韓國水資源學會論文集
第47卷 第8號·2014年 8月
pp. 693~701

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 47, No. 8:693701-701, August 2014
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.8.693
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

추계학적 강우모형의 매개변수 변동을 통한 서울지역 여름철 강우 변동특성 분석

Analysis on the Variability of Rainfall at the Seoul Station during Summer Season Using the Variability of Parameters of a Stochastic Rainfall Generation Model

조 현 곤* / 김 광 섭** / 이 재 응***
Cho, Hyungon / Kim, Gwangseob / Yi, Jaeeung

Abstract

In this study a stochastic rainfall generation model is used to analyze the structural variability of rainfall events since it has limitations in the traditional approach of measuring rainfall variability according to different durations. The NSRPM (Neyman-Scott Rectangular Pulse Model) is a stochastic rainfall generation model using a point process with 5 model parameters which is widely used in hydrologic fields. The five model parameters have physical meaning associated with rainfall events. The model parameters were estimated using hourly rainfall data from 1973 to 2011 at Seoul stations. The variability of model parameter estimates was analyzed and compared with results of traditional analysis.

keywords : NSRPM, Parameter, Rainfall Structure, Variability Analysis

요 지

본 연구에서는 강우의 변동특성 분석에 있어 기존의 접근법인 지속기간별 강우량의 변화 분석을 통하여 얻는 데 한계가 있는 강우의 구조적 변동특성을 분석하기 위하여 추계학적 강우모형을 이용하였다. Neyman-Scott 구형펄스 모형(Neyman-Scott Rectangular Pulse Model, NSRPM)은 점 과정을 이용한 추계학적 강우생성 모형으로 시간단위 강우를 생성함으로써 수문학 분야에서 널리 쓰이고 있으며 강우특성과 관련한 5개의 매개변수로 구성되어있다. 각 매개변수는 물리적인 의미를 가지고 있으므로 서울지점의 1973~2011년 여름철 시강우자료를 이용하여 NSRPM의 매개변수를 추정하고 추정된 매개변수의 변화를 분석하여 강우의 구조적인 변화를 분석하고 기존연구와 비교 분석하였다.

핵심용어 : NSRPM, 매개변수, 강우구조, 변동분석

* 경북대학교 건축·토목공학부 박사과정 (e-mail: Gonny@knu.ac.kr)
Ph.D. Candidate, Dept. of Arch. and Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
** 교신저자, 경북대학교 건축·토목공학부 교수 (e-mail: kimgs@knu.ac.kr, Tel: 82-53-939-6859)
Corresponding Author, Professor, Dept. of Arch. and Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
*** 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 (e-mail: Jeyi@ajou.ac.kr)
Professor, Div. of Env. Civil & Transportation Eng., Ajou Univ., Suwon 443-749, Korea

