RCM 시간해상도가 미래 IDF곡선 추정에 미치는 영향

Effect of RCM Temporal Resolution on Estimating Future IDF Curves

김경민* · 최정현** · 이정훈*** · 김상단****

Kim, Kyungmin*, Choi, Jeonghyeon**, Lee, Jeonghoon***, and Kim, Sangdan****

Abstract

Recent domestic researches on the future design rainfall have been conducted by applying various temporal downscaling techniques based on daily temporal resolution data produced from Regional Climate Model (RCM) provided by Korea Meteorological Administration (KMA) and CORDEX. However, no matter what temporal downscaling techniques are applied, many assumptions are needed in the process of estimating the design rainfall for sub-daily duration from daily rainfall time series. In this study, we investigated the effect of RCM temporal resolution on the estimation of future IDF curves. For this purpose, temporal resolution 3-hour and 24-hour rainfall data were constructed using observed hourly rainfall time series of KMA of Busan station. And, the derived IDF curves were compared with the IDF curve derived from temporal resolution 1-hour rainfall time series, respectively. As a result, it was confirmed that the IDF curve derived from the temporal resolution 3-hour rainfall data reproduces the IDF curve derived from the observed hourly rainfall time series better. Also, future IDF curves were derived from temporal resolution 3-hour future rainfall time series that dynamically downscaled at Busan station using RCM (WRF), general climate model HadGEM2-AO driven by RCP 8.5 scenario. Finally, the effect of RCM's temporal resolution on the estimation of future IDF curves was analyzed by comparing with the future IDF curve derived from temporal resolution 3-hour and 24-hour future rainfall time series.

Key words : Climate Change, IDF Curve, RCM, Temporal Resolution

요 지

최근 미래 확률강우량 분석에 대한 국내 연구들은 주로 기상청이나 CORDEX에서 제공하는 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)로부터 생산된 일-단위 시간해상도 자료를 기반으로 다양한 시간적인 다운스케일링 기법을 적용하여 수행되고 있다. 하지만, 어떠한 시간적인 다운스케일링 기법을 적용하더라도 일-단위 강우 시계열로부터 일-단위 이하의 지속시간에 대한 확률강우량을 추정하고자 하는 과정에서 많은 가정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 RCM에서 일-단위 이하의 시간해상도 자료를 획득할 수 있게 된다면, 미래 IDF곡선 추정에 어떤 영향을 미칠 것인지를 살펴보고자 하였다. 이를 위하여 기상청 부산지점의 관측 시간강우자료를 시간해상도 3-시간과 시간해상도 24-시간으로 구성하여 유도한 IDF곡선을 시간해상도 1-시간으로 유도한 IDF곡선과 각각 비교하였다. 그 결과, 시간해상도 3-시간 자료로부터 유도한 IDF곡선이 시간해상도 1-시간 강우 시계열로부터 유도된 IDF곡선을 더 우수하게 재현하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 RCP 8.5 시나리오에 따라 구동된 전지구기후모델 HadGEM2-AO를 RCM인 WRF를 이용하여 동역학적으로 다운스케일한 부산지점 시간해상도 3-시간의 미래 강우 시계열로부터 미래 IDF곡선을 유도하였다. 최종적으로 시간해상도가 3-시간과 24-시간으로 주어졌을 경우에 유도된 미래 IDF곡선을 비교함으로써 RCM의 시간해상도가 미래 IDF곡선의 추정에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 기후변화, IDF곡선, 지역기후모델, 시간해상도

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

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

**정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 석사과정(E-mail: jeonghyeon202@naver.com)

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

***정회원, 부경대학교 환경연구소 전임연구원 (E-mail: bravo281@hanmail.net)

Member, Researcher, Institute of Environmental Research, Pukyong National 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

전 세계적으로 기후변화로 인한 기상이변이 빈번하게 발생되고 있다. 기후변화는 다양한 원인이 존재하지만, 그 중 지구온난화의 영향이 주원인인 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2014). 기상이변이 늘어남에 따라 기후변화에 대한 관심이 증가하고 있으며, 1990년대 이후부터 기후변화가 수문분야에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있는 중이다(Hamlet and Lettenmaier, 1999; Christensen et al., 2004; Piao et al., 2010). 기후변화는 강우량의 변화를 야기하고 수문시스템의 양이나 질에도 영향을 끼친다. IPCC 제5차 평가보고서(IPCC, 2014)에서는 대부분의 중위도 대륙 습윤 지역에서는 극한 강수 현상의 빈도 및 강도가 증가할 가능성이 매우 높다고 보고하였다. 극한강우의 빈도 및 강도의 증가는 사회경제적 피해와 직접적으로 연결된다. 최근 우리나라에서도 극한강우가 증가하고 있다. 실제로 2016년 10월 태풍 차바가 울산에 상륙하여 시간당 130mm의 비가 내려 수많은 이재민이 발생하였고, 2017년 7월 인천에 시간당 100mm가 넘는 기습폭우가 내려 도시 일부분이 침수되었다. 그리고 2017년 9월 부산에 시간당 100mm에 가까운 폭우가 쏟아져 인명 및 재산 피해를 입기도 하였다. 반복되는 폭우에 수공구조물은 본래의 방재역할을 못하고 있으며, 이에 따라 도시는 방대한 피해를 입었다. 이는 현재의 설계기준은 기후변화에 대한 영향을 적절히 고려하지 못하기 때문에 기후변화를 고려한 극한강우에 대한 수공구조물의 설계기준을 재산정해야 할 필요가 있다. 수공구조물은 다양한 설계기준을 가지고 있으며, 그 중 지속시간과 재현기간을 고려한 설계강우량이 필요하다. 이와 같은 설계강우량 산정에는 IDF곡선을 실무적으로 적용하고 있다. 본 연구에서는 수공구조물의 설계기준을 산정하기 위하여 IDF곡선에 관한 사항을 다루고자 한다.

