

# 차량시뮬레이터를 활용한 도로기하구조 조건별 CO<sub>2</sub> 산정 연구

## Estimation of Greenhouse Gas Emissions as Highway Design Types by Using Driving Simulator

정상민	Chong Sang min	정회원 · 주식회사 건영이앤씨 대표 · 서울시립대학교 교통공학과 박사과정 (E-mail : chongcck@hanmail.net)
이종학	Lee, Jong-hak	(재)한국산업관계연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : jonghack2000@hanmail.net)
최재성	Choi, Jaisung	정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 교수 (E-mail : traffic@uos.ac.kr)
김종민	Kim, Jong-min	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : kimbellsky@kict.re.kr)
노관섭	Noh, Kwan-sub	정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 (E-mail : ksno@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study devotes its energies to estimate greenhouse gas emissions for types of horizontal highway designs.

**METHODS :** This paper suggested two types of road scenarios, scenario 1 is made by the lack of road design consistency. Beside scenario 1, scenario 2 is made by good road design. For comparisons of greenhouse gas emissions, driving simulator was used.

**RESULTS :** Emission rates of road scenario 1 are 1.4 times higher than scenario 2 in the driving simulator.

**CONCLUSIONS :** This study may have important implications for contributing to the application of road alignment technology for reduction of greenhouse gases as quantifying the correlations between greenhouse emissions and various road alignments. Consequently, this study will help road designers determine which roads are best alternatives in the process of choosing the roads in the future in terms of environmental benefits.

### Keywords

greenhouses gases, environmental benefits, road alignment condition, driving simulator

Corresponding Author : Lee, Jong Hak, Senior Researcher  
Korea Institute for Industrial Research, 173, No. 501, Elysia the  
Knowledge Industry Center Building Digital-ro, Geumcheon-gu,  
Seoul, 153-801, Korea  
Tel : +82.2.588.2162 E-mail : jonghack2000@hanmail.net

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Feb. 3, 2014 Revised Feb. 5, 2014 Accepted Nov. 7, 2014

## 1. 서론

온실가스 배출순위 세계 10위인 우리나라는 전체 온실가스 배출량 중 도로가 16%를 차지하고 있으며 저탄소 녹색성장(CO<sub>2</sub> 배출저감 등)에 일조하기 위한 도로설계 기술 개발이 이루어지고 있다.

현재, 도로법을 포함한 도로관련법에서 도로분야의 저탄소녹색성장 및 환경대책과 관련한 구체적인 조항이 없이 “도로법 제22조(도로정비기본계획의 수립)에 “환

경친화적인 도로건설 방안” 조항만 언급하고 있지만, 향후 도로법 및 저탄소녹색성장기본법 개정, 법조항 신설에 대한 움직임이 활발하게 진행되고 있다.

기술적인 측면에서 이러한 움직임에 대응하기 위한 기초연구가 이루어지고 있으며, 국내외에서 도로와 관련한 온실가스 저감 연구단계는 미미한 수준이다.

현재까지의 기술수준은 종단경사 비율에 따른 탄소배출량 연구, 도로유형별(단속류, 연속류) 이산화탄소배출량 연구, 가·감속도 및 운전자 운전행태에 따른 이산화탄

소배출 연구 등이 있다. 하지만 이산화탄소를 적게 배출시키는 도로설계기술에 관한 연구는 미미한 상태이다.

도로유형별(단속류, 연속류), 가·감속도 연구는 기하구조에 따른 온실가스배출량을 예측한 것이 아닌 단순히 도로유형 및 운전행태에 따른 이산화탄소배출량을 연구한 것이다.

그나마, 도로기하구조와 이산화탄소배출량에 관한 연구는 종단경사 비율에 따른 이산화탄소배출량을 연구한 것이지만 그 연구의 결과는 단순히 종단경사 비율이 낮을수록 이산화탄소배출량이 적게 나타나기 때문에 이러한 지표가 실제 도로설계평가에 효과적으로 쓰일 수 있을지는 미지수이다.

본 연구는 한 구간이 아닌 전체 구간(상·하부)에 대한 이산화탄소배출량을 산정할 수 있는 기술을 개발하고자 Lamm의 설계일관성 모형을 적용하였다. Lamm의 도로선형의 일관성 개념은 두 지점의 주행속도차( $V_{85}$ )가 적을수록 도로설계의 안전성이 좋다는 원리이며, 주행속도차가 적게 난다는 의미는 가·감속이 적게 발생하기 때문에 그 만큼 탄소배출량도 적다는 의미이다.

본 연구의 방법으로는 도로에서의 이산화탄소배출량 항목을 산정하기 위해서 시뮬레이터를 이용하여 기하구조 유형별 주행속도( $V_{85}$ )에 따른 이산화탄소배출량을 산출하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1. 온실가스 관련 프로그램

미국에서 개발한 MOVES(Motor Vehicle Emission Simulator)는 미국환경보호청에서 이동오염원에 대한 온실가스 및 대기오염물질의 배출량 산정을 위하여 개발된 모형이다.

