

조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요호우사상의 평가: 2. 정량적 평가

Evaluation of Major Storm Events Both Measured by Chukwooki and Recorded in Annals of Chosun Dynasty: 2. Quantitative Approach

김 대 하* / 유 철 상** / 김 현 준***
Kim, Daeha / Yoo, Chulsang / Kim, Hyeon Jun

Abstract

This study characterized the storm events recorded in the Annals of Chosun Dynasty and evaluated them using a simple rectangular pulses Poisson process model. Storm events without in detail explanation like Keun-Bi (big rain) were found to have rather short return periods compared to the storm events with lengthy explanation about damages like Keun-Mul (high water), Hong-Soo (flood), and Pok-Woo (torrential rain). Not all storm events recorded were the size of annual maxima, so their return periods were found not to be higher than a certain level. Another noticeable fact is that these storm events recorded seem more sensitive to the storm duration rather than the storm intensity. That is, most storms recorded seem to be focused on long durations rather than high intensities. Those storm events with long durations must have caused serious flood damages, which maybe the critical reason why they were recorded.

keywords : Annals of Chosun Dynasty, Chukwooki, rainfall event, flood

요지

본 연구에서는 조선왕조실록의 문헌 기록 호우사상의 특성을 파악하고 구조적으로 간단한 강우모형인 구형펄스모형을 이용하여 평가하였다. 전체적으로 ‘큰비’에서와 같이 강우에 대한 언급만이 있는 경우가 ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’와 같이 홍수유출 및 이에 따른 피해가 설명되어 있는 경우보다 강우의 재현기간이 작게 나타나는 것을 파악할 수 있었다. 기본적으로 기록된 호우사상은 모두 극치사상이 아닌 것으로 파악되었다. 일관되게 어느 정도 이상의 재현기간을 갖고 있는 것도 아니다. 또 하나 주목할만한 점은 기록된 호우사상이 강우의 총량보다는 강우의 지속기간에 보다 민감하다는 점이다. 즉, 일시에 많은 비가 온 경우보다는 장기간에 걸쳐 내린 호우사상에 보다 초점이 맞추어져 있다는 점이다. 즉, 홍수유출의 크기 및 이에 따른 피해의 정도가 실제 이들 호우사상이 기록으로 남게 되는 원인으로 파악된다.

핵심용어 : 조선왕조실록, 측우기, 강우사상, 홍수

* 고려대학교 사회환경시스템공학과 공학석사

Master, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: violt007@korea.ac.kr)

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

Pfor., Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원

Research Fellow, Dept. of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology

1. 서 론

본 연구는 유철상 등(2007)에서 시도한 조선왕조실록의 문헌기록과 측우기 기록의 정성적 검토 내용을 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 한다. 그러나 측우기 자료가 강우지속기간과 총강우량의 기록이며, 또한 조선왕조실록은 주요 호우사상을 정성적으로 묘사하고 있으므로, 이를 근대자료의 형태인 주어진 지속기간에 대한 강우강도로 변화하여 나타내는 것은 어렵다. 오히려 강우사상으로 나타내는 것이 보다 적절한 것으로 판단된다.

그러나 현재까지의 강우 평가는 주어진 지속기간에 대한 강우강도를 통계적으로 분석하는 방법, 즉, 빈도해석의 방법이 일반적이다. 이는 근본적으로 호우사상 자체의 정량화 방안이 가능하지 않기 때문이다. 즉, 강우강도, 지속기간 및 재현기간 등 강우의 여러 특성을 함께 고려하는 빈도해석은 다변량 확률밀도함수의 적용을 요구하므로 적절한 활용밀도함수의 결정방법이나 매개변수 추정방법과 같은 복잡한 문제를 동반한다. 따라서 2변량이상의 확률밀도함수를 적용하여 강우사상을 정량화 한 예는 쉽게 찾아보기 어렵다. 따라서 재현기간을 기준으로 하는 경우 연최대치 혹은 연초과치 호우사상의 선정 자체도 매우 어려운 작업이 된다.

본 연구에서는 다변량 확률밀도함수를 적용하여 호우사상을 정량화 하는 대신 Eagleson(1972), Rodriguez-

Iturbe et al.(1984) 등에 의해 개발된 구형펄스모형(Rectangular Pulses Poisson process Model, 이하 RPPM이라 칭함)을 적용하여 호우사상을 정량화 해 보고자 한다. 구형펄스모형은 구형펄스의 적절한 조합으로 호우사상의 형태를 묘사하는 특징을 가지고 있어 측우기 자료와 같은 호우사상의 분석에 유용할 것으로 판단된다. 이러한 분석은 유철상 등(2001)의 연구에서 이미 시도된 바 있으며, 특히 강우 강도-지속기간-재현기간(rainfall intensity-duration-frequency: I-D-F) 관계의 유도가 가능함을 보여주고 있다. 본 연구에서의 구형펄스 모형 적용은 특히 유철상 등(2001)에서 도출된 방법론의 적용에 해당한다. 구형펄스모형의 적용을 통한 강우의 정량화 결과는 최종적으로 문헌상의 기록과 비교·검토될 것이며, 이러한 검토 결과를 바탕으로 문헌기록의 기준, 기록된 호우 특성 및 향후 근대기록 형태로 변환하는 경우에 필요한 사항 등을 파악해 볼 수 있을 것이다.

