

## Wakeby 및 Kappa 분포의 L-모멘트법에 의한 홍수빈도분석

### Flood Frequency Analysis by Wakeby and Kappa Distributions Using L-Moments

맹 승 진\* · 이 순 혁\* · 이 현 규\* · 류 경 식\*\* · 송 기 현\*\*\*

Maeng, Seung-Jin · Lee, Soon-Hyuk · Lee, Hyeon-Gyu · Ryoo, Kyong-Sik · Song, Gi-Heon

#### Abstract

The objective of this study is to induce the design floods by the methodology of L-moment including test of homogeneity, independence and outlier of the data of annual maximum flood flows for 12 water level gaging stations of South Korea. To select appropriate distribution of the data for annual maximum flood flows, the distributions of Wakeby and Kappa are applied and the appropriateness is judged by Kolmogorov-Smirnov (K-S) test. The parameters of selected Wakeby and Kappa distributions are calculated by the method of L-moment and the design floods are induced. Through the comparative analysis using the relative root mean square errors (RRMSE) and relative absolute errors (RAE) of design floods, the result shows that the design floods by Wakeby distribution are closer to the observed data than those obtained by the Kappa distribution.

*Keywords : Annual maximum flood, L-moment, Wakeby distribution, Kappa distribution, At-site frequency analysis, Design floods, Probability plotting position*

#### I. 서 론

우리나라는 평야부가 적고 거의 대부분이 급준한 산지에다가 연평균강우량 1,283 mm가 여름철에

집중되는 기상특성으로 하천유황의 계절적인 진폭이 심하여 수해를 받기 쉬운 자연적 조건을 갖고 있으며 이로 인한 인명피해는 물론 재산상의 피해가 반복적으로 일어나고 있는 실정이다.

이러한 예로서, 1997년에 경기도 북부인 문산천과 차탄천의 집중호우로 인해 댐과 하천에 인접한 농어촌과 하류부의 문산읍이 댐과 제방의 붕괴 및 범람으로 대규모 침수피해와 함께 귀중한 인명과 재산상의 피해를 받게 되었다. 1998년 8월 경기북부지역을 시작으로 전국에 걸친 호우로 우리나라의

\* 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과

\*\* 한국수자원공사 수자원연구원

\*\*\* 한국농촌공사 충북본부

\* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2576

Fax: +82-43-271-5922

E-mail address: maeng@chungbuk.ac.kr

다목적 댐 중 합천 및 남강댐을 제외한 전 댐에서 수문방류를 실시하게 되는 초유의 상황이 발생하였다. 특히, 2002년 8월 31일에서 9월 1일 사이에 발생한 1일 호우량 900 mm에 육박하는 태풍 '루사'에 의해 경북 김천시, 충북 영동 및 강원도 강릉시의 막대한 재산과 인명의 피해는 사상 유례없는 대 재난이었다. 이듬해인 2003년 9월에는 태풍 '매미'가 우리나라의 남해안 지역에 상륙하여 사망 및 실종자가 131명에 달하였으며 61,844명의 이재민과 4조2,225억원의 재산피해를 안겨 주었다. 이와 같은 홍수재해를 저감하고 방지하기 위해서는 수리구조물의 설계, 운영, 관리 및 개·보수가 철저히 필요하다. 이러한 것을 해결하기 위해서는 신빙성 있는 설계홍수량의 제시가 우선시 되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 수공구조물이나 하천의 치수계획, 수자원의 이용 및 관리를 위한 빈도별 홍수량의 크기 등을 결정하는데 있어서 수문분석에 기초가 되는 신뢰도 높은 유출량자료를 장기간으로 가지고 있는 우리나라 5대강 수계의 주요 지점들을 선정하여 확률분포의 매개변수를 관행의 모멘트법과 최우법보다 신빙성이 있는 L-모멘트법에 의해 Wakeby 및 Kappa 분포의 매개변수를 추정하여 설계홍수량을 유도하고자 한다. 또한, Wakeby 및 Kappa 분포에서 L-모멘트법에 의한 설계홍수량과 플로팅 포지션법을 달리한 설계홍수량과의 비교 분석을 수행하여 적절한 설계홍수량을 추정함으로써 홍수시 각종 수리구조물의 붕괴위험도를 낮추고 중앙정부와 지방자치단체의 홍수에 의한 재해영향평가 등에 활용할 수 있도록 하고자 한다.

## II. 이론적 특성분석

본 연구에서 우리나라의 주요 지점별 설계홍수량 추정을 위해 적용한 분포는 Wakeby 및 Kappa이다. Wakeby 및 Kappa 분포의 매개변수 추정방법인 확률가중모멘트와 L-모멘트의 관계는 각각 Hosking(1986, 1996, 1997), Maidment(1993),

Lee(2000) 등, Lee 와 Maeng(2003) 및 WMO(1989)와 Hosking(1994, 1996, 1997) 및 Oh(2001)에 의해 언급되었다. 따라서, L-모멘트법에 의한 적용 분포의 매개변수 추정식을 정리하면 다음과 같다.

