

연최대 호우사상 계열을 이용한 측우기자료 및 현대자료의 비교

Comparison of Chukwooki and Modern data Using Annual Maximum Rainfall Event Series

박민규* · 유철상** · 김현준***

Park, Minkyu · Yoo, Chulsang · Kim, Hyeon Jun

Abstract

In this study, Chukwooki and modern data were compared using annual maximum rainfall event series. Annual maximum series for specified rainfall duration in modern frequency analysis can not be constructed from Chukwooki data, so the concept of independent rainfall event is introduced to compare Chukwooki and modern data. Annual maximum rainfall event is determined by applying the bivariate exponential distribution and the parameters estimated annually are selected. The results using the annual parameter show that the hydrological meaning of the parameters is related to the variation of annual total rainfall amounts. For the whole independent rainfall events, the total rainfall and the rainfall intensity of Chukwooki data are greater than those of modern data, and rainfall duration of the two periods is similar. However modern annual maximum rainfall events show different characteristics that rainfall duration is much longer, rainfall intensity is similar and the total rainfall is greater than those of Chukwooki period. The increasing trend of rainfall duration and total rainfall of the modern annual rainfall events may be regarded as the one of components of the long-term cycle.

Keywords : Chukwooki, independent rainfall event, annual maximum rainfall event, bivariate exponential distribution

요 지

본 연구에서는 연최대 호우사상 계열을 이용하여 측우기자료와 현대자료를 비교하였다. 측우기 시강우 자료를 이용하여 현대 빈도해석에서 필요한 특정지속기간의 연최대치 계열을 얻는 것이 불가능하므로 두 관측기간의 비교를 위해 독립호우사상 개념을 이용해 연최대 호우사상 계열을 작성하였다. 연최대호우사상은 이변량지수분포를 이용하여 결정하였으며 모수 추정을 위해 연도별 모수를 이용하는 경우가 보다 적절할 것으로 검토되었다. 이는 연도별 모수를 이용할 경우의 결과가 모수의 경년별 변동성이 연강수량의 변동성과 비교해 의미를 가지기 때문이다. 전체적인 독립호우사상을 비교한다면 현대기록이든 측우기기록이든 강우지속기간에서는 큰 차이가 없지만 현대보다는 측우기 관측기록의 경우가 총강우량과 강우강도가 크게 나타났다. 그러나, 연최대 호우사상의 비교에서는 측우기에 비해 현대의 경우가 강우지속기간이 현격하게 길어지면서 강우강도는 큰 차이가 없게 나타나 총강우량에서 상당한 증가를 보이는 것으로 확인되었다. 또한 이러한 연최대호우사상의 경향성을 살펴본 결과 현대관측기간 동안에는 강우지속기간과 총강우량이 증가하는 경향을 보이고 있지만 측우기 관측기록과 비교시에는 일정한 주기성의 한 부분으로 보는 것이 보다 적절한 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 측우기, 독립호우사상, 연최대호우사상, 이변량 지수분포

1. 서 론

측우기 자료는 국내강우분석에서 자주 언급되는 자료기간의 부족으로 인해 발생하는 해석의 신뢰도 문제를 보완하는데 큰 도움을 줄 것으로 기대되어 이를 이용한 정성적 또는 정량적 해석이 다양하게 이루어지고 있다. 이는 측우기의 자료기간이 131년으로 현대 관측기간보다 길기 때문에 만약 현대자료와 함께 어우러질 수 있다면 약 200년 전후의 장기간의 자료를 가질 수 있기 때문에 그 의미가 크다. 측우기

자료와 관련된 연구는 김승과 신현민(1993), Lim and Jung(1992), 정현숙과 임규호(1994), 전종갑과 문병권(1997), 정현숙(1999), 정현숙 등(1999), 유철상(2000), 유철상 등(2000), 유철상과 김보운(2000), 유철상 등(2002), 유철상과 류소라(2003), Jung *et al.*(2001), Yoo(2006), 유철상 등(2007), 김대하 등(2007) 등을 들 수 있다. 이 연구들은 조선시대의 강우 특성 파악과 근대자료를 포함한 장기간의 강수 변동 특성에 관한 것 들이다(유철상 등, 2007).

그러나 현대자료 형식으로 복원된 측우기 자료는 일강우뿐

*정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 연구교수 · 공학박사 (E-mail : mkhojin@chol.com)

**정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : envchul@korea.ac.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : hjkim@kict.re.kr)

이고 시강우의 경우는 강우의 시작과 끝, 그 총량을 나타낸 자료형태를 가진다. 따라서 현재 이루어지고 있는 지속기간 별로 연최대치 계열을 작성하고 여기에 빈도해석을 적용하는 것은 불가능하다. 즉, 측우기 강우자료의 형태가 현대 강우자료와 다르기 때문에 기존 방법처럼 매년 수집된 지속기간별 강우자료 중에서 가장 큰 값을 연최대치로 판단하는 방법의 적용은 불가능하다. 이 경우에 지속기간은 무시하고 단순히 독립호우사상으로 분리한 후 총강우량이 큰 것을 연최대치로 보고 해석해야 한다는 의견이 있을 수 있으나 이는 호우사상이 가진 지속기간의 특성을 고려하지 못하기 때문에 강우강도는 현격히 낮으면서 단순히 길게 지속된 호우사상이 연최대치로 판별될 가능성을 내포하고 있어 합리적이지 못하다. 한편 호우사상의 총강우량과 지속기간이 함께 반영된 호우평균강우강도(=총강우량/강우지속기간)를 기준으로 연최대치를 결정하는 것 역시 강우지속기간은 1~2시간으로 짧으면서 강우강도가 크게 나타난 경우의 호우사상이 상대적으로 많이 연최대치로 판별되기 때문에 마찬가지로 연최대치 적용기준이 되기에 부족하다. 이러한 문제점과 관련하여 Kao and Govindaraju(2007)는 연최대 호우사상의 결정을 위한 여러 기준의 비교 연구를 통해 최대 누적확률 또는 최대 재현기간을 가지는 경우가 가장 적절해 보인다고 설명하고 총강우량과 강우강도를 이용한 적용과정을 보인 바 있다.

이에 본 연구에서는 측우기 강우자료로부터 연최대치 호우사상을 결정하기 위해 총강우량과 강우강도를 함께 고려하여 계산한 재현기간을 기준으로 적용하기 위한 방안을 검토하였다. 이를 위해 강우자료를 독립호우사상으로 분리하여 계열을 작성하고 이들 전기간치 독립호우사상 계열에 대해 이변량 지수분포를 적용하여 매년 최대 재현기간을 가지는 호우사상을 연최대치 호우사상으로 결정하는 방안을 검토하였다. 이변량 지수분포의 적용시 모수 추정은 전기간 자료를 대상으로 추정하는 방안과 장기간의 관측기간임을 반영하여 강우자료의 변동특성이 좀 더 효과적으로 반영될 수 있도록 연도별로 모수를 추정하는 방안을 비교하여 검토하였다. 또한 측우기 자료에 대한 적용성을 확인하기 위한 비교수단으로 현대 강우자료에 동일한 방법을 적용하여 비교를 실시하였다.

2. 자료의 구축

2.1 자료수집 및 IETD에 따른 독립호우사상의 결정

본 연구에서는 우리나라의 측우기 시강우자료로부터 독립호우사상을 추출해내고 재현기간을 기준으로 연최대치 호우사상을 결정하는 방안을 검토하였다. 이를 위하여 서울지점의 1777년부터 1907년까지의 측우기 관측자료와 1961년부터 2006년까지의 현대 관측자료를 우기(6월~9월)동안에 대해 수집하였다.

