

# 측우기자료의 연최대 호우사상 구축에 관한 연구

## Study for Construction of Annual Maximum Storm Event Series from Chukwooki Rainfall Records

유철상<sup>1)</sup>, 박민규<sup>2)</sup>

Chulsang Yoo and Minkyu Park

### 요 지

현대 강우관측 자료를 빈도분석할 때 나타나는 가장 큰 문제는 관측기간이 짧기 때문에 고빈도 확률강우량 추정이나 장기간의 경향성 예측시 신뢰성 부족하다는 점이다. 본 연구에서는 이러한 현대 강우자료의 문제점을 보완하기 위한 방법으로 측우기 관측기록을 활용하기 위한 방안을 검토하였다. 빈도해석을 통한 확률강우량의 결정을 위해서는 연최대치 계열의 작성이 선행되어야 한다. 측우기 강우자료는 강우시작시점과 종료시점 그리고 그 사이의 강우량으로 구성된 펄스 형태로 기록되어 있기 때문에 이를 이용하여 빈도해석을 하려면 전통적인 빈도해석 방법과는 다르게 독립호우사상을 적절하게 정의하는 것이 필요하다. 독립호우사상에 대한 기존 연구결과에 기초하여 무강우지속기간 10시간을 기준으로 측우기 관측기록과 현대 관측기록으로부터 이를 추출한 후 총강우량과 강우강도 두 가지를 대상으로 이변량 지수분포를 적용하였다. 그리고 각 호우사상의 재현기간을 산정하고, 연도별로 최대 재현기간을 가지는 호우사상을 연최대 호우사상으로 결정하였다. 이변량 지수분포의 매개변수 산정시 전기간에 대해 매개변수를 산정하는 경우보다 연도별로 매개변수를 산정하는 경우가 강우발생의 변동양상 및 수문학적인 극한호우의 정의를 반영하기에 적합한 것으로 검토되었고 또한 그로 인해 얻어진 연최대 호우사상이 이변량 극치분포를 보다 잘 따르는 것으로 나타났다. 연도별 매개변수 추정결과를 우기해와 건기해로 나누어 살펴보면 우기해에는 강우강도가 재현기간 산정에서 상대적으로 영향이 크고, 건기해에는 총강우량과 관련된 영향이 큰 것으로 나타났다. 연최대 호우사상의 변동성을 살펴보면 현대자료에서 강우지속기간은 점점 증가하고 강우강도는 감소하며 이에 따른 호우사상의 총강우량은 증가하는 특징을 보였다. 그러나 측우기 자료에서는 이러한 변화양상이 반복순환하는 것으로 나타났으며 이와 관련된 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 측우기 자료를 이용한 빈도해석의 선행작업으로서 연최대 호우사상 계열의 결정 과정을 살펴보았으며 이렇게 얻어진 연최대 호우사상은 현대자료와 어우러져 보다 신뢰성 높은 설계호우사상을 결정하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

**핵심용어 : 측우기, 독립호우사상, 이변량 빈도해석, 이변량 지수분포**

### 1. 서론

강우량 또는 홍수량 등의 발생빈도를 파악하기 위한 빈도해석(frequency analysis)에서 사용되는 수문자료 계열은 전기간치 계열, 부분기간치 계열 그리고 극치계열의 세 가지로 크게 대별할 수 있다. 이 중에서 가장 많이 사용되는 방법은 극치계열 중에서 연최대치 계열(annual maximum series)로 기록기간을 연 단위로 나누어 매년 발생한 최대치만으로 구성된 계열을 말한다(윤용남, 2007), 이러한 연최대치 계열의 작성은 수문빈도해석을 수행하기 위해 선결되어야 할 사항으로 특별히 강우자료에 대해서는 지속시간별로 연최대치 강우량자료를 수집하게 된다. 이는 강우를 유발하는 다양한 호우사상을 하나의 지속시간으로 한정하기 어렵고 또한 지속시간의 변화에 따른 강우의 변동성이 크기 때문이다. 국내의 강우빈도해석에서는 기본적으로 강우지속기간 10분, 1시간 ~ 24시간까지는

1) 정회원-고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 E-mail : envchul@korea.ac.kr

2) 정회원-고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 E-mail : mkhojin@korea.ac.kr

1시간 간격으로 강우자료를 수집해 이를 기준으로 연최대치를 작성하고 있다(정중호, 2007).

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.