우리나라의 경우, 미래 IDF곡선은 대부분 일-단위의 시간해상도로 제공된 미래 강우 시계열을 이용하여 유도돼왔다(Kim et al., 2008; Choi et al., 2016). 수공구조물 설계를 위해서는 분-단위 또는 시간-단위 지속시간의 IDF곡선이 필요하기 때문에 다양한 시간적인 다운스케일링 기법을 개발하여(Burlando and Rosso, 1996; Schmidli, et al., 2006), 일-단위의 미래 강우 시계열로부터 다양한 지속시간(일-단위 이하)의 미래 IDF곡선을 유도하여왔다. 하지만 어떠한 시간적인 다운스케일링 기법이 적용되더라도 일-단위 강우자료를 이용하여 시간-단위 강우자료의 통계학적 특성을 추론하는 것에는 많은 가정이 필요하게 되며, 그러한 가정이 포함됨에 따라 추가되는 불확실성의 증가는 어쩔 수 없이 감수할 수밖에 없게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근 기상청에서는 시간해상도 3-시간의 미래 강우 시계열을 생산 중에 있다.

이에 본 연구에서는 강우 시계열의 시간해상도가 IDF곡선 추정에 미치는 영향을 분석해보고자 하였다. 이를 위하여

기상청 부산지점에 관측된 과거 시간-단위 강우자료를 시간해상도 3-시간과 24-시간으로 각각 재구성하여 IDF곡선을 유도한 후에, 그 차이를 살펴보았다. 또한 RCP 8.5 시나리오에 따라 구동된 전지구기후모델(General Climate Model, GCM) HadGEM2-AO를 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)인 WRF를 이용하여 동역학적으로 다운스케일한 자료로부터 부산지점에 해당되는 자료를 추출한 후에, 주어진 시간해상도 3-시간의 미래 강우 시계열로부터 미래 IDF곡선을 유도하였으며, 동 자료의 시간해상도가 24-시간으로 주어졌을 경우에 유도될 수 있는 미래 IDF곡선과 비교함으로써 RCM의 시간해상도가 미래 IDF곡선의 추정에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 자료정보

2.1 관측자료 정보

본 연구에서는 연구대상지역인 부산지점에 대하여 기상청에서 제공하는 시간해상도 1-시간 관측 강우량 자료를 1981년부터 2010년까지 정리하였다. IDF곡선을 작성하기 위해 부산지점의 관측 강우량 자료를 이용하여 지속시간별 연 최대치 강우강도 시계열을 작성하였다. 지속시간은 1-시간부터 24-시간까지 총 24개의 지속시간을 사용하였다. 그 다음, 시간해상도 1-시간 관측 강우량 자료를 시간해상도 3-시간과 24-시간 강우량 자료로 각각 재구성하여 지속시간별 연 최대치 강우강도 시계열을 작성하였다. 시간해상도 3-시간의 경우 지속시간은 3-, 6-, 9-, 12-, 15-, 18-, 21-, 24-시간으로 총 8개의 지속시간에 대한 연 최대치 시계열을 구성하였고, 시간해상도 24-시간의 경우 지속시간 24-시간에 대한 연 최대치 시계열을 구성하였다.

본 연구를 시작하기에 앞서, 부산지점의 관측 강우량 자료에 대해 분석하였다. Fig. 1은 1981년부터 2010년까지 부산지점의 연강수량을 나타낸 그림이다. 연강수량의 평균은 1,519 mm이며, 최대는 2,400 mm, 최소는 900 mm이다. 1999년, 2003년, 1985년 순으로 연강수량이 높은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 1. Annual Precipitation at Busan

Fig. 2. Annual Maximum Rainfall Intensity at Busan

Fig. 2는 시간해상도 1-시간 관측 강우량 자료를 이용하여 산정한 지속시간별 연 최대치 강우강도를 짧은 지속시간과 긴 지속시간으로 나누어 그린 그림이다. 지속시간 1-시간에 대한 연 최대치 강우강도는 1983년, 2008년, 1997년 순으로 높은 값이 기록되었으며(Fig. 2(a)), 지속시간 24시간에 대한 연 최대치 강우강도는 높은 순으로는 1991년, 2009년, 1999년이다(Fig. 2(b)). 같은 강우 시계열 자료를 이용하더라도 지속시간에 따라 연 최대치 강우강도 시계열은 서로 다른 거동을 보임을 알 수 있다. 또한, Figs. 1과 2를 비교해 볼 경우, 연강수량이 높은 해가 반드시 지속시간별 연 최대 강우강도가 높은 해로 기록되고 있지 않음을 아울러서 살펴 볼 수 있다.

