

# GPS 오차를 고려한 항만 내 낙하물 사고위험 알고리즘 보정 방법론 개발

## Methodology of Calibration for Falling Objects Accident-Risk-Zone Approach Detection Algorithm at Port Considering GPS Errors

손 승 오\* · 김 현 서\*\* · 박 준 영\*\*\*

\* 주저자 : 한양대학교 스마트시티공학과 박사과정

\*\* 공저자 : 한양대학교 스마트시티공학과 석사과정

\*\*\* 교신저자 : 한양대학교 교통·물류공학과, 스마트시티공학과 조교수

Seung-Oh Son\* · Hyeonso Kim\*\* · Juneyoung Park\*\*\*

\* Dept. of Smart city Eng., Hanyang Univ.

\*\* Dept. of Smart city Eng., Hanyang Univ.

\*\*\* Dept. of Transportation & Logistics Eng; Smart city Eng., Hanyang Univ.

† Corresponding author : Juneyoung Park, juneyoung@hanyang.ac.kr

Vol.19 No.6(2020)

December, 2020

pp.61~73

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.6.61>

2020.19.6.61

Received 12 October 2020

Revised 27 October 2020

Accepted 11 November 2020

© 2020. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

IoT 디바이스로부터 수집된 위치정보를 활용한 실시간 위치센싱 기술은 항만 등 다양한 산업현장에서 활용되고 있다. 그러나 GPS 센서의 특성상 오차는 항상 존재하며, 이를 활용하는 사고위험 검지 알고리즘은 오차의 고려가 필수적이다. 본 연구는 GPS 오차를 고려한 항만 내 낙하물 사고위험 구역 접근검지 알고리즘의 보정 방법론을 제안한다. IoT 디바이스로부터 수집된 GPS 오차 데이터를 확률변수로 하는 확률밀도함수를 추정하였으며 알고리즘의 검증을 위해 미시적 시뮬레이션을 활용하였다. 검증 결과 알고리즘은 디바이스의 위치오차 1m, 5m에 따라 검지 정확도가 각각 93%, 77%로 나타났다. 본 연구는 향후 디바이스의 성능을 고려한 유효 위험범위 설정 및 안전관리에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 능동적 안전관리 시스템, 항만 근로자 안전, 사고위험 알고리즘, 사물인터넷, 실시간 위치추적 시스템

### ABSTRACT

Real-time location-sensing technology using location information collected from IoT devices is being applied for safety management purposes in many industries, such as ports. On the other hand, positional error is always present owing to the characteristics of GPS. Therefore, accident-risk detection algorithms must consider positional error. This paper proposes a methodology of calibration for falling object accident-risk-zone approach detection algorithm considering GPS errors. A probability density function was estimated, with positional error data collected from IoT devices as a probability variable. As a result of the verification, the algorithm showed a detection accuracy of 93% and 77%. Overall, the analysis results derived according to the GPS error level will be an important criterion for upgrading algorithms and real-time risk managements in the future.

Key words : Active safety management system, Port worker safety, Accident risk management algorithm, Internet of Things (IoT), Real-time locating system

## I . Introduction

우리나라 경제는 선진국 중 무역에 의존하는 비중이 매우 높다. 산업통상자원부 관세청 통계자료에 따르면 무역의존도가 2018년 기준 70.4% 수준으로 G20 국가 순위에서 상위권을 차지하였다. 무역의존도란 국가 경제가 무역에 의존하는 정도를 나타내는 지표로 1년간의 수출액과 수입액의 합계를 국내총생산(GDP)으로 나눈 비율을 말한다. 지리적 특성상 육로를 이용하여 수출입화물을 운송할 수 없는 우리나라는 항공과 해상 운송을 수출입 운송수단으로 이용하는데, 특히 수출입물량의 해양수송 의존도는 약 99.7%로 항만 산업이 국내에 미치는 영향은 매우 중요하다고 말할 수 있다 (Korea Maritime Institute, 2018).

항만은 중장비에 의한 컨테이너, 화물의 양·적하 작업이 끊임없이 이루어지는 곳으로 중대 사고의 발생 위험이 가장 높은 곳이다. 특히 다른 일반적인 산업환경과 비교했을 때 각종 소음과 높게 적재되어 있는 컨테이너, 장비로 인해 근로자들의 정상적인 의사소통이 어렵고, 적절한 시야 확보가 힘들어 항만근로자 안전 사고가 빈번히 발생한다. 한국해양수산개발원(KMI, Korea Maritime Institute)에 따르면, 항만하역 업종에서 전체 근로자 대비 재해자 비율은 9.46으로 전체 산업 평균인 4.84의 1.9배에 달한 것으로 나타났다. 이는 유사업종인 철도운송업의 4.9배, 항공운수업의 5.6배, 자동차운수업의 1.5배에 달하는 수치이다. 1만명 당 사망자 수도 1.49명으로 전체 산업 평균인 1.05명을 상회하는 수치로 다른 산업과 비교했을 때 수치적으로 근로자들이 중상해를 입을 확률이 높다고 볼 수 있다(KMI, 2018).

이처럼 항만에서는 중상해 사고가 끊임없이 발생하고 있고 이를 해결하기 위한 IoT, 빅데이터 등 정보통신 분야의 신기술 도입이 요구되고 있다. 특히 IoT 디바이스는 항만 뿐만 아니라 다양한 산업현장에서 문제 해결을 위해 다방면으로 도입이 연구되고 있다. IoT 기술은 서로 연결되어 데이터를 공유할 수 있는 기술을 바탕으로 개별적인 항만 자원의 자율적인 의사결정을 돕고 운영을 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히 그중에서도 위치센싱 기능은 안전분야에서 개인의 상태를 추적하고 상황을 분석/예측함으로써 유용하게 쓰일 수 있다(KMI, 2017). 본 연구는 IoT 디바이스로부터 수집되는 위치정보를 이러한 추적 관리에 활용하여 안전분야에 적용하기 위한 사고위험 검지 알고리즘과 평가 방법론을 제안하였다. 사고위험 검지 알고리즘에 앞서 항만의 주요 작업 및 사고위험, 특징을 파악하기 위해 기존 연구를 고찰하였다. 항만을 배경으로 한 다양한 연구들 중 근로자 및 사고위험 예방, 관리를 주제로 한 연구들을 세 분야로 구분하여 정리하였다. 첫째, 사고 및 행태의 통계분석을 통해 문제점과 해결방안을 제시한 연구이다. Budiyanto and Fernanda(2020)은 결함수분석법(Fault Tree Analysis, FTA)과 공식안전평가(Formal Safety Assessment, FSA)를 통해 인도네시아 Jakarta에 위치한 Tanjung Priok 항만 컨테이너 터미널 현장에서 발생하는 위험의 원인을 분석하였다. Lu and Yang(2010)은 계층적 회귀분석을 활용하여 안전 리더십 지수(안전동기부여, 안전정책, 안전우려)가 대만 내 항만 근로자 안전 행동에 미치는 영향을 평가하였다. Bauk et al.(2017)는 대규모 파라미터를 모델링하는 ray-launching 알고리즘과 소규모 파라미터를 산출하기 위한 확률적 모델을 조합하여 항만 근로자 안전경고 시스템을 위한 차량통신방법을 연구하였다. KMI(2017)는 세계의 항만에서 발생한 작업자 안전사고 형태와 통계를 정리하였고, 작업자-장비-환경을 중심으로 IoT/빅데이터를 활용한 최신 항만 안전관리 기술을 분석하여 제시하였다. 위 연구들은 항만 내 사고의 심각성을 인지하고 통계분석을 통해 안전사고와 행동의 영향을 분석한 연구로서 제시한 연구방향성 및 최신 연구동향을 근거로 현재 기술적 수준에 근거한 본 연구의 분석 방법론 구조를 설정하였다.

