소하천 홍수 예·경보시스템 고도화를 위한 실측자료 기반 노모그래프 구축

Establishment of a Measured Data-Based Nomograph for Enhancing the Small Stream Flood Warning System

정태성* · 최현석** · 주재승***

Cheong, Tae Sung*, Choi, Hyeonseok**, and Joo, Jaeseong***

Abstract

The Ministry of the Interior and Safety has developed a small stream flood warning system to reduce damages to small streams, which are estimated to be about 43% of total streams damages. This system, which was developed using a numerically-based nomograph to estimate discharge and depth, was based on rainfall estimates obtained by the McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation (MAPLE) because the small streams exist in unmeasured basins. Before implementing the small stream flood warning system, a study was performed to test its accuracy in estimating measured data obtained from a test basin during 2016 and 2017. Because the results of that study showed that the discharges and depths underestimated the measured data, this study was performed to establish a new nomograph using measured depth and discharge data in the test basin for two rainfall events in 2016. The evaluation results show that the new nomograph correctly represents the measured depth and discharge, and it can be used for enhancing the small stream flood warning system.

Key words : Small Stream Test Basin, Small Stream Flood Warning System, Nomograph, MAPLE Estimated Rainfall, Effective Rainfall

요 지

행정안전부는 전체 하천 피해의 43% 정도에 해당하는 소하천에서의 피해를 경감하기 위하여 소하천 홍수 예·경보시스템을 개발하였다. 소하천 홍수 예·경보시스템은 미계측 유역인 소하천의 특성을 고려하여 수치모의를 통해 노모그래프를 구축하였으며, 기상청에서 제공하는 MAPLE 예측강우 자료를 이용하여 수위·유량을 예측하는 시스템이다. 본 연구는 소하천 예·경보시스템을 본격적으로 운영하기에 앞서 정확도를 검토하기 위한 연구로써 시범 소하천 유역에서 2년간(2016 ~ 2017) 실측한 수위·유량 자료를 이용하여 예측 정확도를 검토하였다. 검토결과 예측유량은 실측치를 과대산정 하는 반면 예측수위는 실측치를 과소산정 하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 소하천 홍수 예·경보시스템을 고도화하기 위하여 2016년 실측한 수위·유량 자료를 이용하여 노모그래프를 새롭게 구축하였다. 구축된 노모그래프를 검증하기 위하여 2017년 9월 11일의 유효강우에 대한 수위, 유량 예측결과를 중선필천에서 실측한 자료와 비교하였다. 그 결과, 구축된 노모그래프는 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타나 소하천 홍수 예·경보시스템을 고도화하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 시범 소하천, 소하천 홍수 예·경보시스템, 노모그래프, MAPLE 예측강우, 유효우량

*정회원, 국립재난안전연구원 연구관(E-mail: bangjaeman@korea.kr)

Member, Senior Researcher, National Disaster Management Research Institute

**교신저자, 정회원, 서울기술연구원 선임연구원(Tel: +82-2-380-3508, Fax: +82-2-380-3515, E-mail: hschoi@sit.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Specialist, Seoul Institute of Technology

***정회원, 국립재난안전연구원 연구원(E-mail: wnwotmd1@korea.kr)

Member, Researcher, National Disaster Management Research Institute

1. 서 론

소하천은 「하천법」에 준용을 받지 않는 하천 중에서 길이 500 m 이상, 하폭 2 m 이상인 하천으로 정의되며 주로 1차 혹은 2차 차수에 해당하는 하천(Strahler, 1952)이다. 국내에는 총 22,823개의 소하천이 존재하며, 이는 우리나라 전체 하천길이 65,295 km의 54.1%에 해당한다. 소하천에서의 피해는 주로 이상강우로 인한 집중호우와 태풍에 의해 발생하며, 하천범람이나 배수불량에 의한 자동차, 주택, 농경지 등의 침수피해가 주로 발생한다(Cheong, 2016; Cheong et al., 2017). 또한, 인근 주민 또는 야영객이 강우발생 초기의 급격한 수위 상승을 예측하지 못하고 사전 대피를 실시하지 않아 인명피해를 야기하는 경우가 많다. 최근 10년간(2007~2016년) 하천에서 발생한 피해를 살펴보면 전체 피해액의 약 42.8%인 6,835억원의 피해가 소하천에서 발생하였으며, 특히 2008, 2013, 2015년의 경우에는 소하천에서 발생한 피해규모가 국가 및 지방하천에서 발생한 피해규모를 훨씬 상회하는 것으로 나타났다(Cheong, 2016).

