

■ 論 文 ■

道路類型別 遲滯函數 定立에 관한 연구

도로유형별 지체함수 개발

Development of Classified Congestion Functions

강 호 익

(제일건설교통연구원 원장)

박 창 호

(서울대학교 도시공학과 교수)

목 차

I. 서론

1. 연구목적
2. 연구범위
3. 연구방법

II. 지체함수의 모형화

1. 이론적 배경
2. 지체함수의 분석
3. 지체함수의 적용성

III. 지체함수 정립을 위한 교통특성 자료의 분석

1. 교통 특성과 지체함수
2. 교통특성 자료 정리

3. 교통용량 분석

4. 교통량-속도 관계 분석

IV. 도로유형별 지체함수의 정립

1. 도로유형의 분류
2. 지체함수의 선택
3. 지체함수의 정산
4. 결과의 분석
5. 기존연구와의 비교 분석

V. 결론

참고문헌

연구의 중요성

지체함수(遲滯函數)는 교통량과 속도의 관계를 單調 增加函數로 단순화하여 교통수요예측의 교통배정모형에 사용되게 된다. 이 지체함수를 구하는 방법은 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫째는 교통배정을 통해 구해지는 추정 링크통행량과 실측 교통량을 비교해 가면서 정산하는 방법이고, 둘째는 교통량-속도 관계로부터 직접 구하는 방법이다. 첫째 방법은 구해진 O/D 통행량표의 부정확성과 모형에 내재하는 오류가 이 지체함수에 포함될 가능성이 매우 높은 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 교통량-속도 관계로부터 직접 도로유형별 지체함수를 구하여 교통배정에 적용하는 새로운 방법을 정립하였다. 교통망 전체에 대하여 단일 지체함수를 적용하는 기존의 방법은, 교통량 변화에 따른 통행시간의 변화가 보다 鈍感한 고급도로에 상대적으로 적은 교통량이 배정될 수밖에 없었다.

분석결과, 교통량 증가에 따른 속도 변화는 고급도로일수록 鈍感하게 나타나며, 교통배정에 도로유형별 지체함수를 적용할 경우 단일 지체함수 적용시에 비하여 고급도로에 더 많은 교통량이 배정되게 된다.

본 연구의 결과, 교통망상에서 보다 현실적인 도로유형별 분담을 이룰 수 있는 방안이 정립됨으로써, 지금까지 교통배정에 있어 상대적으로 과소평가되어 왔던 고속도로등 고급도로의 실제 타당성을 반영할 수 있게 되어 도로의 기능적 位階構造가 확립된 효율적인 교통망을 구성할 수 있는 계기를 마련한 것으로 판단된다.

배정

I. 서론

1. 연구목적

교통계획 과정 중 교통배정 단계는 교통시설 대안 분석의 기초 자료인 링크별 통행량이 산출되므로 가장 중요한 단계이다. 교통배정 모형의 정확도를 제고하는 것이 전체 교통 계획의 정확도에 미치는 영향이 크기 때문이다. 한국적인 속도, 통행시간 특성을 고려하고 통행비용에 대한 이용자의 인식에 기초하는 노선 선택 행태를 정확하게 모형화 하여, 적절한 교통망 구성이 가능하게 하려면 우리 실정에 맞는 지체함수의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 교통배정모형에서 사용되는 지체함수들 중 현실에 적합하게 수정이 가능한 모형을 선정하여, 교통량-속도 관계로부터 도로유형별 지체함수를 도출하는데 그 1차 목적이 있으며, 각 링크별로 相異한 지체함수를 적용하여 배정하는 새로운 방법을 講究함으로써 보다 현실적인 도로유형별 분담이 이루어 질 수 있도록 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 연구범위

본 연구는 각급 도로에 설치된 교통관리 시스템 또는 차량감지기를 통하여 측정된 교통량, 속도, 점유율 등을 1차 자료로 하여, 우리나라 각급 도로에서의 교통량-속도 관계를 분석한다. 각 링크 별로 相異한 지체함수를 적용하는 새로운 방법을 講究하고 기존의 방법, 즉 단일 지체함수를 적용할 때와 비교 분석한다.

본 연구에서는 링크별 기능적 특성을 최대한 반영하기 위하여 도로의 구조, 시설 기준에서 규정한 소재 지역과 기능에 따른 구분을 적용하였다.

본 연구의 공간적범위는 거시적 측면(전국)과 미시적 측면(링크별)으로 대별하여 접근이 가능하나 본 연구에서는 교통류의 교통량-속도 관계를 미시적으로 분석하여 그 특성을 종합하여 도로유형별로 나타내는데 중점을 두었다.

궁극적으로 우리나라 실정에 맞는 통행배정 모형의 개 검증 또는 개선을 위하여 교통행태를 적절히 반영할 수 있는 지체함수의 합리적인 수정 또는 새로

운 제시를 내용적 범위로 한다.

3. 연구방법

교통배정은 교통의 공급과 수요 두 가지 측면의 요소를 포함한다. 교통 공급측면에서는 교통량의 변화에 따른 링크별 통행비용의 변화를 어떻게 반영하는가의 문제이며, 수요측면에서는 이용자의 노선선택은 합리적이라고 假定하는 것이다.

본 연구에서는 교통 공급 측면에서의 요소를 검토하는 것이며 특정한 도로, 교통 상황에 맞도록 지체함수를 수정 또는 산정하는 방안을 모색한다.

지체함수는 수리함수 방법과 이론적 함수 방법으로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 수리 함수 방법 중에서 가장 보편적으로 많이 사용되며, 실 상황을 반영하여 수정이 용이한 BPR식을 분석에 사용하고자 한다.

고정식 교통량 조사 장비를 통하여 수집한 교통류 자료를 이용하여 교통량-속도 관계를 정성적으로 분석하고 우리나라 도로, 교통 실정에 적합한 모형에 적용하여 정량적으로 평가한다.

II. 지체함수의 모형화

1. 이론적 배경

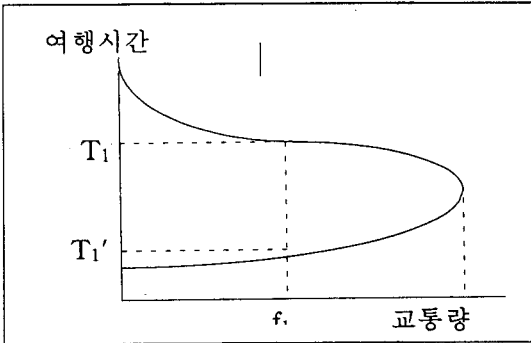
일반적으로 교통량이 臨界密度에 이를 때까지 계속 증가하면 도로저항 증가에 따라 속도는 감소한다. 이 臨界密度를 넘어서면 교통량과 속도 모두 감소하고 통행시간은 늘어나게 된다. 이러한 교통량과 통행시간의 관계를 나타낸 것을 지체함수(Congestion function, Link performance function, Capacity function, etc)라 한다. 교통배정에서 지체함수가 중요한 이유는 교통량 증가에 따른 통행시간 변화를 나타내기 때문에 정확한 지체함수 없이는 이용자의 통행시간 또는 통행비용에 근거한 이용자의 노선 선택 양상을 정확히 모형화할 수 없기 때문이다.

이론상의 지체함수는 <그림 1>과 같은데 특정 교통량에 각기 다른 두 개의 통행시간을 갖게 되므로 이를 그대로 모형화에 사용하기에는 문제가 있다. 즉 수리모

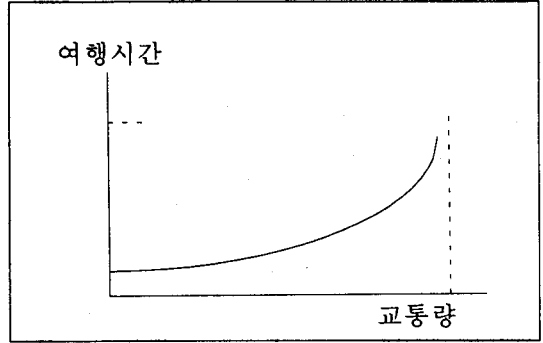
형으로 표시된 교통배정 모형을 사용하기 위해서는 단조증가 함수 형태로 된 지체함수를 사용하여야 單一解를 찾을 수 있다¹⁾. 따라서 대부분의 연구에서는 용량

보다 큰 교통량에 대해서는 <그림 2>와 같이 지체함수를 이론적으로 확장한 단조증가함수²⁾를 사용한다.

