

동수역학 모형을 이용한 침수사고 분석 및 특성요인도를 활용한 재해 원인 고찰

유동현¹, 송창근^{2*}

¹인천대학교 안전공학과 석사과정, ²인천대학교 안전공학과 부교수

Inundation Accident Analysis Using Hydrodynamic Model and Consideration of Disaster Roots Using Cause and Effect Diagram

Dong-Hyun Yoo¹, Chang Geun Song^{2*}

¹Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University

²Associate Professor, Department of Safety Engineering, Incheon National University

요약 최근 기후변화로 인해 태풍과 호우 피해가 증가하고 있으나 물리적인 침수대책과 재난대응 안전관리가 여전히 미흡한 실정이다. 따라서 안전 확보를 위한 대응체계를 마련하고, 침수 발생 시 피해를 최소화할 수 있는 실용적인 방안을 확보함으로써 경제적인 손실과 인명피해를 최소화하는 방안 마련이 필요하다. 본 연구에서는 '노량진 배수지 수몰 사고', '초량제1지하차도 침수사고'에 대한 동수역학 모의를 수행하고 침수양상을 해석하였으며, 침수위험도 정량화 지수를 이용하여 공간적 위험도를 산정하였다. 또한 특성요인도를 통해 침수사고에 대한 물리적, 관리적 원인을 체계적으로 제시하였다.

주제어 : 침수, HDM-2D, 특성요인도, 노량진 배수지 수몰사고, 초량제1지하차도 침수사고

Abstract Recently, the damages by typhoons and heavy rains are increasing due to the climate change. However, we are still vulnerable to inundation disaster due to various causes such as poor physical flood control and lacks of disaster and safety management. Therefore, it is necessary to establish systems to ensure safety and prepare practical countermeasures that can minimize damage when an inundation occurs, thereby minimizing economic loss and casualty. In this study, hydrodynamic inundation modelings were implemented to analyze the "Noryangjin reservoir inundation accident" and "Choryang No. 1 underground road inundation accident." and spatial risk was assessed by a quantitative hazard index. In addition, cause and effect diagrams were provided to present the risk causes in terms of physical and managerial aspects.

Key Words : Inundation, HDM-2D, Cause and Effect diagram, Noryangjin reservoir inundation accident, Choryang No.1 underpass inundation accident

*This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 20DPIW-C153746-02).

Corresponding Author : Chang Geun Song(baybreeze119@inu.ac.kr)

Received September 9, 2020

Revised September 30, 2020

Accepted October 20, 2020

Published October 28, 2020

1. 서론

21세기에 접어들면서 기후변화에 의해 야기되는 호우와 태풍의 빈도와 강도가 증가하고 있다. 이러한 변화는 증가하는 풍수해 재난의 주요 원인으로 지목되고 있으며 침수사고 및 산업 재해를 증가에도 크게 영향을 미친다. 지난 10년간 집중호우에 의한 범람과 저지대 침수, 토사재해 등에 의해 Table 1과 같은 인명재산 피해가 발생하였다. 이러한 침수재해의 원인으로는 호우 및 태풍 강도 증가, 양수기 부족 및 고장, 인접 배수로 배수 기능 불량, 대상영역의 저지대 위치, 재난대응 안전관리의 한계 등이 복합적으로 작용하여 발생한다.

침수재해의 경우 공사현장의 근로자와 일반 시민의 생명을 손상시키는 인명피해뿐만 아니라 도로, 배수지, 지하차도 등 시설물 손상에 따른 재산피해 이외에도 시설물이 복구되기까지 막대한 사회적·경제적 피해를 유발하기 때문에 더욱더 많은 관심이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 동수역학 모형을 활용하여 최근 국내에서 발생한 침수재해 중 2013년에 발생한 '노량진 배수지 수몰 사고'와 2020년에 발생한 '초량제1지하차도 침수사고'에 대한 수치모의를 수행하고 침수양상을 해석하였다. 또한 특성요인도를 활용하여 침수재해의 근본적인 원인을 다각도에서 고찰하고자 한다. 이를 통해 침수재해가 발생한 복합적인 원인들을 분류하고 근원적인 문제점을 도출하여 인명과 경제적 피해를 저감하고 동일한 사고가 발생하는 것을 미연에 방지하는데 일조하는 것을 목표로 한다.