소하천에서 발생하는 인명피해는 소하천의 수위·유량을 사전에 예측하고 주민 공지를 통해 접근 차단 및 적시대피를 유도한다면 상당수의 피해를 예방할 수 있을 것이다. 하천의 수위·유량 예측을 위한 기존의 모의 기법은 대부분 선진국에서 개발된 홍수해석모형을 적용하고 있으나, 이는 해당 국가의 유역특성 및 규모를 고려하여 개발된 모형으로서, 국내 소하천 유역의 지형 및 토지이용특성을 반영하는데 한계가 있다. 더불어 소하천 유역은 1시간 이내의 짧은 유출 특성을 갖고 있어 기존의 관측강우와 수치모의에 기반한 시스템으로는 응급대응에 한계가 있다. 이에 따라 Ministry of the Interior and Safety (MOIS, 2016)는 인명피해를 저감하기 위한 응급대응방안으로 국내 소하천 유역 특성을 반영한 예측강우와 통계 기반의 소하천 홍수 예·경보시스템을 2016년에 개발하였다. 시스템에서는 주의와 심각 두 단계의 경보를 발령하도록 구성하고 있는데, 예측 수위가 사람이 횡단하기 어려운 무릎높이(0.5 m)에 이르면 주의단계, 소하천의 계획홍수위에 이르면 심각단계로 시스템이 구축되어 있다(Song et al., 2015; MOIS, 2016).

소하천 홍수 예·경보시스템은 기상청에서 제공하는 MAPLE 예측강우와 국내실정에 맞게 개발된 수치모의를 통해 산출한 노모그래프를 이용하여 소하천의 수위·유량을 예측하는 시스템이다(You et al., 2016). 노모그래프는 수치해

석을 간단하고 능률적으로 수행하기 위하여 강우량, 지속시간 등과 같은 강우변수와 수위 및 유량 간의 상관관계를 정의한 테이블로, 예·경보시스템에 많이 사용되는 방법으로 알려져 있다(USGS, 1984; Bae et al., 2008; Jang and Kim, 2015; MOIS, 2016). 현재 우리나라의 소하천은 대부분 미계측 유역으로 남아있어 노모그래프를 구축함에 있어 수치모의 결과를 활용하였는데, Table 1과 같이 전국하천을 4대강 유역과 기타 권역의 대권역으로 구분하고 관측자료가 있는 수위관측소를 기준으로 중권역을 구축하였다(MOIS, 2016).

소하천 홍수 예·경보시스템에서는 소하천의 침투유량을 산정하기 위하여, 실측자료 기반의 결과 검증이 가능한 중권역에서 침투 유출량을 산출하고 이를 면적비로 환산하여 소권역의 강우-침투 유출량을 결정하였다(Park et al., 2013). Table 1에서도 알 수 있듯이 각 소권역에는 평균 3개 정도의 소하천이 분포하는 것으로 나타났는데, 분석결과 소권역내 소하천 유역의 면적을 합한 전체면적이 소권역 면적보다 적은 것으로 나타나, 소하천의 유출량 결정에 있어 면적비를 적용할 경우에는 신중한 접근이 요구된다. 즉, 소하천 홍수 예·경보시스템을 운영하기 위해서는 구축된 노모그래프의 정확도 검토가 필수적으로 요구된다고 할 수 있다. 이를 위해서는 소하천에서의 실시간 수위·유량 계측자료가 필요하며, 본 연구에서는 모니터링을 위한 시범소하천 선정기준을 제시하고 기준에 따라 전국 소하천의 약 10%정도에 해당하는 2,200개의 시범소하천을 선정하였다.

현재 지자체와 행정안전부, 국립재난안전연구원은 선정된 시범소하천을 대상으로 모니터링 시설을 확대구축 중에 있으며, 현재까지 여주시 운촌천, 양산시 선장천, 울주군 중선필천의 3개 소하천에 계측시설을 설치하고 실시간 수위·유량을 계측하고 있다. 본 연구에서는 이들 소하천 중 중선필천(35°39' 19.88" N, 129°7' 29.82" E)에서 계측한 최근 2년간(2016-2017)의 강우, 수위, 유량 자료를 이용하여 노모그래프를 새롭게 구축하는 등 소하천 홍수 예·경보시스템 고도화 방안 연구를 수행하였다.

