

교차로 형태에 따른 차량 당 탄소가스 배출량 비교

Vehicles' CO₂ Emissions by Intersection Types

김 다 예 Kim, Da-Ye
오 흥 운 Oh, Heung-Un

정회원 · 경기대학교 공과대학 도시 · 교통공학과 석사과정 (E-mail: dykim0225@gmail.com)
정회원 · 경기대학교 공과대학 도시 · 교통공학과 교수 · 교신저자 (E-mail: ohheung@gmail.com)

ABSTRACT

PURPOSES : The present paper is to compare vehicles' CO₂ emissions in roundabouts and signalized intersections.

METHODS : The present paper uses the SIDRA software with variables of traffic and road conditions.

RESULTS : The results of the study are as follows : First, when entering traffic volumes are more than 1600pcph, vehicle's CO₂ emissions in roundabouts are lower than those of signalized intersections regardless of the left turn ratio. Second, When entering traffic volumes are more than 2800pcph, vehicles' CO₂ emissions in 2-lane approaches are lower than those of 1-lane approaches in signalized intersection. Third, when entering traffic volumes are more than 1600pcph, vehicle's CO₂ emissions of CASE B are lowest. (CASE B is the condition with one exclusive left-turn lane and one exclusive straight lane and one shared straight lane with right-turn.) Also, CASE A is the condition that vehicle's CO₂ emissions in roundabouts are lower than those of signalized intersections between 1600pcph and 3600pcph. (CASE A is the condition with one exclusive left-turn lane and one shared straight lane with right-turn.) But, when entering traffic volumes are more than 4000pcph, vehicle's CO₂ emissions in signalized intersections is lower than those of roundabouts.

CONCLUSIONS : It may be concluded that vehicle's CO₂ emissions on roundabouts are much lower than those of signalized intersections, especially, when entering traffics volumes are between 1600pcph and 3600pcph in 1-lane or 2-lane approaches.

Keywords

CO₂ emissions, SIDRA, signalized intersections, roundabouts

Corresponding Author : Oh, Heung-Un, Professor
Department of Urban & Transportation Engineering College of Engineering
Kyonggi University, Iui-dong San 94-6, Yongtong-gu, Suwon-si, Kyonggi-do
443-760, Korea
Tel : +82.31.249.9742 Fax : +82.31.244.6300
E-mail : ohheung@gmail.com

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

1. 서론

International Energy Agency(이하 IEA)의 보고에 따르면, 2010년 전세계 CO₂ 배출량의 주요 원인 중 수송부분이 23%를 차지하는 것으로 나타났다. 수송부분은 도로, 국내 항공, 국내 항해, 해양 bunker, 항공 bunker, 기타 교통부분이 해당되는데, 도로가 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

최근 환경문제가 더욱 부각되면서 우리나라에서는 도로부분의 CO₂ 배출량 감소를 위해 다양한 방법론이 시행되고 있다. 대표적으로는 에코드라이빙, 차량 10부제, 대체연료사용 등의 방법이 있다.

일부 연구에서는 신호운영, 교차로 형태 등의 적절한 적용도 도로부분의 CO₂ 배출량을 감소시킬 수 있다고 제시하고 있다.

본 연구에서는 도로부분의 CO₂ 배출량 감소를 위해 교차로의 형태에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 분석하였다. 교차로에는 신호교차로, 회전교차로, 무통제교차로 등의 여러 형태가 존재한다. 이 중 신호교차로와 회전교차로를 비교하였다.

회전교차로는 신호교차로에 비해 상충지점이 적고, 지체가 적다고 알려져 있다. 그러나 CO₂ 배출량 감소면에서는 어떤 교차로가 보다 효율적인지에 대한 연구는 미비하다.

따라서, 본 연구는 여러 도로 및 교통조건을 가정하고, 교통량이 증가함에 따라 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 SIDRA를 이용해 비교·분석하고자 한다. 이를 통해 각 도로 및 교통조건에 따라 CO₂ 배출량 감소에서 비교우위에 있는 교차로 형태를 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 연구배경 및 목적

2.1. 연구의 배경 및 목적

교차로는 여러 형태로 운영되며 교차로의 도로 및 교통조건에 따라 그 형태가 결정된다. 교차로의 형태에는 신호교차로, 회전교차로, 무통제교차로 등이 존재한다. 이 중 본 연구에서는 신호교차로와 회전교차로를 비교하고자 한다.

신호교차로는 방향이 다른 두 개 이상의 도로가 만나 는 곳으로서 교통 시스템 중에서 가장 복잡한 지점이다. 따라서 여러 방향의 이동류가 한 지점을 안전하고 효율 적으로 통과하기 위해 교통신호 배정이 필요하다(도로 용량편람, 2013).

회전교차로는 교차로 중앙에 원형의 교통섬을 두고 차량이 이를 우회하여 통과하도록 하는 교차로이다. 회전교차로는 교차로에 진입하는 자동차가 교차로 내부에서 회전하는 자동차에게 양보하는 것을 기본원리로 한다(회전교차로 설계지침, 2010).

회전교차로의 장점은 신호교차로에 비해 상충지점이 적고, 지체가 적으며 안전한 면에서 효율이 좋은 것으로 알려져 있다. 그러나 환경적인 측면에서 신호교차로와 회전교차로의 운영효율에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 회전교차로와 신호교차로에서 좌회전비율에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 비교하고자 함

- 회전교차로와 신호교차로에서 차로 수에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 비교하고자 함
- 회전교차로와 신호교차로에서 좌회전 차로 유무에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 비교하고자 함
- 도로 및 교통조건에 따라 차량 당 CO₂ 배출량에서 비교우위에 있는 교차로 형태를 파악하고자 함

2.2. 연구의 방법

본 연구에서는 SIDRA를 이용하여, 신호교차로와 회전교차로의 비교를 실행한다. 연구 수행과정은 다음과 같다.

첫째, 신호교차로와 회전교차로에 대한 국내의 문헌을 고찰한다. 둘째, 분석을 위해 여러 조건에 따라 교차로의 교통량, 교통특성 및 도로특성에 대한 자료를 구축한다. 셋째, SIDRA를 이용하여 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 비교·분석한다. 이를 토대로 회전교차로의 효과를 판단하고 결론 및 향후과제를 제시한다.

3. 관련문헌조사

3.1. 국내 관련문헌조사

국내에서 교차로의 운영효율 분석에 대한 연구들은 활발하게 진행되어 왔다.

