

교통운영체계선진화의 탄소감축 효과 연구

Carbon Reduction Effect of Traffic Operational Methods Itemized in National Project for Advanced Traffic Operation and Management

김원철* · 김진태**

Kim, Wonchul · Kim, Jin-Tae

Abstract

The presidential council on national competitiveness and the national police agency have initiated a national project to refresh the road traffic control and operation systems to increase operational efficiency at signalized intersections. It would reduce the number of stops and delay of vehicles at intersections and thus mitigate congestion and emission. Although significant reduction of carbon is expected as a consequential result, such effects has yet been studied since traffic operation was behind of interest in the field of green transportation where planning was mainly involved. This paper delivers the macroscopic effects of carbon reduction of the selected items of the national project: the ones managed by the police agency. The results showed that the studied items yield significant reduction of carbon: pedestrian push button operation, flashing signal operation, progression, lagging left turns, permitted left turn, and actuated left-turn operation would reduce 12.31%, 3.27%, 2.44%, 0.97%, 0.81%, and 0.72% of the total amount of carbon emitted a year in a whole transportation sector, respectively.

Keywords : operation, traffic signal, carbon reduction, clean development mechanism, simulation

요 지

대통령자문 국가경쟁력강화위원회와 경찰은 교통운영체계선진화방안을 통하여 신호교차로에서의 효율적인 운영을 도모하고 있다. 신호교차로의 효율적인 운영으로 정체상황이 개선되는 경우 배기가스 및 탄소배출 감소가 기대되나 지금까지 온실가스 저감효과에 대한 관심이 도로교통 운영부에서 소외되어 교통운영체계선진화로 인한 탄소배출량 감소 효과가 공학적으로 검토된 바 없다. 본 연구는 교통운영체계선진화방안으로 추진되는 전체 19개 사업수행 항목 중 경찰이 주관하여 추진하는 운영항목으로부터 기대되는 탄소배출량 분석방법 및 연(年) 단위 전국 탄소배출량 저감효과를 제시한다. 분석결과 2010년을 기준으로 우리나라 전체 도로교통 부문에서 탄소배출량을 기준으로 보행자작동신호운영 도입으로 12.31% 감축, 점멸신호운영 도입으로 3.27% 감축, 신호연동 도입으로 2.44% 감축, 직진우선 도입으로 0.97% 감축, 비보호좌회전 도입으로 0.81% 감축, 좌회전감응 도입으로 0.72% 감축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 교통운영체계선진화, 교통신호, 탄소감축, 녹색청정체계, 모의실험

1. 서 론

우리나라는 국제사회 온실가스 감축노력에 동참하고 있으며 2020년을 기준으로 탄소배출량을 30% 저감하는 것을 목표로 정하고 있다. 경제성장이라는 또 다른 목표를 함께 달성하여야 하기 때문에 우리나라는 산업부문과 건축부문에서의 탄소배출 감소에 제약이 존재하여 상대적으로 교통부문에서의 탄소배출 감축이 매우 중요한 상황이다. 지금까지 교통부문에서의 탄소배출 감축 노력은 철도 및 버스 등 대중교통 수단으로의 전환으로 편중되어 왔다. 기술적 이유 등 여러 가지 이유로 탄소배출이 심각한 도시부 도로운영의 개선을 통한 탄소배출 저감 노력이 소외되어 왔다.

경제성장과 더불어 차량 수 증가 및 생활수준 향상으로 도시지역 도로교통 정체가 가중되고 있다. 지체 및 정체로 인한 차량 연료 연소로 일산화탄소를 포함하는 배기가스가 대기 중에 배출된다. 효율적인 교통운영을 통하여 도시부 신호교차로 정체수준을 격감하는 경우 배기가스 배출량을 감소할 수 있고 따라서 탄소 배출량을 저감할 수 있는 효과가 발생한다.

1.1 연구 배경 및 목적

대통령자문 국가경쟁력강화위원회(2009a)와 경찰청은 교통운영체계선진화방안을 통하여 신호교차로에서의 효율적인 신호운영을 도모하고 있다. 또한 원주, 군산, 창원 모델도시

*충남발전연구원 지역·도시연구부 책임연구원 (E-mail : iwonchul@cddi.re.kr)

**정희원 · 교신저자 · 연세대학교 도시교통과학연구소 부소장 (E-mail : jtkim@dreamwiz.com)

구축사업 등을 통해 실제 현장을 개선하고 있다. 교차로 신호운영의 개선되어 정체상황이 완화되면 도로교통 차량의 배기가스 배출량이 감소하고 탄소배출량이 줄어든다.

앞서 언급되었듯이 도로교통 운영부문에서의 온실가스 저감효과에 대한 연구가 지금까지 관심 받지 못하였기에 교통운영체계선진화의 탄소저감 효과가 검토된 바 없다. 교통운영체계선진화방안의 궁극적 적용대상이 전국 교차로인 것을 감안하는 경우 선진화방안을 통하여 기대할 수 있는 우리나라 탄소배출 저감 효과는 상당할 것으로 기대된다. 교통운영체계선진화방안으로 수행되는 세부 실행항목으로부터 기대되는 탄소감축 효과들에 대하여 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 교통운영체계선진화방안으로 추진되는 전체 19개 사업수행 항목 중 경찰청이 주관하여 추진하는 운영항목으로부터 기대되는 탄소배출량 분석방안 및 저감효과를 분석한다. 이를 위하여 본 연구는 교통운영체계선진화방안 세부 실행항목 개별 집행으로 기대되는 년 간 대기 중 탄소배출 감소량 추정을 목표로 정한다.

1.2 연구 범위

교통운영체계선진화방안은 세부 19개 실행항목을 포함하며, 각각의 실행항목은 내용에 따라 경찰청, 국토해양부 등으로 주관부서가 구분되며 집행되고 있다(국가경쟁력강화위원회, 2009a). 세부항목 집행을 통한 탄소배출 저감효과가 모호하거나 효과측정 자체가 어려운 경우도 존재한다. 본 연구의 범위는 교통운영체계선진화방안 19개 세부항목 중 선별적으로 경찰이 사업을 주관하는 항목으로 탄소배출의 긍정적 감소효과가 기대되고 감소효과의 추정이 가능한 운영방법들로 제한한다.

1.3 연구 방법

선별된 운영방법의 실행으로 예상되는 에너지 소비감축량 및 탄소배출 감소효과에 필요한 기초자료를 현장실험을 통하여 수집할 수 없어 모의실험 자료를 대상으로 수집·분석한다. 교통운영체계선진화를 통하여 구현하고자 하는 기법들을 구현하는 현장의 부재 등이 원인이 되어 사전사후 현장조사 자료수집이 불가하다. 이를 극복하기 위하여 현장에서 관측되는 다양한 교차로 운영 포화수준을 반영하는 미시적 모의실험을 수행한다.

2. 관련연구 고찰

2.1 교통운영체계선진화

국가경쟁력강화위원회(2010)는 우리나라 운전자들은 '비현실적 교통법규'로 인하여 연 간 평균 20.3회 교통법규를 위반하고 있음을 지적하며 도로교통에 관련된 문제를 개선하기 위한 교통운영체계선진화방안을 추진한다. 이를 위하여 경찰청(2010)은 교통운영과 관련된 구체적인 19개 항목을 도출하여 해당 항목 개선을 위한 연구를 수행하였다. 교통운영체계선진화의 목표는 국제적 표준에 부합되고 누구나 공감하며 준수하는 교통운영체계를 구축하기 위한 것이며 도시부 교차로에서의 효과적인 신호운영 개선 내용을 포함한다. 그러나 해당 개선으로 인하여 기대될 수 있는 탄소배출

량 저감 효과는 심각하게 검토된 바 없다.

2.2 도로교통 부문 청정개발체제

선진국들은 온실가스 의무 감축량을 효율적으로 달성하기 위해 국제연합(UN; United Nations)을 중심으로 탄소배출권 인증 제도인 청정개발체제(CDM; Clean Development Mechanism)를 마련한다. 청정개발체제를 통해 국제시장에서 탄소배출 감축량에 대한 일련의 인증 절차와 내용이 규정되고 관리된다. 청정개발체제에서 규정하고 승인하는 탄소감축량에 대한 방법론들이 국제시장에서 기준이 되어 기타 상황에서도 탄소배출 감축에 대한 효과를 추정하는 방법들의 근간이 되고 있다.

