

■ 論 文 ■

교통류 모형을 이용한 도시 연동가로의 통행시간 모형개발

Development of Travel Time Model at the Signal Coordinated Links Using Traffic Flow Model

박 용 진

(계명대학교 건설시스템공학부 조교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구배경 및 목적
- II. 기존 연구의 고찰
 - 1. 가로통행시간모형
 - 2. 교통류모형
- III. 연구방법
 - 1. 통행시간모형
 - 2. 임계통행시간(t_m)모형 개발
 - 3. 가로용량모형
- IV. 자료수집
- V. 자료분석
 - 1. 교통류모형 선정
 - 2. 통행시간모형
 - 3. 가로용량모형
 - 4. 임계통행시간(t_m)모형
 - 5. 통행시간모형
 - 6. 변수들의 민감도 분석
- VI. 결론
- 참고문헌

요 약

대도시 가로망의 대부분은 신호교차로와 신호교차로가 연결되는 가로(link)로 구성되어 있어 가로의 통행시간은 가로의 주변여건, 차량간의 상호작용 및 교통신호등과 같은 요소에 영향을 받게된다. 따라서 본 연구의 목적은 대도시 가로망에서 신호 연동체계로 운영되는 가로의 통행시간을 예측할 수 있는 모형을 개발하는데 있다.

본 연구는 대구광역시 가로망을 대상으로 연동가로의 교통흐름을 가장 잘 나타내는 Greenberg모형을 이용하여 연동가로의 통행시간 모형을 도출하였다. 도출된 연동가로의 통행시간 모형은 임계통행시간(t_m)과 교통량 대 가로최대교통량비(q/q_m)의 함수로 이루어졌다.

t_m 모형은 안정류상태의 통행시간 및 불안정류상태의 통행시간의 비를 이용하여 개발하였고 가로 용량모형은 상류부와 하류부의 신호조건에 따른 변수와 가로길이를 변수로 하는 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 대구광역시를 대상으로 조사한 12개의 연동가로의 자료를 적용하여 연동으로 운영되는 가로의 통행시간 모형을 도출하였다. 도출된 통행시간 모형은 도로용량에 제시한 모형에 비하여 간단하게 가로의 통행시간을 추정할 수 있으며 교통계획에 적용되는 통행시간모형에 비하여 가로의 신호 및 운영조건을 포함한 세부적인 통행시간 모형이다.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

대도시 가로망의 대부분은 신호교차로와 신호교차로가 연결되는 가로(link)로 구성되어 있어 가로의 통행시간은 가로의 주변여건, 차량간의 상호작용 및 교통신호등과 같은 요소에 영향을 받게된다¹⁾. 가로의 통행시간은 교통계획에서 운전자의 경로선택에 중요한 요소이며 일반적으로 교통배분과정에서 중요한 변수의 하나로 적용되고 교통공학에서는 가로의 서비스 수준을 결정하는 효과척도에 적용되고 있다.

교통계획에서 가로구간 통행시간을 추정하기 위하여 일반적으로 Davidson에 의한 Hyperbolic 함수, 미국에서 보편적으로 사용되는 Polynomial 함수(BPR 식)와 호주에서 개발된 Exponential 함수 등이 적용되고 있다²⁾. 이들 함수들은 가로 운영특성 및 주변 상황에 따라 적용되는 계수값들이 여러 연구^{3,4,5)}에서 제시되고 있다. 또한 기하학적인 방법을 이용하여 연속류에서 교통량과 속도의 관계식을 이용하여 교통량이 증가에 따른 통행속도의 변화를 통하여 통행시간을 추정^{6,7,8,9)}하는 모형들이 도출되었다.

대도시 가로망의 대부분은 신호교차로를 포함한 가로로 구성되어 있으므로 기존의 통행시간 모형은 신호등에 의해 통제되는 가로의 운영특성을 계수값으로 일괄적으로 적용하고 있으나 신호교차로를 포함한 가로의 통행시간은 신호조건이나 운영방식에 따라 연동으로 운영되는 도시 가로는 교통흐름의 연속성을 유지할 수 있어 연동으로 운영되지 않는 가로의 통행시간에 비하여 현저한 차이를 나타내고 있다.

대도시 가로의 통행시간추정 모형은 통행자유속도나 가로의 교통량과 용량의 비(V/c) 뿐만 아니라 신호교차로의 신호조건 및 운영방식에 따라 통행시간이 변화하므로 신호조건이나 운영방식이 고려된 통행시간 모형이 제시되어야 한다.

현재 도로용량 편람에서 제시한 가로의 통행시간 모형은 간선도로 유형에 따라 구간길이에 따른 순행시간과 신호교차로에 대한 영향은 신호교차로의 연동보정계수를 이용한 총접근지체가 사용되고 있어

신호교차로 분석이 수반되어야 하는 통행시간 모형이다. 따라서 가로망의 가로통행시간을 예측하기에는 각 가로의 하류부 신호교차로의 지체를 계산하여 적용하여야 한다. 그러나 신호교차로의 지체 산정은 방대한 자료가 요구되고 편람¹⁰⁾에서 제시한 통상적인 변수를 사용한다 하더라도 대도시 가로망 전체에 적용하기에는 비효율적이다.

따라서 본 연구의 목적은 신호 연동체계로 운영되는 대도시 가로에서 신호교차로의 지체를 계산하지 않고 교통류 모형을 이용하여 가로의 통행시간을 예측할 수 있는 모형 개발하는데 있다.

