

첨단차량 도입 시를 고려한 환경적 효과의 정량적 분석 방법론 개발

Development of Quantitative Analysis Methodology on Environmental Effect through Adaptation of Advanced Safety Vehicle

최 지 은*
(Ji-Eun Choi)

배 상 훈**
(Sang-Hoon Bae)

요 약

도로 용량은 제한적이나 교통수요의 증가로 인해 지체가 발생하고 온실가스 배출량을 증대시킨다. 최근 온실가스를 감축하기 위한 노력의 일환으로 청정개발체제 등이 활용되고 있다. 그러나 교통부문의 청정개발체제 채택사례는 아직 미흡한 실정이다. 교통부문의 청정개발체제를 활성화하기 위해서는 온실가스 배출량 산정방법론 관련 추가적인 연구의 필요성이 제기된다. 따라서 본 연구에서는 청정개발체제 승인 기관인 유엔에서 채택하고 있는 베이스라인 방법론을 바탕으로 ITS 서비스 중 첨단차량 및 도로 도입 시 온실가스를 정량적으로 산정하는 방법론을 개발하였다. 교통량과 통행시간의 관계식인 BPR 함수식을 이용하여 첨단의 자동운전차량들로 구성된 교통상황과 일반 차량들로 구성된 교통상황에서의 통행시간을 각각 산출하여 속도를 비교·검토하였다. 산정된 속도 값을 국내의 도로상황을 잘 반영한 국립환경과학원의 차종별 연료별 온실가스 배출계수 식에 적용하여 CO₂ 배출량을 산정하였다. 본 연구에서 개발한 방법론의 타당성을 입증하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 안정류일 때는 첨단차량으로 구성된 도로의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량보다 증가하는 경향을 보였으나 교통량이 용량에 근접하는 불안정류일 때는 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량에 비해 현격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 불안정류 교통상황에서 시스템의 도입으로 인해 용량이 증대됨으로서 많은 교통수요를 처리하고 도로이용의 효율성이 향상됨을 알 수 있다.

Abstract

The capacity of highway is restricted and traffic congestion is caused by increasing traffic demand. Also, greenhouse gases are increased by traffic congestion. CDM (Clean Development Mechanism) is an idea of interest to reduce greenhouse gases. However, CDM's cases applied in traffic field are rare. Thus, it is necessary that methodology to reduce greenhouse gas should be developed and applied to CDM.

A methodology for identifying greenhouse gas emissions was developed in this paper. This methodology was developed on the basis of baseline methodology registered at UN. Travel time and speed in the conventional traffic condition and in the automated traffic condition are compared by BPR function. The calculated speed applied to emission factor equation and then CO₂ emissions was calculated. A simulation was executed to evaluate the validity of the developed methodology. In the result, advanced vehicle's CO₂ emissions are more than conventional vehicle's CO₂ emissions in the stable flow condition. However, advanced vehicle's CO₂ emissions are less than conventional vehicle's CO₂ emissions in the unstable flow condition. It is assure that capacity of highway is enhanced and efficiency of highway is improved by adopting advanced safety vehicle in the smart road.

Key words : CDM(Clean Development Mechanism), AVHS(Advanced Vehicle & Highway Systems), greenhouse gas, emissions factor, BPR(Bureau of Public Road)

† 이 논문은 국토해양부 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

* 주저자 : 부경대학교 위성정보과학과 석사과정

** 공저자 및 교신저자 : 부경대학교 위성정보과학과 부교수

† 논문접수일 : 2010년 5월 14일

† 논문심사일 : 2010년 6월 20일(1차), 2010년 10월 21일(2차)

