

■ 論 文 ■

OD구조 변화시 링크관측교통량으로부터 OD추정모형의 추정력에 관한 연구

The performance of OD estimation from
link traffic counts in varying OD matrix structure

백 승 결
(인천발전연구원
초빙책임연구원)

김 현 명
(주)하이콘엔지니어링
선임연구원)

임 용 택
(여수대학교 교통물류시스템공학부
전임강사)

목 차

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| I. 서론 | 1. 분석예제 |
| II. OD 구조 및 기존연구의 한계 | 2. OD구조 미변화시 모형 추정력 |
| 1. OD 구조의 개념 | 3. OD구조 변화시 모형 추정력 |
| 2. OD 구조 측면에서의 기존 연구 검토 | 4. OD구조 변화시/미변화시 모형 추정력 비교 |
| III. OD 추정모형 및 알고리즘 | V. 결론 |
| IV. 사례분석 | 참고문헌 |

Key Words : OD 행렬 추정, OD 구조, OD 규모, 유전알고리즘, 바이레벨 OD 추정

요 약

지금까지의 링크교통량으로부터 OD 추정연구들은 수리적 모형과 알고리즘 구성에 초점을 두어, 실제 현실에서 일반적으로 발생하고 있는 OD 변화의 속성은 중요하게 고려하지 않고 실제 OD가 기존 OD와 유사하다는 가정하에 모형을 분석하였다. 특히 토지이용이 안정적이지 못한 지역이나 기존 OD와 실제 OD의 시간변동차이가 큰 지역에서는 각 OD쌍마다 OD의 증감이 서로 다른 것이 일반적이거나, 기존 OD가 균일하게 증가 또는 감소하거나 OD구조가 변하지 않는다는 비현실적인 가정하에 모형을 분석하여, OD통행이 다르게 증감하는 일반적인 상황에서의 모형 추정력을 나타내지 못하고 있다.

본 연구에서는 축차적 OD 추정모형이 기존 OD에 대해 가지는 종속성 문제를 보이기 위해, OD를 OD규모와 OD구조라는 새로운 개념으로 구분하여 제시하였다. 여기서 "OD규모"는 OD의 값을 나타내며, "OD구조"는 OD규모의 순위라 할 수 있다. 본 연구에서는 백승결 등(2000)이 개발한 유전알고리즘을 이용한 해도출 알고리즘을 OD구조분석에 적용하였다.

사례분석 결과, OD 통행량이 균일하게 증가 또는 감소한 경우와 각 OD쌍마다 OD 통행량의 증감이 다른 경우에 기존기법과 제시된 기법의 추정력이 서로 달랐다. 즉, OD 통행량이 균일하게 증가 또는 감소한 경우에만 기존 기법의 추정력이 양호하였고, 각 OD쌍마다 증감을 다르게 설정하는 경우와 OD구조가 변화되는 경우는 새로운 기법의 추정력이 양호하였다. 기존 OD와 실제 OD간의 규모차이가 큰 경우에도 OD구조가 변하지 않으면, 추정오차는 상대적으로 적게 도출되었다. 또한 OD구조가 변화된 기점수가 증가할수록, OD구조에 대한 모형의 추정력 뿐만아니라 OD 통행량에 대한 추정력도 저하되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 OD 추정시 OD규모와 함께 OD구조의 추정이 중요하며, 특히 실제 OD가 기존 OD에 비해 각 OD쌍별로 증감이 다른 일반적인 경우에는 OD구조의 추정이 더 중요한 정보가 될 수 있음을 제시하였다.

I. 서론

전통적인 기종점 통행행렬 추정(trip Origin-Destination matrix estimation)방법은 비용, 노동력, 시간이 많이 들며, 특히 토지이용과 인구가 급격하게 변하는 지역에서는 이러한 문제가 더욱 크다. 이에 따라 자료수집이 용이하고 수집비용이 크지 않은 링크관측교통량으로부터 기종점통행량 또는 OD행렬을 추정하는 기법이 지속적으로 연구되고 있다.

링크관측교통량을 이용한 OD행렬 추정방법은 직접 관측이 불가능한 OD자료와 관측된 링크교통량간의 인과관계를 설정하여 링크교통량으로부터 OD를 추정해 내는 것이다. 이러한 기법은 많은 연구자들에 의해 다루어진 것으로 일반적으로 엔트로피 극대화, 최우추정법, 일반화최소자승법, 그리고 베이지안 추정 등이 이용되어 왔다. 이러한 모형들은 일반적으로 상위 모형이 OD 추정모형이고 하위모형이 이용자균형 통행배분모형인 바이레벨(bilevel) 모형형태를 가지고 있다.

식(1)은 Yang 등(1992)이 제시한 것으로 상위문제는 일반화최소자승법, 하위문제는 통행배분인 바이레벨 모형이다.

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

$$\text{제약조건} \\ t \geq 0 \quad (1b)$$

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

여기서,

\bar{t} : 기존(target) OD

\bar{v} : 관측링크교통량

t : 추정 OD

v : 추정 OD에 따른 추정링크교통량

U : 기존 OD와 추정 OD간 오차의 분산-공분산 행렬

V : 관측링크교통량과 추정링크교통량간 오차의 분산-공분산 행렬

여기서, $M(t)$ 는 통행배분(traffic assignment) map이며(Cascetta and Nguyen, 1988), 추정 OD 행렬

t 와 추정 링크교통량 v 간의 관계, 즉 $v(t)$ 를 묘사하는데 이용된다.

그러나 바이레벨 기법들은 통행패턴의 추정시 선형 근사화를 가정하여 기존 OD에 대한 모형의 종속성을 강하게 가지고 있다. 이러한 이유로 기존 연구들은 대부분 기존OD가 실제OD와 유사하다는 가정하에 모형을 분석하였다. 또한 기존연구들은 OD 추정의 수리적 모형과 알고리즘 구성에 초점을 두어, 실제 현실에서 일반적으로 발생하고 있는 OD 변화의 속성은 중요하게 고려하지 않고 있다. 특히 토지이용이 안정적이지 못한 지역이나 네트워크가 개선된 지역, 기존 OD와 실제 OD의 시간변동차이가 큰 지역에서는 각 OD쌍마다 OD의 증감이 서로 다른 것이 일반적이나, 지금까지 OD추정에 대한 대부분의 연구가 기존 OD가 균일하게 증가 또는 균일하게 감소하거나 OD구조가 변하지 않는다는 비현실적인 가정하에 모형을 분석하여, OD쌍마다 OD통행이 다르게 증감하는 일반적인 상황에서의 모형 추정력을 나타내지 못하고 있다.

