

복수의 충격응답함수를 이용한 유역의 유출특성 분석**Analysis of Runoff Characteristics Using Multiple Impulse Response Functions**

유철상* / 김하영** / 박주영***

Yoo, Chulsang / Kim, Hayoung / Park, Jooyoung

Abstract

This study analyzed rainfall-runoff characteristics by deriving multiple impulse responses. The concept of competing impulse responses was used for deriving multiple impulse responses. Based on this concept, each response function derived competes to be selected for simulating the runoff measured. This concept of competing linear impulse responses was applied to four basins, Jeongseon, Yeongwol, Youngchoon and Chungju Dam. One to three impulse responses have been derived and compared each other considering basin characteristics. First, in case of deriving one linear impulse response, the peak flow of the impulse response was found to be increased according to their study basins area. In case of deriving two linear impulse response, the peak flow of the first impulse response and the duration of the second impulse response were increased according to their basin size. The case of deriving three impulse response showed similar characteristics of deriving two impulse responses. However, the peak flow of third impulse response was very small and lasted quite long time. Summarizing these results considering the basin characteristics, the first impulse response seems to be related with the surface runoff, the second impulse with the surface runoff and interflow, and the third impulse response with the interflow and base flow.

Keywords : rainfall-runoff analysis, impulse response, runoff characteristics, basin characteristics

요 지

본 연구에서는 복수의 충격응답함수를 유도하고 이를 이용하여 유역의 강우-유출 특성을 분석하였다. 복수의 충격응답함수를 유도하기 위해 경쟁적 충격응답함수라는 개념을 이용하였다. 이 개념에 따르면 각 충격응답함수는 관측된 유출의 모의에 선택되기 위해 서로 경쟁을 하게 된다. 이와 같은 경쟁적 충격응답의 개념은 정선, 영월, 영춘 및 충주댐 등 4개의 유역에 적용하였다. 각각의 유역에 대해 하나에서 세 개까지의 충격응답을 유도하고 아울러 유역의 특성을 고려하여 비교하였다. 먼저 하나의 충격응답을 유도하는 경우, 그 크기는 유역면적이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 두 개의 충격응답함수를 유도한 경우에는 첫 번째 충격응답의 첨두값 및 두 번째 충격응답의 지속기간이 유역의 크기에 비례하여 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 세 개의 충격응답함수를 유도한 결과는 전체적으로 두개의 충격응답을 유도한 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 세 번째 충격응답은 그 첨두값의 크기가 상당히 작고 아울러 지속기간이 매우 긴 형태로 나타남을 파악하였다. 이상의 결과를 유역의 특성을 고려하여 종합해 보면, 첫 번째 충격응답은 직접유출과 밀접한 관련이 있으며, 두 번째 충격응답은 직접유출 및 중간유출의 특성을 함께 나타내고, 마지막으로 세 번째 충격응답은 중간유출 및 기저유출의 특성을 나타내는 것으로 보인다.

* 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

** 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: gkdud185@korea.ac.kr)

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

*** 고려대학교 과학기술대학 제어계측공학과 교수 (e-mail: Parkj@korea.ac.kr)

Department of Control and Instrumentation Engineering, College of Science and Technology, Korea University, Jochiwon 339-700, Korea

1. 서론

수문곡선 (hydrograph)은 어떤 호우로 인한 하천유량의 시간적 변화를 나타내며, 각 시각에 있어서의 유량은 지표면 유출, 중간유출, 지하수 유출 및 수로 상 강수 등의 합으로 이루어진다. 홍수기나 비홍수기냐에 따라 이들의 구성비가 크게 달라지는데, 이것이 장기적인 측면에서 강우-유출 과정의 변동성을 대변하게 된다. 즉, 유출 전체의 특성이 어떤 성분에 의해 좌우되느냐의 문제가 되는 것이다. 이러한 문제는 홍수기의 유효강우-직접유출 사이의 비선형성과는 다른 의미를 갖는다.

장기유출 측면에서의 직접유출은 당일 또는 다음 날 발생하는 침투유량을 주로 설명한다. 유역의 규모 및 강우 발생시점이 당일 및 익일의 유출량 비를 결정하는 인자가 된다. 이후 수일간의 유출은 주로 중간 유출에 기인한다고 판단할 수 있다. 유역의 규모나 총 강우량의 크기에 따라 더욱 중간유출의 발생기간이 변하게 된다. 이후의 유출은 주로 기저유출에 해당한다. 그러나 이러한 피상적인 설명을 강하게 뒷받침할 수 있는 근거를 찾는 것은 쉬운 일이 아니다. 현재의 연구수준을 살펴보면, 직접유출과 기저유출의 분리 문제는 상대적으로 많은 성과가 축적되어 있는 것처럼 보인다 (김경수와 조기태, 2000; 이황기, 2004; 정진영, 2007; Ninghu, 1995; Steven et al., 2003). 그러나 직접유출, 중간 유출 및 기저유출의 분리문제는 관련 연구를 거의 찾아볼 수 없을 정도로 제 자리 걸음을 하고 있는 것이 현실이다.

이러한 문제의 근본적인 원인은 물론 강우-유출 과정의 비선형성에 있다. 상대적으로 많은 관심이 주어졌던 홍수유출 문제에 있어서는 유효우량-직접유출 사이의 비선형적 거동에 대한 많은 연구 성과들을 살펴볼 수 있다 (신현석 등, 1998; Reed et al., 1975; Kachroo and Natele, 1992; Sajikumar and Thandaveswara, 1999; Gwofong and Luhsien, 2004). 특히, 강우강도 및 선행강우의 정도가 아주 중요한 역할을 하며, 추가로 식생 및 토지이용 등의 영향도 많이 고려되고 있다. 그러나 장기유출의 문제에 있어서의 비선형성 문제는 강우-유출 문제가 아닌 기후학적인 측면에서의 비선형적 거동 문제로 변질되어 있는 것이 현실이다(이봉기, 2008; Vivek, 2002; Menzel and Bürger, 2002; Roger et al., 2005).

또 다른 문제는 관측된 강우-유출 자료로부터 이 과정의 비선형성 또는 장기간의 변동성을 분석할 수 있는 방법론의 부재에서 찾을 수 있다. 즉, 홍수유출의 경우는 그 발생기간이 상대적으로 짧음으로 해서 자료 및 분석기법

의 가용성에서 유리한 측면이 있다. 그러나 장기유출의 경우에는 그렇지 못하다. 특히 유역의 규모가 큰 경우 중간유출 및 기저유출의 지속기간은 정확히 가늠하기 어려운 문제가 되어 버린다. 강우-유출 과정이 뚜렷한 비선형성을 보이는 경우 이 문제는 더욱 접근하기 어려운 문제로 변질되고 만다.

