



분포형 수문모형을 이용한 유역기반의 PMF 및 유사-유출량 산정

Watershed-based PMF and Sediment-runoff Estimation Using Distributed Hydrological Model

유완식* · 이기하** · 김영규*,† · 정관수***

Yu, Wansik · Lee, Giha · Kim, Youngkyu · Jung, Kwansue

Abstract

Probable Maximum Flood (PMF) is mostly applied for the designs of large-scale hydraulic structures and it is estimated by computing the runoff hydrograph where Probable Maximum Precipitation (PMP) is inserted as design rainfall. The existing PMP is estimated by transferring the heavy rainfall from all watersheds of Korea to the design watershed, however, in this study, PMP was analyzed by selecting only rainfall events occurred in the design watershed. And then, Catchment-scale Soil Erosion Model (CSEM) was used to estimate the PMF and sediment-runoff yield according to the watershed-based estimated PMP. Although the PMF estimated in this study was lower than the existing estimated PMF in the Yongdam-dam basin, it was estimated to be higher than the 200-year frequency design flood discharge. In addition, sediment-runoff yield was estimated with a 0.05 cm of the maximum erosion and a 0.06 cm of the maximum deposition, and a total sediment-runoff yield of 168,391 tons according to 24-hour PMP duration.

Keywords: CSEM model; PMF; sediment-runoff yield; watershed-based PMP

1. 서론

우리나라 호우의 경우, 호우의 진행방향 및 호우 중심의 위치에 따른 해석이 매우 복잡하여 강우에 대한 해석하는데 있어 어려운 특징을 지닌다. 또한 호우의 지속기간이 긴 경우에는 호우의 범위가 한반도 전체가 되기 때문에 강우의 시·공간적 특성과 관련된 관측 자료는 부족하며 이러한 특성을 고려하고 해석하는 연구 또한 미진한 실정이다.

최근 강우의 시·공간적 특성과 관련된 대표적인 사례로는 2002년 8월 30일에 발생한 태풍 ‘루사’에 의해 무너진 장현댐과 동막댐을 들 수 있다. 이와 같이 소규모 수공 구조물과는 달리 댐과 같은 대규모 수공 구조물은 예측하기 힘든 거대한 집중호우로 인해 파괴될 경우, 막대한 사회·경제적 피해를 유발시킬 수 있기 때문에 사실상 초과 위험이 없는 극한 홍수량인 가능최대홍수량 (Probable Maximum Flood, PMF)을 기본으로 수공구조물을 설계하고 있다. 여기서 PMF는 강우의 깊이·면적·지속기간 (Depth-Area-Duration, DAD)을 이용하여

산정된 가능최대강수량 (Probable Maximum Precipitation, PMP)의 강우-유출관계에 의해 추정된다. 따라서 DAD를 이용하여 PMP를 합리적으로 해석하고, 해석된 PMP를 PMF로 변환하는데 발생 가능한 오차를 최대한 감소시켜, 대규모 수공구조물을 설계하는데 필요한 홍수량을 제공해 주어야 한다.

한국개발연구원 (2007)에서는 댐 설계 당시와 건설교통부 (2004a)의 PMP 및 PMF의 방법론상의 일관성, 시간상의 일관성, 공간상의 일관성을 분석하여 한국수자원학회 (2005)에서 제시되고 있는 PMP 및 PMF의 적정성을 검토하고 개선방안을 제시하였다. 또한 국토해양부 (2008)에서는 PMP 및 PMF 산정에 대해 표준화된 기준 및 절차를 수립한 후 댐 설계 기준에 반영하여 신규 댐 설계와 기존 댐의 수문학적 안정성 평가뿐만 아니라 치수 능력 증대방안 수립을 위한 설계기준을 제시하였다. Kang (2009)은 건설교통부 (2004b)에서 제안한 PMP도를 이용하여 남강댐 유역의 PMP를 추출하였고, 유역면적, 하천치수 및 하천 길이별로 유역을 분할한 후 남강댐 설계 당시의 PMF와 비교·검토하였다. 그 결과, 댐 설계 당시의 PMF보다 높은 PMF가 추정되었고, 이는 최근 강우의 이상적인 증가 영향과 소유역 분할에 따른 결과라 판단하였다. Lee (2010)는 기존의 PMP도를 이용하여 합천댐 유역의 PMP를 재산정한 후 PMF를 산정하였다. 이 과정에서 합천댐 유역을 소유역으로 분할하지 않고 하나의 유역, 하나의 매개변수만 산정한 후 HEC-HMS를 이용하여 PMF를 산정하였으며, 그 결과 기존의 설계 당시 산정된 PMF에 비해 약 33% 증가한 것으로 나타났다.

* Water Resources Research Center, K-water Convergence Institute

** Dept. of Construction and Disaster Prevention Eng, Kyungpook National Univ.

*** Dept. of Civil Engineering, Chungnam National Univ.

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-7745

E-mail: youngkyu6257@naver.com

Received: September 13, 2017

Revised: October 26, 2017

Accepted: October 30, 2017

이와 같이 기존의 PMF 산정 연구에서는 건설교통부 (2000, 2004b)에서 제공하는 전국 PMP도와 집중형 모형인 HEC-HMS를 이용하여 PMF를 산정하고 있다. 하지만 건설교통부 (2000, 2004b)에서 제공되는 전국 PMP도를 이용할 경우, 이미 포락 되어 있던 상태의 PMP를 다시 재포락하기 때문에 이중포락이 되어 PMP 값의 불확실성을 증가시킨다 (MLTM, 2008). 또한 집중형 모형인 HEC-HMS를 이용하여 PMF를 산정할 경우, 공간적 스케일 문제에서 발생하는 오차를 고려할 수 없으며 (Young, 2006), 물리기반의 분포형 모형에 비해 매개변수가 개념적 그리고 경험적 의미가 크기 때문에 수문 모형 구축시의 초기 매개변수에 의한 모의 정확도가 상당히 떨어진다 (Park and Kang, 2006).

따라서 본 연구에서는 Kim et al. (2016a)이 제시한 유역을 기반으로 산정하는 PMP 산정 방법을 이용하여 용담댐 유역에 대한 PMP를 산정하였으며, 분포형 강우-유사-유출 모형 (Catchment-scale Soil Erosion Model, CSEM)을 이용하여 PMF를 산정하고 대상유역에 PMP의 호우가 내렸을 때, 최대 발생할 수 있는 유사-유출량 및 유역에서 발생하는 침식과 퇴적의 공간적인 변화 양상을 모의하였다.

