RCP4.5 시나리오에 따른 IDF 곡선 분석; 우리나라 30개 저수지를 대상으로

Development of IDF Curves Based on RCP4.5 Scenario for 30-Reservoirs in South Korea

박지훈* · 강문성** · 송인홍*** · 황순호**** · 송정현****

Park, Jihoon · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Hwang, Soon Ho · Song, Jung-Hun

Abstract

The main objective of this study is to evaluate the impact of climate change on Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for the selected 30-Reservoirs in South Korea. A bias inherent in future precipitation data based on Representative Concentration Pathways (RCP) scenario was corrected by a quantile mapping method. The trends in future precipitation changes were analyzed for the three different time periods (correspond to 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, and 2085s: 2071~2100). Gumbel distribution was selected as the probability distribution and parameters were estimated by probability weighted moment method. Rainfall intensity of Han, Geum and Yeongsan river watersheds was greatly increased in 2085s period than 1990s period. Rainfall intensity of Nakdong river watershed appeared to increase sharply in 2025s period than 1990s period. The newly developed IDF curve might enhance the stability of agricultural reservoirs through considering climate change impact into structure design process.

Key words : Climate change, RCP scenario, Bias correction, Probable rainfall, IDF curve

요 지

본 연구의 목적은 우리나라 30개 저수지의 미래 IDF (Intensity-Duration-Frequency) 곡선을 산정하여 기후변화로 인한 영향을 분석하는 것이다. RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오를 기반으로 하는 미래 강수량에 내재하는 계통적 오차를 분위사상법을 이용하여 보정하였고, 미래를 3기간(2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, and 2085s: 2071~2100)으로 나누어 미래 강수량의 변화를 분석하였다. 강수량의 최적 분포형과 매개변수 추정 방법으로 Gumbel 분포와 확률가중모멘트법을 선정하였다. 한강유역, 금강유역, 영산강유역의 강우강도는 현재 1990s 기간에 비해 미래 2085s 기간에 크게 증가하였고, 낙동강유역의 강우강도는 현재 1990s 기간에 비해 미래 2025s 기간에 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 새롭게 도출한 IDF 곡선은 기후변화를 구조물 설계에 반영함으로써 농업용 저수지의 안정성을 증진시킬 수 있을 것이라 사료된다.

핵심용어 : 기후변화, RCP 시나리오, 편의보정, 확률강우량, IDF 곡선

1. 서 론

우리나라에는 2011년 기준으로 69,568개소의 농업용 수리시설물이 산재되어 있다. 이중 1945년 이전에 축조되어 50년 이상이 경과한 농업용 수리시설물은 20.0%(13,911개소)이며, 특히 저수지의 경우는 전체(17,505개소)의 51.9%(9,082개소)가 1945년 전에 설치되어 수리시설물의 노후화가 진행되고

있다(Jeong *et al.*, 2004; MAFRA, 2012). 2000년대에 들어서면서 동인도 쓰나미, 동일본 대지진과 같은 대형 재해가 발생하면서, 이러한 수리시설물을 포함한 기반 시설의 안정성에 대한 관심이 증가하고 있다.

우리나라는 기반 시설의 안정성 증진을 위해 농업생산기반 정비사업을 꾸준히 추진하여 농업용 수리시설물을 관리하고 있으나, 수리시설물 개보수에 초점을 맞춘 사업이 대부분으로

*정회원. 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 박사과정(E-mail: gtjihoon@naver.com)

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

**교신저자. 정회원. 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수. 농업생명과학연구원 겸무연구원

(Tel: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-873-2087, E-mail: mskang@snu.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

***서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수

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

****서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 박사과정

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

농업용 수리시설물의 전반적인 안정성 제고에 대한 연구는 미흡한 실정이다(MAFRA, 2011). 게다가 최근 들어 과거의 농업용 수리시설물 설계한계를 초과하는 집중호우가 빈번하게 발생하고 있으며 이는 수리시설물의 안정성을 약화시키고 있다. 시설 노후화에 따른 기능저하뿐만 아니라 설계기준을 넘어서는 기상이변을 고려한 전반적인 안정성 제고가 필요하며 이를 위해서는 과거 및 미래의 기후변화를 반영하여 시설물의 상태를 올바르게 평가하고 지속적으로 관리해야한다.

