

멀티프랙탈 시·공간 격자강우량 생산기법의 수문학적 적용성 평가 : 충주댐상류유역 중심으로

Hydrological Assessment of Multifractal Space-Time Rainfall Downscaling Model: Focusing on Application to the Upstream Watershed of Chungju Dam

송 호 용* / 김 동 균** / 김 병 식*** / 황 석 환**** / 김 태 웅*****

Song, Ho Yong / Kim, Dong-Kyun / Kim, Byung-Sik / Hwang, Seok-Hwan / Kim, Tae-Woong

Abstract

In this study, a space-time rainfall grid field generation model based on multifractal theory was verified using nine flood events in the upstream watershed of Chungju dam in South Korea. For this purpose, KMA radar rainfall data sets were analyzed for the space-time multifractal characteristics. Simulated rainfall fields that represent the multifractal characteristics of observed rainfall field were reproduced using the space-time rainfall grid field generation model with log-Poisson distribution and three-dimension wavelet function. Simulated rainfall fields were applied to the S-RAT model as input data and compared with both observed rainfall fields and low-resolution rainfall field runoff. Error analyses using RMSE, RRMSE, MAE, SS, NPE and PTE indicated that the peak discharge increases about 20.03% and the time to peak decreases about 0.81%.

keywords : downscaling, multifractal, S-RAT model, space-time rainfall field

요 지

본 연구에서는 멀티프랙탈 이론을 기반으로 시·공간 격자강우장 생산 모형을 충주댐 상류유역에 발생한 9개의 홍수 사상에 대하여 검증하였다. 이를 위하여 기상청의 레이다 강우자료에 대한 시공간 멀티프랙탈 특성을 분석하였으며, 로그 포아송 분포와 3차원 웨이블릿 함수 기반의 시·공간 격자 강우생산 모형을 활용하여 관측강우의 멀티프랙탈 특성을 재현하는 시·공간 가상강우장을 생산하였다. 생성된 가상강우장을 S-RAT 분포형 수문모형에 입력값으로 적용하여 유역출구에서의 반응을 관측강우 및 시공간적으로 균등한 분포를 가진 강우장에 대하여 산출된 유역출구에서의 반응과 비교하였다. 관측 강우장과 가상강우장, 관측 강우장과 저해상도 강우장에 대하여 RMSE, RRMSE, MAE, SS, 그리고 NPE, PTE 등을 이용하여 오차분석을 수행한 결과, 평균적으로 첨두홍수량은 20.03% 증가하였고, 첨두시간은 0.81% 감소하였다.

핵심용어 : 축소기법, 멀티프랙탈, S-RAT 모형, 시공간 격자 강우장

* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: hySong86@hanyang.ac.kr)

Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

** 홍익대학교 건설도시공학부 조교수 (e-mail: kim.dongkyun@hongik.ac.kr)

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

*** 국립강원대학교 소방방재학부 & 방재전문대학원 조교수 (e-mail: hhydrokbs@kangwon.ac.kr)

Assistant Professor, Dept. of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon National University, Kangwon 245-905, Korea

**** 한국건설기술연구원 수자원환경본부 수석연구원 (e-mail: sukany@kict.re.kr)

Chief Researcher, Division of Water Resources Research in Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi 441-712, Korea

***** 교신저자, 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수 (e-mail: twkim72@hanyang.ac.kr, Tel: 82-31-400-5184)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

1. 서 론

19세기 산업혁명 이후 무분별한 화석연료의 사용으로 인해 지구의 CO₂ 농도는 급격하게 증가하고 있는 추세이다. 이러한 급격한 CO₂ 농도의 증가는 온실효과를 일으키며, 이는 기후변화의 주된 원인으로 지목되고 있다(IPCC, 2007). IPCC (2007) 제4차 보고서에 따르면 지구의 평균온도는 1906년부터 2005년까지 약 0.74°C 상승하였고, 이러한 온도의 상승은 대기의 포화증기압의 상승을 의미한다. 더 구체적으로는 대기의 온도가 1°C 상승할 때마다 강수량이 약 7% 정도 증가한다고 보고되고 있다. 또한 기후변화로 인한 이상기후는 극한 가뭄과 극한 홍수에 대한 편차를 증가시켰으며(Ann et al., 2013), 강수량 증가와 이상기후로 인해 극한 강우사상의 크기의 증가 및 발생빈도의 증가를 야기하였다.

기후변화에 대비하기 위한 국제적인 노력은 범국가적으로 진행되고 있으며, 특히 수문분야에서는 미래 기후변화가 전 지구적 시스템에 미치는 영향을 파악하기 위해 대기순환모형(General Circulation Model, GCM)이나 지역순환모형(Regional Circulation Model, RCM)을 활용해 가까운 미래에 발생할 다양한 기후변화 시나리오를 작성하여 미래 수문변화에 대한 연구를 진행하고 있다(Kim et al., 2004, 2008b; Im et al., 2006; Ahn et al., 2009; Kyoung et al., 2009a, b, c; Kang and Lee, 2009; Lee et al., 2012; Kang et al., 2013; Lee and Bae, 2013). 그러나 GCM의 한격자 크기는 수백 킬로미터로 매우 낮은 저해상도 분해능을 가지고 있고, 수문 모형을 활용한 유역 반응의 정확도가 입력강우자료의 시공간적 해상도에 의해 크게 좌우된다는 점을 고려했을 때(Ogden and Turk, 1991; Ogden and Julien, 1994), GCM의 낮은 해상도는 기후변화로 인한 유역의 반응을 예측하는데 있어 부정확성을 초래할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 강우장의 시·공간적 해상도를 높이기 위한 기법들이 개발되었고, 이러한 기법을 축소기법(Downscaling)이라 한다.

축소기법은 크게 동역학적 축소기법(Dynamical downscaling)과 통계학적 축소기법(Statistical downscaling)으로 분류된다. 동역학적 축소기법은 대상지역에 대하여 고해상도의 시·공간 격자망을 가진 역학기반의 모형을 구축하고 GCM의 결과값을 모형의 초기 및 경계조건으로 활용하여 고해상도의 기후시나리오를 만드는 기법이다. 동역학적 축소기법에서는 GCM 시나리오의 결과값으로부터 10~50 km의 지역적 특성을 반영한 강우장을 축소화하는 것이 가능하나 고려해야 하는 인자가 많을 뿐만 아

니라, 동역학적 계산을 위한 부하가 크다는 한계점이 있다(Kyoung et al., 2009b). 통계학적 축소기법은 주로 회귀분석법, Weather typing, Weather generator 등이 있다.

회귀분석법은 가장 보편적인 통계학적 축소기법으로 설명변수(Predictors)와 예측변수(Predictand) 사이의 관계를 수식화하는 방법에 따라 여러 가지 방법이 존재한다(Kim et al., 2008c; Kang and Lee, 2009; Kyoung et al., 2009a, b, c; Lee et al., 2012). 가장 간단한 방법으로는 역거리가중법이 있는데, 보간하는 점으로부터 일정거리 내의 각 점군에 대해 보간점까지의 거리에 따라 가중치를 다르게 부여하여 평균화하는 방법이다. 즉 거리가 가까우면 가중치는 커지게 되고 멀어지면 작아지게 된다(Han et al., 2009; Song et al., 2010; Kim et al., 2011). 회귀분석법을 이용한 가장 활발한 연구는 설명변수와 예측변수 사이의 비선형관계를 설명하는 인공신경망모형(Artificial Neural Networks, ANN)을 적용하는 것이다. ANN은 인간의 두뇌를 구성하는 기본단위인 뉴런의 인식과정을 수학적으로 일반화시킨 병렬정보시스템을 말하며, 비선형관계들을 표현할 때 선형회귀방법들보다 뛰어나다(Cannon, 2007). 그러나 회귀분석방법은 예측변수와 설명변수사이의 연계로 구현되기 때문에 시·공간을 동시에 고려하기가 어렵다.

두 번째 방법인 Weather typing 기법은 “현재의 기상 현상이 미래에도 같다”는 가정 하에 특정지역에서 관측된 기후특징과 GCMs 등에서 계산된 기후특징간의 관계를 설정하여 반영한 예측기법이다(Conway and Jones, 1998; Goodess and Palutikof, 1998; Fowler et al., 2005). 이는 회귀분석법의 연장선으로, 선형회귀방법에 기후의 특성을 설명하는 변수를 추가한 경우이다. 이를 통해 백터기반의 선형모형을 적용할 수 있다.

