

遠隔探查技法에 의한 都市熱섬 研究

李 賢 英*

(目 次)

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1. 序論 | 3. AVHRR 熱赤外線 資料分析 |
| 2. 資料의 特性和 研究方法 | 4. 結論 |

1. 序 論

1) 研究目的

도시기후와 같은 소기후를 연구하기 위하여는 도시는 물론 그 주변의 농촌지역에 이르기까지 조밀한 기상관측망이 필요하다. 그러나 한국에서 뿐만 아니라 선진제국에서도 기상관측망의 밀도가 도시기후를 파악하기에 충분할 만큼 조밀하지 못한 실정에 있다. 이러한 상황에서 도시기후에 관하여 연구하려면 기초자료부터 측정하여야 하는 어려움이 있으며, 따라서 그 연구의 필요성은 절감하면서도 실제적인 연구는 극히 부진하며 그 범위도 대단히 한정되어 있다.

1960년에 TIROS 1호가 미국에서 발사된 이래 다수의 氣象衛星이 軌道上에서 선회하며 많은 氣象情報를 地上으로 보내주고 있다. 그리하여 현상 관측이 어려운 각종 기상현상에 관한 정보를 짧은 시간안에, 그리고 경우에 따라서는 적은 비용으로 입수할 수 있게 됨으로써 기상연구에 박차

가 가하여지게 되었다.

특히 최근에는 컴퓨터 프로그램의 발달과 더불어 解像力이 1 km 인 AVHRR의 映像을 대축적으로 확대하여 사용할 수 있게 되는 한편 여러가지 오류도 수정할 수 있게 되었다. 그리고 이들 위성으로부터 관측된 熱赤外線 映像은 도시열섬을 나타내는 데 있어서 중요한 자료로 사용할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 遠隔探查 技法에 의한 도시열섬 연구의 가능성을 타진하여 보고자 NOAA AVHRR 映像을 이용하여 남한지역의 도시열섬의 존재와 수도권지역 열섬의 강도 및 형태를 알아보고 나아가 도시열섬과 여러 도시현상간의 관계를 밝혀 보고자 한다.

2) 研究動向

오늘날 環境汚染問題가 심각해짐에 따라 환경에 미치는 인간의 영향에 대한 관심이 고조되는 한편 도시화와 더불어 나타나는 도시기후에 관한 관심도 점차 높아지고 있다. 도시화에 따른 도시지역의 기후변화에 대한 연구는 특히 1970년대에 접어들면서 활발히 진행되기 시작하였다. Landsberg (1970)¹⁾를 비롯하여 Chandler (1970)²⁾,

* 建國大學校 理科學部 地理學科 教授
1988학년도 문교부 학술연구 조성비에 의한 것임.

1) Landsberg, H. E., 1970. "Man-made climatic changes." *Science*, Vol. 170, pp. 1265 - 1274.
2) Chandler, T. J., 1970. "Urban climatology-Inventory and prospect." *Urban Climates*, Tech. Note No. 108, WMO No. 254, TP. 141, pp. 1 - 14

Kellogg (1977)³⁾ 등은 도시화로 인하여 나타나는 기후현상 즉, 도시열섬의 분포와 그 생성원인에 대하여 논의하였다. 그리고 Bornstein (1968)⁴⁾은 도시표면은 에너지를 흡수하여 재 복사하고 인간 활동은 수증기, 탄산가스, 이산화황 등을 증가시켜 煤煙層의 고도가 높아져서 이것들이 도시에 야간의 열섬을 발생시키는 요인이 된다고 하였다. 그러나 Atwater (1972)⁵⁾는 그의 모델연구에서 이것들은 다른 요소에 비하여 열섬의 생성에 미치는 기여도가 낮은 편이라고 하였다. 1971년부터 5년간 미국의 St. Louis 지역에서 시행된 METROMEX 연구결과에 의하면 (Changnon, 1978⁶⁾, Huff and Vogel, 1978⁷⁾) 대도시인 St. Louis의 도시구조가 이지역의 여름철의雷雨와 降雨를 일으키는 데 있어서 지배적인 역할을 하는 것으로 되어 있다.

우리나라에서도 도시기후에 관한 관심이 1970년대 이래 짝뜨기 시작하였다. 盧在植(1973)⁸⁾과 李鍾範(1978)⁹⁾은 도시의 시계열적 기온상승률이 농촌지역에 비하여 큰데 이것은 都市化의 영향이라고 하였다. 기상연구소(1978¹⁰⁾, 1986¹¹⁾, 1987¹²⁾, 朴惠淑(1983¹³⁾, 1986¹⁴⁾, 李賢英(1984¹⁵⁾,

1985¹⁶⁾) 등은 서울지역을 그리고 李炳坤(1978)¹⁷⁾은 대구지역을 사례로 하여 도시열섬의 분포와 형성요인에 관하여 연구한 바 있다.

도시기후연구에 있어서 가장 큰 문제점은 관측 자료의 부족이므로 이 점을 극복하기 위하여 1970년대 초부터 衛星資料에 의한 연구가 점차 시도되고 있다. Rao (1972)¹⁸⁾는 ITOS-1에 탑재된 scanning radiometer (SR)를 통하여 측정된 자료로서 New York City와 Philadelphia-Baltimore-Washington, D.C.에 이르는 지역에서 열섬이 나타나고 있음을 밝혔다. ITOS-1은 지구 표면 전체를 밤과 낮에 모두 走査할 수 있는 텔레비전 카메라와 radiometer를 탑재한 環境衛星으로서 radiometer에는 두개의 channel이 있는데, 이 연구에서는 10.2~12.5 μm 의 범위의 channel이 사용되었다. 그는 도시와 공업지역이 주변지역의 농촌지역 보다 대체로 3~4 $^{\circ}\text{C}$ 따뜻하다는 것만을 밝히는데 그쳤다. 그것은 이 위성에 실린 radiometer의 解像力이 7.4 km이기 때문에 보다 구체적인 地域間의 대비를 할 수 없었기 때문이다. 이어서 Price (1979)¹⁹⁾도 위성자료를 사용하여 New England 지역에서 열섬이 도시기후

