청계천 실시간 홍수예보를 위한 Flow Nomograph 개발 및 평가

Development and Assesment of Flow Nomograph for the Real-time Flood Forecasting in Cheonggye Stream

배 덕 효* / 심 재 범** / 윤 성 심***

Bae, Deg-Hyo / Shim, Jae Bum / Yoon, Seong-Sim

Abstract

The objectives of this study are to develop the flow nomograph for real-time flood forecasting and to assess its applicability in restored Cheonggye stream. The Cheonggye stream basin has the high impermeability and short concentration time and complicated hydrological characteristics. Therefore, the flood prediction method using runoff model is ineffective due to the limit of forecast. Flow nomograph which is able to forecast flood only with rainfall information. To set the forecast criteria of flow nomograph at selected flood forecast points and calculated criterion flood water level for each point, and in order to reflect various flood events set up simulated rainfall scenario and calculated rainfall intensity and rainfall duration time for each condition of rainfall. Besides, using a rating curve, determined scope of flood discharge following criterion flood water level and using SWMM model calculated flood discharge for each forecasting point. Using rainfall information following rainfall scenario calculated above and flood discharge following criterion flood water level developed flow nomograph and evaluated it by applying it to real flood event. As a result of performing this study, the applicability of flow nomograph to the basin of Cheonggye stream appeared to be high. In the future, it is reckoned to have high applicability as a method of prediction of flood of urban stream basin like Cheonggye stream.

Keywords : cheonggye stream, flood forecasting, flow nomograph

요 지

본 연구의 목적은 도시하천으로 복원된 청계천유역의 실시간 홍수예보를 위한 flow nomograph를 개발하고, 실측자료를 통해 flow nomograph의 적용성을 검토하는데 있다. 본 연구의 적용대상지역인 청계천유역은 높은 불투수율, 짧은 도달시간 및 복잡한 수문학적 특성을 갖고 있어 기존 강우-유출 모형에 의한 홍수예측 방법의 선행시간 확보 측면에서 실효성을 거두지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 홍수예보 선행시간을 확보하기 위해 강우정보만으로도 홍수예보가 가능한 flow nomograph를 개발하였다. Flow nomograph는 강우강도, 강우지속시간 등의 강우변수와 유량, 수위간의 상관 관계를 구한 것이다. 본 연구에서는 Flow nomograph 개발과정에서 예보 기준 설정을 위해 홍수예보 지점을 선정하여 지점별 기준 홍수위를 산정하였으며, 다양한 홍수사상을 반영하기 위해 가상 강우시나리오를 설정하여 강우조건별 강우강도와 강우지속시간을 산정하였다. 또한 수위-유량관계곡선식을 이용하여 기준 홍수위에 따라 홍수량 범위를 결정하고, SWMM 모형을 이용하여 강우조건에 따른 지점별 홍수량을 산정하여 예보 지점별로 기준 홍수위에 따른 홍수량을 산정하

* 세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** 헤코리아, 연구개발사업부, 대리 (e-mail: zottosim@naver.com)

Post Master ,Dept. Research and Development, HECKOREA, Seoul 158-723, Korea

*** 교신저자, 교토대학교 방재연구소 연구조교수 (e-mail: yoon@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp, Tel: 1-774-38-4263)

Corresponding Author, Research assistant professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ, Kyoto 611-0011, Japan

였다. 산정된 강우 시나리오에 따른 강우정보와 기준 홍수위에 따른 홍수량을 이용하여 flow nomograph를 개발하였으며, 이를 실제 홍수사상에 적용하여 평가하였다. 평가 결과 청계천 유역에 대해 flow nomograph의 적용성이 높은 것으로 나타났다. 향후 청계천과 같은 도시하천유역의 홍수예측 방법으로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 청계천, 홍수예보, flow nomograph

1. 서 론

최근 전 세계적인 기후변화 및 기상이변으로 인해 국지적 집중호우의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 홍수발생으로 인명과 재산피해가 증가하고 있는 실정이다. 우리나라도 예외는 아니며, 특히 도시지역의 경우 급속한 도시화 및 개발에 따라 유입시간의 단축, 도달시간의 감소, 침투 유량의 증가, 통수능 부족, 저류량 감소 등 전반적인 수문 현상의 변화로 그 피해가 가중되고 있다.