둘째, 항만 내 근로자 작업 환경 및 행동 특성과 관련하여 수행된 연구이다. Cho and Kim(2019)은 항만 인력의 고용 안정성을 중심으로 항만 운영성과에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 고용의 안정성이 안전 등 운영에 미치는 영향이 유의하다는 결론을 제시하였다. Tajvar et al.(2010)는 안전행태 샘플링 기법을 활

용하여 이란 사히드 리자이항 내 근로자들의 종합 안전교육 실시에 따른 안전 관련 행동 변화를 분석하였다. Tseng and Pilcher(2017)은 중국 가오슝항 주요 이해관계자들의 심층 인터뷰 자료를 분석하는 질적 접근법을 이용해 기존문헌 내용과 비교·분석하여 가오슝항의 안전 개선 방향을 도출하였다. Lee et al.(2019)은 울산항을 중심으로 해외 사례와 항만하역근로자 설문조사 결과를 바탕으로 항만 안전교육·훈련을 강화하여 관리하는 방안을 제시하였다. 주로 사고 예방을 목적으로 하는 연구가 진행되었다. 대다수의 연구의 원인분석에서 주로 크레인 등의 하역장비와 야드 트랙터, 리치 스택커와 같은 운송장비에 의해 사고가 발생하며 이를 통제, 대응의 필요성을 제시하였다. 위 연구들은 항만 내에서 발생하는 근로자의 행태에 대한 고찰을 토대로 실시간 안전한 작업의 관리가 필요하다는 공통적인 내용을 제시하고 있다. 따라서 이러한 연구를 근거로 IoT 기술로 대변되는 최신 통신기술을 활용한 근로자의 작업 및 위험정보를 실시간으로 관리하는 기술을 연구하고 실제 현장에 도입하기 위해 필요한 부분을 연구 내용으로 설정하였다.

이어서 마지막으로 정보통신 기술을 활용한 근로자 중심의 안전관리 관련된 기존 연구를 검토하였다. Li(2017)은 RFID, IoT, 베이더우 위성 기술 등을 이용하여 항만 근로자와 장비를 동시에 감지하여 상대 거리가 취급 장비의 안전반경보다 짧으면 근로자에게 경고 알람을 제공할 수 있는 항만 위험 지역 안전 모니터링 시스템을 개발하였다. 하지만 경고 알람 제공의 기준이 되는 안전반경을 산정하는 알고리즘 및 기준은 미비하였으며 위치오차에 대한 고려는 이루어지지 않았다. Bauk et al.(2017)은 기존 문헌 검토 자료를 기초로 실시간 항만 터미널 내 위험 구역에 대한 접근을 제어하고 개인보호장비(Personal Protective Equipment, PPE)의 사용을 주기적으로 제어하여 항만 근로자 안전을 개선하기 위한 RFID(Radio Frequency Identification) 기반 시스템 개발 및 구현에 대한 필요성을 제시하였다. 다만 RFID 센서를 기반으로 한 연구로서 인프라가 구축된 구역 기반의 위험관리라는 점과 지속적인 추적관리가 이루어질 수 없다는 점에서 한계가 있었다. Yue et al.(2020)은 보행자 안전관리를 위해 ITS 서비스인 Connected 환경의 차량 운전자가 횡단보도를 포함한 도심부 도로 주행 시 갑작스럽게 나타나는 보행자를 보도에서 센서로 인지하여 경고정보를 제공하는 것의 효과를 분석하였다. 보행자와 차량 모두 통신망을 통해 Connected 환경에 있는 점에서 항만의 상황과 유사하다고 판단하였다. 그러나 차량 운전자에게 위험경고를 제공하는 차량 중심의 연구로서 위험상황 시나리오 및 경고제공 설계에서 유의한 점을 제시하였다. 이처럼 정보통신 분야의 기존 연구에 따르면 각각의 특성과 장점을 활용한 다양한 통신기술이 근로자의 안전을 개선, 관리하기 위해 연구, 적용되고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 대다수의 연구가 근거리 통신 및 인접 객체 판단센서를 기반으로 인접 근로자-장비 간의 상충을 검지하는 내용을 중심으로 개발되고 있으며, 항만 작업 구역 내 원거리 통신으로 송수신되는 위치정보를 활용한 안전관리 연구는 미흡한 것으로 판단된다. 따라서 원거리 통신을 활용한 기술의 현장 도입을 위한 연구의 필요성을 판단하고 실전적인 기술 개발을 위한 보정 방법론을 개발하고자 했다.