그러나 현대자료 형식으로 복원된 측우기 자료는 일강우뿐이고 시강우의 경우 강우의 시작과 끝, 그 총량을 나타낸 시자료 뿐이기 때문에 현재 이루어지고 있는 지속기간별로 연최대치 계열을 작성하고 여기에 빈도해석을 적용하는 것은 어려움이 크다. 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.

이에 본 연구에서는 측우기 강우자료로부터 연최대치 호우사상을 결정하기 위해 총강우량과 강우강도를 함께 고려하여 계산한 재현기간을 기준으로 적용하는 것이 적절할 것으로 판단하여 이를 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 매개변수 추정은 전기간 자료를 대상으로 추정하는 방안과 장기간의 관측기간임을 반영하여 강우자료의 변동특성이 좀 더 효과적으로 반영될 수 있도록 연도별로 매개변수를 추정하는 방안을 비교하여 검토하였다. 또한 측우기 자료에 대한 적용성을 확인하기 위한 비교수단으로 현대 강우자료에 동일한 방법을 적용하여 비교를 실시하였다.

## 2. 자료의 구축

본 연구에서는 우리나라의 측우기 시강우자료로 부터 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.

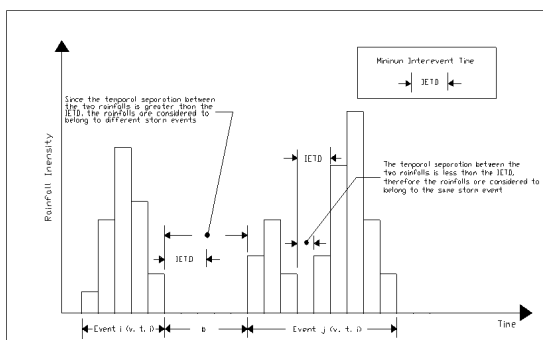


Fig. 1. Discretization of rainfall record based on interevent time definition

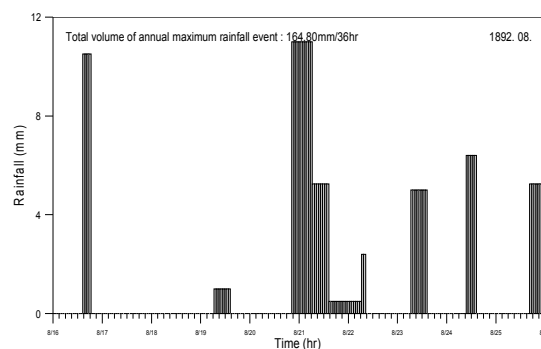


Fig. 2. Timely rainfall observation record in Chukwooki

현대 관측자료는 매시간 간격으로 관측값이 존재하기 때문에 적정한 호우사상 분리 시간정의만 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 측우기 기록을 살펴보면 호우가 끝나자마자 무강우 시간 없이 새로운 호우사상이 바로 시작되는 경우가 자주 발견되는 것을 발견할 수 있다(Fig 2). 따라서 측우기 기록에서 발견되는 강우펄스를 수문학적 정의의 독립호우사상으로 보기는 어렵다. 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. 자기상관계수 분석은 호우사상간의 상관관계수가 0이 되는 무강우시간으로 결정하는 방법이고, 변동계수 분석은 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.

### 3. 이변량 지수분포를 이용한 빈도해석

이변량 지수분포(bivariate exponential distribution)란 분포형을 구성하는 두 변수의 주변분포(marginal distribution)가 지수분포로서 정의되는 분포를 통틀어서 일컫는다. 일반적으로 이들 이변량 분포는 위치 매개변수와 축척 매개변수가 쉽게 얻어질 수 있는 표준지수분포를 주변분포로 가지는 경우가 대부분이다. 따라서 이들 분포형을 적용할 때는 적절한 선형변환을 적용해서 자료계열이 표준지수분포를 따르도록 하는 것이 중요하다(Kotz et al., 2000).

이변량지수분포에는 매우 다양한 종류의 분포형이 제시되어 있다. 선도적인 연구로서 Gumbel(1960)은 최초로 다양한 이변량지수분포를 소개하였다. 두 번째로 곧바로 이어진 것은 Freund(1961) 분포형이었다. 이들 초기 이변량 지수분포형들의 도입 목적은 당시에 과도한 신뢰를 받고 있던 다변량정규분포에 기초한 기법들에 대한 경고의 의미가 강했다. Gumbel은 이변량 지수분포를 통해서 얻을 수 있는 다양한 특성들이 이변량 정규분포를 통해서 얻을 수 있는 결과와는 상당히 많이 다르다는 것을 강조하였다(Kotz et al., 2000). 이들 다양한 이변량 지수분포들을 적용해보면 빈도해석의 결과는 일반적으로 거의 일치하는 것으로 알려져 있다. 따라서 어떤 분포형을 적용하더라도 결과는 큰 차이가 없는 경우가 대부분이며 일반적인 주의사항은 두 가지로 요약할 수 있다.

