

이변량 강우 빈도해석을 이용한 서울지역 I-D-F 곡선 유도

Derived I-D-F Curve in Seoul Using Bivariate Precipitation Frequency Analysis

권영문* · 김태웅**
Kwon, Young-Moon · Kim, Tae-Woong

Abstract

Univariate frequency analyses are widely used in practical hydrologic design. However, a storm event is usually characterized by amount, intensity, and duration of the storm. To fully understand these characteristics and to use them appropriately in hydrologic design, a multivariate statistical approach is necessary. This study applied a Gumbel mixed model to a bivariate storm frequency analysis using hourly rainfall data collected for 46 years at the Seoul rainfall gauge station in Korea. This study estimated bivariate return periods of a storm such as joint return periods and conditional return periods based on the estimation of joint cumulative distribution functions of storm characteristics. These information on statistical behaviors of a storm can be of great usefulness in the analysis and assessment of the risk associated with hydrologic design problems.

Keywords : storm characteristics, bivariate frequency analysis, gumbel mixed model, bivariate return period

요 지

단변량 빈도해석법은 수공구조물 설계에 널리 사용되고 있다. 하지만 호우사상은 강우량, 최대강우강도, 강우지속기간과 같은 특성으로 표현되기 때문에 단변량 빈도해석법으로는 그 특성을 종합적으로 표현하는데 한계가 있을 수 있다. 이러한 호우사상의 특성들을 함께 표현해 줄 수 있는 이변량 빈도해석법의 사용이 수공구조물의 설계에 필요하다. 본 연구는 서울 강우관측소의 46개년(1961~2006) 시 강우자료를 Gumbel 혼합모형에 적용하여 빈도해석을 수행하였다. 이변량 강우빈도해석을 통해 결합누적분포함수를 산정한 후, 결합재현기간, 그리고 조건부 재현기간을 산정하였다. 이와 같은 이변량 강우빈도해석은 다양한 호우특성들에 대한 확률적 거동에 대한 예측정보를 제공함으로써 수공구조물의 계획 및 설계 그리고 위험도 평가 등의 문제 해결에 유용하게 사용될 수 있다.

핵심용어 : 호우 특성, 이변량 빈도해석, Gumbel 혼합모형, 이변량 재현기간

1. 서 론

수문현상의 모든 발생 원리를 정량적으로 표현하는 것은 불가능하기 때문에 과거나 미래에 대해 단순히 확정론적인 원리로 설계강우량을 추정하는 것은 불가능하다. 그렇기 때문에 관측된 수문자료에 대해 통계학적 방법을 통해 설계강우량을 추정하게 된다. 통계학적 분석을 위한 수문자료 계열은 전 기간치 계열, 부분 기간치 계열, 극치 계열로 나눌 수 있는데, 설계홍수량의 산정을 위한 설계강우량 추정시에는 극치 계열의 연 최대치 계열을 주로 사용한다(정중호와 윤용남, 2007). 연 최대치 강우자료를 이용한 설계강우량 산정 시 홍수도달시간을 기준으로 임계시간을 설정하고 있다. 이는 수공구조물에 대한 계획 수립 시 홍수도달시간 동안에 발생하는 설계강우량에 대하여 설계빈도에 해당하는 치수 안전도를 갖는다는 것을 의미한다(박상덕, 1995). 그러나 어떤 수공구조물의 치수 안전성에 위협을 초래한 호우들의 특성을

살펴보면 수공구조물의 설계 지속기간보다 큰 강우 지속기간을 갖는 경우가 대부분이기 때문에 홍수 도달시간내의 평균 확률강우보다 작지만 호우 기간이내의 다른 시간대에 발생하는 강우량에 대한 치수 안정성을 알 수 없다(박상덕, 1995).

최근 증가하고 있는 홍수피해의 경감을 위해 수공구조물 설계빈도의 상향 조정 등이 논의되고 있다. 하지만 설계빈도 상향 조정뿐만 아니라, 홍수도달시간에 근거한 임계시간뿐만 아니라 다양한 지속기간에 대한 확률강우량 산정 또한 필요하다. 특히, 호우사상은 강우량, 최대강우강도, 강우지속기간 등과 같은 특성들에 의해 확률적인 거동이 달라질 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

최근 이러한 논의의 접근방법의 하나로써 이변량 빈도해석 모형(이변량 감마분포, 이변량 정규분포, 이변량 대수정규분포, Copula Method, Gumbel 혼합모형 등)을 적용한 여러 연구들이 진행되고 있다(Yue, 2000a; 2000b; 2001a; 2001b;

*한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Email : ymkwon@hanyang.ac.kr)
**정회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경시스템공학전공 조교수 (E-mail : twkim72@hanyang.ac.kr)

Yue와 Rasmussen, 2002; Zhang과 Singh, 2006). 이러한 연구들은 이변량 빈도해석으로 얻을 수 있는 수문특성들 간 다양한 시나리오를 확인함으로써, 수공 구조물의 계획 및 설계에 유용하게 사용할 수 있음을 밝히고 있다. 국내에서는 박상덕(1995)이 강우량과 지속기간의 이변량으로 이변량 정규분포, 이변량 대수정규분포, 이변량 감마분포를 적용한 연구를 수행하여, 지역별 적합한 이변량 분포형을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 서울 강우관측소의 46개년 시 강우자료에 대한 이변량 강우빈도해석법의 적용성을 살펴보고, 설계강우량 산정을 위한 강우강도-지속기간-빈도(Intensity-Duration-Frequency, I-D-F) 곡선을 유도하고자 한다. 이를 통해 수공 구조물의 설계에 필요한 여러 가지 확률적 결합 시나리오를 표현할 수 있는 결합 재현기간과 조건부 재현기간을 산정하여, 단일 호우사상에 대한 확률강우량 산정 및 그에 따른 강우지속기간, 최대강우강도에 대한 설계정보를 제공하고자 한다.