- 3) Kellogg, W. W., 1977, "Effects of human activities on global climate- Part I", *WMO Bull.*, Vol. 26, pp. 229 - 240.
- 4) Bornstein, R. D., 1968, "Observations of the urban heat island effect in New York City," *J. Appl. Meteor.*, Vol. 7, pp. 575 - 582.
- 5) Atwater, M. A., 1972, "Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer; a numerical study," *Bound.-Layer Meteor.*, Vol. 3, pp. 229 - 245.
- 6) Changnon, S. A., 1978, "Urban effect on severe local storms at St. Louis," *J. Appl. Meteor.*, Vol. 17, pp. 578 - 586.
- 7) Huff, F. A., and J. L. Vogel, 1978, "Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region," *J. Appl. Meteor.*, Vol. 17, pp. 565 - 577.
- 8) 盧在植, 1973, 都市氣候, 韓國의 氣候(金光植 外), pp. 244 - 253, 一志社.
- 9) 李鍾範, 1978, "서울地方의 氣溫 經年變化와 그 要因에 關하여", 韓國氣象學會誌, 14권 1호, pp. 29 - 35.
- 10) 기상연구소, 1978, 서울지방의 Heat Island 특성 연구, 중앙기상대 기상연구 보고서 MR 78-4, pp. 170.
- 11) _____, 1986, 서울의 도시기후 조사(I)(4-9월), 중앙기상대 기상연구 보고서, MR 86-5, pp. 121.
- 12) _____, 1987, 서울의 도시기후 조사(II), 중앙기상대 기상연구소 기상연구 보고서, MR 87-4, pp. 142.
- 13) 朴惠淑, 1983, "서울 夏季氣溫의 都市氣候學的 研究-간선도로에 따른 관측을 중심으로-", 이화여자 대학교 대학원 석사학위 논문, 77 pp.
- 14) Park, Hye-Sook, 1986, "Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities," *Atmos. Environ.* Vol. 20, No. 10, pp. 1859 - 1866.
- 15) 李賢英, 1984, "서울의 氣溫 分布", 理學論叢, 제9집, pp. 87 - 99, 建國大學校 基礎科學 研究所.
- 16) _____, 1985, "서울의 都市氣溫에 關한 研究", 이화여자 대학교 대학원 박사학위 논문, 104 pp.
- 17) 李炳坤, 1978, "都市氣溫의 季節別 分布 實態에 關한 研究", 건국대학교 대학원 석사학위 논문, 25 pp.
- 18) Rao, P. K., 1972, "Remote sensing of urban 'heat islands' from an environmental satellite," *Bull. Amer. Meteor.*, Vol. 53, pp. 647 - 648.
- 19) Price, J. C., 1979, "Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 107, pp. 1554 - 1557.

에 미치는 영향을 평가하였다. 그가 사용한 것은 HCMM (The Heat Capacity Mapping Mission) 으로부터 구한 디지털 자료로서 해상력은 600 m 이다. HCMM 은 1978년부터 1980년까지 2년간 운행된 극궤도 위성으로서 여기에 탑재된 센서는 반사되는 태양복사와 지표면에서 방출되는 열을 측정할 수 있다. Price 는 도시의 지표면 加熱에 대한 강도와 범위를 정량적으로 분석하여 다수의 대도시에서 위성을 통하여 측정된 온도는 농촌보다 10~15°C 높다고 하였다. 그리고 도시기온이 더 높은 까닭을 밝히기 위하여 위성에서 측정된 온도와 기온의 관계, 그리고 산업화에 의하여 局地的으로 가열되는 기온에 대한 補正關係를 연구할 필요가 있다고 하였다. Price (1984)²⁰⁾는 또한 복사온도에 미치는 대기권의 영향을 밝혀 地表溫度와 輻射溫度간의 관계를 알게 되면 NOAA -7에 탑재된 센서인 AVHRR (The Advanced Very High Resolution Radiometer) Channel 4 (10.8~10.9 μm)로 측정된 자료로 지표온도를 파악할 수 있을 것이라고 하였다.

해상력이 1 km 인 NOAA -3 VHRR (Very High Resolution Radiometer) 로 측정된 열적외선 자료를 사용한 Carlson 외 (1977)²¹⁾는 Los Angels 지역에서 오전과 오후의 표면온도를 구한 바 있다. 이들의 연구결과를 보면 오전중에 온도가 가장 높은 지역은 공업지역이고 오후에는 도심지역과 가옥밀도가 조밀한 주거지역에 최고 온도가 나타나고 있다.

한편 도시와 농촌의 서로 다른 지표면 가열현상에 의하여 도시에서는 낮은 층에 수렴현상이 발달된다고 전제한 Scofield 와 Weiss (1977)²²⁾는 同位衛星에서 30분 간격으로 얻은 해상력이 1 km 인 영상의 연속장면과 해상력이 8 km 인 디지털 열적

외선 자료를 사용하여 Washington, D.C. 와 Baltimore 간의 상공에 전형적으로 발달하는 積雲을 설명하려고 하였다. Matson 외(1987)²³⁾는 구름이 없는 날 밤의 열적외선 자료를 분석하여 미국의 중서부와 북동부에서 50여개의 열섬을 확인하였다. 이들은 몇개의 도시를 선정하여 도시와 농촌간의 최대온도차가 2.6~6.5°C에 이른다고 하였다. 또한 이들은 축적 1 : 500,000의 지도에 Washington, D.C., St. Louis 그리고 Baltimore 의 열섬의 영상을 확대하여 投影한 후 이것을 1970년의 미국 센서스 지도에 나타난 도시지역과 비교함으로써 7년간(1970~1977)에 진행된 도시화과정을 추정할 수 있다고 하였다. Vukovich (1983)²⁴⁾는 HCMM 위성자료를 사용하여 St. Louis 지역의 反射率(reflectivity)의 패턴을 연구하였다. 그는 이 지역의 자료온도는 소규모의 토지이용 상태에 의해서도 영향을 받는다고 하였다.

2. 資料의 特性과 研究方法

1) 자료의 특성

AVHRR 는 NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의하여 지구대기권의 기상관측을 목적으로 운영되고 있는 ITOS (The Improved TIROS Operation Satellite)에 탑재된 센서중의 하나이다. 일련의 Tiros-N / NOAA A - G 위성들은 極에 인접한 軌道를 1일 14.2회씩 선회하고 있다. 궤도의 기울기는 극지점에 대하여 98.8°이고 낮에는 남쪽에서

-
- 20) Price, J. C., 1984, "Land surface temperature measurement from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer," *J. Geophysical Res.*, Vol. 89, No. D5, pp.7231 - 7237.
- 21) Carlson, T. H., J. K. Dodd, S. G. Benjamin and J. N. Cooper, 1981, "Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia," *J. Appl. Meteor.*, Vol. 20, pp. 67 - 87.
- 22) Scofield, R. A., C. E. Weiss, 1977, A Report on the Chesapeake Bay Region NOWCASTING experiment, NOAA Tech. Memo. pp.55, NESS 94 NITIS No. Pb - 277 - 102.
- 23) Matson, M., E. P. MacClain, D. F. McGinnis, Jr. and J. A. Pritchard, 1978, "Satellite detection of urban heat island," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 106, pp. 1725 - 1737.
- 24) Vukovich, F. M., 1983, "An analysis of the ground temperature and reflectivity pattern about St. Louis, Missouri, using HCMM satellite data," *J. Climate and Appl. Meteor.*, Vol. 22, pp. 560 - 571.

