

■ 論 文 ■

교통조사를 통한 도로통행비용함수 구축 및 검증

Parameter Estimation & Validation of Volume-delay Function based on Traffic Survey Data

김 주 영

(한국교통연구원 국가교통DB센터 책임연구원)

추 상 호

(한국교통연구원 국가교통DB센터장)

강 민 구

(한국교통연구원 국가교통DB센터 연구원)

허 헌

(한국교통연구원 국가교통DB센터 연구원)

목 차

- | | |
|------------------------|----------------------|
| I. 서론 | 2. 파라메타 추정방법론 |
| II. 기존 VDF의 문제점 및 개선방향 | 3. 파라메타 추정결과 |
| III. VDF 구축을 위한 조사 | V. 새로운 VDF 검증 |
| 1. 조사지점 선정 | 1. 파라메타 추정의 적합도 검증 |
| 2. 교통량 및 통행속도 조사 | 2. VDF 적용을 통한 신뢰도 검증 |
| IV. VDF 추정 | VI. 결론 및 향후연구 |
| 1. VDF 유형 선정 | 참고문헌 |

Key Words : 도로통행비용함수(VDF), 기종점통행량(O/D), 교통분석용 네트워크, 최소자승법, 파라메타 추정
 VDF(volume-delay function), O/D(Origin-destination), traffic network, method of least squares, parameter calibration

요 약

통행비용함수(VDF)는 교통량 수준에 따른 링크 통행시간을 산출하기 위한 것으로 교통수요 예측의 신뢰도에 직접적으로 영향을 미치는 요소이다. 고속도로의 VDF는 1997년 한국도로공사에 의해 구축·제공된 바 있으나, 기타 도로는 미국 공로국(BPR)에서 제시한 기본 값을 그대로 국내에 적용함에 따라 교통수요 예측의 신뢰도를 저하시키는 요인으로 지적되고 있다. 본 연구에서는 기존 VDF의 문제점 및 개선방향을 검토하고 이를 보완하기 위해 교통조사자료에 근거한 VDF를 구축하는데 주목적이 있다. 본 연구에서는 도로위계의 재분류, 교통조사방법, VDF 추정 방법론, 그리고 새로운 VDF의 검증을 통한 개선사항 등을 주요 내용으로 다루고 있다. 새로운 VDF를 전국 지역간 O/D 및 교통분석용 네트워크에 적용한 결과, 적정 오차율 범위 내에 해당하는 링크의 비율이 증가하며, 기종점간 통행시간 및 통행경로 선택이 현실적으로 개선되는 것으로 분석된다. 향후 단속류 구간의 VDF 구축, 도로용량 및 자유통행속도 등에 대한 추후 연구가 요구된다.

VDF(volume-delay function) is one of the most important factor to improve the reliability of traffic demand estimation because it is for estimation of link travel time based on the traffic volume variation. Because VDF of link except for freeway is applied as the parameter of BPR(bureau of public road) of U.S., it causes to deteriorate the accuracy of traffic demand estimation. The purpose of this paper is to establish new parameter of VDF based on the real-surveyed traffic data in order to improve the problem of the existing VDF. We suggest the reclassification of road hierarchy, the approach of traffic survey, the estimating method of VDF parameter, and the improvements of new VDF application. The new VDF allows us to estimate more realistic traffic situation in parts of demand, travel time and path between origin-destination.

I. 서론

최근 교통수요 예측의 신뢰성 증대에 대한 사회적 요구 사항이 점차적으로 증대되고 있다. 교통수요 예측에 영향을 미치는 주요 변수로 기종점통행량(O/D), 교통분석용 네트워크, 통행비용함수(volume-delay function, 이하 VDF) 등 크게 3가지로 구분할 수 있으며, 각 요소를 얼마나 현실적으로 묘사할 수 있는지의 여부가 매우 중요하다. 특히, VDF는 도로구간의 교통량 수준에 따른 통행시간을 산정하는 함수로서, 기종점간 통행시간 계산 및 노선선택에 직접적인 영향을 미치는 요소이다.

VDF가 교통수요의 신뢰도에 지대한 영향을 주는 요소임에도 불구하고 그 동안 국내 여건에 적합한 도로통행비용함수를 구축한 노력이 매우 미흡한 것이 사실이다. 고속도로는 1997년 한국도로공사가 고속도로 교통정보수집체계인 검지기 교통자료(양방향 4차로:호남·중부고속도로, 양방향 6, 8차선 : 경부고속도로)를 이용하여 BPR(Bureau of public road)함수의 파라미터를 추정된 값을 적용하고 있으나, 일반국도, 지방도 등 고속도로를 제외한 기타 도로는 실제 교통량 및 통행속도 조사결과에 근거하여 국내 여건에 적합한 VDF가 구축된 사례가 전무한 실정이다. 고속도로를 제외한 기타 도로는 1964년 미국 공로국에서 제시한 파라미터($\alpha:0.15, \beta:4$)를 그대로 적용하고 있기 때문에 교통수요 예측의 신뢰도 제고를 위해서는 교통조사를 통한 새로운 VDF의 구축이 요구된다.

VDF를 개선하기 위해서는 VDF의 유형, 도로위계, 도로위계별 용량, 자유속도 및 파라미터 값에 대한 전반적인 재검토가 요구된다. 본 연구에서는 기존 VDF의 문제점 검토 및 개선방향 도출을 통하여 교통조사를 수행하고 국내여건에 적합한 새로운 VDF를 구축하는데 주목적이 있다.

II. 기존 VDF의 문제점 및 개선방향

<표 1>은 현재 적용되고 있는 VDF의 도로위계, 자유속도, 용량 및 파라미터 값을 보여주고 있는데, 15개의 도로위계로 구분하여 각 유형별 획일적인 자유속도, 용량 및 파라미터를 적용하고 있다. 현재 적용하고 있는 VDF는 미국 BPR 함수를 적용하고 있다.