Oh *et al.*(2009)은 이상기후에 따른 영향을 평가하기 위해 자료기간에 따른 확률강우량의 변화 특성을 분석하였다. 여러 방법으로 분류된 자료기간에 따른 확률강우량을 산정하고 통계적 기법으로 변동성 및 경향성을 분석함으로써 과거에 설계된 수공구조물에 대한 재평가 및 점검 필요성을 제기하였다. Kim *et al.*(2011)은 기후변화가 수공구조물의 설계기준에 미치는 영향을 분석하기 위해 미래기간 동안의 지역별 확률강우량을 산정한 뒤 이를 기존 관측치의 증감을 경향과 비교하여 지역별로 적합한 확률강우량 산정 방법을 제안하였다. Seo *et al.*(2012)은 기후변화를 고려한 설계강우량을 산정하기 위해 GCM(Global Circulation Model)의 연강수량 시계열, 관측된 연최대강우 시계열, 확률분포함수 모수와의 관계를 회귀모형으로 연결하여 양상별 확률강우량을 산정하는 방법을 제안하였다. 이는 GCM의 연강수량이 영향인자로서 모수의 경향을 결정짓도록 고안된 방법으로 일반적인 확률강우량 산정정보보다 향상된 결과를 보여주었다. Kim and Ha (2013)는 기후변화가 배수체계에 미치는 영향을 평가하기 위해 RCP(Representative Concentration Pathways) 8.5 시나리오를 이용하여 비정상성 빈도해석기법을 적용한 지속시간별 빈도별 설계강우량을 산정하였다. 시간이 지남에 따라 대상유역의 설계홍수량이 증가함을 확인하였으며 현재의 치수안전도 기준에 대한 재고 필요성을 제안하였다. Kim *et al.* (2008)은 기후변화에 따른 극한강우사상의 변화 경향과 분포 특성을 살펴보기 위해 SRES B2 시나리오를 이용하여 IDF

곡선을 분석하였다.

Mailhot *et al.*(2007)은 미래 기후로 인한 극한 강우의 변화 정도를 평가하기 위해 CRCM(Canadian Regional Climate Model)을 이용하여 지역빈도분석을 적용한 지속시간별 IDF(Intensity-Duration-Frequency) 곡선을 제안하였고, Wang *et al.*(2013)은 하천유역을 대상으로 기후변화가 IDF 곡선에 미치는 잠재적인 영향을 7개의 RCM(Regional Climate Model) 결과를 이용하여 분석한 후 높은 강도 사상을 생성하는데 적합한 RCM을 제시하였다. Hailegeorgis *et al.*(2013)은 지역 빈도 해석을 이용하여 도시 지역의 불확실성을 고려한 극한 강우 강도를 분석하여 보다 신뢰할 수 있는 IDF 곡선을 제시하였으며, Willems(2013)은 IDF 곡선과 확률강우량을 이용하여 기후변화의 영향을 고려한 도시 배수 시스템 설계의 개정을 제안하였다. Mirhosseini *et al.*(2012)은 6개의 기후 모형을 사용하여 기후변화가 엘라베마 주 지역 IDF 곡선에 미치는 영향을 분석하였다. 지속시간에 따라 미래 강우강도의 분포가 다르게 나타났으며 대체로 4시간미만의 지속시간에서 현재보다 낮은 강우강도가 발생하는 경향을 보였다.

위와 같이 기후변화가 수공구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 꾸준히 수행되어왔으나, 그 대상이 대부분 도시 및 대하천 주변에 집중되어 있고, 농업용 수리시설물에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 현재 농업용 수리시설물에 대한 안정성 확보 방안을 시급히 마련해야하며 이를 위해서는 시설물에 대한 설계 재평가가 필요하다.

본 연구에서는 RCP 기반의 국가표준 기후변화 시나리오를 사용하여 미래 기후변화에 대비한 농업생산기반시설 설계의 기본이 되는 확률강우량을 산정하고 이를 IDF 곡선으로 나타내어 기후변화에 따른 영향을 분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지 중에

Table 1. Basic Information on Reservoirs and Background Watersheds

Large region	Reservoir	Watershed area (ha)	Storage capacity (10,000 m ³)	Large region	Reservoir	Watershed area (ha)	Storage capacity (10,000 m ³)	Large region	Reservoir	Watershed area (ha)	Storage capacity (10,000 m ³)
Han River	H_YS	790	302.0	Han River	H_AR	890	103.0	Nakdong river	N_DS	1,780	330.2
	H_YG	748	425.9	Geum sriver	G_DR	650	318.6		N_DW	1,050	140.6
	H_GS	717	383.8		G_BS	1,740	627.3		N_DC	5,630	892.7
	H_MG	1,315	306.8		G_GR	1,574	367.7		N_JN	3,510	1,435.9
	H_ON	1,552	271.0		G_TJ	21,880	3,192.7		N_GW	3,741	970.3
	H_BU	1,020	138.0		G_BO	1,785	323.6	Yeongsan river	Y_DY	6,560	6,667.0
	H_YD	2,783	446.5		G_DY	1,577	365.7		Y_GJ	4,130	1,736.0
	H_CP	1,610	380.9		G_DB	2,811	1,218		Y_JS	12,280	8,976.0
	H_JG	1,970	436.4	Nakdong river	N_OB	1,460	395.8		Y_SY	3,300	759.0
	H_MJ	1,420	341.2		N_GO	1,100	212.4		Y_NJ	10,470	9,120.0

*H_YS: Yongseol, H_YG: Yonggye, H_GS: Geumseok, H_MG: Mugeuk, H_ON: Onam, H_BU: Baegun, H_YD: Yongdang, H_CP: Chupyeong, H_JG: Jangok, H_MJ: Maji, H_AR: Aeryong

