

철도건널목 정시간 제어방식 개발 및 효과분석에 관한 연구

Development of a Time-Based Railway Crossing Control System and Evaluation

박동주¹ · 오주택² · 이선아³ · 정천희⁴ · 신성훈⁵

Dongjoo Park · Ju-Taek Oh · Sun-Ha Lee · Chun-Hee Jung · Seong-Hoon Shin

Abstract

Traffic accidents at highway-rail crossing result in larger social and economic damages than the accidents at the typical highway intersections. The traditional control and warning systems of the highway-rail crossing have limitations in that 1) they do not recognize the differences of the trains' arrival times because they rely on the distance-based control system, rather than the time-based one, and 2) thereby they usually cause longer delays of vehicles and pedestrians at the highway-rail crossings. The objective of this study is to develop a time-based railroad crossing control system which takes into account the speed and expected arrival time of trains. Using the spot speeds and acceleration rates of trains measured at three points, the developed system was found to be able to accurately estimate the arrival time of train. VISSIM simulation package was utilized to compare system effect of the developed time-based railroad crossing control system with that of the conventional distance-based one. It was found that the developed time-based railroad crossing control system reduced the average travel time, maximum delay length, average delay time, and average number of stop-experienced vehicles as much as 7.0%, 75.6%, 72.7%, and 60.0%, respectively, compared with those from the conventional distance-based one.

Keywords : Railway crossing(철도건널목), Train speed detection(열차속도검지), Time-based railway crossing control(정시간 제어방식), Supersonic detector(초음파검지기), VISSIM

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

철도건널목 사고는 도로교차로 사고에 비하여 사고빈도는 적으나 사고 발생 시 대형사고로 이어져 막대한 사회적·경제적 손실을 초래한다. 향후 철도의 복선화, 고속화 및 도로 교통량 증가로 인해 철도건널목 사고위험은 현재보다 증가될 것으로 예측된다. 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.

기존 우리나라의 철도건널목 진입경고 및 제어는 특정 위치에서 열차를 검지하여 경보등 및 경보음을 이용하여 일반차량에 열차의 진입을 알려주고 차단기의 하강을 정거리로 제어하는 방식으로 이루어지고 있다. 이러한 정거리 제어방식은 열차의 종류에 따른 접근속도의 편차를 고려하지 않고, 단지 최고속도열차를 기준으로 한 건널목 경보시간을 차량운전자와 보행자에게 제공 한다. 이 제어방식은 저속열차 통과 시 건널목 경보시간이 길어져 차량 운전자와 보행자에게 불편함을 주고 있다. 또한 건널목 대기시간이 필요 이상으로 긴 경우 차량운전자와 보행자는 경고를 불신하게 되고 잘못된 판단을 유도하게 되어 경보중임에도 불구하고 건널목 통과를 시도함으로써 사고가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 최근 1998~2002년 까지 5년 동안 철도청 조사에 의하면, 총 사고발생건수 402건 중 49.5%로에 달하는 199건이 열차의 접근에 의한 경보직후 횡단을 시도하려다 사고가 발생한 경우이다[9,13]. 그리고 철도건널

1 정희원, 국립공주대학교, 건설환경공학부/방재연구센터, 교수
2 비회원, 교통개발연구원, 책임연구원
3 비회원, 국립공주대학교, 건설환경공학부/방재연구센터, 교수
4 비회원, 국립공주대학교, 건설환경공학부, 석사과정
5 비회원, 한국건설기술연구원, 도로연구부, 연구원

목의 차단기 제어시간에 따라 차량의 진행과 정지가 통제되어 인접교차로의 교통흐름에 큰 영향을 주고 있다. 이로 인하여 지속적인 정체와 도로의 효율성 저하로 경제적인 손실이 발생한다. 따라서 열차의 속도와 도착예정시간을 반영한 보다 현실적인 실시간 건널목제어에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 열차 접근속도에 따른 경보시간이 일정한 정시간 제어방식을 개발하여, 차량 운전자나 보행자의 건널목 대기시간에 따른 불편함을 해소하고, 불필요한 대기시간으로 인해 일어날 수 있는 건널목 사고에 대한 사전 예방을 목표로 하였다. 또한 기존의 독립적으로 운영되던 철도건널목 운영과 도로 교차로의 운영을 서로 연계할 수 있는 근간을 마련하고자한다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구의 목적은 철도건널목의 안전성 및 효율성 향상을 위한 정시간 제어방식의 개발 및 평가이다. 철도건널목의 제어방식을 정시간 제어방식으로 운영하기 위해서는 정확한 열차검지와 속도를 검지해야 한다. 이를 위해서는 정확하게 열차를 검지할 수 있는 검지기와 속도검지를 위한 검지기의 위치를 선정하여 열차의 속도를 정확하게 연산할 수 있어야 한다.

따라서 본 연구에서는 열차 검지센서의 적정위치를 선정하고 도착예정시간을 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 기존의 정거리 제어방식과 정시간 제어방식간의 비교평가는 실제 철도 건널목 상에서 이루어지기에는 다소 어려움과 한계성이 있으므로 본 연구에서는 미시적 교통시뮬레이션인 VISSIM을 활용하였다.