2. Gumbel 혼합모형

여러가지 이변량 분포형 중에서 Gumbel 혼합모형(Gumbel mixed model)은 수문학적 빈도해석에 적용되어 안정적인 설계수문량을 예측하는데 사용되어진 바 있다(Gumbel, 1960; Gumbel과 Mustafi, 1967; Oliveira 1982; Yue 등, 1999; Yue, 2000a). Gumbel 혼합모형의 결합 누적분포함수(joint cumulative distribution function, jcdf)는 다음의 식 (1)과 같다(Gumbel, 1960; Yue 등, 1999; Yue, 2000a).

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

여기서 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 는 각각 X 와 Y 의 주변분포함수(marginal distribution function) 또는 누적분포함수(cumulative distribution function)로써 식 (2)과 같다(Yue, 2000a).

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

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

여기서 u_X 와 u_Y 는 각각 X 와 Y 의 위치모수(location parameter)이고, λ_X 와 λ_Y 는 각각 척도모수(scale parameter)이다.

식 (1)에서 θ 는 X 와 Y 간의 조합을 가능하게 하는 회합

모수(association parameter)이다. 이 회합모수는 식 (3)과 같이 계산되며(Gumbel과 Mustafi, 1967, Oliveria, 1975; 1982), 0에서 1사이의 값을 가진다.

$$\theta = 2\left[1 - \cos\left(\pi\sqrt{\frac{\rho}{6}}\right)\right], (0 \leq \theta \leq 1) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 PPMCC(Pearson's product-moment correlation coefficient)이고, 식 (4)와 같이 계산되어진다.

$$\rho = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X\sigma_Y} \quad (4)$$

만약 $\rho=0$ 일 때, 회합모수 θ 는 0이 된다. 이것은 두 변수 X 와 Y 가 통계적으로 독립임을 의미하고, 결합 누적분포함수는 두 개의 주변분포함수의 곱으로 표현될 수 있다. 만약 $\rho=2/3$ 일 때, 회합모수 θ 는 상한값인 1이 된다. Oliveria (1975, 1982)에 의하면 Gumbel 혼합모형은 상관계수가 $0 \leq \rho \leq 2/3$ 일 때만 적합하게 결합분포를 나타낼 수 있다.

조건부 누적분포함수(conditional cumulative distribution function, ccdf)는 두 가지 경우에 대해서 고려할 수 있다. 첫 번째 경우는 $Y=y$ 인 조건에서의 X 의 조건부 누적분포함수를 구하는 것으로써, ccdf는 식 (5)과 같다(Yue, 2000a). 두 번째 경우는 $Y \leq y$ 인 조건에서의 X 의 조건부 누적분포함수를 구하는 것으로써, ccdf는 식 (6)과 같다.

$$F_{X|Y} = P(X \leq x | Y = y)$$

$$= F_{X,Y}(x|y) \left\{ \exp\left[-\frac{y-u_Y}{\lambda_Y}\right] - \theta \frac{\exp\left[\frac{2(y-u_Y)}{\lambda_Y} + \exp\left(-\frac{y-u_Y}{\lambda_Y}\right)\right]}{\left[\exp\left(\frac{x-u_X}{\lambda_X}\right) + \exp\left(\frac{y-u_Y}{\lambda_Y}\right)\right]^2} \right\} \quad (5)$$

$$F'_{X}(x|y) = P(X \leq x | Y \leq y)$$

$$= F_X(x) \cdot \exp\left\{-\theta\left[\frac{1}{\ln F_X(x)} - \frac{1}{\ln F_Y(y)}\right]^{-1}\right\} \quad (6)$$

수공구조물의 설계에서는 초과확률에 의해 산정된 재현기간이 유용하게 사용되므로, 누적분포함수로부터 재현기간을 산정할 필요가 있다. 여러 가지 확률적 결합시나리오에 해당하는 누적분포함수와 재현기간을 Table 1에 정리하였다. 결합 재현기간 $T_{X,Y}(x,y)$ 는 X 와 Y 두 변수 중 어느 한 변수가 초과하거나 또는 두 변수 모두 초과했을 때의 재현기간을 의미하며, 결합 재현기간 $T'_{X,Y}(x,y)$ 는 두 변수 모두 초과하는 확률에 대한 재현기간을 의미한다. 또한 조건부 재현기간 $T_{X|Y}(x|y)$ 와 $T'_{X|Y}(x|y)$ 는 각각 조건부 누적분포함수

Table 1. Bivariate return period and corresponding cumulative distribution function

	Return Period	Cumulative Distribution Function
Joint	$T_{X,Y} = \frac{1}{1-F_{X,Y}(x,y)}$	$F_{X,Y}(x,y) = P(X \leq x, Y \leq y)$
	$T'_{X,Y}(x,y) = \frac{1}{1-F_X(x)-F_Y(y)+F_{X,Y}(x,y)}$	$F_X(x) = P(X \leq x)$ $F_Y(y) = P(Y \leq y)$
Conditional	$T_{X Y}(x y) = \frac{1}{1-F_{X Y}(x y)}$	$F_{X Y}(x y) = P(X \leq x Y = y)$
	$T'_{X Y}(x y) = \frac{1}{1-F'_{X Y}(x y)}$	$F'_{X Y}(x y) = P(X \leq x Y \leq y)$

