국내 회전교차로 설계지침 적용에 따른 속도패턴과 개선효과 분석 - 부산광역시를 중심으로 -

임창식* · 최양원**

Lim, Chang-Sik*, Choi, Yang-Won**

An Analysis of Velocity Patterns and Improvement Effect after Application of Domestic Roundabout Design Guidelines (Focusing on Busan Metropolitan City)

ABSTRACT : To find out if modern roundabout is still effective under drivers behavior and driving conditions in Busan Metropolitan City, the effects before and after introduction of roundabout were analyzed. According to analysis on velocity profile at roundabout, velocity deviation decreased, and average vehicle speed was close to design speed. As a result, it has been confirmed that most roundabouts were properly built. In terms of traffic operation, average vehicle speed improved by 87.2% when a traffic intersection was replaced by a roundabout. therefore, it has been found out that the introduction of roundabout has a positive effect on increasing vehicle speed by reducing traffic congestion. In addition, annual benefits expected from the replacement from a traffic intersection to a roundabout were KRW 872 million as follows; KRW 410 million in traffic communication, KRW 39 million in transportation safety, KRW 255 million in energy saving, KRW 95 million in reduction of air pollution and KRW 73 million in reduction of traffic signal installation cost. In other words, if 10% (193 spots) of all traffic intersections (1,926 spots in total) in Busan City are replaced by roundabouts, the municipal authority would be able to save about KRW 168.3 billion. According to analysis on the benefits expected from the installation of roundabouts compared to the investment cost for traffic intersections, about KRW 679 million could be saved per roundabout. Considering 10% of all traffic intersections in the City of Busan, about KRW 131 billion could be saved annually. The traffic accidents in roundabout usually occur because drivers aren't aware of right-of-way rules. Once the right-of-way rules settle, the number of traffic accidents would significantly decrease. In addition, it is urgent to promote education and campaign for drivers, pedestrians and bikers on the roundabout.

Key words : roundabout, average traffic speed, retardation also, effectiveness analysis

초 록 : 현대식 회전교차로의 장점이 부산광역시 내의 운전자 행태 및 여건에서도 그 효과가 있는지를 검증하기 위해 회전교차로 도입에 따른 사전 사후 효과분석을 수행하였다. 회전교차로에서의 속도프로파일을 분석한 결과 차량간 속도의 편차가 낮아지고, 회전차로부의 평균주행속도가 회전차로의 설계속도에 근접하여 대부분의 회전차로가 이상적으로 설치된 것으로 분석되었다. 교통운영 측면에서는 평균통행속도가 신호교차로를 회전교차로로 전환 시에서는 평균 약 87.2% 향상되는 것으로 분석되어 회전교차로의 도입이 통행속도 및 지체측면에서 효과가 있는 것으로 판명되었다. 또한, 신호교차로를 회전교차로로 전환 시 연간 발생하는 편익은 교통소통 측면에서 4억

* 정회원 · 도로교통공단 부산지부 (Corresponding Author · Busan Branch of Road Traffic Authority · cslim@koroad.or.kr)

** 정회원 · 영산대학교 교통공학과 부교수 (ywchoi@ysu.ac.kr)

Received October 8 2012, Revised October 12 2012, Accepted October 31 2012

1천만원, 교통안전 측면에서 3천9백만원, 에너지절감 측면에서 2억5천5백만원, 대기오염절감 편익에서는 9천5백만원, 그리고 신호등 설치비용 편익에서 7천3백만원으로 총 8억7천2백만원의 편익이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 부산광역시 전체 신호교차로 1,926개소의 10%인 193개소를 회전교차로로 전환한다면, 연간 부산광역시 예산의 약 1천6백8십3억원을 절약할 수 있다. 또한 회전교차로 사업투자비용 대비 회전교차로 설치로 인한 편익분석 결과, 회전교차로 1개소당 6억7천9백만원의 사업비 절감효과가 발생되며, 부산광역시 신호교차로의 10%를 고려하면 연간 약 1천3백1십억원의 사업비 절감효과를 기대할 수 있다. 회전교차로 내에서의 교통사고는 운전자의 통행우선권 미인지로 인한 것으로 회전교차로의 통행우선권이 자리 잡게 되면 충분히 감소될 여지가 있는 것으로 판단되며, 회전교차로에서의 자동차 운전자, 보행자, 자전거 이용자의 교육 및 홍보가 시급히 이루어져야 한다.

검색어 : 회전교차로, 평균통행속도, 지체도, 효과분석

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라를 비롯하여 세계적으로 많은 국가에서 회전교차로(roundabout)에 대한 관심이 높아지고 있다. 회전교차로는 평면교차로의 일종으로 교차로 중앙에 원형교통섬을 두고, 교차로를 통과하는 자동차가 원형교통섬을 우회하도록 하는 교차로 형식이다. 일반적으로 평면교차로에 비해 상충 횟수가 적고, 저속으로 운영되며, 운전자의 의사결정이 간단하여 운전자의 피로와 사고를 줄일 수 있다.

최근 우리나라는 운전자 중심의 정책에서 벗어나 보행자(교통약자)를 우선시하여 효율적이고, 안전한 도로시설물의 설치로 정책이 전환되고 있다. 이러한 시대적 요구에 따라 도로설계 분야에서는 회전교차로에 대한 관심이 급증하고 있으며, 사회적 배경과 더불어 최근 교통안전, 교통운영, 정책방향 등 다각도로 접근하고 있다. 회전교차로에 대한 선행연구들은 회전교차로의 안전성, 운영효율성에 관한 시뮬레이션 연구들이 대부분을 차지한다. 또한 진입차량, 회전교통량, 물리적인 디자인의 변화에 따른 회전교차로의 용량분석에도 주목해왔다. 하지만 기존의 회전교차로는 외국 설계기준 및 이론을 현장여건과 접목하여 설치된 회전교차로였다.

