

계층분석법을 통한 지하차도 재해 예방 및 제어 시스템 개선 연구

A Study on the Improvement of the Disaster Prevention and Control System for Underpasses by Analytic Hierarchy Process

김필도¹ · 김경수² · 문유미^{3*}Phil Do Kim¹, Kyoung Soo Kim², Yoo Mi Moon^{3*}¹Ph.D. Candidate, Department of Construction Safety Engineering, Kyonggi University, Suwon, Republic of Korea²Ph.D. Candidate, Department of Construction Safety Engineering, Kyonggi University, Suwon, Republic of Korea³Visiting Professor, General Graduate School, Kyonggi University, Suwon, Republic of Korea

*Corresponding author: Yoo Mi Moon, feelst1003@daum.net

ABSTRACT

Purpose: Increase in the size and number of underpasses rises occurrence of disasters such as fire and flooding inundation in underpasses. In the occurrence of disasters, the underpasses are more vulnerable to expose of crucial disasters than the general roads due to they are built underground. Therefore, The purpose of this paper is to derive system improvement items to prevent and control disasters in underpasses. **Method:** A hierarchical model of disaster impact factors and alternatives was developed based on prior researches and expert advices on disaster analyses and impact factors in the underpasses. The developed model was employed for surveys of pairwise comparison, and rankings of improvement were determined by applying the AHP method. **Result:** With a consistency of the surveys, results of relative weights of evaluation criteria(traffic accidents, fire, flooding inundation) and alternatives(law, system/planning, maintenance/human factor/environment) shows that improvement of laws and system related to the fire disaster is a top priority to prevent and control disaster of the underpasses. **Conclusion:** From experts' point of view, strengthening laws and systems related to disaster prevention facilities such as water spray facilities, external(ground) exit in relation to fire in underpasses showed that it is an alternative to prevent disasters and minimize damage to underpasses.

Keywords: Underpass, Disaster, Prevention and Control System, Analytic Hierarchy Process

요약

연구목적: 지하차도의 설치 규모, 개수의 증가로 지하차도 내 화재, 침수 등의 재해가 증가하는 추세이다. 지하차도는 지하에 건설되어 재해 발생 시 일반적으로 대비 피해가 크고 공용 중 재해 노출 가능성이 크다. 따라서 지하차도 내 재해를 예방·제어하기 위한 시스템 개선사항을 도출하는 데 목적이 있다. **연구방법:** 본 연구에서는 지하차도 내 재해 분석 및 영향요소에 관한 선행연구와 전문가 자문을 토대로 재해 영향요소 및 대안을 계층 구조화한 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 전문가를 상대로 쌍대비교 형태의 설문에 활용하고, 개선순위 결정 등을 위해 AHP분석 기법을 사용 하였다. **연구결과:** 설문조사는 일관성을 확보하였고, 재해(교통사고, 화재, 침수)와 대안(법, 제도/계획, 설계, 유지관리/인적/환경)을 상대로 가중치 등을 분석한 결과, 지하차도 재해 예방·제어를 위해 화재에 관한 법, 제도 분야 시스템개선이 최우선으로 필요한 것으로 확인되었다. **결론:** 전문가 견지에서 볼 때 지하차도 내 화재 관련하여 물분무시설, 외부(지상)대피통로와 같은 방재시설과 관계된 법, 제도를 강화하는 것이 지하차도 재해 예방 및 피해 최소화의 대안임을 보여 주었다.

핵심용어: 지하차도, 재해, 예방·제어 시스템, 계층분석(AHP)

Received | 18 September, 2020

Revised | 27 October, 2020

Accepted | 17 November, 2020

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

지하차도는 지반을 개착 또는 비 개착 상태로 지하에 만든 터널 형태의 입체교차로로서, 교차로 구간 차량정체 해소를 목적으로 연장이 짧은 지하차도를 설치하기도 하고(Fig. 1 참조), 주변 도시와 사업지구 내부 교통체계를 분리하고, 토지이용계획의 효율성 제고를 위해 사업지구 내·외부에 장대 지하차도를 설치하기도 한다. 이에 따라 지하차도의 설치 규모 및 개수가 증가하고 있다.



Fig.1. Underpasses around Yeomgok intersection(Seoul Metropolitan Government, 2019)

반면에 지하차도를 이용할 때 지하에 있는 공간적 특성으로 인해 화재 등의 재해 발생 시 일반도로보다 상대적으로 큰 피해가 발생한다. Fig. 2에서처럼 교통량이 늘어 상시 지·정체로 인한 집중력 저하와 같은 운전 부주의 등으로 교통사고가 발생하고, 이로 인해 화재, 폭발 등의 2차 재해가 발생하기도 한다. 특히, 화재 때 유독가스 흡입으로 다수의 인명피해가 발생한다. 아울러, 국지성 집중호우 등으로 인해 다수의 지하차도가 침수되어 인적, 물적 피해가 지속해서 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 지하차도에서 발생한 다양한 재해와 재해 원인 및 영향을 미치는 요소를 전문가 집단의 설문을 통한 계층분석(Alytic Hierarchy Process, 이하“AHP”라 한다.)을 통해 효과성, 시급성, 예산 등을 고려하여 효과적으로 재해를 예방·제어하기 위한 시스템 개선사항을 도출하는 데 연구의 목적이 있다.



Fig.2. Major disasters in underpasses(reference : Capture and reorganize YouTube videos of press)

지하차도 재해 현황

The Board of Audit and Inspection of Korea(2019)에 따르면 2018년 9월 기준으로 공용 중인 지하차도는 687개로서, 이중 수도권 및 5대 광역시에 전체의 83.7%인 575개가 있다. 또한, 전체 연장 500m 이상인 지하차도는 144개(21.0%)이며, 수도권 및 5대 광역시에 121개(84.0%)가 분포해 있다.