첫째, VDF 적용을 위한 도로위계는 현재 고속도로, 일반국도, 지방도/국지도, 광역시도/시군도 등 도로의 관

<표 1> 현재 적용되고 있는 VDF

도로위계(편도)	자유속도 (km/h)	용량 (대/시 /차로)	BPR식		가중치
			α	β	
고속도로(1차로)	80	1,600	0.58	2.4	0.110
고속도로(2차로)	117	2,200	0.645	2.047	0.220
고속도로(3차로이상)	119	2,200	0.601	2.378	0.264
일반국도(1차로)	70	750	0.15	4	-
일반국도(2차로)	80	1,000	0.15	4	-
일반국도(3차로이상)	90	1,000	0.15	4	-
지방도/국지도(1차로)	60	750	0.15	4	-
지방도/국지도(2차로)	70	1,000	0.15	4	-
지방도/국지도 (3차로이상)	80	1,000	0.15	4	-
광역시도/시군도	40	4,000대/일	0.15	4	-
센트로이드 커넥터	20	99,999	-	-	-
도시고속화도로 (3차로이상)	90	2,200	0.58	2.4	-
도시고속화도로 (2차로이하)	90	2,000	0.15	4	-
고속도로 연결램프	50	1,600	0.15	4	-
고속도로 Tollgate	50	1,600	0.15	4	2.34

주) 한국교통연구원, "2006년도 국가교통DB구축사업", 2007.4

리주체에 근거하여 유형화되고 있다. 그러나 현실적으로 도로 통행시간은 도로의 관리주체보다는 신호교차로의 밀도와 같은 도로의 기능적 분류에 의해 더 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. VDF 적용을 위한 도로위계를 분류하기 위해서는 VDF내 적용변수인 도로용량, 제한속도, 파라미터에서 반영하기 어려운 부분에 대해 최대한 공통성을 확보할 필요가 있는데, 기존의 도로 관리주체에 근거한 도로위계를 신호등 밀도와 같은 도로의 기능적 분류에 근거한 도로위계로 변경하는 것이 바람직하다.

둘째, 국도 및 지방도 등은 미국 공로국에서 제시한 파라미터 값을 동일하게 적용하므로 인하여 실제 교통자료에 근거하여 예측한 값을 적용하고 있는 고속도로에 비해 상대적으로 통행시간이 작게 추정되는 문제가 있다. 따라서, 전국 지역간 네트워크를 이용하여 통행배정을 수행하면, 현실적으로 고속도로를 이용하는 장거리 통행이 국도를 이용하는 것으로 분석된다. 또한 현재 고속도로 2차로와 3차로의 통행시간이 용량 대비 교통량 비율(v/c 비율) 1.3을 기준으로 서로 역전현상이 발생하여 고속도로의 VDF 파라미터를 현실과 맞도록 재추정할 필요가 있다.

셋째, 기존 VDF는 도로위계별로 자유속도 및 도로용량을 획일적으로 적용함에 따라 도로구간의 기하구조 특성 및 교통운영 특성 등을 탄력적으로 적용하기에 한계가

있다. 먼저 자유속도를 살펴보면, 동일한 국도라 할지라도 제한속도로 60km/h인 도로와 제한속도가 80km/h인 도로의 자유속도는 차별적으로 적용되어야 하지만, 교통수요모형에서는 반영되지 못하고 있다. 또한, 중앙분리대 유무, 차로폭원 등에 따라 현실적으로 자유속도의 차이가 발생하지만, 기존 VDF는 국도의 차로수에 따라 70~90km/h의 수준을 적용하고 있다. 실제 제한속도가 60km/h인 3차로 도로의 자유속도는 90km/h로 적용되는 반면, 제한속도가 80km/h인 2차로 고속화국도의 자유속도는 80km/h로 적용되고 있다. 따라서, 도로위계별 획일적인 자유속도를 적용하기 보다는 해당 도로의 교통운영, 기하구조특성에 근거하여 자유속도를 탄력적으로 적용하는 방안이 검토될 필요가 있다.

도로용량은 자유속도와 같이 도로위계별로 획일적으로 적용하고 있는데, 고속도로는 한국도로용량편람에서 제시하는 용량을 적용하고 있으나, 신호교차로가 존재하는 일반국도, 지방도, 국지도 등의 도로용량은 녹색신호시간비율(신호주기 대비 녹색현시 비율)에 영향을 받기 때문에 설계속도에 따른 도로용량을 명확히 제시하기에 한계가 있다. 기존 VDF의 경우, 2차로 이상인 일반국도 및 지방도는 신호교차로의 녹색현시비율을 약 50% 수준으로 가정하여 다차로도로의 용량인 2,000pcpl의 절반 수준인 1,000pcpl로 적용하고 있으며, 고속도로는 기본구간의 도로용량인 2,200pcpl을 적용하고 있다. 고속도로 기본구간 이외의 진출입부 등의 용량은 크게 낮아질 수 있기 때문에 모든 고속도로의 용량을 기본구간의 용량으로 동일하게 적용하기 보다는 일정 범위내에서 탄력적으로 적용하는 방안이 바람직하다. 또한 전국 지역간 O/D에 적용되는 광역시도의 도로용량이 너무 낮게 적용됨에 따른 문제도 개선될 필요가 있다.

III. VDF 구축을 위한 조사

1. 조사지점 선정

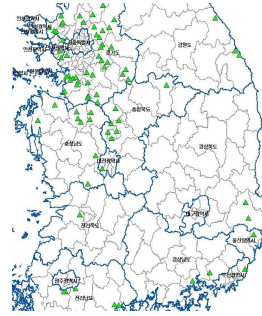
새로운 VDF를 구축하기 위한 교통조사는 크게 교통량, 통행속도와 같은 교통조사, 링크길이, 차로수 등과 같은 기하구조현황, 그리고 제한속도, 하류부 교차로의 신호운영현황 등의 교통운영현황을 조사할 필요가 있다. 본 연구에서는 VDF 적용을 위한 도로위계 구분시 기존의 도로관리주체별 도로위계에서 도로기능에 근거한 도로위계로 변경하는 방안을 적용코자 한다. <표 2>에서와

<표 2> 도로등급별 기능별 분류

구분	1등급	2등급	3등급	기타
연속류(A)	3차로 이상 고속도로	2차로 이하 고속도로	도시 고속화도로	램프
준연속류(B) ^{주1)}	0 < D < 0.3	0.3 ≤ D < 0.7	0.7 ≤ D < 1.0	-
단속류(C)	1.0 ≤ D < 3.0	3.0 ≤ D < 5.0	5.0 ≤ D	-

주1) KHCM의 기준을 적용(1등급:0≤D<0.3, 2등급:0.3≤D<0.7, 3등급:0.7≤D<1.0), D는 신호등 밀도(개/Km)

<표 3> 조사지역 분포



○ 지역분포

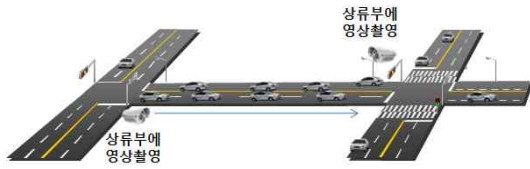
지역	조사지점수	비율
강원	6	2.9%
경기	138	67.0%
충남	22	10.6%
충북	14	6.8%
경남	10	4.9%
경북	4	1.9%
전남	10	4.9%
전북	2	1.0%
합계	206	100.0%

같이 도로위계를 연속류, 준연속류 및 단속류로 구분하고, 연속류 및 준연속류에 대한 교통조사 및 VDF 함수를 구축하는 것을 주목적으로 한다.