II. 기존 연구의 고찰

1. 가로통행시간모형

가로구간의 통행속도를 예측하기 위한 여러 가지 모형^{2,6,7,8,9)}들이 제시되고 있으나 교통흐름을 이용한 도시 가로의 평균통행속도를 예측하기 위한 모형개발은 Herman & Prigogine¹¹⁾에 의하여 제시되었다. 이 모형은 교통류의 흐름을 정지된 차량과 정지하지 않은 차량으로 나누어 운동(kinetic)이론에 적용하였다. 교통의 흐름에서 정지차량의 비율(f_s)과 정지하지 않고 주행한 차량의 비율(f_f)로 나누어 식 (1)과 같이 평균통행속도를 나타내었으며 이를 기초로 Herman & Prigogine¹²⁾이 도시가로의 통행속도를 가로의 교통조건을 나타내는 변수(p)를 추가하여 식 (2)와 같이 유도되었다.

$$u_r = u_o (1 - f_s) = u_o f_f \quad (1)$$

$$u_r = u_m (1 - f_s)^p \quad (2)$$

여기서,

u_r : 평균통행속도

u_o : desired speed (자유속도)

u_m : the average maximum speed

f_f : 정지하지 않고 주행한 차량의 비율

f_s : 정지차량의 비율 ($1 - f_f$)

p : 가로의 교통조건을 나타내는 변수

이 이론은 식 (3)과 같이 가로의 통행속도는 전체 차량중 정지차량 비중이 높고 주행하는 차량 비율에 따라 변화되고, 정지차량의 비율은 식 (4)와 같이 임계밀도와 밀도의 비율과 관계가 있다는 매우 간단한 이론이다.

$$u_r \propto (1 - f_s)^n \quad (3)$$

$$f_s \propto \left(\frac{k}{k_j}\right)^p \quad (4)$$

여기서, k : 밀도
k_j : 임계밀도

또한 Williams와 다른 2명의 연구자¹³⁾는 Herman & Prigogine¹²⁾의 이론과 Ardekani and Herman¹⁴⁾이 제안한 정지차량의 비율을 밀도의 함수로 나타낸 식을 속도와 밀도의 관계식에 적용하여 모의 실험으로도 시 가로에도 간단한 교통류 모형을 적용할 수 있음을 보여주었다.

2. 교통류모형

교통흐름 특성을 교통량, 밀도 및 속도의 관계식으로 나타내는 교통류 모형은 1934년 Greenshields¹⁵⁾에 의하여 속도와 밀도의 관계가 선형식으로 제안되면서 부터 많은 모형들이 제시되었다¹⁶⁾. 교통흐름을 하나의 영역으로 나타낼 수 있는 단일영역(single-regime) 모형과 하나의 영역으로 나타낼 수 없어 두 개이상의 영역을 결정하여 제시한 다중영역(multi-regime) 모형으로 구분 될 수 있다¹⁷⁾.

단일영역의 대표적인 모형은 General Motors(GM)에서 개발한 자동차 추종모형에서 유도될 수 있다. GM자동차 추종모형은 뒤따르는 자동차의 가/감속은 뒤차의 인지시간과 앞뒤 차의 속도 차로 식 (5)와 같이 뒤따르는 자동차의 반응(response)은 앞차와 뒤차와의 속도의 차(stimuli)와 뒤차의 인지반응시간(sensitivity)의 역수로 정립된다.

$$\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = a[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (5)$$

위의 기본적인 자동차 추종이론을 바탕으로 뒤따

르는 자동차의 속도와 차두간격을 포함한 일반적인 General Motors의 자동차추종모형은 식 (6)과 같다.

$$\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{a_{l,m} [\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (6)$$

여기서,

\dot{x}_{n+1} : 자동차 (n+1)의 가속도

\dot{x}_{n+1} : 자동차 (n+1)의 속도

x_{n+1} : 자동차 (n+1)의 거리

\dot{x}_n : 자동차 (n)의 가속도

\dot{x}_n : 자동차 (n)의 속도

x_n : 자동차 (n)의 거리

l, m : 거리 차두간격 및 속도의 설명변수

자동차 추종모형에서 유도된 단일영역 모형은 식 (6)에서 m과 l의 변화에 따라 Greenshields, Greenberg, Underwood, Drew 및 Drake 모형이 유도된다. GM자동차 추종모형은 미시적인 자동차 추종모형을 거시적인 교통류 모형으로 전환될 수 있는 모형으로 미시적인 분석과 거시적인 분석의 교두보 역할을 한 모형으로 본 연구에서는 GM자동차 추종모형에서 유도될 수 있는 단일영역 모형들을 대상으로 하였다.

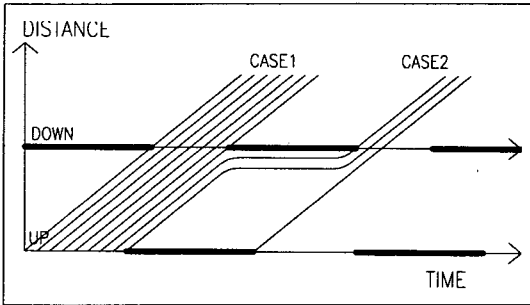
III. 연구방법

본 연구는 연동체계로 운영되는 가로는 신호주기, 녹색시간, 연동값 및 가로의 길이에 따라 <그림 1>과 같이 상류부 교차로에서 하류부 교차로의 흐름이 정지 상태 없이 이어지는 흐름(CASE1)과 신호의 제약에 의하여 정지상태가 되면서 그 흐름이 끊어지는 흐름(CASE2)으로 구분될 수 있다. 흐름이 이어지는 흐름을 안정류(CASE1)로 분류하고, 신호제약에 의하여 흐름이 끊어지는 흐름을 불안정류(CASE2)로 분류하여 신호로 운영되는 간선가로의 교통흐름을 교통류 모형에 적용하였다.