2. 기존 철도건널목 제어방식 및 관련연구 고찰

2.1 기존 제어방식 개요

정거리 제어방식은 열차가 어느 특정위치에 접근하여 검지되면 열차의 건널목 도착예정시간에 관계없이 건널목을 차단하기 때문에 경보시간이 가변적인 제어방식이다. 이러한 경우 건널목 1km 전방에서 150km/h로 운행하는 열차가 검지되었을 때 열차의 건널목 도달시간은 24초, 20km/h로 운행하는 열차의 건널목 도달시간은 180초로, 두 열차의 경보시간 편차는 무려 156초이다[8].

정시간 제어방식은 열차의 접근속도에 관계없이 경보시간이 일정한 방식이다. 이 방식은 검지기 2조를 일정간격을 두고 설치하여 열차를 검지함과 동시에 이들 두 검지기 사이에서 감지되는 열차속도와 건널목 도달시간을 식 (1)과 식 (2)를 통해 산출하여 건널목 경보시간을 일정하게 하는 제어방식이다.

$$V = 3.6L_1 / T \tag{1}$$

여기서, V : 열차속도(km/h)
 L_1 : 검지기와 검지기 사이의 거리(m)
 T : 열차검지 시간(s)

$$T = 3.6L_2 / V \tag{2}$$

여기서, T : 열차의 건널목 도달시간(s)
 L_2 : 검지기와 건널목사이의 거리(m)
 V : 검지된 열차속도(km/h)

그러나 기존 정시간 제어방식은 열차의 정확한 접근속도를 반영하지 않고 고속열차와 저속열차를 식별하여 경보 개시점을 고속도 지점과 저속도 지점으로 구분하여 경보의 시간차를 줄이는 제어방식이다[8].

2.2 국내 열차검지체계에 관한 고찰

우리나라의 기존 열차 검지방식은 궤도회로방식, 휠 검지방식, 제어자 방식이 있다. 열차 검지방식에 관한 내용은 다음과 같다.

궤도회로 방식은 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 열차진입 시 열차의 차축에 의해 열차의 유무를 검지하는 방식이다[8].

휠 검지 방식은 일종의 자기 센서를 레일에 부착 설치하여 검지하는 방식으로 열차바퀴 통과시간을 측정하여 열차속도를 검지할 수 있다[8].

제어자 방식은 개전로식과 폐전로식으로 구분되며 높은 고주파를 레일에 통하게 한 것으로서 궤도회로방식과 병행 사용하고 있다. 이와 같은 국내열차검지 방식은 Table 1과 같은 문제점을 가지고 있다[8].

Table 1. Drawbacks of train detection system in Korea

검지기 종류	문제점
궤도회로 방식	- 열차의 유무만을 검지만을 검지하기 때문에 열차속도에 따른 경보시간 편차 발생 - 레일표면 오염 등에 의한 검지불량
휠 검지 방식	- 검지영역이 짧고 검지시간이 짧음 - 정확한 속도검지 한계 - 유지보수 까다로움
제어자 방식	- 일정구간에서만 열차를 검지하므로 단락감도가 낮은 열차가 빠른 속도로 통과 시 검지오류 발생 - 개전로식 이상동작인 경우(역진행, 전원 불안정)경보 없이 열차 진입

2.3 관련연구 및 문헌고찰

철도건널목 안전관련 연구 및 문헌고찰을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

Venglar(2001)의 연구는 열차의 건널목 도착에 앞서 안전하고 능률적으로 교차로를 정리하기 위하여 Preemption 알고리즘을 개발하고 시뮬레이션을 이용하여 평가하였다. 이 연구에서는 열차의 속도를 고려한 현실적인 도착시간을 예측하였다. 그러나 열차의 가·감속 운동을 고려하지 않았기 때문에 모든 열차의 정확한 도착시간을 예측하는데 문제가 있었다[7].

Mark et al.(2000)의 연구에 의하면 철도건널목으로부터 근접해있는 도로교차로에 대한 Signal Preemption Time이 40초가 적정한 것으로 연구되었다[4]. 또한 Long(2003)의 연구에서는 열차접근 시 건널목에 인접한 도로교차로의 안전도모를 위한 Signal Preemption Time을 결정하는 중요한 구성 요소로 출발지체시간과 Repositioning Time이 밝혀졌다[3]. Cho & Rilett(2003)의 연구는 신경망을 이용하여 열차의 건널목 도착예정시간을 추정하였다[2]. Carter et al.(2000)의 연구는 교통 네트워크상의 경전철(LRT) 교통운영에 대한 사전-사후 분석을 위해 VISSIM을 활용하여 비교평가 하였다. 이 연구에서는 열차 진입 시 건널목 주변 정리시간을 위한 Signal Preemption과 여러 가지 시나리오를 구성하여 능률적인 교통제어 및 경전철(LRT)운동을 모의실험하였다[1].

철도건널목 정시간 제어방식에 관한 연구로는 Richards(1990)의 연구가 있다. 이 연구는 정거리 제어방식으로 운영되던 건널목을 정시간 제어방식으로 전환 하였을 때의 효과를 Before-after 방법을 통하여 분석하였다. 그 결과 정거리 제어방식을 이용하였을 때 건널목의 경보장치가 작동한 시점부터 열차가 건널목을 통과하기 직전 시간 사이에 건널목을 횡단한 차량의 수는 정거리 방식의 경우 열차 당 10.86대이며, 정시간 방식은 열차 당 3.35대였다. 또한 열차가 건널목에 도착하기까지의 시간을 20초로 가정하였을 때 건널목을 횡단하는 차량의 수는 정거리 방식의 경우 열차 당 1.82대이며, 정시간 방식은 열차 당 0.78대로 분석되었다[5].

