

## RCP 시나리오기반 평균기온, 적산온도 불확실성 보완 프로그램

유동수<sup>\*,\*\*†</sup> · 권오창<sup>\*\*\*</sup> · 김홍기<sup>\*\*\*\*†</sup>

<sup>\*</sup>국립생태원 전임연구원, <sup>\*\*</sup>충남대학교 정보통계학과 박사과정, <sup>\*\*\*</sup>국립생태원 연구원, <sup>\*\*\*\*</sup>충남대학교 정보통계학과 교수

### A Simple Program Improving Uncertainly Average Temperature and Growing Degree Days based on RCP Scenario

Yu, Dong-Su<sup>\*,\*\*†</sup> · Kwon, Oh-Chang<sup>\*\*\*</sup> and Kim, Hong-Gie<sup>\*\*\*\*†</sup>

<sup>\*</sup>Associate Researcher, National Institute of Ecology, 1210, Geumgang-ro, Maseo-myeon, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

<sup>\*\*</sup>Ph.D. Candidate, Dept. of Information and Statistics, Chungnam National University, 99 Daehakro, Yuseong, Daejeon, Republic of Korea

<sup>\*\*\*</sup>Researcher, National Institute of Ecology, 1210, Geumgang-ro, Maseo-myeon, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

<sup>\*\*\*\*</sup>Professor, Dept of Information and Statistics, Chungnam National University, 99 Daehakro, Yuseong, Daejeon, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Greenhouse gas released into the environment since the industrial revolution in the 18th century is resulting in global warming and is a critical issue with regard to climate change, which may result in problems such as influx of invasive alien plant/animal species, outbreak of endangered species, and spread of disease. In some studies on climate change and the ecosystem, average temperature and growing degree days (GDD) are basic and important climatic factors that are closely related to the conditions suited for growth and survival of animals and plants. When predicting climate change with average temperature and GDD, the Representative Concentration Pathway (RCP) is the main available scenario for the future climate. However, the RCP scenario has some errors because of its uncertainty caused by complex climate models, by inaccurate greenhouse gas emission, and by the physical natural environment. Thus, it is necessary to compensate the climatic data of the RCP scenario. We developed a simple program named RGI (RCP scenario-based Growing degree days Interpolation) for interpolating average temperature and GDD per day calculated from the RCP scenario (resolution 1 km) as supported by the Korea Meteorological Administration (KMA) in South Korea. Our program interpolates average temperature and GDD from a set of RCP scenario data using a quadratic model and nonlinear models such as the self-starting logistic, Gompertz, or/and Weibull functions. When we tested the RGI program against the actual temperatures in Seoul and Buyeo, South Korea, RGI was close to the observed temperature and had significantly less residual standard error in linear regression analysis than the RCP scenario ( $p$ -value < 0.05) and showed similar results for an additional 10 sites. Based on these results, we expect that RGI can improve the uncertainty of the RCP scenario. As RGI is coded using Perl script language and R open source, it can be easily used. The executive RGI source is available at <https://sourceforge.net/projects/rgi/>.

**Key words:** Climate Change, Average Temperature, Growing Degree Day

<sup>†</sup> Corresponding author: [axxa76@nie.re.kr](mailto:axxa76@nie.re.kr) and [honggiekim@cnu.ac.kr](mailto:honggiekim@cnu.ac.kr) (National Institute of Ecology, 1210, Geumgang-ro, Maseo-myeon, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do, 33657, Republic of Korea. Tel. +82-41-950-5495)

ORCID 유동수 0000-0002-8099-1187 권오창 0000-0003-1288-4715  
김홍기 0000-0002-4186-453X

## 1. 서 론

지구온난화에 의한 기후변화의 문제는 18세기 산업혁명 이후 산업화 및 도시발전으로 인한 화석연료의 사용으로 발생한 온실가스의 배출량의 증가로 인해 기후변화의 속도가 가속화되고 있다 (Kwak et al., 2008). 지구온난화에 대한 문제는 단순히 기온의 상승과 대기환경의 변화를 초래하는 것 뿐만 아니라, 지구상의 모든 생물체 및 무생물체에 영향을 미치게 된다 (Hong, 2008; Kim, 2010). 특히 지구온난화에 의한 자연생태계의 변화는 심각한 문제로 대두되고 있는데, 특히 기온상승으로 인한 생물서식환경의 변화, 질병 발생 및 확산, 외래종 유입 등으로 인해 자생종 및 고유종의 수가 줄어들고 있으며, 멸종위기 혹은 멸종된 생물의 증가와 같은 생태적 환경과 생물종 다양성의 감소로 인해 인간 삶의 변화, 경제 손실 등을 초래할 수 있다 (Hyesoon, 2013). 또한 기후변화에 따른 자연생태계의 변화는 인간생활에 있어서 공중보건에 대한 심각한 위협을 야기시키는데 대기질 악화로 인한 질병 발생, 사망, 기아 발생 등이 일어날 것으로 보고 있다 (Hong, 2008). 따라서 인간의 윤택하고 안정적인 삶의 보장을 위해서는 자연생태계의 보전과 유지를 위한 관리가 필요하며, 자연생태계의 위협을 조장하는 기후변화에 대한 관심과 지구온난화 방지를 위한 노력이 꾸준히 진행되어야만 한다.