국제연합은 지금까지 도로교통 부문 3건의 사업만을 공식적으로 인증하였다(UNFCCC, 2010). 이들 사업은 (1) 콜롬비아 보고타의 BRT사업, (2) 인도 델리의 저(低)온실가스차량 교체사업, (3) 콜롬비아 메트로메델린의 케이블카사업이다. 해당 방법 모두는 대중교통으로 수요를 전환하고, 차량의 장치를 개선하는 방법에 해당된다. 교통운영 부문에서의 탄소감축방법이 승인된 바 없으며 이는 열린 도로 공간에서 탄소감축량을 모니터링하고 증명하는 과정에 존재하는 기술적 어려움이 원인으로 분석된다.

우리나라도 청정개발체제와 관련하여 도로교통 부문 탄소배출량 저감을 위한 연구를 수행하였다(김태호 등, 2010; 빈미영, 2009; 김영철, 2009; 박진영 등, 2008; 박용남, 2007). 서울특별시 중양버스전용차로사업, 한국철도시설공단 호남고속철도를 중심으로 청정개발체제를 추진하고 있으며 이 역시 대중교통으로의 수요 전환 및 차량 장치의 개선에 해당한다. 도로교통 운영부문에서의 탄소감축량 추정을 위한 노력은 미비한 수준이다.

2.3 UN탄소배출 감축량 추정방법

국제연합이 규정하는 IPCC(International Panel on Climate Change)는 교통부문 탄소배출량 추정방법에 있어 일련의 가이드라인을 제시한다(IPCC, 2010). IPCC가 가이드라인을 통하여 정하는 이산화탄소 배출량 산정방법은 표 1에서와 같이 이용하는 자료와 적용방식에 따라 Tier 1, Tier 2, Tier 3로 구분된다. 국가들은 자국 내 접근이 가능한 기초자료의 종류와 형태 등에 따라 이들 중 적절한 것을 사용하도록 권고한다.

IPCC가 제시하는 탄소배출량 추정방법은 거시적인 수준에서 적용가능하다. 청정개발체제 마련 초기 단계에 교통계획

표 1. IPCC 제시 탄소 배출량 추정방법 비교

구분	Tier1	Tier2	Tier3
고려 항목	연료	연료, 차종, 배출제어기술	연료, 차종, 배출제어기술, 주행거리
방식	Top-down	Bottom-up	
장점	기본수준 분석	-	상세수준 온실가스 배출량 산정 가능
단점	차량 주행거리 고려 미흡	차종별, 에너지 소비량 자료 필요	방대하고 다양한 자료가 필요

출처: 김태호 외 4인 (2010) 도로교통부문의 온실가스 배출량 산정방법론 비교 연구

자들이 투입되어 대중교통으로의 수요전환 등 기본적으로 교통수요관리를 통하여 온실가스 배출을 감소시키기 위한 방법에 대한 분석을 지원하기 위한 방법이 틀을 이루고 있다.

교통운영측면의 경우 탄소배출량 추정을 위하여 별도로 추정방법이 설계되어야 한다. 교통운영기법이 적용됨에 따라 효과가 기대되는 시간대 및 포화상태 등이 추정에 반영되어야 하나 IPCC 가이드라인은 표 1과 같이 이들에 대한 효과를 반영하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 교통운영부문 탄소감축량을 추정하기 위하여 교통운영에 따라 효과가 기대되는 상황을 선별하여 탄소감축량을 추정하는 별도의 방법을 Tier1 방식을 기반으로 고안하여야 한다.

3. 분석대상 선진화항목 및 탄소배출 추정방법

교통운영체계선진화를 통해 시행되는 19개 세부항목들은 탄소발생을 감축하게 하는 내용과 탄소발생 감축과 거리가 있는 내용 모두를 포함한다.

3.1 분석대상 선진화방안 실행항목 도출

이들 중 탄소발생 감축 효과가 기대되는 세부항목을 선별적으로 선택하여 이들을 대상으로 탄소감축효과를 분석한다. 선별의 기준은 (1) 경찰청이 주관이 되어 추진하는 항목으로 (2) 온실가스 감축효과를 객관적으로 측정가능하게 하는 기초자료 확보의 용이성으로 하였으며 이를 통하여 선별된 세부항목은 표 2와 같다.

교통운영체계선진화 세부항목 중 온실가스 저감과 직접적

표 2. 교통운영체계 선진화방안 19개 과제 특성분석

과제	기대효과			분석대상	청정개발 관련효과
	통행 개선	연료 절감	배출 감소		
1. 점멸신호 운영	○	○	○	선정	-
2. 신호기 위치 조정	△	×	×	제외	직접효과 미약
3. 보행자 작동 신호기 설치	○	○	○	선정	-
4. 주말·휴일 주차 허용	×	×	×	제외	배출증가
5. 비보호좌회전 확대	○	○	○	선정	-
6. 회전교차로 활성화	○	○	○	제외	국토해양부
7. 우측보행 확립	×	×	×	제외	직접효과 미약
8. 지정차로제 개선	△	△	△	제외	측정불가
9. 보행신호 점멸시점 조정	×	×	×	제외	미약
10. 교통섬 확대	△	△	△	제외	국토해양부
11. 생활도로 일방통행 운영	△	△	△	제외	우회거리 증가
12. 좌회전 신호보완(감응식)	△	△	△	선정	-
13. 자전거 신호등 설치	×	×	×	제외	직접효과 미약
14. 직진우선 신호원칙 확립	○	○	○	선정	-
15. 신호연동 시스템 개발·확대	○	○	○	선정	-
16. 무신호교차로통행우선권	×	×	×	제외	직접효과 미약
17. 우회전 신호등 운영	×	×	×	제외	국제사회 기본
18. 우회전 전용차로 설치	△	△	△	제외	국토해양부
19. 도심 주요도로 일방통행	△	△	△	제외	우회거리 증가

주: ○: 효과 있음, △: 효과 미비, ×: 효과 없음

관련 없는 분석대상 과제를 제외하였다. 예를 들어 ‘신호기 위치조정’이 그러하다. 신호기 위치조정은 정지선 준수율을 향상시키기 위하여 교차로 전방에 교통신호기 이전 설치하는 것으로 정지선 위반 차량 운전자들에게 신호등 확인이 불편한 응모 상황을 제공한다. 정지선 준수율 향상으로 횡단 보도 내 차량과 횡단보행자의 혼재 기회가 줄어들어 교통안전을 증진시킴으로 인해 교통사고 감소와 관련된 간접적 탄소배출 저감 효과가 있으나 배기가스 저감으로 인한 직접적 탄소배출 감소효과는 없다.

배기가스 저감으로 인한 직접적 탄소배출의 감축이 있으며 경찰이 주관하는 교통운영체계선진화 6개 세부항목은 아래와 같다.

- (1) 야간 점멸신호 운영
- (2) 보행자 작동 신호기 설치
- (3) 비보호좌회전 확대
- (4) 좌회전 신호보완(감응식)
- (5) 직진우선 신호원칙 확립
- (6) 신호연동 시스템 개발 및 확대

이들 모두 신호교차로에 적용되는 교통신호 운영방식이다. 이들 교통신호운영방식은 하나의 교차로에 공통 적용될 수도 있으나 이로 인해 기대되는 탄소배출량 저감 효과는 상호 독립적이지 않다.

3.2 탄소배출량 추정방식 개발

도로교통 운영체계 개선을 통하여 기대할 수 있는 탄소배출량 감소효과는 상기 교통신호 운영방식 별로 적용되는 장소, 시간, 포화상태에 따라 다르다. 교통신호운영과 관련된 이러한 주변 환경적 요소의 영향을 일반화하여 반영하는 탄소배출량 추정모형이 별도로 개발되어야 한다.