이러한 장기의 강우기록은 매우 불규칙한 분포로 이루어져 있다. 장기간의 여러 강우사상들을 각각의 일반적인 독립호우사상으로 분리하기 위해서는 각 강우사상의 시작과 끝을 구분할 수 있는 기준이 필요하다. 수문학적으로 호우사상을 분리하는 일반적인 방법은 호우사상 사이의 시간을 분석하

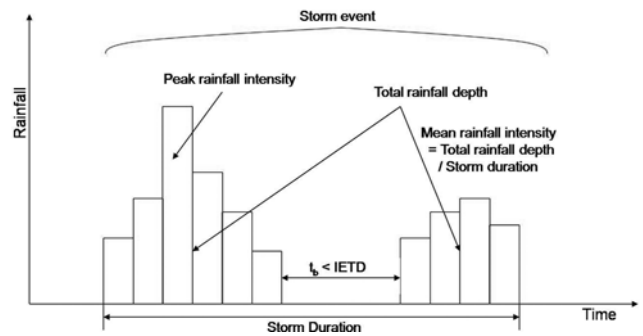


Fig. 1 Discretization of rainfall record based on interevent time definition

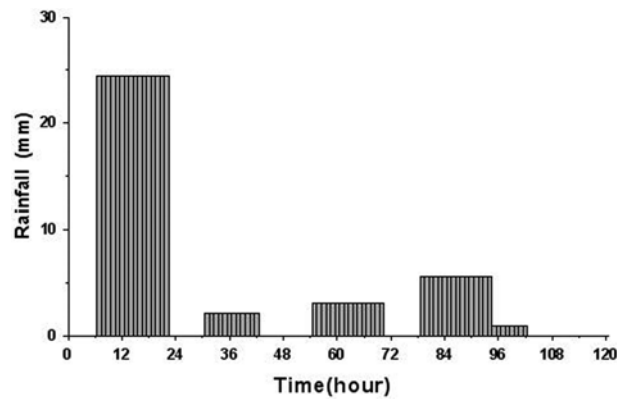


Fig. 2 An example of Chukwooki rainfall records

여 독립적인 호우사상으로 구분해 줄 수 있는 무강우 시간을 결정하는 것이다(권재호 등, 2004; Adams and Papa, 2000). 이것은 Fig. 1에서 처럼 호우사상 분리 시간정의 (Interevent Time Definition, IETD)를 기준으로 보다 짧은 시간간격을 가지는 두 개의 호우사상은 하나의 강우로 보고, 이보다 긴 시간간격으로 떨어진 호우사상은 서로 독립적으로 간주하는 방법으로 설명된다(Adams and Papa, 2000).

현대 관측자료는 매시간 간격으로 관측값이 존재하기 때문에 적절한 호우사상 분리 시간정의(기간)만 이루어진다면 독립호우사상 계열을 쉽게 구성할 수 있다. 한편, 측우기 관측자료는 일반적으로 기존의 기록형태가 시작시점과 끝나는 시점 그리고 호우총량으로 구성되어 있어 이미 관측단계에서부터 독립호우사상으로 기록되었다고 볼 수도 있다. 그러나 실제 측우기 기록을 살펴보면 Fig. 2의 세 번째 호우사상처럼 호우가 끝나자마자 무강우 시간 없이 새로운 호우사상이 바로 시작되는 경우를 발견할 수 있다. Fig. 2에서는 4개의 연속된 측우기 관측기록이 하나의 호우사상을 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 측우기 관측기록으로 얻어진 강우펄스를 수문학적 정의의 독립호우사상으로 직접적으로 정의하기는 어렵다. 따라서, 현대 강우자료와 마찬가지로 측우기 강우자료에 대해서도 독립호우사상을 결정하기 위해서는 호우사상 분리 시간정의를 일관되게 적용하는 것이 필요하다.

일반적으로 호우사상 분리시간을 결정하기 위한 방법에는 자기상관계수 분석, 변동계수 분석 그리고 호우사상의 연평균발생회수 분석이 있다(권재호 등, 2004; Adams and Papa, 2000). 자기상관계수 분석은 호우사상간의 상관관계수가 0이 되는 무강우시간으로 결정하는 방법이고, 변동계수 분석

Table 1. Statistics for Chukwooki and modern rainfall data

Statistics	Chukwooki data			Modern data		
	Total rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/h)	Duration (hr)	Total rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/h)	Duration (hr)
Number of Annual rainfall events	24.2 (=3169/131yr; 1777-1907)			33.3 (=1534/46yr; 1961-2006)		
Average	35.1	3.24	14.3	30.2	1.85	14.5
Standard Deviation	50.7	4.05	14.8	54.4	2.41	16.5
Correlation between total rainfall and intensity	0.20			0.44		
Correlation between total rainfall and duration	0.71			0.74		
Correlation between rainfall intensity and duration	-0.18			0.09		

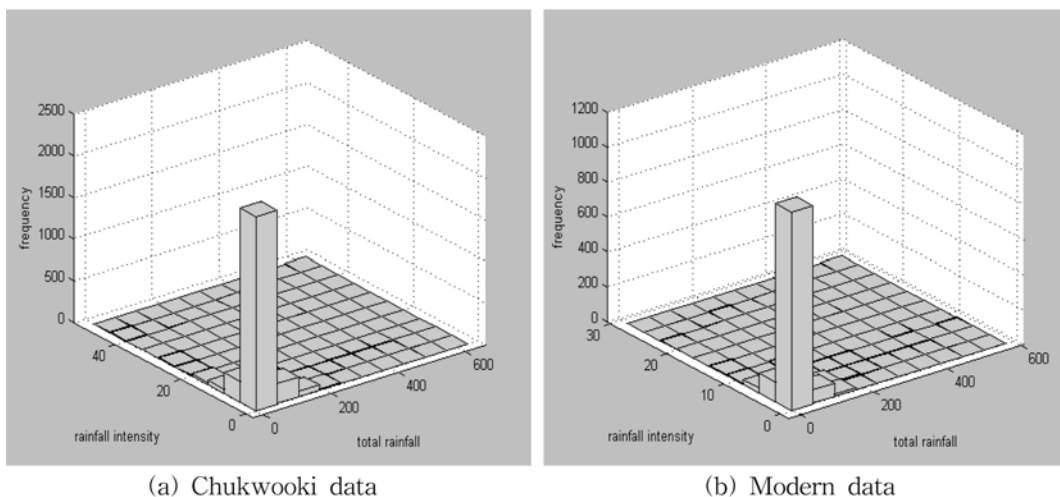
은 무강우시간들의 평균과 표준편차가 같아지는 시점, 즉 변동계수가 1이 되는 시점으로 결정하는 방법이다. 이는 무강우시간의 분포가 지수분포를 따른다고 할 때 무강우시간 시점에서 변동계수가 1이 되는 것이 호우사상간에 독립성을 유지하기 위한 필요조건이 된다는 연구에 기초한다(Restrepo and Eagleson, 1982). 마지막 방법은 호우사상 분리시간 정의(IETD)를 점차 증가시키면 연평균발생회수가 일정한 수로 수렴하게 되며 이때의 시간으로 독립호우사상을 결정하는 방법이다(권재호 등, 2004; Adams and Papa, 2000). 본 연구에서는 권재호 등(2004)에 의해 수행된 서울지점의 합리적인 호우사상 분리 시간정의에 대해 이루어진 연구결과를 활용하여 10시간을 적용하였다.

2.2 독립호우사상 계열의 통계적 특성

본 연구에서 구축한 독립호우사상 계열의 평균강우강도와 총강우량의 기본통계량 및 두 변수간의 상관계수는 Table 1과 같다. Table 1에서는 먼저 측우기와 현대 호우사상의 강우지속기간 평균에 큰 차이가 없이 약 14시간 내외로 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 전체 호우사상의 평균적인 지속기간이 측우기와 현대에서 비슷하게 발생하고 있다. 한편 총강우량과 평균강우강도의 경우에 평균값은 측우기 기록이 크게 나타나고 있으나 표준편차는 오히려 현대 관측기록이 크게 나타났다. 이러한 결과에는 연평균 독립호우사상의 수적 차이가 크게 영향을 미친 것으로 확인된다. 즉, Table 1에서 살펴볼 수 있는 것처럼 6~9월 사이의 연평균

독립호우사상의 수를 보면 측우기 관측기록동안에는 평균 24.2회이나 현대관측기록에서는 33.3회로 현대관측방법으로 얻어진 호우사상의 수가 상당히 크다. 이러한 차이의 원인은 현대관측의 경우 강우를 0.1 mm이상으로 정의하여 아주 작은 양이라도 변동이 있다면 기록에 반영되는 반면에 측우기의 관측의 최소단위는 현대 단위계로 환산하면 2 mm에 불과함을 들 수 있다. 따라서 측우기 관측시에는 호우로 판정하지 않았을 수 cm에 불과한 작은 규모의 호우사상을 현대 관측에서는 호우사상으로 판정하게 되어 평균은 감소하고 표준편차는 증가하는 결과를 초래한 것으로 보인다.