아울러, 지하차도 내 발생 교통사고에 관해 도로교통공단(TASS) 자료를 종합하면 최근 5년(2015~2019)간 교통사고는 총 1,116,035건이 발생하였으며, 1,689,926명(사망 20,228명, 부상 1,169,698명)의 사상자가 발생했다. 이중 터널에서는 3,452건의 교통사고로 126명이 사망하고 7,954명의 부상자가 발생하였다. 지하차도(도로)에서 5,318건의 사고로 159명이 사망하고 8,232명이 부상자가 발생하였다. 발생 건수는 터널이 0.31%, 지하차도가 0.48%를 차지하고 있으나 치사율¹⁾은 터널이 3.65명, 지하차도가 2.99명으로 전체 치사율 1.81명보다 높고, 인명피해²⁾는 터널이 2.32명이고 지하차도는 2.22명으로 전체 인명피해인 1.51명보다 높은 것으로 확인되었다.

또한, The Board of Audit and Inspection of Korea(2019)에 의하면 2012년~2016년까지 발생한 터널 내 교통사고 4,110건(사망 200명) 중 69건은 화재로 이어져 27명이 사망하였으며, 2018년 9월 기준 공용 중인 687개의 지하차도에서 최근 5년간(2014~2018.7) 41개의 지하차도에서 집중호우, 펌프 미작동 등의 사유로 총 49회의 침수가 발생하여 2명의 사망하였다. 최근(2020.7.23.)에는 부산 초량 지하차도에서 집중호우로 인한 침수 등의 사유로 3명이 사망하였다.

이상 지하차도에서 발생한 재해를 살펴본 결과 지하차도는 지하에 위치하여 폭이 좁고 길고 밀폐됨에 따라 공간의 한계로 인해 유독가스 확산, 구조 활동 등의 제약으로 재해 발생 시 일반도로보다 피해가 더 큰 것으로 판단 된다.

지하차도 재해 예방·제어 시스템 개선

선행연구

지하차도 내 교통사고, 화재, 폭발, 침수 등의 재해를 예방하고 제어하기 위한 시스템을 개선하고자 정부, 지자체, 공공기관, 학회, 개인 등이 다양한 연구를 수행하였다.

먼저 정부에서 발표한 자료를 살펴보면 The Board of Audit and Inspection of Korea(2019)은 지하차도 내 침수, 화재 등의 재해와 관련하여 배수시설 설계 및 관리기준 부적정, 침수위험도 평가 및 방재시설 설치기준 미비, 방재 시설 설치·운영 및 관리 부적정, 터널관리자 방재시설운영 교육제도 미흡 등을 재해요인으로 지적하였다. Ministry of the Interior and Safety and Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2020)는 합동으로 「2020 교통사고 사망자 줄이기 대책」에서 사매 2터널 차량화재(2020.2.17.) 등 터널 내 화재 이후 터널 안전관리 강화 일환으로 위험터널 내 구간단속, 터널 방재 강화, 터널 이용자 교육·홍보 강화, 취약요소별 인프라 개선, 운전자 보호를 위한 안전시설 개선, 졸음운전 방지 위한 시설 확충, 터널 등 구조물 안전강화, 도로 안전조직 혁신, 안전속도 5030 도입 등 법·제도, 계획, 설계, 시공, 유지관리 등 전 분야에서 다양한 방안을 도입하였다. 또한, 침수 우려 지하차도 등급화 추진(Ministry of the Interior and Safety, 2019)에도 불구하고 지속해서 지하차도 침수가 발생함에 따라 Ministry of the Interior and Safety(2020)는 침수 우려 지하차도 관리강화로 자동차단시설 설치, 자동알

1) 사고 100건당 사망자 수, 치사율=(사망자/교통사고 발생 건수)×100

2) 인명피해= 사고로 인한 사망 및 부상자의 합 / 사고 건수

림 업무전파 체계, 통제상황 실시간 공개 등의 안전시설 구축 및 관련법을 개정하려고 한다. Nationla Fire Agency(2019)은 「터널 화재 및 지하공간(차량 화재) 초기탐지 및 화재진압 시스템 개발 보고서」에서 도로 터널 화재의 특성과 기존 소화 시스템의 취약성을 조사하였으며, 터널 및 지하 공간 내 화재 방재 시스템과 관련한 안전 기준을 제시하였다. Korea Communications Commission(2019)는 터널 내 재난사고 발생 시 후속 사고 예방 위해 사고 터널 전방 500m 앞 재난 경보방송을 FM 라디오 방송과 연계하여 추진한다고 발표하였다.

아울러, Seoul Metropolitan Government(2010)는 지하 공간 안전체계 구축방안을 연구하면서 지하차도를 포함한 지하 공간에서 붕괴, 가스폭발, 침수, 화재 등의 재해가 발생하며, 지하 공간 안전관리 요소를 시설구조, 피난, 인명구조, 운영관리, 성능기반의 화재 안전계획의 5가지 대분류로 나누고 다양한 요소를 고려하였다. 지하공간 재난 관리를 위해 법, 제도 개선방안과 통합지휘체계 확립, 시설관리 주체 통합개선 등이 필요하다고 하였다. 더불어, 지하 공간 침수방지와 대피체계를 수립 (Seoul Metropolitan Government, 2005)하면서 침수 관련 법, 기준 등의 미비점을 확인하고 자연재해대책법 등 관련 법·제도 개선과 종합방재시스템 구축을 건의하였다. 추가로 지하차도 침수피해 방지대책(Seoul Metropolitan Government, 2020)에서 침수 대응시설 보강, 차량 통제기준 선정, 침수위험등급 기준 선정, 침수대응 매뉴얼 보강 및 표준화, 배수 용량 검토 및 개선안 마련을 추진하고 있음을 확인하였다.

공공기관 연구를 살펴보면 Korea Land and Housing Corporation(2013)는 지하차도 집수정 최적화 방안에서 지하차도 침수 원인을 환경(집중호우)과 설계, 유지관리 등으로 보았다. Korea Expressway Corporation(2018)는 고속도로 터널 부 교통안전 및 소통향상 종합대책을 수립하면서 터널 부 교통사고 원인, 문제점 및 대책을 운전자 및 교통 측면으로 나누어 제시하였으며, 고속도로 교통사고 감소방안 연구(Korea Expressway Corporation, 2016)에서 교통사고 현황을 분석하고 안전시설 개선, 법·제도 개선, 홍보 활성화를 통한 안전의식 제고 방안을 대안으로 제시하였다.