Wardrop의 제1원리에 따른 Beckmann³⁾의 평형배



<그림 1> 理論的인 遲滯函數



<그림 2> 單調增加 遲滯函數

정 수리모형을 사용하기 위하여는 지체함수는 다음과 같은 필요 조건을 충족시켜야 한다.

첫째, 單一解를 구할 수 있도록 지체함수는 음수가 아니어야 하며 單調增加 함수이어야 한다. 둘째, 함수가 연속적이어야 하며 미분이 가능하여야 한다. 셋째, 함수 계산이 쉬워야 한다.

2. 지체함수의 분석

지체함수는 정의하는 방법에 따라 수리함수방법(Mathematical function approach)과 이론적 함수방법(Theoretical approach)으로 구분할 수 있다.

수리함수방법은 관측된 자료를 반영할 수 있는 간단한 수리함수를 사용하여 링크상의 차량지체를 나타내는데 함수의 단순한 형태 때문에 노선망 또는 가로특성을 제대로 반영할 수 없는 단점이 있다. 이론적 함수 방법은 대기행렬이론(Queuing theory)에 근거하여 신호간격, 신호주기같은 도로의 특성이 잘 반영될 수 있으나 수리함수 방법보다 복잡해 질 가능성이 있다.

지금까지 여러 가지 지체함수가 제안되고 사용되어 왔으나 특정 도로구간에 대하여 사용할 지체함수의 형태에 대해서는 일치된 견해가 없다. 그러나 지체함수란 링크에서의 통행량과 통행시간의 관계를 규명하는 식으로 상이한 링크, 차량, 운전자 특성을 반영하기 위하여는 각기 다른 파라메터가 주어져야 한다.

1) 외국의 지체함수 연구

수리함수와 이론적함수로 구분하여 대표적인 외국의 지체함수 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

● 수리함수

(1) Irwin, Dodd와 Von Cube (1961)⁴⁾는 다음과 같은 두 개의 직선식함수를 제안하였다.

$$T = T_a + \alpha(Q' - C_p') \text{ for } Q' < C_p'$$

$$T = T_a + \beta(Q' - C_p') \text{ for } Q' \geq C_p' \quad \text{단, } T_a = T_0 + \alpha C_p'$$

위의 식과 본 절에 나오는 다음 약자의 의미는 아래와 같다.

- Q : 교통량
- T : 교통량이 Q일 때 통행시간
- T₀ : 교통량이 없을 때의 통행시간
- C : 최대용량
- C_p : Practical capacity(서비스 수준 C일 때)
- α, β : 변수
- Q' : 차선당 교통량
- C_p' : 차선당 Practical capacity

이 함수는 다시 Irwin, Von Cube(1962)에 의해 세 개의 직선식으로 발전되었다.

$$T = T_a + \alpha(Q' - C_p') \text{ for } Q' < C_p'$$

$$T = T_a + \beta(Q' - C_p') \text{ for } C_p' \leq Q' \leq C'$$

$$T = T_b + \gamma(Q' - C_p') \text{ for } Q' < C_s'$$

단 $T_a = T_0 + \alpha C_p'$
 $T_b = T_0 + \beta(C' - C_p')$
 C' : 서비스수준 E 용량

이 지체함수를 사용한 결과 실측자료와 추정자료 값이 근사하게 부합되었다. 그러나 이 함수는 C_p' 및 C' 에서 함수가 비연속이기 때문에 수리모형 교통배정에는 사용할 수 없다.

(2) Smock은 1962년 DATS(Detroit Area Transportation Study)에 사용하기 위해 다음과 같은 지수형식⁵⁾을 개발하였다.

$$T = T_0 \exp(Q/C_c)$$

$$T \leq 5T_0$$

적용에 있어 Smock은 각 링크의 용량을 추정하는데 링크의 종점에 있는 교차로의 용량을 평균하여 산출하였다. Smock은 관측치와 비교하여 이 함수의 적합성을 제시하지는 않았다. 그러나 그는 Michigan의 Flint시 조사에서 반복배정 기법에 이 함수를 적용하였는데 전량 배정기법을 적용할 때보다 용량을 초과하여 배정되는 통행량이 상당히 적었다고 보고하였다.

(3) Mosher⁶⁾는 1963년 다음과 같은 log함수를 제안하였다.

$$T = T_0 + \ln(\alpha) - \ln(\alpha - Q)$$

단 $Q \leq \alpha$

(4) BPR식

현재 가장 많이 사용되는 식으로 미국의 공로국(Bureau of Public Roads)에서²⁾ 1964년에 개발한 식으로 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$T = T_0(1 + \alpha(Q/C_p)^\beta)$$

C_p : LOS C에서의 용량(Practical Capacity)

: 0.75 × 가능용량 (LOS E에서의 용량)
 파라미터 α, β 는 통상 0.15, 4를 사용한다.

(5) 영국교통부(DOT, UK)⁷⁾에서는 1985년 교통량 수준에 따라 다음과 같이 3단계로 시간-교통량관계를 제시하고 있다.

$$T = d/S_0 \quad V < F_1$$

$$T = d/S(V) = \frac{d}{S_0 + SS_{01} F_1 - SS_{01} V} \quad F_1 \leq V \leq F_2$$

$$T = d/S_1 + (V/F_2 - 1)/8 \quad V > F_2$$

(6) 이외에 Soltman⁸⁾, Overgaard(1967)⁹⁾, Traffic Research Corporation¹⁰⁾, Dafermos¹¹⁾, Steenbrink¹²⁾에 의해 수리함수식이 제안되었다.

● 이론적 함수

(1) Campbell, Keefer와 Adams¹³⁾는 현재 CATS함수라고 알려져 있는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$T = T_0 \text{ for } \leq 0.6 \frac{Q}{C}$$

$$T = T_0 + \alpha \left(\frac{Q}{C} - 0.6 \right) \text{ for } \frac{Q}{C} > 0.6$$

(2) Davidson¹⁴⁾은 1966년 다음과 같은 지체함수를 제안하였다. 이 식은 대기행렬 이론에 입각한 준 이론적 함수에 속한다.

$$T = T_0(1+J) \frac{C}{C-I}$$

$$T = Q/S$$

(3) Wardrop¹⁵⁾은 노선망의 전체 통행속도와 교통량과의 관계를 표시하는 지체함수를 개발하였다.

$$T = \frac{T_0}{(1 - \gamma Q)} + \frac{\alpha \beta}{(\alpha - Q)D}$$

D : 도로연장

2) 국내의 지체함수 연구

우리나라에서 체계적인 교통 계획이 시작된 것은

1970년대초 세계은행(IBRD)과 아시아개발은행(ADB) 등으로 부터 도로개발 및 교통 개선사업을 위한 차관을 도입하면서 부터였다. 차관도입 초기에는 국내의 교통 자료가 빈약하였을 뿐만 아니라 여러 선진국의 용역단이 기본계획 및 설계에 참여하므로써 여러 가지 함수와 파라미터를 사업에 따라 각기 다르게 적용하였다. 70년대 후반부터는 우리나라 연구기관과 용역단이 직접 교통계획에 참여함에 따라 BPR식이 가장 널리 사용되었는데 이 함수의 파라미터 α, β 의 적합성에 대한 별다른 검증 없이 사실상의 표준 지체함수처럼 사용되어 왔다. 이후 80년대 중반에 들어 젊은 교통학도들 사이에 함수의 적합성과 파라미터를 검증하려는 시도가 있어 왔다.

