

이변량 홍수빈도해석을 이용한 극한홍수사상 평가

Evaluation of Extreme Flood Events Using Bivariate Flood Frequency Analysis

이정호*, 정건희**, 김태웅***
Jeong Ho Lee, Gunhui Chung, Tae-Woong Kim

요 지

홍수사상은 크게 침투홍수량, 홍수용적, 지속기간 등과 같은 서로 상관된 세 가지 요소로 구성되어 있다. 그러나 그동안 홍수의 규모와 크기를 판단하고 예측하기 위하여 수행되어 온 홍수빈도 해석에서는, 서로 상관되어있는 요소들 간의 관계를 고려하지 않은 채 주로 침투홍수량 하나만을 가지고 단변량 빈도 해석을 수행하였다. 이와 같은 단변량 홍수빈도 해석은 특정 홍수의 특성을 종합적으로 표현하는 데 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 홍수빈도 해석에 있어 침투홍수량뿐만 아닌 홍수용적까지도 함께 고려하였다. 소양강댐의 35개년 일유입량 자료를 대상으로 홍수사상을 각각의 강우량 자료와 연계하여 분리한 후 Gumbel 혼합모형을 적용하여 이변량 홍수빈도 해석을 수행함으로써 과거의 극한 홍수사상을 평가·분석하였다. 이변량 빈도해석을 수행하여 홍수사상 요소들 간의 결합분포, 결합 재현기간 등을 추정하였다. 단변량 홍수빈도 해석 결과와 비교함으로써 특정 홍수에 대한 홍수심도를 분석하는 등 극한 홍수사상 평가를 위한 이변량 홍수빈도 해석기법의 적용성에 관하여 검토하였다. 이러한 연구 결과는 기존의 제방 중심 치수사업의 대안으로 제시된 유역종합치수계획에서 선정된 다양한 홍수방어 시설들의 설계 및 운영, 치수효과 평가 등에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 극한홍수평가, 이변량 홍수빈도 해석, Gumbel 혼합모형

1. 서 론

그동안 홍수사상의 빈도해석 및 설계 홍수량의 산정, 홍수심도 평가 등에는 주로 침투홍수량 한 가지에 초점을 맞춘 단변량 홍수빈도 해석법이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 홍수사상은 침투홍수량, 홍수용적, 지속기간 등과 같은 서로 상관된 세 가지의 요소로 구성되어 있으므로, 그 중 한 가지 요소의 데이터만을 이용하는 단변량 홍수빈도 해석법으로는 홍수사상을 구성하고 있는 특성들 간의 다양한 결합 확률적 거동을 파악하는 데 한계가 있다. 예를 들어, 과거 하천 제방 중심의 치수사업에서는 침투홍수량 한 가지 요소만을 가지고 빈도해석을 수행한 후 특정 홍수량에 해당하는 홍수위가 제방의 높이보다 낮으면 안전한 것으로 판단하였기 때문에 단변량 빈도해석법을 적용하는 데 큰 문제가 없었다. 그러나 최근 국내에서 하류부의 홍수량 증가 등 기존의 하천 제방 중심 치수사업에서 발생하는 문제를 해결하기 위한 대안으로 유역종합치수계획이 수립되어지고 있다. 유역종합치수계획에서는 천변저류지나 홍수조절지 등 다양한 홍수 방어시설을 이용하여 해당 유역의 홍수피해 저감을 도모함으로써 침투홍수량 뿐 만 아닌 홍수용적에 대한 고려 또한 필요하다.

본 연구는 이변량 빈도해석법을 이용하여 극한홍수사상의 정량적 평가를 수행하였다. 최근의 이변량 빈도

* 정회원·한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정·E-mail : tarrloss@hanmail.net

** 정회원·고려대학교 방재과학기술연구원 연구교수·E-mail : gunhui@korea.ac.kr

*** 정회원·교신저자·한양대학교 건설환경시스템공학전공 조교수·E-mail : twkim72@hanyang.ac.kr

해석법은 홍수사상 요소들 간의 다양한 결합 확률적 거동을 제시함으로써, 수공 구조물의 계획 및 설계 등에 이변량 빈도해석법이 유용하게 사용될 수 있음을 제시하고 있다(Yue 등, 1999; Yue, 2000). 본 연구에서는 소양강댐의 35개년 일유입량 자료에 대하여 연도별 홍수사상을 분리한 후 첨두홍수량과 홍수량 자료에 대하여 매개변수를 산정하고 결합분포를 도출하였으며, 최종적으로 결합 재현기간을 추정하였다. 또한 추정된 결합 재현기간 결과를 첨두홍수량과 홍수량 자료 각각의 단변량 빈도해석 결과와 비교함으로써, 극한 홍수사상의 심도에 대한 분석과 설계 홍수량 결정에 대한 이변량 빈도해석법의 적용성에 대하여 검토하였다.