박병호, 정용일(2005)은 SIDRA를 이용하여 현대식 회전교차로의 효율성을 비교하고자 하였다. 이를 위해 여러 교통 조건에 따라 평균지체와 V/C비를 분석하였다.

연구결과, 4지 1차로 교차로에서 교통수요가 약 2,600 대/시 이하일 경우 신호교차로에 비해 현대식 회전교차로의 도입을 신중히 고려해 볼 수 있는 것으로 나타났다.

박병호 외(2009)는 회전교차로와 신호교차로의 효과를 SIDRA를 이용하여 비교·분석하였다.

연구결과, 1차로 회전교차로는 총 진입교통량이 2000pcph 이하일 때, 2차로 회전교차로는 총 진입교통량이 3200pcph 이하일 때 신호교차로에 비해 회전교차로가 효과적인 것으로 분석되었다.

한수산, 박병호(2010)는 다지 회전교차로와 신호교차로의 최적의 기하구조를 구축하고, 주도로와 부도로의 진입교통량 비율을 반영한 분석시나리오를 작성하였다. 그 후 VISSIM을 이용해 차량당 평균제어지체를 비교·분석하였다.

연구결과, 5지 1차로와 2차로, 6지 1차로의 경우 3500~3600pcph 이하일 때 회전교차로의 지체가 낮게

나타났다. 6지 2차로의 경우는 모든 진입교통량 조건에서 신호교차로에 비해 지체가 낮은 것으로 분석되었다.

임진강, 박병호(2011)은 국내 로터리를 회전교차로로 전환함에 따른 운영효과를 VISSIM을 통해 분석하였다.

연구결과, 교통량이 적을 경우 로터리가 회전교차로보다 운영효과가 좋은 것으로 평가되었다. 그러나 그 차이가 적어 안전성 측면에서 회전교차로가 더 효율적인 것으로 분석되었다.

이정범, 이승훈(2011)은 차량별 평균주행거리의 데이터를 고려한 Tier 3 방법을 이용하여 현재 운영 중인 교차로를 회전교차로로 변형하였을 때 CO₂ 배출량을 분석하였다.

연구결과, 대상 신호교차로를 회전교차로로 변형하였을 때, 지체와 CO₂ 배출량이 감소하는 것으로 분석되었다.

또한, 자동차의 온실가스 배출량 산출을 위해 국립환경과학원에서는 CO₂ 배출량 산출식을 제시하였다.

국립환경과학원(2011)은 실제 도로에서 측정된 속도 데이터를 차대동력계 상에 입력하여 주행 후 배출가스 측정기를 이용하여 차량 당 CO₂ 배출량을 산출하였다. 여기서, 국내의 차량 당 CO₂ 배출량은 차속과 차종, 사용연료에 따라 차이가 있다. 국내의 승용중형 휘발유 차량에 대한 CO₂ 배출량 산출식을 활용한 식과 차량 당 CO₂ 배출량 곡선은 다음과 같다.

$$y = 1555.5x^{-0.578} \quad (x < 65.4)$$

$$y = 0.0797x + 144.19 \quad (x \geq 65.4)$$
(1)

여기서, y : CO₂ 배출량(g/km)

x : 차량의 통행 속도(km/h)

Eq. (1)을 통해 산출된 차량 당 CO₂ 배출량 곡선은 다음과 같다. 그래프는 Fig. 1과 같이 속도가 약 60km/h

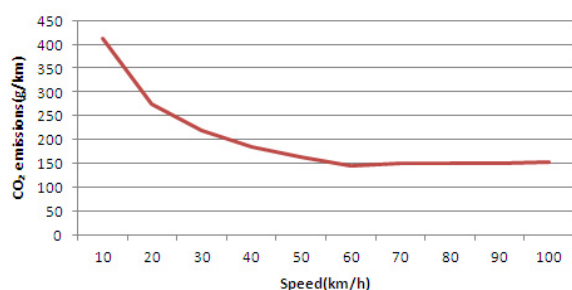


Fig. 1 CO₂ Emissions of National of Environmental Research (NIER, 2011)

인 지점에서 차량 당 CO₂ 배출량은 최소를 나타내며 전체적으로 U자 형태를 띠고 있다. CO₂ 배출량은 최대 411.03g/km, 최소 145.91g/km까지 분포하고 있다.

3.2. 국외 관련문헌조사

IEA(2012)에서는 2010년 전세계 CO₂ 발생량의 약 2/3가 전기와 열의 발생, 수송부분임을 제시하였다. Fig. 2와 같이 전기와 열의 발생은 41%, 수송부분은 22%를 차지하고 있다.

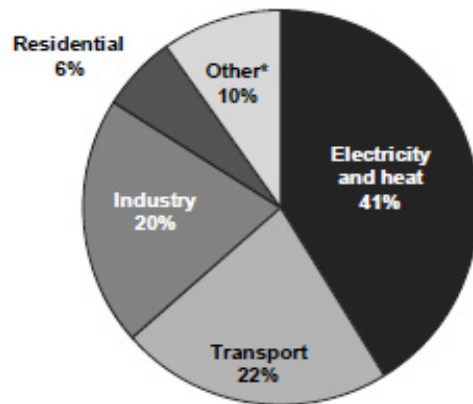


Fig. 2 World CO₂ Emissions by Sector in 2010 (CO₂ Emissions from Fuel Combustion, IEA STATISTICS, 2010)

또한, 2009년에 비해 2010년에 수송부분의 CO₂ 발생량이 3% 증가하였으며, 2035년에는 약 40%까지 증가할 것으로 예상하였다.

Cappiello(2002)는 차량동력계를 이용하여 차량의 기본 데이터를 토대로 배출가스 분석기를 이용하여 차량 당 CO₂ 배출량을 산출하였다. 그래프는 Fig. 3과 같이 속도가 약 80km/h인 지점에서 차량 당 CO₂ 배출량이 최저를 나타내며, 전체적으로 U자 형태를 띠고 있다. 배출량은 최대 469g/km에서 최소 125g/km까지 분포하고 있다.