† 게재확정일 : 2010년 10월 22일

I. 서 론

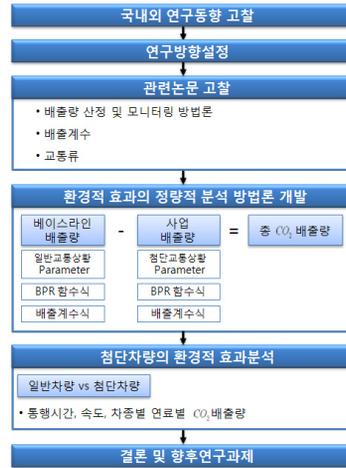
1. 연구 배경 및 목적

도로 용량에 근접하는 교통수요는 지체를 발생 시킨다. 이러한 지체는 온실가스 배출량을 증가시킨다. 따라서 온실가스 감축을 위한 방안 중의 하나로 청정개발체제(Clean Development Mechanism)가 활용되고 있다. CDM 사업은 교토의정서에 의해서 온실가스 의무감축국가가 비 의무국가에 자본과 기술을 투자해서 온실가스 감축사업을 수행하여 달성한 실적을 자국의 감축실적으로 인정받는 제도이다. 교통부문의 청정개발체제 활용사례는 다른 부문의 청정개발체제 활용사례에 비해 아직 미비하다. 교통부문의 온실가스를 정확하게 산정하고 청정개발체제 사업을 활성화하기 위해서는 온실가스 배출량 산정방법론에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 UNFCCC(United Nations Framework convention on Climate Change)에 승인된 베이스라인 방법론을 ITS(Intelligent Transport Systems)의 주요 서비스인 첨단차량 및 도로분야(Advanced Vehicle & Highway Systems)에 접목시켜 온실가스 산정방법론을 개발하고자 하였다. ITS 서비스 중 AVHS는 IT, 통신 등과 같은 첨단기술을 도로와 차량에 적용하여 차량 간(V2V), 차량과 도로 간(V2I) 정보교환을 통해 운전자가 보다 빠르고 안전하게 주행할 수 있도록 지원해준다. 이러한 AVHS 도입 시 용량 증대로 인한 통행시간, 속도, CO₂ 배출량을 정량적으로 산정하는 방법론을 제시하였다. 속도에 따른 배출계수 식 특성을 파악하고 교통량에 따른 속도변화, 속도에 따른 CO₂ 배출량에 대해서 분석하고자 하였다.

2. 연구수행 방법

본 연구는 국내외 연구동향을 고찰하여 연구방향을 설정하였다. 관련 논문의 고찰을 통해 첨단차량 및 도로 도입 시 온실가스를 정량적으로 산정하는 방법론을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 방법론의 타당성을 입증하고자 시뮬레이션을 통해



<그림 1> 연구수행절차
<Fig 1> Flow of Study

일반차량과 첨단차량의 통행시간, 속도, CO₂ 배출량을 각각 산출하여 비교·분석하였다.

본 연구의 수행을 위한 절차는 <그림 1>과 같다.

II. 문헌고찰

1. 배출량 산정 및 모니터링 방법론

AVHS환경하의 온실가스 배출량 산정 방법론을 개발하기 위해 UNFCCC에 승인된 CDM 사업의 베이스라인 방법론을 고찰하였다. 베이스라인 배출량은 CDM 사업을 수행하기 전에 발생하는 온실가스의 양을 말한다.

UNFCCC(2006)에 승인된 BRT(Bus Rapid Transit)프로젝트의 베이스라인 방법론은 Gruetter Consulting에서 개발하였다[1]. 베이스라인 배출량은 BRT프로젝트 시행 전 배출되는 온실가스 배출량을 말하며 운송수단별 승객 당 운송배출계수와 승객 수 곱으로 계산하였다. 운송수단별 승객 당 운송배출계수는 승객 당 운송배출계수, 운송거리의 보정계수, 기술적 개선요소로 산정하였다. 사업배출량은 BRT프로젝트가 시행되었을 때 발생하는 온실가스배출량으로써 연료별 연료소모량과 연료별 배출량으로 산정하였다. 누출배출량은 공사, 도로 변화, 수단전환 등의 리바운드 효과에 의해 발생하는 온실가스배출량을 산정하였다.

UNFCCC(2009)에 승인된 MRT(Mass Rapid Transit) 프로젝트의 베이스라인 방법론은 Grutter Consulting AG가 개발하였다[2]. 베이스라인 배출량은 승객당 조사를 통해 산출되며 조사방법은 일주일 동안의 승객수를 조사하여 조사된 승객과 확장계수(Expansion Factor)의 곱을 통해 계산하였다. 사업배출량은 직접적인 배출량과 간접적인 배출량의 합을 통해 산정하였다. 직접적인 배출량은 연료별 연료소모량에 의해 발생하는 배출량을 말하며 간접적인 배출량은 승객의 최종출발지에서 사업구간까지와 사업구간 도착지점에서 최종목적지까지 이동하는데 발생하는 배출량을 말한다. 누출배출량은 MRT 프로젝트를 시행함으로써 버스와 택시의 수단전환에 의해 발생하는 배출량, 속도변화에 따른 도로의 혼잡완화로 인한 배출량으로 산정하였다. 따라서 기존의 UNFCCC에 승인된 교통부문의 베이스라인 방법론이 적을 뿐만 아니라 교통부문의 온실가스저감을 위한 연구가 미흡한 실정임을 알 수 있었다.

2. 배출계수

본 연구에서는 배출량 산정 방법론에 적용될 배출계수에 대해서 고찰하였다. 배출계수는 차량에서 발생하는 온실가스 배출량을 정확하게 측정하고자 차종별 등록대수, 연료의 종류, 연도별 구성비 및 차종별 주행특성, 통행량, 일일 주행거리 등의 자료를 기초로 개발한 모형을 말한다.

국립환경과학원(2009)은 우리나라 실정에 적합한 온실가스 배출량을 산정하기 위해 차종별, 연료별, 배출가스 제어기술별 자동차 온실가스 배출특성을 반영한 실측자료를 DB화 하였다. 이러한 실측자료를 활용하여 온실가스 배출계수 식을 개발하였다[3]. 또한 공회전 제한장치 부착차량에 대한 온실가스 저감효과를 평가하였다.

