

■ 論 文 ■

철도건널목 인근 신호교차로에서의 우선신호 전략 비교분석 (열차속도를 중심으로)

Study of Effectiveness of Signal Preemption Strategy Depending on Train Speed at Intersections Near Highway-Railroad Grade Crossings

조 한 선

(한국교통연구원 도로교통연구실 책임연구원)

김 원 호

(서울시정개발연구원 도시교통부 부연구위원)

오 주 택

(한국교통연구원 도로교통연구실 책임연구원)

심 재 익

(한국교통연구원 도로교통연구실 책임연구원)

목 차

- I. 서론
- II. 철도건널목 인근 신호교차로의 우선신호 전략
 - 1. 표준 우선신호 전략(Standard Preemption Strategy, SP)
 - 2. 전위 우선신호 전략(Transition Preemption Strategy, TPS)
 - 3. 개선된 전위 우선신호 전략(Improved Transition Preemption Strategy, ITPS)
- III. 현장실험 장소 선정
- IV. 분석방법론
 - 1. 시뮬레이션 설계
 - 2. 시뮬레이션 시나리오
 - 3. 시뮬레이션 길이
- V. 실험 결과
 - 1. 보행자 신호의 조기종결
 - 2. 차량지체 결과
- VI. 결론
용어정리
참고문헌

Key Words : 우선신호, 우선신호전위전략, 열차속도, 우선신호 경고시간, 보행자 현시 조기종결
Signal Preemption, TPS(Transition Preemption Strategy), Train Speed, APWT
(Advanced Preemption Warning Time), Pedestrian Phase Truncation

요 약

철도건널목 인근 신호교차로에서 우선신호의 주목적은 열차가 철도건널목에 도착하기 전에 철도건널목 위의 대기차량을 가능한 신속하게 소거시켜 열차와 철도건널목위의 차량 간의 충돌을 미연에 방지시키는 것이기 때문에, 신호교차로에서의 보행자의 안전이나 차량의 지체시간에 악영향을 미치는 것에는 그다지 관심을 기울이지 않았다. 그로인해, 현재의 우선신호 방법론은 철도건널목 인근 신호교차로에서의 보행자 안전과 교차로의 효율적인 운영에 있어서 심각한 문제를 내재하고 있는 실정이다. 이러한 배경 하에 최근 기존의 표준 우선신호의 문제점을 보완한 전위 우선신호 전략(Transition Preemption Strategy, TPS)이 개발되었는데, 이는 표준 우선신호를 개선한 신호 운영전략으로 현재 철도건널목의 안전수준을 유지하는 동시에 인근 신호교차로의 안전성을 향상시킨 것이다. 하지만, 이 또한 교차로의 효율적인 운영 측면은 고려하지 않았고, 또한 열차 도착예측치의 오차를 고려하지 않아 여전히 문제점을 내포하고 있었다. 이에, TPS의 문제점을 보완하여 개선된 전위 우선신호 전략(Improved Transition Preemption Strategy, ITPS)이 개발되었고, 이는 TPS를 개선한 신호 운영전략으로 현재 철도건널목의 안전수준을 유지하는 동시에 인근 신호교차로의 안전과 효율성을 향상시킨 것이다. ITPS가 철도건널목 인근 신호교차로의 안전과 효율을 개선하는 효과는 있었지만, 이 전략은 차량 및 보행자 교통량, 열차 도착시간 예측오차, 열차속도 등 여러 가지의 요인에 의해 여전히 영향을 받는다. 그러므로 ITPS를 현장에서 실현하기 위해서는 이런 요소들의 영향을 이해하는 것이 필수적이라 할 수 있는데, 본 연구에서는 이 중에서 VISSIM 시뮬레이션 모델을 이용하여 열차속도의 영향을 분석하고자 하였다. 분석 결과, 표준 우선신호나 TPS로 우선신호를 운영할 경우 열차의 속도가 신호교차로의 안전에 영향을 줄 수 있으나, ITPS의 경우에는 교차로 안전상의 문제가 발생하지 않았고, 열차의 속도가 높아질수록 교차로의 지체는 감소하는 것으로 나타났다.

Because the prime objective of the current preemption methods at signalized intersections near highway-railroad grade crossings (IHRGCs) is to clear the crossing, secondary objectives such as safe pedestrian crossing time and minimized delay often are given less consideration or are ignored completely during the preemption. Under certain circumstances state-of-the-practice traffic signal preemption strategies may cause serious pedestrian safety and efficiency problems at IHRGCs.

An improved transition preemption strategy (ITPS) that is specifically designed to improve intersection performance while maintaining or improving the current level of safety was developed by Cho and Rilett. Even if the new transition preemption strategy improved both the safety and efficiency of IHRGCs, the performance of the strategy is affected by train speed. Understanding the impact of this factor is essential in order to implement ITPS. In this paper, the effects of train speed were analyzed using a VISSIM simulation model, which was calibrated to field conditions. It was concluded that the delay is affected more by train speed than the transitional preemption strategy, and the safety of the intersection is not affected by train speed once an advanced preemption warning time (APWT) is equal to or greater than 90 seconds.

I. 서론

철도건널목 인근 신호교차로에서의 우선 신호의 주목적은 열차의 철도건널목 도착 전에 철도건널목의 위의 대기차량을 가능한 신속하게 소거시키는 것이기 때문에, 신호교차로에서 횡단 중인 보행자가 충분히 횡단할 수 있는 시간을 제공한다든지, 차량 지체시간을 최소화시키는 것과 같은 철도건널목 인근 신호교차로의 안전과 효율적인 운영에 대해서는 그다지 관심을 기울이지 못하는 실정이었다. 그로 인해, 현재의 우선 신호 방법론은 철도건널목 인근 신호교차로에서의 보행자 안전과 교차로의 효율적인 운영에서 심각한 문제를 내재하고 있는 것이 현실이고, 이러한 상황에서 현재 운영되고 있는 우선 신호 방법론은 반드시 개선해야 할 필요가 있다고 할 수 있다.

최근 전위 우선 신호 전략(Transition Preemption Strategy, TPS)이 텍사스 교통연구원(Texas Transportation Institute, TTI)^{1~4)}에서 개발되었는데, 이 알고리즘은 우선 신호 시작 시점의 신호현시를 고려하여 표준 우선 신호의 문제를 해결하고자 한 것이다. TPS 알고리즘의 목적은 철도건널목에 접근하는 열차에 의해 우선 신호가 시작될 때, 신호교차로상의 보행자나 운전자에게 혼란을 주지 않고, 또한 위험한 상황에 처하지 않도록 신호현시를 제공하자는 것이다. 하지만, TPS 알고리즘은 일반 현시에서 표준 우선 신호로의 자연스러운 전위를 이끌도록 설계되었지만, 열차의 철도건널목 도착 시간의 예측 오차는 고려하지 못하였다는 문제점을 갖고 있다. 즉, 비록 TPS 알고리즘의 목적은 우선 신호가 시작될 때 차량의 최소 녹색시간이나 보행자 신호의 조기 종결이 발생하지 않도록 하는 것이었지만, 열차도착시간 예측의 오차로 인해 이러한 목적이 제대로 달성되는지에 대해서는 아직도 회의적인 시각이 있다^{1~4)}.