독립호우사상은 강우지속기간, 총강우량 그리고 호우평균강우강도(이하 강우강도)의 세 가지 구성요소를 가지고 있지만, 그 중 두 가지만 정의되면 상관관계에 의해 나머지 요소의 값을 파악할 수 있다. 이때 일반적으로 전체 호우사상을 고려하면 통계적으로 강우지속기간과 강우강도는 독립이거나 음의 상관관계를, 총강우량과 강우지속기간은 독립이거나 양의 상관관계를 가지는 경우가 많다고 알려져 있으나 개별 호우사상에서는 독립, 양의 상관관계, 음의 상관관계 특성이 모두 발견되고 이러한 상관관계에 따른 유출양상의 차이는 상당히 큰 것으로 알려져 있다(Cordova and Rodriguez-Iturbe, 1985; Kurothe et al., 1997; Adams and Papa, 2000; Goel et al., 2000). 본 연구에서 분석대상으로 선정한 구성요소인 총강우량과 강우강도의 경우 상관계수를 산정한 결과 Table 1에서와 같이 양의 상관계수를 가지는 것으로 나타났다는데 이는 총강우량이 큰 호우사상의 경우 강우지속기



(a) Chukwooki data (b) Modern data
Fig. 3 Bivariate Histogram of Chukwooki and modern rainfall data

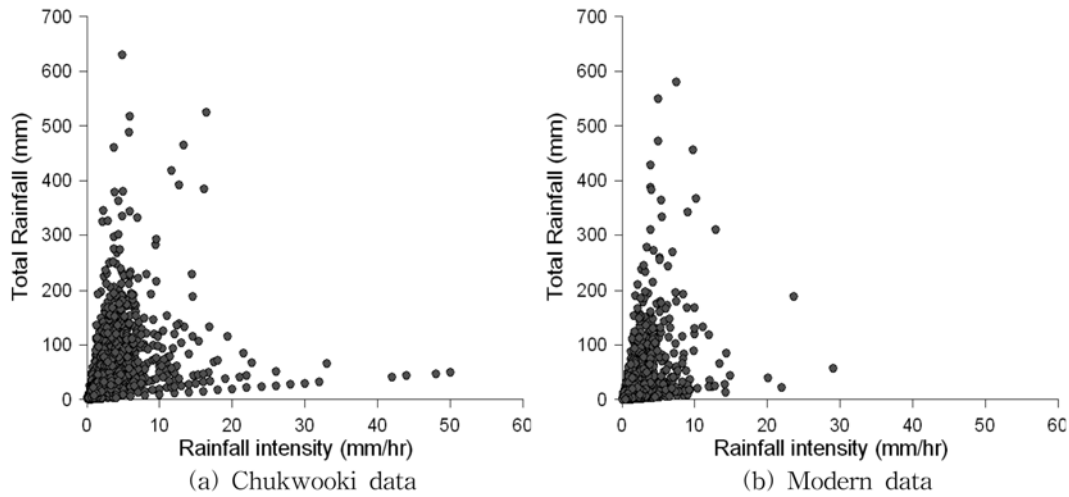


Fig. 4 Rainfall intensity and total rainfall relationship of Chukwooki and modern rainfall data

간도 길어지지만 그에 따라 강우강도도 함께 증가하기 때문으로 보여진다.

독립호우사상의 총강우량 및 강우강도에 대해서 히스토그램과 상관도를 작성한 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. Fig. 3에서는 크기가 작은 호우사상의 발생빈도가 가장 높고, 점점 큰 호우사상으로 갈수록 발생빈도가 지수적으로 감소하는 전형적인 이변량 지수분포의 형태를 보이고 있다. Fig. 4는 Fig. 3을 2차원으로 표현한 것으로 총강우량과 강우강도의 실제발생의 상관관계를 보여준다. 강우강도 또는 총강우량 둘 중 하나가 커질수록 실제 발견되는 호우사상의 수는 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 강우강도와 총강우량이 모두 클 경우에 발견되는 호우사상의 수는 더욱 작아지는 것으로 나타났다.

3. 이변량 지수분포를 이용한 독립호우사상의 재현기간 산정

이변량 지수분포에는 매우 다양한 종류의 분포형이 제시되어 있다. 선도적인 연구로서 Gumbel(1960)은 최초로 이변량지수분포를 소개하였다. 두 번째로 제시된 것은 Freund (1961) 분포형이었다. 이들 이변량 지수분포형들의 도입 목적은 당시에 과도한 신뢰를 받고 있던 다변량정규분포에 기초한 분석에 대한 경고의 의미가 강했다. Gumbel은 이변량 지수분포를 따르는 자료의 확률적 특성이 이변량 정규분포를 통해서 얻은 해석결과와 큰 차이를 보이고 있음을 제시하였다(Kotz et al., 2000). 이 외에도 Arnold and Strauss 이변량 지수분포(1988), Hayakawa 이변량 지수분포(1994)등 10여개가 넘는 다양한 이변량 지수분포가 알려져 있으나 동일한 자료에 대한 서로 다른 이변량 지수분포의 적용결과는 큰 차이가 없고 다만 적용시 고려해야할 조건이 분포형별로 제시되어 있으므로 주의가 필요하다고 알려져 있다(Kotz et al., 2000). 이러한 조건은 다음과 같은 두 가지로 요약할 수 있다.

첫 번째는 대부분의 이변량 지수분포형은 두 변량간의 상관관계수에 대한 일정한 범위를 가지고 유도되었기 때문에 분석대상 자료의 상관관계수가 정해진 특정범위를 벗어나는 경우에는 이용해서는 안 된다는 점이다. 두 번째 조건은 대부분의 분포형이 모수를 최우도법으로 추정하도록 제시되어 있

기 때문에 발생하는 문제로, 자료에 따라서 수치해석 기법으로 우도함수를 구하지 못해 모수를 추정하지 못하고 이로 인해 해당 분포형을 사용하지 못하는 경우가 종종 발생할 수 있다.

본 연구에서는 이변량 지수분포로 Freund 이변량 혼합형 지수분포(Freund's Bivariate Exponential Mixture Distributions)를 선정하였다. 이 모형의 경우 상관관계수의 적정범위가 -0.333에서 1.0으로 본 연구의 대상자료처럼 두 변량이 양의 상관관계수를 가지는 경우에 적용제한이 없고, 또한 분포형의 모수에 대해 최우도법의 해석해가 유도되어 있어 항상 모수를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 호우사상을 구성하는 두 변량을 X_1 과 X_2 로 표기할 때 각 변량이 특정한 값 x 를 가지게 될 이변량 확률분포형은 다음과 같이 정의할 수 있다(Kotz et al., 2000).

$$P_{X_i}(x_i) = \alpha_i e^{-\alpha_i x_i} \quad x_i > 0, \alpha_i > 0 (i=1,2) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_{X_1, X_2}(x_1, x_2) &= \alpha_1 \alpha'_2 e^{-\alpha'_2 x_2 - \gamma x_1}, \quad 0 \leq x_1 \leq x_2 \\ &= \alpha'_1 \alpha_2 e^{-\alpha'_1 x_1 - \gamma x_2}, \quad 0 \leq x_2 \leq x_1 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\gamma = \alpha_1 + \alpha - \alpha'_i (i=1,2)$ 이다. 이 분포형은 만약 $\alpha_i > \alpha'_i$ 라면 단일 지수분포의 형태가 아니라 지수분포의 혼합형 또는 가중평균에 해당한다. 이러한 이유로 이 분포형은 이변량 혼합형 지수분포 또는 간략히 BEDs로 불리워지고 있다(Kotz et al., 2000).

일반적으로 표본의 크기가 n 인 경우에 j 번째 호우사상의 구성요소(강우량, 강우지속기간 또는 강우강도)를 나타내는 변수 X_j 에 대한 모수 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha'_1$, 그리고 α'_2 를 추정하기 위한 우도함수(likelihood function)는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} &(\alpha_1 \alpha'_2)(\alpha'_1 \alpha_2)^{R_2} \exp \left\{ -\alpha'_1 \sum_{j=1}^n X_{1j} - \alpha'_2 \sum_{j=1}^n X_{2j} \right. \\ &\left. - (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha'_1) \cdot \sum *X_{1j} - (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha'_2) \sum *X_{2j} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 R_i 는 호우사상을 구성하는 특정 변량의 표준화된 크

기가 다른 변량의 표준화된 크기보다 작을 경우의 호우사상의 수로 $R_1+R_2=n$ 이 성립한다. \sum^* 는 R_i 인 호우사상들의 합을 가리킨다. 위 식에서 최우추정량은 다음과 같다.

$$\hat{\alpha}_i = \frac{R_i}{\sum^* X_{1j} + \sum^* X_{2j}} \quad \text{및}$$

$$\hat{\alpha}'_i = R_{3-i} \left(\sum_{j=1}^n X_{1j} - \sum^* X_{3-i,j} \right), \quad i=1,2 \quad (4)$$

위 식에서 $\sum^* X_{1j} + \sum^* X_{2j}$ 는 최초로 발생가능한 모든 호우사상들만을 고려할 때 얻어진 값이다.

이변량 빈도해석 결과로 얻어지는 재현기간은 결합재현기간(joint return periods)으로 불리워지고 있으며 정의방법에 따라서 다음의 두 가지가 가장 잘 알려져 있다. 이변량 빈도해석의 적용시에는 이들 정의가 의미하는 바를 잘 고찰하여 해석목적에 부합할 수 있는 있도록 선택하는 것이 필요하다. 이 두 가지 재현기간의 개념적 의미는 다음과 같다 (Yue and Rasmussen, 2002; Michele *et al.*, 2005).

