

저수지 홍수량 추정

Reservoir Flood Estimation



김경덕 | 한국시설안전기술공단 차장, 공학박사, 수자원개발기술사



권지혜 | 한국시설안전기술공단, 공학석사

1. 서론

확률홍수량은 수공구조물 설계의 기준일 뿐만 아니라 홍수로 인한 피해가 발생하였을 경우 그 책임소지를 분명히 하는 척도가 된다. 또한, 홍수피해를 추정하거나 피해경감 대책 등을 마련하고자 할 때에도 중요한 기준이 된다. 그 만큼 확률홍수량은 대단히 중요하며, 신뢰할 수 있는 확률홍수량 산정을 위해 수많은 수문학자 및 기술자들이 노력을 경주해 왔다.

대상유역에 대한 확률홍수량을 산정하는 방법은 크게 2가지로 대별할 수 있는데, 그 첫 번째는 확률강우량을 입력자료로 하여 실측 홍수사상을 기초로 산정된 단위도에 적용하는 방법이고, 두 번째는 실측 홍수량 자료를 빈도해석하는 방법이다. 강우-유출모형을 적용하여 홍수량을 산정하는 첫 번째 방법에 있어서 강우의 빈도와 유출의 빈도가 엄밀히 일치하지 않으며, 적용하는 강우-유출모형의 종류와 유출모형의 적용시 매개변수의 산정방법 등에 따라 홍수량의 크기가 결정되기 때문에 이 방법은 차선택에 불과하다. 직접적인 홍수량 자료에 대하여 빈도해석을 통한 확률홍수량 산정이 가장 합리적인 방법이라 하겠다.

한편, 댐의 홍수방어능력을 평가하기 위해서는 시간에 따른 유입홍수량이 필요하기 때문에 강우-유출에 의한 홍수량 산정도 매우 중요하다.

따라서, 본 고에서는 홍수 빈도해석과 강우-유출 모형에 의한 유역유출해석을 동시에 수행하여 비교, 분석함으로써 적절한 저수지 홍수량을 추정하고자 한다.

2. 본 론

대상 저수지는 유역면적 2,703km²의 소양강댐이며, 홍수 빈도해석과 강우-유출 해석을 수행하여 홍수량 추정 및 비교·분석을 실시하였다(한국시설안전기술공단, 2004).

가. 홍수 빈도해석

우선적으로 대상자료에 대하여 통계적 처리를 위한 적합성을 평가해 보면, 상류에 홍수량을 인위적으로 조절하는 댐 등이 없기 때문에 순수한 자연유량(홍수

량) 자료이며, 설계당시 대상자료로 사용한 1958년부터 2003년 최근까지 41개년 자료(1969~1973, 5개년 결측)로 비교적 장기간 홍수량 자료이다. 물론, 대상 자료의 크기로는 100년, 200년 이상의 큰 재현기간에 대하여 신뢰할 수 있는 확률홍수량을 산정하기 어렵지만 상기에서 언급한 강우-유출에 의한 두 번째 방법과 연계하여 큰 재현기간의 확률홍수량을 산정하고자 한다(이영석 등, 2004).

다음 <그림 1>은 연최대치 홍수량 자료에 대한 경년 변화를 도시한 것이며, <표 1>은 기본통계치를 나타내고 있다. 전체자료에 대한 평균은 3,873m³/s이고 표준편차는 2,459m³/s, 변동계수는 0.635이며, 왜곡도 계수는 1.627로 나타났다. 전반부 자료는 평균이 3,131m³/s로 작게 나타났으며, 후반부 자료는 4,145m³/s로 크게 나타나 차이를 나타내고 있어 변동

성 확인이 요망된다. 또한, 도시적으로 살펴보았을 때 경향성을 판별할 수는 없으나 전반부 자료와 후반부 자료에 대하여 통계적인 경향성 및 변동성을 분석하였다.

T-test, Hotelling Pabst test, Mann-Kendall test, Sen test 등의 경향성을 분석한 결과 모두 평균과 분산에 대한 경향성이 없는 것으로 나타났으며, T test를 통한 변동성을 분석한 결과 변동성도 없는 것으로 나타났다. 따라서, 빈도해석을 수행하는 자료로서 적절한 것으로 판단된다.

전체적으로 양으로 왜곡된(positive skewed) 전형적인 극치 수문자료로서 변동폭도 매우 큰 것으로 나타나 극치 수문자료 해석에 많이 이용되는 확률분포형을 적용하고 매개변수는 확률가중 모멘트법을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

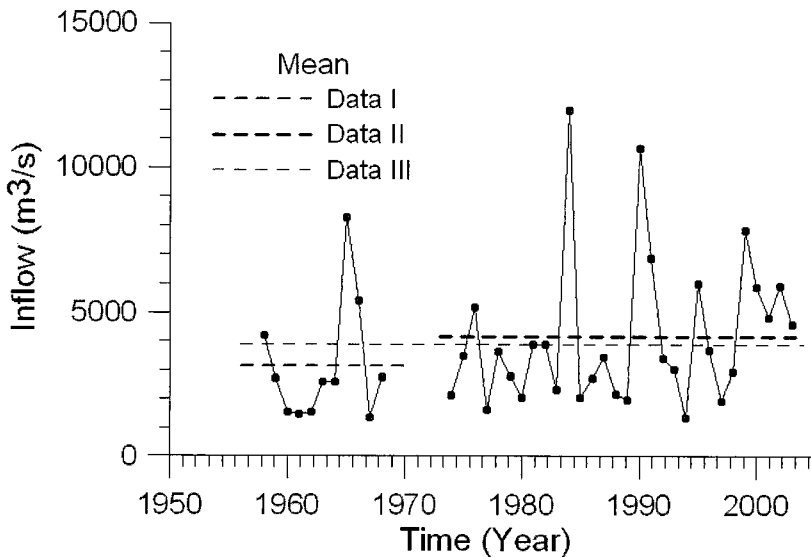


그림 1. 연최대치 홍수량 자료에 대한 경년 변화

표 1. 자료에 대한 기본통계치

자 료 구 분	평균(m ³ /s)	표준편차(m ³ /s)	변동계수	왜곡도계수
자료 I (1958-1968)	3,131	2,109	0.673	1.677
자료 II (1974-2003)	4,145	2,553	0.616	1.643
자료 III (1958-1968, 1974-2003)	3,873	2,459	0.635	1.627

수문자료 해석에 많이 사용되는 gamma, Gumbel, GEV, log-Pearson type III, log-Gumbel, Weibull, Wakeby 분포형 등을 적용하였으며, 확률가중 모멘트 법으로 매개변수를 추정하고 매개변수 적합성 조건을 검토하였다. 매개변수 적합성 조건을 만족하는 확률분포형에 대해서 chi-square 검정, Kolmogorov-Smirnov 검정, Cramer Von Mises 검정, PPCC 검정 등을 실시하여 적정분포형을 선정하였다.