본 연구를 위하여 포화수준, 시간대 및 요일 별 상이한 교통신호운영 주변 환경여건을 고려하며 교통운영체계 개선에 따른 온실가스 배출량을 추정하는 식 (1)의 방법론을 개발하여 적용하였다.

$$ECO_2 = \sum_k (EC_k \times EF_k) = \sum_k \left\{ \left[N \left(1 - \frac{I}{N} \right) (WD + WE) \sum_j S_j M_{jk} \right] \cdot p_k f_k EF_k \right\} \quad (1)$$

- ECO_2 : 온실가스 배출 감축량(ton);
- EC_k : 연료 k 소비 감축량(liter 또는 ton);
- EF_k : 연료 k 탄소배출계수;
- N : 적용대상 신호교차로 수(개);
- I : 특정 운영기법 적용 교차로 수(개);
- WD : 주중 및 토요일 수 환산계수(일);
- WE : 일요일 및 공휴일 수 환산계수(일);
- S_j : 포화수준 j 특정 운영기법 적용시간(시);
- M_{jk} : 포화수준 j 연료 k 소비감축량(liter/시);
- p_k : 에너지 연료 k 사용 차량 비율(%);
- f_k : 에너지 연료 k 환산계수(ton/liter)

식 (1)을 적용하여 교통신호 운영기법 적용 전과 후 상황

에 연소되는 연료 에너지 소비량을 추정하고 추정된 결과들을 비교하며 운영방법 적용을 통해 감소된 탄소배출량을 산출한다. 베이스라인은 현실적으로 기존 자료 및 데이터 수집의 한계가 있어서 국가 전체 연료 사용량으로 한정하여 베이스라인을 산정한다.

3.2.1 석유환산톤의 추정방식

도로교통 운영체계 개선효과를 분석하는 전산모형들을 통해 도출할 수 있는 일반적인 분석지표는 차량의 에너지소비량이다. 도로교통 운영 상태를 분석하는 일반적인 미시적 모의실험 전산모형은 휘발유(gas) 감소량을 결과 값으로 출력한다. 모의실험을 사용하여 탄소감축량을 분석하는 경우 모의실험 전산모형을 통해 산출되는 연료소비량을 입력 값으로 사용한다.

탄소감축량 추정을 위하여 먼저 교통운영 방식의 적용으로 감소된 휘발유(리터) 소비량을 석유환산톤(ToE; Ton of Oil Equivalent)¹⁾으로 환산한 후, 환산된 석유환산톤을 다시 탄소배출량으로 환산한다. 휘발유 소비 감소량에 대한 석유환산톤을 산정하는 방법은 식 (2)와 같다.²⁾

$$TOE = \frac{\text{연료량(L, kg, Nm}^3, \text{kWh)} \times \text{석유환산계수}}{100\text{toe/kgoe}} \quad (2)$$

여기에서 석유환산계수는 에너지관리공단(2007)에서 제시한 기준인 0.8을 적용한다. 에너지열량환산기준에 의하여 가솔린 1L은 8,000kcal 발열량에 해당됨을 적용한다.

3.2.2 탄소배출량 추정방식

식 (2)를 통하여 산출된 석유환산톤에 IPCC가이드라인이 권고하는 탄소배출계수 0.783(Ton C/TOE)과 식 (3)을 적용하며 최종 탄소배출량을 산정한다. 계산과정에 사용되는 계수 3.667은 이산화탄소분자량(44)을 탄소원자량(12)의 관계를 나타낸다.

$$TCO_2 = \text{연료TOE} \times \text{탄소배출계수}(\text{tonC/toe}) \times 3.667 \quad (3)$$

탄소배출 감축량을 추정하기 위하여 식 (2)와 식(3)을 순차적으로 적용하며 (1) 휘발유 사용 감축량에 대한 석유환산톤과 (2) 최종 탄소(이산화탄소, CO₂)배출 감축량을 추정한다.

3.3 운영방법 분석 기초자료

신호교차로 운영방법 개선으로 기대되는 탄소배출량 감축 효과는 (1) 신호교차로 크기(차로 수), (2) 신호교차로 운영 포화수준, (3) 운영방법 적용 시간대 등에 따라 다르다. 탄소 감축 효과가 교통운영 방식이 적용되는 시간동안 균일하게 발생되지 않기 때문에 운영방법별로 효과가 기대되는 상황 특성 기초자료를 합리적이며 보수적(conservative)인 수준으로 마련하여야 한다.

3.3.1 신호교차로 크기(차로 수)

본 연구 분석대상을 선정된 선진화방안 6개 세부항목은 교

차로 규모에 따라 적용이 불가능한 경우가 존재한다. 특정 규모의 신호교차로에만 운영방법이 적용될 수 있는 경우도 있기 때문이다. 운영방법이 적용되지 못하는 신호교차로를 구분하여 분석에서 제외되도록 한다.

우리나라 전국 신호교차로 수에 대한 집계 자료의 확보가 용이하지 않다. 때문에 전국 신호교차로의 수가 전국에 설치된 신호제어기의 수와 같다고 가정하며 추정한다. 우리나라 전국에 설치된 신호제어기 수 현황은 총 33,312개이며(경찰청 2010), 이는 다양한 크기의 교차로 모두를 포함하는 수치이다.

국토해양부에서 제시하는 차로수별 우리나라 포장도로 연장 통계(2차로 이하 77.2%, 4차로 16.4%, 6차로 4.6%, 8차로 1.5%, 10차로 이상 0.4%)를 사용하여 교차로 크기의 분포를 추정한다(국토해양부 2010). 양방향 2차로 이하의 도로는 좁은 생활권 도로로 일반적으로 교통신호가 없는 무신호교차로로 운영된다. 따라서 본 분석에서도 2차로 도로 교차로는 무신호교차로로 운영됨을 가정하며 4차로 이상의 도로연장 통계만을 고려한다.

우리나라 신호제어기 수와 4차로, 6차로, 8차로, 10차로 도로 구성 비율을 토대로 신호교차로 크기를 표 3과 같이 네 개의 그룹(Class A, B, C, D)으로 구분하였다. 교차로 규모별로 구분하여 분석대상 교통운영체계선진화 6개 세부항목의 적용이 가능한지 여부를 검토하였다.

보행자작동신호기, 신호연동, 직진우선신호체계, 좌회전감응 신호운영방법은 교차로 규모와 관련 없이 현장 적용이 가능하다. 그러나 점멸신호와 비보호좌회전 신호운영의 경우 상황은 다르다.

점멸신호운영은 교통량이 적은 야간 시간대에 일반적인 교통신호를 대신하여 황색점멸 운영하는 방안이다. 그러나 교통량이 낮은 야간시간대이더라도 주행속도가 높고 폭이 넓은 간선도로 급 교차로에서는 안전을 확보하기 위하여 일반적으로 점멸운영을 하지 않는다. 8차로 및 10차로와 같이 폭이 넓은 도로를 포함하는 교차로의 경우 현실적으로 점멸신호운영을 집행하기 어려워 큰 탄소배출 감축 효과를 기대하기 어렵다. 따라서 본 분석에서는 교차로 중 4차로(편도 2차로), 6차로(편도 3차로) 도로 신호교차로에서만 점멸신호운영을 적용하는 것을 가정하여 분석한다.

비보호좌회전 역시 도로 폭이 넓은 경우 대향 직진교통량이 일반적으로 많기 때문에 비보호좌회전 운영을 적용하지 않는다. 일반적인 4차로(편도 2차로)도로 규모의 도로를 포

표 3. 교차로 규모별 운영방법 적용성 구분

구분	도로 규모(폭)에 따른 교차로 수				
	Class A	Class B	Class C	Class D	계
점멸운영	23,908	6,639	N/A		30,547
보행자 작동	23,908	6,639	2,215	550	33,312
비보호 좌회전	23,908	N/A			23,908
좌회전 감응	23,908	6,639	2,215	550	33,312
직진우선	23,908	6,639	2,215	550	33,312
신호연동 운영	23,908	6,639	2,215	550	33,312

Class: A(4차로 수준), B(6차로 수준), C(8차로 수준), D(10차로 수준)

1) 국제 에너지기구(IEA)에서 정한 온실가스 계산의 기본 단위
2) kgoe = kilograms of oil equivalent

합하는 크지 않은 신호교차로에만 비보호방식의 좌회전처리 운영이 허용되기 때문에 본 분석에서는 4차로도로에서만 비보호좌회전운영이 적용되는 것을 가정한다. 실제 현장에서는 좌회전 대기차로 확보 등의 어려움 등으로 4차로 도로 교차로에서 비보호좌회전 운영을 하지 않는 경우도 존재하나 6차로 도로 수준에서도 존재하는 비보호좌회전 운영상황을 배제함으로써 서로 상쇄됨을 가정한다.