본 연구에서는 OD 추정모형이 기존 OD에 대해 가지는 종속성문제를 보다 심도있게 검토하기 위해, OD 행렬을 "OD 규모(OD matrix trip)"와 "OD 구조(OD matrix structure)"라는 새로운 개념으로 구분하였다. 또한 OD구조가 변하는 일반적인 상황에서의 모형 추정력을 분석하였다. 이를 위해 백승걸 등(2000)이 유전알고리즘을 이용해 개발한 해도출 알고리즘인 GAM(Genetic Algorithm Model)을 적용하였다. 본 논문은 임용택 등(2000)과 백승걸 등(2000)이 OD 추정연구에서 처음으로 제기한 OD구조문제를 보다 구체적으로 살펴본 것이다.

본 연구는 2장에서 OD 구조의 개념에 대하여 설명하고, OD구조측면에서 기존 OD 추정모형들의 문제점을 살펴본 후, 3장에서 OD구조를 추정하기 위한 기법으로서 유전알고리즘을 이용한 추정 알고리즘을 개발한 후, 4장에서 사례분석을 통해 모형의 추정력을 검토하였다. 결론에서는 분석결과 정리와 함께 향후 연구를 기술하였다.

II. OD 구조 및 기존연구의 한계

1. OD 구조의 개념

본 연구에서는 기존 OD 추정모형의 기존 OD에 대한

종속성 문제를 보이기 위해 OD를 OD규모와 OD구조라는 새로운 개념으로 구분하여 제시하였다. 여기서 "OD규모(OD matrix trip)"는 OD의 통행량(trips)을 나타내며, "OD구조(OD matrix structure)"는 OD의 규모순위라 할 수 있다. 즉 OD구조란 임의의 한 기점(origin)에서 여러 종점들로 통행량이 분할될 때 이들 기종점간의 분할비율순위를 의미하며, OD구조 변화란 이 순위가 바뀌는 경우를 나타낸다.

〈그림 1〉에 OD규모와 OD구조를 예로 나타내었다. OD규모와 OD구조의 변화유무에 따라 4가지 유형이 나타날 수 있으며, 각 유형을 A, B, C, D로 나타내었다. 유형 A의 경우 OD통행량의 규모와 구조가 실제 OD와 유사하여, 교통수요패턴이 크게 변하지 않았음을 나타낸다. 유형 B는 OD규모는 유사하나, (1)순위와 (2)순위의 OD통행량이 변화되어 OD구조가 변화되었다. 유형 C는 OD 규모는 증가하였으나, OD구조는 그대로 유지되었다. 마지막으로 유형 D에서는 OD규모도 증가하였고 OD구조도 변화되어 해당 지역의 교통수요패턴이 가장 복잡하게 변화되었음을 나타낸다.

토지이용이나 네트워크의 안정성 측면에서 OD 변화유형을 볼 때, 유형 A는 극히 안정적인 곳이며, 유형 B, C는 다소 불안정한 곳, 유형 D는 상당히 불안정한 곳이라 할 수 있다. OD쌍의 수가 많은 도시부 네트워크에서는 유형 A보다는 유형 B, C, D가 일반적이라 할 수 있다.

이 두가지 개념의 OD는 네트워크에 통행배분하였을 때 도출되는 교통량에 미치는 영향이 다르다. 즉 특정 OD쌍의 통행량이 변하지 않아도 다른 OD쌍의 통행량 변화에 의해 해당 OD쌍의 통행시간이 달라질 수 있다. 이것은 각 OD통행이 네트워크에 미치는 영향이 서로 비대칭적이기 때문이다. 따라서 특정 OD와 관련된 통행수요의 증가가 다른 OD쌍과 관련된

통행비용의 감소를 초래할 수도 있다(Dafermos and Nagurney, 1984). Yang 등(1992)은 Dafermos 와 Nagurney(1984)의 교통망 균형문제에 대한 민감도 분석연구에 따라 균형링크교통량은 OD 행렬에 대해 연속적인 종속관계를 갖는다고 가정하여 링크교통량과 통행수요에 대한 링크이용비용을 설정하였다. 그러나 이러한 종속관계는 단일 OD쌍에 대한 것으로 다중 OD쌍에 대해서는 그 성립을 보장할 수 없다. 그러므로 OD추정시 추정오차는 OD규모와 OD구조 모두에 의해 영향을 받는다고 할 수 있다.

또한 OD구조가 유사하게 변화한다는 것은 모든 OD 통행량이 동일하게 증가 또는 동일하게 감소하는 경우를 말한다. 유사한 OD구조를 가진 OD행렬을 배분할 경우 각 OD는 유사한 교통량패턴을 도출할 것이다. OD의 규모가 변하여도 OD구조가 동일한 경우 교통량패턴은 유사할 것이지만, OD구조가 조금만 변화해도 교통량패턴은 완전히 달라질 수 있다. 이것은 동일한 교통량 패턴을 도출할 수 있는 많은 OD해가 존재하기 때문이다. 따라서 안정적인 교통패턴, 실제 OD와 기존 OD가 유사한 경우를 전제로 하는 축차적 기법은, 기존OD에 대해 추정의 종속성을 강하게 가지기 때문에 OD구조가 변화되는 경우에는 적용하기 어렵게 된다. 이러한 이유 때문에 OD 추정시 OD구조의 영향이 OD규모의 영향보다 크다고 할 수 있다.

바이레벨 OD 추정에서 하위문제인 링크교통량 추정문제는 OD규모에 대한 문제이며, 상위문제인 OD 추정문제는 OD의 구조적인 관계를 추정하는 문제라고 할 수 있다. 따라서 하위문제에서 교통량만을 이용한 OD 추정은 추정교통량에 부합되는 OD 값이 다중해로 도출되기 때문에, 기존 OD를 기준으로 하여 추정 OD의 가능해 범위를 미리 설정하는 것이다.

