

# 등가하천 개념을 이용한 관망 간략화 홍수추적

## Simplified Flood Routing of Urban Drainage Using Meta-channel Concept

김환석\*, 이경섭\*\*, 박기정\*\*\*, 윤재영\*\*\*\*

Hwan Seok Kim, Gyung Seob Lee, Gijung Pak, Jae Young Yoon

### 요 지

관로의 수리학적 홍수추적은 정확성을 기할 수 있다는 장점이 있으나 2차원 해석을 할 경우 광범위한 관망의 개별적인 계산이 요구되어 계산시간이나 수월성 측면에서 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 2차원 관망을 1차원으로 전환시키는 방법인 등가하천 개념을 도입하여 도시구역의 유출량 산정에 있어서 여러 지선들을 개별적으로 모의하지 않으면서도 실제 존재하는 지선들의 효과를 고려할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다. 등가하천 개념의 관망 적용을 통해 등가관로의 수리기하조건을 유도하였으며 이를 이용하여 관망 간략화 홍수추적을 수행하였다. 등가관로 홍수 추적을 위해 Saint-Venant 방정식에서 유도된 비선형 확산파 방정식이 사용되었으며 이의 수치모의를 위해 양해법을 이용하였다. 본 연구에서는 등가하천 개념 적용을 통해 결정된 군자배수구역의 등가관로 수리매개변수인 파속 및 확산계수를 이용하여 확산파 방정식에 의해 홍수추적을 실시하였고, 그 결과를 SWMM에 의한 2차원 관망 해석결과와 비교하였다. 검토결과 등가관로를 통한 홍수추적결과가 실제 관망분포를 그대로 고려했을 경우를 잘 재현하는 것으로 나타나 등가하천개념의 도시구역 적용성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어 : 관망 간략화, 등가하천 개념, 수리기하조건, 관로홍수추적, 확산파방정식**

### 1. 서 론

도시구역에서의 관망의 배열은 통상 매우 복잡하기 때문에 그대로 홍수추적을 모의하기에는 많은 번거로움이 따르며, 실제 그대로를 모의한다고 하더라도 작은 오차들이 누적되어 양호한 결과를 기대하기 어려운 경우가 많다. 또한, 상수도의 경우에서도 실제관망을 통한 부정류해석의 어려움이 수반되어 실제관망 정보의 간략화가 필요하다. 이에 김환석 등(2007)은 Snell 등(1995, 2004)이 자연하천유역에 대해 도입한 등가하천(meta-channel)개념을 이용해 2차원적인 관망을 1차원으로 변환시켜 그 수리기하조건을 결정하였다.

본 연구에서는 이와 같은 등가관로를 통해 관로홍수추적을 수행함으로써 분포형모형의 복잡성을 피하면서도 강우-유출 모의에 있어서 물리적인 접근방법을 택함으로써 기존의 집중형 모형이 가지는 단점을 극복하고자 하였다.

홍수추적을 위하여 간단한 Muskingum 모델, Saint-Venant 방정식에 기초한 유한차분모델 등 다양한 모델이 제시되어 왔으며(Weinmann and Laurenson, 1979), 확산파 모델은 Saint-Venant 방정식의 근사식으로 많이 사용되어 지고 있다(Gonwa and Kavvas, 1986).

모형 적용을 위한 대상유역으로 군자배수구역을 선정하였으며 이에 대한 등가관로화를 수행하여 수리매개변수인 파속과 확산계수를 추정하였다. 홍수추적에 사용된 확산파 모델의 지배방정식 풀이에는 양해법을 사용하였으며, 이의 적용에는 경계조건, 초기조건, 측방유입수 및 안정적인 해를 얻을 수 있는 공간 및 시간

\* 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : [tinymons@korea.ac.kr](mailto:tinymons@korea.ac.kr)

\*\* 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : [lksyj@hanmail.net](mailto:lksyj@hanmail.net)

\*\*\* 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : [gijpak00@hanmail.net](mailto:gijpak00@hanmail.net)

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 환경시스템공학과 조교수 · E-mail : [jyoon@korea.ac.kr](mailto:jyoon@korea.ac.kr)

간격의 결정이 필요하다. 유한차분화한 확산과 모델을 군자배수구역의 3개 경우사상에 적용하여 홍수추적을 실시하였으며 결과의 타당성을 검증하기 위해 2차원의 실제 배수 관망을 SWMM에 의해 홍수추적한 결과와 비교하였다.