지속시간별 연 최대치 강우강도 시계열 사이에 상관성을 알아보기 위해 연 최대치 강우강도 시계열들 사이의 교차상관계수를 살펴보았다(Fig. 3). Fig. 3으로 볼 때, 긴 지속시간의 연 최대치 강우강도 시계열들 사이에는 어느 정도 상관성을 보이고 있으나, 짧은 지속시간의 연 최대치 강우강도 시계열들 사이에는 상관성이 상대적으로 떨어졌다. 그리고 긴 지속시간과 짧은 지속시간의 연 최대치 강우강도 시계열 사이의 상관성은 매우 떨어지는 것으로 확인되었다.

Fig. 3. Cross Correlation of Observed Data by Duration

2.2 미래자료 정보

미래 기후자료는 GCM과 RCM으로부터 획득된다. GCM은 넓은 지역에 낮은 공간해상도로 모의된 기후모델이다. GCM이 가지는 낮은 공간해상도를 우리나라에 적용하기에는 어려움이 있다. 그렇기 때문에 RCM을 이용하여 공간적으로 역학적인 다운스케일링을 한 후, 생산된 자료를 본 연구에 적용할 필요가 있다. 본 연구에서는 선행연구의 일환으로 단일 GCM과 RCM을 선택하여 연구에 적용하였으며, 영국에서 개발된 GCM인 HadGEM2-AO로부터 WRF(Weather Research and Forecasting model)을 이용하여, 역학적으로 다운스케일링된 자료를 이용하였다.

HadGEM2-AO는 기본적으로 대기, 해양, 해빙 모델로 구성되어 있어 기후계 구성요소 간의 에너지, 운동량, 수분속 등의 상호작용을 표현할 수 있고, 동아시아 및 한반도에서의 지표기온 및 강수를 비교적 현실성 있게 모의하는 것으로 알려졌다(Baek et al., 2013). HadGEM2-AO의 모델 안정화 기간을 200년, 400년, 1000년으로 나누어 실험을 수행하였고, 한반도 상세 기후변화 시나리오 산출에는 상대적으로 우수한 결과를 보인 400년 제어 적분의 HadGEM2-AO 자료를 지역기후모델의 경계자료로 이용하였다. 모델의 격자수는 144×192 (격자당 $1.25^\circ \times 1.875^\circ$), 연직층수는 17개이며, 시작 위·경도는 $-81.375^\circ, 0^\circ$ 이다. 1년은 360일로 구성되어 있다.

WRF는 날씨 예보와 연구를 위해 제공되는 중규모 수치예보 시스템이다. WRF는 3차원 변분 자료 동화 시스템(3DVAR data assimilation)과 병렬컴퓨터 플랫폼, 시스템 확장성을 따르는 소프트웨어 구조(software architecture)를 포함한 다중 역학 코어를 특징으로 한다. CORDEX-East Asia에서 장기간 기후 모의를 위해 스펙트럴 너징(spectral nudging)이 적용된 WRF3.2를 사용하였다(von Storch et al., 2000). Fig. 4는 WRF를 이용하여 한반도 주변만을 12.5 km의 수평 해상도로 상세화한 모의영역을 나타낸 그림이다. 모의영역은 한반도를 중심으로 한 동북아시아 지역이다.

WRF에 대한 자세한 정보는 웹사이트(www.wrf-model.org)를 참고할 수 있다.

Fig. 4. High Resolution Climate Change Scenario Area on the Korean Peninsula

획득된 미래 강우 시계열의 공간해상도는 12.5-km 이며, 시간해상도는 3-시간이다. 모의된 자료의 현재기간은 1981년부터 2010년까지, 미래기간은 2021년부터 2050년까지이며, 기후변화 시나리오는 RCP 8.5를 적용하였다. 본 연구에서는 공간해상도 12.5-km 격자자료들 중에서 부산지점에 해당되는 자료를 추출하여 미래 부산지점의 강우 시계열로 간주하고 이후 분석을 수행하였다.

3. 스케일 분석

3.1 스케일 특성

scale-invariance 기법의 적용을 위해 부산지점 관측 자료의 스케일 특성을 검토하였다. 연 최대 강우강도 시계열의 scale-invariance 관계는 아래와 같다고 가정한다.

$$\langle I_d^q \rangle = \lambda^{k(q)} \langle I_D^q \rangle \quad (1)$$

여기서, λ 는 $\frac{d}{D}$ 로 정의된다. $\langle I_d^q \rangle$ 는 지속시간 d -시간 연 최대 강우강도 시계열의 q 차 모멘트이며, $k(q)$ 는 스케일 지수이다. 스케일 특성을 검토하기 위해 지속시간(실제로는 λ)에 따른 특정 차수의 모멘트의 관계를 회귀분석하면, 차수별 스케일 지수(scale exponent)인 $k(q)$ 를 구할 수 있다. Eq. (4)에서 스케일 지수 $k(q)$ 와 모멘트 차수 q 의 관계가 선형이면 단일 스케일(simple scaling)이고, 비선형이면 다중 스케일(multi scaling)이다. 기존의 scale-invariance 기법은 모멘트법을 기반으로 하였으나, 본 연구에서는 확률가중모멘트법(Method of Probability Weighted Moments, PWM)에 기반하여 scale-invariance 기법을 적용하여 스케일 특성을 검토하였다(Yu et al., 2004). 이는 본 연구에서 scale-invariance

