



Future PMPs projection according to precipitation variation under RCP 8.5 climate change scenario

Lee, Okjeong^a · Park, Myungwoo^a · Lee, Jeonghoon^a · Kim, Sangdan^{a*}

^aDepartment of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

Paper number: 15-088

Received: 21 October 2015; Revised: 1 December 2015 / 4 December 2015; Accepted: 4 December 2015

Abstract

Since future climate scenarios indicate that extreme precipitation events will intensity, probable maximum precipitations (PMPs) without being taken climate change into account are very likely to be underestimated. In this study future PMPs in accordance with the variation of future rainfall are estimated. The hydro-meteorologic method is used to calculate PMPs. The orographic transposition factor is applied in place of the conventional terrain impact factor which has been used in previous PMPs estimation reports. Future DADs are indirectly obtained by using bias-correction and moving-averaged changing factor method based on daily precipitation projection under KMA RCM (HEDGEM3-RA) RCP 8.5 climate change scenario. As a result, future PMPs were found to increase and the spatially-averaged annual PMPs increase rate in 4-hour and 25 km² was projected to be 3 mm by 2045. In addition, the increased rate of future PMPs is growing increasingly in the future, but it is thought that the uncertainty of estimating PMPs caused by future precipitation projections is also increased in the distant future.

Keywords: Climate Change, Hydro-Meteorological Method, Probable Maximum Precipitation, Orographic Transposition Factor, RCP 8.5

RCP 8.5 기후변화 시나리오의 강수량 변화에 따른 미래 PMPs의 전망

이옥정^a · 박명우^a · 이정훈^a · 김상단^{a*}

^a부경대학교 환경공학과

요 지

미래 기후변화 시나리오에 따르면 극한강우사상이 현재보다 더 강화될 것으로 전망되기 때문에, 기후변화의 영향이 추정절차에 반영되지 않는다면 가능최대강수량(PMPs)을 과소 추정하게 될 가능성이 매우 높다. 본 연구에서는 미래의 강우 변동이 반영된 PMPs가 추정된다. PMPs 계산을 위하여 수문기상학적 방법이 이용되며, 기존에 사용되어오던 지형영향비를 대신하여 산악전이비가 가능최대강수량의 산정에 적용된다. 미래 주요호우사상들로부터의 DAD는 기상청 RCM (HEDGEM3-RA) RCP 8.5 기후변화 시나리오의 일 강수량자료를 기반으로 편의보정 및 이동평균된 변화인자를 이용하여 간접적으로 산출된다. 미래 PMPs 산출결과, 현재보다 증가하는 것으로 나타났으며 증가율은 2045년 기준으로 평균적으로 연간 3 mm 정도 증가하는 것으로 예측되었으며, 먼 미래로 갈수록 PMPs의 증가율은 커졌으나 미래강우자료로부터 유발되는 PMPs 추정의 불확실성 또한 증가되고 있는 것으로 파악된다.

핵심용어: 기후변화, 수문기상학적 방법, 가능최대강수량, 산악전이비, RCP 8.5

*Corresponding Author. Tel: +82-51-629-6529
E-mail: skim@pknu.ac.kr (S. Kim)

1. 서론

21세기 들어 더욱 빈번하게 발생하고 있는 기상이변은 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 우려가 되고 있는 자연현상이다. 2005년 9월 미국에서 발생한 초대형 허리케인 카트리나, 2013년 11월 필리핀에 발생한 슈퍼태풍 하이옌을 비롯한 기상이변에 따른 거대재난의 발생은 각 나라별 방재체계에 대한 근본적인 성찰이 필요함을 시사하고 있다. 특히 이러한 기상이변으로 인한 거대재난사상의 증가는 대규모 수공구조물의 설계 및 평가에 적용되는 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitations, PMPs)의 산정에 많은 영향을 미치게 된다. 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO, 1986)에서는 PMPs를 어느 특정 위치에 주어진 호우 면적에 대하여 연중 어느 지정된 기간에 기상학적으로 발생할 수 있는 최대강수량으로 정의하였다. 그동안 PMPs는 파괴 시에 막대한 경제적 손실 및 대규모 인명피해와 극심한 사회 경제적 피해를 유발하게 되는 대규모 수공구조물 설계 시에 국한하여 적용되어 왔으나, 최근에는 거대재난사상의 추정을 위해서도 이용되고 있는 추세에 있다.

PMPs를 산정하기 위한 방법은 크게 수문기상학적 방법과 통계학적 방법, 최대우량 포락곡선방법으로 구분할 수 있다 (Lee, 2010). 그 중 수문기상학적 방법은 PMPs 산정방법 중 가장 대표적으로 사용되는 방법이며, 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로도 PMPs 추정을 위한 공식적인 방법으로 사용되고 있다.

PMPs 추정과 관련된 국내의 연구들을 살펴보면, 국내 사례로 Lee and Joung (1971)은 9개의 호우를 선정하여 낙동강 유역의 DADs (Depth-Area-Duration curves) 및 PMPs를 계산하였으며, Lee (1999)는 1977년부터 1996년까지의 12시간 지속 이슬점 및 가강수량, 호우의 최대화비를 분석, 전반적으로 내륙지방보다 해안지방에서 이슬점이 크게 나타나는 것을 보고하였으며, You et al. (2004)은 PMPs 추정의 주요인자인 가강수량이 어떤 기상인자와 가장 관련이 있는지를 살펴본 바 있다. 상대적으로 최근에 들어서는 Park et al. (2013)이 수문기상학적 방법 중 수분최대화비의 산정에 가장 주요인자인 가강수량의 변화를 토대로 현재 및 미래의 가능최대강수량을 비교하기도 하였다. 한편 수문기상학적 방법이 아닌 통계학적 방법을 이용하여 가능최대강수량의 추세를 분석한 연구가 진행되었으며(Choi et al., 2015), 통계학적 방법을 이용하여 미래의 1일 가능최대강수량을 전망한 연구결과(Sim et al., 2015)가 도출된 바 있다. 그러나 현재의 현업에서 사용 중인 PMPs 산정방법인 수문기상학적 방법을 이용하여 미래의

PMPs 변화를 살펴본 연구는 아직까지 보고되지 않고 있는 실정이다.

국외의 사례를 살펴보게 되면 Al-Mamun and Hashim (2004)이 말레이시아 반도 내의 장기간 호우사상에 대한 PMPs 추정 및 반도 내에서의 모든 기상관측소에 대해 PMP 값을 산출한 바 있으며, Tomlinson et al. (2008)은 미국 네브래스카 주의 PMP도를 산출하여 기존의 극한강우사상의 지속 시간 및 면적에 따른 강수량과 비교하였다. 최근에는 Kunkel et al. (2013)이 PMPs의 산정에 영향을 미치는 인자들에 대하여 분석한 후, 이러한 인자들이 미래의 PMPs에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 더 나아가 Lagos and Vargas (2014)는 GCM (General Circulation Model)과 RCM (Regional Climate Model)의 결과를 바탕으로 수문기상학적 방법과 통계학적 방법을 이용하여 미래의 PMPs를 전망한 바 있으며, Stratz and Hossain (2014) 또한 지역 대기모형인 RAMS를 이용하여 얻은 미래 이슬점의 변화를 통해 미래의 PMPs를 추정하기도 하였다. 이와 같이 GCM 또는 RCM 모형의 결과를 이용하여 미래 PMPs를 분석할 뿐만 아니라, 물리기반의 수치 대기 모형(예를 들어, MM5)을 이용하여 기왕 최대호우사상을 직접 최대화 및 전이시켜 PMPs 산출을 시도하는 연구도 진행되고 있음을 살펴볼 수 있다(Ohara et al., 2011; Ishida et al., 2014).