II. 연구방법

1. 강우의 시·공간성을 고려한 유역기반의 PMP 산정방법

기존의 PMP 산정 방법은 호우 내의 전 관측지점의 시간자료를 호우의 개시시간부터 종료시간까지 일정한 형태, 즉 동시 우량 형태로 구축하여 DAD를 분석한다. 분석된 DAD는 수문 기상학적 방법에 따라 PMP로 전환된다. PMP를 산정하기 위한 공간적인 대상이 우리나라 전 유역이기 때문에 연구 대상유역에 발생한 호우 이외에 다른 모든 유역에서 발생한 호우사상을 대상 유역으로 전이시켜 PMP를 산정한다. WMO (2009)에서는 유역에서 발생한 호우를 전이시켜 설계 유역에 대해 PMP를 산정할 때는 기후 조건이 유사해야 하며, 과거 유사한 홍수가 발생했던 유역으로 전이시켜 PMP를 산정하는 것이 타당하다고 제시하였다. 하지만 기존의 PMP 산정 연구에서는 기상학적 동질성을 고려하지 않고, 해안지역이나 기상이변이 잦고 홍수 빈도수가 높은 지역에서 내륙지역 또는 기상이변이 드물며 홍수 빈도수가 적은 지역으로 호우를 전이하여 산정되고 있다 (Kim et al., 2016b). 이에 따라 전이유역과 대상유역의 기후 조건이 유사한지 과거 유사한 홍수가 발생했는지 충분히 검토가 이루어지지 않고, 기후 변화가 잦은 지역의 호우사상을 기후 변화가 드물고 홍수위험도가 떨어지는 지역으로 전이하여 산정되는 PMP는 오차 발생 가능

성을 지니게 된다.

본 연구에서는 강우의 시·공간성을 고려할 수 있는 유역기반의 PMP 산정을 위해 한반도 전 유역에 발생한 호우를 이용하는 기존의 PMP 산정 방법과 달리 대상유역 내에서 발생한 호우주의보에 기준이 되는 6시간 강우량이 70 mm 이상이 되는 호우, 12시간 강우량이 110 mm 이상이 되는 호우와 호우경보의 기준이 되는 6시간 강우량 110 mm 이상, 12시간 강우량 180 mm 이상이 되는 호우를 선정하였다. 기존의 PMP 산정 방법은 DAD 분석을 위해 등우선도를 이용하였는데 등우선도의 할당된 경중률은 낮은 신뢰성을 갖고 있기 때문에 정확도의 불확실성을 가지며, 면적을 일정하게 1 km²씩 증가시키며 DAD를 분석한 것이 아니라 등우선도에 의해 나뉜 면적에 의존하기 때문에 특정 면적에서의 정확한 면적 우량 값을 도출하기 어렵다. 또한 각 시간 별 자료를 구축하여 DAD를 분석하는 것이 아니라 각 지속시간 동안의 누가강우량 값에 의존하기 때문에 호우의 시·공간적인 분포 및 변화 양상을 파악하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 선정된 호우사상의 각 사상별 지점강우를 역거리가중법 (Inverse Distance Weighting Method, IDW)을 이용하여 1시간별 1 km × 1 km 격자형태의 면적강우로 변환하였으며, 변환된 격자형태의 면적강우는 APT (Average Point Tracking) 방법 (Shin, 2003)을 이용하여 DAD를 분석하였다. 분석된 DAD와 Kim et al. (2016a)이 제시한 PMP 산정절차를 적용하여 대상유역의 PMP를 산정하였고, 최종적으로 분포형 모형인 CSEM에 적용하여 PMF 및 유사-유출량을 산정하였다.

2. 모형의 개요 및 이론

본 연구에서는 분포형 강우-유사-유출 모형인 CSEM (Lee et al., 2010, 2013)을 이용하여 유역에서의 PMP에 따른 유출 (Discharge)과 유사유출 (Sediment Discharge)을 모의하였다. CSEM의 경우 2가지 모듈로 구성되어 있으며, 첫 번째 모듈은 강우-유출 모듈로 수위와 유출 사이의 개념적 관계를 가지고 운동파 (Kinematic wave) 방정식을 기반으로 지표류 및 지표하 흐름을 효과적으로 모의한다 (Tachikawa, 2011; Lee et al., 2013). 두 번째 모듈은 유사-유출을 모의하는 모듈로 각 격자별로 유사의 침식과 퇴적을 계산하고 하천에 해당하는 격자로 이송이 일어나게 된다. 또한 격자별 유사량은 빗방울에 의한 토양분리 (Soil detachment by raindrop; DR)와 지표류 흐름에 의한 토양분리 (Soil detachment by overland flow; DF)에 의해서 계산되며, 각 격자별 이송능력 (Transpot Capacity; TC)과 상류격자에서 유입되는 유사량과의 비교를 통해 침식과 퇴적을 물리적으로 계산하게 된다. 그리고 이송능력은 Yang (1972)이 제안한 단위수류력 이론을 기반으로 모의되

고, 이송능력이 유사공급량 보다 크면 침식이 발생하고 이송 능력이 유사공급량 보다 작으면 퇴적이 발생하게 된다. 이와 같이 CSEM은 DEM을 통해 생성된 지형정보, 토지이용도에 따른 조도계수, 지표하 흐름해석을 위한 토양특성 등을 분석하고 각 격자별로 입력된 PMP로 인한 유출을 계산하기 때문에 유역의 특성을 반영하기 쉬우며 유역전반에 걸쳐 PMP로 인한 침식과 퇴적의 공간적인 분포양상을 확인하는데 적절한 모형이라 판단된다. CSEM에 대한 상세한 설명은 Lee et al. (2013)과 Kim et al. (2015)에 기술되어 있다.

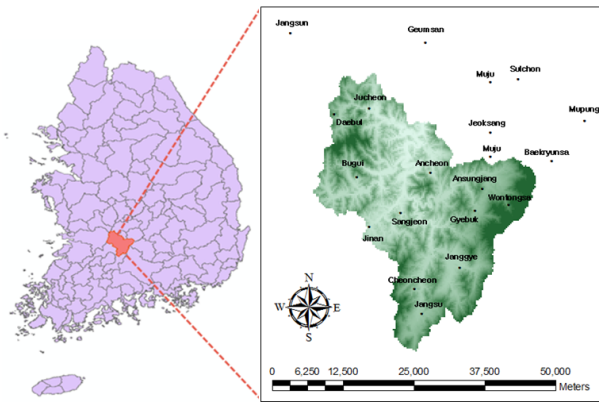


Fig. 1 Catchment Map of Yongdam-dam

3. 대상유역 선정

본 연구에서는 유역기반의 PMP 및 PMF를 산정하기 위해 전북 진안군 안천면 삼락리에 위치하고 있는 용담댐 유역을 연구대상유역으로 선정하였다 (Fig. 1). 용담댐 유역은 북위 36°00'~35°35', 동경 127°20'~127°45'에 해당하는 유역으로 금강유역의 최상류에 위치한다. 유역면적은 금강 유역면적 9,886 km²의 약 9.45 %인 930 km²이다.

