

TECHNICAL NOTE

## 대구의 2016년 폭염시기 열 스트레스 지표의 비교

김지혜 · 김해동\*

계명대학교 환경학부 지구환경학과

### Comparison of Several Heat Stress Indices for the 2016 Heat Wave in Daegu

Ji-Hye, Kim, Hae-Dong, Kim\*

Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

#### Abstract

We compared the spatial distribution of several heat stress indices (the Wet-Bulb Globe Temperature(WBGT) index, Environmental Stress Index (ESI), and Modified Discomfort Index(MDI)) for the heat wave of June 6~August 26, 2016, in Daegu. We calculated the heat stress indices using data from the high density urban climate observation network in Daegu. The observation system was established in February, 2013. We used data from a total of 38 air temperature observation points (23 thermometers and 18 automatic weather stations). The values of the heat stress indices indicated that the danger level was very high from 0900-2000h in downtown Daegu. The daily maximum value of the WBGT was greater than or equal to 35°C. The differences in the heat stress indices from downtown and rural areas were higher in the daytime than at nighttime. The maximum difference was about 4 before and after 1400h, and the time variations of the heat stress indices corresponded well. Thus, we were able to confirm that the ESI and MDI can be substituted with the WBGT index.

**Key words** : Heat stress index, heat wave, wet-bulb globe temperature index, environmental stress index, modified discomfort index

#### 1. 서론

기후학자들은 기후변화가 가져올 다양한 자연재해 중에서 인체건강에 가장 큰 피해를 줄 수 있는 것이 폭염이라고 경고하고 있는데, 폭염은 이미 지구촌에서 가장 혹독한 자연재해로 자리 잡고 있다. 인도에서는 본격적인 여름 우기가 시작되기 직전인 4~6월에 폭염이 기승을 부리는데 기온이 50°C를 넘어서는 사례도 종종 나타나고 있다. 이런 폭염으로 지난 20년 동

안에 확인된 사망자 수만도 5,000명이 넘는다. 특히 폭염이 가장 심각했던 2003년에만 3,000명 이상의 사망자가 나왔다(Hujibe, 2012). 그 해 유럽에서도 35,000명 이상이 폭염으로 사망했는데, 프랑스에서 가장 많은 약 15,000명의 사망자가 발생하였다. 한편 2003년 유럽의 폭염 인명 피해 규모는 당시에는 35,000명으로 발표되었지만 2007년에 발표된 2003년 유럽의 폭염으로 인한 인명 피해 재평가 보고에 의하면 당시보다 2배 많은 70,000명의 폭염 사망자가 발생한

Received 21 September 2017; Revised 26 October, 2017;  
Accepted 6 November, 2017

\*Corresponding author: Hae-Dong Kim, Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea  
Phone : +82-53-580-5930  
E-mail : khd@kmu.ac.k

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

것으로 파악되었다(Kai, 2012).

2010년 여름에도 동유럽과 러시아에서 폭염이 발생하여 56,000명 이상이 사망하였다. 일본에서도 폭염으로 인해 다수의 사망자가 나오고 있는데, 특히 2010년에는 1,700명 이상의 인명피해가 발생한 바 있다. 일본기상학회에서는 2010년 폭염 발생의 기후학적 원인을 정리하여 발간하였는데, 엘니노현상 종료 후의 승온 효과와 라니냐 현상 발생의 영향이 중첩되어 나타난 것으로 지적하고 있다(JMA, 2012). 일본의 2010년의 폭염은 엘니노현상에서 라니냐현상으로의 전환기인 2016년에 나타난 폭염과 흡사하였다. 우리나라에서도 1994년 더위로 서울에서만 고온으로 약 900여명이 사망하였고, 2010, 2012, 2013년과 2016년의 폭염에도 다수의 인명피해가 발생하였다.

폭염의 원인은 지구온난화와 도시화에 있으며, 이 두 요인을 줄여야 폭염을 완화할 수 있다. 화석연료로부터 대규모의 에너지를 얻으면서 인류는 풍요로운 삶을 누리게 되었지만 그 대가로 발생한 이산화탄소가 지구온난화를 가져와 폭염을 가중시키고 있다.

폭염의 또 다른 원인은 도시화에 있다. 대도시의 기온상승에 미치는 영향은 지구온난화보다 도시열섬의 효과가 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. 도시열섬의 가장 큰 원인은 아스팔트도로와 건축물이 늘어나면서 토양과 녹지가 사라지는 것에 있다. 인공구조물은 낮에 태양에너지를 더 많이 흡수하고 더 많이 저장한다. 이를 열용량의 증가라고 하는데, 열용량의 증가로 도시의 지표온도와 기온은 상시적으로 교외에 비하여 높은 상태가 된다.