본 연구는 회전교차로의 부산지역 도입과 확대방안을 위한 기초연구로써 최근 사고감소, 소통증진, 저탄소 녹색교통 활성화와 교통선진화 방안 차원에서 2010년 12월 제정된 국내 회전교차로 설계지침서를 적용한 부산지역 시범사업 4개소에 대하여 국내 운전자의 특성과 도로 및 교통특성이 반영된 회전교차로의 설치와 운영에 따른 개선효과를 분석하는데 그 목적이 있으며, 개선이 필요한 부분에 대해서는 지속적으로 보완해 나가야 할 것이다.

1.2 연구의 범위와 방법

본 연구는 무인단속검사 장비를 이용하여 속도를 분석하였

고, VISSIM을 이용하여 회전교차로의 운영 효과를 비교분석하였으며, 이를 위해 다음과 같은 절차로 연구를 진행한다.

첫 번째로 국내의 문헌과 사례를 통하여 회전교차로의 일반적인 특징과 기하구조에 대해서 살펴본다. 두 번째로 무인단속검사 장비를 이용하여 접근속도, 진입속도, 회전속도, 진출속도를 분석하였다. 세 번째로 VISSIM을 이용하여, 신호교차로, 회전교차로의 운영 효과를 비교분석한다. 네 번째로 교통소통, 교통안전, 에너지절감, 대기오염절감, 신호기 설치비용 측면에서의 절감효과 등을 분석하였다.

2. 선행연구 고찰

2.1 이론적 고찰

회전교차로는 중앙교통섬, 회전차로, 진입·진출차로, 분리교통섬 등으로 구성된다. 내접원 지름은 중앙교통섬 지름과 회전차로 폭을 포함하며, 중앙교통섬 제원에는 내측 길어깨 폭과 화물차 턱(Truck Apron) 폭이 포함된다. 회전교차로와 교통서클의 특징을 비교하면 종래의 교통서클은 진입하는 자동차에게

Fig. 1. Roundabout components

통행우선권이 있어 상대적으로 높은 속도로 진입할 수 있도록 설계되어 있고, 대부분의 교차로의 지름이 크기 때문에 교통서클 내에서 속도가 높아 교통사고가 빈번히 발생한다.

2.2 국내·외 연구

회전교차로에 대한 기존 국내 연구들을 살펴보면, 신부용(2003) 등은 4현시 교통신호로 운영되는 4지교차로에 비해 회전교차로의 용량이 월등하게 크다는 사실을 보여 주었고, 전우훈(2003) 등은 각 방향의 접근로 교통량이 600pcph 이하일 때 신호교차로보다 회전교차로의 효율성이 우수한 것으로 분석하였다. 박병호(2005) 등은 회전교통류별 지체 비교와 V/C로써 회전교통류의 우회전이 주를 이룰 경우 기존의 교차로에 비하여 효율성이 증가하는 것으로 나타났으나, 직진 및 좌회전교통류가 상대적으로 많은 경우에는 효율성이 낮아짐을 제시하였고, 2009년에는 회전교차로와 4지 신호교차로 비교분석에서 1차로 총 진입 교통량이 2,000pcph 이하일 때, 신호교차로에 비하여 효과적이며, 2차로 총 진입 교통량이 3,200pcph 이하일 경우에 신호교차로보다 효과적인 것으로 분석하였다. 심관보(2007) 등은 VISSIM을 이용하여 비신호 Y형 교차로를 회전교차로로 변형하면, 교차로 전체교통량이 증가하고, 안전성이 크게 개선된다고 하였다.

외국을 살펴보면, Thaweesak Taekratok(1998)은 오리건주의 현대식 회전교차로에서 회전교차로의 역사, 안전성, 기하구조, 용량 및 지체시간 등에 대해서 설명하고, 로터리와 회전교차로의 차이점을 설명하였으며, Andras Varhelyi(2002)는 신호교차로를 회전교차로로 변경 시 CO는 29%, NOx는 21%, 연료소모량은 28% 감소하는 것으로 제시하였다. Tove Hels(2007)은 자전거와 차량의 교통량이 높을수록, 회전교차로의 설치년도가 오래될수록 높은 사고 발생가능성을 가지는 것으로 제시하였다. Vincenzo Gallelli(2008)는 VISSIM을 이용하여 circle radius, traffic flow, approach speed, island width에 따른 stop line delay에 대한 분석을 다양한 시나리오를 통하여 제시하였다. Janine M(2008)은 회전교통류별 지체비교와 V/C로써 회전교통류의 경우 우회전이 주를 이룰 경우에는 기존의 교차로에 비하여 효율성이 증가하고, 직진 및 좌회전교통류가 상대적으로 많은 경우에는 효율성이 낮아짐을 제시하였다.

상기에서 살펴본 바와 같이 우리나라 회전교차로에 대한 문헌에서는 회전교차로의 안전성, 운영효율성에 관한 시뮬레이션 연구들이 대부분을 차지한다. 또한 진입차량, 회전교통량, 물리적인 디자인의 변화에 따른 회전교차로의 용량분석에도 주목해왔다. 하지만 기존의 회전교차로는 외국 설계기준 및 이론을 현장여건과 접목하여 설치된 회전교차로이다. 그렇기

때문에 기존 신호교차로의 운영보다는 현대식 회전교차로의 운영효과가 더 높다는 연구결과가 많은 것으로 나타났으며, 외국문헌에서는 환경과 안전에 대한 연구가 이루어지고 있는 것을 알 수 있었다.

2.3 연구의 차별성

본 연구가 기존 연구와의 차별성은 첫째, 부산광역시내 회전교차로 후보대상지 12개소 중 주변상황, 교통량, 예산 등을 고려하여 최종 4개소를 선정하였고, 둘째, 시범사업 대상지점에 대한 현장조사를 통하여 기존 운영되고 있는 교차로의 기하구조, 속도 및 교통량 등을 조사하여 문제점과 속도패턴을 분석하였으며, 셋째, 국내 설계지침서를 바탕으로 만들어진 회전교차로에 대하여 VISSIM을 이용하여 장래서비스수준에 대한 예측과 실제 사업대상지에 적용시킴으로써 교통특성이 반영된 회전교차로의 설치 및 운영에 관한 개선효과를 분석하였다.

