

# 고속도로 구간의 온실가스 On-Line 모니터링 산정방법

## Evaluation Methodology of Greenhouse Gas On-Line Monitoring on Freeway

이 승 봉\* · 장 현 호\*\*

\* 주저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과

\*\* 교신저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과

Soong-bong Lee\* · Hyun-ho Chang\*\*

\* Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

\*\* Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

† Corresponding author : Hyun-ho Chang, nettrek@hanmail.net

Vol.16 No.2(2017)

April, 2017

pp.92~104

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.2.92>

2017.16.2.92

Received 27 December 2016

Revised 26 January 2017

Accepted 5 March 2017

© 2017. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

기존의 도로교통의 속도관리 목표는 이동성 및 안전성 개선을 목표로 운영되어 왔으며, 환경적 측면과 에너지 효율 측면에 대한 고려는 미미하였다. 하지만, 최근 들어 기후변화로 인한 경제적 피해규모가 증가하고 있으며, 외부적 여건변화에 따라 환경가치는 상승할 것으로 예상된다. 또한, 교통부문에서의 탄소배출량 저감정책은 개인교통수단에서 대중교통으로의 전환 및 친환경자동차 개발에만 집중되어있어 상대적으로 도로운영의 개선을 통한 저감 노력이 부족하다는 평가를 받았다. 향후 우리나라의 자동차 보유대수는 증가할 것으로 예상되므로 이에 대한 적응전략 및 대비책이 필요한 시점이다. 이를 위해서는 기존의 이동성 중심의 도로운영 정책에서 환경측면을 고려한 정책으로, 도로운영의 패러다임 전환을 통해 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 교통운영 측면에서 온실가스 배출량을 저감하기 위해서는 현재 도로상에서 어느 정도 온실가스가 배출되는지를 실시간으로 모니터링 할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 실시간으로 수집되는 교통자료를 이용하여 5분 후의 상태를 예측하고 이를 통해 실시간 온실가스 배출량 모니터링 시스템을 구축할 수 있는 방법론을 제안하였다.

핵심어 : 온실가스, 온라인 모니터링, 칼만필터 모형, 교통변수 추정

### ABSTRACT

Previous management for speed in road traffic system was aimed only to the improvement of mobility and safety. However, consideration for the aspect of environment and energy consumption efficiency was valued less than the former ones. Nevertheless, economical damage scope caused by climate change has been increasing and it is estimated that environmental value will be increased because of the change of external circumstances. In addition, policy for reducing carbon emission in transportation system was assessed as insufficient in improving the condition of traffic road since it only focused on the transition of private vehicle into public transportation and development of eco-friendly car. Now it is the time to prepare for the adaptation strategy and precaution for the increased number of private vehicle in Korea. For this, paradigm shift in traffic operation which includes the policy not only about the mobility but also about caring environment would be needed. It is needed to be able to monitor the actual amount of greenhouse gas in real time to reduce the amount of emitted greenhouse gas in the aspect of traffic management. In this research, a methodology which can build on-line greenhouse gas emission monitoring system by using real time traffic data and predicting the circumstance in next 5 minutes was suggested.

Key words : Emission, On-line Monitoring, Kalman-filter Model, Traffic Variable Estimation

## I. 서론

현재까지 우리나라 도로교통의 속도관리 목표는 이동성 및 안전성 개선을 중심으로 운영되어 왔으며, 환경적 측면과 에너지효율 측면에 대한 고려는 미미하였다. 그러나 시대가 변화에 따라 효율성 측면뿐만 아니라 다른 요소들도 고려대상에 포함되고 있다. 최근 들어 기상이변으로 인한 경제적 피해규모의 증가로 인해 환경측면의 가치가 주목받고 있다.

우리나라의 경우 경제성장의 필요성이 아직 존재하며, 기후협약에 의해 탄소배출량을 감축해야함에도 불구하고 산업부문과 건축부문에서의 탄소배출 감소에는 제약이 존재한다. 따라서 상대적으로 교통부문에서의 탄소배출 감축이 중요하게 여겨지고 있다. 그러나 지금까지 교통부문에서의 탄소배출은 개인교통수단에서 대중교통으로의 전환에만 집중되어있어 상대적으로 도시부 도로운영의 개선을 통한 저감 노력이 부족하다는 평가를 받았다. 향후 우리나라의 자동차 보유대수 및 국내여객 수요가 1.5~2.1배 정도 증가할 것으로 예상되므로(Kim and Kim, 2012) 이에 대한 적응전략 및 대비책이 필요하다. 또한 온실가스의 과다 배출로 인해 환경적 위협과 질병위험으로부터 모든 사람들이 평등하게 보호받으며, 동시에 모든 사회구성원이 환경적 위협을 균형 있게 부담해야 한다는 환경정의에 대한 인식의 필요성도 제기되고 있다(Park et al., 2007). 따라서 구체적으로 경제성장을 추구하되 경제성장의 패턴을 환경 친화적으로 전환시키며, 경제성장과 환경파괴의 탈동조화를 실현하는 것이 중요하며, 이는 도로운영의 패러다임 전환을 통해 구현할 수 있을 것으로 예측된다.

본 연구는 고속도로 운영에 있어 패러다임 전환의 필요성에 입각하여 실시간 온실가스 모니터링 체계구축을 위한 방법론을 개발하고자 한다.

## II. 기존연구 검토

### 1. 교통변수 예측에 관한 연구

지난 수년간 교통변수(교통량, 속도, 통행시간)를 예측하기 위하여 다양한 예측모형들이 개발되었다. 예측 문제의 해결을 위해 사용된 모형들은 정적기법(naive)과 모수(parametric)모형, 비모수(non-parametric) 모형으로 구분할 수 있다.

