도시지역의 수재해 예측을 위한 강우시나리오의 불확실성 분석

Uncertainty Analysis of Rainfall Scenarios for the Prediction of Flood Disasters in Urban Areas

금호준* · 김현일** · 김병현***

Keum, Ho Jun*, Kim, Hyun Il**, and Kim, Byunghyun***

Abstract

As data analysis becomes increasingly important in the field of flood disasters, a data-based analytical model that considers hydraulic factors has emerged as an alternative to flood analysis. Data-driven modeling requires complex and extensive data that depend on actual and diverse hypothetical scenarios. Thus, preliminary data processing is required to utilize extensive input data efficiently and obtain accurate results. In this study, a gamma test was applied as a preliminary data processing technique to the efficient prediction of flood disasters in urban areas. Specifically, probability rainfall was calculated for the Daejeo and Dadae districts in Busan, and manhole overflow was estimated by inputting relevant data into a storm water management model (SWMM) with a Huff distribution. A preliminary uncertainty and sensitivity analysis was performed with the gamma test using combined time-series data for probability rainfall and manhole overflow, and then an optimal combination of data was selected for a simulation using correlativity analysis (Gamma, Gradient, Standard error, and V-ratio). The proposed method employs quantitative criteria for efficient selection of optimal input data, thus saving a greater amount of time and effort than when using the traditional method that derives results from repeated execution of models.

Key words : Data Analysis, Rainfall Scenario, Urban Flood, Gamma Test

요 지

수재해 분야에서 데이터 분석의 중요성이 커짐에 따라 수리학적 인자를 고려한 데이터 기반 해석 모형이 홍수해석을 위한 하나의 대안으로 대두되고 있다. 데이터 기반 모델링은 실측 또는 다양한 가상 시나리오에 따른 복잡하고도 광범위한 양의 자료를 필요로 한다. 따라서 대량의 입력 데이터를 효율적으로 활용하여 정확한 결과를 얻기 위한 사전 데이터 처리 기법이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 시나리오에 대한 사전 자료처리 기법으로 Gamma Test를 적용하여 도시지역에 대해 효율적인 수재해 예측을 하고자 하였다. 이를 위해, 침수피해 이력이 있는 부산시의 대저, 다대 지구를 대상으로 확률강우량을 산정하고 Huff 분포로 SWMM에 입력하여 맨홀의 월류량을 산정하였다. 확률강우량과 총 월류량에 대한 시계열 데이터 조합에 대하여 Gamma Test로 사전 불확실도 및 민감도 분석을 수행하고, 상관성 분석(Gamma, Gradient, Standard error, V-ratio)을 통해 시나리오별 자료 길이와 형태에 대한 최적의 조합을 사전에 선정하는 방법을 제시하였다. 제안 방법은 모형의 반복적인 수행을 통해 결과를 도출하는 기존 방법에 비해 시간과 노력을 절약하고 효율적으로 최적 입력자료를 선정할 수 있는 정량적 기준을 보여준다.

핵심용어 : 자료 분석, 강우 시나리오, 도시 홍수, Gamma Test

1. 서 론

최근 지속적인 계측과 관측을 통한 실측 자료의 축적과

시간분포법을 고려한 확률강우량 산정을 통한 시나리오의 생성으로 인하여 수문·수리 해석을 위한 자료가 풍부해진 상황이다. 기후변화에 따른 지속적인 물 관리에 대한 필요가

*정회원, 경북대학교 방재연구소 박사후연구원(E-mail: hojunkeum@naver.com)

Member, PostDoc., Disaster Prevention Research Institute, Kyungpook National University

**정회원, 경북대학교 건설환경에너지공학부 박사과정

Member, Ph.D Candidate, School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University

***교신저자, 정회원, 행정안전부 국민방위재단안전교육원 교수(Tel: +82-41-560-0068, Fax: +82-41-560-0060, E-mail: bhkime@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, National Civil Defense and Disaster Management Training Institute, Ministry of the Interior and Safety

