하절기 도시의 지역별 장·단파복사 특성 분석과 해석

정임수*, 최동호**, 이부용***

*대구가톨릭대학교 대학원 건축학과(wjddlatn3@hanmail.net)

**대구가톨릭대학교 건축학부(dhchoi2@cu.ac.kr)

***대구가톨릭대학교 환경과학과(bylee@cu.ac.kr)

Analysis of Radiative Characteristics at Urban Area by Observation in Summer Season

Jung, Im-Soo* Choi, Dong-Ho** Lee, Bu-Yong***

*Dept. of Architecture, Graduate School, Catholic University of Daegu(wjddlatn3@hanmail.net)

**Dept. of Architecture, Catholic University of Daegu(dhchoi2@cu.ac.kr)

***Dept. of Environmental Science, Catholic University of Daegu(bylee@cu.ac.kr)

Abstract

The objective of this study is to analyze the characteristic of radiation environment in the urban and rural through the field observation in the summer. The radiation balance was compared through the measurement of the shortwave radiation and long-wave radiation in the urban, sub-urban, and rural. The following conclusion could be obtained from this research. (1) In the results of observation including the rain-day, it was found that the short wave radiance in the urban is lower about 10% than the rural. (2) The upper part of atmosphere layers in the urban area absorb much short wave radiation energies compared with the rural relatively. It can increase the temperature of the upper part of atmosphere layers and the emittance of long wave radiation. (3) The ratio of the downward short wave radiation to the downward long wave radiation was 1.24 for the urban, 1.28 for sub-urban and 1.35 for rural. It can be estimated that the atmosphere condition of the rural is better than that of other areas. (4) The net radiation of the rural was lower than that of the urban. It was found that the energy in and outflow of the rural is easier than that of the urban. (5) The temperature variation for the long-wave radiation change of the rural showed more sensitive than that of the urban. It was came from the radiation characteristics of the surrounding environment and can be used as the important index to evaluate the thermal environment characteristic of urban.

Keywords : 복사환경(Radiant environment), 복사수지(Radiant balance), 단파복사(Short wave radiation), 장파복사(Long wave radiation), 알베도(Albedo), 도시상층복사(Urban canopy radiation), 도시기후(Urban climate)

1. 서 론

대기로 입사되는 태양복사에너지는 지표면에 일부 흡수되어 장파복사나 현열, 잠열의 형태로 변환되어 대기 중으로 이동하고 그 나머지는 지표면 입사와 동시에 반사되어 상층대기를 투과하거나 흡수된다. 지면피복재의 인공화 비율이 높고, 인공배열이 많은 도시지역에서는 도시고유의 복사에너지수지를 나타냄으로써 단파와 장파의 복사환경이 교외지역과는 상이한 도시고유의 열적특성을 나타낸다.¹⁾ 그리고 이러한 복사환경의 차이는 도시 상층대기에도 영향을 주어 지역별로 지표면뿐만 아니라 상층대기에서도 상이한 특징이 나타날 것이다. 또한 단파복사량의 경우 도시는 교외지역에 비해 대기 중의 미세먼지와 에어로졸 등 대기성분의 효과에 의해 지표면에 도달하는 단파복사량에 차이가 나타나고, 그로 인해 교외지역과는 차별화된 장파복사특성이 나타날 것으로 예상되므로 도시 고유의 기후특성 평가에 복사에너지 관측과 해석은 중요한 연구주제로 인식되고 있다. 도시기후의 체계적인 해석을 위해서는 위와 같이 태양복사에너지를 시작으로 종합적인 에너지 이동메커니즘에 대해 규명할 필요성이 있으며, 복사에너지 관측을 통한 현상파악에 대한 연구는 그 중요도에 비해 아직은 초기연구단계에 머물러 있다.

이에 관련한 연구로는 Maria Kolokotroni 외²⁾가 여름철 도시열섬강도(UHI) 완화를 위해 런던에서 도시중심지역과 도시외곽지역의 형태, 표면반사율, 도시 밀도, 녹지율, 건물 밀도와 비율, 열용량 등을 변수로 하여 열섬강도에 대해 연구하였으며, Yinka R. Adebayo³⁾는 나이지리아 이바단시 일대에 대한 전천일사, 알베도, 순복사 관측을 통해 도시와 외곽의 복사수지와 열적특성을 연구하여 도심부의 단파복사량이 적은 것을 확인하였다. 한편 국내에서는 건물녹화용 피복 재료의 성능평가를 위한 장·단파복사량 관측과 분석을 수행한

연구^{4),5)}와 콘크리트 포장면에서의 열특성 파악을 위해 시험체를 제작하고 그 포장면에서의 상·하향복사수지를 중심으로 연구한 사례⁶⁾가 있으나 실제 도시환경을 복사수지 해석의 관점에서 접근한 연구는 거의 발표되지 않고 있다. 도시의 광역화 및 고밀도화가 급속히 진행되고 있는 오늘날 쾌적한 도시 열환경 조성을 위해서는 복사환경에 대한 체계적인 관측 연구를 통한 학문적 뒷받침이 시급히 구축되어야 할 시점에 있다.