세 번째 방법인 일기발생기(Weather generator)의 경우, 관측된 지역기후의 통계학적 특성을 반영한 매개변수를 이용하여 임의의 기상기상을 연속적으로 재생성하는 방법이다. 일기발생기는 기상기상에서 시·공간의 연속적 연계가 가능하고 실제 관측 시·공간 강우 사상을 기반으로 가상 기상현상을 재현한다는 점에서 최근 많은 연구가 진행되고 있다(Kwon and Kim, 2009; Bae et al., 2011; Lee and Bae, 2013).

통계학적 축소기법을 활용한 국내 연구동향은 인공신경망이론(ANN)을 활용한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 특히, Kang and Lee (2009)는 인공신경망이론을 적용하여 GCM이 고유적으로 가지고 있는 저해상도의 모의값에 유역규모 혹은 지역규모에서의 시·공간적인 스케일 특성을 부여하여 대상유역에서의 월 누적강수량과 일 평균온도를

예측하였다. Kyoung et al. (2009c)은 AR4 SRES A2 시나리오를 기반으로 기후변화가 서울지역의 기온 및 가뭄에 미치는 영향을 평가하기 위해 최근린법(K-NN)과 인공신경망(ANN)을 적용하였으며, 최근린법은 온도와 강수량 측면에서 모두 예측이 가능하였고 인공신경망의 경우 온도예측은 가능하나 강수량에서 발산하는 결과를 가져왔다. 최근린법을 통한 온도와 강수량 예측을 통해 표준강수지수(Standardized Precipitation Index)를 산출하여 미래 가뭄을 평가한 바 있다. Lee et al. (2012)은 기후변화가 남강댐 유역의 유출량에 미치는 영향을 평가하기 위해서 인공신경망 축소기법 기법을 적용한 RCM 모형의 결과로부터 미래 기상자료를 생산하고 이를 유역유출 모형인 SWAT 모형에 적용하여 미래 남강의 수문학적 거동을 평가하였다. 그 결과 2011년부터 2100년까지 강우, 상대습도, 최고기온, 최저기온의 값이 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 기후에 가장 민감하게 반응하는 강우의 경우, 미래로 갈수록 전체적으로 증가하는 경향을 보였다 (Kang et al., 2013).

멀티프랙탈을 이용한 연구 중 Kang (2003)은 프랙탈 특성 중 하나인 자기유사특성에 대하여 미국 NASA의 GHRC (Global Hydrology Resource Center)에서 제공되는 NEXRAD 강우자료를 이용하여 자기유사특성을 분석하고 이러한 특성이 축소기법에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여주었다. 축소기법의 다른 접근방법으로는 호우사상을 극치호우, 무강수, 기타 일반의 총 3가지 구간으로 구분하고 각각 다른 방법을 통해 보정하는 단계적 축소기법이 최근 연구되었다(Lee and Bae, 2013). 국내 연구동향과 같이 통계학적 축소기법은 주로 회귀모형을 적용하였으며 시공간을 동시에 고려하지 않은 단독적인 시간적 혹은 공간적 축소를 통해 미래 기후변화에 따른 수문변화를 예측하고 있다.

축소된 강우격자를 강우-유출 모형에 적용했을 때, 유역 반응은 격자 크기가 커지면 첨두 유출량과 총 유출량은 감소하는 경향을 보이는 반면, 첨두시간은 증가하는 경향을 보였다(Ogden and Turk, 1991; Ogden and Julien, 1994). 이러한 결과로 인해 GCM이나 RCM의 저해상도 강우자료를 사용했을 때, 첨두유출량은 실제보다 과소 추정되고 첨두시간이 실제보다 과대 추정된다. 본 연구에서는 저해상도 자료를 고해상도 자료로 활용할 수 있도록 멀티프랙탈 이론을 기반으로 시-공간을 동시에 고려하는 통계학적 3차원 시-공간 축소기법을 적용하였다. 이러한 축소기법은 기존의 연구에서 나타난 단독적인 시간축이나 공간축에 한정되지 않고 시간축과 공간축을 동시에 고려하는 기

법으로 시-공간적으로 연속적 표현이 가능하다. 또한 3차원적 시-공간 축소기법을 적용하여 3차원 시-공간 가상강우장을 만들고 이를 분포형 강우-유출 모형인 S-RAT (Spatial-Runoff Assessment Tool) 모형에 적용하여 결과를 비교분석하였다.

2. 분석 자료

2.1 기상청 강우 분석 자료

우리나라에서 관측된 자료의 통계학적 특성을 반영한 멀티프랙탈 시-공간 가상강우장의 생성을 위해 기상청에서 제공하는 천리안위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS))의 레이더(Radar) 기상관측자료를 이용하였다. 천리안위성은 2010년 6월, 남미 프랑스령 기아나 쿠루에서 발사되었으며, 지구 적도 상공 36,000 km, 동경 128.2°에 위치하여 기상관측, 해양관측, 통신서비스 임무를 수행하는 우리나라 최초의 정지궤도복합위성이다. 각 레이더 기상관측자료의 1개 frame은 1 × 1 km 단위격자가 1441 × 1153로 구성되어 있으며, 누적 10분의 강우강도(mm/10 min)를 시간단위의 강우강도(mm/hr)로 환산하여 제공된다. 강우사상을 반영하기 위해 2008년 7월부터 2012년 8월까지의 레이더 관측강우자료 중 9개의 호우주의보기간을 선정하였다(Table 1). 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 우리나라를 500 × 500 격자로 설정한 후, 충주댐 상류유역을 분석대상으로 선정하고 114 × 114 격자로 구성하였다(Fig. 1의 사각형 영역). 또한 본 연구에서 사용될 분포형 강우-유출 모형(S-RAT 모형)의 DEM (Digital Elevation Model) 자료를 추출하였으며, Fig. 1의 사각형 영역 안에 표현되었다. 충주댐 상류유역은 충주댐 (2,484 km²), 평창강(1,773 km²), 남한강상류(2,448 km²)로 구성되며 총 6,705 km²이다. 유역 대부분은 산림지(4,817 km²)와 논(1,153 km²)으로 이루어져 있다. 이와 같이 추출된 호우사상이 본 연구에서 제안하는 멀티프랙탈 시-공간 가상강우장의 생성범위가 된다.

3. 방법론

3.1 강우장의 멀티프랙탈 특성

멀티프랙탈 분석을 위해, 규모(Scale)에 따른 강우의 통계학적 특성을 반영한 강우구조함수(Rainfall Structure Function)를 정의해야 한다. Fabry (1996)은 연속적인 시-공간의 강우량을 표현하기 위해 Eq. (1)과 같은 강우구조함수를 정의하였다. 전체 강우량 P는 공간축 $\lambda_x \times \lambda_y$ 과

Table 1. Characteristics of Radar Rainfall Field

Event ID	Rainfall Field		Maximum Rainfall Field	
	Date (YYMMDDHHMM)	Number of Frames	Date (YYMMDDHHMM)	Number of Frames
N1	0807240010 - 0807252350	287	0807241730 - 0807250400	64
N2	0907111640 - 0907122110	172	0907120250 - 0907121320	64
N3	0907130000 - 0907162200	565	0907141600 - 0907150230	64
N4	0908100520 - 0908131030	464	0908120430 - 0908121500	64
N5	1008151610 - 1008161200	120	1008160120 - 1008161150	64
N6	1009210100 - 1009221010	200	1009211430 - 1009220100	64
N7	1106231800 - 1106262350	468	1106240110 - 1106241140	64
N8	1106280000 - 1106302350	432	1106291520 - 1106300150	64
N9	1208140000 - 1208170550	467	1208151420 - 1208160100	64