용담댐 유역내의 강우자료를 수집하기 위해서 용담댐 유역 내·외에 위치한 K-water 관리 우량관측소 11개소, 국토교통부 관리 우량 관측소 9개소, 총 20개소 우량관측소를 선정하였다.

4. 대상호우 선정

본 연구에서는 DAD 분석을 위해 기상특보 중 호우주의보 및 호우경보의 기준이 되는 호우사상을 고려하였으며, 호우주의보 및 호우경보의 기준이 되더라도 지속시간이 24시간을 넘지 못하는 호우사상은 본 연구에서 배제하였다. 최종적으로 DAD 분석을 위해 선정된 호우사상은 총 18개로 Table 1과 같다.

Table 1 Selected Rainfall Events (2002~2014) in Yongdam-dam

Rainfall Event	Year	Period of Occurrence	Duration (hr)
E1	2002	August 6th 10:00 ~ August 8th 21:00	60
E2	2002	August 31th 13:00 ~ September 1th 19:00	31
E3	2004	August 18th 6:00 ~ August 19th 15:00	34
E4	2005	July 1th 5:00 ~ July 2th 12:00	32
E5	2005	August 2th 11:00 ~ August 3th 12:00	26
E6	2006	July 10th 5:00 ~ July 12th 4:00	48
E7	2007	September 14th 6:00 ~ September 15th 14:00	33
E8	2009	July 14th 7:00 ~ July 15th 7:00	25
E9	2010	July 11th 2:00 ~ July 12th 5:00	28
E10	2010	August 15th 6:00 ~ August 17th 9:00	52
E11	2011	July 9th 0:00 ~ July 11th 5:00	54
E12	2011	August 9th 5:00 ~ August 11th 10:00	54
E13	2012	July 14th 14:00 ~ July 15th 17:00	28
E14	2012	August 12th 15:00 ~ August 13th 22:00	32
E15	2012	September 16th 4:00 ~ September 18th 6:00	51
E16	2013	July 4th 10:00 ~ July 5th 22:00	37
E17	2013	August 22th 18:00 ~ August 24th 21:00	52
E18	2014	August 17th 14:00 ~ August 19th 8:00	43

III. 결과 및 고찰

1. PMP 산정 및 시간분포

Kang (2009)은 단일 유역으로 고려하여 유출량을 산정할 경우, 각 소유역들의 지형학적 매개변수의 평균값을 사용하기 때문에 대상 유역의 지형특성을 제대로 반영하지 못한다고 언급하였다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 소유역을 분할하여 각 소유역의 유역기반 PMP를 산정하였다.

앞서 언급한 바와 같이 대상유역에서 선정된 모든 호우자료는 IDW 방법을 이용하여 격자별 면적강우로 환산하였으

며 환산된 후에 Fig. 2의 소유역 별로 강우자료를 분할한 후, APT 방법을 이용하여 DAD 분석을 실시하였다. DAD 분석을 실시한 후에 PMP로 환산하기 위해 Kim et al. (2016a)이 제시한 방법에 따라 수분최대화비를 고려하여 최종 소유역별 PMP를 산정하였다. Fig. 3은 각 호우사상별로 PMP를 산정한 후에 각 지속시간별, 면적별 최대값만을 선출하여 DAD 곡선으로 나타낸 결과이다. Fig. 3을 통해 지속시간이 길어질수록 PMP의 깊이는 증가하는 것을 볼 수 있었고, 반면에 면적이 넓어질수록 PMP의 깊이가 감소하는 경향을 보였으며, PMP-DAD 곡선의 기울기는 면적이 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 YD2 유역과 YD3 유역에서 지속시간 24시간과 48시간에서의 PMP의 깊이 차이는 다른 지속시간에 비해 유독 작은 것을 확인하였다. 그 원인은 지속시간 24시간까지는 18개의 호우사상을 모두 비교하여 각 최댓값을 나열하여 PMP-DAD 곡선을 작성한 반면에, 지속시간 48시간의 곡선의 7개의 호우사상만을 고려하여 작성한 것이 원인으로 판단된다. 각 소유역 별로 산정된 PMP를 시간분포화하기 위해 주로 적용되고 있는 Huff의 4분위 방법을 이용하여 시간분포화를 실시하였다. 이에 따라 Huff 방법의 최근 연구결과인 국토해양부 (2011)에서 제시한 무차원 누가곡선 분포를 적용하였으며 국토해양부 (2011)에서는 홍수량 산정결과를 고려하여 3분위를 실무적 안전 측으로 제시하고 있기 때문에 Huff의 3분위를 채택하여 각 소유역 별 PMP의 시간분포화를 실시하였다.

