

# 회전교통량 분산식 임계 교차로의 운영 및 환경 효과 분석

## Evaluating the Effectiveness of Unconventional Intersections on Operation and Environment

문재필 Moon, Jae-Pil  
김회룡 Kim, Hoe-Ryong  
이석기 Lee, Suk-Ki  
정준화 Jeong, Jun-Hwa

정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail: jpmoon@kict.re.kr)  
정회원 · 국토교통부 대전지방국토관리청 (E-mail: log0923@korea.kr)  
정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail: oksk@kict.re.kr)  
정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 (E-mail: yhcho@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** Traffic congestions which occur in the intersections of arterials lead to mobility and environment problem, and then traffic agencies and engineers have been struggling for mitigating congestions with greenhouse gas emissions. As an alternative of solving these problems, this study is to introduce a low-cost and high-effectiveness countermeasure as unconventional intersections which are successfully in operation in U.S.. The main feature of unconventional intersections is to reroute turning movement on an approach to other approach, which consequently more green time is available for the progression of through traffic. Due to improved progression, this unique geometric design contributes to reduce delays with greenhouse gas emission and provides a viable alternative to interchanges. This study is to evaluate the potential operation and environment benefits of unconventional intersections.

**METHODS :** This study used the VISSIM model with Synchro and EnViVer. Synchro is to optimize signal phases and EnViVer model to estimate the amount of greenhouse gas emissions by each condition.

**RESULTS :** The result shows that unconventional intersections lead to increase the capacity and to reduce greenhouse gas emissions, compared to existing intersections.

**CONCLUSIONS :** Unconventional intersections have the ability to positively impact operations and environments as a low-cost and high-effectiveness countermeasure

### Keywords

*unconventional intersection, signal intersection, operation, environment,*

Corresponding Author : Moon, Jeapil, Senior Researcher  
Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of  
Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu,  
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 210-702, Korea  
Tel : +82.31.9100.168 Fax : +82.31.9100.373  
E-mail : jpmoon@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ijhe.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Feb, 14, 2013 Revised Feb, 19, 2013 Accepted June, 5, 2014

## 1. 서론

지속적으로 증가하는 교통수요에 대응하여 지역 간  
간선도로 기능을 향상시키기 위해 지난 10년간 기존 2

차로도로 혹은 4차로도로를 고규격 도로(중앙분리 4차  
로)로 확장하거나 개선해 왔다. 지역간 간선도로는 연속  
류와 단속류 도로·교통 특성을 포함하고 있다. 즉, 부도

로와 교차되는 지점은 입체교차로 형태로 설치하여 고속도로와 같이 유출·입이 완전 제한된 도로가 있는 반면, 평면교차로와 입체교차로가 혼재되어 부분적으로 유출·입이 제한되는 도로가 설치·운영 중이다.

지역간 간선도로 상에 설치·운영 중인 신호교차로는 각 방향별 보호신호에 의해 차량은 직진, 좌회전, 우회전하기 위해서 다중 신호현시가 필요하다. 또한, 교통량 수준에 따라 좌회전과 우회전 전용차로가 설치된다. 이러한 다중 현시로 운영하는 교차로의 용량은 신호교차로로 간 구간용량보다 상당히 낮으며, 전체 간선도로의 용량을 제약하는 주 요소이다. 교차로 부근에서 발생하는 교통지체는 그 상류부에게까지 상당히 긴 대기행렬을 형성하여 전체 간선도로의 기능에 상당한 영향을 미치며, 이는 통행시간 및 연료소모량을 증가시키는 주 요인이 되고 있다. 또한 2010년 경찰청 도로교통사고 통계에 의하면, 전체 도로에서 단일로에서 7.1%, 교차로에서 91.9%의 교통사고가 발생하여 교차로 부근에서 사고가 많이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 지방부 도로에서 만성정체와 잦은 사고가 발생하는 대표적인 구간은 교차로 부근이라고 할 수 있다.

지방부 도로 교차로에서 발생하는 지체와 사고 문제를 해결하기 위해 전통적인 저비용 예산투입 방식의 교통운영 전략 즉, 신호교차로 간 연동화, 전용 회전차로 설치, 지능형 교통시스템 등을 적용해 왔다. 그러나 기존 교차로의 제약된 기하구조 및 운영으로 인하여 전통적 운영전략은 교통혼잡 해소에 한계가 있다. 이러한 저비용 교통운영 전략과는 다르게 도로 확장, 우회도로 및 고가도로 건설, 인터체인지 설치 등의 고비용 예산투입 방식의 운영전략은 과도한 공사비용과 환경적 손실을 유발할 수 있으며, 주변 상가로의 접근성 등이 저하되는 문제 등을 안고 있다. 저비용 운영개선 전략은 혼잡해소 효과에, 고비용 시설투자 전략은 비용 문제에 각각 한계를 보인다.

미국의 경우, 도시외곽이나 지방지역 교차로 부근에서 발생하는 도로 정체 해소를 위해 Unconventional Intersection(본 연구에서는 '회전교통량 분산식 교차로'라 칭함)을 적극 도입·운영하고 있으며, 교통혼잡 해소 효과가 있는 것으로 나타났다(FHWA, 2009). 회전교통량 분산식 교차로의 기본개념은 회전교통량을 다른 지점으로 우회시켜 입체교차로에서 직진 교통량을 우선 처리, 신호현시 수를 감소(2현시 혹은 3현시), 교차로내 상충지점 수를 감소시키는 것이다. 교차로의 기하구조와 운영 특성에 따라 다양한 회전교통량 분산식 교차로 형

태가 있다: Median U-turn Crossover, Jughandle, Superstreet, Continuous Green T, Quadrant Roadway Intersection, Double Wide Intersection, Double Diamond Interchange 등 회전교통량 분산식 교차로 적용의 큰 장점은 단기간의 기술 대안 검토와 설계를 거쳐 중저가의 사업으로 현장에 적용할 수 있다는 점에 있다.

