

PA26) 성지곡수원지 부근 산곡풍의 기단변질과정에 관한 수치실험

김익영*, 이부용¹, 황수진², 김해동¹

계명대학교 환경방재시스템학과, ¹대구가톨릭대학교 환경학과
²부산대학교 지구과학교육과

1. 서 론

도시에는 좁은 면적에 많은 사람들이 모여 살기 때문에 지표면은 열저장 기능이 큰 아스팔트도로와 콘크리트 건물로 덮이고, 인공열의 배출이 많아진다. 아울러 도심에는 초고층의 상가건물이 무질서하게 위치하면서 바람의 환기기능이 현저히 악화되고 있다. 이러한 영향으로 도시는 점차 기온이 올라가서 여름철 도시인의 환경쾌적성이 손상되고 있다. 이러한 도시환경의 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 독일의 슈투트가르트와 후라이부르그 등에서는 바람의 환기경로를 고려한 도시계획이 발전해 왔다. 최근에는 일본과 아시아의 대도시에서도 해륙풍이나 산곡풍을 이용한 도시의 환경쾌적성 개선을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근 우리나라에서도 바람길 확보의 중요성이 언급되고 있지만, 기상모델을 이용한 수치실험과 현장관측을 통한 바람의 환기 능력을 정량적으로 평가한 연구는 그다지 많지 않다.

본 연구에서는 남쪽으로는 바다에, 북쪽 내륙으로는 높은 산지가 발달하여 풍부한 바람길을 가진 부산의 성지곡 수원지에서 서면 구간을 대상으로 청정냉기류의 확보를 통한 도시환경 개선의 가능성을 평가해 보았다. 특히 냉기류가 도시를 지나면서 변질되어 가는 과정을 현장관측과 2차원 수치실험을 통하여 정량적으로 평가해 보았다.

부산은 남쪽으로는 바다에 접해 있고, 내륙에는 금정산, 장산, 황령산 등의 규모가 큰 산이 잘 발달해 있다. 그래서 이들 북쪽 산지에서 발원한 하천이 도시를 가로질러 남쪽으로 잘 발달해 있기도 하다. 이들 하천은 무엇보다도 부산의 수문학적 통로로서 중요한 역할을 한다. 산지에 내린 강수와 생활용수로 배출된 물이 바다로 유출되는 통로로서의 역할을 하는 것이다. 그리고 지금은 부산의 소하천이 거의 복개되어 그 기능을 소실하였지만, 하천은 갈수기에 저지대로 물을 공급하여 생태계를 유지시켜주는 기능을 하기도 한다. 최근 환경친화적 도시계획에 있어서 도시하천의 기능을 복원시키는 이유의 하나가 바로 도시에서의 자연생태계 복원과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

부산에서 가장 대규모로 발달한 도시하천은 수영천-온천천-회동수원지 방향이고, 두 번째로 발달한 곳이 동천-서면-연지-성지곡 방향이다. 물론 이 외에도 부산에는 수많은 바람통로가 발달해 있다.

본 연구에서는 성지곡입구-초읍동사무소-LG학생과학관-부산진중학교를 따라서 기상관측사이트를 설치하여 이 경로에서 발달하는 국지풍의 특성을 조사하였다. 그리고 이때 얻어

진 냉기류가 도심을 지나면서 변질되는 과정을 2차원 대류모델을 이용하여 평가하였다. 이 연구의 결과는 도시의 포장재(아스팔트, 건축물 자재)의 개선을 통한 바람길의 보전과 도시 열섬 완화효과를 검증하는 데에 귀중한 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

<현장관측>

성지곡수원지 입구에 위치한 학생과학문화관 광장 지상에 자동기상관측장치를 설치하여 기온, 습도, 풍속, 풍향을 관측하였다. 아울러 대형 풍선에 온도와 습도를 관측하는 센서를 부착하여 고도 150미터까지 기온과 습도의 연직 분포를 관측하였다.

부산진중학교 옥상(고도 약 12미터)에 자동기상관측장치를 설치하여 기온, 습도, 풍향, 풍속을 관측하였다. 그리고 이 두 지점의 사이에 있는 초읍동사무소, SK아파트와 LG학생과학관(세동아파트)에 온습도로그를 설치하여 기온과 습도를 관측하였다.

그리고 성지곡에서는 글로브온도계를 설치하여 복사에너지 흡수를 고려한 온도(=흑구온도)를 관측하여 사람들이 아스팔트 도로상에서 체감할 수 있는 온도를 평가하였다. 동시에 아스팔트와 잔디면 상의 온도를 측정하여 지표면 조건에 따른 온도차이도 얻었다.

