



예보강우 시간분해를 위한 Multiplicative Cascade 모형의 적용성 평가

Applicability of a Multiplicative Random Cascade Model for Disaggregation of Forecasted Rainfalls

김대하* · 윤선권* · 강문성** · 이경도****†

Kim, Daeha · Yoon, Sun-Kwon · Kang, Moon Seong · Lee, Kyung-do

Abstract

High resolution rainfall data at 1-hour or a finer scale are essential for reliable flood analysis and forecasting; nevertheless, many observations, forecasts, and climate projections are still given at coarse temporal resolutions. This study aims to evaluate a chaotic method for disaggregation of 6-hour rainfall data sets so as to apply operational 6-hour rainfall forecasts of the Korean Meteorological Association to flood models. We computed parameters of a state-of-the-art multiplicative random cascade model with two combinations of cascades, namely uniform splitting and diversion, using rainfall observations at Seoul station, and compared statistical performance. We additionally disaggregated 6-hour rainfall time series at 58 stations with the uniform splitting and evaluated temporal transferability of the parameters and changes in multifractal properties. Results showed that the uniform splitting outperformed the diversion in reproduction of observed statistics, and hence is better to be used for disaggregation of 6-hour rainfall forecasts. We also found that multifractal properties of rainfall observations has adequate temporal consistency with an indication of gradually increasing rainfall intensity across South Korea.

Keywords: Rainfall disaggregation; Multiplicative cascade; Flood risk

1. 서론

기상관측자료와 기후변화 시나리오를 이용한 여러 연구에서 우리나라의 홍수 위험은 증가할 것으로 예상되고 있다 (Lee et al., 2011a). 기상 관측자료의 평균 강우강도는 점점 증가하고 있으며, 인구밀도가 높은 곳의 불투수 면적은 증가하여 돌발홍수의 위험은 매우 상시적이다 (Choi, 2002; Jung et al., 2011; Lee et al., 2011a). 농경지역 또한 토양의 침투능과 하천의 배수능이 좋지 않은 경우가 많아 침수피해의 사각지대가 아니며 이에 대한 대비가 반드시 필요하다. 따라서 수문기상학적 홍수예측은 재난대비 필수적인 요소이며 지속적인 성능 향상이 요구되고 있다.

우리나라에서 홍수예측은 관측 강우자료를 기반으로 하는 경우가 보통이다 (Han et al., 2009). 하지만 관측 강우만으로 홍수

예측을 할 경우 침투유량의 크기와 시간을 강우 관측 이후에만 알 수 있기 때문에 대비책을 마련할 시간이 충분치 않을 가능성이 크다. 예보 강우를 이용한 홍수 모의가 이를 극복할 수 있는 좋은 방법이기도 하지만 (Lee et al., 2011b), 홍수예측에는 항상 시강우량 이상의 고해상도 강우가 요구되기 때문에 그 적용이 쉽지 않을 때가 많다. 예를 들어, 기상청의 공식 예보자료인 동네예보 (<http://www.kma.go.kr/weather/forecast/timeseries.jsp>)는 6시간 단위로 제공되고 있어 예보의 정확성을 차치하더라도 홍수모형의 입력자료로 사용되기 어려운 형태를 가지고 있다. 통상적으로 1시간 단위 강우 시계열이 홍수 해석에 요구되고 (Linznar et al., 2011, Koutsoyiannis and Langousis, 2011), 특히 유역의 반응이 매우 빠른 도시지역을 모의할 때에는 1시간보다 짧은 고해상도 강우자료의 가용여부가 해석의 정확도에 큰 영향을 미치게 된다 (Berne et al., 2004). 그러나 예보자료 뿐만 아니라 강우 관측이 일단위로만 이루어지는 경우도 여전히 허다하며 기후변화 시나리오 또한 일단위나 월단위로 제공되고 있어 강우자료의 시간적 해상도 문제는 홍수해석을 할 때 겪을 수 있는 전형적인 문제이다 (Lombardo et al., 2012).

시간적 해상도가 낮은 일강우자료, 기상예보 혹은 기후변화 시나리오를 홍수모형과 적절히 연결하기 위해서는 강우의 시간적 시간분해가 필수적이다. 그리고 분해된 강우를 이용할 경우에는 당연히 분해기법의 성능이 홍수해석의 신뢰도에 큰 영향을 미치게 된다 (Müller and Haberlandt, 2015; 2016). 통계학적 혹은 추계학적 방법이 주로 사용되는데 그 예로 Poisson cluster 모형

* Climate Application Department, APEC Climate Center
** Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
*** National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration
† Corresponding author
Tel.: +82-63-238-2512 Fax: +82-63-238-3823
E-mail: kdlee11@korea.kr

Received: September 6, 2016
Revised: September 21, 2016
Accepted: September 26, 2016

(Onof et al., 2000), Markov Chain 모형 (Sørup et al., 2012) 등이 있다, 특히 프랙탈 이론에 기반을 둔 카오스적 방법인 Multiplicative Random Cascade (MRC) 모형은 강우를 시공간적 분해 모두에 다양하게 적용될 수 있는 편의성이 높은 방법이다 (Paschalis et al., 2014; Licznar et al., 2015).

MRC모형은 Mandelbrot (1974)이 제안한 프랙탈 특성의 일관성을 이용하는 모형으로 수문분야에서는 Gupta and Waymire (1993)가 강우장의 공간해상도를 높이기 위한 방법으로 그 사용이 시작되었다. 추후 점차 시간분해로 사용범위가 넓어졌고 (Olsson, 1998) 높은 편의성을 기반으로 레이더 강우의 시간분해를 통한 도시구역의 홍수해석 (Licznar et al., 2015), 기후 패턴을 고려한 시간 분해 (Lisniak et al., 2013) 등 사용 분야가 더욱 광범위해지고 있다. MRC모형은 통상 단수지점의 자료를 시간분해하는 경우로 사용이 제한되어 왔지만 최근 Müller and Haberlandt (2015, 2016)가 복수지점의 강우분해방법을 제안하여 MRC 모형을 이용한 공간상관 재현이 가능해졌고 시강우의 재현특성 또한 매우 향상된 것으로 확인되었다.