2. Gumbel 혼합모형의 적용

2.1 홍수사상 자료의 통계량 및 매개변수 산정

여러 가지 이변량 분포형 중에서 Gumbel 혼합모형은 수문학적 빈도해석에 적용되어 안정적인 설계수문량을 예측하는데 사용되어진 바 있다. Yue 등(1999)은 캐나다 Ashuapmushuan 유역의 33개년 일유량 자료에 대하여 홍수사상을 분리한 후 빈도해석을 수행하였고, 최종적으로 결합 분포와 결합 재현기간, 조건부 재현기간의 추정을 통해 Gumbel 혼합모형의 적용성을 검토하였다. 또한 Yue(2000)는 강우사상의 최대강우강도, 총 강우량, 지속기간 등의 세 가지 홍수사상 요소에 초점을 맞추어 분리된 강우사상 각각의 경험적 확률과 이론적 확률의 일치성을 검토하고, 빈도해석을 수행하여 결합 분포와 결합 재현기간, 조건부 재현기간 등을 추정하여 제시함으로써 강우사상에 대한 Gumbel 혼합모형의 적용성을 검토하였다.

본 연구에서는 소양강댐의 35개년(1974-2008) 일유입량자료를 이용하여 해당 홍수의 지속기간(duration)에 해당하는 일자의 강우량을 고려하여 지속기간을 보정하는 과정을 거쳐 홍수사상을 분리하여 연최대 홍수사상을 선정하고, 그림 1과 같이 정의된 홍수사상 요소를 추출하여 이변량 빈도해석의 대상 자료로 활용하였다. 첨두홍수량(peak flow)과 홍수용적(flood volume)의 조합을 빈도해석 과정의 주요 결합 시나리오로 선정하였고, 그에 따른 통계량 및 매개변수 산정 결과를 표 1에 제시하였다.

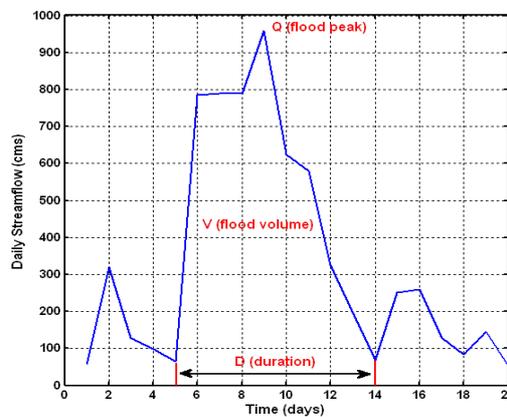


그림 1. 홍수사상 요소

표 1. 홍수사상 자료의 통계량 및 매개변수 산정 결과

	평균	표준편차	위치 매개변수 (u)	축척 매개변수 (λ)	상관계수(ρ)	회합 매개변수 (θ)
첨두홍수량 Q (m ³ /s)	2230	1627	1524	1268		
홍수량 V (m ³ ×10 ⁻⁶)	949	496	734	387	0.64944	0.97651

Gumbel 혼합모형의 결합누적분포함수는 식 (1)과 같이 추정할 수 있다.

$$F_{X,Y}(x,y) = F_X(x)F_Y(y)\exp\left\{-\theta\left[\frac{1}{\ln F_X(x)} + \frac{1}{\ln F_Y(y)}\right]^{-1}\right\}, (0 \leq \theta \leq 1) \quad (1)$$

여기서 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 는 각각 X와 Y의 누적분포함수이다.

$$F_X(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-u_X}{\lambda_X}\right)\right] \quad (2a)$$

$$F_Y(y) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{y-u_Y}{\lambda_Y}\right)\right] \quad (2b)$$

여기서 u_X 와 u_Y 는 각각 X와 Y의 위치모수이고, λ_X 와 λ_Y 는 각각 X와 Y의 척척모수이다.

추정된 결합누적분포함수를 이용하여 결합 재현기간을 식 (3)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$T_{X,Y}(x,y) = \frac{1}{1 - F_{X,Y}(x,y)} \quad (3)$$

2.2 결합분포

분리된 홍수사상 자료에 Gumbel 혼합모형을 적용하여 이변량 홍수빈도 해석을 수행한 결과 추정된 결합 확률밀도함수와 결합 누적분포함수를 그림 2에 나타내었다. 이를 통해 연 최대 홍수사상의 침투홍수량과 홍수용적 간의 확률적 관계를 파악할 수 있었다. 이처럼 이변량 홍수빈도 해석의 결과는 단변량 홍수빈도 해석법에서는 불가능한 침투홍수량과 홍수용적의 다양한 발생 조합을 표현할 수 있고, 이것은 홍수사상의 발생 확률 또는 결합 재현기간 추정의 기본 자료로 활용된다.

