

# 안전요원 배치 여부에 따른 무인운전 경전철의 운행중단 시간예측 연구

곽상록<sup>1†</sup>

## A Study on Prediction of Suspension Time of Unmanned Light Rail according to Safety Personal Deployment

Sang Log Kwak<sup>1†</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Sang Log Kwak

Tel : +82-31-460-0547

E-mail : slkwak@ut.ac.kr

Received : November 16, 2022

Revised : December 23, 2022

Accepted : February 8, 2023

**Abstract** : The number of unmanned light rail train operators is continuously increasing in Korea. In a failure event during an operation due to the nature of the unmanned operation, recovery is performed based on the remote control. However, if remote recovery is not feasible, safety personnel arrive at the train to resume the train operation. There are regulations on safety personnel and the suspension time of the train operation. However, there is currently no rule for safety personnel deployment. Currently, railway operating organizations operate in three scenarios: safety personnel on board trains, stationed at stations, and deployed at major stations. Four major factors influence the downtime for each emergency response scenario. However, these four influencing factors vary too much to predict results with simple calculations. In this study, four influencing factors were considered as random variables with high uncertainty. In addition, the Monte Carlo method was applied to each scenario for the safety personnel deployment to predict train service downtime. This study found a 17% difference in train service suspension by safety personnel deployment scenario. The results of this study can be used in setting service goals, such as standards for future safety personnel placement and frequency of service interruptions.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : light rail, Monte Carlo simulation, probabilistic variable, unmanned train operation

## 1. 서론

국내에는 12개의 철도노선이 무인운전기반으로 건설되어 운영중이며, 세계 2위의 무인운전 철도 운영국가이다<sup>1)</sup>. 무인운전 경전철시스템은 열차내에 기관사가 탑승하지 않고 운행할 수 있도록 설계되어 운행중 철도차량, 시설물 및 신호 시스템 등에 이상이 발생할 경우 비상정차를 원칙으로 하고 있다. 열차 비상정차시 중앙통제실에서 관계사가 원격제어로 문제를 해소한 후에 열차운행을 재개하고 있다. 원격제어로 열차운행 복구가 불가능하거나 위급한 상황에서 여객은 선로변에 별도로 마련된 비상대피로를 이용하여 인근의 역사까지 자력으로 탈출하도록 설계되었다<sup>2)</sup>. 무인운전 경전철은 열차의 운영상황 및 선로, 역사, 객실에 대한

실시간 감시가 가능하고, 대부분의 역사와 역사간 거리가 1 km 이내로 신속한 대피가 가능하여 대형 사고나 인명사고 가능성은 도시철도에 비해 낮다<sup>3)</sup>. 반면 운행중 장애나 고장으로 열차가 정지하여 여객이 인근 역사까지 탈출하여 대피하는 경우 운행의 정상화까지 한시간 이상 소요되는 문제점이 있다. 국내는 높은 여객밀도로 인해 역사와 열차내 여객의 혼잡도가 높아 열차 운행중 고장이 발생할 경우 설계와 같이 여객을 대피할 경우 경전철 운행이 중단시간은 더욱 증가한다. 경전철의 운행 중단 시간을 최소화하기 위해 현재 경전철 운영기관에서는 도시철도 기관사 면허를 소지한 안전요원을 열차 또는 역사에 배치하여 운영중이다<sup>4)</sup>. 그러나 무인운전을 기반으로 설계, 제작, 건설되어 경전철 차량 내부에는 기관사나 안전요원이 안정적으로

<sup>†</sup>한국교통대학교 철도운전시스템 전공 교수 (Department of Railway Operation System, Korea National University of Transportation)

근무할 기관실이 없는 경우가 대부분이다. 경전철 역사도 무인역으로 설계 및 건설되어 직원이 열차운행 상황을 파악하며 안정적으로 근무하기 위한 역무실이 없다. 무인 경전철을 운영하는 기관의 입장에서는 발생빈도가 낮은 장시간의 운행중단을 예방하기 위해 노선 연장 10 km당 50명 수준의 인력을 운영하는데 부담이 있으며, 안전요원의 입장에서는 안정적인 근무공간이 없어 근무 만족도가 낮아 2년 이내의 이직율이 80% 수준으로 높아 인력의 전문성 축적에 어려움이 발생하고 있다<sup>5)</sup>.