개선된 전위 우선신호 전략(Improved transition preemption strategy, ITPS)은 표준 우선 신호의 안전도를 유지 또는 향상시키면서, 신호교차로의 효율성을 향상시키기 위해 Cho와 Rilett에 의해 개발되었다⁵⁾. 이 알고리즘은 TPS 알고리즘과 같이 철도건널목 상류부에 추가로 설치된 열차 검지기 자료를 이용하여 열차도착시간 예측치를 산출하지만, 기존방법과 다른 점으로는 도착시간예측치의 오차의 한계를 이용하여 예측에 이용하고 있다는 것이다.

비록 ITPS가 철도건널목 인근 신호교차로의 안전과 효율성을 개선하는 효과는 있지만, 이 전략은 차량 및 보

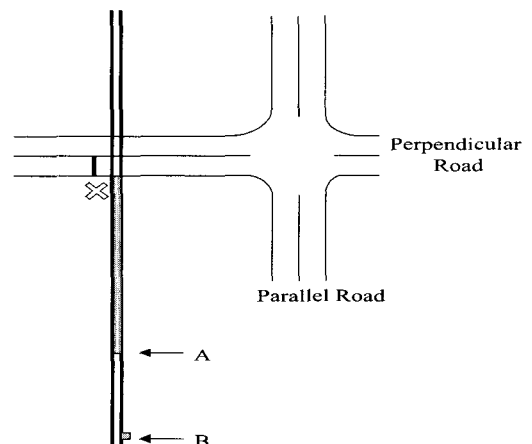
행자 교통량, 열차 도착시간 예측오차, 열차속도 등 여러 가지의 요인에 의해 여전히 영향을 받는 것이 또한 사실이다. 그러므로 ITPS를 현장에서 실현하기 위해서는 이런 요소들의 영향을 이해하는 것이 필수적이라 할 수 있는데, 본 연구에서는 이 중에서 VISSIM 시뮬레이션 모델을 이용하여 열차속도의 영향을 분석하였다.

II. 철도건널목 인근 신호교차로의 우선신호 전략

1. 표준 우선신호 전략 (Standard Preemption Strategy, SP)

표준 우선 신호는 열차의 철도건널목 도착 전에 철도건널목 위에서 대기하고 있는 차량을 가능한 신속하게 소거하도록 설계되어 있어, 일반적으로 인근 신호교차로의 효율적인 운영이나 안전은 고려되지 않는다. 그로 인해, 표준 우선 신호 시작 시 인근 신호교차로는 비효율적으로 운영되어왔고, 보행자나 차량의 최소녹색시간이 제공되기 전에 조기 종결되는 경우가 발생하여 교차로 안전에 문제가 되어왔다. 하지만, 근래에 지속적인 열차검지기 기술의 개발로 표준 우선 신호에 요구하는 열차도착경보시간(우선 신호 경보시간)보다 긴 경보시간을 제공할 수 있게 되어 이를 이용한 안전하고 효율적인 우선 신호 전략 개발에 관심이 모아지고 있다.

〈그림 1〉은 기존의 표준 우선 신호를 위한 검지기과 전위 우선 신호 전략을 위해 개발된 검지기가 설치되어



〈그림 1〉 표준 우선신호와 TPS 및 ITPS 알고리즘을 위한 검지기 설치지점

있는 철도건널목을 보여준다. A지점은 표준 우선 신호를 위해 설치된 열차 검지기를 나타내는데, 미국에서는 보통 정 시간 경보(Constant Warning Time, CWT) 검지기를 이용하며, 이 검지기는 철도건널목 운영을 위한 열차도착 경보시간과 신호교차로의 우선 신호를 위한 경보시간(우선신호 경보시간)을 제공한다.

2. 전위 우선신호 전략 (Transition Preemption Strategy, TPS)

〈그림 1〉의 B지점은 철도건널목 상류부에 추가로 설치된 검지기를 표시하며, 이 검지기는 철도건널목 인근 신호교차로의 교통신호제어기에 기존 우선 신호 경보시간보다 먼저 경보시간을 제공하기 위해 설치된 것으로, 본 연구에서는 이를 전위 우선 신호 경보시간(advance preemption warning time, APWT)이라 정의했다. 검지기에 수집된 데이터는 열차 도착시간 예측 알고리즘에 제공하며, 주로 이용되는 검지기로는 Sonic-based detectors, Doppler radar-based detectors, Automatic Vehicle Identification readers 등이 있다.

전위 우선신호 전략(Transition Preemption Strategy, TPS)은 B지점의 검지기가 제공하는 추가 경보시간에 의해 운영되며, TPS 알고리즘 시작 시 현재 신호현시 상태를 고려하여 표준 우선 신호 시작 전까지 신호현시를 운영하도록 설계되었다. TPS 알고리즘은 철도건널목에 접근하는 열차에 의해 표준 우선 신호가 시작될 때, 신호현시가 갑자기 바뀌는 것을 막아 보행자나 운전자가 당황하거나 위험한 상황에 처하지 않게 하는 것을 목표로 개발되었지만, 이 목표가 완벽하게 달성되지는 않은 것으로 분석되었다(2,3,4). 기존 TPS 알고리즘 연구에서 보행자 신호시간의 조기 종결 횟수가 약 39%가량으로 줄어든 것이 확인되었으며, 이는 보행자 신호현시의 조기종결로 인한 신호생략시간이 약 77% 감소한 것을 나타낸다. 이런 결과는 열차 도착예측치의 오차에 인한 것으로, 더 정확한 예측 알고리즘이 있었다면, 더 좋은 결과를 얻었을 것이다^{3,4)}.

TPS 알고리즘은 APWT에 의해 운영되는데, TPS 알고리즘 시작 후 표준 우선 신호 시작까지가 TPS 알고리즘의 운영시간이 된다. 두 알고리즘은 모두 열차도착 예측치를 이용하기 때문에 예측치의 오차 정도에 따라 열차의 건널목 도착은 예측된 도착시간보다 빠르거나 늦어 질 수 있다. 만약 표준 우선 신호가 TPS 알고

리즘이 정상적으로 그 로직을 끝내기 전에 시작된다면, TPS 알고리즘 진행 중에 교차로의 현시가 조기 종결되어 안전문제를 일으킬 것이며, 표준 우선 신호가 TPS 알고리즘이 정상적으로 종료된 후에 시작된다면, 건널목 소거 현시는 표준 우선 신호가 시작될 때까지 지속되어 교차로에 대기하고 있는 차량은 심한 지체를 겪게 될 것이다^{3,4)}.