3. 철도건널목 정시간 제어방식 개발

3.1 초음파 검지기 선정이유

기존 사용되고 있는 국내의 열차검지체계에 관하여 그 특성 및 문제점을 고찰한 결과 열차속도와 검지를 구현하는 데에는 열차운행정보를 지상 시스템에 전송하는 차상 신호시스템이 가장 적합한 것으로 판단된다. 그러나 이 검지방

식은 열차 차상 시스템의 별도 개발과 설치, 지상 시스템의 별도 개발 및 설치, 차상-지상 시스템의 인터페이스 등 방대한 연구와 개발을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 열차 검지방식으로 초음파 검지방식을 채택하였다. 초음파 검지방식은 검지영역이 확실하고, 국내 기후요소(눈, 비, 온도, 습도)에도 민감하지 않다. 그리고 직접적인 전선 연결이 없으므로 전자기적 잡음에도 강하며, 선로 변 일정거리를 이격하여 지상에 설치하므로 유지보수가 용이한 장점을 지니고 있다[12].

3.2 검지기 설치위치

건널목 횡단(경보)시간은 식 (3)에 의하여 산출되며, 열차의 제어거리를 고려한 검지기의 위치는 식 (4)와 같이 식 (3)에서 산출된 횡단시간에 열차최고속도의 곱으로 검지기의 위치가 산정된다[8].

기존 철도건널목의 경보시간은 일반적으로 30초를 설정하고 있다. 그러나 선로와 선로사이가 넓고 놓여준 지역의 저속 통행수단의 경우 30초의 경보시간이 짧을 수도 있다.

$$T = \frac{2L_1 + L_2(n-1) + L_3}{V} + t \quad (3)$$

여기서, T : 건널목 횡단(경보)시간(s)

L_1 : 궤도중심에서 통행자의 정지 위치까지의 거리(m)

L_2 : 복선 이상인 때의 선로 간격(m)

L_3 : 자동차의 길이(m)

n : 선로의 수

t : 안전 확인에 요하는 시간(s)

V : 건널목 횡단속도(m/s)

$$L = T \times V_{\max} \quad (4)$$

여기서, L : 열차제어거리(m)

T : 건널목 횡단(경보)시간(s)

V_{\max} : 열차 최고속도(km/h)

이에 본 연구에서는 Mark et al(2000)의 Signal Preemption Time을 고려하여 기존 횡단(경보)시간에 15초의 시간을 추가한 45초를 기준 횡단(경보)시간으로 결정하였다. 횡단(경보)시간을 45초로 하였을 때 열차제어거리는 $L = \frac{45 \times 160}{3.6} = 2000m$ 이다. 따라서 건널목 전방 2000m지점에[그림 1]과 같이 초음파 검지기를 10m간격으로 설치하는 것으로 결정하였다. 그리고 Venglar(2001)의 연구는 열차의 가·감속 운동을 고려하지 못하여 정확한 열차도착예정시간을 예측

하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 열차의 가·감속운행을 검지하기 위하여 검지기를 추가로 설치하였다. 가·감속운행을 검지하기 위한 검지기의 위치는 차단기가 안전하게 차단되기까지의 시간인 11초와 열차최고속도를 고려한 열차제어거리는 $L = \frac{160 \times 11}{3.6} \approx 500m$ 이므로 건널목 전방 500m 지점에 설치하였다. 초기 열차속도에 의해 예측된 열차 통과시간은 두 번째 열차검지시간을 연산하여 경보구간 내 열차의 가·감속을 판단하며, 열차의 건널목 도착예정시간을 정확하게 반영하여 건널목을 차단할 수 있다. 그리고 네 번째 검지기(경보중점)에서 열차검지 후 열차가 완전히 통과하게 되면 건널목 차단기가 개방하게 된다. Fig. 1과 Fig. 2

는 초음파검지기 설치위치 및 설치방안 예이다.

3.3 열차속도 연산처리

열차속도 연산처리에는 건널목 경보구간 내 진입 열차의 속도를 측정하여 경보시간 및 경보개시 시간을 산출하고, 경보구간 내에서 가·감속을 산출하여 적정경보 시간을 확보하기 위한 알고리즘이 요구된다.