일반적으로 홍수피해를 줄이기 위한 방법으로는 하천 제방이나 다목적 댐의 건설 등과 같은 구조적인 대책과 홍수예보 시스템 개발을 통한 시스템의 운영과 같은 비구조적 대책을 생각할 수 있다(Anderson and Burt, 1985). 다만, 도시유역의 경우 하천주변이 대부분 도로나 주택지로 이용되고 있어 구조적 대책보다 홍수예보와 같은 비구조적 대책의 적용에 많은 관심을 기울이고 있는 추세이며, 국내에서도 이와 관련된 다양한 연구를 수행한 바 있다. 신현식 등(2007)은 부산시 온천천 유역을 대상으로 도시 유출모형인 SWMM (Storm Water Management Model)을 적용하고 유역이 해안도시임을 고려하여 조위영향을 고려하고 실시간 모니터링 시스템을 구축하여 모형의 적정 운영관리 방안을 평가한 바 있다. 배덕효 등(2008)은 청계천 유역의 구조적 특성을 고려하여 수문열림과 저수호안의 산책로 침수를 홍수기준으로 설정하고, 이러한 기준을 바탕으로 강우, 수위, 수문열림 및 산책로 침수 관측자료를 기반으로 한 홍수예측모델의 구축방안을 제시한 바 있다. 이범희(2010)는 대전광역시의 갑천 유역을 중심으로 한 3대 하천(갑천, 유등천, 대전천)에 대해 홍수예보 모형을 구성하고 수문자료간의 상관분석, 상관계수의 해석 및 검정, 회귀분석을 실시하여 최종적으로 강우 및 수위 관측 자료로부터 미계측 지점에 대한 수위변동을 예측한 바 있다. 또한, 이종태 등(2010)은 도달시간이 짧은 중소하천유역에서 돌발홍수 발생 시 강우에 따른 하천의 수위변화를 신속하고 간편하게 예측할 수 있는 회귀식을 통한 홍수예보 모형을 제시하고 그 적정성을 중랑천 유역에 대해서 검토한 바 있다.

이처럼 국내에서는 홍수예·경보의 기술 마련을 위한 다양한 연구가 수행된 것으로 알 수 있다. 그러나 이와 같은 연구 성과들은 홍수예측과정이 복잡하여 집중호우 발생 시 예보 선행 시간을 확보하기가 어려우며, 강우-유출 모형을 기반으로 이루어져 있어 전문성이 부족한 실무자들의 예보 업무 수행 시 효율적인 활용이 곤란하다는 단점이 있다. 따라서 최근 국외에서는 이 같은 문제점을 보완하고 홍수예보의 선행시간을 확보하고자 간단한 입력 자료만으로도 홍수예측을 수행할 수 있는 예보 방법에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 미국의 USBR (U.S Bureau of Reclamation)에서는 캘리포니아 북부에 설치된 자동 LFWS (Local Flood Warning System)을 토대로 관측강우자료에 근거한 강우량과 홍수의 특정관계를 규명하여 홍수업무에 활용하고 있다(NWS, 1997). 또한 미국의 대표적인 소규모 도시유역인 텍사스주 휴스턴시의 Brays Bayou 지역에서는 강우정보만을 이용하여 홍수예보가 가능한 도표를 작성하여 홍수예보에 활용하고 있다(Vieux, et al., 2005). 유럽의 경우 독일, 룩셈부르크, 네덜란드, 스위스 등으로 구성된 라인강 위원회(International Commission on the Protection of the River Rhine, ICPR)에서 기존 강우, 수위자료를 통해 다중선형회귀모형을 구성하여 홍수위 예측에 이용하고 있다(건설교통부, 2005).

본 연구에서는 강우-유출모형을 기반으로 하며, 홍수예측 시에는 강우정보만을 이용하여 홍수예보가 가능한 flow nomograph를 개발하고자 한다. 본 연구에서 개발한 flow nomograph는 강우강도, 강우지속시간 등의 강우변수와 유량 및 수위간의 상관관계를 도표화한 것으로 이를 이용하여 홍수예보를 실시할 경우, 레이더, 위성 등을 통해 수집되는 예측강우 정보를 이용하여 홍수예보가 가능하여 예보 선행시간을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 홍수예보를 위한 flow nomograph 이론

본 연구에서는 홍수예보의 선행시간 확보를 위해 Fig. 1과 같은 강우정보 기반의 flow nomograph를 개발하고자 한다. 강우정보 기반의 홍수예보시스템인 flow nomograph

는 Eq. (1)과 같이 특정 홍수예보 지점에서의 다양한 강우 시나리오(첨두시 강우강도, 강우지속시간)와 이로 인해 발생 가능한 홍수량 및 대응되는 홍수위 관계를 조합하여 구성한 것이다(윤성심, 2011).

$$WL_i^k = Q_i^k = f(P_r^k, P_t^k) \quad (1)$$

여기서, k 는 홍수예보 지점, i 는 홍수예보 기준, P_r^k 는 강우시나리오별 첨두시 강우강도, P_t^k 는 강우시나리오별 강우지속시간이며, Q_i^k 는 각 강우시나리오별 강우강도와 강우지속시간에 의해 산정된 홍수예보 기준별 등유량선(isoflow), WL_i^k 는 홍수예보 기준별 등수위선(isostage)으로 수위-유량관계곡선을 이용하여 홍수량으로 환산되어 홍수예보 기준별 홍수량 범위 결정에 사용된다. 특히, 본 연구에서는 도시유역의 특성을 감안하여 Q_i^k 를 다음 Eq. (2)와 같이 강우, 지형특성과 유출의 관계를 모의하는 SWMM의 지표면 유출모형을 통해 산정한다.

$$Q_i^k = f(A, W, A_{imp}, S, n, D_s, P) \quad (2)$$

여기서, A 는 유역면적, W 는 유역폭, A_{imp} 는 불투수 면적, S 는 지면경사, n 은 조도계수, D_s 는 저류상수, P 는 강우량이다.

이와 같이 강우-유출모형 및 수위-유량관계곡선을 통해 결정된 홍수예보 기준별 Q_i^k 와 WL_i^k 는 Eqs. (3) and (4)와 같이 실제 호우발생시 관측강우정보(P_r^o , P_t^o) 통해 결정되는 flow nomograph 상의 수치인 Q_i^o 와 WL_i^o 의 비교 기준이 되어, 홍수예보 발생여부를 결정할 수 있도록 한다.

