

■ 論 文 ■

신호교차로의 회전제약함수 개발을 위한 기초연구

Basic Studies on Development of Turn Penalty Functions in Signalized Intersections

오 상 진

(충북개발연구원 연구위원)

김 태 영

(충북대학교 도시공학 박사과정)

박 병 호

(충북대학교 도시공학과 교수)

목 차

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 II. 선행연구 검토 <ul style="list-style-type: none"> 1. 교차로 지체를 고려한 통행배정 2. 회전제약 연구 3. 수요예측 프로그램 특성분석 III. 회전제약함수 개발 <ul style="list-style-type: none"> 1. 함수정립의 기본방향 2. 청주시 교차로 신호운영 현황분석 3. 좌회전 이동류 모의실험 | <ul style="list-style-type: none"> 4. 회전제약함수 구축 IV. 함수의 적용 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> 1. 적용방법 설정 2. 통행배정 결과 V. 함수의 검증 <ul style="list-style-type: none"> 1. 검증방법 설정 2. 검증 결과 VI. 결론 참고문헌 |
|--|--|

Key Words : 통행배정, 교차로 지체, 회전 제약, 수요예측, 모의실험
 traffic assignment, intersection delay, turn penalty, travel forecasting, simulation

요 약

본 연구는 도시교통수요예측에 있어 회전제약함수를 다루고 있다. 연구의 목적은 신호교차로의 좌회전 교통에 대한 제약함수를 개발하고, 통행배정모형에 이러한 함수의 적용가능성을 분석하는데 있다. 이것은 기존 모형이 직진 이동류의 지체보다 더 많은 좌회전 이동류의 지체를 효과적으로 반영하지 못하고 있다는 배경에 근거하고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Transyt-7F의 모의실험 결과를 이용하여 포화도에 근거한 함수를 개발하고, 청주를 사례연구로 이러한 함수의 적용가능성을 분석하는데 중점을 두고 있다.

주요 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 포화도에 따라 개발된 두 제약함수는 모두 통계적으로 의미 있는 것으로 평가된다. 둘째, 위 함수를 청주시에 적용한 결과, 반복횟수는 증가하나 수렴하는 것으로 분석된다. 셋째, 회전제약 함수를 적용하여 예측한 구간통행량은 기존 모형의 경우보다 관측통행량의 오차가 감소된 것으로 평가된다. 마지막으로, 회전제약 함수의 두 형태, 즉 지수함수와 분리함수에 의해 배정된 교통량의 차이는 매우 작은 것으로 분석된다.

This study deals with the turn penalty functions in the urban transportation demand forecasting. The objectives are to develop the penalty functions of left-turn traffic in the case of signalized intersections, and to analyze the applicability of the functions to the traffic assignment models. This is based on the background that the existing models can not effectively account for the delays of left-turn traffic which is bigger than that of through traffic. In pursuing the above, this study gives particular attention to developing the penalty functions based on the degrees of saturation by simulation results of Transyt-7F, and analyzing the applicability of the functions by the case study of Cheongju.

The major findings are the followings. First, two penalty functions developed according to the degrees of saturation, are evaluated to be all statistically significant. Second, the results that the above functions apply to the Cheongju network, are analyzed to be converging, though the iteration numbers increase. Third, the link volumes forecasted by turn penalty functions are evaluated to be better fitted to the observed data than those by the existing models. Finally, the differences of traffic volumes assigned by two functions, which are exponential and divided forms, are analyzed to be very small.

I. 서론

도시교통계획 수립에 가장 중요한 기초자료가 되는 것이 교통수요이므로, 과학적이고 합리적인 교통수요예측이 필수적이다.

4단계 교통수요예측법은 전통적으로 가장 많이 사용되고 있으며, 통행배정은 그 마지막 단계로서 예측된 통행수요(O/D)를 가로망에 배정시키는 것이다. 통행배정시 교통량-지체함수로 가로구간의 통행시간을 결정하여 최단경로를 찾게 된다.

기존 교통수요예측모형은 도시내 가로망에서 신호교차로의 영향을 간과하는 경향이 있어 예측결과가 현실과 많은 차이를 나타내는 경우가 흔히 있다. 특히 교차로에서의 회전교통량은 수요예측결과를 신뢰할 수 없을 정도로 관측 회전교통량과 많은 차이를 나타낸다.

일반적으로 교차로에서의 주이동류는 직진방향이므로 좌회전은 직진보다 차로수 및 신호시간을 적게 할당받는다. 이에따라 좌회전 이동류에 대한 제약은 일반적으로 직진보다 더 크다고 볼 수 있다.

기존의 교통수요예측 프로그램에서는 교차로의 각 회전에 대해 회전제약(turn penalty)를 부여할 수 있도록 되어 있다. 교차로에서 회전에 따른 제약(지체시간)을 입력함으로써 통행배정시 이를 감안하여 최단경로 탐색이 이루어진다.

그러나, 현재까지 회전제약에 대한 연구가 미진하여 교통수요 예측단계에서 회전제약을 입력하여 통행수요를 예측하는 경우는 드물며, 대부분 회전금지만을 적용하고 있는 실정이다. 이로 인하여 교차로에서 주이동류인 직진교통량에 비해 회전교통량이 더 많이 배정되는 등 현실과 다른 통행배정결과를 흔히 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 도시교통수요 예측시 신호교차로에서 회전에 따른 지체시간을 모형화하여 도시교통수요예측에 적용함으로써 보다 현실적인 수요예측결과를 산출하고자 하는 것이다.

II. 선행연구 검토

1. 교차로 지체를 고려한 통행배정

교차로 지체를 반영한 통행시간함수 모델링에 관한 연구에는 Alan J. Horowitz(1991), Ian Taylor · Peter Willoughby(1998), R O'N Hill(1998), Hedayat Z.

Aashtiani(1999), Wu Sun(1999)의 연구가 이에 해당된다. 이들 연구는 교통수요 예측시 교차로에서 신호에 의한 지체시간을 통행시간 산정에 반영하고자 하는 연구로서 이 가운데 Hedayat Z. Aashtiani는 신호교차로와 무신호교차로의 지체를 예측하는 단순한 방법을 개발하여 EMME/2에 적용하는 방안을 제시하였고, Wu Sun은 통행시간 함수에 1994년 HCM을 적용하는 방안을 제시하였다.

국내에서는 오상진 · 박상혁 · 박병호(2008)의 연구에서 신호교차로에서의 지체를 수요예측시 반영해주기 위해 링크의 통행시간을 구간 순행시간과 교차로 지체시간으로 구분하여 계획단계에서 적용 가능한 모형을 개발하고 이를 실제 가로망의 통행배정에 적용하여 그 효과를 입증한 바 있다.