1) 열차검지 알고리즘

열차가 진행방향에 따라 센서 1을 통과하면 열차가 검지되고 센서 2를 통과하면 다시 열차가 검지되어 센서 1, 2사

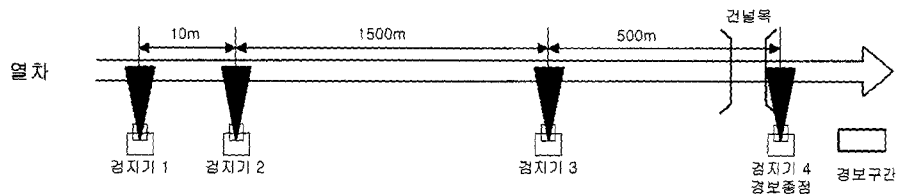


Fig. 1. Installation point of supersonic detector

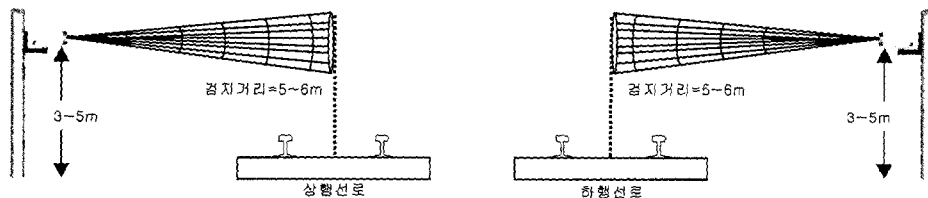


Fig. 2. Installation method of supersonic detector

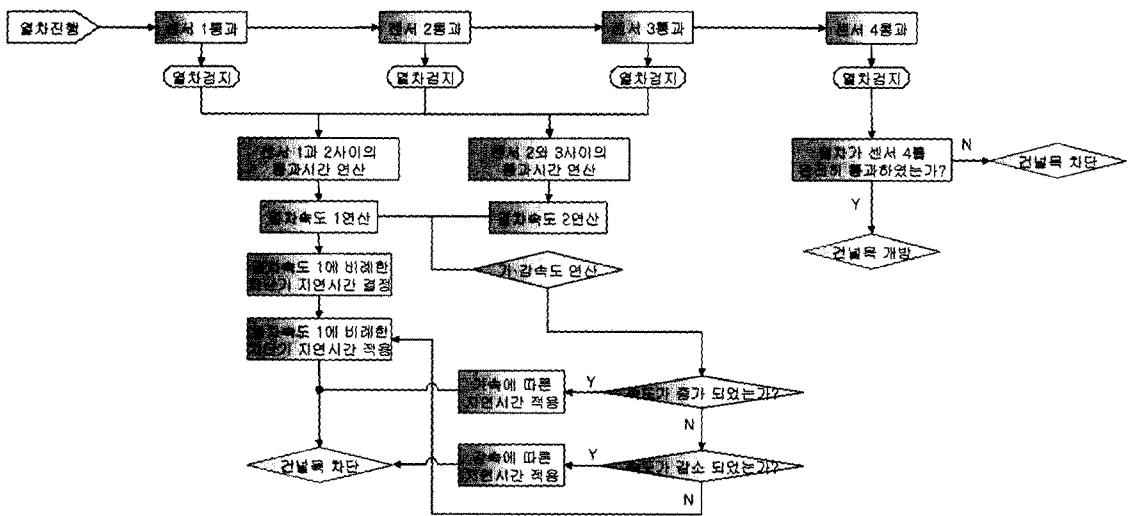


Fig. 3. Train detection algorithm

이의 검지 시간차를 알 수 있다. 이때 마이크로 프로세서는 두 센서간의 거리와 검지 시간차를 연산하여 열차속도 1을 계산하게 되며, 열차속도에 비례한 차단기 지연시간을 적용하여 차단기를 제어하게 된다. 여기에 다시 센서 2와 센서 3사이의 거리와 검지 시간차를 이용하여 열차속도 2를 알 수 있다. 만약 열차가 센서 1, 2사이보다 센서 2, 3사이를 더 빠른 속도로 통과하고 열차속도 1보다 열차속도 2가 어느 비율 이상 크거나, 작으면 열차속도 1과 열차속도 2의 비교연산에 의해 가·감속 여부를 판단하고 차단기 지연시간을 적용하여 건널목을 차단하게 된다. 열차속도 검지알고리즘의 흐름도는 Fig. 3과 같다.

2) 열차속도 검지 및 도착시간 산정

본 연구의 열차속도 검지는 Fig. 3의 알고리즘처럼 3지점에서 검지하며, 각 구간별 열차속도와 전체가속도를 연산하여 최종 건널목 도착예정시간을 산정하게 된다.

각 구간별 열차속도 1, 2는 식 (5)와 같이 산출된다.

$$V = L_s / t \tag{5}$$

여기서, V : 열차속도(km/h)
 L_s : 센서간의 거리(m)
 t : 센서간의 열차 도착 시간차(s)

식 (5)에 의해 산출된 각 구간별 속도가 다를 경우 식 (6)에 의한 각 구간별 가속도를 산정한다.

$$a = \Delta V / t \tag{6}$$

여기서, a : 가속도(km/h/s)
 ΔV : 센서간의 속도변화량(km/h)
 t : 센서간의 열차도착시간차(m/s)

위와 같은 식으로 각 구간별 가속도를 산정하면 다음과 같다.

$$a_1 = \Delta V_1 / t_1 \tag{7}$$

$$a_2 = \Delta V_2 / t_5 \tag{8}$$

여기서, ΔV_1 : 1, 2센서간의 속도변화량(km/h)
 ΔV_2 : 2, 3센서간의 속도변화량(km/h)
 t_1 : 1, 2센서간의 열차도착시간차(s)
 t_5 : 2, 3센서간의 열차도착시간차(s)

만약 열차가 초기속도 검지이후 등속운동을 하였을 경우 식 (5)에서 산출된 초기열차속도를 반영한 건널목 도착예정시간을 적용하게 되고, 열차가 가·감속 운동을 하였을 경우 식 (6)에서 a 가 산정된다.

