

■ 論 文 ■

도로 통행지체함수의 파라미터 추정 및 검증

A Volume-Delay Function Parameter Estimation and Validation for Traffic Assignment

임 용 택

(전남대학교 교통물류학부 부교수)

강 민 구

(전남대학교 교통물류학과 석사과정)

추 상 호

(한국교통연구원 책임연구원)

이 상 민

(한국교통연구원 연구위원)

— 목 차 —

- | | |
|---|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 선행연구 고찰</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 통행지체함수</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 파라미터 추정연구</p> <p>III. 파라미터 추정방법 정립</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 파라미터 추정법</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 검증기준</p> | <p>IV. 파라미터 추정 및 검증</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 분석자료</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 추정결과</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 검증결과</p> <p>V. 결론 및 향후연구</p> <p style="padding-left: 20px;">참고문헌</p> |
|---|--|

Key Words : 통행지체함수, BPR함수, 파라미터 추정, 검증, KTDB, 열거법
 Volume-delay function, BPR function, Parameter estimation, Validation, KTDB, Enumeration

— 요 약 —

통행지체함수는 도로상의 교통량과 통행시간과의 관계를 나타내는 함수로 통행자들의 경로선택행위를 모형화한 통행배정(traffic assignment)모형에 주로 사용되고 있으며, 이를 위해서는 기본적으로 통행지체함수를 현실에 맞게 정산해야 한다. 본 연구는 기존점 통행자료를 구축하는 과정에서 중요한 역할을 하는 통행지체함수(volume-delay function)의 파라미터를 추정하고, 검증하는데 연구의 목적이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 전구간을 탐색하는 열거법에 황금분할법(golden section method)을 결합시켜 효율적으로 해를 찾는 방법을 제시하였으며 몇 가지 검증지표를 이용하여 현재 사용하고 있는 파라미터와 비교 분석하였다. 분석을 위하여 2006년 국가교통DB의 기존점 통행량(OD) 및 네트워크와 2006년 도로교통량 통계연보 자료를 이용하였으며, 분석결과 새롭게 추정된 파라미터값이 좀 더 현실적임을 보여 주었다.

A volume-delay function(VDF) has been used to describe the relation between traffic volumes and delay experienced by travelers on the roads traveling from origin to destination, which has been usually adopted in traffic assignment. For the purpose of more precise description of traffic pattern, we have to estimate the parameters of VDF in advance. This paper presents a methodology for estimating the parameters, which combined with golden section method. By using the method we have estimated the parameters with real data based on KTDB(2006), and validated them. Compared to the existing values of the parameters, newly estimated values are found to be closer to real world.

1. 서론

여객 기종점(O/D) 통행자료는 교통정책의 연구 및 개발, 교통시설의 타당성 평가에 필수적인 기초자료이다. 기종점 통행자료를 구축하는 과정에서 통행지체함수(volume-delay function)는 통행배정단계에서 교통량에 따른 통행시간변화를 계산하여 통행자의 경로선택을 결정하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 따라서, 각 도로 조건(도로위계, 용량 등)에 따라 신뢰성 있는 통행지체함수의 파라미터값을 선정하여 사용해야 하는데, 현재 주로 사용되고 있는 통행지체함수의 파라미터값은 이를 제대로 반영하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 새롭게 고속도로와 국도에 적합한 파라미터를 추정하고 이를 전국 O/D 및 네트워크에 적용하였다. 이를 위하여 우리나라 도로망 및 교통류에 적합한 파라미터를 추정하고, 이를 검증하는게 본 연구의 목적이며 <그림 1>은 본 연구의 전체적인 수행과정을 보여주고 있다.

통행배정을 위한 여객 OD와 네트워크 자료는 한국교통연구원의 2006년 국가교통DB OD자료(승용차, 버스, 트럭)와 네트워크를 사용하였으며, 파라미터 추정과 검증을 위한 관측교통량은 2006년 도로교통량 통계연보를 이용하였다. 이 자료를 가지고 식(1)과 같은 고속도로 및 국도의 통행지체함수 (Bureau of Public

Roads, BPR)의 파라미터를 추정하고 검증하였으며, 각 도로에 대하여 차종별로도 구분하여 추정결과를 검증하였다.

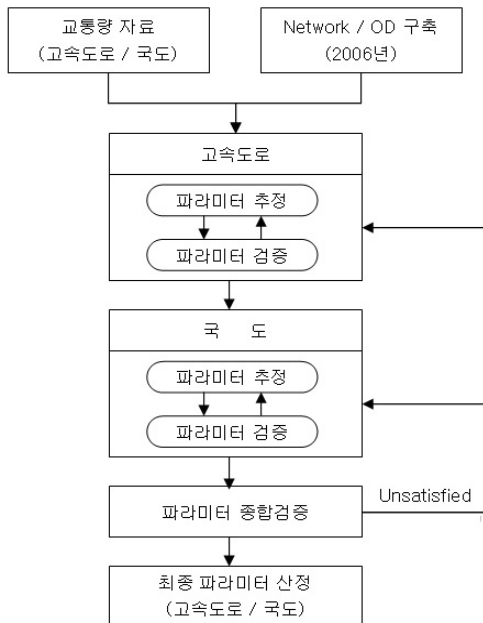
$$T_a = T_{ao} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{V_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

- 여기서, T_a : 링크지체시간
- T_{ao} : 자유교통류통행시간
- V_a : 링크a의 교통량(대/시)
- C_a : 링크a의 용량
- α, β : 파라미터