(1) 이의은(1986)¹⁶⁾은 부산-울산간 국도와 지방도를 분석대상으로 BPR식의 파라미터를 도출하였는데 $\alpha=0.3, \beta=2$ 에서 통행의 실상황을 잘 모사하는 것으로 제시하였다.

(2) 최기주(1986)¹⁷⁾는 서울의 신시가진인 영동지역을 대상으로 BPR, Smock과 Davidson 함수의 적합도를 검증하였는데 도시부 가로에서는 Davidson식이 우수하며, 이때 파라미터 J값이 0.09임을 제시하였다.

(3) 서선덕, 박창호와 김창호(1990)¹⁸⁾는 전국적인 교통망의 O-D표를 사용하여 Bilevel Programming모형을 통하여 BPR지체함수의 파라미터를 도출하였다. 서비스 수준 D일 때 $\alpha=2.72, \beta=6$ 이 우리나라의 도로망에 가장 적합한 값이라고 제시하였다.

(4) 주정열(1993)¹⁹⁾은 BPR식이 전반적으로 모든 도로에서 통행행태를 잘 모사하는 것으로 분석하고 있으며, 지역간 도로에서는 $\alpha=2.04, \beta=1.99$, 도시내 도로에서는 $\alpha=2.0, \beta=3.04$ 를 파라미터 값으로 제시하였다.

(5) 장덕형(1993)²⁰⁾은 1971년부터 1991년까지 21년간의 고속도로 O-D자료를 사용하여 고속도로에서의 BPR식의 파라미터를 검증하였는데 서비스수준에 따라 다음 표와 같다.

초기값 범위	기준용량	산출결과	
$0 < \alpha \leq 1$	LOS C	$\alpha=0.17$	$\beta=1.5$
$0 < \beta \leq 10$	LOS D	$\alpha=0.37$	$\beta=2.3$
	LOS E	$\alpha=0.58$	$\beta=2.4$

이상의 연구 결과들은 첫째, 도로용량 산정에 있어 장덕형 외에는 미국판 HCM을 기초로 하고 있고, 둘째,

시간적, 공간적 범위가 서로 다르고, 셋째, 사용한 교통량 자료의 일부에 대한 신뢰도에 문제가 있어 그대로 활용하기에는 제약이 따르는 것으로 판단된다.

3. 지체함수의 적용성

Benson과 Cunagin²¹⁾은 용량제약 배정법의 각 반복과정 중간에 용량이상 또는 용량 이하의 모든 링크에 적용할 수 있는 각종 지체함수의 실행 효과에 대하여 조사하였다. 그들은 현재 사용하는 지체함수들은 유사하며 특히 BPR 함수가 가장 적합하다고 결론지었다.

지체함수의 개발과 관련하여 교통배정 과정에서 속도-교통량 관계의 적용에 두가지 문제점이 나타나는데, 첫째는 가장 심각한 교통류상의 문제는 실제로 상당히 짧은 시간 동안에 발생하며, 둘째는 배정과정에서 용량을 훨씬 초과하여 배분하더라도 실제 관측치는 최대 용량 수준에 그친다는 것이다.

문헌 조사 결과, 네트워크에 맞는 적절한 지체함수를 정의하는 것이 매우 중요한 문제임에도 간과하려는 경향이 있는 것을 알 수 있었다.

이런 경향은 일부는 자료 수집의 어려움에 기인하며, 일부는 대부분의 관계 정보가 출판되지 않은데 있는 것으로 생각된다. 교통배정된 결과에 대한 지체함수의 상대적인 중요성에 관하여 아직 일치된 견해는 없는 것 같다.

III. 지체함수 정립을 위한 교통특성자료의 분석

1. 교통특성과 지체함수

1) 교통특성과 도로기능

교통계획을 수립하기 위해서는 먼저 장래의 교통수요를 추정하지 않으면 안 된다. 교통수요는 교통서비스나 교통시설등 교통체계를 이용하는 규모 또는 정도라고 정의할 수 있으며, 일반적으로 통행량으로 나타낸다.

도로의 기하구조설계란 눈에 보이는 도로구조를 설계하는 것으로서 지형과 토지 이용계획 및 도로이

용자의 요구에 부응해야 한다. 이는 縱斷 및 橫斷面, 曲線, 視距 등 차도를 대상으로 하기 때문에 교통류 특성과 직접적인 연관을 갖는다. 즉 교통시설은 교통 운영에 결정적인 영향을 미치므로 교통상황에 맞는 도로를 건설하는 것이 바람직하다.

도로의 노선계획이나 설계는 교통량 및 교통구성, 설계차량, 설계속도, 운전자와 보행자특성 등과 같은 교통조건에 지배를 받으며, 건설하고자 하는 도로의 계획 서비스수준이나 출입제한 여부 등 설계지배요소에 영향을 받는다. 특히 교통의 구성과 교통량, 속도 등이 중요한 의미를 갖는다.

2) 교통류 분석 경향

교통류 변수의 상호관계에 대하여 지금까지 발표된 연구 결과에 대하여 최근 일단의 연구자들이 많은 재검토 결과를 내놓고 있다.

(1) 속도-교통량 관계

- ① 최근에 올수록 교통량 증가에 따른 속도 감소율이 줄어들고 있다고 분석되었다. Hall 등의 종합 검토 결과는 1990년에는 용량의 75%까지 일정 속도를 유지한다고 본다
- ② 이 속도 감소분에 대해서는 연구자들이 서로 다른 연구 결과를 발표하였다. 다음 <그림 3>의 S_f (자유속도)에 비하여 HCM은 8kph, Hurdle과 Datta²²⁾는 1983년의 연구에서는 20%, Persaud와 Hurdle²³⁾은 1988년의 연구에서는 25%, Banks²⁴⁾는 10%이다.
- ③ 두 가지 용량이 존재하는데 하나는 대기행렬이 생기기 전에 발견되고 두 번째는 대기행렬에서 풀려날 때(Queue Discharge Flow)의 용량인데 약 40% 차이 난다.
일반적인 형태는 <그림 3>과 같다.
- ④ 정체시에는 용량을 거치지 않고 용량보다 작은 교통량에서 바로 정체영역으로 전이하며 이때 속도의 급격한 변화가 생기고 교통량은 별로 줄어들지 않는다.

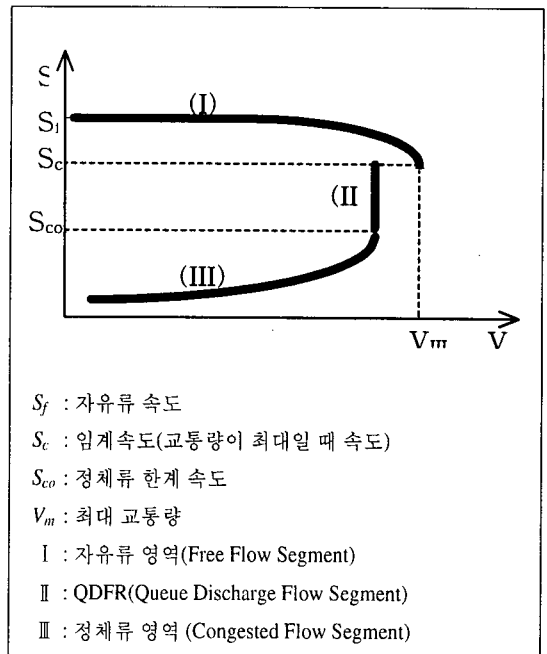
(2) 교통류 분석의 전망

May²⁵⁾는 과거 HCM 등에 언급되어 있던 용량, 속도-교통량 상관관계를 검토하고 미래의 변화 양상을

전망하였다. 1994년판 미국 HCM에 나타난 변화는 이전에 비해 두 가지 특기할 만한 것이 있다.

첫째, 용량이 2000pcphpl 에서 2200pcphpl로 10% 증가한 것이며 이는 차량 성능 및 운전자의 운전능력 향상에 의한 것으로 생각된다. 둘째, 속도-교통량 곡선의 윗부분 형태와 다영역 관계의 인식이다.