운전자행태 기반모형인 MOVES는 개별차량의 행태를 반영한 미시적 분석이 가능하다. 본 모형은 매초 단위로 차량의 속도, 감·가속도, 종단경사 등을 반영한 온실가스 배출량 산정이 가능하고 배출량에 영향을 미칠 수 있는 기온습도 차량연식 등에 따른 분석이 가능하도록 개발되었다. MOVES 프로그램의 산정방법은 차속, 가속도, VSP(Vehicle Specific Power) 등의 변수를 이용하여 운행행태를 반영하는 Operation Mode와 평균차속모형으로 거시적인 분석에 이용되는 Link Mode Link에 Second ID를 부여하여 매 초당 속도와 경사를 반영하여 배출량을 산정하는 Link Drive Schedule Mode로 구분된다.

일본에서 개발한 UC-Win/Road의 ECO 드라이빙 옵션은 주로 3차원의 가상공간을 컴퓨터에서 재현하여 도로설계 비교안의 검토 및 기술제안 등을 수행하는데 쓰이고 있다.

또한, 이 프로그램에서는 자동차 주행행태에 의한 온실가스 배출량의 계산 및 그래프 작성을 지원할 수 있다. 현재 UC-Win/Road의 ECO 드라이빙 옵션은 에코 드라이빙 연습과 차량, ITS연구 등에도 활용되고 있다. UC-Win/Road의 ECO 드라이빙 옵션화면 설정은 [메뉴]-[에코 드라이빙]-[에코 드라이빙 출력설정]에서 옵션을 설정한다. 화면 좌측은 온실가스 배출량 계산식의 계수를 설정할 수 있으며, 우측은 ECO 드라이빙 진단기준을 설정한다. Fig. 1은 ECO 드라이빙 옵션화면 예시를 나타낸 것이다.



Fig. 1 Example of UC-Win/Road and ECO Driving Optional Screen Made by Japan

大口 외(2002)는 UC-Win/Road의 ECO 드라이빙 옵션을 적용하여 온실가스 산정식을 적용하는 방안을 제시하였다. 大口가 개발한 산정식은 온실가스 배출량이 연료 소비량과 비례하는 것을 전제로 하고 있으며, 이에 따른 주행시간 T, 주행거리 D, 차속변동 특성의 3가지 요인에 의해 온실가스 배출량이 결정된다. 다만, 온실가스 배출량을 산정할 때에 감·가속도에 따른 함수식은 반영되지만, 종단경사 구간에 따른 온실가스 배출량은 반영하지 못하고 있다. 그리고, 大口의 산정식에서 배출계수는 1999년 일본 환경청에서 공시된 값이므로 우리나라 환경부에서 공시된 이산화탄소 배출계수를 적용해야 한다. 식(2.1)은 주행시간에 대한 온실가스 배출량을 나타낸 것이다(大口 외 2002).

$$E = K_c (0.3T + 0.028D + 0.056 \sum_k \delta_k (v_k^2 - v_{k-1}^2)) \quad (1)$$

여기서, E: 주행시간에 대한 온실가스 배출량(kg-CO<sub>2</sub>)

- $T$  : 주행시간(sec)
- $D$  : 주행거리(m)
- $k$  : 속도계측점의 수
- $\delta_k$  : 앞 계측점보다 속도가 클 때 1, 아니면 0
- $v_k$  : 제  $k$ 점에서의 주행속도(m/s)
- $K_c$  : 배출계수  $\text{CO}_2$  0.00231kg-C/가솔린cc  
(1999년 환경청)

## 2.2. 온실가스 관련 연구

한동희 외(2012)는 배출량에 영향을 주는 요인으로는 차량특성, 기후조건(온도, 습도), 속도, 가·감속도, 도로 조건, 기하구조 등으로 분류하였다. 연구방법론은 MOVES 프로그램을 활용하여 차량 온실가스 배출량의 도로 종단경사 영향 분석에서 종단경사는 오르막의 경사가 10%일 경우 차종별로 차이를 보이지만, 평지에서 배출되는 배출량 보다 2~4배 이상 배출되고, 내리막 경사가 10%일 경우는 평지대비 약 15~30%의 온실가스가 배출되는 것으로 분석되었다. 분석결과 종단경사에 따라 온실가스 배출량은 비교적 크게 변화되는 것으로 나타났다.

