기후변화에 따른 홍수기 논의 저류능 변화 분석

Impact of Climate Change on Paddy Water Storage During Storm Periods

박근애* · 박종윤** · 신형진** · 박민지** · 김성준*†

Park, Geun Ae · Park, Jong Yoon · Shin, Hyung Jin · Park, Min Ji · Kim, Seong Joon

ABSTRACT

The effect of potential future climate change on the storage rate of paddy field during storm periods (June - September) was assessed using the daily paddy water balance model. The CCCma CGCM2 data by SRES (special report on emissions scenarios) A2 and B2 scenarios of the IPCC (intergovernmental panel on climate change) was used to assess the future potential climate change. The future weather data for the year 2020s, 2050s and 2080s was downscaled by Change Factor method through bias-correction using 30 years weather data. The future (2020s, 2050s and 2080s) rainfall, storage and irrigation of paddy field, runoff in paddy levee and ponding depth were analyzed for the A2 and B2 climate change scenarios based on a base year (2005). The future irrigation change of paddy field was projected to increase by decrease in rainfall. So, runoff change in paddy levee was decrease slightly, future storage change of paddy was projected to increase.

Keywords: Daily water balance model; climate change; scenario; storage of paddy field

1. 서 론

유엔 (United Nations, UN) 정부간 기후변화위원회 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합 보고서를 6년 만에 발표해 지구 온난화는 인간이 초래한 것이라고 강력히 지적하고 금세기 안에 지구표면 온도가 섭씨 1.8~4.0도 상승할 것이라고 전망하였으며 이러한 기후변화가 앞으로 더 심한 폭우와 해빙, 가뭄, 폭염, 그리고 해수면 상승이 있을 것이라고 경고하였다 (IPCC, 2007). 우리나라는 이와 같은 기후변화 상태에서 가장 기온상승이 높은 지역으로 예측되어 2100년에는 아열대 기후로 변화할 것으로 예측되었다. 이러한 지구온난화에 의한 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로는 물 순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지게 된다 (Ahn et al., 2001; Yoo and Lee, 2000). 이로 인해 겪게 될 물 문제는 하천유량, 수생태계, 농업, 홍수, 가뭄, 수

질 등 미래의 수자원에 커다란 영향을 미칠 것으로 예상된다.

우리나라는 수자원의 효과적인 활용측면과 주식인 쌀의 재배 특성 측면에서, 하천을 따라 하천주변의 적절한 공간적 범위를 대상으로 담수 논의 형성된 토지이용 형태를 갖추고 있다. 과거로부터 지금까지 논의 농업용수의 원활한 공급과 이용 관점에서 용배수 관개시설 및 경지정리가 이루어져 왔다. 이에 따라, 기후변화에 따라 우리나라의 장마가 시작되는 6월부터 태풍이 올라오는 9월 동안의 홍수기 (이는 벼의 재배시기와도 일치함) 논의 저류량의 변화를 연구할 필요가 있다. 이는 미래 강우에 의한 논의 저류량이 얼마나 변화해서 평상시 논의 관개량 및 소비수량에 영향을 주는지를 파악할 필요가 있고, 홍수시에는 논의 저류능력 변화가 홍수 유출량에 얼마나 영향을 주는지를 파악할 필요가 있다. 즉 현재의 논의 홍수기 저류기능이 미래에는 시기별로 얼마나 변화하는지를 파악하여 우리나라 유역면적의 약 12 % (MLTM, 2009)를 차지하는 논의 저류기능을 평가할 필요가 있다. 또한 미래 기온 상승에 따른 논의 저류 양상 변화인 관개량 및 관개횟수의 변화도 파악할 필요가 있다.