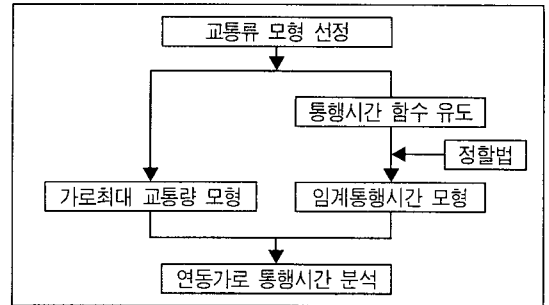
본 연구의 연구과정은 <그림 2>와 같이 기존 단일영역(single-regime) 모형 중 연동가로를 가장 잘 나타내는 모형을 선정하여 통행시간함수를 유도한다. 또한 교통류모형에서 제공된 최대교통량(q_m)을 이용

하여 가로의 최대교통량 모형을 유도하고, 임계통행 시간 모형을 정립하여 본 연구 목적인 연동운영체제

가로의 통행시간모형을 도출하였다.



〈그림 1〉 연동가로의 교통흐름 분류도



〈그림 2〉 연구 과정도

〈표 1〉 교통류 모형과 유도된 통행시간 함수

이름	모형	통행시간함수
Greenshields	$u = u_f(1 - k/k_j)$	$\frac{x}{4} \cdot t^2 - t_{ou} \cdot t + (t_{ou})^2 = 0$
Greenberg	$u = u_m \ln(k_j/k)$	$\frac{x}{t_m} \cdot \ln t \cdot t - t + t_m = 0$
Underwood	$u = u_f e^{-k/k_m}$	$\frac{x}{e \cdot t_{ou}} t - \ln(t) + \ln(t_{ou}) = 0$
Drew	$u = u_f e^{-k/k_m}$	$\frac{x}{6.75} t^3 - t_{ou} \cdot t^2 + 2t_{ou}^2 \cdot t - t_{ou}^3 = 0$
Drake	$u = u_f e^{-k/k_m}$	$\frac{x^2}{2t_m^2} t^2 + \ln(t) - \ln(\frac{t_m}{\sqrt{e}}) = 0$

u_f : 자유속도 u_m : 임계속도 k_j : 혼잡밀도 k_m : 임계밀도 u : 통행속도 k : 밀도 x : q/q_m
 t_m : 자유통행시간 t_{ou} : 임계통행시간 q : 연동가로교통량 q_m : 연동가로 최대교통량

1. 통행시간모형

자동차 추종 모형으로 나타낼 수 있는 단일영역 교통류 모형에서 속도와 밀도의 관계는 단순회귀형, 지수형, 대수형등 다양한 모형이 유도되며 속도와 교통량의 관계에서 교통량과 통행시간의 관계가 유도될 수 있다. 교통류 모형에서 유도된 통행시간 함수는 〈표 1〉과 같이 Greenshields와 Drew 모형은 2차 및 3차 정방식으로 나타내지고, 그 외의 모형은 부정방정식으로 나타난다.

Greenshields모형에서는 통행시간함수(t)가 근의 공식을 적용하여 도출될 수 있고, 그 외의 모형에서는 수치해석법(numerical method)을 적용하였다. 적용된 수치해석방법은 정할법(secant method)으로 t의 함수(f(t))에서 두 점 t_{n-1} , t_n 이 주어지고 $n=0, 1, 2, \dots$ 에 대하여 구하는 근사값이 나올 때까지 식 (7)과정을

반복 시행하는 방법이다¹⁸⁾.

$$t_{n+1} = \frac{f(t_n) \cdot t_{n-1} - f(t_{n-1}) \cdot t_n}{f(t_n) - f(t_{n-1})} \tag{7}$$

그러나 $f(t_n)$ 과 $f(t_{n-1})$ 의 값이 아주 가까워지면 분모가 0에 가까워지므로 t_{n-1} 을 계산할 수가 없거나 마지막 항에서 오차를 유발할 수 있으므로 식 (7)를 $f(t_n)$ 과 $f(t_{n-1})$ 의 값이 가까울 때의 오차 유발을 방지할 수 있는 식 (8)로 변형하여 적용한다.

$$t_{n+1} = t_n - \frac{t_n - t_{n-1}}{f(t_n) - f(t_{n-1})} f(t_n) \tag{8}$$

정할법을 이용하여 도출된 통행시간 모형은 임계속도를 정점으로 안정류와 불안정류 모형으로 구분된다. 안정류 경우는 t값을 0에서 임계속도에 해당되는 임계통행시간(t_m)까지 변화시키고, 불안정류 경우는

모형에 따라 t_m 값을 t_m 부터 교통류 모형에 따라 t_m 의 2배에서 3배까지 변화시켜 $f(t)$ 가 0이 되는 X , t 및 t_m 값들이 FORTRAN program을 이용하여 계산된다. 계산된 값들을 이용하여 안정류와 불안정류에 대한 통행시간 모형을 도출한다.