Ko 외(2012)는 다양한 고속도로의 기하학적인 상태(종단선형)에서의 연료소모량과 온실가스 배출량을 매 초당 속도 Profile을 이용하여 MOVES를 통해 산정하였다. 속도 프로파일은 실제 2차로 고속도로 곡선부를 주행하는 동안 속도자료를 수집하여 분석한 결과와 종단곡선부를 완화한 결과 연료소모량 및 온실가스 배출량이 16%까지 절감되는 것으로 분석되었다.

이태병 외(2010)는 종단경사  $S=2.000\%$ 를 종단경사  $S=1.422\%$ 로 완화하여 차량 평균속도 및 주행안전성을 증가하였을 경우를 비교하였다. 그 결과, 상행과 하행을 포함한 양방향 통행 시 연간  $\text{CO}_2$  배출량은 연간 총 30,301톤으로 나타났으며, 비교안은 총 30,050톤으로 나타나 약 0.8% 대기오염 발생량이 감소하는 것으로 나타났다.

Pablo Cicero-Fernández 외(1997)는 도로에서 종단경사 비율에 따라서 온실가스 배출량이 어떻게 변화하는지를 산정하였다. 산정방법은 1991년식 GM에서 만든 Chevrolet Lumina 차량에 온실가스 배출장치(On-Board Exhaust Emission Measurements)를 탑재하여 미국의 고속도로와 간선도로에서 실측자료를 수집하였다. 실험결과를 살펴보면 승용차를 기준으로 평지대비 종단경사가 3%인 경우에는 온실가스 배출량

이 약 2배 이상 증가하였다.

Mohamadreza 외(2012)는 대기질의 정책적 문제에 대응하기 위하여 현장자료(GPS)와 미시적인 온실가스 배출량 산정 프로그램인 MOVES을 결합하여 고속도로 주행하는 도로에 강제적으로 속도를 제어하였을 때의 잠재적인 편익을 분석한 결과, 속도를 제어하였을 때 준수하는 차량과 준수하지 않은 차량의 평균주행속도를 분석하여 대기오염물질 배출량을 산정하였다. 속도를 제어(65mph, 60mph)하였을 때 제한속도를 초과하는 차량은 오염원 별로 평균적으로  $\text{CO}_2$ 는 3.9%, 1.0% 증가하는 것으로 분석되었다.

## 2.3. 주행속도 프로파일

본 연구에서 Lamm의 주행속도 프로파일을 적용하고자 하는 목적은 이산화탄소를 배출하는 다양한 도로의 유형을 반영할 수 있는 이론이기 때문이다. 본 연구를 수행하기 위한 주행속도 프로파일의 이론적 검토는 다음과 같다.

### 2.3.1. 단일구간의 설계일관성 평가

Lamm 등(1987, 1995)은 설계속도와 85percentile 주행속도 차이를 평균 사고율과 관련하여 연구하였고 이를 바탕으로 도로의 일관성을 Good, Fair, Poor로 구분하였다.

Table 1. Methode of Consistence Valuation on One Spot of Roads

Classification	Methode of Valuation
Good design	$V_{85} - V_d \leq 10\text{km/h}$
Fair design	$10\text{km/h} < V_{85} - V_d \leq 20\text{km/h}$
Poor design	$V_{85} - V_d > 20\text{km/h}$

### 2.3.2 연속구간의 설계일관성 평가

Lamm 등(1995)은 평균 사고율을 기반으로 곡선 상류부-곡선부의 설계일관성 평가를 Good, Fair, Poor로 구분하였다.

Table 2. Methode of Consistence Valuation on Two Spot of Roads

Classification	Methode of Valuation
Good design	$\Delta V_{85} \leq 10\text{km/h}$
Fair design	$10\text{km/h} \leq \Delta V_{85} < 20\text{km/h}$
Poor design	$\Delta V_{85} > 20\text{km/h}$

### 2.3.3. 주행속도 프로파일

유형 1은 평면직선 길이가 충분히 길어 상류부 평면곡선에서 진출한 차량이 평면직선부에 도달한 후 다시 감속하여 하류부 평면곡선으로 진입하는 경우이다.

유형 2은 상류부 평면곡선에서 진출한 차량이 평면직선 구간에 도달하기 위해 가속하지만 도달하지 못하고 하류부 평면곡선으로 진입하기 위해 감속해야 하는 경우이다.

유형 3은 평면직선구간 길이가 짧아 상류부 평면곡선에서 진출한 차량이 평면직선구간에서 감속 또는 가속 한 후 하류부 평면곡선으로 진입하는 경우이다. Fig. 2는 유형 3의 주행속도 프로파일 개념도를 나타낸 것이다.

