

신분당선 무인운전 전동차 출입문의 승객안전도 및 운용가능성 향상을 위한 장애물 검지시스템 최적화에 관한 연구

A study of optimizing obstacle detection system on door for improving passenger's safety and operation availability by driverless EMU in Shinbundang Line

김상현*, 류승균*†, 임용찬*, 문환기*, 정영만*

Sanghyun Kim*, Sungkyeon Ryou*†, Yongchan Lim*, Hwangee Moon*, Yeongman Jeong*

Abstract: Metro is used the most of public transportation by many citizens. For using many passengers, the door of EMU(Electric Multiple Unit) cannot be operated by the obstacles which are passengers or belongings. Accordingly EN(EN14752) and KS(KSR9247) standard defines the function of obstacle detection on door for passenger's safety. The obstacle detection system on door in Shinbundang Line are applied to current control system that is used other Metro by the electric door and sensor control system. In this paper, we will describe function of sensitive edge sensor and find strong point better than the current control system. We will refer to the defect of the sensor which is detected the obstacle and study to compensate that.

Keywords : Shinbundang Line, Electric Multiple Unit(EMU), Door, Obstacle detection, Plug-in door

초 록 도시철도는 많은 승객을 수송하는 각광받는 이동수단이다. 이렇게 많은 승객들이 수송되다 보니 전동차 출입문은 승객 혹은 소지품 등에 의한 출입문 개폐가 불가능한 경우가 발생된다. 이에 따른 승객의 안전성 문제 때문에 EN규격(EN14752) 및 KS규격(KSR9247)은 출입문 장애물 검지 기능을 규정하고 있다. 신분당선 전동차 출입문 장애물 검지시스템은 전기식 출입문을 적용한 타기관과 같은 전류제어 방식과 Sensitive Edge Sensor에 의한 장애물검지 기능이 있다. 본 논문에서는 Sensitive Edge Sensor의 기능과 전류제어방식 보다 뛰어난 점을 분석하고, Sensor에 의한 장애물 검지시 발생하는 문제를 언급하여, 이를 보완하기 위한 방안을 연구한다.

주요어 : 신분당선, 전동차, 출입문, 장애물검지, 플러그인도어

1. 서 론

신분당선은 국내 최초 무인운전으로 운행하는 중량전철로 신호, 통신, 차량 등 다양한 분야에서 무인 운전 컨셉에 맞게 설계되어 있어 철도분야에서 높은 관심을 갖고 있다. 무인운전 시스템으로 운영하기 위해 가장 중요한 부분 중 하나인 출입문 시스템은 독일 보데(Bode)사의 플러그-인 도어(Plug-In Door)를 적용하였다. 국내 대부분의 도시철도에서 사용되는 포켓 슬라이딩도어와 아웃슬라이딩 도어는 철도차량이 고속화 됨에 따라 소음 및 외풍 차단이 어려운

† 교신저자: 네오트랜스 주식회사(sungkyun.ryou@doosan.com)

* 네오트랜스 주식회사

단점이 있다. 플러그인 도어는 주로 고속철도에 적용되는 출입문으로 소음 및 외풍 차단이 용이하여 쾌적성 향상에 큰 도움이 된다.[1] 신분당선은 표정속도 62km/h, 운영 최고속도는 90km/h의 광역철도이며, 전구간이 터널로 구성되어 있어 외부 소음을 효과적으로 차단할 수 있는 플러그인 도어를 도입함으로써 차내 소음을 저감시켜 쾌적성을 크게 향상시켰다. 또한 국내 최초 무인운전 시스템으로 승무원에 의해 운용하는 다른 도시철도와 달리 출입문 개폐를 신호시스템에 의한 무인 또는 관제에 의해 운용하기 때문에 승객의 안전을 고려하여 전기식 출입문을 적용한 다른 도시철도와 같은 모터에 의한 장애물 검지 외에 센서(Sensitive Edge Sensor)에 의한 장애물 검지시스템을 추가 적용하였다. 이는 승객이 출입문에 끼는 사고에 대해 출입문이 최대한 민감하게 반응하여 신속히 출입문을 개방, 승객의 불쾌감 및 신체적 손상, 수화물의 파손을 최소화하기 위함이다. 본 논문에서는 센서제어 장애물 검지시스템에 대해 언급하고, 모터제어 장애물 검지시스템과 비교 분석하여 장단점을 파악함으로써, 센서방식의 단점을 보완하는 방안에 대해 연구하였다.