또한, TPS 알고리즘은 철로와 평행한 도로의 현시에 차량이 없음에도 불구하고, 일반 신호 운영 때보다 많은 녹색시간을 제공할 수 있도록 설계되어있어, 이런 불필요한 녹색시간 제공으로 인해 교차로 평균지체를 증가시키는 결과를 가져올 수 있다. 이 현시들은 표준 우선 신호 운영 중에 충분히 제공되기 때문에, 표준 우선 신호 바로 전에 이 현시들을 더 많이 제공하는 것은 비효율적인 신호운영이라고 할 수 있다. 이러한 TPS 알고리즘의 문제점을 보완하기 위하여 새로운 전위 우선 신호 전략이 개발되었다.

3. 개선된 전위 우선신호 전략 (Improved Transition Preemption Strategy, ITPS)

TPS 알고리즘의 주요 목적은 단지 철도건널목을 안전하게 운영하는 것이었지만, 동시에 인근 신호교차로의 효율성을 향상시킬 수 있다면 더욱 바람직한 전위 우선 신호 전략이 될 수 있을 것이다. 이러한 요구로 인해, 최근 열차 도착시간 예측치의 오차에 의해 발생하는 TPS 알고리즘의 단점을 보완한 열차 도착시간 예측치의 불확실성을 고려한 개선된 전위 우선 신호 전략 (Improved Transition Preemption Strategy, ITPS)이 개발되었다. 이 방법론에는 두 가지 목적이 있는데, 첫 번째는 표준 우선 신호의 원래 목적인 철도건널목상의 안전문제를 완벽하게 없애는 동시에, 교차로상의 보행자 현시 조기종결 횟수의 최소화로 교차로 안전을 증가시키는 것이고, 두 번째 목적은 우선 신호 적용 시 교차로 신호운영에 미치는 우선 신호의 영향을 최소화시켜 전반적인 교차로 지체를 감소시키는 것이다.

ITPS 알고리즘의 기본 개념은 표준 우선 신호 시작 전에 표준 우선 신호가 운영되는 동안 제공되지 않는 현시(non-dwell 현시)들을 더 많이 제공하는 데 있다. 즉, 표준 우선 신호나 TPS 알고리즘과 비교하여 우선 신호 시작 전에 불필요하게 할당된 녹색시간을 우선 신

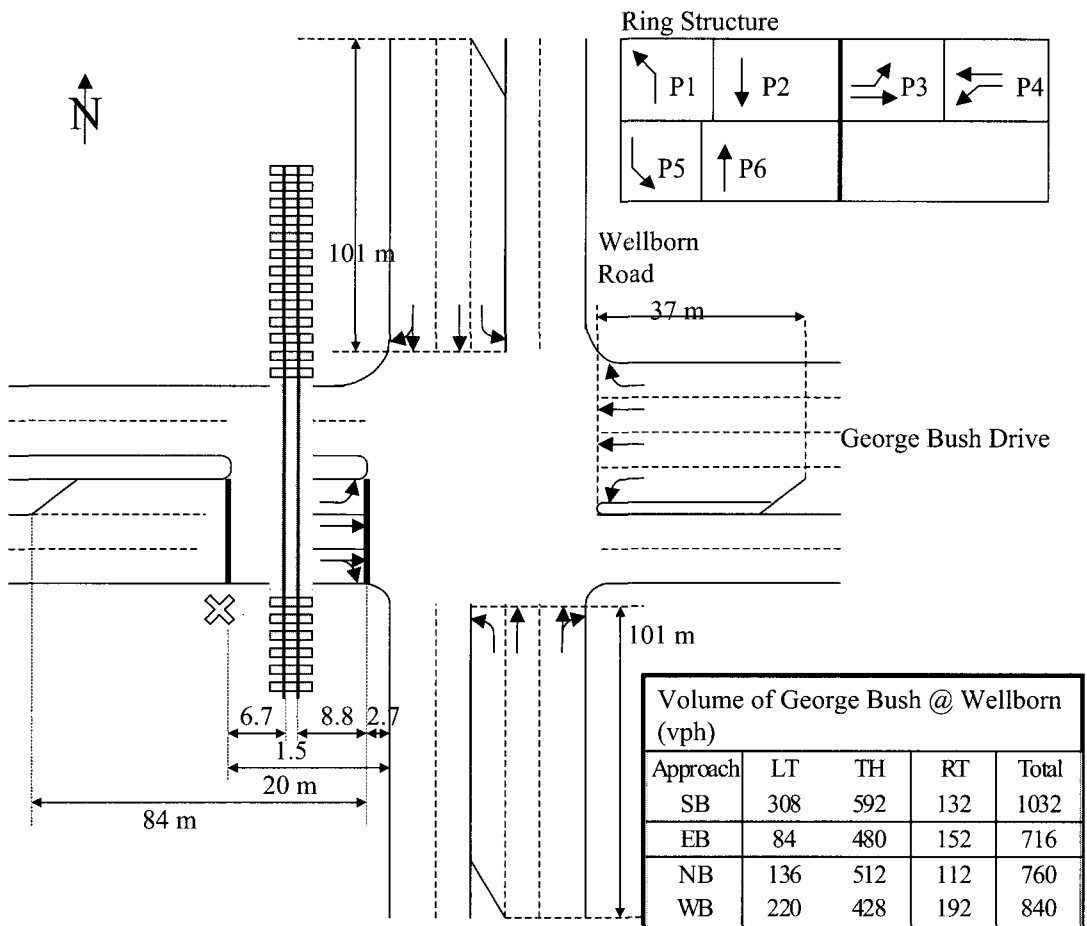
호 동안 제공되지 않는 현시에 제공하도록 한 것이다. TPS 알고리즘과 마찬가지로, ITPS 알고리즘 운영시간도 교차로 운영과 안전에 영향을 주게 되는데, ITPS 알고리즘은 열차 도착시간 예측치가 미리 정한 APWT와 같거나 작아지면 시작하고, 도착시간 예측치가 표준 우선 신호 경보시간과 같거나 또는 표준 우선 신호가 시작될 때까지 운영되도록 설계되어 있다.