Korean Institute of Fire Science & Engineering(2013)는 지하 공간 위험특성 분석 및 제도개선 방안 연구에서 지하상가, 지하철, 터널 등의 지하공간 화재위험 특성을 공간, 피난, 소방활동, 연소 특성 측면에서 분석하고 구조물, 설비, 운용방안 등을 고려하여 대책을 수립하고 소방법 등 관련법과 설계, 유지관리 사항 등에 대해 개선할 것을 제안하였다.

지하차도 내 교통사고 재해와 관련하여, Lee et al.(2016)는 고속도로 교통사고는 인적·차량·도로·환경 요인 등 복합적 요인에 의해 발생하고, 이들 중 도로 요인에 의한 사고는 도로의 계획, 설계, 운영과 관련되었다고 하였으며, 인적요인에 의해 교통사고가 발생하므로 운전자의 태도 및 행동 변화와 더불어 안전한 주행을 위한 도로환경이 이루어져야 교통사고가 감소할 것이라고 주장하였다. Lee(2017)은 터널 내 교통사고를 줄이기 위해 안전시설물 설치가 중요하다고 하였다. Bae(2019)는 교통사고 발생유형별 영향요인 분석을 통해 교통사고 영향요인으로 인적, 도로·환경적 요인을 주장하였고, 대책으로 교통법규에 대한 교육·홍보, 단속카메라 설치 등 단속강화, 시인성 향상을 위한 교통안전시설 개선, 터널 내 안전조명 설치 등을 제안하였다.

지하차도 내 화재·폭발 재해와 관련하여, Kim et al.(2010)는 도심도 지하차도의 화재, 대피, 전원공급 및 기타 방재 기준상의 특성을 검토하고, 화재대책으로 지하차도 단면 특성을 고려한 설계화재강도 정립, 상대적으로 긴 연장에 대한 피난 대책 수립, 비상 전원공급 계획, 내화강도에 대한 기준 정립 필요성 등을 제시하였다. Kim et al.(2011)는 도심지 도심도 장대 지하차도에서 공기질, 화재, 침수 및 운전집중력 저하 등의 재해를 검토하였으며 대 심지 장대 지하차도의 특성을 고려하여 횡류식 환기 방식과 물분무소화설비, 신중한 침수대책 수립 등이 필요하다고 주장하였다. Jin(2019)는 한국도로공사의 5년간 도로터널 화재 분석을 통해 화재의 초기대응 중요성 강조와 더불어, 화재대응지수 추가에 따른 터널 위험도 지수를 연구하여, 고정식 소화 설비 확대 적용을 주장하였다. Koo(2015)은 터널 화재 시 기존의 문제점을 분석하고, 터널 내 광센서 선형감지

시스템과 재난문자 통보시스템 구축과 밀폐된 터널 특성을 반영한 피난유도시스템을 제안하였다. Jo(2018)는 500m이상의 단터널을 포함하여 터널연장등급에서 1등급을 3,000m에서 2,500m로 하향하는 것과 위험도 지수등급 검토 시 사고확률, 대형차 혼입비율 등의 조정을 제안하였다.

지하차도 내 침수 재해와 관련하여, Lee(2007)는 실제 침수 발생 지하차도의 상황을 모의한 결과 펌프 규모 설계시 설계빈도 초과 강우로 인한 외부유입 영향에 대한 고려 미흡을 확인하였으며, 효율적인 펌프 규모 및 운영 방법에 대한 연구 필요성을 제기하였다. Lee et al.(2007)는 침수된 용산 지하차도의 침수상황을 모의 수행하였고, 결과적으로 하수관로 용량초과로 배수가 되지 않아 역류현상이 발생하여 지하차도 침수를 가중시킴에 따라 실무에서 지하차도 설계 시 주변 하수관 용량 등에 대한 면밀한 검토가 필요하다고 하였다. Kim et al.(2016)는 다목적 터널의 침수 시 비상 대응을 위해 정책적인 방재사업에 대한 지원과 추진의 일관성, 지속성 등을 주장 하였다.

이와 같이 선행연구 문헌고찰을 통하여 AHP 상위계층(평가기준)과 대안 하위요소를 도출하였으며 계층 간의 연관성을 확보하였다.

연구방법

본 연구의 방법은 이론적으로 Saaty 의 AHP에 근거하였다. AHP는 의사결정의 목표 혹은 평가 기준이 다수이며 복합적인 경우 상호 배반 적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정 지원기법 중 하나로서, 복잡한 문제를 계층화하여 주요 원인과 세부 요인들로 분해하고, 이러한 요인들에 대한 쌍대 비교를 통해 중요도를 도출하는데 있다(Goo et al., 2011).

덧붙여, AHP분석은 지하차도의 재해와 영향요소를 계층적으로 구조화 하고 이들 간의 상대적 가중치를 결정하여 그 우선순위를 살펴보는 과정은 상당한 전문적 지식이 필요한 영역이기 때문에 응답대상자의 적절성이 중요하며, 전문가 집단에 대한 심도 있는 질문을 바탕으로 진행되기 때문에 그 신뢰성 측면에 있어 매우 가치 있는 분석 기법으로 간주 할 수 있다. (Heo et al., 2016)

이에 따라, 선행연구를 참고하여 지하차도 현황과 재해를 분석하고 전문가 자문을 통해 재해에 영향을 미치는 요소를 범주화, 계층 구조화하였다. 구조화 모형을 공공, 민간 등 다양한 분야에 종사하는 기술사 보유 전문가들에게 쌍대비교 형태의 설문문을 하고 일관성 검증과 평점을 부여하고, 대안별 우선도 분석을 실시하였다. 또한 평가기준영역과 대안을 종합하여 가중치와 중요도를 분석하여 시스템 개선을 위한 최우선 대안을 결정 하였다.

