

■ 論 文 ■

관측교통량을 이용한 다차종 OD 통행량 추정

Multi vehicle OD trip matrix estimation from traffic counts

백 승 걸

(서울대학교 환경대학원 연구원)

김 현 명

((주)하이콘엔지니어링 선임연구원)

임 용 택

(여수대학교 교통물류시스템공학부 전임강사)

임 강 원

(서울대학교 환경대학원 교수)

목 차

- | | |
|---------------------|---------------------|
| I. 서론 | 3. 게임이론 측면에서의 GAMUC |
| II. 바이레벨 OD 추정기법 | IV. 사례분석 |
| 1. IEA 알고리즘 | 1. 네트워크 입력자료 |
| 2. 게임이론 측면에서의 IEA | 2. 분석결과 |
| III. 다차종 OD추정기법의 개발 | V. 결론 |
| 1. 기존 다차종 OD 추정기법 | 참고문헌 |
| 2. 다차종 OD 추정기법의 개발 | |

Key Words : OD 추정, 유전알고리즘, 다차종 통행배정, 게임이론, 바이레벨 모형

요 약

기존의 링크교통량으로부터 OD추정모형은 기존 OD에 대한 추정의 종속성이 커, 기존 OD나 관측링크교통량의 오차에 따라 추정결과가 일관적이지 않은 문제점을 가지고 있다. 또한 관측링크교통량의 정확도가 중요함에도 불구하고 차종구분 없이 링크교통량을 이용하여 정보의 손실을 초래하였고 결과적으로 OD 추정력을 저하시켰다. 그렇지만 다차종 링크교통량으로부터 다차종 OD를 구하는 연구는 거의 없었으며, 그 추정결과가 단일차종에 대한 추정결과와 어떻게 다른지에 대한 연구도 전무하였다.

본 연구의 목적은 기존의 OD 추정모형이 기존OD에 대해 종속성을 가지며 차종구분 없이 모형을 구성함으로써 추정력의 저하를 초래하였음을 밝히고, 이에 대한 대안으로 종속성 문제를 완화하고 차종구분을 통해 OD 추정모형의 추정력을 증진시키자 하는 것이다. 이를 위해 유전알고리즘을 이용한 다차종 OD행렬 추정모형(GAMUC)을 구축하고, 이를 기존의 바이레벨 모형의 IEA 알고리즘 및 다차종으로 확장한 모형(IEAMUC)과 게임이론측면에서 검토하였으며, 사례네트워크에 대해 각 기법을 비교하였다. 본 연구는 유전알고리즘을 이용한 OD 추정기법을 축도로에 적용한 임용택 등(2000)과 이를 네트워크로 확장한 백승걸 등(2000)의 연구를 다차종으로 확장한 것이다.

사례분석 결과 기존 OD의 오차변화나 관측링크교통량의 오차변화 등에 있어 GAMUC가 IEA나 IEAMUC보다 추정력이 양호하여, 실제 OD를 알 수 없는 도시부 네트워크에서 GAMUC 모형의 적용력이 우수하였다. 또한 차종을 구분하지 않은 기존 모형은 실제 OD와는 전혀 다른 OD 구조를 도출할 수 있음을 보였으며, 단일차종을 여러 차종으로 구분하여 OD를 추정하는 것이 더 양호한 추정력을 확보하는 것으로 나타났다.

1. 서론

링크교통량을 이용한 OD 추정기법은 대부분 기존 OD 조사자료와 현재의 링크교통량 관측자료를 이용한다. 그러나 기존 OD 조사자료는 대상지역에 대한 일정표본만을 조사하여 구축하고 일반적으로 1년 이상의 시간간격을 가지기 때문에 표본오차와 시간변동 오차를 가지게 된다. 이에 비해 링크교통량 관측자료는 전수조사가 가능하며, 관측대상도로도 확대되고 있는 추세이다. 따라서 OD 추정시 링크교통량 관측자료는 기존 OD자료에 비해 유용성이 큰 정보라 할 수 있다. 더욱 중요한 점은 링크교통량을 이용한 OD 추정기법은 링크교통량이 주요한 추정기준이므로, 추정 OD값이 기존 OD의 오차보다는 관측교통량오차에 의한 영향을 크게 받기 때문에 관측교통량의 오차를 가능한 줄여야 한다는 것이다.

그러나 지금까지의 OD 추정모형은 차종별로 관측되거나 비교적 용이하게 차종별로 관측할 수 있는 링크교통량을 차종구분 없이 승용차환산단위(Passenger Car Unit:PCU) 등으로 단일화하여 이용함으로써, 정보의 손실을 초래하여 결과적으로 모형의 추정력을 저하시켰다. 이러한 방법은 각 차종별 OD행렬이 합쳐져 다시 나누어지는 과정에서 차종별로 고려하는 방법보다 오차가 내재될 확률이 크다고 할 수 있다(김종형, 2000). 실제로 트럭과 같은 대형차가 통행하는 링크에는 대형차와 승용차가 서로 영향을 주고받으며 통행하기 때문에 한 차종으로 통행배정하는 것은 비현실적이다. 그렇지만 다차종(multiple vehicle) 링크관측교통량으로부터 다차종 OD를 구하는 연구는 거의 없었으며, 그 추정결과가 단일차종에 대한 추정결과와 어떠한 점에서 다른지에 대한 연구는 전무하였다.

따라서 이를 고려한 모형개발이 필요한데, OD 추정모형과 다차종 통행배정모형의 결합모형이 이를 해결할 수 있는 한가지 방법이 될 것으로 판단된다. 즉, 관측교통량과 기존 OD를 차종별로 구분함으로써 단일차종으로 계산하는 경우보다 교통량의 관측오차를 감소시킬 수 있고, 차종별 경로선택을 고려함으로써 OD 추정모형의 추정력을 높일 수 있을 것이다.

