

저류함수를 이용한 일단위 장기유출모의 모형 구축

Long term Rainfall-Runoff Modeling Using Storage Function Method

성 영 두* / 정 구 열** / 신 철 균*** / 박 진 혁****

Sung, Young Du / Chong, Koo Yol / Shin, Cheol Kyun / Park, Jin Hyeog

Abstract

The purpose of developing a rainfall-runoff and reservoir model is to provide an analysis tool for hydrological engineers in order to forecast discharge of rivers and to accomplish reservoir operations easily and accurately. In this study, based on the short-term rainfall-runoff storage function model which has gained popularity for real time flood forecast in practical water management affairs, a long-term runoff model was developed for the improvement of the calculation method of effective rainfall and percolation at the infiltration area. Annual discharge was simulated for three dam watersheds(Andong, Hapcheon, Milyang) in Nakdong River basin to analyze the accuracy of the developed model and compare it to SSARR model, which is used as the long-term runoff model in current practical water management affairs. As the result of the comparison of hydrographs, SSARR model showed relatively better results. However, it is possible for the developed model to simulate reliable long-term runoff using relatively little available data and is useful for hydrological engineers in practical affairs.

keywords : Long-term Run-off, SSARR model, Storage Function

요 지

강우-유출 및 저수지운영 모형의 최종 개발 목적은 가용한 관측자료를 이용하여 실무자가 하천의 유량예측 및 저수지운영 업무를 쉽고 정확하게 수행할 수 있도록 분석도구를 제공하는데 있다. 본 연구에서는 물관리 실무에서 홍수량 예측업무에 활용중인 단기 강우-유출 저류함수 모형을 확장하여 장기유출에 모의에 기여도가 높은 유효우량 및 침투량 산정기법을 개선하여 장기 유출분석이 가능하도록 저류함수기반의 장기 유출모형을 구축하였다. 개발된 모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 낙동강 유역내 3개 댐유역(안동,합천,밀양)을 대상으로 연간 유출모의를 실시하였으며, 현재 물관리 실무에서 장기유출모형으로 활용중인 SSARR모형과의 성능을 비교하였다. 수문곡선 비교 결과, SSARR 모형이 상대적으로 재현성 높은 결과를 보여주었지만, 본 연구에서 개발한 모형은 관측 가용한 자료만

* 한국수자원공사 물관리센터 실장

Director, Water Resources Operations Center, Kwater, Daejeon, 306-711, Korea
(e-mail: ydsung@kwater.or.kr)

** 한국수자원공사 물관리센터 물관리팀장

Manager, Water Resources Operations Center, Kwater, Daejeon, 306-711, Korea
(e-mail: kychong@kwater.or.kr)

*** 한국수자원공사 물관리센터 책임위원

Principal Researcher, Water Resources Operations Center, Kwater, Daejeon, 306-711, Korea
(e-mail: kyun@kwater.or.kr)

**** 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원대우, 교신저자

Principal Researcher, KIWE, K-Water, Daejeon 306-711, Korea
(e-mail: park5103@kwater.or.kr)

으로도 비교적 신뢰성 있는 장기유출모의가 가능하다는 점에서 향후 실무에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 장기유출모형, 저류함수식, SSARR모형, 저수지운영

1. 서론

이수 및 치수관리 측면에서 하늘에서 떨어지는 강우량을 하천의 유출량으로 환산하는 작업에는 고려하여야 할 많은 요소들이 있다. 자연에서 일어나는 많은 영향요소를 모두 고려한다는 것은 매우 어려운 일이며, 비효율적일 수도 있다. 따라서 효율적인 해석을 위해 강우-유출 모의에 기여도가 높은 인자를 선별하여 모델링에 반영하고 있으며, 대부분의 강우-유출모형 등은 사용자의 활용목적에 따라 물리적 환경을 단순화하기도 하며, 단기 및 장기 유출 목적에 따라서도 분석단위 시간 또는 일단위로 적용하게 된다. 따라서 사용자는 모의하고자 하는 목적에 따라 모형을 선정하여야 하며, 적합한 활용을 위해서 모형에 내재되어 있는 유출모의 과정을 충분히 습득하여야만 하는 불편함이 있다.

우리나라에서 유출량 예측의 목적으로 사용되고 있는 모형의 대부분이 선진 외국에서 도입된 이론에 근거한 모형들로서, 수자원의 계획 및 실시간 운영에 직·간접적으로 활용되어지고 있다. 실무적으로 계획단계에서 많이 사용되고 있는 모형 중 강우-유출 및 저수지운영이 가능한 모형은 미공병단에서 개발한 HEC-HMS 모형으로 간편한 사용자 GUI 환경이 구축되어 있어 엔지니어링 분야에서 널리 사용되고 있다. 또한, SSARR 모형처럼 입력자료를 우리나라 여건에 맞게 수정 및 재구성하여 사용자 편의환경을 추가 개발함으로써 모형의 적용성을 한층 높인 사례도 있으나, 원시 프로그램 코드 수준의 활용은 곤란한 상태이다.

한편, 4대강 홍수통제소 및 한국수자원공사에서 운영되고 있는 저류함수기반의 홍수분석 유출모형은 최초 일본의 木村俊晃(1958)가 이론적 배경을 발표한 이래 선우중호 등(1984)이 충주다목적댐 건설에 따른 한강홍수에경보 프로그램 개선업무에 실용화하였다. 또한, 이정규 등(2000)은 홍수유출 해석시 가장 까다로운 문제점 중의 하나인 잔유역 유입량의 처리를 위하여 유역모형과 하도모형을 단일모형으로 하는 통합저류함수 모형을 제안하였으며 매개변수의 실시간 자동보정에 퍼지이론을 적용하여 시간에 따른 유역의 변동특성을 고려한 바있다. 저류함수모형은 도입이후 약 20여년간 지속적으로 연구되어 원시 프로그램 코드 수준의 개발이 이루

어지고 있으며, 정확도 및 효율성이 높아서 실시간 홍수에경보 업무에 활용되고 있다. 하지만, 저류함수기반의 강우-유출 모형은 단일 호우사항에 대한 집중형 단기유출 모형으로 개발되어, 장기유출 모형으로서의 활용성은 검토되지 못하였으며, 물관리 실무에서는 미공병단의 SSARR, 미국 기상청의 NWSRFS 및 개념적 모형인 TANK 모형 등이 장기유출모형으로 활용되고 있다.