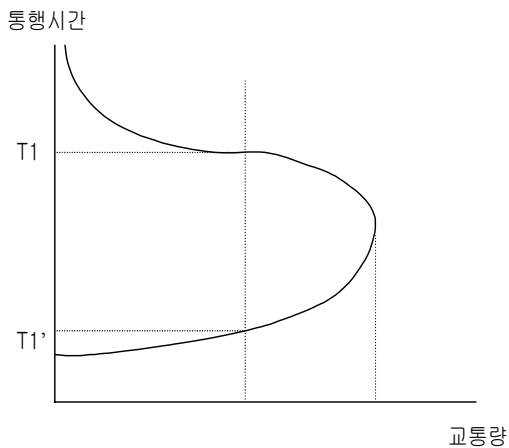
II. 선행연구 고찰

1. 통행지체함수

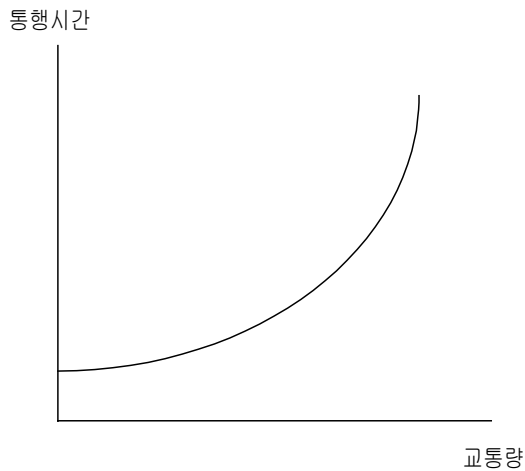
통행지체함수는 도로상의 교통량과 통행시간과의 관계를 나타내는 함수로 통행자들의 경로선택행위를 모형화한 통행배정(traffic assignment)모형에 주로 사용되고 있으며, 이를 위해서는 기본적으로 통행지체함수에 내포된 파라미터를 현장에 맞게 정산해야 한다. 또한, 통행지체함수는 기종점간 최단경로탐색시 사용되는 시간비용으로 운전자의 경로선택에 영향을 미치며, 따라서 도로상에 부과되는 교통량을 결정하는 주된 요소가 된다. 여기서, 최단 경로 탐색시 각 경로별 도로저항(link impedance)이 판단의 기준으로 사용되는데, 일반적으로 교통량이 임계밀도에 이를 때까지 계속 증가하면 도로저항도 증가하기 때문에 밀도는 감소하고 임계밀도를 넘어서면 교통량과 속도 모두 감소하여 통행시간은 증가하게 된다. 교통배정에서 비용함수가 중요한 이유는 교통량 증가에 따른 통행시간 변화를 나타내기 때문에 정확한 비용함수 없이는 사용자의 통행시간 또는 통행비용에 근거한 사용자의 경로 선택 행위를 정확히 모형화 할 수 없기 때문이다. 이론상 통행지체함수는 <그림 2>와 같은데, 그림에서 보듯이 특정 교통량에 각기 다른 두개의 통행시간을 갖게 되므로 이를 그대로 모형화에 사용하기에는 문제가 있다. 즉, 수리적인 모형으로 표현된 교통배정 모형을 사용하기 위해서는 단조증가 함수 형태로 된 지체함수를 사용하여야 단일해를 찾을 수 있기 때문이다. 따라서 대부분의 연구에서는 용량보다 큰 교통량에 대해서는 <그림 3>와 같이 단조 증가하



<그림 1> 파라미터 추정 및 검증과정



〈그림 2〉 이론적인 통행지체함수



〈그림 3〉 단조증가 통행지체함수

는 형태의 지체함수를 사용하며, 이런 통행지체함수가 갖어야 할 속성은 다음과 같다. (Ortuzar et al. 1994)

- ① 사용된 통행 지체함수가 현실에 적합해야 한다.
- ② 통행지체함수는 통행량에 대하여 비감소(non-decreasing), 단조성(monotone)을 가져야 하며,
- ③ 연속적(Continuous)이고 미분가능(Differentiable)해야 한다.
- ④ 또한, 교통수요가 용량을 초과하는 과포화시를 표현할 수 있어야 하며,
- ⑤ 현실적 요구에 맞춰 손쉽게 조작 가능해야 한다.

특히, 여기서 ②, ③조건은 통행배정모형이 유일해(Unique solution)를 갖게 되는 기본적인 조건이 된다.

통행지체함수는 1950년대 이후, 다양한 형태의 통행지체함수가 제시되었는데, Branston (1976)은 그때까지 제시된 지체함수를 크게 수리적 함수(mathematical function)와 이론적 함수(theoretical function)로 분류하였다. 수리적 함수는 관측된 자료를 반영할 수 있는 간단한 수리함수를 사용하는 반면 링크상에서의 차량비용을 나타내는 데에는 함수의 단순한 형태 때문에 도로의 특성을 잘 나타낼 수 없는 단점이 있다. 이에 반해 이론적 함수는 대기행렬 이론(queueing theory)에 근거하여 교통량과 링크상에서의 차량비용을 고려한 것으로 도로망의 특성이 잘 반영되지만 수리함수보다는 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

우리나라에서는 미국도로국(Bureau of Public Roads, BPR)에서 개발한 BPR공식이 가장 널리 사용되어 왔으나, Spiess(1990)에 의해 신호가 존재하는 도시내 도로의 경우 비현실적이라는 비판을 받은 바 있다.

2. 파라미터 추정연구

서울시정개발연구원(1999)에서는 1996년 서울시 교통센서스 자료를 기초로 통행배정모형에 사용되는 통행지체함수(BPR함수)의 파라미터를 다음식으로 추정하였다.

$$T = 60 \times (L/S_f + D) \times [1 + \alpha (V/C)^\beta]$$

- 여기서, T : 링크통행시간(분)
 L : 링크길이(km)
 S_f : 자유류 상태에서의 통행속도(km/h)
 D : 교차로 지체를 반영한 추가지체
 V : 교통량(대/시)
 C : 실용용량(pcu/시)
 α, β : 파라미터

공간적인 범위는 서울을 포함한 광역수도권을 대상으로 하며, BPR 함수의 파라미터를 추정하는 방법은 초기 파라미터 $(\alpha, \beta) = (0.1, 1)$ 를 시작으로 $(1.0, 9)$ 가 될 때까지 $(0.1, 1)$ 씩 점진적으로 증가시켜 최적 파라미터를 찾는 과정으로 이루어지고, 총 조합수는 90개이다. 이렇게 산정된 모형의 추정결과는 신뢰성 검증을 위해 교통량, 속도, OD통행시간에 대한 관측치와 EMME/2로부터 산출된 추정치를 RMSE, Theil 부등계수 등 통계적 검정을 통하여 최종적으로 결정을 하고, 최종적으

로 선정된 결과는 $(\alpha, \beta) = (0.5, 2)$ 이며, 링크당 교차로 지체를 고려하기 위하여 추가로 20초를 반영하였다. 또한, 서울시정개발연구원은 수도권 통행배정을 위해 Conical 함수로 통행지체함수를 제시한바 있으며, 이를 통하여 연속류인 경우 BPR함수식을 이용하며, 도시부 단속류는 Conical 함수식을 사용하고 있다.

한국교통연구원(2005)에서는 BPR 통행지체함수를 대상으로 링크유형별로 설정된 α, β 값을 일정비율로 증감하여 실제 조사교통량과 가장 근접한 결과를 도출하는 방법으로 각 도로유형별 통행지체함수를 추정하였으며, 이를 기초로 현재 국가교통DB센터에서 제공하고 있는 BPR식은 도로의 위계에 따라 모두 15개(센트로이드 커넥터 제외)이며, 각 함수의 파라미터값은 <표 1>과 같다.