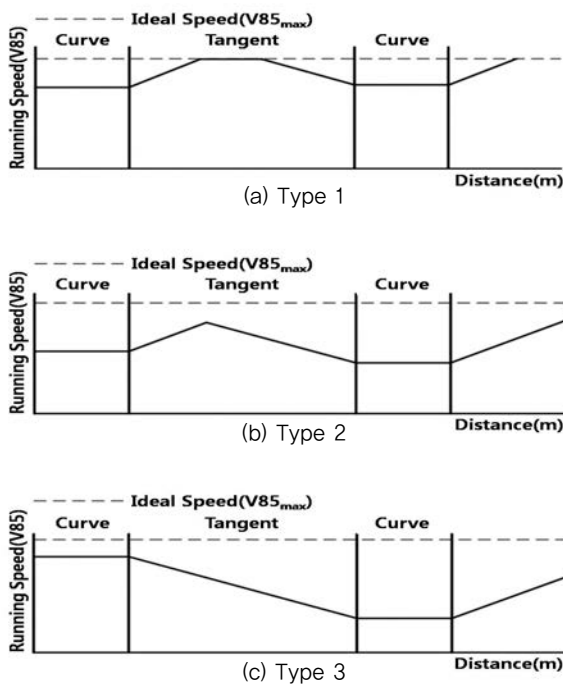


Fig. 2 Concept of Speed Profile

### 2.4. 연구의 방향

문헌 검토결과 배출량에 영향을 주는 요인으로는 차량특성(차종연비, 연식), 기후조건(온도, 습도), 교통조건(속도, 가·감속도, 도로조건, 기하구조) 등이다. 그러나, 본 연구에서는 연구의 제약으로 인해서 다양한 차량 특성 및 기후조건은 반영하지 않았다.

지금까지의 이산화탄소배출량 연구는 운전행태에 따른 이산화탄소배출량을 연구한 것이고 도로기하구조와 이산화탄소배출량에 관한 연구는 단순히 종단경사 비율에 따른 탄소배출량을 연구한 것이다. 따라서 본 연구는 이러한 기존 연구의 한계점을 해결하기 위해서 Lamm이 제안한 도로선형의 일관성 기술을 적용하여 다양한

도로유형을 반영하고자 한다. 본 연구에서는 주행속도 프로파일의 이론을 적용하여 설계일관성이 좋은 유형과 좋지 않은 도로기하구조 유형을 반영하여 이산화탄소를 도로기하구조 유형별로 산정하고자 한다.

## 3. 분석

### 3.1. 주행속도 프로파일 적용

Lamm이 제안한 주행속도 프로파일을 반영하기 위해서는 평면곡선부 및 평면직선부의 주행속도 예측모형을 적용하는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 주행속도 프로파일을 반영하여 주행속도 예측모형을 개발한 최재성(2013)의 모형을 적용하였다. 이 모형은 평면곡선부와 평면직선부의 예측모형으로서 지방부 다차로도로 모형식이다.

평면곡선부 구간의 주행속도 예측모형 결과는 Eq. (2)와 같다(여기서, Adjusted  $R^2 = 0.617$ ).

$$V_{85R} = (-0.098 \times (CCR)) + (-1.023 \times (|G|)) + (13.642 \times (A \cdot D)) + (119.111) \quad (2)$$

여기서,

$V_{85R}$  = 곡선부 85백분위 주행속도(km/h)

$CCR$  = 곡률변화율(gon/km)

$|G|$  = 평면곡선부 종단경사 절대치(%)

$A \cdot D$  = 감·가속도( $m/s^2$ )

평면직선부 구간의 주행속도 예측모형 결과는 Eq. (3)와 같다(여기서, Adjusted  $R^2 = 0.555$ ).

$$V_{85T} = (-0.006 \times (TL)) + (-0.873 \times (|G|)) + (11.323 \times (A \cdot D)) + (-0.074 \times (UpCCR)) + (112.942) \quad (3)$$

여기서,

$V_{85T}$  = 평면직선부 85백분위 주행속도(km/h)

$TL$  = 평면직선길이(m)

$|G|$  = 평면직선부 종단경사 절대치(%)

$A \cdot D$  = 감·가속도( $m/s^2$ )

$UpCCR$  = 상류부 곡선부의 곡률변화율(gon/km)

### 3.2. 시나리오 작성

시나리오 작성은 평면선형설계에서 Lamm의 연속구간의 설계일관성 평가를 기반으로 설계일관성이 좋은

구간과 좋지 않은 구간에서의 온실가스 배출량이 얼마나 차이가 나는지를 알아보려고 한 것이다.

본 연구는 최재성(2013)이 개발한 평면곡선부 및 평면직선부의 주행속도 예측모형을 적용하여 도로 기하구조 조건별 주행속도 예측값을 산정하였다. Table 3은 평면곡선부에서 곡률변화율(CCR)에 따른 주행속도 예측 값이다. 여기서 주행속도차가 큰 도로 기하구조 조건을 구현하기 위해서는 두 곡선부의 곡률변화율의 차이가 커야한다. 따라서 시나리오 1은 평면길이별(200m, 600m) 상류부 구간의 곡률변화율 25(gon/km)와 곡률변화율 250(gon/km)에 대해서 설정하였으며, 시나리오 2는 설계일관성이 확보된 곡률변화율 100(gon/km)와 곡률변화율 150(gon/km)으로 설정하였다.