정적모형으로는 과거평균(historical average), 군집분석(clustering)분석 등이 대표적이다. 두 모형은 과거의 이력자료 중 현행상태와 시간대/기후/요일 등이 동일한 자료들을 평균하여 예측하는 방법이다. 반복적인 행태가 나타나는 구간에 대해서는 타 모형에 비하여 우수한 설명력을 보일수도 있으나, 비반복적인 특성이 강한 구간에서는 예측력이 낮은 편이다. 정적모형은 계산이 간단하여 현장에서 널리 사용되고 있지만 현행상태의 변동성을 가정하지 않아 고도화된 모형들과 비교하였을 때 예측력이 낮은 한계가 있다.

모수모형은 통계기법을 기반으로 한 시계열분석(time series analysis)이 대표적이다. 시계열분석은 과거의 관측값과 오차항의 함수를 이용하여 장래를 추정하는 과정으로 정적인 상태를 가정한다. 교통변수의 연속적(continuous)인 특성을 처리하기 위하여 많은 연구자들은 시계열 분석에 기반한 모형들을 주로 반영하였다. 선형회귀모형(LR, Linear Regression), ARIMA, 칼만필터링(KF, Kalman Filtering), 가우시안 최우수 추정(GML, Gaussian Mximum Likelihood) 등 다양한 모형들이 개발되었다. 시계열 기반의 모형들은 모델링에 있어 정적인 상태를 고려하지만 교통류 시스템은 매우 동적인 시스템으로 상태가 안정적일 때 예측력은 우수하나, 상태가 급격하게 변하는 구간, 또는 단속류의 행태를 설명하기는 힘들다.

비모수모형은 수학적 방정식이 아닌 경험적 지식기반의 문제해결 접근방법으로 퍼지(fuzzy), 신경망(NN, Neural Network),  $k$ -최근근 이웃(KNN,  $k$ -nearest neighbors) 등이 개발되었다. 비모수모형은 모수적 접근방법에 비하여 많은 데이터가 필요하고 탐색시간이 많이 소요될 수 있는 단점이 있지만, 상대적으로 이해하기 쉬우며 파라미터의 개수와 내재적 특성을 동적으로 설명할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 데이터 탐색속도와 관련해서는 첨단 컴퓨터 연산기능과 DB검색기술의 발달로 한계를 극복하여 ITS분야에서 다양하게 적용되고 있다.

## 2. 칼만필터 모형

칼만필터(Kalman Filter) 기법은 과거의 데이터를 이용하여 현재 또는 미래를 추정하는 기법으로 1960년 R.E. Kalman에 의해 개발되었다. 칼만필터 모형은 연산 수행 속도가 매우 빠르고 데이터의 실시간 처리가 가능하며, 시계열 변동을 효과적으로 설명하기 때문에 교통 분야뿐만 아니라 다양한 분야에서 사용되고 있다.(Chang et al., 2012) 본 모형은 변수에 대한 오차공분산과 통계적 가중치를 활용하여 반복적으로(recursive) 새로운 관측치를 즉시 수용할 수 있으므로 온라인 시스템에서의 적용이 매우 유리한 알고리즘이며, 대부분 초기값에 상관없이 참값으로 빠르게 수렴되는 것으로 알려져 있다. 칼만이득(Kalman Gain)은 통계적 가중치로 오차공분산과 측정값과의 잡음으로, 상태전이에서의 잡음과의 연산으로 계산되어진다. 칼만이득은 장래 상태 예측 시 사용되며, 추정단계를 거친 값은 다음 다시 상태전이행렬의 이용되는 반복적(recursive) 과정이 이루어진다.

Bae & Lee(2004)의 연구에서는 버스이용자에게 실시간의 신뢰성 있는 버스도착시간 예측정보를 생성하기 위하여 칼만필터 모형을 적용하였고, 분석에 사용된 자료의 경우 3가지 형태로 분류하여 예측을 수행하였다. 분석결과 예측대상의 버스의 앞서 지나간 버스에 대하여 가중치를 부여한 데이터를 적요한 예측값이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

Lee et al.(2002)는 서울시를 대상으로 신뢰성 있는 교통정보를 제공하기 위해 프로브차량에 의해 수집된 원시데이터를 칼만필터 모형을 적용하여 경로통행시간을 예측하였다. 분석결과 우수한 예측력을 보였으며, 노측마찰과 신호운영으로 인하여 불안정한 교통류에도 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구에서 교통량과 통행속도 예측에 칼만필터 모형을 선정한 이유는 우수한 잡음제거 능력과, 짧은 예측 소요시간, 방대한 과거자료를 저장할 필요 없이 관측치와 예측치를 비교하여 필터를 계량하므로 오차를 점점 줄여가는 특징이 있어 단기예측 즉, 온라인시스템에 적합하기 때문이다.

## 3. 온실가스 산정방법

온실가스 배출량 산정과 관련된 주요 선행연구를 고찰해 보면 국가적, 지역적 범위에서의 온실가스 배출량 산정, 시행 중인 온실가스 저감 정책에 대한 미·거시적 차원의 평가, IPCC(2006) 가이드라인을 활용한 독자적 배출계수의 개발 등에 초점을 맞추고 있다. 기존에 연구된 온실가스 배출량 산정방법과 관련된 연구들은 크게 거시적 연구와 미시적 연구로 나눌 수 있다.

### 1) 거시적 온실가스 산정방법

거시적 온실가스 산정 방법론 연구의 경우 연료판매량이나 기존에 존재하는 교통수요예측모형 등을 이용해 연구 대상이 되는 구간의 교통량을 추정하여 도로 연장과 차종별 배출계수를 통해 온실가스 배출량을 산

정하는 방법으로 정의할 수 있다(Ryu and Bae, 2012).