기존 연구를 세가지 분야로 구분하여 검토한 결과, 항만 내에서 발생하는 사고는 대다수가 중장비에 의해 발생하는 중상 사고인 것으로 나타났다. 또한 센서 기반의 구역 위험을 관리하는 기술이거나 위치센싱 기술에서 위치오차를 고려하지 않은, 미래 개선된 기술을 고려한 제안형식의 연구인 것으로 나타났다. 현재 기술적 수준에서 발생하는 문제점을 개선하지 못했기 때문에, 이를 보완한 실증적인 연구가 필요한 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구는 항만 내 IoT 디바이스의 도입과 향후 기술적 검증 및 고도화를 위해 IoT 기술의 GPS 위치오차를 고려한 오차별 평가 방법론을 제안하였다. 방법론의 검증을 위해 실제 항만 환경에서 발생할 수 있는 낙하물 사고위험 구역 접근 검지 알고리즘을 개발하였다. 낙하물 사고는 항만 내 컨테이너 크레인에서 빈번히 발생하는 핵심 안전사고 유형이다(KMI, 2017). 본 연구에서는 에이프런에 위치한 안벽크레인의 컨테이너 양적하 작업구역에서 작업 중인 근로자가 스프레더 하부로 접근하는 상황을 분석 시나리오로 하여 연구를 수행하였다. 에이프런에는 라싱덴, 신호수 등 작업을 위한 근로자 뿐만 아니라 휴게실로 이동

및 작업으로 복귀하는 근로자, 허가되지 않은 일반인 등 다양한 보행자가 존재한다. 이러한 현장 사고 사례를 근거로 에이프런에 위치한 안벽크레인 작업구역을 우선적인 연구 대상으로 설정하였다. 또한 사고위험 검지 알고리즘을 평가하기 위해서는 IoT 디바이스와 기업 통신망 또는 상용망과의 연계, 통신 및 알고리즘 관리 서버 및 연계 모듈이 필요하다. 그러나 실제 항만 현장에서 사고위험을 관리하는 알고리즘을 탑재한 IoT 디바이스 및 기타 시설이 보급 및 구축되지 않았기 때문에 실제 현장에서의 검증은 어려운 상황이다. 이러한 한계를 극복하고자 미시적 교통 시뮬레이션인 VISSIM을 활용하였다. 항만 교통 네트워크 내에 위치한 근로자가 IoT 디바이스를 착용하고 있다고 가정하고, 가상 네트워크에서 수집되는 근로자 및 이동장비의 위치정보를 디바이스를 통해 수집되는 위치정보로 하여 사고위험 검지 알고리즘을 검증하였다. 가상 네트워크와 관련한 내용은 다음 장에 상세히 제시하였다. 알고리즘 검증은 실제 항만 현장에서 측정된 IoT 디바이스 시제품의 위치정보 수집자료를 바탕으로 오차수준(1~5m)에 따른 확률밀도함수 기반의 방법론을 통해 수행하였다. 최종적으로 오차수준에 따른 사고위험 검지 정확도를 통해 위치오차에 따라 시나리오별로 근로자의 위험상황을 얼마나 정확하게 검지하는지 제시하였다. 여기서 위험상황을 구분하는 위험도 기준은 부산항 안전기준 매뉴얼(BPA, 2013)을 토대로 근로자가 위험하다고 정의하는 위험반경을 연구의 기준으로 하였다.

다음 2장에서는 시뮬레이션 테스트 내용과 분석 시나리오 및 IoT 디바이스 시제품의 위치정보 수집 결과 및 연구 적용방안을 제시하였다. 가상환경 테스트를 위한 상황별 시나리오와 실제 항만의 IoT 디바이스 시제품으로부터 수집한 위치오차 정보, 해당 사고위험 관리기술이 적용되는 공간적 배경을 설명하였다. 3장에서는 분석 방법론으로 사고위험 검지 알고리즘 및 위치정보를 활용한 확률밀도함수 기반의 예상 오차 추정 방법론을 제시하였다. 4장에서는 분석 결과와 함께 시뮬레이션 시나리오별 검지 정확도를 결과로 도출하였다. 마지막 장에서는 결론과 향후 연구과제를 서술하였다.

## II. Simulation test and data

### 1. Simulation network design and test scenarios

본 연구는 부산항 컨테이너 터미널 신선대부두를 공간적 배경으로 한다. 신선대부두의 에이프런의 1개 선석을 대상으로 미시 교통 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM Version 2020을 활용하여 교통 네트워크를 구축하였다. 연구의 목적이 항만 내 근로자 사고위험 상황에서의 오차에 따른 알고리즘을 보정하는 것이기 때문에 에이프런 내 컨테이너 양적하 작업구역의 위험상황을 구현하는 것에 집중하였다. Google map과 kakao map, 실제 현장에서 촬영한 사진을 이용하여 동일한 공간적 네트워크를 구축하였다. 네트워크에서 위험구역으로 접근하는 근로자의 속도는 기존 연구를 근거로 하여 일반적인 보행자의 속도(0~6km/h)로 이동하도록 설정하였다 (Yue et al., 2020). 또한 안벽크레인의 양적하 작업 특성을 가상 네트워크에 유사하게 구현하기 위해 접안된 선박으로부터 에이프런으로 컨테이너를 반복하여 이동 및 작업하는 크레인 스프레더의 움직임을 구현하였다. 크레인 스프레더의 횡행속도(트롤리 속도)는 제원상 분당 210~240m이며 권상속도(호이스트 속도)는 분당 90~180m인 것으로 나타났다(Bartosek and Marek, 2013; Choi, 2004; Jordan, 2002; KOSHA, 2018). 따라서 네트워크 내에서 스프레더로 설정된 객체가 3.5~4m/s의 횡행속도로 움직이도록 설정하였다. 권상속도는 시뮬레이션 상에서 객체가 대기하는 것으로 구현하였다. 권상속도가 1.5~3m/s로 안벽크레인의 높이(40~50m)에 따라 대기시간은 약 13초~30초의 분포를 보일 수 있다. 본 연구의 목적이 IoT 디바이스의 현장 도입을 위해 GPS 오차를 보정한 알고리즘의 검증을 수행하는 것이기 때문에 권상속도를 고려한 대기시간을 20초의 고정

값으로 지정하여 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 기존 교통량 및 속도 중심의 상층분석을 위해 수행되는 교통분야 시뮬레이션 연구와 달리 에이프런 안벽크레인의 현실 작업환경 구현을 목표로 하기 때문에 시뮬레이션 정산 및 검증 과정을 수행하지 않고 학술적 근거를 토대로 네트워크를 구성하였다. 시뮬레이션 시간은 총 1,200초의 길이로 설정하였으며, 실제 IoT 디바이스의 통신능력을 고려하여 수집주기를 3가지로 구분하여 시뮬레이션 데이터를 수집하였다. 현재 IoT 디바이스의 개발가능한 기술적 수준은 1hz, 5hz이며, 향후 배터리 및 송수신 기술의 향상 이후 개선된 수집주기를 고려하여 10hz까지 연구범위로 설정하여 분석을 수행하였다.

