

내수위 조건에 따른 도시내수침수 예보에 관한 연구

추태호, 추연문, 전해성, 권창현, 이재균*
부산대학교 토목공학과

A Study on the Urban Inundation Flooding Forecasting According to the Water Level Conditions

Tai-ho Choo, Yean-moon Choo, Hae-seong Jeon, Chang-heon Gwon, Jae-gyun Lee*

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

요약 전 세계적으로 발생하고 있는 이상기후현상으로 자연재해의 발생빈도와 피해규모가 증가하고 있는 추세이다. 이로 인하여 도시유역의 수문학적 양상이 변화함에 따라 불투수 면적 증가와 함께 증가된 호우로 심각한 내수침수 피해를 가져온다. 이에 인명 및 재산피해를 최소화하기 위하여 내수침수 예측체계가 필요하다. 본 연구에서는 강우강도와 지속시간만으로 침수예측이 가능한 Flood Nomogram을 개발하였다. 내수침수 발생가능이 매우 높고 침수 위험도가 높은 대도시내 침수예상 지역의 내수침수피해 특성을 분석하여 내수침수 예보 기준을 설정하는 방법을 제시하였다. 또한 우수맨홀과 우수관경을 기준으로 내수위를 4가지 조건하에 도시내수침수 예보 기준을 다음과 같이 설정하였다. 1) 우수맨홀이 넘칠 때, 2) 우수관경이 가득 찼을 때, 3) 우수관경의 70%에 도달했을 때, 그리고 4) 우수관경의 60%에 도달했을 경우이다. 따라서, 침수가 발생하기 시작하는 강우와 침수피해를 유발하는 강우사상을 통하여, 내수침수가 시작되기 전에 사전대비, 대응할 수 있는 기준과 예측하는 수단으로 활용할 수 있을 것으로 나타났다.

Abstract The frequency of natural disasters and the scale of damage are increasing due to the abnormal weather phenomenon occurring all over the world. As a result, as the hydrological aspect of the urban watershed changes, the increase in impervious area leads to serious domestic flood damage due to increased rainfall. In order to minimize the damage of life and property, domestic flooding prediction system is needed. In this study, we developed a flood nomogram capable of predicting flooding only by rainfall intensity and duration. This study suggests a method to set the internal water immersion alarm criterion by analyzing the characteristics of the flooding damage in the flooded area in the metropolitan area where flooding is highly possible and the risk of flooding is high. In addition, based on the manhole and the pipe, the water level was set as follows under the four conditions. 1) When manhole overflows, 2) when manhole is full, 3) when 70% of the pipe is reached, and 4) when 60% of the pipe is reached. Therefore, it can be used as a criterion and a predictive measure to cope with the pre-preparation before the flooding starts, through the rainfall that causes the flooding and the flooding damage.

Keywords : Urban Inundation, Flood, Inundation Predication, Flood Nomogram, Forecast

1. 서론

최근 전 세계적인 산업화의 발달은 탄소배출량을 가중하였으며, 이는 전 세계적인 기후변화 및 기상이변을

야기하였다. 지구 평균기온은 1980년대 이후 급격한 증가를 보이고 있으며, 이에 따라 해수면 상승, 농업 생태계 변화 등이 나타나고, 홍수, 가뭄, 태풍, 국지성 호우 등 자연재해의 발생빈도와 강도가 잦아지고 있다. 이로

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Jae-gyun Lee(Pusan Univ.)

Tel: +82-51-510-7654 email: ljj7856@hanmail.net

Received March 21, 2019

Revised March 4, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

인하여 도시유역의 수문학적 양상이 변화하였으며, 이와 더불어 건물이나 도로포장 등의 확대에 의해 불투수 면적이 증가 되어 하천으로 배수시키는 유출량을 증가시켰다. 과거에는 하천유역에서 홍수위보다 낮은 제방고로 인한 하천범람이나 제방붕괴 등 외수에 의한 침수피해가 주원인이었으나, 최근 도시유역에서 가장 빈번히 발생하는 피해는 내수가 배제되지 못하는 내수배제불량에 의한 침수가 주원인이 되고 있다. 실제로 2001년 7월 홍수 피해와 2010년 9월 21일 서울 광화문에서 발생한 최근의 홍수의 상당 부분은 국내 물 배제의 부족에서 비롯되었다.