2. 출입문 제어장치(DCU)

출입문제어장치(DCU)는 100VDC 전원으로 차량에 설치된 승객용 측출입문을 제어하며, 열차종합제어장치(TCMS)의 차량 컴퓨터(VCU)와 인터페이스를 한다. 또한 전동차의 오류 및 고장에 대해 자가인식하여 단힘 또는 열림 상태를 유지하며, 출입문 열림 조건(Zero Speed(Standstill) 신호, 도어 열림 신호, Enable 신호)이 입력되면 모터 구동 명령을 수행하여 출입문을 개방한다. 무인운전시스템(Driverless(DL) Mode)에서 출입문 제어 명령은 신호시스템인 VOBC에서 출력되고, 유인운전시스템(AUTO, ATPM 모드 등)에서는 TCMS에서 열림 조건을 출력, 승무원에 의해 최종 개폐된다. 모터는 직류 영구자석 모터로서 엔코더에 의해 초기 출입문 개방시 위치를 기억하며, 모터의 제어방식은 PWM 방식을 사용하고 있으며, 초퍼(Chopper)에 의해 속도와 토크를 제어하여 출입문을 동작시킨다. 출입문을 제어하는 DCU는 Master와 Slave로 구성되어 있으며, 각 DCU는 출입문 위치에 따라 Address 코드가 부여되고, Master DCU가 TCMS와 통신하여 각 출입문을 감시한다.