OD 변화 유형	OD 규모	OD 구조
A	유사	유사
B	유사	변화
C	변화	유사
D	변화	변화

⇒

동일기점에 대한 실제 OD통행량(순위)	OD 변화 유형별 통행량(순위)			
	A	B	C	D
200 (1)	200 (1)	190 (2)	240 (1)	220 (2)
180 (2)	190 (2)	200 (1)	220 (2)	250 (1)
160 (3)	150 (3)	150 (3)	200 (3)	190 (3)
sum=540	540	540	660	660

()안은 규모순위

(a) OD규모와 OD 구조 변화 유형

(b) 유형별 OD 통행량 및 OD 구조 예

〈그림 1〉 OD규모와 OD구조의 예

2. OD 구조 측면에서의 기존 연구 검토

교통네트워크가 변화되거나 도시활동이 변화됨에 따라 OD행렬이 변화되고 이에 따라 해당지역의 수요패턴이 변화된다. OD규모는 요일 또는 계절마다 변동이 있지만, OD구조는 토지이용과 네트워크 등 공간구조가 안정된 지역에서는 그 변동이 비교적 적다. 그러나 지금까지의 링크교통량으로부터 OD 추정연구들은 이러한 점을 간과하고 모형분석을 하였다.

Ortuzar and Willumsen(1994), Yang 등(1992)은 기존 OD가 현재 OD에 비해 균일하게 과소추정되었다고 가정하였다. 즉 과거의 기존 OD는 실제 OD에 비해 조사무응답 또는 시간경과에 따른 과소추정이 발생한다고 가정하고 일정한 성장계수(growth factor)를 통해 통행량 증가를 보정한 후 OD 행렬을 추정하였다. 이러한 추정의 편의현상을 피하기 위해, Yang 등(1992)은 수정된 형태의 상위문제 목적함수를 식(2)와 같이 제시하였다.

$$\min F(t) = t^T G t + (\bar{v} - v)^T V^{-1} (\bar{v} - v) \quad (2)$$

여기서,

$$G = (H - I)^T U^{-1} (H - I)$$

I : 항등행렬(Identity matrix)

H : 식(3)과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} \bar{t}_1^0 & \bar{t}_1^0 & \dots & \bar{t}_1^0 \\ \bar{t}_2^0 & \bar{t}_2^0 & \dots & \bar{t}_2^0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{t}_N^0 & \bar{t}_N^0 & \dots & \bar{t}_N^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$\bar{t}_w^0 = \bar{t}_w / \sum_{k \in W} \bar{t}_k, \quad w \in W$$

W : 기존 점쌍의 집합

즉, 수정된 모형은 기존 OD와 가장 유사한 구조를 갖는 OD를 찾게된다. Yang 등(1992)은 초기해로 이용하는 기존 OD가 실제 OD와 유사할 경우 지역해가 전역해로 될 가능성이 높으며, 탐색영역은 최적해의 부근으로 국한될 것으로 예상하였다. 이에따라 Yang

(1995)은 사례분석에서 실제 OD구조를 하향보정하여 기존 OD를 구하였다.

Cascetta와 Nguyen(1988) 그리고 Lo 등(1996)은 모형구성에서는 기존 OD가 실제 OD의 평균과 일정한 분산을 갖는 정규분포로부터 발생한다고 설정하였으나, 사례분석에서는 OD 통행수를 동일하게 하거나 그 규모에 상당한 차이를 두어, 결과적으로 OD구조를 변화시키지 않았다. Oh(1991)도 실제 OD가 모두 동일하다고 가정한 후 사례분석을 하였다.

이러한 접근기법들은 여러 가지 문제점을 갖는데, 우선 일반적으로 실제 OD를 알기 어렵기 때문에 기존 OD와 현재 실제 OD의 차이인 성장계수 자체를 안다는 것이 현실적으로 어렵다는 것이다. 둘째, OD통행량이 균일하게 증가 또는 감소한다는 가정은 일반적이지 않은 가정이다. 특히 대상지역이 넓고 토지이용변화가 활발한 경우 OD 통행량의 증감은 각 OD쌍마다 다르게 이루어진다. 따라서 OD통행량이 균일하게 증가 또는 감소한다는 가정은 불확실한 기존 OD에 대한 모형의 종속성을 더욱 강하게 가지게 됨을 의미한다.

Hazelton(2000)은 기존 OD 설정시 통행량은 적으나 수요패턴은 현재 OD와 유사한 경우와 통행량은 유사하나 수요패턴이 현재 OD와 다른 경우를 분석하였다. 분석결과 수요패턴이 다른 경우가 그렇지 않은 경우보다 모형 추정력이 악화되었다. 그 이유는 OD 통행수요의 패턴을 정확히 설정하는 사전분포는 링크교통량으로부터 우도(likelihood)에 의해 정확히 규모확장(scale up) 할 수 있기 때문인 것으로 설명하였으나, 이러한 문제를 OD 구조 등과 같이 명확한 개념으로 정립하지 못했다.

기존 연구들을 검토한 결과 대부분의 연구들이 모형구성과 사례분석에서 동일한 OD행렬 또는 OD규모의 차이가 큰 행렬을 설정하거나 OD가 균일하게 증감하는 것으로 설정하여, OD구조의 변화라는 일반적인 상황을 고려하지 못했다. 활발한 토지이용을 가지거나 네트워크의 개선이 큰 지역에서는, OD구조가 유사하게 변화한다는 것을 기대하기 힘들다. OD 추정모형의 대표적인 기법인 Yang(1995)의 Iterative Estimation Algorithm(IEA)모형도 OD구조가 변할 경우에는 근사화가 성립되지 않으며, OD를 적합하게 추정하지 못할 것으로 예상할 수 있다. 또한 일부 연구에서 통행수요 패턴이 달라지는 경우의 모형추정력 변화를 분석하였으나, 그 근거는 명확히 제시

하지 못하였다. 본 연구에서는 지금까지 링크교통량으로부터 OD 추정시 고려되지 않았던 'OD구조'라는 새로운 개념을 제시하고, 모형이 기존OD에 대해 가지는 종속성을 나타내는 중요한 척도로 OD 구조를 이용할 수 있으며, OD구조에 따라 각 모형의 추정력이 상당한 영향을 받을 수 있다는 것을 보였다.

III. OD 추정모형 및 알고리즘

관측링크교통량으로부터의 OD를 추정하기 위하여 위 식(1)을 스칼라(Scalar) 형태로 표현하면 식(4)와 같다. 식(1)의 U와 V는 identity 행렬로 가정하였다.

$$Min F(t_{ij}) = \frac{1}{2} \sum_{a \in A} (v_a - \bar{v}_a)^2 + \gamma \frac{1}{2} \sum_{ij \in W} (t_{ij} - \bar{t}_{ij})^2 \quad (4a)$$

제약조건

$$t \geq 0 \quad (4b)$$

$$v = M(t) \quad (4c)$$

여기서

γ : 사용되는 기존 OD의 신뢰성을 목적함수에 반영하는 파라미터

W : OD쌍의 집합

목적함수가 비볼록인 OD 추정문제를 해결하고 OD 구조를 추정하기 위해서는 최대한 넓은 탐색 범위를 가져야 하므로 전역최적화 기법의 적용이 필요하다. 유전알고리즘의 경우 가능 OD 해집합의 구성요소들을 동시에 탐색할 수 있어, 목적함수의 형태에 관계없이 전역최적해(global optimum)에 대한 수렴을 확률적으로 보장할 수 있다.

