

압전소자를 이용한 철도차량용 스마트 좌석 기술 적용성 검토

Study on Smart Seat Technology for Railroad Vehicles Using Piezoelectric Sensors

강동훈*, 김헌영**, 김대현***†

Donghoon Kang*, Heon-Young Kim** and Dae-Hyun Kim***†

초 록 본 연구에서는 압전소자를 이용한 철도차량용 스마트 좌석 기술에 대한 적용성을 검토하였다. 이를 위해 스마트 좌석 기술에 대한 개념을 정립하였고, 실제 철도차량용 좌석을 단순화한 축소 모형을 제작하여 압전소자를 적용한 후 스마트 좌석의 기능에 대한 시뮬레이션 시험을 수행하였다. 시험을 통해, 본 연구에서 제안한 실시간 착석 확인 및 도착알림기능이 포함된 압전소자기반 스마트 좌석 시스템의 실현 가능성을 검증하였다. 본 연구 결과는 향후 실용화를 통해 검토 업무 효율화를 통한 고소철도 서비스의 질적 향상에 기여할 수 있을 것이다.

주요용어: 스마트 좌석, 철도차량, 압전소자, 시뮬레이션

Abstract A study on smart seats for railroad vehicles was conducted using piezoelectric (PZT) sensors. For this purpose, the concept of passenger friendly smart seats was defined, and a PZT sensor was selected as the optimum sensor based on this concept. Using PZT sensors, simulation tests were performed using a sub-scale model railroad vehicle. In these tests, the main functions of the smart seats were extracted and simplified to improve the effectiveness of the simulation tests. Based on the test results, the system for smart seats proposed in this paper was successfully verified using PZT sensors and the dedicated operation software for the system. This paper will contribute to the improvement of services in high-speed rail systems through advances in ticket checking tasks.

Keywords: Smart Seats, Railroad Vehicles, PZT, Simulation

1. 서 론

최근 철도 시스템의 고속화에 따라 티켓 발권 시스템 역시 SMS 티켓, 홈 티켓 등 자기발권(self-ticketing) 중심으로 점차 변화하고 있어 발권 시스템의 무인화가 가속되고 있다. 발권시스템의 무인화와 함께 역 개찰구에서의 검표 업무 또한 실시간 좌석 발매 정보를 바탕으로 객실 내에서 PDA 등 개인용 휴대단말기를 활용한 불시점검 형태로 전환되고 있다. 하지만, 기존 방법의 경우 단순히 티켓 발권 정보만을 휴대단말기로 송출하

는 형태이므로 승무원이 실제 좌석 점유 상황과의 육안 비교를 통해 부정승차를 식별해야 하는 노동 집약적인 방법으로 효율성이 매우 낮아 식별에 많은 시간과 노동력이 소요된다. 또한, 열차 운행 중에도 실시간 판매되는 철도 승차권의 특성으로 승·하차 정보는 계속 업데이트 되므로 검표 업무의 효율성 향상을 위해서는 보다 자동화된 형태의 착석확인 식별 시스템의 개발이 필요하다.

한편, 철도 시스템 고속화에 따른 또 다른 문제점으로 철도 이용 중 수면 등의 이유로 승객

[접수일: 2014. 9. 1, 수정일: 2014. 9. 18, 게재확정일: 2014. 9. 23] *한국철도기술연구원 융합신기술연구팀, **서울과학기술대학교 기계공학과, ***서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 139-743, Korea (E-mail: dkim@seoultech.ac.kr)

이 목적지에서 하차하지 못하고 정차역을 지나쳐버리는 등의 사례가 비교적 빈번히 발생하고 있다. 이는 곧 승객들에게 잠재적인 심리적 불안감의 형태로 작용되어 철도를 편안하게 이용하지 못하는 주요 원인이 되고 있다. 따라서, 승객의 편안한 철도 이용과 동시에 열차의 정시운행을 위한 걸림돌로 작용하고 있는 승·하차 시간 단축을 위해서는 보다 시스템적인 개선이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 실시간으로 승객의 착석 정보 확인 및 도착알림 서비스가 가능한 승객 편의형 스마트 좌석 시스템의 철도 적용성을 검토하였다. 이를 위해, 승차권 발매 정보와 각 좌석의 착석 정보와의 비교를 통해 부정승차 등의 식별이 가능한 알고리즘을 도출하였으며 실시간 열차 위치 정보를 기반으로 승객에게 맞춤형 도착알림 서비스가 제공 가능한 시스템을 구축하였다. 또한, 실제 철도 운영 환경을 모사한 축소 모형에 대한 모의시험을 통해 본 연구에서 제안한 스마트 좌석 시스템에 대한 성능 검증 및 철도 적용성을 확인하였다.

