



## Application of exponential bandwidth harmony search with centralized global search for advanced nonlinear Muskingum model incorporating lateral flow

Kim, Young Nam<sup>a</sup> · Lee, Eui Hoon<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Master Student, Department of Civil Engineering, Chungbuk national University, Chungju, Korea

<sup>b</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk national University, Chungju, Korea

Paper number: 20-058

Received: 3 June 2020; Revised: 8 July 2020; Accepted: 8 July 2020

### Abstract

Muskingum, a hydrologic channel flood routing, is a method of predicting outflow by using the relationship between inflow, outflow, and storage. As many studies for Muskingum model were suggested, parameters were gradually increased and the calculation process was complicated by many parameters. To solve this problem, an optimization algorithm was applied to the parameter estimation of Muskingum model. This study applied the Advanced Nonlinear Muskingum Model considering continuous flow (ANLMM-L) to Wilson flood data and Sutculer flood data and compared results of the Linear Nonsingum Model incorporating Lateral flow (LMM-L), and Kinematic Wave Model (KWM). The Sum of Squares (SSQ) was used as an index for comparing simulated and observed results. Exponential Bandwidth Harmony Search with Centralized Global Search (EBHS-CGS) was applied to the parameter estimation of ANLMM-L. In Wilson flood data, ANLMM-L showed more accurate results than LMM-L. In the Sutculer flood data, ANLMM-L showed better results than KWM, but SSQ was larger than in the case of Wilson flood data because the flow rate of Sutculer flood data is large. EBHS-CGS could be applied to be applicable to various water resources engineering problems as well as Muskingum flood routing in this study.

**Keywords:** Flood routing, Muskingum model, ANLMM-L, Optimization algorithm, Harmony search, EBHS-CGS

## Advanced nonlinear Muskingum model incorporating lateral flow를 위한 exponential bandwidth harmony search with centralized global search의 적용

김영남<sup>a</sup> · 이의훈<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>충북대학교 토목공학과 석사과정, <sup>b</sup>충북대학교 토목공학부 조교수

### 요 지

하도홍수추적을 위한 수문학적 방법인 머스킹검 방법은 유입량, 유출량 그리고 저류량의 관계를 활용하여 유출량을 예측하는 방법이다. 머스킹검 방법에 관한 많은 연구가 진행되면서 필요한 매개변수들은 점점 늘어나게 되었고, 많은 매개변수로 인해 계산과정이 복잡해졌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최적화 알고리즘을 머스킹검 방법의 매개변수 산정에 적용하였다. 본 연구는 Advanced Nonlinear Muskingum Model considering continuous flow (ANLMM-L)를 Wilson 홍수자료와 Sutculer 홍수자료에 적용하여 Linear Muskingum Model incorporating Lateral flow (LMM-L)과 Kinematic Wave Model (KWM)의 결과와 비교하였다. 관측 유출량과 모의 유출량의 비교를 위한 지표로 Sum of Squares (SSQ)를 사용하였다. Exponential Bandwidth Harmony Search with Centralized Global Search (EBHS-CGS)가 ANLMM-L의 매개변수 산정에 적용되었다. Wilson 홍수자료에 적용한 결과 LMM-L보다 ANLMM-L이 정확한 결과를 나타냈다. Sutculer 홍수자료에서는 ANLMM-L이 KWM보다 좋은 결과를 보이긴 했으나, Sutculer 홍수자료의 유량이 크기 때문에 Wilson 홍수자료의 경우에 비해 SSQ가 크게 나타났다. EBHS-CGS는 본 연구에서 적용한 머스킹검 홍수추적뿐만 아니라 다양한 수자원 공학 문제에 적용할 수 있을 것이다.

**핵심용어:** 홍수추적, 머스킹검 방법, ANLMM-L, 최적화 알고리즘, Harmony Search, EBHS-CGS

\*Corresponding Author. Tel: +82-43-261-2407  
E-mail: hydrohydro@cbnu.ac.kr (E. H. Lee)

## 1. 서론

하도홍수추적 방법은 수리학적 홍수추적 방법과 수문학적 홍수추적 방법으로 구분된다. 수리학적 홍수추적 방법은 높은 정확도를 보장하지만 홍수추적을 위한 자료가 많이 필요하고 시간도 많이 소요된다. 반대로 수문학적 홍수추적 방법은 다소 정확도가 떨어지지만 홍수추적을 위한 자료가 많이 필요하지 않고, 소요되는 시간이 짧다. 많은 자료가 필요하지 않은 수문학적 홍수추적에 관한 다양한 연구들이 진행되어 왔으며 대표적으로 머스킹검 방법이 있다. 머스킹검 방법은 유입량, 저류량 그리고 유출량의 상관관계를 활용하는 수문학적 홍수추적 방법이다.