이와 같은 현상의 원인은 기후변화로 인한 장마기간과 장마가 종료된 후 잦은 집중호우가 발생하고, 또한, 수도권 지역과 서울 인구의 약 절반이 밀집되어 있기 때문에 인구 밀도가 매우 높다. 그리고 불투수율이 90%이고, 피해가 커지는 것이 환경사 지역이나 저지대의 개발이다.

따라서 본 연구에서는 서울 신천지구의 강우자료 및 하천 현황자료를 조사한 뒤, 미 환경보호청에서 개발한 SWMM(Storm Water Management Model)을 기반으로 태풍이나 갑작스러운 호우에 의한 침수상황을 모의하고, 내수침수 대책방안에 대한 검토를 진행하고자 한다.

2000년대 들어와서 부터는 수리·수문과정의 모델링과 GIS 등의 발달로 각각의 모델들에 대한 연계모형의 구축에 대한 연구가 활성화되고 있다. 침수해석을 위해 하도는 1차원 부정류 및 부정류해석으로 수위를 산정하여 제내지로 연장하고 제내지는 ARC view와 같은 GIS 프로그램을 이용하여 DEM화하는 등의 분석기법이 시도되었다. 내수와 외수를 연계한 해석도 시도되었으나 주로 도시하천과 제방의 범람이나 파괴 해석이 주로 수행되었다. 도시하천에서 침수양은 관거의 통수 범위 이상의 잉여 수량을 말하며, 그 외 하천은 하천분류를 1차원 부정류모형으로 해석하고 하도홍수위에 따라 제방의 월류 또는 붕괴 상황으로 접근하는 원리이다.

Hus 등(2000)은 SWMM 모형을 이용하여 관망의 절점에서 잉여수에 의해 발생하는 침수에 대하여 모의하였으며[1], Phillips 등(2005)은 도시지역 배수 시스템을 XP-SWMM 모형과 2차원 침수해석을 위한 TUFLOW 엔진을 이용하여 1D/2D 모델링을 실시하고, 도시 침수 해석에 관한 2차원 침수 해석의 적용에 XP-SWMM 모형의 적용성을 평가한 바 있다[2]. 도시유역에의 적용을

위해 김형준 등(2005)이 내수침수모의는 ILLUDAS 모형을 도입하고 외수범람모의는 2차원 Saint-Venant 방정식을 유한차분기법으로 해석하는 기법을 연계하였다[3]. 한건연 등(2005)은 각 맨홀지점의 관거통수능 이상의 잉여량 계산을 ILLUDAS모형으로 산정하고 제내지의 저류, 건물주위의 흐름 등 지표류 해석을 DEM자료를 이용하여 일정 격자망으로 구성하고 연속방정식과 운동량 방정식을 유한차분법 또는 유한요소법으로 해석하였으며[4], 이창희 등(2006)은 SWMM모형의 Extran Block과 DEM을 연계하여 내배수시설의 과부하로 인한 도시의 침수심 계산을 위해 시간에 따른 유역침수지도 작성모형을 개발하였다[5]. 또한 한건연 등(2007)은 DEM을 사용한 침수해석에서 계산격자 수의 증가에 따라 상당한 계산시간이 소요되는 것을 보완하기 위하여 Sub-Grid의 개념을 도입한 DEM기반 침수해석모형을 개발하였다[6]. Guo(1998)는 기 시공된 내배수시설, 비용·통수능 곡선, 비용·위험도 곡선, 공사기간에 의해 유도되는 임시 내배수시설물의 설계홍수량을 위험도·비용 법으로 모의하였다[7]. Hsu 등(2000)은 빗물펌프장의 고장이나 하수관거의 통수능 부족에 의한 도시침수해석을 SWMM과 2차원 수리해석모형으로 시도하였다[8]. Pingel과 Ford(2004)는 유역과 하천, 확률강우, 경제성 등을 복합적으로 고려해 Standard of Practice 모형을 이용하여 홍수위험도 저감 방안을 연구하였다[9]. Trowsdale(2007)은 기존 도시유출해석모형의 장단점과 연구진행 방향 등에 관한 논문을 발표하였다[10]. Wei (2013)는 도시지역 홍수예보를 위한 도시유출 모형의 활용방안을 알아보기 위해 대표적 도시유출 모형인 SWMM 모형을 이용하여 불투수지역 조도계수, 투수지역 조도계수, 불투수지역 요면저류량, 투수지역 요면저류량의 4가지 항목의 민감도를 분석하였다[11].