본 연구는 유전알고리즘을 이용한 관측교통량으로부터 OD 추정기법을 축도로에 적용한 임용택(2000) 등의 연구와 이를 네트워크로 확장한 백승걸(2000) 등의 연구를 다차종으로 확장한 연구이다. 본 연구의 목적은 유전알고리즘을 이용한 다차종 OD 추정모형을 구축하고, 이를 기존의 바이레벨 모형의 IEA(Iterative Estimation Assignment) 알고리즘과 비교함으로써, 기존 OD 추정모형이 차종구분 없이 모형을 구성함으로써 추정력이 저하됨을 밝히고, 본 연구에서 개발한 모형의 OD 추정력을 보이고자 하는 것이다. 또한 본 연구에서는 기존모형이 기존OD에 대해 가지는 종속성문제를 보다 심도있게 검토하기 위해 백승걸 등(2000)의 연구에 제시하였던 OD구조(OD matrix structure)¹⁾라는 개념을 이용하여, OD구조가 변한 경우에 기존모형과 본 연구에서 개발한 모형의 추정력도 검토하였다.

본 연구의 구성은 2절에서 다차종 통행배정모형에 대해 살펴보고, 3절에서 다차종 통행배정모형과 이를 결합한 OD 추정알고리즘을 개발한 후, 4절에서는 사례분석을 통해 각 모형들을 비교평가하고, 5절에서는 결과를 요약하였다.

II. 바이레벨 OD 추정기법

본 연구에서는 링크교통량으로부터 OD 추정기법에 관하여 최근 가장 많이 제시되고 있는 바이레벨 OD 추정기법 중 대표적인 기법으로 Yang(1995)이 제시한 IEA 알고리즘을 검토하였다.

1. IEA 알고리즘

기존 OD는 표본행렬의 조사과정에서 조사오차(survey error)를 가지거나 조사시점이 추정시점에 비해 상당히 경과되어 자료의 신뢰성이 저하될 수 있다. 관측교통량도 시간변동이나 관측오차(measurement error)를 가지기 때문에, 이러한 점을 고려하기 위하여 일반화 최소자승법(Generalized Least Square:GLS)기법이 많이 이용되는데, GLS의 가장 큰 장점은 OD 통행량과 직접 관련된 관측교통량을 결합시키고, 이러

1) OD구조란 본 연구에서 새로이 제시하는 개념으로, 임의의 한 기점에서 여러 종점들로 통행량이 배정될 때 이들 기점간의 규모순위(또는 분할비율순위)를 의미하며, OD구조의 변화란 이 순위가 바뀌는 경우를 나타낸다.

한 자료들의 상대적인 정확성을 고려할 수 있다는 것이다(Bell, 1991).

Yang(1992) 등은 혼잡상황에서 경로 선택과 OD 행렬의 추정을 동시에 수행할 수 있는 효과적인 기법으로서 식(1)과 같이 바이레벨 프로그래밍 기법을 사용할 수 있음을 보였다. 여기서 (1a)는 OD추정식인 상위함수, (1c)는 균형통행배정식인 하위함수이다.

$$\min F(t) = (\bar{t} - t)^T U^{-1} (\bar{t} - t) + (\bar{v} - v)^T V^{-1} (\bar{v} - v) \quad (1a)$$

subject to

$$t \geq 0 \quad (1b)$$

$$v = M(t) \quad (1c)$$

여기서,

- \bar{t} : 기존(target) OD 행렬
- \bar{v} : 관측링크통행량
- t : 추정 OD 행렬
- v : 추정 OD행렬에 따른 링크교통량
- U : OD간 오차의 분산-공분산 행렬
- V : 링크교통량간 오차의 분산-공분산 행렬

$M(t)$ 는 통행배정(traffic assignment) map이라 불리며, OD t 와 추정 링크교통량 v 간의 관계를 묘사하는데 이용된다.

링크교통량 $v(t)$ 는 OD 통행량 t 로부터 구해지는데, OD행렬의 성공적인 해 추정은 $v(t)$ 를 어떻게 계산하는가에 달려있다. 그러나 $v(t)$ 는 비선형이고 함수적 형태가 명확히 알려져 있지 않기 때문에, OD통행량 변화에 대한 링크교통량의 변화를 명확하게 나타낼 수 없다. Yang(1995)은 이러한 점을 피할 수 있는 방법으로 영향계수(Influence factor) $Z=[p_{aw}]$ 에 기초하여 현재의 해 ($t^*, v(t^*)$)에서의 $v(t)$ 에 대한 국지적 선형근사식을 구성하는 IEA와 Sensitivity Analysis Based(SAB) 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서는 대각화 알고리즘을 이용하기 때문에 차종간의 관계가 비가분적(nonseparable)인 대신, 링크교통량간의 관계는 가분적(separable)이라고 가정하였다. 따라서 다차종OD 추정모형에서는 비모형으로 IEA를 이용하였다. IEA 알고리즘의 일반적 개요는 다

음과 같다.

[Step 0] 초기해 행렬 $t^{(0)}$ 를 결정한다. $k=0$ 으로 놓는다

[Step 1] 주어진 $t^{(k)}$ 에 대해 하위의 균형통행배정 문제를 푼다.

[Step 2] 영향계수 $Z^{(k)}$ 를 계산한다.

영향계수 Z 는 링크이용비율에 의해 정의하였는데 ($Z=[p_{aw}]$), 여기서 p_{aw} 는 식(2)와 같은 하위문제의 균형통행배정 문제를 풀어 구한 경로통행량을 이용해 계산하였다.

$$p_{aw} = \frac{\sum_{r \in R} f_r \delta_{ar}^w}{t_w}, \quad a \in A, w \in W \quad (2)$$

여기서, f_r 은 t 와 관련된 균형경로통행량의 해를 의미하고, δ_{ar}^w 은 기종점 w 간의 경로 r 이 링크 a 를 이용하면 1의 값을, 이용하지 않으면 0의 값을 갖는다.

[Step 3] $Z^{(k)}$ 를 이용해 상위의 추정문제를 풀어 $t^{(k+1)}$ 을 구한다.