기후변화가 농업분야에 미치는 영향연구로는 농촌진흥청이 주체가 되어 주로 논벼를 대상으로 한 연구가 주종을 이루고 있는데, Yun and Lee (2001)이 기후변화에 따른 벼 적정 등숙 기간의 변동과 대책에 관한 연구를, 기후변화에 따른 과수재배

* 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과

** 건국대학교 일반대학원

† Corresponding author Tel.: +82-2-444-0186

Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2010년 4월 19일 투고

2010년 10월 5일 심사완료

2010년 10월 8일 게재확정

Fig. 1 The flowchart of this study

연구방향 (Jang et al., 2002), 기후변화와 농업생산의 전망과 대책 (Yun et al., 2001), 농업생태계의 기후변화관련 피드백 기능 (Lee and Guh, 1999) 등 논고 위주로 정리된 바 있다. 지금까지 살펴본바와 같이 국내에서는 온실가스 증가에 따른 기후 변화 시나리오에 대한 전체적인 수자원연구 그리고 논벼를 대상으로 한 일부 연구가 수행된 바 있으나, 논지류능에 대한 연구는 극히 미미하거나, 전무한 상태여서 앞으로 지속적으로 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 국외에서도 마찬가지로 Doll (2002)이 기후변화에 따른 논재배지역의 크기와 위치에 대한 평가를 한 연구와 De Silva et al. (2007)이 스리랑카 지역을 대상으로 기후변화에 따른 관개용수량의 변화를 평가한 연구 등이 이루어졌으며 기후변화와 관련하여 홍수기 논지류능에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 이앙재배, 직파재배 (건답 및 답수) 방식별 물관리 형태를 고려하여 강우시 논에서의 저류능을 산정하도록 Kim et al. (2003)에 의해 개발된 논지류능의 일별 물수지 모형을 이용하고자 한다. 여기서, 논지류능은 논이 저류할 수 있는 능력으로 저류량뿐만 아니라 답수심, 관개량, 관개횟수 등을 모두 포함한다. 본 연구의 궁극적인 목적은 미래 기후변화에 따른 논지류능을 분석함으로써 미래 홍수시 논지류능의 변화와 그 저류 양상의 변화를 검토해 보고자 한다. 연구의 전체적인 흐름은 Fig. 1과 같다.

II. 논지류능 산정모형의 적용성 검토 및 재배방식별 논지류능 분석

1. 모형의 개요 및 적용성 결과 검토

본 연구에서 사용한 홍수기 논지류능 산정모형은 Kim et al. (2003)에 의해 개발되었으며 기존에 개발된 물수지 모형과의 차이점은 기존의 모형은 유역단위로 모의와 검·보정이 이루어져 유역출구지점의 유출량자료를 이용하는 반면, Kim et al. (2003)이 개발한 물수지 모형은 논단위의 모의가 이루어지는 모형으로 논지류능의 자료로 검·보정이 이루어지는 모형이다. 이 모형은 논지역으로 특성화되어 있어 기존의 수문 순환 위주의 물수지 모형에 비해 이용할 수 있는 조건이 제한되어 있으나 기존의 물수지 모형에서는 논지역에 대한 자세한 검토가 어려운 반면 이 모형은 보다 정확하고 세밀한 정보를 습득할 수 있는 장점이 있다. 이 모형에서는 논지류능 산정을 위하여 관개배수 분야에서 활용하고 있는 논에서의 유효수량 산정기법을 도입하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$ER(\%) = \frac{ET + DP + ST}{RF} \times 100 = \left(1 - \frac{SD}{RF}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 ER: 강우의 유효율 (%), RF: 강우량 (mm), ET: 증발

산량 (mm), DP: 삼투량 (mm), ST: 논내의 저류량 (mm), SD: 물꼬를 통한 유출량 (mm).

이 물수지 모형에 의해 저류량을 산정하기 위해서 논에서의 일평균 담수심을 연속적으로 추적할 필요가 있으며, 이를 위해서는 전일의 담수심과 논으로의 유입과 유출에 근거를 둔 당일의 변화된 담수심을 일단위로 계산하는 물수지 식 (2)을 이용하였다 (Le, 1977).

$$D_t = D_{t-1} + IR_t + RF_t - ET_t - DP_t - SD_t \quad (2)$$

여기서 D: 담수심 (mm), IR: 관개수량 (mm), t: 일 (day). 이 식과 더불어 논에서 저류되는 한계량을 추정하기 위하여 매일의 여유고 (freeboard)를 산정하여야 하는데, 이는 다음 식 (3)과 같다.