Fig. 1. Flowchart of EMU door operation

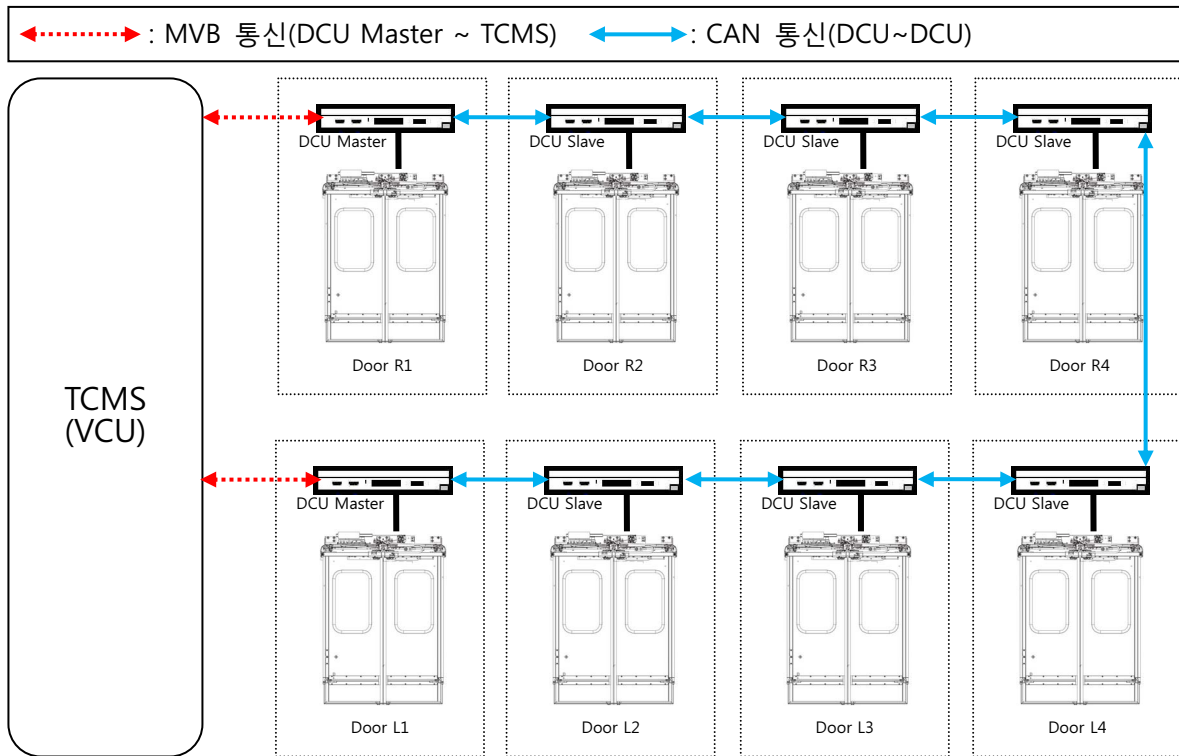


Fig. 2. Diagram of DCU signal

출입문 제어장치의 통신은 Fig.2.과 같이 DCU Master ~ Slave 간은 CAN, TCMS(VCU) ~ DCU(Master) 간은 MVB 통신을 한다.[2]

3. 출입문 장애물 검지 제어

신분당선 전동차는 출입문에 장애물이 검지되었을 경우 Fig. 3. 과 같은 로직으로 출입문이 제어되도록 설정되어 있다.

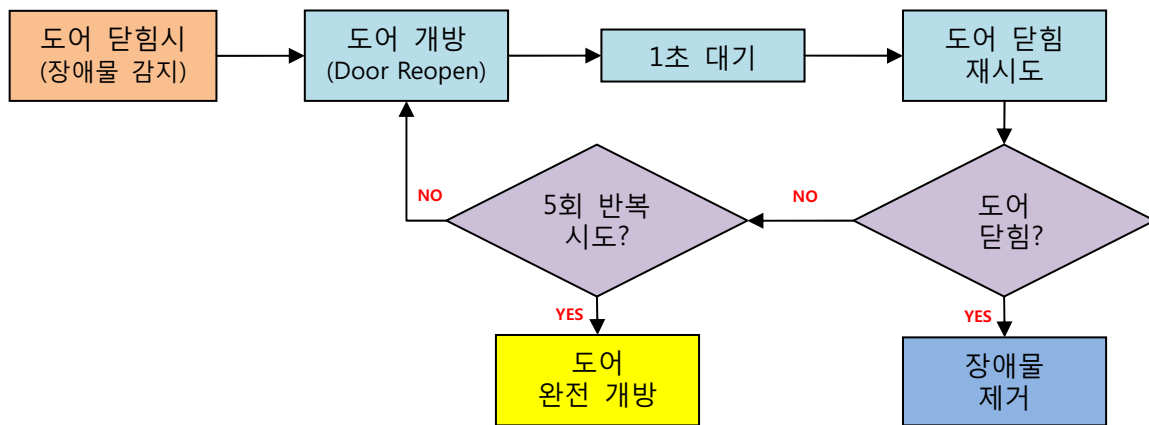


Fig. 3. Diagram of detecting obstacle

신분당선 전동차 출입문은 전기식 출입문으로 모터 전류 상승을 DCU에서 감지하여 장애물을 검지하는 방식과 Sensitive Edge Sensor로 일정한 힘이 센서에 전달되면 장애물을 인지하여

검지하는 방법이 있다.[2] 신분당선 전동차의 초기 장애물검지 횟수는 3회였으나, 무인운전 컨셉을 고려하여 재개폐 횟수를 5회로 늘려 유동장애물(승객 및 수화물)에 의해 운용가능성이 떨어지지 않도록 적용하였다.

3.1 모터제어 장애물 검지시스템

전기식 출입문으로 운영되는 대부분의 도시철도 전동차에 적용된 장애물 검지시스템으로 출입문이 닫히거나 열릴 때 장애물에 의해 모터 부하 증가로 인한 전류 상승을 감지하여 장애물을 검지하는 방식이다.

