

■ 論 文 ■

다차종통행배분을 이용한 통행량기반 수요추정기법개발

Development of a demand estimation method
by using multiclass traffic assignment based on traffic counts

김 증 형

(교통개발연구원 책임연구원)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

목 차

- | | |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구 배경 및 목적</p> <p>2. 연구 내용 및 방법</p> <p>II. 모형검토</p> <p>1. 다차종통행배분기법</p> <p>2. 다차종관측교통량기반 O/D 추정방법</p> | <p>III. 분석</p> <p>1. 분석교통망</p> <p>2. 평가지표</p> <p>3. 분석결과</p> <p>IV. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|--|--|

Key Words : 단일차종통행배분, 다차종통행배분, 관측교통량, PCE, Gradient

요 약

현재까지의 관측교통량기반 수요추정법은 단일차종(singleclass)기반 연구가 대부분을 차지하고 있다. 그러나 현실 교통망에서는 여러 차종이 혼재되어 교통수요나 흐름을 만든다. 즉, 기존의 관측교통량기반 수요추정법은 PCE(Passenger Car Equivalent) 환산을 통한 여러 개의 차종O/D 및 관측교통량을 승용차 단위로 전환하여 하나의 O/D 및 관측교통량으로 만들어 O/D를 추정하고, 최초의 PCE환산이전 차종별 O/D의 고정비율과 관측교통량 고정비율로 곱해 차종별 O/D 및 관측교통량으로 나누어 분석하는 것이 일반적인 방법이었다. 즉, 다차종기반분석법은 각각의 차종별 O/D에 대한 노선선택비율을 각각 계산하고, 그에 따른 목적함수 감소방향인 gradient를 또한 각각 계산하여 차종별 추정력을 극대화하는 것이 그 장점이라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 단일차종기반추정법을 다차종기반추정법으로 확장하여 차종간 혼잡을 고려한 보다 현실적인 수요추정기법을 마련하는 것이 본 연구의 목적이라고 하겠다.

1. 서론

1. 연구 배경 및 목적

현재까지의 관측교통량기반 수요추정방법은 단일차종(singleclass:이하 단일차종)기반 연구가 대부분을 차지하고 있다. 그러나 현실 교통망에서는 여러 차종이 혼재되어 교통수요나 흐름을 만든다. 즉, 기존의 관측교통량기반 수요추정방법은 PCE(Passenger Car Equivalent) 환산을 통한 여러 개의 차종O/D 및 관측교통량을 승용차 단위로 전환하여 하나의 O/D 및 관측교통량으로 만들어 O/D를 추정하고, 최초의 PCE환산이전 차종별 O/D의 고정비율과 관측교통량 고정비율로 곱해 차종별 O/D 및 관측교통량으로 나누어 분석하는 것이 일반적인 방법이었다.

이러한 과정을 거치는 기존분석방법은 각각의 차종별 O/D가 합쳐져 다시 나누어지는 과정에서 오차가 내재될 가능성이 각각의 차종별로 고려되는 다차종(multiclass:이하 다차종)¹⁾ 분석방법보다 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 현실적인 문제점을 바탕으로 대규모 교통망에 적용성이 높은 gradient방법을 단일차종분석위주에서 보다 현실성을 감안할 수 있는 다차종기반 gradient방법으로 개선하여 기술훈련 문제점을 보완하고자 하였다.

다차종기반분석법은 각각의 차종별 O/D에 대한 노선선택비율을 각각 계산하고, 또한, 그에 따른 목적 함수 감소방향인 gradient를 각각 계산하여 차종별 추정력을 극대화하는 것이 그 장점이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 단일차종기반추정법을 다차종기반추정법으로 확장하여 차종간 혼잡을 고려한 보다 현실적인 수요추정기법을 마련하는 것이 본 연구의 목적이라고 하겠다.

2. 연구범위 및 방법

단일차종 관측교통량기반 O/D추정방법과 본 연구에서 제시한 다차종통행배분방법을 이용한 다차종 관

측교통량기반 O/D추정방법으로 추정된 결과들을 비교하여 두 방법의 추정력을 검증하는 것이 전체적인 연구 범위라고 할 수 있다. 즉, 다차종통행배분방법으로 차종간 혼잡효과를 감안하여 추정된 각 차종별 O/D가 단일차종으로 합산되어 추정된 O/D보다 어떤 면에서 장점을 갖는지를 살펴보고자 하는 것이다. 분석에서 이용된 단일차종O/D는 앞서서도 언급하였지만 다차종O/D중 버스와 트럭O/D를 PCE로 환산하여 승용차O/D와 합하여 단일차종으로 합산한 후 추정과정을 거쳐 다시 초기 합산시의 고정비율로 나누어 각 차종별 O/D를 설정하여 비교·분석한 것이다. 따라서, 단일차종으로 변환된 O/D와 각 차종별로 다차종 통행배분기법을 활용하여 추정된 O/D의 추정력이 비교된다.

오차를 반영하는 변동계수는 기본O/D(최소선행O/D)에는 적용하지 않았으며, 단지 관측교통량의 오차(5%, 10%)만을 감안한 분석만을 다루었다.

또한, 관측위치 및 개수에 대한 이론은 본 연구의 범위를 넘어서는 분야이기 때문에 관측교통량개수 및 위치변화에 따른 추정력의 민감도 분석은 제외하였으며, 본 연구에서는 단지 기존연구의 최적관측위치를 산정하는 이론을 이용하여 관측교통량개수 12개, 18개를 임의로 설정하여 관측교통량이 증가함에 따른 추정O/D의 신뢰성 증가만을 분석하고자 한다.