<수치 모델의 설정>

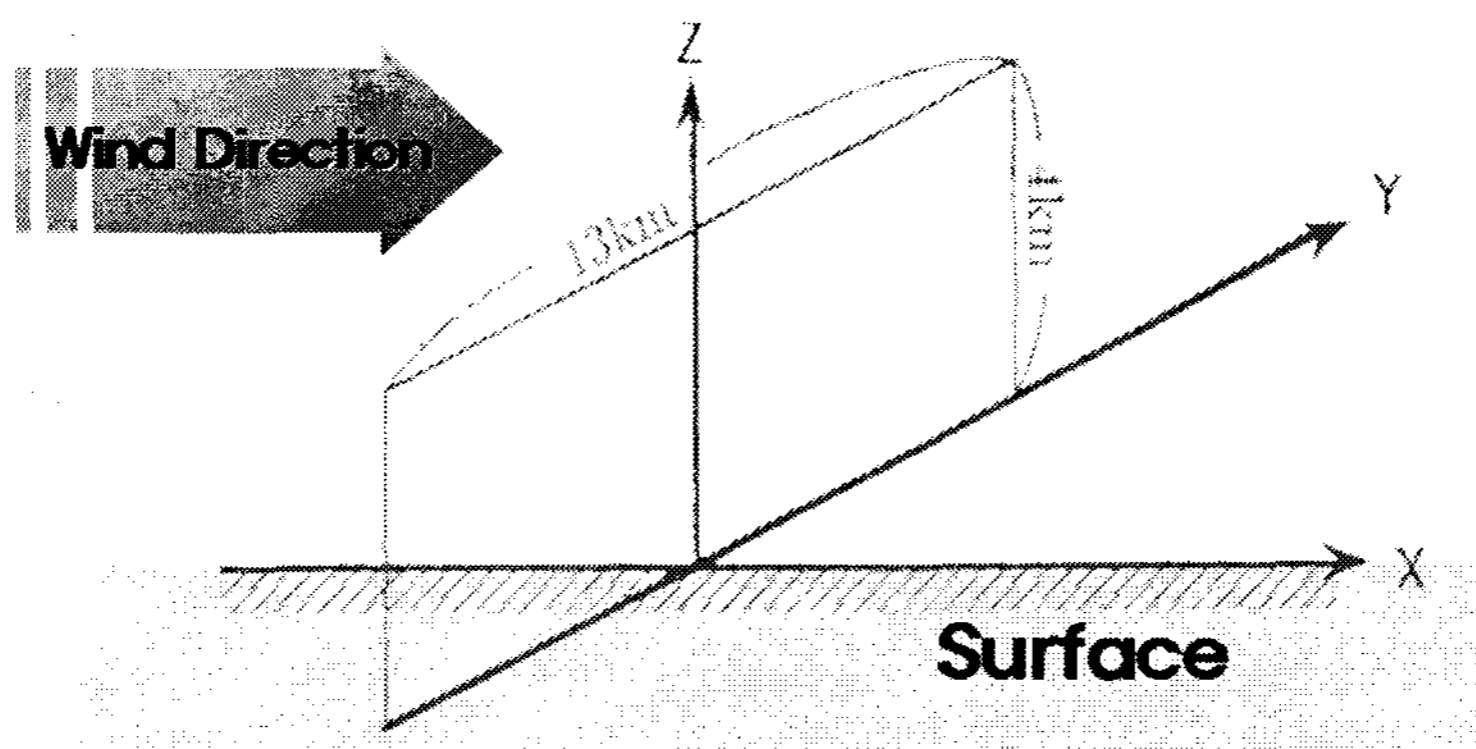


Fig. 1. The domain adopted for numerical experiment.

수치실험이 행해지는 모델의 설정을 Fig. 1에 나타내었다. 일반류는 풍속과 방향이 고도에 따라서 일정한 수평류로 가정한다. 그리고 흐름의 방향을 x-축으로 하고, x-축에 수직인 연직면(yz-면)에서의 2차원 대류에 혼합층이 발달하는 것으로 한다.

본 연구에서는, x-축 방향으로 변화하지 않는 yz-면상에서의 2차원 대류가 균질한 기본류에 의해 x-축 방향으로 진행하여 가면서, 지표면과 열교환을 해가면서 시간적으로 발달해가는 모습을 조사한다. 상정한 기단변질 경로는 성지곡수원지와 부산진중학교 사이의 약 3.5km 구간이고, 풍속은 야간에는 약 1m/s, 주간에는 약 2m/s였다는 사실을 반영하여 실험을 수행하였다. 즉 주간에는 초기 약 32°C였던 공기가 약 65°C의 지표면 위를 30분간 달려 성지곡 수원지에 도달하는 것으로 가정하였다. 야간에는 초가에 성지곡수원지에서 25°C였던

공기가 30°C의 지표면을 1시간 동안 달려서 부산진중학교에 도달하는 것으로 하였다.

<경계조건>

수평 방향의 경계조건은, 전 물리량에 대해서 cyclic으로 한다. 상하의 경계조건은, 속도에 관해서는 경계면이 stress-free이고 공기의 출입이 없는 것으로 생각해서,

$$w = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0, z = Z \quad (8)$$

혹은

$$\eta = \psi = 0 \quad (9)$$

로 둔다. 여기서 $z = 0$ 는 하부경계, $z = Z$ 는 상부경계를 나타낸다.

그리고 지표면과 열교환을 하면서 대류가 발달해 가는 현상을 고려한다. 한편, 본 연구에서는 상부대기가 하층의 기단변질에 기여하는 효과에는 관심이 없기 때문에, 모델대기와 상부대기간의 물질교환은 없는 것으로 가정하여 다음과 같은 경계조건을 도입한다.

$$\frac{\partial}{\partial z}(\theta_0 + \theta) = \frac{\partial}{\partial z}(q_{v0} + q_v) = \frac{\partial}{\partial z}(q_l) = 0 \quad \text{at } z = Z \quad (10)$$

<초기조건>

지표면기압은 1,000hPa, 지표면에서의 기온은 관측된 자료에 따라서 야간에 성지곡 수원지 입구에서 도심으로 향하는 공기의 온도는 298K(=25°C), 주간에 도심인 부산진 중학교에서 성지곡수원지로 향하는 해풍의 초기온도는 305K(=32°C)로 주었고, 기온감률은 $\Gamma = -\frac{dT}{dz} = 6.5 \text{ K/km}$ 로 설정하였다. 그리고 초기 상대습도는 관측으로 얻은 자료에 맞추어 주었다. 초기의 연직적 기압분포는 다음과 같이 정역학방정식을 적분하여 구하는 것으로 하였다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \ln P_0 = - \frac{g}{RT_0(1 + 0.608q_{v0})} \quad (11)$$

3. 결 과

<관측결과>

제시된 자료는 8월 3일 오후 5시(17시)부터 8월 4일 오후 5시까지 관측된 기상자료이다. 관측결과는 주로 성지곡수원지(=AWS라고 지칭되어 있음)와 부산진중학교에서 관측된 기온, 습도, 풍향, 풍속을 중심으로 제시하고자 한다.

먼저 풍향(Fig. 2)을 살펴보면 낮 시간대에는 180도 내외로 나타나고, 야간에는 360도(혹은 0도) 내외로 나타나는데, 풍향은 북쪽을 0도로 해서 시계방향으로 잰 것이다. 따라서 낮에는 남쪽에서 북쪽으로(서면에서 성지곡 쪽으로 부는 바람), 야간에는 성지곡에서 서면 쪽으로 바람이 분다는 것을 확인할 수 있다.