영향계수에 근거하여, 비선형함수 $v = v(t)$ 를 식(3)과 같이 선형으로 근사화한다.

$$v(t) \approx v(t^*) + Z(t - t^*) \quad (3)$$

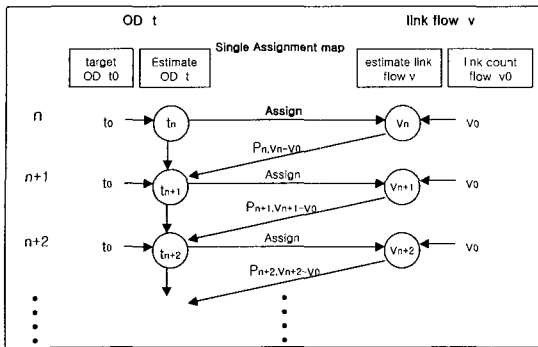
도출하는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t^{(k+1)} = (U^{-1} + Z^{(k)T} V^{-1} Z^{(k)})^{-1} (U^{-1} \bar{t} + Z^{(k)T} V^{-1} \bar{v}) \quad (4)$$

[Step 4] 수렴조건이 만족되면 정지한다. 그렇지 않으면, $k = k+1$ 로 놓고 Step 1로 간다.

2. 게임이론 측면에서의 IEA

Yang(1995)은 바이레벨 OD추정을 상위모형이 OD추정이며, 하위모형이 균형배정인 Stackelberg 게임으로 설명하였다. Stackelberg 게임은 협력적(cooperative) 게임이라고도 하며, 게임에 참여하는 선수



<그림 1> IEA의 추정 과정

들이 자신의 효용을 극대화하기보다는 상위목적함수의 최적화를 목표로 완전히 구속력 있는 협약을 맺고 하는 게임이다. 따라서 상위모형은 하위모형의 반응을 정확히 알아야 한다.

Yang(1992) 등에 의하면 상위함수는 t 와 v 에 대해 강볼록하나, 하위함수는 비볼록(non-convex)하다. 따라서 Yang(1992) 등은 기존 OD가 실제 OD와 근사한 상황, 즉 p 의 변화가 안정적인 패턴을 보이는 경우를 가정하여, 이전 반복계산에서 얻어진 $p_{ave}(t)$ 를 근사적으로 사용하였다. IEA는 축차적 계산으로, $(k-1)$ 반복시에 구한 영향계수를 이용하여 k 단계의 t_k^* 를 구하는데, 이러한 축차적 기법은 목적함수가 볼록형태를 가지며, 이에 따라 전 단계의 영향계수가 현 단계의 영향계수와 선형적으로 근사하다는 것을 가정한다.

IEA의 추정과정은 <그림 1>과 같으며, 이와 관련하여 IEA가 Stackelberg 게임에 부합되는지를 살펴보았다.

첫째, IEA는 기존 OD (t_0)와 링크관측교통량 (v_0)을 모든 반복시에 이용하지만 추정OD와 추정교통량 대신 이전단계의 링크이용확률(P)만 이용한다. 즉 IEA는 기존 OD를 상당히 정확한 값으로 가정하고 해의 탐색과정에서 추정OD에 대한 기준값으로 계속 이용한다. 따라서 해당지역의 OD구조가 크게 변화되지 않은 곳에서는 해의 발생영역을 안정적으로 확보하여 추정의 정확성을 보장해주지만, OD구조가 변화된 곳에서는, 즉 기존 OD가 실제 OD와 다를 경우 오히려 이러한 종속성으로 인해 새로운 OD구조를 추정하는데 한계를 가지게 된다.

둘째, IEA는 반복적인 선형근사화, 즉 이전 통행배정 map이 현 단계의 통행배정 map에 근사하다는 가정을 통해 최적해를 축차적으로 탐색해간다. 그러나 이러한 축차적 기법에서는 leader(OD 추정)가 follower

(UE 배정)의 반응을 정확히 알 수 없기 때문에, 완전한 Stackelberg 게임 상황이 되기 어렵다. 따라서 영향계수가 안정적이지 않고 초기값으로 이용되는 기존 OD가 실제 OD와 유사하지 않은 경우, 특히 동일 기점에 대한 OD구조가 변할 경우에는 이러한 근사화가 성립되지 않는다.

셋째, IEA는 링크교통량과 OD행렬의 추정에 있어 단일통행배정 map을 사용하므로 효율성은 확보할 수 있으나, OD 추정에서 중요한 정확성을 확보하기가 어려우며, 특히 다차종인 경우는 더욱 그렇다.

III. 다차종 OD 추정기법의 개발

1. 기존 다차종 OD 추정기법

다차종 링크교통량으로부터의 다차종 OD 추정기법은 그 필요성에도 불구하고 기존 연구가 거의 없는 실정이다. 김종형(2000)은 EMME/2의 다수단 통행배정을 이용하여 처음으로 다차종 OD를 추정하였다. EMME/2에서는 차종 c 의 통행자에 의해 인지된 링크 a 의 통행비용 C 는 식(5)와 같다고 가정한다.

$$C_a^c(v_a) = C_a(v_a) + b_a^c \quad a \in A \quad (5)$$

식(5)는 다차종 OD추정과 관련되어 몇가지 한계를 가지고 있다. 첫째, 식(5)는 서로 다른 차종들은 링크상의 총통행량을 기반으로 동일한 혼잡영향을 받지만, 각각의 차종들은 서로 다른 고정된 편익(bias) b_a^c 을 갖는다고 가정하는 것으로, 교통량 수준에 따른 혼잡영향도를 동일하게 보기 때문에 승용차환산대수를 적용하는 방법과 유사하다. 둘째, 차종간 상호작용을 고려하기 위해서는 비대칭비용함수를 이용하여야 하는데, 상수로 차종특성을 반영하는 분리가능한 형태의 비용함수를 이용하였기 때문에, 다차종 통행배정에는 적합하지 않다. 셋째, EMME/2에서는 가능경로를 미리 설정하여 통행배정을 수행하기 때문에 대규모 네트워크에 대한 적용성 면에서는 효율적이거나, 통행행태를 단순화하여 반영하기 때문에 실제 통행패턴과는 부합되지 않으며, 따라서 실제OD를 추정한다고 기대하기 어렵다.