이와 같이 외국의 경우 다양한 미래 시나리오 및 다양한 기법에 의하여 미래의 PMPs 추정에 관심을 기울이고 있으나, 국내의 경우에는 가능최대강수량에 대한 연구 자체가 미비한 실정이며, 미래 시나리오를 이용하여 가능최대강수량의 변동을 직접적으로 확인하는 연구는 통계학적인 방법에 국한되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

이러한 원인으로서는 현업에 적용되는 PMPs 추정 사례가 대형 다목적댐 설계 등에 국한되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 상기 언급하였듯이 기상이변에 따른 거대재난사상에 대비하기 위해서는 PMPs와 같은 거대재난 시나리오에 대한 보다 적극적인 연구가 요구되고 있다. 또한 다가오는 미래에 대비하기 위해서도 기후변화에 따른 PMPs 변화를 살펴보는 것이 필수적일 것이다.

이에 본 연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 PMPs 변화를 연구해보고자 한다. PMPs는 수문기상학적인 방법에 의해 산출되며, 이 때 기존의 방법 중 지형영향비에 대한 최근의 연구경향을 반영하여 지형영향비 대신 산악전이비를 도입하여 PMPs를 산정하고자 한다. 미래 PMPs 추정을 위한 미래 강수 자료는 기상청에서 제공하는 12.5-km 해상도의 기상청 RCM 자료로부터 획득되어, 다양한 지속시간별 영향면적별로 현재

의 PMPs 추정값과 비교 분석이 수행된다. 본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오를 사용하였으며, 이는 현재에 비해 가장 급격한 기후변화를 가정하였을 때 발생할 수 있는 시나리오이다.

2. 연구방법

2.1 PMPs 산정방법

2.1.1 PMPs 구조

PMPs 산정의 기본개념은 관측된 최대강수량과 최대 수분과의 관계를 이용하여 관측강수량을 최대화하고 이를 다른 지역으로 전이하는 것을 근간으로 한다. PMPs를 추정하는 절차는 크게 수분최대화, 호우전이, 포락의 세단계로 나누어지며, 이를 좀더 세분화하여 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$P = R_P \cdot R_{HT} \cdot R_{VT} \cdot OTF \cdot OP \quad (1)$$

여기서 AP 는 조절된 강수량, R_P 는 수분최대화비, R_{HT} 는 수평전이비, R_{VT} 는 수직전이비, OTF 는 산악전이비, OP 는 관측강수량이다. 즉, 관측된 강수량은 이상적인 조건하에서 공급 가능한 수분상태를 가정하여 최대화되며(수분최대화), 최대화된 강수량을 우리가 원하는 어떤 지역에 전이시키기 위하여 전이지역의 공급 가능한 수분조건을 반영하여 조절되며(수평 및 수직전이비), 마지막으로 산악의 영향을 고려하여 최종적으로 전이되게 된다.

다양한 강우사상에 대하여 조절된 강수량을 얻은 후, 지속시간별 면적별로 포락하게 되면 PMPs를 얻을 수 있다. 이 때, 포락이란 어느 자료 군에서 최대값을 찾기 위한 한 과정으로서, PMPs 추정 시 최대화되고 전이된 강우 값을 지속시간별 면적별로 도시하여 최대값을 기준으로 매끄럽게 연결하는 기법이다. 수분최대화와 전이 등을 통해 호우효율성을 증가시킨 강수량 값을 얻었다고 하더라도, 관측기간이 충분하지 못하므로 다양한 지속기간 및 면적에서 추정된 강수량이 PMP에 근접하는 정도가 서로 다르게 나타나므로 이를 보정하기 위하여 실시하게 된다(MOLIT and K-water, 2008).

2.1.2 호우 분석 및 DADs 작성

먼저 PMPs 추정에 이용되는 첫 번째 기본 자료는 호우별로 시간 강수량 자료를 해석한 DADs 자료이다. 이를 위해 관측 기간 동안의 지점별 일 강우자료 및 시간 강우자료를 수집한다. 이러한 자료 중에서 일 강수량 130 mm 이상의 호우를 PMPs 분석대상 호우로 삼는다. 선택된 분석 호우의 지점별

시간 자료를 이용하여 다양한 크기의 영향면적에 다양한 지속기간을 가진 최대강수량을 산정함으로써, 호우별 DAD 곡선 군을 얻을 수 있다.

2.1.3 수분최대화 및 호우조절비

호우효율은 대기의 가강수량과 깊은 관계를 가지고 있으나, 가강수량을 직접 측정하기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 가강수량과 이슬점의 상관관계를 이용하여 효율을 평가하며, 이러한 호우효율에 대한 기본 개념으로 도출된 수분최대화비는 PMPs를 추정하는데 주요 골간을 이루고 있다. 참고로 가강수량(precipitable water)은 어떤 지점의 단위면적당 연직 공기기둥 내의 수증기가 응결하여 모두 강수로 내린다고 가정했을 때의 양을 의미한다.

수분최대화비는 12시간 지속 1,000 hpa 최대 이슬점(50-100년 빈도가 적용)에 의한 가강수량과 호우를 대표하는 기간의 12시간 지속 1,000 hpa 지속 이슬점에 의한 가강수량의 비로 산정된다. Miller et al. (1984)에 의하면 수분최대화의 상한계는 1.7이 가장 합리적인 상한계라고 제시하였고, 이보다 큰 경우는 기상학적 판단 및 자료에 대한 판단이 필요하다고 하였다. 따라서 본 연구에서도 수분최대화비의 상한계를 1.7로 설정하였다.

호우전이라 함은 호우를 호우가 발생한 지역에서 호우가 발생할 수 있는 지역으로 옮기는 것을 의미한다. 관측호우를 전이함에 따라 수정되는 비를 전이비라 하며, 수평전이비, 수직전이비, 산악전이비로 분리하여 호우전이비를 산정하였다. Miller et al. (1984)은 “수분최대화를 제외한 기타 비를 상한계 없이 사용하는 것은 호우구조상 불리하다”라고 주장한 바 있으며, 수평 및 수직전이비의 상한계로 1.2를 적용하였다. 이에 본 연구에서도 PMPs의 수평전이비 및 수직전이비의 상한계를 1.2로 설정하였다.

2.1.4 산악전이비

호우전이는 호우지대와 전이지대의 지형학적, 기상학적 동질성을 가정하고 있으나, 지형학적, 기상학적 동질성을 만족하는 객관적인 판단이 불가능하기 때문에, Miller et al. (1984)은 호우지대와 전이지대의 재현기간 100년 지속기간 24시간 확률강수량 차이에 기반한 지형영향비를 호우의 전이에 적용한 바 있으며, 우리나라에서도 이를 채용하여 현업에서 적용하여 왔다.