한국교통연구원에서는 기후변화협약과 관련한 교통 부문 정책 및 전략수립을 위한 에너지 사용량, 온실가스 배출량, 오염물질 배출량에 대한 수단별, 지역별 기초통계 구축을 위해 교통부문 온실가스 배출량 조사사업을 실시하였다. 이때 교통부문은 도로, 철도, 항공, 해운 분야를 지칭하며 도로 부문의 경우 유통판매량을 기초로 Tier 1 방법론을 통해 온실가스 배출량을 추정하여 결과를 제시하였다.

Kim et al.(2010)는 IPCC 가이드라인에서 제시한 온실가스 산정방법론인 Tier 1-3을 비교하여 국내 적용가능성에 대해 고찰하였다. 연구에 따르면 Tier 1의 경우 실질적인 교통부문의 이동특성을 반영하기 어렵다는 단점을 제시하였다. 이를 보완하기 위해 Tier 3방법론 적용을 제안하였고, 이를 위해 지속적인 관련자료 수집, 가공체계의 필요성을 제시하였다.

선행연구에서의 평균 차속모형은 빠르고 간편하게 온실가스 배출로 인한 대기오염 영향을 산출할 수 있다는 장점이 있어 대규모 교통관련 사업 시행 시 발생할 것으로 예측되는 배출가스의 양을 추정하는데 사용되고 있다. 그러나 이러한 모형들의 경우 차량의 다양한 속도변화와 급격하게 변하는 교통상황을 반영하지 못한다는 단점이 존재한다.

## 2) 미시적 온실가스 산정방법

미시적 온실가스 배출량 산정 방법론의 경우 실제 이동오염원의 통행 특성을 분석하여 개별 차량의 구체적인 주행행태에 따른 배출량을 산정하는 방법론으로 정의할 수 있다.

Rakha et al.(2000)는 연료소비와 배출량이 속도와 가속도에 민감하게 반응한다는 것을 연구를 통해 제시하였으며, 이를 기반으로 도로 상에서 연료소비의 영향에 의한 배출량을 산정하였다.

Park et al.(2007)는 VISSIM을 이용하여 개별 차량 정보에 IPCC 가이드라인에서 제시된 차종별 배출계수표를 적용하여 일정 시간 동안의 차종별 온실가스 배출량을 산정하였다.

Ryu et al.(2011)는 IPCC 가이드라인에 제시된 온실가스 산정방법 중 Tier 1과 Tier 3 방법론에 대한 비교분석을 위해 과천시와 안성시를 조사지역으로 선정하여 현장조사를 수행하였다. 이를 통해 수집된 데이터를 바탕으로 지속가능 평가지표 중 환경적 지표군에 해당하는 교통부문 온실가스 배출량, 인구당 교통부문 온실가스 배출량, 면적당 교통부문 온실가스 배출량을 산정하였다.

Han et al.(2012)는 미시적 교통시뮬레이션(Parmics)을 이용하여 요금소 유형(일반TCS, 하이패스)에 따라 통과하는 개별차량의 주행궤적자료를 추출하고, 차량 감·가속을 반영하여 온실가스 배출량을 산출하였다. 차량 감·가속에 따른 영향을 적용하기 위해 미국 환경보호청에서 개발한 MOVES 프로그램을 이용하여 차종별 속도별 가속도별 온실가스 배출량표를 작성하여 온실가스 배출량을 산정하였다.

미시적 온실가스 산정방법의 경우 개별차량의 궤적자료를 수집하여 온실가스 배출량을 산정한다는 측면에서 거시적 산정방법에 비해 정확도가 크다는 장점이 있으나, 데이터 수집 측면에서 많은 제약이 따르므로 산정의 어려움이 존재하는 단점이 있다.

## 3. 시사점

교통변수(교통량/속도) 예측 시 기존의 연구에서는 정적기법, 모수모형, 비모수모형 등 다양한 모형을 활용 및 응용하여 연구에 적용하였다. 본 연구에서는 실시간 온실가스 배출량 모니터링 시스템 구축을 위한 방법론을 개발하고자 한다. 칼만필터모형은 예측 속도가 다른 모형들에 비하여 빠르고 시계열의 변동을 효과적으로 설명할 수 있는 장점이 있어 실시간 모니터링 체계 구축 시 효율적인 모형으로 판단된다. 따라서 본

연구에서는 교통변수(교통량, 속도) 예측 시 칼만필터 모형을 적용하고자 한다.

실시간 온실가스 배출량 산정을 위해서는 미시적인 수준의 방법론 적용이 필요하다. 본 연구에서는 IPCC 배출량 산정방법 중 미시적방법인 Tier 3을 응용한 새로운 방법론을 개발하고자 한다.

현재까지 실시간으로 도로구간의 온실가스 배출량을 모니터링 할 수 있는 연구는 진행되지 않았다. 본 연구는 세계적으로 환경측면의 가치가 주목되고 있는 상황에서 필수적으로 필요한 연구로 판단된다.

### Ⅲ. 분석방법론

#### 1. 분석개요

고속도로 구간의 온라인 모니터링 시스템을 개발을 위해서는 실시간으로 교통변수의 예측이 가능해야 한다. 또한 신뢰성 있는 온실가스 배출량 산정을 위해서는 미시적 수준의 배출량 산정방법론의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 교통량, 속도 예측을 위해서 칼만필터 모형을 적용하였고, 예측의 범위는 5분으로 설정을 하였다. 5분 후의 상태를 예측한 이유는 실시간 온실가스 배출량 모니터링과 이에 따른 다양한 교통운영전략 수립을 위해서는 장래 교통상황이 어떻게 변화될지를 알 수 있어야하기 때문이다. 또한, 검지기에서 수집된 자료들은 일정주기로 센터로 송신하므로, 교통정보의 시간처짐(time lag)을 보완하기 위해서도 예측이 필요하다.