기후변화에 따른 생태계의 영향에 관한 연구에 있어서 가장 크게 활용되는 지표중의 하나는 기온으로 기온의 변화는 폭염, 한파, 가뭄, 해양온난화 등과 같은 자연재해나 생태계 변화와 밀접하다 (Song et al., 2015; Wie et al., 2018). 한반도의 기온은 하루 동안에 온도 상승, 하강의 반복 형태를 보이기 때문에 대개 평균기온으로 일반화 혹은 대표화하여 사용한다. 과거부터 현재 혹은 미래에 대한 기온의 변화를 일, 월, 연단위로 평균화하여 비교하기 위한 기준으로 사용하는 경우가 많은데, 평균기온을 바탕으로 계절변화를 추정하기도 하며, 기후변화와 관련하여 지구온난화를 평가하는 척도로도 사용되기도 한다 (Lee et al., 2011). 평균기온과 유사한 지표로서 생물변화 혹은 생물생육과 관련한 적산온도 (Growing degree days)가 있다 (Grigorieva et al., 2010). 적산온도는 생장도일, 유효적산온도라 불리우기도 하는데, 적절한 생육환경을 조성하고 생물의 생태활동에 필요한 온도범위를 산출, 식물의 분포범위를 설정, 현재 분포하는 식물의 생육단계를 예측하는 등에 사용할 수 있다 (Lim et al., 2016). 예를 들어 신갈나무의 잠재분포와 생장과 관련 (Lim et al., 2016), 식물계절 (개화, 만개일 예측)의 변화 (Kim et al., 2013a) 등과 같은 연구뿐만 아니라, 영농에서 식물의 생장속도와 기온상승

과의 관계 및 작물생산에 대한 결과활용 등에 있어서 적산온도는 매우 유용하게 이용되고 있다 (Kim and Yun, 2008). 따라서 생태계 연구에 있어서 평균기온과 적산온도는 식물개화 시기 분석과 같은 기후변화에 따른 생물계절현상 규명과 같은 생태계 연구와 함께 작물생산에의 활용함으로써 농업경제 산업에 중요한 지표로 이용되기도 한다.

온실가스에 대한 기후변화에 따른 자연생태계 및 사회·경제적인 변화를 연구함에 있어서 미래기후에 대한 평균기온, 적산온도를 계산하기 위해서는 미래기후를 예측한 기온자료가 요구된다. IPCC 제5차 평가보고서를 통해서 사용되었던 온실가스 배출량에 따른 기온상승 시나리오인 대표농도경로 (RCP, Representative Concentration Pathway)는 2100년까지의 기온 (일최저, 일최고, 일평균)과 강수량을 예측하였는데, 최근 많은 연구에서 RCP 시나리오를 이용하여 미래기후의 변화와 그에 따른 생태계의 변화를 유추하고 있다 (Park et al., 2014). 또한 국내 기상청에서는 RCP 시나리오를 한반도 지리적 상황에 맞게 1 km 고해상도의 시나리오를 제공하고 있어서 한반도의 미래 기후변화에 따른 다양한 변화를 예측하고 있다 (Kim et al., 2012). 따라서 이러한 시나리오를 바탕으로 도출한 평균기온과 적산온도를 통해서 지리적 요인과 함께 생물의 생장온도에 따른 시기변화, 생물다양성 변화, 생물의 확산 및 이동하는 방향, 서식지의 증가 혹은 감소 등의 미래 생태계의 변화를 예측하는 연구가 가능하다. 그러나 이러한 연구에 있어서 기준이 되는 평균기온과 적산온도를 미래기후 시나리오를 바탕으로 특정 지역을 선택하고, 선택된 지역에 대한 적산온도를 추출하기에는 관련 자료를 처리할 수 있는 전문가가 아닌 이상 쉽지 않고, 대용량의 자료를 한번에 처리하여 원하는 결과를 얻어내기가 어렵다. 또한 RCP 시나리오 자체의 온실가스 배출농도에 따른 예측에 있어서, 불완전한 물리적 이해, 연산 능력 등의 한계와 같은 불확실성으로 인해 일부 값이 누락 (no data)되거나, 실제의 기온에 비해 비정상적으로 높거나 낮은 값 (이상치), 혹은 정밀하지 못한 차이가 있다 (Han et al., 2018). 기상청에서 제공하는 남한상세 (1 km)자료 또한 이러한 문제를 해결하고, 고해상도로 재가공 되었지만, 여전히 불확실성에 따른 오차가 존재한다 (Kim et al., 2013b). 이러한 기후자료의 불확실성은 평균기온과 특히 기온의 누적계산에 기초하는 적산온도 계산에서 부정확한 결과를 초래할 수 있기 때문에, 추가적인 보완/보정된 자료를 사용하는 경우가 많다 (Bak et al., 2016). 그러나 이러한 보완/보정작업은 연구자에게 있어 익숙한 방법이 아니라면 연구의 진행에 있어 어려움을 초래할 수 있으며, 그만큼 시간적·경제적 손실을 야기할 수 있다. 따라서 대용량의 미

래기후 시나리오로부터 평균기온과 적산온도를 산출하고 보완하는 자동화된 프로그램이 있다면, 그리고 그 결과가 실제 관측자료와 유사한 패턴으로 나타난다면 기후변화연구와 함께 기온을 기준으로 한 생태계 연구의 효율성 및 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 미래 기후 시나리오를 바탕으로 한반도 내 특정 지점 (위도 및 경도)를 바탕으로 해당 일최고 및 일최저 기온을 추출하여, 평균기온과 적산온도를 산출하고 적절한 통계학적 방법을 이용하여 변화를 추정하는 프로그램인 RGI (RCP scenario-based Growing degree days Interpolation program)를 개발하였다. RGI 프로그램은 평균기온에 대하여 2차방적식을 이용한 회귀모형을 통해 자료를 보완하고, 적산온도는 비선형회귀모형을 통해서 적절한 결과를 출력한다. 스크립트 언어인 펄 (Perl)라이브러리와 무료 통계 라이브러리인 R을 사용하여 개발하였기 때문에, 각 라이브러리가 설치된 모든 시스템에서 실행이 가능하고, 특히 방대한 RCP 시나리오 처리가 용이한 리눅스 (Linux) 또는 유닉스 (Unix) 시스템과 같이 대용량의 처리가 가능한 시스템에서 사용할 수 있다. 본 연구에서 개발된 RGI 프로그램은 미래기후변화 시나리오를 바탕으로 적절한 평균기온과 적산온도를 추출하여 기후변화에 따른 미래생태계의 변화에 적용함으로써 보다 정확하고 예측 가능한 연구결과를 도출하는데 기여할 것으로 판단된다. RGI 프로그램은 공개 프로그램 개발관리 사이트인 소스포지 (Sourceforge)에서 다운로드가 가능하다 (<https://sourceforge.net/projects/rgi/>).