### 1. Wakeby 분포

Wakeby 분포는 식 (1)과 같은 역함수 형태로 정의된다.

$$x = \xi + \frac{\alpha}{\beta} \{1 - (1 - F)^{\beta}\} - \frac{\gamma}{\delta} \{1 - (1 - F)^{-\delta}\} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $F$ 는 누가분포함수로서,  $F = P[X \leq x]$ 로 표시되며 Wakeby 분포의 매개변수인  $\xi, \alpha/\beta, \beta, \gamma/\delta, \delta$ 를 각각  $m, a, b, c, d$ 로 표시하기로 한다. 위치매개변수  $m$ 이 0이면 4개의 매개변수를 갖는 Wakeby 분포이며,  $m \neq 0$  이면 5개의 매개변수를 갖는 Wakeby 분포이다. 또한 매개변수  $b$ 는 분포의 왼쪽 꼬리부분인 극소치 자료를 제어하고, 매개변수  $d$ 는 분포의 오른쪽 꼬리부분인 극대치 자료를 제어한다.

Wakeby 분포의 PWM에 의한 매개변수 추정은 다음 식 (2)~식 (13)로 주어진다.

$$a = \frac{(b+1)(b+2)}{b(b+d)} \left\{ \frac{\{1\}}{2+b} - \frac{\{0\}}{1+b} - m \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$b = \max[b_1, b_2] \dots\dots\dots (3)$$

$$c = \frac{(1-d)(2-d)}{d(b+d)} \left\{ \frac{\{0\}}{1-d} - \frac{\{1\}}{2-d} + m \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$d = \frac{(N_1 + bN_2)}{(N_2 + bN_3)} \dots\dots\dots (5)$$

$$m = \frac{[\{3\}] - \{2\} - \{1\} + \{0\}}{4} \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $\{k\} = (k+1)(k+1+b)(k+1-d)\beta'_k$ ,  $k=0, 1, 2, 3$ 이고  $b_1, b_2$  및  $H$ 는 식 (7)~식 (9)와 같다.

$$b_1 = \frac{(N_3C_1 - N_1C_3) + H}{2(N_2C_3 - N_3C_2)} \dots\dots\dots(7)$$

$$b_2 = \frac{(N_3C_1 - N_1C_3) - H}{2(N_2C_3 - N_3C_2)} \dots\dots\dots(8)$$

$$H = [(N_1C_3 - N_3C_1)^2 - 4(N_1C_2 - N_2C_1)(N_2C_3 - N_3C_2)]^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

또한  $\widehat{m} \neq 0$ 으로 5개의 매개변수를 갖는 경우에는 식 (10) 및 식 (11)에 의해  $N$ 과  $C$ 의 값을 구한다.

$$N_{4-j} = (4)^j \beta'_3 - (3)^{1+j} \beta'_2 + 3(2)^j \beta'_1 - \beta'_0, \quad j=1, 2, 3 \quad (10)$$

$$C_{4-j} = (5)^j \beta'_4 - 3(4)^j \beta'_3 + (3)^{1+j} \beta'_2 - (2)^j \beta'_1, \quad j=1, 2, 3 \quad \dots\dots(11)$$

여기서  $\beta'_s$ 는 확률가중모멘트로서 기본식은 (12)와 같다.

$$\beta'_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j^s \frac{(N-j)!(N-s-1)!}{(N-j-s)!(N-1)!}, \quad s \geq 0 \quad (12)$$

여기서  $N$ 은 자료의 개수이다.

$$r\beta_{r-1} = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{k} \left[ 1 - \frac{r\Gamma(1+k)\Gamma(r/h)}{h^{1+k}\Gamma(1+k+r/h)} \right] & \text{if } h > 0, k > -1, \\ \xi + \frac{\alpha}{k} [1 - r^{-k}\Gamma(1+k)] & \text{if } h = 0, k > -1, \\ \xi + \frac{\alpha}{k} \left[ 1 - \frac{r\Gamma(1+k)\Gamma(-k-r/h)}{(-h)^{1+k}\Gamma(1-r/h)} \right] & \text{if } h < 0, -1 < k < 1/h. \end{cases} \dots\dots\dots(18)$$

$$r\beta_{r-1} = \begin{cases} \xi + \alpha[\gamma + \log h + \psi(1+r/h)] & \text{if } h > 0, \\ \xi + \alpha(\gamma + \log r) & \text{if } h = 0, \\ \xi + \alpha[\gamma + \log(-h) + \psi(-r/h)] & \text{if } h < 0. \end{cases} \dots\dots\dots(19)$$

한편  $\widehat{m} = 0$ 으로 4개의 매개변수를 갖는 경우에는 식 (13) 및 식 (14)에 의해  $N$ 과  $C$ 의 값을 구한다.

$$N_{4-j} = -(3)^j \beta'_2 + (2)^{1+j} \beta'_1 - \beta'_0, \quad j=1, 2, 3 \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$C_{4-j} = [- (4)^j \beta'_3 + 2(3)^j \beta'_2 - (2)^j \beta'_1] / 2, \quad j=1, 2, 3 \quad \dots\dots\dots(14)$$