2. 분석대상 호우사상

본 연구에서 고려한 분석대상 호우사상은 유철상 등(2007)에서 분석한 1776년 이후 ‘큰비’ 9개, ‘큰물’ 3개, ‘홍수’ 2개, ‘폭우’ 1개 등이다. 이들 자료에 대한 측우기 기록과 조선왕조실록의 일치성을 김현준(1999)의 연구에서 살펴볼 수 있다. 이들의 기본적인 특성은 Table 1과 같다. 전체적으로 보면 ‘큰비’로 표현된 사상들은 강

Table 1. Characteristics of Rainfall Events Recorded in the Annals of Chosun Dynasty since 1776
(유철상 등, 2007)

event	maximum (mm/day)	total (mm)	duration (day)	AMC	effective rainfall (mm)	
heavy rain 1	72.00	106.02	2	I	14.62	
heavy rain 2	187.98	227.95	2	I	147.46	
heavy rain 3	72.00	134.00	2	I	27.54	
heavy rain 4	107.50	232.00	3	III	191.17	
heavy rain 5	62.08	80.06	3	I	5.64	
heavy rain 6	28.00	59.99	5	I	1.33	
heavy rain 7	67.50	158.00	3	I	40.68	
heavy rain 8	47.96	85.95	3	I	29.48	
heavy rain 9	43.00	78.02	4	I	5.09	
high water 1 (1)	74.97	83.97	3	I	6.77	
high water 1 (2)	33.00	66.04	3	III	34.99	36.12
high water 2	28.02	70.02	4	III	38.36	
flood 1 (1)	73.44	136.04	3	I	25.59	
flood 1 (2)	89.68	148.20	3	III	110.04	138.10
torrential rain (1)	348.42	516.50	5	III	472.20	
torrential rain (2)	160.42	643.76	9	III	599.44	1114.47
mean	93.50	176.66	3.56	-	109.40	137.70
st. dev.	81.16	167.75	1.71	-	176.67	299.90

우의 지속기간이 짧은 편이며, 아울러 선행강우조건을 고려하는 경우 대부분 AMC-1 조건으로 유효우량이 작게 나타난다. 따라서 직접적인 홍수 피해는 미미했을 것으로 추정된다. 반면에 ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’로 표현된 사상들은 그 지속기간이 길고 아울러 대부분 AMC-III를 만족하는 선행강우를 가지고 있어 큰 유효우량에 따른 홍수의 피해가 커질 것으로 추정되는 사상들이다. ‘폭우’로 표현된 사상은 1776년 이후 한차례만 기록되어 있어 일반화하기는 어려우나 막대한 홍수피해가 조선왕조실록에 자세히 기록되어 있는 매우 이례적으로 사상이다.

3. 구형펄스모형을 이용한 강우사상의 정량화

3.1 구형펄스모형(Rectangular Pulses Poisson Process Model)

수문분야에서 흔히 구형펄스모형이라고 불리는 모형은 Eagleson(1972), Rodriguez-Iturbe et al.(1984) 등의 연구에서 그 출처를 살펴볼 수 있다. 이 모형은 이후 군집특성을 추가로 고려하는 여러 모형들(Entekhabi et al., 1989; Islam et al., 1990)로 발전되어 왔다. 이 모형은 그 구조가 간단하고 매개변수가 적어서 여러 관련 연구에 많이 이용되고 있기도 하다(Raines and Valdes, 1993). 이 모형의 구조 및 특성을 살펴보면 다음과 같다.

구형펄스모형은 먼저 개개 사상 $\xi(t)$ 의 발생을 나타내는 과정 $N(t)$ 가 매개변수 λ 인 포아송과정을 따르는 것으로 가정한다. 사상의 발생시간 T_n 과 더불어 강도 $i_r^{(n)}$ 와 지속기간 $t_r^{(n)}$ 이 한 쌍으로 $U_n = (i_r^{(n)}, t_r^{(n)})$ 으로 정의된다. 따라서 U_n 은 시간 T_n 에 발생한 사상의 기본 특성이 된다. 각 사상의 특성인 U_n 은 서로 독립이며 동일하게 분포되어 있고(independent and identically distributed) 발생시간 T_n 과도 역시 독립이다. 일반적으로 각 사상의 강도와 지속기간은 서로 독립인 무작위 변수로서 Eq. (1) 및 (2)와 같은 지수확률밀도함수를 따른다고 가정한다.

$$f(i_r) = \mu e^{-\mu i_r}, \mu > 0 \quad (1)$$

$$f(t_r) = \eta e^{-\eta t_r}, \eta > 0 \quad (2)$$

따라서,

$$f(U) = f(i_r, t_r) = \mu \eta e^{-\mu i_r - \eta t_r} \quad (3)$$

이 때 $E[i_r] = 1/\mu$ 와 $E[t_r] = 1/\eta$ 는 각각 사상의 평균 강우강도와 평균 지속기간을 나타낸다. 이 강우모형의 경우 평균, 분산 및 상관함수는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$E[\xi(t)] = \lambda E[i_r] E[t_r] = \lambda / \mu \eta \quad (4)$$

$$Var[\xi(t)] = 2\lambda / \mu \eta^2 \quad (5)$$

$$Corr[\xi(t_1), \xi(t_2)] = R(\tau) = e^{-\eta \tau}, \tau = t_2 - t_1 \geq 0 \quad (6)$$