2. 동수역학 모형

2.1 동수역학 모형의 개요

HDM-2D 모형은 천수방정식을 Petrov-Galerkin 안정화 기법으로 이산화하여 구성된 수평 2차원 동수역학적 흐름해석 모델이다 [1, 2]. Fig. 1의 구조도에 제시된 것처럼 지형자료 생성 후 경계조건을 부여하여 침수모의를 수행할 수 있으며 모의 결과인 유속과 수심, 수위값을 바탕으로 홍수 피해 범위와 위험도를 산정할 수 있다. HDM-2D는 수로 내에서의 흐름 및 도심지 침수 현상 등을 모의할 수 있는 범용 2차원 지표수 흐름해석 모형으로 외수범람 및 내수침수에 의해 발생하는 침수양상을 모의할 수 있다.

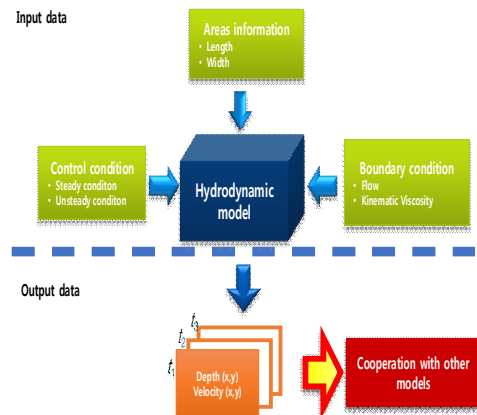


Fig. 1. Input and out of HDM-2D model

Table. 1. Inundation accident over the last decade (Seoul, Incheon)

Date	Place	Casualty and damage
July 27, 2011	Umyeonsan area, Seocho-gu, Seoul	- 17 people died by debris flow - Inundation around Gangnam station due to heavy rainfall of 400 mm
July 27, 2011	Area of Bupyeong-gu, Incheon	- Heavy rain (356 mm) inundated roads and houses - Inundation occurs every year due to poor response from local government
July 22, 2013	Gangnam station area, Seoul	- Sewage pipe backflow due to heavy rainfall
July 23, 2017	Incheon	- 110mm heavy rains around Incheon - Human life damage caused by flooding of house
May 16, 2018	Area of Seo-gu, Incheon	- Heavy rainfall (30 mm/hr) in the central region - Road flooding everywhere in Seo District, Incheon
August 28, 2018	Sinchon station area, Seoul	- Downpour (30 mm/hr) - Drainage outlet clogged with cigarette butts and fallen leaves
August 30, 2018	Nowon-gu and Dobong-gu, Seoul	- House flooded by heavy rain of 250 mm
August 1, 2020	Gangnam station area, Seoul	- Sewage pipe backflow due to heavy rainfall - Inundation occurs frequently

2.2 동수역학 모형의 검증

2차원 침수해석 모형을 배수지나 지하차도에 적용하는 경우 지형의 경사나 평면적 배치가 공간에 따라 변화하므로 불연속적인 흐름을 유발하여 모의결과의 계산오차를 검토해야 한다. 따라서 본 절에서는 2차원 침수해석 모형의 정확성을 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 폭의 일부가 좁아지는 수로 흐름 문제를 고려하였다. 상하류 경계면이 개방되어있는 수로에서 돌출부에 의해 흐름 양상이 달라질 경우 흐름방향을 따른 속도 결과를 기존 문헌[3]자료와 비교하여 모의결과를 검증하였다. Fig. 2와 같이 HDM-2D 모형의 경우 폭이 좁아지는 영역에서 유속이 증가하다 다시 하강하는 양상을 잘 재현하고 있어 기존 문헌에 제시된 값과 매우 유사하였다[4].