Amab Bose 외(2000)은 ICC(Intelligent Cruise Control) 시스템의 환경적 성능평가를 수행하였다. CMEM(Comprehensive Modal Emissions Model)을 이용하여 운전 모드별 연료소모량과 배기가스 배출량을

산정하였다. ICC 차량이 10% 존재한다면 연료소모량은 8.5% 감소하고 배기가스배출량은 8.1%~18.4% 감소하는 것으로 나타났다[4]. 하지만 본 연구에서는 운전 모드에만 초점을 두어 배기가스 배출량을 산정하였으므로 연료별 연식별로 배기가스 배출량이 달라질 것으로 판단된다.

Matthew Barth(2000)은 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)의 CMEM(Comprehensive Modal Emissions Model)을 기반으로 속도, 엔진-도로, 시동 상황을 반영하여 배출모형을 개발하였다[5]. 일반적인 교통상황, 이상적인 속도로 달리는 교통상황, AHS 교통상황 3가지 시나리오를 토대로 시뮬레이션을 수행하여 LOS별 CO, NOx, HC 배출량을 산출하여 분석하였다.

기존의 배출계수 관련 연구는 온실가스를 저감 시키고자 국외에서는 가감속, 엔진상태, 운전행태, 다양한 교통상황을 반영하여 활발히 연구가 진행되고 있다. 하지만 국내에서는 최근 들어 실험을 통해 국내 도로상황을 반영한 차종별, 연료별 온실가스 배출계수 산출 식을 도출하였다. 국외에 비해 국내의 배출계수 관련 연구가 아직 초기 단계에 머물러 있다고 볼 수 있다.

3. 교통류

본 연구에서는 미래의 교통상황에서 발생하는 온실가스 배출량을 산출하기 위해서 첨단 차량 및 도로환경에서의 통행시간, 속도, 교통량, 용량 간의 관계를 파악하고자 교통류 관련 연구를 고찰하였다.

Yun, Seongsoon 외(2004)는 기존의 BPR(Bureau of Public Roads) 함수에 트럭 교통량 변수를 포함하여, 새로운 BPR 함수를 개발하였다[6]. 혼잡속도는 BPR식을 이용하여 자유속도, 교통량, 용량을 계산하였다. 파라미터는 복합선형회귀분석을 통해 도출되어 BPR식에 적용하였다.

Jun Ma(2000)는 AHS(Automated Highway Systems)의 교통류, 통행시간, 밀도 관계에 대해서 연구하여 AHS의 교통류 모형을 개발하였다[7]. 교통량을 차두시간과 용량에 의해 산정하였다. 용량은 평균 차

두시간-교통류 관계식과 속도-밀도 관계식을 이용하여 계산하였다.

Michiel M 외(1999)는 ICC(Intelligent cruise control)이 도입되었을 때 도로 용량을 평가하고 교통류를 분석하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 편도 2차로 고속도로에서 ICC가 장착된 차량의 차두시간이 1.6초일 때 용량이 4,500대/시로 도출되었다[8].

Tang-Hhien Chang 외(1997)는 첨단차량과 일반차량이 함께 주행하는 교통상황에 대해서 교통류 특성을 분석하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 첨단차량만 주행하는 도로의 용량은 일반차량이 다니는 도로용량보다 33% 증가하는 것으로 도출되었다[9].

기존의 교통류 관련 연구에서는 주로 미국의 공로국에서 교통량과 통행시간의 관계를 반영하여 만든 BPR식을 가장 많이 사용하였다. BPR식은 교통지체함수로 수요추정의 노선선정단계에서 국내의 가장 많이 사용되고 있는 함수이다. 따라서 본 연구에서는 국내외 가장 일반적으로 사용되는 BPR식을 이용하여 첨단 교통상황과 일반 교통상황에서의 통행시간, 속도를 산정하여 배출계수 식에 적용하였다.

III. 환경적 효과의 정량적 분석 방법론

본 연구에서는 UNFCCC에 승인된 베이스라인 방법론을 바탕으로 미래의 첨단차량이 주행할 때 발생하는 온실가스배출량 산출방법론을 개발하여 환경적 효과 분석을 수행하고자 하였다. UNFCCC에 승인된 베이스라인 방법론은 베이스라인 배출량, 사업배출량, 누출배출량으로 구성되어 있으며 다음과 같이 총배출량을 산정한다.

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (1)$$

- ER_y : y 연도의 감소된 배출량(tCO_2eq)
- BE_y : y 연도의 베이스라인 배출량(tCO_2eq)
- PE_y : y 연도의 사업 배출량(tCO_2eq)
- LE_y : y 연도의 누출 배출량(tCO_2eq)

사업배출량은 CDM 사업 수행 시 발생하는 온실가스의 양을 말한다. 누출 배출량은 CDM 사업수행 시 사업 범위 외에서 발생하지만 CDM 사업과 관련이 있는 온실가스 배출량을 의미한다. 즉, 사업수행으로 인해 리바운드 효과로 발생하는 배출량이다.

