



미시적 교통류 시뮬레이터기반 통행비용함수의 개발 및 적용

Developing the travel cost function based on Microscopic Simulator(VISSIM) Data

조 현 우* 이 용 택**
Cho, Hyun Woo Lee, Yong Taek

Abstract

In general, based on traffic data in a ideal traffic condition, BPR cost function is used to a variety of transportation policies. However, Some researchers have reported that BRP cost function is not appropriate for analyzing traffic pattern as well as forecasting future demand. (Spiess,1989 ; Singh, 1999) Therefore, in this paper to solve this problem, a methodology based on data through Micro traffic Simulator Based (MSB) is developed. As a result, following outputs are obtained ; (1) presenting a methodology to develop a travel cost function through VISSIM in order to assess transportation policies and (2) developing BRP cost function and MSB cost function from data analysis through VISSIM and verifying availability of MSB function by comparative analysis.

Keywords : travel cost function, BPR cost function, MSB cost function, VISSIM

요 지

일반적으로 도로정책평가 시, 이상적인 도로·교통조건에서 수집한 교통류 자료에 근거하여 BPR식 형태로 개발한 통행비용함수식을 일반화하여 적용한다. 하지만, BPR 형태로 개발된 모형은 장래교통량예측이나 통행행태분석에 있어서 적용이 도로·교통환경을 묘사하는데 적합하지 않은 것으로 보고되고 있다.(Spiess,1989 ; Singh, 1999) 따라서 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 분석대상지의 도로·교통조건에 적합하도록 미시적 교통류시뮬레이터기반(Micro traffic Simulator Based : MSB)으로 생성된 자료로 통행비용함수를 개발, 검증하는 분석방법론을 제시하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 이상적인 도로교통조건 이외의 상황에 대한 도로교통정책 평가에 적용이 용이하도록, 단시간에 다량의 교통류 자료생성이 가능한 미시적 교통류시뮬레이터(VISSIM)를 이용하여 분석대상지에 적합한 통행비용함수를 개발하는 방법론을 제시하였다. 둘째, VISSIM을 이용하여 생성한 분석자료를 기반으로 하여 BPR 함수식과 MSB 함수식을 각각 개발하고, 통계값 및 산포도를 이용한 모형들의 비교분석을 통하여 MSB 함수식의 활용가능성을 검증하였다.

핵심용어 : 통행비용함수, BPR식, MSB식, VISSIM

* 삼성 SDS 책임연구원 · 공학박사
** 정회원 · 감사원 부감사관 · 공학박사



1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

통행시간은 두 지점을 이어주는 하나의 링크(또는 아크)를 통과하는데 소요되는 시간을 의미하며, 통행비용함수식(Travel Cost Function)은 통행시간-교통류관계를 함수식으로 묘사한 것을 말한다. 통행비용함수는 통행시간을 예측하는 함수식으로 이해하기에 쉽고 산출식의 구조가 매우 간단하여 적용이 용이하기 때문에, 많은 연구자에 의해 다양한 형태로 개발되어 활용되고 있다. 이러한 통행비용함수식에 관한 연구는 1960년대 이후부터 교통시설계획 수립시, 수요분석기법이나 시설투자의 적합성 여부를 분석하기 위한 교통망분석기법 (Network Design Problem)에 도입되었으며, 이후 교통공학 전분야에서 활발히 적용되어오고 있다. 먼저 Smock(1962)은 디트로이트 교통연구(Detroit Area Transportation Study)에 사용하기 위해 (식1)과 같이 링크교통량/링크용량(V/C)과 통행시간(T)의 함수로 통행비용함수를 개발하였다.

$$T = T_0 \exp\left(\frac{V}{C}\right) \quad (\text{식 1})$$

이러한 함수의 형태 중 가장 널리 사용되는 함수식은 (식2)와 같이 미국공로국(Bureau of Public Road, 1964)이 개발한 BPR식이다.

$$T = T_{\min} \left[1 + 0.15 \left(\frac{q}{q_{\max}} \right)^4 \right] \quad (\text{식 2})$$