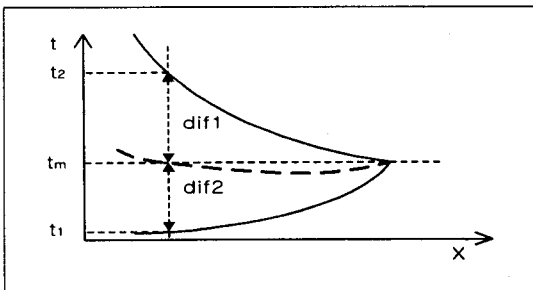
교통류 모형에서 도출된 통행시간함수는 t_m 과 $X(q/q_m)$ 의 함수로 나타나므로 t_m 과 q_m 의 함수를 유도하여야 한다.

2. 임계통행시간(t_m)모형

t_m 은 교통량이 용량상태에 있을 때 나타내는 속도에 의하여 결정되는 가로의 통행시간으로 <그림 3>과 같이 일정 X 값에서 안정류에서의 통행시간 t_1 로 하고 불안정류에서의 통행시간 t_2 로 하면 t_m 과 t_1 차이와 t_m 과 t_2 차이의 비(rt)는 t_m , t_1 및 t_2 의 관계로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. rt 와 X 의 관계는 X 에 따른 통행시간의 변화가 지수함수의 형상으로 나타내고 있으므로 t_m 의 관계식은 자수함수를 이용하여 식 (10)과 같이 유도될 수 있다.

$$rt = \frac{\text{diff1}}{\text{diff2}} = \frac{t_m - t_1}{t_2 - t_m} \quad (9)$$

$$t_m = t_2 - \frac{t_2 - t_1}{e^{a+bx} + 1} \quad (10)$$



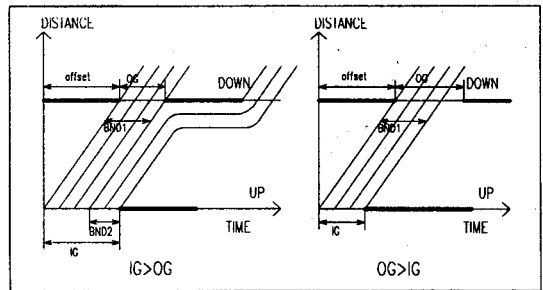
<그림 3> t_m 과 X 의 관계도

3. 연동가로 최대교통량 산정모형

신호교차로 및 간선도로 분석에 가장 보편적으로 사용되는 도로용량 편람¹⁾은 신호 교차로의 지체값

계산에 적용되는 연동보정계수(PF)의 값을 가로길이와 연동값에 따라 적용되고 있다. 여기서 PF값은 같은 가로 길이에서 연동값비가 커질수록 큰 값이 적용되는데 이것은 교차로 지체값을 크게 하고 궁극적으로 가로통과시간을 길게 하므로 가로의 통행시간은 가로길이 및 연동값에 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

연동체계로 운영되는 가로 통과 교통량(그림 4)와 같이 시간대폭에 따라 좌우되므로 상류부와 하류부의 작은 녹색시간을 연동대폭으로 결정하였습니다. 상류부와 하류부 녹색현시시간 중 작은 시간이 가로를 통과할 수 있는 시간대폭(BND1)으로 BND1이 커질수록 통과 교통량은 커진다. 또한 연동가로에서 가로의 길이가 길면 교차로에서 형성된 군집상태가 홀트려져 하류부 교차로 통과 교통량이 작아진다. 가로 통행시간은 가로를 연결하는 두 개의 교차로의 연동값에 의하여 결정되므로 하류부 녹색시간이 크면 유입교통량이 연동값에 의하여 결정되는 통행시간보다 여유 있게 통과할 수 있어 상류부에서 유입된 교통량은 주어진 연동값과 연동값+OG의 비(OFOGRT)에 따라 통과교통량이 영향을 받게 된다. OFOGRT가 크다는 것은 OG의 비율이 작아져 통과할 수 있는 교통량이 줄고, 반대로 OFOGRT가 작다는 것은 OG가 차지하는 비율이 커져 통과할 수 있는 교통량이 커지는 것을 의미한다.



<그림 4> IG와 OG에 따른 진행대폭 개념도

따라서 본 연구에서 적용되는 가로 최대교통량(q_m)은 가로 통행시간 예측에 적용되는 변수로서 연동으로 운영되는 두 개의 가로를 통과할 수 있는 교통량으로 상류부 및 하류부 녹색시간과 이에 따른 녹

색시간대폭, 연동값과 연동값+유출부 녹색시간의 비(OFOGRT) 및 가로길이의 함수로 식 (11)과 같이 나타내질 수 있다.

$$q_m = f(DIS, IG, OG, OFOGRT) \quad (11)$$

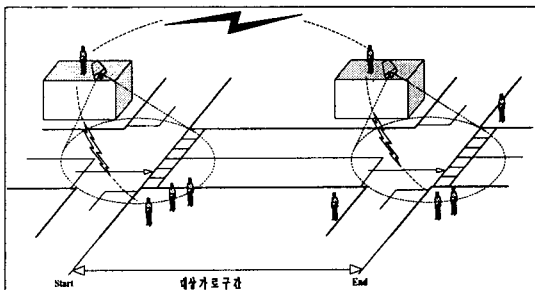
여기서,

- q_m : 연동가로 최대교통량
- DIS : 가로길이
- IG : 상류부 녹색시간
- OG : 하류부 녹색시간
- OFOGRT : 연동값/(연동값+OG)

IV. 자료수집

자료조사는 94년 6월에서 8월과 95년 8월에 오전 첨두시간 및 오후 첨두시간이 대구광역시를 대상으로 가로 상류부 신호교차로를 지나 횡단보도선(Start)부터 하류부 신호교차로를 포함하여 횡단보도선(End)까지를 가로 구간으로 결정하여 조사를 실시하였다.