아울러 실제 관측 자료는 누가된 형태로 존재하므로 모형의 적용을 위해서 즉, 매개변수를 추정하거나 주어진 시간축에 대한 모형의 특성을 시험하기 위해서는 주어진 시간간격의 누가시간에 대한 고려가 필요하게 된다. 먼저 누가된 자료 Y_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$Y_i = \int_{(i-1)T}^{iT} \xi(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots \quad (7)$$

$\xi(t)$ 의 정상성 때문에 Y_i 도 U_n 과 마찬가지로 동일하게 분포됨을 알 수 있다. Y_i 의 평균, 분산 및 공분산은 다음과 같다.

$$E[Y] = T\lambda / \mu \eta \quad (8)$$

$$Var[Y] = \frac{4\lambda}{\eta^3 \mu^2} (\eta T - 1 + e^{-\eta T}) \quad (9)$$

$$Cov[Y_1, Y_k] = \frac{2\lambda}{\eta^3 \mu^2} (1 - e^{-\eta T})^2 e^{-\eta(k-2)T}, \quad k \geq 2 \quad (10)$$

구형펄스모형의 매개변수 λ, μ, η 의 추정은 위 식을 이용하여 수행될 수 있다. 일반적으로 모형의 매개변수는 관측 자료의 평균, 분산 및 lag-1 공분산이 보존되도록 추정한다.

3.2 구형펄스모형을 이용한 빈도해석

유철상 등(2001)은 구형펄스모형에 대한 수학적 접근을 통해 다음과 같은 빈도해석 방법을 제시하였다. 이는 추정된 매개변수와 사상의 재현기간에 대한 관계식을 유도한 것이다.

먼저, 중첩이 고려되지 않는 경우는 강우의 강도 및 지속기간을 서로 독립으로 가정하여 이변량 지수분포를 가정하는 경우와 동일하다. 단지, 관측된 강우의 평균 지속기간과 소위 강우강도-지속기간-생기빈도 (Rainfall Intensity-Duration -Frequency: I-D-F) 해석상의 지속기간을 상대적으로 비교하는 것 정도가 고려될 뿐이다. 예를 들어, 관측 사상의 평균지속기간($1/\eta$)이 분석 대상 지속기간 D (즉, I-D-F의 D)보다 큰 경우 ($D < E[D_\lambda]$)에는 다음의 관계가 성립한다.

$$E[I_D] = E[I_\lambda] \cdot D \quad (11)$$

여기서, $E[I_D]$ 는 지속기간 D 를 고려한 강우강도를 나타내고 $E[I_\lambda]$ 는 모형에 의해 구현되는 개개 사상의 십도의 기대치를 나타낸다. 만일, 관측 사상의 평균지속기간 ($1/\eta$)이 분석대상 지속기간 D 보다 작은 경우 ($D > E[D_\lambda]$)에는 다음의 관계가 성립한다.

$$E[I_D] = E[I_\lambda] \cdot D \cdot \left[\frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \right] \quad (12)$$

여기서 $F(\cdot)$ 는 지속기간에 대한 누가확률밀도함수, 즉 매개변수를 μ 로 하는 지수함수를 나타낸다. 따라서 $F(t) = 1 - e^{-\eta t}$, ($t \geq 0$)이다. 위 식에서 $D < E[D_\lambda]$ 인 경우는 우변의 대괄호 안이 1이 된다.

재현기간 R 의 고려는 강우강도를 결정하는 확률분포(여기서는 매개변수를 μ 로 하는 지수분포)로부터 재현기간을 고려하여 구하게 된다. 즉, 지속기간이 D , 재현기간이 R 인 강우강도는 $D > E[D_\lambda]$ 인 경우에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \cdot \left[\frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \right] \quad (13)$$

여기서 $E[X]_R$ 은 재현기간 R 에 해당하는, 즉 $prob[x \leq X] = 1 - 1/(R+1)$ 인 X 의 기대값을 나타낸다. 아울러 $D < E[D_\lambda]$ 인 경우에는 Eq. (13)의 우변 대괄호 안이 1이 되므로 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \quad (14)$$

본 연구에서 사용하는 구형펄스모형의 경우 강우강도는 지수분포를 따르는 것으로 가정하므로 재현기간 R 에 따른 강우강도는 지수분포로부터 다음과 같이 유

도될 수 있다.

$$E[I_\lambda]_R = -\frac{\ln(1-F)}{\mu} \quad (15)$$

이 때, $F = 1 - 1/(R+1)$ 이다. 아울러 지속기간 D 를 고려하여 강우강도를 보정하는데 필요한 함수 $F(d \leq D)$ 및 $F(d \leq E[D_\lambda])$ 도 역시 구형펄스모형이 지수분포를 가정하므로 다음과 같이 간단히 계산될 수 있다.

$$F(d \leq D) = 1 - e^{-\eta D} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} F(d \leq E[D_\lambda]) &= 1 - e^{-\eta E[D_\lambda]} \\ &= 1 - e^{-1} = 0.632 \end{aligned} \quad (17)$$

구형펄스모형과 단순한 이변량 지수분포모형이 다른 점은 중첩의 고려 유무에 있다. 즉, 구형펄스모형에서는 중첩이 발생하고, 이로 인해 이변량 지수분포를 가정하는 경우보다 큰 강우강도의 발생이 가능해 진다. 이와 같은 중첩효과는 중첩확률 p_O 로 정량화 할 수 있으며, 중첩의 효과는 일반적으로 재현기간에 비례하여 커지게 된다.

