배수관망의 지형형태학적 분석을 이용한 홍수량 산정 및 배수효율 평가

Flood Estimation and Evaluation of Efficiency of Sewer Networks Using Geomorphological Analysis

황석환*

Hwang, Seok Hwan*

Abstract

In urban areas, drainage sewers are installed to reduce the damage caused by rainfall. The installation of drainage sewers has been carried out through simple hydrological analysis. However, the importance of drainage facilities has recently been highlighted. Therefore, in recent years, elaborate analysis for the installation of drainage sewers has been carried out. Until now, drainage networks have been installed mainly in residential areas or roads. Therefore, it is possible to question the efficiency of such a deployment. In this study, rainfall-runoff simulations were performed on the drainage sewers of an urban river using a GIUH, which can simulate runoff through geomorphological factors. We compared the flood runoff before and after the development of a drainage network. Using this, we estimated the efficiency of the existing sewer system. As a result of the analysis, it was possible to simulate the flood runoff through the sewer sufficiently using the GIUH with high accuracy. The drainage effect of the drainage sewers was not significantly different from that of the natural watershed streams. Therefore, it is necessary to consider not only the hydraulic characteristics of the conduit, but also the morphological characteristics of the conduit in order to increase the drainage efficiency of the drainage sewers.

Key words : Rainfall-runoff, GIUH, Drainage Sewer System

요 지

도시지역에서는 강우에 의한 피해를 줄이기 위해 배수관망을 설치하고 있다. 배수시설의 설치에 간단한 수문해석을 통해 수행되어 왔다. 그러나 최근에 배수시설에 대한 중요성이 부각되고 있다. 따라서 최근에는 배수관망 설치를 위한 정교한 분석이 실시되고 있다. 지금까지 배수관망은 주로 주거밀집지역 또는 도로를 중심으로 설치되었다. 따라서 이러한 배치의 효율성에 대한 의문을 가질 수 있다. 본 연구에서는 지형형태학적 인자를 통해 유출을 모의할 수 있는 GIUH를 이용하여 도심 하천의 배수관로에 대한 유출모의를 수행하였다. 이를 통해 개발 전후의 유출을 비교하였다. 이러한 일련의 과정을 통하여 현재 설비되어 있는 배수관로의 효율성을 추정하여 보았다. 분석결과 GIUH를 이용하여 충분히 관로를 통한 유출을 모의할 수 있었고 정확도 또한 높았다. 그리고 배수관거의 배수효과가 자연유역에 비해 크게 차이를 보이지 않았다. 따라서 배수관거의 설비 시 배수효율을 높일 수 있도록 하기 위해서는 관거의 수리학적 특성뿐만 아니라 관로의 지형형태학적 고려도 필요함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 유출해석, GIUH, 배수관망

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원(Tel: +82-31-910-0241, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: sukany@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서 론

많은 자연지역에 도시화가 이루어지면서 수문현상에 많은 변화를 가지고 왔으며 토지이용의 변화나 불투수층의 증가 등으로 인해 강우에 의한 유출현상이 크게 변화하고 있다. 이런 변화에 의해 도시지역에서는 강우에 의한 피해를 줄이기 위해 배수시설을 설치하고 있다. 배수시설 설치 시 간단한 수문해석을 통해 수행되어 왔지만 최근 들어 그에 대한 중요성이 인식되면서 보다 정교한 분석이 동반되고 있다.

Geographic Information System (GIS) 기법이 발달함에 따라 수문분석이 편리하고 신속하게 되었지만 도시화가 이루어짐에 따라 그 유출해석 또한 복잡해져 가고 있다. Nie et al. (2002)은 GIS를 이용하여 도시유출을 해석하였으며 Chen et al. (2003), Nasello and Tucciarelli (2005)는 복잡한 도시유출 해석을 위해 관망해석과 지표흐름을 동시에 해석하였다. 우리나라에서도 Seo and Bac (1996)은 유역개발에 따른 하천유출 변화를, Kim et al. (1996)은 배수관거 추적을 고려한 도시하천 유출해석을 수행하였다. 하지만 아직까지 배수관거에 대한 효율성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

지금까지의 배수관망은 주로 주거밀집지역을 중심으로 또는 도로를 중심으로 설치되었기 때문에 그에 대한 적절한 효율성에 대한 의문을 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 도시화가 이루어짐에 따라 설치된 배수관망에 의한 유출해석과 그 지역이 자연하천일 경우의 유출해석을 통해 배수시설의 효율성을 검토하고자 한다.

