

## 온실가스 감축을 위한 대형 화물차 좌회전 우선신호 알고리즘 개발

양세정<sup>1</sup> · 김수현<sup>2</sup> · 김효승<sup>3</sup> · 이청원<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 건설환경공학부, <sup>2</sup> 한국건설기술연구원 도로교통연구실, <sup>3</sup> 서울대학교 건설환경종합연구소

### An Algorithm for Heavy Duty Truck Priority on Left-turn to Reduce Greenhouse Gas Emissions

YANG, Se Jung<sup>1</sup> · KIM, Suhyeon<sup>2</sup> · KIM, Hyo Seung<sup>3</sup> · LEE, Chungwon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2</sup> Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi 411-712, Korea

<sup>3</sup> Integrated Research Institute of Construction and Environment, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

#### Abstract

This study aims to develop a truck priority on left-turn algorithm that can reduce greenhouse gas emissions by reducing heavy duty truck's stops at signalized intersection. The signal priority is granted for a left-turn phase, because heavy duty trucks can deteriorate left-turn traffic flow due to the low acceleration or deceleration rate and large turn radius. Truck priority allows to provide the stable speed control for heavy duty truck, and reduces emissions at the signal intersection. Also, two signal recovery strategies are compared for various traffic conditions. This study analyzes the effectiveness of truck priority such as greenhouse gas emissions and fuel consumption reduction, and total travel time saving using the PARAMICS and Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM). The results show that signal priority for heavy duty trucks has an effect on reducing greenhouse gas emissions and fuel consumptions at non-peak hour. Also, it shows decreasing total travel time due to reducing truck stops.

본 연구는 신호 교차로에서 대형 화물차의 정지로 인해 야기되는 온실가스 배출과 교차로 효율 저하를 완화하기 위해 좌회전 현시의 대형 화물차 대상 우선신호 알고리즘을 제안하고 효과를 분석한다. 대형 화물차의 진입 속도와 좌회전 속도를 고려한 녹색신호 연장 기법을 적용하며, 우선신호 제공으로 인해 발생할 수 있는 일반차량의 지체 증가를 완화하기 위해 두 가지 보상 전략을 수립하여 비교한다. 제안된 알고리즘의 효과를 분석하기 위해 PARAMICS를 이용한 시뮬레이션 분석을 수행하며 Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM)을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 실제 교통망의 3지 신호교차로를 대상으로 분석한 결과 비첨두시에는 대형 화물차에 능동적 보상 전략을 통해 지속적으로 우선권을 부여하는 것이 온실가스 및 연료소모량 감축에 효과가 있는 것으로 분석되었으며, 대형 화물차의 정지 감소로 인해 총통행시간도 개선되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 제안된 알고리즘은 교통량이 많지 않은 공간 입구의 좌회전 현시에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### Key Words

Greenhouse Gas, Heavy Duty Truck, PARAMICS, Recovery Strategy, Truck Priority Signal  
온실가스, 대형 화물차, PARAMICS, 보상전략, 화물차 우선신호

\* : Corresponding Author  
chungwon@snu.ac.kr, Phone: +82-2-880-7368, Fax: +82-2-873-2684

Received 17 April 2013, Accepted 21 August 2013

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

교통부문 온실가스의 90% 이상이 도로에서 발생하며, 승용차에 비해 대형 화물차는 온실가스 배출계수가 높게 나타나므로 대형 화물차의 온실가스 저감을 위한 노력이 필요하다(Kim J. H. et al., 2011). 특히 저속 및 가속상태일 때 대형 화물차의 온실가스 배출량은 급격하게 커지게 되어 승용차에 비해 약 10배 이상 많은 온실가스를 배출하게 된다. 그러나 대형 화물차의 온실가스 배출을 감소시키기 위한 교통 운영적 차원의 연구가 아직 미흡한 실정이다.

대형 화물차<sup>1)</sup>는 가·감속 능력이 떨어지고 회전 반경이 큰 차량 특성으로 인해 교차로의 운영 효율을 저하시킨다. 대형 화물차의 가·감속도는 1.5% 수준으로서, 일반 승용차의 3.4%에 비해 현저히 낮으므로 신호 교차로에서 출발지체를 가중시킨다. 또한 회전 반경이 커서(AASHTO, 2011) 좌회전시 차두시간이 증가하므로, 대형 화물차가 좌회전 대기행렬 선두의 경우 교차로 효율 저하는 더욱 심화된다(Ramsay et al., 2006). 산업단지 인근이나 대규모 물류시설 진입로 등과 같이 대형 화물차의 좌회전이 빈번히 발생하는 교차로에서는 이러한 특성으로 인해 신호 위반이나 교차로 효율 저하가 발생하며 온실가스 배출이 가중될 수 있다.

본 연구에서는 이와 같이 좌회전 대형 화물차로 인한 문제를 완화하기 위한 방안으로 화물차 우선신호 기법을 개발하고 효과 분석을 수행한다. 화물차 우선신호는 신호 교차로에서 화물차에 우선권을 제공하여 화물차의 지체를 절감하는 신호 운영 기법으로서, 온실가스 배출계수가 높은 대형 화물차에 적용함으로써 온실가스 저감 효과를 기대할 수 있다. 또한 우선신호로 인한 일반 차량의 지체 증가를 완화시키기 위해 우선신호 제어 후의 보상(recovery)전략을 수립한다. 이를 통해 온실가스 배출량 감축과 동시에 교차로의 효율성을 향상시키고자 한다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 신호교차로에서 온실가스 배출계수가 높은 대형 화물차에 우선권을 부여하는 우선신호 기법을

개발한다. 대형 화물차로 인한 악영향이 가중될 수 있는 단일 독립교차로의 좌회전 현시에 우선신호를 적용하며, 다양한 우선신호 기법 중 정지지체를 가장 효과적으로 감소시킬 수 있는 녹색시간 연장(Green Extension) 기법을 이용한다.

