

저류함수법의 매개변수 추정: 1. 범용모형 개발

Parameter Estimation of the Storage Function Model:

1. Development of the Universal Model for the Parameter Estimation

최종남* · 안원식** · 김형수*** · 박민규****

Choi, Jong Nam · Ahn, Won Shik · Kim, Hung Soo · Park, Minkyu

Abstract

The universal model for the parameter estimation of the Storage Function Model(SFM) was developed through the applications of the distributed model for various hypothetical watersheds and runoff conditions. The existing parameter estimation equations are based on observations and these equations which are derived from the restricted conditions are not sensitive to the variation of physical characteristics of a watershed. This study developed the universal model for the parameter estimation through the runoff simulations of 35,000 times. As the simulation results, we have known that the lag time is related to the longest stream channel characteristics and the storage coefficient is related to the watershed characteristics.

Key words : storage function model, distributed model, universal parameter, storage coefficient, lag time

요 지

본 연구에서는 가상유역에 대한 분포형 모형의 적용을 통해 다양한 유역 및 유출조건에서도 적용 가능한 저류함수법의 매개변수를 추정하기 위한 범용모형을 개발하였다. 기존의 매개변수 추정식은 대부분 한정된 조건의 관측자료에 기초하고 있어 실제 유출에 영향을 미치는 인자를 민감하게 고려하기 힘든 문제점이 있었다. 약 35,000회의 다양한 조건을 고려한 유출모의 결과를 기초로 이를 가장 잘 반영해 줄 수 있는 매개변수 모형을 구성한 결과 저류함수법의 지체시간은 주로 유역내 가장 긴 유로의 특성과 밀접한 관련이 있고, 저류상수의 경우 유역의 특성들과 관련성이 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 저류함수법, 분포형 모형, 범용매개변수, 저류상수, 지체시간

1. 서 론

저류함수법은 홍수유출의 비선형성을 고려할 수 있는 방법으로, 특히 이중 또는 삼중으로 침투가 발생하는 복합홍수수문곡선을 비교적 잘 재현할 수 있기 때문에 선형모형보다 합리적이라고 알려져 있다 (송재현, 2006; 최종남 등, 2010). 이러한 저류함수법을 실제 홍수유출현상에 적용하는데 있어 가장 어려운 점은 매개변수를 결정하는 것이다. 국내의 저류함수법의 매개변수 추정은 홍수수문자료 등의 부족으로 일본의 이근천(利根川)공식, 목촌(木村)공식 등과 같이 일본유역을 대상으로 개발된 회귀식을 주로 사용하고 있으나, 우리나라의 유역특성을 충분히 반영하지 못하는 등 많은 문제점을 가지고 있다 (건설교통부, 2004, 2005, 2006;곽재원 등, 2009). 즉, 저류함수법의 매개변수들을 결정할 수 있는 객관적이고

합리적인 방법이 제시되어 있기 않기 때문에 모형의 매개변수를 결정할 때 주로 경험식이나 수문기술자의 판단에 의한 보정에 의존하게 된다.

국내 많은 연구들이 저류함수법의 적용성을 높이기 위해 우리나라 유역특성에 적합한 매개변수 추정식을 개발하는데 노력을 기울여 왔지만 아직까지 만족할 만한 성과를 얻지 못하고 있다 (송재현 등, 2006; 김범준 등, 2006, 2008; 최종남 등, 2010). 이처럼 다양한 연구결과가 만족스럽지 못한 이유를 고찰하면 비슷한 원인을 발견할 수 있다. 가장 근본적인 것은 다양한 유역조건을 충족시키는 유출자료가 구비되어 있기 않기 때문이다. 매개변수 추정과 관련된 연구를 보면 한정된 유역면적, 경사, 지표이용 특성에서 얻어진 몇 개의 자료를 가지고 최적화 기법 등을 통해 관측자료를 가장 잘 재현해주는 매개변수를 찾으려는 연구가 주류를 이룬다

*수원대학교 공과대학 토목공학과 박사수료 (E-mail : lastchoi@dohwa.co.kr)

**수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

***인하대학교 사회기반시스템공학부 교수

****고려대학교 방재과학기술연구센터 연구교수(교신저자)

(최종남 등, 2010). 그러나 기존의 수문관측자료로는 근본적으로 다양한 유역조건을 충족시킬 수 없기 때문에 매개변수가 개발된 유역조건과 크게 차이나는 유역에 이를 적용하게 되면 오차가 클 수 밖에 없다. 예를 들면 유역면적 100 km², 유로연장 40 km, 유역평균경사 15%인 유역에 대해 개발된 매개변수 추정식은 유역면적 100 km², 유로연장 40 km로 동일한 특성이 있더라도 유역평균경사가 5%나 30%인 유역에서 적합한 결과가 될 수 없다. 즉, 다양한 상황에서도 유연하게 적용할 수 있는 매개변수 추정식의 개발은 무엇보다도 다양한 유역특성에서 관측된 유출량 자료가 필요하나 이를 현실적으로 충족시키기 어렵다.

이러한 문제점은 USLE(Universal Soil Loss Equation) 토양침식량 추정공식의 개발 (Wischmeier and Smith, 1978; USDA, 1997)이 필요하게 된 배경에서도 쉽게 찾아볼 수 있다. USLE 모형 이전의 토양침식량 추정공식은 한정된 조건에서 관측된 자료를 이용한 회귀식이 대다수를 이루었고, 이러한 방법론으로는 앞서 소개된 강우유출 모형의 매개변수 추정을 위한 경험식이 보여주는 문제점을 극복하기 어려웠다. 이에 토양침식이 발생할 수 있는 거의 모든 경우를 고려한 관측과 실험 등을 통해 어떤 경우에도 주어진 조건을 적절히 고려할 수 있도록 하는 토양침식량을 추정할 수 있는 방법론으로서 USLE 공식을 개발하게 되었으며 이 때문에 USLE 공식의 첫 알파벳 글자인 U는 Universal 즉, 범용이라는 의미를 가지게 되었다.

저류함수법의 매개변수 추정에서도 기존 매개변수 추정식이 가지는 문제점을 비슷한 과정으로 해결할 수 있을 것으로 보여진다. 최근에는 유역의 물리적인 특성을 고려하여 수치적인 해석과정을 통해 직접적으로 유출량을 얻을 수 있는 방법론의 발전이 상당 수준에 이르렀다. 따라서, 주어진 유역의 물리적 조건만 정확하다면 제한적인 범위내이긴 하지만 정교한 홍수유출량의 예측이 가능해졌다. 그리고, 이러한 목적으로는 주로 운동파모형(kinematic wave model)이 이용되어왔다 (박진혁과 허영택, 2008; 최윤식 등, 2008, 2009, 2010). 이러한 최근의 홍수유출 모의능력의 발전에 기초하여 다양한 유역특성 조건을 모두 충족시킬 수 있는 가상유역의 집합을 설정하고 이를 운동파 모형으로 해석하여 관측홍수수문곡선의 부족을 대체할 수 있는 모의 홍수수문자료를 생성한다면 대부분의 유역조건에서 범용으로 적용할 수 있는 매개변수의 추정이 가능할 수 있다.

이러한 연구배경과 관련된 기존 연구성과를 정리하면 다음과 같다. 저류함수법의 매개변수를 운동파모형을 이용하여 설명하는 연구는 Kuribayashi와 Sadamichi (1969)에 의해 시작되었다. Hoshihata (1972)는 비슷한 연구를 통하여 저류함수법의 매개변수를 실용적으로 추정하기 위해서는 유역평균경사가 반드시 고려되어야 함을 보였다. Aoki 등 (1976)은 저류함수법을 부정류 수치해석 결과와 비교하였으며, 이를 확장하여 Aoki 등 (1979)은 13개 시험유역의 자료와 비교하여 저류함수법 매개변수에 대한 경험식을 제안하였다. 그리고 Nagai 등 (1982)이 최적화 기법을 적용하여 얻은 모형의 매개변수를 이용하여 매개변수의 이론적인 설명을 시도한바 있

다. 이러한 연구결과를 집대성한 것은 Sugiyama 등 (1997)으로 이들은 저류함수법의 매개변수를 운동파모형의 매개변수와 Hack의 법칙의 계수를 이용한 관계식으로 나타낼 수 있음을 보이고 일본하천의 특성을 반영해주는 Hack의 법칙에 기초하여 저류함수법의 지역별 경험식을 제시하고 그 적정성을 검토하였다. 한편, 국내에서는 최종남 등 (2010)이 Sugiyama 등의 연구성과를 발전시켜서 국내유역특성을 고려하여 미계측유역에서도 적용가능한 매개변수 추정방법을 제시한 바 있다. 최종남 등 (2010)의 연구결과는 저류함수법의 매개변수를 운동파모형에 적용하여 해석할 수 있음을 보여주었으며, 이를 통해 얻을 수 있는 이점은 유역의 물리적인 특성으로부터 집중형 수문모형(lumped hydrologic model)의 매개변수를 직접적으로 추정할 수 있는 방법론이 도입되었다는 것이다. 기존에 최적화 기법 등의 적용으로 얻어진 매개변수 추정결과는 매개변수 반응표면(response surface)이 여러 개의 극값(multi-mode)을 가지기 때문에 (Sorooshian and Gupta, 1995) 국지해에 쉽게 빠질 수 있는 등 만족스럽지 못한 추정결과를 얻는 경우가 많았다. 또한 최적화기법의 적용으로 얻어지는 결과는 일반적으로 관측유출수문곡선을 적절히 재현해주는 것처럼 보여지는 매개변수가 한 개가 아닌 여러 개 또는 수십 개가 존재하게 된다. 이들 매개변수 중 상당수는 유역의 물리적인 특성을 고려할 때 해당유역에서 적절하지 못한 값일 가능성이 높으나 이와 관련해서 명쾌하게 판단을 하기 어렵다. 특히, 유출수문곡선의 형상만을 비교하는 최적화 기법을 이용하는 경우 이러한 문제가 더욱 크게 부각될 수 밖에 없다. 즉, 물리적으로 비상식적인 매개변수가 추정될 가능성이 매우 크다 (안상진 등, 2001; 김형수, 2004; 한국수자원공사, 2008; 유철상과 신정우, 2010). 이에 비해 최종남 등 (2010)의 연구결과를 활용할 경우 주어진 유역특성 조건에 대해 일대일로 대응하는 매개변수가 수학적인 관계로 직접 얻어질 수 있기 때문에 매개변수 추정과정상의 불확실성과 오차를 배제할 수 있다는 장점을 가진다.