2. 연구방법

F-N(Flood Nomogram)은 기존의 도시하천에 적용한 사례가 있는 하천지점에서의 홍수량을 예측하기 위한 F-N에 대하여 내수침수위험도가 높은 지역 및 기존의 침수지역에 대하여 강우강도 및 지속시간별 호우에 대하여 Huff법에 의하여 시간분포 시키고 침수발생 가능성을 강우-유출 모형에 의하여 분석을 통하여 강우강도-강

우지속시간에 따른 침수 관계를 회귀분석을 통하여 개발된 회귀 관계도를 F-N로 설정하였다.

설정된 F-N은 대상지점에서 실제 내수침수를 발생시킬 수 있는 호우자료 등을 이용하여 도시구역의 침수예보를 위한 활용가능성을 검증하였다. 연구절차는 Fig. 1에 간략히 나타내었다.

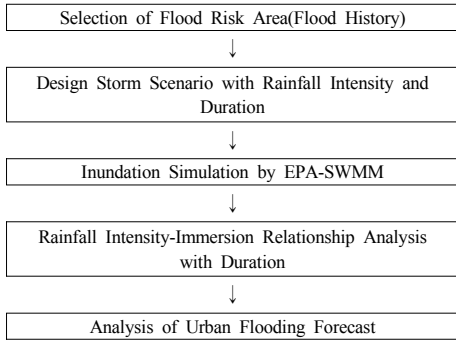


Fig. 1. Study Flowchart

3. 내수침수 예보 구축

3.1 대상구역

도시 저지대를 대상으로 내수침수 시나리오별 강우-유출 모의를 수행하여 침수발생 강수량을 산정하였다. 대상구역은 Fig. 2와 같이 서울 신천으로 1998년 침수이력이 있는 서울 송파구의 신천 빗물펌프장 구역으로 선정하였다.



Fig. 2. Study Area

침수위험도가 높은 상습 침수인 대상지점은 유동인구

가 많고 방류하천인 한강에 인접하여 침수규모가 커질 수 있는 지역이다. 이를 위해 내수침수 예보를 위한 F-N의 구축지점으로 선정하였다.

3.2 도시내수침수 예보

대상구역의 F-N은 강우량 1mm부터 소수점 둘째자리까지 증가시키면서 강우강도로 전환하고 이때 각각의 지속시간을 증가시키면서 내수침수 예보를 구축하였다 (Ex. 1mm, 1.01mm, 1.02mm, …, 200mm). 강우의 시간분포는 Huff 3분위법이 적용되었다.

대상지점에서 침수가 발생된 경우 및 지속시간에서의 침수발생시간은 Table 1과 같다. 우수맨홀과 우수관경을 기준으로 내수위를 4가지 조건하에 도시내수침수 예보 기준을 다음과 같이 설정하였다.