연구의 방법은 대형 화물차를 대상으로 하는 좌회전 우선신호 알고리즘을 수립하고, 교통량 수준에 따른 시나리오별 온실가스 및 연료소모량, 통행시간 감소 효과를 분석한다. 이를 위해 Application Programming Interface(API)를 활용할 수 있는 미시적 교통 시뮬레이션 프로그램인 PARAMICS와 온실가스 및 연료 소모량 산출이 가능한 Comprehensive Modal Emissions Model(CMEM)을 활용하여 우선신호 적용에 따른 결과를 제시한다.

## II. 이론적 배경

### 1. 화물차 우선신호

화물차 우선신호(Truck Priority)는 교차로에 접근하는 화물차가 정지하지 않고 교차로를 통과할 수 있도록 녹색시간을 연장하거나 적색시간을 조기에 종료하는 등으로 신호설정을 조정하는 제어 기법이다. 화물차 우선신호에 대한 연구는 1970년대 말부터 이루어졌으며, 대표적 사례로 미국 텍사스주(Sunkari et al., 2000), 미네소타주의 truck priority(MnDOT, 2004)와 스웨덴의 LHOVRA 중 L-function(Peterson et al., 1986)이 있다(Table 1). 최근에는 안전성에 초점을 맞추어 dilemma zone protection의 개념으로 연구가 수행되었다(Bonneson et al., 2002; Zimmerman, 2007; Gates and Noyce, 2010).

TTI Priority는 포장의 손상과 교차로 지체를 줄이기 위해 화물차 진입시 녹색현시를 유지해 주는 기법을 적용하였다. 그러나 화물차 우선신호 시행 후 통과 교통량 증가와 홀드 시간 중 화물차 정지 비율을 분석하였을 뿐, 지체시간 감소 등의 운영적 측면의 개선효과를 밝히지 못하였으며, 환경적 측면에서의 고려는 전혀 반영되지 못하였다. 또한 최대 녹색시간을 초과하게 되는 경우가 빈번히 발생하여 대향차로 차량의 지체가 지나치게 증가하는 단점이 지적되었으며, 이를 개선하기 위한 연구가

1) 대형 화물차는 도로교통량통계연보(MLTM, 2012)의 차종 구분에 의거하여 세미 또는 풀 트레일러 형식의 4축 이상 2단위 차량으로 정의됨

**Table 1. Practices of truck priority**

Project	TTI	LHOVRA	MnDOT
Purpose	Reduce pavement damage. Improve Safety	Reduce Crash Frequency. Reduce delay of auto	Reduce delay
Method	Green Phase Hold	Red Phase Truncation	Green Phase Hold
MOE	Delay, Crash Frequency	Red-light running, Crash Frequency, Percentage of Stops	Travel speed Percentage of stops., Percentage of front of queue
Evaluation	Site	Site	Site
Results	Increasing other vehicle's delay	The lack of verifying operational effect	Increasing other vehicle's delay. Improving Truck's Travel

미흡하였다(Sunkari et al., 2000).

LHOVRA의 시행결과 사고율 30% 저하, 황색시간 진입율 6% 감소, 신호위반 1% 감소의 효과를 나타냈다. 하지만 주로 안전과 관련된 지표만을 분석한 한계점이 있다. 또한 화물차 우선신호를 위해 적색조기종결 제어기법만을 적용하였고, 녹색시간 연장에 따른 효과분석이 수행되지 못하였다(Peterson et al., 1986).

미네소타는 트레일러 차량이 교차로에 진입하면 녹색현시를 유지하는 기법을 적용하였다. 차량 길이나 중량에 의한 검지가 아니라 트레일러 차량만을 대상으로 함에 따라 많은 대형 화물차는 우선신호를 제공받지 못하였으며, 화물차 우선신호의 실행 횟수도 제한적인 한계점이 있다(MnDOT, 2004).

종합적으로 살펴보면, 녹색현시를 무조건적으로 연장하는 홀드(Hold) 제어기법의 적용으로 인한 일반차량의 지체 증가가 공통적인 한계점으로 나타났다. 또한 기존의 긴급차량, 대중교통 우선신호가 신속성 향상을 위해 개발된 것이라면, 화물차 우선신호는 도로의 유지보수 비용의 절감과 사고율 저감 등을 위한 안전 측면에서의 접근이 이루어졌음을 알 수 있다. 하지만 대형 화물차가 가지는 특수성에 비하여 도입 근거에 대한 연구가 미미하고 다양한 도입 근거가 부족하다.

## 2. 보상전략

보상전략은 우선신호 제공 후 다음 주기 혹은 여러 주기에 걸쳐 손실이 발생한 녹색시간만큼 보상(Recovery 혹은 Compensation)하여 주는 신호 제어전략으로서, 기존 대중교통 우선신호에서는 많이 적용되고 있다. 우

선신호를 지속적으로 특정 차종 혹은 방향에 적용하게 될 경우 대향차로의 대기행렬이 길어지고, 일반 차량의 지체가 증가할 수 있다. 이런 경우를 대비하여 보상은 일반 차량의 불합리한 지체가 증가되는 것을 줄일 수 있는 매우 중요한 전략이다.

Dion et al.(2004)은 Red truncation 신호 제어에 보상을 적용하지 않을 경우 대향차로의 인(person) 기준 통행시간 및 지체가 증가하는 결과를 보였으며, Skabardonis(1998)는 지속적인 우선신호 제공은 대향차로의 과포화를 초래할 수 있다고 지적하였다. 따라서 적절한 보상은 일반차량의 지체가 지나치게 증가하는 것을 줄일 수 있으며, 연동상태 혹은 정상신호 운영으로 신속히 되돌려 보다 합리적인 신호제공이 가능하도록 해준다(Ekila et al. 2009). 하지만 교통량이 많은 교차로나 특정 방향으로 우선신호 제공대상이 많을 경우 지체를 오히려 증가시킬 수도 있다(Liu et al. 1996, Currie and Shalaby, 2008). 따라서 효율적인 신호 교차로 운영과 일반 차량의 지체증가 완화를 위해 상황에 맞는 보상전략의 수립과 효과판단이 필요하다.