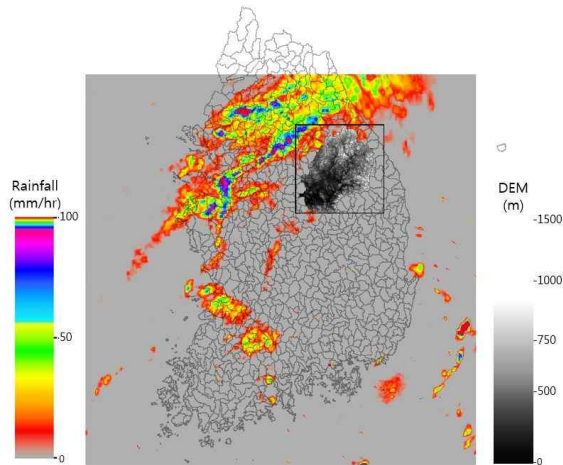


Fig. 1. Observed Radar Rainfall Field (500 × 500 cell) and Analysis Area (114 × 114 cell)

누적 강우시간 τ 의 합과 시·공간에 따라 연속적인 정의되는 강우강도(i)로 표현된다.

$$P_{\lambda_x, \lambda_y, \tau}(x, y, t) = \int_x^{x+\lambda_x} d\xi \int_y^{y+\lambda_y} d\theta \int_t^{t+\tau} d\sigma i(\xi, \theta, \sigma) \quad (1)$$

여기서, $\lambda_x = \lambda_y$ 는 평면축의 간격을 말하며, τ 는 시간축의 간격을 말한다. x, y, t 는 공간좌표, i 는 공간좌표 ξ, θ, σ 일 때의 강우강도를 의미한다.

강우구조함수에서 시간간격(τ)을 고정하면, 강우장의 누적강우량은 공간축의 크기(λ)에 따라 멀티프랙탈 특성을 보이며, 수학적 표현은 Eq. (2)와 같다.

$$M_q(\lambda) = \left\langle [P_{\lambda_x, \lambda_y, \tau}(x, y, t)]_{\tau=const}^q \right\rangle \quad (2)$$

여기서, $\langle \rangle$ 는 각 x, y, t 에 따른 강우량에 대한 평균을 의미하고, q 는 파워모멘트이다.

만약 강우사상이 자기유사 특성을 갖는 프랙탈 특성을 갖는다면, Eq. (2)는 Eq. (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$M_q(\lambda) \sim \lambda^{\xi(q)} \quad (3)$$

여기서, $\xi(q)$ 는 파워모멘트(Power moment) q 에 따른 멀티프랙탈 지수(Multifractal exponent)이다. 즉, 멀티프랙탈 지수는 파워모멘트 q 에 따라 일정하게 증가하는 선형 관계를 보여야 한다(Deidda, 2000).

기상청 레이더 기상관측 자료를 이용하여 강우구조함수를 계산하면 Table 2와 같다. 각 파워모멘트 q 에 따라 멀티프랙탈 지수를 나타내면, Fig. 2와 같이 각 강우 사상은 자기유사 특성을 갖는 프랙탈 특성을 가진다.

3.2 Space-time Multifractal Framework 모형

본 연구에서는 시간축과 공간축을 동시에 고려하는 격자망 구조의 시·공간 가상강우공간(Space-time rainfall field)을 생산하기 위해, Deidda (2000)이 제안한 Space-time Multifractal Framework 모형을 적용하여 가상의 격자구조의 강우장을 생성하였다. Deidda (2000)은 강우량의 총합 모멘트를 통해 Eq. (4)와 같은 강우구조함수(RSF)를 제안하였으며, 이는 강우량의 합과 강우 누적시간 사이의 연계를 통해 산출된다. 강우량의 총합 P 는 공간($\lambda_x \times \lambda_y$)과 누적 시간(τ)에 대한 강우량과 강우강도(i)의 곱으로 정의된다(Deidda, 2000).

$$M_q(\lambda) = \left\langle [P_{\lambda_x, \lambda_y, \tau=\lambda/U}(x, y, t)]^q \right\rangle = \left\langle \left[\int_{\xi}^{\xi+\lambda} dx \int_{\theta}^{\theta+\lambda} dy \int_{\sigma}^{\sigma+\lambda/U} dt i(x, y, t) \right]^q \right\rangle \quad (4)$$

Table 2. Multifractal Exponent $\zeta(q)$ of Each Rainfall Event

Events ID	$\zeta(q)$					
	q=2	q=3	q=4	q=5	q=6	q=7
N1	3.0	5.7	8.3	10.7	12.9	15.1
N2	3.0	5.9	8.7	11.5	14.3	17.0
N3	3.0	5.7	8.4	11.0	13.6	16.1
N4	3.0	5.8	8.6	11.3	14.0	16.5
N5	3.0	5.6	8.1	10.2	12.0	13.6
N6	3.0	5.7	8.3	10.8	13.2	15.5
N7	3.0	5.8	8.6	11.3	14.0	16.6
N8	3.0	5.6	7.9	10.1	12.1	14.2
N9	3.0	5.8	8.6	11.2	13.8	16.2

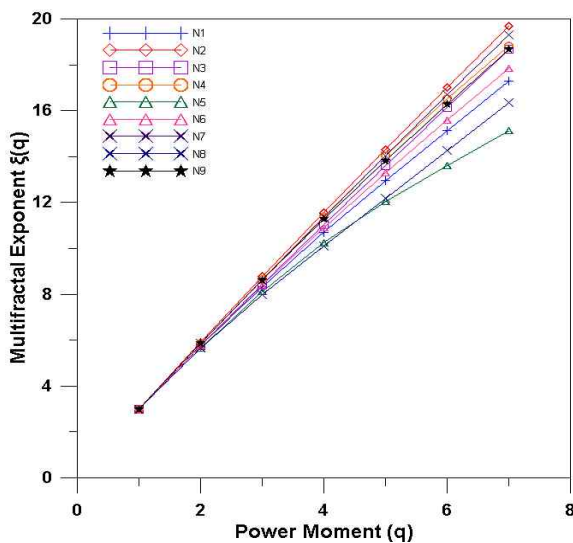


Fig. 2. Comparison of Multifractal Exponent and Power Moment ($\zeta(q) - q$) for Observed Storm Events

여기서, P 는 $\lambda_x \times \lambda_y$ 의 면적과 누적시간 τ 까지의 누적강우량, q 는 파워모멘트, $\langle \rangle$ 는 괄호 안의 평균을 나타낸다. 강우시간 $\tau = \lambda/U$ 로 정의되며, U 는 관측레이더 강우장에서 강우속도(Storm Velocity)를 의미한다. 강우속도는 가상강우장의 각 격자의 독립성을 확보하기 위해 강우장의 간격을 재구성해 준다.

Eq. (4)의 강우강도(i)는 지속적 임의 분할 과정(Random Cascade Process)과 3차원 웨이브렛(3-dimensional Wavelet)으로 구성되며, Eq. (5)와 같이 표현된다.

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

$$\psi_{j,k_x,k_y,k_t}(x, y, t) = 2^{3j} \Psi(2^j x - k_x L) \Psi(2^j y - k_y L) \Psi(2^j U t - k_t L) \quad (5b)$$

$$\Psi(z) = \begin{cases} c \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] & z \in [0, L] \\ 0 & z \notin [0, L] \end{cases} \quad (5c)$$

여기서, j 는 분할 횟수(cascade level)에 따른 단계이며, k_x, k_y 그리고 k_t 는 3차원 시·공간의 좌표를 나타낸다. $\psi_{j,k_x,k_y,k_t}(x, y, t)$ 는 분할 횟수가 j 일 때 좌표 k_x, k_y, k_t 에서 발생하는 웨이브렛을 말하며, α_{j,k_x,k_y,k_t} 는 확률 분할(cascade)에서 추출된 확률 분할계수이다. Eq. (5c)에서 $\mu = L/2$ 이며, $c \cong 1/(\sigma\sqrt{2\pi})$, $\sigma = 0.15L$ 으로 정의된다.

확률 분할계수 α_{j,k_x,k_y,k_t} 는 지속적으로 증식하는 과정을 통해 구축된다(Yaglom, 1966; Monin and Yaglom, 1975). 지속적 임의 분할 과정에서 j 단계에서의 α_{j,k_x,k_y,k_t} 는 $j-1$ 단계에서의 발생기 η 에 의해 분할하게 되며, Eq. (6)을 따른다.

$$\alpha_{j,k_x,k_y,k_t} = \eta \alpha_{j-1, k_x/2, k_y/2, k_t/2} \quad (6)$$

따라서 총 구간에 걸친 강우량은 Eq. (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{L,L,T} = \int_0^L dx \int_0^L dy \int_0^{L/U} dt i(x, y, t) \quad (7)$$

여기서, L, L, T 는 전체 평면축 크기 $L \times L$ 을 나타내며, T 는 전체 시간을 나타낸다.