1. 서 론

최근 급변하는 기후변화에 따른 국지성 호우 등에 의해 발생하는 자연재해의 피해 규모와 빈도는 점점 증가하고 있는 추세이다. 이러한 추세 속에서 자연재해로 인한 인적, 물적 피해를 최소화하기 위해 기후변화에 따른 지역별 영향에 대한 분석 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 기후변화로 야기되는 수문환경의 변화는 자연재해예방(가뭄, 홍수)과 수자원의 관리에 있어 우리에게 새로운 도전을 주고 있다. 이에 따라 기후변화에 의한 지역별 강우의 변동특성을 분석하는 연구가 세계 곳곳에서 수행되고 있다. 그러나 일반적으로 강우의 변동을 분석하기 위한 방법으로 지속시간별 최대강우량, 연 강우량 등 총량적인 개념을 이용한 연구가 대부분이며 이는 최종 강우자료를 사용하여 실제 강우사상의 구조적인 변동특성을 파악하기에는 한계가 있기 때문이다. 강우변화에 대한 모의를 하기 위한 방법 중에서 통계적 강우모의는 다양한 시간 스케일의 강우를 생성할 수 있으며 적은 입력 변수를 이용하여 강우의 통계적 특성을 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점은 저수지 설계, 홍수 설계, 상수도 설계 등 월강우자료에서부터 시강우자료까지 필요로 하는 다양한 수문학적 분야에 적합한 강우를 모의할 수 있다. 통계적 강우생성 모형은 관측된 장기간의 강우의 통계적 특성으로부터 강우의 시간변화에 따른 내적 구조특성에 대한 표현을 용이하게 한다. 수문학 분야에서 널리 쓰이고 있는 추계학적 강우생성모형인 Neyman-Scott Rectangular Pulse Model (NSRPM)은 점과정을 이용한 추계학적 강우생성 모형으로 강우의 발생과 강우세포(rain cell)의 강우강도, 지속시간의 분포로 표현함으로써 Rectangular Pulse Model (RPM)에서 반영하지 못했던 강우의 군집특성을 잘 반영할 수 있어 그 적용성이 뛰어나다는 평가를 받고 있다. NSRPM은 원하는 지속시간에 대한 시계열 강우를 생성함으로써 수문학적인 적용을 위한 다양한 시간스케일의 강우자료를 생성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 추세 속에 수문학 분야의 시계열 강우의 통계적인 모형에 대한 국내, 국외에서 활발하게 연구가 수행되고 있다. NSRPM과 같이 점 과정을 이용한 추계학적 강우생성 모형에는 Barlett-Lewis Rectangular Pulse Model (BLRPM)모형이 있다. BLRPM과 NSRPM 모형은 세 개의 기본이 되는 독립적인 확률과정 의해 구성된다. 첫째, 강우의 이벤트 시작을 결정짓는 과정이다. 둘째, 각각의 강우 이벤트에 속해있는 강우세포의 개수를 결정짓는 과정이다. 셋째, 강우세포 위치를 결정짓는 과정이다. BLRPM, NSRPM의 차이점은 강우세포의 위치를 결정짓는 기준에서 차이가 있다. 연속 모형을 이용한 점 강우의 시간적 분포에 대한 모의는 Rodriguez-Iturbe et al. (1987)에 의해 제안 되었다. 점 과정을 기본으로 한 연속 모형은 강우강도의 시간적 변화패턴을 표현할 수 있으며 강우의 관측 자료는 정해진 관측시간 동안에 얻어진 자료이기 때문에 강우를 모의하기 위해서는 모형의 매개변수를 구하여야 한다. NSRPM과 BLRPM을 이용한 강우의 시간적 구조의 모의에서 두 모형은 건조기간에 대해서는 매개변수를 과대 추정하는 경향이 있었다 (Amorocho and Wu, 1977). 이러한 문제를 해결하기 위해 매개변수를 추가한 수정된 BLRPM을 제시하였다(Rodriguez-Iturbe et al., 1988). 이와 비슷한 수정된 NSRPM 또한 제시되었다(Entekhabi et al., 1989). Burlandor and Rosso (1991)는 NSRPM이 처음의 BLRPM과 수정된 BLRPM보다 더 적합하게 모의 한다는 결과를 제시하였다. 또한 추계학적 점 과정을 이용한 강우의 모의는 극한 강우의 전체적인 특성이 아닌 부분적인 특성만 표현할 수 있다. 따라서 매개변수 추정에 있어 사용자의 주관적인 판단이 강우모형의 결과에 영향을 끼친다(Burlando and Rosso, 1996). 수정된 모형은 강우 이벤트 내에 존재하는 비가 오지 않는 확률을 더 잘 표현 하지만 매개변수 추정을 위한 계산의 복잡성 때문에 이차통계 특성(Second order property)을 잘 나타내지 못 한다. 또한 수정된 BLRPM은 매개변수 추정을 위한 모멘트 식의 선택에 민감하며 geometric NSRPM이 Poisson NSRPM보다 수문학적 연구에 적합하다(Velghe et al., 1994). 습윤 지속기간과 건조 지속기간 변화 확률을 고려한 NSRPM의 매개변수 추정 수식을 제시하였으며 이를 고려한 NSRPM이 더 나은 모의결과를 보였다(Cowperwait et al., 1996). 국내에서도 NSRPM에 관한 연구가 활발히 진행되었다. Kim et al. (1998)은 4대강 유역 11개 지점에 대하여 NSRPM을 이용한 강우 시계열을 모의하였으며 Nam et al. (2011)은 한강유역에 대한 A2시나리오에 근거한 ECHO-G모델을 이용하여 얻은 확률강우량과 NSRPM을 이용하여 얻은 확률강우량을 비교 분석 하였다. Yoo et al. (2001)은 구형펄스모형을 이용하여 얻은 I-D-F 곡선과 년최대치계열을 이용한 I-D-F 곡선을 비교하여 적용성을 판단하였으며, 중첩을 고려한 강우의 지속기간 및 재현기간에 따른 강우강도의 변화를 분석하였다. Shin et al. (2008)과 Jung (2009)은 직접적인 방법과 모멘트 식을 이용하여 얻은 NSRPM의 추정된 매개변수의 적합성을 판단하였다. 모멘트 식을 이용할 경우 유강수일수에 대한 항이 없어

유강수일수를 잘 표현하지 못하며 전체적인 정확도에서도 직접적인 방법의 매개변수 추정이 더 높은 정확도를 보였다. 본 연구에서는 통계적 강우생성 모형인 NSRPM의 매개변수를 추정하고 물리적인 의미를 가지고 있는 각 매개변수들의 변동 특성을 분석함으로써 강우계에서 얻어지는 최종 강우자료의 분석으로 파악할 수 없는 강우의 구조적 변화를 파악하였다. 본 연구의 대상 지역은 서울로 대상 지점의 1973~2011년까지의 시강우 자료를 이용하여 서울지점에 대한 강우사상의 구조적 변화 특성을 분석하였다.

2. Neyman-Scott Rectangular Pulse Model

NSRPM은 5개의 매개변수로 이루어져 있으며 Rectangular Pulse Model에서 반영하지 못했던 강우의 군집특성을 표현할 수 있어 수문학 분야에 널리 쓰이고 있다. 5개의 매개변수는 강우의 시작, 강우세포의 강우강도, 지속시간 등 물리적인 의미를 가지며 각각의 매개변수는 독립적인 분포를 가진다. NSRPM은 세 개의 독립적인 확률과정에 의해 구성된다. 먼저 강우사상의 시간적 시점을 결정하고 다음으로 각 강우사상에 속하는 강우세포 개수를 결정한다. 마지막으로 발생된 강우세포의 시간적 위치를 결정한다. 여기서, 각 강우사상에 속하는 강우세포는 임의적으로 지속시간과 강우강도를 가진다.