표 1. AVHRR의 파장별 통로(spectral channel)

channel	spectral limit(μm)	region
1	0.58~0.68	가시광선
2	0.73~1.10	가시광선 및 근적외선
3	3.55~3.92	근적외선
4	10.5~11.3	열적외선
5	11.5~12.5	열적외선

북쪽으로 밤에는 북쪽에서 남쪽으로 선회한다.

AVHRR는 ITOS 가운데 NOAA-5까지 사용되던 VHRR를 더욱 개선한 센서로서 VHRR와 유사한 cross-track scanning system에 속하지만 전자가 단지 2개의 channel을 가졌던 것에 비하여 후자는 4개 또는 5개의 channel을 가지고 있다. Tiros-N의 AVHRR spectral band의 파장폭은 표1과 같다.

AVHRR는 하루에 2번씩 같은 지역에서 폭 2,700 km의 지표면은 走査하고 있다. 鉛直點(nadir)에서의 解像力은 약 1.1 km이다. 이 자료는 10 bit의 해상력으로 기록되어 있는데 이것은 다른 衛星에 실려있는 센서인 MSS(Multispectral Scanner), TM(Thematic Mapper), HRV(High Resolution Visible) 등의 해상력과 거의 비슷하다. AVHRR는 주사선마다 2,048개의 pixel을 나타내므로 5개의 channel을 합치면 pixel의 수는 10,240개에 이른다. 열적외선 센서는 백금 저항 온도계로 주사선에 나타나는 열의 값을 정확하게 측정한다.

AVHRR의 可視光線(channel 1,2)값은 알베도(albedo) 값으로 환산될 수 있고 AVHRR 열적외선값(channel 3,4,5)은 온도값으로 전환시킬 수 있다. 본연구에서 사용한 열적외선은 파장 10.5~11.3 μm 인 channel 4의 값이므로 이의 분석에서 얻은 값은 지표면의 輝度溫度(brightness temperature)이다. radians와 count의 관계는 기율기/차단값(the calibration coefficient)으로 나타낼 수 있으며 milliwatts/m² steradian cm⁻²/count로 표시한다. 따라서 센서(channel *i*)가 측정한 에너지는 다음과 같이 input data의 1차 함수로서 계산하게 된다.

$$E_i = S_i C + I_i$$

여기에서 E_i 는 에너지값, C 는 input count (1-1023), 그리고 S_i 와 I_i 는 scaled slope와 차단값이다. 에너지는 Plank의 역함수를 사용하여 복사온도로 전환시킬 수 있다.

$$T(E) = \frac{C_2 V}{\ln(1 + C_1 V^E)} E$$

여기에서 T 는 에너지 값 E 에 대한 온도(°K)이고, V 는 channel filter (cm⁻¹)의 중심 파장수이며 C_1 과 C_2 는 상수이다. 이 과정에 의하여 구한 온도는 대기에 의하여 약화된 값은 고려하지 않은 것이다.

映像에서 구한 온도값은 pixel의 평균값이므로 지상의 한 지점에서 측정되는 복사온도의 값과의 오차가 필연적으로 나타나게 되는데, AVHRR의 探查範圍가 상당히 큰 것을 고려하면 연직선을 중심으로 주사폭 15°(궤도상의 주사폭에서는 약 25°에 해당)의 범위의 자료에서는 변두리에서도 거의 왜곡이 나타나지 않으므로 추정된 지표 온도는 항공기에서 측정된 자료나 경우에 따라서는 지표에서 측정된 자료보다 양호하다고 할 수 있다.

2) 研究方法

열섬의 분포패턴과 강도의 특성을 밝히고 도시화의 원인이 되는 각종 요인과 열섬간의 관계를 분석하는 한편 표면온도와 기온을 비교하여 도시 기후 특히 열섬연구에 위성자료의 활용 가능성을 타진하기 위하여 본 연구에서는 1986년 2월 24일 오후 3시와 1989년 3월 9일 오전 9시의 NOAA AVHRR level 1 B archive tape를 사용하여 표면복사온도의 영상을 구하였다. 주사지역의 중심은 북위 38°와 동경 127°이고 범위는 위도상으로 약 8°, 경도상으로 약 4°에 걸친 지역으로서 서울을 중심으로 하여 한반도가 포함된다. 자료 분석에는 TeraScan system을 사용하였다. 이것은 TRIOS-N 極軌道 氣象衛星의 센서로부터 자료를 획득, 기록, 분석하고 영상을 모니터에 投影할 수 있도록 고안된 컴퓨터 프로그램으로서 2개의 subsystem으로 나뉘어 있는데 그중 하나는 위성으로부터 자료를 획득하는 것이고 다른 하나는

자료를 분석하는 것이다. Channel 1(0.58~0.68 μm)과 channel 2의 近赤外線(0.725~1.1 μm) 자료의 분석을 통하여는 하천의 유로, 하천 퇴적물, 호수, 저수지 등을 지도화하는 한편 지표면, 수면 및 구름 상단의 알베도(albedo)를 구할 수 있고 channel 3(3.5~3.9 μm), channel 4(10.5~11.5 μm) 및 channel 5(11.5~12.5 μm)의 熱赤外線 자료로서는 지표면과 해수면의 온도를 추정할 수 있다.

衛星으로부터의 영상은 위성의 전진운동과 이 운동에 수직되는 走査運動의 조합으로 연속된 線으로 나타난다. 이 결과로 나타나는 視差는 대체로 지표의 曲面과 관계되므로 수평선쪽으로 영상이 짧아지게 된다. 이러한 기하학적 오차 역시 이 프로그램은 보정하여 준다. 그리하여 본 연구에서는 우선 AVHRR channel 2의 영상에서 경기만의 해안선과 지표상의 위치가 일치하도록 位置補正을 하였고, Kidwell (1981)²⁵⁾의 방법에 의하여 raw count data를 表面溫度로 표시되는 radiance로 전환시켰다. 그리고 조사일의 도시온도의 범위인 -5~+10°C 범위의 온도를 취하여 영상을 구한 다음에 매 pixel에서 경위도 좌표와 온도 sampling을 하여 표면복사온도값을 구하였다. 따라서 이 값은 기온이 아니고 channel 4 파장의 에너지가 대기권을 통과하며 측정된 지표면의 輝度溫度이다. 이러한 표면온도는 여러가지 이유로 실제의 기온과 그 값이 같지 않다. 그 까닭은 大氣條件(雲量, 水蒸氣, 에어로졸 및 기온 관측점과 輻射體間的 거리 등)이 주요 인자로 작용하기 때문이다.