Eq. (4)의 강우구조함수를 연속적으로 산출해 보면, 강우구조함수는 Eq. (3)의 지배를 받는다. 또한 멀티프랙탈 지수 $\xi(q)$ 는 오직 발생기 η 의 파워모멘트 평균에 따라 변화하게 되며, Eq. (8)과 같다(Deidda et al., 1999).

$$\xi(q) = q(3 + \log_2 \bar{\eta}) - \log_2 \bar{\eta}^q \quad (8a)$$

$$\eta = e^{A\beta^q}, \quad P(y=m) = \frac{c^m e^{-c}}{m!} \quad (8b)$$

여기서, η 은 로그 포아송 분포를 따르며, A 와 β 는 고정된 변수이고, y 는 $E(Y)$ 를 매개변수($c=E(Y)$)로 가지는 Poisson 분포의 변수가 된다. 따라서 로그 포아송 분포의 파워 모멘트 q 에 대한 평균은 $\bar{\eta}^q = \exp[qA + c(\beta^q - 1)]$ 가 되어 Eq. (9)를 유도할 수 있다.

$$\xi(q) = 3q + c \frac{q(\beta - 1) - 1(\beta^q - 1)}{\ln 2} \quad (9)$$

여기서, 멀티프랙탈 지수 $\xi(q)$ 는 매개변수(β, c)에 의해 결정되며, 이러한 두 매개변수는 규모적으로 독립성을 갖는다.

매개변수(β, c)를 산정하기 위해서 Eq. (10)과 같이 관측 레이더 강우장을 통해 계산된 멀티프랙탈 지수와 가상 강우장에서 산출된 멀티프랙탈 지수 사이에서 최소가 되는 β 와 c 를 산정해야 한다. 이 두 변수는 로그 포아송 분포의 매개변수가 되고, 관측강우의 특성을 나타내는 계수가 된다. 선정된 각 사상 별로 산정된 로그 포아송 매개변수 β 와 c 는 Table 3과 같다.

$$\min_{(\beta, c)} = \sum_q \left[\frac{\xi_o(q) - \xi_s(q)}{\sigma(q)} \right]^2 \quad (10)$$

여기서, $\xi_o(q)$ 와 $\xi_s(q)$ 는 각각 관측강우장과 가상강우장의 멀티프랙탈지수를 말하며, $\sigma(q) = q - 1$ 로 각각의 파워 모멘트 q 에 의해 발생하는 오차에 대한 가중치를 보정해 준다.

분할단계(Cascade level)에 따라 연속적으로 공간을 분할하게 되며, 분할된 공간에 실제 레이더 강우장을 기반으로 산출된 로그 포아송 매개변수(β 와 c)에 따라 확률을 분포시킨다. 이러한 과정을 다차원 강우생산모델(Generalization of the multi-dimensional model)이라 하며(Deidda, 2000), 이는 지속적으로 분할하는 로그 포아송 분포에 따라 생성된다(Dubrule, 1994; She and Waynire, 1995). 1차원 선형 웨이블릿 함수를 예로 들면, Fig. 3에서의 Gaussian(x)의 함수와 같이 나타난다. 이후 Gaussian(x)는 로그 포

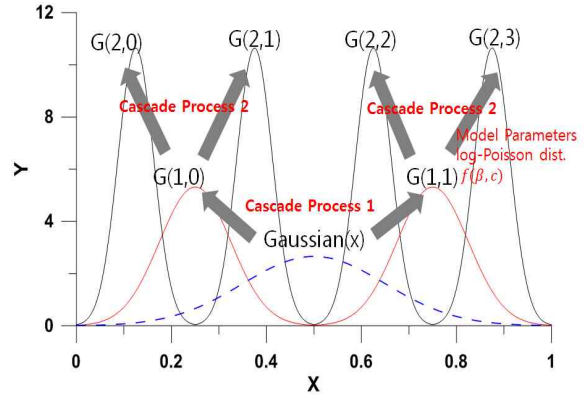


Fig. 3. One-dimensional Wavelet Cascade

아송 분포의 매개변수(β, c)에 따라 확률값이 분배되며, Gaussian(1,0)과 Gaussian(1,1)로 나누어지게 된다. 연속적으로 Gaussian(1,0)과 (1,1)은 각각 (2,0), (2,1)과 (2,2), (2,3)으로 나누어지게 된다. 같은 방법으로 2차원 웨이블릿 평면에서는 평면에 대한 2차원의 원형 형태로 나누어지게 되고, 본 연구에서 생산하고자 하는 3차원 웨이블릿 공간에서는 3차원 구체의 형태로 나누어지게 된다.

3.3 속도계수(U)

가상 강우장을 생성하기 위해 2차원 공간 좌표와 1차원의 시간좌표를 하나의 축으로 통일시켜 3차원을 형성해야 한다. 또한, 각 강우의 독립성을 확보하고 자기유사성을 반영하기 위해 강우의 평균이동속도를 확인하고 이를 반영하여 가상강우의 시·공간적 간격을 설정해야 한다. 강우 추적방법은 특정 지역의 레이더 강우 자료를 이용하여 첫 번째 시간의 레이더 자료와 두 번째 레이더 자료를 비교하여 각 격자에 있던 강우의 도심이 어디로 이동했는가를 판단하여 속도를 산출한다(Johnson and Bras, 1979). 본 연구에서는 강우속도 U 를 5.346 km/hr, 10.74 km/hr, 12 km/hr, 14 km/hr, 16 km/hr, 18 km/hr로 가정하고 이들의 자기상관성(Autocorrelation)을 분석하여 상호간에 연관성이 높은 속도로 강우속도를 산정하였다.

각 사상 별로 산출한 결과 각 강우마다 이동속도는 다소 차이가 있으며, 5.5 km/hr에서 18 km/hr까지의 속도를 보여준다. 이들 중 가장 적절한 강우속도를 가정하기 위

Table 3. Log-Poisson Parameters in Each Rainfall Event (in case of $U_{total}=10.74$ km/hr)

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
β	0.80	0.82	0.53	0.74	0.84	0.69	0.59	0.71	0.89
c	4.31	1.76	0.70	1.34	9.30	1.69	0.60	3.06	7.55

해, Eq. (11)을 이용하여 각 사상별 공간축(x, y)과 시축(t)의 자기상관성을 비교하였다.

$$\rho_x(\delta) = \frac{\langle P_{\lambda_0, \lambda_0, \tau_0}(x, y, t) P_{\lambda_0, \lambda_0, \tau_0}(x + \delta, y, t) \rangle - \mu^2}{\sigma^2} \quad (11a)$$

$$\rho_y(\delta) = \frac{\langle P_{\lambda_0, \lambda_0, \tau_0}(x, y, t) P_{\lambda_0, \lambda_0, \tau_0}(x, y + \delta, t) \rangle - \mu^2}{\sigma^2} \quad (11b)$$

$$\rho_z(\delta) = \frac{\langle P_{\lambda_0, \lambda_0, \tau_0}(x, y, t) P_{\lambda_0, \lambda_0, \tau_0}(x, y, t + \delta/U) \rangle - \mu^2}{\sigma^2} \quad (11c)$$

여기서, $\lambda_0=1$ km, $\tau_0=\lambda_0/U \approx 10$ min, $U=10.74$ km/hr이다. 그리고 $\langle \rangle$ 는 공간축(x, y)과 시간축(t)의 평균을 말하며, μ 와 σ^2 은 각각 평균과 분산을 말한다.

강우속도의 자기상관관계는 Fig. 4(대표적으로 N3의 10.74 km와 16 km/hr의 결과만 도시)과 같고 본 연구에서는 전체 사상에 대한 상관성이 비교적 높은 10.74 km/hr로 강우속도를 설정하고, 각 사상별 강우특성을 반영한 시·공간을 동시에 고려하여 가상강우장(64×64×64)을 생산하였다. 각 격자의 간격은 $\lambda=1.79$ km이고 시간간격은 $\tau=10$ min으로 설정하였다. 강우속도의 자기상관관계에서는 주로 공간축(x, y)에 대한 높은 상관성을 보이나 시간축(z)에 따른 상관성은 비교적 낮게 나타났다.