본 연구의 목적은 저류함수기반의 일단위 장기 강우-유출모형을 개발하여 홍수기 및 이수기에 모두 적용이 가능한 범용모형을 개발하여 물관리 실무 사용자의 편의를 도모하는데 있다.

저류함수기반 장기유출모형의 활용성 검증을 위하여 비교대상으로 선정한 모형은 미국 공병단에서 수자원시스템의 계획, 설계 및 관리를 위해 개발한 SSARR모형을 선정하였으며, 낙동강 수계의 다목적댐을 대상으로 유출모의 결과를 비교하였다.

2. 적용이론

본장에서는 단기유출해석을 위해 개발된 저류함수모형을 장기유출모의가 가능하도록 확장하기위해서 유역 및 하도의 저류함수 개념설명과 유효강우 및 저류식의 개선사항을 기술하였다.

2.1 유역저류함수의 개념화

기존의 저류함수모형을 장기유출모형으로 개선하기 위하여 유역을 유출특성에 따라 Fig. 1.과 같이 3가지로 분류하였는데, 첫째는 강우에 대하여 초기부터 유출에 기여하는 불투수지역인 유출역이 존재하며, 둘째는 강우가 지표면하로 침투된 후 일정량의 토양 포화우량을 만족시킨 후 유출에 기여하는 침투역을 두었고, 마지막으로 침투역을 설정하여 하천 유출에 직접적으로 기여하지 않고 바로 지표하로 유출되는 지역을 개념적으로 가정하였다. 유역의 하도구간($I \sim O$)은 하류방향으로 경사져있으며, 유역 전체에 균등하게 강우량(R_{ave})이 발생하고, 소유역에서의 초과강우에 대한 지체시간을 고려하여 얻어지는 유출량은 하천에 유입된 후, 하도 형상에 따른 저류과정을 거쳐 출구로 배출된다고 가정한다(건설교통부, 2006; 신철균 등, 2004).

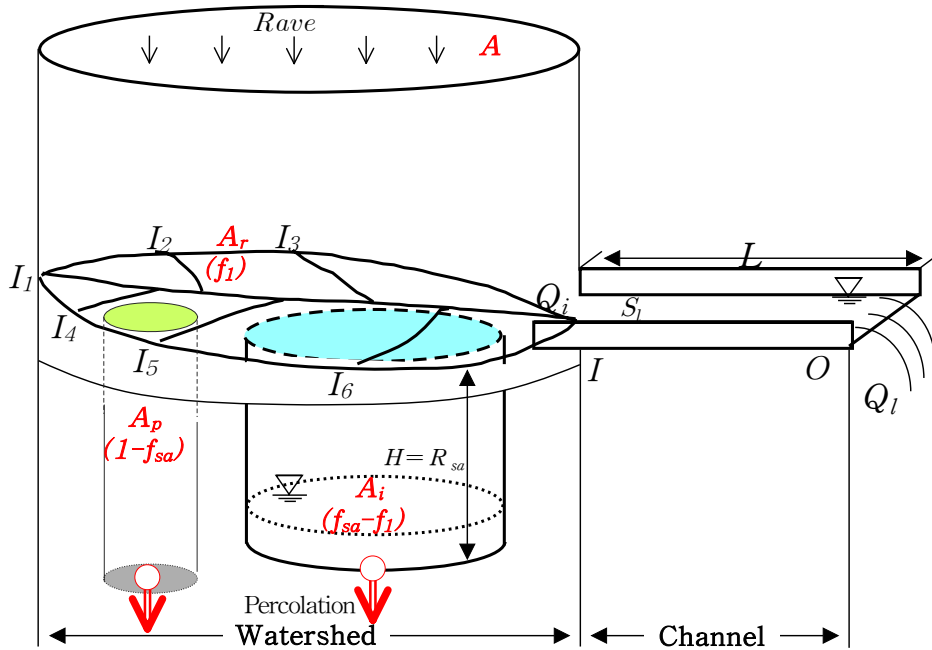


Fig. 1. Conceptual Watershed

여기서 R_{ave} 은 유역평균 강우량(Rainfall), A 는 대상유역 면적(km^2), A_r 는 유출역(Runoff Area) 면적(km^2), A_p 는 침투역(Percolation Area) 면적(km^2), A_i 는 침투역(Infiltration Area) 면적(km^2)을 의미하며, f_{sa} 는 대상유역에 대한 유출에 기여하는 면적비($\frac{A_r + A_i}{A}$), f_1 은 대상유역에 대한 유출역 면적비($\frac{A_r}{A}$), $f_{sa} - f_1$ 는 대상유역에 대한 침투역 면적비($\frac{A_i}{A}$), $1 - f_{sa}$ 는 대상유역에 대한 침투역 면적비($\frac{A_p}{A}$), R_{sa} 는 지표면하 침투역에 대한 포화우량(Saturation Rainfall, H), L 은 하도의 길이, S_i 은 하도저류량, Q_i 는 하도유입량(소유역 유출량), Q_l 는 하도의 유출량이다.

일단위 장기 유출계산에 있어서는 유역저류와 유출에 관한 단위를 강우량단위(mm/day)와 같이 단위저류고(mm), 단위유출고(mm/day)로 사용한다. 이에 따라 유역의 저류함수식은 Eq. (1) 및 Eq. (2)으로 표시한다.

$$Re(t) - q_l(t) = dS_l(t)/dt \quad (1)$$

$$S_l(t) = kq_l(t)^p \quad (2)$$

여기서, $q(t)$ 는 t 시간의 유역출구에서의 유출량 $q_l(t - \Delta t)$, Re 는 유효강우($\text{mm}/\Delta t$), k 는 저류상수($\text{mm}^{(1-p)}/\Delta t^{(-p)}$), p 는 저류상수(무차원), T_l 은 지체시

간(hr), S_i 은 저류고(지체)(mm), q_l 은 유출고(지체)($\text{mm}/\Delta t$), q 은 유출고(출구)($\text{mm}/\Delta t$), Δt 은 계산단위 시간 이다.