반면 수요예측의 통행배정과 교차로 신호운영의 결합에 관한 연구로서 정용식(1995), 김원호(1997), 임용택(1997), 이승재(1998) 등이 있다. 이들 연구는 신호 제어전략과 통행배정 모형을 이론적으로 결합함으로써 발생하는 해의 수렴성의 문제와 이에대한 해법을 구상하는 형태의 연구이다. 이들 연구는 교통계획의 수요예측 측면이 아닌 교통운영의 측면에서 접근하여 자료수집 한계 등 계획단계에서 실제 도로망의 수요예측에 적용하지 못하고 있는 실정이다.

2. 회전제약 연구

교차로의 회전제약(turn penalty)에 대한 연구는 대부분 회전제약을 반영한 경로탐색 알고리즘에 대한 연구가 주류를 이룬다.

이들 연구에는 Athanasios K. Ziliaskopoulos and Hani S. Mahmassani(1995), Enrique Benavent, David Soler(1999) 등에서 도심의 혼잡 가로망에서 회전이동류의 지체는 중요하므로, 보다 효율적인 회전이동류 반영을 위한 경로탐색 알고리즘을 제안하였다.

국내에서도 성태경 · 명선영 · 홍원철(1999), 이미영 · 유기윤 · 김정현 · 신성일(2003), 임용택(2004), 김익기(2004), 정연정 · 김창호(2006) 등의 연구에서 회전제약 등 교차로 이동류의 제약을 경로탐색에 반영하는 내용의 연구가 있다.

그러나 대부분의 기존 연구는 회전제약(금지 혹은 지체 값)을 반영한 경로탐색에 대한 연구로서 회전제약을 회전교통량의 함수로 모형화하여 수요예측시 반영하고자

한 연구는 매우 부족한 실정이다.

이에 반해 R O'N Hill(1998)은 뉴질랜드 오클랜드 지역의 수요예측에 있어서 노드에서의 활동을 모형화하는 과업을 수행한 바 있는데, 여기서 분석적 제약함수와 spiss의 원뿔형제약함수를 이용하여 회전제약함수로 적용한 바 있다. 분석적 제약함수는 다음의 형태를 갖는다.

$$fpNN(x) = Z \times D(x) + G \quad (\text{분/대}) \quad (1)$$

여기서, $x = \# \times pvolau$ (%)

$$\text{그리고, } \# = \frac{(P \times K)}{(T \times Q)}$$

D(x)는 주어진 분석적 대가지체함수(원뿔형 제약함수), Z는 1로 초기화되어 있는 승수이고, 이것은 신호운영에 따라 조정이 가능하다. G는 기하학적 지체로 모든 회전에 대해 0.1로 초기화되어 있다. pvolau는 EMME/2에 의해 배정된 분석기간 T시간동안 회전차량 대수이며, Q는 회전의 용량(대/시)이다. P는 pvolau에 적용되는 침투계수이며, K는 회전교통량계수(turn volume factor)로서, 이것은 분석차로의 특성(공용차로 등)을 반영하여 정확한 평균지체를 산출하기 위해 제약함수에 필요한 것이다. #은 회전이동류의 용량을 보정하는 식이며, x는 회전이동류의 포화도를 나타낸 식이다.

3. 수요예측 프로그램 특성분석

본 절에서는 교차로의 회전제약 함수를 구축하기 위해 앞서 교통수요예측을 위한 기존 상용프로그램 중 국내에 보급되어 널리 알려져 있는 프로그램인 Tranplan, MinUTP, TransCAD, EMME/2에서 회전제약을 어떻게 다루고 있는지 검토한다.

〈표 1〉 기존 상용프로그램의 회전제약

구 분	BPR 계수		turn penalty		
	α	β	금지	지체	함수
TRANPLAN	고정 (0.15)	변경가능 (4)	가능	가능	불가
MinUTP	변경가능 (0.15)	변경가능 (4)	가능	가능	불가
TransCAD	변경가능 (0.15)	변경가능 (4)	가능	가능	불가
EMME/2	프로그램내 내제된 함수가 없음 (임의 함수형태 적용가능)				

주) ()는 default setting

〈표 1〉에서 보는바와 같이 대부분의 프로그램에서 교차로-지체함수로 BPR함수를 적용하고 있는 반면, EMME/2는 내제된 함수가 없고 임의함수 형태 적용이 가능하다. 또한 대부분의 프로그램에서 회전금지나 회전에 따른 제약(penalty)을 지체시간으로 직접 입력하는데 그치나 EMME/2의 경우 회전제약을 회전교통량의 함수로 구성할 수 있는 장점이 있다.

III. 회전제약함수 개발

1. 함수정립의 기본방향

교차로의 회전제약을 모형화함에 있어서 본 연구에서는 청주시내 교차로의 신호운영 현황자료를 수집 분석하여 교차로의 신호운영을 유형별로 분류한다. 분류된 유형별 신호운영에 대하여 회전교통량 증가에 따른 지체의 변화를 Transyt-7F로 모의실험하여, 이를 토대로 함수를 구축하고자 한다. 그리고 이를 청주시 교통수요 예측 단계에 적용하여 회전제약의 효과를 검증하고자 한다.

교통수요 예측시 교차로의 각 회전별 제약을 적용하기 위해서는 접근로의 직진, 좌회전, 우회전의 함수를 별도 적용할 수 있으나, 이것은 차로운행 방법 및 신호운영 방법에 따라 변수들간의 관계가 복잡하고 많은 가정을 수반해야 한다.

본 연구에서는 좌회전이 직진보다 신호시간을 적게 할당받음에 의한 추가제약(penalty)을 수요예측시 반영해주는 것으로 단순화하여 적용한다. 따라서 신호통제를 받는 좌회전에 한하여 모형구축 및 분석을 시행하고, 비보호 좌회전 및 우회전은 분석에서 제외한다. 여기서 구축된 회전제약 모형은 교통수요예측 프로그램으로 구현한다.

국내 널리 알려져 있는 교통수요예측 프로그램은 대부분 회전제약(지체시간)을 수치로 입력토록 되어 있으나, EMME/2는 회전제약을 회전교통량의 함수로 구현할 수 있도록 되어있어 이를 이용하여 좌회전 지체를 좌회전 교통량의 함수로 구현한다.

신호교차로의 지체에 영향을 주는 변수는 신호주기, 해당현시의 녹색시간, 황색시간, 상부교차로와의 읍셋, 교통량, 차로운행방법 등 여러가지 변수가 존재하고, HCM모형, Webster모형 등 비교적 정교한 지체산정모형이 이미 개발되어 있다.

그러나, EMME/2의 특성상 회전제약함수는 회전교

통량(pvolau)과 사용자변수(up1~up3)로 구현되어야 하며, 계획단계에서 도시내 모든 개별교차로의 신호운영 현황을 조사하여 수요예측에 적용하기 어려운 문제점 등을 감안하여 도시내 신호교차로 좌회전의 보편적인 운영 특성을 도출하여 모형을 단순화하여 적용하고자 한다.