또한, 교통 소통적 측면, 교통안전 측면, 에너지절감 측면, 대기오염절감 측면, 신호기 설치비용 측면에서의 절감효과 등을 비교·분석하였다.

3. 회전교차로 현황조사 및 분석

3.1 자료수집

최근 저탄소 녹색성장에 따른 교통선진화 방안의 일환으로 회전교차로에 대한 관심이 증대되었고, 이러한 국가적 관심으로 회전교차로 설계지침이 제정되었으며, 국내 지침을 만족하도록 부산지역 시범사업 4개소 회전교차로를 설치하였다. 그러나 회전교차로의 진입방식과 운영형태에 대하여 대부분 운전자들의 관련 지식이 부족하고, 이에 대한 교육과 홍보 또한 미비한 실정이었기에 설치초기에는 일부 혼잡이 발생하기도 하였다. 따라서 본 연구에서는 국내 회전교차로 설계지침을 적용한 시범사업 4개소를 대상으로 회전교차로가 완공된 후 운전자들의 5~6개월간 적응기간이 지난 지점에 대하여 현장조사 자료를 수집하였다.

3.2 교통사고 분석

조사대상 회전교차로 4개소에 대해 2008년부터 2010년 3년간의 교통사고 발생건수를 조사하였다. 부산에서의 2008년부터 2010년까지 교차로에서 발생한 교통사고는 꾸준히 증가하고 있는 실정이며, 3년 동안 발생한 교차로에서의 평균 교통사고는 5,294건, 본 연구 대상지의 사고건수는 평균 9.3건으로 나타났다.

또한 사고건수를 교통량(건/천대) 대비를 통하여 살펴보았을 때, 범어사입구사거리가 4.96으로 교통량에 비해 사고건수가

적게 나타나는 것으로 나타났으며, 송정해수욕장사거리가 8.51로 가장 높게 나타났다.

2008년~2010년 3년간 부산지역 각 교차로에서 발생하는 사고건수를 분석한 결과, 차대차 사고발생은 68.3%, 차대사람 사고발생은 28.4%, 차량단독 사고발생은 3.3%로 차대차 사고가 약 24배 더 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 주간 사고발생 건수가 야간보다 약 1.4% 정도 더 많이 발생하는 것으로 분석되었다.

분석대상 교차로에서 발생한 평균사고건수는 9.3건이며, 이 중에서 차대차 사고가 59.5%, 차대사람 사고는 35.1%, 그리고 차량단독사고가 5.4%로 나타났다.

회전교차로에서 발생한 유형별 사고 중에서 차대사람 사고발생 비율이 전체 교차로에서 발생한 차대사람 사고 비중보다 높게 나타나 회전교차로에서는 보행자 안전에 유념해야 할 것으로 분석되었다.

회전교차로의 통행에서 끼어들기 방식과 고속주행으로 인해 차대차 사고가 많이 발생하는 것으로 분석되며, 이 중 측면직각 충돌사고가 40.5%로 가장 많이 발생하였다. 측면직각 충돌사고는 교차로 내에서 서로 다른 방향의 접근 차량들이 상대차량의 측면부를 충격하여 발생하는 사고로 회전교차로 내에 충분한 시거가 확보되지 않아 문제로 발생하는 것으로 분석되었다.

차량 상충시 상대차량이 정지하거나 양보해 줄 것이라는 예측에 의한 통행으로 인해 통행우선권 확립이 정립되지 않아 접촉사고가 발생한다고 판단된다. 또한 도시부 회전교차로는 보행량이 지방부보다 많아 보행자 횡단중 사고가 발생하게 되는데, 횡단보도 부근에서 차량이 서행하지 않고 주행하여 횡단중 사고가 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 교차로 내 교통사고는 통행우선권 확립이 정립되지 않은 데에서 기인한다고 본다.

2011년도 4개의 회전교차로에서 발생한 총교통사고 10건의

Table 1. The number of accidents in roundabouts (2008'~2010')

Roundabout name	Accident numbers	Traffic density (vehicle numbers/hour)	Accident numbers/ Traffic density (numbers/1,000 vehicles)
Nulbit church roundabout	10	1,584	6.31
Gudoeck church roundabout	10	1,685	5.93
Songjeong beach roundabout	9	1,057	8.51
Beomoe temple entrance roundabout	8	1,612	4.96
Average	9.3	1,485	6.26

사고위차별 교통사고를 도로형태에 따라 분석해 본 결과 교차로 내에서 50.0%(5건), 접근부에서의 사고가 30.0%(3건)로 많은 비율을 차지하였다.

3.3 평균통행속도 분석

시험사업 4개 교차로를 대상으로 회전교차로의 속도분포에 대해 조사를 수행하였다. 회전교차로를 통행하는 차량들의 속도는 4가지로 나눌 수 있는데 접근속도, 진입속도, 회전속도, 진출속도이다. 속도조사 방법은 무인단속검사 장비를 이용하였고, 각 교차로의 접근로별 접근속도, 진입속도, 회전속도, 진출속도를 조사했으며, 회전교차로 속도조사 측정의 결과는 Table 2와 같다.

또한, Figure 2와 같이 회전교차로를 통과하는 자동차가 진입부에서 충분히 속도를 줄여 회전차로에 진입하고, 점진적으로 가속하여 진출시 신속하게 교차로를 통과하도록 지침서의 속도프로파일이 제시되어 있으며, 이는 접근부의 속도보다 진출 속도가 높게 나타난다.

