다중 RCMs를 이용한 미래 IDF곡선의 불확실성

Uncertainty of Future Intensity-Duration-Frequency Curves Using Multi-Regional Climate Models

김경민* · 이정훈** · 금종호*** · 박무중**** · 김상단*****

Kim, Kyungmin*, Lee, Jeonghoon**, Keum, Jongho***, Park, Moojong****, and Kim, Sangdan*****

Abstract

Climate change has increased the size and frequency of extreme rainfall events and has caused extensive damage. Accordingly, this phenomenon has become an important topic worldwide. Various analyses of future intensity-duration-frequency (IDF) curves have been applied in climate change scenarios. However, future IDF curves considering climate change have shown many differences depending on the particular future scenario applied. Therefore, uncertainty should be considered when deriving future IDF curves. The present study is a follow-up to Kim et al. (2018) and uses various future IDF curves to estimate the percentage change and uncertainty of the future depth of design rainfall. The observed hourly rainfall data from 57 sites operated by the Korea Meteorological Administration were used. The future climate change data were obtained through a combination of two Representative Concentration Pathways (RCPs), two General Circulation Models (GCMs), and four Regional Climate Models (RCMs). Quantile mapping was applied to correct the bias. The future ensemble of the IDF curve was derived by using the corrected future climate change data, and the rate of change and its coefficient of variation were then estimated by using the observed data and the future ensemble.

Key words : Climate Change, IDF Curves, Ensemble, RCM Uncertainty

요 지

기후변화는 극한강우의 크기와 빈도를 증가시키고, 각지에서 큰 피해를 입히고 있다. 이에 따라 기후변화는 세계에서 중요한 주제가 되었고, 기후변화 시나리오가 적용된 미래 IDF (Intensity-Duration-Frequency) 곡선에 대한 분석 또한 이미 다양하게 시행되고 있다. 하지만 기후변화를 고려한 미래 IDF곡선은 각각의 시나리오에 따라 많은 차이를 보인다. 따라서 미래 IDF곡선을 유도하기 위하여 불확실성은 필수적으로 고려되어야 한다. 본 연구는 Kim et al. (2018)의 후속연구로서 다양한 미래 IDF곡선을 이용하여 미래 확률강우량의 변화백분율 및 불확실성을 산정하였다. 관측자료는 기상청 관할 57개 기상 관측소의 강우자료를 이용하였다. 미래 기후변화자료는 2개 RCPs (Representative-Concentration-Pathways), 2개 GCMs (General-Circulation-Models), 4개 RCMs (Regional-Climate-Models)의 조합으로부터 획득되었으며, Quantile-Mapping을 이용하여 편의보정 하였다. 보정된 미래 기후변화자료를 이용하여 IDF곡선의 미래 앙상블을 도출한 다음, 관측자료와 미래 앙상블을 이용하여 변화율과 변화율의 변동계수를 추정하였다.

핵심용어 : 기후변화, IDF곡선, 앙상블, 지역기후모델, 불확실성

*정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 석사과정(E-mail: kmin1392@naver.com)

Member, Master Course Student, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 환경연구소 전임연구원

Member, Researcher, Institute of Environmental Research, Pukyong National University

***Research Professor, Department of Civil Engineering, McMaster University

****정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

*****교신저자, 정회원, 부경대학교 환경공학과 교수(Tel: +82-51-629-6529, Fax: +82-51-629-6523, E-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

