

## PMF 산정을 위한 단위도의 최적 매개변수 추정\*

채수권, 맹승진\*\*, 황주하, 김태우, 김형산

본 연구에서는 보령댐 유역을 대상으로 강우-유출모형인 HEC-HMS를 사용하여 가능최대홍수량의 체계적이고 합리적인 추정을 위해 대표단위도의 최적 매개변수를 산정하였다. HEC-HMS의 매개변수 중 도달시간의 초기값은 Kraven(II)의 경험식을 이용하여 2.21hr로 추정하였고 저류상수는 Sabol 경험식을 이용하여 1.92로 추정하였다. 유출곡선번호는 선형함수조건 AMC-III에 따라 80으로 추정하였다. 민감도 분석 결과 각각 매개변수의 범위는 다르지만 도달시간과 저류상수가 가장 민감한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 PMF 산정을 위한 최적 매개변수를 추정하는 방법으로 극한 홍수량을 의미하는 PMF를 산정하기 위해서는 각 호우사상별로 산정된 매개변수를 첨두홍수량별로 도시하여 PMF에 가까운 최대 첨두유량이 발생하도록 수렴하는 매개변수를 찾는 방법의 과정을 통해 최대 단위도를 추정하는 방법이 적합하다고 판단되었다. 최대 단위도를 이용하여 최적매개변수를 산정한 결과 도달시간은 1.68hr로 추정하였고 저류상수는 1.49로 추정하였다.

**주제어:** 강우, 유출, HEC-HMS, 가능최대강우량, 가능최대홍수량

### 1. 서론

우리나라의 기후와 강수형태는 대륙성 기후와 해양성 기후의 특성을 모두 지니고 있다. 겨울철에는 중국대륙에서 발생하는 고기압에 의한 건조한 북서계절풍이 불어오고, 여름철에는 태평양에서 발생하는 저기압에 의한 습한 남동계절풍이 불어와 겨울에 비가 적게 내리고 여름에 비가 많이 내린다.

우리나라는 아시아 대륙의 동쪽 끝에 위치한 몬순(Monsoon)기후지역으로 연평균 1,283mm의 비교적 많은 강수량을 나타내고 있으며 지역적, 시기적으로 편차가 심한 강우특성을 가지고 있다. 계절별 강수량의 분포를 보면 홍수기인 6월에서 9월까지의 강수량이 연강수량의 2/3에 이르며 장마기간에는 산악지역에서 최대강수량이 발생하다가 장마 후 태풍과 저기압성강수 그리고 불안정한 대류의 영향을 받아 주로 남해안과 영동산간 및 해안지방에서 강수량의 집중현상이 나타난다.

\* 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었습니다.

\*\* 교신저자

최근 세계적인 기상이변으로 인해 이상홍수가 빈번하게 발생하고 있으며, 우리나라도 이상홍수로 인해 수해 규모가 날로 증가하고 있다. 또한 국지성 호우로 인한 피해규모도 증가하고 있어 홍수량, 특히 극치홍수량에 관한 중요성이 강조되고 있다.

따라서 매년 우리나라에 막대한 인명과 재산의 피해를 주는 홍수의 항구적인 대책 수립을 위해서 근본적으로 선행되어야 할 것은 다목적 댐 및 저수용량 500만톤 이상의 농업용 저수지의 규모를 결정짓는데 필요한 신뢰성 있는 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)를 유도하는데 있다.

PMF는 일반적으로 “지역에서 합리적으로 가능한 극심한 기상학적 그리고 수문학적인 조건들의 가장 심각한 조합에 의해 예상되는 홍수량”으로 정의되며, 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP)을 입력으로 한 강우-유출 관계에 의하여 산정되는 것이 일반적이다(건설교통부 2004, 2005).

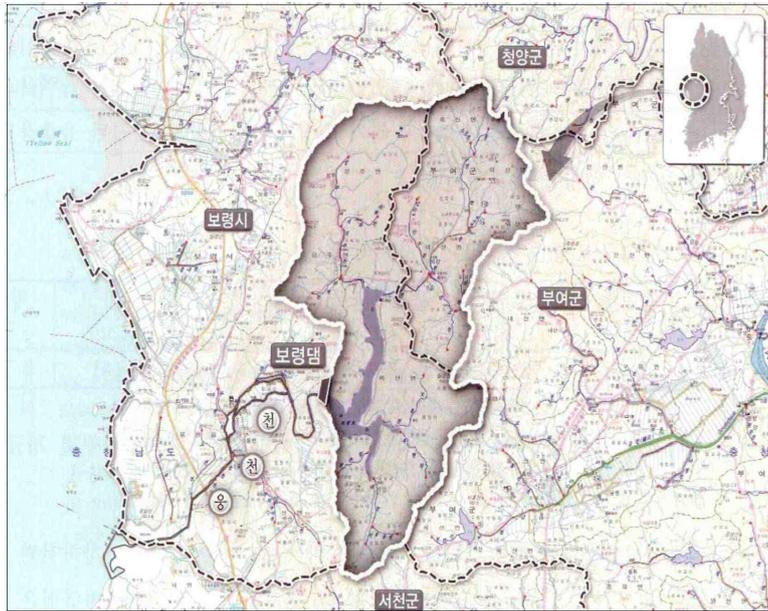
PMF 산정시 적용한 강우-유출 모형의 매개변수 결정에 따른 PMF 값이 분석자의 주관에 따라 상이한 것이 현실이다. 이 문제점을 해결하기 위해 객관적인 PMF 산정을 위한 단위도의 매개변수 산정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 보령댐 유역을 대상으로 합리적인 PMF 산정을 위해 강우-유출 모형으로 선정된 HEC-HMS의 매개변수 민감도를 분석하고, 민감한 매개변수의 적정 값을 추정하여 PMF 산정을 위한 단위도의 최적 매개변수를 제시하고자 한다.