<표 1> 전국 기반의 도로 유형별 VDF 함수 파라미터값

도로위계(편도)	VDF	자유속도 (Km/h)	용량 (pcu)	BPR식		가중치 (분/km)
				α	β	
고속도로 (1차로)	1	80	1,600	0.58	2.4	0.215
고속도로 (2차로)	2	117	2,200	0.645	2.047	0.215
고속도로 (3차로이상)	3	119	2,200	0.601	2.378	0.215
일반국도 (1차로)	4	70	750	0.15	4.0	-
일반국도 (2차로)	5	80	1,000	0.15	4.0	-
일반국도 (3차로이상)	6	90	1,000	0.15	4.0	-
지방도, 국지도 (1차로)	7	60	750	0.15	4.0	-
지방도, 국지도 (2차로)	8	70	1,000	0.15	4.0	-
지방도, 국지도 (3차로이상)	9	80	1,000	0.15	4.0	-
광역시도, 시군도 (1차로)	10	40	200	0.15	4.0	-
광역시도, 시군도 (2차로)	11	40	200	0.15	4.0	-
광역시도, 시군도 (3차로 이상)	12	40	200	0.15	4.0	-
센트로이드 커넥터	13	20	99.999	-	-	-
도시고속화도로 (3차로이상)	14	90	2,200	0.58	2.4	-
도시고속화도로 (2차로이하)	15	90	2,000	0.15	4.0	-
고속도로 연결램프	16	50	1,600	0.15	4.0	-

자료: 한국교통연구원, 『2004년 국가교통DB구축사업 최종보고서』, 2005. 4

앞에서 살펴본 국책연구기관 외에도 80년대 중반이후 교통전문가들에 의한 파라미터 추정 및 검증에 대한 연구들도 지속적으로 진행되고 있다.

이의은(1986)은 부산-울산간 국도와 지방도를 분석 대상으로 BPR식의 파라미터를 도출하였는데 $\alpha = 0.3, \beta = 2$ 에서 통행의 실 상황을 묘사하는 것으로 제시되었고, 지체함수를 통행자 구분, 지역유형, 교통시설 유형별로 세분화하여 적용하는 방안이 강구되어야 한다고 제안하고 있다. 최기주(1986)는 서울의 도시가로인 영동지역을 대상으로 BPR, Smock과 Davidson 함수의 적합도를 검증하였는데 도시부 가로에서는 Davidson식이 우수하며, 이 때 파라미터 J 값이 0.09임을 제시하였다. Suh et. al. (1990)는 우리나라 전국 도로망에서 BPR 지체함수의 파라미터 산출을 시도하였으며, 전국적인 교통망의 O-D표를 사용하여 Bilevel Programming 모형을 통하여 BPR 지체함수의 파라미터를 도출하였고, 서비스 수준 D일 때 $\alpha = 2.72, \beta = 6$ 이 우리나라의 도로망에 가장 적합한 값이라고 제시하였다. 주정열(1993) 역시 BPR과 DAVIDSON 식에 대하여 지역간과 도시내로 도로를 구분하여 파라미터를 추정하였으며, Bilevel Programming을 사용하였다.

장덕형(1993)은 1971년에서 1991년까지 기간의 고속도로 년도별 통행 O/D결과를 토대로 이중계약 엔트로피 극대화 모형내 통행저항 파라미터 β 의 년도별 최적값을 도출, 단일시점 및 비교 정태적 시점에서 민감도 분석을 통하여 시간에 대한 유의성을 검증을 하였고, 1992년 한국형 도로용량편람에 제시된 내용을 토대로 도로용량을 산출하고 관측된 자료를 활용하여 BPR식의 파라미터 검증하였다. 강호익(1996)은 고속도로 교통관리 시스템의 차량검지 시스템에서 수집된 자료와 전국 국도에 설치된 상시 교통량 조사장비에서 수집된 자료를 이용하여 BPR식의 파라미터 추정을 하였으며, 최근 김병기(2002)는 국도 기능분류상으로 국도 I 이고, 4차로인 도로의 교통량-속도 관계로부터 회귀분석을 통해 통행지체함수를 BPR모형, 직선모형, 지수모형을 통하여 파라미터 추정을 하였다.

이들 기존 연구들중 본 연구의 대상인 BPR함수를 분석방법에 따라 이를 회귀분석과 수리모형으로 구분하여 정리하면 <표 2>와 같다. α 값의 경우, 수리모형으로 구한 값이 회귀분석으로 구한 값보다 큼을 알 수 있으며, β 값은 비슷하다. 사용된 자료와 분석시점들이 상이하야 각 연구결과를 직접적으로 비교하기는 곤란하나 고속도로의 경우, α 는 0.5~2.0사이의 값을 갖고 있으며, β

〈표 2〉 국내 기존연구

함수식	방법론	도로구분	α	β	비고
BPR	회귀 분석	고속도로 (8차로)	0.77	1.20	강호익(1996)
		고속도로 (4차로)	0.48	1.91	강호익(1996)
		국도(8차로)	0.93	1.80	강호익(1996)
		국도(4차로)	1.30	2.30	강호익(1996)
		국도(4차로)	0.80	0.58	김병기(2002)
		국도, 지방도	0.30	2.00	이의은(1986)
	수리 모형	전국 (서비스수준 D)	2.72	6.0	Suh et al. (1990)
		지역간 도로	2.04	1.99	주정열(1993)
		고속도로	2.06	1.09	주정열(1993)
		국도	1.38	1.91	주정열(1993)
	점증	고속도로 (서비스수준 D)	0.37	2.3	장덕형(1993)
직선모형	회귀	국도(4차로)	25.06	-	김병기(2002)
지수모형	분석	국도(4차로)	0.43	-	김병기(2002)

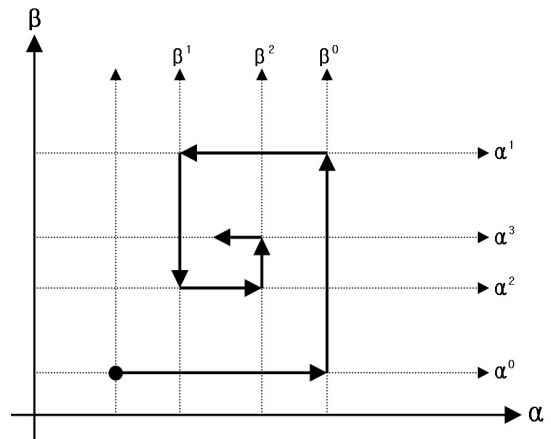
는 1.0~2.5사이의 값을 갖고 있다. 국도 역시 α 는 0.3~1.5, β 는 0.5~2.5사이의 값을 갖고 있어 고속도로와 대체로 비슷한 값을 갖고 있다.

III. 파라미터 추정방법 정립

1. 파라미터 추정법

통행지체함수의 파라미터를 추정하기 위하여 회귀분석, 수리적인 바이레벨(bi-level) 프로그램, 그리고 전 구간을 열거하는 방법들이 제시되었으나, 회귀분석법은 통행배정을 고려하지 않고 현장자료만으로 추정하기 때문에 이를 통행배정모형에 적용시 상이한 값을 도출하는 문제가 있다. 바이레벨 프로그램은 수리적으로 최적해를 구할 수 있는 장점이 있으나, 초기값에 따라 다수의 해가 존재하며(Suh et al., 1990; Lim et al., 2007), 모형의 속성상 파라미터 α 값이 β 값보다 큰 경우가 발생할 수 있으며, 열거법은 분석시 전구간을 탐색해야 하기 때문에 상당한 시간이 소요된다는 단점이 있으나, 도출된 해에 대한 신뢰성이 높다는 장점이 있다.