교통량에 대한 지체시간의 변화를 검토하기 위해 교차로 분석프로그램인 Transyt-7F를 이용하여 좌회전 교통량 증가에 따른 좌회전 지체시간의 변화를 모의실험(simulation)하고 그 결과를 토대로 함수를 구축한다. Transyt-7F에서는 포화도(degree of saturation)를 계산하여 지체산정에 적용하는데, 그 식은 다음과 같다.

$$X_i = \frac{v_i \times C}{S_i \times g_i} \quad (2)$$

- 여기서, X_i : i 링크의 포화도
- v_i : i 링크의 교통량(vph)
- C : 신호주기(초)
- S_i : i 링크의 포화교통류율(vphg)
- g_i : i 링크의 유효녹색시간(초)

좌회전 이동류의 포화도를 산정하기 위하여 좌회전 녹색시간비를 적용해야 하나, 계획단계에서 각 교차로의 좌회전 녹색시간비를 조사하여 적용하는 것은 어려운 일 이므로 기존의 신호운영체계에서 교차로 신호유형별 평균 좌회전 녹색시간비를 적용하는 방안을 검토한다.

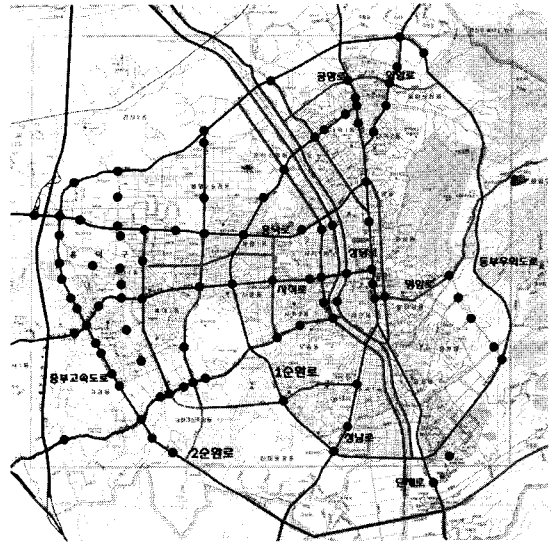
2. 청주시 교차로 신호운영 현황분석

회전제약모형에 적용될 좌회전 녹색시간 분포를 분석하기 위해 <그림 1>과 같이 청주시내 96개 신호교차로의 354개 접근로에 대한 신호운영 현황자료를 수집한다.

이들 자료 중 보호 좌회전을 포함하는 접근로에 대해 교차로 유형 및 신호운영방법에 따라 좌회전 녹색시간비를 구분한다.

우선 354개의 접근로중 좌회전이 없는 접근로 및 비보호 좌회전 접근로를 제외한 316개 접근로에 대해 3지 교차로와 4지교차로로 구분하면, 3지교차로는 55개, 4지교차로는 261개 접근로로 분류된다. 신호운영방식은 현지상황에 따라 여러유형이 있으나 대표적인 유형을 살펴보면 <표 2>와 같다.

3지 교차로의 경우 직진으로 처리되는 방향을 주도로



<그림 1> 신호교차로 위치도

<표 2> 교차로 유형별 신호운영 예시

교차로유형	구분	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5
3지	유형1	↖	↗	↔		
	유형2	↖	↘	↔		
4지	유형1	↖	↘	↔	↗	
	유형2	↖	↘	↔	↔	
	유형3	↖	↘	↔	↔	↗

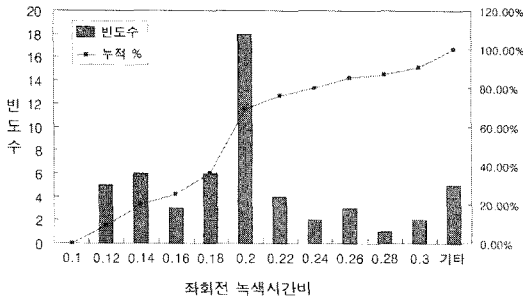
로 하고, 좌회전으로 처리되는 방향을 부도로 하면, 주도로의 좌회전을 직·좌후 양방향 직진 처리와 좌회전후 양방향 직진처리 방식으로 분류할 수 있다.

4지교차로의 경우 전체 261개 접근로 중 직·좌 동시 신호가 160개를 차지하며, 주간선도로와 그 외 도로가 만나는 4지교차로의 경우 주간선도로의 보다 많은 교통 처리를 위해 직·좌 동시신호에 양방향 직진을 추가로 할당하는 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 교차로 유형별 좌회전 운영방식을 3지 교차로의 좌회전, 4지교차로의 동시신호 좌회전(좌회전 신호시간=직진 신호시간)과 별도신호 좌회전(좌회전 신호시간≠직진 신호시간)으로 크게 세가지로 구분하여 각 유형별 녹색시간비 분포를 분석한다.

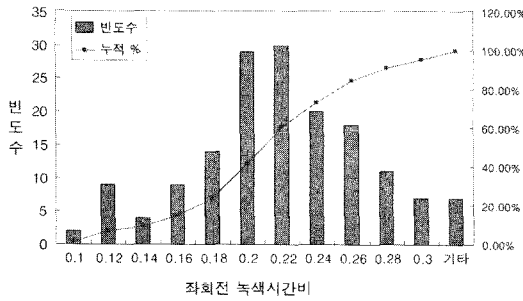
교차로 유형별 좌회전 녹색시간비의 분포를 분석한 결과, 3지교차로의 경우 평균 좌회전 녹색시간비는 0.2로 분석되었고, 4지교차로의 동시신호좌회전은 0.21, 별도신호 좌회전은 0.15로 분석된다. <그림 2>~<그림 4>는 유형별 좌회전 녹색시간비를 그래프화한 것이다.

3지 교차로 좌회전녹색시간비 분포



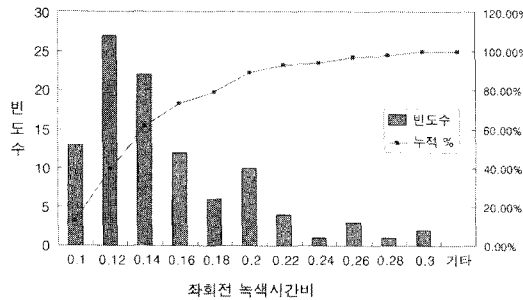
(그림 2) 3지교차로 좌회전 분포도

4지교차로 좌회전(동시) 녹색시간비 분포



(그림 3) 4지교차로 동시신호 좌회전 분포도

4지교차로 좌회전(별도) 녹색시간비 분포



(그림 4) 4지교차로 별도신호 좌회전 분포도

3. 좌회전 이동류 모의실험

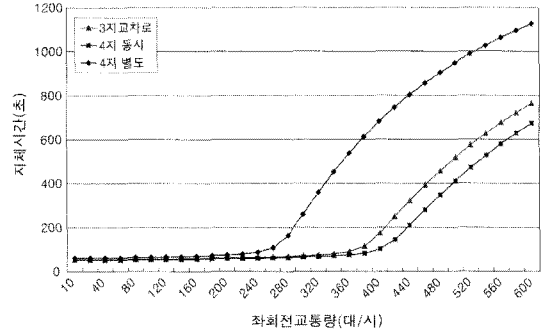
위에서 검토한 청주시내 교차로 좌회전 신호운영 자료를 토대로 교차로 유형별로 신호운영을 가상 설정하고, 교차로 분석 프로그램인 Transyt-7F를 이용하여 좌회전교통량 증가에 따른 지체의 변화를 관찰한다.