## 2. GPS Data from IoT device(Prototype)

본 연구는 시뮬레이션 기반 사고위험 검지 알고리즘을 보정하는 것을 목표로, 위치정보의 오차에 따른 알고리즘의 검지 정확도를 제시하는 것을 목적으로 한다. 시뮬레이션에서 수집되는 대상 객체(근로자, 이동장비)의 위치정보는 정확도가 100%(오차율 0%)로 알고리즘 단계에서 정량적인 판단의 문제점을 제외하면 검지 정확도는 100%로 나타날 것이다. 그러나 실제 환경에서는 IoT 디바이스의 상용화 및 지속 가능성 등 작업 현장에서 즉각 활용가능한 기술적 수준을 고려하면 GPS(Global Positioning System) 위치정보 오차가 존재한다. 위성으로부터 디바이스의 GPS 수신기로 실시간 송신되는 위치정보는 디바이스의 위치정보 측위 방식에 따라 단순한 위성 GPS 신호 수신시 음영지역에서 오차는 최대 15m 이상 발생할 수 있다. 그러나 항만 환경으로 활용 계획 중인 IoT 웨어러블 디바이스의 경우 GPS 측위 방식은 인접 기준국을 통해 1~2m 이내의 위치정확도 확보가 가능한 위성항법보정시스템(DGPS, Differential Global Positioning System) 방식으로 제공된다. DGPS 방식은 기존 GPS 위치측위 정밀도를 지상 기준국의 보정정보를 이용하여 향상시킬 수 있는 기술로서 전용장비를 이용해 활용이 가능하다 (Bang and Hong, 2015; Kim et al., 2012). 본 연구에서는 DGPS 방식의 디바이스에서 수집한 위치정보를 가정하여 위치오차에 따른 알고리즘 정확도 검증을 수행하였다. DGPS 방식에서 정밀 전처리 전에 수집 가능한 5m의 위치오차와 전처리 이후 1m 이내의 위치오차 등 2가지 오차범위를 연구 비교대상으로 설정하였다.

본 연구에서는 검증에 앞서 DGPS 측위 방식의 IoT 웨어러블 디바이스 시제품으로 부산 신선대부두 현장에서 수집한 위치정보 데이터를 활용하여 시뮬레이션에서 수집한 위치정보의 오차율을 산출하였다. 위치정보는 개활지(Open area), 작업장(Work place), 휴게실(Rest area)로 구분하여 수집하였으며 전체 표본 수는 689개이다. 수집한 위치정보 데이터의 기초통계량은 <Table 1>과 같다. GPS 위치좌표는 위도(Latitude), 경도(Longitude) 기준에 따라 수집되었으며, 이를 오차길이로 환산하기 위해 Haversine formula를 활용하여 m단위로 변경하였다(Cajori, 1993). 위치정보의 오차는 평균 1.5461m(Min 0m, Max 4.7m)로 나타났다.

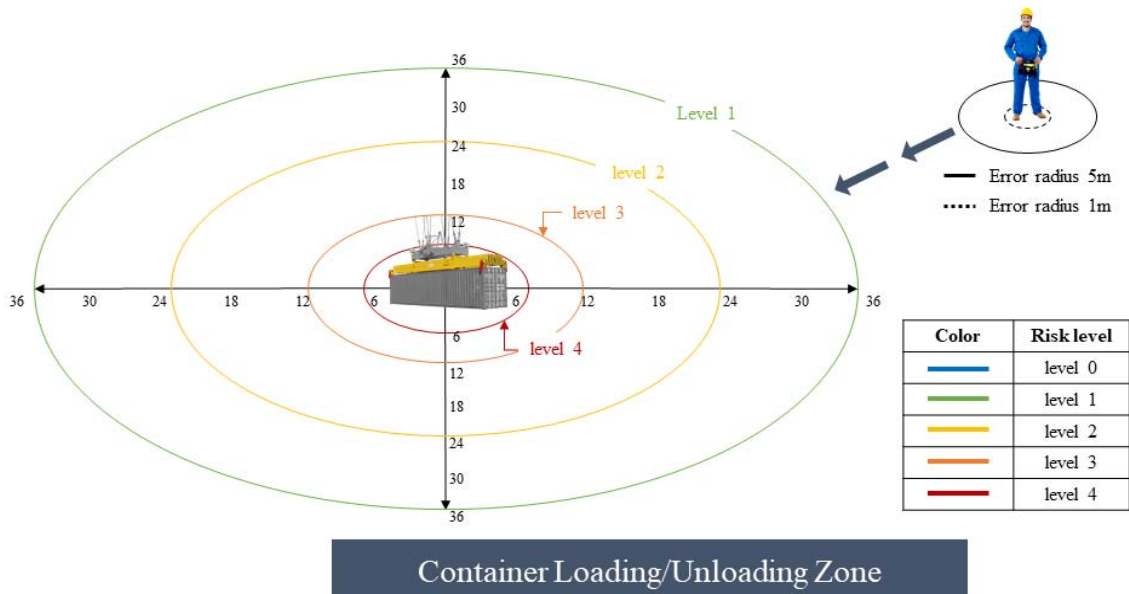
<Table 1> Descriptive Statistics of GPS Data from IoT wearable device(Prototype) (Unit: m)

Variable	Number of Samples	Mean	Median	Mode	Standard error	Max	Min
Open area	207	2.4754	2.5	2.0	1.2196	4.7	0.1
Work place	156	1.3051	1.2	1.0	0.7627	3.2	0.0
Rest area	325	1.0698	1.0	0.3	0.7265	2.8	0.0
Total	688	1.5461	1.2	0.3	1.0986	4.7	0