2. 시범소하천 선정기준 및 선정절차

본 연구에서는 선정된 시범소하천 유역이 지역별, 유역별 특성을 대표할 수 있도록 전국 소하천을 대상으로 지자체 수요조사를 실시하였다. 지자체 수요조사를 위해서 i) 과거 피해 규모가 컸던 소하천, ii) 지역공동체내 경제, 사회, 문화적

Table 1. Basin Numbers for Estimating Nomograph in Each River Basin

Large Influence Area	Han River	Nakdong River	Geum River	Youngsan River	Others	Total Number
Middle Influence Area	18	22	14	8	17	79
Small Influence Area	1,689	2,268	953	267	2,116	7,293
Small Stream	5,332	7,208	2,429	1,149	6,705	22,823

으로 중요성이 커 계측이 필요한 소하천, iii) 재해발생시 피해를 클 것으로 예상되는 소하천 등과 같은 선정기준을 사전에 제공함으로써 적절한 시범소하천이 선정되도록 유도하였다. 지자체 수요를 통해 선정된 소하천은 총 2,344개로 이를 각 시·도별로 분류해 보면 4 ~ 28% 정도에 해당된다(National Disaster Management Research Institute, 2017).

이들 소하천을 대상으로 i) 4대강 유역 내에 포함된 소하천 중 홍수위험도 분석결과가 1내지 2등급에 해당하는 소하천(MOIS, 2016), ii) 유역면적이 4.5 km² 보다 커서 계측결과의 안정성이 높은 소하천 그리고 iii) 소하천정비종합계획이 수립되어 있어 유역특성자료 수집이 용이한 소하천을 대상으로 시범소하천을 결정하였으며, 선정절차는 Fig. 1과 같다. 이후, 대상 소하천들을 유역별로 분류하고 위험도평가 결과와 지자체 수요가 일치하는 소하천을 우선 선정하고, 이들을 대상으로 우선순위가 낮거나 소하천유역 길이가 너무 짧으며, 직선구간이 없어 계측이 어려운 소하천유역을 제외하였다. 최종적으로 선정된 시범소하천은 전국 소하천의 약 10%에 해당하는 2,200개로서 이들은 위험도 등급이 높으며 지역별, 유역별 대표성을 갖는 다고 할 수 있다.

본 연구에서는 소하천유역을 도시, 농촌, 산지, 해안, 복합하천유역으로 분류하고 각 하천유역별로 우선순위를 결정하였다. 소하천유역을 분류하기 위해 행정안전부가 제안한 하상경사, 농경지면적비율, 대지면적비율, 임야면적비율, 해안과의 거리 등의 특성인자를 이용하였다. 소하천의 경우 하천시점을 정확하게 파악하기 어려워 하천길이를 산정하는데 어려움이 있어 보다 정확도가 높은 유역면적을 인자로 결정하였다. 본 연구에서는 행정안전부가 제안한 특성인자를 고려하여 임야면적이 30%이상인 소하천을 농촌하천으로 분류하였으며, 공공·산업단지와 같이 불투수면적이

70% 이상인 소하천을 도시하천으로 분류하였다. 이 외에도 산지와 농촌 혹은 산지와 도시 면적비가 비슷한 소하천은 복합하천으로 별도 분류하였다. 복합하천은 급경사지역과 완경사지역이 혼재한 소하천으로 평균하상경사를 적용할 경우 소하천 홍수 예·경보시스템의 예측수위 정확도가 낮아질 우려가 있어 이들 소하천을 별도로 분류하였다.

산지하천에서의 유량계측은 급경사 지역의 특성을 검증하는데 그 목적이 있으므로 지형 특성을 우선적으로 고려하여 토지이용도가 대부분 산지로 구성된 소하천을 산지하천으로 분류하였다. 농촌하천의 특징은 완경사유역으로 유역 내 토지이용도가 대부분 농경지에 해당하므로 농경지를 기준으로 분류하였다. 도시하천에서의 유량계측은 불투수 지역으로 인한 빠른 강우반응속도를 검증하는데 목적이 있으므로 불투수층 비율을 추가하여 도시하천을 분류하였다. 복합하천은 소하천이 산지에서 시작하여 농촌을 경유하여 흐르는 산지농촌하천과, 산지와 어촌을 경유하여 흐르는 산지어촌하천으로 구분할 수 있는데, 이들 소하천에는 급경사지역인 산지와 완경사 지역인 농촌 혹은 어촌의 거주지 면적비율이 비슷한 소하천유역이 대부분 포함되었다.

