

■ 論 文 ■

관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형의 대규모 가로망에 적용 (CG모형 적용을 중심으로)

The Estimation of an Origin-Destination Matrix from Traffic Counts using Conjugate Gradient Method in Nationwide Networks

이 헌 주

(교통개발연구원 국가교통DB센터 책임연구원)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

목 차

- I. 서론
 - II. 기존연구 검토
 - III. 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형
 - IV. CG모형의 대규모 가로망에 적용
 - 1. 분석 방법
 - 2. 분석자료의 구성
 - 3. 일관성 분석
 - 4. 기존 전국 OD통행량의 오차 분석
 - 5. 관측링크 개수에 따른 추정력 분석
 - V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 관측교통량, Gradient법, Conjugate Gradient법, 기종점 OD행렬, 관측링크

요 약

본 연구는 Conjugate Gradient법을 적용하여 개발한 관측교통량기반 기종점 OD행렬 추정모형이 대규모 가로망에서도 적용 가능성이 있는지를 판단하기 위하여 246개존 기준 전국 가로망에 적용하여 적용성 및 활용가능성을 판단해 보았다.

대규모 가로망에서 모형의 일치성을 분석한 결과, 모형의 상위수준과 하위수준이 내부적으로 유기적인 관계를 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 관측링크 개수에 따라 모형의 추정력을 분석한 결과, 교통량 오차는 허용오차 범위내에서 추정력을 확보하는 것으로 나타났다. 또한 추정 기종점 OD행렬의 추정력 역시 기존의 모형을 이용한 결과치보다는 양호한 추정력을 보이고 있는 것으로 분석되었다.

더 많은 다양한 실험을 하여 개발된 모형의 알고리즘의 안정성이 확보된다면 대규모 가로망에서도 적용 가능성이 있다고 판단된다.

We evaluated the availability of Origin-Destination Matrix from traffic counts Using conjugate gradient method to large scale networks by applying it to the networks in 246 zones.

As a result of the analysis of the consistency of the model on Nationwide Networks, the upper and lower levels in model had the systematic relationship internally.

From the analysis of the estimable power of the model according to the number of traffic counting links, the error in traffic volume had the estimable power in the range of permissible error. In addition, the estimable power of estimation of an Origin-Destination Matrix was more satisfactory than that of existing methods.

We conclude that conjugate gradient method can be applied to nationwide networks if we can make sure that the algorithm of the developed model is reliable by doing various kinds of experiment.

I. 서론

관측교통량으로 기종점 OD행렬¹⁾을 추정하는 일반적인 형태는 엔트로피 최대화 방법(Entropy Maximizing), 일반화 최소자승법(Generalized Least Squares), 베이저안 추론기법(Bayesian Inference) 등이 있다. 이러한 기법들을 이용한 모형들은 일반적으로 2단계(bi-level) 형태를 이루고 있다. 2단계 형태는 비볼록성(nonconvexity)과 비차분성(nondifferentiability) 때문에 기종점 OD행렬을 추정하는데 어려움이 있고(Chen and Florian, 1991) 목적함수의 값과 경사벡터(gradient vector)는 항상 하위(second-level) 수준의 해를 요구한다. 또한 경로비율이 미리 정해져 있다고 가정하며, 대규모 가로망에 적용하기에는 현실적으로 적용이 쉽지 않다. 때문에, 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정하는 것은 이론적이면서 현실에 적용 가능한 알고리즘을 개발하는 것이 중요하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Spiess(1990)는 경로교통량(path flow) 비율이 부분적으로 일정하다는 가정하에 Gradient 방법을 이용하여 기종점 OD행렬 추정 모형을 개발하였으며 대규모 가로망에 이 방법을 적용하였다. Spiess (1990)의 기종점 OD행렬 추정 모형은 목적함수식이 관측교통량과 배정교통량의 차이만을 최소화하는 함수식으로 구성되어 있다. 때문에, 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정할 때 관측교통량과 배정교통량의 차이는 최소화되지만 사전(prior) 기종점 OD행렬²⁾과 추정 기종점 OD행렬³⁾의 차이는 최소화가 되지 않는다. 즉, 추정된 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조⁴⁾는 사전 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조를 유지하면서 추정되어야 하지만 사전(prior) 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조를 유지하지

못할 경우가 많다.