McCarthy (1938)가 처음 고안한 머스킹검 방법(Linear Muskingum Model, LMM)은 대형저류와 켄지저류를 유입량과 유출량의 상관관계로 표현하여 저류량의 변화를 모의하고 이를 통해 유출량을 계산하는 방법이다. LMM은 저류상수(K)와 가중치(x)를 통해 저류량의 변화를 모의하는 간단한 선형방정식으로 이루어져 있다. 하지만 자연유역에서의 유입량과 유출량을 선형방정식인 LMM으로 추정하는 것은 한계가 있었다. 복잡한 자연유역의 홍수추적을 위해 Gill (1978)은 비선형계수(m)를 추가하여 비선형 머스킹검 방법(Nonlinear Muskingum Model, NLMM)을 제안하였다. NLMM은 복잡한 자연유역의 홍수추적이 가능했으나, 측방유입을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있었다. O'Donnell (1985)은 측방유입을 고려하기 위하여 측방유입계수( $\beta$ )를 적용한 3변수 머스킹검 방법(Linear Muskingum Model Incorporating Lateral Flow, LMM-L)을 제안하였다. 이후 머스킹검 방법의 정확도를 올리기 위해 이전 시간의 유입량을 고려한 가중유입량(weighted inflow)을 추가한 Nonlinear Muskingum Model incorporating Lateral flow (NLMM-L, Karahan *et al.*, 2015)이 제안되었고, 이를 개량하여 전 시간과 전전 시간의 유입량을 고려한 가중유입량을 추가한 Advanced Nonlinear Muskingum Model considering continuous flow (ANLMM-L, Lee *et al.*, 2018)이 제안되었다.

머스킹검 방법의 정확도를 올리기 여러 연구가 진행되었고, 측방유입, 비선형적인 유입량과 유출량의 관계 그리고 연속적 흐름 특성과 같은 자연유역의 특징을 고려하기 위해 머스킹검 방법의 매개변수의 수는 점점 늘어났다. 특히, ANLMM-L에서는 저류상수(K), 가중치(x), 비선형계수(m), 측방유입계수( $\beta$ ), 그리고 유입량 가중치( $\theta_1, \theta_2$ )까지 총 6개의 매개변수가 존재한다. 늘어난 매개변수로 인해 매개변수를 직접 계산으로 구하기 매우 어려워졌고, 이를 해결하고자 메타 휴리스

틱 최적화 알고리즘(Meta heuristic optimization algorithm)이 적용되었다.

메타 휴리스틱 최적화 알고리즘은 경우의 수가 많아 일일이 계산하기 불가능하거나 정확한 방정식이 존재하지 않을 경우 발견적 탐색방법을 적용하여 근사값을 찾는 알고리즘이다. 다양한 메타 휴리스틱 최적화 알고리즘에 관한 많은 연구가 진행되어왔으며 그중 Geem *et al.* (2001)이 개발한 Harmony Search (HS)는 최적화 과정이 간단하여 많은 연구자들이 사용하였다. 하지만 HS는 최적화 과정이 간단한 만큼 복잡한 문제에서 정확한 결과를 찾기 어려웠고 더 정확한 결과값을 얻기 위해 HS를 개량할 수 있는 다양한 연구들이 진행되었다. HS를 개량한 대표적인 알고리즘으로 Mahdavi *et al.* (2007)이 개발한 Improved Harmony Search (IHS)가 있다. IHS는 HS의 매개변수인 Pitch Adjusting Rate (PAR)과 bandwidth (bw)를 반복시산 횟수에 따라 변화도록 개량하였다. 이후 다양한 HS의 개량방안이 제시되어 왔으며(Omran and Mahdavi, 2008; Wang and Huang, 2010), 본 연구에서 사용하게 되는 Exponential Bandwidth Harmony Search with Centralized Global Search (EBHS-CGS)는 효과적인 국지탐색을 위한 Exponential Bandwidth (Ebw)와 효율적인 전역탐색을 위한 Centralized Global Search (CGS)로 구성된 최적화 알고리즘으로 다양한 문제에서 좋은 결과를 보여주었다(Kim and Lee, 2020).

본 연구에서는 ANLMM-L의 매개변수 추정에 EBHS-CGS를 적용함으로써 ANLMM-L이 기존 머스킹검 방법보다 유출량 모의에 더 효과적임을 확인하여 EBHS-CGS가 수자원 공학 문제에도 적용할 수 있음을 확인하고자 한다.