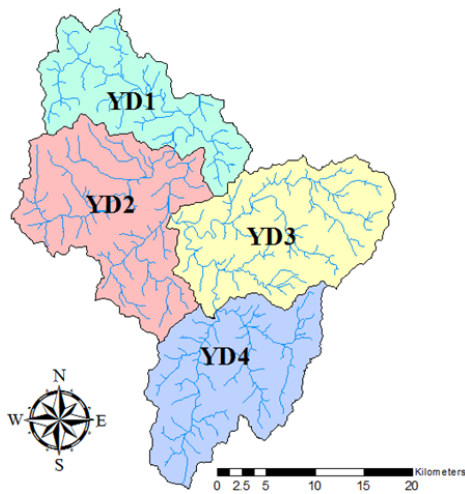


Fig. 2 4 Sub-basins in Yongdam-dam Basin

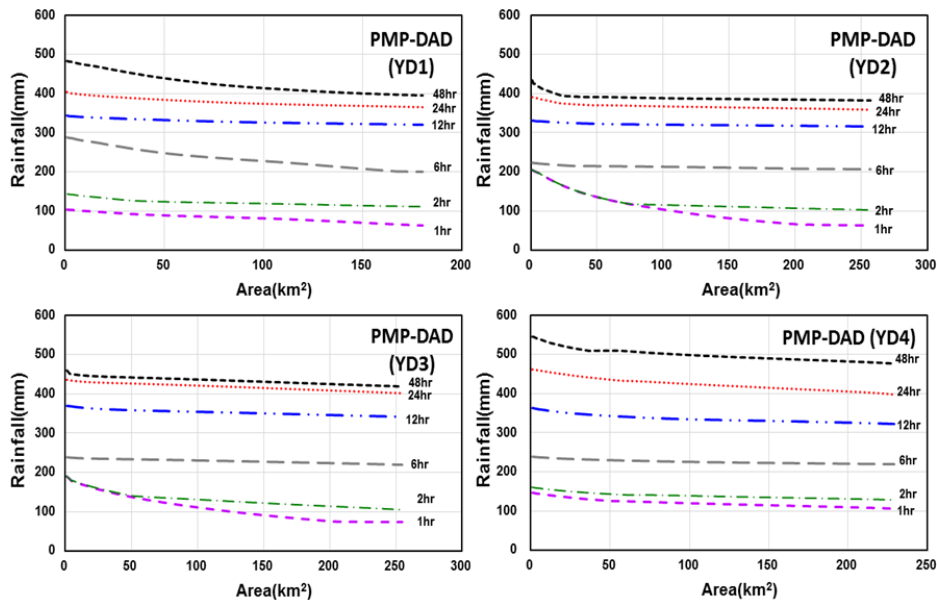


Fig. 3 PMP-DAD Curve for Different Durations in Yongdam-dam

2. PMF 산정을 위한 매개변수의 선정

본 연구에서 PMF를 산정하기 위해 적용되는 CSEM 모형은 완전 분포형 모형이기 보다는 준 분포형 모형이기 때문에 과정 매개변수뿐만 아니라 공간적 이질성을 완벽하게 고려할 수 있는 물리적 매개변수 또한 보정이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 대상유역내 총 토양두께 D 는 격자별로 균등하게 1m로 고정하였으며, 물리적 매개변수와 과정 매개변수 중 실측을 통해 산정이 어려운 유출관련 매개변수 4개 (k_a, d_s, d_m, β), 유사-유출관련 매개변수 5개 ($d_{50}, k_s, \alpha, KE, V_{cr}S$)를 선정하였으며, 보정 범위는 Table 2와 같이 설정한 후 SCE-UA 방법을 이용하여 보정하였다. SCE-UA 방법은 매개변수를 자동보정 할 수 있는 방법이며 적절한 목적함수의 선정이 필요하다. 따라서 SCE-UA 방법에 따라 실측치와 모의치의 유량 및 유사량의 오차를 효율적으로 줄일 수 있는 RMSE (Normalized Root Mean Square Error)를 목적함수로 선정하여 매개변수 보정을 실시하였다 (Eq. 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2} \quad (1)$$

여기서, N 은 자료의 개수, O_t 와 P_t 는 시간 t 에서의 실측치와 모의치를 나타낸다.

3. 강우-유출 모형 검증

본 연구에서는 SCE-UA 방법을 이용하여 적용된 CSEM의 보정된 매개변수의 재현성 평가를 실시하기 위해 첨두유량 및 유사량의 오차를 나타내는 첨두상대오차 (Relative Error, RE), 관측값과 산정값간의 정확성을 검증하는데 주로 사용되는 Nash-Sutcliffe 효율계수 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)를 이용하였다 (Eqs. 2 and 3).

$$RE = \frac{(O_p - P_p)}{O_p} \times 100 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O})^2} \quad (3)$$

여기서, O_p 와 P_p 는 첨두 시간에서의 실측치와 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균값을 나타낸다.

본 연구에서는 모형의 재현성을 평가하기 위해 Table 3과 같이 2002년 태풍 ‘루사’, 2003년 태풍 ‘매미’, 2007년 태풍 ‘나리’의 호우사상을 이용하였다.

3개의 호우사상 중 2002년 태풍 ‘루사’의 경우 용담댐 관측 유입량의 결측으로 인하여 태풍 ‘매미’를 이용하여 매개변수

Table 2 Feasible Parameter Ranges for Model Calibration and Optimal Parameter Values (Yu, 2010)

Parameter	Description	Range of Value
D	The depth of total soil layer (mm)	1000
d_m	The depth of the unsaturated soil layer (mm)	50 ~ 300
d_s	The depth of the saturated soil layer (mm)	1 ~ 700
k_a	The hydraulic conductivity of the saturated soil layer (m/s)	0,001 ~ 0,1
β	The non-linear exponent constant for the unsaturated soil layer (k_a/k_m)	2 ~ 10
D_{50}	The median grain size (mm)	1 ~ 10
k_s	The soil detachability (kg/J)	0,0008 ~ 0,006
α	The detachment or deposition efficiency	0,335 ~ 1,0
KE	The total kinetic energy of the net rainfall (J/m ²)	1 ~ 30
$V_{cr}S$	The critical unit stream power (m/s)	0,002 ~ 0,1

Table 3 Historical Flood Events for Rainfall-Sediment Yield-Runoff Simulation

Event Number	Rainfall Duration	Total Rainfall (mm)	Typhoon	Classify
1	2002.08.30,17:00 ~ 09.02,19:00	197,46	Rusa	Verification
2	2003.09.11,21:00 ~ 09.15,16:00	128,24	Maemi	Calibration
3	2007.09.14,06:00 ~ 09.20,14:00	153,15	Nari	Verification

를 보정하였으며 보정 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 5는 태풍 ‘매미’를 이용하여 보정된 매개변수를 적용하여 태풍 ‘루사’와 ‘나리’에 검증한 결과이다. 실측치와 모의치의 비교 결과 값은 Table 4와 같다. 태풍 ‘루사’의 결측 문제로 인하여 관측 데이터가 있는 구간에 대하여 재현성을 평가하였으며, 태풍 ‘나리’의 경우, 매 시간마다 실측치가 크게 변동하는 것을 확인할 수 있다.