준연속류의 조사지점 선정을 위해 통행시간에 영향을 미치는 요소인 신호등 밀도(신호등간 거리), 차로수, 중앙분리대 유무, 제한속도 등에 따라 도로유형을 세분화 하였으며, 세분화된 도로유형별로 도로 기하구조 조사를 통하여 최종 조사지점을 선정하였다. VDF는 다양한 도로 기하구조 특성을 고르게 반영해야 하므로 조사지점이 전국적으로 고르게 분포될 수 있도록 설정함이 바람직하지만, 정확한 VDF 파라메타 추정을 위해 용량 대비 교통량비율(v/c ratio)이 높은 지점을 우선적으로 선정할 필요가 있다. 그 결과, 조사지점이 교통량이 많은 경기, 충남, 충북에 집중되는 결과를 보여주고 있다. 연속류인 고속도로는 한국도로공사의 AVC(automatic vehicle classification) 검지기에서 수집되는 교통량 및 통행속도 자료를 이용하였다.

2. 교통량 및 통행속도 조사

VDF 파라메타 추정을 위한 교통량 및 통행속도는 1일 동안(07:00~21:00)의 단위시간대(예: 5분, 15분 등)별로 조사되어야 하며, 조사자료를 이용하여 교통량 수준에 따른 통행속도를 추정할 수 있어야 한다. 여기서,



<그림 1> 영상촬영 설치(예)

교통량은 하류부 신호교차로를 통과하는 교통량이 아니라 해당 링크를 이용하고자 하는 교통수요 개념으로 조사되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 조사 대상 링크의 상류부 진입부에서 교통량을 조사하였는데, 대기행렬이 상류부 진입부까지 발생하지 않는다면 상류부 진입부를 통과한 교통량을 순수한 교통수요라고 정의할 수 있다. <그림 1>에서와 같이, 조사 대상 링크의 상류부 진입부에 영상카메라를 설치하여 차종별 교통량을 조사하였다.

VDF 구축을 위한 통행속도는 대상 링크의 상류부 진입부에서 하류부 교차로를 통과하는데 소요되는 시간을 조사하여 구간통행속도를 조사해야 한다.

통행속도 조사 방법을 결정하기 위해, 본 연구에서는 조사원이 링크 진입시각, 하류부 교차로 통과시각을 조사하는 프로브 차량을 이용한 조사기법, GPS 탑재차량을 이용한 조사기법, 링크 중간지점에서의 스피드건 혹은 검지기자료를 이용한 조사기법에 대해 시험조사를 수행하여 <표 4>과 같이 정확도를 평가하였다. 스피드건을 이용한 지점속도 및 GPS를 이용한 구간통행속도조사기법 모두 조사원에 의한 프로브차량 이용기법과 큰 오차를 보이는 것으로 나타나, 본 과업에서는 조사원이 직접 프로브 차량을 이용하여 구간통행속도를 조사하는 기법을 적용하였다.

<표 4> 속도조사 결과비교

도로등급	구분	프로브 (km/h)	프로브 대비 오차율(%)	
			GPS	스피드건
국도(1)	상행	63	-5.27	25.91
	하행	63	-7.39	31.23
국도(2)	상행	67	-6.14	-2.73
	하행	65	-4.60	3.20
지방도(1)	상행	63	-12.10	15.70
	하행	65	-13.76	14.21
지방도(2)	상행	28	-16.54	22.08
	하행	26	-15.32	41.14
국지도(1)	상행	58	-8.06	37.25
	하행	60	-12.65	18.63
국지도(2)	상행	47	-5.77	-10.83
	하행	53	-15.55	-15.40

IV. VDF 추정

1. VDF 유형 선정

VDF의 유형으로는 국내에서 적용된 바 있는 BPR함수(Bureau of public roads, 1964), 코니칼함수(Heinz, 1990)가 있으며, 이외에 다양한 함수들이 Irwin외(1961), Smock(1962), Mosher (1963), Soltman(1965), Overgaard(1967), Dafemos (1967), Steenbrink(1974), Davidson(1966), Florian (1976) 등에 의해 제안된 바 있다. 국내에 적용된 사례를 보면, 국가교통DB(2006)는 전국 단위의 네트워크에 BPR 함수를 적용하였으며, 서울시정개발연구원은 2004년에 수도권 네트워크의 고속도로는 BPR 함수를, 신호간선도로는 코니칼 함수를 적용하였으나, 2008년에는 고속도로 및 신호 간선도로 모두 BPR함수를 적용한 바 있다. BPR 함수는 v/c 비율이 1보다 큰 경우에 통행시간이 급격히 증가하는 단점이 있는데 이를 보완하기 위해 선형함수 형태의 코니칼 함수가 제안된 바 있다. 본 연구에서 구축할 대상인 고속도로 및 준연속류의 실제 조사된 교통량 및 통행속도 자료를 이용하여 v/c 비율과 통행시간과의 관계도를 도시한 결과, 코니칼 함수보다는 BPR 함수가 더욱 적합한 것으로 나타났기 때문에 고속도로 및 준연속류의 VDF 유형으로 BPR 함수를 선정하였다.