온실가스 배출량 산정을 위해서 차종별 배출량 원단위는 네트워크상의 점유율(NOR) 개념을 사용하였고, 예측된 교통량과 속도자료를 이용하여 배출량을 산정하였다. 또한, 실시간 모니터링에 적용을 위해서 예측된 변수들의 오차를 분석하고, 실제 대상구간에 적용하여 비교분석하였다.

#### 2. 교통량/속도 예측방법

본 연구에서는 교통량과 속도 예측방법으로 칼만필터 모형을 사용하였다. 칼만필터를 이용한 예측방법은 시간의 순서에 따라 입력되는 관측값과 이전시간을 기준으로 예측된 예측값을 비교하여 평균제곱오차의 최소화조건을 만족하도록 필터를 동적으로 적용한다. 본 모형은 새로운 관측치를 즉시 수용할 수 있으므로 온라인 모니터링 시스템에 적용이 용이하며, 대부분 초기값에 상관없이 참값으로 빠르게 수렴하는 경향을 보인다.

칼만필터 알고리즘은 다음과 같이 상태방정식(state equation), 관측방정식(observation equation)으로 구성된다.  $t+1$ 시점에서의 예측치  $x_{t+1}$ 은 이전 시점의 상태  $x_t$ 와 그때의 오차항  $w_t$ (평균이 0이고 다른 변수와의 상관관계가 없는 벡터)를 이용하여 예측할 수 있다. 또한 현재시점에서의 새로운 관측치  $z_t$ 는 현재의 오차항  $v_t$ 를 통해 계산되어질 수 있다. 칼만필터에서는 예측치  $x_t$ 와 오차항  $w_t$ 의 분산  $P_t$ 에 대한 초기치,  $\hat{x}_t, \hat{P}_t$ 가 주어진 상태에서  $x_t$ 의 예측치  $\hat{x}_t$ 를 구하고,  $\hat{x}_t$ 와 새로운 관측치  $z_t$ 를 이용해 더 나은  $\hat{x}_t$ 를 다시 예측한다. 즉, 장래예측 시 관측값을 포함하여 새로운 예측값을 찾으므로 보다 현실에 가까운 예측값을 구할 수 있다. 새로운 예측치는  $\hat{x}_t$ 와 관측치 추정오차의 선형조합(linear combination)으로 이루어진다. 이때 칼만이득이라고 불리는 상수  $K$ 를 매개변수로 사용하게 되며, 이 매개변수는 예측오차를 최소화시키는 방법으로 추정된다.

$$x_{t+1} = \Phi_t \times x_t + w_t \quad (\text{상태방정식})$$

$$z_t = H_t \times x_t + v_t \quad (\text{관측방정식})$$

$x_t$  : 시점  $t$ 에서의 상태벡터                       $w_t$  : 시점  $t$ 에서의 알려진 공분산을 가진 백색순서  
 $\Phi_t$  : 시점  $t$ 에서  $t+1$ 로의 전이행렬             $H_t$  : 시점  $t$ 에서 관측벡터와 상태벡터를 연결시켜 주는 벡터  
 $z_t$  : 시점  $t$ 에서의 관측벡터                       $v_t$  : 시점  $t$ 에서의 알려진 공분산을 가지고  $w_t$ 와 상관관계가 없는 관측오차

교통량과 속도 예측을 위한 칼만필터링 알고리즘은 초기화단계, 칼만이득계산, 상태벡터 갱신, 공분산계산, 장래예측의 순서로 반복적으로 수행되며, 세부적인 내용은 아래와 같다.

<Step 1> 초기화 단계

- 초기값 입력 : 초기상태 추정치( $\hat{x}_i$ ), 교통량(or 속도) 추정치 오차공분산( $P_i = 1$ ), 측정에러분산( $R_i = 0$ ), 상태전이 행렬( $\Phi_i = 1$ )

<Step 2> 칼만이득 계산

- 초기자료에 의해 칼만이득 산정

$$K_t = P_t \times H(H \times P_t \times H + R_t)^{-1} \tag{1}$$

- 통행시간 주기  $t+1$ 에서,

$$K_{t+1} = P_{t+1} \times (P_{t+1} + R_{t+1}) \tag{2}$$

$$P_{t+1} = \Phi_t \times P_t \times \Phi_t + Q_t \tag{3}$$

$K_t$  : 시점  $t$ 에서의 칼만이득

$R_t$  : 시점  $t$ 에서의 측정 에러분산

$P_t$  : 시점  $t$ 에서의 교통량/속도 추정치의 오차공분산

<Step 3> 상태벡터 갱신

- 관측벡터  $z_t$ 를 이용하여 상태벡터 추정치 갱신

$$\hat{x}_t = \hat{x}_i + K_t(z_t - H \times \hat{x}_i) \tag{4}$$

$\hat{x}_i$  : 예측주기 이전 상태벡터(교통량/속도)

$z_t$  : 시점  $t$ 에서의 관측벡터(교통량/속도)

<Step 4> 공분산 계산

- 갱신된 예측치에 대한 공분산 계산

$$P_t = P_i - K_t \times H \times P_i \tag{5}$$

$P_t$  : 예측주기 이전 값의 추정오차 공분산

<Step 5> 장래 사전 예측치 산정

$$\hat{x}_t = \Phi_t \times \hat{x}_i \tag{6}$$

$$\Phi_{t+1} = \frac{z_{t+1}}{z_t} \tag{7}$$

$\hat{x}_i$  : 예측주기 이후 상태벡터(교통량/속도)