차량의 통행속도 및 교통량을 수집하기 위한 자료수집 방법에는 시험차량 운행법(test car technique), 주행차량 이용법(moving vehicle method), 차량번호판 이용법 등 여러 가지가 있으나 시험차량이나 주행차량을 이용하는 방법은 운전행태에 따라 자료의 객관성이 떨어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 <그림 5>와 같이 인원, 장비 및 시간이 많이 필요로 하지만 거시적·미시적 분석이 가능하며 필요한 모든 정보를 얻을 수 있는 비디오카메라와 녹음기를 병행한 차량번호판 이용법을 사용하였다.



<그림 5> 조사방법 및 조사원의 위치

비디오 카메라는 가로에 유입되는 차량과 유출차량을 녹화하고 조사원들은 가로변에서 녹음기를 이용해 차량의 통과 순서대로 차량번호와 차종을 녹음하는 방법으로 진행되었다. 카메라는 교차로 전체를 충분히 촬영할 수 있도록 높은 건물의 옥상에 설치하였다. 유입부와 유출부의 거리가 200~900m로써 비교적 먼 거리였기 때문에 무전기를 이용해 조사원 상호간에 연락을 취하도록 하였으며 유입부와 유출부의 옥상에서 카메라를 담당하는 조사원이 각각 모든 진행을 통제하였다.

유입부와 유출부의 거리가 200~900m로 비교적 먼 거리였기 때문에 무전기를 이용해 조사원 상호간에 연락을 취하도록 하였으며 유입부와 유출부의 옥상에서 카메라를 담당하는 조사원이 각각 모든 진행을 통제하였다.

조사된 연동 가로구간은 총 17개구간으로 각 구간에 대한 신호조건 및 기하 조건은 <표 2>와 같이 가로 길이의 범위는 194m~866m로 대략 200m내외의 가로는 2개, 300m 내외의 가로는 6개, 500m내외의 가로는 4개, 600m 내외의 가로는 4개 그리고 700m 이상은 3개 가로로 나타났다. 신호주기는 140~160초로 나타났으며 상류부 및 하류부 교차로의 현시는 주로 4현시 체계이고 9번, 12번 가로는 2현시 체계로 운영되고 있었다. 차선의 구성은 2차선부터 5차선으로 구성되어 있으며 5차선 가로는 대동-대서로 1개구간이다. 자료수 각 교차로별로 평균 275개의 자료가 수집되었다.

V. 자료분석

연동가로구간의 통행시간 모형을 산출하기 위해서는 먼저 실제 가로구간에서 조사된 자료를 GM자동차 추종모형에서 유도된 5가지 교통류모형에 적용하여 대구광역시 가로에 가장 적합한 모형을 선정한다. 선정된 모형에서 유도된 통행시간 식에 조사된 자료를 적용하여 통행시간 모형을 도출한다.

1. 교통류모형 선정

연동가로는 대구광역시 17개 가로를 대상으로 자료

<표 2> 조사된 가로의 상류부 및 하류부 신호 및 기하조건

구분	상류부 교차로	하류부 교차로	자료수	구간 길이(m)	구간 차선수	상류부					주기	하류부					offset (초)
						현시1	현시2	현시3	현시4	현시1		현시2	현시3	현시4	주기		
1	수성전화국	약사회관	404	660	4	35	20	50	35	140	41	21	57	21	140	30	
2	약사회관	수성전화국	112	706	4	41	21	57	21	140	36	20	50	35	140	109	
3	달성	태평3가	273	582	3	50	34	27	29	140	53	31	27	29	140	40	
4	태평3가	대구역	186	639	3	53	31	27	29	140	28	63	21	28	140	43	
5	대구역	태평3가	218	637	3	63	21	28	28	140	53	31	27	29	140	67	
6	태평3가	달성	108	620	3	53	31	27	29	140	50	34	27	29	140	101	
7	중리	신흥산업	194	866	2	31	46	31	32	140	35	39	38	28	140	126	
8	건들바위	대봉	143	365	3	48	24	44	24	140	98	15	27		140	30	
9	서성	만경관	318	348	3	37	26	35	42	140	90	50			140	85	
10	의대	미문화원	237	194	3	32	28	49	31	140	50	24	24	42	140	10	
11	동본리	그린코아	92	366	4	42	38	39	21	140	83	38	19		140	20	
12	세강병원	그린코아	280	366	4	106	34			140	83	38	19		140	25	
13	비산	대영학원	186	568	3	39	39	29	33	140	90	25	25		140	10	
14	광명	서성	424	345	3	40	29	45	26	140	31	41	29	39	140	11	
15	대구은행 중동지점	동성학교	316	835	3	40	35	35	30	140	36	27	50	27	140	53	
16	대현과출소	경대서문	661	206	3	27	39	43	41	150	72	45	33		150	94	
17	봉산육거리	삼덕	523	306	5	64	43	37	16	160	40	50	35	35	160	160	

를 조사하고 분석한 결과, 가로 2, 7, 8, 11 및 16번 가로는 교통량이 포화상태를 넘지 않고 모두 제주기에 정지 없이 상류부 교차로를 통과하여 앞에서 언급한 CASE2를 형성하지 못하므로 안정류와 불안정류로 이루어진 교통류 모형에 적용될 수 없어 5개 가로를

제외한 12개 가로를 대상으로 교통류 모형을 분석하였다.

