

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.1.163>  
JIIBC 2024-1-24

# IoT 기반 도시철도 재난 예지 및 경보 시스템 아키텍처 설계

## Architecture Design for Disaster Prediction of Urban Railway and Warning System (UR-DPWS) based on IoT

조응영\*, 이종윤\*\*, 이주연\*\*\*

Eung-young Cho<sup>\*</sup>, Joong-Yoon Lee<sup>\*\*</sup>, Joo-Yeoun Lee<sup>\*\*\*</sup>

**요약** 현재 도시철도 운용기관은 터널 내에서의 비상 상황에 신속히 대처하기 위해 운용 중인 비상전화를 다양한 부가 서비스 지원이 가능한 IP 기반의 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”로 개량중에 있다. 본 연구는 이를 기반으로 터널 내 이상상황 감지를 위한 IoT 센서네트워크 환경을 구축하고 수집된 정보를 관제센터로 전달하여 재난 상황을 사전에 예지하는 시스템 아키텍처 설계에 관한 다양한 이해관계자의 요구를 분석하고, 시스템의 요구사항을 정의하며, 서비스 모델의 제시를 통해 재난대응 시나리오 모델을 제공하였다. 이를 통해 도시철도 재난에 대한 대응 관점을 사후 대처에서 사전 예방으로 전환하여 도시철도 안전운행 확보 및 중대 산업재해 예방을 도모한다.

**Abstract** Currently, the urban railway operating agency is improving the emergency telephone in operation into an IP-based “trackside integrated interface communication facility” that can support a variety of additional services in order to quickly respond to emergency situations within the tunnel. This study is based on this Analyze the needs of various stakeholders regarding the design of a system architecture that establishes an IoT sensor network environment to detect abnormal situations in the tunnel and transmits the collected information to the control center to predict disaster situations in advance, and defines the system requirements. In addition, a scenario model for disaster response was provided through the presentation of a service model. Through this, the perspective of responding to urban railway disasters changes from reactive response to proactive prevention, thereby ensuring safe operation of urban railways and preventing major industrial accidents.

**Key Words** : Control Center, Disaster, Emergency phone, Internet of things, Sensor Network, Urban Railway

\*정회원, 아주대학교 시스템공학과

\*\*정회원, 아주대학교 시스템공학과

\*\*\*정회원, 아주대학교 과학기술정책학과(교신저자)

접수일자 2023년 12월 29일, 수정완료 2024년 1월 29일  
게재확정일자 2024년 2월 9일

Received: 29 December, 2023 / Revised: 29 January, 2024 /

Accepted: 9 February, 2024

\*Corresponding Author: love7277@ajou.ac.kr

Department. of Systems Engineering, Ajou University, Korea

## I. 서 론

현재 수도권과 광역시를 중심으로 건설되어 운용 중인 도시철도망은 저렴한 운임과 그 접근용이성으로 시민들로부터 신뢰 받는 대중교통으로 자리잡고 있다.

반면 현재의 도시철도망은 도심의 생성 이후 설계가 진행되고 구축되어 대부분의 운행구간이 지하 또는 고가 구간으로 건설되어 운용되고 있다. 이러한 지하터널 구간에서의 운행선은 지상부 철도망 구성에 따른 도심 분할의 문제를 해결하는 장점을 갖고 있으나 재난, 재해에 매우 취약한 위험 요소를 갖고 있다.

지하철 환경은 일반적인 건물과는 다른 특수한 환경으로, 전기, 전자, 그리고 화학 물질 등의 위험한 물질이 많이 사용되는 장소이기 때문에 화재 발생 가능성이 높다. 또한, 지하에 위치하여 공기 흐름이 제한되어 있고 인적 밀집도가 높아 화재 사고 시 대형 인명사고로 직결될 수 있다<sup>[1]</sup>.

본 연구는 이러한 위험에 대처하기 위해 운용중인 비상전화 시스템의 한계를 극복하며 다양한 재난상황에 능동적으로 대처할 수 있는 “선로변 통합 인터페이스 통신설비 설비”를 활용한 재난 예지 및 경보 시스템 아키텍처 설계에 대한 모델을 제시한다.

## II. 본 문

### 1. 도시철도 비상전화 시스템의 법률적 요구사항

현재 도시철도 운용기관은 표 1의 “철도시설의 기술기준 (2019-132호) 33조[비상통신장비]”를 근거로 터널 구간에서의 열차탈선, 추돌, 화재 발생, 침수 등의 긴급 상황발생 시 관제센터, 경찰, 소방 등 유관기관에 신속한 비상 연락 수단을 제공하고 전쟁, 테러 등으로 인한 공중통신망의 붕괴 상황에서도 안정된 통신서비스의 제공을 위해 외부망과 분리된 자체적인 비상전화 시스템(연선전화)을 구축하여 운용하고 있다.

표 1. 선로변인터페이스설비의 기술적  
Table 1. Technical standards for railway facilities

구분	제33조(비상통신장비)
내용	① 본선 터널에는 화재 등 비상사태가 발생한 경우에 응급구조를 요청할 수 있는 비상통신장비를 설치하여야 한다.
	② 터널의 출입구, 대피통로의 내부 또는 대피로에 비상통신장비를 500미터 이내의 간격으로 설치하여야 한다.

도시철도의 경우 일반적으로 그림 1과 같이 터널 내부에 역사와 역사 간에 3~4개의 연선전화설비를 구성하여 운영하고 있으며 역사(Station)의 교환설비에서 CPEV (City Pair Polyethylene PVC) 케이블을 선로를 따라 포설하고 각 연선전화에 개별적으로 signal을 제공하여 비상전화 망을 구성한다.