2. 파라메타 추정방법론

국내에서 BPR함수의 파라메타를 추정하는 연구는 다수 수행된 바 있는데, 방법론은 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 첫째, 실제 교통량 및 통행속도 자료를 이용하여 BPR 파라메타를 추정하는 방법으로 식(2)와 같이 BPR 함수의 양변에 log를 취하여 선형함수화하고, 회귀분석기법을 이용하여 α, β 의 최적 값을 산출하는 방법이다(장덕형(1993), 강호익(1996), 김병기(2002)). 둘째, 교통수요모형을 이용하여 관측교통량과 배정교통량간의 오차를 최소화하는 BPR 파라메타 α, β 의 값을 추정하는 방법이다(이의은(1986), 최기주(1986), 서선덕(1990), 주정열(1993), 임용택(2008)).

$$t = t_0(1 + \alpha(v/c)^\beta) \tag{1}$$

1) 김주영, 최정민, 김진우, “도로통행비용함수 유형 선정에 관한 연구”, 교통연구 제16권 제3호, pp.1~12

$$\log(t/t_0 - 1) = \log\alpha + \beta \log(v/c) \quad (2)$$

여기서, t_0 : 자유통행시간, v : 교통량(대/시),
 c : 도로용량(대/시), α, β : BPR함수의 파라메타

본 연구에서는 연속류 및 준연속류 도로구간에서 실제 조사된 교통량 및 통행속도자료를 이용하여 VDF 파라메타를 추정하는데, 분석방법론은 다음과 같다.

[step 0] 조사지점별 $v/c, t/t_0$ 비율 계산

조사지점별 도로용량 및 자유통행시간을 산정한 후, 용량 대비 교통량비율(v/c)과 자유 교통류 하에서의 통행시간(이하 자유통행시간) 대비 통행시간비율(t/t_0)을 산출한다.

[step 1] 도로유형별 $v/c, t/t_0$ 자료 통합

VDF 구축을 위한 도로위계별로 모든 조사지점의 $v/c, t/t_0$ 값을 통합하여 구축한다.

[step 2] 이상치 제거

실제 조사된 교통량 및 통행속도자료는 돌발상황요인인 교통사고, 공사, 기상악화 및 이상 운전자 그룹 등에 의해 크게 영향을 받기 때문에 교통류 이론에 근거한 일반적인 교통량-속도 관계식과 상이한 패턴을 보일 수 있다. 따라서, 조사지점 및 시기 조정과정에서 배제되지 못한 돌발상황요인에 따른 영향을 배제하기 위해 이상치 제거를 수행해야 한다. 고속도로인 연속류와 준연속류에 대한 각각의 이상치 제거기준은 KHCM에 근거하여 다음과 같이 적용한다.

- 연속류 이상치 제거기준
- v/c 비율이 0.45 이하(LOS B)이면서, 통행속도가 80km/h 이하인 것
- v/c 비율이 0.8 이하(LOS D)이면서, 통행속도가 자유통행속도 이상인 것

<표 5> 준연속류 이상치 제거기준

구분	$0 < D^{(1)} < 0.3$	$0.3 \leq D < 0.7$	$0.7 \leq D < 1.0$
LOS "C"	V/C<0.58 Speed<70km/h t/to >1.24	Speed<50km/h t/to >1.47	Speed<53km/h t/to >1.64
LOS "E"	V/C<1.0 Speed<57km/h t/to >1.52	Speed<42km/h t/to >2.07	Speed<35km/h t/to >2.48
LOS "F"	V/C>1.0 Speed>57km/h t/to <1.52	Speed>42km/h t/to <2.07	Speed>35km/h t/to <2.48

*free flow speed는 87km/h 기준임 (KHCM의 다차로도로 기준)
 주1) D는 신호등 밀도(개/Km)

- v/c 비율이 1.0 이상이면서, 통행속도가 80km/h 이상인 것
- 준연속류 이상치 제거기준
- v/c 와 t/t_0 비율간의 상관성을 도출하기 위해 KHCM의 고속도로(설계속도 80km/h)의 서비스수준과 다차로 도로의 서비스 수준간을 비교하여 이상치 제거기준을 적용

[step 3] 최소자승법을 이용한 최적 파라메타 추정

본 연구에서는 BPR 파라메타 추정을 위한 방법론으로 최소자승법을 이용하였는데, BPR 파라메타인 α, β 값은 아주 작은 단위로 변화시키면서 v/c 에 따른 t/t_0 값의 추정치와 관측치간 오차의 자승값을 최소화하는 최적 파라메타 값을 선정하는 방법이다 (MATLAP(ver 6.5) 이용).

[step 4] 도로위계간 역전현상 검토 및 재추정

일반적으로 도로위계가 높은 도로가 낮은 도로에 비해 동일한 v/c 일 때 상대적으로 낮은 t/t_0 값을 보이는 것이 바람직하며, 도로위계간 이와 같은 현상이 유지되지 않은 경우에 역전현상이 발생한다고 정의하고 있다. VDF 구축 시 도로위계별로 높은 등급과 낮은 등급간 v/c 비율 변화에 따른 t/t_0 비율이 역전현상이 발생하는지를 검토하고, 역전 현상이 발생하는 경우에 관측치와 추정치간 오차가 가장 작은 도로위계를 기준으로 역전현상이 발생하지 않는 범위내에서 통행시간의 추정치와 관측치간 오차를 최소화하는 파라메타를 다시 추정하는 기법을 적용한다.

```
function[alpha,beta]=est_par_low(data,alpha_b,beta_b)
[a,b]=size(data);
error=1000000000;
for i=0:0.001:5
    for j=0:0.001:10.0
        er_spr=0;
        for k=1:a
            temp=i*data(k,1)^j;
            er_spr=er_spr+(data(k,2)-temp)^2;
        end
        if(er_spr<error)
            temp_2=0;
            for l=0.1:0.1:3
                aa=alpha_b*(l)^beta_b;
                bb=i*(l)^j;
                if(bb>=aa)
                    temp_2=1;
                end
            end
            if(temp_2<1)
                error=er_spr;
                alpha=i;
                beta=j;
            end
        end
    end
end
end
```

[step 5] O/D 및 교통분석용 네트워크를 이용한 검증

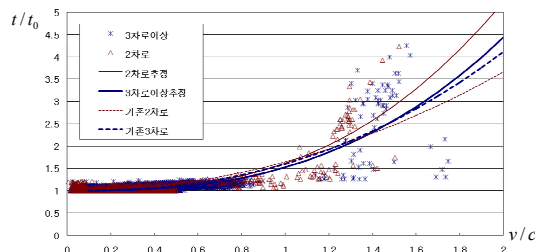
새로이 추정된 VDF 결과를 이용하여 얼마나 현실적으로 묘사할 수 있는지를 검증할 필요가 있다. 전국 지역 간 O/D와 교통분석용 네트워크를 이용한 링크별 배정교통량과 관측교통량간 오차비교, 기종점간 통행시간 비교, 링크별 통행시간 비교 등을 수행하여 새로운 VDF의 신뢰도를 검증한다.

