

옥외공간 열쾌적성과 건물 에너지절약을 위한 녹지계획지표 연구[†]

조현길* · 안태원** · 김한수** · 정응호***

*강원대학교 조경학과 · **강원대학교 대학원 조경학과 · ***계명대학교 에너지환경계획학과

I. 서론

도시공간 표면재료의 종류, 색채, 수평적 및 수직적 분포는 에너지 수지를 좌우하고 미기후에 영향을 미치는 주요한 인자이다. 조경분야에서 미기후 관련 관심사 중의 하나는 옥외공간을 이용하는 주민에게 계절에 따라 쾌적한 열환경을 제공해 주는 것이다. 공간 표면 재료에 따른 미기후 변화는 주민의 열쾌적성(thermal comfort)에 영향을 미치며, 옥외공간을 다루는 조경계획 및 설계는 옥내의 경우처럼 활동에 쾌적한 열환경을 창출할 필요가 있다. 옥외공간의 쾌적한 미기후는 곧 옥내공간의 냉난방 에너지를 절약하고 탄소 배출을 저감하는데 기여한다. 본 연구의 목적은 도시 옥외공간의 표면재료 구성에 따라 인체 열쾌적성에 작용하는 에너지 수지를 산정하고, 녹지가 건물의 에너지 절약에 기여하는 효과를 분석하여 도시녹지계획의 지표와 전략을 제시하는 것이다.

II. 연구내용 및 방법

1. 옥외공간 열쾌적성 계량분석

도시에서 흔히 나타나는 공간구성 재료의 유형을 반영하여, 수목차양이 부재하는 콘크리트 포장공간(이하 하드스케이프 공간), 수목차양이 부재하는 잔디공간(이하 잔디공간), 느티나무 차양의 마사토 포장공간(이하 수목차양공간) 등 3개 유형으로 구분하고, 아래의 수식(Brown and Gillespie, 1995)을 적용하여 휴식활동의 인체 에너지 수지를 산정하였다. 인체를 가열하는 주 에너지원은 활동유형에 따라 인체 내부에서 발생하는 대사에너지(metabolic energy: M), 태양으로부터 흡수한 태양 복사(solar radiation: S) 및 지구의 모든 물체로부터 얻는 지구 복사(terrestrial radiation: T)이다. 반면, 인체를 냉각시키는 에너지는 발한(perspiration)에 기인한 증발(E), 바람에 의한 대류(C) 및 장파방사(longwave emission: L)이다.

$$\text{인체 에너지수지} = (M+S+T) - (E+C+L) \quad (\text{식 1})$$

이 수식에 필요한 변수인 공간유형별 기온, 표면온도, 풍속, 수평면 총일사, 수관 일사투과율, 수관개방률, 알베도 등은 8월 중순의 맑은 날 오후 1~2시에 실측하여 적용하였다. 수관 일사투과율과 알베도는 Pyranometer(LI-COR의 LI-200SA)를 이용하여 공간유형별로 각각 5반복에 걸쳐 측정하였다.

2. 옥내공간 에너지절약 모델링

수목차양에 의한 냉난방 에너지 절약효과는 건물 주변 식재 위치, 기후조건 등에 따라 상이할 수 있다. 남부지방의 대구를 사례로 수목차양에 의한 건물에너지 절약을 모델링하고, 중부지방 춘천의 경우(조현길과 안태원, 1999a)와 비교하였다. 건물에너지 소비는 PC용 모델링 프로그램으로서 그 결과에 대한 신뢰성이 입증된 MICROPAS(ENERCOMP, Inc., 1995)를 활용하여 산정하였다. 비교 차원에서 춘천시 주택 중 남향의 1층 및 2층 단독주택을 선정하고, 열전도와 관련된 건물구조, 냉난방시설과 이용 특성, 기상자료 등 모델링 관련 변수를 입력하여 월별 및 시간별 건물 에너지 이용량을 산출하였다. 기상자료의 경우 기상청으로부터 2006년부터 2008년까지 365일 매시간의 기온, 일사량, 풍속, 풍향 등을 구입하여, 3개년 대표치의 MICROPAS 호환성 기상파일을 작성하고 이를 모델링에 이용하였다.