시범소하천 선정을 위한 우선순위는 하천길이가 가장 긴 소하천을 우선 선정하고, 두 번째로 유역면적이 큰 소하천을 선정하였다. 또한, 상류에 저수지가 위치하여 유량예측이 가능한 소하천은 제외하도록 우선순위를 설정하였다. 시·도내 하천유역별 우선순위는 도시하천, 복합하천, 농촌하천, 산지하천 순으로 결정하였다. 행정안전부와 국립재난안전연구원은 선정된 시범소하천을 대상으로 우선순위에 따라 모니터링 시설을 확대구축 중에 있으며, 현재 여주시 운촌천, 양산시 선장천, 울주군 중선필천 3개 소하천에 모니터링 시설을 설치·운영 중에 있다. 본 연구에서는 이들 소하천

Fig. 1. Flowchart of Selecting Test Small Stream Basins

Table 2. A New Small Stream Classification Guideline

Characteristic Indexes	Urban Stream	Agricultural Stream	Mountainous Stream	Ocean Stream	Complex Stream
Channel Slope	-	-	more than 0.1	-	
Agricultural Area Ratio (%)	-	more than 40	-	-	50
Length from Ocean (km)	more than 3			less than 3	
Residence Ratio (%)	more than 13	4 ~ 13	less than 4	-	50
Forest Area Ratio (%)	-	more than 30	more than 65	-	50
Impermeable Ratio (%)	more than 70	-	-	-	

중 국립재난안전연구소에서 시범소하천으로 운영 중인 중선필천 실측자료를 이용하여 소하천 홍수 예·경보시스템의 노모그래프 정확도 검증 및 고도화 연구를 수행하였다.

3. 소하천 홍수 예·경보시스템 고도화

3.1 노모그래프 정확도 검토

본 연구에서는 중선필천에서 실측한 수위·유량자료를 이용하여 노모그래프의 예측 정확도를 검토하였다. 중선필천은 울주군 두서면에 위치한 소하천으로 유역의 기하학적 특성은 유역면적이 5.09 km², 유로연장은 3.18 km, 유역평균 폭은 1.60 km, 유역의 형상계수가 0.50인 나뭇잎 형상을 가진 유역이며, 유역의 최고표고는 867 m, 평균표고는 435 m, 최대경사는 71°, 평균경사는 23°로써 비교적 급경사 하천에 속한다. 본 연구에서는 정확도 검토를 위하여 MOIS (2016)가 제시한 중선필천의 노모그래프를 그대로 사용하였다. 먼저 강우에 따른 노모그래프의 변화를 분석하기 위하여 중선필천이 위치한 울산지역내 강우관측소를 조사하였는데, 조사결과 중선필천 주변에는 Fig. 2와 같이 두서, 삼동, 울산, 울산공항 그리고 매곡 등 5개의 강우관측소가 위치하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 2. Location Map of i) ■: Jungseonpil-Chun and ii) ●: Automatic Weather Stations in Ulsan City, Korea

이들 중 중선필천을 대표하는 강우관측소를 선정하기 위하여 본 연구에서는 가장 멀리 떨어진 매곡 관측소를 제외하고 Table 3과 같이 4개 관측소들에 대해서 2016년 9월 17일과 10월 5일 관측된 총 강우량 등을 비교·분석하였다. 분석결과 각 관측소별 강우량에 차이를 보이는 것으로 조사되었는데, 이는 해안, 산지 등 지형적 특성이 영향을 준 것으로 판단된다. 본 연구에서는 중선필천과의 거리가 4.2 km로 가장 가까운 두서 관측소의 관측결과를 이용하여 노모그래프의 변화를 분석하였다.

MOIS (2016)는 전국 소하천에 대한 노모그래프를 제시하였는데, 각각의 하천에 대한 단면 형상, 최심하상고, 제방고, 계획홍수위 등에 대한 자료는 소하천정비종합계획을 참고하였다. 이들 자료에 기반하여 유출해석을 통해 침투유량을 결정하고 Manning 공식을 이용한 수위-유량 관계식을 산정하여 중선필천의 강우-유량 및 강우-수위 노모그래프를 Table 4와 같이 도출하였다. Table 4에서 하늘색으로 표시된 구간은 주의단계 구간이며, 붉은색으로 표시된 구간은 심각단계 구간을 나타낸다.