## 2. 평균기온 및 적산온도 보간

### 2.1 RGI 프로그램 개요

RGI 프로그램은 RCP 시나리오로부터 기온자료를 특정좌표에 따라 추출하여 일단위 평균기온과 적산온도를 산출하고 소실된 자료 및 특이적 자료를 대표값으로 보정하는 프로그램으로 아래의 순서도에 의해 자동화된다 (Fig. 1). 특정 자료 (Coordinates)와 RCP 시나리오 자료가 입력되면 RGI 프로그램은 RCP 시나리오 자료처리 (RCP Scenario Process), 기온 (평균기온 및 적산온도) 산출 (AvgTemp & GDD Calculation), 회귀모형을 이용한 기온 (평균기온 및 적산온도) 보간 (Interpolation Regression Modeling)으로 총 3가지 단계로 진행된다. 각각의 단계에서 처리된 결과물은 텍스트 파일인 rcp.txt, temperature.txt, interpolation.txt로 출력되는데, 최종 파일인 interpolation.txt에서 일별로 보간된 기온자료가

저장된다.

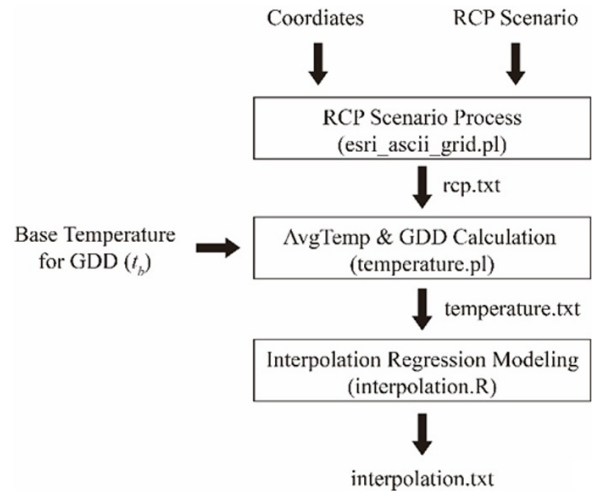


Fig. 1. Pipeline for RGI program.

### 2.2 기상청 남한 상세 기후변화 시나리오 처리

IPCC 제5차 보고서에서 사용된 온실가스 배출량에 따른 기온상승을 예측한 대포농도경로 (RCP) 시나리오는 온실가스 농도에 따라 총 4가지 (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)를 제공하고 있다. 그 중에서 RCP 4.5와 8.5가 다수의 연구에서 이용되고 있는데 RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우에 대한 시나리오이며, RCP 8.5는 온실가스의 저감이 없이 배출될 때의 시나리오이다 (Lim et al., 2016). RCP 시나리오는 범지구적인 자료로서 각 나라의 지형에 대한 특성을 고려하지 않았기 때문에, 지리적 환경, 인구의 밀집, 에너지 소비 등으로 인해 실제 기온과는 차이가 있으며, 온실가스의 배출량에 근거한 추정된 기온값을 제공한다. 국내 기상청에서는 국내의 특이적 지리적 요건 및 환경적 요인 등을 고려하여 한반도 (남한)의 환경에 맞게 프리즘 (PRISM, Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model) 모델을 적용한 RCP 시나리오남한 상세자료를 제공하고 있다 (Kim et al., 2012). 12.5 km 간격의 지역기후모델의 일평균 기온, 일최고/일최저 기온, 일평균 강수량을 1 km 간격으로 재조정하였기 때문에 보다 높은 해상도로써 상세화된 기후변화 분석이 가능하다. 기상청에서 제공하는 자료는 한반도를 대상으로 기상/기후학, 지리정보학 및 생태학 등, 환경과 관련한 많은 분야에서 활용되고 있어서, RGI 프로그램에서도 기상자료의 활용성을 감안하여 남한 상세 기후변화 시나리오를 입력자료로 사용하도록 개발되었다. RGI 프로그램의 RCP 시나리오 자료 처리 단계에서 사용하는 남한 상세자료 가운데 ESRI-ASCII-

GRID 형식의 파일을 사용하는데, 이 파일은 행과 열의 개수 (ncols, nrows)와 시작지점의 좌표 (xllcorner, yllcorner), 그리고 각 칸으로 이동시 증가되는 좌표범위 (cellsize)와 NULL값 (nodata\_value)과 같은 기본정보와 함께 일렬로 나열된 각 좌표에 해당하는 자료값으로 구성되어 있다 (Fig. 2). 본 프로그램은 ESRI-ASCII-GRID 형식의 파일을 전 처리한 후, 입력한 좌표정보에 가장 근접한 지점의 기온자료를 자동적으로 도출하며, 해당연도에 대한 다량의 시나리오 자료가 있는 경우 RGI 프로그램은 모든 자료를 처리한다.

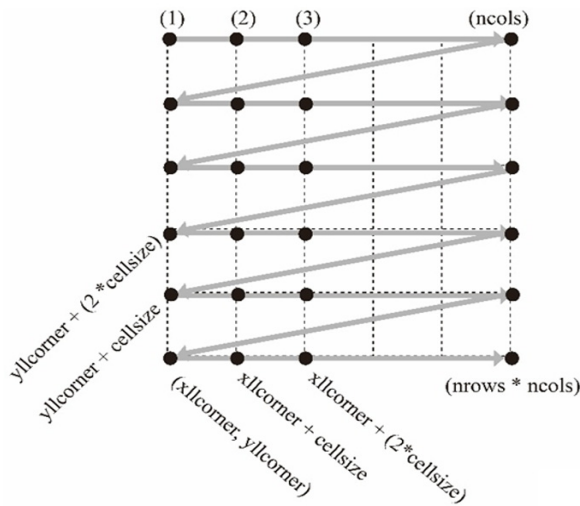


Fig. 2. A Matrix converted from lining values (gray arrow) for ESRI-ASCII-GRID file format.