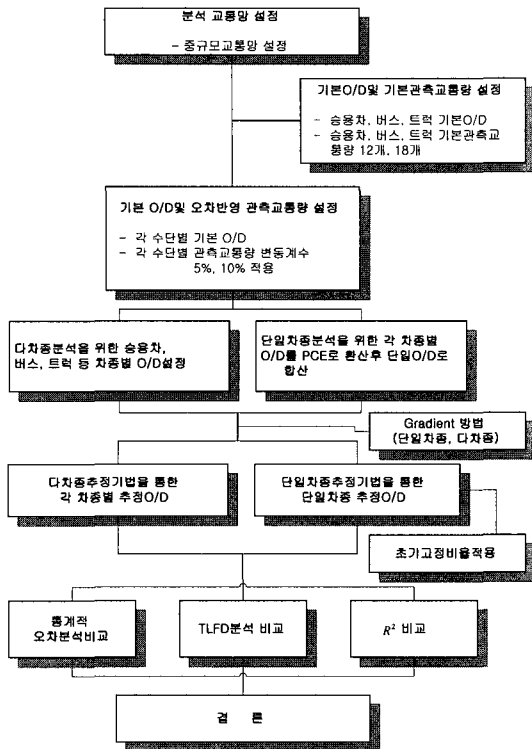
분석 절차는 중규모 교통망상에서 단일차종 분석방법으로 추정된 결과와 다차종분석방법으로 분석한 내용을 ①통계적 오차분석, ②TLFD(Trip Length Frequency Distribution)분석²⁾, ③배분교통량과 관측교통량을 비교하기 위한 R^2 분석법 등의 3가지로 비교하여 다차종기반추정방법의 정확도가 단일차종기반추정방법과 어떠한 차이를 나타내는지를 살펴보고자 하는 것이다. 전체적인 분석절차는 아래와 같다.

첫째, 다차종기반분석법을 이용하여 3개의 차종별 O/D를 추정하고,

둘째, 단일차종기반분석을 위한 차종별O/D 및 차종별 관측교통량을 PCE로 환산하여 하나의 단일O/D, 단일관측교통량으로 설정한 후, 설정된 단일O/D 및

1) multiclass의 개념은 여러 가지로 정의할 수 있으나 본 연구에서는 다차종(승용차, 버스, 트럭 등)의 개념으로 정의한다.

2) 이승재·손의영·김종형(2000), 통행시간분포를 이용한 교통량기반 추정O/D의 신뢰성 평가에 관한 연구, 대한교통학회지, 제18권 제2호, 2000.



(그림 1) 다차종 및 단일차종모형 비교

단일관측교통량을 가지고 단일차종기반 O/D 추정법으로 분석하고,

셋째, 둘째 단계의 단일차종 O/D 및 단일관측교통량으로 환산하기 이전의 비율로 나누어, 각 차종별 O/D 및 관측교통량으로 제작상하고,

넷째, 단일차종별 O/D와 관측교통량을 첫째단계의 다차종추정법분석결과와 통계적 오차분석법, TLFD, R^2 등으로 비교한다.

(그림 1)은 분석과정에 대한 전체적인 흐름도이다.

II. 모형검토

1. 다차종통행배분기법

이용자 균형원리는 Wardrop의 1차 원리를 따르며, 이 원리는 Beckmann이 동치최소화문제로 일컬어지는 수학식으로 표현되며, 이후 Le Blanc *et al.*이 Frank-Wolfe 알고리즘을 이용해 효율적인 해를 구하는 방법을 개발하였다.

Beckmann의 수식에서 통행시간을 결정짓는 링크

저항함수의 구성요소 중 물리적 측면을 제외하면 링크 통행속도를 결정하는 것은 링크 자신의 통행량뿐이다. 따라서, Beckmann의 수식은 링크의 통행시간이 링크 자신의 통행량뿐만 아니라 다른 관련 링크의 통행량에 영향을 받는 현실에서는 적용하기가 부적절하다.

이러한 단점을 보완하기 위해 여러 연구가 행하여졌는데 M.J.Smith(1979)와 S.C.Dafermos(1980)는 벡터 형태의 변동부등식의 개념을 이용해 Beckmann 수식의 단점을 보완할 수 있음을 보였다. 최적해를 찾기 위한 변동부등식의 편미분행렬은 비대칭행렬로 나타나는데 이를 효율적으로 해결할 수 있는 방법 중 가장 많이 쓰이는 것은 대각화 알고리즘(diagonal algorithm)이다.

Wardrop원리를 표현한 Beckmann의 수식은 링크 자신의 통행량만으로 링크통행시간이 표현된다고 하였으나, 이 가정은 다분히 비현실적인 가정이라고 할 수 있다. 현실적으로 링크통행시간은 경로상의 다른 링크의 통행량과도 연관되어 있다. 즉, 신호교차로에서 상류부 링크통행량은 하류부 링크의 통행량에 영향을 받을 수 있고, 이면도로와 같은 협소한 폭원의 도로나 무신호 교차로의 회전교통량은 대항링크의 통행량에 영향을 받을 수 있다. 즉, Beckmann의 수학적 모형식은 현실 표현력이 다소 떨어져 보다 현실적인 모형을 필요로 한다. 또한, Beckmann이 구성한 수식에 기초한 여러 알고리즘들은 단일차종에 대해서만 통행배분을 할 수가 있다. 따라서, PCE(Passenger Car Equivalent) 환산을 통해 여러 개의 차종을 승용차 단위로 전환하여 승용차만을 배분한다. 이러한 과정은 거친다면, 대형차도 승용차와 똑같은 영향을 미치는 결과를 가져오는데 현실적으로 화물차와 같은 대형차들은 승용차와는 다르게 타차종에게 서로 영향을 주고받기 때문에 이를 PCE로 환산하여 단일 차종으로 통행배분하는 것은 비현실적이다. 이 문제를 해결하기 위한 방법은 통행시간을 결정하는 변수가 둘 이상으로 구성된 수식이 필요하게 된다.