2. 기존 문헌 고찰

본 연구 관련 기존 문헌들은 철도차량용 좌석 시스템 관련 연구와 압전소자 관련 연구로 크게 구분해 볼 수 있다. 먼저, 좌석 시스템 관련 연구를 살펴보면 본 연구와 가장 유사도가 높은 문헌으로 차세대 분산형 고속전철 차량에서의 승객 좌석 표시기 시스템 관련 연구[1]가 수행된 바 있다. 해당 논문에서는 해외 적용 사례를 고찰함으로써 국내 철도차량 환경에 맞는 시스템을 개발, 설계 및 적용하기 위한 검토를 수행하였으나 논문에서 제안한 좌석 예약 시스템 및 좌석 LCD 모니터를 통한 현시 방법은 각 좌석마다 고가의 설비가 필요하다는 단점이 있다. 또 다른 연구로는, KTX-II 고속차량의 중령 편성 운영 계획에 대한 최적화를 위해 수리적 모형을 제시하고, 제안된 수리적 모형의 적용 방안을 제시한 연구[2]나 경춘선 복선화 구간을 중심으로 광역철도 좌석형 급행열차 도입 타당성에 관한 연구[3]가 수행한 바 있다. 이 외에도 승객 감성 평가를 이용한 고속철도 승차감의 구조 모형 개발에 대한 연구[4]나 열차의 좌석 용량 배분과 관련한 연구

[5,6]를 비롯하여 충돌과 관련하여 국내 철도차량 좌석의 승객 거동 및 상해에 대한 연구[7] 등이 수행되었다.

한편, 압전소자 관련 연구는 센서와 액추에이터의 2가지 용도로 활용이 가능한 압전소자의 고유 특성으로 인해 다양한 분야에서 오래 전부터 많은 연구가 진행된 바 있다. 예를 들어, 압전소자의 대표격이라 할 수 있는 PZT의 압전효과를 이용한 기계적 진동에너지 하베스팅 연구[8]나 PZT를 이용한 마이크로 캔틸레버 방식의 질량센서를 제작한 연구[9], 그리고 PZT를 기존 센서 시스템의 구성 시 신호 변조를 위한 소자로 활용한 연구[10] 등과 같이 적용 분야와 활용 목적이 매우 다양하다. 이 외에도 본 연구에서 활용한 PZT에 비해 전기음향 변환 효율이 떨어지며 내부 손실이 큰 단점이 있지만 음향 임피던스가 물 또는 생체와 비슷하고 수신 효율이 우수하며 광대역 특성이 좋은 PVDF 압전고분자와 관련한 연구[11,12]도 활발히 진행되고 있다.

하지만, 이상과 같은 기존의 연구와 달리 본 연구에서는 PZT의 센싱(착석 확인) 및 액추에이팅(도착 알림) 기능을 동시에 활용함으로써 철도 운영자 및 이용자의 편의성이 동시에 향상되는 스마트 좌석 기술을 제안하고 있다는 점에서 기존의 연구와 차별된다.