*G_DR: Dorim, G_BS: Bansan, G_GR: Gyeryeong, G_TJ: Tapjeong, G_BO: Boksom, G_DY: Deokyeong, G_DB: Dongbu

*N_OB: Obong, N_GO: Geumo, N_DS: Daeseong, N_DW: Dowon, N_DC: Dalchang, N_JN: Junam, N_GW: Gawol

*Y_DY: Damyang, Y_GJ: Gwangju, Y_JS: Jangseong, Y_SY: Suyang, Y_NJ: Naju

Fig. 1. Flowchart of Developing IDF Curve

서 4대강 유역(한강 유역, 낙동강 유역, 금강 유역, 영산강 유역)을 고려하여 30개 대상지역을 선정하였다. 4대강 유역별 대상지는 한강 유역 11개소, 금강유역 7개소, 낙동강유역, 7개소, 영산강 유역 5개소로 정하였다. 대상 지역 조사는 문헌 조사와 현장조사를 병행하여 실시하였으며, 현장조사는 한국 농어촌공사의 관할 지사의 협조를 얻어 수행하였다. Table 1

은 대상 저수지의 기본 정보를 나타내고 있다.

Fig. 1은 기후변화를 반영한 IDF 곡선을 산정하는 흐름도를 보여주고 있다. 먼저 과거 기상자료 및 미래 기상자료를 구축하고 연단위로 지속시간별 최대강수량을 산정한다. 다음으로 빈도분석을 수행하여 지점별 확률강우량을 취득한 후 지점별 Thiessen 계수를 적용하여 저수지별 확률강우량을 산정하고, 저수지 유역면적이 26 km² 이상이면 면적확률강우량을 산정한다. 최종적으로 저수지별 IDF 곡선을 도출하여 기간별, 유역별 비교 분석을 수행한다.

2.1 과거 강수량 자료 구축

과거 강수량 자료는 30개 대상 저수지 인근에 위치한 15개의 기상관측소를 선정하여 구축하였다. Table 2는 대상 저수지 인근에 위치한 기상관측소와 저수지 유역별 Thiessen 계수를 나타내고 있다. 1시간 강수량, 일 강수량을 취득하였고, 자료기간은 각 기상관측소별 관측시작연도 ~ 2011년까지 취득하였다. 기상관측소별로 확률강우량을 산정한 결과를 이용하여 저수지별 확률강우량을 산정하였으며, 저수지 인근에 두 개 이상의 기상관측소가 위치한 경우에는 Thiessen 계수를 이용하여 확률강우량을 보간하였다.

2.2 미래 강수량 자료 구축

2.2.1 국가표준 기후변화 시나리오

기상청은 2014년 발간 예정인 IPCC 제5차 보고서(Fifth Assessment Report, AR5)의 대표농도경로(Representative

Table 2. Weather Stations and Thiessen Coefficients Near the Study Reservoirs

Large region	Reservoir	Weather station	Large region	Reservoir	Weather station
Han River	H_YS	Suwon	Geum river	G_DR	Buyeo
	H_YG	Chungju		G_BS	
	H_GS			G_BO	
	H_MG			G_GR	Daejeon
	H_YD			G_TJ	Daejeon (0.04) ^a
	H_CP				Buyeo (0.09) ^a
	H_ON				Geumsan (0.87) ^a
	H_MJ	Ganghwa		G_DY	Buyeo (0.95) ^a
	H_AR				Gunsan (0.05) ^a
	H_BU	Icheon		G_DB	Buyeo (0.48) ^a
	H_JG	Cheorwon			Gunsan (0.52) ^a
Nakdong river	N_OB	Gumi	Yeongsan river	Y_DY	Jeongeup
	N_GO			Y_SY	Gwangju
	N_DS			Y_GJ	
	N_DW	Daegu		Y_JS	Jeongeup (0.74) ^a
	N_DC				Gwangju (0.26) ^a
	N_JN	Masan		Y_NJ	Gwangju (0.30) ^a
	N_GW				Jangheung (0.70) ^a

*a: Thiessen coefficient

*H_YS: Yongseol, H_YG: Yonggye, H_GS: Geumseok, H_MG: Mugeuk, H_ON: Onam, H_BU: Baegun, H_YD: Yongdang, H_CP: Chupyeong, H_JG: Jangok, H_MJ: Maji, H_AR: Aeryong

*G_DR: Dorim, G_BS: Bansan, G_GR: Gyeryeong, G_TJ: Tapyeong, G_BO: Boksims, G_DY: Deokyeong, G_DB: Dongbu

*N_OB: Obong, N_GO: Geumo, N_DS: Dalseong, N_DW: Dowon, N_DC: Dalchang, N_JN: Junam, N_GW: Gawol

*Y_DY: Damyang, Y_GJ: Gwangju, Y_JS: Jangseong, Y_SY: Suyang, Y_NJ: Naju

Concentration Pathways)를 기반으로 하는 기후변화 시나리오를 제공하고 있다. 전 지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO를 이용하여 약 135 km 해상도의 월 단위 전 지구 기후변화 시나리오를 산출한 다음 그 결과 값을 지역기후모델인 HadGEM3-RA에 입력하여 12.5 km 해상도를 가지는 일, 6시간, 3시간 단위 지역기후변화 시나리오를 산출하여 제공하고 있다.