Fig. 1. Composition of Flow Nomograph

$$Q_i^k \leq Q_i^o \rightarrow \text{flood forecast} \quad (3)$$

$$WL_i^k \leq WL_i^o \rightarrow \text{flood forecast} \quad (4)$$

따라서 본 이론을 따르면 예보기간동안의 첨두시 강우강도와 강우지속시간을 이용하여 환산된 결과가 Fig. 1의 flow nomograph의 등유량선을 상회하는 경우는 호우로 인한 강우량이 홍수 기준을 초과하여 실제 홍수의 위험이 있을 수 있다고 판단하여 홍수예보를 발령하고, Fig. 1의 등유량선을 하회하는 경우는 안전하다고 판단한다.

Flow nomograph 개발을 위한 절차는 Fig. 2에 제시한 바와 같이 1) 유역수문모형(SWMM)의 구축, 2) 예보 지점별 기준 홍수위 설정, 3) 가상 강우시나리오 설정, 4) 예

Fig. 2. Diagram for Developing and Evaluating the Flow Nomograph

보 지점별 홍수량 산정, 5) 예보 지점별 flow nomograph 작성 과정으로 구분할 수 있다. 우선 첫 번째로 flow nomograph 개발 시 필요한 홍수량 산정은 유역수문모형(SWMM)을 이용하며, 이를 위해 지형자료, 수위-유량관계곡선, 수문자료 등 수문관련 기초자료를 구축한다. 두 번째로 flow nomograph 구성을 위한 홍수예보 발령기준 설정을 위해 홍수 시 재해위험도에 따라 기준 홍수위를 설정하고, 예보 지점별 기준 홍수위를 산정한다. 세 번째로 flow nomograph 개발 시 다양한 홍수사상을 반영하기 위해 지속시간별 강우량별 가상 강우시나리오를 설정하고, 가상시나리오별 강우강도와 강우지속시간을 산정한다. 네 번째로 flow nomograph에 제시되는 기준 홍수위에 대한 홍수량 값을 산정하기 위해 수위-유량관계곡선을 통해 기준 홍수위별 홍수량 범위를 결정하고, SWMM 모형에 가상 강우시나리오를 적용하여 예보 지점별 홍수량을 산정한다. 마지막으로 가상 강우시나리오에 따른 강우강도, 강우지속시간과 기준 홍수위별 홍수량을 이용하여 예보 지점별 flow nomograph를 개발하고, 과거 관측강우자료를 통해 적용성을 평가한다(심재범, 2011).

3. 청계천 홍수예보를 위한 flow nomograph의 개발

3.1 적용 대상지역 선정 및 자료구축

본 연구에서 제시한 flow nomograph 개발은 청계천 유역을 대상으로 수행되었다(Fig. 3). 그 이유는 청계천 유역이 대부분이 도시화가 진행되어 홍수도달시간이 매우 짧고 복원공사 후 시민의 여가활동 및 관광명소로 활용되고 있어 호우발생 시, 그 피해가 대형화될 가능성이 높은 지역으로 빠른 선행시간의 확보 및 대책 마련의 중요성이 대두되는 지역이기 때문이다.

또한, flow nomograph와 같은 관측기반의 홍수예보시스템은 해당유역의 관측자료를 이용한 유역의 강우와 유출특성 분석이 수반되어야 하므로, 관측수문자료가 장기간 수집·관리되어야 한다. 특히 청계천 유역은 2006년부터 2010년까지 수행된 청계천 하천모니터링 연구를 통해 5년간의 수문관측자료(강우, 수위, 유량)와 하천단면 측량자료가 구축되어 있다. 또한 평수기 및 홍수기 유량측정을 통해 Fig. 3의 5개 지점의 수위-유량 관계곡선식이 산정되어있다(서울시설관리공단, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010). 산정된 수위-유량 관계곡선식은 호우기간의 상승과 하강시 측정된 값들의 평균을 이용하여 산정된 값이다. 이에 본 연구에서는 이들 자료를 바탕으로 flow nomograph 개발 및

평가를 수행하였다. Flow nomograph 개발에 사용된 수문관측 자료 중 강우자료는 1분 단위 기상청 AWS (Automatic Weather System) 강우강도, 1분 단위 초음파 수위 형태이다. 추가적으로 청계천복원사업(청계천복원추진본부, 2005) 및 돌발강우대비 청계천 방재시스템 구축방안(서울시 시설관리공단, 2005)에서 제시한 하천단면계획을 예보 지점별 기준홍수위 산정을 위해 활용하였다.