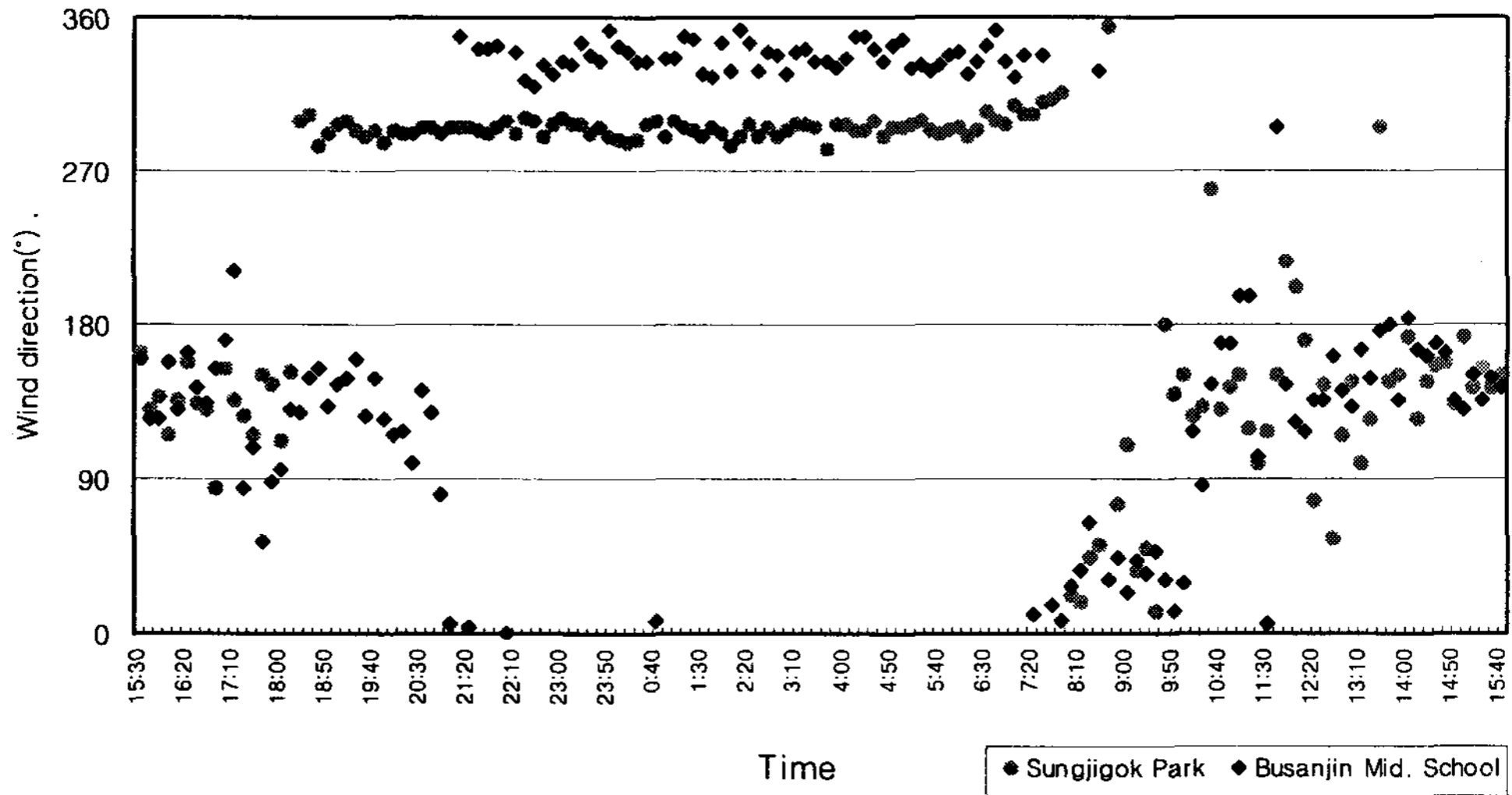


Fig. 2. Time variation of wind direction observed at Seongji valley and Busan-Jin middle school.