Table 3. Prediction Speeds of Curves

CCR (gon/km)	25	50	100	150	200	250
Speed ( $V_{85}$ )	117	114	109	104	100	95

Table 4는 평면직선부 구간의 주행속도( $V_{85}$ ) 예측값을 나타낸 것으로서 평면길이(TL)와 상류부 구간의 곡률변화율( $U_pCCR$ )에 따른 주행속도( $V_{85}$ ) 예측값을 나타낸 것이다.

Table 4. Prediction Speeds of Tangents

TL (m)	$U_pCCR$ (gon/km)					
	25	50	100	150	200	250
200	112	110	107	103	99	96
600	115	113	109	105	102	98

### 3.3. 시뮬레이터 실험

#### 3.3.1. 실험장비

본 연구에서 쓰였던 차량시뮬레이터 장비는 실제도로와 유사한 조건에서 운전자가 주행할 수 있도록 가상공간을 제공할 수 있다(Fig. 3).

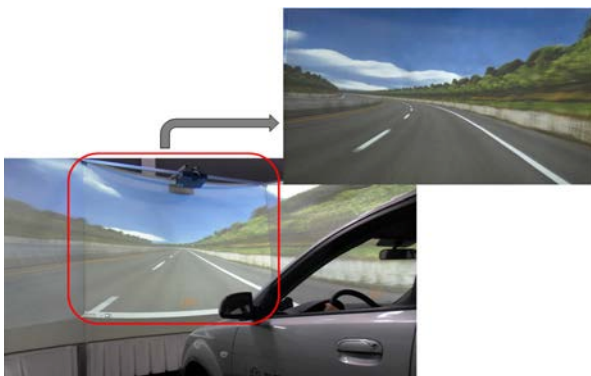


Fig. 3 Example of Driving Simulator in this Study

#### 3.3.2. 실험참가자

실험참가자는 운전경력이 있는 실험자로서 총 30명이 참가하였으며 실험참가자의 인적 정보는 다음과 같다.

- 실험일자 : 2013. 5월~6월
- 장소 : 한국건설기술연구원 시뮬레이터 실험실
- 연령범위 : 23~57세
- 평균연령 : 35.4세(표준편차=6.83)
- 성별분포 : 남성 21명, 여성 9명
- 평균운전경력 : 11년(표준편차=7.38)

#### 3.3.3. 시뮬레이터의 가상도로 제작

시뮬레이터의 가상도로 제작은 Eq. (2)와 Eq. (3)을 토대로 예측된 시나리오 1과 시나리오 2의 기하구조 조건을 차량시뮬레이터에 그대로 재현하였다. 가상도로 제작은 Table 5와 같이 총 2가지 유형의 지방부 다차로 도로를 제작하였다. 앞서 설명하였듯이, 가상도로 유형 1은 도로설계일관성이 좋지 않은 구간이며 유형 2는 도로설계일관성이 좋은 구간이다.

Table 5. Horizontal Curves of Road Scenarios

Curvature Change Rate (gon/km)	Radius (m)		Tangent (m)	
	250	255	300	
150	425	500		
100	640	700		
25	2,500	1,500		

Types	Tangent length 200m				Tangent length 600m				
	① Acceleration		② Deceleration		③ Acceleration		④ Deceleration		
	Curve	Tan	Curve	Tan	Curve	Tan	Curve	Tan	
1	$CCR_1$ 250	$TL_1$ 200	$CCR_2$ 25	$TL_2$ 200	$CCR_3$ 250	$TL_3$ 600	$CCR_4$ 25	$TL_4$ 600	$CCR_5$ 250
2	$CCR_1$ 150	$TL_1$ 200	$CCR_2$ 100	$TL_2$ 200	$CCR_3$ 150	$TL_3$ 600	$CCR_4$ 600	$TL_5$ 600	$CCR_5$ 150

본 연구의 한계점은 종단경사 구간은 제외시켰다는 것이다. 왜냐하면, 기존 연구 검토에서 살펴보았듯이大口가 개발한 온실가스 산정식에는 온실가스 배출량을 산정하기 위한 종단경사에 대한 계수가 없고 주행 중 차속의 변동만을 제시하고 있다[Eq. (1) 참고]. 또한 차량시뮬레이터 자체의 한계점으로 종단경사 사항이 재현되지 않기 때문이다. 여기서 시뮬레이터 실험은 승용차로서 연료를 휘발유로 가정하고 있다. 본 연구에서는 환경부에서 공시된 경유수송(육상)에 의거하여 이산화탄소 배출계수 0.0832(kgCO<sub>2</sub>/L)을 적용하였다<sup>1)</sup>.