여기서 산출된 a 를 고려하여 식 (9)에 의해 건널목 도착예정시간을 산정할 수 있다.

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \tag{9}$$

여기서, S : 센서1에서 건널목과의 거리(m)
 V_0 : 열차초기속도(km/h)
 a : 가속도(km/h/s)
 t : 건널목 도착예정시간(s)

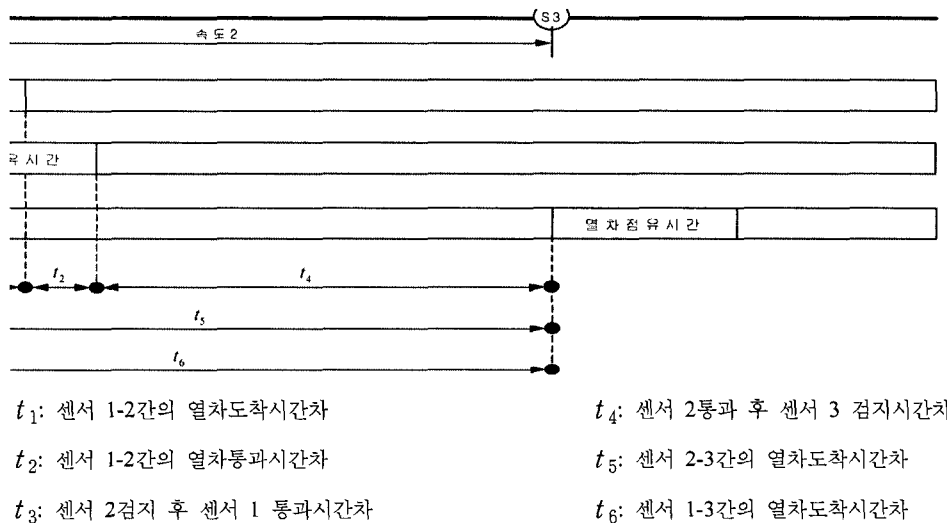


Fig. 4. Time difference diagram of a train detection

Table 2. Detection distance of an ultra wave sensor & results

실험거리(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
측정간격(m)	0.230	0.452	0.684	0.914	1.134	1.377	1.595	1.880	-	-
검지각도(°)	12.95°	12.73°	12.84°	12.87°	12.78°	12.93°	12.84°	12.68°	-	-

3.4 초음파 검지기 측정 실험

철도건널목 제어시스템을 개발하는데 있어서는 무엇보다도 안전성이 최우선이므로 각각 장치의 검증과정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 초음파검지기의 기초성능 테스트를 실시하였다.

1) 검지거리 측정실험

초음파검지기의 검지거리를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 센서를 일정높이(3~5m)에 고정하고, 1.8m의 평면 정사각형의 이동물체를 검지범위 밖에 위치시킨 후, 검지범위 내 1m간격으로 이동시켜 실험하였다. 그 결과 Table 2와 같이 8m까지는 안정적으로 검지가 되지만 8m가 초과된 거리에서는 물체의 검지가 불분명해졌다. 따라서 검지거리의 한계치인 8m보다는 6m를 기준으로 설치하는 것이 안전성 증대에 효율적인 것으로 판단된다.

Table 3. Detection gap experiment by a different ultra detection degree

검지기각도 변화(°)	측정간격(m)	검지각도(°)
0°	1.375	12.91°
45°	1.360	12.77°
90°	1.372	12.88°
135°	1.356	12.73°
180°	1.370	12.86°
225°	1.373	12.89°
270°	1.369	12.85°
315°	1.362	12.79°

2) 초음파검지기 각도변화에 따른 검지간격 측정실험

초음파검지기의 각도 변화에 따른 검지간격을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 초음파검지기를 일정높이(3~5m)에 고정하고, 검지거리를 6m 이격시킨 다음 초음파검지기를

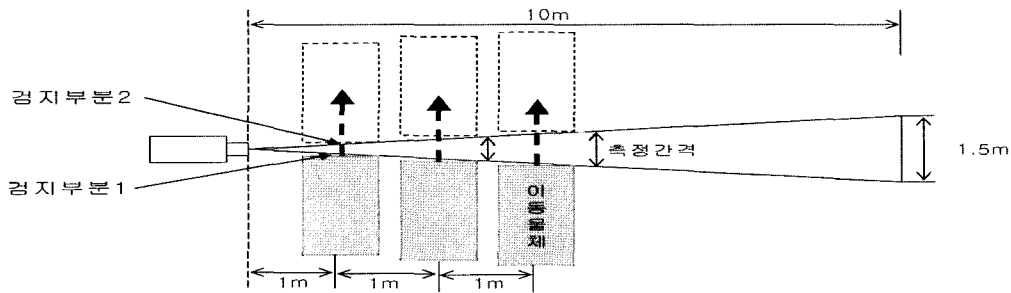


Fig. 5. A detection distance of an ultra wave sensor & an experimental diagram of the determined gap