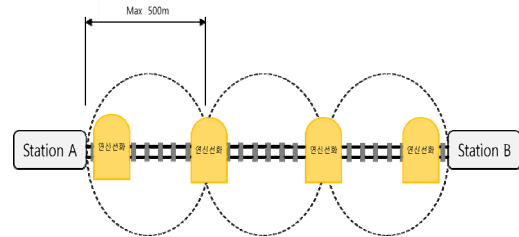


그림 1. 터널 내 비상전화  
Fig. 1. Emergency Phone in tunnel

### 2. 비상전화의 세대별 운용특성

#### 가. 1st Generation 비상통화장치

도시철도의 선로변에서 운용 중인 연선전화는 재난상황 시 신속하고 안정된 비상전화의 기능을 제공하였으며, 열차운행 종료 후 터널 내 유지보수 인원에게 접근성 용이성과 이용 편리성으로 널리 운영되어 왔으나 단순한 구내전화 기능만을 제공하는 연선전화는 개인의 휴대전화 및 다양한 멀티미디어 전송설비의 보급으로 그 기능이 축소되어왔다.

더불어 주요 물리 회선인 동케이블 기반의 CPEV 케이블은 정거리 광대역 전송에 한계가 있어 음성 전화서비스에 국한되어 운용되고 있으며, 기존 케이블의 노후화로 인한 잡음 발생 등으로 통화품질 및 서비스 품질의 저하에 따른 운용상의 어려움과 유지보수에 많은 문제점이 발생하고 있다.

따라서 현재 철도 운용기관은 기존에 운용중인 비상전화를 개량 시기에 맞추어 현재의 연선전화에서 Open Interface 기반으로 장거리·광대역기반의 다양한 부가서비스를 지원하는 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”로 개량 중에 있다.

#### 나. 2nd Generation 비상통화장치 (선로변 통합 인터페이스 통신설비)

기존 연선전화의 제약을 극복하며 새로운 표준으로 자리잡고 있는 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”는 유선 물리매체로 광케이블 기반의 광전복합 케이블을 적용하

여 기존 비상전화의 전송 거리의 한계와 전력공급 문제를 해결하며 IP 기반의 Networking 기능의 추가로 다양한 IoT 서비스를 제공할 수 있는 물리적 기반을 마련하였다. 그 세부 구성은 그림 2와 같다.

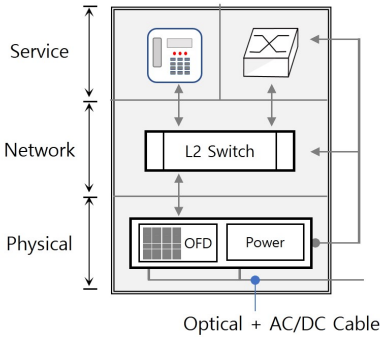


그림 2. 설비의 구성  
 Fig. 2. Equipment configuration

Service 부분은 비상전화의 기능 수행을 위한 IP 전화기와 수집된 Sensing 정보를 서버로 전송하기 위한 IoT Gateway로 구성되며 Network 부분은 수집된 정보를 물리매체로 송,수신하는 기능을 수행하며 일반적으로 L2switch 로 구성된다.

Physical 부분은 장비 외함, 전원부, OFD (Optical Fiber Distribution), 광전 복합케이블로 구성된다. 외함은 선로변의 분진, 진동, 강수 등으로부터 내부의 장비를 보호하는 기능을 수행하고 OFD는 장비로 인입된 광심선을 분배하며 Power 부분은 설비에 전원을 공급하는 기능을, 광전 복합케이블은 설비에 광신호와 전원을 동시에 제공하는 기능을 수행한다.

표 2. 세부 기능의 이해  
 Table 2. Understanding detailed features

구분	설비	기능
Service	IP Phone	유선 비상전화 기능 주요 단축번호 제공
	IoT Gateway	IoT 센서의 Sensing 정보를 서버로 전달
Network	L2Switch	Switch 기능 제공
Physical	광 분배기	인입된 광섬유 설비에 접속
	전원부	장비 전원공급
	광전 복합 케이블	광신호 및 전원 동시 공급

### 다. 3rd Generation 비상통화장치 (선로변 통합 인터페이스 통신설비 + IoT)

3rd Generation 비상전화는 2nd 선로변 통합 인터페이스 통신설비와 IoT 플랫폼을 결합한 서비스 모델로 선로변 및 터널 내부에 다양한 센서네트워크를 구축하고 이를 스마트 통합관제와 연동하는 시스템이다.

이러한 센서네트워크 환경의 구축을 통하여 현재의 인력 중심의 사후 조치를 IoT와 AI 중심의 사전탐지 및 예방으로 전환하여 도시철도 운행에서의 안전성과 재난 대응성을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 그 세대별 특징은 표 3과 같다.

표 3. 서비스의 비교  
 Table 3. Comparison of Service

구분	1st	2nd	3rd
개 념	비상전화	비상전화	IoT 기반 비상상황 예측 및 대응 시스템
서비스	비상사태 유선전화 서비스	비상사태 유선전화 서비스	비상사태 예측 및 경보 통신서비스 현장 상황 데이터 실시간 제공
회 선	CPEV	광케이블	광케이블
전 원	불필요	공급	공급
사 진			

### 3. 기존 서비스의 문제점

#### 가. 서비스 품질 저하

유고상황은 정상적인 상황이 아닌 상황을 말하며, 대형사고 및 2차 사고를 유발할 가능성이 상당하므로 신속한 인지 및 대처하는 것이 중요하다<sup>[2][3]</sup>. 연선전화는 초기 선로변 에서의 이러한 유고상황 등의 발생 시 신속한 비상통화의 기능을 충실히 제공하였다. 특히 터널 내에서의 열차탈선 등의 상황에서 비상전화 내부의 여유 회선을 이용하여 터널 내 다수의 비상전화 회선을 구성하는 주요 기능을 충실히 수행하였다.

재난상황에서 신속한 비상연락 수단을 제공하는 연선전화는 앞 2절에서 언급한 바와 같이 설비 및 회선의 노후화로 인해 서비스의 품질 측면에서 이해관계자의 요구사항을 충족시키지 못하고 있어 서비스 품질의 개선을 위한 신속한 개량이 요구되고 있으나 대부분의 철도 운영기관에서 예산확보 등의 한계로 인하여 이를 중장기

개량 과제로 미루고 있다.

### 나. 부가서비스 제공 한계

철도 건설 초기에 연선전화의 물리적 회선으로 사용된 CPEV 케이블은 근거리에서 voice 중심의 음성 서비스를 제공하는 용도로는 적합하나 이미지 및 영상 등의 대용량 Data를 장거리로 전송하는 데는 한계를 갖고 있다. 따라서 터널 내에서 연선전화를 다양한 부가서비스 제공을 위한 메인 인프라로 운영하기에는 한계가 있다.