현재 2000년도판 HCM 작성을 위한 NCHRP Project 3-45가 진행중인데 3영역의 관계가 가설로서 검증되고 있는 상태이다.



<그림 3> 속도-교통량의 일반적 관계

<그림 3>에서, 첫 번째 영역(Segment 1)은 속도 변화가 약 1400pcphpl 까지 수평하게 진행되며 용량에 달할 때까지 속도가 약 8~16kph 감소되는 것이다. 용량은 상류에 정체가 존재하는 병목 지점에서 관찰할 수 있으며 전체적으로 속도 감소가 작아 밀도나 교통량/용량(V/C)비를 서비스 수준의 척도로 사용하는 것이 더욱 타당하게 된다.

두 번째 영역은 용량 근처에서 거의 수직적 형태를 보이는데 속도 구간은 80~48kph 이며, 이 구간에서 밀도(% 점유율)는 거의 28~44/km/lane 의 변화를 보인다. 세 번째 영역은 정체영역으로 아직까지 별로 알려진 것이 없다.

앞으로의 변화 추세는 차량성능과 운전 능력의 향상, 차량 내 운행 장치의 고도화에 따라 용량이 2400pcphpl까지 증가할 것이며 수평 관계가 더욱 뚜렷해 질 것으로 전망된다.

3) 교통배정에서의 지체함수

교통배정이란 전통적 4단계 교통계획기법의 마지막 단계이며 4단계 추정법은 현재 교통 여건을 지배하고 있는 교통체계의 구조가 장래에도 크게 변하지 않는다는 기본적인 가정을 기초로 하고 있다. 따라서 4단계 추정법은 각 단계별로 도출되는 분석 결과에 대한 적절성을 검증하면서 순서적으로 추정해 가는 장점을 지니고 있다.

반면 약점으로는, 첫째 일정한 시점을 기초로 하여 구한 자료로서 모형화한 어느 시점의 고정적인 모형이므로 장래를 추정하는 데 경직성을 드러낸다. 둘째, 어느 시점의 자료를 토대로 4단계의 과정을 별개로 거치게 되므로 각 단계를 거치는 동안 계획가의 주관이 강하게 반영될 여지가 있다. 셋째, 총체적 자료에 의존하기 때문에 통행자의 총체적, 평균적 특성만 반영되고 행태적 측면은 거의 무시된다.

속도 또는 통행시간은 어떤 도로나 도로망의 운영 성능을 나타내는 대표적인 지표이다. 일반적으로 교통량이 증가함에 따라 통행저항, 즉 통행밀도나 통행시간이 증가하게 되는데, 이러한 교통량과 통행저항과의 관계를 나타내는 것이 지체함수(Congestion Function)이다. 도로망을 모형화하는 작업은 대부분 링크 비용에 기초하고 있으며, 이러한 링크 비용을 결정하는 것이 지체함수이므로 교통배정 또는 노선선택 과정에서 이 지체함수가 중요하게 작용한다.

교통배정시 어떠한 지체함수를 적용하는가에 따라 교통배정 결과가 달라지며 결국 전체 교통계획에 막대한 영향을 미치게 되므로, 적절한 지체함수의 산정은 교통계획 과정에서 매우 중요하다.

2. 교통 특성 자료 정리

1) 고속도로 자료

고속도로 교통관리 시스템(FTMS)의 차량감지 부

시스템(Vehicle Detection System:VDS)이 설치되어 있는 경부고속도로 양재-대전간, 중부고속도로, 서울 외곽 순환고속도로의 관교-구리 구간에서 교통량-속도 관계가 넓은 분포를 나타내며 V/C>1로서 정체 상태도 나타나는 지점을 선정하였다. 20초 간격으로 측정된 자료를 15분 간격으로 합산하여 사용하였다. 본 연구에서 사용한 자료 수집지점은 28개소이다.

<표 1> 고속도로 자료 수집 지점 (위치, km)

노선	차선수	상행	하행
경부고속도로	4	11.3	9.9
		15.7	11.3
		16.7	15.7
		21.5	16.7
			19.2
		21.5	
중부고속도로	2	9.5	5.8
		10.0	13.3
		12.0	
		13.3	
		15.8	
		19.7	
		25.1	
수도권 외곽 순환고속도로	2	4.2	4.2
		20.5	18.1
		20.8	20.5
		23.2	20.8
			23.2

2) 국도자료

국도 자료는 건설교통부에서 전국 국도에 설치한 고정식 도로 교통량 조사장비로부터 발생한 자료를 사용하였다.

전국 82지점중 지역적 분포, 지형별 분포, 교통량 수준, 도로의 기능을 고려하여 26개 지점을 선정하였다.

자료는 3일간 측정치를 사용하였으며 방향별, 차종별로 5분 간격으로 측정되었다. 26개 지점의 측정 결과를 1차 검토하여 V/C < 0.6 으로 교통량이 적은 구간을 제외하고 15개 지점을 세부 분석 대상으로 선정하였다.

3) 교통특성 자료 정리

수집된 자료에는 오류자료가 포함되기도 하였는데 고속도로 자료의 유효화 과정에서 다음의 경우는 그 자료를 사용하지 않았다.

〈표 2〉 국도 자료 수집 지점

측점번호	노선번호	구간	위 치	차로수
311	6	양수리-양평	경기 양평 양서 신원	4
361	5	원 주-제천	강원 원주 신립 신립	2
362	19	원 주-충주	강원 원주 흥업 매지	2
369	6	양 평-횡성	강원 횡성 공근 초원	2
417	36	공 주-청양	충남 청양 정산 용두	2
451	17	죽 산-진천	충북 진천 이월 노원	2
452	17	청주-청원IC	충북 청원 남이 가좌	4
456	19	괴 산-보은	충북 청원 미원 미원	2
501	3	사 천-진주	경남 사천 좌룡	4
508	33	합 천-진주	경남 합천 대양 덕정	2
554	3	김 천-거창	경북 김천 구성 양각	2
606	1	무 안-목포	전남 무안 청계 청천	4
608	15	화 순-별교	전남 화순 동 윤농	2
652	30	부 안-태인	전북 정읍 신태인공사	2
656	24	순 창-담양	전북 순창 순창 백산	2

- 다음의 가능 범위를 초과하였을 때
 (0 ≤ 점유율 ≤ 100, 0 < 속도 < 180, 0 < 교통량 (20초 단위) < 25
 - 점유율, 교통량이 0일 때 속도가 0으로 표시
 - 쌍루프에서 각 루프의 점유율 차가 5 이상일 경우
 - 쌍루프에서 각 루프의 교통량 차가 8 이상일 경우
 국도의 교통량 자료는 한 지점에 대하여 방향별, 차
 중별로 교통량-속도 관계를 나타낼 수 있도록 하였다.
 이와 같이 유효화 과정을 거친 자료의 취합은 다음
 과 같이 하였다.

- 차선의 취합
- 교통량 : 차선별 또는 차중별 값들의 합계
 - 속 도 : 차선별 또는 차중별 값들의 교통량
가중 평균
- 20초, 또는 5분 단위에서 15분 단위로의 시간변환
- 교통량 : 합계
 - 속 도 : 교통량 가중 평균

3. 교통용량 분석

본 연구에서는 1992. 10월 건설교통부가 제정한 도
 로용량편람²⁶⁾에 따라 분석대상 교통망의 구간별 도로
 용량을 산출하였다.

지체함수에서 사용하는 도로용량에 어떤 용량을 적
 용하는가는 매우 중요하다. BPR공식의 경우 $T = T_0(1 + \alpha(V/C)^\beta)$ 에서 사용한 C는 실용용량(Practical Capacity)으
 로서 HCM 1950, 1965년판에는 사용되었지만 HCM
 1985, 1994년판에서는 더 이상 사용하지 않는 개념이다.
 BPR공식을 산정 할 당시 적용할 실용 용량이 어떠한

개념으로 사용되었으며, 제시된 도로기능별로 어느 서
 비스 수준에 해당하는가를 판단하는 것이 필요하다.