우리나라의 폭염정보는 기상청에서 일 최고기온을 기준으로 폭염특보(폭염주의보와 폭염경보)를 내고 있는데, 주요 국가에서 온열환경지수를 사용하여 다단계의 폭염정보를 생산하는 것에 비하여 대단히 단순한 수준에 머물러 있는 셈이다.

고온 열 환경을 평가하는 지수로 다수의 직접·간접 열지수가 개발되어 사용되고 있는데, 가장 대표적인 것으로 WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature)와 인지온도(Perceived Temperature, PT)를 들 수 있다. 직접 열지수는 관측된 여러 기상요소로 구성되는 관계식으로부터 구하고, 간접 열지수는 인체 에너지수지 방정식을 계산하여 구한다. WBGT와 PT는 전 세

계에서 가장 널리 사용하고 있는 직접 열지수와 간접 열지수이다.

일본 체육협회에서는 운동 시의 열중 증 예방, 일본 생기상학회에서는 일상생활 중에서 발생하는 열중 증의 예방에 WBGT를 지표로 한 예방지침을 제언하고 있다. 일본에서는 정부 부처, 지자체 및 민간단체들도 WBGT를 “더위 지수”라는 일반인에게 받아들여지기 쉬운 명칭으로 고쳐서 열중 증 재해 평가에 적극 활용하고 있다. 이렇게 WBGT가 일본에서 널리 이용되게 된 이유는 실제로 열중 증 환자 발생률과 높은 상관성이 얻어졌기 때문이다. 최근 우리나라에서도 2020년 기상영향예보를 앞두고 수행중인 지방기상청 영향예보 시범사업에서 WBGT (더위체감지수라고 지칭하고 있음)가 온열질환자 발생규모를 잘 설명하는 것으로 보고하고 있다(KMA, 2017). 그런데 WBGT는 건구온도와 습구온도 이외에 흑구온도를 측정해야하기 때문에 일반인이 사용하기 어렵다. 이러한 배경에서 최근에는 국내외적으로 기상관서에서 통상적으로 측정하고 있는 몇몇 기상요소를 사용해서 WBGT를 추정하든가, WBGT를 대체할 수 있는 ESI (Environmental Stress Index; 환경 스트레스 지수)와 같은 새로운 온열환경지수를 만들어 사용하고 있다. WBGT는 현재 유럽과 일본 등에서 열중 증 예방을 위하여 가장 많이 활용하고 있는 온열환경 지수로 주로 야외에서 일하는 근로자나 군인, 운동선수에게 가장 적합한 열사병 예방 기준으로 꼽히며, 체육, 군사훈련, 노동, 조경분야 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 2016년 폭염 기간을 대상으로 대구에서 관측된 기상자료를 이용하여 도시 내 온열환경의 공간분포 차이를 평가함에 있어서 WBGT와 ESI의 적용가능성을 조사해 보았다. 아울러 대구기상지청과 대구의 소기후지역간의 이들 온열환경지수의 차이를 비교하여 봄으로써 대구기상지청에서 대구의 소기후지역별로 차별화된 폭염특보 자료를 제공할 수 있는 방안을 검토해 보고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

2016년 여름은 1994년 이래 기록적인 고온으로 다수의 인적, 물적 피해를 가져왔다. 특히 대구에서는

7월 6일부터 8월 26일에 걸쳐서 강우가 나타난 수일을 제외하고는 폭염 특보가 지속되었다. 이 기간을 대상으로, 대구 도시지역에 대략 5 km × 5 km 격자 범위로 설치한 온습도로거, 자동기상관측장치를 이용하여 관측한 기상자료를 이용하여 WBGT, ESI, MDI를 산출하였다. 기상관측 방법과 자료의 품질 관리에 대해서는 Kim et al.(2014)에 자세히 설명되어 있다. 이 연구에 사용한 3개의 온열환경지수는 다음과 같이 정의된다.

<WBGT 산출방법>

WBGT는 Yaglou and Minard(1957)에 의해 미국에서 처음으로 제안된 지수로 현재 유럽과 일본 등에서 열중 증 예방을 위하여 널리 이용되고 있는 지수로 주로 야외에서 일하는 농동자, 군인, 운동선수들에게 적용하기에 적합한 것으로 국제적으로 표준화되어 있는 지수(ISO 7243)이다(Parsons, 2006).

