



## RCP 시나리오에 따른 계룡저수지 유역의 설계홍수량 산정

### Estimation of Design Flood for the Gyeryong Reservoir Watershed based on RCP scenarios

류정훈\* · 강문성\*\* † · 송인홍\*\*\* · 박지훈\*\*\*\* · 송정현\*\*\*\*\* · 전상민\*\*\*\* · 김계웅\*\*\*\*\*

Ryu, Jeong Hoon · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Park, Jihoon · Song, Jung-Hun · Jun, Sang Min · Kim, Kyeung

#### Abstract

Along with climate change, the occurrence and severity of natural disasters have been increased globally. In particular, the increase of localized heavy rainfalls have caused severe flood damage. Thus, it is needed to consider climate change into the estimation of design flood, a principal design factor. The main objective of this study was to estimate design floods for an agricultural reservoir watershed based on the RCP (Representative Concentration Pathways) scenarios. Gyeryong Reservoir located in the Geum River watershed was selected as the study area. Precipitation data of the past 30 years (1981 ~ 2010; 1995s) were collected from the Daejeon meteorological station. Future precipitation data based on RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 scenarios were also obtained and corrected their bias using the quantile mapping method. Probability rainfalls of 200-year frequency and PMPs were calculated for three different future spans, i.e. 2011 ~ 2040; 2025s, 2041 ~ 2070; 2055s, 2071 ~ 2100; 2085s. Design floods for different probability rainfalls were calculated using HEC-HMS. As the result, future probability rainfalls increased by 9.5 %, 7.8 % and 22.0 %, also design floods increased by 20.7 %, 5.0 % and 26.9 %, respectively, as compared to the past 1995s and tend to increase over those of 1995s. RCP4.5 scenario, especially, resulted in the greatest increase in design floods, 37.3 %, 36.5 % and 47.1 %, respectively, as compared to the past 1995s. The study findings are expected to be used as a basis to reduce damage caused by climate change and to establish adaptation policies in the future.

**Keywords:** Climate change; RCP scenarios; Design flood; HEC-HMS

## 1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 1950년 이후 전 지구 규모의 기상시스템에서 지난 수십 년에서 수천 년간 전례 없는 이상기후가 발생했다고 보고하였다. 이러한 이상기후 현상 증가의 주요 원인으로 기후변화가 지목되고 있다 (Jo et al., 2012). 지난 100여 년간 전 지구적으로 평균 지표온도가 약 0.85 °C 상

승하였고, 우리나라의 경우에도 이상고온, 장마, 태풍 등 이상기후의 발생빈도와 강도가 증가하는 것으로 보고되었다 (IPCC, 2013; CCIC, 2013). 지난 20세기 (1912 ~ 2010년) 동안 우리나라 기온은 0.18 °C/10년 비율로 상승하였고, 강수량은 21 mm/10년 비율로 증가하였다 (NIMR, 2012). 특히 우리나라의 최근 20년간 강수량은 약 7 % 증가한 반면 강우일수는 14 % 감소하였으며, 80 mm 이상의 호우 발생빈도는 증가 추세를 나타내는 것으로 보고된 바 있다 (MOLIT, 2009).

이러한 급격한 변화는 지속적인 물 공급에 대한 안정성을 약화시키고 홍수와 가뭄 등의 기상재해로 인한 피해를 야기할 수 있다 (Hong et al., 2012). 우리나라는 매 여름마다 국지적 저기압 및 태풍의 형성에 따른 집중호우로 홍수 피해를 겪고 있다. 특히 기후변화로 인해 수공구조물의 설계한도를 초과하는 강우가 발생하고 있으며, 강수량 증가 경향을 고려하여 수공구조물의 전반적인 재검토가 필요한 실정이다 (Jo et al., 2012). 수공구조물의 재검토를 위해서는 설계의 기본자료가 되는 설계홍수량의 산정이 필수적이며, 현재뿐만 아니라 미래의 설계홍수량을 같이 산정하여 변화를 분석할 필요가 있다.

미래의 설계홍수량 변화를 분석하기 위해서는 먼저 기후변화로 인한 정량적인 분석이 우선시되어야 하며 이를 위해서는 기후변화 시나리오를 이용한 분석이 필수적이다. 기상청에서

\* MSc Student, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

\*\* Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

\*\*\* Research professor, Research Institute for Agricultural and Life Sciences, Seoul National University

\*\*\*\* Ph.D. Student, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

\*\*\*\*\* MSc Student, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: August 13, 2014

Revised: December 1, 2014

Accepted: December 3, 2014

는 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP)를 국가표준기후변화 시나리오로 선정하여 산정한 강수량 자료를 제공하고 있다. RCP 시나리오는 온실가스 농도를 결정된 후에 인간 사회 경제적 시나리오를 동시에 산출함으로써 기후 변화로 인한 부정적인 영향의 완화 및 저감을 목표로 하는 기후변화 시나리오이다 (NIMR, 2012).

Seong (2004)은 HEC-HMS 모형을 이용하여 설계홍수량을 추정하고, Snyder 방법, Clark 방법, SCS 단위도법 등의 단위도 모형의 적용성을 비교 평가한 바 있다. SCS 단위도법이 실측치와 모의치의 침투유출량과 침투시간에 대한 여러 통계적 지표에서 유역의 특성을 가장 잘 반영한다는 결과를 보여주었다. Song (2009)은 확률가중모멘트법의 선형조합인 L-모멘트법을 이용하여 확률분포형의 매개변수를 추정하고, 수공구조물의 적정 설계를 위해 연최대홍수량의 점진적 구성기간에 따른 설계홍수량 변화 특성을 분석한 바 있다. Maeng et al. (2006)은 강우특성과 기후학적, 지형학적 특성 등을 고려하여 우리나라에 위치한 각종 수공구조물의 지역별 지속시간별 적정 설계홍수량을 산정하는 방법을 제시하였다. 타 확률분포형에 비해 GEV 분포형이 연최고치계열 강수량 자료의 분석에 적절한 것으로 검증되었다.