본 연구에서는 사업시행 전의 베이스라인 배출량을 현재의 일반차량이 고속도로에서 주행할 때 발생하는 온실가스 배출량으로 산정하였다. 사업배출량은 미래의 첨단차량 및 도로환경에서 발생하는 온실가스 배출량으로 가정하여 산정하였다. 본 연구에서 누출배출량은 도로에 첨단장비를 설치하는 공사로 인해 발생하는 배출량, 첨단차량 도입 시 일반차량을 폐기함으로써 발생하는 배출량이라 할 수 있다. 이러한 배출량은 정량적으로 산정하기 어려워 본 연구에서 배제하였다.

본 연구에서는 차량에 의해 발생하는 온실가스 총배출량에서 88.6% 차지하는 CO₂ 만 고려하였으며 국내 도로상황을 잘 반영한 국립환경과학원[3]의 배출계수 식을 이용하여 CO₂ 배출량을 산정하고 분석하였다.

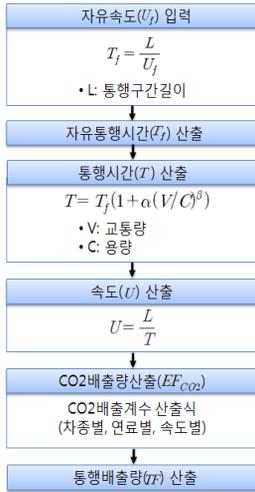
1. 베이스라인 배출량 산정

베이스라인 배출량은 미래의 첨단기술이 적용되지 않은 일반차량이 고속도로에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량이다. 베이스라인은 속도에 따른 통행배출량, 교통량, 통행거리에 의해서 다음과 같이 산출된다.

$$BE_y = TF \times l \times 24 \times 365 \quad (2)$$

- BE_y : 베이스라인 배출량(g/yr)
- TF : 통행배출량(g/km · h)
- l : 통행거리(km)

통행배출량(TF)은 국립환경과학원[3]에서 제시한 차종별 연료별 온실가스 배출계수 식을 이용하여 속도에 따른 CO₂ 배출량을 산출한다. 속도는 산출된 통행시간과 통행거리를 BPR 함수식에 적용하여 산정한다. 통행배출량 산출을 위한 흐름도는 다음과 같다.



〈그림 2〉 통행배출량 산출 흐름도
〈Fig 2〉 Flow Chart of Trip Emissions Calculation

통행구간의 자유속도(U_f)와 통행구간길이를 통해서 자유통행시간을 산출한다. BPR 함수식에 자유통행시간, 교통량, 용량을 적용하여 교통량별 통행시간을 구한다. 산정된 통행시간, 통행구간길이를 통해 속도를 계산하고 CO₂ 배출계수 식에 적용

하여 CO₂ 배출량을 산정한다.

자유속도, 통행구간길이를 통해 자유통행시간을 다음과 같이 구한다.

$$T_f = \frac{L}{U_f} \tag{3}$$

- T_f : 자유통행시간(h)
- L : 통행구간길이(km)
- U_f : 자유통행속도(km/h)

산정된 자유통행시간과 통행구간에 대한 교통량, 용량을 BPR 함수식에 적용하여 통행시간을 산정한다.

〈표 1〉 일반고속도로에서의 BPR 파라미터
〈Table 1〉 BPR's parameters of manual highway

고속도로 (편도)	자유속도 (km/h)	용량 (pcphpl)	최종결과	
			α	β
1차로	80	1,600	3.931	5.316
2차로	117	2,200	1.459	1.943
3차로 이상	119	2,200	3.210	5.936

〈표 2〉 CO₂ 배출계수 식
〈Table 2〉 CO₂ Emission factor equation

차 종	연 료	차 속	배출계수 산출식
승용차	경 형	휘발유	65.4km/h 미만 $Y = 887.12 U^{-0.5703}$
		65.4km/h 이상 $Y = 0.9303 U + 30.821$	
	소 형	휘발유	65.4km/h 미만 $Y = 1313.7 U^{-0.6}$
			65.4km/h 이상 $Y = 0.5447 U + 78.746$
		경 유	65.4km/h 미만 $Y = 1133.1 U^{-0.587}$
			65.4km/h 이상 $Y = 0.6175 U + 62.478$
	중 형	휘발유	65.4km/h 미만 $Y = 1555.5 U^{-0.578}$
			65.4km/h 이상 $Y = 0.0797 U + 144.19$
		경 유	65.4km/h 미만 $Y = 1818.1 U^{-0.6643}$
			65.4km/h 이상 $Y = 0.3184 U + 95.66$
		LPG	65.4km/h 미만 $Y = 1539.4 U^{-0.5748}$
			65.4km/h 이상 $Y = 0.5056 U + 117.39$
대 형	휘발유	65.4km/h 미만 $Y = 1970.1 U^{-0.6187}$	
		65.4km/h 이상 $Y = 0.1791 U + 145.07$	
	LPG	65.4km/h 미만 $Y = 1849.8 U^{-0.6164}$	
		65.4km/h 이상 $Y = -0.1348 U + 159.9$	

$$T = T_f(1 + \alpha(V/C)^\beta) \quad (4)$$

- T : 교통량별 통행시간(h)
- T_f : 자유류 통행시간(h)
- V : 교통량(pcph)
- C : 용량(pcphpl)

α , β 는 임용택외(2008) 논문에서 제시한 BPR 파라미터 값을 적용하였다. 임용택외(2008)은 <표 1>에서와 같이 BPR 함수식의 파라미터를 황금분할법을 이용하여 고속도로와 국도에 맞는 최적값을 추정하였다[10].