따라서 본 연구는 필자들의 하절기 관측을 통한 도시의 지역별 열환경 특성 연구¹⁾에 대한 후속 연구로써, 본 연구에서는 장파복사, 단파복사, 흑구온도, 표면온도, 기온과 습도의 현지 관측을 통해 도시와 외곽지역의 복사환경 특성과 그 차이를 파악하여 도시 고유의 열환경에 대해 분석하고자 한다. 특히 본 연구에서는 장·단파복사수지 해석을 중심으로 도시 상층대기의 특징과 열특성을 파악하였다.

2. 관측개요

2.1 관측대상지역

관측대상지역은 도시 중심부의 도심과밀지역과, 이 지역에 인접하고 자연 피복률이 높은 수변·녹지지역, 그리고 이들 지역과는 달리 비교적 인공적인 요소의 효과가 비교적 적은 교외지역을 관측대상지점으로 선정하였으며 이들 세 지점의 위치를 그림1, 표1에 각각 나타내었다.¹⁾

그림 1. 관측대상지역

표 1. 각 관측지점 구분과 공간녹지분포율

항 목	도심과밀지역	수변·녹지지역	교외지역	대구기상대
위 치	한국전력공사 대구·경북본부 송변전지원센터	파동초등학교	경북 경산시 하양읍 대구가톨릭대학교	대구광역시 동구 신암동
공간녹지 분포율	0%	52%(수공간 5%포함)	40%	4.3%
항공사진 에서의 녹지면적
관측지점 전경				-

※ 공간녹지분포율은 각 관측지점을 중심으로 반경 500m 이내의 영역에 있는 녹지면적의 비율을 정의

도심과밀지역은 관측지점 주변 환경이 대부분 고층건물, 인공노면 등의 인공조성물로 구성된 지역으로 공간녹지분포율이 0%로 나타났다. 수변·녹지지역은 녹지(산)와 하천에 접해 있는 곳으로 공간녹지분포율이 52%로 도시 내부에서는 비교적 자연적인 요소의 비율이 높은 지역이다. 그리고 도심관측지점에서 약 20km 동쪽 도시 외곽에 위치한 교외지역(경북 경산시 하양읍 소재 대학캠퍼스)은 공간녹지분포율이 40%로 관측을 통해 도시 내부의 복사열 형성 특성을 상호 비교하기 위해 선정하였다.

본 연구에서는 위와 같이 선정한 각 지점별 관측 자료와 그 도시의 기상을 대표하는 대구 기상대(대구광역시 동구소재) 관측 자료와도 상호 비교·검토를 통해 도시 내 지역별 복사 환경에 대한 차이를 분석하였다.

표 2. 관측기기 및 관측위치

측정 항목	관측기기 관측위치
기온	HMP45C-L34 / VAISALA T-type열전대, 온습도로거(SK-L200THⅡ) 지상 1.5m 높이
표면 온도	T-type열전대 각 지점 표면
흑구 온도	Globe 0420 / SATO T-type열전대, 온습도로거(SK-L200THⅡ) 지상 1.0m 높이
상대 습도	HMP45C-L34 / VAISALA 온습도로거(SK-L200THⅡ) 지상 1.5m 높이
단파 복사	CMP6 / Kipp & Zonen (대구기상대) Li200X / Campbell Scientific (본 연구) 지상 1.0m 높이
장파 복사	CGR3 / Kipp & Zonen 지상 1.0m 높이
기록 장치	Data logger CR1000 / Campbell Scientific

2.2 관측방법 및 기간

관측에 사용된 측정기와 관측지점 전경을 그림2, 표2에 각각 나타내었다. 각 지점에서는 기온, 상대습도, 흑구온도, 표면온도, 장·단파복사량을 관측하였다. 단파복사는 대기의 투과도에 따라, 장파복사는 상층 대기의 온도에

따라 그 값이 각각 달라질 수 있어, 본 연구에서는 상공에서 지면으로 향하는 하향복사성분과 지면에서 상공으로 향하는 상향복사성분을 각각 분리 관측하여 각 지점에서의 장·단파 복사에너지 수지를 해석하였다. 도심과 밀지역과 교외지역의 지면조건은 아스팔트

포장면 위에서 관측이 이루어졌고, 수변·녹지 지역은 잔디면에서 관측하여 지역과 지면조건 차이에 따른 복사환경을 분석하였다. 기온과 상대습도는 지상 1.5m 높이에서 관측하였고, 흑구온도와 장·단파복사는 지상 1.0m 높이에서 관측이 이루어졌다. 관측은 2010년 7월 20일~8월 31일까지 수행되었으나, 본 연구에서는 데이터가 안정적으로 수집된 7월 23일에서 8월 20일까지의 데이터 중 강우시 지역별로 구름 발생에 의해 수반되는 단파복사 차폐 효과를 배제하기 위해 주로 강우일(대구 기상대 강우량 4.5mm 이상)을 제외한 19일간의 데이터에 대해 분석하여 나타내었다.