분석대상 접근로의 좌회전 교통량만 변화시키고 그 외 방향별 교통량 등 모든 설정을 동일하게 적용하여 다른 영향요인을 배제한다. 신호운영은 <표 3>과 같이 주기를 160초로 동일하게 설정하고, 좌회전 녹색시간비는 3지교차로의 경우 0.2, 4지교차로의 경우 동시신호와

<표 3> 모의실험 신호운영 설정

교차로유형	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5	주기
3지	↙	↘	↔			160
4지 동시	↙↘	↖↗	↔	↗↖		160
4지 별도	↙	↘	↔	↗↖	↗↖	160

좌회전 교통량에 따른 지체시간 변화



(그림 5) 좌회전 교통량에 따른 지체시간 변화

별도신호로 구분하여 0.21, 0.15로 설정하였으며, 기타 설정은 기본 설정값(default)을 그대로 적용한다.

좌회전 교통량은 Transyt-7F의 최소 입력 교통량인 10대에서 600대까지 20대씩 증가시키며 지체도의 변화를 관찰한 결과 <그림 5>와 같이 나타낼 수 있다.

각 교차로 유형별 그래프 형태는 동일하게 나타나며, 단지 지체도가 급격히 증가하는 지점의 차이를 확인할 수 있다. 이것은 Transyt-7F 지체의 경우 이동류의 포화도가 100%를 넘기 전까지는 완만한 증가 추이를 보이다가 100%를 넘으면서 급격한 증가 추이를 보이는 특성 때문이다. 이는 Transyt-7F의 지체함수식이 균일지체(uniform delay)와 임의지체(random-plus-saturation delay)의 합으로 구성되어 있고, 임의지체는 포화도가 100%를 넘으면 급격히 증가하는 특성에 따른 결과이다. 위의 그래프에서 4지교차로(별도신호)는 녹색시간비가 0.15로 가장 작기 때문에 가장 먼저 포화도 100%를 초과하는 것으로 나타난다.

4. 회전제약 함수구축

위의 모의실험 결과를 통해 신호교차로 지체에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 교차로의 보편적인 운영특성이 접근로의 녹색시간비(g/c)와 교통량/용량비(v/c)로 구성된 접근로의 포화도로 판단되어, 신호교차로의 좌회전

제약 함수를 구축함에 있어서 교차로 접근로의 포화도를 독립변수(x)로 하여 Transyt-7F의 지체(종속변수 y)와의 관계를 모형화 한다.

1) 단일모형 구성

모형식의 형태는 선형식($y=a+bx$), 지수식($y=a \cdot e^{bx}$), 로그식($y=a \cdot \ln(x)+b$), 다항식($y=ax^2+bx+c$)을 우선 검토하였고, 그래프의 형태가 BPR모형의 통행시간 변화추이를 따른다고 판단하여, BPR모형 형태($y=a+bx^c$)의 함수식을 검토한다.

검토결과 교차로 유형에 따라 다소의 차이는 있으나, 로그식의 경우 R^2 가 0.5 미만으로 검토대상에서 제외하고, 선형식의 경우 R^2 가 0.66~0.89로 비교적 양호하나 포화도가 낮은(약 30% 이하) 경우 음의 지체를 나타내어 부적합한 것으로 분석된다. 또한 다항식의 경우 R^2 가 0.95이상으로 매우 높게 나타나지만 포화도가 증가함에 따라 지체가 감소하다가 다시 증가하는 U자형 예측으로 현실성이 낮은 것으로 분석된다. 따라서 본 연구에서는 지수함수가 모형의 형태 및 예측력에 있어 가장 적합한 모형으로 판단되며 각 유형별 지체식은 <표 4>와 같다.

또한 BPR함수는 자유속도 통행시간(T_0)에서 교통량 증가에 따른 통행시간의 변화를 모형화한 것이므로 여기서는 주어진 신호주기에 좌회전 교통량이 최소일 때 소요되는 시간(D_0)으로 정의하고, 신호교차로의 좌회전 지체함수를 좌회전이동류의 포화도를 이용하여 함수를 다음과 같이 구성한다.

$$D = D_0(1 + \alpha(v_L/c_L)^\beta) = D_0(1 + \alpha X_L^\beta) \quad (6)$$

- 여기서, D : 좌회전 지체시간
- D_0 : 해당주기에서 최소 지체시간
- v_L : 좌회전 교통량
- c_L : 좌회전 용량(포화도를 1로 하는 교통량)
- X_L : 좌회전 포화도(= v_L/c_L)

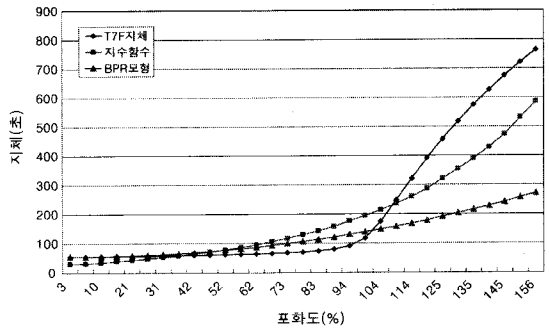
Transyt-7F의 좌회전 이동류 모의실험으로 산출된 지체시간을 이용하여 위 함수를 정산하기 위해 선형화를 거친 후 각 유형별 모형을 구축한 결과는 <표 5>와 같다.

<표 4> 유형별 지체함수(지수식) 검토결과

유형	함수식	R^2
3지교차로	$y=28.548 \cdot e^{1.9367x}$	0.83 (3)
4지(동시)	$y=28.39 \cdot e^{1.8784x}$	0.80 (4)
4지(별도)	$y=35.628 \cdot e^{1.7506x}$	0.92 (5)

<표 5> 유형별 지체함수(BPR형태) 검토결과

유형	함수식	R^2
3지교차로	$y=D_0(1+1.584x^{2.071})$	0.80 (7)
4지(동시)	$y=D_0(1+1.386x^{2.011})$	0.80 (8)
4지(별도)	$y=D_0(1+1.981x^{2.466})$	0.88 (9)



<그림 6> 3지교차로 모형별 지체도 변화

신호주기가 160초이며 녹색시간비가 0.2인 임의의 3지 교차로 좌회전에 대해 앞서 구축한 지수함수 형태의 모형과 BPR형태의 지체함수 예측결과를 실제 Transyt-7F의 예측결과와 비교하면 <그림 6>과 같다.