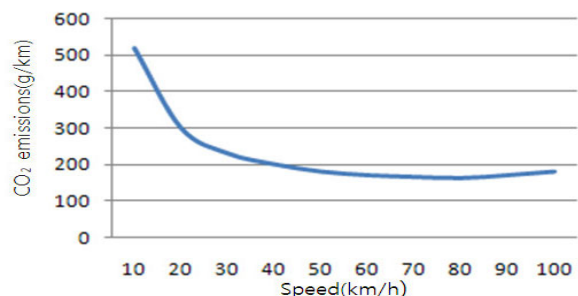


Fig. 3 CO₂ Emissions of Cappiello (Modeling Traffic Flow Emissions, 2002)

Rakah 외(2008)은 휴대용 도로배출 측정기를 이용하여 실제 도로주행을 통해 차량 당 CO₂ 배출량을 산출하였다. 그래프는 Fig. 4와 같이 속도가 약 50km/h인 지점에서 차량 당 CO₂ 배출량이 최저를 나타내며, 전체적으로 U자 형태를 띄고 있다. 배출량은 최대 432g/km에서 최소 144g/km까지 분포하고 있다.

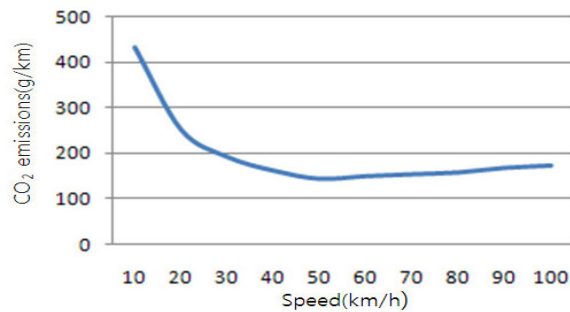


Fig. 4 CO₂ Emissions of Rakah(Emission Model Development Using In-Vehicle On-Road Emission Measurements, 2008)

Matthew(2001)은 실제 도로주행을 통해 속도, 통행 패턴 등의 기본 차량 데이터를 바탕으로 하여 차량 당 CO₂ 배출량을 산출하였다. 그래프는 Fig. 5와 같이 속도가 약 50km/h에서 차량 당 CO₂ 배출량이 최저를 나타내며, 전체적으로 U자 형태를 띄고 있다. 배출량은 최대 1500g/km에서 최소 580g/km까지 분포하고 있다.

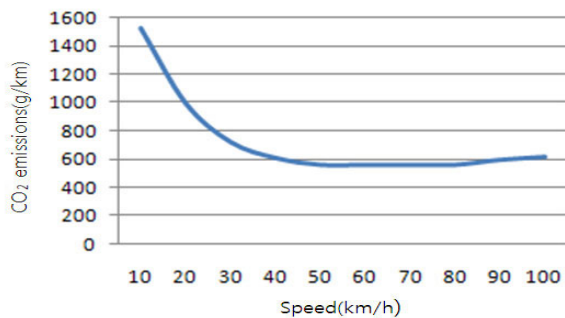


Fig. 5 CO₂ Emissions of Matthew (Traffic Congestion and Greenhouse Gases, 2001)

Saccomanno 외(2008)는 VISSIM을 이용하여 신호교차로와 회전교차로의 안전에 관하여 미시적 분석을 실시하였다. 그 결과, 사고 잠재효과 분석에서 회전교차로가 신호교차로에 비해 안전한 것으로 분석하고 있다.

Shokri 외(2010)는 aaSIDRA를 이용해 실제 신호교차로를 분석해보고 이를 회전교차로로 변형하여 재분석하였다. 비교·분석 결과, LOS, 비용, 지체 면에서 회전교차로가 기존 교차로에 비해 효과적임을 알 수 있었다.

3.3. 연구의 차별성

회전교차로와 신호교차로의 운영효율성에 대한 연구는 국내·외에서 계속적으로 진행되고 있다.

현재 국내에서 진행된 교차로의 운영효율과 관련된 연구를 검토한 결과와 본 연구의 착안점은 Table 1과 같다.

Table 1. Review the Results of Studies about Analysis of Roundabout

	Conditions of analysis	Tools of analysis	MOE
Park, Byung-Ho, Jung, Yong-II (2003)	Volumes, Ratio of turn volumes	SIDRA	Average delay V/C ratio
Park, Byung-Ho et al.(2009)	Number of lanes, Volumes, Existence of turn lane	SIDRA	Average delay
Han, Su-San, Park, Byung-Ho (2010)	Volumes, Number of lanes	VISSIM	Average delay
Lim, Jin-Kang, Park, Byung-Ho (2011)	Existing rotaries at present	VISSIM	Average delay
Lee, Jung-Beom, Lee Seung-Hoon (2011)	Existing signalized intersection at present	VISSIM	Average delay CO ₂
This paper	volumes, number of lanes, ratio of turn volumes, Existence of turn lane	SIDRA	CO₂

기존의 회전교차로 운영효율에 대한 연구의 효과적도는 대부분 지체, V/C비 등으로 진행되어 왔다. 분석도구는 SIDRA와 VISSIM이 대부분이었다. 또한 분석조건은 실제 존재하는 로터리나 신호교차로를 회전교차로로 개선하거나 교통량, 회전교통량 비율, 차로 수 등을 지정하여 분석하였다.

이러한 선행연구를 검토한 결과, 본 연구의 효과적도는 차량 당 CO₂ 배출량, 분석도구는 SIDRA를 이용하여 신호교차로와 회전교차로의 운영효율을 비교하였다.

또한, 한 가지의 제한된 조건에서 분석하는 것이 아니라 현시, 차로 수, 좌회전 차로 유무 등의 여러 조건에 따라 신호교차로와 회전교차로의 운영효율을 비교하고자 한다.

4. 분석방법론

4.1. 분석의 틀 설정

4.1.1. SIDRA 소프트웨어의 개요

SIDRA는 호주의 ARRB(Australian Road Research Board)에 의해 신호교차로, 회전교차로, 비신호교차로 등과 같은 여러 가지 유형의 교차로 설계 및 평가를 위해 개발되었다(박병호 외, 2009).

SIDRA는 다른 소프트웨어 모델 이상의 장점을 가지고 있다. 첫째, 다양한 교차로 유형에 대해 분석이 가능하다. 둘째, 회전교차로, 신호교차로, 비신호교차로 모두 동일한 지표로 분석이 가능하다. 셋째, 호주의 ARRB 뿐만 아니라 미국의 HCM 연구결과를 기반으로 한다. 이러한 이유로, SIDRA는 회전교차로 연구에 가장 대표적인 분석도구로 사용되고 있다.

본 연구에서도 신호교차로와 회전교차로를 비교·분석하기 위하여 SIDRA를 분석도구로 사용하였다.

