韓國水資源學會論文集
第47卷 第9號·2014年 9月
pp. 839~852

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 47, No. 9:839-852, September 2014
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.9.839
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

강우의 시공간적 멀티프랙탈 특성에 기반을 둔 강우다운스케일링 기법의 한반도 호우사상에 대한 적용성 평가

Applicability of a Space-time Rainfall Downscaling Algorithm Based on Multifractal Framework in Modeling Heavy Rainfall Events in Korean Peninsula

이 동 률* / 이 진 수** / 김 동 균***
Lee, Dongryul / Lee, Jinsoo / Kim, Dongkyun

Abstract

This study analyzed the applicability of a rainfall downscaling algorithm in space-time multifractal framework (RDSTMF) in Korean Peninsula. To achieve this purpose, the 8 heavy rainfall events that occurred in Korea during the period between 2008 and 2012 were analyzed using the radar rainfall imagery. The result of the analysis indicated that there is a strong tendency of the multifractality for all 8 heavy rainfall events. Based on the multifractal exponents obtained from the analysis, the parameters of the RDSTMF were obtained and the relationship between the average intensity of the rainfall events and the parameters of the RDSTMF was developed. Based on this relationship, the synthetic space-time rainfall fields were generated using the RDSTMF. Then, the generated synthetic space-time rainfall fields were compared to the observation. The result of the comparison indicated that the RDSTMF can accurately reproduce the multifractal exponents of the observed rainfall field up to 3rd order and the cumulative density function of the observed space-time rainfall field with a reasoable accuracy.

keywords : downscaling, climate change, fractal, multifractal, rainfall, precipitation

요 지

본 연구에서는 강우의 시공간적 멀티프랙탈 특성에 기반을 둔 다운스케일링 알고리즘(RDSTMF-Rainfall Downscaling in Space-Time Multifractal Framework)을 한반도에 적용하여 그 적용성을 살펴보았다. 이를 위하여 2008년부터 2012년까지 우리나라에 호우주의보를 일으킨 8개의 이벤트에 대한 레이더강우자료를 분석하여 각 이벤트에 대한 멀티프랙탈 지수를 판별하였으며, 이에 근거하여 RDSTMF의 모수들을 산정하고 이 모수들과 시공간강우장의 평균강우량과의 관계를 도출하였다. 이 관계에 근거하여 RDSTMF를 사용하여 가상의 시공간강우장을 생성, 관측 시공간 강우장과 비교하였다. 비교 결과, RDSTMF를 사용하여 생성된 가상의 시공간 강우장은 관측 시공간 강우장의 멀티프랙지수를 3차 모멘트까지 정확히 모사함을 확인하였으며, 누적분포함수 또한 비교적 정확히 모사함을 확인하였다.

핵심용어 : 상세화, 기후변화, 프랙탈, 멀티프랙탈, 강우

* 한국건설기술연구원 수문레이더 재해연구·데이터센터 센터장 (e-mail: dryi@kict.re.kr)
Director, Center of Disaster Research and Hydrologic Data Center Using Radar Measurement, Korea Institute of Construction Technology, Korea
** 홍익대학교 토목공학과 학사과정 (e-mail: ljs251@nate.com)
Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea
*** 교신저자, 홍익대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: kim.dongkyun@hongik.ac.kr, Tel: 82-2-320-1613)
Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

1. 서 론

기후변화의 증거는 전지구적으로 관측되고 있으며(IPCC, 2007; IPCC, 2013), 그 주 원인이 인간의 활동으로 인한 온실가스의 증가라는 점은 다소의 반론이 존재할 지라도(Pielke, 2005) 과학계에서 정설로 받아들여지고 있다(National Research Council, 2001; Oreskes, 2004; IPCC, 2013). 특히, 온난화의 정도 및 이에 따른 기후변화의 속도가 온실가스와 생태계와의 상호작용으로 인하여 급속하게 악화될 수 있다는 사실(Cox et al., 2000)은 인류가 기후변화에 대하여 더욱 능동적으로 대비해야 한다는 사실을 역설한다. 특히 다수의 인명을 단시간에 앗아갈 수 있는 극한홍수, 산사태 등의 재난의 직접적인 원인이 되는 극한강우와 관련된 각종 통계값의 정상성의 붕괴는 기후변화의 가장 대표적인 징후이므로 수문학자들이 깊은 관심을 가지고 분석해야 할 사항이기도 하다. 따라서 이와 관련한 분석이 세계기상기구와 유엔환경계획이 공동으로 구성한 정부간 기후 변화 협의체인 Intergovernmental Panel on Climate Change(이후 IPCC)를 중심으로 지난 수십 년 동안 활발히 행해졌다. IPCC의 가장 최근 보고서는(IPCC, 2013) 앞으로 100년 동안 (1) 중위도 지역의 육지 및 열대 지역에서의 극한 강우량 및 발생 빈도가 증가하고, (2) 몬순의 지속기간 및 강우량이 증가할 것이라는 점을 확실시(very likely) 하고 있으며, 이는 중위도 지역에 위치하여 동아시아 몬순(장마)을 매년 겪는 우리나라의 수문설계 방법론에 반드시 기후변화의 영향을 고려해야 함을 의미한다.

기후변화에 따른 수문설계방법론의 개선을 위해서는 미래 강우발생의 유형을 정교하게 예측하는 것이 필수적이다. 이러한 예측을 위하여 Global Climate Model (GCM)이 활용되는데, 이는 지구표면 위의 대기권을 3차원 공간상에서 여러 조각으로 나눈 격자망 혹은 격자세포의 군집으로 개념화하고 이들 사이의 물리적 상호작용을 고성능 컴퓨터를 활용하여 모의한 후, 강우/온도/기압 등의 시간과 공간에 따른 수문기상인자의 변화를 얻는 일종의 수치모형이며, 앞서 언급된 IPCC의 예측 또한 GCM 모형을 활용한 모의의 결과를 분석한 것이라 할 수 있다. 컴퓨터의 계산용량 및 계산속도의 향상이 GCM의 모의결과의 정확도와 정밀도를 꾸준히 향상시키고 있는 것은 사실이나(IPCC, 2013), 방대한 지구의 공간적 스케일로 인하여 모의해야 하는 격자 혹은 격자세포의 개수가 수 만개에 달할 정도로 많고, 이들 사이의 물리적 상호작용의 주체인 열, 습기, 공기 등의 움직임을 지배하는 방정식이 높은 비선형성을 가지고 있어, 가장 발달된 GCM으로써 IPCC가 활용한 CMIP (Taylor et al., 2009)의 경우라 할지라도 이를 구성하는 하나의 격자 사이의 거리 혹은 격자세포의 크기가 약 50 km에서 400 km에 달하며, 시간해상도 또한 수 시간에서 수 일에 달한다. 이러한 이유로, GCM 모형에서 우리나라는 10,000 km^2의 크기를 가진 20개 내외의 격자 세포로 표현된다. 이러한 격자세포의 공간적 스케일은 23,000 km^2의 크기를 가진 한강유역, 낙동강유역 등의 대규모 유역에 발생하는 강우를 단 두 개의 시공간 누적 강우 시계열을 사용하여 예측하고 있음을 의미한다.

한편, 강우의 시공간적 변동성의 정도에 따라 유역의 반응이 크게 달라진다는 점은 수많은 선행연구들을 통해 규명되었다. 다시 말해, 동일한 누적 강우량을 가진 이벤트라 할지라도 짧은 시간 및 공간에 걸쳐 집중적으로 발생하는 이벤트와 그렇지 않은 이벤트에 의한 유역반응의 차이는 상당하다. 이와 관련하여, Marani et al. (1997)은 강우이벤트의 시간에 따른 변동성의 정도에 따라 표면 유출량이 10배 가량의 차이가 날 수 있음을 밝혔으며, Arnaud (2002)는 다수의 강우게이지에서 관측되어 공간적 변동성이 상당한 극한강우를 공간적으로 누적하여 수문모형에 적용하는 경우 첨두유량분포의 차이가 80%까지 발생할 수 있음을 밝혔다. Singh (1997)은 유역 내에서 유역출구를 향하여 강우의 이동경로에 따라 유역 출구에서의 첨두홍수량이 약 45%까지 달라질 수 있음을 밝혔다. 앞서 언급되었듯이 GCM을 통해 산출할 수 있는 미래의 강우 예측값은 수만 제곱킬로미터에 걸쳐 수 시간 동안 발생한 강우의 누적 값으로 그 시공간적 해상도가 낮아 강우의 시공간적 변동성을 충분히 고려하지 못하므로, 수문 모형에 직접적으로 적용하여 미래 홍수의 양상을 분석하는 경우 발생할 수 있는 오차가 상당할 것이다(Shmidli et al., 2007; Borga et al., 2009).

