

기후변화 시나리오에 근거한 전주지역의 농업가뭄 전망

김대준* · 윤진일

경희대학교 식물환경신소재공학과

(2015년 10월 15일 접수; 2015년 10월 24일 수정, 2015년 10월 30일 수락)

An Outlook of Agricultural Drought in Jeonju Area under the RCP8.5 Projected Climate Condition

Dae-jun Kim* and Jin I. Yun

Agroclimatology Lab., Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

(Received October 15, 2015; Revised October 24, 2015; Accepted October 30, 2015)

ABSTRACT

In order to figure out the future drought characteristics of the Jeonju plains, the major crop production area in Korea, daily agricultural drought indexes based on soil water balance were calculated for the relevant 12.5 km by 12.5 km grid cell using the weather data generated by the RCP8.5 climate scenario during 1951-2100. The calculations were grouped into five climatological normal years, the past (1951-1980), the present (1981-2010), and the three futures (2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100). Results showed that the soil moisture conditions in early spring, worst for both the past and present normal years, will ameliorate gradually in the future and the crop water stress in spring season was projected to become negligible by the end of this century. Furthermore, the drought frequency in early spring was projected to diminish, resulting in rare occurrence of spring drought by that time. However, the result also showed that the soil moisture conditions during the summer season (when most crops grow in Jeonju plain) will deteriorate and the drought incidence will be more frequent than in the past or present period.

Key words: Drought index, Agriculture, RCP8.5 scenario, Residual soil moisture

I. 서 론

예로부터 농업부문의 가장 큰 자연재해 중 하나였던 가뭄은 첨단기술로 무장한 현대에도 그 위상이 크게 달라지지 않고 있다. 우리나라의 2015년 가뭄상황은 당분간 완화되지 않을 것으로 전망되는 가운데, 전문가들 사이에서는 한반도가 125년 주기의 대가뭄기에 들어섰다는 주장도 제기되었다(Lee, 2015). 다행히 2100년까지의 한반도 미래 기후에 대한 전망이 12.5km 격자해상도의 일별 기상자료 형태로 제작되었

으므로(NIMR, 2011), 이들 자료를 분석해보면 미래 가뭄의 발생빈도는 물론 가뭄주기의 존재 여부까지 확인할 수 있을지 모른다.

기상청의 미래 기후전망에 의하면 우리나라의 평균 강수량은 21세기 후반에 약 18% 이상 증가할 것으로 예상되나, 강우빈도는 줄어들고 호우빈도는 늘어나며 계절적으로 집중도가 높아져, 물수지에 악영향을 미치게 되고, 이로 인해 결과적으로 가뭄이 빈번해질 것이라 예상된다(KMA, 2015). Lee *et al.*(2012)은 기상청 관측자료를 이용, SPI (Standardized Precipitation



* Corresponding Author : Dae-jun Kim
(djcoming@naver.com)

Index)와, PDSI (Palmer Drought Severity Index)를 계산하고 가뭄의 발생양상을 통계적으로 분석하여 과거 30년간(1980-2009) 남한지역 내에서 중부지방보다 남부지방이 극심한 가뭄에 취약했음을 밝혔다. Park *et al.*(2013)은 여기에 여러 기후변화 시나리오(SRES; Special Report on Emission Scenario, RCP; Representative Concentration Pathways)를 적용하여, 과거에는 주로 남부지방에 국한되었던 가뭄이 미래에는 한반도 전역에 걸쳐 광범위하게 발생할 것이라고 하였다. Sohn *et al.*(2014)은 기후변화 시나리오와 수문학적 가뭄 모형을 이용하여 미래의 가뭄이 계절적으로 봄과 겨울철에 크게 증가 할 것이라 전망하였다. 요약하면, 우리나라는 기후변화로 인하여 앞으로 가뭄의 양상이 전국적으로, 전기간에 걸쳐 빈번하게 발생하는 상황을 맞게 될 가능성이 있다는 것이다.