RCP 시나리오 자료에 대한 RGI 프로그램의 결과와 실제 기온과의 차이를 비교하기 위하여 기상청의 종관기상관측지점에서 관측된 기온자료를 사용하였다. 종관기상관측은 시간적·공간적으로 규모가 큰 고기압이나 저기압의 공간적 크기 및 수명에 해당하는 종관규모의 매일 날씨를 파악하기 위하여 설치된 모든 관측소에서 같은 시각에 실시하는 지상관측으로, 기온, 강수, 바람, 기압, 습도, 일사, 일조, 등 15개의 기후요소를 매분 관측한다. 현재 전국 102개 지점에서 관측된 자료를 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr>)에서 제공하고 있으며, 본 연구에서는 서울 및 부여지점과 함께 RGI 프로그램의 활용 가능성에 대한 평가를 위하여 강릉, 수원, 인천 등 전국 10개 지점을 추가로 분석하였다.

### 2.3 평균기온 및 적산온도

평균기온은 일정기간 동안 변동된 기온에 대한 평균값으

로, 일반적으로 일단위, 월단위, 혹은 연단위로 아래의 식과 같이 계산되는 평균기온을 많이 이용하는데, 기온은 시간단위로 변동이 있기 때문에, 일반적인 연구에서는 아래의 식으로 평균기온 ( $T_{avg}$ )을 산출한다. 평균기온에 대한 보정을 위해서는 본 프로그램에서는 기상청 제공의 남한 상세 (1 km) 시나리오에서 제공하는 일평균 기온을 이용한다.

$$T_{avg}(t_1, \dots, t_n) = \sum \frac{t_i}{n} \text{ or } \frac{(t_{max} + t_{min})}{2} \quad (1)$$

적산온도 (GDD)는 생물의 생육, 성장과 기온과의 관계를 분석할 때 많이 사용되며, 작물의 경우 발아에서부터 성숙, 동물의 경우 월동, 우화에서 성체까지의 단계로 성장할 때, 일정량의 열량 (기온)이 필요하다는 가정에 근거한 자료로 사용된다 (Kim et al., 2015b; Shim et al., 2019). 적산온도는 아래의 식과 같이 일최고 기온 ( $t_{max}$ )과 일최저 기온 ( $t_{min}$ )간의 중간값에서 생물이 생육할 수 있는 최저온도인 기준온도 ( $t_b$ )를 제한 나머지 기온값을 누적하여 1년단위로 아래와 같이 계산한다 (McMaster and Wilhelm, 1997). 기준온도의 경우에 생물종마다 생육할 수 있는 최저온도가 차이가 있는데 기상청의 기상자료개방포털의 적산온도에 대한 설명에 따르면 일반적으로 저온에서 자라는 식물의 경우는 5°C, 온대 지방의 여름철 작물은 10°C, 고온을 필요로 하는 작물은 15°C를 적용하는데, 생물종마다 해당하는 기준온도는 차이가 있다.

$$GDD(t_{max}, t_{min}, t_b) = \sum \left( \frac{t_{max} + t_{min}}{2} - t_b \right) \quad (2)$$

### 2.4 RGI의 평균기온 및 적산온도 보간

RGI 프로그램은 RCP 시나리오를 통해 계산된 평균기온과 적산온도를 보간한다. 그러나 RCP 시나리오의 불확실성으로 일단위 기온의 누락이 있거나, 잘못 예측되었을 가능성을 고려해야 하기 때문에 기온자료에 대한 보간이 필요하다. 한반도의 평균기온은 증가와 하강의 형태로 나타나며 7-8월 사이에 최고기온을 보이기 때문에, 아래와 같은 2차 모형 모델 (quadratic model)을 이용해서 아래의 식과 같이 모델링을 통해서 일별 날짜 ( $x$ )를 통해서 보간할 수 있다.

$$T_{interpolation}(x) \approx \alpha_1 x^2 + \alpha_2 x + \beta + \epsilon \quad (3)$$

적산온도는 년 단위로 늘어진 시그모이드 곡선 (sigmoid

curve) 형태로 기온이 높아지기 시작하는 봄, 여름철에는 적산온도가 급격하게 증가하고 기온이 낮아지는 가을부터는 증가폭이 감소하며, 겨울철 일최고 기온과 일최저 기온의 차이가 기준온도 ( $t_b$ )보다 낮은 경우에는 증가폭이 없다. 이러한 형태의 적산온도 곡선을 회귀분석으로 처리하기 위해서는 비선형 모델 (nonlinear model)을 이용하여 경향을 분석함으로써 일자 (day)에 대한 적절한 적산온도 예측값을 도출할 수 있다. 많이 활용되고 있는 비선형 모델로서 R 라이브러리에서는 *SSlogis*, *SSgompertz*, *SSweibull*, *SSfpl* 함수 등 (Nematollahi et al., 2016)를 제공하고 있으며, 각 함수에 대한 내용은 아래와 같다 (R project).

*SSlogis* (Self-Starting Nls Logistic Model)는 기온의 변화, 식물의 생장곡선 등, 생태학의 개체수 변화를 모형화하기 위해 제시된 함수로 (Kim et al., 2015a), 생태학뿐만 아니라 S자형 곡선을 나타내는 분포에 대한 다양한 연구분야에서 이용되고 있다 (Jungers et al., 2018).

$$SSlogis(x) = \frac{Asym}{(1 + \exp((xmid - \chi)/scale))} \quad (4)$$

$\chi$  = day

*Asym* = a numeric vector of values at which to evaluate the model

*xmid* = the value of *SSlogis* will be *Asym* / 2 at *xmid*

*scale* = a numeric scale parameter on the input axis

*SSgompertz* (Self-Starting Nls Gompertz Growth Model) 함수는 Benjamin Gompertz에 의해 개발된 모델 (Gompertz, 1825)로서 사망률을 모형화하기 위해 제시된 함수이며, 수식은 다음과 같다.