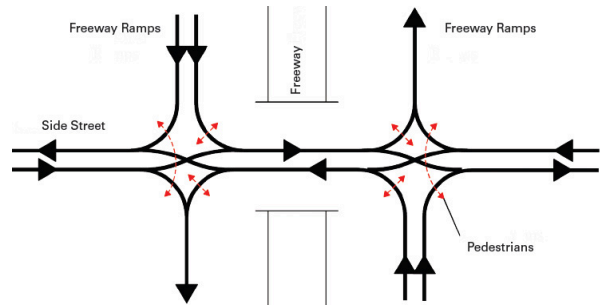


Fig. 1 Example of Unconventional Intersection (DDI Concept) (FHWA, 2009)

최근 우리나라도 교통혼잡을 줄이기 위한 방안으로서 회전교차로를 전국 도로를 대상으로 설치·운영 중이다. 그러나 회전교차로는 이동성을 강조하는 지방부 간선도로의 신호교차로 대안으로 설치하기에는 용량, 운영, 안전 측면에서 어렵다고 판단된다. 지방부 간선도로는 높은 이동성을 유지하기 위해서 적정수준 이상의 속도와 용량을 갖추어야 한다. 또한 도로 주변 접근에 대한 서비스는 주 기능이 아니기 때문에 어느 정도 접근로 설치를 제한하는 것이 타당하다. 따라서 효율적이고 안전한 간선도로의 기능을 유지하기 위해서 기존 전통적인 방법들의 한계(운영개선 전략의 효과 한계, 전략의 시설투자 이용 문제)를 극복하는 새로운 접근이 필요하다.

본 연구에서는 대전지방국토관리청 관내 국도 교차로를 대상으로 교통운영과 환경측면에서 회전교통량 분산식 교차로의 적용 타당성을 검토를 통해 국내 지방부 간선도로의 도로용량 증대 및 온실가스 저감을 위한 저비용-고효율 효과적인 대안지를 평가하였다.

## 2. 문헌고찰

Jonathan Reid(2003)는 회전교통량 분산 교차로 형태와 특징을 소개하였다. 그는 교통량이 상충되는 교차로 지점에서 모든 방향별 교통량을 처리하는 것보다 회전 교통량을 여러 지점으로 분산하여 처리하는 것이 그렇지 않는 경우에 비해 교통운영과 안전측면에서 더 효

울적이라고 결론을 내렸다.

Warren Hughes 외(2009)연구에서는 기존 평면교차로와 입체교차로에 비해 6개의 회전교통량 분산식 교차로 형태로부터 제공할 수 있는 추가적인 교통운영 및 안전효과를 다양한 교통조건에 대하여 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 그 결과, 기존 평면교차로에 비해 통과교통량이 전체적으로 10~40% 증가한 것으로 나타났다. 그 밖에 각 교차로별 독특한 기하구조 특성도 다루었다.

Hummer 외(2007)연구에서는 회전교통량 분산식 교차로의 형태 중 Superstreet의 기능을 시뮬레이션 통해 분석하였다. 그 결과에 의하면, 각 방향별로 신호운영이 가능하여 이웃 교차로와 연동 시 기존 신호교차로에 비해 신호운영이 더 효과적인 것으로 보여주고 있다.

문재필 외(2011)연구는 국외에서 설계·운영 중인 Superstreet 소개 및 국내 적용 타당성을 평가하는 것이다. 그들은 지방부 도로의 한 구간 및 특정한 교통조건을 시뮬레이션에 구현하여 기존 평면교차로와 Superstreet간의 운영 및 안전효과를 비교·평가하였다. 그 도로·교통조건에서 지체가 약 20%, 사고는 약 17% 감소하는 것으로 나타났다.

관련 기존 연구 검토를 통해 회전교통량 분산교차로의 특징인 직진교통량을 회전교통량과 분리시켜 운영함으로써 신호현시 수를 줄일 수 있으며 직진교통량에 더 많은 녹색시간을 할당할 수 있다. 이로 인해 유효녹색시간비(g/C) 증가 등 교차로의 직진방향 용량 증대를 기대할 수 있다. 또한 회전교통량과 직진교통량을 분리함으로써 상충지점이 감소하여 안전 향상을 기대할 수 있다.

그러나 운영·안전효과 분석과 달리, 기존 연구결과들은 환경효과는 정량적보다 정성적으로 평가하였다. 또한 국내 관련 연구는 특정한 교통조건에서 하나의 회전교통량 분산식 교차로를 적용하였다. 따라서 본 연구에서는 좀 더 다양한 도로·교통조건에서 적합한 회전교통량 분산식 교차형태를 적용하여 운영 그리고 환경 측면에서 효과를 정량적으로 평가하였다.

### 3. 회전교통량 분산식 교차로 운영 및 환경효과 분석 결과

#### 3.1. 적용 대상구간

본 연구는 충청남·북도지역 일반도로 교차로를 대상으로 국도 기능, 이동성 제고를 위해서 교차로 운영방식

이 필요한 구간이라고 판단되는 총 3개 대상구간을 선정하였다. 대상구간 간선도로는 평면교차로 설치로 이동성 기능이 떨어져 지역간 통과 교통량의 통행시간 증가 이외에 사고발생 위험도가 증가될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고자 저비용-고효율 대안으로서 회전교통량 분산식 교차로에 대한 국내 적용 타당성을 검토한 것이다. Fig. 2에서는 각 적용 대상구간에 대한 가로망을 보여주고 있다.