본 연구에서는 미세계측 소유역의 유출량 산정에 적합하다고 소개된 Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH)식을 이용하였으며 Rodriguez-Iturbe et al. (1979)이 GIUH에 대해 연구한 이후로 국외에서는 Snell and Sivapalan (1994), Sorman (1995), Bhaskar et al. (1997), Karvonen et al. (1999)이 지형학적 순간단위도와 관련된 연구를 진행하였으며, Sahoo et al. (2006)이 Clark과 Nash모델에 근거한 GIUH를 사용하여 홍수량을 평가하는 연구를 수행하였다.

국내에서도 하천유역에서 GIS를 이용하여 GIUH를 적용한 Kim (1998), Kim et al. (2000), Heo and Lee (2002), Kim et al. (2003), Shin et al. (2004), Joo et al. (2008)의 연구가 있다. Kim et al. (2003)의 연구에서는 관측된 여러 강우-유출 사상을 분석하여 각 사상마다 GIUH의 특성속도를 추정하고 이를 분석하여 총유효우량이 GIUH의 특성속도를 상대적으로 잘 설명하고 있음을 도출하였다. 그리고 한강유역에 GIUH를 이용하여 유출량을 산정한 Kim and Bae (2006), 단위도 산정지점에 따른 GIUH 형상 변화를 적용한 Joo et al. (2011)이 GIUH 개선을 위한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이러한 연구들은 자연 하천의 지형형태학적 특성을 기반으로 유도

된 GIUH를 이용하여 하천 유출을 적합하게 모의하는 목적에 한정되어 왔다. 따라서 인위적으로 설치된 관망의 유출에 대한 고려는 대부분 배제되어 있으며 이러한 해석은 별도의 해석 모형을 구축하여 수행하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 우리나라 대부분의 대도시는 오랜 기간에 걸쳐 도시가 자연적으로 형성되면서 취수와 배수가 용이한 하천을 주변으로 주거 공간이나 도로가 배치되어 있기 때문에 도시 하천망과 우수관망의 배치가 상당히 유사성을 가지는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 이러한 하천망과 배수관망의 유사성을 검토한 후, 이러한 유사성을 가정으로, 도시지역의 배수관망은 평상시에 개수로 흐름형식을 보이고 있기 때문에 이를 하나의 하천으로 간주하여 GIUH를 이용해 유출해석을 수행하였으며, 비교를 위해 도시지역의 Digital Elevation Model (DEM)을 이용하여 자연하천을 형성한 후에 그 하천을 통한 유출해석을 수행함으로써 배수관망의 효율성을 검토하였다.

2. GIUH 이론

2.1 하천차수법칙

유역은 Horton 및 Strahler의 차수법칙을 따른다고 할 수 있으며 이에 대한 가정 사항은 Source에서 시작되는 하도는 1차하천으로 정의하며, 차수가 ω 인 두 하천이 합류하면 합류된 하류의 하천의 차수는 $\omega + 1$ 이 된다. 만약 차수가 각기 다른 두개의 하천이 합류될 때는 하류 하천의 차수는 상류의 두 개 하천 중 큰 차수를 따르며 유역의 차수는 최대 하천차수 Ω 와 같아라하는 것이다.

하천수 법칙은 다음과 같은 하천수와 차수와의 경험적인 관계가 성립한다.

$$N_{\omega} = R_B^{\Omega - \omega} \quad (1)$$

여기서, Ω 는 하천의 최고차수, ω 는 임의의 하천차수, R_B 는 상수로써 분기율(bifurcation ratio)이다. 차수 ω 에 대한 N_{ω} 의 대수값을 도시하면 대략 음의 기울기를 갖는 직선을 얻을 수 있으며 직선의 기울기가 R_B 의 대수값이다.