1. 서론

기후변화는 극한강우의 빈도 및 강도를 모두 변화시킬 가능성을 가지고 있다(Bates et al., 2015). 많은 불확실성이 남아 있으나, 중위도 지역의 경우에는 많은 지역에서 극한강우의 강도가 증가할 것이라는 것이라 전망되고 있다(Meehl et al., 2007). 또한, 세계 각지에서 극한강우에 의한 사회경제적 피해는 지속적으로 발생하고 있는 추세이다(Coles et al., 2003; Goswami et al., 2006). 2017년 8월경 미국 남부를 강타한 허리케인 하비(Harvey)는 사망자만 70명 이상, 재산 피해는 100조원을 넘어가는 기록적인 피해를 일으켰다. 당시 허리케인에 의해 휴스턴에 기록된 강수량은 1,250 mm로 미국에서 역대 최대치로 기록되었던 강수량인 1,220 mm를 넘어서는 강수량이다. Lawrence Berkeley Laboratory에서는 기후변화의 영향으로 하비에 따른 강수량을 최소 19 %에서 38 %까지 끌어올렸다고 추산하였다. 곧이어 하비의 여파가 가기도 전에, 9월 미국 동남부에 허리케인 어마(Irma)가 상륙하였다. 그리고 2018년 4월경 하와이에 24시간동안 700 mm 이상의 강수량에 의한 대홍수가 발생하였다. 이와 같이 기후변화와 관련하여 실제적인 극한강우재해가 늘어남에 따라 미래의 극한강수량을 예측하고 분석하는 것에 대한 중요성이 증가하고 있다(Guhathakurta et al., 2011). 그러나 기후변화 시나리오를 적용하기 위해 사용되는 모델의 자료들은 추정된 값으로 상당한 불확실성이 내재되어 있다(Johnson et al., 2016). 최근에 수문분야 외에도 데이터 관련하여 불확실성 분석 및 정량화 기법에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으며(Challinor et al., 2014; Karmalkar, 2018), 미래 IDF곡선에 대한 불확실성의 분석도 진행되고 있다. IDF곡선은 GCM, RCM, RCP, 편의보정법 및 지속시간별, 재현기간별, 지역별 다양한 변수에 의해 좌우되기 때문에, 불확실성을 정량화하기는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 기후변화 시나리오에 내재된 불확실성의 범위를 수치로 확인할 필요가 있으며, 이러한 정량적인 정보는 기후변화 적응정책 수립 시에 유용한 자료로 활용될 수 있다.

외국의 경우, Hailegeorgis et al. (2013)는 지역빈도해석을 통하여 불확실성의 범위를 고려한 IDF곡선을 제시하였으며, Chandra et al. (2015)은 베이지안(bayesian) 방법을 이용하여 미래 IDF곡선의 불확실성을 분석하였다. Shrestha et al. (2017)는 9개의 GCM 자료를 이용하여 현재대비 미래 확률강우량의 증가폭을 산정한 후, 증가폭을 통하여 불확실성을 정량화하였다. 또한, Hosseinzadehtalei et al. (2017)는 GCM, GCM 초기조건, RCP를 포함하여 140개의 CMIP5 GCMs의 대규모 미래 IDF곡선 앙상블에서 얻은 결과를 이용하여 불확실성을 정량화 하였으며, 추가적으로 GCM, GCM 초기조건, RCP가 변화함에 따라 미래 IDF곡선의 불확실성 민감도 분석까지 수행하였다.

우리나라의 경우, Seo et al. (2012)는 확률분포함수의 모수와 GCMs를 통해 모의된 강수량 자료들의 관계를 이용하여 앙상블 확률강우량을 산정하는 방법을 제안하였고, GCMs 및 온실가스 배출시나리오에 따른 확률강우량의 불확실성 분석을 수행하였다. Kim et al. (2016)은 조건부 Copula 함수를 활용하여 지속시간별 극치시간단위 강우상세화 모형을 개발하였으며, 베이지안 방법과 연계하여 자료 및 모형 자체의 불확실성을 살펴보기도 하였다. Choi et al. (2016)은 기후변화의 영향으로 인한 극한강우의 변동을 지역적으로 살펴보기 위해 scale-invariance 기법을 이용하여 미래 IDF곡선을 작성한 후, 미래 자료의 추세에 따른 불확실성을 미래 IDF 곡선 추정에 연계함으로써 미래 IDF곡선 전망의 불확실성을 살펴보고자 하였다. 미래 IDF곡선에 대한 연구는 국내외로 다양하게 진행되었으나, 외국과 비교하여 우리나라는 미래 IDF곡선에 대한 불확실성 분석은 아직까지 많은 연구가 진행되지 않았다.