그러나 기존의 지형영향비는 산정방법의 모호성에 기인한 주관적인 요소가 많아 객관적인 지형영향비의 산출이 어렵기

때문에, 최근 미국에서는 지형영향비를 산악전이비로 대체하여 PMPs를 산정하고 있는 것으로 조사되었다(Tomlinson et al., 2013; Bill et al., 2014). 지형영향비를 대체하는 산악전이비(Orographic Transposition Factor; 이하 OTF)를 산정하는 방법은 다음과 같다. 예를 들어 강릉의 호우를 안동에 전이시키고 싶다면 먼저 안동과 강릉의 24시간 지속시간 연 최대치 시계열 및 빈도별 확률강우량을 구한다. 이후 호우지점인 강릉의 빈도별 확률강우량을 횡축으로, 전이지점인 안동의 확률강우량을 종축으로 하여 선형 회귀분석을 실시한다(Fig. 1). 선형 회귀분석을 통해 Fig. 1의 회귀공식(예를 들어, Fig. 1의 경우 $y = 0.056x + 140.19$)이 구해지면 x 에 호우지점의 지속시간 24시간의 기왕 최대 연 최대치 강우량을 대입하여 P_o 를 산정한다. 강우에 대해 조정된 P_o 를 P_i 로 나누어 주게 되면(Eq. (2) 참조) 강릉의 호우를 안동으로 전이하고자 할 때의 OTF를 구할 수 있다.

$$OTF = \frac{P_o}{P_i} \quad (2)$$

기존의 지형영향비의 경우 상한계로 1.1이 추천되었으나 (Miller et al., 1984), 현재 미국에서 PMPs 추정 시 OTF의 하한계 및 상한계로 각각 0.5와 1.5가 추천되고 있다. 따라서 본 연구에서도 OTF의 하한계 및 상한계를 0.5와 1.5로 설정하였다.

Fig. 1을 도출하기 위해 총 여섯 개의 자료를 이용하여 선형 관계를 도출하였음을 살펴볼 수 있으며, 이는 현재 미국에서 적용하는 방법(Tomlinson et al., 2013; Bill et al., 2014)을 그대로 전용하여 산악전이비 산정 시 선형관계를 이용하여 결과를 도출하였음을 의미한다. 이와 관련해서는 추후 지수형태 또는 이차함수 형태로 결과를 도출하는 방향 등 보다 다양한 방법에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2.2 기상자료

2.2.1

본 연구에서는 수문기상학적 방법을 이용한 PMPs를 산정하기 위하여 우리나라 기상청에서 40년 이상의 자료를 보유하고 있는 강우관측소 62개 지점을 대상으로 하였다. 선정된 지점은 Fig. 2와 같다.

자료의 기간은 RCP 시나리오의 현재기간 모의자료 기간과 같은 1981년부터 2005년까지이며, 일 강우 및 시간강우자료, 3시간 지속 이슬점 자료가 사용되었다. PMP 산출의 기준이 되는 공간적 해상도는 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 로 격자화하여 격자별로 PMPs를 산출하였으며, 지점 관측자료는 역거리 가중방법을 이용하여 공간적인 자료로 확장하여 적용하였다.

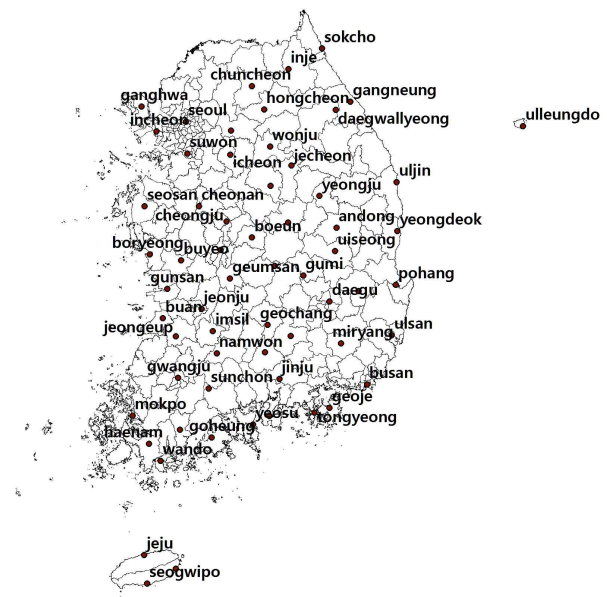


Fig. 2. Location of selected weather stations

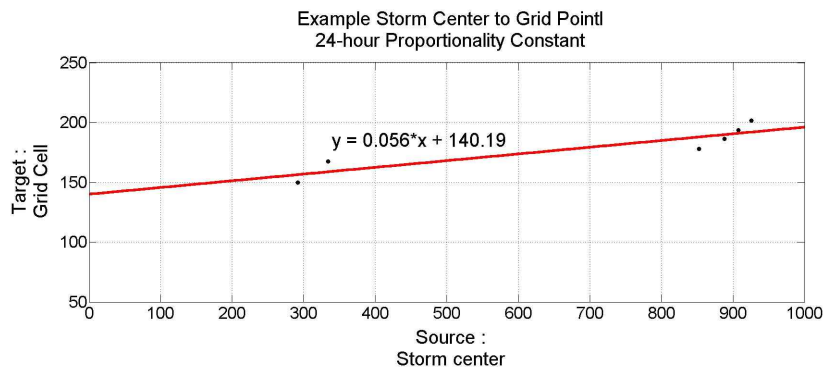


Fig. 1. Regression estimation for OTF

Table 1. Scale and resolution of climate change scenarios

Class	Variable	Form	Scenario	Spatial scale	Spatial resolution	Temporal resolution	Temporal scale	
Korea peninsula	Precipitation	BINARY	RCP 8.5	Longitude: 123°~133° Latitude: 32°~44°	About 12.5 km	Day (360-day)	Present	1981~2005
							Future	2021~2100

2.2.2 RCP

우리나라 기상청에서 제공하는 RCP는 세 가지의 공간해상도와 200년, 400년 제어적분으로 나뉘어져 있으며, 영국 기상청 해들리 센터의 기후변화 예측 모델인 HadGEM2-AO를 도입하여 생산한 135 km 공간해상도의 전지구 자료, 영국 해들리센터 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 사용한 12.5 km 공간해상도의 한반도지역 자료 그리고 1 km 공간해상도의 남한상세자료로 구성된다. 본 연구에서 사용한 자료는 Table 1과 같으며 기후변화정보센터(<https://www.climate.go.kr>)에서 획득하였다. 본 연구에서는 RCP 8.5 일 강우 시나리오를 이용하였으며, 이는 가장 극심한 기후변화를 가정하였을 때 나타날 수 있는 시나리오이다.

2.3 미래자료생성

2.3.1 편의보정

대다수 선행 연구에서는 RCP 일 강우자료의 전망 성능 검토 및 활용 가능성 검토 등을 수행하였다. 반면, 실제 활용 측면에서 RCP 일 강우자료의 적절성에 대한 평가와 관련된 연구는 부족한 실정이다. 최근의 연구에 따르면(Kim et al., 2015), 연 강수량은 RCM에 의하여 비교적 정확하게 예측될 수 있는 반면에 일 강수량의 경우에는 강수일수가 지나치게 많이 예측되는 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 관측자료와 RCP 8.5 자료의 차이를 극복하기 위해 편의보정을 실시하였다. 편의보정 방법은 Hawkins et al. (2012)이 제안한 방법을 적용하였으며, 지점별 월별로 각각 수행되었다. 이를 간단하게 나타내면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에

서 는 관측된 월강수량, R_p 는 RCM으로 모의된 현재기후로부터 도출된 월강수량, R_f 는 RCM으로 모의된 미래기후로부터 도출된 월강수량, R_{fc} 는 편의보정된 미래 월강수량이다.