유전 알고리즘은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 세 가지 과정을 반복하여 최적해를 도출한다. 식(4)의 최소화문제를 풀기 위하여 백승걸 등(2000)이 유전 알고리즘을 이용하여 개발한 GAM을 해도출 알고리즘으로 적용하였다. 자세한 알고리즘은 백승걸 등(2001)을 참고하기 바라며, 본 연구에서는 [Step 0]의 유전자 설정만을 중점적으로 설명한다.

[Step 0] 초기화(Random Generation)

① 파라미터값 등 설정

② 유전자 설정

(0, 1) 사이의 값을 가지는 $X_{1,n}[m][ij]$ 과 $X_{2,n}[m][i]$ 의 random values 발생

여기서,

$X_{1,n}[m][ij]$: m 번째 유전자의 기종점 ij간 선택 비율($m=1,2,\dots,M$, M은 짝수)

$X_{2,n}[m][i]$: n 세대중 m 번째 유전자의 기점 i에 대한 발생비율

[Step 1] 적합도 계산(Fitness Calculation)

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

여기서 O_i : 기점 i에서 발생하는 기존 OD

② $t_{ij}[m]$ 에 대한 통행배분으로부터 v_a 계산

③ 식(4)를 이용하여 적합도 계산

[Step 2] 교배(Cross-over)

[Step 3] 돌연변이(Mutation)

[Step 4] 적합도 계산(Fitness Calculation)

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

[Step 5] 수렴조건(Stopping Criteria)

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

[Step 0]에서 기종점쌍 수만큼의 유전자를 설정하고, 이 유전자를 효율적으로 발생시키기 위하여, 기점에 대한 종점의 선택비율(X_1)과 기점통행량의 발생비율(X_2)를 구분하여 임의로 발생시켰으며, 이를 기초로 통행배분을 실시하여 목적함수값을 계산하였다.

위의 유전자 설정방법은 기존연구들의 발생가능영역(feasible region) 설정과 비교할 수 있다. 먼저 Cascetta와 Nguyen(1988)과 Lo 등(1996)은 표본 OD 통행수 집합을 설정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션기법을 제시하였다. 그들은 각 기점의 평균통행수(λ)를 구한 후 이 평균을 가진 포아송분포로 표본통행을 발생시킨 후, 각기 다른 OD쌍 ij 에 대한 통행(λ_{ij})을 확률(λ_{ij}/λ)인 다변정규분포를 이용하여 배분하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 최우추정을 위한

표본OD 통행수를 구하는 데에만 이용되고 각 OD쌍마다 한 개의 통행만을 도출한다. 이에 반해 GAM은 다중통행배분 map을 이용하기 때문에 유전자수만큼의 통행수를 발생시키고 반복수마다 적합도함수로 이를 평가하여 전개해 나가기 때문에 해도출과정에서 계속적으로 발생된 OD통행수를 이용한다.

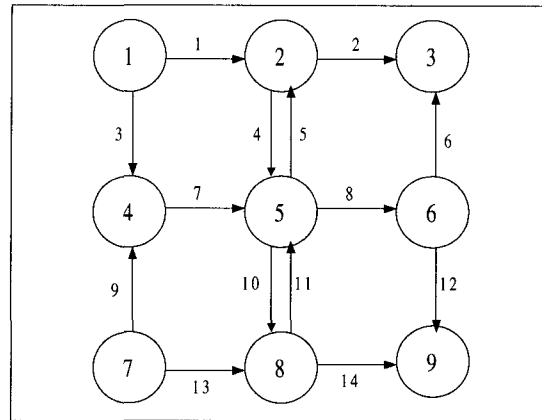
Oh(1991)는 각 OD 통행에 대해 가능탐색구간을 설정하고, 페널티값을 설정하여 여러 개의 OD를 설정한 후, 각 OD에 대한 균형배분을 수행하여, 도출되는 균형링크교통량과 대응되는 OD 통행량이 근사 선형관계를 이루도록 선형회귀시켰다. 이를 각 OD쌍마다 미리 설정한 수렴값에 도달할 때까지 수행하였다. Janson(1993)은 링크의 초기저항을 확률적으로 조정하여 다양한 UE해를 도출한 후, 링크교통량내 OD 통행량(link uses)이 entropy를 갖는다는 가정을 통해 OD를 추정하였다. Lo 등(1999)은 하강방향에 따른 OD 통행량간 차이를 계산하여, 이 값을 Oh(1991)의 기법과 유사하게 현재 OD통행량에 대한 페널티값으로 부여하여 새로운 OD 통행량으로 설정하였다. 하지만 페널티값을 부여하는 기법의 경우 탐색간격이 페널티 파라미터에 의해 결정되며, 선형근사식을 이용하기 때문에 개략적인 통행패턴 분석시에만 적용이 가능하다.

IV. 사례분석

1. 분석예제

사례네트워크는 Yang(1995)이 제시한 것과 동일하게 <그림 2>와 같이 9개의 노드와 14개의 링크로 구성하였다. 사례분석에 이용한 GAM의 파라미터 및 입력자료는 백승걸 등(2000)과 동일하게 구성하였다. 사례네트워크에 대한 실제 OD는 <표 1>과 같다.

기존 OD 통행행렬 t_w 과 관측링크교통량 v_a 은 백승걸 등(2000)과 동일하게 발생시켰다. 기존 OD의 오차가 5%, 10%, 15%, 20%의 오차를 갖는 경우에 대해 모형추정력을 분석하였다. 본 연구의 주목적은 기존 OD의 오차변화에 대해 OD구조를 일관적으로 추정할 수 있는 모형을 구축하는 것이므로, 관측교통량의 오차는 3%로 동일하게 설정하였다. 또한 총 14개 링크중 8개 링크(링크번호 1, 2, 3, 7, 8, 12, 13, 14)만을 관측하는 것으로 하였다.