이러한 배경하에 이현주, 이승재(2004.2)는 추정된 기종점 OD행렬이 사전 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조를 반영하면서 관측교통량과 추정교통량의 오차는 허용오차범위내에서 오차를 최소화시켜주도록 하는 기종점 OD행렬 추정모형을 개발하였다. 개발된 모형의 타당성 확보를 위해서 모의 분석 가로망에서 기종점 OD행렬 추정 모형과 하부 모형인 통행배정모형간 유기적으로 작동되는지를 분석하기 위한 모형의 일관성 분석을 실시하였으며 모형내 내부적으로 일치하는 것으로 분석되었다. 또한 관측링크 개수에 따른 관측 교통량을 이용하여 모형의 추정력을 분석하였으며, 기존의 모형으로 추정한 결과보다 양호하게 추정되는 것으로 나타났다. 이현주, 이승재(2004.2)의 연구는 모의 분석가로망에서 모형의 타당성을 검증하였으며, 개발된 모형이 현실 상황에서도 일관성 및 안정성이 확보되는지를 검토해 볼 필요가 있다.

따라서, 본 연구는 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형(이현주, 2004.2)⁵⁾이 대규모 가로망에서도 모형의 일관성⁶⁾, 안정성 및 적용 가능성이 있는지를 판단하기 위하여 246개 존 기준 전국 가로망 및 기종점(O/D) 통행량(KOTI, 2001)에 적용하여 MAE%⁷⁾에 의한 모형의 추정력⁸⁾ 분석을 통해 활용 가능성을 판단해 보는 것이 본 연구의 목적이다.

II. 기존연구 검토

관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정하는 기법은 크게 정보이론 기반 추정기법(information based approach), 교통수요모형 기반 추정기법(traffic mo-

- 1) 기종점(O/D) 통행량 또는 O/D행렬값을 모형으로 표시한 것. 세로 i , 가로 j 의 수치는 통행유출존 i 에서 유입존 j 로의 통행수의 양을 나타냄. 즉 출발지(Origin)와 목적지(Destination)별로 통행량을 구분 정리해 놓은 표(table).
- 2) 사전(prior) 기종점 OD행렬이라 함은 추정하기 이전의 기종점 OD행렬을 말하며 기존에 존재하는 historical OD행렬을 일컫음. 이를 선행 OD, 사전 OD, 통행행렬이라고도 함. 본 연구에서는 사전(prior) 기종점 OD행렬이라고 칭함.
- 3) 추정(estimated) 기종점 OD행렬이라 함은 사전(prior) 기종점 OD행렬과 관측교통량을 이용하여 추정된 기종점 OD행렬을 말함. 이를 추정 OD, 사후(posterior) OD라고도 함. 본 연구에서는 추정(estimated) 기종점 OD행렬이라고 칭함.
- 4) 본 연구에서 "OD행렬 구조"라 함은 사전(prior) 기종점 OD행렬과 추정된(estimated) 기종점 OD행렬 각각의 OD행렬 쌍간 사전(prior)과 추정(estimated) OD행렬값과의 MAE%값의 차이로 정의하였으며 이를 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조의 변화수를 파악하는 지표로 설정하였음.
- 5) 이하 CG모형이라고 명명함.
- 6) 모형의 일관성(또는 일치성)이라 함은 사전(Prior) 기종점 OD행렬을 가로망에 균형통행배정하여 배정된 배정(추정) 교통량을 관측 교통량이라 가정하고 이 교통량을 입력자료로 이용하여 OD 추정모형을 실행하였을 때, 추정된 기종점 OD행렬과 배정된 교통량이 사전 기종점 OD행렬값과 초기 배정교통량을 그대로 유지할 수 있어야 모형이 내부적으로 일치성을 확보하였다고 할 수 있음. 즉, 기종점 OD행렬 추정 모형과 통행배정모형이 유기적으로 내부적 일치성을 유지하여야만 개발된 모형이 일관적으로 안정성을 확보할 수 있음.
- 7) MAE%라고 함은 상대평균절대오차의 개념으로서 어떤 기준값에 대한 추정값이 벗어나는 정도(오차)를 의미하며 구체적인 산식은 식(4)와 같음.
- 8) 모형의 추정력이라 함은 기종점 OD행렬 추정 모형을 이용하여 추정된 기종점 OD행렬값과 배정교통량이 사전 기종점 OD행렬값과 관측교통량의 패턴을 얼마나 잘 구현하고 있는가를 나타내는 정도라고 말할 수 있으며 본 연구에서는 이를 모형의 추정력이라고 명명함.