이들 연구는 대부분 가뭄의 기상학적 혹은 수문학적 측면에서 수행된 것으로서 기상학의 농업분야에서 가뭄의 피해가 직접적이며 치명적인 농업분야에서 미래 기후전망에 근거한 연구가 이루어진 적이 거의 없다. 미래 기후조건에서 식물가용 토양수분의 경시변화가 어떠한 것인지 장기적인 양상을 예측할 수 있다면 미래 농업분야 가뭄대책 마련에 능동적인 대처가 가능할 것이다. Kim *et al.*(2015)은 농작물이 생육에 이용할 수 있는 토양 중 가용수분상태를 매일의 기상자료로부터 추정하여 보여주는 '농업가뭄지수'(ADI, Agricultural Drought Index)를 제시하였는데, 이 가뭄지수는 강수에 의한 장기간의 물 공급과 증발산 및 지면유출에 의한 물 소비 등 토양의 물수지를 기반으로 토양수분상태의 경시변화를 원하는 시공간 해상도로 모의할 수 있다. 미래 기후시나리오에서 제시되는 일별 기상자료는 특정시점의 농업가뭄을 전망하는데 사용할 수는 없지만, 장기간의 기후추세를 반영한 것이므로 2100년까지 자료를 몇 개의 구간으로 나누어 농업가뭄지수를 산출하면 구간별 가뭄특성을 파악할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 우리나라 농업의 중심지에 해당하는 전주지역을 대상으로 미래 기후변화 시나리오로부터 수집된 기상자료를 이용하여, 기후변화 조건 하에서 예상되는 가뭄의 발생 정도를 농업가뭄지수를 이용하여 평가하고자 하였다. 전주와 그 인근 지역은 곡창지대인 호남평야가 위치하고 있으며, 최근 농촌진흥청 등 주요 농업 유관기관이 이전해 온 우리나라 농업연구의 핵심지역이다. 또한 우리나라 국토가 대부분 산

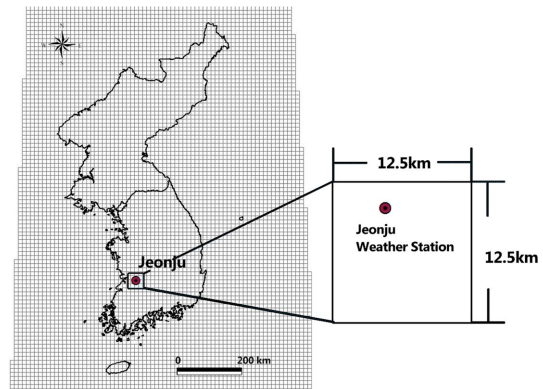


Fig. 1. Map of the study area and the relevant grid cell location on the 12.5 km regional climate model grid.

지로 이루어져 지역 간 기상요소의 편차가 큰 것에 반해 평야지대인 전주는 인근지역과의 편차가 상대적으로 적어, 지점 단위 연구자료가 주변 넓은 지역의 대표성을 가진다(Fig. 1).

II. 재료 및 방법

2.1. 기후변화 시나리오

기상청에서는 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 토대로 전지구 대기-해양-해빙 결합 지구시스템모델인 HadGEM2-AO (Atmosphere-Ocean coupled model of Hadley Centre Global Environment Model version 2)를 구동하여 약 135km 해상도로 전지구 기후변화시나리오를 산출하였다. 이들 가운데 한반도 지역에 대해 지역기후모델 HadGEM3-RA (Atmospheric Regional climate model of Hadley Centre Global Environment Model version 3)를 적용하여 2100년까지 기후변화 시나리오를 12.5km 격자 해상도로 상세화 하여 제공하고 있다 (NIMR, 2011). 한반도 기후변화 시나리오는 과거기후 모의(1950~2005년)와 RCP4.5 및 8.5에 기초한 미래 기후전망(2006~2100)으로 구성되며, 시간해상도에 따라 월별 및 일별 자료가 준비되어 있다.