모든 가로를 5개의 교통류 모형에 적용한 결과는 <표 3>와 같이 모든 모형에서 R²가 비교적 높게 나타났으나 Greenberg모형이 다른 모형에 비해 가장 적합

<표 3> 가로별 교통류 모형에 대한 회귀분석결과 (R²)

가로	Greenshields	Greenberg	Underwood	Drew	Drake
1	0.9166	0.9600	0.9329	0.9454	0.8672
3	0.9517	0.9576	0.9431	0.9601	0.9086
4	0.8565	0.9083	0.8464	0.8912	0.7335
5	0.7970	0.8729	0.8454	0.8453	0.7210
6	0.8896	0.8994	0.8938	0.8994	0.8548
9	0.9080	0.9506	0.9203	0.9359	0.8380
10	0.7788	0.9421	0.9262	0.8689	0.7871
12	0.7954	0.9110	0.8112	0.8640	0.6405
13	0.9332	0.9504	0.9313	0.9482	0.8784
14	0.8794	0.9428	0.9067	0.9200	0.7893
15	0.9069	0.8836	0.9189	0.9053	0.8670
17	0.9793	0.9947	0.9897	0.9888	0.9644

한 모형으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Greenberg모형을 이용하여 통행시간 모형을 도출하였다.

2. 통행시간 모형

Greenberg모형에서 유도된 통행시간 함수는 부정방

정식으로 정할법에서 계산된 t, t_m 및 X(q/q_m)값을 적용하여 CASE1과 CASE2 상태에서 <표 4>와 같이 회귀분석을 실시하여 통행시간 모형을 도출하였다. 도출된 통행시간 모형은 임계통행시간과 교통량 대 용량의 비(X)의 함수로 이루어져 있으며 CASE1 및 CASE2에서 R²가 각각 0.9838 및 0.9978로 높게 나타났다.

<표 4> Greenberg모형의 통행시간 함수 및 모형

통행시간 함수	통행시간 모형	
	CASE1	CASE2
$\frac{x}{t_m} \cdot \ln t \cdot t - t + t_m = 0$	$t = t_m \cdot e^{(-1.728+1.461x)}$	$t = t_m \cdot e^{(2.733-2.50x)}$
R ²	0.9838	0.9978

3. 연동가로 최대교통량 모형

도심의 연동가로는 상류부와 하류부 결정점이 신호교차로인 가로로서 상류부 및 하류부 신호교차로의 녹색시간, 연동값, 신호주기, 진행대폭 및 가로길이에 따라 가로 통과시간이 다르게 나타난다. 그러나 분석 대상 가로 중 1개 가로를 제외하고 모두 주기가 140초로 용량모형에 주기를 변수로 하는 것은 타당하지 않다고 판단되어 신호 시간에 대한 변수는 신호주기로 나눈 비를 변수로 하여 분석하였습니다.

가로 최대교통량 산정을 위한 모형을 도출하기 위하여 교통류모형에서 제공된 최대교통량을 독립변수로 하고 수집된 신호 및 기하조건을 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다. 분석 결과는 <표 5>와 같이 R²가 0.9410으로 높게 나타났으며 본 연구에서 제시한 용량모형은 식 (12)와 같이 나타났다. 본 연구에서 도출된 모형은 매우 제한적인 실측자료에서 도출된 모형으로 본 모형의 적용 가능한 범위는 가로의 길이(DIS)는 200m에서 800m, BNDRT1은 0.22에서 0.59를 모두 만족시키는 범위에서 적용 가능한 것으로 나타났다.

<표 5> 가로용량 모형의 회귀분석 결과

Variable	Parameter Estimate	T for H0 : Parameter=0	Prob > T
INTERCEPT	-1589.6	-25.707	0.0001
DIS	-0.47	-20.829	0.0001
DBNDRT1	-18775	-33.610	0.0001
BNDRT1	14363	37.158	0.0001
BNDRT2	2048.7	13.449	0.0001
OFOGRT	-229.15	-9.317	0.0001
R ²		0.9410	

$$q_m = -1589.6 - 0.47 * DIS - 18775 * DBNDRT1 + 14363 * BNDRT1 + 2048.7 * BNDRT2 - 229.15 * OFOGRT$$

(R² = 0.9410) (12)

(단, 200 ≤ DIS ≤ 800, 0.22 ≤ BNDRT1 ≤ 0.59)

- BNDRT1 : BND1/CY
- BND1 : MIN[IG,OG]
- BNDRT2 : (IG-BND1)/CY(초)
- OFOGRT : 연동값/(연동값+OG)
- CY : 신호주기(초)
- DIS : 가로거리 (m)
- DBNDRT1 : BNDRT1*BNDRT1

여기서,

q_m : 가로최대교통량(대/시/차선)

4. 임계통행시간(t_m)모형

Greenberg 모형에서 유도된 통행시간함수에서 정할 법을 이용하여 도출된 t_m 에 따른 t 값 및 X 값은 t 가 t_m 보다 작은 값은 제주기에 정지 없이 통과한 차량(CASE1)의 통행시간으로 t_1 이라 하고 t 가 t_m 보다 큰 값은 하류부 교차로에서 정지하였다가 통과한 차량(CASE2)의 통행시간을 t_2 라 정의한다. <그림 2>에서와 같이 t_m 과 t_1 의 차이와 t_2 와 t_m 의 차이에 대한 비율과 교통량 대 용량 비(X)의 변화를 회귀분석을 실시한 결과 식 (13)과 같다.