### Ⅲ. Methodologies

#### 1. 안벽크레인 작업구역 낙하물 사고 위험구역 접근 금지 알고리즘

에이프런 내 안벽크레인이 위치한 작업구역에서는 크레인의 스프레더에 의해 컨테이너의 양·적하 작업이 수행된다. 고중량의 컨테이너를 선박에서 야드 트랙터로 또는 그 반대로 운반시키는 반복 작업이 수행되기 때문에 예측이 불가능한 장비 파손 등의 사유로 인한 사고위험이 항상 존재하고 있는 구역이다. 이러한 사유로 발생하는 사고 유형은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째, 장비 측면의 대책 방안으로 장비상태 정기 및 수시 점검, 생애주기 관리, 작업환경 관리 등 사전에 필수적으로 시행하여 사고를 예방하는 방안이다. 둘째, 근로자 측면에서의 대책 방안으로 사전 준비운동, 위험구역 접근 금지, 위험작업 간 부주의 금지, 작업절차 준수 등 근로자의 행태를 교정하여 사고를 예방하는 방안이다. 여기서 장비 측면의 대책 방안은 사고율을 낮출 수는 있지만 장비의 노후화, 점검상태 불량 등은 일반적인 체크리스트 수준에 그치기 때문에 우발적으로 발생하는 사고에 대처하기 어렵고 특히 보다 사고위험에 취약한 낙후된 터미널에서는 원천적인 사고예방에 제한적일 수밖에 없다. 따라서 해당 유형의 사고를 예방할 수 있는 최선의 방법은 근로자 관점에서 사전에 위험 구역으로부터 회피할 수 있도록 유도하는 방안이다. 본 연구에서 검증하고자 하는 낙하물 사고위험 금지 알고리즘은 위험구역으로의 접근을 단계별로 금지하여 위험상황을 알려주는 알고리즘이다. 위험구역으로의 진입을 알려주기 위해 금지 알고리즘을 총 5단계로 구성하였다. 각 단계는 Level 0(Blue, 안전), Level 1(Green, 관심), Level 2(Yellow, 주의), Level 3(Orange, 경고), Level 4(Red, 위험)의 5단계로 구성되며 정성적, 공학적으로 판단할 수 있는 기준을 토대로 설정하였다.



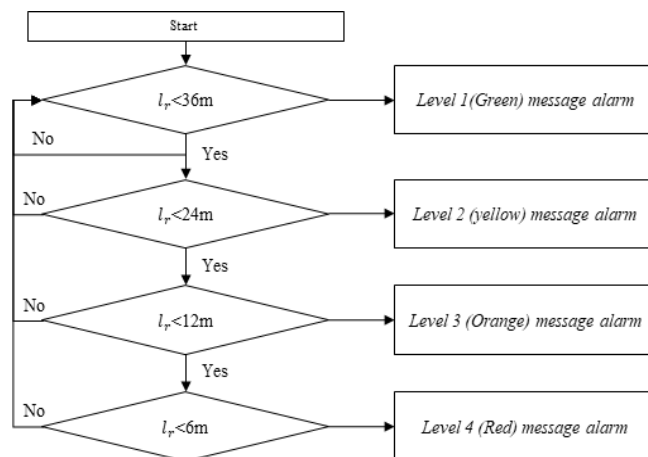
<Fig. 1> Port Worker Container Loading/Unloading Zone Accident Risk Algorithm schematic diagram

산업안전보건기준에 관한 규칙(Ministry of Employment and Labor, 2020)의 제20조(출입의 금지 등) 15. 항만하역작업 장소의 다항에 따르면 ‘양화장치, 데릭(derrick), 크레인, 이동식 크레인(이하 “양화장치등”이라 한

다)에 매달린 화물이 떨어져 근로자에게 위험을 미칠 우려가 있는 장소'에 대해 출입을 금지하고 있다. 또한 부산항 안전기준 매뉴얼(Busan Port Authority, 2013)에 따르면 '라싱 작업자 등 모든 작업자는 본선작업을 하고 있는 컨테이너 하부에서 최소 컨테이너 3개 폭(36m)만큼 떨어져야 한다.'라고 명시하고 있다. 또한 부산항 터미널(BPT)의 현장 안전관리 매뉴얼에 따르면 크레인의 스프레더로부터 컨테이너 2개 폭(24m) 이내로는 접근을 금지하고 있다. 위 산업기준 규칙 및 안전기준 매뉴얼을 근거로 20ft(12m) 컨테이너 3개 기준(36m)을 Level 1(Green) 최소 안전관리 수준으로 설정하였으며, 실제 현장 매뉴얼 기준인 컨테이너 2개 기준(24m)을 Level 2(Yellow)로 1개 기준(12m)을 Level 3(Orange)로 설정하였다(Table 2). 본 연구의 알고리즘에서 제시하는 단계별 위험도 수준을 구분하는 기준은 <Table 2>에서 제시한 정성적 판단 기준과 행동 매뉴얼을 토대로 설정하였으나, 현장 근로자 관점에서의 유효성 및 정보 수용성 검토가 이루어지지 않았다. 따라서 향후 실제 항만 현장에서 개발된 디바이스의 도입 시 근로자 관점에서 받는 위험경고의 수용성을 고려하여 실증 실험 기반의 정밀한 보정은 필수적이다.

<Table 2> Risk Level Classification Criteria for risk detection algorithm

Risk level	Qualitative classification criteria	Quantitative classification criteria
Level 4(Red)	A dangerous situation in which an accident can occur immediately.	$l_r < 6m$
Level 3(Orange)	A situation in which an accident is likely to occur without notification of the surrounding environment.	$l_r < 12m$
Level 2(Yellow)	A situation in which the port-worker is aware of the surrounding situation and is able to actively avoid it.	$l_r < 24m$
Level 1(Green)	A situation in which a response or avoidance is possible without being aware of the situation, but there is a possibility of an accident.	$l_r < 36m$
Level 0(Blue)	A safe situation without the possibility of an accident	$l_r \geq 36m$



<Fig. 2> Port Worker Container Loading/Unloading Zone Accident Risk Algorithm Flow Chart

컨테이너 작업구역 낙하물 사고위험 판단 알고리즘은 향후 실제 현장에서의 수차례 사전 안전성능 테스트를 거쳐 설정한 안전거리 기준에 대해 안전성 이슈를 보장하는 공학적 보완이 필요하다. 검증용 작업 구역 접근 금지 알고리즘의 모식도와 순서도는 각각 <Fig. 1>, <Fig. 2>에 제시하였다.

안벽크레인 스프레더 작업구역 접근금지 알고리즘은 위험구역 내에 접근한 근로자를 위험하다고 판단하여 위험경고를 제공하도록 설계되었다. 즉 근로자의 위치정보에 오차가 발생한다면, 정확한 위치판단에 의한 위험검지를 할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 상황을 Confusion matrix 기반의 검지 정확도를 감소시키는 False로 판단하여 <Table 3>과 같이 분류하였다. NN(Normal-Normal), DD(Danger-Danger)는 정확한 판단이 이루어진 상황이며 ND(Normal-Danger), DN(Danger-Normal)은 위치오차로 인해 잘못된 판단을 한 상황이다. 예를 들어 근로자가 위험구역(Dangerous area)의 외부에 있지만 위치오차로 인해 위험구역 내부에 있다고 판단하는 경우(ND), False alarm이 울릴 것이다. 반대로 근로자가 위험구역 내에 접근하였으나 위치오차로 인해 위험구역 외부에 있다고 판단한 경우(DN), 알람은 울리지 않는다. DN 상황이 가장 위험한 상황이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 위치오차로 인해 잘못된 판단을 야기하는 DN, ND 상황을 도출하는 위치오차 기반의 알고리즘 보정 방법론을 제안하여 위치오차에 따른 검지 정확도를 비교하고 분석하였다.