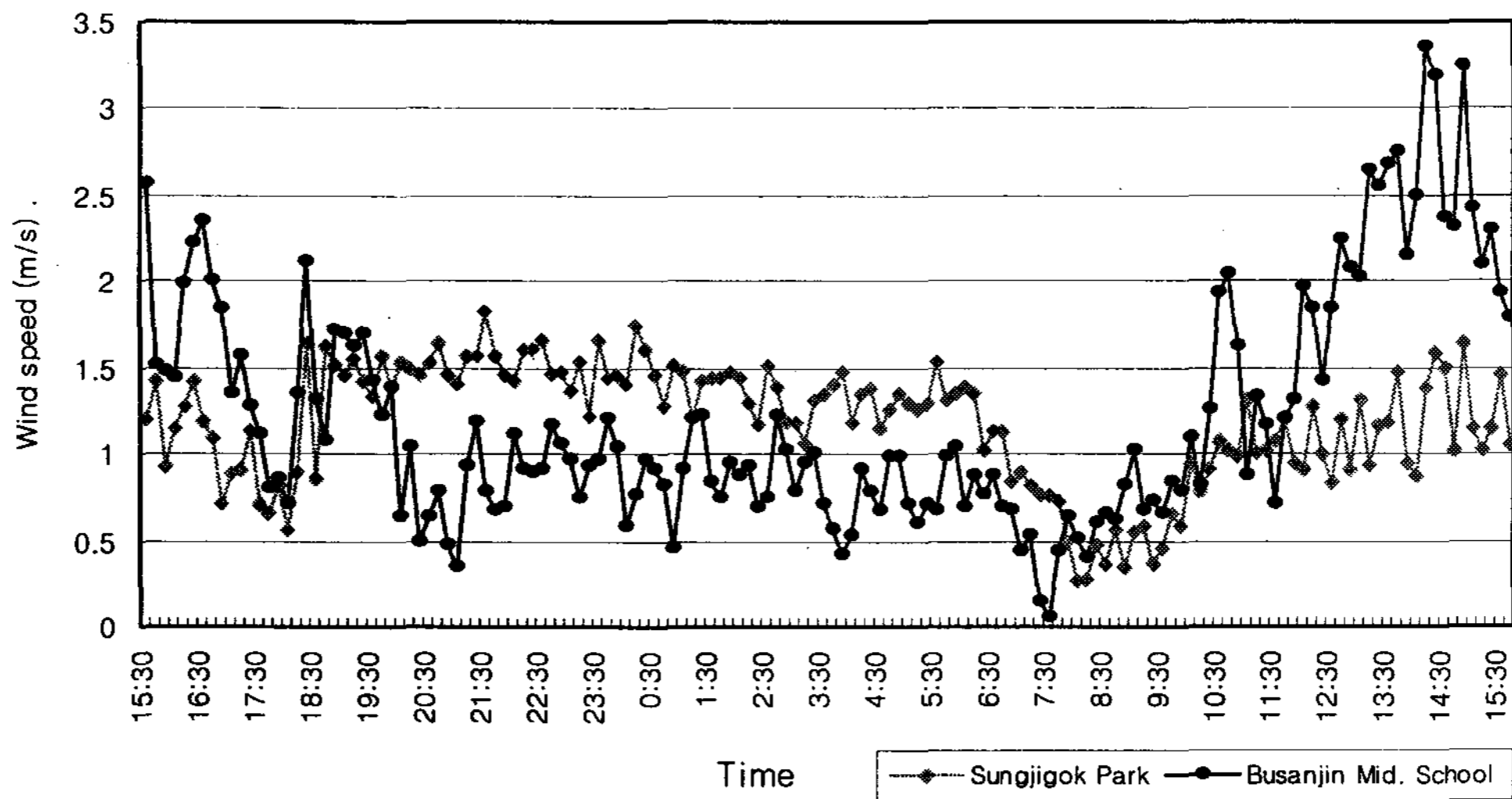


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for wind speed.

풍속(Fig. 3)은 낮에는 부산진중학교가 강하고, 야간에는 성지곡수원지쪽이 강함을 볼 수 있는데, 그 차이는 대략 30% 내외이다. 이렇게 차이는 나는 주요 원인은 두 지점 사이에 존재하는 건축물로 인한 마찰효과로 판단된다.

기온의 시간변화(Fig. 4)는 대체로 낮 시간 대에는 성지곡의 기온이 부산진중학교보다 약 3°C 높다. 야간에는 반대로 부산진중학교의 기온이 성지곡보다 약 3°C 높은 것을 확인할 수 있다. 이 두 지점 사이에 존재하는 아스팔트도로와 건축물에 의해 대기가 가열된 결과로 3°C의 차이가 발생하였다고 생각할 수 있다.

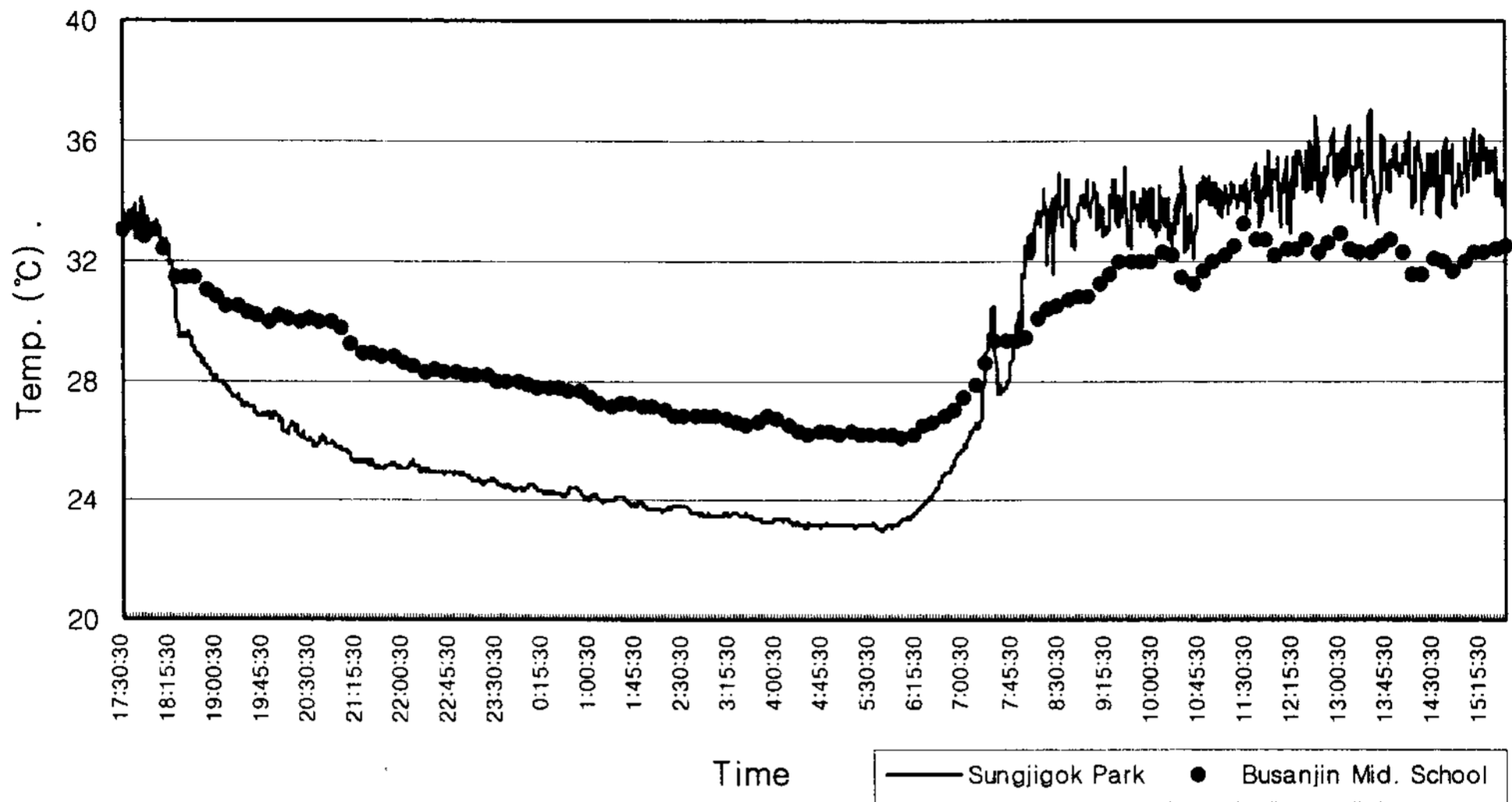


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for air temperature.