〈Heemang-Interseption〉



〈Bongyang-ri〉



〈Kumga-Intersection〉

Fig. 2 Study Sections

### 3.2. 연구방법

본 연구에서는 각 현장별로 계획교차로와 회전교통량 분산식 교차로 적용에 따른 운영·환경 효과적도에 미치는 영향 정도를 분석하였다. 모든 현장에 대하여 운영효과를 정량적으로 분석하기 위해서 VISSIM(5.40) 모델을 적용하였으며, 다음과 같은 도로·교통조건을 가정하였다.

- ① 자유속도
  - 주도로 : 90km/h(85~120km/h)
  - 부도로 : 60km/h(58~68km/h)
- ② 평지구간
- ③ 교통류는 승용차로 구성

그 밖에 차로 폭, 측방여유 폭 등 나머지 도로조건은 한국도로용량편람(2001)의 다차로도로에서 제시한 이상적인 조건으로 가정하였다.

VISSIM의 두 가지 차량 추종 모델 중에서 Wiedemann 71 모델을 적용하였다. Wiedemann 71 모델은 3개 매개변수들이 있다: 평균정지거리(ax), 요구되는 안전거리( $bx = (bx\_add + bx\_multi \times z) \times \sqrt{v}$ ). 여기서 bx\_add와 bx\_multi는 요구되는 안전거리이며, z는 0과 1사이의 정규분포, v는 속도(km/h)이다. bx\_add와 bx\_multi가 도로용량에 가장 많은 영향을 미치기 때문에 다차로도로의 용량 2,000pcphpl을 처리할 수 있는 매개변수의 값을 체계적으로 적용하여 정산과정을 수행하였다.

시뮬레이션 시간은 1시간이며, VISSIM 모델은 확률적 교통류 시뮬레이션이기 때문에 한 시나리오에 대해 시뮬레이션 난수를 달리하여 10번을 반복 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과를 평균하여 운영효과 분석에 사용하였다. 운영효과 척도는 차량당 지체시간(초), 차량당 정지지체(초), 차량당 평균 정지 횟수, 평균속도(km/h), 통과 교통량(대), 총 통행시간(시)을 사용하였다.

VISSIM 모델 이외에, Synchro 모델이 각 대상구간의 도로·교통조건에 따른 신호현시 최적화 및 이웃 교차로간 신호연동화를 하기 위해서 적용되었다. Synchro에서 제시한 포화교통류율은 한국도로편람(2013)의 신호교차로편에서 제시한 값으로 반영하였다. 각 대상구간별, 교차로 형태별로 Synchro 모델에서 최적화된 신호운영 방안은 VISSIM 모델에 반영하였다.

계획교차로와 회전교통량 분산식 교차로에 대한 환경효과 비교·평가는 TNO(The Netherlands Organization

for Applied Scientific Research)에서 개발한 VERSIT+ 모델을 적용한 EnViVer 환경 Tool를 이용하여 수행되었다. 이 환경 평가 Tool은 VISSIM 모델에서 시뮬레이션된 개별 차량의 시·공간 교통자료(예를 들면 속도, 차량제원, 도로 기하구조 등)를 사용하여 차량으로부터 온실가스(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>) 발생량을 예측한다. EnViVer에서 제공하는 온실가스 배출량 산정 모델은 지형별(도시부, 지방부)로 다양한 차종(12,500 이상)으로부터 관측한 자료를 토대로 개발되었다. 비록 이런 모델은 유럽의 차량제원, 종류, 비율 등을 토대로 개발되었기 때문에 우리나라에서 도로·교통 여건별 발생하는 온실가스 배출량의 대표 값이라고 볼 수는 없지만, 교차로 기하구조와 운영방식에 따라 미치는 환경효과 정도를 정량적으로 비교·분석하는 데에는 유용할 것으로 판단된다.

### 3.3. 운영·환경 효과적도 분석 결과

#### 3.3.1. 희망교차로

희망교차로는 국도 1호선에 위치한 3지 교차로로서 교차로로부터 약 300m 하류부 지점에 위치한 다른 3지 교차로가 있다. 두 개의 교차로가 인접하여 위치하고 있기 때문에 한쪽 교차로의 서비스수준이 다른 교차로에 영향을 미치기 쉽다. 각 3지 교차로는 주도로와 부도로 회전교통량을 처리하기 위해서 최소 3개 신호현시가 필요하다. 본 연구에서는 신호현시 최소화와 회전교통량을 분산시켜 직진교통량의 이동성을 향상시키기 위해서 Superstreet 설계 개념을 적용하였다. 주 도로 좌회전은 교차지점에서 허용되고, 부도로의 좌회전 교통량은 그 교차지점에서 좌회전이 허용되지 않고 우회시킨다. 즉, 부도로 좌회전 교통량은 먼저 그 교차지점에서 주도로로 우회전한 후 주행하여 약 100m 하류지점에 설치된 U-턴 구간에서 우턴하여 주도로로 주행한다. 이러한 회전교통량 분산식 교차로는 신호현시가 2현시로 직진교통량에 많은 녹색시간을 배정하여 국도의 이동성 기능향상을 기대할 수 있다(Fig. 3 참조).

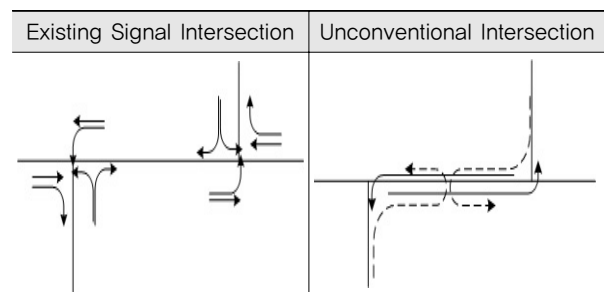


Fig. 3 Geometric Design Signal Phase by Each Intersection Type (Heemang-Intersection)

2037년 방향별 예측 교통량을 토대로 각 교차로에 대하여 Superstreet 개념을 적용하고 교차로간 연동체계를 구축하였다. Synchro 모델을 통하여 연동체계에 따른 주기, 신호현시, 오프셋을 최적화하였다. 최적화된 연동체계는 VISSIM 모델에 적용하여 운영·환경효과를 분석하였다.