3.2 예보 지점별 기준 홍수위 결정

본 연구에서는 청계천 유역 내 재해 안정성을 확보하기 위해 수행되는 ‘청계천 하천 모니터링 연구’를 통해 지속적으로 관측자료가 수집되고 있는 Fig. 3의 수위관측지점 5개소를 주요 홍수예보 지점으로 선정하였다. 선정된 지점에 대해 flow nomograph의 예보 발령기준이 되는 기준 홍수위를 홍수시 하도 내 재해위험도에 따라 산책로(walk lane), 성인 무릎높이(knee level), 성인 허리높이(waist level), 경계홍수위(flood alert level), 위험홍수위(flood risk level), 계획홍수위(design flood level)로 설정하였다. 여기서 성인 무릎높이는 산책로를 기준으로 50 cm, 성인 허리높이는 1 m, 경계홍수위는 계획홍수량의 50%인 경계홍수량 시의 홍수위, 위험홍수위는 계획홍수량의 70%인 위험홍수량 시의 홍수위로 설정하였다.

예보 지점별 기준홍수위 산정을 위해 산책로 높이, 계획홍수위는 하천단면계획 및 2010년 단면측량 자료를 이용하였으며, 성인 무릎높이, 성인 허리높이, 경계홍수위, 위험홍수위는 2009년 개발된 수위-유량관계곡선식을 이용하였다. 본 연구에서 산정된 예보 지점별 기준 홍수위는 Table 1과 같다(서울시설안전관리공단, 2010).

Fig. 3. Flood Forecasting Stations in Cheonggye Stream

3.3 가상 시나리오 설정

Flow nomograph 개발을 위해서는 기초자료로 강우조건별 강우강도와 강우지속시간이 필요하다. 다만 실제 강우조건에 따른 실측 강우강도와 강우지속시간은 그 범위와 조건의 수가 너무 적어 이를 대신할 다양한 강우시나리오의 설정이 요구된다. 본 연구에서는 청계천 유역특성을 고려하여 가상 강우시나리오를 설정하고, 가상 강우시나리오별 강우강도와 강우지속시간을 산정하였다. 강우지속시간은 Table 2와 같이 청계천의 유역규모 및 돌발강우대비 청계천 방재시스템

구축방안(서울시 시설관리공단, 2005)에서 제시한 도달시간이 60분 전후인 점을 고려하여, 총강우량 규모에 따라 10분 간격으로 10~60분을 적용하였다. 또한 Table 3의 가상시나리오 범위는 청계천 설계 규모보다 적은 가상강우부터 기상청 관할의 서울관측소 확률강우량의 500년 빈도 이상 가상강우까지 모든 조건을 포함하여 각 지속시간별 총강우량에 대해 2mm 간격으로 2~100mm 범위 내에서 구성하였다(국토해양부, 2000). 또한, 이렇게 설정된 가상 시나리오별 강우는 Yen and Chow 방법의 삼각형 우량주상도를 이용하여 시간분포 하였으며, 시간분포 된 가상강우를 이용하여 지속시간별 총강우량

Table 1. Reference Flood Level at Each Flood Forecasting Station

(unit : m)

Station	Mojeonggyo	Samilgyo (left)	Ogansugyo (right)	Muhakgyo	Gosanjangyo
Walk lane	0.86	1.00	2.95	2.52	3.54
Knee level	1.36	1.50	3.45	3.02	4.04
Waist level	1.86	2.00	3.95	3.52	4.54
Flood alert level	1.78	2.73	4.09	5.05	5.56
Flood risk level	2.11	3.44	4.83	6.08	6.92
Design flood level	2.57	4.42	5.77	7.40	8.75

Table 2. Concentration Time at Each Flood Forecasting Station

Station Location	Stream Length (km)	Travel time (minute)	Entrance time (minute)	Concentration time of flood wave (minute)
Mojeonggyo	2.70	15	Minimum Entrance time 10min	25
Samilgyo	3.48	19		29
Ogansugyo	5.68	31		41
Muhakgyo	7.30	40		50
Gosanjangyo	8.15	45		55

Table 3. Peak Rainfall Intensity at Each Rainfall Scenario

(unit : mm/hr)

Accumulated rainfall (mm)	Rainfall duration (min)					
	10	20	30	40	50	60
2	18.0	7.5	4.7	3.4	2.6	2.2
10	90.0	37.5	23.3	16.9	13.2	10.3
20	180.0	75.0	46.6	33.7	26.4	21.6
30	270.0	112.5	70.0	50.6	39.6	32.5
40	360.0	150.0	93.3	67.5	52.8	43.3
50	450.0	187.5	116.6	84.3	66.0	54.1
60	540.0	225.0	140.0	101.2	79.2	65.0
70	630.0	262.5	163.3	118.1	92.4	75.8
80	720.0	300.0	186.6	135.0	105.6	86.6
90	810.0	337.5	210.0	151.8	118.8	97.5
100	900.0	375.0	233.3	168.8	132.0	108.3

에 따라 강우침투시의 강우강도를 산정하였다(Table 3).

3.4 예보 지점별 홍수량 산정

Flow nomograph에 제시되는 기준 홍수위에 대한 홍수량을 산정하고자 지점별 기준 홍수위를 수위-유량관계곡선식에 적용하여 지점별 및 기준 홍수위별 홍수량을 산정하였다. 수위-유량관계곡선식을 통해 산정된 홍수량은 각 기준 홍수위에 대한 정확한 홍수량을 나타내는 것은 아니므로, 각 홍수위 기준에 적합한 실제 하천 홍수량을 유발하는 강우강도를 결정하기 위해 수위-유량관계곡선식을 통해 산정된 홍수량에 $\pm 5\%$ 유량허용범위를 적용하여 지점별 기준 홍수위별 홍수량 범위를 결정하였다. 다음 Table 4의 홍수위는 앞서 산정된 지점별 기준 홍수위를 뜻하고, 홍수량은 수위-유량관계곡선식을 통해 산정된 지점별 기준 홍수위별 홍수량 값을 뜻하며, 홍수량 범위는 $\pm 5\%$ 유량허용범위를 적용한 값을 나타낸 것이다.

