

도시가로망 통행배정을 위한 통행비용함수 정립에 관한 연구

A Study on Travel Cost Function for Traffic Assignment on Urban Network

오 상 진

충북대학교 도시공학과
박사수료

임 민 희

충북대학교 도시공학과
석사과정

박 병 호

충북대학교 도시공학과
교수

목 차

- | | |
|---------------------|-----------------|
| I. 서론 | 3. 교차로기반 통행비용함수 |
| II. 기존이론의 검토 | IV. 함수의 적용 및 분석 |
| 1. 통행비용함수의 이론적 검토 | 1. 적용대상 네트워크 |
| 2. 전통적인 통행배정모형의 한계 | 2. 입력자료의 설정 |
| 3. 개선방안 연구동향 | 3. 대안별 통행배정 결과 |
| III. 통행비용함수의 정립 | 4. 종합평가 |
| 1. 문제제기 및 함수정립 기본방향 | V. 결론 및 제언 |
| 2. 링크기반 통행비용함수 | 참고문헌 |

I. 서론

도시교통계획을 수립하거나 교통문제를 해결하기 위한 여러 가지 방안을 강구할 때 가장 중요한 기초자료가 되는 것이 교통수요이며, 이를 위해서는 과학적이고 합리적인 교통수요예측이 필수적이다.

교통수요 예측법 중 4단계 수요예측법은 전통적으로 가장 많이 사용되며 도시교통계획 과정의 골격을 이루고 있다. 통행배정은 4단계 교통수요예측과정의 마지막 단계로 예측된 교통수요를 교통망 시설에 배정시키는 것이다.

통행배정(Traffic Assignment) 모형에서 통행비용함수(Travel Cost Function)는 교통량지체함수(Volume Delay Function)로서 가로구간의 통행시간을 결정하여 통행량을 도로망에 배정할 때 이 시간의 크기에 근거하여 최단경로를 찾게 된다.

고속도로, 국도, 지방도 등 지역간 가로망의 교통수요 예측에서는 교차로에 관련된 지체시간은 무시할 수 있을 정도이며 무시될 수 있다. 그러나 도시내 가로망에서는 교차로가 통행자에게 상당한 지체를 유발시키므로 교차로의 지체시간은 통행시간에 엄청난 영향을 준다.

기존 통행배정 모형은 도시내 통행시간의 대부분을 차지하는 교차로 혼잡지체를 적절히 고려하지 못하고 있어, 비교적 정확하고 미시적인

자료를 필요로 하는 소규모 TSM사업이나 교통영향평가의 교통수요예측에 적용하는 데는 한계가 있다.

반면 통행배정과 신호제어전략의 결합에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 대부분 교통운영 측면에서 통행배정과 신호제어 전략의 이론적 결합이 갖는 문제점과 이의 해결방안에 초점 맞춰져 있으며, 계획단계에서 수집가능한 자료의 한계 등을 감안한다면 실제 교통계획의 수요예측에 적용하는 데는 한계가 있다.

또한 계획단계에서 교차로의 지체도를 감안하여 수요예측의 정확도를 높이려는 시도는 부족한 실정으로, 교통통제가 있는 도시내 가로망에 대한 보다 현실적인 교통수요 예측결과를 산출하는 교통량지체함수에 대한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 교통수요 예측시 보다 현실적인 예측결과를 산출하기 위해 교차로의 혼잡특성을 교통수요예측의 통행배정단계에 적용하는 방안을 모색하는 것이다.

II. 기존이론의 검토

1. 통행비용함수의 이론적 검토

통행배정이란 전통적 4단계 교통수요예측의 마지막 단계로 이전 과정에서 구한 각 존간 분포 통행량을 주어진 도로망에 배분하여 각 도로구간에 부하되는 차량대수를 구하는 과정이다. 이 과정은 기존 교통체계의 모의 실험과 장래 교

통량의 예측에 이용된다.

통행배정에 영향을 주는 요소에 대한 국외연구로는 Outram과 Thomson의 연구, Leiser와 Stern의 연구, Bovy와 Jansen의 연구 등이 있었으며, 대부분의 기존연구에서 시간과 거리가 노선선택의 기준임을 제시하고 있다.

통행비용함수는 통행배정에서 교통량 증가에 따른 통행시간의 변화를 계산하여, 이 시간에 근거한 운전자의 노선선택 양상을 모형화한 것이다.

통행비용함수는 교통류 모형에서 유도될 수 있으며, 그 전제는 속도가 밀도에 대해 감소함수라는 것이다. 즉, 밀도가 증가하면 차량간의 간격은 감소하고 운전자는 그들의 속도를 낮추어 반응한다.

통행비용함수에 대한 기존연구는 경험식과 이론식으로 나눌 수 있는데, 경험식에는 Irwin, Dadd와 Von Cube(1961, 1962)의 직선식, Smock(1962)의 지수식, Mosher(1963)의 로그식, BPR(1964), Soltman(1965), Overgaard(1967)의 모형 등이 있으며, 이론식에는 Campbell, et. al.의 모형, Wordrop모형 등이 있다.

이 가운데, 미국 공로국에서 개발되어 현재 가장 널리 사용되는 통행비용함수는 BPR식으로 함수의 조작성이 쉬우며, 특정치에 접근하지 않기 때문에 어떠한 통행량에도 통행비용을 구할 수 있다는 특징이 있다.

$$T = T_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{Q}{C_p} \right)^\beta \right]$$

여기서, T_0 는 자유속도통행시간, Q 는 교통량이며, C_p 는 LOS C의 실용용량으로서 가능용량(LOS E 용량)의 75% 수준이다. 계수 α 는 자유속도와 용량시 속도의 비율을 나타내며, β 는 자유속도에서 교통량이 증가하면서 속도가 얼마나 급격하게 감소하는가를 나타낸다.

2. 전통적인 통행배정모형의 한계

도시내 가로망에 있어서 차량의 흐름은 교통 통제 시스템의 제어를 받는다. 따라서 차량들은 주어진 신호제어에 지속적으로 반응하여 움직이게 되며 경우에 따라서 과도한 지체를 만나게 되면 새로운 경로로 이동하게 된다.

이것은 가로망을 통과하는 차량들의 통행비용을 최소화하는 방향으로 이루어지게 된다. 이때 고려되는 통행비용은 시스템 안의 각 개별 교차로에서 발생하는 지체에 의해서 상당한 영향을 받게 된다.

그런데 전통적인 모형들은 이러한 상호연관성을 배제하고 통행배정과 신호제어를 각각 독립적으로 취급해 왔으며, 따라서 현실을 정확히 묘사하지 못하고 있다.