## 3. 배출량 산정 모델

차량의 배출량은 차량 중량, 연료 유형, 속도, 배기가스 처리 장치, 차량연식 등에 따라 달라지며, 이러한 배출량 산정 모형은 분석의 상해함에 따라 거시적(macroscopic) 모형과 미시적(microscopic) 모형으로 구분할 수 있다. 거시적 모형은 차량의 평균속도와 이동거리를 바탕으로 배출량을 산정하는 모형으로서, 차종별 차이는 반영할 수 있으나 정차, 정상 순행, 감·가속 등 주행 상태에 따른 배출량 차이를 반영하지는 못한다. 이에 비해 미시적 모형은 차량의 주행 상태와 함께 도로 기하구조 등에 의한 배출량 변화도 반영할 수 있으므로 램프미터링, 신호 연동 등 교통체계 운영 전략에 다른 효과 검증에 이용될 수 있다.

대표적인 미시적 배출량 산정 모형으로는 CMEM과 Virginia Tech Microscopic Energy and Emission Model (VT-Micro)를 들 수 있다. VT-Micro는 속도와 가속도를 독립변수로 한 다항 회귀식을 이용하여 배출량을 추정하는데 비해, CMEM은 차종, 엔진 유형, 오염 저감 기술 등과 차량 주행 상태를 고려하여 배기가스가 배출되는 매커니즘을 반영하여 보다 정확한 배출량을 산정하고자 하였다(Scora and Barth, 2006). 또한 기

개발된 플러그인을 이용하여 VISSIM, PARAMICS와 같은 시뮬레이션 프로그램에 적용할 수 있다는 장점이 있다.

Boriboonsomsin and Barth(2008)는 CMEM을 이용하여 고속도로 다인승 전용차로의 배출 저감 효과를 제시하였으며, Chamberlin et al.(2011)에서는 교통량 수준에 따라 3지 고정 신호교차로와 회전교차로 운영시의 배출량 비교에 CMEM을 이용하였다. 이와 같이 CMEM은 차량 주행 상태를 고려한 정교한 배출량 산출이 가능하므로 교통류 운영 전략이 배출량에 미치는 효과를 평가하는데 이용되고 있어 본 연구의 목적에 부합한다. 따라서 본 연구에서는 CMEM을 이용하여 제안된 우선신호 제어가 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석한다.

### III. 방법론

#### 1. 개요 및 전제

본 연구는 대형 화물차 검지 및 우선신호 제공 여건 판단을 통한 능동형 조건부 우선신호를 기반으로 한다. 즉, 대형 화물차의 접근이 검지되면 우선신호 제어를 통한 교차로 정지 회피 여부를 판단하여 우선신호 제공 여부를 결정한다. 또 우선신호 제어 기법 중 가장 효과적으로 정지를 줄일 수 있는 녹색시간 연장(Green Extension: GE)을 적용하되 신호 주기는 고정시킨다. 녹색시간 연장(GE)은 최대녹색시간을 초과하지 않는 범위 내에서 횡수에 제한을 두지 않는 것을 기본 전제로 한다.

우선신호 구현을 위해서는 대상 차종에 대한 판별 방법이 필요하다. 대형 화물차를 구분하여 검지하는 기술로는 DSRC 와 같이 차종 구분이 가능한 무선 통신 기법을 이용하는 방법, 영상 검지기를 통해 차종 패턴을 판별하는 방법, 피에조 검지기를 이용한 차축 계수, 루프 검지기를 이용한 차량 길이 추정 등 다양한 기술들을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 PARAMICS를 이용한 시뮬레이션 분석을 위해 루프 검지기를 이용하여 대상 차종

을 판별한다. 차량의 길이를 기반으로 우선신호의 대상인 대형 화물차를 구분하며 15m를 기준으로 판별한다. 검지기는 정지선 상류부 60m에 설치하며, 차종 및 길이, 속도 정보를 정확히 수집할 수 있는 것으로 가정한다. 본 연구에서 사용한 가정은 Table 2에 제시되어 있다.

#### 2. 녹색시간 연장시간 산정

본 연구에서는 Ioannou et al.(2000)과 Hong and Kwon(2002)이 제시한 화물차의 교차로 내 속도 및 상태 프로파일을 참고하여 대형 화물차의 교차로 통과 소요 시간을 산정한다. 교차로 통과에 필요한 시간( $T_{total}$ )은 대형 화물차가 검지 후 정지선까지 감속하는 시간( $T_d$ )과 교차로 내 곡선부를 주행하는 시간( $T_c$ ), 그리고 차량의 후미가 교차로를 완전히 벗어나기 위해 가속하는 시간( $T_a$ )의 합으로 계산된다. 우선신호 제공 현시에 대형 화물차가 상류부의 진입 검지기에 검지되면, 해당 시점의 차량 속도를 이용하여 교차로 통과에 필요한 시간( $T_{total}$ )을 예측한다.

교차로에 진입하는 차량은 좌회전시 교차로 내에서 일정 수준으로 속도를 낮추어 진행하며 90° 호와 같은 궤적을 따라 주행한다고 가정한다. 또한 차량의 가·감속도가 상수값을 가지며 좌회전 후 감속시와 같은 크기로 가속하여 교차로를 빠져나간다고 가정하면 식(1)의 각 항은 다음과 같이 계산된다. 현장 조사를 통해 수집한 대형 화물차 105대의 좌회전 주행 특성을 분석하여 곡선부 주행시간과 가속구간 주행시간의 최대값은 85 percentile 에 해당하는 6.67초와 2.23초를 각각 적용하였다.

$$T_{total} = T_d + T_c + T_a \tag{1}$$

- $T_{total}$  : 교차로 통과에 필요한 시간
- $T_d$  : 검지 후 정지선까지 감속하는 시간
- $T_c$  : 교차로 내 곡선부를 주행하는 시간
- $T_a$  : 차량의 후미가 교차로를 완전히 빠져나가기 위해 가속하는 시간

#### 1) 감속구간 주행시간

$$T_d = \frac{2 \cdot X_d}{V_l + V_c} \tag{2}$$

Table 2. Assumptions for priority signal

Object	Heavy duty truck
Phase	Left-turn
Method	Green extension (GE)
Limits of GE	Maximum green
Cycle length	Fixed
location of detector	60m upstream of the stop line