## II. 대상유역 선정 및 연구방법

### 1. 대상유역 선정

본 연구에서는 홍수기 호우사상 기록이 많고 유역 면적에 비해 댐의 규모가 작아 PMF에 민감한 보령댐 유역을 대상유역으로 선정하였다.

보령댐 유역은 북쪽으로 차령산맥이 접하고 있으며 하천의 경사가 급하여 홍수기에는 강우로 인한 수위의 상승이 급하게 나타나고 유속이 빠르며 하천의 침식이 많이 발생하여 하상변동이 특히 심하다. 또한 보령댐 유역의 형상계수는 0.33으로 지연된 유출응답을 갖는 긴 유역의 형상을 나타낸다. 유역내의 연평균 강수량은 1,227.0mm로서 우리나라 연평균강수량 1,283mm보다 다소 적게 나타나는 과우지역에 속한다. 보령댐 유역도는 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Map of watershed

## 2. 연구방법

본 연구에서는 신뢰성이 확보된 실측 강우-유출 사상을 다수 확보하고 있으며 PMF에 민감한 보령댐 유역을 선정하였다. 보령댐 유역의 PMF 산정을 위한 단위도의 최적 매개변수 산정을 위해 다음의 절차에 의해 연구를 수행하고자 한다.

- 가. 실측된 강우-유출 사상들 중에서 단일호우 대비 유출된 호우사상을 선정한다.
- 나. 현업 적용사례가 다수 있으며 공개된 강우-유출 모형을 선정한다.
- 다. 선정된 강우-유출 모형의 매개변수 초기값을 경험식들에 의해 산정한다.
- 라. 최적화 작업으로 결정된 매개변수에 의해 민감도 분석 범위를 결정하고 매개변수간 민감도 분석을 실시한다.
- 마. 민감한 매개변수의 선정과 대표단위도 선정방법을 결정한다.
- 바. 호우사상별 최적 매개변수를 산정한다.
- 사. 대표단위도의 적절한 매개변수를 추정한다.

## III. 결과 및 고찰

## 1. 대상유역 특성과 호우사상

본 분석의 대상 유역인 보령댐의 유역 경계 구분 및 유역 특성인자를 추출하기 위해 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 수집하여 분석을 수행하였다. GIS 분석 프로그램을 이용하였으며 추출된 유역 경계 및 유역 특성인자는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Characteristics of Watershed

Area (km <sup>2</sup> )	Length (km)	Slope (%)
163.6	22.3	36.9

보령댐유역에 대한 유출 매개변수를 추정하기 위해서는 양질의 관측된 강우-유출 자료가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 보령댐 유역에 기록된 호우사상을 조사하였다. 가용 호우사상 선정을 위해 일 우량자료를 이용한 개략적인 호우기간 선정 후 시강우와 시유량자료 수집 그리고 강수대비 유출율, 우량주상도와 유출곡선의 형태 분석 절차를 수행하여 적절한 호우사상을 결정하였다. 최종적으로 채택된 7개 호우사상과 호우사상별 총강우량과 첨두유량은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Selection of rainfall-runoff event

Event	Duration	Total precipitation (mm)	Observed peak flow (m <sup>3</sup> /s)
1	Aug. 23 to Aug. 25, 2000	218	513
2	Aug. 26 to Aug. 29, 2000	300	1,028
3	Sep. 15 to Sep. 16, 2000	141	226
4	Aug. 06 to Aug. 09, 2002	230	529
5	Jul. 10 to Jul. 12, 2005	94.4	373
6	Jul. 11 to Jul. 13, 2006	95.1	368
7	Aug. 31 to Sep. 02, 2007	90.8	204

## 2. 모형의 선정

본 연구에서 적용되는 강우-유출 모형은 국내의 한국수자원공사, 학계 및 용역사에서 많은 적용사례가 있는 HEC-HMS로 하였다(한국수자원공사, 1998). HEC-HMS는 1967년 미국 공병단 산하 수문공학연구소(Hydrologic Engineering Center)에서 개발된 HEC-1 모형에 포함되어 있는 단위도, 수문학적 홍수추적 과정을 모의한다. HEC-HMS 모형은 각각의 유출 성분을 모의하기 위해 유출량, 직접유출량, 기저유출량을 모의하며 하도구간에서의 흐름을 모의하기 위해 하천 홍수추적 모듈을 제공한다. 더불어 격자형 강우자료를 이용하여 적용할 수 있는 유출 변환과 장기연속유출에 적용 할 수 있는 간단한 수분감소 등을 포함하여 GUI가 보강된 윈도우 환경으로 개발된 모형이다(황주하 등, 2010; US Army Corps of Engineers, 2008).

## 3. 매개변수 초기값 선정

HEC-HMS 모형 수행의 시작을 위해서는 모형의 7개 매개변수별로 초기값을 결정하여야 한다. 매개변수 초기값의 결정은 매개변수의 물리적 특성에 따른 최적화 값을 찾는 데 있어서 중요할 뿐만 아니라 PMF 산정에 많은 영향을 미친다(한국개발연구원, 2007).

따라서 본 분석에서 7개 매개변수의 초기값은 유역특성인자를 고려하며 합리적이라고 판단되는 경험식을 통해 산정하였다.

### 1) 도달시간( $T_c$ )

도달시간의 초기값은 <Table 3>의 각 경험식에 의해 산정된 도달시간과 이 결과를 유로연장으로 부터 역산하여 산정한 평균유속이 합리적이라고 판단되는 경험식의 도달시간으로 결정하였다. 또한 <Table 3>의 경험식은 우리나라 하천기본계획 및 수자원 시설 설계와 같은 실무에서 다양하게 사용하고 있는 방법들이다. 그리고 집중시간의 초기값은 최소 1.0hr를 초과하여야 한다.