1. (OR case) $X_1 \geq x_1$ 또는 $X_2 \geq x_2$ 또는 둘 다를 포함하는 경우의 호우사상 즉,

$$E_{or} = \{X_1 \geq x_1 \quad \text{or} \quad X_2 \geq x_2\}$$

2. (AND case) $X_1 \geq x_1$ 그리고 $X_2 \geq x_2$ 인 경우의 호우사상 즉,

$$E_{and} = \{X_1 \geq x_1 \quad \text{and} \quad X_2 \geq x_2\}$$

상기 두 가지 개념에 따르면 E_{or} 인 호우사상은 두 변량 강우총량과 강우강도 중 하나만 임계값을 넘더라도 발생할 수 있는 호우사상이라면, E_{and} 인 호우사상은 두 변량이 모두 임계값보다 커야 발생할 수 있는 호우사상이다. 이때 이 두 가지 결합재현기간을 수식으로 정의하면 다음과 같다 (Yue and Rasmussen, 2002; Michele *et al.*, 2005).

$$T_{or} = \frac{1}{\mu \times (1 - F_{X_1, X_2}(x_1, x_2))} \quad (5)$$

$$T_{and} = \frac{1}{\mu \times (1 + F_{X_1, X_2}(x_1, x_2) - F_{X_1}(x_1) - F_{X_2}(x_2))} \quad (6)$$

여기서 $F_{X_i}(x)$ 는 변수 X_i 에 대한 주변누가확률분포, $F_{X_1, X_2}(x_1, x_2)$ 는 $\Pr[X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2]$ 로 정의되며 μ 는 전기간에 대한 연평균 호우발생회수를 의미한다.

일반적으로 비초과확률에 보다 충실한 개념으로서 널리 사용되는 것은 Eq. (5)이다. 그러나 이를 이용하여 연최대치 계열을 결정하는 것은 극단적인 경우를 예로 들면 아주 작

은 강우강도로 상당히 오랜 기간동안 내린 호우사상이나 또는 아주 짧은 시간동안에 상당히 큰 강우강도를 뿌리고 끝난 호우사상이 재현기간이 높은 것으로 평가될 경우가 높다. 이 경우에 수문학적으로 의미가 큰 설계수문량이 가져야 할 물리적인 특성인 수자원시스템에 대한 피해유발 가능성이 낮기 때문에 연최대치 호우사상으로 적합하지 않다고 판단된다. 따라서, 연최대치 호우사상을 결정하기 위한 빈도해석에서는 강우강도와 총강우량이 모두 특정한 크기 이상이 되는 확률에 기초한 Eq. (6)의 방법을 적용하는 것이 타당하다.

4. 이변량 지수분포의 적용 결과

이변량 지수분포인 Freund 이변량 혼합형 지수분포와 E_{and} 개념에 기초한 재현기간의 정의 T_{and} 적용하여 호우시간 분리 시간정의(IETD)로 10시간을 적용하여 얻어낸 독립호우사상의 계열의 강우강도와 총강우량의 이변량을 대상으로 재현기간을 산정하였다. 이렇게 얻어진 재현기간을 기준으로 매년 최대재현기간을 가지는 독립호우사상을 연최대호우사상으로 결정하였다.

이변량 지수분포의 모수 산정시 두 가지 방법으로 구분하여 적용하였다. 첫 번째는 전기간 단일 모수 방법으로 측우기 관측기간과 현대 관측기간의 두 가지로 구분하여 해당기간의 전체 호우사상을 대상으로 모수를 추정하는 방법이다. 첫 번째 방법으로 모수를 추정하는 경우의 수문학적 의미는 전기간에 대해 총강우량과 강우강도의 이변량의 상관관계가 일정하게 유지된다고 가정하는 것이다.

두 번째는 연도별 모수 방법으로 장기간에 걸친 강우사상의 변동특성을 반영할 수 있도록 연도별로 모수 추정하는 방법이다. 이는 매년 6월~9월 사이에 관측된 호우사상의 수가 평균적으로 30~40개에 이르기 때문에 통계학적으로 무리가 없고 특히 우기동안의 총강수량을 기준으로 할 때 연도별로 상대적으로 강수량이 많았던 해(우기해)와 강수량이 작았던 해(건기해)가 존재하고 있고 두 경우의 강우발생양상이 서로 다르게 나타나는 특징을 모수 추정시에 반영할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 연도별로 모수를 추정할 경우는 매년 변동하는 총강우량과 강우강도의 상관관계를 고려하여 호우사상을 결정할 수 있다.

4.1 모수 추정

측우기 자료와 현대 자료에 대해 모수를 추정된 결과는 Table 2 및 Table 3과 같다. 이를 살펴보면 연도별로 모수를 추정된 평균값과 전기간 모수 추정치가 서로 값의 차이

Table 2. Parameter estimation for Chukwooki rainfall events

Classification		Total rainfall			Rainfall intensity		
		Mean μ_1 (mm)	α_1	α'_1	Mean μ_2 (mm/hr)	α_2	α'_2
Total year parameter		35.13	0.99	1.00	3.24	0.83	1.21
Annual parameter	Mean	35.00	1.24	0.78	3.22	0.94	1.06
	Std. dev	12.34	0.40	0.23	0.98	0.16	0.15
	Max	84.38	2.80	1.67	6.85	1.61	1.42
	Min	12.23	0.42	0.32	1.11	0.60	0.62

Table 3. Parameter estimation for modern rainfall events

Classification		Total rainfall			Rainfall intensity		
		Mean μ_1 (mm)	α_1	α'_1	Mean μ_2 (mm/hr)	α_2	α'_2
Total year parameter		30.23	1.15	0.78	1.85	0.53	1.69
Annual parameter	Mean	30.42	1.66	0.62	1.84	1.09	0.96
	Std. dev	9.57	0.38	0.18	0.45	0.13	0.07
	Max	59.43	2.76	1.10	3.04	1.37	1.11
	Min	17.26	1.10	0.37	1.08	0.85	0.82

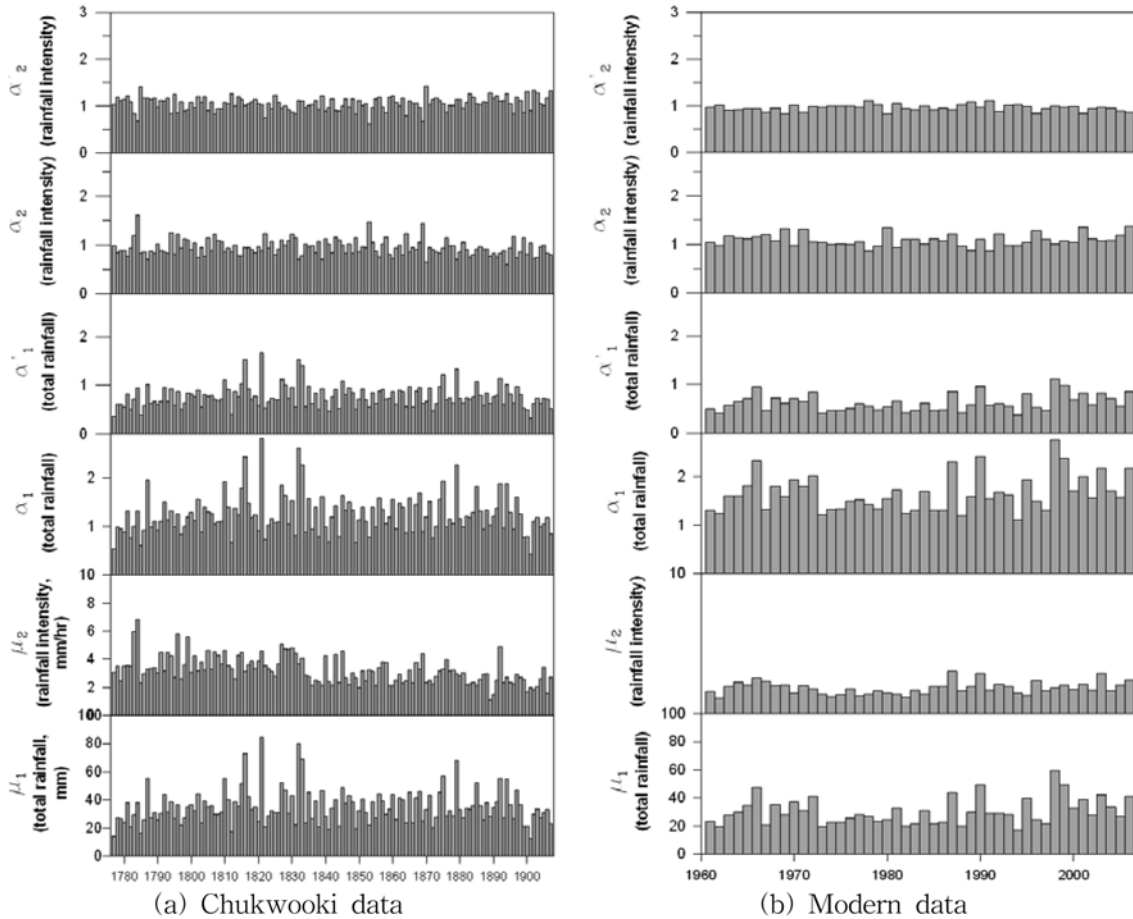


Fig. 5 Model parameters estimated annually

가 큰 것으로 나타나 전기간 모수 추정결과가 연도별 매개 변수 추정치를 대표하는 값으로 보기가 어렵다고 볼 수 있다. 또한, 연도별 모수를 도시한 Fig. 5를 살펴보면 이들 모수의 변동폭이 상당히 크고 명확하지는 않으나 일종의 주기성과 경향성이 함께 발견되므로 전기간에 대해 단일 모수를 추정하는 방법은 연최대치를 결정하는 분석결과를 왜곡할 수도 있다고 추정할 수 있다.