- 1) 내수위 조건으로 우수맨홀이 넘칠 때 내수침수가 발생하기 시작하는 강우량 및 큰 침수피해를 유발하는 호우사상을 파악하여 내수침수에 따른 예보 기준을 작성하였다.
- 2) 내수위 조건으로 우수관경이 가득 찼을 때 내수침수가 발생하기 시작하는 강우량 및 큰 침수피해를 유발하는 호우사상을 파악하여 내수침수에 따른 예보기준을 작성하였다.
- 3) 내수위 조건으로 우수관경의 70%에 도달했을 때에 따른 내수침수가 발생하기 시작하는 강우량 및 큰 침수피해를 유발하는 호우사상을 파악하여 내수침수에 따른 예보기준을 작성하였다.
- 4) 내수위 조건으로 우수관경의 60%에 도달했을 때에 따른 내수침수가 발생하기 시작하는 강우량 및 큰 침수피해를 유발하는 호우사상을 파악하여 내수침수에 따른 예보기준을 작성하였다.

Table 1. Flooding Rainfall Intensity with Inundation Time According to the Water Level Conditions

Inundation Time (min)	Rainfall Intensity (mm/hr)			
	Over	Full	70%	60%
10	138	130.4	119	103.6
30	48	46.8	42.3	36.5
60	31	29.6	25	21.1
120	23	21.6	17.9	14.9
180	20.7	19.5	15.9	13.1
360	19	18.3	14.5	11.7
720	18.4	17.9	14	10.3

오른쪽 Fig. 3은 대상구역 지점별 F-N을 침수시점이 빠른 경우와 지속시간으로 구성되어 대표 F-N으로 구축하였다. 또한, Huff 3분위의 침수모의결과로 구축된 F-N 회귀선을 나타내었다.

내수위 조건별 F-N 회귀선을 통해 침수발생전 대비 할 수 있는 시간을 얼마나 확보 가능할지 분석해 보았다.

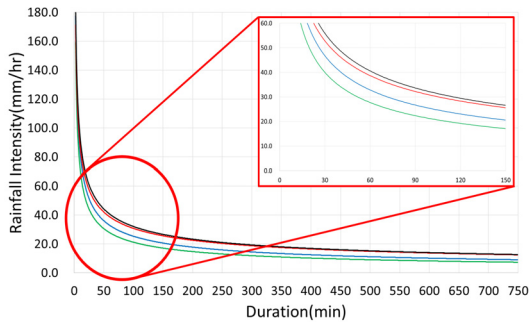


Fig. 3. Study Area F-N

4. 내수침수 예보의 적용성

내수침수 예보로 예측되는 침수발생시각의 적용성 검증 위해 EPA-SWMM 침수발생시각 결과와 검토하였다. Table 2와 같이 지속시간 3hr의 30yr, 50yr, 100yr 빈도 확률강우량의 EPA-SWMM 모의 결과와 F-N과의 침수발생시각을 Fig. 4에 검토하였다.

Table 2. Probability Rainfall Events (3hr duration)

Frequency (year)	Rainfall (mm)
30	165.2
50	180.0
100	199.9

SWMM에 의한 침수발생시각은 강우 발생 후 30yr - 85min, 50yr - 82min, 100yr - 79min으로 발생했으며, F-N으로 예측된 침수발생시각은 30yr - 77min, 50yr - 75min, 100yr - 70min이다. F-N으로 예측된 침수발생