대두되면서 수자원 정보의 수집, 관리 및 제공의 중요성 또한 증대되고 있다(Nam et al., 2016). 이에 따라 다양한 데이터 분석 및 기계학습의 방법론이 수자원 분야에 적용되고 있다. 수자원 분야에서의 데이터기반 모델링은 수문학의 기본 물리적 프로세스를 직접 고려하지 않고 과거 데이터를 사용한다는 특징이 있다. 실제 수문학적 프로세스를 모델링할 때에 일반적으로 고유하면서도 복잡한 동적 시스템을 나타내기 위해 복잡한 입력 구조와 방대한 학습 데이터가 필요하다(Shin et al., 2005). 수치해석에 기반한 홍수사상에 대한 분석을 재현하기 위하여, 근래 20년 동안 자료기반 해석 및 기계학습 분야는 더 개선된 홍수 및 수자원 현상의 재현 및 효율적인 예측 과정을 위해 발전해 왔다(Mosavi et al., 2018). 이에 따라 자료에 따라 합리적인 전처리 과정이 필수적인 요소로 되었으며, 이에 대하여 기존에 제시된 방법론과 통계학적 이론에 기반한 많은 전처리 과정이 수문·수리 자료에 적용되고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 자료에 대한 불필요한 시행착오 및 데이터의 입력 자료에 대한 평가를 많은 시간을 소요되고 있는 실정이다.

수자원 및 홍수 사상에 대한 분석을 위한 데이터 기반 모델링은 자료간의 상호연관성과 의도적으로 지나치게 단순화된 가정 사항이 존재하기 때문에 다양한 유형의 불확실성과 모호성이 있을 수가 있다. 기존 연구에 따르면 어떤 상황에서는 빈약한 모델이 수용 가능한 결과를 제공할 수 있는 반면, 다른 환경에서는 좋은 세련된 모델이 더 나은 응답을 제공하지 못할 수 있다. 데이터를 이용한 수문학적 예측 모델을 위하여 적절한 모델 구조를 선택하고 중복 입력을 피함으로써 올바른 입력을 선택함으로써 보다 현실적이고 더 나은 모델 프레임워크에 접근해야 하며, 이를 위한 사전 불확실성 분석 방법으로서 엔트로피 분석, 주성분 분석, 군집 분석, Akaike's Information Criterion (AIC) 분석, Bayesian Information Criterion (BIC) 분석 그리고 Gamma Test가 있다. 예측 모델의 입력 자료로서 시계열 형태의 자료를 이용할 때에 자료의 불확실성 및 분산도를 검토하여 안정적인 알고리즘을 구축해야 하며, 불확실성이 크게 산정되는 경우 예측 매개변수가 과다하게 산정 될 위험성 커질 수 있음을 고려하여야 한다. 이 외에 입력 자료의 조합을 선정하고 어느 정도의 자료를 사용할 것인지 판단하는데 적지 않은 시간이 소요 될 수 있다. 예를 들어, 데이터 기반 모형인 뉴로-퍼지의 경우 각 입력 자료의 규칙이 3개이면 퍼지이론에 따라 총 규칙의 수는 $3n$ 개가 된다. 입력변수가 증가하면 이와 비례하여 모형의 정확도가 증가하는 것은 아니며, 퍼지 규칙수가 기하급수적으로 증가하여 모의시간이 너무 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서 정확도를 증가시키면서 모의시간을 단축할 수 있는 입력 자료의 조합을 선정하기 위하여 입력변수와 출력변수간의 상관관계를 분석할 필요가 있다. 이를 위한 분석 방법론으로서 Gamma Test는 Stefánsson et al. (1997)에 의해 이론적 소개가 되었으

며, 뉴로-퍼지 모형과 순환형 신경망을 통하여 강우-유출 분석을 실시하기에 앞서 사전 데이터 분석을 Gamma Test를 적용한 연구가 있었으며, 이를 통해 최적의 유량 및 강우 자료조합을 지체 시간 매개변수를 고려하여 선정한 사례가 있다 (Remesan et al., 2008). 홍수 빈도 해석 모델의 최적 검증 자료조합을 선정 및 불확실도 분석을 위하여 Gamma Test를 적용한 연구는 Wan Jaafar and Han (2012)에 수행된 사례가 있다.