3. 관측결과 및 고찰

3.1 기온과 흑구온도

본 논문의 기온, 흑구온도 분석에서는 강우

시 구름에 의해 발생할 수 있는 지역별 상이한 차폐 효과를 완화하기 위해 강우일(대구 기상대 강우량 4.5mm 이상)을 제외한 19일간의 데이터를 대상으로 분석하여 그림2, 표3에 나타내었다. 관측기간 동안의 세 지점의 평균 기온과 평균흑구온도는 도심과밀지역이 각각 29.0℃, 33.1℃로 가장 높았고, 수변·녹지지역 27.8℃, 32.4℃, 교외지역 27.8℃, 31.9℃의 순으로 높게 나타났다. 수변·녹지지역의 경우 도심과밀지역에 비해 기온과 흑구온도가 1.0℃가량 낮게 관측되어 도시 내에서도 주변 인공물의 밀도와 녹지 분포에 따른 온도차를 확인할 수 있었고, 교외지역과도 유사한 온도 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 최고기온과 최고흑구온도는 도심과밀지역이 각각 35.0℃, 53.2℃로 가장 높았고, 수변·녹지지역이 34.6℃, 53.1℃, 교외지역이 33.8℃, 50.0℃의 순서로 나타나 수변·녹지지역이 도심

표 3. 각 지점별 기온, 흑구온도 측정결과(강우일 제외)

지역 구분	각 지점별 기온[℃]											
	각 지점별 흑구온도[℃]											
	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00	24:00	최고	최저	평균	변화폭
도심과밀 지역	25.8	25.0	28.9	32.4	33.4	30.4	28.2	26.7	35.0	24.6	29.0	10.4
	25.3	24.9	40.6	44.8	42.0	31.1	27.7	26.1	53.2	23.9	33.1	29.3
수변·녹지 지역	24.4	23.8	29.1	31.9	32.9	28.5	26.4	25.2	34.6	23.4	27.8	11.1
	23.7	23.6	41.6	44.1	42.9	29.5	25.6	24.5	53.1	22.7	32.4	30.3
교외 지역	24.4	23.8	28.7	31.6	32.7	29.4	26.2	25.2	33.8	23.4	27.8	10.4
	24.2	24.0	41.0	42.5	40.3	30.6	25.9	24.9	50.0	23.0	31.9	27.0
대구 기상대	26.1	25.4	28.8	31.7	33.0	31.0	28.6	27.4	34.2	25.0	29.1	9.2

그림 2. 각 측정지점의 기온, 흑구온도 분포

과밀지역과 교외지역 사이에서 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 최저기온과 최저흑구온도는 도심과밀지역이 각각 24.6℃, 23.9℃, 수변·녹지지역이 23.4℃, 22.7℃, 교외지역이 23.4℃, 23.0℃를 나타내어 도시 내의 수변·녹지지역이 교외지역에 보다 근접한 온도를 나타내었다. 수변·녹지지역의 경우 주간온도는 도심과 교외지역 사이에서 분포하였으나 야간의 경우 도심보다는 교외지역에 보다 가까운 온도분포를 나타내었다. 최저 온도의 경우 흑구온도가 기온보다 더 낮게 나타나는 것은 흑구온도에 자체의 냉복사에 의한 영향으로 추정되나, 이에 대해서는 추후 연구를 통해 객관화할 필요가 있을 것으로 생각된다.

3.2 복사환경

3.2.1 단파복사(수평면 일사량)

분석기간 동안의 각 지점별 단파복사량을 그림3, 표4에 나타내었다. 각 지점별 강우일을 제외한 19일간의 누적 단파복사량은 교외지역 343.0MJ, 대구기상대 335.9MJ, 수변·녹지지역 333.2MJ, 도심과밀지역 313.5MJ 순으로 나타나 도시보다 교외지역에 더 많은 단파복사에너지가 입사하는 것으로 관측되었다.