3. 파라메타 추정결과

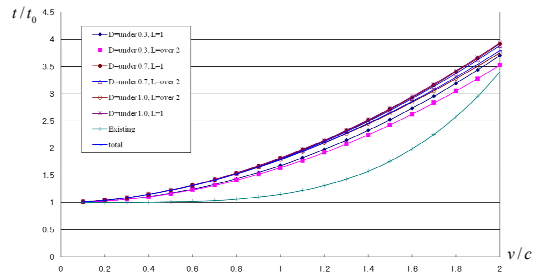
앞에서 제시한 바와 같이 연속류인 고속도로와 준연속류(교차로간 거리가 1km 이상인 링크)에 대해 교통조사자료에 근거하여 새로운 VDF를 구축하였다(<표 6> 참조). <그림 2>은 고속도로의 기존 VDF와 새로이 추정된 VDF를 보여주고 있는데, 점선으로 표현된 기존 2차로의 VDF가 v/c 비율 약 1.3정도에서 3차로보다 작아지는 역전현상을 보이고 있으나, 새로이 추정된 VDF는 역전현상이 발생하지 않고 있다. 새로운 VDF는 기존에 비해 α 값은 작아지고, β 값은 커짐에 따라 v/c 비율 1.0 이하에서는 통행시간이 작아지고, 반대로 1.0 이상에서는 다소 높게 추정하는 패턴을 보이고 있다. 준연속류의 새로운 VDF는 기존에 비해 α 값은 커지고, β 값은 작아지는 패턴을 보여준다. <그림 3>에서 v/c 비율의 변화에 따

<표 6> 추정된 도로유형별 파라메타

변경 도로위계(편도)		α	β
고속도로(2차로)		0.611	2.772
고속도로(3차로 이상)		0.526	2.707
준연속류 (1등급)	1차로	0.686	1.991
	2차로 이상	0.668	1.911
준연속류 (2등급)	1차로	0.809	1.849
	2차로 이상	0.798	1.809
준연속류 (3등급)	1차로	0.818	1.849
	2차로 이상	0.803	1.815
준연속류 전체(등급/차로 통합)		0.791	1.817



<그림 2> 고속도로 VDF



<그림 3> 준연속류 VDF

른 t/t_0 비율을 보면, 새로운 VDF가 기존에 비해 v/c 비율 2.0 이하에서는 큰 통행시간을 추정하는 반면, β 값이 크게 감소함에 따라 기존의 문제점인 v/c 비율이 2.0 이상에서 통행시간의 급격한 증가를 완화하는 패턴을 보여주고 있다.

V. 새로운 VDF의 검증

새로이 구축된 VDF에 대한 검증과정은 크게 2가지로 구분할 수 있는데 첫째, 얼마나 조사된 교통자료와 적합하게 VDF 파라메타를 추정하였는지에 대한 검증이며, 둘째, 새로운 VDF 적용시 교통수요 예측의 신뢰도가 얼마나 개선되는지에 대한 검증이다.

1. 파라메타 추정의 적합도 검증

VDF 파라메타 추정의 적합성을 검증하기 위해 본 연구에서는 Theil의 부등계수를 적용한다. Theil의 부등계수는 RMSE에 의해 정의되고 있으며, 관측치와 모형에 의한 추정치간의 차이를 비교하여 독립변수 v/c 비율에 따른 종속변수 t/t_0 비율의 모형 추정치가 관측치를 얼마나 잘 표현하고 있는가를 설명하는 방법으로, 유틸리티 값은 0과 1사이의 값을 가지며 0에 가까울수록 모형의 설명력은 높다고 해석할 수 있다.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}} \quad (3)$$

여기서, e_i : v/c 에 따른 t/t_0 의 추정치
 o_i : v/c 에 따른 t/t_0 의 관측치
 n : 관측치의 수

<표 7> Theil의 부등계수 비교

구분 (편도 기준)		기존 VDF	새로운 VDF
고속도로	2차로	0.2830	0.2459
	3차로 이상	0.3901	0.3875
준연속류 (1등급)	1차로	0.7696	0.2930
	2차로 이상	0.6974	0.3750
준연속류 (2등급)	1차로	0.5643	0.2732
	2차로 이상	0.6940	0.3164
준연속류 (3등급)	1차로	0.4856	0.2411
	2차로 이상	0.8477	0.3497

<표 7>은 새로운 VDF와 기존 VDF에 대한 Theil의 부등계수 분석결과를 보여주고 있다. 고속도로는 새로운 VDF가 기존 VDF에 비해 미미하게 개선된 결과를 보여주고 있는데, 이는 기존 VDF가 실제 교통자료에 근거하여 추정되었기 때문인 것으로 판단된다. 준연속류는 새로운 VDF의 Theil 부등계수가 기존에 비해 약 절반수준 이하로 떨어지는 것으로 분석되어 적합도가 크게 개선되는 것으로 나타났다. 따라서, 새로운 VDF는 실제 교통자료에 근거하여 추정되었기 때문에 현실을 잘 묘사하고 있다고 설명할 수 있다.

2. VDF 적용을 통한 신뢰도 검증

새로운 VDF를 적용시 교통수요 예측의 신뢰도가 얼마나 개선되는지 여부를 분석하기 위해, 본 연구에서는 배정 교통량과 관측 교통량간의 오차를 변화, 기종점간 통행시간의 변화, 경로선택의 변화를 검토한다.

1) 신뢰도 검증을 위한 VDF 관련변수 적용방안

기존 VDF는 도로위계별로 도로용량, 자유통행속도를 확률적으로 적용함에 따라 현실적으로 O/D를 보정하거나 교통분석용 네트워크를 수정하지 않으면 배정교통량과 관측교통량간의 오차를 줄이는 정산과정을 효율적으로 수행하기에 많은 한계점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 도로용량과 자유통행속도를 일정범위내에서 조정하면서 교통수요모형이 현실 교통상황을 잘 반영할 수 있도록 정산하는 방안을 제안한다. 실제로 미국사례에서는 정산과정을 통하여 교통수요모형의 배정교통량과 관측교통량을 일치시키기 위해 링크별 도로용량과 자유통행속도를 조정하는 것으로 조사된다.