ITPS 알고리즘은 TPS 알고리즘에 기초를 두어 개발되었으며^{1~4)}, 특이할 점은 열차 도착시간 예측치의 오차 범위를 이용하여 도착시간을 재 산정했다는 것이다. 이러한 과정을 통해 열차가 예측시간보다 늦게 도착함으로써 증가하는 교차로에서의 차량의 지체를 감소시킬 수 있었다. ITPS의 방법론과 열차 도착시간 예측치의 오차 범위를 이용하여 도착시간을 재 산정한 방법론은 참고문헌에 구체적으로 나와 있으므로, 본 논문에서는 생략하기로 한다⁵⁾.

III. 사례연구

본 연구를 위해서는 미국 Texas 주 College Station 의 Union Pacific 철도와 평행한 Wellborn Road와 철도와 직교하는 George Bush Drive가 만나는 교차로와 철도와 George Bush Drive가 만나는 철도건널목이 현장실험 장소로 선정되었다. Doppler radar 검지기가 철도건널목으로부터 약 2.2km 상류부에 설치되어 있어, 열차가 검지영역을 통과하는 동안 열차속도 정보를 지속적으로 제공하는데, 이 정보를 이용하여 철도건널목에 열차가 도착하는 시간을 예측하게 된다⁶⁾.

〈그림 2〉는 철도건널목과 인근 신호교차로의 기하구조를 보여주고 있으며, 교차로의 모든 접근로는 서쪽로의 접근로를 제외하고 직진 전용차로 한 개, 우회전/직진 공용차로 한 개와 좌회전 전용차로 하나씩 있으며,



〈그림 2〉 현장실험 장소의 조건(George Bush Drive and Wellborn Road 교차로)

서쪽으로의 접근로는 두 개의 직진 전용차로와 우회전 전용차로 한 개, 좌회전 전용차로 한 개가 있다. 또한, 적당한 양의 침두시 교통량을 가지고 있으며, 교차로의 서쪽 대략 12m 지점에 있는 철도건널목을 통과하는 열차에 의해 정기적으로 우선 신호가 운영된다. 표준 우선 신호를 위해 검지기로부터 35초의 우선 신호 경보시간이 제공되며, 교차로와 건널목 사이의 거리는 동쪽 방향 접근로의 정지선에서 철도건널목 측면 가장자리까지 대략 10m 정도 되며, 한 차로 당 두 대의 차량(트럭 제외)이 대기할 수 있는 공간이 있다.

우선 신호가 운영되는 경우의 교통량을 측정하기 위해 교차로에 비디오카메라를 설치하여 1999년 12월 7일부터 12월 13일까지 총 51개의 우선 신호 시 교통량을 측정하였다. 최종적으로 1999년 12월 9일 오후 5시 5분과 5시 20분 사이의 교통량이 본 연구를 위한 침두시 교통량으로 선정되었고, <그림 2>에서 보이는 바와 같이, 각 방향의 15분 교통량은 1시간 교통량으로 변환되었다. 참고로 본 논문에서 사용된 교통량 자료는 참고문헌 (9)의 연구에 사용된 자료이며, 물론 현재에는 교통량이 증가하였으나, 본 연구를 위한 교통량 자료로 사용하기에는 무리가 없는 것으로 판단하였다.

신호현시는 <그림 2>에서 볼 수 있듯이, 120초 주기로 북쪽과 남쪽의 현시는 Wellborn Road의 상류부와 하류부의 교통신호와 연동되어 운영되고 있었으며, George Bush Drive의 동쪽과 서쪽은 각각 직·좌 동시신호로 운영되고 있었다.

IV. 분석방법론

1. 시뮬레이션 설계

표준 우선 신호 및 TPS 알고리즘 평가를 위해서는 시뮬레이션 상에서 차량, 보행자 및 열차 등이 개별적으로 구현되어야 하며, TPS와 ITPS를 포함한 기존 신호제어기에서 제공하지 않는 기능이 구현될 수 있는 시뮬레이션 모델이 필요한데, 본 연구를 위해서는 이를 모두 만족시키는 미시적 시뮬레이션 모델 중의 하나인 VISSIM이 선정되었다. VISSIM은 감응신호제어를 위해 프로그램화가 가능한 모듈인 Vehicle Actuated Programming (VAP)을 제공함으로써, 기존 신호제어기의 대부분의 기능을 시뮬레이션 상에서 구현할 수 있게끔 구성된 시

뮬레이션 모델이다.

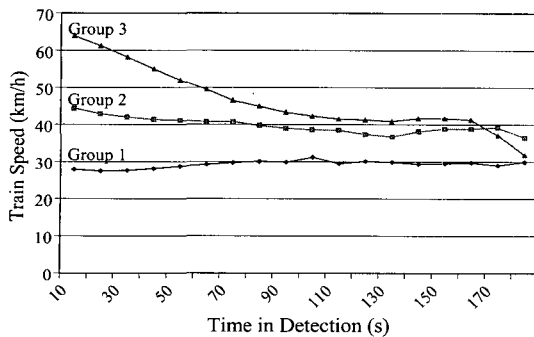
본 연구를 위해 필요한 신호운영 요소인, 표준 우선 신호, TPS, ITPS 뿐만 아니라, 신호제어기 고유기능인 우선 신호 이후의 일반 신호로 돌아가기 위한 신호 전위방법도 VAP를 이용해 프로그램화 되었다. 즉, 표준 우선 신호, TPS 및 ITPS에 대해 각각 다른 VAP 코드가 개발되었고, 교통신호 로직은 현재 실험 장소에서 이용되고 있는 EPAC 300 제어기에 기초를 두었다(8). 또한, 개발된 VAP 코드가 EPAC 300 제어기의 기능을 제대로 수행하는지에 대한 검증이 hardware-in-the-loop system을 이용하여 수행 되었으며, 검증결과 신호제어기의 기능을 충분히 구현할 수 있다는 것이 밝혀졌다⁹⁾.

열차 도착시간 예측치의 오차 범위를 이용하여 도착시간을 재 산정하였지만, 이 역시 실제 열차 도착시간과는 오차가 있을 수 있다. 이런 오차를 시뮬레이션 상에서 구현하기 위해서 열차의 속도와 예측오차에 따라 검지기 위치를 산정하여, 각 열차의 도착시간 예측치의 오차는 각 열차별로 시뮬레이션 상에서 구현하였다.

2. 시뮬레이션 시나리오

연구의 목적중의 하나가 ITPS의 효과를 분석하는 것이므로, 본 연구에서는 표준 우선 신호, TPS 및 ITPS를 같은 조건하에서 실험하도록 실험시나리오를 설정하는 것이 필요하다. 효과적으로는 교차로의 안전도를 파악하기 위해 보행자 신호의 조기종결 횡수를 이용하였고, 효율적인 교차로 신호운영의 정도를 파악하기 위해 차량의 지체시간을 사용하였다.