$$\ln\left(\frac{t_m - t_1}{t_2 - t_m}\right) = -2.92 + 2.56x \quad (R^2 = 0.9927) \quad (13)$$

식 (13)은 t_m 의 관계식인 식 (14)와 같이 변환 될 수 있다.

$$t_m = \left[t_2 - \frac{t_2 - t_1}{e^{-2.92+2.56x} + 1} \right] \quad (14)$$

안정류상태의 가로에서 t_1 은 연동값으로 하고 불안

정류에서의 t_2 는 제주기에 통과하지 못하고 다음 주기에 통과한 차량의 통행시간으로 t_1 에 신호주기에 IG와 OG의 최소값의 차를 합한 값으로 나타낼 수 있으므로 각 가로에서 조사된 신호조건을 식 (14)에 적용하여 회귀분석을 실시한 결과 식 (15)와 같이 도출되었다.

$$t_m = 1.325 * \left[t_2 - \frac{t_2 - t_1}{e^{-2.92+2.56x} + 1} \right] \quad (R^2 = 0.9586) \quad (15)$$

여기서,

t_1 : 연동값

t_2 : 연동값+CY-BND1

5. 가로통행시간 모형

본 연구에서 도출된 통행시간 모형은 임계통행시간(t_m)과 가로 교통량 대 최대교통량(q/q_m)의 함수로 이루어지고, t_m 값 및 연동가로의 최대교통량(q_m)을 예측하기 위한 모형이 도출되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 연동가로의 통행시간 모형은 <표 7>과 같다.

<표 7> 연동가로의 통행시간 모형

	CASE1	CASE2
통행시간 모형	$t = t_m \cdot e^{(-1.728+1.461x)}$	$t = t_m \cdot e^{(2.73-2.50x)}$

여기서,

$$t_m = 1.325 * \left[t_2 - \frac{t_2 - t_1}{e^{-2.92+2.56x} + 1} \right] \quad (\text{초})$$

$$q_m = -1589.6 - 0.47 * DIS - 18775 * DBNDRT1 + 14363 * BNDRT1 + 2048.7 * BNDRT2 - 229.15 * OFOGRT$$

(단, $200 \leq DIS \leq 800, 0.22 \leq BNDRT1 \leq 0.59$)

- X : q/q_m
- q : 가로교통량(대/시/차선)
- q_m : 가로최대교통량(대/시/차선)
- BNDRT1 : BND1/CY
- BND1 : MIN[IG,OG]
- BNDRT2 : (IG-BND1)/CY(초)
- FOGRT : 연동값/(연동값+OG)

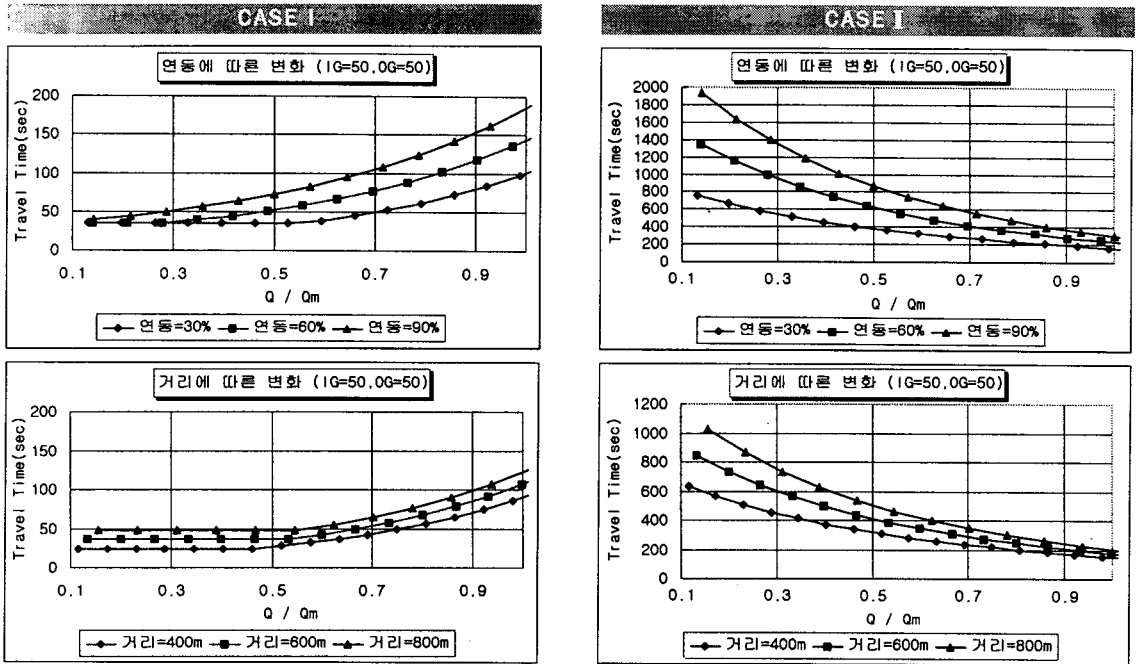
- CY : 신호주기(초)
- DIS : 가로거리(m)
- DBNDRT1 : BNDRT1*BNDRT1
- t_1 : 연동값
- t_2 : 연동값+CY-BND1

6. 변수들의 민감도 분석

본 연구에서 제시한 연동가로의 통행시간모형은 Greenberg 교통류 모형에서 유도된 모형으로 가로의 신호 및 기하조건과 교통량의 함수로 이루어졌다. 통행시간 모형에서 적용된 변수들에 따른 교통량/가로 최대교통량 비에 따른 통행시간 관계는 <그림 6>과 같이 일정한 IG와 OG에서 CASE1 및 CASE2의 경우 연동/신호주기의 비가 커질수록 통행시간이 커지

는 것으로 나타났다. 가로 길이에 따른 통행시간의 변화는 IG와 OG가 일정하면 가로 길이가 길수록 통행시간이 길어지는 것으로 나타났으며 가로 길이에

따른 통행시간 차이는 CASE1이 CASE2보다 크게 나타났다.