3.4 수문모형

3.4.1 S-RAT 모형

S-RAT 모형은 격자 기반의 GUI 환경을 구현가능하도록 개발된 것으로, 자체적인 GIS 관련 지형 매개변수를 추출할 수 있는 기능을 탑재하였다. GIS 자료를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고, 각 격자마다 시간간격별 개념적 물수지를 계산함으로써, 유역의 시·공간적 강우-유출량 변화를 모의할 수 있다. 이는 격자기반의 레이더 강우자료를 GIS 격자와 동일하게 입력하는 것

이 가능하다. 모형의 입력자료인 유역의 수치지형도, 토양도, 토지이용도는 ESRI-ARCII 형식의 파일로 입력되며, DEM으로부터 지형적 매개변수를 생성한다. 또한 토양도와 토지이용도로부터 각 격자별 CN값 및 조도계수 등 격자자료를 생성한다(Kim et al., 2010).

3.4.2 수문 입력 자료

수문 입력 자료를 S-RAT 모형에 적용하기 위해서는 관측 레이더 강우장과 생산한 가상강우장의 공간적 보정이 필요하다. S-RAT 모형에 적용되는 DEM은 114×100의 평면 공간 좌표이고, 생산된 가상강우는 64×64의 형태이기 때문에 DEM 자료와 같은 크기로 보정해줄 필요가 있으며, 64×64 격자를 114×100 격자로 보간법을 이용하여 보정하였다. 또한 가상강우장의 시간 간격은 64×10 min을 고려하여 관측 강우장에서 최대 강우발생 기간을 산출하여(Table 1) 64×10 min으로 설정하였다.

이를 바탕으로 충주댐 상류유역에 DEM과 동일한 공간스케일(114×100 격자)과 시간간격 64×10 min으로 관측 레이더 강우장과 10개의 가상강우장을 생산하였으며, 또한 비교대상인 모든 격자에 동일한 값을 입력한 저해상도 자료를 생산하여 S-RAT 모형에 적용한 후, 강우-유출 분석을 실시하고 이를 비교분석하였다.

4. 결 과

본 연구에서는 멀티프랙탈 이론을 기반으로 관측 레이더 강우장의 특성을 반영한 시·공간 3차원 가상강우장을 구축하였다. 구축된 가상강우장의 멀티프랙탈 특성을 분석한 결과는 Table 4와 같고 관측 레이더 강우장과 멀티프랙탈 특성을 비교한 결과 매우 유사하였다. 특히 대부분의 사상(N2, N4, N6, N7, N9)에서 N3과 같이 관측 레이더 강우장과 가상강우장의 파워모멘트 q 와 멀티프랙탈

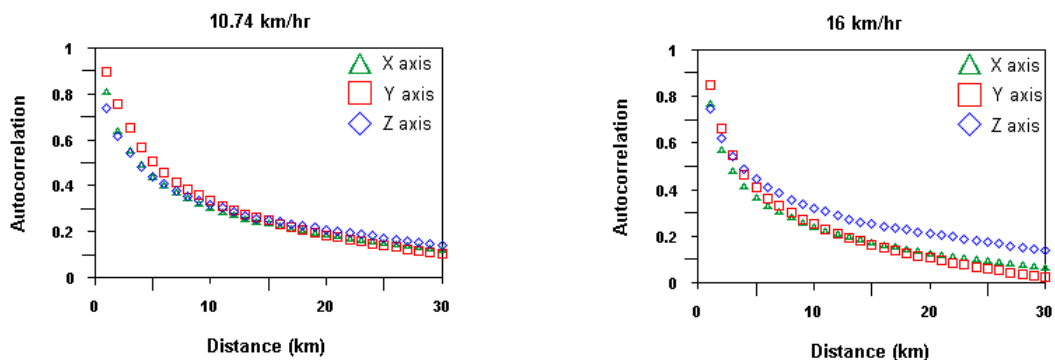


Fig. 4. Autocorrelation for Storm Velocity in Radar Rainfall Field (N3)

지수의 관계가 선형관계를 나타내며, 그 외 사상(Fig. 5 (a), (c), (d))에서도 약간의 차이는 있기는 하나 유효할 수 있는 정도의 멀티프랙탈 특성을 반영되었다(Fig 5).

본 연구에서는 S-RAT 모형에 수문 입력 자료를 입력하고 충주댐 상류유역에 대하여 분석을 실시하였다. 수문 입력 자료로는 관측 레이더 강우장, 본 연구에서 제시하는 가상강우장, 모든 가상강우 공간에 동일한 강우량을 포함하는 저해상도 강우장(Low-Resolution)이다.

관측 레이더 강우장과 가상강우장, 그리고 비교 대상인

저해상도 강우장에 대한 강우-유출 모의 결과는 Fig. 6과 같다. 관측 레이더 강우장과 저해상도 강우장을 비교하였을 때, 전체 사상에서 유출량은 감소하였고, 침투시간은 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서 제안하는 멀티프랙탈 기반의 가상강우장의 강우-유출 모의에서는 저해상도 강우장과 비교했을 때, 유출량이 충분히 확보된 사상의 경우 비교적 잘 모의되는 것으로 나타났으며(Fig. 6. (b), (f), (i)), 비교적 유출량이 적은 N5의 경우 일정하지 않은 강우-유출 모의결과를 나타낸다.

Table 4. Multifractal Exponent $\zeta(q)$ Of Simulated Rainfall Events

Events ID	$\zeta(q)$ (Average)					
	q=2	q=3	q=4	q=5	q=6	q=7
N1	3.000	5.773	8.361	10.816	13.183	15.494
N2	3.000	5.930	8.801	11.623	14.406	17.156
N3	3.000	5.817	8.534	11.197	13.833	16.455
N4	3.000	5.892	8.703	11.453	14.157	16.826
N5	3.000	5.782	8.375	10.820	13.164	15.444
N6	3.000	5.815	8.497	11.087	13.613	16.092
N7	3.000	5.878	8.682	11.440	14.172	16.889
N8	3.000	5.723	8.225	10.544	12.723	14.820
N9	3.000	5.893	8.689	11.400	14.034	16.597

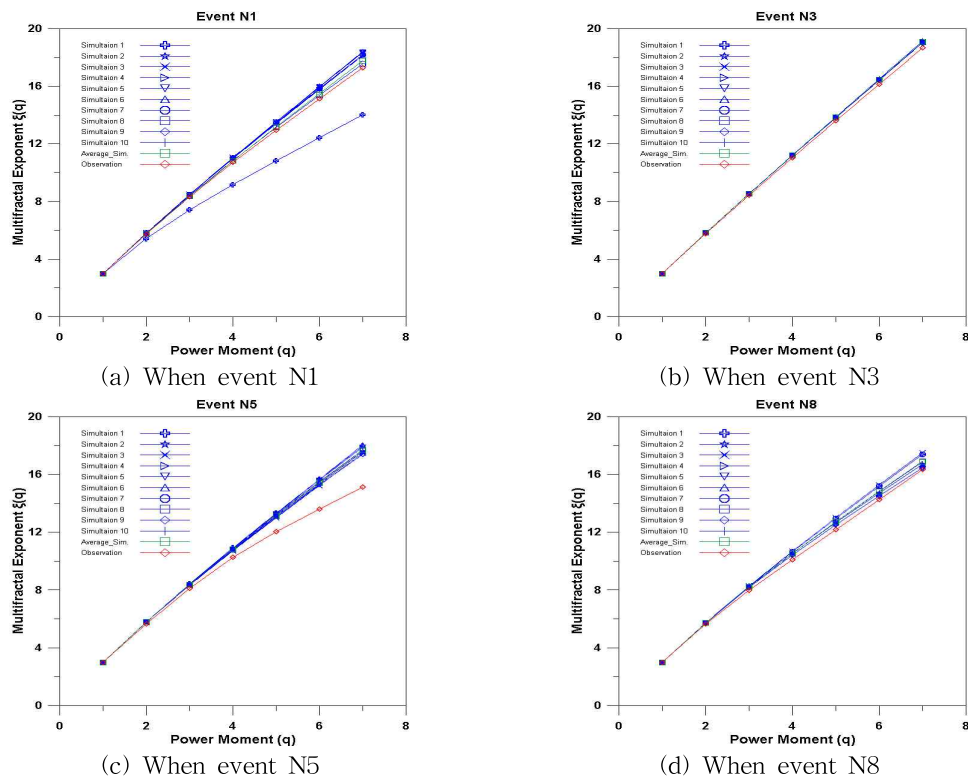


Fig. 5. Comparison of Multifractal Exponent and Power Moment ($\zeta(q) - q$) for Simulated Events