이러한 문제를 해결하기 위하여 강우의 시공간적 해상도를 향상시키는 기법이 개발되었는데, 이러한 기법을 다운스케일링이라 한다. 다운스케일링 기법은 크게 동역학적(Dynamic) 다운스케일링 기법(Giorgi et al., 2001; Mearns et al., 2003)과 통계학적(Statistical) 다운스케일링 기법(von Storch et al., 1993; Wilby et al., 2004; Goodess et al., 2007)으로 분류된다. 동역학적 다운스케일링 기법에서는 모의를 대상으로 하는 지역에 대하여 공기 및 수분의 동역학적 움직임을 모의하는 고해상도의 Regional Climate Model (RCM)을 구축한 후, 그 입력자료로 GCM의 출력값을 활용하는 역학 기반의 기법이며, 통계학적 다운스케일링 기법은 서로 다른 해상도를 가진 강우자료의 통계값들 사이

의 특정 관계를 규명한 후, 이를 활용하여 고해상도의 강우자료를 획득하는 기법이다. 동역학적 기법은 모형의 구축과 모의를 수행하기 위한 수문기상인자 자료의 확보를 위해 상당한 노력이 요구되고, 모형의 구동에 많은 시간이 소요되는 반면, 통계학적 기법에 비하여 기온/습도/강수 등의 다양한 종류의 변수를 모의의 결과값으로 얻을 수 있고, 이들 각각의 높은 정확성을 기대할 수 있다는 장점이 있다. 이와는 반대로, 통계학적 기법은 모형의 구축 및 자료의 확보에 많은 노력이 필요하지 않다는 장점이 있으나, 동역학적 기법에 비하여 결과값의 정확성이 다소 뒤쳐진다는 단점이 있다(Shcmidli et al., 2007). 그럼에도 불구하고, 통계학적 기법이 자주 활용되는 이유는 두 기법의 구현에 있어 투입되는 노력의 차이에 비하여 산출된 결과값의 정확도의 차이가 크지 않고, 모형이 적용되는 지역과 계절에 따라 오히려 더 높은 정확성을 기대할 수 있기 때문이다. 일례로 Wilby et al. (2000)은 미국 남서 콜로라도에 위치한 Animas River Basin에 대하여 두 종류의 모형의 성능을 비교한 결과, 동역학적 기법과 통계학적 기법을 사용하여 산출된 유량의 정확도에 큰 차이가 없음을 밝혔으며, Shcmidli et al. (2007)은 유럽 알프스 지역에 대하여 6개의 동역학적 기법과 3개의 통계학적 기법을 비교한 후, 겨울철에는 전자가 후자보다 확연히 뛰어난 성능을 보였으나, 여름철의 경우, 전자와 후자의 성능에 큰 차이가 없음을 밝혔다.

국내에서도 한반도 지역을 대상으로 한 강우 다운스케일링 기법을 다룬 다수의 연구가 수행되었다. 통계학적 기법의 일종인 Markov Chain 기반의 강우생성기를 활용하여 월강수량을 일강수량으로 다운스케일링한 선행연구(Moon and Cha, 2004; Kwon and Kim, 2009; Kyoung et al., 2009)와, RCM을 활용한 동역학적 기법을 활용한 사례(Kim et al., 2002; Choi et al., 2011)가 발견됐다.

본 연구는 강우의 멀티프랙탈(multifractal) 특성에 기반을 두고 강우를 시공간적으로 상세화하는 통계학적 기법을 다루고자 하며, 다음과 같은 측면에서 기존의 연구와 비교하여 의미를 찾을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 모형을 구축하기 위한 사전 단계로 레이더 강우자료에 근거한 한반도 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성을 분석하였다. 이와 관련하여, Kim et al. (2008)이 우리나라 4개 지점(서울, 부산, 목포, 광주)에서 관측된 강우 시계열의 멀티프랙탈 특성을 분석하였으나, 레이더 강우장에 기반을 둔 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성에 대한 분석은 국내에서 행해진 바가 없다. 본 연구는 우리나라의 특정 지점에서의 강우 시계열과, 특정 시간대의 강우장 뿐만이 아닌, 시공간 강우장에서도 멀티프랙탈 특성이 존재함을 발견하였고, 그 결과를 본 논문을 통해 보고한다. 아울러, 대부분의 통계 기반의 다운스케일링 모형은 강우자료의 시간적 해상도를 향상시키거나(disaggregation) 혹은 공간적 해상도를 높이는데(downscaling) 초점을 맞추고 있는 반면, 본 연구에 적용된 기법은 공간적 해상도와 시간적 해상도를 동시에 높일 수 있는 특성(space-time downscaling)을 가지고 있으며 아직까지 그 국내 적용 사례가 보고된 바가 없다. 본 연구는 한반도의 강우에 대하여 앞서 소개된 방법론을 구현한 후 적용성과 한계점을 명확히 밝혔다는 측면에서 의미를 찾을 수 있을 것이다.

2. 방법론

2.1 자료 설명

본 연구에서는 우리나라 기상청에서 제공한 레이더 강우자료를 활용하였다. 레이더 강우자료의 시간 해상도는 10분, 공간해상도는 $1km$이며, 가로 1,441개, 세로 1,153개의 셀로 이루어져있다. 강우자료의 공간적 범위는 Fig. 1에 보인 바와 같이 한반도 전역을 포함한다. 본 연구에서는 다운스케일링의 적용성을 우리나라의 수도권 지역에 최적화하기 위하여 멀티프랙탈 특성 분석의 공간적 범위를 Fig. 1의 검정색 정사각형으로 한정하였다. 이 정사각형의 좌측 하단의 위경도 좌표는(북위 37.051118º, 동경 126.661436º)이고, 한 변의 길이는 128 km이다. 또한, Table 1에 보인 바와 같이 2008년에서 2012년 사이에 기상청에서 호우주의보를 발령한 8개의 강우사상들을 선별하여 분석을 시행함으로써 호우사상에 대한 다운스케일링 알고리즘의 적용성을 살펴보는데 초점을 맞추었다.

2.2 멀티프랙탈 다운스케일링

2.2.1 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성 분석

하나의 시간축$[t]$과 두개의 공간축$[x, y]$으로 이루어진 3차원 공간에서 발생하는 순간강우강도를 $i(x, y, t)$로 정의한다면, (x_0, y_0, t_0)를 시작점으로 하는 τ의 시간간격 동안 λ의 길이를 가진 정육면체의 셀 안에 누적된 강우는 Eq. (1)과 같이 표현 될 수 있다.

$$P_{\lambda_x\lambda_y\tau}(x_0, y_0, t_0) = \int_{x_0}^{x_0+\lambda}\int_{y_0}^{y_0+\lambda}\int_{t_0}^{t_0+\tau} i(\xi, \theta, \sigma)d\xi d\theta d\sigma \quad (1)$$

여기에서 정육면체의 시간축 방향의 길이인 τ는 공간축 방향의 길이인 λ와의 균등성을 유지하기 위하여 Eq. (2)

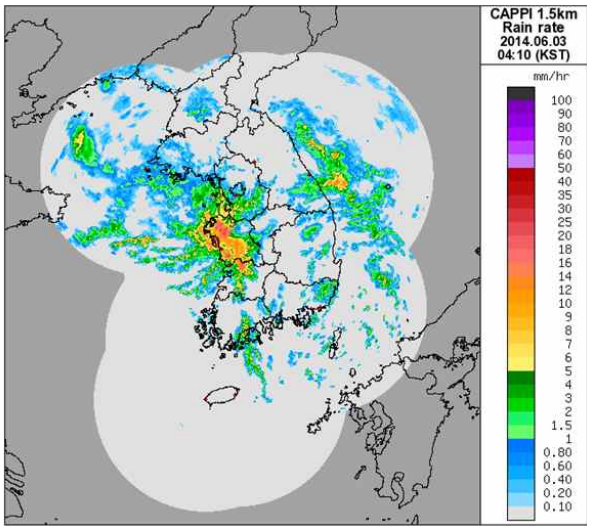

Fig. 1. Radar Precipitation Imagery of Korean Peninsula and the Study Area of This Study (black squre). The Image was Captured from Korea Meteorological Administration (KMA)