delling based approach), 통계적 추론기법(statistical inference approach), 2단계 추정기법(bi-level approach), Gradient기반 추정기법(gradient based approach)으로 분류할 수 있다. 정보이론기반 추정기법의 대표적인 예는 Willumsen의 ME2모형으로서 이 모형의 한계는 통행수요와 무관하게 경로선택비율이 결정된다는 점과 추정결과의 정확성은 사전 정보의 정확성에 전적으로 의존하게 되는 약점이 있다. 통계적 추론기법중 일반화최소자승법은 추정값에 대한 비음제약을 만족하지 못한다는 약점이 있다. H.Yang의 2단계 기종점 OD행렬 추정 모형은 일반화최소자승기법을 혼합한 가로망에 확장한 것으로, 기종점 OD행렬 추정시에 상위문제(upper-level)에 대한 전역최적해를 도출하지 못할 가능성이 있다. Gradient기반 추정기법의 대표적인 예는 Spiess(1990)의 모형으로서, 이 모형의 장점은 대규모 가로망에서도 적용이 가능하며 관측교통량과 추정교통량의 오차를 최소화하면서 기종점 OD행렬을 추정하지만 추정된 기종점 OD행렬은 사전 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조를 유지하는 못하는 경우가 많다. 이와 관련된 유사한 연구는 DOBLAS와 BENITEZ(2001)의 연구 등이 있다.

Spiess(1990)가 제안한 gradient 방법은 최급강하법(steepest descent)에 의해 필요이상으로 기종점 OD행렬을 변경시키지 않는 볼록최소화문제(convex minimization problem)로 수식화되었다. 이러한 유형의 가장 간단한 형태는 아래의 볼록최소화문제(convex minimization problem)를 유도하는 최소자승법이며 기종점 OD행렬 추정을 위한 gradient기반 모형식 및 알고리즘은 식(1)과 같다

$$\min Z(t) = \frac{1}{2} \sum_{a \in A} (v_a - \bar{v}_a)^2 \quad (1)$$

subject to

$$v = assign(t) \quad (1a)$$

여기서, 유사함수(pseudo function) $assign(t)$ 는 기종점 OD행렬 t 의 통행배정 결과로부터 나온 교통량을 나타내기 위해 사용되었다. 물론 사용된 통행배정모형은 식(1)이 볼록하게 되기 위하여 볼록최적화문제(convex optimization problem)와 대응되어야 한다. 위의 함수식을 풀기 위한 gradient방법의 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1. 초기화 : $P_{ij}^{k(0)}$ 를 계산, 여기서, $P_{ij}^{k(0)}$ 는 기점 i 와 종점 j 간의 가능한 경로통행비율:
 $\ell = 0$

단계 2. $P_{ij}^{k(0)}$ 를 사용하여 모든 링크 a 의 링크교통량 v_a 계산

단계 3. v_a 를 사용하여 gradient $\frac{\partial Z(t)}{\partial t}$ 계산

단계 4. 방향탐색(volume direction search)

$$v_a = - \sum_{i \in I} t_i^{\ell} \left(\sum_{k \in K_i} p_k \sum_{a \in A} \delta_{ak} (v_a - \bar{v}_a) \right) \times \left(\sum_{k \in K_i} \delta_{ak} p_k \right)$$

를 계산

단계 5. step size 계산

$$\lambda^* = \frac{\sum_{a \in A} v_a (\bar{v}_a - v_a)}{\sum_{a \in A} v_a^2}$$

단계 6. $t_i^{\ell} \left(1 - \lambda^{\ell} \left[\frac{\partial Z(t)}{\partial t_i} \right]_{t_i^{\ell}} \right)$ 이 수렴조건에 부합되면, 알고리즘 정지. 그렇지 않으면,
 $\ell = \ell + 1$, 단계 2로 감