중첩확률은 개별 강우사상의 평균지속기간 및 평균 발생간격의 함수로 나타낼 수 있다. 즉,

$$p_O = prob\left[E[D_\lambda] \geq \frac{R}{\lambda R}\right] \quad (18)$$

따라서 구형펄스모형의 경우에 p_O 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p_O = \int_{1/\lambda}^{\infty} f(t_r) dt_r = e^{-\frac{\eta}{\lambda}} \quad (19)$$

주어진 재현기간이 R 인 경우 중첩이 될 수 있는 개별호우사상의 기대값은 $p_O R$ 이 된다. 여기서 주의하여 야할 것은 위의 계산에서 R 이 월단위로 고려된다는 점이다. 이는 연속적인 사상의 과정을 고려하면 쉽게 이해될 수 있다.

중첩이 발생하는 경우에 강우강도는 증가하나 그 정도 α 는 개별 사상의 평균지속기간 $E[D_\lambda]$ 와 고려되는 지속기간 D 에 영향을 받는다. α 는 $D > E[D_\lambda]$ 의 경우에 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\alpha = \frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \quad (20)$$

위 식을 고려하면 $\alpha = 0.632/(1 - e^{-\eta D})$ 가 된다. 아울러 $D > E[D_\lambda]$ 인 경우 α 값은 1이 된다. 따라서 재현기간 R , 지속기간 D 에 해당하는 강우강도는 $D > E[D_\lambda]$ 인 경우에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \cdot \left[\frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \right] \cdot [\alpha \cdot p_O \cdot R + 1] \quad (21)$$

반면에 $D < E[D_\lambda]$ 인 경우는 다음과 같이 간단히 나타나게 된다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \cdot [p_O \cdot R + 1] \quad (22)$$

일반적인 빈도해석의 경우 연최대치계열을 이용한 빈도해석으로 실제 사상의 빈도를 정확하게 추정할 수 없는 단점을 지니고 있지만 이 방법을 아래 그림과 같은 측우기 강우자료 시계열에 적용할 경우 사상 자체에 대한 빈도해석이 가능하므로 복원된 강우자료에 대한 평가가 가능하다.

4. 기록 호우사상에 대한 적용

4.1 자료

본 연구에서 고려한 자료는 총 3가지이다. 먼저 근대 자료는 1908년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지의 우기(6-9월) 일 강우자료이고, 측우기자료는 1777년 1월 1일부터 1907년 12월 31일까지의 일 강우자료이다. 마지막으로 3장에서 설명한 문헌기록 상의 호우사상들이 분석에 포함되었다. Fig. 1은 측우기자료와 근대자료를 그림으로 비교한 것이다. 본 연구의 대상자료가 우기에 한정되므로 강설이 측정되지 않은 측우기 기록의 영향은 배제되나 여전히 2 mm이하의 관측이 기록되지 않느 문제점은 가지고 있다. 그러나 우기 시 2 mm 이하의 강우량은 대체로 무시될 수 있는 수준이므로 근대기록과의 뚜렷한 차이는 살펴보기 어렵다.

막으로 3장에서 설명한 문헌기록 상의 호우사상들이 분석에 포함되었다. Fig. 1은 측우기자료와 근대자료를 그림으로 비교한 것이다. 본 연구의 대상자료가 우기에 한정되므로 강설이 측정되지 않은 측우기 기록의 영향은 배제되나 여전히 2 mm이하의 관측이 기록되지 않느 문제점은 가지고 있다. 그러나 우기 시 2 mm 이하의 강우량은 대체로 무시될 수 있는 수준이므로 근대기록과의 뚜렷한 차이는 살펴보기 어렵다.

4.2 구형펄스모형을 적용한 강우의 I-D-F 해석

본 연구에서는 먼저 구형펄스모형을 적용한 강우의 I-D-F해석과 통상적으로 확률밀도함수를 적용하여 수행하는 I-D-F해석 결과를 비교하였다. 이러한 분석은 향후 문헌에 나타난 기록자료에 대한 분석 결과의 타당성을 부여하기 위한 사전분석에 해당한다. 본 연구에서는 근대 관측기록을 대상으로 하여 각 방법론 별로 I-D-F곡선을 유도하고 비교하였다. 통상적인 빈도해석에 필요한 확률밀도함수로는 감마분포를 가정하였다.