기법의 적용을 통하여 얻고자 하는 정보가 확률강우량에 관한 것이며, 확률강우량을 산정할 때 모멘트법보다는 PWM을 적용하기 때문이다. PWM에 대해서도 스케일 특성이 성립한다고 가정할 경우, PWM을 이용한 scale-invariance 관계는 아래와 같다.

$$M_d^q = \lambda^{H(q)} M_D^q \quad (2)$$

여기서, M_d^q 는 지속시간 d -시간에 대한 q 차 PWM이고, $H(q)$ 는 PWM으로 산정한 스케일 지수이다. $M^q = M_{1,q,0}$ 라 하면, $H(q)$ 는 모멘트법을 적용할 때와 동일한 방법으로 추정이 가능하다. 차수 q 는 0, 1, 2, 3, 4차를 사용하였다. 스케일 지수 $H(q)$ 를 산정하기 위해, PWM 차수 q 별로 구해진 PWM을 지속시간에 따라 전대수지상에 도기한 다음 선형으로 회귀분석하였다(Fig. 5). 회귀분석하여 구해진 스케일 지수 $H(q)$ 와 PWM 차수 q 사이의 관계식을 도출하였다. 0차에서부터 4차까지 스케일 지수는 모든 차수에 대해 비슷한 값으로 산정되어 상수로 나타낼 수 있으며, 부산지점의 $H(q)$ 는 모든 차수의 스케일 지수를 평균한 $H_m = 0.6039$ 로 산정되었다(Fig. 6).

Fig. 5. The Regression Analysis Between Values of PWM and Rainfall Duration at Busan

Fig. 6. Scale Exponents at the Various Orders of PWM Order for Busan

부산 지점의 지속시간별 연 최대 강우강도 시계열을 단일 스케일 특성으로 간주할 경우에는 위의 분석과 같이 단일한 스케일 지수 H ($=0.6039$)를 적용하여 지속시간 24시간 확률강우량으로부터 지속시간 24시간 이하의 지속시간에 대한 확률강우량을 추정하는 것이 *scale-invariance* 이론 상 타당하다고 볼 수 있을 것이다. 그러나 Fig. 5를 조금 더 자세하게 살펴볼 경우, 지속시간이 짧은 구간, 중간 구간, 지속시간이 긴 구간으로 구분한다면 각 구간별 기울기가 서로 다르게 계산될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 현상을 반영하기 위해서는 부산 지점의 지속시간별 연 최대 강우강도 시계열을 다중 스케일 특성을 갖는 것으로 간주하고 분석하여야 함을 의미한다. 연 최대 강우강도 시계열의 다중 스케일 특성은 사실 Figs. 2와 3에서도 간접적으로 살펴볼 수 있었다. 긴 지속시간의 연 최대 강우강도 시계열들 사이에는 상대적으로 강한 상관성을 보이고 있었으나, 그 외의 시계열들 사이에는 상관성이 매우 떨어지고 있었기 때문이다.

3.2 변환계수 산정

시간해상도 3-시간 자료를 이용하여 획득한 지속시간 3-시간, 6-시간, 9-시간, 12-시간, 15-시간, 18-시간, 21-시간, 24-시간 연 최대 강우강도 시계열값은 시간해상도 1-시간 자료를 이용하여 획득한 지속시간별 연 최대 강우강도 시계열값 보다 작을 수밖에 없다. 또한, 시간해상도 24-시간 자료를 이용하여 획득한 지속시간 24시간 연 최대 강우강도 시계열값도 시간해상도 1-시간 자료를 이용하여 획득한 지속시간 24-시간 연 최대 강우강도 시계열값 보다 작아질 것이다. 이러한 강우자료의 시간해상도에 따른 오차를 보정하기 위해 각각의 시간해상도로 획득한 연 최대 강우강도 시계열 사이에서 지속시간별로 회귀분석을 수행하여 오차를 보정할 수 있는 변환계수를 산정하였다. 시간해상도 3-시간 자료로부터 획득한 지속시간별 연 최대 강우강도 시계열의 변환계수를 산정하는 방법으로 황축에 시간해상도 3-시간 연 최대 강우강도 시계열을, 종축에 시간해상도 1-시간 연 최대 강우강도 시계열을 두고 선형 회귀분석을 수행하는 방법을 취하였다. Fig. 7은 지속시간별로 이와 같은 회귀분석을 수행하여 산정한 변환계수를 보여주고 있으며, Table 1은 지속시간별로 수행된 회귀분석의 정확도를 검토하기 위한 결정계수를 나타내고 있다.

