

정규화강수증발산지수(NPEI)를 활용한 한반도 농경지의 가뭄심도 평가

임철희 · 김다민 · 신유승 · 이우균[†]

고려대학교 환경생태공학과

Assessment of Drought Severity on Cropland in Korea Peninsula using Normalized Precipitation Evapotranspiration Index (NPEI)

Lim, Chul-Hee, Kim, Damin, Shin, Yuseung and Lee, Woo-Kyun[†]

Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT

Although a considerable part of climate change can be explained by temperature change, hydrological change such as precipitation, evapotranspiration, and runoff impact more on society. For the ascertain a hydrological change in agriculture sector, this study estimate evapotranspiration of cropland in the Korean peninsula, and then to assess the drought severity in the past 30 years through the estimated potential evapotranspiration and observed precipitation. The potential evapotranspiration is estimated by EPIC model and Penman-Monteith method and the drought severity in cropland of the Korean peninsula is assessed using Normalized Precipitation Evapotranspiration Index (NPEI) based on the difference in precipitation and potential evapotranspiration. In North Korea, the estimated evapotranspiration tends to increase even though a significant change is not found due to the change of climate. Although a time series change in drought severity in the past 30 years is not pronounced, a deviation by year and difference between South and North Korea is certain. One reason of this is difference in precipitation and evapotranspiration change according to the latitude. The result including expansion of facilities for water management in North Korea can be used for agricultural decision making, as well as base data of climate change adaptation.

Key Words: Drought Severity, NPEI, Climate Change, EPIC

1. 서 론

보다 현실화되어가는 기후변화는 기온의 변화로 가장 많이 설명되어지지만, 강수와 증발산, 유출 등으로 인한 수문학적 변화가 우리에게 더 많은 영향을 미치고 있다. 기후로 인한 피해는 가뭄과 홍수로 인한 사례가 가장 많이 나타나는데, 이들은 대부분의 산업에 영향을 미치지만, 단연 농업이 가장 직접적이다(Rosenzweig *et al.*, 2013). 특히, 최근 3년은 가뭄으로 인한 피해가 기상 관측 이래 가장 심각한 수준으로, 앞으로의 기후변화에 따른 선제적 대응이 요구되는 시점이다(Kim *et al.*, 2013; Lim 2013).

농업부에서 물 관리는 전통적으로 가장 중요시되는 부분으로, 하상계수가 높은 우리나라 기후 특성상 저수지와 보, 댐

등을 통해 농업용수를 저장하고 공급하여 왔다. 그러나 최근의 집중호우와 마른장마 등의 변화한 강수특성은 기존의 관리방안에 한계를 가져오고 있다. 게다가 RCP(Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오에서는 이러한 강수특성의 변화와 이상기후가 더욱 빈번할 것임을 예고하고 있기에, 물과 농업에 관한 연구는 강조할 가치가 있다(IPCC, 2014; Lim *et al.*, 2015).

농경지에서 물의 순환은 크게 강수, 증발산, 유출 등으로 구분할 수 있다. 강수가 물의 투입이라면, 증발산은 대기로 회귀하거나 작물을 통해 소비되는 물을 의미하고, 유출은 소비되지 못하고 빠져나가는 물을 말한다(Kendy *et al.*, 2003). 강수량은 물의 투입량을, 증발산량은 물의 소비량으로 해석이 가능하며, 이의 차이를 통해 물이 부족하지, 부족하지 않은지를

[†] Corresponding author : leewk@korea.ac.kr

Received August 19, 2015 / Revised September 9, 2015(1st), September 16, 2015(2nd) / Accepted September 23, 2015

간접적으로 확인하는 연구들이 진행된 바 있다(Mu *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2014). 특히 강수와 증발산을 통해 가뭄을 평가하는 지수들은 기존에 강수나 기온만으로 평가했던 연구에 비해 진일보한 결과를 얻을 수 있었다(Kim *et al.*, 2012; Vincete-Serrano *et al.*, 2013).

한반도는 중위도권에 위치하여 향후 기후의 변동성이 타 지역에 비해 크게 나타날 수 있는데, 가뭄이나 농경지의 이슈는 남한보다 식량문제와 기후재해의 영향을 많이 받고 있는 북한에 더 주목할 필요가 있다(Yoo *et al.*, 2008; IPCC, 2014). 북한의 농경지는 최근 30년간 지속적으로 증가하였으나, 실제 생산량은 이를 반영하지 못하고 있으며, 식량문제는 더 빈번하게 발생하고 있다(Cui *et al.*, 2014; KREI, 2014). 특히 저수지와 보, 댐 등 물 관리시설에서도 열악한 환경인 북한에서는 단기적인 가뭄이나 호우에도 큰 피해가 야기될 수 있다.

기후가 변화함에 따라 수반되는 수문학적 변화는 농업으로 영향이 이전되며, 강수와 증발산의 균형을 통해 영향 정도를 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서는 한반도의 전체 농경지를 대상으로 증발산량을 추정하며, 추정된 증발산량과 관측된 강수량을 통해 지난 30년간의 가뭄심도를 평가하고자 한다. 이를 통해 한반도 전체 농경지 증발산량과 가뭄심도의 시공간적 차이를 확인할 수 있으며, 남한과 북한의 독립된 비교를 통해 지역에 따른 수자원 확보 및 관리 방안을 제시할 수 있을 것이다.

