

등가하천 개념을 이용한 관망 간략화 기법에 대한 연구

Urban Drainage Simplification Using Meta-channel Concept

김환석*, 박기정**, 윤재영***

Hwan Seok Kim, Gi Jung Pak, Jae Young Yoon

요 지

본 연구에서는 도시배수관망의 간략화 모의 시 지선을 단순 생략하는 것이 아니라 2차원 관망을 1 차원으로 전환시키는 방법인 등가하천 개념을 도입하여 도시유역의 유출량 산정에 있어서 여러 지선들을 개별적으로 모의하지 않으면서도 실제 존재하는 지선들의 효과를 고려할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다. 자연하천에 대해 개발된 등가하천 개념은 최근의 수문모형의 경향인 물리적 분포형 모형의 복잡성을 피하면서 전통적인 개념적 집중형 모형이 가지는 간편성을 살리고 그 것이 가지고 있는 선형가정의 한계를 극복하기 위한 방안으로서 제안된 방법이다. 등가하천 개념을 도입하여 개발된 모형은 종국적으로 강우-유출관계에 있어서 강우의 크기, 선형 및 비선형성, 유역면적 등이 미치는 영향을 분석하기 위한 도구로 개발되었으며, 본 연구에서는 출구로부터 동일 거리 s 에 위치한 지점에서의 배수관망의 공간적인 분포 및 집중패턴을 파악하는 폭함수(width function, $n(s)$)와 면적함수(area function, $M(s)$)를 이용하여 관망을 간략화 하였다. 등가관의 수리기하조건 결정은 유역이 정상상태에 도달했을 경우에 대해서 이루어지게 되며 정상상태 모의를 통해 개별 관망단면들에 대해 얻어진 유량(Q), 면적(A), 수심(y) 자료간의 상관관계를 유추하여 $Q(A)$, $A(y)$ 함수를 유도하게 되면 종국적으로 관로홍수추적에 이용되는 지배방정식의 매개변수인 평균계수(c) 및 확산계수(D)를 계산할 수 있게 된다. 본 연구에서는 대상 유역으로 군자 배수구역을 선정하여 유역의 특성과 관망 자료를 수집하고 간략화 기법을 적용한 결과를 분석하였다.

핵심용어 : 등가하천, 도시배수관망 간략화, 수리기하조건, 관로홍수추적

1. 서 론

도시유역에서의 관망의 배열은 통상 매우 복잡하기 때문에 그대로 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. 하수도 관망의 단순화에 대하여 전병호 등(1994)은 관로의 생략, 합성, 결합 등의 방법을 적용하여 관망을 단순화 시켰으며, 그에 따른 영향을 검토하였다. 또한, 상수도 관망의 간략화에 있어서 이종필 등(2004)은 단순 간략화법, Courant 수의 변화 방법 및 관로 길이 변화 방법 등을 적용하여 간략화 전·후에 따른 영향을 분석하여 생략 가능한 관을 검색하여 관망을 간략화 하였다. 국외 연구의 경우 Snell (1996)은 자연하천유역에 대해 등가하천(meta-channel)이라는 개념을 도입해 2차원적인 하천망을 1차원으로 전환시키고 그 수리기하조건

* 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 · E-mail : tinymons@korea.ac.kr

** 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 · E-mail : gipak00@hanmail.net

*** 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 조교수 · E-mail : jyyoon@korea.ac.kr

을 결정하는 방법을 제시하였으며 이와 같은 등가하천을 통해 하도홍수추적을 수행함으로서 분포형모형의 복잡성을 피하면서도 강우-유출 모의에 있어서 물리적인 접근방법을 택함으로서 기존의 집중형 모형이 가지는 단점을 극복하고자 하였다. 본 연구에서는 Snell의 등가하천의 개념을 도입하여 도시유역의 관망을 간략화 하여 보고자 한다.