$$FB_t = LH - D_{t-1} + ET_t + DP_t \quad (3)$$

여기서 FB: 여유고 (벼의 소비수량을 고려한 물꼬높이에서 담수심을 뺀 값) (mm), LH: 벼의 생육시기별로 고정된 물꼬높이 (mm). 상기의 두 식을 이용하면, 논에서의 저류량과 더불어 물꼬를 넘어 유출된 양도 계산이 가능하다. 강우발생시 논에서의 저류량은 다음 식 (4)로 계산된다.

$$\begin{aligned} ST &= RF & \text{for } RF \leq FB \\ ST &= FB & \text{for } RF > FB \end{aligned} \quad (4)$$

논의 저류량에 영향을 주는 인자는 물수지 요소 즉, 강우량, 차단, 증발산량, 삼투량, 물꼬를 통한 유출량, 물꼬높이 및 관개방법 등으로 이루어진다. 이들은 크게 자연적인 조건과 인위적으로 조작되는 것으로 나누어진다. 자연적인 조건 즉, 강우

량, 차단, 증발산량, 삼투량은 입력자료로 처리가 가능하며, 인위적인 조건 즉, 물꼬높이, 관개방법, 강제배수량은 모형의 매개변수로 처리하여야 한다.

논의 저류량과 밀접한 관계가 있는 관개방법은 강우 직전의 담수심에 영향을 주어 여유고를 결정하는 중요한 요인이 된다. 이 모형에서는 기준담수심 (관개시기를 결정하는 담수심)과 순별 물꼬높이를 매개변수로 처리하였다. 모형에서의 입력자료는 측후소의 위도 및 표고, 풍속 측정높이, 일강우량, 일기상자료 (평균기온, 최대 및 평균상대습도, 평균이슬점온도, 평균풍속, 일조시간), 순별 삼투량, 초기담수심으로 이루어져 있다. 출력자료는 입력자료와 더불어, 물꼬를 통한 유출량, 저류량, 그리고 필요에 따라 유효우량을 출력하도록 하였다. 모형의 언어는 Fortran을 기반으로 개발되었다.

개발된 논의 일별 물수지모형의 적용성을 검토하기 위하여, Kim et al. (2003)은 수원지역 (1996년-1997년)과 여주지역 (2001년-2002년)의 현장 측정자료 (담수심, 관개량, 배수량, 침투량)를 이용하였다 (MIFAFF, 1997, 2002). 그 결과, 논의 일별 담수심을 모의하기 위한 모형의 조건으로 생육시기별 물꼬높이, 관개시기 결정을 위한 기준담수심 등을 이용하였으며, 모형의 모의결과, 모형효율은 0.41-0.94의 범위를 보였다 (Kim et al., 2003). Kim et al. (2003)은 수원과 여주지역의 총 4개년 (1996, 1997, 2001, 2002)간의 모의결과, 벼 재배기간 동안의 강우량과 논에 저수된 양과의 관계를 살펴보았으며, 강우량이 증가할수록 논에서의 저수율이 7.75 % 기울기로 떨어졌으며 강우량이 증가할수록 지수함수적으로 감소하면서 저수율은 약 20 %에 수렴하는 것으로 분석하였다.

2. 재배방식별 논의 저류능 분석

본 연구에서는 모형에 적용하기 위하여 2005년의 수원기상

Table 1 Input condition of model for simulation of storage of paddy by cropping type (Kim et al., 2003)

Month		5				6			7			8			9
Date		Mid		End		Begin	Mid	End	Begin	Mid	End	Begin	Mid	End	Begin
		11-15	16-20	21-25	26-31										
Paddy levee height (cm)	Transplanting	-	-	-	-	8	6	6	0	8	8	8	6	6	4
	Dry direct seeding	-	-	-	-	8	6	6	0	8	8	8	6	6	4
	Watered direct seeding	6	0	6	0	8	6	6	0	8	8	8	6	6	4
Percolation rate (mm/day)	Transplanting	-	-	-	-	6.7	6.7	6.7	0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Dry direct seeding	-	-	-	-	12.5	12.5	12.5	0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Watered direct seeding	8.8	0	8.8	0	8.8	8.8	8.8	0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Reference ponding depth (cm)	Transplanting	-	-	-	-	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2
	Dry direct seeding	-	-	-	-	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2
	Watered direct seeding	2	0	2	0	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2