3. AVHRR 열적외선 자료 분석

1) 1986년 2월 24일 오후의 氣象概況

1986년 2월 상순과 하순에는 몽고부근에서 발달한 고기압의 세력이 커서 우리나라는 대체로 북

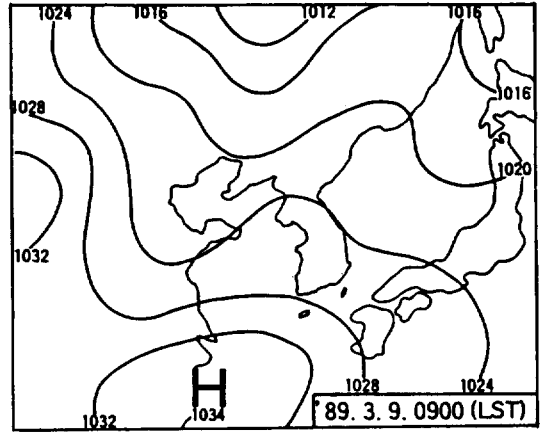


그림 1. 地上日氣圖(1986.2.24. 0900 LST)

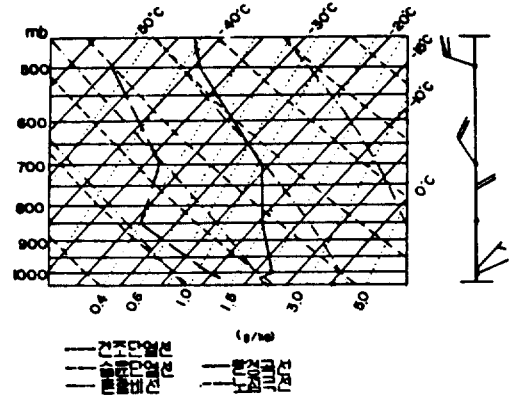


그림 2. 斷熱線圖(오산, 1986.2.24 00Z)

서계절풍이 불고 예년보다 추운 날씨를 보였다. 중순에는 대륙성 고기압이 다소 약화되면서 이동성 고기압의 영향을 받아 예년 보다 포근하였으나 후반에는 폭넓은 기압골이 통과하여 전국적으로 비가 내리는 곳이 많았다. 위성자료 조사일인 24일에는 전국이 몽고 남쪽으로 이동한 1038 mb의 고기압의 영향권에 들게 되어 서울의 해면 기압은 1024 mb였고 날씨는 구름이 전혀 없이 맑았다(그림 1). 이날 오산의 00Z의 斷熱線圖인 그림 2를 보면 지표 부근에서는 약한 氣溫逆轉現象이 나타나서 대기가 安定狀態를 유지하였다. 그리고 약 3000 m 이상의 고도에서는 북서풍이 불었으나 지표면 부근에서는 약한 북동풍이 불거나 정온상태

25) Kidwell, K. B., 1981. "NOAA Polar Orbiter Data User Guide. National Oceanic and Atmospheric Administration. Satellite Data Service Division. Washington, D.C."

를 보였다. 이 날의 地上 氣象概況(표 2)을 보면 고기압의 확장으로 자료의 시간인 오후 3시에는 서해안 지역의 군산(WNW, 9.7 m/sec), 목포(WNW, 6.3 m/sec), 완도(NNW, 7.0 m/sec) 등지에서는 다소 강한 바람이 불었다. 그러나 일평균 풍속은 7.3 m/sec 였던 목포를 제외하면 대부분의 도시지역에서 5 m/sec 이하로서 열섬이 발달하기에 적합한 기상조건을 갖추었다.

도시와 농촌간에 기온차가 나타나는 것은 대체로 일몰 후에 도시와 농촌지역의 冷却比가 다르게 나타나기 때문이다. 따라서 열섬의 최대강도는 일몰 후 3~5시간후에 나타나는 경우가 많다. 1500 LST는 열섬이 모식적으로 발달하는 시간이 아니므로 강도 높은 열섬을 기대하기 어려운 시간이다. 그러나 1986년 2월 24일의 NOAA AVHRR 열적외선(10.30~11.30 μm) 자료를 사용하여

구한 남한지역의 지표면 온도의 영상에서는 표 2에 수록된 관측소 이외에도 창원, 안산, 성남 등 20여개의 열섬을 확인할 수 있다.

2) 首都圈地域의 熱섬의 形態

그림 3은 1986년 2월 24일 오후 3시의 NOAA-9 AVHRR channel 4의 자료를 분석하여 얻은 수도권지역의 지표면 온도의 영상을 보여준다. 암회색 내지 검은 색에 가까운 색깔은 따뜻한 곳이고 밝은 회색은 서늘한 곳임을 의미한다. 그림 3을 확대하여 보면 다수의 도시에서 도시지역이 주변의 농촌지역보다 따뜻하다는 것을 알 수 있다. 이 영상을 축척 1:200,000 지도에 투영하여 그린 등온선도가 그림 4로 이는 겨울철 오후에 나타나는 열섬의 특성을 보여주고 있다.

표 2. 1986년 2월 24일의 기상개황

관측소	기온(°C)		풍속(m/sec)		풍향 (15:00)	상대습도(%) (15:00)	운량 (1/10)
	일평균	15:00	일평균	15:00			
춘천	-3.7	3.0	1.9	1.0	S	29	0.0
강화	-3.1	0.6	2.3	3.5	NW	42	0.0
서울	-3.2	0.3	2.6	3.7	NW	42	0.0
인천	-3.4	0.2	3.9	5.3	WNW	43	0.0
양평	-3.6	2.6	1.6	6.0	NW	-	-
수원	-3.6	0.4	1.8	4.3	W	40	0.0
포항	-0.3	4.8	2.0	3.3	ESE	33	0.0
군산	-1.7	0.4	4.9	9.7	WNW	51	0.0
대구	-0.1	4.3	3.2	5.3	W	39	0.0
전주	-2.2	2.3	1.5	2.7	WSW	38	0.0
울산	0.6	5.9	2.5	2.7	NNW	22	0.0
마산	0.8	3.4	3.9	3.8	N	32	0.0
광주	-0.8	3.6	3.6	5.3	NW	37	0.0
부산	1.2	5.8	2.6	3.7	WSW	35	0.0
남해	1.5	7.0	2.5	2.0	SW	37	0.0
목포	0.2	4.3	7.3	6.3	WNW	42	0.0
여수	0.7	5.6	5.7	4.0	NNW	28	0.0
완도	0.7	3.4	7.7	7.0	NNW	45	0.0
진주	0.7	5.8	2.3	4.3	NNE	41	0.0

(중앙기상대, 1986)