도심과밀지역과 수변·녹지지역 간에는 19.7MJ 정도의 단파복사량 차이가 나타났으나, 태양복사가 인근 고층 건물과 주변 장애물 등에 의한 영향이 최소화되는 10:00~15:00시 사이의 관측자료(그림4)에 의하면 도시 내 두 지점의 단파복사량은 거의 동일한 값을 나타내었다. 반면, 도시 외곽인 교외지역과 도시 내 두 관측지점간의 단파복사량은 6.2%(12.38MJ)의 주목할 만한 차이가 있었다. 따라서 이와 같은 도심 안팎의 단파복사량 차이는 상층대기에 의한 복사차폐 효과가 각 지역별로 달리 나타나고 있음이 입증된 것이다. 다시 말하자면 지표면 단파복사량은 상층대기의 단파복사 흡수도에 따라 복사량의 차이가 나타나므로 교외지역 상부대기층에 비해 도심과밀지

역 상층대기가 상대적으로 많은 에너지를 흡수(지표면 도달 단파복사량 감소)하여 그 대기층의 온도는 교외지역보다 더 높은 것으로 추정할 수 있고, 이것이 도시기후에서 볼 수 있는 전형적인 한 특징임을 알 수 있다. 대구

그림 3. 각 지점의 평균 단파복사량

표 4. 각 관측지점의 수평면일사량 적산치

지역구분	19일간 누적 일사량(MJ)	일평균일사량(MJ)
도심과밀지역	313.5	16.5
수변·녹지지역	333.2	17.5
교외지역	343.0	18.1
대구기상대	335.9	17.7

※ 대구기상대는 유리구타입 일사계(CMP6)로 관측됨

a) 우천일 제외 6.2%(교외와 도시내부 평균값 차)

b) 우천일 포함 10.1%(교외와 도시내부 평균값 차)

그림 4. 각 지점별 수평면일사량 적산치

표 5. 우천일 포함한 경우와 우천일 제외한 경우의 일평균복사량 비교(단위 : MJ)

관 측 지 점	우천일 포함(29일)	우천일 제외(19일)	차	비율
도심과밀지역	8.75	10.40	1.65	15.8%
수변녹지지역	8.92	10.66	1.74	16.3%
교외지역	9.83	11.18	1.35	12.0%
대구기상대	9.14	10.59	1.45	13.7%

기상대의 경우 도시 내 두 관측지점과 유사한 지표면 단파복사량 값을 나타내었다. 한편 강우일을 포함한 전 관측기간 동안의 각 지점별 단파복사량에 대해 살펴보면 그림4, 표5와 같이 분석되었다. 각 지점별로 우천일을 제외한 10:00~15:00시 사이에 관측된 하향단파복사량은 10.40~11.18MJ(일 평균)사이에서 분포하고, 우천일을 포함하였을 경우에는 8.75~9.83MJ(일 평균)사이에서 분포하여 우천일을 포함한 경우가 약 12.0~16.3%정도 낮게 나타났다.

한편, 우천일을 포함한 교외지역과 도심과밀지역과의 하향단파복사량 차이는 교외지역이 10.1% 많았고, 우천일을 제외한 경우의 6.2%보다는 더 크게 나타나 도심지역은 교외지역에 비해 강우에 의한 복사차폐효과가 더 큰 것으로 분석되었다. 대구기상대의 경우 도심지 관측지점들과 유사한 값을 나타내었다.

3.2.2 장파복사

상층대기에서 지표면으로 복사되는 하향장파복사의 일변화추이를 나타낸 그림5을 살펴보면 도심과밀지역은 수변·녹지지역과 교외지역에 비해 주야간 모두 일관되게 높은 장파복사 값을 나타내었으며, 오전보다는 오후와 야간에 더 큰 차이가 관측되었다. 수변·녹지지역은 오전(09:00~12:00시)중에는 도심과밀지역과 유사한 값을 나타내었고, 정오부터 익일 일출까지는 도심과밀지역보다는 교외지역과 흡사한 장파복사 값을 나타내었다. 이는 수변·녹지지역 상층대기의 복사형태가 도심과밀지역과 교외지역의 양쪽 특징을 모두 가지고 있음을 알 수 있었다. 도심과밀지역과

그림 5. 각 지점의 평균 장파복사량

교외지역의 하향장파복사량 비교에서 두 지점간의 실질적인 장파복사량 차이는 $4.0 \sim 11.3 \text{ W/m}^2$ (0.9~2.7%)로써 도심과밀지역의 장파복사 값이 항상 더 높게 나타나는 도시 고유의 기후 특성을 본 관측을 통해 확인할 수 있었다. 이러한 현상에 대한 해석으로는 앞 3.2.1절의 단파복사 자료의 분석에서 상층대기는 단파복사를 흡수하여 기온이 올라가고, 이렇게 승온된 도시 상층대기는 지표면으로 하향장파복사에너지를 더 많이 방출하여 결과적으로 도심과밀지역이 교외지역보다 더 높은 장파복사 값이 관측된 것으로 해석할 수 있었다.