## III. 이해관계자 및 시스템 요구사항 정의

### 1. 3세대 비상전화의 주요 이해관계자 요구사항

3세대 비상전화인 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”의 주요 이해관계자는 운용기관, 이용고객으로 구성되며 그 주요 요구사항은 표 4와 같이 재난 대응성, 경제성 및 안전성의 범위로 정의된다.

**표 4. 주요 이해관계자의 요구사항**

**Table 4. Main Stakeholder Requirements**

이해관계자	구분	번호	명칭	이해관계자 요구사항 문장
운용기관	재난 대응성	StR.1	화재 사전 예지	화재상황 발생 시 승객대피 소요 시간 (15분 이상) 이전 예지
		StR.2	붕괴 사전 예지	역사, 터널 내 구조물 붕괴 발생 시 승객 대피 소요시간(15분 이상) 이전 감지
		StR.3	침수사전 예지	선로,역사 침수 발생 시 승객대피 소요시간(15분 이상) 이전 감지
		StR.4	테러사전 예지	선로,역사 가스테러 발생 시 승객대피 소요시간(15분 이상) 이전 감지
		StR.5	탈선 사전예지	열차탈선 발생 시 승객대피 소요시간 (30분 이상)이전 감지
	경제성	StR.6	비용 절감	운용 및 유지보수 인력의 50% 감소
		이용 고객	StR.7	재해 감소

\*\*이해관계자 요구사항 문장\*은 6하원칙에 의하여 작성되어야 하나 본 연구의 특성상 단문으로 정의

### 2. 기타 이해관계자 요구사항

기타 이해관계자는 시스템 감독기관, 시스템 유지보수자 등으로 정의할 수 있으며 그 세부 내용은 표 5와 같이 서비스 안전성 및 시스템 효율성으로 세부항목을 정의하였다.

**표 5. 기타 이해관계자 요구사항**

**Table 5. Other stakeholder requirements**

이해관계자	구분	번호	명칭	이해관계자 요구사항 문장
감독기관	서비스 안전성	StR.8	재해 감소	위험상황 사전예지 및 재난상황전파 (중대산업재해 50% 감소)
유지보수자	시스템 효율성	StR.9	효율성 증대	시스템 장애 발생 최소화 및 부품 교체 주기 최소화

\*\*이해관계자 요구사항 문장\*은 6하원칙에 의하여 작성되어야 하나 본 연구의 특성상 단문으로 정의

### 3. 기존 한계 극복을 위한 시스템 요구사항

**표 6. 시스템 요구사항**

**Table 6. System requirements**

이해관계자	구분	명칭	시스템 요구사항 문장
재난 대응성	SyR.1	화재 사전탐지	온도, 변동량 실시간 감지
	SyR.2	화재 사전탐지	범위 내 섭광 실시간 감지
	SyR.3	화재 사전탐지	O <sub>2</sub> 농도, 변동량 실시간 감지
	SyR.4	붕괴 사전탐지	구조물 기울기 변동량 실시간 감지
	SyR.5	침수 사전탐지	주변 습도 및 변동량 실시간감지
	SyR.6	테러 사전탐지	CO, CO <sub>2</sub> 실농도 및 변동량 실시간 감지
	SyR.7	탈선 사전탐지	이상 진동 및 감지 이상 소음 실시간 감지
경제성	SyR.8	현장운용	현장 1인 운용 (유지보수자 업무최소화)
		관제운용	관제 1인 운용 (운용자 개입 및 판단 최소화)
안전성	SyR.9	재난예지	위험 상황 실시간 감지·판단
	SyR.10	상황전파	위험 상황 실시간 예지 및 상황전파
효율성	SyR.11	커버리지확보	4km 이상의 커버리지 확보
	SyR.12	설비 방호	터널 내 진동, 분진, 누수 등으로부터의 설비 보호
	SyR.13	전원수명	센서부 배터리 2year 이상의 운용기간 보장

1, 2장에서 제시한 다양한 이해관계자의 요구사항의 충족을 위한 재난대응성, 경제성, 안전성, 효율성 측면에서의 시스템의 요구사항은 표 6과 같이 정의하였다.

#### IV. 터널 내 IoT 기반의 비상통화 장치를 활용한 재난대응성 향상 설계

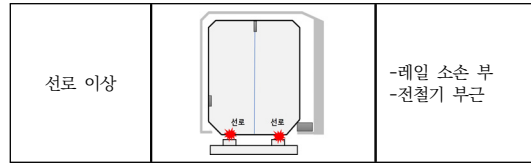
##### 1. 터널 내 IoT 기반 재난대응 운용개념

###### 가. 재난 상황의 유형 이해

도시철도는 일반 시민들이 이용하는 대중교통의 특성상 재난 발생 시 열차 운행중단과 더불어 심각한 인명피해와 물적 피해가 발생하는 위험 요소를 안고 있다. 특히 2003년 대구 도시철도에서의 방화로 인한 대구지하철 참사는 관련 기관의 부실한 사고 대응과 많은 인명피해 발생으로 사회적으로 큰 충격을 준 사건으로 이를 계기로 도시철도 분야에서의 시민안전에 대한 패러다임이 변화하게 되었다. 표7은 도시철도에서의 주요 사고사례 및 이의 유형별 분류이다.

표 7. 주요 재난의 유형  
 Table 7. Types of Major Disasters

재난의 유형	그림 설명	취약개소
화재 발생		-전차선 -바닥트레이 -벽면 트레이
구조물 붕괴		-내력 벽면 -내력 기둥
침수 및 누수		-벽면 누수 -기계실 침수 -선로 변 침수
(가스) 테러		-터널 내부 -역사 내부 -기계실 내부



###### (1) 터널 내 화재

철도 터널에서의 화재사고 발생 가능성은 매우 낮으나, 일반적인 건축물과 달리 지하공간의 밀폐특성 때문에 화재사고 발생 시 위험수준이 상대적으로 매우 높으며 도로터널에 비해 단위 차량의 이용객이 많으므로 인명 및 재산피해가 커질 확률이 높다<sup>[4]</sup>.