본 연구에서는 12.5km 격자해상도의 RCP8.5 시나리오 일별 Raster 자료를 기상청으로부터 수집하고, 전주기상대 위치에 해당하는 격자점의 값을 추출하여 전주지역 일별 기상자료로 간주하였다. 수집한 기상요소는 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량, 상대습도,

평균풍속, 수증기압 등이다. 이 자료에서 1년은 365일이 아닌 360일로 구성되며, 1951년에서 2100년 까지 총 $150\text{년} \times 360\text{일} = 54,000\text{일}$ 분이 확보되었다.

2.2. 농업가뭇지수 계산

농업가뭇지수는 유효강수지수(Effective Drought Index, Byun and Wilhite, 1999)의 유효강수량을 기반으로, FAO Penman-Monteith 기준증발산(Allen *et al.*, 1998)에 각 작목 별 고유 계수를 적용한 작물증발산, 유출곡선지수(Runoff Curve Number)로부터 추정된 지면유출량을 각각 적용하여 산출되는 작토층의 물수지 지표이다(Kim *et al.*, 2015). 즉 농업가뭇지수의 기초는 유효강수량에서 작물증발산과 지면유출량을 제한 토양잔류수분량(residual soil moisture)이다. 수십 년 동안 토양잔류수분량을 계산해서 도수분포를 그려보면 그 자연대수값이 정규분포에 근접함을 알 수 있는데 이것이 잔여수분지수(residual moisture index)이다. 기후학적 평년의 잔여수분지수 평균과 표준편차를 기준으로 두고 임의연도의 잔여수분지수를 계산하여 평년분포와 비교하며 상대적인 가뭇의 정도를 가늠할 수 있다. 구체적으로 농업가뭇지수로 표현되는 가뭇의 심각성 정도는 평년 자료에서 얻은 표준편차(σ)를 기준으로 구분된다. 계산된 잔여수분지수값이 평년의 평균에 비해 -1σ (표준편차) 이상 낮다면 ‘약한 가뭇’(mild drought), -2σ 이상 벗어나면, ‘심한 가뭇’(severe drought) 단계를 나타낸다(Kim *et al.*, 2015).

기후변화 시나리오의 전주 격자점에서 추출한 54,000일의 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량, 상대습도, 평균풍속 및 수증기압 자료를 이용하여 Kim *et al.*(2015)이 제시한 방법에 따라 매일 토양잔류수분량을 계산하고 이를 토대로 잔여수분지수를 1951년부터 2100년 까지 150년간 매년 일 단위로 계산하였다. 작물계수는 Yoo *et al.*(2006)의 파종 후 기간단위로 산출한 벼 작물의 계수를 적용하였고, 유출곡선지수는 국토교통부 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 표준유역 단위 유출곡선지수 값 중 ‘전주천하류’ 유역 값을 이용하였다. 잔여수분지수의 기후학적 평년 평균과 표준편차는 1981-2010년 값을 사용하였다.

2.3. 농업가뭇의 미래전망 도출

잔여수분지수는 토양 내 잔류하고 있는 수분의 양을

간접적으로 추정할 수 있는 지수 이므로, 이 것을 평년 단위로 비교하면, 과거-현재-미래로 이어지는 토양 내 수분 조건을 전망할 수 있다. 연도별로 계산된 잔여수분지수와, 임의연도의 잔여수분지수와 평년 평균 간 편차에 의해 산정된 농업가뭇지수를 5개의 기후학적 평년기간(1951-1980, 1981-2010, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)에 대하여 요약하였다. 즉 매년 가뭇지수 값을 가뭇의 정도(약한 가뭇, 심한 가뭇)에 따라 분류하고 평년기간 및 계절별로 가뭇의 발생빈도를 조사하였다. 여름작물의 생육기간에 대해서도 별도로 가뭇 발생빈도를 조사하였으며, 미래 각 평년의 기후조건에서 식물이용가능 토양수분의 변동양상을 추정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 토양수분의 연중 변동양상