수목의 차양효과는 SPS(McPherson *et al.*, 1985: 1988)를 활용하여 계량화하였다. SPS(Shadow Pattern Simulator)는 태양의 고도 변화에 따른 월별, 시간별 수목차양에 의한 건물표면 전체의 차양계수(shading coefficient)를 산출하는 MICRO-PAS 호환성 프로그램이다. 이 프로그램은 태양각 변화와 관련된 위도와 경도, 건물길이 및 넓이, 수목크기와 식재위치 등 태양, 건물, 수목 관련 다양한 변수의 입력을 필요로 한다. 수목차양 유형은 식재위치의 차이에 초점을 두고 동향, 남향, 서향 등 3개 방위를 선정하여, 건물로부터 5m 거리에 식재한 수고 8m,

[†] 본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호: 07도시재생B04)에 의해 수행된 결과의 일부임.

수관폭 7.5m의 낙엽수에 의한 차양효과를 모델링하였다. 주택 및 차양유형별 SPS 시뮬레이션을 통하여 생성된 파일을 MICROPAS에 입력하여 차양효과를 반영한 건물에너지 이용량을 산정하였다.

3. 녹지계획지표 및 전략 제시

본 연구결과와 관련 기존연구를 바탕으로, 미기후 개선 및 건물에너지 절약을 위한 도시녹지계획의 지표를 제시하고 전략을 모색하였다. 즉, 공간구성 재료에 따른 열쾌적성, 녹지의 차양, 증발산 및 풍속 감소에 의한 건물에너지 절약, 기온저감을 위한 녹지의 면적과 체적 등의 지표를 제시하였다. 그리고, 옥외공간의 인체 열쾌적성과 옥내공간의 에너지 절약을 위한 녹지계획의 기술적, 제도적 전략을 제안하였다.

III. 연구결과

1. 옥외공간 구성유형별 열쾌적성

연구대상 옥외공간의 수평면 일사는 8월 중순의 맑은 날 오후 1~2시에 장애물이 없는 조건 하에서 평균 831W/m²이었고, 풍속(지상 1.5m)은 0.3m/s이었다. 공간재료 구성유형별 평균 기온(지상 3m)은 하드스케이프 공간 약 33℃, 잔디공간 31℃, 수목차양 공간 30℃이었다. 지표면의 온도와 알베도는 각각 콘크리트 포장 36℃ 및 0.30, 잔디면 29℃ 및 0.25, 마사토 포장 22℃ 및 0.34이었다. 느티나무 수관의 일사투과율은 10%, 개방률은 4%, 알베도는 0.23인 것으로 나타났다.

공간재료 구성유형별 인체 에너지수지는 하드스케이프 공간 284W/m², 잔디공간 226W/m², 수목차양 공간 13W/m²이었다. 에너지수지가 +이면 과열로서 더위를, -이면 추위를 각각 느끼며, 균형을 이룰 경우 활동에 쾌적한 열환경이 된다. 에너지수지에 근거한 열쾌적성 지표는 -50~50W/m²인 경우 쾌적한 상태이며, -150W/m² 미만이면 훨씬 따뜻하게 개선을, 그리고 150W/m²을 초과하면 훨씬 시원하게 개선을 요구한다(Brown and Gillespie, 1995). 따라서 수목차양 공간은 휴식에 쾌적한 천정면과 바닥면으로 구성되었으나, 하드스케이프 공간이나 잔디공간은 열쾌적성 측면에서 상당히 불량한 상태임을 시사한다.