Table 2. Annual maximum storm characteristics and joint probabilities

Year	A (mm)	P (mm/hr)	D (hr)	Joint probability (A & P)		(Ob-Th) /Ob(%)	Joint return period (year)	Joint probability (A & D)		(Ob-Th) /Ob(%)	Joint return period (year)
				Observed	Theoretical			Observed	Theoretical		
1973	62.7	15.8	22	0.0121	0.0053	56.4	1.1	0.0121	0.0126	-3.4	1.1
1962	86.9	9.3	28	0.0121	0.0008	93.6	1.1	0.0338	0.0327	3.3	1.3
1994	94.4	14.4	18	0.0338	0.0067	80.2	1.1	0.0121	0.0175	-44.1	1.2
1967	102.1	35	25	0.0772	0.0977	-26.6	2.3	0.0555	0.0358	35.4	1.3
1979	109.1	28.1	40	0.0772	0.0805	-4.3	1.6	0.0989	0.0839	15.2	1.6
1988	111.8	17.6	78	0.0772	0.0201	73.9	1.2	0.1206	0.1426	-18.3	5.0
1974	122	32.4	34	0.1206	0.1271	-5.4	2.0	0.0989	0.0816	17.5	1.5
1985	127.3	18.2	33	0.0989	0.0278	71.8	1.3	0.0989	0.0836	15.5	1.5
1997	130.4	36.1	31	0.1856	0.1652	11.0	2.6	0.0989	0.0783	20.8	1.5
1975	131.6	38.5	20	0.2073	0.1786	13.8	3.0	0.0338	0.0351	-3.7	1.3
2005	132.5	49	25	0.2290	0.2054	10.3	6.4	0.0989	0.0543	45.0	1.4
1980	132.7	18.9	30	0.1206	0.0343	71.6	1.3	0.1422	0.0760	46.5	1.5
1982	143.4	40	61	0.2507	0.2174	13.3	3.4	0.2507	0.2121	15.4	3.0
1983	144.4	58.3	25	0.2940	0.2524	14.2	13.9	0.1206	0.0614	49.1	1.5
2004	146	19	39	0.1422	0.0398	72.0	1.4	0.2507	0.1358	45.8	1.8
1989	148	38.1	35	0.2507	0.2215	11.6	3.0	0.2507	0.1171	53.3	1.7
1986	152.2	19.2	59	0.1639	0.0437	73.4	1.5	0.3157	0.2312	26.8	2.9
1992	161.3	40.5	41	0.3374	0.2726	19.2	3.6	0.3157	0.1706	46.0	1.9
1964	167.5	17.2	137	0.0772	0.0308	60.2	1.6	0.4024	0.3403	15.4	53.8
1968	173.1	28.7	28	0.2290	0.1840	19.7	2.0	0.1639	0.0963	41.3	1.7
1963	176	27.1	56	0.2073	0.1637	21.0	2.0	0.3591	0.2827	21.3	2.8
1981	179	25.6	62	0.2073	0.1433	30.9	1.9	0.4241	0.3155	25.6	3.4
1993	186.5	58.5	61	0.4892	0.4036	17.5	14.9	0.4241	0.3320	21.7	3.4
1971	188.6	49.5	8	0.4675	0.3961	15.3	7.3	0.0121	0.0103	15.5	1.7
1991	190.5	29.9	106	0.2940	0.2289	22.2	2.3	0.5108	0.4198	17.8	15.8
1970	192.8	27.3	23	0.2507	0.1867	25.5	2.2	0.0989	0.0720	27.2	1.9
1969	195.4	32.7	54	0.3591	0.2819	21.5	2.7	0.4024	0.3174	21.1	2.9
1961	214.8	37.4	72	0.4241	0.3889	8.3	3.6	0.5325	0.4526	15.0	5.1
1977	219.7	31.5	64	0.3374	0.3010	10.8	2.9	0.5325	0.4311	19.1	4.1
1976	233.8	42.9	72	0.5542	0.4951	10.7	5.4	0.5759	0.5030	12.7	5.4
1965	238.9	32.9	90	0.4024	0.3559	11.6	3.4	0.6193	0.5654	8.7	9.6
2003	256.5	64.5	52	0.6843	0.6381	6.8	27.0	0.4024	0.4052	-0.7	3.9
1978	259.6	27.4	50	0.2723	0.2453	9.9	3.3	0.4024	0.3878	3.6	3.8
1996	292.6	36	52	0.4675	0.4863	-4.0	5.4	0.4458	0.4416	0.9	5.0
2001	321	38.5	89	0.5759	0.5668	1.6	7.1	0.6843	0.7407	-8.2	12.3
2000	334	43.5	113	0.6626	0.6697	-1.1	9.3	0.7493	0.8042	-7.3	26.5
1984	334.4	46	61	0.6843	0.7047	-3.0	10.4	0.5759	0.5735	0.4	7.6
1987	342.6	61.4	38	0.7927	0.8130	-2.6	25.6	0.3374	0.2762	18.1	6.5
1990	367.5	32.4	36	0.4024	0.4323	-7.4	8.9	0.3374	0.2518	25.4	8.1
2006	384	40.5	97	0.6626	0.6478	2.2	12.2	0.7927	0.8361	-5.5	20.1
1966	387.5	73.3	100	0.8794	0.8844	-0.6	66.9	0.8144	0.8469	-4.0	21.9
1995	429.4	31	110	0.3591	0.3995	-11.3	15.4	0.8578	0.8967	-4.5	33.9
1972	455.8	43.3	47	0.7277	0.7250	0.4	23.6	0.4458	0.4219	5.4	19.6
2002	472	52.5	95	0.8361	0.8569	-2.5	32.9	0.8144	0.8732	-7.2	33.3
1999	549.8	39.1	104	0.6409	0.6416	-0.1	53.4	0.8794	0.9167	-4.2	66.7
1998	580.5	60.5	77	0.9228	0.9306	-0.8	92.7	0.7493	0.7809	-4.2	74.0