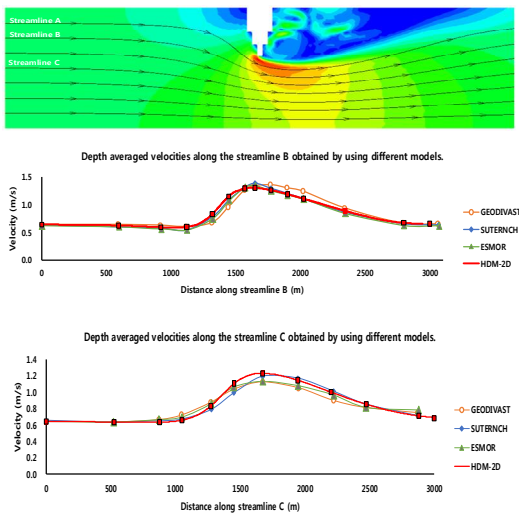


Fig. 2. Model verification

3. 침수재해의 동수역학적 모의

3.1 침수 위험 정량화

침수가 발생하는 경우 사람이나 구조물·시설물에 미치는 영향을 정량적으로 산정하기 위해 유속과 수심을 고려한 FHR(Flood Hazard Rating) 지수를 사용했다. FHR 지수는 영국 환경부의 'Flood and Coastal Defence R&D Programme'에서도 활용되었으며[5], Table. 2와 같이 유속(v)과 수심(h)의 곱인 hv 값에 따라 위험 등급을 4구간으로 구분한다. FHR 지수의 경우

그 정의에 의해 침수심이 2.5 m이면 유속이 없더라도 위험 등급이 높게 산정될 수 있으며, 수심이 낮을 경우에도 유속이 빠르면 위험도가 높게 형성될 수 있다 [6].

Table. 2. Risk quantification by FHR

Definition	$FHR = h(v+0.5)$			
Level	Low	Moderate	Significant	Extreme
Range	0-0.75	0.75-1.25	1.25-2.0	2.0-
	Caution	Dangerous for some	Dangerous for most people	Dangerous for all

3.2 노량진 배수지 수몰 사고 모의

노량진 상수도관 공사 사고 현장의 치수를 따라 Fig. 3과 같이 지름 12 m의 원형 전진기지, 길이 1,426 m와 높이 2.2 m의 송수터널, 가로 9 m와 세로 12 m의 도달기지 등 3개의 구조물을 제작하여 지형자료를 구축했다. 전진기지는 노량진 배수지 입구에 위치해 있으므로 사고 당시 폭우로 수위가 급격히 증가하여 전진기지를 통해 유입된 우수가 송수터널을 따라 공사가 끝나는 지점인 도달기지까지 이동하였다. 대상 영역은 총 12,913개의 요소와 15,359개의 절점으로 이루어져 있으며 침수재해 발생을 재현하기 위해 도달기지에 수심 조건을 사고발생 시와 동일하게 입력하였다.