1) 탄소배출계수/원료원별 사용

<http://www.edp.or.kr/> (2013. 03.20 확인)

교통량 조건은 서비스 수준이 A인 조건으로서 상대방 차량으로부터 운전행위를 방해받지 않는 조건이다. 그러나 향후 연구에서는 서비스 수준이 낮은 구간인 경우에는 교통량에 따른 감·가속도를 반영해야 한다.

본 연구에서의 차량시뮬레이터 실험을 위한 가상도로의 횡단구성은 왕복 4차로이며, 도로에서의 분기 및 교차가 없는 경우이다. 본 연구의 가상도로 제작을 위한 차로폭 및 중앙분리대의 제원은 다음과 같다. 또한 Fig. 3은 실험 중앙분리대 제원에 대한 개념도이다.

- 편도 2차로
- 차로폭 3.5m
- 길어깨(우측 : 2m, 좌측 : 0.75m)
- 중앙분리대 제원(Fig. 4)

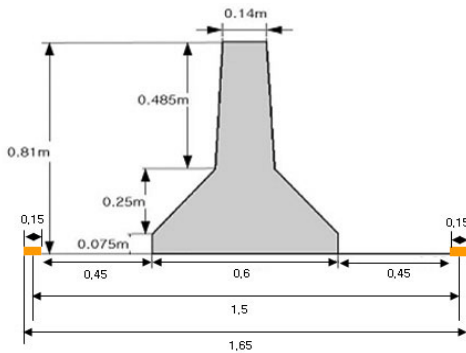


Fig. 4 Median for Driving Simulator Experiment

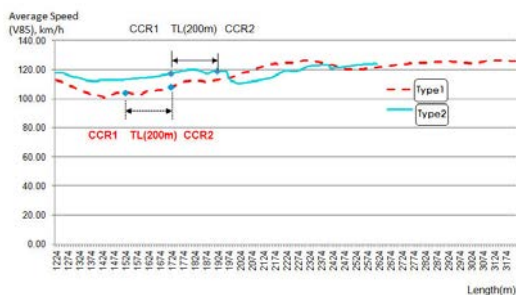
### 3.4. 실험결과

#### 3.4.1. 평면직선길이 200m일 때 가속구간

주행속도의 결과를 살펴보면 Table 6에서 보는 것과

Table 6 Results 1 of Acceleration Section (Tangent Length; 200m)

Section	Type 1			Type 2		
	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ , km/h]	Total Emissions [g/trip]	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ , km/h]	Total Emissions [g/trip]
$CCR_1$	1525	104	32.8	1724	117	52.1
$TL_1$	1726	108	28.2	1925	119	25.1
$CCR_2$	3225	126	181.4	2623	123	93.9
Total	3,251	-	61	3,649	-	77.2



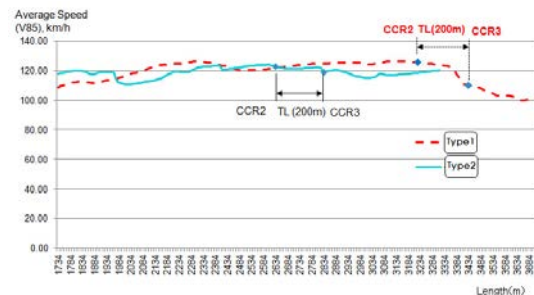
같이 유형 1의 주행속도 변화율이 크게 나타났으며 유형 2에서는 주행속도가 거의 변동이 없었다. 온실가스 배출량을 살펴보면, Table 6과 같이 유형 1의 총 온실가스 배출량은 유형 2보다 높게 나타났다. 또한 평면직선부 ( $TL_1$ ) 구간의 온실가스 산정결과를 살펴보면, 표에서 보는 것과 같이 유형 1의 평면직선부( $TL_1$ ) 구간의 온실가스 배출량은 유형 2의 구간보다 온실가스 배출량이 소폭 증가했다. 유형 1의 경우, 두 평면곡선부의 곡률변화율의 차이가 크기 때문에 차량은 가속을 하게 되었고 이로 인한 온실가스 배출량도 증가한 것으로 볼 수 있다.