따라서, 기존 링크의 통행시간이 그 링크통행량의 함수로 가정된 Beckmann의 수식은 보다 현실을 반영할 수 있는 식으로 재구성되어야 하며, 재구성된 식 또한 Wardrop균형조건을 만족하여야 할 것이다.

M.J.Smith(1979)는 편미분방정식에서 자유경계 영역문제(free boundary problem)을 연구하기 위해 개발된 변동부등식구조가 위의 여러 문제를 해결할

뿐만 아니라 Wardrop균형을 만족시키며, Beckmann 수식의 단점을 보완할 수 있다는 것을 입증하였다.

단일차종 균형배분에서 어떤 링크 a 의 모든 통행자들은 동일한 통행비용 $c_a(v_a)$ 을 지불한다. 물론, 여기서 사용되는 함수(일반적으로 교통량-지체(volume-delay) 함수라고 일컬어짐)는 교통량 v_a 에 대해 비감소함수이다.

다차종(multiclass) 이용자 균형배분에서 발생하는 문제는 상이한 이용자 그룹에는 각각 다른 통행비용을 지불한다는 것이라 할 수 있다. $m \in M$ 을 서로 다른 이용자 그룹이라고 하자. 각 이용자 그룹 m 에서 링크 a 상의 비용은 모든 이용자 그룹의 각각의 통행량 v_a^m 에 의해 결정된다. 즉, 통행비용함수의 형태는 $c_a^m(v_a^m | m' \in M)$ 이다.

일반적인 형태에서, 다차종 이용자 균형배분 문제는 일반화(또는 비대각) 비용형태의 균형배분과 동치이다. 이 문제는 지난 수십 년간 연구되어온 분야이다. 즉, 이 문제는 유일해가 존재하지 않는 변동부등식 형태라고 알려져 있으며, 이러한 형태는 불록최적화문제로 변환되지 않는다.

본 연구에서 이용된 EMME/2에서는 이러한 다차종 균형배분문제를 풀기 위해 보다 단순한 형태로 이 문제를 변형하였다. 그룹 m 내의 통행자에 의해 인지된 링크 a 의 통행비용은 아래와 같다고 가정한다.

$$c_a^m(v_a) = c_a(v_a) + b_a^m \quad a \in A, m \in M$$

위 식은 서로 다른 차종들은 링크상의 총통행량을 기반으로 동일한 혼잡영향을 받지만, 각각의 차종들은 서로 다른 고정된 편익(bias) b_a^m 를 갖는다는 것이다.

즉, 이러한 단순화된 다차종 균형배분문제라 할지라도 아래의 불록최적화문제의 형태와 동일하다는 것을 증명될 수 있다.

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} c_a(v) dv + \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} v_a^m b_a^m$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건} \quad & \sum_k f_{kw}^m = t_w^m \\ & f_{kw}^m \geq 0 \\ & v_a^m = \sum_m \sum_w \sum_k f_{kw}^m \delta_{ak}^{wm} \end{aligned}$$

여기서,

- k : 경로
- w : O/D쌍,
- f : 경로통행량
- m : 차종

2. 다차종관측교통량기반 O/D 추정방법

다차종 관측교통량기반 O/D추정법의 전체적인 모형의 형태는 아래와 같이 차종별 관측 링크 통행량과 배분된 통행량의 차이를 최소화하는 형태라고 할 수 있다.

$$\min Z(g^m) = \frac{1}{2} \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} (v_a^m - \hat{v}_a^m)^2 \quad (1)$$

제약조건

$$v_a^m = \text{assign}(g^m) \quad (2)$$

여기서,

- m : 차종
- g^m : 차종 m 의 O/D
- v_a^m : 링크 a 에서 차종 m 의 배분교통량
- \hat{v}_a^m : 링크 a 에서 차종 m 의 관측교통량

기본적으로 다차종 관측교통량기반 추정법은 아래의 식과 같이 단일차종 관측교통량기반 추정법과 같이 상대적 gradient를 이용하여 이전 O/D를 보정한다.

$$g_{im}^{\ell+1} = \begin{cases} \hat{g}_{im} & \ell = 0 \text{에서} \\ g_{im}^{\ell} \left(1 - \lambda_m^{\ell} \left[\frac{\partial Z(g^m)}{\partial g_{im}} \right]_{g_{im}^{\ell}} \right) & \ell = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

- λ^{ℓ} : step length
- g^{ℓ} : ℓ 번째 iteration상의 선행O/D

식(3)의 gradient $\frac{\partial Z(g)}{\partial g}$ 를 계산하기 전에 먼저 경로통행량(path flow)을 계산하여야 하는데, 경로통행량을 계산하기 위해서는 식(4)와 같이 차종별 링크통행량으로 분해(decomposition)하는 과정이 선행

되어야 한다.

$$v_a^m = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak}^m h_k, \quad a \in A \quad (4)$$

$$\delta_{ak}^m = \begin{cases} 0 & \text{만약 } a \notin k \\ 1 & \text{만약 } a \in k \end{cases} \quad (5)$$

여기서, i : O/D쌍

또한, 각각의 iteration시 추정되는 O/D를 고정된 배분경로교통량 대신 차종별 경로통행비율을 사용한다.

$$p_k^m = \frac{h_k^m}{g_{im}}, \quad k \in K_i, i \in I, m \in M \quad (6)$$

따라서, 식(4)는 아래와 같은 차종별 링크통행량 계산식으로 변환될 수 있다.

$$v_a^m = \sum_{i \in I} g_{im} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak}^m p_k^m, \quad a \in A \quad (7)$$

이 식으로 아래와 같이 차종별 gradient $\frac{\partial Z(g_m)}{\partial g_{im}}$ 를 계산한다.

