

## 대규모 재난 대피경로의 GIS 분석 및 현장조사를 통한 재난대피 개선사항 도출

김 지 호<sup>1\*</sup> · 남 동 엽<sup>2</sup> · 심 준 석<sup>3</sup><sup>1</sup>국립재난안전연구원 방재연구실 연구원<sup>2</sup>국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원<sup>3</sup>국립재난안전연구원 방재연구실 책임연구원

# Derivation of Disaster Evacuation Improvements through the GIS Analysis and Field Investigation of Large-Scale Disaster Evacuation Routes

Ji-Ho Kim<sup>1\*</sup> · Dong-Yup Nam<sup>2</sup> · Jun-Seok Sim<sup>3</sup><sup>1</sup>\*Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute, Ulsan 44538, Korea<sup>2</sup>Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute, Ulsan 44538, Korea<sup>3</sup>Principal Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute, Ulsan 44538, Korea

### [요 약]

최근 복합재난에 따라 피해지역의 범위가 대형화되고 있으며 많은 사람들이 재난피해의 대상자가 될 수 있다. 이에 따라 대피자를 집결시키고 이동하는 경로의 안전성을 확보하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 대규모 재난에 대비하기 위해 방사능재난 시나리오를 가정하여 일시에 대피가 이루어지는 임의의 마을회관에서 대피하는 경로를 대상으로 네트워크 분석을 수행하였다. 이를 통해 우회 불가능한 도로를 추출하고, 이를 취약경로로 정의하였다. 분석 결과를 바탕으로 취약경로가 존재하는 마을회관에 대해 현장조사를 수행하였다. 연구 결과는 첫째, 분석을 통해 대피경로의 취약지점을 선별하였다. 재난관리자는 우선적인 도로관리를 통해 자원을 효율적으로 분배할 수 있고, 선제적으로 대응하기에 용이하다. 둘째, 현장조사를 통해 주민들의 집결용이성을 파악하고 대피 저해요소를 확인하였다. 이것은 재난관리자가 대피경로의 집결지 지정 시에 고려해야 하는 요인을 도출하는데 의의가 있다. 결론적으로 본 연구는 대피경로 선정과 관리를 위한 콘텐츠를 생산하여 재난대비 역량을 강화한다.

### [Abstract]

In order to prepare for large-scale disasters, we assumed a radioactive disaster scenario and performed a GIS-based network analysis of the evacuation routes in areas where evacuations were temporarily implemented, through which roads that cannot be bypassed were identified as vulnerable routes. A field investigation was conducted of village halls. The results are as follows. First, the vulnerable points were selected through graph analysis, allowing disaster managers to distribute resources through priority roads. Second, the ease of gathering and hindering factors were identified through surveys, which was helpful in deriving factors disaster managers should consider when designating a gathering point. In conclusion, this study strengthens local disaster preparedness capabilities.

**색인어** : 지리정보시스템, 재난관리, 재난안전정보, 대피경로, 취약점**Keyword**: GIS, Disaster Management, Disaster Information, Disaster Routes, Vulnerability<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2024.25.5.1347>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 22 March 2024; Revised 12 April 2024

Accepted 09 May 2024

\*Corresponding Author, Ji-Ho Kim

Tel: 

E-mail: jihokim0015@gmail.com

## 1. 서론

재난 상황과 같은 위급한 상황이 발생하였을 때 시민의 안전을 도모하기 위해서 가장 우선시 되어야 하는 사항은 위험으로부터 회피하는 것이다. 이와 관련하여 우리나라에서는 재난 상황 시 대규모 대피를 위한 집결지로서 임시주거시설을 지정 및 운영하고 있다[1]. 임시주거시설은 재난으로 인해 거주지의 피해가 예상될 때 일시적인 대피장소로 사용되거나 혹은 주거지의 복구까지 임시로 생활하는 장소로 사용된다. 즉, 임시주거시설은 지역주민들에게 재난상황에서 가장 먼저 활용되는 국가 재난구호 지원 방안 중 하나이다.

따라서 임시주거시설은 재난 상황에서의 운영을 가정하고 있으며, 재난으로부터의 안정성은 핵심적인 선정요건이다. 재해구호계획 수립지침[2]에서도 임시주거시설의 운영과 관련하여 재난 유형 및 내진성능을 고려하여 임시주거시설을 선정·운영하도록 명시하고 있다. 그러나 현재는 임시주거시설물 자체의 수용면적 특성과 내재해성을 위주로 선정하여 관리되고 있으며, 대피상황에서의 편의성, 접근가능성 등에 대한 검토는 고려하고 있지 않은 상황이다.

본 연구에서는 원전안전분야, 풍수해, 지진·해일 등 여러 현장조치 매뉴얼에서 나타난 대응 단계에 따라 대피자의 이동형태를 크게 두 가지로 정리하였다. 첫 번째는 목적지로의 즉각적 이동이다. 대규모 대피는 재난 발생 시 피해 범위가 광범위하며, 주변 지역에 피해가 확산될 수 있으며, 이 경우 피해지역의 주민뿐 아니라 주민보호조치계획에 의해 사전에 정의된 지역도 일시에 대피하는 것까지를 의미한다. 단, 이 경우에도 장거리 이동을 위한 집결지로 지정하여 운영하고 있다. 두 번째는 1차 임시주거시설에서의 추가적인 대피이다. 재난 발생 초기에는 대피를 실시하고 예상보다 재난의 진행이 빠르고 피해 범위가 불규칙하게 진행되는 경우 및 주거시설의 복구를 위해 2차 임시주거시설로 주민들이 대피하는 경우이다. 일반적으로 화학사고, 방사능재난의 경우 관련법에 따라 대규모 일시 대피가 계획되어 있으며, 재난 발생 시 재난영향평가에 따라 단계적 대피가 함께 고려될 수 있다. 이외에도 산불 등의 재난의 경우 재난 이후 상황에 따라 불규칙적이고 불확실하게 피해가 확산되는 특징을 갖는다.

대규모 대피의 경우 방사능재난이나 화학사고가 대표적이다. 국내 방사능재난 대응체계는 원자력시설의 방호 및 방사능 방재 대책법[3]에 따라 방사선비상계획구역은 지역방사능 방재계획을 수립하고 있다. 주민대피는 방사선비상 단계에 따라 백색비상에서 초기대응을 운영하고, 청색비상의 경우 상황판단 회의와 피폭선량 평가를 통해 주민보호조치를 준비한다. 적색비상의 경우 방사능물질의 외부누출에 따라 주민대피 및 구호와 갑상샘방호약품 배포, 주민 안정화대책을 시행한다. 우리나라에서는 비상계획구역을 2개로 나누어 구분한다. 고리원자력시설 주변 3~5 km 이하에 위치한 예방적보호조치구역(PAZ, Precautionary Action Zone)과 원자력 시설 주

변 20~30 km 이하 긴급보호조치계획구역(UPZ, Urgent Protective action planning Zone)으로 나뉜다. 예방적보호조치구역(PAZ)은 방사선비상 적색 발령 시 장거리 대피를 의미하는 선제적 주민소개가 이루어지는 구역이며, 긴급보호조치계획구역(UPZ)은 현장방사능방재지휘센터 결정에 따라 옥내대피 혹은 주민소개를 통해 주민보호 조치가 이루어진다. 이에 따라 원전반경 30 km 이내 부산시 248만 명, 울산시 103만 명, 경남 및 양산시 29만 명 등 최대 380만 명이 일시적으로 대규모 대피의 대상자가 될 수 있다.