1) BPR식의 한계

우선 BPR 함수에서 자유속도와 용량을 얼마나 정확히 예측하는가 하는 것이 매우 중요한데, 실제로 이러한 사항을 정확히 예측하기가 쉽지 않다.

또한 1965년 자료를 기반으로 작성된 BPR식은 1985년과 1994년 그리고 1997년의 HCM에서 사용한 자료들을 이용하여 검증하였을 때 많은 차이를 나타낸다.

그리고 BPR식은 혼잡으로 인한 지체를 과소평가하는 약점도 가지고 있어, 서선덕(1994)에서도 보인바와 같이 V/C가 1근처에서 실제적으로 통행시간이 약 100% 정도 증가되는 반면 공식에서는 약 20~30% 정도의 증가만을 보인다.

마지막으로 BPR식은 교통신호제어 간선도로의 통행시간을 적절히 나타낼 수 있는 변수를 가지고 있지 않아, 특히 도시부에서의 적용에 많은 문제점을 보일 수 있다.

2) 기존 수요예측 프로그램의 한계

전통적인 통행배정모형에 기반을 둔 많은 교통수요 예측 프로그램들은 현실적인 지체를 예측하는데 제한적일 수밖에 없는 다음의 특성이 있다.

- ① 링크의 지체는 해당 링크만의 교통량의 함수임
- ② 지체함수는 연속이고, 단조 증가이어야 하며, 미분이 가능하여야 함
- ③ 많은 프로그램들은 오직 하나의 함수형태(전형적으로 BPR식)만 허용
- ④ 많은 프로그램들은 turn penalty를 회전교통량의 함수로 구성하는 기능을 제공하지 않음
- ⑤ V/C비가 1.0을 초과하는 지체 예측
- ⑥ 통행배정 과정 동안 이용자의 판단 개입불가
- ⑦ 회전계약이나 회전지체함수의 존재는 연산 시간을 상당히 증가시킴

또한 네트워크는 수천개의 링크와 교차로를 포함할 수 있으므로 경제적으로 각각 공급받을 수 있는 자료의 양에 있어서 상당한 제한이 있다. 전형적인 모형은 지체산정을 위한 목적으로 두 가지(용량과 자유통행시간)의 정보를 요구한다. 적절한 민감도 분석을 통하여 추가 자료의 필요성이 확실하지 않다면, 이용자에게 추가적인 자료를 요구하지 않는 것이 중요하다.

예측은 그 본질상 장래년도에 대한 것이다. 계획가는 지체에 영향을 주는 많은 중요한 교통 특성에 대한 정확한 정보를 갖고 있지 않다. 예를 들면 장기예측을 하는 계획가는 어떤 주어진 교차로의 교통운영 유형(신호교차로의 신호시간계획 등)에 관한 지식을 거의 갖고 있지 않다. 분명히 얻을 수 없는 자료를 필요로 하는 지체관계식을 구성하는 것은 부적절하다.

교통수요예측을 위한 기존 상용 프로그램중 국내에 보급되어 많이 알려져 있는 프로그램인 TRANPLAN, MINUTP, TransCAD, EMME/2에서 통행비용함수가 어떻게 적용되는지, Turn Penalty 등 교차로 혼잡을 반영할 수 있는 기능의 존재 여부 등을 검토한 결과, 대부분의 프로그램에서 BPR함수를 통행비용함수로 적용하고 있으며, Turn Penalty 기능을 제공하고 있으나, Turn Penalty를 함수로 구성하여 적용하는 기능은 제공하지 않고 있다.

<표 1> 프로그램별 지체함수 적용기능

구 분	BPR 계수		Turn Penalty		
	α	β	금지	지체값	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 내재된 함수가 없음 (임의 함수형태 적용가능)				

주) ()는 default setting

특이한 점은 MINUTP의 경우 통행배정시 반복적인 통행시간 산정에 기본적으로 BPR식을 사용하는데 그 식은 다음과 같다.

$$T_c = T_0 * (1 + c * (V/C)^{exp}) + DELAY$$

여기서 DELAY는 링크의 V/C비율에 따라 추가 지체시간을 직접 더해주기 위한 DCRV표에 지정된 값이다.

또한 기본적으로 c는 0.15, exp는 4가 사용되나, 다음과 같이 여러 가지 계수 조정방안을 제공한다.

- ① 다양한 링크 유형별 함수 제공(VCRV)
 - 혼잡지체를 구하기 위해 V/C비에 따라 링크 기본통행시간에 곱해지는 계수 적용
- ② 표준식의 계수(c)를 속도등급별로 지정
 - c는 0.15를 기본으로 하나, 링크의 속도 등급(63개)별로 지정가능
- ③ 표준식의 계수(c)와 승수(exp)를 별도 함수로 지정

또한 MINUTP는 다양한 회전제약을 부여하는 방안을 제공하는데, 회전제약으로 직접 지체시간을 입력하는 방법 외에도 회전용량을 지정하여 회전교통량과 회전용량비에 따라 조정하는 방법, 회전교통량 대신 접근(upstream A-B)링크, 진입(downstream B-C)링크중 하나의 V/C비에 따라 penalty가 조정되도록 지정할 수도 있으며, 회전종류(직진, 좌·우회전)별 조정함수를 지정할 수도 있다. 단, 회전교통량에 대한 회전제약함수를 이용자가 직접 구성할 수는 없다.

EMME/2의 경우 어떤 분석모델에서도 특별히 지정된 Default Setting이 없어 이용자가 자신의 모델을 구성해야 하는 대신 어떤 형태의 모델이라도 사용할 수 있는 장점이 있다.

통행비용 함수, 회전패널티 함수 등 사용자가 모형을 직접 입력하여 사용하도록 되어 있어, 초보자에게는 어려울 수도 있지만, 능숙한 실무자에게는 보다 강력한 분석력을 제공한다.

3. 개선방안 연구동향

Horowitz(1991)는 BPR공식이 1965년 HCM에 사용된 자료를 근거하여 만들어진 점에 착안하여 1985년 HCM에 근거한 일련의 속도-교통량 관계식을 개발하였고, 교차로에서의 지체를 차량의 속도에 반영하기 위한 교차로 용량추정식을 제시한 바 있다.

Akcelik은 Queuing이론에 근거한 공식을 제안하였고, 이는 개념상 기존의 Davidson공식과 유사한 식으로 특히 도시부에서 그 적용도가 높을 것으로 기대하였다. Eash et al(1992)에서 검토한 바와 같이 Chicago시에서는 BPR 공식보다는 Davidson 공식이 더 설명력이 높았다.