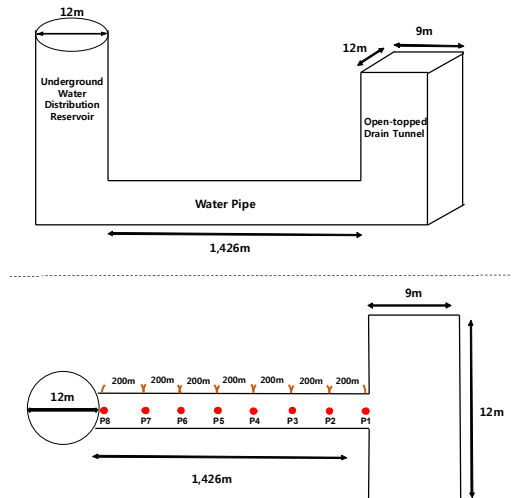


Fig. 3. Schematic sketch of Noryangjin water distribution reservoir

침수해석 모의는 1 s의 시간 간격으로 2000 s까지 진행했다. 모의구간 중 송수터널 입구(P1)부터 송수터

널 출구 (P8)까지 200 m 간격으로 총 8개 지점에서의 침수심과 유속결과를 추출하였다. Fig. 4와 같이 송수터널의 침수심은 모든 구간에서 터널 높이인 2.2 m까지 상승하여 침수되었다. 또한 송수터널에서 200 m 지점인 P2에서 최대 유속이 발생하였고, 송수터널 입구에서 멀어질수록 지점별 최대 유속에 도달하는 시간이 오래 소요되었으며, 전진기지 입구에서는 600 s에 최고 유속이 나타났다.

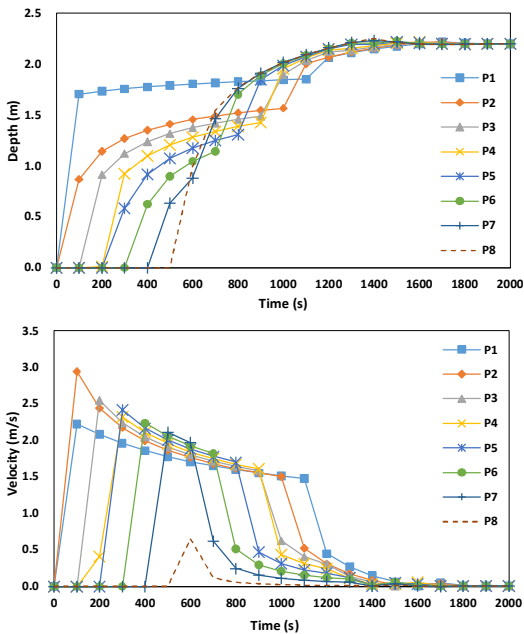


Fig. 4. Inundation depth and propagating velocity of Noryangjin water distribution reservoir accident

수심과 유속 모의결과를 바탕으로 Table. 3과 같이 FHR 지수를 활용해 노량진 배수지 수몰 사고 시의 근로자의 작업 위치, 수평갱도 입구에서의 FHR 지수와 위험 등급을 확인했다. 근로자들의 작업공간에서는 FHR이 2를 초과하여 사고 당시 빠른 유속과 깊은 수심에 의해 작업자들의 침수위험도가 매우 높았음을 알 수 있다.

Table. 3. FHR of Noryangjin reservoir inundation accident

Location	Work site	Discovery point	Tunnel entrance
FHR	2.03	1.45	1.02
	Dangerous for all	Dangerous for most people	Dangerous for some

3.3 초량제1지하차도 침수피해 모의 해석

초량제1지하차도의 침수양상을 모의하기 위해 Fig. 5과 같이 길이 165 m, 폭 15 m, 높이 3.5 m인 지하차도의 실제 지형을 계산영역으로 구축하였다. 1,400개의 요소와 1,584개의 절점으로 대상지역의 지형요소망을 구성하였으며, 지표면을 따라 유하하여 지하차도 내로 유입되는 조건을 부여하기 위해 모의구간의 상하류 경계면 양끝단에서 침수발생원이 생성되도록 하였다.

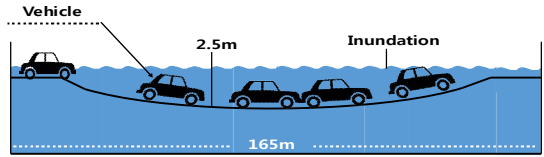


Fig. 5. Vehicle submergence by inundation of underpass

침수해석 모의는 1 s의 시간간격으로 1500 s까지 진행했다. 침수해석 측정 구간은 지하차도 입구(P1)부터 20 m 간격 마다 측정해 출구(P9)까지 총 9구간 측정했다. 모의 결과 Fig. 6과 같이 지하차도 내 최대 2.5 m까지 침수심이 상승하였다. 지하차도 입출구에서 지형 경사에 의해 흘러 들어오는 물에 의해 1.6 m/s의 고 유속이 나타났고 지하차도 입·출구에서 멀어질수록 유속이 작아졌다.