따라서, 추정된 파라미터 값의 신뢰성을 확보할 수 있는 열거법을 본 연구의 추정방법으로 이용하며 탐색시간을 줄이기 위하여 황금분할법(golden section method)을 풀이과정에 결합시켰다. 본 연구에서 사용되는 목적함수는 식(2)와 같다.



〈그림 4〉 열거법에 의한 파라미터 산출과정

$$Z(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \sum_b (v_b - \bar{v}_b)^2 \quad (2)$$

여기서, v_b 는 통행배정에서 산출된 링크 통행량이며, \bar{v}_b 는 관측 링크통행량이다. 따라서, 식(2)는 통행배정에서 산출된 링크교통량과 실제 관측된 통행량간의 차이를 최소화시키는 파라미터 α, β 값을 구하는 문제가 된다. 위 문제를 풀기 위하여 본 연구에서 적용한 열거법의 풀이 과정은 다음과 같다.

【step 0】 초기화

초기치 (α^0, β^0) 설정, $n=0$

【step 1】 α^n 를 고정시킨 상태에서 황금분할법(golden)

을 이용하여 β^{n+1} 을 산출.

여기서, 사용되는 목적함수는 식(2)임.

【step 2】 β^{n+1} 을 고정시킨 상태에서 황금분할법을

이용하여 α^{n+1} 을 산출

【step 3】 수렴성 검토

만약 $|\alpha^{n+1} - \alpha^n| < \epsilon$ & $|\beta^{n+1} - \beta^n| < \epsilon$ 이면 중지 그렇지 않으면 [step1]로 진행.

〈그림 4〉는 열거법을 개념적으로 보여준 것으로 먼저, α 축에서 초기 파라미터 α^0 를 고정시키고, β 축에서 황금분할법으로 최적 β^0 을 구한 후, β^0 을 고정시킨 상태에서 다시 최적 α^1 를 구하는 방법으로, 이런 과정을 여러번 반복하면 그림과 같이 최적 파라미터 α^*, β^* 를 구하게 된다.

2. 검증기준

관측치와 통행배정에서 추정된 결과치를 검증하기 위해서는 다양한 척도를 사용하여 평가하는게 바람직하다. 대표적으로 고려될 수 있는 척도로는 개별링크별 또는 노선별 통행량, 통행시간, 주요지점별 회전교통량, 주행차량-킬로미터(Vehicle Kilometer of Travel, VKT) 등이 있다. 그러나, 현재 신뢰성 있는 관측자료로는 한국도로공사와 건설교통부에서 매년 제공하는 각 도로별 일별 교통량이 있으며, 속도나 통행시간 등 다른 자료는 2차적인 가공이나 정리가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 현재 가장 신뢰성이 높은 도로별 교통량을 기준으로 통행지체함수의 파라미터를 검증코자 한다. 본 연구에서 사용되는 검증척도는 다음과 같다.

- (1) 통계적 기준 : 획득된 자료를 통하여 추정치와 실측치간의 오차의 정도를 평가

- 평균제곱근측정(Root Mean Squared Error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\sum_i \left[\frac{(e_i - o_i)^2}{n} \right]} \quad (3)$$

여기서, e_i : 링크 i 의 추정치(교통량 등)
 o_i : 링크 i 의 관측치(교통량 등)
 n : 관측치의 수

- (2) 적합도 검증

- Theil의 부등계수(Theil's Inequality Coefficient):

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}} \quad (4)$$

여기서, U 값이 0에 가까우면, 추정치가 관측치에 가까움을 나타내며, 1이나 그이상이 되면, 추정치가 적합하지 않음을 나타낸다.

IV. 파라미터 추정 및 검증

파라미터의 추정(estimation)과 검증(validation)

은 서로 연관되어 있기 때문에 순환적인(feedback) 과정을 거치게 된다. 즉, 본 연구에서는 대상이 되는 고속도로와 국도의 파라미터 추정과 검증과정을 반복하게 된다.

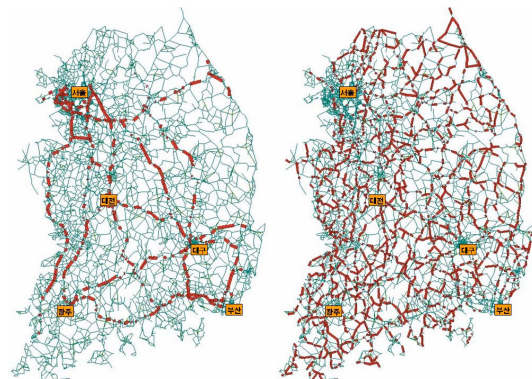
파라미터 추정의 분석년도는 2006년으로 설정하였고, 통행배정에 사용된 교통수단은 승용차, 버스, 트럭이며 수렴조건(Normalized gap)은 0.5로 설정하여 분석하였다.

1. 분석자료

통행배정을 위한 여객 OD와 네트워크 자료는 한국교통연구원의 2006년 국가교통DB OD자료와 네트워크를 사용하였으며, 파라미터 추정과 검증을 위한 관측교통량은 2006년 도로교통량 통계연보(건설교통부, 2007)를 이용하였다.

고속도로 편도 1차로의 경우, 전남 무안 망운면~대구 달성 논공읍으로 연결되는 88올림픽고속도로와 현재, 강원도의 동해시와 주문진간을 연결하는 동해고속도로가 포함되며, 편도 36개 지점을 분석하였고, 편도 2차로의 경우, 편도 404개의 지점을 분석대상에 사용하였다. 편도 3차로 이상의 경우, 편도 234개의 지점을 분석대상에 사용하여, 총 674개 지점을 대상으로 분석하였다.

국도 역시, 2006 도로교통량통계연보에 있는 국도 지점 및 교통량을 사용하였다. 편도 1차로의 경우, 편도 1,754개의 지점을 분석대상에 사용하였고, 편도 2차로의 경우, 편도 1,263개의 지점을 분석대상에 사용한다. 편도 3차로 이상의 경우, 편도 71개 지점(편도 3차로 : 59개, 편도 4차로 : 10개, 편도 5차로 : 2개)을 분석대상에 사용하여, 총 편도 3,088개 지점을 대상으로 분석하였다. <그림 5>는 본 연구에서 관측지점으로 사용된 위치를 보여주고 있다.