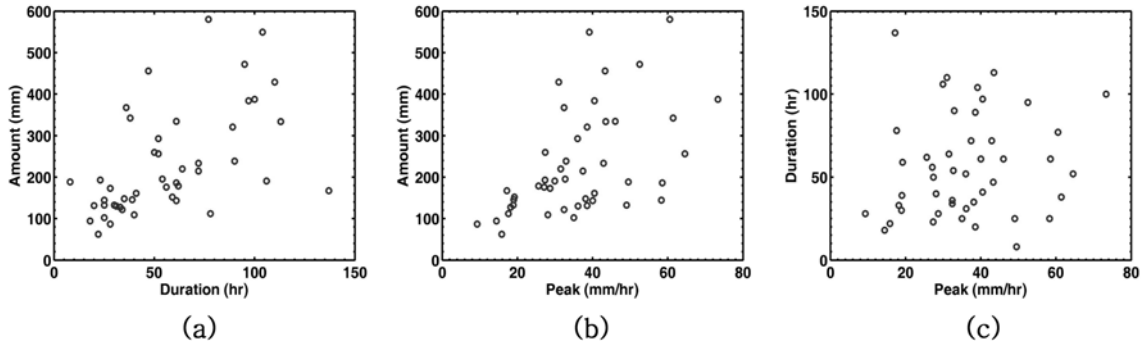


Fig. 1 Scatter plots among storm characteristics (a) Duration and Amount (b) Peak and Amount (c) Peak and Duration

$F_{X|Y}(x|y)$ 와 $F'_{X|Y}(x|y)$ 에 상응하는 재현기간을 의미한다.

3. Gumbel 혼합모형의 적용

본 연구에서는 서울지점 46개년(1961~2006) 시 강우자료 (hourly rainfall)에서 단일호우 분리시간(이동률과 정상만, 1992; 권재호, 2003)을 적용하여 년 최대 호우사상을 추출한 후, 최대강우강도와 강우지속기간을 산정하였다. 이를 기본자료로 하여 Gumbel 혼합모형을 이용한 이변량 빈도해석을 수행하였다.

3.1 호우사상의 특성

본 연구의 호우특성은 강우량(storm amount), 최대강우강도(storm peak), 강우지속기간(storm duration)으로 산정방법은 다음과 같다.

1. 강우량(A) : 단일호우 분리시간으로 결정된 강우사상의 전체 강우의 합, $\sum_{i=1}^D R_i$, 여기서 R_i 는 시강우량.
2. 최대강우강도(P) : 하나의 호우사상에서 가장 큰 강우강도, $\text{Max}(R_i)$
3. 강우지속기간(D) : 단일호우 분리시간을 포함한 하나의 호우사상이 시작하여 끝날 때까지의 시간, $T_{RE}-T_{RS}$, 여기서 T_{RS} 는 호우가 시작되는 시간이고 T_{RE} 는 호우가 끝나는 시간이다.

호우특성은 각각의 단일호우사상에 대하여 산정하므로, 단일 호우사상의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 단일호우 분리시간을 적용하여 호우를 분리하였다. 단일호우 분리시간은 단일 호우사상을 결정할 때, 하나의 호우사상이 발생하고 다음 호우사상이 발생할 때까지의 무강우 시간을 의미한다. 이동률과 정상만(1992)은 Restrepo-Posada와 Eagleson(1982)이 제안한 독립호우 선정방법과 비교 검토하여 한강유역 강

우관측소의 단일호우 분리시간을 제안하였고, 권재호(2003)는 자기회귀 분석, 변동계수 분석, 연 강우 평균발생개수 분석을 통해 단일호우 분리시간을 산정하였다. 두 연구는 모두 10시간을 서울의 단일호우 분리시간으로 산정하였다. 본 연구에서도 두 연구결과를 바탕으로 10시간의 단일호우 분리시간을 적용하였다.

무강우 시간이 단일호우 분리시간보다 작을 경우 관련된 호우사상들은 하나의 호우사상으로 판정하고, 단일호우사상 중 년 최대 호우사상을 추출한 후 년 최대 호우사상을 대상으로 호우특성들을 산정하였다. 산정된 호우특성들은 Table 2의 1-4열에 정리하였다. 이와 같은 호우특성이 이변량 빈도 해석을 위한 기본적인 자료이다.

3.2 모수 산정

Fig. 1과 Table 3은 호우특성 간의 상관성을 파악하기 위한 산포도와 상관계수이다. 지속기간(D)과 최대강우강도(P) 간의 상관계수는 0.14로써 낮은 상관관계를 보이고 있다. 따라서, 본 연구에서는 강우량(A)과 최대강우강도(P)($\rho=0.5226$), 강우량(A)과 지속기간(D)($\rho=0.5484$)이 주요 확률적 결합 시나리오이다. 이는 Olivaria(1975, 1982)가 제안한 Gumbel 혼합모형의 적용기준에도 부합되는 결합시나리오이다.