운영효과 분석결과, 회전교통량 분산식 교차로가 평면 신호교차로에 비해 차량당 지체시간은 40%, 차량당 정지지체 49%, 차량당 평균 정지 횟수 50%, 총 통행시간 5%가 각각 감소되었으며, 평균속도는 5km/h 증가되었다. 통과교통량은 두 개 교차로 형태간 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 1 참조). 회전교통량 분산식 교차로가 교차로 부근에서 발생하는 지체완화 등 간선도로 기능을 개선시키는 것으로 나타났다.

Table 1. Comparing Operation Effectiveness by Each Intersection Type (Heemang-Intersection)

MOE	Existing Intersection*	Unconventional Intersection*
Delay per Vehicle(s)	10.18	6.07 (▼40%)
Stop Delay per Vehicle(s)	4.15	2.12 (▼49%)
Average Stop per Vehicle	0.24	0.13 (▼50%)
Average Speed(km/h)	82	87 (▼6%)
Throughput(Vehicle)	1209	1210 (▼0.1%)
Travel Time(h)	25.29	23.91 (▼5%)

\* : Adopting Optimal Signal Phase

환경효과 분석결과, 회전교통량 분산식 교차로가 평면 신호교차로에 비해 차량에서 발생하는 온실가스 배출량

Table 2. Comparing Greenhouse Gas Emissions by Each Intersection Type (Heemang-Intersection)

Measures		Existing Intersection	Unconventional Intersection
CO <sub>2</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	1436.0	1377.6(▼4%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	173.4	165.8(▼4%)
NO <sub>x</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	467.0	418.5(▼10%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	0.05639	0.05037 (▼11%)
PM <sub>10</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	88.87	88.37(▼1%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	0.01073	0.01064(▼1%)

이 감소되는 것으로 나타났다. 회전교통량 분산교차로는 평면신호교차로에 비해 이산화탄소 발생량 약 5%, 산화질소 발생량 약 11% 정도 감소되는 것으로 나타났다 (Table 2 참조). 그러나 미세먼지 발생량은 두 개 교차로 간에 큰 차이는 없는 것으로 분석되었다. Fig. 4는 회전교통량 분산식 교차로가 평면신호교차로에 비해 온실가스 발생량이 균등하게 분포하는 것을 보여준다.

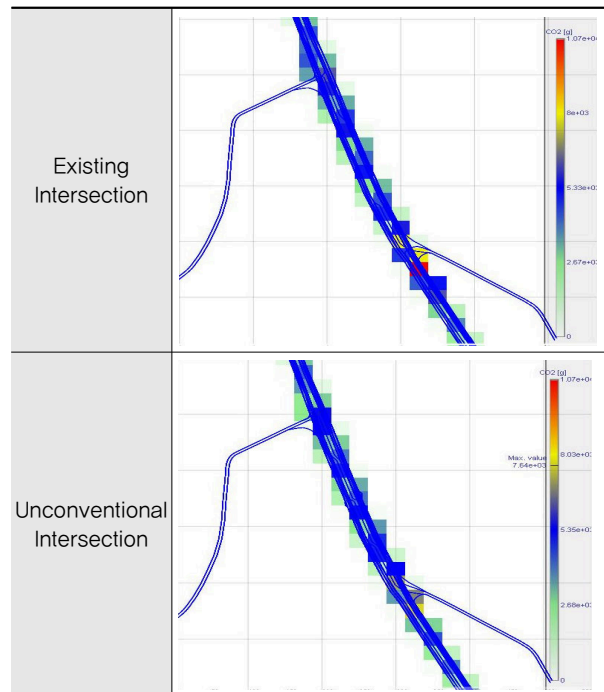


Fig. 4 Comparing Distribution of Greenhouse Gas Emission (Heemang-Intersection)

### 3.3.2. 봉양 시가지 구간

충주시와 제천시를 연결하는 국도 38호선의 일부 간선도로는 봉양읍 시가지를 통과한다. 봉양 시가지내 두 개의 평면신호교차로는 간선도로의 이동성 기능에 상당한 부정적 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히, 봉양역 앞 교차로는 신호현시 수가 4개 이상 필요하기 때문에 봉양 시가지를 통과하는 장거리 교통량은 추가로 통행시간이 증가할 것으로 예상된다. 또한 두 개의 교차로가 200m 간격으로 인접하여 위치하고 있기 때문에 한쪽 교차로의 운영이 다른 교차로에 영향을 미치기 쉽다. 따라서 간선도로 기능성 유지, 신호현시 최소화, 접근 용이성 확보 등 이러한 운영 문제점을 해결하기 위해서 회전교통량을 분산·처리할 필요가 있다.

이 교차로에는 Superstreet 개념을 제안하였다(Fig. 5 참조). 이 교차로 개념은 주도로상에 통행하는 차량만이 직진과 좌회전을 교차지점에서 할 수 있고, 부도로

직진과 좌회전 교통량은 교차지점에서 직진과 좌회전을 허용하지 않는 대신 U-turn을 통하여 우회시키는 것이다. Superstreet 개념이 적용된 봉양 시가지 구간내 모든 교차로의 신호현시는 2현시로 운영된다. 이러한 운영방식에 의해 직진교통량(장거리 차량)에 많은 녹색시간을 할당할 수 있어 간선도로의 이동성 기능향상효과를 기대할 수 있다.

