

■ 論 文 ■

# 철도건널목 정시간 제어를 위한 열차속도 및 위치추적방식 개발

## Development of Train Velocity and Location Tracking Algorithm for a Constant Warning Time System

**오 주 택**

(한국교통연구원 책임연구원)

**김 태 권**

((주)유경제어 차장)

**박 동 주**

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

**신 성 훈**

(한국건설기술연구원 연구원)

### 목 차

- I. 서론
  - 1. 연구의 내용 및 목적
  - 2. 연구의 범위 및 절차
- II. 기존 건널목 열차검지방식
  - 1. 국내 열차검지방식
  - 2. 국외 열차검지방식
- III. 초음파 검지기를 이용한 열차위치추적 및 속도검지방식 개발
  - 1. 열차검지센서의 선정
- 2. 초음파 검지기 설치위치 선정
- 3. 열차 위치추적방식 개발
- 4. 열차 속도검지 방식 개발
- IV. 초음파 검지기를 이용한 열차위치추적 및 속도검지방식의 검증
  - 1. 열차위치추적방식 시험
  - 2. 열차속도검지방식 시험
- V. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

Key Words : 철도건널목, 정시간, 속도검지, 위치추적, 초음파 검지기

### 요 약

우리나라는 건널목 중 약 91.1%가 정거리 방식을 사용하고 있으며, 약 8.9%가 정시간 방식을 사용하고 있다. 정거리 방식의 경우 열차의 종류에 따른 접근속도의 편차를 고려하지 않고 단지 최고속도의 열차를 기준으로 한 건널목 대기시간을 차량운전자와 보행자에게 제공한다. 이는 저속 열차의 통과 시 건널목 대기시간이 길어져 차량 운전자와 보행자의 불만을 야기하며 건널목 대기시간이 필요 이상으로 긴 경우 차량운전자와 보행자는 경고를 불신하게 되고 잘못된 판단을 유도하게 되어 사고가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 철도건널목의 정확한 정시간 방식의 운영으로 철도건널목 사고예방 및 안전성 향상에 기여하고자 한다. 정확한 정시간 방식의 운영을 위하여 초음파 검지기를 이용한 열차 위치추적 및 속도검지 방식을 개발하였다.

초음파 검지기의 설치위치는 본 연구의 범위인 열차최고속도 160km/h와 새마을호의 최고속도 및 가속도, 건널목 최소경보시간을 고려하여 선정하였다. 그리고 개발된 열차 위치추적 및 속도검지 방식의 알고리즘에 대한 검증은 사고위험성의 문제로 실내에서 간이시험을 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 개발된 열차 위치추적 방식의 경우 실제 열차의 위치와 본 연구에서 개발된 알고리즘에 의한 열차 위치는 일치하였으며, 속도검지 방식은 실제 열차의 속도와 개발된 알고리즘에 의한 속도와의 오차가 최대 0.07m/sec인 것으로 분석되었다.

About 91.1% of Railway-Highway Crossings (RHC) in Korea use a Constant Distance Warning System(CDWS), while about 8.9% use a Constant Warning Time System(CWTS). The CDWS does not recognize speed differences of approaching trains and provides only waiting times to vehicles and pedestrians based on the highest speed of approaching trains. Under the CDWS, therefore, low speed trains provide unnecessary waiting times at crossings which often generates complains to vehicle drivers and pedestrians and may cause wrong decisions to pass the crossings.

The objective of this research is to improve the safety of the RHC by developing accurate a CWTS. In this research a train speed and location detection system was developed with ultra sonic detectors. Locations of the detectors was decided based on the highest speed and the minimum warning time of Saemaul of 160 km/h. To validate the algorithms of the newly developed systems the lab tests were conducted.

The results show that the train detection system provides accurate locations of trains, and the maximum error between real speeds of trains and those of the system was 0.07m/s.

# 1. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

철도건널목 사고는 도로교차로 사고에 비하여 사고 빈도는 작으나 사고발생 시 대형사고로 이어져 막대한 사회적·경제적 손실을 초래한다. 장래 철도의 복선화, 고속화 및 도로 교통량 증가로 인해 철도건널목 사고위험은 현재보다 증가될 것이다. 철도건널목 사고를 줄이기 위해 건널목의 입체화가 매년 이루어지고 있으나 지형적 문제 및 경제적 여건 등으로 한계가 있다. 입체화가 이루어지지 않은 건널목의 경우 사고위험성을 줄이기 위하여 건널목의 지능화가 필요한 실정이다. 철도공사의 신호업무자료(2004)에 의하면 국내의 철도건널목은 전체 건널목 1804개 중 1657(약 91.1%)개가 열차의 속도에 상관없이 특정 위치에서 열차를 검지하여 열차의 진입을 알려주고 차단기의 하강을 정거리로 제어하는 방식을 사용하고 있으며, 147개(약 8.9%)가 열차의 속도를 고려하여 언제나 일정한 시간동안 건널목을 제어하는 정시간 방식을 사용하고 있다.<sup>1)</sup>

현재 한국교통연구원에서 연구하고 있는 ‘철도건널목 안전관리 시스템개발’ 연구를 살펴보면 기존의 국내 정거리 제어방식의 경우 열차의 종류에 따른 접근속도의 편차를 고려하지 않고 있다. 단지 최고속도의 열차를 기준으로 한 건널목 대기시간을 차량운전자와 보행자에게 제공하고 있다. 이는 저속 열차의 통과 시 건널목 대기시간이 길어져 차량 운전자와 보행자에게 불편함을 제공한다. 또한 건널목 대기시간이 필요 이상으로 긴 경우, 차량운전자와 보행자는 경고를 불신하게 되고 잘못된 판단을 유도하게 되어 열차 진입 정보증임에도 불구하고 건널목으로 진입하여 통과를 시도함으로써 사고가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 그리고 현재 우리나라의 도로와 철도가 만나는 건널목의 경우 열차 진입으로 인한 철도 건널목의 차단기 제어시간에 따라 차량의 진행과 정지가 통제되어 인접교차로의 교통흐름에 큰 영향을 주고 있다. 교차로와 건널목간의 신호가 연계되지 않아 연속적인 차량의 흐름이 이루어지지 않을 때 운전자의 경우 지속적인 정체로 인하여 스트레스 및 불만을 유발시킨다. 이로 인하여 지속적인 정체와 도로의 효율성 저하로 경제적인 손실이 발생한다.<sup>2,3,4)</sup>

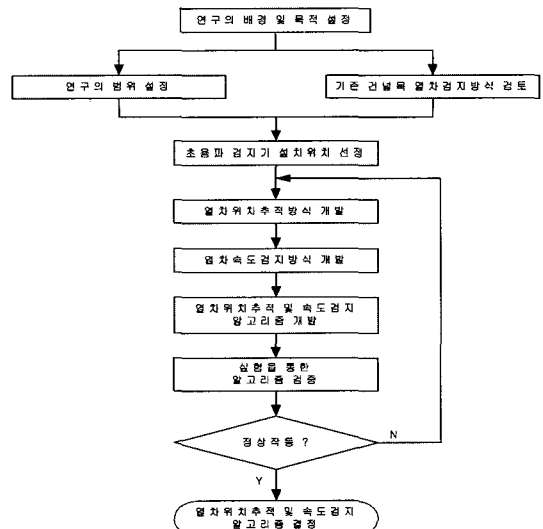
따라서 열차의 속도와 도착예정시간을 반영한 보다 현실적인 실시간 제어에 대한 연구가 필요하다. 열차의 속