BPR식을 통해 산출된 통행시간과 통행구간길이를 통해 속도를 다음과 같이 산정한다.

$$U = \frac{L}{T} \quad (5)$$

- U : 속도(km/h)
- L : 통행구간길이(km)
- T : 통행량별 통행시간(h)

산출된 속도는 차종별, 연료별, 속도에 따른 배출계수 식에 적용하여 CO₂ 배출량을 산출한다. 통행배출량은 다음과 같이 계산한다.

$$TF = \sum_i (EF_{CO_2,i,x} \times \frac{N_{i,x}}{N_i} \times V) \quad (6)$$

- TF : 통행배출량(g/km · h)
- $N_{x,i}$: 차종 i 이고 연료 x 인 차량 수(대)
- N_i : 차종 i 인 전체 차량 수(대)
- V : 교통량(pcph)
- x : 연료(휘발유, LPG, 경유)
- i : 차종(경차, 소형, 중형, 대형)
- $EF_{CO_2,x,i}$: 차량당 속도에 따른 CO₂ 배출량(g/km)

국립환경과학원[3]에서 제시하고 있는 승용차의 CO₂ 배출계수 식은 <표 2>와 같다.

2. 사업 배출량 산정

사업 배출량은 미래의 첨단차량 및 도로 환경하

에서 발생하는 CO₂ 배출량이다. 본 연구에서 언급되는 첨단차량은 수소, 연료전지 등과 같은 천연연료를 사용하는 차량이 아니라 차량과 차량 간, 차량과 도로 간 통신을 통해 추종거동, 차로변경 기능 등이 구현되어 자동으로 제어하는 차량을 말한다. 이러한 첨단차량은 속도에 따라 안전거리를 유지하며 주행하므로 교통소통을 원활하게 해준다. 또한 위험한 상황을 미리 감지하여 주행함으로써 충돌을 예방하고 운전자가 보다 안전하게 운전할 수 있도록 지원해준다.

사업 배출량은 베이스라인 배출량의 산출 방식과 같은 방법으로 산정하였다.

$$PE_y = TF' \times l \times 24 \times 365 \quad (7)$$

- PE_y : 사업 배출량(g/yr)
- TF' : 통행배출량(g/km)
- l : 통행거리(km)

사업 배출량에서 통행배출량의 산출 방법은 베이스라인 배출량의 통행배출량 산출 방법과 같다. 하지만 BPR식에 적용되는 용량은 Steven E. Shladover(1991), Joel. VanderWerf 외(2002) 등의 연구를 바탕으로 <표 3>을 따른다고 가정하였다. Steven E. Shladover(1991)은 AHS에서 고속도로 용량이 4000-7000 vplph로 증가한다고 제시하였다[11]. Joel. VanderWerf(2002)외는 일반차량, AACC (Autonomous Adaptive Cruise Control) 차량, CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control) 차량의 비율에 따라 용량을 산정하였다. 일반차량이 100% 일 때, 용량은 한 차로 당 2099대/시, AACC 차량이 100% 일 때, 용량은 한 차로 당 2142대/시, CACC 차량이 100% 일 때 한 차로 당 4259 대/시로 도출하였다[12]. 따라서 첨단차량이 통행하는 첨단도로의 용량은 현 도로용량의 2배 이상 확대될 것으로 추정된다. 이는 첨단교통상황에서의 차두거리가 충돌하지 않는 최소거리만 유지하여 주행하므로 교통용량이 증대되기 때문이다. 따라서 본 연구에서 첨단차량이 주행하는 도로의 용량을 기존의 도로용량보다 2.5배로 증가할 것으로 판단되어 <표 3>과 같이 적용하였다.

〈표 3〉 첨단도로에서의 BPR파라미터
 〈Table 3〉 BPR's Parameters of Advanced Highway

고속도로 (편도)	자유속도 (km/h)	용량/차로 (pcphpl)
1차로	80	4000
2차로	117	5500
3차로 이상	119	5500

〈표 4〉 시뮬레이션 결과
 〈Table 4〉 Results of Simulation

교통량 (대/시)	통행시간(h)		속도(km/h)	
	일반차량	첨단차량	일반차량	첨단차량
2000	0.189	0.103	52.88	97.15
2100	0.199	0.105	50.15	95.53
2200	0.210	0.106	47.58	93.90
2300	0.221	0.108	45.16	92.26
2400	0.233	0.110	42.89	90.61
2500	0.245	0.112	40.76	88.95
2600	0.258	0.115	38.76	87.30
2700	0.271	0.117	36.88	85.64
2800	0.285	0.119	35.12	83.99
2900	0.299	0.121	33.47	82.35
3000	0.313	0.124	31.92	80.73
3100	0.328	0.126	30.46	79.11
3200	0.344	0.129	29.09	77.52
3300	0.360	0.132	27.81	75.94
3400	0.376	0.134	26.60	74.38
3500	0.393	0.137	25.46	72.84