4.1.2. SIDRA 분석지표의 선정

SIDRA는 비용, 속도, 연료 배출량, 평균지체, LOS, V/C비 등 여러 지표들을 통하여 각기 다른 유형의 교차로를 분석할 수 있다.

본 연구에서는 환경적인 요인에 중점을 두어 신호교차로와 회전교차로의 CO₂ 배출량을 분석지표로 선정하였다.

SIDRA에서의 CO₂ 배출량은 다음과 같은 과정을 통해 산출된다.

Eq. (2)는 Δt 시간동안 연료소비량 또는 방출량을 산정하기 위한 식이다.

$$\Delta F = \{\alpha + \beta_1 R_T v + [\beta_2 M_v a^2 v / 1000]_{a>0}\} \Delta t \quad (2)$$

여기서, ΔF : Δt 시간동안 연료 소비량 또는 방출량

R_T : 차량을 전진시키는 힘

M_v : 차량의 질량

v : 차량의 순간속도(m/s)

a : 순간가속도(m/s²)

α : 유류연료비율(ml/s) 또는 방출비율(g/s)

β₁ : 연료소비나 방출과 관련된 효율계수

β₂ : 관성과 가속이 작용하는 동안 연료소비나 방출과 관련된 효율계수

Eq. (3)은 Eq. (2)에서 계산된 연료소비량과 연료 1ml 당 CO₂의 비율을 곱해 Δt 시간동안의 CO₂ 소비량을 산정하는 식이다.

$$\Delta F(CO_2) = f_{CO_2} \Delta F(fuel) \quad (3)$$

여기서, ΔF(fuel) : Eq. (1)에서 계산된 연료소비/방출량

f_{CO₂} : Table 2의 CO₂ 비율(g/ml)

Table 2. CO₂ Rate in Grams Per Milliliter of Fuel

Vehicle	f _{CO₂} (g/ml)
Light Vehicle	2.5
Heavy Vehicle	2.6

SIDRA를 이용해 동일조건에서 교차로를 분석한 결과 CO₂ 배출량은 kg/h의 단위로 나타났다. 기존의 국립환경과학원(2011)의 차량 당 CO₂ 배출량 곡선과 비교하기 위해 SIDRA CO₂ 배출량 곡선의 단위를 g/km로 변경하는 과정을 거쳤다.

$$\begin{aligned} (kg/km) &= (kg/h) \div (km/h) \\ (g/km) &= (g/km) \times 1000 \end{aligned} \quad (4)$$

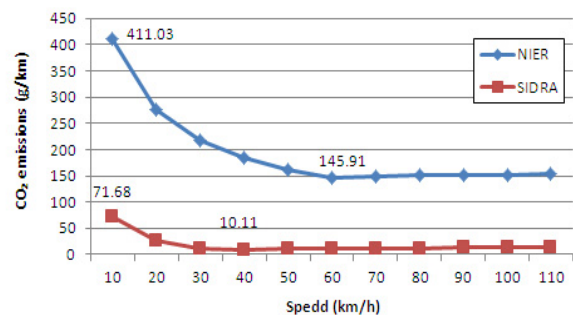


Fig. 6 Comparison of Vehicle's CO₂ Emissions in SIDRA and NIER

Fig. 6은 국립환경과학원(2011)과 SIDRA의 차량 당 CO₂ 배출량 곡선을 비교한 그래프이다.

국립환경과학원(2011)과 SIDRA의 경우 모두 속도 약 50~60km/h인 지점에서 차량 당 CO₂ 배출량 최저를 나타내며, 전체적으로 U자 형태를 띄고 있다.

그러나 SIDRA의 CO₂ 배출량과 국립환경과학원(2011)의 CO₂ 배출량은 다소 차이가 있었다. SIDRA의 CO₂ 배출량의 경우, 차량의 질량, 가속도, 속도, 연료 관련 효율계수 등을 반영하여 CO₂ 배출량을 산출한다. 그러나 국립환경과학원(2011)은 차종과 속도를 반영하여 CO₂ 배출량을 산출하기 때문에 두 CO₂ 배출량에 차이가 있는 것으로 보인다.

4.2. 분석 시나리오 작성

회전교차로와 신호교차로를 비교하기 위해 Table 3 과 같이 교통량, 차로 수, 좌회전차로의 유무, 좌회전 교통량 비율에 따라 시나리오를 구성하였다.

Table 3. Analysis Scenarios

Signalized Intersections			
Total Entering Flow	400pcph - 4800pcph		
Left-turn Ratio	10%, 20%, 30%		
Lane	1-lane approach	2-lane approach	
Existence of Left-turn Lane	-	O	X
Phase	2	4	
ETC	① Lane width 3.3m ② None of Pedestrian ③ Heavy vehicle 0%		
Roundabouts			
Total Entering Flow	400pcph - 4800pcph		
Left-turn Ratio	10%, 20%, 30%		
Lane	1-lane approach	2-lane approach	
Existence of Left-turn Lane	-	O	X
ETC	① Island Diameter 23m ② Circulation Road Width 6m		

신호교차로와 회전교차로의 경우 모두 진입교통량은 400~4800pcph까지 400pcph간격으로 적용하였다. 진입교통량은 교차로의 총 진입대수를 뜻하며, 각 접근로별 진입교통량은 균등하다고 가정하였다.

차로 수에 대한 비교는 1차로와 2차로일 경우를 대상으로 하였다.

좌회전 교통량 비율에 대한 비교는 좌회전 10%, 20%, 30%를 대상으로 하였다. 우회전 교통량은 15%로 일정하게 하였으며, 그 밖에 분석상의 편의를 위해 보행교통량, 유턴, 중차량, 우회전 전용차로는 없는 것으로 가정하였으며, 해당 교차로 외 주변교차로, 반대방향 접근로, 교차도로 등의 상태는 고려하지 않았다.

좌회전 차로의 유무에 대한 비교는 신호교차로에서 적용하였으며, Table 4와 같다.

Table 4. Scenarios for Left-Turn Lane

	None of left-turn lane	Existence of left-turn lane	
		CASE A	CASE B
Lane			

첫 번째, 전용차로가 없는 경우, 두 번째, 2차로 중 한 차로가 좌회전 전용차로인 경우(CASE A), 세 번째, 2차로에 한 차로를 좌회전 전용차로로 추가한 경우(CASE B)로 나누어 분석하였다. 회전교차로에서는 좌회전교차로가 없는 한 가지의 경우로 분석하였다.