Hwang and Kang (2013)은 기후변화 연구 방법에 내재된 불확실성에 대하여 고찰하였으며, 시나리오 및 기후모델 선정, 편의보정 및 상세화 기법, 그리고 해당 분야의 응용모델 적용이 순차적으로 적용되어 그 과정상에 내재된 불확실성 요소는 급수적으로 증폭된다고 보고한 바 있다. 이상기후 현상의 과학적 원인 구명과 그 잠재적 영향 평가 과정에 내재하고 있는 불확실성은 여전히 크게 존재하고 있다고 주지하였다. Kim et al. (2013)은 지역 기후변화 시나리오로부터 RCP8.5 시나리오를 이용하여 미래 설계홍수량을 산정함으로써 기후변화가 미호천 유역의 배수체계에 미치는 영향을 평가 분석하였다. Park et al. (2013)은 기후변화로 인한 확률강우량의 변화를 분석하기 위하여 우리나라 30개 저수지를 대상으로 RCP4.5 시나리오에 따른 미래 IDF 곡선을 산정하였다. 분위사상법을 이용한 편의보정을 통해 모의치와 관측치 간의 오차를 보정하였고, 한강, 금강, 영산강 유역의 경우 미래 기간의 강우강도가 과거와 현재에 비해 크게 증가함을 확인하였으며 수공구조물의 전반적인 재검토의 필요성을 제안하였다. Noh et al. (2013)은 기후변화에 따른 금강 유역의 미래 유출량을 산정하였다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 하에서 댐별 용수공급 변화량을 산정하였으며 이수안전도 95% 유지조건에서 취수 가능량을 분석하였다. Jun et al. (2013)은 독높이기 저수지 중 13개 저수지를 대상으로 저수지 모의 운영을 실시하여 기후변화에 따른 독높이기 전후 홍수조절효과를 분

석하였다. RCP4.5 시나리오에 따른 미래 기상자료를 사용하여 미래 확률강우량과 설계홍수량을 산정하였으며 이를 저수지 모의 운영의 유입량 자료로 사용하였다. Son et al. (2013)은 기후변화에 따른 영향과 강우의 시공간적 특성을 고려하여 탄천 하류부유역의 미래 확률강우량을 산정하였다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 적용하여 국지적인 도시지역의 강우 특성을 반영할 수 있는 미래 확률강우량을 산정하였으며 재현기간에 따라 RCP4.5 시나리오에서 약 8%, RCP8.5 시나리오에서 약 10% 가량 확률강우량이 증가하는 것으로 분석하였다. 이와 같이 RCP 시나리오의 단일 적용에 관한 연구는 이루어지고 있으나, 최근 사회적 관심사로 대두되고 있는 농업수리구조물을 대상으로 전 RCP 시나리오를 적용하여 미래 설계빈도를 고려한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 계룡저수지 유역을 대상으로 RCP 시나리오별 미래 강수량 자료에 대한 편의보정을 통하여 확률강우량을 산정하고, 임계지속시간을 고려한 설계홍수량을 추정하며, 이를 바탕으로 농업수리구조물에 대한 미래 설계빈도를 재검토하는데 있다.

## II. 재료 및 방법

본 연구의 순서도는 Fig. 1과 같다. 과거 강수량 자료를 수집하고, RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오를 사용하여 미래 강수량 자료를 구축하였다. 분위사상법을 이용하여 과거 강수량 자료를 바탕으로 미래 강수량 자료의 편의를 보정하였다. 편의보정된 미래 강수량을 이용하여 확률강우량을 빈도분석

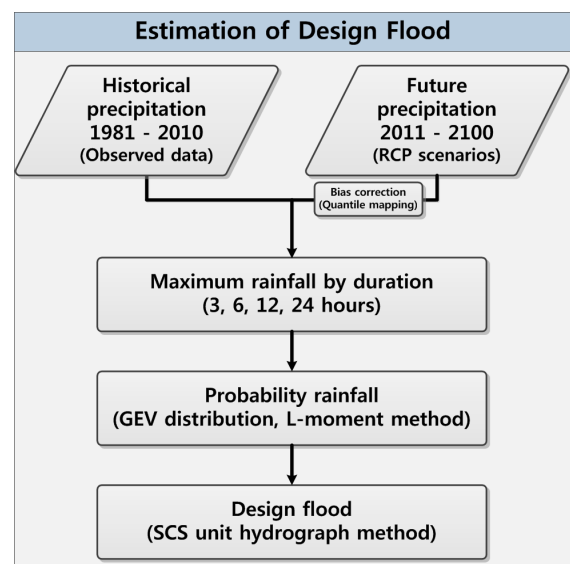


Fig. 1 Flow chart of this study

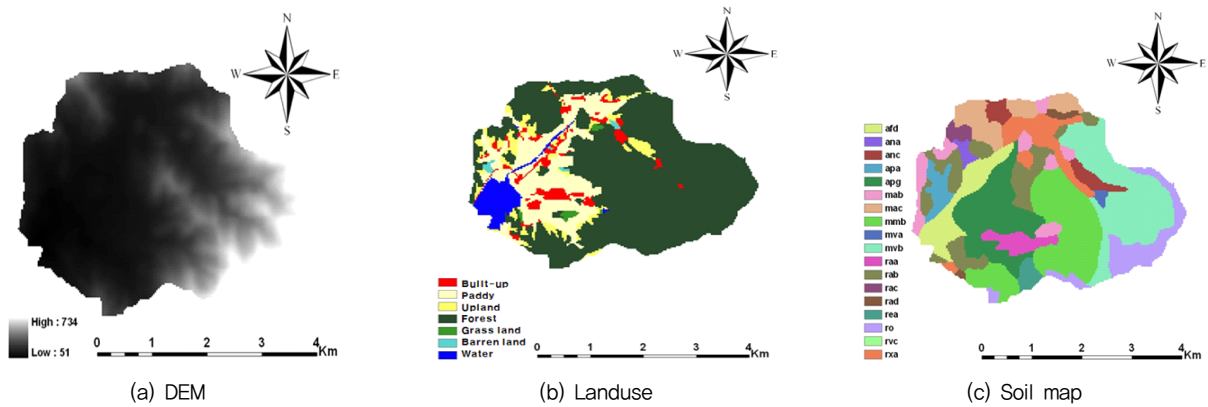


Fig. 2 DEM, landuse, and soil maps of the Gyeryong Reservoir

Table 1 Characteristics of the Gyeryong Reservoir watershed

Watershed length	Stream gradient	Time of concentration	Impervious	Curve number (CN) III			
				This study	B. Reservoir (Seong et al., 2008)	W. Reservoir (Hwang et al., 2012)	S. Reservoir (Hwang et al., 2012)
6.3 km	3.67 %	0.98 hr	4.62 %	85	89	83	85

(B. Reservoir: Balan Reservoir, W. Reservoir: Wangdong Reservoir, S. Reservoir: Suyang Reservoir)

하고 HEC-HMS 모형에 적용하여 설계홍수량을 산정하여 비교분석하였다.

### 1. 연구 대상지

본 연구의 대상지구는 금강 유역의 계룡저수지로 선정하였다. 계룡저수지는 충청남도 공주시 계룡면 하대리에 위치한 농업용 저수지이다. 유역면적은 15.74 km<sup>2</sup>, 유효 저수량은 3,412.4만 m<sup>3</sup>이다. 홍수빈도는 60년, 홍수면적은 75 ha로 설계되었다. 연구 대상지인 계룡저수지 유역의 유역특성인자를 추출하기 위해 하천도, 수치표고모형 (Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도, 토양도 등의 자료를 수집하였다 (Fig. 2). 수집된 자료를 GIS를 이용해 대상 유역의 유역특성인자를 추출하였다. CN III 값은 85로 산정되었으며, 다른 저수지 유역에 대한 타 연구자들의 연구결과와 유사하게 나타났다 (Seong et al., 2008; Hwang et al. 2012). 추출한 유역특성인자를 Table 1에 나타내었다.