Table 1. The Starting and the Ending Time at which the Heavy Rainfall Warning was Released by the Korea Meteorological Administration of Korea During the Period between the Year 2008 and the Year 2012, which was Considered in This Study

Storm ID	Starting Date(Time)	Ending Date(Time)
N1	2008.07.24. (00:00)	2008.07.24. (12:10)
N2	2009.07.10. (22:30)	2009.07.12. (21:00)
N3	2009.07.12. (23:00)	2009.07.16. (22:00)
N4	2009.08.10. (05:20)	2009.08.13. (10:30)
N5	2010.09.21. (01:00)	2010.09.23. (08:00)
N6	2011.06.28. (00:00)	2011.07.01. (08:50)
N7	2012.08.14. (00:00)	2012.08.17. (05:50)
N8	2012.08.21. (00:00)	2012.08.21. (23:50)

를 사용하여 스케일된다. 이는 강우의 이동 속도가 공간적 스케일에 관계없이 동일하다는 자기유사성(Self-Similarity)의 가정에 따른 것이다.

$$\tau = \frac{\lambda}{U} \tag{2}$$

여기에서 $U[LT^{-1}]$는 강우의 이동속도이며, 통상적으로 x,y,t 세 방향의 강우량의 자기상관계수(auto-correlation coefficient)의 차이를 최소화시키는 값이 채택된다. 이러한 스케일링을 통해 각각의 시공간 정육면체 내에 누적된 강우량의 상호 독립성의 확보가 가능하여 진다. 이와 관련한 자세한 설명이 Deidda et al. (2000)에 수록되어 있다.

한편, 다음과 같이 시공간 강우장에서의 구조함수 (structure function) $S_q(\lambda)$를 정의한다.

$$S_q(\lambda) = < [P_{\lambda,\lambda,\tau}(x,y,t)]^q > \tag{3}$$

다시 말해, $S_q(\lambda)$란 3차원 시공간 강우장의 시간축을 Eq. (2)를 통해 스케일 한 후, 이를 각 변이 λ의 길이를 가진 정육면체의 모임으로 분할한 후, 각각의 정육면체 내의 누적강우량에 q승을 한 값들의 평균을 의미하며, Fig. 2에 이를 자세히 도시하였다.

강우의 멀티프랙탈특성 (multifractality) 분석은 Eq. (4)와 같은 스케일링 법칙이 존재하는 λ의 범위를 판별해 내는 과정이다.

$$S_q(\lambda) = \lambda^{\xi(q)} \tag{4}$$

여기에서 $\xi(q)$는 일정한 시공간적 범위 안에서는 동일하게 유지되는 멀티프랙탈 지수이며, 오로지 시공간강우 모멘트의 차수인 q만의 함수이다. 본 연구에서는 λ의 값을 $1km$, $2\ km$, $4\ km$, $8\ km$, $12\ km$, $16\ km$, $20\ km$, $24\ km$, $28\ km$, $32\ km$, $36\ km$, $44\ km$, $56\ km$, $64\ km$로 변화시키며 Eq. (4)의 스케일링 법칙을 도출하였다.

2.2.2 추계학적 3차원 캐스케이드 모형을 활용한 시공간 강우장의 생성

본 연구에서는 Deidda (2000)이 제안한 3차원 케스케이드 강우생성모형을 활용하여 강우를 다운스케일링하였으

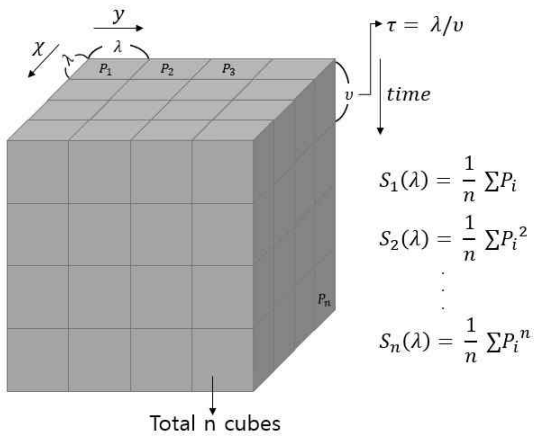

Fig. 2. Space-time Rainfall in 3 Dimensional Grid Structure and the Statistical Moment Ensembles with Different Degrees $S_q(\lambda)$

며, 그 개념도를 Fig. 3에 보였다. Fig. 3은 1차원 다운스케일링의 개념도이며, 본 연구는 이 개념도를 3차원으로 확장하여 사용하였다. 이 알고리즘에 따라 생성된 시공간 강우장내의 임의의 좌표 (x,y,t)에서의 강우강도 $i(x,y,t)$는 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$i(x,y,t)=\sum_{j=0}^{N}\sum_{k_x=0}^{2^j-1}\sum_{k_y=0}^{2^j-1}\sum_{k_t=0}^{2^j-1}\alpha_{j,k_x,k_y,k_t}\psi_{j,k_x,k_y,k_t}(x,y,t) \quad (5)$$

여기서, j는 캐스케이드 단계의 인덱스값을 의미하며, 0에서 시작해서 N까지 증가한다. k_x,k_y,k_t는 임의의 좌표 (x,y,t)가 포함되어 있는 세부 정육면체의 인덱스 값이며 (Fig. 1), $\psi_{j,k_x,k_y,k_t}(x,y,t)$는 j번째 캐스케이드 단계에서 k_x,k_y,k_t번째 정육면체에서 발생하는 wavelet값을 의미한다. 3차원 공간에서 wavelet인 $\psi_{j,k_x,k_y,k_t}(x,y,t)$는 Eq. (6)과 같이 표현된다.

$$\psi_{j,k_x,k_y,k_t}(x,y,t)=2^{3j}\Psi(2^jx-k_xL)\Psi(2^jy-k_yL)\Psi(2^jU_t-k_tL) \quad (6)$$

α_{j,k_x,k_y,k_t}는 각 케스케이드 단계 및 각 세부정육면체에 대하여 무작위로 생성되는 케스케이드 계수로, 이전 케스케이드 단계에서 생성된 α_{j-1,k_x,k_y,k_t}과 로그포아송 난수생성기에 의해 생성된 난수 η에 의해 Eq. (7)과 같이 결정된다.

$$\alpha_{j,k_x,k_y,k_t}=\eta\alpha_{j-1,k_x/2,k_y/2,k_t/2} \quad (7)$$

총 구간에 걸친 강우량이 $P_{L,L,T}=\int_0^L dx\int_0^L dy\int_0^{L/U} dt\, i(x,y,t)$라 하였을 때, 0번째 케스케이드 단계에서의 α_0은 Eq. (8)을 통해 구한다.

$$\alpha_0=\frac{P_{L,L,T}}{\sum_{j=0}^{N}2^{3j}\eta^{-j}} \quad (8)$$

여기에서 로그포아송 난수 η는 다음과 같은 로그-포아송 분포에서 무작위적으로 추출된다.

$$\eta=e^A\beta^y,\ P(y=m)=\frac{c^m e^{-c}}{m!} \quad (9)$$

Eqs. (5)~(9)를 종합하여 보면, 시공간 강우장 생성모형을 위해서는 Eq. (9)의 A,β,c 값을 알아야 하며, 이들의 값은 생성된 시공간 강우장의 멀티프랙탈 지수 $\xi_{cal}(q)$과 관측된 시공간 강우장의 멀티프랙탈 지수 $\xi_{real}(q)$가 서로 유사해질 수 있도록 산정된다. Deidda (2001)은 Eq. (5)에 근거하여 생성된 시공간 강우장의 멀티프랙탈지수를 Eq. (10)과 같이 해석적으로 유도하였다.