5. 분석결과

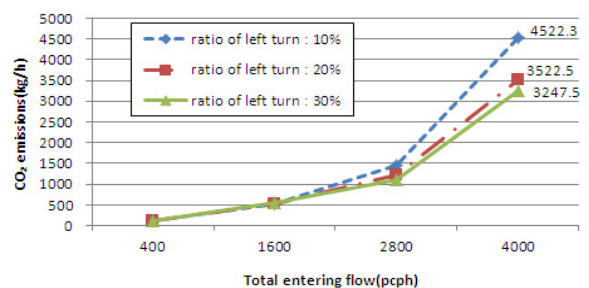
5.1. 좌회전 비율에 따른 효과분석

Table 5는 진입교통량이 400~4800pcph일 때, 교통량을 400pcph씩 증가시키며 좌회전 비율에 따른 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 분석한 결과이다. 단, 신호교차로는 2차로 중 한 차로가 좌회전전용차로인 CASE A를 대상으로 하였다.

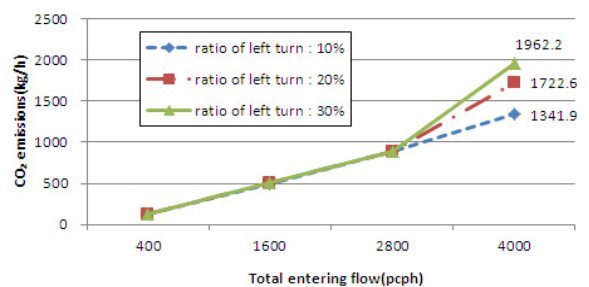
Table 5. Comparison of CO₂ Emissions for Left-Turn Ratio in Signalized Intersections and Roundabouts

Traffic volume		400	1600	2800	4000
Left-turn ratio 10%	intersection	125.5	519.5	1444.7	4522.3
	roundabout	124.6	500.6	883.1	1341.9
Left-turn ratio 20%	intersection	126.2	539.9	1236.6	3522.5
	roundabout	125.0	503.3	891.3	1722.6
Left-turn ratio 30%	intersection	126.9	558.1	1100.1	3247.5
	roundabout	125.3	503.6	897.1	1962.2

Fig. 7은 2차로 신호교차로와 회전교차로에서 각각 좌회전 교통량 비율에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 비교



(a) CO₂ Emissions in Signalized Intersection



(b) CO₂ Emissions in Roundabout

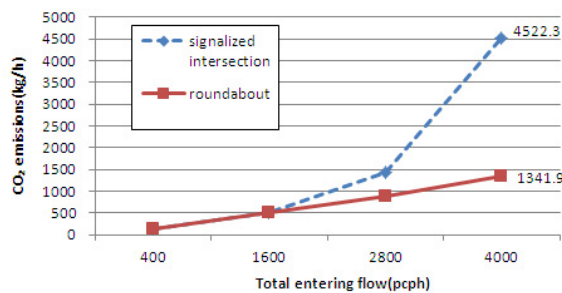
Fig. 7 Comparison of CO₂ Emissions for Left-Turn Ratio

한 결과이다.

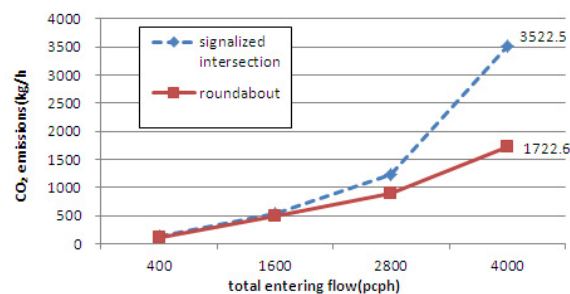
신호교차로의 경우, 진입교통량이 1600pcph 이하일 때는 좌회전 비율에 따른 차량 당 CO₂ 배출량의 차이가 거의 없었다. 진입교통량이 1600pcph 이상일 때는 좌회전 비율이 10%일 경우보다 30%일 경우에 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

회전교차로의 경우, 진입교통량이 2800pcph 이하일 때 좌회전 비율에 따른 차량 당 CO₂ 배출량의 차이가 거의 없었다. 진입 교통량이 2800pcph 이상일 때 좌회전 비율이 30%일 경우보다 10%일 경우에 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

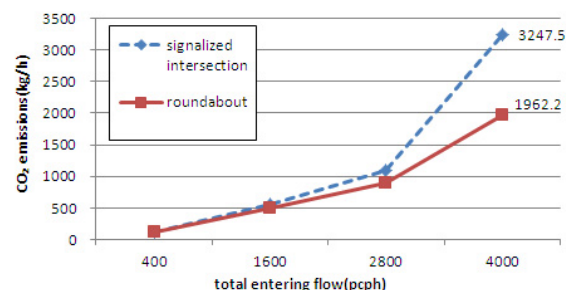
Fig. 8은 2차로에서 각각의 좌회전 비율에 따라서 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 비교한 그래프이다. 단, 신호교차로는 2차로 중 한 차로가



(a) Comparison of CO₂ Emissions (Ratio of left-turn : 10%)



(b) Comparison of CO₂ Emissions (Ratio of left-turn : 20%)



(c) Comparison of CO₂ Emissions (Ratio of left-turn : 30%)

Fig. 8 Comparison of CO₂ Emissions for Left-Turn Ratio in Signalized Intersections and Roundabouts

좌회전 전용차로인 CASE A를 대상으로 한 결과이다.

진입교통량이 1600pcph 이하일 때 좌회전비율 10%, 20%, 30% 전체에서 회전교차로가 신호교차로에 비해 차량 당 CO₂ 배출량이 약간 낮게 나타났으나 거의 차이가 없었다. 진입교통량이 1600pcph 이상일 때에는 좌회전 10%, 20%, 30% 모두에서 회전교차로가 신호교차로에 비해 차량 당 CO₂ 배출량이 확연히 낮게 나타났다.

5.2. 차로 수에 따른 효과분석

Table 6은 진입교통량이 400~2400pcph일 때, 교통량을 400pcph씩 증가시키며 차로 수에 따른 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 분석한 결과이다.

단, 1차로의 경우에는 회전교차로의 용량이 약 1800pcph로 나타났다. 따라서, 그 이상의 진입교통량에 대한 경우는 과다혼잡으로 분석결과가 나타나지 않아 분석결과에서 제외하였다.