Spieß(1989)는 통행배정단계에서의 수렴과정을 빨리하기 위해서 conical 지체함수를 개발하였으며, 그밖에 STEAM모형 등이 개발되었다.

최근의 국내연구에서 전통적인 통행배정과 교통신호제어를 결합한 모형이나 동적 통행배정과 대응신호제어를 다루는 동적운영방식을 다루고 있는데, 정용식(1995), 김원호(1997), 임용택(1997), 이승재(1998), 강환민(1999), 김성인(2000)의 연구가 이에 해당되나, 아직까지 이러한 모형들이 현실적인 교통계획과정에 직접적으로 적용되지 못하고 있다.

그밖에 IAN TAYLOR & PETER WILLOUGHBY는 도로망의 성능을 보다 현실적으로 표현하기 위해 EMME/2를 이용하여 신호교차로 회전이 동류의 지체를 고려한 반복적 접근방법의 통행

배정을 제시하였으며, ALAN J. HOROWITZ는 HCM과 대부분의 교통수요 예측모형간에 중요한 불일치를 발견하고, 이를 조정하는 방법을 제시하였다. Hedayat Z. Aashtiani는 신호교차로와 무신호교차로의 지체를 예측하는 단순한 방법을 개발하여 EMME/2에 적용하는 방안을 제시하였다. R O'N Hill는 회전에 대한 지체함수를 도로교통 통행배정에 적용한 ASRTAM모형을 설명하고, EMME/2 통행배정을 위해 3개의 계수를 포함하는 원뿔형 함수를 각 회전의 분석지체 함수로 적용하였다.

III. 통행비용함수의 정립

1. 문제제기 및 함수정립의 기본방향

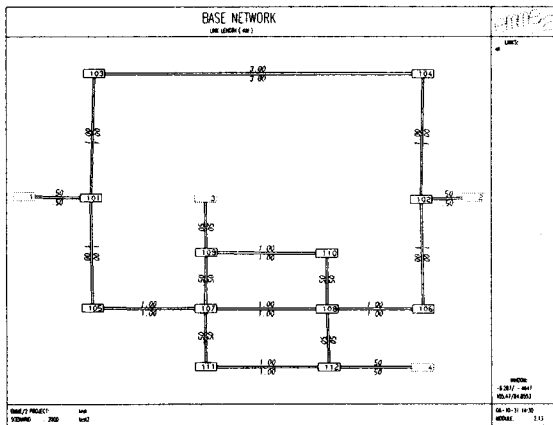
1) 문제의 제기

기존 교통수요 예측프로그램으로 도시내 가로망의 교통수요 예측시 발생할 수 있는 오류를 파악하기 위해 국내에서 널리 사용되고 있는 EMME/2로 간단한 네트워크를 구성하여 시험하였다.

시험 네트워크는 존1에서 존2로 연결되는 두 개의 경로로 구성하되, 첫 번째 경로는 교차로를 거치지 않는 경로이며 두 번째 경로는 교차로를 경유하는 경로이다.

분석의 편의상 EMME/2의 Link Type을 이용하여 교차로를 포함하지 않는 경로는 Type 1로 교차로를 포함하는 경로는 Type 2으로 구성하고 통행배정 결과를 링크 타입별로 비교해 보고자 한다.

<그림 1>에서 1존에서 2존으로 연결되는 두 경로의 거리는 101번 노드에서 102번 노드까지 5km(Centroid Connector 제외)로 동일하며 차로수도 동일하다. 그러나 경로2는 교차로(107, 108 node)를 포함하고 있다.



<그림 1> 시험가로망

존간 통행 O/D는 1존과 2존간 통행량을 주로

하되, 교차로에서의 교차 통행량의 영향정도를 파악하기 위해 3존과 4존간 통행량도 부여한다.

<표 2> 존간 통행 O/D

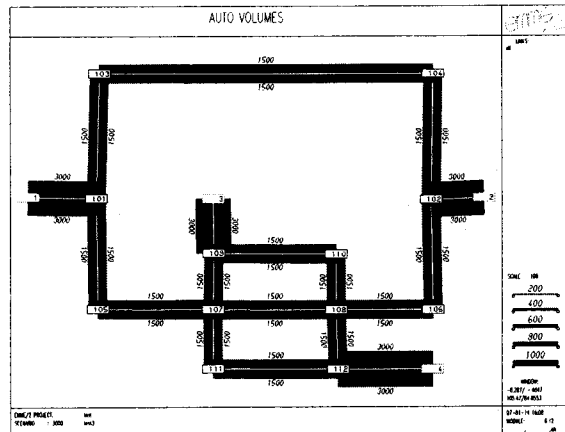
O/D	1	2	3	4	계
1	-	3,000	-	-	3,000
2	3,000	-	-	-	3,000
3	-	-	-	3,000	3,000
4	-	-	3,000	-	3,000
계	3,000	3,000	3,000	3,000	12,000

시험가로망에 적용할 교통량-지체 함수는 일반적으로 많이 사용되는 BPR식을 적용하되, 차로당 용량은 1600으로 가정하며 계수는 흔히 사용하는 $\alpha=0.15$, $\beta=4.0$ 을 적용하였다. 존간 통행 O/D를 시험가로망에 통행배정한 결과는 아래와 같다.

<표 3> 링크타입별 통행배정결과 요약

AUTO-ASSIGNMENT SUMMARY BY LINK TYPE						

link no.	of links	link length (km)	-vehicle- hrs	speed km (km/h)	vol	
1	6	10.00	188.9	15000	79	1500
2	10	10.00	188.9	15000	79	1500



<그림 2> 시험가로망 통행배정결과

링크타입별 통행배정결과 요약을 보면 교차로를 포함하지 않는 경로(type1)와 교차로를 포함하는 경로(type2)의 총통행시간이 188.9대·시간(3.8분 × 1500대 × 양방향/60 = 190대·시간)으로 동일하다. 또한 링크별 배정결과를 보아도 알 수 있듯이 교차로를 포함하지 않는 경로와 교차로를 포함하는 경로의 배정된 통행량도 1,500대씩 양 경로에 동일하게 배정되었다.

위의 결과로 알 수 있는 것은 LinkType2의 경우 교차로 2개소를 통과함에 따른 지체시간이 전체 통행시간 산정에 반영되지 않았다는 것이며,

교차로 지체가 도시내 통행시간의 많은 비중을 차지한다는 점에서 기존 수요예측 프로그램의 한계를 보여주는 결과이다. 이것은 어찌보면 당연한 결과로서, 프로그램에서는 node를 지체가 있는 교차로로 간주하지 않기 때문이다.