본 연구에서 대상으로 하는 매개변수를 소개하기에 앞서 저류함수법의 매개변수를 분류하면 1) 유역의 유출반응을 계산하는데 이용되는 저류상수 K , P 및 지체시간 T_l 과 2) 유효우량을 산정하기 위해 필요한 1차유출물 f_1 , 포화유출물 f_{sa} 와 포화우량 R_{sa} 의 지표로 나눌 수 있다. 이 중에서, 유효우량을 산정하기 위해 필요한 f_1 , f_{sa} 및 R_{sa} 는 호우사상마다 달라지고, 동일 호우사상에서도 시간의 경과에 따라 변화되는 폭이 크게 나타날 수 있기 때문에 실시간으로 매개변수를 검보정하는 것이 반드시 필요하다. 즉, f_1 , f_{sa} 및 R_{sa} 는 호우사상별 선행강수조건과 호우규모에 의한 영향을 주로 받는 인자이며 유역의 수문지형학적 특성과의 상관관계가 상대적으로 낮기 때문에 홍수예경보에서는 이들만을 주요 대상변수로서 고려하고 있다 (건설교통부, 2004, 2005, 2006). 이에 비해 유역의 유출반응을 고려하기 위한 매개변수인 저류상수 K , P 및 지체시간 T_l 은 호우의 규모, 선행강수 조건 등에는 상대적으로 영향을 덜 받으며, 유역면적, 유로연장, 유로경사 등 유역의 수문지형학적 특성에 주로 영향을 받는다 (정상만 등, 1993; 김태균과 윤강훈, 2007). 따라서 본 연구에서는

유역의 유출반응을 고려하기 위한 매개변수인 저류상수 K , P 및 지체시간 T_l 만을 대상으로 다양한 유역특성에 기초한 매개변수 추정식의 개발을 고려하기로 한다. 한편, 이들 인자에 대한 유효우량 산정결과의 영향을 살펴보기 위해 김태균과 윤강훈 (2007), 최종남 등 (2010)의 연구결과에 기초하여 f_i , f_{sa} 및 R_{sa} 대신에 국내에서 보편적으로 사용하는 유출곡선지수법을 적용하였다.

본 연구에서는 운동파모형을 이용하여 수문관측을 통한 자료취득이 어려웠던 다양한 유역조건에서의 유출자료와 유출특성을 보여주는 매개변수에 대한 자료 데이터베이스를 구축하였다. 이를 통해 저류함수법의 매개변수를 추정하여 보고 각 유역특성 변량이 매개변수에 미치는 영향을 평가하기로 한다. 이를 기초로 다양한 유역조건에서도 적용가능한 저류함수법의 매개변수를 추정하기 위한 범용모형을 개발하고자 한다.

2. 운동파모형을 이용한 저류함수법 매개변수의 추정

하천유역으로부터의 홍수유출계산을 위한 저류함수법(貯溜函數法, storage function method)은 홍수류의 연속방정식에, 유역이나 하도에서의 유출량과 저류량의 관계를 표시하는 저류함수를 대입하여 홍수류의 연속방정식을 풀고 수문학적으로 홍수유출량을 계산하는 방법이다. 이 방법은 1961년 Kimura에 의해 제안되었으며, 주로 일본에서 널리 사용되어 왔다. 우리나라에서는 한강홍수에경보에 30여년 이상 사용되어 왔고 계산절차가 간편하며, 홍수유출의 비선형성을 고려해주는 방법이므로 선형모형보다 합리적인 것으로 알려져 있다.

홍수유출을 Manning 공식으로 표시할 수 있는 지표면 유출이라 가정하면 유역이나 어떤 하도구간의 저류량 S 는 유출량 O 의 멱함수로 표시할 수 있다. 즉

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

여기서, K , P 는 유역에 대한 상수이다. 한편, 유역에 대한 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$R_e(t - T_l) - O(t) = \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

여기서 R_e 는 지체시간 T_l 을 고려한 유효우량 [$L^3 T^{-1}$], O 는 유역으로부터의 직접유출량 [$L^3 T^{-1}$], S 는 유역 내의 강우에 의한 저류량의 깊이[L]이며, t 는 시간 [T]이다.

위의 식 (1)과 (2)에서 K , P , T_l 은 저류함수법의 매개변수들이다. 이 중에 K 와 P 는 기존의 비선형 저류를 고려한 모형 (Laurenson, 1964, 1965; Prasad, 1967)에서 제안된 개념과 유사하다. 지체시간 T_l 은 유효우량 R_e 의 함수의 형태로서 나타나는 유출이 홍수추적과정을 통하여 지체되는 효과를 고려하기 위한 매개변수이다.

한편, 운동파모형은 부정류인 홍수파의 흐름을 표시하는 Saint-Vernant 방정식의 하나인 운동량 방정식에서 관성력과 압력에 관련되는 항을 무시하고 중력과 마찰력이 흐름을 지

배하는 부정류의 해를 구하는 방법이다 (윤용남, 2007). 운동파 모형에서는 유역에서 발생하는 호우사상에 대해 표면류대 (overland flow)와 집수수로 혹은 주하도 (channel flow)로 나누어 유출반응을 조합함으로써 유출해석을 한다. 표면류는 하천흐름과는 특성이 상이하고 운동파 가정이 잘 들어맞는 흐름이므로 개수로 내 흐름과는 별도로 다루어진다.

표면류의 단위폭당 유량 q_0 를 수심 y_0 의 함수로 표시하면,

$$q_0 = \alpha y_0^m \quad (3)$$

Manning 공식을 이용하여 표현하면 조도계수를 n 이라고 할 때, $\alpha = \sqrt{S_0}/n$, $m = 5/3$ 임을 알 수 있다. 식(3)을 다시 정리하면

$$y_0 = kq_0^P \quad (4)$$

식(4)는 저류함수법의 저류방정식인 식(1)과 같은 형태를 가짐을 알 수 있다. 이때 k 는 Manning 공식이 성립할 때 유역등가조도, 유역경사 및 p 의 함수로 구성된 유역특성을 반영해 주는 상수이다.

한편, 표면류의 단위폭당 흐름에 대한 연속방정식을 단위폭당 유량 q_0 , 수심 y_0 및 유효우량 R_e 를 이용하여 나타내면

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = R_e \quad (5)$$

위의 식 (4)와 (5)는 각각 표면류의 운동과 추적을 위한 운동량 방정식과 연속방정식으로 이 두 식을 치환화하여 수치해석하거나 특성방정식상에서 수치적분을 하면 결과를 얻을 수 있다.

하도구간의 흐름에 대해서도 비슷한 식을 유도할 수 있다.

$$A = \alpha_0 Q^{m_0} \quad (6)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = I \quad (7)$$

여기서 Q 와 A 는 각각 하도를 통한 유량(m^3/s)과 흐름단면적(m^2)이고, I 는 하도 내 흐름방향과 직각인 방향으로 측방유입하는 단위폭당 표면류($m^3/s/m$)이다. 식(4)와 (6)의 k , p , α_0 , m_0 는 운동파추적방법의 매개변수들이며, x 는 거리이다.

위의 (3)-(7)의 방정식을 이용하면 유효우량에 의한 유역에서의 지표면유출을 모의할 수 있다. 우선 분포형 모형으로 유출의 모의하기 위해 유역을 DEM을 이용한 격자형태의 자료로 변환할 필요가 있다. DEM에 대한 분석과정을 통해 가장 경사가 급한 경로를 이용하여 하나의 셀에서 나머지 셀로 이동하는 흐름망을 추출한다. 이 결과를 이용하면 하나의 그리드 셀(grid cell)로부터의 주변을 둘러싸고 여덟 개의 셀 중에서 가장 큰 경사를 가지는 하나의 셀로의 유출의 1차원 운동파 모형의 수치해석적인 적용으로 얻을 수 있다. 일본의 경우 소개된 절차처럼 운동파모형에 의한 유역유출 계산을 하는 경우 매개변수로서 지표면조도계수가 큰 영향을 미치기 때문에 이 모형을 우수류법 또는 등가조도법이라고 부르기도

부른다 (이은태 등, 1999; 일본하천협회, 1997). 이러한 방법의 특징은 홍수시 관측되는 유출량이 주로 직접유출에 의해 결정되는 경우에 적합하다는 것이다 (일본하천협회, 1997). 특히 일본에서는 실측 침투유량이 $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 유역에서 다른 유출해석방법보다 적합성이 좋다고 알려져 있다. 그 이유로 유출량의 변화에 대응하는 도달시간이 적절히 변화하고 있기 때문으로 소개하고 있다 (이은태 등, 1999). 우리나라의 하천은 산지의 비중이 높고 경사가 급한 경우가 많아 홍수시의 침투홍수량은 대부분 직접유출량에 의해 결정되므로 운동과 모형의 적용성이 높다고 할 수 있다.

이와 같이 저류함수법과 운동과 모형은 비슷한 형태의 연속방정식과 운동량방정식으로 정리가 가능하며, Sugiyama 등 (1997)의 결과에 따르면 저류함수법의 매개변수인 K , P 를 계산하기 위해 운동과추적방법의 매개변수인 k , p 를 이용한 식을 수학적으로 유도할 수 있다. 이러한 적용결과는 최종남 등 (2010)에 의해 국내하천유역에서의 적용성이 검토된 바 있다. 표면류 흐름의 특성거리를 B , 수로까지의 유입시간을 t_s 그리고 주수로에서의 유하시간을 t_a 라고 하면 유도된 계산식은 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

$$P = p \quad (8)$$

$$K = \frac{kB^p}{1+p} \left(1 + \frac{t_a}{t_s} \right) \quad (9)$$

$$T_l = \alpha t_p = \alpha \frac{kB^p}{R_e^{1-p}} \left(1 + \frac{t_a}{t_s} \right) \quad (10)$$

유역의 지체시간(T_l)은 유효우량 중심에서 직접유출수문곡선의 침투부분까지 시간으로 정의하여 운동과모형에 의한 모의결과에서 직접적으로 값을 얻을 수 있다. 여기서 α 는 유역의 집중시간($t_p = t_a + t_s$)과 지체시간(T_l)의 비이다.