<Table 3> Experience formula for time of concentration

Proponent	Type	Coverage
Kirpich	$T_c = 0.0663 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	Suitable formula in farm land area( $A \leq 0.5 \text{km}^2$ )
Rziha	$T_c = 0.0139 \frac{L}{S^{0.6}}$	Application to the upper stream ( $S \geq 1/200$ )

Kraven( I )	$T_c = 0.0074 \frac{L}{S^{0.515}}$	Application to the downstream (S<1/200)
Kraven( II )	$T_c = \frac{L}{3.6V}$	Application to the velocity of flow by stream slope (S≤1/200: V=2.1m/s, S>1/100: V=3.5m/s, 1/200≤S≤1/100: V=3.0m/s, S≥1/100: V=3.5m/s)

TC; Time of concentration(hr), L; Length(km), S; Slope(m/m), n; Coefficient of roughness

### 2) 저류상수(K)

저류상수의 초기값은 역시 도달시간과 같이 <Table 4>의 경험식으로 산정한다. 일반적인 저류상수 산정 방법으로는 Russel, Linsley 및 Sabol 등의 방법이 이용되고 있다(Sabol, 1988). <Table 4>의 경험식은 우리나라의 하천기본계획 및 수자원 시설 설계와 같은 실무에서 다양하게 사용하고 있는 방법들이다. 그리고 관측값이 존재할 경우 관측값을 초기값 선정에 반영한다. 저류상수의 초기값은 최소 0.5hr를 초과하여야 한다.

<Table 4> Experience formula for storage constant

Proponent	Type	Coverage
Linsley	$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}}$	b : 0.01~0.03
Russel	$K = \gamma T_c$	$\gamma$ : Urban area (1.1~2.1) Nature area (1.5~2.8) Forest area (8.0~12.0)
Sabol	$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A}}$	

K; Storage constant(hr), TC; Time of concentration(hr), L; Length(km), S; Slope(m/m), A; Area(km<sup>2</sup>)

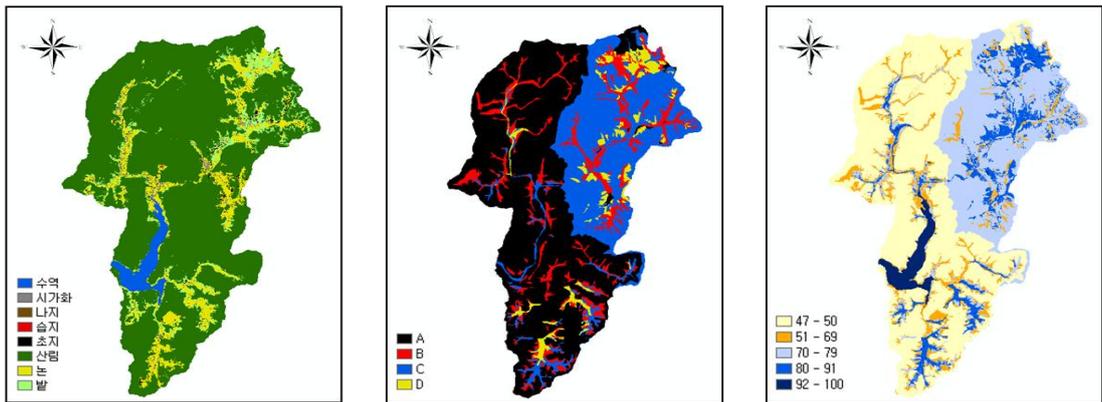
### 3) 유출곡선번호(CN)

미 농무성 산하 자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service; NRCS)에서는 유역내 토양의 배수특성과 토지이용 및 피복상태 등의 정보를 이용하여 총우량으로부터 유효우량을 산정할 수 있는 방법을 개발하였다. 현재 우리나라에서는 단위도를 이용한 홍수량 산정시 유효우량을 산정하기 위한 방법으로 이 방법이 널리 이용되고 있다(윤라영 외, 2007; Hawkins, et. al., 2000; McCuen, 2002).

유출곡선지수(CN)의 초기값은 우리나라의 경우 전국에 걸쳐 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토

양도(1:25,000)를 이용하여, 각 토양의 성질별로 배수능력을 평가하여 A, B, C, D형으로 재분류하여 수문학적 토양군을 산정하였다. 이 결과와 1:25,000 축척의 토지 이용도를 이용하여 대상 유역의 평균 CN값을 산정하였다.

유역에 대한 토지피복, 수문학적 토양군, AMC-II 조건의 CN값 분포 현황은 <Fig. 2>와 같다.



<Fig. 2> Estimated results of land use and hydrologic soil group, CN value at watershed on Boryeong dam

보령댐유역에 대해 산정된 CN값 결과를 이용하여 유역평균 CN값을 추출하였다. 매개변수 추정에 사용될 초기 CN값에 대해 설계의 안전성을 고려하여 선행토양함수 조건을 AMC-III의 상태로 지정하여 유출해석을 수행하였다. <Table 5>는 시범유역에 대해 산정된 AMC-II 조건과 AMC-III 조건의 CN값을 각각 나타낸 것이다.

<Table 5> Estimation of CN value

Item	Boryeong dam
CN(AMC-II)	63
CN(AMC-III)	80

#### 4) 감수상수(RC)

감수상수는 Sabol(1988)이 제안한 다음의 식을 사용한다.

$$RC = e^{-\frac{1}{K}} \tag{1}$$

여기에서 K는 저류상수이다.

5) 초기손실(IL)

초기손실의 초기값은 NRCS에서 제시한 다음의 식을 사용한다. CN값은 전술한 방법에 의해 산정된 값이다.

$$IL = 0.2S, CN = \frac{25,400}{(S + 254)} \quad (2)$$

6) 초기기저유량(IBF)

초기기저유량의 초기값은 호우 발생이 시작된 때의 평균유량으로 선정한다. 이는 HEC-HMS의 매뉴얼에서 추천한 방법이다.

7) Threshold(TQ)

Threshold 유량이 발생하는 변곡점은 강우가 끝난 시점에서 도달시간을 더하며 이때의 유량을 초기값으로 선정한다. 본 분석에서 Threshold는 Threshold 유량을 첨두유량으로 나눈 비율을 모형의 입력자료로 하였다.

