

# 온실가스 산정을 고려한 평면선형 설계기법 연구

Evaluation of Horizontal Alignment Alternatives Based on Levels of the Greenhouse Gases



이 종 학 | 한국산업관계연구원 수석연구원 · 공학박사

## 1. 서론

현재 경제성 분석 시 환경비용 절감편익 산정은 단순히 차종과 속도만을 반영하기 때문에 도로 노선 대안 선정 시 교통량과 도로연장이 같으면 환경비용이 똑같이 산정되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제로 인해서 도로설계자는 어느 노선이 온실가스 배출량을 최소화하는 대안인지를 결정하기가 어려웠다. 최근 이 문제점을 해결하기 위한 방안으로 도로의 기하구조 조건을 반영하여 온실가스 배출량을 산정하려는 연구가 진행되고 있다. 도로의 기하구조 조건을 반영할 수 있는 온실가스 연구가 필요한 이유는 도로의 기하구조에 따라 차량들의 온실가스 배출량이 민감하게 변하기 때문이다. 한 예로 비교 노선에서 차량이 같은 속도로 주행한다고 할지라도 도로 기하구조 조건에 따라서 온실가스 배출량의 차이가 많이 나는 것으로 나타났다(한동희 외, 2012). 지금까지 이 문제를 다룬 국내외 연구 결과를 살펴볼 때, 도로의 기하구조 조건 중에서 종단경사가 온실가스 배출량에 미치는 영향이 가장 크며(Park and Rakha, 2006), 종단경사 이외에도 평면곡선설계가 달라지

면 차량들의 온실가스 배출량도 변하는 것으로 나타났다(Ko, 2011). 종단경사 구간에서 발생하는 차량들의 온실가스 배출량은 주로 엔진의 부하에 따른 배기가스에 해당하며 평면곡선부의 설계 변화에 따라 발생하는 차량들의 온실가스 배출량은 주로 차량의 국지적 감가속 상황에서 발생하는 배기 가스다(Ko, 2011). 따라서 한 도로노선에 대한 온실가스 배출량을 정확하게 산정하려면 다양한 도로 기하구조에 따라서 변화하는 주행속도 및 감가속도를 모두 고려하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 차량이 감속 및 가속을 반복할 때 온실가스 배출량이 평상시 보다 높기 때문이다(한국교통연구원, 2010; Farzaneh and Zietsman, 2012). 또한 이론적으로 볼 때도 주행속도 및 감가속도는 운전자의 운전행태에 따라서 차이가 있지만 도로 기하구조 요인으로 인한 영향이 크다고 볼 수 있다(AASHTO, 1995; Lamm and Chouiri, 1987). 이와 같이 도로는 직선과 곡선의 연속으로 구성되어 있고, 지방부 도로에서는 감가속이 끊임없이 발생하기 때문에 지금까지 알려진 종단경사에 의한 온실가스 배출량 못지않게 감가속도 비중이 클 수 있다.

지금까지 국내외 연구 결과를 놓고 볼 때 이런 목적으로 수행한 연구 결과는 없었다. 이러한 관점에서, 본 연구는 다양한 도로 기하구조 조건에 따른 온실가스 배출량을 보다 정확히 산정할 수 있는 기법을 정립하는데 주력하였고 이 방법론을 토대로 다양한 도로의 기하구조 조건 등을 포함시켜 온실가스 배출량을 산정하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 연구의 수행방법

본 연구는 도로 기하구조 유형에 따른 온실가스 배출량을 보다 정확히 산정하기 위한 목적을 가지고 도로 선형별 온실가스 배출산정기법을 정립하였다. 그림 1은 본 연구에서 수행하고자 하는 도로 선형별 온실가스 배출산정기법을 정립한 것이다.