김종형(2000)은 EMME/2의 gradient 기법을 적용하였으며, 무수히 많은 경로교통량, 즉 OD 통행의 합이 일정한 경로만 이용한다는 가정 하에 관측교통

량을 구하고 이에 대해서 관측오차를 고려하였다. 따라서 정확한 OD를 추정하기 위한 기법이라기보다는 대규모 네트워크에서 효율적으로 OD를 추정하는 데 초점을 둔 방법이라고 할 수 있다.

2. 다차종 OD 추정기법의 개발

Stackelberg 게임에 부합되는 OD추정 알고리즘을 구성하기 위해서는 목적함수가 비볼록인 상황에서 전역해를 찾기 위한 방법이 필요하다. 이러한 문제를 풀기 위해 하위문제는 이용자 통행배정(UE)을 통해 구하고, 상위문제는 유전알고리즘(GA:Genetic Algorithm)을 이용하여 전역해를 구하는 방법을 이용할 수 있다. GA는 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 세 가지 과정을 반복하여 최적해를 도출한다.

GA를 이용해 관측링크교통량으로부터의 다차종 OD를 추정하기 위하여 위 식(1)을 스칼라(Scalar) 형태로 표현하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } F(t_{ij}) = & \frac{1}{2} \sum_c \sum_a (v_a^c - \bar{v}_a^c)^2 \\ & + \gamma \frac{1}{2} \sum_c \sum_{ij \in W} (t_{ij}^c - \bar{t}_{ij}^c)^2 \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\text{subject to } t \geq 0 \quad (6b)$$

$$v = M(t) \quad (6c)$$

여기서,

$t = \{t_{ij}^c\}$: 기종점 ij간 차종 c의 OD통행량

$v = \{v_a^c\}$: 링크 a의 차종 c의 링크교통량

위 식은 기종점 통행량 추정모형에서 흔히 쓰이는 최소자승 형태로, 여기서 식(1)의 U와 V는 identity 행렬로 가정하였다. 식에서 γ 는 사용되는 기존 기종점표의 신뢰성을 목적함수에 반영하는 파라미터이고, A는 관측링크집합, W는 기종점쌍의 집합을 나타낸다.

다차종 관측교통량을 고려하기 위해서는 다차종 통행배정이 필요한데, 이는 비대칭 문제(asymmetric problem)이라는 의미로도 해석된다. 비대칭 문제란 최적화과정에 사용되는 통행배정 목적함수의 야코비안

행렬이 비대칭적인 형태를 갖는 경우를 의미한다. 다차종 비대칭 비용함수에 관한 연구는 여러 연구자들을 통해 발표된 바 있으나, 가장 대표적인 형태의 함수식은 Lawphongpanich and Hearn(1984), Mahmassani and Mouskos(1988) 등이 제시한 BPR 함수를 기본식으로 하는 형태의 함수식이다. 본 연구에서는 식(7)과 같이 Mahmassani(1988) 등의 식을 차종별 통행비용함수로 이용하였다.

$$t_{aA}(x_{a,a}, x_{aT}) = t_{aA}^0 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_{aA} + 1.5x_{aT}}{C_a} \right)^4 \right] \quad (7a)$$

$$t_{aA}(x_{aT}, x_{a,i}) = t_{aA}^0 \left[1 + 0.43 \left(\frac{x_{aA} + 1.5x_{aT}}{C_a} \right)^3 \right] \quad (7b)$$

여기서

t_{aA}^0, t_{aT}^0 : 링크 a에서 승용차와 트럭의 자유교통류시간

X_{aA}, X_{aT} : 링크 a에서 승용차와 트럭의 교통량

C_a : 링크 a의 PCU 단위 용량

야코비안이 비대칭이고 양정이 아닌 상황이 일반적이라고 볼 수 있기 때문에 본 연구에서 이용하는 링크비용함수도 유일해 보장이 어렵다. 하지만 다차종 통행배정문제는 대각화기법을 적용할 수 있는데, 그 이유는 convex 수리프로그램으로 균형문제를 푸는 데 이용하는 Frank-Wolf(F-W)알고리즘을 약간만 수정하면 되기 때문이다. Mahmassani(1988) 등은 비분리, 비대칭인 경우 대각화알고리즘을 이용하여 수렴성을 갖음을 보였다. 대각화 알고리즘은 IEA와 결합하여 IEAMUC(IEA Multi User Class)로 확장할 수 있으며, GA를 이용한 OD추정과도 결합하여 GAMUC로 확장된다.

유전알고리즘을 이용한 다차종 OD 추정모형의 구체적인 해도출 알고리즘은 다음과 같다.

[step 0] 초기화(Random Generation)

① Set *mutratio*(돌연변이 확률)

$\max \text{iter}$ (최대반복수)

$n = 1$ (세대수 또는 반복수)

② $X_{1,n}^c[m][i]$ 과 $X_{2,n}^c[m][i]$ 에 대해 (0,1) 사이의 확률값 발생

여기서, $X_{1,n}^c[m][ij]$ 은 차종 c 의 m 번째 유전자의 기종점 ij 간 선택비율 ($m=1,2,\dots,M$, M 은 짝수)
 $X_{2,n}^c[m][i]$ 은 차종 c 의 n 세대중 m 번째 유전자의 기점 i 에 대한 발생 비율

③ 식(8)을 계산

$$X_{1,n}^{c*}[m][ij] = \frac{X_{1,n}^c[m][ij]}{\sum_{r \in D} X_{1,n}^c[m][ir]} \quad (8)$$

여기서 $\sum_{j \in D} X_{1,n}^{c*}[m][ij] = 1.0 \quad \forall i \in O, j \in D$

[step 1] 차종별 추정 OD $t_{ij}^c[m]$ 의 산정

① 식(9) 계산

$$t_{ij}^c[m] = X_{1,n}^{c*}[m][ij] \cdot X_{2,n}^c[m][i] \cdot O_i \quad (9)$$

여기서 O_i : 기점 i 에서 발생하는 기준 OD

[step 2] 대각화 알고리즘(통행배정)

$t_{ij}^c[m]$ 에 대한 통행배정으로부터 v_a^n 를 계산하기 위해 복수(multiple)통행배정 map을 수행하며, 다차종OD 추정에서는 대각화 알고리즘을 수행한다.