여기서, T : 특정교통류(q)의 통행시간
 q_m : 포화유율, T_{\min} : 는 최소통행시간

BPR식은 통행시간은 교통량의 증감과 큰 상관관계를 가지고 있다는 1965년 HCM을 기본가정으로 만든 함수식으로, 함수의 조작성이 쉽고 특정치에 접근(asymptote)하지 않기 때문에 어떤 통행량에서도 통

행비용을 구할 수 있다는 특징을 가지고 있다.(임강원, 2003) 그러나 이러한 BPR식은 도로·교통환경을 묘사하는데 비현실적이라는 문제점이 지적되고 있다. 첫째, V/C비가 1.0을 넘어가는 과포화상태(oversaturated condition)의 경우 통행시간을 과소추정(underestimate)하는 반면, V/C가 1.0 이하인 비포화상태(unconstrained condition)의 경우에는 통행시간을 과다추정(overestimate)하는 결과를 보이고 있어 V/C비가 1.0을 넘어가게 되는 장래 교통량예측이나 통행행태분석에 있어서는 적용이 적합하지 않은 것으로 보고되고 있다(Spiess,1989;Singh,1999). 둘째, 도로·교통운영조건에서 개발된 함수식을 일반화하여 서로 다른 조건의 링크에 동일하게 사용하다보니 다양한 조건에서 도입되는 교통정책대안을 분석하는데 현실성이 떨어진다.

이러한 단점을 극복하기 위해 해당 연구대상지의 도로·교통조건에 적합하도록 Modified BPR식, MTC식 (Metropolitan Transportation Commission Bay Area), Akcelik 함수식 등이 개발되어왔으나 기존의 문제점을 완벽하게 극복하지는 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 이상적인 도로·교통조건하에서 수집한 통계자료를 바탕으로 개발한 BPR 함수식을 획일적으로 적용함으로써 발생할 수 있는 비현실적인 문제점을 해결하기 위해서, 미시적 교통류시뮬레이터인(Microscopic traffic simulator) VISSIM을 이용하여 (장래에 건설되는) 분석대상지에 적합한 통행비용함수식을 필요에 따라 유형별로 개발하여 다양한 정책대안에 적용할 수 있도록 함수식의 개발·활용방안을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 수행방법

본 연구의 내용은 기존 통행비용함수식의 한계를 극복할 수 있도록 분석대상지의 도로·교통조건에 적합한 미시적 교통류시뮬레이터기반(Micro traffic Simulator Based : MSB) 통행비용함수를 개발하



는 것을 주목적으로 하고있다. 이를 위해 미시적 교통류시뮬레이터인 VISSIM으로부터 생성된 교통류 자료를 기반으로 하여 BPR 함수식과 MSB 함수식을 각각 개발하고, 통계값 및 산포도를 이용하여 모형간 비교분석을 통해 MSB 함수식의 활용도를 검증하였다. 이를 수행하기 위한 본 연구의 수행방법은 다음과 같다.

첫째, 기존 링크 통행비용함수의 한계와 적용 시 문제점을 파악한다.

둘째, 미시적 교통류시뮬레이터(VISSIM)를 통해 모형개발을 위한 자료를 수집한다.

셋째, 수집한 자료를 이용하여 BPR, MSB 함수식을 개발한다.

넷째, 모형간 비교분석을 통해 MSB 함수의 활용도를 확인한다.

표 1. VISSIM의 주요 입력·출력자료 현황

| 구분 | 자료항목 | 세부 내역 |
|----------------------|----------|---|
| 입력 자료 | 도로유형 | 일방향 고속도로 |
| | 차로수 | 2차로 |
| | 도로연장 | 2003 ft |
| | 도로폭 | 12 ft |
| | 차량종류 | Car: 100%, Heavy Vehicle: 0% |
| | 교통량 | 7600 대 |
| | 희망통행속도 | 96 mph (Default 값) |
| 출력 자료 | 차량인식번호 | 개별 차량번호 (Individual Vehicle Number) |
| | 교통량 | 관측된 차량수 (Number of Vehicles observed during the Simulation) |
| | 통행시간 | 차량총통행시간 (Total Travel Time of the Individual Vehicle) |
| | 교통류 속성자료 | 밀도 (Density) |
| 교통량 (Volume) | | |
| 평균속도 (Average Speed) | | |

2. 자료수집 및 분석

2.1 기본가정

분석대상지에 적합한 자료수집을 위해서, VISSIM을 이용하여 함수식 개발을 위한 자료수집을 수행한다. 미시적 교통류시뮬레이터의 도로기하 구조 및 교통운영조건과 관련한 입력·출력자료들의 자료항목과 항목별 세부내역은 표 1과 같다.