이런 이유로 유출성분 분해나 강우-유출 특성화 관련 연구는 대부분 홍수유출에 한정되는 경우가 많다 (강주복 등, 1995; 최한규 등, 1999; 조용수 등, 2005; 허성철 등, 2008; Tabios et al., 1998; Ogden et al., 1995). 반면에, 장기유출의 경우에는 경험적인 기저유출의 분리방법이 대부분을 차지하는 실정이다. 대표적인 방법으로는 수평직선분리법, 주 지하수 감수곡선법, N-day법, 수정N-day법 등이 있다 (윤용남, 1998). 기저유출과 직접유출을 정확하게 분리하기 위해 유역의 지질수문학적 특성 (geo-hydrological characteristics)을 고려하는 것이 일반적이나, 이러한 특성을 해석적으로 규명할 수 있는 방법은 아직까지 마련되어 있지 않다. 최근에는 디지털필터링 방법을 기저유출 분리 문제에 적용하고 있기도 하다 (강부식과 문수진, 2009; Bouhdon and Freebairn, 1985; Amord et al., 2000; Ashu and Sanaga, 2006).

본 연구에서는 장기유출의 비선형성을 강우-유출 과정의 측면에서 분석하는 것을 목표로 한다. 기존연구에서 수행했던 기저유출의 분리 문제가 아닌 강우-유출 과정의 특성을 살펴보고자 하는 것이다. 그러나 분석의 도구로는 선형시스템에 근거한 충격응답함수 (impulse response function)를 이용하려고 한다. 비선형 문제에 대해 선형적인 도구를 사용하는 불일치의 문제점을 극복하기 위해 다수의 충격응답함수를 유도하여 이용하는 방법을 도입하였다. 소위 '경쟁적 충격응답함수'라는 개념으로서, 매 단위시간의 강우입력에 가장 적합한 충격응답함수를 단수 또는 복수로 선택하여 유출해석이 이루어지도록 하는 방법이다 (Yoo and Park, 2008). 본 연구는 충주댐 유역에 적용하였으며, 유역규모 (면적)의 영향을 고려하기 위해 충주댐 지점 이외에 추가로 3개의 수위관측소 지점을 선정하여 분석하였다.

2. 배경 이론

2.1 경쟁적 선형 충격응답

다음은 선형 충격응답에 경쟁법칙을 도입하여 강우-유

출 과정을 해석하는 방법을 설명한 것이다 (Yoo and Park, 2008). 먼저 임의의 시간 t 에서의 강우량과 유출량을 각각 $r(t)$ 와 $q(t)$ 라 하자. 일반적으로 강우-유출 모형화란 강우 입력에 대해 가장 그럴듯한 모의 유출을 제공하는 함수 또는 모형 f 를 찾는 과정이라고 정의할 수 있다. 즉,

$$q(t) \cong f(r(t), \dots, r(t-T+1)) \quad (1)$$

여기서, T 는 입력변수인 강우자료의 길이를 나타낸다. 만일, 위 Eq. (1)에서의 함수 f 가 선형이라면 강우-유출 과정은 간단히 모형화 된다. 소위 단위유출도의 개념이 이 경우에 해당한다. 즉,

$$\begin{aligned} q(t) &\cong f_j(r(t), \dots, r(t-T+1)) \\ &= q_j^0 + \sum_{k=0}^{T-1} h_j(k)r(t-k), \quad t = T_1, \dots, T_2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, q_j^0 는 기저유출에 해당하는데, 홍수유출해석과 같이 짧은 기간에 대한 유출모의의 경우 이 기저유출은 일정한 상수항을 가지게 된다. 그러나 장기유출해석의 경우 이 상수항은 0으로 수렴하게 되어 기저유출의 의미를 상실하게 된다. $h_j(i)$ 는 시간 0에서 발생하는 단위 충격입력에 대한 각 시간 i 에서의 충격응답을 의미한다. 그러나 위 식에서 f_j 는 j -번째 선형 모형을 가리키는 것으로, 가능한 여러 충격 응답함수 중에서 유출 $q(t)$ 을 가장 잘 모의하는 모형을 의미한다. f_j 는 j 번째 모드(mode)로 불리기도 한다. 본 연구에서 f_j 는 선형으로 가정했으므로, 각 충격응답은 음이 아닌(non-negative) 성분을 갖고 아울러 한 개의 첨두(peak)만을 가져야 한다. 즉,

$$q_j^0 \geq 0, h_j(k) \geq 0, j = 1, \dots, m, k = 0, \dots, T-1, \quad (3)$$

$$h_j(0) \leq \dots \leq h_j(t_{\max,j}) \geq \dots \geq h_j(T-1) \quad (4)$$

여기서, $t_{\max,j} \in \{0, \dots, T-1\}$ 이다.

가능한 여러 모드 중 어떤 모드가 $q(t)$ 에 가장 근접할지를 처음부터 알 수는 없다. 따라서 이를 결정하는 과정은 확률적이다. j 번째 모드에서 $q(t)$ 가 관측 유출량에 가장 근접할 확률 $p_j(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_j(t) = \Pr\{x(t) = j\}, j = 1, \dots, m, t = T_1, \dots, T_2 \quad (5)$$

위 식에서 $p_j(t)$ 사전에 결정하는 것은 불가능하므로, 다음과 같은 2단계의 과정을 반복함으로써 점진적으로 최적화 하게 된다. 즉, 각각의 모드 $j \in \{1, \dots, m\}$ 에서, $p_j(t)$ 를 고정시켜 놓은 후 최상의 선형 모델 f_j 를 찾아야 한다. 이 단계는 다음 Eq. (6)과 같은 최소화 문제로 정의할 수 있다. 당연히 충격응답 f_j 와 기저유출 q_j^0 는 음이 아닌 성분을 가져야 하고, 동시에 하나의 첨두만을 가져야

한다.

$$\min_{f_j} \sum_{t=T_1}^{T_2} p_j(t) (q(t) - f_j(r(t), \dots, r(t-T+1)))^2 \quad (6)$$

위 식에서 $p_j(t)$ 는 다음과 같은 제약조건 하에서 조정하게 된다.

$$\sum_{j=1}^m p_j(t) = 1, p_j(t) \geq 0, j = 1, \dots, m, t = T_1, \dots, T_2 \quad (7)$$