3. 스마트 좌석 시스템

3.1. 아이디어 개념

본 연구에서 제안한 스마트 좌석 시스템은 좌석에 설치된 센서를 통해 승객의 착석 유무를 확인하고 이를 승차권 발매 정보와 실시간으로 비교하여 승차 정보를 판단한 후 그 결과를 승무원에게 가시화하여 제공함으로써 보다 효율적인 검표가 가능하도록 하는데 첫 번째 목적이 있다. 그리고, 실시간 열차 위치 정보와 승객의 발매 정보에 기초한 최종 목적지 정보와의 상호 비교를 통해 열차가 목적지에 도착하기 일정시간 전 승객에게 도착알림 기능을 제공하는 것을 두 번째 목적으로 하고 있다. 이러한 두 가지 목적을 도식화하여 표현하면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 승차 정보의 판단은 열차가 운행 중인 임의의 위치에서 승차권 발매 상황과 착석

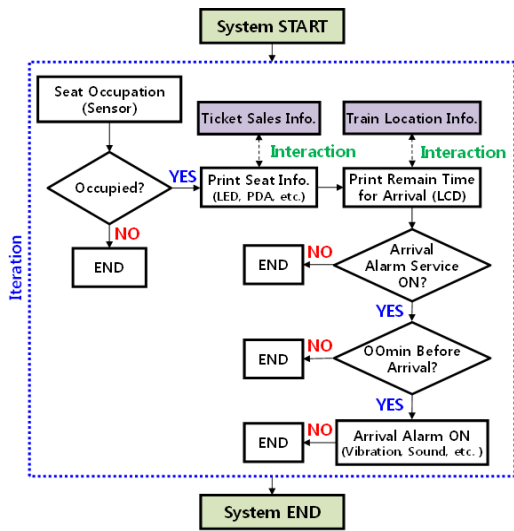


Fig. 1 Basic concept of smart seats for railroad vehicles

Table 1 Decision logic for illegal boarding from ticket information and seat occupation

Ticket Information (Ticket Sales System)	Sold		Unsold	
	Occupied	Unoccupied	Occupied	Unoccupied
Seat Information (Sensor DAQ)	Occupied	Unoccupied	Occupied	Unoccupied
Final Decision	Normal	Normal	Abnormal	Normal
Print Results	GREEN	YELLOW	RED	OFF

Table 2 Performance comparison of sensors for detecting seat occupation

Sensor Type	Sensor Requirements				
	Precision	Measurement Range	Adaptability	Cost	Etc.
Photo Sensor	▲	▲	▲	●	-
Proximity Sensor	▲	▲	✳	●	Adaptability is low for Electrode Type
Pressure Sensor	●	●	●	●	-
Load Cell	●	●	●	●	-
Fiber Optic Sensor	●	●	●	✳	System is Simple, but Expensive
Hybrid Sensor	●	●	●	▲	Optimized for Seats

●: Good, ▲: Fair, ✳: Poor

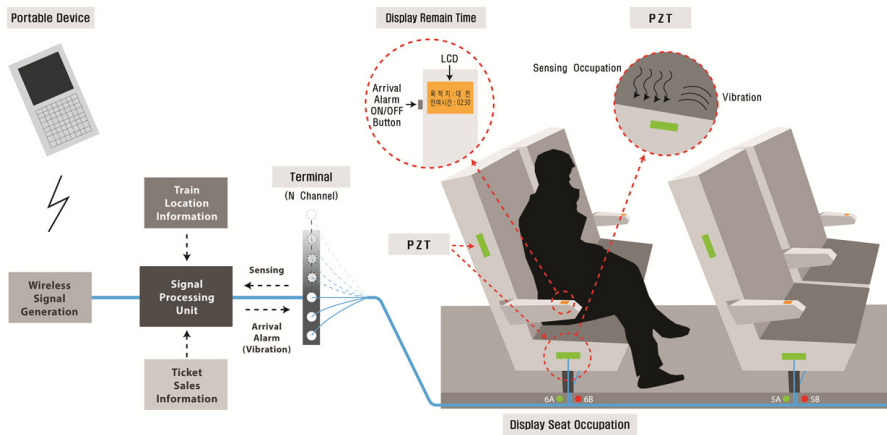


Fig. 2 Example of smart seats system applied to railroad vehicles

정보 간의 상호 비교를 통해 최종적으로 Table 1 과 같은 4가지 상황으로 판단이 가능하며, 가시성 높은 정보 표시 방법을 통해 최종적으로 승무원에게 쉽게 식별이 가능한 정보를 제공할 수 있게 된다.

