

거대강우 시나리오를 이용한 거대홍수량 산정

한대건·김덕환*·김정욱[†]·정재원·이종소**·김형수

인하대학교 토목공학과

*한국건설기술연구원 국토보전연구본부

**국토연구원 도시연구본부

Estimation of Mega Flood Using Mega Rainfall Scenario

Daegun Han·Deokhwan Kim*·Jungwook Kim[†]·JeaWon Jung·Jongso Lee**·Hung Soo Kim

Department of Civil Engineering, Inha university, Korea

*Department of land, Water and Environment Research Korea institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT)

**Korea Research Institute for Human Settlements

(Received : 11 October 2019, Revised: 01 December 2019, Accepted: 01 December 2019)

요약

최근 연속적인 호우사상으로 인해 홍수가 발생하고 있으며, 이로 인한 재산 및 인명피해가 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 연속적인 호우사상 발생 사례를 바탕으로 거대강우 시나리오와 거대홍수량을 정의하였다. 경안천 유역의 100년 빈도 확률강우사상이 연속적으로 발생한다는 가정하에 거대강우 시나리오를 생성하였으며, 거대홍수량을 산정하기 위하여 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)모형을 이용하였다. 또한, 보다 합리적인 유출해석을 수행하기 위하여 SCE-UA기법을 통해 매개변수를 추정하고, SSR(Sum of Squared of Residual)과 침투유량 모의에 유리한 WSSR(Weighted Sum of Squared of Residual)의 목적함수를 이용하여 모형의 보정 및 검증을 수행하였다. 이를 통해 적합성 검토를 수행하였다. 그 결과, 경안천 유역의 100년 빈도 강우사상의 연속발생으로 인한 거대홍수량은 4,802m³/s로 산정되었고, 경안천하천정비기본계획(2011)에서 산정한 100년 빈도 단일 강우사상에 의한 홍수량은 3,810m³/s로 산정되었다. 따라서 거대홍수량이 단일 호우사상에 의한 홍수량 보다 약 992m³/s 만큼 증가하는 것으로 확인되었으며, 이는 향후 거대홍수를 고려할 경우, 경안천 유역의 치수방어대책 수립시 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 거대강우 시나리오, 거대홍수, SSARR, SCE-UA, WSSR

Abstract

In recent years, flood due to the consecutive storm events have been occurred and property damage and casualties are in increasing trend. This study calls the consecutively occurred storm events as a mega rainfall scenario and the discharge by the scenario is defined as a mega flood discharge. A mega rainfall scenario was created on the assumption that 100-year frequency rainfall events were consecutively occurred in the Gyeongancheon stream basin. The SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) model was used to estimate the mega flood discharge using the scenario in the basin. In addition, in order to perform more reasonable runoff analysis, the parameters were estimated using the SCE-UA algorithm. Also, the calibration and verification were performed using the objective functions of the weighted sum of squared of residual(WSSR), which is advantageous for the peak discharge simulation and sum of squared of residual(SSR). As a result, the mega flood discharge due to the continuous occurrence of 100-year frequency rainfall events in the Gyeongan Stream Basin was estimated to be 4,802m³/s, and the flood discharge due to the 100-year frequency single rainfall event estimated by "the Master Plan for the Gyeongancheon Stream Improvement" (2011) was 3,810m³/s. Therefore, the mega flood discharge was found to increase about 992m³/s more than the single flood event. The results of this study can be used as a basic data for Comprehensive Flood Control Plan of the Gyeongan Stream basin.

Key words : Meteorological drought, Agricultural drought, Reservoir water storage rate, ROC analysis

[†] To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Inha university, Korea

E-mail: love10406@nate.com

- Han, Dae Gun Department of Civil Engineering, Inha university, Korea / Ph.D. candidate (eorjs0615@naver.com)
- Kim, Deok Hwan Korea institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT) / Research fellow (kimdeokhwan@kict.re.kr)
- Kim, Jung Wook Department of land, Water and Environment Research / Research fellow (love10406@nate.com)
- Jung, Jea Won Department of Civil Engineering, Inha university, Korea / Ph.D. candidate (jungjw89@gmail.com)
- Lee, Jong So Korea Research Institute for Human Settlements / Research fellow (jslee@krihs.re.kr)
- Kim, Hung Soo Department of Civil Engineering, Inha university, Korea / Professor (sookim@inha.ac.kr)

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화에 따른 극한 강우사상의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 과거 관측 자료에서는 볼 수 없었던 규모의 연속적인 강우사상 또는 상대적으로 긴 지속기간의 강우사상으로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있다(Kim, 2018). 즉, 단기간에 거대 호우사상이 연속적으로 중첩되거나, 비교적 장기간의 지속시간을 갖는 호우사상에 의해 발생하는 거대홍수 피해가 증가하고 있다. 또한, 연속적인 태풍의 내습, 태풍과 집중호우의 연속 발생, 장마가 끝난 후 국지성 호우 발생 등의 연속적인 호우로 인해 발생하는 피해는 단일 호우사상으로 인한 일반적인 피해보다 더 큰 재산과 인명피해를 발생시킬 우려가 있다.