$$SSgompertz(x) = Asym \times \exp(-b_2 \times b_3^x) \quad (5)$$

$x$  = day

*Asym* = a numeric parameter representing the asymptote

$b_2$  = a numeric parameter related to the value of the function at  $x=0$

$b_3$  = a numeric parameter related to the scale the  $x$  axis

*SSweibull* (Self-Starting Nls Weibull Growth Curve Model) 함수는 Waloddi Weibull에 의해 개발된 모형으로, 산업현장

에서의 부품의 수명을 추정하는데 사용된다 (Weibull, 1951). 와이블 분포 (Weibull distribution)에 기초한 Self-Starting 비선형 모델로 아래와 같은 수식에 의해 진행된다.

$$SSweibull(x) = Asym - Drop \times \exp(-\exp(lrc) \times x^{pwr}) \quad (6)$$

$x$  = day

*Asym* = a numeric vector of values at which to evaluate the model

*Drop* = a numeric parameter representing the change from *Asym* to the y intercept

*lrc* = a numeric parameter representing the natural logarithm of the rate constant

*pwr* = a numeric parameter representing the power to which  $x$  is raised

이들은 모두 셀프-스타팅 함수 (self-starting function)로서 초기 변수가 요구되지 않고 독립변수 ( $x$ )만으로 사용이 가능하다. 본 프로그램에서는 *SSlogis*, *SSgompertz*, *SSweibull* 함수를 제공하여 자료에 적합한 함수를 선택할 수 있도록 하였다.

### 3. 연구결과

본 프로그램의 성능을 시험하기 위하여 기상청에서 제공하는 Esri-ASCII 파일 형식의 RCP 4.5 남한 상해 (1 km) 시나리오 가운데, 서울 (126.9658°E, 37.5714°N)과 부여 (126.7614°E, 36.0053°N)에 대한 2018년 일평균, 일최저, 일최고 기온 예측 자료를 바탕으로 평균기온과 적산온도를 예측 및 보간하였다. 각 두 지점에 대하여 RGI 프로그램으로 회귀분석했을 때, 평균기온과 적산온도에 대해서 3가지 모델 모두 95% 신뢰수준에서 p-value가 모두 유의함 (< 0.05)을 보여, 사용한 회귀모형이 적절하다고 볼 수 있다 (Table 1). 세부적으로는 비록 잔차표준오차 (residual standard error)가 평균기온의 경우 서울과 부여 모두 4°C 정도의 차이가 있으며, 적산온도는 3가지 모델에 대해서 30~69°C 정도의 오차가 나타났다. 따라서 평균기온의 경우 모델에 의한 보간 결과와 큰 차이가 나타나지는 않았고, 적산온도는 잔차표준오차가 평균기온에 비해 크게 나타났지만 누적에 따른 오차의 축적으로 보여진다. 적산온도의 보간에 있어서 본 프로그램에서 사용된 3가지 모델 가운데 잔차표준오차를 기준으로 시나리오에 가장 적합한 모



델은 *SSweibull* 모델로 나타났다. 그러나 지리적 상황을 고려할 때, 적산온도가 차이가 있을 수 있으므로, 3가지 모델을 서로 비교하여 적절한 모델을 사용하기를 권장한다.

일반적으로 미래기후의 예측을 위해 사용하는 RCP 시나리오는 온실가스의 농도에 따른 실제 기온일 것으로 가정하고 있다. 따라서 RGI 프로그램을 통해서 얻어진 보간결과가 실제기온과의 차이가 있는지를 확인하기 위하여, 서울과 부여의 종관기상관측지점에서 실제로 측정된 일평균, 일최저, 일최고 기온 자료 (기상청 제공)를 이용하여 RCP 시나리오의 보간 결과와 비교하였다 (Fig. 3과 4). 평균기온의 경우 실제기온 (검은색)과 RCP 시나리오 (녹색)와 크게 차이가 보이지 않고, RGI 프로그램 (붉은색)은 최고기온에서는 차이가 있지만 전체적으로 비슷한 패턴으로 나타나 실제기온과 RCP 시나리오와는 큰 차이가 없는 것처럼 보인다 (Fig. 3). 또한 적산온도에서는 관측자료에 대하여 RCP 시나리오와 RGI 프로그램의 결과가 거의 유사하게 나타났지만, 기온이 증가하는

3~4월까지와 기온의 감소구간인 9월~12월에서는 실제기온과 차이가 나타나 그래프 상에서는 차이의 구분이 쉽지가 않고 모두 관측기온에 유사하게 나타났다 (Fig. 4).

그러나 일별로 관측기온과의 차이를 평균으로 확인했을 때, 평균기온에서 서울은 실제기온대비 RCP 시나리오는 평균 3.90°C, 부여는 3.39°C, RGI는 서울 3.57°C, 부여 3.33°C으로 실제기온에 가까운 결과가 나타났으며, 적산온도에서는 서울의 경우 RGI 프로그램의 *SSweibull* 모델, 부여는 *SSlogis* 모델이 관측기온과의 차이에서 근접하게 나타났다 (Table 2). 또한 지역에 따라서 적산온도의 비교차이가 서울의 경우 *SSweibull*, 부여의 경우 *SSlogis*가 낮은 차이로 나타나는 것을 볼 때, 지역에 따라서 적절한 함수를 선택하여 사용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

관측된 기온에 대한 RCP 시나리오와 RGI 프로그램과의 자세한 차이를 비교하기 위하여, 등분산성에 따라 t-검정 (t-test) 혹은 윌콕슨 순위합 검정 (Wilcoxon rank sum test) 및

Table 1. A regression model test using RCP 4.5 scenario of Seoul and Buyeo, Korea

Temp.	Model	Site	p-value	Residual standard error
TAVG	<i>Quadratic</i>	Seoul	1.71E-156	4.11255
		Buyeo	1.03E-150	3.98582
GDD	<i>SSlogis</i>	Seoul	1.04E-06	63.93170
		Buyeo	5.64E-07	57.31117
	<i>SSgompertz</i>	Seoul	1.33E-06	69.16922
		Buyeo	2.98E-06	65.34650
	<i>SSweibull</i>	Seoul	4.09E-07	37.80906
		Buyeo	2.94E-07	30.86342

