

## 교통사고 검지 기술 동향과 음향 신호 기반 기술 도입 효과 연구: 터널 및 지하도로를 중심으로

Study on the Trend of Traffic Accident Detection Technology and the Effect of  
Introducing Acoustic Signal-based Technology



윤일수



윤여환



조용성

### 서론

우리나라의 지형 특성상 전체의 70%가 산지로 이루어져 있어 도로를 연결하기 위한 터널이 지속적으로 증가하고 있다. 또한 도심의 경우에는 도심 경관 보호 및 공간 사용 용이성 등으로 인해 지하도로의 활용이 증시되고 있다.

국토교통부에서 발간된 「도로업무 편람」(국토교통부, 2022)에 따르면, 터널과 지하도로의 연장이 지속적으로 증가하는 추세로 보고되었으며, 예산 편성에서도 비중이 확대되고 있다. 또한, 토목 기술이 진보함에 따라 터널 또는 지하도로의 연장도 늘어나 화재 등 이에 따른 폐쇄된 공간에 대한 위험성도 점차 부각되고 있다(채재묵, 2022).

터널과 지하도로 같은 폐쇄 공간은 교통사고와 같은 돌발상황 발생 시, 여러 가지 측면에서 문제가 심각해질 수 있다. 첫 번째, 교통적인 측면에서 교통사고 발생 시, 극심한 정체를 유발할 수 있다. 때문에

교통사고를 빠르게 인지하여 유입되는 후속 차량에게 신속히 전파하여 정체를 방지하도록 유도해야 한다. 두 번째, 사회적인 측면에서는 화재 또는 2차 사고로 인해 인명피해와 직결될 수 있다. 화재의 경우 밀폐 공간의 특성으로 주변 차량에 쉽게 번지고 연기로 인한 질식과 같은 심각한 피해가 발생할 수 있다. 실제로 1999년에 몽블랑 터널 화재의 경우, 주변 차량이 모두 타버렸으며 환기가 되지 않는 구조로 질식하여 총 39명이 사망하는 사건이 발생하였다.

이러한 터널 및 지하도로의 위험성으로 인해 국토교통부는 「도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침」을 공포하여 재해 시 위험을 최소화할 수 있는 방안을 제시하고 있다(국토교통부, 2020). 해당 지침에 의하면 일정 등급 이상 터널에는 통합관리센터 필수로 설치해야 하며, 터널 내 교통사고와 같은 돌발상황 발생을 집중 모니터링 할 수 있는 시스템이 설치되어 있어야 한다. “터널 교통통합관리 시스템”이라 지칭되는 이 시스템을 통해서 관리자는

윤일수 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수, ilsooyun@ajou.ac.kr, Phone: 031-219-3610, Fax: 031-215-7604

윤여환 : 한국건설기술연구원 선임연구위원, kicthyh@kict.re.kr, Phone: 031-910-0193, Fax : 031-910-0339

조용성 : 한국지능형교통체계협회 R&BD센터 센터장, standard@itskorea.kr, Phone: 031-478-0403, Fax: 031-478-0491

각 종 설비들을 모니터링 및 제어할 수 있다. 또한 해당 시스템에는 유고검지 시스템이 포함되어 있어야 한다.

앞서 제시한 위험한 돌발상황 발생 시, 유고검지 시스템은 자동으로 돌발상황을 감지하여 운영자에게 알림을 주는 역할을 한다. 해당 시스템으로 인해 운영자는 신속하게 돌발상황을 인지하고 2차 사고를 예방하는 역할을 수행한다.

본 연구는 현재 운영 중인 각 유고검지 기술의 장단점을 분석을 통해 정확하고 신속하게 유고사항을 파악할 수 있는 기술 개발 동향을 알아보하고자 한다. 특히, 최근 확대되고 있는 음향 기반의 유고검지 기술의 활용 가능성을 점검하고자 한다.

## 관련 이론 및 문헌 고찰

### 1. 터널 교통통합관리 시스템 개요

#### 1) 터널 교통통합관리 시스템 목적

터널 통합관리 시스템은 터널에 설치되어있는 시설물들을 유지관리하고 유고나 교통사고와 같은 위험 상황 속에서 터널 내 이용자들의 안전을 도모하는 데 목적이 있다. 예를 들면, 터널 내 스모그가 발생하거나 이산화탄소 농도가 전해질 경우, 제트팬을 이용해 환기를 시킨다. 또는, 교통사고 발생 시 가변문자전광표지판(variable message sign, VMS), 차로 제어시스템(lane control system, LCS), 비상방송과 같은 표출시설을 이용하여 신속한 알림을 전파한다.