Table 2. Speed change passing traffic flow in roundabouts

No	Target location		Approaching Speed (km/h)	Entering speed (km/h)	Turning speed (km/h)	Leaving speed (km/h)
1	Nulbit church roundabout	Approach 1	27.13	21.22	19.81	25.94
		Approach2	40.92	23.36	20.94	37.67
		Approach3	35.05	21.45	20.75	36.96
		Approach4	36.15	24.48	20.74	37.58
		Average	34.81	22.63	20.56	34.54
2	Gudoeck church roundabout	Approach1	33.54	23.18	20.74	28.58
		Approach2	25.47	20.83	20.94	-
		Approach3	34.66	22.79	19.93	33.98
		Approach4	31.57	21.25	18.07	29.85
		Average	31.31	22.01	19.92	30.80
3	Songjeong beach roundabout	Approach1	28.67	19.29	18.75	27.54
		Approach2	24.41	18.33	19.85	27.01
		Approach3	23.74	18.38	18.61	-
		Approach4	36.38	21.58	19.06	32.86
		Average	28.30	19.40	19.07	29.14
4	Beomoe temple entrance roundabout	Approach1	33.36	23.95	18.78	30.85
		Approach2	-	-	20.35	25.97
		Approach3	31.59	22.94	19.59	31.66
		Approach4	29.46	20.17	19.31	24.07
		Average	31.47	22.35	19.51	28.14
Average speed			31.47	21.60	19.77	30.66

Fig. 2. Speed change passing traffic flow in roundabouts

그러나 본 연구대상 4개소의 각 접근부별 차량 통행속도 특성을 살펴보면 지침서에서 제시하는 속도변화 그래프와 차이를 보이는데 회전부에서 회전하는 차량이 접근부의 차량을 보고 차량 상충이 발생하는 지점(5번)에서 상대차량이 정지하거나 양보해주지 않을 것이라는 불확실한 예측에 의한 제동 등으로 현저하게 속도가 낮아졌으며, 국내 운전자들의 회전교차로 통행 우선권 확립이 정립되지 않았기 때문이라고 판단된다.

3.4 VISSIM 시뮬레이션 분석

회전교차로의 운영효과를 평가할 수 있는 대표적인 프로그램은 ARCADY, RODEL, aaSIDRA, KREISEL, VISSIM 등이 있다. 본 연구에서 사용된 VISSIM은 독일 PTV사에서 개발된 미시적인 분석도구로서, 시간의 변화와 특성에 따른 도시교통 및 대중교통 운영 시뮬레이션 모델의 개발에 기초하고 있다. 또한 교통 및 대중교통 운영의 분석이 가능하고, 교통공학 및 계획의 효과척도를 기본으로 교통운영상의 다양한 대안을 평가하기 편리하다. VISSIM은 교차부분 및 합류부분에서의 속도 감소에 대해 분석이 가능하고, 신호 및 정지표지 제어가 포함된 교차로의 설계 대안에 관해 쉽게 비교 가능하며, 회전형 교차로나 경사가 분리된 인터체인지에 관해서도 그 비교가 가능하다. 시뮬레이션을 통해 평균지체시간, 평균정지차량수, 평균속도, 총 통행거리 등의 결과 값을 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 차량당 평균지체시간과 서비스수준을 분석지표로 설정하였다.

분석대상은 국내 회전교차로 설계지침(2010.12)에서 제시된 회전교차로 유형별 설계요소를 참고하여 대상지점 4개소의

Fig. 3. Traffic speed characteristics in roundabouts by point to be analyzed

Fig. 4. Average traffic speed characteristics in roundabouts by point to be analyzed

Table 3. Scenario for the analysis of the effects of roundabout

No	Section		Signal operation	Traffic density (both directions)
1	Nulbit church roundabout	Signalized intersection	Period:120 sec, Thru-Left-Turn	Primary: 816 (vehicles/hour) Secondary: 758 (vehicles/hour)
		Roundabout	Roundabout	
2	Gudoeck church roundabout	Signalized intersection	Period:120 sec, Thru-Left-Turn	Primary: 918 (vehicles/hour) Secondary: 767 (vehicles/hour)
		Roundabout	Roundabout	
3	Songjeong beach roundabout	Signalized intersection	Period:120 sec, Thru-Left-Turn	Primary: 863 (vehicles/hour) Secondary: 194 (vehicles/hour)
		Roundabout	Roundabout	
4	Beomoe temple entrance roundabout	Signalized intersection	Period:120 sec, Thru-Left-Turn	Primary: 1,364 (vehicles/hour) Secondary: 248 (vehicles/hour)
		Roundabout	Roundabout	

도시지역 1차로 회전교차로를 VISSIM을 통해 네트워크를 구축하였다.

회전교차로 접근속도는 30.11~34.81km/h, 진입속도는 20.51~22.63km/h, 회전속도는 19.84~20.56km/h, 진출속도는 27.46~34.54km/h로 각 지점별 속도조사 측정값을 적용하였다. 진입로의 차로폭은 4.0m, 진출로 차로폭은 4.5m, 화물차 턱은 2.0~3.0m, 회전차로 폭은 5.5m로 설정하였고, 차량번호판 및 비디오조사를 통한 침두시간 및 비침두시간 각 2시간 교통량을 조사하였으며, 침두시간 평균1시간교통량을 적용하였다.

이 연구의 분석 절차는 국내 회전교차로 설계지침을 적용한 시험사업 4개소를 대상으로 회전교차로가 완공된 후 운전자들의 5~6개월간 적응기간이 지난 지점에 대하여 국내 운전자들의 형태를 고려한 회전교차로에서의 속도패턴을 분석하였고, 기존 신호교차로와 회전교차로의 설치 전·후를 비교하여 평균 제어지체를 분석하였다.