1951년부터 2100년까지 매년의 잔여수분지수를 기후변화시나리오를 이용하여 계산하고, 이것을 5개 기후학적 평년기간에 따라 분류하고 그 평균값을 1일부터 360일까지 그림으로 표현한 것이 Fig. 2이다. 과거, 현재, 그리고 미래 3개 평년기간 단위로 추정된 잔여수분지수의 연중변동양상은 대체로 비슷하며, 전주지방에서 토양수분이 가장 풍부한 시기는 장마기간인 7월이며, 가장 건조한 시기는 3월과 10월로 나타났다. 여름작물의 초기생육기인 6월이 비교적 건조하지만 3월과 10월에 비해서는 그래도 토양수분이 풍부한 편이다. 3월의 건조기는 아직 농사일이 시작되기 전이므로 큰 문제는 없고 10월의 건조기는 작물의 수확기와 일치하므로 오히려 이 지역 작부체계 정립에 도움이 되었을 것이다.

현재평년(1981-2010)을 기준으로 두고 각 시기의 잔여수분지수를 비교해보면 변화의 양상이 더 명확해진다. 먼저 과거(1951-1980)에는 3월말~4월초에 걸친 봄가뭇이 현재에 비해 훨씬 심각했음을 보여주는데, 이런 추세는 여름작물 파종기인 5월에도 지속되는 것으로 보아 수리시설이 지금보다 열악했던 이 시기에 지역농민들이 많은 어려움을 겪었을 것으로 추정된다. 수확기인 10월의 가뭇 역시 현재보다 과거에 더욱 심했던 것으로 보이는데, 이는 현재의 기후조건이 가을 건이에는 오히려 과거보다 불리한 것으로 판단할 수 있다. 11월부터 1월중순까지 겨울에는 지금보다 토양수분상태가 나운데 이는 11월, 12월의 적설량이 현재