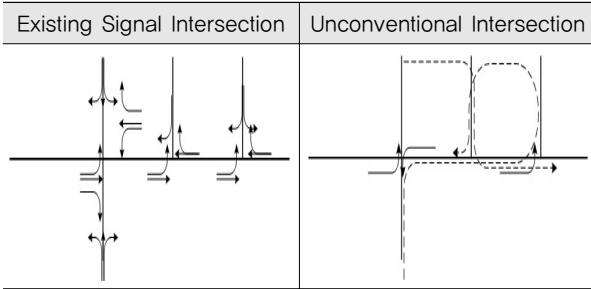


Fig. 5 Geometric Design Signal Phase by Each Intersection Type (Bongyang-ri)

2037년 방향별 예측 교통량을 운영·환경효과 분석에 적용하였다. 봉양 시가지 내 각 교차로는 인접하게 위치하고 있기 때문에 각 교차로간 연동체계를 구축하였다. 연동체계 적용에 따른 주기, 신호현시, 오프셋을 최적화하였다.

운영효과 분석결과, 회전교통량 분산식 교차로가 평면신호교차로에 비해 차량당 지체시간은 35%, 차량당 정지지체 45%, 차량당 평균 정지 횟수 33%, 총 통행시간 8%가 각각 감소되었으며, 평균속도는 6km/h 증가되었다. 봉양 시가지내의 평면신호교차로에 의해서 발생하는 지체를 회전교통량 분산식 교차로가 상당히 지체를 완화시키는 것으로 분석되었다. 통과 교통량은 두 개 교차로간 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 3 참조).

Table 3. Comparing Operation Effectiveness by Each Intersection Type (Bongyang-ri)

MOE	Existing Intersection*	Unconventional Intersection*
Delay per Vehicle(s)	20.01	12.98 (▼35%)
Stop Delay per Vehicle(s)	9.17	5.05 (▼45%)
Average Stop per Vehicle	0.49	0.33 (▼33%)
Average Speed(km/h)	73	79 (▼8%)
Throughput(Vehicle)	740	741 (▼0.1%)
Travel Time(h)	19.41	17.84 (▼8%)

\* : Adopting Optimal Signal Phase

Table 4를 보면, 온실가스 배출량은 회전교통량 분산식 교차로가 평면신호교차로보다 유리한 것으로 나타났다. 회전교통량 분산식 교차로는 평면신호교차로에 비해 이산화탄소 발생량 약 5%, 산화질소 발생량 약 10% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 미세먼지 발생량은 두 개 교차로간에 큰 차이는 없는 것으로 분석되었다. Fig. 6은 회전교통량 분산식 교차로가 평면신호교차로에 비해 온실가스 발생량이 많이 발생하는 특정한 지점에서 감소하는 것을 보여준다.

Table 4. Comparing Greenhouse Gas Emissions by Each Intersection Type (Bongyang-ri)

Measures		Existing Intersection	Unconventional Intersection
CO <sub>2</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	1066.6	1023.2(▼4%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	188.3	180.6(▼4%)
NO <sub>x</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	382.5	346.5(▼9%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	0.06752	0.06116(▼9%)
PM <sub>10</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	61.00	60.92(▼0.1%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	0.01077	0.01075(▼2%)

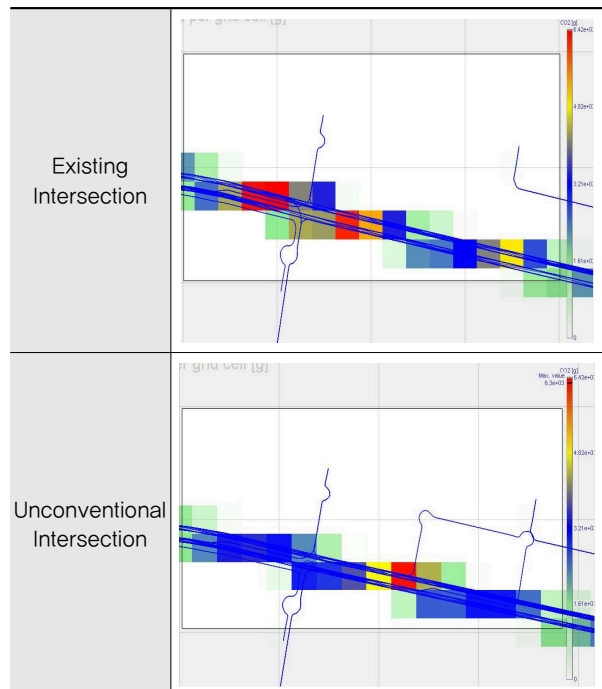


Fig. 6 Comparing Distribution of Greenhouse Gas Emission (Bongyang-ri)

### 3.3.3. 금가교차로

분석대상 구간은 지역거점 도시간(충주시와 제천시 혹은 원주시)을 연결하는 국도 19호선이다. 일부 노선은 금가면 도촌리를 통과하며, 금가교차로에서 금가면으로 유·출입할 수 있는 도로와 교차한다. Fig. 7에서 보여주는 것과 같이, 평면신호교차로이며, 주도로에서 좌회전 전용차로와 신호를 운영하는 것으로 설계되었다. 이러한 교통운영으로 최소 4현시 신호운영이 요구되기 때문에, 장거리 이동 교통량을 처리하는 주 간선도로의 기능에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 이러한 운영상의 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서 회전교통량 분산식 교차로 개념을 적용하였다. Fig. 7과 같이, 금가교차로는 주도로 좌회전 교통량을 주요 교차지점 부근에 설치된 부가 도로를 이용하여 우회시키는 Quadrant Roadway Intersection이 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한, 2037년 예측 교통량을 보면 부도로 직진교통량과 좌회전 교통량이 비보호 신호운영 기준에 만족하기 때문에 비보호 현시로 운영하는 것으로 설계하였다.