#### 2) 터널 교통통합관리 시스템 기능

터널 교통통합관리 시스템은 크게 시설물과 ITS 설비로 구분되며, ITS 설비에는 수집부와 표출부로 나뉜다.

시설물은 터널의 기본 상태를 유지하기 위한 설비로 터널 내 환기를 위한 제트팬, 측류팬이 있고, 전기 설비를 안전하게 유지하기 위한 누전경보기, 터널 안과 밖의 시야를 암순응에 유연하게 조절하기 위한 조명 제어기, 그리고 화재 시 소화전을 통해 화재를 감지할 수 있는 수동 및 자동 화재감지기

가 포함되어 있다.

ITS 설비의 수집부에는 차량 속도를 측정하는 검지기(vehicle detection system, VDS), 유고 상황 시 위급상황을 전할 수 있는 긴급전화, 터널 내 현장을 감시할 수 있는 CCTV가 있다. 그리고 표출부에는 가변문자를 표시하는 VMS, 이용 가능한 차로를 심볼로 표시하는 LCS 그리고 안내방송을 할 수 있는 비상방송이 있다.

### 3) 터널 교통통합관리 시스템의 개선에 대한 요구

최근 내연차뿐만 아니라 전기차의 화재가 심각한 문제로 대두되고 있다(강성욱 외, 2021). 전기차의 화재는 내연차와는 다르게 진압 방법이 다른데 화재 시에 감지 및 대응 자체를 구축 된지 꽤 지난 터널 교통통합관리 시스템에서 감당할 수 있을지에 대한 의문점이 존재한다. 또한 유고검지 시스템의 부재 시 발생할 수 있는 대응 방법과 시간을 심각하게 고려해봐야 한다. 따라서, 기존의 터널 교통통합관리 시스템이 내연차가 아닌 전기차의 화재에 강건하게 대응할 수 있는 지를 전체적으로 점검해야 할 시점이라 판단된다.

## 2. 유고검지 시스템 개요

### 1) 유고검지 시스템 목적

유고검지 시스템은 「도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침」에 의하면 자동사고감지설비로 이루어지는 전체 시스템을 지칭한다(국토교통부, 2020). 자동사고감지설비는 자동으로 감지된 유고상황을 운영자에게 경보하는 장치를 말한다. 설치기준에서는 선택 사항으로 설치의 필요성 검토에 의한 것으로 명시되어있다.

### 2) 유고검지 시스템 종류별 기능

유고검지 시스템은 크게 영상식과 레이더식, 그리고 음향식을 설치하여 사용 중이다. 영상식 유고검지 시스템은 CCTV에서 수집된 영상을 통해 이미지 프로세싱 기술을 통하여 시각적인 유고상황을 자동으로 판단하는 기능이다. 반면 레이더식 유고

검지 시스템은 레이더 기술을 통하여 수집된 물체나 객체를 통하여 특이상황을 판별한다. 최근 확대되고 있는 음향식 유고검지 시스템은 마이크를 통하여 음향을 수집하고 이를 통하여 일반적이지 않은 음향을 구별해내는 기능을 가지고 있다.

### 3. 유고검지 시스템 관련 연구 동향

각 유고검지 시스템의 검지 방법에 대한 기술적인 부분을 논문을 통해 조사해 보았다.

#### 1) 영상 기반 연구

영상의 경우 최근 딥러닝 기반의 알고리즘이 연구되고 있는 것으로 조사되었다. Lee et al.(2021)은 YOLO(you only look once) 알고리즘을 이용하여 유고상황을 검지하여 2차 사고를 방지하는 알고리즘을 개발하였고, 이를 대구, 광주, 부산에 일부 도로에 적용하여 운용 중에 있다고 밝히고 있다.

Lee et al.(2019)는 Faster CRNN(convolution recurrent neural network) 알고리즘을 CCTV 이미지 내에 적용하였고 이를 통해 10초 내에 터널에 일어난 유고사항 4가지(역주행, 정지차량, 보행자, 화재) 등을 검지하는 기능에 대해 연구하였다.