또한, 교차로의 안전성과 효율성은 APWT의 길이에 직접적으로 영향을 받으므로, 최적의 APWT를 파악하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 이를 위해 등 간격의 APWT를 각각의 우선 신호 방법에 적용하여 결과를 비교하였다. APWT가 표준 우선 신호 경보시간인 35초보다 더 길어야 하기 때문에, APWT를 최소 40초에서 최대 120초로 하여 10초 간격으로 실험하였다. 무작위로 횡단보도에 도착하는 보행자의 행태를 구현하기 위해 음수 분포를 이용하여 보행자를 발생시켰으며, 보행자가 400인/시인 경우, 우선 신호가 시작될 때 보행자 신호가 제공되고 있을 확률이 99.99%이므로 이 보행자 양을 분석에 사용했다. 총 90대의 열차에 대해 각 우선 신호 방법과 APWT 시나리오별로 시뮬레이션을 실행하였고,



〈그림 3〉 각 그룹 당 30개 열차의 속도변화

현장에서의 관측된 각 열차의 길이 및 속도가 VISSIM에서 구현될 수 있게끔 시뮬레이션을 구성하였다.

우선 신호시 열차 속도의 영향을 파악하는 것이 본 연구의 주목적이기 때문에, 열차의 속도변화에 따른 영향을 분석하기 위해 각각 다른 속도 변화를 갖는 열차에 대해 시뮬레이션이 수행되었다. 이 영향을 평가하기 위해 열차의 속도에 대해 3개의 카테고리를 이용하기로 하였으며, 통계학적 분석을 위해 각 카테고리당 30대 열차를 할당하였다(그룹 1 : 속도 증가, 그룹 2 : 일정한 속도, 그룹 3 : 속도 감소). 〈그림 3〉은 각 그룹의 속도 변화를 보여주는데, 그룹 1의 열차 평균 속도는 30km/h이며, 이 열차의 속도는 검지 시간이 지남에 따라 약간씩 증가하는 경향이 있었고, 그룹 2의 열차 평균 속도는 41km/h이었으며, 이 열차 속도는 검지 시간이 지날수록 약간씩 감소하는 경향이 있으나 거의 일정한 속도를 보인다고 볼 수 있었다. 그룹 3의 열차 평균 속도는 51km/h이며, 이 열차 속도는 검지 시간이 지날수록 급격히 감소하는 경향이 있었다. 90대의 열차에 대해 서로 다른 랜덤시드를 할당하여 차량 및 보행자가 랜덤하게 발생하는 특성을 반영하게끔 하였다.

3. 시뮬레이션 지속시간 및 분석시간

시뮬레이션 분석에서 중요한 두 가지 요소는 시뮬레이션 지속시간과 분석시간이다. 분석은 시뮬레이션 시작 후 네트워크가 안정 상태에 이른 후부터 시작되어야 하며, 열차가 네트워크를 통과하고 난 후 네트워크가 다시 안정 상태에 이를 때까지 지속되어야 한다. 이런 시뮬레이션 지속시간과 분석시간을 찾기 위해 본 시뮬레이션 실험에 앞서 간단한 실험이 수행되었고, 이 실험결과 네트워크는 시뮬레이션이 시작되고 대략 5분 후에 안정 상

태에 이르렀으며, 결과적으로, 시뮬레이션이 시작되고 6분 후에 분석을 시작하도록 설계하였다.

또한, 시뮬레이션 지속시간은 분석시간의 길이에 영향을 받고, 분석시간은 또한 열차의 철도건널목 도착시간에 영향을 받는다. 그러므로 적당한 시뮬레이션 지속시간과 분석시간을 찾기 위해서는 열차 도착시간이 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 시뮬레이션이 시작되고 835초에서 855초 사이에 철도건널목에 열차가 도착하도록 설계하였고, 또한, 시뮬레이션 시작 후 18분 후엔 네트워크가 다시 안정 상태로 돌아오는 것이 확인되어, 시뮬레이션 지속시간은 18분, 분석시간은 12분을 사용하기로 하였다.

V. 실험 결과

1. 보행자 신호의 조기종결

TPS와 ITPS 알고리즘은 보행자 신호의 조기종결 가능성을 제거시키는 것을 목표로 개발되었지만, 열차의 도착 예측시간이 정확하지 않거나 APWT가 충분히 길지 않으면, 보행자 신호의 조기종결 가능성은 여전히 존재하게 된다. 〈표 1〉은 APWT 값에 따라 보행자 신호가 조기 종결되어 생략된 평균시간과 횟수를 보여준다. 표준 우선 신호 시작 시 보행자 신호는 항상 제공되게끔 시뮬레이션이 설계되었기 때문에, 표준 우선 신호에서는 90번 모두 보행자 신호가 조기종결된 것으로 나타났으며, 평균 생략시간은 약 6초였다. 그러므로 열차의 도착 시 보행자 신호가 제공되고 있을 경우 표준 우선 신호 방법으로는 교차로의 안전성을 보장할 수 없었고, 이런 경우, 보행자 신호는 우선 신호 시작과 동시에 조기 종결하게 되어 보행자가 횡단보도에 남아있는 상태에서 상충되는 차량 현시를 제공하게 된다.

TPS와 ITPS 알고리즘에서 보행자 신호가 조기 종결은 다음의 두 가지 조건이 만족되어야만 일어나게 된다. 만약 예측도착시간이 실제도착시간보다 짧거나 같으면, 철도건널목 소거 현시는 표준 우선 신호 시작 전에 시작될 것이므로 보행자 신호 조기종결은 일어나지 않을 것이다. 그러므로 첫 번째 필요조건은 예측 도착시간이 실제 도착시간보다 길어야 한다는 것이다. 하지만, 이럴 경우 표준 우선 신호 시작 시 보행자 신호가 제공되고 있지 않다면 보행자 신호 조기종결은 발생하지 않을 것이

〈표 1〉 우선신호 시작시의 보행자 현시 조기종결과 평균 현시 생략시간

APWT*	표준 우선신호	TPS	ITPS
	90(6)		
40		90(6)	90(6)
50		77(6)	84(6)
60		59(6)	76(6)
70		18(6)	45(6)
80		5(6)	14(6)
90		4(4)	1(6)
100		4(4)	0(0)
110		1(3)	0(0)
120		1(3)	0(0)

() : 현시 생략시간(초)

다. 그러므로 두 번째 필요조건은 첫 번째 조건을 만족하는 상황 하에서 우선 신호 시작 시에 보행자 신호가 제공되고 있어야 한다는 것이다. 즉, 아무리 APWT가 길다 해도 두 가지 필요조건이 충족된다면 보행자 신호는 언제든 조기종결 될 수 있는 것이다.