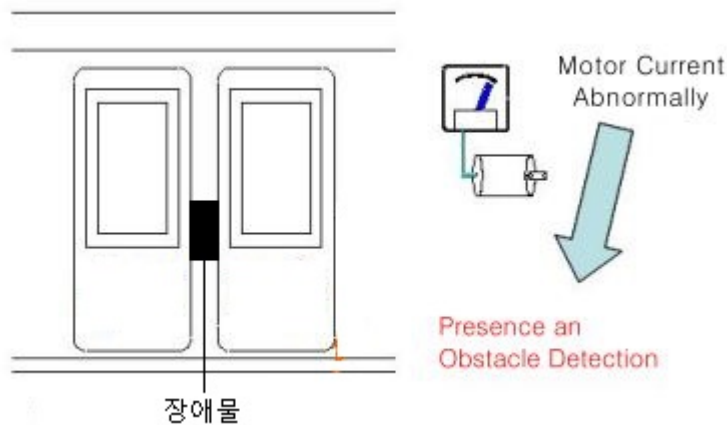
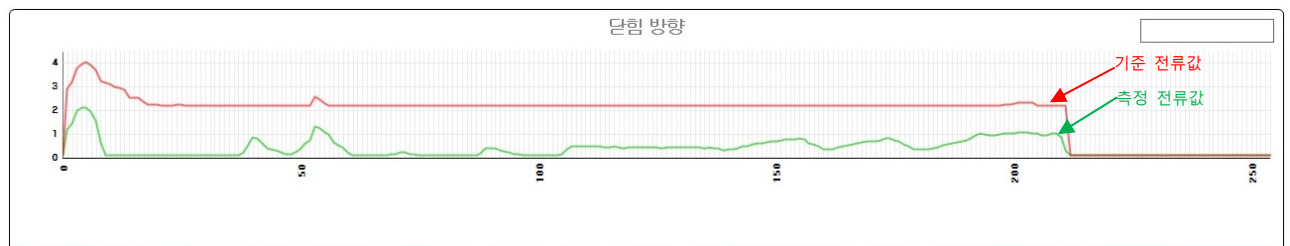
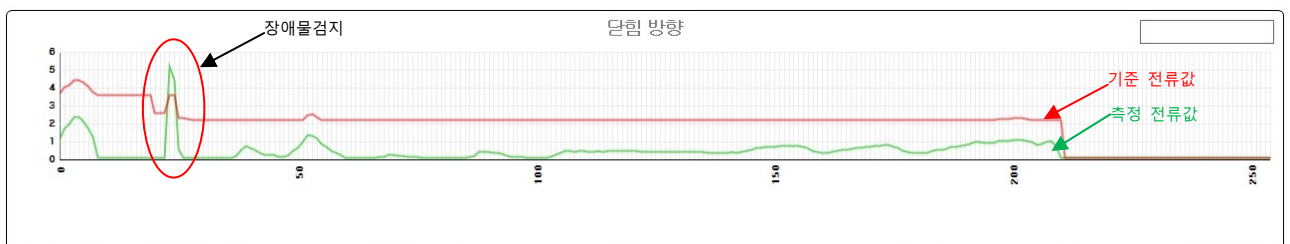


Fig. 4. Obstacle detection in closing door

신분당선 전동차에 적용된 출입문이 모터에 의한 장애물 검지시 모터 전류 값의 변화는 Fig. 5. 와 같다.



① 정상 닫힘시 모터 전류 값



② 장애물 검지시 모터 전류 값

Fig. 5. Measured motor current

기준 전류 값은 전동차 기동 후 최초 출입문 개폐시 DCU는 기준전류 계산 모드로 운영되어 DCU에 입력된 출입문 개폐시간, 압력 등을 근거로 계산된 전류 값이고, 측정 전류 값은 출입문 동작에 따른 실제 전류 값을 나타낸다. 모터에 의한 장애물 감지는 DCU에서 계산된 기준 전류 값보다 실제 측정된 전류 값이 초과할 경우 장애물을 감지하여 재개폐를 시행하게 된다.