도로용량은 도로위계별로 확률적인 차로당 용량을 차로수를 곱하여 적용하고 있는데, 차로수가 증가함에 따라 단순 증가하지 않는다는 연구결과(KTDB, 2009)가 제시

된 바 있다. 또한, 도로용량에 지대한 영향을 미치는 진출입부 병목구간, 선형불량구간 등의 도로용량은 기본구간에 비해 낮은 반면, 기하구조가 일반적인 기본구간에 비해 양호한 경우에는 증가될 수 있다. 예로써, 고속도로의 경우에 진출입 램프간의 평균거리, 링크의 평면 및 종단선형 등을 감안하여 차등화 하여 적용하는 방안이 바람직하다. 본 연구에서는 교통수요모형 정산시 도로위계별 적정용량을 기준으로 일정 범위 내에서 도로용량을 탄력적으로 적용하는 방안을 제안한다.

기존 VDF의 자유통행시간은 도로관리주체별 도로유형과 차로수에 따라 확률적으로 적용함에 따라 도로설계시 고려된 속도(설계속도 혹은 제한속도)가 전혀 반영되지 않는 문제점이 있다. 예로써, 제한속도가 60km/h인 국도 3차로는 자유통행속도가 90km/h로 적용되나, 제한속도가 80km/h인 국도 2차로는 80km/h로 더 낮게 적용되는 문제가 발생하고 있다. 따라서, 자유통행속도는 해당 링크의 제한속도 혹은 설계속도에 비례하여 적용될 필요가 있으며, 효율적인 정산을 위해 적정 범위 내에서 탄력적으로 적용할 필요가 있다. 교통조사를 통하여 최대속도를 분석한 결과, 대부분 제한속도와 설계속도 범위 내에 해당되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 효율적인 정산을 위해 자유통행속도를 제한속도와 설계속도 범위 내에서 링크별로 적절히 조정하는 방안을 제안한다.

2) 신뢰도 검증

본 연구에서 제안한 도로용량 및 자유통행속도를 일정 범위 내에서 탄력적으로 적용하는 방안이 근거하여 신뢰도 검증을 위한 시나리오를 다음과 같이 구성한다.

- 도로용량 : 고속도로의 도로용량을 2,000~2,200대/시/차로 범위내 탄력적으로 적용
 - ※ 준연속류는 기존과 동일하게 적용(추후 신호운영 조건을 고려하여 반영)
- 자유통행속도 : 링크별 제한속도~설계속도 범위 내에서 탄력적으로 적용

도로용량과 자유통행속도에 대해 시나리오를 다양하게 적용하여 신뢰도 검증을 수행한 결과, 도로용량은 고속도로 2,200대/시/차로를 적용하고 자유통행속도는 설계속도를 적용하는 대안이 가장 좋은 신뢰도를 가지는 것으로 나타나, 도로용량 및 설계속도의 초기값으로 각각 2,200대/시/차로, 설계속도를 적용한다. 이를 근거로 통행배정을 수행한 후, 고속도로에 대해 배정교통량이 관측교통량을 30% 이상 초과하는 과다노선은 도로

<표 8> 신뢰도 검증 결과

(단위: %, 대/일)

구분	고속도로			일반국도			상대오차의 (배정량-관측량) 합계		절대오차의 (배정량-관측량) 합계	
	과다	적정	과소	과다	적정	과소	고속도로	일반국도	고속도로	일반국도
'06년 현행화	23.1	63.9	13.0	37.0	33.0	30.0	2,754,930	1,327,478	8,874,528	11,837,273
'07년 현행화	20.9	66.6	12.5	32.0	34.0	34.0	3,020,564	-625,562	9,778,282	12,197,777
새로운 VDF	18.4	69.2	12.4	18.0	33.7	48.3	-580,496	-7,985,035	8,534,354	12,599,215

주1) 과다노선/과소노선 : 오차율 비교시 +30% 이상인 노선/-30% 이하인 노선
 주2) 본 연구에서 수행하지 않은 단속류의 새로운 VDF는 준연속류의 최하위레벨(3등급) 적용

용량 및 자유통행속도를 제한 범위 내에서 조금씩 감소시키고, 반대로 과소노선은 조금씩 증가시키면서 최대한 신뢰도를 높이는 정산과정을 수행하였다.

<표 8>은 기존 VDF와 새로운 VDF 적용시 신뢰도가 얼마나 개선되는지를 살펴보기 위해 국가교통DB(KTDB)에서 제공하는 전국 지역간 O/D와 교통분석용 네트워크를 이용하여 신뢰도 검증을 수행한 결과를 보여주고 있다. '06년 현행화(모든 도로: 기존 VDF), '07년 현행화(고속도로: 새로운 VDF, 기타: 기존 VDF), 새로운 VDF(모든 도로: VDF 적용)의 3개의 대안에 대해 과다 및 과소 통행 배정 링크의 비율, 관측교통량과 추정교통량간의 상대오차의 합계 및 절대오차의 합계를 표현하고 있다. 새로운 VDF 적용시 적정 오차범위내의 비율이 고속도로 69.2%, 일반국도 33.7% 수준으로 기존에 비해 증가하는 것으로 나타나 신뢰도가 개선되는 것으로 분석된다. 기존 VDF('06년)의 오차율을 분석해보면, 고속도로는 과다 23.1%, 과소 13.0% 수준으로 과다가 많은 특성을 보이고 있으며, 일반국도는 과다 37.0%, 과소 30.0%로 과다가 많은 특성을 보이고 있다. 그러나 현실적으로 전국 지역간 O/D는 전국 248개 시·군·구 단위의 존재계로 교통수요모형 이용시 존 내부통행(약 전국 통행량의 37% 수준)을 배정하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 또한 관측교통량 조사지점이 시·군·구간 경계지점으로부터 구성되어 있지 않기 때문에 관측교통량은 내부통행량이 다수 포함되어 있다. 따라서, 일반국도는 통행배정시 관측교통량이 배정교통량보다 많아야 바람직하지만, 기존 VDF 적용시 반대의 현상을 보이는 문제점이 발생한다. 새로운 VDF 적용시 일반국도의 경우 배정교통량이 관측교통량보다 과소인 지점이 전체의 48.3%로 과다 18.0%보다 훨씬 높아짐에 따라 이와 같은 문제점을 개선하는 것으로 분석된다. <표 8>에서는 3개의 대안별로 배정교통량과 관측교통량간 상대오차의 합계와 절대오차의 합계를 비교하고 있다. 여기서, 상대오차는 고속도로 및 일반국도별 전체적으로 과다 혹은 과소 배정되는지의 여부를 판단할 수 있는 지표가 되며, 절대오차는 고속도로

