

인간 열환경지수(Human Thermal Sensation)를 이용한 조경계획 및 디자인 방법

박수국

캐나다 빅토리아대학교 지리학과

I. 서론

좋은 디자인이란 기능적 효율성과 미적 아름다움이 함께 고려되어야 한다. 기존의 많은 연구들에서 기능적 효과들에 대한 정량화 작업이 활발히 이루어지고 있는데, 최근에는 기후를 접목하고자 하는 시도가 있다(이채연 등, 2011). 이것은 기존에 이미 이용되고 있는 간단한 기후를 이용한 디자인 개념(태양의 위치를 고려하여 여름에 직사광선을 막거나 겨울 북풍을 막기 위한 식재)이 아니라, 조경공간을 포함한 도시 옥외공간을 이용하는 사람들에게 미치는 미기후적 에너지량[태양복사에너지(solar radiation), 지구복사에너지(terrestrial radiation), 현열(sensible heat flux density) 및 잠열(latent heat flux density)]을 시간대별로 정량화하여 그 공간을 이용하는 사람들에게 온도적으로 쾌적한 환경을 만들어 주고자 하는 것이다. 이에 대한 연구들은 인간 에너지 균형 모델(Human energy balance model)을 기초로 하여 인간 열환경지수(human thermal sensation)로서 perceived mean vote(PMV)(Fanger, 1972), physiological equivalent temperature(PET)(Höppe, 1993; 1999), universal thermal climate index(UTCI)(<http://www.utci.org>) 등 여러 가지 모델들로 발전되어 이용되고 있다(Matzarakis et al., 1999; 2007; Bröde et al., 2011a; 2011b; Fiala et al., 2011). 조경분야에서는 Brown and Gillespie(1986; 1995)가 comfort formula(COMFA) 모델을 만들어 최초로 미기후를 이용한 조경디자인(microclimatic landscape design)이라는 개념을 소개하였다. 국내에서도 최근에 열환경에 대한 연구가 초기 단계 진행되고 있으나(이은주, 2006; 조현길 등, 2009; 이정아 등, 2010), 한국형 모델 개발과는 아직 거리가 있다고 할 수 있다.

이 연구의 목적은 지금까지 개발되어 이용되고 있는 열환경지수와 모델들을 조경공간을 포함한 옥외공간에서 어떻게 이용할 수 있으며, 그 장단점은 무엇인지를 분석하고, 더 나아가 한국형 모델을 만들기 위한 방향에 대해서 검토해보고자 한다.

II. 열환경지수 모델들

현재까지 기상청과 조경 및 도시계획쪽에서 활용되는 지수와

모델로는 Wind chill(Siple and Passel, 1945; Environment Canada, 2001; <http://www.ec.gc.ca/meteoweather/default.asp?lag=En&n=5FBF816A-1>), Humidex(불쾌지수)(Thom, 1969), Heat index(열지수)(Steadman, 1979; Rothfus, 1990), WBGT(wet bulb global temperature; Yaglou and Minard, 1957), PMV, COMFA, PET, UTCI가 있는데, 이 지수들(Wind chill, Humidex, Heat index)은 인간의 열환경에 영향을 미치는 모든 기후요소(기온, 습도, 풍속, 태양복사에너지량, 지구복사에너지량)를 분석에 다 포함시키지는 않으므로 조경계획과 디자인에 적용하기에는 한계가 있다고 하겠다. Wind chill은 기온과 풍속 요소만을, Humidex는 기온과 습도만을, Heat index도 기온과 습도만을 이용하지만 임의의 환경을 만들어 고정된 복사에너지량과 풍속을 토대로 만들어진 좀 더 진보된 지수라고 할 수 있다. 기존의 도시 건축공간에서 인간의 열환경 분석에 이용되고 있는 WBGT는 모든 기후요소를 분석에 이용하지만 아직 건설되지 않은 미래의 공간에 대한 분석은 할 수 없으므로 이 모델도 조경계획이나 디자인에는 적합하지 않다.