### 2. 강수량 자료

#### 가. 과거 강수량 자료 구축

연구 대상지인 계룡저수지의 과거 강수량 자료는 저수지 유역과 가장 인접한 곳에 위치한 대전 관측소로부터 수집하였다. 기상청에서 제공하는 대전 관측소의 강수량 자료를 토

대로 1시간 단위 과거 강수량 자료를 수집하였고, 1981~2010년 (1995s) 자료를 사용하였다.

#### 나. 미래 강수량 자료 구축

본 연구에서는 국립기상연구소 (National Institute of Meteorological Research, NIMR)에서 제공하는 RCP 시나리오에 기반한 미래 강수량 자료를 설계홍수량 산정에 이용하였다. 이 자료는 전 지구 기후변화 모델 HadGEM2-AO와 지역 기후변화 모델 HadGEM3-RA를 조합하여 12.5 km 해상도로 3시간, 6시간, 일 단위에 대한 강수량 자료로 2006~2100년에 대하여 제공된다 (NIMR, 2012; NIMR, 2011). 본 연구에서는 2011~2100년에 대한 3시간 단위 미래 강수량 자료를 구축하였고, 2011~2040년 (2025s), 2041~2070년 (2055s), 2071~2100년 (2085s)으로 구분하여 사용하였다.

#### 다. 편의보정

전 지구 기후변화 시나리오로부터 축소된 지역 기후변화 시나리오는 관측치와 모의치 간에 어느 정도의 편의를 보이며 이러한 계통적 오차 (Systematic bias)는 모형 내부에서 해결하기 쉽지 않다 (Park et al., 2012). 관측치와 모의치 간의 편의보정은 강수량 자료 분석의 정확성을 향상시키고 미래 강수량 자료 산출의 신뢰도를 높이는 데 필수적이다. Park et al. (2012)은 GEV (Generalized Extreme Value) 분포에 적합

시킨 강수량 자료를 분위사상법 (Quantile mapping) 기법을 사용하여 편의보정을 실시하였으며, 본 연구에서는 같은 방법으로 과거 자료기간 1979~2005년에 대한 강수량 관측치와 모의치 간의 편의를 보정하였다. 과거 자료기간의 편의보정을 통해 최적화된 매개변수를 미래 자료기간 2011~2100년에 적용하여 RCP 시나리오 기반의 미래 강수량 자료를 보정하였다.

### 3. 확률강우량 산정

확률강우량은 편의보정한 과거 및 미래 강수량 자료를 지속시간 (3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24시간)에 따라 빈도분석하여 산정하였다. 먼저, 앞서 수득한 과거 및 미래 강수량 자료를 통해 지속시간별 최대강수량을 수집하였다. 수집된 지속시간별 최대강수량에 고정시간-임의시간 환산계수를 곱함으로써 임의시간 강수량으로 변환하였다.

강수량 자료의 분석을 위해서는 적합한 확률분포형과 매개변수 추정방법을 선택할 필요가 있다. Hosking (1990)은 모멘트법과 최우도법의 단점을 보완하기 위하여 확률가중모멘트의 선형조합인 L-모멘트법을 제시하였다. L-모멘트법은 표본의 크기가 작거나 자료가 왜곡된 경우에도 비교적 안정적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 연최고치계열 자료를 이용할 때에 많이 사용되는 GEV 분포를 확률분포형으로 선정하고, 매개변수 추정 방법으로는 L-모멘트법을 사용하였다.

본 연구의 대상지구인 계룡저수지는 유역면적이 15.47 km<sup>2</sup>로 상대적으로 작고, 유역 내에 대전 관측소만이 위치하므로 해당 관측소의 강수량 자료로부터 구축한 임의시간 강수량을 확률강우량 자료로 이용하였다.

설계홍수량 산정을 위해서는 앞서 산정한 확률강우량의 시간적 분포를 고려해야 한다. 본 연구에서는 MOLIT (2000)에서 발표한 전국의 주요 기상관측소별 Huff 분포에 의한 무차원 우량 시간분포곡선 자료를 사용하여 확률강우량에 시간적 분포를 적용하였다.

위의 방법으로 8개 지속시간 (3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24시간)에서 200년 빈도 확률강우량 및 PMP (Probable Maximum Precipitation, 가능최대강수량)를 산정하였다. 과거 확률강우량은 대전 관측소의 1시간 단위 강수량 자료를 토대로 수득한 3시간 단위 강수량 자료를 통해 산정하였으며, 자료기간은 1981~2010년 (1995s)으로 설정하였다. 미래 확률강우량은 앞서 편의보정한 강수량 자료를 토대로 산정하였으며, 자료기간은 2011년부터 2100년까지 90년으로 설정하고 이를 2011~2040년 (2025s), 2041~2070년 (2055s), 2071~2100년 (2085s)으로 나누어 분석하였다.

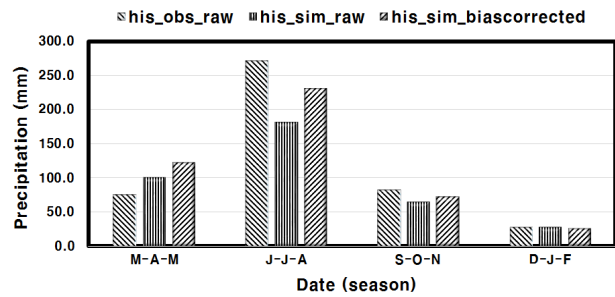


Fig. 3 Observed and simulated precipitation before and after bias correction

### 4. 설계홍수량 산정

과거 및 미래의 설계홍수량은 미국육군공병단 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE)의 수문공학연구소 (Hydrologic Engineering Center, HEC)에서 개발한 HEC-HMS (HEC - Hydrologic Modeling System) 모형을 이용하여 모의하였다.

HEC-HMS 모형이 제공하는 여러 가지 홍수량 산정 방법 중 본 연구에서는 손실우량 산정에는 MOLIT (2005)에서 추천하고 있는 SCS 유출곡선지수 방법을 사용하였고, 직접유출량 산정에는 유역의 특성에 커다란 관계없이 적용 가능한 SCS 단위도법을 이용하였다 (Seong et al., 2008). 이를 통해 각 자료기간 (1995s, 2025s, 2055s, 2085s)에 대한 200년 빈도 설계홍수량 및 PMF (Probable Maximum Flood, 가능최대홍수량)를 산정하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 강수량 편의보정 결과

Fig. 3은 과거 강수량 관측치와 모의치, 그리고 편의보정된 모의치를 나타내고 있다. 1979년부터 2005년의 관측치 및 모의치를 토대로 편의보정을 실시하였으며, 자료기간에 대한 계절별 (봄 (M-A-M), 여름 (J-J-A), 가을 (S-O-N), 겨울 (D-J-F)) 평균 강수량을 산정하였다. 여름철의 경우 관측치에 비해 모의치가 과소 모의된 것으로 나타났으며, 편의보정된 모의치 자료로부터 극한 강우사상에 대한 편의보정 효과가 있는 것으로 분석되었다. 겨울철의 경우 관측치와 모의치 간의 편이가 거의 존재하지 않아 편의보정에 따른 효과는 적게 나타났다.