이에 본 연구에서는 현재까지 우리나라에서 적용 가능한 다양한 RCMs 미래자료를 이용하여 미래 IDF곡선의 불확실성을 분석해보고자 하였다. 미래 강우자료는 MPI_ESM_LR과 HadGEM2-AO 2개의 GCMs를 각각 MM5, WRF, RegCM4, RSM 4개의 RCMs와 조합하여 시간해상도 3-hour, 공간해상도 12.5-km로 역학적 다운스케일한 자료가 사용되었으며, 미래 기후변화 시나리오는 RCP 4.5와 8.5가 적용되었다. 따라서 기상청 관측지점별로 16개의 미래 기후변화 앙상블이 불확실성 분석을 위해 사용되었다. 또한 분석된 기상청 관측소는 57개 지점이 적용되었는데, 가까운 지점들 사이의 미래 변화율이 서로 큰 차이를 보인다고 볼 수 없으므로, 57개 지점을 6개 지역으로 분할하여 분석을 수행하였다. 도출된 미래 IDF곡선의 앙상블을 평균으로부터 현재 대비 변화백분율을 추정하였으며, 미래 IDF 곡선 앙상블별 변화백분율의 변동계수를 불확실성의 척도로 규정하였다. 미래 IDF 곡선의 앙상블 평균과 불확실성을 지속시간별로, 재현기간별로, 지역별로 정량화하고자 하였으며, 적용된 4개의 RCMs가 개별적으로 갖는 불확실성도 각각 살펴보고자 하였다.

2. 자료정보 및 보정

2.1 관측자료

본 연구에서는 기상청에 운영하고 있는 ASOS 57개 지점의 시간단위 강우관측자료를 1981년부터 2010년까지 수집하였다(<http://data.kma.go.kr>). 지점의 선정기준은 자료측정 개시일이 1981년 1월 1일 이전인 지점이며, 2010년 12월 31일까지 중간에 누락된 자료가 있는 지점은 제외하였다. 수집된 강우관측자료를 이용하여 57개 지점에 지속시간별로 총 30년간의 연 최대치 강우강도를 추출하였다. Fig. 1에 기상청 관할 57개 지점을 나타내었다.

Fig. 1. Location of Selected Weather Station

2.2 기후변화 시나리오

GCMs는 낮은 해상도와 상대적으로 간단한 물리과정으로 우리나라의 미래 극한 강우를 전망하기에는 많은 한계점이 존재한다. 따라서 GCMs의 한계점을 극복하기 위해 GCM의 결과를 우리나라 지역을 대상으로 역학적으로 상세화한 RCMs으로부터의 결과를 이용하여 미래 극한 강우를 살펴볼게 된다. 본 연구에서는 한반도를 포함한 동아시아 지역을 12.5-km의 수평해상도로 상세화한 한반도 상세 기후변화 시나리오 자료(KOR-11)를 이용하였다(Fig. 2). KOR-11에서는 RCP 4.5과 8.5 기후변화 시나리오 하에서 HadGEM2-AO (Hadley Center Global Environmental Model version 2 coupled with the Atmosphere-Ocean, 이하 H2)과 MPI-ESM-LR (Max Plank Institute Earth System Model-Low Resolution, 이하 ML) 2개의 GCMs를 강제장으로 하여, MM5, WRF, RegCM4, RSM 4개의 RCMs를 이용하여 역학적으로 상세화한 총 16개의 기후변화 시나리오 자료가 생산되고 있다. 본 연구에서

Fig. 2. High Resolution Climate Change Scenario Area on the Korea Peninsula

사용된 미래 기후자료에 대한 정보를 Table 1에 정리하였다.

2.3 Quantile Mapping

GCMs에 비하여 RCMs가 지역의 기후 특성을 더 실제와 가깝게 모의하더라도, 특히 강수량과 관련하여 여전히 편이가 존재한다(Boé et al., 2007). 따라서 방재 및 수자원, 환경 분야의 기후변화 적응정책에 활용하기 위해서는 RCMs의 결과들은 항상 편의보정과정을 수행하여야 한다. 다양한 편의보정 방법이 개발되어 왔으며, 대표적으로는 Quantile-Mapping (QM), Quantile-Delta-Mapping (QDM), Detreted-Quantile-Mapping (DQM), Change Factor (CF) 등이 있다. 본 연구에서는 많은 연구에서 활용되고 있으며, 쉽고 간단하게 적용이 가능한 QM을 이용하였다. QM을 이용한 편의보정은 Eqs. (1)과 (2)와 같이 수행되며, 이를 도해적으로 나타내면 Fig. 3과 같다.