본 연구에서는 비선형성 특징을 가지는 예측모델의 입력 자료에 대한 사전 불확실성 점검과 함께 신뢰도 향상을 위한 Gamma Test를 실시하여 시나리오별 최적의 자료 길이와 형태 및 조합을 선정하고자 한다. Gamma Test는 강우-유출에 대한 해외 연구사례가 있으며 이에 대한 방법론을 국내 도시유역에 적용하여 방법론의 범용성을 확인하고자 하였다. 또한 비선형적인 자료 관계의 불확실성 분석하는데 간단하고 명료하여, 타 지역에서도 수월하게 적용할 수 있을 것이라 판단되었기 때문이다. 연구 대상 지역은 극심한 내수 침수피해 이력을 가지고 있는 부산시의 대저지구, 다대지구에 대하여 분석을 실시하였다. 1차원 도시유출해석을 다양한 강우 시나리오 바탕으로 실시하였으며, 각 시나리오별 대표성을 나타낼 수 있는 총 월류량 데이터를 사용한다. 위의 과정을 통하여 최적 입력 자료를 위한 시나리오를 선정하고자 하였으며, 이를 위해 Gamma Test의 다양한 결과를 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 EPA-SWMM

도시유역에 대한 다양한 강우 시나리오에 따른 홍수 양상을 분석하기 위하여 본 연구에서는 수문학적 지형 인자를 반영하여 1차원 도시유출 해석을 수행 할 수 있는 EPA-SWMM을 이용하였다. 대상 유역에 대한 각 맨홀의 월류량을 계산한 SWMM 모형은 도시유역이나 인위적인 배수계통을 갖는 유역에서 강우사상으로 인해 발생하는 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에 대한 유출량 추적 등 강우-유출 및 하도 추적 모두 가능한 도시유출 모형이다(Huber and Dickinson, 1988).

SWMM의 EXTRAN 블록은 개수로와 관망에 대해 유량 추적을 수리학적으로 수행하는 모형이다. 물리적인 특성과 Saint-Venant의 점변부정류의 수학적 해법을 나타내기 위해 관로 시스템을 연결 관로와 절점으로 구성한다. 연결 관로에서 우수관로의 물 흐름문제를 해석하기 위한 기본 미분방정식은 점변부정류식으로부터 운동량방정식과 연속방정식을 연계한 Eq. (1)을 이용한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

여기서, A 는 단면적, Q 는 관로 유량, V 는 관로 유속, x 는 관로/수로 방향의 거리, t 는 시간, g 는 중력가속도, H 는 관로 수위, z 는 관로 최심고, h 는 관로 수심, S_f 는 마찰(에너지) 경사를 나타낸다.

2.2 Gamma Test

Gamma Test는 연속적인 비선형 기법을 사용하여 데이터를 모델링 할 때 산정되는 최소 평균제곱오차를 추정하는 기법으로, 최초로 Stefánsson et al. (1997) 의해 발표된 후, 많은 연구자들에 의해 기법이 발전되고 구체적으로 정립되었다. Gamma Test를 위한 기본적인 개념은 비선형 해석을 이용한 기존의 자료 전처리 분석들과는 차별성을 가진다. 분석 대상이 되는 자료가 Eq. (2)와 같이 준비되어 있다는 가정 하에 분석을 실시한다.

$$(x_i, y_i), 1 \leq i \leq M \quad (2)$$

여기서, 입력 벡터 $x_i \in R_n$ 는 폐집합 $C \in R_n$ 에 한정된 벡터이며, 일반적인 모형의 결과 또는 종속변수에 해당되는 출력값 $y_i \in R_n$ 는 스칼라이다. 벡터 x 값들은 출력값 y 에 영향을 주며 예측을 위한 입력값으로 사용할 수 있는 독립변수이다. x 와 y 관계에 대한 기본적인 가정은 다음과 같다.

$$y = f(x_1, \dots, x_m) + r \quad (3)$$

여기서, f 는 지수 평활법 함수이고 r 은 노이즈를 나타내는 확률 변수이다. Eq. (3)에서 x 값은 입력자료, y 값은 예측되는 결과(목표값)를 나타낼 수 있다. Gamma Test는 각 벡터 x_i ($1 \leq i \leq M$)에 대한 k 번째 ($1 \leq i \leq p$) 가장 가까운 변수 $N[i, k]$ 를 기반으로 비선형 분석을 실시한다. 각각의 입력자료 x 에 대해서 k 개의 최근접 이웃자료와의 평균제곱 근거리를 산정하게 된다. 이에 대한 수식은 Eq. (4)와 같다. 독립변수 x 에 대응되는 결과(또는 목표)값이 되는 y 에 대해서도 동일한 방식으로 k 개의 최근접 이웃자료와의 평균제곱 근거리를 산정하게 된다(Eq. (5)).