또한 일시적으로 대규모 대피가 일어나는 화학사고 대응체계의 경우 재난 및 안전관리 기본법 시행령[4]에 의해 자체 복구계획 및 재난복구계획에 피해시설별·관리주체별 복구 내용, 일정과 복구비용 등이 포함되어야 한다고 명시되어 있다. 또한 「화학사고예방관리계획서 검토 등에 관한 규정」에 의해 유해화학물질 취급시설의 설치·운영하려는 사업장에 대해서 화학사고예방관리계획서를 검토하는 등 화학사고에 대한 대피 및 구조소 위치 등의 내용을 포함하여 관리체계를 확보하고 있다. 화학사고의 경우 화학물질종합정보시스템의 위해관리계획서에 의하면 울산, 여수 등 화학단지 내 특정업체의 사고 영향범위가 최대 반경 8~10 km까지 나타나므로 화학사고 시에도 일시에 대규모 대피가 이루어질 수 있다.

단계적 대피가 나타날 수 있는 대표적인 재난인 산불의 경우 산불피해법[5]에 의해 산불예방을 위해 산림을 중심으로 산불취약지역을 관리하고 있다. 하지만 방사능재난이나 화학사고처럼 특정시설물을 대상으로 관리하고 재난 시 일시에 대규모 대피가 일어나는 것을 가정하고 있지는 않으며, 이에 재난의 진행에 따른 피해 범위 확산에 따라 주민들이 단계적으로 임시주거시설이나 거점을 이동하며 대피해야 할 수 있다.

이러한 배경 속에서 본 연구는 대피를 위한 집결지 및 임시주거시설로 활용되는 마을회관에서의 대규모 일시 대피경로를 대상으로 재난대피체계의 개선사항 도출을 위한 연구를 수행하였다. 이는 재난 상황에서 대규모 대피체계의 고도화뿐만 아니라 피해 예상 지역의 확대에 의해 다른 대피소까지 단계적으로 피난해야 하는 경우와 이재민 임시주거시설에 구호물자 등을 지원하는 긴급수송 경로 연구로 확장될 수 있다.

따라서 본 연구는 방사능재난 상황에 실시되는 장거리 대피를 가정하여 마을회관에서 거점·구조소까지의 대규모 인원이 일시에 진행하는 대피경로를 분석하고 우회가 불가능하여 접근이 취약한 지점의 현장조사를 실시한다. 구체적으로 분석 실험은 원전사고 시나리오를 기반으로 부산시 원전안전분야 현장조치 행동매뉴얼을 참고하여 주민보호조치구역 내 예방적보호조치구역 및 긴급보호조치계획구역의 임의의 마을회관을 대상으로 구조소까지의 대피경로를 네트워크 분석을 통해 수행한다. 분석결과를 기반으로 현장조사를 수행하여 개선사항을 도출한다.

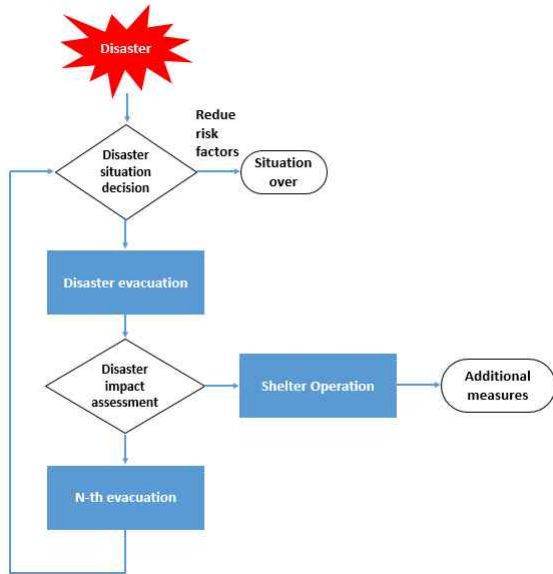


그림 1. 일반적인 재난대피 절차  
Fig. 1. General disaster evacuation process

## II. 재난대피 관련 연구

### 2-1 대규모 대피가 필요한 재난 특성

재난에 따른 대규모 대피의 대표적인 예로는 방사능재난이 존재한다. 방사능재난은 잠재 피해지역이 광범위하며, 다른 재난과 달리 사고의 수습 부담도 막대한 편이다[6]. 또한 방사선 확산에 따른 특징으로는 재난 현장에 접근이 제한되고, 사고수습에 방사선 작업 전문인력이 투입된다. 또한 방사선 작업 종사자의 피폭을 고려하여 재난 지역에 체류하는 시간에 제한을 두어야 하며, 방사선으로 인한 인명 피해 규모는 피폭으로 인한 장기간의 역학 조사가 필요한 만큼 파악이 어렵고 작업 처리과정에서 다량의 방사성폐기물이 발생하여 처분에 관한 대책 마련이 필요하다. 이처럼 방사능재난은 재난 발생 직후 및 이차적 특성에 의해 대규모 대피가 필요한 재난이다. 하지만 이와 같은 특성을 고려한 대규모 대피 상황에서 대피 경로 내 취약지점을 탐색하는 연구는 부족하다.

또한 화학사고의 사고원인은 일반적으로 안전기준 미준수, 시설 결함, 운송차량 사고, 자연재해 등으로 나뉘며, 사고의 유형은 누출, 화재, 폭발 등으로 구분 짓는다[7]. 화학물질의 사고 현황 및 사례는 2014년 1월부터 2023년 2월까지 전체 지역에서 757건이며 각 원인별로 안전기준 미준수로 인해 309건, 시설 결함으로 인해 284건, 운송차량 사고 등으로 인해 156건, 자연재해로 인해 8건이 집계되었으며, 사고 형태는 누출의 경우 601건, 화재의 경우 51건, 폭발의 경우 62건, 기타의 경우 43건으로 나타난다[7]. 환경부의 화학물질사고 대응 정보시스템(Chemical Accident Response Information

System, CARIS)을 통해 동일한 상태에서 유독물질 중 하나인 황화수소를 대상으로 폭발, 화재, 용기누출로 인한 독성 확산 등을 시뮬레이션한 결과 독성확산으로 인한 피해범위가 가장 넓은 것으로 나타났다. 이처럼 화학사고 또한 재난 발생 시 대규모 대피가 필요하나, 방사능재난과 마찬가지로 경로의 안전성을 보장하고 취약지점이나 경로를 도출하는 연구가 부족하다.