$\Phi_t$  : 시점  $t$ 에서의 상태전이행렬( $\Phi_t = 1$ )

<Step 6> 장래예측 및 다음 예측주기 오차 공분산 산정

$$\hat{x}_{t+1} = \Phi_t \times \hat{x}_t \tag{8}$$

$$P_{t+1} = \Phi_t \times P_t \times \Phi_t + Q_t \tag{9}$$

$$Q_t = (\hat{x}_t - \Phi_t \times \hat{x}_{t-1})^2 \tag{10}$$

$Q_t$  : 시점  $t$ 에서의 시스템 잡음, 상태에러분산

칼만필터 알고리즘은 크게 예측과정과 추정과정으로 구분되어 진다. 예측과정에서는 직전의 추정값( $\hat{x}_t$ )과 오차공분산( $P_t$ )을 입력받아 최종적으로 예측값( $\hat{x}_{t+1}$ ,  $P_{t+1}$ )을 출력하게 된다. 추정과정에서는 예측과정의 예측값( $\hat{x}_t$ ,  $P_t$ )과 관측값( $z_t$ )을 전달 받아 입력값으로 사용하여 추정값( $\hat{x}_t$ )과 오차공분산( $P_t$ )을 출력하게 된다. 칼만필터 알고리즘에서는 예측과정과 추정과정을 정확하게 구분할 필요가 있다. 추정값은 분석가가 실제로 예측하고자 하는 값을 의미하며, 예측값은 칼만필터 알고리즘 내에서 추정값을 계산하기 위한 예측값을 의미한다.

### 3. 온실가스 배출량 산정방법

온실가스 배출 계수식은 국립환경과학원의 “수송부문 온실가스 기후변화대응 시스템 구축II, (2009)” 연구의 결과물을 적용하였다. 온실가스 배출량 산정을 위해서는 자동차의 등급별, 유형별, 연료별, 연식 등에 따라 각각의 배출 계수식을 적용하여 산정하도록 개발되어 있다. 하지만, 이러한 모든 부분을 적용하기 위한 활동자료 수집의 한계가 있으므로, 본 연구에서는 대표차종으로 승용차, 버스, 화물차로 구분하여 구축하였다.

온실가스 배출량 산정은 기본적으로 Network Occupancy Rate(NOR)를 고려하여 각 차종별/연료별 배출 계수식 이용하여 산정하였다. NOR은 차종별 신뢰성 높은 배출량 원단위 산정을 위해서 개발된 지표이다. 지표의 산정의 기본 개념은 해당 차종 중에 차량의 크기(경형, 소형, 중형, 대형), 연료(휘발유, 경유, LPG)별로 해당 차량들이 실제 도로를 주행한 거리(VKT, Vehicle Kilometer Traveled) 즉, 네트워크에 점유된 비율을 의미한다. 기존의 다수의 연구에서 대표차종을 선정하거나 자동차 등록대수를 기준으로 원단위를 산정하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 하지만 이러한 방법은 정확한 배출량 산정에 한계가 있다.

본 연구에서는 교통안전공단의 ‘2012년도 자동차 주행거리 실태분석 연구(2013)’ 자료를 활용하여 차종별 실 주행거리 기반의 NOR을 산정하였다.

$$NOR_{i,j} = \frac{VKT_{i,j}}{\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} VKT_{a,b}} \quad \forall i, j \tag{11}$$

$VKT$  : 총 주행거리(백만km)  $j$  : 연료 ( $j, b \in B, B = \{휘발유, 경유, LPG\}$ )  
 $i$  : 차량크기( $i, a \in A, A = \{경/소/중/대형\}$ )

<Table 1>은 차종별, 연료별 온실가스 배출량 산정을 위한 배출계수식과, 차량별로 실제 도로구간을 점유한 비율을 나타내고 있다.

온실가스 배출량 산정을 위해서는 차종별 온실가스 배출량 원단위, 도로연장, 차종별 교통량자료가 필요하다. 차종별 온실가스 배출량 원단위는 NOR값과 배출계수의 곱을 합산하여 산정하며, 차종별 차량 1대당 1km 주행시 온실가스 배출량을 의미한다. 도로연장은 고속도로 통계자료를 이용하였고, 차종구성비는 교통량 조사자료를 활용하였다. 배출량 산정을 위해 사용되는 교통량, 속도(5분 단위)는 칼만필터 알고리즘으로 예측된 값을 적용하여 배출량을 산정하게 된다.

$$Emissions = \sum_{a=1}^3 (Length \times EU_a \times Volume_a) \tag{12}$$

$$EU_a = \sum_b (NOR_b \times EF_b) \tag{13}$$

- Length* : 도로연장(km)
- Volume<sub>a</sub>* : 차종별 교통량(대/5분)
- EU<sub>a</sub>* : 차종별 배출량 원단위(g/대·km)
- a* : 차종(승용차, 버스, 화물차)
- EF<sub>b</sub>* : 차종별 연료별 배출계수(g/대·km)
- b* : 차종별 연료별 구분