Table 2 Analysis results of model by cropping type (unit : mm)

Cropping type	Total rainfall (Jun.-Sep.)	Irrigation		Runoff in paddy levee				Storage of paddy (rate)		Average ponding depth
		Amount	Number	Amount		Number		Total cropping periods	Storm periods (Jun.-Sep.)	
				Total cropping periods	Storm periods (Jun.-Sep.)	Total cropping periods	Storm periods (Jun.-Sep.)			
Watered direct seeding	795.0 (765.0)	463.7	9	386.4 (48.6 %)	380.2 (49.7 %)	18	15	391.2 (49.2 %)	361.2 (47.2 %)	38.2
Dry direct seeding		482.1	9	375.1 (47.2 %)	375.1 (49.0 %)	15	15	366.3 (46.1 %)	366.3 (47.9 %)	34.0
Transplanting		355.5	7	380.2 (47.8 %)	380.2 (49.7 %)	15	15	361.2 (45.4 %)	361.2 (47.2 %)	35.4

Fig. 2 Results of model by cropping type

관측소의 기상자료를 수집 및 이용하여 이앙, 건답직파, 담수직파 재배방식별 강우에 의한 논 저류량의 변화를 살펴보고자 Kim et al. (2003)이 이용한 농촌진흥청에서 추천하는 생육시기별 표준담수심과 삼투량 측정자료를 이용하여 Table 1과 같은 조건하에서 모의하여 그 결과를 Table 2와 Fig. 2와 같이 정리하였다.

재배방식별 논 저류량 변화를 살펴보기 위한 모형의 결과를 정리하면, 총 재배기간동안 이앙재배, 담수직파, 건답직파 순으로 관개량이 증가하는 것으로 나타났으며, 물꼬를 통한 유출량은 담수직파 48.6 %, 이앙재배 47.8 %, 건답직파 47.2 % 순으로 많았으며, 논 저류량은 담수직파 49.2 %, 건답직파 46.1 %, 이앙재배 45.4 % 순으로 많은 것으로 모의되었다. 본 결과

를 Kim et al. (2003)이 적용한 결과와 비교하면, 소량의 정량적인 차이만 발생할 뿐 그 순서는 동일하게 분석되었다. Kim et al. (2003)이 언급했듯이 건답직파가 관개량이 가장 많은 이유는 벼 생육초기에 삼투량이 많이 소비되기 때문일 것으로 판단된다. 또한 담수직파가 논 저류량이 가장 많은 이유는 이 재배방법이 5월 중순과 하순에 담수를 실시하기 때문에, 이 시기에 발생한 강우를 논내에 가두어둘 수 있기 때문이다. 상기의 모의조건에서, 재배방식별로 주어진 삼투량이 일 담수심의 변화를 크게 좌우하여 관개횟수 및 관개량, 그리고 강우 시 물꼬를 통한 유출량에 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

III. 미래의 기후변화에 따른 홍수기 논의 저류능 변화분석

1. 미래 기후 입력자료 구축

기후변화로 인한 영향을 예측하고 평가하기 위해서는 장래 기후조건에 관한 합리적 예측과 각 영향 평가 항목에 대한 모형의 설계 및 통합적인 영향평가과정이 요구된다 (KEI, 2004). 미래 기후를 예측하기 위해서는 향후 온실가스 배출 상황을 가정한 시나리오를 선정하는 것이 필요하며, 이 온실가스 농도를 전지구 순환 모형 (General Circulation Models, GCMs)의 경계자료로 입력하게 된다. 현재 IPCC의 정보분배센터 (Data Distribution Center)에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 IS92a 및 SRES 시나리오에 의한 다수의 GCMs 결과들을 제공하고 있다. 최근에는 IPCC의 SRES에 기초한 시나리오 산출이 주를 이루는데, 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 배출시나리오에 고려하는 것은 불가능하기 때문에

상당한 불확실성이 포함될 수밖에 없다. 따라서 이에 반응하는 미래 기후변화는 매우 불확실하지만, 현재로는 기후가 어떻게 변화될지를 보여줄 수 있는 유일한 선택이 시나리오다 (Bae et al., 2007).