## 2. 연구방법

머스킹검 홍수추적방법으로 Lee *et al.* (2018)이 제안한 ANLMM-L를 사용하였고 머스킹검 홍수추적방법의 매개변수 추정을 위해 Kim and Lee (2020)이 제안한 EBHS-CGS를 적용하여 2가지 홍수자료의 홍수추적을 실시하였다. EBHS-CGS의 목적 함수는 관측 유출량과 모의 유출량의 오차로 설정하였으며 오차 계산은 Sum of squares (SSQ)로 실시하였다. Eq. (1)는 SSQ를 적용한 최적화 알고리즘의 목적함수이다.

$$\text{Minimize } SSQ = \sum (O_{obs} - O_{cal})^2 \quad (1)$$

여기서,  $O_{obs}$ 는 관측 유출량 그리고  $O_{cal}$ 는 모의 유출량이다.

## 2.1 Exponential Bandwidth Harmony Search with Centralized Global Search (EBHS-CGS)

EBHS-CGS는 HS의 성능개선을 위해 반복시산에 따라 국지탐색의 폭을 조절하였으며 효과적인 전역탐색을 위한 새로운 방법을 제안하였다. 국지탐색 강화를 위해 시산횟수가 증가함에 따라 탐색의 폭을 줄일 수 있는 Ebw를 적용하였고 효과적인 전역탐색을 위해 가장 좋은 결정변수에 따라 탐색범위를 축소하는 CGS를 적용하였다.

### 2.1.1 Exponential Bandwidth (Ebw)

EBHS-CGS의 Ebw는 HS의 매개변수인 PAR과 Harmony Memory Consider Rate (HMCR)를 구성요소로 하고 있으며 반복시산에 따라 각 결정변수의 bw값이 변하도록 하기 위해 현재 시산 횟수와 최대 시산 횟수를 포함한 식으로 구성되어 있다. Ebw는 Eq. (2)와 같다.

$$Ebw = \text{EXP}\left(\frac{-k}{N \times PAR \times HMCR}\right) \quad (2)$$

여기서, N은 최대 시산 횟수, k는 현재 시산 횟수이다.

Eq. (2)와 같은 Ebw는 변수의 범위를 고려하지 못하기 때문에 EBHS-CGS는 Eq. (3)과 같은 형태의 Ebw를 제안하였다.

$$Ebw = \text{Range}(x) \times \text{EXP}\left(\frac{-k}{N \times PAR \times HMCR}\right) \quad (3)$$

여기서, N은 최대 시산 횟수, k는 현재 시산 횟수, Range(x)는 변수 x의 범위이다.

초기 해집합의 크기는 최적화 알고리즘에서 중요한 역할을 한다. 초기 해집합이 크면 전역탐색에는 유리하지만 국지탐색이 효과적이지 못하여 최적해를 찾기 힘들다. 반대로 초기 해집합이 작으면 국지탐색에 유리하지만, 지역해에 빠져 최적해를 찾기 힘들다. 따라서 초기 해집합의 크기를 어떻게 설정하느냐에 따라 최적화 알고리즘의 결과가 달라진다.

본 연구에서는 초기 해집합의 크기를 고려하지 못하는 기존 Ebw를 개선하기 위해 Ebw에 HS에서 초기 해집합의 크기를 의미하는 Harmony Memory Size (HMS)를 추가하여 새로운 Modified Exponential bandwidth (MEbw) 제안하였다. MEbw는 Eq. (4)와 같다.

$$MEbw = \text{Range}(x) \times \text{EXP}\left(\frac{-k}{N \times HMS \times PAR \times HMCR}\right) \quad (4)$$

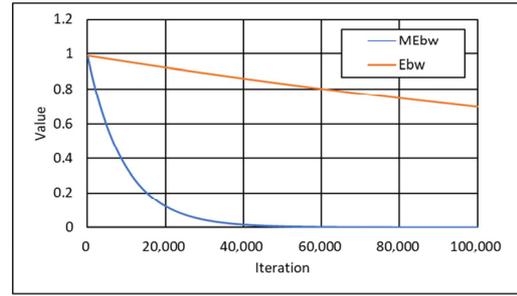


Fig. 1. Variation of Ebw and MEbw

여기서, N은 최대 시산 횟수, k는 현재 시산 횟수, Range(x)는 변수 x의 범위이다.

Ebw와 MEbw의 시산에 따른 차이를 보기 위해 HMS, HMCR, PAR, 최대 시산 횟수 및 결정변수의 범위를 설정하여 살펴보았다. Fig. 1은 HMS가 30, HMCR이 0.7, PAR이 0.5, 최대 시산 횟수가 100,000, 그리고 결정변수의 범위가 0.99일 때 Ebw 및 MEbw의 시산횟수에 따른 변화를 보여주고 있다.