흑구온도 관측 자료가 있는 경우,  

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1)$$

흑구온도 관측 자료가 없는 경우,  

$$WBGT = 0.735T_a + 0.0374RH + 0.00292T_aRH + 7.619SR - 4.557SR^2 - 0.0572W_s - 4.064 \quad (2)$$

여기서  $T_w$ ,  $T_g$ ,  $T_a$ 는 섭씨(°C)단위의 습구온도, 흑구온도, 건구온도이고 RH는 상대습도(%), SR은 일사량(W/m<sup>2</sup>),  $W_s$ 는 풍속(m/s)이다. 대구 지역에 설치한 기상관측 망에는 흑구온도가 관측되지 않고, 풍속과 일사량이 관측되지 않는 지점(온습도로거 자료)이 다수이기 때문에 이 연구에서는 호주 기상청에서 사용하고 있는 아래의 추정 식을 사용하였다.

기온과 습도자료만 있는 경우,  

$$WBGT = 0.567T_a + 0.393e + 3.94 \quad (3)$$

여기서  $T_a$ 는 기온(°C)이고,  $e$ 는 수증기압(hPa)인데 다음과 같은 공식으로 계산된다.

$$e = RH/100 \times 6.105 \times \text{EXP}(17.27 \times \frac{T_a}{237.7 + T_a})$$

<ESI와 MDI 산출방법>

ESI와 MDI는 Obayashi(2015)를 따라서 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$ESI = 0.63T_a - 0.03RH + 0.002SR + 0.0054T_a \cdot RH - 0.073(0.1 + SR)^{-1} \quad (4)$$

$$MDI = 0.3T_a + 0.7T_w \quad (5)$$

여기서  $T_a$ , RH, SR,  $T_w$ 는 각각 기온(°C), 상대습도(%), 일사량(W/m<sup>2</sup>), 습구온도(°C)이다. MDI (Modified Discomfort Index; 개량 불쾌지수)와 ESI는 모두 WBGT를 목적 변수로 하는 중회귀 분석을 통해 작성되었다. 특히, ESI의 경우에는 심박 수와 직장(直腸) 온도 등의 온열 생리 변동과의 양호한 대응도 확인되었다. 최근 일본에서는 기온과 상대습도 및 일사량도 포함하는 새로운 열지수인 ESI (Environmental Stress Index; 환경 스트레스 지수)가 새롭게 주목받고 있다. ESI는 심박 수와 직장(直腸) 온도 등의 온열 생리 변동과 양호한 대응관계가 확인되었다는 보고가 있다 (Obayashi, 2015).

3. 결과 및 고찰

2016년 폭염이 이어진 7월 6일부터 8월 26일까지를 분석 대상 기간으로 하여, 대구에서 관측된 상세 공간 기온 관측 자료를 이용하여 일 최고기온이 나타난 시간대의 기온과 습도를, 일사량은 해당 시각의 대구 기상지청의 자료를 이용하였다. 해당 지점에서 나타난 최고기온은 매일 매일의 일 최고기온을 폭염 지속 기간에 대해서 평균하여 구한 값이다. 열지수 계산에 사용한 습도와 일사량은 일 최고기온 발생 시각의 값을 동일 기간에 대하여 평균하여 얻었다. Fig. 1에 그 결과를 제시하였다. MDI, ESI, WBGT의 3개 지수 값은 공간적으로 소지역별로 거의 일치하고, 각 지수별로 나타나는 소지역 간의 값의 차도 일정한 분포를 보였다. 이러한 사실로부터 3개 지수는 대체 사용이 가능한 것으로 판단할 수 있었다. WBGT가 매우 위험

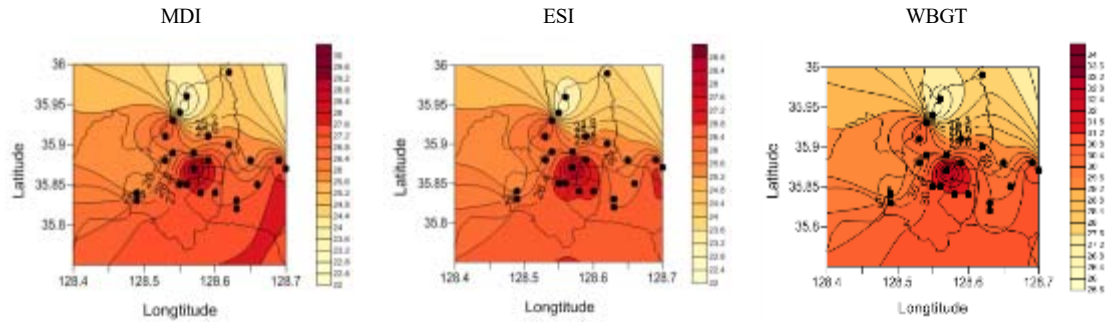


Fig. 1. Spatial distribution of MDI, ESI and WBGT during the heat wave stage( 6 July~26 August) of 2016 in Daegu.