국내의 경우, 연속호우 발생으로 인명피해와 재산피해가 발생하였는데, 2008년 7월 제 7호 태풍 ‘갈매기’의 영향으로 약화된 지반에 집중호우까지 발생하면서 약 10명의 사망자와 463억 원의 재산피해가 발생하였다. 또한, 2012년 제 14호 태풍 ‘텐빈’, 제 15호 태풍 ‘볼라벤’, 제 16호 태풍 ‘산바’가 연속적으로 내습하여 막대한 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 국외의 경우, 연속적인 호우로 인한 피해 사례로는 2011년 4월과 6월에 걸쳐 미국 미시시피강에 한 달간 내린 폭우로 인하여 홍수가 발생하여 20여명의 인명피해와 40억 달러의 재산피해가 발생하였다. 또한, 중국은 2013년 제 23호 태풍 ‘피토’와 제 24호 태풍 ‘다나스’가 연속적으로 내습하였으며, 2014년 일본은 제 18호 태풍 ‘판폰’과 제 19호 태풍 ‘봉퐁’이 1주일 간격으로 내습하여 막대한 피해가 발생하였다.

본 연구에서는 연속적인 호우사상의 발생을 거대강우로 정의하였으며 이로 인해 발생하는 홍수를 거대홍수로 정의하였다. 거대홍수 발생은 한반도에만 국한된 문제가 아니며 전 세계적으로도 큰 피해를 야기하고 있다. 따라서 이러한 피해를 최소화하기 위해서 연속적인 호우사상에 대한 유출해석을 수행하여 이를 대비해야 할 필요가 있다. 연속적인 호우사상에 대한 유출해석을 위해서는 연속호우에 따른 합리적인 매개변수 추정을 통해 유출해석을 수행해야 한다. 효율적인 매개변수 추정을 위한 국외 연구사례로는 Mohan(1997)이 비선형 Muskingum 모형의 보정을 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수를 추정하였으며, Madsen(2002)는 SCE-UA 알고리즘을 이용하여 MIKE11과 NAM 모형에 다목적 보정 문제를 해결하였다. Victor and Alexander(2012)는 SSARR 모형의 매개변수 추정을 위한 방법론 Cascade 3 routing routine을 개발하여 Columbia 강의 유출량을 분석하고 홍수 추적을 실시하였다. 또한 Kim et al. (2018)은 SSARR 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 유전자 알고리즘, 패턴 탐색, SCE-UA의 보정방법을 적용하고, 목적함수로 SSR과 WSSR을 이용하여 목적함수에 따른 적응성을 평가하였다. 이외에도 다양한 연구에서 강우-유출 모형의 보정을 위해 유전자 알고리즘, SCE-UA 등 다양한 최적화 알고리즘을 통해 매개변수를 추정하였다(Yu et al., 2000; Cheng et al., 2002; Chen et al., 2006; Remegio et al., 2007; Zhang et al. 2015; Chen et al.

2016, Huo et al. 2017, Kouchi et al. 2017).

국내 매개변수 산정 연구를 살펴보면 Song et al. (2006)은 저류함수모형의 매개변수 보정을 위하여 임의탐색 법, Rosenbrock 법, 시뮬레이티드 어닐링법, 유전자 알고리즘의 보정방법을 이용하였다. Kwak et al. (2009)는 저류함수모형, TANK 모형, SSARR모형을 이용하여 강우-유출 모형에 최적화 방법을 적용하여 매개변수를 산정하였다. Chung et al. (2012)은 다양한 수문모형의 전역 최적해를 찾기 위해 SCE-UA 방법을 이용하여 저류함수모형의 매개변수를 최적화하고, 유출해석을 수행하였으며, Gang and Lee(2014)는 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 SWMM 모형 내 매개변수의 적절한 탐색범위를 설정하였으며, Lee et al. (2017)는 저류함수모형의 매개변수를 추정하기 위하여 자동기법으로 오프라인과 온라인의 매개변수 자동기법을 이용하였으며, 추정된 매개변수를 이용한 수문해석 결과를 비교·분석하여 각 기법의 장·단점을 도출하였다. 또한 Lee et al. (2017)은 SSARR 모형을 이용하여 미호천 유역에 대하여 홍수모의예측을 수행하였다. 이를 위해 유전자 알고리즘, 패턴탐색, SEC-UA등의 최적화 기법을 이용하였고, 목적함수로는 WSSR과 SSR을 적용하였다.

국내외 선행연구들을 살펴보면 유출해석을 위한 매개변수 추정시 모든 연구에서 단일호우사상에 대한 매개변수를 추정하여 유출해석을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 유출해석은 다양한 매개변수에 영향을 받기 때문에 단일호우사상을 통해 산정한 매개변수를 이용하여 연속적인 호우사상의 유출해석을 수행할 경우, 결과가 상이하게 도출될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연속적인 호우사상에 대한 매개변수를 추정하여 보다 합리적인 유출해석 결과를 도출하고자 하였다.