3. 가상유역에서의 매개변수 추정

3.1 가상유역 및 호우조건의 설정

본 연구에서는 다양한 유역조건에서의 유출현상을 분포형

운동과모형으로 모의하기 위해 Fig. 1(a)와 같은 형태로 가상유역을 설정하였다. 가상유역은 다이아몬드 형상으로 가정하고 총 72개의 셀로 구성하였다. 유역의 중심부를 관통하는 가상의 하도를 설정하고, 모든 셀의 흐름방향을 하도를 향하여 비스듬히 대각선으로 유하한다고 가정하였다. 이때, 다양한 유역형상을 고려하기 위한 유로연장의 길이는 Table 1과 같이 설정하여 셀의 연직방향 길이를 유로연장의 1/12로 가정하였다. 이 경우에 각 셀의 수평폭은 미리 설정된 유역면적을 만족시킬 수 있도록 계산된 유역평균폭의 1/12로 설정된다.

본 연구에서는 가정한 다이아몬드 형상의 유역형태는 실제 발견되는 유역의 형태와 많은 차이를 보일 수 있고 이 경우 동일한 유역특성에서도 어느 정도 유출발생 특성의 차이가 나타날 수 있다. 그렇지만 이러한 모든 조건을 고려하여 유출계산을 수행하는 것은 굉장히 어려운 일이다. 뿐만 아니라 저류함수법이나 단위도법과 같은 집중형 모형(lumped model)의 경우 대부분 그 적용시 유역형상 특성을 정교하게 고려하기 매우 어렵다. 대체로 매개변수 추정시에 반영될 수 있는 거의 유일한 유역형태와 관련된 특성은 유역형상계수 정도이다. 본 연구에서는 동일유역면적에서 유로연장과 유역평균폭을 다양하게 고려함으로써 넓은 범위의 유역형상계수를 포함하고 있으며, 이 때문에 실제 유역에서 나타날 수 있는 유역형상 특성을 충분히 고려하여 가상유역 조건을 고려하였다고 볼 수 있다.

수문지형학적인 특성인자들 중에서 홍수유출분석에서 가장 중요하게 다루어지는 것은 유역면적이다. 그렇지만 동일한 유역면적, 동일한 호우에서도 상당히 다른 유출특성이 발견된다. 이는 앞서 언급한 것처럼 면적이 같더라도 유로연장, 유로경사, 유역평균경사, 토지이용조건 등 다른 수문지형학적인 조건들이 서로 상이하기 때문이다. 이로 인해 특정 유역에서 개발된 매개변수 추정모형은 유역특성이 상이할 경우에 그 적용성이 상당히 떨어지게 되기 때문이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 본 연구에서는 최대한 다양한 유역조건을 가정하였다. 그러나, 이들을 체계적으로 분석하기 위해서는 유

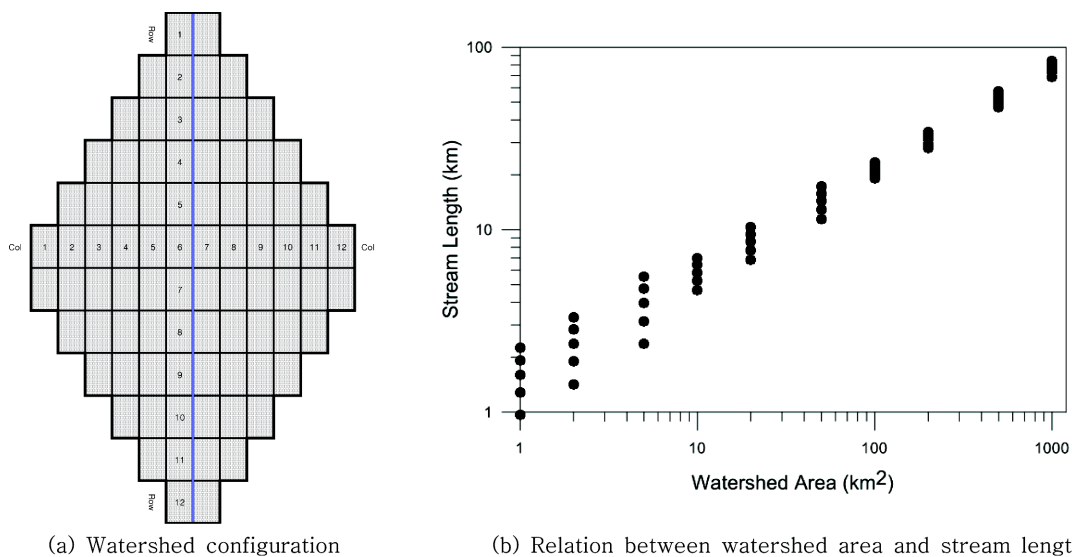


Fig. 1. Hypothetical watershed representation.

Table 1. The hypothetical watershed characteristics

Characteristic	Cases
Watershed area (km ²)	10 cases : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 km ²
Stream length (km)	5 cases : Max, (Max+Normal)/2, Normal($L=1.6A^{0.56}$), (Normal+Min)/2, Min
Slope	7 cases : 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001, 0.0005, 0.0001
Manning coefficient n	5 cases : 0.020, 0.025, 0.030, 0.035, 0.040
Storm average rainfall intensity R (mm/hr)	5 cases : 10, 30, 50, 100, 150
Runoff curve number CN	4 cases : 60, 70, 80, 90

역의 수문지형학적인 특성을 일정한 기준에 따라 분류하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 금강 292개, 영산강 40개, 안성천 205개의 총 537개 유역의 실제 수문지형학적 특성인자를 검토하여 각 특성인자의 최소값과 최대값을 기준으로 가상유역의 설정범위를 계획하였다.

국내하천이 주로 나타나는 범위를 고려하여 가상유역으로서 고려한 유역면적과 유로연장의 관계를 살펴보면 Fig. 1(b)와 같다. 동일한 면적에서 Hack의 법칙을 따르는 표준적인 유로연장과 최대 및 최소 유로연장을 먼저 설정하고 표준과 최대의 중간정도에 해당하는 유로연장, 표준과 최소의 중간정도에 해당하는 유로연장의 총 5가지 경우를 설정하였다. 이때, 최대와 최소사이의 유로연장의 차이를 살펴보면 유역면적이 작을 경우에는 상대적으로 수문지형학적인 특성인자들의 변동폭이 넓게 나타난다. 이에 비해 유역면적이 커지면 이러한 변동폭이 감소하게 되고 상당히 큰 유역의 경우에는 거의 일정한 값으로 수렴하게 된다. 이러한 특징은 자료의 증가에 따라 나타나는 값이 다양성이 증가하기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 유역면적이 작은 소유역은 그 개소수가 상대적으로 많기 때문에 나타나는 값의 범위도 넓고, 이에 비해 유역면적이 커지면 점차 한정된 개수의 유역만이 남게 되기 때문에 나타나는 범위 역시 좁아지게 된다.

본 연구에서는 가상유역을 특징짓는 조건을 Table 1과 같이 고려하였다. 운동파모형의 적용에서 필요로 하는 특성으로는 유역면적, 유로연장, 경사와 조도계수의 4가지 인자를 고려하였다. 이중 경사는 가상유역에서의 유출이 지표면유출에 의해 지배적으로 결정된다고 보고, 유역경사와 유로경사를 같은 값을 가지는 것으로 고려하였다. 유출현상의 유발원인이 되는 호우의 경우 일정한 강우강도의 호우가 계속해서 지속된다고 가정하였다. 강우의 시간적 분포에 의한 영향을 정량화하기 위해서는 여러 가지 추가 고려조건이 필요하고 이 경우에 모의계산의 횟수가 기하급수적으로 증가하는 문제가 있다. 따라서 이러한 영향을 최소화하기 위해 가장 간단한 호우의 시간분포 형태인 균등분포를 가정하였다. 호우의 크기는 저빈도에서 고빈도까지의 호우사상의 특성이 반영될 수 있도록 강우강도의 크기를 10, 30, 50, 100, 150 mm/hr의 5가지 조건으로 고려하였다. 이때 강우강도의 상한값 150 mm/hr

는 극한 호우사상의 규모를 보여주는 1시간 가능최대강수량의 규모를 참고하여 결정하였다. 한편, 강우의 지속기간은 주어진 강우를 통해 나타나는 유출량의 값이 더 이상 증가하지 않고 1시간 이상 지속되는 경우 호우가 멈추는 것으로 고려하였다. 이때, 손실우량의 크기를 결정해주는 유역의 토지이용특성 및 토양특성은 유출곡선지수(CN)를 이용하여 고려하였다. 이는 동일한 유역이라고 하더라도 선행강수 특성 등의 영향으로 실제 유효우량의 크기가 달라질 수 있기 때문이다. 직접적으로 유효우량을 가정하지 않고, 총우량을 먼저 가정하고 유출곡선지수를 이용하여 유효우량을 고려한 이유는 유출계산 결과가 보다 실제현상에 가깝게 얻어질 수 있도록 하기 위해서이다. 실제 관측되는 유효우량의 시간적 변화특성이 강우초기에는 크지 않고 아주 작은 값이었다가 시간이 흐르면서 점차 증가하여 일정한 크기로 수렴하는 경향성을 가지고 있고, 이 영향으로 유출수문곡선의 형상이 결정된다.