무인운전 경전철 시스템의 안전한 운영과 관련된 국제표준인 IEC 62267<sup>6)</sup>은 국내의 KSC IEC 62267<sup>7)</sup>에 반영되어 2020년부터 적용중이다. 그러나 무인운전에 관한 국내외 표준은 사고시 인명피해에 초점을 두고 있어, 안전요원 배치 기준은 없다. 이로 인해 무인운전 경전철 운영기관과 철도안전관리를 위한 감독기관 사이에서는 안전요원 배치여부에 대한 논란이 지속적으로 발생하고 있다.

본 연구에서는 장시간 운행중단을 예방하기 위한 대책으로 국내에서 적용중인 대표적인 대책인 안전요원의 배치 및 운영 방식에 따른 효율성을 분석하고자 하였다. 경전철의 운행 중단시 시간에 대한 기준은 국내의 철도안전법에서 20분 이내로 기술하고 있다. 경전철 및 도시철도의 운행중단 시간이 20분 이상인 경우 운행장애로 규정하고 국가에 보고하도록 하고 있다<sup>4)</sup>. 20분 이상의 운행중단은 운영기관의 경영평가는 물론 서비스 평가의 주요지표로 활용중이다. 따라서 20분 이내의 운행재개를 서비스의 목표로 설정하고 있다. 본 연구에서는 무인운전 경전철 노선의 안전요원의 배치 방식에 따른 열차운행 중단시간의 차이를 예측하기 위해 운행중단에 큰 영향을 미치는 인자를 분석하였으며, 이들 영향인자의 큰 편차를 효과적으로 고려하기 위해 Monte Carlo 모사기법을 적용하였다<sup>8,9)</sup>. 본 연구에서 도출된 결과는 운영기관의 열차운행중단에 대한 목표설정과 목표 달성을 위한 안전요원의 배치 전략 수립에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 경전철 운행중단시 운행재개 시나리오

무인운전 경전철의 운행중단은 빈번하게 발생하나 중앙통제실에서 원격제어를 통해 복구가 가능한 경우가 대부분이다. 다만 복구가 불가능할 경우 다음의 시나리오로 운영을 재개하고 있다.

- ① 이상 발생 여부 확인 및 원인 예측

- ② 구간 내 운행 열차의 인근역 정차 후 운행중지
- ③ 복구를 위한 안전요원의 출동 결정
- ④ 안전요원 출동 명령 및 관련 인력 비상 연락
- ⑤ 고장 발생 열차 인근의 안전요원 출동
- ⑥ 안전요원의 역사 도착
- ⑦ 안전요원의 승강장 도착
- ⑧ 비상 대피로를 통한 안전요원의 고장 열차 도착 (필요시 전차선 단전)
- ⑨ 고장 열차의 임시 제어기능 활성화 및 고장조치
- ⑩ 고장조치 후 임시 이동 승인 요청
- ⑪ 관제실 승인후 열차의 임시 이동 또는 회송
- ⑫ 인근역 또는 차량기지 도착 후 여객하차, 정비

위의 시나리오로 복구가 불가능한 경우 다른 열차나 복구용 특수차량을 이용하여 고장난 열차를 견인하는 구원운전을 하고 있으며, 이 경우 구원운전 열차의 출동에는 30분 이상이 소요되어 열차 운행의 정상화에는 많은 시간이 소요된다. 위의 시나리오와 같이 안전요원이 운행이 중단된 열차에 출동하여 조치한 사례는 무인운전 노선 전체에 대해 최근 5년(2017~2021년)간 93건이 발생하였다<sup>3)</sup>.

### 2.1 현재 국내의 안전요원 배치 방식

국내의 무인운전 경전철 운영기관에서는 철도안전법의 운행장애 기준인 20분 이상의 운행중단을 최소화하기 위해 다음 3가지 방식으로 안전요원을 배치하고 있다<sup>10)</sup>.

- 1) 일반 도시철도와 동일하게 무인운전 열차에 기관사가 탑승하여 운행 중단시 기관사가 직접 운전하는 방식(실제 열차운행은 중앙제어실에서 제어하며, 비상시에만 기관사가 운전하는 방식)
- 2) 무인운전 열차에 안전요원은 배치하지 않으며, 역사에만 배치하는 방식(안전요원은 역사와 선로 옆에 설치된 비상대피로를 통해 운행이 중단된 열차까지 도보로 접근하여 열차에 탑승하여 열차를 수동으로 운행)
- 3) 2개 또는 주요 역사에만 안전요원을 배치하거나 역사이를 순회하며 근무하는 방식(역사에 도착한 이후에는 2번 시나리오와 동일하게 열차에 접근)