## 2. 수치모형을 이용한 관로 추적

### 2.1 지배 방정식

홍수추적을 위한 비선형 확산과 방정식은 연속방정식과 운동량 방정식의 형태로 식(1) 및 식(2)와 같이 나타낼 수 있다(Bates and Sivapalan 1990).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2)$$

확산과 모델은 Saint-Venant 방정식에서 국부가속도와 대류가속도 항을 생략하여 얻은 근사식이며 Chezy 또는 Manning 공식을 이용하여 마찰경사를 다음과 같이 계산한다.

Manning

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{S_0 - \frac{\partial y}{\partial x}} \quad (3)$$

Chezy

$$Q = \frac{1}{n} AC \sqrt{R(S_0 - \frac{\partial y}{\partial x})} \quad (4)$$

여기서 R은 동수반경이다. 위의 식들을 결합하여 정리하면 아래와 같은 확산과 모델의 지배 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad D = \frac{Q}{2BS_0} \quad (5)$$

여기서 B는 수면폭, c는 파속, D는 확산계수를 의미한다(Cevza and Miguel, 2007). 또한 Q는 등가하천을 구성하는 하천단면을 통해 보존되는 전체유량을 의미하며 이와 마찬가지로 다른 수리변수들도 등가하천에 대한 매개변수이다.

### 2.2 수치모형

식(5)를 수치적으로 풀기 위하여 계산의 격점을  $t \geq 0$ ,  $0 \leq x \leq aL$  ( $a > 1$ ,  $L = \text{구간길이}$ )에 위치시킨다. x축은 n 개의 간격으로 나누어지며  $\Delta x = aL/N$ 일 때 계산 격점은  $x_i = (i-1)\Delta x$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N+1$ 과  $t_j = j\Delta t$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 으로 정의 된다. 각 항은 양해법에 의해 유한차분화 한다.

### 2.3 수치모형의 세부사항

#### 2.3.1 매개변수 추정

추정해야할 주요 매개변수로는 하도추적에 이용되는 확산과 방정식의 구간평균 파속(c(Q)) 및 구간평균 확산계수(D(Q))가 있으며 등가관로 수리하조건의 함수관계식으로부터 결정된다.

### 2.3.2 측방유입수

실제 등가관로의 홍수추적을 위해서는 측방 유입수를 고려하여야 한다. 측방유입수는 유입 지점인 맨홀의 출구로 부터의 거리만큼 증가하천에 위치시켜 고려 하였으며 각 소구역의 경사와 침투량을 고려 소구역에서의 시간에 따른 유출을 구하여 측방유입수로 하였다.

### 2.3.3 경계조건과 초기조건

해의 풀이를 위한 상류단 경계조건은 증가하천 상류단으로 유입되는 배수면적으로부터의 유출수문곡선이 다. 초기조건은 관에서의 초기 흐름으로 합류식관거의 경우 초기조건은 하수의 흐름이며 우수관거에서의 초기조건은 0이 된다. 하지만 초기조건으로 0의 값을 사용할 경우 결정된 주요 수리매개변수인 파속과 확산계수 관계식을 확산과 모델에 적용할 수 없으므로 0에 가까운 작은 값을 사용한다.

## 2.4 안정성

확산과 방정식을 수치적으로 풀이하는데 있어 배수관망 내에서 관로의 급속한 경사, 짧은 관로, 월류가 발생하는 맨홀 등이 있을 경우에는 계산된 유량값이 불안정할 수 있으므로 계산격자 선정에 유의해야 한다. 수치해의 안정성은 Courant number( $C_n$ )에 의해 파악될 수 있으며  $C_n$  값은 아래의 식과 같이 정의된다. 수치해의 안정성은 이 값이 1과 같거나 더 작아야 한다.

$$C_n = \frac{\text{Actual wave velocity}}{\text{Numerical wave velocity}} = \frac{|V| \pm c}{\Delta x / \Delta t} \quad (6)$$

여기서 V는 유속, c는 파속,  $\Delta x$  및  $\Delta t$ 는 공간 및 시간 계산 격자이다(Chaudhry, 1993).