2.1 NSRPM 구축 과정

NSRPM을 구축하기 위한 과정은 강우이벤트 시작과 간격은 매개변수 λ를 가지는 지수 분포를 따른다. 여기서 지수분포는 I.I.D (Independent Identically Distribution)이며 Eq. (1)과 같다.

$$P_T(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{1}$$

각 강우이벤트에 속하는 강우세포의 개수 N을 정한다. 강우세포의 개수는 매개변수 μ를 가지며 기하함수(Geometric Distribution)와 포아송분포(Poisson Distribution)에 의해 결정하지만 본 연구에서는 기하함수를 이용하여 강우세포의 개수를 결정한다(Eq. (2)). 또한 최소 1개의 강우세포를 발생시키기 위해 R=N-1이며 E(R)=μ-1이다. μ는 강우세포 개수 N의 평균이다.

$$P_R(r) = \frac{1}{\mu}\left(1 - \frac{1}{\mu}\right)^r \tag{2}$$

강우세포의 시작위치는 지수분포를 이용하여 결정한다. 지수분포는 매개변수 β를 가진다(Eq. (3)).

$$P_L(l) = 1 - e^{-\beta l} \tag{3}$$

각각의 강우세포의 지속시간과 강우강도를 결정한다. 강우세포의 지속시간과 강우강도는 지수분포를 따른다. 지속시간은 매개변수 η를 가지며 η는 지속시간의 역수이다(Eq. (4)). 강우강도는 매개변수 ξ를 가지며 매개변수 ξ 또한 강우강도의 역수이다(Eq. (5)).

$$P_D(d) = 1 - e^{-\eta d} \tag{4}$$

$$P_I(i) = 1 - e^{-\xi i} \tag{5}$$

각 강우이벤트에 속하는 강우세포에서 발생한 강우를 중첩하여 강우를 생성한다. Fig. 1은 NSRPM의 구축과정을 도시화 한 것이다.

NSRPM의 모멘트는 Rodriguez-Iturbe et al. (1987)에 의해 제시되었으며 다음과 같다. Eq. (6)은 h시간 동안 강우의 평균, Eq. (7)은 분산, Eq. (8)은 k시간과의 공분산을 나타낸 것이다.

$$E[Y_i^{(h)}] = \lambda\eta^{-1}\mu\xi h \tag{6}$$

$$Var[Y_i^{(h)}] = \lambda\eta^{-3}(\eta h - 1 + e^{-\eta h})\left[4\mu\xi^2 + 2(\mu^2-\mu)\xi^2\frac{\beta^2}{\beta^2-\eta^2}\right] - \lambda(\beta h - 1 + e^{-\beta h})\frac{2(\mu^2-\mu)\xi^2}{\beta(\beta^2-\eta^2)} \tag{7}$$

$$Cov[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}] = \lambda\eta^{-3}(1-e^{-\eta h})^2 e^{-\eta(k-1)h}\left[2\mu\xi^2 + (\mu^2-\mu)\xi^2\frac{\beta^2}{\beta^2-\eta^2}\right] - \lambda(1-e^{-\beta h})^2 e^{-\beta(k-1)h}\frac{(\mu^2-\mu)\xi^2}{\beta(\beta^2-\eta^2)} \tag{8}$$

3. 적 용

기존의 강우변동특성 분석관련 연구에서는 최종자료를 이용한 강우사상의 특성 즉 지속시간에 따른 강우량과 강우강도 등을 총량적 개념으로 접근하여 분석하였으나 본 연구에서 Fig. 2에서 개념적으로 제시한 바와 같이 강우사상이 가지는 내적 구조적 특성을 총량적 개념이 아닌 강우구조의 변화에 대한 분석을 통하여 강우변화특성을 분석하고자 하였다. 이에 선행 연구된 일반적인 한반도 강우변동 특성을 살펴보고 본 연구결과와 비교 분석을 수행하였다.