2. 연구자료 및 방법

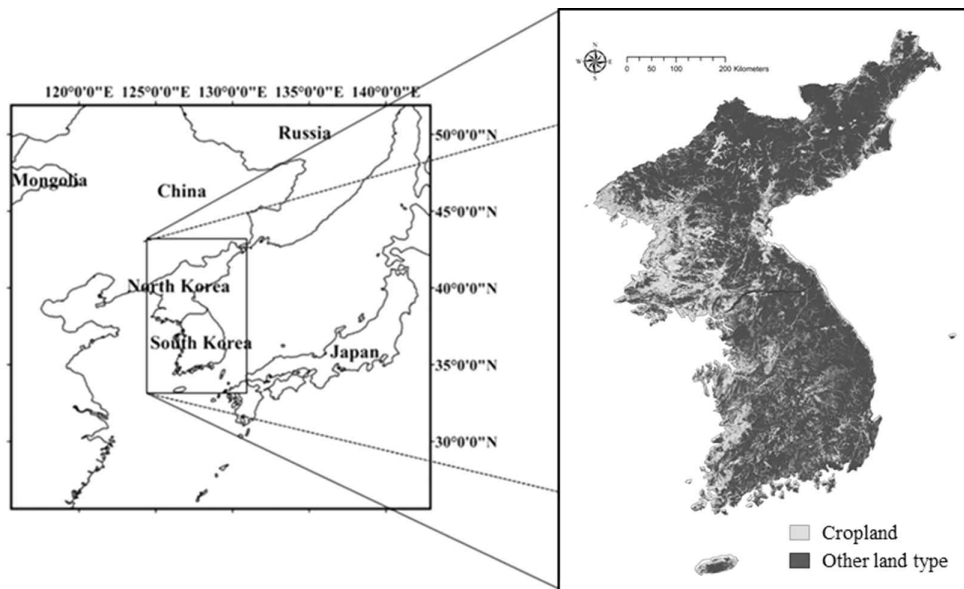


Fig. 1. Study area with cropland distribution.

2.1 연구대상지 및 자료

본 연구에서는 남한과 북한을 모두 포함하는 한반도를 대상으로 하며, 그 중 농경지만을 추출하여 분석 대상으로 삼았다. 농경지의 구분은 2010년 환경부 대분류 토지피복도를 따르며, 약 54,000 km²에 해당하는 면적이다. 농경지의 면적은 북한이 약 33,000 km², 남한이 약 21,000 km²로 평안도, 황해도를 중심으로 한 북한의 서해안에 많은 농경지가 집중되어 있다.

연구에 활용된 기상자료는 최고기온(°C), 최저기온(°C), 강수량(mm), 일사량(MJ m⁻²), 풍속(m s⁻¹), 상대습도(%) 등 총 6가지로 1981년부터 2013년까지 남한과 북한의 유인기상관측소에서 관측된 기상자료를 기상청을 통해 일별로 확보하여 활용하였다. 남한의 경우 1980년대 60여개의 관측소에서 최근에는 90여개로 증가하였으나, 북한은 27개의 관측소에서 증가하지 않고 유지되었다. 기상자원의 변화를 파악하는 과정에서는 초기부터 관측되었던 70여개의 관측소 정보만을 활용하였고, 증발산량 추정 및 가뭄심도를 평가하는 과정에서는 새로운 관측소의 정보를 매년 투입하여 분석에 활용하였다. 기상자료의 보간은 대표적 공간내삽기법인 Kriging을 통해 수행되었으며, 공간해상도는 1 km²로 설정하였다.

2.2 증발산량 추정 방법

증발산량의 추정은 일반적으로 잠재증발산량(PET: Potential Evapotranspiration), 기준증발산량(RET: Reference Evapotranspiration), 실제증발산량(AET: Actual Evapotranspiration)

등을 대상으로 이루어지는데, 본 연구에서는 수자원 및 가뭄 연구에 주로 활용되는 잠재증발산량을 추정하였다. 이를 위해 농업부문에 다양하게 활용되고 있는 EPIC(Environmental Policy Integrated Climate, originally known as Erosion Productivity Impact Calculator) 모형이 활용되었다. EPIC 모형은 작물의 생산성과 농경지에 관한 다양한 파라미터를 보유하여 작물 생산량 및 증발산량, 지표면 유출, 토양 질소, 탄소 등의 농업 전반의 분석을 가능케 하는 대표적 작물 모형이다(Williams *et al.*, 1984; Song *et al.*, 2014). EPIC 모형은 생산량을 대상으로 국내에 적용된 바 있으며, 국외에서는 증발산량을 통한 농경지 가뭄 연구에 활용된 바 있다(Strauss *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2015).