3.2 저류함수법 매개변수의 추정

3.1절에서 설정된 가상유역에 대하여 분포형 운동파모형을 적용하여 유출계산을 수행하고 저류함수법의 매개변수를 산정하였다. Table 1의 조건들을 모두 고려하면 약 35,000여의 유역특성 및 상이한 유출영향인자를 반영한 유출해석결과와 매개변수를 얻을 수 있다. 유출계산의 결과로부터 유역반응시간을 정의하는 방법은 Fig. 2와 같다. 우선 집중시간(time of concentration)은 호우의 종료시점으로부터 변곡점이 나타나는 시점까지의 시간으로 정의할 수 있다. 지체시간(lag time)은 호우의 중심점으로부터 첨두홍수량이 발생하는 시점까지의 시간으로 정의할 수 있으나 본 연구에서는 계속해서 지속되는 호우로 인하여 첨두홍수량의 발생 시점이 자연적인 유출현상에서처럼 특정시점에서 언어지지 않으므로 지체시간을 판별하기 위한 기준이 필요하게 된다. Fig. 2와 같이 유출모의결과에서 지체시간을 얻어내기 위해 첨두홍수량이 나타나는 시점을 기준으로 호우가 종료되었다고 가정하고 이때까지의 호우의 중심점에서 최초로 첨두홍수량의 발생시점까지의 시간차를 지체시간(lag time)으로 정의하기로 한다.

Fig. 3은 가상유역에서 얻어진 집중시간과 지체시간의 분포를 보여주고 있다. 유역면적이 커지면서 집중시간이 나타나는 발생범위는 큰 폭으로 증가하는 경향을 보이는 반면에 지체시간의 경우 상대적으로 유역면적의 크기와 상관없이 일정한

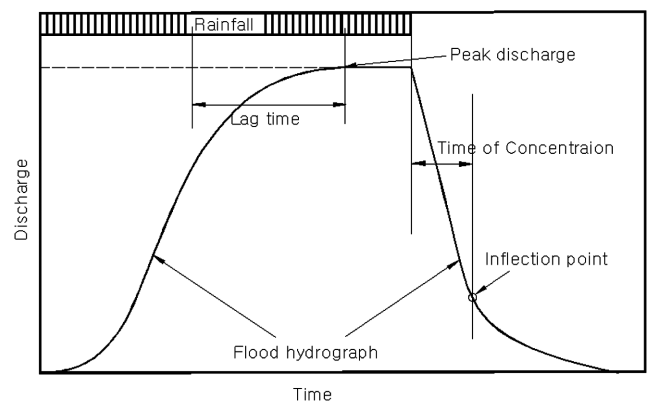


Fig. 2. Definition of watershed response time.

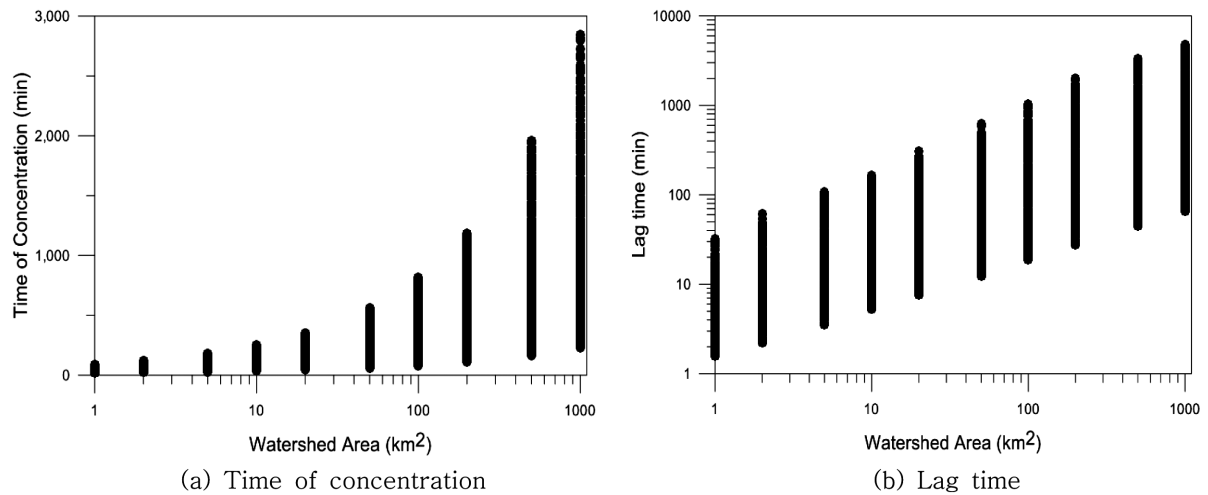


Fig. 3. Watershed response time in hypothetical watersheds.

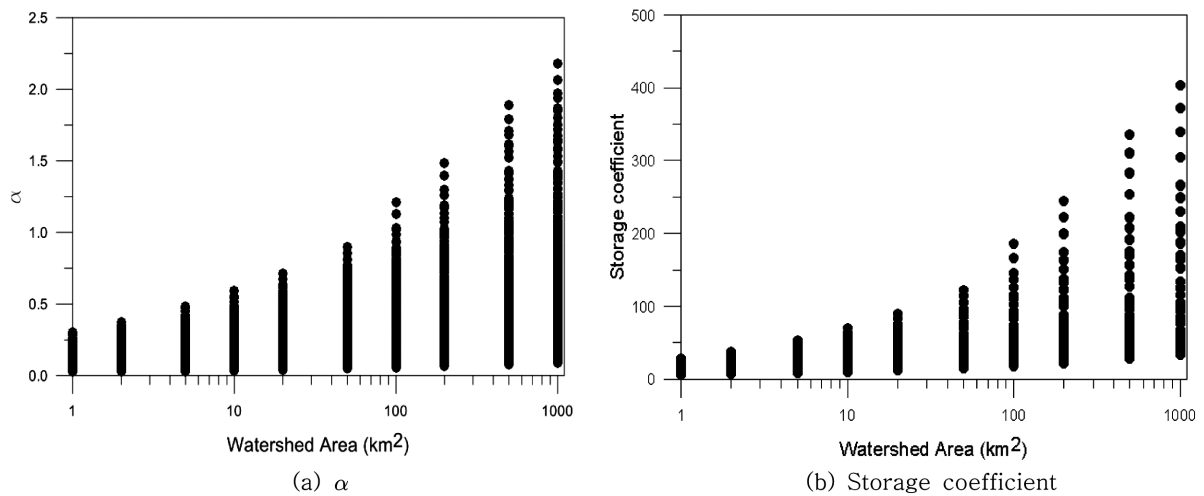


Fig. 4. Parameters based on the various simulations for hypothetical watersheds.

폭을 가지는 것으로 검토되었다. 이렇게 얻어진 유역반응시간 값을 이용하여 앞서 제시된 식 (8), (9), (10)을 기초로 저류 함수법의 매개변수를 추정하기로 한다. 지체시간(T_i)의 경우 그대로 이용될 수 있고 K 와 P 는 추가적인 계산을 필요로 한다. 우선 P 의 값을 살펴보기로 한다. 최종남 등 (2010)에 의한 선행연구에서 국내 실측수문자료를 기초로 추정한 P 의 기대값은 Hack의 법칙의 역승인 0.56과 일치하는 것으로 검토되었다. 그러나, 등류흐름 조건이 만족되는 경우의 저류함수법 모형의 매개변수인 P 의 이론적인 값은 0.6으로 널리 알려져 있다 (윤용남, 2007; 이은태 등, 1999; Sugiyama, 1997). 이러한 두 값의 차이는 이론적인 해석값이 주로 유출의 등류흐름 조건이 만족되는 경우를 기본 가정으로 한 것인데 비해, 실제 발생 호우 조건에서 이러한 조건이 성립되지 않을 경우의 유출현상의 발생특성 차이로 볼 수 있으나 이와 관련된 엄밀한 배경을 설명하기는 어렵다. 본 연구에서는 호우의 시간에 따른 변동특성이 유출에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 강우량의 시간에 따른 변화가 없는 직사각형으로 된 호우사상을 고려하였으며 이러한 호우는 침투홍수가 발생할 때 등류 조건에 해당하는 흐름을 야기한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 P 의 값을 0.6으로 적용하였다.

등류흐름 조건이 성립하는 경우의 운동파모형의 매개변수

k 는 $(N/S^{0.5})^2$ 으로 알려져 있고, 여기서 N 은 유역의 등가조도로 $530B^{-1.08}$ 을 적용하여 얻을 수 있는 값이며 S 는 유역경사를 의미한다 (이은태 등, 1999). 또한, 식 (9)와 (10)을 적용하기 위해서는 얻어진 집중시간을 유입시간과 유하시간으로 구분하여야 한다. 이를 위해 적용한 유로연장의 10%가 유입시간을 유발하는 구간이라고 임의로 가정하였으며, 기존 유입시간과 관련된 연구를 참고하여 이 거리가 400 m를 넘어서는 경우 400 m의 값을 가지는 것으로 고려하였다 (Kerby, 1959). 이러한 관계식과 가정을 이용하면 식 (10)에서 집중시간과 저류상수의 비에 해당하는 와 가상유역에서의 지표면 흐름의 특성거리 를 산정할 수 있다. 그리고 이 값들을 다시 식 (9)에 적용하면 저류상수 K 를 얻어낼 수 있다. 다음 Fig. 4는 α 와 저류상수 K 의 추정결과이다. α 와 K 모두 집중시간과 유사한 양상을 보이고 있다.