(a) 고속도로 관측지점 (b) 국도 관측지점

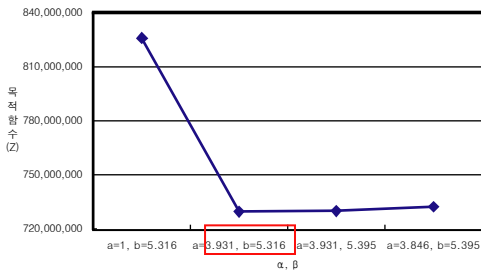
<그림 5> 고속도로 및 국도 관측지점

2. 추정결과

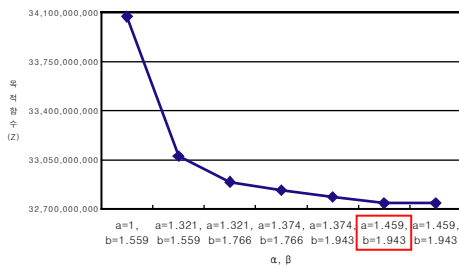
1) 고속도로

차로별 파라미터 추정과정을 살펴보면, 먼저 α 의 범위를 0과 4사이, β 의 경우는 0과 6사이에서 최적값을 찾도록 하였는데, 이는 기존 연구성과(표 2참조)에서 보듯이 대부분 이범위내에 최적값이 존재했기 때문이다.

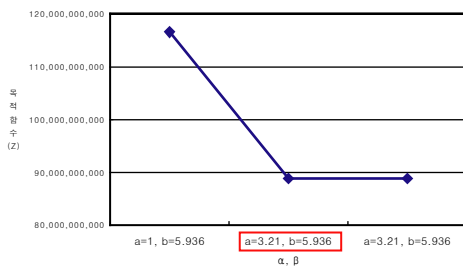
〈그림 6〉은 열거법으로 고속도로 각 차로별 파라미터 추정과정을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 목적함수(Z)가 가장 작은값에서 최적파라미터가 결정되며, 최종적으로 1차로의 경우 $\alpha=3.931$, $\beta=5.316$, 2차로의 경우 $\alpha=1.459$, $\beta=1.943$, 3차로의 경우, $\alpha=3.210$, $\beta=5.936$ 에서 각각 최적값을 도출하였다. 이상의 추정



(a) 고속도로 1차로



(b) 고속도로 2차로



(c) 고속도로 3차로 이상

〈그림 6〉 고속도로 차로별 파라미터 추정과정

〈표 3〉 추정된 고속도로 차로별 파라미터

고속도로(편도)	자유속도 (Km/h)	용량/차로 (pcupl)	최종 결과	
			α	β
1차로	80	1,600	3.931	5.316
2차로	117	2,200	1.459	1.943
3차로이상	119	2,200	3.210	5.936

과정을 거쳐 열거법으로 산출된 파라미터값들을 정리한 내용이 〈표 3〉에 나와 있다. 대략적으로 α 값은 1.45~3.93정도의 값을 갖고 있으며, β 는 1.94~5.93사이의 값을 보이고 있다. 이 값은 한국교통연구원의 VDF 파라미터값(표 1)과 비교해 보면, α, β 모두 조금 큰데, 이는 교통량에 좀 더 민감하게 반응한다는 것을 의미한다. 이런 차이는 주로 기초자료로 사용된 네트워크와 OD, 그리고 관측교통량이 서로 다르기 때문이다.

2) 국도

고속도로 추정시와 같이, α 의 경우는 0과 4사이, β 의 경우는 0과 6사이에서 최적값을 찾도록 하였으며 〈그림 7〉은 열거법으로 국도 각 차로별 파라미터 추정과정을 보여주고 있다. 최종적으로, 1차로의 경우 $\alpha=1.896$, $\beta=3.894$, 2차로의 경우 $\alpha=0.430$, $\beta=3.566$, 3차로의 경우, $\alpha=0.653$, $\beta=3.232$ 에서 각각 최적값을 도출하였다. 본 연구에서 열거법으로 추정된 국도의 파라미터 추정결과가 〈표 4〉에 제시되어 있다. 표에서 보듯이 α 값의 경우 0.43~1.9, β 는 3.23~3.89 사이의 값을 갖고 있으며, 〈표 1〉과 비교해 보면, α 는 큰 값을, β 는 약간 작은 값을 갖고 있다.

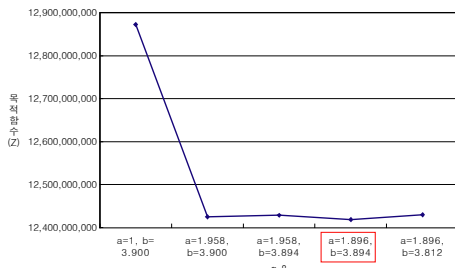
3. 검증결과

본 연구에서 추정된 고속도로와 국도의 파라미터값이 얼마나 현실에 부합하는지를 알아보기 위하여 검증한 결과는 다음과 같다.

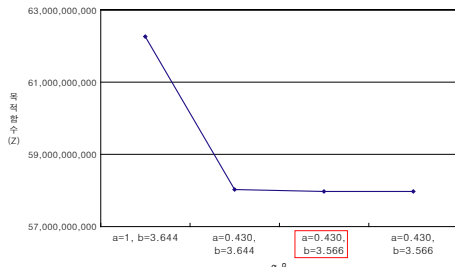
1) 고속도로 차로별 검증

새롭게 추정된 파라미터를 적용하여, 고속도로 각 차로별로 추정된 교통량과 관측교통량간의 오차율이 〈표 5〉에 나와 있으며, 비교를 위하여 현 VDF 파라미터를 적용한 결과도 함께 제시하였다.

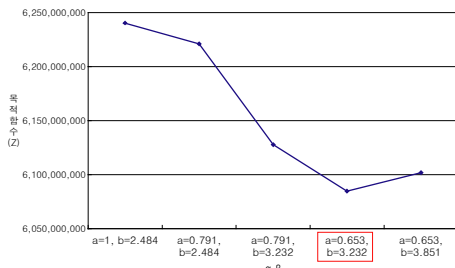
1차로의 경우, $\pm 30\%$ 이내(적정)의 오차에 포함될 비율(적중율)이 8.4% \rightarrow 58.3% 로 크게 증가되어 본 연



(a) 국도 1차로



(b) 국도 2차로



(c) 국도 3차로 이상

〈그림 7〉 국도 차로별 파라미터 추정과정

〈표 4〉 추정된 국도 차로별 파라미터

국도(편도)	자유속도 (Km/h)	용량/차로 (pcupl)	최종 결과	
			α	β
1차로	70	750	1.896	3.894
2차로	80	1.000	0.430	3.566
3차로 이상	90	1.200	0.653	3.232

구에서 구한 파라미터 값의 현실 재현력이 크게 개선되었음을 알 수 있으며, 2차로의 경우, $\pm 30\%$ 이내의 적중률이 63.3% \rightarrow 64.1% 로 증가되었다. 3차로 이상의 경우도, 적중률이 68.0% \rightarrow 81.7%로 크게 증가되어 3차로 역시 현실 재현력이 크게 개선되었음을 알 수 있다.