2.2 자료수집

VISSIM을 통한 자료수집을 위해 표 1과 같은 입력자료를 바탕으로 도로네트워크를 구성하여 해당도로로 각각의 V/C비에 따라 차량을 통과시켰다. 먼저 교통류시뮬레이션을 통해 개별차량의 통행시간이 수집되어지고 이 자료를 토대로 평균통행시간 및 분산이 산출되었다. 그림 1은 평균통행시간과 V/C비의 관계를 보여주고 있는데, 평균통행시간은 교통량의 증가에 따라 점차 증가하고 있으며, V/C비가 0.8

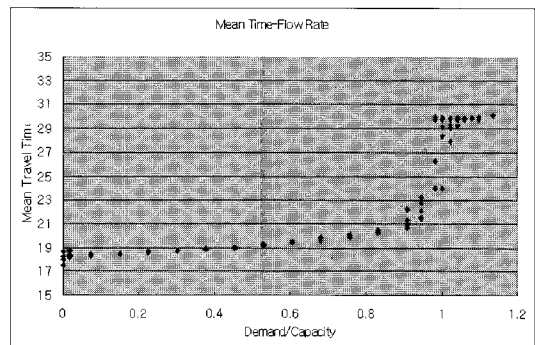


그림 1. 평균통행시간과 교통량과의 상관관계

을 넘어가는 지점부터 더욱 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

VISSIM을 이용한 자료수집 시 두 가지 유의사항이 발견되었다. 첫째는 네트워크가 비포화상태일 경우 ($V/C \leq 1.0$), 모든 개별차량은 운전자의 희망통행속도(desired cruising speed)로 네트워크를 통과하게 된다는 것이다. 이러한 현상은 그림 1과 같이 낮은 교통류율($0 \leq V/C \leq 0.7$)에서 평균통행속도가 크게 변하지 않는 특성을 가지게 된다. 둘째, 일반적으로 그림 2와 같이 네트워크내의 혼잡



도가 커질수록 차량의 대기행렬 길이는 점점 길어지게 되고 그 대기행렬은 네트워크의 크기를 넘어 가게 된다는 것이다. 그러므로 포화상태의 네트워크에서는 통행속도는 대기행렬의 네트워크 통과비율(discharging rate)에 따라 결정되게 되고, 그 결과 일정한 평균통행속도를 보여주게 된다. 이러한 현상은 그림 1에서 V/C비율이 1.0을 넘어가는 경우, 평균통행시간이 크게 변하지 않는 특징을 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 특성을 반영하여 포화(constrained) 상태에서 수집된 자료들(V/C)1.0)은 분석대상에서 제외하여 함수식을 개발하였다.

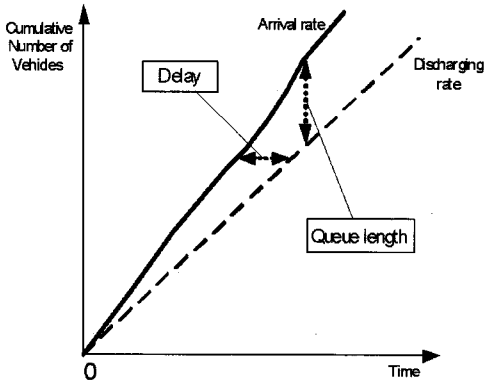


그림 2. 혼잡도의 증가에 따른 대기행렬 길이와의 관계

2.3. 모형식 개발과 통계검증

2.3.1 BPR식 개발

MSB식과 비교분석을 위하여 수집된 자료 중 시물레이션 수행 시 중간부분에 해당하는 표본(n) 100개를 추출하여 기존에 널리 사용되고 있는 BPR식의 통행비용함수를 먼저 개발하였다.