산불과 기타 재난의 경우 일시에 장거리 대피 상황을 고려하지 않고 단계적 대피를 실시하는 경우가 있다(그림 1). 해외 사례의 경우 산불 피해 범위에 따라 일차적으로 대피한 인원들이 추가적으로 대피하였다. 2023년 8월 8일 발생한 미국 하와이주 산불 재난의 경우 마우이섬의 이재민은 대피소로 활용되는 학교로 피난 후 산불의 확산에 따라 단계적으로 대피한 사례가 있다[8]. 하지만, 국내에서는 1차 대피장소에서 재난피해 확산 시에 단계적으로 대피할 수 있는 거점·구호소에 대한 안내는 없다. 경우에 따라 2차 대피가 필요할 수 있기에 1차 임시주거시설을 대피소로 지정 시 추가적으로 장거리에 위치한 2차 대피소로 가기 위한 경로를 고려해야 한다.

### 2-2 대피경로 연구

재난대피 문제는 대피 경로탐색 알고리즘 연구를 통해 해결하려는 연구들이 있다. 일반적으로 알고리즘을 통한 접근법은 최적의 경로를 탐색하는 접근법을 의미한다[9],[10]. 이에 따라, 대피 거리의 최소화를 목적으로 피난 대피계획을 제시한 연구가 존재한다[9]. 혹은 대피 시간의 최소화를 위해 연구가 진행된 바가 있다[10]. 이후, 재난 상황이라는 특수성을 고려하여 최단경로를 기반으로 재난 발생 지점을 장애물로 판단하여 대피 우회경로를 도출하는 연구가 있다[11]. 이처럼 기존 연구들은 대피 시간이나 대피 거리의 최소화를 목표로 특정 재난에 대하여 피난하는 알고리즘을 연구했지만, 재난 상황에서 특정 시설물을 대상으로 장거리 경로를 연구하여 도로관리의 우선순위를 도출한 연구는 부재한 상황이다.

긴급수송 경로 계획은 임시주거시설과 같은 중요 거점에 구호물자 보급 및 의료인력 등을 투입하는 경로를 의미한다. 기존에는 재난발생 지역의 응급 환자 이송에 대한 프로세스를 최적화하는 연구가 존재한다[12]. 이에 따라, 지진과 같은 특정 재난 상황에서 우선순위가 높은 비상대응 운영을 위해 길이 및 이동시간이라는 제약조건을 고려한 매트릭을 구성하여 차량의 최적 경로를 연구했다[13]. 또 재난 상황을 고려한 비상 대응의 효율성 개선을 위해 논문을 분석하고 구호물품을 할당하기 위한 위치 계획을 연구하였다[14]. 하지만 재난 외 지역에서 재난지역으로 이동하는 거점 간 경로 계획은 거점을 연결하는 도로가 단일도로인 경우에 정상적인 재난 대응이 불가능한 경우를 고려하지 못한다는 한계점이 존재한다.

한편, 대피에 이용되는 도로는 대피 경로를 이루는 최소단위가 된다. 최근 기후변화로 인해 복잡하고 재난피해가 확산되는 만큼 도로의 유실 및 파손 등의 피해가 증가하고 있어

관리가 필요하다. 도로의 파손은 여름철 나타나는 국지성 호우와 호우에서 유발된 토사물 유출, 산사태로 인한 도로파손 등으로 인해 포장도로의 파손이 일어난다[15]. 또한, 도로포장 파손 연구[16],[17]에 의하면, 빗물에 의한 침수로 인해 수분이 도로에 침투하며 이와 함께 도로포장의 노후화 등으로 포트홀이나 노면 변형, 균열 등 다양한 파손 형태가 나타난다.

지자체의 경우 도로 파손 및 손상과 함께 보행로의 파손이 나타난다. 지방도의 경우 대부분 재정 및 인력의 취약성으로 인해 적정 시기에 유지·보수를 시행하지 못하기 때문에 파손이 심화되고 있다. 지방 도로의 경우 주차구역과의 명확한 구분이 없어 도로의 파손과 보행로의 파손이 함께 나타난다. 또한 차도는 있지만, 지역주민들이 보행할 수 있는 인도가 없는 경우가 빈번한 것으로 나타났다[12].

대부분의 연구는 도로 파손의 관리방안으로 취약지역 모니터링과 도로포장의 품질관리 고도화에 관한 연구를 진행하였다. 하지만 대피경로의 관점에서 특정 지점에 대한 도로 관리의 필요성을 부각하는 연구가 부재한 상황이다.

### III. 네트워크 분석 기반 취약지점 도출

본 연구의 프로세스는 그림 2와 같다. 먼저 임의의 마을회관을 추출하고 이를 대상으로 도착지까지 경로를 분석한다. 이를 통해 경로 내 우회가 불가능한 취약경로를 도출하고 이를 현장조사 대상지로 선택한다. 이러한 네트워크 분석 및 현장조사 결과를 토대로 대피체계 개선사항을 도출한다.

집결지(출발지점)는 마을회관을 활용한다. 「고성군 마을회

관 운영지원에 관한 조례」 제8조제2항 하천·산림과 이격되어 재해로부터 안전성을 확보하고, 유사시 재난 대피시설로 활용할 수 있는 입지조건을 충족하여야 한다고 명시되어 있다. 또한, 대부분의 마을회관 운영·지원 조례들을 살펴보면 마을회관은 마을주민의 자치적 집회소 목적으로 사용하는 건축물을 의미한다. 이와 더불어 행정안전부에서 발간하는 재해구호계획 수립지침에서는 중앙행정기관, 지방자치단체, 정부출연연구기관, 공공기관의 숙박·훈련·연수시설, 학교·마을회관·경로당·병원급 의료시설 등을 임시주거시설로 지정하고 있다.

마을회관은 임시주거시설로 활용되어 재해발생 상황에서 이재민과 일시대피자의 집결과 재해구호물자의 지급이 이루어질 수 있는 공간이다. 따라서 지역주민들이 쉽게 인지하고, 접근이 용이한 마을회관을 대피의 출발지점인 집결지로 설정한다.

도착지의 경우 거점 및 구호소로 활용 가능한 부산광역시의 강서체육공원으로 설정하였다. 강서체육공원은 지리적으로 넓은 부지가 확보되어 있어 거점과 구호소 역할을 수행하기에 적합하다. 또한, 부산시의 원전안전분야 현장조치 행동매뉴얼에 백스코, 사직종합운동장, 아시아드 경기장, 구덕운동장, 강서체육공원 등을 구호소로 정하고 있으며, 고리원자력본부 기준으로 구덕운동장 및 강서체육공원은 직선거리로 각각 33 km, 31 km이므로 거리상 UPZ 외 구역이다. 반면에, 구덕운동장의 경우 대피경로가 부산 시내를 통과하여 이동하므로 경로가 복잡하고 실제 주행시간이 길다. 따라서, 강서체육공원을 대규모 재난의 거점 및 구호소로 설정하여 도착지로 활용한다.