3.2. 적합센서 선정

앞 절에서 제안한 스마트 좌석을 구현하기 위해서는 승객의 착석 확인을 위한 센서 시스템이 필수적으로 요구된다. 특히, 착석 확인을 위해 센

서에 요구되는 사항은 승객의 착석 유무를 정확하게 측정할 수 있어야 하며 많은 수의 좌석이 존재하는 철도의 특성을 고려하여 적용성 및 비용 측면에서 함께 검토되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 하중, 변형률, 변위 등 일반적인 물리량의 측정이 가능한 센서들을 대상으로 정밀도, 작동 범위, 적용성, 가격의 4가지 항목에 대한 정성적 분석을 통해 착석 확인에 가장 적합한 센서를 선정하였다. 대상으로 검토된 센서로는 빔(광전) 센서(photo sensor), 근접센서(proximity sensor), 압

력센서(pressure sensor), 로드셀(load cell), 광섬유센서(fiber optic sensor) 및 2가지 이상의 센서를 복합적으로 활용하는 복합 센서(hybrid sensor)의 총 6가지이며 검토 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 압력센서와 로드셀 만이 고려항목 4가지 모두에서 우수한 것으로 검토되었다. 하지만, 앞 절에서 제안한 도착알림 서비스 기능까지 고려항목으로 포함할 경우 여러 형태의 압력센서 중에서 압전형 압력센서(이후 압전센서, PZT)가 하나의 센서로 착석 확인 및 도착알림의 2가지 기능이 모두 가능해 로드셀에 비해 더 효율적인 것으로 확인되어 본 연구의 적합센서로 최종 선정하였다.

Fig. 2는 선정된 압전센서를 이용하여 스마트 좌석 시스템을 철도차량에 구현한 개념도를 보여 주고 있다.

4. 모의시험

4.1. 시험 개요

본 절에서는 스마트 좌석 시스템의 실현 가능성 검증을 위해 축소 모형 시험체를 통한 모의시험을 수행하였다. 본 시험은 본 연구에서 제안한 시스템의 기술적 가능성 검증이 목적이므로 실제 철도운영 환경의 핵심기능을 기술적으로 단순화하여 모사한 시편시험의 형태로 진행하였다.

Fig. 3에서와 같이 스마트 좌석 시스템을 기술적으로 단순화하여 모사한 내용을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

① 철도차량 좌석

철재 평판의 베이스와 아크릴을 이용해 실제 철도차량 좌석을 단순화한 축소모형을 통해 좌석을 모사하였다. 또한, 탑승 정보 판단 시 구분되는 4가지 탑승 정보(정상, 부재중, 부정승차 의심, 미판매)에 대한 동시 검증이 가능하도록 총 좌석수를 4개(1A, 1B, 2A, 2B)로 설정하였다.

② 탑승 승객

단순화된 좌석에 적당한 무게를 갖는 무게추(450g/개)를 이용해 실제 승객이 좌석에 착석한 상황을 모사하였다. 또한, 승객의 체중 차이를 반영하기 위해 2가지(450g, 900g)의 서로 다른 하중

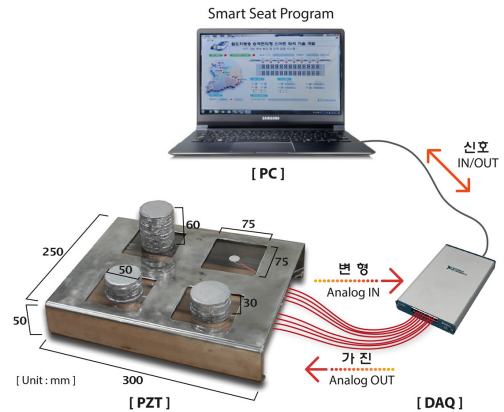


Fig. 3 Appearance of experimental setup for a simulation test

을 부과할 수 있도록 하였다.