2037년 방향별 예측 교통량을 운영·환경효과 분석에 적용하였다. 추가 설계된 부가도로와 주요 교차지점 간 신호연동체계를 구축하여 연속진행 연동체계 적용에 따른 주기, 신호현시, 오프셋을 Synchro 모델에 의해 최적화하였다. 최적화된 신호계획은 VISSIM 모델에 적용하여 각 교차로 형태별로 운영·환경 효과를 분석하였다.

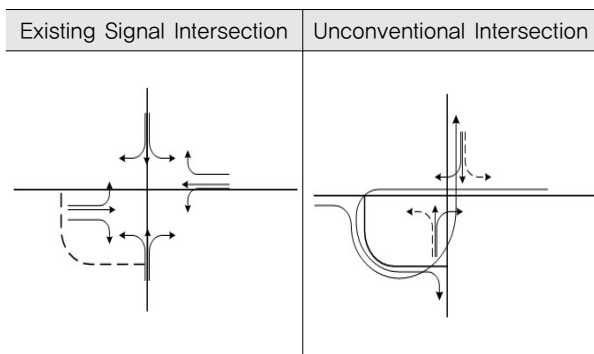


Fig. 7 Geometric Design Signal Phase by Each Intersection Type (Kumga-Intersection)

시뮬레이션 결과, 회전교통량을 분산한 교차로 형태가 평면신호교차로에 비해 차량당 지체시간은 39%, 차량당 정지지체 46%, 차량당 평균 정지 횟수 30%, 총 통행시간 14%가 각각 감소되었으며, 평균속도는 10km/h 높아졌다. 회전교통량 분산식 교차로의 기하구조와 운영방식에 의해 지체완화, 평균속도 향상 등

운영효율성이 상당히 개선된 것으로 나타났다(Table 5 참조). 그러나 통과 교통량은 두 개 교차로간에 큰 차이는 없는 것으로 나타났는데, 이는 수요와 관련된 것으로 보인다.

Table 5. Comparing Operation Effectiveness by Each Intersection Type (Kumga-Intersection)

MOE	Existing Intersection*	Unconventional Intersection*
Delay per Vehicle(s)	23.40	14.39 (▼39%)
Stop Delay per Vehicle(s)	11.92	6.49 (▼46%)
Average Stop per Vehicle	0.47	0.33 (▼30%)
Average Speed(km/h)	58	68 (▼17%)
Throughput(Vehicle)	1149	1151 (▼0.1%)
Travel Time(h)	20.70	17.80 (▼14%)

\* : Adopting Optimal Signal Phase

회전교통량 분산식 교차로 적용에 따른 환경영향은 이산화탄소 약 7%, 산화질소 약 15%로 온실가스 배출량이 각각 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, 비록 차이는 작지만, 미세먼지 발생량도 약 1% 감소효과가 있는 것으로 나타났다(Table 6 참조). 온실가스 확산 분포도에 의하면 회전교통량 분산식 교차로가 평면신호교차로에 비해 차량이 정지와 가속을 하는 교차로 부근에서 발생하는 온실가스 배출량이 상당히 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 8 참조).

Table 6. Comparing Greenhouse Gas Emissions by Each Intersection Type (Kumga-Intersection)

Measures		Existing Intersection	Unconventional Intersection
CO <sub>2</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	1031.0	959.7(▼7%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	213.0	197.2(▼7%)
NO <sub>x</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	433.7	369.2(▼15%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	0.08953	0.07585(▼16%)
PM <sub>10</sub>	Emissions per Hour per Veh.(kg/h)	54.46	53.92(▼1%)
	Emissions per Dis. per Veh.(g/km)	0.01125	0.01108(▼2%)

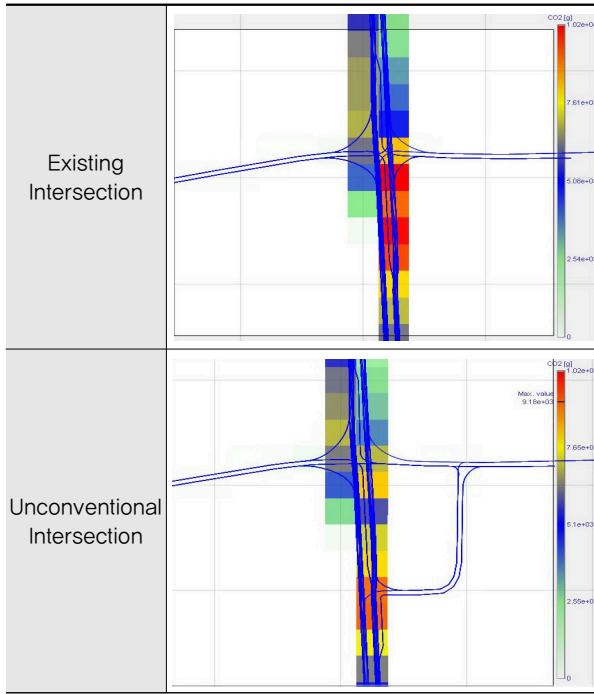


Fig. 8 Comparing Distribution of Greenhouse Gas Emission (Kumga-Intersection)

### 3.4. 회전교통량 비율별 효과분석

각 교차로별 분석결과를 토대로 총 교통량 1,900~5,420대/시와 회전교통량 비율 2~29%에서 회전교통량 분산처리에 따른 일반 신호교차로 대비 지체와 온실가스(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>) 배출량 변화를 분석하였다. Fig. 9는 총 교통량 대비 회전교통량 비율별 차량당 지체(초) 감소비율에 대한 관계를 보여주고 있다. R<sup>2</sup> 값이 0.75로서 U자형태 추세선이 적절한 것으로 나타났다. 이런 포물선 관계식은 회전교통량이 없을 경우 두 개 교차로 간 지체가 차이가 없으며, 어느 회전교통량 수준에서는 회전교통량 분산식 교차로의 운영효율성 임계점에 도달할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 회전교통량 비율 30% 이상인 경우 두 개 교차로간 차량당 지체는 차이가 없을 것으로 분석되었다.