4.2 모수 추정방법별 연최대 호우사상 계열의 특징

전절에서 추정된 모수를 이용하여 Eq. (11)로 정의되는 재현기간을 산정하고 최대 재현기간을 가지는 호우사상을 연최대 호우사상으로 결정하였다. 그 결과는 도시하면 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 두 결과를 비교해 보면 직관적으로 큰 호우사상임을 파악할 수 있는 경우 두 가지 모수 추정 방법 모두에서 동일하게 연최대 호우사상으로 결정되었다. 그러나 아주 큰 호우사상이 발견되지 않고 서로 비슷한 규

모의 호우사상이 여러 개 있는 경우에는 두 가지 모수 추정방법이 다른 결과를 보였다. 그로 인해 측우기 기록기간 131년 중 40년과 현대 기록기간 46년 중 15년이 서로 다른 호우사상을 연최대에 해당한다고 판정하였다. 이는 측우기 기록기간에 대해서는 30.5%, 현대 기록기간에 대해서는 32.6%에 해당하는 것으로 두 기간을 합친 전체 기록기간의 31.1%가 서로 다른 연최대 호우사상을 선정되었음을 보여준다.

연최대 호우사상의 통계적 특징을 전기간 단일 모수를 적용하는 경우와 연도별 모수를 이용하는 경우로 나누어 정리하면 Table 4 및 Table 5와 같다. 이를 살펴보면 연도별 모수 방법에 의한 연최대 호우사상은 전기간 모수 방법의 경우보다 강우지속기간이 짧고 총강우량이 크며 따라서 호우평균강우강도도 큰 것을 확인할 수 있다. 한편, 측우기 기록으로부터 얻어진 연최대호우사상과 현대 연최대호우사상을 비교하면 전기간 단일 모수이든 연도별 모수의 여부와 상관

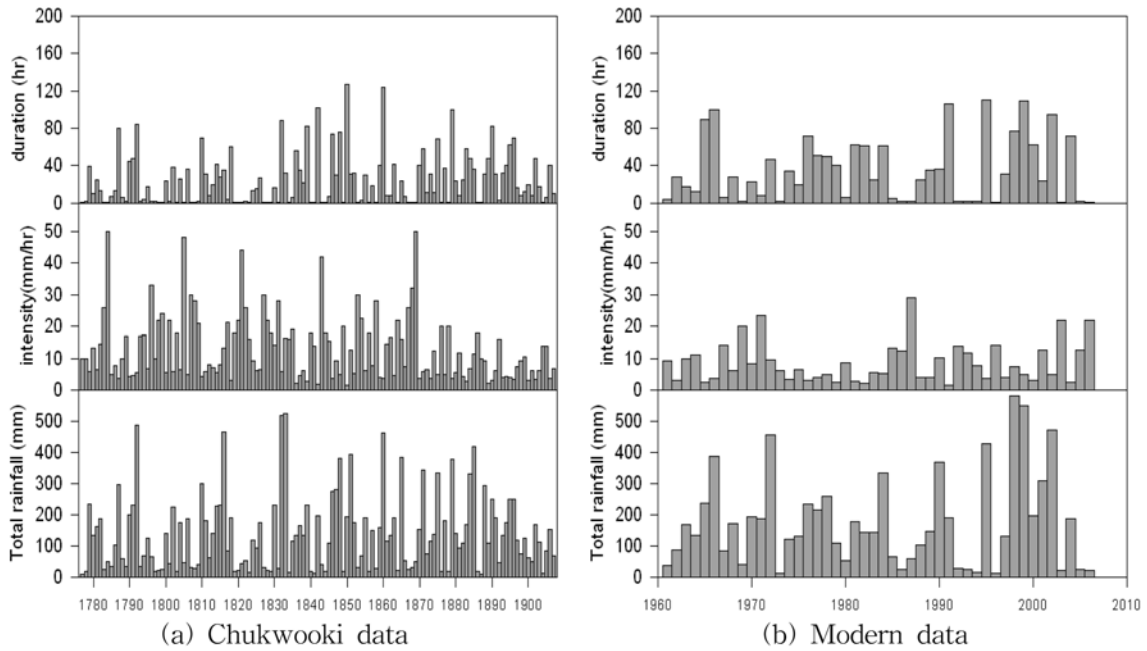


Fig. 6 Annual maximum rainfall event series (total year parameter)

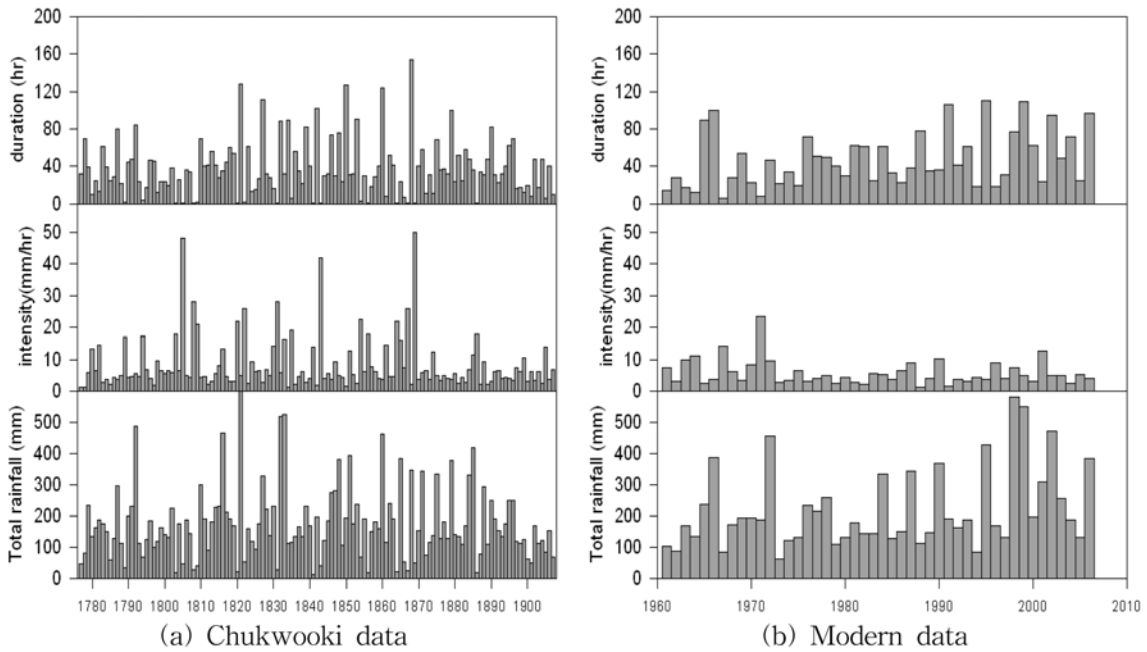


Fig. 7 Annual maximum rainfall event series (annual parameter)

없이 현대의 연최대호우사상이 강우지속기간이 더 짧아진 반면 강우강도는 현격히 증가하여 전체적으로 총강우량이 증가하는 것으로 나타난다.