수준인 30 이상인 등치선이 위·경도(35.82, 128.4~35.88, 128.55~35.88, 128.7)를 지나는 것을 확인할 수 있다. 이 등치선의 남쪽은 30 이상의 값에 해당한다. 가장 높은 값은 중구에서 32정도로 계산되었다. 행정구역상으로는 달서구, 서구, 중구 및 남구가 이에 해당한다. WBGT 30선과 유사한 위치를 지나는 값이 MDI와 ESI로는 26이다. MDI와 ESI가 가장 높게 나타난 지역은 중구로 각각 30과 28로 나타났다. 이러한 분석 자료로부터, 기온과 습도만을 요구하는 MDI로도 WBGT를 대체하는 온열 환경지수로 활용할 수 있을 것이라는 가능성을 확인할 수 있었다. 다만 Obayashi(2015)는 일본의 5개 도시(교토, 오사카, 고베, 오카야마)를 대상으로 기상관서에서 관측한 기상요소를 이용해서 MDI·ESI를 계산하여 이를 일본 환경성이 동일한 기상관서의 노장에서 측정하고 있는

WBGT와 비교하는 연구를 수행하였는데, MDI는 WBGT에 대해서 한낮에 산포 성이 다소 큰 단점이 확인되었다. 반면에 ESI는 낮과 밤에 관계없이 WBGT와 아주 좋은 대응을 보였다(상관계수 0.95 이상).

MDI와 ESI 중 WBGT와 대응성이 더 나은 열지수가 무엇인지를 확인해 보기 위하여 Fig. 2에 대구기상지청에 대하여 2016 폭염 시기의 3개 열지수의 시간변화를 제시하였다. 야간 시간대에는 3개 열지수가 거의 일정한 변화를 하고 있지만 낮 시간대에는 WBGT와 ESI의 시간변화가 거의 유사한 위상을 보였고, MDI는 낮의 고온상황에 대한 민감도가 다소 떨어지는 나타났다. 이러한 사실로부터 Obayashi(2015)가 지적하고 있듯이 ESI가 WBGT의 대체 열지수로 더 적합한 것으로 판단할 수 있다.

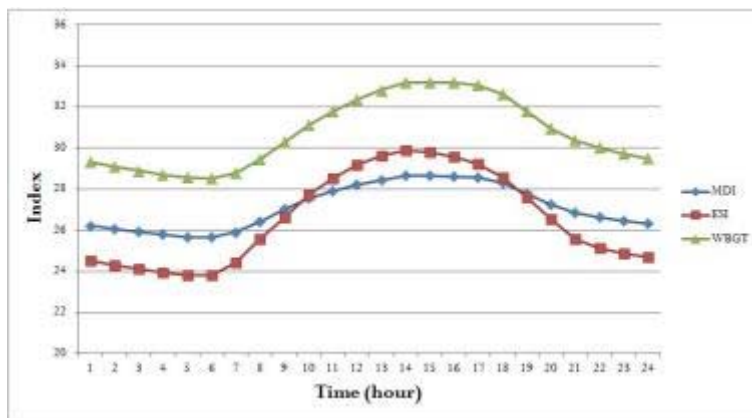


Fig. 2. Time variation of MDI, ESI and WBGT at Daegu meteorological branch administration during hot summer days (6 July~26 August 2016).

열지수의 도시 공간 분포 특성을 보다 명확하게 파악해 보기 위하여 ESI와 WBGT를 대상으로 대구의 도시기후권역별 시간변화 특성을 조사해 보았다.