노모그래프의 강우-유량, 강우-수위 변화 분석 및 실측 유량·수위와의 비교를 위하여 두서 관측소에서 2016년 9월 17일과 10월 5일 관측된 강우량을 정리하여 Table 5에 수록하였다.

노모그래프의 침투홍수량 예측 정확도를 검토하기 위하여 2016년 9월 17일과 10월 5일 중선필천에서 측정된 침투수위 및 유량을 노모그래프와 비교하고 그 결과를 Table 6에 제시하였다. 보다 정확한 비교를 위하여 본 연구에서는 MAPLE 예측 강우를 사용하지 않고 실측 강우자료를 노모그래프에 적용하여 도출한 유량·수위 결과를 비교하였으며, 강우지속기간 60분에 해당되는 강우자료를 사용하여 유량과 수위를 산정하였다. 비교 결과 노모그래프를 이용하여 예측한 침투홍수량은 2016년 9월 17일과 10월 5일에 측정된 실측치를 각각 4.89배와 8.41배 정도 과대 산정하는 것으로 나타났다. 반면 홍수위 예측결과는 실측치를 각각 0.46배와 0.74배 정도 과소 산정하는 것으로 나타났다.

3.2 노모그래프 개선

본 연구에서는 소하천 홍수 예·경보시스템을 고도화하기 위하여 2016년에 중선필천에서 실측한 수위와 유량 자료를 반영하여 강우-침투홍수량, 강우-수위 노모그래프를

Table 3. Distance of Automatic Weather Stations from Jungseonpil-Chun and Total Rainfall Measured at 2016 on AWS located in Ulsan City

Station Name (Number)		Doseo (900)	Samdong (854)	Ulsan (152)	Ulsan Airport (151)
Distance (km)		4.2	17.8	20.7	21.7
Total Rainfall (mm)	17 Sep.	140.5	159.0	129.7	112.0
	5 Oct.	162.0	319.0	266.0	280.5

Table 4. Rainfall-peak Discharge and Rainfall-depth Nomograph of Jungseonpil-Chun, Korea

Rainfall (mm)	Duration Time(min)											
	Peak Discharges (m ³ /s)						Maximum Depth (m)					
	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
5	11.45	9.81	8.36	7.20	6.29	5.54	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1
15	62.94	53.15	44.48	37.87	32.5	28.25	0.44	0.4	0.36	0.32	0.30	0.27
25	125.55	105.08	87.41	73.55	62.57	54.13	0.68	0.61	0.54	0.49	0.44	0.41
35	191.75	159.52	132.10	110.34	93.36	80.64	0.88	0.79	0.7	0.63	0.57	0.52
45	259.52	214.91	177.40	147.44	124.53	107.22	1.07	0.95	0.84	0.75	0.68	0.62
55	328.08	270.74	222.92	184.59	155.71	133.76	1.24	1.1	0.97	0.86	0.78	0.71
65	397.09	326.79	268.52	221.74	186.85	160.23	1.4	1.23	1.09	0.97	0.87	0.79
75	466.38	382.94	314.15	258.85	217.93	186.64	1.54	1.36	1.2	1.07	0.96	0.87
85	535.85	439.16	359.78	295.92	248.96	213.00	1.74	1.49	1.31	1.16	1.04	0.94
95	605.44	495.40	405.39	332.94	279.95	239.30	1.96	1.61	1.41	1.25	1.12	1.01
105	675.11	551.66	450.98	369.94	310.90	265.57	2.21	1.85	1.51	1.33	1.2	1.08
115	744.85	607.92	496.56	406.95	341.81	291.80	2.29	1.96	1.61	1.42	1.27	1.15
125	814.63	664.19	542.11	444.04	372.69	318.00	2.37	2.18	1.83	1.5	1.34	1.21
135	884.45	720.66	587.65	481.11	403.55	344.18	2.45	2.26	1.92	1.58	1.41	1.27
145	954.30	777.28	633.17	518.16	434.38	370.34	2.52	2.33	2.05	1.65	1.48	1.33
155	1024.1	833.91	678.67	555.18	465.19	396.48	2.6	2.39	2.21	1.86	1.54	1.39
165	1094.0	890.53	724.16	592.19	495.99	422.60	2.67	2.45	2.26	1.93	1.61	1.45
175	1163.9	947.15	769.64	629.18	526.77	448.71	2.74	2.52	2.32	2.02	1.67	1.51
185	1233.8	1003.7	815.10	666.16	557.54	474.81	2.81	2.58	2.37	2.18	1.86	1.56
195	1303.7	1060.3	860.56	703.13	588.29	500.89	2.88	2.63	2.42	2.24	1.93	1.62