시간대별 도심과밀지역과 각 지점간의 장파복사량 분포와 기온(표6)에서 09:00시와 12:00시는 도심과밀지역과 수변·녹지지역의 장파복사량비율(상관식 기울기)이 0.999와 0.996으로 두 지점간의 장파복사량이 각각 $443, 443 \text{ W/m}^2$ (09:00시)과 $466, 464 \text{ W/m}^2$ (12:00시)으로 거의 동일한 값을 나타내었다. 그 이외의 시간대에서는 두 지점 모두 0.991 이하의 상대적으로 낮은 값을 나타내어 09:00시와 12:00의 특이한 값에 대해서는 추후 검토가 필요할 것으로 사료된다. 표6에서 살펴보면

표 6. 시간대별 도심과밀지역과 각 지점간의 장파복사량 분포와 기온(강우일 제외)

분포도	00:00			03:00			06:00

	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)
	도심과밀	436	26.7	26.1	430	25.8	25.3	422	25.0
수변·녹지	426	25.2	24.5	421	24.4	23.7	415	23.8	23.6
교외지역	427	25.2	24.9	424	24.4	24.2	415	23.8	24.0
분포도	09:00			12:00			15:00

	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)
	도심과밀	443	28.9	40.6	466	32.4	44.8	468	33.4
수변녹지	443	29.1	41.6	464	31.9	44.1	464	32.9	42.9
교외지역	439	28.7	41.0	457	31.6	42.5	463	32.7	40.3
분포도	18:00			21:00			그래프 설명
	<div>1) 각 점 하나는 해당일의 그 지점의 장파복사량을 나타냄</div> <div>2) 도심과밀지역에 대한 각 지점의 장파복사량 비율을 나타낸 것으로 기울기가 1보다 작은 것은 도심과밀지역에 비해 해당장파복사량이 적음을 의미</div> <div>3) 수변녹지지역과 교외지역 두 지점의 기울기가 같은 것은 두 지점에서 장파복사량이 같음을 의미</div>		
	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)	장파복사량 (W/m ²)	기온 (℃)	흑구온도 (℃)			
	도심과밀	451	30.4	31.1	437	28.2			
수변녹지	442	28.5	29.5	427	26.4	25.6			
교외지역	446	29.4	30.6	426	26.2	25.9			

- 1) 각 점 하나는 해당일의 그 시 각 하향장파복사량을 나타냄
- 2) 도심과밀지역에 대한 각 지점의 장파복사량 비율을 나타낸 것으로 기울기가 1보다 작은 것은 도심과밀지역에 비해 하향장파복사량이 적음을 의미
- 3) 수변녹지지역과 교외지역 두 지점의 기울기가 같은 것은 두 지점에서 장파복사량이 같음을 의미

18:00시 이후부터 03:00시까지는 교외지역보다 수변·녹지지역이 완만한 기울기 값을 나타내 주간시간대와와는 다른 경향을 확인할 수 있었다. 대부분의 시간대에서는 수변·녹지지역과 교외지역이 서로 유사한 값을 나타내어 장파복사환경이 유사함을 확인하였다. 기온과 흑구온도 또한 09:00시를 제외하고는 모든 시간대에서 도심과밀지역에 비해 수변·녹지지역과 교외지역이 낮게 나타났고, 이에 대한 것은 다음 절의 ‘복사수지 해석’에서 고찰하도록 하였다.

3.3 복사수지 해석

도심과밀지역과 수변·녹지지역, 교외지역의 관측기간(7월 23일~8월 20일) 중의 10:00~15:00시(주간)와 0:00~05:00시(야간) 사이의 장·단파 복사수지를 표7에 나타내었다. 장·단파 복사수지는 세 관측지점에서의 상·하향 단파복사, 장파복사 계측치를 활용하여 산출하였으며, 그 중 교외지역 상향 장파복사

량에 대해서는 직접적인 장파복사 계측치가 아닌 지면 표면온도 측정치를 근거로 하여 교외지역 지면조건(아스팔트)과 동일한 도심과밀지역에서 산출한 지면(아스팔트) 복사율 값을 적용하여 장파복사 산출식에 의해 산출하였다. 각 관측지점의 지면조건은 도심과밀지역과 교외지역은 아스팔트 포장면으로 같고, 수변·녹지지역은 잔디조성면 위에서 관측이 진행되었다. 교외지역과 도심과밀지역의 지면조건을 같게 한 것은 동일한 조건에서 두 지역 간의 대기에 의한 효과를 비교하기 위해서이다. 도시 내부에 위치하고 있는 수변·녹지지역은 지표면이 잔디로 조성되어 잔디에 의한 복사효과와 지면재료 차이(잔디면, 아스팔트)에 따른 열적효과, 즉 지면으로부터의 상향복사를 비교하기 위해 선정하였다. 각 측정지점에서의 장파복사와 단파복사의 총 복사량(강우일을 제외한 19일간)을 비교하면 도심과밀지역 582MJ, 수변·녹지지역 591MJ, 교외지역 597MJ로 총 복사량은 도심과밀지