첫 번째는 대부분의 이변량 지수분포형은 두 변량간의 상관관계수에 대한 일정한 범위를 가지고 유도되었기 때문에 분석대상 자료의 상관관계수가 이러한 특정범위를 벗어나는 경우에는 이용해서는 안 된다. 두 번째는 대부분의 분포형이 매개변수를 최우도법으로 추정할 수 있도록 정리되어 있기 때문에 분석대상 자료에 따라서 해를 구하지 못하는 경우가 상당히 자주 발생한다.

본 연구에서는 이변량 지수분포로 Freund 이변량 혼합형 지수분포(Freund's Bivariate Exponential Mixture Distributions)를 선정하였다. 상관관계수의 적정범위가 -0.333에서 1.0으로 양의 상관관계수를 가지는 경우에 적용제한이 없고, 또한 다른 이변량 지수분포에 비해 최우도법으로 매개변수를 추정할 수 있는 해석해가 유도되어 있어 거의 발산하지 않는 장점을 가지기 때문이다.

### 4. 이변량 빈도해석 결과

앞장에서 설명한 이변량 지수분포인 Freund 이변량 혼합형 지수분포와  $E_{\text{and}}$  개념에 기초한 재현기간의 정의  $T_{\text{and}}$ 를 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 매개변수 산정시 두 가지 방법으로 구분하여 적용하였다. 첫 번째는 전기간 단일 매개변수 방법으로 측우기 관측기간과 현대 관측기간의 두 가지로 구분하여 해당 기간의 전체 호우사상을 대상으로 매개변수를 추정하는 방법이다. 첫 번째 방법으로 매개변수를 추정하는 경우의 수문학적 의미는 전기간에 대해 총강우량과 강우강도의 이변량의 상관관계가 일정하게 유지된다고 가정하는 것이다.

두 번째는 연도별 매개변수 방법으로 장기간에 걸친 강우사상의 변동특성을 반영할 수 있도록 연도별로 매개변수 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 매개변수 추정시에 반영할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 연도별로 매개변수를 추정할 경우는 매년 변동하는 총강우량과 강우강도의 상관관계를 고려하여 호우사상을 결정할 수 있다.

본 연구에서 결정된 연최대 호우사상을 Fig. 3과 같은 이변량히스토그램으로 나타내면 전형적인 이변량 극치분포의 형상을 확인할 수 있다. 호우사상의 총강우량과 강우강도의 상관관계는 Fig. 4와 같다.