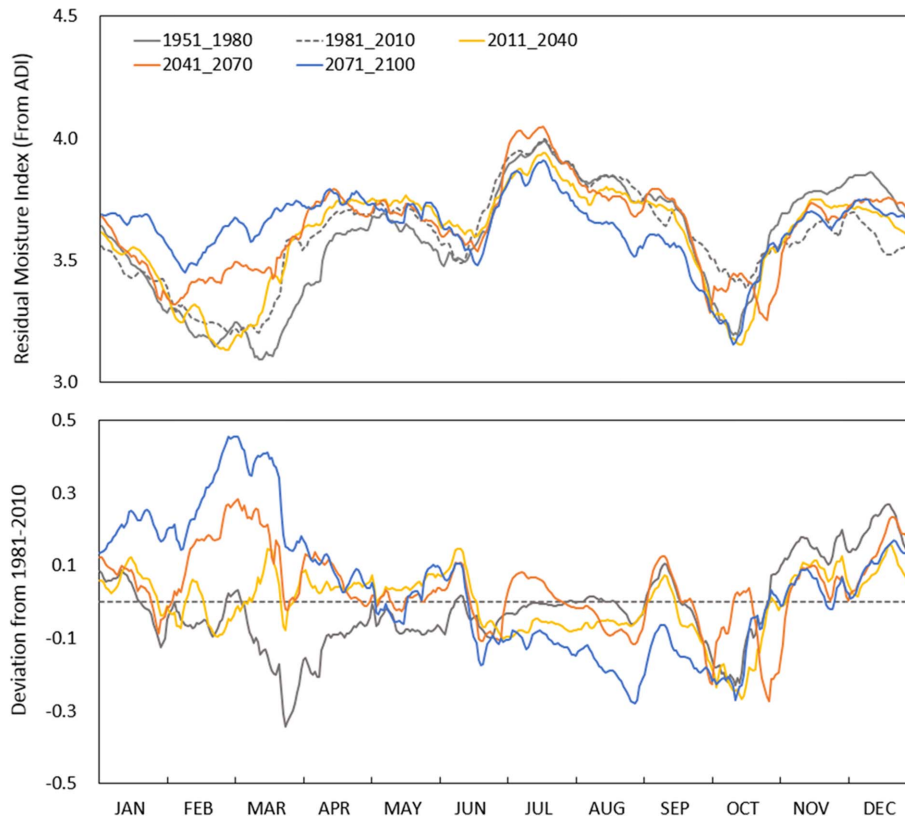


Fig. 2. Daily time course changes in the residual moisture index for the 5 climatological normal periods (top) and those of deviations from the present normal period (1981-2010, bottom).

보다 많았던 탓으로 보인다.

현재평년과 비교한 미래의 토양수분상태는 이른봄의 '개선'과 한여름의 '악화'로 요약된다. 과거로부터 현재에 이르기까지 가장 건조했던 시기인 3월을 중심으로 미래로 갈수록 토양수분이 풍부해지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 개선추세는 과거로부터 이어져 온 것으로 보이며 '먼 미래'(2071-2000)에는 봄가뭄이 거의 사라지는 것으로 전망할 수 있다. 하지만 여름작물의 파종기인 4월말~6월초에는 개선효과가 거의 없어 지금과 비슷한 가뭄상태가 이어질 전망이다. 문제는 작물의 본격적인 생육기인 6월말 이후 9월까지 여름기간의 토양수분 상태가 지금보다 악화된다는 데 있다. 이러한 악화추세 역시 가까운 미래로부터 먼 미래로 갈수록 지속적으로 심해지는 것을 확인할 수 있다.

이러한 예상대로라면 현재 전주지방에서 겨울철 재배가 어려운 담리작 보리의 경우 높아지는 겨울기온 상승과 함께 토양수분조건이 개선되면 재배면적이 늘

어날 수 있을 것이다. 하지만 콩, 옥수수, 고추 등 여름 발작물과 배추, 무 등 김장용 채소의 경우 여름철 가뭄피해가 더욱 증가할 것으로 우려된다.

3.2. 농업가뭄의 발생빈도

앞서 토양수분상태의 연중변동으로부터 어느 정도 미래 가뭄에 대한 전망을 내릴 수는 있지만, 피해를 입힐만한 가뭄의 빈도가 과연 증가할 것인지 또는 감소할 것인지 구체적인 정보는 제시하지 못했다. 현재 평년(1981-2010)을 비교의 기준으로 두고 각 시기별 농업가뭄지수를 계산한 다음, 단계 별 가뭄에 해당하는 날짜를 계수한 것이 Table 1이다.

미래 가뭄지수의 발생일수를 월별로 보면, 1월에서 3월은 현재에 비해 미래로 갈수록 가뭄발생일수가 현재와 비슷하거나 대체로 감소하는 경향을 보인다. 특히 -2σ 이상의 심한 가뭄은 2071-2100년대에 크게 감소하여 거의 발생하지 않을 것으로 나타났다. 작물

Table 1. The number of ‘drought’ days for each climatological normal period classified by the soil water balance based criteria

Month	Mild Drought ($-2 < Z < -1$)					Severe Drought ($Z < -2$)					Total ($Z < -1$)				
	1951-1980	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100	1951-1980	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100	1951-1980	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100
January	117	88	56	78	45	25	43	46	40	13	142	131	102	118	58
February	88	94	80	85	41	42	40	43	12	0	130	134	123	97	41
March	111	76	84	69	14	60	49	30	30	6	171	125	114	99	20
April	101	71	54	67	52	40	45	24	18	38	141	116	78	85	90
May	125	110	59	47	53	57	30	4	54	29	182	140	63	101	82
June	106	83	90	84	73	77	42	54	50	88	183	125	144	134	161
July	98	93	90	70	120	63	42	114	22	106	161	135	204	92	226
August	83	99	114	88	140	81	34	91	85	185	164	133	205	173	325
September	35	73	88	67	136	58	51	55	34	60	93	124	143	101	196
October	90	80	105	114	108	58	43	75	75	49	148	123	180	189	157
November	10	22	46	75	44	7	54	5	20	24	17	76	51	95	68
December	22	124	88	67	95	1	38	18	2	26	23	162	106	69	121
Total	986	1013	954	911	921	569	511	559	442	624	1555	1524	1513	1353	1545

