

저류함수법의 매개변수 추정을 위한 상수고정법의 개선 Modification of the Fixed Coefficient Method for the Parameter Estimation of Storage Function Method

정 건 회* / 박 희 성**

Chung, Gunhui / Park, Hee-Seong

Abstract

The researches on the parameter estimation for storage function method have been conducted for a long time using different methods. However, the determination of the optimal parameters takes a long time and there is a controversy that the proposed optimal parameters do not likely represent the physical characteristics of watershed. In this study, the characteristics of the continuity and storage function equation was analyzed and sensitivities were evaluated. As the result, the only optimal solution is suggested among several local optimums. It is also shown that the lag time is able to be determined using the direct runoff starting time of the watershed. From the sensitivity analysis, it is also proved that the determination of the lag time is very important and the only optimal solution could be found easily after selecting the lag time. Therefore, unlike the traditional optimization method, the proposed method does not take a long time to find the optimal solution which is depending on the characteristics of the rainfall events. The fixed coefficient method which is a method to estimate the optimal parameters of storage function method has been modified using the proposed method. Therefore, the practical efficiency to apply storage function method could be enhanced by applying the proposed method. While the traditional method takes care only the error of the runoff hydrograph, it is very important that the proposed method considers the characteristics of the watershed.

Keywords : storage function method, parameter estimation, fixed coefficient method, lag time

요 지

저류함수법의 최적 매개변수를 추정하기 위한 연구는 오랜 동안 여러 가지 방법으로 수행되어왔다. 그러나 여전히 최적 매개변수를 결정하는 것은 시간이 오래 걸리는 일이며, 유역의 물리적인 특성과 상관없는 매개변수가 결과로 제시되는 경우가 잦다는 인식이 팽배하다. 본 연구에서는 저류함수모형의 연속방정식과 저류함수식을 충실히 분석하고 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, 많은 수의 국지해 중에서 유일해를 결정하는 방법을 제안할 수 있었다. 또한 유역의 직접유출 시작 시간을 고려하여 저류함수법의 지체시간을 결정할 수 있다는 것을 보였으며, 매개변수의 민감도 분석 결과, 모형의 지체시간을 결정하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다. 지체시간을 결정된 후에는 유일한 해를 비교적 쉽게 찾을 수 있었다. 그러므로 제안된 방법은 기존의 최적화 방법과 같이 시간이 오래 걸리지 않으며, 강우사상별로 비교적 정확한 매개변수를 산정할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 방법을 이용하여 기존의 저류함수법의 매개변수를 추정하기 위한 다양한 방법 중 상수고정법을 수정하였으며, 그 결과 실무에서 업무효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제안된 방법은

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: gunhui@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: hspark90@kict.re.kr, Tel: 031-910-0517)

Corresponding Author, Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

기존의 유출수문곡선의 계산오차에만 의지하여 매개변수를 최적화하는 방법과는 다르게 유역의 특성을 고려할 수 있다는 점에서 그 의미가 있다.

핵심용어 : 저류함수법, 매개변수 추정, 상수고정법, 지체시간

1. 서 론

우리나라 실무 홍수예보에 사용되는 저류함수법은 유역 내 저류고와 직접유출고 사이에 비선형 관계를 가정하고, 유역 내 연속방정식을 풀어서 강우-유출해석을 하는 방법이다. 일본의 Kimura (1961)에 의해 제안된 이 방법은 한강유역에 홍수예보모형이 구축된 이후 오랜 기간 동안 실무에 적용되어 오고 있다. 그러므로 저류함수법에 대한 연구가 상당수 진행되었으며, 그 중 많은 부분이 매개변수 최적화 및 유출수문곡선 예측성능향상에 대한 연구이다. 그러나 기존에 적용된 매개변수 최적화 기법들은 Brent 기법(Lee and Lee, 1996), 다중모델적응추정(Kim et al., 1998), 유전자 알고리즘(Song et al., 2006), 적응뉴로퍼지 추론시스템(Yi and Choi, 2008)과 같은 최적화 알고리즘들이었다. 혹은 운동파모형에서 유도된 저류함수모형(Nam, 1985; Sugiyama et al., 1997; Sugiyama et al., 1999), 추계 동역학적 상태·공간형태의 하도 저류함수모형(Bae and Jung, 2000), Dynamic Effect를 고려한 저류함수(Kim et al., 2006)로 저류함수모형의 예측성능향상을 위해 많은 연구들이 수행되었다. 또한 최근 들어, 강우의 불확실성을 고려하기 위해 4차 모멘트를 이용하거나(Fujita and Kudo, 1995), 앙상블 칼만필터를 적용하였다(Bae et al., 2009a, b; Shamir et al., 2010).

그러나 최적 매개변수 탐색 시 강우-유출관계의 비선형성을 고려하는 저류함수법의 특성으로 인해 매개변수의 개수가 선형모형들에 비해 많고, 매개변수들 간의 상관성으로 인해 같은 형태의 유출수문곡선을 나타내는 매개변수 세트의 종류가 무수히 많이 존재하는 경우가 빈번하다. 즉, 최적해가 다수 존재하는 경우가 많기 때문에 유일해를 제시하는 것이 거의 불가능하다. 그러므로 선형연구들처럼 최적화방법을 이용하여 매개변수의 최적화를 시도한 경우, 계산시간이 매우 길고 최적해로 제시된 매개변수가 과연 최적해인지를 장담하기가 쉽지 않다. 그러므로 실무에는 저류함수법의 총 6개의 매개변수를 조정하여 유출수문곡선을 계산해야 함에도 불구하고, 기술자의 경험이나 감각에 의존하여 소수의 매개변수만을 조정하여 시행착오적인 방법을 통해 유출수문곡선은 계산하고

있다. 저류함수법은 모형의 복잡성과 매개변수의 다양성으로 인해, 모형의 정확한 메커니즘을 알지 못하더라도 제법 괜찮은 성능을 가진 매개변수를 시행착오적으로 구할 수 있으므로 이러한 접근법 또한 유효하게 사용되고 있다. 이러한 특징 때문에 저류함수법은 같은 강우사상을 이용하더라도 매개변수를 구하는 사람마다 다른 값을 사용하여 최적화 할 수 있다. 즉, 다른 매개변수들을 적용한 경우라 하더라도 그 유출수문곡선은 매우 흡사할 것이므로 다양한 최적해 중 어떤 매개변수가 정말 최적인지 정하는 것은 매우 어려운 일이다.

그러나 무조건 결과의 오차에만 의존하여 매개변수의 타당성을 논하는 것 보다는 모형의 거동특성을 이해하는 것은 매우 기본적이면서도 중요한 일이다. 즉, 매개변수 결정에 앞서, 각각의 매개변수가 총 유출량 혹은 침투유출량에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이러한 방법을 통해 저류함수법의 매개변수들의 특성을 이해하면, 보다 효율적이고 타당한 매개변수들을 설정할 수 있다.

본 연구에서는 저류함수법의 매개변수 결정을 위해 유역의 특성에 의해 결정될 수 있다고 알려져 있는 매개변수를 대상으로 각 매개변수별 민감도 분석을 수행하고, 기존의 상수고정법을 개량하여 보다 효율적으로 최적 매개변수를 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하고, 최적 매개변수를 구하는 순차적인 방법을 제안하여 실무에서 매개변수 설정 시 손쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

2. 저류함수법

유역으로부터의 유출량을 계산하기 위한 저류함수법은 1961년 일본에서 기무라(木村)에 의해 제안되었다. 저류함수법에 의해 발생하는 직접유출량을 계산하는 방법은 Fig. 1에 간략히 도시되어 있다. 저류함수법에서는 유역 전반에 걸쳐 일정한 강우강도로 호우가 내릴 때, 초기유출률(f_1)에 의해 유출이 발생하고, 누적강우량이 포화우량(R_{sa})에 도달하고 나면, 유역의 포화유출률(F_{sa})에 의해 유출이 발생한다고 가정한다. 또한 직접유출고(O)와 유역 내 저류고(S) 사이의 관계를 비선형으로 가정하여(Eq.