Table 5. Measured Rainfall Data at Doseo Automatic Weather Station on Ulju-gun in 2016

Day	Contents	Duration Time (min)					
		10	20	30	40	50	60
17 Sep.	Maximum Rainfall (mm)	5.5	8.0	10.0	11.5	13.0	14.5
	Maximum Rainfall Intensity (mm/h)	33.0	24.0	20.0	17.3	15.6	14.5
5 Oct.	Maximum Rainfall (mm)	10.5	18.5	28.0	36.5	45.5	54.0
	Maximum Rainfall Intensity (mm/h)	63.0	55.5	56.0	54.8	54.6	54.0

Table 6. Comparisons of Estimated Discharge and Depth from the Nomograph with Measured Data at Jungseonpil-Chun, Ulju-Gun

Time	Discharge (m ³ /s)		Depth (m)	
	Measured	Nomograph	Measured	Nomograph
2016. 9. 17.	5.54	27.11	0.57	0.26
2016. 10. 5.	15.5	130.3	0.95	0.70

Table 7과 같이 새롭게 구축하였다. 그 결과, 기존 소하천 대한 침투유량은 감소하고 침투수위는 증가하는 것으로 홍수 예·경보시스템의 노모그래프에 비해 동일 강우에 나타났다.

Table 7. New Developed Rainfall-peak Discharge and Rainfall-depth Nomograph with Measured Data in Jungseonpil-Chun, Korea

Rainfall (mm)	Duration Time(min)											
	Peak Discharges (m ³ /s)						Maximum Depth (m)					
	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
5	1.97	1.65	1.41	1.21	1.06	0.93	0.25	0.22	0.19	0.17	0.15	0.14
15	6.84	5.78	4.84	4.12	3.53	3.07	0.67	0.59	0.52	0.46	0.41	0.37
25	13.05	10.92	9.09	7.64	6.50	5.63	1.01	0.90	0.78	0.69	0.62	0.56
35	20.47	17.03	14.10	11.78	9.97	8.61	1.27	1.13	0.99	0.88	0.78	0.70
45	29.02	24.03	19.83	16.48	13.92	11.99	1.51	1.34	1.17	1.04	0.93	0.83
55	38.71	31.95	26.30	21.78	18.37	15.78	1.71	1.52	1.34	1.18	1.05	0.95
65	49.55	40.78	33.51	27.67	23.32	19.99	1.89	1.68	1.48	1.31	1.16	1.05
75	61.53	50.52	41.45	34.15	28.75	24.63	2.07	1.84	1.61	1.43	1.27	1.14
85	74.65	61.18	50.12	41.23	34.68	29.67	2.22	1.98	1.73	1.53	1.36	1.23
95	88.90	72.74	59.53	48.89	41.11	35.14	2.37	2.11	1.84	1.64	1.45	1.31
105	104.29	85.22	69.66	57.15	48.03	41.02	2.51	2.23	1.96	1.73	1.54	1.39
115	120.80	98.60	80.53	66.00	55.44	47.33	2.65	2.36	2.07	1.83	1.63	1.46
125	138.45	112.88	92.13	75.47	63.34	54.05	2.76	2.46	2.15	1.91	1.70	1.53
135	157.23	128.11	104.47	85.53	71.74	61.18	2.87	2.56	2.24	1.98	1.77	1.59
145	177.14	144.28	117.53	96.18	80.63	68.74	2.98	2.65	2.32	2.06	1.83	1.65
155	198.17	161.36	131.32	107.43	90.02	76.72	3.08	2.74	2.40	2.13	1.89	1.70
165	220.34	179.36	145.85	119.27	99.89	85.11	3.18	2.83	2.48	2.20	1.96	1.76
175	243.63	198.26	161.10	131.70	110.27	93.93	3.28	2.92	2.56	2.27	2.02	1.81
185	268.06	218.06	177.09	144.73	121.13	103.16	3.35	2.98	2.61	2.31	2.06	1.85
195	293.61	238.79	193.81	158.35	132.49	112.81	3.44	3.06	2.68	2.38	2.12	1.90