3.2 센서 인지 장애물 감지시스템

센서(Sensitive Edge Sensor)를 이용한 출입문 장애물 감지 방식은 출입문이 닫힐 때 걸리는 장애물을 감지하기 위한 시스템으로 무인운전시스템을 채택한 신분당선 전동차의 승객안전도 향상을 위해 적용한 시스템이다. 다른 도시철도는 승무원이 승객의 탑승여부를 확인하여 출입문 운용을 자동 또는 수동 모드를 활용하여 탄력적으로 운용할 수 있지만, 무인운전인 신분당선 전동차는 출입문 개방 후 일정시간이 지나면 안내방송과 함께 자동으로 출입문이 닫히기 때문에 승객의 안전을 고려하여 센서 방식을 채택하였다. 센서 방식은 Fig.6 과 같이 부착된 압력센서에 일정 압력이 감지되면 DCU가 제어하여 출입문을 즉시 개방한다.

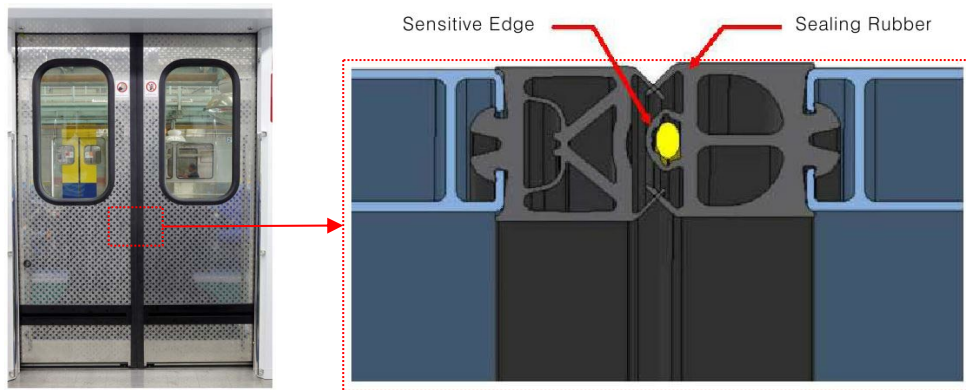


Fig. 6. Sensitive edge sensor

센서제어 장애물 감지방식이 모터제어 장애물 감지방식과 비교하였을 때 뛰어난 점은 다음과 같다. 첫째, 모터제어 장애물 감지방식은 일정한 부하 이상이 모터에 전달되어야 하기 때문에 장애물을 일정한 힘으로 밀고 있는 상태가 유지되어 최대 1초 정도 출입문에 장애물이 끼는 현상이 발생되나, 센서 방식은 일정 압력이 센서에 가해지는 순간 출입문이 개방되기 때문에 출입문에 장애물이 끼는 시간이 줄어들어 승객의 신체적 부상이나, 수화물이 파손될 가능성이 줄어든다. 둘째, 모터제어 장애물 감지방식은 출입문이 닫힐 때 접촉되는 부분인 판넬 엣지가 고무로 되어 있기 때문에 고무 특성에 의해 일정한 크기(30mm×60mm, EN14752 규격, 20mm×30mm KS9247 규격) 이하의 장애물은 감지하지 못하지만, 센서제어 감지방식은 센서에 닿는 압력으로 감지되는 방식이므로, 작은 물질이 끼더라도 센서에 의해 감지할 수 있다.

4. 승객안전도 비교 분석

4.1 닫힘력 및 장애물 인지시간 비교 분석

센서제어와 전류제어 방식의 닫힘력, 장애물 검지시 인지시간, 장애물 크기에 따른 검지여부 등을 비교 분석하였다. 식 (1)은 닫힘력에 대한 EN규격(EN 14752)에 정의된 식이다.

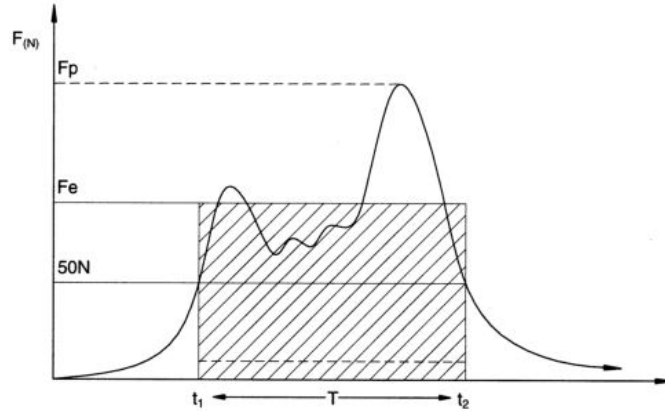


Fig. 7. Parameter relation

$$F_e = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \quad (1)$$

F_p : Peak Force

F_e : Effective Force

$$T = t_2 - t_1$$

With t_1 being threshold of sensitivity, where the closing force exceeds 50N and t_2 being the fade away threshold, where the closing force becomes less than 50N