<그림 2> 사례네트워크

<표 1> 사례 네트워크의 실제 OD

구 분	종 점		
	3	5	9
기점			
1	1800	1000	1500
5	1200	-	1000
7	1600	1400	2000

GAM의 추정력은 Yang(1995)의 IEA모형과 비교하였으며, 각 모형의 추정값과 실제 OD간의 차이를 비교하기 위한 통계적 추정자는 relative Mean Absolute Error(MAE)를 사용하였다.

$$MAE(\%) = \left(\frac{\sum_{w \in W} |t_w - t_w^+|}{\sum_{w \in W} t_w^+} \right) \times 100 \quad (5)$$

여기서,

t_w 와 t_w^+ , $w \in W$: 추정 OD와 실제 OD

N : 기중점의 수

OD구조 변화에 대한 모형 추정력을 검토하기 위해 <표 2>와 같이 사례분석 시나리오를 설정하였다. 분석 시나리오는 크게 OD구조가 변화되지 않은 경우(시나리오 A)와 변화된 경우(시나리오 B)로 구분하였다. OD구조가 변화되지 않은 경우는 OD통행량이 균일하게 증가하거나 감소하여 기점발생량이 차이가 나는 경우(시나리오 A1, A2)로 세분하였다. OD통행량이 모든 OD쌍에서 균일하게 증가 또는 감소하는 경우는 실제 네트워크에서는 거의 발생하지 않으며, 극히 이상적인 경우라 할 수 있다. 또한 OD 구조는 변화되지 않으나 각 OD쌍에 대해 통행량 증감이 서로 다른 경우(시나리오 A3)도 설정하였다.

〈표 2〉 사례분석 시나리오

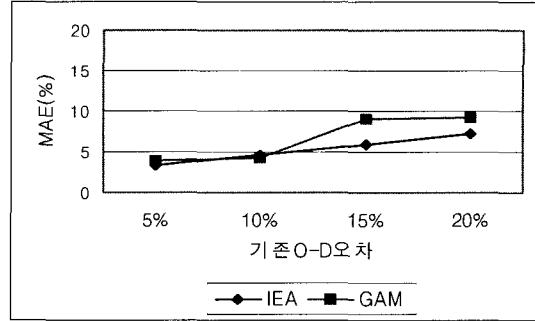
시나리오 구분	OD 구조	기존OD에 대한 실제OD 통행량	실제OD와 기존 OD 기점발생량	
A1	미변화	균일 증가	다름	
A2		균일 감소		
A3				
B1	변화	각 OD쌍에 대해 증감	유사	
B2				2개 기점
B3				3개 기점

OD구조가 변화되는 경우는 총 3개의 기점 중 1개 기점의 OD 구조만 변화되는 경우(시나리오 B1), 2개 기점의 OD 구조가 변화되는 경우(시나리오 B2), 3개 기점의 OD 구조가 모두 변화되는 경우(시나리오 B3)로 설정하였다. 시나리오 A3와 시나리오 B에서는 실제 OD와 기존 OD의 기점발생량은 서로 유사하게 설정하였다. OD쌍의 수가 많은 도시부 네트워크에서는 시나리오 A3 또는 시나리오 B가 일반적인 상황이라 할 수 있다.

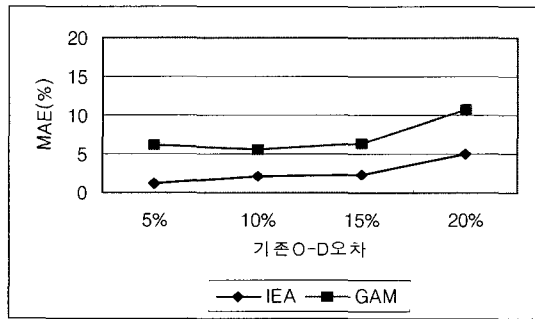
2. OD구조 미변화시 모형 추정력

OD 통행량을 균일하게 증가 또는 감소시킨 경우와 각 OD쌍이 다르게 증감하지만 OD구조는 변화하지 않은 경우 각 모형의 추정력을 비교하였다. 〈표 3〉은 시나리오 A의 OD 오차별 기존 OD를 나타낸다.

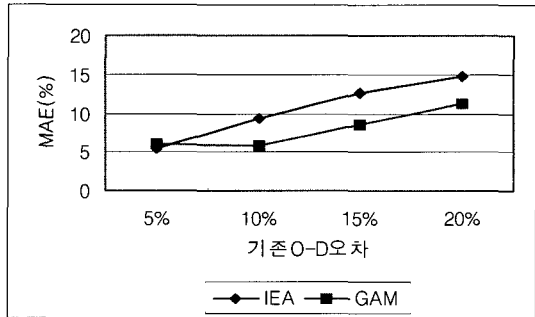
〈그림 3a〉는 실제 OD가 기존 OD에서 균일하게 증가하여 OD구조가 변화되지 않은 경우(시나리오 A1)의 모형별 추정 OD를 나타낸다. 기존 OD의 오차가 10%인 경우에만 GAM의 추정력이 IEA보다 양호하였다. 〈그림 3b〉는 실제 OD가 기존 OD보다 균일



(a) 시나리오 A1의 모형 추정력



(b) 시나리오 A2의 모형 추정력



(c) 시나리오 A3의 모형 추정력

〈그림 3〉 시나리오 A의 모형 추정력

〈표 3〉 시나리오 A의 OD 오차별 기존 OD

기점	종점	실제 OD	시나리오 A1				시나리오 A2				시나리오 A3			
			5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
1	3	1800	1714	1627	1541	1454	1886	1973	2059	2146	1886	1973	2059	2146
	9	1500	1432	1364	1297	1229	1568	1636	1703	1771	1432	1364	1297	1229
	5	1000	942	884	826	768	1058	1116	1174	1232	942	884	826	768
5	3	1200	1145	1091	1036	981	1255	1309	1364	1419	1255	1309	1364	1419
	9	1000	927	854	780	707	1073	1146	1220	1293	927	854	780	707
7	9	2000	1929	1858	1786	1715	2071	2142	2214	2285	2071	2142	2214	2285
	3	1600	1497	1394	1290	1187	1703	1806	1910	2013	1497	1394	1290	1187
	5	1400	1333	1265	1198	1130	1467	1535	1602	1670	1333	1265	1198	1130