본 연구에서는 SRES 특별보고서에서 제안된 A2 (다원화 사회), B2 (지역 공존형 사회) 시나리오의 CCCma CGCM2 모의 결과 값을 사용하여 유역 수문에 미치는 영향을 분석하였다. CCCma (Canadian Center for Climate Modelling and Analysis) CGCM2는 2001년 IPCC SRES 3차보고서에서 제시된 GCM으로 캐나다에서 개발되었고, 많은 GCMs 중 유일하게 일 기상자료로 제공되고 있으며 공간해상도가 약 417km×342km로 1개의 셀 안에 우리나라 전부가 포함될 정도로 공간해상도가 낮다. 따라서 기후변화에 따른 유역수문평가를 위해서는 분석 대상지역을 위주로 다운스케일 기법을 적용할 필요가 있다 (Park et al., 2010).

또한 다른 나라에서 개발한 GCM이므로 대상지역에 적합한 값의 추출여부를 검토하기 위하여 과거 30년 (1977년-2006년) 기간의 GCM자료와 관측자료의 값을 추출하여 비교해본 결과, 과거 30년의 CCCma CGCM2의 강수량과 온도가 관측자료에 비해 일률적으로 과소 추정되었다. 따라서, Alcamo et al. (1997)이 사용했던 기법인 편이보정 (bias-correction)법을 이용하여 가장 중요한 입력 기상자료인 온도와 강수량을 보정하였다. 그 외 입력자료인 상대습도, 풍속, 일사량 등은 CCCma CGCM2의 미래자료를 수집하여 사용하였다.

CCCma CGCM2의 온도는 관측자료에 비해 약 0.7 °C 정도 과소 추정되어 미래 GCM 온도 값에 더해 주어 보정하였으며 강수량은 관측자료에 비해 약 69 % 과소 추정되어 미래 GCMs 강수량 값에 이 비율만큼 보정하였다.

Fig. 3 The result of CF downscaling technique for temperature

Fig. 4 The result of CF downscaling technique for precipitation

Fig. 5 The future predicted seasonal temperature and precipitation

편이보정을 실시한 온도와 강수량에 대해 Diaz-Nieto and Wilby (2005)가 사용했던 기법인 CF (change factor) 다운스케일 기법을 사용하여 적합한 자료로 재 추출하였다. CF 다운스케일 기법은 기상관측소별 30년 (1977-2006)간의 관측 기상 자료를 관측소의 월평균 자료로 추출하고 GCM 미래 기상자료 또한 2020년 (2010년-2039년), 2050년 (2040년-2069년), 2080년 (2070년-2099년)의 월평균 자료를 추출하게 된다. 이 월평균 과거자료와 미래자료간의 차이 값을 비율로 분석하여 기준년도 (2005년)의 기상자료에 대해 이 비율을 각각 적용하여 미래 기상자료를 재구축하였다. 이 때 선택한 기준년도는 검·보정 기간 (1998년-2006년) 중 우리나라의 일반적인 강수량 추세와 가장 유사하고 또한 평수년의 해인 2005년을 선정하였다. 재구축된 온도와 강수량은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