#### 3-1 데이터 선정

연구 대상지는 대규모 재난 중 하나인 방사능재난을 가정하였으며 부산시 원전안전분야 현장조치 행동매뉴얼을 참고하여 주민보호조치 구역의 예방적보호조치구역 및 긴급보호조치계획구역에 위치한 임의의 마을회관 30개를 출발지 노드로 선정한다. 마을회관은 마을주민들의 집회가 가장 활발히 이루어지는 장소이며 유사시 임시주거시설로 활용되기 때문이다. 도착지의 경우 부산 시내를 경유하지 않아 지리적으로 이동이 편리하고 유사시 대규모 이재민 및 일시대피자 수용이 가능하며 고리원자력본부로부터 30 km 이상 떨어져 있으며, 이재민구호소 및 거점센터로 운영할 계획이 있는 강서체육공원을 최종 목적지 노드로 선정한다.

데이터는 국토교통부 표준노드링크 데이터(2023년 7월)를 사용하였으며, ArcGIS pro 프로그램을 통해 양산시, 부산시, 김해시 각 지역의 일부 폴리곤을 추출하고 표준노드링크 데이터와의 교차 지역 추출을 통해 일부 도로 구간에 대한 노드와 링크를 도출하였다. 그림 3의 노란색 지점은 출발지를 나타내며, 빨간색 지점은 도착지를 나타낸다.

출발지 기장군 내 30개의 임의의 마을회관 구성목록 및 노드는 표 1과 같다. 도착지인 강서체육공원의 노드는 “141004

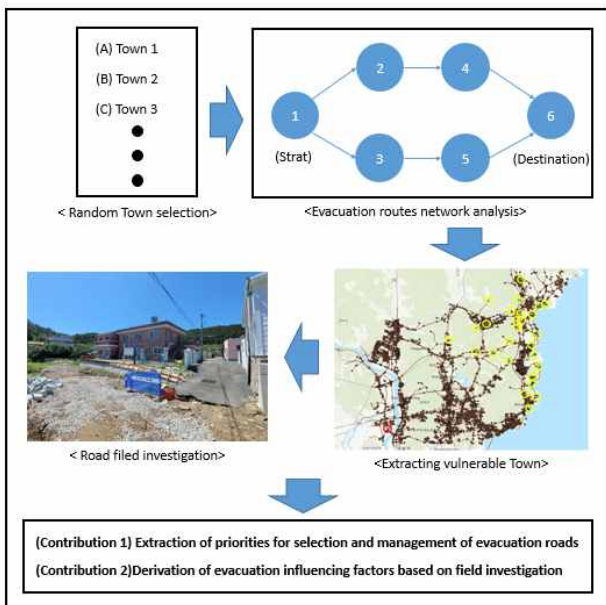


그림 2. 연구수행 접근법 절차  
Fig. 2. Research approach process



그림 3. 도로 네트워크 노드 및 링크 데이터  
 Fig. 3. Road network node and link data

표 1. 마을회관 시작지점 리스트  
 Table 1. Starting point town list

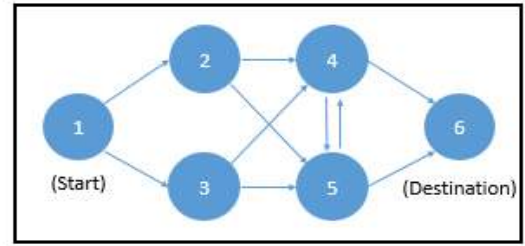
Node ID	Town	Node ID	Town
1450423701	Town 1	1450008401	Town 16
1450021500	Town 2	1450400200	Town 17
1450406000	Town 3	1450018301	Town 18
1450391300	Town 4	1450392900	Town 19
1450411200	Town 5	1450355500	Town 20
1450246600	Town 6	1450414700	Town 21
1450411800	Town 7	1450394400	Town 22
1450248800	Town 8	1450391000	Town 23
1450020900	Town 9	1450409800	Town 24
1380026200	Town 10	1450412900	Town 25
1450145302	Town 11	1450416100	Town 26
1450005601	Town 12	1450005500	Town 27
1450411500	Town 13	1450008802	Town 28
1450418900	Town 14	1450019600	Town 29
1450017600	Town 15	1450397900	Town 30

2000"이다. 전체 분석대상지 도로 네트워크 내 노드의 개수는 약 3,800개이고 링크는 약 11,000개이다.

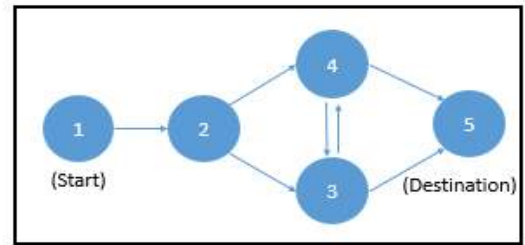
### 3-2 분석방법

본 연구에서는 네트워크 분석법을 활용하여 대피경로들을 분석한다. 분석결과로 나타나는 경로 및 지점은 우회가 어려운 취약지점으로 정의한다. 네트워크 분석법은 개체 간의 연관성 분석 및 경로분석 등 그래프 데이터 분석에 적합한 방법이다[18]. 특히, 대규모 지리정보를 그래프로 구성하는 도로 네트워크의 분석에서 몇 가지 이점이 존재한다.

먼저 그래프의 특징은 개체 간 링크의 연결관계 등을 통한 위상학적 형태로 데이터의 이해가 가능하다. 이러한 특징은 특정 노드가 많은 링크로 연결되어 있는 특정 지점을 도출하고 개체 간 상호작용이 활발한 지점을 파악하기 용이하다. 또한, 노드의 속성정보나 개체의 특징을 반영하여 특정한 경로나 목적에 적합한 지점을 탐색한다. 둘째로, 실제 도로 네트워크는 노드인 교차로와 링크인 도로로 표현되어 있기 때문에 그래프의 형태로 변환하여도 직관적인 이해가 가능하다. 마지막으로 그래프 데이터 타입은 새로운 도로 혹은 건물의 추가



(A)



(B)

그림 4. 연결성 분석 예시  
 Fig. 4. Connectivity example

를 노드 및 링크로 반영하고 속성정보를 쉽게 반영하기 때문에 데이터의 변화에 따라 확장과 재현에 편리하다. 특히 연결성(Connectivity)은 도로 구간 사이의 연결 강도를 측정하기에 적합하다[19]. 연결성은 출발지점과 목적지점 사이를 sub-graph의 형태로 그래프를 단절하고 다수 경로 중 링크의 연결지점이 가장 적은 부분을 도출한다. Feng Xie 등은 도로 네트워크의 구조를 측정하기 위해 이질성, 연결성, 접근가능성, 상호연결성 등의 지표를 사용하여 도로 네트워크 구조를 측정하였다[20]. 이질성은 노드의 종류에 따른 구분을 의미한다. 접근가능성은 특정 노드에 접근하는데 소요되는 시간, 비용, 거리 등으로 정의하여 지표를 산정한다. 상호연결성은 연결성의 개념을 확장한 것으로 노드의 클래스가 다양한 경우 교통·운송 형태에 의해 연결되는 것을 의미한다[21].