또한, 가상 시나리오의 강우 조건에 해당하는 예보지점별 침투홍수량을 산정하기 위해 본 연구에서는 청계천 하천 모니터링 연구를 통해 청계천 유역에 구축된 SWMM 모형을 활용하였다(서울시 시설관리공단, 2008). 구축된 SWMM 모형은 본류 양안에 존재하는 우수박스와 수문열림을 고려하기 위해 수문을 weir로 설정하였다. 이렇게 산정된 가상

시나리오별 침투홍수량값 중 결정된 기준 홍수위별 홍수량 범위에 대응되는 값을 추출하여 가상 시나리오에 대한 기준홍수위별 홍수량값을 지점별로 결정하였다. Table 5는 대표적으로 5개 지점 중 삼일교의 가상 시나리오에 대한 기준 홍수위별 침투홍수량을 나타낸 것이다. Table 5의 음영으로 표시된 부분은 산책로(W1), 무릎높이(K), 허리높이(W2), 홍수경계수위(A), 홍수위험수위(R), 설계홍수위(D)와 같이 기준홍수위별 홍수량 산정결과를 나타낸 것이다.

3.5 예보 지점별 최적 flow nomograph 개발

본 연구에서는 지점별 flow nomograph 개발을 위해 가상 시나리오에 따른 강우침투시의 강우강도와 강우지속시간, 지점별 기준 홍수위별 홍수량 결과를 이용하였다. Flow nomograph는 앞서 설정된 6개의 기준 홍수위에 대하여 회귀분석을 통해 작성하였으며, 각 기준별 수심의 차는 크지 않으나 홍수량 산정의 결과, 무릎 높이, 경계홍수위는 허리 높이, 위험홍수위 등 다른 기준과 일부 겹치거나 유사하게 나타나 최종적으로 설정한 6개의 기준 홍수위에서 무릎 높이, 경계홍수위 기준을 제외한 산책로, 허리 높이, 위험홍수위, 계획홍수위를 최적 기준 홍수위로 결정하여 Fig. 4와 같이 지점별 flow nomograph를 개발하였다. 다만 지속시간 10, 50, 60분의 경우, 강우 시나리오의 한계로 인해 지속

Table 4. Flood Discharge Range and Reference Flood Level at Each Flood Forecasting Station

Station \ Flood level		Walk lane	Knee level	Waist level	Flood alert level	Flood risk level	Design flood level
Mojeonggyo	Flood level (m)	0.86	1.36	1.86	1.78	2.11	2.57
	Flood discharge (cms)	16.84	41.51	76.14	70.00	97.00	141.67
	Range of flood discharge (cms)	16~18	39~44	72~80	67~74	92~102	135~149
Samilgyo (left)	Flood level (m)	1.00	1.50	2.00	2.73	3.44	4.42
	Flood discharge (cms)	17.92	34.85	54.27	85.96	120.34	171.91
	Range of flood discharge (cms)	17~19	33~37	51~57	84~93	108~120	163~181
Ogansugyo (right)	Flood level (m)	2.95	3.45	3.95	4.09	4.83	5.77
	Flood discharge (cms)	70.95	97.74	128.72	138.34	193.68	276.68
	Range of flood discharge (cms)	67~74	92~103	122~135	131~145	184~203	263~290
Muhakgyo	Flood level (m)	2.52	3.02	3.52	5.05	6.08	7.40
	Flood discharge (cms)	53.41	72.99	95.42	181.05	253.46	362.09
	Range of flood discharge (cms)	50~56	69~77	90~100	171~190	240~266	343~380
Gosanjagyo	Flood level (m)	3.54	4.04	4.54	5.56	6.92	8.75
	Flood discharge (cms)	180.36	223.52	269.33	370.26	518.36	740.52
	Range of flood discharge (cms)	171~189	212~235	256~283	352~389	492~544	703~778

Table 5. Peak Flood Discharge Using Rainfall Scenario at Samilgyo (unit: m³/s)

Total Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min)					
	10	20	30	40	50	60
2	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28
10	22.98	21.78	20.02	18.35 (W1)	16.96 (W1)	15.47
20	74.39	67.52	58.28	50.85 (W2)	45.27	40.78
30	116.95 (R)	102.73	95.29	83.86 (A)	75.58	68.18
40	152.81	131.31	114.35 (R)	104.81	104.26	93.09 (A)
50	212.05	156.87	138.36	124.06	113.45 (R)	105.67
60	267.80	193.16	156.77	143.06	130.05	120.36 (R)
70	327.32	232.30	183.06	157.12	147.12	134.90
80	391.29	270.30	207.34	177.03 (D)	157.70	148.34
90	431.96	309.11	235.62	199.77	176.29 (D)	158.06
100	446.17	351.89	262.56	221.54	193.47	173.08 (D)

(W1), Walk lane; (K), Knee level; (W2), Waist level; (A), Flood alert level; (R), Flood risk level; (D), Design flood Level.