EPIC 모형에서 증발산량을 추정하는 가장 기본적인 방법은 Penman-Monteith 방법이며, 추가로 Priestly-Taylor, Hargreaves 방법 등을 활용할 수 있다. 이론적으로 증발산량을 산정할 수 있는 방법은 현재까지 약 50여 가지 이상이 제시되었으며(Grismer *et al.*, 2002), 이러한 방법 중 FAO-56 Penman-Monteith 방법이 가장 널리 이용되고 있다. 이에 본 연구에서는 Penman-Monteith 방법을 기초로 PET를 추정하였다.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s}{r_a} \right]} \quad (1)$$

Penman-Monteith 방법은 식 (1)과 같이 설명되며, 여기서 λET 는 잠열 유속($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), R_n 은 농경지 표면에서 축적되는 에너지, G 는 토양 열 유속, Δ 는 포화증기압과 온도곡선의 기울기, γ 는 건습계 상수, e_s 는 포화증기압(kPa), e_a 는 실제 증기압(kPa), r_s 는 표면저항(surface resistance) 그리고 r_a 는 공력저항(aerodynamic resistance)을 의미한다. 여기서 잠열 유속은 증발량과 에너지와의 관계에서 입증되어 증발산량으로 환산된다(Allen *et al.*, 1998).

2.3 가뭄심도 평가 방법

가뭄의 심도를 평가하는 다양한 연구에서는 가뭄지수들을 개발하고, 이를 기반으로 가뭄심도를 평가하여 왔다(McKee *et al.*, 1993; Mu *et al.*, 2013; Vincete-Serrano *et al.*, 2013). 전통적으로 많은 연구에서 활용되어온 가뭄지수는 표준강수지수(SPI : Standardized Precipitation Index), 팔머가뭄지수(PDSI : Palmer Drought Severity Index, Palmer) 등이 있으며, 최근에는 이들을 보완하여 표준강수증발산지수(SPEI : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)가 제시된 바 있다.

SPI의 경우, 강수의 시계열적 누적과 매개변수 추정, 누적확률산정, 표준정규분포를 통한 가뭄지수 산정 등의 단계를 거쳐 산출되나, 기온과 관련된 변수를 고려하지 않는 가정에 대해 문제점이 제시되고 있다(Mavromatis, 2007; Kempes *et al.*, 2008). PDSI의 경우, 기온과 관련된 변수가 포함되어 있지만, 수문 순환과 관련된 가뭄과 여러 양상(type)의 가뭄을 구분하기 위한 다규모적(multi-scalar) 특징이 부족하며, 지형이 고르고 넓은 지역에서 훨씬 유용한 것으로 알려져 있다(McKee *et al.*, 1993).

이러한 한계를 보완하기 위해 Vincete-Serrano *et al.* (2010)이 제시한 SPEI는 주로 월(month) 단위로 계산되며, 강수와 PET의 차이를 나타낸다. 강수와 기온의 변화를 원인으로 하는 증발산량의 변동성을 고려할 수 있으며, 강수 부족이 지속되는 시간 단위에 의해서 가뭄의 양상을 분리할 수 있는 다규모적 가뭄지수이다(Vincete-Serrano *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012).

본 연구에서도 이러한 연구 동향에 근거하여 증발산량과 강수량을 기반으로 한 가뭄심도를 평가하고자 하며, Vincete-Serrano *et al.*(2010)이 제시했던 SPEI에서처럼 강수와 PET의 차이를 나타내지만, 해당 값을 0과 1사이의 값으로 정규화(Normalization)하여 정규화강수증발산지수(NPEI : Normalized Precipitation Evapotranspiration Index)의 형태로 제시한다. NPEI는 기존 SPEI와 평가 방법은 같으나, 전체 연구 대상 기간의 지수를 정규화하여 시계열적 변화 및 공간적 차이를 규명하는 데 장점을 가질 수 있다. NPEI는 식 (2)와 같이 설명되며, 강수량 P 와 Penman-Monteith 방법을 통해 구한 PET의 차이로 구해진다.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 최근 30년간 한반도 기후자원 변화 분석

증발산량을 추정하는 과정에서는 총 6가지 기후변수가 활용되나, 증발산량과 가뭄심도 평가에 직접적인 변수가 되는 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량의 기후변수를 본 절의 분석에 활용하였다. 증발산량 추정과 가뭄심도 평가에 앞서 한반도 전체 농경지의 최근 30년간 기후자원을 시공간적으로 확인하고자 하였다.

먼저, 최고기온의 경우 공간적으로는 남서지역에서 높고, 동북지역에서 낮은 형태를 보이며, 위도와 지형의 영향을 많이 받고 있음이 나타났다. 시계열적 변화에서는 매년 변동 폭이 있지만, 타 변수에 비해 적게 나타나며, 기온이 소폭 상승하는

경향을 보이는데, 특히 북한이 남한에 비해 더 높은 상승 폭을 보였다(Fig. 2(a), 3(a)).

최저기온의 경우, 공간적으로 최고기온과 전반적으로 유사한 경향이거나, 북한의 황해도 지역에서 남한 중부지방 정도의 기온을 나타낸 것이 특징이다. 시계열적 변화에서는 몇 해를 제외하고는 연간 편차가 크지 않았으며, 남한과 북한에서 모두 소폭 상승하고 있는 결과를 확인할 수 있다(Fig. 2(b), 3(b)).

강수량은 공간적으로 전통적인 다우지인 제주도와 지리산 남쪽 사면이 단연 높게 나타났으며, 경기도와 강원도에 해당

하는 중부지방에서 비교적 높은 강수를 보였다. 함경도와 양강도, 자강도에서는 매우 낮은 수준이며, 대동강 하구에서도 비교적 낮은 강수를 보였다. 시계열적으로는 연간 편차가 매우 크게 나타나 쉽게 변화 양상을 설명할 수 없으며, 이러한 편차는 가뭄이나 기후재해를 야기하는 부분이다(Fig. 2(c), 3(c)).