연구대상 옥외공간의 에너지수지 차이에 결정적 역할을 담당한 인자는 태양복사를 비롯하여 지구복사 중의 하늘복사와 지표복사이었다. 태양복사는 직달일사, 산란복사, 지표반사복사 등의 합으로서, 3개 복사의 합은 하드스케이프 공간 438W/m², 잔디공간 397W/m², 수목차양 공간 42W/m²이었다. 이 차이에 영향을 미친 주요 변수는 수관 일사투과율, 수관개방률 및 지표면 알베도이었다. 하늘복사와 지표복사의 합은 하드스케이프 공간 917W/m², 잔디공간 863W/m², 수목차양 공간 436W/m²

표 1. 옥외공간 구성유형별 여름철 인체 에너지수지와 열쾌적성 지표*

에너지	하드스케이프 공간	잔디공간	수목차양 공간
M	134	131	126
S	276	250	38
T	449	423	433
E	39	39	40
C	41	53	69
L	495	486	475
수지	284	226	13
지표	훨씬 시원하게 개선 필요	훨씬 시원하게 개선 필요	개선 불필요 (쾌적)

*: 에너지수지의 단위는 W/m²이며, 열쾌적성 지표는 -50<수지<50이면 개선 불필요하고, 수지>150이면 훨씬 시원하게 개선 필요함(Brown and Gillespie, 1995).

이었다. 하늘복사와 지표복사의 차이에 관여한 결정변수는 각각 기온과 지표면 온도이었다.

열쾌적성을 위한 옥외공간의 조성은 상기한 에너지수지의 결정변수를 반영해야 한다. 옥외 휴식공간에서 녹음식재를 무시하고 불필요하게 넓은 면적에 걸쳐 잔디를 식재하거나 불투수 하드스케이프로 포장하는 경향을 볼 수 있다. 공원에서 녹음이 없는 잔디 위주의 식재는 여름철 태양복사에의 노출을 회피하는 이용자에게 바람직하지 않으며, 수목의 환경생태적 및 경관미적 효과를 위해서도 식재공간을 낭비하는 결과가 된다. 따라서, 옥외 휴식공간은 증발산이 가능한 교목의 양호한 차양과 자연재 바닥면으로 조성할 필요가 있다.

2. 수목차양에 의한 건물에너지 절약

건물유형별 MICROPAS 모델링을 통해 나타난 냉난방면적당 에너지이용은 춘천에서 1층 주택이 난방 1,099.9MJ/m², 냉방 8.2kWh/m²이고, 2층 주택이 난방 1,025.1MJ/m², 냉방 7.5kWh/m²이었다. 대구의 경우는 1층 주택이 난방 835.8MJ/m², 냉방 8.5kWh/m²이고, 2층 주택이 난방 769.9MJ/m², 냉방 7.8kWh/m²이었다. 즉, 대구에서는 춘천에 비해 난방에너지 소비량이 약 25% 더 적은 반면 냉방에너지 소비량은 3% 더 많았다.

수목차양이 건물의 냉난방에너지 절약에 미치는 효과는 건물 주변 식재위치와 연구대상 지방에 따라 상이하였다. 동향의 수목은 냉방에너지를 춘천에서 1주당 1.0~1.6%, 대구에서 1.7~2.4% 각각 절약하여, 그 절약효과가 남향이나 서향의 수목보다 높았다. 남향 수목은 동향 및 서향 수목에 비해 여름철차양을 통한 냉방에너지 절약효과가 가장 낮은 것으로 나타났다. 한편, 모든 방위의 차양수목은 겨울철 수관을 차단하여 난방에너지 이용을 오히려 가중시키는 역효과를 초래하였다. 그 역효과는 남향

표 2. 식재방위별 수목차양에 의한 호당 연간 에너지절약 효과*

식재방위	도시	건물 유형	난방		냉방		비용	
			%	MJ	%	kWh	%	₩
동향	춘천	1층	-0.10	-104	1.55	12	0.04	530
		2층	-0.09	-176	1.02	14	-0.01	-20
	대구	1층	-0.14	-113	2.39	19	0.14	1,480
		2층	-0.13	-186	1.74	25	0.08	1,490
남향	춘천	1층	-0.45	-466	0.40	3	-0.38	-5,230
		2층	-0.30	-570	0.13	2	-0.26	-6,680
	대구	1층	-0.58	-455	0.53	4	-0.46	-4,930
		2층	-0.36	-510	0.29	4	-0.29	-5,610
서향	춘천	1층	-0.05	-54	1.35	10	0.07	900
		2층	-0.04	-71	0.84	12	0.04	890
	대구	1층	-0.05	-37	1.68	13	0.14	1,560
		2층	-0.03	-48	1.10	16	0.09	1,790