#### 3.4.2. 평면직선길이 200m일 때 감속구간

주행속도의 결과를 살펴보면 Table 7에서 보듯이 유형 1과 유형 2의 주행속도 패턴은 유사하게 나타나고 있다. 그러나 평면직선부( $TL_2$ ) 구간을 주행할 때 유형 1의 경우는 차량의 속도가 떨어지고 있다. 반면에 유형 2의 주행속도는 일정한 형태를 유지하고 있다. 유형 1에서 차량의 속도가 떨어진 이유는 평면곡선부의 곡률변화율 ( $CCR_2$ )은 작고, 평면곡선부의 곡률변화율( $CCR_3$ )은 크기 때문에 이에 따른 감속의 폭도 컸던 것이다. 온실가스 배출량을 살펴보면, Table 7에서 보는 것과 같이 유형 1의 총 온실가스 배출량이 유형 2보다 높게 나타났다. 또한 평면직선부( $TL_2$ ) 구간의 온실가스 산정결과를 살펴보면, 표에서 보듯이 유형 1의 평면직선부( $TL_2$ ) 구간의 온실가스 배출량은 유형 2보다 온실가스 배출량이 소폭 감소했다. 유형 1에서 온실가스 배출량이 적게 배출된 이유는 이 구간에서 차량이 감속을 했기 때문이다. 반면에 유형 2에서의 주행속도는 일정하게 속도를 유지

Table 7. Results 2 of Deceleration Section (Tangent Length; 200m)

Section	Type 1			Type 2		
	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ , km/h]	Total Emissions [g/trip]	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ , km/h]	Total Emissions [g/trip]
$CCR_2$	3225	126	181.4	2623	123	93.9
$TL_2$	3424	111	15.6	2826	121	17.8
$CCR_3$	3725	101	28.5	3324	120	58.0
Total	6,649	-	197	5,449	-	111.7



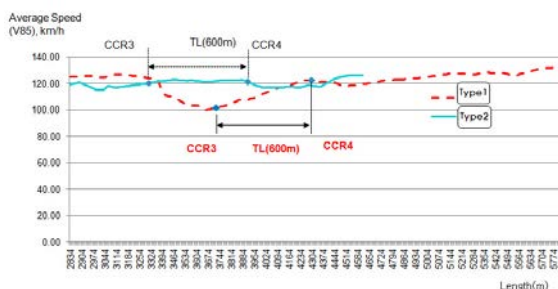
했기 때문에 온실가스 배출량도 소폭 증가한 것으로 보인다.

### 3.4.3. 평면직선길이 600m일 때 가속구간

주행속도의 결과를 살펴보면 Table 8에서 보는 것과 같이 유형 2에서의 평균 주행속도가 유형 1보다 높게 나타났다. 그러나 유형 1에서의 가속도 변화율은 유형 2보다 크다는 것을 알 수 있다. 온실가스 배출량을 살펴보면, Table 8에서와 같이 유형 1에서의 총 온실가스 배출량은 유형 2보다 높게 나타났다. 또한 평면직선부( $TL_{\beta}$ ) 구간의 온실가스 산정결과를 살펴보면, 표에서 보는 것과 같이 유형 1의 평면직선부( $TL_{\beta}$ ) 구간에서의 온실가스 배출량은 유형 2보다 온실가스 배출량의 차이가 많이 나타났다. 왜냐하면, 유형 1에서는 가속의 비중이 높기 때문에 온실가스의 소모량도 함께 증가한 것이다.

Table 8. Results 3 of Acceleration Section (Tangent Length; 600m)

Section	Type 1			Type 2		
	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ ,km/h]	Total Emissions [g/trip]	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ ,km/h]	Total Emissions [g/trip]
CCR <sub>3</sub>	3725	101	28.5	3324	120	58
TL <sub>3</sub>	4323	122	92.6	3923	120	58.5
CCR <sub>4</sub>	5824	131	163	4626	126	81.3
Total	8,048	-	121.1	7,247	-	116.5



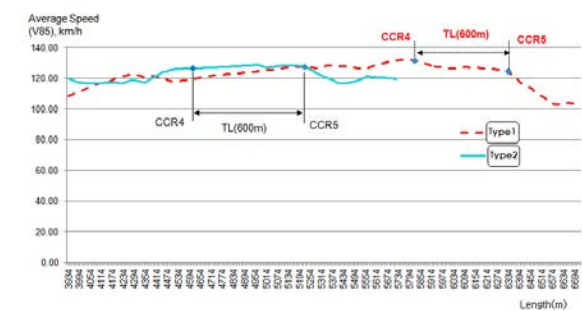
### 3.4.4. 평면직선길이 600m일 때 감속구간

주행속도의 결과를 살펴보면 Table 9에서 보는 것과 같이 유형 1과 유형 2의 주행속도 패턴은 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 평면직선부( $TL_{\beta}$ )로 주행할 때 유형 1의 구간에서는 주행속도가 떨어지고 있는 반면에 유형 2에서는 주행속도의 변화량이 거의 없다. 온실가스 배출량을 살펴보면, Table 9에서 보는 것과 같이 유형 1의 총 온실가스 배출량은 유형 2보다 높게 나타났다. 또한 평면직선부( $TL_{\beta}$ ) 구간의 온실가스 산정결과를 살펴보면, 표에서 보는 것과 같이 유형 1의 평면직선부( $TL_{\beta}$ ) 구간에서의 온실가스 배출량은 적은 반면에 유형 2의

온실가스 배출량은 소폭 증가했다. 왜냐하면 유형 1에서는 차량의 감속으로 인한 온실가스 배출량이 적은 반면에 유형 2에서는 차량이 감속을 하지 않고 일정한 속도로 주행을 했기 때문에 상대적인 온실가스 배출량도 높게 나타난 것이다.