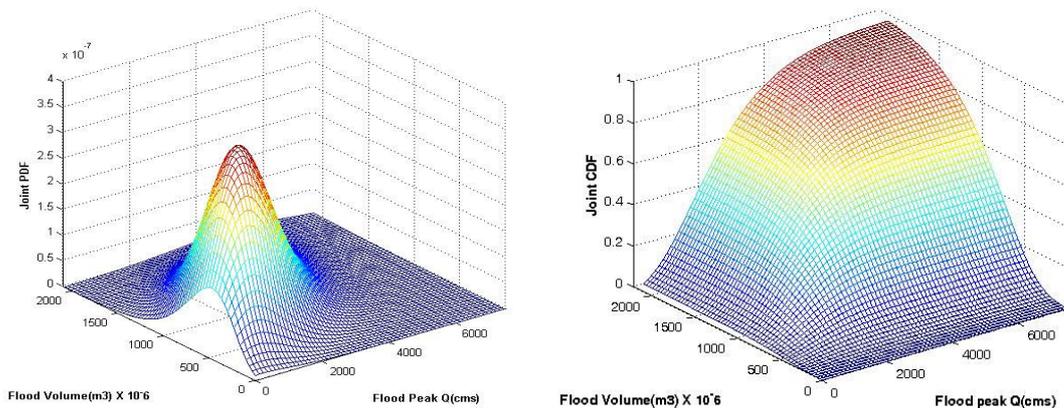


그림 2. 결합 확률밀도함수(JPDF)와 결합 누적분포함수(JCDF)

2.3 결합 재현기간

소양강댐 홍수사상 자료의 연도별 침투홍수량과 홍수량 간 조합에 대응하는 결합 재현기간을 추정된 결과를 표 2에 나타내었다. 단변량 홍수빈도 해석법과의 비교를 위해 국립방재연구소의 FARD2006을 이용하여 동일한 자료에 대해 산정한 단변량 홍수빈도 해석 결과 역시 함께 나타내었다.

2.4 홍수사상 평가

표 2의 결합 재현기간 산정 결과를 바탕으로, 소양강댐의 과거 홍수에 대한 홍수심도를 평가하였다. 재현기간에 의한 홍수심도 평가에 있어 전체적으로 이변량 결합 재현기간 추정 결과가 단변량 해석 결과 중 침투홍수량에 의한 해석 결과와 유사한 양상을 보였다. 그러나 그 중 1984년과 1990년 결과치의 경우 두 빈도 해석법 간 큰 차이를 보였는데, 이는 이변량 홍수빈도 해석 시 침투홍수량과 홍수용적 두 가지 요소가 서로 결합빈도에 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 표 2의 각 요소들 간 상관성을 분석한 결과를 표 3에 제시하

였다. 상관성 분석 결과, 역시 소양강댐과 대청댐 모두 이변량 빈도해석 결과 도출된 결합 재현기간의 결과가 단변량 빈도해석 결과 중 홍수용적보다는 첨두홍수량에 의한 결과와 상대적으로 높은 상관성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

표 2. 이변량 빈도해석 결과 추정된 결합재현기간과 단변량 빈도해석의 재현기간

연도	첨두홍수량 Q (m ³ /s)	홍수량 V(m ³)	단변량 재현기간 및 이변량 결합 재현기간 (year)		
			첨두홍수량 (단변량)	홍수용적 (단변량)	첨두홍수량과 홍수용적 (이변량)
1974	724.3	244010880	1.1037	1.026	1.1804
1975	1994.7	482112000	2.0746	1.168	2.0066
1976	2767.5	969338880	3.8361	2.468	3.197
1977	474.8	433995840	1.0502	1.123	1.1131
1978	2056	1089132480	2.1682	3.192	2.0757
1979	1674.9	587805120	1.6762	1.304	1.6995
1980	941.1	549495360	1.1756	1.248	1.2584
1981	2835.7	1054598400	4.0699	2.958	3.3426
1982	1391.1	774446400	1.426	1.709	1.4913
1983	1084.3	548821440	1.239	1.247	1.3212
1984	7405.6	1989308160	354.44	30.813	103.74
1985	1051.7	358871040	1.2233	1.072	1.3061
1986	1217.3	581264640	1.3107	1.294	1.3887
1987	1481	1910917440	1.4962	25.027	1.5515
1988	1164.5	797558400	1.2806	1.778	1.3608
1989	958	584694720	1.1824	1.299	1.2653
1990	7062.6	1449619200	251.04	7.561	79.28
1991	2443	904288320	2.9226	2.166	2.6043
1992	1361	776736000	1.4041	1.716	1.4723
1993	1232.3	908219520	1.3197	2.183	1.3969
1994	664.9	276013440	1.0884	1.035	1.1624
1995	4029.4	1539492480	12.31	9.497	7.721
1996	2737.4	785712960	3.738	1.742	3.1352
1997	1023.5	730434240	1.2104	1.591	1.2934
1998	1588	1825346880	1.5905	19.965	1.63
1999	4665.3	1340487360	22.9	5.765	12.409
2000	1853.4	807658560	1.8811	1.810	1.8604
2001	1656.8	899009280	1.6576	2.144	1.6846
2002	3449.6	791112960	7.0946	1.758	5.0826
2003	2131	1713234240	2.2914	14.879	2.1653
2004	2810.8	1176258240	3.9827	3.892	3.2885
2005	832.8	483969600	1.1364	1.170	1.217
2006	4212	2060881920	14.692	37.282	8.8357
2007	2774.8	825716160	3.8604	1.869	3.2122
2008	2307.6	977391360	2.6233	2.510	2.3998