APWT 80, 90, 110초에서 조기종결이 각각 5, 4, 1로 나타난 것처럼 TPS 알고리즘을 이용하였을 경우 APWT가 증가할수록 보행자 신호의 조기종결 횟수는 감소한다. 기존의 TPS 알고리즘 연구에서는 APWT를 70초로 고정하여 평가를 수행하였는데, 이때 51개 경우 중 약 22%인 11개의 경우에 보행자 신호 조기종결이 발생하였고⁵⁾, 본 연구에서는 APWT 70초인 경우 90개의 시뮬레이션 중 20%인 18개의 조기종결이 발견되어 비슷한 경향을 보였다. 이 결과에 의하여, APWT가 클수록 TPS알고리즘의 효과는 크다는 사실을 알 수 있었지만, APWT 110, 120초에서도 조기종결이 각각 한번씩 발생하였으므로, TPS 알고리즘으로는 보행자 신호 조기종결을 완벽하게 제거할 수 없었고, 여전히 위험을 내포하고 있다고 볼 수 있다.

ITPS 알고리즘의 경우, 〈표 1〉에서 보듯이 TPS 알고리즘의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다. 특이할 점은, APWT가 80초 이하일 경우 ITPS 알고리즘의 조기종결 횟수가 TPS 알고리즘의 조기종결 횟수보다 많다는 것이다. 하지만, APWT는 100초 이상일 경우에는, 보행자 신호 조기종결이 일어나지 않았기 때문에, 안전성 측면에서 가장 바람직한 알고리즘은 ITPS 알고리즘이라고 할 수 있다. 그러므로 실험현장의 경우 ITPS 알고리즘과 최소 APWT 100초를 이용하면, ITPS의 첫 번째 목표인 보행자 신호의 조기종결 가능성을 제거할 시킬 수 있을 것이다.

2. 차량지체 결과

각 우선 신호 방법론에서 APWT의 길이와 열차속도는 차량지체 정도에 영향을 주는데, 이 두 요소는 서로 상관관계가 없으므로 개별적인 것으로 분석되었다. 첫 번째로 각 우선 신호 방법이 APWT 값에 따라 교차로 지체에 미치는 영향을 분석하였고, 다음으로 열차 속도의 변화가 교차로 지체에 미치는 영향을 분석하였다.

1) 우선신호 방법론별 영향분석

교차로 지체에 대한 각 우선 신호 방법의 영향은 APWT 값에 따라 평가되었으며, 〈표 2〉에서는 각 시나리오에 대한 평균지체를 보여준다. 표준 우선 신호의 경우 평균지체는 54.7초/대로 비교적 낮은 값을 보였지만, 〈표 1〉에서 보인 바와 같이 90개의 모든 시뮬레이션에서 교차로 안전에 문제가 있었다. TPS 알고리즘은 각 APWT 시나리오별로 평균지체는 57.4초/대였으며, 최소 평균지체는 APWT 40초와 80초에서 54.7초/대 나타났다. 하지만, 이 역시도 〈표 1〉에서 보듯이, 보행자 신호 조기종결 횟수가 각각 90, 5로 나타나 교차로 안전에 문제가 있었다. 또한 〈표 2〉에서는 APWT가 60초보다 길 경우, APWT가 증가함에 따라 ITPS 알고리즘에서의 지체는 감소한다는 것을 보여주고 있다. ITPS 알고리즘은 APWT 120초에서 평균지체가 51.8초/대로 최소 값을 보였고, 이는 표준 우선 신호나 TPS 알고리즘에서의 최소값 보다 약 2.9초 더 작은 것이다.

본 연구에는 세 가지 방법(표준 우선 신호, TPS, ITPS)이 분석되었기 때문에, paired t-test의 확장개념

〈표 2〉 각 시나리오별 평균지체

APWT	표준 우선신호 (sec/veh)	TPS (sec/veh)	ITPS (sec/veh)
	54.7		
40		54.7	54.7
50		56.5	55.5
60		56.4	55.8
70		55.2	54.8
80		54.7	53.9
90		56.5	52.9
100		59.5	52.2*
110		61.7	52.0*
120		61.2	51.8*
Mean	54.7	57.4	53.7

* : 안전측면을 만족하는 경우
 굵은체 : 각 TPS 알고리즘의 최소지체

〈표 3〉 Duncan Test 결과에 의한 TPS 알고리즘의 비교

AP WT	Algorithm Comparison		평균 (sec/veh)		Test Sta- tistic	Cri- tical Value	결 과
	Algo. 1	Algo. 2	Algo. 1	Algo. 2			
40	SP1	TPS	54.7	54.7	0.0	N/A	N/A
	SP	ITPS	54.7	54.7	0.0	N/A	
	TPS	ITPS	54.7	54.7	0.0	N/A	
50	SP	TPS	54.7	56.5	1.7	0.9	Reject H_0^2
	SP	ITPS	54.7	55.5	0.8	0.9	Don't Reject H_0^3
	ITPS	TPS	55.5	56.5	0.9	0.9	Reject H_0
60	SP	TPS	54.7	56.4	1.7	1.1	Reject H_0
	SP	ITPS	54.7	55.8	1.1	1.1	Reject H_0
	ITPS	TPS	55.8	56.4	0.6	1.1	Don't Reject H_0
70	SP	TPS	54.7	55.2	0.5	1.3	Don't Reject H_0
	SP	ITPS	54.7	54.8	0.0	1.2	
	ITPS	TPS	54.8	55.2	0.5	1.2	
80	ITPS	SP	53.9	54.7	0.9	1.3	Don't Reject H_0
	ITPS	TPS	53.9	54.7	0.8	1.2	
	TPS	SP	54.7	54.7	0.0	1.2	
90	ITPS	TPS	52.9	56.5	3.7	1.5	Reject H_0
	ITPS	SP	52.9	54.7	1.9	1.4	
	SP	TPS	54.7	56.5	1.8	1.4	
100	ITPS	TPS	52.2	59.5	7.2	1.5	Reject H_0
	ITPS	SP	52.2	54.7	2.5	1.4	
	SP	TPS	54.7	59.5	4.7	1.4	
110	ITPS	TPS	52.0	61.7	9.7	1.2	Reject H_0
	ITPS	SP	52.0	54.7	2.8	1.1	
	SP	TPS	54.7	61.7	7.0	1.1	
120	ITPS	TPS	51.8	61.2	9.5	1.2	Reject H_0
	ITPS	SP	51.8	54.7	3.0	1.1	
	SP	TPS	54.7	61.2	6.5	1.1	

SP¹: 표준 우선신호

Reject H_0^2 : Evidence of a statistical difference between the two means at 0.01 level of significance

Do not Reject H_0^3 : No evidence there is a statistical difference between two means at 0.01 level of significance

인 block design 테스트로 각 알고리즘 간의 평균지체를 비교하였다. 이 테스트에서는 각 열차의 시나리오가 하나의 block으로 설정되었고, 각 APWT의 값에 따라 세 가지 방법에서 각 쌍의 조합을 비교하기 위해 Duncan multiple range test를 적용하였다¹⁰⁾.