RMSE 변화율을 살펴보면, 고속도로 1, 3차로의 경우

각각 -35.2%, -34.66%로써 크게 감소한 반면, 고속도로 2차로는 0.12%로써 약간 증가하였다. Theil 부등계수를 살펴보면, RMSE의 변화율과 같이 대체로 감소하고 있으며, 고속도로 2차로는 차이가 없음을 알 수 있다.

2) 국도 차로별 검증

국도 차로별 오차율은 〈표 7〉과 같다. 1차로의 경우, $\pm 30\%$ 이내(적정)의 적중률이 23.7% \rightarrow 27.5%로 증가되었으며, 2차로의 경우도, 적중률이 40.7% \rightarrow 43.4%로 증가되었고, 3차로 이상 역시, 적중률이 45.1% \rightarrow 46.4%로 증가되었다. 이처럼 국도1차로의 오차비율이 상대적으로 다른 차로에 비해 낮은 이유는 1차로의 경우, 지역간 통행보다는 지역내의 통행을 서비스하는 기능이 강하나, 이런 지역적인 도로 특성들을 고려하지 않고 전국단위의 파라미터 값을 추정하기 때문인 것으로 판단된다.

RMSE 변화율을 살펴보면, 국도 1, 2차로 역시 고속도로의 패턴처럼 -15.80%, -4.44%로 감소한 반면, 국도 3차로는 6.87%로 증가하였으며, Theil부등계수 역시, 국도 3차로의 경우 약간 증가하는데, 이는 적은 표본수로 인한 한계로 판단된다.

3) 전체 검증

〈표 9〉는 고속도로와 국도를 전체적으로 비교한 내용인데, 고속도로의 경우 $\pm 30\%$ 이내 적중률이 현 62.0% \rightarrow 69.8%로 증가되었으며, 국도 역시, 31.2% \rightarrow 34.5%로 증가되었다.

〈그림 8〉은 현재 VDF와 본 연구에서 추정된 파라미터를 적용하여 산출된 교통량을 비교한 것으로, 본 연구에서 구한 파라미터를 사용하여 추정된 교통량이 관측교통량에 좀 더 근접함을 알 수 있다. 〈표 10〉은 고속도로와 국도에 대한 t-검정과 F-검정치를 보여주고 있다.

4) 차종별 검증

마지막으로, 다차종 통행배정(multiple user class assignment)법을 통하여 나온 결과를 분석해 보면, 〈표 11〉, 〈표 12〉에서 보듯이 승용차의 경우, 고속도로의 적중률이 60.2% \rightarrow 64.6%로 증가하였으나, 국도에서는 32.5% \rightarrow 31.5%로 약간 감소하였다. 버스의 경우, 고속도로에서 28.5% \rightarrow 34.4%로 증가하였으며 국

〈표 5〉 고속도로 통행배정시 오차율

오차범위	고속도로 1차로				고속도로 2차로				고속도로 3차로 이상				
	현 VDF		본연구 VDF		현 VDF		본연구 VDF		현 VDF		본연구 VDF		
	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	
과대추정	300이상	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	100~300	1	2.8	1	2.8	9	2.2	14	3.5	6	2.6	3	1.3
	60~100	1	2.8	1	2.8	31	7.7	38	9.4	7	3.0	5	2.1
	30~60	0	0.0	2	5.6	59	14.6	56	13.9	44	18.8	18	7.7
	10~30	0	0.0	4	11.1	89	22.0	71	17.6	77	32.9	40	17.1
	0~10	1	2.8	5	13.8	52	12.9	53	13.1	24	10.3	40	17.1
과소추정	-10~0	2	5.6	6	16.7	51	12.6	43	10.6	28	12.0	43	18.4
	-30~-10	0	0.0	6	16.7	64	15.8	92	22.8	30	12.8	68	29.1
	-60~-30	0	0.0	5	13.8	46	11.5	37	9.1	8	3.3	13	5.5
	-100~-60	31	86.0	6	16.7	3	0.7	0	0	10	4.3	4	1.7
	합계	36	100	36	100	404	100	404	100	234	100	234	100

주) 오차율 = $\frac{\text{추정치} - \text{관측치}}{\text{관측치}}$

〈표 6〉 고속도로 RMSE 및 Theil 부등계수 비교

도로위계(편도)	현 VDF 파라미터		RMSE (A)	Theil 부등계수	본 연구 파라미터		RMSE (B)	Theil 부등계수	RMSE변화율(%) $\frac{B-A}{A} \times 100$
	α	β			α	β			
고속도로(1차로)	0.58	2.4	6,346	0.5078	3.931	5.316	4,112	0.2720	-35.20
고속도로(2차로)	0.645	2.047	8,989	0.1328	1.459	1.943	9,000	0.1348	0.12
고속도로(3차로)	0.601	2.378	29,354	0.1558	3.210	5.936	19,181	0.1127	-34.66

〈표 7〉 국도 통행배정시 오차율

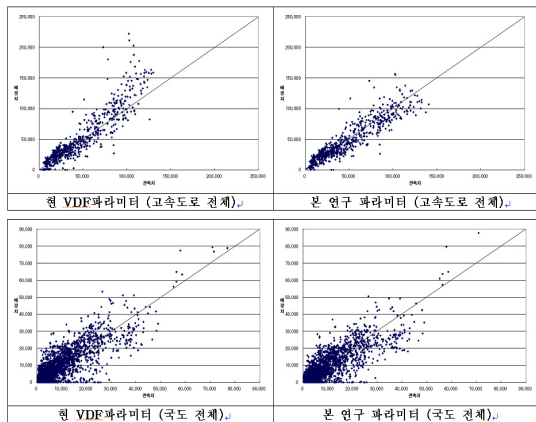
오차범위	국도 1차로				국도 2차로				국도 3차로 이상				
	현 VDF		본연구 VDF		현 VDF		본연구 VDF		현 VDF		본연구 VDF		
	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	
과대추정	300이상	108	6.2	92	5.2	21	1.7	17	1.3	0	0.0	0	0.0
	100~300	265	15.1	245	14.0	133	10.5	109	8.6	1	1.4	0	0.0
	60~100	148	8.4	130	7.4	111	8.8	121	9.6	3	4.2	1	1.4
	30~60	165	9.4	152	8.7	198	15.7	162	12.8	9	12.7	8	11.3
	10~30	133	7.6	136	7.8	169	13.4	174	13.8	5	7.0	10	14.1
	0~10	83	4.7	74	4.2	80	6.3	80	6.3	9	12.7	4	5.6
과소추정	-10~0	64	3.6	91	5.2	90	7.1	98	7.8	8	11.3	5	7.0
	-30~-10	137	7.8	181	10.3	176	13.9	196	15.5	10	14.1	14	19.7
	-60~-30	175	10.1	239	13.6	139	11.0	179	14.2	14	19.7	21	29.6
	-100~-60	476	27.1	414	23.6	146	11.6	127	10.1	12	16.9	8	11.3
	합계	1,754	100	1,754	100	1,263	100	1,263	100	71	100	71	100