본 연구의 목적은 이렇게 향상된 MRC모형을 간략화 했을 때 6시간 강우를 1시간으로 분해할 때 충분한 성능을 보이는 지 평가하고 홍수예보에 대한 적합성을 확인하는 것이다. 기상청 공식

예보자료의 해상도인 6시간 강우량의 시간분해를 위해 시강우량을 6시간까지 집성하여 프랙탈 특성을 확인하였고 간략화된 MRC모형을 집성된 강우에 다시 적용하여 통계특성의 재현성을 평가하였다. 아울러 프랙탈 특성의 시간적 변동성을 파악해 우리나라 홍수위험도의 변화를 평가하였다.

II. 연구방법 및 자료

1. Multiplicative Random Cascade (MRC) 모형

본 연구에 사용된 MRC 모형은 Müller and Haberlandt (2015)가 제시한 Microcanonical Random Cascade 모형으로 Fig. 1에 기본 원리를 도식화하였다. Müller and Haberlandt (2015)는 24시간 강우를 1시간 강우로 분해하기 위해 Uniform Splitting (Fig. 1(a)) 과 Diversion (Fig. 1(b)), 두 가지 형태의 Cascade 모형을 독일 Aller-Leine 강 유역에 시험 적용하였고 Uniform Splitting의 우수한 성능을 확인하였다. Uniform Splitting은 24시간 강우를 먼저 3개의 8시간 강우로 분해하고 8시간 강우를 다시 3회에 걸쳐 1/2로 분해하는 방법이고 반면 Diversion은 24시간 강우를 5회에 걸쳐 1/2로 분해한 후 0.75시

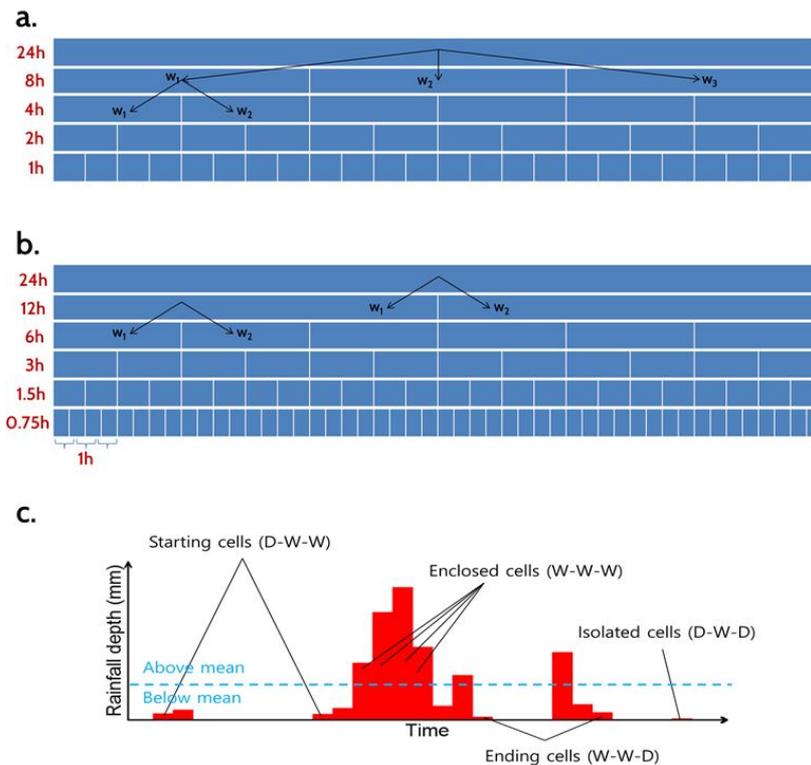


Fig. 1 The concepts of uniform splitting (a), diversion (b), and categorization of cell location and amount for splitting (c). W and D indicates wet and dry cells respectively

간으로 분해된 강우를 다시 1시간으로 간략히 집성하는 방법이다.

홍수예측에 사용될 예보강우를 동네예보자료로 가정할 경우, 6시간 단위 강우자료를 분해하는 것이므로 본 연구에서는 Müller and Haberlandt (2015)의 방법을 더 간략화 하였다. Uniform Splitting을 이용할 경우 2회의 분해 (6시간 → 2시간 → 1시간) 만으로 1시간 강우를 얻어낼 수 있고, Diversion의 경우는 3회의 분해와 1회의 재집성으로 (6시간 → 3시간 → 1.5시간 → 0.75시간 → 1시간) 1시간 강우를 구할 수 있게 된다. 먼저 Uniform Splitting를 이용해 1개의 강우셀을 3개로 분해하는 과정을 수식화하면 다음과 같다.

$$w_1, w_2, w_3 = \begin{cases} 1, 0, \text{ and } 0 & \text{with } P(0/0/1) \\ 0, 1, \text{ and } 0 & \text{with } P(0/0/1) \\ 0, 0, \text{ and } 1 & \text{with } P(0/0/1) \\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \text{ and } 0 & \text{with } P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}) \\ \frac{1}{2}, 0, \text{ and } \frac{1}{2} & \text{with } P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}) \\ 0, \frac{1}{2}, \text{ and } \frac{1}{2} & \text{with } P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}) \\ \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \text{ and } \frac{1}{3} & \text{with } P(\frac{1}{3}/\frac{1}{3}/\frac{1}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, w_1, w_2, w_3 는 각 셀로 분해되는 강우의 비율, $P(0/0/1)$ 은 강우가 3개 중 한 개의 셀로만 분해될 확률, $P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2})$ 은 두 개로 분해될 확률, $P(\frac{1}{3}/\frac{1}{3}/\frac{1}{3})$ 은 세 개로 분해될 확률이다. Müller and Haberlandt (2015)는 세 가지 경우의 $P(0/0/1)$ 과 $P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2})$ 을 따로 구분하지 않고 통합해 사용하였으며 강우 셀이 두 개 혹은 세 개의 셀로 분해될 때 동일한 비율로 분해되는 것을 가정하였다. 한 개의 강우 셀이 두 개로 분해되는 경우를 수식화하면 다음과 같다.

$$w_1, w_2 = \begin{cases} 1 \text{ and } 0 & \text{with } P(0/1) \\ 0 \text{ and } 1 & \text{with } P(1/0) \\ x, \text{ and } 1-x & \text{with } P(x/(1-x)) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, w_1 와 w_2 는 두 개의 셀로 분해되는 강우의 비율, $P(\cdot)$ 은 각 경우의 확률을 의미한다. 강우가 두 개의 셀로 분해되는 비율 x 는 관측 자료에서 얻어진 비모수적 경험적 확률밀도 함수, $f(x)$ 에 의해 결정된다. Uniform Splitting은 3개로 분해하는 과정과 2개로 분해하는 과정이 섞여 있으므로 식 (1), (2)가 모두 사용되고 Diversion의 경우에는 강우 셀을 두 개로만 분해하므로 식 (2)만이 사용된다.