상관계수(ρ)는 Gumbel 혼합모형의 회합모수 값에 인자로 들어간다. 따라서 모멘트법에 의해 구해진 상관계수(ρ)와 일

Table 3. Correlation coefficients among storm characteristics

Characteristic	Amount	Peak	Duration
Amount	1	-	-
Peak	0.5226	1	-
Duration	0.5485	0.1430	1

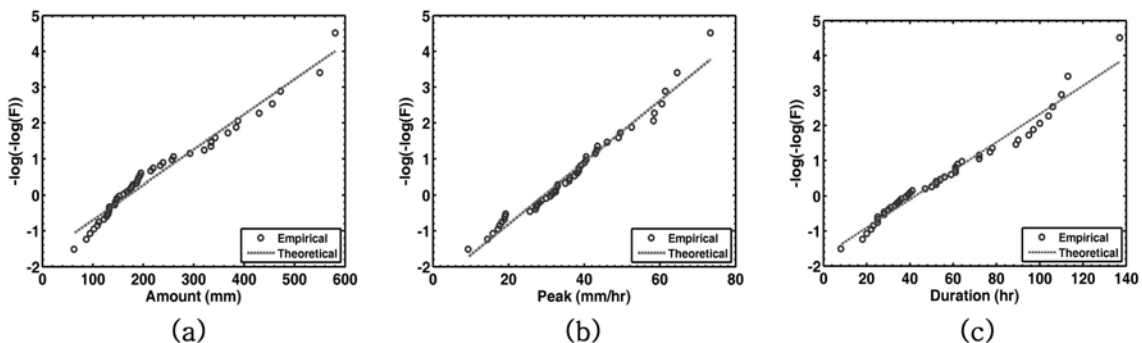


Fig. 2 Empirical and theoretical non-exceedance probabilities (a) Amount (b) Peak (c) Duration

Table 4. Statistics of storm characteristics

	Mean(M)	Standard deviation(S)	Location parameter(u)	Scale parameter(λ)
Amount (mm)	229.62	126.74	172.60	98.82
Peak (mm/hr)	36.08	14.50	29.55	11.31
Duration (hr)	56.48	30.79	42.63	24.01

관성을 유지하기 위해 위치모수(u)와 척도모수(λ) 또한 다음 식 (7)과 같이 산정하였다.

$$\lambda = \frac{\sqrt{6}S}{\pi} \tag{7a}$$

$$u = M - 0.577\lambda \tag{7b}$$

여기서 M 과 S 는 각각 표본자료의 평균과 표준편차이다. 산정된 모수의 Gumbel 분포에 대한 적합성을 알아보기 위하여 각 호우특성별 이론적 확률과 경험적 확률을 Fig. 2에 나타내었고, 각 호우특성의 통계량은 Table 4에 나타내었다. 각 호우특성이 Gumbel 모형에 대해 적합한지의 여부를 검토하기 위하여 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정을 수행하였다. 표본크기가 46이고 유의수준 5%의 한계치는 $D_{46}(0.05) = 0.197$ 이다. 각 호우특성별 D_{max} 는 강우량이 0.131, 최대강우강도가 0.107, 지속시간이 0.088로써, Gumbel 분포에 대한 적합성을 확인할 수 있다.

3.3 경험적 확률

경험적 결합확률은 Gringorten 공식(Gringorten, 1963)에 기초를 두고 있는 식 (8)과 같이 계산할 수 있다(Yue *et al.*, 1999; Yue 2000a).

$$P_{ml} = P(X \leq x_m, Y \leq y_l) = \frac{n_{ml} - 0.44}{N + 0.12} \tag{8}$$

여기서 N 은 표본자료의 관측횟수이고, n_{ml} 은 x_m 와 y_l 을 초과하지 않는 결합 발생 빈도이다. 경험적 확률과 Gumbel 혼합모형을 이용한 이론적 확률의 비교는 Table 2의 7열과 11열, 그리고 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3은 식 (1)에서 구한 이론적 확률과 식 (8)에서 구한 경험적 확률의 비교를 나타낸 것으로 구해진 경험적 확률과 이론적 확률을 이론적 확률을 기준으로 오름차순 정렬한 것과 두 확률의 차이를 도시하였다. Table 2는 강우량을 기준으로 오름차순 정렬한 표본자료와 경험적, 이론적 비초과확률을 비교한 자료이다. 연도별 최대 강우량(A)과 그에 따르는 최대강우강도(P), 강우지속시간(D)의 자료를 2열의 강우량(A)을 기준으로 오름차순 정렬한 것이다. 5, 6열은 강우량과 최대강우강도($A \& P$) 간의 경험적 확률과 이론적 확률을 나타낸 것이고, 7열은 이 두 확률간의 차이를 백분율로 나타내었다. 8열은 강우량(A)과 최대강우강도(P)의 조합에 대한 재현기간을 나타내었다. 같은 방법으로 강우량과 강우지속시간($A \& D$)에 대한 결과를 Table 2의 9, 10, 11열에 나타내었다.