$$t_a(x_a) = \theta_{a1} \left[1 + \theta_{a2} \left(\frac{x_a}{s_a} \right)^{\theta_{a3}} \right] \quad (\text{식3})$$

여기서, θ_{a1} : 계수 ($i = 1, 2, 3$)

x_a : 링크 a의 교통량, s_a : 링크 a의 용량

BPR식 내 계수들($\theta_{ai}(i = 1, 2, 3)$)은 서로 독립적이라고 가정하였으며, 계수들의 추정을 위해 VISSIM으로부터 수집된 교통류자료를 기초로 하여 회귀분석(regression analysis)이 이루어 졌다. 분석과정의 단순화를 위해, θ_{a3} 는 정수로, $\theta_{a3} = 1, 2, \dots, 19, 20$ 으로 한정하여 분석하였으며, 통계치와 분석결과는 표 2와 같다.

표 2. BPR식 추정을 위한 회귀분석 결과

| θ_{a3} (given) | 통계값 | | θ_{a1} | | | θ_{a2} | | |
|--------------------------|------------------|------------|---------------|--------|----------|---------------|-------|---------|
| | R ² 값 | 표본수 (n) | 계수 | t 값 | P값 | 계수 | t 값 | P 값 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 12 | 0.832 | 100 | 18.85 | 164.71 | 6.2E-101 | 0.461 | 19.68 | 5.5E-32 |
| 13 | 0.835 | 100 | 18.88 | 166.95 | 2.2E-101 | 0.475 | 19.84 | 3.3E-32 |
| 14 | 0.836 | 100 | 18.90 | 168.65 | 9.9E-102 | 0.488 | 19.94 | 2.4E-32 |
| 15 | 0.838 | 100 | 18.92 | 169.86 | 5.7E-102 | 0.500 | 18.53 | 2.0E-32 |
| 16 | 0.837 | 100 | 18.94 | 170.64 | 4.0E-102 | 0.513 | 19.98 | 2.1E-32 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

분석결과 표 2와 같이, $\theta_{a3} = 15$ 일 때, 가장 높은 R²값을 보이고 있어, BPR함수식은 (식4)와 같이 추정할 수 있다.

$$t_{2-lane} = 18.92318 \times \left(1 + 0.500434 \cdot \left(\frac{D}{C} \right)^{15} \right) \quad (\text{식4})$$

여기서, t_{2-lane} : 2차로 고속도로의 평균통행시간,

D: 교통량, C: 용량

D/C비: 0 과 1.0. 사이의 값

2.3.2 MSB식 개발

BPR식의 한계를 해결하기위해서 (식 5)와 같은 비선형 함수식형태로의 통행비용함수식을 가정하였다.

$$t_a(x_a) = \sum_{i=0}^x \tau_i \cdot \left(\frac{x_a}{s_a} \right)^i \quad (\text{식5})$$

여기서, $t_a(x_a)$: 링크 a의 통행시간, i : i^{th} 승수,

x_a : 링크 a의 교통량, s_a : 링크 a의 용량



MSB식 내 계수($\tau_i, (i=1,2,3)$)들은 서로 독립적이라고 가정하였으며, 계수들의 추정을 위해 VISSIM으로부터 수집된 교통류자료를 기초로 하여, 회귀분석(regression analysis)이 이루어 졌다. 또한 분석이 용이하도록 $(\frac{x}{s})^i, i=1, 2, \dots, 19, 20$ 으로 한정하여 분석하였으며, 이에 대한 분석결과는 표 3과 같이 나타났다.