한편, 식 (1), (2)를 모든 강우 셀에 동일하게 적용할 경우 한 개의 강우 사상이 가지는 시간적 상관성이 깨지기 때문에 이를 보완하기 위해 Müller and Haberlandt (2015)는 강우셀 분류 방법을 제시하였다. 식 (1)을 사용할 때에는 95퍼센트 확률에 해당하는 강우를 기준으로 강우 셀을 두 개로 분류하여 각 분류별로 $P(0/0/1), P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}), P(\frac{1}{3}/\frac{1}{3}/\frac{1}{3})$ 을 따로 적용하였고, 식 (2)의 경우에는 평균 강우와 한 개의 강우 셀이 가질 수 있는 네가지 위

치 (starting, enclosed, ending, isolated)를 이용해 8가지로 강우 셀을 분류하여 $P(0/1), P(1/0), P(1/1)$ 과 $f(x)$ 를 적용하였다 (Fig. 1c). 분류된 강우 셀마다 각각 다른 확률을 적용하게 되면 연속된 강우사상이 MRC에 의해 여러 개로 분해되는 것을 어느 정도 방지할 수 있으며 좀 더 재현성이 높은 시간분해가 이루어지게 된다.

2. 연구자료 및 MRC모형의 적용

본 연구에 사용된 자료는 1973년부터 2014년까지 기상청 중관측측점 59개소의 시강우량 자료이고 각 지점의 위치는 Fig. 2에 나타내었다. 홍수모형을 위한 시간분해가 연구의 주목적이므로 6월부터 9월사이의 자료만을 MRC 모형에 적용하였다. Uniform Splitting과 Diversion 두 방법의 성능 비교를 위해 먼저 서울지점에 두 방법을 적용하였고 성능이 더 우수한 방법을 나머지 58개 지점에 대해 적용하였다.

MRC모형 적용시 매개변수의 시간적 이동가능성 판단을 위해 1973년부터 1994년까지의 자료와 1995년부터 2014년까지의 자료를 구분하였다. 1973년부터 1994년 시강우자료를 6시간으로 집성하여 MRC모형의 매개변수를 산정한 후 남은 기간의 6시간 강우를 1시간으로 시간 분해하였다. 분해된 강우의 통계적 특성과 관측자료의 특성을 비교해 제시된 모형의 시간 분해 성능을 검증하였다. 마지막으로 59개 전 지점의 공간적 매개변수 특

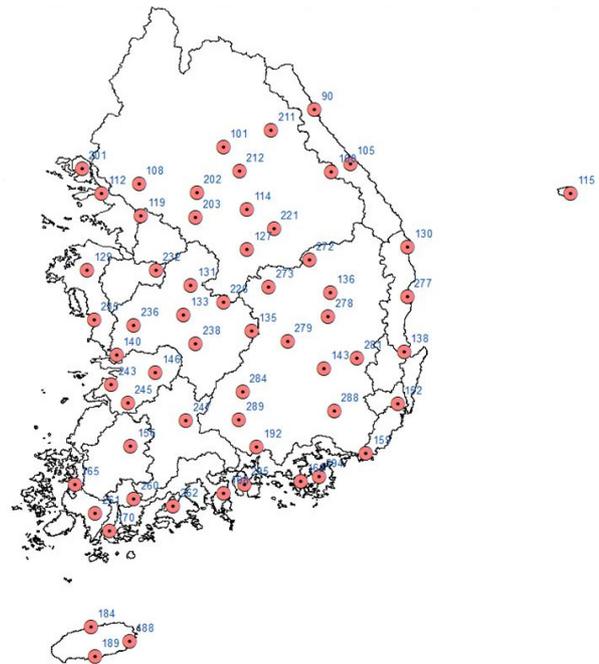


Fig. 2 Locations of rainfall gauging stations selected for applying the MRC model. The locations are numbered with the station IDs of the Korean Meteorological Administration

성 변화를 파악해 1994년 전후 기상의 변동 특성을 파악하였다.

III. 결과 및 고찰

1. Uniform Splitting과 Diversion의 성능 비교

Fig. 3은 1987년 7월 26일~27일 발생했던 서울지점의 태풍 셀마 소멸 직후 발생한 호우사상을 Uniform Splitting과 Diversion을 이용해 분해한 결과를 도시한 그림이다. 이 사상은 태풍 셀마의 영향으로 유역의 수분함유 상태, 하천 수위와 유량이 상당히 높아져 있는 상태에서 연이어 내린 집중호우로 수도권 지역에 비교적 큰 침수피해를 일으켰던 대표 강우사상 중 하나이다. 당시

서울지점에 18시간동안 내린 총강우량은 284.5 mm이고 시간당 최대강우량은 61.4 mm hr^{-1} 이었다.

본 연구에서 사용된 MRC 모형은 분해되기 이전 총강수량이 그대로 보존되는 방법이므로 Fig. 3에 나타난 분해된 강우의 총강수량은 Uniform Splitting과 Diversion 모두 관측강우량 284.5mm과 동일하다. 하지만 시간당 최대강우량의 경우, Uniform Splitting에서는 51.5 mm hr^{-1} 로 나타난 반면, diversion으로 분해된 강우는 91.9 mm hr^{-1} 로 나타났다. 이 결과는 한 개의 강우 셀을 2개씩 분해하는 Cascade를 3회 수행하는 것보다 3개로 분해한 후 다시 2개로 분해하는 2회 Cascade가 관측 강우강도에 더 가깝게 분해할 가능성이 크다는 것을 의미한다. 이 결과는 1973년부터 1995년까지 분해강우와 관측강우의 누적확률밀도함수 비교로 재확인되었다 (Fig. 4).

