부에서의 자정작용이라는 측면에서 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구(단독)(KRF-2008-313-C00937) 사업입니다. 재정지원을 해 주신 한국연구재단 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Ichinose, T., Urano, A., Shimodozono, K., Hanaki, K., 1998, Impact analysis of three dimensional replacement of urban activity on urban thermal environment, "Klimaanalyse fuer die Stadtplanung", Report of RCUSS, Kobe University, 279-285.
- Ichinose, T., 1999, The climate analysis of Germany -Climate analysis for urban plan-, Tenki, 46, 709-715.
- Ichinose, T., 2002, Counteractions for Urban Heat Island in Regional Autonomies: Activities in Councils of MoE. Japan, Journal of Atmospheric Environment, 37, A71-A83.
- Jung, W. S., Park, J. K., Lee, H. W., 2006, An analysis on influence of geographical variation induced by development affecting to the local scale wind environment -Numerical simulation using the Envi-met model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(6), 888-903.
- Jung, W. S., 2007, An analysis of wind field according to the prevailing wind directions for understanding of ventilation passages in an apartment complex, Journal of Environmental Sciences, 16(4), 467-477.
- Kanno, Y., Yamajoe, K., 2001, 暑い夏, 地理, 549(7), 51-63.
- Kim, H. D., 2003, Study on the Long-term Change of Urban Climate in Daegu, Journal of the Environmental Sciences, 12(7), 697-705.
- Koo, H. S., 2003, A numerical simulation of air pollutant concentration considering mesoscale circulation in Daegu, Master, Keimyung University, Daegu, Korea.
- Koo, H. S., Kim, H. D., Kang, S. D., 2004, Numerical simulation experiment on the wind ventilation lane of the local circulation winds in Daegu, Journal of the Environmental Sciences, 13(4), 367-376.
- Koo, H. S., Kwon, B. H., Kim, H. D., 2007, Observational Study on the Local Wind of the Dalbi-Valley Located at Ap-Mountain in Daegu, Journal of the Environmental Sciences, 16(1), 73-79.
- Landsberg, H. E., 1981, The urban climate. Academic Press, Newyork, 275.
- Mikami, T., 2005, Abnormal climate in Tokyo, Yosensha Press, 95pp.
- Yamashita, S., 1995, Heat island and amenity, Study group for climate impact and application newsletter, 11, 66-73.
- 一之瀬俊明, 1999, 獨逸のKlimaanalyse-都市計劃のための氣候解釋, 天氣, 46, 709-715.
- 日本環境省, 2001, Heat Island 對策手法 に関する調査檢討報告書, Heat Island 對策手法調査檢討委員會, Japan, 4.