#### 2) 레이더 기반 연구

레이더를 통한 유고상황을 검지하는 논문 중에서 Kim et al.(2018)은 Radar System Delphi ESR에 새로운 모듈인 RWM(road watch module)을 추가한 연구를 진행하였다. 이 기술을 통해 기존의 방법에 비해 실시간으로 유고검지를 활용할 수 있으며 검지율 또한 향상되는 결과를 얻은 것으로 확인되었다.

Felguera-Martín et al.(2012)는 기존 레이더 시스템의 한계를 극복하고자 2개의 레이더 시스템을 통해 보다 안전한 도로 안전 시스템을 구축할 수 있는 방안을 제시하였다.

#### 3) 음향 기반 연구

음향기반검지 시스템은 영상 및 레이더에 비해

저렴하고 방향성을 가지지 않는다는 장점을 가진다는 점에서 활발히 연구가 진행되어 왔다.

장진환(2019)은 머신러닝의 HMM-GMM 알고리즘을 이용한 분석 알고리즘에 대한 연구를 진행하였다. 연구 결과, 실제 터널의 운영 결과로 94%의 검지율과 2초 이내의 신속한 검지를 할 수 있는 것으로 확인이 되었다.

Kim et al.(2019)은 이상음 감지를 위한 알고리즘을 2단계 방법을 제시하여 전처리 구간에서의 non-negative tensor factorization(NFT) 기술과 CRNN을 이용한 학습 알고리즘을 제시하여 딥러닝의 적용 가능성을 확인하였다.

또한, Yan and Ko(2021)는 deep neural network을 이용한 사고음 감지 기술을 연구한바 있다.

#### 3) 시사점 도출

최근에 사고를 감지하기 위한 기술은 노면 비접촉 방법인 영상, 레이더, 음향 등으로 확대되고 있다.

현재 국토교통부 지침에는 유고검지 시스템의 유형이 레이더와 영상을 기준으로 규정되어 있다. 하지만 최근 서울시 선도적 지자체에서는 국토교통부의 지침에 음향기술을 포함하는 유고검지 시스템으로 확대하고 있다. 대표적인 예로 서울시에서 적용하고 있는 3Mix는 레이더, 영상 및 음향을 통합한 검지시스템으로 검토 단계를 끝내고 실제 사업에 적용되고 있다.(남산1호터널, 구룡터널, 위례터널, 위례지하차도 등)

## 유고검지 기술 비교

### 1. 유고검지 기술 발전 동향

교통사고 검지 기술의 발전 경과를 살펴보면, 최초에는 교통관리 시스템에 VDS라는 차량 검지 센서를 통해 교통관리 시스템으로 차량의 속도, 점유율 그리고 교통량 등을 확인하는 것으로 지능형 교통관리 시스템이 시작되었다. 이후 CCTV라는 영상 센서의 발달로 도로를 육안으로 모니터링 하는 기술이 발달 하였고, 2002년에는 VDS를 통해 최초 사고 자동 감지 알고리즘이 탄생했다.

또한 2006년에는 레이더 검지기가 개발 되어 교통량, 속도, 차종 등을 검지할 수 있게 되었고, 2011년에는 영상을 통해 사고를 감지할 수 있게 된다. 이후 사고의 위험성을 인지한 국토교통부는 2015년에 한국지능형교통체계협회와 함께 돌발상황 검지 시스템 표준 규격안을 발표한다.

2016년도에는 레이더를 통한 사고 검지 시스템이 개발 되었으며 2018년도는 최초로 인공지능이 탑재된 영상 사고자동감지 시스템이 개발된다. 이어서 음향을 통한 딥러닝 사고자동감지 시스템도 개발된다.

## 2. 영상 유고검지 시스템 조사

영상 유고검지 시스템의 현황 파악을 위해 부산시의 특정 터널의 설치 사례를 확인해 보았다. 영상 CCTV는 약 100m 간격으로 설치되어 있고 운영자의 의견과 실제 데이터를 분석한 결과 환경적인 요인으로 인한 과검지와 미검지가 현저히 많은 것을 알 수 있다. 또한, 영상 유고검지 시스템은 주로 사고 검지를 위해 사용되기보다는 실시간 영상 모니터링 위주로 사용되고 있었다.