연결성은 그래프 내 시점 및 종점을 잇는 모든 경우를 고려하여, 이를 sub-graph로 단절하는 링크의 수를 도출하는 방법이다. 그림 4는 연결성을 설명하는 예시이다. 먼저, (A)는 노드(1)에서 시작하여 노드(6)으로 도착하는 경로이며 전체 경로의 수는 다양하다. 예를 들어 각각 [1→2→4→6], [1→2→5→6], [1→2→4→5→6] 등이다. 그림 4에서 (B)의 경우도 노드(1)에서 노드(5)까지 다양한 경로가 존재한다. 하지만, (A)의 경우 [1→2]로 가는 경로가 끊기는 경우 혹은 [2→4]로 이동하는 경로가 끊기는 경우 대체할 수 있는 경로인 [1→3], [2→5]와 같은 대체경로가 존재한다. 하지만, 그림 4의 (B)는 노드(1)에서 노드(2)로 가는 링크가 유실될 경우 모든 경로가 기능을 상실한다. 따라서, 그림 4의 (A)에서 노드(1)에서 노드(6)까지 나타나는 경로 중 sub-graph로 경로를 단절하는 경우 연결성이 가장 낮은 부분은 노드(1)에서 노드(2) 혹은 노드(3)으로 이어지는 두 곳이다. 반면에, 그림 4의 (B)의 경우 가장 연결성이 가장 낮은 부분은 노드(1)에서 노드

(2)로 이동하는 한 곳이다. 이러한 경우를 취약지점으로 정의하며 해당 부분이 파손되거나 도로가 유실되어 이동에 제약이 발생하는 경우 경로 자체가 기능을 할 수 없게 된다. 따라서, 그림 (B)의 경우 경로의 지속성을 유지하기 위해서 노드 (1)과 노드(2)를 잇는 링크의 집중적인 관리가 필요하다.

본 연구에서는 네트워크 분석법을 활용하여 대규모 재난 상황에서 다수의 주민들이 일시에 대피하는 상황을 가정한다. 구체적으로 대규모 재난의 대피경로를 네트워크 분석법을 통해 최소 연결성을 가지는 부분을 추출한다.

본 논문에서는 Python 3.10 환경에서 Networkx 3.0 버전 패키지를 활용하여 연결성 분석 수행하였다. Networkx 패키지는 도로 네트워크와 같은 그래프 데이터 형태의 네트워크를 분석하는데 용이한 도구이다.

#### IV. 네트워크 분석 결과 및 현장조사

##### 4-1 연결성 분석

대상지의 30개 마을회관에서 강서체육공원까지의 경로에 대해 그래프 연결성 분석을 실시하였다. 표 2는 각 마을회관에서 도착지까지의 대피경로에서 나타나는 최소 연결성의 수를 의미한다. 마을회관의 명칭은 임의로 표기한다.

##### 4-2 취약지점 세부분석

우회가 어려운 최소 연결성 값이 1인 경우는 총 10개의 경로로 나타난다. 따라서, 해당 도로 구간의 기능이 마비되는 경우 대피가 지연되거나 불가능하다. 최소 연결성이 1인 지점을 확인한 결과 모든 경우 마을회관이 자리한 경로의 첫 지점으로 확인되었다. 이에 마을회관 초입부 도로를 제외하고 연결성이 낮은 다른 취약지점 도출을 위해 경로를 분석한 결과는 표 3에 나타난다.

분석결과는 다음과 같다. 출발지점 다음 노드에서 시작하는 경로는 모든 경로에서 최소 2개의 연결성을 가지는 것을 확인하였다. 이에 따라 30개의 분석대상지에서 10개의 마을회관에 대한 경로의 초입부 도로에 대하여 직접 현장조사를 수행하였다.

##### 4-3 취약지점 분석 기반 대피경로 현장조사

현장조사는 연결성 값이 1인 지점을 대상으로 2023년 8월 1일, 2023년 8월 2일까지 1차 현장조사를 수행하였다. 이후 경상도 지역 태풍 상륙 다음날 2023년 8월 11일에 2차 현장조사를 수행하였다. 태풍은 강풍, 폭우 등을 동반하므로 도로의 파손을 야기하고, 산사태 등으로 인해 도로의 통행량을 저하시킬 수 있는 요인이기 때문이다. 현장조사에서는 집결지에서 출발하는 차량의 운행에 방해되는 요소가 있는지, 태풍과

표 2. 최소 연결성

Table 2. Minimum connectivity

Number	Town	minimum connectivity
1	Town(1)	2
2	Town(2)	3
3	Town(3)	2
4	Town(4)	2
<b>5</b>	<b>Town(5)</b>	<b>1</b>
6	Town(6)	3
7	Town(7)	2
8	Town(8)	2
9	Town(9)	3
10	Town(10)	2
11	Town(11)	2
12	Town(12)	2
13	Town(13)	2
<b>14</b>	<b>Town(14)</b>	<b>1</b>
<b>15</b>	<b>Town(15)</b>	<b>1</b>
16	Town(16)	3
17	Town(17)	2
18	Town(18)	2
<b>19</b>	<b>Town(19)</b>	<b>1</b>
<b>20</b>	<b>Town(20)</b>	<b>1</b>
<b>21</b>	<b>Town(21)</b>	<b>1</b>
<b>22</b>	<b>Town(22)</b>	<b>1</b>
<b>23</b>	<b>Town(23)</b>	<b>1</b>
24	Town(24)	2
25	Town(25)	2
<b>26</b>	<b>Town(26)</b>	<b>1</b>
27	Town(27)	3
28	Town(28)	3
29	Town(29)	3
<b>30</b>	<b>Town(30)</b>	<b>1</b>

표 3. 시작지점 제외 경로 분석

Table 3. Route analysis(removing starting point)

No.	Town	M-C	Vulnerable node pair
1	Town(5)	2	(1450292601, 1450292600) (1450292603, 1450292800)
2	Town(14)	2	(1450347101, 1450347100) (1450347101, 1450006600)
3	Town(15)	2	(1450017901, 1450017902) (1450017901, 1450017903)
4	Town(19)	2	(1450003302, 1450003300) (1450002102, 1450002100)
5	Town(20)	2	(1450355300, 1450353900) (1450355300, 1450355200)
6	Town(21)	2	(1450022101, 1450007900) (1450022101, 1450022100)
7	Town(22)	2	(1450005602, 1450005600) (1450143300, 1450388900)
8	Town(23)	2	(1450005602, 1450005600) (1450143300, 1450388900)
9	Town(26)	2	(1450416400, 3880002001) (1450416000, 1450019101)
10	Town(30)	2	(1450005602, 1450005600) (1450143300, 1450388900)

같은 재난 피해에 도로 파손이 나타나는지 확인하였다.