Eq. (2)를 Eq. (1)에 대입하고 차분식으로 표시하면 Eq. (3)과 같이 표시되며 우변은 기지의 값 이므로 Newton-Raphson법에 의하여 좌변의 미지항 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{kq_l(t)^p}{\Delta t} + \frac{q_l(t)}{2} & \quad (3) \\ & = \frac{kq_l(t - \Delta t)^p}{\Delta t} - \frac{q_l(t - \Delta t)}{2} + Re(t) \end{aligned}$$

상기 계산과정을 유출역과 침투역별로 각각 행하면 유출에 기여하는 면적(f_{sa})에 대한 단위유출고 q' (mm/day)는 유출역(f_1)의 단위유출고 q_f (mm/day)와 침투역($f_{sa} - f_1$)의 단위유출고 q_s (mm/day)로 Eq. (4)와 같이 표시하며, 이때 유출에 직접적으로 기여하지 못하고 지표하로 영원히 침투하는 영역인 침투역($1 - f_{sa}$)의 단위유출고에 대하여는 계산에서 제외한다.

$$q' = f_1 \cdot q_f + (f_{sa} - f_1) \cdot q_s \quad (4)$$

유역의 총 유출량 Q_T 는 기지유량을 포함하여 유출고에 유역면적 및 단위환산을 거쳐서 m^3/s 단위로 고쳐 쓰면 Eq. (5)와 같다.

$$Q_T = \frac{1}{86.4} \cdot f_1 \cdot A \cdot q_f + \frac{1}{86.4} \cdot (f_{sa} - f_1) \cdot A \cdot q_s + q_b \quad (5)$$

여기서, q_b 는 기저유출(m^3/s), A 는 전체 유역면적(km^2), 86.4는 단위환산계수($day \rightarrow sec$)이다.

2.2 하도의 홍수추적

저류함수법에 의한 하도추적은 하도내의 저류량과 유출량 사이의 관계를 나타내는 저류함수를 연속방정식 Eq. (6)과 조합하여 홍수량을 산정하는 방법이다. 부정류 하천의 비선형성을 나타내기 위하여 저류식(Eq. (7))에 지체시간에 대한 항을 두어 유출을 해석하게 되며, 하도추적에 필요한 매개변수들은 실측 홍수 수문곡선 자료를 활용하여 추정할 수 있으므로 모형의 적용이 용이한 장점이 있다.

$$I(t) - Q_i(t) = \frac{dS_i(t)}{dt} \quad (6)$$

$$S_i(t) = k' Q_i(t)^{p'} - T_i' Q_i(t) \quad (7)$$

$$Q(t) = Q_i(t - T_i') \quad (8)$$

여기서, $I(t)$ 는 유입량(m^3/s), k' 는 저류상수($m^{(1-p')}/s^{(-p')}$), p' 는 저류상수(무차원), T_i' 는 지체시간(hr), $S_i(t)$ 는 저류량($m^3 \cdot hr$), $Q_i(t)$ 는 지체된 유출량(m^3/s), dt 및 Δt 은 계산 단위시간(hr), $Q(t)$ 는 출구에서의 유출량(m^3/s)이다.

하도추적식을 모형에 적용하기 위해서는 Eq. (6)~(8)을 연립하여 차분식으로 구분하면 Eq. (9)와 같이 표현할 수 있으며, 이는 유역 추적 방법과 같이 Newton-Raphson법에 의하여 미지의 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{k' Q_i(t)^{p'}}{\Delta t} + \frac{Q_i(t)}{2} - \frac{T_i' Q_i(t)}{\Delta t} = \\ & \frac{k' Q_i(t - \Delta t)^{p'}}{\Delta t} - \frac{Q_i(t - \Delta t)}{2} \quad (9) \\ & - \frac{T_i' Q_i(t - \Delta t)}{\Delta t} + \frac{I(t) + I(t - \Delta t)}{2} \end{aligned}$$

2.3 장기유출모형으로의 확장

2.3.1 유효우량 산정

유효강수량은 유역출구로 유입되는 직접유출수의 근원이 되는 강수를 의미하며, 강수가 강우인 경우 이를 유효우량이라 부른다(윤용남, 1985). 단기 홍수분석 용

도로 개발된 저류함수모형을 장기유출모형으로 확장하기 위해서는 유효우량 산정방법의 개선이 필요하다.

단기 유출의 경우, 침투역에서 초기 강우에 대하여 일정량(포화우량(R_{sa} , Fig. 1))까지는 토양속으로 침투가 일어난다. 침투로 인해 지표면하 토양의 포화우량이 충족되고 초과하는 우량에 대하여는 유출이 발생하도록 구성되어 있다. 이후 무강우 기간이 지속되어도 침투역의 포화우량은 감소하지 않고 포화상태를 지속적으로 유지하도록 구성되어 있기 때문에 후속강우가 발생되면 강우 초기부터 전 유역에서 유출이 발생하게 된다.

장기유출모형을 위해서는 강우 후 무강우 기간이 지속됨에 따라 침투역의 포화수량이 지하수대로 침투되어 포화도가 자연 건조되고, 토양의 침투능이 다시 증가하는 현상을 모의하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 장기유출에 기여하는 물리적인 현상중에서 유출기여도가 높은 유효우량 및 침투의 연속모의를 통하여 유역출구에서의 유출량을 산정하고자 하였다. 모형내에서 증발산은 강우시 유효우량 산정 및 침투과정에 반영되도록 구성하였고, 무강우시는 기저유량에 의한 지하수감수곡선에 반영하는 것으로 통합하였으며, 별도의 증발산 과정을 분리하지 않았다. 아울러 용설은 우리나라의 기후특성상 북부 산간지역에서 주로 발생되나, 해석을 위한 방법 및 자료의 부족 등 여러 가지 이유로 연구실적이 저조하여 본 연구에서는 반영하지 않았다.

침투역에 대한 침투현상 모의를 위해서 지하수 감수곡선과 침투역 면적비의 상관관계를 고려한 침투량 산정 관계식을 도입하였다. 침투역에서의 침투량은 강우의 지속 형태와 무강우 기간에 따라 재산정하여, 침투역의 유효우량을 시간의 경과에 따라 재설정하도록 하였다. Fig. 2는 침투역의 분석시간(t)에 대한 유효우량 산정 절차를 모식화 하였다.