그리고 여름철 기온이 30°C를 넘을 때, 일본인들은 이를 진하일(眞夏日)이라고 지칭하는데 부산진중학교에서는 대략 오후 9시 30분경까지도 30°C 이상을 나타내었다. 이는 성지곡(오후 6시 30분)보다 3시간 정도 더 긴 것이다.

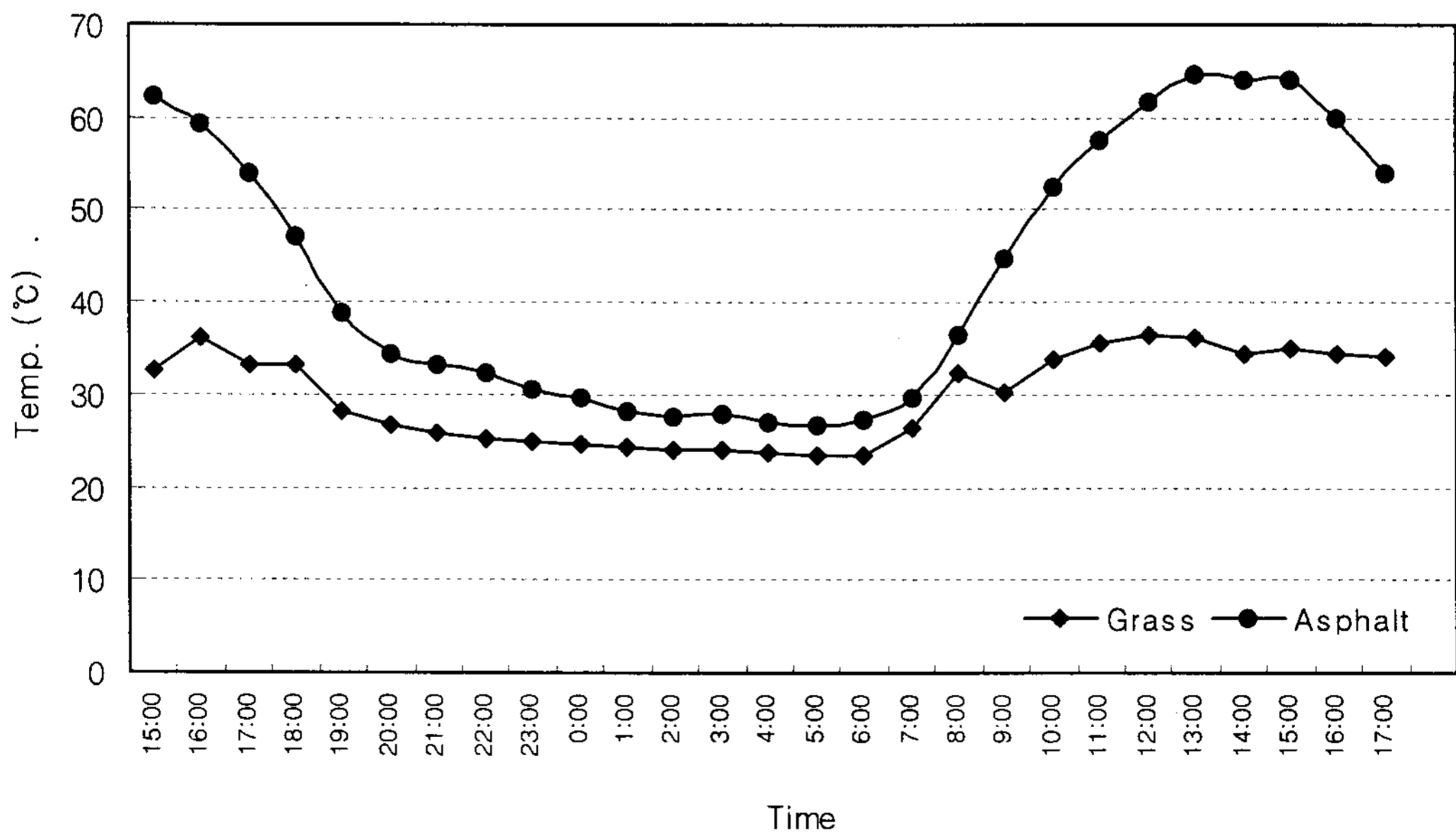


Fig. 5. Time variation of surface temperature at asphalt and a grass plot.

관측일에 아스팔트 도로의 온도(Fig. 5)는 야간의 30°C 내외에서 주간 65°C에 이르기까지 항상 기온보다 높은 온도를 유지하였다. 참고로 관측일에 얻은 잔디면의 온도를 같이 제시하였다.