Town(5)의 경우 보행로가 존재하지 않았다. 하지만, 가까운 갈래길 교차로까지 약 160 m 가량 거리가 있어 우회가능한 도로까지 보행대피는 가능하였다. 또한, 마을회관 앞 공간이 충분히 확보되어 있어 대형버스와 같은 대피지원 차량의 유턴이나 정차가 가능하여 집결지로 활용이 가능하였다(그림 5).

Town(14)의 경우 가까운 갈래길 대로변까지 약 500 m였으며, 보행로가 따로 존재하지 않지만 교차로까지의 거리가 가까워 집결에 용이하였다. 또, 마을회관 앞의 버스 회차 공간이 별도로 지정되어 있어 버스 등 대피차량의 사용이 용이하였다. 다만, 도로 중간에 창고가 입지하였고 작업차량이 있어 교통흐름에 방해될 가능성이 존재하였다(그림 6).

Town(15)의 경우 교차로까지 약 220 m 가량 떨어져 있으며, 보행로가 존재하여 보행대피가 가능하였다. 또한, 마을회관 옆에 방사선비상 대피 안내판이 있어 주민들의 정보습득이 용이하였으며 대피차량의 활용이 가능하였다(그림 7). 하지만, 2회의 현장조사에서 교차로 부근 불법주차차량이 항상 주차하고 있어 대규모 재난 발생 시 교통체증 등의 문제가 우려되었다(그림 8).

Town(19)의 경우 마을회관에서 교차로까지 약 500 m 정도 떨어져 있었고, 경사로가 존재하여 안전취약계층이 보행대피하는 경우에 예상되었다. 하지만 마을회관 앞에 대피차량이 주·정차하기에 용이하였다(그림 9).

Town(20)은 대피차량이 주·정차 및 회차에 충분한 공간이 존재하였다. 하지만, 우회 가능한 교차로까지 약 1.9 km의 거리가 떨어져 있어 고령자 등의 안전취약계층이 보행대피하기에는 다소 어려움이 있다. 이에 따라, 해당 경로의 도로는



\*Local information proper nouns and Korean signboard notation

그림 6. Town(14) 정보  
Fig. 6. Town(14) information



그림 5. Town(5) 정보  
Fig. 5. Town(5) information



\*Local information proper nouns and Korean signboard notation

그림 7. Town(15) 정보  
Fig. 7. Town(15) information

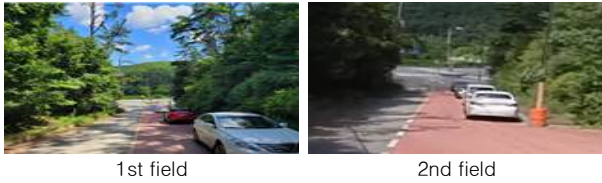


그림 8. Town(15) 대피 방해요소  
 Fig. 8. Town(15) evacuation hindrance factor



\*Local information proper nouns and Korean signboard notation  
 그림 9. Town(19) 현장정보  
 Fig. 9. Town(19) information

단일경로 길이가 길어 도로의 우선순위를 부여하고 반드시 항상 점검할 필요가 있었다(그림 10).

Town(20)은 태풍 상륙 직후 2차 현장조사에서 병설된 보행로의 두 곳에서 보도블럭의 파손과 낙석 등이 나타났다(그림 11).

Town(21)의 경우 마을회관 앞 공간이 충분하여 차량의 주차가 용이하였다. 또한, 대피자가 보행가능한 도로가 존재하여 우회가 가능한 교차로까지 이동이 가능하였다(그림 12).

Town(22)의 경우 교차로까지 약 1.4 km 정도의 거리가 있고, 보행가능한 도로가 없어 노약자와 같은 안전취약계층은 보행대피가 어려웠다. 도로는 인접한 산림지역에서 낙석 등의 흔적이 발견되었다. 또한 집결지 초입부는 중앙선에 화단이 조성되어 도로의 폭이 좁아지고 차량의 진출입에 어려움이 예상되었다(그림 13).

이후 태풍 카눈 상륙 직후 2차 현장조사에서 도로에서 약간의 낙석 흔적이 나타났다. 1차 조사에서 낙석이 우려되는 지점에서 낙석이 발견되었기에 해당 지점의 경우 관리가 필요할 것으로 사료된다(그림 14).

Town(23)의 경우 마을회관에서 집결하기에 어려웠다. 마을 주위의 도로는 폭이 좁고 마을회관 앞 공간이 협소하여 차량을 이용할 공간이 충분하지 않았다. 다만, 교차로까지의 거리가 가까워 안전취약계층도 대피에 용이하였다. 따라서,

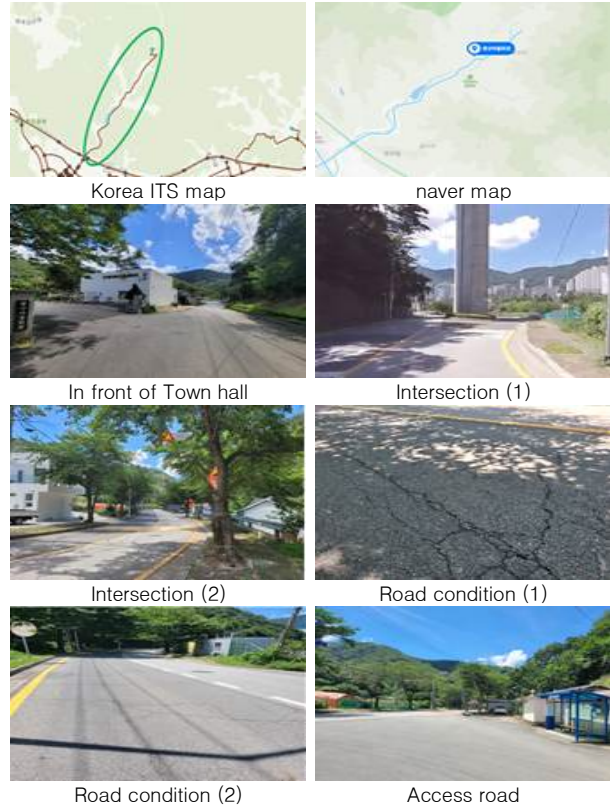


그림 10. Town(20) 현장정보  
 Fig. 10. Town(20) information



그림 11. Town(20) 보행로 파손  
 Fig. 11. Town(20) pedestrian road damage

Town(23)의 경우 집결지는 그림 15의 교차로가 집결에 용이하였다(그림 15).

Town(23)의 경우 우회 가능한 가까운 교차로까지 약 300 m 정도의 거리가 있었고 보행로가 존재하였기 때문에 안전취약계층도 보행대피가 가능하였다. 또한, 마을회관 앞의 공간이 충분히 집결 및 대피차량 활용이 가능하였다. 도로의 상태는 콘크리트 포장에 약간의 균열이 존재하였지만 운행에 지장이 되는 파손은 없었다(그림 15).