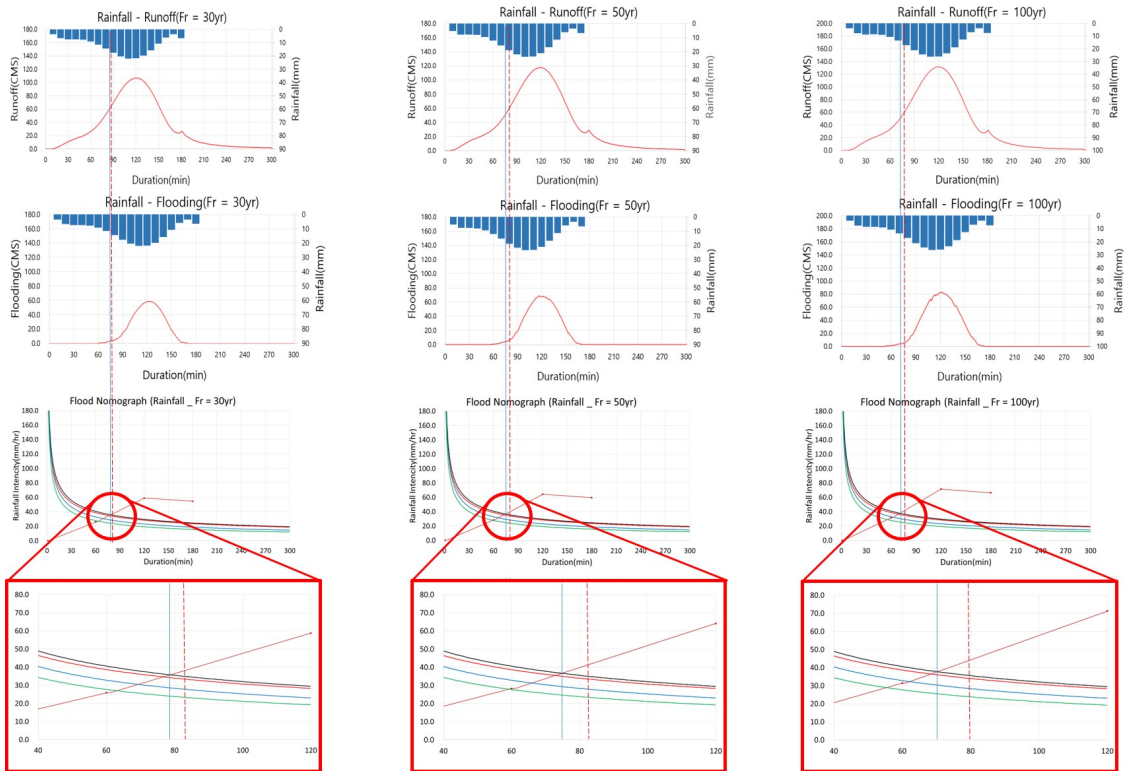


Fig. 4. Comparison and verification of following time of probability rainfall

시각과 SWMM 모의 결과와의 차이가 약 5~10min 정도로 유사하게 나타나서 도시내수침수 예보의 활용성이 기대되는 것으로 판단되었다.

Fig. 4와 같이 F-N을 도시침수예보에 활용하면 침수 발생시간 예측에 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 집중호우에서 빠르게 침수되는 도시의 내수유역에서 F-N을 도입한 침수예보시스템으로 활용성을 기대할 수 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 강우시나리오에 대하여 SWMM 모의를 통하여 강우발생에 대하여 침수예측이 가능한 도시내수침수 F-N을 구축하였다.

F-N은 침수 예측이 어려운 도시지역에서 침수예보의 가능성을 제시한 것으로 강우강도와 지속시간의 정보만으로 빠르게 침수의 추정이 가능하므로 도시지역의 침수 피해 저감에 기여할 것으로 판단된다. 특히 최근 빈번한 도시홍수발생으로부터 시민의 재산과 안전을 지킬 수 있는 효과적인 지표가 될 것이다. 또한, 3hr 예보강우인 동네예보 등과 같은 예측 강우를 이용하면 사전에 대비시간 확보도 가능할 것으로 판단된다.

더욱이 본 연구에서 주목할 점은 지금까지 내수침수 관련 많은 논문이 발표되었으나 그중에서 내수침수에 따른 예보 기준을 설정한 연구논문이 없었으며, 본 연구가 최초의 연구라는데 연구사적 의미가 있다고 사료된다.