2022년 6월 기준 Table 1에 현재 국내 무인운전 경전철 운영기관별 운영노선 연장, 편성별 여객정원, 역사 수, 기관 전체의 안전요원 수를 수록하였다. 현재 안전요원의 수는 지속적으로 변화하고 있다. 예로서 신규

Table 1. Status of unmanned light rail operation

Company	Length km	No. of station	Passenger per train	No. of safety staff
A	31.1	13	940	257
B	29.1	27	206	259
C	23.7	10	172	94
D	23.1	30	265	245
E	22.4	21	184	68
F	18.1	15	133	69
G	12.7	14	312	175
H	11.4	13	174	43
I	10.6	15	236	53
J	7.5	11	158	TBD*
	189.7	169		1,263

\*개통 초기로 변경 가능

개통시 초기 안정화 단계에는 많은 인원이 투입되다가 점차 감소하는 형태로 운영중이다.

## 2.2 운행중단 시간 영향인자특성 분석

기관사 열차를 운전하지 않는 무인운전 경전철 시스템에서 운행중 문제가 발생하여 열차가 정지한 경우 중앙통제실에서 비상복구를 시도한다. 비상복구는 전철에 기술된 운행재개 시나리오를 적용한다. 운행 재개 시나리오중 가장 많은 시간이 소요되는 영향인자를 도출하기 위해 국내 10개 노선의 경전철 운영기관의 전문가 인터뷰와 현장방문, 운행 중단시 복구절차, 비상시 대응 매뉴얼, 기술적인 복구시스템을 분석하였다.

무인운전 경전철의 운행중단 특성을 분석한 결과 경전철 차량, 신호시스템 등과 같은 H/W 시스템의 경우 경험이 축적되면서 문제가 되는 구성요소에 대한 점검 주기 감소, 신뢰성이 높은 시스템으로 교체, 감시설비의 추가 설치 등을 통해 문제를 지속적으로 해소하였다. 그러나 안전요원의 투입 시간은 H/W 교체로 대체가 되지 않고 가장 많은 시간이 소요되는 인자이다. 이로 인해 안전요원 배치 방식의 영향이 점차 커지고 있어 본 연구에서는 안전요원의 배치 방식에 초점을 두어 분석하였다.

본 연구의 목적은 무인운전 경전철의 안전요원 배치 방식에 따른 운행중단 시간 변화 예측으로 국가차원의 안전요원 배치의 효과를 측정하기 위함이다. 따라서 개별적인 무인운전 노선의 모든 특징보다는 공통적인 요소에 초점을 두었다. 분석 결과 공통적으로 다음 4가지의 활동을 위한 시간이 운행재개 시간에 가장 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. 주요 영향인자는 고장 상황이나, 고장의 종류, 열차가 정지한 위치, 여객의 혼

잡도에 따라 편차가 매우 크다. 현재와 같이 최악의 경우를 가정한 열차운행 재개 시나리오를 적용할 경우 모두 20분 이상의 운행중단이 예측되어 사실상 무인운전이 불가능하도록 되어 있다. 그러나, 실제 운행중 운행중단이 발생한 경우 대부분은 10분 이내에 운행 재개가 가능하였다. 무인운전 경전철 노선의 장시간 운행중단 고장은 연간 18건 수준으로 노선별로는 연간 1~2건 정도 발생하고 있다. 본 연구에서는 무인운전 경전철의 운행중단 시나리오를 현실화하여 최악의 경우를 가정하지 않고 실제 다양한 편차를 고려한 해석을 하고자 하였다. 다음에 주요 인자의 특징과 확률분포 특성을 기술하였다.