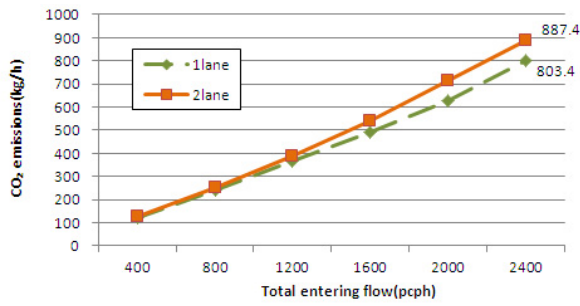
Table 6. Comparison of CO₂ Emissions for Number of Lane in Signalized Intersections and Roundabouts

Traffic volume	1-lane approach		2-lane approach	
	intersection	roundabout	intersection	roundabout
400	119.6	125.1	126.2	125.0
800	239.1	249.7	252.9	249.3
1200	364.4	378.2	388.2	377.3
1600	492.3	505.4	539.9	503.3
2000	626.5	647.3	713.2	628.4
2400	803.4	931.1	887.4	755.3

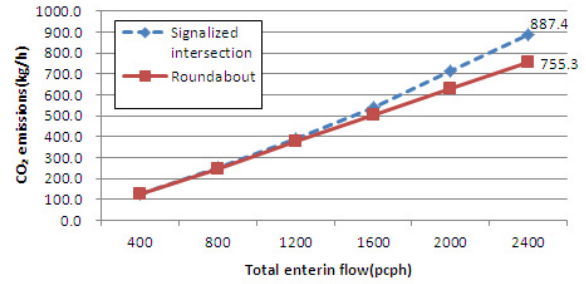
Fig. 9는 신호교차로와 회전교차로에서 각각 차로 수에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 비교한 결과이다. 단, 2차로 신호교차로의 경우, 2차로 중 한 차로가 좌회전 전용차로인 CASE A를 대상으로 하였다.

신호교차로의 경우, 진입교통량이 1200pcph 이하일 때 차로 수에 따른 차량 당 CO₂ 배출량의 차이가 거의 없었다. 그러나 진입교통량이 1200pcph 이상일 때 2차로일 경우보다 1차로일 경우에 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

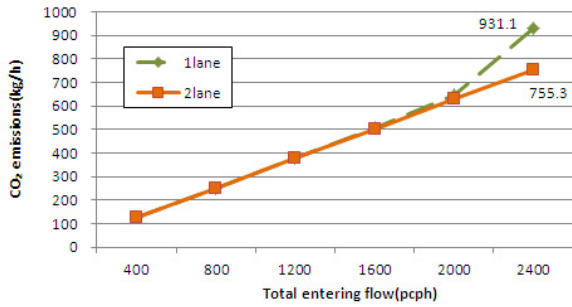
회전교차로의 경우, 진입교통량이 2000pcph 이하일 때는 차로 수에 따른 차량 당 CO₂ 배출량의 차이가 거의 없었으며, 진입교통량이 2000~2400pcph 일 때 1차로일 경우보다 2차로일 경우에 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.



(a) CO₂ Emissions in Signalized Intersections



(b) Comparison of CO₂ Emissions (2-lane)



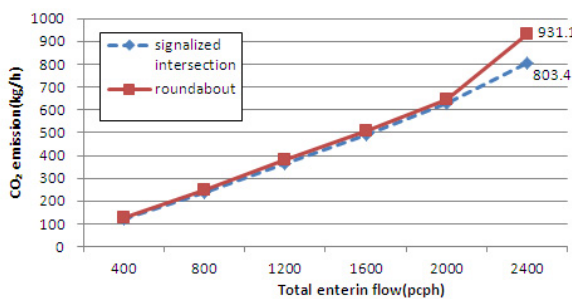
(b) CO₂ Emissions in Roundabout

Fig. 9 Comparison of CO₂ Emissions for Number of Approach Lane

Fig. 10은 좌회전비율이 20%일 때 각각의 차로 수에 따라서 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 비교한 그래프이다.

1차로의 경우, 진입교통량이 2000pcph 이하일 때 신호교차로와 회전교차로의 차이가 거의 없었다. 진입교통량이 2000~2400pcph일 때는 회전교차로보다 신호교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

2차로의 경우, 진입교통량이 1200pcph 이하일 때 신호교차로와 회전교차로의 차이가 거의 없었다. 진입교통량이 1200~2400pcph 이상일 때 신호교차로보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.



(a) Comparison of CO₂ Emissions (1-lane)

Fig. 10 Comparison of CO₂ Emissions for Number of Lane in Signalized Intersections and Roundabouts

5.3. 좌회전차로 유무에 따른 효과분석

Table 7은 400~4800pcph까지 교통량에서 400pcph씩 증가시키며 좌회전차로 유무에 따른 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 분석한 결과이다.

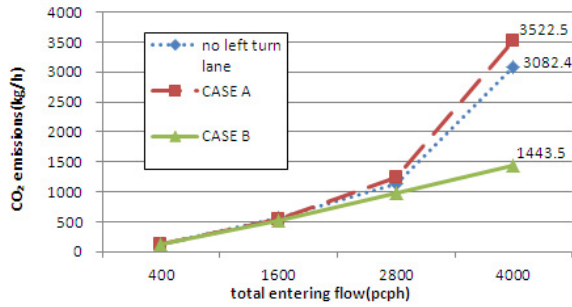
Table 7. Comparison of CO₂ Emissions for Left-Turn Lane in Signalized Intersection and Roundabouts

Traffic volume		400	1600	2800	4000
none of left-turn lane	intersection	125.9	558.6	1143.1	3082.4
	roundabout	125.0	503.3	891.3	1722.6
CASE A (change of straight lane)	intersection	126.2	539.9	1236.6	3522.5
	roundabout	125.0	503.3	891.3	1722.6
CASE B (addition of deceleration lane)	intersection	125.7	513.0	971.3	1443.5
	roundabout	125.0	503.3	891.3	1722.6

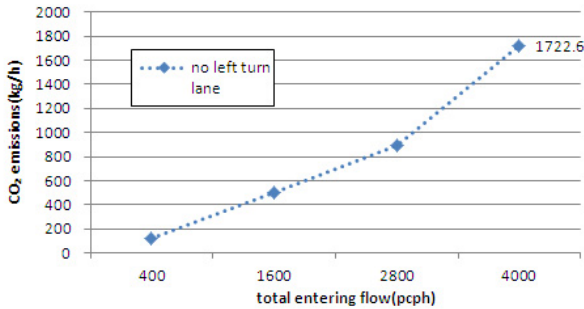
Fig. 11은 2차로 신호교차로와 회전교차로에서 각각 좌회전차로 유무에 따른 차량 당 CO₂ 배출량을 비교한 결과이다. 단, 회전교차로는 좌회전차로가 없는 한 가지의 경우로 분석하였다.