일사량의 경우, 공간적 차이가 타 변수에 비해 극명하게 나타나지는 않으나, 남한의 주요 곡창지대인 호남평야와 경상분지, 제주도 등에서 높게 나타나고 있다. 시계열적으로는 강수량과 마찬가지로 연간 편차가 크게 나타나 변화 양상을 확인

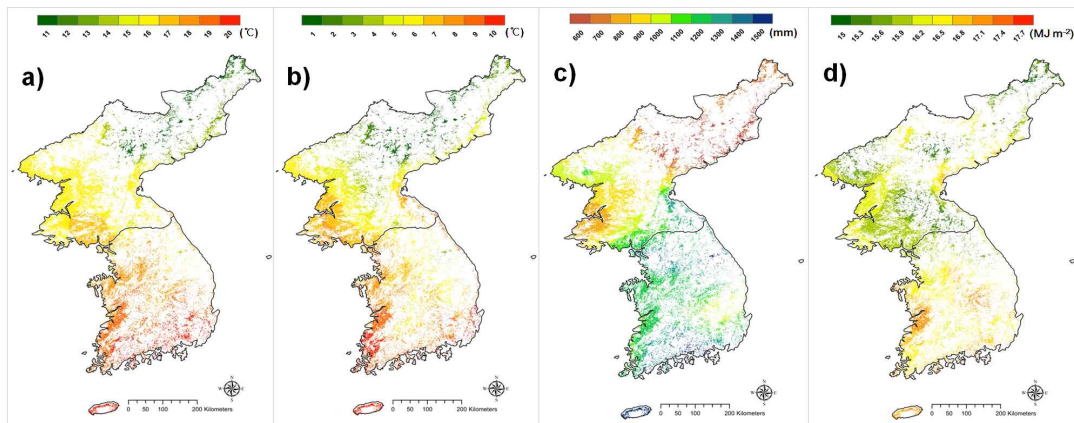


Fig. 2. Spatial distribution of climate variables for (a) maximum temperature, (b) minimum temperature, (c) precipitation and (d) solar radiation on last 30 years.

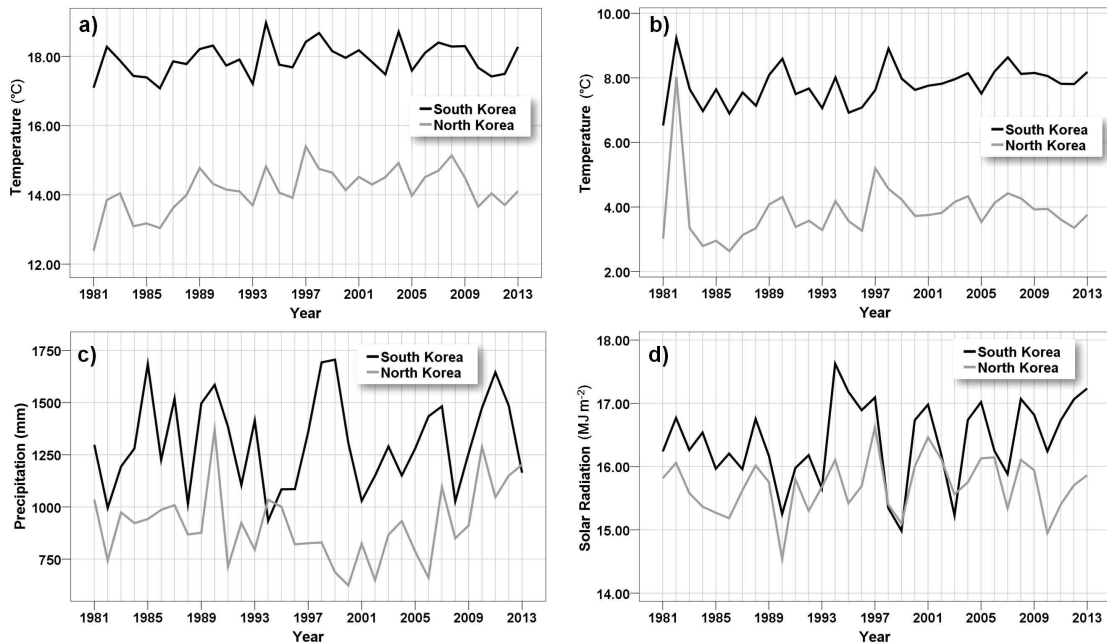


Fig. 3. Temporal change of climate variables for (a) maximum temperature, (b) minimum temperature, (c) precipitation and (d) solar radiation for last 30 years.

하기 어려운데, 그림에도 남한의 경우 소폭 증가하는 경향으로 확인된다(Fig. 2(d), 3(d)).

3.2 농경지 증발산량 추정 결과

한반도 농경지의 PET 추정 결과, 연평균 1,055~1,156 mm로 시계열적 차이는 크지 않게 나타났(Fig. 4). 30년간의 공간적 평균값에서도 958~1,181 mm로 강수량에 비해서는 낮

은 차이를 보였고, 전체 연구기간의 최저 PET는 908 mm, 최고 PET는 1,265 mm로 상대적으로 균일한 수준을 나타냈다.