한편, 이들 결과로 얻어진 매개변수의 추정값을 살펴보면 일반적인 분석에서 찾아보기 힘든 큰 값과 작은 값이 함께 나타나고 있다. 이는 유역의 경사를 유역면적 1 km^2 내외의 소유역이 보일 수 있는 0.1~0.0001로 고정하여 모든 유역면적에 대해 적용하였기 때문이다. 국내 실재하천의 경우 유역면적이 어느 정도 이상 커지면 나타날 수 있는 경사의 폭이 고려한 범위보다 훨씬 줄어들 것으로 보여지나 범용적인 매

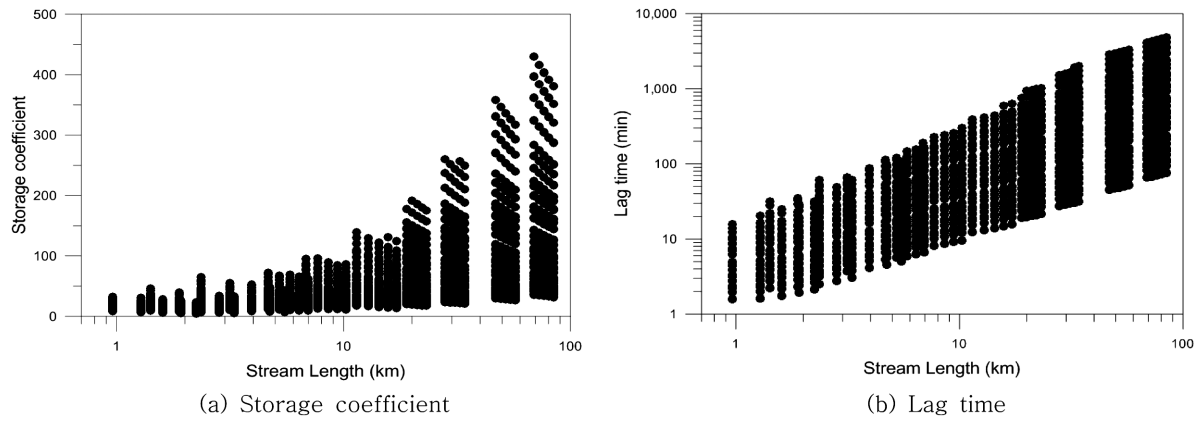


Fig. 5. Parameter variations according to stream length.

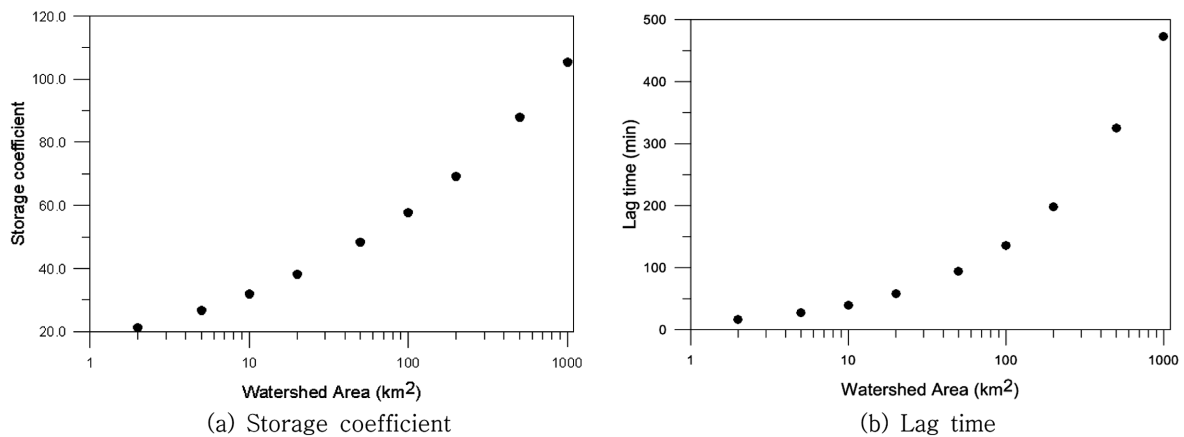


Fig. 6. Typical parameters in hypothetical watershed (L : normal, $S = 0.005$, $n = 0.03$, $R = 50$ mm/hr, $CN = 80$).

개변수 추정모형의 개발 취지상 가능한 경사의 범위를 모든 면적에서 동일하게 이용하였다.

4. 저류함수법 매개변수와 유출영향 특성인자의 상관관계

전 절에서 얻어진 저류함수법 매개변수 산정결과들은 다양한 조건으로부터 산정되어 상당히 넓은 범위의 변화를 보이고 있다. 얻어진 결과를 기초로 매개변수 추정을 위한 범용모형을 개발하기에 앞서 유출에 영향을 미치는 특성인자와의 상관관계를 살펴보기로 한다. 이때 P 의 경우 0.6의 상수로 가정하였으므로 저류상수 K 와 지체시간 T_l 를 주요 검토 매개변수로 고려한다.

Fig. 5는 유역의 면적과 상관없이 유로연장의 차이에 따른 매개변수의 변화를 파악할 수 있다. 이때 두 매개변수 저류상수와 지체시간이 서로 다른 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 저류상수의 경우 Fig. 4(b)를 함께 비교하면서 살펴보면 유역면적이 커지면 점차 나타나는 범위가 커지지만, 동일 유역면적을 기준으로 할 때 유로연장이 길어질수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 비해 지체시간은 유역면적과는 상관없이 단순히 유로연장에 따라 변동하고 있는 경향성을 보이고 있다. 즉, 저류상수를 결정하기 위해서는 유역면적과 별도로 유로연장을 고려해야 한다면, 지체시간의 경우 유역면적은 무시하고 유로연장만을 고려하여도 무난한 것으로

검토되었다. 이는 지체시간이 나타나는 범위가 유로연장의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며 유역면적이 작을 경우 면적에 따른 영향은 상대적으로 미미하고 유로연장이 미치는 영향이 상당히 크다고 판단할 수 있다. 다만, 유로연장의 경우처럼 큰 영향을 미치지 않지만 면적이 증가할수록 지체시간이 증가하는 경향성이 있으므로 유역평균폭(A/L) 등의 인자를 활용하여 유역형상 등에 따라 유로연장을 보완해 주기 위한 목적으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 보여진다.

Fig. 6은 각 면적별 유로연장이 Hack의 법칙을 따르는 표준유로연장(normal stream length)에 해당한다고 가정하고, 추가로 4가지 유출에 영향을 미치는 특성인자를 일정한 값으로 가정했을 때의 매개변수의 그래프이다. 4가지 인자 중 유로경사(S)는 0.005, 조도계수(n)은 0.03, 호우평균 강우강도는 50 mm/hr 그리고 CN 은 80으로 가정하였다. 이 값들은 한국의 평균적인 특성값은 아니고 단순히 본 연구에서 고려하고 있는 변동범위의 중앙에 위치하는 값임에 주의해야 한다. 본 절에서 유출영향 특성인자가 저류함수법 매개변수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 앞서 소개된 Fig. 3 및 Fig. 4의 전체 매개변수를 도시한 그림과 Fig. 6의 가장 간단한 경우를 기준으로 도시한 그림의 두 가지 형태를 기준으로 설정하기로 한다. 유로경사, 조도계수, 호우평균 강우강도, CN 의 4가지 인자 중 한 가지는 고정하고, 나머지 세 가지는 모의를 수행한 조건들을 모두 고려한다고 할 때에 나타나는 매개변

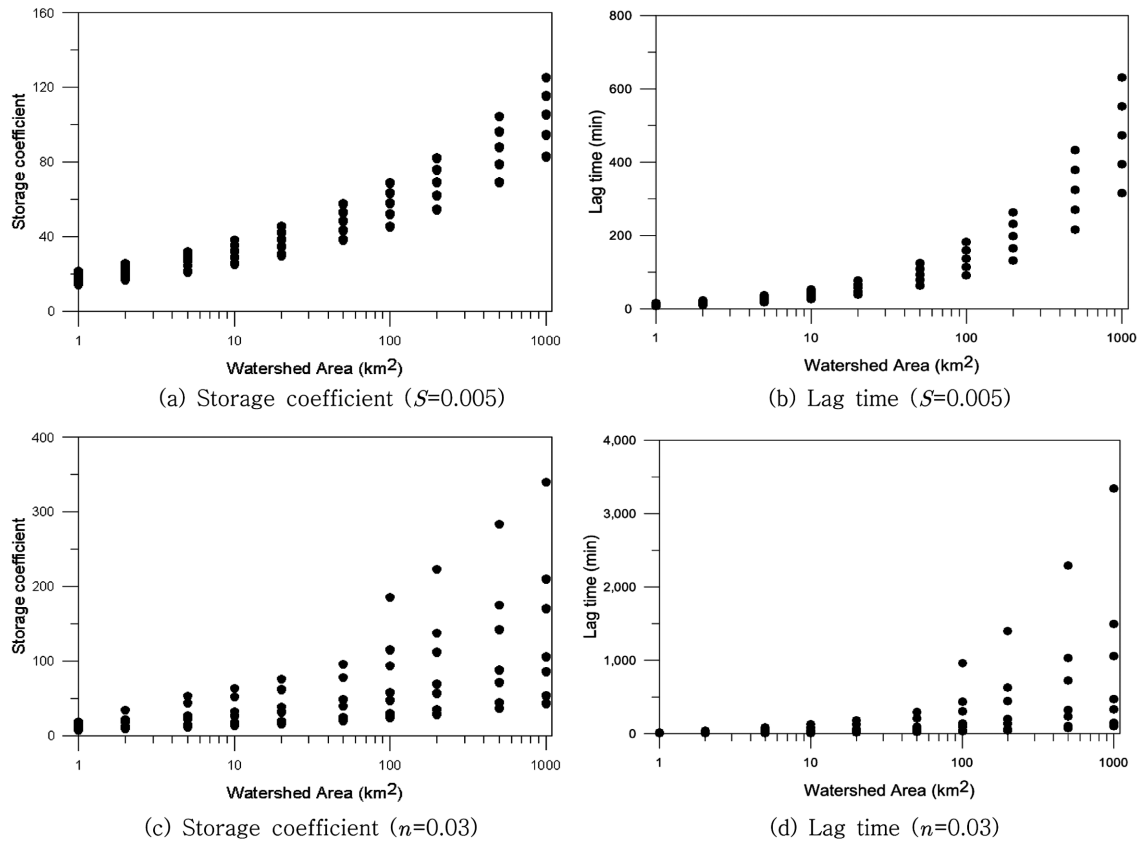


Fig. 7. Parameter variation at fixed stream slope or Manning's roughness coefficient.