Fig. 2에서는 구형펄스모형을 이용하는 경우(중첩확률의 고려 및 미고려)와 감마분포를 가정하는 경우에 대해 유도된 I-D-F곡선을 비교하고 있다. 전체적으로 I-D-F곡선의 경향은 유사한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 세부적으로 들어가 보면 주어진 재현기간에 대한 확률강우량은 크게 차이가 남을 확인할 수 있다. 중첩을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 차이는 중첩 확률로 쉽게 설명이 된다. 그러나 보다 현실적인 경우인 중첩을 고려하는 경우의 확률강우량과 감마분포를 적용한 경우에 추정된 확률강우량 차이는 보다 복잡한 양상을 나타낸다. 즉, 1일 또는 2일의 지속기간에서는 구형펄스모형을 적용한 경우의 확률강우량이 작게 추정되어 있으나 지속기간이 3일인 경우에 있어서는 오히려 크게 나타나고 있다. 이러한 차이는 지속기간이 작은 경우에 있어서는 전체자료를 이용하는 경우와 연 최대

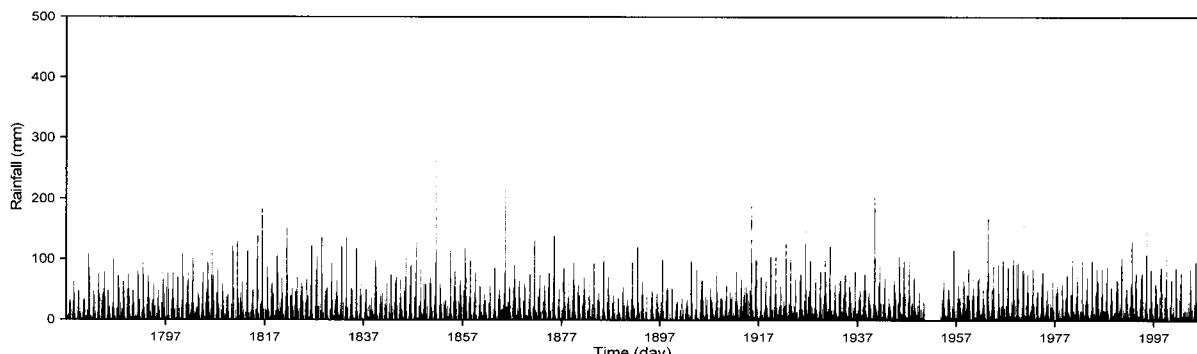


Fig. 1. Daily Rainfall Data Used in This Study (before 1907 Were the Chukwooki Data and After 1907 Were Modern Rain Gauge Data)

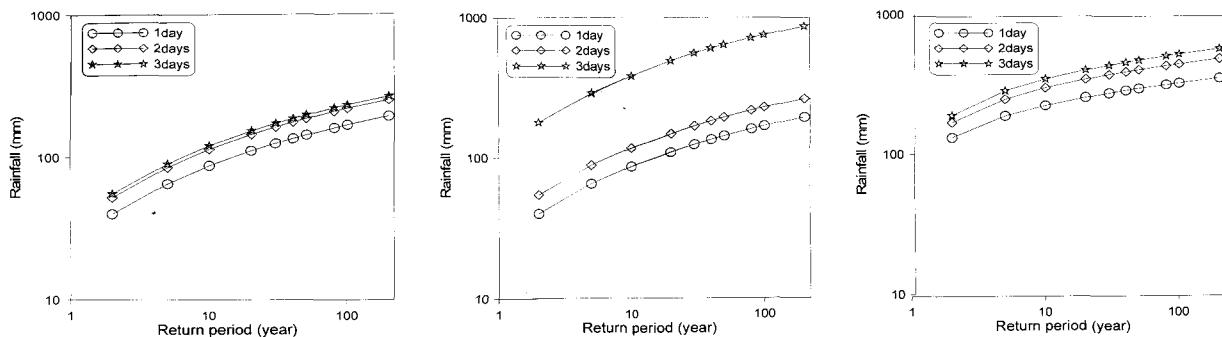


Fig. 2. Comparison of Frequency Analysis Results Based on the Rectangular Pulses Poisson Process Model (Left and Middle Panels Are for Disregarding and Considering the Overlap of Rectangular Pulses, Respectively) and Gamma Distribution (Right)

치계열을 이용하는 경우의 차이가 반영된 결과이고, 반대로 지속기간이 긴 경우에 있어서는 지수함수의 특성을 갖는 중첩확률이 상대적으로 부각되었기 때문에 판단된다. 즉, 장기간 지속되는 강우사상의 강도는 구형펄스의 평균 강우강도보다는 구형펄스가 서로 중첩됨에 따라 커지게 된다는 것을 나타낸다.

4.3 측우기 기록과 근대 관측기록의 비교

1777-1907년까지의 측우기 기록과 이후의 근대 관측기록에 대한 비교는 측우기 기록과 근대관측기록 사이에 어떤 차이가 있는지를 확인하기 위해 수행되었다. 먼저 각 경우에 대해 통계 특성치를 산정하고 이를 구형펄스모형의 매개변수 추정에 이용하였다.

Table 2에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 측우기 기록의 평균이 근대 관측기록의 평균이 비해 작게 나타난다. 아울러 분산의 경우도 약간 작은 것으로 파악되었다.

다. 그러나 lag-1 상관계수는 약간 크게 나타나는 경향이 있는데, 이는 2 mm이하 강우가 기록되지 않아 상대적으로 평활화 되었기 때문으로 판단된다. 이를 바탕으로 추정된 매개변수는 Table 3과 같다.