### 2. 계룡저수지 유역의 미래 강수량 전망

RCP 시나리오를 바탕으로 계룡저수지 유역의 강수량의 미래 전망을 알아보았다. 현재 (1995s)를 기준으로 미래 3기

간(2025s, 2055s, 2085s)에 걸쳐 21세기 말까지의 연강수량의 변화를 살펴보았다(Fig. 4). 연강수량은 증가 추세가 뚜렷하지 않으며, 연별 변동폭은 큰 것으로 분석되었다. 2025s에는 현재(1995s)에 비하여 강수량이 RCP2.6 시나리오에서 6.2% 증가, RCP4.5 시나리오에서 2.8% 감소, RCP6.0 시나리오에서 5.5% 증가, RCP8.5 시나리오에서 1.3% 증가하는 것으로 나타났다. 2055s와 2085s 기간에는 현재(1995s)와 비교하여 강수량이 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에서 각각 6.2%, 16.1%, 2.7%, 3.5%와 6.1%, 9.6%, 9.8%, 11.0% 증가하는 것으로 분석되었다(Table 2).

현재(1995s) 대비 미래(2025s, 2055s, 2085s) 강수량의 표준편차는 RCP2.6 시나리오에서 표준편차는 2025s에 266.1 mm, 2055s에 270.1 mm, 2085s에 284.0 mm로, 현재(1995s) 309.1 mm보다 작게 나타났다(Table 2). RCP4.5 시나리오의 경우, 2025s에 280.6 mm, 2055s에 314.4 mm, 2085s에 389.0 mm로, 2025s에는 현재(1995s)보다 작은 값을 나타내지만 2085s로 갈수록 점차 큰 값을 나타내며 2085s에는 현재(1995s)에 비하여 표준편차가 25.9% 가량 커지는 것으로 분석되었다. RCP6.0 시나리오의 경우, 2025s에는 346.6 mm로 현재보다 큰 값을 나타내지만 2085s로 갈수록 점차 작은 값을 나타내며 2085s에는 현재(1995s)에 비하여 표준편차가 9.2

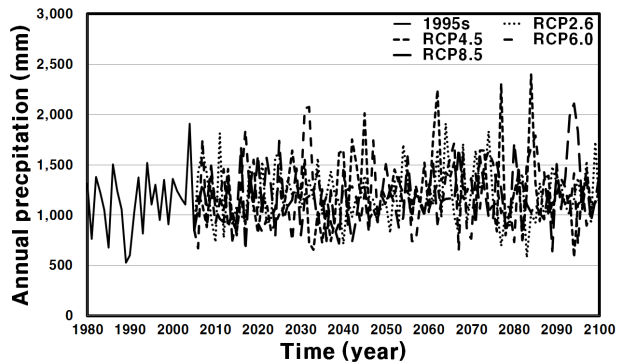


Fig. 4 Annual precipitation change of the Gyeryong Reservoir watershed

% 가량 작아지는 것으로 분석되었다. RCP8.5 시나리오의 경우, 2025s에는 302.5 mm로 현재(1995s)와 유사하였으며, 2085s에는 346.2 mm로 현재(1995s)에 비하여 12.0% 가량 커지는 것으로 분석되었다. 이와 같이 계룡저수지 유역의 미래 강수량은 전반적으로 각 RCP 시나리오에서 증가 추세를 나타내며, 2025s에는 RCP2.6 시나리오, 2055s에는 RCP4.5 시나리오, 2085s에는 RCP8.5 시나리오에서 각각 증가폭이 가장 큰 것으로 분석되었다.

국립기상연구소(2012)는 CMIP5 (the phase five for the Coupled Model Intercomparison Project) 16개 전지구 기후변화 모델을 이용하여 한반도 영역의 1861~2100년에 대한 강수량 변화를 살펴본 바 있으며, 과거기후(1971~2000년)를 기준으로 21세기 말(2071~2100년)에 한반도의 강수량은 RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오에서 각각 6.5%, 9.2%, 8.4%, 13.2% 증가될 것으로 전망하였다. 또한 지역 기후변화 모델(HadGEM3-RA)로 한반도 상세 기후변화 시나리오를 산출한 결과, 우리나라의 현재(1981~2005년) 대비 미래(2071~2100년) 연평균 강수량이 RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오에서 각각 4.0%, 4.7%, 5.5%, 15.0% 증가하며 한편 증가 추세는 약하게 나타날 것으로 전망한 바 있다. Sung(2012)은 지역 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 현재(1973~2005년) 대비 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 따른 21세기 말(2070~2099년)의 극한강수량을 비교한 바 있으며, 평균을 의미하는 GEV 분포의 위치 매개변수와 변동을 의미하는 규모 매개변수가 현재에 비해 증가하여 미래 강수량의 평균과 변동성의 변화가 커질 것이라는 결과를 보여주어 본 연구의 결과와 유사한 점을 보였다.

### 3. 확률강우량 산정 결과

본 연구의 대상지구인 계룡저수지 유역에 적용되는 대전 관측소에 대하여 과거 및 미래 강수량 자료를 기반으로 200년 빈도 확률강우량을 산정하였다(Table 3). 미래 기상자료는 국립기상연구소에서 제공된 3시간 단위 기후변화 시나리오를 통해 수득하였기 때문에 지속시간 3시간, 6시간, 9시간, 12

Table 2 Future precipitation of the Gyeryong Reservoir watershed

Scenario	Precipitation mean ± standard deviation (mm)			
	Historical	2025s	2055s	2085s
RCP2,6	1,128,2 ± 309,1	1,197,7 (+6,2 %) ± 266,1	1,198,0 (+6,2 %) ± 270,1	1,196,5 (+6,1 %) ± 284,0
RCP4,5		1,096,8 (-2,8 %) ± 280,6	1,310,0 (+16,1 %) ± 314,4	1,236,5 (+9,6 %) ± 389,0
RCP6,0		1,190,4 (+5,5 %) ± 346,6	1,158,6 (+2,7 %) ± 291,1	1,236,3 (+9,6 %) ± 280,8
RCP8,5		1,143,2 (+1,3 %) ± 302,5	1,167,4 (+3,5 %) ± 212,3	1,252,0 (+11,0 %) ± 346,2