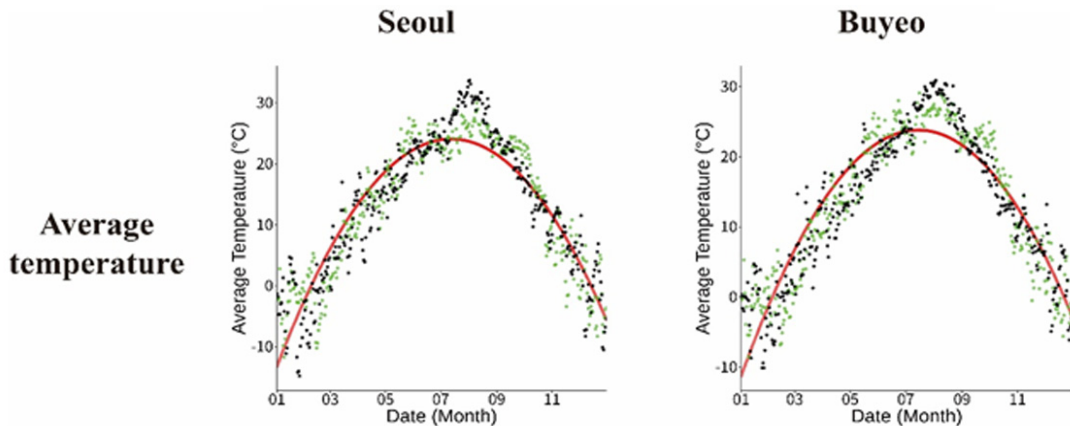


Fig. 3. A test for average temperature in Seoul and Buyeo, Korea (observed temperature, black; RCP scenario, green; RGI, red).

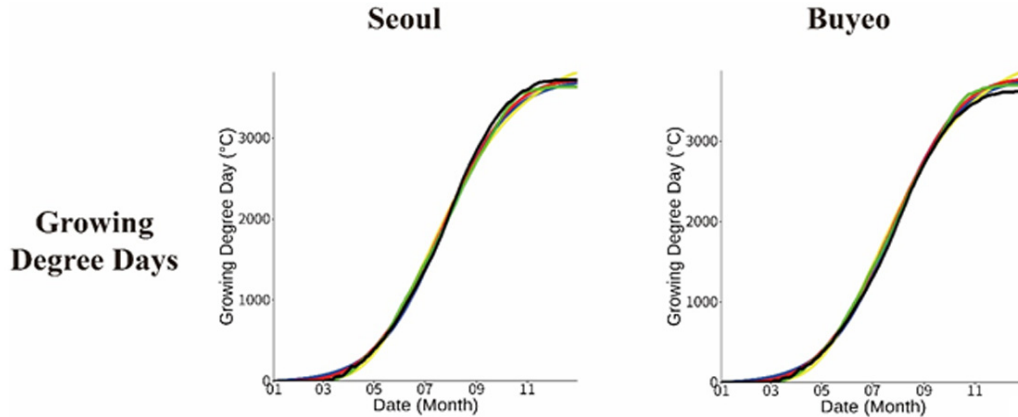


Fig. 4. A test for growing degree days in Seoul and Buyeo, Korea (observed temperature, black; RCP scenario, green; *SSlogis*, blue; *SSgompertz*, yellow; *SSweibull*, red).

Table 2. Average temperature difference of RCP and RGI against observed temperature

Site	Method	Seoul	Buyeo
TAVG	RCP	3.90	3.39
	RGI	3.57	3.33
GDD	RCP	49.04	49.62
	<i>SSlogis</i>	57.00	44.06
	<i>SSgompertz</i>	68.77	61.31
	<i>SSweibull</i>	43.85	61.11

선형회귀분석 (linear regression analysis)을 수행하였다 (Table 3). 평균기온에서 t-test 또는 윌콕슨 순위합 검정의 결과에서는 실제 평균기온과는 유의수준에서 크게 차이가 없는 것으로 나타나 ( $p\text{-value} > 0.05$ ), 관측한 일평균 기온과 RCP 시나리오 및 RGI의 산출평균 기온과 차이가 없어 RCP와 RGI와의 결과가 큰 차이가 없을 것으로 판단할 수 있다. 또한 선형회귀모형을 이용하여 분석했을 때도 관측기온과 RCP 및 RGI 결과가 서로 선형적으로 관계가 있으므로 나타났다 ( $p\text{-value} < 0.05$ ). Fig. 3, Fig. 4와 같이 관측기온에 대하여 RCP 시나리오와 RGI 프로그램과 RCP 시나리오가 관측기온을 대신하여 사용할 수 있음을 통계적으로 검증된다. 그러나 단지 유의적 수준으로만 일 단위의 RCP 시나리오에 대한 불확실성과 RGI 프로그램의 성능을 평가하기 어려운데, 그 이유는 t-test 및 회귀분석의 유의수준은 통계적 평균에 근거하여 가설검정을 하기 때문에 평균의 차이가 크지 않는 경우에는 RCP 시나리오의 불확실성을 설명하기 어렵다. 그러나 각 일별 기온에 대한 선형회귀모형을 기준으로 한 잔차표준

오차 (residual standard error)를 비교하였을 때, RCP 시나리오보다 RGI 프로그램이 더 낮게 나타나 RGI의 결과가 관측기온에 더 근접함을 알 수 있고, Table 3에서 관측기온에 대하여 평균기온과 적산온도의 평균적 차이에서와 같이 RCP 시나리오의 불확실성을 RGI 프로그램에 의해 보정됨을 확인할 수 있다.