역사 및 객차 내에서의 화재는 철도 이용고객의 방화 및 실화가 대부분을 차지하며 터널 내 화재는 내부 케이블 등에서의 자연 발화와 작업 중의 실화가 주요 발생 요인이다. 유독가스 발생에 따른 2차 인명피해가 우려되는 매우 심각한 위험 요소로 신속한 사전탐지 및 대응이 요구되는 재난이다.

###### (2) 터널 내 구조물 붕괴

터널 내의 구조물 붕괴는 철도 운행구간 인근에서의 폭발 및 지진 등에 의한 간접 충격과 열차탈선 등 터널 내 시설물에 대한 직접 충격에 의한 요인으로 구분할 수 있다. 최근 우리나라도 지진의 발생 빈도 및 그 강도가 증가하는 상황에서 도시철도 운영기관은 이에 대비해 구조물에 대한 내진 보강 공사 등을 시행하고 있으나 그 주요 범위가 역사 구조물에 집중되어 있어 향후 터널 내 구조물에 대한 내진 보강이 요구된다.

###### (3) 터널 침수

도시철도 운영구간의 주요 침수 및 누수는 집중 호우에 의한 우수의 역사 출입구를 통한 유입과 역사 개량공사 지점을 통한 물막이 공사 미비에 따른 우수 유입이 대부분의 발생 요인을 차지하며 이로 인해 역사, 선로, 주요설비 및 운영실의 침수 등이 발생할 수 있다. 특히 최근 기후변화에 따른 집중호우 발생이 빈번해 지고 있어 그 위험성이 증대되고 있다.

###### (4) (가스) 테러

도시철도 운영구간에서의 가스의 살포는 대부분 테러에 의해 발생하고 있으며, 대한민국 또한 향후 외국의 사례처럼 철도와 이용고객을 대상으로 한 (가스)테러가 발생할 가능성이 있어 이에 대한 충분한 대책이 요구된다.

환경 센서를 이용하여 취득할 수 있는 오염원은 미세 먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5) 등의 먼지뿐만 아니라 다양한 산화물질들(SO2, CO, O3, NO2)에 대해서도 센싱이 가능하다<sup>[5]</sup>.

향후 도시철도 구간에 설치되는 환경 센서는 (가스)테러에 사용될 수 있는 유해가스의 범위를 확대 적용하여 다양한 종류의 가스에 의한 테러 및 화재를 사전에 감지하여야 한다.

#### (5) 열차탈선

철도선로의 선형조건과 차량-궤도의 하중불균형 조건 등으로 인해 열차탈선 사고의 위험이 내재 되어있으며, 탈선에 의한 열차사고를 미연에 방지하고자 열차 방호시설 설비 등의 많은 발전을 이루었다<sup>[6]</sup>. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 열차탈선 등에 의한 중대재해의 발생 위험은 상존하고 있으며 다른 어느 철도 사고 보다도 심각한 중대재해가 발생되며 복구에도 많은 시간이 소요되 철도운영기관은 이의 방지를 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

### 나. 서비스 활동모델 및 요구성능

#### (1) 대응 사나리오(사전조치)

본 도시철도 재난 예지 및 경보 시스템의 요구성능에서 터널 내에 설치되어 환경정보를 수집하는 센서의 환경정보 수집과 관련된 요구성능은 표 8과 같다.

표 8. 센서의 요구성능

Table 8. Required performance of sensor

구분	탐지 항목	임계치
화재 상황	현재 온도	80℃
	평균 온도	10min/10℃
	섬광(블랙)	30m
구조물 붕괴	기울기	±5°
침수 및 누수	습도	80%
(가스) 테러	CO <sub>2</sub> 농도	800ppm
	CO <sub>2</sub> 농도 상승율	10min/100ppm
	O <sub>2</sub> 농도	18%
열차 탈선	O <sub>2</sub> 농도 감소율	10min/2%
	이상 진동	100dB(V)
	이상 소음	90dB

터널 내에서 발생할 수 있는 이러한 각 위험 모델의 실제 발생 상황 판단은 표 8의 항목에 대하여 센서의 실시간 환경정보에 기반한 Real time 기반, 기존의 분류되

고 정제된 정보에 기반한 Big data 기반, 두 방식을 결합한 Hybrid 방식으로 나눌 수 있다.

Real time 기반은 사용자에게 의해 설정된 한계치를 초과 시 즉시 경보를 발생하는 시스템이다. 이 방식은 Big data의 수집 및 AI 기반의 기계학습 없이 신속한 서비스 제공이 가능한 반면 계절별, 시간대 별로 온도, 습도 등의 편차가 심하게 발생하여 빈번한 경보발생 및오탐 등으로 인한 위험발생 사전탐지의 신뢰도가 낮은 단점이 있다. 따라서 주기적인 센서의 경보발생 임계치의 재설정과 컨피그 재설정을 통하여 시스템의 신뢰도를 높일 수 있다.

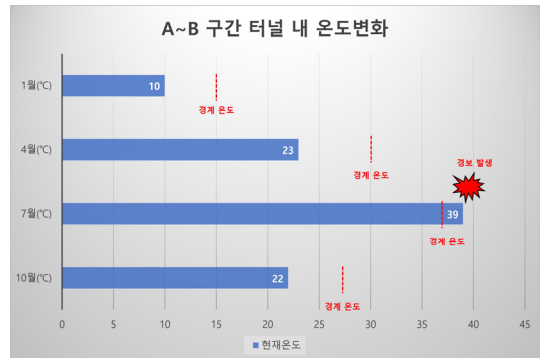


그림 3. 실시간 기반 운용

Fig. 3. Real time based operation

Big data 기반은 기존의 위험요소에 대한 정보들을 계절별, 요일별, 시간대별로 분류하여 축적된 온도, 습도, 진동, 구조물 기울기 변화, 소음, 산소농도, 특정 가스 농도 등의 data를 수집하고 패턴을 분석하여 학습된 data와 현재 data를 비교하여 위험상황을 판단하여 경보발생 여부를 결정한다.