## 2. Kappa 분포

Kappa 분포의 누가밀도함수와 확률밀도함수는 각각 식 (15) 및 (16)과 같이 주어진다(Hosking, 1994; Oh, 2001).

$$F(x) = \left\{ 1 - h \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \xi) \right]^{1/k} \right\}^{1/h} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \xi) \right]^{(1/k)-1} [F(x)]^{1-h} \quad (16)$$

여기서  $\xi$ 는 위치 매개변수,  $\alpha$ 는 척도 매개변수,  $k$ 와  $h$ 는 형상 매개변수이다. Kappa 분포의 확률가중모멘트는 식 (17)과 같이 표현된다(Hosking, 1994; Oh, 2001).

$$\beta_r = \frac{1}{(r+1)} \left( \xi + \frac{\alpha}{k} \right) - \frac{\alpha}{k} \int_0^1 \left[ \frac{1}{h} (1 - F^h) \right]^k F^r dF \quad \dots\dots\dots(17)$$

식 (17)에서  $k \neq 0$ 면 확률가중모멘트는 식 (18)과 같고  $k = 0$ 이며 식 (19)와 같다.

여기서  $\gamma=0.5772$ 로서 Euler 상수이며,  $\psi(x) = d[\log \Gamma(x)]/dx$  이다.

Kappa 분포의 매개변수는 확률가중모멘트와 L-모멘트의 관계를 나타내는 다음의 식 (20)에 의해 추정된다.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \beta_0, \\ \lambda_2 &= 2\beta_1 - \beta_0, \dots\dots\dots (20) \\ \lambda_3 &= 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0, \\ \lambda_4 &= 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0. \end{aligned}$$

### III. 강우자료 및 분석방법

#### 1. 기본수문자료와 유역특성

본 분석에 사용된 대상유역은 한강수계의 여주, 영월, 주천, 홍천, 낙동강수계의 진동, 왜관, 금강수계의 규암, 공주, 섬진강수계의 송정, 압록, 적성, 영산강수계의 남평의 12개 유역을 선정하였으며 설계홍수량 유도를 위해 연최대홍수량 자료를 구성하였다. 대상유역별 연최고수위와 수위-유량 곡선식은 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 자료를 활용하였다(MOCT, 2000).

#### 2. 분석방법

가. L-모멘트법에 의해 유도된 매개변수를 사용하여 설계홍수량을 산정하는데 기본적으로 필요한 연최대홍수량 자료의 통계치로서 평균치, 표준편차, 왜곡도계수 및 변동계수를 각 유역별로 구한다.

나. 대상유역별 연최대홍수량 자료의 독립성 및 동질성을 검정한다.

다. 대상유역별 연최대홍수량 자료의 Outlier 검정을 실시함으로써 자료 분석 여부를 판정한다.

라. 확률가중모멘트의 선형조합인 L-모멘트의 비로서 L-변동계수, L-왜곡도 및 L-첨예도를 구한다.

마. 대상유역별로 L-모멘트법에 따른 Wakeby

분포 및 Kappa 분포에 대한 적합도 검정을 위해 비매개변수 방법인 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정에 의해 적합도를 판정한다.

바. L-모멘트법에 따른 Wakeby 분포와 Kappa 분포의 매개변수를 산정한다.

사. L-모멘트법에 따른 Wakeby 분포와 Kappa 분포에 의해 유도된 설계홍수량을 비교 분석한다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 사용수문자료의 기본통계치 분석

여주, 영월, 주천, 홍천, 진동, 왜관, 규암, 공주, 송정, 압록, 적성 및 남평유역에 대한 평균치, 표준편차, 왜곡도계수, 변동계수 및 첨예도의 기본통계치를 각 유역별로 구한 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 보는 바와 같이 전 유역에 걸쳐 평균치와 표준편차는 각각 422.5~6,251.4 및 216.8~5,549.2의 범위를, 왜곡도계수와 변동계수는 각각 -0.117~3.291 및 0.409~0.993의 범위를 그리고 첨예도는 1.952~17.865의 범위를 나타내었다.

### 2. 연최대홍수량의 독립성, 동질성 및 Outlier 검정

대상유역별 연최대홍수량의 독립성 및 동질성 검정을 각각 Wald-Wolfowitz test 및 Mann-Whitney test에 의해 실시한 결과는 Table 2와 같다.