하도망에서의 하천 총수는 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} N_{\omega} = R_B^{\Omega-1} + R_B^{\Omega-2} + \dots + R_B^1 + R_B^0 = \sum_{\omega=1}^{\Omega} R_B^{\Omega-\omega} = \frac{R_B^{\Omega} - 1}{R_B - 1} \quad (2)$$

R_B 는 Eq. (3)과 같이 표현되며, 만약 $\omega = \Omega$ 라면 R_B 는 $\Omega - 1$ 차의 하천수와 같음을 알 수 있다.

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_{\omega}} = \frac{R_B^{\Omega-(\omega-1)}}{R_B^{\Omega-\omega}}, \quad R_B = \frac{N_{\Omega-1}}{N_{\Omega}} = N_{\Omega-1}(\omega = \Omega) \quad (3)$$

각 차수 $\overline{L}_\omega$ 의 평균하천 길이는 Eq. (4)와 같으며, 하천길이 법칙은 Eq. (5)와 같이 계산된다.

$$\overline{L}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega i} \quad (4)$$

$$\frac{\overline{L}_\omega}{\overline{L}_{\omega-1}} = R_L \quad (5)$$

여기서, $L_{\omega i}$ 는 ω 차의 하천 길이이다. 하천수법칙과 마찬가지로 차수 ω 에 대한 $\overline{L}_\omega$ 의 대수값을 도시하면 대략 양의 기울기를 갖는 직선을 얻을 수 있으며 직선의 기울기가 R_L 의 대수값이다.

각 차수 $\overline{A}_\omega$ 의 평균하천 면적은 Eq. (6)과 같이 구할 수 있으며, 하천면적 법칙은 Eq. (7)과 같이 계산된다.

$$\overline{A}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} A_{\omega i} \quad (6)$$

$$\frac{\overline{A}_\omega}{\overline{A}_{\omega-1}} = R_A \quad (7)$$

여기서, $A_{\omega i}$ 는 ω 차의 하천의 유출에 기여하는 면적을 말하며, 차수 ω 에 대한 $\overline{A}_\omega$ 의 대수값을 도시하면 대략 양의 기울기를 갖는 직선을 얻을 수 있으며 직선의 기울기가 R_A 의 대수값이다.

2.2 GIUH 유도

Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)는 GIUH를 단순화하여 삼각형 모양으로 계산하였다. GIUH에서 침투유량(q_p)과 침투 유량 발생시간(t_p)를 구하기 위해 식을 단순화시켰으며 이를 위해 θ 와 k 를 제시했는데 이는 R_B , R_L , R_A , V , L_Ω 인자의 함수이다.

$$\begin{aligned} q_p &= \theta \cdot V \\ t_p &= k / V \end{aligned} \quad (8)$$

θ , k 를 R_B , R_L , R_A 만의 함수로 표현하면 Eq. (9)와 같다.

$$\theta, k = \alpha R_B^{\beta_1} R_A^{\beta_2} R_L^{\beta_3} \quad (9)$$

Eq. (9)를 회귀분석하여 다음과 같은 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= 1.31 \cdot R_L^{-1.57}, R^2 = 0.997 \\ k &= 0.44 \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{1.62}, R^2 = 0.992 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 임의의 차수 Ω 를 고려하고 $\overline{L}_1$ 를 달리하여 식을

유도하면, Eq. (11)과 같이 일반화될 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1.31}{\overline{L}_1} \cdot R_L^{-1.57} \\ k &= 0.44 \cdot \overline{L}_1 \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{1.62} \end{aligned} \quad (11)$$

한편, 식의 임의의 차수 Ω 에 대해 적용 가능하도록 $\overline{L}_1$ 을 일반화하면 Eq. (12)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \overline{L}_1 &= L_\Omega \cdot R_L^{1-\Omega} \\ \theta^* &= \frac{1.31}{L_\Omega R_L^{1-\Omega}} \cdot R_L^{-1.57} \\ k^* &= 0.44 \cdot L_\Omega \cdot R_L^{1-\Omega} \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{1.62} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, 임의의 차수 Ω 에 대해 Eq. (13)과 같은 관계가 성립하며 이를 이용해 θ 와 k 는 Eq. (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \theta^* \cdot \frac{1}{R_L^{\Omega-3}}, k = k^* \cdot R_L^{\Omega-3} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{1.31}{L_\Omega} \cdot R_L^{0.43}, k = 0.44 \cdot L_\Omega \cdot \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} \cdot R_L^{-0.38} \quad (14)$$