강우시 저류함수 모형의 유역면적은 초기부터 유출에 기여하는 유출역이 있으며, 강우의 일정량이 지면하로 침투하여 토양이 포화되면 초과우량이 발생되어 유출에 기여하는 침투역으로 구분된다. 침투역에서는 총 연산시간 동안의 유효우량을 산정하기 위하여 강우가 발생하는 시점부터 누가 침투량을 산정하며, 강우의 변동에 따라 누가 침투량이 누가 침투량보다 적어지면 토양은 건조한 상태로 간주되어 강우 초기의 침투능을 회복하게 되며, 이후에 강우가 추가로 발생되면 침투역에서의 침투량은 증가하여 유효우량이 감소하도록 장기유출과정을 모형화 하였다.

침투역에서 지하수층으로 침투하는 양을 산정하는 과정은 침투역에 대한 토양성분을 고려하여 물리적인 관계를 도출하는 것이 바람직하나, 이는 모형의 실용적

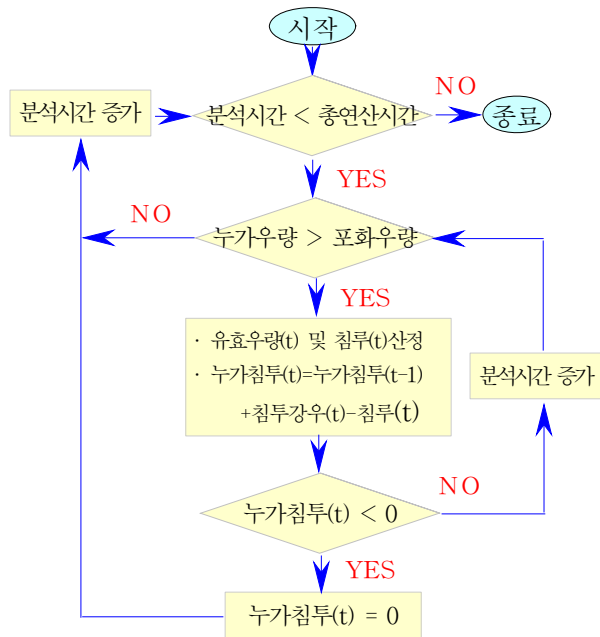


Fig. 2. Calculation of Effective Rainfall at Infiltration Area

활용성 측면을 고려할 경우 토양별 투수계수 등의 고려 항목이 다양하므로 본 연구에서는 추가 매개변수의 도입 없이, 기존의 저류함수모형에서 적용중인 매개변수 중 침투모의에 기여도가 높은 매개변수를 조합하여 과거 수문자료에 근거한 회귀식을 도출하였다.

Eq. (10)은 침투역에서의 지면하 침투량을 산정하는 공식으로 초기값은 침투역의 포화우량(R_{sa})을 기준으로 하였으며, 침투량의 증가량을 고려하기 위해서는 대상유역 출구지점의 지하수 감소계수를 적용하였다. 또한 침투량의 가중치로서 전체 유역면적 중 침투역 면적비($f_{sa} - f_1$)를 반영하여 매개변수의 민감도를 높였다. 또한 산정된 침투 공식은 과거 수문사항에 대한 보정을 통하여 0.5×10^{-4} 와 같은 민감도 보정 계수를 경험적으로 산정하였으며, 이는 유역의 침투 및 침투 특성에 따라 재산정 되어야 한다.

$$IFR = R_{sa} \times 0.5 \times 10^{-4} \times (f_{sa} - f_1) \times DEC^{-t} \quad (10)$$

여기서, IFR : 침투량(mm), R_{sa} : 침투역 포화우량(mm), t : 누가 계산시간, DEC : 대상유역의 지하수 감소계수

대상유역의 감소계수(Recession Constant)는 지하수 감수곡선(Groundwater Depletion Curve)을 과거 수문곡선으로부터 작성하여 사용하는 방법으로서 지하수 감수곡선을 작성하는 절차는 다음과 같다. 대상유역에 대

한 수년간의 연속적인 유량기록을 일련의 수문곡선으로 표시한 후 각 수문곡선의 감수곡선(Recession Curve) 부분을 택하여 유량 Q 의 대수값($\log Q$)을 시간에 따라 표시한다. 그 다음에는 각 감수곡선의 최저 $\log Q$ 값에 대략적으로 접선을 긋는다. 이 곡선의 종좌표를 다시 선형좌표(linear scale)로 바꾸어 표시함으로써 지하수 감소계수를 얻을 수 있다.

2.3.2 저류함수식 적용

유효우량에 대한 유역 및 하도 유출량을 산정하기 위해서는 저류함수식에 적용되는 매개변수의 단위환산이 필요하다. 유역의 저류함수식(Eq. (2))에서 저류매개변수(k)의 단위는 $mm^{(1-p)}/\Delta t^{(-p)}$ 으로 이루어져 있어서 시간과 강우강도의 함수라고 할 수 있다. Eq. (7)의 하도 저류매개변수인 k' 의 경우도 $m^{(1-p)}/s^{(-p)}$ 의 단위로서 유량과 시간의 함수로 이루어졌으며, 저류상수(p 또는 p')와의 관계로 인하여 수식화를 통한 프로그램화가 어려워 저류함수의 비선형성을 고려하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 Eq. (2)와 Eq. (7)에 대하여 시간의 항만을 선형적으로 비례하여 환산계수를 적용하였다. 즉 1시간 단위 분석에 대한 기본 매개변수에 대하여 일단위 분석시에는 산정된 매개변수에 일단위를 시간으로 환산한 24시간을 환산계수로 반영하였다. 상기 방법에 의거 산정된 유량은 분석 단위에 대한 평균 유량을 의미하므로 실측자료와 비교시 양호한 분석결과를 보였다. 아울러 지체시간(T_l)의 경우도 저류매개변수와 같은 방법으로 분석시간 변경에 따른 선형 비례로 보정계수를 적용하였다.