③ 승차권 발매 정보

실제 운행중인 열차는 승차권 발매 시스템과의 실시간 접속을 통해 데이터(승차권 발매 정보)를 다운받는 형태로 각 좌석별 승차권 발매 정보를 확인하게 된다. 하지만, 본 모의시험에서는 기술적인 단순화를 위해 각 좌석별 승차권 발매 정보(편명, 호/차, 출발역, 도착역)를 스마트 좌석 시스템이 구동될 때 미리 작성된 텍스트 파일을 읽어오는 방식으로 프로그래밍 하였다.

④ 실시간 열차 위치 정보

실제 운영 환경과 같이 열차의 실시간 위치 정보 반영을 위해 본 연구에서는 스마트 좌석 시스템이 구동될 때 미리 설정된 일정시간(서울→부산, 52초) 간격으로 열차가 정해진 노선을 이동하는 방식으로 열차의 실제 운영 환경을 모사하였다. 물리적인 실제 역간 거리를 고려하여 이동 소요시간을 역 별로 다르게 설정하였으며 각 정차역 사이에 중간 구간을 두어 열차의 역간 이동 상황과 역 도착 상황에 대한 가시화 구분이 가능하도록 하였다.

4.2. 시험장치 구성 및 신호 처리

본 연구에서 제안한 스마트 좌석 시스템의 구성을 위해 착석 확인 및 도착알림 기능을 제공하는 센서부와 탑승 정보 판단 및 기타 실시간 정보 처리를 위한 신호처리부를 각각 구성하였다.

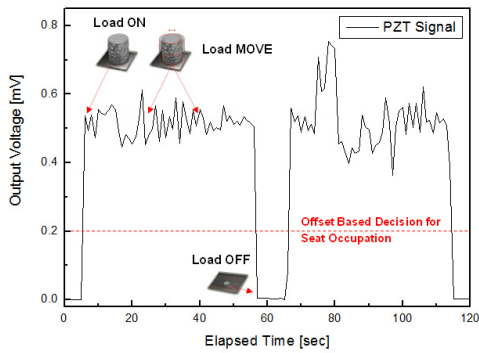


Fig. 4 Signal characteristics of PZT applied to smart seats

좌석을 형상화한 아크릴 평판 하부에 직경 15 mm, 두께 0.8 mm의 압전센서(C-82, Fuji Ceramics Co.)를 부착하여 4개의 좌석에 부착된 4개의 센서로 이루어진 센서부를 구성하였다. 부착된 각각의 센서는 DAQ 장치(NI USB-6343, National Instruments)의 각 채널로 연결한 후 최종적으로 구동 프로그램이 장착된 노트북 컴퓨터와 USB 방식으로 연결하였다. 착석 확인은 DAQ 장비의 아날로그 입력으로 1 Hz의 속도로 측정하였으며, 도착알림은 DAQ 장비의 아날로그 출력단자를 통해 정현파를 구동하는 방식으로 구현하였다. 또한, 압전센서의 입-출력신호 처리와 승차 정보 판별, 승차권 발매 정보, 실시간 열차 위치 정보 등의 기능 구현을 위해 전용 구동 프로그램(LabVIEW 2011)을 작성하였다.

한편, 압전센서의 입력신호를 바탕으로 승객의 착석 유무 확인을 위한 알고리즘 구성을 위해 좌석 하부에 부착된 압전센서에 하중이 부과될 때 발생하는 신호를 측정하였다. 실제 좌석에 착석한 승객은 불규칙적인 작은 동작을 하게 되므로 이를 반영하여 무게추에 작은 진동을 가하였으며, 이 때 압전센서로부터 발생된 신호를 Fig. 4와 같이 측정하였다.

Fig. 4에서와 같이 압전센서는 하중 부과 시 DC형태의 신호를 발생시키며 좌석에서의 승객 움직임과 같은 작은 진동에 대해 민감하게 반응하는 형태를 나타냈다. 또한, 좌석에서 승객이 이탈할 경우, 즉 하중이 OFF 되면 신호도 곧바로 OFF 되는 계단(step) 형태의 신호 특성을 보였다. 이를 토대로, ON/OFF 상태 신호의 출력값 기준으로 일정값의 오프셋(offset)을 두어 해당값 이상



Fig. 5 Front page of LabVIEW software developed for smart seats system



Fig. 6 Execution of ticketing systems and target selection

의 신호가 입력될 경우 착석한 것으로 판단하는 ON/OFF 방식의 신호 처리를 통해 착석 확인을 위한 신호 처리부를 구성하였다.