2. 거대강우 시나리오 및 거대홍수

2.1 거대강우 시나리오 및 거대홍수 정의

본 연구에서는 연속호우사상 발생에 의한 거대강우 시나리오를 과거 발생한 태풍, 극한강우, 집중호우, 확률강우량, 미래 확률강우량 등이 최소무강우기간 간격을 사이에 두고 가능최대강수량(PMP)를 넘지 않고, 연속적으로 발생하는 강우 시나리오로 정의하였다. 즉, 거대강우사상이란 확률론적으로는 발생될 가능성이 매우 적으나, 물리적으로는 발생될 수도 있는 연속적인 호우사상을 의미한다. 또한, 이러한 거대강우 시나리오로 인해 발생하는 유출량을 거대홍수 또는 거대홍수량으로 정의하였다.

2.2 거대강우 시나리오 생성 방법

연속적인 호우사상 발생으로 인한 거대강우 시나리오는 아래와 같이 크게 3가지 절차를 거쳐 생성하였다.

2.2.1 호우사상 선택

연속적인 호우사상 발생으로 인한 거대강우 시나리오를 생성하기 위해서는 태풍, 극한강우, 집중호우, 확률강우량 등 연

속적으로 발생시킬 호우사상에 대하여 선정해야한다. 본 연구에서는 해당구역의 확률강우량을 연속 발생시켜 거대강우 시나리오를 생성하고자 한다. 따라서 해당구역의 확률강우량을 산정하기 위해서 30년 이상의 시간 강우 자료가 있는 관측소를 선정하여 통계적 유의성을 확보하였다. 그 다음 관측소의 예비 해석, 분포형 적용, 매개변수 추정, 적합도 검정, 최적 분포형 선정 등을 통해 해당구역의 빈도별 지속시간별 확률강우량을 산정하였다.

2.2.2 최소무강우기간(Inter Event Time Definition, IETD) 산정

앞서 선택한 호우사상을 연속적으로 발생시키기 위해서는 최소무강우기간을 선정해야 한다. 강우 시계열 자료는 연속적인 형태로 존재한다. 따라서 연속적인 호우사상을 독립적인 호우사상으로 나누기 위한 방법으로 최소무강우기간을 산정하여 그 시간 내에 이벤트를 발생시켜 연속적인 강우 시나리오를 생성해야 한다. 강우기록을 독립 호우사상으로 분리하기 위하여 최소무강우기간을 정의하는 방법은 자기상관 분석(Autocorrelation analysis), 변동계수 분석(Coefficient of Variation), 연평균 강우 발생개수 분석(Average annual number of rainfall event analysis) 등이 있다. 본 연구에서는 변동계수 분석을 이용하여 최소무강우기간을 산정하였다. 변동계수 분석은 Fig. 1과 같이 무강우시간들의 평균과 표준편차가 같아지는 시점, 즉 변동계수가 1이 되는 시점을 IETD로 정의한다. 변동계수 분석에 경우, 강우시계열 자료의 무강우시간들이 지수 분포를 따른다는 가정을 가진다(Adams and Papa, 2000). 강우시계열의 무강우시간들의 확률밀도는 Exponential 분포와 Gamma 분포를 잘 따른다. Gamma 분포의 경우 변수들의 계산이 복잡하여 분포형을 결정하기 힘든 반면 Exponential 분포의 경우 그 변수들의 경정이 쉽기 때문에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서도 각각의 강우 사상들의 강우사상의 특성을 분석하기 위해 변동계수 분석 방법을 사용하였다(식 1).

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \tag{1}$$

여기서, S 는 표준편차이고, \bar{x} 는 평균이다.

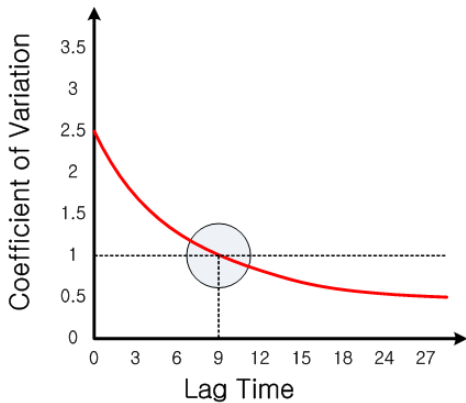


Fig. 1. Coefficient of Variation method(Kim, 2018)

2.2.3 가능최대강수량과의 비교

가능최대강수량이란 특정시간, 특정장소에서 물리적으로 발생할 수 있는 가능한 최대의 강수량이므로, 거대강우가 가능최대강수량 보다 작은 양의 값을 가지도록 생성하여야한다. 따라서 생성한 거대강우 시나리오와 통계적 기법으로 추정된 가능최대강수량과 비교를 통해 거대강우 시나리오의 현실성을 확인해야한다.