5. 회전교차로 전환에 따른 개선효과 분석

5.1 교통소통 측면

국내 회전교차로 설계지침에 따른 교통소통 측면의 효과분석을 위해서 본 연구는 교차로별 통행시간 비용을 이용하였다. 기존 신호교차로가 회전교차로 전환 시 발생하는 교통소통 완화에 따른 편익은 분석 시 도출된 평균 속도변화 값을 이용하

Table 4. Per vehicle average travel time value (Busan-Ulsan Regional)

Section	passenger cars		Bus		Vans	
	Business	Non-business	Business	Non-business	Business	Non-business
Again Persons (People)	0.10	1.26	1.27	16.33	1.00	0.00
Time value (won)	18,626	6,091	10,228 (1People) 18,626 (0.27People)	3,036	16,571	-
Time value (won/vehicleh)	1,804	7,694	15,298	49,572	16,571	-
Average time value (won/vehicle)	9,497		64,870		16,571	

Note: 1) Referred to vehicle speed and air pollutant emission factor defined in Standard revision and remedy study on preliminary feasibility of Road and Train business.(5th Edition), KDI, 2008.12

2) passenger cars again Persons Business : Non-business = 7.4 : 92.6

3) Bus again Persons Business : Non-business = 7.2 : 92.8

였으며, 차종은 승용차를 기준으로 계산하였다.

교차로별 통행시간 비용은 통행시간 절감편익 계산식에 의해 산출된 값이며, 다음 식과 같다.

$$VOTS = VOT_{\text{사업미시행}} - VOT_{\text{사업시행}}$$

여기서,

$$VOT = \sum_{l=1}^3 (T_{kl} \times P_k \times Q_{kl}) \times 365$$

T_{kl} = 링크 l 의 차종별 통행시간

P_k = 차종별 시간가치

Q_{kl} = 링크 l 의 차종별 통행량

k = 차종(1:승용차, 2:버스, 3:화물차)

위의 식에서 부산·울산권 차량 1대당 평균 통행시간 가치는 다음 Table 4에서 제시하고 있는 승용차 기준값을 적용하여 분석하였으며, 승용차의 업무와 비업무비로 구분하여 분석하였다.

시나리오에 따라 도출된 평균통행 속도는 Table 5와 같으며, 신호교차로에서 회전교차로 전환 시 늘빛교회앞사거리에서의 차량당 평균통행속도는 1.2(km/h), 구덕교회앞은 5.8(km/h), 송정해수욕장은 20.0(km/h), 범어사입구는 16.8(km/h)로 나타나 평균 10.9(km/h)의 속도증가 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 5. Average traffic speed by scenarios

No	Section		Average traffic speed (km/h)	Improvement effect (Roundabout-Signal operation)
1	Nulbit church roundabout	Signalized intersection	27.9	1.2
		Roundabout	29.1	
2	Gudoeck church roundabout	Signalized intersection	11.8	5.8
		Roundabout	17.6	
3	Songjeong beach roundabout	Signalized intersection	13.5	20.0
		Roundabout	33.5	
4	Beomoe temple entrance roundabout	Signalized intersection	11.4	16.8
		Roundabout	28.2	
Average		Signalized intersection	16.2	10.9
		Roundabout	27.1	

Table 6. Results of annual benefit analysis in aspects of traffic

(unit : mil. won)

No	Roundabout name	Signalized intersection	Roundabout	Time benefit
1	Nulbit church roundabout	110.7	69.8	40.9
2	Gudoeck church roundabout	965.5	540.4	425.1
3	Songjeong beach roundabout	379.1	28.9	350.2
4	Beomoe temple entrance roundabout	894.2	68.6	825.6
Average		587.4	176.9	410.5

Note : $70,300,000 \approx 70,246,440 = \frac{3.6\text{second} \times 5,781,600\text{vehicles} \times 12,150\text{won}}{3,600}$
 $5,781,600 = 1,584 \times 10 \times 365\text{day} \rightarrow \text{annual total traffic density (vehicles/day)}$

Table 7. Number of traffic accidents

(unit : number of cases, persons)

No	Roundabout name	Before improvement(2008'~2010')		After improvement(2011')		Accident reduction effect(%)	
		accidents	casualty	accidents	casualty	accidents	casualty
1	Nulbit church roundabout	10	19	4	4	+16.67	-58.33
2	Gudoeck church roundabout	10	12	2	2	-66.67	-100.0
3	Songjeong beach roundabout	9	16	2	3	-50.00	-33.33
4	Beomoe temple entrance roundabout	8	9	2	2	-33.33	-50.00
Average		9.25	14.00	2.50	2.75	-33.33	-60.42

신호교차로에서 회전교차로로 전환 시 통행시간을 분석한 결과 늘빛교회앞에서는 차량당 1.7초, 구덕교회앞에서는 16.6초, 송정해수욕장에서는 21.8초, 범어사입구에서는 33.7초의 통행시간이 감소되었으며, 교차로 1곳 당 평균 18.4초의 통행시간이 감소되는 것으로 나타났다.

앞서 분석된 통행속도를 이용하여 통행시간 절감편익을 산정한 결과는 Table 6과 같으며, 늘빛교회앞에서는 연간 약 4천만원, 구덕교회앞에서는 연간 약 4억3천만원, 송정해수욕장에서는 연간 약 3억5천만원, 범어사입구에서는 연간 약 8억3천만원의 편익이 발생되는 것으로 분석되었다. 또한, 신호교차로에서

의 평균통행시간 비용은 약 5억9천만원, 회전교차로는 1억8천만원이 발생되는 것으로 나타났다. 결국, 신호교차로 한 지점을 회전교차로로 전환 시 교차로 교통소통 완화 편익은 약 4억1천만원이 발생되는 것으로 분석되었다.