$$\delta_M(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |x_{N[i, k]} - x_i|^2 \quad (1 \leq k \leq p) \quad (4)$$

$$\gamma_M(p) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (y_{N[i, k]} - x_i)^2 \quad (1 \leq p \leq p_{\max}) \quad (5)$$

각 변수들에 대한 최근접 이웃자료와의 물리적 거리의 관계를 산정하였을 때에, 자료 양과 동일한 수 만큼의 δ 와 γ 의 값들이 생성되게 되며, 두 값을 통하여 Γ 를 산정하기 위한 회귀식을 생성하게 된다. 이를 통하여 산정된

감마 통계량 Γ 는 지수 평활법 데이터 모형에 의해 설명될 수 없는 인공신경망 모형의 결과값에 대한 분산의 추정치이다.

$$\gamma = A\delta + \Gamma \quad (6)$$

$$V_{ratio} = \frac{\Gamma}{\sigma^2(y)} \quad (7)$$

산정된 Γ 는 특정 입력 자료조합에 따른 불활실도 지표 V_{ratio} 를 산정할 때에 사용된다. Eq. (7)에서 $\sigma^2(y)$ 는 출력 y 의 분산이며, 이는 출력이 부드럽고 신뢰성 있게 모델링 될 수 있는지에 대하여 출력 범위와 독립적으로 예측력에 대한 판단이 가능하도록 만들어준다. 0에 가까운 V_{ratio} 는 주어진 출력 y 의 높은 예측 가능성을 나타낸다(Remesan et al., 2015). 일반성의 손실 없이, Γ 의 분포의 평균은 0이라고 가정 할 수 있고, 노이즈 V_{ratio} 의 분산은 한정되어있다. 위의 과정을 통하여 Gamma Test는 예상 노이즈 분산을 근사하는 평균제곱오차로 모델을 구축하는 데 필요한 데이터의 양을 결정하는데도 도움을 줄 수 있다(Rauf et al., 2016).

Gamma Test를 활용하기 위해서 가정해야할 원리가 다음과 같이 세 가지가 있다(Durrant, 2001).

- (1) Gamma Test의 적용을 위한 모든 훈련 자료는 입력 자료상에서 여분이 없도록 사용되어야 한다.
- (2) 각각의 입력값에 대한 목표값 자료는 확정론적인 과정에 의해 결정되어야 한다.
- (3) 확정론적 방법으로 산정된 목표값들은 통계적인 잡음에 영향을 받으며, 각각의 분포형은 다를 수 있지만 해당 입력값에 대한 훈련 및 테스트 과정에서 함께 사용된다.

3. 불확실성 분석의 적용

3.1 연구 대상지역

대상유역인 대저지구와 다대지구는 풍수해저감종합계획에서 각각 내수재해 위험지구 후보지로 선정이 되었다. 후보지 선정 이유로는 대저지구의 경우 피해이력지역이고 다대지구의 경우 자연재해위험개선지구로 정비 사업이 필요한 지역이다. 또한, 2014년도에 집중호우로 인하여 대저지구는 사덕시장을 중심으로 도시지역의 침수피해가 발생하였으며 다대지구의 경우 낙동남로를 중심으로 침수피해가 발생하였다. 본 연구 대상지는 수리학적 모형을 검증 할 수 있는 침수흔적자료와 주민신고 자료가 존재하여 Gamma Test를 적용하기 위한 신뢰성 있는 1-2차원 모형 결과를 산출해낼 수 있는 것으로 판단되었다. Fig. 1은 대상유역의 위성지도와 주요 관망 및 맨홀을 나타내고 있다.