2.3.3 모형의 평가

모형수행결과의 효율을 객관적으로 나타내기 위해 본 연구에서는 Eq. (11)와 같이 Nash J.E. and Sutcliffe (1970)가 제안한 "River flow forecasting through conceptual models"(1970)에서 제안한 효율계수(Efficiency Coefficient)를 사용하고자 한다. 산정된 효율계수는 대상지점의 실측유량과 모의유량과의 차이가 적을수록 1.0에 가까운 값을 갖는다. Eq. (11)은 모의값이 관측 평균값과 비교하여 오차가 클수록 낮은 점수를 받도록 구성되었으며, 무차원 값으로 상대적인 모형의 적용성을 검증하는데 주로 적용되고 있다.

$$ES = \left[1.0 - \frac{\sum_{j=1}^N (O_j - P_j)^2}{\sum_{j=1}^N (O_j - O_{avg})^2} \right] \quad (11)$$

여기서, ES 는 효율계수, O_j 는 j 번째 관측값, P_j 는 j 번째 모의값, O_{avg} 는 관측값의 평균값이다.

아울러 관측수문곡선과의 오차범위를 판단하기 위하여 Eq. (12)과 같이 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 산정하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (O_j - P_j)^2}{N}} \quad (12)$$

여기서, SE 는 평균제곱근오차, O_j 는 j 번째 관측값, P_j 는 j 번째 모의값, N 은 자료의 수이다.

3. 모형의 적용성 검토

본 장에서는 2장에서 개발된 저류함수기반의 장기유출모형의 검증에 위하여 비교대상 모형을 선정후 낙동강 유역내 면적 크기별 3개 댐유역에 대한 강우 유출모의를 수행하였다.

3.1 비교대상 모형의 선정

본 연구의 적용성을 검증하고자 비교대상으로 선정 한 모형은 현재 물관리 실무에서 장기유출모형으로 활용중인 SSARR 모형이다. 본 모형은 미국 공병단의 북태평양지부에서 수자원시스템의 계획, 설계 및 관리를 위한 수학적 수문모형으로 1956년에 처음 개발되었으며, 이후 저수유출모의에서 회귀지하수 추적기능과 증발산 기능 등 장기유출에 유용한 기능이 보완되었다. 상기 모형은 유역을 1~20개의 밴드(Band)로 분할하여 고도에 따른 강우량과 토양함수량 및 기온에 따른 증발산량의 변화 등을 고려하여 유출해석이 가능하다. 유역내 또는 인근 관측소에서 얻어진 강수 및 기온 자료로부터 밴드별 수문자료를 가공후 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)에 따라 토양수분과 유출량을 구분하며, 유출량은 기저침투량 지수에 의해 직접유출과 기저유출로 구분된다. 이러한 유출성분들은 여러 과정을 거쳐 지표면, 지표하, 지하수, 회귀지하수로 저수지에 유입되고 저수지 추적방법을 통해 하천유출량을 산정하도록 구성되었다.(건설교통부, 2001)

본 연구에서는 현재 물관리 실무에서 널리 활용중인 SSARR 모형과의 적용성 비교를 통해 신규 개발된 저류함수 기반의 장기 유출모형을 검증하고자 한다.

3.2 대상유역의 선정

모형의 유출모의 능력을 비교하기 위하여 대상 유역의 크기 및 유량계측의 신뢰성이 높은 댐지점을 선정하

되, 댐의 크기 등 다양한 공간적 특성을 고려하기 위하여 낙동강 유역내 3개 댐유역(안동·합천·밀양댐)을 대상유역으로 하였다. 안동댐 유역(1,584km²)은 낙동강 수계의 최상류에 위치하여 대상 유역 중에서 면적이 제일 크며, 밀양댐은 유역 면적이 95.4km²으로 가장 작은 유역 면적을 가지고 있다. 아울러 합천댐(925km²)은 상기 두댐에 비하여 유역 면적 및 댐의 크기가 중간 크기여서 분석 대상유역으로 선정 하였다.

Table 1. Characteristics of Dam Basin

구 분	안동	합천	밀양
· 유역면적(km ²)	1,584	925	95.4
· 댐마루표고(EL.m)	166.0	181.0	212.5
· 댐높이(m)	83.0	96.0	89.0
· 댐길이(m)	612.0	472.0	535.0
· 계획홍수위(EL.m)	161.7	179.0	210.2
· 상시만수위(EL.m)	160.0	176.0	207.2
· 저수위(EL.m)	130.0	140.0	150.0
· 총저수용량(10 ⁶ m ³)	1,248	790	73.6

3.3 대상유역별 모의결과 비교

상기 검증방법을 이용하여 유역별로 2006~2007년의 관측강우에 대한 일별 유출모의 능력을 비교하였다. 분석기간을 2년으로 설정한 사유는 장기유출모형의 경우 매월별 또는 계절별로 유출정도를 평가할 경우 신뢰할 수 있는 강우계측 자료가 있다는 조건에서는 다양한 특성을 지닌 매개변수의 보정을 통해 정밀도를 조정할 수 있으므로 객관적인 평가가 이루어 질수 없다. 따라서 평가의 객관성을 위해 단기간별 분석이 아닌 2년간을 연속 분석하되 초기 1년은 안정화분석기간(Warming Up)으로 하고 후반기 1년을 평가기간으로 하여 기간별로 정확성을 평가하였다. 대상기간은 수문학적 측면에서 이수기('06.9월말~'07.6월중)와 홍수기('07.6월말 ~ '07.9월중)로 구분하였다.

모형별 매개변수의 산정과 적용은 다음과 같다. SSARR 모형의 매개변수는 고도별 유역면적, 토양수분지수 등 11개의 매개변수를 이용하여 유출량을 산정하는데, 유역별 매개변수 산정을 위한 지형특성인자는 GIS 작업을 통해 산정하였으며, 기타 매개변수는 SSARR 매뉴얼에서 제시된 기본값을 적용하되, 과거 5개년에 대한 연간 유출분석을 실시하여 매개변수 보정을 하였고, 검정 대상기간에 대하여는 보정된 매개변수를 수정없이 적용하였다. 저류함수 장기유출모형의 경우는 경험식에 의해 산정된 8개의 매개변수를 기본값으로 적용하되, 과거 5개년에 대한 연간 유출분석으로

보정된 매개변수를 검증기간에 대하여 수정없이 적용하였다.

SSARR 모형은 임시 메모리 용량의 한계 때문에 2년 이상의 분석기간에 대하여 한번에 모의가 불가능하므로 1년씩 2회로 구분하여 모의하였다. 반면, 저류함수 모형은 최장 4년까지 한번에 수행이 가능토록 구성되어 2년간의 자료를 1회에 모의하였다.