따라서, 침투유량과 침투유량 발생시간은 Eq. (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_p &= \frac{1.31}{L_\Omega} \cdot R_L^{0.43} \cdot V \\ t_p &= \frac{0.44 \cdot L_\Omega}{V} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} \cdot R_L^{-0.38} \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 2변수 gamma 밀도함수

순간단위도를 표현하는 다른 방법은 Gamma 밀도함수를 이용하는 방법이 있다. 순간단위도를 2변수 Gamma 밀도함수로 표현하면 다음과 같다.

$$u(t) = \frac{1}{K} \left(\frac{t}{K} \right)^{n-1} \frac{\exp(-t/K)}{\Gamma(n)} \quad (16)$$

여기서 n 은 모양을, K 는 축척을 나타내는 변수이며, $\Gamma(n)$ 은 실수 n 의 Gamma 함수를 나타낸다. 이 분포는 순간단위도로 자주 이용되고 있다. 침투유량(q_p)과 침투유량 발생시간(t_p)은 다음과 같이 n , K 로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_p &= K(n-1) \\ (n-1)^n \cdot \exp(1-n) / \Gamma(n) &= t_p \cdot q_p \end{aligned} \quad (17)$$

침투유량과 침투유량발생시간을 Eq. (15)로 표현할 수 있으며 q_p 와 t_p 의 곱은 Eq. (18)과 같다.

$$q_p \cdot t_p = 0.58(R_B/R_A)^{0.55} R_L^{0.05} \quad (18)$$

Eqs. (17) ~ (18)을 통해 n 값을 구할 수 있으며 이를 통해 K 값을 산정할 수 있다.

3. 유역 적용

3.1 대상유역

본 연구에서는 배수시설(배수관망)의 효율성을 알아보기 위해 배수관망도 자료가 있는 지역 중 서울시의 평창배수구역과 구기배수구역을 선정하였다. 이 두 유역은 DEM 자료를 이용하여 자연하천을 형성할 수 있는 지역이다. 평창배수구

역과 구기배수구역의 자연하천도 및 배수관망도는 Figs. 1~4와 같다. Figs. 1, 3에서 배수관망은 주로 주거밀집지역 위주로 매설되어 있는 것을 알 수 있다. 평창배수구역과 구기배수구역의 유역특성은 Table 1과 같다. 또한 평창배수구역은 주로 종로구 평창동 위주로 구성되어 있으며 인구밀도는 3193.10명/km²이며, 구기배수구역은 주로 종로구 구기동 위주로 구성되었으며 인구밀도는 1684.23명/km²이다. 인구밀도만으로 두 배수구역의 도시화율을 이야기할 수는 없지만 Figs. 1과 3에서 알 수 있듯이 배수관망도가 구기배수구역보다는 평창배수구역에 보다 폭넓게 그리고 복잡한 양상을 보임을 알 수 있다. 그리고 배수관망의 경우 지선(600 mm관 이하)를 고려하면 최고차수가 높아지겠지만 Jun et al. (1994)에서 우수관망을 단순화 하여도 유출곡선에 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 근거로 간선(600 mm관 이상)만을 고려하여 GUIH의 유역특성을 추출하였다.