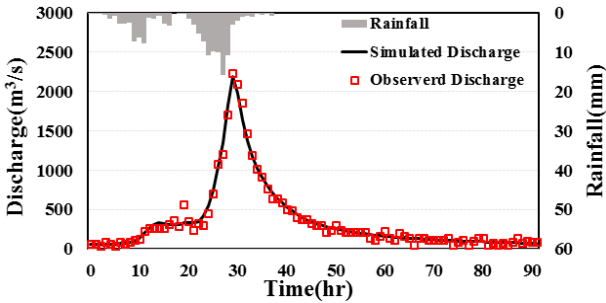


Fig. 4 Rainfall-Runoff Parameter Calibration Performances for the ‘Maemi’ Event

Table 4 Summary of Rainfall-Runoff Performances for the Events

Event	Item	Peak Discharge
Rusa	Simulated (m ³ /s)	4,265.11
	NSE	0.96
Maemi	Observed (m ³ /s)	2,227
	Simulated (m ³ /s)	2,194.22
	NSE	0.98
Nari	RE (%)	1.47
	Observed (m ³ /s)	1,221.20
	Simulated (m ³ /s)	1,461.54
	NSE	0.78
	RE (%)	-19.68

태풍 ‘매미’의 호우사상을 이용하여 보정된 매개변수에 따라 모의를 실시한 결과, 실측치의 첨두 유량은 2,227 m³/s, 모의치의 첨두 유량은 2,194 m³/s로 RE는 1.47 %, NSE는 0.98로 분석되었고, 실측치와 모의치 모두 동일한 시간에서 첨두유량이 발생하였다. 보정된 매개변수를 이용하여 태풍 ‘루사’와 ‘나리’의 호우사상에 적용한 결과, 태풍 ‘루사’의 경우 NSE는 0.96로 분석되었고, 태풍 ‘나리’의 사상의 경우 RE는 -19.68 %, NSE는 0.78로 분석되었다. 태풍 ‘나리’의 대한 NSE 결과는 실측유량이 매시간 변동함에 따른 결과로 판단된다.

4. 유사-유출 모형 검증

본 연구에서는 용담댐 유출구에 대한 실측 유사량 및 유량

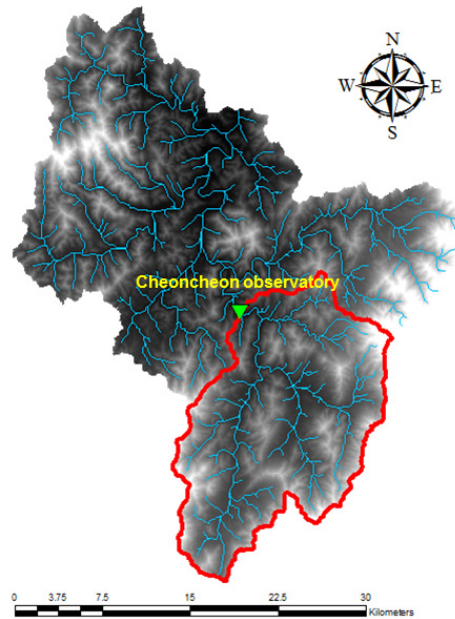


Fig. 6 Selecting Cheoncheon Basin for Rainfall-sediment-runoff Parameter Calibration

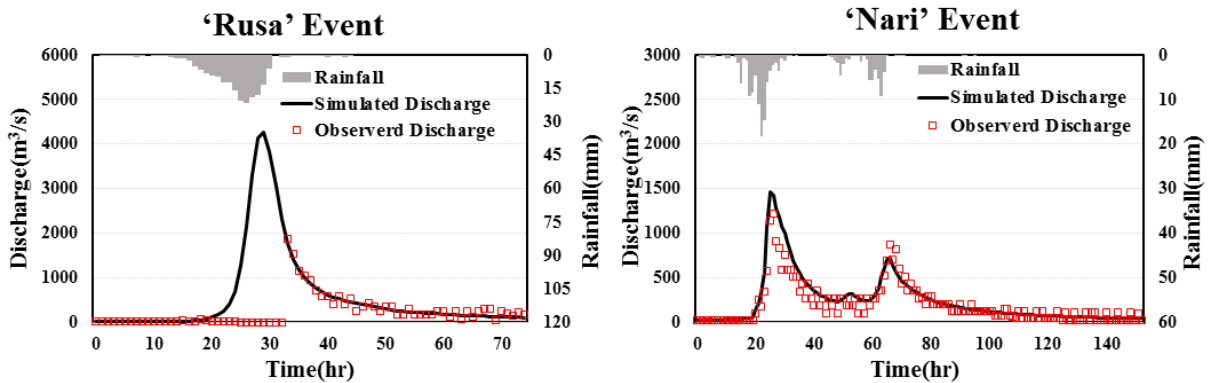


Fig. 5 Rainfall-Runoff Parameter Validation Performances

유사량 관계식이 존재하지 않아 용담댐 유역의 상류유역인 천천 유역을 대상으로 유사 매개변수를 보정 및 검증하였다. 용담댐 유역 내에서 천천유역이 차지하는 유역은 Fig. 6과 같으며 유역면적은 289.8 km²이다.

Fig. 7은 태풍 ‘매미’의 호우사상을 이용하여 매개변수를 보정한 결과이며, Fig. 8은 보정된 매개변수를 이용하여 태풍 ‘루사’와 ‘나리’에 검증한 결과이다, 실측치와 모의치의 비교 결과 값은 Table 5와 같다. 태풍 ‘매미’의 호우사상을 이용하여 매개변수를 보정하고 모의를 실시한 결과, 실측 침투 유사량은 603.8 mg/l, 모의 침투 유사량은 478.8 mg/l로 나타났고, RE는 20.7 %, NSE는 0.90으로 분석되었으며, 모의치의 침투 유사량은 실측치에 비해 1시간 늦게 발생하였다. 태풍 ‘루사’의 호우사상에 대해 검증을 실시한 결과, NSE는 0.33으로 분석되었고, RE는 -38.54 %로 분석되었다. 태풍 ‘나리’의 사상의 경우 실측치의 침투 유사량은 716.03 mg/l, 모의치의 침투 유사량은 542.71 mg/l로, RE는 24.2 %, NSE는 0.81로 분석되었다. 또한 침투시간에 대해 검증한 결과, 실측치 모의치 모두 동일한 시간에 침투 유사량이 발생한 것을 확인하였다. 강우-유출모의 결과에 비해 유사-유출 모의결과는 실측치에 비

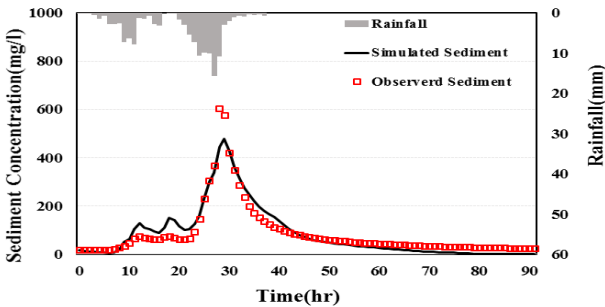


Fig. 7 Sediment-Runoff Parameter Calibration Performances for the ‘Maemi’ Event

해 과소 및 과대산정이 크게 발생하였는데, Johnson et al. (2000)은 일반적인 유사-유출의 경우 -50~200 % 범위의 오차는 유사량 자료의 불확실성을 고려하였을 때 적합한 결과라고 언급하였다.