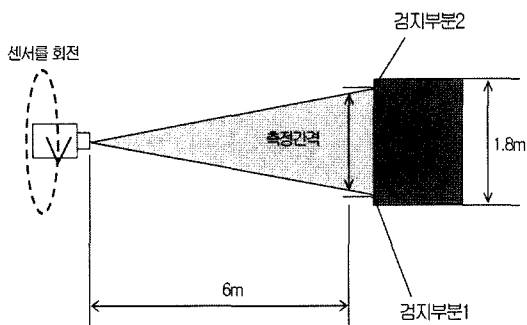


Fig. 6. Measured gap experiment composition by changing a detect degree

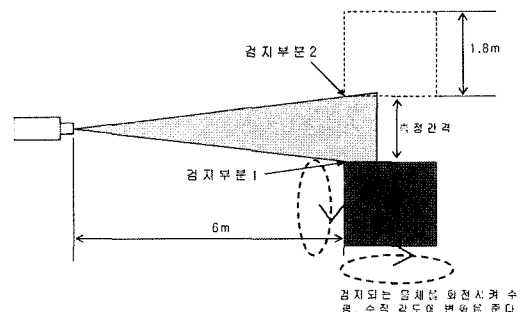


Fig. 7. Measured gap experiment composition by changing a moving object

Table 4. Detection distance & experiment by a different moving object

물체각도 변화(평면)	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
측정간격(m)	1.362	1.373	1.374	1.358	1.355	1.365	1.374	1.380	1.354	1.377
검지각도(°)	12.79°	12.89°	12.89°	12.75°	12.73°	12.82°	12.90°	12.95°	12.72°	12.93°
물체각도 변화(수직)	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
측정간격(m)	1.372	1.359	1.368	1.367	1.358	1.370	1.372	1.375	1.382	1.345
검지각도(°)	12.88°	12.76°	12.84°	12.83°	12.75°	12.86°	12.88°	12.90°	12.97°	12.63°

45°씩 8번 회전시켜 검지기 각도 변화에 따른 검지폭 측정 실험을 하였다. 그 결과 Table 3과 같이 초음파검지기가 어떠한 각도로 회전되더라도 이동물체를 정확히 검지할 수 있었다.

3) 이동물체 각도변화에 따른 검지간격 측정실험

이동물체 각도변화에 따라 초음파검지기가 이동물체를 안정적으로 검지 할 수 있는지에 대하여 Fig. 7과 같이 초음파검지기를 일정높이(3~5m)에 고정하고, 검지거리는 6m 이격시킨 다음 이동물체를 수직, 수평방향으로 각각 5°씩 10번 회전시켜 각도에 따른 검지간격 측정실험을 하였다. 그 결과 Table 4와 같이 이동물체의 수직, 수평각도가 변하더라도 이동물체 검지에는 아무지장이 없는 것을 알 수 있었다.

4. VISSIM을 활용한 효과분석

4.1 VISSIM Simulation 시나리오 구성

1) 시나리오 구성

건널목 제어방식 효과분석을 위한 시나리오는 철도/도로 교통량 및 도로차선수로 구분하여 전체 30개(30= 2가지 차선×3가지 열차교통량×5가지 도로교통량)의 시나리오를 Table 5와 같이 구성하였다. 각 시나리오별 구성내용은 다음과 같다.

- 도로왕복 차선수 : 2, 4차로
- 시간당 열차교통량 : 3, 5, 7대
- 시간당 도로교통량 : 100, 250, 500, 750, 1000대
- 선로수 : 복선

2) 네트워크 구성

건널목 제어방식 효과분석을 위한 철도건널목 부근의 네트워크 특성은 다음과 같다.

- 교차지점은 직각인 90°
- 도로구간의 총 연장은 5.495km
- 선로의 총 연장은 2.6km
- 건널목 알림표지(건널목 안전표지)가 있는 건널목 전방

120m부터는 모든 통과차량이 서행하여야 하므로 문제구간) 설정

3) 교통여건 가정

(1) 도로교통여건

도로차량의 차종구성비는 일반차량 90%, 중차량 10%의 비율로 구성하여 도로차량 대기행렬분석 시 차량의 운행속도 및 차두간격에 대해서 다음과 같은 조건을 설정하여 분석하였다.

- 5km/h ≤ 차량운행속도 ≤ 10km/h 일때 대기행렬차량 대상
- 5km/h ≤ 차량운행속도 ≤ 10km/h 그리고 차두간격이 20m이상이면 대기행렬차량에서 제외
- 차량운행속도 ≤ 5km/h때 정지차량
- 관측 Interval(분석의 시간적 단위) 3,600초

Table 5. Scenarios for VISSIM simulation

시나리오 번호	도로 차선 (왕복)	시간당 열차 교통량	시간당 도로 교통량	시나리오 번호	도로 차선 (왕복)	열차 교통량	도로 교통량
1	2	3	100	16	4	3	100
2	2	3	250	17	4	3	250
3	2	3	500	18	4	3	500
4	2	3	750	19	4	3	750
5	2	3	1,000	20	4	3	1,000
6	2	5	100	21	4	5	100
7	2	5	250	22	4	5	250
8	2	5	500	23	4	5	500
9	2	5	750	24	4	5	750
10	2	5	1,000	25	4	5	1,000
11	2	7	100	26	4	7	100
12	2	7	250	27	4	7	250
13	2	7	500	28	4	7	500
14	2	7	750	29	4	7	750
15	2	7	1,000	30	4	7	1,000

1) 문제구간: 교차로, 횡단보도, 버스정차장, 철도건널목 등의 접근 부를 말한다.