RGI 프로그램의 성능을 추가적인 검정을 위하여 전국단위로 10개 종관기상관지점을 추가로 선정하여 분석했을 때, 회귀분석은 모두 유의적으로 실제 관측된 자료와 관계성이 있고 ( $p\text{-value} < 0.05$ ), 잔차표준오차를 비교했을 때 모든 지점에서 RGI의 성능이 RCP 시나리오보다 실제 관측된 기온에 비해 낮았다 (Table 4). 따라서 RCP 시나리오가 내포하고 있는 기온자료에 대한 불확실성에 대하여 RGI 프로그램을 통해 보간됨을 알 수 있으며, 지역에 따라서 *SSlogis* 혹은 *SSweibull*의 성능차이가 다를 수 있기 때문에 Table 3을 통해서 언급한 바와 같이 향상된 결과를 위해서는 적절한 모델을 선택하여 사용하는 것이 중요하다.

#### 4. 결론 및 고찰

도시화, 산업화, 인간생활의 발전 등으로 인해 나타나는 온실가스 배출량의 증가로 인해 지구온난화가 불과 2~3세기 동안에 급진적으로 발생하고 있는 가운데, 이로 인한 기후의 변화는 전지구적으로 모든 생태계에 부정적 영향을 주고 있다. 이러한 이유로 범국가적 정책과 함께 미래 기후변화에 대한 다학제적인 연구가 진행되고 있지만, 미래 기후를 예측하고 실제 해당 연구에 적용하기에는 기후/기상학 전문가가 아닌 이상 관련 지식 및 이해의 부족, 관련 프로그램의 사용에 대

Table 3. Statistic test for average temperature and growing degree days

Site	Analysis	TAVG		GDD			
		RCP	RGI	RCP	<i>SSlogis</i>	<i>SSgompertz</i>	<i>SSweibull</i>
Seoul	Homoscedasticity	0.4479717	0.0299678	0.6334404	0.4652739	0.6540554	0.6276117
	t-test	0.4172708	0.844363*	2.35147E-13	1.44358E-17	5.08878E-09	0.07853077
	Linear regression analysis	4.7969E-137	3.4654E-147	<2E-16	<2E-16	<2E-16	<2E-16
	Residual standard error	4.698452	4.090956	47.22472	30.51097	79.04871	36.40944
Buyeo	Homoscedasticity	0.9213639	0.1522657	0.6425041	0.8180667	0.609942	0.6467084
	t-test	0.5308424	0.5211443	2.71246E-47	5.84666E-73	7.26434E-20	1.40357E-89
	Linear regression analysis	3.553E-144	4.486E-144	<2E-16	<2E-16	<2E-16	<2E-16
	Residual standard error	4.19531	3.874087	37.39245	27.90216	70.8247	25.72911

\*Wilcoxon rank sum

Table 4. Residual standard errors for average temperature and growing degree days

Site	TAVG		GDD			
	RCP	RGI	RCP	<i>SSlogis</i>	<i>SSgompertz</i>	<i>SSweibull</i>
Gangneung	4.792819	4.235769	27.87386	32.67443	56.91178	21.34058
Suwon	4.545261	4.059671	45.21065	29.98378	79.26622	34.16096
cheongju	4.490016	4.046794	35.78253	33.05774	71.44763	25.71146
Daejeon	4.423598	3.947019	42.64085	32.69701	75.81912	32.48128
Pohang	4.473529	3.804932	31.24129	42.95025	62.37051	28.23623
Jeonju	4.462982	3.939807	34.656	35.71385	71.77117	25.35345
Ulsan	4.35004	3.776408	27.54804	39.83073	60.05716	24.64086
Gwangju	4.085986	3.673606	37.45692	48.9017	67.45774	29.68643
Busan	4.039811	3.498263	31.32574	35.49227	59.82768	26.40412
Gimhae	4.089597	3.53454	31.8461	41.90942	63.67167	28.03659

한 어려움 등의 문제로 연구방법에 있어서의 접근이 쉽지 않다. 미래기후에 대한 연구를 위해 많이 이용되는 RCP 시나리오의 관련 연구분야에서 매우 유용하게 사용되어 미래기후변화에 따른 종 다양성 변화, 종 서식지 범위의 변화, 멸종위기종 발생가능성 등 자연생태계의 변화를 평균기온과 적산온도를 통해서 많이 연구가 되고 있다. 그런데 기온관련 지표를 이용하여 생태계 생물종과 기후와의 관계를 이해하고 분석하기 위하여 기온자료를 효율적으로 도출할 수 있어야 하지만, 전문적 지식의 부족, 대량 자료의 처리 등의 어려움으로 인해 연구진행에 있어서 걸림이 있을 수 있다. 게다가 RCP 시나리오에 대한 불확실성으로 인한 기온자료의 오차로 연구에 있어서 사전에 RCP 시나리오를 보완해야 하지만 그에 따른 시간적, 비용적인 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 기후변화를 분석하고 활용하고자 하는 연구자들이 평균기온과 적산온도를 바탕으로 생태적 연구를 수행할 때, 기후변화 시나리오에 대한 불확실성 자료의 보완에 대한 시간과 비용을 절감하고, 통계적 기법을 이용하여 실제 기후자료에 근접하게 보완할 수 있는 RGI 프로그램을 개발하였다. RGI 프로그램은 기상청에서 제공하는 RCP 남한 상세 (1 km) 기후자료를 바탕으로 지정된 위도와 경도 좌표의 평균기온과 적산온도를 자동적으로 계산하고 통계적 기법을 통해 보간하여 RCP 시나리오의 불확실성에 따른 자료의 부정확성을 보완한다. RGI 프로그램의 성능을 분석하기 위하여 2018년 기온자료를 대상으로 평균기온과 적산온도에 대한 RGI 프로그램의 적합성을 검증하기 위하여 서울과 부여의 종관기상관측자료와 함께 비교했을 때, 비록 RCP 시나리오



와 RGI 프로그램의 결과가 모두 실제 기온자료와의 관계에서 유의미한 결과가 나타났지만, 잔차표준오차에서 RGI 프로그램이 RCP 시나리오보다 관측기온에 근접함을 확인하였다. 추가로 10개 지점에서 분석한 결과 동일하게 RGI 프로그램의 성능에 대한 동일한 결과가 나타났다. 따라서 RCP 시나리오에 내재되어 있는 불확실성에 의한 자료의 오류를 RGI 프로그램을 통해 보완할 수 있을 것으로 추정할 수 있다.