5.2 교통안전 측면

교통안전 측면에서의 효과를 분석하기 위해서는 국내 교차로에서의 평균 사고건수와 회전교차로에서의 사고건수를 비교·분석해야 한다. 그러나 2010년 이전 국내에 설치되어 있는 회전교차로는 전무하였고, 설치된 교차로는 교통서를 방식으로,

Table 8. Cases of reduction in the number of accidents according to the transition into roundabouts in the United States

		Average Annual Crashes						Percent change		
		Before Roundabout			After Roundabout					
Type of Roundabout	Number	Total	Injury	PDO	Total	Injury	PDO	Total	Injury	PDO
Small/ moderate	8	4.8	2.0	2.4	2.4	0.5	1.6	-51	-73	-32
Large	3	21.5	5.8	15.7	15.3	4.0	11.3	-29	-31	-10
Total	11	9.3	3.0	6.0	5.9	1.5	4.2	-37	-51	-29

Data: Modern Roundabout Practice in the United States(NCHRP synthesis 264), Transportation Research Board, pp25

Note: 1) Significant difference at 95% confidence level

2) Significant difference at 90% confidence level

Table 9. Traffic accident reduction benefits

(unit : mil. won)

No	Roundabout name	Cost reduction (mil. won)	Average numbers of accidents for roundabouts	Cost for each accidents (including PGS)	Accident reduction effect(%)
1	Nulbit church roundabout	+21.9	3.33	38.7	+0.17
2	Gudoeck church roundabout	-86.3	3.33	38.7	-0.67
3	Songjeong beach roundabout	-58.1	3.00	38.7	-0.50
4	Beomoe temple entrance roundabout	-34.1	2.67	38.7	-0.33
Average		-39.3	3.08	38.7	-0.33

Note: 1) Cost reduction = Average numbers of accidents for roundabouts × Costs for each accidents × Accident reduction effect

2) Costs for each accidents: Assumption of traffic accident costs in 2008', pp77 The Korea Transport Institute

3) PGS cost means psychological cost on traffic accidents

이는 회전교차로의 운영방식이 다르기 때문에 교통서클에서 발생한 사고건수를 이용할 수 없는 실정이었다. 2010년 12월말 발간된 국내 설계지침을 적용한 시범사업 대상지 4개소의 신호 교차로와 회전교차로 전환 후 발생한 교통사고 발생건수 자료를 이용하여 본 연구에 활용하고자 하였다.

국외의 경우에는 Table 8에서와 같이 신호교차로에서 회전교차로로 전환 시 1차로 소형회전교차로에서는 51%, 2차로의 대형회전교차로에서는 29%의 교통사고 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 대상지인 남구 늘빛교회앞에서는 2008~2010년 3년간 평균 3.3건의 교통사고가 발생하였고, 2011년 4건의 교통사고가 발생하여 16.7%가 증가하였으며, 서구 구덕운동장 뒤는 평균 3.3건에서 2건으로 66.7%, 해운대구송정해수욕장은 평균 3.0건에서 2건으로 50.0%, 금정구 범어사입구는 평균 2.7건에서 2건으로 33.3%가 각각 감소하였다. 4개소에서의 평균 교통사고 발생건수는 약 33.3%가 감소하였다.

2010년 부산에 4개의 한국형 회전교차로 도입에 따른 교통안전 측면의 효과분석 결과는 다음 Table 9와 같으며, 신호교차로를 회전교차로로 전환 후 교차로 1곳 당 연간 평균 약 3천9백만원의 교통사고감소 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

5.3 에너지절감 측면

신호교차로를 회전교차로 전환 시 발생하는 에너지절감 편익은 소동원화효과 시뮬레이션 분석 시 도출된 평균 속도변화 값을 ‘도로철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)’ 차종별 유류소비량에 적용하여 산출하였고, 차종은 승용차를 기준으로 계산하였다.

분석결과 늘빛교회앞에서는 연간 약 2백만원, 구덕운동장 뒤에서는 약 3천3백만원, 송정해수욕장에서는 약 4억3천3백만원, 범어사입구에서는 약 5억5천3백만원이 절감되었고, 교통량이 비교적 많은 부산광역시 4개소의 평균은 연간 약 2억5천5백만원의 에너지 절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

5.4 대기오염절감 측면

회전교차로 전환 시 발생하는 대기오염 물질의 종류는 다양하나 본 연구에서는 주로 자동차에서 발생하는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 탄화수소(HC) 그리고 이산화탄소(CO₂)를 분석대상으로 하였다. 회전교차로 전환 시 속도에 따른 오염물질 배출량은 Table 11과 같다.

기존 신호교차로에서 회전교차로 전환 시 대기오염 물질에 대한 환경비용 편익은 다음 Table 12와 같다. 남구 늘빛교회앞사거리에서는 연간 약 0.8백만원, 서구 구덕교회앞사거리에서는

Table 10. Energy saving benefits

No	Section		Speed(km/h)	Oil consumption(liter)	Oil cost(1,000 won)
1	Nulbit church roundabout	Signalized intersection	27.9	417,903.35	814,912
		Roundabout	29.1	417,145.11	813,433
		Variation	+1.2	-758.24	-1,479
2	Gudoeck church roundabout	Signalized intersection	11.8	740,712.47	1,444,389
		Roundabout	17.6	723,533.81	1,410,891
		Variation	+5.8	-17,178.66	-33,498
3	Songjeong beach roundabout	Signalized intersection	13.5	461,490.18	899,906
		Roundabout	33.5	239,218.87	466,477
		Variation	+20.0	-222,271.31	-433,429
4	Beomoe temple entrance roundabout	Signalized intersection	11.4	709,755.66	1,384,024
		Roundabout	28.2	425,933.57	830,571
		Variation	+16.8	-283,822.09	-553,453
Average		Signalized intersection	16.2	582,465.42	1,135,808
		Roundabout	27.1	451,457.84	880,343
		Variation	+10.9	-131,007.58	-255,465

Data : Referred to vehicle speed and air pollutant emission factor defined in Standard revision and remedy study on preliminary feasibility of Road and Train business.(5th Edition), KDI, 2008.12

Note: 1) Oil reduction calculation example=[Oil consumption by speed(30km/h)+{(Oil consumption by speed(40km/h)-Oil consumption by speed(30km/h)×6}×Average driving distance(km/h)×Oil price(1,950won/ℓ)×Annual average traffic density(vehicles/day)/1,000won
2) Annual average traffic density=65×(On-peak traffic/K), On-peak time modulus K=0.1