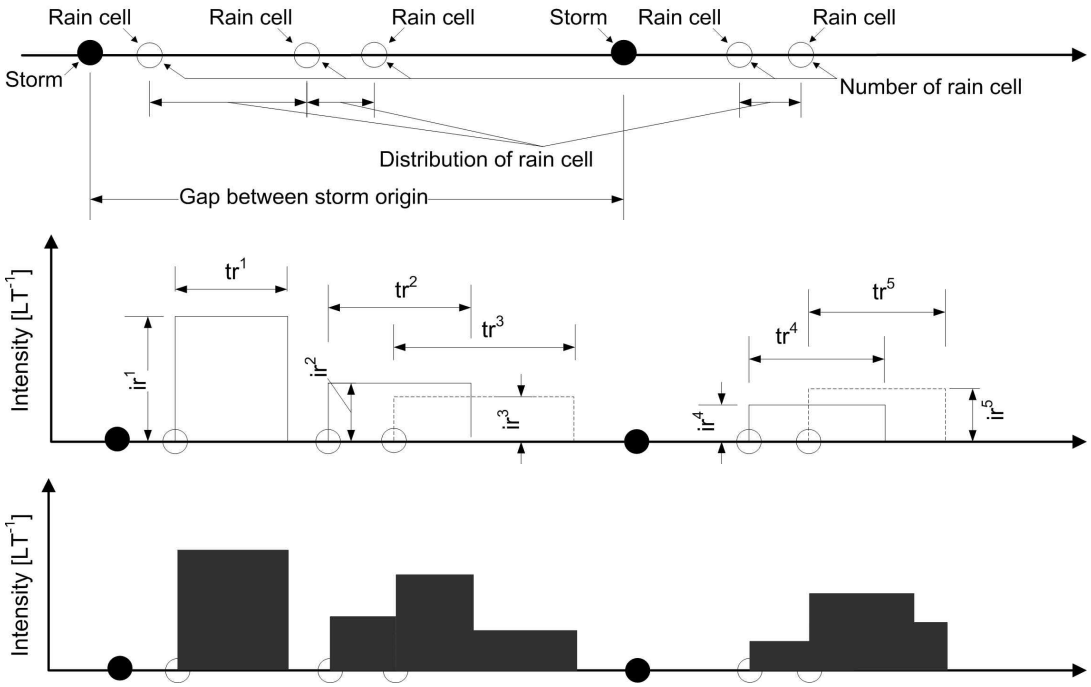
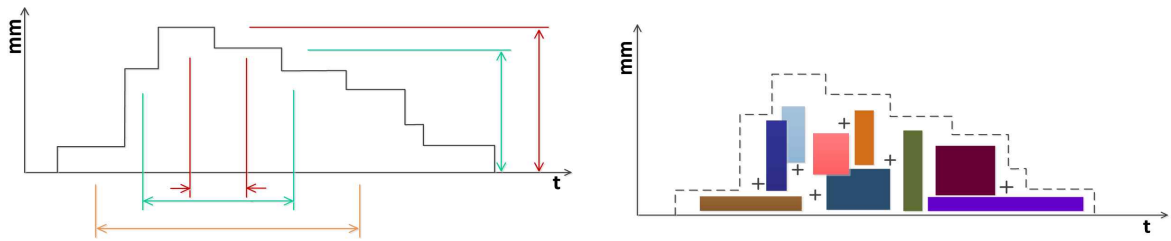


Fig. 1. A Schematic Diagram for the Neyman-Scott Rectangular Pulse Model



(a) Traditional Rainfall Data Structure (b) Real Rainfall Structure

Fig. 2. Comparison between Traditional View of Rainfall Data and New Approach of Rainfall Data

3.1 자료 구축

현재 기상청에서는 1904년 이후로 현대식 관측설비를 갖춘 76개 기상관측소를 운영하고 있다. 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 한강유역 지상기상관측소 14개 지점 중 서울지점의 1973~2011년까지 39년 동안의 시강우의 자료를 이용하였다. Fig. 3과 Table 1은 한강유역 지상기상관측소 14개 지점의 정보를 나타낸 것이다.

3.2 NSRPM 매개변수 추정

일반적으로 NSRPM의 매개변수를 추정하기 위해 모멘트를 이용한 방법이 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서는 NSRPM의 매개변수를 추정하기 위한 목적함수로 Cowpertwait et al. (1996)이 연구논문에 사용한 함수를 이용하였다(Eq.

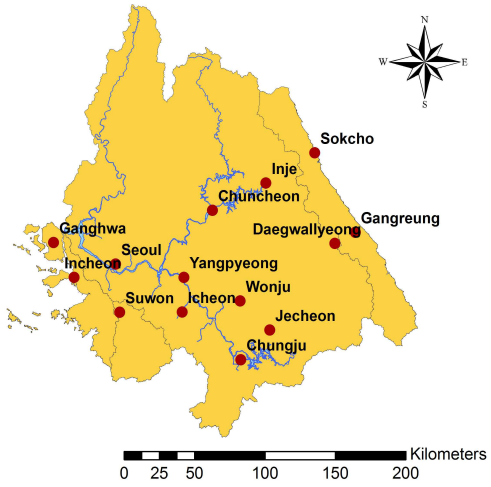


Fig. 3. Weather Station in Han-River Basin

(9)). 사용된 목적함수의 분자는 관측된 강우의 통계특성이며 분모는 추정된 매개변수를 이용하여 역산된 값이다.

$$\min z = \left(1 - \frac{\hat{E}(Y_i^{(h)})}{E(Y_i^{(h)})}\right)^2 + \left(1 - \frac{\widehat{Var}(Y_i^{(h)})}{Var(Y_i^{(h)})}\right)^2 + \left(1 - \frac{\widehat{corr}(Y_{i+i}^{(h)}, Y_i^{(h)})}{corr(Y_{i+i}^{(h)}, Y_i^{(h)})}\right)^2 \quad (9)$$

본 연구에서 사용된 제약조건이 없는 비선형 목적함수의 문제를 해결하기 위해 최적화기법(unconstrained non-linear optimization) 중 목적함수의 미분을 요구하지 않으며 비교적 전역 최소값을 구하는 Differential Evolution Algorithm을 이용하였다. 추정된 매개변수의 범위는 Calenda and Napolitano (1999)가 사용한 범위를 이용하였다(Table 2). 서울지점에 대한 1973~2011년까지 시계열 강우자료를 이용하여 추정된 매개변수는 다음과 같다(Table 3).