〈표 4〉 시나리오 B1의 기존 OD 및 모형별 추정OD

기점	종점	실제 OD	기존 OD				추정 OD							
							IEA				GAM			
			5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
1	3	1800	1714	1627	1541	1454	1723	1666	1610	1556	1731	1734	1624	1495
	5	1000	1058	1116	1174	1232	1005	1049	1092	1136	939	976	1023	1126
	9	1500	1568	1636	1703	1771	1479	1524	1573	1622	1478	1439	1503	1539
5	3	1200	1255	1309	1364	1419	1255	1321	1390	1459	1173	1299	1359	1388
	9	1000	927	854	780	707	892	809	732	654	898	837	753	720
7	3	1600	1497	1394	1290	1187	1487	1422	1361	1304	1579	1421	1471	1559
	5	1400	1333	1265	1198	1130	1324	1281	1243	1207	1362	1412	1344	1243
	9	2000	2071	2142	2214	2285	2058	2117	2162	2204	1963	2115	2135	2143
MAE(%)							4.46	8.11	11.92	15.65	3.28	6.25	8.07	11.12

〈표 5〉 시나리오 B2의 기존 OD 및 모형별 추정OD

기점	종점	실제 OD	기존 OD				추정 OD							
							IEA				GAM			
			5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
1	3	1800	1714	1627	1541	1454	1689	1598	1506	1415	1743	1586	1480	1330
	5	1000	1058	1116	1174	1232	1002	1045	1088	1131	1063	963	1057	1101
	9	1500	1568	1636	1703	1771	1510	1582	1654	1725	1343	1602	1617	1725
5	3	1200	1255	1309	1364	1419	1234	1282	1332	1381	1197	1252	1300	1275
	9	1000	927	854	780	707	925	871	817	761	978	730	810	763
7	3	1600	1703	1806	1910	2013	1662	1763	1864	1965	1520	1623	1687	1849
	5	1400	1333	1265	1198	1130	1313	1248	1185	1120	1358	1270	1299	1179
	9	2000	1929	1858	1786	1715	1917	1852	1785	1720	2070	2055	1958	1906
MAE(%)							4.04	8.72	13.44	18.14	4.30	7.68	8.82	14.54

〈표 6〉 시나리오 B3의 기존 OD 및 모형별 추정OD

기점	종점	실제 OD	기존 OD				추정 OD							
							IEA				GAM			
			5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
1	3	1800	1,714	1,627	1,541	1,454	1,691	1,569	1,461	1,360	1,666	1,635	1,589	1,584
	5	1000	1,058	1,116	1,174	1,232	1,004	1,067	1,116	1,173	1,036	1,038	1,107	1,033
	9	1500	1,568	1,636	1,703	1,771	1,485	1,541	1,592	1,643	1,452	1,477	1,459	1,531
5	3	1200	1,145	1,091	1,036	981	1,136	1,094	1,045	992	1,136	1,135	1,101	971
	9	1000	1,073	1,146	1,220	1,293	1,045	1,100	1,167	1,224	1,027	1,054	1,116	1,155
7	3	1600	1,703	1,806	1,910	2,013	1,655	1,743	1,831	1,927	1,669	1,705	1,778	1,922
	5	1400	1,467	1,535	1,602	1,670	1,429	1,469	1,514	1,572	1,387	1,407	1,371	1,353
	9	2000	1,929	1,858	1,786	1,715	1,889	1,828	1,752	1,665	1,893	1,838	1,797	1,676
MAE(%)							3.76	8.08	12.71	17.58	4.33%	5.38%	8.56%	11.8%

주) 굵은 선은 OD구조가 변화된 기점, 음영부분은 모형에 의해 OD구조가 정확히 추정된 기점

하게 감소하여 OD구조가 변화되지 않은 경우(시나리오 A2)의 모형별 추정 OD를 나타낸다. 기존 OD의 모든 오차에서 IEA의 추정력이 GAM보다 양호하였으며, 추정오차가 최대 5%를 넘지 않았다. <그림 3a>와 <그림 3b>를 비교하면, 모든 OD통행량이 감소하는 경우가 모든 OD통행량이 증가하는 경우보다 모형 추정력이 양호하였다.

<그림 3c>는 실제 OD가 기존 OD보다 각 OD쌍별로 증감하나, OD구조가 변화되지 않고 기점발생총량이 유사한 경우(시나리오 A3)의 모형별 추정 OD를 나타낸다. 결국 시나리오 A3는 OD규모가 큰 OD 통행량은 더 증가시키고, OD 규모가 작은 OD 통행량은 더 감소시켜서 기존 OD구조가 더 명확해진 경우이다. 분석결과 시나리오 A3는 시나리오 A1, A2에 비해 추정오차의 크기가 커졌으며, 기존 OD의 오차 5%인 경우를 제외하면 GAM의 추정력이 IEA보다 양호하였다.

3. OD구조 변화시 모형 추정력

시나리오 A는 기존 OD에 비해 실제 OD구조가 변화되지 않았으며, 추정 OD도 OD 구조가 변화되지 않았다. 그러나 시나리오 B에서는 기존 OD가 10% 이상의 오차를 갖는 경우 동일한 통행기점에 대한 통행종점의 OD구조가 변화되도록 설정하였다. OD 구조가 변화된 경우에는 전체적인 모형추정력 외에 OD 구조에 대한 모형추정력을 파악할 수 있도록 각 OD쌍별 추정 OD도 표로 나타내었다.

<표 4>는 OD구조가 1개만 변화되었을 경우(시나리오 B1)의 추정OD를 나타낸다. IEA와 GAM 모두 10%, 15% 오차에 대해서는 변화된 OD구조를 정확히 추정하였으나, 20% 경우에는 OD구조를 추정하지 못하였다. 하지만 <그림 4a>에 보인 바와 같이 기존OD 오차가 커질수록 IEA의 추정오차가 GAM의 추정오차보다 상대적으로 더 커지는 것으로 나타났다.

<표 5>는 OD구조가 2개 변화되었을 경우의 추정 OD를 나타낸다. IEA는 10%의 오차에 대해서만 변화된 OD구조를 추정하였으나, GAM은 15%, 20% 경우에도 변화된 OD구조를 최소한 1개는 정확히 추정하였다. <그림 4b>에 보인 바와 같이 전체적인 OD 추정오차는 IEA와 GAM 모두 OD 구조가 1개만 변화되었을 경우보다 더 커지며, 기존OD의 오차가 커

질수록 IEA의 기중점 통행량 추정오차가 GAM의 기중점 통행량 추정오차보다 상대적으로 더 커지는 것으로 나타났다.