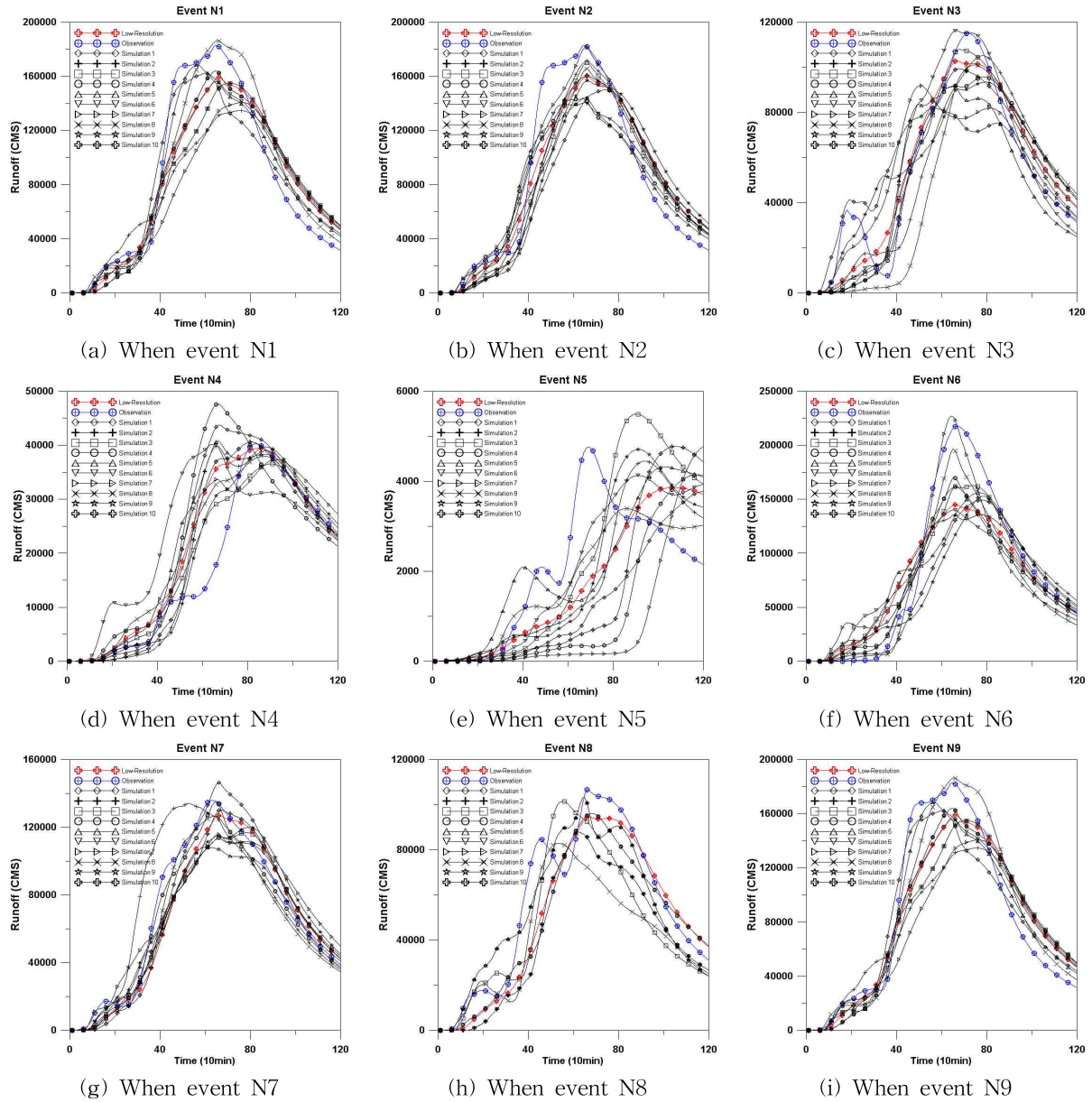


Fig. 6. Results of Rainfall-runoff Analysis from Observed Rainfall Field, Simulated Rainfall Field and Low-resolution Rainfall Field

본 연구에서는 제안한 가상강우장의 강우-유출 모의가 지속적으로 만족할 수 있는 결과가 도출되는 것은 아니다. 왜냐하면 가상강우장의 생성이 일정한 공간 안에 확률적으로 가중치를 적용하여 분배되기 때문에 모든 경우에 우수한 결과를 얻을 수 없었다. 그러나 생성된 가상강우장의 강우-유출 모의에 있어서 잘 모의된 결과도 존재하고 잘 안된 결과도 존재한다. 따라서 본 연구에서는 모의한 값을 정량적으로 표현하기 위하여 Eq. (12)와 같은 RMSE (Root Mean Squared Error), RRMSE (Relative Root Mean Squared Error), MAE (Mean Absolute Error),

SS (Skill Score), NPE (Normalized Peak Error), PTE (Peak Timing Error) 방법(Kim et al., 2008a)을 이용하여 관측 레이더 강우장과 가상강우장, 관측 레이더 강우장과 저해상도 강우장의 오차 분석을 수행하였으며, 결과는 Table 5와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{vir \text{ or } low})^2} \quad (12a)$$

$$RRMSE = \frac{1}{Q_{obs}} \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{vir \text{ or } low})^2} \times 100 \quad (12b)$$

Table 5. Error Measures of Simulated Radar Fields at Upstream Basin of Chungju Dam

Event (1)	Data (2)	RMSE (CMS) (3)	RRMSE(%) (4)	MAE (CMS) (5)	SS-MAE (6)	NPE (7)	SS-NPE (8)	PTE (min) (9)	SS-PTE (10)
N1	Max	149300	56.06	28120	56.85	0.061	146.56	82	50.75
	Min	3718	11.06	4751	-155.4	-0.305	-132.82	33	-22.39
	Best	26370	37.54	17290	-57.04	-0.305	-132.82	33	50.75
	Worst	82170	30.8	11820	-7.36	-0.178	-35.88	70	-4.48
	Mean	66678	32.80	15322	-39.17	-0.100	25.88	67.6	-0.90
	Low	49300	21.68	11010		-0.131		67	
N2	Max	111100	38.76	24680	20.38	-0.006	95.2	74	3.03
	Min	49310	20.93	13950	-40.87	-0.231	-84.8	64	-12.12
	Best	63590	20.93	13950	20.38	-0.006	95.20	66	0.00
	Worst	111100	38.76	24680	-40.87	-0.179	-43.20	74	-12.12
	Mean	65979	28.72	18678	-6.61	-0.130	-6.56	66.4	-0.61
	Low	19150	25.96	17520		-0.125		66	
N3	Max	97020	38.87	16810	9.23	0.01	109.35	80	25.37
	Min	1932	20.23	7884	-93.53	-0.288	-169.16	50	-19.4
	Best	19170	22.13	8778	-1.06	0.010	109.35	66	1.49
	Worst	9071	38.87	14060	-61.87	-0.288	-169.16	56	16.42
	Mean	32336	29.15	11900	-37.00	-0.140	-35.05	68.4	-2.09
	Low	12610	20.56	8686		-0.107		67	
N4	Max	62170	68.52	9200	28.03	0.184	1020	93	23.53
	Min	14320	24.63	2599	-154.78	-0.092	-360	65	-9.41
	Best	21770	37.31	3630	-0.53	0.009	145.00	81	4.71
	Worst	14320	24.63	2599	28.03	-0.092	-360.00	90	-5.88
	Mean	35262	43.58	4688	-29.83	0.000	124.00	77.1	9.30
	Low	36960	37.19	3611		-0.020		85	
N5	Max	13140	108.71	1653	42.58	0.153	180.53	120	19.63
	Min	161.5	39.23	498.4	-90.44	-0.288	-51.58	86	-12.15
	Best	161.5	46.61	723.7	16.62	-0.133	30.00	91	14.95
	Worst	13140	108.71	1653	-90.44	0.002	101.05	120	-12.15
	Mean	4652	73.57	1103	-27.05	-0.080	59.26	102.0	4.67
	Low	3431	59.97	868.2		-0.190		107	
N6	Max	189200	49.1	29340	32.18	0.043	112.87	78	3.03
	Min	20700	24.47	16290	-22.15	-0.377	-12.87	64	-18.18
	Best	20700	27.94	20080	16.40	0.043	112.87	64	3.03
	Worst	178800	42.31	20690	13.86	-0.314	5.99	78	-18.18
	Mean	105936	36.87	21887	8.88	-0.240	27.67	71.0	-7.57
	Low	87800	39.06	24020		-0.334		66	
N7	Max	88710	27.14	13620	41.58	0.077	216.67	79	19.7
	Min	4681	8.78	5216	-52.54	-0.202	-206.06	53	-19.7
	Best	51030	8.78	5216	41.58	-0.005	92.42	65	1.52
	Worst	18380	18.85	11170	-25.10	-0.117	-77.27	79	-19.70
	Mean	46080	17.94	9839	-10.20	-0.080	-25.15	66.5	-0.76
	Low	45580	17.11	8929		-0.066		66	
N8	Max	157900	37.59	15920	-13.99	-0.034	70.18	68	20.9
	Min	24570	21.23	10240	-77.22	-0.223	-95.61	53	-1.49
	Best	24570	21.23	10240	-13.99	-0.034	70.18	65	2.99
	Worst	152200	37.59	15920	-77.22	-0.223	-95.61	53	20.90
	Mean	96032	29.16	12885	-43.44	-0.110	3.51	62.5	6.72
	Low	62390	23.11	8983		-0.114		67	
N9	Max	123600	42.64	26870	39.75	0.02	20.9	76	13.64
	Min	14500	15.43	10640	-52.15	-0.263	-1.49	57	-15.15
	Best	30560	19.58	12160	31.14	0.020	20.90	65	1.52
	Worst	123600	42.64	26870	-52.15	-0.230	-1.49	76	-15.15
	Mean	44434	28.15	18581	-5.22	-0.130	6.72	67.0	-1.51
	Low	24800	26.26	17660		-0.130		66	