CF 다운스케일 기법에 의해 추출된 2020년, 2050년, 2080

년의 온도와 강수량은 모두 월별로 증가하는 경우와 감소하는 경우가 비슷한 경향으로 발생하였으며, 이를 자세히 살펴보기 위해 본 연구에서는 2005년을 기준으로 하여 2020년, 2050년, 2080년의 온도와 강수량의 변화를 계절별 (Fig. 5) 및 연별로 분석하였다. A2, B2 시나리오의 2020년, 2050년, 2080년 전체에서 온도의 결과 여름에는 +7.3 % (1.8 °C)에서 +17.7 % (4.3 °C)로, 가을에는 +27.6 % (3.8 °C)에서 +42.4 % (5.9 °C)로 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으며, 강수량은 여름과 가을에는 -26.7 % (-195.1 mm)에서 -7.7 % (-56.1 mm)의 변화율과 -26.8 % (-106.0 mm)에서 -3.5 % (-13.7 mm)의 변화율로 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이를 연별로 살펴보면, 온도는 +10.1 % (1.2 °C)에서 +30.0 % (3.5 °C)의 변화율로 증가하였으며 강수량은 -0.3 % (-3.8 mm)에서 -9.2 % (-121.3 mm)의 변화율로 감소하는 것으로 나타났다.

2. 미래 기후변화에 따른 홍수기 논 유역의 일별 및 분기별 거동 변화

본 연구에서는 미래의 기후변화조건에 따른 홍수기 논 유역의 저류능을 분석하기 위하여 CCCma CGCM2의 A2, B2 기후변화 시나리오를 이용하여 재배방식 중 답수직파의 경우에 대해서 그 변화를 살펴보았다.

홍수기에 해당하는 5월 11일에서 9월 10일의 123일 동안에

대하여 기준년도 2005년을 기준으로 미래 2020년, 2050년, 2080년을 모의하였다. 그 결과를 일별과 분기별로 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었으며, 분기별 결과를 자세히 살펴보면 미래의 강우량이 5월과 6월에는 각각 +52.9 %에서 +85.1 %로, +14.8 %에서 +64.4 %로 증가하는 반면, 7월, 8월, 9월에는 각각 -27.6 %에서 -44.7 %, -33.8 %에서 -44.7 %, -14.1 %에서 -49.6 %로 감소하는 것을 알 수 있으며 이에 따라 관개량은 5월 (-2.9 %~-7.5 %)과 6월 (-0.7 %~-7.7 %)에는

Fig. 6 Daily change for storage of paddy by future climate change

몇몇 경우를 제외하고는 주로 감소하는 경향을 나타내었으며 7월에는 +1.0 %에서 +8.8 %로, 8월에는 2005년에는 관개량이 없지만 미래에는 강우량의 감소로 43.0mm에서 43.6mm의 관개량이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 9월에는 +54.0 %에서 +61.6 %로 증가하는 것을 알 수 있었다. 물꼬 유출량은 강우량의 변화에 따라 5월과 6월에 각각 +172.6 %에서 +300.0 %로, +3.7 %에서 +86.0 %로 증가하는 반면, 7월과 8월에는 각각 -36.9 %에서 -100.0 %, -40.0 %에서 -100.0 %로 감

소하였으며 9월에는 변화가 없는 것으로 분석되었다.

한편, 논의 저류량은 강우량, 관개량, 물꼬 유출량의 변화에 따라 5월 (+0.7 %~+80.0), 6월 (+14.9 %~+64.4 %)에 크게 증가하며 7월에는 중반기까지는 -20.0 %에서 -44.6 %의 범위로 감소하다가 하반기에는 물꼬 유출량의 감소로 +9.9 %에서 +30.0 %의 범위로 증가하였다. 이는 8월 상반기까지 +16.8 %~+36.3 %로 증가하는 경향이 이어지며 중반기와 하반기에는 -12.3 %에서 -28.6 %의 범위로 감소하며 9월에

(a) Rainfall

(b) Storage of paddy

(c) Irrigation

(d) Runoff in paddy levee

(e) Ponding depth

Fig. 7 Quarterly change for storage of paddy by future climate change

는 -14.1 %에서 -49.6 %로 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 따라 논 의 평균담수심은 5월 중순에는 +4.2 %~+8.5 %로 증가, 하순에는 -0.7 %~-3.5 %로 감소하였으며 6월에는 중순까지 -2.5 %~-6.1 %로 감소하고 하순에 +0.6 %~+1.5 % 증가하였다. 7월에는 주로 감소하였는데 그 변화율은 -2.5 %에서 -10.9 %의 범위를 보였으며 8월에는 상반기에는 -5.7

%~-19.8 %로 감소하였지만 하순까지는 +0.1 %~+1.3 %로 약간 증가하였지만, 9월에는 -6.1 %에서 -9.6 %의 범위로 감소하는 경향을 나타내었다.