3.3 연구결과

3.3.1 서울유역의 강우변동 특성

서울유역의 강우변화는 일반적으로 강우량, 호우일수, 강우강도의 증가와 지속시간의 감소로 나타난다. 서울지점의 경우 1973~1992년 동안 지속시간 1~6시간의 강우사상 발생 횟수는 84회로 전체 강우사상의 20.34%를 차지하였고 1973~2011년 동안 지속시간 1~6시간의 강우사상 발생횟수는 180회로 전체 22.53%를 차지하여 2.53% 증가를 보인 반면 지속시간 13~24시간인 강우사상은 3% 정도 감소하였다. 지속시간 49시간 이상의 강우강도는 연구기간 동안 약 1 mm/h 증가하였으며 나머지 강우에서도 미미하지만 증가하는 추세를 보였다(Fig. 4). 또한 1973~1992년 동안의 여름철(6, 7, 8월) 평균 강우량은 736 mm이며 1973~2010년 동안의 여름철 평균 강우량은 843 mm로 약 100 mm 정도 증가하였다. 호우일수 또한 증가하는 추세를 보이고 있다. 이와 같이 여름철 강우는 짧은 시간에 많은 강우량을 보이는 형태로 변화하고 있어서 집중호우에 대한 위험성이 증가하고 있다.

또한 1973~2011년 동안 여름철(6, 7, 8월) 지속시간 1시간, 24시간 강우의 극한강우량 변화는 증가하는 추세를 보이고 있다. 지속시간 1시간 극한강우량은 선형 증가량이 대략 11.31 mm/h로 보였으며 지속시간 24시간 극한 강우량의 선형 증가분은 61.15 mm/h로 나타났다(Fig. 5).

1973~1992년 동안의 강우자료를 이용하여 Huff분포

Table 1. Information of Weather Stations in the Han River Basin

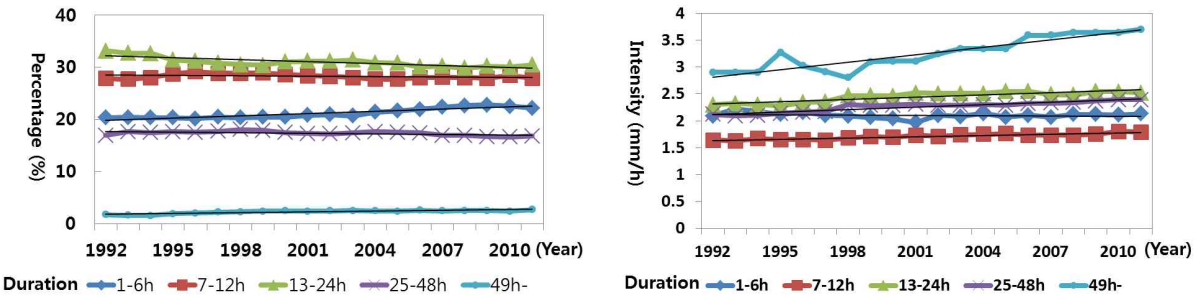
ID	NAME	Latitude	Longitude	Altitude
90	Sokcho	38°15'	128°34'	22.9
100	Daegwanrung	37°41'	128°43'	772.4
101	Chuncheon	37°54'	127°44'	76.8
127	Chungju	36°58'	127°57'	113.7
105	Gangreung	37°45'	128°53'	26.1
112	Incheon	37°29'	126°37'	54.6
108	Seoul	37°34'	126°57'	85.5
114	Wonju	37°20'	127°57'	150.7
119	Juwon	37°16'	126°59'	34.5
201	Ganghwa	37°42'	126°27'	46.1
202	Yangpyeong	37°29'	127°30'	47.4
203	icheon	37°16'	127°29'	90.0
211	Inje	38°04'	128°10'	198.7
221	Jecheon	37°09'	128°11'	263.1

Table 2. Upper and Lower Limits for the Parameters

Parameter	λ(h-1)	μ	β(h-1)	η(h-1)	ξ(mm/h)
Minimum value	0.001	2.0	0.01	0.10	0.10
Maximum value	0.050	100.0	0.50	15.0	20.00

Table 3. Results of Parameter Estimation at the Seoul Station

Year	λ(h-1)	μ	β(h-1)	η(h-1)	ξ(mm/h)	Estimated Rainfall (mm)	Observed Rainfall (mm)
1992	0.0117	19.9538	0.2496	6.3217	9.1042	741.1434	736.1472
1993	0.0118	18.3001	0.2499	5.2283	8.2540	750.5712	752.9280
1994	0.0122	14.0021	0.2392	3.3666	6.7130	754.4209	743.6544
1995	0.0118	21.0179	0.2524	6.2258	8.9158	786.0978	781.8528
1996	0.0110	15.6334	0.2128	3.3726	6.9371	782.3001	792.2304
1997	0.0116	18.0897	0.2326	4.1163	7.0516	791.0205	790.9056
1998	0.0119	25.4115	0.2870	11.8893	14.9354	834.8983	835.7280
1999	0.0113	24.0812	0.2643	8.7775	12.4140	845.6350	843.8976
2000	0.0114	22.5005	0.2694	7.8399	11.7387	849.8262	847.6512
2001	0.0114	24.4183	0.3047	8.6693	12.2031	865.0445	864.6528
2002	0.0118	25.8800	0.3081	11.5610	15.4343	896.2283	889.8240
2003	0.0118	27.2260	0.3176	13.0676	17.0308	921.9980	927.3600
2004	0.0122	26.4188	0.3201	12.9540	17.1100	936.5867	934.2048
2005	0.0120	26.4865	0.3182	11.2818	15.0184	935.2552	934.8672
2006	0.0114	29.1531	0.2968	14.3580	18.6222	955.2410	958.0512
2007	0.0116	27.6851	0.3015	12.4566	16.2020	923.4227	921.1776
2008	0.0119	27.7771	0.3045	13.4779	17.4622	941.7488	941.7120
2009	0.0117	28.6795	0.2902	13.3739	17.3167	957.0688	952.9728
2010	0.0115	27.8470	0.2929	14.8438	19.7691	941.9138	937.9584
2011	0.0098	18.3755	0.2178	4.5221	9.5487	841.2998	865.6051