본 프로그램을 통해 도출된 평균기온과 적산기온을 바탕으로, 지구온난화와 같은 기후변화에 따른 식물의 개화시기와 기온과의 관계, 혹은 동물의 월동기간, 서식환경 분석 등과 같은 생물계절 (phenology) 현상 연구와 같은 생태계 연구, 생물생장에 필요한 적절 기온의 추출에 있어서 미래기후 시나리오의 적용하는 연구분야와의 연계, 농업생산량 증대를 위한 미래기후적용 등과 같은 다양한 연구분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 RGI 프로그램은 간결한 통계적 모델을 이용하였기 때문에 사용에 대한 어려움이 없을 뿐만 아니라, 연구하고자 하는 지형의 특성, 주변환경의 영향 등에 연계하여 향상된 결과물 도출에도 유용하게 사용될 수 있으며, 미래기후 시나리오의 불확실성을 보완을 위한 새로운 알고리즘의 개발에 있어서 비교분석에 활용할 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 국립생태원 연구사업인 『기후변화에 따른 화분 매개곤충 수분시기 영향 연구 (II)』 (NIE-기반연구-2020-16)의 일환으로 추진되었습니다.

## REFERENCES

- Bak JU, Kim DH, Kim HS. 2016. Assessment of resilience in incheon city - (2) assessment of future resilienc under climate change using change rate simulation. J Korean Soc Hazard Mitig. 16 (6): 119-128.
- Gompertz B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 115: 513-583.
- Grigorieva E, Matzarakis A, De Freitas C. 2010. Analysis of growing degree-days as climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude. Climate Research. 42: 143-154.
- Han J, Shim C, Kim J. 2018. Variance analysis of rcp4.5 and 8.5 ensemble climate scenarios for surface temperature in south korea. Journal of Climate Change Research. 9 (1): 103-115.
- Hong YC. 2008. Climate change and human health. Journal of the Korean Medical Association. 51 (8): 764-769.
- Hyesoon K. 2013. Ecological responses of plants to climate change: Research trends and its applicability in korea. Korean Journal of Ecology and Environment. 46 (3): 319-331.
- Jungers JM, Frahm CS, Tautges NE, Ehlke NJ, Wells MS, Wyse DL, Sheaffer CC. 2018. Growth, development, and biomass partitioning of the perennial grain crop *thinopyrum intermedium*. Annals of Applied Biology. 172 (3): 346-354.
- Kim DH. 2010. Global wanning effect on marine environments and measure practices against global wanning Journal of the Korean society of marine environment & safety. 16 (4): 421-425.
- Kim H, Ahn SJ, Jung WS. 2015a. A study on technology forecasting based on co-occurrence network of keyword in multidisciplinary journals. Journal of The Korean Operations Research and Management Science Society 40 (4): 49-63.
- Kim JH, Yun JI. 2008. On mapping growing degree-days (gdd) from monthly digital climatic surfaces for south korea. 10.
- Kim JS, Jeong MI, Han SW, Jang HK, Jung HH. 2013a. Base temperature for the application of the growing degree day model to estimate flowering of several landscape woody plants. Journal of Korean Society for People, Plants and Environment. 16 (5): 275-279.
- Kim KD, Suh JT, Lee JN, Yoo DL, Kwon M, Hong SC. 2015b. Evaluation of factors related to productivity and yield estimation based on growth characteristics and growing degree days in highland kimchi cabbage. Korean Society for Horticultural Science. 33 (6): 911-922.
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S. 2012. Production technique of observation grid data of 1 km resolution. Journal of climate research. 7 (1): 55-68.
- Kim MK, Lee DH, Kim J. 2013b. Production and validation of daily grid data with 1 km resolution in south korea.

- Journal of climate research. 8 (1): 13-25.
- Kwak TS, Ki JH, Kim YE, Jeon HM, Kim SJ. 2008. A study of gis prediction model of domestic fruit cultivation location changes by the global warming -six tropical and sub-tropical fruits. Journal of Korea Spatial Information System Society. 10 (3): 93-106.
- Lee K, Sung JH, Kim YO, Lee S. 2011. Change-point analysis of mean temperature and extreme temperature in the republic of korea. Journal of the Korean Geographical Society. 46 (5): 583-596.
- Lim JH, Park KE, Shin MY. 2016. Effect of yearly changes in growing degree days on the potential distribution and growth of quercus mongolica in korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 18 (3): 109-119.
- McMaster GS, Wilhelm W. 1997. Growing degree-days: One equation, two interpretations.
- Nematollahi MR, Fathipour Y, Talebi AA, Karimzadeh J, Zalucki MP. 2016. Comparison of degree-day distribution models for predicting emergence of the cabbage aphid on canola. Crop Protection. 80: 138-143.
- Park IS, Jang YW, Chung KW, Lee G, Owen JS, Kwon WT, Yun WT. 2014. In-depth review of ipcc 5th assessment report. Korean Society for Atmospheric Environment. 30 (2): 188-200.
- R project. R Project; [accessed]. <https://www.r-project.org/>.
- Shim KB, Lee JK, Koo BI, Shin MN, Yoon ST. 2019. Determination of adaptable sowing dates of waxy corn using growing degree days in the central northern area of korea. Korean Society Of Crop Science. 64 (3): 269-277.
- Song E, Moon K, Son I, Wi S, Kim C, Lim C, Oh S. 2015. Impact of elevating temperature based on climate change scenarios on growth and fruit quality of red pepper (capsicum annum l.) Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 17 (3): 248-253.
- Weibull W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. Journal of applied mechanics. 18 (3): 293-297.
- Wie J, Moon Bk, Jung Hc, Lee H. 2018. Climate over the korean peninsula: Heat wave, cold wave, drought, and ocean warming. Journal of Science and Science Education. 43 (1): 13-22.