Fig. 1에서 MEbw의 최솟값은 0에 근접하는 반면, Ebw의 최솟값은 약 0.7이다. Ebw 및 MEbw를 포함하는 bw는 각 결정변수의 변동 폭으로 결정한다. 각 bw의 최솟값을 비교해보면 시산이 진행됨에 따라 MEbw가 Ebw에 비해 더 작은 값을 가지기 때문에 MEbw를 적용할 경우 더 세부적인 조절이 가능한 것을 확인할 수 있다.

### 2.1.2 Centralized Global Search (CGS)

적용할 문제에 지역해가 많은 경우 지역해에서 빠져나오기 위해 효율적인 전역탐색이 필요하다. CGS는 효율적인 전역탐색을 위해 현재 최적해를 고려하여 각 결정변수의 탐색범위를 축소하는 역할을 한다. CGS의 적용과정은 다음과 같다.

1. 탐색범위의 중앙에서부터 HM 내의 최적 결정변수까지의 거리(A)를 구한다.
2. 탐색범위 중앙에서 A를 더하거나 빼주어 최적 결정변수의 대칭값을 만든다.
3. 최적 결정변수와 그 대칭값을 상한과 하한으로 하는 새로운 탐색범위를 설정한다.
4. 새로운 탐색범위로 전역탐색을 실시한다.

CGS는 새로운 매개변수 Centralized Global Search Rate (CGSR)를 기반으로 확률에 따라 실행되며 0과 1 사이의 값을 갖는다. CGS는 반복시산이 진행됨에 따라 탐색범위가 줄어들게 된다. Fig. 2는 전역탐색의 범위를 조절하는 CGS의 모식도를 나타낸 것이다.

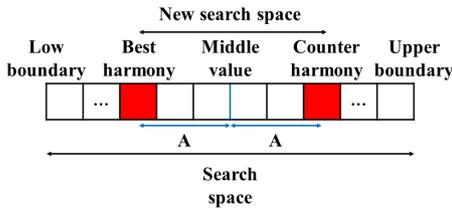


Fig. 2. Concept of changing global search range (Kim and Lee, 2020)

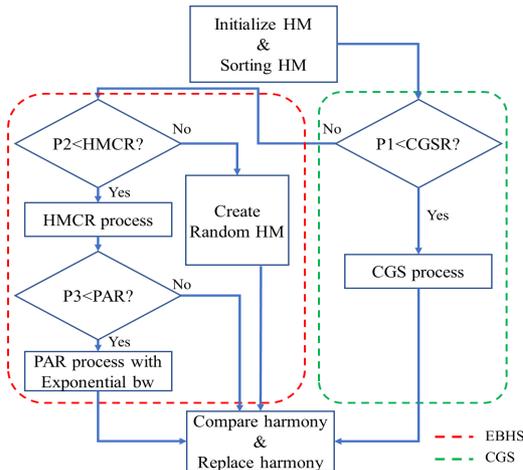


Fig. 3. Flowchart of EBHS-CGS (Kim and Lee, 2020)

Fig. 3는 EBHS-CGS의 탐색과정을 나타내는 흐름도이며 여기서 P1, P2 및 P3는 매 계산 과정 중 무작위로 생성되는 0과 1사이의 실수이다.

Fig. 3을 보면 EBHS와 CGS가 서로 독립적으로 운영된다. CGS는 변수의 탐색범위를 축소하여 탐색을 실시하므로 일반적인 전역탐색과는 다르며 EBHS에 포함되지 않고 독립적으로 수행된다.

**2.2 Advanced Nonlinear Muskingum Model considering continuous flow (ANLMM-L)**

머스킹검 방법은 하천구간 내 저류량을 대형저류와 썰기저류의 합으로 가정하였다. 여기서 대형저류는 유출량에 비례하고 썰기저류는 유입량과 유출량의 차이와 비례한다. 머스킹검 방법에서 저류량은 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$S = KO + Kx(I - O) \tag{5}$$

여기서 S는 저류량, K는 저류상수, x는 가중치이다.

머스킹검 방법은 Eq. (5)에 대입하여 추적구간 상류부의 유입량으로부터 하류부의 유출량을 축차적으로 계산하며 Eq. (6)과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = I - O \tag{6}$$

여기서 dS는 저류량의 변화량, dt는 자료의 시간간격, I는 유입량, O는 유출량이다.

NLMM-L은 이전 시간의 유입량을 고려하기 위한 가중 유입량(Weighted inflow)을 제시하였다. NLMM-L의 가중 유입량은 Eq. (7)과 같다.

$$W_t = [\theta I_t + (1 - \theta)I_{t-1}] \tag{7}$$

여기서, W<sub>t</sub>는 가중 유입량, θ는 가중치, I<sub>t</sub>는 t시간의 유입량 그리고 I<sub>t-1</sub>은 t-1시간의 유입량이다.