실용용량은 미국의 1950년판 도로용량편람(HCM
 1950)에서 정의한 것이다. 이들 용량 개념은 1965년판
 HCM에서는 6개의 서비스수준 용량(A-F)으로 대체
 되었으며, 1985 및 1994년판 HCM에서는 교통류
 (Flow Rate)라는 개념이 도입되었다.

1950년판에서 제시된 실용 용량(Practical Capacity)
 은 주어진 도로 및 교통조건에서 심각하지 않은 정체
 하에서 운전자가 크게 제약을 받지 않을 정도의 소통
 상태를 유지하면서 시간당 최대로 통과할 수 있는 교
 통량을 말한다. 도시부의 경우 1,500pcplph이며, 지방
 부 다차선도로의 경우 1,000pcplph이다. 2차선도로의
 경우에는 도시부 1,500pcplph이며, 지방부 600pcplph으
 로 사용된다.

본 연구에서는 한국 도로용량편람을 적용하였으며
 구간별 시간 교통용량을 산출한 결과는 다음과 같다.

- ① 고속도로는 노선별 구간별 방향별 시간 교통용
량으로 산출하였다.
- ② 국도는 고정식 교통량 조사 장비가 설치된 구
간의 방향별 시간 교통용량으로 산출하였다.
2차선 도로의 방향별 용량은 양방향 용량의
1/2을 적용하였다.
- ③ 교통용량은 LOS E 수준의 혼합 교통량으로
나타내었다.

〈표 3〉 고속도로와 국도의 교통용량

구분	구간	1방향 차로수	용량(대/시)
고속도로	경부선(양재-수원)	4	7,400
	중부선(동서울-곤지암)	2	3,250
	서울외곽순환(관교-구리)	2	3,600
국 도	501	2	4,050
	606	2	3,610
	456	1	1,140
	608	1	1,425

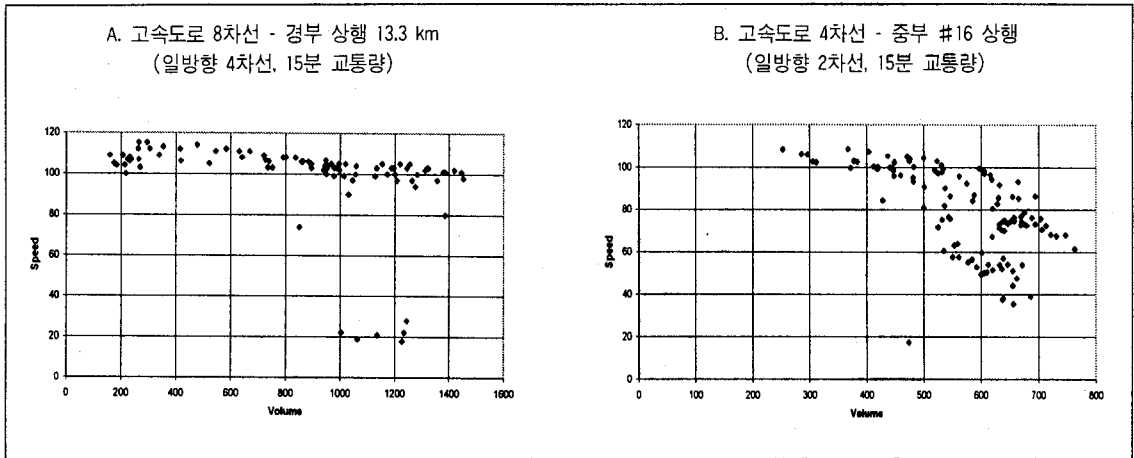
4. 교통량-속도 관계 분석

1) 지점별 형태 비교

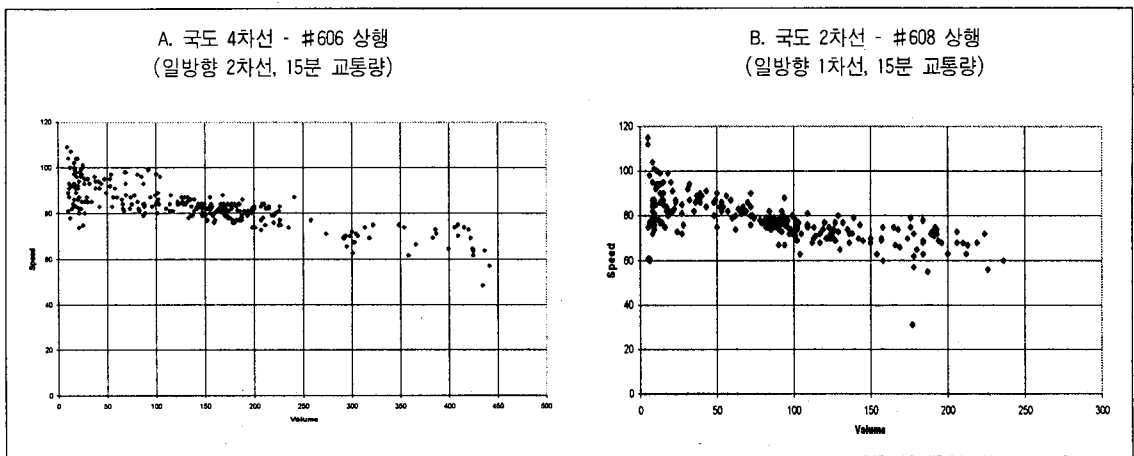
고속도로와 국도의 지점별 교통량-속도 곡선은 다
 음 〈그림 4, 5〉와 같다.

고속도로는 교통량이 증가하더라도 비정체영역에서의 속도가 거의 수평 상태를 유지하다가 최대 교통량의 60~80% 지점에서부터 꺾이기 시작하여 용량 근처에서 정체영역과 단절 상태를 보인다. 고속도로

에서는 일방향 2차선 도로에 비하여 4차선 도로의 속도 감소점이 일찍 발생하며, 국도의 경우 일방향 2차선 도로에 비하여 1차선 도로의 속도 감소가 조기에 나타난다.



<그림 4> 고속도로의 교통량-속도 관계



<그림 5> 국도의 교통량-속도 관계

IV. 도로유형별 지체함수의 정립

1. 도로유형의 분류

도로유형은 고속도로와 국도로 구분하여 앞에서 자료 정리한 구간을 다음과 같이 구분하여 지체함수

를 비교 분석하였다.

고속도로는 경부 고속도로 8개 지점을 종합하여 4차선의 대표유형을 도출하고 중부 고속도로 9개 지점과 수도권 외곽순환 고속도로 9개 지점을 종합하여 2차선의 대표 유형을 도출하였다.

또한 국도는 2차선 2개 지점의 상하행 4개 자료와

1차선 2개 지점의 상하행 4개 자료를 종합하여 각각 국도 4차선과 2차선의 대표 유형을 도출하였다.

〈표 4〉 도로 유형의 분류

구분	차로수	대상구간
고속도로	8	경부고속도로
	4	중부, 서울의곽순환
국도	4	#501 #606
	2	#456 #608

2. 지체함수의 선택

제II장 외국의 지체함수 연구에서 제시된 바와 같이 지체함수는 수리함수방법과 이론적함수방법으로 구분할 수 있는데 본 연구에서는 수리함수방법 중에서 보편적으로 가장 많이 사용되고 상호 비교가 용이하며 수정이 용이한 BPR식을 선택하였다.

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

3. 지체함수의 정산

지체함수의 정산은 교통량-속도 자료를 이용한 회귀분석을 통해 BPR식의 파라미터인 α 와 β 를 구하는 방법을 사용하였다. 먼저, 선형회귀분석을 이용하기 위해 BPR식을 선형식으로 변형하고 단순회귀를 이용하여 분석한다.