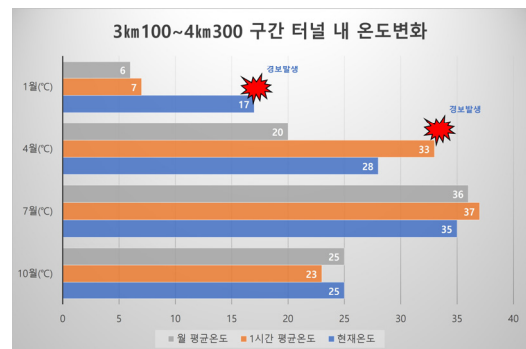


그림 4. Big data 기반 운용

Fig. 4. Big data based operation

Big data의 수집 및 AI 기반의 기계학습을 통하여 시스템을 구축하므로 경제성과 초기 구축에서의 경쟁력은 낮으나 경보발생의 신뢰성을 높일 수 있다. 도시철도의 재난에서 특히 많은 인명피해를 발생시키는 화재와 관련된 온도와 유해 가스농도 및 산소농도는 경보 항목에 현재의 측정값과 일정 기간의 정보 변화량을 함께 적용하여 재난대응의 효율성을 확보할 수 있다.

표 9는 수집된 정보의 효과적인 전송을 위한 요구성능으로 운용성과 안전성 항목으로 나누어 설명한다.

**표 9. 운용성 및 안전성의 이해**  
**Table 9. Understanding operability and safety**

구분	요구 항목	요구 성능
운용성	통신방식	~10kbps
	전원용량	2year 보장
안전성	회선절체	Real time
	설비운용	Seamless

(2) 시스템 요구성능

본 시스템은 다양한 이해관계자의 요구사항을 만족시킬 수 있어야 하며 이를 위한 성능의 확보가 요구된다. 표 10은 이를 충족시키기 위한 센서의 환경정보 수집과 관련된 시스템의 요구성능을 제시한다.

**표 10. 시스템 요구성능**  
**Table 10. System requirements**

탐지항목	성능범위	주요 설치 개소	1st 경보
온도	~120℃	전차선 케이블 트레이	70℃
불꽃	~30m		occur
기울기	±90°	기동 면, 벽면	±3°
습도	~100%	선로변, 벽면	70%
CO <sub>2</sub>	~5,000ppm	기계실, 선로변	800ppm
O <sub>2</sub>	~95%		18%
진동	~110dB(V)	선로변, 기동	70dB(V)
소음	~150dBm		80dB

사물인터넷 장치의 전력공급은 자체 배터리에 의존할 수밖에 없기 때문에 사물인터넷 구축의 핵심 관건은 장치의 전력 소모를 최소화하는 것이다<sup>[8][9]</sup>. 표 11은 수집된 정보의 효과적인 전송을 위한 요구성능으로, 센서와 G/W 간의 통신은 저전력 기반의 IEEE 802.15 기반의 근거리 저속 통신방식을 적용하여 2년 이상의 배터리 성능이 보장하여 운용성을 확보하여야 한다.

더불어 네트워크는 회선 장애 시 실시간 절체를 통한 seamless 한 서비스 제공을 통하여 서비스 안전성을 보장하여야 한다. 표 11은 이를 만족시키기 위한 네트워크 및 시스템의 운용성과 안전성에 관한 요구성능이다.

**표 11. 시스템 규격 정의**  
**Table 11. System specification definition**

성능 정리	요구성능	규격 정의
통신용량	~10kbps	근거리, 저용량
통신속도	2year 보장	근거리, 저속통신
보호절체	Real time	ITU-TG .832
이중화	Seamless	이중화 운용

스마트 디바이스는 대부분의 기간 동안 휴면 상태이며 데이터를 읽고 보내거나 결정을 내릴 필요가 있을 때만 활성화된다<sup>[7]</sup>. 운용자는 선로변의 센서가 휴면 상태에서 벗어나 환경정보를 센싱하는 주기를 상황에 맞게 단계별로 설정하여 재난 대응성 및 서비스 효율성을 확보할 수 있다.

2. 터널 내 IoT 기반 재난대응 시스템 개념

가. 시스템 운용개념 및 재난대응 시나리오

터널 내 IoT 기반 재난대응 시나리오에는 그림 5와 같이 도시철도 시스템과 연계기관 시스템으로 나누어 설명할 수 있다. 도시철도 시스템은 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”의 IoT G/W에 수집된 Sensing Data는 전송망을 통하여 관계센터로 전송하며 수집된 Data와 영상 정보는 AI를 통해 판별되고 관리자는 그 판별 결과를 최종적으로 판단하여 상황발생 여부를 결정한다.

인공지능은 기계가 경험을 통해 학습하고 새로운 입력 내용에 따라 기존 지식을 조정하며 사람과 같은 방식으로 과제를 수행할 수 있도록 지원하는 기술을 말한다<sup>[10]</sup>. 관계 운용자는 현장에서 수집되는 전체 환경정보에 대해 학습된 인공지능이 “위험 상황”으로 보고한 항목에 대하여 최종 확인·판단함으로써 서비스의 효율성과 신속성을 확보할 수 있다.

운용자의 최종으로 판단이 재난상황으로 결정 시 관계 근무자는 즉시 재난대응 매뉴얼에 따라 비상 연락망, 국가재난통신망(PS-LTE), 스마트 일제방송 등의 연계기관 시스템을 통하여 상황을 신속히 전파한다.



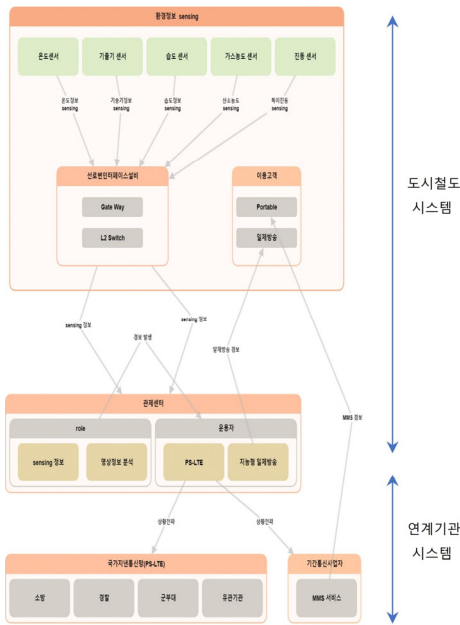


그림 5. 시스템 시나리오  
Fig. 5. System Scenario

나. 시스템 물리적 구조

본 시스템은 터널 내부에 실제 센서가 부착되어 운용되는 Edge Area, 수집된 정보를 수집하고 전송하는 Network Area, 전달된 정보를 가공하여 표출하는 Service Area 로 나누어 구성된다.