일련의 수문자료계열에서 자료의 일반적인 균형 분포의 상태에서 훨씬 위 또는 아래로 격리되는 Data Point를 나타내는 Outlier의 유발로 인해 부적절한 통계학적 매개변수의 유도로서 설계수문량의 제시에 불확실성을 초래하게 된다. 이에 본 분석에서는 Grubbs-Beck에 의한 검정방법을 사용하여 Outlier의 유무를 검정하였다(Bobee, 1991). 본 분석에 적용된 유역의 연최대홍수량자료에 대한 검정 결과는 Table 3과 같고 이들의 결과를 표본

Table 1 Basic statistics

River	Station	Duration of observed data	Mean ( $\bar{x}$ ) ( $m^3/s$ )	Standard deviation (S)	Coefficient of skewness ( $C_S$ )	Coefficient of variation ( $C_V$ )	Coefficient of kurtosis ( $C_K$ )
Han	Yeoju	1956-2003	5,570.5	5,549.2	3.291	0.962	17.865
	Yeongwol	1977-2003	2,140.8	1,643.0	1.657	0.768	5.329
	Jucheon	1965-2003	913.3	907.2	1.655	0.993	5.119
	Hongcheon	1967-2003	816.9	787.0	2.123	0.963	7.882
Nakdong	Jindong	1966-2003	6,251.4	2,558.1	0.287	0.409	3.244
	Waegwan	1966-2003	3,947.6	1,981.3	0.732	0.502	3.411
Geum	Gyuam	1966-2003	3,185.1	1,856.2	1.593	0.583	6.644
	Gongju	1966-2003	2,398.3	1,517.6	0.647	0.633	2.833
Seomjin	Songjeong	1963-2003	2,307.2	1,382.4	0.557	0.599	2.761
	Amnok	1965-2003	1,513.8	730.1	-0.117	0.482	1.952
	Jeokseong	1973-2003	714.4	415.6	0.634	0.582	2.842
Yeongsan	Nampyeong	1963-2002	422.5	216.8	1.110	0.513	4.260

Table 2 Independence and homogeneity tests of observed flows

River	Station	Wald-Wolfowitz's test for Independence			Mann-Whitney's test for Homogeneity		
		$u$	$u_{\alpha/2}$	Test	$Z$	$Z_{\alpha/2}$	Test
Han	Yeoju	1.65	1.96	○	-1.75	1.96	○
	Yeongwol	0.19		○	-0.63		○
	Jucheon	0.70		○	-1.63		○
	Hongcheon	-0.34		○	-1.19		○
Nakdong	Jindong	1.50		○	-1.68		○
	Waegwan	0.82		○	-0.86		○
Geum	Gyuam	0.69		○	-0.16		○
	Gongju	1.14		○	-1.82		○
Seomjin	Songjeong	1.48		○	-1.71		○
	Amnok	1.56		○	-0.31		○
	Jeokseong	1.48	○	-1.44	○		
Yeongsan	Nampyeong	-0.15	○	-1.30	○		

$u$ : W-W test statistic

$Z$ : M-W test statistic

$u_{\alpha/2}$ ,  $Z_{\alpha/2}$ : Standardized normal deviate corresponding to a probability of exceedance  $\alpha/2$

○: Accept at a 5% level of significance

Table 3 Grubbs and Beck test for detection of outliers

River	Station	Grubbs and Beck test			Test
		$K_N$	$X_L$	$X_H$	
Han	Yeoju	2.752	472.9	37,635.3	○
	Yeongwol	2.518	301.8	9,507.4	○
	Jucheon	2.671	40.2	8,418.4	○
	Hongcheon	2.650	54.4	5,854.1	○
Nakdong	Jindong	2.661	1,578.1	20,413.7	○
	Waegwan	2.661	811.8	14,791.0	○
Geum	Gyuam	2.661	627.6	12,014.6	○
	Gongju	2.661	261.3	13,780.6	○
Seomjin	Songjeong	2.691	258.9	13,314.4	○
	Amnok	2.671	248.6	6,760.2	○
	Jeokseong	2.577	98.2	3,503.0	○
Yeongsan	Nampyeong	2.681	90.8	1,524.7	○

$K_N$ : G-B statistic tabulated for various sample size and 10% significance level

$X_H$ : Critical quantity of high outliers

$X_L$ : Critical quantity of low outliers

○: Accept at a level of 10% significance level

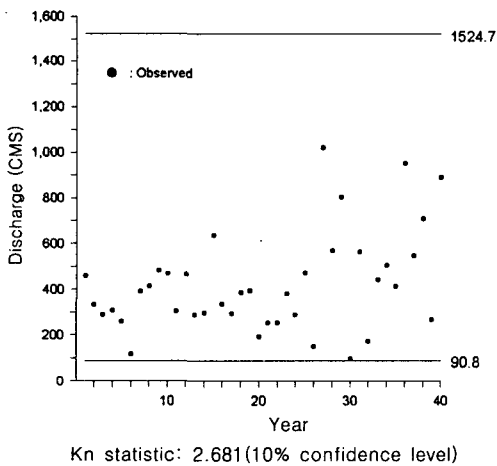


Fig. 1 G-B test for detection of high and low outliers at Nampyeong watershed of Youngsan river

예로 영산강수계의 남평유역을 대상으로 도시한 것은 Fig. 1과 같다.