추정된 매개변수를 통해 강우의 특성을 분석하는 것 보다는 강우의 특성을 직접 이용하는 것이 보다 효율적이다. Table 4는 Table 3의 결과를 가지고 계산한 강우의 평균 강우강도, 평균 지속기간 및 지속기간별 총강우량이다. 가장 큰 차이는 강우의 구형펄스 당 총 강우량이 근대에 와서 줄어들고 있음에도 불구하고, 평균 지속기간이 작아짐으로 해서 평균 강우강도가 오히려 증가했다는 점이다. 이러한 결과는 측우기 자료가 2 mm이하의 단기기록을 배제된 상태에서의 결과라는 점에서 더욱 중요한 특징이라고 판단할 수 있다. 실제 근대자료에 나타난 총강우량의 증가분은 강우의 발생빈도가 커진 부분에서 주로 고려된다.

Table 2. Basic Statistics of Chukwooki and Modern Rain Gauge Rainfall

statistics	Chukwooki			modern records		
	1 day	2 days	3 days	1 day	2 days	3 days
mean	3.10314	6.20615	9.30902	3.45933	6.91846	10.37768
variance	155.08720	402.03070	687.99670	182.32990	457.19750	774.92860
lag-1 covariance	45.27557	102.41880	195.57370	45.86860	103.83800	210.27460

Table 3. Parameters of Rectangular Pulses Poisson Process Model Estimated Using Basic Statistics in Table 2

parameters	Chukwooki			modern records		
	1 day	2 days	3 days	1 day	2 days	3 days
λ	0.15046	0.12363	0.10309	0.17030	0.14145	0.11627
μ	0.02130	0.03051	0.04259	0.01862	0.02805	0.04110
η	2.27652	1.30584	0.78003	2.64393	1.45757	0.81777

Table 4. Characteristics of Rectangular Pulses Derived by Use of Parameters Estimated (Mean Rainfall Intensity, $E[i_r] = 1/\mu$; Mean Rainfall Duration, $E[t_r] = 1/\eta$; Total Rainfall Amount, $E[i_r] \cdot E[t_r]$)

	Chukwooki			modern records		
	1 day	2 days	3 days	1 day	2 days	3 days
$E[i_r]$	46.95	32.78	23.48	53.71	35.65	24.33
$E[t_r]$	0.44	0.77	1.28	0.38	0.69	1.22
$E[i_r] \cdot E[t_r]$	20.62	25.10	30.10	20.31	24.46	29.75

Table 5. Change of Overlap Probability according to the Rainfall Duration

duration	Chukwooki	modern records
1 day	2.686E-07	1.809E-07
2 days	2.587E-05	3.348E-05
3 days	5.174E-04	8.817E-04

마지막으로 지속시간에 따른 중첩확률(p_O)의 변화를 정리한 것이 Table 5이다. 전체적으로는 지속시간이 증가함에 따라 중첩확률은 더욱 크게 증가함을 살펴볼 수 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 중첩확률이 지속기간에 대해 지수적인 분포특성을 가지고 있기 때문이다. 따라서 지속시간이 증가할수록 중첩의 효과는 더욱 커지게 되며, 이에 따라 재현기간에 따른 강수량의 증가폭도 더욱 커지게 되는 것이다. 측우기 기록과 근대 관측기록의 비교에서 살펴보면 지속시간 1일을 제외하고 나머지 지속기간에 대해 모두 현대자료의 경우가 중첩률이 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 앞의 Table 4에서 살펴본 구형펄스의 특성에서와 같이 근대 자료에서 측우기 기록에서 보다 큰 강우강도가 관측되는 원인이기도 하다. 즉, 측우기 기록에서 보다는 근대 관측기록에서 구형펄스의 평균 지속기간은 짧아지고, 평균 강우강도는 커졌으며 아울러 구형펄스사이의 중첩 확률이 더욱 커졌다는 것을 나타낸다. 이러한 차이는 추정된 매개변수를 이용하여 유도한 $I-D-F$ 곡선에서도 확인할 수 있다(Fig. 3). 즉, 전체적으로 보면 측우기 기록과 근대 관측기록에 대한 구형펄스모형의 매개변수 차이는 아주 크지 않음에도 불구하고, 중첩을 고려한 빈도해석 결과의 차이는 매우 큰 것으로 나타난다. 중첩을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교해보면 중첩을 고려하지 않은 경우는 지속시간의 증가에 따른 확률강우량의 증가폭이 감소하는 경향이지만 고려한 경우에는 그 반대 양상을 띠고 있음을 확인할 수 있다.

4.4 문헌 기록에 나타난 주요 호우사상에 대한 평가

Table 6는 전절의 결과 중 측우기 기록에 대한 적용 결과를 바탕으로 문헌기록에 나타난 주요 호우사상을

평가한 것이다. 주요 호우사상의 경우 지속기간이 긴 것이 대부분이어서 지속기간별 평균 강우강도를 평가하는 형식을 취하였다. 강우강도와 지속기간을 함께 고려하여 가장 큰 재현 기간을 나타내는 것을 그 호우사상의 대표 재현기간으로 판단하였다. 이를 그림으로 나타낸 결과는 Fig. 4과 같다.