이 테스트의 전체 유의수준은 0.03으로 각 쌍의 테스트 유의수준은 0.01로 정해졌으며, 〈표 3〉는 그 결과를 보여준다. 27개 조합 중 16개에서 지체에 대한 통계학적인 차이점을 발견할 수 있었다. 또한, 일반적으로 APWT가 증가함에 따라 평균지체의 차이가 있는 것으

로 나타났다. 각 알고리즘 사이의 평균지체의 차이는 약 4.4%였고, 이는 모든 쌍에서 약 2.6초/대의 평균지체 차이를 보여주는 것이다. 통계적으로 차이가 있는 쌍만을 보면, 알고리즘 사이의 평균지체의 차이는 약 6.9%였고, 이는 약 4.1초/대의 평균지체 차이를 보이는 것이다. 또한, APWT 90~120초에서 ITPS 알고리즘에서의 지체가 통계적으로 표준 우선 신호나 TPS 알고리즘에서의 지체보다 작다고 나타났으며, APWT 40초의 경우, TPS나 ITPS 알고리즘은 이 시나리오에서 시작조차 하지 않아, 우선 신호 방법별로 신호운영상 차이가 없어 테스트 자체가 불가능하였다.

앞 절의 '보행자 신호의 조기종결'에서 논의된 바와 같이, 안전측면에서의 바람직한 APWT 값은 100, 110이나 120초였고, 이들 간의 평균지체는 유의수준 0.03에서 통계적으로 차이점을 발견하지 못했다. 그러므로 APWT 100, 110, 120초에서의 ITPS 알고리즘은 현장 실험에서 같은 수준의 안전성과 지체를 보인다고 할 수 있다. 표준 우선 신호와 TPS 알고리즘 및 ITPS 알고리즘에서의 최소 지체에 대한 테스트도 역시 실행되었는데, APWT 100, 110, 120초에서의 ITPS 알고리즘의 지체가 통계적으로 표준 우선 신호의 지체나 TPS 알고리즘의 최소 지체보다 작다는 것을 발견하였다. 즉, APWT 120초인 경우 ITPS 알고리즘은 표준 우선 신호나 TPS 알고리즘과 비교해서 5.4% 줄어든 2.9초/대 가까이 차량 평균지체를 감소시켰다. 그러므로, ITPS 알고리즘은 APWT 100, 110, 120초에서 교차로의 안전성과 효율성 측면으로 가장 효과적인 운영 전략이라고 할 수 있다.

2) 열차속도의 영향분석

위의 실험결과에서 보듯이, ITPS를 이용해 철도건널목 인근 신호교차로의 안전과 효율성을 높일 수는 있지만, 여전히 차량 및 보행자 교통량, 열차 도착시간 예측 오차, 열차속도 등 여러 가지의 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 여기서는 우선 신호 전략별로 열차속도에 따른 영향을 분석해 보고자 한다.

〈표 4〉는 열차 속도에 의한 각 그룹의 평균지체를 보여주고 있다. 그룹 3에서 50.1초/대로 가장 작은 평균지체를 보였고, 그룹 1에서 62.6초/대로 가장 큰 평균지체를 보였다. 각 그룹의 속도 차이가 약 10km/h 씩 정도이고, 그룹 1과 그룹 2의 평균지체 차이는 약 7.9초, 그룹 2와 그룹 3의 차이는 약 4.2초인 점을 감안할 때, 속도가

낮은 범위 내에서 속도의 증가가 높은 범위에서의 속도 증가보다 교차로 평균 지체에 더 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러므로, 열차의 속도가 증가 할수록 교차로 평균 지체는 감소하지만 감소 폭은 줄어들 것으로 보인다. 또한, 그룹 1과 그룹 3사이의 평균지체 차이는 표준 우선 신호에서 10.5초/대, TPS 알고리즘에서 13.2초/대, ITPS 알고리즘에서 11.1초/대로 우선 신호 방법 별로는 큰 차이를 보이고 있지 않은 것으로 나타났다.

통계학적으로 열차속도 그룹별 평균지체를 비교하기 위해, 앞 절에서와 같이 Duncan's multiple range test를 사용하였다. 이 테스트에서도 역시 전체 유의수준은 0.03으로 각 테스트 당 유의수준은 0.01로 정해졌으며, 그 결과는 <표 5>에서 나타나있다.

그룹 3에서의 지체는 그룹 1이나 그룹 2의 지체보다 통계적으로 작고, 그룹 2에서의 지체는 그룹 1의 지체보다 작은 것으로 나타났다. 그러므로 철도건널목으로 접근하는 열차의 속도가 증가하면 인근 신호교차로의 지체는 감소한다고 볼 수 있을 것이다. 이는 열차의 속도가 높을 경우 열차가 철도건널목을 통과하는 시간이 감소함으로써 우선 신호 시간 자체가 감소하여 일반적인 신호 운영으로의 조기 복귀로 발생하는 편익이라 할 수 있다.

또한, <표 1>에서 보인 바와 같이 APWT를 100초 이상으로 하고 ITPS를 적용할 경우, 열차의 속도에 관계없이 보행자 신호 조기종결이 일어나지 않아, 안전성 측면에서 문제가 없는 것으로 나타났다. 일반적으로, 열차가 도시 외곽지역에서 도시부로 접근 할 때 철도건널목이 있는

면, 안전을 위해서 속도를 감속할 것을 권장하고 있는데, ITPS를 적용할 경우, 열차의 속도변화가 안전과는 무관하게 나타났으므로, 굳이 그런 권장사항은 필요 없을 것으로 판단된다. 또한, 열차의 속도가 높을수록, 교차로의 차량 지체는 감소하는 것으로 나타났으므로, 높은 속도로 열차를 운영하는 것이 안전에도 문제가 없고, 효율성 측면에서 오히려 더 나은 방안이라 할 수 있을 것이다.