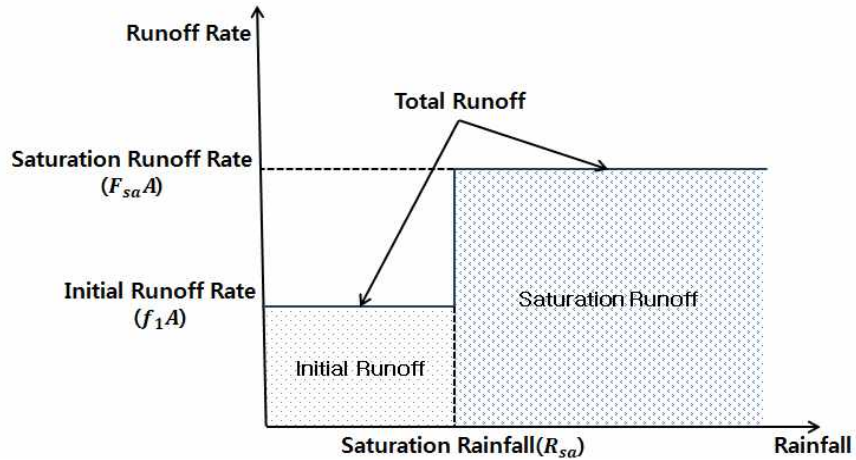


Fig. 1. Runoff from a Watershed using Storage Function Method

(1), 유역 내 저류고가 증가함에 따라 유출속도가 증가하여 직접유출량이 증가하는 현상을 모의하도록 하였다. 이 저류함수식을 하도에 적용할 경우에는 Manning's 공식으로 대신하여 계산한다.

$$S = KO^p \quad (1)$$

유역 내 단위면적에 대한 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$I_t - O_t = \frac{dS_t}{dt} \quad (2)$$

여기서, I_t 는 t 시간에 내린 유효강우의 강우강도(mm/hr), O_t 는 t 시간에 유역으로부터의 직접유출량(mm/hr), S_t 는 t 시간의 유역 내 저류량(mm)이다. 이 연속방정식을 차분방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{O_t + O_{t+1}}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\left(\frac{I_t + I_{t+1}}{2}\right)\Delta t - \left(\frac{O_t + O_{t+1}}{2}\right)\Delta t = S_{t+1} - S_t \quad (4)$$

$$R_{t+1} - \left(\frac{O_t + O_{t+1}}{2}\right)\Delta t = S_{t+1} - S_t \quad (5)$$

여기서, R_{t+1} 은 t 시간에서 $t+1$ 시간까지 Δt 시간 동안 발생한 유역의 강우량(mm)이다.

유역의 저류함수를 사용하여 유출계산을 하기 위해서는 유역의 1차유출률(f_1), 포화유출률(F_{sa}), 포화우량(R_{sa}), 지체시간(T_l), 저류상수(K), 지수(P)를 결정하여야 한다. 이 6개의 매개변수 중 1차유출률(f_1), 포화유출

률(F_{sa}), 포화우량(R_{sa})은 유효우량을 결정하기 위한 매개변수이며, 이렇게 결정된 유효우량은 지체시간과 저류함수식에 의해 지체되고 추적되면서 직접유출량에 기여하게 된다.

3. 저류함수법 매개변수 특성 평가

저류함수법의 6개 매개변수들은 유역의 특성에 따라 결정이 가능하다고 판단되는 매개변수들(K , P , T_l)과 강우사상에 따라 결정된다고 알려져 있는 매개변수들(f_1 , f_{sa} , R_{sa})로 나눌 수 있다. 이들 중 유역의 특성에 따라 결정된다고 알려져 있는 매개변수는 지체시간(T_l)과 저류함수의 저류상수(K)와 지수(P)이다. 이러한 매개변수를 결정하기 위해서는 유역면적, 시간별 유역평균우량, 유역출구에서의 시간별 유출량 자료 등이 필요하다. 이들 자료를 이용하여 매개변수를 결정하는 방법으로는 상수고정법, 상수역산법, 초기우량 평가방법, 경험식에 의한 방법, 최적화에 의한 방법이 있다.

상수역산법은 계산시각 이전의 실측한 누가우량과 누가우량을 이용하여 각 시각의 저류함수의 모형상수들을 역산하고, 이들 값의 평균치를 유출계산의 초깃값으로 사용하여 홍수량을 계산하는 방법이며, 초기우량 평가방법은 저류상수 K 를 초기우량의 크기에 따라 결정하고 우량의 지체시간을 누가우량의 상관관계식으로부터 구하여 유출계산을 하는 방법이다. 또한 저류함수법의 매개변수를 구하기 위해 많은 경험식들이 개발되었다. 그러나 도네가와 공식, 가꾸야 공식 등 대부분의 경험식이 100 km² 정도의 유역면적을 가지는 일본 유역을 대상으로 개발된 것이며, 국내 유역은 일본 유역에 비해 크기가 5~10배 정도 큰 유역이 대부분이

므로, 기존의 경험식이 유역에서 발생하는 모든 강우사상을 만족시킬 수 있는 매개변수를 제시하지 못한다는 단점이 있다. 즉, 일본에서 적용되는 저류함수법에 비하여 큰 국내 유역을 단일 유역으로 적용하였기 때문에, 강우의 공간적인 분포에 대한 고려가 미약하고, 제시된 매개변수가 유역의 전체 특성을 대표하기에는 무리가 있다.

그러므로 국내 강우-유출 관계를 잘 재현할 수 있는 유역 별 매개변수 추정을 위해 많은 선행연구들이 매개변수 최적화를 시도하였다. 어떤 방법을 사용하던 매개변수의 유역별 참값을 찾아내려는 목적은 홍수예보모형의 성능을 높이면서도 최대한 간편하고 빠르게 강우-유출해석을 하기 위함이다. 그러나 실제 매개변수의 변동특성을 알지 못한 채 계산유출수문곡선의 오차에만 의지해 매개변수를 찾아내는 방법이 기존 최적화 연구의 대부분을 차지한다. 이렇게 적용된 최적화 방법은 시간이 오래 걸리며, 모든 강우 사상 자료가 확보된 이후에 매개변수 추정이 가능하므로, 실시간 홍수예보는 불가능하며, 강우사상에 종속된 매개변수가 대부분이다. 또한 최적화 결과 산정된 매개변수에 대한 가장 많은 비판은 제안된 매개변수가 유역의 물리적인 특성을 대표하지 못한다는 것이다. 예를 들어, 유역 크기와 하도경사에 비하여 매우 큰 도달시간이 결정된다든지, 유역의 유출률이 현실적이지 않은 결과를 단지 계산된 유출수문곡선이 관측값과 일치한다는 이유로 최적 매개변수로 제시하는 것이다.

마지막으로 상수고정법을 이용하여 저류함수의 매개변수를 추정하는 방법은 기존의 홍수자료를 사용하여 K , P , T_l 을 결정하고 이 상수 값들을 고정하여 홍수유출계산을 실시하는 방법이다. 이 방법에서는 Fig. 2에 도시되어 있는 것과 같은 절차로 계산하는데, 우선 지체시간 T_l 을 가정한 후 실측 우량자료와 유량자료로 시간별 직접유출고와 실측 저류고를 계산하여 산술방안지에 그려 일가함수관계의 성립여부를 검토한다. 이 때 곡선이 시계방향으로 돌면 T_l 을 더 크게 가정하며, 반시계 방향으로 돌면 T_l 을 더 작게 가정하여 반복 계산함으로써 일가함수관계에 가장 가까운 T_l 을 결정하고, 이때의 T_l 을 기준으로 최소자승법에 의해 K , P 값을 추정한다. 그러나 이 방법에서는 지체시간 T_l 가정에 대한 기준이 없으므로, 직접유출고와 저류고 사이에 선형관계가 형성될 때까지 많은 반복을 수행하여야 한다. 또한 전체 강우사상 자료가 존재하여야 선형관계를 판단할 수 있으므로 실시간으로 적용하는 것은 불가능하다.