모든 좌회전 신호유형에 있어서 포화도가 100%을 지나면서 Transyt-7F 지체는 급격히 증가하는 한편 BPR형태의 지체모형 예측치는 그에 미치지 못하여 차이가 크게 나타나게 된다. 또한 포화도가 100%를 지나 계속 증가함에 따라서 Transyt-7F 지체는 지체증가 폭이 작아지는 반면 지수함수의 경우는 증가폭이 더욱 커지는 것으로 나타난다.

또한 4지교차로 동시신호와 4지교차로 별도신호의 경우도 3지교차로와 마찬가지로 포화도 100%를 중심으로 급격히 변화하는 모습을 볼 수 있었다. Transyt-7F 시뮬레이션 결과는 균일지체와 포화지체항이 포함된 결과로서 이들 단일모형의 구조상 이를 정확히 일치(fit)시키는 것은 한계가 있다.

2) 분리모형 구성

Transyt-7F의 지체가 포화도 100%을 기준으로 전혀 다른 모형의 형태를 나타내므로 포화도 100% 미만과 포화도 100% 이상의 지체함수를 분리하여 각각 모형화하는 방안을 검토한다.

따라서 앞서 시뮬레이션 결과를 포화도 100% 미만과 100% 이상으로 구분하여 다시 정리하고, 앞서 단일모형 구성에서 검토하였던 모형식 형태에 대해 모형의 예측력 및 적합성을 재검토한다.

〈표 6〉 유형별 지체함수(분리모형) 검토결과

유형	함수식		R ²
3지 교차로	x<1	$y=49.233e^{0.55x}$	0.76
	x≥1	$y=1462.5\ln(100x)-6607.2$	0.99
4지 (동시)	x<1	$y=48.014e^{0.52x}$	0.80
	x≥1	$y=1515.2\ln(100x)-6863.4$	0.99
4지 (별도)	x<1	$y=56.315e^{0.48x}$	0.80
	x≥1	$y=1265.9\ln(100x)-5649.7$	0.99

주) x는 포화도(%)를 100으로 나눈 값임

그 결과 포화도 100%미만에서 로그식의 형태는 R²가 0.5미만으로 매우 낮아 제외하고, 선형식의 경우 R²가 0.65~0.73으로 양호하나 포화도가 20%미만으로 매우 낮거나 100%에 가까울 경우 지수식에 비해 오차가 크게 나타난다. 다항식의 경우 R²는 0.85이상으로 매우 높으나 단일모형식의 경우와 같이 U자형 예측으로 현실성이 없어 제외한다. 따라서 포화도 100% 미만에서는 지수모형이 가장 적합한 것으로 판단된다.

포화도 100% 이상에서는 선형식, 다항식, 로그식의 R²가 0.95 이상으로 높게 나타난 반면 지수식은 0.83~0.91로 비교적 낮았고, 특히 로그식의 R²가 0.99로 예측력이 우수하며 그래프의 형태가 로그함수의 형태를 따른다고 판단하여 로그함수를 적용하였으며 각 모형식은 〈표 6〉과 같다.

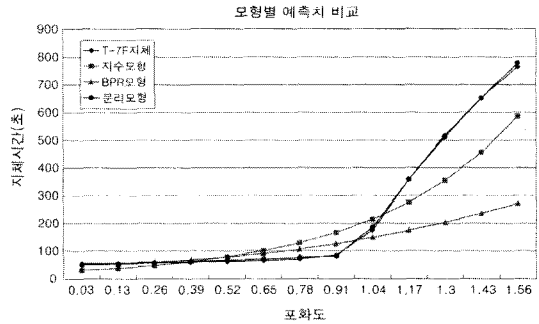
3) 모형간 비교분석

신호주기가 160초이며 녹색시간비가 0.2인 임의의 3지 교차로 좌회전에 대해 앞서 단일모형으로 구축한 지수함수 및 BPR함수 형태의 지체모형과 분리모형의 예측결과를 포화도 증가에 따른 Transyt-7F 지체와 비교 분석하면 〈표 7〉과 같으며, 이를 도시하면 〈그림 7〉과 같다.

모형별 예측치를 비교해 보면 Transyt-7F는 포화도가 1(100%)을 넘으면서 지체가 급격히 증가하다가 포화도가 계속 증가하면서 지체증가 추이가 둔화되는 모습을 볼 수 있다.

지수함수식의 예측치는 포화도가 0.4 이하의 경우 Transyt-7F 지체보다 낮게 예측되는 반면 포화도가 1 이상의 경우 지체증가의 폭이 크게 나타남을 확인하였다. BPR함수 형태의 모형은 포화도가 낮은 경우 비교적 정확한 지체예측이 가능하나, 포화도가 1을 넘으면 Transyt-7F지체와의 차이가 크게 증가하는 것으로 나타난다.

반면 포화도 1을 기준으로 함수를 분리하여 적용하는 분리모형은 포화도 1 부근에서 다소의 차이가 있으나,



〈그림 7〉 포화도에 따른 모형별 예측치 비교

〈표 7〉 모형별 지체시간 예측치 비교

좌회전 교통량	포화도	T-7지체	단일모형		분리모형
			지수모형	BPR모형	
10	0.03	54.5	30.26	54.6	50.05
50	0.13	55.3	36.72	55.8	52.88
100	0.26	57.1	47.23	59.8	56.80
150	0.39	59.1	60.76	66.8	61.01
200	0.52	61.5	78.15	76.8	65.53
250	0.65	64.8	100.53	89.9	70.39
300	0.78	70.1	129.31	106.1	75.61
350	0.91	84.3	166.33	125.5	81.21
400	1.04	174.0	213.95	148.1	185.22
450	1.17	357.1	275.21	174.0	357.48
500	1.3	518.1	354.00	203.1	511.57
550	1.43	652.1	455.35	235.6	650.96
600	1.56	764.4	585.72	271.3	778.21

전체 포화도에 있어서 Transyt-7F의 지체와 거의 근사하는 것으로 나타난다.

Ⅳ. 함수의 적용 및 분석

1. 적용방법 설정

1) 기본방향

본 연구에서는 신호교차로에서 직진에 비해 상대적으로 제약을 받는 보호좌회전에 의한 제약을 통행배정시 반영해 주기 위하여 좌회전 제약을 회전교통량의 함수로 구현한다.