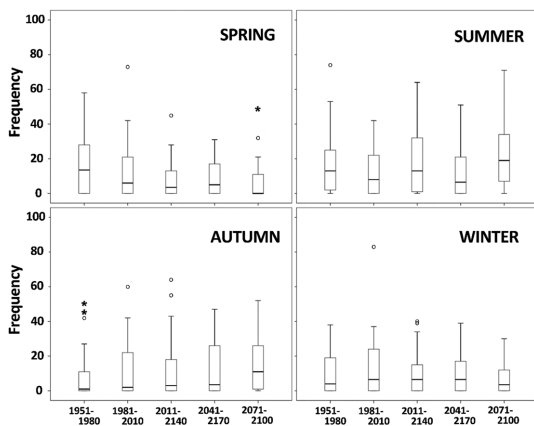


Fig. 3. Box and whisker plots of the number of days classified as drought for spring (March, April, May), summer (Jun, July, August), autumn (September, October, November) and winter (December, January, February), respectively, for each climatological normal period.

의 생육 최적기에 해당하는 7월에서 9월에는 가뭄의 발생일수가 대체로 증가하는 것으로 예상되었다. 2041-2070년대에는 가뭄의 빈도가 일시 줄어들으나 2071-2100년대에 다시 증가하는데, 약한 가뭄과 심한 가뭄을 합쳤을 때 각각 296일(7월), 213일(8월), 195일(9월)로 적게는 5일 중 하루, 많게는 3일 중 하루가 가뭄상태가 될 것으로 예상된다(Table 1).

가뭄상태($Z < -1$)에 해당되는 날의 빈도수를 과거 및 미래 30년 단위로 계수하여 계절별로 분류한 다음 상

자수염도(Box and Whisker Plot) 형태로 표현한 것이 Fig. 3이다. 역시 봄철의 가뭄은 줄어들고 여름과 가을은 증가하며 겨울은 거의 변화가 없는 특징을 보인다. 중앙값(median)의 감소 혹은 증가뿐 아니라 사분위수(quartiles)로 표현된 변동폭도 이러한 특징과 일치하여 중앙값이 커지면 변동폭도 증가하는 경향이 있다.

IV. 결 론

기후변화 시나리오로부터 농업가뭄지수를 계산하여 전주 지역의 가뭄 발생양상을 전망해본 결과, 여름작물 재배기간의 가뭄은 지속적으로 늘어나 그 피해가 지금보다 커질 것으로 보인다. 이 같은 사실은 가뭄의 빈도뿐 아니라 토양수분의 계절변동 양상으로부터도 확인된다. 반면 이른 봄과 겨울의 토양수분상태는 지금보다 개선되며 가뭄빈도 역시 줄어들 것으로 전망되었다. RCP시나리오에 근거한 미래기후전망에서 한반도의 연강수량은 증가하며 집중호우에 따른 피해 역시 늘어날 것이라 분석이 지배적이지만(NIMR, 2012), 여름작물의 생육기간에는 도리어 가뭄피해가 심해질 것이라는 것이 본 연구의 결론이다. 2015년 현재 진행 중인 가뭄이 만약 일각의 주장대로 주기성을 가지고 있다면 앞으로 수년간 더 지속되다가 점차 정상으로 회복될 것이다. 하지만 우리의 연구결과에 따르면 농업부문의 가뭄발생확률은 점차 증가하며 21세기 말까

지 좀처럼 회복이 어렵다는 것이다.