지속시간이 증가할수록 시간해상도에 따른 연 최대 강우강도가 서로 비슷하게 산정되어 결정계수(R^2)는 1에 가깝게 산정되고 있다(Table 1). 짧은 지속시간에 대한 변환계수는 시간해상도에 민감하게 반응하여 상대적으로 낮은 결정계수가 산정되었다. 이는 짧은 지속시간에 대해 연 최대치 시계열값의 오차가 발생할 가능성이 높기 때문이다. 지속시간 3-시간을 제외한 나머지 지속시간에 대한 변환계수는 결정계수가 0.99보다 높은 상관성을 보이므로 합리적으로 산정되었다고 볼 수 있다. 시간해상도 24시간의 변환계수를

산정하는 방법도 같은 방법으로 수행되었다. 단, 시간해상도 24-시간 자료에서는 지속시간 24-시간에 대한 변환계수만 산정될 수 있으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 시간해상도 24-시간 자료의 지속시간 24-시간 연 최대 강우강도 시계열에 대한 시간해상도 1-시간 자료의 지속시간 24-시간 연 최대 강우강도 시계열의 변환계수는 결정계수가 0.8063으로, 시간해상도 3-시간 자료의 지속시간 3-시간 연 최대 강우강도 시계열에 대한 시간해상도 1-시간의 지속시간 3-시간 연 최대 강우강도 시계열의 변환계수를 추정할 때의 결정계수 0.8634보다 낮음을 살펴볼 수 있다. 이는 시간해상도 24-시간 자료를 이용하여 시간해상도 1-시간의 자료로 변환하는 것은 큰 불확실성을 가지고 있음을 의미한다.

3.3 Scale-Invariance

변환계수를 이용하여 보정된 지속시간별 연 최대 강우강도 시계열로부터 Gumbel분포를 적용하여 확률강우강도를 추정하였으며(매개변수 추정은 L-moment 법을 이용), 재현기간은 10년부터 200년까지 10년 단위를 사용하였다. 추정된 확률강우강도의 시간적인 다운스케일링을 위하여 *scale-invariance* 기법을 적용하였다. 시간해상도 24-시간 자료가 주어진 경우에는 Burlando and Rosso(1996)을 참고하여 아래와 같은 단일 스케일 특성을 이용한 관계식이 적용되어 24시간 이하의 지속시간에 대한 확률강우강도를 산정하고자 하였다.

$$I_d^T = \left(\frac{d}{24} \right)^{-H} \cdot I_{24}^T \quad (3)$$

여기서, I_d^T 는 재현기간 T -yr 지속시간 d -시간 확률강우강도, I_{24}^T 는 재현기간 T -yr 지속시간 24시간 확률강우강도이고, H 는 스케일 지수이다. Eq. (3)에서 사용된 스케일 지수 H 는 스케일 특성을 검토할 때 구한 단일 스케일 지수 $H_m = 0.6039$ 을 이용하였다.

시간해상도 24-시간 강우자료가 주어질 경우에는 *scale-invariance* 기법을 이용하여 24시간 이하의 지속시간에 대한 확률강우량을 추정하기 위해서는 단일 스케일 특성을 가정할 수밖에 없지만, 시간해상도 3-시간 강우자료의 주어질 경우에는 원 자료가 가지고 있는 다중 스케일 특성을 충분히 활용하여 지속시간 구간별로 다양한 스케일 지수를 적용할 수 있게 된다. 즉, 지속시간 d_1 -시간 확률강우강도 $I_{d_1}^T$ 와 지속시간 d_2 -시간 확률강우강도 $I_{d_2}^T$ 가 주어진다면(예를 들어, $d_1 = 3\text{-hr}$, $d_2 = 6\text{-hr}$), 지속시간 d_1 과 지속시간 d_2 사이 구간에서의 스케일 지수 $H_{d_1-d_2}$ 는 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$H_{d_1-d_2} = - \frac{\ln \left(\frac{I_{d_1}^T}{I_{d_2}^T} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \quad (4)$$

(a) Duration 3-hr

(b) Duration 6-hr

(c) Duration 9-hr

(d) Duration 12-hr

(e) Duration 18-hr

(f) Duration 24-hr

Fig. 7. Conversion Factors (temporal resolution: 3-hr→1-hr)

Table 1. Coefficient of Determination

Duration	3-hr	6-hr	9-hr	12-hr	18-hr	24-hr
R^2	0.8634	0.9926	0.9938	0.9985	0.9990	0.9984

Fig. 8. Conversion Factor (temporal resolution: 24-hr → 1-hr)

Eq. (4)를 이용하여 지속시간 d_1 과 지속시간 d_2 사이의 지속시간 d -hr(예를 들어, $d=4$ -hr 또는 $d=5$ -hr) 확률강우강도는 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$I_d^T = \left(\frac{d}{d_2}\right)^{-H_{d_1-d_2}} \cdot I_{d_2}^T \quad (5)$$

Eqs. (3)과 (4)를 이용하여 스케일 지수 H_{3-6hr} , H_{6-9hr} , ..., $H_{21-24hr}$ 를 산정하여, 지속시간 4-, 5-, 7-, 8-, ..., 19-, 20-, 22-, 23-시간에 대한 확률강우강도를 추정할 수 있다.