기존 프로그램에서 교차로의 지체를 반영토록 하기 위해서는 Turn Penalty를 입력하여야 하는데, 계획단계에서 각각의 교차로의 지체특성에 맞는 회전별 Penalty를 계산하여 입력하는 것은 거의 불가능한 일이며, 현재 교통계획단계에서는 회전금지 정도를 활용하고 있는 상태이다.

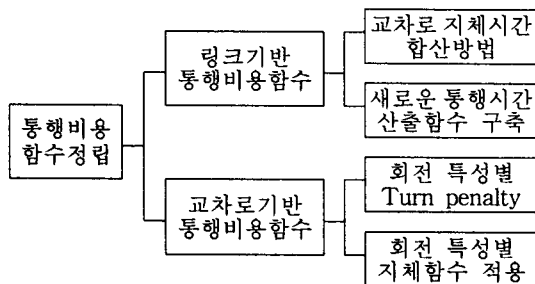
2) 함수정립의 기본방향

본 연구에서는 기존 교통수요예측 프로그램들이 링크의 용량을 제약하는 링크 통행시간 산정 모델을 적용함으로써 도시내 통행시간의 대부분을 차지하는 교차로의 지체를 간과하는 점을 개선하여 교차로에서의 지체를 통행배정 단계의 존간 통행시간 산출에 반영하는 방안을 모색하고자 한다.

앞서 기존연구에서 보았듯이 현재까지 다수의 국내연구가 진행된 바 있으나, 대부분 교차로 신호운영계획과 통행배정 모델 사이의 관계에 대한 연구가 대다수이다.

그러나 교통계획 단계에서 도시내 모든 교차로의 신호운영 현황이나 장래 교차로의 신호운영계획에 관한 상세 자료를 수집하는 것은 거의 불가능하므로 실제 교통과업에 적용하는데 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 계획단계에서 수집 가능한 자료를 기반으로 기존 링크 통행시간 산출모형에 교차로의 지체특성을 감안하여 구간 통행시간을 산출하는 기법에 대해 연구하고, 기존 링크통행시간 산출모형과 비교하여 그 효과를 검증하고자 한다.



<그림 3> 통행비용함수 정립도

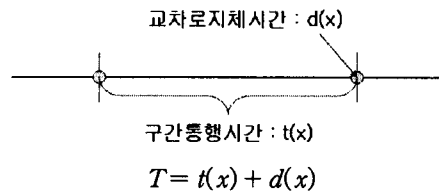
구간통행시간 산출모형에 교차로 지체시간을 감안하는 방법에 대하여 본 연구에서는 <그림 3>과 같이 분류하여 제시하였다. 교차로 지체를 감안하는 방법으로 링크통행시간 산출시 교차로의 영

향을 감안하여 산출하는 링크기반 통행비용함수와 링크통행시간과는 별개로 교차로의 각 회전에 대한 지체시간을 Turn Penalty로 별도 적용하는 교차로기반 통행비용함수로 크게 구분하고, 그 적용방법에 따라 각각 두 가지로 세분하였다.

2. 링크기반 통행비용함수

링크기반 통행비용함수는 교차로에 접근·정지하는 지체를 해당링크의 통행시간 산출에 반영시켜주는 방법을 통칭하는 것이다.

즉, 링크통행시간 산출시 링크의 중점이 다른 링크와 교차점인 경우 교차로에서의 지체시간을 접근가로 통행시간에 반영해 주는 것이라 할 수 있다. 이를 개념식으로 나타내면 다음과 같다.



위 식에서 구간통행시간 $t(x)$ 는 기존의 통행비용함수(BPR)로 산정되며, 그 결과는 링크의 혼잡도에 따른 링크구간만의 통행시간으로 간주하는 것이다. 또한 교차로 지체시간은 교차로가 존재함에 따른 접근·정지지체를 포함하는 개념으로 정의한다.

여기에는 가정이 필요하다. 교차로에 진입하는 차량의 모든 회전이 같은 지체를 갖는다고 가정한다. 이것은 운영단계에서 비현실적으로 보일 수 있으나, 그 목적이 정책결정을 위한 계획단계에서는 합리적일 수 있으며, 적어도 교차로지체를 배제하는 방법과 비교해서는 보다 현실적이다.

본 절에서는 교차로의 지체를 링크통행시간 산출에 반영하는 방안으로 접근로의 유형 및 차로수, 교차로의 신호화 여부 등 교차로의 특성에 따른 교차로 지체시간 합산방법과 교차로에 접근하는 교통량의 크기에 따라 교차로 지체가 달리 적용될 수 있도록 함수로 구성하는 새로운 링크통행시간 산출함수 구축방법으로 구분하였다.

3. 교차로기반 통행비용함수

교차로기반 통행비용함수는 일반적으로 교통수요예측 프로그램에서 제공하는 Turn Penalty 기능을 이용하는 방법을 통칭한다.

본 연구에서는 교차로기반 통행비용함수의 경우에도 크게 두 가지로 구분하여, 신호화 여부 등 교차로의 형태에 따라 각 회전별 지체시간을

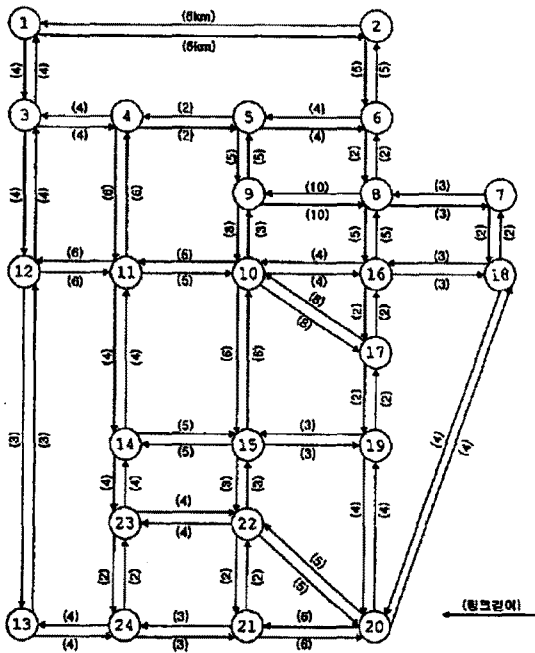
확실적으로 적용하는 회전특성별 Turn penalty 입력방법과 회전교통량에 따라 회전지체시간이 계산될 수 있는 회전 유형별 지체함수 구성 방법으로 구분하였다.

IV. 함수의 적용 및 분석

1. 적용대상 네트워크

본 절에서는 교차로 지체시간을 감안한 통행배정 모형을 테스트 가로망에 적용하여 기존 통행배정모형과 차이점을 분석하고 교차로 지체시간의 영향을 파악하고자 하였다.