표 7. 주간과 심야의 복사수지 산출결과
(2010. 07. 23~08. 20일 사이 강우일 제외한 19일간의 자료)

주간시간대(10:00~15:00시) 적산치						심야시간대(00:00~05:00시) 적산치						
측정대상	항 목	단파복사 [MJ]	장파복사 [MJ]	총복 사랑 [MJ]	단파/장 파 비율	순복 사랑 [MJ]	측정대상	항 목	단파복사 [MJ]	장파복사 [MJ]	총복 사랑 [MJ]	순복 사랑 [MJ]
도심 과밀 지역	하향성분	198	160	358	1.24	134	도심 과밀 지역	하향성분	0	147	147	-13
	상향성분	23	201	224	0.11			상향성분	0	160	160	
	차	▽175	△41	▽134	-			차	0	△13	△13	
	합	221	361	582				합	0	307	307	
	비율 (상향/하향)	0.12	1.26	-				비율 (상향/하향)	-	1.09	-	
수변 녹지 지역	하향성분	203	159	362	1.28	133	수변 녹지 지역	하향성분	0	145	145	-7
	상향성분	55	174	229	0.32			상향성분	0	152	152	
	차	▽148	△15	▽133	-			차	0	△7	△7	
	합	258	333	591				합	0	297	297	
	비율 (상향/하향)	0.27	1.09	-				비율 (상향/하향)	-	1.05	-	
교외 지역	하향성분	212	157	369	1.35	141	교외 지역	하향성분	0	145	145	-14
	상향성분	28	200	228	0.14			상향성분	0	159	159	
	차	▽184	△43	▽141	-			차	0	△14	△14	
	합	240	357	597				합	0	304	304	
	비율 (상향/하향)	0.13	1.27	-				비율 (상향/하향)	-	1.10	-	

관측 지점	항 목 (단위:W/m ²)	0:00시	3:00시	6:00시	9:00시	12:00시	15:00시	18:00시	21:00시	
도심 과밀 지역	단과 복사량	(상향/하향)	0 / 0	0 / 0	2 / 19	56 / 455	71 / 606	50 / 407	6 / 48	0 / 0
		비율	-	-	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	-
	장과 복사량	(상향/하향)	472 / 436	465 / 430	459 / 442	517 / 443	585 / 466	586 / 468	519 / 451	488 / 437
		비율	1.08	1.08	1.09	1.17	1.26	1.25	1.15	1.12
	단과 / 장과 비율		-	-	-	1.03	1.30	0.87	0.11	-
	총복사량		908	895	902	1471	1728	1511	1024	925
순복사량		-36	-35	-20	325	416	239	-26	-51	
수변· 녹지 지역	단과 복사량	(상향/하향)	0 / 0	0 / 0	6 / 21	128 / 443	168 / 621	132 / 473	15 / 55	0 / 0
		비율	-	-	0.29	0.29	0.27	0.28	0.27	-
	장과 복사량	(상향/하향)	446 / 426	442 / 421	440 / 415	486 / 443	507 / 464	507 / 464	470 / 442	452 / 427
		비율	1.05	1.05	1.06	1.10	1.09	1.09	1.06	1.12
	단과 / 장과 비율		-	-	-	1.00	1.34	1.02	0.12	-
	총복사량		872	863	882	1500	1760	1576	982	879
순복사량		-20	-21	-10	272	410	298	12	-25	
교외 지역	단과 복사량	(상향/하향)	0 / 0	0 / 0	2 / 18	65 / 472	82 / 633	58 / 443	10 / 76	0 / 0
		비율	-	-	0.11	0.14	0.13	0.13	0.13	-
	장과 복사량	(상향/하향)	470 / 427	463 / 424	458 / 415	525 / 439	584 / 457	591 / 463	530 / 446	485 / 426
		비율	1.10	1.09	1.10	1.20	1.28	1.28	1.19	1.14
	단과 / 장과 비율		-	-	-	1.08	1.39	0.96	0.17	-
	총복사량		897	887	893	1501	1756	1555	1062	911
순복사량		-43	-39	-27	321	424	257	-18	-59	

또한 각 관측지역에서 하향장파복사에 대한 하향단파복사의 비율을 각 지역별로 계산하면 도심과밀지역이 1.24, 수변녹지지역 1.28, 교외지역 1.35로 장파복사에 대해 단파복사가 가장 많은 지역은 교외지역으로 대기에 의한 단파복사의 투과율이 높고, 하향장파복사량이 적은 것으로 해석되어 대기의 상태가 세 관측지점 중에서 가장 양호한 것으로 평가할 수 있다. 일반적으로 상층대기 평가는 용이하지 않으나 본 연구에서 사용한 지표를 활용하면 비교적 간단한 방법으로 상층대기 환경을 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 한편 주간과 심야시간의 복사수지 비교(표7)에서 심야시간은 단파복사가 있는 주간과는 달리 도심과밀지역과 교외지역은 유사한 복사수지를 나타낸 반면 지면재료가 잔디인 수변·녹지지역에서의 상향장파복사가 두 지점에 비해 낮게 나타나 상·하향 비율이 1.05로 낮았다. 심야시간의 복사수지는 주간과는 달리 지표면 재료의 열특성에 의해서 좌우됨을 확인할 수 있었다.