본 장에서는 앞서 구축한 회전제약함수를 실제 가로망에 적용하여 회전제약모형 적용 전과 비교분석함으로써 모형적용의 효과를 검토한다. 적용방법은 링크 통행시간 모형으로는 수요예측시 흔히 적용하고 있는 BPR모형을 적용하고, 여기에 회전제약 함수를 적용하여 회전제약 적용 전·후 회전제약 모형간 결과를 비교한다.

앞서 회전제약함수 구축시 각 교차로의 좌회전 신호 유형을 3가지로 구분하고, 각 유형별 평균녹색시간비를 적용한 회전제약함수를 구성한다. 실제 적용시 해당 신호교차로의 좌회전 신호유형을 결정하여야 하는데, 청주시의 교차로 신호운영 현황 분석을 토대로 3지교차로 좌회전($g/C=0.2$), 4지교차로 중 주간선도로와 그 외 도로가 교차하는 경우 주간선도로 접근로의 좌회전은 별도 신호($g/C=0.15$)로 적용하고, 그 외 4지교차로 접근로는 동시신호($g/C=0.21$)로 적용한다.

링크통행시간 모형에 적용할 BPR모형은 비교적 최근 국내연구인 강호익·박창호(1998)의 연구에서 국도를 대상으로 정산한 계수($\alpha=0.93, \beta=1.8$)을 적용한다. 또한 회전제약함수로는 앞서 구축한 단일모형중 모형의 형태가 간단하여 적용이 용이한 지수함수의 형태와 포화도 1을 기준으로 함수를 달리 적용하는 분리함수를 함께 적용하여 비교 분석한다.

회전제약함수를 적용함에 있어서는 신호교차로의 좌회전, 직진, 우회전에 대해 각각 적용하는 방안도 있으나, 이를 위해서는 접근로 차로배분과 신호유형에 따라 많은 가정이 필요하므로 수요예측 단계에서 검토할 수 있는 범위를 벗어나게 된다.

따라서 본 연구에서는 교차로의 직진과 우회전에는 제약을 주지 않고, 보호좌회전에 한하여 회전제약함수를 적용한다. 여기서, 모형으로 예측된 전체 지체를 좌회전 제약으로 부여하면 직진이나 우회전에 비해 과다 제약이 될 수 있으므로 좌회전이 직진이나 우회전에 비해 추가로 받는 제약을 적용하는 방법으로 청주시내 교차로의 직진 녹색시간비의 평균치(약 0.5)와 좌회전 녹색시간비의 평균치(약 0.2)를 감안하여 회전제약 함수로 산정된 지체의 30%만을 적용하여 통행배정한다.

2) 적용대상 네트워크

구축된 함수를 적용할 가로망은 청주시가로망으로서 「청주시 교통정비 중기계획」에서 구축한 네트워크와 O/D를 수정 보완하여 적용한다. 도로구간의 차로수 및 거리는 실제값을 입력하였으며, BPR모형 적용에 필요한 자유속도는 도로별 제한속도로 설정하였고, 차로당 용량은 도로의 위계에 따라 1400~2200까지 차등 설정하였다. 또한 각 교차로는 고정식 신호운영이며, 신호주기는 청주시내 대부분의 교통축이 연동화되는 점을 감안하여 주간선축내 교차로는 150초, 그 외 교차로는 140초로 단순화하여 적용한다. 포화도 산정에 필요한 포화교통류

율은 기본 포화교통류(2,200)을 동일하게 적용한다. 통행배정에는 교통계획 프로그램인 EMME/2를 사용한다.

3) EMME/2 적용 방법

EMME/2에서 회전제약 함수(turn penalty function)는 회전 교통량(pvolau)의 함수로 구현이 되는데, 여기서는 지수식 형태의 모형과 포화도 1을 기준으로 함수를 분리·적용하는 분리함수를 구성한다. 우선 지수식 형태의 좌회전 지체함수를 표현하면 다음과 같다. 앞서 구축한 모형이 포화도를 변수로 한 모형이므로 회전교통량과 포화교통류율, 유형별 녹색시간비를 이용하여 포화도를 계산하는 식을 모형에 적용한다.

지수식 형태 모형식(exp_penalty)
a fp41= $((28.548 \cdot \exp(1.9367 \cdot ((pvolau/2200)/.2)))/60) \cdot 0.3$
a fp42= $((28.39 \cdot \exp(1.8784 \cdot ((pvolau/2200)/.21)))/60) \cdot 0.3$
a fp43= $((35.628 \cdot \exp(1.7506 \cdot ((pvolau/2200)/.15)))/60) \cdot 0.3$

여기서 fp41($g/C=0.2$)은 3지교차로의 좌회전 지체 산정에 사용하고, fp43($g/C=0.15$)는 4지교차로의 주간선도로에서 기타도로로 좌회전하는 지체를 표현하고, fp42($g/C=0.21$)는 기타 4지교차로의 동시신호 좌회전 지체를 표현한다. 앞서 설명한 바와 같이 모든 지체식에 0.3을 곱하여 30%만 회전제약으로 적용한다.

또한 분리함수를 EMME/2에 적용하기 위해서는 포화도가 1미만인지, 이상인지를 판별하는 함수를 포함하여야 하므로 아래와 같이 구성한다.

분리모형의 지체함수식(div_penalty)
a fp31= $(\text{put}((pvolau / 2200) / .2) .\text{le. } 0) * 0 + ((\text{get}(1) .\text{gt. } 0 .\text{and. } \text{get}(1) .\text{lt. } 1) * (49.233 * \exp(.55 * \text{get}(1))) / 60) * .3 + ((\text{get}(1) .\text{ge. } 1) * (1462.5 * \ln(\text{get}(1) * 100) - 6607.2) / 60) * .3$
a fp32= $(\text{put}((pvolau / 2200) / .21) .\text{le. } 0) * 0 + ((\text{get}(1) .\text{gt. } 0 .\text{and. } \text{get}(1) .\text{lt. } 1) * (48.014 * \exp(.52 * \text{get}(1))) / 60) * .3 + ((\text{get}(1) .\text{ge. } 1) * (1515.2 * \ln(\text{get}(1) * 100) - 6863.4) / 60) * .3$
a fp33= $(\text{put}((pvolau / 2200) / .15) .\text{le. } 0) * 0 + ((\text{get}(1) .\text{gt. } 0 .\text{and. } \text{get}(1) .\text{lt. } 1) * (56.315 * \exp(.48 * \text{get}(1))) / 60) * .3 + ((\text{get}(1) .\text{ge. } 1) * (1265.9 * \ln(\text{get}(1) * 100) - 5649.7) / 60) * .3$

여기서 팔호안의 판별식은 포화도가 1이상 인지여부에 따라 참이면 1을 반환하고 거짓이면 0을 반환하는 식으로, 이에 따라 적용모형이 달라지도록 구성한 것이다. 여기서도 fp31~fp33은 3지교차로, 4지교차로 동시신호, 4지교차로 별도 신호에 각각 적용되도록 구성한다.