$$X'_p = F_o^{-1}(F_p(X_p)) \quad (1)$$

$$X'_f = F_o^{-1}(F_p(X_f)) \quad (2)$$

Table 1. Information of Future Climate Data

GCMs	RCMs	Temporal Scale	Temporal Resolution	Spatial Resolution	Scenarios
MPI-ESM-LR (ML)	MM5	Present: 1981~2010 Future: 2021~2050	3-hr (365 Day)	12.5-km	RCP 4.5 RCP 8.5
	WRF				
	RegCM4				
	RSM				
HadGEM2-AO (H2)	MM5		3-hr (360 Day)		
	WRF				
	RegCM4				
	RSM

Fig. 3. Quantile Mapping

Eqs. (1)과 (2)에서 X_p 은 현재기후 모의자료, X'_p 은 보정된 현재기후 모의자료, X_f 은 미래기후 모의자료, X'_f 은 보정된 미래기후 모의자료이다. F_p 은 현재기후 모의자료의 누가확률분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)이며 F_o^{-1} 은 관측자료의 누가확률분포함수의 역함수(Inverse Cumulative Distribution Function, ICDF)이다. 먼저, 현재기후 모의자료를 현재기후 모의자료의 CDF에 대입하여 비초과확률을 구한 뒤, 구해진 비초과확률을 관측자료의 ICDF에 대입하여 보정된 현재기후 모의자료의 값을 구한다. 그 다음, 미래기후 모의자료도 동일한 절차를 이용하여 편의를 보정한다.

QM을 위한 확률분포함수는 Generalized Extreme Value Distribution (GEV)을 사용하였으며, 매개변수 추정에는 L-moment

법을 적용하였다. 그러나 GEV의 경우 매개변수에 따른 제한된 범위를 가지고 있다. 따라서, GEV가 적합하지 않은 경우 Gumbel을 적용하였으며, Gumbel을 적용한 이유는 ‘설계홍수량 산정요령’(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012)에서 Gumbel 분포를 채택하고 있기 때문이다(Choi et al., 2016). 연구대상 지점인 57개 지점 중 34개 지점은 GEV가 적용되었고, 나머지 23개 지점은 Gumbel을 적용하였다. Fig. 4는 편의보정 되기 전 부산지점 연 최대 강우강도의 빈도 분포를 나타내 그림이며, Fig. 5는 편의보정이 시행된 후의 그림이다. Table 2에 부산지점에서 연 최대 강우강도 시계열의 편의보정 전후의 평균값을 범위와 함께 나타내었다.

Fig. 4. Frequency Distribution of Annual-Maximum-Rainfall-Intensity Before Bias-Correction at Busan Station

Fig. 5. Frequency Distribution of Annual-Maximum-Rainfall-Intensity After Bias-correction at Busan Station

Table 2. Observed Mean and Multi-Model Mean by Duration at Busan Station

Duration	Observed Mean (mm/hr)	Multi-Model Mean (Before Bias-Correction) (mm/hr)	Multi-Model Mean (After Bias-correction) (mm/hr)
3-hr	24.9	21.2 (15.2-34.2, 29)	25.0 (24.8-25.3, 0.5)
6-hr	18.5	15.8 (12.1-25.0, 12.9)	18.6 (18.5-18.7, 0.2)
12-hr	11.9	10.4 (8.2-15.0, 6.8)	11.9 (11.9-12.0, 0.1)
24-hr	7.3	6.4 (5.0-8.6, 2.6)	7.3 (7.3-7.4, 0.1)

Figs. 4와 5에서 편의보정 전후의 빈도분포를 비교해보았을 때, 분산되어 있던 모델별 빈도분포는 관측값의 빈도분포와 유사한 패턴으로 편의가 보정되어졌음을 확인할 수 있다. Table 2에서 지속시간별 연 최대 강우강도 관측값의 평균과 편의보정 된 후의 현재자료의 평균값은 모든 지속시간에서 0.1 mm/hr 이하의 오차를 보이고 있으며, 모델별 평균값의 오차도 1 mm/hr이하로 나타났다.