(a) Daejeo District, Busan

(b) Dadae District, Busan

Fig. 1. Study Area for Uncertainty Analysis

3.2 강우 시나리오

본 연구에서는 제시된 1차원 도시유출 해석 모형 SWMM 을 이용하여 대상지역에서 나타날 수 있는 월류 및 홍수 양상 제시하고자 하였으며, 모든 침수 상황을 대표할 수 있는 자료 세트를 구성하고자 하였다. 이러한 이유로 빈도 별 확률 강우량에 기반하여 Huff 방법을 사용하였으며, 부산

지점의 과거 57개년의 시 단위 강우자료를 분석하여 빈도별 확률강우량을 산정하였다. 지속시간은 1시간, 2시간 그리고 3시간을 사용하였다. 각 지속시간에 대하여 10년, 20년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년 빈도로 Huff 분위 1, 2, 3, 4분위를 이용하여 총 84개의 시나리오를 구성하였다. Figs. 2~4에서 지속시간 별 확률강우량의 분포를 도식화 하였다.

Fig. 2. Probabilistic Rainfall Scenario (1hr. Duration)

Fig. 3. Probabilistic Rainfall Scenario (2hr. Duration)

Fig. 4. Probabilistic Rainfall Scenario (3hr. Duration)

3.3 1차원 도시유출해석

1차원 도시유출해석 모형 SWMM을 이용하여 연구 대상지에 대한 통수능을 초과한 월류량을 산정하고자 하였으며, 하수관거와 맨홀은 부산시에서 제공하는 Shape 형태의 하수관망 네트워크 자료를 사용하였다. 대저지구의 소유역 분할 개수는 45개와 관로의 개수는 30개로 구성하였으며, 다대지구의 경우 소유역 분할 개수는 84개와 관로의 개수는 79개로 구성하였다. 대저지구 유역의 총 유역면적은 105.25ha이며, 다대지구의 총 유역면적은 276.49ha이다.

각각 지형과 유역 요건을 고려하여 SWMM을 구축한 형태는 앞서 제시된 Fig. 1에 나타나 있다. 도시유출해석에서 침투유량과 그 발생시간의 산정이 매우 중요한 인자이고, Ha (2016)의 연구에 따르면 무점정 적용 상황에서의 유출해석 시에 소규모 대상유역에서는 여러 개의 소유역으로 분할하지 않고 1개의 소유역으로 적용하며, 소유역의 개수가 많아질수록 가정해야 하는 유역 매개변수의 수가 증가하므로 그에 따른 불확실성이 증가하게 되어 오차도 더 증가하는 것으로 나타났다.

3.4 사전 불확실성 검토

3.4.1 Gamma Test의 구축 및 적용

Gamma Test를 효율적으로 이용하기 위해서는 입출력 데이터는 일부 경계 범위에서 연속적인 실제 변수여야 한다. 입력 또는 출력 변수 중 일부가 범위내의 모든 값만 취하는 경우 효과는 미미 할 것이다. 또한 각 출력의 노이즈 변동은 제한적이며 입력 값과는 무관하다고 가정한다. 연구지역에서의 입력값에 대한 목표값의 정확도 측정을 위한 Gamma Test에서 Near Neighbours은 10개의 값을 사용하였으며, 추후 사용되어질 미지의 데이터 기반 모형의 입력 자료에 대한 최적 입력 자료조합에 대해 검토를 실시하고자 한다. Fig. 5는 다양한 강우시나리오와 그에 대한 SWMM 출력 자료를 이용한 최적의 입력자료 조합을 선정하기 위하여 Gamma Test를 적용한 흐름도를 나타내었다.

Gamma Test를 수행 후에 계산되는 결과는 Gamma, Gradient, Standard error 그리고 V-ratio가 있다. Gamma 값이 클수록 자료간의 상관성이 낮고 불확실도가 높음을 나타내고, Standard error는 자료의 표준편차를 나타낸다. Gradient가

급하게 나올수록 강우-총 월류량 관계의 복잡함을 나타내며, V-ratio가 0값에 가까울수록 입력된 강우 자료를 통하여 총 월류량에 대한 예측력이 높음을 나타낸다(Niknia et al., 2014).