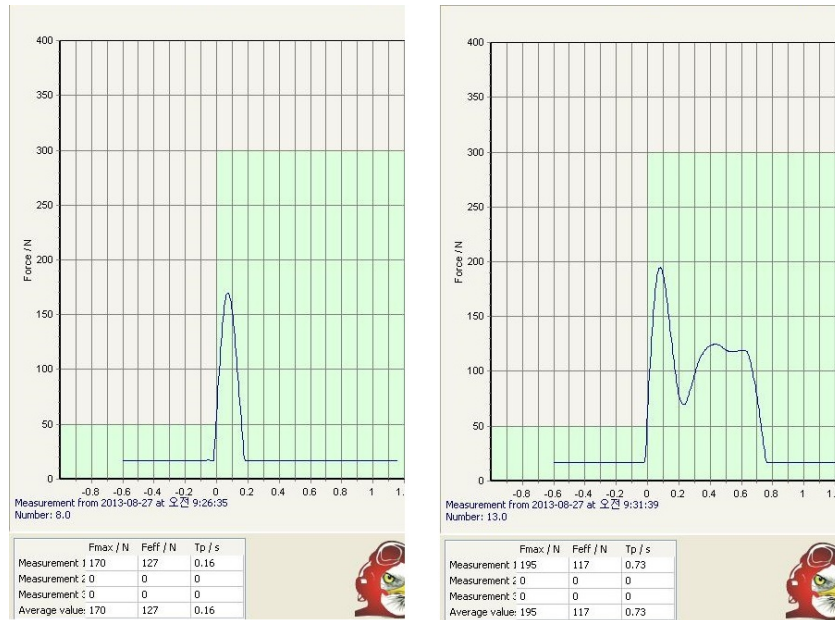
본 연구에서는 신분당선 플러그인 출입문과 전기식 출입문으로 운영되는 2개 기관의 닫힘력 (Closing force) 및 크기별 장애물 인지 여부를 측정하여 비교 분석하였다.

Table 1 Comparison with subway door of closing force and obstacle detection time

구분	운영사	신분당선		A사	B사	
	출입문 Type	플러그인		포켓슬라이딩	아웃슬라이딩	플러그인
	장애물 검지방식	센서제어	모터제어	모터제어	모터제어	모터제어
닫힘력(Closing Force)	F_p (Peak force)	170 N	195 N	167 N	83 N	205 N
	F_e (Effective force)	127 N	117 N	91 N	78 N	135 N
T, 장애물 인지시간(Obstacle detection time)		0.15 sec	0.73 sec	0.79 sec	0.96 sec	0.85 sec

Table 1은 각 출입문 검지방식에 대한 장애물 검지 후 인지시간에 대해 비교 분석한 표이다. 닫힘력을 비교했을 때 센서제어 방식과 모터제어 방식의 피크 값 및 실효 값은 비슷함을 알 수 있다. 하지만 Fig.8 과 같이 장애물을 인지하는 시간은 센서제어 방식이 약0.6~0.8초 이상 (약 5배) 빠른 것으로 확인되었다. 신분당선 출입문에 적용된 센서는 약 10N의 힘에 반응하도록 설계되어 있으며, 해당 압력에 의한 전류가 DCU에 입력되면, 즉시 열림 신호를 출력하기

때문에 장애물에 의해 전류 상승이 이뤄지는 모터제어 방식보다 반응 속도가 빠름을 알 수 있었다. 이는 실제 운행시 장애물이 검지되었을 때, 승객의 신체적 부상 및 수화물의 파손을 최소화 할 수 있어 안전도 향상에 크게 기여함을 알 수 있다.