3. 거대홍수량 산정 방법

3.1 거대홍수량 산정 모형

앞서 정의한 거대강우 시나리오에 대한 홍수량을 산정하기 위하여 SSARR 모형을 이용하였다. SSARR 모형에서 유역추적모형과 하도추적 수문모형의 기본적인 추적 방법은 Nash 모형과 유사한 Cascade of Reservoir 방법으로서, 홍수파가 연속적인 일련의 저수지를 통과하면서 평행이동과 지체효과를 갖게 되는 방법이다. SSARR 모형의 기본 추정방정식은 유역이나 하도 혹은 저수지를 통한 홍수류의 연속방정식인 저류방정식이 사용된다. 이는 각각 식 (2)~(3)와 같으며, 식 (2)에서 저류량과 유출량은 식 (3)과 같이 선형이라고 가정한다.

$$I_t = Q_t + \frac{dS_t}{dt} \tag{2}$$

$$S_t = T_s Q_t \tag{3}$$

여기서 I_t 는 각각의 임의 시간 t 에서 유입량, Q_t 는 각각의 임의 시간 t 에서의 유출량이며, S_t 는 저류량, T_s 는 저류상수이다. 또한, 식 (2)는 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (3)을 식 (4)에 대입하면 식 (5)와 같은 추적식을 얻게 된다.

$$[(I_1 + I_2)/2 - (Q_1 + Q_2)/2] \Delta t = S_1 - S_2 \tag{4}$$

$$O_2 = O_1 + \Delta t(I_m - O_1)/(T_s + \Delta t/2) \tag{5}$$

여기서 아래첨자 1, 2는 각각 계산 시작점과 종점을 나타낸다. I_m 은 Δt 동안 평균유입량이며, Δt 는 계산시간 간격이다. 식 (4)에서 계산된 계산종점의 유출량 O_2 를 다음 추적기간의 시작점 유입량으로 하고 계산과정을 반복하여 유출량을 계산한다.

3.2 매개변수 추정 방법

SSARR 모형의 유출은 지표면 유출, 지표하 유출, 지하수 유출, 회귀지하수 유출로 구분되고, 각각 유출 성분은 여러 개의 가상적인 선형 저수지로 구성되어 있다고 가정하여 저수지 추적을 실시하여 유출량을 계산한다.

앞서 언급한 바와 같이 매개변수에 영향으로 인해 상이한 유출해석 결과가 도출될 수 있다. 따라서, 최적의 매개변수를 값을 산정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 매개변수 추정을 위하여 전역 최적화 기법 중 하나인 SCE-UA(SCE-UA(Shuffled

Complex Evolution-University of Arizona)기법을 적용하여 매개변수를 추정하였다.

SEC-UA기법은 GA(Genetic Alogrithm), Simplex법, CRS (Controlled Random Search)방법, 경쟁적 진화(Competitive Evolution) 등과 같은 기존 탐색기법의 장점에 집합체의 혼합 (Complex Shuffling)이라는 새로운 개념을 도입한 혼합형의 최적화 기법이다. SCE-UA법은 자연진화의 과정에 최적해 탐색과정을 도입한 것으로, s개의 선정된 점을 하나의 모집단 (Population)으로 구성하며, 이 모집단은 몇 개의 집합체로 나누어지고, 이들은 독립적으로 서로 다른 방향으로 탐색공간을 찾아서 진화하게 된다. 진화한 몇 세대 후, 이들 집합체들은 혼합되어 재분할 과정을 거쳐 재형성된다. 이 과정 통하여 각각의 집합체에서 독립적으로 얻은 탐색공간에 대한 정보를 공유함으로써 부모세대의 생존가능성을 높이게 된다. 진화과정의 경쟁성을 보장하기 위하여 양호한 부모세대가 불량한 부모세대 보다 자손세대의 생성에 기여할 확률을 높이기 위해서 삼각형 확률분포를 이용한다. 삼각형확률분포는 식 (6)~(8)과 같이 단 세 가지의 값, 즉 최소값, 최빈값, 최대값만 가지고 있으면 그려낼 수 있는 분포이다.

$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(b-c)(c-a)}, \quad \text{if } a \leq x \leq b \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{2(c-x)}{(c-a)(c-b)}, \quad \text{if } b \leq x \leq c \quad (7)$$

$$f(c) = 0, \quad \text{otherwise} \quad (8)$$

여기서 a는 최소값, b는 최빈값, c는 최대값을 의미한다.

특히, SEC-UA 기법은 광범위한 범위에서 전체 최적 해를 탐색할 수 있으며, 수렴조건이 주어지면 전체 최적해를 찾을 확률을 높이게 된다. 즉, SSARR모형의 보정시 SCE-UA를 통해 자동보정을 수행한다면 모형의 최적 매개변수를 산정하여 보다 정확한 거대홍수량을 모의할 수 있다.

3.3 목적함수

모형의 자동보정에 있어 목적함수는 모형거동의 측정치 역할을 하며, 그 값은 참 값에 대한 추정 값의 근접정도를 나타낸다. 하지만 목적함수에 따라 매개변수가 다르게 추정되기 때문에 특정한 목적함수가 다른 목적함수 보다 적합하다고 명확하게 주장할 수 없다. 따라서 모형의 매개변수 자동보정을 위해서는 적절한 목적함수의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 목적함수로 실측유량과 모의유량의 편차 제곱의 합인 SSR과 Song (2006)에 의해 제안된 WSSR을 적용하여 이에 대한 적합성 평가를 수행한 뒤 매개변수 자동보정을 위한 최적의 목적함수를 선정하였다.