3.3.2 신호교차로 운영 포화수준별 누적시간 분포

신호교차로 교통량은 시간대에 따라 다르기 때문에 신호교차로 운영상황이 시간대에 따라 다르다. 따라서 분석대상 선진화방안 6개 세부 운영항목의 탄소배출량 감축 효과가 시간대에 따라 변하는 신호교차로 운영 포화수준에 따라 변화한다.

이처럼 신호교차로 운영 포화수준은 교차로 주변 토지이용 여건에 따라 또 시간대에 따라 다르다. 도심부의 경우 심야 새벽시간에도 교통량이 많아 교차로 운영 포화수준이 높을 수 있으며 외곽부의 경우 주간 시간에도 교차로 운영 포화수준이 낮을 수 있다. 본 연구는 일반적인 평균 상황을 기준으로 효과를 분석하여야 하나 전국 교차로 운영 포화수준에 대한 통계자료가 부재하다.

따라서 본 연구는 루프검지기를 이용하여 수집되는 서울시 간선도로 및 시계 외곽도로 온라인 교통량 자료(서울지방경찰청 2009)를 참고하여 하루 24시간 시간 신호교차로 운영 포화수준 상태를 공학적인 판단을 토대로 표 4와 같이 가정한다.

야간 23:00-새벽 04:00 시간 대 포화수준(v/c ratio)은 도시부와 지방부 상황을 동시에 고려하여 평균 0.2 수준으로 가정한다. 이는 유효녹색시간 100초 중 20초만이 사용되는 상황에 해당된다. 오전 9:00에 업무를 시작하는 통근자들에 대한 오전 침두시간 대 교통상황을 반영하기 위하여 오전 4:00시를 시점으로 교통량이 오전침두시간 까지 증가하며 교통량이 8:30분부터 감소함을 가정한다.

오전 침두시간 종료시점으로부터 오후 침두시간까지 포화

수준은 0.95, 0.85에서 0.75까지 낮아지며 오후 17:30분을 기점으로 오후 침두시간이 시작됨을 가정한다.

상기 분석을 토대로 하루 시간대에 따라 교차로에서 관측되는 운영상태 누적시간은 포화도 0.2, 0.4, 0.6, 0.75, 0.85, 0.95별 각각 5시간, 2시간, 2시간, 7시간, 4시간, 3시간, 1시간으로 정한다(표 4 참조).

3.3.3 신호교차로 운영방법 적용 누적시간

본 연구의 분석대상인 6개 선진화방안 세부항목은 교차로 운영 포화상태에 따라 현장 적용이 불가할 수 있으며 적용이 가능하더라도 탄소감축 효과가 다르다. 특정 운영 포화상태에 해당 방법이 적용 불가한 상황이 있을 수 있으며 큰 효과를 기대할 수 없는 운영 포화상태가 있을 수 있다.

이에 따라 아래와 같이 방법이 적용되지 못하는 교차로 운영 포화상태와 큰 효과를 기대할 수 없는 포화상태를 구분하여 탄소배출량 감소량 분석에서 제외하여 과대 추정되는 상황을 억제한다.

- (1) 교통량이 적어 탄소감축 효과가 미비한 경우 탄소감축 효과가 없음으로 가정하여 분석 대상에서 제외
- (2) 대상 신호운영 방안을 바르게 적용한 경우 탄소감축 효과가 있을 수 있더라도 지속적인 교통신호 운영관리가 현실적으로 어려운 경우 기대효과가 크지 않은 것으로 구분하여 분석대상에서 제외
- (3) 과포화상태는 어떠한 방법으로도 효과를 기대할 수 없으므로 분석에서 제외

분석대상인 6개 세부 운영방식이 앞서 구분된 교차로 운영 상태(표 4 참조)에 따라 적용될 경우 탄소감축 효과가 기대되는 일별 누적시간은 표 5와 같다.

점멸신호운영은 야간 및 심야시간대와 같이 교통량이 낮은 상태에 한하여 적용할 수 있어 하루 중 점멸신호운영이 가능한 경우는 포화도 0.6 이하 수준으로 하루 중 총 9시간 동안 적용이 가능한 것으로 분석기준을 정한다. 이는 도시부의 상황과 지방부 교차로의 경우 24시간 전환하는 상황을 모두를 고려한다. 교차로 교통량이 높은 경우 점멸신호운영은 일반적으로 적용하지 않는다. 교차로 규모가 작은 경우라 할지라도 포화수준이 높은 경우 교통안전사고가 문제가 존재하기 때문이다.

보행자작동 보행신호운영 방안은 보행자 교통량이 낮은 시간대에 국한 적용된다. 보행자작동 보행신호운영 방안은 보행자가 적은 시간대에 불필요하게 보행시간을 제공하며 발생하는 불필요한 차량 적색시간을 소거하여 차량신호가 효

표 4. 교차로 운영상태 시간대별 구분(시간/일)

구분	일(日) 시간					누적 시간 (h)	
	v/c	오 전		오 후			
비포화	1	0.20	00:00-04:00	-	-	23:00-24:00	5
	2	0.40	04:00-05:00	-	-	22:00-23:00	2
	3	0.60	05:00-06:00	-	-	21:00-22:00	2
	4	0.75	06:00-07:00	10:30-12:00	12:00-16:00	20:30-21:00	7
	5	0.85	07:00-07:30	09:00-10:30	16:00-17:30	20:00-20:30	4
	6	0.95	07:30-08:00	08:30-09:00	17:30-18:30	19:00-20:00	3
과포화	>1.00	08:00-08:30	-	18:30-19:00	-	1	
계							24

표 5. 운영방법 적용 시간대 구분 (시간/일)

구분	운영상태 시간/일						누적 시간
	0.20	0.40	0.60	0.75	0.85	0.95	
점멸운영	5	2	2	N/A			9
보행자 작동	효과미비 ¹⁾			7	4	3	14
비보호 좌회전	5	2	2	N/A			9
좌회전 감응	5	2	2	효과미비			9
직진우선	효과미비 ¹⁾			7	4	3	14
신호연동 운영	효과미비 ²⁾			7	4	3	14

울적으로 운영되게 한다. 즉 보행교통량에 따라 영향 받는 운영방식이나 그 효과는 차량흐름에게 수여되기 때문에 차량 교통량이 많은 경우 해당 운영방법 적용으로 인한 탄소배출량 감축 효과가 크다. 교통량이 낮은 경우에도 탄소배출량 감축 효과가 존재하겠으나 본 분석에서는 과대 추정을 피하기 위하여 그 효과가 상대적으로 미비한 것으로 구분하여 탄소배출 감축량 계산에서 제외한다.

우리나라의 신호연동 운영은 일반적으로 TOD신호제어방식으로 현장 구현된다. 일반적인 교통신호 연동운영은 오전 첨두시간대, 오후 첨두시간대, 비(非)첨두시간대를 구분하며 설계되고 적용된다. 오전 및 오후 첨두시간 신호연동은 도심방향 및 외곽방향을 구분하는 주 교통흐름방향 중심으로 운영되기 때문에 그 효과가 크다.

그러나 비(非)첨두시간대 신호연동은 일반적으로 주간시간대를 기준으로 오프셋(offset)을 설계하여 야간 시간대로부터 높은 효과를 기대하기 어렵다. 야간 비(非)첨두시간 신호연동을 위한 교통신호 운영관리가 현실적으로 실무에서 집행되기 어렵기 때문에 탄소감축효과가 없음을 가정하여 분석대상에서 제외한다.

3.3.4 일요일 및 공휴일에 대한 보정

주중 평일의 교통흐름 상황과 달리 일요일 및 공휴일 교통흐름은 일반적으로 다르다. 평일에는 출퇴근을 목적으로 하는 통행의 패턴이 뚜렷하고 업무 중심의 시내통행이 일반적으로 많다. 일요일 및 공휴일의 경우는 도로를 이용하는 전체 교통량 수준이 상대적으로 적어 교통운영선진화를 통한 탄소배출량 감소 효과도 적다. 일요일 및 공휴일에 교통운영선진화 세부 운영항목의 적용으로 기대되는 탄소배출량 감소 효과를 반영하여야 한다.