5. PMP에 따른 PMF 및 유사-유출량 산정

태풍 ‘매미’의 호우사상을 이용하여 보정된 각각의 강우 유출 매개변수와 유사-유출 매개변수를 이용하여 용담댐 유역에서 유역기반의 PMP가 발생하였을 경우에 발생하는 PMF 및 유사-유출량을 산정하였다. 그 결과 각각의 산정된 PMF 및 유사-유출량은 Figs. 9 and 10과 같으며 침투 유출량은 7,799 m³/s로 각 소유역에 PMP가 내리기 시작하고 15시간이 지난 후에 발생하였고 침투 유사-유출량은 696 mg/l가 발생 하였다.

Table 5 Summary of Sediment-Runoff Performances for the Events

Event	Item	Peak Sediment Concentration
Rusa	Simulated (mg/l)	439.1
	Observed (mg/l)	608.4
	EI	0.33
	RE (%)	-38.5
Maemi	Observed (mg/l)	603.8
	Simulated (mg/l)	478.8
	RE (%)	20.7
Nari	Observed (mg/l)	716.0
	Simulated (mg/l)	542.7
	RE (%)	24.2

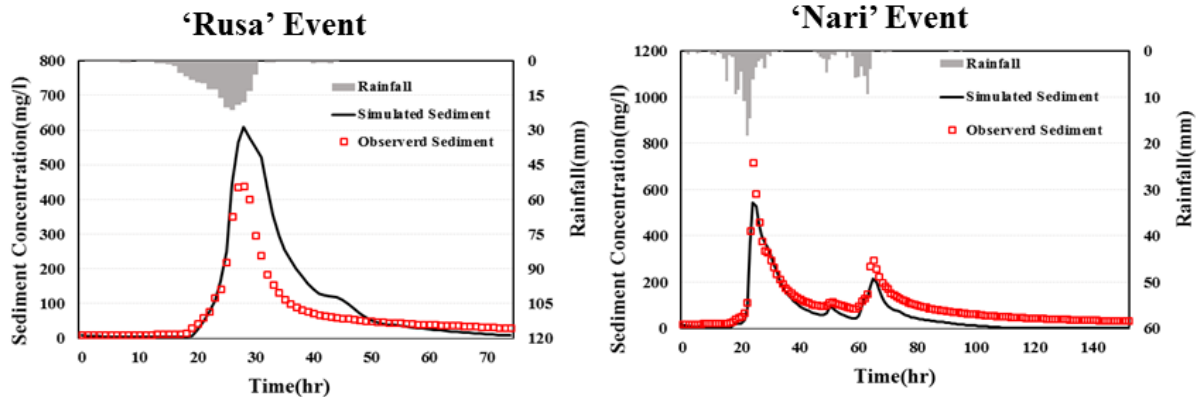


Fig. 8 Sediment-Runoff Parameter Validation Performances

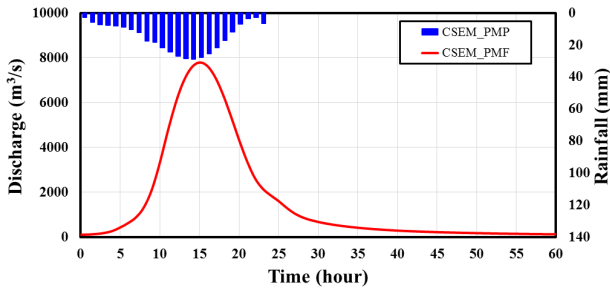


Fig. 9 PMF According to 24-Hour PMP in Yong-dam Basin

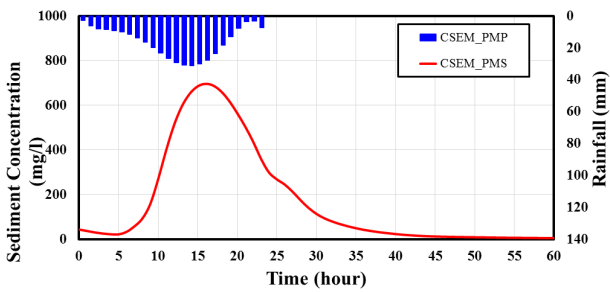


Fig. 10 Sediment-runoff According to 24-Hour PMP in Yongdam-dam Basin

6. 침식량의 공간분포 분석

CSEM 모형을 이용하여 각 모의시간에 따른 공간적 분포 양상을 분석하였다. Fig. 11은 PMP가 용담댐 유역에 발생하였을 때 PMP 경과 시간에 따른 침식분포도를 나타낸다. Fig. 11을 확인해 보면 PMP가 발생하고 6시간이 경과되었을 때, 유역 내 일부격자에서 침식이 발생하였고, PMP의 지속시간 및 강우량이 증가할수록 토양의 포화가 진행되고 지표류가 발생하여 침식이 확장되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 15시간이 경과되었을 때 격자별 최대 침식량이 발생하였다. 하지만 15시간이 지난 후, PMP가 감소함에 따라 다시 침식량과 침식이 발생한 영역이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11의 경우 침식과 퇴적에 의한 토양의 공간적 재분배를 고려하지 않은 경우를 도시한 것이며, 유사이송능력과의 비교를 통해 계산된 유역내 침식 및 퇴적의 공간적 분포는 Fig. 12와 같다. PMP에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포를 살펴보면 최대 0.05 cm의 침식이 발생하였고, 최대 0.06 cm의 퇴적이 발생하였으며, PMP가 발생함에 따른 총 유사-유출량을 확인한 결과, 용담댐 유역에서 168,391.2 ton의 유사-유출량이 발생하였다.