강우 시나리오에 따른 전체적인 총 월류량 자료와의 관계를 파악하기 위하여 Huff 분포의 1분위~4분위에 대한 1시간, 2시간 그리고 3시간 지속시간의 시나리오를 하나의 시계열 형태로 정리하였다. 즉 Gamma Test의 입력 자료는 1분위 지속시간 1시간~3시간의 연속 시계열 강우자료와 동 시간대의 출력자료인 유역 전체 맨홀의 월류량을 합산하여 한 개의 자료세트를 구성하였다. 각각의 자료 세트는 총 4개의 입력(Figs. 6(a), (c)의 누가 강우량)과 출력자료(Figs. 6(b), (d)의 누가 총 월류량)로 구성하였으며, 이 자료세트를 이용하여 Gamma Test 분석을 실시하였다.

대저지구 및 다대지구에 대한 Huff 분포에 따른 Gamma Test의 입력자료 조합으로서 Case1은 1분위에서 4분위까지 모든 Huff분위의 확률강우량과 이에 대한 SWMM의 총 월류량을 사용한 조건이다. 각 분위별 상관도와 입력 자료 참여 시 불확실도와 민감도의 증감을 파악하기 위해 Case2는 1분위를 제외, Case3은 Huff 2분위를 제외, Case4는 Huff 3분위를 제외, Case5는 Huff 4분위를 제외하였을 때의 입력 자료 조합으로 선정하였다(Table 1).

3.4.2 Gamma Test의 결과해석

대저지구에 대한 Huff분포에 따른 Gamma Test을 위한 입력 자료로서 Table 1에 나타난바와 같이 분위별 조합을 사용하였으며, 이에 대한 상이한 결과를 분석하여 추후 수치 해석 모형 또는 인공신경망 모형에 불확실도와 민감도를 증가시킬 가능성이 있는 분위 자료를 추정하고자 하였다. 대저지구에서의 Huff 분위에 따른 Gamma Test 해석 결과는 Table 2와 같다.

Gamma Test의 해석 결과로서, Gamma지수와 V-ratio 값에 대한 비중을 두어 순위(Ranking)을 산정하였다. 1순위 일수록 입력 자료 조합이 불확실도가 낮고 추후 다른 수리학적 모형에 대한 적용에 유리할 것으로 판단된다. 즉, 2차원 수리학적 해석 모형 또는 자료지향형 인공신경망 모형을 운용 시에 더 나은 결과값을 얻을 수 있으며 안정적으로 수치해석 또는 예측력을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 분위

Fig. 5. Flowchart for the Application of Gamma Test

Fig. 6. Input & Target Data for Gamma Test

Table 1. Input Cases for Gamma Test

	Rainfall Scenario (Input Vector)	Total Overflow (Target Vector)
Case1	1, 2, 3, 4 Quantile	SWMM Result with 1, 2, 3, 4 Quantile
Case2	2, 3, 4 Quantile	SWMM Result with 2, 3, 4 Quantile
Case3	1, 3, 4 Quantile	SWMM Result with 1, 3, 4 Quantile
Case4	1, 2, 4 Quantile	SWMM Result with 1, 2, 4 Quantile
Case5	1, 2, 3 Quantile	SWMM Result with 1, 2, 3 Quantile

Table 2. The Results of Gamma Test According to Huff's Distribution in Daejeo District

	Gamma	Gradient	Standard error	V-ratio	Ranking
Case1	0.054845	0.038907	0.009413	0.21938	-
Case2	0.058293	-0.07103	0.006913	0.233171	4
Case3	0.055013	0.049622	0.00793	0.220051	1
Case4	0.055593	-0.00168	0.009097	0.222374	3
Case5	0.055169	0.612184	0.010065	0.220676	2

별 자료조합에 유무에 따른 불확실도를 측정하고, 불필요한 자료를 소거시키고자 하는 목적이기에 모든 분위 자료를 사용한 Case1은 순위 선정에서 제외시켰다. Table 2를 통하여 Case3, 즉 2분위의 자료를 사용하지 않았을 때에 가장

낮은 Gamma지수와 V-ratio를 나타내어 1순위로 선정되었다. 이는 Case3가 예측 모델에 적용된다면 안정적인 수행과정과 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다. 반면에 1분위 자료만이 제외된 Case2의 경우 불확실도가 높지만 예측 모델에 대한

다양한 강우-유출 현상을 반영할 수 있으며, 예측결과에 대한 범위가 다른 입력 조건보다 넓어 질 수 있을 것으로 판단된다. 각 입력 자료 조합의 길이에 따른 Gamma, Gradient, Standard error, V-ratio의 지수 변동성은 Fig. 7에 나타나 있으며, 이는 자료 조합에 분위 별 유무와 자료의 정량적인 양에 따른 불확실도를 시각적으로 확인할 수 있다.