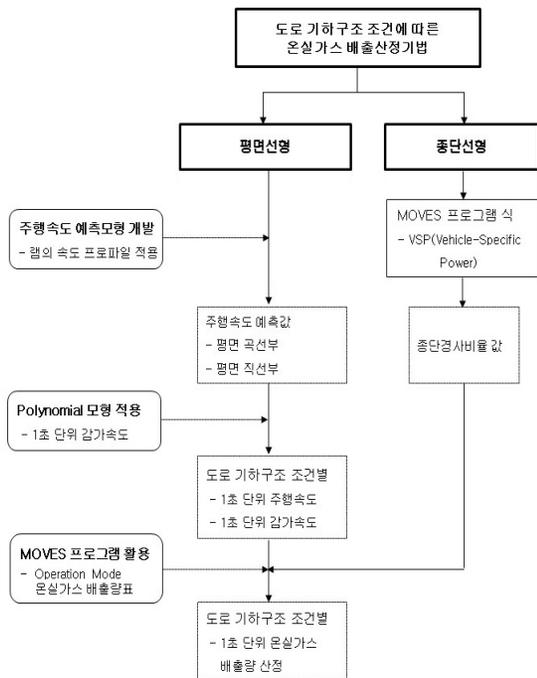


그림 1. 본 연구의 도로 선형별 온실가스 배출산정기법 정립

### 2.2 온실가스 배출산정기법 정립

#### 2.2.1 평면선형

본 연구에서는 램(Lamm)의 주행속도 산정모형 이론을 토대로 평면선형별 온실가스의 배출유형을 살펴보기 위한 적용방안을 마련하였다.

##### ① 독립구간 온실가스 배출 유형 검토

이 구간의 특징은 평면직선부의 길이가 충분히 길기 때문에 평면직선구간(LT)의 주행속도는 두 곡선부의 영향을 받지 않는다. 내용을 살펴보면, 직선부 길이(LT<sub>1</sub>) ≥ 감가속도길이(LTL)인 경우는 그림 2에서 보는 것과 같이 직선의 길이가 감가속보다 같거나 큰 경우를 나타낸다. 두 평면곡선부(R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>)에 접해있는 평면직선부의 감가속도(S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>)는 두 곡선부의 크기 및 직선의 길이에 따라서 다르게 나타나며, 이에 따른 온실가스 배출량도 유형별로 산정할 수 있다. 이 구간을 제외한 평면직선부의 등속도(T) 구간은 두 곡선부의 영향을 완전히 벗어난 구간이기 때문에 운전자가 선택할 수 있는 희망속도에 따라서 온실가스 배출량을 산정할 수 있다. 그림 2는 평면직선부 독립구간의 온실가스 배출량 개념도를 나타낸 것이다.

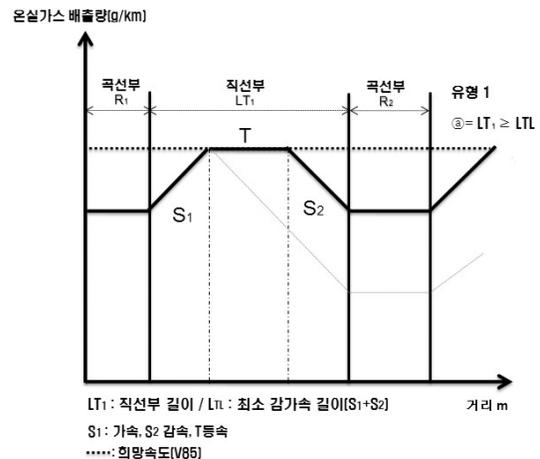


그림 2. 독립구간 온실가스 배출량 개념도

② 비독립구간 온실가스 배출 유형 검토

이 구간은 평면직선의 길이가 짧기 때문에 평면직선구간( $LT_1$ )의 주행속도는 두 평면곡선부의 영향을 받는다. 내용을 구체적으로 살펴보면, 그림 3과 같이 유형2(㉑)보다는 유형3(㉒)의 평면직선 길이가 짧게 나타난다.  $V85_{R1} > V85_{R2}$ 인 경우, 유형2(㉑)는 가속도의 길이보다 감속도의 길이가 길며, 유형3(㉒)의 경우는 가속도의 길이가 존재하지 않고 감속도의 길이만 존재한다. 또한  $V85_{R1} < V85_{R2}$ 인 경우, 유형2(㉑)는 가속도의 길이가 길며 유형3(㉒)은 가속도의 길이만 존재한다. 이 결과를 종합해 볼 때 평면직선부 비독립구간의 경우, 기하구조의 영향으로 인한 감가속도의 영향이 독립구간보다 크기 때문에 이에 따른 온실가스 배출량의 변화량도 다양하다. 그림 3은 평면직선부 비독립구간의 온실가스 배출량 개념도이다.