1) 회귀분석을 위한 BPR식의 변형

회귀분석에 이용할 식을 구성하기 위해, BPR 식의 양변에 \log 를 취하여 다음과 같이 α 와 β 에 관한 선형 식으로 변형한다.

$$\log(T/T_0 - 1) = \log \alpha + \beta \log(V/C)$$

또한 교통량-속도 자료를 이용하기 위해 T/T_0 대신 U_f/U (여기서, U_f 는 자유통행속도)를 사용하여 최종적으로 다음과 같은 식을 구성하였다.

$$\log(U_f/U - 1) = \log \alpha + \beta \log(V/C)$$

2) 자료의 정리

분석 과정에서 3가지의 그래프를 통하여 데이터의 선택 범위를 결정하였다. 즉, 교통량-속도관계, $(V/C) - (U_f/U - 1)$ 관계, $\log(V/C) - \log(U_f/U - 1)$ 관계 그래프에서 V/C 비가 작으며 속도변화가 작은 구간의 자료는 분석대상에서 제외하였다. 이는 V/C 가 작은 구간의 경우 자유통행상태를 나타내며, 속도결정에 교통량의 영향보다는 운전자 및 시간대의 특성이 더 많이 반영되는 구간이라는 판단에 따른 것이다. 이에 따라 경부고속도로의 경우는 $V/C < 0.3$, 중부와 순환 고속도로는 $V/C < 0.5$ 범위의 자료는 제외하고 회귀분석을 시행하였다.

3) 회귀분석 수행 및 결과도출

회귀분석은 통계분석 프로그램을 사용하여 시행하였으며 회귀분석 통계량은 결정계수로 나타내었다. 고속도로 주요지점의 교통량-속도 관계를 회귀분석한 결과는 다음 〈표 5〉에 나타나 있다.

〈표 5〉 고속도로 회귀분석 결과

구분	지점	α	β	R ²
경부고속도로	21.51 상행	0.58	2.14	0.74
	21.51 하행	0.80	1.03	0.79
	9.91 하행	0.72	1.10	0.41
	11.3 하행	0.71	1.23	0.38
중부고속도로	#10 상행	5.40	0.73	0.40
	#16 상행	0.39	3.12	0.36
	#10 하행	0.35	1.25	0.68
	#16 하행	0.77	2.40	0.57
서울의곽순환	#29 상행	0.59	1.88	0.71
	#30 상행	1.11	1.77	0.73
	#29 하행	0.33	1.71	0.64
	#30 하행	0.84	1.94	0.51

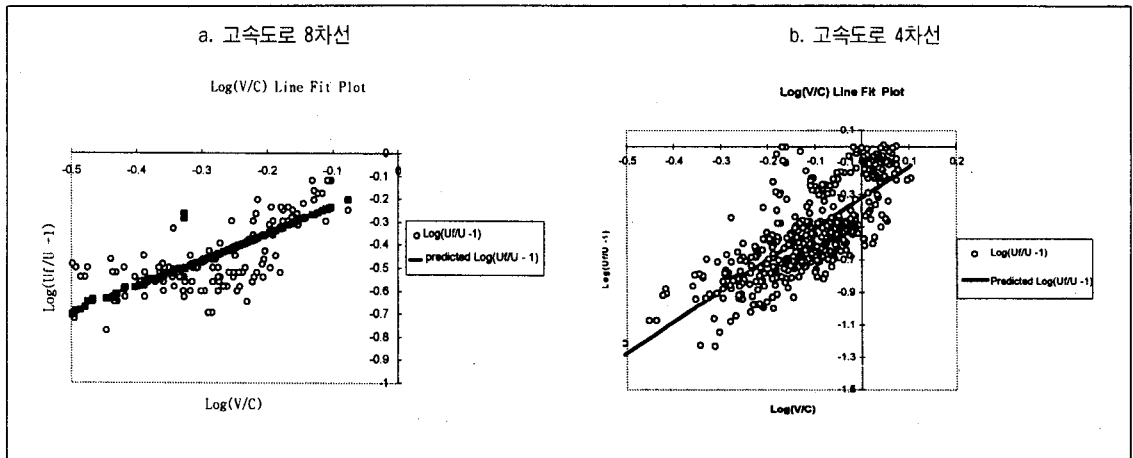
앞의 표에서 보는 바와 같이 지점별로 서로 다른 양상을 나타내는 부분들이 있으나 극단적으로 다른 지점을 제외하면 고속도로에서의 교통량-속도관계의 특성을 대체로 잘 나타내고 있다. 중부선의 경우는 결정계수값이 하행선에서 비교적 안정된 값을 보이고 있다. 중부선과 같은 4차선고속도로인 판교-구리선에서는 다른 양상을 보이고 있는데 이는 도시 고속도로로서 비교적 운행거리가 짧아 통행시간에의 반응 정도가 비교적 높은 이용자의 운행행태를 나타낸다고 볼 수 있다. 즉 교통량증가에 따른 운행시간의 증가에 보다 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 고속도로 4차선의 대표치를 구하는 과정에서는 중부선에서 결정계수 값이 0.4 이하인 구간자료나 전체적인 추세

와 어긋나는 자료는 제외하였다.

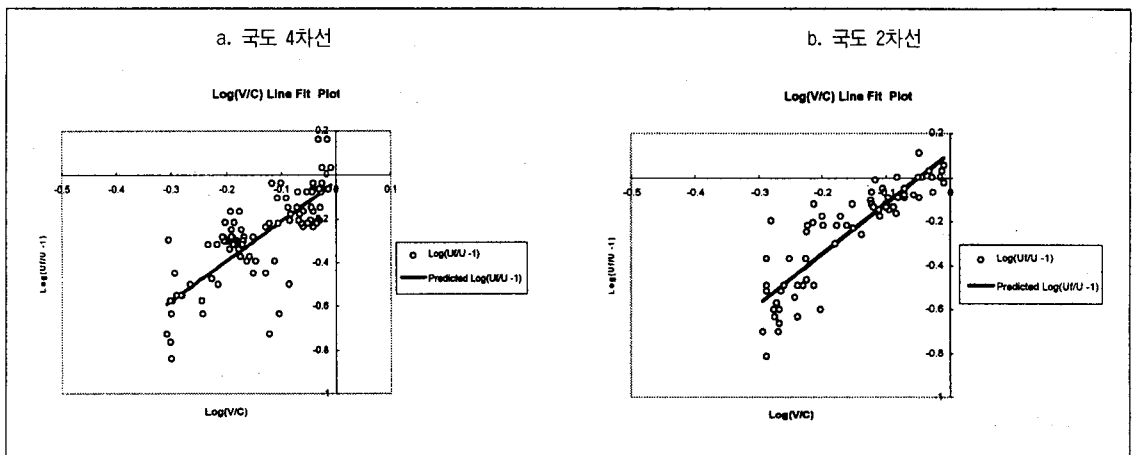
고속도로 및 국도를 통합한 전국 대표치 함수를 구하기 위해 모든 자료값을 취합하여 회귀분석을 하는 경우에는, 서로 다른 특성을 갖는 자료들이 상충되어 회귀분석 결과의 신뢰성 및 대표치 규명에 한계가 있으며, 그

결과도 별 의미가 없게 된다. 이에 따라 본 논문에서는 전국적인 관점에서의 파라미터는 산정하지 않았다.

도로유형별 회귀분석 결과를 그래프로 나타내면 <그림 6>, <그림 7>과 같으며, 도로유형별로 정산된 파라미터 값은 다음 <표 6>과 같다.