IV. 첨단차량의 환경적 효과 분석

1. 시뮬레이션 환경

본 연구에서 개발한 CO₂ 배출량 산정방법론의 타당성을 입증하고자 Matlab7.1의 코딩을 통해 일반차량과 첨단차량의 통행시간, 속도, CO₂ 배출량을 각각 산출하여 비교분석하였다. 첨단차량의 도입 시 환경적 효과 분석은 일반교통상황일 때 CO₂ 배출량과 첨단 교통상황일 때 CO₂ 배출량을 산정하여 비교분석하였다. 첨단 교통상황은 첨단도로에 첨단차량이 주행하는 상황으로 차량 간, 차량과 도로 간 실시간 정보교환을 하며 자동 제어할 수 있는 상황으로 가정하였다.

시나리오는 편도 2차로 고속도로의 10km구간에서 승용차만 주행한다고 설정하였다. 불안정한 교통류의 상황을 반영하기 위해 차로당 교통량 범위를 2000대/시~3500대/시까지 설정하여 100대/시 간격으로 증가하면서 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션

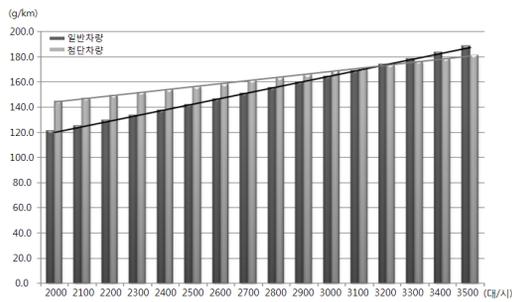
교통량 변화에 따른 일반차량과 첨단차량의 통행시간, 속도는 다음과 같이 산출되었다. 교통량이 2000대/시~3500대/시 범위를 가질 때 BPR 함수식에 의해서 일반차량의 통행시간은 0.189시~0.393시(약11분~24분), 첨단차량의 통행시간은 0.103시~0.137시(약6분~8분)로 도출되었다. <표 4>와 같이 일반차량의 속도는 52.88km/h~25.46km/h까지, 첨단차량의 속도는 97.15km/h~72.84km/h로 도출되었다. 교통량이 2100대/시일 때 일반차량의 경우,

지체가 발생하는 불안정류한 교통흐름을 가지는 것으로 보였으며 반면 첨단차량의 경우, 교통량을 처리할 수 있는 용량이 증대됨으로써 원활한 교통흐름을 가지는 것으로 나타났다.

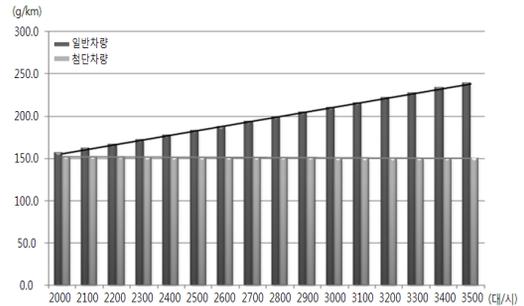
산출된 속도를 국립환경과학원[3]에서 제시한 CO₂ 배출계수 식에 적용하였다. 차종별 연료에 따른 CO₂ 배출량은 다음과 같이 도출되었다.

1) 소형 승용차

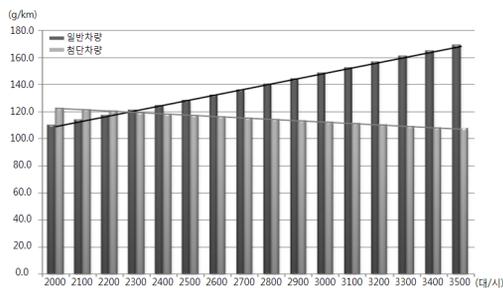
연료가 휘발유인 소형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 121.5g/km~188.4g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 144.9g/km~181.4g/km으로 나타났다. 따라서 교통량이 2000대/시~3100대/시일 때는 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 19.29%~1.03% 증가하는 것으로 나타났으나 3200대/



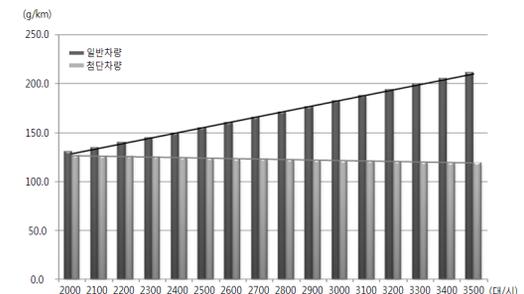
〈그림 3〉 소형차-휘발유의 CO₂ 배출량
(Fig 3) CO₂ Emissions(Compact Car-Gasoline)



〈그림 5〉 중형차-휘발유의 CO₂ 배출량
(Fig 5) CO₂ Emissions(Midsize Car-Gasoline)



〈그림 4〉 소형차-경유의 CO₂ 배출량
(Fig 4) CO₂ Emissions(Compact Car-Diesel)



〈그림 6〉 중형차-경유의 CO₂ 배출량
(Fig 6) CO₂ Emissions(Midsize Car-Diesel)

시~3500대/시에서는 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 0.24%~3.73% 감소하는 것으로 나타났다.