(1) Closing Force of sensor detection (2) Closing force of motor detection

Fig. 8. Comparison of sensor and motor detection force

4.2 장애물 크기에 따른 검지 기능 비교 분석

각 출입문에 Table 2와 같이 크기가 각각 다른 장애물에 대해 검지가 가능한지 확인하였다. 각 장애물은 EN 규격 및 KS 규격에 명시된 출입문 검지 포인트에서 측정하였다. 3개 기관의 출입문에서 EN 및 KS 규격에 맞는 장애물은 검지함을 확인하였으나, 규격보다 작은 1mm 두께의 장애물(재질: steel)은 검지가 불가능하고 센서제어 방식은 1mm 두께의 장애물이 걸릴 경우에도 장애물을 인지함을 확인할 수 있다. 실제 센서는 1.5mm 이하에는 동작되지 않으나, 옛지 라바의 구조에 의해 1.5mm 이하의 장애물에도 동작하였다. 실제 운용시 가방끈과 같은 두께가 작은 수화물이 출입문에 걸리더라도 장애물로 인지, 검지함으로써 승객의 안전이 크게 향상됨을 알 수 있다.

Table 2 Check detecting in accordance with size of obstacle

구분	운영사	신분당선		A사	B사		비고
	Type	플러그인		포켓슬라이딩	아웃슬라이딩	플러그인	
	검지방식	센서제어	모터제어	모터제어	모터제어	모터제어	
30×60mm(EN14752)		○	○	○	○	○	EN14752
20×30mm(KSR9247)		○	○	○	○	○	KSR9247
1×20mm		○	X	X	X	X	재질:Steel

4.3 사례 연구

(1) 엷지 라바 탈락에 의한 장애물 검지

혼잡한 출퇴근 시간에 수많은 승객이 탑승하기 때문에 출입문에 다수의 승객이 몰린다. 승객 또는 수화물이 출입문 장애물 검지 센서가 부착되어 있는 엷지 라바에 걸려 강력한 타격이 가해질 경우 라바가 탈락되는 사례가 발생하였다. 엷지 라바 탈락으로 인해 Fig.9 와 엷지 라바가 어긋나게 되어 센서에 장애물이 검지되는 것으로 인지되어 출입문 작동 불가 상태가 되었다. 이와 같이 양 판넬에 부착된 엷지 라바가 어긋나는 경우 장애물 없이 장애물을 인지하는 단점이 있음을 확인하였다.



Fig. 9. Falling of Edge Rubber

(2) 해결방안

Sensitive Edge sensor는 일정압력이 센서에 가해지면 전기적 신호를 DCU가 인지하여 모터를 즉시 다시 개방하도록 되어있기 때문에 사례와 같이 센서가 부착된 엷지 라바가 탈락되어 어긋나는 경우, 장애물로 인지하여 검지하였다. 이를 보완하기 위해 출입문 검지방식을 초기 3회는 센서에 의해 검지하고, 남은 2회는 모터전류제어로 검지하는 방식으로 DCU 프로그램을 변경하였다. 출입문 개방 초기 3회 검지시 승객 및 수화물에 의해 엷지 라바가 탈락하여 장애물을 검지하더라도 남은 2회는 센서를 차단하고, 모터에 의해 장애물을 검지하게 함으로써 무인운전이 가능하도록 선조치하고, 다음 역 도착 후 본선기동검수 또는 역무원에 의해 조치되도록 하기 위함이다. DCU가 장애물을 인지하면 TCMS에서 확인, 차내 설치된 CCTV가 해당 출입문을 포커싱하게된다. 이 모든 정보는 VOBC 및 통신라인을 통해 관제로 정보를 송출하고, 관제사는 알람 및 CCTV 화면을 통해 실제 장애물에 의한 검지인지, 사례와 같이 라바 탈락에 의한 장애인지 확인할 수 있다. 이를 통해 다음 조치사항에 대해 판단, 관련직원(역무원 또는 승무원)에게 해당 정보 알릴 수 있다. 초기 3회를 센서에 의한 장애물 검지 방식을 적용한 사유는 관제사가 조치가 필요한 고장인지 판단이 가능하도록 하기 위함이다.