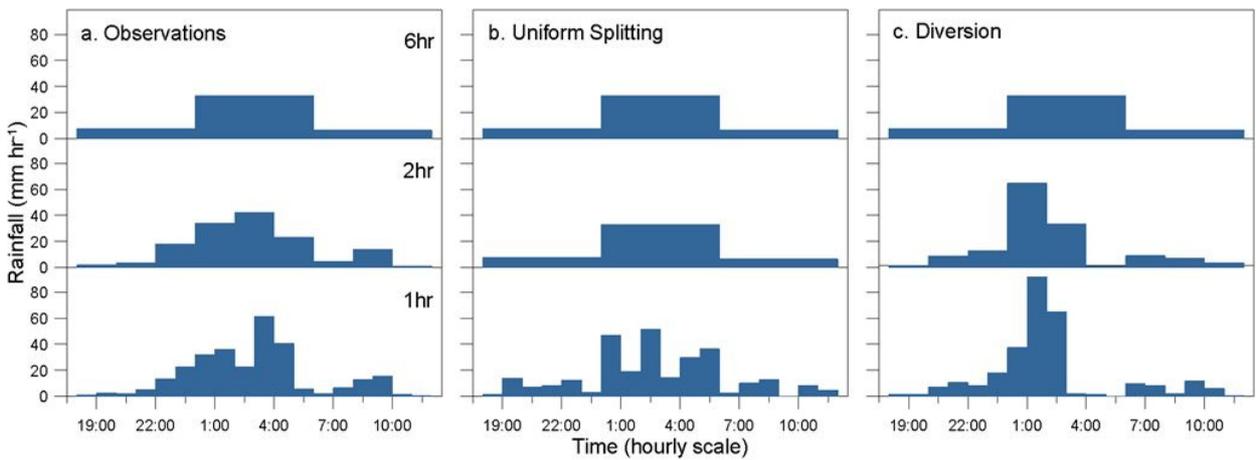


Fig. 3 Disaggregation of a heavy rainfall event at Seoul station of KMA using Uniform Splitting (b) and Diversion (c) method in comparison with observations (a)

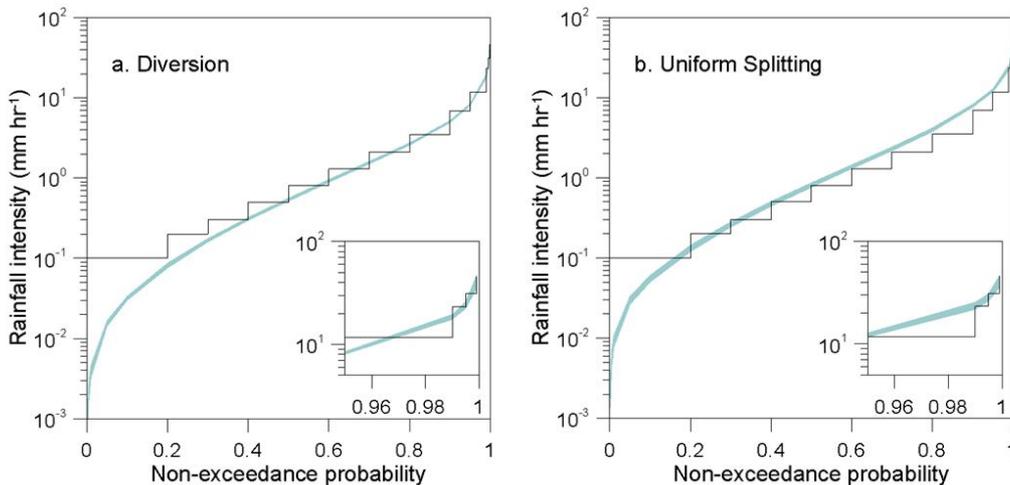


Fig. 4 Performance comparison between Uniform Splitting and Diversion in terms of reproducibility of the cumulative density function of observed hourly rainfalls. Colored areas indicate 99% confidence intervals of 100 random generations using both methods

Table 1 Statistics comparison between observed and disaggregated rainfalls. Statistics for disaggregated rainfalls are given in terms of ranges from 100 Monte Carlo simulations

Statistics	1973–1994		1995–2014	
	Observed	Disaggregated	Observed	Disaggregated
Average	2.63	2.67–2.83	3.47	3.23–3.37
Variance	23.9	21.7–26.8	39.9	32.8–41.8
Lag1 Corr ¹	0.555	0.333–0.453	0.561	0.329–0.467
P(X>0) ²	0.112	0.104–0.110	0.115	0.119–0.124

¹Lag-1 autocorrelation coefficient, ²Probability of rainfall occurrence

Table 2 Probability for splitting 6-hr rainfall into 3 son cells

Splitting probability	6-hr rainfall above 95 percentile	6-hr rainfall below 95 percentile
P(0/0/1)	0.028	0.357
P(0/1/1)	0.073	0.294
P(1/3/1/3)	0.899	0.349

Fig. 4는 1973년부터 1995년까지 관측된 6시간 강우량을 Uniform Splitting과 Diversion으로 분해된 강우의 누기확률밀도 함수와 관측된 1시간 강우의 밀도함수를 비교한 그림이다. 기상청 종관관측소의 강수량 관측한계가 0.1 mm 이므로 그 이하의 강우는 관측강우에서 얻어질 수 없다. 비초과확률 0.4 이상에 대해 살펴보면 Diversion의 경우는 모든 비초과 확률에 대해 분해강우가 관측 시강우보다 큰 것을 확인할 수 있고 99 % 신뢰구간은 Uniform Splitting 보다 작은 것을 확인할 수 있다. 다시 말해 Diversion으로 분해된 강우의 모의 발생범위는 Uniform Splitting 보다 넓지만 일반적으로 과대 산정된다고 할 수 있다. 반면 Uniform Splitting은 모의 발생범위는 좀 더 넓지만 관측 강우와 유사한 강우강도를 발생시키는 것으로 보인다.