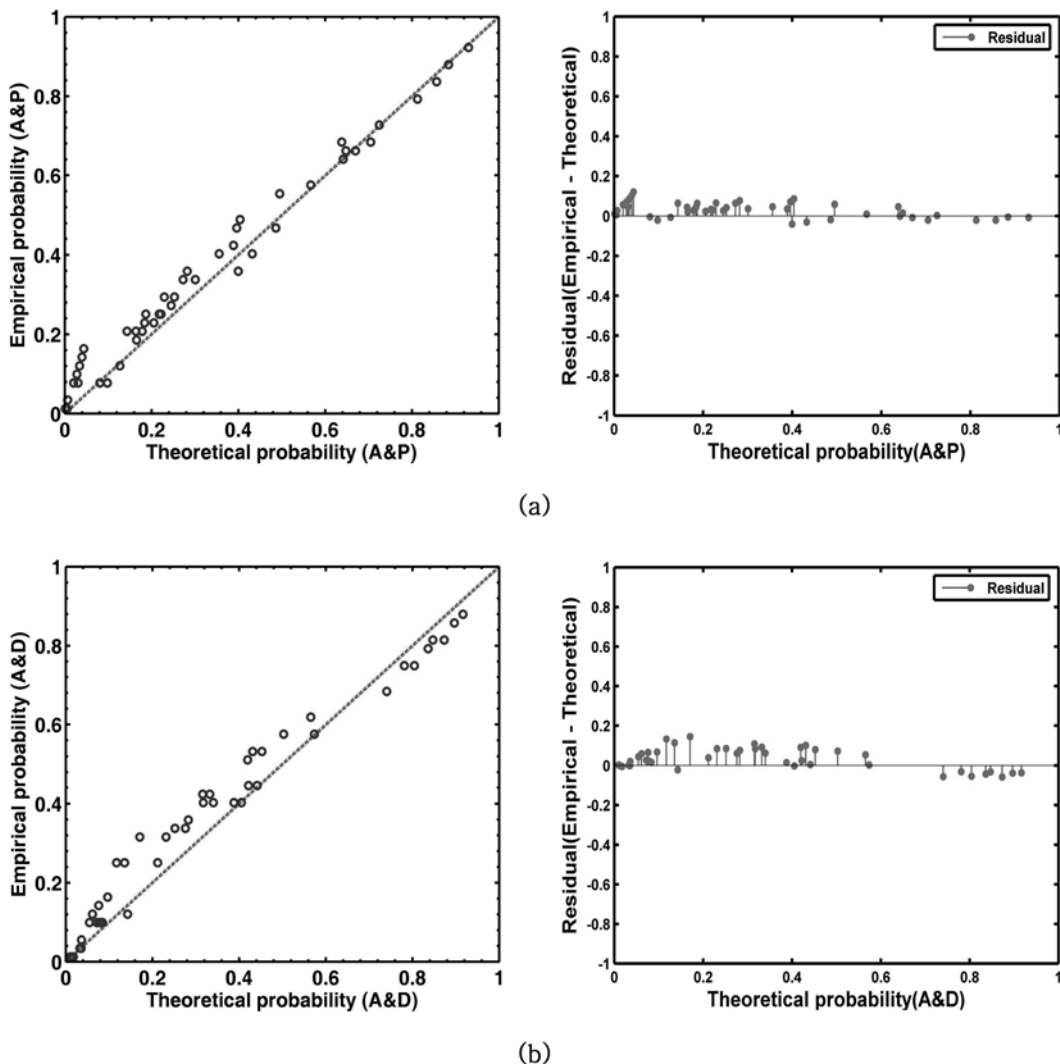


Fig. 3 Comparison between empirical and theoretical joint probabilities (a) Amount and Peak (b) Amount and Duration

모형의 적합도 검정을 위해 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정을 수행하였다. 이 방법은 관측된 자료의 누적상도와 이론적인 누적확률밀도함수의 차이를 구해 그 중 최대로 나타나는 차이를 한계치와 비교하여 판단하는 것이다. 유의수준 5%의 K-S 검정 한계치는 $D_{46}(0.05)=0.197$ 이다. 강우량과 최대강우강도(A&P)의 경험적 확률과 이론적 확률의 최대 차는 0.120이고, 강우량과 강우지속기간(A&D)의 경험적 확률과 이론적 확률의 최대 차는 0.145이다. 두 경우 모두 확률 간 최대 차이가 한계치보다 작으므로, Gumbel 혼합모형의 사용은 유용하다 할 수 있다.

3.4 결합분포

3.4.1 결합 누적분포함수(joint cumulative distribution function)

먼저 식 (3), (4), 그리고 (7)를 이용하여 모수를 계산한 후, 식 (1)과 (2)를 이용하여 결합 누적분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 를 추정하여 이를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)는 강우량과 최대강우강도의 결합 비초과확률($F_{A,P}(a,p)$)을 나타내는 것으로 결합 재현기간의 기본자료로서 활용된다. 또한 강우량과 강우지속기간의 결합 누적분포함수($F_{A,D}(a,d)$)는 Fig. 4(b)에 나타내었다.

3.4.2 결합 재현기간 (joint return period)

$X > x$ 그리고 $Y > y$ 의 조건을 만족하는 결합 재현기간

($T'_{X,Y}(x,y)$)은 Table 1과 같이 산정할 수 있다. Fig. 5(a)는 강우량과 최대강우강도의 결합 재현기간($T'_{A,P}(a,p)$)이다. 이를 통해 각각의 재현기간별 확률강우량(A) 및 그에 따르는 단위 시간당 최대강우강도(P)의 정보를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5(b)에서는 강우량과 강우지속기간의 결합 재현기간($T'_{A,D}(a,d)$)으로 확률강우량(A)과 그에 따른 강우지속기간(D) 간의 관계를 확인할 수 있다. 예를 들어, 지속기간 50시간의 10년, 20년, 40년, 60년, 100년 빈도의 강우량은 각각 380 mm, 460 mm, 540 mm, 570 mm, 620 mm 정도임을 Fig. 5(b)에서 파악할 수 있다. 단변량 강우빈도해석을 통해 이러한 정보를 파악하기 위해서는, 자료 구축에서부터 빈도 해석까지 반복적으로 수행해야 한다.