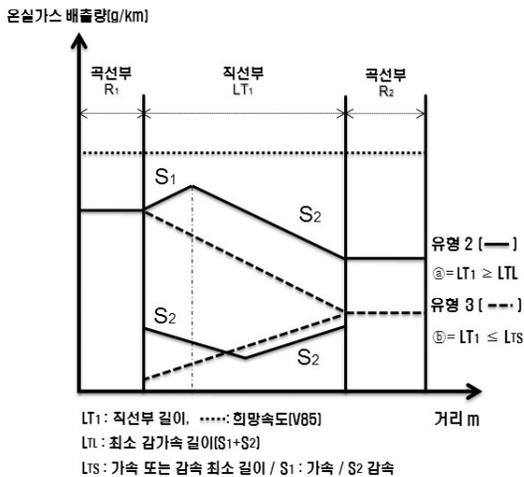


그림 3. 비독립구간 온실가스 배출량 개념도

③ 평면곡선부 구간 온실가스 배출 유형 개념도

평면곡선부에서 램의 가정은 그림 4에서 보듯이 주행속도는 항상 일정하다는 가정이다. 그러나 실제 평면곡선부의 주행속도는 상류부 및 하류부의 평면직선길이 및 평면곡선부의 크기에 따라서 다르게 나타난다. 본 연구에서의 평면곡선부의 온실가스 배출량은 상하류부 평면직선길이 및 평면곡선부의 크기

에 따른 도로 기하구조 조건을 반영하여 그림 4와 같이 온실가스 배출량을 산정하였다.

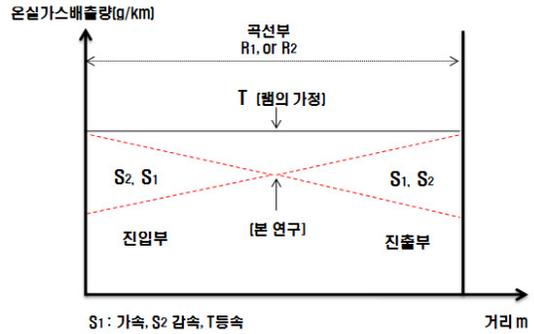


그림 4. 평면곡선부 온실가스 배출량 개념도

④ 평면선형별 온실가스 배출량 산정 개념도

이 결과들을 정리하자면 주행속도 프로파일의 이론을 적용한 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 평면직선부와 평면곡선부에 대한 주행속도 예측모형 개발이 필요하다. 평면직선부의 주행속도 예측모형은 독립구간과 비독립구간을 재현해야 하기 때문에 이러한 가정을 실현하기 위해서는 평면직선부의 길이를 설명변수로 선택하고 평면곡선부의 곡률변화율 및 곡선반경의 크기를 설명변수로 선정하여 주행속도를 예측할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 주행속도 프로파일이 반영된 평면직선부와 평면곡선부의 예측모형을 활용했을 때 도로 기하구조 유형에 따른 온실가스 배출량을 그림 5와 같이 산정하였다.

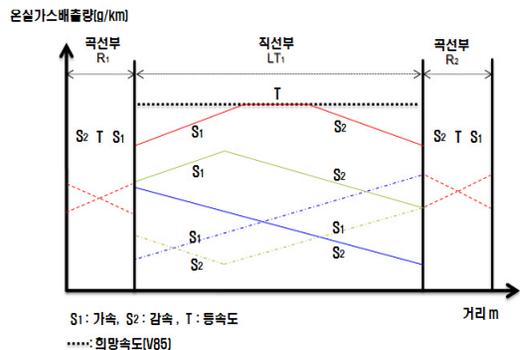


그림 5. 평면선형별 온실가스 배출량 개념도

### 2.2.2 종단선형

종단선형에서의 온실가스 배출량 산정은 평면선형에서의 온실가스 배출량 산정방법과는 약간의 차이점이 있다. 평면선형은 차량의 주행속도 및 감가속도 만으로도 차량의 온실가스 배출량을 산정할 수 있지만, 종단선형의 경우는 주행속도, 감가속도와 함께 종단경사를 함께 고려해야 한다. 그 이유는 차량의 주행속도가 갈더라도 내리막길 또는 오르막길을 주행하느냐에 따라서 온실가스 배출량이 크게는 10배 이상 나기 때문이다(한동희 외, 2012). 본 연구에서 종단선형에서의 온실가스 배출량을 산정하기 위한 방법으로는 MOVES 프로그램에서 제공하는 VSP (Vehicle-Specific Power) 식을 활용하여 종단경사 비율에 따른 온실가스 배출량을 산정하였다.

$$VSP = \frac{A \cdot V + B V^2 + C V^3 + M V (\alpha + g \sin \theta)}{M}$$

여기서,

VSP : 시간 t 일 때의 차량이 받는 힘(kW/tonne)

$\alpha$  : 가속도(m/s<sup>2</sup>)

V : 속도(m/s)

A : 노면마찰저항(KW-sec/m)

B : 차량의 회전저항(KW-sec<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

C : 공기저항(KW-sec<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

M : 무게(tonne)

$\theta$  : 종단경사비율(%)

g : 중력가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)