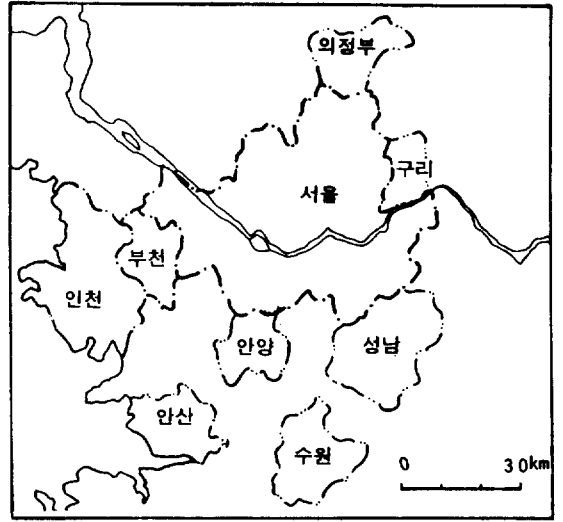
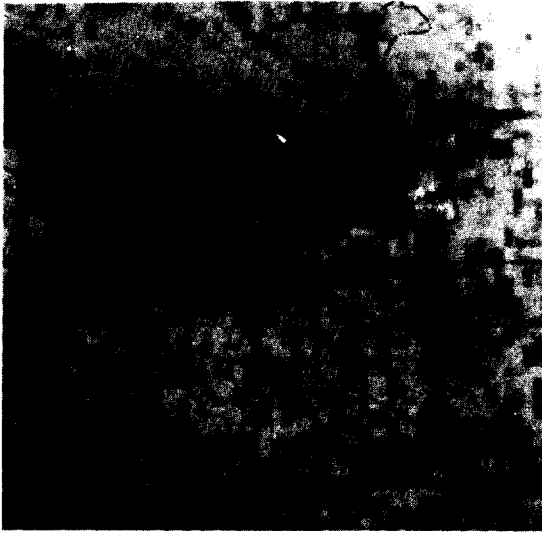


그림 3. 수도권지역 표면온도의 영상(1986.2.24 오후 3 시)

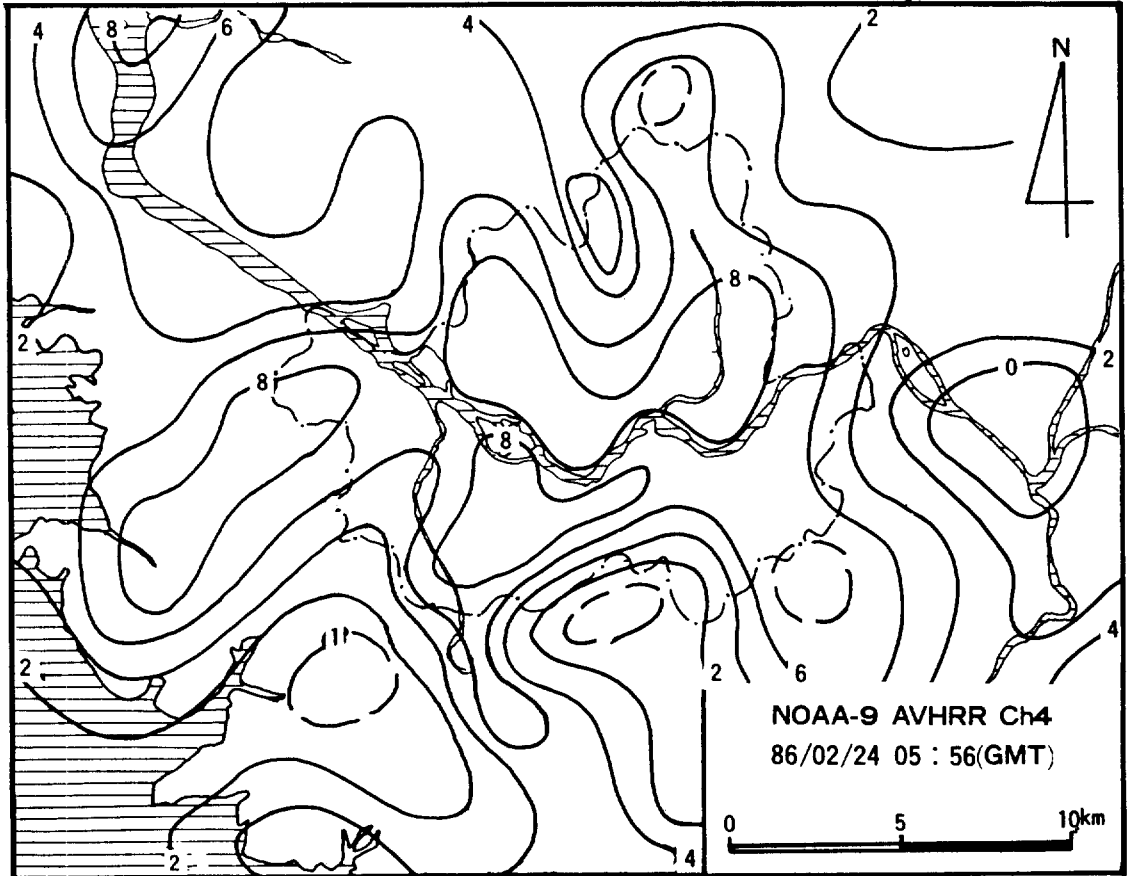


그림 4. 수도권지역의 지표면 온도의 분포(1986년 2월 24일 오후 3시)

지표면 온도의 분포에서도 李賢英(1985)²⁶⁾이 서울 지방에서 시행한 지상기온 관측결과와 같이 2개 이상의 열섬이 한강을 사이에 두고 발달되어 있다. 한강의 북쪽 지역에서는 시가지 전역에 말발굽 모양의 난핵이 넓게 발달되어 있는데 이것은 北漢山이 都心북부에 위치하는 까닭이다. 8.8℃에 달하는 최고 표면온도는 철도와 지하철역, 상가 및 고층 아파트 등이 분포하며 교통량이 많은 서울의 도심 중의 하나인 청량리 부근에서 나타난다. 한강 남쪽 지역에서는 업무지구와 고층 아파트가 밀집되어 있는 여의도, 상업 및 주거지역이 밀집한 영등포지역, 공업지구인 가리봉동, 그리고 고속버스 터미널이 위치하며 상가와 고층 아파트가 조밀하게 발달되어 있는 잠원동 등지를 연결하는 지역에 난핵이 자리잡고 있다.

暖核은 서울 이외에 인천과 수원은 물론 서울 주변의 衛星都市인 성남, 의정부, 안양, 부천, 부평 그리고 새로운 공업지역으로 부상하던 반월 등지에서도 소규모로 나타난다. 특히 김포공항에서부터 경인고속도로를 따라서 부천, 부평을 거쳐 인천에 이르는 지역 즉, 경인공업지대에는 마치 띠 모양의 열섬이 발달되어 있다. 한편 북한산 일대에서 부터 서울의 도심에 가까이 위치하는 秘苑에 이르는 지역과 冠岳山 부근은 주변에 비하여 표면온도가 낮다. 특히 흥미있는 것은 안양 서쪽에 위치하는 물왕 저수지(2000m²)와 과천 동남쪽의 과천저수지(8000m²)와 같이 소규모의 水塊부근의 표면온도가 낮게 나타난다는 것이다. 그리고 이 영상을 더 확대하여 보면 安山과 仁旺山 사이의 계곡을 따라 남쪽 기슭에 위치하는 冷泉洞이 도심에 인접한 지역임에도 불구하고 서늘한 지역으로 나타난다.