및 일반국도별 전체적으로 어느 정도 오차가 발생하는지를 평가할 수 있는 지표가 된다. 새로운 VDF 적용시 기존 VDF('06년)에 비해 고속도로의 상대오차 및 절대오차가 모두 감소하는 결과를 보여주고 있다. 고속도로의 상대오차가 0에 가까워지므로 고속도로 전체 배정 교통량이 전체 관측교통량 수준에 가까워진다고 해석할 수 있으며, 절대오차는 기존에 비해 약 34만대 정도 감소하는 결과를 보여주고 있다. 일반국도는 상대오차는 기존 약 133만대에서 약 -800만대로 감소하여 양의 값에서 음의 값으로 변화되는 결과를 보여주고 있다. 이는 기존 VDF 적용시 총 배정교통량이 총 관측교통량보다 많았으나, 새로운 VDF 적용시 총 관측교통량이 총 배정교통량보다 많다는 것을 의미한다. <표 8>에서 고속도로 및 국도의 상대오차가 기존 VDF에 비해 감소하고 있는데, 이는 고속도로 및 국도 전체의 배정 교통량이 감소하였다고 평가할 수 있다. 새로운 VDF는 기존 도로관리주체별 도로유형 구분에서 도로 기능별(신호등간 거리) 도로유형으로 재 분류하여 파라메타를 추정하고 신뢰성 검증을 수행하였다. 기존 VDF 중 광역시도, 시군도 VDF의 과소 평가(자유통행속도 40km/h, 일용량 4,000대)문제로 상대적으로 국도 및 지방도에 교통량이 많이 배정되었으나, 새로운 VDF 적용시 국도의 교통량이 광역시도 및 시군도로 전환되어 국도의 상대오차가 작아지는 결과를 초래한 것으로 분석된다.

3) 기종점간 통행시간 검증

VDF는 교통량 수준에 따른 링크 통행시간을 산정하는 함수로서, 기종점간 통행시간 및 경로선택에 결정적인 영향을 미치는 요소이다. 따라서, 새로운 VDF에 대한 검증 과정으로 기종점간 통행시간이 어떻게 변화되는지가 반드시 분석될 필요가 있다. <표 9>에서는 신뢰도 검증을 수행한 3개의 대안에 대해 장거리 기종점간의 통행시간이 어떻게 변화되는지를 분석하여 제시하고 있다. 전국 지역간 O/D 및 교통분석용 네트워크를 이용하여 세로축, 가로축, 서남축, 북동축 등의 주요 장거리 기종점에 대한 통행시간을 분석한

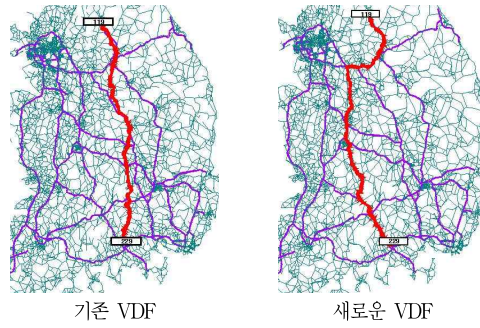
<표 9> 장거리 기종점간 통행시간 비교

구분	출발존	도착존	통행시간		
			현행화(06)	현행화(07)	새로운 VDF
세로축1	서울	광주	6시간 48분	6시간 39분	4시간 56분
	광주	서울	6시간 38분	6시간 26분	4시간 54분
세로축2	진주	춘천	5시간 18분	5시간 12분	5시간 28분
	춘천	진주	5시간 20분	5시간 13분	5시간 30분
세로축3	강릉	부산	5시간 56분	5시간 38분	6시간 00분
	부산	강릉	5시간 57분	5시간 47분	6시간 13분
가로축1	강릉	태안	4시간 32분	4시간 25분	4시간 52분
	태안	강릉	4시간 35분	4시간 34분	4시간 58분
가로축2	군산	포항	4시간 33분	4시간 28분	4시간 46분
	포항	군산	4시간 32분	4시간 33분	4시간 49분
서남축	서울	부산	9시간 02분	8시간 14분	6시간 20분
	부산	서울	8시간 46분	7시간 59분	6시간 27분
북동축	강릉	광주	6시간 16분	6시간 8분	6시간 27분
	광주	강릉	6시간 18분	6시간 5분	6시간 27분

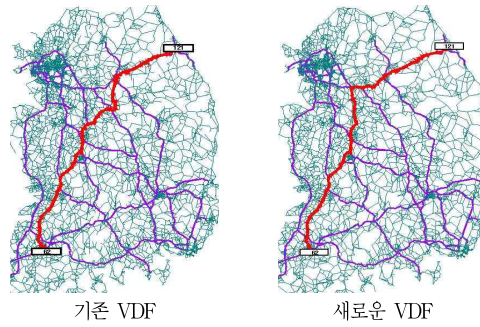
결과, 서울-광주간의 통행시간은 기존 VDF 적용시 소요시간이 약 6시간 40분대에서 새로운 VDF 적용시 약 4시간 50분대로 약 2시간 가량 감소하는 패턴을 보이고 있으며, 서울~부산간의 통행시간은 기존 VDF 적용시 약 9시간에서 새로운 VDF 적용시 약 6시간 20분대로 약 2시간 30분 정도 감소하는 패턴을 보이고 있다. 기존 VDF 적용시 서울~광주, 서울~부산 구간의 통행시간이 현실보다 장시간 추정하는 패턴을 보이고 있으나 새로운 VDF를 적용하면 이러한 문제점이 개선되는 것으로 분석된다. 서울~광주, 서울~부산을 제외한 나머지 기종점은 기존 VDF와 새로운 VDF 적용시 유사한 수준을 보이는 것으로 나타났다.