그러나, 위와 같은 방법으로 다중 스케일 특성을 반영한 지속시간 구간별 스케일 지수들을 구할 수 있다 하더라도,

지속시간 1-시간과 지속시간 2-시간 확률강우강도를 추정하기 위한 스케일 지수 H_{0-3hr} 을 구할 수는 없다. 본 연구에서는 앞서 산정한 지속시간 구간별 스케일 지수 $H_{d_1-d_2}$ 와 지속시간 사이의 관계를 회귀분석하여 H_{0-3hr} 을 산정하고자 하였다. Fig. 9(a)는 재현기간별 지속시간 구간별 스케일 지수를 보여주고 있다. Fig 9(a)에서 살펴볼 수 있듯이, 스케일 지수는 지속시간에 대해 민감하게 반응하고, 재현기간에 대해 둔감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 지속시간별로 일관성 있는 추세를 보이지 않기 때문에, 부산지점의 경우에는 스케일 지수 H_{3-6hr} , H_{6-9hr} , H_{9-12hr} 와 지속시간 사이의 관계로부터 H_{0-3hr} 를 산정하였으며(Fig. 9(b)), 이를 이용하여 지속시간 1-, 2-시간 확률강우강도를 추정하였다.

(a) Scale exponent

(b) Extrapolation of scale exponent

Fig. 9. Observed Scale-exponent at Busan

3.4 IDF곡선 비교결과

시간해상도 1-시간, 3-시간, 24시간 관측 강우량 자료를 이용하여 확률강우강도를 추정하고, IDF곡선을 유도한 결과를 Figs. 10과 11에 도시하였다. Fig. 10(a)에서 'obs'로 표기한 부분은 시간해상도 1-시간 강우자료를 이용하여 유도한 IDF곡선이며, 'SI03'로 표기한 부분은 시간해상도 3-시간 강우자료를 이용하여 유도한 IDF곡선을 의미한다. Fig. 10(b)는 Q-Q plot을 나타낸 그림으로, 3-시간 시간해상도의 강우자료로 유도한 IDF곡선은 1-시간 시간해상도의 강우자료로 유도한 IDF곡선을 전체적으로 우수하게 재현함을 확인할 수 있다.

Fig. 11(a)에서 'SI24'로 표기한 부분은 시간해상도 24-시간

간의 강우자료를 이용한 유도한 IDF곡선을 의미한다. 시간 해상도 24-시간의 확률강우강도는 시간해상도 1-시간의 확률강우강도와 비교할 때 지속시간 3-hr에서 21-hr 사이에서 낮게 추정되고 있으며(Fig. 11(a)), 이는 Fig. 11(b)에서도 살펴볼 수 있다.

두 개의 IDF곡선을 비교해 볼 때, 미래 일 강우자료가 주어질 경우 scale-invariance 기법을 이용하여 24시간 이하의 지속시간에 대한 확률강우량을 추정할 때의 오차가 어느 정도 발생할 수 있을 것인지에 대한 전체적인 윤곽을 살펴볼 수 있을 것이며, 다음 장에 미래자료를 이용한 IDF곡선을 유도하여 비교함으로써 이에 대한 수치적인 분석을 시도하였다.

Fig. 10. Comparison of IDF Curves (temporal resolution: 1-hr & 3-hr)

Fig. 11. Comparison of IDF Curves (temporal resolution: 1-hr & 24-hr)

4. 미래 IDF곡선

4.1 Delta-Change 기법

기후모델로부터 모의된 결과는 어느 정도의 편의를 보이며 이러한 계통적 오차(Systematic Bias)는 모형 내부에서 해결하기가 쉽지 않다(Park et al., 2012). 그렇기 때문에 기후모델에서 모의된 자료는 편의보정을 수행하여 이용한다. 편의보정 방법에는 여러 가지가 존재하나, 본 연구에서는 Delta-Change-Method(DCM)를 적용하였다. DCM은 간단하고 쉬운 적용법으로 인해 많은 연구에서 사용하고 있다(Akhtar et al., 2008; Hay et al., 2008).

DCM을 적용하여 보정된 미래 확률강우량 I'_f 를 산정하는 식은 다음과 같다(Olsson et al., 2012).

$$I'_f = I_o \cdot \frac{I_f}{I_p} \quad (6)$$

여기서, I_f 는 기후모델에서 생산된 자료로부터 추정된 미래기간 확률강우강도, I_p 는 기후모델의 현재기간 모의자료로부터 추정된 확률강우강도, I_o 는 관측 자료를 이용하여 추정된 확률강우강도이다. 현재와 미래자료의 확률강우강도의 비를 이용하여 change factor(즉, I_f/I_p)를 산정한 다음, 관측 자료에 적용하여 미래자료의 확률강우강도를 보정하는 원리이다.

Fig. 12(a)에 지속시간별 재현기간별 현재기간 모의자료의 스케일 지수를 나타내었다. 관측 자료로부터 구한 스케일 지수(Fig. 9(a))와 비교해 볼 때, 재현기간에 따라서는 둔감하며, 지속시간에 따라서는 민감하게 반응한다는 측면에서는 유사성이 있으나, 산정된 스케일 지수 값들은 많은 차이가 있음을 살펴볼 수 있다. Fig. 12(b)에 지속시간별 재현기간별 미래기간 모의자료의 스케일 지수를 도시하였다. Fig. 12(a)의 스케일 지수와 비교해 볼 때, 기후모델의 현재자료와

미래자료의 스케일 지수도 많은 차이가 있음을 살펴볼 수 있다. Fig. 12로부터 단일 스케일 특성을 적용하여 24-시간 이하의 지속시간에 대한 미래 확률강우강도를 추정할 경우 많은 오차가 포함될 수밖에 없음을 알 수 있다.