도를 검지하면 고속열차와 저속열차에 따라 속도를 계산하여 건널목을 정시간으로 제어할 수 있다. Stephen H. Richards(1990)의 연구에 의하면 정시간 제어방식으로 운영되는 건널목이 정거지 제어방식으로 운영되는 건널목 보다 효율성 및 안전성이 높은 것으로 연구되었다.<sup>5)</sup> 그리고 Venglar S(2001)의 연구에서는 열차의 건널목 도착에 앞서 건널목과 인접한 교차로를 안전하고 능률적으로 정리하기 위해서는 열차 속도를 고려한 열차도착시간의 예측이 우선되어야 한다고 연구되었다.<sup>6)</sup>

본 연구의 목적은 철도 건널목의 정시간 제어를 위한 열차위치추적 및 속도검지방식을 개발하여 차량 운전자나 보행자의 건널목 대기시간에 따른 불편함을 해소하고 그로 인해 일어날 수 있는 건널목 사고를 사전에 예방하는 것이다. 그리고 기존의 독립적으로 운영되던 철도 건널목 운영과 도로 교차로의 운영을 서로 연계시켜 운영할 수 있는 근간을 마련하고자 한다.

## 2. 연구의 범위 및 절차

본 연구는 고속철도가 운행되는 노선의 경우 기존 모든 평면 건널목의 입체화가 추진중에 있으므로 입체화가 추진되기 어려운 일반열차 노선의 평면 건널목을 대상으로 하였다. 열차의 속도범위는 일반열차 노선을 운행하는 열차의 최고속도가 새마을호의 150km/h이다. 본 연구에서는 건널목의 안전성을 극대화시키기 위하여 열차 최고속도는 160km/h를 기준으로 160km/h 이하의 다양



〈그림 1〉 연구수행절차

한 속도로 건널목에 접근하는 열차의 위치추적 및 속도감지방식을 개발하였다.

본 연구에서 개발된 위치추적방식과 속도감지방식에 대한 검증은 실내 시험을 통하여 검증하였다. <그림 1>은 본 연구의 수행 흐름도를 도시화한 것이다.

## II. 기존 건널목 열차감지방식

철도건널목 안전을 향상시키기 위하여 열차를 정확하게 감지하고 건널목을 안전하게 제어할 수 있는 기술에 대한 연구가 불행히도 국내에서는 매우 미흡한 실정이다. 국외의 경우에도 열차사고를 예방하기 위하여 건널목 신호 제어관련 연구가 이루어지고 있으나 건널목제어관련 부분은 아직 활발한 연구가 이루어 지지 않고 있는 실정이다.

### 1. 국내 열차감지방식

국내에서는 궤도회로 방식과 제어자 방식을 이용하여 건널목을 정거리로 운영하고 있으며, 휠 감지방식을 이용하여 정시간으로 운영하고 있다.

기존의 정거리 운영방식에 사용되는 궤도회로방식과 제어자 방식의 경우 열차의 유무만을 판정하여 건널목 경보를 제어함으로 열차의 운행위치 및 운행속도를 감지하지 못하며 단락감도가 낮은 열차가 빠른 속도로 통과할 때에는 건널목 경보를 위한 열차 감지의 오류가 발생하는 단점이 있다. 그리고 기존의 정시간 운영 방식에 사용되고 있는 휠 감지방식은 열차 바퀴를 센싱하여 감지 유무를 판단함으로 감지 시간이 매우 짧고 열차 바퀴의 크기에 따라 민감하게 반응하며 열차의 가속을 감지하지 못하는 단점이 있다.<sup>2,7,8)</sup>

국내 열차감지방식을 살펴보면 다음과 같다.

- 궤도회로 방식 : 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 회로를 구성하고 있다. 진입하는 열차의 차축에 의해 레일사이를 단락함에 따라 신호기, 선로전환기, 연동장치, 기타의 신호기기를 직접 또는 간접적으로 제어하여 열차의 유무를 감지하는 전기회로 방식이다.
- 제어자 방식 : 궤도회로 방식과 마찬가지로 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 회로를 구성하고 있다. 평상시 여자되어 있다가 출력 또는 입력단자 사이를 열차의 차축으로 단락하면 계전기가 무여자되어 열차를 감지하는 폐전로식과 평상시 무여자되어 있다가 출력 또는 입력단자 사이를 열차의 차축으로 단락하면 계전기가

여자되어 열차를 감지하는 개전로식이 있다.

- 휠 감지방식 : 일종의 자기 센서로 자기 센서 2개를 병렬로 부착하여 열차의 방향과 센서간 부착 거리에 대한 열차 바퀴 통과시간을 측정하여 열차의 속도 및 길이를 검출한다.

### 2. 국외 열차감지방식

국외의 경우 열차위치를 정확하게 감지할 수 있는 새로운 기술개발에 많은 투자를 하고 있다. 국외의 열차 감지방식으로는 마그네토미터 시스템(Magnetometer system)과 자동 장비 식별기(Automatic equipment identification), 트랜스폰더 위치추적시스템(Transponder location system), 관성항법시스템(Inertial navigation system), Video-Based Sensor, VPAS (Vehicle Proximity Alert System), AWARD (Advanced Warning for Railroad Delays) 등이 있다.<sup>9)</sup>

국외 열차 감지방식을 정리하면 다음과 같다.

- 마그네토미터 시스템 : 레일의 표면 아래에 설치된 수동 자기센서에 의하여 열차가 통과할 때 변화하는 지자계를 통하여 열차를 감지한다.
- 자동 장비 식별기 : 태그(tags)가 장착된 열차가 판독기가 설치된 현장을 통과할 때 판독기에서 발생된 신호에 의해 태그가 포착되어 열차를 감지한다.
- 트랜스폰더 위치추적시스템 : 선로에 묻혀 있거나 레일 체결구에 장착된 트랜스폰더는 통과하는 열차에 의해 에너지를 공급함에 따라 열차를 감지한다.
- 관성항법시스템 : 선로를 통과하는 열차의 이동과 가속 같은 움직임을 관성측정장치(IMU: Inertial Measuring Unit)을 사용하여 감지한다.
- Video-Based Sensor : Video-Based Sensor를 통해 얻어진 이미지와 데이터 처리를 통하여 열차의 속도, 길이, 방향을 감지한다.
- VPAS : 열차의 전·후방 정보 전송장치를 이용하여 건널목을 이용하는 차량 운전자에게 열차접근을 경고한다.
- AWARD : 음향센서와 레이더 스피드건을 건널목 부근에 설치하여 열차의 출현과 길이 및 속도를 감지한다.

## III. 초음파 감지기를 이용한 열차위치추적 및 속도감지방식 개발

본 연구의 목적은 건널목의 안전성을 향상시키기 위

하여 철도 건널목의 연속적인 제어와 차량 운전자 및 보행자에게 열차의 속도와 상관없이 일정한 건널목 제어시간을 제공하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 국내 현실에 맞추어 검지기 및 설치위치를 선정하였으며 이를 이용한 열차위치추적 및 속도검지방식을 개발하였다.