4) 기종점간 통행경로 검증

일반적으로 지적되어 온 기존 VDF의 주요 한계점으로 미국 공로국의 파라메타를 그대로 적용한 일반국도, 지방도 등의 통행시간이 현실보다 너무 낮게 평가된다는 것예로 들 수 있다. 이로 인하여 장거리 기종점 통행의 경우 현실적으로 고속도로를 이용하여 통행하지만 교통수요모형에서는 고속도로에서 국도로 전환하는 패턴을 자주 보이고 있다. 준연속류의 새로운 VDF는 기존 VDF에 통행시간이 다소 높게 추정되도록 구축됨에 따라 이와 같은 문제를 많이 해소한 것으로 분석된다. <그림 4>는 진주 → 춘천간의 장거리 통행과 <그림 5>은 광주 → 강릉간의 장거리 통행에 대해 기존 VDF와 새로운 VDF 적용시 교통수요모형에 의해 선택된 통행경로를 비교하고 있다. <그림 4>에서 기존 VDF 적용시 선택된 통행경로는 대부분 일반국도로 구성되는 특성을 보이고 있으며, <그림 5>에서 대전~여주구간에서 일반국도가 고속도로보다 통행시



<그림 4> 세로축2(진주 → 춘천) Path



<그림 5> 북동축(광주 → 강릉) Path

간이 짧은 것으로 분석되고 있다. 그러나, 새로운 VDF 적용시 <그림 4>와 <그림 5> 모두 선택된 통행경로는 고속도로로만 구성되는 것으로 나타났다.

VI. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 기존 통행비용함수의 문제점을 검토하고, 현재 도로 관리주체별로 분류되어 있는 도로등급을 신호등 밀도 등에 따른 도로 기능별로 재분류하여 도로위계를 재설정하였다. 또한, 고속도로 및 준연속류에 대해 교통량 및 통행속도 등을 조사하여 도로위계별 새로운 VDF를 구축·제시하였다. 새로운 VDF의 신뢰도 검증을 수행한 결과, 오차율의 개선, 기종점간 통행시간 및 통행경로의 현실적인 개선 등의 효과를 가지는 것으로 분석되었다. 전국 지역간 O/D 및 교통분석용 네트워크를 이용하여 통행배정을 수행한 결과, 존내부통행이 배정될 수 없는 교통수요모형의 한계점의 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 구축한 새로운 VDF를 적용하기 위해서는 선행되어야 할 몇가지 사항이 있는데, 첫째, 본 연구에서 구축되지 않은 단속류(신호등간 거리가 1km 이하)의 VDF가 구축되어야 한다. 둘째, 본 연구에서는 기존 도로 관리주체에 근거한 도로위계에서 신호등 밀도(혹은 신호

등간 거리) 등 도로의 기능에 근거한 도로위계로 재분류하여 VDF를 구축함에 따라, 이를 교통분석용 네트워크에 적용하기 위해서는 전국 단위의 신호등 조사가 선행될 필요가 있다. 단기적으로 교통분석용 네트워크에서 2개 이상의 도로가 교차하는 지점을 신호교차로로 가정하여 접근하는 방법도 제안할 수 있다. 셋째, 준연속류 및 단속류의 도로용량, 자유통행속도를 탄력적으로 적용할 수 있도록 하여 교통시설 타당성 평가시 현실과 유사하게 정산이 가능하도록 조정하는 방안도 요구된다.

참고문헌

1. 강호익(1996), “도로유형별 지체함수 정립과 교통배정에 미치는 영향분석”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 강호익 · 박창호(1998), “도로유형별 지체함수 정립에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.117~131.
3. 건설교통부(2001), “한국도로용량편람(KHCM)”
4. 김병기(2002), “국도기능별 통행저항함수 추정에 관한 연구”, 한양대학교 환경대학원 석사학위 논문.
5. 이의은(1986), “링크체증함수 및 일반화 비용함수의 적용에 관한 고찰”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
6. 임용택 · 강민구 · 추상호 · 이상민(2008), “도로 통행 지체함수의 파라미터 추정 및 검증”, 대한교통학회지, 제26권 제3호, 대한교통학회, pp.17~29.
7. 장덕형(1993), “고속도로 통행의 지체함수와 통행저항 파라미터의 민감도 분석에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
8. 주정열(1993), “통행배정모형의 도로용량함수 비교 및 적용에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
9. 최기주(1986), “용량저항함수의 비교분석 및 그 적용방안에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
10. 한국교통연구원(2007.4), “2006년도 국가교통DB 구축사업”.
11. 한국교통연구원(2009.4), “2008년도 국가교통수요조사 및 DB 구축사업 중 도로통행비용함수 구축관련 조사연구”.
12. 김주영 · 최정민 · 김진우, “도로통행비용함수 유형 선정에 관한 연구”, 교통연구 제16권 제3호, pp.1~12.
13. Bureau of Public Roads(1964), Traffic Assignment Manual, U.S. Dept. of commerce, Urban Planning Division, Washington D.C., USA.
14. Dafermos, S. C. (1968). Traffic Assignment and Resource Allocation in Transportation

Networks. PhD thesis, The John Hopkins University, Baltimore, MD.

15. Davidson, K. B. (1966). A flow travel time relationship for use in transportation planning. Proceedings of Australian Road Research Board, Bulletin, 3(part a), pp.183~194.
16. Florian, M. and Nguyen S.(1976), ‘An Application and Validation of Equilibrium Trip Assignment Methods,’ Transportation Science 10, pp.374~390.
17. Highway Capacity Manual, Dept. of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee.
18. Irwin, N. A., Dodd, N., and Von Cube, H. G. (1961). Capacity restraint in assignment programs. Highway Research Board Bulletin, 297, pp.109~127.
19. Mosher, W. W. (1963), A Capacity Restraint Algorithm for Assigning Flow to a Transport Network, Highway Research Record 6, pp.41~70.
20. Overgaard, K. R. (1967). Urban transportation planning: Traffic estimation. Traffic Quarterly, pp.197~218.
21. Smock, R. J. (1962). An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks. Highway Research Board Bulletin, 347, pp.60~66.
22. Soltman, T. J. (1965). Effects of alternate loading sequences on results from Chicago trip distribution and assignment model. Highway Research Record, 114, pp.114~122.
23. Spiess, H.(1990), Conical volume-delay functions, Transportation Science Vol 24, No. 2.
24. Steenbrink, P. A. (1974). Optimization of Transport Network. John Wiley and Sons, New York, NY.

✉ 주 작성자 : 김주영
 ✉ 교신처자 : 김주영
 ✉ 논문투고일 : 2009. 7. 21
 ✉ 논문심사일 : 2009. 10. 16 (1차)
 2009. 11. 10 (2차)
 2009. 12. 4 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2009. 12. 4
 ✉ 반론접수기한 : 2010. 6. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필