Town(26)의 경우 가까운 우회가 교차로까지의 거리가 짧





그림 12. Town(21) 현장정보  
Fig. 12. Town(21) information



그림 13. Town(22) 현장정보  
Fig. 13. Town(22) information



그림 14. Town(22) 도로 낙석  
Fig. 14. Town(22) road rock fall



\*Local information proper nouns and Korean signboard notation

그림 15. Town(23) 현장정보  
Fig. 15. Town(23) information

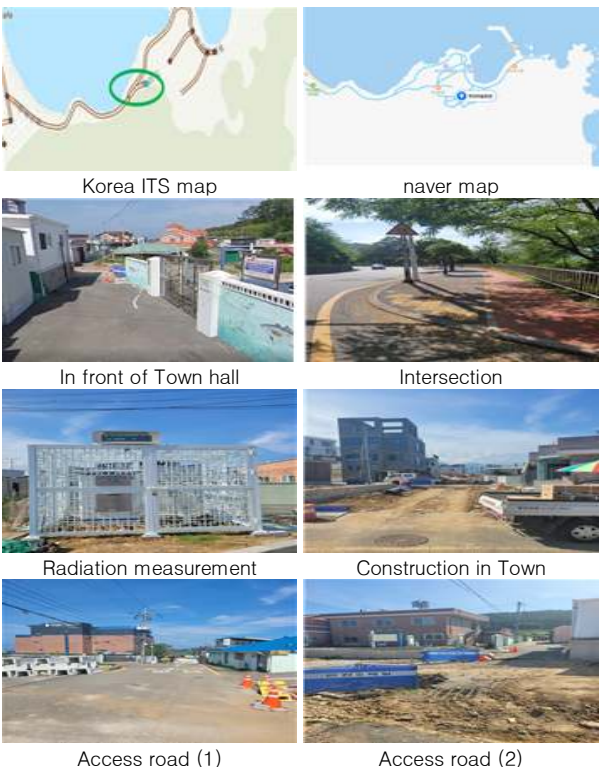
아 보행대피가 가능하였다. 다만, 마을회관의 위치가 주택과 상가 사이에 위치하여 마을회관을 중심으로 집결하는 경우 일부 주민들 혹은 외지인은 집결에 어려움이 예상된다(그림 16). 이에 따라 안내판 등이 설치될 필요가 있었다.

Town(30)은 지리적으로 협소하였고 마을회관까지의 경로가 보행로 및 도로 지선이 다양하여 집결에 어려움이 예상된다(그림 17.), 해안가 근처 지진해일대피 안내판이 존재하여 해당 지점을 집결지로 지정하는 경우 정보의 전파 및 집결하



\*Local information proper nouns and Korean signboard notation

그림 16. Town(26) 현장정보  
Fig. 16. Town(26) information



\*Local information proper nouns and Korean signboard notation

그림 17. Town(30) 현장정보  
Fig. 17. Town(30) information



그림 18. Town(30) 지진해일 대피 안내판 앞  
Fig. 18. Town(30) Tsunami evacuation information board area

기에 용이하였다(그림 18).

현장조사 결과는 표 4와 같다. 취약지점에 대한 현장조사 평가 기준은 다음과 같다. 도로의 유지보수 및 관리 실태, 마을회관의 집결지로써의 활용가능성, 대피차량의 잔·출입을 위한 마을회관 앞 여유공간 유무, 보행대피를 위한 보행로 유무 현황, 단일경로 내 차량방해요소 존재 유무 현황이다.

본 연구에서 취약지점으로 도출한 모든 도로의 현장조사에서 차량 운행이 불가능한 수준의 도로파손은 나타나지 않았

표 4. 현장조사 결과

Table 4. Field research result

Town	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Town(5)	○	○	○	×	×
Town(14)	○	○	○	×	○
Town(15)	○	○	○	○	○
Town(19)	○	○	○	×	×
Town(20)	○	○	○	○	○
Town(21)	○	○	○	○	×
Town(22)	○	×	×	×	○
Town(23)	○	×	×	×	×
Town(26)	○	○	○	○	×
Town(30)	○	×	×	○	○

- (1): Road management and maintenance state
- (2): Possibility of use as a gathering place
- (3): Free space in town for use of evacuation vehicles
- (4): Pedestrian path
- (5): Vehicle obstruction elements

다. 10개의 조사지점 중 보행로가 존재하는 도로는 전체의 절반으로 조사되었다. Town(22), Town(23), Town(30)의 경우 차량대기 공간이 협소하여 별도의 집결지의 마련과 안내표지판 설치가 필요하였다. 또한 Town(22), Town(30)은 낙석, 도로공사 등으로 인해 일시적으로 차량운행이 어려움을 주는 요소가 있었다. 이는 추후 낙석방지책, 공사완료에 따라 해결되는 문제이다. Town(22)는 마을회관 앞 도로에 중앙분리대로 화단이 조성되어 있어 대형버스와 같은 대피차량 활용이 어렵다고 판단된다.

## V. 한계점 및 향후 연구

본 연구의 한계는 다음과 같다. GIS(Geographic Information System) 기반 네트워크 분석의 경우 왕복 1차로와 같은 도로를 분석하는 것에 한계가 있었다. 또한 네트워크 분석은 대피경로 분석에 한정했기 때문에 재난의 특징, 시간적인 특징 그리고 교통공학적인 측면을 고려하지 못했다는 한계점이 존재한다.

본 연구는 추후 다음과 같은 고도화가 필요하다. 먼저 동일한 연결성이 나타나는 지점들이 존재할 수 있으므로 추가적인 분석을 통해 도로의 초입을 제외한 취약지점을 도출하는 연구가 필요하다. 또한 방사능재난의 경우 NEREG/CR-7002에서 제시하는 시나리오가 존재한다[22]. 시나리오는 계절, 시간, 날씨, 풍향 등의 다양한 변수를 제시하고 있다. 이처럼 재난에 따른 특징을 반영한 취약지점을 도출하는 고도화 연구의 진행이 필요하다.

## VI. 결 론

본 연구는 방사능재난과 같은 대규모 대피상황을 상정하고 지리정보 및 네트워크 분석법을 활용하여 진행하였다. 대피경로의 연결성이 낮아 경로가 소실되는 지점을 도출하였으며 이러한 도로구간을 취약지점으로 정의하고 현장조사를 실시하였다. 연구 결과, 일반적으로 집결지로서 활용되는 마을회관이 취약지점으로 나타났다. 네트워크 분석 결과를 토대로 현장조사를 수행한 결과 일반적으로 마을회관은 주민의 접근이 용이하여 집결지로서 활용이 가능하나 외지인이 찾기 어려울 수 있었다. 또한, 대피차량이 대기 및 주행하기에 협소한 지역들이 존재하였다.