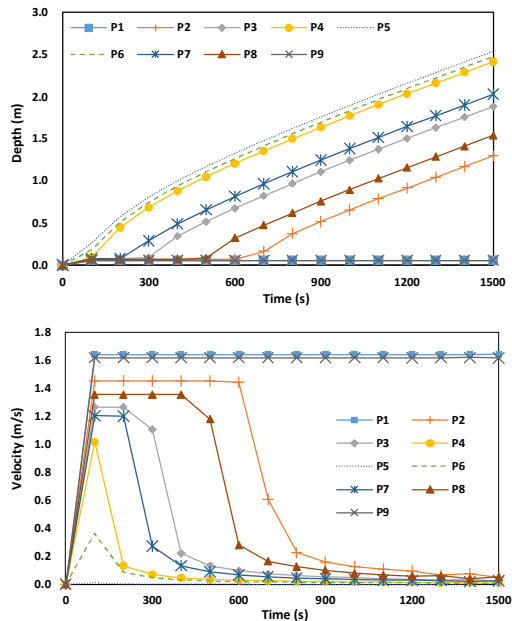


Fig. 6. Inundation depth and propagating velocity of Choryang No.1 underpass inundation accident

초량제1지하차도의 중앙과 지하차도 초입에서의 FHR 지수와 위험 등급 Table. 4.과 같이 확인했다. 지하차도 중앙에서 깊은 침수심에 의해 FHR 지수가 1.27 까지 상승하여 인명피해가 발생할 수 있는 조건이었다.

Table. 4. FHR of Underground road inundation accident

Location	Center of road	Entrance to the road
FHR	1.27	1.01
	Dangerous for most people	Dangerous for all

4. 침수재해 원인 고찰

4.1 노량진 배수지 수몰 사고

특성요인도는 재해를 유발하는 원인을 체계적으로 분류하고 이들의 작용과 잠재적 영향을 생선뼈 형태로 배치하여 ‘Fishbone diagram’이라고도 불린다. 이 분석법은 문제의 근본적인 원인을 찾는 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 결함, 변형 또는 실패의 원인을 추적하는 데 도움이 되는 인과 관계를 나타낼 수 있다[7]. 또한 원인과 결과를 확인하기 위한 용도, 프로세스 초기 단계에 있는 문제점들을 파악하기 위해서도 사용되며, 예상과 결과를 분석하는 경우에도 효과적이다[8].

특성요인도를 활용하여 노량진 배수지 수몰 사고에 복합적인 침수원인을 파악하여 Fig. 7에 수록하였다. 물리적인 원인과 재난대응 관리적인 원인의 측면에서 특성요인도를 구성하였다. 물리적인 원인으로 폭우와 차수 대책의 문제점을 꼽을 수 있다. 사고 당일 이틀 전인 2013년 7월 13일부터 서울을 중심으로 중부 지방에 150 mm 이상의 많은 비가 내렸으며, 사흘 동안 이

어진 폭우로 사고 당일인 7월 15일 한강대교 수위가 5.38 m까지 치솟아 침수사고가 발생했다[9]. 사고 당시 도달 기지 작업구에 임시로 설치한 6 mm 두께의 차수막이 수압을 이기지 못하고 터져 작업현장에 한강물이 쏟아져 들어왔다. 차수막은 도달 기지 내 수위가 5.8 m를 넘어야 파손되지만 용접 이음 상태의 불량으로 5.8 m보다 낮은 수위의 수압에도 파손된 것으로 분석된다.