Fig. 8과 같이 연도별로 우기동안의 총강수량과 모수 추정치와의 상관관계를 그래프로 그려서 살펴보면 우기 총강수량은 연최대 호우사상의 총강수량에 대한 모수 α_1 (또는 α'_1) 와는 서로 동일한 경향을 보이면서 변동하지만, 강우강도와 관련된 모수 α_2 (또는 α'_2) 과는 상반된 거동특성을 보였다. 이는 우기 총강수량이 많은 우기해의 경우 연최대치 호우사상 결정시 강우강도가 큰 경우가 총강우량이 큰 경우보다(강우지속기간이 긴 경우보다) 재현기간에 미치는 영향이 크고, 건기해에는 총강우량이 큰 경우가 강우강도가 큰 경우보다 재현기간에 미치는 영향이 우세하였다는 것을 의미한다. 즉, 우기해에는 강우강도의 특성이 연최대치 호우사상을 결정하는

데 보다 지배적이고 건기해에는 총강우량이 많은 경우가 연최대 호우사상을 결정하는데 지배적이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 상기에서 검토된 두 가지 모수 추정방법을 비교하여 모수가 가지는 물리적 의미 및 얻어진 연최대 독립호우사상의 특징을 고려하여 연도별 모수 추정방법이 보다 적합하다고 판단하였다. 이는 수문학적으로 의미가 있는 극한 호우사상(critical storm)이 다양한 조건을 모두 고려할 때 주어진 수자원시스템에서 최대유출을 유발하는 호우사상으로 정의하는 것보다 서로 연관성이 있다(Pilgrim, 1987; Akan and Houghtalen, 2003) 즉, 우기해에는 선행강수량이 많기 때문에 강우지속기간이 길지 않더라도 높은 강우강도에 의해 큰 홍수가 발생할 가능성이 높지만 건기해에는 선행강수량이 작아 강우지속기간이 길고 총강수량이 많은 경우에 더 큰 홍수의 발생이 높다. 따라서, 연도별 모수를 추

Table 4. Statistics for annual maximum rainfall events (total year parameter)

Statistics	Chukwooki data			Modern data		
	Total rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/h)	Total rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/h)
Average	138.9	13.0	24.3	179.1	8.8	36.6
Standard Deviation	122.3	10.4	28.1	149.9	6.5	34.4
Correlation between total rainfall and intensity	-0.47			-0.36		

Table 5. Statistics for annual maximum rainfall events (annual parameter)

Statistics	Chukwooki data			Modern data		
	Total rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/h)	Total rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/h)
Average	175.0	8.4	37.3	220.6	5.9	47.7
Standard Deviation	116.5	8.4	30.2	127.5	4.0	29.4
Correlation between total rainfall and intensity	-0.30			0.10		

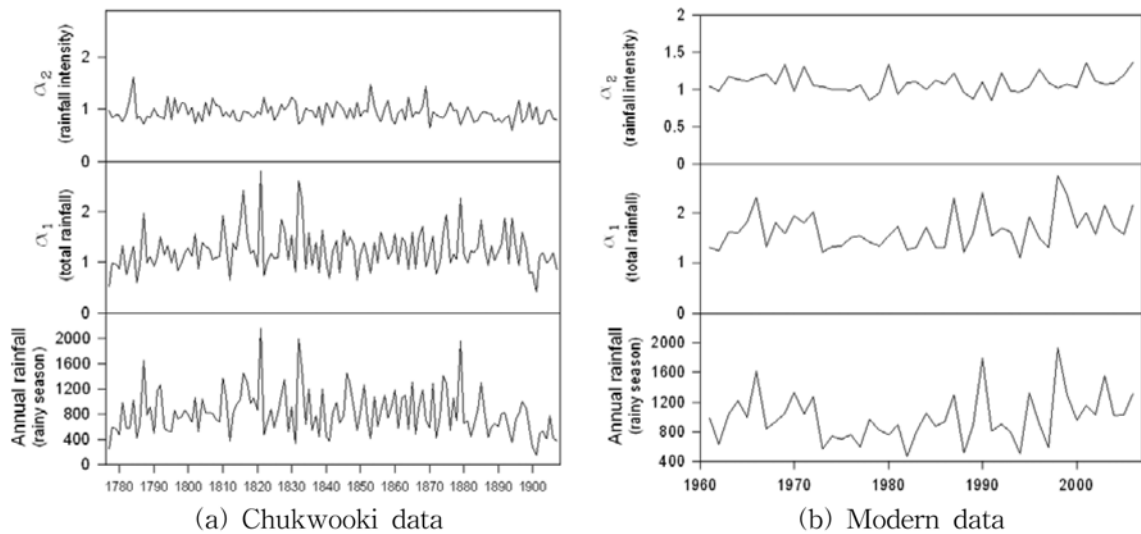
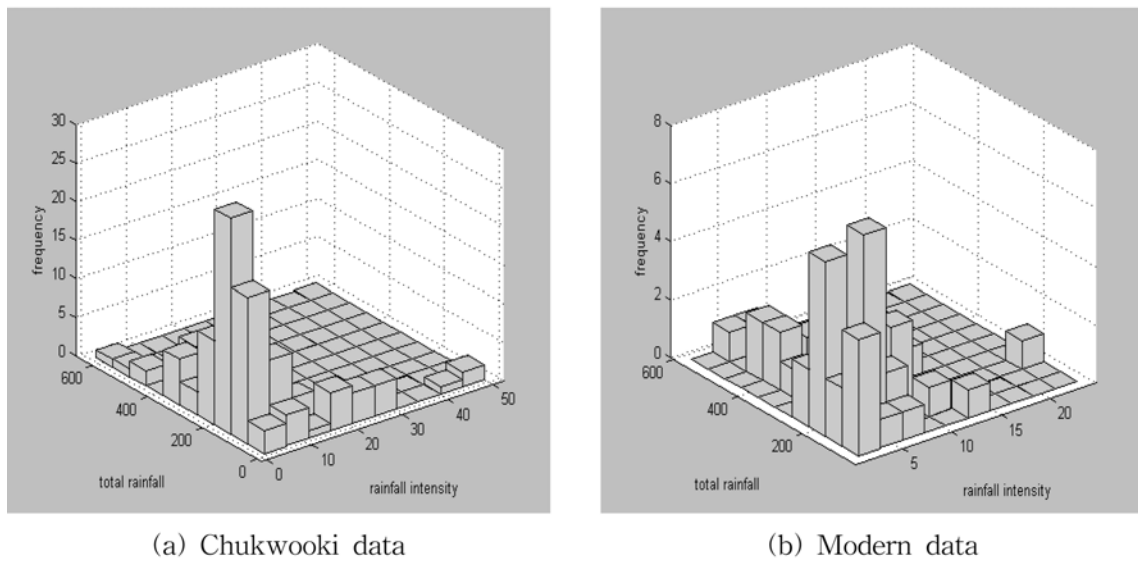


Fig. 8 Comparison of rainy season total rainfalls and model parameters



(a) Chukwooki data (b) Modern data

Fig. 9 Bivariate histogram of annual maximum rainfall events

정하는 경우에 결정된 연최대 호우사상이 보다 수문학적으로 큰 홍수를 유발할 수 있는 호우사상으로 볼 수 있으므로 이를 적용하기로 한다.