여기서, v_a : 기종점 OD행렬(t)의 통행배정 결과로 산출된 구간(a)교통량
 \bar{v}_a : 구간(a)의 관측(실제) 교통량
 i : 기종점 OD행렬 쌍
 h_k : 경로(k) 교통량

i 쌍 OD행렬중 경로 k 를 이용할 확률(p_k) :

$$p_k = \frac{t_k}{t_i}, \quad k \in K_i, \quad i \in I$$

$$\delta_{ak} = \begin{cases} 0 & \text{if } a \neq k \text{ (구간 } a \text{는 경로 } k \text{ 상에 없음)} \\ 1 & \text{if } a = k \text{ (구간 } a \text{는 경로 } k \text{ 상에 있음)} \end{cases}$$

위의 해를 찾기 위한 과정은 다음과 같다.

$$t_i^{l+i} = \begin{cases} \bar{t}_i & \text{for } l=0, \\ t_i^{l-1} - \lambda^l \left[\frac{\partial Z(t)}{\partial t_i} \right]_{t_i^{l-1}} & \text{for } l \geq 1 \end{cases}$$

관측교통량기반 기종점 OD행렬 추정연구에 대한 국내연구로서는 김종형(2000), 백승걸(2001), 이승재, 김종형(2000), 이현주, 이승재(2004) 등의 연구가 있다. 이승재, 김종형(2000)의 연구는 Gradient모형을

이용하여 대규모 가로망에서 통행수요를 추정하였다. 백승걸(2001)의 연구는 유전자 알고리즘을 이용한 관측교통량으로부터의 기종점 OD행렬 추정기법을 제시하였으며 이를 다차종 관측교통량으로부터의 다차종 기종점 OD행렬 추정모형으로 확장하여, 다차종을 고려한 기종점 OD행렬 추정모형을 제시하였다. 이현주, 이승재(2004)는 Conjugate Gradient기법을 이용하여 추정된 기종점 OD행렬은 사전 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조를 크게 변경시키지 않으면서 관측교통량과 추정교통량의 차이는 허용오차범위내에서 최소화하는 추정모형을 개발하였다.

III. 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형

본 연구에서 대규모 가로망에서도 적용이 가능한지를 판단하기 위해 이용할 관측교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하는 모형은 이현주, 이승재(2004)가 개발한 추정모형(이하 CG모형) 및 알고리즘을 이용하였다. 구체적인 과정을 살펴보면 다음과 같다.

일반적으로 관측교통량을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정하기 위한 2단계모형의 일반적인 구조는 식(2)와 같다.

$$\min F(t, v) = \gamma_1 F_1(t) + \gamma_2 F_2(v) \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{k \in K_{ij}} h_k - t_{ij} = 0 \quad (2a)$$

$$h_k \geq 0 \quad (2b)$$

$$v_a = \sum_{k \in K_i} \delta_{ak} h_k \quad (2c)$$

$$\sum_{a \in A} s_a(v)(v_a - \bar{v}_a) \leq 0 \quad (2d)$$

식(2a)~식(2d)를 만족시키는 $k \in K_{ij}$ 와 v 에 대해, $F_1(t)$ 는 추정 OD행렬과 사전 OD행렬과의 거리함수이며 $F_2(v)$ 는 관측교통량과 균형배정교통량과의 거리함수. γ_1 과 γ_2 는 미리결정된 가중값으로서 γ_1 은 기존에 이용하는 사전 기종점 OD행렬의 신뢰성의 정도를 목적함수에 반영하도록 하는 매개변수이다. 본 목적함수 식에 γ_1 과 γ_2 의 값을 0.5로 설정한 것은 사전 기종점 OD행렬값과 관측교통량의 참값이 실제로 알려져 있지 않은 관계로 0.5를 적용하였다. 그리고 $s_a(v)$ 는 링크 a 의 비용이다.