*: 건물에서 5m 거리에 식재한 수고 8m, 수관폭 7.5m의 낙엽수 1주에 의한 차양

수목이 지방에 따라 1주당 -0.3~-0.6%로서 가장 큰 반면, 서향 수목의 경우는 미미하였다. 수목차양에 의한 건물유형별 에너지절약은 춘천보다 대구에서 더 효과적인 것으로 분석된다.

에너지소비에 따른 비용은 난방에너지가 8,800kcal당 약 450원, 냉방에너지가 1kWh당 약 150원이었다(조현길과 안태원, 1999a). 이 비용을 적용하여 차양에 의한 호당 연간 냉난방에너지 절약을 산출하면, 남향 수목은 지방에 따라 1주당 -0.3~-0.5%인 -4,900~-6,700원이었다. 남향의 수목차양이 연간 에너지소비를 증가시킨 이유는 여름철 냉방에너지의 절약 이상

으로 겨울철 난방에너지 이용을 더 많이 요구했기 때문이다. 동향 수목은 대구에서 층수에 관계없이 약 1,500원 절약하였으나, 춘천의 2층 건물에서는 에너지비용을 오히려 약간 증가시켰다. 서향 수목은 춘천에 비해 대구에서 약 2배 많은 1,600~1,800원을 절약하였다.

결국, 서향은 중부 및 남부지방 모두 수목차양을 통한 에너지절약 상 가장 바람직한 식재방위인 것으로 나타났다. 동향의 차양식재 역시 남부에서 바람직하지만, 춘천에서는 가지밀도가 낮은 대형 낙엽수 외엔 제한을 필요로 한다. 남향은 중부 및 남부지방 모두 연간 에너지소비를 증가시키는 역효과를 초래하므로 차양수목의 식재를 회피해야 한다. 기존 연구들(McPherson, 1994; 조현길과 안태원, 1999a; Jo and McPherson, 2001) 역시 본 연구결과와 유사하게, 차양효과가 가장 양호한 식재방위는 건물의 서향 및 동향이며, 남향의 차양수목은 오히려 난방에너지 이용을 증가시킴을 보고한 바 있다.

3. 녹지계획지표 및 전략

1) 옥외공간 미기후 개선

옥외공간의 여름철 열쾌적성을 결정하는 주요 인자는 복사와 표면온도에 영향을 미치는 공간재료 및 알베도이다. 옥외휴식공간은 하드스케이프 재료를 최소화하고 증발산이 가능한 차양수목과 자연재 포장으로 구성함이 바람직하다. 도시 전체의 미기후 개선 역시 녹지체적의 확충을 필요로 하며, 바닥면의 투수포장과 지피식재, 수직벽과 옥상의 녹화 등으로 하드스케이프의 현열발생을 제어한다. 하드스케이프는 알베도가 높은 밝은 계통의 색채로 마감하되 중명도 및 중채도의 색채를 혼용한다.