신호교차로의 경우, 진입교통량이 1600pcph 이하일 때 좌회전차로에 따른 차량 당 CO₂ 배출량이 거의 차이가 없었다. 진입교통량이 1600pcph 이상일 때 2차로에 한 차로를 좌회전차로로 추가한 CASE B의 차량 당 CO₂ 배출량이 가장 낮았고, 두 번째가 전용차로가 없는 경우, 세 번째로 2차로 중 한 차로가 좌회전 전용차로인 CASE A가 차량 당 CO₂ 배출량이 가장 높게 나타났다.

회전교차로는 좌회전차로가 존재하지 않기 때문에 비교대상에서 제외하였다.



(a) CO₂ Emissions in Signalized Intersection



(b) CO₂ Emissions in Roundabout

Fig. 11 Comparison of CO₂ Emissions for Left-Turn Lane

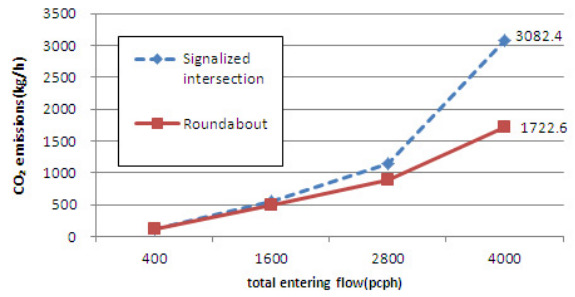
Fig. 12은 좌회전비율이 20%일 때 각각의 좌회전차로 유무에 따라서 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 비교한 그래프이다.

좌회전차로 유무에 관계없이 진입교통량이 1600pcph 이하에서는 회전교차로와 신호교차로의 차량 당 CO₂ 배출량이 거의 차이가 없었다.

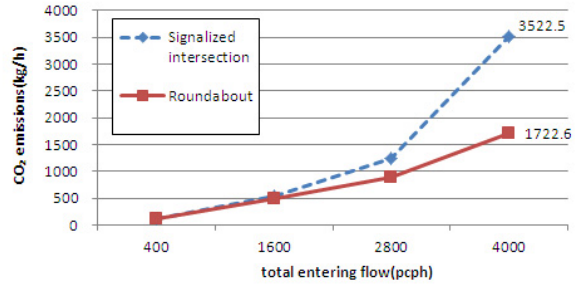
좌회전차로가 없는 경우, 진입교통량이 1600pcph 이상일 때 신호교차로보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

2차로 중 한차로가 좌회전 전용차로인 CASE A의 경우, 진입교통량이 1600pcph 이상일 때 신호교차로보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다. 진입교통량이 늘어날수록 차량 당 CO₂ 배출량의 차이는 더 크게 나타났다.

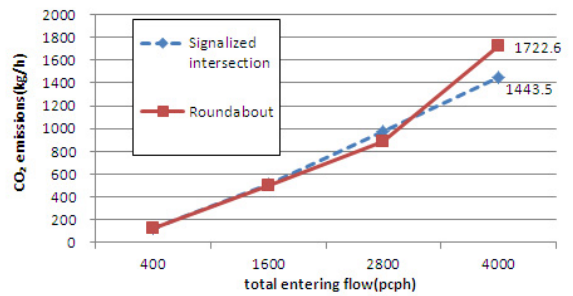
2차로에 한 차로를 좌회전 차로로 추가하여 다차로가 된 CASE B의 경우, 진입교통량이 1600~2800pcph까지는 신호교차로보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다. 그러나 진입교통량이 4000pcph 이상일 때 회전교차로보다 신호교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.



(a) Comparison of CO₂ Emissions (No left-turn lane)



(b) Comparison of CO₂ Emissions (Case A)



(c) Comparison of CO₂ Emissions (Case B)

Fig. 12 Comparison of CO₂ Emissions for Left-Turn Lane in Signalized Intersections and Roundabouts

6. 결론

본 연구는 CO₂ 배출량을 효과적으로 신호교차로와 회전교차로를 비교하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 신호교차로와 회전교차로의 여러 도로조건을 가정하고, 교통량이 증가함에 따라 신호교차로와 회전교차로의 차량 당 CO₂ 배출량을 비교·분석하였다. 여러 가지 분석 시나리오에 따라 SIDRA를 이용해 신호교차로와 회전교차로의 효과를 분석하였다.

연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 좌회전 비율에 따른 비교 결과, 진입교통량이 1600pcph 이상일 때 좌회전비율에 관계없이 신호교차로

보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

따라서, 진입교통량이 1600pcph 이상일 때 좌회전 비율에 관계없이 신호교차로보다 회전교차로가 CO₂ 배출량 감소에 효과적임을 알 수 있다.

둘째, 차로 수에 따른 비교 결과, 1차로에서 진입교통량이 2000~2400pcph일 때 신호교차로보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다. 2차로에서 진입교통량이 1600~2400pcph일 때 회전교차로보다 신호교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

따라서, 1차로의 경우 진입교통량이 2000~2400pcph 일 경우에만 신호교차로보다 회전교차로가 CO₂ 배출량 감소에 효과적임을 알 수 있다. 2차로의 경우 진입교통량이 1600~2400pcph일 경우에만 신호교차로보다 회전교차로가 CO₂ 배출량 감소에 효과적임을 알 수 있다.

셋째, 좌회전 차로 유무에 따른 비교 결과, 좌회전 차로가 없는 경우와 차로 중 한차로가 좌회전 전용차로인 CASE A에서 진입교통량이 1600pcph 이상일 때, 신호교차로보다 회전교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다. 2차로에 한 차로를 좌회전 차로로 추가하여 다차로가 된 CASE B에서 진입교통량이 4000pcph 이상일 때 회전교차로보다 신호교차로가 차량 당 CO₂ 배출량이 낮게 나타났다.