Fig. 1. Sewer Network (Pyeongchang)

Fig. 2. Stream Network (Pyeongchang)

Fig. 3. Sewer Network (Gugi)

Fig. 4. Stream Network (Gugi)

Table 1. Characteristics of Drainage Area

Drainage	Drainage type	A (km ²)	Maximum stream order	R_B	R_L	R_A	L_Q (km)
Pyeongchang	Sewer	4.35	4	4.03	1.82	4.34	1.05
	Stream		3	4.28	1.88	5.10	1.59
Gugi	Sewer	3.55	3	3.96	2.08	4.69	0.64
	Stream		3	4.08	2.50	4.38	2.81

3.2 모형의 적용

4차 이상의 하천에 대해 해석적 방법으로 GIUH를 구하는 것은 현재로서 매우 어려운 일이다(4차 하천의 경우 경우의 수는 8가지). 그리고 Henderson (1963)에 의하면 직접유출곡선의 침투유량을 결정하는데 단위도의 모양은 별로 중요하지 않음을 언급한 바 있다. 따라서 본 과제에서는 단위도를 Gamma함수형태로 근사하여 GIUH를 추정하였다.

해당유역의 GIUH를 유도하기 위해서는 여러 매개변수를 추정해야 하며 그 중에서도 특성속도를 추정하여야 한다. 특성속도를 추정하기 위하여 기존 국내연구에서는 침투시간을 이용한 회선 추정치나 실측자료를 이용한 모의 검정치를 구해 산정하였다. 그러나 본 대상유역인 구기와 평창 배수구역의 경우는 현재 기 개발유역으로 개발 전 실측유량자료가 전무하여 자연하천인 경우의 특성속도를 실측치로부터 검정할 수 없다. 따라서 자연하천인 경우에 대해서는 조도계수와 하폭 등을 이용한 Rodriguez-Iturbe et al. (1979)가 제안한 공식을 사용하였다.

배수관망의 경우는 특성속도를 실측자료로부터 침투유

량에 대한 최고유속으로 Manning의 공식을 이용하여 추정 가능하다. 그러나 이 경우 호우사상이 한정되어 있고 특성속도 자체의 정의나 해석상의 모호함 때문에 임의의 호우사상에 대한 최고유속을 특성속도로 정의하기는 어렵다. 따라서 실측유량으로부터 추정된 최고유속을 이용한 특성속도와 Rodriguez-Iturbe et al. (1979)가 제안한 공식에 의한 특성속도를 적용하여 GIUH를 산정한 후 실제 유출과 비교하여 선택하였다.

우선, 적절한 특성속도를 결정하기 위해서는 해당유역에 대한 특성속도 변화에 따른 실제 유출의 민감도 분석과정이 필요하였고, Figs. 5와 6과 같이 특성속도에 따른 GIUH 변화와 유출량 변화를 분석하여 보았다.

분석결과 Fig. 5에서 보듯이 특성속도 변화에 따라 단위도가 변하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6의 유출량 비교에서는 특성속도가 0.3 m/s 이상인 경우는 침투유량 및 침투시간 그리고 유출곡선의 형상이 크게 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는, 일반적으로 단위도를 이용하여 산정한 유출곡선의 지속시간은 강우지속시간과

Fig. 5. GIUHs According to Characteristic Velocities (Pyeongchang, 2005-06-26 rainfall event)

Fig. 6. Rainfall-runoff Curves According to Characteristic Velocities (Pyeongchang, 2005-06-26 rainfall event)

Table 2. Characteristics of GIUH

Drainage area	n	b_{Ω} (m)	S_{Ω}	i_r (cm/h)	α_{Ω}	v (m/s)	q_p (h^{-1})	t_p (h)
Sewer								
Pyeongchang	0.017	10.5	0.0048	0.2	0.8499	0.5705	0.9208	0.6192
Gugi	0.017	7.0	0.0068	0.2	1.3256	0.6867	1.9259	0.2829
Stream								
Pyeongchang	0.08	10.5	0.008	0.2	0.2332	0.2626	0.2838	1.9036
Gugi	0.08	7.0	0.017	0.2	0.4454	0.3569	0.2467	2.3519

단위도 지속시간의 함으로 산정되는데, GIUH 지속시간에 비해 강우지속시간이 현저히 크기 때문에 GIUH의 지속시간변화가 크게 유출곡선의 지속시간에 영향을 주지 못하기 때문이다.