4.3. 시험 결과

Fig. 5는 모의시험을 위해 개발된 스마트 좌석 시스템 구동 프로그램의 초기 화면을 보여주고 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 시스템 구동, 승차권 발매 시스템 접속, 대상 호/차 선택, 열차 출발의 총 4단계로 구성되어 있다. 보다 구체적으로, 시스템을 구동시키면 Fig. 5와 같은 초기화면이 실행된다. 이후 승차권 발매 시스템을 구동시키면 현재 날짜와 시간 그리고 차량 정보를 파일로 입력받아 표시한다. 이후 Fig. 6과 같이 적용대상 호/차를 선택하면 해당 호/차의 각 좌석별 승차권 발매 정보(출발/목적지)가 자동적으로 시스템에 입력된다. 각 좌석에 대한 모든 승차 정보가 입력되면 열차 출발 버튼을 눌러 좌석에 부착된 압전센서를 구동시키게 된다. 열차는 출발 후 미리 정해진 시간 간격으로 위치 정보를 Fig. 7과 같이 실시간으로 표시(녹색)하며 이동하게 되고 각 좌석에 부착된 압전센서는 1 Hz의 속도로 착석 확인을 하고 프로그램 상의 승차 정보 판단 알고리즘을 통해 최종 탑승 정보를 판단, 앞서 제안한 4가지 형태로 표시되게 된다.



Fig. 7 Operation results of smart seats system

Fig. 7은 발생 가능한 4가지의 서로 다른 탑승 정보 상황을 인위적으로 동시에 발생시켜 본 연구에서 개발한 스마트 좌석 시스템의 성능을 검증한 결과를 보여주고 있다. 이를 위해 인위적으로 설정된 각 항목 별 세부 조건은 다음과 같다.

- ① 티켓 발매 정보 : 1A(서울→대구), 1B(천안아산→부산), 2A(대전→경주), 2B(미판매)
- ② 현재 열차 위치: 대구→경주 이동 중
- ③ 좌석 상황: 1A(하중 ON), 1B(하중 OFF), 2A(하중 ON), 2B(하중 OFF)

위 조건에 대해 각 좌석별 탑승 정보를 판단해 보면 아래와 같다.

- ① 1A: 현 위치 기준 티켓 ‘미판매’ & 좌석 ‘점유’ → RED (부정승차 의심)
- ② 1B: 현 위치 기준 티켓 ‘판매’ & 좌석 ‘미점유’ → GREEN (부재중)
- ③ 2A: 현 위치 기준 티켓 ‘판매’ & 좌석 ‘점유’ → ORANGE (정상)
- ④ 2B: 현 위치 기준 티켓 ‘미판매’ & 좌석 ‘미점유’ → OFF (미판매)

Fig. 7과 같이 본 시스템은 각 좌석 별로 판단한 탑승 정보를 가시화하여 표시해주며 부정승차 의심 좌석 번호를 텍스트 형태로 출력해준다. 이 정보는 향후 좌석에 설치된 LED나 승무원의 개인용 휴대단말기에 송출하는 방법을 통해 승무원에게 검표 업무의 편의성을 제공할 수 있게 된다. 뿐만 아니라, Fig. 7의 우측 하단과 같이 도착알림 기능의 제공도 확인이 가능하다. 각 좌석 별로 해당 서비스 제공에 대한 승객의 ON/OFF 여부를 통해 승객이 해당 서비스를 희망할 경우

(서비스 ON) 열차 위치 정보와의 비교를 통해 도착 일정시간 전 정현과 형태의 가진신호를 바탕으로 압전센서를 구동(진동), 승객이 착석하고 있는 좌석에 진동을 발생시키게 된다.