이현주, 이승재(2004.2)는 식(2)의 일반적인 구조를 기초로 하여 Spiess(1990)의 Gradient모형 및 Chen & Florian(1995)의 2단계(bi-level)모형을 기반으로 하는 식(3)과 같은 관측교통량 기반 OD행렬 추정모형을 개발하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & F(t, v) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{ij \in OD} (t_{ij} - \bar{t}_{ij})^2 + \frac{1}{2} \sum_{a \in A} (v_a - \bar{v}_a)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

subject to

$$t_{ij} \geq 0, \quad ij \in OD \quad (3a)$$

$$v \equiv v^* = (\dots, v_a, \dots) = \text{assign}(t) \quad (3b)$$

$i \in O$: 기점 존

$j \in D$: 종점 존

a : 가로망의 링크

$k \in K_{ij}$: i 와 j 를 연결하는 경로

δ_{ak} : 경로 k 에 링크 a 가 속하면 1, 아니면 0

t_{ij} : i 에서 j 까지 추정 기종점 OD행렬

\bar{t}_{ij} : i 에서 j 까지 사전 기종점 OD행렬

v_a : 링크 a 의 배정 교통량

\bar{v}_a : 링크 a 의 관측 교통량

h_k : 경로 k 의 교통량

식(3)을 풀기 위하여 공역경사 기법(Conjugate Gradient Method)을 기반으로 기종점 OD행렬 추정모형의 풀이 알고리즘을 전개하였다. 기본개념은 공역방향(conjugate direction)을 고려하여 탐색하는데 이현주, 이승재(2004.2)는 Fletcher & Reeves가 개발한 방법을 이용하였다. 공역경사기법(Conjugate Gradient Method)의 특성은 첫째, 해를 찾는 수렴속도가 경사탐색기법(Gradient Search Method)보다 빠르기 때문에 정확한 이동방향(move size)을 결정하여 최적해를 찾아준다. 둘째, 반복과정(단계 5)에서 이동방향 계산시에 경사도값을 한번 더 계산하여 이동방향을 결정하므로 초기값에 근접하도록 해를 도출한다.

이현주, 이승재(2004.2)는 기종점 OD행렬 모형을 개발하기 위하여 공역경사기법(Conjugate Gradient Method)을 적용하였고 식(3)의 최적해를 도출하기 위한 과정을 다음과 같이 제시하였다.

[단계 0] 초기화(initialization)

$n = 0$ 으로 하고 사전(initial) 기종점 OD행렬 t^0 을 이용하여 하위수준(lower level)의 균형통행배정 문제 해결. 균형통행배정을 실시하면 내생적으로 링크배정교통량 v^0 와 경로통행비를 h^0 가 계산됨

[단계 1] t^0 에서 $F(t^0, h_k^0)$ 의 경사도(gradient) b^0 값 계산

$$b_{ij}^0 = \frac{\partial F(t, h_k^0)}{\partial t_{ij}} \Big|_{t_i} = \sum_{i \in OD} (t_{ij}^0 - \bar{t}_{ij})$$

[단계 2] 경사방향(descend gradient direction) d^0 값 계산

$$d_{ij}^0 = -b_{ij}^0 t_{ij}^0$$

여기서, 최대경사값(maximum absolute gradient, g_{max}) 계산 = $\left| \frac{d_{ij}^0}{t_{ij}} \right|$

[단계 3] step length λ^0 값 계산⁶⁾

$$\lambda^0 = \arg \min [F(t_{ij}^0 + \lambda d_{ij}^0)]$$

subject to

$\lambda b_{ij}^0 \leq 1$, 이 함수식을 풀어 λ^0 값 도출

$$\lambda^0 = \frac{\sum_{i \in OD} (\bar{t}_{ij} - t_{ij}^0) d_{ij}^0 + \sum_{a \in A} (\bar{v}_a - v_a^0) \delta_{ak}^0 d_{ij}^0}{\sum_{i \in OD} (d_{ij}^0)^2 + \sum_{a \in A} (\delta_{ak}^0 d_{ij}^0)^2}$$

[단계 4] t_{ij}^1 값 계산 : $t_{ij}^1 = t_{ij}^0 + \lambda^0 d_{ij}^0$

[단계 5] 반복과정

i) β^n 값 계산 : $\beta^n = \frac{|\nabla F(t^n, h_k^n) T|^2}{|\nabla F(t^{n-1}, h_k^{n-1}) T|^2}$

ii) 경사방향 d_{ij}^n 값 계산 : $d^n = b^n t^n + \beta^n d^{n-1}$

iii) step length λ^n 값 계산

$$\lambda^n = \frac{\sum_{i \in OD} (\bar{t}_{ij} - t_{ij}^n) d_{ij}^n + \sum_{a \in A} (\bar{v}_a - v_a^n) \delta_{ak}^n d_{ij}^n}{\sum_{i \in OD} (d_{ij}^n)^2 + \sum_{a \in A} (\delta_{ak}^n d_{ij}^n)^2}$$

iv) t_{ij}^{n+1} 값 계산 : $t_{ij}^{n+1} = t_{ij}^n + \lambda^n d_{ij}^n$

[단계 6] 수렴성 판단(convergence test)