Table 11. Emissions of pollutants

No	Section		Speed (km/h)	Amount of pollutants(kg/year)			
				CO	NOx	HC	CO2
1	Nulbit church roundabout	Signalized intersection	27.9	10,739	3,788	1,320	1,464,637
		Roundabout	29.1	10,689	3,775	1,312	1,460,990
		Variation	+1.2	-50	-13	-8	-3,647
2	Gudoeck church roundabout	Signalized intersection	11.8	26,430	7,128	4,200	2,326,171
		Roundabout	17.6	25,564	6,951	4,038	2,282,310
		Variation	+5.8	-866	-177	-162	-43,861
3	Songjeong beach roundabout	Signalized intersection	13.5	16,420	4,439	2,605	1,451,142
		Roundabout	33.5	4,533	1,850	484	786,426
		Variation	+20.0	-11,887	-2,589	-2,121	-664,716
4	Beomoe temple entrance roundabout	Signalized intersection	11.4	25,342	6,831	4,028	2,228,287
		Roundabout	28.2	10,916	3,852	1,341	1,489,599
		Variation	+16.8	-14,426	-2,979	-2,687	-738,688
Average		Signalized intersection	16.2	19,733	5,547	3,038	1,867,559
		Roundabout	27.1	12,926	4,107	1,794	1,504,831
		Variation	+10.9	-6,807	-1,440	-1,244	-362,728

Note: The analysis traffic density for each scenario is on-peak traffic, and was applied by K=0.1 to be converted to Annual average traffic density (Annual average traffic density=On-peak time x K x 365)

Table 12. Air pollution reduction benefits

No	Section		Speed (km/h)	Costs for pollutants(1,000 won)			
				CO	NOx	HC	CO2
1	Nulbit church roundabout	Signalized intersection	27.9	85,667	34,682	12,510	62,101
		Roundabout	29.1	85,264	34,563	12,437	61,946
		Variation	+1.2	-403	-119	-72	-155
2	Gudoeck church roundabout	Signalized intersection	11.8	210,829	65,260	39,799	98,630
		Roundabout	17.6	203,926	63,634	38,264	96,770
		Variation	+5.8	-6,903	-1,626	-1,535	-1,860
3	Songjeong beach roundabout	Signalized intersection	13.5	130,984	40,639	24,684	61,528
		Roundabout	33.5	36,162	16,937	4,586	33,344
		Variation	+20.0	-94,822	-23,702	-20,098	-28,184
4	Beomoe temple entrance roundabout	Signalized intersection	11.4	202,151	62,540	38,176	94,479
		Roundabout	28.2	87,079	35,264	12,712	63,159
		Variation	+16.8	-115,072	-27,276	-25,464	-31,320
Average		Signalized intersection	16.2	157,408	50,780	28,792	79,185
		Roundabout	27.1	103,108	37,600	17,000	63,805
		Variation	+10.9	-54,300	-13,181	-11,792	-15,380

Note: Won unit of environmental cost is CO 7,977won, NO_x 9,155won, HC 9,477won, and CO₂ 42.4won.

Table 13. Installation and operating costs at signalized intersections

Signalized intersection installation costs		Signalized intersection operating costs	
Intersection type	Average installation costs(10,000won /intersections)	Section	Operating costs (won/month)
Three-way intersection	6,500	Communication	24,000
		Electrical bills	28,000
Four-way intersection	7,700	Maintenance fee	71,083
		Signaler operating costs	76,750
Average costs	7,100	Total	199,833
Annual average costs (Saving benefits)	73.4 mil. won.		

Data: Internal data of the Metropolis of Seoul, June, 2010.

Note: The average installation cost of signaler is based on controller installation and undergrounding, and the operating costs is based on controller installation intersection.

연간 약 1천2백만원, 해운대구 송정해수욕장사거리에서는 연간 약 1억6천7백만원, 금정구 범어사입구사거리에서는 연간 약 1억9천9백만원의 비용절감 효과가 있는 것으로 분석되었으며, 부산광역시 4개소의 평균은 연간 약 9천5백만원의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

5.5 신호등 설치비용 측면

국내 설계지침을 적용한 한국형 회전교차로 적용시의 절감효과는 교통소통, 교통안전, 에너지, 대기오염 외에 신호기 설치비용절감 효과가 발생되고, 일반적으로 신호교차로 운영비용은 Table 13에서와 같이 통신료, 전기료, 유지보수비, 신호기 운영비 등으로 구분되며, 회전교차로 설치에 따라 이러한 비용은 절감할 수 있다.

신호교차로를 회전교차로로 전환 시 연간 약 7,340만원의 편익이 발생하는 것으로 분석되었다.

6. 결론

6.1 결론 및 연구요약

본 연구는 부산광역시 내에 국내 회전교차로 설계지침 적용 따른 속도패턴 분석과 다양한 기대효과를 분석한 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

회전교차로를 통과하는 자동차가 진입부에서 충분히 속도를 줄여 회전차로에 진입하고, 점진적으로 가속하여 진출시 신속하게 교차로를 통과하도록 설계지침서의 속도프로파일이 제시되어 있으며, 이는 접근부의 속도보다 진출속도가 높게 나타난다. 그러나 본 연구대상 4개소의 차량 통행속도 특성을 살펴보면 지침서에서 제시하는 속도변화 그래프와 차이를 보이는데 회전부에서 회전하는 차량이 접근부의 차량과 차량 상충이 발생하는

Table 14. Budget saving effects installing roundabouts

Section	Budget saving (bil. won, 1-2)	Roundabout installtion benefits (bil. won, 1)	Roundabout business costs (bil. won, 2)
Average per one roundabout	6.79	8.72	1.93
Busan 10% (193)	1,310	1,683	373
Whole country 10% (3,399)	23,079	29,639	6,560

Note: The average costs of the four roundabouts installation business in 2010 is totally 176mil. won.

지점에서 속도가 현저하게 낮아졌다. 이는 상대차량이 정지하거나 양보해주지 않을 것이라는 불확실한 예측에 의한 제동으로 현저하게 속도가 낮아졌으며, 국내 운전자들의 회전교차로 통행 우선권 확립이 정립되지 않았기 때문이라고 판단된다.