본 연구의 결과를 기후변화 시나리오별로 전체적인 논 유역의 거동 변화로 다시 분석하였으며 이를 Fig. 8과 Table 3에 나타내었다. 그 결과를 자세히 살펴보면 강우량은 전체적으로

Fig. 8 Total change for storage of paddy by future climate change

Table 3 Change rate for storage of paddy by future climate change

Scenarios	Rainfall (%)	Storage of paddy (%)	Irrigation (%)	Runoff in paddy levee (%)	Ponding depth (%)
A2-2020	-22.0	+2.2	+14.5	-49.9	-4.4
A2-2050	-20.0	+3.2	+14.9	-47.7	-3.6
A2-2080	-11.9	+9.4	+17.0	-37.1	-4.4
B2-2020	-27.3	-0.9	+13.8	-57.5	-5.2
B2-2050	-15.8	+4.6	+14.5	-39.7	-3.2
B2-2080	-18.2	+4.1	+13.8	-43.9	-2.7

-11.9 %에서 -27.3 %의 범위로 감소하였으며 이에 따라 논 관개량은 +13.8 %에서 +17.0 %로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 물꼬 유출량은 강수량의 감소로 -37.1 %에서 -57.5 %로 감소하였으며 이의 영향으로 논 저류량은 B2 시나리오의 2020년을 제외하고는 전체적으로 +2.2 %~+9.4 %로 증가하였지만 논 담수심은 -2.7 %에서 -5.2 %의 범위로 감소하는 것으로 분석되었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 Kim et al. (2003)에 의해 개발된 일별 물수지모형을 이용하여 재배방식별 물관리 형태를 고려하여 홍수 시 논에서의 저류능을 산정함으로써 모형의 적용성을 검토하였으며, 미래 기후변화에 따른 논 저류량을 분석하므로써 미래 홍수시 논이 가지는 저류능의 변화와 그 저류 양상의 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 재배방식별 논 저류량 변화를 살펴보기 위한 모형의 결과, 총 재배기간동안 이앙재배, 담수직파, 건답직파 순으로 관개량이 증가하는 것으로 나타났으며, 물꼬를 통한 유출량은 담수직파, 이앙재배, 건답직파 순으로 많았으며, 논 저류량은 담수직파, 건답직파, 이앙재배 순으로 많은 것으로 모의되었다.

2. 미래 기상자료는 CCCma CGCM2 A2, B2 시나리오 자료를 수집하였고 편이보정 (bias-correction)법을 이용하여 온도와 강수량을 보정하였으며, 편이보정을 실시한 온도와 강수량에 대해 CF (change factor) 다운스케일 기법을 사용하여 적합한 자료로 재 추출한 결과, A2, B2 시나리오의 2020년, 2050년, 2080년 전체에서 여름과 가을 온도는 뚜렷하게 증가하는 경향을, 강수량은 여름과 가을에 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내었다.

3. 기후변화 시나리오별로 전체적인 논 유역의 거동 변화를 살펴보면, 강우량은 전체적으로 -11.9 %에서 -27.3 %의 범위로 감소하였으며 이에 따라 논 관개량은 +13.8 %에서 +17.0

%로 증가하는 경향을, 물꼬 유출량은 강수량의 감소로 -37.1 %에서 -57.5 %로 감소하였으며 이의 영향으로 논 저류량은 전체적으로 +2.2 %~+9.4 %로 증가하였지만 논 담수심은 -2.7 %에서 -5.2 %의 범위로 감소하는 것으로 분석되었다.