### 1. 열차검지센서의 선정

기존 국내·외에서 사용되고 있는 궤도회로 방식, 제어자 방식과 같은 정거리 방식은 열차의 속도를 고려하지 못하며 간헐적으로 열차검지의 오류를 발생시킨다. 또한 기존의 정거리 방식은 열차를 전류의 흐름변화로 검지하므로 기존의 정거리 방식을 정시간 방식으로 변형하여 사용하기는 기술적으로 어려움이 많다. 휠검지방식과 같은 정시간 방식의 경우에도 짧은 검지시간과 열차 바퀴의 크기에 따라 오류를 발생시키며 열차의 속도변화를 검지하지 못하는 등 철도건널목상의 안전을 위한 열차검지 설비로는 미약한 부분이 많다. 또한 국내의 경우 산지가 많고 계절에 따른 환경의 변화가 크므로 기술적요인 뿐만 아니라 환경적인 요인까지 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 검지방식에서 발생된 문제점을 최소화하고 안전성을 증가시키기 위하여 조봉관(2002)의 연구에서도 소개된 적이 있으며 진동판에서 발생하는 고유 주파수를 전송하여 물체에서 반사되는 반사파를 입력받아 검지물을 인식하는 초음파 센서를 이용한 열차검지 방식을 개발하였다.<sup>10)</sup>

초음파 센서는 눈, 비, 온도, 습도에 민감하지 않고 직접적인 전선 연결이 없으므로 전자기적 잡음에도 강하다. 그리고 기존 열차 검지기는 유지보수가 어렵고 선로 보수 작업 시행시 철거 후 재설치를 하여야하는 불합리점이 많았으나 초음파 센서는 철로 변에서 일정거리를 이격하여 설치함으로써 유지보수의 편리성을 제공한다.<sup>2)</sup>

### 2. 초음파 검지기 설치위치 선정

#### 1) 열차의 속도검지를 위한 초음파 검지기 설치

건널목의 정시간에 따른 제어를 안전하게 하기 위해서는 열차의 속도검지 지점의 선정이 매우 중요하다. 그리고 건널목의 안전한 제어를 위해서는 건널목 경보시간이 충분히 고려되어야 한다. 따라서 열차의 속도검지 및 건널목의 안전한 제어를 위한 초음파 검지기의

위치 결정은 다음에 근거한다.

건널목 경보제어시간은 경보시작 3초 후 차단기가 하강하기 시작하여야 하며 차단기의 완전하강시간은 8초이고, 차단기가 완전 하강한 후 후 최소 15초 후에 열차가 통과하여야 한다. 건널목의 안전한 제어를 위한 최소 경보시간은 식(1)에 의하여 26초이다.

$$T = S_t + E_t + P_t = 3 + 8 + 15 = 26 \text{ 초} \quad (1)$$

여기서,  $T$  : 건널목 경보시간

$S_t$  : 경보시작 후 차단기가 하강시작까지의 시간

$E_t$  : 단기가 하강 시작 후 완전 하강하기까지의 시간

$P_t$  : 차단기가 완전 하강한 후 열차가 통과하기까지의 시간

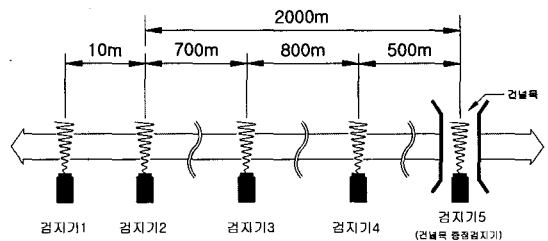
국내의 경우 경보제어시간을 30초로 설정하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 철도건널목 인근 교차로와 신호를 연계시키기 위하여 Hanseon Cho (2003)의 연구에 의한 최소 Signal Preemption Time값이 40초인 것을 고려하여 일반 경보시간 30초에 15초의 시간을 추가한 45초를 기준으로 건널목 제어구간 길이를 산정하였다.<sup>11)</sup>

경보제어시간의 길이는 산출된 경보시간과 그 구간을 운행하는 열차의 최고속도의 곱으로 산출된다. 본 연구에서의 열차 최고속도는 160km/h 이므로 속도가 160km/h인 열차의 제어거리는 식(2)에 의하여 약 2,000m 이다.

$$L = T \times V_{\max} = \frac{45 \times 160}{3.6} \approx 2000 \text{ m} \quad (2)$$

여기서,  $T$  : 건널목 경보시간

$V_{\max}$  : 열차 최고속도(m/sec)



〈그림 2〉 초음파 검지기 설치위치

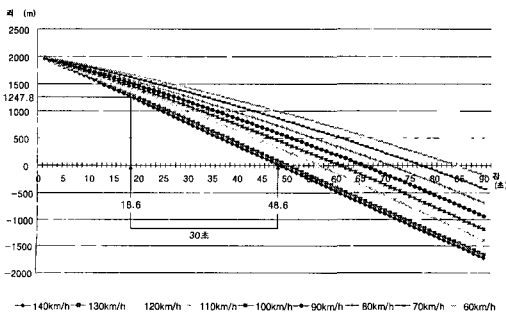
따라서 본 연구에서 제시하는 경보제어시간 40초를 만족하기 위해서는 건널목 전방 2km 지에 초음파 검지기를 설치하여야 한다. 또한 초음파 검지기의 특성 상 1개의 초음파 검지기만으로는 열차의 속도를 검지할 수 없으므로 열차의 속도를 검지하기 위하여 <그림 2>와 같이 10m 간격으로 검지기 1, 2를 설치하였다.

2) 열차의 가·감속도 검지를 위한 초음파 검지기 설치

열차는 운행구간에서의 열차 가·감속이 비 주기적으로 수행되므로 열차의 가·감속을 검지할 수 있는 구간 감시 검지기가 필요하다. 열차 검지구간 내에서 가·감속이 발생되었을 경우 건널목 경보시간은 최소 경보시간 보다 짧거나 길게 발생되어 사고위험이 높아진다. 따라서 열차가 건널목 2km 전방에 설치되어 있는 검지기 1, 2를 통과한 후 가·감속을 대비하여 열차의 가·감속을 측정할 수 있는 검지기의 설치가 요구된다. 열차의 가·감속도 검지를 위한 초음파 검지기의 위치 결정은 다음에 근거한다.

본 연구에서 열차의 속도 범위는 안전을 고려하여 최대 160km/h이나 실제 국내에서 운영되고 있는 열차의 최대 속도는 새마을열차의 150km/h이다. 열차의 가·감속도 검지를 위한 초음파 검지기의 위치는 새마을열차의 최대속도 150km/h와 최대 가속도 0.169  $m/sec^2$ 을 고려하여 선정되어야 한다. 초음파 검지기 1, 2에서 검지된 열차의 속도가 60km/h~140km/h의 범위일 때 새마을열차의 최대속도 150km/h, 최대 가속도 0.169  $m/sec^2$ 과 건널목 경보시간 30초를 비교·분석하여보면 <그림 3>, <표 1>과 같다.

초음파 검지기 1, 2에서 검지된 열차의 속도가 140km/h 일 경우 건널목 경보제어시 안전차리 시간 30초를 부여하기 위해서는 식(3)과 같이 최소 건널목 1,166.7m 전방에서 건널목 경보가 시작되어야 한다.