4.2 미래 IDF곡선

미래 IDF곡선을 유도하기 위해 기후모델자료를 시간해상도 3-시간, 24시간으로 구성하여 연 최대 강우강도 시계열을 추출하였다. 이와 같이 추출된 강우강도 시계열의 시간해상도에 따른 오차를 줄이기 위해 관측 자료로부터 계산한 변환계수를 적용하여(Figs. 7과 8) 이후 분석을 수행하였다. 확률강우강도를 추정하기 위해 적용된 지속시간은 3-, 6-, 9-, 12-, 15-, 18-, 21-, 24-시간이며, 적용된 재현기간은 10, 30, 50, 100, 200년이다. 확률분포형은 Gumbel분포를 이용하였다(매개변수 추정은 L-moment 법을 이용). 추정된 지속시간별 재현기간별 미래 확률강우강도는 Eq. (6)에 나타낸 DCM을 이용하여 추정된 미래 확률강우강도를 보정하였으며, Eqs. (4)와 (5), Fig. 9에 나타낸 scale-invariance 기법을 적용하여 나머지 지속시간(1-, 2-, 4-, 5-, ..., 19-, 20-, 22-, 23-시간)에 대한 미래 확률강우강도를 추정하였다.

Fig. 13은 관측된 시간해상도 1-시간의 연 최대 강우강도로부터 유도된 IDF곡선(Fig. 13에서 '2010')과 시간해상도 3-시간 및 24-시간의 미래 강우자료로부터 유도된 IDF곡선(Fig. 13에서 '2050')을 보여주고 있다. 미래 강우자료의 시간해상도가 3-시간으로 주어질 경우 미래 확률강우강도는 대부분의 지속시간에서 높게 추정되었으나, 지속시간 1-시간의 경우에는 현재의 확률강우강도와 큰 차이가 나타나고 있지 않은 것을 살펴볼 수 있다. 확률강우강도의 변화율은 지속시간 6-시간에서 최고 143%까지 증가하였으며, 지속시간 1-시간에서 최저 93%까지 감소할 수 있는 것으로 전망되었다. 반면에, 미래 강우자료의 시간해상도가 24-시간으로 주어질 경우 미래 확률강우강도는 모든 지속시간에 대해서

Fig. 12. Scale Exponent

(a) Temporal resolution: 3-hr

(b) Temporal resolution: 24-hr

Fig. 13. Future IDF Curves

현재보다 높은 값을 갖는 것으로 전망되었음을 살펴볼 수 있다. 그러나 단일 스케일 특성의 가정으로 인하여, 지속시간 24시간보다 작은 지속시간에 대한 미래 확률강우강도의 증가 경향은 지속시간 24시간 확률강우강도의 미래 변화율에 동조할 수밖에 없는데 기인한다. 이러한 특성은 Fig. 14를 통해 더 명확하게 살펴볼 수 있을 것이다.

Fig. 14는 미래 강우자료가 시간해상도 3시간 및 24시간으로 주어졌을 때, 지속시간 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24시간에 대한 미래 IDF곡선을 보여주고 있다. 지속시간 24시간을 제외한 모든 지속시간에 대해 시간해상도 3시간의 확률강우강도가 높게 추정되고 있음을 살펴볼 수 있다. 이러한 결과는 미래 강우자료의 시간해상도가 24시간 자료로 주어질 경우 지속시간 24시간보다 작은 지속시간에 대해 추정된 미래 확률강우강도의 불확실성이 더 커질 수 있음을 의미한다.

Fig. 14. Differences in Future IDF Curves with Temporal Resolution

5. 결 론

본 연구에서는 RCM 시간해상도가 미래 IDF곡선 추정에 미치는 영향에 대해 살펴보기 위해 시간해상도에 따라 IDF곡선을 추정하여 비교해 보았다. 먼저, 관측강우자료를 이용하여 시간해상도에 따른 IDF곡선의 변화를 확인하였다. 관측강우자료의 시간해상도를 1-시간, 3-시간, 24-시간으로 구성하여 지속시간별 연 최대치 강우강도 시계열을 작성하였다. 지속시간별 시간해상도 3-시간, 24-시간 연 최대치 강우강도 시계열을 변환계수를 이용하여 시간해상도 1-시간 연 최대치 강우강도로 변환하였다. 시간해상도 3-시간의 변환계수는 짧은 지속시간에서 큰 불확실성을 나타내었으며, 지속시간이 증가함에 따라 불확실성이 감소하였다. 이는 짧은 지속시간에 대해 시간해상도에 따라 오차가 커질 가능성이 크기 때문이다. 시간해상도 24-시간의 변환계수는 시간해상도 3-시간의 변환계수보다 더 큰 불확실성을 나타내었다. 변환된 강우강도 시계열을 이용하여 재현기간별 확률강우량을 산정한 뒤, scale-invariance 기법을 적용하여 IDF곡선을 유도하였다. 유도된 IDF곡선은 시간해상도 1-시간으로부터 유도된 IDF곡선과 비교하였다.