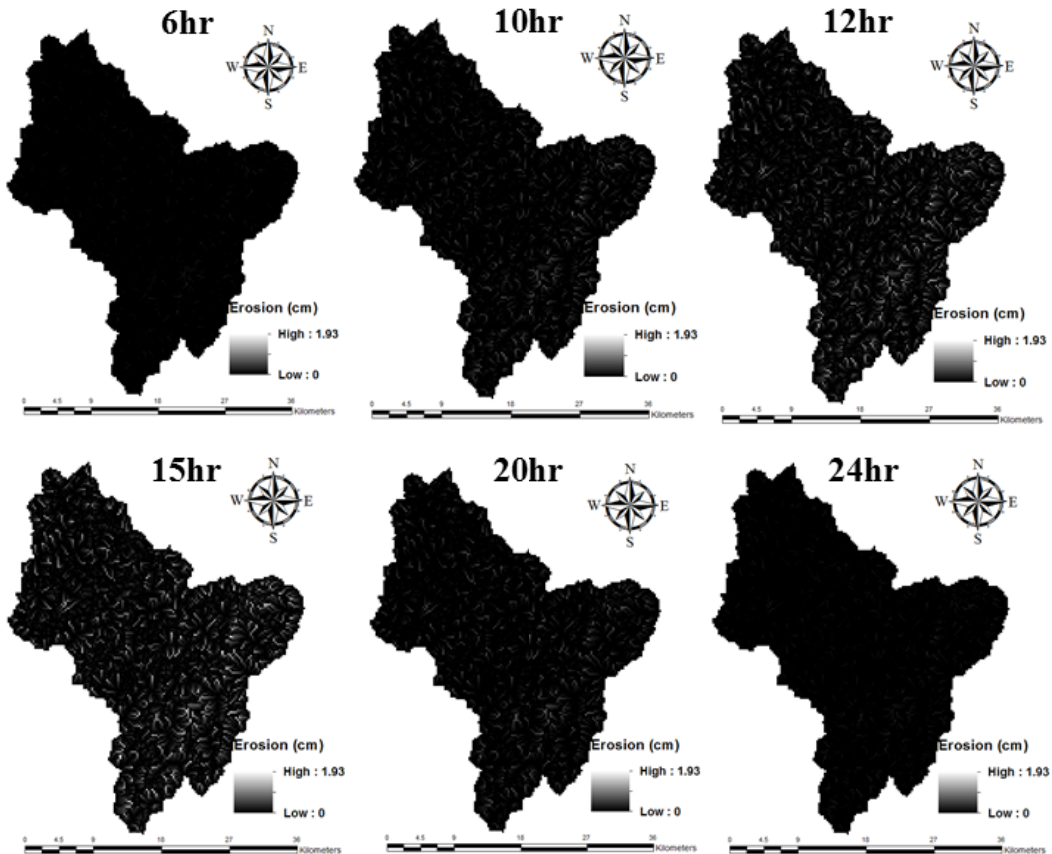


Fig. 11 Variation of Erosion in Time and Space During the PMP

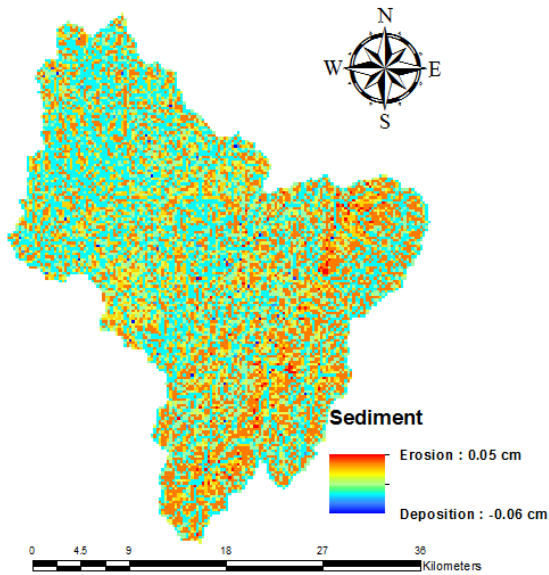


Fig. 12 Spatial Patterns of Erosion and Deposition within the Yongdam-dam Basin

7. 기존 PMF와의 비교 및 검토

기존의 PMF에 따른 PMF와 본 연구에서 산정된 PMF를 비교하였으며, PMF의 과소 산정 여부를 판단하는 지표로 200년 빈도 홍수량과 비교를 실시하였다 (Table 6). 그 결과, 기존에 산정된 용담댐 유역의 PMF는 10,760 m³/s로 본 연구에서 산정된 PMF에 비해 약 1.38배 이상 크게 산정된 것으로 확인되었다. 이는 기존의 PMF의 경우 한반도 전역에서 발생한 호우사상을 이용하여 분석된 결과인 반면, 본 연구에서 제시한 PMP는 용담댐 유역을 기반으로 산정되었고, 용담댐 유역 내에서 발생했던 호우사상 및 호우자료를 이용함에 따른 결과로 판단된다. 또한 200년 빈도 홍수량과 비교한 결과, 본 연구에서 산정된 PMF가 200년 빈도 홍수량인 4,445 m³/s에 비해 1.75배 이상 높게 나타났다. 따라서 호우자료의 범위 및 산정방법론에 따른 차이로 인해 기존의 용담댐 유역의 PMF 보다는 낮은 결과 값을 나타냈지만, 200년 빈도 홍수량 보다는 1.75배 이상 높게 산정되었기 때문에 용담댐 유역의 계획 홍수량 보다는 과소산정 될 수 있는 가능성을 벗어났다고 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 논문에서 산정된 PMP는 APT 방법과 유역 내에 발생한 호우자료만을 적용하여 산정함으로써 대상유역에서 발생한 호우의 시·공간적인 특성을 반영할 수 있었다. 그 후, 지형적 특성을 효과적으로 반영하기 위해 분포형 모형을 이용하여 유역기반의 PMP에 따른 PMF를 산정하였다. 따라서 기존의 산정방법과 달리, 산정방법 및 절차에서 발생할 수 있는 불확실성 및 오차발생 가능성을 최소화 할 수 있는 유역 기반의 PMP 및 PMF 산정방법론을 제시하였다. 또한, 제시된 산정방법론에 따라 유역기반의 PMP와 PMP에 따른 PMF 및 유사-유출량을 산정하여 기존의 자료와 비교·검토 하였다. 이에 따라 본 연구를 통해 도출된 주요 연구 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 산정된 PMF를 기존의 PMF와 비교한 결과, 기존의 PMF 보다는 과소 산정된 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 적용된 PMP에 경우, 용담댐 유역 내에서만 발생했던 호우사상을 이용하여 유역을 기반으로 PMP를 산정한 것과 달리, 기존의 PMF를 산정하기 위해 적용된 PMP는 한반도 전 유역에서 발생한 호우사상을 용담댐 유역으로 전이시켜 산정됨에 따른 결과라 판단된다. 기존의 PMF와의 비교·검토를 수행한 후, 과소산정 여부를 판단하기 위해 200년 빈도 홍수량과 비교해본 결과, 200년 빈도 홍수량 보다는 1.75배 이상 높게 산정된 것을 확인할 수 있었다.
2. 유역기반의 PMF에 대해 비교·검토를 수행한 후, 유사-유출에 대해서도 검토를 실시하였다. 그 결과, PMP가 내린 후, 16시간이 경과하고 침투 유사-유출량이 발생하였다. 또한 유역 내에서 발생하는 침식과 퇴적에 대한 분포양상을 확인한 결과, 최대 0.05 cm의 침식이 발생하였고, 최대 0.06 cm의 퇴적이 발생하였으며 총 지속시간에 따른 용담댐 유역에 총 유사-유출량은 168,391.2 ton으로 산정되었다.