<그림 3> 새마을 열차의 가속력에 따른 거리의 시간관계

<표 1> 최대 가속력에 따른 거리와 시간관계

초기속도 (km/h (m/s))	최대가속도 (m/sec <sup>2</sup> )	이동시간 (sec)	이동 후 속도 (km/h (m/s))	이동거리 (m)
140 (38.9)	0.169	10	146.1 (40.6)	397.3
		20	150.0 (42.3)	810.5
		30	150.0 (44.0)	1227.2
		40	150.0 (45.6)	1643.9
		50	150.0 (47.3)	2060.5
		60	150.0 (49.0)	2477.2
		70	150.0 (50.7)	2893.9
		80	150.0 (52.4)	3310.5
		10	136.1 (37.8)	369.6
130 (36.1)	0.169	20	142.2 (39.5)	756.0
		30	148.3 (41.2)	1159.4
		40	150.0 (42.9)	1575.4
		50	150.0 (44.6)	1992.1
		60	150.0 (46.3)	2408.8
		70	150.0 (47.9)	2825.4
		80	150.0 (49.6)	3242.1
		10	126.1 (35.0)	341.8
		20	132.2 (36.7)	700.5
120 (33.3)	0.169	30	138.3 (38.4)	1076.1
		40	144.3 (40.1)	1468.5
		50	150.0 (41.7)	1877.9
		60	150.0 (43.5)	2294.6
		70	150.0 (45.2)	2711.2
		80	150.0 (46.9)	3127.9
		10	116.1 (32.2)	314.0
		20	122.2 (33.9)	644.9
		30	128.3 (35.6)	992.7
110 (30.6)	0.169	40	134.3 (37.3)	1357.4
		50	140.4 (39.0)	1739.0
		60	146.5 (40.7)	2137.5
		70	150.0 (42.4)	2551.5
		80	150.0 (44.1)	2968.1
		10	106.1 (29.5)	286.2
		20	112.2 (31.2)	569.4
		30	118.3 (32.8)	909.4
		40	124.3 (34.5)	1246.3
100 (27.8)	0.169	50	130.4 (36.2)	1600.1
		60	136.5 (37.9)	1970.9
		70	142.6 (39.6)	2358.5
		80	148.7 (41.3)	2763.0
		10	96.1 (26.7)	258.5
		20	102.2 (28.4)	533.8
		30	108.3 (30.1)	826.1
		40	114.3 (31.8)	1135.2
		50	120.4 (33.5)	1461.3
90 (25.0)	0.169	60	126.5 (35.1)	1804.2
		70	132.6 (36.8)	2164.1
		80	138.7 (38.5)	2540.8
		10	86.1 (23.9)	230.7
		20	92.2 (25.6)	478.2
		30	98.3 (27.3)	742.7
		40	104.3 (29.0)	1024.1
		50	110.4 (30.7)	1322.4
		60	116.5 (32.4)	1637.5
80 (22.2)	0.169	70	122.6 (34.1)	1969.6
		80	128.7 (35.7)	2318.6
		10	76.1 (21.1)	202.9
		20	82.2 (22.8)	422.7
		30	88.3 (24.5)	659.4
		40	94.3 (26.2)	913.0
		50	100.4 (27.9)	1183.5
		60	106.5 (29.6)	1470.9
		70	112.6 (31.3)	1775.2
70 (19.4)	0.169	80	118.7 (33.0)	2096.4
		10	66.1 (18.4)	175.1
		20	72.2 (20.0)	367.1
		30	78.3 (21.7)	576.1
		40	84.3 (23.4)	801.9
		50	90.4 (25.1)	1044.6
		60	96.5 (26.8)	1304.2
		70	102.6 (28.5)	1580.7
		80	108.7 (30.2)	1874.1
60 (16.7)	0.169	10	66.1 (18.4)	175.1
		20	72.2 (20.0)	367.1
		30	78.3 (21.7)	576.1
		40	84.3 (23.4)	801.9
		50	90.4 (25.1)	1044.6
		60	96.5 (26.8)	1304.2
		70	102.6 (28.5)	1580.7
		80	108.7 (30.2)	1874.1

$$d = v \times t = \frac{140}{3.6} \times 30 = 1,166.7 \text{ m} \quad (3)$$

여기서,  $d$  : 거리       $v$  : 속도       $t$  : 시간

그러나 초음파 검지기 1, 2에서 속도가 140km/h로 검지된 열차가 최대 가속력으로 가속을 하여 속도가 150km/h로 증가되었을 경우에는 건널목 경보제어 안전처리 시간 30초를 부여하기 위해서는 최소 건널목 1,250m 전방에서부터 건널목 경보가 시작되어야 한다. 그러므로 열차의 가속력을 고려하여 건널목 1,300m 전방에 열차의 가·감속도 검지를 위한 검지기 3이 설치되어야 한다.

$$d = v \times t = \frac{150}{3.6} \times 30 = 1,250 \text{ m}$$

본 연구의 열차 최고 속도 160km/h와 건널목 차단에 필요한 최소한의 시간을 기준으로 저속 열차의 급격한 가속 시 긴급한 상황을 대비하고 최소한의 안전을 도모할 수 있는 검지기의 설치가 필요하다. 열차의 가속이 검지됐을 때 즉시 경보를 울리고 차단기가 완전히 하강하기 위한 건널목 차단에 필요한 최소한의 시간은 경보 후 차단기 동작 개시 3초, 차단기 하강 시간 8초가 소요된다. 건널목 차단에 필요한 최소한의 경보시간 11초를 만족하기 위해서는 열차 최고속도 160km/h를 기준으로 최소한 건널목 500m 전방에 열차의 가·감속도 검지를 위한 검지기 4가 설치되어야 한다. 검지기 3과 4의 설치위치는 <그림 2>와 같다.

$$d = v \times t = \frac{160}{3.6} \times (3 + 8) = 488.9 \text{ m}$$

3) 건널목 제어 종료를 위한 초음파 검지기 설치

열차가 건널목 제어구간에 진입하여 건널목 제어가 시작된 후 건널목 제어를 종료하기 위해서는 열차가 건널목을 완전히 통과하였는가에 대한 확인이 필요하다. 그러므로 열차의 건널목 통과여부를 확인 할 수 있는 검지기 5가 설치되어야 한다. 검지기 5의 설치위치는 <그림 2>와 같다.

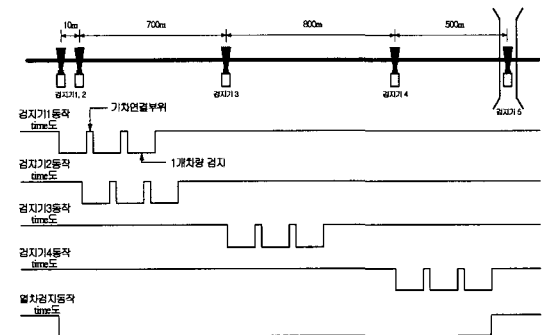
3. 열차 위치추적방식 개발

열차의 위치추적은 열차의 위치를 연속적으로 파악하는 것으로 그 구간을 지나는 다수의 열차를 각각 추적하여 새로 진입하는 열차가 있는가, 열차가 건널목 구간을 완전히 통과 하였는가 등을 연속적으로 파악하여 건널목

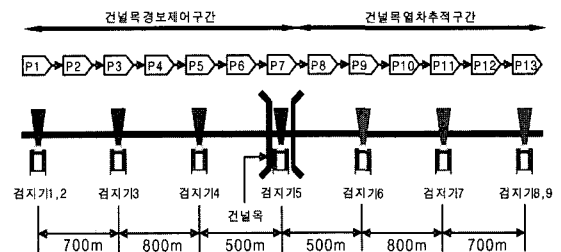
제어에 이용하는 것이다. 열차가 건널목 통과 직후, 연속해서 두 번째 열차가 건널목 구간에 진입하게 되면 건널목 경보가 잠시 중지되었다가 다시 시작하게 된다. 이때 건널목 차단기가 하강을 실시했다가 다시 상승하는 등의 동작으로 차량운전자나 보행자가 판단에 혼란을 일으키거나 고장으로 간주하여 사고를 유발시킬 수 있다.