신호교차로를 회전교차로 전환 시의 연간 발생하는 편익은 교통소통 측면에서 4억1천만원, 교통안전 측면에서 3천9백만원, 에너지절감 측면에서 2억5천5백만원, 대기오염절감 편익에서 9천5백만원, 그리고 신호등 설치비용 편익에서 7천3백만원으로 총 8억7천2백만원의 편익이 발생하는 것으로 나타났다.

이는 부산광역시 전체 신호교차로 1,926개소의 10%인 193개소를 회전교차로로 전환한다면, 연간 부산광역시 예산의 약 1천6백8십3억원을 절약할 수 있으며, 우리나라 전체 신호교차로 33,992개소의 10%인 3,399개소를 회전교차로로 전환한다면, 연간 우리나라 예산의 약 2조3천6백3십9억원을 절약할 수 있다.

또한 회전교차로 사업투자비용 대비 회전교차로 설치로 인한 편익분석 결과는 다음 Table 14와 같고, 이는 회전교차로 1개소당 연간 평균 약 6억7천9백만원의 사업비 절감액이 발생되며, 부산광역시 신호교차로의 10%를 고려하면 연간 약 1천3백1십억원의 사업비를 절감, 우리나라 신호교차로의 10%를 고려하면 연간 약 2조3천7십9억원의 사업비 절감효과를 기대할 수 있다.

6.2 연구의 한계점 및 향후 연구과제

본 연구는 교통선진국에서 활성화되어 있는 회전교차로를 부산지역에도 활성화시키기 위해 국내 회전교차로 설계지침을 적용한 대상지 4개소의 속도패턴 분석과 효과를 분석하여 개선 방안을 마련하는데 기여하였다. 하지만 분석 대상지의 수가 작아 부산지역을 대표하기에는 부족한 면이 있었으며, 국내에서는 회전교차로가 도입초기 단계임으로 앞으로 이를 보다 활성화시키기 위해서는 다음과 같은 많은 노력이 필요할 것으로 보인다.

회전교차로 시범사업들이 주로 도시부와 지방부의 작은 규모

도로 위주로 추진되고 있어, 보조간선도로 상에 설치할 수 있는 회전교차로의 시범사업 추진이 필요할 것으로 보이며, 최근에 건설되고 있는 회전교차로에 대한 지속적인 모니터링을 통해 설계지침의 내용과 비교·검토하고 검토결과를 반영하여 향후 보완이 필요하다.

특히, 회전교차로 설치 및 운영의 성공을 위해서는 운전자 교육 및 홍보가 가장 중요함으로 동영상, 홍보책자 및 언론 등의 다양한 매체를 통한 홍보방안과 운전자시험 및 운전자교육 등의 교육 방안을 마련하고 이를 지속적으로 수행할 필요가 있다.

또한, 회전교차로 설계 및 시공, 사업계획 수립 및 감독하는 전문가 및 실무자에 대한 교육을 통해 바람직한 형태의 회전교차로 도입 및 운영이 가능하도록 해야 한다. 회전교차로에서의 통행우선권 확립은 법제도정비와 함께 이루어져야 하는 부분으로 회전교차로에서의 교통사고 시 피해자 구분을 위한 법제도 개선이 필요하다. 기본적으로 운전자들은 통행원칙이 상이한 교통서클과 회전교차로를 주행 중에 구분하기가 어렵기 때문에 이에 대한 대책마련이 시급하다.

마지막으로 기존 교차로를 회전교차로로 전환하기에는 추가 토지매입, 지장물 이설 등의 많은 어려움이 있는 바, 도시 및 도로계획 단계에서 회전교차로가 적극 도입될 수 있도록 정책마련이 필요하다. 결론적으로 계획, 설계, 시공 및 모니터링 등의 절차를 통해 교통사고감소와 교차로 소통원활 효과뿐만 아니라 에너지 소비절감과 대기오염 배출량 감소 등의 녹색교통 활성화 효과를 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 영산대학교 연구비 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Presidential Council on National Competitiveness (2009), *Roundabouts Activation Plan for Green Transport*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2001), *Highway Capacity Manual*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009), *Rules and Guidance of the Road Structure & Facility Standards*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), *Roundabout Design Guideline*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, The Korea Transport Institute and Korea Institute of Construction Technology (2011), *Activation Plan for Roundabouts*.
- Park, Byeong Ho, Kim, Tae Young, Kim, Yoon Shin, Yang, Jeong Mo (2009), "Comparative Analysis of Roundabouts and 4 Signals

- Intersections”, *Journal of Intelligent Transport Systems* II. Vol. 8, pp. 139-151.
- Park, Byeong Ho and Jeong, Yong il (2005), “Evaluation of the Effect of Modern Roundabouts using SIDRA”, *Journal of The Korea Regional Development Association* II. Vol. 17, pp. 89-106.
- Shin, Bu Yong and Kim, Kee Joon (2003), “Obstacles and Solutions in Introduction of Western-style Roundabouts”, *Journal of the Annual Conference of The Korea Society of Civil Engineers*, pp. 214-219.
- Shim, Kwan Bo and Im, Pyeong Nam (2007), “A Study on Analysis on Applied Effectiveness and Installation Conformity according to Transformation Y-shaped Roundabouts”, *Journal of Korea Society of Road Engineers* IV. Vol. 9, pp. 105-106.
- Jeon, Woo Chul and Do, Chul Woong (2003), “Roundabout Capacity Analysis”, *Journal of Korea Society of Association* III. Vol. 21, pp. 59-69.
- Akcelik, R.E. Chung and M. Besley (2003), “Roundabout Capacity and Performance Analysis”, *ARRB Transport Research Ltd.*, Research Report No. 321.
- Blackmore, F. C. (1998), *Priority at roundabout*, Traffic Engrg. & Control, London, 5(6), pp. 104-106.
- Thaweesak Taekratok (1998), *Modern Roundabouts for Oregon*.
- TRB (2007), NCHRP Report-572, *Roundabouts in the United States*.