추가적으로 도시공식(plotting position formula)을 이용한 홍수 빈도해석을 수행하였는데, 이는 비매개변수적인 방법으로 빈도해석에 널리 사용되고 있다. 이 방법은 자료를 군집화(grouping)하지 않고 사용하는 경험적인 방법으로 Cunnane(1978)이 다음과 같은 일반식을 제안하였다.

$$F(i) = \frac{i-\alpha}{N+\beta-2\alpha} \quad (1)$$

여기서, I_n 는 자료를 가장 큰 값부터 정리하였을 때 i 번째 큰 자료에 해당하는 순서(order)이며, $F(i)$ 는 이에 해당하는 비초과확률(nonexceedance probability), N 은 자료수, α 와 β 는 분포형에 따른 상수이다.

빈도해석을 하기 위해서는 일반적으로 연속된 자료를 사용해야 한다. 만일 결측된 기간이 있을 때, 결측치 기간을 포함하여 빈도해석을 하는 경우 정확한 빈도해석을 할 수 없다. 따라서, 결측된 자료가 있을 경우에는 자체자료를 이용하거나 상관성이 있는 주변의 자료를 이용한 여러 가지 모형을 이용하여 자료를 보완하여 빈도해석을 하게 된다. 그러나 자료를 보완할 수 없는 경우에는 역사적 홍수정보를 이용한 홍수 빈도해석법을 이용한다.

역사적 홍수정보를 이용한 빈도해석에서는 자료를 체계적인 홍수자료(systematic flood record)와 역사적인 홍수자료 두 가지로 분류한다. 여기서, 체계적인 자료는 연속적이며 체계적으로 수집된 자료를 말하며, 역사적인 홍수자료는 연속적인 자료는 아니지만 과거

의 기록상 알려져 있는 비교적 극대치의 값을 갖는 자료이다. 역사적 홍수자료를 빈도해석에 이용함으로써 일반적으로 비교적 짧은 기록기간을 갖고 있는 체계적인 홍수자료에 의한 빈도해석에 대해 정보를 높이고자 하는 기법이 역사적 홍수정보를 이용한 빈도해석 방법이다(Condie와 Lee, 1982; Stedinger와 Cohn, 1986; Tasker와 Stedinger, 1987). 이 방법을 사용할 때 기준값(censoring level) 이상의 자료는 Type I 과 Type II 두가지로 분류할 수 있다.

Type I의 경우에는 기준값 x_0 가 정해지면 역사적인 자료기간에서 기준값 이상의 자료수는 e' 이고, 체계적인 자료기간에서의 기준값 이상의 자료수는 e 가 되므로, 전체 자료기간동안의 기준값 이상의 자료수 $k = e + e'$ 이 된다. Type II의 경우는 가장 큰 자료로부터 몇 번째 홍수자료까지 사용할 것인가를 정하고 이에 해당하는 기준값을 정하기 때문에 기준값이 확률변수가 된다. 예를 들어 3번째 큰 홍수를 기준값으로 정하면 그에 해당하는 홍수자료가 기준값이 되며 이때의 홍수량이 기준값 x_0 가 된다(Condie와 Lee, 1982; Salas와 Fernandez, 1995). 위 두 가지 형태 중 일반적으로 Type I이 많이 사용된다.

기준값 x_0 가 정해지면 역사적인 자료기간에서 기준값 이상의 자료수는 e' 이고, 체계적인 자료기간에서의 기준값 이상의 자료수는 e 가 되므로, 전체 자료기간동안의 기준값 이상의 자료수 $k = e + e'$ 이 된다.

IACWD(1982)가 제안한 도시위치공식은 식 (2)와 같다.

$$F(i) = \frac{i}{n+1}, \quad i = 1, \dots, k \quad (2a)$$

$$F(i) = \frac{k+0.5}{n+1} + \frac{n-k}{n+1} \frac{i-k-0.5}{s-e}, \quad i = 1+k, \dots, g \quad (2b)$$

여기서, $g = s + k - e$ 이다. 자료를 크기순으로 배열하여 1부터 k 순위까지는 식 (2a)를 사용하고, $k+1$ 부터 g 순위까지는 식 (2b)를 사용한다. 그 후 Hirsh와

Stedinger(1986), 그리고 Hirsh(1987)가 식 (3)을 제안하였다.

$$F(i) = \frac{i-\alpha}{k+1-2\alpha} \left[\frac{k}{n} \right], i = 1, \dots, k \quad (3a)$$

$$F(i) = \frac{k}{n} + \left[1 - \frac{k}{n} \right] \frac{i-k-\alpha}{s-e+1-2\alpha} \quad (3b)$$

$i = 1, \dots, k$

위 식 (2a)와 식 (3a)에서 보는 바와 같이 기준값 이상의 자료에 대해서 식 (3a)가 식 (2a)보다 항상 큰 재현기간을 산출하게 된다. 다음 <표 2>는 도시위치공식과 IACWD(1982)와 Hirsch(1987)가 제안한 방법에 의한

기존의 홍수량자료에 대한 재현기간을 나타내고 있다.

표에서 보는 바와 같이 기준값(5,000m³/s) 이상에서는 IACWD에 의한 값보다는 Hirsh에 의한 재현기간이 크게 나타남을 알 수 있다. 도시공식을 사용할 때에는 결측치가 없어야 하나, 자료 III에 Cunnane의 도시공식을 이용하여 구한 재현기간을 참고적으로 표에 나타내었다. 자료 III의 자료기간은 총 46년간이나 5년간의 결측치를 뺀 41년간의 자료를 가지고 산정된 값이므로 실제로는 표에 나타난 값보다 큰 재현기간을 가져야 한다. 그러므로, IACWD에 의한 재현기간은 과소 추정된 것이라 할 수 있다.