RCP 시나리오는 총 4가지 종류(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)가 있다. RCP2.6 시나리오에서 RCP8.5 시나리오로 갈수록 많은 온실가스가 배출되는 것으로 가정되며, 이 중에서 우리나라 온실가스 저감정책을 잘 반영하고 있는 것으로 보고되고 있는 RCP4.5 시나리오를 선정하여 연구를 수행하였다. RCP 시나리오의 과거모의자료(Historical scenario data) 자료기간은 1950~2005년이고, RCP4.5 시나리오에 대한 자료기간은 2006~2100년이다.

2.2.2 미래 강수량 자료 생성

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 국가표준 기후변화 시나리오 자료 중 12.5 km 격자, 3시간 단위의 강수량 자료를 취득하여 사용하였다. 기상청에서 12.5 km 격자로 제공하는 자료를 저수지 인근의 기상관측소 지점으로 상세화하였다. 먼저, 강수량 자료를 기상관측소 지점으로 상세화하기 위해 강수량 격자점과 기상관측소의 경도, 위도 값을 ArcGIS(ESRI ArcGIS Desktop, Version 9.3, USA) 상에 나타내어 각각의 기상관측소 인근의 4개의 격자점을 추출하였다. 다음으로, 기상관측소 인근의 4개 격자점에 대한 강수량 자료를 역거리가중법을 사용하여 기상관측소에 대한 자료를 추출하였다. 위의 방법으로 총 15개의 기상관측소에 대한 미래 강수량 자료를 생성하였다.

2.2.3 편의보정

기후모델을 이용하여 상세화한 결과는 어느 정도의 계통적 오차(Systematic Bias)를 보이며 이러한 편의는 상세화 모델 내부에서 해결하기가 쉽지 않으므로 상세화를 수행한 다음 외부적으로 보정을 실시해야 한다. 본 연구에서는 분위사상법(Quantile Mapping)을 사용하여 미래 강수량 자료의 편의를 보정하였다. 분위사상법은 모의치, 관측치의 누적확률분포를 각각 구한다음 모의치의 누적확률분포를 관측치의 누적확률분포에 사상시키는 방법으로 Eq. (1)로 나타낼 수 있다 (Hashino *et al.*, 2007).

$$Z_j^i = F_{oj}^{-1}(F_{sj}(\hat{Y}_j^i)) \quad (1)$$

F_{oj} 는 관측치의 j 기간 동안의 누적확률분포, F_{sj} 는 모의치의 j 기간 동안의 누적확률분포를 의미한다.

Fig. 2는 편의보정의 전체적인 순서를 나타내고 있다. 먼저, 1976~2005년 기간 동안 RCP 기반의 12.5 km, 3시간 단위 해상도를 가지는 지역기후변화 시나리오와 관측치에 대한 편의보정을 분위사상법을 이용하여 수행하였다. 자료를 사상시킬 확률분포형으로는 GEV(Generalized Extreme Value, GEV) 분포를 선정하였으며, 3시간 강수량이 0.1 mm 보다 큰 강우사상을 대상으로 GEV 분포에 대한 적합성 검토를 실시하였다. 편의보정을 실시할 GEV 분포의 매개변수는 정상 연 평균강수량(Normal Annual Precipitation)을 기준으로 최적화한 다음 강우일수에 대해서도 편의보정을 실시하여 최종값을 도출하였다. 과거 기간 동안의 편의보정을 통해 최적화한 매개변수를 2006~2100년 기간 동안의 미래 지역기후변화 시나리오에 적용하여 미래 강수량 자료의 편의보정을 수행하였다 (Park *et al.*, 2012).

Fig. 2. Procedures of the Bias Correction (Park *et al.*, 2012)

2.3 확률강우량 산정

2.3.1 강우 빈도 분석

빈도별 확률강우량은 다음과 같이 과거 및 미래 지속시간에 따른 빈도 분석을 수행하여 산정하였다. 먼저, 과거 및 미래의 시 단위 강수량 자료를 지속시간별로 합산하여 지속시간별 최대 강수량 산정하고 지속시간별 최대 강수량에 임의시간 환산계수를 곱하여 임의시간 강수량으로 환산하였다. 다음으로, 강수량 자료에 적합한 확률분포와 매개변수 추정방법을 사용하여 재현기간별 빈도 분석한 다음 기상관측소에 지배비율(Thiessen 계수)을 적용하여 대상 저수지 유역의 확률강우량을 산정하였다. 마지막으로, 저수지 유역면적이 26 km² 이상이면 면적우량환산계수(Areal Reduction Factor, ARF)를 적용하여 면적확률강우량을 산정하였다.