2. 통행배정

우선 통행배정시 교차로 좌회전 제약함수를 적용했을 경우 통행배정의 수렴성 등 수행결과에 대하여는 <표 8>과 같이 모든 모형의 통행배정이 수렴하는 것으로 나타난다.

반복 통행배정의 정지기준 중 relative gap은 회전제약 적용 전·후 모두 정지기준을 만족하지 못하였고, normalized gap에 의해 정지기준을 만족하여 수렴하는 것으로 나타났다. 회전제약 적용 후 반복횟수와 평균통행시간이 증가하는 것을 볼 수 있다.

<표 8> 모형의 수행력 비교

구분	회전제약 미적용	회전제약 적용	
		exp_pen	div_pen
iteration	3	5	6
relativegap(0.5%)	1.03	2.2	3.44
normalized gap(0.5분)	0.08	0.184	0.28
Average trip time	7.82	8.57	8.62

주) exp_pen은 지수식 제약함수이며, div_pen은 포화도 1을 기준으로 함수를 분리한 분리모형임, 이하동일

IV. 함수의 검증

1. 검증방법 설정

회전제약 적용 전·후 통행배정 결과에 대한 검증은 구간통행량 검증과 교차로 회전통행량 검증으로 크게 구분한다. 구간통행량 검증은 통행배정 결과와 실제 관측치와의 오차정도를 비교함으로써 회전제약함수 적용효과를 분석하는 것이며, 회전통행량 검증에서는 회전 제약함수를 적용함으로써 실제 교차로 통행패턴에 보다 접근하는지를 분석하는 것이다.

1) 구간통행량 검증방법

구간 통행량 검증은 청주시 간선교통축의 주요교차로를 기준으로 양방향 114개 구간으로 구분하여 양방향 평균 통행량을 정리하고, 관측교통량 자료와 통계분석을 시행한다.

구간통행량 검증에 적용된 통계분석 방법은 실제 관측 자료와 모형에 의해 산출된 자료간의 오차분포 특성을 분석할 수 있는 평균제곱근 오차(RMSE)와 퍼센트 평균제곱근 오차(%RMSE)를 이용하여 분석한다.

널리 이용되는 측정법인 평균제곱근오차(RMSE: root mean square error)는 비교하는 자료간의 전체변동을

나타낸다. RMSE와 %RMSE의 산정식을 살펴보면 다음 식과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - T_i)^2}{N}}, \%RMSE = \left(\frac{RMSE}{T_e}\right) \times 100 \quad (13)$$

여기서, t_i : 배정된 구간 자료(교통량)

T_i : 실제 관측된 구간 자료(교통량)

N : 구간 수

T_e : 실제 관측 자료의 평균

위의 산정식에서 나타난 것과 같이, RMSE는 통행배정된 자료의 실제 관측 자료에 대한 평균적 이탈정도를 나타내며, %RMSE는 그 이탈정도를 관측자료에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

2) 회전통행량 검증방법

교차로 회전통행량 검증은 앞서 구간 통행량에 대한 분석과 같이 회전제약 함수의 적용 전·후 시내 주요교차로의 회전패턴에 대하여 실제 관측 회전통행량 및 회전비율과 배정된 통행량 및 회전비율간 비교분석이다.

일반적인 교통수요 예측 프로그램에서 교차로의 회전통행량은 미배정 회전으로 인하여 정확도가 매우 낮아 실제 관측 회전통행량과의 오차분석은 큰 의미가 없을 것으로 판단되므로, 본 연구에서는 시내 주요교차로의 회전통행량 관측치 및 접근로별 회전비율과의 상관분석을 통해 회전제약을 적용함으로써 실제 교차로 통행패턴을 보다 잘 모사할 수 있는지를 검증하고자 한다.

대상 교차로는 청주시 주간선축간 주요교차로를 중심으로 21개 교차로를 선정하여 총 238개 회전에 대하여 실제 관측된 회전교통량과 배정된 회전교통량간의 관계를 분석한다.

2. 검증 결과

1) 구간통행량 검증

먼저 회전제약 적용 전·후 구간별 배정된 통행량과 실제 조사된 통행량간의 통계지표를 비교하면 <표 9>와 같다. 회전제약 적용 후 배정된 구간통행량은 실측통행량과의 오차가 다소 감소하는 것으로 나타났으며, 회전제약 모형간 결과는 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 분석된다.

〈표 9〉 회전계약 적용전·후 구간통행량 통계분석

구분	회전계약 적용 전	회전계약 적용 후	
		exp_pen	div_pen
RMSE	476.96	446.65	453.89
%RMSE	29.93	28.03	28.48

2) 교차로 회전통행량 검증

교차로 회전통행량 비교에서는 청주시내 주요교차로의 238개 회전에 대해 관측 통행량과 배정된 통행량간 상관분석을 시행한다.

또한 접근로의 직진, 좌회전, 우회전의 비율을 산정하여 실제 조사된 회전비율과 통행배정된 회전비율간의 상관분석을 함께 시행하였고, 그 결과는 〈표 10〉, 〈표 11〉과 같다.

교차로의 관측 회전통행량과 배정된 회전통행량간 상관분석에서는 회전계약함수 적용 후 상관도가 다소 향상되는 것으로 분석된다. 또한 교차로 회전 비율간 비교에 있어서도 회전계약 적용 후 상관도가 향상됨을 볼 수 있다. 회전 통행량 검증에서도 회전계약 모형간 차이는 크지 않은 것으로 분석된다.

또한 교통수요 예측프로그램의 교차로 회전교통량 예측치의 실제 적용 가능성을 분석하기 위하여 실제 관측 회전통행량과의 평균제곱근오차를 산정하여 비교해 보았다. 그 결과, 회전계약을 적용하지 않는 경우 약 80%의 오차를 나타내고, 회전계약을 적용한 후에도 약 79%의 오차로 크게 오차가 감소하지 않는 것으로 나타나 실제 적용은 어려운 것으로 판단되며, 단지 회전계약 적용후 교차로 회전패턴이 실제와 상관도가 높아진다는 결과에 만족할 수밖에 없다.

〈표 10〉 교차로 회전통행량간 상관분석

구분	실측치	no_pen	exp_pen	div_pen
실측치	1			
no_pen	0.630488	1		
exp_pen	0.692321	0.858927	1	
div_pen	0.689303	0.871579	0.993165	1

주) no_pen은 회전계약함수 미적용 결과임, 〈표11〉과 동일

〈표 11〉 교차로 회전비율간 상관분석

구분	실측치	no_pen	exp_pen	div_pen
실측치	1			
no_pen	0.694285	1		
exp_pen	0.74461	0.915771	1	
div_pen	0.749218	0.928841	0.99005	1

V. 결론

본 연구는 도시교통수요예측에 있어 회전계약함수를 다루고 있다. 연구의 목적은 신호교차로의 좌회전 교통에 대한 제약함수를 개발하고, 통행배정모형에 이러한 함수의 적용가능성을 분석하는데 있다. 이것은 기존 모형이 직진 이동류의 지체보다 더 많은 좌회전 이동류의 지체를 효과적으로 반영하지 못하고 있다는 배경에 근거하고 있다. 이를 위해 이 연구에서는 Transyt-7F의 모의실험 결과를 이용하여 포화도에 근거한 함수를 개발하고, 청주를 사례연구로 이러한 함수의 적용가능성을 분석하는데 중점을 두고 있다.