4. 미래 기후변화에 따른 논 저류능을 정량적으로 제시한다면, 앞으로 기후변화의 영향에 따른 논 기능의 변화를 정확히 파악하여 그에 따른 대응방안 차원에서 논을 포함한 도시개발계획, 치수능력을 고려한 하천정비사업 수행 등과 같은 많은 정책 수립 시 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호 : 2-2-3, 50 %)과 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (No. 2009-0080745, 50 %)의 지원을 받아 수행되었음

REFERENCES

- Ahn, J. H., Y. N. Yoon, and C. S. Yoo 2001. On the Change of Hydrologic Conditions due to Global Warming : 2. An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin using Water Balance Model. *J. of Korea Water Resources Association* 34(5): 511-519 (in Korean).
- Alcamo, J., P. Doll, F. Kaspar, and S. Siebert 1997. Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: An Application of WaterGAP 1.0. Report A9701, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.
- Bae, D. H., I. W. Jung, and B. J. Lee 2007. Outlook on Variation of Water Resources in Korea under SRES A2 Scenario. *J. of Korea Water Resources Association* 40(12): 921-930 (in Korean).
- De Silva, C. S., E. K. Weatherhead, J. W. Knox, J. A. Rodriguez-Diaz 2007. Predicting the Impacts of Climate Change : A Case Study of Paddy Irrigation Water Requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management* 93: 19-29.
- Diaz-Nieto, J., and R. L. Wilby 2005. A Comparison of Statistical Downscaling and Climate Change Factor Methods: Impacts on Low Flows in the River Thames, UK. *Clim. Change* 69: 245-268.

6. Doll, P. 2002. Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements : A Global Perspective. *Clim Change* 54: 269-293.
7. IPCC 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K and New York, USA.
8. Jang, H. I., H. H. Seo, and S. J. Park 2002. Strategy for Fruit Cultivation Research under the Changing Climate. *Korean J. of Horticultural Science & Technology* 20(3): 270-275 (in Korean).
9. KEI 2004. Development of Impact Assessment Model by Climate Change in Water Resources. ISBN (89-8464-107-3 93530) (in Korean).
10. Kim, S. J., S. J. Kim, C. G. Yoon, H. J. Kwon, and G. A. Park 2003. Development and Application of Paddy Storage Estimation Model During Storm Periods. *J. of Korea Water Resources Association* 36(6): 901-910 (in Korean).
11. Le, N. S. 1977. Field studies of effective rainfall for lowland rice. M.S. Thesis, University of the Philippines at Los Banos, Los Banos, Laguna.
12. Lee, B. L., and J. O. Guh 1999. Potential Feedback of Agroecosystem to Climate Changes. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 1(2): 151-159 (in Korean).
13. MIFAFF 1997. A Study on the Water Requirement Variation with the Farming Conditions in the Paddy Field. *Study Report* : 145-148 (in Korean).
14. MIFAFF 2002. Development of an Environment-friendly Management and Treatment Measures for Drainage from Paddy Field. *Study Report* : 288-339 (in Korean).
15. MLTM 2009. Cadastral Statistics Annual Report (in Korean).
16. Park, G. A., Y. J. Lee, H. J. Shin, and S. J. Kim 2010. Assessment of the Contribution of Weather, Vegetation, Land Use Change for Agricultural Reservoir and Stream Watershed using the SLURP model (I) : Preparation of Input Data for the Model. *J. of Korean Society of Civil Engineers* 30(2B): 107-120 (in Korean).
17. Yoo, C. S., and D. R. Lee 2000. Climate Change and Water Resources : the trend of research in Korean. *Magazine of Korea Water Resources Association* 33 (3): 42-47 (in Korean).
18. Yun, S. H., and J. T. Lee 2001. Climate Change Impacts on Optimum Ripening Periods of Rice Plant and Its Countermeasure in Rice Cultivation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(1): 55-70 (in Korean).
19. Yun, S. H., J. N. Im, J. T. Lee, K. M. Shim, and K. H. Hwang 2001. Climate Change and Coping with Vulnerability of Agricultural Productivity. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(4): 220-237 (in Korean).