Lee et al. (2018)은 Karahan et al. (2015)이 개발한 NLMM-L을 개량한 ANLMM-L을 제안하였다. ANLMM-L은 연속적인 유입량을 고려한 가중 유입량을 산정한다. ANLMM-L의 가중 유입량은 Eq. (8)과 같다.

$$W_t = [(1 - \theta_1)I_t + \theta_1 I_{t-1}] \quad (t = 2)$$

$$W_t = [(1 - \theta_1 - \theta_2)I_t + \theta_1 I_{t-1} + \theta_2 I_{t-2}] \quad (t \geq 3) \tag{8}$$

여기서, W<sub>t</sub>는 가중 유입량, θ<sub>1</sub>과 θ<sub>2</sub>는 유입량가중치, I<sub>t</sub>는 t시간의 유입량, I<sub>t-1</sub>은 t-1시간의 유입량 그리고 I<sub>t-2</sub>는 t-2시간의 유입량이다.

앞서 Eq. (8)을 통해 산정한 가중 유입량을 Eq. (9)에 대입하여 유출량을 계산한다.

$$Q_t = \left(\frac{1}{1-x}\right) \left(\frac{S_t}{K}\right)^{1/m} - \left(\frac{(1+\beta)x}{1-x}\right) W_t \tag{9}$$

여기서 Q<sub>t</sub>는 t시간의 유출량, S<sub>t</sub>는 t시간의 저류량, W<sub>t</sub>는 t시간의 가중 유입량, K는 저류상수, x는 가중치, m은 비선형계수 그리고 β는 측방유입계수이다.

Eq. (9)를 통해 계산한 t시간의 유출량과 관측 유입량을 Eq. (10)에 대입하여 t+1시간의 저류량을 계산한다.

$$S_{t+1} = S_t + [(1 + \beta)I_t - Q_t]dt \tag{10}$$

여기서 S<sub>t+1</sub>은 t+1시간의 저류량, S<sub>t</sub>는 t시간의 저류량, I<sub>t</sub>는 t시간의 유입량, O<sub>t</sub>는 t시간 유출량, β는 측방유입계수 그리고 dt는 자료의 시간 간격이다.

### 3. 결 과

ANLMM-L에 적용한 EBHS-CGS는 HMS를 30으로, HMCR을 0.7으로, PAR을 0.5로 그리고 CGSR을 0.5로 설정하여 수행하였다. Table 1은 각 홍수자료의 ANLMM-L 매개변수 범위이다.

#### 3.1 Wilson 홍수자료

Wilson 홍수자료는 Wilson (1974)이 비선형 머스킹검 방법을 제안하기 위해 적용한 홍수자료이다. Wilson 홍수자료는 매우 작은 측방유입과 단일 첨두유량 곡선을 가지고 있다.

Table 1. Definition of parameters in ANLMM-L

flood data	k	x	m	$\beta$	$\theta_1$	$\theta_2$
Wilson flood data	0.01 ~ 1.00	-0.50 ~ 0.50	1.00 ~ 3.00	-0.10 ~ 0.10	0.00 ~ 1.00	0.00 ~ 1.00
Sutculer flood data	0.01 ~ 1.00	-0.50 ~ 0.50	1.00 ~ 3.00	-0.10 ~ 0.10	0.00 ~ 1.00	0.00 ~ 1.00

Table 2. Results for Wilson flood data

Time (hour)	Input (m <sup>3</sup> /s)	Output (m <sup>3</sup> /s)	LMM-L (m <sup>3</sup> /s)	ANLMM-L (m <sup>3</sup> /s)
0	22	22	22.0	22.00
6	23	21	22.1	21.58
12	35	21	21.7	21.69
18	71	26	22.6	25.51
24	103	34	30.7	34.50
30	111	44	44.7	43.66
36	109	55	58.1	54.67
42	100	66	68.9	66.04
48	86	75	76.1	75.49
54	71	82	79.2	82.11
60	59	85	78.5	84.98
66	47	84	75.6	83.93
72	39	80	70.7	79.61
78	32	73	65.1	72.64
84	28	64	59.1	63.85
90	24	54	53.4	54.35
96	22	44	47.9	44.83
102	21	36	43.1	36.22
108	20	30	38.9	29.37
114	19	25	35.4	24.53
120	19	22	32.3	21.29
126	18	19	29.9	19.73
SSQ	-	-	815.68	4.61

EBHS-CGS를 적용하여 산정한 ANLMM-L의 매개변수는  $K = 0.8575$ ,  $x = 0.3368$ ,  $m = 1.7649$ ,  $\beta = -0.0214$ ,  $\theta_1 = 0.6962$  그리고  $\theta_2 = 0.2392$ 이다. Table 2는 Wilson 홍수자료의 결과를 나타낸 표이다.