다음 <표 3>은 각 확률분포형별 추정된 매개변수

표 2. 도시위치공식과 역사적 홍수정보에 의한 확률홍수량

순 위	홍수량(m ³ /s)	IACWD		Hirsh		Cunnane	
		CDF	재현기간(년)	CDF	재현기간(년)	CDF	재현기간(년)
1	11995.	.0212	47.00	.0074	134.84	.7670	68.67
2	10653.	.0425	23.50	.0192	51.86	.7913	25.75
3	8250.	.0638	15.67	.0311	32.11	.8155	15.85
4	7841.	.0851	11.75	.0430	23.25	.8398	11.44
5	6905.	.1063	9.40	.0548	18.22	.8641	8.96
6	6002.	.1276	7.83	.0667	14.98	.8883	7.36
7	5904.	.1489	6.71	.0786	12.72	.9126	6.24
8	5874.	.1702	5.88	.0904	11.05	.9369	5.42
9	5420.	.1914	5.22	.1023	9.77	.9612	4.79
10	5160.	.2127	4.70	.1142	8.76	.9854	4.29

표 3. 각 확률분포형별 추정된 매개변수

확률분포형	위치 매개변수	규모 매개변수		형상 매개변수	
gamma-2	0.0	1446.753		2.677	
gamma-3	1326.907	2556.066		0.996	
GEV	2643.494	1397.750		- 0.237	
Gumbel	2811.005	1839.215		-	
log-Gumbel-2	0.0	2558.004		2.436	
lognormal-2	0.0	8.052		0.586	
lognormal-3	519.125	7.872		0.702	
log-Pearson type III	5.851	0.150		14.974	
Weibull-2	0.0	4346.149		1736	
Weibull-3	1325.998	2544.714		0.998	
Wakeby-4	0.0	a	1410.803	b	93.687
		c	68753.213	d	0.035
Wakeby-5	925.700	a	499.342	b	25.457
		c	61788.084	d	0.038

학술분야

표 4. 적합도 검정결과

확률분포형	Chi-square			K-S			CVM			PPCC		
	COM	TAB	RST	COM	TAB	RST	COM	TAB	RST	COM	TAB	RST
gamma-2	4.73	7.81	○	0.10	0.19	○	0.08	0.46	○	0.98	0.97	○
gamma-3	1.07	5.99	○	0.05	0.19	○	0.02	0.46	○	1.00	0.97	○
GEV	1.00	5.99	○	0.06	0.19	○	0.02	0.46	○	1.00	0.92	○
Gumbel	1.29	7.81	○	0.11	0.19	○	0.10	0.46	○	0.98	0.96	○
log-Gumebel-2	2.76	7.81	○	0.10	0.19	○	0.09	0.46	○			
lognormal-2	1.00	7.81	○	0.05	0.19	○	0.03	0.46	○	0.91	0.97	×
lognormal-3	1.00	5.99	○	0.04	0.19	○	0.02	0.46	○	0.91	0.97	×
log-Pearson type III	0.10	5.99	○	0.05	0.19	○	0.02	0.46	○			
Weibull-2	3.36	7.81	○	0.12	0.19	○	0.13	0.46	○	0.97	0.96	○
Weibull-3	4.29	5.99	○	0.09	0.19	○	0.05	0.46	○	0.99	0.96	○
Wakeby-4	1.00	3.84	○	0.07	0.19	○	0.02	0.46	○			
Wakeby-5	0.49	1.64	○	0.06	0.19	○	0.02	0.46	○			

표 5. 각 확률분포형별 확률홍수량

(단위 : m³/s)

확률분포형	50	100	200	500	1,000	5,000	10,000	비고
gamma-2	10,111	11,360	12,583	14,166	15,345	18,058	19,172	
gamma-3	11,304	13,074	14,845	17,186	18,956	23,087	24,894	
GEV	11,611	14,284	17,425	22,446	27,034	41,090	49,000	
Gumbel	9,988	11,272	12,551	14,239	15,515	18,476	19,751	채택
log-Gumebel-2	12,695	16,909	22,499	32,794	43,599	84,433	112,230	
lognormal-2	10,459	12,270	14,200	16,949	19,190	24,972	27,730	
lognormal-3	11,598	13,933	16,498	20,273	23,441	31,943	36,145	
log-Pearson type III	12,637	15,742	19,396	25,201	30,498	46,426	55,231	
Weibull-2	9,536	10,475	11,356	12,449	13,231	14,928	15,616	
Weibull-3	11,305	13,076	14,848	17,191	18,964	23,081	24,855	
Wakeby-4	11,429	13,350	15,319	17,995	20,076	25,108	27,363	
Wakeby-5	11,436	13,372	15,360	18,071	20,186	25,319	27,630	

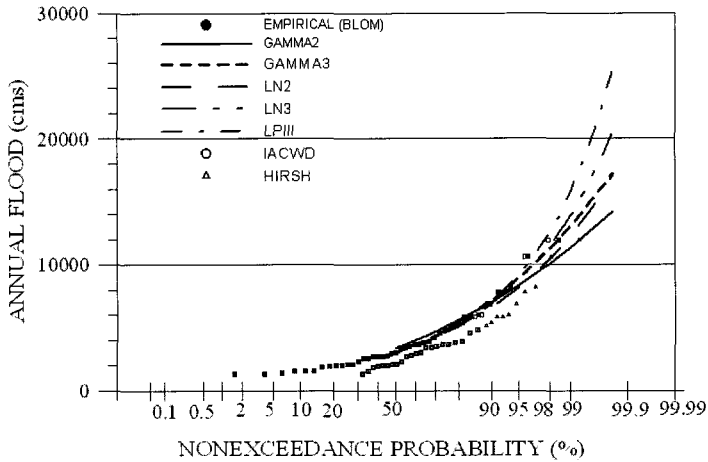
를 나타내며, <표 4>는 적합도 검정결과를 나타내고 있다.

<그림 2>는 확률분포형별, 또한 도시위치공식과 역사적 홍수정보에 의한 확률홍수량을 Gumbel 및 정규확률지에 나타낸 것이다. 결측치를 갖고 있는 지점에 확률분포형을 적용한 문제점은 가지고 있으나 역사적 홍수정보를 이용한 홍수빈도해석 결과와 경험적 및 적합된 확률밀도함수 및 누가분포함수의 비교 결과를 고려할 때 확률분포형 가운데에는 Gumbel

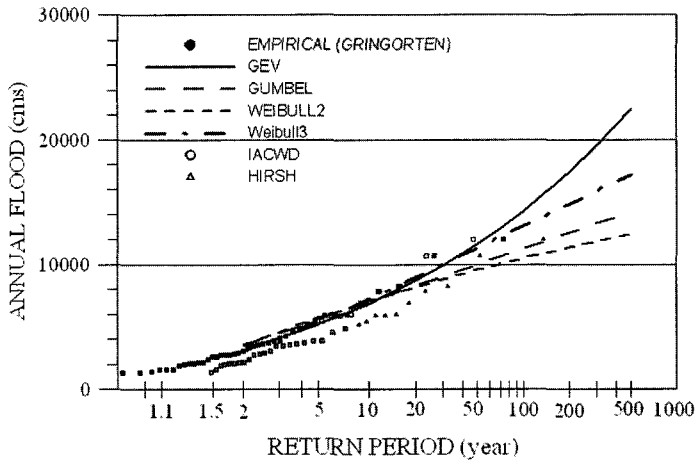
분포형이 홍수 빈도해석에 적절하다고 판단된다.