$$\zeta(q)=3q+c\frac{q(\beta-1)-(\beta^q-1)}{\ln 2} \quad (10)$$

Eq. (10)에 따르면, 멀티프랙탈 지수는 Eq. (9)에서의 A의 값에 무관하며 β와 c만의 함수이다. 따라서 Eq. (11)을

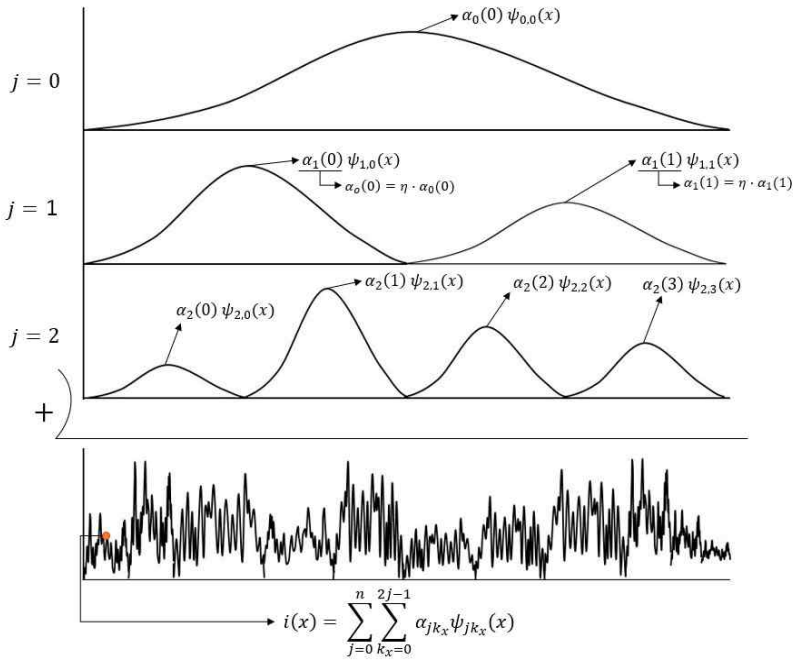

Fig. 3. The Schematic of the 1-dimensional Cascade Rainfall Generation Algorithm Combined with Wavelet Function

목적함수를 가진 2차원 최적화 문제의 해결을 통해 β와 c의 값을 판별하는 것이 멀티프랙탈 분석의 목적이라 할 수 있을 것이다.

$$\min_{(c,\beta)} = \sum_{q} [\frac{\zeta_{real}(q) - \zeta_{cal}(q)}{\sigma(q)}]^2 \qquad (11)$$

여기에서, $\sigma(q) = q - 1$로 시공간 구조함수의 차수인 q에 따라 차등적인 가중치를 적용하는 역할을 한다. 본 연구에서 β, c 값을 산출하기 위하여 활용된 구조함수의 차수는 q=2, 3, …, 7이다. 1차 모멘트에 대한 $\xi(q)$는 시공간 강우장의 특성과 관계없이 3의 값을 가지므로 Eq. (11)에서 제외되었다.

3. 결 과

3.1 시간축의 스케일링을 위한 강우의 평균 속도 산정

Table 1에 보인 8개의 강우 이벤트 각각에 대하여

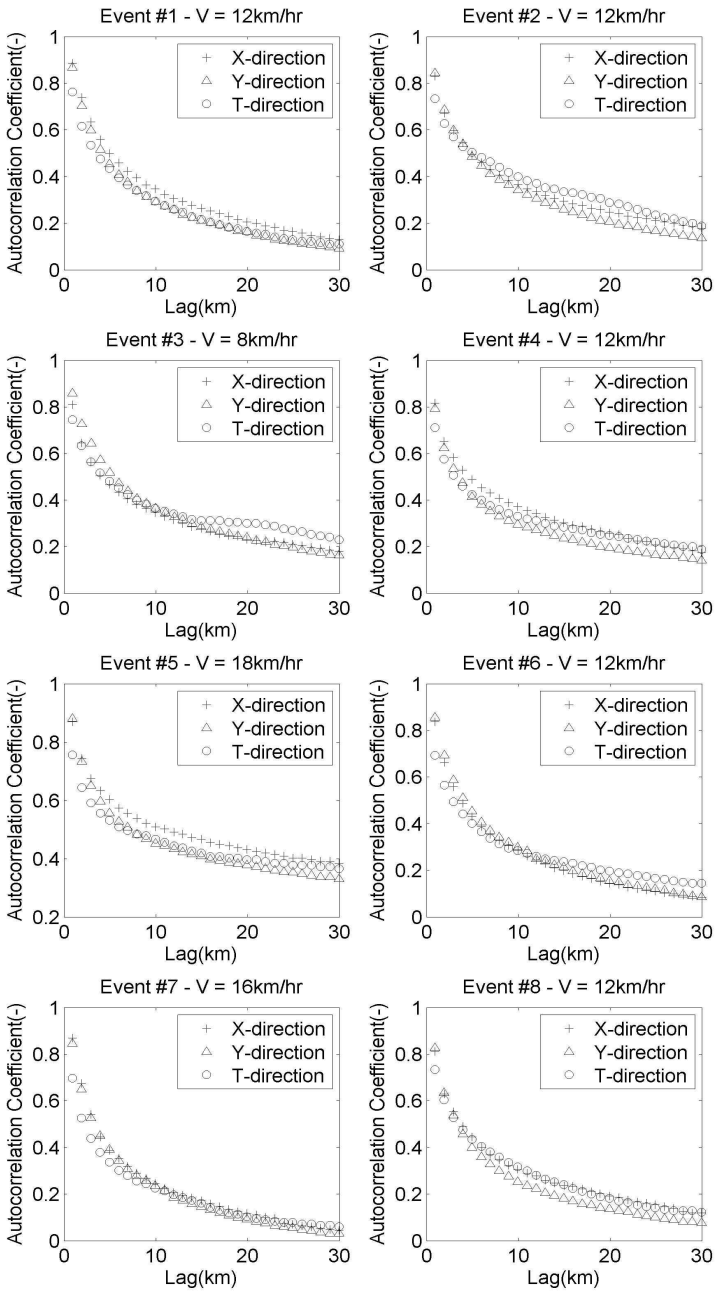

Fig. 4. Spatial and Temporal Autocorrelation with Regard to Distance (and the time scaled into distance)

x, y, t 방향의 자기상관계수를 Fig. 4에 보였다. 각 그래프에서 x축은 지연거리(km)를 나타내며, y축은 해당 지연거리에 따른 자기상관계수이다. 여기에서 시간(t) 방향의 자기상관계수는 시간의 차원 $[T]$을 강우의 속도$[LT^{-1}]$를 활용하여 길이의 단위$[L]$로 스케일한 후 (Eq. (2))의 시공간정육면체(Fig. 2)에서 시간축(높이) 방향의 자기상관계수를 의미하며, 여기에서 강우의 속도는 x, y, t 세 방향의 자기상관계수의 차이를 최소화 시키는 값으로 산정된다. 각 그래프의 제목에 각 강우 별로 이러한 강우의 속도를 표시하였다.

각 강우 이벤트는 $8\,km/hr$에서 $16\,km/hr$의 값을 가졌으며, 총 강우량에 대한 패턴은 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 가장 많은 강우 이벤트에 대하여 최적의 속도로 판별된 $12\,km/hr$의 속도로 모든 강우에 대한 시간축을 스케일하였다.

이와 아울러, 산정된 강우의 속도에 대하여 x, y, t 방향으로의 자기상관계수가 비슷하게 나타났는데, 이는 강우의 시공간적 형상이 등방성을 가지고 있다는 점을 의미하며, 이는 본 연구에서 사용한 시공간 강우장 생성알고리즘 또한 등방성을 가정하고 있다는 점에서 의미가 있는 결과라 할 수 있다. 그러나 실제로 다운스케일링을 활용해야 하는 상황에서는 시공간 강우장이 주어지지 않으므로, 강우의 시공간적 등방성을 보장하는 강우의 속도를 자기상관계수를 활용하여 알아내는 방법은 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 태풍, 국지성 집중호우, 장마 등 우리나라의 다양한 강우 패턴에 대한 강우의 속도를 분석하고 이를 다운스케일링에 고려하는 방안이 고려될 수 있을 것이다.