Table 3 Probability rainfall of a 200-year frequency for different durations (mm)

Scenario	Period	3hr	6hr	9hr	12hr	15hr	18hr	21hr	24hr
Historical	1995s	176.9	243.2	306.1	336.8	377.0	405.1	416.7	457.6
RCP2.6	2025s	104.6	185.1	245.1	315.8	348.0	382.9	404.0	418.5
	2055s	151.5	244.7	266.5	328.4	364.6	381.0	385.7	426.9
	2085s	149.2	282.4	406.7	398.7	412.1	454.7	492.8	545.0
RCP4.5	2025s	164.3	369.2	468.6	545.8	561.3	590.2	612.1	661.3
	2055s	165.7	343.6	378.4	430.9	526.3	634.8	732.6	828.0
	2085s	155.1	309.8	462.9	591.8	605.5	642.7	705.7	782.9
RCP6.0	2025s	104.5	246.0	358.8	463.9	562.3	640.0	690.8	725.6
	2055s	117.8	221.8	318.1	363.5	381.8	443.9	525.6	561.7
	2085s	132.6	275.3	291.9	314.3	375.4	411.6	428.0	448.2
RCP8.5	2025s	117.1	264.3	380.7	482.2	572.8	663.3	725.2	804.6
	2055s	146.4	238.3	316.3	364.1	367.6	373.4	378.1	379.5
	2085s	187.5	319.0	359.9	364.4	378.2	407.6	442.9	467.7

Table 4 PMP for different durations (mm)

Scenario	Period	3hr	6hr	9hr	12hr	15hr	18hr	21hr	24hr
Historical	1995s	370.7	535.8	656.3	729.6	810.8	865.4	889.6	1,108.5
RCP2.6	2025s	245.3	432.0	556.7	703.3	780.0	858.1	908.2	1,083.8
	2055s	324.7	546.0	602.3	732.2	811.8	851.3	870.1	1,096.4
	2085s	331.6	615.4	850.2	864.6	912.3	1,002.3	1,084.6	1,364.6
RCP4.5	2025s	363.1	782.3	974.1	1,126.3	1,176.4	1,238.6	1,288.1	1,589.2
	2055s	365.2	735.0	820.4	935.6	1,116.7	1,308.4	1,471.4	1,869.1
	2085s	345.4	675.2	959.6	1,191.6	1,244.9	1,329.7	1,448.3	1,823.4
RCP6.0	2025s	245.1	555.3	765.5	955.7	1,134.5	1,275.0	1,368.7	1,649.6
	2055s	274.4	516.3	709.0	806.5	856.9	987.4	1,150.5	1,413.7
	2085s	297.9	595.6	635.4	688.7	806.7	879.5	921.0	1,110.1
RCP8.5	2025s	271.9	591.9	819.1	1,016.2	1,184.6	1,343.5	1,462.1	1,846.2
	2055s	330.2	547.3	704.4	809.5	828.1	846.3	860.1	997.6
	2085s	397.7	683.6	764.2	787.8	821.9	886.5	964.2	1,173.0

시간, 15시간, 18시간, 21시간, 그리고 24시간에 대하여 각각 확률강우량을 산정하였다. 확률강우량은 미래 기간별, 지속 시간별로 다양한 경향을 나타냈다. 지속시간 3시간에서는 RCP8.5 시나리오의 2085s를 제외하고 현재 (1995s)에 비하여 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 더 작은 확률강우량 값을 가지는 것으로 나타났다. 지속시간 6시간에서는 현재에 비하여 2025s에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 126.0 mm (51.8%) 증가하고, 2055s에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 100.4 mm (41.3%) 증가하여 이들 기간에서는 4가지 시나리오 중 RCP4.5 시나리오에 따른 확률강우량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 2085s에는 RCP8.5 시나리오의 확

률강우량이 현재에 비하여 75.8 mm (31.2%) 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 12시간에서는 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 각각 209.0 mm (62.1%), 94.1 mm (27.9%), 255.0 mm (75.7%) 증가하여 4가지 시나리오 중 확률강우량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 24시간에서는 2025s에 RCP8.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 347.0 mm (75.8%) 증가하고, 2055s와 2085s에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 각각 370.4 mm (80.9%), 325.3 mm (71.1%) 증가하여 4가지 시나리오 중 확률강우량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

**Table 5** Peak runoff of a 200-year frequency for different durations (m<sup>3</sup>/s, min)

Scenario	Period	3hr	6hr	12hr	24hr
Historical	1995s	371.5	413.6	274.9	171.7
RCP2,6	2025s	186.6	321.7	251.8	156.0
	2055s	305.8	354.0	264.9	159.0
	2085s	299.7	564.4	302.2	206.3
RCP4,5	2025s	338.8	656.8	419.1	251.8
	2055s	342.3	522.2	391.7	317.5
	2085s	342.3	648.6	453.5	299.5
RCP6,0	2025s	186.2	492.8	419.8	277.5
	2055s	219.7	431.7	278.6	212.3
	2085s	257.1	392.2	273.5	167.9
RCP8,5	2025s	218.0	525.7	428.0	308.2
	2055s	292.7	428.9	267.4	140.2
	2085s	398.9	494.5	275.7	175.2

Table 4는 PMP 산정 결과를 나타내고 있다. PMP는 200년 빈도에 대한 확률강우량과 마찬가지로 지속시간 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간, 18시간, 21시간, 그리고 24시간에 대하여 산정하였다. 지속시간 3시간에서는 RCP8.5 시나리오의 2085s를 제외하고 현재 (1995s)에 비하여 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 더 작은 확률강우량 값을 가지는 것으로 나타났다. 지속시간 6시간에서는 2025s와 2055s에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 각각 317.8 mm (46.0%), 205.9 mm (37.2%) 증가하고, 2085s에는 RCP8.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 147.8 mm (27.6%) 증가하여 4가지 시나리오 중 확률강우량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 12시간에서는 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 각각 396.7 mm (54.4%), 205.9 mm (28.2%), 462.0 mm (63.3%) 증가하여 4가지 시나리오 중 확률강우량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 24시간에서는 2025s에 RCP8.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 737.7 mm (66.6%) 증가하고, 2055s와 2085s에 RCP4.5 시나리오의 확률강우량이 현재에 비하여 각각 760.6 mm (68.6%), 714.9 mm (64.5%) 증가하여 4가지 시나리오 중 확률강우량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 설계홍수량 산정 결과

Table 5는 계룡저수지 유역의 200년 빈도 첨두유출량을 지속시간 3시간, 6시간, 12시간, 24시간에 대하여 산정한 결과를 나타내고 있다. 첨두유출량은 확률강우량과 마찬가지로