모형을 적용할 시험가로망은 LeBlanc이 제시한 Sioux Falls Network와 O/D자료를 수정하여 이용하였다. 이 네트워크는 24개의 노드(존)와 76개의 링크로 구성되어 있고 그 형태는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> Sioux Falls Network

<표 4> Sioux Falls O/D(×10 unit)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	1	1	5	2	3	5	8	5	13	5	2	5	3	5	5	4	1	3	3	1	4	3	1
2	1	0	1	2	1	4	2	4	2	6	2	1	3	1	1	4	2	0	1	1	0	1	0	0
3	1	0	2	1	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0
4	5	2	0	5	4	4	7	12	14	6	6	5	5	8	5	1	2	3	2	4	5	2	1	0
5	2	1	5	0	2	2	5	8	10	5	2	2	1	2	5	2	0	1	1	1	2	1	0	0
6	3	4	3	4	2	0	4	8	4	8	4	2	2	1	2	9	5	1	2	3	1	2	1	1
7	5	2	1	4	2	4	0	10	0	15	5	7	4	2	5	14	10	2	4	5	2	5	2	1
8	6	4	2	7	5	8	10	0	8	16	8	6	6	4	6	22	14	3	7	9	4	5	3	2
9	5	2	1	7	8	4	6	8	0	28	14	6	6	6	9	14	9	2	4	6	3	7	5	2
10	12	6	3	12	10	8	15	16	28	0	40	30	19	21	40	44	39	7	18	2	12	26	18	6
11	5	2	3	15	5	4	5	8	14	39	0	14	10	14	14	14	10	1	4	6	4	11	13	6
12	2	1	2	6	2	2	7	6	6	20	14	0	13	7	7	7	6	2	3	4	3	7	7	5
13	5	3	1	6	2	2	4	6	6	19	10	13	0	6	7	6	5	1	3	6	6	13	8	7
14	3	1	1	5	1	1	2	4	6	21	16	7	6	0	13	7	7	1	3	5	4	12	11	4
15	5	1	1	5	2	2	5	6	10	40	14	7	7	13	0	12	15	2	8	11	8	36	10	4
16	5	4	2	8	5	9	14	22	14	44	14	7	6	7	12	0	28	5	13	14	6	12	5	3
17	4	2	1	5	2	5	16	14	9	39	10	6	5	7	15	28	0	6	17	15	8	17	6	3
18	1	0	0	1	0	1	2	3	2	7	2	2	1	1	2	5	6	0	3	4	1	3	1	0
19	3	1	0	2	1	2	4	7	4	18	4	3	3	8	13	17	3	0	17	4	12	3	1	
20	3	1	0	3	1	3	5	0	6	25	6	5	6	5	11	16	17	4	12	0	12	24	7	4
21	1	0	0	2	1	1	2	4	3	12	4	3	6	4	8	6	1	4	1	0	17	7	5	0
22	4	1	1	4	2	2	5	7	28	11	7	13	12	26	12	17	3	12	2	18	0	21	1	
23	3	0	1	5	1	1	2	3	5	18	13	7	8	11	10	5	6	1	3	7	7	21	0	7
24	1	0	0	2	0	1	1	2	2	8	6	5	7	4	4	3	3	0	1	4	5	11	7	0

기본 네트워크는 링크들간 거리의 차이가 있을 뿐, 차로수 및 도로용량 등 도로의 위계가 구분되어 있지 않다.

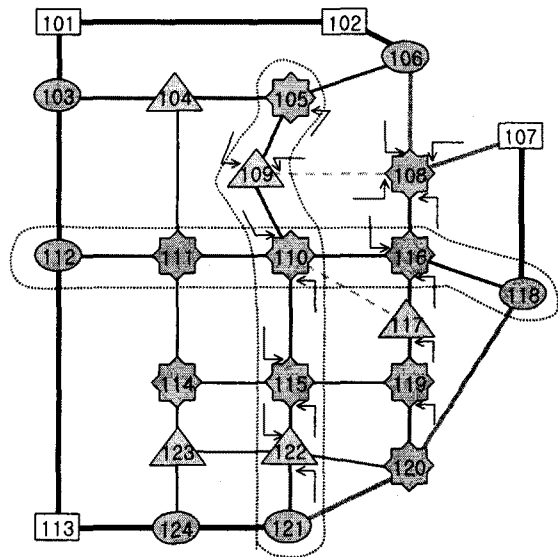
또한 OD자료는 <표 4>와 같이 총 528(24×24)개의 대칭적인 OD쌍들로 이루어져 있다. 단위는 10으로 조정·적용하였다.

교차로 지체시간을 감안한 통행배정에 적용한 교통계획 프로그램은 타 프로그램에 비해 적용함수의 형태에 있어 제약이 없어 여러 가지 함수형태의 적용이 가능한 EMME/2를 사용하였다.

2. 입력자료의 설정

본 절에서는 Sioux Falls Network를 이용하여 여러 가지 도로 및 교차로 기하구조 조건을 가상으로 설정하여 네트워크를 수정하고, 수정된 네트워크에 위의 통행비용함수를 유형별로 적용하여 적용된 결과를 비교분석하고자 한다.

우선 기본 가로망의 링크를 도로유형별로 구분하였다. 도로의 유형은 도시고속도로, 주간선도로, 보조간선도로, 집산도로로 <그림 5>와 같이 구분하였다.



- <도로 구분>
- 도시고속도로(type1)
- 주간선도로(type2)
- 보조간선도로(type3)
- - - 집산도로(type4)
- 연동축 설정구간
- <교차로 구분>
- Regular node
- 임체교차로(IC)
- ☆ 평면 신호교차로
- △ 평면 무신호교차로
- ∨ 회전차로 확보

<그림 5> 도로망 재구성

외곽의 도로는 도시고속도로로 편도 2차로로,

기타 도로는 1차로로 설정하였다. 또한 기본 통행 비용함수도 도로의 유형별로 차등 설정하였다.

<표 5> 도로유형별 속성설정

구 분	자유속도	1차로용량	차로수
도시고속도로(type1)	100	2000	2
간선도로(type2)	80	1800	1
보조간선도로(type3)	70	1600	1
집산도로(type4)	60	1500	1

교차로의 경우 입체교차로, 평면 신호교차로, 평면 무신호교차로로 구분하고, 연동축 설정, 좌회전차로의 유무를 가상으로 설정하였다.

여기서 106~108~107구간과 118~120~121구간은 도시고속도로 구간이나 신호교차로를 포함하고 있어 차로수는 2차로로, 통행비용함수는 주간선도로의 함수를 적용하였다.