3.2 강우의 멀티프랙탈 지수

Fig. 5에 Table 1에 보인 8개의 강우 이벤트 각각에 대하여 관측된 레이더강우자료를 근거로 산정된 구조함수의 차수 q와 멀티프랙탈지수 $\xi(q)$와의 관계를 보였다.

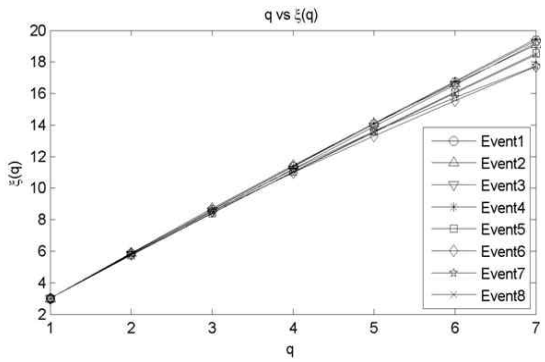

Fig. 5. Relationship between the Order of the Moment of the Structure Function and the Corresponding Multi-fractal Exponent ξ(q)

멀티프랙탈지수 $\xi(q)$는 구조함수의 차수인 q의 증가에 따라 선형의 증가추세를 보였으며, 3차 구조함수까지는 이벤트 별 멀티프랙탈 지수의 최대값과 최소값이 차이가 평균값의 3% 이내로, 이벤트에 따른 차이가 나타나지 않았으나, 4차 모멘트부터는 그 차이가 점진적으로 증가하여, 7차 모멘트의 경우 이벤트 별 멀티프랙탈 지수의 최대값과 최소값의 차이가 평균값의 10%에 이르렀다. 이러한 차이의 원인을 찾기 위하여 각 이벤트의 시공간 강우장에 포함되어 있는 강우의 총량과 멀티프랙탈 지수와의 관계를 분석하였으나, 두 변수 사이의 뚜렷한 관계는 판별되지 않았다.

3.3 강우의 멀티프랙탈 지수에 따른 로그포아송 모수의 거동

본 연구에서 사용한 강우다운스케일링 모형을 사용하여 시공간강우장을 생성하기 위해서는 Eq. (9)의 β와 c의 값이 필요하며, 이 값들은 Fig. 5에 보인 $q-\xi(q)$의 관계를 잘 재현할 수 있도록 산정된다. 이를 위하여 본 연구에서는 레이더를 통해 관측된 강우의 시공간장과 합성된 시공간강우장의 멀티프랙탈 거동의 차이를 나타내는 목적함수 값(Eq. (11))을 최소화하는 β와 c의 값을 Table 1에 보인 8개의 호우 이벤트 각각에 대하여 판별하였다. Fig. 6에 8개의 강우 이벤트에 대하여 β와 c에 따라 변화하는 목적함수의 등고선을 보였으며 2차원 평면에서 판별된 β와 c의 값은 +로 표기하였다. β와 c의 산정 범위는 Deidda (2000)의 제안에 따라 각각 [0, 1], [0, 2]로 정하였다. 실제로 다운스케일링이 행해져야 하는 상황에서 주어지는 정보는 시공간 정육면체 내에 포함되어 있는 총 강우량(혹은 평균강우강도)뿐이므로, 이 값과 β와 c의 관계를 밝혀내는 것이 중요하다. Fig. 7에 8개의 호우 이벤트에 대한 평균강우강도(I)와 β와 c의 관계를 보였다. β와 c 모두 시공간강우장내의 평균강우량에 대하여 증가하는 추세를 보였으며 최소자승회귀선의 방정식 및 R^2값을 Eqs. (12) and (13)에 나타냈다.

$$\beta = 0.02 \times I + 0.04,\ R^2 = 0.49,\quad 20mm/hr < I < 60mm/hr \tag{12}$$

$$c = 0.09 \times I - 1.57,\ R^2 = 0.49,\quad 20mm/hr < I < 60mm/hr \tag{13}$$

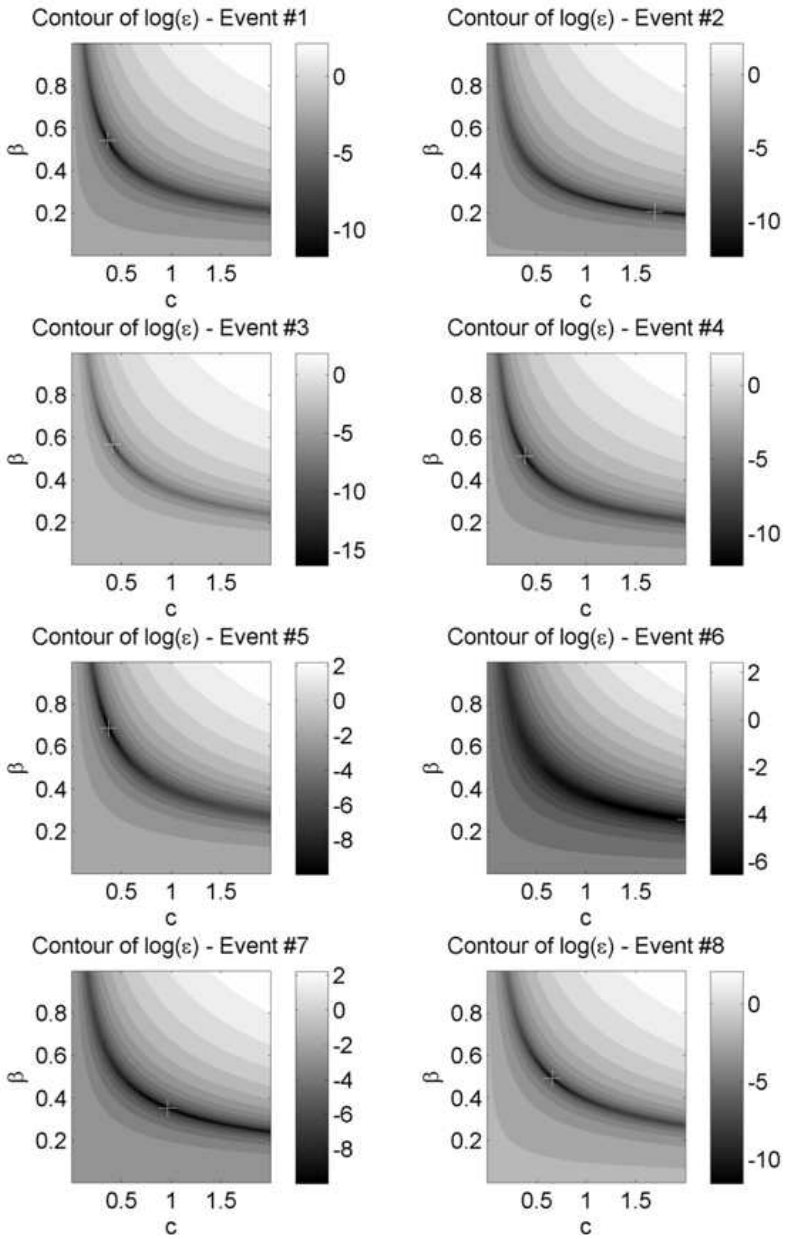

Fig. 6. The Color Contour of Objective Function (Equation 11) Varying with the Values of β and c

본 연구에서 밝힌 이러한 관계는, β값이 I 값과 큰 연관성이 없으며, c 값은 I 값의 증가에 따라 감소한다고 밝힌 Deidda (2000)의 결과와 다소 차이가 있는데, 그 이유는 본 연구에서 제시한 세 변수 사이의 관계가 우리나라의 독특한 강우특성인 장마시기에 근거한 호우사상의 시공간 강우장에 근거하여 판별되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 시공간 다운스케일링 강우생성 모형의 멀티프랙탈 특성 모사 성능

본 연구에서 제시한 시공간 다운스케일링 강우생성모형은 Eq. (5)에 근거하여 가상의 시공간 강우장을 생성하며, 이를 통해 생성된 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성은 Fig. 5에 보인 관측 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성을 모사할 수 있어야 한다. 이를 검증하기 위하여 Table 1에 보인 8개의 이벤트에 대하여 Eqs. (12) and (13)에 근거하여 β와 c를 Table 2와 같이 산출한 후, 다운스케일링 모형을 사용하여 10개의 가상 시공간 강우장을 생성하고 각각의 가상 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성과 관측 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 보였다. 8개 모두의 강