PET의 공간적 분포에서는 최고기온 또는 최저기온과 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 대부분의 남한지역에서는 1,100 mm 이상을 나타내고, 북한의 경우 황해도 일부, 평안도 서부에서 높은 수준을 보였다(Fig. 5). PET의 5년 단위 공간분포에서도 시계열적 변화가 크지는 않았으며, 시기에 따

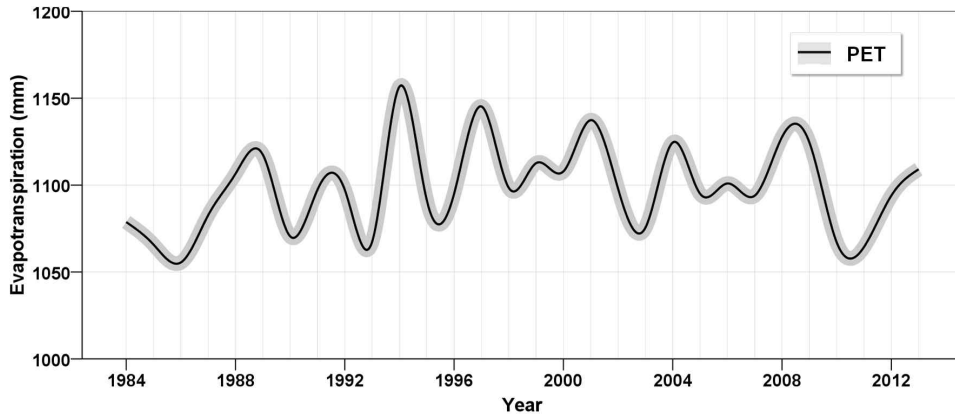


Fig. 4. Temporal change of PET for last 30 years.

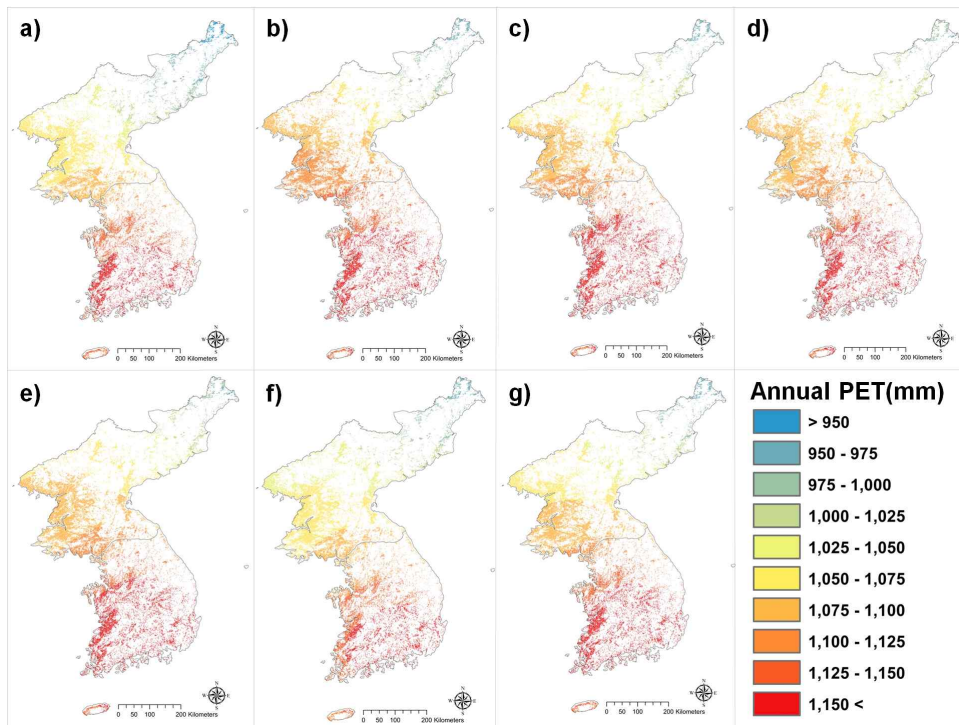


Fig. 5. Spatial distribution and half decadal comparison of annual PET for (a) 1985~1989 years, (b) 1990~1994 years, (c) 1995~1999 years, (d) 2000~2004 years, (e) 2005~2009 years, (f) 2010~2013 years and (g) 1984~2013 years.

라 북한 황해도와 평안도 지역의 PET가 높거나 낮아지는 정도의 변화를 보였다(Fig. 5). 즉, 강수량과 비교하면 공간적으로도 편차가 상당히 적은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5를 통해 PET의 시계열적 변화와 공간분포를 확인하였고, 이번에는 시간의 변화에 따른 공간적 차이를 구체적으로 확인하기 위해 1980년대 후반 5년에 대한 각 시기의 변화율을 공간적으로 확인하였다(Fig. 6).