- $X_d$  : 감속구간 길이
- $V_l$  : 교차로 접근속도(m/s)
- $V_c$  : 교차로 좌회전시 진입속도(m/s)

2) 곡선구간 주행시간

$$T_c = \frac{X_c}{V_c} = \frac{\frac{\theta}{180} \pi \cdot R}{V_c} \approx \frac{\frac{1}{2} \pi \cdot W}{V_c} \quad (3)$$

- $T_c$  : 곡선부 주행시간
- $X_c$  : 곡선부 길이(m)
- $V_c$  : 좌회전시 속도(m/s)
- $\theta$  : 교차각( $^\circ$ ),  $90^\circ$ 임을 가정
- $R$  : 회전반경(m)
- $W$  : 해당 링크 폭(m)

3) 가속구간 주행시간

$$T_a = \frac{2 \cdot X_a}{V_l + V_c} = \frac{2 \cdot L}{V_l + V_c} \quad (4)$$

- $X_a$  : 가속구간 길이(m)
- $L$  : 차량 길이(m)

이와 같이 추정된 교차로 통과 소요시간이 대형 화물차가 검지된 시점에 남은 유효녹색시간(녹색시간과 황색시간의 합)보다 클 경우에는 해당 현시 내 통과가 어려우므로 녹색시간 연장 요청을 한다. 이때 필요 연장시간( $T_{G,E}$ )은 교차로 통과 소요시간( $T_{total}$ )에서 남은 유효녹색시간만큼 뺀 시간으로 계산된다.

3. 녹색시간 연장 제공 조건

우선신호가 정상 신호를 지나치게 교란시키는 것을 피하기 위해 검지된 대형 화물차가 현시 내에 통과하지 못하는 것으로 예상되는 경우라도 다음의 두 가지 조건을 판단하여 녹색시간 연장 여부를 결정한다.

- 연장된 현시( $n$ )의 총 녹색시간이 최대 녹색시간을 초과하지 않음
  - 다음 현시( $n+1$ )의 줄어든 녹색시간이 최소 녹색시간 이상임
- 위 두 조건을 만족할 경우 녹색시간 연장을 요청하게

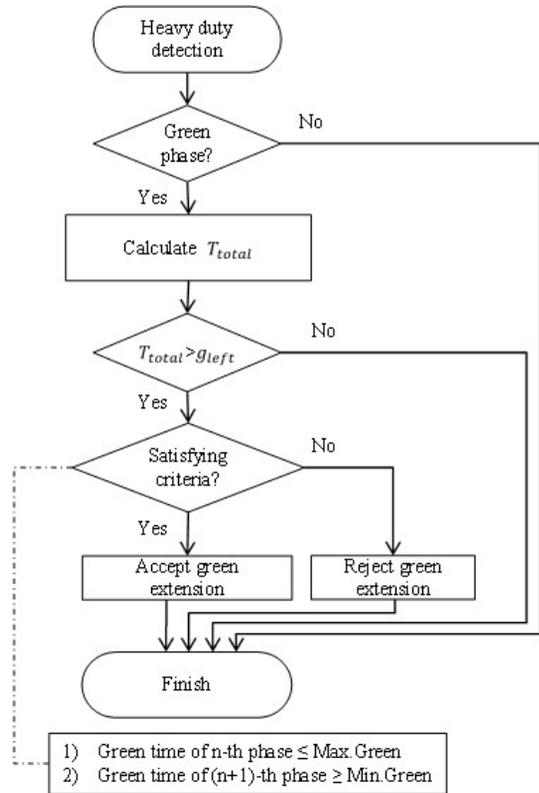


Figure 1. Green extension module (detection-based)

되고, 하나라도 만족시키지 못하는 경우에는 녹색시간 연장 요청을 기각한다(Figure 1).

4. 보상 전략 수립

본 연구에서는 보상을 위한 두 가지 대안을 수립하고 시뮬레이션 분석을 통해 보다 효과적인 방법을 도출한다. 첫 번째 대안은 녹색 연장이 이루어진 후 다음 주기에는 대형 화물차에 우선권을 부여하지 않고, 보상만 적용하는 수동적(무조건적) 보상전략이다. 두 번째 대안은 다음 주기에 보상을 실시하되, 보상 중 대형 화물차가 검지되면 제공 조건을 만족시키는 1대에 대해 추가적으로 녹색시간 연장을 제공하는 능동적(조건부) 보상전략이다.

1) 수동적(무조건적) 보상

$N$ 주기,  $n$ 현시의 녹색시간 연장( $t'$ )으로 인해 줄어든  $(n+1)$ 현시의 녹색시간을 보상해주기 위해  $N$ 주기의 총 연장시간( $t'$ )만큼  $N+1$ 주기의  $(n+1)$ 녹색현시가 앞서

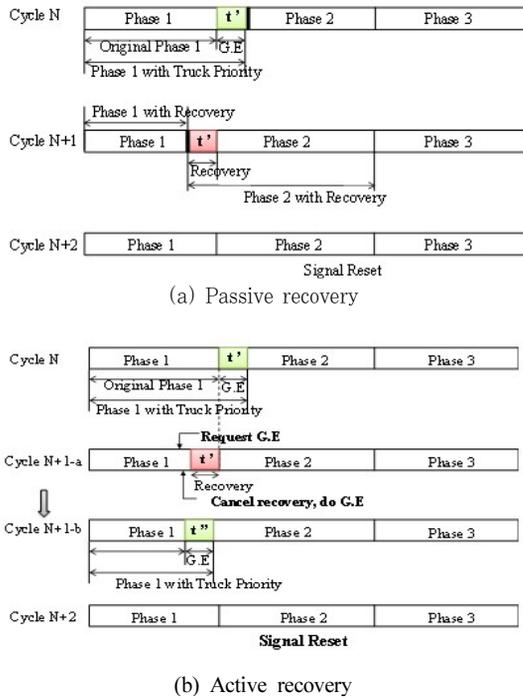


Figure 2. Recovery strategy

서 시작되도록 신호를 조정해준다. 그 후 다음 주기에는 원래의 신호 운영상태로 초기화한다(Figure 2(a)).