<그림 6> 회귀분석결과 - 고속도로



<그림 7> 회귀분석결과 - 국도

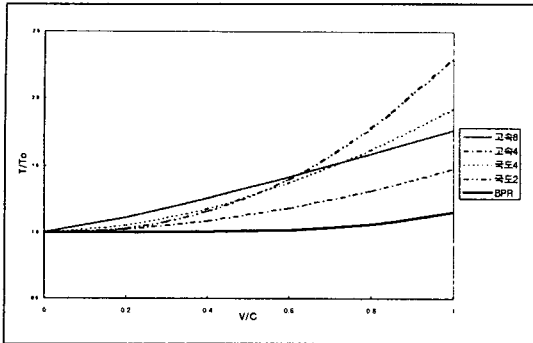
<표 6> 정산된 파라미터

구분	차로수	α	β	R^2
고속도로	8	0.77	1.20	0.517
	4	0.48	1.91	0.588
국도	4	0.93	1.80	0.573
	2	1.30	2.30	0.770

4. 결과의 분석

1) BPR곡선과 파라미터

앞 절에서 정산한 도로유형별 파라미터값으로 BPR곡선을 그려보면 <그림 8>과 같다.



〈그림 8〉 정산된 도로유형별 곡선도

α 값이 작을수록 V/C 변화에 매우 둔감하며 특히 V/C가 작은 범위에서는 α 값이 작으면 교통량 변화에 따른 속도 변화가 거의 반영되지 않음을 알 수 있다.

α 값이 거의 같을 때는 β 값이 클수록 V/C비가 큰 범위까지 둔감하다가 일정 V/C비를 지나면 경사가 급하고 곡률 반경이 작아지는 현상을 나타내는데 혼잡상태에 가까워지면 속도 변화가 예민해 짐을 알 수 있다. β 값이 거의 같을 때 α 값이 클수록 V/C비가 작은 범위에서 일찍 꺾이기 시작한다. 즉 α 값이 클수록 V/C가 작은 범위에서도 교통량 변화에 따른 속도 변화가 예민함을 알 수 있다.

2) 정산된 지체함수의 해석

앞의 〈그림 8〉에서 고속도로가 국도에 비하여 상당한 V/C 수준까지 교통량 변화에 속도가 둔감함을 알 수 있다. 같은 고속도로에서 8차선과 4차선을 비교해보면 8차선 고속도로에서 V/C비가 작은 범위에서 교통량 증가에 보다 예민하게 반응하며 오히려 4차선 고속도로가 둔감하게 반응함을 알 수 있다.

이러한 현상은 HCM 1994²⁷⁾ 에서 제시한 “자유류 속도가 낮은 고속도로(4차선)의 경우, 교통량 증가에 속도의 변화가 둔감한 구간이, 자유류 속도가 더 높은 고속도로(8차선)에 비하여 더 높은 교통류 수준(higher flow rates)까지 연장된다.”는 현상과 일치하는 양상을 보이고 있다. 즉 고속도로 기본구간에서 교통량 증가에 속도가 영향을 받지 않는 구간은 평균운행 속도가 112kph인 경우 1,300pcphpl인 반면, 88kph인 도로에서는 1,750pcphpl 까지 연장된다. HCM 1994에서는 4차선 고속도로의 용량을 2,200pcphpl, 6차선 이상

고속도로는 2,300pcphpl로 규정하고 있으므로, 8차선 도로에서의 속도변화 시작은 4차선 도로에 비하여 더 작은 V/C비 범위에서 시작됨을 알 수 있다.

이러한 현상은 승용차만 운행하는 이상적인 조건에서의 값으로서 차로수뿐만 아니라 교통량 구성 특성의 영향도 받음을 알 수 있다. 고속도로 교통량 구성은 경부고속도로의 대형차 혼입을 29%에 비하여 중부고속도로는 45%로서, 대형차가 많이 다니는 도로가 속도 변화에 보다 둔감함을 설명할 수 있다.

국도에서는 4차선에 비하여 2차선 도로에서 교통량 변화에 따른 지체현상이 더 빨리, 더 예민하게 나타난다.

위의 결과를 종합하면, 설계속도가 높은 고급도로일수록 지체증가 없이 더 많은 교통량을 수용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 기존연구와의 비교 분석

1) 국내 연구 결과와의 비교

본 연구에서 정산한 지체함수의 파라미터를 지금까지 국내의 연구에서 제시된 파라미터와 비교해보면 다음 〈표 7〉과 같다.

〈표 7〉 국내의 BPR 모형 파라미터

구 분	대상도로	α	β	비 고
이외은 ①	국도, 지방도	0.30	2.00	1986, O-D
서선덕 ②	전국	2.72	6.00	1989, O-D
주정열 ③	전국	2.04	1.99	1993, O-D
④	고속도로	2.06	1.09	
⑤	국도	1.38	1.91	
장덕형 ⑥	고속도로	0.58	2.40	1993, O-D
본 연구	고속도로 8차선	0.77	1.20	
	4차선	0.48	1.91	1996,
	국 도 4차선	0.93	1.80	교통량-속도
	2차선	1.30	2.30	

이 값들은 파라미터 정산방법이 본 연구에서 채택한 방법과 상이하므로 직접적인 비교는 곤란하다. 다만, 위의 표에서 時系列에 따른 변화추이를 보면 비록 뚜렷한 양상은 보이지 않으나, 최근에 올수록 α , β 값이 작아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 교통량 증가에 따른 속도 변화의 민감도가 작아지는 경향을 보여주는 결과라 하겠다.

특히 장덕형²⁰⁾이 전국 고속도로에 대하여 구한 값

과 본 연구의 고속도로 4차선의 값이 상당히 유사하게 나타남을 알 수 있다. 우리나라의 고속도로는 전체 16개 노선 1,800km중 4차선이 940km로서 반 이상을 차지하고 있어, 본 연구에서 제시한 고속도로 4차선의 교통량-속도 관계를 이용한 지체함수의 산정 결과가 고속도로의 현실을 잘 묘사해 주고 있다는 검증 자료로서의 역할을 하고 있다.

2) BPR식과의 비교

본 연구의 결과를 미국의 BPR식과 비교해 보면, 교통량변화에 상당히 민감한 것으로 나타나고 있다. 그러나 이 두 결과의 비교에 있어서는 본 연구에서는 도로용량편람에서의 용량기준인 서비스수준 E를 기준으로 지체함수를 산출하였고, BPR식은 서비스수준 C의 실용용량을 기준으로 했음을 감안해야 한다.

이에 따라, BPR식과의 비교를 위해 동일한 용량기준인 서비스수준 C를 적용해 지체함수를 산출하였으며, 그 결과는 다음 <표 8>과 같다.

<표 8> 기준 도로용량에 따른 지체함수 파라미터의 변화

구 분	서비스수준 E 기준	서비스수준 C 기준
고속도로 8차선	$\alpha=0.77 \beta=1.20$	$\alpha=0.55 \beta=1.20$
고속도로 4차선	$\alpha=0.48 \beta=1.91$	$\alpha=0.74 \beta=1.03$
국 도 4차선	$\alpha=0.93 \beta=1.80$	$\alpha=0.55 \beta=1.80$
국 도 2차선	$\alpha=1.30 \beta=2.30$	$\alpha=0.67 \beta=2.30$

<표 8>에서 보는 바와 같이 대체로 β 값은 큰 변화가 없으나, α 값은 많이 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 고속도로 4차선의 경우는 α 값이 증가하고 β 값이 많이 감소하는 전혀 다른 경향을 보인다. 일반적으로, BPR식과 같은 서비스수준 C의 용량을 적용하면 교통량 증가에 따른 속도변화가 더욱 둔감한 것으로 나타난다. 이는 본 연구에서 도출한 한국형 도로유형별 지체함수의 값이 BPR식과 동일한 도로용량을 기준으로 하면 BPR곡선에 보다 더 접근한다는 것을 알 수 있다.

또한, 이 결과는 II. 4. 국내의 지체함수 연구에서 서선덕 외가 제시한 도로용량별 지체함수 파라미터의 변화와 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 장덕형이 제시한 도로용량별 지체함수 변화와도 같은 경향을 보여주고 있다.