인프라 구조상, 사고 검지용 카메라와 모니터링 카메라가 분리되어 설치되어야 하지만 예산 및 설치 환경 여건상 동일 카메라로 운영되고 있었다. 이

로 인해 카메라 제어, 영상 불량, 조도 영향 등으로 인한 오검지 건수가 하루 평균 약 55건에 달하는 것으로 확인되었다. 뿐만 아니라, 검지율 역시 일주일 기간 동안에 총 6건의 충돌사고 중 1건도 검지하지 못한 것을 확인하였다. 현장 운영자에 의하면, 사고는 특정 화면만 표시하는 카메라에서 발생할 확률도 적을 뿐더러, 사각지대나 조도에 의해 시야가 없는 곳에 대한 확인이 어렵다는 의견이 있었다.

오주택 외(2009)는 단속류 사고검지 오인인식 유형을 분석하였으며, 많은 유형으로 인해 영상 오검지가 발생하는 것을 표 1과 같이 제시하였다.

## 3. 레이더 유고검지 시스템 조사

본 연구에서는 서울시의 레이더 유고검지 시스템 설치 사례를 확인해보았다. 해당 터널에는 터널 내에 굴곡이 존재하였으며 약 200m마다 설치가 되어 있었다. 검지 및 오검지에 대한 정확한 데이터를 입수하지는 못하였지만, 운영자의 의견에 따르면 다양한 유형을 검지할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 굴곡과 탐차에 의한 가림 현상이 발생하고 낙하물 또는 보행자에 대한 세부 분류가 미흡하다는 단점도 존재한다. 또한 이벤트에 대한 오검지가 서행 중일 경우 정지 차량 유형으로 자주 발생하는 것으로 파악되었다.

표 1. 단속류 사고검지 오인식 유형분석

사고 오인 유형	문제점
검지구역 안으로 정차한 경우 발생하는 오류	차량이 검지구역 안에서 정차한 후 1주기가 되지 않았지만 사고로 처리하는 오류 발생
야간에 주변 조명이 계속 감지되어 발생하는 오류	야간 조명 변화에 의해 감지되어 오류 발생
차량이 감지되어 발생하는 오류	정지신호를 받은 차량이 감지된 후 1주기가 되는 순간에 사고로 처리하는 오류 발생
그림자에 의해 발생하는 오류	건물그림자가 지속적으로 감지되어 오류가 발생
검지구역이 하얗게 감지되는 오류	특별한 이유 없이 검지구역이 하얗게 인식을 하면서 오류 발생
젖은 노면에 의해 오류가 발생하는 유형	젖은 노면에 의하여 야간에 조명들이 바다에 비춰져서 더욱 예민하게 감지가 되어 오류 발생
차량조명에 의해 발생하는 오류	차량이 검지구역 안에서 정차한 후 1주기가 되지 않았지만 사고로 처리하는 오류 발생
특정시간대에 검지구역의 특정 부분이 하얗게 변하면서 감지되는 오류	새벽 05시 전후 특정 시간대에 사고로 처리하는 오류 발생
햇빛에 의해 발생하는 오류	검지 구역 내 햇빛이 지속적으로 들어와 감지되는 현상 발생

검지율 부분에서도 사고에 대한 자체를 인지할 수 없고, 정체 및 정차 차량에 대한 돌발상황만 인지하기에 사고율 검지에 대한 정확한 확인이 불가하다는 의견이 있었다.

#### 4. 음향기반 유고검지 시스템

##### 1) 기술의 필요성

유고검지 시스템의 운영 과정에서 나타났던 두 가지 오류는 다음과 같다. 실제 유고상황을 유고검지 시스템이 정상이라고 판정하는 Type I 오류와 실제 상황이 정상임에도 불구하고 유고검지 시스템이 유고상황이라고 판정하는 Type II 오류가 존재한다.

일반적으로 Type I 오류가 발생하는 경우 유고 상황에 처한 운전자가 위급상황일 수 있으므로 심각한 오류라고 생각되므로 시스템 운영자들은 Type II 오류의 발생을 감수하고 Type I 오류를 줄이는 방법으로 유고검지 시스템을 그림 1의 우측 그림과 같이 운영을 한 것이다. 유고검지 시스템의 운영을 통해 밝혀진 유고검지 시스템 요구사항 중의 핵심은 Type I 에러와 Type II 에러를 동시에 줄일 수 있는 기술의 개발이라고 할 수 있다. 음향 기술은 앞서 서술한 문제점을 해결해줄 수 있는 방안이다.