회전차로 확보여부는 주간선축을 기준으로 좌회전차로가 확보되어 있다고 가정하였다. 그리고 105번 교차로에서 121번 교차로를 연결하는 간선축과 112번 교차로에서 118번 교차로를 연결하는 간선축이 연동화되어 있다고 가정하였다.

1) 링크기반 통행비용 함수

(1) 교차로 지체시간 합산방법

이 방법은 교차로의 지체시간을 링크통행시간에 합산하는 방법으로서 다음의 함수와 같이 계산된다.

$$\text{링크통행시간} = \text{BPR} + \text{교차로지체}(d)$$

먼저 교차로의 유형별 지체시간을 설정함에 있어 본 연구에서는 해당 접근링크와 교차링크의 도로등급과 신호화여부에 따라 다음과 같은 가정으로 교차로의 유형별 지체시간을 가상 설정하였다.

- 가정1 : 무신호교차로는 교차 도로의 등급이 높을수록 지체가 크다
- 가정2 : 신호교차로는 교차 도로의 등급이 높을수록 지체가 작다.

<표 6> 접근로유형별 지체시간 설정

구 분	교차링크			
	도시고속	주간선	보조간선	집산도로
접근링크	-	0.5	0.6	0.7
링크	주간선	0.5	0.5/0.7	0.4/0.6
링크	보조간선	0.6	0.6/0.8	0.5/0.7
링크	집산도로	0.7	0.7/0.9	0.6/0.8

* 신호/비신호시 지체시간(단위 : 분)

접근링크는 통행시간이 계산되는 해당링크를 말하며, 교차링크는 해당링크와 교차되는 링크를 말한다. 예를들어 접근링크가 주간선도로이며

교차링크가 보조간선도로인 신호교차로는 링크통행 시간에 교차로지체시간 0.4분이 더해지는 것이다.

위의 가정이 다소 무리한 설정일 수 있으며, 교차로 유형별 지체도에 대하여는 추가 연구가 필요하나, 교차로의 영향을 배제하는 기존 방법과의 차이를 분석하는 측면에서 의의가 있다.

(2) 새로운 링크통행시간 산출모형

이 방법은 통행배정에 적용되는 통행비용함수를 재구성하여 교차로의 지체특성을 반영토록 하는 방법이다.

교차로의 영향을 감안한 새로운 통행비용함수는 다음과 같은 함수를 적용하고자 한다.

$$\text{링크통행시간} = \text{BPR} + \text{교차로지체}(d(x))$$

여기서 BPR식은 기존 통행비용함수이며, 이는 링크구간의 혼잡도에 따른 링크구간의 통행시간 계산식으로 간주하고, 여기에 교차로 지체시간 $d(x)$ 를 합산하는 형태의 모형식을 구성한다.

교차로 지체시간을 산정하는 함수는 계획단계에서 수집 적용할 수 있는 자료의 한계 등을 감안하여 해당 접근로의 교통량과 용량비를 이용하고자 한다. 이를 모형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T = T_0(1 + \alpha(V/C)^\beta) + \gamma(V/C)$$

여기서 α , β , γ 는 도로의 유형별 실측자료에 근거하여 정산되어야 하겠지만, 본 연구에서는 교차로의 영향이 통행배정에 어떤 영향을 미치는지를 분석하기 위함으로써 일반적으로 널리 사용되고 있는 계수 설정치, 즉 $\alpha=0.15$, $\beta=4$ 로 적용하고, γ 는 실측자료를 통하여 정산되어야 할 계수이나 여기서는 우선 1.0을 적용하였다. 따라서 V/C 비가 0.8인 경우 0.8분이 교차로 지체시간으로 더해지도록 구성한 것이다.

2) 교차로기반 통행비용 함수

이 방법은 Turn Penalty를 적용하는 방법으로 기존 링크통행시간 산출모형은 해당 링크 구간만의 혼잡도에 따른 통행시간을 계산하고, 교차로에서의 지체시간은 별도로 적용하는 것이다.

(1) 회전특성별 Turn Penalty 입력

이 방법은 교차로의 각 회전에 소요되는 지체시간이 교차로의 기하구조 및 운영특성에 좌우된다고 가정하고, 각 교차로의 회전특성별 지체시간을 Turn Penalty로 직접 적용하는 방법으로 다음의 가정으로 회전유형별 지체시간을 산정하였다.

- 가정1 : 신호/무신호교차로에서 좌회전은 직진보다 지체시간이 더 크다.
- 가정2 : 전용차로가 있는 경우가 없는 경우보다 지체가 적다.

<표 7> 교차로의 회전유형별 지체시간

구 분	좌회전	직진	우회전
신 호	0.8/0.9	0.6/0.8	0.01/0.2
무신호	0.5/0.6	0.5/0.7	0.01/0.1

- * 전용차로 유/무에 따른 회전 지체시간(분)
- * 직진의 경우 좌회전전용차로 유/무에 따른 직진 지체시간(분)

(2) 회전특성별 지체시간 모형 구축

이 방법은 회전유형별 통행량에 따라 지체시간이 변화하는 함수식으로 회전지체함수를 구성하여 회전유형별 지체시간을 산정하는 방법이다.

회전제약함수는 Sioux Falls 네트워크에서 가상 설정한 연동축을 감안하여 회전유형별로 다음과 같이 구상·적용하였다.

$$fpl = \frac{pvola_u}{(C_{in} + C_{out})/2} * yon$$

여기서, pvola_u는 회전교통량

C_{in}은 교차로 접근링크의 회전용량

C_{out}은 회전후 진입 링크의 용량

yon은 연동보정계수(연동정도에 따라 0.1(Good)~1.0(Poor) 적용)

여기서 접근링크의 회전용량은 회전 전용차로가 있는 경우 1차로 용량의 50%를 추가하여 회전별 비율을 적용하였으며, 3지교차로의 경우 교차되는 도로의 등급이 같으면 50%씩 균등 배분하고, 등급이 상이하면 도로의 등급에 따라 차등 배분하였다. 5지교차로 및 회전이동류의 구분이 모호한 경우 교차로의 형태에 따라 적정 배분하였다.

<표 8> 회전지체함수내 변수 설정

구 분	접근용량 (up1)	진입용량 (up2)	연동계수 (up3)
직진	40%	100%	0.1/0.8
좌회전	30%	100%	0.3/0.9
우회전	30%	100%	0.2/0.7

- * 연동계수 : 연동축 내/외 교차로

3. 대안별 통행배정 결과

앞서 대안별 교차로지체 반영방법을 적용하여 통행배정한 결과는 다음과 같다. 편의상 5가지 대안으로 아래와 같이 구분하였다.