한편, BPR식이 처음 제시된 1964년 미국의 도로

및 교통 상황²⁹⁾(1965년 통계)을 살펴보면, 인구 194백만 명에 자동차 보유대수는 90백만 대로서 인구 1,000명당 460대이며, 도로 연장은 5.9백만km로서 인구 1,000명당 26km에 달하여 자동차시대가 상당히 발달되고 정착되어, 현재의 우리 실정보다 훨씬 양호한 도로 및 교통조건을 갖고 있었음을 알 수 있다. 따라서 도로 및 교통 상황이 발전할수록 교통량 증가 변화에 속도 변화가 둔감하게되며, 파라미터 α, β 값이 작아지는 경향이 있음을 유추할 수 있다. 이는 자동차 문화의 진전에 따른 운전 능력의 향상에도 기인한다고 볼 수 있다.

V. 결론

본 연구는 교통수요예측의 마지막 단계인 교통배정모형에서 사용되는 지체함수를 산정함에 있어, 현재 각급도로에 설치된 교통관리시스템 또는 교통량조사 운영시스템을 통하여 도로유형별로 수집한 정확한 교통량-속도 관계 자료를 사용하여 회귀분석을 통해 도로 및 교통특성을 반영한 지체함수의 파라미터를 직접 정산하므로써, 실측통행량과 추정통행량을 비교하여 간접적으로 파라미터를 정산하는 전통적인 방법의 한계성을 탈피하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 도로 유형에 따라 다음과 같은 BPR 식의 파라미터 값이 산출되었다.
 - 고속도로 8차선 : $\alpha=0.77 \beta=1.20$
 - 고속도로 4차선 : $\alpha=0.48 \beta=1.91$
 - 국 도 4차선 : $\alpha=0.93 \beta=1.80$
 - 국 도 2차선 : $\alpha=1.30 \beta=2.30$
2. 위의 값에서도 볼 수 있듯이, 고급도로일수록 교통량 증가에 따른 속도 변화가 둔감하게 나타나는 것으로 분석되었다. 즉, 고속도로와 국도간에는 고속도로가 보다 둔감하다.
3. 고속도로의 경우 자유통행속도가 높은 다차로 고속도로일수록 교통량 증가에 따른 속도감소가 더욱 빨리 나타나는 것으로 분석되었는데, 이는 미국도로용량편람 94년판에서 제시한 현상과 일치한다.

4. 교통수요가 클수록 도로유형별 지체함수를 사용하여 교통배정을 할 경우 고급도로에 더 많은 교통량이 배정된다.
5. 본 연구는 한국도로용량편람에서 규정한 LOS E의 서비스교통량을 적용하였는데, BPR식과 같은 LOS C의 실용용량을 적용하면 β 값은 큰 변화가 없으나 γ 값은 감소하는 경향을 보인다. 즉 교통량 증가에 따른 속도 변화가 더욱 둔감하게 나타나며 본 연구 결과와 BPR식의 파라메터가 보다 유사하게 접근한다.
6. 도로유형별 지체함수를 적용하면, 고속도로가 국도에 비하여 더 많은 교통량을 수용하게 되므로 기존의 단일지체함수를 적용한 방법은 고속도로의 타당성을 과소평가한 것으로 판단된다.

본 연구를 수행하는 과정에서 도출된 향후 연구 과제는 다음과 같다.

1. 교통량-속도 관계 자료 측정시설이 구축됨에 따라 이를 이용한 링크별 지체함수를 구하는 것도 가능할 것이다.
2. 또한, 향후 자료의 축적에 따라 도로유형별 지체함수의 時系列상의 변화를 추적해 보는 것도 연구의 의미가 있을 것이다.
3. BPR 식이 아닌 순수한 한국형 지체함수 모형의 개발이 요구된다.

본 연구는 교통망상에서 보다 현실적인 도로유형별 분담 방안을 정립함으로써, 도로의 기능적 위계구조가 확립된 효율적인 교통망을 구성할 수 있는 근거를 마련한 것으로 판단된다.

또한 본 연구의 결과를 기반으로, 지능형 교통관리시스템(ATMS)에서 정기적으로 링크별 지체함수가 자동 산정되도록 하는 것이 가능할 것이며, 이는 향후 동적통행배정 등에 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Y. Sheffi, Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
2. Bureau of Public Roads, Traffic Assignment Manual, Department of Commerce, Washington D. C., 1964.
3. M. J. Beckman, C. B. McGuire and C. B. Winsten, Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Heaven, Conn. 1956.
4. N. A. Irwin, N. Dodd and H. G. Von Cube, Capacity Restraint in Assignment Programs, Highway Research Board Bulletin 297, 1961, pp.109~127.
5. R. J. Smock, An Iterative Assignment Approach to Capacity Restraint on Arterial Networks, Highway Research Board Bulletin 347, 1962, pp.60~66.
6. W. W. Mosher, A Capacity Restraint Algorithm for Assigning Flow to a Transport Network. Highway Research Record 6, 1963, pp.41~70.
7. J. D. Ortuzar and L. G. Willumsen, Modelling Transport, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1990, p.243.
8. T. J. Soltman, Effects of Alternate Loading Sequences on Results from Chicago Trip Distribution and Assignment Model, Highway Research Record 114, 1965, pp.114~122.
9. K. R. Overgaard, Urban Transportation Planning: Traffic Estimation, Traffic Quarterly, 1967, pp.197~218.
10. Traffic Research Corporation, Winnipeg Area Transportation Study, Technical Report, 1966.
11. S. C. Dafermos, Traffic Assignment and Resource Allocation in Transportation Networks, PhD Thesis, The John Hopkins University, Baltimore, MD., 1968.
12. P. A. Steenbrink, Optimization of Transport Network, John Wiley and Sons, New York, 1974.
13. E. W. Campbell, L. E. Keefer and R. W. Adams, A Method for Predicting Speeds Through Signalized Street Sections, Highway Research

- Board Bulletin 230, 1959, pp.112~115.
14. K. B. Davidson, A Flow Travel-Time Relationship for Use in Transportation Planning, Proc. 3rd Australia Road Research Board Conference, Australia, 1966, pp.183~194
 15. J. G. Wardrop, Journey Speed and Flow in Central London, Traffic Engineering and Control, No. 9, 1968, pp.528~532
 16. 이의은, 링크체증函數 및 일반화 費用函數의 適用에 관한 고찰, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1986. 1.
 17. 최기주, 容量抵抗函數의 比較分析 및 그 適用方案에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1986. 1.
 18. Sunduck Suh, Chang-Ho Park, and Tschangho John Kim, A Highway Capacity Function in Korea: Measurement and Calibration, Transportation Res.-A, Vol. 24A, No.3, pp.177~186, 1990.
 19. 주정열, 通行配定模型의 道路容量函數 比較 및 適用에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문, 1993. 2.
 20. 장덕형, 高速道路 通行의 遲滯函數와 通行抵抗 파라메터의 敏感度 分析에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1993. 2.
 21. D. B. Benson and W. D. Cunagin, Development and Implementation of a New Impedance Function for Capacity Restraint Traffic Assignment, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, Texas, 1980.
 22. V. F. Hurdle and P. K. Datta, Speeds and Flows on an Urban Freeway: Some Measurements and a Hypothesis, Transportation Research Record 905, T.R.B., National Research Council, Washington D. C., 1983.
 23. B. N. Persaud and B. F. Hurdle, Some New Data That Challenge Some Old Ideas About Speed-Flow Relationships, Transportation Research Record 1194, T.R.B., National Research Council, Washington D. C., 1988, pp.191~198.
 24. J. H. Banks, Freeway Speed-Flow-Concentration Relationships: More Evidence and Interpretations, Transportation Research Record 1225, T.R.B., National Research Council, Washington D. C., 1989, pp.53~60.
 25. A. D. May, Traffic Management from Theory to Practice: Past, Present, Future, Preprint for Transportation Research Board Annual Meeting, Jan. 1994.
 26. 건설부, 道路容量便覽, 대한교통학회, 1992.
 27. Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, Special Report 209, Third Edition, Washington D.C. 1994.10, pp.3.3~3.5.
 28. U.S. Bureau of Public Roads, Highway Statistics, In Robley Winfrey, Economic Analysis for Highways, International Textbook Company, Scranton, Penn., 1969, p.3.