① 초기화

자유교통류 링크비용을 통해 각 차종의 최단경로를 계산하고 전량통행배정을 수행한다. $n=0$.

② 반복횟수 증가

$$n = n + 1$$

③ 비용함수 대각화

식(10)에 따라 특정차종의 비용은 나머지 차량의 통행량을 가장 최근에 계산한 값으로 고정하여 계산한다. 따라서 C_a^n 은 v_a 만의 함수가 된다.

$$C_a^n = C_a(v_a, v_i^{(n-1)}) \quad (10)$$

④ 균형통행패턴 탐색(현재 최소화문제의 해 탐색)

③에서 링크비용함수 $C_a^n(v_a)$ 와 $v_a^{(n-1)}$ 을 초기링크 교통량 산정치로 가정하고 링크교통량 v_a^n 을 산정하기 위해 F-W 알고리즘을 이용하여 대각화된 차종의 이용자균형통행패턴을 찾는다.

⑤ 내부계산 수렴성 검증

링크 a 에서 대각화된 차종의 통행량 변화율이 미리 정해진 값 이하면 정지하고 ③으로 가서, 다른 차량에 대각화를 실시한다. 수렴이 되지 않으면 ④로 가 최적화 작업을 반복한다.

⑥ 외부계산 수렴성 검증

교통망의 총 통행비용 변화량이 미리 주어진 값 이하면 정지하고, 그렇지 않으면 ②로 간다.

[step 3] 적합도 계산(Fitness Calculation)

③ 식(6)으로 적합도 계산

④ 정렬 : 적합도값이 적은 순서로 sorting

[step 4] 교배(Cross-over)

① $n+1$ 세대의 전체 유전자들중 하위 50%를 n 세대 유전자들의 교배로 구한 새로운 유전자로 교체

$$X_{1,n+1}^{c*}[m][ij] = \alpha X_{1,n}^{c*}[k][ij] + (1-\alpha) X_{1,n}^{c*}[k+1][ij] \quad (11a)$$

$$X_{2,n+1}^c[m][i] = \alpha X_{2,n}^c[k][i] + (1-\alpha) X_{2,n}^c[k+1][i] \quad (11b)$$

여기서, α : random number(0~1)

[step 5] 돌연변이(Mutation)

① 각 $X_{1,n+1}^{c*}[m][ij]$ 과 $X_{2,n+1}^c[m][i]$ 에 대해 (0,1) 사이의 확률값 r 발생

② 만일 $r \leq mutratio$ 이라면

$X_{1,n+1}^{c*}[m][ij]$ 과 $X_{2,n+1}^c[m][i]$ 에 대해 (0,1) 사이의 확률값 r 발생

[step 6] 적합도 계산(Fitness Calculation)

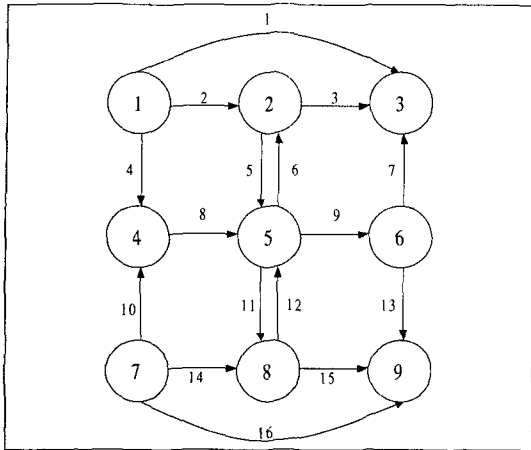
① 식(12)을 계산

$$t_{ij}[m] = X_{1,n+1}^{c*}[m][ij] \cdot X_{2,n+1}^c[m][i] \cdot O_i \quad (12)$$

② 이하는 step 1과 동일

[step 7] 수렴조건(Stopping Criteria)

$n \leq \max iter$ 이면 $n = n + 1$ 하고 [step 2]로 가고, 그렇지 않으면 정지.



〈그림 3〉 사례네트워크

- 돌연변이율은 반복수에 따라 다르게 설정
- 최대반복수는 500번

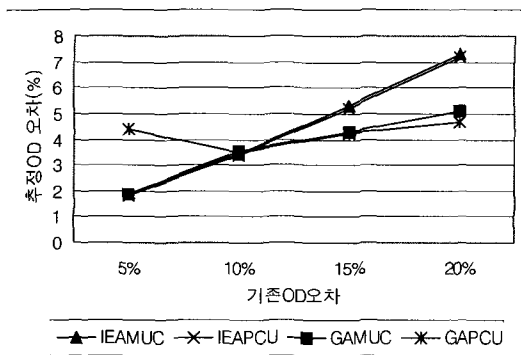
각 모형의 추정OD와 실제 OD간 차이를 비교하기 위한 추정자로 Relative Mean Absolute Error(MAE)를 사용하였다.

$$MAE(\%) = \left(\frac{\sum_{w \in W} |t_w - t_w^+|}{\sum_{w \in W} t_w^+} \right) \times 100 \quad (9)$$

여기서, t_w 와 t_w^+ 는 각각 추정 OD 행렬과 실제 OD 행렬을 나타낸다. N 은 기중점의 수이다.

2. 분석결과

OD 추정문제는 실제해를 알 수 없기 때문에 기존 OD 오차나 관측링크교통량오차에 일관적인 모형이



〈그림 4〉 기존 OD 오차에 대한 모형 추정력 (관측교통량 오차 0%, 관측링크수 16개)

필요하며, 본 연구에서는 다양한 오차요인에 대한 모형의 추정력을 비교검토하였다.