- ① 출동명령시간( $T_A$ ) : 중앙통제실에서 열차고장을 확인하고 원격으로 복구를 시도한 후 원격복구가 불가능하다고 판단하여 안전요원의 출동을 명령하는데 소요되는 시간(출동에 대한 의사결정시간 포함, 고장 발생 직후 부터 기관사 출동 명령지시까지의 시간)  
중앙통제실의 관제사는 주변의 관제사로부터 조언이 가능하며, 빈번히 발생하는 고장의 경우 신속한 출동명령이 가능하다. 그러나 특이한 고장이나 관제사의 숙련도가 낮은 경우 의사결정에 시간이 소요되는 특성을 고려하여 Log-Normal 분포를 가정하였다.
- ② 안전요원의 열차 접근시간( $T_B$ ) : 안전요원이 고장으로 운행이 중단된 열차까지 접근하는 시간(안전요원이 출동 명령을 받고 역사와 선로를 통해 고장난 열차에 탑승까지의 시간)  
관제사의 명령에 따라 역사나 역사 사이에서 순환 근무중인 안전요원이 고장난 열차에 접근하는 물리적인 이동 시간. 고장으로 운행이 중단된 열차와 기관사의 물리적인 거리가 지배적인 영향을 미치며, 역사내 이동시간 및 선로에서 열차내부 진입시간은 고정값으로 계산이 가능하다. 열차의 고장이 역사와 역사 사이에서 임의로 발생하고 있어 고장난 열차의 위치는 균일분포로 가정하였다.
- ③ 안전요원의 조치시간( $T_C$ ) : 안전요원이 고장난 열차에서 고장의 원인을 파악, 고장원인을 제거하고 열차내 비상시 조치를 성공 후 인근 역사까지 이동 준비를 마무리하는 시간이다.(열차내 비상제어 설비를 개방후 고장원인 파악과 고장조치를 완료하고, 관제사에 운행재개를 보고하는데 소요되는 시간). 안전요원의 경험과 능력에 많은 영향을 받으며, 고장원인 파악과 비상 조치시 무전을

통해 외부에 있는 전문가의 조언이 가능하다. 시간이 경과할 수록 비상 조치에 성공할 확률이 증가한다. 따라서 안전요원의 조치시간은 지수함수 분포로 가정하였다. 안전요원의 숙련도에 따라 영향을 받는 인자이나, 안전요원의 이직율이 높고, 고장을 경험할 확률이 낮아 표준편차를 평균값의 20%로 고려하였다.

- ④ 인근역까지의 이동시간( $T_D$ ) : 안전요원이 고장 열차를 15~25 km/h 이하의 속도로 인근 역사까지 수동으로 운행후 여객이 모두 하차하는데 소요되는 시간으로 여객의 혼잡도와 정차된 열차의 위치에 따라 영향을 받는다. 본 연구에서는 관련된 자료가 충분히 확보되지 않아 정규분포로 가정하였다. 향후 개별적인 운영노선에 적용할 경우에는 노선별 특성을 고려한 확률 분포를 수정하여 적용할 수 있다.

### 2.3 확률론적 해석을 통한 운행중단 시간 예측

전 절에서 도출한 열차운행중단에 영향을 미치는 주요 인자의 편차를 고려한 해석을 위해 본 연구에서는 Monte Carlo 모사기법을 적용하였다. Monte Carlo 모사기법은 주요 영향인자별로 확률모형에 따른 난수를 발생시켜 다수의 반복적인 계산을 통해 특정한 조건을 충족하는 횟수를 구하는 일반적인 해석기법이다<sup>8)</sup>. 안전요원 배치에 대한 3가지 시나리오별로 열차운행 재개시간에 지배적인 영향을 미치는 4개 인자의 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)의 종류, 평균값(mean), 표준편차(STD), 최대값(Max), 최소값(Min)을 Table 2에 각각 수록하였다. 본 연구에서는 Table 2에 기술된 확률밀도함수에 따른 4개의 확률변수를 발생시켜 10,000회의 반복계산을 수행하였다. 또한 낮은 확률의 난수발생시 오차를 최소화하기 위해 난수 발생 시점을 변화하여 3회의 독립된 분석을 수행하였다. 전체 해석은 3만회(확률변수별 난수 발생은 120,000회)를 수행하여  $10^4$ 의 정밀도로 확률을 산출할 수 있다. Monte Carlo 모사를 위한 해석은 선행연구<sup>11,12)</sup>에서 개발된 코드를 사용하였으며, 난수발생 결과 등의 검증은 동일

한 방법으로 수행하였다. 열차운행 중단시간 20분 이상의 확률은  $10^2$  이상으로 본 연구에서 수행한  $10^4$  이상의 정밀도로 설정하였다. Monte Carlo 해석시 20분 이내의 열차운행재개의 성공조건과 실패 조건은 다음 식을 사용하였다.