재난대응 관리적인 원인으로 현장 근로자 배려 부족과 안전불감증을 고려하였다. 건설현장에서 외국인 근로자의 의사소통 문제와 문화적 차이 때문에 안전사고 위험이 증가하고 있는데도 교육 등 이들의 안전에 대한 교육과 경각심 고취가 아직 미흡한 실정이다. 또한 현장의 근로환경 개선, 비상경보 시스템 작동 등 국내외 근로자의 안전사고를 예방하기 위한 배려와 노력이 여전히 부족하다. 노량진 배수지 수몰 사고의 가장 직접적인 원인은 현장대리인과 책임감리원이 강물이 넘치는 위급한 상황에서 근로자를 대피시키지 않았다는 점이다. 하도급사 직원은 시공사의 지시를 강물 범람이 아니라 한강 수위가 오르고 있다는 취지로 이해하여 근로자들에게 대피를 지시하지 않아 인명피해가 발생하였다.

4.2 초량제1지하차도 침수사고

초량제1지하차도 침수사고에 특성요인도를 적용하여 복합적인 침수원인 중 물리적인 원인과 재난대응 관리적인 원인을 도출하여 Fig. 8에 나타내었다.

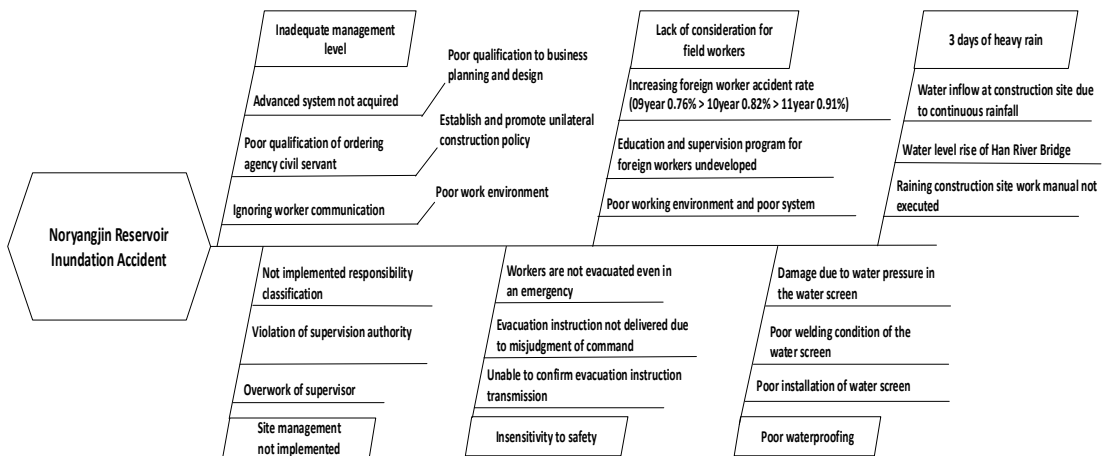


Fig. 7. Cause and effect diagram for Noryangjin reservoir inundation accident

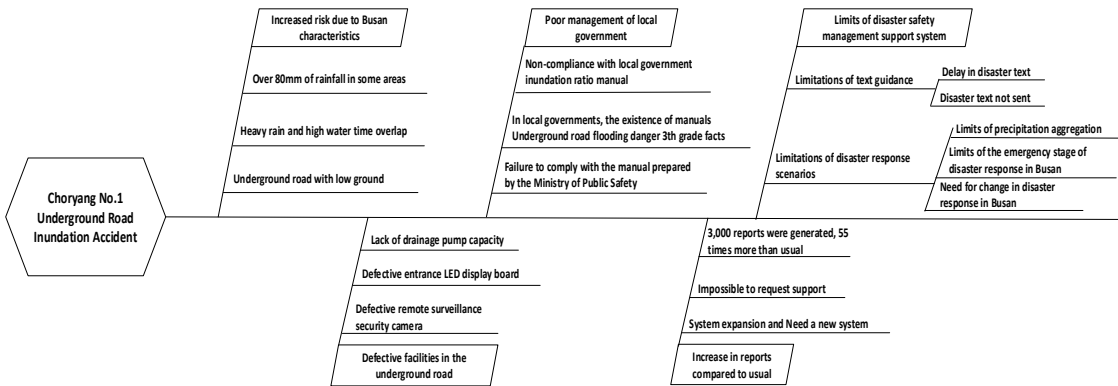


Fig. 8. Cause and effect diagram for Choryang No.1 underground road inundation accident