또한 Eq. (7)에서 확률 $p_j(t)$ 는 다음 두 가지 가정 하에 추정된다. 즉, $f_j(r(t), \dots, r(t-T+1))$ 는 가우스 확률분포에 따라 분포되고, $q(t-\Delta), \dots, q(t+\Delta)$ 는 모두 동일한 모드에서 왔다고 가정한다. 이러한 가정 하에 $p_j(t)$ 는 다음과 같이 수정될 수 있다 (Chang et al., 2004).

$$p_j(t) = \frac{\exp(-\beta \sum_{\delta=-\Delta}^{\Delta} (e_j(t))^2)}{\sum_{i=1}^m \exp(-\beta \sum_{\delta=-\Delta}^{\Delta} (e_i(t))^2)} \quad (8)$$

여기서, e_j 는 오차항으로, 다음과 같이 정의된다.

$$e_j(t) = q(t) - f_j(r(t), \dots, r(t-T+1)) \quad (9)$$

또한, Eq. (8)에서 β 는 m 개 모드 사이의 경쟁 정도를 조절하기 위한 일종의 어닐링(annealing) 변수이다. β 가 큰 값을 갖는 경우에는 “승자 모두 갖기”라고 불리는 법칙에 따라 분포된 점들이 주어진 확률분포를 따르도록 하고, 반대로 작은 β 값은 주어진 점들이 일양분포를 따르도록 한다.

2.2 경쟁적 선형 충격응답의 개념을 이용한 강우-유출 해석 과정

주어진 강우-유출 자료 및 유역에 대한 정보를 이용하여 Δ, m 및 T 을 사전에 결정할 수 있다. 아울러, Eq. (7)을 만족하는 초기 $p_j(t)$ 도 선택할 수 있다. 강우-유출 해석의 첫 번째 단계는 강우에 지수함수적인 가중치를 부여하여 다음 식과 같이 그 합을 구하는 것이다.

$$R_\lambda(t) = r(t) + \lambda r(t-1) + \lambda^2 r(t-2) + \dots + \lambda^{T-1} r(t-T+1) \quad (10)$$

위 식에서, $\lambda \in (0,1)$ 이고, $t = T_1, \dots, T_2$ 이다. 다음으로, 강우에 지수함수적인 가중치를 적용하여 그 합인 $R_\lambda(t)$ 이 구해지면, 이것을 m 개의 집단으로 군집화 한다. $m=1$ 인 경우 한 개의 충격응답, $m=2$ 인 경우 두 개의 충격응답 등으로 군집화 된다. 일례로, $m=2$ 인 경우 군집되는 두 개의 충격응답은 유출 $q(t)$ 를 모의 하는 모형 f_j 의 2번째 모드를 구성하는 충격응답이라 할 수 있다. 또한 군집

화 할 때 사용되는 범위 $I = [0, \max_{t \in [T_1, T_2]} R_\lambda(t)]$ 는 일반적으로 m 개의 집단으로 균집될 만큼 충분한 크기를 가지고 있으며, I 를 m 개의 집단으로 균집화 할 때 나뉘지는 각각의 I_1, \dots, I_m 는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$I_i \cap I_j = \emptyset \text{ for } i \neq j, \text{ and } \bigcup_{i=1}^m I_i = I \quad (11)$$

마지막으로, $R_\lambda(t) \in I_j$ 일 때, $t \in T_1, \dots, T_2$, $p_j(t) = 1$ 이고, 나머지 $i \neq j$ 일 때 $p_i(t) = 0$ 이다. 일단 $p_j(t)$ 가 결정되고, j -번째 모드 f_j 가 주어지면, 유량 $q(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} q(t) &\cong f_j(r(t), \dots, r(t-T+1)) \\ &= q_j^0 + \sum_{k=0}^{T-1} h_j(k)r(t-k) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, j 번째 모드 f_j 가 $q(t)$ 에 근접할 확률이 $p_j(t)$ 이므로 f_j 를 찾는 문제는 다음과 같은 성과지수 PI_j 를 최소화하는 문제로 귀결시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} &PI_j(q_j^0, h_j(0), \dots, h_j(T-1)) \\ &= \sum_{t=T_1}^{T_2} p_j(t) \left\{ q(t) - \left(q_j^0 + \sum_{k=0}^{T-1} h_j(k)r(t-k) \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

이미 언급한 것처럼 각각의 모드는 음이 아닌 성분을 갖도록 하고, 동시에 한 개의 첨두를 갖는 형태이어야 한다. 따라서 f_j 를 찾기 위해서는 Eqs. (3) and (4)의 제약조건하에서 Eq. (13)와 같이 나타난 PI_j 를 최소화시켜야 한다. 그러나 Eq. (4)에 포함되어 있는 $t_{\max, j}$ 는 사전에 알 수 없는 값이므로, 다음 문제를 먼저 해결해야만 한다.

$$\begin{aligned} &\min PI_j(q_j^0, h_j(0), \dots, h_j(T-1)) \\ &\text{s.t. } q_j^0 \geq 0, h_j(k) \geq 0, k=0, \dots, T-1 \\ &\quad h_j(0) \leq \dots \leq h_j(l) \geq \dots \geq h_j(T-1) \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서, $t_{\max, j}$ 는 $l \in \{0, \dots, T-1\}$ 이다. 강우유출 자료 및 유역정보를 이용하여 사전에 결정된 T 에 대해 최적의 결과를 주는 값을 f_j 로 채택한다. MATLAB의 최적화 툴박스에서 “quadprog”와 같은 QP 솔버를 이용하면 이러한 QP (quadratic programming)문제를 손쉽게 해결할 수 있다 (Coleman et al., 1999).

$q(t)$ 가 $f_j(r(t), \dots, r(t-T+1))$ 의 평균을 가진 가우스 분포를 따른다면, 그 공분산 τ 는 다음 식을 통해 추정 가능하다.

$$\hat{\tau} = \frac{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{j=1}^m \{(e_j(t))^2 p_j(t)\}}{T_2 - T_1 + 1} \quad (15)$$

위 식의 $\hat{\tau}$ 는 어닐링 (annealing) 변수 β 와 다음의 관계

를 가지므로, 즉 $\beta = 1/2\hat{\tau}$ 이므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Moon and Stirling, 2000; Chang et al., 2004).

$$\beta = \frac{1}{2\hat{\tau}} = \frac{T_2 - T_1 + 1}{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{j=1}^m (e_j(t))^2 p_j(t)} \quad (16)$$

아울러, 위의 확률 적용 단계에서 언급하였듯이, $p_j(t)$ 는 다음과 같이 수정된다.

$$p_j(t) = \frac{\exp(-\beta \sum_{\delta=-\Delta}^{\Delta} (e_j(t))^2)}{\sum_{t=1}^m \exp(-\beta \sum_{\delta=-\Delta}^{\Delta} (e_j(t))^2)} \quad (17)$$

여기에서, Δ 는 스위칭 비율을 조절하는 변수이다. 본 연구에서는 Δ 값으로 1을 사용하였다.