$$\frac{\partial Z(g_m)}{\partial g_{im}} = \sum_{a \in A} \frac{\partial v_a^m}{\partial g_{im}} (v_a^m - \hat{v}_a^m), \quad i \in I \quad (8)$$

경로선택확률이 국지적으로 상수라고 가정하면, 식(7)에서 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial v_a^m}{\partial g_{im}} = \sum_{k \in K_i} \delta_{ak}^m p_k^m, \quad a \in A, i \in I, m \in M \quad (9)$$

이 식(9)를 식(8)에 대입하면 아래와 같은 차종별 gradient를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z(g_m)}{\partial g_{im}} &= \sum_{a \in A} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak}^m p_k^m (v_a^m - \hat{v}_a^m) \\ &= \sum_{k \in K_i} p_k^m \sum_{a \in A} \delta_{ak}^m (v_a^m - \hat{v}_a^m), \quad i \in I \quad (10) \end{aligned}$$

다음 식은 위에서 구한 gradient를 가지고 차종별

최적 step length를 얻기 위해 아래 식의 해를 구한다.

$$\min_{\lambda_m} Z \left(g_{im} \left(1 - \lambda_m \frac{\partial Z(g_m)}{\partial g_{im}} \right) \right) \quad (11)$$

제약조건

$$\lambda_m \frac{\partial Z(g_m)}{\partial g_{im}} \leq 1, \quad g_{im} > 0 \text{인 모든 } i \in I \text{에서} \quad (12)$$

목적함수 Z 는 링크교통량 v_a 에 관해서 표현되었기 때문에, gradient 방향을 따라 이러한 변화가 어떻게 이루어졌는지 알 필요가 있다. 이것은 식(10)에 연쇄 법칙(chain rule)을 적용함으로써 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} v_a^{m'} &= \frac{dv_a^m}{d\lambda_m} = \sum_{i \in I} \frac{dg_{im}}{d\lambda_m} \frac{\partial v_a^m}{\partial g_{im}} \\ &= - \sum_{i \in I} g_{im} \left(\sum_{k \in K_i} p_k^m \sum_{a \in A} \delta_{ak}^m (v_a^m - \hat{v}_a^m) \right) \\ &\quad \times \left(\sum_{k \in K_i} \delta_{ak}^m p_k^m \right) \quad (13) \end{aligned}$$

식(11)의 해를 구하는 것은 도함수가 0이 되는 지점을 찾는 것이다. 즉, 아래와 같은 도함수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dZ(\lambda_m)}{d\lambda_m} &= \sum_{a \in A} \frac{dv_a^m}{d\lambda_m} \frac{\partial Z_m}{\partial v_a^m} \\ &= \sum_{a \in A} v_a^{m'} (v_a^m - \hat{v}_a^m + \lambda v_a^{m'}) \quad (14) \end{aligned}$$

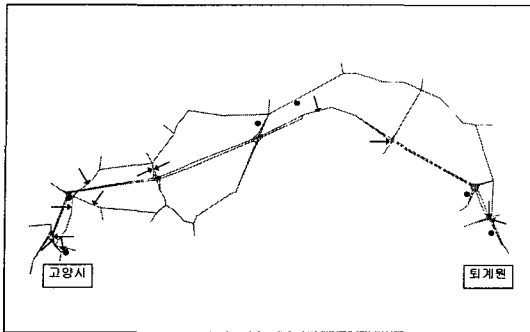
따라서, step length는 아래와 같다.

$$\lambda_m^* = \frac{\sum_{a \in A} v_a^{m'} (\hat{v}_a^m - v_a^m)}{\sum_{a \in A} v_a^{m'2}} \quad (15)$$

III. 분석

1. 분석 교통망

다차종 관측교통량기반 O/D추정모형을 적용하기 위해 사용된 교통망은 아래와 같다. 혼의 개수는 20개이며, 화살표로 지정된 링크는 관측링크 12개를 말



〈그림 2〉 분석교통망

하며, 흑색점으로 표시된 6개의 링크는 12개 관측링크에 추가된 18개의 관측링크를 설정한 것이다. 선정된 링크들은 Yang(1998)이 제시한 4가지 규칙을 기반으로 선정된 링크들이다.

Target 관측교통량을 설정하는 방법은 앞에서 밝힌 Iida et al.(1987)이 제시한 기준을 동일하게 따랐다. 즉, 〈표 1〉에서 보는 바와 같이 각 차종별 관측교통량의 변동계수(c_{of}) 2개(5%, 10%)와 각 차종별 기본O/D를 설정하여 분석자료를 구축하였다. 이렇게 구축된 자료를 각 차종별 3개의 분석자료에 각각 관측교통량이 12개, 18개일 때의 경우로 나누어 관측교통량이 변화할 때 추정의 신뢰성 변화를 관찰하였다.

2. 평가지표

평가지표는 전통적인 통계적 오차분석방법(MAE, RMSE, RRMSE)과 선행연구³⁾에서 제시한 TLFD 분석법을 이용하여 결과의 신뢰성을 검증하였다. 또한, 각 링크의 관측교통량과 모형에서 배분된 교통량 간의 차이가 어느 정도 차이가 있는지를 파악하기 위해 변동계수조합별로 각각의 차종별 R^2 를 검토하였다.

전체적인 분석 과정은 먼저 다차종추정방법을 사용하여 추정된 O/D들의 추정력을 검토하고, 두 번째로 단일차종추정방법과의 비교를 통해 다차종추정방법의 신뢰성을 검증하였다. 여기서 단일차종이라 함은 다차종추정방법과 비교하기 위해 다차종O/D를 PCE (Passenger Car Equivalent)로 환산하여 모두 합한 O/D라 할 수 있다. 즉, 단일차종으로 추정된 O/D를

〈표 1〉 분석을 위한 차종별 자료 구축

차종	관측교통량변동계수	관측교통량개수
승용차	5%	12개 18개
	10%	12개 18개
버스	5%	12개 18개
	10%	12개 18개
트럭	5%	12개 18개
	10%	12개 18개

분석 후 최초의 각 차종별 O/D의 고정 비율로 나눈 후 다차종O/D추정방법으로 추정된 각 차종별 O/D와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하고자 하는 것이다. 〈표 1〉은 분석을 위해 구축된 자료를 나타낸다.