SSR은 실측유량과 모의유량의 편차 제곱의 합을 사용하였으며, SSR의 목적함수는 식 (9)와 같다. WSSR은 SSR에 첨두값과 첨두값 발생시간에 대한 가중치를 부여한 목적함수로서 식 (10)과 같으며, 식 (11)과 같이 첨두유량의 상대오차를 가

중치로 적용하여 첨두유량의 과소 및 과대 추정을 방지하였다. 또한, 식 (12)와 같이 첨두유량 발생시간의 오차백분율을 가중치로 적용하여 수문곡선의 지체시간에 대한 오차를 줄였다. 즉, WSSR은 SSR보다 첨두유량 및 이상자료에 대한 영향을 개선한 목적함수이다.

$$Min \sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_s(i)]^2 \quad (9)$$

여기서 n은 자료의 수, Q_o 는 관측유량, Q_s 는 모의유량을 각각 나타낸다. 수문모형의 매개변수 최적화시 목적함수로 가장 보편적으로 사용하는 지표이며, 값이 0에 가까울수록 모형의 효율이 높다.

$$F = \left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i))^2 \right] \times W_1 \times W_2 \quad (10)$$

$$W_1 = 1 + \frac{|Q_{op} - Q_{sp}|}{Q_{op}} \quad (11)$$

$$W_2 = 1 + \frac{|T_{op} - T_{sp}|}{T_{op}} \quad (12)$$

여기서 i는 관측자료의 개수, Q_o 는 관측유량, Q_s 는 모의유량, Q_{op} 는 관측첨두유량, Q_{sp} 는 모의 첨두유량, T_{op} 는 관측첨두유량 발생시간, T_{sp} 는 모의첨두유량 발생시간이다.

3.4 목적함수의 적합성 평가

모형의 매개변수 자동보정을 위해서는 목적함수의 적합성 평가를 통해 적절한 목적함수의 선정이 필요하다. 이는 특정 목적함수가 다른 목적함수보다 적합하다고 명확하게 주장할 수 있는 근거가 될 수 있다. 본 연구에서는 아래 3가지 방법 식 (13)~(15)를 사용하여 두 가지 목적함수인 SSR과 WSSR에 의해 산정된 모의유량을 실제유량과의 차이를 비교·분석하여 가장 적합한 목적함수를 선정하였다.

(1) NRMSE(Non-dimensional Root Mean Square Error)

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_{obs}(i) - Q_{sim}(i)]^2}}{Q_{op}} \quad (13)$$

여기서 n은 자료수, Q_{obs} 는 관측유량, Q_{sim} 는 모의유량, Q_{op} 는 관측첨두유량이다. NRMSE의 경우 0에 가까운 값을 가지는 경우 모의효율이 우수하다고 할 수 있다.

(2) RE(Relative Error of Peak)

$$RE = \frac{Q_{sp} - Q_{op}}{Q_{op}} \quad (14)$$

여기서 RE는 첨두유량의 상대오차, Q_{op} 는 관측첨두유량, Q_{sp} 는 모의첨두유량이다. RE의 경우에도 0에 가까운 값을 가지는 경우 모의효율이 우수하다고 할 수 있다.

(3) R^2 (Coefficient of Determination)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{oa})(Q_{sim}(i) - Q_{sa})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{oa})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - Q_{sa})^2}} \right]^2 \quad (15)$$

여기서 $Q_{obs}(i)$ 는 시간 i 에서의 관측유량, $Q_{sim}(i)$ 는 i 에 대한 모의유량, n 은 관측 자료의 개수, Q_{oa} 및 Q_{sa} 는 각각 n 개 자료에 대한 관측유량 및 모의유량의 평균이다. R^2 의 값은 0~1의 범위를 가지며, 1에 가까운 값을 가지는 경우 모의효율이 우수하다고 할 수 있다.

4. 거대강우 시나리오에 따른 거대홍수량 산정

4.1 대상유역

본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 분석을 수행하였다(Fig. 2). 경안천은 광주시가지 구간을 중심으로 고수부지, 친수공간 및 생태습지 등이 집중적으로 개발되어 지역 주민들의 하천 활용도가 증가하고 있으므로 침수피해시 인명피해가 발생할 것으로 우려된다. 또한, 과거 2011년도에 초월읍, 지월리를 비롯한 7개 마을에 침수가 발생하여 760명이 고립되고 4명이 사망하였으며, 2018년 5월 16일 기습적인 폭우로 인하여 한명이 사망하는 등 홍수에 취약한 것으로 판단된다. 만약 경안천 유역에 거대강우가 발생한다면 막대한 재산피해 및 인명피해가 발생할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 거대강우 시나리오를 생성하고, 거대홍수량을 산정하였다.

4.2 거대강우 시나리오 생산

IETD를 이용한 거대강우 시나리오를 생산하기 위해서는 먼저 해당 유역의 기상관측소별 무강우 기간을 산정해야 한다. 따라서, 경안천유역의 기상관측소인 서울 기상관측소, 이천 기상관측소,