다대 지구의 경우에도 앞서 대저지구에서 분석한 동일한 방법으로 조건별 데이터 세트를 구성하여 Gamma Test의 입력 자료로서 사용하였다. 다대 지구에서의 Huff 분위에 따른 결과는 Table 3에 나타나있다.

다대 지구에도 역시 Gamma지수와 V-ratio 값에 대한 비중을 두어 순위(Ranking)를 산정하였다. Table 3을 통하여 Case4,

즉 3분위의 자료를 사용하지 않았을 때에 가장 낮은 Gamma지수와 V-ratio를 나타내어 1순위로 선정되었다. 반면에 4분위 자료만이 제외된 Case5의 경우 불확실도가 높지만 더욱 다양한 강우-유출 현상을 반영할 수 있을 것으로 보인다. 각 입력 자료 조합의 길이에 따른 Gamma, Gradient, Standard error, V-ratio의 지수 변동성은 Fig. 8에 나타났다. 대저 지구와는 다르게 Case5의 경우 다른 조건의 결과값에 비해 월등히 불확실도가 높게 나타났으며, 그 외의 자료조합 간의 편차가 크지 않음을 시각적으로 확인할 수 있었다. 이는 대저 지구에 비하여 다대 지구에서는 강우 시나리오에 따른 맨홀 월류량이 크게 나타나지 않아, 애초에 강우-유출 자료에 대한 편차 및 분산도가 크지 않아 나타나는 현상으로 파악되었다.

Fig. 7. Data Point-Gamma Graph (Daejeo District)

Table 3. The Results of Gamma Test According to Huff's Distribution in Dadae District

	Gamma	Gradient	Standard error	V-ratio	Ranking
Case1	0.00846	0.215217	0.002433	0.033838	-
Case2	0.009654	0.286211	0.002119	0.038616	3
Case3	0.008866	0.254793	0.002087	0.035464	2
Case4	0.008550	0.255167	0.002028	0.034201	1
Case5	0.015139	0.442032	0.002757	0.060556	4

Fig. 8. Data Point-Gamma Graph (Dadae District)

4. 결 론

본 연구에서는 비선형적 특성을 가지는 강우-총 월류량 수문 · 수리학적 자료에 대하여 Gamma Test를 실시하였으며, 최적의 자료길이 및 조합을 선정하고자 하였다. 방법론의 적용을 위한 대상지역으로서 극심한 침수사례를 가지고 있는 부산시 대저와 다대 지구를 선정하였다. 연구 대상지역에 대하여 유출 양상을 파악하기 위해 첫 번째로 과거 호우 사상을 고려한 확률강우량을 산정하였으며, 각 확률강우량에 대한 시간분포 결정을 위해 Huff의 총 강우량 시간분포방법을 적용하였다. 이로 인해 84개의 강우 시나리오를 생성할 수 있었으며, 시나리오 별 유출 양상을 파악하기 위해 1차원 도시유출해석을 실시하는 SWMM을 각 대상지역 별로 구축하였다. 그 결과 강우량 및 분위에 따른 총 월류량을 산정할 수 있었다. 구축된 강우-총 월류량 자료들을 홍수 예측을 위한 모형의 입력 자료로서 사용하기에 앞서 Gamma Test를 통한 불확실도와 민감도를 사전에 파악하여 불필요한 반복적인 모의 수행을 지양하고 신뢰성을 확보하고자 하였다. 위의 연구과정들에 대한 결과를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- (1) 다대지구와 대저지구에서 84개의 강우시나리오를 고려한 총 자료 개수는 각각 동일하게 3,023개로 나타났다. 강우시나리오를 모두 고려하였을 때에 총 월류량은 최대 $121.9m^3/s$ (다대지구)와 $15.41m^3/s$ (대저지구)로 산정되어, 대저지구에 비하여 다대지구에서 1차원 해석 결과가 더욱 다양한 정량적 범위로 나타났음을 알 수 있다.
- (2) 강우 시나리오와 SWMM 모의결과에 대하여 Gamma Test를 수행한 결과 대저지구의 경우 Huff 2분위를 입력 자료조합에 포함하지 않은 Case 3에서 가장 낮은 Gamma값 0.05501과 V-ratio 0.22005가 나타났다. 다대지구의 경우 Huff 3분위를 사용하지 않은 Case 4에서 가장 낮은 Gamma값 0.0855와 V-ratio 0.0342를 나타내었다. 대체적으로 다대지구가 대저지구에 비하여 Gamma값이 높게 산정되었음을 알 수 있었고, 이는 다대지구에서 더욱 다양한 강우-총 월류량을 내포함으로써 불확실도와 민감도가 상대적으로 높게 측정된 것으로 보인다.
- (3) 입력 자료를 사용하고자 하는 사용자가 모형의 안전성에 중점을 둔다면 Gamma 및 V-ratio 지수가 낮게 산정되는 입력자료 조합인 Case 3 또는 Case 4 자료를 사용하는