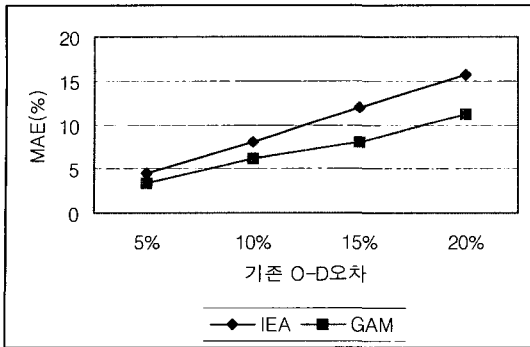
실제 OD와 기존 OD의 구조가 3개 기점에서 모두 다를 경우, IEA는 기존 OD의 오차가 10%인 경우의 1번 기점을 제외하면 OD구조의 변화를 추정하지 못하였다. <표 6>과 <그림 4c>에서 볼 수 있듯이 3개의 OD구조가 변화된 경우, IEA는 전체 모형추정력(MAE) 뿐만 아니라 OD구조에 대한 추정력도 GAM보다 낮았다. 이에 비해 GAM은 기존 OD의 오차가 15%일 때 5번 기점을, 기존 OD의 오차가 20%일 때 5번 기점과 7번 기점의 OD구조만을 추정하지 못하였다. OD구조를 추정하지 못하는 경우에도 GAM은 추정 OD가 실제 OD에 가까운 값을 가지나, IEA는 기존 OD에 대한 종속성으로 인해 기존 OD에 가까운 OD를 추정하였다.

4. OD구조 변화시/미변화시 모형 추정력 비교

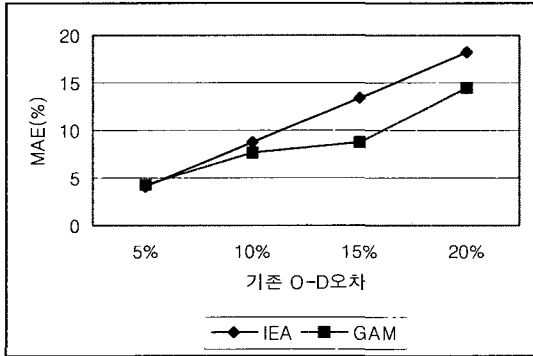
앞의 분석결과를 정리하면, OD 통행량이 균일하게 증가 또는 감소한 경우와 각 OD쌍마다 OD 통행량의 증감이 다른 경우, IEA와 GAM의 모형 추정력이 서로 달랐다. 즉 OD 통행량이 균일하게 증가 또는 감소한 경우는 IEA의 추정력이 양호하였고, 각 OD쌍마다 OD 통행량의 증감이 다른 경우와 OD구조가 변화되는 경우는 GAM의 추정력이 양호하였다.

시나리오 A1, A2의 경우 기존 OD와 실제 OD의 기점발생량 차이가 시나리오 A3, 시나리오 B보다 컸음에도 불구하고, 추정오차는 상당히 작았다. 이러한 사실에서 볼 때, 기존연구에서 실제 OD의 균일한 증가 또는 감소를 가정하고 이를 보정하기 위해 제시한 성장계수(식(3) 참조)는 그 적용 필요성이 적다고 할 수 있다. 또한 시나리오 A1, A2에서 IEA의 추정결과가 양호한 것으로 나타났지만, 이는 토지이용과 네트워크가 극히 안정적인 곳에서만 적합한 추정결과로, 토지이용과 네트워크가 계속 변화하는 일반적인 지역에서는 모형의 추정력을 보장할 수 없다.

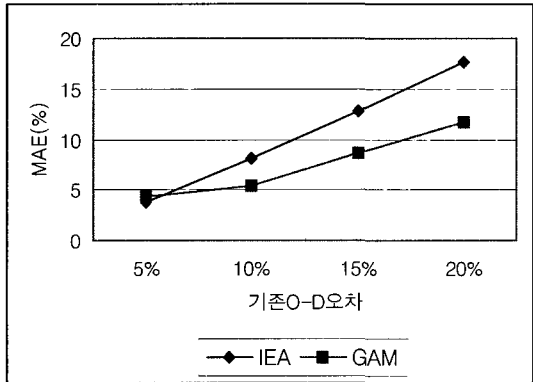
시나리오 A3의 경우, 각 기점에서 기존 OD통행량과 실제 OD 통행량간의 규모차이가 시나리오 B보다 컸음에도 불구하고, 추정오차는 유사하거나 오히려 더 작은 것으로 분석되었다. 또한 시나리오 B의 분석결과 OD 구조 변화시 OD구조가 변화된 기점수가 증가할수록, IEA는 GAM에 비해 OD구조에 대한 추정력



(a) 시나리오 B1의 모형 추정력



(b) 시나리오 B2의 모형 추정력



(c) 시나리오 B3의 모형 추정력

〈그림 4〉 시나리오 B의 모형 추정력

뿐만 아니라 전체적인 추정오차도 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 OD 추정시 기존 OD와 실제 OD 통행량의 규모 차이보다는 규모순위인 OD구조가 더욱 중요한 정보가 될 수 있다. 따라서 모든 OD쌍의 통행이 균일하게 증가 또는 감소하는 안정적인 통행 수요패턴을 가진 지역에서는 축차적 기법인 IEA의

적용성이 크지만, 이는 극히 이상적인 경우에만 해당되며, 일반적으로 도시부 네트워크에서는 각 OD쌍마다 증감이 다르게 통행수요패턴이 변화된다. 그러므로 실제 OD의 규모를 알기 어려운 도시부 네트워크에서는 GAM의 적용성이 더 크다고 할 수 있다.

GAM은 각 시나리오에서 비교적 안정된 추정오차를 나타내었으며, 특히 OD통행의 증감이 균일하지 않은 경우에도 안정적 추정오차를 나타내었다. 이는 GAM이 기존 OD의 오차에 대한 종속성이 적으며, 전역최적화를 기반으로 하는 기법이기 때문이다.