또한 문제구간에서는 일반차량이 30~40km/h, 중차량이 30~35km/h의 속도분포를 가지고 통행하게 하였다. 문제구간을 제외한 나머지 구간의 속도분포는 일반차량 65~70 km/h, 중차량이 60~65km/h로 운행하도록 하였다.

(2) 철도교통여건

전체 30개 시나리오의 열차대수는 총 150대이며, 열차길이는 모두 130m로 가정하였다. 또한 열차의 가·감속운행이 비주기적으로 수행되므로 이를 반영하여 150대의 열차 중 각각 5%씩 무작위로 추출하여 열차속도의 5km/h/s의 가속과 감속을 경험하게 하였다. 그리고 열차의 배차간격은 균등 분할하여 구간별로 최대한 간격을 두어 배차하였으며, 각 열차의 속도(km/h)는 다음과 같이 가정하였다.

- 시간당 열차교통량이 3대일 경우 : 100, 160, 50
- 시간당 열차교통량이 5대일 경우 : 90, 120, 30, 60, 160
- 시간당 열차교통량이 7대일 경우 : 90, 50, 30, 70, 160, 130, 110

4) 건널목 제어방식 가정

(1) 정거리 제어방식 가정

정거리 제어방식의 건널목제어 시스템은 열차 출현 시 검지센서에 의해 검지된 직후 차단기의 경보올림과 동시에 작동하여 차단하게 된다. 그리고 열차가 건널목 통과 1초 후 차단기 상승과 동시에 경보를 해제하게 된다. 건널목 차단기의 위치는 VISSIM Simulation의 Stop-Line과 동일하게 처리하였다. 또한 열차검지 센서의 위치는 철도건널목으로부터 1.333km로 가정하였다.

(2) 정시간 제어방식 가정

정시간 제어방식의 건널목제어 시스템은 열차검지 후 열차도착시간 30초 전부터 차단기가 작동한다. 즉, 시속 100 km/h의 속도로 1.333km전방의 건널목까지의 도달시간은 53.7초가 소요되는데 53.7초에서 23.7초를 제외한 시간부터 차단기의 경보올림과 동시에 작동하여 차단하게 된다. 그리

고 열차가 건널목 통과 1초 후 차단기 상승과 동시에 경보가 해제된다.

4.2 VISSIM Simulation 결과분석

1) 전체 시나리오 분석결과

위와 같이 가정된 시나리오 및 네트워크를 구성하여 분석한 결과 정시간 제어방식을 적용할 경우 평균 7.0%의 통행시간이 감소되었으며, 차량 평균대기행렬길이는 89.5%감소하였다. 또한 최대 대기행렬길이는 75.6%의 감소율을 보였으며, 평균지체 시간 및 평균 정지차량대수가 각각 72.7%와 60.0%의 감소효과를 나타내었다. 30개 전체 시나리오에 대한 분석결과는 Table 6과 같다.

2) 각 시나리오별 분석결과

건널목 제어방식 효과평가에 있어서 도로교통량 및 철도교통량의 영향이 어떻게 작용하는지 알아보기 위하여 각 도로교통량, 철도교통량별로 구분하여 비교분석 하였다. Table 7은 도로교통량 증가에 따른 평균통행시간, 평균지체시간 그리고 평균대기행렬길이를 비교분석한 것이다. 도로교통량이 증가하면 감소율은 더 높아지는 것으로 나타났으며, 평균대기행렬 및 평균지체시간의 경우 정시간 제어방식에 따른 효과는 매우 높게 나타났다.

Table 8은 철도교통량 증가에 따른 평균통행시간, 평균지체시간 그리고 평균대기행렬길이를 비교분석한 것이다.

Table 6. Result of VISSIM simulation

분석구분		정거리 방식(A)	정시간 방식(B)	감소율(%) $\frac{A-B}{A} \times 100$	
양방향 평균	평균통행시간(초)	337.2	313.6	7.0	
	평균지체시간(초)	32.2	8.8	72.7	
	대기행렬 길이	평균(m)	55.1	5.8	89.5
		최대(m)	1,884.0	4,59.0	75.6
	정지차량대수(대/시)	304.8	1,22.0	60.0	

Table 7. Impact of traffic volume

교통량 (차선당 대/시)	평균통행시간(초)			평균지체시간(초)			평균대기행렬길이(m)		
	정거리	정시간	감소율(%)	정거리	정시간	감소율(%)	정거리	정시간	감소율(%)
100	320.4	306.9	4.2	17.1	3.8	77.9	3.1	0.5	83.8
250	323.2	309.4	4.3	19.0	5.3	72.1	7.7	1.3	82.6
500	328.7	313.0	4.8	23.4	7.8	66.5	19.7	2.9	85.2
750	343.4	317.7	7.5	37.5	11.9	68.2	58.5	8.8	85.0
1000	370.4	321.1	13.3	64.1	14.9	76.7	186.7	15.3	91.8

Table 8. Impact of rail volume

분석구분		방향당 철도교통량		
		3	5	7
평균 통행시간(초)	정거리	316.3	336.4	358.9
	정시간	311.6	313.6	315.7
	감소율(%)	1.5	6.8	12.0
평균 지체시간(초)	정거리	11.5	31.4	53.8
	정시간	6.8	8.7	10.8
	감소율(%)	40.8	72.4	79.9
평균대기행렬 길이(m)	정거리	10.7	45.9	108.8
	정시간	3.2	5.3	8.8
	감소율(%)	70.6	88.4	91.9

그 결과 철도교통량이 증가하면 감소율은 또한 높아지는 것을 알 수 있다. 평균통행시간의 경우 도로교통량 증가에 따른 감소율과는 달리 더 높은 감소율을 나타내고 있으며, 평균지체시간 및 평균대기행렬길이 또한 정시간 제어방식에 따른 효과는 매우 높은 것으로 분석되었다.