먼저 Fig. 3에 Park et al.(2011)이 기온과 지형 및 지상 바람순환의 공간 구조 등을 바탕으로 분류한 대구 지역의 도시기후지도를 제시하였다. 그들은 Mikami(2005)의 방법을 따라서 기온과 국지풍의 시공간적 변화특성에 따라서 대구를 6개 소지역으로 분류하였다. A가 도심지인 중구이고 대구의 산업시설 중 약 70%가 몰려있고, 가장 많은 인구가 밀집해 있는 달서구가 포함되어 있는 곳이 D이고, 대구의 전통적 주거시설이 밀집되어 있는 남구가 E지역이다. 팔공산의 영향이 크고 인구 밀도가 낮은 동구가 B이고, 경산과 맞닿아 있고 대구에서 녹지분포가 가장 높은 수성

구는 C지역에 포함된다. 대구기상지청은 동구 효목동에 위치하여 B지역에 포함된다.

Fig. 4와 5에 이렇게 분류한 대구의 도시기후 지역별 ESI와 WBGT의 시간변화를 나타내었다(MDI도 ESI와 유사한 특성을 보여서 생략). 각 지역에 속하는 여러 지점에서 관측된 기상요소를 이용하여 이를 계산한 후에 평균하여 나타내었다. 대구의 도심지인 A 지역에서는 낮과 밤에 관계없이 ESI와 WBGT가 가장 높게 나타났다. 남구가 속한 E지역이 그 다음으로 높은 값을 보이는데, 특히 한낮과 오후 시간대에 타 지역보다 높았다. B와 C지역으로 나타났다. 가장 낮은 값을 보인 지역은 팔공산에 인접한 북구와 동구가 포함된 B지역이었다. 특히 낮 시간대에 타 지역에 비하여 훨씬 낮은 값을 보였다. 지역별 열지수에 차가 가장 큰 시간대는 일 최고기온이 출현하는 오후 2시 전후였고 값의 차는 4정도였다. 이것은 기온과 다른 특성이다. 즉, 각 기후권역별 기온의 시간변화를 비교해 보면 권역별 차가 가장 크게 나타나는 시간대가 일출 전후이고 한낮에는 그 차가 가장 작게 나타난다(Kim et al., 2017). 이렇게 열지수가 고온 출현 시간대에 지역별로 보다 뚜렷한 차를 보여준다는 사실도 폭염 상세 정보 제공에 기온보다 열지수를 사용하는 것이 좋다는 근거로 들 수 있다. 또 도심지인 E지역에서 폭염의 매우 위험 수준인 WBGT 31 이상, ESI 29 이상이 유지된 시간대가 각각 09~20시, 10~19시로 나타나서, Kim et al.(2017)이 제시하고 있는 E 지역에서의 폭염 주의보 수준(33℃ 이상)이 유지된 시간대(12~18시)보다 3~

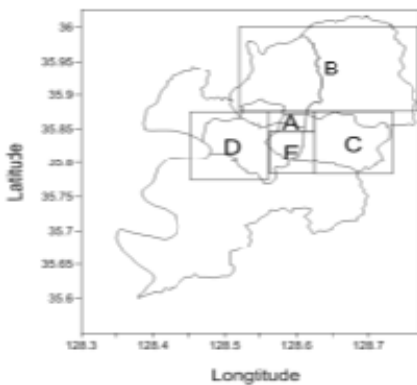


Fig. 3. Climatope mapping in Daegu classified by Park et al.(2011).

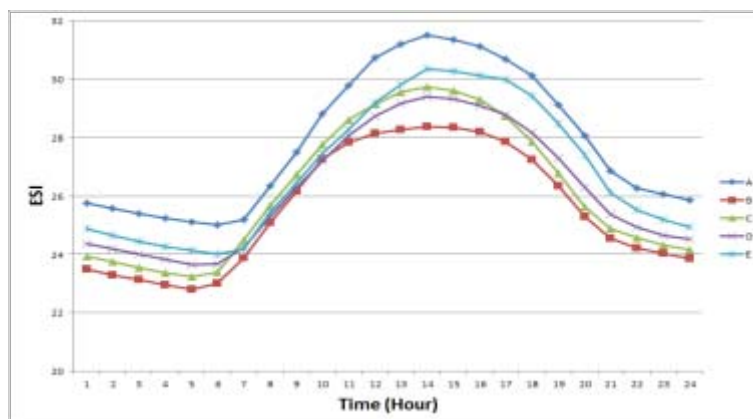


Fig. 4. Time variation of ESI during the heat wave stage (6 July ~ 26 August) of 2016 in Daegu.