2) 냉난방에너지 절약

표 3. 미기후개선 및 에너지절약 녹지계획지표

변수	기능	지표	
		미기후개선	에너지절약
알베도	태양복사 반사/저장	아스팔트 0.09, 잔디 0.25, 콘크리트 0.30, 백색벽 0.68 ^a	건물 알베도 3배 증가→냉방 20% 절약 ^b
표면온도	장파복사, 대류	잔디면 대비 콘크리트 7~8℃ ↑, 아스팔트 13℃ ↑ ^a	옥상토심 30cm 관목식재→건물에너지 15% 절약 ^c
증발산	현열의 잠열 전환	단풍나무 증산 75~플라타너스 250g/m ² /h ^d	수목피도 10% 증발산→냉방 9% 절약 ^e
차양	태양복사 차단	낙엽수 착엽기간 90% 차양, 마사토포장 수목차양 공간→인체 에너지수지 13W/m ² (열쾌적)	대형수목 건물서향/동향 차양→냉방 1~2% 절약
바람조절	대류, 통풍, 방풍	수목피도 10%→풍속 10% 감소 ^f	수목피도 10% 풍속감소→난방 1% 절약
수목피도	증발산, 차양 및 풍속감소	수목피도 10~20%→여름철 기온 0.5~1℃ 감소 ^g	수목피도 10%→냉방 10%, 난방 1% 절약 ^e
공간재료 체적	도시 에너지수지	식생체적 10% 증가→여름 기온 0.30% 저감/건물체적 10% 감소→기온 0.39% 저감 ^h	-

자료: a: 조현길과 안태원(1999b), b: Akbari et al.(1992), c: Wong et al.(2003), d: 조현길과 野島義照(2000), e: 조현길과 안태원(1999a), f: Heisler(1989), g: 조현길과 안태원(2006), h: 조현길 등(2008)

건물 서향 및 동향의 벽면 가까이에 차양수목을 식재하여 여름철 오후의 태양복사를 최대한 차단한다. 다만, 중부지방의 경우 동향에는 가지밀도가 낮은 대형 낙엽교목을 식재하여 겨울철 오전의 일사를 허락하는 전략이 필요하다. 남향에는 중부 및 남부지방 모두 겨울철 일사를 차단하는 수목식재를 회피해야 한다. 북향에는 낙엽수와 상록수의 다층 군식을 통해 여름철 증발산을 증진하고 겨울철 한풍을 감속한다. 건물 지붕 및 외벽은 알베도를 고려하여 밝은 계통의 색채로 마감하되 가급적 녹화를 병행한다. 다만, 남측 벽면은 겨울철에 비해 태양고도가 높은 여름철 수광량이 적으므로, 중부지방에서는 진한 계통의 색채로 마감하는 것이 난방에너지 절약 상 유리하다.

3) 관계법제 개선

건축법의 경우 최소조경면적 기준을 상향 조정하고, 도시공원 및 녹지 등에 관한 법률에는 도시녹지의 확보기준을 도입하되, 미기후 개선 등을 위한 녹지계획 지표를 적용하여 합리적 기준을 수립할 필요가 있다. 예를 들어, 여름철 온도를 0.5~1°C 저감할 수 있는 녹지공급 지표로서(조현길과 안태원, 2006), 최소조경면적 5%는 수목피도 10~20% 이상 또는 수관체적 35~70m³/100m²(홍고직경 15cm의 수목 0.5~1주에 상당) 이상으로 그 기준을 개정하는 것이다. 또한, 건축법의 에너지절약 관련 조항에 건물주변 식재기법과 알베도를 포함하는 냉난방에너지 절약기준을 삽입하는 방안이 요구된다.

주택건설기준 등에 관한 규정은 공동주택단지에 휴게시설의 설치를 명기하고 있으나, 그 휴식공간의 조성기준이 모호하다. 열쾌적성을 고려하여 증발산이 가능한 차양교목과 투수성 자연포장재로 구성된 휴식공간 모델을 제시하는 명쾌한 지침이 필요하다. 친환경건축물 인증제도에는 생태환경, 에너지 등 관련 평가항목에 미기후 개선을 위한 녹지지표의 달성 여부와 건물에너지 절약을 위한 방위별 식재기법의 적용 여부를 추가하길 제안한다.

IV. 결론

본 연구는 도시 옥외공간의 대표적 구성재료 유형에 따른 인체 에너지 수지 및 열쾌적성을 분석하고, 수목차양에 의한 건물의 냉난방에너지 절약효과를 계량화하였다. 연구대상 옥외공간의 에너지 수지 차이에 기여한 결정변수는 차양 여부와 지표면 알베도 및 온도로서, 차양이 부재하는 하드스케이프 공간이나 잔디공간은 열쾌적성 측면에서 상당히 불량한 것으로 나타났다. 따라서, 옥외 휴식공간은 증발산이 가능한 차양교목과 자연재 바닥면으로 구성함이 바람직하다.