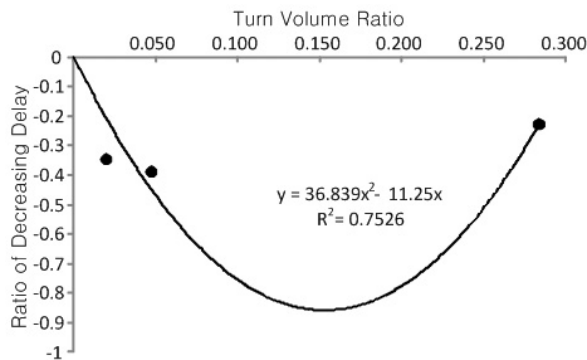


Fig. 9 Relationship of Turn Volume Ratio and Delay

Fig. 10~12는 회전교통량 비율별 CO<sub>2</sub> 배출량(kg/h), NO<sub>x</sub> 배출량(kg/h), PM<sub>10</sub> 배출량(kg/h) 감소 비율 관계를 추세선과 같이 보여주고 있다. 차량당 지체 감소비율과 같이 U자형태로 회전교통량 비율에 따라 온실가스 감소량 차이가 어느 시점까지 증가하였다가 다시 작아지는 것으로 예측되었다. 각 추세선의 R<sup>2</sup> 값은 0.77 이상으로 통계적 유의성이 높은 것으로 나타났다. 또한 회전교통량 비율 30% 이상인 경우 온실가스 배출량 차이가 없거나 혹은 회전교통량 분산식 교차로가 더 많은 온실가스를 배출할 것으로 예상된다.

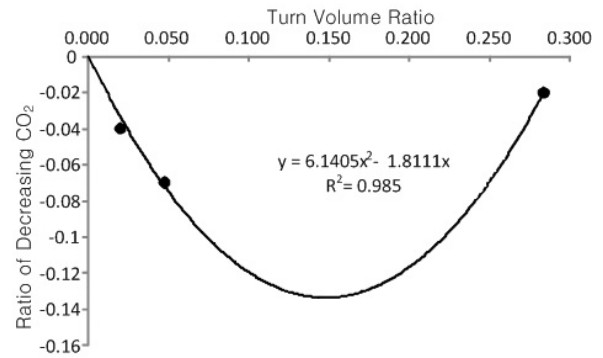


Fig. 10 Relationship of Turn Volume Ratio and CO<sub>2</sub>

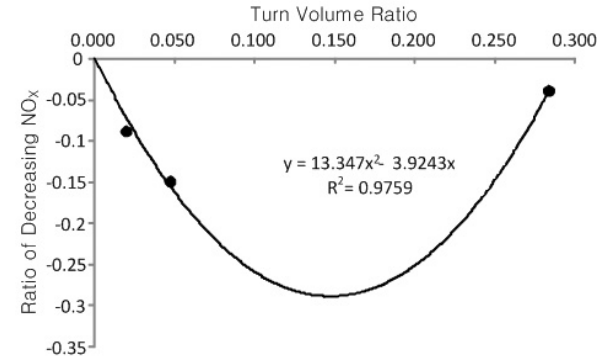


Fig. 11 Relationship of Turn Volume Ratio and NO<sub>x</sub>

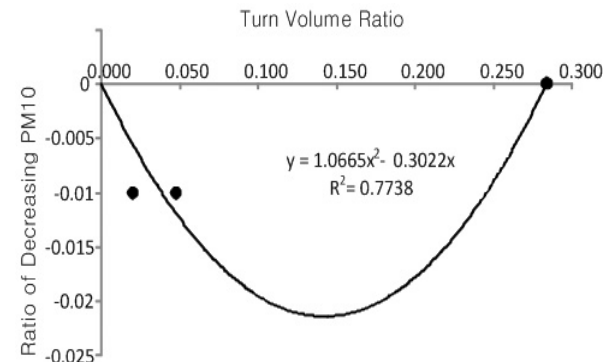


Fig. 12 Relationship of Turn Volume Ratio and PM<sub>10</sub>



회전교통량 분산식 교차로에 대한 종합적 분석은 3개 교차로에서 분석한 결과를 토대로 수행되었기 때문에 결과 해석은 특정한 교통조건(총 교통량 1,900~5,420 대/시, 회전교통량 비율 2~29%)에 제한적이다. 그러나 이런 종합적인 분석을 통해 회전교통량 분산식 교차로에 대한 일반 교차로 대비 운영 및 환경효과 정도는 U자형태이며, 어느 회전교통량 수준까지는 일반 교차로에 비해 운영 및 환경효과가 탁월한 것으로 판단된다. 따라서 효율적으로 처리할 수 있는 최대 회전교통량 산정 및 효과정도는 다양한 도로·교통조건에서 각 회전교통량 분산식 교차로형태별로 수행할 필요가 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