본 논문에서 제시한 산정방법은 용담댐 유역 이외에 유역들과, 레이터 강우 등을 이용하여 적용성에 대한 검토를 수행할 필요가 있다. 이에 따라서 각 유역의 홍수 위험도에 따라 분

Table 6 Comparison between PMF and Design Floods in Yongdam-dam Basin

Division	Discharge (m ³ /s)
PMF Estimation using Existing Method (MOCT, 2004)	10,760
200-Year Flood Frequency using Clark Unit Hydrograph (MLTM, 2009)	4,445
PMF Estimation using Watershed-based PMP and CSEM	7,799

류하여 기존의 방법과 적절히 구분하여 적용한다면, 오차 발생 가능성을 줄일 수 있는 극한 홍수량 및 극한 호우현상에 따른 유사-유출량의 거동을 파악하는 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 유역 내에서 발생할 수 있는 유사의 거동을 격자별 침식 및 퇴적의 양상의 시각화를 통해 유역의 토양유실 취약지역을 선별 및 최우심 지역을 결정할 수 있는 기초자료로 제공함에 따라 향후 극한 호우현상에 대한 유역대응 유사관리방안 수립 등에 중요한 자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었음 (18AWMP-B079625-05)

REFERENCES

- Johnson, B. E., P. Y. Julien, D. K. Molnar, and C. C. Watson, 2000. The two dimension-upland erosion model CASC2D-SED. *Journal of the AWRA*, 36(1): 31-42. doi:10.1111/j.1752-1688.2000.tb04246.x
- Kang, M. J., 2009. Estimation of the Nam river dam's PMF by the dividing watershed. Master's thesis, Gyeongsang National University, Jinju (in Korean).
- Kim, Y. K., Y. S. Kim, W. S. Yu, S. R. Oh, and K. S. Jung, 2016a. Development of basin-scale PMP estimation method by considering spatio-temporal characteristic. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(1): 51-61 (in Korean). doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.1.51
- Kim, Y. K., W. S. Yu, Y. S. Kim, A. C. Jeong, and K. S. Jung, 2016b. Basin-scale PMF estimation by considering spatio-temporal characteristics : Focused on Yongdam-dam basin. *The Korean Spatial Planning Review*, 91: 125-138 (in Korean). doi:10.15793/kspr.2016.91.008.
- Kim, Y. S., G. H. Lee, D. E. Lee, and S. J. Noh, 2015. Parameter estimation and uncertainty assessment of a soil erosion model using data assimilation method. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(6): 373-382 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.6.373
- KDI (Korea Development Institute), 2007. Evaluation of dam design criteria. KDI, Seoul, Korea (in Korean).
- KWRA (Korea Water Resources Association), 2005. Dam design criteria. KWRA, Seoul, Korea (in Korean).
- Lee, K. H. 2006. Estimation of probable maximum depth-area-duration by moisture maximization over the Geumgang river basin. *Atmosphere*, 16(2): 55-65 (in Korean).
- Lee, G. H., W. S. Yu, and K. S. Jung, 2013. Catchment-scale soil erosion and sediment yield simulation using a spatially distributed erosion model. *Environmental Earth Sciences*, 70(1): 33-47. doi:10.1007/s12665-012-2101-5
- Lee, G. H., W. S. Yu, C. L. Jang, and K. S. Jung, 2010. Analysis on spatio-temporal variability of erosion and deposition using a distributed hydrologic model. *Journal of Korea Water Resources Association*, 43(11): 995-1009 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2010.43.11.995
- Lee, S. R., 2010. Calculation for the probable maximum flood of the Hapcheon dam watershed. Master's thesis, Gyeongsang National University, Jinju, Korea (in Korean).
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation), 2000. Estimation of probable maximum precipitation in Korea. Gwacheon, Korea (in Korean).
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation), 2004a. Analysis on hydrological stability of dam and master plan for flood control capability increase. Gwacheon, Korea (in Korean).
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation), 2004b. Renewable report of PMP map in Korea. Gwacheon, Korea (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2008. PMP and PMF estimation procedure guidelines. Gwacheon, Korea (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2009. River improvement plan of the Geum River. Daejeon, Korea (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011. Study on improvement and supplement of probability rainfall in South Korea. Gwacheon, Korea (in Korean).
- Nash, J.E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A Discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Park, J. H., and B. S. Kang, 2006. Comparison of runoff analysis between GIS-based distributed model and lumped Model for flood forecast of dam watershed. *Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies*, 9(3): 171-182 (in Korean).
- Shin, Y. A., 2013. Grid-Based spatial and temporal approaches to depth-area-duration rainfall analysis. Master's thesis, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Song, M. Y., 2014. DAD analysis using GIS-based rain search method. Master's thesis, Chungnam National University, Daejeon, Korea (in Korean).
- Tachikawa, Y. 2011. Distributed rainfall-runoff modelling. CE74.55 Modeling of water Resources Systems, 1-15.

23. Vieux, B. E. 2004. Distributed hydrological modeling using GIS. The series Water Science and Technology Library, 38: 1-17. doi:10.1007/978-94-015-9710-4_1
24. WMO (World Meteorological Organization), 2009. Manual on estimation of probable maximum precipitation. No. 1045, WMO, Geneva, Switzerland.
25. Yang, C. T. 1972. Unit stream power and sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 98(10): 1805-1826. doi:10.1.1.540.7000
26. Young, A. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320: 155-172. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.017
27. Yu, W. S., 2010. A study on rainfall-sediment-runoff estimation with consideration to parameter uncertainty. Master's thesis, Chungnam National university (in Korean).