**Table 6** Peak runoff of PMF for different durations (m<sup>3</sup>/s, min)

Scenario	Period	3hr	6hr	12hr	24hr
Historical	1995s	876.3	935.8	612.8	427.3
	2025s	549.6	787.9	588.9	417.5
	2055s	756.7	855.8	613.4	422.6
RCP2,6	2085s	774.4	1,222.3	691.1	527.2
	2025s	856.5	1404.6	895.0	614.5
	2055s	862.1	1178.3	849.0	723.7
RCP4,5	2085s	810.5	1383.1	947.8	705.8
	2025s	548.9	1097.1	862.6	638.0
	2055s	625.3	1013.6	648.4	546.1
RCP6,0	2085s	686.6	904.7	609.5	427.7
	2025s	618.8	1176.2	901.2	714.5
	2055s	771.1	1006.8	626.1	383.8
RCP8,5	2085s	946.7	1095.2	621.3	452.3

로 미래 기간별, 지속시간별로 다양한 경향을 나타냈다. 지속시간 3시간에서는 RCP8.5 시나리오의 2085s를 제외하고 현재 (1995s)에 비하여 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 더 작은 첨두유출량 값을 가지는 것으로 나타났다. 지속시간 6시간에서는 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 RCP4.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 각각 243.2 mm (58.8%), 108.6 mm (26.3%), 235.0 mm (56.8%) 증가하여 4가지 시나리오 중 첨두유출량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 12시간에 대해서는 2025s에 RCP8.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 153.1 mm (55.7%) 증가하고, 2055s와 2085s에 RCP4.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 각각 116.8 mm (42.5%), 178.6 mm (65.0%) 증가하여 4가지 시나리오 중 첨두유출량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 24시간에 대해서는 2025s에 RCP8.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 136.5 mm (79.5%) 증가하고, 2055s와 2085s에 RCP4.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 각각 145.8 mm (84.9%), 127.8 mm (74.4%) 증가하여 4가지 시나리오 중 첨두유출량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 6은 PMF 첨두유출량 산정 결과를 나타내고 있다. 지속시간 3시간에서는 RCP8.5 시나리오의 2085s를 제외하고 현재 (1995s)에 비하여 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 더 작은 첨두유출량 값을 가지는 것으로 나타났다. 지속시간 6시간에서는 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 RCP4.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 각각 468.8 mm (50.1%), 242.5 mm (25.9%), 447.3 mm (47.8%) 증가하여 4가지 시나리오 중 첨두유출량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지

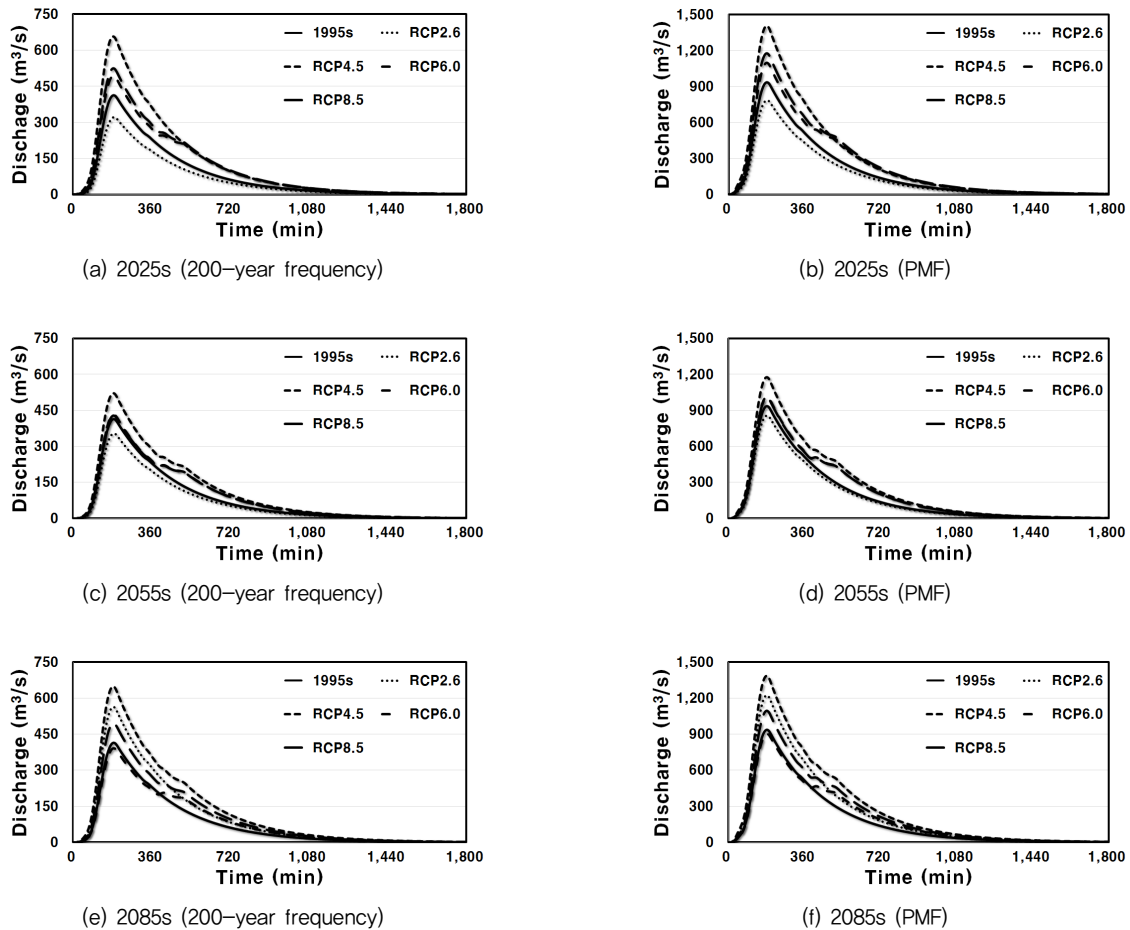


Fig. 5 Design flood of a 200-year frequency, and PMF for 6 hour duration ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

속시간 12시간에 대해서는 2025s에 RCP8.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 288.4 mm (47.1 %) 증가하고, 2055s와 2085s에 RCP4.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 각각 236.2 mm (38.5 %), 335.0 mm (54.7 %) 증가하여 4가지 시나리오 중 첨두유출량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 24시간에 대해서는 2025s에 RCP8.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 287.2 mm (67.2 %) 증가하고, 2055s와 2085s에 RCP4.5 시나리오의 첨두유출량이 현재에 비하여 각각 296.4 mm (69.4 %), 278.5 mm (65.2 %) 증가하여 4가지 시나리오 중 첨두유출량이 가장 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

첨두유출량은 모든 미래 기간 (2025s, 2055s, 2085s)과 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 대하여 지속시간 6시간에서 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났으며, 따라서 지속시간 6시간을 임계지속시간으로 고려하였다.