표 3. MSB식 추정을 위한 회귀분석 결과

| 변 수 | 계수 | t값 | P값 | 통계값 | |
|----------------------|--------|--------|-------|------------------|-----|
| | | | | R ² 값 | 표본수 |
| 상 수 | 18.20 | 106.04 | 0.000 | 0.8970 | 100 |
| $\frac{x}{s}$ | 1.78 | 3.74 | 0.000 | | |
| $(\frac{x}{s})^{12}$ | 46.40 | 1.96 | 0.054 | | |
| $(\frac{x}{s})^{15}$ | -91.00 | -2.11 | 0.038 | | |
| $(\frac{x}{s})^{20}$ | 55.10 | 2.71 | 0.008 | | |

표 3에서 나타난 분석결과로부터, R²값이 가장 높은 다음과 같은 함수식이 제시되었다.

$$t_a(x_a) = 182 + 1.78 \left(\frac{x_a}{s_a} \right) + 4.64 \cdot \left(\frac{x_a}{s_a} \right)^{12} - 9.10 \cdot \left(\frac{x_a}{s_a} \right)^{15} + 5.51 \cdot \left(\frac{x_a}{s_a} \right)^{20} \quad (식6)$$

2.4 모형간 비교분석 및 해석

(식4)에서 도출한 BPR식과 (식6)에서 도출된 MSB식의 설명력과 예측력을 간략히 확인하기 위해서 먼저 R²값을 비교하였다. BPR식에서의 R²값은 0.838에 불과한 반면, MSB식의 R²값은 0.8970으로 높게 나타나는 것으로 볼 때, MSB의 설명력이 높은 것으로 분석되었다.

또한 모형간의 예측력을 비교분석하기 위해 VISSIM으로부터 구해진 교통류 자료중 위 함수식 개발에 사용되지 않았던 표본(n=50)자료를 추출하여 (식4), (식6)에 각각 대입하여 예측통행시간을 산

출하고 실제통행시간과 산포도(scatter plot)를 이용하여 비교분석하였다.

그림 3은 BPR식의 예측통행시간과 실제통행시간과의 산포도로 V/C비가 증가함에 따라 통행시간이 증가하는 패턴을 나타내고 있다. 그러나 BPR식의 통행시간은 V/C비가 0.8 이하일 경우 거의 일정한 평균통행시간을 보여주고 있다. 또한 V/C비가 0.4 이하에서는 VISSIM으로부터 나온 실제통행시간보다 높은 수치가 나왔고, 0.4~0.8사이에서는 실제통행시간보다 더 낮은 수치를 보여주고 있는 등 V/C구간별로 도로현장의 특성을 묘사하는 데에는 한계가 있는 것으로 나타났다.

그림 4는 MSB식의 예측통행시간과 실제통행시간의 산포도로 BPR식과 마찬가지로 V/C비가 증가함에 따라 통행시간이 증가하는 패턴을 나타내고 있다. 그러나 그림 3과 달리 V/C비 전구간에 걸쳐 실제평

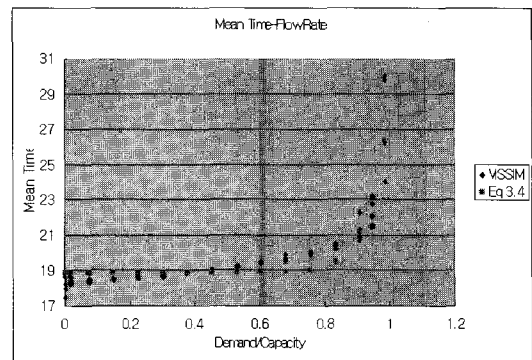


그림 3. BPR식 예측통행시간의 산포도

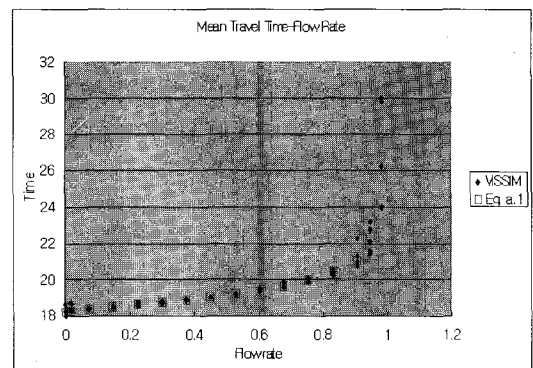


그림 4. MSB식 예측통행시간의 산포도



균통행시간과 증가패턴이 일치함을 보이고 있다. 따라서, 통행비용함수는 BPR식 보다는 MSB식을 이용하는 것이 더 정확한 평균통행속도를 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