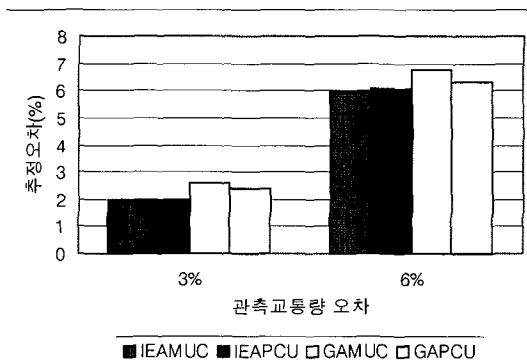
1) 모형의 안정성 비교

(1) 기존 OD 오차에 따른 추정력

모든 링크 관측시(관측링크수 16개)를 기준으로 하여, 관측교통량 오차는 없고 기존 OD의 오차만 5%, 10%, 15%, 20%일 때 각 모형의 추정력을 검토하였다. 기존 OD 오차가 5%에서는 각 모형의 추정력이 유사하나, 10% 이상에서는 GAMUC의 추정력이 높다. IEA는 모형의 안정성을 보이지 않았는데, 이는 IEA의 교통량이 관측교통량을 승용차환산대수로 환산한 값이어서 추정교통량 기준에 부합되지 않기 때문이다. 또한 IEA에서는 OD도 PCU로 환산되었기 때문에, 원래 차종 구분된 OD보다 동일한 관측교통량에 대해 실행가능해의 범위가 넓어지기 때문이다.

(2) 관측교통량 오차에 따른 추정력

기존 OD 오차는 없고 관측교통량 오차만 있는 경우의 각 모형의 추정력은 〈그림 5〉와 같다. 대부분의 모형이 관측교통량 오차가 3%일 때는 약 2%의 오차를, 6%일 경우는 약 6%의 오차를 나타내어 관측교통량 오차가 대부분 OD 추정오차에 반영되는 것을 알 수 있다. 앞에서 관측교통량 오차가 없는 경우에는 추정 OD의 오차가 기존 OD 오차에 비해 약 절반 정도 감소하는 것으로 분석되었기 때문에, 관측교통량 오차가 기존 OD의 오차보다 OD 추정에 더 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 또한 기존OD 오차는 없고 관측교통량 오차만 있는 경우에는, 반복수가 500번으로 상



〈그림 5〉 관측교통량오차에 대한 모형 추정력 (기존 OD 오차 0%, 관측링크수 16개)

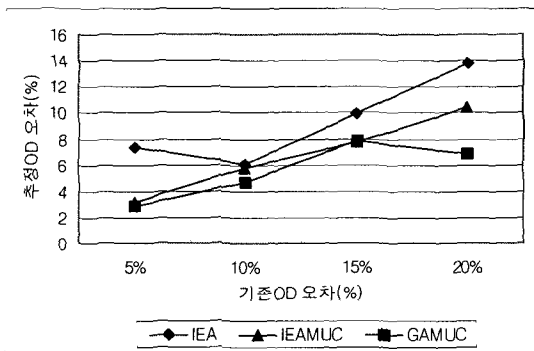
당히 적다는 것을 감안하더라도 GAMUC의 추정력이 IEAMUC보다 양호하지 않았다.

2) 기존OD 오차에 따른 추정력 비교

기존OD 오차에 따른 추정오차는 오차크기에 관계 없이 IEA가 가장 크고, GAMUC가 가장 작았으며, 기존 OD의 오차가 클수록 IEA, IEAMUC보다는 GAMUC의 추정오차가 더 작았다.

3) 관측교통량오차에 따른 추정력

기존OD 오차를 반영하고, 10개 관측링크수에서 관측교통량오차 3%, 6%에 대한 모형추정력을 비교 분석하였으며, 이는 <표 2>에 기술하였다. 관측교통량 오차가 3%일 때는 기존 OD 오차에 관계없이 모든 모형에서 추정이 가능하였으나, 관측교통량 오차가 6%일 때는 IEA와 IEAMUC가 추정을 못하였다. 이는 관측교통량 오차가 어느 정도 클 때는 차종구분하지 않은 모형(IEA)이 추정에 심각한 오차를 가지며, IEAMUC로 추정하였을 경우에도 추정오차가 커지게 됨을 의미한다.



<그림 6> 기존OD 오차별 추정오차 (관측교통량오차 3%, 관측링크갯수 10개)

<표 2> 관측교통량 및 기존 OD오차별 모형 추정력

구 분	기존 OD오차별 MAE							
	5%		10%		15%		20%	
관측교통량 오차	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%
IEA	7.31	12.70	6.11	14.98	9.92	17.41	13.81	20.59
IEAMUC	3.21	7.44	5.79	9.90	7.77	13.08	10.39	15.81
GAMUC	2.86	6.34	4.69	6.78	7.89	7.98	6.84	8.76

<표 3> 기존OD 오차별 추정OD(IEA)

기점	종점	실제 OD	기존 OD 오차별 추정OD			
			5%	10%	15%	20%
1	3	1,625	1,731	1,775	1,851	1,928
1	5	1,075	1,071	1,022	990	957
1	9	1,650	1,471	1,609	1,556	1,501
5	3	990	1,166	1,167	1,208	1,247
5	9	1,075	874	1,039	992	944
7	3	1,725	1,779	1,702	1,635	1,568
7	5	1,175	1,130	1,129	1,100	1,069
7	9	1,600	1,633	1,741	1,812	1,886
MAE			7.311	6.111	9.922	13.807

주) 굵은 선 부분은 OD구조 변경된 기점, 음영부분은 정확히 OD 구조를 추정한 기점.

또한 기존 OD 오차가 5%일 때 IEA, IEAMUC, GAMUC의 추정오차가 5%를 모두 초과하여 추정을 하지 못하였는데, 이는 어떠한 모형을 이용하더라도 관측교통량 오차가 최소한 기존 OD오차보다는 적어야 추정이 가능함을 나타낸다고 할 수 있다. 이것은 기존 OD와 관측교통량 오차중 적은 오차가 추정오차의 하한기준임을 나타낸다고도 할 수 있다.

4) OD구조 변화에 대한 모형 추정력

<표 4>, <표 5>의 PCU 환산시 기존OD 오차에 대한 추정OD는 차종구분된 추정OD에 대형차량(트럭)의 PCE를 곱하여 단일한 PCU로 나타낸 것이다. 따라서 정확한 비교대상은 아니지만 다차종을 단일차종으로 환산하는 경우 발생하는 문제점을 검토하기 위해 PCU로의 추정값도 함께 기술하였다.