$$\text{성공 조건} : (T_A + T_B + T_C + T_D) \leq 1200 \quad (1)$$

$$\text{실패 조건} : (T_A + T_B + T_C + T_D) > 1200 \quad (2)$$

Table 2의 확률밀도함수에 따른 변수를 각각 발생시켜 합산한 시간이 20분 이내(1200초 이내)인 식(1)을 성공으로 해석하고, 전체 Monte Carlo 시행 횟수중 성공횟수의 비율을 계산하였다. Table 2의 확률변수 생성시 Case 1의 경우 안전요원이 고장난 열차에 이미 탑승하고 있으므로 기관사 접근시간( $T_B$ )를 Zero로 해석하였다. Case 2의 경우 안전요원이 역사 배치되어 있으나, 역사내부에서 고장난 열차까지 이동하는 고정된 시간을 고려하여 기관사 접근시간( $T_B$ )를 120초로 해석하였다. Case 3은 모두 Table 2상의 확률분포(평균값이 255초인 균일분포)로 해석하였다. Monte Carlo 해석 결과 열차운행 재개에 소요되는 전체시간의 분포는 Fig. 1과 같은 Log-Normal 분포로 분석되었다. 3가지 경우에 대해 성공한 빈도를 시간축으로 하여 히스토그램으로 표현하였다. 20분 이내 열차 운행재개 성공률은 Fig. 1에서 실선 안에 위치한 영역의 면적의 비율로 산정된다. 해석결과 20분 이내 운행 재개 성공확률은 Case 1(안전요원이 열차에 탑승하는 경우)이 90.5%로 가장 높으며, Case 2(안전요원이 모든 역사에서 대기하는 경우)의 경우 85.8%로 나타났다. Case 3(안전요원이 2개 역사를 순회하는 경우)는 20분 이내 운행 재개 성공률이 76.8%로 가장 낮게 나타났다. Monte Carlo 모사를 통해 안전요원의 배치 방식 3가지별로 20분 이내에 운행 재개 성공률 또는 운행재개 실패율을 분석하였다. 분석결과 안전요원 배치여부에 따라 운행재개 시간은 14% 수준의 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과는 경전철 운영노선의 최초설계시 운행중단 목표를 설정하거나, 운행노선의 안전요원의 배치여부

Table 2. Probabilistic characteristics of major factors for light train suspension time

Probabilistic variable (sec.)	PDF type	Case 1				Case 2				Case 3			
		Mean	STD	Min.	Max.	Mean	STD	Min.	Max.	Mean	STD	Min.	Max.
Time to dispatch order( $T_A$ )	Log-normal	240	48	180	420	240	48	180	420	240	48	180	420
Time to arrival to train( $T_B$ )	Uniform	0	-	-	-	120	-	-	-	255	-	90	420
Time to repair( $T_C$ )	Exponential	300	-	180	420	300	-	180	420	300	-	180	420
Time to resume( $T_D$ )	Normal	240	48	60	360	240	48	60	360	240	48	60	360

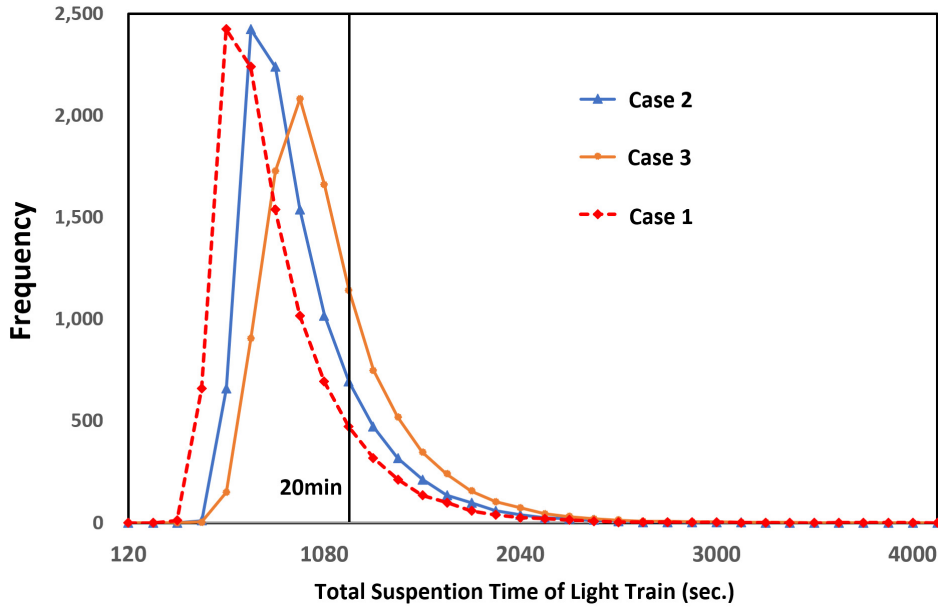


Fig. 1. Total Suspension time of unmanned light train for each case.