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{obs} - Q_{vir\ or\ low}| \quad (12c)$$

$$SS(\%) = \frac{A_{low} - A_{vir}}{A_{perf} - A_{vir}} \times 100 = 1 - \frac{A_{low}}{A_{vir}} \times 100 \quad (12d)$$

$$NPC = \frac{Q_{vir\ or\ low}^{max} - Q_{obs}^{max}}{Q_{obs}^{max}} \quad (12e)$$

$$PTE = T_{vir\ or\ low}^{max} - T_{obs}^{max} \quad (12f)$$

여기서, N은 강우-유출 사상수를 나타내며, Q_{obs} 는 관측된 직접유출량, Q_{vir} 는 가상강우장의 직접유출량을 말하며, Q_{low} 는 저해상도 강우장의 직접유출량을 말한다. A_{perf} 는 완벽하게 예측한 경우의 오차이며, 본 연구의 경우 '0'의 값을 갖는다. A_{low} 는 관측 유출량과 저해상도 강우장의 유출량의 오차, A_{vir} 는 관측 유출량과 가상강우장의 유출량의 오차를 말한다. $Q_{vir\ or\ low}^{max}$ 는 가상강우장 혹은 저해상도 강우장의 첨두유출량, Q_{obs}^{max} 는 관측강우장의 첨두유출량을 말하며, $T_{vir\ or\ low}^{max}$ 는 가상강우장 혹은 저해상도 강우장의 첨두시간, T_{obs}^{max} 는 관측강우장의 첨두시간을 말한다.

통계적 유출량 오차분석결과, 각 사상별 총 유출량의 차이가 있으나 관측 레이더 강우장과 가상강우장의 평균적인 RMSE는 4,652~105,936 m³/s로 관측 강우장과 오차율(RRMSE)은 17.94~73.57% 범위이다. 관측 강우장과 저해상도 강우장의 경우, 3,431~87,800 m³/s로 관측 강우장과 오차율(RRMSE)은 17.11~59.97% 범위이다. 또한, MAE 검정 후, SS 적용결과 Event N6을 제외하고 가상강우장의 오차가 6.61~43.44% 과다하게 산출되었다. RMSE, RRMSE, MAE 및 SS-MAE에서는 크게 만족할 만한 결과는 나타나지 않는다. 이러한 특징은 관측강우장과 1대 1로 비교되기 때문에 가상강우장은 유연한 강우-유출 결과를 보여주는 반면 저해상도 강우장은 부드러운 강우-유출 결과를 보여주어 오차가 커진 것으로 판단된다. 결과를 바탕으로 첨두홍수량과 첨두시간의 변화를 판단하기 위해 NPC 및 PTE 검정을 수행하였으며, 각각에 대한 SS를 산정하였다. 이는 가상강우장이 저해상도 강우장과 비교했을 때 첨두홍수량 증가 및 첨두시간을 비교하기 위해 실시하였다. 평균적으로 SS-NPC 검정결과 첨두홍수량은 20.03% 증가하였으며, SS-PTE 검정결과 0.81% 감소된 첨두시간을 보여준다(Table 5). 여기서, SS-MAE, SS-NPE, SS-PTE는 관측 레이더 강우장과 가상강우장의 강우-유출 결과값, 관측 레이더 강우장과 저해상도 강우장의 결과값을 각각 MAE, NPE, PTE 검정 후(Col. (5),

(7), (9)), 오차에 대하여 각각 SS로 비교한 값(Col. (6), (8), (10))이다.

5. 결 론

본 연구에서는 멀티프랙탈 이론을 바탕으로 시·공간을 동시에 고려하는 3차원 시·공간 가상강우장을 생산하였다. 대상유역은 충주댐 상류유역으로 선정하였으며, 2008~2012년 중 우기에 해당하는 6월, 7월, 8월의 호우주의보 기간 중 9개의 사상을 선정하였다. 선정된 사상을 중심으로 지역강우 특성을 반영하기 위해 로그 포아송 분포모형의 매개변수(β, c)를 산정하였다. 이를 기반으로 멀티프랙탈 기반의 가상강우장을 각 사상마다 10개씩 생성하였다. 관측 강우장과 생성된 가상강우장의 강우-유출 모의 및 비교를 위해, 관측 레이더 강우장과 GCM이나 RCM 같은 저해상도 강우장을 생산하여 S-RAT 모형에 적용 후, 강우-유출 분석을 실시하였다. 또한 이를 정량화하기 위해 RMSE, RRMSE, MAE, SS, 그리고 NPC, PTE 이용하여 본 연구에서 제안하는 멀티프랙탈 시·공간 가상강우장의 적용성을 판단하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 관측 강우장의 멀티프랙탈 특성은 5번 사상(N5)을 제외하고 매우 뚜렷하게 나타났으며, 본 연구에서 제안한 멀티프랙탈 시·공간 가상강우장의 멀티프랙탈 특성 또한 매우 뚜렷하게 나타난다. 강우장 내에 내리는 강우의 양이 작을 뿐만 아니라 한 지점에 집중되는 경우(5번 사상), 멀티프랙탈 특성이 다른 사상과 비교했을 때 차이가 있지만, 유효할 수준으로 판단된다.
- 2) 강우-유출 모의결과를 분석해 보면, RMSE, RRMSE, MAE 및 SS-MAE 분석 결과, 저해상도 강우장보다 6.61~43.44%의 오차가 나타났으며, 이는 가상강우장의 강우-유출 모의값은 강우량에 따라 유연하게 나타내는 반면, 저해상도 강우장의 경우 비교적 부드러운 강우-유출로 모의되는 것으로 나타났다. 왜냐하면 가상강우장은 로그 포아송 분포의 매개변수에 따라 가중치가 부여해 주기 때문에 인접한 격자 간에 상관성이 없는 독립적인 값을 배정받는다. 따라서 강우-유출모의에서도 유연한 결과가 나타난 것으로 판단되고 저해상도 강우장의 경우, 비교적 부드러운 결과가 도출된 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 가상강우장의 첨두홍수량과 첨두시간의 변화를 살펴보기 위해 NPE, PTE 분석을 실시하였으며, 첨두홍수량은 평균적으로 20.03% 증가하