일요일 및 공휴일 도로를 이용하는 교통량은 기존 연구(이용택 외 2명 2005)에 따라 평일 교통량에 비하여 0.86%수준을 유지하는 것으로 보고된다. 교통량 변화로 인한 지체 및 정체 증감과 이로 영향 받는 연료소비량의 관계가 비포화상태에서 단순 비례하는 것을 가정하여 본 연구에서는 일요일 및 공휴일에는 연료소비량 역시 0.86%가 감소하는 것으로 분석한다. 일요일 및 공휴일에 해당하는 날을 일 년 총 62일(년³⁾로 분석한다.

3.3.5 운영항목 기 집행 부분에 대한 보정

교통운영체계선진화방안 세부 운영항목 중 이미 현장 교차로에 기 집행되고 있는 경우 해당 교차로를 분석에 포함하는 경우 결과가 과대 추정될 수 있다. 따라서 분석대상 운영방법을 기존에 이미 적용하고 있는 교차로를 별도로 고려하여 분석에서 제외하여야 한다. 기존에 집행된 교통운영체계 선진화 방안 교차로의 비율은 표 6과 같으며 해당 부분만큼을 고려하여 탄소배출감축 효과 결과를 보정하여야 한다.

3) 구정 및 추석 당일을 제외한 교통정체 휴일은 본 분석에서 제외(교차로가 과포화 운영되는 경우 교통운영선진화 탄소저감 효과기대할 수 없음을 분석에 반영). 보수적 탄소감축량 분석을 위하여 공휴일과 일요일이 겹치는 경우가 없는 상황을 반영하며 분석함.

표 6. 교통운영체계선진화방안 세부과제별 현장적용 비율

구분	선진화방안 현재 현장적용 비율
점멸운영	58.27%
보행자 작동	7.69%
비보호 좌회전	41.05%
좌회전 감응	1.32%
직진우선	50.58%
신호연동	64.66%

출처: 2010년 11월 경찰청 내부 집계 자료

표 6은 교통운영체계선진화가 집행되면서 각 지방경찰청으로부터 경찰본청에 보고된 현장 집행비율이다.

4. 모의실험 분석

교통운영선진화방안 6개 세부 운영방안의 집행으로 기대할 수 있는 에너지절감 효과를 추정을 위한 기초자료를 현장조사를 통하여 수집하기 어렵다. 사업을 통하여 구축되고 있는 교통선진화 모델도시들은 현재 기본설계를 구상하는 수준이라 실질적인 현장자료 수집이 불가하다. 본 연구는 이에 따라 현장에서 수집하기 불가한 기초자료를 모의실험 자료로 대체하며 연구를 수행하였다.

모의실험 자료를 구축하기 위하여 다양한 교통조건, 기하구조조건, 제어조건을 반영하는 베이스 시나리오를 개발하여 이를 기준으로 본 논문 앞 단락에서 설명한 (1) 교차로 크기(차로 수), (2) 교차로 운영포화수준별 누적시간 분포, (3) 운영방법 적용 누적시간, (4) 일요일 및 공휴일에 대한 보정, (5) 운영항목 기 집행부분에 대한 보정 항목들을 반영하며 전체적인 탄소배출량 저감 효과를 산정한다.

4.1 모의실험 전산모형

본 연구에서는 미국 FHWA에서 개발한 미시적 모의실험 전산모형인 CORSIM(Corridor Simulation; version 6.1)을 적용하여 분석을 수행하였다. CORSIM 모형은 현재 적용 가능한 전산모형 중 가장 현장 설명력이 높은 모형으로 검증된다. CORSIM 모의실험 분석을 위해 가상의 간선도로 및 교차로 네트워크를 구축하고 교통선진화방안으로 추진하는 세부항목 각각에 대한 실행 전·후 연료소모량 변화를 분석한다.

4.2 모의실험 시나리오

분석대상 운영항목 중 (1) 점멸신호운영, (2) 비보호좌회전 확대, (3) 좌회전 신호보완(감응신호운영)은 교통량이 적은 경우 탄소배출량 저감 효과가 크다(표 5 참조). 이들 운영방법은 교통량이 많은 경우 여러 이유로 적용이 불가하며 적용되는 경우에도 많은 개선 효과를 기대할 수 없다.

분석대상 운영항목 중 (4) 보행자작동신호제어, (5) 직진우선 신호원칙, (6) 신호연동시스템개발 확대의 경우는 교통량이 충분히 많은 경우 운영방법 적용에 따른 효과가 크다(표 5 참조).

상기와 같이 각 운영방법 운영특성을 반영하며 모의실험

표 7. 모의실험 분석을 위한 교차로 운영상황 시나리오

구 분	운영특성	분석대상 운영상태
점멸운영	한가한 시간대 효과	낮은 포화수준
보행자 작동	차량 교통량 많은 경우 효과	높은 포화수준(비포화)
비보호 좌회전	교통량 적은 경우 효과	낮은 포화수준
좌회전 감응	교통량 적은 경우 효과	낮은 포화수준
직진우선	직진 교통량 많은 경우 효과	높은 포화수준(비포화)
신호연동 운영	직진 교통량 많은 경우 효과	높은 포화수준(비포화)

분석이 수행될 수 있도록 분석대상 시나리오 틀을 표 7과 같이 마련하였다.

표 7이 제시하는 내용을 반영하며 교통조건, 기하구조 조건, 제어조건을 조합하는 시나리오를 상세 설계 및 분석하였으며 아래 세부단락은 이에 대한 내용을 설명한다.

4.2.1 교통조건 설정

높은 포화수준에서 적용에 따른 효과가 기대되어도 교통량이 일정수준을 넘어 과포화수준이 되는 경우는 선진화 과제 의 어떠한 항목도 효과를 기대할 수 없다. 따라서 높은 포화수준의 교통수준은 적어도 교통량-대-용량 비율(v/c; volume to capacity ratio)이 1.0을 넘지 않도록 전체분석이 기본이 되는 베이스 교통조건을 설계하였다.

(1) 점멸신호운영, (2) 비보호좌회전, (3) 좌회전 감응운영의 경우는 교통량이 낮은 세 가지 수준(포화도 0.20, 0.40, 0.60)을 대상으로 기초 분석하고, 이와 별도로 (4) 보행자작동, (5) 직진우선, (6) 신호연동 운영은 교통량이 높은 세 가지 수준(포화도 0.75, 0.85, 0.95)을 대상으로 기초 분석하였다.

교통량 수준이 낮은 상태 3개 교통량 수준(포화도 0.20, 0.40, 0.60)과 높은 상태 3개 교통량 수준(포화도 0.75, 0.85, 0.95)에 해당하는 베이스 교통량 수준을 각각 설정하였다. 설정된 교통량 수준은 모두 교통신호운영이 최적인 상태를 반영한다.

상기 설정된 베이스 교통량 수준에서 접근방향비율은 55:45, 60:40, 65:35, 좌회전비율은 5%, 10%, 15%로 변화하게 하였다. 이처럼 모의실험 교통조건이 교통량 수준, 접근방향비율, 좌회전비율의 조합으로 구성되도록 하여 다양한 교통상황이 분석에 반영되도록 하였다.

4.2.2 기하구조 조건 설정

실제 현장에서 분석대상 교통운영체계선진화 세부 항목이

표 8. 다양한 모의실험 교통조건 설정

구분	교통량 수준		좌회전 비율
	포화도 ¹⁾	접근방향 비율	
낮음	0.20	55:45, 60:40, 65:35	5%, 10%, 15%
	0.40	55:45, 60:40, 65:35	5%, 10%, 15%
	0.60	55:45, 60:40, 65:35	5%, 10%, 15%
높음	0.75	55:45, 60:40, 65:35	5%, 10%, 15%
	0.85	55:45, 60:40, 65:35	5%, 10%, 15%
	0.95	55:45, 60:40, 65:35	5%, 10%, 15%

1) TRANSYT-7F 신호최적화 후 교차로 전체 포화도 수준

표 9. 모의실험 네트워크 규모 설계

구 분	일반 적용 교차로 규모	적용 일반	모의실험 네트워크
점멸운영	집산도로 급	야간 연속	도로 축(3개 교차로)
보행자 작동	집산/간선도로 급	개별	독립교차로
비보호 좌회전	집산도로 급	개별	독립교차로
좌회전 감응	집산도로 급	개별	독립교차로
직진우선	집산/간선도로 급	연속	도로 축(3개 교차로)
신호연동 운영	집산/간선도로 급	연속	도로 축(3개 교차로)

적용되는 교차로와 어울리는 모의실험 기하구조 환경을 구축하기 위하여 표 9와 같은 모의실험 네트워크 기하구조를 설계하였다.