위의 방법으로 10개 지속시간(1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24시간)과 5개 재현기간(20년, 50년, 100년, 200년, PMP)에 대한 확률강우량을 산정하였다. 과거 확률강우량은 기상관측소의 시 단위 강수량을 사용하였으며, 자료기간은 각 기상관측소별 관측시작연도 ~ 2011년으로 설정하였다. 미래 확률 강우량은 기상청에서 제공하는 RCP4.5 시나리오의 3시간 단위 강수량을 사용하였으며, 자료기간은 2011년부터 2100년까지 90년으로 이를 30년씩 나누어 2025s(2011~2040), 2055s(2041~2070), 2085s(2071~2100)으로 설정하였다.

미래 강수량 자료는 시간 간격이 3시간 단위이므로 지속시간을 3의 배수인 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24시간으로 설정한 다음 빈도 분석을 수행하였다. 이 빈도 분석 결과 값을 확률강우량-지속시간-재현기간 곡선으로 도시한 다음 회귀식을 도출하여 1, 2, 4 시간에 대한 확률강우량을 도출하였다.

과거 및 미래 강수량에 대한 빈도 분석은 FARD 2006 (FARD 2006, Version 2006, South Korea) 프로그램을 사용하여 실시하였다. FARD 2006은 강우 빈도 분석 프로그램으로 다양한 확률분포형과 매개변수 추정방법을 제공한다. 빈도 분석에서 사용한 확률분포와 매개변수 추정방법은 Gumbel 분포와 확률가중모멘트법(Probability Weighted Moment Method)을 선정하였다.

2.3.2 가능최대강수량 추정

가능최대강수량(Possible Maximum Precipitation, PMP)을 추정하는 방법은 수문기상학적 방법, 최대강우량 포락곡선 방법, 통계학적 방법 등이 있다. 수문기상학적 방법과 최대강우량 포락곡선 방법은 많은 기상인자와 자료가 필요하기 때문에 미래 PMP를 추정하기에 부적절하다. 본 연구에서는 확률강우량과 PMP의 상관관계를 검토하여 100년 빈도 확률강우량에 대한 PMP의 비를 제시하는 통계학적 방법을 이용하여

PMP를 추정하였다(KICT, 2009). Table 3은 100년 빈도 확률강우량과 PMP의 비율을 지속시간별로 나타내고 있으며, 이 값을 100년 빈도 확률강우량에 곱하여 PMP를 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강수량 편의보정

Fig. 3은 1976~2005년 기간을 기준으로 편의보정을 실시한 결과를 나타내고 있다. 대표 관측소 4개 지점에 대하여 도시화하였으며, 3시간 단위로 편의보정을 실시한 강수량을 월별 평균값으로 정리하여 분석한 결과 모든 관측소에서 결정계수 0.95 이상의 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 이는 편의보정을 적용한 지역기후변화 시나리오 모의치가 관측치의 경향성을 보다 정확하게 반영한 것을 의미한다(Park *et al.*, 2012).

3.2 강수량 변화 추이

Fig. 4는 RCP4.5 시나리오에 따른 연강수량의 추이를 보여주고 있다. Mann-Kendall 검정을 사용하여 90년(2011~2100년) 동안의 추세를 분석한 결과 95%의 유의수준에서 증가추세를 보였다. 2085s 기간에는 연강수량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 3. Correlation between Observed and Bias Corrected Precipitation for the Four Selected Weather Stations (Park *et al.*, 2012)

Table 3. PMP Ratios to Probable Rainfall of 100 Years Return Period for Different Durations (KICT, 2009)

Duration (hr) \ Return period (yr)	1	6	12	24	48	72	Average
100	1	1	1	1	1	1	1
PMP	2.05	2.43	2.38	2.74	2.36	2.36	2.39

Fig. 4. Trend in Annual Precipitation Changes Based on RCP4.5 Scenario

(a) December-February season

(b) March-May season

(c) June-August season

(d) September-November season

Fig. 5. Seasonal Changes of Annual Precipitation Based on RCP4.5 Scenario

Fig. 5는 계절 연강수량의 추세를 보여주고 있다. 가을(9~11월)의 강수량은 시간이 지남에 따라 소폭의 감소추세와 연도별로 큰 변동성을 보이고 있으며, 겨울(12~2월)의 강수량은 시간에 따라 소폭의 증가추세와 연도별로 큰 변동성을 보이고 있다. 봄(3~5월)과 여름(6~8월)의 강수량은 전반적으로 증가추세를 보이고 있으며 2085s 기간에 극치강우가 발생하는 것으로 나타났다.

3.3 IDF 곡선 개발

기상청에서 지역기후모델을 이용하여 동역학적 방법으로 산정한 12.5 km 격자의 강수량 자료를 사용하고, GEV 분포를 적용한 분위사상법을 통해 극한사상에 대한 보정효과를 최대화하여 보다 정확한 IDF 곡선을 개발하였다. 30개 대상 저수지를 대상으로 10개 지속시간(1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24시간)과 5개 재현기간(20, 50, 100, 200년, PMP)에

대한 IDF 곡선을 도시화하였다. Fig. 6~Fig. 9는 재현기간에 따라 도출한 IDF 곡선을 기간별로 보여주고 있다.