초량제1지하차도 침수사고의 물리적인 원인으로는 해안에 인접해 있는 부산의 지리적 특성으로 인한 위험도 증가와 지하차도 내 배수 및 차수대책 불량을 꼽을 수 있다. 2020년 7월 23일 부산 지역에 호우경보가 발효된 후 4시간 30분만에 3명이 사망했다. 호우경보 발효 후 부산 도로와 지하철 역사 여러 곳에서 침수피해가 발생했다. 또한 해안지역의 특성으로 만조시간이 겹쳐 내수가 원만하게 배수되지 못하여 피해가 가중되었다. 사고 당시 지하차도 내 침수방지 대책 중 통제 안내 LED 전광판과 원격감시 방법 카메라가 제대로 작동하지 않았다. 배수펌프로 분당 20 ton에 가까운 빗물을 의측으로 퍼냈지만, 저지대에 위치해 있는 지하차도에서는 우수로 수위가 상승하였다.

재난대응적 측면에서는 관리적인 한계가 주된 원인이었다. 2014년 8월 우장춘로 지하차도 침수사고 이후 부산은 지역 내 지하차도 3곳의 관리 매뉴얼을 마련했지만 사고 당시 매뉴얼의 존재를 몰라 호우주의보 및 호우경보가 발효되었음에도 매뉴얼에 명시되어 있는 사항을 이행하지 못하였다. 또한 2019년 2월 행정안전부가 침수 우려가 있는 전국 145개 지하차도에 대해 위험도에 따른 매뉴얼을 마련한 바 있었는데 초량제1 지하차도의 경우 위험 3등급으로 호우경보가 발효되면 즉각 통제에 들어가야 했지만 신속한 대응에 한계가 있었다. 이에 더하여 강수량 집계는 경우 3시간, 12시간 동안 강수량을 집계해 재난 대응 비상 단계를 결정하므로 초단기 집중강우에 대한 사전 대책이 부족하여 최근 잦아진 집중호우에 대비하기 어렵다. 또한 재난대응 비상 단계에 하천 수위에 대한 기준이 포함되어 있지 않아 개선의 여지가 있었다[10]. 이상의 문제점들은 AI를 활용하여 호우 발생 시에 초단기 피해를 신속

하게 예측하여 재난문자를 통보하고 지하차도 출입구에 차단시설이 자동으로 작동될 수 있는 제어 시스템을 개발하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

시간당 80 mm가 넘는 강수량으로 인해 부산 지역 곳곳에 침수피해가 동시다발적으로 발생하면서 평소보다 55.7배 증가한 3천여건의 신고가 접수되었다. 초량제1지하차도 침수사고의 최초 신고 시각은 21시 32분이었으나, 타지역 신고 폭증으로 즉각적으로 대처하지 못하고 41분 뒤인 22시 13분에 이르러서야 처음으로 신고가 접수되어 구조 타이밍이 지연되었다.

5. 요약 및 결론

최근 기후변화로 태풍과 집중호우가 증가하고 있지만 복합적인 원인으로 인한 침수사고의 안전 대책은 미비한 실정이다. 기존 침수사고를 살펴보면 동일한 원인에 의해 반복적으로 발생하므로 본 연구에서는 침수사고의 근본적인 원인을 효과적으로 찾기 위해 특성요인도를 활용하였다.