5. 결론 및 향후 연구과제

기존 철도건널목의 진입경고 및 제어방식은 열차 위주의 제어방식으로써 열차접근 속도에 따른 가변적인 경고시간 편차로 인해 경고시간에 대한 불신을 초래하고 차량대기행렬 길이를 증가시키고 있다. 또한 기존 열차검지 체계는 한 지점에서 열차속도를 검출하여 일정시간 이후 건널목을 차단하므로 열차 가속 시 예정보다 빨리 건널목에 도착하여 위험한 상황을 초래하고 있다. 또한 ITS(Intelligent Transportation System)분야의 관심이 높아지고 도로부문에 관한 연구가 활발하게 이루어지는 반면 위험도가 높은 철도건널목에 관한 안전연구는 아직까지는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존 열차검지 체계 및 제어방식의 문제점을 보완하고 철도건널목에 인접한 도로교차로의 안전 도모를 위한 보다 현실적인 정시간 제어방식을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존 철도건널목 정시간 제어방식의 경우 기존 경보시간을 30초를 기준으로 설정하고 있다. 그러나 본 연구에서는 Mark et al(2000)의 연구에 의한 건널목 안전도모를 위한 건널목 주변정리시간(Signal Preemption Time)이 40초인 점을 감안하여 국내의 기준 경보시간에 15초를 추가한 45초를 기준 경보시간으로 결정하였다.
- (2) 기존 검지체계를 검토한 결과 국내의 환경요인과 설치 및 유지보수가 용이한 초음파검지기를 채택하였다.

- (3) 본 연구에서 제안한 새로운 경보시간(45초)와 열차최고속도를 기준으로 할 경우 건널목 2km전방에 10m간격으로 검지기를 설치하고 건널목 전방 500m지점에 검지기를 추가로 설치하여 열차의 가·감속 여부를 알 수 있게 하였다.
- (4) 미시적 교통시뮬레이션인 VISSIM을 이용한 30개 시나리오를 분석한 결과 평균통행시간은 7%, 평균대기행렬 길이는 89.5%, 평균지체시간은 72.7%가 감소한 것으로 분석되었다. 또한 도로교통량 및 철도교통량이 증가하면 감소율은 더 높아지는 것으로 분석되었다. 이와 같이 본 연구의 제어방식은 시뮬레이션 분석결과 뚜렷한 효과 있음을 보여 주었다.

그러나 본 연구는 몇몇의 가정된 시나리오와 네트워크를 토대로 현상이 아닌 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 이에 철도건널목 기하구조, 통행위반차량, 보행자, 기후요인 등과 같은 특성을 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다.

향후에는 철도건널목 주변에 인접한 도로교차로 안전도모를 위한 Signal Preemption과의 연계방안, 첨단 도로시스템과의 연계방안, 열차접근 경고 및 정보를 주는 가변 정보판(Variable Message Signs) 활용방안 등과 같은 연구들이 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. Carter D, Moen B, Ouyang Y, Integrating Light Rail Into a Freight Corridor and Analyzing Traffic Signal Preemption With VISSIM, Presented at The Transportation Research Board Annual Meeting, 2000.
2. Cho H and Rilett LR, Forecasting Train Travel Times at-Grade Crossings, Transportation Research Record, 1844, 2003. pp.94~102
3. Long G, Easy-To-Apply Solution to a Persistent Safety Problem: Clearance Time for Railroad-Preemption Traffic Signals, Transportation Research Record, 1856, 2003. pp.239~247
4. Mark D. Wooldridge, Daniel B. Fambro, Marcus A. Brewer, Roelof J. Engelbrecht, Scott R. Harry and Hanseon Cho, Issues Related to Design of At-Grade Intersections near Highway-Railroad Grade Crossings, Texas Transportation Institute, 2000.
5. Stephen H. Richards, Evaluation of Constant Warning Times Using Train Predictors at a Grade Crossing with Flashing Light Signals, Transportation Research Record, 1254, 1990. pp.60~71
6. PTV Planing Transport Verkehr AG(2000) "VISSIM User Manual-Version 3.50"
7. Venglar S, Advanced Intersection Controller Response to Railroad Preemption Presented at The Transportation Research Board Annual Meeting, 2001.

8. 박재영, 홍원식, 전병록, 철도신호공학, 동일출판사, 2001.
9. 교통개발연구원, 철도건널목 진입경고 및 제어기술 개발, 2001.
10. 유재호, 철도건널목 사고방지를 위한 건널목 제어장치의 효율성에 관한 연구, 인하대학교, 1997.
11. 철도기술연구원, 철도건널목 위험요인 분석 및 개량방안 연구, 2003
12. 조봉관, “초음파로 건널목 장애물을 검지한다”, 정보·신호통신 기술특집, 2002, RRR.
13. 철도청, 2002철도통계연보, 2003.
14. 철도청(1998~2002), “철도사고이력카드”
15. www.its.dot.gov