이상의 결과에서 HEC-HMS 모형의 매개변수인 감수상수, 초기손실, 초기기저유량 및 Threshold의 초기값이 선정되었고 선정된 대상구역의 이상의 매개변수 초기값 선정 방법에 의해 대상구역의 호우 사상별 매개변수 초기값은 <Table 6>과 같다.

<Table 6> Initial value of parameters by each event

Event	Tc	K	CN	IL	IBF	RC	TQ
1	2.21	1.92	80	8.27	3.00	0.5940	0.55
2	2.21	1.92	80	8.27	0.00	0.5940	0.11
3	2.21	1.92	80	8.27	32.00	0.5940	0.62
4	2.21	1.92	80	8.27	1.00	0.5940	0.45
5	2.21	1.92	80	8.27	27.10	0.5940	0.35
6	2.21	1.92	80	8.27	6.98	0.5940	0.72
7	2.21	1.92	80	8.27	17.80	0.5940	0.24

#### 4. 매개변수 민감도 분석

본 분석에서는 PMF 산정에 결정적인 영향을 미치는 모형의 매개변수 상호간 변화 특성을 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였다.

매개변수간 민감도 분석을 수행하기 위해 우선적으로 <Table 6>의 값을 매개변수 초기치로 설정한 후 각 매개변수의 물리적 특성을 고려하여 시행착오법에 의해 매개변수들을 추정한다(McCuen, 1973; Shalaby, 1995). 그리고 최적화 기법에 의해 최적의 매개변수를 추정한다. 매개변수들의 상호간 변화 특성을 파악하기 위해 추정된 각각의 매개변수에 대한 최소값과 최대값을 <Table 7>과 같이 선정하였고 이들의 평균을 기준으로 10%씩 증감해 가며 매개변수 상호간의 민감도를 분석하였다(박세훈 외, 2004).

<Table 7> Range for sensitivity analysis between parameters

Item	Tc	K	CN	IL	IBF	RC	TQ
Minimum <sup>1)</sup>	2.13	1.55	73	12.62	10.00	0.1900	0.10
Maximum <sup>2)</sup>	4.83	3.58	89	87.81	40.00	0.2500	0.60
Mean	3.70	2.45	81	50.22	21.93	0.2200	0.40

1) Minimum value among parameter by event, 2) Maximum value among parameter by event

매개변수 초기값에 따른 매개변수간 민감도분석 결과 모든 매개변수에서 상대적인 차이는 있으나 TC, K, CN값의 변화가 가장 컸다. 이것은 PMF의 결정적인 영향을 주는 매개변수라 볼 수 있는 결과이다. 그리고 대체적으로 모든 매개변수들이 매개변수 추정시 초기값의 영향을 받는 것으로 나타났다(Sorooshian, *et. al.*, 1982).

HEC-HMS의 매개변수의 민감도 분석 결과인 <Table 8> 및 <Table 9>에서 침투유출량과 총유출량은 도달시간, 저류상수, CN 및 기저유량이 민감한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 매개변수 초기값에 따른 매개변수간 민감도분석과 유사하게 나타났다.

<Table 8> Sensitivity analysis for peak runoff rate

(Unit : m<sup>3</sup>/s)

Rate(%)	TC	K	CN	IL	IBF	RC	TQ
-100	2,293.5 (2.001)	2,508.2 (11.550)	2,130.9 (-5.230)	2,359.0 (4.914)	2,241.3 (-0.320)	2,247.9 (-0.027)	2,248.5 (0.000)
-90	2,286.8 (1.703)	2,483.1 (10.434)	2,143.6 (-4.665)	2,345.5 (4.314)	2,242.0 (-0.289)	2,248.0 (-0.022)	2,248.5 (0.000)

-80	2,283.1 (1.539)	2,451.9 (9.046)	2,156.0 (-4.114)	2,331.8 (3.705)	2,242.8 (-0.254)	2,248.0 (-0.022)	2,248.5 (0.000)
-70	2,279.3 (1.370)	2,424.9 (7.845)	2,168.3 (-3.567)	2,319.3 (3.149)	2,243.5 (-0.222)	2,248.1 (-0.018)	2,248.5 (0.000)
-60	2,275.1 (1.183)	2,392.7 (6.413)	2,180.3 (-3.033)	2,309.6 (2.717)	2,244.2 (-0.191)	2,248.2 (-0.013)	2,248.5 (0.000)
-50	2,271.2 (1.010)	2,364.6 (5.163)	2,192.2 (-2.504)	2,299.9 (2.286)	2,244.9 (-0.160)	2,248.2 (-0.013)	2,248.5 (0.000)
-40	2,265.6 (0.761)	2,336.7 (3.923)	2,203.9 (-1.984)	2,290.0 (1.846)	2,245.6 (-0.129)	2,248.3 (-0.009)	2,248.5 (0.000)
-30	2,254.6 (0.271)	2,306.7 (2.588)	2,215.3 (-1.477)	2,279.9 (1.396)	2,246.4 (-0.093)	2,248.3 (-0.009)	2,248.5 (0.000)
-20	2,248.2 (-0.013)	2,289.4 (1.819)	2,226.6 (-0.974)	2,269.7 (0.943)	2,247.1 (-0.062)	2,248.4 (-0.004)	2,248.5 (0.000)
-10	2,248.6 (0.004)	2,267.1 (0.827)	2,237.7 (-0.480)	2,259.2 (0.476)	2,247.8 (-0.031)	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)
0	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)	2,248.5 (0.000)
10	2,248.3 (-0.009)	2,219.2 (-1.303)	2,259.2 (0.476)	2,237.6 (-0.485)	2,249.6 (0.049)	2,248.6 (0.004)	2,248.5 (0.000)
20	2,244.1 (-0.196)	2,192.0 (-2.513)	2,269.6 (0.938)	2,226.4 (-0.983)	2,250.7 (0.098)	2,248.6 (0.004)	2,248.5 (0.000)
30	2,243.1 (-0.240)	2,167.7 (-3.594)	2,279.9 (1.396)	2,214.8 (-1.499)	2,251.8 (0.147)	2,248.7 (0.009)	2,248.5 (0.000)
40	2,239.7 (-0.391)	2,140.2 (-4.817)	2,289.9 (1.841)	2,202.9 (-2.028)	2,252.9 (0.196)	2,248.8 (0.013)	2,248.5 (0.000)
50	2,235.3 (-0.587)	2,113.6 (-6.000)	2,299.7 (2.277)	2,190.5 (-2.579)	2,254.0 (0.245)	2,248.8 (0.013)	2,248.5 (0.000)
60	2,229.6 (-0.841)	2,086.1 (-7.223)	2,309.3 (2.704)	2,177.7 (-3.149)	2,255.1 (0.294)	2,248.9 (0.018)	2,248.5 (0.000)
70	2,224.0 (-1.090)	2,059.1 (-8.423)	2,318.7 (3.122)	2,164.7 (-3.727)	2,256.2 (0.342)	2,248.9 (0.018)	2,248.5 (0.000)
80	2,217.5 (-1.379)	2,034.8 (-9.504)	2,327.9 (3.531)	2,151.6 (-4.310)	2,257.3 (0.391)	2,249.0 (0.022)	2,248.5 (0.000)
90	2,211.4 (-1.650)	2,006.0 (-10.785)	2,336.9 (3.932)	2,138.4 (-4.897)	2,258.3 (0.436)	2,249.0 (0.022)	2,248.5 (0.000)
100	2,205.2 (-1.926)	1,982.3 (-11.839)	2,345.6 (4.318)	2,125.0 (-5.493)	2,259.4 (0.485)	2,249.1 (0.027)	2,248.5 (0.000)