3. 미래 IDF곡선의 불확실성

3.1 미래 IDF곡선

최근 기상청에서는 일-단위 강우 시계열이 아닌 3-hour 해상도의 미래 강우 시계열을 생산하고 있다. 이에 따라 지속시간 3-, 6-, 9-, 12-, 15-, 18-, 21-, 24-hour에 대해 편의보정된 연 최대 강우강도 시계열을 이용하여 미래 IDF곡선을

유도하였다. 3-hour 해상도를 가지는 강우 시계열의 미래 IDF곡선의 적용성 및 유도방법은 Kim et al. (2018)에 자세히 기술되어 있으며, 적용된 재현기간은 10-, 30-, 50-, 100-year이다. 미래 IDF곡선을 유도하기 위한 확률분포함수는 우선 GEV를 적용하기 위해 시도하였으나 GEV의 적용이 가능한 지점은 없었던 관계로, 모든 지점에 Gumbel을 일괄적으로 적용하였다. Fig. 6에 Observed, RCP 4.5-ML-MM5, RCP 4.5-ML-WRF에 의한 지속시간 3-hour 및 재현기간 30-year에 대응하는 현재 및 미래의 확률강우강도를 도시하였다. Fig. 6에서 3개의 그림을 모두 비교하여 살펴보면, 자료의 기간이나 모델에 관계없이 경남과 경기지역은 확률강우강도가 크게 나타났으며, 상대적으로 경북지역은 확률강우강도가 낮게 나타났다. MM5는 경남지역에서 확률강우강도는 크게 증가하였으며, WRF는 일부 경북지역에서 감소하였으나, 경기지역에서 크게 증가함을 살펴 볼 수 있다. Fig. 6에서 살펴볼

수 있듯이, 동일한 기후변화 시나리오(Fig. 6의 경우에는 RCP 4.5)와 동일한 GCM (Fig. 6의 경우에는 MPI-ESM-LR)이 적용되더라도, 적용된 RCM에 따라 미래 전망결과에 유의한 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 6의 결과만 보더라도 다양한 기후모델의 결과로부터 원하는 수문량의 양상불을 도출하고, 그에 대한 양상불 평균 및 양상불 평균에 대한 불확실성의 범위를 살펴보는 것이 필요함을 알 수 있다.

3.2 변화백분율 및 미래 양상불 평균

본 연구에서 특정 지점에서 특정 지속시간 d -hour 및 특정 재현기간 T -year에 대한 미래 확률강우강도 양상불은 총 16개(2개 RCPs, 2개 GCMs, 4개 RCMs)가 생산된다. 이 들 중 특정 RCP 시나리오와 특정 GCM에 대한 4개 RCMs로부터의 양상불에 대한 중간 값을 RCP-GCM 조합에 따른 미래 양상불 평균(Future Ensemble Average, FEV)로 정의하였으며, 이를 도식적으로 표현하면 Fig. 7과 같다.

변화백분율 CP 은 Eq. (3)과 같이 정의하였으며, 변화백분율은 지점별, 지속시간별, 재현기간별로 계산된다.

$$CP_d^T(\%) = \frac{FEA_d^T}{obs_d^T} \times 100 \quad (3)$$

여기서, FEA_d^T 은 지속시간 d -hour 및 재현기간 T -year에서 RCP-GCM 조합별 미래 확률강우강도 양상불의 중간 값(median)으로 양상불 평균을 의미하며, obs_d^T 은 이에 대응하는 관측자료로부터 도출된 확률강우강도이다. 이와 같이 산정된 CP 은 100 %를 기준으로 관측자료의 확률강우강도에 대한 변화백분율을 나타내며, 지점별 지속시간별 재현기간별로 계산된다. Fig. 8에 RCP 8.5-ML 조합과 RCP 8.5-H2 조합에 의해 전망된 지속시간 6-hour 및 재현기간 30-year의 미래 확률강우강도 양상불 평균의 변화백분율을 도시하였다. Fig. 8에 도시하였듯이, ML은 호남지역 및 일부 강원, 경북지역에서 확률강우강도가 크게 증가하였으며, H2는 경기지역과 일부 충청지역에서 감소하였으나, 경북지역에서 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이와 같이 동일한 RCP와 RCM를 적용하더라도, GCM에 따라 미래 확률강우강도 양상불 평균의 변화백분율은 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 6. Design Rainfall Intensity with Duration 3-hour and Return Period 30-year