- I안 : Do Nothing(기존 통행배정법)
- II안 : 링크기반(교차로 지체시간 합산)
- III안 : 링크기반(새로운 지체함수 적용)

- IV안 : 교차로기반(회전지체시간 입력)
- V안 : 교차로기반(회전지체함수 적용)

통행배정 결과를 보면 교차로지체를 감안하지 않은 대안 I에 비해 교차로지체를 감안하는 타 대안들의 총주행거리가 모두 증가하였다. 이것은 도심의 교차로를 통과함에 따른 지체시간을 피하기 위해 우회함에 따른 결과로 보여진다.

<표 9> Link Type별 통행배정 결과

구분	Link Type	1	2	3	4	Total
대안 I	총주행시간(대·시)	1,027	2,325	774	148	4,274
	총주행거리(대·km)	94,002	170,429	52,376	8,834	325,641
	평균속도(km/h)	92	73	68	60	76
	평균통행량(대/시)	1,022	1,386	794	315	1,054
대안 II	총주행시간(대·시)	1,223	2,477	870	173	4,742
	총주행거리(대·km)	107,410	162,542	50,030	9,200	329,182
	평균속도(km/h)	88	66	58	53	69
	평균통행량(대/시)	1,168	1,321	758	329	1,065
대안 III	총주행시간(대·시)	1,222	2,614	865	188	4,889
	총주행거리(대·km)	108,224	160,058	50,774	10,568	329,624
	평균속도(km/h)	89	61	59	56	66
	평균통행량(대/시)	1,176	1,301	769	377	906
대안 IV	총주행시간(대·시)	1,239	2,197	720	115	4,270
	총주행거리(대·km)	113,790	161,734	49,000	6,860	331,384
	평균속도(km/h)	92	74	68	60	78
	평균통행량(대/시)	1,237	1,315	742	245	1,072
대안 V	총주행시간(대·시)	1,081	2,227	744	200	4,252
	총주행거리(대·km)	98,696	165,165	50,790	11,858	326,508
	평균속도(km/h)	91	74	68	59	77
	평균통행량(대/시)	1,073	1,343	770	423	1,057

총주행시간은 교차로 지체를 링크통행시간에 반영하는 대안 II, III이 대안 I에 비해 증가한 반면, 교차로 지체를 Turn Penalty로 반영하는 방식인 대안 IV, V는 오히려 감소하였다. 이것은 총 주행시간이 링크통행시간과 링크 통행량 곱의 합으로 산정되며, 여기에 교차로 회전제약은 누락되기 때문인 것으로 판단된다.

도시고속도로인 Link Type 1의 경우 대안 I에 비해 교차로의 지체도를 감안하는 대안들의 평균 통행량이 증가하고, 이에 따른 총주행시간(대·시) 및 총주행거리(대·km)가 모두 증가하는 반면, 평균 속도는 대체로 감소하는 것으로 나타났다.

이에 비해 간선도로인 Link Type 2와 보조간선도로인 Link Type 3의 경우 교차로를 포함함으로써 추가적인 지체시간이 소요되므로 대안 I에 비해 교차로 지체를 감안하는 타 대안들의 배정통행량이 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 종합평가

본 절에서는 기존 교통수요예측 프로그램을

이용하여 Sioux Falls 가로망에 통행배정시 각 대안별 적용상의 문제점과 도출된 결과를 토대로 각 대안별 특성을 평가하고자 한다.

먼저 대안Ⅱ의 경우 기존 통행비용함수로 도출된 각 링크의 통행시간에 교차로의 지체를 합산하는 방식으로서 비교적 논리가 단순하여 도시교통 수요예측시 교차로의 영향을 대략적으로 반영할 수 있는 간단한 방법이다. 그러나 교통량에 따른 변화없이 교차로의 유형에 따라 교차로 지체를 획일화하고, 교차로내 직진을 포함한 모든 회전은 같은 지체를 갖는다고 가정하는 논리적인 한계를 갖고 있다. 그럼에도 불구하고 기존 통행수요예측모형과 같이 교차로의 지체를 배제하는 방법과 비교해서는 현실적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

대안Ⅲ의 경우 통행배정시 적용되는 통행비용함수를 교차로 지체를 반영할 수 있도록 변경하는 방안이다. 본 연구에서는 교차로의 지체가 접근 링크의 접근교통량에 따라 좌우된다고 가정하고 기존 통행비용함수에 접근링크의 V/C비를 교차로 지체시간으로 합산하는 방법을 적용하였다.

이 방법은 교차로의 유형별 구분은 없으나 링크 통행시간 계산에 접근링크의 교통량에 따른 교차로 지체를 추가 반영할 수 있는 방법으로 현실적인 예측결과를 기대할 수 있을 것이다.

그러나 이 방법은 모형자체에 대한 심도있는 추가 연구가 필요하며, HCM 등 기존 교차로 지체산정모형에 상당히 많은 변수를 필요로 하는 점을 감안한다면, 계획단계에서 적용할 수 있는 변수로 모형식의 정확도를 어느정도 높일 수 있을지가 모형의 신뢰도를 좌우한다고 할 수 있다. 이 방법 또한 교차로의 지체를 링크 통행시간 산정시 반영하는 방법이기 때문에 교차로내 회전별 지체는 동일하다고 가정하는 것이다.

대안Ⅳ의 경우 링크 통행비용함수는 기존 함수를 그대로 적용하고 교차로의 지체는 링크통행시간과 별개로 회전유형별 Turn Penalty를 입력하여 교차로의 지체시간으로 적용하는 방안이다.

이 방법은 기존의 많은 교통수요예측 프로그램에서 지원하는 기능을 이용하는 방법이기 때문에 프로그램에 적용하는 것은 간단하고, 교차로의 지체를 회전유형별로 구분·적용함으로써 논리적으로도 타당한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 교차로의 유형(신호 유무, 좌회전 차로 확보여부 등)별, 회전유형별로 구분하여 회전에 따른 지체시간을 Turn Penalty로 적용하였다.

그러나 이 방법 또한 교차로 회전통행량의

크기와는 무관하게 교차로 유형별 획일적인 지체 시간 적용에 따른 논리적인 한계가 있고, 교차로의 유형에 따라 회전통행의 지체시간을 산정하는 것 자체에 대한 타당성 논란이 있을 수 있다. 그럼에도 불구하고 계획단계에서 개략적인 교차로 지체를 수요예측에 반영하는 목적에는 부응할 수 있을 것으로 기대된다.