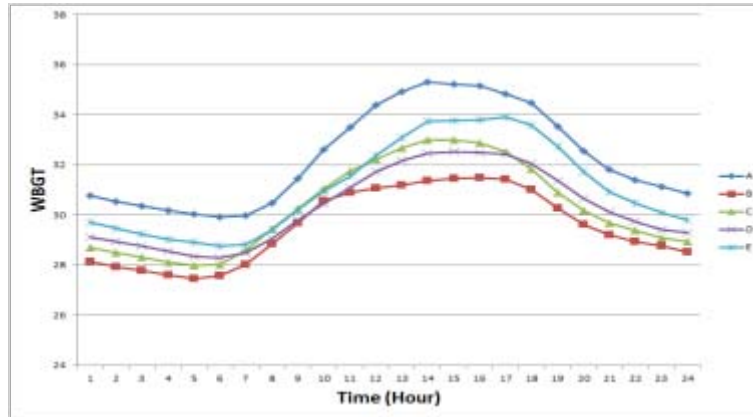


Fig. 5. Same as Fig. 2 except for WBGT.

5시간 정도 더 긴 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

2016년 대구의 주요 폭염기간(7월 6일~8월 26일)에 상세 공간해상도로 관측된 기상요소로부터 3개 열지수를 계산하여 분석한 결과 다음과 같은 사실이 확인되었다.

첫째, 도심지인 E지역에서는 WBGT와 ESI가 폭염 매우 위험 수준을 나타내는 31과 29 이상이 각각 09~20시, 10~19시 사이에 유지되어 대구기상지청이 위치하며 팔공산에 인접한 B지역에 비하여 2시간 정도 더 길었다. 또 대구기상지청과 도심지역 간에는 한낮에 열지수 값에 4정도의 차가 존재하는 것으로 나타났는데, 이는 도심지가 대구기상지청이 위치하는 교외 지역에 비하여 폭염 위험 가이드라인에서 두 단계나 차이가 날 정도로 열 환경이 현저히 나쁘다는 사실을 입증한다.

둘째, 도시 내 기후권역별 열지수 값에 가장 큰 차가 나타나는 시간대는 일출 전후에 지역 간 차이가 가장 크게 나타나는 기온과 달리 일 최고기온이 출현하는 오후 2시 전후이었다. 이러한 사실도 폭염 상세 공간정보의 생산과 활용에 열지수가 기온보다 유리한 사유로 판단할 수 있다.

셋째, 기상청에서 관측하고 있는 기상요소로 산출이 가능한 ESI와 MDI의 시공간적 변화 특성이 WBGT와 상응하는 것으로 확인되었다. 따라서 흑구

온도의 관측이 어려운 환경에서는 이들 열지수를 이용하여 폭염정보를 생산하여 사용하는 것도 유효한 방법이 될 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015년 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015 R1D1A1A01057632).

#### REFERENCES

- Hujibe, H., 2012, Climate change and abnormal weather of urban area, Asakusa Press, Tokyo, 97-109.
- Japan Meteorological Agency, 2012, Abnormal Weather Report, 12-20.
- Kai, K., 2012, Two warming phenomenon - Global warming and urban heat Island -, Seizando Press, 2-18.
- Kim, H. D., Kim, J. B., Kim, H. Y., Bae, H. K., 2012, Energy and climate change, Keimyung University Press, Daegu. 231-246.
- Kim, H. D., Kim, J. H., 2017, Spatial distribution of thermal environment during the heat wave stage of 2016 in Daegu, Proc. Kor. Earth Sci. Soc. 38(1), 105.
- Kim, S. D., Cho, C. B., Kim, H. D., 2014, Investigation of urban high temperature phenomenon in summer using the high density ground monitoring system in Daegu Metropolitan area, J. Environ. Sci. Int., 23, 1619-1626.
- Korea Meteorological Administration, 2017, Midterm

- Report on the Model Project of Impact Predictions performed by the Local Meteorological Administrations, 81-155.
- Mikami, T., 2005, Abnormal weather in Tokyo, Yousensha Mook Press, Tokyo, Japan, 24-41.
- Obayashi, T., 2015, On the summer heat stress indices. Proc. Japan Meteor. Soc. 107(1), 230.
- Park, M. H., Jung, W. S., Kim, H. D., 2011, A Study on urban environmental climate mapping method for sustainable urban planning in Daegu, J. Environ. Sci., 20, 465-482.
- Parsons, K., 2006, Heat stress standard ISO 7243 and its global application, Industrial Health, 44, 368-379.
- Yaglou, C. P., Minard, D., 1957, Control of heat casualties at military training centers, Arch. Ind. Health, 16, 302-316.