현재 조경계획이나 디자인에 이용가능한 모델로서는 위에서 언급한 바 있는 PMV, PET, UTCI가 있다. 1970년에 만들어진 PMV는 여러 연구자들에 의해 지속적으로 개량 발전되어 왔으며(Gagge et al., 1986; ISO 7730, 2005), PMV를 기준으로 표현 단위를 사람들이 인식하기 쉬운 기온의 단위(°C)로 변화시켜 발전되어 온 PET와 최근에 발표되어 생기상 국제학술지(International Journal of Biometeorology)에 활발하게 발표되고 있는 UTCI는 태양과 지구 복사에너지를 직접 계산하는 방식이 아니라 인간의 신체에 흡수되는 총 복사에너지량을 기온의 형태로 바꾼 mean radiant temperature(T_{mrt})을 이용한다. T_{mrt} 은 둘러싸고 있는 건물 및 식재들의 표면온도가 동일하다고 가정하여 계산된 평균 온도를 뜻한다(Fanger, 1972). 3차원 공간인 조경 및 도시 공간에서 T_{mrt} 를 계산할 수 있는 컴퓨터 프로그램으로는 RayMan, ENVI-met, TOWNSCOPE(Teller and Azar, 2001), SOLWEIG(solar and longwave environmental irradiance geometry-model)(Lindberg et al., 2008; Lindberg and Grimmond, 2011), Human-urban radiation exchange simulation (HURES) model (Park, 2011)이 있다. 이 중에서 RayMan과

ENVI-met은 그 결과가 실제 측정된 양과 많은 차이를 보인다고 보고된 바 있고(Thorsson et al., 2007; Ali-Toudert, 2005; Park, 2011), TOWNSCOPE는 태양복사에너지 중 건물이나 식재 등 다른 인공 구조물에 의해 반사되는 양과 지구복사에너지는 계산식에 넣지 않았으며, SOLWEIG는 인체가 복사에너지와 상호교환하는 모델로 VDI(1998)가 제시한 육면체를 가정해 여섯 방향(동서남북과 하늘, 땅)에서 오는 복사에너지를 조합하여 인체에 미치는 양을 예측하는 방법을 사용하였는데 최근(Lindberg and Grimmond, 2011)에 수목이 차지하는 시각적인 양(vegetation view factor)을 인공구조물이 차지하는 시각적인 양(building view factor)에서 따로 분리하여 계산식에 포함시켰으나 지구복사에너지 계산을 위해 수목의 표면온도를 기온과 함께 예상한다든지, 태양직사광선이 건물이나 수목, 지표면에 미치는 부분과 미치지 않는 부분과의 시각적인 양의 분리가 되지 않는 점 등 반사되는 태양복사에너지 부분과 지구복사에너지 부분에서 앞으로 많은 개선이 요구되어진다. HURES model은 그 중 가장 최근에 업데이트된 인체 모델(Park and Tuller, 2011a)이나 복사에너지 계산식(Park and Tuller, 2011b), 가장 발달된 시각적인 양 분석 방법을 이용해, 태양 직사광선 유무에 따른 시각적인 양 분리와 지상에서의 수목과 건물의 시각적인 양 분리를 하여 태양 및 지구 복사에너지 양 예측 모델에 이용함으로써 현재로서는 방법론적으로 가장 앞서 나가 있으나, 좀 더 많은 자료와의 비교를 통해 지구복사에너지양 계산을 위한 표면 온도 예측식의 개선이 요구된다.

위의 T_{mrt} 예측 프로그램과 열지수 모델들을 이용하여 인체가 느끼는 생리학적(physiological) 결과들을 예측할 수 있는데, 독일이나 홍콩의 경우는 이미 도시계획도에 열지수를 접목하여 인간 생기후도(human biometeorological map)를 만들어 도시 계획 및 개발에 중요하게 이용하고 있다.

III. 토론 및 결론

현재까지 국내에서 미기후를 이용한 열지수 분석 방법은 이루어진 사례가 없으며, 한국형 모델 개발에 대한 기본적인 토의도 미미하였다. 한국형 모델을 만들기 위해서는 우선, 한국인을 대상으로 한 인체모형 제작이 선행되어야 하는데, 기존의 인체모형은 서양인들과 일본인을 대상으로 한 것으로 최근에 밝혀진 결과에 따르면 기존의 결과치와 큰 차이를 보였다(Park and Tuller, 2011a). 두번째로, 삼차원인 조경 및 도시 공간에서의 복사에너지 분석을 위해서 공간을 구성하고 있는 물질들에 대한 태양복사에너지 반사율(albedo) 및 지구복사에너지 예측을 위한 표면온도 예측모델을 위한 한국형 공간 구성 물질에 대한 실측이 요구되어 지고 있다. 마지막으로, Lin et al.(2010)가 보여준 서양인과 동양인의 열지수 만족도(human thermal com-

fort)가 다르므로, 한국인에 맞는 모델 개발이 필수이다.