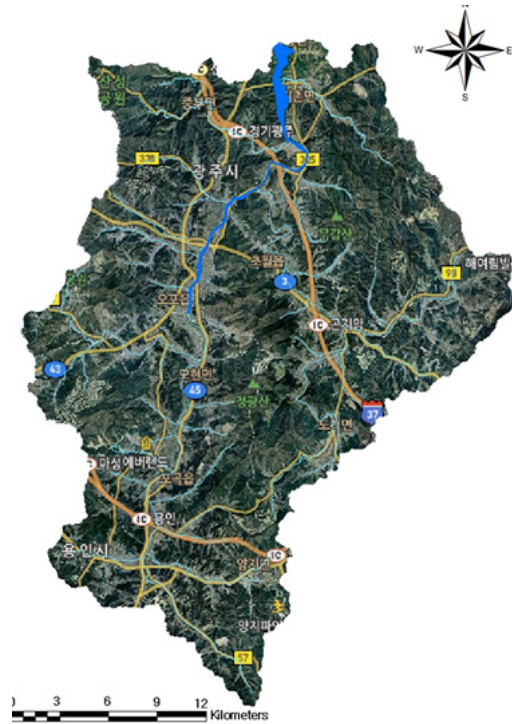


Fig. 2. Gyeongang Stream Basin

수원 기상관측소, 양평 기상관측소에 대한 최소무강우기간을 산정하였다. 각 관측소별 IETD는 서울 9시간, 이천 12시간, 수원 13시간, 양평 12시간으로 산정되었다. 각 소유역에 강우량을 적용할 때 환산강우량을 적용해야 하므로, 가장 짧은 서울 관측소의 IETD값을 기준으로 9시간을 최소무강우기간으로 선택하여 분석을 수행하였다. 최종적으로 거대강우 시나리오를 생산하기 위하여 경안천 유역에 해당하는 설계빈도인 100년빈도 확률강우량을 두 번 연속적으로 발생시켜 거대강우 시나리오를 생성하였다(Fig. 3). 경안천 유역에 해당하는 설계빈도인 100년 빈도 확률강우량을 두 번 연속적으로 발생시켜 거대강우 시나리오를 생성하였다.

4.3 목적함수를 이용한 모형의 보정 및 검증

경안천 유역의 경안수위관측소 자료를 사용하여 보정 및 검증을 수행하였다. 목적함수 SSR과 WSSR을 이용하여 2009년 7월 9일~2009년 7월 12일의 강우사상을 이용하여 보정을 실

Table 1. Calibration of the Model Using Objective Functions

Calibrating Events		Evaluative Indicator	SCE-UA	SSR	WSSR
2009-07-09 ~ 2009-07-12	SSR	R^2	0.8670		
		NRMSE	0.1063		
		RE	0.2583		
	WSSR	R^2	0.8694		
		NRMSE	0.1024		
		RE	0.2241		

Table 2. Validation of the Model Using Objective Functions

Validating Events		Evaluative Indicator	SCE-UA	SSR	WSSR
2002-08-01 ~ 2002-08-31	SSR	R^2	0.8751		
		NRMSE	0.0724		
		RE	0.1613		
	WSSR	R^2	0.8787		
		NRMSE	0.0715		
		RE	0.1349		
2006-07-01 ~ 2006-07-31	SSR	R^2	0.8670		
		NRMSE	0.1063		
		RE	0.2583		
	WSSR	R^2	0.8694		
		NRMSE	0.1024		
		RE	0.2241		
2008-07-01 ~ 2008-07-31	SSR	R^2	0.8516		
		NRMSE	0.0627		
		RE	0.0394		
	WSSR	R^2	0.8534		
		NRMSE	0.0627		
		RE	0.0122		

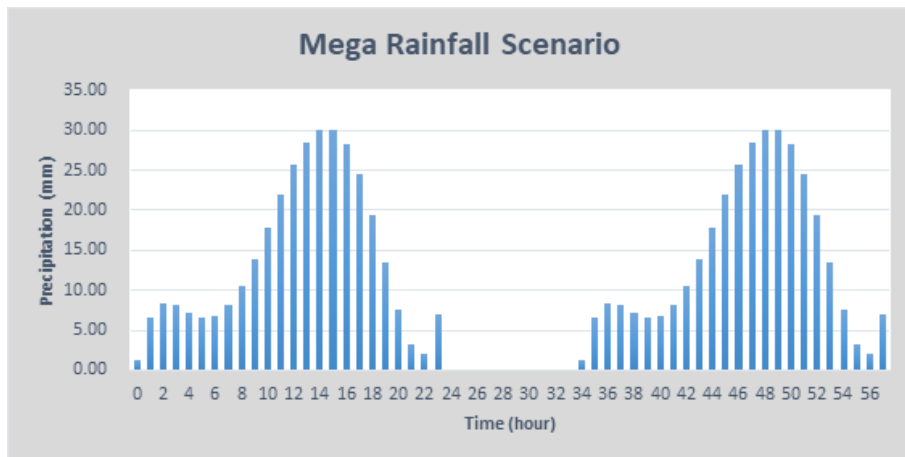


Fig. 3. Generation of the Mega Flood Scenario Using IETD

시하였으며, R^2 , NRMES, RE 기법을 통해 목적함수의 적절성을 평가하였다. 그 결과 Table 1과 같이 목적함수 WSSR을 이용하였을 때 NRMSE, RE가 SSR보다 0에 근접하므로 모의 효율이 우수한 것으로 확인되었으며, R^2 역시 목적함수 SSR보다 WSSR이 1에 근접하므로 모의 효율이 우수한 것으로 확인되었다. 즉, 연속적인 호우사상에 대하여 유출모의를 수행할 경우 목적함수 WSSR을 이용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 또한, Table 2와 같이 2002년 08월 01일~2002년 08월 31일, 2006년 07월 01일~2006년 07월 31일, 2008년 07월

01일~2008년 07월 31일의 강우사상을 이용하여 검증을 실시한 결과 역시 SSR보다 WSSR이 적절한 것으로 확인되었다. 즉, 연속적인 호우사상으로 발생하는 거대홍수를 모의하기에는 WSSR의 목적함수를 이용하여 거대홍수량을 산정하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

4.4 거대강우 시나리오를 이용한 거대홍수량 산정

검보정 결과를 통해 WSSR의 목적함수를 이용하여 거대홍수 시나리오에 따른 거대홍수량을 산정한 결과 Fig. 4와 같다.