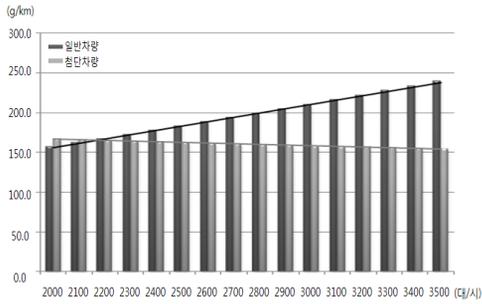
연료가 경유인 소형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 110.3g/km~169.5g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 122.5g/km~107.5g/km으로 나타났다. 따라서 교통량이 2000대/시~2100대/시일 때는 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 11.00%~2.62% 증가하는 것으로 나타났으나 2200대/시~3500대/시에서는 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 1.31%~36.59% 감소하는 것으로 나타났다.

2) 중형 승용차

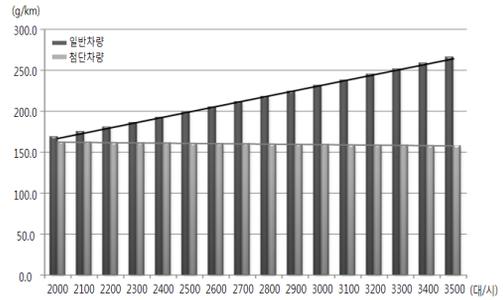
연료가 휘발유인 중형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에

서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 157.0g/km~239.5g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 151.9g/km~150.0g/km으로 나타났다. 따라서 교통량이 증가함에 따라 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 3.20%~37.37% 감소하는 것으로 나타났다.

연료가 경유인 중형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 130.3g/km~211.7g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 126.6g/km~118.9g/km으로 나타났다. 따라서 교통량이 증가함에 따라 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 2.82%~43.86% 감소하는 것으로 나타났다.



〈그림 7〉 중형차-LPG의 CO₂ 배출량
〈Fig 7〉 CO₂ Emissions(Midsize Car-LPG)



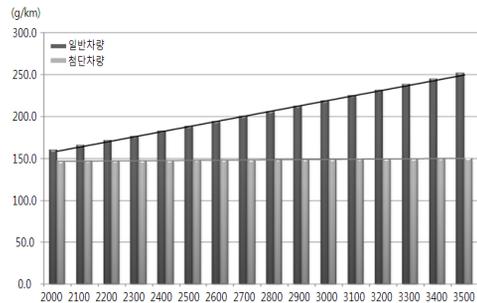
〈그림 8〉 대형차-휘발유의 CO₂ 배출량
〈Fig 8〉 CO₂ Emissions(Full-Size Car-Gasoline)

연료가 LPG인 소형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 157.3g/km~239.5g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 166.5g/km~154.2g/km으로 나타났다. 따라서 교통량이 2000대/시~2100대/시일 때는 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 11.00%~2.62% 증가하는 것으로 나타났으나 2200대/시~3500대/시에서는 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 1.38%~35.61% 감소하는 것으로 나타났다.

3) 대형 승용차

연료가 휘발유인 대형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 169.1g/km~265.9g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 162.5g/km~158.1g/km으로 나타났다. 따라서 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 3.95%~40.54% 감소하는 것으로 나타났다.

연료가 LPG인 대형차가 일반교통상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량과 첨단교통 상황에서 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. 교통량이 2000대/시~3500대/시로 변화할 때 일반교통상황



〈그림 9〉 대형차-LPG의 CO₂ 배출량
〈Fig 9〉 CO₂ Emissions(Full-Size Car-LPG)

에서 발생하는 CO₂ 배출량은 160.3g/km~251.5g/km 으로 나타났다. 첨단차량 및 도로 상황에서 발생하는 CO₂ 배출량은 146.8g/km~150.1g/km으로 나타났다. 따라서 교통량이 증가함에 따라 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량 보다 8.40%~40.33% 감소하는 것으로 나타났다.

4) 차종별 평균 CO₂ 감소량

앞서 교통량이 2000대/시~3500대/시 범위에서 변화할 때 현재의 일반 교통상황과 미래의 첨단 차량 및 도로 환경에서 발생하는 CO₂ 배출량을 각각 차종별, 연료별로 비교 분석하였다. 첨단 차량 및 도로 도입 시 승용차의 차종별 평균 CO₂ 감소량은 <표 5>와 같다.