점멸신호운영, 직진우선, 신호연동 운영은 일반적으로 교차로 규모가 유사한 일련의 교차로에 연속적으로 적용되는 반면, 보행자작동신호, 비보호좌회전, 좌회전 감응신호운영은 필요에 따라 단위 교차로에 독립적으로 적용된다. 따라서 점멸신호운영, 직진우선, 신호연동 운영은 3개의 교차로로 구성된 하나의 도로축을 대상으로 분석이 수행되도록 모의실험 시나리오를 구축하였으며, 보행자작동신호, 비보호좌회전, 좌회전 감응신호운영은 독립교차로를 대상으로 분석되도록 모의실험 시나리오를 구축하였다.

독립신호교차로는 주도로와 부도로 모두 왕복4차로이며 접근로 모두 비보호좌회전 운영이 가능하도록 별도의 좌회전 전용차로(left-turn bay)를 가진다. 점멸신호운영, 직진우선, 신호연동 운영분석을 위한 도로축은 주도로 부도로 모두 왕복6차로이며 별도의 좌회전 전용차로를 포함한다.

4.2.3 기타 모의실험 변수 설정

CORSIM 모의실험 모형은 모의실험 내 주행차량의 차종을 구분하면서 총 연료소비량을 추정한다. 올바른 연료소비량을 측정하기 위하여 표 10에서 제시하는 우리나라 차종별 차량등록대수(국토해양부, 2010) 비율을 모의실험 입력 값으로 반영하였다.

모의실험 분석에 1,900대/시 포화교통류율을 적용하였다(포화차두시간 = 1.90초/대). 국토해양부는 우리나라 신호교차로에서의 포화차두시간을 1.63초/대로 규정하나, 이는 수도권 도시부 출퇴근 운전자들을 대상으로 측정한 값이기에 전국 신호교차로를 이용하는 일반 이용자들을 모두 고려한 포화차두시간 값을 대표하기에 무리가 있어 일반적인 교차로분석에 사용되는 값을 적용한다.

4.3 다중 모의실험 분석

모의실험은 먼저 설정된 일련의 무작위 난수를 토대로 개

표 10. 차종별 차량등록대수비

차종	등록대수 (비율)
승용	1,334만대 (75.6%)
승합	106만대 (6.0%)
화물	319만대 (18.1%)
특수	5만대 (0.3%)

출처: 국토해양부, 자동차관리현황 및 자동차등록현황(2010년 6월)

별차량의 진입시간, 자유속도, 고유 운전자 타입 등이 결정된다. 이러한 모의실험 전산분석 특성으로 인하여 일 회의 모의실험 분석은 특정한 하나의 교통상황만을 실험하는 것에 해당하여 다양한 현장상황을 일반적으로 반영하지 못한다. 여러 번의 모의실험을 반복 수행 하였다더라도 동일한 난수 초기변수를 적용할 경우 모의실험에서 반영된 현장상황은 하나에 해당된다.

본 연구에서는 하나의 교통운영 상황에 대한 분석을 여러 번의 모의실험으로 자동 분석하기 위하여 CORSIM.DLL Windows파일을 DOS 스크립트 언어 환경에서 실행시키는 CMRP(CORSIM Multiple Run Processor) 소프트웨어를 개발하였다. CMRP는 자동으로 일련의 모의실험을 수행한 후 이들로부터 생산되는 결과파일에 위치한 최종 측정지표를 선출하여 이들의 평균과 표준편차를 산정한다. 여러 번의 모의실험 분석으로 도출되는 다수의 측정지표(본 분석을 통해 수집되는 측정지표는 연료소비량) 평균값의 10% 내로 표준편차가 작아지는 경우까지 10회씩 횡수를 증가하며 모의실험을 수행한다.

본 연구에서 수행한 CORSIM 모의실험 수행횟수는 최소 총 1,620회이다. 교통선진화방안 과제 개별항목별 최소 270번의 모의실험을 수행하여 분석하였다(교통량 수준 3단계 × 접근교통량 비 3단계 × 회전교통량 3단계 × 무작위 난수 초기변수 10개). 경우에 따라 표준편차가 평균의 10%보다 클 경우 10회의 모의실험을 추가로 수행하여 270번의 두 배인 540번의 모의실험을 수행한 경우도 포함되어 있어 실제로 자료생성을 위해 수행한 모의실험 수행횟수는 1,620회 이상이며 이와 같은 반복 실행을 통하여 본 분석에 사용되는 최종 모의실험 기초자료를 생성하였다.

5. 분석결과

다양한 교통조건, 기하구조조건, 제어조건을 반영하는 시나리오를 반영하는 모의실험 수행 후 (1) 교차로 크기(차로 수), (2) 교차로 운영포화수준별 누적시간 분포, (3) 운영방법 적용 누적시간, (4) 일요일 및 공휴일에 대한 보정, (5) 운영항목 기 집행부분에 대한 보정 항목들을 반영하며 도출된 분석결과이다.

5.1 시간단위 탄소배출량 추정

교통운영체계 선진화방안 6개 세부 교통운영방안에 대하여 다양한 운영상황을 고려하며 수행한 모의실험으로부터 도출된 연료소비 감축량(사전 및 사후분석으로 도출된 결과의 차)의 평균값을 정리하여 표 11에 정리하였다.

표 11이 제시하는 결과는 단일 교차로 단위로 운영방법을 적용함에 따라 한 시간 동안 기대되는 연료소비 절감량으로 모의실험 결과 값이다⁴⁾. 특정 규모의 교차로에서 한 시간 동안 기대되는 연료소비 감축량에 해당한다. 특정 규모가 아닌 다양한 크기의 교차로들에서 연료소비 감축 기대치를 교차로 규모별로 연료소비 감축량을 보정하는 표 12 계수를

4) 직진우선, 신호연동, 점멸운영과 같이 간선도로 축을 대상으로 모의실험 분석한 경우 결과를 1/3배하여 한 개 교차로에 대한 연료소비 감축량으로 수치를 환산하였음

표 11. 세부과제별 연료소비 감축량(리터/시/교차로)

구분	교차로 규모	포화도 수준					
		0.20	0.40	0.60	0.75	0.85	0.95
점멸운영	A	49.82	66.03	69.10	점멸신호 적용불가		
	B	74.36	98.55	103.13			
	C						
	D						
보행자 작동	A	보행자작동신호기 탄소배출 절감효과미흡 (본 분석제외)			21.38	78.95	96.18
	B				32.07	118.43	144.27
	C				42.76	157.90	192.36
	D				53.45	197.38	240.45
비보호 좌회전	A	7.26	17.95	28.03	비보호좌회전 적용 불가		
	B						
	C						
	D						
좌회전 감응	A	5.16	3.78	3.96	신호현시 Max-out 영향으로 탄소배출절감효과 미흡 (본 분석제외)		
	B	7.74	5.67	5.94			
	C	10.32	7.56	7.92			
	D	12.90	9.45	9.90			
직진우선	A	효과미약			6.12	6.20	14.72
	B				9.13	9.25	21.97
	C				12.14	12.30	29.22
	D				15.25	15.45	36.69
신호연동	A	효과미약			22.12	16.86	56.41
	B				33.02	25.16	84.19
	C				43.92	33.46	111.97
	D				55.14	42.02	140.60

표 12. 차로 수를 반영한 모의실험 추정 연료소비량 보정계수

구분	4차로	6차로	8차로	10차로
점멸운영	0.67	1.00	N/A	N/A
보행자 작동	1.00	1.50	2.00	2.50
신호연동 운영	0.67	1.00	1.33	1.67
비보호 좌회전	1.00	N/A	N/A	N/A
직진우선	0.67	1.00	1.33	1.67
좌회전 감응	1.00	1.50	2.00	2.50

적용하며 계산한다.