기존의 궤도회로 방식, 제어자 방식, 휠 검지방식은 시스템의 구성상 열차의 위치추적이 불가능하다. 그러나 본 연구에서 제시한 초음파 검지기를 이용할 경우 <그림 4>와 같은 초음파 검지기의 동작으로 건널목 구간에서의 열차 위치추적이 가능하다.

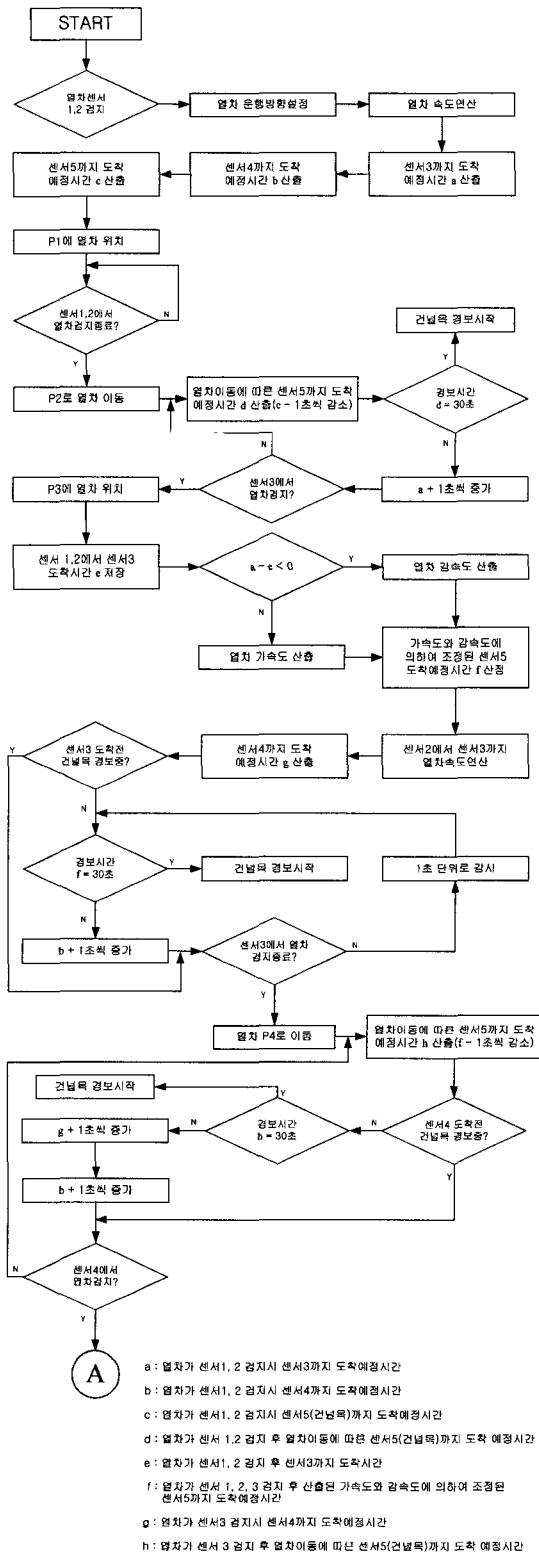
본 연구에서는 건널목 구간에서의 열차추적은 <그림 5>와 같이 열차추적구간과 건널목 열차추적구간으로 구분할 수 있다. 건널목 구간에서는 검지기 1~5를 이용하여 열차가 P1에 진입하여 건널목을 완전히 벗어나는 P8까지 열차의 위치를 추적한다. 건널목 열차추적은 열차가 건널목을 완전히 벗어난 후 돌발상황 등으로 인하여 후진을 하는 경우를 대비하여 검지기 6~9를 검지기 1~4의 설치위치와 대칭이 되도록 설치하여 열차의 위치를 추적한다. 열차위치추적 알고리즘은 <그림 6>과 같으며 검지기 1~검지기9의 열차검지 여부에 따른 열차의 위치에 대한 설명은 <표 2>와 같다.



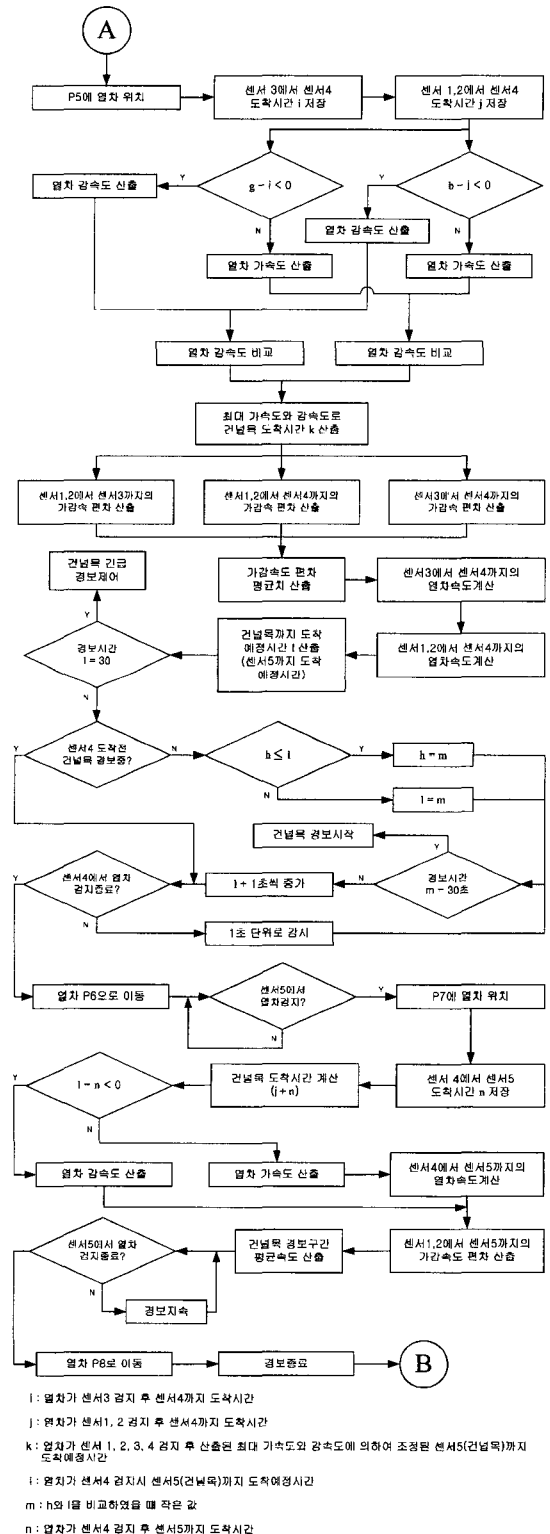
<그림 4> 초음파 검지기 동작 타이밍도



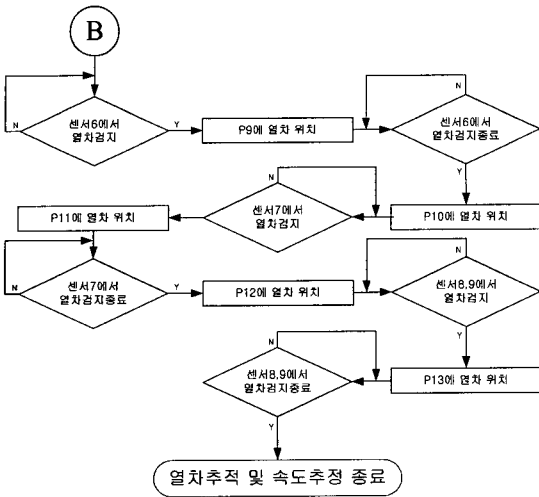
<그림 5> 열차추적구간과 건널목 열차추적구간



〈그림 6〉 열차위치추적 및 속도감지알고리즘



〈그림 6〉 열차위치추적 및 속도감지알고리즘(계속)