나. 강우-유출해석

강우의 빈도와 이로 인한 홍수의 빈도가 동일하다는 가정 및 강우-유출 모형의 불확실성 등으로 인해 유역유출해석을 통한 홍수량 산정은 간접적인 방법일 수 밖에 없다. 그러나, 실측 홍수량 자료에 비하여 양질의 강우자료를 다수 확보할 수 있고 무엇보다도 유



(a) 정규확률지



(b) Gumbel 확률지

그림 2. 경험 및 적합된 곡선

입수문곡선을 획득할 수 있기 때문에 댐의 홍수방어 능력을 평가할 수 있다는 장점이 있다.

1) 강우량의 시간분포 설정

확률강우량의 시간분포는 실측 호우사상의 통계적 처리에 의한 Huff의 시간적 분포를 사용하였다. <그림 3>은 소양강댐 유역의 Huff 분위별에 의한 강우의 시간적 분포를 나타낸 것인데, 각 분위별로 회귀 정도가 매우 높음을 알 수 있다.

2) 강우-유출모형의 검정

(가) 단위도 유도

단위도를 유도하기 위해서는 먼저 다음과 같은 수문자료 및 기상자료를 수집해야 한다.

- 과거의 주요 호우시 유량 자료 - 대표단위도가 신뢰성을 갖기 위해서는 최소한 세 개의 호우사상에 대한 강우 및 유량 자료가 필요함
- 과거에 홍수를 발생시킨 호우에 대한 강우기록

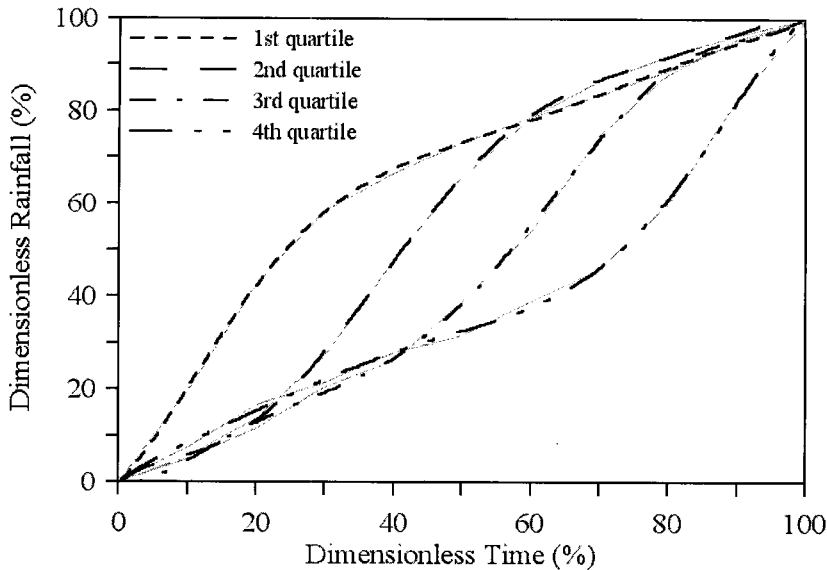


그림 3. Huff 분위법에 의한 강우의 시간적 분포(인제 지점)

및 유역 내 모든 강우 관측소에 대한 위치와 과거 수문 자료

- 지형, 토양 종류 및 토지 이용 상태 등을 포함하는 유역의 물리적 특성

대표단위도는 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood; PMF)의 양, 발생형태, 발생시간 등을 가장 잘 예측할 수 있는 것으로 정해져야 하며, 과거 자료 중 최대 홍수에 대하여 침투 홍수량을 과소 산정하지 않고 모의되는 것이 바람직하다. 또한, 보다 많은 호우사상에 대하여 적용하면 유도된 단위도의 신뢰성이 높으나, 최소한 3개의 호우사상을 이용할 때에는 2개의 사상을 이용하여 매개변수들을 산정(estimation, calibration)하고 나머지 하나는 이를 검증(verification)하는 데에 이용한다.

단위도의 매개변수들은 가장 큰 호우사상의 해석을 통해 산정하여 대표단위도를 유도하고 그 후 이 대표단위도를 사용하여 다른 호우사상을 잘 재현할 수 있는지에 대한 검증을 거친 것이 신뢰도가 높다. 그렇지 않다면 단위도의 매개변수들에 대하여 검토하

고 잘 맞도록 수정하여 개선하는 것이 필요하다.

또한, 이 자료를 활용하기에 앞서 기존 연구나 보고서 등에서 사용된 단위도가 주요 호우사상에 대한 수문곡선과 잘 맞는지 검토해 보아야 한다. 단위도의 적용성을 검토하는 최선의 방법은 이를 위하여 선정된 과거 수문곡선 중 가장 큰 사상을 재현하는지 조사하는 것이다. 재현된 수문곡선이 과거 수문곡선과 잘 맞는다면 조정할 필요 없이 이 단위도를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나, 확보되어 있는 기존의 단위도가 주요 호우사상을 합리적으로 재현하지 못하거나 유역특성의 변화 및 가정한 초과강우의 시간분포에서 나타나는 오차 등에 의하여 합리적으로 재현되지 않는다고 판단될 때는 새로운 수문곡선이 개발되어야 한다.

최근에 이루어진 몇몇 수문 분석에서 실측 호우사상의 자료를 이용하여 매개변수들을 최적화함으로써 단위도를 유도하는 방식을 통하여 홍수량을 산정하는 방식을 취하고 있다. 그러나, PMF에 대하여 확률홍수량을 산정하는 과정과의 차별화 없이 평균단위도의 개념을 그대로 적용하거나 도달시간을 호우사상의 크기

와 관계없이 일정한 것으로 가정하는 등 개선이 필요한 부분이 있는 것으로 판단되어 본 고에서는 기존 호우사상 자료에 최근 발생한 큰 호우사상 자료를 추가하여 새로 확률홍수량과 PMF에 대한 단위도를 각각 유도하였다. 또한, 기존의 방식대로 일괄적으로 평균 단위도 개념을 적용할 경우 PMF가 과소산정될 가능성이 있는 문제점이 있어 최근 선진국에서 수행되고 있는 다음과 같은 절차를 따라 단위도 유도 과정을 개선하고자 하였다. 즉, 영국의 경우 Flood Estimation Handbook(Institute of Hydrology, 1999)에서 단위도의 침투발생시각을 1/3만큼 감소시키고 침투를 1/2만큼 증가시키며 단위부피를 유지하기 위하여 기저시간을 1/3만큼 감소시키는 방식을 제안하고 있고, 호주의 경우 단위도의 침투유량 부분을 30% 증가시키는 방법을 채택하는 등 PMF 산정시 기존의 방식에 비하여 보다 합리적인 결과를 도출하기 위한 기준을 마련하고 있는 실정이다.