그림 6. 각 관측지점별 하향장파복사량과 기온의 관계

주야간 전 시간대에서 장파복사량의 상향/하향 비율이 교외지역이 도심과밀지역에 비해 평균 1~2%가량 높은 것으로 보아 교외지역에서 주야간 전 시간대에서 열 방출이 용이하게 일어날 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 순복사량 비교에서도 주간시간대의 최고치는 교외지역(424W/m^2)이 도심과밀지역(416W/m^2)에 비해 더 높게 나타나 에너지 흡수가 용이하고, 야간시간대의 최저치는 교외지역 -59W/m^2 , 도심과밀지역 -51W/m^2 로 열방출은 교외지역이 도심과밀지역보다 용이함을 확인할 수 있었다.

관측지점에서의 총복사량과 순복사량에서는 12:00시를 전후하여 최대값을 나타내었으며 지역별 총복사량에서는 도심과밀지역 1728W/m^2 , 수변녹지지역 1760W/m^2 , 교외지역 1756W/m^2 으로 산출되었고, 순복사량에서는 도심과밀지역 416W/m^2 , 수변녹지지역 410W/m^2 , 교외지역 424W/m^2 로 산출되었다. 총복사량과 순복사량에 대해서는 추후 연구를 통해 지역별 복사수지 특성을 해석하고자 한다.

수변·녹지지역과 교외지역과의 비교에서는 기존의 연구⁴⁾에서 잔디의 알베도가 0.26으로 본 연구의 0.27과 유사한 값을 나타내었으며, 아스팔트 0.12~0.13에 비해 2배 이상 높은 알베도로 단파복사의 흡수가 아스팔트에 비해 상대적으로 적음을 확인할 수 있었다. 수변·녹지지역은 잔디에서의 상향장파복사 값이 도심과밀지역과 교외지역에 비해 항상 적은 값을 나타낸 것으로부터 잔디의 표면온도는 아스팔트보다 항상 낮음을 알 수 있다. 따라서 잔디는 태양복사에너지를 효과적으로 반사할 뿐만 아니라 낮은 표면온도로 인해 도시의 온도상승을 억제할 수 있는 훌륭한 피복 재료임을 본 연구를 통해서도 확인하였다.

표8에 나타난 3시간 단위의 각 요소별 평균(단파복사/장파복사)에서 태양의 고도각이 높은 시간대인 12:00시 경이 도심과밀지역 1.30, 수변·녹지지역 1.34, 교외지역 1.39로 다른 시간대에 비해 가장 큰 값을 나타내었고, 지역별 비교에서도 교외지역이 1.39로 가장 큰 값을 나타내었다.

표 9. 각 지점별 장파복사량과 기온의 회귀분석
(기울기, 절편, 상관계수)

구 분	기울기	절편	상관계수 (R^2)
도심과밀지역	0.181	-51.6	0.982
수변·녹지지역	0.181	-51.4	0.986
교외지역	0.195	-57.5	0.983

3.4 하향장파복사량과 기온의 상관도

장파복사량과 기온에 대한 관계를 나타낸 그림6의 a)를 살펴보면 시간에 따른 변화의 패턴이 매우 유사하게 나타나며 두 요소에 대한 상관도는 그림6의 b)와 같다. 장파복사량과 기온의 일변화에서 최고값과 최저값 도달 시각은 거의 동일한 시각에서 나타났으며, 장파복사량과 기온의 일변화 추이는 매우 높은 상관성으로 세 관측지점 모두 장파복사량과 기온의 상관도는 0.982이상으로 높은 상관성을 입증하였다.

장파복사량과 기온의 상관관계(표9)에서 도심과밀지역과 수변·녹지지역의 경우 기울기는 0.181로 동일하게 나타났고, 절편은 각각 -51.6, -51.4로 유사한 값을 나타내었다. 반면 인공구조물의 밀도가 낮고 인공열 발생이 상대적으로 적은 교외지역의 기울기는 0.195로 도시지역에 비해 급한 경사도를 나타내었고 절편은 -57.5로 도시 내 관측지점들에 비해 적은 값으로 교외지역의 기온변화는 장파복사변화에 더 민감하게 반응하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 관측지점의 장파복사와 기온의 관계인 기울기와 절편값으로부터 주변 환경적 특성을 해석할 수 있으며 도시의 열환경을 평가하는 하나의 주요한 척도로 적용될 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 분석된 결과들을 정리하면 다음과 같다.