본 연구에서는 개선된 노모그래프가 실측 유량 및 수위를 정확하게 재현하는지를 검토하기 위하여 2016년 9월 17일 발생한 강우에 대해 노모그래프를 이용하여 유량과 수위를 도출하고 실측 결과와 비교하여 Fig 3에 도시하였다. 2016년 9월 17일 발생한 강우는 최대 시우량 14.5 mm/h, 최대 유량 5.54 m³/s, 최대 수위 0.57 m의 비교적 큰 유량조건에서 측정된 것으로, 실측치와의 비교를 위하여 실측분포를 가장 잘 재현하는 60분 단위 강우분포를 노모그래프에 적용하고 유량과 수위를 계산하였다. Fig. 3(a)는 강우-유량 노모그래프 관계식으로 도출한 시간별 유량 자료를 도시한 것으로써 노모그래프 관계식은 첨두유량을 비교적 정확히 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)는 강우-수위 노모그래프 관계식으로 도출한 시간별 수위 자료로써 노모그래프 관계식은 첨두수위 및 상승부를 비교적 정확히 재현하는 것으로 나타났다. 그러나 첨두 이후의 유량과 수위는 실측값에 비해 과소 산정하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 유효우량에 대한 영향을 세밀히 분석하기 위하여 전체강우와 유효강우에 대한 노모그래프 수위, 유량 결과를 실측치와 비교하여 Fig 3에 함께 도시하였다. 유효유량을 고려하지 않은 총 강우에 대한 노모그래프 유량·수위 예측 결과는 Fig. 3의 점선으로 표기된 바와 같이 실측치를

과대 산정하는 것으로 나타났다. 즉, 소하천 유역에서 선행강우가 없는 경우 초기 강우의 손실이 크게 나타나며, 강우 초기의 유출에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 그러나 현재 예·경보 시스템에서는 이러한 영향을 고려하지 못해 실제 소하천 수위가 증가하지 않았음에도 수위가 증가한 것으로 예측하여 잘못된 경보를 발령하는 등 재난대응에 혼선을 초래할 우려가 크다. 따라서 2016년 9월 17일의 강우에 대해서는 Fig 3의 실선으로 표기된 바와 같이 초기손실을 반영하고 유효우량만을 고려하여 실측치를 잘 재현하도록 노모그래프를 구축하였다.

2016년 10월 5일 발생한 태풍 차바 당시의 강우는 최대 시우량 54.0 mm/h, 최대 유량 15.5 m³/s, 최대 수위 0.95 m로 설계홍수량에 근접한 유량조건에서 측정되었다. 이 경우, 9월 17일 강우와는 달리 선행강우로 인해 토양이 포화되어 총 강우가 별다른 손실 없이 유출된 것으로 나타났다. Fig. 4(a)는 시간별 유량 자료를 도시한 것으로써 노모그래프는 실측 첨두유량과 상승곡선을 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)는 시간에 따른 수위 자료를 도시한 것으로써 노모그래프는 첨두수위를 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. 그러나 9월 17일의 결과와 마찬가지로 첨두 이후의 유량과 수위를 실측값에 비해 과소 산정하는 것으로 나타났다.

Fig. 3. Comparisons of Rainfall-Depth Nomograph Results with Measured Depth at 17 September 2017 in Jungseonpil-Chun, Ulju-Gun

Fig. 4. Comparisons of Rainfall-Discharge Nomograph Results with Measured Depth at 5 October 2016 in Jungseonpil-Chun, Ulju-Gun

4. 노모그래프 검증

2016년의 강우, 수위, 유량자료를 이용하여 구축한 노모그래프를 검증하기 위하여 2017년 9월 11일 발생한 유효강우를 적용하고, 강우-유량 및 강우-수위 결과를 실측치와 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 검증 결과 본 연구에서 구축된 노모그래프는 Fig. 5(a)와 같이 첨두유량의 변화를 비교적 정확히 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 시간에 따른 수위 자료를 도시한 것으로써 노모그래프는 첨두수위를 비교적

잘 재현하는 것으로 나타났다. 소하천의 유출특성은 강우초기에 홍수량이 급격하게 상승하는 반면, 강우 종료 이후에는 초기 침투 유량이 지속적으로 하천에 유입되어 유량이 일정 시간 동안 꾸준히 유지되는 것으로 나타났다. 강우만으로 유량을 예측하는 노모그래프는 이러한 소하천의 유출특성을 재현하는데 한계가 있는 것으로 나타나 침투유량 이후에 노모그래프를 사용하는 경우 주의를 요한다. 2017년 9월 11일 발생한 강우는 최대 시우량이 19.5 mm/h, 최대유량이 0.15 m³/s, 최대수위는 0.28 m로써 비교적 저유량 조건에서