<Table 3> Confusion matrix

Classification		Error-induced position	
		Normal (Outside of dangerous area)	Danger (Inside of dangerous area)
Actual position	Normal (Outside of dangerous area)	NN	ND
	Danger (Inside of dangerous area)	DN	DD

## 2. 누적분포함수 기반 GPS 오차 보정 방법론

본 연구에서 활용하는 GPS 수집이 필요한 객체는 사고위험 관리 대상인 근로자와 사고위험 유발 대상인 이동장비(야드 트랙터 및 외부트럭)이다. 이 중에서 근로자가 착용하는 것으로 가정하는 IoT 웨어러블 디바이스만을 대상으로 한다. 이동장비에 설치되는 위치센싱 디바이스의 경우 현재 기술적 수준에 따라 개발시 위치오차가 0.1m로 예상되기 때문에 본 연구에서는 위치오차를 시뮬레이션 상에서 수집되는 결과와 동일한 0m로 가정하여 분석하였다. 따라서 근로자용 IoT 웨어러블 디바이스에서 수집되는 오차만을 보정 대상으로 설정하여 연구를 수행하였다. DGPS 방식에서 정밀 전처리 전의 위치오차는 현장 실측결과 약 5m로 나타났으며, 향후 전처리 방식 등 기술개선을 통해 현재 기술적 수준인 1m 이내까지 개선이 가능하다(KISA, 2017). 따라서 본 연구에서는 보정을 위한 비교그룹을 1m, 5m로 설정하여 비교분석을 수행하였다.

위치정보 오차의 차이에 따른 검지 정확도를 보정하기 위해 IoT 웨어러블 디바이스 시제품으로부터 수집한 위치정보를 연속확률변수(Continuous Random Variable, CRV)로 하는 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 이용하였다. 위치정보 오차는 연속적으로 수집되는 자료로 연속적인 구간 내의 값을 취하기 때문에 연속확률변수로 하였고, 연속확률변수의 누적분포함수(CDF)는 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 적분한 것이다. 본 연구의 공간적 배경인 부산 신선대부두에서 수집한 689개의 위치정보 표본으로 확률밀도함수  $f(x)$ 와 누적분포함수  $F(x)$ 를 도출하였다. 수집된 위치정보는 상대거리와 위험구역 길이의 차로 계산하며, 누적분포함수에 맞춰 각 표본에 곱하여 오차율이 보정된 표본 수를 산출할 수 있다. 오차율(Error rates)과 오차 표본수( $N_e$ )를 계산하는 수식은 식 (1), (2), (3)에 제시하였으며 오차정보를 연속확률변수 기반의 누적분포함수(CDF)를 적용한 오차율 보정 방법론 적용 방안을 <Fig. 3>에 제시하였다.



$$e_k = p(k < x < r_{e,max}) = \int_k^{r_{e,max}} f(x) dx \quad (1)$$

$$k = r_{e,max} + |l_r - r_d| - r_e \quad (2)$$

$$N_{e,i} = \sum_{k=0}^{r_{e,max}} e_{k,i} \quad (3)$$

여기서,

$e_{k,i}$  = 객체  $i$ 의 위치  $k$ 에서의 오차율(Error rates) ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )

$k$  = 시뮬레이션 내 실제 위치(Actual position) ( $0 < k < 4.7$ )

$r_{e,max}$  = 근로자 위치정보 표본 최대 오차 값

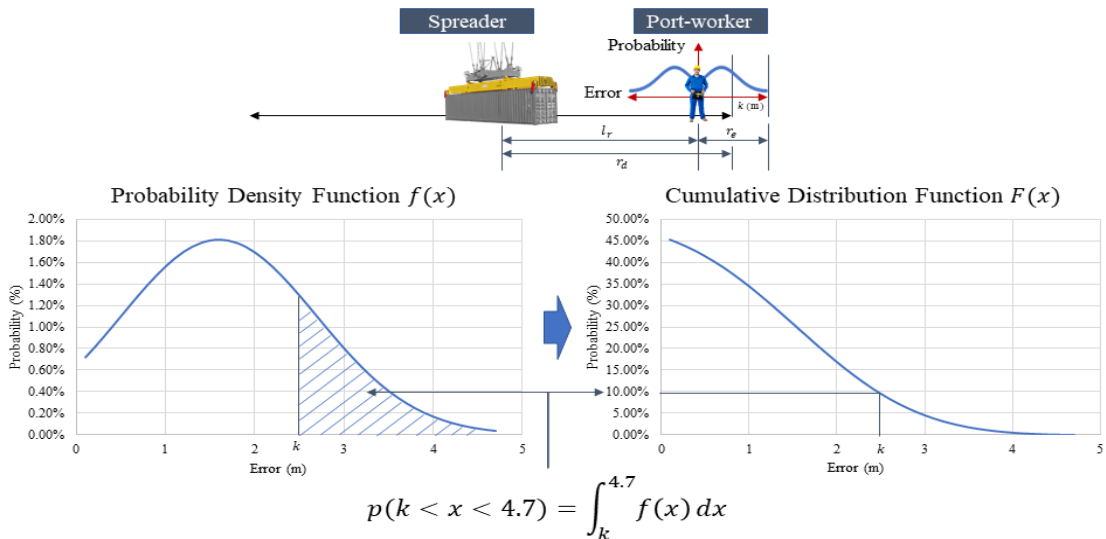
$l_r$  = 상대거리(Relative distance)

$r_e$  = 근로자 위치정보 오차반경(Radius of error position)

$r_d$  = 컨테이너 작업구간 위험반경(Radius of danger)

$N_{e,i}$  = 객체  $i$ 의 오차 표본 수 ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )

$N$  = 위험반경 내 수집 표본 수



<Fig. 3> Procedure for calculating error rate based on

안벽크레인 컨테이너 작업구역의 근로자 접근 검지를 위해 설정된 사고위험 범위는 원이기 때문에 원의 방정식을 활용하여 범위를 정의하였다. 각 위치오차별 세부 범위는 <Table 4>에 제시하였다. 5m 위치오차의 경우 각 위험도 수준별 중복되는 구간이 있다. 따라서 각 수준을 정확하게 분류하지 못하는 상황은 모두 오차로 간주하여 검지 정확도를 산출하였다.