〈표 8〉 국도 RMSE 및 Theil 부등계수 비교

도로위계(편도)	현 VDF 파라미터		RMSE (A)	Theil 부등계수	본 연구 파라미터		RMSE (B)	Theil 부등계수	RMSE변화율($\frac{B-A}{A} \times 100$)
	α	β			α	β			
국도(1차로)	0.15	4	3,183	0.3411	1.896	3.894	2,680	0.3279	-15.80
국도(2차로)	0.15	4	7,137	0.2195	0.430	3.566	6,820	0.2171	-4.44
국도(3차로)	0.15	4	9,584	0.1475	0.653	3.23	10,242	0.1577	6.87

〈표 9〉 통행배정시 오차율 (전체)

오차범위		고속도로				국도			
		현 VDF 파라미터		본연구 VDF 파라미터		현 VDF 파라미터		본연구 VDF 파라미터	
		관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)
과대추정	300이상	0	0.0	0	0.0	129	4.2	109	3.5
	100~300	16	2.4	18	2.7	399	12.9	354	11.5
	60~100	39	5.8	44	6.5	262	8.5	252	8.2
	30~60	103	15.3	76	11.3	372	12.0	322	10.4
	10~30	166	24.6	115	17.1	307	9.9	320	10.4
과소추정	0~10	77	11.4	98	14.5	172	5.6	158	5.1
	-10~0	81	12.1	92	13.6	162	5.2	194	6.3
	-30~-10	94	13.9	166	24.6	323	10.5	391	12.7
	-60~-30	54	8.0	55	8.2	328	10.6	439	14.1
	-100~-60	44	6.5	10	1.5	634	20.6	549	17.8
합계		674	100	674	100	3,088	100	3,088	100



〈그림 8〉 관측교통량대 배정교통량 비교 (고속도로 및 국도 전체)

도에서도 15.9% → 17.2%로 증가하였다. 또한, 트럭의 경우도 고속도로에서 50.8% → 59.1%로 증가하였으며 국도 역시 24.6% → 28.7%로 증가하였다.

〈표 10〉 차로별 유의성 검증

비교		Paired t-test P(T≤t)		F-test	
		현 VDF	본연구 VDF	현 VDF	본연구 VDF
고속도로	1차로	0.0001	0.1150	0.0001	0.0001
	2차로	0.0213	0.0850	0.2277	0.0030
	3차로이상	0.0001	0.0689	0.0001	0.4113
국도	1차로	0.0001	0.0001	0.0001	0.1451
	2차로	0.0007	0.2251	0.0026	0.3805
	3차로이상	0.0052	0.0018	0.1083	0.0711

5) 기존 함수와의 통행시간 비교

현VDF와 본 연구에서 제시한 VDF를 비교한 그림이 〈그림 9〉에 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 현VDF는 교통량에 매우 둔감함을 알 수 있으며, 본 연구에서 추정한 VDF는 교통량의 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있다.

〈표 11〉 다차종 통행배정 실시 결과(고속도로)

오차범위		현 VDF 파라미터						본연구 VDF 파라미터					
		승용차		트럭		버스		승용차		트럭		버스	
		관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)
과 대 추 정	300이상	0	0.0	0	0.0	37	5.5	0	0.0	1	0.1	35	5.2
	100~300	12	1.8	39	5.8	140	20.8	12	1.8	44	6.5	115	17.1
	60~100	42	6.2	43	6.4	63	9.3	40	5.9	43	6.4	68	10.1
	30~60	115	17.1	118	17.4	73	10.8	98	14.5	79	11.7	77	11.4
	10~30	143	21.2	111	16.5	54	8.0	106	15.7	121	18.1	71	10.5
	0~10	81	12.0	74	11.0	27	4.0	101	15.0	77	11.4	45	6.7
과 소 추 정	-10~0	68	10.1	59	8.8	41	6.1	76	10.9	71	10.5	34	5.0
	-30~-10	114	16.9	98	14.5	70	10.4	155	23.0	129	19.1	82	12.2
	-60~-30	50	7.4	79	11.7	99	14.7	75	11.1	93	13.8	110	16.3
	-100~-60	49	7.3	53	7.9	70	10.4	14	2.1	16	2.4	37	5.5
합계		674	100	674	100	674	100	674	100	674	100	674	100

〈표 12〉 다차종 통행배정 실시 결과(국도)

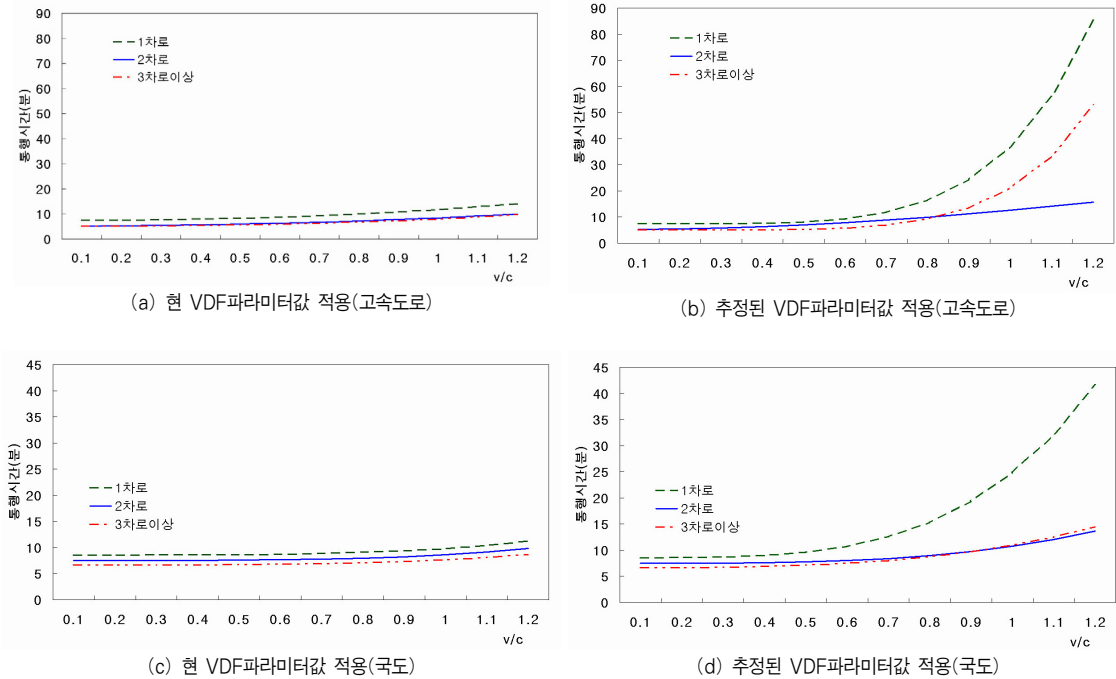
오차범위		현 VDF 파라미터						본연구 VDF 파라미터					
		승용차		트럭		버스		승용차		트럭		버스	
		관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)	관측수	비율(%)
과 대 추 정	300이상	94	3.0	233	7.5	364	11.8	85	2.8	212	6.9	322	10.4
	100~300	352	11.4	492	15.9	443	14.3	290	9.4	456	14.8	402	13.0
	60~100	211	6.8	300	9.7	198	6.4	205	6.6	266	8.6	179	5.8
	30~60	247	8.0	289	9.4	194	6.3	250	8.1	299	9.7	191	6.2
	10~30	275	8.9	228	7.4	155	5.0	244	7.9	275	8.9	172	5.6
	0~10	168	5.4	151	4.9	79	2.6	140	4.5	127	4.1	87	2.8
과 소 추 정	-10~0	186	6.0	133	4.3	73	2.4	169	5.5	165	5.3	88	2.8
	-30~-10	376	12.2	246	8.0	182	5.9	419	13.6	322	10.4	185	6.0
	-60~-30	447	14.5	355	11.5	343	11.1	553	17.9	399	12.9	387	12.5
	-100~-60	732	23.8	661	21.4	1,057	34.2	733	23.7	567	18.4	1,075	34.9
합계		3,088	100	3,088	100	3,088	100	3,088	100	3,088	100	3,088	100