였고, 침투시간은 0.81% 감소하였다. 이러한 결과를 바탕으로 GCMs나 RCMs 같은 저해상도 격자 구조의 자료를 이용하여 강우-유출을 모의 했을 경우, 침투량 감소 및 침투시간이 증가하는 결과를 도출 하기에 적합할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안하는 멀티프랙탈 시-공간 가상강우장 생산방법은 지역특성인자인 로그 포아송 분포의 매개변수(β, c)와 관측강우장의 총 강우량을 입력값으로 사용한다. 그래서 3가지 매개변수만 필요로 하기 때문에 비교적 쉽게 가상강우장을 생성할 수 있다. 또한 시-공간을 동시에 고려하기 때문에 강우에 대한 연속적 접근이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 가상강우장 생성 방법은 관측 레이더 강우장으로 부터 산출한 매개변수를 이용하여 확률적으로 분포시켜 주는 것으로 모든 공간에 확률을 분포시킨다. 이는 모든 구간에 확률값이 존재한다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 실제 관측 레이더 강우장에서 발생하는 유체 또는 기체의 흐름(구름, 강수의 이동 등)은 표현되지 않는다(특히, 강우 발생 격자와 미발생 격자 표현). 이러한 점을 개선하기 위해서는 대상유역을 소유역 중심으로 선정하고, 장마와 같은 강우가 모든 공간에 분포한 사상을 선정한다면, 본 모형의 결과는 더욱 나아질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요(시드)사업(지역특성을 반영한 상세 격자강우량 생산기술 개발)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Ahn, S.R., Park, M.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2009). "Assessing future climate change impact on hydrologic components of Gyeongancheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 1, pp. 33-50. (in Korean)

Ann, B.Y., Hong, S.J., Kim, B.S., and Kim, H.S. (2013). "Analysis of extreme event using extreme indices and RCP 8.5 scenario in Korean peninsula." *Journal of Korean Society of Hazard Conference 2013*, pp. 135. (in Korean)

Bae, D.-H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). "Future Korean water resources projection consi-

dering uncertainty of GCMs and hydrological models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406. (in Korean)

Cannon, A.J. (2007). "Nonlinear analog predictor analysis: a coupled neural network/analog model for climate downscaling." *Neural Networks*, Vol. 20, No. 4, pp. 444-453.

Conway, D., and Jones, P.D. (1998). "The use of weather types and air flow indices for GCM downscaling" *Journal of Hydrology*, 212-213, pp. 348-361.

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

Deidda, R., Benzi, R., and Siccardi, F. (1999). "Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall" *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 1853-1867.

Dubrule, B. (1994) "Intermittency in fully developed turbulence: log-Poisson statistics and generalized scale-covariance" *Physical Review Letters*, Vol. 73, No. 7, pp. 959-962.

Fabry, F. (1996) "On the determination of scale ranges for precipitation fields" *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. D8, pp. 12,819-12,826.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O'Connell, P.E., and Burton, A. (2005). "A weather type conditioned multi-site stochastic rainfall model for generation of scenarios of climatic variability and change." *Journal of Hydrology*, Vol. 308, No. 1-4, pp. 50-66.

Goodess, C.M., and Palutikof, J. (1998). "Development of daily rainfall scenarios for southeast Spain using a circulation-type approach to downscaling." *International Journal of Climatology*, Vol. 18, No. 10, pp. 1051-1083.

Han, M.S., Kim, C.S., Kim, H.S., and Kim, H.R. (2009). "A study on the revised methods of missing rainfall data for real-time forecasting systems." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 131-139. (in Korean)

Im, E.S., Kwon, W.-T., and Bae, D.-H. (2006). "A study on the regional climate change scenario for impact assessment on water resources." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 12, pp. 1043-1056. (in Korean)

- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- Johnson, E.R., and Bras, R.L. (1979). "Real-time estimation of velocity and covariance structure of rainfall events using telemetered raingage data—A comparison of methods." *Journal of Hydrology*, No. 44, pp. 97–123.
- Kang, B.S. (2003). *Statistical characteristics of self-similarity in rainfall radar field*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2003, pp. 431–434. (in Korean)
- Kang, B.S., and Lee, B.K. (2009). *Dam basin-scale regionalization of large-scale model output using the artificial neural network*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2009, pp. 179–183. (in Korean)
- Kang, J.Y., Kim, Y.D., and Kang, B.S. (2013). "Effect of change in hydrological environment by climate change on river water quality in Nam River watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 8, pp. 873–884. (in Korean)
- Kim, B.-S., Kim, B.-K., and Kim, H.-S. (2008a). "Flood simulation using the gauge adjusted radar rainfall and physics-based distributed hydrologic model." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 22, pp. 4400–4414.
- Kim, B.-S., Kim, B.K., Kyoung, M.S., and Kim, H.-S. (2008b). "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. (in Korean)
- Kim, B.-S., Kim, H.-S., Seoh, B.H., and Kim, N.W. (2004). "Impact assessment of climate change on hydrologic components and water resources in watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 185–193. (in Korean)
- Kim, B.-S., Noh, H.S., and Kim, H.-S. (2011). "The comparison of estimation methods for the missing rainfall data with spatio-temporal variability." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 189–197. (in Korean)
- Kim, B.-S., Yoon, S.-H., Hong, S.-J., and Kwon, H.-H. (2010). *Development of conceptually grid based hydrological model*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2010, pp. 149–154. (in Korean)
- Kim, J.S., Rim, H.W., Um, M.J., Kim, W.I., and Ahn, W.S. (2008c). *Spatial adjustment of rainfall using kriging method and application of distributed model*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2008, pp. 130–134. (in Korean)
- Kwon, H.-H., and Kim, B.-S. (2009). "Development of statistical downscaling model using nonstationary Markov Chain." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 213–225. (in Korean)
- Kyoung, M.S., Kim, H.-S., and Kim, B.-S. (2009a). *Climate change effect on daily precipitation frequency in Korea*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2009, pp. 129–133. (in Korean)
- Kyoung, M.S., Lee, J.K., and Kim, H.-S. (2009b). "Downscaling technique of monthly GCM using daily precipitation generator." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 5B, pp. 441–452. (in Korean)
- Kyoung, M.S., Lee, Y.W., Kim, H.S., and Kim, B.S. (2009c). "Assessment of climate change effect on temperature and drought in Seoul : based on the AR4 SRES A2 scenario." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2, pp. 181–191. (in Korean)
- Lee, J.M., Kim, Y.D., Kang, B.S., and Lee, H.S. (2012). "Impact of climate change on runoff in Namgang Dam watershed" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 6, pp. 517–529. (in Korean)
- Lee, M.H., and Bae, D.-H. (2013). "Evaluation of hybrid downscaling method combined regional climate model with step-wise scaling method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 585–596. (in Korean)
- Monin, A.S., and Yaglom, A.M. (1975). *Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence, Volume 2 Fluid Mechanics*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Ogden, F.L., and Julien, P.Y. (1994). "Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution" *Journal of Hydrology*, Vol. 158, No. 1–2, pp. 1–18.
- Ogden, F.L., and Turk, F.K. (1991). *The applicability of weather radar to hydrologic modeling: radar resolution requirements and comparison with dense rain-gauge network data*. Proceedings of 11th Annual AGU Hydrology Days, pp. 11–22.

She, Z.-S., and Waymire, E.C. (1995). "Quantized energy cascade and log-Poisson statistics in fully developed turbulence" *Phys. Rev. Lett.*, 74, pp. 262-265.

Song, C.W., Song, C.J., Kim, B.-S., and Kim, H.-S. (2010). *Estimation of missing rainfall data considering spatio-temporal variation using radar data*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2010, pp. 1196-1120. (in Korean)

Yaglom, A.M. (1966) "Effect of fluctuations in energy dissipation rate on the form of turbulence characteristics in the inertial subrange" *Dokl. Akad. Nauk*, No. 166, pp. 49-52.

논문번호: 14-077	접수: 2014.08.17
수정일자: 2014.09.20/09.25	심사완료: 2014.09.25