이상의 독립성, 동질성 및 Outlier 검정 결과에서 대상유역의 연최대홍수량 자료에 관한 독립성과 동

Table 4 Results of L-coefficient of variation (L-CV), L-skewness and L-kurtosis

River	Station	L-moment ratios		
		L-CV	L-skewness	L-kurtosis
Han	Yeoju	0.4268	0.3880	0.2817
	Yeongwol	0.3823	0.3981	0.2513
	Jucheon	0.4934	0.3959	0.2195
	Hongcheon	0.4633	0.4020	0.2489
Nakdong	Jindong	0.2332	0.0720	0.1646
	Waegwan	0.2797	0.7101	0.1669
Geum	Gyuam	0.3061	0.2699	0.1968
	Gongju	0.3588	0.1699	0.0771
Seomjin	Songjeong	0.3376	0.1490	0.1114
	Amnok	0.2808	-0.0141	0.0119
	Jeokseong	0.3302	0.1703	0.1133
Yeongsan	Nampyeong	0.2787	0.2250	0.2015

질성이 인정됨과 동시에 연최대홍수량 자료의 Outlier가 없음이 검정되었다. 따라서 대상유역별 연최대홍수량 자료는 수문자료로서 분석하기에 타당한 것으로 인정되었다.

### 3. L-모멘트비에 의한 L-변동계수, L-왜곡도 및 L-첨예도 산정

확률가중모멘트의 선형조합으로서 L-모멘트값을 각 유역별로 구하고 L-모멘트값의 비인 L-변동계수, L-왜곡도 및 L-첨예도를 구한 결과는 Table 4와 같다. 전 유역에 걸쳐 L-변동계수, L-왜곡도 및 L-첨예도는 각각 0.2332~0.4934, -0.0141~0.7101 및 0.0119~0.2817의 범위를 나타내고 있다.

### 4. 적합도 검정

L-모멘트법에 따른 Wakeby 분포와 Kappa 분포에 대한 적합도 판정은 비매개변수 방법인 K-S 검정을 이용하였으며 각 유역에 대한 적합도 검정 결과는 Table 5와 같다.

**Table 5 Kolmogorov-Smirnov test for the Wakeby and Kappa distributions using L-moment method**

River	Station	$D_n$				$D_{0.05}$
		Wakeby	Test	Kappa	Test	
Han	Yeouju	0.0942	○	0.0898	○	0.196
	Yeongwol	0.1579	○	0.1671	○	0.262
	Jucheon	0.1111	○	0.1112	○	0.218
	Hongcheon	0.0614	○	0.0585	○	0.224
Nakdong	Jindong	0.0573	○	0.0425	○	0.221
	Waegwan	0.0674	○	0.0755	○	0.221
Geum	Gyuam	0.0687	○	0.0595	○	0.221
	Gongju	0.0524	○	0.0513	○	0.221
Seomjin	Songjeong	0.0843	○	0.0877	○	0.212
	Amnok	0.0861	○	0.0834	○	0.218
	Jeokseong	0.0563	○	0.0587	○	0.244
Yeongsan	Nampyeong	0.0739	○	0.0669	○	0.215

○: Significance level can't be acknowledged  
 ×: Significance level can be acknowledged

Table 5에 나타난 바와 같이 5% 유의수준에서 각 유역별 연최대홍수량 자료가 Wakeby 분포와 Kappa 분포를 따르는 것으로 인정되었다.

5. L-모멘트법에 의한 Wakeby 분포와 Kappa 분포의 매개변수 산정

L-모멘트법에 따른 Wakeby 분포와 Kappa 분포의 매개변수를 각 유역별로 구한 결과는 Table 6과 같다.

6. Wakeby 분포와 Kappa 분포의 L-모멘트법에 따른 설계홍수량의 유도

Wakeby 분포과 Kappa 분포의 L-모멘트법과

**Table 6 Parameters calculated by Wakeby and Kappa distributions using methods of L-moments**

River	Station	Wakeby				
		m	a	b	c	d
Han	Yeouju	506.65	7,360.03	3.65	2,527.19	0.31
	Yeongwol	0.00	31,998.01	45.93	1,187.90	0.19
	Jucheon	0.00	26,398.84	357.69	725.77	0.14
	Hongcheon	74.55	512.75	4.94	519.72	0.21
Nakdong	Jindong	882.64	22,530.11	6.18	2,414.31	-0.08
	Waegwan	592.78	11,337.90	6.33	1,952.17	-0.04
Geum	Gyuam	632.89	6,868.77	7.22	1,616.01	0.06
	Gongju	286.19	3,128.16	0.52	14.22	0.75
Seomjin	Songjeong	132.61	3,773.86	4.16	1,714.99	-0.19
	Amnok	0.00	9,859.86	37.21	2,512.58	-1.00
	Jeokseong	-104.01	8,717.94	27.85	664.35	-0.29
Yeongsan	Nampyeong	47.98	1,963.10	10.72	202.76	0.02