표 3. 침투홍수량, 홍수용적, 단변량 재현기간, 이변량 결합 재현기간의 상관성

	침투홍수량	홍수용적	침투홍수량 재현기간 (단변량)	홍수용적 재현기간 (단변량)	결합재현기간 (이변량)
침투홍수량	1	0.649	0.794	0.507	0.824
홍수용적	0.649	1	0.432	0.867	0.453
침투홍수량 재현기간 (단변량)	0.794	0.432	1	0.446	0.998
홍수용적 재현기간 (단변량)	0.507	0.867	0.446	1	0.453
결합재현기간 (이변량)	0.824	0.453	0.998	0.453	1

이처럼 대부분의 경우에는 이변량 홍수빈도 해석의 결과와 침투홍수량에 의한 단변량 홍수빈도 해석 결과 사이에 큰 차이점을 발견할 수 없었다. 그러나 주목할 점은 1984년과 1990년의 경우처럼 이상치로 간주되는 침투홍수량이 발생하였던 해에는 단변량과 이변량 두 빈도해석 결과가 서로 큰 차이를 보였다는 것이다. 두 해에는 이변량 빈도해석 결과 도출된 결합 재현기간 값이 침투홍수량에 의한 단변량 빈도해석 결과 도출된 재현기간 값보다 현저히 작은 수치를 보였다. 이러한 결과는 비록 1984년과 1990년의 침투홍수량이 이상치로 간주되는 가장 큰 수치를 기록하였지만 그 해의 홍수용적은 다른 해의 홍수량 기록과 유사한 범주 이내의 수치를 기록하였기 때문으로, 이는 침투홍수량뿐만이 아닌 홍수용적 또한 고려하는 이변량 홍수빈도 해석의 특성에 의해 도출된 결과이다.

3. 결론

본 연구에서는 단변량 홍수빈도 해석에 의한 홍수심도 평가의 개선을 위해 Gumbel 혼합모형을 이용한 이변량 홍수빈도 해석법을 제안하였다. 연구 결과 이변량 홍수빈도 해석의 결합 재현기간 추정 결과는 단변량 홍수빈도 해석 결과 중 침투홍수량에 의한 해석 결과와 비슷한 양상을 보였으나, 그 중 이상치로 간주되는 큰 침투홍수량이 기록된 해의 두 빈도해석법 간 재현기간 추정 결과는 많은 차이를 보였으며, 이는 이변량 홍수빈도 해석 시 침투홍수량과 함께 고려되었던 홍수용적의 영향에 의한 것으로 판단되었다. 홍수용적이 홍수심도에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구의 결과를 서론에 기술하였던 홍수조절지나 친변저류지 등 홍수용적과 관련된 홍수 방어시설의 설치에 있어서 고려할 수 있을 것이다. 예를 들면, 침투홍수량 만을 기준으로 일률적인 홍수심도 평가를 수행하여 홍수 방어시설 계획 시 과도한 설계홍수량을 추정하기 보다는, 홍수 방어시설 별 특성에 따라 해당 홍수 방어시설에 적합한 이변량 홍수빈도 해석을 통해 홍수심도를 평가함으로써 홍수용적을 함께 고려한 보다 적절하고 경제적인 최적의 설계홍수량을 추정하는 데 본 연구 결과가 도움이 될 수 있을 것이다.

감사의글

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

참고문헌

1. Yue, S., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B., Legendre, P. and Bruneau, P. (1999). The Gumbel mixed model for flood frequency analysis, J.Hydrol, Vol. 226, No. 1-2, pp. 88-100
2. Yue, S. (2000). The Gumbel mixed model applied to storm frequency analysis, Water Resource Management, Vol. 14, pp. 377-389