〈Table 1〉 CO<sub>2</sub> emission factor

Car type		Fuel	Network Occupancy Rate	Emission Factor	
				Speed	formula
passenger car	compact	gasoline	6.8%	more than 65.4km/h	Y=887.12×V <sup>(-0.5703)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=0.9303×V + 30.821
	small	gasoline	6.7%	less than 65.4km/h	Y=1313.7×V <sup>(-0.6)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=0.5447×V + 78.746
		diesel	3.2%	less than 65.4km/h	Y=1133.1×V <sup>(-0.587)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=0.6175×V + 62.478
	midsize	gasoline	27.3%	less than 65.4km/h	Y=1555.5×V <sup>(-0.578)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=0.0797×V + 144.19
		diesel	13.1%	less than 65.4km/h	Y=1818.1×V <sup>(-0.6643)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=0.3184×V + 95.66
		LPG	12.3%	less than 65.4km/h	Y=1539.4×V <sup>(-0.5748)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=0.5056×V + 117.39
large	gasoline	21.0%	less than 65.4km/h	Y=1970.1×V <sup>(-0.6187)</sup>	
			more than 65.4km/h	Y=0.1791×V + 145.07	
	LPG	9.5%	less than 65.4km/h	Y=1849.8×V <sup>(-0.6164)</sup>	
			more than 65.4km/h	Y=-0.1348×V + 159.9	
bus	city-bus	CNG	78.4%	-	Y=5019.8×V <sup>(-0.5582)</sup>
	express-bus	diesel	21.6%	less than 65.4km/h	Y=2676.7×V <sup>(-0.3344)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=1.3034×V + 548.56
truck	small	diesel	87.0%	less than 65.4km/h	Y=1135.2×V <sup>(-0.4668)</sup>
				more than 65.4km/h	Y=2.2307×V + 25.76
	midsize	diesel	9.1%	Y=0.1029×V <sup>2</sup> - 14.937V + 798.9	
	large	diesel	4.0%	Y=6240.3×V <sup>(-0.3829)</sup>	



#### 4. 개발모형의 평가지표

개발된 모형의 평가를 위한 지표로는 ① 평균절대퍼센트오차(Mean Absolute Percentage Error(%), MAPE), ② 평균절대오차(Mean Absolute Error(분), MAE)를 이용하여 검증을 수행하였다.

$$MAPE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \times 100, y_i > 0 \quad (14)$$

$$MAE(\text{대 or km/h}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (15)$$

$N$  : 분석 자료의 개수

$\hat{y}_i$  :  $i$ 번째 예측값

$y_i$  :  $i$ 번째 관측값

### IV. 개발모형 적용 및 평가

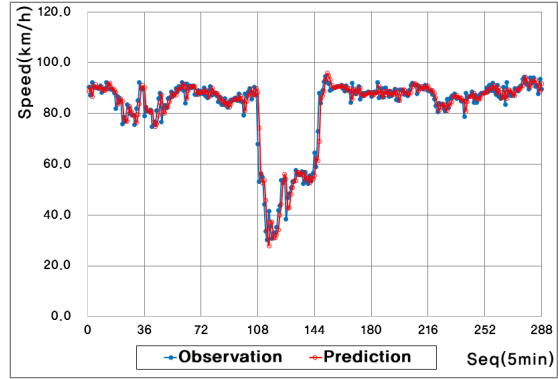
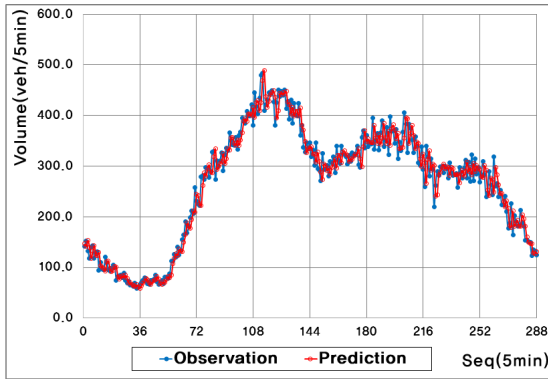
#### 1. 분석데이터

본 연구에서 교통량, 속도를 예측하기 위해 사용된 자료의 공간적 범위는 영동고속도로 동수원IC~신갈JC 구간을 대상으로 하였고, 시간적 범위는 2010년 10월 셋째주 1주일 자료를 이용하였다. 분석에 사용된 data는 30초 집계자료로 차로별로 교통량, 점유율, 통행속도 정보를 갖고 있다. 분석시에는 해당자료를 5분 단위 집계자료로 가공하여 사용하였다. 자료의 가공은 차로별로 해당 시퀀스 내에 수집된 데이터를 기준으로 하여 가중평균 하였다. 또한 누락된 자료의 경우는 해당시점  $t$ 를 기준으로  $t-1, t+1$ 자료를 평균하여 보정하는 작업을 수행하였다. 또한 요일별로 통행특성의 변화에 따른 모형의 예측 정확도를 비교 평가하기 위하여 1주일(월~일요일) 치의 자료를 분석에 사용하였다.

#### 2. 교통변수 예측결과

본 연구에서는 교통량과 속도 예측을 위해 칼만필터 알고리즘을 이용하였다. 칼만필터 모형은 잡음이 섞여 있는 기존의 관측값을 최소 제곱법을 통해 분석함으로써 일정 시간 이후를 예측할 수 있도록 하는 최적의 수학적 계산 과정으로 알려져 있다. 본 모형을 교통량과 통행속도에 적용한 결과 관측값과 예측값은 유사한 행태를 보이고 있으며, 실시간으로 온실가스 배출량 산정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

다음 그림은 교통량의 변동이 가장 큰 일요일의 예측결과와 통행속도의 변동이 가장 큰 토요일의 예측결과이다. 통행속도의 경우 9시 이후에 급격히 속도가 감소하여 12시 이후에 회복되는 행태를 유사하게 예측하는 것으로 나타났다.



<Fig. 1> Traffic volume prediction result(sunday)    <Fig. 2> Traffic speed prediction result(saturday)

요일별로 온실가스 배출량의 특성을 분석하기 위하여 1주일치의 교통량/속도 자료를 분석에 사용하였다. 교통량 1주일 자료에 대한 평균 MAPE값은 약 7.7%, MAE는 16.9대, 통행속도는 평균 MAPE 2.7%, MAE는 2.2km/h으로 예측되었다.