예를 들어 1981~2005년 기간을 대상으로 RCM에서 모의된 서울기상관측소에 상응하는 격자의 1월 월강수량 R_p 와 1981~2005년에 서울기상관측소에서 관측된 1월 월강수량 R_h 사이에 아래와 같은 관계를 가정한다.

$$R_{pc} - \langle R_h \rangle = R_p - \langle R_p \rangle \tag{3}$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 평균 연산자이며, R_{pc} 는 편의보정된 현재기간 월강수량, σ_h 는 관측된 1월 월강수량 표준편차, σ_p 는 현재기간 모의자료의 월강수량 표준편차이다. 위 식을 재배열하면 아래와 같이 현재기간 모의자료의 편의보정된 월강수량을 얻을 수 있다.

$$R_{pc} = \langle R_h \rangle + \sigma_h \left(\frac{R_p - \langle R_p \rangle}{\sigma_p} \right) \tag{4}$$

Eq. (4)로부터 편의보정된 현재기간 모의자료의 월강수량은 관측자료의 평균과 표준편차가 같아지게 됨을 알 수 있다. Eq. (4)의 관계가 미래에도 그대로 적용된다고 가정하면 편의보정된 미래 월강수량을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$R_{fc} = \langle R_h \rangle + \sigma_h \left(\frac{R_f - \langle R_p \rangle}{\sigma_p} \right) \tag{5}$$

2.3.2 이동평균 된 변화인자

미래자료 편의보정을 통해 구해진 R_{fc} 는 지점별 월별로 구해진다. 그러나 Fig. 4에 나타난 바와 같이 RCM 자체의 불확실성으로 인하여 편의보정된 미래 월강수량 자료를 연별로 살펴볼 경우 강우의 변동성이 너무 큰 문제가 발생된다. 참고로 Fig. 4는 서울지점의 8월 자료를 대상으로 한

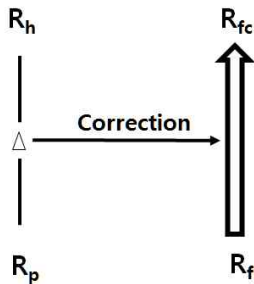


Fig. 3. Concept of bias correction

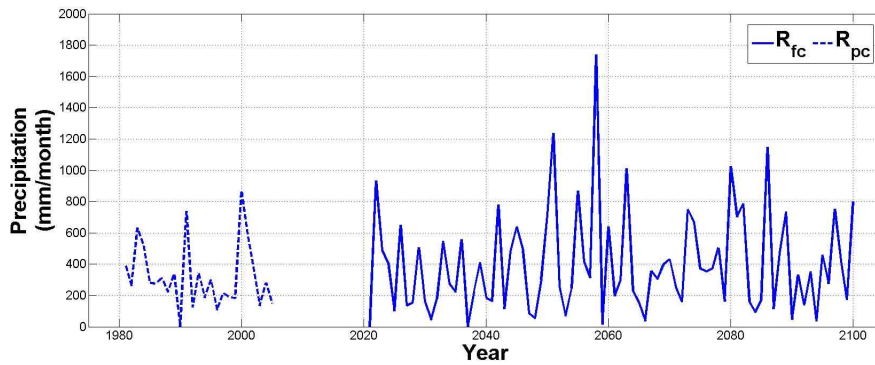


Fig. 4. Before applying the moving-averaged changing factor

보정 후의 강수량 결과이다. R_{pc} 의 표준편차는 관측자료의 표준편차와 같은 값인 207.55 (mm/month)이며, R_{fc} 의 표준편차는 325.22 (mm/month)로 미래자료의 변동성이 비현실적으로 과다하게 추정되고 있음을 살펴볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이를 방지하기 위하여 25년을 기준으로 1년씩 이동평균 하여 변화인자(changing factor)를 산출하여 적용함으로써 과다한 강우변동성을 보완하고자 하였다. 예를 들어, 2021-2045년의 편의보정 된 월강수량을 평균한 값 R_{fc} >를 관측된 월강수량 R_h >로 나눈 값 F_c 를 구한 후, 이를 2045년의 이동평균 된 변화인자로 정의하였다. 이와 같은 방법으로 다시 2022-2046년의 편의보정 된 월강수량을 통하여 2046년의 이동평균 된 변화인자를 산출할 수 있으며, 이를 반복하면 2100년까지의 이동 평균된 변화인자를 산출할 수 있게 된다. 이렇게 이동평균 된 변화인자는 지점별, 월별로 다양한 결과값들을 나타낸다. Fig. 5는 이동평균 된 여러 지점들의 결과값을 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 서울지점 8월 강수량을 대상으로 이동평균 된 변화인자를 보여주고 있다. 2100년까지 강수량의 변화가 그리 크지 않은 것을 확인 할 수 있다. 그러나 다른 지점들을 살펴보면(Fig. 5(b)와 (c)), 2100년까지의 강수변화가 매우 큰 폭으로 변화하고 있음을 살펴볼 수 있다. 현재와 비교할 때, 울산지점의 8월 강수량의 경우에는 약 1.8배 증가하는 것으로 전망되고 있으며, 남해지점의 경우 현재에 비해 3배 이상 증가하는 경우도 있음을 확인 할 수 있다. 전체적으로 살펴보면, 먼 미래로 갈수록 상대적으로 일관성이 떨어지는 결과를 보여주는 것으로 분석되었다.

2.3.3 반영된 미래 DAD 생성

기상청에서 제공하고 있는 RCP 시나리오 자료는 모두 일 강우자료이기 때문에, 미래에 예측된 주요 호우별 DAD를 작성하는데 직접적으로 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는

앞서 수행된 이동평균 된 변화인자를 이용하여 과거 관측된 주요 호우사상의 DAD로부터 강수변화가 반영된 미래의 DAD를 생성하였다. 먼저 관측된 주요 호우사상의 DAD들 중 i 번째 DAD를 $DAD_{hi}(x_i, t_i)$ 로 정의하였다. 여기서 x_i 는 i 번째 DAD를 대표하는 기상관측지점의 위치정보이며, t_i 는 해당 호우사상이 발생한 월이다. 이로부터 예를 들어 2045년 시기의 주요 호우사상의 DAD들 중 i 번째 DAD인 $DAD_{fi}(x_i, t_i)$ 는 아래와 같이 산출된다.

$$DAD_{fi}(x_i, t_i) = DAD_{hi}(x_i, t_i) \cdot F_c(t_i) \tag{6}$$

여기서 $F_c(t_i)$ 는 2045년 t_i 월에 대응하는 이동 평균된 변화인자이다. 이에 따라 2045년 기준으로 관측자료의 DAD 개수만큼 미래 DAD를 생성할 수 있게 되며, 이를 바탕으로 2045년 기준의 PMPs를 산출하게 된다. 이 때, 수분최대화 및 호우조절비는 관측된 값과 같다고 가정하였다. 이와 같은 방법으로 2045년부터 2100년까지 년별로 미래 PMPs가 산출된다.