3) 氣溫과 AVHRR 熱赤外線 측정에 의한 表面溫度

그림 5는 지상 관측소의 기온자료²⁷⁾와 관측소의

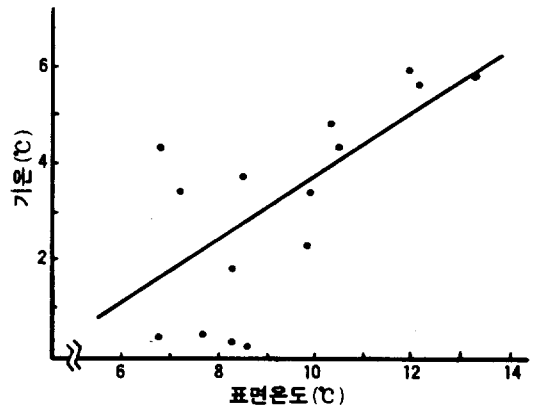


그림 5. 氣溫과 表面溫度의 관계

위치에 해당하는 지점의 표면온도를 그림 3에서 구하여 비교한 것이다. 衛星을 통하여 측정된 표면온도는 지상의 백엽상에서 측정된 기온과 같지 않다. Vuchovich (1983)²⁸⁾가 St. Louis 지역을 대상으로 HCMM 자료 분석을 통하여 측정된 표면복사온도의 경우 기온보다 더 높았다. 이것은 도시에 형성되는 都市峽谷 (Nunez, Oak, 1979)²⁹⁾에 에너지가 갇히기 때문이다. 도시지역에 세워진 각종 구조물은 복사에너지를 수용하는 잠재력이 크고, 높은 빌딩들은 공기의 순환을 제어하므로 흡수된 태양 복사에너지가 배출되는 것을 억제하기 때문에, 도시지역은 입체적으로 발달하면 할수록 더 높은 복사온도의 값을 나타낼 것이라고 추측할 수 있다. 그리고 태양은 기온이 측정되는 장소보다 훨씬 높은 건물의 지붕과 벽면을 가열하며, 이러한 현상은 결국 지표 부근의 온도를 상대적으로 낮게 해 준다.

한편 그림 4의 자료에서 두 변수간의 상관계수를 보면 0.73으로 나타나 자료에 대한 설명력이 단지 53%에 지나지 않는다. 이로 미루어 볼 때 도시의 구조물 이외에도 공장이나 발전소와 같은 人工熱의 排出源이 복사온도를 높이는 데 큰 역할을 하고 있음이 분명하다.

26) 李賢英, 1985, 前掲書, pp. 18-33.

27) 중앙기상대, 1986, 기상관측 원부(미간행).

28) Vukovich, 1983, op. cit, pp. 565-567.

29) Nunez, M., and T. R. Oke, 1977, "The energy balance of an urban canyon," *J. Appl. Meteor.*, Vol. 16, pp. 11-18.

4) 熱섬의 強度

1986년 2월 24일 1500 LST의 위성자료를 통하여 인구 30만 이상의 도시에서 구한 열섬의 강도는 표 3과 같다. 자료의 조사시간에 약간의 차이가 있으므로 비교하기가 곤란하지만 대체로 표면온도에 의한 열섬의 강도가 기온에 의한 것보다 크다. New England 지방의 열섬의 효과에 관한 Price (1979)³⁰⁾의 연구 결과에 의하면 대도시의 열섬 강도는 실제 기온 측정에 의한 것보다 HCMM radiometer로 측정된 표면온도에 의한 경우에 더 높게 나타난다. Vukovich (1983)³¹⁾ 역시 St. Louis 지역에서 같은 결과를 얻었는데 그는 기온과 복사온도에 의한 도시내외의 온도차가 여름보다는 겨울에 더 작다고 하였다.

열섬의 강도는 도시화 정도와 깊은 관련을 가지고 있다고 알려져 있다. 도시화는 정량화하기가 용이한 일이 아니므로 기후학자들은 인구수를 도시화의 지표로 하여 열섬의 강도와와의 관계를 연구하여 왔다. Oak (1973)³²⁾는 북아메리카와 유럽의

경우 최대열섬과 인구수의 관계식은 다음과 같다고 하였다. 그리고 이 방정식은 전자의 경우 분산의 96%를, 그리고 후자의 경우에는 74%를 설명하여 준다고 하였다. 그는 이러한 차이는 도시의

$$\left. \begin{aligned} \text{북미지역 } Tu-r(\max) &= 2.98 \log P - 6.41 \\ \text{유럽지역 } Tu-r(\max) &= 2.01 \log P - 4.06 \end{aligned} \right\}$$

공간적 구조의 차에 기인한다고 하였다. Fukuoka (1983)³³⁾ 또한 일본의 도시에 관하여 같은 관계를 구하였는데, 그의 연구결과에서는 두 변수가 선형관계를 보여주지 않는다. 즉, 도시인구 30만 이상인 도시에서는 $Tu-r(\max) = 4.83 \log P - 23.81$ 이고, 30만 이하인 도시에서는 $Tu-r(\max) = 0.85 \log P - 2.46$ 으로 나타나 전자는 분산의 95%를, 후자는 84%를 설명하는 것으로 되어 있다. 박혜숙(1986)³⁴⁾은 1982년에 移動觀測에 의하여 얻은 자료(서울, 성남, 의정부, 광명, 그리고 신도)와 李炳坤³⁵⁾의 대구자료를 사용하여 인구 30만 이상의 도시에서 두 변수간의 관계식을 $Tu-r(\max) = 3.43 \log P - 16.58$ 로 구하였는데; 여기에서는 분산의 98%를 설명하는 것으로 되어

표 3. 주요도시의 열섬의 강도

도 시	표면복사 온도차(℃)	기 온 차	측 정 일 시	비 고
서 울	8.0	4.0	1982. 1. 22, 1500	이현영(1985)
부 산	8.4			
대 구	9.0	4.0	1977. 2, 오후(월 2회 평균)	이병근(1978)
인 천	5.6			
광 주	5.5			
울 산	4.9			
전 주	5.6			
마 산	4.5			
성 남	4.1	1.4	1982. 6. 8, 오후	박혜숙(1983)
수 원	3.3			

30) Price, J. C., 1979, op. cit, p. 1566.

31) Vukovich, 1983, op. cit, pp. 566-567.

32) Oak, T. R., 1973, "City size and urban heat island," *Atmos., Environ.*, Vol. 7, pp.760 - 779.

33) Fukuoka, Y., 1983, "Physical climatological discussion on causal factors of urban temperature," *Memoirs of the faculty of integrated arts and sciences*, Vol. 8, pp.157 - 178, Hiroshima Univ.