본 시스템은 착석자의 체중에 대한 오프셋 지정을 통해 다양한 체중에 대한 대처가 쉬운 장점이 있고, 단순 ON/OFF 방식의 신호 처리는 복잡한 신호 처리가 필요없어 오작동률이 낮아 높은 시스템 신뢰성을 보장한다. 반면, 외부 진동 및 전자기에 민감한 압전센서 고유의 특성은 향후 적용 시 추가적으로 검토되어야 할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 스마트 좌석 시스템에 대한 개념을 정립하고 적합한 센서를 도출하였다. 또한, 실제 철도 운영 환경을 모사한 축소 모형에 대한 모의시험을 통해 본 연구에서 제안한 스마트 좌석 시스템의 철도 적용성을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 아래와 같다.

- 1) 압전센서를 이용할 경우 승객의 착석 유무에 대한 실시간 확인 및 진동 기반의 도착알림 기능의 제공이 동시에 가능하다.
- 2) 승차권 발매 정보와 열차 위치 정보를 바탕으로 착석 확인 데이터와 비교하여 좌석별 4가지 탑승 정보(정상, 부재중, 부정승차 의심, 미판매)를 식별할 수 있는 알고리즘을 도출하였다.
- 3) 식별된 탑승 정보는 실시간으로 승무원에게 가시화(LED, 무선송출)하여 제공이 가능하며 이를 통해 승무원의 보다 효율적인 검표업무가 가능하다.

향후 본 연구에서 도출된 결과를 바탕으로 실용화가 진행된다면 현재 PDA 기반으로 진행되고 있는 노동 집약적인 검표 업무에 대한 시스템적인 개선을 통해 철도 운영 효율화가 가능하고 승객에게는 도착알림 서비스의 제공을 통해 고속철도에 걸맞은 질 높은 서비스 제공이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S.-J. Kim, J.-H. Kim, S.-T. Kim, M.-K. Son and C.-C. Park, "Consideration for application of passenger seat/saloon display system to the HEMU(High Speed EMU)," *Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 2457-2463 (2010)
- [2] S. M. Oh, M. S. Sohn and I. C. Choi, "A study on an efficient double-fleet operation of the Korean high speed rail," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 6, pp. 742-750 (2007)
- [3] M. K. Park and S. G. Kim, "A feasibility investigation of adoption for the seat-type express electric railway on the railroad in metropolitan area - Focus on the double tracked Seoul-Chuncheon line," *Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 1434-1444 (2008)
- [4] J. H. Lee, B. S. Jin, I. K. Kim, Y. K. Ji, C. Lee and M. H. Yoon, "Structural modeling of ride comfort for high speed rail passengers using a quantification method," *Proceedings of the Spring Conference of the Ergonomics Society of Korea*, pp. 240-245 (2012)
- [5] S. H. Kim and S. H. Hong, "A nonlinear programming model for the solution of the train seat capacity distribution problem," *Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 72-79 (2001)
- [6] S. H. Kim and S. M. Oh, "A train seat capacity distribution model to multiple origin-destinations," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 5, No. 2, pp. 77-83 (2002)
- [7] Y. H. Yoon, G. L. Yoon, W. H. Han, J. H. Yoo and J. H. Chun, "A study on occupants kinematics and injury assessment of domestic train seats based on Europe train interior safety standard," *Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, p. 597 (2008)
- [8] M. S. Kim, "Piezoelectric mechanical vibration energy harvesting," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 5, pp. 603-610 (2012)
- [9] S. K. Lee, J. Y. Cho, Y. H. Lee, S. M. Jeon, H. J. Cha and W. K. Moon, "Quantitative alpha fetoprotein detection with a piezoelectric microcantilever mass sensor," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 5, pp. 487-493 (2011)
- [10] S. J. Kim, Y. J. Kang, K. M. Hong, J. H. Lee and N. J. Choi, "Performance comparison between optical fiber type ESPI and bulk type ESPI for the internal defect in pressure vessel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 177-184 (2012)
- [11] S. Hur, Y. D. Jung, Y. H. Lee, W. J. Song and W. D. Kim, "Fabrication of biomimetic MEMS acoustic sensor and analysis of its frequency characteristics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 5, pp. 522-528 (2011)
- [12] K. L. Ha and Y. Cao, "Piezoelectric polymer ultrasound transducers and its biomedical applications," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 5, pp. 585-596 (2012)