이에 본 연구에서는 실시간으로 매개변수 최적화를 하기 위한 기본적인 아이디어를 제공하기 위해 매개변수의 변동특성에 대한 연구를 시도하였다. 이를 위하여 본 연구

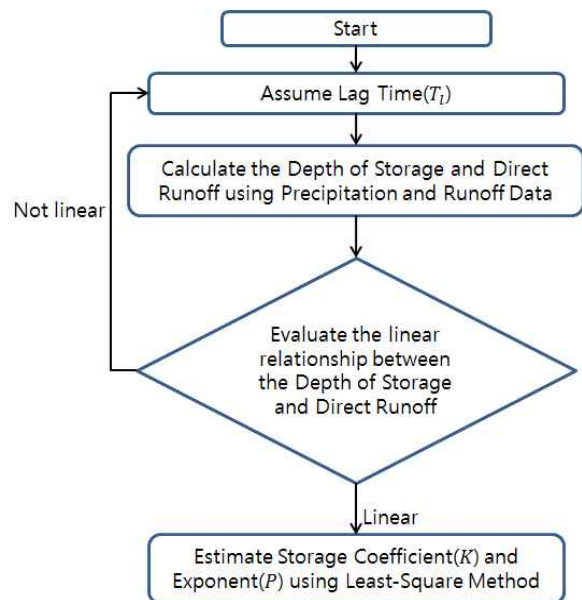


Fig. 2. Flowchart of Fixed Coefficient Method

에서는 남한강 최상류 지역인 정선2관측소(Table 1)의 2011년 7월 3일 4:00~2011년 7월 3일 23:00까지의 강우사상을 분석하였다. 본 연구는 매개변수 중 유역의 특성에 따라 결정되는 매개변수들인 K , P , T_l 만을 대상으로 하므로, SCE-UA 최적화 기법을 적용하여 최적 매개변수를 결정 한 결과를 활용하였다. 최적화 결과에서 유효우량 계산을 위한 매개변수들은 $f_1=0.31$, $f_{sa}=0.95$, $R_{sa}=32$ 로 결정한 후 분석을 수행하였으며, 본 강우사상의 총 강우량 117.22 mm이며, 유출률은 84%, 자료의 시간간격은 0.5시간이다.

3.1 지체시간(T_l) 결정

우선, 매개변수 최적화를 하기에 앞서, 실무에서 홍수예보 시 매개변수를 시행착오법으로 보정하는 단계에 대해 개념적으로 생각해볼 필요가 있다. 조정해야할 매개변수가 총 3개라면, 우선 어떤 매개변수를 먼저 조정할 것인가는 전적으로 사용자가 결정해야 한다. 그러나 경험이 풍부한 사용자가 아니라면, 사전정보가 아무것도 없으므로 3개의 매개변수 중 처음 조정하기 시작하는 매개변수를 선택할 확률은 모두 1/3이 될 것이다. 그러나 각각의 매개변수가 가지는 특징에 대해서 생각해본다면, 선택확률은 확연히 달라진다.

여기에서 가장 중요하게 관찰해야 하는 것은 기존의 상수고정법에서도 명시하고 있는 것과 같이 저류고와 직접유출고간의 관계이다. 이 그래프는 저류함수식 $S=KO^P$ 을 그린 것으로, 한 개의 비선형 회귀식으로 저류고와 직접유출고 간의 관계를 나타내야 하므로, 최대한 하나의 선

으로 보이도록 만드는 것이 중요하다. 이 관계는 지체시간 (T_l)에 따라 원을 그리기도 하고, 하나의 선으로 중첩되기도 한다. 그러므로 가장 먼저 최적화해야 하는 매개변수는 지체시간이다. 이는 기존의 상수고정법에서도 채택하고 있는 순서이다. 그러나 본 연구에서는 기존의 상수고정법에

서 제안한 시행착오법이 아닌 유역의 물리적인 특성을 반영하여 지체시간 T_l 을 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

이러한 유추를 증명하기 위해 $K=1$, $P=1$ 으로 가정하여 저류고와 직접유출고 사이의 관계를 선형관계($S=O$)로 가정한 후, 지체시간에 변화를 주었다. Fig. 3에서 보이는

Table 1. Water Level Gauging Stations at the Outlet of Jeongseon Watersheds (<http://www.wamis.go.kr>)

Station	Code	Latitude	Longitude	Organization	Watershed area (km ²)
Jeongseon2	1001655	37-22-42	128-39-26	MLTM*	1,688.41

*MLTM : Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs

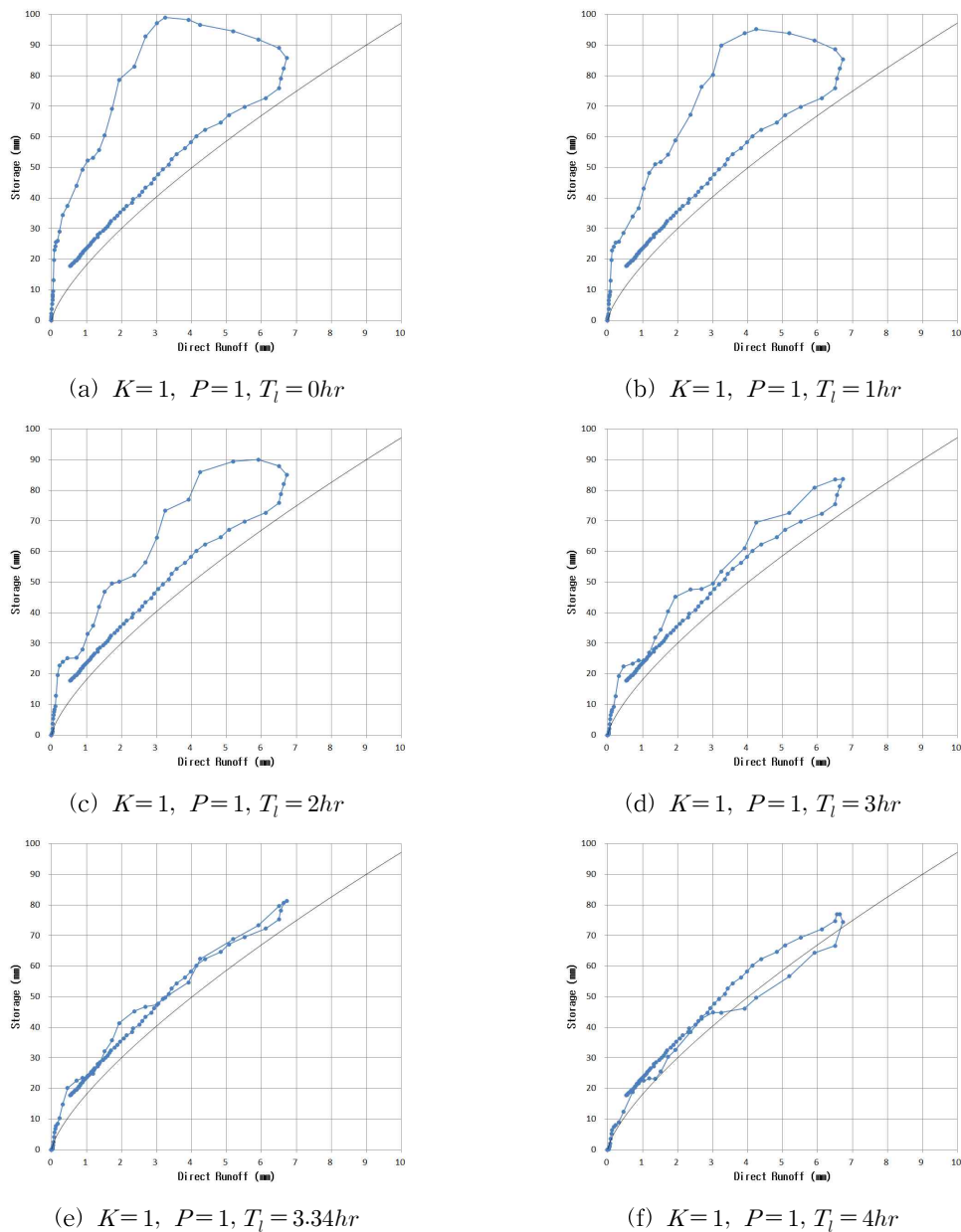


Fig. 3 The Relationship between Direct Runoff and Storage using Storage Function

것과 같이 지체시간이 0시간에서 3시간까지 변화함에 따라 그래프가 원을 그리다가, $T_l = 3.34 \text{ hr}$ 일 때 거의 중첩되었다가, 지체시간이 4시간일 경우에는 반대 방향으로 원을 그린다.