2. 관망 등가하천화 방법

2.1 통제용적

하천망을 하나의 등가하천으로 변형하는 방법은 Snell (1996)과 Snell과 Sivapalan (1995)에 자세히 소개되어 있다. 통제용적은 n 개의 하천에 걸쳐 연장될 수 있다. 이러한 연장된 개념에서의 통제용적이 등가하천의 통제용적이라고 할 수 있다. 개개 하천은 길이 s 에서 $s+ds$ 에 걸쳐 있으며 여기서 s 는 유역 출구로부터 임의 하천 지점에서의 거리를 나타낸다. 하천을 통과하는 흐름은 유속 $v(x)$ 를 가진다. 통제용적은 변형이 가능하며 시간의 함수이다. 수표면의 임의지점은 유속 w 를 가진다. 이와 더불어 유량, Q 가 있으며 단위면적당 측방유입수 q_i 이 있다. 통제용적은 입구, 출구, 윤면(wetted surface), 자유수면의 4개로 나눌 수 있다. 통제용적의 입구 및 출구는 최대수심 $y(s)$, 수면폭, $B(s)$, 하상고 $\xi_0(s)$ 를 가지며 입구/출구면에서의 임의지점은 $\eta - \xi$ 좌표계에 의해 공간적으로 파악된다.

2.2 방정식

Strelkoff (1969)의 방법론을 적용하여 Snell (1996)은 이송정리를 n 개의 하천으로 구성된 등가하천을 통해 흐르는 비압축성유체의 질량통과율에 적용할 경우 다음과 같이 등가하천에 대한 연속방정식과 에너지 방정식이 유도됨을 보여주었다. 연속방정식과 에너지방정식은 식(1), 식(2)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{n(s)} A_i + \frac{\partial}{\partial s} \sum_{i=1}^{n(s)} Q_i = \sum_{i=1}^{n(s)} q_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{n(s)} \left(\frac{a_i Q_i \bar{u}_i}{2g} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \sum_{i=1}^{n(s)} (Q_i H_i) = \sum_{i=1}^{n(s)} \left(\frac{Q_i \tau_0 P_i}{\gamma A_i} \right) + \sum_{i=1}^{n(s)} (H_i q_i) \quad (2)$$

여기서 A_i 는 개개 유역출구로부터 s 만큼 떨어진 개개하천에서의 단면적을, Q_i 는 유량을, q_i 는 하천의 단위길이당 측방유입량을, $n(s)$ 는 폭함수(width function)로서 유역출구로부터 s 만큼 떨어진 곳에서의 하천단면의 수를 나타내는 함수, \bar{u}_i 는 하천 i 에서의 단면평균유속을, H_i 는 총에너지수두를, τ_0 는 하천 경계면에 발생되는 평균전단응력을, P_i 는 하천 i 의 윤변을, H_i 는 측방 유입수에 의해 공급되는 총에너지수두를, a_{1i} 는 에너지보정계수를 나타낸다.

2.3 등가하천 구성원리의 적용

2.3.1 가정

앞서 유도된 보존방정식들을 이용해 등가하천의 기하조건을 유도하기 위해 다음과 같은 가정이 사용되었다.

- 정상상태 가정

수리기하조건의 결정을 위해 정상상태 시스템을 가정한다. 따라서 어떤 지점에서의 유량은 그 지점으로 유입되는 기여면적에 선형적으로 비례하며 비례상수는 함양 매개변수가 된다. 이 함양 매개변수 R 은 유역내 강우와 토양특성에 내재된 비선형성과 공간변동성을 반영한다. 관계식은 식(3) 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(s) = R(\vec{x})M(s) \quad (3)$$

여기서 $M(s)$ 는 거리 s 로 유입되는 기여면적을 나타낸다.

초기에는 함양이 유역전체에 걸쳐 균일한 것으로 고려한다. 여기서 강조될 점은 정상상태는 하천의 수리기하조건을 결정하는데만 사용되며 등가하천내에서의 흐름은 비정상흐름으로 모의된다는 것이다. 정상 등류 난류 흐름에 대해 결정된 저항계수가 홍수추적과 같은 비정상, 부등류 흐름 상황에서도 동일하게 적용될 수 있다고 가정한다.