Fig. 5는 임계지속시간 6시간에서 200년 빈도에 대한 설계홍수량과 PMF를 미래 기간 (2025s, 2055s, 2085s)에 대하여

시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)별로 비교한 것이다. 임계지속시간 6시간에서 200년 빈도에 대한 미래 설계홍수량은 2025s에는 RCP4.5, 6.0, 8.5 시나리오에서 현재 (1995s)보다 증가하지만, RCP2.6 시나리오에서 현재보다 감소하는 것으로 나타났으며, 2055s에도 2025s와 마찬가지로의 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 2085s에는 RCP2.6, 4.5, 8.5 시나리오에서 현재보다 설계홍수량이 증가하지만, RCP6.0 시나리오에서 현재보다 감소하는 것으로 나타났다. RCP4.5, 8.5 시나리오의 경우, 설계홍수량이 미래 기간 (2025s, 2055s, 2085s)에 현재보다 항상 증가하는 것으로 분석되었다. 미래 PMF 또한 200년 빈도 미래 설계홍수량과 같은 변화 양상을 보이는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 지속시간 24시간에서 200년 빈도에 대한 설계홍수량과 PMF를 비교한 것이다. 지속시간 24시간에서 200년 빈도에 대한 미래 설계홍수량은 2025s에는 RCP4.5, 6.0, 8.5 시나리오에서 현재 (1995s)보다 증가하지만, RCP2.6 시나리오에서 현재보다 감소하는 것으로 나타났다. 2055s에는



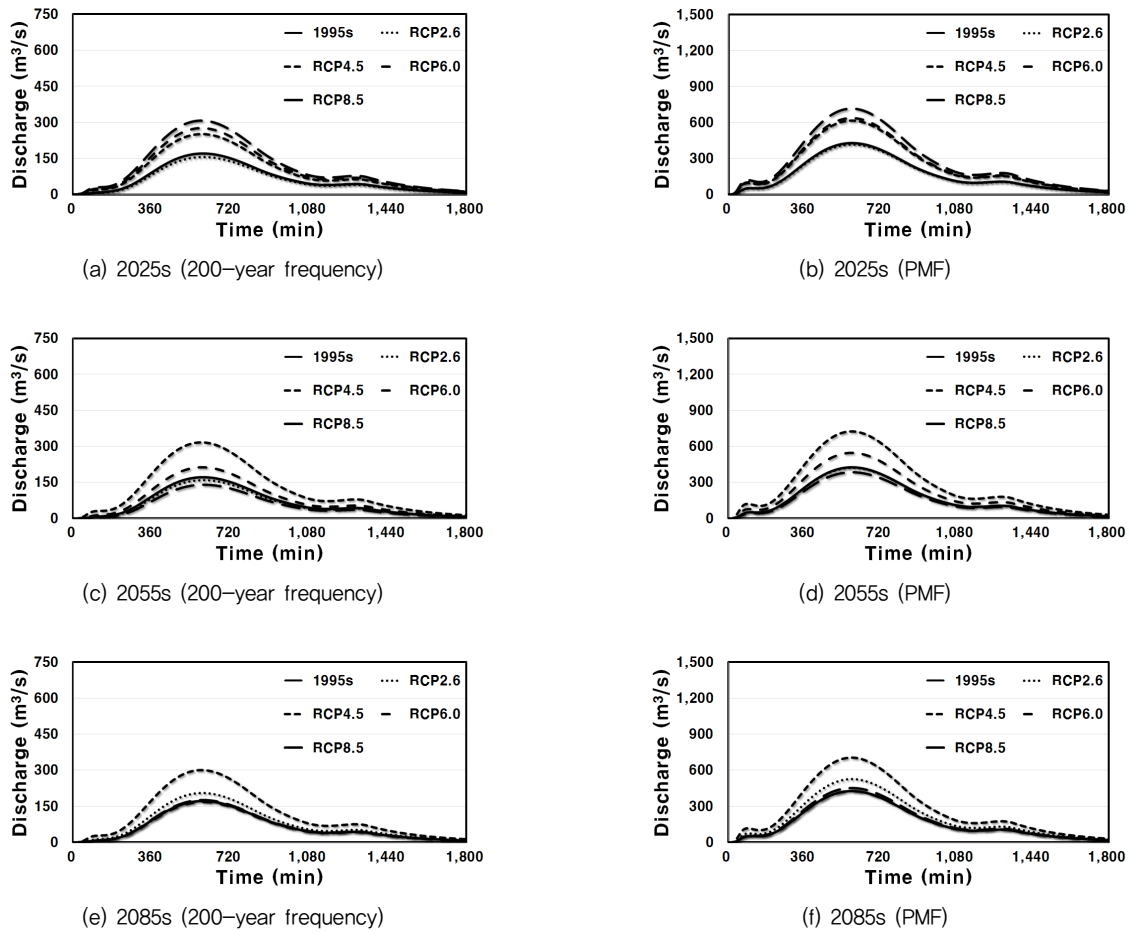


Fig. 6 Design flood of a 200-year frequency, and PMF for 24 hour duration ( $m^3/s$ )

RCP4.5, 6.0 시나리오에서 현재보다 설계홍수량이 증가하지만, RCP2.6, 8.5 시나리오에서 현재보다 감소하는 것으로 나타났다. 2085s에는 RCP2.6, 4.5, 8.5 시나리오에서 현재보다 설계홍수량이 증가하지만, RCP6.0 시나리오에서 현재보다 감소하는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오의 경우, 설계홍수량이 미래 기간(2025s, 2055s, 2085s)에 현재보다 항상 증가하는 것으로 분석되었다. 미래 PMF는 2085s에 RCP6.0 시나리오에서도 현재보다 설계홍수량이 증가하는 것을 제외하고, 200년 빈도 미래 설계홍수량과 같은 변화 양상을 보이는 것으로 분석되었다. Kim et al. (2013)은 RCP8.5 시나리오를 이용하여 재현기간 50년, 100년, 200년 빈도에 따른 미래 기간 (Case 1; 2011~2040년, Case 2; 2041~2070년, Case 3; 2071~2100년)에서의 미호천 유역의 미래 설계홍수량 변화를 분석한 바 있으며 Case 1, 즉 가까운 미래에 설계홍수량이 가장 크게 증가하는 것으로 나타났고, 저빈도에서 고빈도로 갈수록 설계홍수량이 증가할 것이라는 결과를 보여주어 본 연구의 RCP8.5 시나리오에 따른 결과와 유사한 점을 보였다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 RCP 시나리오에 따른 계룡저수지 유역의 설계홍수량을 산정하여 비교분석하였다. 기간별로 수득한 강수량 자료를 분위사상법을 이용하여 편의보정한 뒤, L-모멘트법과 GEV 분포형을 적용하여 재현기간별 확률강우량을 산출하였고, Huff 분포 및 SCS 단위도법을 사용하여 RCP 시나리오별 설계홍수량을 산정하였다.