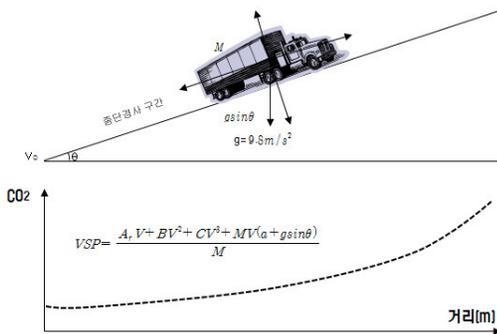


그림 6. 종단선형 온실가스 배출산정기법 개념도

본 연구에서 그림 6은 종단선형 온실가스 배출산정기법 개념도를 나타낸 것이다.

### 2.2.3 감가속도 분석

실제 주행속도는 다양한 인적요소 및 도로의 다양한 환경 때문에 등속도 운동은 쉽게 발생하지 않는다. 따라서 차량이 매순간 감가속도가 변화하기 때문에 이를 반영한 1초 단위 시간에 근거한 분석이 필요하다. Akcelik 외는 온실가스 배출량 산정 시 1초 단위(Second by Second) 시간에 근거한 감가속도 분석이 중요하다고 언급하여 이를 반영한 Polynomial 감가속도 프로파일 모형을 제안하였고 본 연구에서도 Polynomial 감가속도 모델을 반영하였다(Akcelik and Biggs, 1987; Akcelik and Besley, 2001).

### 2.2.4 MOVES 프로그램 활용방법

온실가스 배출량 산정은 MOVES 프로그램을 통해서 산정한다. MOVES 프로그램에서 온실가스 배출량을 산정하기 위한 방법은 Link Drive Schedule Mode, Link Mode, Operation Mode 등이 있다(EPA, 2010). 3가지의 MOVES 산정방법론 중에서 본 연구는 특정 연속류 구간을 분석하여 온실가스 배출량을 산정하는 목적이기 때문에 Operation Mode를 선정하였다. 이 방법론은 온실가스 배출량표를 작성하는 단계에서 VSP에 대한 속도 및 감가속도를 함께 반영할 수 있다. 표 1은 MOVES의 Operation Mode Bin 예시이다.

이 방법론을 토대로 Operation Mode 배출량표를 작성할 수 있으며 이 표는 1초 단위에 근거한 값으로서 본 연구에서 수행하려고 하는 도로 기하구조에 따른 1초 단위의 주행속도 및 감가속도 값과 연결시킨다. 연결방법은 도로 기하구조 조건에서 산정한 순간속도 및 순간 VSP에 해당하는 Bin을 찾아서 Operation Mode 온실가스 배출량표에 해당하는

표 1. MOVES의 Operation Mode Bin 예시

구분	순간속도(mph)		
	0~25	25~50	> 50
순간 VSP(kW/tonne)	0 <	Bin 11	Bin 21
0 ~ 3	Bin 12	Bin 22	Bin 33
3 ~ 6	Bin 13	Bin 23	
6 ~ 9	Bin 14	Bin 24	
9 ~ 12	Bin 15	Bin 25	Bin 35
12 이상	Bin 16		
12 ~ 18		Bin 27	Bin 37
18 ~ 24		Bin 28	Bin 38
24 ~ 30		Bin 29	Bin 39
30 이상		Bin 30	Bin 40

Bin ID 값을 연결시킨다. 최종적으로 이 값은 본 연구에서 얻고자 하는 도로 기하구조 조건에 따른 1초당 온실가스 배출량이 된다.

### 3. 결론 및 기대효과

도로 기하구조 조건에 따른 온실가스 배출량 산정에서 가장 중요한 것은 객관적이고 신뢰성 있는 온실가스 배출산정기법을 정립하는 것이다. 본 연구에서는 도로 기하구조 조건에 따른 온실가스 배출산정기법을 정립하는데 주안점을 두었다. 기존 연구에서 도로 기하구조 조건에 따른 온실가스 배출량을 산정하는 방법은 단순히 한정된 구간만을 산정하고 있지만 본 연구에서 제안한 온실가스 배출산정기법은 상하류부 도로 기하구조 조건을 동시에 고려할 수 있기 때문에 다양한 도로 기하구조 조건에 따른 온실가스 배출량을 정확하게 산정할 수 있다. 본 장에서는 본 연구의 결과가 가지는 의미가 무엇이고 향후 본 연구에서 제안한 온실가스 배출산정기법이 도로 환경 부문에 어떻게 기여를 할 수 있는지에 대해서 살펴본다.