우리가 찾고자 하는 것은 궁극적으로 저류고와 직접유출량과의 관계를 나타내는 비선형 회귀식이라는 점을 기억한다면, 이 그래프가 최대한 중첩이 되어 한 개의 회귀식으로 나타내는 데에 무리가 없어야 한다는 것에 동의할 것이다. 그러므로 본 강우사상의 지체시간은 3.34시간으로 정하도록 한다. 이때의 지체시간 변화에 따른 유출수문곡선을 관찰하기 위해 $K=1$, $P=1$ 일 때의 유출수문곡선을 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 유효우량이 전량 직접유출에 기여하는 것을 알 수 있다. 이때 기저유량은 직선분리법으로 분리하였다. 또한 지체시간을 변화시킴에 따라 유출수문곡선 그래프의 형태는 변하지 않으면서 첨두유량의 발생시간만 변화하는 것을 알 수 있다. 그러나 지체시간이 3.34시간인 경우에는 유효우량을 지체시간만큼 지체시킬 때 정수배만큼 지체시키지 않으므로 발생하는 약간의 첨두유량 저하가 발생하였다.

여기서 한 가지 언급해야 하는 것은 지체시간(lag time)의 정의이다. 수문학적 지체시간은 유효우량정상도의 질량중심 시각에서 유출수문곡선의 최대유량 발생 시각까지의 시간 간격 혹은 직접유출 수문곡선의 중심까지의 시간 간격이다. 하지만 저류함수법의 지체시간(T_l)은 유효우량이 산정된 이후라면, 유출곡선을 해당 시간만큼 이동

시키는 역할을 하는 것이다. 따라서 저류함수법의 지체시간은 강우발생시각으로부터 초기직접유출이 발생하는데 걸리는 시간에 매우 근접한 값을 가질 것이라고 가정하였다. 이는 수문학적인 지체시간이 가지는 의미를 매개변수 T_l 이 대표하지 않는다는 것을 의미한다. 이에 실제 실무에서 실시간 홍수예보를 하거나 매개변수 최적화를 할 때에는, 호우가 시작된 시각 이후 직접유출이 발생하기 시작한 시각을 지체시간의 초기값으로 사용하여 매개변수의 최적화를 시도할 수 있다고 판단하였다. 실제로 최적 매개변수 T_l 이 3.34시간인 해당 강우사상의 직접유출량 발생시각은 호우가 시작되고 3.5시간 이후였다. 이는 자료의 시간 간격이 0.5시간임을 감안한다면 매우 정확한 추정이라고 할 수 있다.

3.2 저류상수(K)의 결정

지체시간이 결정되고 나면, Fig. 3(e)에서와 같이 저류고와 관측직접유출고의 관계 그래프 중 상승부와 하강부가 비선형 회귀식으로 나타낼 수 있을 정도로 중첩이 된다. 이때 매개변수 $K=1$, $P=1$, $T_l=3.34$ 값을 대입한 저류함수식($S = KO^P$)을 이용하여 계산직접유출고를 계산한 결과인 저류함수곡선식은 Fig. 2(e) 아래쪽에 보이는 검은색의 실선과 같다. 이때의 계산직접유출고와 관측직접유출고 사이의 관계를 Fig. 5에 그려보았다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이, 관측직접유출고는 저류고의 관계 그래프는 중첩되나, 계산직접유출고와 저류고의 관계 그래프는

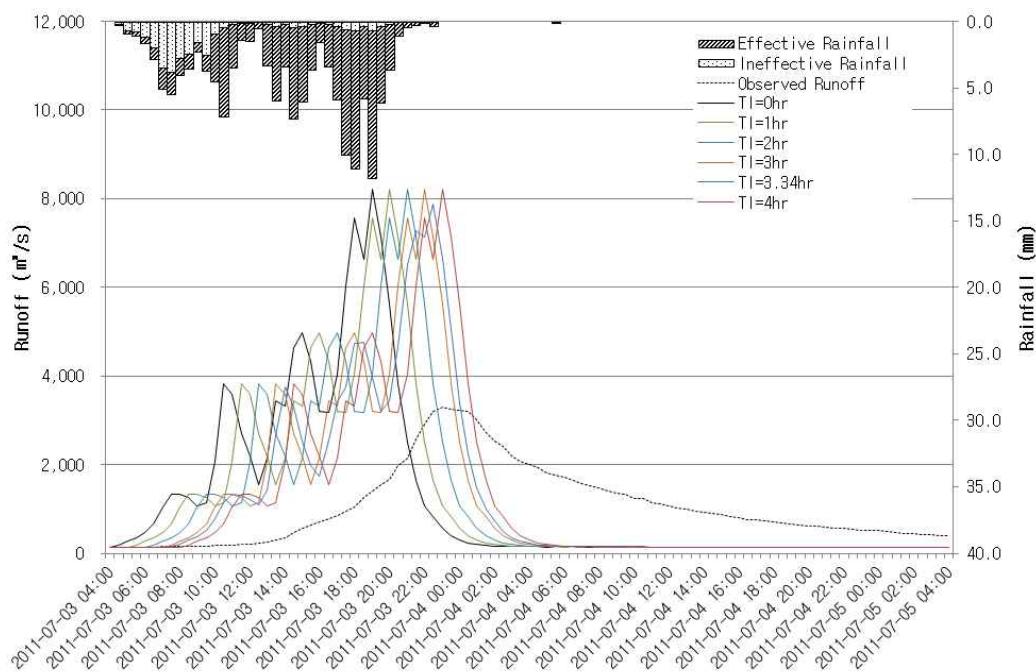


Fig. 4. Runoff Hydrographs depending on Lag Time (T_l , $K=1$, $P=1$, $T_l=0hr$)

큰 원을 그리고 있다. 매개변수최적화가 마무리되면, 계산 직접유출고 역시 저류고와 중첩되고, Fig. 3(e)의 저류함수 곡선 역시 저류고-관측직접유출고 자료와 중첩될 것이다.

그러므로 이제 저류함수식의 저류상수와 지수를 최적화할 단계이다. 둘 중, 어떤 변수를 먼저 최적화 할 것인가를 결정해야 한다. 지체시간이 결정된 후에는 상수고정법과 같이 최소자승법을 이용하여 K , P 를 결정할 수도 있으나, 실시간으로 매개변수를 보정하고자 할 때, 사용자가 단계적으로 새로운 자료가 입력됨에 따라 적용하기 편리한 방법을 소개하고자 한다.

Fig. 3(e)의 x축은 직접유출고(O)이고 y축은 저류고(S)를 나타낸다. 그러므로 검은색 실선으로 표현된 저류

함수곡선식은 K 를 변화시키에 따라 원점에 고정되어 기울기가 바뀌며, P 가 바뀌면 그래프의 곡률이 변화된다. 즉, $P=1$ 일 경우에는 선형식이 되며, 이외의 경우에는 해당곡률을 가지는 비선형식이 된다. 이러한 특성을 기억하면서 저류함수식이 관측직접유출고와의 관계와 일치하도록 매개변수를 조정하면 된다.