3. 분석결과

1) 통계적 오차 분석 비교

〈표 2〉 및 〈그림 3〉, 〈그림 4〉, 〈그림 5〉에서 볼 수 있듯이 관측교통량이 12개일 때의 각 차종별 추정 O/D에 대한 통계적 오차분석을 나타낸 것이다.

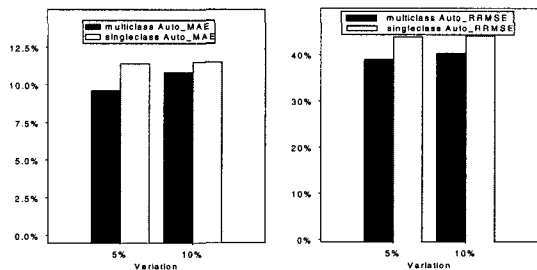
전반적으로 관측교통량 오차가 증가함에 따라 추정 O/D의 오차가 비례적으로 증가하는 경향은 단일차종 기반추정법이나 다차종기반추정법으로 추정된 모든 O/D에서 나타나고 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 단일차종 관측교통량기반 추정O/D의 오차보다 다차종 관측교통량기반 추정O/D의 오차가 상대적으로 작은 것으로 나타나 다차종으로 분석된 오차분석이 전반적으로 단일차종보다 추정력이 높은 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 앞서도 언급한 바와 같이 단일 O/D는 추정과정에서 고정된 비율을 가지고 합산한 후 추정과정을 거친 단일 O/D를 다시 고정비율로 나누는 과정에서 오차가 내재될 수 있는 가능성이 더욱 더 많기 때문인 것으로 분석되며, 다차종 분석방법은 각각의 차종별 O/D에 대한 gradient를 각각 계산하여 초기O/D를 보정하며, 또한 각 차종간 노선선택비

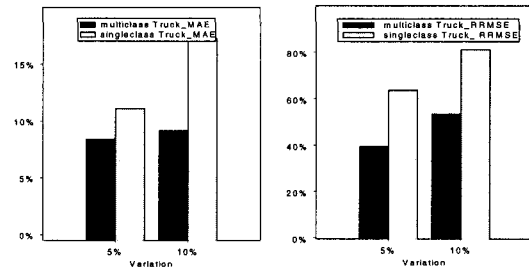
3) 이승재 · 손의영 · 김종형(2000), 전계서.

〈표 2〉 변동계수별 오차분석(관측교통량 12개)

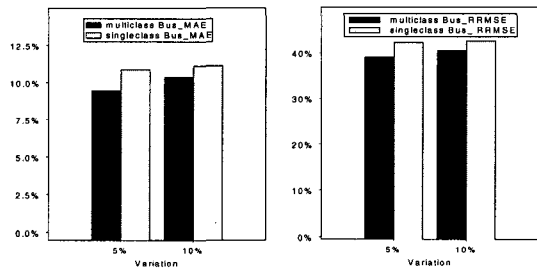
변동계수별 관측교통량 변동계수 (c_{vf})		다차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차			단일차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차			
		추정방법	MAE (%)	RMSE	RRMSE (%)	MAE (%)	RMSE	RRMSE (%)
5%	승용차		9.60	460.33	38.88	11.50	518.37	43.78
	버 스		9.45	35.57	39.05	11.11	38.51	42.28
	트 릭		8.40	77.70	39.37	11.08	125.52	63.60
10%	승용차		10.81	476.99	40.28	11.40	521.75	44.06
	버 스		10.36	36.85	40.46	10.88	38.84	42.64
	트 릭		9.15	105.17	53.29	17.25	160.18	81.17



〈그림 3〉 MAE 및 RRMSE비교(승용차:12개)



〈그림 5〉 MAE 및 RRMSE비교(트럭:12개)



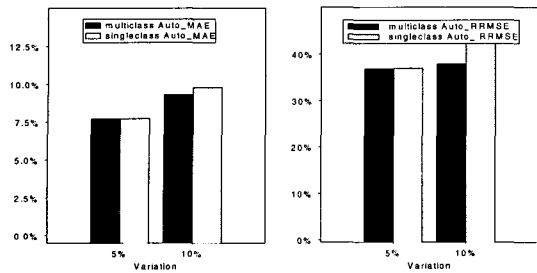
〈그림 4〉 MAE 및 RRMSE비교(버스:12개)

율도 별도로 계산되기 때문에 단일차종기반 분석보다 차종별로 좀더 세밀한 분석이 가능한 것이 보다 신뢰성 높은 이유라고 할 수 있다.

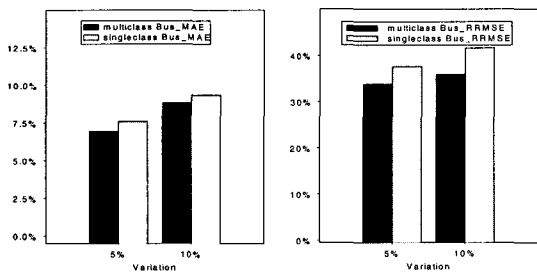
관측교통량이 18개 일 경우에도 두 방법의 비교내용인 〈표 3〉 및 〈그림 6〉, 〈그림 7〉, 〈그림 8〉를 살펴보면 관측교통량이 12개인 상황과 동일하게 다차종 추정법의 분석결과가 단일차종 추정법의 결과보다 비교적 양호한 분석결과가 도출되었다.