열지수 만족도를 이용하여 삼차원인 외부공간을 기후적으로 쾌적하게 조성하는 노력은 인간의 외부활동 시간 증대와 삶의 질 향상을 이루어 나갈 수 있으며, 향후 한국형 모델 개발 각 지역에 맞는 도시 생기후도를 작성함으로써 각 주거민들에게 기후적으로 최적화된 도시 개발 방향을 제시할 있게 할 것이다. 이 방법은 나아가 도시열섬완화 및 바람길 연구로도 확대 적용되어 질 수 있다.

인용문헌

1. 이채연, 엄정희, 최영진, 김규량(2011) 토지이용도와 기상모델을 이용한 서울기후분석(CAS) 지도 개발. 한국지리정보학회지 14(1): 12-25.
2. 이정아, 정대영, 전진형, 이상문, 송영배(2010) 공간 구조별 열쾌적성 평가와 열환경 개선방안. 한국조경학회지 38(5): 12-20.
3. 이은주(2006) 도시공간 구성요소와 열쾌적성과의 관련성 연구: 서울 사례지역을 중심으로. 한양대학교 도시대학원 석사학위논문.
4. 조현길, 안태원, 김한수, 정응호(2009) 옥외공간 열쾌적성과 건물 에너지절약을 위한 논지계획지표 연구. (사)한국조경학회 추계학술발표대회 논문집: pp. 10-13.
5. Ali-Toudert, F.(2005) Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr. 15, <http://www.freidok.unifreiburg.de/volltexte/2078>.
6. Bröde, P., D. Fiala, K. Blazejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz, and G. Havenith(2011a) Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International Journal of Biometeorology, doi: 10.1007/s00484-011-0454-1.
7. Bröde, P., E. L. Krüger, F. A. Rossi, and D. Fiala(2011b) Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index (UTCI)-a case study in Southern Brazil. International Journal of Biometeorology, doi: 10.1007/s00484-011-0452-3.
8. Brown, R. D. and T. J. Gillespie(1986) Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model. International Journal of Biometeorology 30: 43-52. doi: 10.1007/BF02192 058.
9. Brown, R. D. and T. J. Gillespie(1995) Microclimatic Landscape Design: Creating Thermal Comfort and Energy Efficiency. Wiley, New York.
10. Fanger, P. O.(1972) Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York.
11. Fiala, D., G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann and G. Jendritzky (2011) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. International Journal of Biometeorology, doi: 10.1007/s00484-011-0424-7.
12. Gagge, A. P., A. Fobelets and L. G. Berglund(1986) A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transactions 92 (2B): 709-731.
13. Höppe, P. R.(1993) Heat balance modeling. Experientia 49: 741-746. doi: 10.1007/BF01923542.
14. Höppe, P. R.(1999) The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology 43: 71-75. doi: 10.1007/s004840050118.
15. Lindberg, F., B. Holmer and S. Thorsson(2008) SOLWEIG 1.0-Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. International Journal of Biometeorology 52(7): 697-713.

16. Lindberg, F. and C. S. B. Grimmond(2011) The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, doi: 10.1007/s00704-010-0382-8.
17. Matzarakis, A., H. Mayer and M. G. Iziomon(1999) Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* 43: 76-84. doi: 10.1007/s004840050119.
18. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2007) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51: 323-334. doi: 10.1007/s00484-006-0061-8.
19. Park, S.(2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model. PhD dissertation, University of Victoria, BC, Canada.
20. Park, S. and S. E. Tuller(2011a) Human body area factors for radiation exchange analysis: standing and walking postures. *International Journal of Biometeorology* 55(5): 695-709.
21. Park, S. and S. E. Tuller(2011b) Comparison of human radiation exchange models in outdoor areas. *Theoretical and Applied Climatology* 105 (3-4): 357-370.
22. Rothfus, L. P.(1990) The Heat Index 'Equation' (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). Scientific Services Division (NWS Southern Region Headquarters) SR 90-23, Fort Worth, TX.
23. Siple, P. A. and C. F. Passel(1945) Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89: 177-199.
24. Steadman, R. G.(1979) The assessment of Sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology* 18: 861-873.
25. Teller, J. and S. Azar(2001) TownScopeII-A computer system to support solar access decision making. *Sol Energy* 70: 187-200.
26. Thorsson, S., F. Lindberg, I. Eliasson and B. Holmer(2007) Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27: 1983-1993 doi: 10.1002/joc.1537.
27. VDI(1998) 3787, Part 2: Environmental Meteorology-Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning at Regional Level Part 1: Climate. Beuth, Berlin.
28. Yaglou, C. P. and D. Minard(1957) Control of heat casualties at military training centres. *A. M. A. Arch. Industr. Health*, 16: 302-31.
29. <http://www.utci.org>
30. <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=5FBBF816A-1>.