본 고에서는 대표단위도를 유도하기 위하여 1984년~2003년까지의 기간 중 태풍 메미와 루사 등의 호우사상을 포함하는 큰 호우가 발생했을 때의 시간별 강우 및 환산된 유입량 자료 등의 수문자료를 확보하여 이 중 신뢰성이 있다고 판단되는 15개 호우사상을 선정하였다.

(나) 기저유출 및 유효우량

총유출량의 구성성분은 직접유출과 기저유출로 대별하여 분리할 수 있는데 이중 직접유출은 총우량 중에서 차단이나 침투 또는 지체 등에 의해 발생하는 손실유량을 제외한 유효우량 성분이며, 단위도를 유도하기 위해서는 이러한 직접유출과 기저유출량의 분리가 선행되어야 한다. 일반적으로 홍수시 기저유량은 침투유량에 비해 상대적으로 작은 값이므로 이러한 특성을 감안한 간략법으로 지하수 감수곡선법, 수평직선 분리법, N-day법, 수정 N-day법 등이 있는데 본 고에서는 지하수 감수곡선법을 이용하였다. 한편, 홍수량 산

정시 포화 조건을 대표하는 침투율을 가정할 필요가 있는데 침투율은 대상 유역에 대하여 알 수 있는 특성들에 따라 가정해야 한다. 미육군 공병단의 수문연구소(Hydrologic Engineering Center)에서 개발한 HEC-HMS 모형에서는 손실률 계산 방법으로서 Green-Ampt 식, Initial/Constant 방법, NRSC Curve Number(CN), Gridded NRSC Curve Number, Deficit/Constant, SMA, Gridded SMA, No Loss Rate 등 여덟 가지 기법을 제공하고 있는데, 본 고에서는 NRSC Curve Number Method를 사용하여 유효우량을 산정하였다. 이는 유출량 자료가 없는 경우에 유역의 토양특성과 토지이용 상태, 지표면 식생피복 처리상태, 선행 토양 함수조건 등 토양의 수문학적 조건에 관한 자료만으로 총강우량으로부터 유효우량을 계산하는 방법이다. 또한, HEC-HMS 모형에서는 직접유출에 대한 transform 기법으로서 Clark, Kinematic Wave, ModClark, Snyder, NRSC, User-Specified S-Graph, User-Specified Unit Hydrograph 등의 일곱 가지 기법을 제시하고 있는데 이 중 Clark 기법을 사용하여 단위도를 유도하였다.

(다) Clark 합성단위도

① 기본 개념 및 산정공식

대상 유역의 토양, 지표 및 수로에서 발생하는 단기간의 저류는 초과강우를 유출로 전환하는데 대한 중요한 역할을 수행하게 된다. 이러한 저류효과를 표현하기 위하여 일반적으로 선형저수지 개념을 이용하게 되며, 이러한 모델에서는 다음과 같은 연속방정식을 사용한다.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (4)$$

여기서, dS/dt 는 시각 t 에서의 저류량 변화율이며 I_t 및 O_t 는 시각 t 에서 저류되는 평균 유입량과 유출

학술분야

량을 각각 의미한다. 이러한 선형저수지 개념을 이용한 모형에서 시각 t 에서의 저류량은 다음 식과 같이 유출량과 관계되어 있다.

$$S_t = KO_t \quad (5)$$

여기서, K 는 선형저수지 개념의 모형에서의 상수이며 단순 유한차분법 개념을 이용하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$Q_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (6)$$

여기서, C_A , C_B 는 저수지추적 계수이며 이들 계수는 다음 식으로 계산된다.

$$C_A = \frac{\Delta t}{K+0.5\Delta t} \quad (7)$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (8)$$

여기서, t 시간 동안의 평균 유출량은 다음과 같다.

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (9)$$

Clark 모형에서 선형저수지 개념은 유역 내의 모든 저류량의 총합에 대한 효과를 표현하게 되며, 따라서 이러한 의미에서 저수지는 유역의 출구에 위치하는 것으로 간주하게 된다. 또한, lumped 모형인 Clark 모형에서는 유역의 출구점까지 이동하는데 필요한 시간 범위에 대하여 고려한다. 선형 수로 개념의 모형(Dooge, 1959)에서 유역의 최원점으로부터 선형저수지 개념상의 출구점까지 추적하게 되는데 이때 지체(delay)는 발생하지만 감쇠(attenuation)는 발생하지 않는 것으로 한다. 이러한 지체현상은 도달시간-누가면적 주상도에 의하여 음해적으로 표현되는데, 이는 출구점에서의 유량에 기여하는 유역면적

을 시간의 함수로 정의한다. 만약 면적에 단위 깊이를 곱하고 이를 계산시간간격 Δt 로 나누면, 선형저수지 개념에서의 유입량인 I_t 이 산정된다.

② 매개변수의 의미 및 산정절차

Clark 모형을 적용하기 위해서는 도달시간-누가면적 주상도의 특성과 저류상수 K 가 필요하다. 앞에서 언급한 대로 선형 추적 모형의 특성은 도달시간-누가면적 주상도에 의하여 음해적으로 정의된다. HEC의 연구에 의하면, 대상유역의 특성들에 대한 관계가 정립되더라도 일반적인 도달시간-누가면적 관계에 대한 회귀식이 대부분의 유역의 단위도를 유도하는데 적절하다. 이러한 일반적인 도달시간-누가면적 관계는 HEC-HMS에도 포함되는데 이는 다음과 같다.

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414\left(\frac{t}{T_c}\right)^{1.5} & \text{for } t \leq \frac{T_c}{2} \\ 1 - 1.414\left(1 - \frac{t}{T_c}\right)^{1.5} & \text{for } t \geq \frac{T_c}{2} \end{cases} \quad (10)$$

여기서, A_t 는 시각 t 에 기여하는 누가유역면적, A 는 총유역면적, T_c 는 유역의 집중시간이다. T_c 는 유역의 최원점에서 출구까지의 유하시간 또는 수문곡선의 유효우량이 끝나는 지점에서 감수부 변곡점까지의 시간으로서 도달시간-누가면적 주상도를 작성하는데 이용된다.

수문곡선에서 감수부 변곡점은 유효강우량에 의한 유출이 끝나는 점을 의미한다. 유역의 저류상수 K 는 초과강우가 출구점까지 배수되면서 발생하는 일시적인 저류현상을 나타내는 지표이다. 이는 만약 이용가능한 관측 강우자료 및 유량자료가 있는 경우 calibration을 통하여 산정할 수 있으며, 그렇지 않은 경우 수문곡선의 변곡점에서의 평균유량을 그 점에서의 점선의 기울기로 나는 값으로 구할 수 있는데 이는 다음의 <그림 4>에서 보는 바와 같다.