따라서 본 연구를 시발점으로 향후 내수침수에 따른 예보, 대비 및 대응 등에 관련된 예보 기준설정에 관한 지속적인 연구에 대한 관심과 투자가 필요하다.

References

- [1] M. H. Hsu, S. H. Chen, T. J. Chang, "Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system", *Journal of Hydrology*, Vol.234, No.1-2, pp.21-37 June. 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00237-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00237-7)
- [2] B. C. Phillips, S. Yu, G. R. Thompson, N. de Silva, "1D and 2D Modelling of Urban Drainage System using XP-SWMM and TUFLOW", *International Conference on Urban Drain-age*, Copenhagen, Denmark, Aug. 2005.
- [3] H. J. Kim, Y. S. Cho, "Development of a Coupled Model for the Flood Inundation Simulation", *Journal of*

Korea Water Resources Association, Vol.2005, No.1, pp.1047-1052, May. 2005.

- [4] K. Y. Han, C. H. Lee, J. S. Kim, "Development and Verification of Inundation Model Considering Storm Sewers in Urban Area", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.2005, No.1, pp.159-162 May. 2005.
- [5] C. H. Lee, K. Y. Han, G. H. Choe, "DEM Based Urban Inundation Analysis Model Linked with SWMM", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.39, No.5, pp.441-452, May. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2006.39.5.441>
- [6] K. Y. Han, K. H. Ahn, W. H. Cho, K. T. Lee "2D Urban Inundation Analysis by Sub-Grid Scale Treatment", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2007, No.10, pp.1329-1332, Oct. 2007.
- [7] Guo, J. C. Y. James, "Risk-cost approach to interim drainage structure design", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.124, No.6, pp.330-333 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(1998\)124:6\(330\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1998)124:6(330))
- [8] M. H. Hsu, S. H. Chen, T. J. Chang, "Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system", *Journal of Hydrology*, Vol.234, No.1-2, pp.21-37, June. 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00237-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00237-7)
- [9] N. Pingel, D. Ford, "Interior Floodplain Flood-Damage Reduction Study", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.130, No.2, pp.123-130, Mar. 2004.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2004\)130:2\(123\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:2(123))
- [10] A. H. Elliott, S. A. Trowsdale, "A review of models for low impact urban stormwater drainage", *Environmental Modelling & Software*, Vol.22, No.3, pp.394-405, Mar. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>
- [11] N. S. Hsu, C. L. Huang, C. C. Wei, "Intelligent real-time operation of a pumping station for an urban drainage system", *Journal of Hydrology*, Vol.489, pp.85-97, May. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.047>

추 태 호(Kil-Dong Hong)

[정회원]



- 1990년 12월 : Pittsburgh 대학교 일반대학원 토목공학과 (수리학 석사)
- 1998년 12월 : Pittsburgh 대학교 일반대학원 환경토목공학과 (환경수리학 박사)
- 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : K-Water 연구원 책임연구원
- 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

댐, 수리수문, 하천, 방재

추연문(Yeon-Moon Choo)

[정회원]



- 2011년 8월 : 서울과학기술대학교 토목공학학과 (공학사)
- 2013년 8월 : 영남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2018년 10월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 연구교수

<관심분야>
수리학, 수리수문, 댐

이재균(Jae-Gyun Lee)

[정회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 대학원 재학(석사)

<관심분야>
수리학, 방재

전해성(Hae-Seong Jeon)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동아대학교 해양공학과 졸업 (학사)
- 2006년 8월 : 부경대학교 산업대학원 토목공학과 졸업 (석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 대학원 재학 (박사)

<관심분야>
수리수문, 하천, 댐

권창현(Chang-Heon Gwon)

[준회원]



- 2018년 2월 : 동서대학교 토목공학과 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 석사과정

<관심분야>
하천, 수리학, 방재