점멸신호운영, 신호연동, 직진우선신호체계의 모의실험 분석에 사용된 신호교차로 차로 수는 경우 6차로이다. 보행자 작동신호, 비보호좌회전, 좌회전감응신호운영 모의실험 분석을 위해 사용된 신호교차로 차로 수는 4차로이다. 편도2차로를 기준으로 처리되는 직진교통량을 기준으로 편도 3차로로 처리되는 직진교통량은 이의 1.5배, 편도 4차로 경우는 2.0 배하여 교차로 규모에 따른 연료소비량 변화를 추정한다.

5.2 전국단위 탄소배출량 추정

분석대상 교통운영체계선진화 세부 운영방법이 신규 적용될 수 있는 전국 교차로 수, 효과가 기대되는 시간대 등을 고려하여 분석결과를 일반화한다. 교통운영체계선진화방안으로 수행되는 6개 세부과제를 수행하였을 시 전국에서 기대

표 13. 연료소비 절감 량(리터)

구분	연료 절감 량(리터)		효과 순위
	일	년	
점멸운영	7,329,101	1,116,368,645	2
보행자 작동	27,612,187	4,205,888,325	1
비보호 좌회전	1,807,666	275,343,750	5
좌회전 감응	1,616,023	246,153,574	6
직진우선	2,186,859	333,102,394	4
신호연동	5,476,965	834,251,275	3

되는 에너지소비 감소량은 식 (2)를 토대로 추정하였으며 그 결과는 표 13과 같다.

지금까지 교통운영체계선진화방안 세부과제 적용에 따른 에너지 감소량을 연료단위에서 탄소배출량으로 전환한다. 가솔린 감소량을 탄소(CO₂) 감소량으로 환산하기 위해서는 식 (3)을 적용한다. 이를 통하여 도출된 선진화방안 세부과제별로 예상되는 탄소배출 감축량은 표 14와 같다.

단위시간당으로 분석된 에너지 절감효과를 년 단위로 환산한 결과로 보행자작동신호 도입, 점멸신호 운영, 신호연동운영이 분석대상 교통운영선진화방안 세부 6개 운영방안 중 큰 에너지절감에 큰 효과가 있는 것을 파악할 수 있다.

탄소배출량 감소 효과가 가장 높은 것은 보행자작동신호로 년 간 약 9,660,962.5톤 CO₂가 감소되는 것으로 나타난다. 그 다음으로는 점멸운영신호 및 신호연동의 효과가 높은 것으로 나타났고, 비보호좌회전, 좌회전감응, 직진우선 신호의 적용은 이산화탄소 감축측면에서 다른 사업에 비해 상대적으로 저감 효과가 높지 않으나 탄소배출량 감축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

박진영 등(2008)은 우리나라가 배출하는 전체 온실가스 중 약 16.6%가 교통부문에서 배출되며 이 중 77.7%에 해당하는 7,848만 톤이 도로교통부문에서 배출되는 것으로 보고하고 있다. 해당 수치와 비교할 시 (1) 점멸신호운영, (2) 보행자작동신호, (3) 비보호좌회전, (4) 좌회전감응, (5) 직진우선, (6) 신호연동 운영기법의 전면 도입으로 각각 도로교통부문의 온실가스의 13.93%, 31.44%, 2.00%, 1.73%, 1.49%, 13.19%의 감소를 기대할 수 있는 수준에 해당된다(표 15 참조).

5.3 연구의 제약

우리나라 휘발유, LPG등의 연료특성을 반영하며 연료소비

표 14. 연료소비 절감에 따른 석유환산톤 및 이산화탄소 감축량

구분	석유환산톤(TOE)		TCO ₂	
	일	년	일	년
점멸운영	5,863.3	893,094.9	16,835.0	2,564,309.6
보행자 작동	22,089.7	3,364,710.7	63,425.4	9,660,962.5
비보호 좌회전	8,646.1	220,275.0	24,825.3	632,467.0
좌회전 감응	1,292.8	196,922.1	3,712.0	565,414.6
직진우선	1,749.5	266,481.9	5,023.2	765,139.1
신호연동	4,381.6	667,401.0	12,580.6	1,916,282.5
계	39,645.781	5,412,160.4	109,585.335	16,104,575.3

표 15. 도로교통 부문 전체 온실가스 배출량 기준 차지비율

구분	비율
점멸운영	3.27%
보행자 작동	12.31%
비보호 좌회전	0.81%
좌회전 감응	0.72%
직진우선	0.97%
신호연동	2.44%

표 16. 도로교통부문 연료 종류별 연간 소비량

구분	휘발유	경유	LPG
도로교통부문 연료 소비량(<i>I</i>) ¹⁾	52,875	82,720	40,760
	(29.98%)	(46.91%)	(23.11%)
TOE당 IPCC 탄소배출계수 ²⁾	0.783	0.837	0.713
이산화탄소 도로배출계수(g/km) ³⁾	2.56~6.21	1.16~12.0	6.17~6.36

¹⁾한국석유공사 통계 (2010) <http://www.petronet.co.kr>

²⁾UN, IPCC 가이드라인

³⁾환경부 국립환경연구원 (2000) 대기 오염물질 배출량

량을 추정하는 모의실험 전산모형이 현재 부재하여 더 이상 상세한 수준의 연구수행에 어려움이 있다. 모의실험에 사용된 시나리오 역시 거시적 수준에서 마련되었기에 분석 대상이 되는 교통운영 상황의 일반화 측면에서 제약이 존재한다. 상세한 수준의 본 실험에서는 CORSIM 모의실험을 적용하여 분석하였기 때문에 우리나라 등록 차량 중 휘발유, 경유, LPG 연료차량 비율을 고려하지 않고, 전 차량이 휘발유 연료를 사용하는 차량으로 가정된 상태로 에너지소비 감축효과를 추정하는 한계를 가지고 있다.

한국석유공사(2010)의 집계에 따르면 우리나라 도로교통에서 소비되는 연료는 표 16과 같이 경유가 비율이 가장 높고(46.91%) 그 다음으로 휘발유(29.98%)와 LPG(23.11%) 순이다.

도로교통부문에서 가장 많이 사용되는 경유는 1톤당 이산화탄소배출은 0.837톤으로 휘발유(0.73)에 비하여 약 15% 정도 높다. 이는 향후 경유의 사용량을 고려하는 모의실험 모형을 적용하며 분석하는 경우 교통운영체계선진화를 통한 탄소배출량 감소 효과가 본 분석을 통하여 계산된 수치보다 더욱 높게 된다. 이를 통하여 본 연구가 제시하는 분석결과가 매우 보수적인 수준에서 추정된 최소치의 탄소감축량임을 알 수 있다.

LPG의 경유는 탄소배출계수가 0.713으로 휘발유에 비하여 0.98% 수준으로 수치는 낮으나 실질적으로 LPG가 배출하는 이산화탄소량은 휘발유 보다 낮지 않다. 이유는 휘발유의 경우 도로 1km를 주행하며 배출하는 이산화탄소량이 승용차의 경우 2.56에서 버스 및 트럭의 경우 6.21이나 LPG의 경우 택시 및 승용차의 경우 6.17로부터 버스 및 트럭의 경우 6.36으로 그 수준이 높다.

6. 결 론

도로교통 운영부문에서의 개선 노력이 UN 청정개발체제 시장으로 연계될 경우 시너지효과로 국가 교통발전, 경제발

전 및 국가 위상 향상을 기대할 수 있다. 교통운영체계선진화사업의 세부실행과제가 국제사회에서 인정받기 위해서는 이를 청정개발체제로 승화시킬 필요가 있다.

IPCC 가이드라인의 권고에는 온실가스 배출량 추정에 사용되는 방법들이 소개되지만, 이들 방법들은 기본적으로 교통수요관리를 통한 온실가스 배출감소에 초점을 맞추고 있어 교통운영관리를 통한 분석에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 (1) 교통운영관리를 위해 고려하여야 하는 기본 항목을 정의하고, (2) 도로교통 운영기법 적용 전과 후 상황에 연소되는 연료 에너지 소비량을 추정하고, (3) 이를 토대로 하는 에너지소비변화를 이산화탄소(CO₂)로 변환하여 탄소배출량을 추정하는 방법을 제안하였다.