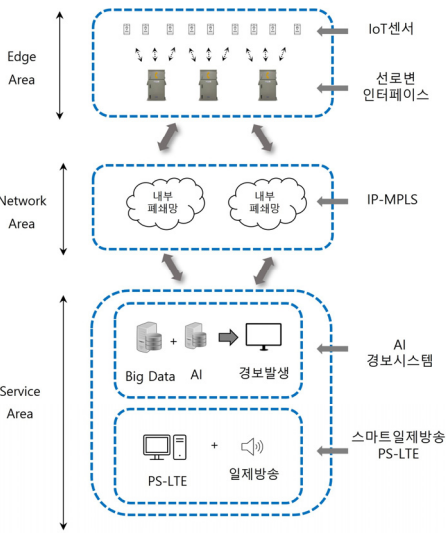


그림 6. 시스템 구조  
Fig. 6. System structure

Edge Area는 터널 내의 주요 Point에 IoT 센서 (node)를 서비스 커버리지 및 음영 구간을 고려해 설치하여 Sensor Area를 구성하고 각 node는 주변의 환경 정보를 IEEE 802.15 WPAN (Wireless Personal Area Network) 기반의 저전력 통신방식으로 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”로 전달한다.

Network Area는 다수의 “선로변 통합 인터페이스 통신설비”에서 수집된 정보를 내부 전송망을 통하여 관제센터로 전송하는 기능을 수행하며, Service Area는 수집된 정보를 분석하여 위험 상황으로 판단된 정보에 대하여 정보를 운용자에 상황을 전달하고 위험 상황이 아닌 경우에는 이를 폐기한다. Service Area의 핵심요소인 Big data와 AI는 다음의 연구에서 진행한다.

3. 컴퍼넌트 규격의 정의

본 연구의 주제인 “IoT 기반 도시철도 재난 예지 및 경보 시스템 아키텍처 설계”를 위한 이해관계자 요구사항(표4, 5참조) 측면과 시스템 요구사항(표6 참조)의 상호 연관성을 확인하며 재난대응 응용 시나리오를 충족시키는 컴퍼넌트의 요구사항은 표 12와 같이 정의된다.

표 12. 컴퍼넌트 규격의 정의

Table 12. Definition of component specifications

항목	구분	명칭	시스템 요구사항 문장
재난 대응성	CR.1	센서 성능	~120℃ 주변 온도탐지
	CR.2		~30m 거리 내 불꽃 감지
	CR.3		±3" 기울기 변화 감지
	CR.4		~100%(완전 침수) 감지
	CR.5		O <sub>2</sub> 농도 ~95% 감지
	CR.6		CO <sub>2</sub> 농도 5,000ppm 감지
	CR.7		진동: ~110dB(V) 감지 소음: ~150dBm 감지
경제성	CR.8	1인 운용	유지보수자 관리 최소화 원격 감시지원
		1인 운용	운용자 개입 최소화 Big data/AI 기반 판단
안전성	CR.9	재난 판단	IoT 센서 24H 운용 Big data/AI 기반 판단
	CR.10	통제 관리	PS/LTE 모바일 기반 스마트 일제방송
효율성	CR.11	장거리 전송	설비의 전송로 구간 광케이블 구성
	CR.12	방수 방진	설비의 합체 IP45 등급이상 방호확보
	CR.13	저전력	BLE 4.0 저전력 운용



## V. 평가 및 고찰

### 1. 시스템 요구사항의 적합성 판단

본 연구는 다양한 이해관계자의 관점과 시스템의 요구사항의 충족을 요구하고 있다. 본 연구에서 제시한 시스템 요구사항의 적합 여부는 재난 대응성, 경제성, 서비스 안전성, 시스템 효율성의 항목으로 표 13의 설문문을 통하여 확인하였다.

설문의 항목의 시스템 요구사항으로의 적합성 여부는 IT 전문가(69.2%), 도시철도 운용기관 근무자(23.1%), IT 전문가 및 도시철도 운용기관 근무자(7.7%) 총 39명을 대상으로 매우 적정(+5점), 적정(3점), 적정하지 않음(-3점), 매우 적정하지 않음(-5점)을 부여하여 설문을 진행하였다. 설문 결과 본 연구에서 제시한 재난 대응성, 경제성 서비스 안전성 항목에서의 “매우 적정” 값은 70% 이상, 시스템 효율성 항목에서의 “매우 적정” 값은 60% 이상으로 나타났으며, 전체 항목에서 “적정하지 않음”과 “매우 적정하지 않음”은 응답에 포함되지 않았다. 이를 통하여 본 연구의 설문에서 제시한 시스템의 요구사항 항목이 시스템의 요구사항으로 적정함을 확인하였다.

표 13. 시스템 요구사항의 적합성  
 Table 13. Conformity of system requirements

항목	세부 항목	적정도
재난 대응성	터널 내 환경정보 사전 탐지	매우적정: 84.6% 적정: 15.4%
경제성	담당자 업무 및 개입 최소화	매우적정: 71.8% 적정: 28.2%
서비스 안전성	재난 사전예지 및 상황전파	매우적정: 74.4% 적정: 25.6%
시스템 효율성	설비 커버리지, 방호, 전원수명	매우적정: 64.1% 적정: 35.9%

### 2. 요구사항 충족 여부

#### 가. 이해관계자 요구사항 충족여부

본 연구의 다양한 이해관계자의 요구사항(표 4, 5)과 이와 상호 연관성을 갖는 시스템의 요구사항(표 6)은 표 14의 이해관계자 요구사항 항목 StR.1~StR.9와 시스템 요구사항 항목 SyR.1~SyR.13의 Tracking Table을 통하여 그 세부 항목 및 명칭의 상호 연관성 및 충족 여부를 확인하였다.