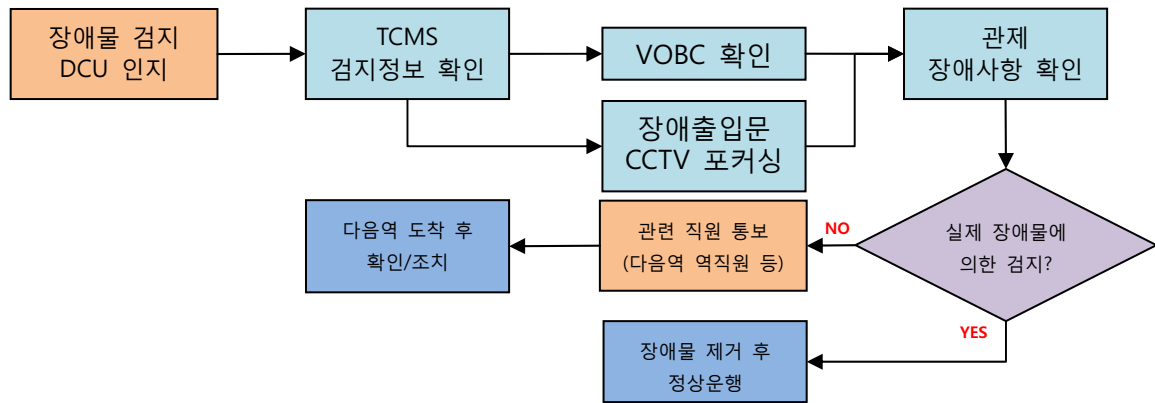


Fig. 10. Procedure of obstacle detection

이 방식의 총 장애물 검지시간을 계산해보면 다음과 같다.

$$(A + B + C) \times 3 = 21$$

$$A = \text{출입문_개방시간(약3초)}$$

$$B = \text{출입문_닫힘시간(약3초)}$$

$$C = \text{장애물검지_후_대기시간(약1초)}$$
(2)

식 (2)와 같이 총 21초의 운행지연이 발생됨을 알 수 있다. 이는 관련직원이 출동하여 출입문 쇄정 혹은 옛지 라바 취부 등의 조치에 소요된 평균 조치 시간인 약 3분보다 약 9배 이상 빠른 시간으로 운영 지연을 최소화 할 수 있다. 이 방식은 승객안전도에 영향을 주는 센서검지 방식과 센서 검지의 단점을 보완하는 모터 방식을 결합함으로써 승객안전도 및 운용가능성을 확보할 수 있는 방안이 되었다.

3. 결론

신분당선 전동차의 무인운전 컨셉에 맞는 장애물 검지 기능 및 승객안전도 및 운용가능성 향상을 위한 방안에 대해 살펴보았다. 무인운전시스템에서 출입문의 운용은 전동차 운행에 가장 중요한 부분이며, 출입문의 주요 장애는 승객 및 수화물에 의한 장애물 검지에 좌우된다. 이에 신분당선에 적용된 센서 제어 장애물 검지시스템은 모터 제어 장애물 검지시스템보다 승객의 신체적 부상이나, 수화물의 파손에 안전하고, 모터제어방식으로 검지할 수 없는 작은 장애물에도 센서제어방식으로 검지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 반대로 센서제어 방식의 단점으로 지적된 옛지 라바 탈락으로 인한 장애물 오검지를 실제 운용상황에서 확인하였으며, 위와 같은 상황으로 인한 출입문 운용 불가 상황에 대처하기 위해 모터제어방식과 혼합한 검지방식은 센서 제어 방식의 단점을 보완하여 전동차 운행에 적합한 방안임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 정의진 (2011) 전동차 전기식 플러그도어 출입문 제어 장치 개발, 전자공학회 논문지, 제 48권 SC편 제 4호, 303~309쪽.
- [2] 신분당선 정비지침서 제 1권, pp. 3-4-3 ~3-4-21.