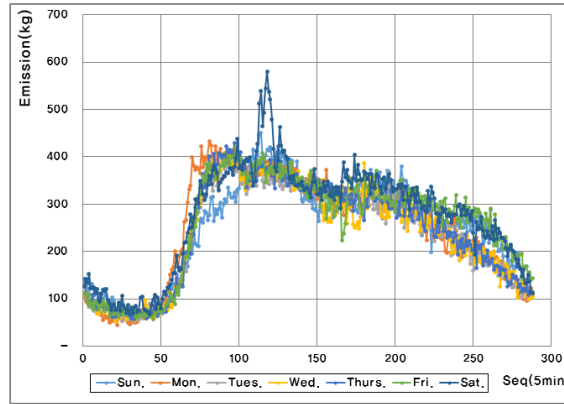
<Table 2> Traffic volume/speed prediction result

Day of the week	Volume		Speed	
	MAE(veh)	MAPE(%)	MAE(veh)	MAPE(%)
Sun.	18.8	7.7%	2.0	2.3%
Mon.	16.0	7.2%	2.2	2.7%
Tues.	16.0	7.4%	2.2	2.6%
Wed.	17.6	7.6%	2.2	2.6%
Thurs.	15.6	6.6%	2.2	2.6%
Fri.	17.1	6.9%	2.1	2.5%
Sat.	17.1	6.9%	2.5	3.6%
Avg.	16.9	7.2%	2.2	2.7%

### 3. 온실가스 배출량 산정결과

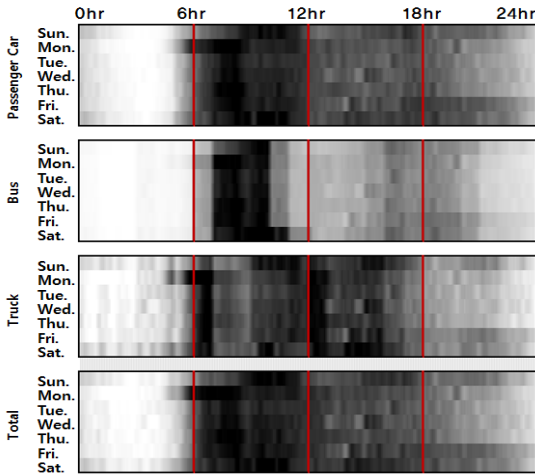
본 연구에서는 영동고속도로 동수원IC~신갈JC 구간을 대상으로 실시간으로 수집되는 교통변수(교통량, 속도)를 이용하여 장래 5분 후의 변화를 예측하였고, 이를 통해 실시간으로 온실가스 배출량을 산정할 수 있는 모니터링 시스템을 제안하였다.

요일별 시간대별 온실가스 배출량 산정결과는 요일별로 큰 차이를 보이지는 않지만 토요일 9시~12시 사이에 온실가스 배출량이 크게 증가하는 행태를 보이는 것으로 나타났다.

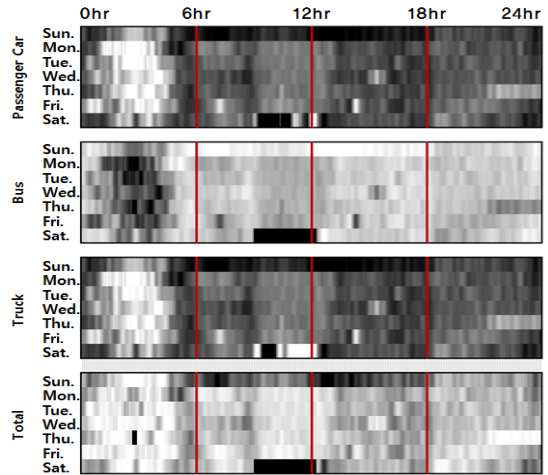


〈Fig. 3〉 Greenhouse gas emission results

다음 그림은 차종별 시간대별(5분 단위)로 온실가스 배출량 총량의 변화량을 표현한 것이다. 명암의 표출은 차종별로 일주일치의 각 시퀀스별 배출량을 기준으로 하여 배출량이 많은 시간대에는 어두운 색으로 표출하였다. 또한, 해당 그림은 각 차종별로 시간대에 따른 배출량의 변화를 상대적으로 비교하기 위하여 표출한 그림으로, 차종 간의 비교는 불가능하다. 온실가스 배출량을 차종별로 살펴보면 승용차는 오전(6~12시), 버스는 출근 시(7~9시), 화물차는 6~18시에 온실가스 배출량이 많이 배출되는 것으로 분석되었다.



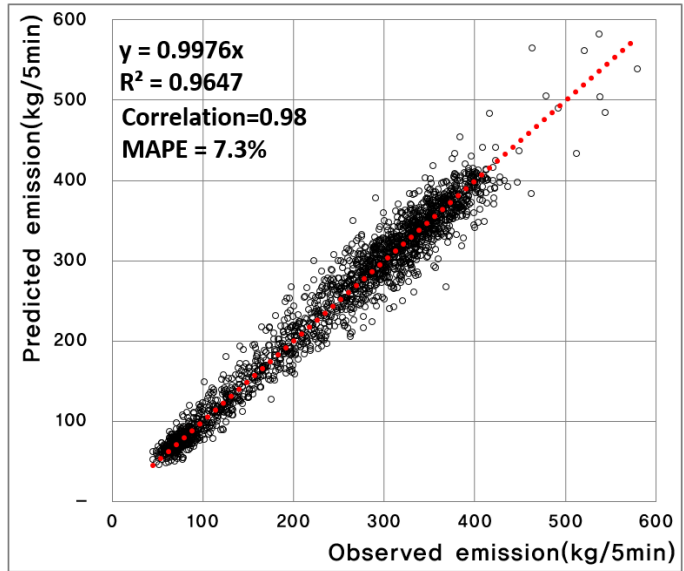
〈Fig. 4〉 Total amount of GHG emissions by time of vehicle type



〈Fig. 5〉 Unit GHG emissions by time of vehicle type

다음 그림은 동일한 방법으로 차종별 시간대별 배출량 원단위를 표출한 그림이다. 배출량 원단위 산정시 속도는 해당구간의 평균속도를 적용하여 산정한 결과이다. 동일한 속도를 적용하여 배출량 원단위를 산정한 결과 차종별로 차이를 보였다.