〈표 3〉 변동계수별 오차분석(관측교통량 18개)

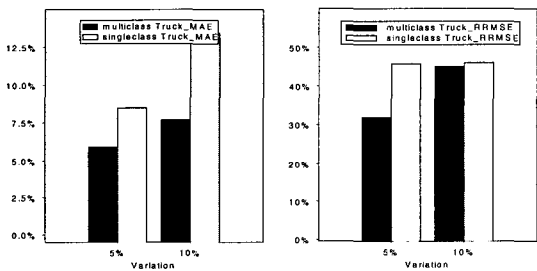
변동계수별 관측교통량 변동계수 (c_{vf})		다차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차			단일차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차			
		추정방법	MAE (%)	RMSE	RRMSE (%)	MAE (%)	RMSE	RRMSE (%)
5%	승용차		7.70	435.64	36.79	7.72	437.31	36.93
	버 스		6.95	30.74	33.75	7.59	34.24	37.59
	트 릭		5.89	62.83	31.84	8.48	90.21	45.71
10%	승용차		9.32	447.94	37.83	9.79	500.92	42.30
	버 스		8.83	32.67	35.87	9.35	37.88	41.59
	트 릭		7.70	88.93	45.06	13.43	90.79	46.00



〈그림 6〉 MAE 및 RRMSE비교(승용차:18개)



〈그림 7〉 MAE 및 RRMSE비교(버스:18개)



〈그림 8〉 MAE 및 RRMSE비교(트럭:18개)

이러한 분석결과는 관측교통량이 12개 일 경우와 같이 차종간 혼잡효과를 고려할 수 있고, 각 차종별 gradient를 별도로 계산하는 장점 때문인 것으로 판단된다.

또한, 단일차종 분석법이나 다차종 분석법에 관계없이 위의 12개 분석결과보다는 관측교통량이 18개 일 경우 보다 나은 결과를 나타내는 것으로 분석되어 관측교통량증가에 따른 신뢰성 증가라는 일반적인 통념에 두 방법 모두 부합하는 것으로 나타났다.

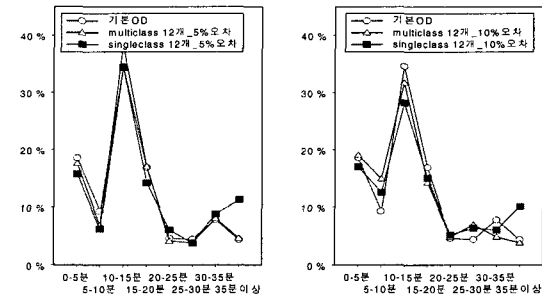
따라서, 관측교통량 변동계수와 추정방법이 달라짐에 따라 추정O/D의 오차크기가 작지만 다차종기반 분석법이 상대적으로 좋은 결과를 나타낸 것은 교통망의 크기가 증규모라는 것을 감안한다면 보다 큰 교통망에서는 이러한 결과가 더욱더 커질 것으로 판단되어 전반적으로 다차종기반 분석법으로 추정된 O/D의 신뢰성이 매우 높은 것으로 말할 수 있다고 하겠다.

2) TLFD 비교

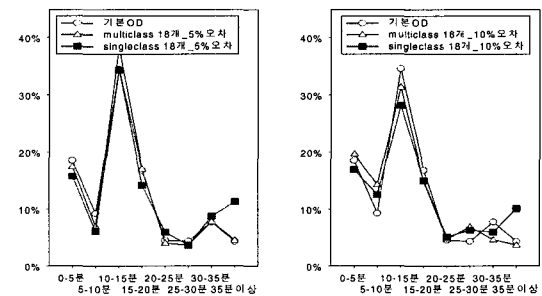
TLFD비교는 전체적으로 두 가지 방법으로 나누어 분석된다. 첫째는 분포의 패턴이 기본O/D의 그것과 유사한지를 살펴보는 것과 둘째, 평균통행시간의 차이가 기본O/D의 그것과 어떻게 차이가 나는지를 살펴보는 것이라고 할 수 있다.

〈그림 9〉와 〈그림 10〉에서 살펴볼 수 있듯이 추정된 O/D의 전체적인 분포 패턴은 관측교통량의 개수에 관계없이 기본O/D의 그것과 매우 유사한 모양을 나타내는 것으로 분석되었으나, 단일차종기반분석과 다차종기반분석법에 상관없이 관측교통량의 개수보다는 관측교통량의 오차에 더욱 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 그렇지만, 각각의 동일한 변동계수내에서는 단일차종기반분석법보다는 다차종기반분석법이 기본O/D의 패턴에 보다 유사한 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 분석결과는 각 차종별 혼잡을 고려하면서 차종별 노선선택비율을 각각의 차종별로 고려할 수 있는 다차종기반분석법이 단일차종기반분석보다는 보다 정밀하게 관측교통량을 이용하여 선행 O/D를 보정하기 때문에 선행O/D의 구조적 정보를 크게 변화시키지 않는 것이라 분석된다.