〈표 5〉 승용차의 차종별 평균 CO₂ 감소량
(Table 5) Average Reduced CO₂ Emissions of Vehicle Category

차종	연료	평균 CO ₂ 감소량
소형	휘발유	10.59% 증가
	경유	6.76% 감소
중형	휘발유	16.11% 감소
	경유	17.85% 감소
	LPG	9.85% 감소
대형	휘발유	17.58% 감소
	LPG	20.44% 감소

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 UNFCCC에 승인된 베이스라인 방법론을 바탕으로 첨단차량이 주행할 때 발생하는 CO₂ 배출량 산출방법론을 개발하여 환경적 효과 분석을 수행하였다. 첨단 교통상황과 일반 교통상황에서의 통행시간을 산출하여 속도를 계산하였다. 계산된 속도를 국내의 도로상황을 잘 반영한 국립환경과학원[3]의 배출계수 식에 적용하여 CO₂ 배출량을 산정하여 비교·분석하였다.

분석결과, 교통량의 범위가 2000대/시~3500대/시 일 때 첨단 차량 및 도로 시스템 도입 시 연료가 휘발유인 승용차의 평균 CO₂ 감소량은 7.70% 감소하였으며 연료가 경유인 승용차의 평균 CO₂ 감소량은 12.31% 감소하는 것으로 나타났다. 연료가 LPG인 승용차의 평균 CO₂ 감소량은 15.15% 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 차종별, 연료에 따른 배출계수 식은 낮은 속도에서 65.4km/h 미만까지는 CO₂ 배출량이 감소하는 경향을 보였으며 65.4km/h 이상에서는 CO₂ 배출량이 점차 증가하는 포물선 형태의 배출 특성을 보였다. 이는 65.4km/h 기준으로 저속 및 고속으로 주행할 때 CO₂ 배출량이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 속도가 향상된다고 해서 배출량이 항상 감축하는 것은 아님을 알 수 있다. 따라서 교통소통이 원활한 안정류 일 때는 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량보다 증가하는 경

향을 보였으며 교통혼잡 상태인 불안정류일 때는 첨단차량의 CO₂ 배출량이 일반차량의 CO₂ 배출량에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 이는 불안정류 교통상황에서 AVHS 도입으로 인해 용량이 증대되어 많은 교통수요를 처리하고 도로이용의 효율성이 향상됨을 알 수 있다. 따라서 AVHS를 통해 온실가스의 감축효과가 발생한다고 결론지을 수 있었다.

본 연구에서는 승용차에만 국한하여 첨단차량 및 도로상황에서 발생하는 CO₂ 배출량을 산정하였다. 향후 연구에서는 모든 차종을 고려하고 모든 차량의 연식별 CO₂ 배출량을 산정함으로써 CDM 사업에 적용할 수 있는 베이스라인 방법론 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] UNFCCC, "Baseline methodology for bus rapid transit projects," http://cdm.unfccc.int/EB/025/eb25_repan01.pdf, July 2006.
- [2] UNFCCC, "Baseline methodology for mass rapid transit projects," <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>, October 2009.
- [3] 국립환경과학원, "수송부문 온실가스 기후변화 대응 시스템 구축(II)-자동차 온실가스 Bottom-up 배출계수 개발," pp.64, 2009. 10.
- [4] A. Bose and P. Ioannou, "Environmental evaluation of intelligent cruise control(ICC) vehicles," *2000 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pp.352~357, October 2000.
- [5] M. Barth, "An emissions and energy comparison between a simulated automated highway system and current traffic conditions," *2000 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pp.358~363, October 2000.
- [6] S. S. YUN and D. S. YUN, "Development of BPR functions with truck traffic impacts for network assignment," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol.22, no.4, pp.117~134,

- August 2004.
- [7] J. Ma, "Traffic stream models and capacity analysis of AHS," *Traffic and Transportation Studies* (2000), Proceedings of the Second International Conference on Transportation and Traffic Studies, *ICTTS 2000*, pp.650~654, August 2000.
- [8] M. M. Minderhoud and P. H. L. Bovy, "Impact of intelligent cruise control on motorway capacity," *Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board*, vol.1679, pp.1~9, 1999.
- [9] T. H. Chang, "Analysis of characteristics of mixed traffic flow of autopilot vehicles and manual vehicle," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.5, no.6, pp.333~348, December 1997.
- [10] 임용택, 강민구, 추상호, 이상민, "도로 통행지체함수의 파라미터 추정 및 검증," *대한교통학회지*, 제26권, 제3호, pp.17~29, 2008. 6.
- [11] S. E. Shladover, "Potential freeway capacity effect of advanced vehicle control systems," Proceedings of the Second International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, pp.213~217, August 1991.
- [12] J. VanderWerf, S. E. Shladover, M. A. Miller and N. Kourjanskaia, "Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol.1800, pp.78~84, 2002.

저자소개



최 지 은 (Choi, Ji-Eun)

2009년 : 부경대학교 대학원 석사과정 위성정보과학과 ITS 연구실



배 상 훈 (Bae, Sang-Hoon)

1995년 : 미국 Virginia Tech. 박사

2002년 : 한국교통연구원 ITS 팀장

현재 : 부경대학교 부교수(위성정보과학과)