Table 2의 LMM-L의 결과는 O'Donnel (1985)의 결과를 인용하였고, ANLMM-L의 결과는 EBHS-CGS를 적용하여 구한 결과이다. Table 2에 따르면 LMM-L의 SSQ가 815.68, ANLMM-L의 SSQ는 4.61로 LMM-L보다 오차가 작게 산출되었다. 첨두 유출량이 발생한 60시간에서 2가지 머스킹검 방법 간의 오차를 비교하면, LMM-L은 78.5 m<sup>3</sup>/s로 약 6.5 m<sup>3</sup>/s의 오차가 발생하였다. 이외의 시간에서도 전반적으로 ANLMM-L이 LMM-L보다 관측 유출량과 유사한 결과를 보여준 것을 확인할 수 있으며, 따라서 ANLMM-L이 Wilson 홍수자료에서 전반적으로 더 정확한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 Wilson 홍수자료의 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 살펴보면 ANLMM-L이 LMM-L보다 대부분 구간에서 관측 유출량과 비슷하게 산출된 것을 볼 수 있다. 특히 LMM-L은 54시간부터 오차가 크게 나타나기 시작했으며 마지막 126시간일 때 오차는 10.9 m<sup>3</sup>/s 정도로 매우 크게 나타났다.

#### 3.2 Sutculer 홍수자료

Sutculer 홍수자료는 터키의 Sutculer 시에서 1995년 11월 4일에 측정된 홍수자료이다. Sutculer 홍수자료는 일반적인 다른 홍수자료와는 다르게 두 개의 첨두 유출량을 보여주고 있다. EBHS-CGS를 적용하여 산정한 ANLMM-L의 매개변

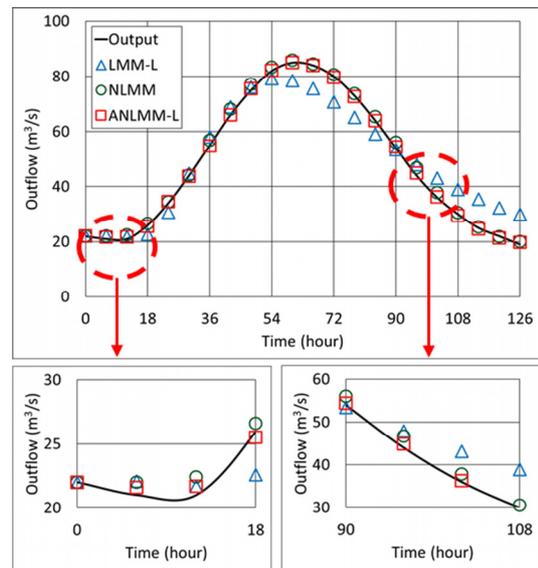


Fig. 4. Comparison of results for Wilson flood data

수는  $K = 0.6772$ ,  $x = -0.2979$ ,  $m = 1.0103$ ,  $\beta = -0.0409$ ,  $\theta_1 = 0.5505$  그리고  $\theta_2 = 0.3714$ 이다. Table 3은 Kinematic Wave Model (KWM) 및 ANLMM-L를 적용한 Sutculer 홍수자료의 결과를 표로 정리한 것이다.

Table 3의 KWM의 결과는 Karahan and Gurarslan (2013)의 결과를 인용하였고, ANLMM-L의 결과는 EBHS-CGS를 적용하여 구한 결과이다. Table 3를 살펴보면 KWM의 SSQ는 532.62이고, ANLMM-L의 SSQ는 280.60이며 ANLMM-L의 오차가 252.02만큼 작다. 두 방법 모두 유출량이 급격하게

증가하는 2시간일 때부터 큰 오차를 보이지만 대부분의 시간에서 ANLMM-L의 오차가 KWM에 비해 더 작다.

Sutculer 홍수자료에서 첨두 유출량이 발생한 시간에서 두 머스킹검 방법 간의 오차를 비교하면 첫 번째 첨두 유출량이 발생한 4시간의 경우 ANLMM-L의 유출량은  $75.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 관측 유출량인  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ 와의 오차가  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 KWM의 유출량은  $73.78 \text{ m}^3/\text{s}$ 로  $1.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 오차가 발생하였다. 두 번째 첨두 유출량이 발생한 16시간의 경우 KWM의 유출량은  $206.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 ANLMM-L의 유출량은  $204.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 관측 유출량인  $206 \text{ m}^3/\text{s}$ 와의 오차가 각각  $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$  및  $1.99 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 이러한 결과를 바탕으로 전체 시간에서의 결과는 ANLMM-L이 더 작은 오차를 보여주지만 첨두 유출량에서의 결과는 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 Sutculer 홍수자료의 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 살펴보면 0시간에서 2시간까지 KWM 및 ANLMM-L에 의해 계산된 유출량이 관측 유출량과 큰 오차를 보여준다. 특히 2시간일 때 KWM 및 ANLMM-L에 의해 계산된 유출량이 각각  $13.02 \text{ m}^3/\text{s}$  및  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 오차를 나타낸다. 이후 3시간부터 5시간까지의 결과에서는 KWM의 유출량보다 ANLMM-L의 유출량이 관측 유출량과 근접한 결과