(1) 강우일을 제외한 전 관측기간에 대한 분석

결과에서 도시 내 관측지점간의 단파복사량은 거의 동일한 값을 나타내었으나 상층대기의 복사차폐 효과가 적은 도시 외곽(교외지역)과 도시 내 두 관측지점간의 비교에서 단파복사량(19일간 누적일사량)은 6.2%(12.38MJ)의 큰 차이가 관측되어 각 지역별로 단파복사량의 차이가 있음이 입증되었다.

- (2) 강우일을 포함한 전 관측기간의 단파복사 관측결과 10:00~15:00시 사이의 교외지역과 도심과밀지역간의 일사량 차이는 10.0%(1.08MJ)이며, 강우일을 제외한 관측기간 동안의 차이는 7.0%(0.78MJ)로 관측되어 강우에 의한 일사차폐효과가 교외지역에 비해 도심과밀지역이 높게 나타나는 것으로 확인되어 도심과밀지역은 상층대기의 단파복사 흡수와 구름형성에 의해 단파복사가 차폐되는 두 가지 경우로 설명할 수 있다.
- (3) 지표면 단파복사량은 상부대기층의 단파복사 흡수도에 따라 복사량의 차이가 나타나 교외지역 상부대기층에 비해 도심과밀지역 상부대기층이 상대적으로 많은 에너지를 흡수(지표면도달 단파복사량 감소)하여 상부대기가 승온되고, 그 결과 지표면으로의 하향장파복사량을 증가시켜 지표면에서는 전형적인 도시기후의 특징인 높은 장파복사 값이 관측되었다.
- (4) 잔디는 다른 두 관측지점의 지면피복 재료인 아스팔트에 비해 알베도가 높고, 표면온도가 상대적으로 낮아 장파복사 상향성분 값이 적어 도시에서의 하절기 기온상승 억제에 효과적으로 작용할 수 있는 이상적인 지면재료로 사료된다.
- (5) 각 관측지역에서 하향장파복사에 대한 하향단파복사의 비율은 도심과밀지역(1.24), 수변녹지지역(1.28), 교외지역(1.35)의 순으로 나타나 장파복사량에 대해 단파복사량이 가장 많은 지역은 교외지역으로 대

기의 단파복사 투과율이 높고, 하향장과 복사량이 적은 것으로 해석되어 대기의 상태가 세 관측지점 중에서 가장 양호한 것으로 평가되었다.

- (6) 순복사량 비교에서도 주간시간대의 최고치는 교외지역($424\text{W}/\text{m}^2$)이 도심과밀지역($416\text{W}/\text{m}^2$)에 비해 더 높게 나타났고, 야간시간대의 최저치는 교외지역 $-59\text{W}/\text{m}^2$, 도심과밀지역 $-51\text{W}/\text{m}^2$ 로 교외지역에서 에너지 유출입이 보다 용이한 것을 확인할 수 있었다.
- (7) 장파복사량과 기온의 상관관계에서 장파복사변화에 대해 기온이 민감하게 반응하는 교외지역은 그 기울기가 0.195로 도시지역(0.181)보다 크게 나타나 이러한 관계로부터 주변 환경적 특성을 설명할 수 있어 도시의 열환경을 평가하는 주요한 척도로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0015970).

아울러 본 연구 수행과정에서 관측에 도움을 주신 한국전력공사 대구경북본부 송변전지원센터와 초등학교의 관계자에게 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 정임수, 최동호, 이부용, 하절기 관측을 통한 도시의 지역별 공간녹지분포율에 따른 열환경 특성 연구, 한국태양에너지학회 논문집(31권 3호), 2011.06
2. Maria Kolokotroni, Renganathan Giridharan, Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical

characteristics on changes in outdoor air temperature during summer, Science Direct Solar Energy(Vol82 Issue11), 986-998, 2008.11

3. Yinka R. Adebayo, Aspects of the variation in some characteristics of radiation budget within the urban canopy of Ibadan, Atmosphere Environment(Vol.24 No1), 9-17, 1990
4. 최동호, 이부용, 하절기 실험을 통한 건물녹화용 피복재료의 복사수지 해석, 한국태양에너지학회 논문집(30권 3호), 71-80, 2010.06
5. 최동호, 이부용, 하절기 복사환경 관측을 통한 석재, 목재, 알루미늄 바닥재의 열특성 평가, 한국태양에너지학회 논문집(28권 3호), 35-44, 2008.06
6. 류남형, 유병립, 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열환경 특성(I), 한국조경학회지(32권 6호), 82-94, 2005.02