〈그림 6〉 열차위치추적 및 속도검지알고리즘(계속)

〈표 2〉 열차검지 여부에 따른 열차의 위치

위치	내용
P1	센서 1, 2에서 열차 검지
P2	센서 1,2열차검지 종료 후 센서 3열차검지 전
P3	센서 3에서 열차 검지
P4	센서 3 열차검지 종료 후 센서 4 열차검지 전
P5	센서 4에서 열차 검지
P6	센서 4 열차검지 종료 후 센서 5 열차검지 전
P7	센서 5에서 열차 검지
P8	센서 5 열차검지 종료 후 센서 6 열차검지 전(건널목 제어 종료)
P9	센서 6에서 열차 검지
P10	센서 6 열차검지 종료 후 센서 7 열차검지 전
P11	센서 7에서 열차 검지
P12	센서 7 열차검지 종료 후 센서 8 열차검지 전

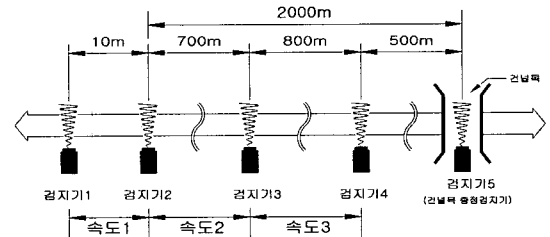
### 4. 열차 속도검지 방식 개발

기존의 횡 검지기를 이용한 건널목 정시간 제어방식은 열차 검지 시간이 매우 짧고 열차 바퀴의 크기에 따라 민감하게 반응한다. 그리고 열차 속도검지 이후에 열차가 감속할 경우에는 안정상 문제는 없으나, 가속할 경우에는 열차가 예상보다 빨리 건널목으로 진입하게 되므로 경보기기의 동작 및 운전자 정보 표시 시간이 부족하여 사고발생 위험이 높다. 따라서 본 연구에서는 열차의 형태에 영향을 받지 않고 열차의 가·감속을 고려하여 대처할 수 있는 열차속도검지방식을 개발하였다.

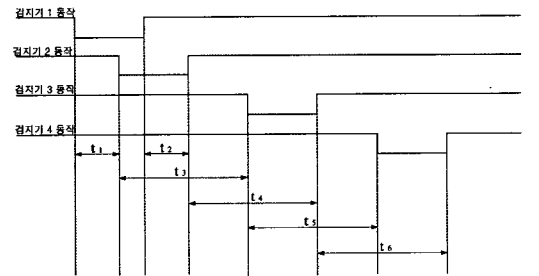
열차 검지센서는 〈그림 7〉과 같이 검지기 1, 2를 10m 간격으로 설치하고 검지기 3은 건널목으로부터 1300m 전방, 검지기 4는 건널목으로부터 500m 전방

에 설치하여 검지기에 검지된 열차의 속도를 연산한다.

건널목으로 진입하는 열차의 속도는 〈그림 8〉과 같이 초음파 검지기의 검지동작에 의하여 각 구간별 속도와 도와 전체 가속도 및 감속도를 계산하여 최종 건널목 도착시간을 산출한다. 검지기 1~4의 열차검지시간에 따른 열차속도와 건널목 도착시간 산출방법은 검지기 1, 2에서 열차가 검지되면 검지된 시간으로 열차속도 1을 연산하고 연산된 속도를 이용하여 건널목 도착예정시간( $t_6$ )을 산출한다. 이후 도착예상시간을 감산하여 경보 제어시간(기준 경보 시간 30초)와 비교하여 도착예정시간과 경보 제어 시간과 동일할 때 경보를 개시한다. 검지기 3에서 열차가 검지되면 검지기 2에서 검지기 3까지의 열차 검지시간을 환산하여 열차속도 2를 연산하고 열차속도 1과 2를 비교하여 가·감속도를 연산한다. 이때 연산된 가·감속도를 이용하여 건널목 도착예정시간( $t_5$ )을 산출하며, 도착예정시간을 감산하여 경보 제어시간이 도착예정시간과 경보 제어 시간과 동일할 때 경보를 개시한다. 검지기 4에서 열차가 검지되면 열차속도 3을 연산하고 열차속도 2와 3을 비교하여 가·감속도에 따른 건널목 도착예상시간( $t_4$ )을 산출한다. 이후 도착예정시간을 감산하여 경보 제어시간과 도착 예정시간과 경보제어 시간과 동일할 때



〈그림 7〉 검지기 위치에 따른 열차속도구분



- $t_1$  : 검지기 1~2간의 열차 도착시간차
- $t_2$  : 검지기 1~2간의 열차 통과시간차
- $t_3$  : 검지기 2~3간의 열차 도착시간차
- $t_4$  : 검지기 2~3간의 열차 통과시간차
- $t_5$  : 검지기 3~4간의 열차 도착시간차
- $t_6$  : 검지기 3~4간의 열차 통과시간차

〈그림 8〉 검지기 센서 출력에 따른 열차의 시간 차



정보를 개시한다. 만약 열차속도 3이 60km/h를 이상일 경우에는 열차의 건널목 도착예정시간이 기준 경보시간 30초보다 짧으므로 건널목 차단기를 급제어하여야 한다.

속도와 가·감속도 산출식은 식(4, 6, 7, 9, 10)과 같으며, 열차 건널목 도착예정시간 산출식은 식(5, 8, 11)과 같다. 열차속도검지 알고리즘은 <그림 6>과 같다.

열차속도 1( $V_1$ ) :

$$V_1 = \frac{2L_{d1}}{t_1 + t_2} \quad (4)$$

여기서,  $L_{d1}$ : 검지기 1~2 설치거리

열차속도 1에 따른 건널목 도착예정시간( $T_a$ ) :

$$T_a = \frac{d_1}{V_1} = \frac{d_1(t_1 + t_2)}{2L_{d1}} \quad (5)$$

여기서,  $d_1$ : 검지기 2에서 건널목까지 거리

따라서, 건널목 제어시간 30초를 제공하기 위한 건널목 경보시작 예상시간은 검지기 1, 2에서 열차가 검지되고 ( $T_a - 30$ 초) 후 이다.