이와 같은 가뭄전망은 장기적으로 전주지역 주작물의 재배전략 수립에 반영되어야 할 것이다. 예를 들어 수리시설이 갖춰진 수도작의 경우 문제가 덜하겠지만, 밭작물은 수분이용효율이 높거나 가뭄에 잘 견디는 작목과 품종으로 점차 교체해야 안전할 것이다. 대신 겨울이 따뜻해지고 토양수분조건이 개선되므로 맥류를 비롯한 월동작물을 작부체계에 도입하는 방안을 적극 검토할 수 있을 것이다.

본 연구는 전주지역에 국한된 연구 결과를 제시하였으나, 추후 지역을 확장한다면 기후변화 시나리오에 근거한 우리나라 전역의 공간분포를 상세하게 제작할 수 있어 농업부문 기후변화 적응의 일환으로 가뭄대책 수립에 기여할 것으로 기대된다.

적 요

미래 기후조건에서 농업부문 가뭄양상을 전망하기 위해 우리나라 농업의 중심지인 전주지역을 대상으로 1951-2100 기간의 기후변화시나리오(RCP8.5) 일자료를 이용하여 토양의 물수지에 근거한 농업가뭄지수를 계산하였다. 계산결과는 과거(1951-1980), 현재(1981-2010), 그리고 3개의 미래 기후학적 평년기간(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)으로 분류하여 분석하였다. 그 결과 과거부터 현재까지 계절적으로 가장 부족한 이른봄의 토양수분은 점차 개선되어 금세기말이면 수분부족현상이 해소될 것으로 전망되며, 봄철 가뭄발생빈도 역시 지금보다 줄어들어 이른봄에는 가뭄이 거의 나타나지 않을 것이다. 반면 여름작물 생육기간에는 토양수분상태가 악화되며 가뭄발생빈도가 대체로 증가할 것으로 전망되었다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ101007)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCE

Allen, R. G., L. S. Peretira, D. Raes, and M. Smith, 1998:

Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO irrigation and drainage paper **56**, UN-FAO, Rome, Italy.

Byun, H. R., and D. A. Wilhite, 1999: Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate* **12**, 2747-2756.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013: *Climate change 2013: the physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kim, D. J., S.-O. Kim, J.-H. Kim, K.-M. Shim, and J. I. Yun, 2015: A drought index designed for field-scale water management. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **51**(3), 197-203.

Lee, J. H., J. W. Seo, and C. J. Kim, 2012: Analysis on trends, periodicities and frequencies of Korean drought using drought indices. *Journal of Korea Water Resources Association* **45**(1), 75-89. (in Korean with English abstract)

Park, B.-S., J.-H. Lee, C.-J. Kim, and H.-W. Jang, 2013: Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* **33**(5), 1871-1885. (in Korean with English abstract)

Sohn, K. W., D. H. Bae, and J. H. Ahn, 2014: Projection and analysis of drought according to future climate and hydrological information in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* **47**(1), 71-82. (in Korean with English abstract)

Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang 2006: Estimation of paddy rice crop coefficients for Penman-Monteith and FAO modified Penman Method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **48**, 13-23. (in Korean with English abstract)

KMA (Korea Meteorological Administration), 2015: 최근 가뭄현황과 전망. Press Release (2015.6.3). (in Korean)

Lee, S. H., 2015: "한반도 최악의 가뭄은 아직 오지 않았다" (2015.06.23). *Pub.chosun.com* (<http://pub.chosun.com/client/news/viw.asp?cate=C02&mcate=M1001&nNewsNumb=20150617680&nidx=17681>)

MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2015: 농산물 수급상황 점검. Press Release (2015.7.22). (in Korean)

NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, p79-81. (in Korean)

NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2012: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2012, p60-72. (in Korean)

국토교통부 국가수자원관리종합정보시스템 (www.wamis.go.kr) (2015.10.1)