설문지 구성 및 AHP 모형

지하차도 내 재해 예방·제어 시스템 개선을 목표로, 관련 요인을 2단계로 계층화하여 Fig. 3과 같이 AHP 모형을 구축하였다. 1단계 모형은 재해로서 ①교통사고 ② 화재, 폭발 ③ 침수로 구성하였고, 이러한 주요 분석 차원은 다시 2단계 모형에서 ①법, 제도 ②계획, 설계, 유지관리 ③인적 요소 ④환경요소로 구분하여 쌍대 비교를 통해 재해 예방·제어에 적합한 요소를 선정하였다.

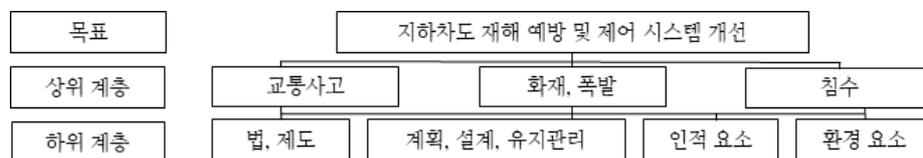


Fig. 3. AHP hierarchy model

응답자들의 이해도를 높이기 위해 Table 1에 선행연구로 도출된 하위계층(영향인자)에 관한 세부사항을 나타내었으며, 각 항목은 응답자들이 두 항목의 상대적인 중요성을 9점 척도로 평가하도록 하였다.

Table 1. Hierarchical classification and details in survey

상위계층	하위계층 ³⁾	세부사항 ³⁾
교통 사고	법, 제도 ⁴⁾	제한속도 하향, 구간단속, 터널 500m전 FM라디오 경보방송, 대피시설 강화, 안전교육 등
	계획, 설계, 유지관리	기하구조(폭, 연장, 형상 등), 운전자 주의력 향상 시설, 단속카메라, 교통안전시설, 예산반영 등
	인적요소	부주의(과속, 졸음, 운전미숙, 주시태만, 폐쇄감 등) 등
	환경요소	교통밀도, 지·정체, 대형·위험 차, 노면상태(블랙아이스), 빙기 등
화재, 폭발	법, 제도 ⁵⁾	방재기준(방재시설, 터널등급, 대피시설, 위험도지수, 내화 등)
	계획, 설계, 유지관리	화재 시뮬레이션, 방재설비, 방재시설 점검 및 관리, 예산반영, 유관기관 협조 및 훈련 등
	인적요소	방향감각 상실, 고립감, 심리적 동요, 담당자 교육, CCTV관제 등
	환경요소	좁고 긴 밀폐 공간, 지하차도 연장 및 높이, 열 축적, 불완전 연소, 연기확산과 피난경로 동일성 등
침수	법, 제도 ⁶⁾	기준 강화 (유역면적, 펌프용량, 하수도 기준, 차단기설치), 침수위험도평가 등
	계획, 설계, 유지관리	관리실 지상, 수위자동 계측, 시설 점검, 전기시설 보완(이중수전, 비상발전기 설치 등) 등
	인적요소	이용자 안전의식 향상, 침수 시 진입금지, 담당자 업무 해태 및 미숙, 등
	환경요소	자연환경(집중호우), 도시개발정도(유역면적 증가), 하천범람, 유관기관 협조 등

본 연구의 표본선정은 토목, 도시, 교통, 기계, 전기 및 안전 등을 전공하고 공공과 민간부문에서 제도, 기준, 계획, 설계, 시공, 감리, 안전 및 유지관리 등의 직무를 수행하고 있는 기술사 보유 전문가 집단(20명)을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 조사 방법은 설문에 응답하는 방법을 전화로 설명한 후, 설문지를 이메일로 송부 및 결과를 회신 받았다. 즉, 1단계: 문제규명 통한 요소도출→2단계: 도출한 요인을 계층구조→3단계: 평가 기준과 대안의 중요도 산출→4단계: C. I 의 계산→5단계: Cr≤ 0.1 값의 적정성 판단→6단계: 계층 전체의 중요도와 우선도 계산→7단계: 종합 대안의 우선순위 판단과정으로 분석하였다.

분석방법

AHP 분석 프로그램(Expert Choice 2000)을 이용하여 분석하였고, 이를 통해 가중치와 일관성 비율을 확보하였다. 이를 위해 Saaty가 제창한 기하평균(geometric mean)을 사용하여 대칭되는 행렬의 역수관계를 유지 하도록 하여 중요도를 산출하였으며, 전문가 집단응답을 바탕으로 지하차도 재해 예방·제어 시스템개선 계층구조에 대한 분석을 하였다. 더불어 표본 구성의 특성은 SPSS IBM25를 이용하여 빈도 분석, 기술통계분석을 통해 자료의 특성을 반영하였다.

분석결과

AHP전문가 모집 특성

연구를 위해 2020년 7월부터 8월까지 Fig. 4와 같이 토목, 도시, 교통, 기계, 안전(건설, 전기, 소방), 품질(토목, 건축) 분야 기술사(중복보유로 대표기술사 반영)를 보유하고 10년 이상 경력을 소유한 20명을 대상으로 설문조사를 하였다.

- 3) 감사원, 국토교통부, 행정안전부, 소방청, 서울시, 한국토지주택공사, 한국도로공사 자료와 개인논문 등의 선행연구를 참고하여 재구성 함
- 4) 「경관법」, 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」, 「도시지역 지하도로 설계지침」, 「도로설계편람」 등
- 5) 「화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률」, 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」, 「도로터널의 화재안전기준」 등
- 6) 「자연재해 대책법」, 「지하 공간 침수방지를 위한 수방기준」, 「도로배수시설 설계 및 관리지침」 등



Fig.4. Characteristics of specialist group

응답의 일관성 검증

쌍대비교에 대한 AHP 분석 과정으로 문제구명의 요소를 목표→평가 기준→대안의 계층구조를 설정하고, 다음 단계로 평가 기준에 대하여 대안의 중요도를 평가한다. 람다(λ)로부터 일관성 지수(C.I. : Consistency Index) = (λ max - n) / (n - 1) 계산을 통해 응답의 일관성 비율(C.R. : Consistency Rate)을 검증 하였다. 이 연구에서는 Saaty가 제안한 ∑_i w_i = 1로 표준화 하여 분석하였다. 이 결과, 평가 기준 항목 별 일관성 비율은 0.006으로 0.1보다 작아 일관성을 확보하였다. 더불어 대안의 항목 별 일관성 분석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Verification of consistency