〈그림 6〉 변수들에 따른 통행시간의 관계도

VI. 결론

가로의 통행시간은 교통계획에서 운전자의 경로선택에 주요한 요소이며 일반적으로 교통배분과정에서 중요한 변수의 하나로 적용되고 있다. 교통계획에서 적용되는 가로통행시간 모형들은 하류부 교차로 용량과 가로 운영특성 및 주변상황에 따라 적용될 수 있는 계수값의 함수로 이루어져있다. 그러나 대도시 가로망의 대부분은 신호교차로를 포함한 가로로 구성되어 있으며 운영방식에 따라 교통흐름의 연속성을 유지할 수 있는 연동 운영방식과 독립교차로 운영방식에 따라 가로의 통행시간은 현저한 차이를 나타내고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 대도시 가로망에서 신호연동체로 운영되는 가로의 통행시간 추정을 위하여 교통류 모형을 이용하여 신호교차로의 지체를 계산하

지 않고 통행시간을 예측할 수 있는 통행시간 추정 모형을 개발하는데 있다.

본 연구는 대구광역시 가로망을 대상으로 연동가로의 교통흐름을 가장 잘 나타내는 Greenberg모형을 이용하여 연동가로의 통행시간 모형을 도출하였다. 연동가로의 통행시간 모형은 임계통행시간(t_m)과 가로교통량 대 가로 최대교통량비(q/q_m)의 함수로 이루어졌다.

t_m 모형은 안정류상태의 통행시간 및 불안정류상태의 통행시간의 비를 이용하여 도출하였고 가로의 용량모형은 상류부와 하류부의 신호조건에 따른 변수와 가로길이를 변수로 하는 모형을 도출하였다. 도출된 모형은 대구광역시를 대상으로 조사한 12개의 연동가로에 잘 적용되는 가로구간의 통행시간 추정모형으로 도로용량에 제시한 모형에 비하여 적은 자료와 분석시간으로 통행시간을 추정할 수 있으며 교통계획에

적용되는 통행시간모형에 비하여 가로의 신호조건을 포함한 세부적인 통행시간 모형이라 할 수 있다.

본 연구에서 제시된 통행시간 모형은 제한된 자료에 의하여 도출된 모형으로 적용 범위를 두어야 하는 단점이 있으므로 모형의 일반화를 위한 연구와 가로망에 적용하여 교통운영의 최단경로 선택에 정보를 제공할 수 있는 연구가 향후과제로서 고려되어야 겠다.

참고문헌

1. 건설부, 도로용량편람, 1992.
2. Akcelik, R., "A new look at Davidson's travel time function," Traffic Engineering & Control, October, 1978.
3. 김대웅, 정웅기, 김인동, "도로교통분배에 있어서 Q-V관계식에 관한 연구, 1992년 학술발표회 개요집(II), 대한토목학회, 1992.
4. 이인원, 정관희, "Stochastic Dynamic Assignment 모형의 개발과 활용", 대한교통학회지 제11권 제1호, 1993, pp.67~86.
5. 정웅기, 가로교통분배에 있어서 Q-V관계변화에 관한 연구, 영남대학교 대학원도시공학과, 석사학위 논문, 1992. 12.
6. 旅行時間の設定に關する研究報告書(Ⅱ),(財)高速道路調査會,昭和54年3月, pp.1~10.
7. 星野 和 : "道路交通量と走行速度の調査及び兩者の相互關係について,第6回 日本道路會議論文集, 1961.
8. 岩瀬晃省,浦野 隆 : "地點データによる速度と密度との相互關係の統計的性質", 交通工學, 第17卷3號, 1982, pp.3~10.
9. 臟田他3名 : "一般道路における旅行速度推定"土木研究所資料, 第1608號, 設省土木研究所, 昭和55年8月, pp.4~6.
10. Highway Capacity Manual, TRR Special Report 209, TRB, 1985.
11. Prigogine and Herman, Kinetic Theory of Vehicular Traffic, American Elsevier, New York, 1971.
12. Herman, R., Prigogine, I., "A Two-Flow Approach to Town traffic," Traffic Science, Vol. 204, 1979, pp.148~151.
13. Williams, J.C., Mahamssani,H.S., Herman, R., "Urban Traffic Network Flow Models," TRR 1112, pp.78~88, 1987.
14. S. Ardekani and Herman, "Urban Network-wide Variables and Their Relations", Transportation Science, Vol. 21, No.1, 1987.
15. Greenshields, A Study of Traffic Capacity, Proc. Highway Research Board, 14:448-477, 1934.
16. Traffic Flow Theory, Special Report 165, TRB, National Research Council, 1975.
17. May, A. D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice-hall, Inc., 1990.
18. 정상권, 하성남, 수치해석, 경문사, 1994.
19. Lornax, Turner, Shunk, Levinson, Pratt, Bay, and Dougl, Quantifying Congestion, Final Paper(Draft), 1995.