Fig. 4. Flow Nomographs with Reference Flood Level

시간별 기준 홍수위에 해당하는 홍수량 값의 갯수가 적어 회귀식을 연장함에 따른 불확실성을 포함하고 있다.

Fig. 4의 flow nomograph는 강우강도를 통해 nomograph로 예측할 수 있는 홍수예보상태를 보여주고 있다. 산책로(초록색)를 기준으로 그래프 하단은 홍수안전측이며, nomograph의 x축과 y축이 증가할수록 홍수위험도 및 심각성이 증가한다. 일반적으로 예보 발령 후 대피시간을 고려하여 강우예보의 선행시간이 30~60분까지 확보된다면 본 연구의 flow nomograph의 홍수예보 활용성은 보다 증대될 수 있을 것이다.

4. Flow nomograph의 적용 및 평가

4.1 적용대상 기간 선정 및 자료 구축

본 연구에서 개발한 지점별 flow nomograph 적용성 검토를 위해 2006년에서 2010년까지 수행된 ‘청계천 하천 모니터링 연구’를 통해 관측된 10개의 강우사상을 선정하였다. 선정된 강우사상은 체계적인 수문자료 품질관리된 자료 중 청계천에 홍수를 유발시킨 사상이다. 우선 적용성 평가를 위해 강우사상별 관측 강우자료를 예보 지점별로 분할된 티센다각망에 적용하여 지점별 유역평균강우량을 산정하

Table 6. Maximum Rainfall Intensity And Level at Each Time Duration

(unit: mm/hr)

Rainfall Event	11 July 2007				
Station	Mojeonggyo	Samilgyo	Ogansugyo	Muhakgyo	Gosanjagyo
10 min duration	61.85	56.7	56.21	49.02	47.93
20 min duration	38.20	35.60	35.38	32.87	31.24
30 min duration	25.66	24.00	23.84	23.21	22.31
40 min duration	19.74	18.36	18.23	17.68	17.21
50 min duration	16.02	15.07	14.99	14.53	14.24
60 min duration	13.43	12.74	12.68	13.02	12.97
Maximum level(m)	0.71	1.10	1.49	1.19	1.51
Rainfall Event	20 July 2008				
Station	Mojeonggyo	Samilgyo	Ogansugyo	Muhakgyo	Gosanjagyo
10 min duration	50.94	46.32	46.02	49.20	51.90
20 min duration	42.87	39.12	38.70	41.97	42.96
30 min duration	38.44	36.16	35.96	38.72	39.30
40 min duration	36.93	34.55	34.28	36.69	37.88
50 min duration	32.95	30.61	30.35	34.97	35.94
60 min duration	28.67	26.86	26.65	33.06	34.37
Maximum level(m)	0.79	2.08	2.59	3.17	3.31
Rainfall Event	24 July 2008				
Station	Mojeonggyo	Samilgyo	Ogansugyo	Muhakgyo	Gosanjagyo
10 min duration	79.80	72.84	72.18	66.00	64.44
20 min duration	59.49	56.31	56.01	51.42	52.08
30 min duration	51.66	49.54	49.34	47.10	47.10
40 min duration	50.96	49.74	49.64	49.67	49.77
50 min duration	44.99	43.99	43.91	43.96	43.43
60 min duration	42.35	41.25	41.16	41.16	40.53
Maximum level	0.95	2.40	3.51	3.97	4.21
Rainfall Event	21 September 2010				
Station	Mojeonggyo	Samilgyo	Ogansugyo	Muhakgyo	Gosanjagyo
10 min duration	94.08	91.08	90.78	74.94	66.96
20 min duration	86.43	83.16	82.83	66.33	60.42
30 min duration	79.66	77.66	77.46	63.28	56.16
40 min duration	75.96	73.95	73.74	62.64	55.52
50 min duration	73.99	72.49	72.34	61.55	55.19
60 min duration	73.68	71.57	64.00	61.10	55.13
Maximum level(m)	1.34	3.17	4.72	5.03	5.47

고, 산정된 지점별 유역평균강우량을 지속시간별로 이동누적하여 지점별 지속시간별 최대강우강도를 산정하였다.

Table 6은 10개 강우사상 중 모든 지점에서 침수범위를 예측한 경우(2007년 7월 11일), 가장 많이 침수범위를 예측하지 못한 경우(2008년 7월 20일), 산책로 침수여부를 기준으로 침수범위를 예측한 경우(2008년 7월 24일, 2010년 9월 21일)로 구분된 대표적인 강우사상에 대한 최고수위와 지속시간별 최대강우강도를 나타낸 것이다. Table 6의 강우강도자료는 flow nomograph에 적용되어 청계천의 홍수발생 가능성을 판단하는 입력자료이다.

4.2 예보 지점별 flow nomograph의 적용 및 평가

본 연구에서 Figs. 5~8과 같이 개발된 flow nomograph에 대해 앞서 산정한 지속시간별 강우강도자료와 최고수위 자료를 적용하여 개발된 flow nomograph가 실제 발생한 호우로 인한 홍수발생을 구현할 수 있는지를 평가 하였다.