2.3.2 수리기하조건

등가하천을 통해 하도홍수추적을 하기 위해서는 등가하천의 기하조건의 유도가 필요하다. 이러한 수리기하조건 관계식은 식(4), 식(5)에 의해 파속, $c(Q)$ 와 확산계수, $D(Q)$ 를 결정한다 (Henderson, 1966).

$$c(Q) = \frac{dQ}{dA} \quad (4)$$

$$D(Q) = \frac{Q}{2BS_0} \quad (5)$$

2.3.3 등가하천 매개변수의 결정

먼저 유량, 단면적, 윤변이 폭함수에 걸쳐 직접적으로 더해짐으로서 보존된다. 유속은 유량가중된 운동에너지 유량 항에 의해 결정된다. 단면최대수심과 하상표고도 이와 비슷한 방식으로 결정된다. 마찰계수는 통합된 에너지손실항, 유속 및 윤변으로부터 결정된다. 수면폭은 단면적과 단면최대수심과의 관계를 나타내는 멱함수를 미분함으로서 결정된다. 단면적과 수면폭을 이용하면 평균수심을 구할 수 있다. 마지막으로 동수반경은 단면적을 윤변으로 나눠줌으로서 얻을 수 있으며 마찰계수와 함께 Manning의 n 값을 계산하는데 사용된다.

3. 실제배수구역에 대한 적용

3.1 대상 배수구역

등가관망의 수리기하조건 결정 방법의 적용 대상으로서 군자배수구역을 설정하였다. 등가관망은 앞서 언급된 바와 같이 배수구역 출구로부터 거리 s 에 위치한 관 단면들을 대표하는 단면을 의미하므로 출구지점에서 거리에 따라 떨어져있는 집수구를 유입지점으로 하여 거리를 산출하였다. 군자배수구역의 주요지선을 토대로 구역을 나눈 다음 지선에서 나온 2차 지선을 토대로 43개 소유역으로 나누었으며, 각각의 소유역에 관로 하나만이 있다고 가정하며 소유역의 관로가 소유역의 특성을 반영한다. 결정된 군자 배수구역의 소구역 모식도는 아래(그림 1)와 같다.

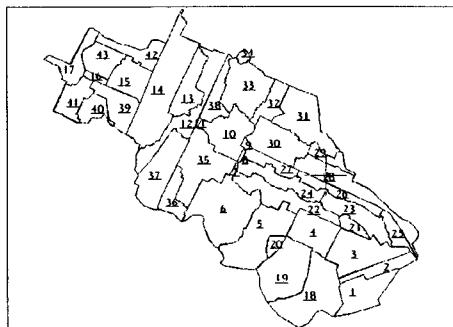


그림 1. 군자배수구역 모식도

3.1 실제 배수구역의 등가관망 수리기하조건

유효우량 1.8~7.4mm/hr (0.8mm/hr간격)에 정상상태 모의를 수행하여 산출한 등가관망의 유량 (Q)과 단면적(A), 수심(y)자료를 이용 등가관망의 수리기하조건을 나타내는 관계식식을 면함수 형태로 회귀분석한 다음 폭(B)과 파속(c)을 구한다..

3. 등가하천의 산출과 결과

가상 배수구역의 폭함수 $n(s)$, 즉 임의 거리 s 에서의 관망 단면의 개수는 아래(그림2) 그래프에 나타 내었다..

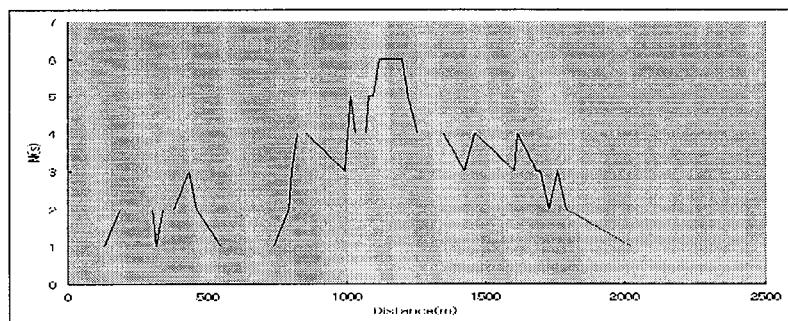


그림 2. 군자 배수 구역의 거리에 따른 폭함수 $n(s)$

그래프의 경향은 주요 지선만을 사용하였을 경우이므로 실제 배수관망의 경향과는 약간의 차이가 있다. 실제 배수 관망의 경우 전체적으로 증가하다가 배수구역 경계에 가까워지면서 줄어드는 경향이 나타날것이며 이는 자연하천유역에서 하천망의 경우와 비슷한 경향이 나타날 것이다. 하지만 이번 연구에서는 지선만을 대상으로 하였으므로 유역의 분할수에 많은 관계가 있으며 거리에 따른 소유역의 개수와 밀접한 관련을 갖는다.