상기 연구결과를 바탕으로 도출한 대피체계 개선사항은 두 가지이다. 먼저 본 연구의 분석 방법인 네트워크 분석을 활용하여 대피경로를 분석하는 경우 우회가 불가능한 취약지점인 단일경로를 추출할 수 있다. 이는 재난관리자가 대피경로를 지정하고 도로를 유지·보수하는 경우 우선순위를 부여함으로써 도로관리 및 재난관리에 사용되는 한정된 자원으로 효율

적인 방재대책을 수립할 수 있다. 더 나아가 재난 발생 시 취약지점에 대한 선제적 대응이 가능하고, 마을회관과 같은 임시주거시설의 경우 비상시 재해구호물자의 보급이 이루어지므로, 결과적으로 지역의 재난대응 역량강화에 기여한다.

두 번째는 취약지점 대상 현장조사 결과 대피방해 요소를 확인하였다. 먼저, 집결지로서 활용되는 마을회관 주변 도로가 비좁고 집결장소가 협소하고 방해물이 있는 경우와 단일경로 내 낙석이 발생하는 등 파손이나 통행의 제한이 나타나는 경우를 발견하였다. 이러한 경우에 재난관리자는 대안 집결지를 마련할 필요가 있으며, 도로 및 보행로의 기능관리를 위한 낙석방지대책 등을 강구하고 대안 집결지까지 안전취약계층을 위한 이동수단의 마련과 안내표지판의 설치가 필요하다.

결과적으로 본 연구는 경로에 대한 분석결과와 현장조사를 기반으로 재난관리자가 대피경로의 취약지점을 파악하여 우선적인 도로 관리를 통해 도로관리 및 재난관리에 사용되는 자원을 효율적으로 활용하고, 재난 발생 시 선제적인 대응에 활용되는 콘텐츠로서 생산하였다. 또한, 현장조사를 통해 실제 대피체계에 개선될 수 있는 방안을 제시하였다. 이러한 결과는 지역의 재난대비 역량을 강화하고 재난관리자의 의사결정에 정보를 제공한다.

## 감사의 글

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원(“도시단위 대규모 재난대피 시뮬레이션 기술 개발”, “NDMI-주요-2024-05-01”)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Ministry of Public Administration and Security, Disaster Relief Act, 2020.
- [2] Ministry of Public Administration and Security, Guidelines for Establishing a Disaster Relief Plan, 2023.
- [3] Nuclear Safety and Security Commission, Act on Physical Protection and Radiological Emergency, 2022.
- [4] Ministry of Public Administration and Security, Enforcement Decree of the Framework act on the Management of Disasters and Safety, 2024.
- [5] Korea Forest Service, Forest Protection Act, 2023.
- [6] J. H. Moon, “Suggestions to Improve the Effectiveness of National Radiological Emergency Response System,” *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 195-206, June 2020.
- [7] National Institute of Chemical Safety. Chemical Substance Information System [Internet]. Available: <https://icis.me.go.kr>.

[8] B. Debusmann Jr. and M. Matza. Why Weren't Maui Residents Warned about the Fire Sooner? [Internet]. Available: <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-66476746>.

[9] T. Yamada, "A Network Flow Approach to a City Emergency Evacuation Planning," *International Journal of Systems Science*, Vol. 27, No. 10, pp. 931-936, 1996.

[10] H. Sbayti and H. S. Mahmassani, "Optimal Scheduling of Evacuation Operations," *Transportation Research Record*, Vol. 1964, No. 1, pp. 238-246, 2006.

[11] J. Kim, J. Park, K. Kim, and M. Kim, "RnR-SMART: Resilient Smart City Evacuation Plan based on Road Network Reconfiguration in Outbreak Response," *Sustainable Cities and Society*, Vol. 75, 103386, December 2021.

[12] I. M. Hains, A. Marks, A. Georgiou, and J. I. Westbrook "Non-Emergency Patient Transport: What Are the Quality and Safety Issues? A Systematic Review," *International Journal for Quality in Health Care*, Vol. 23, No. 1, pp. 68-75, February 2011.

[13] N. Nikooa, M. Babaei, and A. S. Mohaymany, "Emergency Transportation Network Design Problem: Identification and Evaluation of Disaster Response Routes," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 27, pp. 7-20, March 2018.

[14] J. Shen, K. Liu, C. Ma, Y. Zhao, and C. Shi, "Bibliometric Analysis and System Review of Vehicle Routing Optimization for Emergency Material Distribution," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Vol. 9, No. 6, pp. 893-911, December 2022.

[15] J.-H. Jin, M.-H. Jo, J.-S. Lee, and J.-T. Park, "Types of Local Government Road Pavement Damage and Countermeasures," *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 12-18, September 2012.

[16] T.-S. Park, J.-S. Kim, and M.-B. Ha, "A Field Survey and Analysis of Early Damage on Asphalt Paved Roads (Focusing on Cheongju Area)," *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 21-29, June 2013.

[17] J. H. Im, C. I. Seo, T. Han, and B. Lee, "Suggestion of Future Pavement Maintenance by Pothole Analysis in Gyeonggi-Do," *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 51-59, 2019.

[18] R. C. Thompson and D. E. Richardson, "A Graph Theory Approach to Road Network Generalization," in *Proceedings of the 17th ICA/ACI Conference*, Barcelona: Spain, September 1995.

[19] M. G. Sreelekha, K. Krishnamurthy, and M. V. L. R. Anjaneyulu, "Interaction between Road Network Connectivity and Spatial Pattern," *Procedia Technology*,

Vol. 24, pp. 131-139, 2016.

[20] F. Xie and D. Levinson, "Measuring the Structure of Road Networks," *Geographical Analysis*, Vol. 39, No. 3, pp. 336-356, July 2007.

[21] P. Rietveld, Some Notes on Interconnectivity in Transport Networks, in *Overcoming Isolation: Information and Transportation Networks in Development Strategies for Peripheral Areas*, pp. 18-28, January 1995.

[22] B. Wolshon, Criteria for Development of Evacuation Time Estimate Studies, *Office of Nuclear Security and Incident Response US Nuclear Regulatory Commission*, November 2011.



김지호(Ji-Ho Kim)

2022년 : 중앙대학교 대학원(공학석사)

2022년~현 재: 국립재난안전연구원

2023년~현 재: 부산대학교 정보융합공학과 컴퓨터공학전공 박사과정

※관심분야: GIS(Geographic Information System), 그래프 이론(Graph Theory), 텍스트 마이닝(Text mining), 재난대피(Disaster Evacuation), 알고리즘(Algorithm) 등



남동엽(Dong-Yup Nam)

2013년 : 광운대학교 대학원(심리학석사)

2018년~현 재: 국립재난안전연구원

※관심분야: 심리학(Psychology), 재난구호·복구(Disaster Relief), 재난피해자 지원(Disaster Victims Support) 등



심준석(Jun-Seok Sim)

2013년 : 부산대학교 대학원 (공학석사)

2018년 : 부산대학교 대학원 (공학박사  
수료-공간정보공학과)

2016년~2018년: 울산연구원

2018년~현 재: 국립재난안전연구원

※관심분야: 공간정보(GIS), 공간분석(Spatial Analysis), 재난대피(Disaster Evacuation) 등