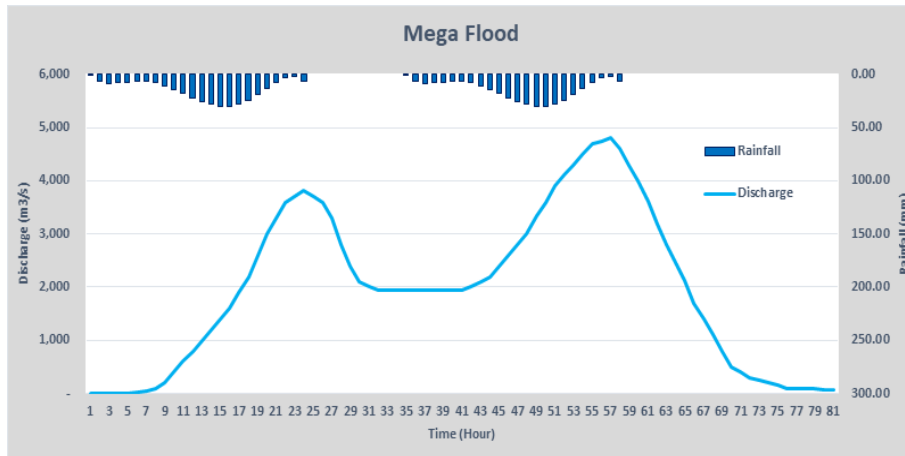


Fig. 4. Mega Flood Estimation Using the Mega Rainfall Scenario

거대홍수량은 4,802m³/sec로 경안천하천정비기본계획(2011)에서 산정한 100년빈도 설계홍수량인 3,810m³/sec보다 992m³/sec의 홍수량이 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 연속적인 호우로 인해 토양이 포화되었기 때문에 단일 호우사상으로 인한 유출량 보다 연속적인 호우사상으로 인한 유출량이 증가한 것으로 확인할 수 있다. 이는 토양 수분함유량의 포화로 인해 거대홍수량이 증가한 것으로 보인다.

5. 결 론

최근 연속적인 호우사상(Consecutive Storm Event)으로 인해 거대홍수(Mega Flood)가 발생하고 있으며, 이로 인한 재산 및 인명피해가 증가하고 있다. 거대홍수의 경우 단일 호우사상이 아닌 연속적인 호우사상으로 인한 피해이기 때문에 보다 합리적인 매개변수 추정을 통해 유출해석을 수행하고 대비해야 피해를 최소화 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연속 호우사상 발생에 따른 거대강우 시나리오를 생성하고, 보다 합리적인 유출해석을 통해 정확한 거대홍수량을 산정하였다.

연속적인 호우사상에 따른 거대강우 시나리오를 정확하게 유출해석 하기 위해서 SSARR모형에 전역최적화 기법 중 하나인 SCE-UA 기법을 적용하여 목적함수 SSR과 WSSR의 적절성을 평가한 결과, R², NRMES, RE 모두 SSR보다 WSSR이 적절한 것으로 확인되었다. 즉, 단일호우사상이 아닌 연속적인 호우사상에 대한 유출해석시 SSARR모형의 매개변수는 목적함수 WSSR을 적용하는 것이 보다 더 합리적임을 증명하였다. 경안천 지역의 100년빈도 확률강우량을 연속적으로 발생시켜 거대강우 시나리오를 생성하고, 거대홍수량을 산정한 결과를 보면, 거대홍수량은 4,802m³/sec로, 경안천하천정비기본계획(2011)에서 산정한 홍수량보다 약 992m³/sec의 홍수량이 증가하는 것으로 도출되었으며, 이는 거대홍수량이 단일 호우사상에 의한 홍수량 보다 약 26% 증가한다는 것을 보여준다.

본 연구에서 설정한 거대강우 시나리오와 같이 연속적으로 호우사상이 발생하게 되면 동일한 양의 비가 내리더라도 토양의 수분함량이 포화되어 강우 손실량이 감소하게 되고 이로

인해 유효우량이 증가하게 된다. 즉, 거대강우 시나리오의 첫 번째 100년빈도 확률강우량으로 인해 토양의 수분함유량이 포화되어 강우 손실량이 감소하게 되고 유효우량이 증가하게 됨으로써 두 번째 100년빈도 확률강우량이 발생하였을 때 더 큰 홍수량이 발생한다. 기존 설계빈도로 수립한 홍수방어대책으로는 연속적인 호우사상 발생시 설계빈도를 초과하는 홍수량이 발생함으로 홍수피해를 방어하기에는 한계가 있다. 따라서 단일호우사상 뿐만 아니라 연속적인 호우사상 발생에 따른 유출해석을 통해 이를 대비한 홍수방어대책을 수립해야 홍수피해를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 최근 빈번하게 발생하는 연속적인 호우사상에 대한 피해를 최소화하기 위해 선행되어야 할 기초연구로서 향후 경안천 지역의 유역종합치수계획수립 시 참고자료로 활용될 수 있으며, 이를 통해 홍수피해를 경감하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음. (83067)

References

Adams, B. J. and Papa, F. (2000). Urban Storm water Management Planning with Analytical Probabilistic Models, John Wiley and Sons, New York, NY.