이처럼 일정 특성속도 이상에서 유출곡선이 크게 변화하지 않음으로 본 연구에서는 배수관망의 경우도 Rodriguez-Iturbe et al. (1979)가 제안한 공식을 사용하였다. 이를 선택한 또 하나의 이유는 실측자료를 이용한 특성속도를 사용하여도 해석상에 문제는 없으나 특성속도가 상대적으로 크게 산정되기 때문에 GIUH의 지속시간이 매우 짧아져서 강우자료의 계속시간인 10분보다도 작아져 적절한 유출량 산정이 어렵기 때문이다. 이러한 과정을 통해 선정된 관로와 자연하

천의 GIUH 특성치는 Table 2와 같다.

여기서, Rodriguez-Iturbe et al. (1979)가 제안한 특성속도 공식은 다음과 같다.

- $v = 0.665\alpha_{\Omega}^{0.6}(i_r A_{\Omega})^{0.4}$, $\alpha_{\Omega} = s_{\Omega}^{1/2}/(nb_{\Omega}^{2/3})$
- 산지유역임을 감안 $n=0.08$ (Yoon, 1994)을 사용
- S_{Ω} 는 최고차 하천의 유로 평균경사 사용

3.3 모형의 검증

본 연구에서 적용한 구기와 평창배수구역의 경우 실제로 유량측정 성과가 없는 지점으로 도심 개발지역이긴 하나

사실상 미계측 유역이라 할 수 있다. 따라서 앞서 구성된 GIUH 모형의 타당성을 검증하기 위해 부득이하게 구기와 평창 유역의 하류부에 위치한 홍제천 성산 2교의 유량자료 (Seoul Metropolitan Government, 2005)를 이용하였다(Table 3).

실측유량과는 다소 차이는 있었으나 홍제천 유역자체가 크지 않고 홍수시에는 회귀수의 영향이 크지 않을 것으로 판단하여 구기와 평창의 침투유량을 홍제천에 대한 유역면 적비로 산정하였다. 단, 유역이 대체로 작으며 유역별로 강우관측지점이 없는 관계로 구기와 평창지점의 강우는 동일하게 적용하였고 도시소유역인 만큼 구기와 평창에서 홍제천 성산2교까지의 도달시간은 고려하지 않았다.

Table 3. Storm Events for Model Evaluation

Drainage area	Rainfall events
Pyeongchang	2005-06-26 19:00 ~ 2005-06-27 01:50
Gugi	
Pyeongchang	2005-07-28 01:00 ~ 2005-07-28 07:10
Gugi	

4. 적용 결과

본 연구에서 평창과 구기유역에 대하여 GIUH를 이용하여 산정된 유출과 실측된 유출사상의 비교 결과는 Table 4와 Figs. 7~10에 나타내었다. 2005년 6월 26일 호우 사상의 경우는 평창과 구기 모두 배수관거를 이용한 유출과 실측 유출이 매우 잘 일치하고 있다. 도달시간이 약 10분차를 보이고 있으나 유출량 산정 시 도달시간을 고려하지 않은 점을 고려하면 매우 정확히 추정되었다고 볼

수 있다.

그리고 동일 호우사상에 대하여 자연하천유역으로 해석한 경우와의 비교에서 침투유량의 차가 크지 않고 유출곡선의 모양이 유사한 점을 볼 때 자연하천인 경우와 배수관거를 설치한 후의 배수 능력에 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 배수관로에 의한 유출의 배수효율이 상대적으로 높지 않음을 알 수 있다. 특히 평창유역의 경우 두 개의 수문곡선이 유사하며 이는 배수관거의 종류, 설치정도, 배치형태 등 구조적, 지형학적인 여러 가지 원인이 있을 수 있겠으나 앞의 Table 1에서 보듯이 평창 유역의 경우 자연하천과 배수구역의 지형학적 특성이 매우 유사한 점도 주요 원인으로 판단된다.