주요 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 포화도에 따라 개발된 두 제약함수는 모두 통계적으로 의미 있는 것으로 평가된다. 둘째, 위 함수를 청주시에 적용한 결과, 반복횟수는 증가하나 수렴하는 것으로 분석된다. 셋째, 회전계약 함수를 적용하여 예측한 구간통행량은 기존 모형의 경우보다 관측통행량과의 오차가 감소된 것으로 평가된다. 마지막으로, 회전계약 함수의 두 형태, 즉 지수함수와 분리함수에 의해 배정된 교통량의 차이는 매우 작은 것으로 분석된다.

본 연구에서는 자료수집의 한계가 있는 계획단계에서 신호교차로의 운영특성상 좌회전이 직진에 비해 추가로 받는 제약을 모형화하여 통행배정시 적용함으로써 보다 현실적인 결과를 도출하려 하였다. 그러나 좌회전 지체 함수 구축과정에서 포함된 가정과 모형을 단일변수로 단순화한 부분, 회전계약함수 적용결과 교차로 회전교통량의 예측 정확도가 크게 향상되지 않는 부분 등 향후 연구할 과제가 많이 남아 있으며, 본 연구는 이를 위한 초기 연구로 의의가 있다고 판단된다.

또한 회전지체함수로서 도로용량편람 등 기존 교차로 지체함수를 그대로 활용하는 방안도 검토할 수 있으나, 접근로의 차로운영방법에 대한 추가 가정, 즉 접근로의 차로수 별로 좌회전 전용차로의 경우와 직·좌 공용차로의 경우에 따라 모형식이 달라질 수 있으며, 이러한 가정이 계획단계에서 교차로별로 별도 적용되기 어려운 점이 있어 본 연구에서는 좌회전 녹색시간비와 좌회전 교통량을 이용한 포화도로 변수를 단순화하였다.

본 연구를 근거로 차로운영 방법과 신호운영 방법에 따른 회전방향별 지체함수를 정립하고, 이를 계획단계에 적용하는 방법 등을 적용하여 교차로의 회전통행량 예측 정확도를 높이는 방안에 대하여 추가 연구가 필요하다.

또한 본 연구에서는 청주시의 신호교차로 자료수집을 토대로 좌회전 신호유형을 분류하고 유형별 좌회전 녹색시간

비의 분포를 분석하여 평균 녹색시간비를 지체모형 구축에 적용하였다. 그러나 신호운영방식은 다른 도시와 차이가 있을 수 있고, 좌회전 유형별 녹색시간비도 차이가 있을 수 있다고 판단되므로 다른 도시의 자료와 비교연구도 필요하다. 다른 도시가로망 자료수집의 한계로 본 연구에서 수행치 못하였으며 향후 별도의 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 강호익·박창호(1998), 도로유형별 지체함수 정립에 관한 연구, 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.117~131.
2. 김원호(1997), 교차로지체를 고려한 통행배정모형 구축에 관한 연구:신호연동효과를 중심으로, 서울대 환경대학원 석사학위논문
3. 김익기(2004), 수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘을 이용한 다경로 생성 알고리즘, 대한교통학회지, 제22권 제2호, 대한교통학회, pp.121~130.
4. 성태경·명선영·홍원철(1999), 회전제한이 있는 도로망을 위한 고속 최적경로 알고리즘, 대한교통학회지, 제17권 제3호, 대한교통학회, pp.73~85.
5. 오상진·박상혁·박병호(2008), 교차로 지체를 고려한 통행시간함수 개발, 대한교통학회지, 제26권 제4호, 대한교통학회, pp.63~76.
6. 이미영·유기윤·김정현·신성일(2003), 덩굴망 통행패턴을 고려한 one-to-one 다경로알고리즘, 대한교통학회지, 제21권 제6호, 대한교통학회, pp.89~99.
7. 이승재(1998), 통행배정과 신호제어 결합문제를 풀기위한 새로운 해법개발에 관한 연구, 대한교통학회지, 제16권 제1호, 대한교통학회, pp.151~164.
8. 임용택(1997), 신호제어 및 가변교통정보를 고려한 동적 교통관리모형의 개발 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문
9. 임용택(2004), 일반가로망에서 교통정보제공을 위한 n-path 알고리즘의 개발, 대한교통학회지, 제22권 제4호, 대한교통학회, pp.135~145.
10. 정연정·김창호(2006), 다목적 정보 제공을 위한 다경로 탐색 기법 개발, 대한교통학회지, 제24권 제3호, 대한교통학회, pp.177~187.
11. 정용식(1995), 교차로 지체에 의한 통행배정모형과 가로신호제어의 최적화에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문
12. Alan J. Horowitz(1991), "Delay-Volume Relation for Travel Forecasting, Based on the 1985 Highway Capacity Manual", Federal Highway Administration, Washington DC
13. Athanasios K. Ziliaskopoulos and Hani S. Mahmassani(1995), "A Note on Least Time Path Computation considering Delays and Prohibitions for Intersection Movements", Transportation Research Part B
14. Enrique Benavent & David Soler(1999), "The Directed Rural Postman Problem with Turn Penalties", Transportation Science
15. Hedayat Z. Aashtiani(1999), "Use of Intersection Delay Functions to Improve Reliability of Traffic Assignment Model", 14th Annual International EMME/2 Conference Chicago, Illinois
16. Ian Taylor & Peter Willoughby(1998), Junction Modelling in EMME/2, 7th European EMME/2 Users Conference
17. R O'N Hill MSc(Auckland), MEngSc (New South Wales), MOPENZ(1998), An application of EMME/2 auto-assignment with detailed modeling of activity at node, Waitakere Eco City, New Zealand
18. Wu Sun(2000), "Traffic Assignment in Urban Transportation Networks", 79th Annual Meeting of the TRB

✉ 주 작성자 : 오상진
 ✉ 교신저자 : 박병호
 ✉ 논문투고일 : 2008. 8. 20
 ✉ 논문심사일 : 2008. 10. 16 (1차)
 2008. 11. 17 (2차)
 2008. 12. 30 (3차)
 2009. 1. 23 (4차)
 2009. 2. 4 (5차)
 ✉ 심사판정일 : 2009. 2. 4
 ✉ 반론접수기한 : 2009. 6. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필