만약 $|F(t^{n+1}) - F(t^n)| < \epsilon$ 이면 정지하고 t^{n+1} 도출, 그렇지 않으면 $n = n + 1$ 로 하고 단계 5로 감

IV. CG모형의 대규모 가로망에 적용

1. 분석 방법

본 연구에서 모형의 추정력을 분석하기 위하여 MAE%를 이용하였으며 교통계획 분석용 패키지인 EMME/2를 이용하여 분석하였다. 본 연구결과와의 비교모형은 Spiess(1990)의 Gradient모형이다. 본 연구의 구체적인 분석방법은 다음과 같다.

첫째, 대규모 가로망에서도 개발된 모형이 기종점 OD행렬 추정 모형과 통행배정모형이 내부적으로 일치하는지를 검토하기 위해 모형의 일관성 분석을 실시하였다.

둘째, 관측교통량으로 이용할 관측링크의 개수에 따른 관측링크교통량과 배정링크교통량의 오차를 분석하였다. 관측교통량으로 이용할 자료는 '교통량 통계연보(건설교통부)'상의 교통량을 이용하였다.

셋째, 또한 기종점 OD행렬 모형의 추정력을 분석하였다.

2. 분석자료의 구성

제3장에서 추정한 모형이 대규모 가로망에서도 적용이 가능한지를 분석하기 위해 이용할 전국 기종점 OD행렬은 교통개발연구원(KOTI, 2001))에서 구축한 전국 기종점 OD행렬을 이용하였다. 2001년기준 차종별 기종점 OD행렬을 재차인원과 승용차환산계수(PCU)를 적용하여 차종별 PCU단위 기종점 OD행렬로 전환하였으며 차종별 재차인원과 승용차환산계수는 <표 1>과 같다.

<표 1>의 재차인원과 승용차환산계수를 적용하여 최종적으로 구축된 전국 기종점 OD행렬의 1일 통행량은 1,763만대PCU/일로 구축되었다. 2001년기준 전국 분석 가로망의 도로등급별 링크개수 및 그림은 각각 <표 2>, <그림 1>과 같다.

<표 1> 차종별 재차인원 및 승용차환산계수

구분	재차인원	승용차환산계수
승용차	1.80	1.0
버스	9.03	3.5
트럭	-	3.5

자료 : 2001년 전국교통DB구축사업, KOTI.

〈표 2〉 전국 가로망의 도로등급별 링크개수

구분	링크개수	비율
고속도로	658	4.4%
국도	5,405	35.9%
지방도	5,976	39.7%
국가지원지방도	618	4.1%
시군도	554	3.7%
도시고속화도로	190	1.3%
존중심 연결링크	1,278	8.5%
고속도로 램프	364	2.4%
계	15,043	100.0%



〈그림 1〉 2001년 기준 전국 가로망

기종점 OD행렬 추정의 추정력을 비교분석하기 위한 모형 추정력 평가지표는 식(4)와 같이 MAE%(Relative Mean Absolute Error)를 이용하여 분석하였다.

$$MAE(\%) = \left(\frac{\sum |v_{est} - v_{obs}|}{\sum v_{obs}} \right) \times 100 \quad (4)$$

여기서, v_{obs} : 관측교통량(또는 사전(prior) OD)
 v_{est} : 추정교통량(또는 추정 OD)

3. 일관성 분석

이헌주, 이승재(2004)의 관측교통량기반 기종점 OD행렬 추정모형(CG모형)이 대규모 가로망에서도 OD행

렬 추정모형과 균형통행배정모형이 내부적으로 일치하고 있는지를 분석하기 위해서 대규모 가로망인 전국 가로망과 전국 기종점 OD행렬을 이용하여 일관성을 분석하였다. 전국 기종점 OD행렬(사전 OD행렬이라고 가정)을 이용하여 전국 가로망에 균형통행배정을 실시한 후 링크에 배정된 배정링크교통량을 관측교통량이라 가정하고 이 관측교통량을 이용하여 추정된 추정 기종점 OD행렬이 전국 기종점 OD(사전 OD)행렬을 다시 구현하면 모형의 내부적 일관성이 확보되었다고 할 수 있다.