<Table 9> Sensitivity analysis for total runoff

(Unit : 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>)

Rate(%)	TC	K	CN	IL	IBF	RC	TQ
-100	101,086.8 (2.447)	103,688.9 (5.084)	93,887.9 (-4.849)	105,265.5 (6.682)	98,159.5 (-0.520)	98,489.5 (-0.185)	97,962.1 (-0.720)
-90	100,655.8 (2.010)	103,166.0 (4.554)	94,382.8 (-4.347)	104,594.5 (6.002)	98,210.7 (-0.468)	98,508.7 (-0.166)	97,962.1 (-0.720)
-80	100,415.9 (1.767)	102,619.3 (4.000)	94,872.2 (-3.851)	103,922.7 (5.321)	98,262.3 (-0.416)	98,527.6 (-0.147)	97,962.1 (-0.720)

-70	100,241.9 (1.591)	102,176.2 (3.551)	95,356.1 (-3.361)	103,256.4 (4.646)	98,313.5 (-0.364)	98,546.4 (-0.128)	97,962.1 (-0.720)
-60	100,057.2 (1.403)	101,555.5 (2.922)	95,834.6 (-2.876)	102,603.8 (3.984)	98,364.6 (-0.312)	98,565.0 (-0.109)	97,962.1 (-0.720)
-50	99,887.6 (1.231)	101,049.4 (2.409)	96,307.8 (-2.397)	101,950.6 (3.322)	98,415.8 (-0.260)	98,583.4 (-0.090)	97,962.1 (-0.720)
-40	99,691.0 (1.032)	100,542.6 (1.895)	96,775.7 (-1.922)	101,296.8 (2.660)	98,467.4 (-0.208)	98,601.6 (-0.072)	97,962.1 (-0.720)
-30	99,421.0 (0.759)	100,012.9 (1.358)	97,256.4 (-1.435)	100,642.2 (1.996)	98,518.6 (-0.156)	98,619.6 (-0.054)	97,962.1 (-0.720)
-20	99,166.5 (0.501)	99,641.8 (0.982)	97,733.6 (-0.952)	99,986.7 (1.332)	98,569.8 (-0.104)	98,637.4 (-0.036)	97,962.1 (-0.720)
-10	98,920.6 (0.251)	99,083.9 (0.417)	98,205.7 (-0.473)	99,330.2 (0.667)	98,621.4 (-0.052)	98,655.0 (-0.018)	98,148.6 (-0.531)
0	98,672.5 (0.000)						
10	98,502.7 (-0.172)	98,051.1 (-0.630)	99,134.3 (0.468)	98,013.5 (-0.668)	98,750.4 (0.079)	98,689.8 (0.018)	99,198.2 (0.533)
20	98,190.0 (-0.489)	97,594.9 (-1.092)	99,590.9 (0.931)	97,353.0 (-1.337)	98,827.8 (0.157)	98,707.0 (0.035)	99,684.8 (1.026)
30	98,046.0 (-0.635)	97,180.5 (-1.512)	100,042.6 (1.389)	96,690.7 (-2.008)	98,905.6 (0.236)	98,724.0 (0.052)	100,311.4 (1.661)
40	97,915.7 (-0.767)	96,747.5 (-1.951)	100,489.3 (1.841)	96,052.7 (-2.655)	98,983.4 (0.315)	98,740.8 (0.069)	100,964.1 (2.322)
50	97,772.2 (-0.912)	96,482.5 (-2.219)	100,931.1 (2.289)	95,413.5 (-3.303)	99,060.8 (0.394)	98,757.5 (0.086)	101,583.2 (2.950)
60	97,605.8 (-1.081)	96,137.8 (-2.569)	101,368.1 (2.732)	94,774.5 (-3.950)	99,138.7 (0.472)	98,774.0 (0.103)	102,244.7 (3.620)
70	97,446.7 (-1.242)	95,798.0 (-2.913)	101,800.2 (3.170)	94,133.4 (-4.600)	99,216.5 (0.551)	98,790.4 (0.119)	102,999.1 (4.385)
80	97,267.9 (-1.423)	95,531.6 (-3.183)	102,227.6 (3.603)	93,492.4 (-5.250)	99,294.4 (0.630)	98,806.6 (0.136)	103,723.1 (5.119)
90	97,100.8 (-1.593)	95,151.6 (-3.568)	102,650.3 (4.031)	92,851.4 (-5.899)	99,371.8 (0.709)	98,825.7 (0.155)	104,417.4 (5.822)
100	96,931.5 (-1.764)	94,879.9 (-3.844)	103,068.3 (4.455)	92,210.5 (-6.549)	99,449.6 (0.788)	98,849.3 (0.179)	105,121.3 (6.536)