열차속도 2( $V_2$ ) :

$$V_2 = \frac{2L_{d2}}{t_3 + t_4} \quad (6)$$

여기서,  $L_{d2}$ : 검지기 2~3 설치거리

열차속도 1, 2의 차이에 따른 가·감속도( $a_1$ ) :

$$a_1 = \left( \frac{2(V_2 - V_1)}{t_3 + t_4} \right) \quad (7)$$

열차의 가·감속도에 따른 건널목 도착예정시간( $T_b$ ) :

$$T_b = \frac{\sqrt{V_2^2 + 2a_1d_2} - V_2}{a_1} = \frac{(t_3 + t_4) \left( \sqrt{V_2^2 + \frac{4d_2(V_2 - V_1)}{(t_3 + t_4)}} - V_2 \right)}{2(V_2 - V_1)} \quad (8)$$

여기서,  $d_2$ : 검지기 3에서 건널목까지 거리

따라서, 건널목 제어시간 30초를 제공하기 위한 건널목 경보시작 예상시간은 검지기 3에서 열차가 검지되고 ( $T_b - 30$ 초) 후 이다.

열차속도 3( $V_3$ ) :

$$V_3 = \frac{2L_{d3}}{t_5 + t_6} \quad (9)$$

여기서,  $L_{d3}$ : 검지기 3~4 설치거리

열차속도 2, 3의 차이에 따른 가·감속도( $a_2$ )

$$a_2 = \frac{2(V_3 - V_2)}{t_5 + t_6} \quad (10)$$

열차의 가·감속도에 따른 건널목 도착예정시간( $T_c$ ) :

$$T_c = \frac{\sqrt{V_3^2 + 2a_2d_3} - V_3}{a_2} = \frac{(t_5 + t_6) \left( \sqrt{V_3^2 + \frac{4d_3(V_3 - V_2)}{(t_5 + t_6)}} - V_3 \right)}{2(V_3 - V_2)} \quad (11)$$

여기서,  $d_3$ : 검지기 4에서 건널목까지 거리

따라서, 건널목 제어시간 30초를 제공하기 위한 건널목 경보시작 예상시간은 검지기 4에서 열차가 검지되고 ( $T_c - 30$ 초) 후 이다.

#### IV. 초음파 검지기를 이용한 열차위치추적 및 속도검지방식의 검증

본 연구의 목적은 열차의 위치추적과 속도를 정확하게 검지하여 철도건널목을 정시간으로 제어함으로써 철도건널목의 안전성을 향상시키는 것이다. 그러므로 열차의 위치추적과 속도검지방식을 개발하는데 있어서 무엇보다도 중요한 것은 안전성이므로 각각에 대한 검증과정이 필요하다.

본 연구에서 개발한 열차 위치추적 및 속도검지 방식에 대한 정확한 검증은 현장에 직접 검지기를 설치하여 검증하는 것이 가장 정확한 방법이지만 현장시험대상 건널목의 선정과 사고위험성의 문제로 본 연구에서는 실내에서 간이시험을 실시하였다. 검증시험 항목 및 내용은 <표 3>과 같다.

<표 3> 검증시험 항목 및 내용

시험항목	시험내용
열차위치추적 시험	초음파 검지에 의한 열차위치추적 신뢰성 시험
열차속도검지 시험	초음파 검지에 의한 열차속도검지 신뢰성 시험

#### 1. 열차위치추적방식 시험

열차위치추적 방식에 대한 검증시험은 각 검지기에 해당하는 시험지그<sup>1)</sup> 스위치 동작을 이용하여 시험하였으며 시험지그에 의하여 검지된 열차정보를 이용하여 열차의 위치를 검증하였다.

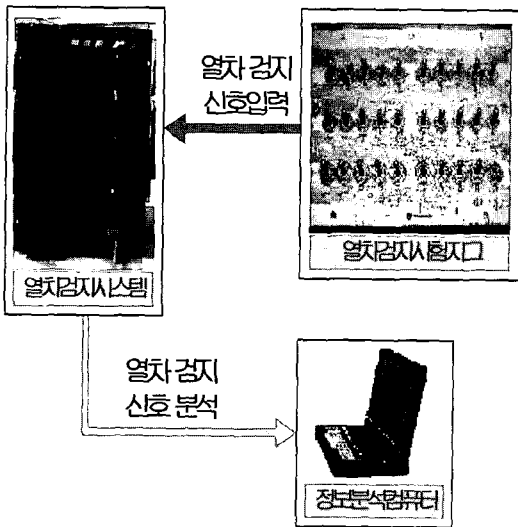
1) 초음파 검지기의 열차검지를 대신하여 초음파 검지기가 열차를 검지하는 입력을 스위치 조작으로 대신하는 시험기기.

1) 시험 구성 및 방법

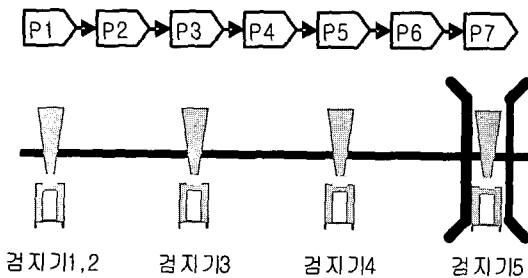
열차위치추적 방식 검증시험 구성은 <그림 9>와 같이 검지기기에 해당하는 시험지그와 센서의 입력을 받는 열차검지 시스템, 그리고 열차 검지동작정보를 받아 분석할 수 있는 컴퓨터로 구성되어 있다.

열차위치추적 방식 검증시험 방법은 다음과 같으며 열차검지 정보에 따른 열차위치 표출은 <그림 10>과 같다.

- ① 검지기별 시험지그를 이용하여 검지기의 열차 검지여부에 대한 정보를 열차검지시스템으로 입력
- ② 열차검지시스템에서 입력받은 열차정보를 정보분석 컴퓨터로 전송
- ③ 정보분석 컴퓨터로 전송된 열차검지 정보를 분석하여 열차위치 표출



<그림 9> 열차위치검지 시험



<그림 10> 열차위치 표출

2) 시험결과

본 연구에서 개발한 열차위치추적 알고리즘을 이용하여 열차검지 정보에 따른 열차위치추적의 정확성을 검증한 결과 <표 4>와 같이 시험지그에 의한 열차의 위치와 정보분석 컴퓨터에서 도출된 열차위치가 모두 일치하였다.

<표 4> 열차위치추적 방식 검증시험 결과

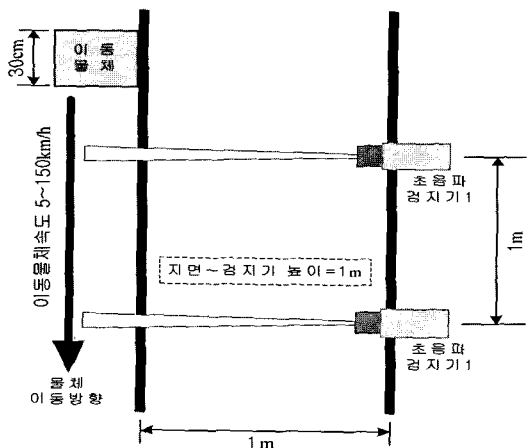
시험 횟수	구분	시험결과						
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차1	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차2	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차3	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차4	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차5	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차6	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
열차7	실제위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	표출위치	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7

단) 여기서 실제위치는 시험지그에 의한 열차위치임

2. 열차속도검지방식 시험

초음파 검지기에서 검지한 열차속도와 실제 열차속도를 비교하기 2개의 초음파 검지기를 설치하고 1개의 이동물체를 이동시켜 속도를 검지하는 시험을 실시하였다. 그리고 이동물체를 열차로 가정하였으며 이동물체의 크기는 실내 시험장의 한계로 축소하여 시험하였다.