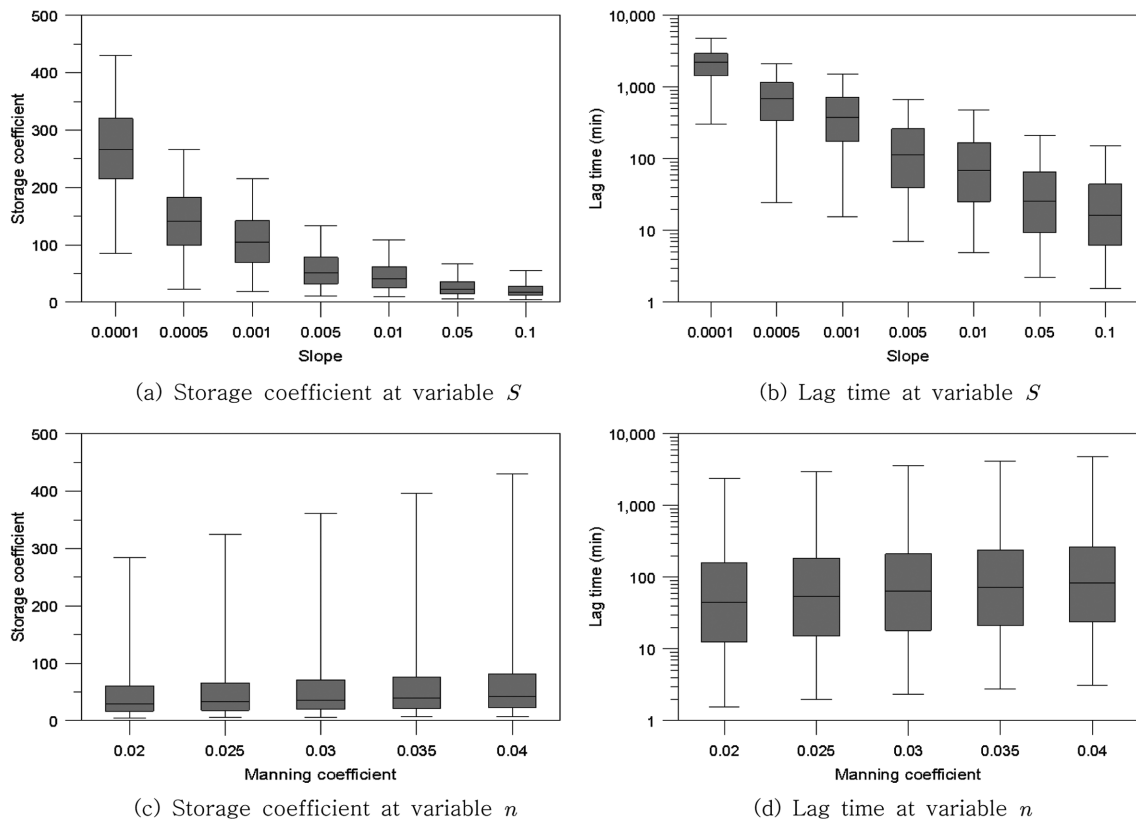


Fig. 8. Parameter variation at variable stream slopes or Manning's roughness coefficient.

수의 양상을 살펴보기로 한다.

Fig. 7은 유로경사 S 를 0.005로 고정한 경우 (a)와 (b) 및 조도계수 n 을 0.03으로 고정한 경우 (c)와 (d)의 매개변수의

변동성향을 보여주고 있다. 유로경사 또는 유역평균경사가 하나의 값으로 고정되면 이에 따라 나타날 수 있는 매개변수의 범위는 상당히 크게 축소되는 것을 확인할 수 있다. 따라서

유로경사는 지체시간 및 저류상수를 추정하기 위한 모형식 개발에서 정밀도를 높이기 위해 반드시 포함되어야 하는 인자로 판단할 수 있다. 또한, 조도계수의 경우 유역면적이 20 km^2 이하로 작을 경우 매개변수 값의 변동폭이 상당히 크게 줄어드는 것으로 검토되었다. 유역면적이 20 km^2 이상에서 점차 커질수록 유로경사의 효과가 상당히 크게 나타나고 있으며, 이 경우 조도계수의 영향은 상대적으로 감소하는 특징을 보인다. 그러나 이 경우에도 매개변수의 전체적인 변동범위를 크게 축소시키지는 못하지만 특정 유로경사 조건에서 나타날 수 있는 매개변수의 변동폭을 상당히 감소시키고 있기 때문에 적절한 매개변수 결정을 위해 유효한 인자라고 볼 수 있다.

Fig. 8은 각 유로경사 및 조도계수에서의 저류상수와 지체시간의 변동범위를 수염상자 그림(box-whisker plot)으로 보여주고 있다. 경사가 급해질수록 저류상수의 평균적인 값이 급속히 감소하면서 분산 역시 크게 감소하는 경향을 보인다. 이에 비해 지체시간의 경우 평균적인 값은 크게 감소하지만 분산의 경우에는 오히려 조금씩 증가하다가 0.005보다 급해질 경우 일정한 범위로 수렴하는 특성을 보이고 있다. 조도계수의 경우 작은 값에서 큰 값으로 변화한다 하더라도 평균은 거의 변화가 없는 반면 저류상수의 최대값은 조도계수의 증가에 선형적으로 비례하여 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이에 비해 지체시간에 대해서는 평균이 미미하게 증가하기는 하나 분산의 경우 큰 변화를 보이지 않고 있다.

Fig. 9는 호우평균 강우강도를 50 mm/hr 로 고정된 경우 및 CN을 80으로 고정된 경우의 매개변수의 변동성향을 보여주

고 있다. 호우평균 강우강도가 하나의 값으로 고정되면 저류상수의 경우 일정한 범위만큼 나타나는 범위가 축소되고 있으며 지체시간에서는 호우평균 강우강도의 변화가 저류상수 값의 변화에 미치는 영향이 크게 발견되지 않았다. 이로 미루어 저류상수를 추정하려고 하는 경우 호우평균 강우강도를 고려해야 할 필요성이 높은 것으로 검토되었다. 한편, 유출곡선지수 CN의 경우 하나의 값으로 고정하더라도 나타나는 범위가 크게 달라지지 않고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 각 호우평균 강우강도 및 유출곡선지수에서의 저류상수와 지체시간의 변동범위를 수염상자 그림(box-whisker plot)으로 보여주고 있다. 호우평균 강우강도가 커질수록 저류상수의 평균특성은 큰 변화가 없으나 분산은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이에 비해 지체시간의 경우 평균 값이 미미하게 감소하면서 분산이 커지지만 유의할 정도로 큰 변화로 보기는 어렵다. 유출곡선지수의 경우 작은 값에서 큰 값으로 변화한다 하더라도 큰 변동을 찾아보기 어렵다. 다만 저류상수의 경우 CN이 70이하로 감소하는 경우 나타날 수 있는 최대값이 감소하는 양상을 보이고 있다.

5. 저류함수법의 매개변수 추정을 위한 범용모형

앞서 얻어진 다양한 매개변수의 값들을 유출영향 특성인자들을 이용하여 여러 형태로 매개변수 추정식을 가정하고 회귀분석을 실시하였다. 이때 일부 모형식의 결정계수는 0.8 이상으로 추정되기도 하였다. 그러나 결정계수의 경우 독립변수의 수가 같은 모형을 비교하는 경우 판단기준으로 적절하지

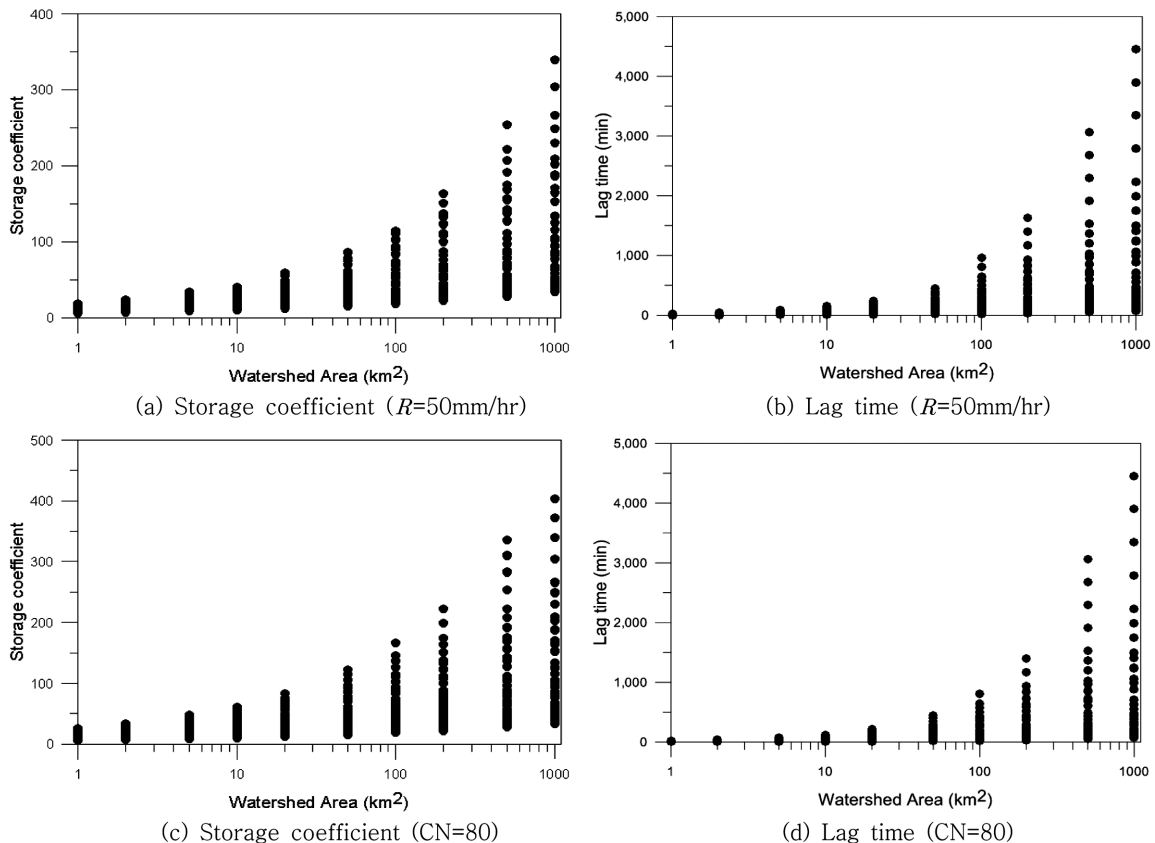


Fig. 9. Parameter variation at fixed rainfall intensity or curve number.