River	Station	Kappa			
		$\xi$	$\alpha$	k	h
Han	Yeouju	3,558.47	2,251.64	-0.34	-0.19
	Yeongwol	1,021.53	994.87	-0.24	0.53
	Jucheon	80.45	721.31	-0.14	0.99
	Hongcheon	270.69	477.10	-0.23	0.62
Nakdong	Jindong	5,900.76	1,600.13	-0.03	-0.71
	Waegwan	3,255.00	1,376.35	-0.06	-0.27
Geum	Gyuam	2,276.93	1,207.56	-0.15	0.01
	Gongju	701.68	2,434.05	0.32	0.82
Seomjin	Songjeong	1,386.53	1,501.99	0.16	0.35
	Amnok	489.95	2,119.38	0.92	0.86
	Jeokseong	409.00	464.88	0.15	0.43
Yeongsan	Nampyeong	356.48	123.27	-0.18	-0.53

다른 재현기간별 홍수량을 유역별로 구한 결과는 Table 7과 같다. 대상유역별 연최대홍수량 자료에 적용된 분포의 우열을 판정하기 위하여 관측된 연최대홍수량과 L-모멘트법에 의해 유도된 설계홍수량을 플로팅 포지션법인 Weibull, Hazen, Cunnane 및 Gringorton식에 의해 비초과확률을 각각 식 (21)~식 (24)에 의해 구하고 이를 정규확률지상에 도시하였다.

$$P = 1 - m/(N+1) \dots\dots\dots (21)$$

$$P = 1 - (m - 0.5)/N \dots\dots\dots (22)$$

$$P = 1 - (m - 0.4)/(N + 0.2) \dots\dots\dots (23)$$

$$P = 1 - (m - 0.44)/(N + 0.12) \dots\dots\dots (24)$$

여기서  $N$ 은 표본크기이며  $m$ 은 가장 큰 값부터 나열한 순서이다.

Table 7 Comparison of design floods calculated by method of L-moment for Wakeby and Kappa distributions (Unit: CMS)

Distribution	River	Station	Return period					
			5	10	20	50	100	200
Wakeby	Han	Yeoju	7,807.25	11,053.21	15,081.01	21,942.86	28,613.43	36,903.17
		Yeongwol	2,925.13	4,110.26	5,458.32	7,528.86	9,346.87	11,414.81
		Jucheon	1,379.29	2,035.56	2,756.57	3,820.00	4,717.05	5,702.59
		Hongcheon	1,171.69	1,713.08	2,338.31	3,315.85	4,189.36	5,198.19
	Nakdong	Jindong	8,175.04	9,607.89	10,963.76	12,645.22	13,838.26	14,967.35
		Waegwan	5,362.82	6,614.33	7,831.59	9,389.84	10,531.28	11,641.54
	Geum	Gyuam	4,311.73	5,568.12	6,876.64	8,690.10	10,128.16	11,625.88
		Gongju	3,736.06	4,564.40	5,183.96	5,838.58	6,318.91	6,894.65
	Seomjin	Songjeong	3,423.58	4,250.21	4,975.59	5,801.05	6,338.08	6,809.90
		Arnok	2,274.13	2,525.03	2,650.41	2,725.60	2,750.65	2,763.16
		Jeokseong	1,065.41	1,328.60	1,544.33	1,771.01	1,906.97	2,018.41
	Youngsan	Nampyeong	563.01	709.37	857.85	1,057.43	1,210.95	1,366.68
	Kappa	Han	Yeoju	7,871.54	11,088.13	15,018.85	21,730.59	28,328.23
Yeongwol			2,905.09	4,045.79	5,374.74	7,495.23	9,435.24	11,728.98
Jucheon			1,378.84	2,034.35	2,755.18	3,819.86	4,719.35	5,708.94
Hongcheon			1,172.56	1,705.41	2,323.21	3,301.65	4,190.11	5,231.97
Nakdong		Jindong	8,223.36	9,567.94	10,851.75	12,533.26	13,817.87	15,123.06
		Waegwan	5,374.22	6,559.67	7,738.43	9,337.23	10,595.28	11,903.72
Geum		Gyuam	4,305.90	5,499.90	6,776.66	8,644.00	10,221.36	11,962.88
		Gongju	3,729.01	4,645.64	5,371.23	6,108.45	6,536.91	6,879.19
Seomjin		Songjeong	3,440.21	4,253.72	4,960.87	5,772.15	6,308.98	6,789.16
		Arnok	2,266.42	2,520.91	2,654.24	2,739.13	2,769.40	2,785.42
		Jeokseong	1,053.04	1,308.33	1,532.84	1,793.24	1,967.25	2,124.16
Youngsan		Nampyeong	559.13	693.28	837.60	1,052.50	1,238.12	1,447.43



이상의 Weibull, Hazen, Cunnane 및 Gringorton 플로팅 포지션법과 Wakeby 분포 및 Kappa 분포의 L-모멘트법에 의해 유도된 빈도별 설계홍수량의 비교 분석을 위해 상대평균제곱근오차(Relative Root Mean Square Error, RRMSE) 및 상대절대오차(Relative Absolute Error, RAE)를 각각 식 (25) 및 식 (26)에 의해 대상유역별로 구한 결과는 Table 8과 같다.

$$RRMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q_0 - Q_c}{Q_0} \right)^2 \right]^{0.5} \dots \dots (25)$$

$$RAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_0 - Q_c}{Q_0} \right| \dots \dots \dots (26)$$

여기서  $Q_0$  및  $Q_c$ 는 각각 유역에서 관측된 연최대홍수량 및 적용 분포의 L-모멘트법에 의해 산정된 설계홍수량이다.