저류함수식의 특성상 직접유출고가 1mm인 경우에는 지수의 영향을 받지 않으므로 지수를 변경하여도 같은 저류고를 갖는다. 이러한 특성을 이용하여 지수 $P=1$ 로 고정된 후, 저류상수(K)를 변화시키면서 저류고가 1mm가 되는 점을 관측직접유출고와 같아지도록 조정한다. Fig. 6에서 보이는 것과 같이 K 가 1부터 커짐에 따라 저류함수

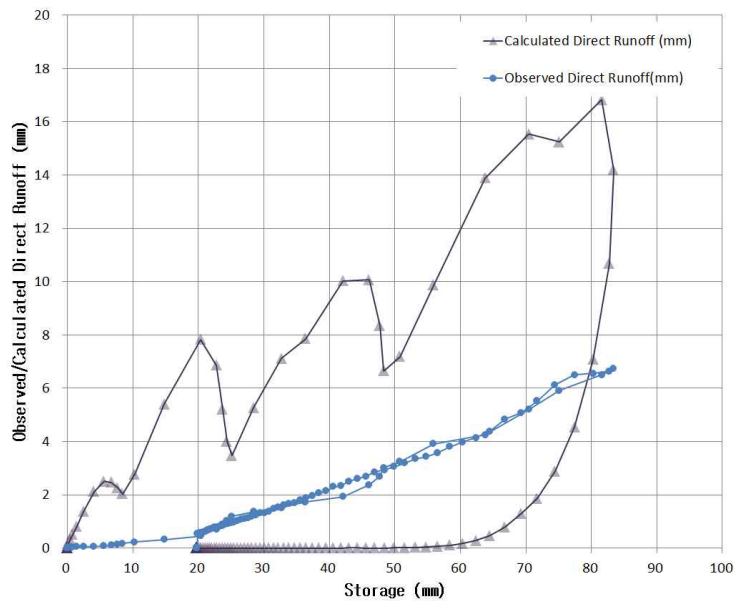


Fig. 5. The Relationship between Direct Runoff and Storage ($K=1$, $P=1$, $T_l=3.34hr$)

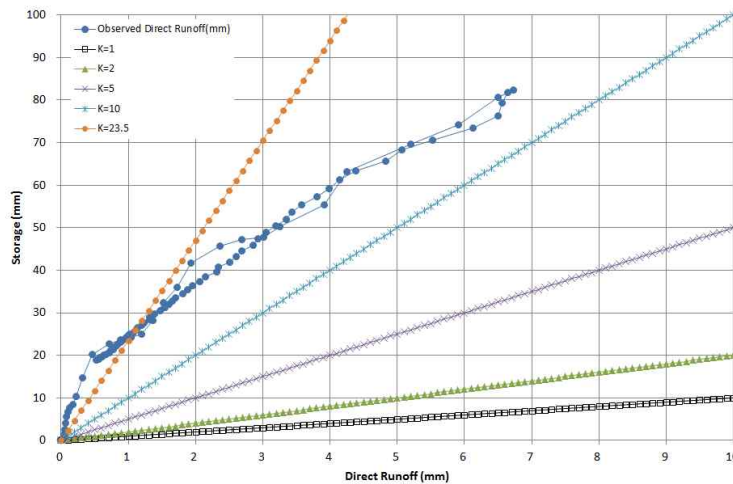


Fig. 6. The Change of Storage Function Depending on Storage Coefficient (K)

식의 기울기가 커지는 것을 볼 수 있다. $K=23.5$ 일 때, 저류함수식이 직접유출고가 1mm인 관측직접유출고와 중첩된다. 그러므로 저류상수(K)를 23.5로 결정하도록 한다. 이때의 유출수문곡선의 변화는 Fig. 7에 나타나 있는 것처럼 저류상수가 커짐에 따라 첨두유량이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다.

여기에서 유출수문곡선의 오차 만에 의지하여 매개변수를 조정하는 것이 쉽지 않은 것을 알 수가 있다. 즉, K 가 10일 경우, 계산유출수문곡선은 관측유출수문곡선과 매우 근접하다는 것을 알 수 있으며, K 가 23.5일 경우에는 계산유출수문곡선의 첨두유량이 너무 작아지는 것처럼 보인다. 그러나 후에 P 를 최적화함으로써 유출수문곡선이 변함을 보일 것이다.

3.3 저류함수식의 지수(P)의 결정

마지막으로 저류함수식의 지수인 P 를 조정하여 유출수문곡선을 계산한다. 앞에서 언급한 것과 같이, 유출고가 1mm인 경우에는 P 가 변화하여도 저류함수식의 값은 영향을 받지 않는다. 그러므로 Fig. 8(a)에서 보이는 것과 같이 P 를 변화시키기에 따라(직접유출고, 저류고)=(1, K)=(1, 23.5)인 점은 고정되고, 곡선식의 곡률만 변하는 것을 볼 수 있다. 지수가 커질수록 곡률이 작아지며, $P=0.65$ 일 때, 가장 근사한 곡선식이 나타남을 알 수 있다. 많은 경우, 비선형 식은 로그축을 이용하여 도시한다. 로그축을 이용할 경우에도 마찬가지로 Fig. 8(b)에서 보이는 것과 같이(직접유출고, 저류고)=(1, K)=(1, 23.5)인 점을 중심으로 P 가 변화함

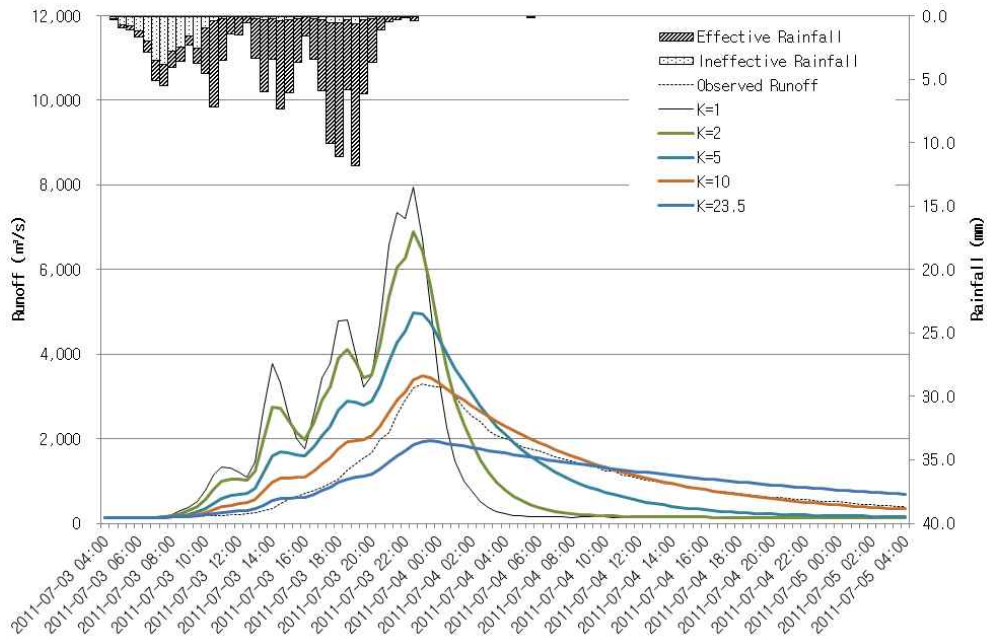


Fig. 7. The Runoff Hydrographs Depending on Storage Coefficient (K)

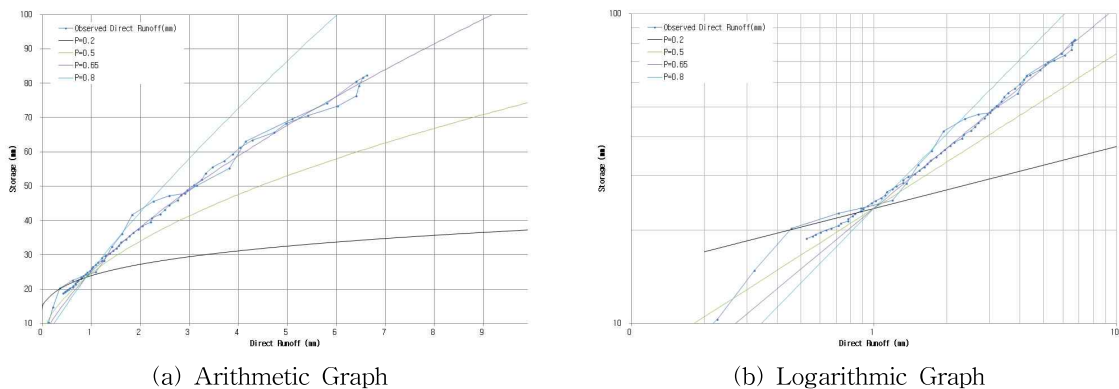


Fig. 8. The Change of Storage Function Depending on the Exponent of Storage Function (P)

에 따라 회전하는 것을 볼 수 있다. 이때의 유출수문곡선의 변화는 Fig. 9와 같다. Fig. 7에서 작아졌던 침투유량이 P 를 조정함에 따라 점차 변화되어, $P=0.65$ 일 경우 Nash-Sutcliffe 모형효율계수(NSE, Nash and Sutcliffe, 1970)를 사용하여 오차를 계산한 결과, 0.996으로 매우 높은 효율이 나타났다.