## 3. 등가관로 홍수추적을 통한 홍수량 결정

### 3.1 공간과 시간간격의 결정

군자 배수구역(43개 소구역으로 분할)에 대해 형성된 등가관로의 총 길이는 2029.4m로 안정된 해를 얻기 위해서는  $C_n$ 값이 1보다 작아야 하며 이와 같은 조건이 충족될 수 있도록 적정한  $\Delta x$  및  $\Delta t$ 조합을 결정하였다. 강우사상 별로 결정된  $\Delta x$  및  $\Delta t$ 는 아래 표와 같다.

표 1. Case별  $\Delta x$ ,  $\Delta t$

	Case 1 2005-04-06	Case 2 2005-05-17	Case 3 2005-08-24
$\Delta x(m)$	100	100	100
$\Delta t(sec)$	30	10	10

### 3.2 파속(c(Q)) 및 확산계수(D(Q))의 추정

파속(c(Q))과 확산계수(D(Q))는 Saint-Venant 방정식에서 유도된 확산과 모델의 중요 매개변수이다. 본 연구에서는 김환석 등(2007)이 증가하천개념을 군자배수구역에 적용해 유도한 등가관로의 A(y) 및 Q(A) 관

계식을 이용하여 아래와 같이 파속식 및 확산계수식을 추정하였다.

$$c = \frac{dQ}{dA} = 1.328538A^{0.074} = 1.309211Q^{0.069} \quad (7)$$

$$D = \frac{Q}{2BS_0} = \frac{Q^{0.862}}{5.861902S_0} \quad (8)$$

### 3.3 경계조건과 측방유입수

#### 3.3.1 경계조건

본 연구에서는 군자배수구역의 43개 소구역중 최상류단에 위치한 소구역에서의 강우사상별 유출수문곡선을 상류단 경계조건으로 사용되었다.

#### 3.3.2 측방유입수

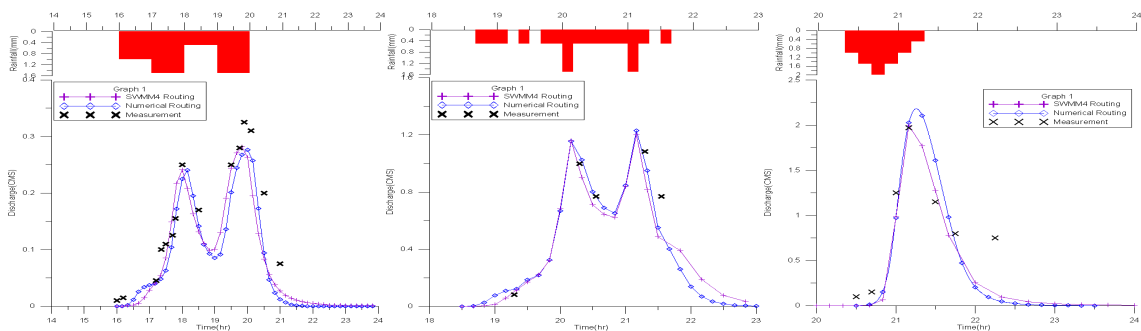
맨홀의 위치는 소구역에서 발생한 유출이 유입되는 지점이다. 따라서 출구에서 각 소구역의 유입맨홀까지의 거리를 구하여 등가관로상의 동일 거리에 위치시키고 소구역별 유출수문곡선을 이 지점에 측방유입수로 입력 하였다. 본 연구에서는 소구역별 유출수문곡선을 SWMM에 의하여 계산하였다.

### 3.4 홍수추적 결과

수치해석에 의해 계산된 등가관로 홍수추적 결과의 타당성을 검증하기위해 이를 SWMM에 의해 실제 배수관망에 대해 홍수추적한 결과와 비교하였으며 그 내용은 표 2 및 그림 1과 같다.