이상의 결과에서 보건데 Wakeby 분포와 Kappa

**Table 8** Relative Root Mean Square Errors (RRMSE) and Relative Absolute Errors (RAE) calculated by Wakeby and Kappa distributions using methods of L-moment and different plotting position formulas

Distribution	River	Station	Weibull		Hazen		Cunnane		Gringorten	
			RRMSE	RAE	RRMSE	RAE	RRMSE	RAE	RRMSE	RAE
Wakeby	Han	Yeosu	9.26	7.11	8.57	6.47	8.57	6.57	8.56	6.53
		Yeongwol	18.40	14.40	15.81	12.76	15.94	12.74	15.84	12.60
		Jucheon	15.41	12.48	14.60	11.83	14.54	11.80	14.54	11.79
		Hongcheon	11.68	7.32	9.26	6.64	9.53	6.52	9.41	6.56
	Nakdong	Jindong	6.07	4.15	5.83	3.74	5.56	3.70	5.64	3.71
		Waegwan	6.92	5.00	7.56	5.34	7.16	5.16	7.30	5.21
	Geum	Gyuam	6.43	5.07	5.87	4.95	5.79	4.83	5.81	4.88
		Gongju	5.96	4.53	5.90	4.37	5.76	4.34	5.81	4.35
	Seomjin	Songjeong	11.47	8.93	12.10	9.08	11.78	8.93	11.89	8.98
		Amnok	7.50	5.66	10.72	6.44	9.74	6.22	10.12	6.30
		Jeokseong	18.81	8.92	20.80	10.06	19.50	9.73	19.95	9.86
	Youngsan	Nampyeong	5.89	4.60	6.23	4.52	5.73	4.48	5.90	4.49
	Kappa	Han	Yeosu	11.22	8.40	12.60	7.91	11.93	7.91	12.16
Yeongwol			17.02	14.21	15.45	13.32	15.60	13.32	15.52	13.32
Jucheon			15.22	12.26	14.51	11.81	14.43	11.78	14.44	11.79
Hongcheon			11.68	7.10	8.55	6.19	8.96	6.14	8.77	6.13
Nakdong		Jindong	9.51	5.29	10.59	5.40	9.54	5.23	9.89	5.28
		Waegwan	7.58	5.59	9.09	6.25	8.07	5.92	8.42	6.04
Geum		Gyuam	6.95	5.38	5.90	4.92	5.82	4.90	5.82	4.91
		Gongju	6.68	4.86	7.47	4.88	7.12	4.70	7.25	4.76
Seomjin		Songjeong	13.13	9.90	15.48	10.27	14.58	10.07	14.91	10.14
		Amnok	6.70	5.33	8.12	5.97	7.70	5.78	7.86	5.86
		Jeokseong	13.73	7.59	12.19	7.68	12.14	7.54	12.13	7.58
Youngsan		Nampyeong	7.87	5.70	6.67	5.19	6.36	5.05	6.43	5.10

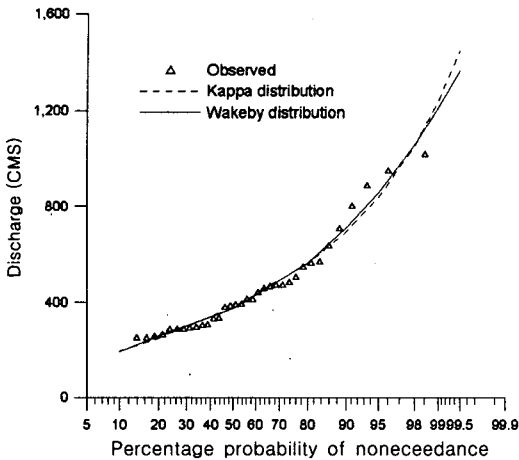


Fig. 2 Comparison of design floods estimated using methods of L-moments with Cunnane plotting position at Nampyeong watershed of Youngsan river

분포의 L-모멘트법에 의해 유도된 설계홍수량과 실측치의 플로팅 포지션방법에 의해 유도된 설계홍수량과의 상대평균제곱근오차 및 상대절대오차의 비교에서 전 유역에 걸쳐 Wakeby 분포와 Weibull 및 Cunnane 플로팅 포지션법에 의한 설계홍수량이 타 방법에 의한 것보다 전반적으로 작게 나타나는 좋은 결과를 가져왔다.

표본 예로 영산강수계의 남평유역에 대한 Cunnane 플로팅 포지션법에 의한 Wakeby 분포와 Kappa 분포의 L-모멘트법에 따른 설계홍수량의 결과를 정규확률지에 도시한 결과는 Fig. 2와 같다.