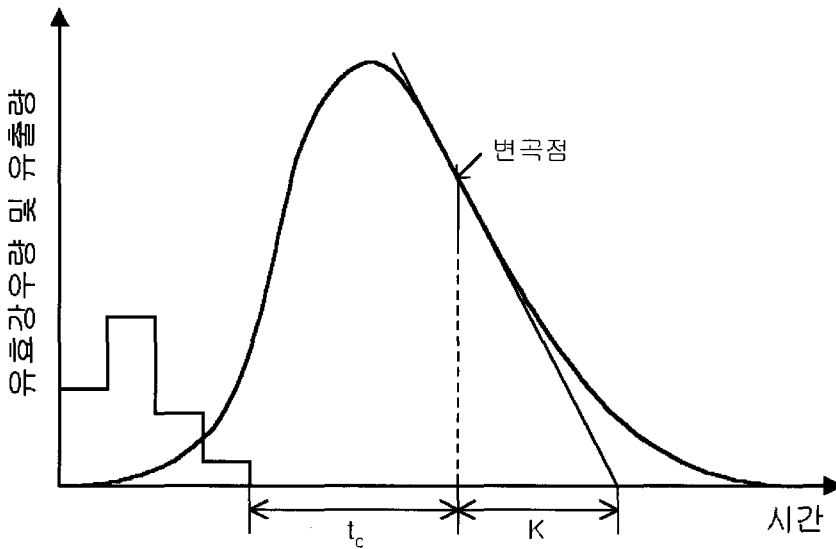


그림 4. 도달시간과 저류상수

③ 실측자료를 이용한 매개변수의 산정

기존의 평균단위도 개념에서 유역의 대표 유출곡선지수, 집중시간 및 저류상수 등의 주요 매개변수는 각 호우별로 산정된 매개변수들의 평균값이나 중앙값으로 결정되며, 이렇게 유도된 대표단위도를 확률홍수량과 PMF를 산정하는데 있어서 공통적으로 이용해 왔다. 그러나, PMP에 준하는 극대 호우사상이 발생할 경우 그 유출특성을 100년, 200년 빈도 확률홍수량의 유출특성과 같은 것으로 간주한다면 홍수량이 과소산정될 수 있으므로 금회 진단에서는 PMF 산정 절차에 대한 미국, 영국, 호주 등 선진국의 추세에 부합하여 실측 호우사상별로 산정된 매개변수들을 이용하여 합리적인 범위에서의 가장 불리한 조건을 형성하도록 대표단위도를 선정하였다.

본 고에서는 Clark 방법의 매개변수인 도달시간, 저류상수를 비롯한 유효우량과 기저유량에 관한 항들을 산정하기 위하여 HEC-HMS의 최적화기법을 사용하였으며, 이 때 목적함수유형은 Peak-Weighted RMSE(root mean squared error)를, 목적함수를 찾아가는 기법으로는 Univariate Gradient 방법을

사용하였다. 또한, 앞에서 언급한 자료기간 중 매개변수 산정을 위하여 주요 호우 사상으로서 15개 실측자료(1984. 8.31~1984. 9. 1, 1987. 8.15~1987. 8.17, 1990. 6.20~1990. 6.23, 1990. 7.17~1990. 7.19, 1990. 9. 9~1990. 9.13, 1991. 7.25~1991. 7.27, 1992. 8.26~1992. 8.28, 1995. 8.23~1995. 8.26, 1996. 7.26~1996. 7.28, 1998. 8. 5~1998. 8.12, 1999. 7.31~1999. 8. 6, 1999. 9.19~1999. 9.22, 2000. 8.25~ 2000. 8.26, 2002. 8. 5~2002. 8. 8, 2002. 8.31~2002. 9. 1)를 채택하였다. 다음 <그림 5>, <그림 6> 및 <표 6>은 최적화 결과를 나타내고 있다.

다음의 <그림 7(a)> ~ <그림 7(c)>에서 보는 바와 같이 실측호우의 최적화를 통하여 산정된 미의 값이 첨두홍수량이 커짐에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보이는데, PMF 산정을 위해서는 호우시 발생가능한 홍수량의 크기에 대하여 가장 불리한 조건을 형성하도록 단위도를 선정해야 하므로, 앞에서 언급한 두 매개변수의 경향을 이용하여 이들 매개변수의 값을 각 지수함수의 한계값에 가까운 값으로 고려함으로써