마지막으로, 미리 설정된 멈춤 조건을 만나면 프로그램은 멈추게 되고, 그렇지 않으면 각각의 모드를 찾기 위한 최적화 단계로 돌아가게 된다. 멈춤 조건은 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 지정된 수만큼의 반복이 끝나면 프로그램이 멈추는 간단한 조건을 사용하였다.

3. 적용 유역 및 자료

본 연구는 충주댐 유역을 대상으로 수행하였다. 충주댐 유역은 한국 중북부에 속하며, 남한강이 관류하는 동령산맥 협곡단에 위치한다. 남한강에는 주천강, 평창강, 송천, 골치천 등의 지류가 흐르고, 댐 지점은 평수위가 표고 68 m인 깊숙한 협곡 하천상에 위치해 있다. 제천관측소의 최근 기상자료 10개년 (1994~2003년)에 의하면 유역의 연평균 강수량은 1,343 mm 정도이다.

본 연구에서는 2006년 4월부터 11월까지의 일 자료를 이용하여 분석하였다. 유역 내 수십 개의 강우관측소에서 측정된 일 강우자료를 면적평균강우로 환산하여 충격응답함수의 유도 및 유출특성 분석을 위한 입력자료로 사용하였으며, 유출자료로는 2006년 수문조사연보의 지점별 관측유량값을 이용하였다.

유역특성에 따른 충격응답함수의 차이를 살펴보기 위해, 충주댐 유역의 상류지점인 정선, 영월, 영춘과 충주댐 수위 관측소 등 4개의 지점을 분석 대상으로 선정하였다. 각 지점이 대표하는 유역은 Fig. 2와 같다. 정선유역은 유역면적 1688.53 km², 유로연장 102.53 km로 4개 유역 중 가장 작은 면적을 가진 유역이고, 충주댐유역 면적의 0.25배이다. 영월유역은 유역면적 2282.40 km², 유로연장 161.27 km로 정선유역 면적의 1.35배, 충주댐 유역의 0.34배이다. 영춘유역은 유역면적 4823.93 km², 유로연장 189.53 km로 정선유역 면적의 2.86배, 충주댐 유역의 0.72

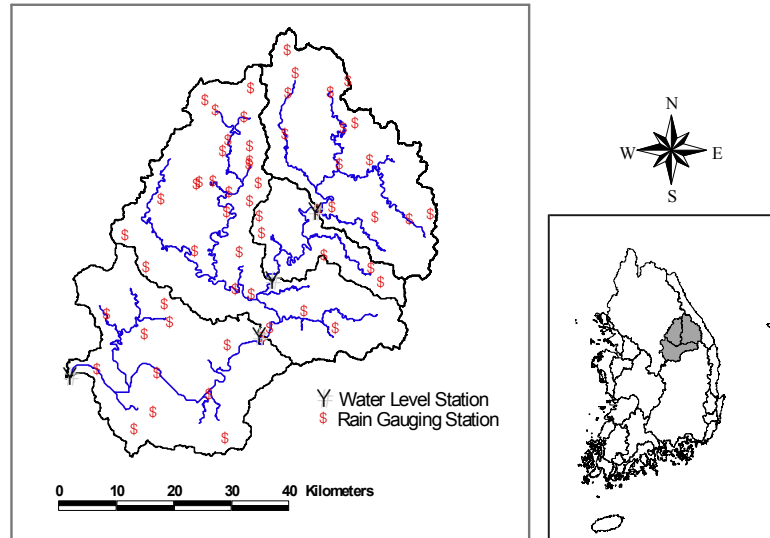


Fig. 1. Location of the Chungju Dam Basin and Gauge Networks of Rain and Water stage

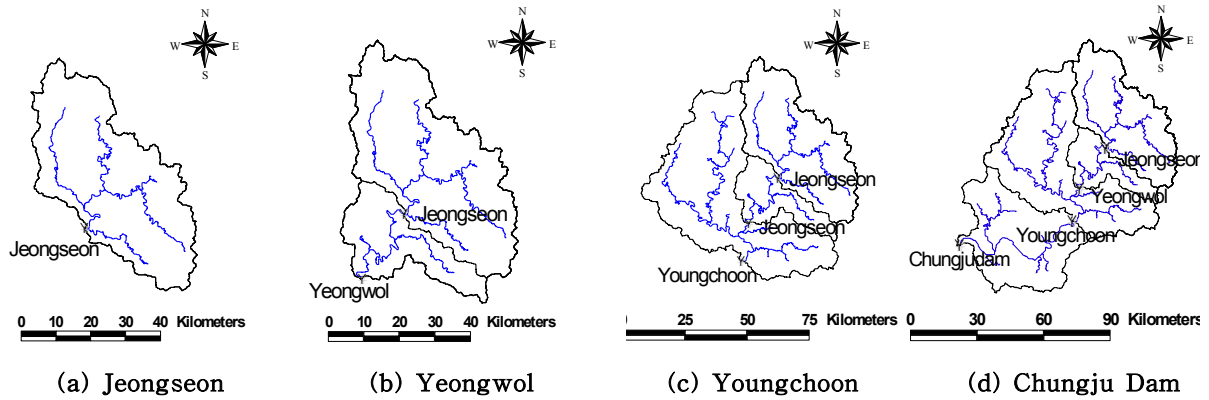


Fig. 2. Comparison of Four Basins Considered in This Study

Table 1. Characteristics of Four Basins Considered in This Study

Basin	Area (km ²)	Length of longest flow path (km)	Average basin slope	Average channel slope
Jeongseon	1688.53	102.53	0.011	0.0061
Yeongwol	2282.40	161.27	0.008	0.0058
Youngchoon	4823.93	189.53	0.011	0.0054
Chungju Dam	6698.74	277.67	0.005	0.0047

배이다. 충주댐 유역은 유역면적 6698.74km², 유로연장 277.67km로 정선유역 면적의 3.97배에 달한다. 기타 유역의 특성은 Table 1에 정리하였다.

4. 적용 결과

본 연구에서는 충격응답함수를 하나에서 3개까지 유도

해 보며 그 특성을 파악하였다. 먼저, 각 지점별로 하나의 충격응답함수를 유도하는 경우는 기존의 단위도 유도과정과 동일하다. 그 결과는 Fig. 3과 같다. 정선, 영월, 영춘, 충주댐 유역 순으로 유역면적이 증가함에 따라 충격응답의 크기 자체도 동일한 순서로 점점 증가함을 확인할 수 있다. 전체적으로 유도된 충격응답함수는 모두 비슷한 패턴을 보이나 유역면적이 커질수록 지속기간이 길어지는

경향이 있다. 처음 2일까지 모든 충격응답함수가 증가하고, 이후에는 그 크기가 급속히 감소하여 6일까지 일정하게 유지되고, 6일 이후에는 다시 감소하여 종료되는 형태를 보인다.