Table 6에서 살펴볼 수 있는 것처럼 기록된 호우사상이 모두 극치사상은 아니다. 일관되게 어느 정도 이상의 재현기간을 갖고 있는 것도 아니다. 그러나 전체적으로 보면 ‘큰비’에서와 같이 강우에 대한 언급만이 있는 경우가 ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’와 같이 홍수유출 및 이에 따른 피해가 설명되어 있는 경우보다 강우의 재현기간이 작게 나타나는 것을 파악할 수 있다. ‘폭우’의 경우는 겨우 하나만의 사례만이 나타나고 있으므로 정량화하기는 어려우나 ‘큰비’, ‘큰물’ 및 ‘홍수’의 상황을 훨씬 뛰어넘는 큰 강우사상으로 판단된다.

또 하나 주목할만한 점은 기록된 호우사상이 강우의 총량보다는 강우의 지속기간에 보다 민감하다는 점이다. 즉, 일시에 많은 비가 온 경우보다는 장기간에 걸쳐 내린 호우사상에 보다 초점이 맞추어져 있다는 점이다. 즉, 홍수유출의 크기 및 이에 따른 피해의 정도가 실제 이를 호우사상이 기록으로 남게 되는 원인으로 파악된다.

유철상 등(2007)에서 파악한 SCS 방법을 이용한 유효우량 산정에 대한 결과에서도 이러한 현상을 반영한다. ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’와 같은 지속기간이 긴 사상의 경우 대부분이 선행 5일 강수량이 커서 강우가 유출에 직접적으로 영향을 받은 것으로 판단된다. 이에 비해 ‘큰비’의 경우와 같이 지속기간이 짧은 강우는 강우량 자체는 크지만 선행 5일 강수량이 작아 유출에 직접적

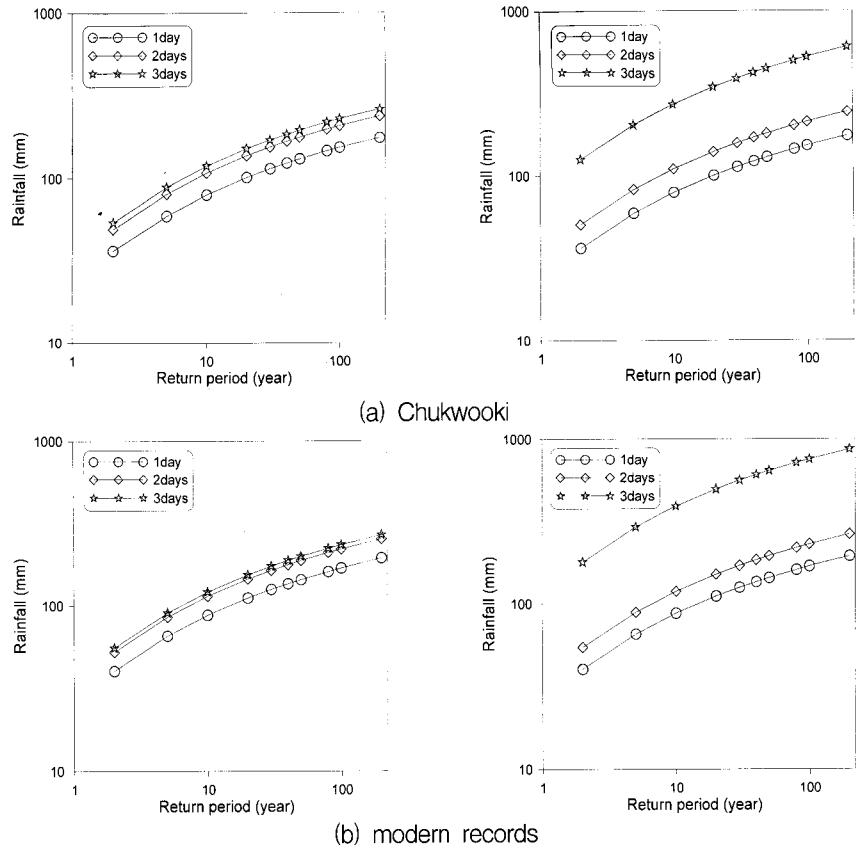


Fig. 3. Application Results of Rectangular Pulses Poisson Process Model for Chukwooki Rainfall and Modern Rain Gauge Rainfall Data (Left and Right Panels are for Disregarding and Considering the Overlap of Rectangular Pulses, Respectively)

Table 6. Return Periods Derived for the Rainfall Events Recorded in the Annals of Chosun Dynasty

events	1 day		2 days		3 days	
	max. rainfall (mm)	return period (years)	max. rainfall (mm)	return period (years)	max. rainfall (mm)	return period (years)
heavy rain 1	72.00	8	106.02	9		
heavy rain 2	187.98	>200	227.95	170		
heavy rain 3	72.00	8	134.00	16		
heavy rain 4	107.50	25	194.5	75	232.00	7
heavy rain 5	62.08	6	72.08	4	80.06	<2
heavy rain 6	28.00	<2	34.00	<2	46.00	<2
heavy rain 7	67.50	7	134.00	16	158.00	3
heavy rain 8	47.96	4	61.29	3	85.95	<2
heavy rain 9	43.00	3	62.00	3	72.68	<2
high water 1 (1)	74.97	8	81.97	4	83.97	<2
high water 1 (2)	33.00	<2	53.04	2	66.04	<2
high water 2	28.02	<2	30.02	<2	57.02	<2
flood 1 (1)	73.44	8	105.96	9	136.04	2
flood 1 (2)	89.68	15	97.44	8	148.20	3
torrential rain	348.42	>200	463.5	>200	488.00	75