것이 타당하겠으나, 다양한 홍수사상을 재현 및 예측하는 데에 다소 불리할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 수리학적 특성이 고려된 입력 및 출력자료에 대한 사용자의 합리적인 판단을 위해 정량적 기준을 제시하고자 하였으며, 추후 수행될 홍수예측 모형에 대한 효율성과 신뢰도를 확보하고자 하였다. 더욱이 제시된 방법론을 이용함에 따라 지속적으로 나타나는 국지성 호우와 급변하는 수재해 양상에 따라 능동적으로 대처 할 수 있도록 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원(“디지털 기반 도시침수 예측 및 분석기술 개발”, “주요-2018-09-01”)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Durrant, P.J. (2001). *WinGammaTM: A non-linear data analysis and modelling tool with applications to flood prediction*. Ph.D. dissertation, Cardiff University, Wales, UK.
- Ha, C.Y. (2016). *Parameter optimization analysis in urban flood simulation by applying 1D-2D coupled hydraulic mode*. Ph.D. dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Storm water management model Version 4: User's manual*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Mosavi, A., Ozturk, P., and Chau, K.W. (2018). Flood prediction using machine learning Models: Literature review. *Water*, Vol. 10, No. 11, 1536. doi:10.3390/w10111536
- Nam, W.H., Kim, J.D., Kang, S.M., Kim, T.G., and Kim, H.J. (2016). Management of agricultural water resources information for flood damage reduction based on big data. *Proceedings of The Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, Vol. 2016, p. 90.
- Niknia, N., Moghaddam, H.K., Banaei, S.M., Poteh, H.T., Omidinasab, F., and Yazdi, A.A. (2014). Application of gamma test and neuro-fuzzy models in uncertainty analysis for prediction of pipeline scouring depth. *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 6, pp. 514-525.
- Rauf, A., Ahmed, S., Ghumman, A.R., Ahmad, I., Khan, K.A., and Ahsan, M. (2016). Data driven modelling for real-time flood forecasting. *2nd International Multi-Disciplinary Conference Gujat*, Pakistan.
- Remesan, R., Shamim, M.A., Han, D., and Mathew, J. (2008). ANFIS and NNARX based rainfall-runoff modeling. *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. doi:10.1109/ICSMC.2008.4811490.
- Remesan, R., and Mathew, J. (2015). *Hydrological data driven modeling: A case study approach*. Springer International Publishing.
- Shin, S.Y., Yeo, C.G., Baek, C.H., and Kim, Y.J. (2005). Mapping inundation areas by flash flood and developing rainfall standards for evacuation in urban settings. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 8, No. 4, pp. 71-80.
- Stefánsson, A., Končar, N., & Jones, A.J. (1997). A note on the Gamma test. *Neural Computing and Applications*, Vol. 5, No. 3, pp. 131-133.
- Wan Jaafar, W.Z., and Han, D. (2012). Uncertainty in index flood modeling due to calibration data sizes. *Hydrological Processes*, Vol. 26, No. 2, pp. 189-201.

Received	February 11, 2019
Revised	February 12, 2019
Accepted	February 22, 2019