Criteria	Cr ≤ 0.1	Measurement of Inconsistency	Cr ≤ 0.1
교통사고			0.0040
화재, 폭발	0.006	법, 제도 / 계획, 설계, 유지관리 / 인적요소 / 환경요소	0.0043
침수			0.0037

상위단계 쌍대비교에 대한 결과, 평가 기준 상대적 중요도 순위는 교통사고(가중치 w=0.442) 화재/폭발(w=0.344), 침수(w=0.213) 순으로 중요도 순위가 나타났다. 구체적 내용은 Table 3과 같다. 즉, 지하철도 재해 예방 제어 시스템개선을 위해 우선하여 고려해야 할 평가 기준은 교통사고로 나타났다. 다음으로 화재, 폭발 또한 교통사고에 가깝게 중요시하는 결과가 나타났다. 이는 대부분의 재해가 교통사고와 화재, 폭발에 기인한다고 보았기 때문이라고 볼 수 있다. 고유치는 3.006이며 C.I.는 0.03으로 나타나 충분히 일관성이 있다.

Table 3. Priority ranking of higher level criteria

Number	Criteria	weights	Rank	Graph
A1	교통사고	0.442	1	
A2	화재, 폭발	0.344	2	
A3	침수	0.213	3	

λ max = 3.006 C.I. = 0.03 = (3.06 - 3) / (3 - 1)

대안의 중요도와 우선순위

지하차도의 폐쇄적인 환경과 운전 부주의 등으로 지하차도 내 교통사고가 발생하며, 교통사고는 화재의 발화점 발생에 주 원인이 된다. 또한 지하차도와 같이 폐쇄적 공간에서의 화재는 강도 높은 인명피해를 수반한다. 덧붙여, 국지적 집중호우에 의해 순식간에 발생하는 지하차도 내 침수로 많은 인명피해가 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 세 가지 평가 기준(A1 교통사고, B1 화재/폭발, C1 침수)의 쌍대비교를 하였다.

먼저 교통사고 요소에 관해 살펴보면, 쌍대비교 결과 Table 4에서처럼 교통사고 관리를 위해, 법, 제도(w=0.345)가 먼저 개선되어야 하며, 다음 순으로 계획, 설계, 유지관리(w=0.338)가 고려대상이며, 인적 요소(w=0.213), 환경요소(w=0.105)순으로 중요도가 확인되었으며, λ_{max} 값은 4.107이며, C.I 값은 0.036이다. 이 경우와 같이 Ministry of the Interior and Safety(2020) 주도로 도로 속도를 낮추는 “안전속도 5030”을 전국 68개 구간에 시범 도입한 결과 사고 건수는 13%, 사망자 수는 63%로 감소한 것으로 나타남에 따라, 법제도 개선 효과를 확인하였다.

Table 4. The importance ranking of the pairwise comparison of criteria and alternatives in traffic accidents

Number	Alternatives	weights	Rank	Graph
AB1	법, 제도	0.345	1	
AB2	계획, 설계유지관리	0.338	2	
AB3	인적요소	0.213	3	
AB4	환경요소	0.105	4	

A1 : 교통사고, λ_{max} =4.107 C.I. =0.036

다음으로 화재/폭발요소 평가 기준과 대안 요소의 쌍대비교를 보면 Table 5에서처럼 법, 제도(w=0.413), 계획, 설계, 유지관리(w=0.402), 환경요소(w=0.110), 인적요소(w=0.075) 순으로 중요도가 도출되었으며, λ_{max} 값은 4.115이며, C.I 값은 0.038이다. 이 경우와 같이 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2020)는 사매2터널 화재 이후 신규 터널은 터널 내 제연설비, 터널 외 진입차단설비, 정보표지판을 3등급(현재 2등급)까지 의무화(방재지침 개정 20.6)하고, 운영 중인 터널 가운데 대피시설이 미흡하거나 위험차량 운행량이 많은 터널(114개소, 전체 3등급의 20%) 위주로 방재 시설 보강을 추진할 예정이다. 또한 Seoul Metropolitan Government(2018)에서는 지하차도 등의 화재에 대비하여 1,000m 이상 설치하는 제연설비 기준을 500m로 강화하였다. 덧붙여, Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2016)는 비상시 원활한 승객 탈출과 소방대의 진입을 위해 외부(지상) 대피 통로에 관한 기준을 제시하였으며, 국내에는 한국토지주택공사에서 광장 지하차

Table 5. The importance ranking of the pairwise comparison of criteria and alternatives in fire and explosion

Number	Alternatives	weights	Rank	Graph
AB1	법, 제도	0.413	1	
AB2	계획, 설계유지관리	0.402	2	
AB3	인적요소	0.075	4	
AB4	환경요소	0.110	3	

A2 : 화재, 폭발, λ_{max} =4.115 C.I. =0.038

도(준공2009, 판교, 연장 2,297m), 주주 지하차도(준공2012, 세종시, 연장 2,803m)등에 외부(지상) 대피통로(계단+엘리베이터)를 설치하였다. 아울러, 미국 도로터널 기준(NFPA-502)에서는 터널 전 구간에 걸쳐 300m 간격을 초과하지 않는 외부 탈출구를 계획하도록 규정하고 있다.