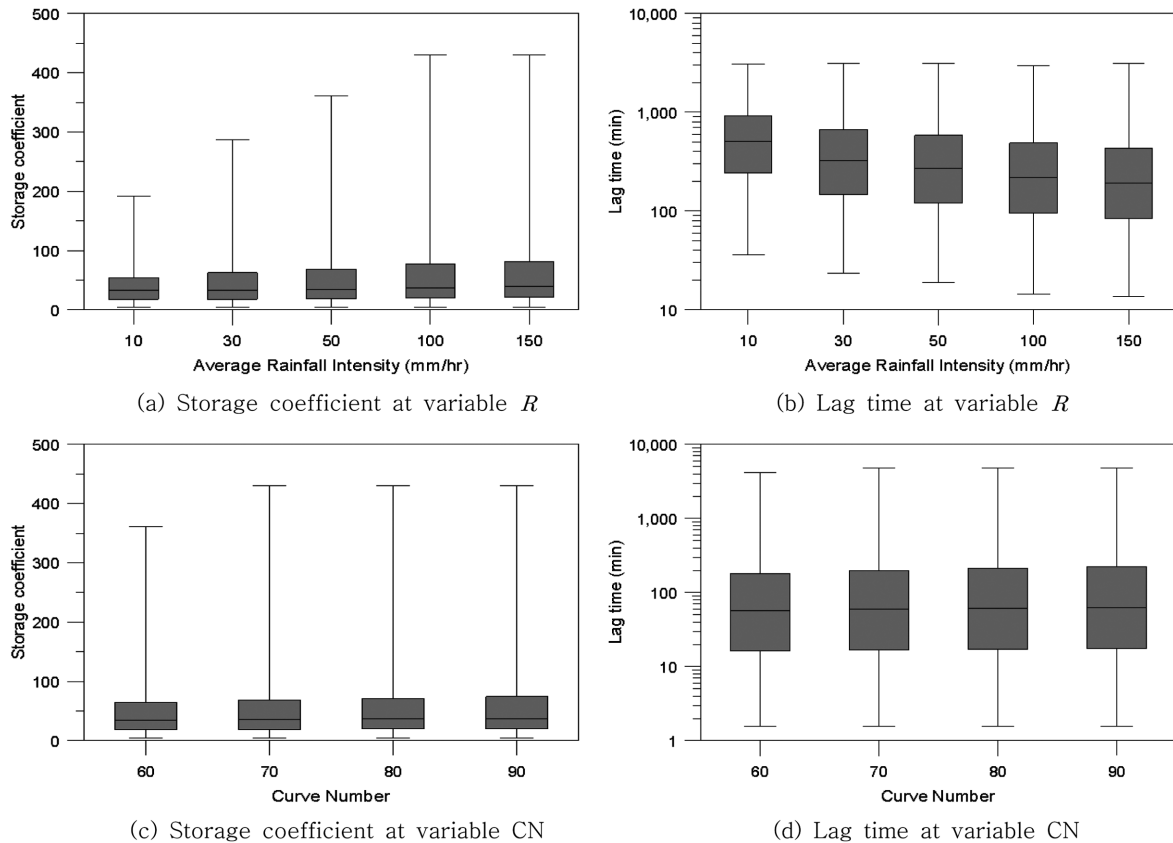


Fig. 10. Parameter variation at variable rainfall intensity or curve number.

만 일반적으로는 독립변수의 수가 증가할수록 결정계수의 값이 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타나 적정하지 않은 것으로 판단되었다. 또한 모형의 구성에서 모든 독립변수를 사용하는 것이 아니라 종속변수인 매개변수에 영향을 줄 가능성이 큰 독립변수만을 중요변수로 다루는 것이 적절하다고 판단되었다. 이는 무조건적으로 많은 매개변수를 고려할 경우 다중공선성을 초래하여 회귀모형의 추정을 곤란하게 할 가능성이 크고, 모든 매개변수를 고려하면 앞서 설명된 것처럼 결정계수의 값이 작게 나타나면서 편의의 양(magnitude of bias)이 줄어들 수는 있지만 반대로 분산이 커지면서 평균제곱오차 등은 반드시 최소가 아니게 나타날 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 이런 이유로 결정계수의 결점을 보완한 수정 결정계수를 사용하였다. 이를 통해 일차적으로 수정결정계수가 0.7 이상으로 얻어지면서 설명변수로서 고려해야할 특성인자를 살펴보면 다음과 같다. 지체시간의 경우 유로연장, 조도계수와 유로경사의 세 가지를 고려하면 충분하고, 저류상수의 경우 유역면적, 유로연장, 유로경사와 조도계수의 네 가지를 고려하면 상당히 정밀도 높은 결과가 얻어질 수 있는 것으로 나타났다.

그러나 이와 함께 4절에서 살펴본 유출영향 특성인자가 저류함수법의 매개변수에 미치는 영향을 다시 정리하면 다음과 같다. 우선 유역면적의 경우 저류상수에 대해서는 반드시 고려해야할 인자이지만, 지체시간의 경우 유로연장을 고려한다면 굳이 고려하지 않아도 무방한 것으로 나타난다. 다시말해, 지체시간의 경우 유역내 가장 긴 유로의 특성과 상당히 관련성이 높은 반면, 저류상수의 경우 유역의 전반적인 특성과

관련성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 유역면적이 20 km^2 이하로 작은 경우의 지체시간은 유로연장 뿐만 아니라 유역형상의 영향을 상당히 크게 받고 있는 것으로 보여진다. 따라서 지체시간을 고려하기 위해 단순히 유로연장만을 사용하기 보다는 유역형상의 영향을 고려하기 위한 유역평균폭을 보정인자로 함께 사용하는 것이 바람직할 것으로 나타났다. 한편 유로연장, 유로경사 및 조도계수는 지체시간 및 저류상수를 추정하기 위하여 반드시 포함되어야 할 변수로 검토되었다. 이에 비해 호우평균 강우강도와 CN이 이들 매개변수의 값에 미치는 영향은 크지 않다고 할 수 있다. 특히, CN의 경우 그 영향이 미미하게 존재하기는 하지만 최종적인 매개변수 값의 결정에 큰 차이를 유발하지 않는다고 판단되어 범용모형 개발을 위해 고려해야할 대상인자에서 제외하였다. 이에 비해 호우평균 강우강도의 경우 마찬가지로 그 영향이 크지 않아 지체시간에서는 고려하지 않아도 무방하나, 저류상수의 경우 일정한 경향성이 나타나므로 이를 보정인자로서 고려하기로 한다. 이때, 호우평균 강우강도의 영향은 유역면적이 작을 경우에 아주 크게 나타나는 것으로 검토되었다. 즉, 유역면적이 1 km^2 내외로 작을 경우에는 최대 30%까지 영향을 미치나 유역면적이 커지면서 그 영향이 급속하게 감소하여 10 km^2 정도 내외의 유역면적에서는 5%, 20 km^2 에 이르러서는 2%도 되지 않는 것으로 검토되었다. 이는 유역면적이 작을수록 짧은 지속기간 동안의 강우강도에 의해 유출 응답이 결정되는 경우가 많아 본 연구에서 검토된 것처럼 호우평균 강우강도의 영향이 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 그렇지만 유역면적이 20 km^2 을 넘어서면 대체로 순간적으로

발생하는 유출현상보다는 강우가 유역에서 집중되는 과정과 유역내 다양한 인자로 인한 저류특성의 반영이 필요하며, 이 과정에서 순간적인 호우평균 강우강도의 영향은 무시 가능한 정도로 미미하게 바뀌는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 회귀분석의 결과로 얻어진 형태에 좀 더 추정결과를 높일 수 있도록 지체시간에는 유역평균폭을 추가로 고려하고 저류상수에는 호우평균 강우강도를 고려할 수 있도록 식을 수정하였으며 그 결과 수정결정계수가 0.8 이상으로 나타나는 최종적으로 개발된 저류함수법의 매개변수를 추정하기 위한 범용모형은 다음 식 (11), (12), (13)와 같다. 기본적으로 최종 결과식 (11), (12), (13)은 앞서 소개된 이론적으로 유도된 운동파모형과 저류함수법의 관계식 (8), (9), (10)에 다양한 유출모의결과로 얻어진 수문지형학적인 특성과 유역반응시간의 관계식을 추가하여 얻어진 결과로 볼 수 있다. 이는 추정하고자 하는 매개변수를 추정하기 위한 모형의 형태가 어느 정도 구조가 알려져 있는 상태에서 미지수인 유역반응과 관련된 부분을 통계적 분석을 통해 보완하는 방법으로 최종결과가 얻어졌기 때문이다. 한편, 회귀분석을 이용한 보완과정은 여러 가지 형식의 모형들을 시행착오적으로 검토하였으나 큰 의미를 가지지 않으므로 채택된 방정식만을 소개하기로 한다.

$$P = 0.6 \quad (11)$$

$$T_l = 0.207 \left(L + \frac{A}{L} \right) n_l S_l^{-0.5} \quad (12)$$

$$K = A^{0.6} \left(\frac{37.5 n_0^{0.6}}{L^{0.6} S_0^{0.3}} + \frac{0.636 R^{0.4}}{L^{1.2}} \right) \quad (13)$$

여기서는 경사 및 조도계수를 지표면과 유로로 구분하였으며 다음과 같다. S_0 는 유역평균경사, S_l 는 유로경사, n_0 는 지표면 흐름의 조도계수, n_l 은 유로의 조도계수이다.

위에서 제시된 범용모형은 국내에서 상대적으로 관측자료가 풍부한 담유역들을 대상으로 그 적용성을 확인하기로 하며 그 결과는 별도의 연구에서 소개하기로 한다. 다만, 여기서는 연구결과로 개발된 모형의 의의를 살펴보기로 한다.