Fig. 5. Comparisons of Rainfall-Discharge Nomograph Results with Measured Depth at 11 September 2017 in Jungseonpil-Chun, Ulju-Gun

측정된 것이나, 본 연구에서 구축한 노모그래프는 실제 유량·수위 분포를 잘 재현하는 것으로 나타나 향후 예·경보를 위한 유량 예측에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 소하천 홍수 예·경보시스템을 고도화하기 위하여 시범 소하천 유역에서 실측한 2년간(2016 ~ 2017)의 강우, 수위, 유량자료를 사용하였다. 2016년 실측자료를 이용하여 소하천 홍수 예·경보시스템의 예측 정확도를 비교한 결과, 예측유량은 실측치를 과대산정하고 예측수위는 실측치를 과소산정하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 소하천 홍수 예·경보시스템의 정확도를 개선하기 위하여 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 노모그래프를 새롭게 구축하였다. 노모그래프의 구축은 2016년 9월 17일과 10월 5일에 측정된 유량·수위 자료를 이용하였으며, 선행강우가 없는 경우에는 강우손실을 고려한 유효유량을 통해 노모그래프를 구축하였다.

구축된 노모그래프를 검증하기 위하여 2017년 9월 11일 강우를 노모그래프에 적용하여 예측한 유량·수위 결과를 실측치와 비교하였다. 비교 결과, 구축된 노모그래프는 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타나 홍수 예·경보에 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 노모그래프는 침투 이후의 유량과 수위를 과소 산정하는 것으로 나타나, 침투 이후의 대응에 활용하기 위해서는 세심한 주의가 요구된다. 또한, 구축된 노모그래프가 유량·수위 자료를 잘 재현한다고 하더라도 선행 강우에 따른 침투량을 고려하지 않는 경우 예측결과가 과대 산정될 수 있으므로 더 많은 시범소하천 유역 운영을 통해 유효유량에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 이와 함께 전국에는 22,823개의 소하천이 있어 이들 소하천 모두에서 유량·수위를 계측하는 것은 한계가 있으므로, 시범소하천 확대와 함께 유출특성이 유사한 미세측소하천으로 확대 적용이 가능하도록 강우-유출해석 기법 개발 및 노모그래프 정확도 향상 등의 연구도 추가적으로 요구된다.

References

Bae, D., Shim, J.B., and Yoon, S. (2008). Development and assesment of flow nomograph for the real-time flood forecasting in Cheonggye stream. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1107-1119.

Park, J.B., Shin, D.S., Park, M.J., Kang, B.G., and Shin,

H.S. (2013). Rainfall thresholds estimation to develop flood forecasting and warning system for nakdong small river basins. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 2, pp. 311-317.

Cheong, T.S. (2016). Development of guideline to select the artistic and safe small stream. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 259-267.

Cheong, T.S., Ko, T., Choi, H., and Kim, S. (2017). Development of large scale particle image velocimetry prototype for the small stream discharge monitoring. *Journal of Disaster Management*, Vol. 2, No. 1, pp. 19-28.

Jang, C.H., and Kim, H.J. (2015). Development of flood runoff characteristics nomograph for small catchment using R-programming. *Proceedings of 2015 Annual Conference*, Korea Water Resources Association, p. 590.

MOIS (Ministry of the Interior and Safety). (2016). *The integration model of flood forecasting for medium and small streams*. Report No. 1741000181.

National Disaster Management Research Institute. (2017). *Establishment of the safety design codes based on empirical experiments(II)*. Report No. 11-1741056-000042-14.

Song, Y.H., Park, M., and Lee, J. (2015). Preliminary feasibility study on alert standard rainfall for urban mid and small rivers. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 1, pp. 315-326.

Strahler, A. (1952). Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 63, No. 9, pp. 923-938.

US Geological Survey. (1984). *Flood frequency and storm runoff of urban areas of memphis and shelby county, tennessee*. Water Resources Investigations Report 84-4110.

You, K.T., Jun, H.D., and Lee, J. (2016). Hack's law and topographical properties analysis of small river basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 173-182.

Received July 10, 2018

Revised July 12, 2018

Accepted September 11, 2018