Fig. 3는 2006~2007년의 2년 연속 모의결과중 후반 이수기('06.9.21~'07.6.20)의 안동댐 유출분석 수문곡선으로, 댐의 관측 유입량에 대한 SSARR 모형(점선)과 저류함수모형(굵은실선)의 유출수문곡선을 병행하여 표시하였다. SSARR모형은 저류함수모형과 비교하여 강우 발생시마다 관측값보다 높은 유출양상을 보여주고 있으나, 저류함수모형은 효율계수 및 평균제곱근오차가 상대적으로 양호한 것으로 분석되었다. 합천댐의 유출 수문곡선(Fig. 4)에서는 SSARR 모형의 효율계수가 비

교적 양호한데, 이는 후반기 강우에 대한 저류함수모형의 유출량이 비교적 크기 때문이며, 평균제곱근오차의 경우는 저류함수모형이 양호한 것으로 분석되었는데, 이는 강우발생시 생성되는 SSARR 모형의 침투유출량이 저류함수모형 보다 과다하기 때문이다. Fig. 5는 이수기 밀양댐의 유출량을 비교한 수문그래프로서 SSARR 모형의 유출분석결과가 우월한 것으로 나타났다. Table 2는 이수기 유출상황에 대한 총괄표로서 비교대상 모형의 효율계수는 상대적으로 둘 다 낮은 편이며, 관측 수문그래프에 대한 평균제곱근오차도 유역 및 모형의 특성에 따라 정밀도의 우월을 논하기 곤란한 것으로 분석되었다. 이는 모형의 매개변수가 과거 5년간의 매개변수 보정기간동안 홍수기에 적합하도록 보정되어 급회 검증 기간에 대한 이수기 유출모의 대하여는 비교적 많은 오차를 포함하기 때문이라고 판단된다.

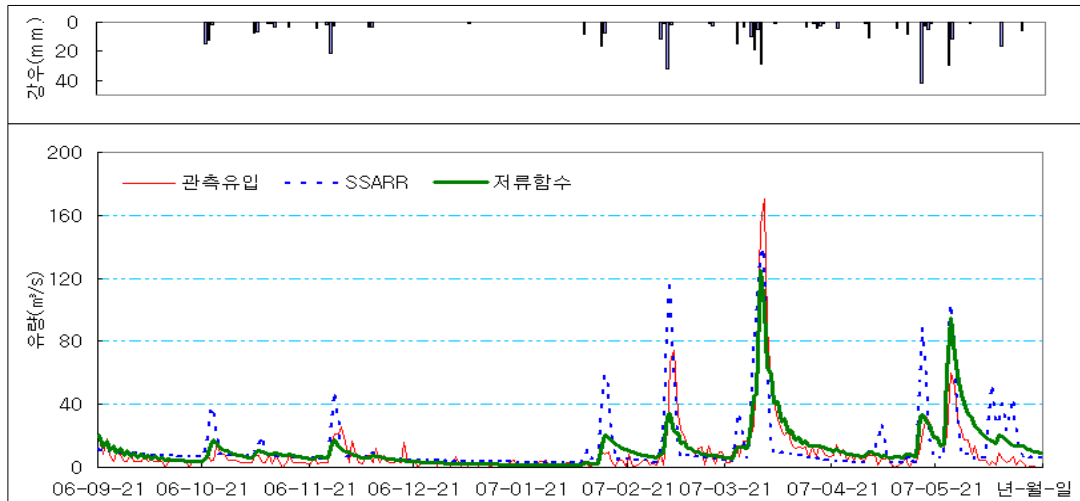


Fig. 3. Hydrograph of Andong Dam Basin(Nonflood Season)

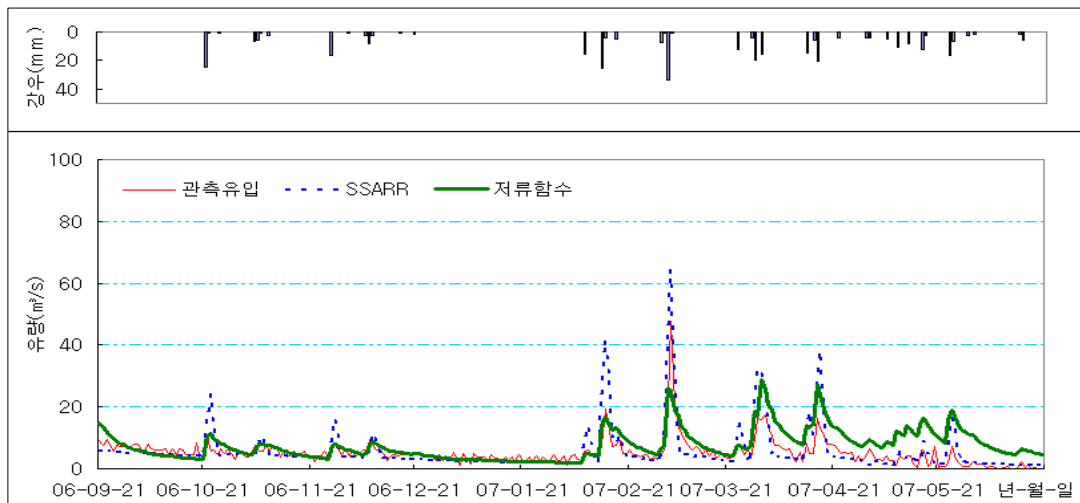


Fig. 4. Hydrograph of Hapcheon Dam Basin(Nonflood Season)