Chen, H. W and Chang, N. B. (2006). Decision Support for Allocation of Watershed Pollution Load Using Gery Fuzzy Multi objective Programming, *J. of the American Water Resources Association*, 42(3), pp. 725-745.

Chen, R. S., Pi, L. C., Hsieh, C. C. (2005). Application of Parameter Optimization Method for Calibrating Tank Model, *J. of the American Water Resources Association*, 41(2), pp. 389-402.

Chen, Y., Xu, H. (2016). Improving flood forecasting capability

- of physically based distributed hydrological models by parameter optimization, *Hydrol & Earth System Sciences Discussions*, 12(10)
- Cheng, C. T., Ou, C. P., Chau, K. W. (2002). Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration, *J. of Hydrology*, 268(1-4), pp. 72-86.
- Chung, GH., Park, HS., Sung, JY., and Kim, HJ. (2012). Determination and evaluation of optimal parameters in storagefunction method using SCE-UA, *J. of Korea Water Resources Association*, 45(11), pp. 1169-1186. [Korean Literature]
- Gang, TU and Lee, SH(2014), Development on an automatic calibration module of the SWMM for watershed runoff simulation and water quality simulation, *J. of Korea Water Resources Association*, 47(4), pp. 343-356. [Korean Literature]
- Huo, J., Zhang, Y., Luo, L., Long, Y., He, Z. (2017). Model parameter optimization method research in Heihe River open modeling environment, *J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 31, pp. 31-53.
- Kim, DH. (2018). Development of Consecutive Storm Event Based Rainfall-Runoff model for Short Term Flood Runoff Simulation and Applicability of the Model under Climate Change, Ph. D. Dissertation, INHA University. [Korean Literature]
- Kim, JW., Kim, DH., Joo, HJ., Noh, HS., Lee, JS., Kim, HS. (2018). Case study : On objective functions for the peak flow calibration and for the representative parameter estimation of the basin, *Water*, 10(5), pp. 614. [Korean Literature]
- Kouchi, D. H., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S. H., Khalili, D., Abbaspour, K. C. (2017). Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms, *Water*, 9, pp. 384.
- Kwak JW., Kim, DG., Hong IP, Kim, HS. (2009). A Study of Progressive Parameter Calibrations for Rainfall-Runoff Models, *J. of Korean Wetlands Society*, 11(2), pp. 107-121. [Korean Literature]
- Lee, DE., Kim, YS., Yu, WS., Lee, GH. (2017). Evaluation on applicability of on/off-line parameter calibration techniques in rainfall-runoff modeling, *J. of Korea Water Resources Association*, 50(4), pp. 241-252. [Korean Literature]
- Lee, MJ., Kim, BJ., Kim, JS., Kim, DH., Lee, DR., Kim, HS. (2017). Parameter Calibration and Estimation for SSARR Model for Predicting Flood Hydrograph in Miho Stream, *J. of Korean Wetlands Society*, 19(4), pp. 423-432. [Korean Literature]
- Madsen, H., Wilson, G., Ammentrop, H. C. (2002) Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models, *J. of Hydrol*, 261, pp. 48-59.
- Ministry of Land Infrastructure and Transport (2011). Maintenance plan of the Gyeongan Stream. [Korean Literature]
- Mohan, S (1997). Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm, *J. of Hydraul ENG*, 123(2), pp. 137-142.
- Remegio, B., Confesor, JR., Gerald, W., Whittaker. (2007). Automatic Calibration of Hydrologic Models With Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Pareto Optimization, *J. of the American Water Resources Association*, 43(4), pp. 981-989.
- Shahzad, M. K. (2011). A Data Based Flood Forecasting Model for the Mekong River, Ph. D. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Baden-Württemberg, Germany.
- Song, JH., Kim, HS., Hong, LP., Kim, SU. (2006). Parameter Calibration of Storage Function Model and Flood Forecasting (1) Calibration Methods and Evaluation of Simulated Flood Hydrograph, *J. of Korean Society of Engineers*, 26(1), pp. 27-38. [Korean Literature]
- Victor, P. and Alexander, P. (2012). Evaluating a Hydrological Flood Routing Function for Implementation into a Hydrological Energy Model, Lund University, Lund, Sweden.
- Yu, P. S. and Yang, T. C. (2000). Fuzzy multi-objective function for rainfall-runoff model calibration, *J. of Hydrology*, 238, pp. 1-14.
- Zhang, C., Wang, R. B., Meng, Q. X. (2015). Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models Using Global Optimization, *Advances in Meteorol*, pp. 12.