## 5. 대표 단위도 선정

### 1) 기존 대표 단위도 선정 방법

확률홍수량 또는 가능최대홍수량을 산정하기 위해서는 산정하고자 하는 홍수량의 의미에 적합한 매개변수를 추정하는 것이 매우 중요하다. 통상 100~200년 이내의 설계빈도 이내의 확률홍수량을 추정하기 위해서는 수집된 홍수사상을 적절히 대표할 수 있는 평균 단위도를 채택하는 것이 바람직하고, PMF와 같은 극한 홍수량을 모의하기 위해서는 최대 단위도 개념을 도입하는 것이 타당하리라 사료

된다. 현재 국내에서 사용되고 있는 평균 또는 최대 단위도 산정방법을 살펴보면 ① 각 호우사상별로 산정된 매개변수를 평균하는 방법, ② 호우사상별로 산정된 매개변수 중 가장 큰 홍수량을 유발시키는 매개변수를 채택하는 방법, ③ 각 호우사상 중 가장 큰 첨두홍수량에 해당하는 매개변수 집합을 이용하는 방법, ④ 호우사상별로 산정된 매개변수를 첨두홍수량별로 도시하여 PMF에 가까운 최대 첨두유량이 발생하도록 수렴하는 매개변수를 찾는 방법이 있다. 현재 이들 방법 중 특정 방법을 사용하도록 하는 규정이 수립되어 있지 않은 관계로 설계자의 주관적인 판단에 따라 여러 방법이 혼용되어 사용되고 있는 실정이다.

## 2) PMF 산정을 위한 최적 매개변수 산정 방안

본 연구에서는 PMF 산정을 위한 최적 매개변수를 추정하는 방법으로 앞서 언급한 4가지 방법 중 양질의 호우사상 유무에 따라 ①과 ②, ③, ④의 방법을 제안하고자 한다. 기본적으로 극한 홍수량을 의미하는 PMF를 산정하기 위해서는 ②, ③ 및 ④의 과정을 통해 최대 단위도를 추정하는 방법이 적합하다고 판단된다. ②와 ③은 호우사상에 따라 결정되는 매개변수가 모의하는 사용자에 따라 다르게 산정되어 보다 객관적인 결과를 얻을 수 있는 ④의 과정을 선택하고자 한다. 다만, 이 경우 관측 최대 첨두유량 경계에 해당하는 회귀값을 적용하기보다 매개변수 추정에 적합한 회귀식 적용을 통해 수렴하는 지점까지 첨두유량을 연장하고 그때에 해당하는 매개변수를 추출하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한, 유역의 수문자료 상황이 여의치 않아 양질의 호우사상 확보가 어려운 경우 ①의 과정을 통해 매개변수를 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 이유는 소수의 호우사상으로부터 산정된 매개변수가 대상유역의 홍수유출반응을 대표한다고 하기에는 무리가 있고 도출된 결과에 대한 신뢰성 측면에서도 부적합하다고 판단되기 때문이다.

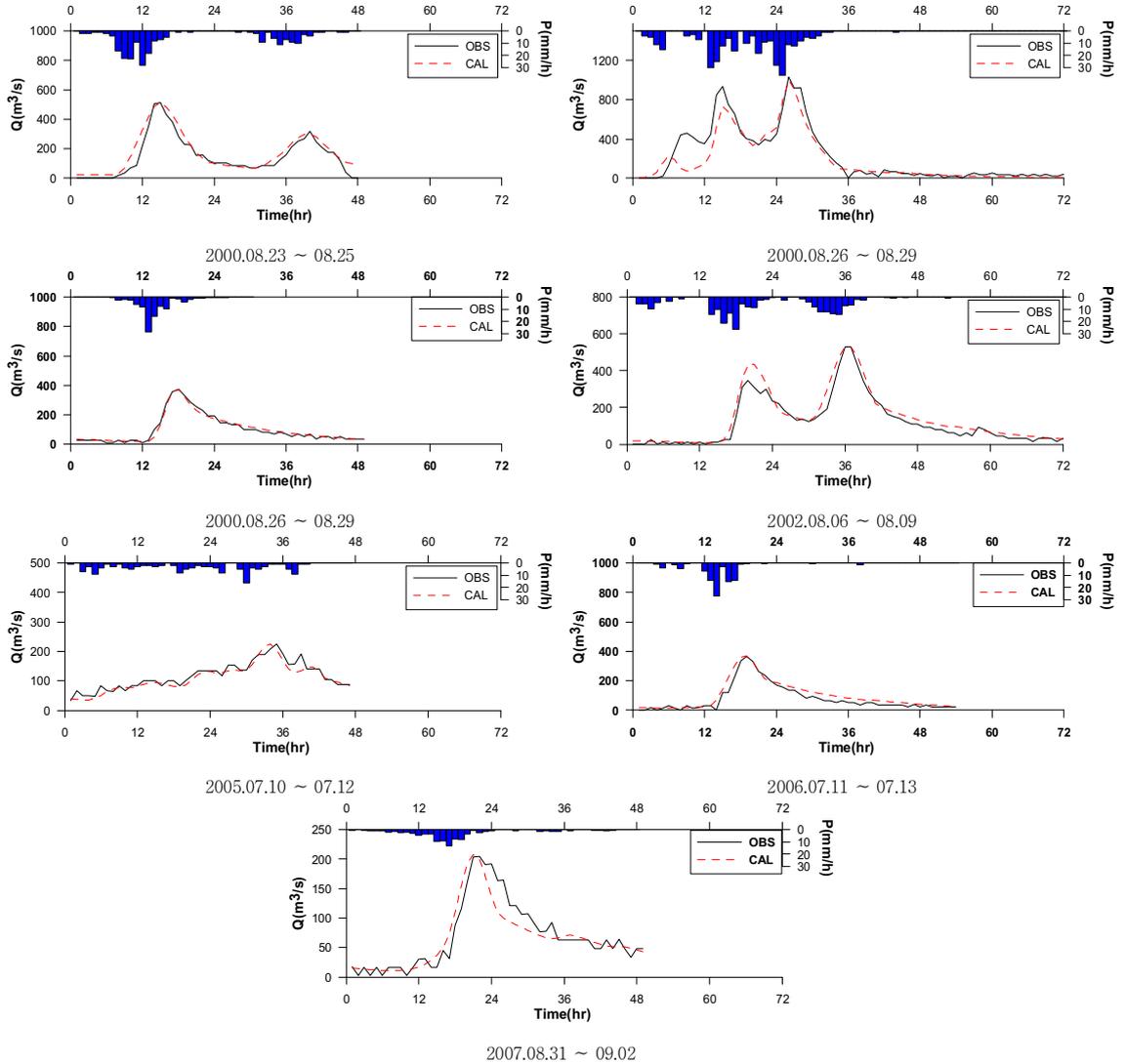
따라서 본 연구에서는 보령댐 유역에서 추정된 호우사상별 매개변수를 분석하여 ④ 과정을 통해 최대 매개변수 추정 및 PMF를 산정하고자 한다.