또한 각 강우특성별 단변량 재현기간을 Fig. 5에 함께 표시하였다. Fig. 5에 도시된 바와 같이 이변량 빈도해석에 의한 재현기간이 단변량 빈도해석에 비해 더 크게 산정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 하나의 변량에 대한 다른 변량의 변화는 결합빈도에 영향을 주기 때문이다. 두 변량 중 하나의 변량을 무시할 경우의 재현기간은 단변량과 이변량 해석방법이 일치하나 하나의 변량을 고정하고 다른 하나의 변량을 증가시켰을 때는 재현기간이 증가하게 된다. 이를 통해 여러 가지 강우 패턴의 시나리오에 대한 분석이 가능하다. 또한 결합재현기간에 의해 홍수 도달시간에 근거한 임의시간의 확률강우량 산정 및 최대 강우사상에 근거한 확률 강우량 산정으로 고려할 수 없었던 사상별 강우량-최대강우

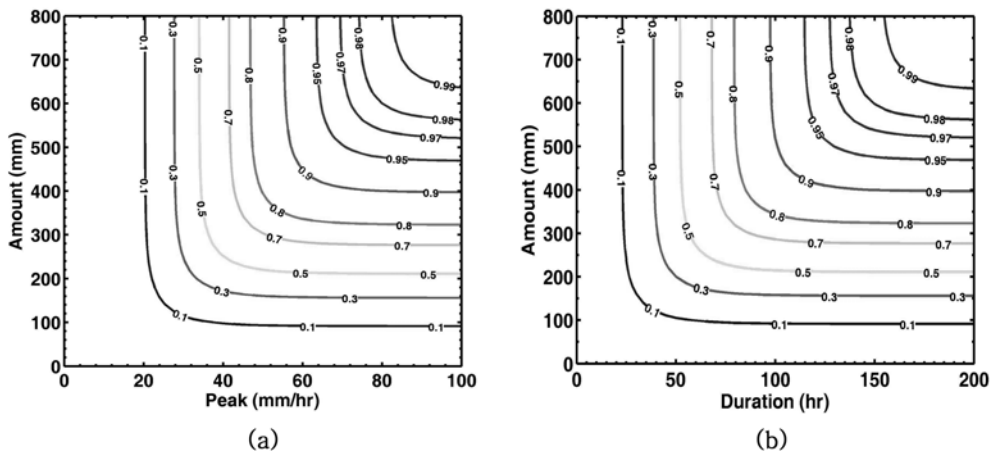


Fig. 4 Joint cumulative distribution function (a) Amount and Peak (b) Amount and Duration

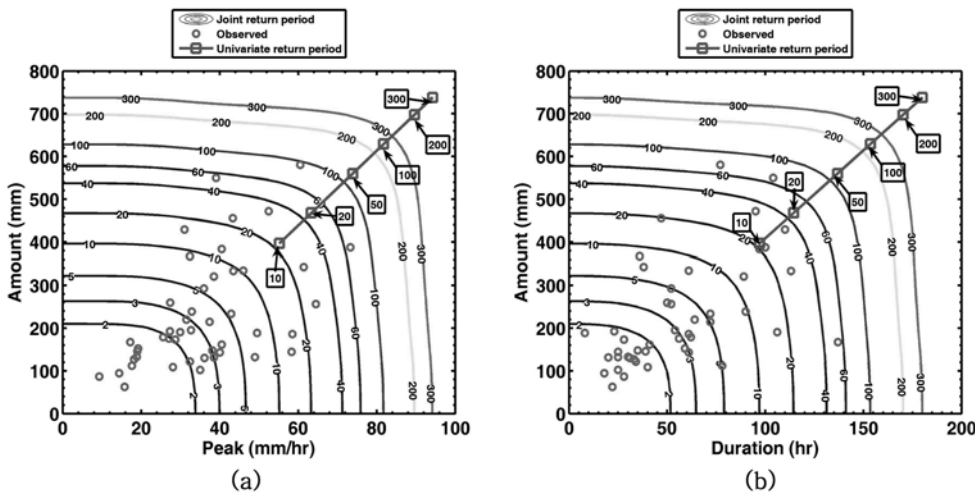


Fig. 5 Joint return period (a) Amount and Peak (b) Amount and Duration

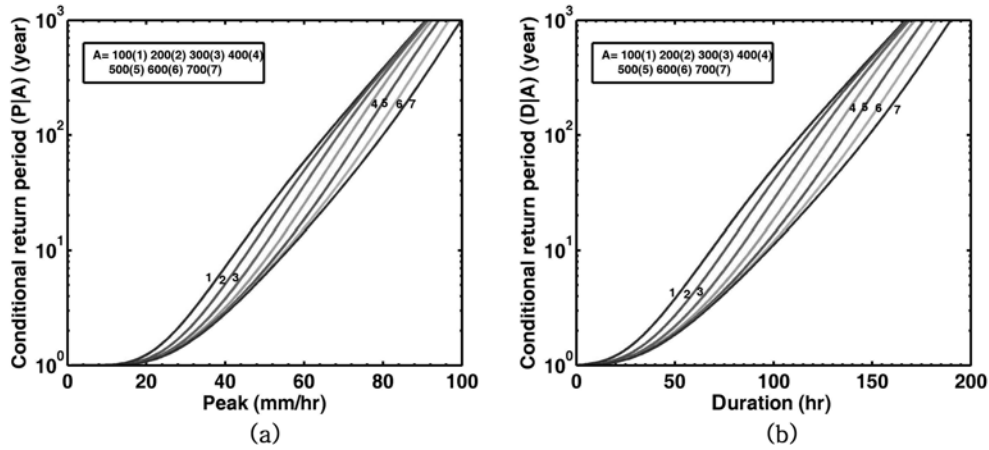


Fig. 6 Conditional return period (a) Peak given Amount (b) Duration given Amount

강도, 강우량-지속시간에 관한 정보를 확인할 수 있다.