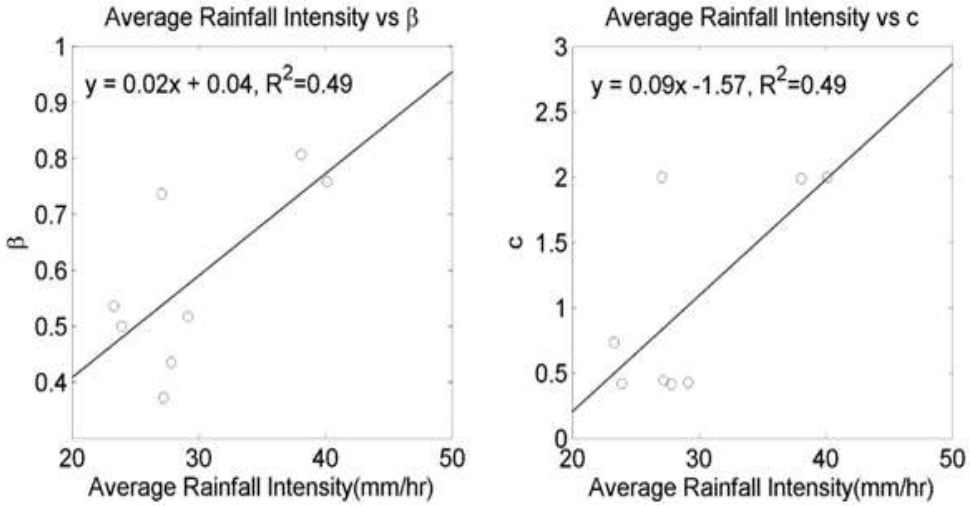

Fig. 7. Relationship between Average Rainfall Intensity (mm/hr) and the Parameter β and c

Table 2. The Value of β and c Estimated for the 8 Rainfall Events Considered in This Study

Event ID	Average Rainfall Intensity (mm/hr)	β	c
1	23.9	0.46	1.43
2	38.1	0.68	2.04
3	27.8	0.52	1.6
4	29.2	0.54	1.66
5	27.2	0.51	1.57
6	27.1	0.51	1.57
7	40.1	0.71	2.13
8	23.3	0.45	1.41

우 이벤트에 대하여, 3차 모멘트까지는 멀티프랙탈 지수가 정확히 모사되는 것을 확인할 수 있었으며, 4차 모멘트부터 7차 모멘트까지의 멀티프랙탈 지수의 모사 성능은 강우 이벤트에 따라 차이를 보였다. 이러한 차이의 원인을 판별하기 위하여 시공간 강우장 내에 포함된 총 강우량과 모사 성능과의 상관관계를 조사하였으나 유의한 관계는 판별되지 않았다. 모형의 이러한 멀티프랙탈 지수의 모멘트에 따른 불균등한 모사 성능이 유역 수문모의 시 어떠한 문제를 발생시킬 수 있는지에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 예를 들어, 다양한 시공간 강우장을 유역 모형의 입력값으로 적용하여 유출량 및 첨두유량을 산출한 후, 각각의 시공간 강우장의 멀티프랙탈 지수와 유출량 및 첨두유량과의 상관관계를 살펴보는 것도 좋은 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 시공간 다운스케일링 강우생성 모형의 누적분포함수 모사 성능

두 시공간강우장 사이의 유사성을 나타낼 수 있는 가장 직접적인 기준은 시공간강우장을 구성하는 격자강우량의 누적분포함수의 유사성일 것이다. 본 연구에서는 다운스케일링 모형의 성능 평가를 위하여 다운스케일링 모형을 사용하여 생성한 가상 시공간강우장과 관측 시공간강우장의 누적분포함수를 비교하였다. 이를 위하여, 각 8개의 이벤트에 대하여 Table 2에 보인 모형의 모수를 활용하여 시공간 각 3방향으로 128개의 셀을 가진(총 2097152셀=1283셀) 10개의 가상 시공간강우장을 생성하고 이들 각각의 격자에 포함된 강우량의 누적분포함수를 관측시공간강우장의 누적분포함수와 비교하였다.

Fig. 9는 이벤트 7에 대하여 생성된 첫 번째 가상 시공

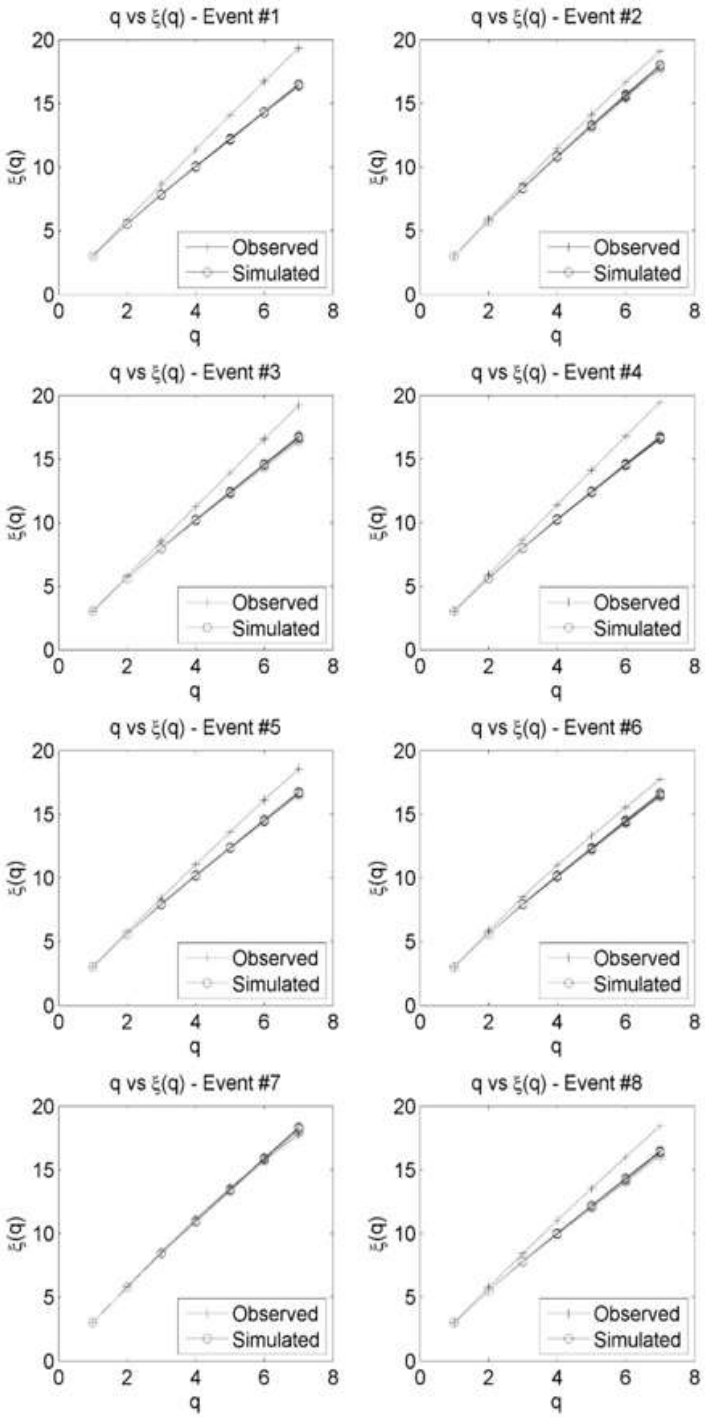

Fig. 8. Comparison of the Multifractal Exponent of the Observed Space-tme Rainfall Field ad 10 Synthetic Space-tme Rainfall Fields Generated by the Downscaling Model of This Study