Uniform Splitting이 좀 더 관측강우와 가깝게 모의된 결과는 Müller and Haberlandt (2015)의 결과와 일관된다. Müller and Haberlandt (2015)의 경우에는 24시간 강우를 1시간까지 Diversion을 이용해 분해했을 때 강우강도가 과소 모의 되었으며 Uniform Splitting의 경우가 관측강우의 확률밀도함수와 더 가까웠다. 이 결과는 2개씩 분해하는 동일한 Cascade를 연속적으로 적용했을 때 1시간 강우에 편의를 발생시킬 수 있음을 나타내는 경험적 근거가 될 수 있다. 동시에 3개로 분해하는 Cascade를 추가하는 것이 편의를 방지하기 위한 한 방법이 될 수 있음을 의미한다.

Table 1는 서울지점의 관측강우와 Uniform Splitting으로 분해된 강우의 통계적 특성을 요약한 표이다. 분해강우의 평균, 분산, 강우확률이 관측강우와 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 이는 강우셀의 분류를 통해 완전히 임의적으로 강우셀이 분해되는 것이 어느 정도 보완된 결과로 판단된다. 모든 강우 셀에 동일한 분기확률을 적용해 비교하였을 때에는 강우의 변동성, 즉 분산이

훨씬 크게 모의됨을 사전에 확인하였다. 다만, MRC모형의 단점은 관측 시간별 강수량을 임의적으로 분해하기 때문에 연속적으로 나타나는 강우사상의 특성이 일부 사라지게 되는 것이다. 위치 특성을 이용한 강우셀의 분류를 통해 이 단점이 어느 정도 보완되는 것으로 보이거나 관측의 자기상관보다는 작게 강우의 분해가 이루어지는 것으로 판단된다.

Fig. 3에서 Uniform Splitting의 6시간 강수와 3시간 강수가 차이나지 않는 것은 95 % 누기확률 이상의 6시간 강우의 경우 압도적으로 3개로 강우가 쪼개질 확률이 높기 때문이다. 방법론에서 설명한 바와 같이 누기확률 95 %을 기준으로 6시간 강우를 둘로 분류하여 Cascade의 확률을 적용하게 되는데 강우가 누기확률 95 % 이상을 가질 때는 압도적으로 P(1/3/1/3)이 다른 경우보다 높게 나타난다 (Table 2). 반면 누기확률 95 % 이하의 경우에는 P(0/0/1), P(0/1/1), P(1/3/1/3) 세 확률이 근사하다. 이는 총강우가 매우 큰 경우에는 6시간동안 지속해서 내릴 가능성이 매우 높다는 것을 의미하고 작은 경우에는 2시간 동안 집중해서 내릴 확률과 6시간 동안 지속해서 내릴 확률이 유사함을 의미한다. Uniform Splitting은 말 그대로 강우를 세 셀로 동일하게 나누는 것이므로 3개로 분해되는 확률이 모의되었을 때는 6시간 강우강도와 동일할 수밖에 없다. 따라서 6시간 강우를 간단히 3개로 나누고 두 개로 쪼개는 cascade를 한 번만 적용하는 방법도 큰 강우사상을 분해할 때는 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

2. 강우셀 분류에 따른 프랙탈 특성 변화

MRC 모형을 가장 간단히 적용하는 방법은 모든 강우셀에 동일한 프랙탈 특성을 적용하는 것이다. 그러나 하나의 강우 셀이

들로 나뉘는 과정에 완벽한 무작위성을 가정할 경우 기상학적 조건의 시간적 연속성이 무시되게 되므로 비현실적인 시간분해가 나타날 수 밖에 없다. 이를 보완하기 위해 Müller and Haberlandt (2015)는 셀의 위치와 크기 조건을 프랙탈 특성 산정에 고려하였다. 예를 들어 강우가 시작되는 셀이 분기 될 때에는 사상의 연속성을 고려해 앞쪽 셀에 분기될 확률보다는 다음 셀과 연결될 수 있는 뒤쪽 셀로 분기될 확률이 높은 것을 고려하는 것이다.

Fig. 5는 네 가지 강우 셀에 대해 강우가 둘로 분기될 때 앞쪽 셀로 분기되는 비율 x 의 누적확률밀도 함수 $f(x)$ 를 비교한 그림이다. x 가 0.5보다 클 때 앞쪽으로 분기되는 비율이 뒤쪽으로 분기되는 비율보다 크다. 따라서 Starting Cell의 경우 뒤쪽으로 분기되는 비율, 즉 x 가 0.5보다 작을 확률이 높고 Ending Cell의 경우에는 그 반대임이 쉽게 확인된다. Enclosed Cell과 Isolated Cell의 경우는 좀 더 균일 분포에 가까워보인다. 반면 강우가 평균보다 낮을 때에는 Starting 셀과 Ending Cell의 x 값이 균일분포에 가까워지고 있고 이는 작은 강우가 더 무작위적인 프랙탈 특성을

가지는 것을 의미한다. 요약하면 강우 셀의 위치특성에 따라 프랙탈 특성이 다르게 나타나고 강우 셀의 크기가 커질수록 무작위성이 약해진다고 할 수 있다. 따라서 완벽한 무작위성을 가정하는 MRC를 큰 강우사상에 대해 사용하게 되면 분해된 강우에 편이가 발생할 확률이 높다고 할 수 있다. 홍수 해석을 위해서는 강우 사상의 분류나 대기 순환패턴을 고려한 프랙탈 특성의 고려가 반드시 필요한 것으로 보이고 완벽한 무작위성을 가정한 MRC는 작은 강우사상에 대해서 주로 유효한 것으로 판단된다.