## 3) 호우사상별 최적 매개변수 산정

보령댐 유역의 호우사상별로 산정된 초기 매개변수를 이용하여 각각의 호우사상에 대한 최적 매개변수를 추정하였다. 이를 위해 자동보정기법을 통해 매개변수를 추정한 후 추정된 매개변수가 물리적인 범위 내에 있는 지를 검토하고 그 범위를 벗어난 경우 수동보정을 통해 최종 매개변수를 추정하는 절차를 수행하였다.

<Fig. 3>은 보령댐 유역의 호우사상에 대한 매개변수 보정결과를 도시한 것이다. 대체로 모든 호우사상에서 첨두유량, 첨두시간, 상승부와 하강부의 수문곡선에 있어서 모의치가 관측치를 유사하게 모

의하는 것으로 나타났다. <Table 10>은 시범유역에 대해 호우사상별, 침투홍수량과 유출용적에 대한 관측유량 대비 모의유량의 상대오차를 산정한 결과를 나타낸 것이다.



<Fig. 3> Parameter calibration using HEC-HMS

<Table 10> Evaluation of accuracy according to parameter calibration

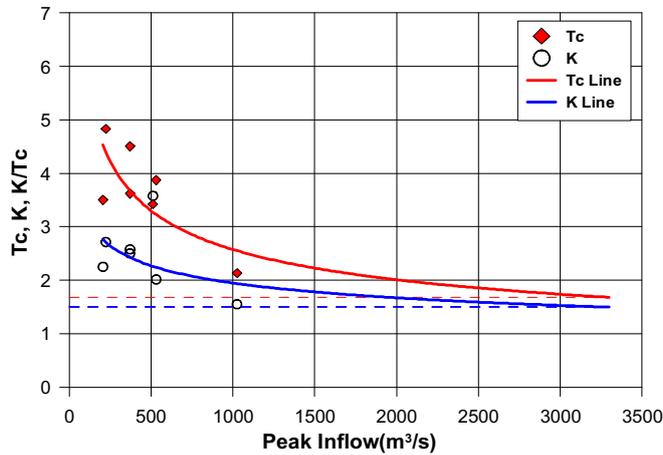
Event	Relative error (%)	
	Peak flow rate	Discharge volume
1	0.17	18.11

2	2.53	16.08
3	0.75	5.92
4	0.28	17.03
5	0.48	1.86
6	0.19	6.68
7	1.63	5.12

<Table 10>에서 침투홍수량에 대한 상대오차는 0.17~2.53%, 유출용적에 대한 상대오차는 1.86~18.11%로 대체적으로 만족할 만한 결과를 나타내었다.

#### 4) 대표 단위도 최적 매개변수 산정

보령댐유역의 실측호우사상 개수는 7개이며, 민감도 분석 결과 침투유량에 대해 상대적으로 민감한 매개변수인  $T_c$ ,  $K$ 를 <Fig. 4>과 같이 도시한 결과 침투유량에 수렴하는 매개변수를 <Table 11>과 같이 도출하였다.



<Fig. 4> Estimate of representative unit hydrograph

<Table 11> Parameter estimation of maximum unit hydrograph

TC (hr)	K (hr)
1.68	1.49

## IV. 결론

본 연구에서는 보령댐 유역의 PMF 산정을 위한 단위도의 최적 매개변수 산정을 위해 HEC-HMS의 매개변수 민감도 분석을 실시하여 민감한 매개변수를 선정하고, PMF와 같은 극한 홍수량을 모의하기 위해 최대 단위도 개념을 도입하여 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 매개변수 초기값 산정 결과, 도달시간은 Kraven(II)공식에 의한 값인 2.21hr, 저류상수는 Sabol공식에 의한 값인 1.92, 유출곡선지수는 토지이용상태, 피복형태 및 수문학적 토양군에 따라 홍수량 산정결과에 크게 영향을 미치므로 설계의 안정성을 고려하여 선행토양함수 조건을 AMC-III의 상태로 지정하여 80값으로 분석되었다.

2. 매개변수 민감도 분석결과 모든 매개변수에서 상대적인 차이는 있으나 도달시간, 저류상수, 유출곡선지수값이 민감한 것으로 분석되었다.