본 연구에서 개발한 저류함수법 매개변수의 추정모형은 기존 경험식들이 제한적으로 관측된 자료로부터 유도되었기 때문에 나타나는 문제점을 해결하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 기존 경험식들의 경우 실제 나타날 수 있는 다양한 유역특성들을 반영하기에는 턱없이 부족한 소수의 유역에서 얻어진 자료에 근거로 두고 있다. 따라서 상대적으로 많은 유역의 자료를 수집하였다고 하더라도 여기에서 충분하게 수집된 유출영향인자는 유역면적 정도에 불과한 경우가 대부분이다. 그리고 동일 유역면적에서도 서로 다른 유로연장, 유로경사 등의 특성을 가진 자료를 충분히 확보하지 못했기 때문에, 매개변수 추정식 개발은 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서 발생가능한 다양한 조건들을 대부분 포함하여 매개변수의 추정을 위해서는 본 연구에서 취하고 있는 것처럼 실제유역보다는 가상유역을 이용한 검토가 필요하다. 비록 본 연구에서는 유로경사와 유역평균경사의 분리, 다양한 유역형상 특성,

그리고 하천수계가 분기되어 나가면서 나타날 수 있는 분기비, 길이비, 면적비 등의 특성 등을 고려하지는 못하였다. 뿐만 아니라 호우사상의 시간적 변화 역시 고려하지 못하였다. 유역의 경사특성을 균질하다고 가정하였기 때문에 불규칙하게 나타나는 지형특성 역시 반영되었다고 보기 어렵다. 그렇지만, 기존 매개변수 추정식의 개발에서 상대적으로 간과되어 왔고 또한 기존 수문자료로는 그 거동특성을 파악하기 힘들었던 동일한 유역면적에서도 서로 다르게 나타날 수 있는 유출영향인자들의 변화가 저류함수법의 매개변수에 미치는 영향을 정량적으로 검토하고 이를 기초로 범용적인 매개변수 추정식을 개발하였다는 측면에서 의의가 크다고 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 다양한 조건을 충족시키는 가상유역을 이용하여 저류함수법의 매개변수를 추정하기 위한 검토를 실시하였다. 기존의 집중형 강우유출모형에서 사용되는 매개변수를 추정하기 위한 경험식들은 대부분 불충분한 자료의 수로 인하여 그 적용성이 제한적이었다. 특히, 동일 면적에서도 다양하게 나타날 수 있는 유로연장, 유로경사, 지표면 특성 등을 고려하지 못하는 경우가 대부분이었다. 이에 착안하여 본 연구에서는 다양한 유역특성을 감안한 가상유역을 설정하고 약 35,000여회에 해당하는 상이한 유역특성 및 유출영향 특성인자에 기초한 유출해석을 실시하여 매개변수를 추정하였다. 이렇게 얻어진 매개변수의 추정결과를 기초로 다양한 유출영향인자의 조건에 대해 민감하게 반응할 수 있는 범용적인 저류함수법의 매개변수 추정모형을 개발할 수 있었으며, 모형 개발 과정에서 얻어진 유출영향 특성인자와 저류함수법 매개변수의 관련성은 다음과 같다.

- 1) 지체시간의 경우 유역특성 보다는 유로의 특성에 영향을 주로 받는 것으로 나타났다. 특히, 유로연장, 유로경사 그리고 유로의 조도계수 특성 등이 지배적인 인자로 검토되었다. 다만, 단순히 유로연장을 고려하기 보다는 유역내 수계의 배치나 분포 등을 고려하기 위한 인자를 추가로 고려하여 검토한다면 보다 정밀도 높은 연구결과가 얻어질 것으로 기대되었다. 본 연구에서는 유역평균폭을 이러한 인자로서 도입한 결과 단순히 유로특성만을 고려한 경우보다 개선된 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 저류상수의 경우 유로의 특성보다는 유역의 특성에 영향을 주로 받는 것으로 나타났다. 유역면적, 유역평균경사 그리고 유역내 지표면 상태 등이 중요한 인자로 고려되었다. 또한 유역면적이 1 km² 내외로 줄어들 경우 유역의 유출응답이 상당히 빨라지는 관계로 강우강도의 영향 역시 저류상수의 값에 상당히 큰 영향을 미치는 것으로 검토되었다. 그렇지만 유역면적이 20 km²을 초과하는 경우에는 강우강도의 크기의 영향은 무시가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 다양한 조건을 고려한 가상유역에서의 모의를 통해 유출에 영향을 미치는 특성인자와 저류함수법 매개변수의 거동특성의 관계에 대한 이해를 보다 높일 수 있었다.

이를 기초로 단순히 회귀분석을 실시한 경우보다 정도가 높은 매개변수 추정모형을 개발할 수 있었다. 이 결과들은 집중형 강우유출모형의 매개변수와 유출영향인자에 대한 이해를 높이고 국내 미계측유역을 대상으로 저류함수법을 보다 보편적으로 적용하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

건설교통부 (2004) **용담댐 및 미호천에 대한 금강홍수예경보시스템 개선**, 연구보고서, 한국건설기술연구원.

건설교통부 (2005) **홍수에보모형의 성능평가 및 개선 연구(1차)**, 연구보고서, 한국건설기술연구원.

건설교통부 (2006) **홍수에보모형의 성능평가 및 개선 연구(2차)**, 연구보고서, 한국건설기술연구원.

곽재원, 김덕길, 홍일표, 김형수 (2009) 강우-유출모형을 위한 매개변수 순차보정기법 연구, **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제 11권, 제2호, pp. 107-121.

김범준, 송재현, 김형수, 홍일표 (2006) 저류함수모형의 매개변수 보정과 홍수예측 (1) 홍수예측방법의 비교 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 39-50.

김범준, 곽재원, 이진희, 김형수 (2008) 저류함수모형의 매개변수 보정 및 추정, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제 1B호, pp. 21-32.

김태균, 윤강훈 (2007) SCS 초과우량산정방법을 이용한 저류함수법 적용, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 523-532.

김형수 (2004) HEC-HMS의 이론과 실무 적용, **한국수자원학회 2004년도 제 13호 수공학 특집 교재**, 한국수자원학회, pp. 1-124.

박진혁, 허영택 (2008) 홍수유출해석을 위한 운동과기반의 분포형 모형 개발 및 적용, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 41권, 제5호, pp. 455-462.

송재현, 김형수, 홍일표, 김상욱 (2006) 저류함수모형의 매개변수 보정과 홍수예측 (1) 보정 방법론과 모의 홍수수문곡선의 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 27-38.

안상진, 김진국, 윤석환, 곽현구 (2001) 유출모의를 위한 HEC-HMS 모형의 매개변수 추정, **한국수자원학회학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 365-370.

유철상, 신정우 (2010) Nash 모형의 구조를 이용한 관측유역의 저류상수 및 집중시간 결정, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제6호, pp. 559-569.

윤용남 (2007) **수문학 - 기초와 응용**, 청문각.

이은태, 이도훈, 이주현 (1999) **홍수유출계산법**, 구미서관.

일본하천협회 (1997) 건설성 하천사방기술기준(안) 동해설 (조사편). 일본하천협회.

정상만, 김현수, 안계현, 노순안, 이성재 (1993) 저류함수법에 의한 주요지점의 홍수위 예측, **수공학연구발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 369-375.

최윤석, 김경탁, 이진희 (2008) 유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 895-905.

최윤석, 김경탁, 심명필 (2009) 댐 하류 지점에 대한 분포형 모

형의 적용성 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 42권, 제9호, pp. 703-703.

최윤석, 김경탁, 심명필 (2010) 분포형 강우-유출 모형을 이용한 미계측 중소유역의 유량 추정, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 353-365.

최종남, 안원식, 김형수, 박민규 (2010) 운동과모형을 이용한 저류함수법 매개변수의 특성 평가, **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제10권, 제4호, pp. 93-102.

한국수자원공사 (2008) PMP 및 PMF 산정절차 지침 수립, 연구보고서.

Aoki, H., Usui, N. and Kon, H. (1976) One estimation method of the lag time T_l in the storage function method, *Journal Research of PWRI*, The public works research institute, 18(6), pp.29-43.

Aoki, H., Ishizaki, K., Kishiii, T., Haesegawa, T. (1979) The research report in the experimental basin in all Japan, *Journal Research of PWRI*, The public works research institute, 21 (8), pp. 23-30.

Hoshihata, K. (1972) On the relation between rainfall and runoff - mainly on a watershed slope. Japan Society of Civil Engineers.

Kerby, W.S. (1959) Time of concentration for overland flow, *Civil engineering*, 29(3), p. 174.

Kimura, T. (1961) *The flood runoff analysis by the storage function model*. The public works research institute, Ministry of construction.

Kuribayashi, M. and Sadamichi, N. (1969) *The characteristics and runoff analysis method in a drainage system*. Technical report. The public works research institute.

Laurenson, E.M. (1964) A catchment storage model for runoff routing, *Journal of Hydrology*, ASCE, 2, pp. 141-193.

Laurenson, E.M. (1965) Storage routing methods of flood estimation, *Inst. Eng. Aust. Civ. Eng. Trans.*, pp. 39-47.

Nagai, A., Kadoya, M., Sugiyama, H. and Suzuki, K. (1982) Synthesizing storage function model for flood runoff analysis, *Disaster Pres. Res. Inst. Annu. Kyoto Univ.*, 25B-2, pp. 207-220.

Prasad, R. (1967) A nonlinear hydrologic system response model, *Proc. ASCE*, HY4, pp. 201-219.

Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1995) Model calibration. *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publication, Highlands Ranch, Co.

Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A. and Lansey, K. (1997) Evaluation of the storage function model parameter characteristics, *Journal of Hydrology*, ASCE, 191, pp.332-348.

USDA, Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the RUSLE, *Agriculture Handbook*, 1997.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. Prediction rainfall erosion losses, *Agricultural Handbook* 537, Science and Education Administration, USDA, Washington, DC 58, 1978.

◎ 논문접수일 : 10년 10월 06일

◎ 심사의뢰일 : 10년 10월 07일

◎ 심사완료일 : 10년 10월 20일