3.4.3 조건부 재현기간(conditional return period)

$Y \leq y$ 로 주어졌을 때, X 의 조건부 재현기간 $T_{X|Y}(x|y)$ 는 Table 1과 같이 산정하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 5에서 각각의 재현기간별 확률강우량과 최대강우강도 및 지속시간의 변화를 파악할 수 있었다면, Fig. 6에서는 강우량별 최대강우강도(P)와 지속시간(D)의 변화에 따르는 재현기간을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

이번 연구를 통해서 다양한 확률적 결합시나리오에 의한 결합 재현기간과 조건부 재현기간을 산정하였다. $T_{X,Y}(x,y)$ 의 경우 변량 X 와 Y 중 하나의 변량만 초과해도 되는 재현기간이고, $T_{X,Y}(x,y)$ 는 두 변량 모두 초과하는 재현기간을 의미한다. 또한 $T_{X|Y}(x|y)$ 는 주어지는 조건이 $Y=y$ 로 고정되었을 때 X 가 초과하는 재현기간을 의미하고, $T_{Y|X}(y|x)$ 는 $Y \leq y$ 일 때 X 가 초과하는 재현기간을 의미한다. 따라서 수공구조물 설계에 있어서, 결합형 및 조건형 모두 $T_{X,Y}(x,y)$ 와 $T_{X|Y}(x|y)$ 가 적절한 초과확률을 산정하게 되므로 더 유용하게 적용될 수 있다.

이러한 호우사상에 의한 확률강우량 산정은 유역별 호우의 특성을 잘 나타낼 수 있어 설계기본자료로써 활용할 수 있다. 홍수도달시간에 근거한 임계시간을 이용한 일반적인 확률강우량 산정에서 설계빈도의 조정으로 홍수피해를 경감할 수도 있지만, 호우사상에 의한 확률강우량 산정과 호우 특성을 활용한 이변량 빈도해석에 의한 호우특성의 확률적 거동을 파악하는 것 또한 중요하다. 또한 호우사상 결정시 단일 호우 분리시간에 따라 강우량의 변화가 클 수 있기 때문에 적절한 지역별 단일호우 분리시간을 선택할 수 있는 기준에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

본 연구결과에 의한 최대강우강도, 강우지속시간, 그리고 재현기간과의 확률적 관계는 수공구조물의 계획 및 설계 시 기존의 홍수도달시간에 근거한 임의시간에 의한 확률강우량보다 풍부한 기본자료로 활용되어, 대규모 다목적 댐과 같은 고도의 치수안전도와 수자원의 최대한 확보를 동시에 만족하여야 할 수문계획, 또는 수공구조물의 치수기능 상실 시 많은

인명 및 재산 피해가 예상되는 대도시 내배수 처리 시설 등의 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

- 권재호(2003) 비점오염원 산정을 위한 강우분석, 석사학위논문, 고려대학교.
- 박상덕(1995) 매년최대 연속 강우량에 따른 강우사상 계열의 확률분포에 관한 연구. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제2호, pp. 145-154.
- 이동률, 정상만(1992) 한강유역 강우의 시·공간적 특성, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제25권, 제4호, pp. 75-85.
- 정중호, 윤용남(2007) 수자원설계실무. 구미서관.
- Gringorten, I.I. (1963) A plotting rule for extreme probability paper. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, No. 3, pp. 813-814.
- Gumbel, E.J. (1960) Multivariate extremal distributions. *Bull. Inst. Internat. De Statistique*, Vol. 37, No. 2, pp. 471-475.
- Gumbel, E.J. and Mustafi, C.K. (1967) Some analytical properties of bivariate extreme distributions. *J. Am. Stat. Assoc.*, Vol. 62, pp. 569-588.
- Oliveria, J.T.D. (1975) Bivariate extremes: Extensions. *Bull. of the Inter. Statistical Inst.*, Vol. 46, No. 2, pp. 241-251.
- Oliveria, J.T.D. (1982) *Bivariate Extremes: Models and Statistical Decision*. Tech. Report no. 14, Center for Stochastic Processes, Dept. of Statistics, University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, U.S.A.
- Rstrepo-Posada P.J. and Eagleson P.S. (1982) Identification of independent rainstorms. *J. Hydr.*, Vol. 55, pp. 303-319.
- Yue, S., Ouarda, T.B.M.J., Bobe, B., Legendre, P., and Bruneau, P. (1999) The gumbel mixed model for flood frequency analysis. *J. Hydr.*, Vol. 226, No. 1-2, pp. 88-100.
- Yue, S. (2000a) The gumbel mixed model applied to storm frequency analysis. *Water Resource Management*, Vol. 14, pp. 377-389.
- Yue, S. (2000b) Joint probability distribution of annual maximum storm peaks and amounts as represented by daily rainfalls. *Hydrological Science J.*, Vol. 45, No. 2, pp. 315-326.
- Yue, S. (2001a) A bivariate gamma distribution for use in multivariate flood frequency analysis. *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp.

1033-1045.

Yue, S. (2001b) The gumbel logistic model for representing a multivariate storm event. *Advances in Water Resources.*, Vol. 24, pp. 179-185.

Yue, S. and Rasmussen, P. (2002) Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application.

Hydrol Process., Vol. 16, pp. 2881-2898.

Zhang, L. and Singh, V.P. (2006) Bivariate flood frequency analysis using the copula method. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 11, No. 2, pp. 150-164.

(접수일: 2008.12.15/심사일: 2009.1.19/심사완료일: 2009.1.30)