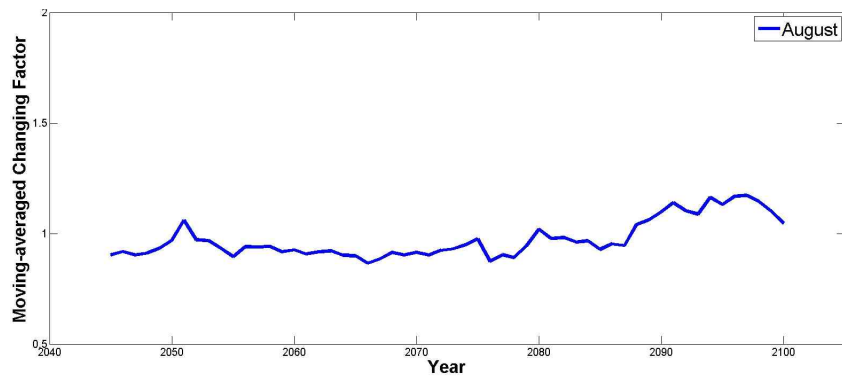
즉, 과거 자료로부터 선택된 주요호우별 DAD 곡선군들에 해당 년의 해당 월의 이동평균 된 변화인자를 곱함으로써, 미래 특정 년도별 DAD 곡선군들을 획득하게 된다.

3. 결 과

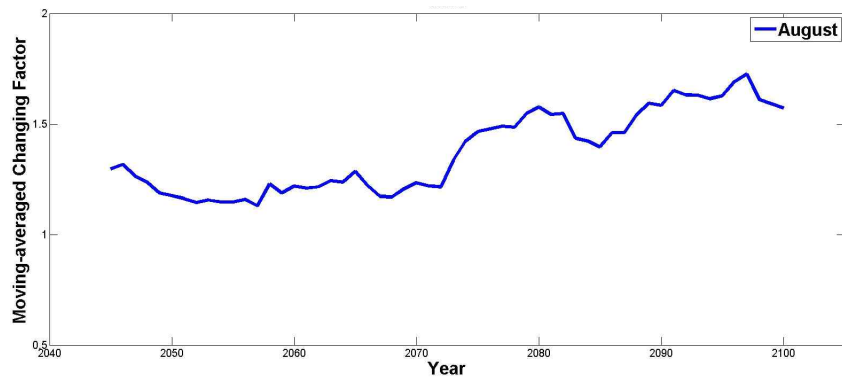
3.1 과거자료를 이용한 PMPs 결과

3.1.1 관측 최대호우

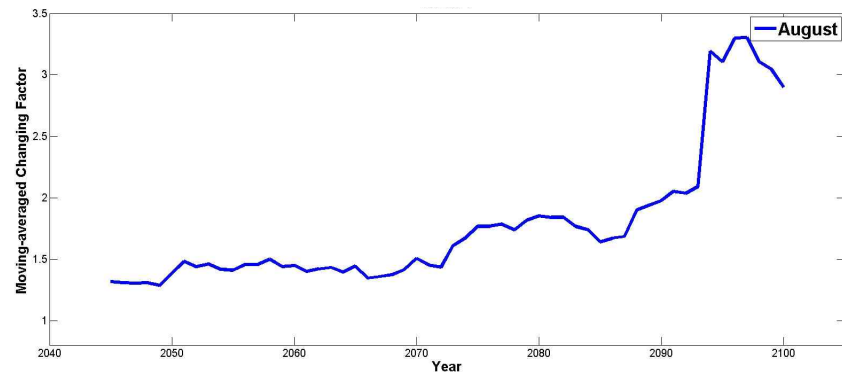
본 절에서는 최근까지 우리나라에 큰 피해를 준 호우가 어떤 것인지를 확인하기 위하여 지속시간별 영향면적별 DAD 분석을 통하여 우리나라 관측 최대 호우를 아래 표(Table 2)에



(a) Seoul



(b) Ulsan



(c) Namhae

Fig. 5. Moving-averaged changing factors in august

정리하였다. 호우명은 호우시작년, 월, 일, 지속일로 이루어져 있다. 아래 표를 살펴보면 대부분의 지속시간 및 면적에서 2002년 8월 29일 발생하여 4일 동안 지속된 태풍 루사에 의한 DAD가 관측 최대값을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 짧은 지속시간 및 작은 면적의 경우 2000년 이전의 호우가 대부분 지배하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2 이용한 PMPs

본 절에서는 1981년-2005년 자료를 이용하여 PMPs를 산정한 결과를 나타내었다. 아래의 그림(Fig. 6)은 분석된 PMP도 중에서 특정 지속시간별 영향면적별 PMP도 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 연안지역의 PMPs가 내륙지방보다 크게 나타나는 모습을 확인할 수 있다. 또한 강릉을 중심으로 주변지역과 비교하여 PMPs가 크게 나타나는 것을 볼 수 있는

Table 2. Observed maximum storm events

Duration (hr) \ Area (m)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	R1999090904	R1998080502	R1998080502	R1998080502	R1998080502	R1998080502	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904
100	R1999090904	R1998080502	R1998080502	R1998080502	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904
225	R2002082904	R1998080502	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904
400	R2002082904	R1998080502	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904
900	R2002082904	R1998080502	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904
2,025	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904
4,900	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R1981082808	R1981082808
10,000	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R1981082808	R1981082808
19,600	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R2002082904	R1981082808	R2002082904	R2002082904	R1981082808	R1981082808