Table 3. Results for Sutculer flood data

Time (hour)	Input ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Output ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	KWM ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	ANLMM-L ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
0	7.53	7	7.00	7.00
1	9.06	8	7.62	7.41
2	28.00	23	9.98	9.00
3	79.80	25	29.16	27.51
4	64.30	75	73.78	75.06
5	38.20	60	63.01	61.32
6	41.40	40	41.98	37.33
7	41.30	41	41.25	39.80
8	33.80	41	40.48	39.45
9	32.00	32	34.64	32.53
10	29.00	30	32.13	30.72
11	35.00	34	29.52	27.97
12	63.10	35	36.16	33.97
13	110.00	60	62.98	60.72
14	170.00	105	108.45	105.20
15	216.00	160	166.29	161.87
16	131.00	206	206.02	204.01
17	101.00	128	136.31	127.60
18	65.00	97	104.68	97.47
19	62.40	61	67.14	63.30
20	53.80	60	63.35	59.95
21	36.30	50	53.18	51.49
22	29.60	33	37.84	35.09
23	25.00	27	30.34	28.53
24	21.30	23	25.11	24.02
25	19.60	19	21.68	20.48
26	18.00	18	19.71	18.82
27	17.30	17	18.10	17.28
28	17.00	17	17.39	16.61
29	16.00	17	16.97	16.30
SSQ	-	-	532.62	280.60

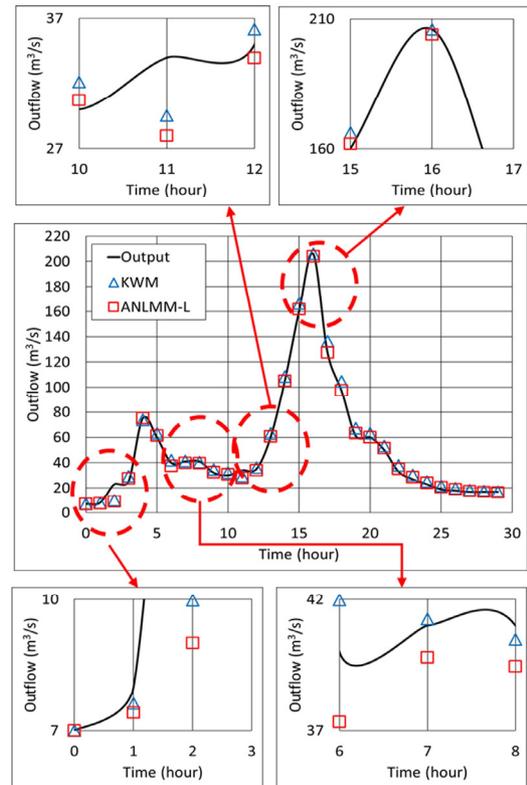


Fig. 5. Comparison of results for Sutculer flood data

를 보였다. 반대로 6시간에서 8시간까지의 결과를 살펴보면 KWM의 유출량이 ANLMM-L의 유출량보다 관측 유출량에 더 근접하였다. 첫 번째 첨두 유출량을 지나 두 번째 첨두 유출량으로 이어지는 유출량 상승구간인 10시간에서 12시간까지의 기간에서는 11시간인 경우를 제외하면 ANLMM-L이 관측유출량 곡선에 더 근접한다. 두 번째 첨두 유출량이 발생하는 15시간에서 17시간까지 기간에서는 ANLMM-L이 KWM보다 관측 유출량 곡선에 더 근접하게 나타난다.

이러한 결과가 발생하는 이유는 ANLMM-L은 연속적인 유입량을 고려하여 유출량을 산출하는 머스킹검 방법이므로 유출량의 변동이 크거나 유출량의 상승 및 하강이 반복될 경우 이를 고려하여 계산하지 못하는 단점이 발생한다. Sutculer 홍수자료의 경우 Wilson 홍수자료에 비해 더 큰 관측 유출량으로 구성되어 있기 때문에 ANLMM-L의 효율이 크지 않았다. 추가적으로 ANLMM-L의 연속적인 유입량을 반영하는 방식은 유입량 계산방법의 특성상 Sutculer 홍수자료와 같이 두 개 이상의 첨두 유출량이 발생하는 홍수자료에서 완벽하게 관측 유출량을 반영할 수 없었다.