<Table 4> Radius of Hazardous Areas and Scope of Location Errors

Type	Level 1 (18m)	Level 2 (12m)	Level 3 (6m)	Level 4 (3.5m)
Error <1m	$17^2 < x^2 + y^2 < 19^2$	$11^2 < x^2 + y^2 < 13^2$	$5^2 < x^2 + y^2 < 7^2$	$2.5^2 < x^2 + y^2 < 4.5^2$
Error <5m	$13^2 < x^2 + y^2 < 23^2$	$7^2 < x^2 + y^2 < 17^2$	$1^2 < x^2 + y^2 < 11^2$	$x^2 + y^2 < 3.5^2$

## IV. Results and discussions

본 연구에서는 VISSIM을 통해 시뮬레이션 실험을 진행하였으며 주기별(1hz, 2hz, 10hz), 실험 상황별 총 9개의 시나리오에 대한 분석을 수행하였다. 분석결과는 시나리오별 주기에 따른 오차율 및 검지 정확도를 비교하여 제시하였으며, 이를 바탕으로 알고리즘 검지를 위한 적정 위치오차를 검토하였다.

시뮬레이션 상에서 설계한 위험 시나리오에 따라 위치정보의 오차에 따른 알고리즘의 검지 정확도를 비교하였다. 먼저 수집주기가 1hz일 때 위험구간에서 전체 표본은 12,321개이고 방법론에 의해 보정된 위치오차 표본 수는 1m일 때 859개(검지 정확도 93%, 오차율 7%), 5m일 때 2,849개(검지 정확도 77%, 오차율 23%)로 나타났다. 위치오차의 증가에 따라 위치정보가 틀리는 경우가 많기 때문에 약 3배 이상의 오차가 증가하는 것으로 분석되었다. 특히 두 위치오차 모두 Level 3에서 정확도가 가장 낮은 것으로 나타났는데, 이는 level 2, level 4 구역과 접해있어 간격이 가장 좁기 때문에 잘못된 결과를 도출하는 경우가 증가하는 것으로 판단된다. 이에 대한 결과는 <Table 5>에 제시하였다.

<Table 5> Results of detection accuracy in accident risk algorithm (Frequency 1hz)

Error range	Classification	Level 1 (18m)	Level 2 (12m)	Level 3 (6m)	Level 4 (3.5m)	Total
1m	$N_e$	255	328	198	77	859
	$N$	5,286	5,109	1,302	624	12,321
	Accuracy (%)	95%	94%	85%	88%	93%
5m	$N_e$	1,253	1,029	544	23	2,849
	$N$	5,286	5,109	1,302	624	12,321
	Accuracy (%)	76%	80%	58%	96%	77%

<Table 6> Results of detection accuracy in accident risk algorithm (Frequency 5hz)

Error range	Classification	Level 1 (18m)	Level 2 (12m)	Level 3 (6m)	Level 4 (3.5m)	Total
1m	$N_e$	1,286	1,695	779	274	4,034
	$N$	26,814	26,059	6,705	3,107	62,685
	Accuracy (%)	95%	93%	88%	91%	94%
5m	$N_e$	6,354	5,251	2,722	126	14,452
	$N$	26,814	26,059	6,705	3,107	62,685
	Accuracy (%)	76%	80%	59%	96%	77%

정보수집 주기가 5hz일 때의 낙하물 사고 위험구역 접근 검지 알고리즘의 정확도 결과는 1hz일 때의 결과와 큰 차이가 있지 않은 것으로 나타났다. 이는 상대거리 기반의 단순한 알고리즘이며, 위치오차에 따른 보정 방법론이 주기에 따라 변경되지 않기 때문에 유사한 것으로 판단된다. 5hz, 10hz에 따른 시뮬레이션 결과는 각각 <Table 6>, <Table 7>에 제시하였다.

&lt;Table 7&gt; Results of detection accuracy in accident risk algorithm (Frequency 10hz)

Error range	Classification	Level 1 (18m)	Level 2 (12m)	Level 3 (6m)	Level 4 (3.5m)	Total
1m	$N_e$	1,279	1,756	799	529	4,362
	$N$	53,283	52,199	13,419	6,657	125,558
	Accuracy (%)	98%	97%	94%	92%	97%
5m	$N_e$	6,445	7,890	3,816	272	18,424
	$N$	53,283	52,199	13,419	6,657	125,558
	Accuracy (%)	88%	85%	72%	96%	85%

## V. Conclusions

항만이라는 공간은 일반 도로와 비교했을 때 업무 효율화 및 안전관리의 목적 하에서 공간 내 객체 간 정 보수집 및 공유, 활용이 자유로운 곳이라고 할 수 있다. 이러한 특성에 따라 제한적이지만 V2X(Vehicle to X) 기술을 넘어 P2X(Pedestrian to X)을 보다 먼저 적용하여 관리할 수 있다. 본 연구는 이러한 항만의 공간적 특 성을 활용하여 IoT 웨어러블 디바이스로부터 수집한 근로자의 위치정보를 통해 구현할 수 있는 안전관리 기 술을 제시하고 위치오차에 따른 알고리즘 보정 방법을 제시하였다.

본 연구는 GPS 오차 보정 기술의 향후 개선 성능에 따라 1m 이내, 5m 이내 등 2가지로 구분하여 분석을 수행하였다. 여기서 위치오차는 실제 IoT 디바이스 시제품으로부터 수집한 위치정보 자료를 데이터셋으로 구축하여 통계기법을 근거로 확률밀도함수를 개발하여 본 연구에서 제시한 보정 방법론에 활용하였다. 또한 실제 현장에 도입되지 않은 알고리즘 기술의 보정을 위한 방법론의 검증에 위해 에이프런 컨테이너 양적하 작업구역 사고 위험상황을 미시적 교통류 시뮬레이션으로 구현하였다. 시뮬레이션 네트워크는 근로자의 이 동특성, 크레인 스프레더의 종방향, 횡방향 움직임 및 속도를 시뮬레이션으로 구현하여 보다 사실적으로 설 계하고자 하였다. 이어서 사고 위험상황을 검지하기 위한 알고리즘은 에이프런 기준으로 컨테이너를 양적하 하는 스프레더로부터 설정된 위험반경에 따라 위험도 수준을 판단할 수 있도록 설계되었다. 여기서 설정된 위험도 수준은 실제 항만 현장에서 운영되고 있는 근로자 사고위험 관리 매뉴얼의 위험관리 이격 거리를 기 준으로 하여 위험단계를 세부적으로 추가 설정하였다.