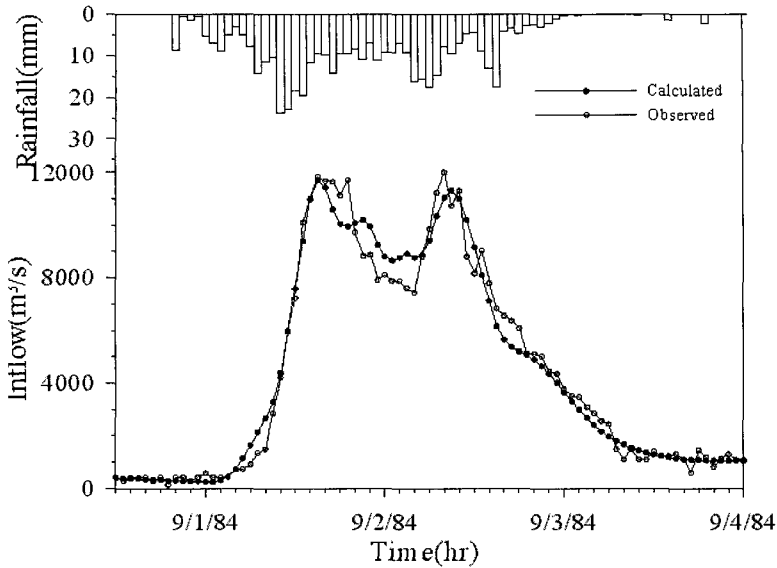


그림 5. 1984. 8. 31 ~ 9. 3 호우사상의 최적화 결과와 실측자료 비교

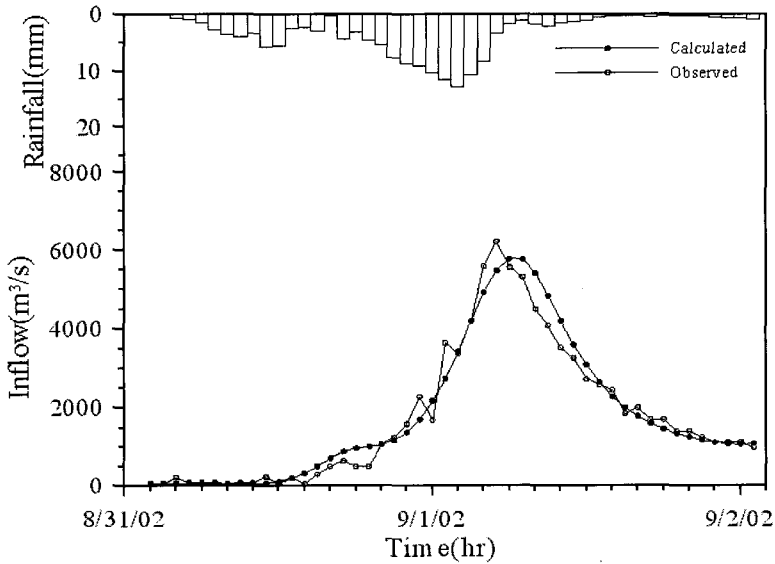


그림 6. 2002. 8. 31 ~ 9. 1 호우사상의 최적화 결과와 실측자료 비교

인북천 유역의 경우 $T_c=3.15$, $K=2.62$, 내린천 유역의 경우 $T_c=3.42$, $K=2.87$, 댐유역의 경우 $T_c=2.44$, $K=1.51$ 로 결정하였다.

또한, PMF 산정시 이용되는 단위도에 사용되는 초기 기저유량(initial baseflow)으로서 미국의 경우에

는 PMP가 발생하는 계절의 월평균유량을 적용하고 있고, 영국의 경우에는 Flood Estimation Handbook(Institute of Hydrology, 1999)에서 제안하고 있는 유역습윤지수, 표준연평균강우량, 유역면적을 이용한 다음과 같은 식을 적용하고 있으며, 호주

표 6. 호우사상별 매개변수 최적화 결과

호우사상	Peak Q (m^3/s)	Curve Number	Tc (hr)	K (hr)	Initial Baseflow (m^3/s)	Recession Coeff.	Recession Threshold (m^3/s)	비 고
1984. 8. 31 ~1984. 9. 1	11,995	88.0	3.35	2.80	1.0	0.21	53.5	인북천유역
		87.0	3.65	3.05	245.0	0.41	3.4	내린천유역
		82.3	2.61	1.62	362.6	0.36	3,375.0	댐유역
1987. 8. 15 ~1987. 8. 17	3,032	61.7	5.23	4.37	36.1	0.21	716.5	인북천유역
		60.5	5.69	4.76	253.9	0.41	270.6	내린천유역
		93.4	4.07	2.52	38.8	0.36	378.5	댐유역
1990. 6. 20 ~1990. 6. 23	2,773	64.1	5.23	4.37	288.6	0.21	7.4	인북천유역
		81.7	5.69	4.76	209.2	0.41	735.1	내린천유역
		86.9	4.07	2.52	53.0	0.36	592.7	댐유역
1990. 7. 17 ~1990. 7. 19	4,791	60.3	4.71	3.93	149.3	0.21	794.2	인북천유역
		72.4	5.12	4.29	364.7	0.41	978.0	내린천유역
		91.2	3.66	2.27	1.4	0.36	263.8	댐유역
1990. 9. 9 ~1990. 9. 13	10,653	58.2	3.40	2.84	0.0	0.21	2,500.8	인북천유역
		60.6	3.70	3.10	223.2	0.41	2.3	내린천유역
		85.5	2.64	1.64	1.0	0.36	1,912.6	댐유역
1991. 7. 25 ~1991. 7. 27	6,905	62.0	3.20	2.67	16.5	0.21	0.6	인북천유역
		74.7	3.48	2.91	515.3	0.41	1,085.9	내린천유역
		92.0	2.49	1.54	23.9	0.36	1,195.2	댐유역
1992. 8. 26 ~1992. 8. 28	3,434	64.7	5.28	4.40	10.1	0.21	381.4	인북천유역
		60.6	5.74	4.80	190.6	0.41	424.5	내린천유역
		92.9	4.10	2.54	1.3	0.36	629.7	댐유역
1995. 8. 23 ~1995. 8. 26	5,661	75.2	4.58	3.82	1.0	0.21	194.6	인북천유역
		83.6	4.98	4.17	313.0	0.41	165.8	내린천유역
		76.4	3.56	2.21	1.0	0.36	1,260.4	댐유역
1996. 7. 26 ~1996. 7. 28	3,709	60.6	4.36	3.64	1.2	0.21	694.2	인북천유역
		60.4	4.74	3.97	266.5	0.41	343.9	내린천유역
		84.2	3.39	2.10	0.0	0.36	996.8	댐유역
1998. 8. 5 ~1998. 8. 12	2,943	52.5	6.54	5.46	62.7	0.21	119.0	인북천유역
		53.1	7.11	5.85	490.3	0.41	15.1	내린천유역
		89.6	5.09	3.15	334.1	0.36	965.0	댐유역
1999. 7. 31 ~1999. 8. 6	7,841	92.1	4.36	3.64	1.0	0.21	173.0	인북천유역
		56.3	4.74	3.97	490.9	0.41	536.6	내린천유역
		63.5	3.39	2.10	1.0	0.36	853.9	댐유역
1999. 9. 19 ~1999. 9. 22	3,375	65.4	4.48	4.08	51.9	0.21	53.5	인북천유역
		72.6	5.31	4.45	51.7	0.41	982.9	내린천유역
		81.2	3.80	2.35	27.1	0.36	699.6	댐유역
2000. 8. 25 ~2000. 8. 26	2,638	60.2	5.01	4.19	4.7	0.21	359.3	인북천유역
		78.8	5.45	4.57	139.5	0.41	19.8	내린천유역
		78.5	3.90	2.42	55.6	0.36	599.0	댐유역
2002. 8. 5 ~2002. 8. 8	4,984	60.3	5.60	4.68	10.1	0.21	8.6	인북천유역
		53.1	6.09	5.10	10.1	0.41	4.4	내린천유역
		86.0	4.35	2.70	385.3	0.36	512.5	댐유역
2002. 8. 31 ~2002. 9. 1	6,227	74.6	4.23	3.53	65.9	0.21	16.5	인북천유역
		92.1	4.60	3.85	1.2	0.41	1,004.2	내린천유역
		93.9	3.29	2.04	1.3	0.36	115.8	댐유역

학술분야

의 경우 관측 최대 기저유량보다 20~50% 큰 값을 사용할 것을 권장하고 있다. CN값의 경우 관측값으로부터 산정된 값 중 최대값을 사용하는 것이 원칙이나 본

보고서에서는 큰 값들 중 3개의 평균을 취하는 등 합리적으로 CN값을 선정하였다. 이러한 과정에 의하여 산정된 각 단위도의 매개변수는 다음 표와 같다.