간 강우장의 16, 32, 48, 64번째 시간프레임(160분, 320분, 480분, 640분)에 해당하는 공간강우장과, 같은 시간에 대하여 관측된 관측 공간강우장을 비교하여 보여준다. 통계기반의 다운스케일링 알고리즘이 활용되었으므로 관측 시공간 강우장과 생성된 시공간 강우장의 차이가 뚜렷하지만, 전반적인 시공간적인 강우의 형태와 양상이 크게 다르지 않음을 육안으로 확인할 수 있다. 이러한 차이는 케스케이드형 다운스케일링 기법의 한계로, 이미 분리된 격자가 향후에는 서로간의 연관성이 유지되지 않기 때문이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서, Eq. (9)의 난수

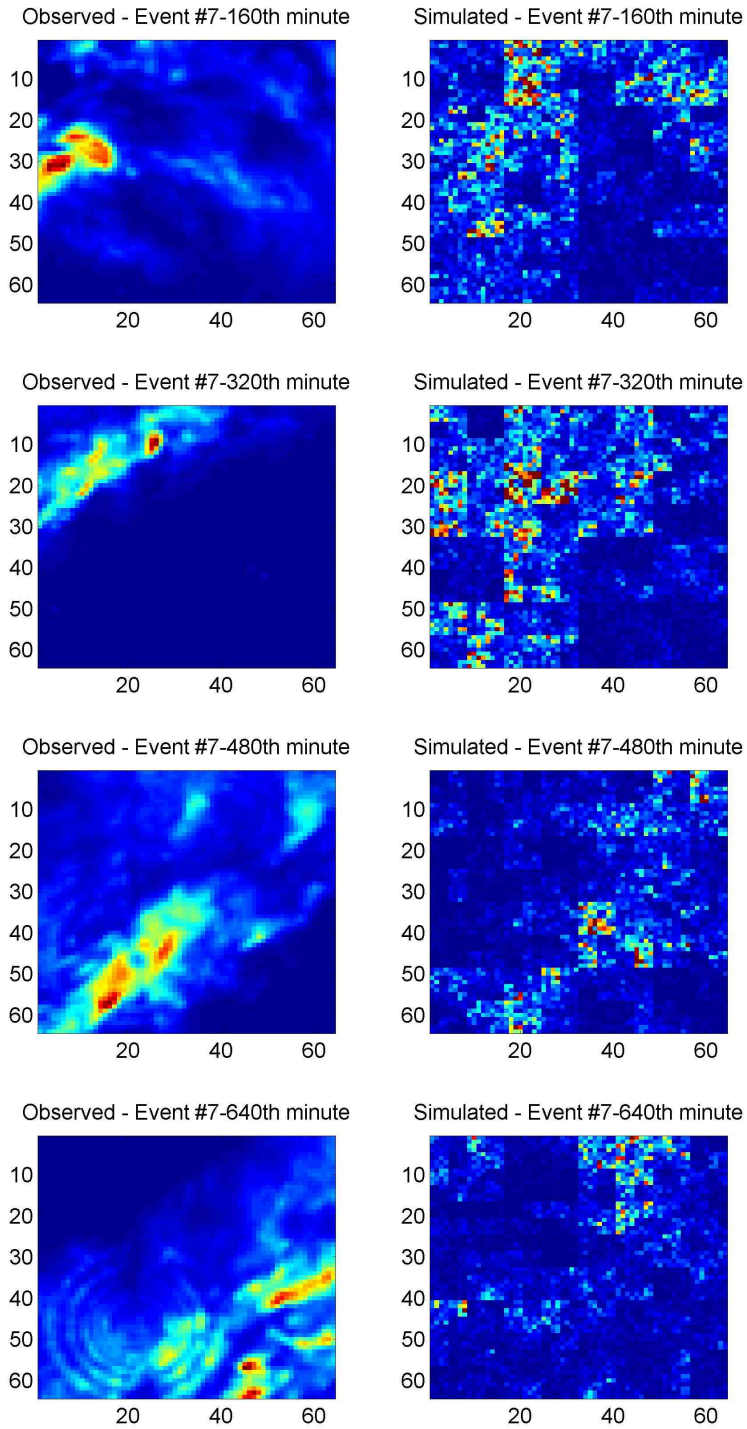

Fig. 9. The Rainfall Fields at 160 th, 320 th, 480 th, and 640 th Minutes of the Observed Radar Imagery of Event #7 (left column)and the Ones Corresponding to the Synthetic Space-time Rainfall Field (right column)

생성과정에서 강우의 비등방성 및 움직임을 고려하는 알고리즘을 추가하는 방안을 고려해 볼 수도 있을 것이다.

Fig. 10은 관측 시공간강우장의 격자강우량과 가상 시공간강우장의 누적분포함수를 비교한 결과를 보여준다. 전반적으로 보았을 때, 가상 시공간 강우장에 포함된 격자강우량은 시공간적으로 넓은 범위에 분포하고 있는 반면, 관측 시공간강우장에 포함된 격자강우량은 시공간적으로 상대적으로 더 좁은 특정 범위에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 가상 시공간강우장의 격자강우량의 경우 양의 외도 값을 가지는(오른쪽으로 긴 꼬리를 가진)

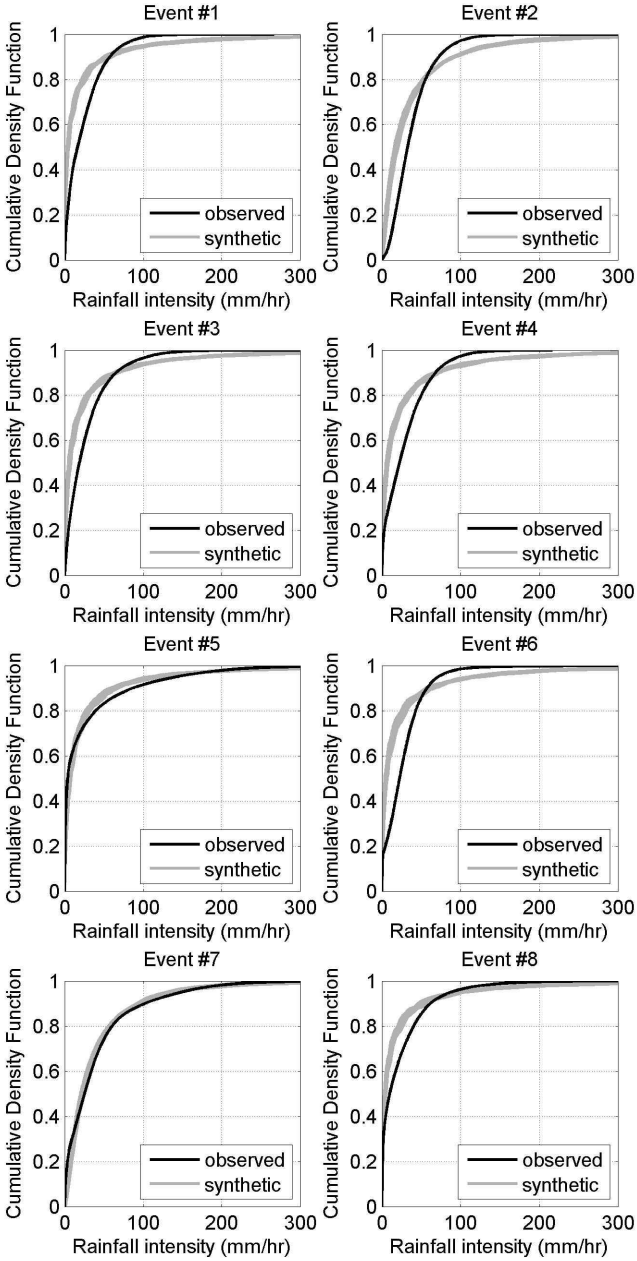

Fig. 10. Comparison of the Cumulative Density Function of the Observed Space-time Rainfall Field (black line) and 10 Synthetic Space-time Rainfall Fields Generated by the Downscaling Model of This Study (gray line)

확률분포를 보인 반면, 관측 시공간강우장의 격자강우량은 균등한 확률분포를 보였다. 가상 시공간강우장이 관측 시공간강우장을 잘 모사한 3번, 5번, 7번, 8번 이벤트를 살펴보면, 시공간강우장의 격자강우량이 100 mm를 초과하는 값이 강우장내에 상당부분 존재한다는 것을 발견할 수 있다. 이는 본 연구에서 활용한 Deidda (2000)의 다운스케일링 알고리즘이 호우 이벤트 중에서도 격자강우량의 확률분포가 양의 외도를 가지며 극한 강우를 포함하는 이벤트, 즉 시공간강우장 내에 0에 가까운 작은 강우가 시공간적으로 다수 분포하는 한 편, 큰 강우량을 가진 지역이 상당부분 존재하는 경우에 더 적절히 사용될 수 있음을 나타낸다.