(1) IEA

<표 3>은 교통량 환산자료를 이용한 IEA기법의 추정력을 나타낸 것이다. 분석결과 5%에서 1개 OD 구조의 변화만을 추정하였다. 따라서 PCU로 환산된 교통량과 OD는 실제 상황과 전혀 다른 OD를 추정할 가능성이 매우 높으며, 그 추정력도 낮을 수밖에 없다는 것을 나타낸다고 할 수 있다.

(2) IEAMUC

<표 4>에서 차종구분하지 않은 경우에는 OD구조가 변화되지 않은 5%의 7번 기점에 대해서만 OD구조를

〈표 4〉 기존OD 오차에 따른 IEAMUC의 추정OD 및 추정오차

기점	종점	차종구분시 기존OD 오차별 추정OD						PCU 환산시 기존OD 오차별 추정OD				
		차종	실제 OD	5%	10%	15%	20%	실제 OD	5%	10%	15%	20%
1	3	a	1,100	1,155	1,210	1,265	1,320	1,625	1,662	1,714	1,741	1,805
		t	350	338	336	317	323					
1	5	a	700	668	654	647	634	1,075	1,034	1,001	986	976
		t	250	244	231	226	228					
1	9	a	1,200	1,149	1,128	1,118	1,097	1,650	1,584	1,556	1,547	1,517
		t	300	290	285	286	280					
5	3	a	600	624	657	686	722	990	1,025	1,074	1,111	1,157
		t	260	267	278	283	290					
5	9	a	700	670	654	641	623	1,075	1,026	1,004	988	941
		t	250	237	233	231	212					
7	3	a	1,200	1,151	1,125	1,089	1,064	1,725	1,649	1,611	1,547	1,510
		t	350	332	324	305	297					
7	5	a	800	777	767	753	741	1,175	1,142	1,129	1,107	1,100
		t	250	243	241	236	239					
7	9	a	1,000	1,050	1,100	1,150	1,200	1,600	1,613	1,658	1,686	1,731
		t	400	375	372	357	354					
MAE			4.243	7.055	9.970	12.667	3.207	5.790	7.765	10.394		

주 1) a:승용차, t:트럭

2) 굵은 선 부분은 OD구조가 변경된 기점, 음영부분은 OD구조를 정확히 추정한 기점

〈표 5〉 기존OD 오차에 따른 GAMUC의 추정OD 및 추정오차

기점	종점	차종구분시 기존OD 오차별 추정OD						PCU 환산시 기존OD 오차별 추정OD				
		차종	실제 OD	5%	10%	15%	20%	실제 OD	5%	10%	15%	20%
1	3	a	1,100	1,133	1,201	1,194	1,216	1,625	1,658	1,750	1,728	1,762
		t	350	350	366	356	364					
1	5	a	700	662	642	638	659	1,075	1,033	1,001	947	952
		t	250	247	239	206	195					
1	9	a	1,200	1,189	1,191	1,170	1,153	1,650	1,626	1,625	1,682	1,626
		t	300	291	289	341	315					
5	3	a	600	605	658	669	611	990	1,006	1,077	1,142	1,100
		t	260	267	279	315	326					
5	9	a	700	637	644	597	627	1,075	997	1,009	890	930
		t	250	240	243	195	202					
7	3	a	1,200	1,168	1,149	1,104	1,151	1,725	1,683	1,662	1,565	1,636
		t	350	343	342	307	323					
7	5	a	800	768	787	805	750	1,175	1,130	1,146	1,225	1,116
		t	250	241	239	280	244					
7	9	a	1,000	981	1,022	1,039	1,046	1,600	1,569	1,642	1,651	1,658
		t	400	392	413	408	408					
MAE			2.945	4.779	8.033	6.921	2.863	4.691	7.888	6.839		

주 1) a:승용차, t:트럭

2) 굵은 선 부분은 OD구조 변경 기점, 음영부분은 OD구조를 정확히 추정한 기점

추정하기 때문에, 결국 구조가 변화된 OD쌍은 전혀 추정하지 못하고 있음을 보인다. 즉 IEAMUC는 OD 구조를 정확히 추정하지 못할 수도 있다는 것을 나타낸다.

(3) GAMUC

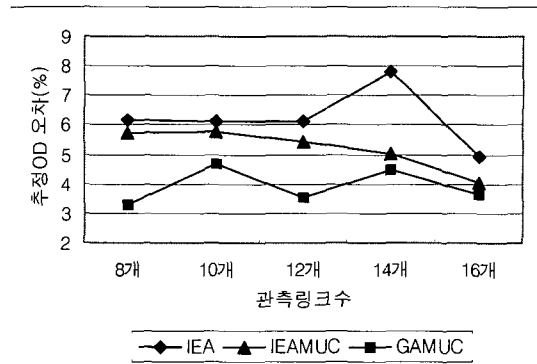
〈표 5〉는 차종구분하지 않았을 경우 GAMUC가 7번 기점의 OD오차 5%에 대해서만 OD구조를 추정하는 것을 나타낸다. 그러나 차종 구분시에는 7번 기점에 대한 OD구조를 모두 추정하였다. 이것은 GA를 이용할 경우도 실제 OD구조 추정을 위해서는 차종별로 OD를 구분하여 추정하는 것이 필요하다는 것을 의미한다.

따라서 어떠한 모형을 이용하더라도 차종별로 구분된 OD와 관측교통량을 이용하여야만 실제 OD에 대한 추정력을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다.

〈표 3〉, 〈표 4〉, 〈표 5〉의 전체적인 추정력을 〈표 6〉에 다시 정리하였다. OD구조가 변화하였을 때 〈표 3〉(IEA)은 세 개 기점중 한 개 기점의 OD도 추정하지 못함을 나타내며, 〈표 4〉(IEAMUC)는 OD오차 10%일 때의 한 개의 기점만을 추정하였다. 이에반해 〈표 5〉(GAMUC)는 OD오차에 관계없이 최소한 한 개 기점의 OD구조는 정확히 추정가능하다는 것을 나타낸다.