교통지표의 관측값을 기준으로 산정된 배출량과 예측된 값을 기준으로 산정된 배출량(kg/5분)을 비교한 결과  $R^2=0.96$ , 상관계수는 0.98, MAPE는 7.3%로 나타났고, 일주일 치에 대한 배출량 총량의 오차는 0.04%로 분석되었다.



〈Fig. 6〉 GHG emission prediction result

## VI. 결 론

2008년 저탄소 녹색 성장이 국가 비전으로 선언된 이후, 우리나라는 2020년 까지 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 30%를 감축하기로 발표하였다. 이중 교통부문 온실가스 감축목표는 2020년 배출전망치(BAU) 대비 34.3%로 국가 온실가스 중기 감축목표 달성을 위하여 그린카 개발과 온실가스 감축을 위한 다양한 정책을 수행하고 있다.

교통운영 측면에서 온실가스 배출량을 저감하기 위해서는 현재 도로상에서 어느 정도 온실가스가 배출되는지를 실시간으로 모니터링 할 수 있어야 한다. 하지만 현재까지 우리나라에서 실시간으로 교통부문의 온실가스 배출량을 모니터링 할 수 있는 시스템은 구축되어있지 못하다. 본 연구에서는 실시간으로 수집되는 교통자료를 이용하여 5분 후의 상태를 예측하고 이를 통해 실시간 온실가스 배출량 모니터링 시스템을 구축할 수 있는 방법론을 제안하였다. 온실가스 배출량 산정에서 가장 중요한 변수인 교통량과 속도에 대한 예측 결과는 일주일치 자료를 기준으로 각각 MAPE는 7.2%, 2.7%로 오차율이 크지 않아 온실가스 배출량 산정을 위한 변수로 사용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한, 차종별 시간대별로 온실가스 배출량의 변화량을 분석한 결과를 바탕으로 고속도로 운영의 방향을 설정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 충분한 데이터가 누적되면 본 연구에서 적용된 칼만필터 외에도 다양한 모형을 이용한 예측도 가능하므로 향후 비교연구가 필요할 것으로 판단된다.

현재까지 고속도로의 속도관리 목표는 이동성 중심으로 수행되어 왔으나 시대가 변함에 따라 효율성 측면뿐만 아니라 환경의 가치가 점차 증가하고 있으며, 기상이변 증가로 경제적 피해가 증가하고 있다. 즉, 외부적 여건변화에 따라 환경가치가 상승할 경우 도로의 속도관리 방안의 변화가 필요하다.

본 연구에서 제안하는 고속도로 구간의 실시간 온실가스 배출량 모니터링 시스템의 활용방안은 다음과 같다. 첫째, 환경비용을 고려한 고속도로 운영전략 수립 시 활용이 가능할 것이다. 둘째, 기후변화를 대비한

도로운영정책 수립 시 활용이 가능할 것이다. 셋째, 교통부문에서 발생하는 온실가스 배출량을 보다 정확하게 산정할 수 있을 것이다. 넷째, 내비게이션 정보 제공시 환경을 고려한 경로정보 제공 시에도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- Bae S. H., Lee H. J.(2004), "An Application of Kalman Filter Algorithm to Real-Time Traffic Information," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 24, no. 4, pp. 543-547.
- Chang H. H., Lee Y. I., Yoon B. J., and Baek S. K.(2012), "Dynamic near-term traffic flow prediction: system-oriented approach based on past experiences," *IET: Intelligent Transport Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 292-305.
- Han D. H., Hong S. H and Lee S. B.(2012), "Development of CO2 Emission Estimating Methodology of Electronic Toll Collection System Based on Instantaneous Speed and Acceleration," *Journal of Transport Research*, vol. 19, no. 3, pp.63-76.
- IPCC(2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 1, General Guidance and Reporting.
- Kim T. H., Lee S. I., Kim Y. I and Rho J. H.(2010), "Comparison Study of Generated Greenhouse Gas(GHG) Amount Estimation from Road Transportation," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 58, no. 9, pp.67-73.
- Kim W. C and Kim J. T.(2012), "Carbon Reduction Effect of Traffic Operational Methods Itemized in National Project for Advanced Traffic Operation and Management," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 32, no. 1d, pp.1-11.
- Lee C. W., Park J. Y., Kho S. Y.(2002), "Prediction of Path Travel Time Using Kalman Filter," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 22, no. 5, pp. 871-880.
- Park J. H., Kim W. H., Nam D. H and Lee Y. I.(2007), "A Study on the Strategy and the Evaluation of Traffic Operation Considering the Environmental Justice in Emission," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 25, no. 3, pp.7-17.
- Rakha, H. Van A. M., Ahn K. and Trani A. A.(2000). "Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no.1738, pp.56-67.
- Ryu B. Y and Bae S. H.(2012), "Estimation of Greenhouse Gas in the Urban Area by Using Advanced Traffic Management Systems," *Journal of Transport Research*, vol. 19, no. 3, pp.119-134.
- Ryu B. Y., Bae S. H., Han S. Y and Kim G. Y.(2011), "A Comparative Study for Estimation of Greenhouse Gas for Local Government's Sustainable Transport," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 29, no. 5, pp.55-65.