첫째, 본 연구에서 제안한 온실가스 배출산정기법

은 온실가스를 저감할 수 있는 도로 설계방법에 대해서 정확한 지표를 제시할 수 있다는 점이다. 기존 연구에서는 단순히 종단경사가 크고 평면곡선반경이 작으면 온실가스 배출량에 미치는 영향이 크다고 알려져 있었다. 그러나 본 연구결과에서 나타난 결과로는 비교 노선에서 똑같은 제원의 종단경사 구간일지라도 상하류부 도로 기하구조 조건에 따른 차량의 감속도 및 주행속도의 변화량에 따라서 온실가스 배출량은 다르게 나타났다. 또한 기존 연구의 결과처럼 평면곡선반경이 무조건 작다고 해서 온실가스 배출량이 많이 배출되지는 않았다.

본 연구에서 제시된 결과는 평면직선부의 길이에 따라서 평면곡선부의 온실가스 배출량이 달라지는 것으로 나타났다. 다시 말해서 같은 제원의 평면곡선부에서도 상하류부 평면직선부의 길이에 따라서 온실가스 배출량의 차이가 있다는 점이다. 이러한 관점에서 기존 연구는 이론상의 한계점을 노출시켰기 때문에 온실가스를 저감시킬 수 있는 도로설계방법을 정확하게 제시할 수 없었지만 본 연구에서 제안한 온실가스 배출산정기법은 도로 기술자에게 보다 정확한 지표를 제시할 수 있다.

둘째, 환경측면에서 최적의 도로 노선 대안 선정시 도로 기술자들이 보다 정확한 의사결정을 할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 환경비용 절감편익을 산정할 때에는 단순히 차종과 속도만을 반영하기 때문에 도로 노선 대안 선정시 교통량이 같으면 환경비용이 똑같이 산정되는 문제점을 나타냈다. 또한 최근 연구조차도 도로의 기하구조와 온실가스 배출량의 관계를 증명하는 연구가 미미하기 때문에 최적 도로 노선의 비교 대안들 중에서 어느 대안이 온실가스 배출량을 최소화하는 대안인지 알 수 없게 하는 문제를 발생시키고 있다. 그러나 이 문제와 관련하여 본 연구에서 제안한 온실가스 배출산정기법을 활용한다면 도로 기술자들이 도로 노선 대안 선정시 보다 객관적이고 신뢰성 있는 의사결정을 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) 한국교통연구원(2010), 운전자 운행패턴과 교통류 분석을 통한 에코드라이빙 활성화 방안 연구.
- 2) 한동희, 백승걸, 이승봉(2012), 차량 온실가스 배출량의 도로 중단경사 영향 분석, 대한교통학회 추계학술발표회, pp.634-639.
- 3) AASHTO(1995), Safety Module for Highways Design
- 4) Akcelik, R. and Biggs, D. C.(1987), Acceleration Profile Models for Vehicles in Road Traffic, Transportation Science, Vol. 21, No. 1, pp.36-54.
- 5) Akcelik, R., and Besley, M.(2001), Acceleration and Deceleration Models, 23rd Conference of Australian Institute of Transportation Research, Monash University, Melbourne, Australia.
- 6) EPA, Motor Vehicle Emission Simulator(2010), User Guide for MOVES2010a.
- 7) Farzaneh, M. and Zietsman, J.(2012), Characterization of Potential Impact of Speed limit Enforcement on Emissions Reduction, Transportation Reserch Record 91st Annual Meeting.
- 8) Ko, Myunghoon,(2011), Incorporating Vehicle Emission Models into the Highway Design Process, Ph.D. Dissertation, Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas.
- 9) Lamm, R. and Chouiri, E. M.(1987), Rural Roads Speed Inconsistencies Design Methods, Research Report for the State University of New York, Research Foundation, Parts 1, Albany, N.Y., U.S.A.
- 10) Park, S. and Rakha, H.(2006), Energy and Environmental Impacts of Roadway Grades, In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1987, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., pp.148-160.

**학회지 광고접수 안내**

본 학회지에 게재할 광고를 모집합니다. 우리 학회지는 계간으로 매회 2,100부를 발간하여 회원과 건설관련 기관에 배포하고 있습니다. 회사 영업신장과 이미지 제고를 원하시는 업체는 우리 학회지에 광고를 실어주시기 바랍니다.

광고료 : 표2 · 표3 · 표4(300만원) · 간지(200만원)  
 ※ 상기금액은 연간(4회)광고료임.

사단법인 **한국도로학회**  
 전화 (02) 3272-1992 전송 (02) 3272-1994