본 연구에서는 총유량 및 총유출을 분석하므로, 그 결과는 유효유량 및 직접유출을 분석하는 경우와 다르다는 점에 유의할 필요가 있다. 유도된 충격응답함수는 직접유출, 중간유출, 기저유출의 특성이 모두 나타나게 되는 것

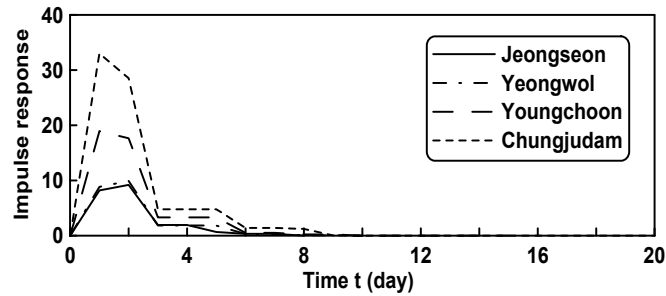
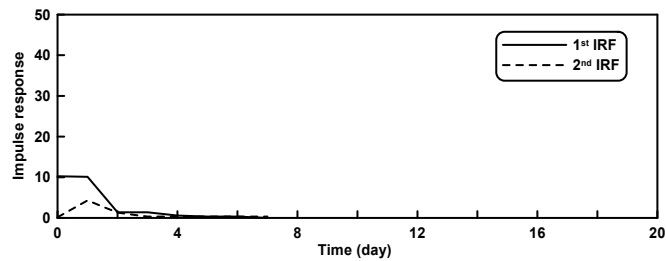
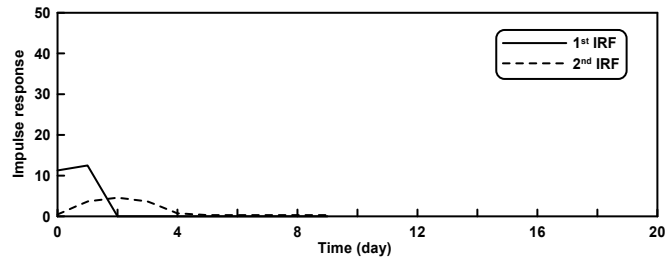


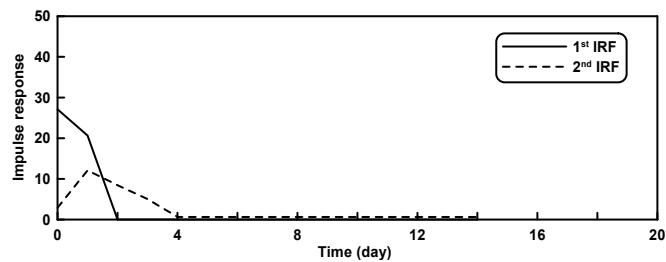
Fig. 3. Comparison of Impulse Response Functions Derived for Four Study Basins Considered in This Study



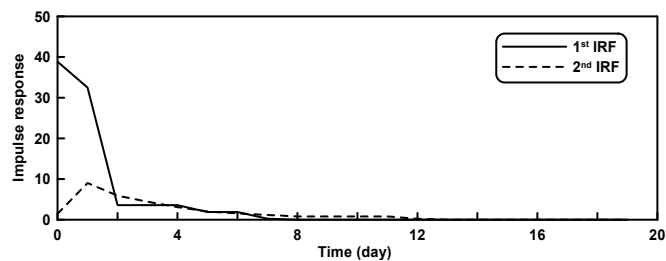
(a) Jeongseon



(b) Yeongwol



(c) Youngchoon



(d) Chungju Dam

Fig. 4. Two Impulse Response Functions Derived for Each Study Basin Considered in This Study

이다. 그러나 유도된 충격응답함수가 상대적으로 일찍 종료되는 형태를 보이고 있어, 기저유량의 특성이 반영되었다고 보기는 어렵다. 충격응답함수를 여러 개 유도하는 경우에서 자세히 살펴볼 예정이나, 이 경우에서처럼 하나의 충격응답함수를 유도한 경우에는 직접유출 및 중간유출의 특성을 구분해서 판단하는 것이 매우 주관적이 될 수밖에 없다. 따라서 이 경우에 있어서는 일반적으로 알려진 유출특성이외의 특별한 사항을 발견하는 것은 쉽지 않다.

위의 경우와 동일한 자료에 대해 두 개의 충격응답함수를 유도한 결과는 Fig. 4와 같다. 4개의 대상유역 모두 첫 번째 충격응답함수는 1일 이내에 침투값이 발생하고 아울러 대부분 2일 이내에 종료되는 형태를 보이고 있다. 반면에 두 번째 충격응답함수의 경우에는 첫 번째 충격응답함수보다 1일 정도 늦게 침투값이 발생하고, 아울러 그 크기도 작으며, 비교적 길게 지속되는 경향을 보인다. 또한 첫 번째 충격응답함수는 유역 면적과 상관없이 대부분 2일 이내에 종료되나 두 번째 충격응답함수는 유역면적이 클수록 오래 지속되는 특성을 보인다. 전체적으로 보면, 유역면적이 증가함에 따라 첫 번째 충격응답함수는 침투값

이, 두 번째 충격응답함수는 지속기간이 길게 나타남을 확인할 수 있다.

충격응답함수를 두 개 유도한 경우에도 유출특성을 명확히 설명하기란 쉽지 않다. 충격응답함수를 하나 유도한 경우에서처럼, 기저유출의 특성은 명확히 나타나지는 않는다. 특이한 것은 매우 빠른 응답이 하나이고, 또 다른 하나는 약간 지체된 응답이라는 점이다. 관측유출과의 비교를 통해 분석한 결과, 선행강우가 있는 상대적으로 높은 강우강도의 호우사상은 첫 번째의 빠른 충격응답함수가 유출을 모의하고, 반대로 강우강도가 작은 호우사상의 경우는 두 번째의 충격응답함수가 유출을 모의하는 것으로 나타났다 (Fig. 5). 즉, 유도된 두개의 충격응답함수는 직접유출 및 중간유출을 구분하기 보다는 강우 및 선행강우의 특성에 따른 유출의 비선형성을 설명하고 있는 것으로 보인다.