앞서 유도한 등가관망 단면의 수리기하조건 관계식을 이용하여 계산된 결과는 그림3에 나타 내었으며 유량에 비례하므로 출구점에 가까워질수록 그 값이 크게 나타나나 경사에 민감한 반응을 보여 변화한다. 그림4는 앞서 유도한 $Q(A)$ 관계식을 이용해 $c=dQ/dA$ 에 따라 계산된 결과를 거리에 따라 나타 내었다.

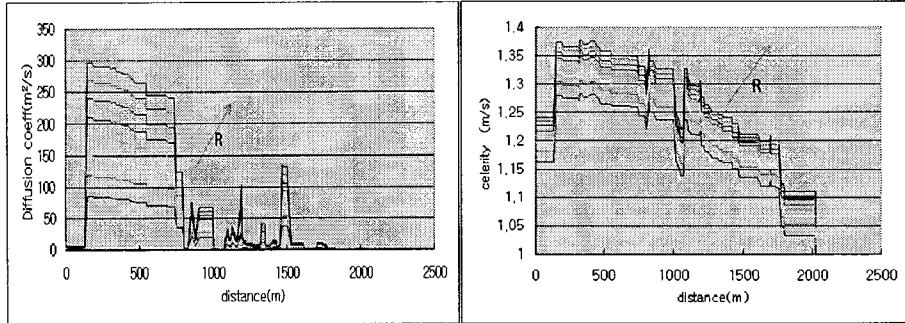


그림 3. 유효우량별 확산계수(D)

그림 4. 유효우량별 파속(c)

4. 결 론

본 연구에서는 자연하천유역에 대해 개발 적용되었던 등가하천 개념 및 수리기하조건 결정 방법을 도시배수관망의 간략화 모의의 일환으로 군자배수구역에 대해 적용해 보았다. 적용과정에서 자연하천과는 다른 도시배수관망의 차이점이 나타났는데 관수로 흐름의 경우 통수면적 제한에 따른 만관흐름 발생이 그 중 하나이다. 이와 더불어 자연하천의 경우는 거리 s 에 따라 연속적으로 측방유입이 이루어지나 도시배수관망의 경우는 집수구 지점에서만 표면유출의 유입이 이루어져 불연속적인 측방유입이 이루어진다는 것이 또 하나의 차이점이라고 할 수 있겠다. 방법론의 적용 결과 등가관망 단면에 대한 여러 수리변량의 계산이 가능하였으며 검토결과 거리 s 에 따른 분포가 관망분포 및 집수면적 분포를 잘 반영하고 있어 유효하게 2차원 관망이 1차원의 단일 관망으로 변환된 것으로 파악되었다. 추후 연구는 새롭게 적용된 등가하천개념에 의해 정립된 단면 수리기하조건을 이용해 관로홍수추적을 수행하고 그 결과를 2차원 관망의 해석결과와 비교함으로서 등가관망이 실제 관망분포를 그대로 고려했을 경우를 얼마나 잘 재현하는지 비교해 보는 것이 되겠다.

]

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과물로서 관계당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이종필 등(2004), “상수관망 부정류 해석을 위한 관망 간략화 방법에 대한 연구”, 한국수자원학회 학술발표회 초록집, p. 100
2. 전병호 등(1994), “우수관망의 단순화와 관로배치의 영향분석”, 한국수자원학회논문집 제 27권 제2호, 139-146.
3. Snell JD, Sivapalan M. (1995). Application of the meta-channel concept: construction of the hydraulic geometry for a natural catchment. Hydrol Process, 9(5/6): 485-505.

4. Strelkoff T. (1969). One-dimensional equations of open-channel flow. *J Hyd Div, Am Soc Civ Eng* 95(HY3):861-76.
5. Snell JD. (1996). A physically-based representation of channel network response: an integration of geomorphology, hydraulic geometry, and channel hydraulics. Ph.D Thesis, Dept. Env. Eng., Centre for Water Research, Univ. of West. Australia.
6. Henderson, F. M. (1966). Open Channel Flow. MacMilan, New York.