### V. 결 론

본 연구는 우리나라 5대강 수계의 12개 유역에 대한 연최대홍수량 자료를 구성하여 이들 자료에 대한 통계학적 분석을 위한 타당성을 판정하고, K-S 검정에 의해 적용 분포의 적합도 검정을 실시하였다. L-모멘트법에 의해 Wakeby 및 Kappa 분포의 매개변수를 추정하여 설계홍수량을 유도하였다. Wakeby 및 Kappa 분포에서 L-모멘트법에 의한 설계홍수량과 플로팅 포지션법을 달리한 설계

홍수량과의 비교 분석을 수행하였으며 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상유역별 연최대홍수량 자료에 관한 Wald-Wolfowitz의 독립성 검정, Mann-Whitney의 동질성 검정 및 Grubbs-Beck의 Outlier 검정을 수행한 결과 이의 분석 타당성이 인정되었다.
2. 대상유역별 연최대홍수량 자료가 Wakeby 및 Kappa 분포의 적합성을 판별하기 위해 K-S 검정을 실시한 결과 2개 분포의 적정성이 인정되었다.
3. Wakeby 및 Kappa 분포의 L-모멘트법에 따른 매개변수와 설계홍수량을 각각 유도하였다.
4. Wakeby 및 Kappa 분포의 L-모멘트법에 따른 설계홍수량과 실측치의 플로팅 포지션법을 달리하여 구한 설계홍수량을 상대평균제곱근오차 및 상대절대오차에 의해 비교한 결과에서 Wakeby 분포와 Weibull 및 Cunnane 플로팅 포지션법에 의한 설계홍수량이 타 방법들에 의한 설계홍수량 보다 일반적으로 적정한 것으로 나타났다.

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음  
(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2005).

### References

1. Bobee, B. and F. Ashkar, 1991. *The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*, Water Resources Publications.
2. Greenwood J. A., J. M. Landwehr, N. C. Matalas, and J. R. Wallis, 1979. Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressed in Inverse Form. *Water Resources Research* 15(5): 1049-1064.
3. Hosking J. R. M., J. R. Wallis, E. F. Wood. 1985. Estimation of the generalized extreme-

- value distribution by the method of probability-weighted moments. *American Statistical Association and the American Society for Quality Control* 27(3): 251-261.
4. Hosking J. R. M. 1986. *The Theory of Probability Weighted Moments*. 3-16. RC12210. IBM Research Center: Yorktown Heights.
  5. Hosking. J. R. M. 1990. L-moments: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combination of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 52(2): 105-124.
  6. Hosking, J. R. M. and J. R. Wallis. 1993. Some Statistics useful in Regional Frequency Analysis. *Water Resources Research* 29(2): 271-281.
  7. Hosking J. R. M. 1994. The parameter Kappa distribution. *IBM J. Res. Develop.* 38 (3): 251-258.
  8. Hosking J. R. M. 1996. *Fortran Routines for Use with the Method of L-moments*. 1-43. RC2025. IBM Research Center: Yorktown Heights.
  9. Hosking, J. R. M. and J. R. Wallis. 1997. *Regional Frequency Analysis*. Cambridge CB2 1RP, United Kingdom: Cambridge University Press.
  10. Lee, S. H., K. H. Song, S. J. Maeng, K. S. Ryoo and H. K. Jee. 2000. Derivation of Design Floods by the Probability Weighted Moments in the Wakeby Distribution. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(6): 63-71. (in Korean)
  11. Lee, S. H., J. H. Park, K. S. Ryoo, H. K. Jee, T. K. Jeon and Y. H. Shin. 2001b. Estimation of Design Rainfall by the Regional Frequency Analysis using Higher Probability Weighted Moments and GIS Techniques(II). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(5): 70-82. (in Korean)
  12. Lee S. H, S. J. Maeng. 2003. Frequency analysis of extreme rainfall using L-moment. *Irrigation and Drainage* 52(3): 219-230.
  13. Maidment, D. R. 1993. *Handbook of Hydrology*: McGraw-Hill, Inc.
  14. Ministry of Construction and Transportation (MOCT). 2000. Water Management Information System (WAMIS), <http://www.wamis.go.kr>
  15. Naghavi B. and F. X. Yu. 1995. Regional Frequency Analysis of Extreme Precipitation in Louisiana. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(11): 819-827.
  16. Oh U. S. 2001. *Estimation of Population for Kappa Distribution Applied Rainfall distribution*. Master Degree Paper in Chonnam National University.
  17. Schaefer M. G. 1990. Regional Analysis of Precipitation Annual Maxima in Washington State. *Water Resources Research* 26(1): 119-131.
  18. Vogel R. M., T. A. McMahon and F. H. S Chiew. 1993. Flood Flow Frequency Model Selection in Australia. *Journal of Hydrology* 146: 421-449.
  19. World Meteorological Organization. 1989. Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis. *Operational Hydrology Report* No.33. Secretariat of the World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland; A4.1-A4.14.