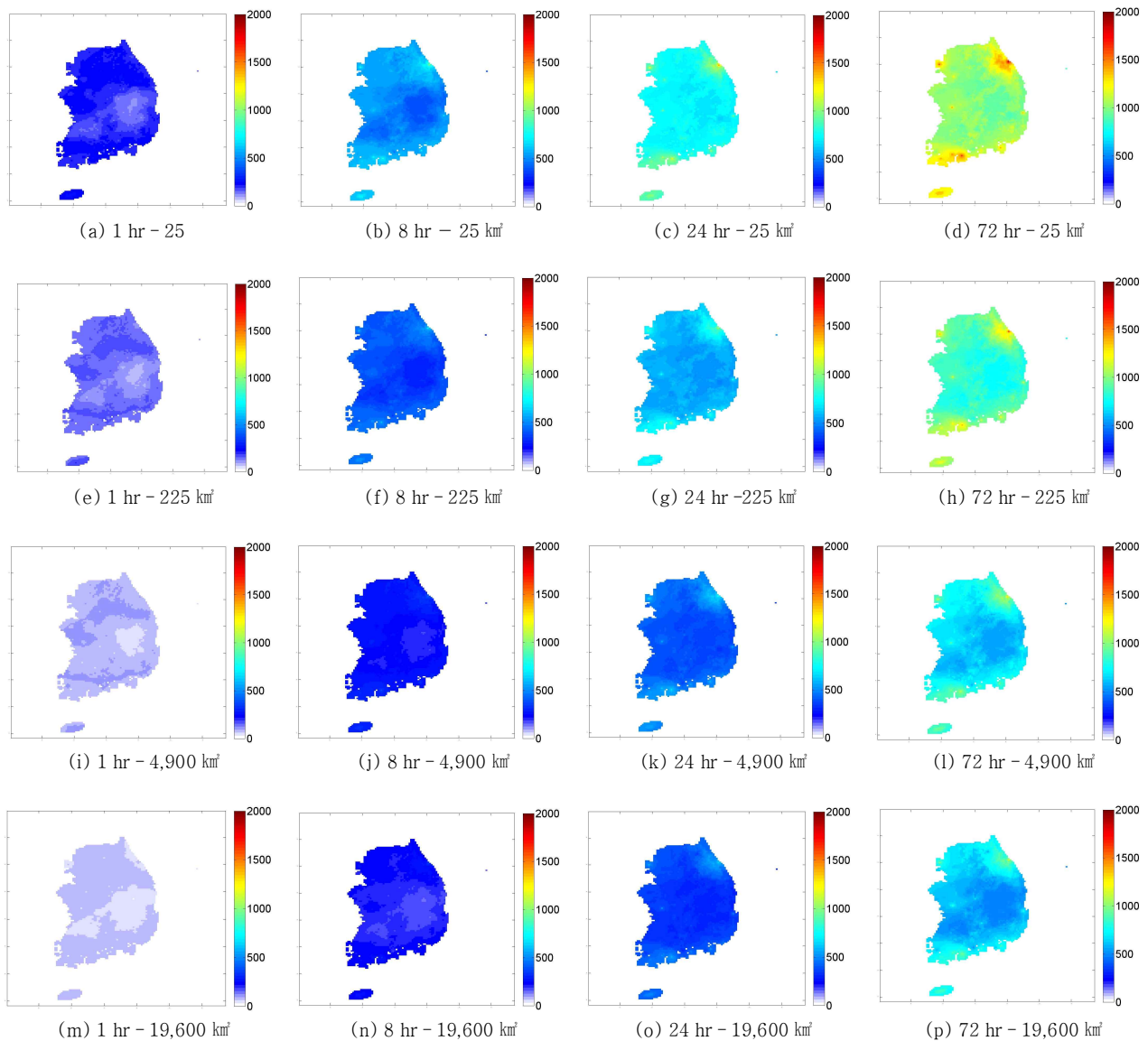


Fig. 6. PMP maps obtained from observed data

Table 3. Grid-averaged values in historical PMPs

Duration (hr) Area (m)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	205.5	279.9	381.5	457.4	520.3	624.3	721.4	754.4	899.9	1049.7
100	163.1	225.5	312.0	377.4	432.0	523.0	612.7	646.6	791.8	939.3
225	142.5	198.7	277.4	337.3	387.5	471.6	556.9	590.8	734.7	880.2
400	129.5	181.7	255.2	311.4	358.7	438.2	520.4	554.2	696.8	840.7
900	113.1	160.1	226.9	278.3	321.8	395.1	473.1	506.5	646.7	788.0
2,025	98.8	141.1	201.7	248.7	288.6	356.3	430.0	462.9	600.2	738.7
4,900	85.3	123.0	177.4	220.0	256.4	318.3	387.6	419.7	553.4	688.5
10,000	75.8	110.0	160.0	199.3	233.0	290.6	356.5	387.8	518.4	650.6
19,600	67.7	99.1	145.1	181.6	212.9	266.7	329.4	359.9	487.4	616.8

Table 4. Standard deviations in historical PMPs

Duration (hr) Area (km ²)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	28.8	36.5	47.3	56.2	64.1	78.0	65.5	71.3	89.6	106.0
100	22.8	28.9	37.9	45.4	52.2	64.6	59.7	66.2	86.6	105.1
225	19.9	25.3	33.3	40.1	46.3	57.8	56.8	63.5	85.1	104.6
400	18.1	23.0	30.4	36.7	42.6	53.5	54.9	61.7	84.0	104.3
900	15.9	20.2	26.7	32.4	37.8	48.0	52.4	59.3	82.5	103.7
2,025	13.9	17.7	23.4	28.6	33.6	43.1	50.0	57.0	80.8	103.0
4,900	12.1	15.3	20.4	25.0	29.5	38.3	47.5	54.5	79.0	102.1
10,000	10.8	13.7	18.2	22.4	26.6	34.9	45.6	52.6	77.5	101.2
19,600	9.7	12.3	16.4	20.2	24.1	31.9	43.8	50.8	76.0	100.2

데, 이는 2002년 우리나라를 강타한 태풍 루사의 영향에 의해 강릉의 확률강우량이 높게 나타났으며 이러한 결과가 산악전 이비에 영향을 주었기 때문으로 분석되었다.

Table 3과 4는 1981년-2005년의 자료를 이용하여 구한 PMPs의 지속시간별 면적별 전체 격자의 평균값 및 표준편차 값을 보여주고 있다. 지속시간 24시간 영향면적 25 km²의 경우 평균적으로 750 mm 정도의 PMPs가 산출되며, 공간적인 표준편차는 71 mm 정도가 됨을 살펴볼 수 있다. 공간적인 변동 계수는 10-16% 정도로 계산되었다.

3.2 미래 강우변동에 따른 PMPs

본 절에서는 미래 기간에 따라 보정된 이동 평균된 변화인자를 이용하여 DADs를 변동시킨 후 PMPs를 재산출한 결과를 나타냈다. 본 연구에서는 2045년, 2070년, 2100년의 강우변동에 따른 PMPs 결과를 확인해 보았다.

먼저 2045년 강우자료를 이용한 PMPs 산정결과는 Table 5와 6과 같다. Table 5와 6은 미래 강우변동에 따른 기준년도별 지속시간별 영향면적별 PMPs를 산정한 후, Table 3과 4와

같이 공간적인 현황 표를 작성, 이를 과거자료로부터 산출된 결과와 비교하여 백분율로 나타낸 결과이다. 즉, 기준년도 2045년의 지속시간 24시간 영향면적 25 km²의 경우 평균적으로 874 mm 정도의 PMPs가 계산되고 있음을 의미한다. 이는 연평균 3 mm 정도 PMP가 증가하는 경향을 보이고 있다고 보고한 Choi et al. (2015)의 결과와 일치하는 결과이다.

지속시간 4시간 이상에서는 모든 영향면적에서 PMPs가 증가할 것으로 예측되고 있음을 살펴볼 수 있다. 표준편차 또한 지속시간 4시간 이상에서는 모든 영향면적에서 증가하는 것으로 나타남에 따라 지역별 PMPs의 차이가 지금보다 더 커질 가능성이 있음을 알 수 있다. 다만, 지속시간 2시간 이하의 PMPs의 경우에는 현재와 비교하여 작거나 거의 같게 PMPs가 산출되고 있음을 살펴볼 수 있다.