따라서, 좌회전차로의 유무에 따라 차량 당 CO₂ 배출량의 차이가 크게 나타나며, 좌회전 차로가 없거나 차로 중 한차로가 좌회전 전용차로인 경우에서 진입교통량이 1600pcph 이상일 경우에는 신호교차로보다 회전교차로가 CO₂ 배출량 감소에 효과적임을 알 수 있다. 또한, 2차로에 한 차로를 좌회전 차로로 추가하여 다차로가 된 경우에서 진입교통량이 4000pcph 이상일 때 회전교차로보다 신호교차로가 CO₂ 배출량 감소에 효과적임을 알 수 있다.

본 연구는 SIDRA를 이용하여 차량 당 CO₂ 배출량을 척도로 신호교차로와 회전교차로의 운영효율을 여러 조건에서 분석하였다. 본 연구결과를 통해 각 도로 및 교통조건에 따라 CO₂ 배출량 감소에서 비교우위에 있는 교차로 형태를 제시할 수 있었다.

7. 한계점 및 향후과제

그러나, 본 연구는 SIDRA의 CO₂ 배출량 곡선과 식을 이용하여 회전교차로와 신호교차로를 비교·분석하였기 때문에 국내의 CO₂ 배출량 곡선과는 차이가 존재했

다. SIDRA의 CO₂ 배출량 곡선은 국내의 CO₂ 배출량 곡선에 비해 과소평가되고 있었다. 따라서, 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

또한, 실제로 회전교차로는 수용할 수 있는 용량에 한계가 있다. 그러나, 본 연구에서 그 용량에 관계없이 총 진입교통량을 일괄적으로 적용하였기 때문에 세밀한 분석에 어려움이 있었다. 회전교차로의 용량을 반영하여 용량 이하의 낮은 교통량에서의 세밀한 분석이 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 연구지원프로그램으로 지원받았습니다. (연구과제 관리코드: 2013R1A1A2012547)

알림

“제67회 대한교통학회 학술발표회”에서 발표된 프로시딩을 수정하여 편집하였습니다.

References

- Pakr, Byung-Ho, Jung, Yong-Il. 2005. Performance Evaluation of 4-leg and 1-lane Modern Roundabout Using SIDRA. *The Journal of Korean Regional Development Association*, Vol.17. No.2. 89-106
- (박병호, 정용일(2005) SIDRA를 이용한 4지 1차로 현대식 회전교차로의 효과 평가. 한국지역개발학회지, 제 17권 제 2호, pp.89-106)
- Park, Byung-Ho, Kim, Tae-Young, Han, Sang-Wook, Yang, Jeong-Mo, 2009. Comparative Analysis on the Effectiveness of Modern Roundabouts and 4-legged Signalized Intersections, *The Journal of Korean Institute of Intelligent Transport System*, Vol.8, No.2. 27-35
- (박병호, 김태영, 한상욱, 양정보(2009) 회전교차로와 4지 신호교차로 효과에 관한 비교분석. 한국 ITS 학회 논문지, 제 8권 제 2호, pp.27-35)
- Han, Su-San, Park, Byung-Ho, 2010. Comparative Analysis on the Delay Between Multi-legged Roundabout and Signalized Intersection, *The Journal of Korean Institute of Intelligent Transport System*, Vol.9 No.6. 83-93
- (한수산, 박병호(2010) 다지 회전교차로와 신호교차로의 지체 비교 분석, 한국 ITS 학회 논문지, 제 9권 제 6호, pp.83-93)
- Pakr, Byung-Ho, Song, Dae-Sup. 2003. Rationalities of Modern Roundabouts in the Intersection Planning. *Journal of the Institute of Construction Technology*, Vol.22. No.2. 139-151
- (박병호, 송대섭(2003) 교차로계획에서 현대식 회전교차로의 도입 타당성. 충북대학교 건설기술논문집 제 22권 제 2호, pp.139-151)
- Ahn, Woo-Young, 2012. A Study on Roundabout Signal Metering Operation by Considering Entry Lane's Traffic Volume.

- International Journal of Highway Engineering*, Vol.14 No.2. 175-181
- (안우영(2011) 진입교통량을 고려한 회전교차로 Signal Metering 운영에 관한 연구, 한국도로학회논문집, 제 14권 제2호, pp.175-181)
- Lee, Jung-Beom, Lee Seung-Hoon. 2011. Analysis of the Effect of Carbon Dioxide Reduction by Changing from Signalized Intersection to Roundabout using Tier 3 Method. *The Journal of Korean Institute of Intelligent Transport System*, Vol.10, No.5. 105-112
- (이정범, 이승훈(2011) Tier 3 방법을 이용한 회전교차로 도입에 따른 CO2 감축 효과, 한국ITS학회논문지, 제 10권 제 5호, pp.105-112)
- Lim, Jin-Kang, Park, Byung-Ho. 2011. Comparative Analysis of Operational Effectiveness Related to the Conversion of Rotary to Roundabout in Korea. *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.13 No.2, 77-83
- (임진강, 박병호(2011) 국내 로터리의 회전교차로 전환에 따른 운영효과 분석. 한국도로학회 논문집, 제 13권 제 2호 pp.77-83)
- National of Environmental Research, 2001. *An Investigation of Green House Gas Emission From Automobiles*
- (국립환경과학원(2001), 자동차의 온실가스 배출량 조사)
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2001, *Korean Highway Capacity Manual*
- (국토해양부(2013), 도로용량편람)
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010, *Roundabout Design Guideline*
- (국토해양부(2010), 회전교차로 설계지침)
- aaSIDRA User Guide. 2000. Akcelik&Associated Pty Ltd
- AKCELIK AND ASSOCIATES(2002) *aaSIDRA User Guide*, Akcelik and Associates Pty Ltd, Melbourne, Australia
- Foad Shokri, Hamid Reza Mokhtarian, Amiruddin Ismail, Riza Atiq O.K. Rahmat. 2010. Comparing the Design of Roundabout and Intersection with aaSIDRA Software, *European Journal of Scientific Research*, pp.239-246
- International Energy Agency(2012) *CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2012 Edition*, International Energy Agency
- Ranhami Operating cost, fuel consumption, and emission models in aaSIDRA and aaMOTION. 2007. Akcelik&Associates Pty Ltd
- Virginia P. Sisiopiku, Heung-Un Oh(2001) Evaluation of Roundabout Performance Using SIDRA, *Journal of Transportation Engineering*.
- (접수일 : 2013. 2. 27 / 심사일 : 2013. 2. 28 / 심사완료일 : 2013. 8. 8)