34) Park, Hey-sook, 1986, "Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities," *Atmos. Environ.* Vol. 20, No.10, pp.1864 - 1865.

35) 李炳坤, 1978, 前掲書, 25 pp.

있다. 그리고 인구 30만 이하의 도시에서도 $Tu-r$ (\max) = $1.46 \log P - 5.93$ 의 관계식을 구하여 역시 분산의 98%를 설명한다고 하였다. 그러나 이 관계식에 사용된 도시의 수가 모두 5개에 지나지 않는 것을 감안하면 통계적 유의성에 문제가 있을 수 있다.

본연구에서는 그림 3의 映像資料를 축척 1:200,000 지도에 투영한 다음 도시내에서 표면온도의 최고값을 찾아서 그 값과 주변 농촌지역의 값의 차로써 열섬의 강도를 구하였는데 도시-교외-농촌을 나누는 임계치를 구하기가 용이하지 않았다. 그리하여 거대도시인 서울의 경우에는 도시와 농촌의 경계 부근에서 溫度傾倒가 큰 지점을 4 방위에서 각각 선택한후 이 지점에서 구한 농촌지역의 온도값을 평균하여 농촌지역의 온도값으로 사용하였다. 南韓地域에서 20여개의 열섬을 인지할 수 있으나 인구 30만 이상의 도시만을 선택하여 열섬과의 관계를 알아보았다(그림 6). 여기에서 두 변수의 상관계수는 0.84이고 분산에 대한 설명력이 71%이다. 그런데 인구 30만 이하의 도시에서 열섬의 강도가 오히려 대도시 보다 큰 경우가 있다. 창원(17.4만명)과 포항(26.1만명)이 이에 속하는데 창원은 1974년 이래 기계공업단지로 부상하여 工業立地係數가 9.0에 이르러 울산(공업입지계수: 11.9)에 이어 工業特化度가 전국 제 2위이고 포항은 한국 제일의 철강공업단지로서 공업입지계수가 7.1인 것을 고려하면 전술한 바와 같이 산업체에서 배출되는 인공열이 열섬의 강도를 강화시키고 있음을 알 수 있다.

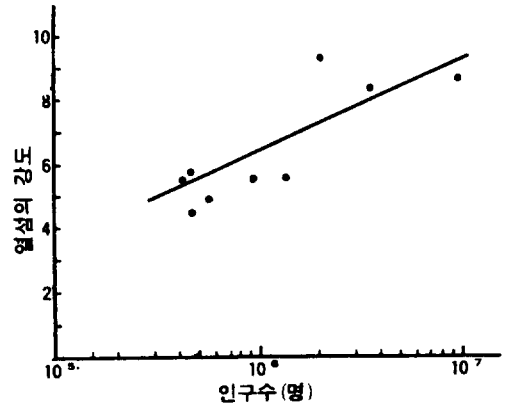


그림 6. 인구수와 열섬의 강도 ($Tu-r=2.89 \log P - 10.95$)

5) 熱섬의 變動

1969년 8월의 평균 최고기온에 의한 열섬의 분포³⁶⁾를 보면 당시 가옥의 밀도가 조밀한 방산동 일대에 난핵의 위치했었다. 그 후 10여년이 경과한 1982~1983년의 관측치³⁷⁾에 의하면 종관적 기상조건에 따라서 난핵의 위치는 조금씩 달라지지만 대체로 業務地區와 商街가 발달된 都心部를 중심으로 하여 동쪽으로는 청량리, 서쪽으로는 신촌로 타리까지 범위가 넓어졌다. 그리고 新市街地로 발달되고 있던 한강 이남 지역에도 또다른 열섬이 나타났었다. 그러나 난핵의 범위가 한강 이북의 그것에 비하여 좁고 強度 또한 크지 않았다. 暖核의 출현빈도가 높은 곳은 주택의 밀도가 조밀하며

표 4. 都市人口와 표면온도에 의한 熱섬의 強度

도 시	인구(10 ⁵)	열섬의 강도(℃)	도 시	인구(10 ⁵)	열섬의 강도(℃)
서울	9,646	8.6	울산	551	4.9
부산	3,517	8.4	진주	450	5.6
대구	2,031	9.3	마산	449	4.5
인천	1,387	5.6	성남	447	4.1
광주	906	5.5	수원	430	5.5

(인구자료: 1986년 11월 1일 상주인구조사)

36) 盧在植, 1977, 前掲書, pp. 252-253.

37) 李賢英, 1985, 前掲書, p. 62.

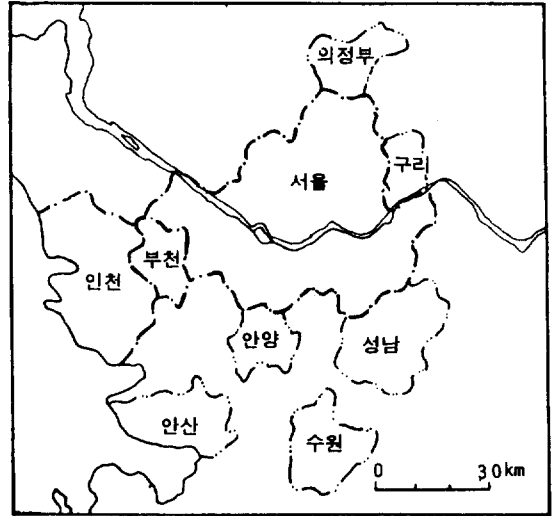


그림 7. NOAA - 10AVHRR 熱赤外線의 映像(1989년 3월 9일 0900 LST)

작은 구름으로 둘러 싸인 봉천동과 화곡동이었으며, 고속버스터미널 부근에도 가끔씩 난핵이 형성되었었다.

1986년에는 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 열섬의 난핵의 규모가 1982~1983년의 것에 비하여 확대되었고, 서울의 열섬이 위성도시지역까지 띠 모양으로 연결되었다. 그림 7은 1989년 3월 9일의 NOAA-10 AVHRR 열적외선 영상이다. 1989년 3월 9일도 비교적 열섬이 발달하기에 적합한 기상조건을 갖춘 날씨를 보였다. 그림 3과 그림 7을 비교하여 보면 1986년의 映像에서는 발견할 수 없는 따뜻한 구역이 1989년의 映像에서는 열섬으로 인지되는 것이 다수 나타난다. 즉, 최근 3년간에 邑에서 市로 승격되면서 도시화가 활발했던 구리시, 미금시, 하남시 등지와 1986년에 준공된 반월 공업단지가 동서로 확장되면서 반월면, 수암면 및 군자면의 각각 일부를 병합하여 건설된 안산시가 이에 속한다. 한편 서울에서부터 남쪽으로 판교 인터체인지, 기흥공업단지를 연결하는 경부고속도로와 북쪽으로는 통일로 연변에서 신홍주거지로 부상되고 있는 원당, 일산, 그리고 신도읍을 연결하는 지역이 高温域으로 나타나고 있다.