2) 능동적(조건부) 보상

보상 중 대형 화물차의 녹색시간 연장 요청이 들어오면 보상을 취소하고 1회에 한하여 녹색시간 연장을 제공해준다 (Figure 2(b)). 이 보상 전략을 적용할 경우 화물차의 정지수를 더욱 줄일 수 있어 온실가스 감축 측면에서는 효과가 증대될 수 있으나 대형차로의 교통량이 많을 경우에 지체를 증가시킬 수 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 수동적 보상과 능동적 보상에 대해 각각 시나리오 분석을 수행하여 보다 효과적인 적용방안을 모색한다.

IV. 분석 틀 구축

1. 분석 틀 구축

본 연구에서는 제안된 알고리즘의 효과 분석을 위해 미시적 교통시뮬레이션 프로그램인 PARAMICS와 배출량 산정모델 중 하나인 CMEM을 이용한다. PARAMICS는

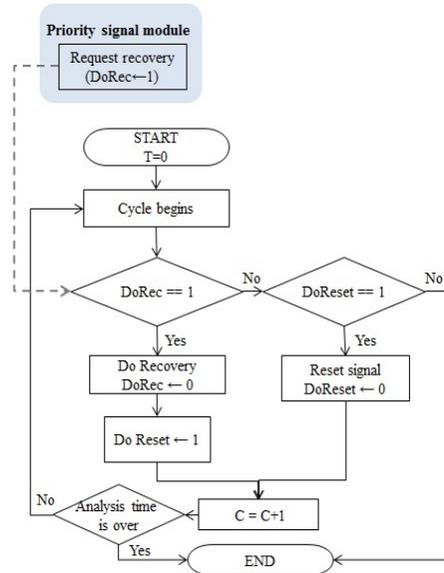


Figure 3. Recovery and signal reset module (time-based)

API 기능을 지원하여 분석자가 작성한 새로운 프로세스에 따라 시뮬레이션을 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한 교차로 신호 시간 조정 API함수를 제공하므로 본 연구에서 제안된 우선신호 제어를 용이하게 구현할 수 있다.

시뮬레이션에서 우선신호 구현을 위한 프로그램은 크게 차량 검지 및 연장시간 예측, 우선신호 제공조건 판단, 우선신호 제공, 보상 전략 시행으로 구성되며 프로세스는 Figure 3과 같다.

2. 모형 정산

본 연구에서는 대형 화물차의 좌회전 통과 소요시간에 대한 예측이 우선신호 제공 여부 판단에 중요한 영향을 미치므로 좌회전 진입 속도에 대한 보정과 점검이 필요하다. 또한 미국에서 개발된 CMEM을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 국내 차종별 배출계수 기준과의 부합성에 대한 검토가 필요하다. 분석의 신뢰성을 높이기 위해 시뮬레이션 결과와 관측값을 비교하여 적절한 차종을 선정하고 관련 모수들을 조정하는 정산 과정을 수행하였다.

1) 대형 화물차 주행 특성

대형 화물차의 주행 속도에 따라 알고리즘의 정확성이 크게 달라지기 때문에 대형 화물차의 속도에 대한 보

**Table 3. Difference in observed and simulated speed**  
(Unit: km/h)

Veh. type	N	Observed speed (A)		Simulated speed (B)		Difference (B-A)	
		Non-peak	peak	Non-peak	peak	Non-peak	peak
Auto	1,257	29.2	21.5	30.1	23.3	0.91	1.85
HDT	1,034	15.3	13.2	16.3	13.5	1.03	0.32

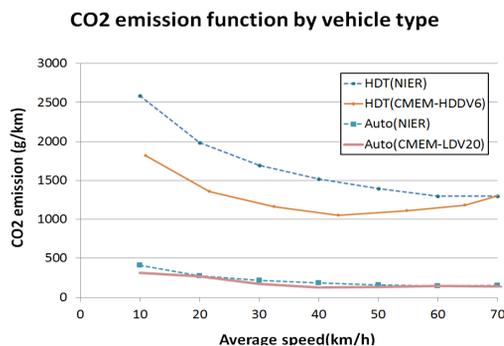
정이 필요하다. 대형 화물차의 접근 속도는 교통 상황에 따라 크게 달라지는 요소이기 때문에, 본 연구에서는 보다 더 중요한 요소로 판단되는 좌회전 시 진입속도에 대한 차종별 보정을 실시하였다.

차종별 가-감속도 및 속도 조절을 통해 관측한 실제 주행 속도와 시뮬레이션 상의 주행 속도를 확인하였다. 실제 관측평균 속도보다 시뮬레이션 상의 주행속도가 조금 더 높게 나타났으나 승용차의 경우 평균 1.38km/h (약 0.44m/s), 대형 화물차의 경우 평균 0.68km/h (약 0.18m/s) 수준으로 나타나 분석을 수행하는 데 있어 큰 무리가 없는 수준이라고 판단된다.

**2) 온실가스 배출량 보정**

PARAMICS 상에서 CMEM을 통해 산출된 온실가스 배출량이 실제 우리나라 차종 및 속도에 맞게 배출되는지는 본 연구의 효과를 검증하는 데 있어 중요한 요소이다. 따라서 국립환경과학원에서 제시하는 차종별-속도별 CO<sub>2</sub> 배출량(Kim Y. K. et al., 2011에서 재인용)을 기준으로 국내 대형 화물차의 배출량과의 부합성을 확인하였으며 적정 차종을 선정하였다.