지속시간 24시간, 재현기간 200년을 기준으로 살펴보면, 과거 1990s 기간은 255.5 mm(오봉, 금오, 대성) ~ 551.0 mm(오남, 마지, 애룡), 미래 2025s 기간은 257.7 mm(달창) ~ 675.4 mm(용설), 미래 2055s 기간은 267.3 mm(오봉, 금오, 대성) ~ 741.9 mm(주남), 미래 2085s 기간은 236.9 mm(오봉, 금오, 대성) ~ 955.9 mm(덕용)의 범위를 보였다. 일반적으로 확률강우량의 최댓값은 미래로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 최솟값은 기간에 따라 변동성을 나타냈다.

Fig. 10~Fig. 13은 용당저수지(한강유역), 대성저수지(낙동강유역), 계룡저수지(금강유역), 장성저수지(영산강유역) 등 각 대권역 별로 저수지 유역을 하나씩 선정하여 결과를 나타내고 있다. 각 재현기간에 따라 구분하였으며, 과거 1기간 및 미래 3기간에 대한 IDF 곡선을 도시화하였다.

Fig. 6. IDF Curve Over 1990s

(a) 20 years (1st ~ 15th reservoirs)

(b) 20 years (16th ~ 30th reservoirs)

(c) 50 years (1st ~ 15th reservoirs)

(d) 50 years (16th ~ 30th reservoirs)

(e) 100 years (1st ~ 15th reservoirs)

(f) 100 years (16th ~ 30th reservoirs)

(g) 200 years (1st ~ 15th reservoirs)

(h) 200 years (16th ~ 30th reservoirs)

(i) PMP (1st ~ 15th reservoirs)

(j) PMP (16th ~ 30th reservoirs)

Fig. 7. IDF Curve Over 2025s

(a) 20 years (1st ~ 15th reservoirs)

(b) 20 years (16th ~ 30th reservoirs)

(c) 50 years (1st ~ 15th reservoirs)

(d) 50 years (16th ~ 30th reservoirs)

(e) 100 years (1st ~ 15th reservoirs)

(f) 100 years (16th ~ 30th reservoirs)

(g) 200 years (1st ~ 15th reservoirs)

(h) 200 years (16th ~ 30th reservoirs)

(i) PMP (1st ~ 15th reservoirs)

(j) PMP (16th ~ 30th reservoirs)

Fig. 8. IDF Curve Over 2055s

(a) 20 years (1st ~ 15th reservoirs)

(b) 20 years (16th ~ 30th reservoirs)

(c) 50 years (1st ~ 15th reservoirs)

(d) 50 years (16th ~ 30th reservoirs)

(e) 100 years (1st ~ 15th reservoirs)

(f) 100 years (16th ~ 30th reservoirs)

(g) 200 years (1st ~ 15th reservoirs)

(h) 200 years (16th ~ 30th reservoirs)

(i) PMP (1st ~ 15th reservoirs)

(j) PMP (16th ~ 30th reservoirs)

Fig. 9. IDF Curve Over 2085s

용당저수지 유역을 도시화한 Fig. 10(a)의 재현기간 20년인 경우를 살펴보면, 강우강도가 지속시간 1시간일 때 과거 1990s 기간을 기준으로 미래 2025s, 2055s 기간에 각각 -14.3%, -17.8%씩 감소하였으나, 미래 2085s 기간에 80.5%로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 지속시간이 길어짐에 따라 증가율이 점차 감소하기는 하나, 지속시간 24시간일 때에도 미래 2085s 기간에 37.2% 증가하였다. Fig. 10(d)의 재현기간 200년인 경우에도, 강우강도가 지속시간 1시간 일 때 과거 1990s를 기준으로 미래 2085s 기간에 124.7%로

크게 증가하였고, 지속시간 24시간 일 때 미래 2085s 기간에 45.7% 증가하였다.

대성저수지 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 과거 1990s 기간, 미래 2025s 기간에는 지속시간이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 미래 2055s, 2085s 기간에는 지속시간 2~3시간까지 증가한 다음 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 지역기후모델에서 3시간 단위의 미래 강수자료를 제공함에 따라 3시간미만의 확률강우량을 회귀분석을 통해 산정하는 과정에서 지속시간이 짧아질수록 강우강도가 감소하

Fig. 10. IDF Curve for the Yongdang Reservoir Watershed

Fig. 11. IDF Curve for the Daesung Reservoir Watershed

는 현상이 발생하는 개연성이 있을 것이라 사료된다. Fig. 11(a)의 재현기간 20년인 경우를 살펴보면, 강우강도가 지속시간 1시간일 때 과거 1990s 기간을 기준으로 미래 2025s 기간에는 3.5% 증가하여 비슷한 경향을 나타내었으나, 미래 2055s, 2085s 기간에 각각 -60.0%, -67.6%씩 감소하였다. 이 후 지속시간에 따라 강우강도가 점차 변화하여 지속시간 4시간일 때는 과거 1990s 기간을 기준으로 미래 2025s 기간은 42.0% 증가하고, 미래 2055s, 2085s 기간은 각각 4.2% 증가, -3.4% 감소하여 현재와 비슷한 수준을 나타내었다.