여기서 소개하는 음향 기술은 최근 트렌드 기술인 딥러닝 기술을 접목하여 음향을 기반으로 다양한 유고상황을 검지하고 있으며, 딥러닝 기술을 통해 특성곡선을 변화시켜 검지와 오검지에 대한 딜레마를 줄이고 분류 모델을 통해 더 많은 유형의 돌발 상황을 찾아 낼 수 있을 것이라는 기대가 있다.

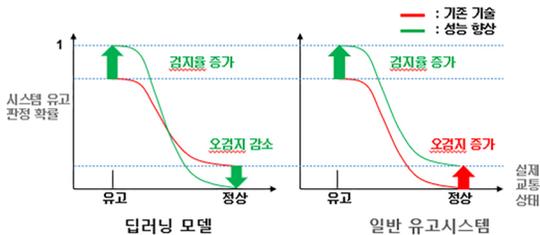


그림 1. 딥러닝과 일반기술의 특성곡선 변화

##### 2) 음향기반 유고검지 시스템의 강점

음향은 회절(diffraction)이라는 특성이 존재한다. 회절이란 음파가 통과할 때 가림부분 뒤편까지 전달되는 특성을 말한다. 때문에 사각지대가 존재하지 않아 주변 가림 현상에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

또한 햇빛이나 조도, 안개, 비 등에 영향을 받아 오검지가 자주 발생하는 영상과는 달리 음향은 환경 변화에 둔감하다.

기존 유고검지 시스템은 교통류의 상태를 모니터링하여 사고를 판별하는데 반해 음향을 기반한 시스템은 순간 발생하는 데이터로 사고를 검지해 낼 수 있어 검지 시간이 빠르다는 강점이 있다.

이 외에도 음향을 통해 도로 유지관리도 가능할 수 있다. 예를 들면 일반 도로에서 발생하지 않던 음원을 지속적으로 검지한다면, 도로 상에 발견되지 않은 이슈, 예를 들어 포트홀이나, 도로 신축이음부 이상 등을 조기에 확인할 수 있다.

##### 3) 음향기반 유고검지 시스템의 한계

국가에서 제시한 돌발상황에는 단순 사고뿐만 아니라 보행자, 낙하물, 역주행 등 사고를 예방하기 위해 필요한 검지 유형들이 존재한다. 하지만 제시한 음향 기술에는 해당 유형들을 검지할 수 없다.

#### 5. 유고검지 기술 비교

유고검지 시스템의 기술 비교에서 확인된 바와 같이 각각의 시스템에는 장단점이 존재한다. 현재 개발된 다양한 센서의 장점과 서로의 단점을 보완할 수 있는 방법을 잘 연결한다면 사고를 검지할 수 있는 검지율을 향상시킬 수 있다.

각 기술의 장점을 살펴보면, 레이더의 경우 다양한 유형을 검지함으로써 사전에 사고가 날 수 있는 예방의 역할을 할 수 있고, 영상의 경우 현장 운영자가 직관적으로 사고 및 위험상황에 대해 모니터링을 할 수 있는 장점이 있다. 특히 작업과 같은 특이상황에 유연한 대응을 할 수 있다.

음향은 제일 큰 장점이 신속한 검지 시간이다. 사고 발생 즉시 소리로 인지하기 때문에 사고에 대한

표 2. 시스템별 비교 및 보완 방안

시스템	단점	보완 방안
영상	탐차에 의한 사각지대 터널 굴곡에 의한 사각 지대 사고 판단 시간 지연 (교통류에 의한 검지) 조도 변화, 안개에 의한 환경 변화	음향 센서를 통한 사고 인지 레이더를 통한 유고 인지
레이더	탐차에 의한 사각지대 터널 굴곡에 의한 사각 지대 사고 판단 시간 지연 (교통류에 의한 검지) 상세한 사고 분류 문제 (예, 보행자, 낙하물 등)	음향 센서를 통한 사고 인지 영상을 통한 객체 확인
음향	검지 유형의 제한	영상 또는 레이더 이용한 검지

즉각적인 인지가 가능하고 2차사고 대응에 절대적으로 필요한 기술이라고 사료된다.

특히 터널 및 지하도로와 같은 제한 공간은 여러 가지 측면으로 사고에 대한 취약성을 가지고 있는데, 빠른 인지시간을 통해 유연한 대처 및 부상자에 대한 골든 타임을 확보할 수 있는 장점이 있을 것으로 판단된다.