PARAMICS에서 2km의 링크를 주행하는 차종별 속도에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하여 비교한 결과, 총 31개 차종 중 승용차는 light-duty vehicle(LDV, 일반 배출 차



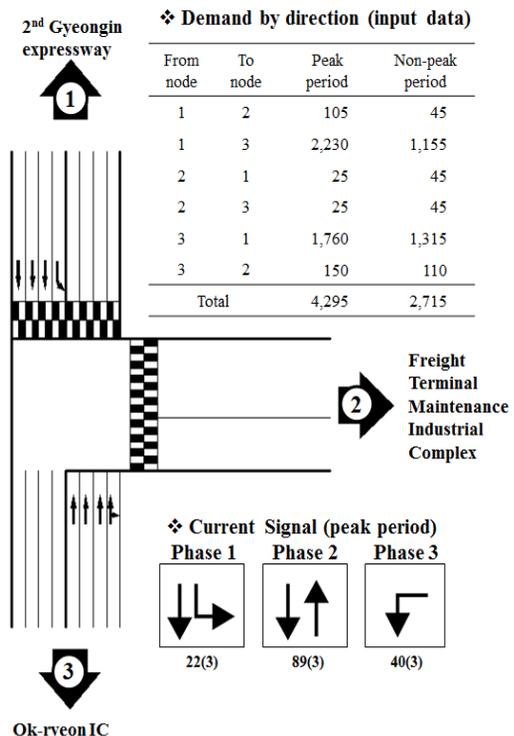
**Figure 4. Emission rates by travelling speed of target and simulated vehicle**

량) 20번이, 대형 화물차는 heavy-duty diesel-power vehicle (HDDV, 총 중량 11.8톤 이상 차량) 6번이 국내 기준에 가장 유사한 것으로 선정되었다. 두 차종의 속도별 배출량 함수는 Figure 4에 제시하였다.

**3) 대상 교차로 선정**

본 연구는 화물차 우선신호 도입의 효과검증을 위한 기초연구로서 인접 교차로의 영향이 없는 단일 독립교차로를 대상으로 한다. 또 대형 화물차의 좌회전 진입이 많은 것으로 판단되는 공단 및 물류거점시설 입구를 대상으로 하여 우선신호 적용에 따른 효과를 알아보기 위하여, 제2경인고속도로와 인접해있으며 공장, 유통시설, 화물 트럭터미널, 자동차정비단지로 이어지는 인천광역시 남구의 정비단지 입구 삼거리를 대상 교차로로 선정하여 알고리즘을 적용 및 분석을 실시하였다. 분석 대상 교차로의 현황은 Figure 5와 같다.

교차로 교통량은 평일 첨두시 08:00-09:00, 비첨두시 13:00-14:00으로 설정하여 조사하였으며, 대형 화물차는 방향별 비율을 조사하여 시나리오 분석의 근거로 활용하였다.



**Figure 5. Site description**

## 2. 시나리오 설정

대형 화물차 우선신호 도입에 타당한 근거를 확보하기 위해서는 다양한 교통상황에 따른 효과 분석이 필요하다. 현장 조사를 통해 교통량이 적은 수준일 때와 많은 수준일 때로 구분하여 기본 교통 수요로 활용하며, 이 교통량에 대한 신호설정은 TRANSYT-7F를 이용하여 산출된 최적 주기와 현시분할을 적용한다.

대형 화물차의 비율이 본 연구의 중요한 요인으로 작용하기 때문에 대형 화물차의 비율을 변화시켜 효과를 분석하는 것이 필요하다. 따라서 대형 화물차의 비율을 전체 교통량의 5%, 10%, 15% 수준으로 변화시켜 효과측도(Measurement of Effectiveness, MOE)를 산출한다. 비교 대안은 크게 화물차 우선신호를 적용하지 않았을 때와 적용하였을 때로 나뉜다. 화물차 우선신호를 적용하는 경우는 다시 수동적 보상과 능동적 보상 2가지 case로 나뉘게 된다. 전체 교통량 및 대형 화물차 비율에 따른 시나리오 분석에 두 가지 보상기법을 더하여 총 18개의 Case를 설정하여 분석한다.

## V. 효과 분석

### 1. 분석의 전제

분석시간은 1회 당 2시간으로 설정하였으며, 한 Case 당 Random seed를 이용하여 30회씩 실행하여 결과를 도출하였다. 분석의 MOE로는 전 차량의 온실가스 배출량과 연료 소모량, 총 통행시간을 이용하였으며, 시뮬레이션 상에서 차량들이 교통망에 진입하여 안정화되기 전

Table 4. Analysis cases

Traffic condition	Non-peak						Peak									
Total traffic volume	2,715 vph						4,250 vph									
HDT ratio	5%		10%		15%		5%		10%		15%					
Priority Strategy	N	P	A	N	P	A	N	P	A	N	P	A	N	P	A	
cycle of signal	110 sec		140 sec		110 sec		110 sec		90 sec		110 sec					

N : Non-Truck Priority  
 P : Truck Priority with Passive Recovery  
 A : Truck Priority with Active Recovery

의 10분을 제외한 1시간 50분의 자료를 분석하였다. 온실가스 배출량은 교통부문에서 발생하는 온실가스의 대부분을 차지하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)만을 대상으로 선정하였다. 분석 대상 교통망은 Figure 5에 제시된 인천광역시 남구 화물터미널 정비공단 입구의 3지 교차로를 동일하게 이용하였으며, 좌회전하여 공단으로 진입하는 차량을 대상으로 우선신호를 적용하였다.

## 2. 분석 결과

### 1) CO<sub>2</sub> 배출량 및 연료소모

분석 Case별 CO<sub>2</sub> 배출량 및 연료소모에 대한 증감을 살펴보면 Table 5와 같다. 비첨두시에는 대형 화물차의 비율에 관계없이 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 대형 화물차에 녹색시간 연장을 제공하여 가-감속 및 정지를 줄이는 것이 다른 차량들의 지체를 유발하게 되더라도 온실가스 배출량 감축에 보다 유리하다고 판단할 수 있다. 또한 전체 교통량과 대형 화물차가 적은 수준에서는 지속적으로 화물차에 우선권을 부여하