마지막으로, 세 개의 충격응답함수를 유도한 결과는 Fig. 6과 같다. 두 개의 충격응답함수를 유도한 경우와 마찬가지로 유역 면적이 증가함에 따라 첫 번째 충격응답함수는 침투값이 증가하고 있다. 두 번째 충격응답함수도 두 개의 충격응답함수를 유도한 경우에서와 유사한 특성

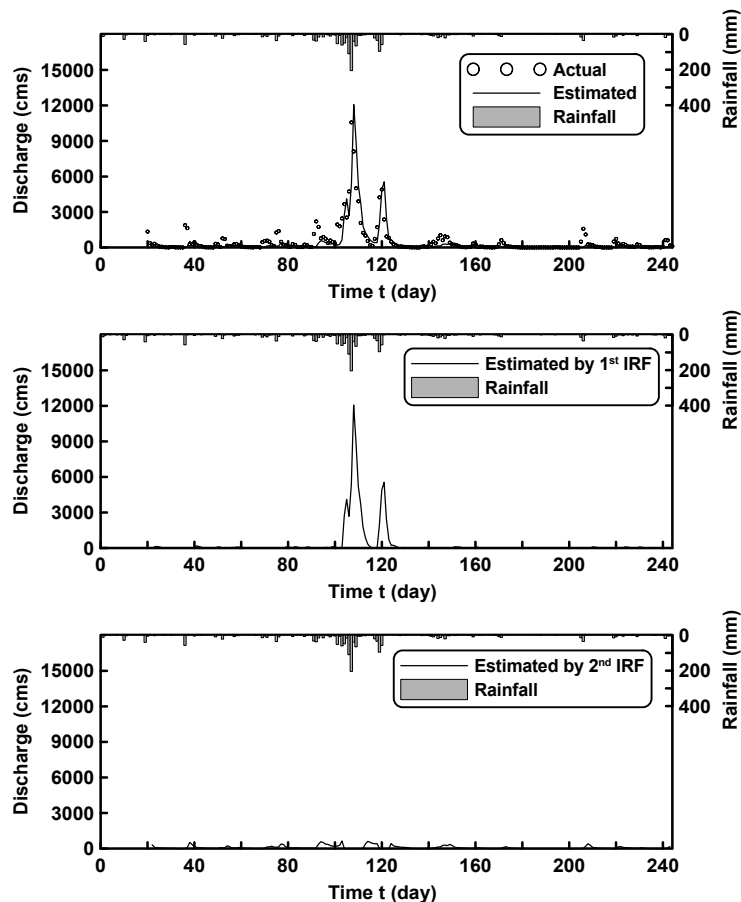
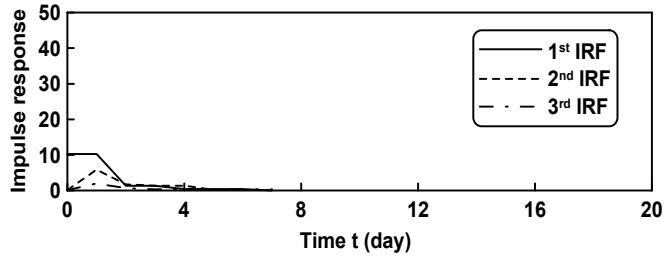
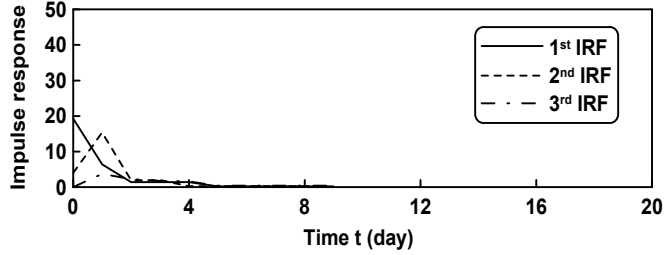


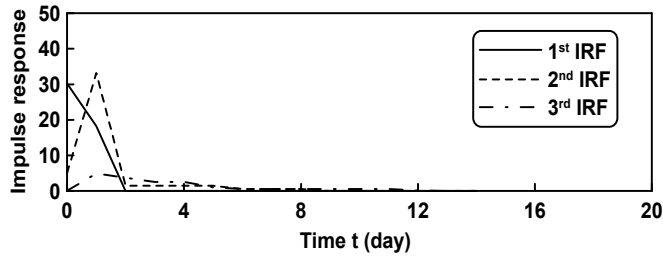
Fig. 5. Comparison of Observed and Simulated Runoffs (Top) Along with Two Separate Runoff Simulates with First and Second Impulse Response Functions (Bottom two) for the Chungju Dam Basin



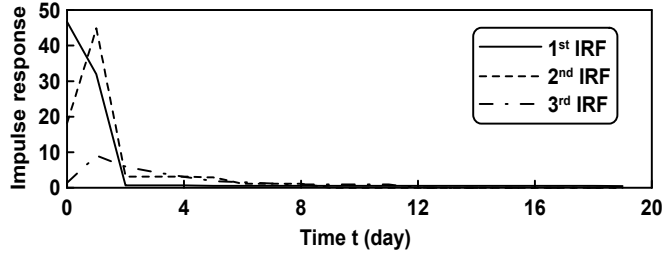
(a) Jeongseon



(b) Yeongwol



(c) Youngchoon



(d) Chungju Dam

Fig. 6. Three Impulse Responses Derived for Each Basin Considered in This Study

을 보인다. 즉, 첫 번째 충격응답함수에 비해 첨두값의 크기가 약간 작고 첨두시간은 1일 늦으며, 전체적인 지속시간은 약간 길게 나타나는 것이다. 그러나 세 번째 충격응답함수는 첫 번째 및 두 번째의 충격응답함수와는 완전히 다른 모습을 보이고 있다. 즉, 첨두가 상당히 작고 아울러 지속시간이 확연히 증가한 형태를 보이고 있다. 관측유출의 모의결과를 가지고 살펴본 결과 세 번째 충격응답함수는 선행강우도 적고 강우강도 자체도 적은 경우의 대부분을 모의하는 것으로 확인되었다.

이러한 특성은 Fig. 7을 통해 잘 살펴볼 수 있다. 이 그림은 충주댐 지점에 대해 충격응답 3개를 유도한 경우이다. 첫 번째 그림은 관측유량과 모의유량을 비교한 것이

며, 나머지 3개의 그림은 각 충격응답이 유출모의에 어떻게 기여하고 있는지를 보여주는 그림이다. 즉, 첫 번째와 두 번째의 충격응답함수가 상대적으로 큰 호우사상의 유출모의에 관여하고 있다면, 세 번째 충격응답함수는 주로 유출에 크게 기여하지 못하는 호우사상의 유출모의를 담당하고 있는 것이다. 이런 특성으로 살펴볼 때, 첫 번째 충격응답함수는 직접유출을, 두 번째 충격응답함수는 직접유출 및 중간유출을, 세 번째 충격응답함수는 중간유출 및 기저유출을 설명하고 있는 것으로 보인다.