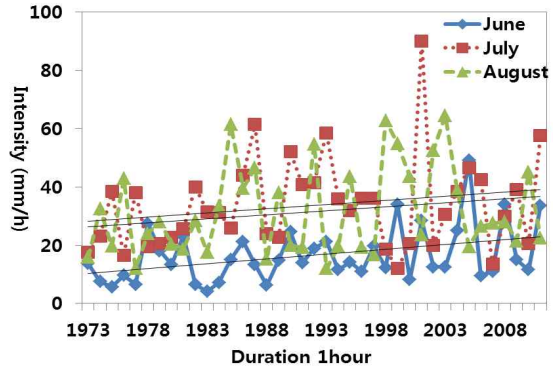
(a) Ratio of Rainfall Events (b) Change of Rainfall Intensity

Fig. 4. Variation of the Ratio of Rainfall Events and Rainfall Intensity according to Different Durations

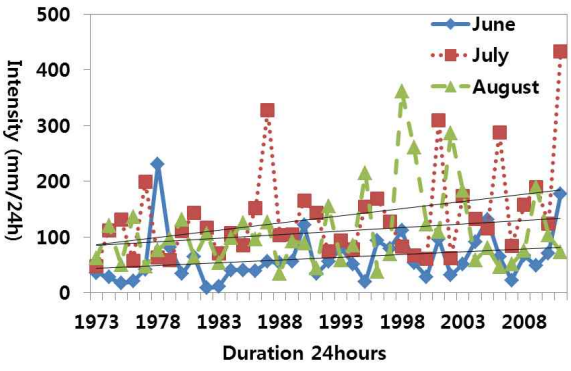
를 분석하고 1년씩 누적하면서 2011년까지 강우의 Huff 분위의 변화를 분석하였다. 1분위와 3분위가 전체강우에서 차지하는 비율은 감소하는 추세를 보였으며 2분위는 큰 변화를 보이지 않았다. 홍수위험이 가장 큰 4분위의 변화는 전체비율이 약 25%에서 32%를 보여 연구기간동안 7% 증가하였으며 추세역시 증가하는 추세를 보이고 있으며 강우사상의 지속시간은 약 3.5시간에서 3시간으로 짧아지는 추세를 보이고 있다(Fig. 6). 강우사상의 사상 당 변화는 지속시간이 짧아지면서 강우량은 증가하는 추세를 보이고 있어 집중호우 위험성이 증가하였다(Fig. 7).