본 연구에서는 제안한 위치오차 보정 방법론을 통해 매 주기별 평가된 위험도 수준을 누적분포함수(CDF) 기반의 오차율을 통해 오차 표본을 보정하였으며 그 결과 오차가 1m 이내인 경우 검지 정확도가 93%, 5m 이내일 경우 77%의 분포를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 위치오차 기반의 알고리즘 보정 방법론은 현장 중심의 IoT 웨어러블 디바이스의 보급 확대를 위한 정확도 향상 방법론으로 활용될 수 있다. 나아가 당면한 항만 내 안전관리의 수준을 향상시키는 것은 물론 미래 통신기술 기반 자율주행시대의 보행자 안전관리 개념을 발전시키는 기초 방법론으로의 역할 을 할 수 있을 것으로 판단한다. 그러나 다음 단계로의 연구적 성과 달성을 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구 및 보완이 필요하다. 첫째, 본 연구에서는 실제 항만에서 수집한 IoT 디바이스 위치정보를 바탕으로 확 률분포를 생성하여 시뮬레이션이라는 대체 환경에서 분석을 수행하였다. 그러나 이는 가상환경에 불가하며, 향후 실제 디바이스를 통해 소프트웨어 및 공유 하드웨어를 구축하여 실효성을 검증할 필요가 있다. 둘째, 본 연구에서는 총 4단계의 위험도 수준 설계를 위해 정성적 기준을 세우고 그에 맞는 현장 매뉴얼 및 기준 연구 기반의 지표를 설정하였다. 그러나 이는 항만 현장의 실제 근로자 및 장비에 설치하여 수집, 검증된 기

준이 아니다. 따라서 실제 항만의 사실적인 특성을 반영한 연구 및 검토과정을 거쳐 공학적 근거에 기반한 단계별 위험도 수준의 보완이 고려된다. 셋째, 근로자 관점에서의 사용자 친화적인 웨어러블 디바이스 서비스 설계가 필요하다. 본 연구에서는 알고리즘 기반의 위험도 수준 판단과 위치정보의 확률통계적 검증 방법론으로 위치오차를 검증하였다. 그러나 근로자의 관점에서 항만 작업환경에 의해 정보 수집에 제한사항이 있을 경우, 또는 현장 관점에서 제공되는 경고정보의 활용도가 떨어진다면 알고리즘의 가치는 극대화될 수 없다. 따라서 보다 현장중심의 유저 인터페이스 등을 고려할 수 있는 디바이스 사용 환경을 구축해야 한다.

본 연구는 IoT 디바이스를 활용한 항만 내 안전관리 기술 개발 및 GPS 오차를 고려한 사고위험 검지 알고리즘의 보정 방법론을 제시하였다는 데에 의의가 있다. 향후 미래 항만 환경 및 미래 자율주행환경에서 보행자, 근로자의 스마트폰 또는 IoT 디바이스와의 통신을 활용한 안전관리 기술 개발 등에 유의한 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(스마트 항만 IoT 융합·운영기술 개발)

## REFERENCES

- Bang S. and Hong S.(2015), "Design and Implementation of DGPS device-based on Smart Phone," *KIISE Transactions on Computing Practices*, vol. 21, no. 12, pp.798-803.
- Bartosek A. and Marek O.(2013), "Quay Cranes in Container Terminals," *Transaction on Transportation Sciences*, vol. 6, pp.9-18.
- Bauk S., Calvo J. A. L., Schmeink A. and Mathar R.(2017), "Enhancing on port safety by vehicular communication approach: Port of Bar (Montenegro) case study," *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing(MECO)*, Bar, pp.1-4, 35-40.
- Budiyanto M. A. and Fernanda H.(2020), "Risk Assessment of Work Accident in Container Terminals Using the Fault Tree Analysis Method," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 6, p.466.
- Busan Port Authority(2013), *Busan Port Safety Manual*.
- Cajori F.(1993), *A history of mathematical notations* (Vol. 1), Courier Corporation.
- Cho Y. and Kim S.(2019), "A Study on The Workforce Agility and Operational Performance of Distribution Center-Focused on Busan New Port Distripark-," *Korea Trade Review*, vol. 44, no. 3, pp.25-42.
- Choi H.(2004), *Development of Real Time Operating Simulator for Container Crane*, Master's Dissertation, Korea Maritime University, Busan, Korea.
- Jordan M. A.(2002), "Quay crane productivity," *Terminal Operation Conference Americas*.
- Kim H., Kim J., Kim K., Park D. and Kim D.(2012), "Accuracy Evaluation of DGPS Service via Terrestrial Digital Multimedia Broadcasting," *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 36,

no. 6, pp.437-442.

Korea Internet & Security Agency(KISA)(2017), *Domestic/International LBS Industry Trend Report*, pp.129-134.

Korea Maritime Institute(KMI)(2017), *A Study on Port Labour Safety System with IoT and Big Data Analysis*, pp.74-85.

Korea Maritime Institute(KMI)(2018), *KMI Trend analysis-Need to rebuild the safety management governance of port workers*, pp.1-20.

Korea Occupational Safety & Health Agency(KOSHA)(2018), *Crane safety management model for improving safety and health technology by job type in shipbuilding industry*.

Lee J. and Lee C.(2019), "A Study on Improvement of Management System for Strengthening the Safety Education of Port Workers for Ulsan Port," *Journal of Fishier and Marine Sciences Education*, vol. 31, no. 3, pp.765-775.

Li H.(2017), "Research on safety monitoring system of workers in dangerous operation area of port," *In 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), IEEE*, pp.400-408.

Lu C. S. and Yang C. S.(2010), "Safety leadership and safety behavior in container terminal operations," *Safety Science*, vol. 48, no. 2, pp.123-134.

Ministry of Employment and Labor(2020), *Rules on occupational safety and health standards*, Article 20.

Son S., Jeong J., Park S. and Park J.(2020), "Effects of advanced warning information systems on secondary crash risk under connected vehicle environment," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 148, 105786.

Tajvar A., Aghamolaei T., Ghanbarnejhad A., Mahdavi S., Eqhbal Eftekhari T. and Charsoughi M. (2010), "Behavior-Based Safety in Port Industry: A Pretest-intervention-Posttest Study," *International Electronic Journal of Medicine(IEJM)*.

Tseng P. H. and Pilcher N.(2017), "Maintaining and researching port safety: A case study of the port of Kaohsiung," *European Transport Research Review*, vol. 9, no. 3, pp.1-11.

Yue L., Abdel-Aty M., Wu Y., Yuan J. and Morris M.(2020), "Influence of pedestrian-to-vehicle technology on drivers' response and safety benefits considering pre-crash conditions," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 73, pp.50-65.