Table 5. Changes in CO<sub>2</sub> and fuel consumption by case

Case	CO <sub>2</sub>		Fuel consumption		Average No. of GE (% of cycle)		
	amount (kg)	diff. ratio (%)	amount (kg)	diff. ratio (%)			
Non-peak	5%	N	2,627.31	•	981,808	•	•
		P	2,534.46	-3.53	952,835	-2.95	7.8 (13.0)
		A	2,433.24	-7.39	952,592	-2.98	11 (18.3)
	10%	N	3,473.21	•	1,209,349	•	•
		P	3,234.13	-6.88	1,131,729	-6.42	14.0 (30.0)
		A	2,875.34	-17.21	1,018,116	-15.81	18.0 (38.2)
	15%	N	4,328.10	•	1,462,870	•	•
		P	4,144.34	-4.25	1,444,904	-1.23	32.2 (53.7)
		A	4,107.10	-5.11	1,424,681	-2.61	32.7 (54.5)
Peak	5%	N	4,133.14	•	1,553,521	•	•
		P	4,246.63	2.75	1,600,360	3.02	18.4 (30.7)
		A	4,236.79	2.51	1,596,441	2.76	24.2 (40.3)
	10%	N	5,224.70	•	1,867,248	•	•
		P	5,521.35	5.68	1,977,940	5.93	45.2 (61.6)
		A	5,536.13	5.96	1,983,136	6.21	49.6 (67.6)
	15%	N	6,613.83	•	2,307,331	•	•
		P	6,907.06	4.43	2,400,795	4.05	30.8 (51.3)
		A	7,032.39	6.33	2,442,505	5.86	36.4 (60.7)

N : Non-Truck Priority  
 P : Truck Priority with Passive Recovery  
 A : Truck Priority with Active Recovery

는 것이 더 효과적인 것으로 분석되었다.

보상 전략에 따른 효과를 살펴보면, 능동적 보상을 적용하여 대형 화물차에 더 높은 우선권을 부여하는 것이 전체 배출량 감소 측면에서 더 우수한 것으로 파악되었다. 그러나 첨두시의 경우, 교차로 내에 대기하는 차량이 많고 전체적인 통행속도가 낮아 배출계수가 더 높아지기 때문에 배출 감소 효과는 나타내지 못하였다.

연료 소모와 Emission은 밀접한 관계가 있으므로 앞서 살펴본 CO<sub>2</sub> 배출량의 증감패턴과 증감률이 유사하게 나타났다. 대형 화물차의 좌회전 우선신호를 적용했을 때 대부분 미시행시 대비 5% 내외의 연료 소모량 증감이 나타났으며, 비첨두시 대형 화물차의 비율이 10% 수준일 때 가장 효과가 있는 것으로 분석되었다. 교차로 내 교통량이 많은 첨두시에는 CO<sub>2</sub> 배출량과 마찬가지로 알고리즘의 적용 효과가 없었다.

## 2) 통행시간 개선 효과

먼저 모든 차량의 총 통행시간(TTT)에 대한 변화를 살펴보면, 비첨두시의 경우 모든 시나리오에서 총 통행

시간이 줄어든 것을 확인할 수 있다(Table 6). 이는 대형 화물차의 정지수를 줄임으로써 교차로에서 소요되는 통행시간이 감소되었기 때문으로 판단된다. 특히 대형 화물차 비율이 10%일 때, 우선신호와 능동적 보상을 적용함으로써 대형 화물차의 평균 통행시간이 최대 14초(약 8.5%) 이상 단축되어 총 통행시간이 상당히 개선되는 것을 확인할 수 있다.

첨두시의 경우 우선 신호를 제공하더라도 대형 화물차의 지체가 개선되지 않았으며 또한 대향차로의 차량들의 지체가 증가하여 전체적으로 총 통행시간을 악화시키는 것으로 검토되었다. 이는 전방차량의 간섭으로 인하여 녹색시간 연장의 효과가 미비하게 나타나며, 오히려 수요가 많은 대향차로의 적색시간을 연장하여 전체 지체 시간이 늘어나기 때문인 것으로 검토되었다. 따라서 첨두시 대형 화물차의 비율이 높은 경우에는 특정 방향대형 화물차에 우선신호를 제공하는 것이 불합리하다고 판단된다.

## VI. 결론

본 연구에서는 대형 화물차를 대상으로 우선신호를 제공하여 가·감속이나 정지 없이 신호교차로를 통과할 수 있도록 함으로써 교차로 전체의 온실가스 배출량 및 연료 소모량을 줄일 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘의 효과 판단을 위하여 실제 교차로를 대상으로 시뮬레이션 분석을 수행하였으며, 총 18개의 Case 분석을 통해 대형 화물차 좌회전시 녹색시간 연장의 효과를 검증하였다.

대형 화물차 좌회전 우선신호는 비첨두시일 때 대형 화물차의 비율과 상관없이 모두 온실가스 저감, 연료소모량 감소, 총 통행시간 감소 효과를 보였으며, 특히 대형 화물차 교통량이 10% 수준일 때 가장 효과적으로 온실가스 및 연료소모량, 통행시간을 감소시키는 것을 확인하였다. 그러나 첨두시의 경우 그 효과를 거두기 어려우며, 전체 교통량 대비 대형 화물차 비율이 높아질수록 온실가스 배출량이 오히려 가중되는 것으로 나타났다.

수동적 보상과 능동적 보상으로 구분하여 보상 전략에 대한 시나리오 분석을 수행한 결과, 비첨두시의 경우에는 능동적 보상 적용시 우선신호의 효과가 더욱 크게 나타났다. 이는 대향 차로에 교통량이 많지 않은 경우 대형 화물차의 정지에 따른 온실가스 배출량이 전체 교차

**Table 6. Changes in travel time by vehicle type**

Case	All		Truck		Car			
	TTT (s)	Diff. from N (s)	Avg. Travel Time	Diff. from N (s)	Avg. Travel Time	Diff. from N (s)		
Non-peak	5%	N	598.834	•	152.61	•	116.42	•
		P	594.479	-4.534	147.57	-5.04	117.30	0.88
		A	594.601	-4.232	148.97	-3.64	117.57	1.15
	10%	N	668.462	•	163.39	•	119.20	•
		P	634.012	-34.450	155.63	-4.75	117.30	-1.59
		A	606.084	-62.378	149.55	-8.47	116.07	-2.62
	15%	N	635.931	•	153.86	•	128.72	•
		P	621.584	-14.347	147.77	-6.08	120.59	0.09
		A	624.156	-11.775	150.43	-3.42	119.20	1.48
Peak	5%	N	973.827	•	150.79	•	121.56	•
		P	1,014.833	41,006	152.08	1.29	123.23	1.67
		A	1,012.681	38,853	151.00	0.21	122.53	0.97
	10%	N	942,829	•	145.78	•	114.40	•
		P	1,039,314	96,485	152.25	6.47	129.46	15.05
		A	1,053,325	110,496	152.08	6.3	126.30	11.89
	15%	N	1,069,554	•	151.16	•	121.55	•
		P	1,092,312	22,757	152.94	1.78	129.46	3.11
		A	1,128,672	59,117	155.56	4.4	133.80	5.08