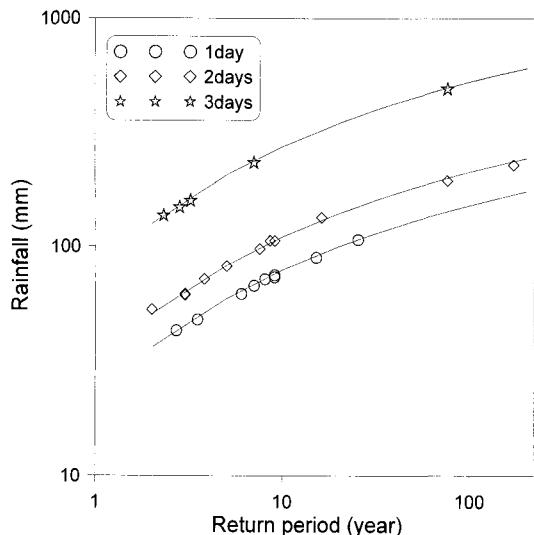


Fig. 4. Return Periods of Rainfall Events Recorded in the Annals of Chosun Dynasty

인 영향은 크지 않았던 것으로 보인다. 즉, ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’ 등과 같이 피해가 직접적이고 자세하게 기록되어 있는 경우는 선행 5일 강수량이 크고 강우의 지속기간이 상당히 길게 나타나는 특성을 보이는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 조선왕조실록의 문헌 기록 호우사상의 특성을 파악하고 구조적으로 간단한 강우모형인 구형펄스모형을 이용하여 평가하였다. 분석에 고려된 호우사상의 수가 제한적이어서 분석 결과를 일반화하기에 다소 무리가 있어 보이기는 하지만 전체적으로 다음과 같은 특성을 살펴볼 수 있었다.

먼저, ‘큰비’에서와 같이 강우에 대한 언급만이 있는 경우가 ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’와 같이 홍수유출 및 이에 따른 피해가 설명되어 있는 경우보다 강우의 재현기간이 작게 나타나는 것으로 파악되었다. 다만, ‘폭우’의 경우는 하나만의 사례만이 나타나고 있으므로 정량화하기는 어려우나 ‘큰비’, ‘큰물’ 및 ‘홍수’의 상황을 훨씬 뛰어 넘는 큰 강우사상으로 나타났다.

기본적으로 기록된 호우사상은 모두 극치사상이 아닌 것으로 파악되었다. 일관되게 어느 정도 이상의 재현기간을 갖고 있는 것도 아니다. 그러나 전체적으로 보면 ‘큰비’에서와 같이 강우에 대한 언급만이 있는 경우가 ‘큰물’, ‘홍수’, ‘폭우’와 같이 홍수유출 및 이에 따른 피해가 설명되어 있는 경우보다 강우의 재현기간이 작게 나타나는 것을 파악할 수 있었다.

또 하나 주목할만한 점은 기록된 호우사상이 강우의

총량보다는 강우의 지속기간에 보다 민감하다는 점이다. 즉, 일시에 많은 비가 온 경우보다는 장기간에 걸쳐 내린 호우사상에 보다 초점이 맞추어져 있다는 점이다. 즉, 홍수유출의 크기 및 이에 따른 피해의 정도가 실제 이들 호우사상이 기록으로 남게 되는 원인으로 파악된다.

본 연구는 궁극적으로 조선왕조실록의 문헌기록을 근대 관측기록으로 변환하여 정량화하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서 수행한 문헌기록의 특성파악과 구형펄스모형을 이용한 사상의 재현기간 정량화는 문헌기록의 근대기록으로의 변환에 어느 정도 도움을 줄 수 있는 결과라 할 수 있다. 하지만 문헌기록 변환에 대한 적절한 방법론으로 제시되는 방법이라 할 수 없으며 이에 대한 연구는 추가적으로 더 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- 김현준 (1999). 조선시대 홍수기록조사, 한국건설기술연구원.
- 유철상, 김남원, 정광식 (2001). “점 강우모형과 강우강도-지속기간-생기빈도 해석.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 577-586.
- 유철상, 김대하, 김현준 (2007). “조선왕조실록 및 축우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 1. 정성적 평가.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 533-543.
- Eagleson, P. S. (1972). “Dynamics of flood frequency.” *Water Resources Research*, AGU, Vol. 8, No. 4, pp. 878-898.
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and Eagleson, P.S. (1989). “Probabilistic representation of the temporal rainfall by a modified Neymann-Scott rectangular pulses model: Parameter estimation and validation.” *Water Resources Research*, AGU, Vol. 25, No. 2, pp. 295-302.
- Islam, S., Entekhabi, D., and Bras, R.L. (1990). “Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall.” *Journal of Geophysical*

- Research*, AGU, Vol. 95, No. D3, pp. 2093–2100.
- Raines, T.H. and Valdes, J.B. (1993). "Estimation of flood frequencies for ungaged catchments." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1138–1154.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V.K., and Waymire, E. (1984). "Scale Considerations in the Modeling of Temporal Rainfall." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 20, No. 11, pp. 1611–1619.

(논문번호:07-20/접수:2007.03.09/심사완료:2007.07.11)