<수치실험>

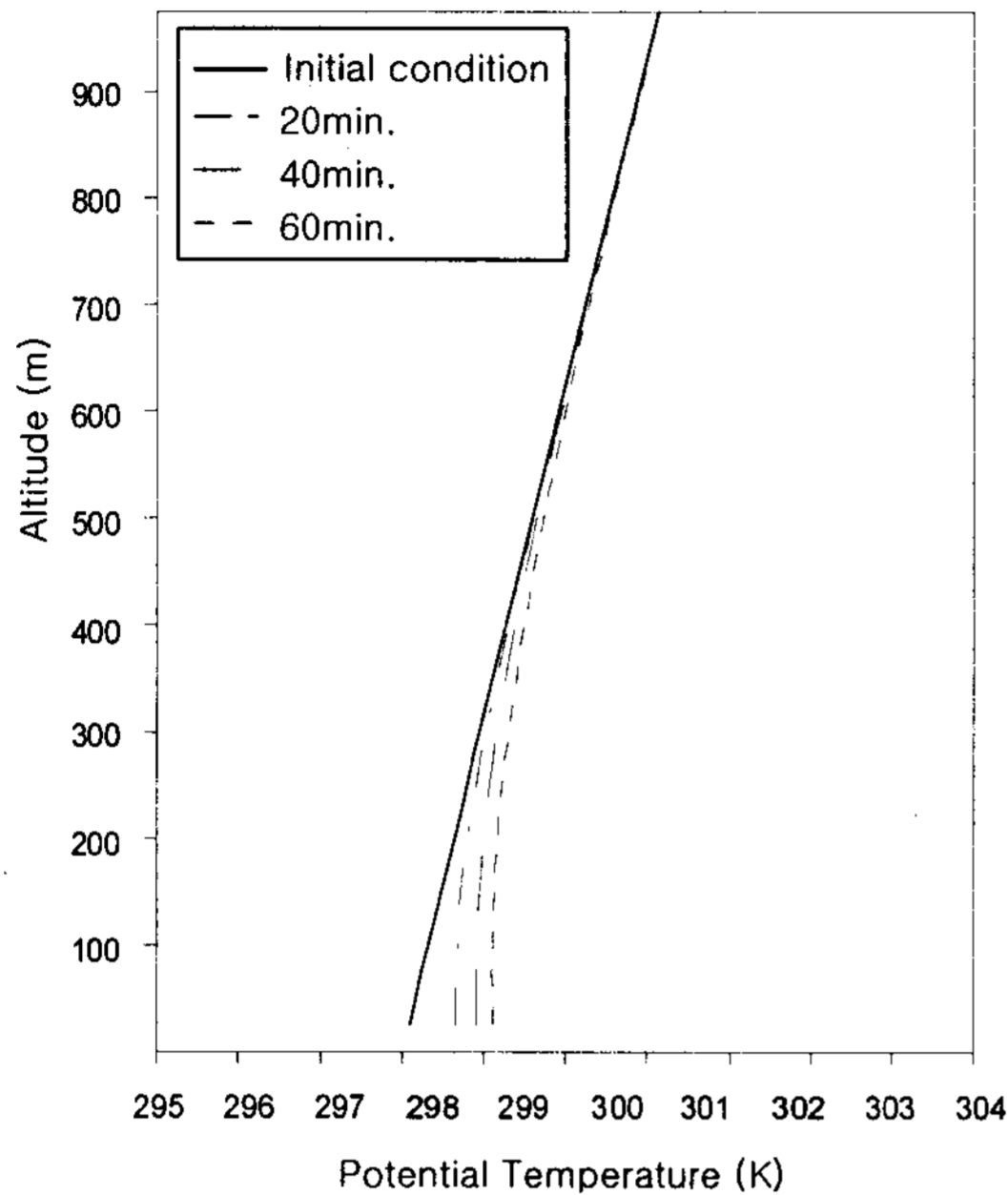


Fig. 6. Time variation of temperature during nighttime.