4.3 측우기 관측기간 및 현대 관측기간의 연최대 호우사상 계열의 비교

본 연구에서 결정된 연최대 호우사상을 펄스의 형태로 도

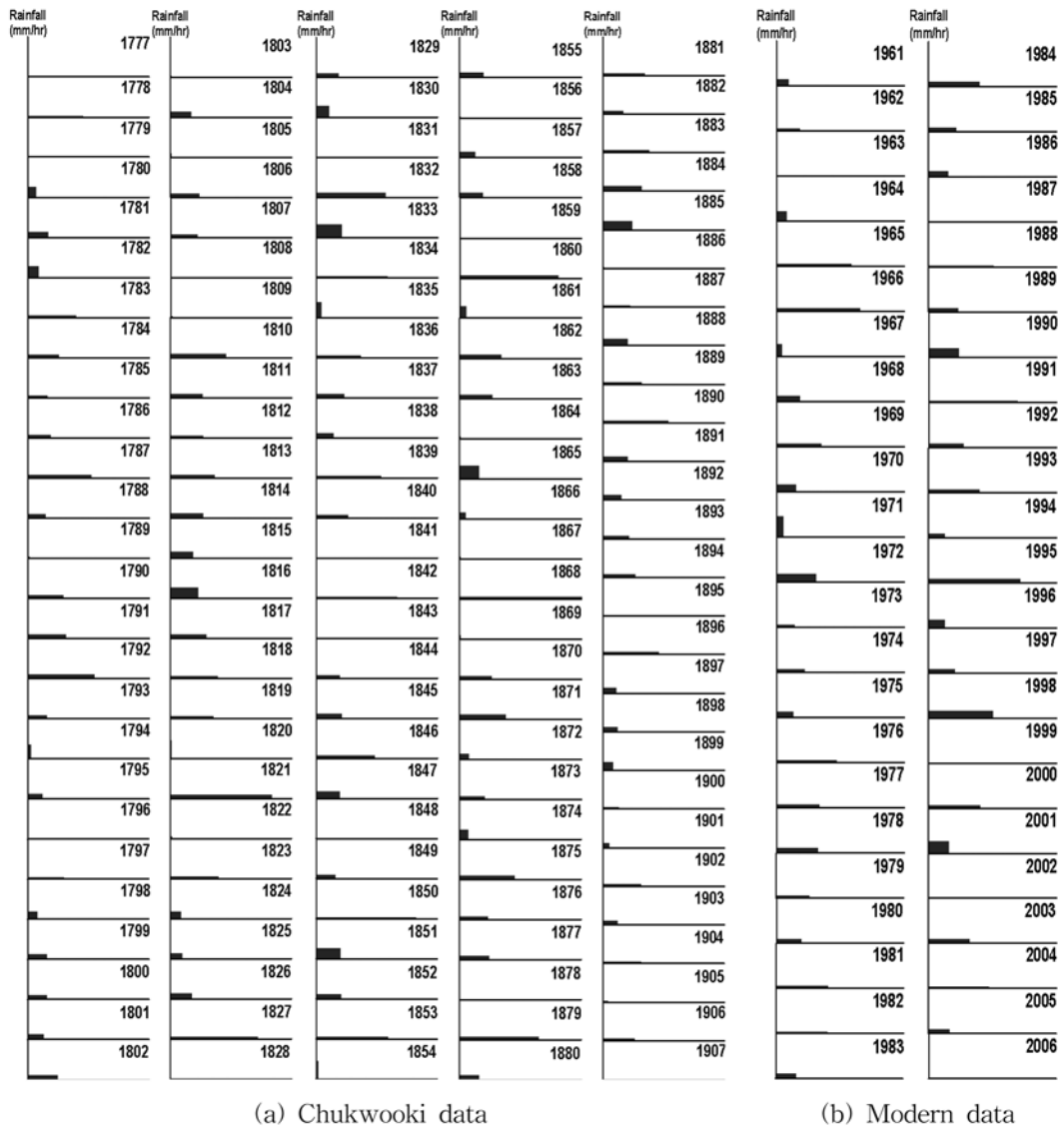


Fig. 10 Plot of puls type annual maximum rainfall events

Table 6. Statistical Comparison for total and annual maximum rainfall events

Statistics	Chukwooki data			Modern data		
	Total rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/h)	Duration (hr)	Total rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/h)	Duration (hr)
Total rainfall events	35.1	3.24	14.3	30.2 (-16.2%)	1.85 (-75.1%)	14.5 (1.4%)
Annual maximum events	175.0	8.41	37.3	220.6 (20.7%)	5.86 (-43.5%)	47.7 (21.8%)
Ratio between total events and annual maximum events	5.0	2.6	2.6	7.3	3.2	3.3

Note) () refer to the increasing percent of modern dat compared to the Chukwooki data

시하면 Fig. 10과 같고, Fig. 9는 두 자료기간의 연최대치 호우사상 계열의 이변량 히스토그램을 작성한 결과이다. 앞서 Fig. 3의 전체 호우사상의 이변량 히스토그램과 비교하면 연최대 호우사상의 히스토그램은 이변량 지수확률분포의 형태에서 전통적인 연최대치 계열의 분포형이 잘 따르는 것으로 알려진 Gamma분포, Gumbel 분포, GEV 분포 또는 대수정규분포 등과 같이 한쪽으로 치우친 형태의 분포형이 이변량으로 확장된 형태로 바뀌어서 나타나고 있다.

측우기 관측기간과 현대 관측기간의 연최대치 호우사상의 평균적인 특성을 살펴보면 Table 6과 같다. 전체 호우사상을

고려할 때 총강우량 뿐만 아니라 강우강도에서도 측우기 관측기간의 값이 현대 관측기간보다 크게 나타났으나, 연최대 호우사상의 비교에서는 측우기의 경우가 강우강도는 큰 값을 보이지만 총강우량 및 강우지속기간이 오히려 작은 것으로 나타났다.

좀 더 구체적으로 살펴보면 전체호우사상에서 연최대호우사상 자료가 결정될 때의 평균적인 특성의 차이를 살펴보면 Table 6과 같다. 측우기 자료의 경우 전체호우사상의 평균 특성보다 강우지속기간 및 강우강도는 약 1.7배 크고 총강우량은 약 5.0배 크게 연최대호우사상의 평균이 결정되었다.

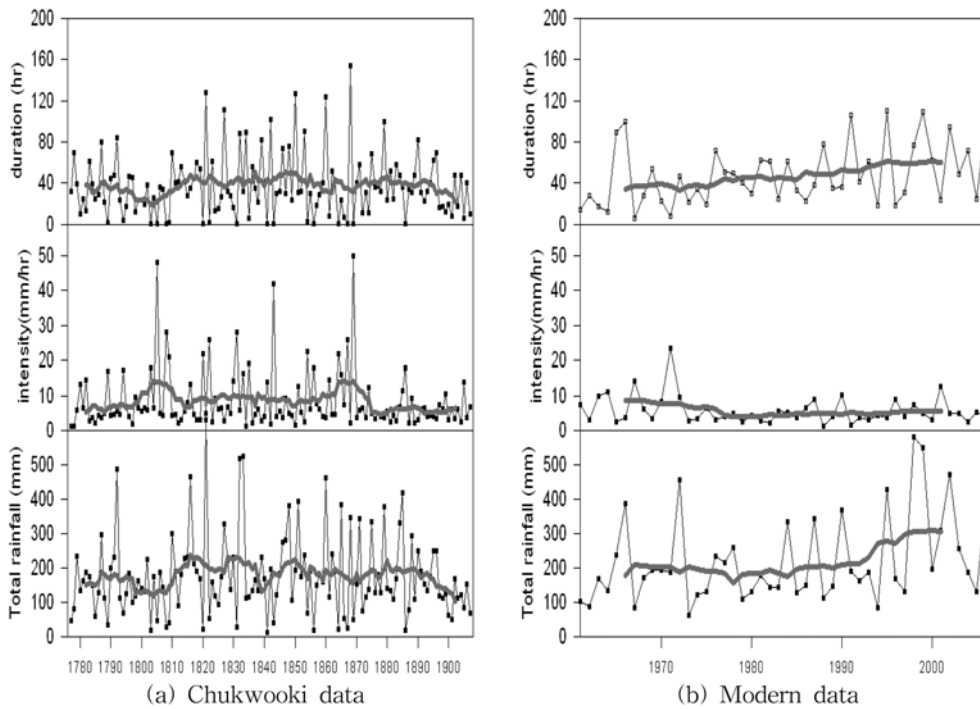


Fig. 11 Moving average plot of annual maximum events

현대관측기록에서는 강우지속기간은 약 3.3배, 강우강도는 약 3.2배 그리고 총강우량은 약 7.3배 큰 것이 연최대호우사상의 평균으로 계산되었다. 이렇게 결정된 연최대호우사상의 특성을 현대를 기준으로 측우기를 비교해보면 현대의 연최대호우사상이 측우기 연최대호우사상보다 평균적으로 강우지속기간은 10.4시간 길지만 강우강도는 2.6 mm/hr만큼 작아져서 총강우량은 45.6 mm가 커지는 것으로 나타났다. 이러한 값을 측우기 연최대호우사상을 기준으로 증가량을 비율로 표시하면 강우지속기간은 21.8% 증가하고, 강우강도는 43.5% 감소하여 전체적으로 총강우량은 20.7% 증가하였다고 볼 수 있다. 이는 전체호우사상의 분석시에 현대 호우사상의 총강우량의 평균이 측우기 호우사상의 총강우량의 평균보다 작았던 것에 비해 연최대호우사상에서는 반대의 경향을 나타내고 있다고 할 수 있다. 이는 현대로 오면서 나타나는 극한 호우사상이 강우강도 특성 면에서는 큰 차이가 없으나 호우가 발생했을 때 유지되는 지속성이 커지고 이와 함께 총강우량도 증가하였다고 볼 수 있다.

연최대치 호우사상의 각 구성성분인 강우지속기간, 강우강도, 총강우량을 각각 그래프로 도시하여 나타내고 그 평균적인 변동경향을 파악하기 위해 전후 5년을 고려한 11년에 대해 이동평균 그래프를 작성하였다(Fig. 11). 이를 살펴보면 현대 46년 동안에는 강우지속기간은 증가하고 있으나 강우강도는 미미하게 감소하여 전체적으로 총강우량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이에 비해 측우기 131년 동안에는 현대에서 관측된 연최대 호우사상의 변화특성이 반복되면서 순환하는 과정이 2회 정도 나타났다. 그러나, 이러한 순환과정이 실제로 주기성을 가지고 존재하는지를 판단하는 것은 보다 정교한 통계적 판단이 필요할 것으로 보여진다.