아울러, 침수의 평가 기준과 대안 요소 간의 쌍대비교결과, Table 6에서처럼 계획, 설계, 유지관리(w=0.360), 환경요소(w=0.290), 법, 제도(w=0.242), 인적요소(w=0.107) 순으로 중요도가 도출되었으며, λ_{max} 값은 4.100이며, C.I 값은 0.033이다. 이 경우와 같이 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2017)는 인천 북항터널 침수의 원인을 설계 및 유지관리 부실 등의 복합적인 사유로 보았으며, Korea Land and Housing Corporation(2013)는 외부유입면적 산정 부적정, 환기구 및 유지관리 출입구 우수유입 미 고려 등 설계부실과 지하차도 구간 외 외부유입수의 배수처리 및 차단 불량 등 유지관리 부실 등의 복합적인 사유로 지하차도가 침수된다고 하였다. 아울러, The Board of Audit and Inspection of Korea(2019)에서는 지하차도 배수 시설 설계(집수유역면적 산정 오류, 강우 설계 빈도 적용 오류) 및 관리기준(수 배전반 침수대책 미비) 부적정 등의 사유로 침수가 발생하였다고 판단하였다.

Table 6. The importance ranking of the pairwise comparison of criteria and alternatives in inundation

Number	Alternatives	weights	Rank	Graph
AB1	법, 제도	0.243	3	
AB2	계획, 설계유지관리	0.360	1	
AB3	인적요소	0.107	4	
AB4	환경요소	0.290	2	
A3침수, $\lambda_{max} = 4.100$ C.I. = 0.033				

덧붙여, Table 7을 보면 평가 기준의 대안에 관한 중요도에 대한 순위는 계획, 설계, 유지관리요소가 1순위로 확인되었고, 법, 제도가 2순위, 인적 요소가 3순위, 환경요소가 4순위로 확인되었으며, 이는 계획, 설계, 유지관리는 재해 예방 및 제어를 위해 즉시 실행할 수 있음에 따라 쌍대비교결과 중요한 대안으로 선택되었다고 판단된다.

Table 7. Pairwise comparison of the importance of evaluation criteria

Number	Alternatives	weights	Rank	Cr < 0.1	Graph
D1	법, 제도	0.254	2	0.030	
D2	계획, 설계유지관리	0.448	1		
D3	인적요소	0.167	3		
D4	환경요소	0.131	4		
$\lambda_{max} = 4.080$ C.I. = 0.027					

평가기준과 대안의 우선도 분석

본 연구에서는 각 평가 기준의 가중치를 대안의 가중치 값에 곱하여 합산한 것을 각 대안의 우선도라 하며 계산결과는 Table 8과 같다. 이에 따라 지하차도 전문가들은 B2: 계획, 설계, 유지관리를 화재, 폭발 예방 관리시스템으로 채택하였다. 이

러면, 중요도 순위가 높게 나타난 A1: 교통사고 대안 하위요소 중 법, 제도가 아니라 교통사고의 평가기준 다음으로 중요시 된 A2: 화재, 폭발 평가기준 대안에서 높게 나타난 B1:법, 제도(W=0.413)가 아닌 2번째로 높게 나타난 B2: 계획, 설계, 유지 관리(W=0.402)가 선택된 것에 관심을 가져야 한다.

Table 8. Eigenvectors (importance) of the pairwise comparison matrix for the evaluation criteria and the evaluation criteria importance

구분	B1:법, 제도	B2:계획, 설계, 유지관리	B3:인적요소	B4:환경요소	평가기준의 고유벡터 Wc =
A1:교통사고 $W_{A1}^T =$	0.345	0.338	0.213	0.105	0.442
A2:화재, 폭발 $W_{A2}^T =$	0.413	0.402	0.075	0.110	0.344
A3:침수 $W_{A3}^T =$	0.243	0.360	0.107	0.290	0.213

우선도 계산결과 0.3035(2위) 0.3643(1위)^{주1)} 0.1427(4위) 0.1460(3위)

주1) B2. 계획, 설계, 유지관리의 우선도=0.442×0.338+0.344×0.402+0.213×0.360=0.3643(1위)

다중응답 의사결정통합순위

3개의 평가기준영역(재해)과 대안 4개를 통합한 12개 대안의 가중치와 중요도 순위를 분석한 결과는 Table 9과 같다. 4위 안에 포함된 대안을 살펴보면 화재, 폭발의 평가 기준에 관한 대안으로 법, 제도(w=0.138)가 가장 높은 우선순위로 확인되었다. 전체 2순위로는 화재, 폭발 평가 기준과 대안의 계획, 설계, 유지관리(w=0.134), 침수의 평가 기준과 대안 요인 중 계획, 설계, 유지관리(w=0.120), 교통사고 평가기준의 대안요소 중 법, 제도(w=0.115)순으로 중요도가 나타났다.

Table9. Decision integration ranking through multiple responses

Criteria	Alternatives															
	B1법제도				B2계획, 설계, 유지관리				B3인적요소				B4환경요소			
	weights	Rank	통합 가중치	통합 순위	weights	Rank	통합 가중치	통합 순위	weights	Rank	통합 가중치	통합 순위	weights	Rank	통합 가중치	통합 순위
A1교통사고	0.345	1	0.115	4	0.338	2	0.113	5	0.212	3	0.071	8	0.105	4	0.035	11
A2화재, 폭발	0.413	1	0.138	1	0.402	2	0.134	2	0.075	4	0.025	12	0.110	3	0.037	9
A3침수	0.242	3	0.081	7	0.360	1	0.120	3	0.107	4	0.036	10	0.290	2	0.097	6