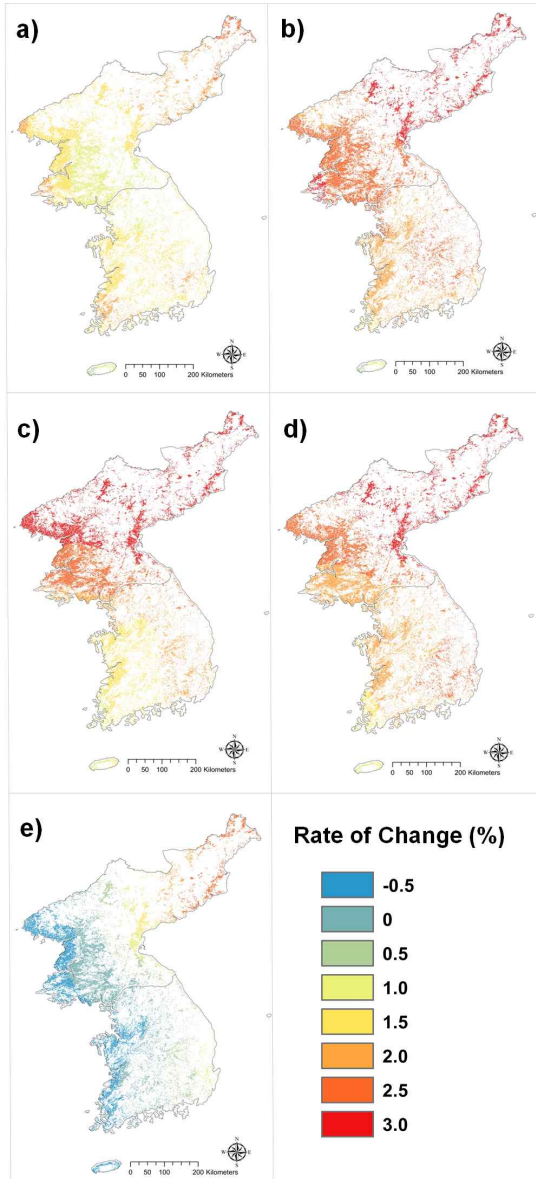


Fig. 6. The change on PET from late of 1980s in each period for (a) 1990~1994 years, (b) 1995~1999 years, (c) 2000~2004 years, (d) 2005~2009 years and (e) 2010~2013 years.

그 결과, 1990년대 후반과 2000년대 후반에는 한반도 전역의 PET가 1980년대 후반에 비해 2~3% 증가했던 것이 확인되었고, 2000년대 초반에는 북한 전 지역에서 2.5% 이상 증가했던 것으로 나타났다. 2010년대 전반에는 북한 함경도 지역을 제외한 대부분의 지역이 1980년대 후반과 유사하거나, 일부 지역에서는 소폭 감소한 것으로 나타났다. 주목할 부분은 PET가 가장 낮게 나타나는 북한 함경도 지역은 모든 기간에 상승한 것으로 확인되었고, 남한에 비해 북한이 훨씬 높은 상승 폭을 나타냈다(Fig. 6). 기온의 변화에 따라 PET가 낮았던 지역부터 상승하고 있는 것이며, 향후 더 많은 기온 변화가 있을 시에는 보다 큰 폭의 PET 변화를 예상할 수 있다.

3.3 한반도 농경지의 가뭄심도 평가

농경지의 가뭄심도를 평가하기 위해 본 연구에서 활용한 NPEI는 0과 1사이 값으로 나타나며, 지수가 낮을수록 가뭄심도가 높음을 의미한다. NPEI의 산정 결과, 최근 30년간 시계열적 변화 경향이 분명하게 나타나진 않았다. 연도별 편차는 크게 나타났는데, 특히 1980년대 후반부터 1990년대 초반에는 0.12부터 0.71까지 오르내리며 매우 높은 편차를 보였고, 1990년대에는 한 해도 0.5를 넘지 못하며, 전반적으로 가뭄심도가 높은 상태를 나타냈다(Fig. 7). 비교적 균일하였던 증발산량에 비해 연별 편차가 심했던 강수량의 많고 적음이 가뭄심도를 평가하는 데 많이 반영되었다.

가뭄심도의 시공간적 분포에서는 대부분의 기간 동안 북한 지역이 남한에 비해 가뭄심도가 상당히 높은 것으로 확인되었다. 2010년대 전반을 제외한 대부분의 기간에서 북한의 가뭄심도가 높았으며, 2010년대 초는 여름철 많은 비가 한반도 전역에 내렸던 것이 북한의 가뭄심도 평가 결과를 달리 만들었다(Fig. 8). 30년 전체의 종합적인 가뭄심도에서도 위도의 변화에 따른 가뭄심도의 차이가 분명하게 나타났는데, 특히 북한지역의 가뭄심도가 높게 나타난 것은 해당 기간 농업 생산에 불리했던 원인이 될 수 있다(KREI, 2014).