기준년도를 2070년으로 한 경우의 PMPs 전망결과는 Table 7과 8에 나타내었다. 2045년의 결과와 비슷한 경향성을 보이고 있으나, PMPs 증가율이 2045년보다는 더 크게 나타나고 있음을 살펴볼 수 있다. 그러나 공간적인 변동성은 2045년보다도 대체적으로 작아지는 것으로 예측되었다. 참

Table 5. Future PMPs change rate in 2045

Duration (hr) Area (m)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	98.8	105.2	112.3	117.1	120.8	126.1	115.8	115.8	114.1	112.6
100	95.6	102.3	109.8	114.8	118.6	124.1	117.4	117.0	114.5	112.4
225	93.8	100.7	108.3	113.4	117.3	123.0	118.4	117.8	114.7	112.3
400	92.6	99.5	107.3	112.5	116.4	122.2	119.1	118.3	114.8	112.2
900	90.9	97.9	105.9	111.1	115.2	121.1	120.0	119.0	115.0	112.1
2,025	89.2	96.4	104.5	109.9	114.0	120.0	121.0	119.8	115.1	112.0
4,900	87.5	94.7	103.0	108.5	112.7	118.9	122.1	120.6	115.3	111.8
10,000	85.9	93.5	101.8	107.4	111.7	117.9	123.0	121.3	115.5	111.7
19,600	84.8	92.2	100.8	106.3	110.7	117.1	123.9	122.0	115.6	111.6

Table 6. Future PMPs standard deviation change rate in 2045

Duration (hr) Area (km ²)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	85.7	103.3	125.2	137.2	144.7	154.1	193.3	186.8	177.3	174.7
100	80.8	99.0	122.0	134.7	142.6	152.5	189.7	181.1	167.2	162.1
225	78.8	97.2	120.7	133.8	142.0	151.9	187.4	177.8	161.5	155.1
400	77.8	96.3	120.1	133.4	141.7	151.7	185.7	175.5	157.7	150.3
900	76.9	95.5	119.6	133.3	141.7	151.7	183.3	172.3	152.6	144.1
2,025	76.5	95.1	119.6	133.5	142.1	151.9	181.1	169.4	147.9	138.4
4,900	76.6	95.3	120.1	134.3	142.9	152.4	178.7	166.4	143.2	132.7
10,000	77.0	95.8	120.9	135.2	143.8	153.1	176.9	164.2	139.7	128.5
19,600	77.6	96.6	121.9	136.4	144.9	153.8	175.4	162.2	136.6	124.8

Table 7. Future PMPs change rate in 2070

Duration (hr) Area (km ²)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	84.9	91.7	99.3	104.6	108.6	114.6	132.5	133.2	134.5	135.5
100	83.8	91.4	99.9	105.6	110.1	116.7	133.0	133.0	132.5	132.3
225	83.2	91.2	100.2	106.3	110.9	118.0	133.2	132.9	131.3	130.5
400	82.7	91.0	100.4	106.7	111.6	118.8	133.4	132.8	130.5	129.3
900	82.1	90.9	100.7	107.4	112.5	120.1	133.7	132.6	129.4	127.5
2,025	81.6	90.6	101.0	108.0	113.4	121.4	133.9	132.5	128.2	125.8
4,900	80.9	90.4	101.4	108.8	114.4	122.9	134.2	132.4	127.0	123.9
10,000	80.2	90.4	101.7	109.3	115.2	124.1	134.4	132.3	126.0	122.4
19,600	79.9	90.1	102.0	109.9	116.0	125.2	134.7	132.2	125.1	121.0

고로 지속시간 24시간 영향면적 25 km²의 경우 현재보다 33% 정도 PMPs가 증가하는 것으로 전망되었으며, 이는 연평균 3.5 mm 정도의 PMPs 증가율을 의미한다.

기준년도를 2100년으로 한 경우의 PMPs 전망결과는 Table 9와 같다. 모든 지속시간별 영향면적별로 PMPs가 현재

보다 크게 증가하며, 심지어는 2배 이상 증가하는 결과를 산출하고 있음을 살펴볼 수 있다. 계산상으로는 이러한 값이 도출되고 있으나, PMPs가 2배 이상 증가한다는 전망은 합리성을 부여하기 곤란할 것으로 판단된다. 오히려 이러한 결과는 먼 미래로 갈수록 기후모델 전망결과의 불확실성이 매우 커질

Table 8. Future PMPs standard deviation change rate in 2070

Duration (hr) Area (m)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	112.1	106.2	93.5	83.3	77.1	73.5	103.3	101.6	108.9	117.5
100	109.6	108.9	101.1	92.5	86.2	80.0	105.3	103.3	109.3	116.3
225	108.0	110.4	105.8	98.4	92.4	85.3	107.1	104.8	109.6	115.5
400	106.7	111.4	109.2	102.9	97.2	89.7	108.5	105.9	109.8	114.9
900	104.9	112.8	114.2	109.5	104.4	96.7	110.7	107.6	110.0	114.0
2,025	102.9	114.2	119.4	116.5	112.2	104.7	112.9	109.4	110.1	113.0
4,900	100.6	115.6	125.3	124.5	121.2	114.2	115.4	111.2	110.2	111.8
10,000	98.7	116.6	130.2	131.3	129.0	122.5	117.3	112.7	110.2	110.8
19,600	96.9	117.5	134.9	138.0	136.6	130.7	119.1	114.0	110.1	109.9

Table 9. Future PMPs change rate in 2100

Duration (hr) Area (km ²)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
25	176.7	171.7	167.3	164.7	162.8	160.2	152.0	156.6	169.1	177.3
100	172.1	170.5	169.1	168.3	167.7	166.7	162.5	166.1	175.5	181.5
225	169.5	169.8	170.2	170.4	170.6	170.7	168.9	172.0	179.4	184.0
400	167.6	169.2	171.0	172.0	172.7	173.5	173.7	176.3	182.1	185.7
900	165.2	168.5	172.1	174.2	175.6	177.6	180.5	182.4	186.1	188.2
2,025	162.7	167.7	173.2	176.4	178.7	181.8	187.7	188.8	190.2	190.8
4,900	159.9	166.8	174.5	178.9	182.1	186.5	195.8	196.0	194.7	193.6
10,000	157.7	166.3	175.4	180.9	184.8	190.4	202.6	202.0	198.4	195.8
19,600	155.7	165.6	176.4	182.8	187.5	194.1	209.2	207.8	201.9	197.9

수 있음을 의미하는 것으로 보는 것이 더 타당할 것이다. 앞서 나타낸 Fig. 5(b), 5(c)의 경우처럼 상대적으로 먼 미래로 갈수록 현재에 비해 3배 이상의 강수량 증가가 전망되고 있으며, 이로부터 PMPs도 매우 큰 폭으로 증가하는 결과가 산출되게 된다. 따라서 이러한 부분은 추후 보다 심도 깊은 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 과거자료를 이용하여 1981~2005년의 PMP 산정 및 기상청 RCP 8.5 일 강수량 자료를 이용하여 미래 강우변동에 따른 PMPs의 변화를 분석하였다. 이 때, 기존의 PMPs 산정절차 중 지형영향비 부분은 최근의 경향을 반영하여 산악전이비로 대체하여 적용하였다.

먼저 과거자료를 이용한 PMPs 산정 결과를 살펴보면 대부분의 지속시간과 영향면적에서 내륙보다는 연안에서의 PMPs가 상대적으로 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

또한 다른 지역에 비하여 강릉인근지역의 PMPs가 더 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었는데 2002년 우리나라에 내습한 태풍 루사의 영향 때문인 것으로 분석되었다.