분석된 교통운영체계선진화방안 중 보행자작동신호의 경우가 약 9,660,962.5톤의 CO₂ 감소효과가 있는 것으로 도출되어 분석 대상 교통신호운영방안 중 가장 효과가 높은 것으로 나타났다. 이어 점멸운영신호 및 신호연동체계 구축이 탄소배출량 감소 효과가 높은 것으로 나타났고, 그 뒤로 비보호좌회전 확대 적용, 좌회전감응신호의 도입, 직진우선신호의 적용이 이산화탄소 발생 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

연구를 통해 분석된 교통운영선진화사업 6개 세부과제들의 탄소감축 비율은 우리나라전체 교통부문에서 배출되고 있는 7,848만 톤의 온실가스 중

- (1) 점멸신호운영 확대적용이 3.27%,
- (2) 보행자작동신호운영 확대적용이 12.31%,
- (3) 비보호좌회전 확대적용이 0.81%,
- (4) 좌회전감응신호 확대적용이 0.72%,
- (5) 직진우선(선직진)신호제어 확대적용이 0.97%,
- (6) 신호연동 확대적용이 2.44%

인 것으로 도출되었다. 이는 6개 교통운영체계선진화 사업을 현장에 실시하였을 경우 한 해 동안 도로교통부문이 배출하는 이산화탄소의 비율을 그 만큼 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.

앞서 모의실험 분석기법을 통해 분석된 교통운영체계선진화방안의 세부과제가 산출하는 이산화탄소 감축량은 양적 측면에서 그 중요성이 인식되었으나 크게 세 가지 항목이 추가·보완되어야 할 필요가 있다.

첫째, 국제사회에서 이산화탄소 감축효과가 있는 청정개발체제 사업으로 인정받기 위하여 이산화탄소 배출 감축량이 현재를 기준으로 추가적(특정 시점을 기준으로 추가적으로 감소되어야 함)이어야 하며 실질적이어야 한다. 추가성의 분석을 위해서는 제안방법론과 관련이 있는 다양한 시나리오 설정과 이를 분석하기 위한 연구개발이 필요하다. 예를 들어, 콜롬비아 보고타 BRT사업이 청정개발체제 사업으로 추진되는 과정에서 추가성(Additionality)을 증명하기 위해서 기존 대중교통체계의 개편, 청정개발체제 사업이 포함되지 않는 BRT구축 등 다양한 시나리오를 설정한 바 있다. 또한, BRT사업의 제약조건으로 소요 비용, 정치적 저항, 기존 교통운영자들의 반대, BRT사업의 경험 미숙 등을 제시하였다. 이에 기초하여, 교통운영체계선진화방안 세부사업의 경우에는 현재 교통신호시스템 유지, 전 도로망 연동화 신호운영, 감응신호시스템 체계 구축 등이 해당될 수 있으며, 교통운영

체계선진화사업의 제약조건으로 소요비용, 기존신호운영업자의 반대, 경험미숙 등이 포함될 수 있다.

둘째, 청정개발체제 사업 수행 시 사업 범위 바깥에서 발생하지만 청정개발체제 사업과 관련이 있는 온실가스 배출량(누출, leakage이라고 함)을 객관적으로 산출할 수 있는 방안이 구체화되어야 한다. 예를 들어, 보고타 BRT(Bus Rapid Transit)사업은 탄소누출(leakage)을 고려하기 위하여 BRT건설에 소요되는 시멘트, 아스팔트 생산에서 발생하는 온실가스, 기존 차량 폐차 시 발생하는 온실가스, 사업시행으로 절감된 유류의 정제 및 운송과정에서 줄어드는 온실가스 감소량, BRT운영으로 인한 교통수단 전환 따른 온실가스 감소량, 교통 혼잡 감소로 인한 온실가스 감소 및 이에 따른 수요증가로 인한 온실가스 변화 내용을 적용하였다. 이를 고려하여, 교통운영체계선진화방안 세부사업의 UN인증 청정개발체제 사업으로 승인을 받기 위한 누출항목 설정에는 현장 도로구조 개선에 소요되는 시멘트와 아스팔트 생산에서 발생하는 온실가스, 선진화사업의 개선효과 즉 교통혼잡 감소로 인한 대중교통/승용차 수요증가로 인한 온실가스 증대 등이 포함될 수 있다.

셋째, 청정개발체제 사업이 시행되는 과정을 보여주는 자료의 투명성을 확보할 수 있을 정도의 모니터링을 실시되어야 한다. 모니터링은 정확한 배출 자료를 수집하기 위한 것으로 (1) 배출 감축 및 기타 사업 목표들이 실제로 달성되고 있다는 신뢰를 주어야 하고, (2) 베이스라인과 사업으로 인한 온실가스 배출과 이에 따른 위험들을 모니터 할 수 있어야 한다.

교통운영체계선진화사업이 청정개발체제 사업으로 시행되는 과정을 보여주는 자료를 객관적으로 확보하여 투명성을 확보하는 방안으로 우리나라 경찰청이 운영하는 UTIS(Urban Traffic Information Systems)시스템을 활용하는 방법이 있다. 예로 UTIS가 운영되고 있는 도시에 교통운영체계선진화 세부사업이 적용될 경우, UTIS 정보센터에서는 개별차량이 갖는 반경 500m 이내의 차량이동을 추적할 수 있기 때문에 해당 차량의 속도, 위치정보, 지점 및 가로축별 차량 에너지 변화량 및 온실가스 배출량 측정이 모형 개발 등의 추가 노력이 있을 경우 실시간으로 가능할 수 있는 여건을 확보할 수 있다. 사업 추진에 따른 온실가스 배출량 측정이 가능하고 측정방법에 대한 타당성 입증의 외국에 비하여 유리할 것으로 판단된다.

현재 UN이 인정하는 도로교통 운영부문 CDM방법론이 없다. 대중교통 활성화 노력이 꾸준히 지속되더라도 승용차 이용을 강제로 억제할 수는 없기 때문에 도로교통 운영부문 및 녹색 첨단교통체계(Green ITS) CDM 필요성은 점차 강조될 것이라 예견된다. 도로교통 운영부문 CDM방법론은 다양한 모습으로 발전될 수 있기에 지속적인 연구를 통해 본 논문이 제안하는 방법을 발전시킬 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 경찰청 재원으로 치안정책연구소의 지원을 받아 2010년 수행된 교통운영체계선진화사업의 탄소감축 청정개발효과 연구 결과 중 일부를 발췌·요약하여 정리한 논문이

며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 국가경쟁력강화위원회(2009) 12차 회의 보도자료.
국가경쟁력강화위원회(2010) 우회전 때 꼭 신호등 확인하세요, **대한민국정책포털**, 2010.01.14.
국토해양부(2010) 국토해양통계누리.
국토해양부(2010) 자동차관리현황 및 자동차등록현황.
기후변화홍보포털(2010) <http://www.gihoo.or.kr/portal/index.jsp>
김영철(2009) 세계 탄소시장 현황과 정책 및 우리의 대응방안, **봄호**, 사단법인한국가스연맹, pp. 24-32.
김태호, 이수일, 김영일, 노정현(2010) 도로교통부문의 온실가스 배출량 산정방법론 비교연구, **대한토목학회지**, 대한토목학회, Vol. 58, No. 9, 통권365호, pp. 67-73.
박용남(2007) 간선급행버스시스템과 지속가능도시: 기후변화협약에 대응한 전략을 중심으로, 지속가능도시연구센터.
박진영, 조준행, 김동준(2008) 교통부문 청정개발체제(CDM) 활성화 방안, 한국교통연구원
빈미영(2009) 교통부문 청정개발체제(CDM)사업의 과제와 전망, 경기개발연구원
서울지방경찰청(2009) 2009 서울특별시 교통량조사자료.
에너지관리공단(2007) 기업을 위한 CDM사업 지침서.
이용택, 이태경, 조성준(2005) 서울시 도로교통량조사체계, **도로교통 제99호 봄**, pp. 44-57.
한국석유공사 석유정보망(2010) <http://www.petronet.co.kr/main2.jsp>
IPCC (2010) Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006_gl/vol2.html
United Nations Framework Convention on Climate Change (2010) <http://unfccc.int/>
United Nation (2010a) <http://unfccc.int/>
United Nation (2010b) <http://cdm.unfccc.int/>
- (접수일: 2011.3.7/심사일: 2011.3.30/심사완료일: 2011.11.11)