N : Non-Truck Priority  
 P : Truck Priority with Passive Recovery  
 A : Truck Priority with Active Recovery

로에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 첨두시에는 대형 차로에 교통량이 많으므로 지속적으로 대형 화물차에 대해 녹색시간 연장을 제공하는 것이 온실가스 배출을 증가시키고, 교통흐름에도 좋지 않은 영향을 끼치는 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 종합할 때, 교차로 전체 교통량이 많은 경우에는 대형 화물차에 우선권을 부여하는 것이 효과를 거두기 어렵다. 그러나 혼잡하지 않은 구간 또는 시간대에는 좌회전 현시에 녹색신호 연장과 능동적 보상전략을 이용한 우선신호를 제공하여 온실가스 배출량 및 연료 소모량, 통행시간 절감 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다. 대형차 검지기법이 보완될 경우, 본 연구의 결과는 대형 화물차의 진출입 통행이 많은 공단지역 혹은 물류거점시설 앞 교차로에 우선신호 도입을 검토하는데 참고할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 다양한 교차로 유형 및 교통 특성을 고려한 분석이 수행될 경우 화물차 우선신호 도입 기준을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- AASHTO (2011), A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
- Bonnesone J., Middleton D., Zimmerman K., Charara H., Abbas M. (2002), Intelligent Detection-Control System for Rural Signalized Intersections, Texas Department of Transportation.
- Boriboonsomsin K., Barth M. (2008), Impacts of Freeway High-occupancy Vehicle Lane Configuration on Vehicle Emissions, *Transp. Res.-D*, 13(2), 112-125.
- Chamberlin R., Swanson B., Talbot E., Dumont J., Pesci S. (2011), Analysis on MOVES and CMEM for Evaluating the Emissions Impact on an Intersection Control Change, 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 11-0673.
- Currie G., Shalaby A. (2008), Active Transit Signal Priority for Streetcars: Experience in Melbourne, Australia, and Toronto, Canada, *Transp. Res. Rec.*, 2042, 41 - 49.
- Dion F., Rakha H., Zhang Y. (2004), Evaluation of Potential Transit Signal Priority Benefits Along a Fixed-Time Signalized Arterial, *J. Transp. Eng.*, 130(3), 294-303.
- Ekila W., Sayed T., Esawey M. E. (2009), Development of Dynamic Transit Signal Priority Strategy, *Transp. Res. Rec.*, 2111, 1 - 9.
- Gates T. J., Noyce D. A. (2010), Dilemma Zone Driver Behavior as a Function of Vehicle Type, Time of Day, and Platooning, *Transp. Res. Rec.*, 2143, 88-93.
- Hong C. E., Kwon O. Y. (2002), Estimating of the Adequate Yellow-time Considering the Driving Patterns of the Left-turn Vehicle, *J. Traffic Saf. Res.*, 21, 59-68.
- Ioannou P., Anastasios C., Arnab B., Hossein J., Alez K., Hamid P. et al. (2001), Modeling and Route Guidance of Trucks in Metropolitan Areas, METRANS.
- Kim J. H., Kim H. S., Choi S.-J., Park S.-K., Kim J., Jang Y. K. (2011), A Study on the Calculation of CO<sub>2</sub> Emission and Road Freight Environmental Index for Logistics Companies, *J. Korean Soc. Transp.*, 29(2), Korean Society of Transportation, 25-35.
- Kim Y. K., Wu S. K., Park S., Kim M. J., Han D. H. (2011), A Study on Evaluation Methodology of Green house Gas and Air Pollutant Emissions on Road Network, The Korea Transport Institute.
- Liu C., Herman R., Gazis D. (1996), A Review of the Yellow-light Interval Dilemma, *Transp. Res.-A*, 30(5), 333-348.
- MLTM (2012), Statistical Yearbook of Traffic Volume, Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
- Minnesota Department of Transportation (2004), Truck Priority at Signalized Intersections, Short Elliott Hendrickson, INC., Minnesota.
- Peterson A., Bergh T., Steen K. (1986), LHOVRA: A New Traffic Signal Control Strategy for Isolated Junctions, *Traffic Eng. and Control*, 27(7/8), 98-101.
- Ramsay E. D., Bunker M. J., Bruzsa L. (2006), Management of Traffic-related Effects of Heavy

Vehicles on Urban Freight Corridors, Proceeding  
9th International Symposium on Heavy Weights  
and Dimensions, Pennsylvania State University.

Scora G., Barth M. (2006), Comprehensive Modal  
Emission Model (CMEM), Version 3.01 User's  
Guide, University of California Riverside Center  
for Environmental Research and Technology.

Skabardonis A. (1998), Control Strategies For Transit  
Priority, California Partners for Advanced Transit  
and Highways (PATH), Research Reports,  
UCB-ITS-PRR-98-2.

Sunkari S. R., Chrara H. A., Urbanik T. (2000), Reducing  
Truck Stops at High-Speed Isolated Traffic Signals,  
Texas Transportation Institute.

Zimmerman K. (2007), Additional Dilemma Zone  
Protection for Trucks at High-Speed Signalized  
Intersections, Transp. Res. Rec., 2009, 82-88.

☞ 주 작성 자 : 양세정

☞ 교 신 저 자 : 이청원

☞ 논문투고일 : 2013. 4. 17

☞ 논문심사일 : 2013. 6. 11 (1차)

2013. 7. 31 (2차)

2013. 8. 21 (3차)

☞ 심사판정일 : 2013. 8. 21

☞ 반론접수기한 : 2014. 2. 28

☞ 3인 익명 심사필

☞ 1인 abstract 교정필