3.3.2 NSRPM 매개변수 변동특성

서울지점 1973~2011년 동안의 시강우 자료를 이용하여 NSRPM 매개변수를 추정하고 각 매개변수의 변동을



(b) Annual Extreme Change - 1 Hour



(b) Annual Extreme Change - 24 Hour

Fig. 5. Annual Extreme Change according to Different Durations

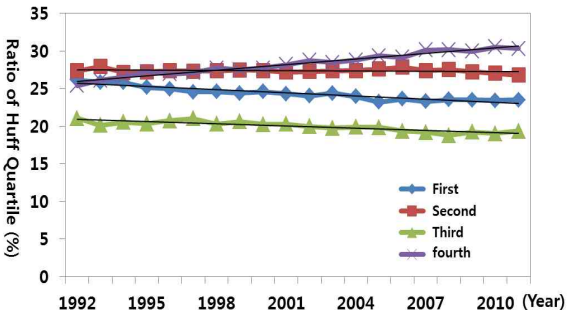


Fig. 6. Ratio of Huff Quartile

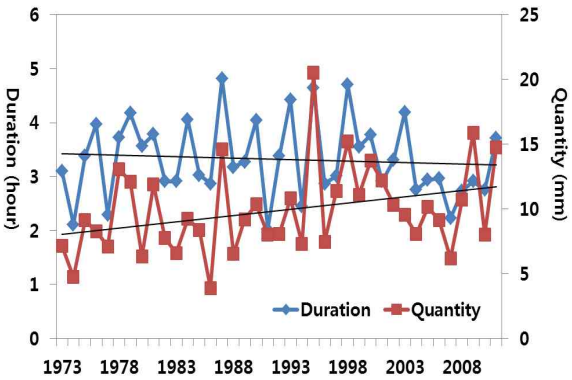
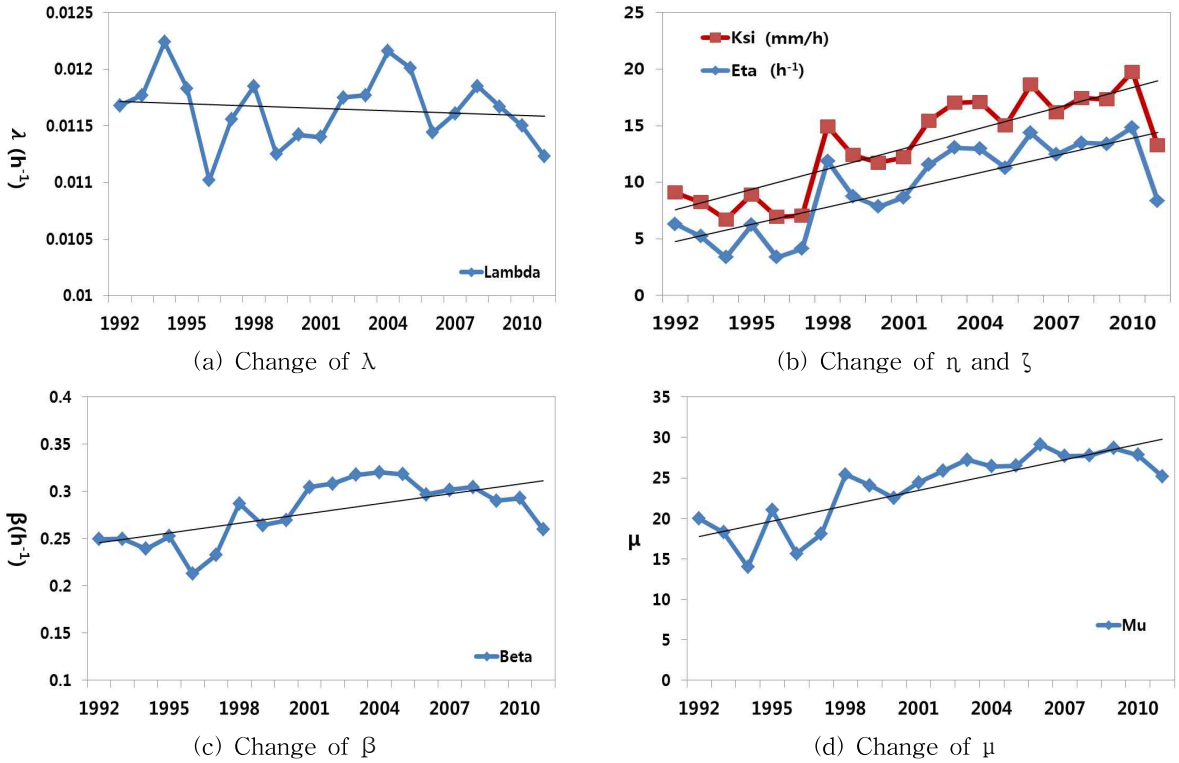


Fig. 7. Quantity and Duration of a Single Rainfall Event

파악하여 서울지점의 강우변동 특성과 비교 분석하였다 (Fig. 8).

강우사상의 발생을 나타내는 매개변수 λ는 감소하는 추세를 보였으며 선형 증감분은 약 0.0002이다. 추정된 λ를 이용하여 구한 강우발생 횟수는 약 27회에서 25회로 감소하였다. 강우사상 구조적 변화분석에서 강우의 발생을 변화는 약 23회에서 22회로 감소하였다. 매개변수를 이용하여 얻은 강우발생의 횟수와 관측된 강우사상의 횟수가 약 2~3회 차이를 보이나 이는 6, 7, 8월 3개월에 걸쳐 발생하는 강우사상의 횟수이며 강우발생 빈도의 감소 추세 또한 적절히 표현하였다. 또한 강우세포의 강우강도는 증가하나 지속시간은 감소하는 결과를 보였다. 강우강도는 약 10 mm/h에서 20 mm/h로 증가하는 것으로 나타났으며 증가폭은 약 10 mm/h이다. 강우세포의 지속시간의 경우에는 5 h-1에서 10 h-1로 약 6분 감소하였다. 이러한 결과는 짧은 시간에 많은 비를 내리는 집중호우의 증가로 이어진다. 또한 현재 한반도 강우의 변화가 호우일수, 국지성 호우의 증가로 특징지어질 수 있는 사실과 상통한다. 각 강우이벤트에 속하는 강우세포의 수를 나타내는 매개변수 μ는 17개에서 30개로 증가하는 추세를 보였으며 증가분은 약 13개였다. 각각의 강우이벤트에 속한 강우세포의 경향이 지속시간은 짧아지고 강우강도는 증가하고 있기 때문에 세포의 개수가 증가하게 되면 강우이벤트의 강우량은 증가하며 강우시간을 짧아진다. 강우세포의 위치를 나타내는 매개변수 β의 0.25에서 0.3으로 약 0.05 증가하였으며 증가추세를 보였다. 강우세포의 위치는 지수분포를 따르기 때문에 강우이벤트가 시작된 시점에서 가까운 곳에 강우세포가 많이 분포하는 추세로 변하고 있다. 이는 Huff 분위에서 1, 2분위에 해당하는 것으로 바뀌는 것이나 관측된 서울지점의 변화에서는 1, 2분위는 감소하며 3분위는 뚜렷한 변화를 보이지 않았지만 4분위에서 가장 큰 변화량으로 증가하였다. 하나의 강우사상의 지속시간이 약 1시간 정도 감소한 것을 고려하면 강우세포 위치의 분포는 3, 4분위에 해당한다고 볼 수 있다. 따라서 강우의 분포가 1, 2분위는 감소하고 3, 4분위는 증가한다.



(a) Change of λ (b) Change of η and ζ

(c) Change of β (d) Change of μ

Fig. 8. Change of the NSRPM Parameters

4. 결 론

기후변화가 야기하는 수문 요인들의 변화에 대한 관심과 경각심이 고조되고 있는 시점에 일반적인 강우의 변동특성 분석은 강우사상의 특성을 지속시간에 따른 총량적 개념으로 접근하여 분석하였으나 이러한 분석은 실제적인 강우구조 변화를 파악하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 서울 지점을 대상으로 1973~2011년 기간 동안의 강수자료를 활용한 추계학적 강우생성모형의 매개변수 추정과 추정된 매개변수의 변화에 대한 분석을 통한 강우구조의 변화를 고찰하였다.