2013년에 발생한 '노량진 배수지 수몰 사고'와 2020년에 발생한 '초량제1지하차도 침수사고'의 침수 모의를 진행한 후 침수피해 정량화 기법 중 유체의 유속과 수심의 곱을 주요 인자로 하는 Flood Hazard Rating(FHR) 지수로 분석하였다. 노량진 사고의 경우 근로자들의 작업공간에서는 FHR이 2을 초과하여 사고 당시 빠른 유속과 깊은 수심에 의해 작업자들의 침수위험도가 매우 높았으며, 초량지하차도 사고의 경우 지하차도 내에 침수심이 최대 2.5 m까지 상승하였으며, 지하차도 입출구에서 지형 경사에 의해 흘러 들어오는 우수에 의해 1.6 m/s의 고유속이 나타났다. 이후 특성요

인도를 통해 각각의 사고에서 직접적으로 영향을 끼친 물리적인 원인(폭우, 차수 대책, 지리적 특성 등)과 재난대응 원인(근로자 배려 부족, 안전불감증, 관리적 한계 등)을 선정하고 각 원인별 세부적인 원인을 정한 뒤 하나의 사고에 대한 복합적인 원인을 순차적으로 제시하였다.

본 연구에서 제시된 '노량진 배수지 수몰 사고'와 '초량제1지하차도 침수사고'의 원인 분석을 위한 특성요인도는 침수재해에 대한 복합적인 원인을 파악하여 인명피해와 재산손실을 저감하는데 기여할 수 있을 것이다. 향후에는 본 연구내용을 응용한 침수사고 피해 원인 평가기법의 고도화 및 체계화를 통해 보다 근원적으로 재해 원인을 분류하는 연구를 수행할 계획이다.

REFERENCES

[1] E. T. Shin, J. H. Shin, D. S. Rhee, H. J. Kim & C. G. Song. (2019). Integrated Inundation Modeling of Flooded Water in Coastal Cities. *Applied Science*, 9(7). DOI : 10.3390/app907131

[2] H. J. Kim, D. S. Rhee, & C. G. Song. (2018). Numerical computation of underground inundation in multiple layers by adaptive transfer method. *Water*, 10(85). DOI : 10.3390/w10010085

[3] L. C. van Rijn. (1987). *Mathematical Modelling of Morphological Processes in the case of Suspended Sediment Transport*. Doctoral dissertation. Bibliotheek Technische University, Delft.

[4] A. Mohammadian, M. Tajrishi & F. L. AZAD. (2004). Two Dimensional Numerical Simulation of Flow and GEO-MORPHOLOGICAL Process Near Headlands by Using Unstructured Grid. *International Journal of Sediment Research*, 19(4), 258-277.

[5] Defra and Agency. (2006). *The Flood risks to People Methodology, Flood Risks to People Phase 2, FD2321 Technical report 1, Flood and Coastal Defence R&D Programme*. Bristol : Defra and Agency

[6] E. T. Shin. (2019). *Development of Inundation Risk Evaluation Method Considering Hydrodynamic Force of Fluid Flow and Difficulty of Evacuation*. Masters Thesis. Incheon National University, Incheon.

[7] J. S. Park, G. H. NAM. & J. O. Choi. (2011). Parameters in cause and effect diagram for uncertainty evaluation. *Accreditation and Quality Assurance*, 16, 325-326. DOI : 10.1007/s00769-011-0763-4

[8] O. Abbasi, E. Noorzai, K. G. Jafari, S. M. ASCE & M. Golabchi. (2020). Exploring the Causes of Delays in Construction Industry Using a Cause-and-Effect Diagram: Case Study for Iran. *Journal of Architectural Engineering*, 26(3). DOI : 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000431

[9] Han River Flood Control Office (2013). *Hydrological Annual Report of Korea*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

[10] Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA) (2014). *Safety and Health Manual for Storm and Flood*. Seoul : Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA)

유 동 현(Dongh-Hyun Yoo)

[정회원]



- 2019년 8월 : 인천대학교 안전공학(공학사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 안전공학과(공학석사)
- 관심분야 : 재난안전관리
- E-Mail : ydh0100@inu.ac.kr

송 창 근(Chang-Geun Song)

[정회원]



- 2001년 2월 : KAIST 건설환경공학과(공학사)
- 2011년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부(공학박사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 안전공학과 교수

- 관심분야 : 범람 및 침수 모델링, 재난안전관리, 위험성평가
- E-Mail : baybreeze119@inu.ac.kr