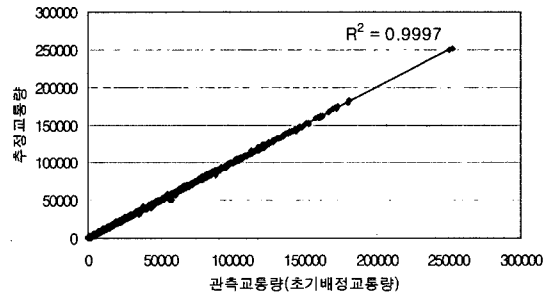
1) 배정링크교통량 재도출 분석

링크배정교통량 재도출 분석결과 〈표 3〉에서처럼 Gradient모형과 CG모형의 결과가 MAE%기준 각각 1.1과 1.0으로 분석되어 CG모형의 OD행렬 추정모형

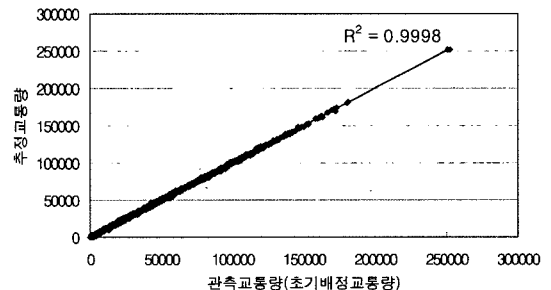
〈표 3〉 링크배정교통량의 오차비교

구분	MAE%
gradient 모형	1.1
CG모형	1.0

주 : 값은 각 개별 링크에 대한 관측과 배정교통량의 오차를 분석한 후, 평균치를 제시한 것임



〈그림 2〉 초기배정교통량과 추정교통량의 비교 (gradient모형 적용)



〈그림 3〉 초기배정교통량과 추정교통량의 비교(CG모형 적용)

과 균형통행배정모형이 내부적으로 일치성(일관성)이 유지되었다고 판단된다.

〈그림 2〉와 〈그림 3〉은 초기배정교통량(관측교통량)과 추정된 배정교통량의 R^2 값을 나타낸 그림이다. 그림과 같이 R^2 값이 거의 1에 가까운 값을 유지하고 있어 대규모 가로망에서도 모형의 내부적 일치성이 유지된 것으로 판단된다.

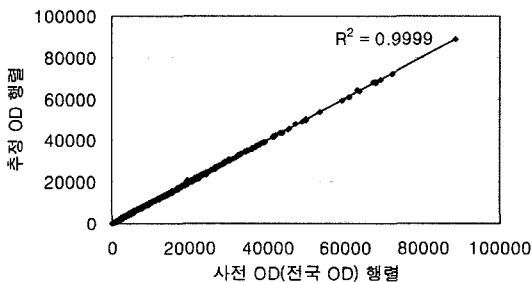
2) 사전 기종점 OD(전국 OD)행렬 재도출 분석

〈표 4〉는 전국 기종점 통행량을 이용하여 초기배정된 링크배정교통량을 이용하여 추정된 기종점 OD행렬의 결과를 분석한 것이다. 전국 기종점 OD(사전 OD)행렬 값과 거의 비슷하게 추정된 것으로 보아 역시 CG

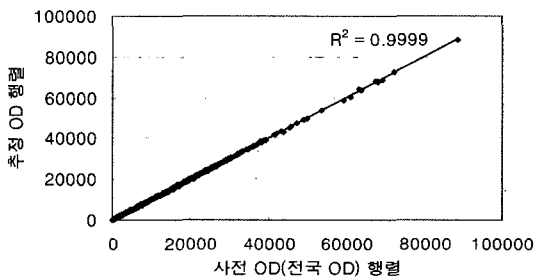
〈표 4〉 추정 기종점 OD행렬의 추정력 비교

구분	사전 OD (전국 OD)	추정 OD	MAE%
gradient 모형	17,631,148	17,618,737	0.9
CG모형		17,627,978	0.8

주 : 값은 각 행렬쌍에 대한 사전과 추정OD의 오차를 분석한 후, 평균치를 제시한 것임



〈그림 4〉 사전 OD(전국 OD)와 추정 OD의 추정력 비교 (gradient 적용)



〈그림 5〉 사전 OD(전국 OD)와 추정 OD의 추정력 비교 (CG모형 적용)

모형의 일관성이 확보되었다고 판단된다.