지역간 이동기능을 주로 하는 지방부 간선도로 중에서 유출·입이 완전 통제된 도로가 있는 반면, 평면교차로가 간헐적으로 설치되어 유출·입을 통제하는 도로가 있다. 신호교차로가 설치된 간선도로의 용량은 신호운영에 의해 결정되며, 이러한 신호현시 수 때문에 구간 용량보다 낮다. 또한, 교차로 부근은 간선도로에서 사고와 정기적인 지·정체가 발생하는 대표적인 구간이다. 기존 평면신호교차로의 제약된 기하구조 및 신호운영으로 인하여 교통혼잡 해소와 안전 개선에 큰 효과를 내지 못하고 있으며, 아울러 기존 교통운영 기술의 한계가 이르렀다고 판단된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 한 가지 방법으로 회전교통량 분산식 임계교차로 적용을 제안하였다. 회전교통량 분산식 임계교차로의 특징은 회전교통량을 부가도로 혹은 U-턴 허용지점으로 분산·우회시켜 직진교통량을 우선 처리하는 기하구조 설계 및 운영전략이다. 이러한 기하구조 설계 및 운영방안에 의해 평면신호교차로에 비해 신호현시 수가 감소되며, 교차로내 상충지점 수도 감소된다. 따라서, 직진교통량 우선 처리로 간선도로의 이동성 기능이 향상되며, 이로 인해 환경측면에서도 상당한 효과가 있다.

본 연구는 충청남·북도지역 일반국도 교차로를 대상으로 간선도로 이동성 기능제고를 위해 회전교차로 분산식 교차로를 적용하였다. 각 분석대상 교차로별로 여러 유형의 회전교통량 분산식 교차로 적용에 따른 효과를 운영과 환경측면에서 분석하기 위해 VISSIM 모델, Synchro 모델, VERSIT+ 모델을 사용하였다.

분석대상 교차로별 운영·환경효과에 대한 분석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 회전교통량 분산으로 인한 신호현시 수 감소, 회전교통량 분산·우회처리, 직진교통량 우선 처리 등이 회전교통량 분산식 교차로의 주요 특징이다. 이러한 신개념 교차로 운영방식으로 평면신호교차로에 비해 평균 통행속도는 증가하고, 지체(차량당 지체시간, 차량당 정지지체, 차량당 평균 정지 횟수, 총 통행시간)는 감소하는 등 교차로 운영효율성이 상당 부분 개선되는 것으로 나타났다.
2. 환경효과 척도(이산화탄소 발생량, 산화질소 발생량, 미세먼지 발생량)에서도 평면신호교차로에 비해 회전교통량 분산식 교차로가 차량으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub>의 경우 약 5%, NO<sub>x</sub>의 경우 약 11%, 미세먼지의 경우 약 1%정도 감소하는 것으로 분석되었다. 운영효과에 비해 상대적으로 환경효과가 적게 나타나는 이유는 교통량이 높은 수준이 아니기 때문이다.
3. 종합적인 분석 결과, 회전교통량 분산식 교차로에 대한 운영효율성과 환경효과는 U자형태로 보이며, 이러한 효과가 나타나는 최대 회전교통량이 있다.

이러한 연구결과를 토대로, 지방부 간선도로 성능을 적정수준으로 유지, 교통혼잡과 환경개선을 위해서 교차로 설계 및 운영 개선방안이 필요하며, 본 연구에서 제시한 회전교통량 분산식 교차로가 하나의 대안이 될 수 있는 것으로 입증되었다. 이러한 회전교통량 분산식 교차로 설계·운영을 통하여 지방부 간선도로 통행 서비스 증진과 이용자 편익을 증대할 수 있다고 판단된다.

현장에서 적용하기 위한 몇 가지 향후 연구가 요구된다. 첫 번째, 우리나라 도로·교통여건을 고려하여 각 회전교통량 분산식 교차로 형태별로 처리할 수 있는 최대 교통량을 제시할 필요가 있다. 두 번째, 기존 평면신호교차로와 다른 운영방식에 의한 운전자 기대에 위배되기 때문에 안내표지 표기방법에 대한 연구도 필요하다. 마지막으로 안전하며, 효율적으로 신개념 교차로를 설계 및 운영하기 위해 U-turn 지점, 최소회전반경 등 기하구조 설계기준이 필요하다.

#### References

FHWA(2009), Non-Conventional Intersection and Interchange Treatments Guide.  
 FHWA(2004), Signalized Intersections: Informational Guide.  
 J.E. Hummer, J.P. Moon, B.J. Schroeder, and Ram Jagannathan(2007), Recent Superstreet Implementation, Third Urban Symposium on Highway Geometric Design, Transportation Research Board.

- Jae-Pil Moon, Young-Rok Kim, Do-Gyeong Kim, and Suk-Ki Lee(2011), The Potential to Implement a Superstreet as an Unconventional Arterial Intersection Design in Korea, KSCE: Journal of Civil Engineering, Volume 15, Number 6, pp. 1109-1114.
- Jonathan. Reid(2003), Unconventional Arterial Intersection Design, Management and Operations Strategies.
- Missouri Department of Transportation(2010), Missouri's Experience with a Diverging Diamond Interchange-Lessons Learned.
- Rebecca L. Haley, Sarah E. Ott, Joseph E. Hummer, Robert S. Foyle, Christopher M. Cunningham, and Bastian J. Schroeder(2011), Operatioenal Effects of Signalized Superstreets in North Carolina, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2223, pp. 72-79.
- T.H. Maze, Joshua L. Hochastein, Reginald R. Souleyrette, Howard Preston, and Richard Storm(2010), Median Intersection Design for Rural High-speed Divided Highways, NCHRP Report 650, Transportation Research Board.
- Warren Hughes, Ram Jagannathan, Dibu Sengupta, and Joe Hummer(2009), Alternative Intersections/Interchanges: Informational Report(AIIR), Report No. FHWA-HRT-09-060, FHWA.