### 결론 및 정책제언

과학의 기술 발전의 궁극적 목표는 삶의 질 향상을 위해 진화한다. 교통의 경우에는 보다 빠른 이동 시간, 보다 저렴한 비용 그리고 무엇보다도 이를 위한 안정성이 기반이 되어야한다.

한국도로공사에 따르면 1차 교통사고 보다, 2차 사고의 치사율이 6.7배에 달하며 사망자는 연평균 34명의 사망자가 발생한다. 때문에 빠른 교통사고 대응이 절실하며, 특히 터널 또는 지하도로의 경우에는 유고감지의 신속성이 더욱 중요해진다.

이를 위해 국토교통부는 유고검지 시스템을 교통에 도입하여 국민의 안정성을 보장하였다. 도입된 유고검지 시스템은 전기차와 같은 환경에 변화에 지속적으로 대응되어야 할 것이며, 더 나은 기술이 개발되면 적극적인 시범을 통하여 철저한 인증을 거쳐 실생활에 빠르게 반영되어야 한다.

특히 글에서 제시한 음향의 경우 시중에 개발된 타 센서와는 다른 방법으로 사고를 검지하고 있다. 영상이나 레이더는 차량과 낙하물, 보행자와 같은 물체 확인에 대해 특화가 되어있지만, 실질적으로 사고를 확인하는 데에는 교통류의 흐름의 변화를 통해 감지하기 때문에 사고 유무를 판단하는 것이 이론상으로 시간이 필요할 수 있다. 하지만 앞서 소개한 음향의 경우 사고 자체의 음향을 통해 사고를 검지하기 때문에 순간의 데이터만으로도 충분히 확인 가능하다.

주변을 둘러보면 하나의 완벽한 시스템은 존재하지 않는다. 그렇기에 물건을 하나 구매할 때도 장단점을 충분히 고려하여 신중하게 선택하는 방법이 고려되기도 한다. 이처럼 유고 시스템도 완벽한 시스템을 선택하는 것보다 서로의 장단점을 상충 보완할 수 있도록 구성하는 것이 타당하다. 사람에게 있어 시각, 촉각, 청각 등 여러 가지 센서가 존재하는 것처럼 사고를 판단하기 위한 다양한 센서가 하나로 잘 통합된 시스템을 구성해야 한다.

이를 위해 서울시가 추진 중인 3Mix 사업처럼 정부 차원에서의 적극적인 지원과 꾸준한 관심이 필요하다. 이는 국민의 안정성, 미래를 위한 인프라 등을 한층 향상시키는 결과가 될 것이다.

### 참고문헌

강성욱, 이규민, 권민재, 최정윤 (2021), 배터리전기차 화재대응방법 및 절차에 대한 제안, 2021년도 한국 화재소방학회 학술대회 추계학술대회 논문집, 한국화재소방학회.

국토교통부 (2020), 도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침.

국토교통부 (2022), 2022 도로업무편람.

오주택, 임재극, 황보희(2009), 신호교차로 내 실시간 교통사고 자동검지 알고리즘 개발, 대한교통학회지, 27(5), 대한교통학회, 97-111.

장진환(2019), 음향신호 기반 터널 돌발상황 검지 시스템, 교통ITS학회논문지, 18권 5호, pp.112-125.

채재묵 (2022), 초장대 도로터널의 방재설계 사례(인제 양양터널), 설비저널.

- Felguera-Martín D., González-Partida J. T., Almorox-González P., Burgos-García M. (2012), Vehicular traffic surveillance and road lane detection using radar interferometry, *IEEE transactions on vehicular technology*, 61(3), 959-970.
- Kim N. K., Jeon K. M., Kim H. K. (2019), Convolutional recurrent neural network-based event detection in tunnels using multiple microphones, *Sensors*, 19(12), 2695.
- Lee C., Kim H., Oh S., Doo I. (2021), A Study on Building a Real-Time Vehicle Accident and Road Obstacle Notification Model: Using AI CCTV, *Applied Sciences*, 11(17), 8210.
- Lee K. B., Shin H. S. (2019), An application of a deep learning algorithm for automatic detection of unexpected accidents under bad CCTV monitoring conditions in tunnels. In 2019 International Conference on deep learning and machine learning in emerging applications, *Deep-ML*, pp.7-11, IEEE.
- Yan Linyang, Ko Sun-Woo (2021), In-tunnel Accident Detection System based on the Learning of Accident Sound, *The Open Transportation Journal*, 15(1), 81-92.