3. 분기확률의 시간적 변동성

Table 3에 서울지점의 1973년부터 1995년까지의 분기확률과 그 이후에 대한 2시간 강우가 1시간으로 분해될 때의 확률을 비교하였다. 2시간 강우가 평균이상일 경우에는 강우가 두 셀 중 하나로 집중되기 보다는 두 개로 고르게 분포될 확률이 높음을 쉽게 확인할 수 있다. 예상되는 대로 강우가 시작되는 셀의 경우는 뒤쪽에 분기될 확률이 높고 강우가 끝나는 셀의 경우는 그 반대일

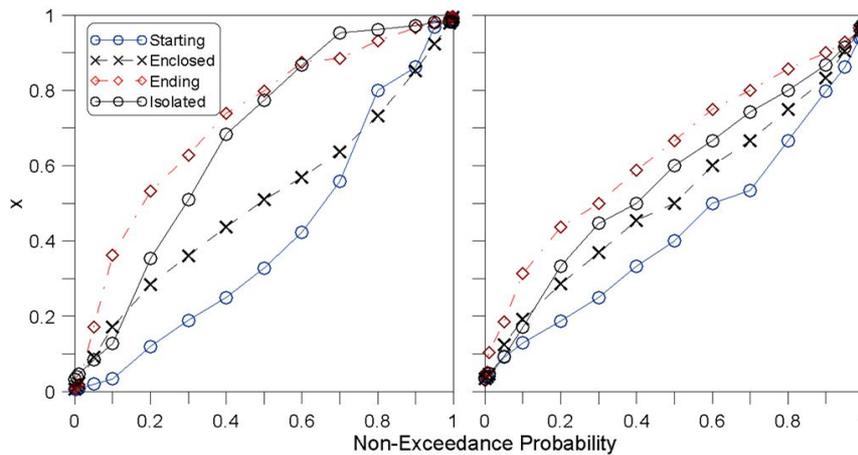


Fig 5. Empirical cumulative functions of x for the four categories of rain cells in the case of above-mean (left) and below-mean (right) at Seoul Station during 1974-1994

Table 3 Comparison of splitting probability between two periods

Cell Class	1973-1994			1995-2014			
	P (0/1)	P (1/0)	P (x/1-x)	P (0/1)	P (1/0)	P (x/1-x)	
Above Mean	Starting	0,314	0,000	0,686	0,294	0,007	0,699
	Enclosed	0,019	0,014	0,967	0,041	0,016	0,944
	Ending	0,009	0,236	0,755	0,018	0,188	0,795
	Isolated	0,097	0,032	0,871	0,205	0,205	0,591
Below Mean	Starting	0,551	0,088	0,361	0,549	0,142	0,308
	Enclosed	0,139	0,129	0,732	0,179	0,191	0,630
	Ending	0,072	0,553	0,375	0,150	0,552	0,298
	Isolated	0,376	0,387	0,237	0,424	0,379	0,197

확률이 높은 것 또한 확인할 수 있다. Starting, Enclosed, Ending 셀에 대해서는 두 기간의 분기확률의 차이가 크지 않은 것으로 보이고 따라서 한 기간의 분기확률을 다른 기간의 강우분해에 적용하는 것이 큰 편의를 발생시키지 않을 것으로 보인다. 다시 말해 2 시간 단위의 강우가 연속되는 경우에는 프랙탈 특성의 변동성이 크지 않았다는 것이다.

하지만 Isolated cell의 경우에는 두 셀로 분기될 확률이 1994년 이후로 현저하게 떨어졌음을 확인할 수 있다. 이는 2시간 강우가 단독으로 발생했을 경우에 1994년 이전에는 2시간 동안 고르게 발생할 확률이 압도적으로 높았던 반면 그 이후에는 1시간으

로 집중해서 내릴 확률이 상당히 높아졌음을 의미한다. 이러한 현상은 평균 이하의 강우에 대해서도 나타났으며 1995년 이후의 강수특성이 돌발홍수를 일으킬 가능성이 더 큰 방향으로 이동되었음을 함께 의미한다. 따라서 도시지역 홍수해석과 같이 도달시간이 매우 짧은 홍수 및 침수해석을 수행하는 경우 프랙탈 특성을 시간적으로 이동해 적용하는 것은 해석에 편의를 일으킬 가능성이 상당하다. Table 3에 나타내지는 않았지만 비초과확률 95% 이상의 6시간 강수가 3개로 고르게 쪼개질 확률은 1994년을 전후로 0.899에서 0.809로 9% 가량 줄어들었다. 이 역시 강우강도가 증가하고 있음을 의미하고 프랙탈 특성이 시간에 따라 조금

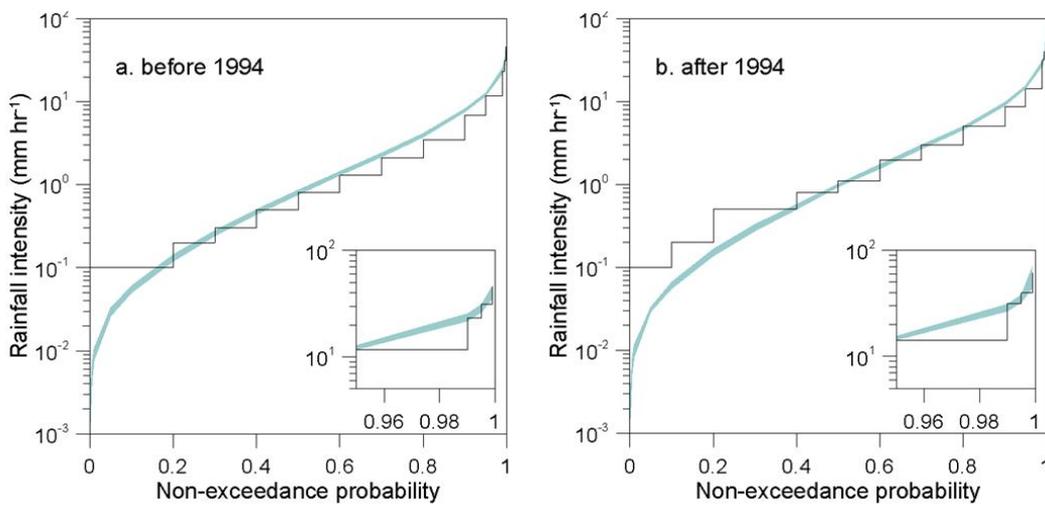


Fig 6. Performance comparison between before and after 1994 in terms of reproducibility of the cumulative density function of observed hourly rainfalls. Colored areas indicate 99% confidence intervals of 100 random generations using both methods