Fig. 7. Future Ensemble Average (FEA) and Change Percent (CP)

Fig. 8. Change Percent of Design Rainfall Depth with Duration 6-hour and Return Period 30-year

3.3 지역별 미래 IDF곡선의 변화백분율 및 불확실성

본 절에서는 RCP-GCM 조합별 미래 양상을 평균의 변화 백분율을 이용하여 지역별 미래 IDF곡선의 변화정도와 그에 포함된 불확실성을 살펴보고자 하였다. 이 때, 현재와 비교하여 미래 IDF곡선의 변화백분율이 인근 지점들 사이에서 큰 차이를 보이는 것은 합리적이지 못하다고 판단하였기 때문에, 지역적인 특성을 반영하여 행정구역을 기준으로 우리나라를 경기권(6개 지점), 충청권(9개 지점), 호남권(14개 지점), 강원권(7개 지점), 경북권(11개 지점), 경남권(10개 지점) 등 6개 지역으로 분할하여 CP의 평균적인 거동 및 불확실성을 살펴보고자 하였다(Fig. 1 참조). 즉, 경기지역의 경우 RCP-GCM 조합이 4개가 있으며, 6개의 지점으로 구성되므로 총 24개의 CP를 이용하여 분석에 적용하였다. 타 지역의 경우에는 RCP-GCM 조합의 개수는 동일하나, 포함된 지점 수에서 차이를 보이기 때문에 분석에 이용된 CP의 개수는 지역별로 다르게 된다. 상기 구분된 지역별 CP를 평균하여 CP_{μ} 로 나타내었으며, 이는 관측자료의 확률강우강도에 대한 지역의 미래 확률강우강도의 평균적인 변화

백분율을 의미한다. 그리고 이러한 지역별 CP의 변동계수를 계산하여 CP_{CV} 로 나타내었으며, 이로부터 지역의 미래 확률강우강도 전망의 불확실성 척도로 삼고자 하였다.

지역별로 미래 IDF곡선의 변화백분율 및 불확실성을 살펴보기 위해 재현기간 30-year을 기준으로 CP_{μ} 와 CP_{CV} 을 지속시간별로 모든 지역에 대해 도시하였다(Fig. 9). 확률강우강도는 경기지역을 제외한 모든 지역에서 모든 지속시간에서 증가하는 것으로 나타났다. 경기지역의 경우에는 지속시간에 따라 차이는 있지만, 현재와 유사하거나 약간 감소하는 경향을 보이는 있으나 짧은 지속시간의 경우에는 증가하고 있는 것을 살펴볼 수 있다. Fig. 9(a)로부터 우리나라 전체적으로 볼 때 미래 확률강우강도는 현재보다 증가할 가능성이 대체로 높을 것으로 전망하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 또한 경기-강원-충청지역보다는 경남-경북-호남지역의 확률강우강도의 변화백분율이 더 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 변화백분율의 불확실성은 지역별로 큰 차이 없이 비슷한 경향을 보이고 있으며, 대략적으로 10 % 내외의 불확실성을 가지고 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 9. Change Percent and Its Uncertainty (Return Period: 30-year)

다만, 짧은 지속시간에서의 불확실성이 매우 크게 나타나고 있는데, 이는 미래 강우자료가 3-hour 단위로 생산된다는 것에 기인하는 것으로 기후변화 시나리오 및 기후모델로 인한 불확실성에 덧붙여서 지속시간 3-hour 미만의 지속시간에 대한 확률강우강도 추정 시의 불확실성이 추가된 결과로 판단된다.

지속시간별로 미래 IDF곡선의 변화백분율 및 불확실성은 변화백분율의 빈도분포로 보다 명확하게 시각화할 수 있다. Fig. 10에 재현기간 30-year을 기준으로 지역별 CP의 빈도를 지속시간 1-, 3-, 6-, 12-, 24-hour에 대해 도시하였다. 지역에 상관없이 지속시간 1-hour 및 2-hour에서 불확실성이 크게 나타나고 있으며(Fig. 9), 나머지 지속시간에서는 지역별로 편차가 있음을 살펴볼 수 있다.