4. 結論

도시화 현상이 범세계적으로 확대됨에 따라서 도시기후는 장차 지구 전체에 나타날 수 있는 기후현상의 축소형이라고 볼 수 있다. 도시기후에 관한 연구의 필요성은 절감하면서도 그 연구가 부진한 가장 중요한 원인은 도시기후 연구에 필요한 기상관측 자료가 부족하다는 데 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 수도권 지역의 열섬을 사례로 해상력이 1 km 인 NOAA AVHRR 熱赤外線(1986년 2월 24일 1500 LST, 1989년 3월 9일 0900 LST) 자료를 분석하여 얻은 영상을 통하여 遠隔探査 技法에 의한 도시기후 연구의 가능성을 검토해 보고자 하였다.

AVHRR 열적외선 자료에서 구한 온도는 지표면의 복사온도이므로 백엽상에서 측정된 기온과는 다르다. 또한 열적외선 에너지는 대기권을 통과하면서 약화되기 때문에 지상에서 측정된 표면복사온도와도 일치하지 않는데도 분석결과는 다음과 같이 표면복사온도와 도시화현상이 비교적 밀

접한 관련을 가지고 있음을 보여주고 있다.

(1) 일반적으로 최대열섬이 나타나는 시간이 아닌 경우에도 열섬이 발달하기에 적합한 기상조건을 갖춘 날에는 AVHRR 적외선 자료에서 열섬을 발견할 수 있다. 남한지역의 영상에서는 20여개의 크고 작은 열섬이 인지된다.

(2) 인구 30만 이상의 도시에서 같은 시각의 기온과 위성에서 측정된 표면복사온도를 비교해 보면 대체로 도시의 규모가 클수록 표면복사온도가 기온보다 높다. 이와 같은 현상은 도시의 구조물이 태양복사 에너지를 都市峽谷에 가두기 때문에 나타난다. 인구수와 표면복사온도는 선형관계를 나타낸다. 두 변수간의 상관계수가 0.82이고 관계식은 자료의 67%를 설명하여 주고 있는 것으로 미루어 도시열섬의 형성 원인이 단순하지 않다는 것을 알 수 있다.

(3) 인구수 30만 이하의 도시에서도 都市内外의 온도차가 큰 곳을 발견할 수 있다. 창원과 포항이 이에 속하는데 전자는 工業立地係數가 4.99로 特化度가 전국에서 제 2위이고 후자의 그것은 3.9로서 제 3위이다. 창원과 포항의 인구는 각각 17만과 26만으로 도시규모에 있어서는 소도시에 속하는 데도 불구하고 도시내외의 표면복사온도의 차 즉, 도시열섬의 강도는 창원이 9.0℃이고 포항은 7.1℃이다. 인공열이 열섬 형성에 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

(4) 1986년과 1989년의 AVHRR 열적외선 자료에서 구한 영상의 비교로서 열섬의 變動過程 즉, 도시화의 과정을 파악할 수 있다. 1986년의 영상에서는 한강을 사이에 두고 강의 북쪽에는 동서로 길게 말발굽 모양의 열섬이 시가지에 넓게 발달되고 남쪽에는 업무지구, 상가 및 아파트 단지가 조밀하게 분포하는 여의도와 가리봉동에서부터 고속버스 터미널 부근에 이르는 지역에까지 열섬이 연결되어 있다. 그리고 서울의 위성도시인 성남, 의정부, 안양, 부천, 부평 등지에도 소규모의 열섬이 형성되어 있다. 3년후인 1989년에는 열섬이 마치 聯合都市와 같이 서울에서부터 위성도시지역에 이르는 전지역에 연결되어 나타난다. 특히 교통량의 증가로 배출 가스가 증가함에 따라 경부고속도로가 고온역으로 나타난다.

(5) AVHRR 열적외선 자료의 분석으로 구한 표면온도는 pixel의 표면복사온도의 평균 값이므로 하나의 pixel 안에 서로 다른 성질의 복사체가 섞여 있을 때 그 값이 한지점에서 측정된 값과 다르게 된다. 그러나 도시에서는 같은 유형의 토지 이용이 수 km씩 연속적으로 전개되는 것이 보통이므로 조밀한 기상관측 자료가 부족한 이 시점에서는 도시 열섬의 패턴, 강도 및 시계열적 변동을 개략적으로 파악하는 데 있어서 AVHRR 열적외선 자료의 활용은 바람직하다고 생각된다.

A Study on Urban Heat Islands over the Metropolitan Seoul Area, Using Satellite Images

Hyoun-Young Lee*

Summary

The brightness temperature from NOAA AVHRR CH 4 images was examined for the metropolitan Seoul area, the capital city of Korea, to detect the characteristics of the urban heat island for this study. Surface data from 21 meteorological stations were compared with the brightness temperatures. Through computer enhancement techniques, more than 20 heat islands could be recognized in South Korea, with 1 km spatial resolution at a scale of 1:200,000 (Fig. 3, 4 and 6). The result of the analysis of AVHRR CH 4 images over the metropolitan Seoul area can be summarized as follows.

(1) The pattern of brightness temperature distribution in the metropolitan Seoul area shows a relatively strong temperature contrast between urban and rural areas. There is some indication of the warm brightness temperature zone characterizing built-up area including CBD, densely populated residential district and industrial zone. The cool brightness temperature is associated with the major hills such as Bukhan-san, Nam-san and Kwanak-san or with the major water bodies such as Han-gang, and reservoirs. Although the influence of the river and reservoirs is obvious in the brightness temperature, that of small-scaled land use features such as parks in the cities is not apparent.

(2) One can find a linear relationship be-

tween the brightness temperature and air temperature for 10 major cities, where the difference between two variables is larger in big cities. Though the coefficient value is 0.82, one can estimate that factors of the heat islands can not be explained only by the size of the cities.

The magnitude of the horizontal brightness temperature differences between urban and rural area is found to be greater than that of horizontal air temperature difference in Korea.

(3) Also one can find the high heat island intensity in some smaller cities such as Chang-won ($T_u-r=9.0^{\circ}\text{C}$) and Po-hang ($T_u-r=7.1^{\circ}\text{C}$). The industrial location quotient of Chang-won is the second in the country and Po-hang the third.

(4) A comparison of the enhanced thermal infrared imageries in 1986 and 1989, with the map at a scale of 1:200,000 for the metropolitan Seoul area shows the extent of possible urbanization changes. In the last three years, the heat islands have been extended in area.

(5) Although the overall data base is small, the data in Fig. 3 suggest that brightness temperature could be utilized for the study on the heat island characteristics. Satellite observations are required to study and monitor the impact of urban heat island on the climate and environment on global scale. This type of remote sensing provides a means of monitoring the growth of urban and suburban areas and its impact on the environment.

* Professor, Dept. of Geography, Kon-Kuk University.