매개변수가 최적화 된 후, 저류고와 관측직접유출고, 저류고와 계산직접유출고 사이의 관계를 대수축과 로그축에 도시한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다.

3.4 최적 매개변수 결정

그러나 최적해가 다수 존재할 가능성이 많은 비선형 시

스템의 특성을 고려하면, 제시된 매개변수 이외에 다른 매개변수 세트 역시 비슷한 정도의 오차로 유출수문곡선을 예측할 수 있을 것이라는 것을 알 수 있다. 예를 들어, Table 2에 나타나 있는 것과 같이 비슷한 정도의 유출수문곡선오차를 나타내는 매개변수들의 세트는 쉽게 찾아지며, 이때의 유출수문곡선(Figs. 11~13) 역시 눈으로는 구분이 쉽지 않다. 즉, 각각의 매개변수들이 서로 보완을 하여, 최종 유출수문곡선은 비슷한 결과를 주는 것이다. 예를 들어, Opt. 2 경우, 초기유출률을 나타내는 f_1 이 0.31에서 0.29로 작아지고, 포화우량 R_{sa} 가 32에서 44로 증가하여 유효우량이 줄어들었으나, 저류상수 K 가 작아지면

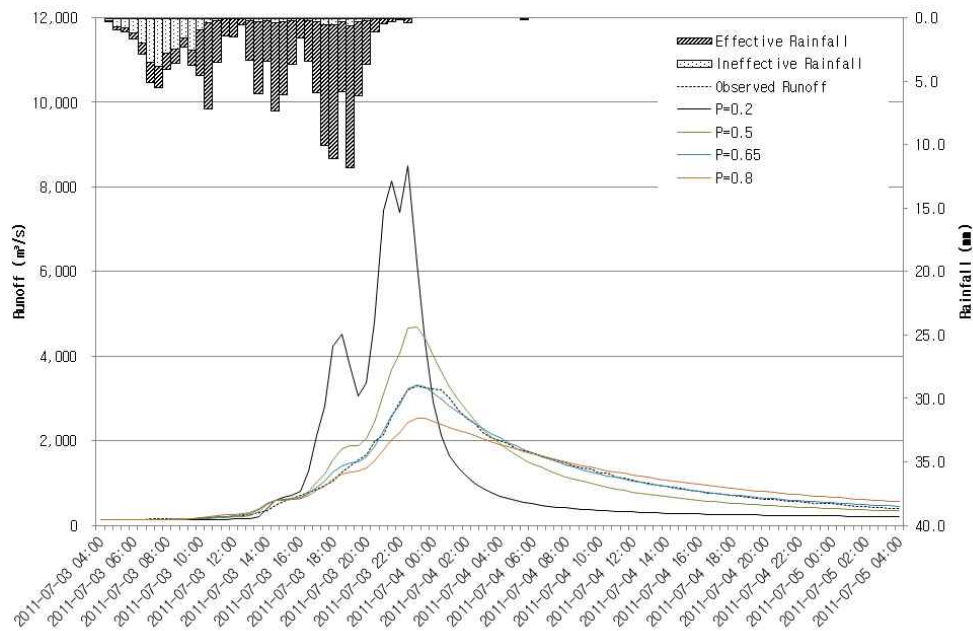


Fig. 9. The Runoff Hydrographs Depending on the Exponent of Storage Function (P)

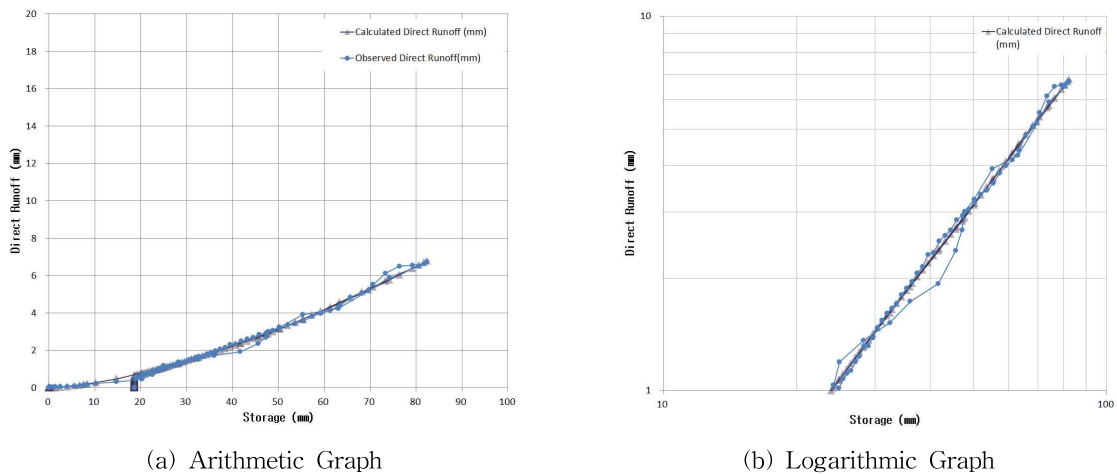


Fig. 10. The Relationship between Storage and Direct Runoff after Parameter Optimization ($f_1=0.31$, $F_{sa}=0.95$, $R_{sa}=32$, $K=23.5$, $P=0.65$, $T_l=3.34$)

Table 2. Optimal Sets of Parameters and Errors

	f_1	F_{sa}	R_{sa}	K	P	T_l	NSE
Opt. 1	0.31	0.95	32	23.5	0.65	3.34	0.996
Opt. 2	0.29	0.95	44	18.1	0.73	3.34	0.995
Opt. 3	0.40	1.00	54	20.6	0.69	3.28	0.994

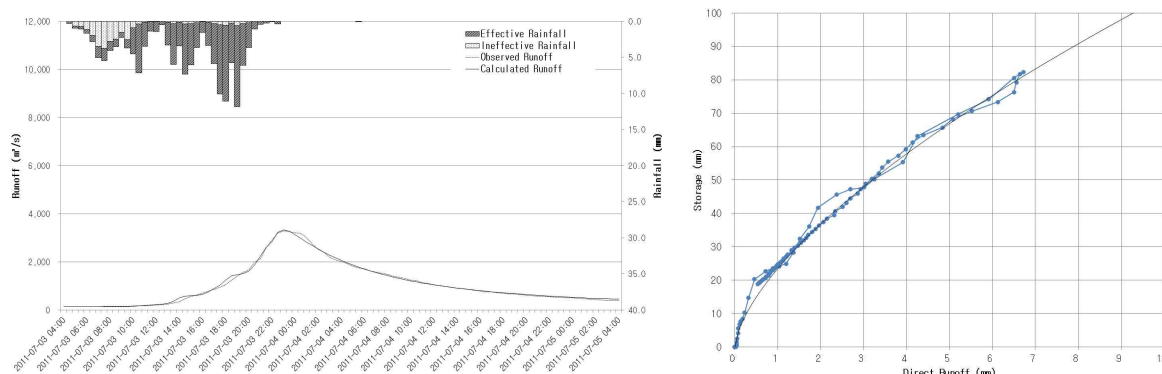


Fig. 11. Runoff Hydrograph and Storage Function after Parameter Optimization ($f_1=0.31$, $F_{sa}=0.95$, $R_{sa}=32$, $K=23.5$, $P=0.65$, $T_l=3.34$)