미래 강우자료를 이용한 PMPs 전망 결과, 2045년의 경우 지속시간 4시간 이상에서는 현재보다 PMPs가 증가하는 것으로 예측되었으며, 공간적인 편차도 더 커지는 것으로 나타났다. 또한 지속시간 24시간 영향면적 25 km² 기준으로 PMPs는 우리나라 평균적으로 연간 3 mm 정도 증가하는 추세를 살펴볼 수 있었다. 2070년의 경우에는 2045년의 경향이 계속 이어져 지속시간 4시간 이상에서의 PMPs가 증가하는 것으로 예측되었으나, 공간적인 변동성은 다소 줄어드는 것으로 나타났다. 2100년의 경우에는 현재와 비교하여 PMPs가 큰 폭으로 증가하는 것으로 예측되었으나, 이러한 결과는 미래 전망자료의 불확실성이 더 먼 미래로 갈수록 매우 증가할 수도 있음을 의미하는 것으로 해석되었다.

분석된 결과는 미래의 기후변화에 따라 변화하는 PMPs의 거동을 살펴볼 수 있을 것으로 판단되며, 향후 다양한 기후변화 기후시나리오에 따른 PMPs의 변화 연구에 초석을 제공할

수 있을 것으로 기대된다.

다만 GCM 또는 RCM의 산출물인 RCP 시나리오가 국내 과거 관측 기후를 잘 재현하지 못한다는 사실은 이에 따른 응용 연구의 결과 또한 부정확할 수 밖에 없다는 것을 의미할 것이다. 그러나 이를 대체할 수 있는 마땅한 현실적인 대안이 없다는 점을 고려하였을 때 본 연구에서 제시하는 방법론 및 결과는 현재 주어진 상황에서 미래의 PMPs 변화를 살펴보기 위한 최선의 방안인 것으로 판단된다. 이러한 한계점을 보완하기 위하여 최근 해외에서는 기후모델을 직접 구동하여 미래 기후시나리오에 따른 PMPs를 생산하는 방법에 대한 연구들 (Ohara et al., 2011; Ishida et al., 2014)이 진행되고 있으며, 따라서 우리나라도 이와 같은 방법론의 적용이 앞으로는 진행되어야 할 것이다.

또한 본 연구에서 RCP 8.5 강우 시나리오를 이용하여 분석한 이유는 현재에 비해 가장 급격한 기후변화를 가정하였을 때 발생할 수 있는 시나리오이기 때문이다. 추후 RCP 8.5 이외에 시나리오 및 다양한 기후모형으로부터의 결과를 추가적으로 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 미래강우자료 외에도 이슬점 등과 같이 다른 기후요소가 PMPs 산정에 영향을 미치고 있기 때문에, 이에 대한 분석이 추후 요구된다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 기후변화 시나리오의 적용뿐만 아니라 강우변동 이외의 요소를 고려한 PMPs의 변화를 알아보는 것이 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Al-Mamun, A., and Hashim, A. (2004). "Generalised Long Duration Probable Maximum Precipitation (PMP) Isohyetal Map for Peninsular Malaysia." *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 4, No. 1.
- Casas, M.C., Rodriguez, R., Prohom, M., Gazquez, A., and Redano, A. (2011). "Estimation probable maximum precipitation in Barcelona (Spain)." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 1322-1327.
- Choi, Y.J., Sim, K.B., Kim, S.D., and Kim, E.S., (2015). "Trend Analysis of 1-Day Probable Maximum Precipitation." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 1, pp. 369-375.
- Hawkins, E., Osborne, T.M., Ho, C.K., and Challior, A.J. (2012). "Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 170, pp. 19-31.
- Ishida, K., Kavvas, M.L., Jang, S., Chen, Z.Q., Ohara, N., and Anderson, M.L. (2014). "Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over Three Watersheds in Northern California: Atmospheric Boundary Condition Shifting." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 4.
- Kappel, B., Muhlestein, G., Hultstrand, D., McGlone, D., Steinhilber, K., Lawrence, B., Rodel, J., Parzybok, T., and Tomlinson, E. (2014). *Probable Maximum Precipitation Study for Wyoming*. Applied Weather Associates. U.S., pp. 99-102
- Kappel, B., Tomlinson, E., Haapala, J., and Sadden, B. (2014). *Susitna-Watana Hydroelectric Project Probable Maximum Precipitation Study*. 14-07-REP, Alaska Energy Authority. U.S., pp. 40-46.
- Kim, J.H., and Joo, J.G. (2015). "Characteristics of Daily Precipitation Data Based on the Detailed Climate Change Ensemble Scenario Depending on the Regional Climate Models and the Calibration." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 261-272.
- Kunkel, K.E., Karl, T.R., Easterling, D.R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., and Hennon, P. (2013). "Probable maximum precipitation (PMP) and climate change." *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, No. 7, pp. 1402-1408.
- Lagos-Tuniga, M.A., and Vargas, M.X. (2014). "PMP and PMF estimations in sparsely-gauged Andean basins and climate change projections", *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 59, No. 11, pp. 2027-2042.
- Lee, K.H. (1999). "A hydrometeorological study on the maximum 12-h persisting dew point at 1000 hpa for moisture maximization of heavy precipitation recorded in South Korea." *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 35, No. 4, pp. 519-530.
- Lee, K.H., and Joung, C.H. (1971). "Generalized Estimate of Probable Maximum Precipitation over the Nakdong River Basin." *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 7, No. 2, pp. 57-64.
- Lee, S.R. (2010). *Calculation for the Probable Maximum Flood of the Hapcheon Dam Watershed*. Master's Thesis, dissertation, Gyeongsang National University.
- Miller, J.F., Hansen, E.M., and Fenn, D.D. (1984). *Probable Maximum Precipitation for The Upper Deerfield River Drainage, Massachusetts/Nermont*, NOAA Technical Memorandum, NWS HYDRO 39, National Weather Service, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, MD, 36 pp.
- Ministry of Construction & Transportation. (2000). *Estimation of Korea Probable Maximum Precipitation, 1999 water management techniques developed research report*, Vol. 2.
- Ministry of Land Infrastructure and Transport and K-Water,

- (2008). *PMP and PMF estimation procedures guidance service for final report*, K-water.
- Ohara, N., Kavvas, M.L., Kure, S., Chen, Z.Q., Jang, S., and Tan, E. (2011). "Physically based estimation of maximum precipitation over American River watershed, California." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16. No. 4. pp. 351-361.
- Park, M.G., Park, M.J., Kim, S.D., and Joo, J.G. (2013). "Extreme Storm Estimation by Climate Change Using Precipitable Water." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 1, pp. 121-127.
- Sim, K.B., Lee, O.J., Kim, S.D., and Kim, E.S. (2015). "1-day Probable Maximum Precipitation in accordance with AR5 RCPs in KOREA." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 273-280.
- Stratz, S., and Hossain, F. (2014). "Probable Maximum Precipitation in a Changing Climate : Implications for Dam Design." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 12.
- Tomlinson, E., Kappel, B., Diederich, P., Parzybok, T., and Hultstrand, D. (2008). *Nebraska Statewide Probable Maximum Precipitation (PMP) Study*, Applied Weather Associates.
- Tomlinson, E., Kappel, B., Muhlestein, G., Hulstrand D., and Parzybok, T. (2013). *Probable Maximum Precipitation Study for Arizona*, Applied Weather Associates. U.S., pp. 78-92.
- World Meteorological Organization (1986). *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*, Second Edition, Operational Hydrology Report No. 1, WMO No. 332.
- World Meteorological Organization (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation(PMP)*, WMO No. 1045.
- You, C.S., Shin, C.K., Yoon, Y.N. (2004). "Estimation and Analysis of Precipitable Water." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 5B, pp. 413-420.