5. 결 론

본 연구에서는 관측기간이 짧기 때문에 나타나는 신뢰성

부족이라는 현대 강우관측의 가장 큰 문제점을 보완하기 위한 수단으로서 측우기 관측기록을 활용하기 위한 방안의 선행연구를 수행하였다. 빈도해석을 통한 확률강우량을 결정하기 위해서는 연최대치 계열의 작성이 선행되어야 하며 펄스형태로 기록된 측우기 자료를 이용하기 위하여 먼저 독립호우사상을 정의하고 이변량에 지수분포를 적용하여 재현기간을 산정하였다. 이때 최대 재현기간을 가지는 호우사상을 연최대치 호우사상으로 결정하였다. 이 과정에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 측우기 시강우 자료에 대해서는 현대 시강우 자료의 빈도 해석처럼 분석을 위한 특정 지속기간에 대한 연최대치 계열을 얻는 것이 불가능하다. 따라서 측우기 관측기간과 현대 관측기간 두 기간의 강우특성 비교를 위해서는 두 기록 모두에서 구성가능한 형태의 연최대치 계열을 정의하는 것이 필요하며 이러한 이유로 독립호우사상을 이용하였다. 이때, 연최대 호우사상 계열을 정의하기 위해 이변량 지수분포를 적용하였으며, 재현기간은 독립호우사상을 구성하는 두 변량 모두가 특정 크기 이상이 되는 경우로 하였다.
2. 이변량 지수분포의 모수 산정시 전기간에 대해 단일 모수를 추정하는 방법보다 연도별로 모수를 추정하여 얻어진 연최대호우사상이 보다 적절할 것으로 판단된다. 이는 결과적으로 얻어진 히스토그램에서 연도별 모수를 취한 경우가 연도별로 추정된 모수의 경년별 거동특성이 연강수량의 변동성과 의미있는 관계를 보이기 때문이다.
3. 평균적인 특성을 기준으로 할 때 연최대 호우사상은 전체 호우사상보다 강우지속기간과 호우평균 강우강도는 약 2~4배, 총강우량은 5~8배 정도 크게 나타나고 있다. 이때, 측우기 기록보다는 현대 기록에서 이러한 비율이 훨씬 큰 것으로 확인되었다.
4. 전체 호우사상의 비교시에 측우기 기록이든 현대 기록이든 지속기간의 경우에는 큰 차이가 없지만 총강우량과 강

우강도의 경우 측우기 관측기록의 경우가 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이에 비해 연최대 호우사상에 대해서는 현대 기록이 측우기 기록의 경우보다 강우지속기간이 현격히 길어지면서도 강우강도는 조금 감소하거나 큰 차이가 없게 나타나 결과적으로 총강우량이 상당히 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 현대로 오면서 나타나는 극한 호우사상의 특성이 강우강도면에서는 큰 차이가 없지만 호우가 발생하였을 때의 강우 지속성은 커진 관계로 총강우량의 경우 증가하였다고 판단할 수 있다.

5. 연최대 호우사상의 변동성을 살펴본 결과 현대자료에서 강우지속기간은 증가하는 경향을 강우강도는 미미하게 감소하는 경향을 그리고 이에 따른 호우사상의 총강우량은 증가하는 경향을 보였다. 한편, 측우기 자료에서는 비슷한 변화양상이 2회 정도 반복되면서 순환하는 것으로 나타났다. 그러나, 이러한 순환과정이 실제로 주기성을 가지고 존재하는지를 판단하는 것은 보다 정밀한 판단이 필요할 것으로 보여진다.

본 연구의 결과는 측우기 자료를 이용한 이변량 빈도해석의 선행작업으로서 연최대 호우사상의 결정과정을 살펴보고 그에 따라 얻어진 모수의 물리적 의미와 연최대 호우사상의 특징을 살펴보았다. 측우기 기록기간의 연최대 호우사상 계열을 구축할 수 있게 되면 현대 관측기록과 동일선상에서의 분석이 가능하게 되며 그 결과 수공구조물 설계에서 보다 신뢰도가 높은 설계호우사상을 정의하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

권재호, 박무중, 김중훈(2004) 비점오염원 산정을 위한 강우 분석, **한국수자원학회 04 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 666-670.

김 승, 신현민(1993) 서울지점 강수의 장기간 변동성향에 대한 통계학적 검증, **제34회 수공학연구발표회논문집**, 한국수문학회, pp. 264-272.

김대하, 유철상, 김현준(2007) 조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 2. 정량적 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권 제7호, pp. 545-554.

유철상(2000) 서울지점 연강수량 자료에 나타난 장기 건조기의 재현 가능성에 관한 고찰, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 519-526.

유철상, 김보윤(2000) 서울지점 연강수량 자료에 나타난 다우해 및 과우해의 재현 특성에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권 제3호, pp. 307-314.

유철상, 김보윤, 노재경(2000) 서울지점 연강수량 자료에 나타난 다우해 및 과우해의 재현 특성에 관한 연구, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 307-314.

유철상, 류소라, 김정환(2002) 서울지점 월강수량자료에 나타난 기물의 장기 재현특성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권 제3B호, pp. 281-289.

유철상, 류소라(2003) 서울지점 기물의 재현 및 지속특성 분석, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 561-573.

유철상, 김대하, 김현준(2007) 조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 1. 정성적 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권 제7호, pp. 533-543.

전종갑, 문병권(1997) 측우기 강우량 자료의 복원과 분석, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제33권, 제4호, pp. 691-707.

정현숙(1999) 서울지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성의

해석, 박사학위논문, 서울대학교.

정현숙, 임규호(1994) 서울지역 월강수량과 강수일의 관계, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제28권, 제2호, pp. 125-132.

정현숙, 임규호, 오재호(1999) 측우기 관측강우량 자료에 근거한 한반도 건조기에 관한 연구, **1999년도 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 147-152.

Adams, B.J. and Papa, F. (2000) *Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models*. John Wiley & Sons, INC., pp. 55-68.

Akan, A.O. and Houghtalen, R.J. (2003) *Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality - Engineering Applications and Computer Modeling*. John Wiley & Sons, INC., pp. 246-249.

Arnold, B.C. and Strauss, D. (1988) Bivariate distributions with exponential conditionals. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 83, pp. 522-527.

Cordova, J.R. and Rodriguez-Iturbe, I. (1985) On probabilistic structure of storm surface runoff. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 5, pp. 755-763.

Freund, J. (1961) A bivariate extension of the exponential distribution. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 56, pp. 971-977.

Goel, N.K., Kurothe, R.S., Mathur, B.S., and Vogel, R.M. (2000) A derived flood frequency distribution for correlated rainfall intensity and duration. *Journal of Hydrology*, Vol. 228, pp. 56-67.

Gumbel, E.J. (1960) Bivariate exponential distributions. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 55, pp. 698-707.

Hayakawa, Y. (1994) The construction of new bivariate exponential distributions from a Bayesian perspective. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 89, pp. 1044-1049.

Jung, H.S., Lim, G.H., and Oh, J.H. (2001) Interpretation of the transient variations in the time series of precipitation amounts in Seoul, Korea: Part 1. diurnal variation. *Journal of Climate*, Vol. 14, No. 13, pp. 2989-3004.

Kao, S.C. and Govindaraju, R.S. (2007) A bivariate frequency analysis of extreme rainfall with implication for design. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D13119, Doi:10.1029/2007JD008522.

Kotz, S., Balakrishnan, N., and Johnson, N.L. (2000) *Continuous Multivariate Distributions Volume 1: Models and Applications*. John Wiley & Sons, INC., pp. 350-362.

Kurothe, R.S., Goel, N.K., and Mathur, B.S. (1997) Derived flood frequency distribution of negatively correlated rainfall intensity and duration. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 2103-2107.

Lim, G.H. and Jung, H.S. (1992) Interannual variation of the annual precipitations at Seoul 1771-1990. *Journal Korean Meteorological Society*, Vol. 28, pp. 487-505.

Michele, C.D., Salvadori, G., Canossi, M., Petaccia, A., and Rosso, R. (2005) Bivariate Statistical Approach to Check Adequacy of Dam Spillway. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 50-57.

Pilgrim, D.H. (1987) *Australian Rainfall and Runoff - A Guide to Flood Estimation Volume 1*. revised edition, The Institute of Engineers, Australia, pp. 160-161.

Restrepo-Posada, P.J. and Eagleson, P.S. (1982) Identification of independent rainstorms. *Journal of Hydrology*, Vol. 55, pp. 303-319.

Yoo, C. (2006) Long-term analysis of wet and dry years in Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 318, No. 1-4, pp. 24-36.

Yue, S. and Rasmussen, P. (2002) Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application. *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 2881-2898.

(집수일: 2008.11.27/심사일: 2009.1.5/심사완료일: 2010.1.26)