시간해상도 1-시간으로 산정된 확률강우량 강도와 비교하여 시간해상도 3-시간으로 산정된 확률강우량은 모든 재현기간에 대해 97~104% 값의 범위에서 유사하게 산정되었으며, 시간해상도 24-시간으로 산정된 확률강우량은 91~106% 값의 범위에서 산정되었다. 시간해상도 24-시간의 확률강우량은 시간해상도 3-시간에 비해 두 배가 넘는 오차범위를 보였다. 이는 시간해상도 24-시간 강우자료의 경우에는 단일 스케일 특성을 이용하여 지속시간이 24시간 보다 작은 지속시간에 대한 확률강우강도를 유도할 수밖에 없다는 한계 때문인 것으로 파악되었으며, 따라서 미래 강우자료의 시간해상도가 24-시간으로 주어질 경우 작은 지속시간에 대한

확률강우강도 추정에 많은 불확실성이 포함될 수밖에 없음을 유추할 수 있었다.

시간해상도에 따른 불확실성을 수치적으로 확인하기 위하여 시간해상도 3-시간으로 생산된 미래 강우자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 미래 강우자료는 GCM MSI-ESM-LR 및 RCM WRF를 이용하여 생산된 자료이다. 시간해상도 3-시간 관측 자료로부터 유도된 다중 스케일 특성을 이용하여 지속시간별 미래 IDF곡선을 추정하였으며, 미래 강우자료를 시간해상도 24시간 자료로 재구성한 후, 관측 자료로부터 유도된 단일 스케일 특성을 이용하여 지속시간별 미래 IDF곡선을 추정하였다. 두 개의 IDF곡선을 서로 비교한 결과, 지속시간 24시간을 제외한 모든 지속시간에 대해 시간해상도 3-시간의 확률강우강도가 높게 추정되고 있음을 살펴볼 수 있다. 따라서 미래 IDF곡선 추정 시, 그동안 수행되어온 다양한 접근을 통한 시간적인 다운스케일링 기법의 연구와 더불어서 RCM에서 제공되는 미래 강우자료 자체의 시간해상도를 고도화시키는 것이 미래 전망의 불확실성을 줄이는데 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Akhtar, M., Ahmad, N., and Booij, M.J. (2008) The Impact of Climate Change on the Water Resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya Region under Different Glacier Coverage Scenarios. *Journal of hydrology*, Vol. 355, No. 1-4, pp. 148-163.
- Baek, H.J., Lee, J., Lee, H.S., Hyun, Y.K., Cho, C., Kwon, W.T., Marzin, C., Gan, S.Y., et al. (2013) Climate Change in the 21st Century Simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 49, No. 5, pp. 603-618.
- Burlando, P., and Rosso, R. (1996). Scaling and Multiscaling Models of Depth-duration-frequency Curves for Storm Precipitation. *Journal of Hydrology*, Vol. 187, No. 1-2, pp. 45-64.
- 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.
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmaier, D.P., and Palmer, R.N. (2004) The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*, Vol. 62, No. 1-3, pp. 337-363.
- Ghanmi, H., Bargaoui, Z., and Mallet, C. (2016) Estimation of Intensity-duration-frequency Relationships According to the Property of Scale Invariance and Regionalization Analysis in a Mediterranean Coastal Area. *Journal of Hydrology*, Vol. 541, Part A, pp. 38-49.
- Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (1999) Effects of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Columbia River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 1597-1623.
- Hay, L.E., Wilby, R.L., and Leavesley, G.H. (2000) A Comparison of Delta Change and Downscaled GCM Scenarios for Three Mountainous Basins in the United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 36, No. 2, pp. 387-397.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- 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 Korea Water Resources Association*, Vol. 41 No. 4, pp. 379-394.
- Olsson, J., Gidhagen, L., Gärnerth, V., Gruber, G., Hoppe, H., and Kutschera, P. (2012) Downscaling of Short-term Precipitation from Regional Climate Models for Sustainable Urban Planning. *Sustainability*, Vol. 4, No. 5, pp. 866-887.
- 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.
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Zhou, L., Liu, H., et al. (2010) The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China. *Nature*, Vol. 467, No. 7311, pp. 43-51.
- Schmidli, J., Frei, C., and Vidale, P.L. (2006) Downscaling from GCM Precipitation: A Benchmark for

Dynamical and Statistical Downscaling Methods. *International Journal of Climatology*, Vol. 26, No. 5, pp. 679-689.

von Storch, H., Langenberg, H., and Feser, F. (2000) A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes. *Monthly Weather Review*, Vol. 128, No. 10, pp. 3664-3673.

Yu, P.S., Yang, T.C., and Lin, C.S. (2004) Regional Rainfall

Intensity Formulas based on Scaling Property of Rainfall. *Journal of Hydrology*, Vol. 295, No. 1-4, pp. 108-123.

Received	February 13, 2018
Revised	February 19, 2018
Accepted	March 6, 2018