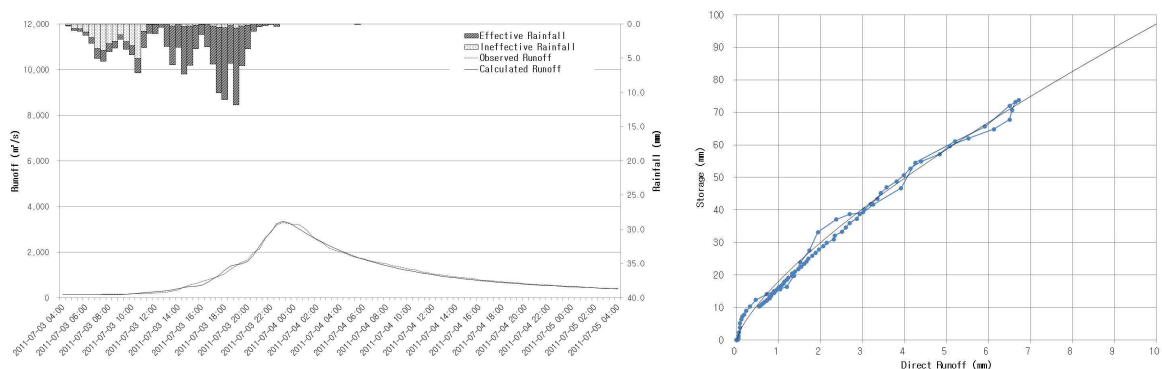


Fig. 12. Runoff Hydrograph and Storage Function after Parameter Optimization ($f_1=0.29$, $F_{sa}=0.95$, $R_{sa}=44$, $K=18.1$, $P=0.73$, $T_l=3.34$)

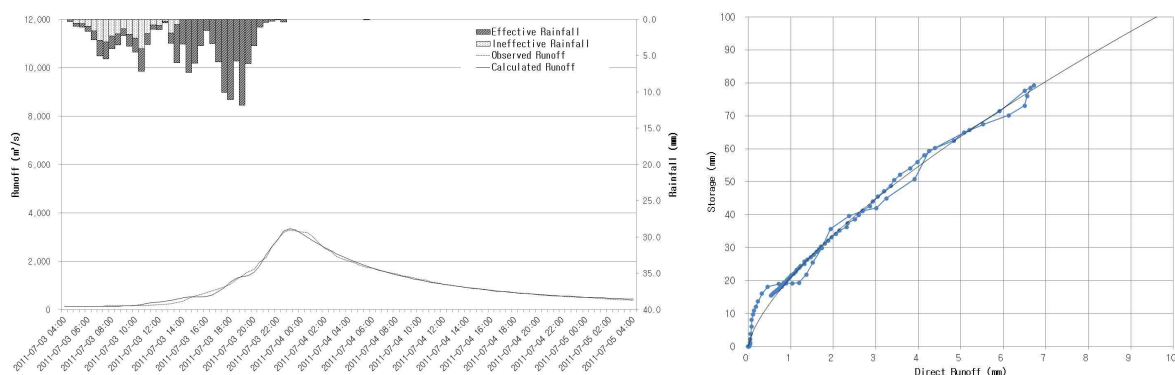


Fig. 13. Runoff Hydrograph and Storage Function after Parameter Optimization ($f_1=0.40$, $F_{sa}=1.0$, $R_{sa}=54$, $K=20.6$, $P=0.69$, $T_l=3.21$)

서 총 유출량을 증가시켰다.

그러나 Table 2의 결과에서 알 수 있는 것과 같이, 지체 시간(T_l)은 최적화 경우에 따라 많이 달라지지 않는 것으로 나타났다. 또한 유효우량을 결정하는 매개변수인 f_1 , F_{sa} , R_{sa} 가 결정되고 나면, 나머지 매개변수인 K , P , T_l 은 거의 유일하게 결정된다. 그러므로 유효우량이 적절히 결정되고 나면, 유역의 특성을 나타내는 매개변수들인 K , P , T_l 은 Fig. 14와 같은 절차로 결정될 수 있다.

3.5 검증

Fig. 14에서 제안된 방법을 검증하기 2011년 8월 16일 17:30~8월 22일 17:30까지의 사상을 대상으로 선정하였다. 대상 호우의 총 강우량은 81 mm, 유출률은 68%였으며, 매개변수 최적화에 의해 $f_1=0.38$, $F_{sa}=1.0$, $R_{sa}=40$ 로 결정하였다. 이 매개변수들을 Table 2의 Opt. 3의 경우와 비교해보면, f_1 과 F_{sa} 는 비슷하지만 R_{sa} 가 54에 비해 작아진 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 적용한 강우사상의 유출률이 84%였던 것에 비해, 검증에 사용된 강우사상의 유출률은 68%로 작으므로, 포화우량이 줄어들어, 유출률을 높인 것으로 볼 수 있다. 물론 두 호우사상의 총 강우량이 다르므로, 직접적인 비교는 불가능하다.

Fig. 14와 같은 절차로 매개변수를 결정한 결과, $K=32.6$, $P=0.50$, $T_l=4.76$ 로 결정되었으며, 이때의 유출수문곡선과 저류함수식은 Fig. 15에 도시되어 있으며, 이때의 유출수문곡선 오차는 0.996이다. 해당 강우의 직접유출량은 호우가 시작하지 5시간 후에 발생하였다. 이는 지체시간 4.76시간이 타당함을 알려준다.

제안된 방법에서 가장 중요한 부분은 유역의 직접유출이 시작된 시간을 매개변수 T_l 이라고 가정한 부분이다. 이

를 검증하기 위해 총 13개의 사상을 이용하여 관측 자료에서 계산된 직접유출시작시간과 최적화된 지체시간 T_l 을 비교하였다. 적용된 13개 사상의 특성은 Table 3에 기술되어 있으며, 그 결과는 Fig. 16에 도시되어 있다. 이 그림에서 계산된 매개변수 T_l 과 관측자료에서 직접유출량이 발생하는 시각이 대체로 일치함을 알 수 있다.

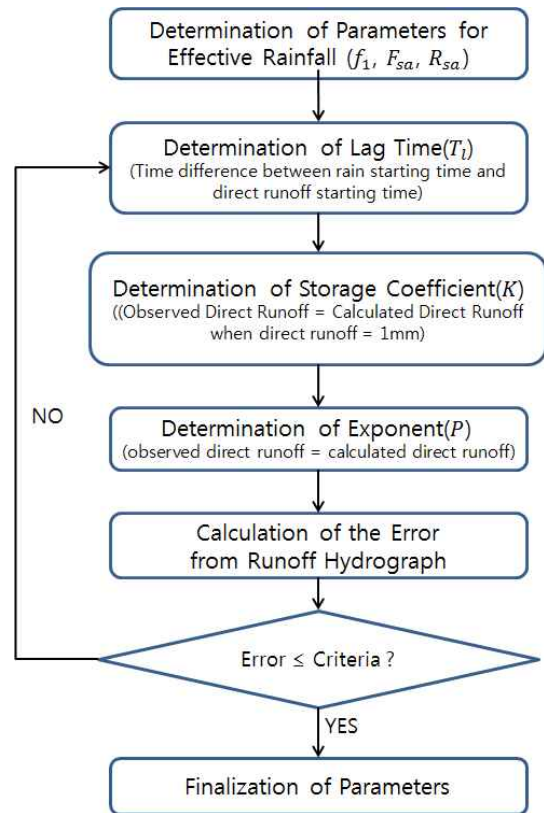


Fig. 14. The Calculation Steps of the Proposed Method for Parameter Estimation

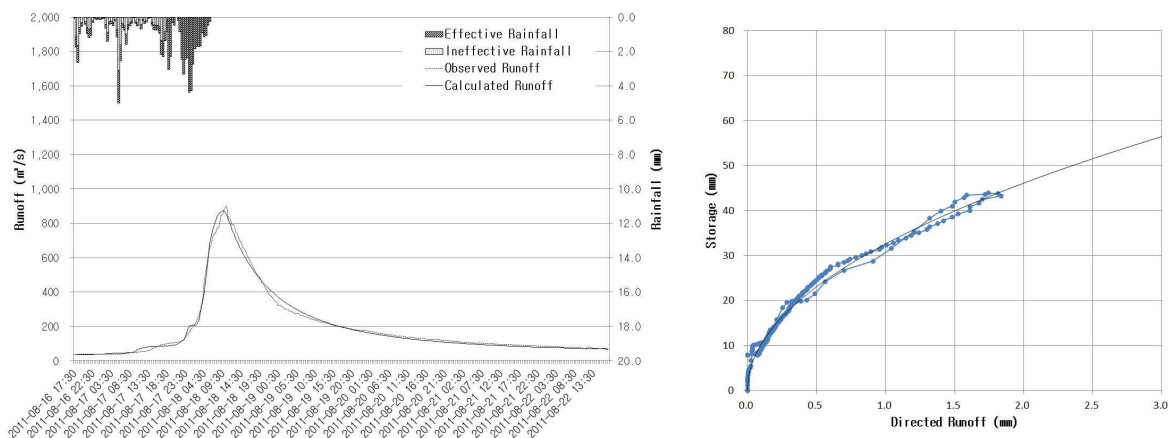


Fig. 15. Runoff Hydrograph and Storage Function after Verification ($f_1=0.38$, $F_{sa}=1.0$, $R_{sa}=40$, $K=32.6$, $P=0.50$, $T_l=4.76$)