이와 아울러, 관측시공간강우장과 생성된 가상시공간강우장의 각 격자에 포함된 강우량의 표준편차, 외도, 첨도를 비교하였으나 서로간의 좋은 상관관계가 발견되지는 않았다. 모형의 이러한 단점은, 본 연구에서 활용한 다운스케일링 알고리즘이 강우의 통계값이 아닌 멀티프랙탈 특성을 모사하는데 초점을 맞추고 있다는 점에서 필연

적인 결과라 할 수 있을 것이다. 이와 관련하여, 강우의 멀티프랙탈 특성과 강우의 통계값 중 어느 것이 유역의 수문변수 모의에 직접적인 영향을 미치는지에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강우의 멀티프랙탈 특성에 기반을 둔 시공간 강우 다운스케일링 알고리즘을 우리나라에의 호우사상에 대하여 적용하여 보았다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 분석한 8개의 모든 호우사상에 대하여 뚜렷한 시공간적 프랙탈 특성이 관측되었다. 다시 말해, 서로 다른 임의의 두 시공간적 스케일에서 관측한 강우장의 모멘트 사이의 관계는 하나의 일정한 모수를 사용하여 표현이 가능하다. 이러한 결과는 지금까지 우리나라의 시공간 강우장에 대하여 밝혀진 바가 없다는 점에서 그 의미를 찾을 수 있겠다.
2) 본 연구에서는 3차원 캐스케이드 모형과 3차원 Wavelet을 결합한 시공간 다운스케일링 알고리즘 (Deidda, 2000)을 활용하여 강우를 다운스케일링하였다. 이 모형은 두 개의 모수를 가졌으며, 두 모수(β와 c) 모두 시공간강우장의 평균 강우량에 따라 증가하는 추세를 보였으나 그 불확실성이 상당하였다. 이러한 모수의 불확실성을 줄이고 더 정확한 모수를 얻기 위해서는 시공간강우장의 평균강우량 이외에도 모형의 모수에 영향을 주는 추가적인 인자를 판별하여 모수의 산정에 활용하는 방안이 필요하다. 예를 들어 장마철에 발생한 호우, 태풍 기간 동안 발생한 호우 등을 따로 분류하는 방안도 고려해볼 수 있을 것이다.
3) 앞서 언급한 다운스케일링 알고리즘의 두 모수의 불확실성이 상당함에도 불구하고, 다운스케일링된 가상 시공간강우장의 멀티프랙탈 특성은 관측 시공간강우장의 멀티프랙탈 특성을 비교적 잘 모사하는 것으로 나타났다. 특히 1차 모멘트부터 3차 모멘트에 해당하는 멀티프랙탈 특성은 매우 정확히 모사되었다.
4) 다운스케일링된 가상 시공간강우장의 누적분포함수는 관측 시공간 강우장의 멀티프랙탈 특성과 유사한 특성을 보였다. 특히, 시공간강우장 내에 0에 가까운 작은 강우가 시공간적으로 다수 분포하는 한 편, 100 mm/hr이상의 큰 강우강도를 가진 지역이 상당부분 존재하는 경우, 즉 시공간 강우장의 외도가 큰 경우에 더 적절히 사용될 수 있음을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수예경보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Arnaud, P., Bouvier, C., Cisneros, L., and Dominguez, R. (2002). “Influence of rainfall spatial variability on flood prediction.” *Journal of Hydrology*, Vol. 260, No. 1, pp. 216-230.

Choi, J., Song, C., Lee, J., Hong, S., and Bang, C. (2011). “Development of a Dynamic Downscaling Method using a General Circulation Model (CCSM3) of the Regional Climate Model (MM5).” *Journal of the Korean Society of Climate Change Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 93-106.

Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., and Totterdell, I.J. (2000). “Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model.” *Nature*, Vol. 408, No. 6809, pp. 184-187.

Deidda, R. (2000). “Rainfall downscaling in a space time multifractal framework.” *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 1779-1794.

Giorgi, F., Hewitson, B., Christensen, J., Fu, C., Jones, R., Hulme, M., Mearns, L., Von Storch, H., and Whetton, P. (2001). Regional climate information-Evaluation and projections, in Climate Change 2001: The Scientific Basis, edited by J. T. Houghton et al., pp. 583-638, Cambridge Univ. Press, New York.

Goodess, C.M., Anagnostopoulou, C., Bárdossy, A., Frei, C., Harpham, C., Haylock, M.R., Hundecha, Y., Maheras, P., Ribalaygua, J., Schmidli, J., Schmith, T., Tolika, K., Tomozeiu, R., and Wilby, R.L. (2007). An intercomparison of statistical downscaling methods for Europe and European regions-assessing their performance with respect to extreme temperature and precipitation events. Climatic Change.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). The Physical Science Basis.

Kim, S., Lim, G., Chang, K., Jung, J.-W., Kim, K., and Park, C. (2008). “Multifractal analysis of Rainfalls in

Korean Peninsula." *Journal of Korean Physical Society*, Vol. 52, No. 3, pp. 669-672.

Kim, S.Y., Lim, G., Chang, K., Jung, J., Kim, K., and Park, C.H. (2008). "Multifractal analysis of rainfalls in Korean peninsula." *Journal-Korean Physical Society*, Vol. 52, No. 3, pp. 669-672.

Kim, T., Min, Y., Oh, J., and Kim, D. (2002). "Numerical modeling of the climate in the east Asia using dynamic downscaling method."*Journal of the Korean Meteorological Society, Atmosphere*, Vol. 12, No. 1, pp. 475-479.

Kwon, H., and Kim, B. (2009). "Development of Statistical Downscaling Model Using Nonstationary Markov Chain." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 213-225.

Kyoung, M., Lee, J., and Kim, H. (2009). "Downscaling Technique of Monthly GCM Using Daily Precipitation Generator." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 29, No. 5B, pp. 441-452.

Marani, M.,G. Grossi, F., Napolitano, M., Wallace, Entekhabi, D. (1997) "Forcing intermittency and land surface hydrologic partitioning." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 167-175.

Mearns, L.O., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M., and Lal, M. (2003). Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate model experiments, technical report, Data Distrib. Cent., Intergovt. Panel on Clim. Change, Norwich, U. K.

Moon, Y., and Cha, Y. (2009). "Simulation of Daily Precipitation Data Using Nonhomogeneous Markov Model I-Theory." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B,* Vol. 24, No. 5B, pp. 431-435.

National Research Council (2001). *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*. Washington, DC: The National Academies Press

Oreskes, N. (2004). "The scientific consensus on climate change." *Science*, Vol. 306 No. 5702, pp. 1686.

Pileke Jr., R.A. (2005). "Consensus about climate change?." *Science*, Vol. 308, No. 5724, pp. 952-953.

Schmidli, J., Goodess, C.M., Frei, C., Haylock, M.R., Hundecha, Y., Ribalaygua, J., and Schmith, T. (2007). "Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 112, Issue D4, No. 27.

Singh, V.P. (1997). "Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph." *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 12, pp. 1649-1669.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A. (2012). "An overview of CMIP5 and the experiment design." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, No. 4, pp. 485-498.

von Storch, H., Zorita, E., and Cubasch, U. (1993), "Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime." *Journal of Climate*, Vol. 6, No. 6, pp. 1161-1171.

Wilby, R.L., Hay, L.E., Gutowski, W.J., Arritt, R.W., Takle, E.S., Pan, Z.,Leavesley, G. H., and Clark, M.P. (2000). "Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output." *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 8, pp. 1199-1202.

Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., and Mearns, L.O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, technical report, Data Distrib. Cent., Intergovt. Panel on Clim. Change, Norwich, U. K.

Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K., and Band, L. (1988). "Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 102, No. 1, pp. 29-47.

논문번호: 14-078	접수: 2014.08.18
수정일자: 2014.09.16	심사완료: 2014.09.16