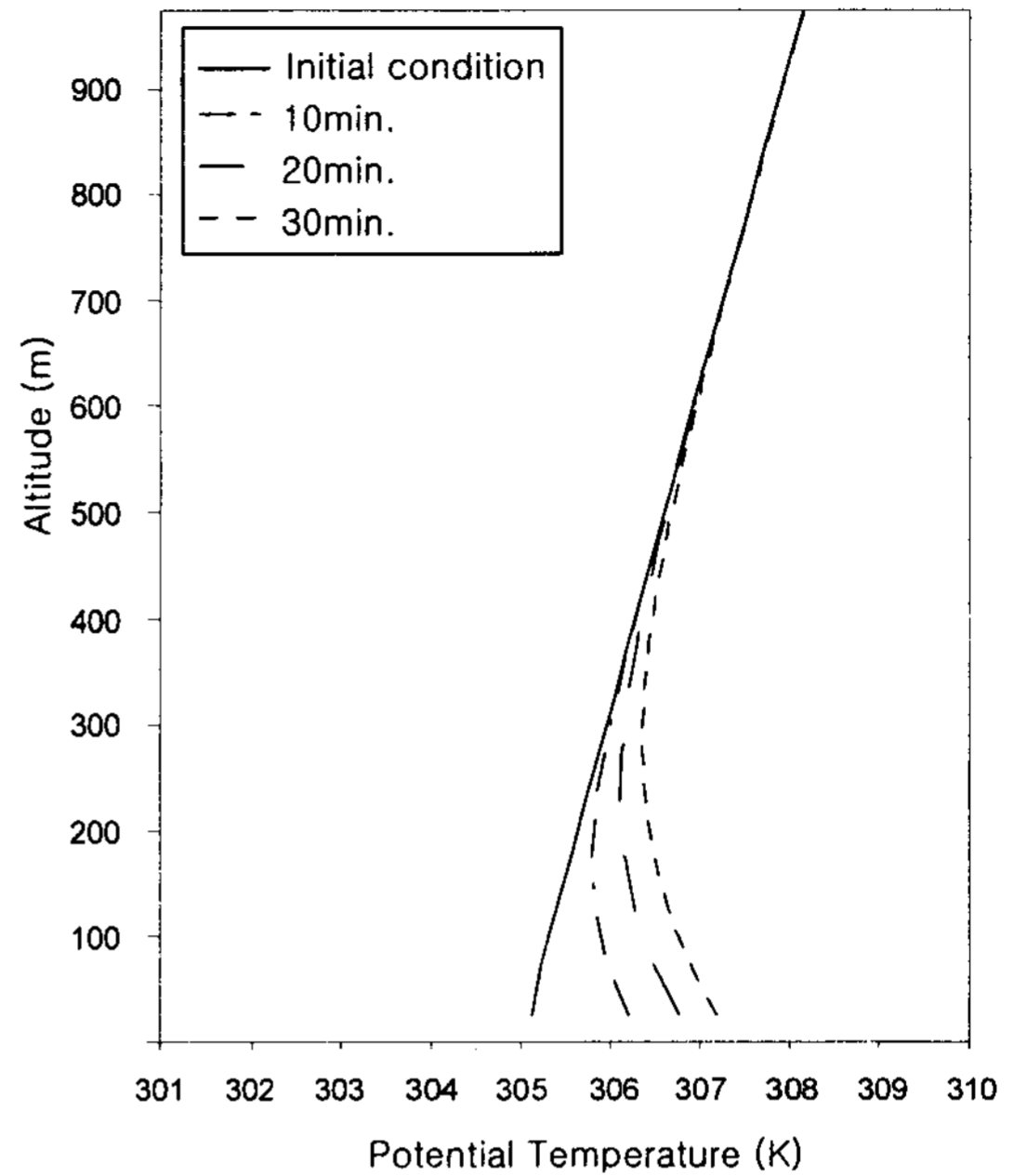


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for daytime.

주간과 야간을 대상으로 수행한 기단변질에 관한 수치실험으로 얻은 기온의 연직분포 변화를 (Fig. 6과 7)에 제시하였다. (Fig. 6)은 야간에 성지곡수원지에서 생성되어 도심으로 향하고 있는 기류가 1시간 동안 기단변질을 받아 가면서 부산진 중학교에 도달하기까지의 기온변화과정을 나타낸 것이다. 저온의 산풍이 약 3.5km 도심으로 달려 약 1.3°C의 기온상승이 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 관측결과(3°C 상승)의 약 50%에 불과한 것이다. 이렇게 관측과 차이가 나는 것은, 이 모델에는 야간 동안에 냉방의 폐열로 대량 방출되고 있는 인공열의 부하가 반영되지 않았다는 사실에 주로 기인하는 것으로 사료된다.

(Fig. 7)은 낮에 부산진 중학교에서 출발한 해풍이 약 30분 후에 성지곡 수원지에 도달하는 과정에 나타난 기온의 시간변화를 나타낸 것이다. 지상기온상승은 약 2.4°C에 이르렀는데, 이는 관측결과(약 3°C)보다는 낮지만 대체로 현상을 잘 재현한 것으로 평가된다.

주간과 야간에 있어서 관측치와 수치실험의 결과에 차이가 크게 나타나는 것은, 여기서 사용한 수치모델이 인공열의 효과를 반영하고 있지 못한데 인공열의 기여도가 주간보다 야간에 높기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 인공열이 기온상승에 차지하는 비중은 여름보다는 겨울에 크고, 낮보다는 야간이 크다는 사실(Mikami, 2003)과도 잘 부합되는 것으로 판단된다.

지표면에서 대기 중으로 방출된 현열의 크기를 야간(Fig. 8)과 주간(Fig. 9)으로 나누어 제시하였다. 주간에는 약 150W/m², 야간에는 약 10W/m² 내외의 현열이 대기 중으로 제공되어 냉기류를 가열시키고 있음을 알 수 있었다.

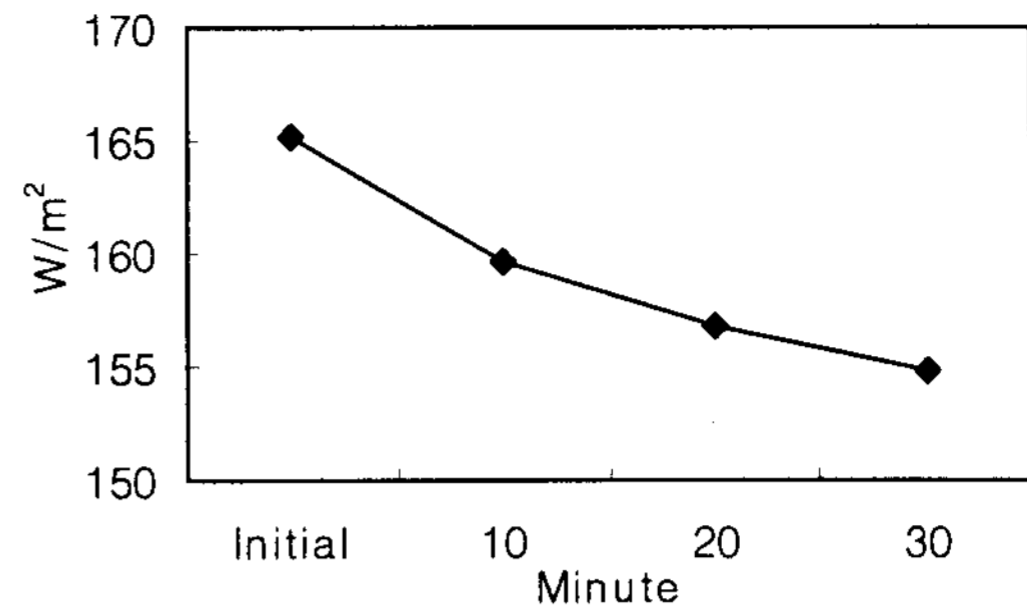
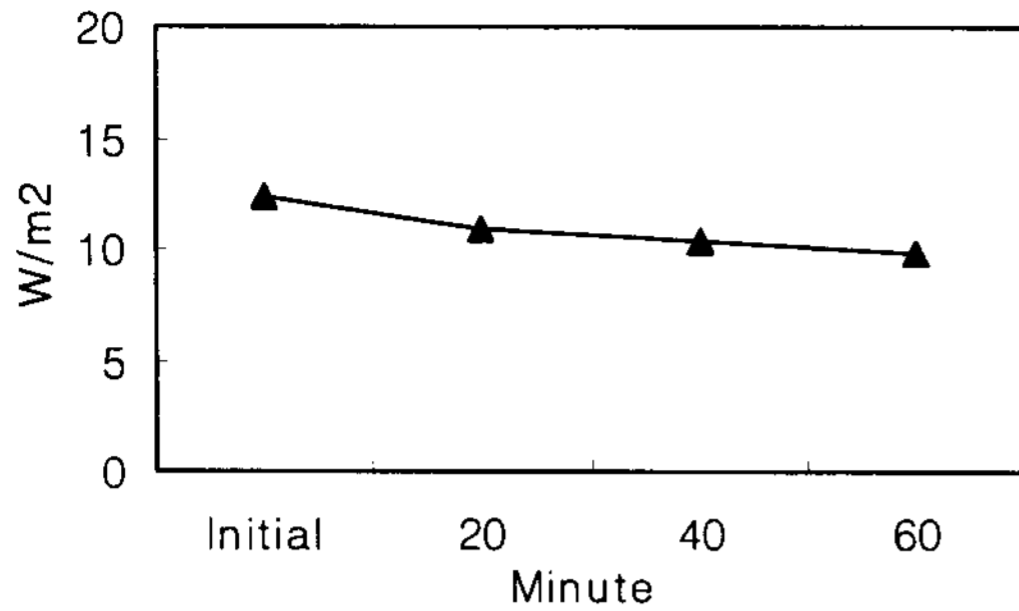