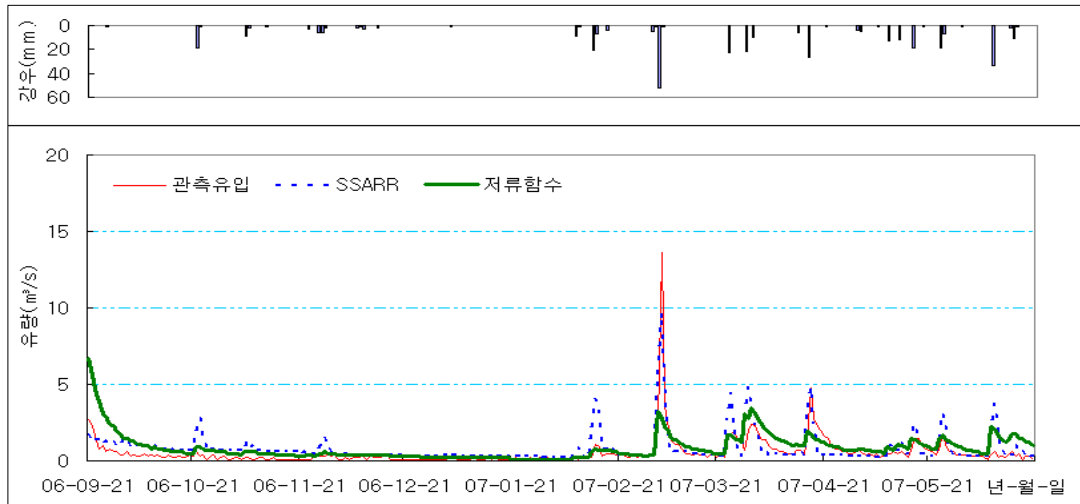


Fig. 5. Hydrograph of Milyang Dam Basin(Nonflood Season)

Table 2. Runoff for Nonflood Season('06.9.21~'07.6.20)

항 목		댐 명	단위	안동댐	합천댐	밀양댐
관측 강우			mm	406.0	349.7	373.7
관측 유량			백만m³	222.5	122.2	12.9
계산 유량	SSARR		백만m³	306.5	130.4	19.1
	저류함수		백만m³	284.3	179.4	20.4
ES	SSARR		-	0.42	-0.10	0.46
	저류함수		-	0.70	-0.28	0.07
RMSE	SSARR		m/s	7.4	2.9	0.6
	저류함수		m/s	4.4	1.9	0.9

Fig. 6은 2006~2007년의 2년 연속 모의결과중 후반 홍수기('07.6.20~9.21) 안동댐의 유출 수문그래프이다. 검정기간에 대한 모의결과 SSARR 모형은 일부기간에 대하여는 과다 및 과소 유출이 나타나지만, 전반적으로

과거 5년간 수문자료에 의해 보정된 매개변수가 홍수기에 적합하도록 산정된 것으로 판단된다. 이에 반하여 저류함수모형은 유출총량 면에서는 약 13%정도의 과다 유출이 발생되어 정밀도가 SSARR모형 보다는 낮으나

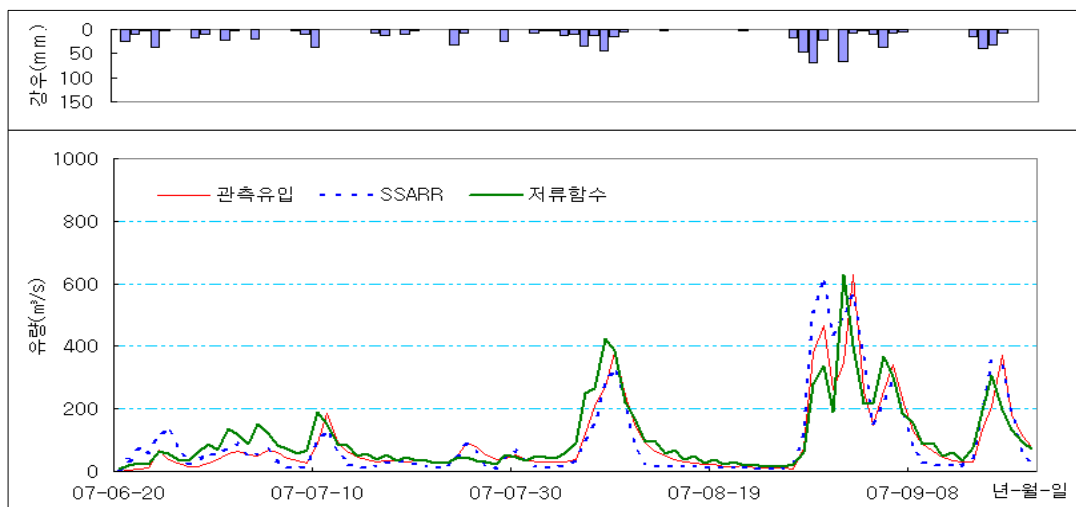


Fig. 6. Hydrograph of Andong Dam Basin(Flood Season)

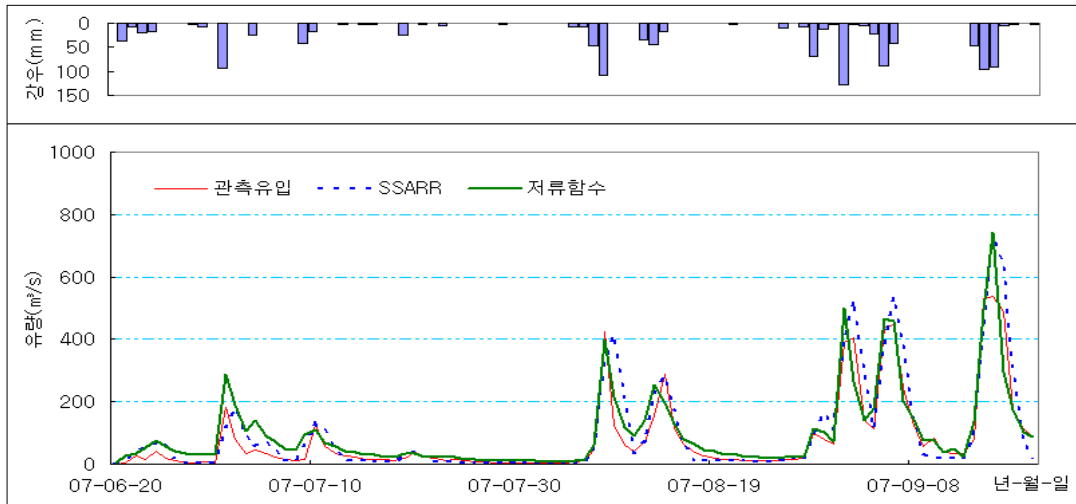


Fig. 7. Hydrograph of Hapcheon Dam Basin(Flood Season)