3. 결론 및 향후연구과제

일반적으로 모든 도로정책평가 시, 이상적인 도로·교통조건에서 수집한 교통류 자료에 근거하여 BPR식 형태로 개발한 통행비용함수식을 일반화하여 적용한다. 하지만, BPR 형태로 개발된 모형은 장래교통량 예측이나 통행행태분석에 있어서 적용이 적합하지 않은 것으로 보고되고 있다. (Spiess, 1989 ; Singh, 1999) 따라서, 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 분석대상지의 도로·교통조건에 적합하도록 미시적 교통류시뮬레이터기반(Micro traffic Simulator Based : MSB)으로 생성된 자료로 통행비용함수를 개발, 검증하는 분석방법론을 제시하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 미래에 건설 예정인 도로 또는 이상적인 도로교통조건외의 도로교통정책 평가 시 적용이 용이하도록 단시간에 다량의 교통류자료 생성이 가능한 미시적 교통류시뮬레이터(VISSIM)에 기반한 통행비용함수를 개발하는 방법론을 제시하였다. 둘째, 미시적 교통류시뮬레이터(VISSIM)를 이용하여 생성한 분석자료를 기반으로 하여 BPR함수식과 MSB함수식을 각각 개발하고, 통계값 및 산포도를 이용하여 모형 간 비교분석하여 MSB함수식의 활용가능성을 검증하였다. 셋째, 미시적 교통류 시뮬레이터는 내재된 교통류모형의 특성에 따라 통행비용함수식 개발에 있어서 일정한 한계가 있음이 나타났다. 따라서, 본 연구에서 사용된 VISSIM의 경우, 다음과 같은 사항을 고려하여 함수식 개발시 참고하여야 할 것이다. 첫째, 네트워크가 비포화(unconstrained) 상태일 경우 모든 차량은 운전자의 희망통행속도로 네트워크를 통과하려 한다는 것이다. 둘째, 네트워크내의 혼잡도가 커질수

록 대기행렬의 길이가 점점 길어지게 되고, 그 대기행렬은 네트워크의 크기를 넘어가게 된다. 그러므로 포화상태의 네트워크에서 통행속도는 결국 대기행렬의 네트워크 통과비율 (discharging rate)에 따라 결정되게 되어 일정한 평균통행속도를 보여주게 된다. 이러한 VISSIM의 특성상 낮은 교통류율 ($0 \leq V/C \leq 0.7$)에서의 평균통행속도는 비교적 일정하게 나타나고 있으며, 또한 V/C비율이 1.0을 넘어가는 경우, 평균통행시간이 크게 변하지 않는 한계가 있다. 따라서 본 방법론을 적용할 경우 선택한 미시적 교통류시뮬레이터의 한계를 충분히 숙지하고, 이를 보정하여 통행비용함수식을 개발하도록 해야하겠다.

참고문헌

- Boyce, D. (2004), Forecasting Travel on Congested Urban Transportation Networks: Review and Prospects for Network Equilibrium Models, *The 5th Triennial Symposium on Transportation Analysis*.
- H. Cho, (2006), *MULTICRITERIA TRAFFIC EQUILIBRIUM MODEL IN STOCHASTIC NETWORKS*, Ph.D Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Schrank, D. and T. Lomax, (2003), The 2003 Urban Mobility Report, Texas Transportation institute, *The Texas A&M University System*.
- Singh, R. (1999) Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models, *Presented at the 7th TRB conference on Application of Transportation Planning Methods*, Boston, Massachusetts.
- Turner, S. M., et al. (1998), Travel Time Data Collection Handbook, Texas Transportation Institute, *The Texas A&M University System*, Mar.
- 임강원, 임용택 (2003), *교통망분석론*, 서울대학교출판부

접 수 일 : 2007. 8. 16
 심 사 일 : 2007. 8. 27
 심사완료일 : 2007. 9. 19