Flow nomograph를 통해 예보를 실시할 경우, 실제 관측 및 예측된 강우를 통해 산정된 지속시간별 강우강도를 flow nomograph에 적용하였을 때, 지속시간별로 표시된 위치가 예보 기준 위치를 하나라도 넘었을 경우 예보가 발령되어야 한다. 본 연구에서는 강우사상별로 산정된 강

우강도와 강우지속시간을 flow nomograph에 적용하여 실제 침수가 발생했을 경우, 지속시간별로 표시된 위치가 하나라도 실제 침수범위 이내에 위치하고 모든 표시 위치가 침수범위를 초과하지 않을 시에는 Good, 침수가 발생하지 않았는데 표시된 위치가 하나라도 침수발생 기준을 상회하였을 경우와 침수가 발생했을 경우 모든 표시 위치가 실제 침수범위를 하회하였을 경우에는 No Good으로 예보 지점별 flow nomograph의 평가를 수행하였다. 또한 실제 침수가 발생한 경우 일부 표시된 위치가 실제 침수범위에 있더라도 나머지가 실제 침수범위를 초과한 경우는 산책로 침수여부를 기준으로 한 청계천 예보의 특성을 고려하여 Good으로 판단하였다.

Fig. 5는 2007년 7월 11일 호우사상을 평가한 것으로, 실제 침수가 발생하지 않은 모전교, 오간수교, 무학교, 고산자교는 강우지속시간별 강우강도 분석 결과가 모두 산책로 이하에 존재하여 Good으로, 실제 산책로이상 허리높이 이하로 침수가 발생한 삼일교는 강우분석 결과가 침수범위에 존재하여 Good으로 판단하였다. Fig. 6은 2008년 7월 20일 호우사상의 평가 결과로 실제 침수가 발생하지 않은 모전교, 오간수교, 고산자교의 경우, 강우분석 결과는 침수가 발생된 것으로 나타나 No Good으로 판단하

Fig. 5. Application of Flow Nomograph at Each Station (11, July 2007)

Fig. 6. Application of Flow Nomograph at Each Station (20, July 2008)

Fig. 7. Application of Flow Nomograph at Each Station (24, July 2008)

었다. 이는 SWMM 모형과 회귀식 연장에 따른 한계를 갖고 있는 flow nomograph로는 당시의 강우특성 및 홍수 발생 현상을 구현하는데 한계가 존재하기 때문에 판단된다. 특히 본 결과는 과다한 홍수경보를 발생시켜 홍수 예보시스템의 신뢰성이 저하될 수 있음을 보여 주고 있다. 삼일교와 무학교는 실제 산책로 이상의 침수가 발생한 것으로 모의하였으므로 Good으로 판단하였다. Fig. 7은 2008년 7월 24일 호우사상의 평가 결과로 모든 지점에서 실제 산책로 이상의 침수가 발생한 것을 잘 모의하여 Good으로 판단하였다. 또한 Fig. 8은 2010년 9월 21일 호우사상의 평가 결과로 모든 지점에서 실제 산책로 이상의 침수가 발생한 것을 잘 모의하여 Good으로 판단하였다.

Figs. 5~8의 분석 결과와 같이 산책로 침수여부를 기준으로 한 청계천 예보의 특성을 고려하면 본 연구에서 개발된 flow nomograph는 Table 7을 통해 알 수 있듯이, Good의 비율이 88%, No Good의 비율이 12%로 예보 지점별로 적용성이 높은 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 flow nomograph는 향후 청계천의 홍수 위험도 판단기준으로써 활용도가 높을 것으로 사료되며, 특히 안정적인 예보를 위해서는 5개 지점 중 한곳만 홍수 위험이 있어도 청계천 전역에 홍수 위험이 있다고 판단하

는 것이 보다 유용할 것이다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 대표적 도시 하천인 청계천 유역을 대상으로 실측 및 예측 강우만으로 홍수발생 유무를 예측할 수 있는 flow nomograph를 개발하였다. Flow nomograph 작성 시 필요한 홍수량을 산정하기 위해 수문모형을 구축하였으며, 청계천 유역의 모전교, 삼일교, 오간수교, 무학교, 고산자교 등 수위관측지점 5개소를 예보 지점으로 선정하고, flow nomograph의 예보 기준이 되는 기준 홍수위를 설정하였다. 기준 홍수위로 산책로, 성인 무릎높이, 성인 허리높이, 경계홍수위, 위험홍수위, 계획홍수위를 설정하고, 홍수예보 지점별 기준 홍수위를 산정하였다. 또한, 다양한 강우사상을 반영하기 위해 가상 시나리오를 설정하고 그에 따른 강우지속시간과 강우강도를 산정하였으며, 지점별 기준 홍수위에 대해 지점별 기준 홍수위별 홍수량 범위를 결정하여 가상 시나리오에 따른 지점별 기준 홍수위별 홍수량을 산정하였다. 산정된 가상 시나리오에 따른 침투시 강우강도와 지점별 기준 홍수위별 홍수량값을 이용하여 flow nomograph를 개발하고, 지점별 최적 flow

Fig 8. Application of Flow Nomograph at Each Station (21 September 2010)