〈그림 9〉 12개관측교통량 TLFDbi교



〈그림 10〉 18개관측교통량 TLFDbi교

〈표 4〉 12개지점 관측교통량 기반 추정O/D의 TLFD (단위:%)

통행시간	변동계수	기본O/D	다차종		단일차종	
			5%	10%	5%	10%
0~5분		18.52	17.56	19.00	15.71	16.96
6~10분		9.25	6.75	14.89	6.13	12.50
11~15분		34.54	38.37	31.71	34.37	28.14
16~20분		16.84	17.01	14.25	14.18	15.00
21~25분		4.50	4.03	4.76	5.95	5.13
26~30분		4.32	3.73	6.90	3.66	6.28
31~35분		7.75	8.02	4.77	8.75	5.96
36분이상		4.28	4.52	3.73	11.25	10.04
합 계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

〈표 5〉 18개지점 관측교통량 기반 추정O/D의 TLFD (단위:%)

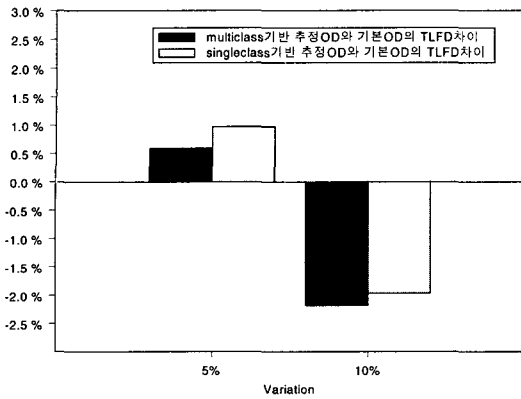
통행시간	변동계수	기본O/D	다차종		단일차종	
			5%	10%	5%	10%
0~5분		18.52	17.50	19.68	15.41	17.38
6~10분		9.25	6.97	14.30	6.27	12.50
11~15분		34.54	38.35	31.35	33.14	27.98
16~20분		16.84	17.12	14.79	14.51	15.10
21~25분		4.50	4.04	4.71	6.98	5.23
26~30분		4.32	3.65	6.89	3.38	6.10
31~35분		7.75	7.83	4.60	8.16	5.76
36분이상		4.28	4.53	3.67	12.15	9.96
합 계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

〈표 6〉 평균통행시간차이비교(12개)

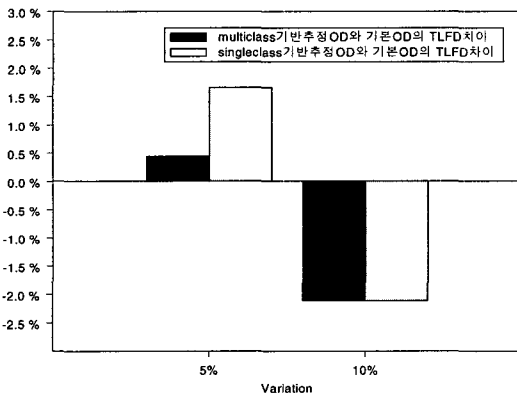
변동계수	추정방법 (c_{ij})	다차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차		단일차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차	
		평균통행시간 (분)	기본O/D와의 평균통행 시간차이(%)	평균통행시간 (분)	기본O/D와의 평균통행 시간차이(%)
5%		22.69	0.59	22.78	0.97
10%		22.06	-2.18	22.11	-1.97
기본O/D		22.56	0.00		

〈표 7〉 평균통행시간차이비교(18개)

변동계수	추정방법 (c_{ij})	다차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차		단일차종 관측교통량기반 추정O/D의 통계적 오차	
		평균통행시간 (분)	기본O/D와의 평균통행 시간차이(%)	평균통행시간 (분)	기본O/D와의 평균통행 시간차이(%)
5%		22.66	0.44	22.93	1.66
10%		22.08	-2.11	22.08	-2.11
기본O/D		22.56	0.00	-	-



〈그림 11〉 평균통행시간차이비교(12개)



〈그림 12〉 평균통행시간차이비교(18개)

또한, 〈표 6〉, 〈표 7〉과 〈그림 11〉, 〈그림 12〉의 기본O/D와의 평균통행시간차이에 대한 분석에서는 다차종기반분석법과 단일차종분석법에 관계없이 기준치인 ±3%이내에 들어 전반적으로 안정된 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.

이 분석에서도 마찬가지로 관측교통량 개수가 증가함에 따라 전반적으로 추정방법에 상관없이 18개 관측교통량을 가진 추정O/D의 분석결과가 12개일 경우보다 기본O/D의 그것과 비교적 차이가 적어 평균

통행시간차이분석에서도 관측교통량의 증가에 따른 신뢰성 증가현상이 나타났다.

또한, 관측교통량의 변동계수가 증가함에 두 가지 분석 모두 평균통행시간차이가 증가하는 것으로 나타났다. 다차종 분석이 단일차종분석보다 는 전반적으로 오차가 작은 것으로 분석되었다.

전체적으로 두 가지 분석방법의 TLFD차이가 오차 한계를 벗어나지 않고 그 절대적인 크기 또한 작아 매우 양호한 분석결과라고 할 수 있다. 전반적으로 TLFD분석에서는 관측교통량의 개수에 상관없이 두 가지 분석방법에서 다소간의 차이는 있지만 다차종 분석방법이 단일차종 분석방법보다 양호한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 이것은 위의 통계적 오차 분석법에서의 같이 다차종기반분석법이 각각의 차종별 O/D에 대한 노선선택 및 gradient(보정방향)를 단일차종기반분석법보다는 보다 세밀히 제어할 수 있기 때문이라고 판단된다.

3) R² 비교

본 절에서는 차종별 관측교통량과 추정교통량을 비교하는 방법으로 R²를 이용하였다. 앞에서의 통계적 오차분석방법이나 TLFD분석이 추정O/D의 신뢰성을 나타내는 반면 본 분석은 모형에서 배분된 교통량이 관측교통량을 어느 정도의 정확성을 가지고 설명하는지를 살펴보고자 하는 것이다.

전반적으로 다차종기반추정법과 단일차종기반추정법으로 추정된 O/D들의 각 차종별 배분량과 관측교통량의 절대적 양의 차이는 거의 없는 것으로 분석되었다.