RCP 시나리오를 바탕으로 대상지구인 계룡저수지 유역의 미래 강수 전망을 살펴본 결과, 강수량 변화는 증가 추세가 뚜렷하지 않으며 연별 변화율의 변동폭을 큰 것으로 분석되었다. 계룡저수지 유역의 미래 강수량은 전반적으로 각 RCP 시나리오에서 증가 추세를 나타내며, 2025s에는 RCP2.6 시나리오, 2055s에는 RCP4.5 시나리오, 2085s에는 RCP8.5 시나리오에서 각각 현재(1995s)에 비해 6.2%, 16.1%, 11.0% 증가하여 가장 증가폭이 큰 것으로 전망된다.

계룡저수지 유역의 200년 빈도 확률강우량과 PMP를 산정

한 결과, 지속시간에 따라 다양한 경향성이 나타났다. 지속시간 3시간에서는 현재에 비하여 미래에 더 작은 확률강우량 값을 가졌다. 지속시간 6~12시간에서는 미래의 확률강우량이 현재에 비하여 증가하며, RCP 시나리오 중에서는 RCP4.5 시나리오에 따른 확률강우량이 현재에 비해 가장 큰 폭으로 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 15~24시간에서도 미래의 확률강우량이 현재에 비하여 증가하며, 특히 2025s에는 RCP8.5 시나리오에 따른 확률강우량이, 2055s와 2085s에는 RCP4.5 시나리오에 따른 확률강우량이 현재에 비해 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

계룡저수지 유역의 200년 빈도 설계홍수량과 PMF를 산정한 결과, 미래 기간별, 시나리오별로 다양한 경향성이 나타났다. RCP2.6 시나리오에 따른 설계홍수량은 미래 기간에 걸쳐 지속적으로 증가하지만 2055s까지 현재보다 작은 값을 나타내었다. RCP6.0 시나리오에 따른 설계홍수량은 2025s에서 현재보다 크게 증가한 후, 점차 감소하는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에 따른 설계홍수량은 2025s까지 증가하다가 2055s에서 감소한 후, 2085s까지 다시 크게 증가하는 경향성을 나타냈다. RCP6.0 시나리오에 따른 설계홍수량은 2025s에서 현재보다 크게 증가한 후, 점차 감소하는 것으로 분석되었다. 미래 기간에 따라 RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오 평균 설계홍수량은 현재에 비하여 2025s, 2055s, 2085s에서 각각 20.7%, 5.0%, 26.9% 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과, 계룡저수지 유역의 설계홍수량은 RCP2.6 시나리오를 제외하면 미래 기간에서 현재에 비하여 증가하는 추세를 나타냈으며, RCP8.5 시나리오에 대한 결과가 RCP4.5 시나리오에 대한 결과보다 반드시 크게 나타나지는 않는 것으로 분석되었다. 또한 21세기 말 (2085s) 뿐만 아니라 가까운 미래 (2025s)에도 현재 (1995s)에 비하여 설계홍수량이 20% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 전반적으로 RCP4.5 시나리오가 가장 큰 값을 나타내는 것으로 분석됨에 따라 기후변화에 대비한 계룡저수지의 설계홍수량 산정을 위한 시나리오 선정의 근거 자료로 활용할 수 있으며, 향후 다른 수계의 유역으로 확장하여 적용할 시에 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 농림수산식품부 생명산업기술개발사업 기획과제인 “농업생산기반시설 통합 관리시스템 개발” 연구비지원 (과제번호 : 311009-3)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Climate Change Information Center (CCIC), 2013. Abnormal climate report (in Korean).
2. Hong, S. J., B. S. Kim, H. S. Kim, and H. J. Kim, 2012. The impact assessment of climate change on streamflow in Han River basin based on RCP climate change scenario. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 2012(10): 704-708 (in Korean).
3. Hosking, J. R. M., 1990. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of Royal Statistical Society* 52(1): 105-124.
4. Hwang, S. H., M. S. Kang, J. H. Kim, J. H. Song, S. M. Jun, S. H. Lee, and J. Y. Choi, 2012. Assessment of flood impact on downstream of reservoir group at Hwangryong River Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 103-111 (in Korean).
5. Hwang, S. W., and M. S. Kang, 2013. Uncertainty of methodology and process of climate change impact assessment. *Rural Resources* 55(1): 30-39 (in Korean).
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. Summary for policymakers. In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. Jo, D. J., and B. H. Jeon, 2012. Analysis on the characteristics of exceeding probability rainfall events. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 309-313 (in Korean).
8. Jun, S. M., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, K. Kim, and J. Park, 2013. Effects of agricultural reservoir rehabilitation on their flood control capacities. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 57-68 (in Korean).
9. Kim, B. S., and S. R. Ha, 2013. The impact assessment of climate change on design flood in Mihochen basin based on the Representative Concentration Pathway Climate Change Scenario. *Journal of Korean Wetlands Society* 15(1): 105-114 (in Korean).
10. Maeng, S. J., and H. G. Lee, 2006. Regional frequency analysis by rainfalls using GEV distribution. *The Korea Contents Society* 8(3): 403-407 (in Korean).
11. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2000. Development research report of water resources management technology in 1999: Vol. 1, the creation of probability rainfall in Korea (in Korean).
12. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2005. Design criteria of the river (in Korean).
13. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2009.

- National water ensure security measures to climate change: the second year, research report (in Korean).
14. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2012. Climate change scenarios corresponding to IPCC assessment report 5<sup>th</sup> in 2012 (in Korean).
  15. Noh, S. H., K. S. Kung, J. H. Park, and K. S. Ryoo, 2013. Water supply change outlook for Geum River Basin considering RCP climate change scenario. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(5): 505-517 (in Korean).
  16. Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 2012. Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method: for 20-weather stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 133-142 (in Korean).
  17. Park, J., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, and J. H. Song, 2013. Development of IDF curves based on RCP4.5 scenario for 30-reservoirs in South Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13(6): 145-159 (in Korean).
  18. Son, A. L., S. H. Bae, K. Y. Han, and W. H. Cho, 2013. Prospect of design rainfall in urban area considering climate change. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(6): 683-696 (in Korean).
  19. Song, K. H., 2009. Characteristic of design flood flow using L-Moment according to gradual composition of annual maximum flood flows. Chungbuk National University (in Korean).
  20. Seong, C. H., 2004. A comparative study of unit hydrograph models using HEC-HMS at a small watershed. Seoul National University (in Korean).
  21. Seong, C. H., S. M. Kim, and S. W. Park, 2008. A comparative study of unit hydrograph models for flood runoff simulation at a small watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(3): 17-27 (in Korean).
  22. Sung, J. H., B. S. Kim, H. S. Kang, and C. H. Cho, 2012. Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on Representative Concentration Pathways (RCP) climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 231-244 (in Korean).