3개의 충격응답함수로 모의되는 유출이 전체 유출에서 차지하는 비중을 정리하면 Table 2와 같다. 이 표에서 살펴볼 수 있는 것처럼, 최상류에 위치한 정선 유역과 다른

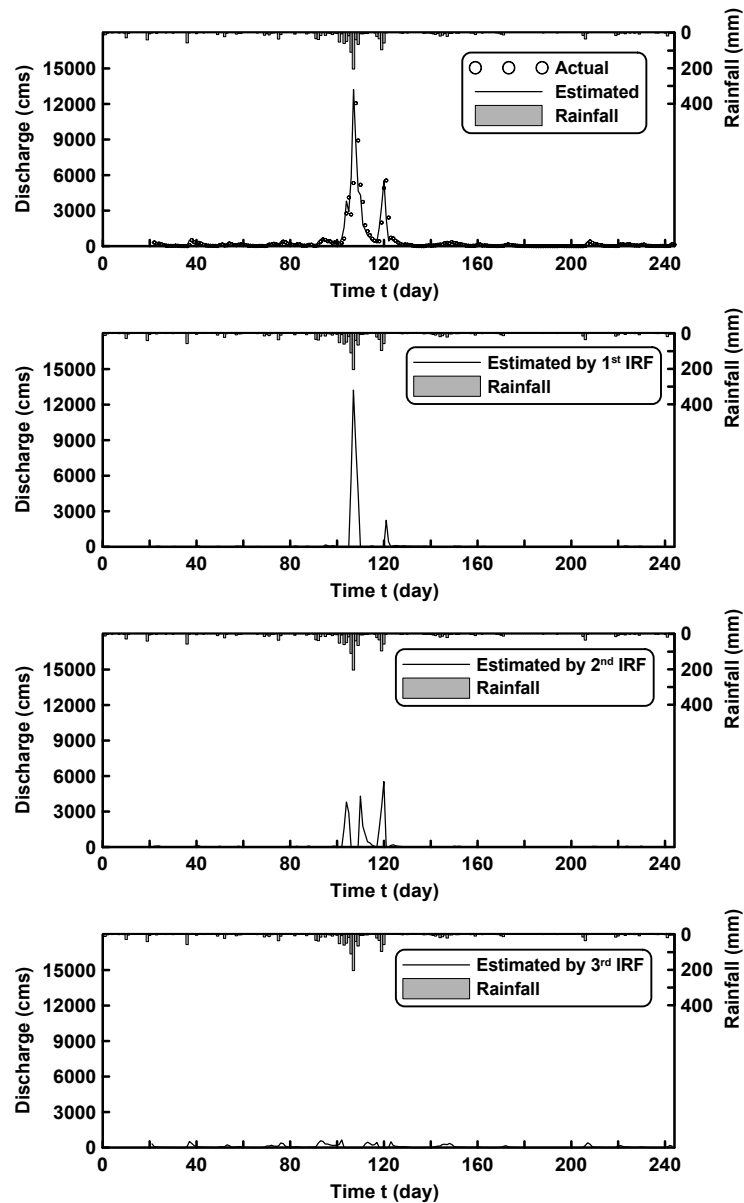


Fig 7. Comparison of Observed and Simulated Runoffs (Top) Along with Three Separate Runoff Simulates with First, Second and Third Impulse Responses (Bottom three) for the Chungju Dam Basin

Table 2. Comparison of Relative Contributions to Total Runoff of First, Second and Third Impulse Response Functions

Basin	Total Runoff Observed (1011 m ³)	Total Runoff Simulated (1011 m ³)	Runoff Volume (1011 m ³) by Each Impulse Response Function		
			First	Second	Third
Jeongseon	5.77440	5.79279	3.84858 (66.44%)	1.15385 (19.92%)	0.79036 (13.64%)
Youngwol	5.63143	5.65824	2.15894 (38.16%)	1.93720 (34.24%)	1.56210 (27.61%)
Youngchoon	11.2712	11.0218	4.30123 (39.02%)	4.20405 (38.14%)	2.51652 (22.83%)
Chungju Dam	16.7361	16.8114	7.47116 (44.44%)	5.97021 (35.51%)	3.36998 (20.05%)

세 유역은 그 유출특성이 매우 다른 것으로 나타난다. 즉, 정선유역의 경우에는 직접유출이 차지하는 비중이 상당히 크고, 반대로 나머지 세 유역의 경우에는 중간유출 또는 기저유출이 차지하는 비중이 큰 것으로 나타난다. 특히, 정선유역의 경우, 첫 번째 충격응답이 차지하는 비중이 매우 커서 호우 시 아주 빠른 직접유출이 발생시키고 있는 것으로 나타난다. 반대로 두 번째나 세 번째의 충격응답함수가 차지하는 비중은 매우 작아서 중간유출이나 기저유출의 정도가 상대적으로 작은 것으로 나타난다. 이러한 특성은 나머지 세 유역과는 크게 다른 점이다. 나머지 세 유역의 경우, 첫 번째 및 두 번째 충격응답함수의 비중이 유사하고, 또한 세 번째 유출응답함수의 비중도 20% 이상을 나타내고 있어, 직접유출, 중간유출 및 기저유출의 역할이 모두 중요하게 나타나고 있는 것으로 파악된다.

5. 결 론

본 연구에서는 복수의 경쟁 선형 충격응답을 이용하여 유역의 유출특성을 분석하였다. 먼저 충주댐 유역을 4개의 대상유역으로 분할하고 각 대상유역 별로 1, 2, 3개의 선형 충격응답을 유도하여 유출특성을 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저, 하나의 선형 충격응답의 경우 4개 대상유역이 모두 동일한 패턴의 충격응답 형상을 보이며, 유역면적이 증가함에 따라 충격응답의 크기가 증가한다. 두 개의 선형 충격응답의 경우, 유역면적이 증가함에 따라 첫 번째 선형 충격응답은 침투없이 증가하고 두 번째 선형 충격응답은 지속시간이 길어지는 특징이 있다. 특히 첫 번째 충격응답은 매우 빠른 응답이고, 두 번째 충격응답은 약간 지체된 응답인데, 관측유출과의 비교를 통해 분석한 결과, 첫 번째 충격응답은 강우강도가 높은 호우사상의 유출을 모의하고 두 번째 충격응답은 강우강도가 작은 호우사상의 유출을 모의하는 것으로 나타났다. 따라서 강우 및 선형강우의 특성에 따른 유출의 비선형성을 확인할 수 있었다. 세 개의 선형 충격응답의 경우, 세 번째 충격응답함수가 그 크기가 매우 작고, 상당히 긴 지속시간을 가지는 것으로 나타났다. 유출모의결과와 비교해 볼 때 세 번째 충격응답함수는 선형강우와 강우강도가 적은 대부분의 경우를 모의하는 것으로 확인되었다. 따라서 첫 번째 충격응답함수는 직접유출을, 두 번째 충격응답함수는 직접유출 및 중간유출을, 세 번째 충격응답함수는 중간유출 및 기저유출을 설명하고 있는 것으로 보인다.