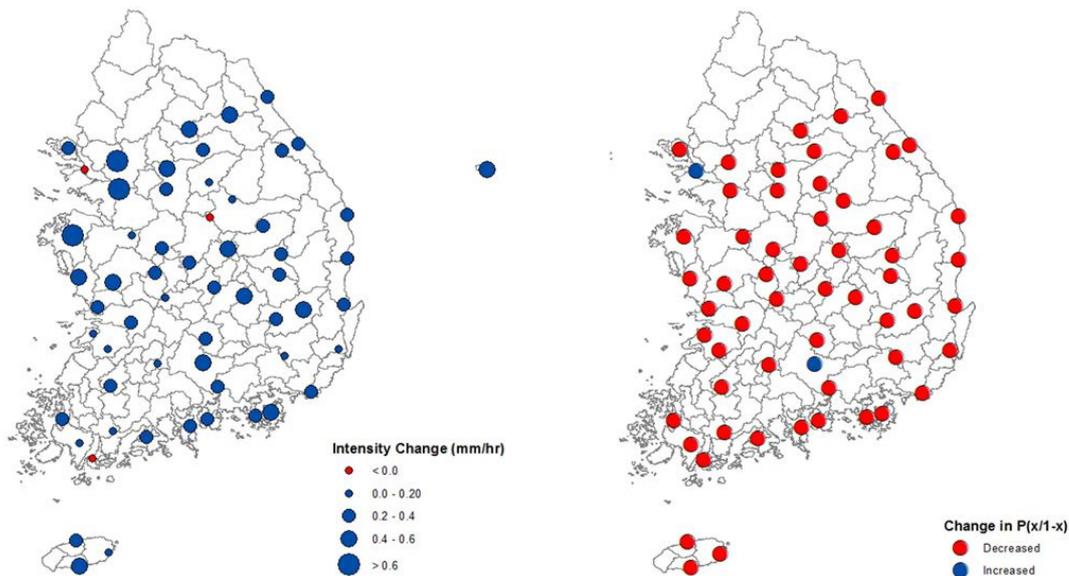


Fig 7. Changes in rainfall intensity (left) and $P(x/1-x)$ of enclosed cells (right) before and after 1994

씩 홍수위험도를 높이는 방향으로 변화하고 있음을 의미한다. 따라서 6시간 예보강우를 이용해 홍수예측을 하는 경우에 오래전의 프랙탈 특성을 이용해 강우를 시간분해 할 경우 홍수 위험이 과소 산정될 우려가 있고 특히 도시지역 홍수 예측에 그 영향이 클 가능성이 높다.

다만 모든 셀을 고려한 두 기간의 평균적인 프랙탈 특성의 변화는 크지 않았으며 특히 높은 강우강도에 대해 큰 변화를 보이지 않은 것으로 판단된다(Fig. 5). 본 연구에서 사용된 Microcanonical MRC 모형이 보인 높은 시간적 일관성은 강우의 총량이 보존되는 특성에 기인하는 것으로 보인다. 1994년 전후 두 기간의 기상학적 차이는 이미 6시간 관측 강우에 어느 정도 반영되어 있기 때문에 양기간 사이의 변동성이 크지 않은 것이다. 예보강우의 정확도 문제를 제외한다면 본 연구에서 적용한 MRC 모형의 시간적 일관성은 충분한 것으로 판단되며 홍수예보에 충분히 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 작은 도시구역에 적용할 때에는 사용에 신중을 기할 필요가 있다.

4. 평균 강우강도와 분기확률에 의한 홍수위험도 평가

1994년 전후의 평균 강우강도의 변화와 Enclosed 셀의 분기 확률변화는 우리나라 홍수위험도의 변화양상을 파악할 수 있는 중요한 지표이다. 상당히 많은 연구에서 1994년~1995년은 동아시아 몬순의 패턴이 변동한 시기로 해석하고 있으며 이전 이후로 강우패턴 역시 양상이 상당히 다른 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2011; Yim et al., 2008). Fig. 7은 1994년 전후의 강우강도 변화와 2시간강우가 1시간으로 분해될 때 Enclosed cell의 $P(x/1-x)$ 의 변화를 나타낸다. 한두 개 지점을 제외하면 1시간 자료로부터 얻어진 강우강도는 증가한 것을 알 수 있고 $P(x/1-x)$ 는 감소했음을 알 수 있다. 59개 지점 평균 0.31 mm hr^{-1} 가 증가 되었으며 $P(x/1-x)$ 는 최대 4% 정도 감소하였다. Fig. 7의 $P(x/1-x)$ 는 평균이상의 강우 셀에 대한 확률이며 평균보다 낮은 셀의 경우에는 최대 16% 감소로 이러한 현상이 훨씬 뚜렷이 나타났다.

2시간 강우 셀의 $P(x/1-x)$ 의 감소는 강우가 한 시간에 집중될 확률이 높아진다는 의미이므로 강우강도의 증가 양상과 일관된 결과이다. 이렇게 1995년 이후에 나타나고 있는 강우강도의 증가는 홍수의 위험도가 높아지는 방향으로 기상특성이 이동했음을 의미하고 기후변화의 영향으로 홍수위험도가 높아지고 있다는 여러 문헌의 예측과 무관하지 않은 것으로 보인다. 다만 앞 절에서 언급했듯이 $P(x/1-x)$ 의 시간적 변화가 그렇게 크지 않기 때문에 홍수 위험도의 증가가 급격히 이루어지고 있다고 보기는 어렵다. 다만 평균이하 2시간 강우 셀의 $P(x/1-x)$ 가 상당히 빠르게 감소하고 있는 것은 1994년 이전보다 평균이하 2시간 강우만으로 홍수가 일어날 가능성이 빠르게 높아지고 있다는 것이다. 따라서 도시지역과 같이 침투능이 낮은 지역의 홍수 위험도가 기상학

적으로 높아지고 있음을 간접적으로 나타낸다.

IV. 결 론

1시간이하 고해상도 강우시계열은 홍수해석에 있어 필수적이지만 일부지역에서는 여전히 구하기 쉽지 않은 상태이다. 또한 기후변화 시나리오나 예보자료의 경우에도 강우의 시간적 해상도 문제는 여전히 풀리지 않은 문제이다. 이에 본 연구에서는 최근에 제시된 간단한 Microcanonical MRC 모형을 기상청 종관관측소 59개 지점의 시간강수량에 적용하여 6시간 강우 시간분해를 수행하였다.