Fig. 9는 남한과 북한의 NPEI를 분리하여 비교한 것으로, 각 시기별 25%, 75% 및 중간 값을 통해 지역 간 차이를 확인할 수 있다. Fig 9를 통한 남한과 북한의 가뭄심도 차이는 2010년대 초에는 거의 비슷한 것으로 확인되나, 대부분의 기간에서 0.1 이상의 차이로 북한이 크게 부정적인 것으로 나타나며, 종합적으로도 북한의 가뭄심도가 더 높게 나타났다. PET의 경우, 기온의 분포와 유사하게 북쪽으로 갈수록 더 낮아지는 경향을 보였고, 강수량의 경우에도 북쪽으로 갈수록 낮아지나, PET에 비해 더 큰 폭으로 낮아져 한반도 남부에 비해 북부의 수자원 저장량이 낮아질 수밖에 없는 환경으로 확인되

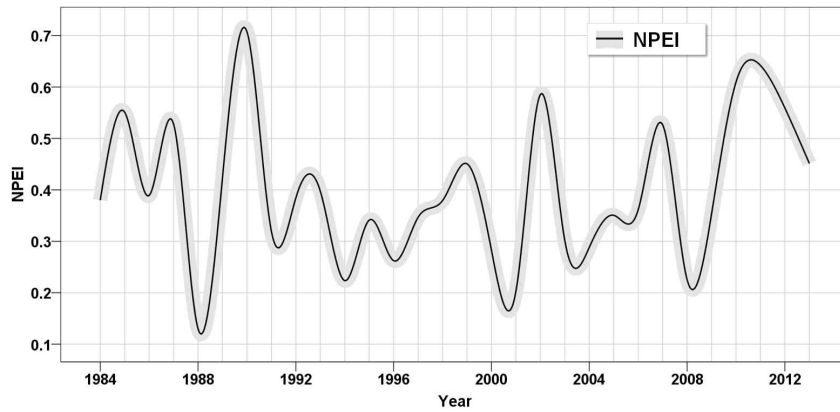


Fig. 7. Temporal change of NPEI for last 30 years.

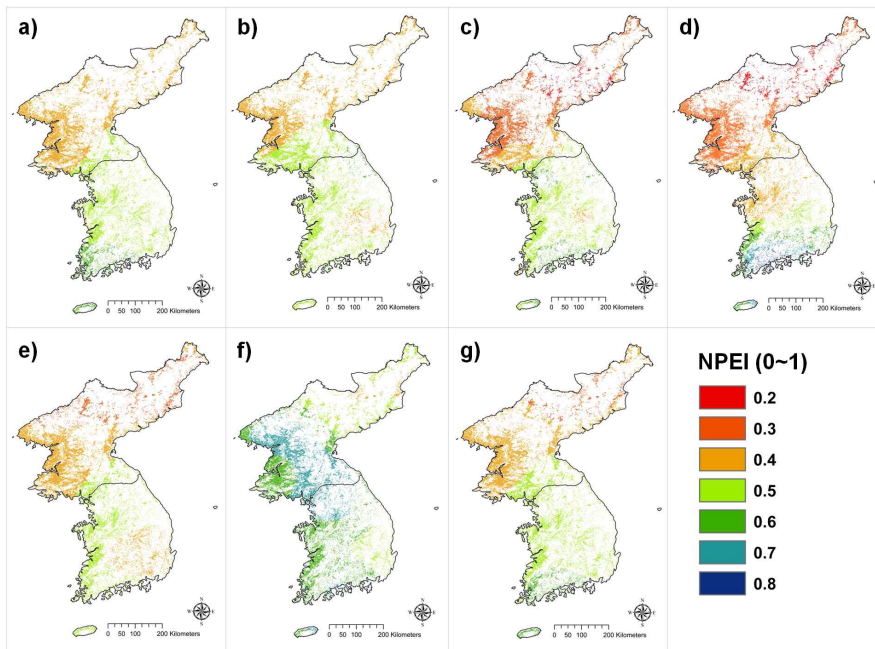


Fig. 8. Spatial distribution and half decadal comparison of NPEI for (a) 1985~1989 years, (b) 1990~1994 years, (c) 1995~1999 years, (d) 2000~2004 years, (e) 2005~2009 years, (f) 2010~2013 years and (g) 1984~2013 years.

었다. 분석한 자료에 따르면, 북한의 강수량은 남한의 80% 수준이나, PET는 90% 수준으로 확인되고 있다. 한반도 남부지역의 경우 강수량이 PET에 비해 월등히 많으나, 중부지역에서는 균형을 유지하다가, 북한지역으로 이동하면서 PET가 강수량을 초과하는 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 현상이 북한의 가뭄심도를 높이는 요인이 되었으며, 장기적으로 이를 극복할 수 있는 적응 대책 마련의 필요성이 제기된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한반도 전체 농경지를 대상으로 최근 30년 동안의 기후자원과 증발산량을 바탕으로 가뭄심도를 평가하였으며, 이에 따른 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

먼저 기후자원을 분석한 결과, 기온 관련 변수는 시계열적 편차가 적고, 공간적 차이도 균일하게 나타났으나, 강수량의 경우 시공간적 편차가 굉장히 크게 나타났으며, 북쪽으로 갈수록 강수량이 적어지는 경향이 확인되었다.