#### 4. 결론

본 연구는 ANLMM-L을 Wilson 홍수자료와 Sutculer 홍수자료에 적용하여 LMM-L과 KWM의 결과와 비교해 보았다. 비교를 위한 지표로 관측 유출량과 계산 유출량의 오차를 계산했으며, 오차계산은 SSQ로 하였다. Wilson 홍수자료의 결과를 살펴보면 ANLMM-L의 SSQ가 4.61로 LMM-L의 SSQ가 845.68인 것에 비해 정확한 값을 나타낸다. Sutculer 홍수자료의 결과를 보면 ANLMM-L의 SSQ는 280.60으로 KWM의 SSQ가 532.62인 것에 비해 정확한 결과를 보이지만, Wilson 홍수자료에서의 ANLMM-L의 결과보다 좋지 않게 나타났다. Sutculer 홍수자료에서 ANLMM-L이 가장 큰 오차를 보이는 시간은 관측 유출량이 증가에서 감소로 또는 감소에서 증가로 변화할 때였으며 이때 KWM이 ANLMM-L보다 더 오차가 작게 나타나는 경우도 발생하였다. 두 홍수자료에서의 적용결과를 비교해보면 관측 유출량의 증감 추세가 변화하는 시간이 상대적으로 적은 Wilson 홍수자료에서 더 좋은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 연속적인 유입량을 고려하는 ANLMM-L의 특성상 유출량의 증감 추세가 변화하는 시간이 많은 홍수자료에서 정확한 유출량 예측이 어렵다는 것을 의미한다.

이후 연구를 통해 관측 유출량의 증감 추세가 변화하는 지

점에서 정확한 유출량 예측을 위해 ANLMM-L을 개량하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 ANLMM-L을 해외의 홍수자료에 적용하였으나 국내의 다양한 홍수자료에 대한 적용을 검토하는 연구가 필요하다. 추가적으로 EBHS-CGS은 HS에 비해 구조가 복잡하기 때문에 각 매개변수들을 자동으로 조절할 수 있는 자가적응형 최적화 알고리즘에 대한 연구도 이어질 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었습니다 (20NSPS-B154315-03).

#### References

- Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. (2001). "A new heuristic optimization algorithm: harmony search." *Simulation*, Simulation Councils INC, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
- Gill, M.A. (1978). "Flood routing by the Muskingum model." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 36, No. 3-4, pp. 353-363.
- Karahan, H., and Gurarlan, G. (2013). "Modelling flood routing problems using kinematic wave approach: Sutculer example." *Proceedings of the 7th National Hydrology Congress*, Isparta, Turkey, pp. 26-27.
- Karahan, H., Gurarlan, G., and Geem, Z.W. (2015). "A new non-linear Muskingum flood routing model incorporating lateral flow." *Engineering Optimization*, Taylor and Francis, Vol. 47, No. 6, pp. 737-749.
- Kim, Y.N., and Lee, E.H. (2020). "Development of the meta-heuristic optimization algorithm: Exponential bandwidth harmony search with centralized global search." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, JKAIS, Vol. 21, No. 2, pp. 8-18.
- Lee, E.H., Lee, H.M., and Kim, J.H. (2018). "Development and application of advanced Muskingum flood routing model considering continuous flow." *Water*, MDPI, Vol. 10, No. 6, p. 760.
- Mahdavi, M., Fesanghart, M., and Damangir, E. (2007). "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems." *Applied mathematics and computation*, Elsevier Science INC, Vol. 188, No. 2, pp. 1567-1579.
- McCarthy, G.T. (1938). "The unit hydrograph and flood routing." *Proceedings Conference of North Atlantic Division*, U.S. Army Corps of Engineers, New London, CT.
- O'Donnell, T. (1985). "A direct three-parameter Muskingum procedure incorporating lateral inflow." *Hydrological Sciences Journal*,

- Taylor and Francis, Vol. 30, No. 3, pp. 479-496.
- Omran, M.G., and Mahdavi, M. (2008). "Global-best harmony search." *Applied mathematics and computation*, Elsevier Science INC, Vol. 198, No. 2, pp. 643-656.
- Wang, C.M., and Huang, Y.F. (2010). "Self-adaptive harmony search algorithm for optimization." *Expert Systems with Applications*, Pergamon-Elsevier Science LTD, Vol. 37, No. 4, pp. 2826-2837.
- Wilson, E.M. (1974). *Engineering Hydrology*. Macmillan, London.