즉, 동행배분량과 관측교통량이 부합되는 정확도가 매우 높게 나타났다. 〈표 8〉에서 보는 바와 같이 각 관측교통량개수별로 단일차종분석치와 다차종분석치가 각 차종별로 거의 모든 수준에서 유사한 분석치가

〈표 8〉 R² 비교

관측교통량 개수	관측교통량 변동계수	승용차		버스		트럭	
		다차종	단일차종	다차종	단일차종	다차종	단일차종
12개	5%	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	1.0000
	10%	0.9999	0.9999	0.9999	1.0000	0.9990	1.0000
18개	5%	1.0000	0.9893	0.9999	0.9877	0.9987	0.9994
	10%	0.9991	0.9999	1.0000	0.9998	0.9999	0.9999

도출되었다.

그러나, 다차종기반 추정 O/D의 배분량은 관측교통량이 증가함에 따라 비교적 단일차종기반 추정O/D의 배분량보다는 관측교통량에 부합하는 정확도가 균일한 것으로 나타나 있는데 반하여, 단일차종기반 추정O/D의 배분량은 관측교통량 12개일 경우에는 다차종추정 O/D의 배분량의 정확도가 비슷하게 도출되었으나, 관측교통량이 18개일 경우에는 그 정확도가 미미하지만 다차종기반 모형보다 떨어지는 것으로 분석되었다.

이러한 분석결과는 앞에서의 통계적 오차분석 및 TLFDB분석에서와 같이, 다차종기반분석법이 차종간의 혼잡효과 및 각각의 차종별 노선선택을 감안하기 때문에 그 추정력은 교통망의 규모가 커질수록 단일차종으로 추정된 결과보다 우수할 것이라고 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 많은 차종들이 혼재하는 현실적인 교통망상에서 다차종관측교통량기반 수요추정방법의 신뢰성이 어느 정도인가를 가늠하고, 그 가능성을 살펴보고자 한 것이다.

전체적으로 다차종기반추정법의 결과 또한 관측오차의 증가에 따른 추정오차의 증가가 수반되었고, 관측교통량이 증가함에 따라 그 오차는 감소하는 일반적인 통념에 크게 벗어나지 않는 것으로 분석되었다.

또한, 전반적으로 다차종으로 분석된 결과가 단일차종으로 분석된 결과에 비해 그 신뢰성측면에서도 떨어지지 않고, 상대적으로 보다 나은 결과를 나타낸 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 현실적으로 여러 차종이 동시에 혼재되는 교통망에서의 수요를 설명하는데 효과적이라고 할 수 있다.

분석 과정은 중규모 교통망상에서 단일차종 분석방법으로 추정된 결과와 다차종O/D추정법으로 분석한 내용을 통계적 오차분석, TLFDB분석 및 R^2 분석법으로 각각 비교하여 다차종 O/D추정방법의 정확도가 단일 차종 O/D추정시의 분석내용과 거의 차이가 없을 뿐만 아니라 전체적인 결과측면에서는 보다 나은 결과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

현재의 O/D추정방법은 전술한 바와 같이 일반적으로 단일차종기반 분석에서와 같이 여러 차종의 O/D 및 교통량을 PCE로 환산하여 단일O/D 또는 관측교통량으로 만들어 추정한 후 다시 처음의 고정된 비율로 환산하는 방법이 그 주류를 이루고 있다고 할 수 있다. 즉, 이러한 사실은 차종간 혼잡효과를 반영하지 못할 뿐만 아니라 다소 현실적 측면이 부족하다고 여겨진다. 따라서 본 연구는 이러한 문제점을 다소나마 해결할 수 있는 기반이 될 수 있다고 판단된다.

또한, 본 연구에서 제시한 다차종기반기법은 단일차종기반기법과는 달리 다차종통행배분방법을 이용하기 때문에 통행배분시 다소 시간적인 효율성면에서 떨어지는 문제가 있으나, 그 차이는 추정의 정확성을 감안한다면 크게 문제될 것이 없다고 판단된다.

본 연구는 다차종관측교통량기반 수요추정방법을 중규모교통망이지만 가상의 교통망을 이용하여 모형의 신뢰성을 평가하였다. 이러한 모형적용과정은 모형 비교에 많이 이용되는 방법이기도 하지만, 실제적인 상황에서는 어떠한 문제점이 발생할 지에 대해서는 장담할 수 없다고 할 수 있다. 따라서, 향후과제로는 실제적인 교통망(대규모교통망)에 조사된 자료를 이용하여 각각의 모형을 평가(evaluation)하는 과정이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 이승재·김종형(2000), Gradient방법과 일반화최소자승법을 이용한 관측교통량기반 O/D 추정방법에 관한 비교평가연구, 대한교통학회지, 제18권 제2호.
2. 이승재·손의영·김종형(2000), 통행시간분포를 이용한 교통량기반 추정O/D의 신뢰성 평가에 관한 연구, 대한교통학회지, 제18권 제2호.
3. 김종형(2000), Gradient방법에 의한 통행량기반 수요추정연구, 서울시립대학교 박사학위논문.
4. H.Spiess(1990), A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem, INRO.
5. Iida, Y., Takayama, J., Kaneko, N. (1987), Traffic demand estimation model by observed link flows considering trend of secular change, *Proceedings of JSCE*, No.383/IV-7, pp.83~91.

6. Smith, M.J.(1979), The Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria. *Transportation Research* 13B(4), pp.295~304.
 7. Dafermos, S.C.(1980), Traffic Equilibrium and Variational Inequalities. *Transportation Science* 14(1), pp.42~54.
 8. Yang, H.(1998), Optimal traffic counting locations for O/D estimation, *Transpn. Res.* 25B, pp.351~363.
- ✉ 주 작 성 자 : 김종형
✉ 논문투고일 : 2000. 6. 28
논문심사일 : 2000. 7. 31 (1차)
2001. 1. 22 (2차)
2001. 2. 1 (3차)
심사판정일 : 2001. 2. 1