VI. 결론

표준 우선 신호로 철도건널목 인근 신호교차로를 운영하였을 경우, 실험결과 보행자 신호의 조기종결은 90번의 경우에서 모두 발생하였다. 그러므로 보행자 신호 제공 중에 열차가 접근하면 표준 우선 신호 운영으로는 매우 위험한 상황에 처할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, TPS 알고리즘으로 운영되었을 경우, APWT가 120초인 상황에서도 보행자 신호 조기종결은 90번 중 한번 발생하였으며, ITPS 알고리즘으로 운영했을 때에도 APWT가 90초 이하일 때에는 보행자 신호 조기종결은 발생하였다. 그러므로 보행자 신호 조기종결의 가능성을 제거하기 위해서는 최소한 APWT가 100초는 되어야 하고 ITPS로 우선신호가 운영되어야 한다.

ITPS 알고리즘과 APWT 120초를 이용하였을 시 교차로 평균지체는 표준 우선 신호와 TPS 알고리즘을 이용했을 때 보다 약 2.9초/대(5.4% 감소) 감소한 것으로 나타나, APWT 120초인 ITPS 알고리즘이 교차로의 안전성과 효율성 면에서 최상의 운영 전략이라고 할 수 있다. 또한, 표준 우선 신호 수행 시 안전에 전혀 문제가 없다고 할 경우라도, ITPS의 로직 상 ITPS 알고리즘은 여전히 지체 측면에서 큰 이점이 있을 것으로 판단된다.

또한, 세 개의 우선 신호 알고리즘 모두에서, 가장 높은 열차 속도를 가진 그룹 3에서 가장 적은 차량 평균지체를 갖는다는 사실을 발견했다. 또한, APWT를 100초 이상으로 하고 ITPS를 적용할 경우, 열차의 속도에 관계없이 안전성 측면에서 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러므로 철도건널목으로 접근하는 열차의 속도가 증가하면 안전상에는 문제점이 없고 교차로의 지체는 감소한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 1개의 실험사이트만을 선정하여 분석을 하였지만, 실험에 다양한 열차속도가 이용되어 우선신호 전략별로 그 영향이 분석되었으므로, 열차속도에 대한 영향이 어느 정도 일반화 된 것이라 할 수 있을 것이다. 본 연구에서 이용한 실험사이트는 가장 일반화된 기하구

<표 4> 각 열차그룹의 평균 지체

열차 그룹	표준 우선신호 (sec/veh)	TPS (sec/veh)	ITPS (sec/veh)	평균
그룹 1	60.4	64.6	60.0	62.2
그룹 2	53.9	56.2	52.4	54.3
그룹 3	49.9	51.4	48.9	50.1
평균	54.7	57.4	53.7	55.5

<표 5> Duncan test 결과에 의한 열차 속도 그룹의 비교

그룹 비교	평균 (sec/veh)		Test Statistic	Critical Value	결과
	첫 번째 그룹	두 번째 그룹			
그룹 3 그룹 1	50.1	62.2	12.05	1.39	Reject H ₀ *
그룹 3 그룹 2	50.1	54.3	4.13	1.33	Reject H ₀
그룹 2 그룹 1	54.3	62.2	7.92	1.33	Reject H ₀

Reject H₀* : Statistically different between two means at 0.01 level of significance

조를 가지고 있고, 기하구조의 형태가 우선 신호의 효과에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어, 기하구조의 형태가 다소 다른 지역에서도 적용가능하리라 본다.

본 연구에서는 우선 신호 시 교차로 신호운영 효율성에 영향을 주는 여러 요인 중 열차의 속도만을 분석하였는데, 차량 및 보행자 교통량도 교차로 신호운영에 분명히 영향이 있을 것으로 사료되어 이에 대한 분석도 반드시 필요할 것으로 본다. 또한, 본 연구에서 MOE로 사용한 것은 안전측면에 대해서는 보행자 신호의 조기종결횟수이고, 운영측면에서는 차량지체 뿐이었다. 그 이외에 철도건널목 및 교차로의 안전과 효율성 측면에서 다양한 MOE가 있을 수 있을 것으로 판단되며, 보다 합리적이고 객관적인 MOE를 선정하는 연구도 추후에는 필요하리라 본다.

용어정리

• **우선신호**

일반적인 신호모드에서 특별한 신호모드로의 전환

• **TPS(Transition Preemption Strategy)**

전위 우선 신호 전략, 우선 신호로 신호가 갑자기 바뀌는 대신에 전위과정을 거쳐 우선 신호로 바뀌게 하는 전략

• **APWT (Advance Preemption Warning Time)**

TPS나 ITPS를 시작하기 위한 경보시간

• **Hardware-in-the-Loop System**

신호제어기와 시뮬레이션간의 통신을 통해 시뮬레이션 상의 신호운영을 실제 신호제어기로 할 수 있게끔 한 시뮬레이션 시스템

참고문헌

1. Jacobson, M., S. Venglar, and J. Webb (1999), "Advanced Intersection Controller Response to Railroad Preemption - Stage I Report", Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Tex.
2. Engelbrecht R., S. Venglar, and M. Jacobson (1999), "Advanced Intersection Controller Response to Railroad Preemption - Stage II Report". Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Tex.

3. Venglar, S., R. Engelbrecht, and S. Sunkari (2000), "Advanced Intersection Controller Response to Railroad Preemption - Stage III Report". Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Tex.
4. Venglar, S.(2000), "Advanced Intersection Controller Response to Railroad Preemption - Stage IV Report". Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Tex.
5. Cho, H. and L.R. Rilett(2004), "Improved Transitional Preemption Strategy For Traffic Signal Near At-Grade Railway Crossing", Preprint 04-4758, Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, Washington, D.C.
6. Cho, H. and L. R. Rilett (2003), "Forecasting Train Arrival Times at At-Grade Crossings", Transportation Research Record 1844, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 94~102.
7. (2000), "VISSIM User's Manual, Version 3.5". PTV Planning Transport Verkehr AG.
8. (1997), "EPAC 300 Actuated Controller Unit, PIM-177 Product Manual, Rev C.12", Eagle Traffic Control Systems, A Business Unit of SIEMENS Energy & Automation, Inc.
9. Cho, H.(2003.), "Preemption Strategy For Traffic Signals At Intersections Near Highway-Railroad Grade Crossings", Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas.
10. Milton, J.S. and J.C. Arnold (1995). "Introduction to Probability and Statistics, Third Edition", McGraw-Hill International Editions, New York.

- ☞ 주 작성 자 : 조한선
- ☞ 교 신 저 자 : 조한선
- ☞ 논문투고일 : 2006. 7. 14
- ☞ 논문심사일 : 2006. 12. 14 (1차)
2007. 1. 29 (2차)
2007. 2. 23 (3차)
- ☞ 심사판정일 : 2007. 2. 23
- ☞ 반론접수기한 : 2007. 8. 31