를 결정할 때 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 본 연구에서는 안전요원 배치와 운행중단과 관련된 국내의 기준이나 선행연구가 없어 열차운행 간격, 여객의 혼잡도 등을 상황별로 고려하지 않고 있어 시간대별로 안전요원 배치를 변경하는 상황을 고려하지는 않았다. 또한 열차운행 재개시간에 영향을 미치는 주요 인자의 확률모형의 표준편차 설정을 위한 충분한 자료가 확보되지 않아 평균값의 20%로 설정하였다. 이들 제약사항은 향후 추가적인 자료가 확보되면, 보다 신뢰성 있는 분석이 가능할 것으로 예상된다.

### 3. 결론

국내에서 운영중인 경전철은 무인운전을 기반으로 설계되어 제작 및 운영중이나, 안전요원 배치에 대한 기준이 없어 운영기관별로 상이한 안전요원 배치하여 운영중이다. 본 연구에서는 무인운전 경전철 운영기관의 안전요원 배치에 대한 3가지 시나리오를 구성하여 20분 이상의 운행중단이 발생할 확률을 예측하였다. 관련된 선행연구가 없어 일부 영향인자에는 가정을 사용하였으나, 세부적인 운영시 해당 노선의 확률분포를 적용할 경우 실제 확률을 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

1) 현재 국내의 무인운전 경전철의 안전요원 배치 방식과 안전요원의 투입실적을 분석하였다.

2) 무인운전 경전철의 운행중 중단이 발생한 경우 안전요원 배치 시나리오별로 열차운행 재개에 소요되는 주요 영향인자를 도출하였다.

3) 열차운행 재개에 영향을 미치는 주요 인자의 편차가 매우 커서, 최악의 상황을 가정하면, 모든 무인운전 경전철에 안전요원이 탑승해야 하는 문제가 있다. 이를 해소하기 위해 주요 인자를 단일 변수로 가정하지 않고 확률변수로 가정한 확률론적 해석을 수행하였다.

4) 확률론적 해석을 통해 무인운전 경전철의 안전요원 배치 시나리오 별로 20분 이내 열차운행 재개확률을 각각 도출하였다. 20분 이내 열차운행 재개 확률은 76.8%~90.5% 범위로 14% 정도의 차이를 보였다.

본 연구의 결과는 무인운전 경전철 노선의 안정적인 운영에 대한 목표설정과 안전요원의 배치 방안 마련에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 국내의 무인운전 표준의 안전요구 사항을 충족하는 경우에 대해 적용이 가능하다.

**Acknowledgement:** This research was supported by Korea National University of Transportation in 2022.

### References

- 1) UITP, International Association of Public Transport, World Report on Metro Automation 2018 : Statistics Brief. 2020.
- 2) MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport),

- Regulation on Railway Safety Management System Inspection and Approval, 2022.
- 3) KOTSA, Korea Transportation Safety Authority, Railroad Safety Annual Report 2021, 2022.
  - 4) Ministry of Government Legislation, Railroad Safety Act, 2022.
  - 5) Korea Railroad Research Institute, Research Report : 3<sup>rd</sup> National Railway Safety Plan(2016-2020), Report No. 11-1613000-001213-14, 2015.
  - 6) IEC 62267, Railway Applications -Automated urban guided transport(AUGT)-Safety Requirements, 2009.
  - 7) KS C IEC, IEC 62267, Railway Applications- Automated urban Guided Transport(AUGT)-Safety Requirements, 2020.
  - 8) Averill M Law, W David Kelton, Simulation and Modeling & Analysis, McGrawHill, 1991.
  - 9) W. S. Park and S.Y. Ok, “Reliability Analysis of Stowage System of Container Crane Using Subset Simulation with Markov Chain Monte Carlo Sampling”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, pp. 54-59, 2017.
  - 10) Korea Railroad Research Institute, Research Report : Modified 3<sup>rd</sup> National Railway Safety Plan(2016-2022), Report No. 11-B551201-00126-01, 2019.
  - 11) S. L. Kwak, S. H. Hong, J. B. Wang and Y. O. Cho, “Application of Probabilistic Technique for the Development of Fire Accident Scenarios in Railway Tunnel”, Journal of Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 4, pp. 302-206, 2004.
  - 12) H. Ang and W. H. Tang, “Probability Concepts in Engineering Planning Design”, Vol. I, II, John Wiley & Sons, Inc, 1975.