이상과 같은 결과를 정리하면, 유역면적이 가장 작은 정선유역의 경우, 첫 번째 충격응답이 차지하는 비율이

두 번째 세 번째 충격응답이 차지하는 비율이 비해 월등히 크기 때문에 호우 시 아주 빠른 직접유출이 발생하는 것을 알 수 있고, 나머지 유역들은 첫 번째와 두 번째 충격응답의 비율이 비슷하고, 세 번째 유출응답의 비율도 20%이상으로 직접유출, 중간유출, 기저유출의 역할이 모두 중요하게 나타나고 있는 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2008-313-D01083)과 한국수자원공사의 물산업 핵심분야 연구개발비 지원사업(No. KIWE2008-0003)의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강부식, 문수진 (2009). "Eckhart filter를 이용한 복합수문곡선에서의 기저유출분리." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1292-1295.
- 강주복, 정연태, 강인식, 김태희 (1995). "소유역에 대한 제 유출해석 모형의 비교에 관한 연구." **부산대학교 생산기술연구소논문집**, 부산대학교, 제48집, pp. 1-12.
- 김경수, 조기태 (2000). "대청댐유역의 기저유출분리를 통한 기저유량 산정에 관한 연구." **지하수환경**, 한국지하수토양환경학회, 제7권, 제1호, pp.15-19.
- 신현식, 박무중, 최종남 (1998). "신경망을 이용한 비선형 강우 및 홍수 유출 실시간 예측 모형." **대학토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제2호, pp. 185-188.
- 윤용남 (1998). **공업수문학**. 청문각, pp. 258-262.
- 이봉기 (2008). 인공신경망을 이용한 유역단위 기후변화상세시나리오 추정, 석사학위논문, 단국대학교, pp. 4-7.
- 이황기 (2004). 수문곡선분리기법과 물리기반 유출모형을 이용한 지하수 함양량 추정, 충남대학교, pp. 35-43.
- 정진영 (2007). 기저유출분리와 Nash순간단위도 모형을 이용한 연속유출모의, 석사학위논문, 단국대학교
- 조용수, 전민우, 김훈 (2005). "유역형상에 의한 이동강우의 유출분석." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 649-653.
- 최한규, 백경원, 최용목 (1999). "유역특성을 고려한 적정 강우-유출모형의 제시에 관한 연구." **강원대학교 산업기술연구소논문집**, 강원대학교, 제19집, pp. 379-390.
- 허성철, 박상식, 이종태 (2008). "유역형상을 고려한 도시단위 소유역의 유출 해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 491-501.

- Ashu, J., and Sanaga, S. (2006). "Integrated approach to model decomposed flow hydrograph using artificial neural network and conceptual techniques." *Journal of Hydrology*, Vol. 317, No. 3-4, pp. 291-306.
- Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M. (2000). "Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi river basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 227, No. 1-4, pp. 21-40.
- Boughton, W.C., and Freebairn, D.M. (1985). "Hydrograph recession characteristics of some small agricultural catchments." *Australian Journal of Soil Research*, CSIRO, Vol. 23, No. 3, pp. 373-382.
- Chang, M.W., Lin, C.J., and Weng, R.C. (2004). Analysis of switching dynamics with competing support vector machines, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 15, pp. 720-727.
- Coleman, T.F., Branch, M.A., and Grace, A. (1999). *Optimization Toolbox for Use with MATLAB, User's Guide, Version 2*, Math Works Inc..
- Gwofong, L., and Luhsien, C. (2004). "A non-linear rainfall-runoff model using radial basis function network." *Journal of Hydrology*, Vol. 289, No. 1-4, pp. 1-8.
- Kachroo, R.K., and Natele, L. (1992). "Non-linear modeling of the rainfall-runoff transformation." *Journal of Hydrology*, Vol. 135, No. 1-4, pp. 341-369.
- Menzel, L., and Bürger, G. (2002). "Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany)." *Journal of Hydrology*, Vol. 267, No. 1-2, pp. 53-64.
- Moon, T.K., and Stirling, W.C. (2000). *Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Ninghu, S. (1995). "The unit hydrograph model for hydrograph separation." *Environment International*, Vol. 21, No. 5, pp. 509-515.
- Ogden, F.L., Richardson, J.R., and Julien, P.Y. (1995). "Similarity in catchment response to moving rainstorms." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 6, pp. 1543-1547.
- Reed, D.W., Johnson, P., and Firth, J.M. (1975). "A non-linear rainfall-runoff model, providing for variable lag time." *Journal of Hydrology*, Vol. 25, No. 3, pp. 295-305.
- Roger, N.J., Francis, H.S.C., Walter, C.B., and Lu, Z. (2005). "Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models." *Advances in Water Resources*, Vol. 29, No. 10, pp. 1419-1429.
- Sajikumar, N., and Thandaveswara, B.S. (1999). "A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network." *Journal of Hydrology*, Vol. 216, No. 1, pp. 32-55.
- Steven, R.H., Kenneth, J.E., Chermak, Donald, D.R., David, C.K., and Larry, E.H. (2003). "Estimating ground water discharge by hydrograph separation." *Ground Water*, Vol. 41, No. 3, pp. 368-375.
- Tabios, G.O., Obyesekera, J.T.B., and Shen, H.S. (1988). *The influence of storm movement on streamflow hydrograph through space-time rainfall generation and hydraulic routing*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Vivek, K.A. (2002). "The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff." *Journal of Hydrology*, Vol. 265, No. 1-4, pp. 164-177.
- Yoo, C.H., and Park, J.Y. (2008). "Rainfall-runoff analysis based on competing linear impulse response: decomposition of rainfall-runoff processes." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 5, pp. 660-669.

논문번호: 09-122	접수: 2009.10.26
수정일자: 2010.02.08/04.28	심사완료: 2010.04.28