그 결과 6시간 강우를 2개씩 분해하는 것을 3번 반복하는 Diversion 방법보다 1회 3개로 분해하고 다시 2개로 분해하는 Uniform Splitting 방법이 더 우수함을 확인하였다. 관측자료의 2개씩 분기시키는 프랙탈 특성이 분해 단계마다 달라지는 것이 Diversion의 낮은 성능의 주 원인으로 판단된다. 따라서 6시간 강우를 MRC 모형을 이용해 시간분해 할 경우에는 3개로 1회 분해한 후 다시 2개로 분해하는 기법을 적용하는 것이 통계적으로 더 유효할 것으로 판단된다. 아울러 프랙탈 특성의 시간적 이동성이 어느 정도 유효하여 한 기간에서 얻어진 매개변수를 다른 기간에 옮겨 사용하는 것이 실용적으로 가능함을 확인하였다. 다만, Isolated cell과 같이 지점의 독특한 강수특성을 나타내는 경우에는 프랙탈 특성의 시간적 일관성이 상당히 달라질 수 있다. 또한 1994년 전후의 강수특성이 상당히 다른 것을 강우강도의 비교를 통해 확인되었다. 이는 Enclosed Cell의 프랙탈 특성변화를 통해 재확인되었다. 1995년 이후 우리나라의 강우강도는 대체적으로 천천히 증가하고 있는 것으로 보이며 1시간에 집중되는 강우 역시 증가하고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 Microcanonical MRC 모형은 최초 일강우를 분해는 기법으로 제시되었다. 본 연구를 통해 6시간 강우에도 유연하게 적용될 수 있음이 확인되었으며 예보강우에 충분히 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 아울러 모형 구조의 단순성과 높은 통계특성의 재생산성을 바탕으로 여러 분야에 적용될 수 있을 것으로 보인다. 특히 기후변화 시나리오의 시간적 상세화를 통해 장기 홍수 위험도 전망을 위한 연구에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서는 자료가 충분히 관측된 지점에서의 검증만이 수행되었으므로 자료 기간이 짧거나 없는 지역에서의 적용성을 위해 매개변수의 공간적 확장성에 관한 연구가 추가적으로 필요하다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ0116860 12016)의 지원에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

Reference

- Berne, A., G. Belrieu, J. -D. Creutin, and C. Obled, 2004. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology* 299: 166-179.
- Choi, Y., 2002. Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in South Korea, *Journal of the Korean Data Analysis Society* 4: 269-282.
- Gupta, V. J., and E. C. Waymire, 1993. A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade. *Journal of Applied Meteorology* 32: 251-267.
- Han, M. S., C. S. Kim, H. S. Kim, and H. Kim, 2009. A study on the revised methods of missing rainfall data for real-time forecasting system, *Journal of Korea Water Resources Association* 42(2): 131-139 (In Korean).
- Jung, I. W., D. H. Bae, and G. Kim, 2011. Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. *International Journal of Climatology* 31: 359-370.
- Kim, W., J. -G. Jhun, K. -J. Ha, and Kimoto, M., 2011, Decadal changes in climatological intraseasonal fluctuation of subseasonal evolution of summer precipitation over the Korean Peninsula in the mid-1990s. *Advances in Atmospheric Sciences* 28: 591-600.
- Koutsoyiannis, D., and A. Langousis, 2011. Precipitation. In.: P. Wilderer and S. Uhlenbrook, eds. *Treatise on water science*, volume 2. Oxford: Academic Press, 27-78.
- Lee, M. H., I. W. Jung, and D. H. Bae, 2011a. Korean flood vulnerability assessment on climate change, *Journal of Korea Water Resources Association*, 44(8): 653-666 (In Korean).
- Lee, S. J., C. S. Jeong, J. C. Kim, and M. H. Hwang, 2011b. Long-term streamflow prediction using ESP and RDAPS model, *Journal of Korea Water Resources Association* 44(12): 967-974 (In Korean).
- Liczner, P., C. De Michele, and W. Adamowski, 2015. Precipitation variability within an urban monitoring network via microcanonical cascade generators. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 485-506.
- Liczner, P., J. Lomotoski, and D. E. Rupp, 2011. Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator, *Atmospheric Research* 99: 563-578.
- Lisniak, D., J. Franke, and C. Bernhofer, 2013. Circulation pattern based parameterization of a multiplicative random cascade for disaggregation of observed and projected daily rainfall time series. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 2487-2500.
- Lombardo F., E. Volpi, and D. Koutsoyiannis, 2012. Rainfall downscaling in time: theoretical and empirical comparison between multifractal and Hurst-Kolmogorov discrete random cascades. *Hydrological Science Journal* 57: 1052-1066.
- Mandelbrot, B., 1974. Intermittent turbulence in self-similar cascades-divergence of high moments and dimension of carrier. *Journal of Fluid Mechanics* 62: 331-358.
- Müller, H., and U. Haberlandt, 2015. Temporal rainfall disaggregation with a cascade model: from single-station disaggregation to spatial rainfall. *Journal of Hydrologic Engineering* 20: 04015026.
- Müller, H., and U. Haberlandt, 2016. Temporal rainfall disaggregation using a multiplicative cascade model for spatial application in urban hydrology. *Journal of Hydrology*, In press.
- Olsson, J., 1998. Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation, *Hydrology and Earth System Science* 2: 19-30.
- Onof, C., R. E. Chandler, and A. Kakaou, 2000. Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: a review of developments. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 14: 384-411.
- Paschalis, A., P. Molnar, S. Fatichi, and P. Burlando, 2014. On temporal stochastic modeling of precipitation, nesting models across scales. *Advances in Water Resources* 63, 152-166.
- Sørup, H. J. D, H. Madsen, and K. Arbjerg-Nielsen, 2012. Descriptive and predictive evaluation of high resolution Markov chain precipitation models. *Environmetrics* 23: 623-635.
- Yim, S. -Y., J. -G. Jhun, and S. -W. Yeh, 2008. Decadal change in the relationship between east Asian-western North Pacific summer monsoons and ENSO in the mid-1990s. *Geophysical Research Letters* 35: L20711.