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 교통수요예측의 신뢰성을 향상시키기 위하여 수요예측단계에서 사용되는 통행지체함수의 파라미터를 추정하고 이를 검증하는 연구로, 2006년 KTDB자료를 기준으로 고속도로 및 국도에 대한 파라미터를 추정하였다. 현 VDF 파라미터와 비교할 때, 고속도로의 경우, 전 차로의 α , β 값은 크게 추정되었으나, 2차로의 β 값만 작게 추정되었다. 국도의 경우, 이와 반대로 전 차로의 β 값은 작게 추정되었다. 본 연구에서 추정한 파라미터를 검증한 결과, 대체로 현 VDF

파라미터를 사용한 결과보다는 현실 재현력이 개선된 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행한 파라미터 추정법은 기존 연구들과는 달리, KTDB를 이용하여 통행배정된 배경교통량과 건설교통부의 도로교통량 통계연보(2007)상 관측교통량과의 차이를 최소화시키는 파라미터를 추정하였다. 이는 KTDB나 도로교통량 통계연보상의 관측교통량이 변하는 경우, 본 연구에서 구한 파라미터도 변해야 함을 의미한다. 현재 본 연구에서 제시한 고속도로와 국도의 파라미터값들은 2006년도를 기준으로 추정된 값이다. 따라서, 이들 파라미터값들은 KTDB가 수정·보완되거나



〈그림 9〉 현 VDF와 본 연구 VDF의 통행시간 비교

도로교통량 통계연보상의 관측교통량이 갱신될 때마다 새롭게 추정되어야 하나, 건설교통부에서 발간하는 도로교통량 통계연보는 매년 새롭게 갱신되기 때문에 이에 맞추어 매년 파라미터를 매년 추정하기는 현실적으로 쉽지 않다. 그러므로 KTDB의 갱신주기에 맞추어 추정하거나 정기적으로(예를 들어, 3년 단위) 추정하여 KTDB와 함께 제공되어야 파라미터의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

향후 연구로는 먼저, 본 연구에서는 국지도와 지방도가 포함되어 있지 않으나, 이를 포함한 전체 도로차원의 파라미터 추정이 필요하다. 또한, 본 연구에서는 고속도로의 경우, 차로당 2,200pcu/h를 기본 용량으로 적용하였지만, 최근 연구 성과에 의하면 이에 다소 못 미치는 것으로 나타나고 있어 현재 사용되고 있는 제반 도로용량에 대한 연구와 현 VDF체계와 다른 새로운 도로위계체계를 정립하는 연구도 향후 과제로 남아있다. 또한, 본 연구에서 제시된 지체함수를 적용했을 경우 발생할 수 있는 영향에 대한 연구도 필요하다. 이 외에, 본 연구에서는 구간 교통량만을 대상으로 파라미터를 추정하였지만, 좀 더 정확한 추정을 위해서는 구간 통행속도를 기준으로 추정하는 연구도 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. 강호익(1996), “도로유형별 지체함수 정립과 교통배정에 미치는 영향분석”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
2. 건설교통부(2007), “2006년 도로교통량 통계연보”.
3. 김병기(2002), “국도기능별 통행저항함수 추정에 관한 연구”, 한양대학교 환경대학원 석사학위 논문.
4. 서울시정개발연구원(1999), “서울시 종합교통분석 체계정립 및 광역통행분석”.
5. 이의은(1986), “링크체증함수 및 일반화 비용함수의 적용에 관한 고찰”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
6. 장덕형(1993), “고속도로 통행의 지체함수와 통행저항 파라미터의 민감도 분석에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
7. 주정열(1993), “통행배정모형의 도로용량함수 비교 및 적용에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
8. 최기주(1986), “용량저항함수의 비교분석 및 그 적용방안에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
9. 한국교통연구원(2005), 『2002년 국가교통DB구

축사업 최종보고서』 제4권 제4장(장래 여객OD예측모형 개발).

10. Branston, D.(1976) Link capacity functions: A review, *Transportation Research* 10(4), pp.223~236.
11. FHWA(1997), *Model Validation and Reasonableness Checking Manual*, TMIP.
12. Lim, Y., M. Kang, D. Nam, C .Choi.(2007) A parameter calibration technique for travel cost function in traffic assignment, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.7, pp.742~750.
13. Ortuzar, J.D., L.G. Willumsen (1994) *Modelling Transport*, Wiley.
14. Spiess, H.(1990), Conical volume-delay functions, *Transportation Science* Vol.24, No.2., pp.153~158.
15. Suh Sunduck, Chang-Ho Park Tschangho John Kim.(1990), A Highway Capacity Function in Korea Measurement and Calibration, *Transportation Research* 24A, No.3, pp.177~186.

- ☞ 주 작 성 자 : 임용택
- ☞ 교 신 저 자 : 임용택
- ☞ 논문투고일 : 2007. 9. 17
- ☞ 논문심사일 : 2008. 3. 10 (1차)
2008. 4. 16 (2차)
2008. 4. 21 (3차)
- ☞ 심사관정일 : 2008. 4. 21
- ☞ 반론접수기한 : 2008. 10. 31
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필