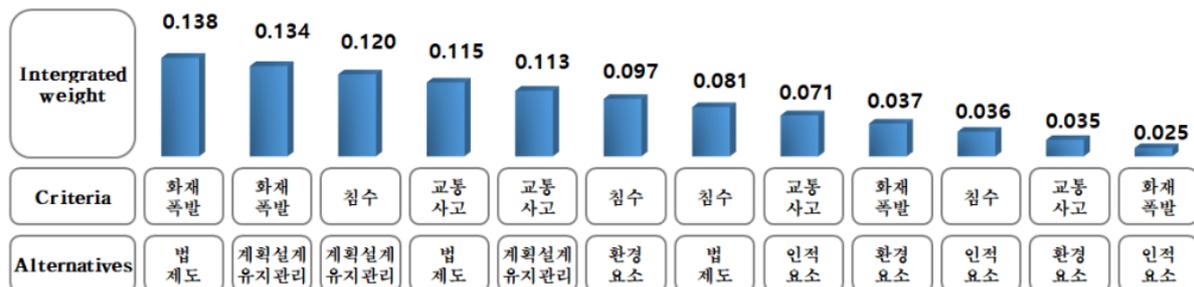


Fig. 5. Importance ranking of overall alternatives

또한 고유벡터의 중요도는 화재, 폭발의 평가 기준에 대한 대안 요소 중 인적 요소만 중요도가 0.1보다 작았으며, 다른 대안 요소는 0.1 이상으로 도출되어 지하철도 재해 예방·제어 시스템개선에 중요한 요인으로 확인되었다. 더불어 대안평가중요도 분석에서 계획, 설계, 유지관리가 가중치 0.448(Table 7 참조)로 지하철도 재해 예방·제어 시스템개선에 가장 중요한 요인으로 드러났다. 전체 대안의 중요도 순위는 다음 Fig. 5와 같다.

결론

도시공간의 효율적 이용과 교차로 통행 개선 등으로 인해 지하철도 설치가 많아지고 있으나, 지하철도에서는 교통사고, 화재, 폭발 및 침수 등의 재해가 빈발하게 발생하고 있으며 이는 일반도로에서 발생하는 일반적 재해보다 치사율과 인명피해가 더 크다. 이에 따라 지하철도 내 발생 재해를 효과적으로 예방·제어하고자 관련 시스템을 개선하기 위해 재해와 관련된 요소(대안)를 ①법·제도, ②계획·설계·유지관리, ③인적 요소, ④환경 요소로 나누고 계층분석법(AHP)을 활용한 전문가(기술사) 설문을 하였다.

설문 결과 평가 기준 영역인 재해의 상대적 중요도는 ①교통사고 ②화재, 폭발 ③침수 순으로 나타났다. 이는 도로교통공단의 분석결과와도 일치하며, 화재·폭발의 원인이 교통사고에 기인하고, 침수는 장마철에 국한된 계절적 특성에 기인한 것으로 보인다. 다음으로 평가 기준과 각 대안의 우선도 분석결과는 ①계획, 설계, 유지관리 ②법, 제도 ③환경요소 ④인적 요소로 확인되었다. 이는 재해 예방·제어를 위해 지체 없이 실행 가능한 대안이기 때문이라 판단된다.

그러나 재해와 대안을 통합한 12개 대안을 상대로 가중치와 중요도를 분석한 결과 화재, 폭발과 연관된 법, 제도와 계획, 설계, 유지관리가 각각 1순위와 2순위로 결정되었다. 즉, 지하철도 내 화재나 폭발 발생 시 지하철도가 지하에 위치하고 좁고, 길고, 밀폐된 공간적 특성으로 인해 열 축적이 쉽고, 유독가스 제어 및 배연이 어려워 유독가스 흡입과 시야 확보 곤란으로 대피경로 확보가 쉽지 않은 등의 문제로 사매터널과 같이 대규모 인명피해가 발생함에 따라 화재, 폭발과 관련한 요소(법, 제도 / 계획, 설계, 유지관리)가 재해 예방·제어 시스템 개선을 위해 최우선으로 고려되어야 한다고 본다.

먼저 화재 관련 법·제도에는 「화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률», 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침», 「도로터널의 화재안전기준(NFSC 603)」 등이 있으며, 다양한 전문가 및 현장 의견을 수렴하여 연장에 따른 연장등급과 위험도 지수에 의한 방재등급에 의해 결정되는 방재 시설(외부피난계단, 물 분무 설비 등) 강화와 등급조정(연장하향, 지수조정 등)이 필요하다. 또한, 적절한 예산반영을 선행조건으로 계획 및 설계 시 화재 강도를 고려한 합리적 시뮬레이션으로 최적의 환기 설비 및 방재 시설을 반영해야 하며, 유지관리 때에는 사고예방, 초기대응, 피난대피, 소화 및 구조 활동, 사고확대방지를 기본목적으로 하고 관련 시설의 지속점검 및 업데이트와 종사들의 교육과 유관기관과의 협업 등이 필요하다. 본 연구는 효과적인 재해 예방과 제어의 적정선 확보와 가용 예산 등을 고려하여, 연장등급 및 방재등급 강화의 정도와 같은 합리적 법, 기준 개정사항을 제시하지 못한 한계가 있다. 향후 연구자는 재해 발생 시 피해 최소화를 위해 법, 기준 세부 개정사항과 신기술, 신공법 등의 적용을 기반으로 다양한 해법을 위한 대책에 관하여 구체적 하위계층을 반영한 연구가 이루어지기를 제안하고자 한다.