대안Ⅴ는 대안Ⅳ와 같이 링크 통행시간과는 별개로 교차로의 회전에 대한 지체시간 산정모형을 적용하는 방법으로서 기존 수요예측 프로그램 중 EMME/2의 기능을 이용하여 교차로 회전교통량의 함수를 구성하는 것이다.

본 연구에서는 교차로의 회전에 따른 지체는 회전교통량과 회전용량의 비에 따라 좌우된다는 가정하에 회전교통량과 용량비를 기반으로 한 함수를 구성하여 적용하였다. 이 방법은 회전교통량의 크기에 따라 지체가 변화하기 때문에 논리적으로도 합당한 것으로 판단되나, 함수 자체에 대한 심도있는 연구가 필요하고, 교차로의 형태나 유형을 함수에 반영하기가 쉽지 않다.

도출된 결과를 보면 교차로의 영향을 반영한 대안들 모두 기존 모형을 적용한 결과와 차이를 나타내고, 대체로 교차로 지체를 수반하지 않는 링크를 이용하려는 경향을 읽을 수 있었다.

특이한 점은 프로그램에서 도출한 여러 가지 지표들중 평균속도의 경우 대안Ⅱ, Ⅲ과 대안Ⅳ, Ⅴ가 차이를 나타내는데, 이것은 링크기반 모형에서는 링크구간 통행시간에 교차로 지체시간이 포함되는데 반해 교차로기반 모형에서는 링크통행시간에는 교차로지체시간이 포함되지 않으며, 교차로내 회전지체를 별도 주기 때문에 이를 반영한 결과로 보여진다

V. 결론 및 제언

기존 통행배정 모형은 도시내 통행시간의 대부분을 차지하는 교차로 혼잡지체를 적절히 고려하지 못하고 있다는 판단하에, 본 연구에서는 교통수요 예측시 보다 현실적인 예측결과를 산출하기 위해 교차로의 혼잡특성을 교통수요예측의 통행배정단계에 적용하는 방안을 모색하고자 하였다.

도시내 교통수요예측시 교차로의 지체를 감안하는 방법으로 링크기반모형과 교차로기반 모형으로 크게 구분하고, 각각의 모형별 적용방안에 따라 각각 2가지로 구분하여 총 4가지 대안과 기존 수요예측방법을 비교하였다.

비교 방법은 교통수요예측 프로그램인 EMME/2를

이용하여 Sioux Falls 가로망을 신호/무신호 교차로를 포함하는 도심가로망 유형으로 변형하여 시험가로망을 구축하고, 여기에 앞서 선정한 4가지 대안과 기존 수요예측방법을 적용한 결과를 비교분석하였다.

도출된 결과를 보면 대안간 차이는 다소 있으나 교차로의 영향을 반영한 대안들 모두 기존 모형의 결과와 차이를 나타내고, 대체로 교차로 지체를 수반하지 않는 링크를 이용하려는 경향을 읽을 수 있었다.

본 연구에서 고려하지 못한 부분과 향후 연구할 과제는 다음과 같다.

우선 본 연구에서는 교차로 지체를 교차로 유형별로 결정하여 적용하는 방안과 교차로 지체 시간을 링크통행시간 산정모형에 반영하는 새로운 모형식을 적용하였으나, 교차로 유형별 지체시간 및 새로운 모형식의 적합성을 검증하여 모형의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요하다. 특히 계획단계에서 예측할 수 있는 교차로 지체예측 간략식에 대한 추가 연구도 절실하다.

도시내 가로는 주간선축을 중심으로 신호를 연동하여 운영하는 것이 보편적이므로, 본 연구에서 적용한 대안들에 적용할 수 있는 신호연동화 여부 적용방안에 대한 연구가 미흡했던 것으로 판단된다.

또한 교차로 기하구조에 따른 회전유형별 지체 시간의 적정성, 회전지체함수의 적합성 등을 검증하여 예측결과의 신뢰도를 높일 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다

마지막으로 실제 가로망에 적용하여 예측결과와 실제 조사치에 대한 비교분석을 통해 본 연구에서 적용한 방안들 중 계획단계에서 적용이 용이하며 정확도가 높은 방법을 제안하여야 하지만 향후 연구과제로 남긴다.

참고자료

1. 원제무·최재성, 「교통공학」, 전영사, 1990
2. 박병호, 「교통공학」, 보성문화사, 1998
3. 임강원·임용택, 『교통망분석론』, 서울대학교 출판부, 2003. 3
4. 강환민, 신호제어를 고려한 가로망설계모형, 서울대학교 석사학위논문, 1999
5. 정용식, 교차로 지체에 의한 통행배정모형과 가로신호제어의 최적화에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 1995

6. 김원호, 교차로지체를 고려한 통행배정모형 구축에 관한 연구 : 신호연동효과를 중심으로, 서울대 환경대학원 석사학위논문, 1997
7. 임용택, 신호제어 및 가변교통정보를 고려한 동적 교통관리모형의 개발 연구, 서울대 대학원 박사학위논문, 1997
8. 강환민, 신호제어를 고려한 가로망 설계모형의 구축에 관한 연구, 서울대 대학원 석사학위논문, 1999
9. 김성인, 도심가로망에서의 확률적 사용자 평행배정에 관한 연구, 서울대 대학원 석사학위논문, 2000
10. 신성일·최기주·김정현, 네트워크의 확장없이 방향별 지체를 고려하는 통행배정모형의 개발, 대한교통학회지 제20권제1호, 2002
11. D. Van Vliet, Road Assignment-Principles and Parameters of Model Formulation, Transportation Research 10, 1976, pp. 137-143.
12. Horowitz, Ajan J, Delay-Volume Relation for Travel Forecasting, Based on the 1985 Highway Capacity Manual, Federal Highway Administration, Washington DC, March 1991
13. Spiess, Heinz, Conical Volume Delay Function, Publication #628, Transportation Research Center, University of Montreal, Canada, 1989
14. IAN TAYLOR & PETER WILLOUGHBY, Junction Modelling in EMME/2, 7th European EMME/2 Users Conference, 1998
15. ALAN J. HOROWITZ, Delay-Volume Relations for Travel Forecasting : Based on the 1985 Highway Capacity Manual, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, 1991
16. Hedayat Z. Aashtiani, Use of Intersection Delay Functions to Improve Reliability of Traffic Assignment Model, 14th Annual International EMME/2 Conference Chicago, Illinois, 1999
17. R O'N Hill MSc, MEngSc, MOPENZ, An application of EMME/2 auto-assignment with detailed modeling of activity at node, Waitakere Eco City, New Zealand
18. LeBlanc, L. J., E. K. Morlok, and W. Pierskalla. "An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem" Transportation Research 9(5), 1975