표 14. 추적표 #1  
 Table 14. Tracking table #1

StR	명칭	SyR	명칭
StR.1	화재 사전 예지	SyR.1	화재 사전탐지
		SyR.2	화재 사전탐지
		SyR.3	화재 사전탐지
StR.2	붕괴 사전 예지	SyR.4	붕괴 사전탐지
StR.3	침수 사전 예지	SyR.5	침수 사전탐지
StR.4	테러 사전 탐지	SyR.6	테러 사전탐지
StR.5	탈선 사전 예지	SyR.7	탈선 사전탐지
StR.6	비용 절감	SyR.8	현장 운용
			관계 운용
StR.7	중대 시민재해 감소	SyR.9	재난예지
		SyR.10	상황전파
StR.8	중대 산업재해 감소	SyR.9	재난예지
		SyR.10	상황전파
StR.9	효율성 증대	SyR.11	커버리지 확보
		SyR.12	설비 방호
		SyR.13	전원수명

본 연구에서 요구되는 다양한 시스템의 요구사항(표 6)과 이를 충족시키기 위한 상호 연관성을 갖는 컨퍼넌트의 규격(표 12)은 표 15의 추적 결과를 통하여 그 연관성 및 세부 항목을 확인하였다.

표 15. 추적표 #2  
 Table 15. Tracking table #2

SyR	명칭	CR	명칭
SyR.1	화재 사전탐지	CR.1	센서 성능
SyR.2	화재 사전탐지	CR.2	센서 성능
SyR.3	화재 사전탐지	CR.3	센서 성능
SyR.4	붕괴 사전탐지	CR.4	센서 성능
SyR.5	침수 사전탐지	CR.5	센서 성능
SyR.6	테러 사전탐지	CR.6	센서 성능
SyR.7	탈선 사전탐지	CR.7	센서 성능
SyR.8	현장 운용	CR.8	1인 운용
	관계 운용		1인 운용
SyR.9	재난 예지	CR.9	재난 판단
SyR.10	상황전파	CR.10	통제, 관리
SyR.11	커버리지 확보	CR.9	장거리 전송
SyR.12	설비 방호	CR.10	방수,방진
SyR.13	전원수명	CR.11	저전력

표 13, 14에서 정의된 추적표를 통하여 상호 연관성을 확인하고 다양한 이해관계자의 요구사항과 시스템 요구사항 그리고 컨퍼넌트 규격의 상호 연관성과 그 충족

여부를 확인하였다. 본 연구에서 제시한 재난대응 시나리오에서의 사전탐지를 위한 환경정보 획득 관련 요구사항과 운용에서의 시스템 요구성능은 표 16을 통하여 확인하였다.

**표 16. 시스템 요구성능의 확인**  
Table 16. Confirmation of system required performance

구분	탐지 항목	탐지범위	임계치	1st 경보
화재	온도	120℃	80℃	70℃
	섭광	30m	발생시점	발생시점
붕괴	기울기	±90°	±5°	±3°
침수	습도	~100%	80%	70%
(가스) 테러	CO <sub>2</sub> 농도	5,000ppm	1,600ppm	800ppm
	O <sub>2</sub> 농도	~95%	16%	16%
열차 탈선	진동	~110dB(V)	100dB(V)	70dB(V)
	소음	~150dBm	90dB	80dB

터널 내 IoT 센서는 재난 상황에서의 상황별 임계치 이전에 1<sup>st</sup> 경보를 발생하여 재난의 발생 이전 상황에 대처하여 재난상황에 사전에 대처할 수 있다.

수집된 환경정보의 효과적 전송을 요구사항과 운영에서의 시스템 요구성능은 표 17을 통하여 확인하였다.

**표 17. 네트워크 및 시스템 요구성능의 확인**  
Table 17. Confirmation of system required and network

항목	구분	적정도
통신용량	~10kbps	zigbee, sigfox
통신속도	2year	~kbps
보호절체	Real time	50% 절체
이중화	Seamless	설비 이원화

**나. 시스템 요구사항 충족 여부**

본 시스템 요구사항에 대한 충족 여부는 IT 전문가(69.2%), 도시철도 운용기관 근무자(23.1%), IT 전문가 및 도시철도 운용기관 근무자(7.7%) 총 39명을 대상으로 설문을 진행하여 확인 하였다.

표 18의 “시스템 요구사항의 충족”에 대한 설문 결과 대부분의 항목에서 요구사항을 만족하나 N/W의 항목에서의 “안전성 향상, 효율성 향상”과 전송망 항목의 “경제성 향상, 안전성 향상” 부분에서 “적정하지 않음”이 각각 2.6%로 응답 되었다. 향후 이를 개선하기 위한 시스템 아키텍처 설계에 관한 추가 연구를 통하여 재난 예지 및 경보 시스템의 구축 및 운용에서 다양한 이해관계자 및 시스템의 요구사항을 충족시키는 모델의 제시가 요구된다.

**표 18. 시스템 요구사항의 충족**  
Table 18. Meets system requirements

항목	구분	적절성	적정도
선로변	경보발생 임계치 및 1st 경보 발생 point	재난 대응성 향상	매우적정: 71.8% 적정: 28.2%
		경제성 향상	매우적정: 57.9% 적정: 42.1%
		서비스 안전성 향상	매우적정: 71.9% 적정: 28.2%
		시스템 효율성 향상	매우적정: 66.7% 적정: 33.3%
N/W	bluetooth zigbee	재난 대응성 향상	매우적정: 53.8% 적정: 41% 적정하지않음: 5.1%
		경제성 향상	매우적정: 61.5% 적정: 38.5%
		안전성 향상	매우적정: 61.5% 적정: 33.3% 적정하지않음: 5.1%
		효율성 향상	매우적정: 61.5% 적정: 33.3% 적정하지않음: 5.1%
전송망	50% 이내 시스템 절체 / 장비 및 선로 이중화	재난 대응성 향상	매우적정: 74.4% 적정: 25.6%
		경제성 향상	매우적정: 66.7% 적정: 30.8% 적정하지않음: 2.6%
		안전성 향상	매우적정: 74.4% 적정: 23.1% 적정하지않음: 2.6%
		효율성 향상	매우적정: 69.2% 적정: 30.8%