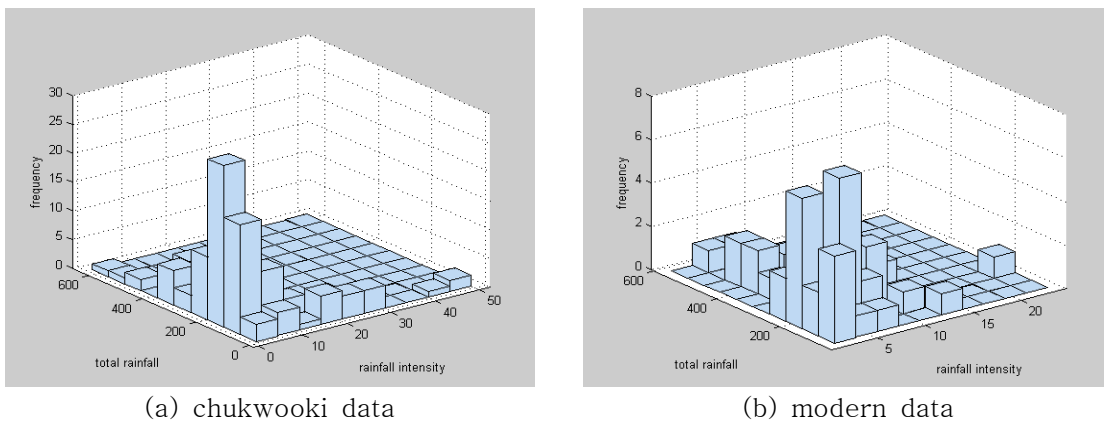


Fig. 3. Bivariate histogram of annual maximum rainfall events

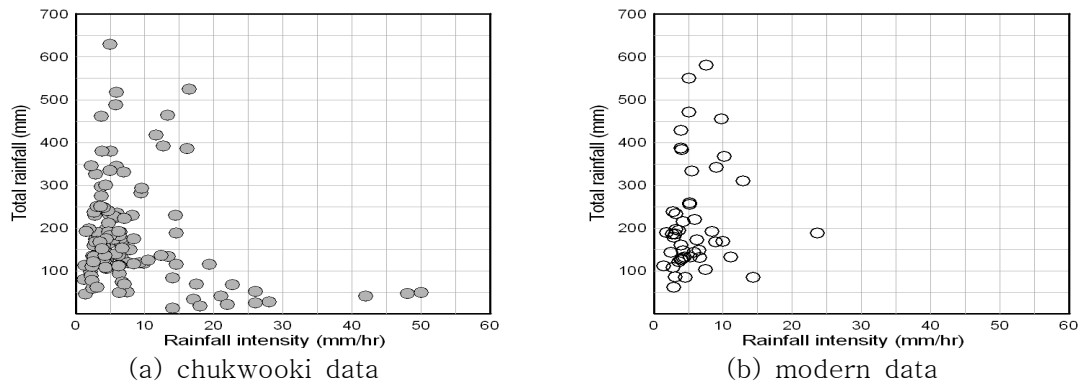


Fig. 4. Rainfall intensity and total rainfall relationship

## 5. 결론

본 연구에서는 관측기간이 짧기 때문에 나타나는 신뢰성 부족이라는 현대 강우관측의 가장 큰 문제점을 보완하기 위한 수단으로서 측우기 관측기록을 활용하기 위한 방안을 검토하였다. 빈도해석을 통한 확률강우량을 결정하기 위해서는 연최대치 계열의 작성이 선행되어야 하며 펄스 형태로 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 시강우자료는 기존 단변량 빈도해석에서와 같이 주어진 지속기간에 대해 연최대치 계열을 얻어내는 것이 불가능하므로 독립호우사상을 먼저 정의하고 호우사상의 총강우량 및 강우강도 두 가지 변량을 동시에 고려하여 해석하는 이변량 빈도해석의 적용방안 도입이 필요하다.

(2) 재현기간을 정의하는 방법에 따라 독립호우사상의 재현기간이 다르게 산정될 수 있으므로 구하고자 하는 목적에 부합하는 정의를 채택하여야 하며 호우사상의 총강우량과 강우강도의 두 변량을 기준으로 빈도해석하여 연최대 호우사상을 결정하기 위한 목적에서는  $T_{and}$ 에 해당하는 재현기간의 적용이 적합한 것으로 검토되었다.

(3) 이변량 지수분포의 매개변수 산정시 전기간에 대해 단일 매개변수를 추정하는 방법은 장기간에 걸친 강우 발생의 변동양상 및 수문학적인 극한호우의 정의를 반영하기에 적합하지 않는 것으로 검토되었으며 연도별로 매개변수를 추정하는 얻어진 연최대 호우사상이 이변량 극치분포에 보다 부합한다는 결과를 얻었다.

본 연구의 결과는 측우기 자료를 이용한 이변량 빈도해석의 선행작업으로서 연최대 호우사상의 결정과정을 살펴보고 그에 따라 얻어진 매개변수의 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.

## 감 사 의 글

이 논문은 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01) 연구결과의 일부입니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 유철상, 김대하, 김현준(2007). “조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 1. 정성적 평가.”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권 7호, pp.533-543.
2. 김대하, 유철상, 김현준(2007). “조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 2. 정량적 평가.”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권 7호, pp.545-554.
3. 윤용남 (2007). 수문학 - 기초와 응용 -. 청문각.
4. 전종갑, 문병권 (1997). “측우기 강우량 자료의 복원과 분석.” **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제33권, 제4호, pp. 691-707.
5. 정중호, 윤용남. (2007). 수자원설계실무. 구미서관
6. 정현숙 (1999). 서울지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성의 해석. 박사학위논문, 서울대학교.
7. 정현숙, 임규호 (1994). “서울지역 월강수량과 강수일의 관계”, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제28권, 제2호, pp. 125-132.
8. Freund, J. (1961). "A bivariate extension of the exponential distribution", *Journal of the American Statistical Association*, 56, pp. 971-977.
9. Kotz, Samel, Balakrishnan, N., Johnson. N.L. (2000). *Continuous Multivariate Distributions Volume 1: Models and Applications*. John Wiley & Sons, INC., pp. 350-362.
10. Yue, S. Rasmussen, Peter. (2002), "Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application", *Hydrological processes*, 16, pp. 2881-2898