1) 시험구성 및 방법



<그림 11> 열차속도검지 시험

시험대상 열차의 속도를 측정하기 위하여 초음파센서를 지면에서 일정높이(1m)에 고정하고 평면정사각형(30cm)의 이동물체를 일직선상의 같은 높이에 위치시킨 후 이동속도를 5~150km/h까지 변화시키며 시험하였다. 열차속도검지 시험의 구성은 <그림 11>과 같다.

2) 시험결과

두개의 센서를 배치하고 1개의 이동물체를 이동시켜 측정된 초음파센서의 검지 반응속도는 <표 5>와 같다. 초음파센서1, 2와 10m의 간격으로 떨어져있을 때 5~150km/h의 열차가 지나갈 때 시험속도와 검지속도를 시험한 결과 시험속도와 초음파 센서에 의하여 검지된 속도의 차이는 최대 0.05초, 최소 0초였다.

<표 5> 열차속도에 따른 센서1과 2사이의 검지속도

열차시험속도 (km/h (m/sec))	검지속도 (m/sec)	시험속도와 검지속도 차(m/sec)
150 (41.7)	42.0	0.03
140 (38.9)	3.85	0.04
130 (36.1)	3.62	0.01
120 (33.3)	3.28	0.05
110 (30.6)	3.05	0.01
100 (27.8)	2.80	0.02
90 (25.0)	2.47	0.03
80 (22.2)	2.18	0.04
70 (19.4)	1.96	0.02
60 (16.7)	1.66	0.01
50 (13.9)	1.37	0.02
40 (11.1)	1.10	0.01
30 (8.3)	0.82	0.01
20 (5.6)	0.55	0.01
10 (2.8)	0.27	0.01
5 (1.4)	0.14	0

V. 결론 및 향후 연구과제

철도건널목 사고는 사고발생 시 대형사고로 이어져 막대한 사회적·경제적 손실을 초래한다. 장래 철도의 복선화, 고속화 및 도로 교통량 증가로 인해 철도건널목 사고위험은 현재보다 증가될 것이다. 철도건널목 사고를 줄이기 위해 건널목의 입체화가 매년 이루어지고 있으나 지형적 문제 및 경제적 여건 등으로 한계가 있다. 입체화가 이루어지지 않은 건널목의 경우 사고위험성을 줄이기 위하여 건널목의 지능화가 필요한 실정이다. 국내의 철도건널목은 전체 건널목 1804개 중 1657(약 91.1%)개가 정거리 제어방식을 사용하고 있으며, 147개(약

8.9%)가 정시간 제어방식을 사용하고 있다. 정거리 제어방식의 경우 구간을 운행하는 열차의 최고속도를 기준으로 건널목을 제어하고 있다. 이는 저속 열차의 통과 시 건널목 대기시간이 길어져 차량 운전자와 보행자에게 불편함을 제공하며, 차량운전자와 보행자는 경고를 불신하게 되고 잘못된 판단을 유도하게 되어 사고가 발생할 가능성이 내포하고 있다. 또한 기존의 정시간 제어방식은 열차검지 후 열차속도의 변화에 따른 건널목 제어시간의 조종이 불가능하다. 따라서 열차의 속도에 따른 도착에 정시간을 반영한 철도건널목의 정시간 제어에 대한 연구가 필요하며, 이러한 연구를 통하여 철도건널목의 효율성 및 안전성을 높여야 한다.

본 연구는 입체화가 추진되기 어려운 일반열차 노선의 평면 건널목을 대상으로 하였다. 열차의 속도범위는 건널목의 안전성을 극대화시키기 위하여 열차의 최고속도를 160km/h를 기준으로 초음파 검지기의 설치위치를 선정하였으며 열차의 위치추적 및 속도검지방식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 위치추적방식과 속도검지방식에 대한 검증은 실제 현장을 이용하여 검증하는 것이 가장 정확한 방법이지만 현장 시험시 사고위험성의 등과 같은 문제로 본 연구에서는 실내 시험을 통하여 검증하였다. 그 결과 열차위치추적방식의 경우 열차의 위치추적 정보에 대한 오차는 없었으며, 속도검지 방식에 대한 오차는 최대 0.07m/sec인 것으로 분석되었다.

향후 본 연구에서 개발한 열차 위치추적 및 속도검지방식을 실용화시키기 위해서는 다음과 같은 추가 연구가 필요하다.

첫째, 실내 시험의 결과가 실제 현장 설치를 통한 시험결과와 동일하다고 판단하기는 어려우므로 실제 현장 시험을 통하여 현장에서 발생 될 수 있는 환경적인 요소와 돌발상황 등이 고려된 시험이 필요하다.

둘째, 본 연구에서 개발한 열차 위치추적 및 속도검지방식이 실용화 될 경우 센서의 고장이나 통신이 불량일 경우 열차검지의 오류로 인한 대형사고와 혼란을 초래할 수 있다. 이를 대비하여 통신시스템은 유선으로 설치하여 통신선의 단선을 검지하는 장치와 열차의 운행이 없는 시간동안 수시로 센서의 고장여부를 검지할 수 있는 고장 및 오류 검지장치의 설치가 필요하다.

셋째, 본 연구에서 제시한 열차 위치추적 및 속도검지방식이 실용화를 대비한 경우 기존의 방식과 비교하여 발생하는 비용과 편익에 대한 분석이 필요하다.

현장시험과 센서 및 통신장치의 고장 및 오류 검지

장치, 경제성 분석이 모두 이루어진다면 본 연구에서 개발한 철도건널목 열차속도 및 위치추적방식의 신뢰도와 도입 타당성을 보다 향상시키고 철도건널목에서 발생하는 사고를 획기적으로 감소시킬 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 철도청(2004), 신호업무자료 제20호.
2. 교통개발연구원(2004), 철도건널목 안전관리시스템 개발(Ⅰ).
3. 교통개발연구원(2001), 철도건널목 진입경고 및 제어기술 개발.
4. 오주택·신성훈·성낙문·박동주·최은수(2005), 철도건널목 사고요인 분석에 관한 연구, 대한교통학회지, 제24권 제1호, 대한교통학회, pp.33~44.
5. Stephen H. R.(1990), Evaluation of Constant Warning Times Using Train Predictors at a Grade Crossing with Flashing Light Signals, Transportation Research Record, 1254, pp 60~71.
6. Venglar S.(2001), Advanced Intersection Controller Response to Railroad Preemption Presented at The Transportation Research Board Annual Meeting.
7. 김영태(2003), 신호제어시스템, 테크미디어.
8. 박재영·홍원식·전병록(2001), 철도신호공학, 동일출판사.
9. www.its.dot.gov
10. 조봉관(2002), "초음파로 건널목 장애물을 검지한다", 정보·신호통신기술특집.
11. Cho H.(2003), Preemption Strategy For Traffic Signals At Intersections Near Highway-Railroad Grade Crossings. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Tex.
12. 유재호(1997), 철도건널목 사고방지를 위한 건널목 제어장치의 효율성에 관한 연구, 인하대학교.
13. 철도기술연구원(2003), 철도건널목 위험요인 분석 및 개량방안 연구.

✉ 주 작 성 자 : 오주택

✉ 논문투고일 : 2005. 4. 9

논문심사일 : 2005. 6. 1 (1차)

2005. 7. 17 (2차)

2005. 8. 17 (3차)

심사판정일 : 2005. 8. 17

✉ 반론접수기한 : 2005. 12. 31