3. 본 연구에서는 호우사상별로 산정된 매개변수를 첨두홍수량별로 도시하여 PMF에 가까운 최대 첨두유량이 발생하도록 수렴하는 매개변수를 찾는 방법의 과정을 통해 최대 단위도를 추정하는 방법이 적합하다고 판단되었고, 유역의 수문자료 상황이 여의치 않아 양질의 호우사상 확보가 어려운 경우 호우사상별로 산정된 매개변수를 평균하는 방법의 과정을 통해 매개변수를 추정하는 방법을 수행하였다.

4. 최대 단위도를 이용하여 최적매개변수를 산정한 결과 도달시간은 1.68hr로 유역특성인자를 이용하여 산정한 매개변수 초기값에 비해 감소하였으며, 저류상수도 1.49로 경험식에 의해 산정된 매개변수 초기값에 비해 감소하였다.

5. 향후 합리적인 PMF 산정을 위해 우리나라 주요 수리시설물에 대한 신뢰성 있는 대표단위도의 추정이 지속적으로 개발되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- 건설교통부. 2004. 댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력 증대 기본계획 수립 보고서.
- 건설교통부. 2005. 댐 설계 기준.
- 박세훈, 김정덕, 문영일. 2004. 댐 유역별 PMF 및 확률홍수량 변화양상 고찰. 한국수자원학회 학술발표회 논문집: 282-286.
- 윤라영, 손광익, 신승철, 노진욱, 심재호. 2007. CN분포를 고려한 총 유출량 산정기법. 한국수자원학회 학술발표회 논문집: 1880-1884.
- 한국개발연구원. 2007. 댐 설계기준의 적정성 검토: PMP 및 PMF 산정을 중심으로.
- 한국수자원공사. 1998. 수문학적 모델링. 수자원분야 전문가과정.

- 황주하. 2010. HEC-HMS의 유출곡선 변동에 의한 가능최대홍수량 비교 분석. 충북대학교 석사학위 논문.
- Hawkins, R. H, and A. V. Hhojeini. 2000. Initial Abstraction and Loss in the Curve Number Method. *Arizona Hydrological Society Proceedings*.
- McCuen, R. H. 1973. The Role of Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling. *Journal of Hydrology*. 18: 37-53.
- McCuen, R. H. 2002. Approach to Confidence Interval Estimation for Curve Number. *Journal of Hydrologic Engineering*. 6: 43-48.
- Sabol. G. V. 1988. Clark Unit Hydrograph and R-parameter Estimation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(1): 100-111.
- Shalaby. A. I. 1995. Sensitivity to Probable Maximum Flood. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 121(5): 327-337.
- Sorooshian. S. and Arfi. F. 1982. Response Surface Parameter Sensitivity Analysis Methods for Postcalibration Studies. *Water Resources Research*. 18(5): 1531-1538.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2008. HEC-HMS Manual.
- 국가 수자원관리종합정보 시스템, <http://wamis.go.kr/>

---

**蔡洙權**: 인하대학교 토목공학과에서 공학박사 학위를 취득하였으며(1995. 2), 현재는 을지대학교 보건환경안전학과 교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 상하수도 분야이며, 현재 한국수자원학회, 대한환경공학회, 한국환경영향평가학회 등에 활동 중이다(cskwen@eulji.ac.kr).

**孟昇辰**: 충북대학교에서 “LH-모멘트의 적정 차수 결정에 의한 설계홍수량 추정”으로 농학박사 학위를 취득하였으며(2002. 2), 현재는 충북대학교 지역건설공학과 부교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 수문통계, 강우-유출 모형 개발, 수문자료 측정 분야이며, 현재 한국농공학회 이사, 한국수자원학회 편집위원 등으로 활동 중이다(maeng@cbnu.ac.kr).

**黃柱夏**: 충북대학교 지역건설공학과를 졸업하고, 동 대학원에서 공학석사 학위를 취득하였다(2010. 2). 현재 평화에지니어링 수자원부에서 근무 중이다(ultras3@naver.com).

**金兌祐**: 충북대학교 지역건설공학과에서 공학사 학위를 취득하였으며(2011. 2), 현재는 충북대학교 지역건설공학과에서 석사과정 중이다(twkim@cbnu.ac.kr).

**金炯山**: 충북대학교 지역건설공학과를 졸업하고, 동 대학원에서 공학석사 학위를 취득하였다(2011. 2). 현재 충북대학교 지역건설공학과에서 박사과정 중이다(kimhs@cbnu.ac.kr).

투 고 일: 2013년 01월 07일

수 정 일: 2013년 02월 15일

게재확정일: 2013년 02월 25일

## Parameter Estimation of Unit Hydrograph for Derivation of Probable Maximum Flood

Soo Kwon Chae, Seung Jin Maeng, Ju Ha Hwang, Tae Woo Kim, Hyung San Kim

In this study, optimum parameters of Unit Hydrograph for the systematic and reasonable derivation of PMF (probable Maximum Flood) were estimated using the HEC-HMS model as a rainfall-runoff model in Boryeong Dam watershed. As a result, the time of concentration was estimated to be 2.21 hr using the Kraven(II) equation and the storage constant was estimated to be 1.92 using the Sabol equation. The CN was estimated to be 80 under AMC-III as an antecedent moisture condition. The result of the sensitivity analysis was that the sensitivity of the time of concentration and storage constant was similar each showed a different parameter range. The experiment conditions were divided on time of concentration and storage constant, which affects the PMF regarding the Boryeong Dam watershed. In the HEC-HMS model, the optimum parameter value on the Clark Unit Hydrograph was estimated. The result using Maximum Unit Hydrograph was that the time of concentration was estimated to be 1.68 hr and the storage constant was estimated to be 1.49. Therefore, considering the recent onset of climate change, in designing large scale hydraulic, it is better to use PMF estimated based on the "Maximum Unit Hydrograph" concept under the time of concentration and storage constant condition.

**Key words:** rainfall, runoff, HEC-HMS, probable maximum precipitation, probable maximum flood