Fig. 8 Sensible heat flux during nighttime. Fig. 9 Same as Fig. 8 except for daytime.

4. 결 론

유난히 더위가 기승을 부리는 요즘에도 성지곡에서는 야간에 청정한 저온의 공기가 대규모로 생성되어 도심으로 유출되고 있다. 그러나 이들 냉기류가 지나는 바람 길의 보전이 이루어지지 않아 냉기류의 유익한 효과가 사장되고 있는 것이 확인되었다.

이들 바람이 지나는 통로는 지금은 복개된 하천지역이다. 향후 이들 지역을 중심으로 도시녹화(거리가로수, 옥상정원화, 벽면녹화 등)를 철저히 추진하고, 건물의 층고를 제한하면 성지곡에서 생성된 냉기류를 도심으로 보다 많이 도입할 수 있어 도시환경개선에 큰 도움을 받을 수 있을 것이다.

그리고 하얏리아부대 철거 후 시민공원 건립 시에도 공원 내의 지표면온도 저감대책(환경친화적 도로포장재(차열재 혹은 보수성 포장재 도입)/녹지공간/수변지대 확보 등)을 반영하면 낮 동안에는 성지곡 부근 지역, 야간에는 서면 일대의 기온을 낮추는 데에 기여할 수 있을 것이라는 것이 확인되었다.

5. 요 약

부산의 대표적 큰 계곡인 성지곡수원지는 남쪽으로 부산의 최대 도심인 서면을 향해 열려 있고, 그 이외의 삼면은 높은 산지로 둘러싸여 있다. 그래서 성지곡-서면-남향 일대는 낮에는 해풍이 곡풍(남풍)의 형태로 불고, 야간에는 산풍이 육풍(북풍)의 형태로 불고 있다.

이렇게 형성된 국지풍 순환의 규모와 특성을 평가하기 위하여, 계곡입구와 도심인 서면 부근에 자동기상관측장치를 설치하여 특별 관측을 수행하였다. 관측결과 주간에는 서면 부근의 기온이 성지곡 입구보다 낮았고, 야간에는 이와 반대로 나타났으며 그 차이는 대체로 3°C 내외였다. 이것은 주로 지표면 가열에 의한 기단변질의 결과로 판단된다. 관측 일에 확인된 도로표면온도는 낮에 약 65도까지 상승하였으며 야간에도 30도 정도의 고온이 유지되었다.

이 연구에서는 현장관측으로 확인된 기단변질과정을 이해하기 위하여 2차원 대류모델을 이용한 수치실험을 수행하였다.

수치실험의 결과 낮에는 지표로부터 약 150W/m²이상의 현열이 보급됨이 확인되었다. 야간에도 10W/m² 내외의 현열이 대기 중으로 보급되어 성지곡 수원지에서 발원된 냉기류를 가열시키고 있음이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10104-0)의 지원금으로 수행되었습니다. 재정지원을 해 주신 한국과학재단 및 기타 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- H. Kusaka and F. Kimura, "The Effects of Land-Use Alteration on the sea Breeze and Daytime Heat-Island in Tokyo Metropolitan Area," J. of Meteorological Society of Japan 78(4) (2000), 89-92.
- M. Kanou and T. Mikami, "Interaction between the Heat Island Phenomena and the Mountain Breeze in a Urban Area located on a Valley Mouth," 天氣 50(2) (2003), 87-88.
- M. Mori., T. Takemasa, T. Kobayashi, and H. Komoda, "Air Temperature structure and local winds during the night in the area of Nagasaki City" 天氣 44, 113-120.
- Y. Sakakibara, "The feature of water vapor pressure difference between urban and rural with a paddy field in the southeast park of Koshigaya City," 天氣 42 (1995), 355-361
- Y. Sakakibara and A. Morita, "Temporal March of the Heat-Island in Hakuba, Nagano" 天氣 49 (11) (2002), 39-40.
- T. Mikami, Actual Condition of Urban Heat Islands in Tokyo, 環境情報科學 32(2003), 32-36
- 環境省委員會, "地方自治體におけるヒートアイランド對策," 大氣環境學會 37(6) (2002), 23-25.
- 구현숙, 김해동, 2004, 대구지역의 국지순환풍의 환기경로 및 대기오염수송에 관한 수치모의, 한국지구과학회지, 제25권 6호, 418-427.
- 구현숙, "중규모 대기순환계를 고려한 대구지역 오염물질 농도의 수치모의에 관한 연구" (석사학위논문, 계명대학교, 2003), 60-63.
- 김종철, "대구지역의 도시기후환경지도 제작에 관한 연구" (석사학위논문, 계명대학교, 2005), 75pp.
- 김해동, 2003, 대구의 장기적 도시기후 변동에 관한 연구, 한국환경과학회지, 제12권 7호, 697-704.
- 성미애, 구현숙, 김종철, 김해동, 최혁, 전현숙, 2006, 대구지역의 기온 및 바람의 공간분포, 한국환경과학회 춘계발표회 논문집, 265-267.