**다. 효과성 지표**

**표 19. 효과성 지표**  
Table 19. An indicator of effectiveness

항목	구분	적절성	개선도
도시철도 재난 대응성	사후탐지(As-Is)	기관사 탐지	500% (1/5)
	사전탐지(To-Be)	센서 탐지	
도시철도 고객 안전성	사후대처(As-Is)	확보 계약	400% (1/4)
	사전예방(To-Be)	확보 용이	
도시철도 중대재해	사후대처(As-Is)	중대재해 발생	437% (8/35)
	사전예방(To-Be)	중대재해 발생	
도시철도 재난대응 서비스 확장성	사후전파(AS-IS)	대내외 기관 사후상황 전파	400% (1/4)
	사전전파(To-Be)	대내외 기관 사전상황 전파	

- \*비용편의 B/C(Benefit Cost Ratio) ratio 은 B/C ratio >1로 추정함.
- \*도시철도 재난대응성의 사후 탐지는 기관사 최초 탐지 ~ 최종확인(15min) vs 사전탐지 ~ 운전자 최종 확인(3min) 비교함.
- \*도시철도 고객안전성은 재난 사후 탐지 ~ 고객 상황전파(20min) vs 사전탐지 ~ 상황전파(5min) 비교함.
- \*도시철도 중대재해(감소)는 중대시민재해를 기준으로 위의 두 항목의 평균으로 비교함.
- \*도시철도 재난대응 서비스 확장성은 재난 사후 탐지 ~ 전파(20min) vs 사후 탐지 ~ 전파(5min) 비교함.

본 연구는 표 19의 효과성 지표를 통하여 다양한 이해 관계자와 시스템의 요구사항을 충족하는 재난 예지 및 경고 시스템을 통한 개선도를 확인하였다. 향후 이러한 시스템 아키텍처 설계에 대한 연구를 기반으로 실제 도시철도에서의 시스템 설계, 구축, 운용 등 전체 Life Cycle에 대한 폭넓은 연구가 요구된다.

## VI. 결 론

산업현장에 끊임없이 발생하고 있는 인명사고를 감소 시키기 위해 정부는 중대 산업재해와 중대 시민재해 발생 시 사용자의 처벌을 강화하는 “중대재해 처벌 등에 관한 법률”을 시행하고 있다. 특히 재난 발생 시 신속한 대응에 한계를 갖는 도시철도는 중대시민재해와 중대 산업 재해의 발생 우려가 매우 높은 곳이다.

본 연구는 이러한 도시철도에서 발생 가능한 위험 요소를 사물인터넷 기술과 인공지능을 활용하여 사전에 인지하여 판별하여 사용자에게 경보를 알리는 시스템 아키텍처의 설계에 대한 방안을 제시하였다.

이번 연구를 배경으로 향후 수집된 환경정보의 정확한 분별을 위한 Big data의 수집-전처리를 통한 인공지능의 판별 정확도를 향상 시키는 방안에 대한 연구를 진행할 예정이다.

## References

[1] Hyeonso Kim, Gyeongmi “Development of Subway Fire Response Simulation Game Based on Virtual Reality”, The Journal of KIIT pp. 390-392, Jun, 2023.

DOI: <https://ki-it.or.kr/%EB%85%BC%EB%AC%B8%EA%B2%80%EC%83%89>

[2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), “Guideline of installation and management of disaster prevention facilities on road tunnels”, 2021.

[3] Kyu Beom Lee, Hyu Soung Shin “Study on influence of the region of interest(ROI) in performance of accident event detection in tunnel CCTV”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 24, No. 2 pp. 619-624, 2023  
DOI: [https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11217262&language=ko\\_KR&hasTopBanner=true](https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11217262&language=ko_KR&hasTopBanner=true)

[4] Kim, Eul Young “ A study on the fire protective measures for High-Deep Underground Railway Tunnels”, Master’s Paper of Gashon University, pp. 23, Aug 2017.

[5] Taeha Ryu, Seungcheon Kim “A study on alarm broadcasting method using public data and IoT sensing data”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 22, No. 1, pp. 21-27, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2023.23.1.7>

[6] Jung-Youl Choi, Hyeon-Yo Park, Jee-Seung Chung “A Study on Relationship between Structural Safety and Maintenance of Derailing Prevent Guard Rail”, The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 9, No. 4, pp. 593-599, 2023.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.593>

[7] Kai Kang, Jinchun Kim, Seongbae Eun “Low-Power-Consumption Repetitive Wake-up Scheme for IoT Systems”, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 25, No. 11: 1596~1594, Nov. 2021  
DOI: <https://koreascience.kr/article/JAKO202102661331101.page>

[8] A. Pötsch, A. Berger, and A. Springer, “Efficient analysis of power consumption behaviour of embedded wireless IoT systems,” IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1-6, 2017.

[9] Lee Hakjae “ A Study on IoT Application System based on Ultra Low Power Wireless Sensor Network”, doctoral thesis of Chonnam University, pp. 7, Aug 2017.

[10] Soonduck Yoo “A Study on Analysis Criteria for AI Service Impact Assessment”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 23, No. 1, pp. 7-13, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2022.22.1.21>

저 자 소 개

조 응 영(정회원)



- 건국대학교 정보통신대학원 석사
- 경력: 서울지방철도청, 서울교통공사
- 관심분야 : 첨단 시스템 공학, 통합관제센터, 사물인터넷

이 중 윤(정회원)



- 아주대학교 박사
- 경력: 아주대학교 시스템공학과 교수
- 관심분야 : 첨단 시스템 공학, Smart System Architecture Design, Capability Engineering

이 주 연(정회원)



- 인하대학교 박사
- 경력: 아주대학교 과학기술정책학과 주임교수
- 관심분야 : Smart Factory, Smart Energy, Artificial Intelligence, Science and Technology Policy