추계학적 강우생성 모형의 매개변수는 강우발생, 강우강도, 지속시간 등 강우의 특성을 반영하고 있다. 매개변수 λ는 강우의 발생 간격을 나타내고 있으며 약 2회 정도 감소하는 추세를 보였다. 또한 강우세포의 강우강도를 나타내는 ξ는 10 mm/h 증가하는 추세를 보였으며 지속시간을 나타내는 η는 감소하는 경향을 띄었다. η의 변화는 5 h-1에서 10 h-1로 약 6분 정도 감소하였다. 강우세포의 수를 결정하는 매개변수 μ의 변화는 증가하는 추세를 보였으며 한 강우사상에 속하는 개수의 증가 폭은 약 10개 정도였다. 강우세포의 시작을 결정하는 매개변수 β는 증가하는 추세를 보여 강우사상 분포의 중심이 강우사상의 시작에 근접하고 있는 추세를 보였다. 분석결과 강우구조의 변화에 있어서 발생 횟수는 감소하며 강우의 분포형태의 경우 강우강도는 증가하며 지속시간은 짧아져 집중호우의 발생이 증가하며 전체적인 강우량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선행 연구에 의해 분석된 집중호우의 증가와 강우량 증가 추세와 동일한 결과를 보이고 있다. 관측된 강우자료를 분석한 결과 하나의 강우사상의 지속시간은 짧아지는 추세를 보이고 있으며 이러한 추세에 맞춰서 강우분포의 중심 또한 강우사상의 시작점에 가까워지고 있다. 그러나 Huff분위 변화에서 1분위, 2분위가 감소하는 경향을 보였으며 3분위는 미미한 변화를 나타냈지만 4분위에서 뚜렷한 증가변화 추세를 보였다. 이는 강우분포의 중심이 옮겨간 것 보다 강우사상의 지속시간이 더 짧아진데서 기인한 것으로 판단된다. 또한 관측 자료로부터 분석한 강우사상의 발생 횟수, 지속시간별 강우사상의 강우강도, 지속시간을 분석한 결과와 같은 추세를 보였다. 본 연구결과를 통해 기후변화에 따른 강우의 변동 특성을 보다 세부적으로 파악할 수 있어 미래 수자원 관리에 필요한 데이터로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 추계학적 강우생성 모형이 강우생성 과정을 구조적으로 완벽하게 모의하는 데는 한계가 있으므로 강우사상의 구조변화를 보다 정확히 분석

하기 위해서는 추계학적 모형뿐만 아니라 강우생성을 보다 상세히 모의하는 강우물리모형과의 연계를 통한 분석이 지속되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013-065006).

References

Amorocho, J., and Wu, B. (1977). "Mathematical models for the simulation of cyclonic storm sequences and precipitation fields." *Journal of Hydrology*, Vol. 32, pp. 329-345.

Burlando, P., and Rosso, R. (1991). "Comment on parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses mode of rainfall by S. Islam et al." *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 96, No. D5, pp. 9391-9395.

Burlando, P., and Rosso, R. (1996). "Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 45-64.

Calenda, G., and Napolitano, F. (1999). "Parameter estimation of Neyman-Scott processes for temporal point rainfall simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 225, pp. 45-66.

Cowperwait, P.S.P., O'Connell, P.E., Metcalfe, A.V., and Mawdsley, J.A. (1996). "Stochastic point process modelling of rainfall. I. Single-site fitting and validation." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 17-46.

Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and Eagleson, P.S. (1989). "Probabilistic representation of the temporal rainfall by a modified Neyman-Scott rectangular pulse model: parameter estimation and validation." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 295-302.

Jung, C.S. (2009). "Study of direct parameter estimation for Neyman-Scott rectangular pulse model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 1017-1028.

Kim, J.H., Lee, J.S., Lee, J.J., and Son, K.I. (1998). "A modeling of daily precipitation series using the Poisson cluster process." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 2(3), pp. 231-241.

Nam, W.S., Um, M.J., Shin, J.Y., Joo, K.W., and Heo, J.H. (2011). *The effects of climate change on rainfall quantile in Han River basin based on scaling invariance and NSRPM.* Proceeding of Korea Water Resources Association, pp. 68-72.

Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., and Isham, V. (1987). "Some models for rainfall based on stochastic point process." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A410, No. 1839, pp. 269-288.

Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., and Isham, V. (1988). "A point process for rainfall: further development." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A417, No. 1853, pp. 283-298.

Shin. J.Y., Jeong, C.S., Kim, T.S., and Heo, J.H. (2008). *Study of Direct parameter Estimation for Neyman-Scott rectangular pulse model.* Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Conference, pp. 1612-1616.

Velghe, T., Troch, P.A., De Troch, F.P., and Van de Velde, J. (1994). "Evaluation of cluster-based rectangular pulse point process models for rainfall." *Water Resource Research*, Vol. 30, No. 10, pp. 2847-2857.

Yoo, C.S., Kim, N.W., and Jung, K.S. (2001). "A point rainfall model and rainfall intensity-duration-frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 6, pp. 577-586.

논문번호: 14-058	접수: 2014.07.07
수정일자: 2014.07.12	심사완료: 2014.07.12