GAM 알고리즘 적용시 시나리오에 따라 계산에 필요한 반복수에 차이가 있었다. 즉 시나리오 A는 반복수 500번 이상에서 추정력의 변화가 크지 않았으나, OD구조가 변화되는 시나리오 B는 10,000번의 반복을 하여야만 안정적 구조추정이 가능하였다. 즉 OD구조가 변화되는 경우 이를 정확히 추정하기 위해서는 많은 계산시간이 소요되었다. 정적 OD 추정문제는 추정의 효율성보다는 정확성이 더 중요한 문제이기 때문에, 본 연구에서는 모형의 추정력을 추정의 적합도(정확성)에만 초점을 맞추었지만, IEA에 비해 GAM은 계산시간이 상대적으로 커서 실제 네트워크에 적용하기 위한 효율성 측면에서는 한계를 가지고 있다. 따라서, GAM을 이용한 OD추정기법의 정확성이 안정적으로 입증되면 효율성을 확보하기 위한 기법에 대한 논의가 필요하다고 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 OD 추정시 OD규모와 함께 OD구조의 추정이 중요하며, 특히 실제 OD가 기존 OD에 비해 각 OD쌍별로 증감이 다른 경우에는 OD구조의 추정이 더 중요한 정보가 될 수 있음을 제시하였다. 또한 선형근사식을 이용하는 축차적 추정기법은 기존 OD에 대한 추정의 종속성을 심화시킬 수 있으며, 이를 해결하기 위해서는 전역최적화 기법 등이 필요하다는 것을 제시하였다. 이를 보이기 위해 유전알고리즘을 이용한 해도출 기법을 개발하고 이를 기존 바이레벨 기법중 대표적인 IEA와 비교하였다.

IEA 알고리즘을 포함한 기존 바이레벨 기법들은 통행패턴의 추정시 반복적인 선형근사화를 가정하여 기존 OD에 대한 모형의 종속성을 강하게 가지고 있

기 때문에, 기존 OD와 실제 OD간의 구조적 차이가 있는 경우에는 이를 일반적으로 추정하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 비해, GAM은 복수의 OD 각각에 대한 복수의 통행배분map을 동시에 도출하여 다양한 통행패턴을 묘사할 수 있으므로, 기존 OD의 오차에 대해 크게 종속적이지 않으며 OD구조가 변하는 경우에도 추정이 가능하다.

사례분석결과 OD 통행량이 균일하게 증가 또는 감소한 경우와 각 OD쌍마다 OD 통행량의 증감이 다른 경우에 IEA와 GAM의 모형 추정력이 서로 달랐다. 즉 OD 통행수가 균일하게 증가 또는 감소한 경우에만 IEA의 추정력이 양호하였고, 각 OD쌍마다 증감이 다른 경우와 OD구조가 변화되는 경우에는 GAM의 추정력이 양호하였다. 기존 OD와 실제 OD의 기점발생량 차이가 큰 경우에도 OD구조가 변하지 않으면 추정오차는 작게 도출되었고, 기존 OD통행량과 실제 OD 통행량간의 규모차이가 큰 경우에도 OD구조가 변하지 않으면 추정오차는 상대적으로 적게 도출되었다. 또한 OD구조가 변화된 기점의 수가 증가할수록, OD구조에 대한 추정력 뿐만 아니라 전체적인 추정오차도 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 OD 추정시 기존 OD와 실제 OD 통행량의 규모 차이보다는 규모순위인 OD구조가 더욱 중요한 정보가 될 수도 있음을 보였다. GAM은 본 연구에서 설정한 모든 시나리오에서 비교적 안정된 추정오차를 나타내어, 기존 OD의 오차에 대한 종속성이 적은 것으로 분석되었다.

향후연구로 우선 추정OD의 발생가능영역 설정을 위한 유전자 구성에 대한 보다 합리적이고 적합한 방법이 개발되어야 하며, 효율성을 확보하기 위한 알고리즘의 개선이 필요하다. 또한 OD구조는 OD규모보다 더 단순한 정보이기 때문에 OD 구조 개념을 활용하는 방법에 대한 검토가 필요하다. 보다 일반적인 OD구조 추정기법이 개발된다면, IEA를 비롯한 기존 알고리즘도 효율성을 유지하면서 보다 정확한 OD추정이 가능해질 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 백승걸(2001) 유전알고리즘을 이용한 링크관측교통량으로부터의 기종점 통행행렬 추정. 서울대학교 대학원 박사학위논문.

2. 백승걸·김현명·임용택 임강원(2000) 관측링크교통량을 이용한 도시부 OD 통행행렬 추정 - GA와 SAB 알고리즘의 비교를 중심으로-, 대한교통학회지, 제18권 제6호.

3. 임용택·김현명·백승걸(2000) 유전알고리즘을 이용한 OD 추정모형의 개발과 적용에 관한 연구-서울시 내부순환도로를 대상으로-, 대한교통학회지, 제18권 제4호.

4. Cascetta E. and Nguyen S.(1988) A unified framework for estimating or updating OD matrices from traffic counts, Transpn. Res. 22B, pp.437~455.

5. Dafermos S. and Nagurney A.(1984) "Sensitivity Analysis for the asymmetric network equilibrium problem", Mathematical Programming 28, pp.174~184.

6. Hazelton M. L.(2000) Estimation of OD matrices from link flows on uncongested networks, Tranpn. Res. 34B, pp.549~566.

7. Janson B. N.(1993). Most likely OD link uses from equilibrium assignment, Transpn. Res. 27B, pp.333~350.

8. Kim H. M., Baek S. K., and Lim Y. T (2001) "OD Matrices Estimation using Genetic Algorithm from link traffic counts", Transpn. Res. Record, Forthcoming.

9. Lo H. P. and N. Zhang and Lam W. H. K. (1996) "Estimation of and OD matrix with random link choice proportions : a statistical approach", Transpn. Res. 30B, pp.309~324.

10. Lo H. P. and N. Zhang and Lam W. H. K.(1999) "Decomposition Algorithm for statistical estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts", Transpn. Res. 33B, pp.369~385.

11. Oh, J. H.(1991) "Estimation of trip matrices from traffic counts : An equilibrium approach", thesis of Ph.D, University College London.

12. Ortuzar, J. D., Willumsen, L. G.(1994) Modelling Transport, Wiley & Sons

13. Yang H., Iida Y. and T. Sasaki(1992) "Esti-

mation of OD Matrix from link traffic counts on congested networks", Transpn. Res. 26B, pp.417~434.

14. Yang H.(1995) "Heuristic algorithms for the bilevel OD matrix estimation problem", Transpn. Res. 29B, pp.231~242.

✎ 주 작 성 자 : 백승걸

✎ 논문투고일 : 2001. 5. 22

논문심사일 : 2001. 10. 17 (1차)

2001. 11. 30 (2차)

2001. 12. 5 (3차)

심사판정일 : 2001. 12. 5