재현기간별로 미래 IDF곡선의 변화백분율 및 불확실성을 살펴보기에 위해 지속시간 6-hour을 기준으로 지역별 CP의 빈도를 재현기간 10-, 30-, 50-, 100-year에 대해 도시하였다(Fig. 11). Fig. 11에서 알 수 있듯이, 모든 지역에서 변화백분율은 재현기간이 증가할수록 변화백분율의 불확실성은 증가하고 있다. 즉, 미래의 확률강우량을 전망할 때 낮은 재현기간의 확률강우량보다는 높은 재현기간의 확률강우량이 더 많은 불확실성을 가지고 있음을 살펴볼 수 있다.

마지막으로 개별적인 RCM 각각이 가지고 있는 불확실성의 정도를 살펴보고자 하였다. 이를 위하여 RCP-GCM 조합별 4개 RCMs를 이용하여 미래 앙상블 평균을 구하는 대신에, RCP-GCM 조합에 특정 RCM(예를 들어, RegCM4)을 하나씩 적용하여 미래 IDF곡선을 추정하였다. 즉, 특정 RCM

Fig. 10. Change Percent and Its Uncertainty for Duration (Return Period: 30-year)

Fig. 11. Change Percent and Its Uncertainty for Return Period (Duration: 6-hour)

하나에 다양한 RCP-GCM 조합을 결합하여 다양한 미래 IDF곡선 앙상블을 구성함으로써, 개별적인 RCM이 가지고 있는 불확실성을 도출하고자 하였다.

Fig. 12는 지속시간 6-hour와 재현기간 30-year을 기준으로 RCM별로 도출된 미래 IDF곡선의 변화백분율의 빈도를 지역으로 구분하여 보여주고 있다. Fig. 12에서 All RCMs는 기존 분석에서와 같이 4개 RCMs를 모두 적용한 결과이며, MM5, WRF, RegCM4, RSM는 각각 해당 RCM만을 적용하였을 때의 결과이다. 하나의 RCM을 사용하는 것보다 다중 RCMs를 사용하였을 때, 불확실성이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 RCM별 불확실성은 지역에 따라 다르게 나타나고 있으나, 대체적으로 RSM이 높은 불확실성을 나타내고 있으며, MM5와 WRF가 상대적으로 낮은 불확실성을

나타내고 있음을 살펴볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지역구분을 통하여 RCM에 따른 미래 IDF곡선의 변화백분율 및 불확실성을 산정하였다. 이를 위하여 RCP 2종, GCM 2종, RCM 4종의 조합으로부터 도출된 미래 자료의 기상청 ASOS 57개 지점에 해당되는 자료를 추출하였으며, 추출된 자료는 Quantile Mapping을 이용하여 편의보정을 실시하였다. 모든 지점에서 관측자료의 연 최대 강우강도와 편의보정된 현재자료의 연 최대 강우강도는 1 % 이하의 오차로 편의보정 되었다. 보정된 57개 지점의 연 최대 강우강도를 이용하여 Kim et al. (2018)에서 개발된

Fig. 12. Change Percent and Its Uncertainty for RCMs (Duration: 6-hour & Return Period: 30-year)

방법을 이용하여 미래 IDF곡선을 유도하였다. 도출된 미래 IDF 곡선들을 이용하여 지역별 지속시간별 재현기간별 다양한 미래 양상별 평균을 도출하여, 사용된 미래 자료의 평균적인 변화백분율 및 그 불확실성을 추정하였다.

미래 IDF곡선을 추정한 결과, 지속시간 및 재현기간에 상관없이 경기지역을 제외한 모든 지역에서 미래 확률강우량은 평균 5 - 15 % 내외로 증가할 것으로 전망되었으며, 경기지역 또한 지속시간별로 현재보다 약간 감소하기도 하였으나, 그 감소율은 매우 작을 것으로 분석되었다.