Table 9. Results 4 of Deceleration Section (Tangent Length; 600m)

Section	Type 1			Type 2		
	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ ,km/h]	Total Emissions [g/trip]	Length [m]	Average Speed [ $V_{85}$ ,km/h]	Total Emissions [g/trip]
CCR <sub>4</sub>	5824	131	163	4626	126	81.3
TL <sub>4</sub>	6425	116	51.7	5224	127	56.9
CCR <sub>5</sub>	6724	103	27.7	5725	120	49.8
Total	12,249	-	214.7	9,850	-	138.2



## 4. 결론

본 연구는 차량시뮬레이터를 활용하여 가상도로 유형 1과 2에 대해서 도로 기하구조 유형별 온실가스 배출량을 분석하였다. 그 결과, 도로설계의 일관성은 주행속도 패턴에 중요한 영향을 주었고 이로 인한 온실가스 배출량에도 영향을 주는 것으로 나타났다. 결과를 요약하면, 두 곡선부의 주행속도 차가 큰 가상도로 유형 1은 도로 기하구조의 영향으로 인한 감·가속도의 영향이 유형 2보다 크기 때문에 온실가스 변화량도 크게 나타났다. 따라서, 유형 2와 같은 도로설계는 온실가스 배출량을 적게 소모시킬 수 있다는 점에서 온실가스를 저감시킬 수 있는 도로 선형설계기법이 중요하다는 점을 보여주었다.

기존 연구에서는 종단경사 구간만을 한정시켜서 온실가스 배출량을 산정하였기 때문에 다양한 도로 조건일 때의 온실가스 배출량을 산정할 수 없었다. 그러나 본 연구에서는 차량시뮬레이터를 활용하여 다양한 도로 기하구조 조건 등을 고려하여 온실가스 배출량을 산정할 수 있었다. 무엇보다도 본 연구는 차량 시뮬레이터를 활용하였기 때문에 인적요인에 따른 온실가스 배출량을

고려하였다는 점이 기존 연구와의 차별성이다.

본 연구의 한계점은 차량시뮬레이터의 특성에 있다. 차량시뮬레이터는 실험환경의 용이성으로 인해서 실내에서 현실감 있는 조건을 구축하여 실험할 수 있다는 장점이 있다. 특히 많은 요소를 고려해야하는 본 실험의 경우는 더욱 유용하다고 볼 수 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 차량시뮬레이터의 논란거리는 현실조건과 얼마만큼 유사하냐는 점이다. 이러한 문제로 인해서 절대적인 값을 도출하기 보다는 상대적인 평가에 의한 대안의 비교로 사용되어왔다. 따라서 본 연구에서의 결과 값은 상대적인 평가를 위한 수행방법이라고 볼 수 있다. 향후 연구결과의 활용성을 높이기 위해서는 다양한 차종 및 도로조건(중단경사 등) 하에서 종합적이고 다각적인 분석이 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 '탄소중립형 도로 기술 개발' 연구단을 통하여 지원된 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

#### References

Choi, J.S, Lee, J.H, Jeong, S.M, Cho, W.B, Kim, S.Y, 2013, Acceleration and Deceleration Profile Development of Reflecting Road Design Consistency, International Journal of Highway Engineering, Vo.15, No.6, pp.103-111

Han, D.H, Baek, S.k, Lee, S.B, 2012, Impact of Road Grade on CO<sub>2</sub> Emission, Annual Meeting of Korea Society of Transportation,

pp. 634-639.

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.

Lamm, R., and E. M. Chouiri(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.

Lamm R.(1995), 'Safety Module for Highways Design', Unpublished Manuscript, Institute for Highway and Railroad Engineering, University of Karlsruhe, Germany.

Mohamadreza Farzaneh, Josias Zietsman(2012), "Characterization of Potential Impact of Speed limit Enforcement on Emissions Reduction", Transportation Reserch Record 91st Annual Meeting.

Pablo, Cicero-Fernández. and Long, Jeffrey R.(1997), Effects of Grades and Other Loads on On-Road Emissions of Hydrocarbons and Carbon Monoxide, ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Assoc. 47:898-904.

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.

Ruediger Lamm, B. Psarianos, and T. Mailaender(1999), 'Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook', McGraw-Hill

大口・片倉・谷口(2002), 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木學會論文集, No.695/IV-54, pp.125-136.