표 2. 유출분석 비교표

	Case 1 2005-04-06 강우사상		Case 2 2005-05-17 강우사상		Case 3 2005-08-24 강우사상	
	유출체적 (m <sup>3</sup> )	첨두 유출량 (cms)	유출체적 (m <sup>3</sup> )	첨두 유출량 (cms)	유출체적 (m <sup>3</sup> )	첨두 유출량 (cms)
SWMM	2,184	0.282	6,157	1.205	4,896	1.999
등가관로	2,075	0.277	6,355	1.231	5,236	2.183
비교	-4.7%	-1.8%	+3.1%	+2.1%	+6.9%	+9.2%



(a) Storm event 1 (2005-04-06)      (b) Storm event 2 (2005-05-17)      (c) Storm event 3 (2005-08-24)

그림 1. 강우사상별 유출분석 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 도시배수관망의 간략화 모의의 일환으로 자연하천유역에 대해 개발 적용되었던 등가하천 개념 및 수리기하조건 결정 방법을 군자배수구역에 대해 적용하여 등가관로의 수리기하조건을 결정 하였다. 이러한 등가관로에 대해 양해법에 의해 유한차분화한 확산과 모델을 적용하여 수치모의를 수행하였다. 이와 더불어 등가관로 모의의 적절성을 파악하기 위해 실제 2차원 배수관망에 대한 SWMM 모의를 실시하여 이를 등가관로 홍수추적결과와 비교하였다. SWMM 모의 결과와의 비교로부터 Case 1의 경우에는 SWMM 보다 유출체적 및 첨두 홍수량이 적은 값(4.7% 및 1.8%)이 나왔으며 Case 2의 경우에는 유출체적 및 첨두 홍수량이 더 큰 값(3.1% 및 2.1%)이 나왔다. 마지막 Case 3의 경우 또한 유출체적 및 첨두홍수량 모두 더 큰 값(6.9% 및 9.2%)이 계산되었다. 이와 같이 경우사상별로 계산결과에 다소 차이는 있지만 등가관로 홍수 추적에 의해 계산된 유출수문곡선은 전반적인 형상이라든가 첨두홍수치가 SWMM에 의한 상세모의 결과에 매우 근접하게 모의되어 등가관로 모의의 적용가능성이 높음을 파악할 수 있다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단에 의해 지원되었습니다. 더불어 소방방재청 자연재해경감사업단(NEMA-06-NH-03) 중 내배수 침수피해 저감기술 개발 과제의 의해 지원되었으며 관계당국에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 김환석, 박기정, 윤재영 (2007). 등가하천 개념을 이용한 관망 간략화 기법에 대한 연구, 한국수자원학회 07 학술발표회 논문집, pp. 1194-1199
2. Snell, J.D. and Sivapalan, M. (1995). Application of the meta-channel concept: construction of the hydraulic geometry for a natural catchment. *Hydrol. Processes*, 9(5/6): 485-505.
3. Snell, J.D., Sivapalan, M., and Bates, B. (2004). Nonlinear kinematic dispersion in channel network response and scale effects: application of the meta-channel concept. *Advances in Water Resources*, 27, 141-154.
4. Gonwa, W.S. and Kavvas, M.L. (1986). A modified diffusion equation for flood propagation in trapezoidal channels. *J. Hydrol.*, 83, 119-136.
5. Weinmann, P.E. and Laurenson, E.M. (1979). Approximate flood routing methods: A review. *J. Hydr. Div., ASCE*, 105(12), 1521-1536.
6. Bates, B.C. and Sivapalan, M. (1990). A generalized diffusion wave flood routing model. In: Chang HH, Hill JC, editors. *Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1990 National Conference*, vol. 1. New York: Am. Soc. Civ. Engrs. (Hydraul. Div.), 545-550.
7. Cevza, M.K.-A. and Miguel, A.M. Jr. (2007). Kinematic and Diffusion Waves: Analytical and Numerical Solutions to Overland and Channel Flow. *J. Hydr. Engrg.*, 133, 2, 217-228
8. Chaudhry, M.H. (1993). *Open-Channel Flow*. Prentice Hall, New Jersey.