지역별로 양상별 평균 미래 IDF곡선의 변화백분율은 10

% 이상의 차이가 있는 것으로 전망됨에 따라 지역별로 방재대책 수립 시에 기후변화를 고려하려는 의도에서 현재의 확률강우량에 할증을 부여하는 정도에 차등을 줄 필요가 있을 것으로 판단되었다. 다만, 불확실성의 경우에는 지속시간 3-hour 미만의 경우 미래 자료의 시간해상도가 더 정밀하게 되지 않는 한(본 연구의 경우 3-hour) 큰 불확실성을 감수해야할 것으로 분석되었으며, 지속시간 3-hour 이상의 경우에는 지역별 차이 없이 대체로 10 % 내외의 불확실성이 있는 것을 살펴볼 수 있었다.

지속시간별 불확실성은 미래 기후자료의 시간해상도의

한계로 인하여 지속시간 3-hour 미만에서 크게 나타났으며, 3-hour 이상의 지속시간에서는 지속시간에 따른 불확실성의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 재현기간별 불확실성은 재현기간이 증가함에 따라 같이 증가하였으나, 그 정도는 다른 요소(지속시간, RCM)에 비해 적게 나타났다. 또한, 단일 RCM을 적용하는 것보다 다중 RCMs를 적용하였을 때, 불확실성은 줄어드는 것을 확인하였으나, RCM별 불확실성은 지역에 따라 다양한 편차가 있는 것으로 파악됨에 따라, 이에 대한 추가적인 연구가 진행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MOIS-재난-2015-03].

References

- Bates, B., Phatak, A., Lehmann, E., Lau, R., Rafter, T., Green, J., Evans, J., et al. (2015). *Revision project 1: Development of intensity-frequency-duration information across Australia (Climate change research plan project)*. Australian Rainfall and Runoff.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, Vol. 27, No. 12, pp. 1643-1655.
- Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R., and Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, Vol. 4, No. 4, pp. 287-291.
- Chandra, R., Saha, U., and Mujumdar, P.P. (2015). Model and parameter uncertainty in IDF relationships under climate change. *Advances in Water Resources*, Vol. 79, pp. 127-139.
- Choi, J., Lee, O., and Kim, S. (2016). Analysis of the effect of climate change on IDF curves using scale-invariance technique: Focus on RCP 8.5. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 12, pp. 995-1006.
- Coles, S., Pericchi, L.R., and Sisson, S. (2003). A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. *Journal of Hydrology*, Vol. 273, No. 1-4, pp. 35-50.
- Goswami, B.N., Venugopal, V., Sengupta, D., Madhusoodanan, M.S., and Xavier, P.K. (2006). Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, Vol. 314, No. 5804, pp. 1442-1445.
- Guhathakurta, P., Sreejith, O.P., and Menon, P.A. (2011). Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India. *Journal of Earth System Science*, Vol. 120, No. 3, pp. 359-373.
- 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.
- Hosseinizadehtalaei, P., Tabari, H., and Willems, P. (2017). Uncertainty assessment for climate change impact on intense precipitation: How many model runs do we need? *International Journal of Climatology*, Vol. 37 No. S1, pp. 1105-1117.
- Johnson, F., White, C.J., van Dijk, A., Ekstrom, M., Evans, J.P., Jakob, D., Kiem, A.S., et al. (2016). Natural hazards in Australia: Floods. *Climate Change*, Vol. 139, pp. 21-35.
- Karmalkar, A.V. (2018). Interpreting results from the NARCCAP and NA-CORDEX ensembles in the context of uncertainty in regional climate change projections. *Bulletin of the American Meteorological Society* (in press). doi:10.1175/BAMS-D-17-0127.1
- Kim, J.Y., Park, C.Y., and Kwon, H.H. (2016). A development of downscaling scheme for sub-daily extreme precipitation using conditional copula model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 10, pp. 863-876.
- Kim, K., Choi, J., Lee, J., and Kim, S. (2018). Effect of RCM temporal resolution on estimating future IDF curves. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 341-352.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., et al. (2007). Global climate projections. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 747-845, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2012). *Design flood estimation tips*.
- Seo, L., Jeon, M., Kim, T.W., and Kim, S. (2012). Ensemble prediction of future design rainfalls considering climate change. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 159-171.
- Shrestha, A., Babel, M.S., Weesakul, S., and Vojinovic, Z. (2017). Developing Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves under climate change uncertainty: The case of Bangkok, Thailand. *Water*, Vol. 9, No. 2, Article No. 145.

Received	■	August 27, 2018
Revised	■	August 28, 2018
Accepted	■	September 12, 2018