이와는 달리 2005년 7월 28일 호우 사상에 대해서는 자연 유역으로 해석한 경우와 관로로 해석한 경우에 있어 침투유량과 유출곡선이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 실측유량과의 비교를 통해 볼 때 자연유역으로 해석한 경우가 비교적 잘 모의 되었다고 볼 수 있다. 물론 하도가 배수관거로 자연하도와는 다른 점, 강우지속시간, 강우계측시간, 강우강도 등의 호우양상이 다른 점, 실측 유출자료의 신뢰성, 단위도의 선형성 가정 등의 문제점도 있었지만 특성속도 자체만으로 정확히 유출특성을 추정하기 어려운 점도 중요한 이유로 판단된다. GIUH의 경우 특성속도가 단위도의 지배적 인자로 작용하는데 반해 그 적용범주나 산정방법 등이 일부 작위적이어서 결과치에 대한 일반적인 검증에 있어 매우 어려움이 있다. Kim et al. (2000)이 언급하였듯이 특성속도에 대한 보다 객관적이고 정확한 추정방법의 개발과 적절한 해상도의 지형도 선택, 상태전이 확률밀도함수의 확정 등이 보완된다면 미계측유역이나 자료가 충분하지 않은 유역의 적용에 좋은 결과를 줄 수 있을 것이다.

Table 4. Comparison of Runoff Characteristics Among Observation and GIUHs

Drainage area	Rainfall events	Analysis method	peak time (minute)	peak direct discharge (m^3/s)
Pyeongchang	2005/06/26	Observation	190	17.95
		Sewer	181	16.43
		Stream	188	14.34
	2005/07/28	Observation	180	14.96
		Sewer	161	23.93
		Stream	169	14.77
Gugi	2005/06/26	Observation	190	13.99
		Sewer	180	13.77
		Stream	192	10.66
	2005/07/28	Observation	180	11.56
		Sewer	160	23.36
		Stream	172	10.60

Fig. 7. Comparison of Hydrographs (Pyeongchang, 2005-06-26 rainfall event)

Fig. 8. Comparison of Hydrographs (Gugi, 2005-06-26 rainfall event)

Fig. 9. Comparison of Hydrographs (Pyeongchang, 2005-07-28 rainfall event)

Fig. 10. Comparison of Hydrographs (Gugi, 2005-07-28 rainfall event)

또한 앞에서 언급한 인구밀도 즉, 도시발전 상황으로 살펴 보았을 때 인구밀도가 낮은 구기배수구역의 경우가 배수관 망과 자연하천 해석 시 차이가 큰 것으로 나타났다. 이 두

유역으로 전체를 언급할 수는 없으며 도시가 발달함에 따라 배수관망을 복잡하게 설치함으로써 유출의 변화가 많이 생길 수도 있지만 분석 결과를 살펴보았을 때 배수관망의

복잡성보다는 관망의 지형학적 배치에 큰 영향을 받는 것으로 생각되며 보다 확실한 결과는 많은 유역에 대한 검증을 통해 분석할 수 있으리라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지형형태학적 인자를 통해 유출을 모의할 수 있는 GIUH를 이용하여 도심하천의 배수관로에 대한 유출모의를 수행하였다. 이를 통해 개발 전후의 유출을 비교하여 현재 설비되어 있는 배수관로의 효율성을 추정하여 보았다.

분석결과 일부 제약조건이 있으나 GIUH를 이용하여 충분히 관로를 통한 유출을 모의할 수 있었고 그 정확도 또한 높았다. 그리고 이를 통한 배수효율성 검토결과 본 연구 대상유역의 경우에는 배수관거의 배수효과가 자연유역에 비해 크게 차이를 보이지 않았고 이는 유역전반에 대한 관로의 설비정도, 관거의 배치 등의 문제로 판단된다. 따라서 배수관거의 설비 시 배수효율을 높일 수 있도록 하기 위해서는 관거의 수리학적 특성뿐만 아니라 관로의 배치시 지형형태학적 고려도 필요함을 알 수 있다.

더불어 GIUH의 경우 특성속도가 단위도의 지배적 인자로 작용하는데 반해 그 적용범주나 산정방법 등이 일부 작위적이고, 특성속도에 대한 유출의 반응이 민감하여 다양한 유출양상을 적절히 반영하기 어렵기 때문에 GdIUH를 이용하는 것도 한 가지 보완방법으로 판단된다.

또한, 도시의 발달 정도에 따라서는 정확한 결론을 내리기 힘들며 보다 많은 유역에 적용한다면 비교가능하리라 판단된다. 지속적으로 정확한 실측자료의 확보를 위해 많은 노력을 기울여야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 18주요-대4-시드사업인 ‘커뮤니티 빅데이터 패턴 해석을 통한 수난(水難) 발생 및 규모 예측 기술 개발(2018-0369)’로 수행되었습니다.