References

- [1] Bae, M.J. (2019). A Study on the Establishment Plan of the Traffic Accident Prevention Measures by Analyzing Influencing Factors per Traffic Accident Occurrence Type. MS, Pusan National University, pp. 6, 44-50.
- [2] Cho, S.T., Song, K.H., Lee, H. (2008). "Design of Sejong underpasses with functionality and economy." Korean Society of Road Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 58-67.
- [3] Goo, B.C., Hwang, M.K., Jeong, D.D. (2011). Analysis on development factors for improvement of R&D performance using AHP: Cases of Korea and UK. Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning, p.70.
- [4] Heo, S.Y., Cho, M.S., Lee, Y.G. (2016). "Analysis of relative importance of factors in Korea's new renewable energy policy using hierarchical analysis (AHP)." Innovation Studies, Vol. 11, No. 1, p. 30, 32.
- [5] Jin, K. (2019). A Study on the Improvements of Risk Index through the Analysis of Large Road Tunnel Fire." MS, Yonsei University, p. 1-2, 8, 51, 63, 73-76.
- [6] Jo, J. (2018). A Study on Improvement of the Risk Rating Method of Road Tunnel Based on Traffic Accident Data." MS, Yonsei University, p. 9-12, 78-79, 83-85.
- [7] Joint association of related ministries of South Korea (2020). Expansion Installation of the Point to Point Speed Enforcement Systems in Vulnerable Tunnels of Traffic Accidents.
- [8] Joint association of related ministries of South Korea (2020). Traffic accidents in tunnels have occurred 3,218 times in the past five years, with 7,472 casualties.
- [9] Kim, H.G., Yun, S.U. (2010). "Disaster prevention plan of deep underground roads-focused on fire control." Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 10, No. 3, pp. 20-32.
- [10] Kim, H.K., Kim, S.C. (2011). Disaster Prevention Counterplans for Deep Underground Road and Undersea Tunnel. Collection of proceedings at the Conference of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 804-809.
- [11] Kim, J.H., Kwon, S.H., Chung, G. (2016). "Research on emergency response plans for flood in a multi-purpose tunnel." Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 16, No. 1, pp. 125-129.
- [12] Kim, N.Y., Jo, J.B., Kim, J.W. (2011). "Counterplan to prevent long-range underground roads in urban areas." The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 40, No. 4, pp. 4-10.
- [13] Kim, P.D. (2018). "A study on paradigm shift in safety of long and bigger urban underpasses: Focusing on the implementation of Korea Land and Housing Corporation." MS, Kyonggi University, p. 2, 19, 50.
- [14] Koo, H.M. (2015). A Study on Integrated System of Disaster Management on Road Tunnel. MS, Gachon University, p. 1-2, 24-25, 64-69.
- [15] Korea Communications Commission (2019). Prevent Secondary Car Accidents by Broadcasting an Alarm 500 meters ahead of the Tunnel where the Traffic Accident Occurred.
- [16] Korea Express Corporation (2016). A Study on the Reduction of Highway Traffic Accidents. Vol. 1, pp. 18, 57, 65-67.
- [17] Korea Express Corporation (2016). A Study on the Reduction of Highway Traffic Accidents. Vol. 2, pp. 8-19.
- [18] Korea Expressway Corporation (2018). A Study on the Comprehensive Countermeasures for the Improvement of Traffic Flow Condition and Safety in Tunnel Areas of Expressways. p. 15, 19, 29, 32, 127, 128.
- [19] Korean Institute of Fire Science & Engineering (2013). A Study on the Analysis of the Risk Characteristics and the Improvement of the System in Underground Space. pp. 6-11, 16, 31-32, 41.
- [20] Korea Land and Housing Corporation (2013). Establishing an Optimization Plan for Collector wells in Underground Roads.
- [21] Lee, C.J., Kim, H.B., Seo, M., Song, Y.S. (2016). "Strengthening the highway evaluation system, considering traffic

- safety.” The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 64, No. 1, pp. 54-62.
- [22] Lee, D.H., Ko, Y.J., Lee Y.C. (2007). A Study on Appearance and Lighting of the Entrance to Underground Road-focused on the Case of Song do Seaside Road. Korean Society of Design Science, pp. 224-225.
- [23] Lee, D.W. (2017). A Research on The Reduction of Fatality in Tunnel Traffic Accidents. MS, Chung-Ang University, pp. 8-10, 15, 38, 71.
- [24] Lee, D.Y., Lee, K.H., Kyung, M.S., Kim, H.S. (2007). Flooding Analysis and Modeling for Underground Roadway”, Korean Society for Civil Engineers, pp. 2668-2673.
- [25] Lee, J.H. (2007). “Evaluation of drain pump system by inundation analysis in urban underground passage.” Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 8 No. 5, pp. 1192-1200.
- [26] Lee, Y.J., Kim G.C., Park, H.J. (2011). “A study on effectiveness for car-crash fires prevention through a full-length speed enforcement system in highway tunnels.” Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No.51, pp. 119-127.
- [27] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016). Design Guidelines for Underground Roads in Urban Areas. pp. 238-239.
- [28] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017). BukHang Tunnel Flooding caused by Drainage Pump Facility, which was not Functioning due to Torrential Rains.
- [29] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020). Special Counterplan to Strengthen Road Traffic Safety for the Innovative Reduction of Traffic Accidents- Focused on the Improvement of Road Infrastructure.
- [30] Ministry of the Interior and Safety (2019). Intensive Inspection of Preparations for the Rainy Season and Typhoon.
- [31] Ministry of the Interior and Safety (2020). The Government will Prevent Casualties by Strengthening Management of Underpasses to Flood Them.
- [32] Ministry of the Interior and Safety and Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020). The Introduction of “National urban safety speed 5030” will be accelerated.
- [33] National Fire Agency (2019). Development of Initial Detection and Fire Control System for Tunnel Fire and Vehicle Fire in Underground Space. pp. 151-154, 314.
- [34] Park, H.G., Jo, H.J., Sim, S.H., Sim, J.B. (2008). “Design of long and bigger urban underpasses with New Concept.” Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 2, pp. 62-70.
- [35] Road Traffic Authority, Traffic Accident Analysis System(TASS)/Stat/Traffic Accident Detail Statistics, <http://taas.koroad.or.kr/>
- [36] Seoul Metropolitan Government (2005). A Study on Inundation Prevention and Evacuation Systems of Underground Spaces in Seoul. Seoul Development Institute, pp. 9-18, 28, 109-112.
- [37] Seoul Metropolitan Government (2010). A Study on the Safety System Planning Strategy of Underground Space in Seoul. pp. 4-5, 39, 52-53, 57-58, 89-93, 127-129.
- [38] Seoul Metropolitan Government (2018). Increasing installation of smoke removal facilities on tunnels and underpasses in case of fire in Seoul City.
- [39] Seoul Metropolitan Government (2019). Opening Yeomgok East West Underpass 27 (Friday) and Geum Ha Underpass 28 (Sat) on Gangnam Circulation Road.
- [40] Seoul Metropolitan Government (2020). Measures to Prevent Flood Damage in Underpasses.
- [41] Son, A.L., Han, K.Y., Kim, I.J. (2013). Optimal Operation Model of Drainage Pump Station for Reduction in Urban Inundation. Koreans Society of Civil Engineers, pp.1875-1877.
- [42] The Board of Audit and Inspection of Korea (2019). Inspection on Safety Management of Underpasses in Metropolitan Areas, pp. 4-12.