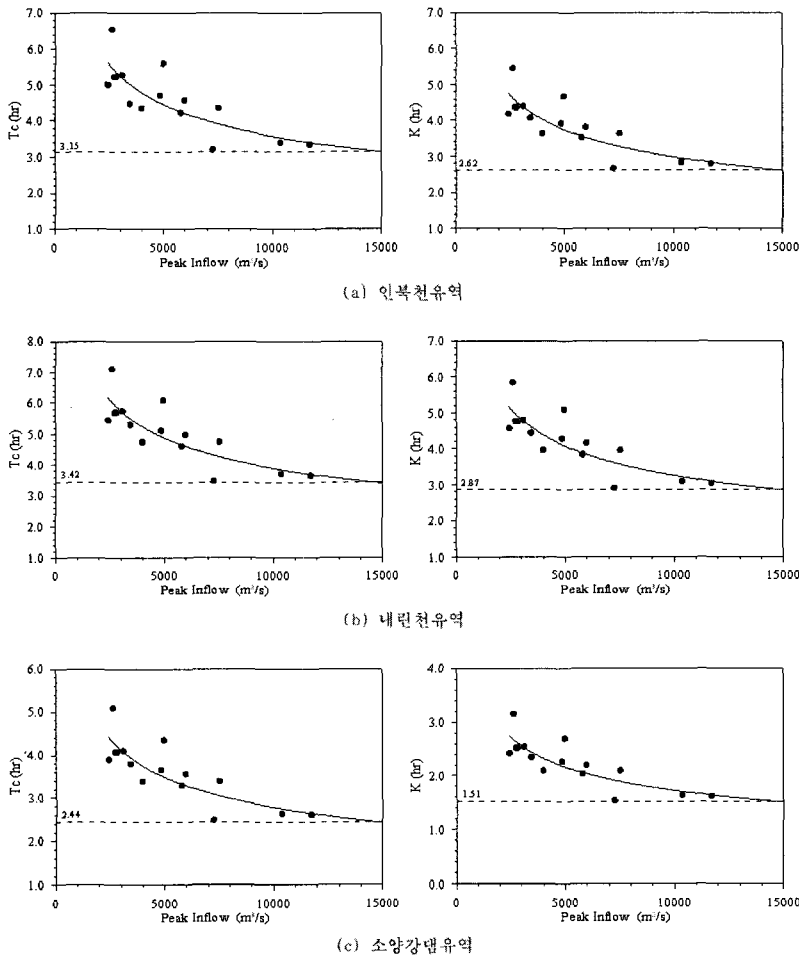


그림 7. 실측호우사상별 첨두홍수량과 및 간의 관계

표 7. 단위도별 매개변수

단위도 구분	유역	CN	Tc(hr)	K(hr)	감수상수	Threshold Q(m³/s)
확률 홍수량	인북천	66.7	4.64	3.89	0.21	404.9
	내린천	69.8	5.07	4.24	0.41	438.2
	댐유역	85.2	3.63	2.25	0.36	956.7
PMF	인북천	80.6	2.88	2.39	0.21	2,500.8
	내린천	85.8	3.12	2.62	0.41	1,085.9
	댐유역	85.4	2.22	1.38	0.36	1,912.6

3. 결론

빈도별 홍수량 및 PMF를 홍수 빈도해석 기법과 Clark 단위도법에 의한 유역유출해석을 통하여 산정하였다. 다음 <표 8>은 산정된 홍수량 분석결과를 나타내고 있다.

지점 홍수빈도해석을 통해 외삽 범위에서 큰 재현기간의 확률홍수량을 산정하는 것은 신뢰성에 문제가 있으나, 결정론적 모형을 이용한 홍수량과 비교할 때

큰 무리가 없다고 판단되며, 유럽 대부분의 국가에서 채택하고 있는 10,000년 빈도 설계 홍수량과 미국·영국 등에서 채택하는 PMF 사이의 관계를 고려할 때 금회 분석결과는 추정범위에 포함되는 것으로 판단된다.

향후 지역 빈도해석을 통한 홍수량 산정(김경덕과 허준행, 2004; 김경덕 등, 2004)과 결정론적 방법인 PMF 산정을 통해 보다 신뢰할 수 있는 홍수량 추정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

표 8. 홍수량 분석결과 비교

(단위 : m³/s)

구 분	적용모형	재 현 기 간		
		100 yr	200 yr	PMF
설 계 시	Nakayasu	9,400	10,500	13,500(1,000년)
금회분석	홍수빈도해석	11,212	12,551	19,751(10,000년)
	Clark	11,054	12,695	21,037

참고문헌

김경덕, 김지훈, 허준행 (2003). 지수홍수법과 Netmax 자료를 이용한 지역 빈도해석, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
 김경덕, 허준행 (2004). 수문자료 크기에 따른 지역빈도해석 적용성 기준 검토, 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
 이영석, 김경덕, 허준행 (2004). 한강 인도교 지점에서의 홍수빈도해석에 대한 고찰, 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
 한국시설안전기술공단 (2004). 제2차 소양강다목적댐 정밀안전진단 보고서.
 Condie, R. and Lee, K. A. (1982). "Flood Frequency Analysis with Historic Information", Journal of Hydrology, Vol. 58, pp. 47-61.
 Cunnane, C. (1978). "Unbiased Plotting Positions - A Review" Journal of Hydrology, Vol. 37, pp. 205-222.
 Hirsh, R. M. (1987). "Probability Plotting position Formulas for Flood Records with Historical Information", Journal of Hydrology, Vol. 96, pp. 185-199.
 Hirsh, R. M. and Stedinger, J. R. (1986). "Plotting Position for Historical Floods and Their Precision" Water Resources Research, Vol. 23, No. 4, pp. 715-727.
 Institute of Hydrology (1999). Flood estimation handbook, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
 Interagency Advisory Committee on Water Data (IACWD). (1982) "Guidelines for Determining Flood Flow Frequency", Bulletin #17B, Hydrology Committee. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
 Salas, J.D. and Fernandez, B. (1995). "Plotting Position Formulas Based on Systematic Historical and Paleoflood Records", Journal of Hydrology.
 Stedinger, J. R. and Cohn, T. A. (1986). "Flood Frequency Analysis with Historical and Paleoflood Information", Water Resources Research, Vol. 22, No. 5, pp. 785-793.
 Tasker, G. D. and Stedinger, J. R. (1987). "Regional Regression of Flood Characteristics Employing Historical Information", Journal of Hydrology, Vol. 96, pp. 255-264.