References

Bhaskar, N.R., Parida, B.P., and Nayak, A.K. (1997). Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 228-238.

Chen, S.H., Hsu, M.H., and Chen, T.S. (2003). Simulation for interactions between storm sewer and overland flows. *Proceedings of the Pipelines 2003 International Conference on Pipeline Engineering and Construction*, Baltimore, Maryland, July 13-16.

Henderson, F.M. (1963). Some properties of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 16, pp. 4785-4793.

Heo, C.H., and Lee, S.T. (2002). Analysis of GIUH model by using GIS in river basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 3, pp. 321-330.

Joo, J.G., Ham, D.H., Jun, H.D., Lee, J.H., and Kim, J.H. (2008). Comparison of IUHs obtained by the derived and simple equation of GIUH on third and fourth-order streams. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41 No. 11 pp. 1107-1121.

Joo, J.G., Yang, J.M., and Kim, J.H. (2011). GIUH variation by estimating locations. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 1, pp. 85-91.

Jun, B.H., Lee, J.T., Yoon, J.Y. (1994). Effect of the simplification and composition in sewer networks. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 27, No. 2, pp. 139-146.

Karvonen, T., Koivusalo, H., Jauhainen, M., Palko, J., and Wepling, K. (1999). A hydrological model for predicting runoff from different land use areas. *Journal of Hydrology*, Vol. 217, No. 3-4, pp. 253-265.

Kim, D.H., Seo, K.W., Bae, D.H., and Cho, W.C. (1996). Analysis of runoff effect based on pipeflow routing method on small urban watersheds. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 16, No. 2-3, pp. 271-280.

Kim, J.H., and Bae, D.H. (2006). Estimation or threshold runoff on Han River watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 151-160.

Kim, N.W. (1998). *Development of dynamic flood frequency model for estimation of probabilistic flood at ungaged location*. Ph.D. dissertation, Kangwon National University.

Kim, S.D., Yoo, C.S., and Yoon, Y.N. (2000) Investigation of the characteristic velocity of geomorphologic Instantaneous unit hydrograph. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 3, pp. 315-330.

Kim, K.W., Roh, J.H., Jeon, Y.W., and Yoo, C.S. (2003). Analysis of rainfall effect on the GIUH characteristic velocity. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 4, pp. 533-545.

Nasello, C., and Tucciarelli, T. (2005). Dual multilevel urban drainage model. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 748-754.

- Nie, L., Sægrov, S., and Schilling, W. (2002). GIS based urban runoff modeling. *Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage, Global Solutions for Urban Drainage*, pp. 1-8. doi:10.1061/40644(2002)80
- Rodriguez-Iturbe, I., Devoto, G., and Valdés, J.B. (1979). Discharge response analysis and hydrologic similarity: The interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1435-1444.
- Sahoo, B., Chatterjee, C., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., and Kumar, R. (2006). Flood estimation by GIUH-based Clark and Nash models. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 6, pp. 515-525.
- Seo, K.W., and Bae, D.H. (1996). A Study on the Variation of Runoff and Travel Time in Urban Stream due to Watershed Development. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 29, No. 3, pp. 207-216.
- Seoul Metropolitan Government. (2005). *Research on river management linked with universities*.
- Shin, H.S., Kim, H.T., and Park, M.J. (2004). The analysis of correlation between GIUH parameters and DEM based parameters. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 1B, pp. 55-62.
- Snell, J.D., and Sivapalan, M. (1994). On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 7, pp. 2311-2323.
- Sorman, A.U. (1995). Estimation of peak discharge using GIUH model in Saudi Arabia. *Journal of Water Resources planning and management*, ASCE, Vol. 121, No. 4, pp. 287-293.
- Yoon, Y.N. (1994). *Hydrology: Basic and application*. Cheongmoongak, pp. 224-290.

Received	October 23, 2018
Revised	October 25, 2018
Accepted	November 5, 2018