5) 관측링크수에 대한 모형의 추정력

〈그림 7〉의 기존OD 오차와 관측교통량의 오차를 반영한 관측링크수에 대한 모형의 추정력 비교에서는 모든 관측수에서 IEA와 IEAMUC보다 GAMUC의 추정력이 양호한 것으로 나타났다. 모든 링크를 관측



〈그림 7〉 관측링크수별 모형의 추정력

한 경우(관측수 16개)에는, 세 모형이 비교적 유사한 추정오차를 갖지만, 관측수가 8개로 적은 경우 IEA, IEAMUC와 GAMUC의 추정력 차이가 특히 컸다. 이는 관측수가 적을 경우에도 GAMUC는 추정 효율성이 크기 때문에 모형의 적용력이 상대적으로 크다는 것을 보이고 있다.

관측수 증가에 따라 추정력은 일관적이지 않았다. 이는 관측교통량오차가 링크마다 다른 상황에서, 관측오차가 큰 링크의 포함여부에 따라 추정값이 영향을 받기 때문이며, 네트워크 토폴로지(topology) 특성에 인한 OD와 경로와의 관계 등과 같은 요인이 영향을 미치는 것으로 파악된다. 이 같은 문제로 인해 관측 링크위치에 따라 OD 추정력이 달라지게 된다. OD 추정에 있어 관측교통량위치 문제는 그 자체가 하나의 연구분야로, 본 연구에서는 다루지 않았다.

V. 결론

본 연구에서는 전역최적화가 가능한 GA를 이용하여 기존OD에 대한 종속성을 완화하고, 다차종 통행배정 기법의 적용으로 관측교통량의 오차에 덜 민감한 OD 추정모형을 제시하였다. 또한 바이레벨 알고리즘(IEA, IEAMUC)과 본 연구에서 개발한 알고리즘(GAMUC)에 대해 그 추정과정을 게임이론측면에서 검토하였으며, 기존OD와 관측교통량의 오차가 존재하는 사례네트워크에 대해 각 기법들을 비교하였다.

사례분석 결과, 기존 OD와 실제 OD간의 구조적 차이가 있는 경우에는 기존모형은 OD구조를 일반적으로 추정하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 비해, GAMUC는 복수 OD 각각에 대한 복수의 통행배정

〈표 6〉 OD구조 변화에 대한 모형 추정력(다차종)

구분	기존 OD오차							
	5%		10%		15%		20%	
	NC	NCE	NC	NCE	NC	NCE	NC	NCE
IEA		0		0		0		0
IEAMUC	1	0	3	1	3	0	3	0
GAMUC		1		1		1		1

주) NC(Number of Change of the ordinal OD scale) : OD 구조가 변화한 통행기점의 수
 NCE(Number of Correct Estimation the ordinal OD scale) : OD구조를 정확히 추정한 통행기점의 수

map을 동시적으로 도출하여 다양한 통행패턴을 묘사할 수 있으므로 보다 정확한 Stackelberg 게임상황을 구현하는 것으로 나타났다. 또한 단일차종 OD추정기법은 심각한 추정오류를 범할 수 있으며, 그 적용성도 낮다는 것을 보였다. 다차종 OD추정기법(GAMUC, IEAMUC)이 단일차종 OD추정기법(IEA)에 비해 기존 OD오차변화나 관측링크교통량 오차변화 등에 대해 양호한 추정력을 보였다. 따라서 실제 OD를 알 수 없는 도시부 네트워크에서 GAMUC 모형의 적용력이 우수하다고 할 수 있으며, 특히 버스 등 경로가 있는 차종을 고려하는 경우 추정력이 더 높아질 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 김종형, Gradient 방법에 의한 통행량기반 수요 추정연구 - 다차종통행배분 및 대규모교통망 적용을 중심으로-, 서울시립대학교 대학원 박사학위논문, 2000.
2. 김현철, 복수수단 통행배정모형에 의한 대기오염물질의 배출량 산정에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문, 1997.
3. 백승걸, 유전알고리즘을 이용한 링크관측교통량으로부터 기종점 통행행렬 추정, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 2001.
4. 백승걸·김현명·임용택·임강원, 관측링크교통량을 이용한 도시부 OD 통행행렬 추정 - GA와 SAB 알고리즘의 비교를 중심으로-, 대한교통학회지, 제18권 제6호, 2000.
5. 김종형·이승재, 다차종 통행배분을 이용한 통행량기반 수요추정기법 개발, 대한교통학회지 제19권 제1호, 2001.
6. 임용택·김현명·백승걸, 유전알고리즘을 이용한 OD 추정모형의 개발과 적용에 관한 연구- 서울시 내부순환도로를 대상으로-, 대한교통학회지, 제18권 제4호, 2000.
7. Bell M.G.H., The estimation OD matrices constrained generalized least squares, Transp. Res. 25B, 1991, 13~22.
8. Fisk C. S., Game Theory and Transportation Systems Modelling, Transpn. Res. 18B, 1984, 301~313.
9. Hearn D. W., The gap function of a convex program, Operations Researches, Letter 1, 1982, 67-71.
10. Kim H. M., Baek S. K., and Lim Y. T, OD Matrices Estimation using Genetic Algorithm from link traffic counts, 2001 Transp. Res. Record, Accepted, 2000.
11. Lawphongpanich S., Hearn D. W., Simplicial decomposition of the asymmetric traffic assignment problem, Transportation Research 18B, 1984, 123-133.
12. Mahmassani H. S. Mouskos K. C., Some numerical results on the diagonalization algorithm for network assignment with asymmetric interactions between cars and trucks, Transportation Research 22B, 1988.
13. Oh, J. H, Estimation of trip matrices from traffic counts : An equilibrium approach, thesis of Ph.D, University College London, 1991.
14. Yang H., Heuristic algorithms for the bilevel OD matrix estimation problem, Transpn. Res. 29B, 1995, 231~242.
15. Yang H., Iida Y. and T. Sasaki, Estimation of OD Matrix from link traffic counts on congested networks, Transpn. Res. 26B, 1992, 417~434.

✉ 주 작성자 : 백승걸

✉ 논문투고일 : 2000. 12. 20

논문심사일 : 2001. 2. 7 (1차)

2001. 3. 17 (2차)

2001. 3. 20 (3차)

심사판정일 : 2001. 3. 20