Fig. 11(d)의 재현기간 200년인 경우에도, 강우강도가 지속시간 1시간 일 때 가장 큰 격차를 나타내었다. 과거 1990s를 기준으로 미래 2025s 기간에 35.8%로 증가하였고, 미래 2055s, 2085s 기간에 각각 -37.0%, -48.5%씩 감소하였다.

계룡저수지 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 지속시간 1시간 일 때 미래 2085s 기간을 제외하고는 재현기간에 상관없이 전반적으로 비슷한 강우강도를 보여주고 있다. Fig. 12(a)의 재현기간 20년인 경우를 살펴보면, 강우강도가 지속시간 1시간일 때 과거 1990s 기간을 기준으로 미래 2085s 기간에

Fig. 12. IDF Curve for the Gyeryong Reservoir Watershed

Fig. 13. IDF Curve for the Jangsung Reservoir Watershed

108.0%로 크게 증가하였고, 지속시간 24시간일 때는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간에 각각 18.3%, 19.2%, 66.9%씩 증가하였다. Fig. 12(d)의 재현기간 200년인 경우에도, 강우강도가 지속시간 1시간 일 때 미래 2085s 기간에 170.1%로 크게 증가하였고, 지속시간 24시간일 때는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간에 각각 23.1%, 25.1%, 81.0%씩 증가하였다.

장성저수지 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 지속시간 1시간 일 때를 제외하면 강우강도가 미래 기간 동안 전반적으로 증

가하고 있다. Fig. 13(a)의 재현기간 20년인 경우를 살펴보면, 강우강도가 지속시간 1시간일 때 과거 1990s 기간을 기준으로 미래 2025s 기간에 -23.6%로 감소하였고, 미래 2055s, 2085s 기간에는 각각 10.2%, 118.9%로 미래 2085s 기간에 크게 증가하였다. Fig. 13(d)의 재현기간 200년인 경우에도, 강우강도가 지속시간 1시간 일 때 미래 2025s 기간에 -2.4%로 감소하였고, 미래 2055s, 2085s 기간에 각각 38.3%, 158.0%로 미래 2085s 기간에 크게 증가하였다.

본 연구에서 개발한 IDF 곡선을 2011년도에 국토교통부에

* MOLIT: Ministry of Land, Infrastructure and Transport

Fig. 14. Historical IDF Curve of This Study and MOLIT

서 산정한 IDF 곡선과 비교하였다. 본 연구에서 선정한 저수지 인근에 위치한 기상관측소 지점의 확률강우량 자료를 사용하여 저수지별 IDF 곡선을 산정하였다. Fig. 14은 용당저수지, 대성저수지, 계룡저수지, 장성저수지에 대해 IDF 곡선을 비교한 결과를 보여주고 있다. 용당저수지는 재현기간 20년, 200년에서 지속시간 별로 9%이하의 차이를, 대성저수지, 계룡저수지는 재현기간 20년, 200년에서 지속시간 별로 4% 이하의 차이를, 장성저수지는 재현기간 20년, 200년에서 지속시간 별로 6~18% 차이를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 편의보정을 적용한 RCP4.5 시나리오에 따른 IDF 곡선을 우리나라 30개 저수지를 대상으로 분석하였다. 과거 및 미래 강수량 자료를 구축한 다음 분위사상법을 이용하여 미래 강수량 자료의 편의를 보정하였다. 분위사상법을 적용하기 위한 확률분포형으로는 GEV 분포를 선정하였고, 과거 기간 동안에 대해 편의보정을 수행하여 최적화한 매개변수를 미래 지역기후변화 시나리오에 적용하였다. 편의를 보정한 강수량 자료를 이용하여 기상관측소별 확률강우량을 산정한 다음, Thiessen 계수를 이용하여 과거 1기간 및 미래 3기간에 대한 저수지별 IDF 곡선을 도출하였다.

각 대권역 별로 선정한 저수지 유역에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

용당저수지(한강유역) 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 강우강도가 과거 1990s 기간을 기준으로 미래 2025s, 2055s 기간까지는 10% 전후의 변화율을 보이나, 미래 2085s 기간에 들어서는 전반적으로 크게 증가하였으며 지속시간이 짧아짐에 따라 증가율이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

대성저수지(낙동강유역) 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 전반적으로 미래 2025s 기간의 강우강도가 높게 산정되었다. 지속시간 1시간일 때 과거 1990s, 미래 2025s 기간의 강우강도가 높게 나타난 후, 지속시간이 길어짐에 따라 기간별 강우강도의 차이가 점차 줄어들어 지속시간 24시간일 때에는 미래 2025s 기간을 제외하고는 대체로 10% 미만의 변화율을 보였다.