증발산량 추정 결과, 위도가 높아짐에 따라 양이 줄어드는 것으로 확인되며, 시간의 흐름에 따라 큰 변화가 발생하지는 않

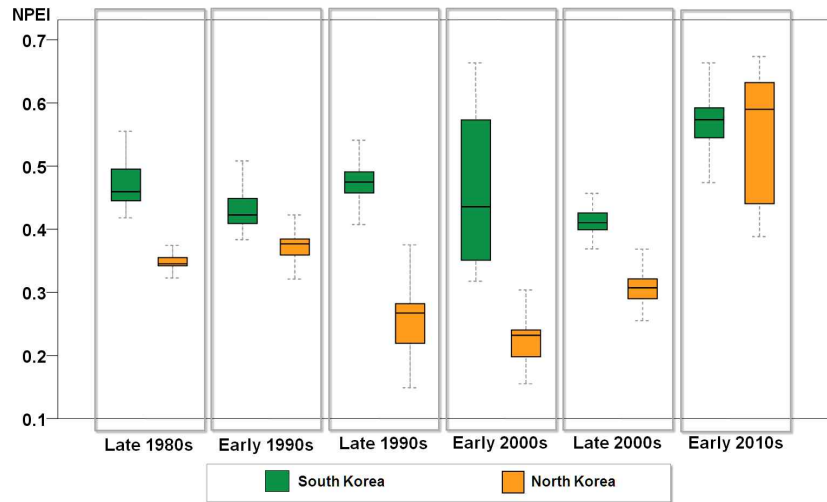


Fig. 9. Half decadal comparison with South and North Korea of NPEI.

았지만, 북한지역을 대상으로 증가하고 있는 것으로 나타났다.

가뭃심도 평가 결과, 최근 30년간 시계열적 변화는 뚜렷하지 않았지만, 연도별 편차는 분명하였고, 남한과 북한의 차이가 두드러지게 나타났다. 이는 위도에 따른 강수 및 증발산량의 변화 차이에 기인하는 것으로 확인되었다.

이러한 결과는 향후 한반도 농업 관련 의사결정에 기초자료가 되며, 특히 북한 지역의 물 관리시설 보완 필요성과 기후변화 적응 관련 자료로서 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에 이어, 작물생육과 계절에 따른 가뭃심도 평가가 시행된다면, 보다 한반도 기후와 농업 특징에 맞는 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 농업공동연구 농업기후변화적응체계구축사업(과제번호: PJ00987003)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy. ISBN: 92-5-104219-5.
- Cui G, Lee WK, Kim D, Lee EJ, Kwak H, Choi HA, Kwak DA, Jeon S, Zhu W. 2014. Estimation of forest carbon budget from land cover change in South and North Korea between 1981 and 2010. *Journal of Plant Biology* 57: 225-238.
- Grismer ME, Orang M, Snyder R, Matyac R. 2002. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 128 (3):180-184.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Kang SU, Moon JW. 2014. Drought analysis using SC-PDSI and derivation of drought severity-duration-frequency curves in North Korea. *Korea Water Resource Association Journal* 47(9):813-824.
- Kempes CP, Myers OB, Breshears DD, Ebersole JJ. 2008. Comparing response of *Pinus edulis* tree-ring growth to five alternate moisture indices using historic meteorological data. *Journal of Arid Environments* 72:350-357.
- Kendy E, Gerard-Marchant P, Walter MT, Zhang Y, Liu C, Steenhuis TS. 2003. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. *Hydrological Process* 17:2011-2031.
- Kim BS, Sung JH, Kang HK, Cho CH. 2012. Assessment of drought severity in the South Korean region using

- SPEI. Korea Water Resource Association Journal 45(9): 887-900.
- Kim, BS, Sung, JH, Lee, BH, Kim, DJ. 2013. Evaluation on the impact of extreme srougths in South Korea using the SPEI and RCP8.5. Climate Change Scenario Journal of Kosham 13(2):097-109.
- KREI. 2014. KREI Quarterly agriculture trends in North Korea. KREI. 2014-04.
- Lim CH. 2013. Jeju agriculture: Opportunities and challenges associated with climate change. Jeju Development Research 17:23-48.
- Lim CH, Lee WK, Song Y, Eom KC. 2015. Assessing the EPIC model for estimation of future crops yield in South Korea. Climate Change Research 6(1):21-31.
- Mavromatis T. 2007. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. International Journal of Climatology 27:911-924.
- McKee TB, Doeskin NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proc. 8th Conf. on Applied Climatology 179-184.
- Mu Q, Zhao M, Kimball JS, McDowell NG, Running SW. 2013. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. American Meteorological Society. DOI:10. 1175/BAMS-D-11-00213.1
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, Boote KJ, Folberth C, Glotter ML, Khabarov N, Neumann K, Piontek F, Pugh TAM, Schmid E, Stehfest E, Yang H, Jones JW. 2013. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. PNAS 111:3268-3273.
- Song Y, Lim CH, Lee WK, Eom KC, Choi SE, Lee EJ, Kim E. 2014. Applicability analysis of major crop models on Korea for the adaptation to climate change. Climate Change Research 5(2):109-125.
- Strauss F, Moltchanova E, Schmid E. 2013. Spatially explicit modeling of long-term drought impacts on crop production in Austria. American Journal of Climate Change 2:1-11.
- Yoo SH, Nam WH, Jang MW, Choi JY. 2008. Assessment and classification of meteorological drought severity in North Korea. Journal of the Korean Society of Agriculture Engineers 50(4):3-15.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010. A multi scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index - SPEI. Journal of Climate 23:1696-1718.
- Vicente-Serrano SM, Gouveiab C, Camarero JJ, Beguería S, Trigo R, López-Moreno JI, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. PNAS 110(1):52-57.
- Williams JR, Jones CA, Dyke PT. 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Transactions of the ASABE 27:129-144.