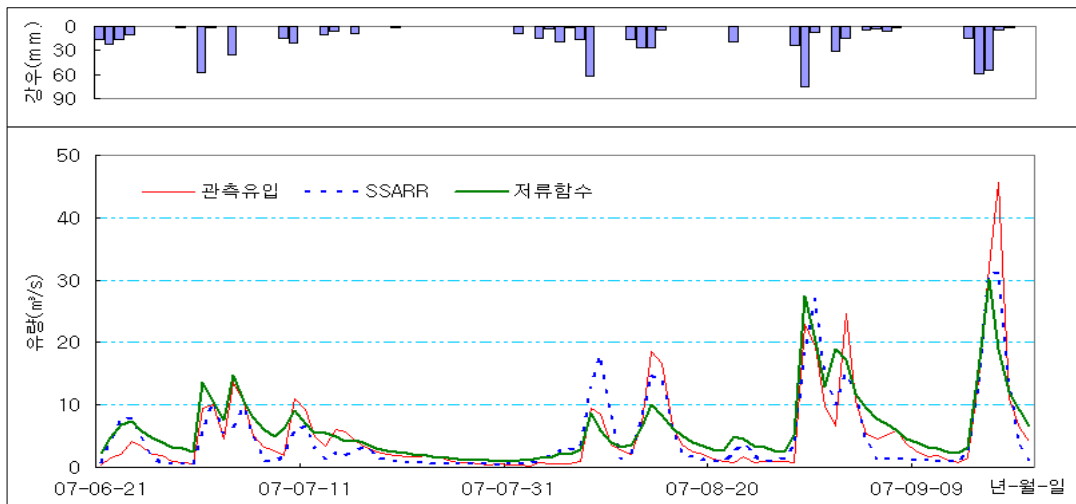


Fig. 8. Hydrograph of Milyang Dam Basin(Flood Season)

Table 3. Runoff of Flood Season('07.6.21~'07.9.20)

항 목		댐 명		단위	안동댐	합천댐	밀양댐
		SSARR	저류함수				
관측 강우				mm	827.8	1220.5	742.1
관측 유량				백만m³	759.0	648.8	41.6
계산 유량	SSARR			백만m³	756.5	777.0	38.1
	저류함수			백만m³	862.8	797.2	48.7
ES	SSARR			-	0.83	0.78	0.81
	저류함수			-	0.72	0.85	0.70
RMSE	SSARR			m³/s	47.7	60.1	3.1
	저류함수			m³/s	60.6	49.6	3.9

효율계수가 0.7 정도로 강우에 대한 응답은 양호한 것으로 판단된다. 합천댐의 분석결과(Fig. 7)에서는 두 개 모형의 모의유출 총량이 관측 유출총량에 비하여 상대적으로 약 20%정도 과다하게 분석되었으나 효율계수 및 평균제곱근 오차는 저류함수모형이 비교적 우수한

것으로 분석되었다. Fig. 8는 홍수기 밀양댐의 유출분석 결과로서 관측유량에 대한 두 모형의 유출응답은 유사한 것으로 분석되었다.

Table 3은 3개 댐유역에 대한 유출상황을 나타내며, 검정기간 중 두 모형의 효율계수는 이수기에 비하여 양

호하게 분석되었다. 한편, 댐유역의 관측유량에 대한 저류함수모형의 유출이 SSARR모형 보다 많이 모의되었으나 이는 저류함수모형의 경우 증발산 및 유역내 광역 용수이용 등의 모의기능이 부족하기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

강우-유출 모형의 최종 개발 목적은 수집가능한 자료를 이용하여 물관리 실무자가 하천의 유량을 예측하여 용수이용계획 수립 등의 업무를 쉽고 정확하게 할 수 있는 분석도구를 제공하는데 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 물관리 실무에서 홍수량 예측업무에 활용중인 단기 강우-유출 저류함수 모형을 확장하여 장기 유출분석이 가능한 저류함수기반의 유출모형을 구축하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 홍수분석 용도로 활용중인 단기 저류함수 강우-유출 모형에서 장기유출 모의에 기여도가 높은 유효우량 및 침투량 산정기법을 개선하여, 시간단위 유출분석은 물론 일단위의 장기 유출이 가능하도록 확장하였다.
- 2) 개선된 저류함수기반 장기유출 모형의 적용성 비교를 위하여 국내·외에서 신뢰도가 입증되어 널리 사용중인 SSARR 모형을 선정하였으며, 검정기간(2006~2007년)에 대하여 과거 5년간의 수문사상에 의해 보정된 대표 매개변수를 수정없이 적용하여 두 모형간의 정확도를 비교한 결과, 저류함수 장기유출모형에 비하여 SSARR 모형의 강우-유출 응답 수준이 상대적으로 우월한 것으로 검토되었다.
- 3) 그러나, 증발산, 용설 및 회귀수 모의기능 등 물관리 실무에서 기여도가 상대적으로 낮은 유출모의 기능을 축소한 저류함수기반의 장기유출모형을 적용시 관측 가용한 자료만을 이용하여 간편하게

장기 유출모의가 가능하였다.

- 4) 향후 저류함수 장기유출모형에 증발산, 용설 및 유역내 용수이동 등의 추가 기능보장이 이루어진다면 활용성이 더욱 높아질 것으로 기대된다.

참고 문헌

건설교통부 (2006). **한강수계 댐군홍수조절연계운영 시스템 구축 보고서**. pp. 203-224.

건설교통부 (2001). **낙동강수계 댐군최적연계운영 시스템개선 연구 보고서**. pp. 157-176.

선우중호 (1984). “한강유역의 홍수예보 - 저류 함수법에 의한 유출모형.” **대한토목학회 학술발표회논문집**, 대한토목학회, pp. 445-450.

신철균, 조효섭, 정관수, 김제한 (2004). “저류함수 기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 969-978.

윤용남 (1985). **공업수문학**. 청문각, pp. 129-134.

이정규, 김한섭 (2000). “홍수예보를 위한 통합저류함수 모형의 퍼지제어.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제6호, pp. 689-709.

한국수자원공사 (2003). **K-water 홍수분석모형 개발 보고서(Final Report)**. pp. 13-18.

Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.

U.S. Army Corps of Engineers (1987). **SSARR User's Manual**.

木村俊晃 (1958). “洪水流出の推定法に關する研究(I) - 貯留關數に關する一考察 -.” **土木研究所報告**, 102號, pp. 9-16.

(논문번호:08-24/접수:2008.02.21/심사완료:2008.05.28)