Table 7. Applicability assesment result of flow nomograph at each station

		Mojeonggyo	Samilgyo	Ogansugyo	Muhakgyo	Gosanjagyo
12 July 2006	Inundation range (maximum level)	walk lane ~ waist level (1.42m)	waist level ~ risk flood level (2.73m)	walk lane ~ waist level (3.59m)	waist level ~ risk flood level (4.15m)	walk lane ~ waist level (4.51m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
16 July 2006	Inundation range (maximum level)	walk lane ~ waist level (1.45 m)	waist level ~ risk flood level (2.78 m)	walk lane ~ waist level (3.77 m)	waist level ~ risk flood level (4.27 m)	waist level ~ risk flood level (5.60 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
11 July 2007	Inundation range (maximum level)	No inundation (0.71 m)	walk lane ~ waist level (1.10 m)	No inundation (1.49 m)	No inundation (1.19 m)	No inundation (1.51 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
08 August 2007	Inundation range (maximum level)	No inundation (0.77 m)	walk lane ~ waist level (1.26 m)	No inundation (1.89 m)	No inundation (1.78 m)	No inundation (1.87 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
20 July 2008	Inundation range (maximum level)	No inundation (0.79 m)	waist level ~ risk flood level (2.08 m)	No inundation (2.59 m)	walk lane ~ waist level (3.17 m)	No inundation (3.31 m)
	assesment	No Good	Good	No Good	Good	No Good
24 July 2008	Inundation range (maximum level)	walk lane ~ waist level (0.95 m)	waist level ~ risk flood level (2.40 m)	walk lane ~ waist level (3.51 m)	waist level ~ risk flood level (3.97 m)	walk lane ~ waist level (4.21 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
12 August 2008	Inundation range (maximum level)	No inundation (0.83 m)	walk lane ~ waist level (1.22 m)	No inundation (2.86 m)	walk lane ~ waist level (2.94 m)	No inundation (2.95 m)
	assesment	No Good	Good	No Good	Good	No Good
07 September 2009	Inundation range (maximum level)	walk lane ~ waist level (1.17 m)	waist level ~ risk flood level (2.79 m)	walk lane ~ waist level (3.82 m)	waist level ~ risk flood level (4.39 m)	waist level ~ risk flood level (4.84 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
14 July 2009	Inundation range (maximum level)	walk lane ~ waist level (0.99 m)	waist level ~ risk flood level (2.50 m)	walk lane ~ waist level (3.17 m)	waist level ~ risk flood level (3.65 m)	walk lane ~ waist level (3.83 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good
21 September 2010	Inundation range (maximum level)	walk lane ~ waist level (1.34 m)	waist level ~ risk flood level (3.17 m)	waist level ~ risk flood level (4.72 m)	waist level ~ risk flood level (5.03 m)	waist level ~ risk flood level (5.47 m)
	assesment	Good	Good	Good	Good	Good

nomograph를 결정하였다.

개발된 지점별 flow nomograph에 대해 과거 수문관측 자료를 이용하여 적용성을 평가한 결과, 적용한 10개의 강우사상에 대해 88% 이상이 적합한 것으로 나타나, 이후

레이더, 수치예보에 제공되는 강우예측자료를 활용하여 강우의 선행시간을 확보할 수 있다면 향후 청계천 유역과 같은 중소규모 도시하천 유역에 적합한 홍수예보 방안으로써 활용도가 높을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업 (08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

국토해양부 (2000). 한국 확률강우량도 작성. 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서.
 건설교통부 (2005). 주요지천 홍수예보프로그램 개선.
 배덕효, 정창삼, 윤성심 (2008). “수문관측 기반의 청계천 홍수예측모델 구축.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6호, pp. 683-690.
 서울시 시설관리공단 (2005). 돌발강우대비 청계천 방재시스템 구축방안.
 서울시 시설관리공단 (2005-2010). 청계천 하천 모니터링 연구용역 연구보고서.
 신현석, 박용운, 홍일표 (2007). “미계측 해안 도시 지역의 홍수예경보 시스템 구축 방법 검토 -부산시 온천천 유역 대상-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제6호, pp. 447-458.
 심재범 (2011). 청계천 홍수예경보를 위한 Flow Nomograph 개발. 석사학위논문, 세종대학교.
 이범희 (2010). “회귀분석에 의한 도시홍수 예보시스템의

개발.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제4B호, pp. 347-359.

이종태, 서경아, 허성철 (2010). “실시간 수문관측자료에 의한 돌발 홍수예경보 시스템 -중랑천 유역을 중심으로-.”

한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제43권, 제1호, pp. 51-65.

윤성심 (2011). 지형효과를 고려한 레이더 강우 최적 추정 및 도시홍수예보 활용기술 개발. 박사학위논문, 세종대학교.

청계천복원추진본부 (2005). 청계천 복원사업.

Anderson, M.G., and Burt, T.P. (1985). *Hydrological Forecasting*. John Wiley & Sons, New York.

Vieux, B.E., Bedient, P.B., and Mazroi, E. (2005). *Real-time urban runoff simulation using radar rainfall and physics-based distributed modeling for site-specific forecasts*. 10th International Conference on Urban Drainage.

NWS (1997). Automated Local Flood Warning System Handbook Weather Service Hydrology Handbook No. 2, U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Maryland.

논문번호: 11-073	접수: 2011.07.12
수정일자: 2012.06.20/08.01	심사완료: 2012.08.01