계룡저수지(금강유역) 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 20년 빈도 지속시간 1시간을 제외하고는 과거 1990s 기간에 비해 미래 기간의 강우강도가 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 지속시간 1시간일 때 미래 2085s 기간의 강우강도가 확연하게 증가하였고 지속시간이 길어짐에도 높은 증가율을 유지하였다.

장성저수지(영산강유역) 유역의 재현기간별 IDF 곡선은 지속시간 1시간을 제외하고는 과거 1990s 기간에 비해 미래 기간의 강우강도가 전반적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 미래 2025s 기간에는 증가율이 미미하나, 미래 2055s 기간을 시점으로 미래 2085s 기간에 대폭 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 지속시간 6시간일 때에 가장 큰 증가율을 보여주었으며 이후로 증가율이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

한강유역, 금강유역, 영산강유역은 전반적으로 미래 2085s

기간의 강우강도가 현재 1990s 기간에 비해 크게 증가하여 저수지 설계 당시의 기준을 크게 상회하는 것으로 나타났으며, 향후 치수 안전 계획 수립에 따른 수공구조물의 전반적인 검토가 필요할 것으로 전망된다. 낙동강유역은 미래 2025s 기간의 강우강도가 현재 1990s 기간에 비해 크게 증가하는 것으로 분석되어 물넘이 보강, 비상대처계획 등의 신속한 치수계획 재수립이 필요할 것이다.

본 연구에서는 기후변화로 인한 확률강우량의 변화를 검토하고, 이에 따른 IDF 곡선을 작성하였다. 본 연구에서 도출한 결과는 대표적인 농업용 수리시설물인 저수지의 치수 안정성 검토를 위해 200년 빈도 홍수량과 PMF를 모의하는데 사용하여 설계당시의 저수지 설계홍수량과 비교를 통해 안정성 증진의 척도로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Hailegeorgis, T.T., Thorolfsson, S.T. and Alfredsen, K. (2013) Regional Frequency Analysis of Extreme Precipitation with Consideration of Uncertainties to Update IDF Curves for the City of Trondheim. *Journal of Hydrology*, Vol. 498, pp. 305-318.
- Hashino, T., Bradley, A.A., and Schwartz, S.S. (2007) Evaluation of Bias-Correction Methods for Ensemble Streamflow Volume Forecasts. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 11, pp. 939-950.
- Jeong, I.Y., Kim, H.T., Kim, S.Y. and Kim, S.W. (2004) Agricultural Facilities Maintenance. *Magazine of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 6-11.
- Kim, B.S., Kim, B.K., Kyung, M.S. and Kim, H.S. (2008) Impact Assessment of Climate Change on Extreme Rainfall and I-D-F Analysis. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 41, No. 4, pp. 379-394.
- Kim, B.S. and Ha, S.R. (2013) The Impact Assessment of Climate Change on Design Flood in Mihochen basin based on the Representative Concentration Pathway Climate Change Scenario. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 15, No. 1, pp. 105-114.
- Kim, Y.H., Yeo, C.G., Seo, G.S. and Song, J.W. (2011) Estimation of Regional Probable Rainfall Based on Climate Change Scenarios. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, pp. 29-35.
- Korea Institute of Construction Technology (2009) Analysis of the trend of extreme flood events.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D. and Talbot, G. (2007) Assessment of Future Change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves for Southern Quebec Using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, Vol. 347, pp. 197-210.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2011) A study on the appropriate scale and requirement of the agricultural infrastructure development and improvement project.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs and Korea Rural

- Community Corporation (2012) Statistical yearbook of land and water development for agriculture.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011) A study of probable rainfall of improvement and compliment.
- Mirhosseini, G., Srivastava, P. and Stefanova, L. (2012) The Impact of Climate Change on Rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves in Alabama. *Journal of Regional Environmental Change*.
- Oh, T.S., Kim, M.S., Moon, Y.I. and Ahn, J.H. (2009) An Analysis of the Characteristics in Design Rainfall According to the Data Periods. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 4, pp. 115-127.
- Park, J., Kang, M.S. and Song, I. (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*, Vol. 54, No. 6, pp. 133-142.
- Seo, L., Jeon, M.H., Kim, T.W. and Kim, S.D. (2012) Ensemble Prediction of Future Design Rainfalls Considering Climate Change. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 159-171.
- Wang, D., Hagen, S.C. and Alizad, K. (2013) Climate Change Impact and Uncertainty Analysis of Extreme Rainfall Events in the Apalachicola River Basin, Florida. *Journal of Hydrology*, Vol. 480, pp. 125-135.
- Willems, P. (2013) Revision of Urban Drainage Design Rules after Assessment of Climate Change Impacts on Precipitation Extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*, Vol. 496, pp. 166-177.
-
- © Received September 12, 2013
 © Revised September 13, 2013
 © Accepted November 5, 2013