Table 3. Rainfall Events for Validation

Event No.	Rainfall starting time	Rainfall ending time	Runoff rate
1	2004-04-26 14:30	2004-05-08 19:30	0.47
2	2004-07-07 06:00	2004-07-10 06:00	0.62
3	2005-07-01 00:30	2005-07-09 19:00	0.53
4	2005-07-11 06:00	2005-07-24 13:00	0.97
5	2005-09-21 05:30	2005-09-30 05:00	0.84
6	2007-09-14 14:00	2007-09-21 21:00	0.79
7	2008-08-22 07:30	2008-09-01 21:30	0.48
8	2009-07-09 03:00	2009-07-11 20:00	0.37
9	2010-09-21 08:00	2010-10-07 11:30	0.87
10	2011-05-09 14:00	2011-05-20 05:30	0.60
11	2011-07-03 04:00	2011-07-07 05:30	0.83
12	2011-07-26 18:00	2011-07-30 04:00	0.60
13	2011-08-16 17:30	2011-08-22 17:30	0.68

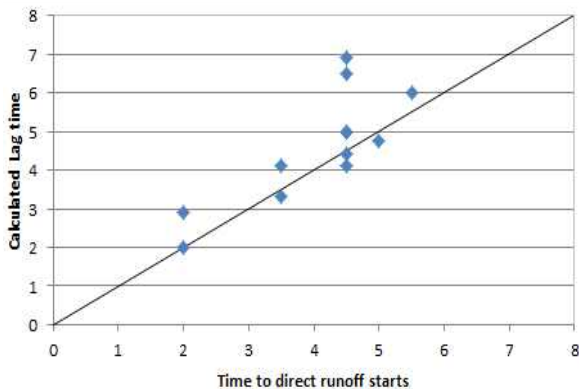


Fig. 16. The Relationship between the Starting Time of Direct Runoff and Lag Time (T_l)

4. 결론

본 연구의 주요 국가하천에 홍수예보모형으로 사용되고 있는 저류함수모형의 매개변수 최적화를 위해 유역의 특성치로 알려져 있는 매개변수들(K , P , T_l)의 거동특성과 민감도를 분석하고, 기존의 상수고정법을 수정하여 각 매개변수들 간의 조정 순서 및 최적 매개변수 결정방법을 제안하였다. 기존의 최적화 방법은 계산시간이 오래 걸리며, 최적화된 매개변수들이 유역의 특성을 반영하지 못한다는 단점을 가지고 있었다. 이것은 강우-유출관계가 비선형성을 가지고 있기 때문이다. 즉, 저류함수법의 전체 매개변수 개수인 6개의 매개변수를 모두 이용할 경우, 많은 수의 국지해가 존재하므로, 유역의 지체시간과 같은 물리

적인 특성을 만족시키지 못하는 일이 자주 발생하였다. 또한 기존의 상수고정법으로 매개변수를 결정할 경우에는 여러 번의 반복계산이 불가피하였다. 그러나 본 연구에서 제안된 방법은 기존의 매개변수 최적화 방법이 가지고 있는 단점을 극복하여 빠른 시간에 최적해를 찾아내고 유역의 지체시간 등 물리적인 특성을 고려하며, 시행착오법이 아니고, 실무에서 실시간 매개변수의 최적화에도 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

제안된 방법에서는 강우-유출관계를 해석할 경우 첨두 유량이 발생하는 시간을 결정하는 것은 매우 중요하며, 유효유량이 결정된 후에는 3개의 매개변수들 중 지체시간 T_l 만이 첨두유량의 발생시간에 기여한다는 점에 착안하여, 강우 시작 후 관측된 유출곡선을 이용하여 유역의 직접유출 시작시간으로 지체시간을 결정하도록 제안하였다. 지체시간이 결정되고 나면, 저류곡과 직접유출고와의 관계를 이용하여 합리적으로 K , P 를 결정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 실무에서 빠른 시간에 유역의 유출 특성을 고려한 매개변수를 찾는 데 사용되어 업무의 효율을 높일 수 있을 것으로 기대하며, 유출수문곡선의 계산오차에만 의지하여 매개변수를 최적화하는 방법을 탈피하여 유역의 유출특성을 고려하는 방법으로 그 의미가 크다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 수탁연구사업 “추계학적 기법을 적용한 홍수예측체계 개선”의 지원으로 수행되었으며,

성의 있고 심도 있는 의견을 주신 심사자분들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Bae, D.H., and Jung, I.M. (2000) "Development of Stochastic-Dynamic Channel Routing Model by Storage Function Method." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 33, No. 3, pp. 341-350.
- Bae, D.H., Lee, B.J., and Georgakakos, K.P. (2009a). "Stochastic Continuous Storage Function Model with Ensemble Kalman Filtering (I): Model Development." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 11, pp. 953-961.
- Fujita, M., and Kudo, M. (1995). "Stochastic response of a storage function model for flood runoff estimation of higher-order moments." *Environment International*, Vol. 21, No. 5, pp. 523-531.
- Kim, J.R., Kim, J.C., Jeong, D.K., and Kim, J.H. (2006). "The optimal parameter estimation of storage function model based on the dynamic effect." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 7, pp. 593-603.
- Kim, W.H., Im, Y.C., and Ryu, J.W. (1998). "An Adaptive Storage Function Method for Rainfall-Runoff Forecasting." *Journal of Electrical Engineering & Technology*, KIEE, Vol. 47, No. 2, pp. 231-236.
- Kimura, T. (1961). "The Flood Runoff Analysis Method by the Storage Function Model." The Public Works Research Institute, Ministry of Construction
- Lee, B.J., Bae, D.H., and Shamir, E. (2009b). "Stochastic Continuous Storage Function Model with Ensemble Kalman Filtering (II): Application and Verification." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 11, pp. 963-972.
- Lee, J.K., and Lee, C.H. (1996). "A Study on the Introduction of Fuzzy Theory to the Adjustment of Time-Variant Parameter of Storage Function Method." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 29, No. 4, pp. 149-160.
- Nam, K.T. (1985). "Parameter Determination of Rainfall Runoff Model by Storage Function Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 18, No. 2, pp. 185-185.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Shamir, E., Lee, B., Bae, D., and Georgakakos, K. P. (2010). "Flood forecasting in regulated basins using the ensemble extended kalman filter with the storage function method." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 12, pp. 1030-1044.
- Song, J.H., Kim, H.S., Hong, I.P., and Kim, S.U. (2006). "Parameter Calibration of Storage Function Model and Flood Forecasting (1) Calibration Methods and Evaluation of Simulated Flood Hydrograph." *The KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 26, No. 1B, pp. 27-38.
- Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A., and Lansey, K. (1999). "Verification and application of regional equations for the storage function runoff model." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 5, pp. 1147-1157.
- Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A., and Lausey, K. (1997). "Evaluation of the storage function model parameter characteristics." *Journal of Hydrology*, Vol. 191, pp. 332-348.
- Yi, J.E., and Choi, C.W. (2008). "Flood Forecasting and Warning Using Neuro-Fuzzy Inference Technique." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 3, pp. 341-351.

논문번호: 12-085	접수: 2012.08.01
수정일자: 2012.09.17/09.27	심사완료: 2012.09.27