수목차양에 의한 연간 건물에너지 절약이 가장 효과적인 식재방위는 중부 및 남부지방 모두에서 건물의 서향이였다. 서향

과 동향의 차양수목은 건물유형 및 지방에 따라 냉방에너지를 1~2%/주 절약하였다. 한편, 남향의 차양수목은 냉방에너지 절약효과가 낮고 난방에너지 소비를 가중시키므로 그 식재를 회피해야 한다. 수목차양에 의한 건물에너지 절약은 춘천보다 남부의 대구에서 더 많은 것으로 나타났다.

본 연구 결과와 관련 기존연구를 바탕으로, 옥외공간의 미기후 개선과 건물의 에너지 절약에 초점을 두어 녹지확보 관련 법제의 과학적 개선을 포함한 도시녹지계획 지표 및 전략을 제시하였다. 본 연구는 옥외공간의 인체 에너지수지 산정에 부가하여, 수목차양에 의한 남부지방의 건물에너지 절약과 식재전략 등 국내 미진한 연구내용을 다룬 점에 그 의의가 있다. 저탄소 녹색성장의 사회적 이슈에 부응하여, 향후 다양한 건물유형을 대상으로 녹지의 차양, 증발산 및 풍속감소 기능을 포괄하는 건물에너지 절약에 관한 추가 연구가 필요하다.

인용문헌

1. 조현길, 안태원(1999a) 춘천시 주거지내 수목피도의 차이가 난방방 에너지 이용 및 비용에 미치는 효과. 한국조경학회지 27(2): 19-28.
2. 조현길, 안태원(1999b) 도시녹지에 의한 미기후개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
3. 조현길, 안태원(2006) 도시 수목식재와 미기후 개선의 상관성 구명. 한국조경학회지 34(5): 70-75.
4. 조현길, 이관규, 안태원, 정은호(2008) 입체적 토지피복 유형에 따른 기온변화 연구. 한국조경학회 추계 학술대회 논문집: 42-45.
5. 조현길, 野島義照(2000) 도시녹지의 미기후개선, CO₂ 흡수 및 화재방지의 효과. 한국자연식물학회지 13(3): 155-163.
6. Akbari, H., P. Martien and A. Rosenfeld(1992) Using light-colored surfaces to cool our communities. In H. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, and S. Winnett, eds., *Cooling Our Communities*. Washington, D.C.: US Government Printing Office.
7. Brown, R. D. and T. J. Gillespie(1995) *Microclimatic Landscape Design*. New York: John Wiley & Sons.
8. ENERCOMP, Inc.(1995). *MICROPASA User's Manual*. Sacramento, CA.
9. Heisler, G. M.(1989) *Site Design and Microclimate Research*. Final Report to Argonne National Laboratory, University Park, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
10. Jo, H.-K. and E. G. McPherson(2001) Indirect carbon reduction by residential vegetation and planting strategies in Chicago, USA. *Journal of Environmental Management* 61: 165-177.
11. McPherson, E. G.(1994) Energy-saving potential of trees in Chicago. In E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. General Technical Report NE-186, Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
12. McPherson, E. G., L. P. Herrington and G. D. Heisler(1988) Impacts of vegetation on residential heating and cooling. *Energy and Buildings* 12: 41-51.
13. McPherson, E. G., R. Brown and R. A. Rowntree(1985) Simulating tree shadow patterns for building energy analysis. In A. T. Wilson and W. Glennie, eds., *Solar 85-Proceedings of the National Passive Solar Conference*. Boulder, CO: American Solar Energy Society.
14. Wong, N. H., D. K. W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C. L. Ong and A. Sia(2003) The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings* 35: 353-364.