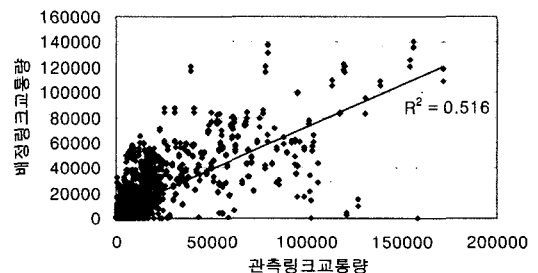
〈그림 4〉와 〈그림 5〉는 전국 기종점 OD행렬과 추정된 기종점 OD행렬의 산포도 및 R^2 값을 나타낸 그림으로서 R^2 값이 거의 1에 가까워 모형의 일치성이 유지된 것으로 판단된다.

4. 기존 전국 OD통행량의 오차 분석

1) 관측교통량과 배정교통량의 오차분석

전국 지역간 기종점 OD행렬(2001)을 이용하여 교통량의 오차를 분석하였다. 오차분석에 이용된 관측교통량은 "2001년 도로교통량 통계연보(건설교통부)"의 관측지점과 전국 가로망상에서 확인가능한 지점을 비교하여 관측교통량으로 이용하였다. 관측교통량으로 이용된 관측지점은 1,814개 지점이며 링크기준은 3,628개 링크이다. 이 3,628개 링크의 관측교통량을 기준으로 배정링크교통량과 오차분석을 하였다. 관측교통량과 배정교통량의 평균 MAE%는 71.9%로 분석되었으며 관측링크교통량과 배정링크교통량의 R^2 값은 0.516으로 분석되었다. 즉, 2001년 전국 지역간 기종점 OD통행량을 사전 기종점 OD행렬이라고 가정하고 전국 네트워크에 통행배정하여 배정된 교통량과 2001년기준 도로교통량 통계연보상의 각 지점별 실제(관측) 교통량을 scattergram(산포도)으로 표현했을 때 산출되는 값인 R^2 값이 0.516으로서, R^2 값의 범위는 0~1의 값을 가지게 되는데 1에 가까울수록 배정된 교통량과 실제(관측) 교통량의 차이가 적다는 것을 의미한다.

〈그림 6〉은 관측링크 3,628개 링크를 기준으로 관측링크교통량과 배정링크교통량의 산포도를 나타낸 것이다.



〈그림 6〉 관측과 배정링크교통량의 비교(관측링크 3,628개 기준)

5. 관측링크 개수에 따른 추정력 분석

CG모형의 추정력 변화를 분석하기 위하여 관측링크 개수에 따라서 모형의 추정력을 분석하였다. 관측링크 개수는 6개의 대안으로 구분하여 <그림 7>~<그림 12>와 같이 546개, 1,092개, 1,636개, 2,180개, 2,724개, 3,628개 관측링크로 구분하여 관측링크의 개수변화에 따라서 모형의 추정력을 분석하였다.

1) 관측링크와 배정링크교통량의 오차비교

<표 5>와 <그림 13>은 관측링크개수가 증가함에 따른 관측링크교통량과 배정링크교통량의 오차변화를 분석한 것이다. 관측링크수가 증가함에 따라 오차는 감소

하는 것으로 분석되었다. CG모형의 결과는 gradient 모형의 결과보다 오차가 큰 것으로 분석되었으나 상대적 오차의 차이는 크지 않은 것으로 보인다. 하지만 <표 6>의 추정된 기종점 OD행렬의 추정력은 gradient 모형의 오차 변화폭이 더 큰 것으로 분석되었다. 이는 모형상의 구조적인 차이라고 판단되는데, Gradient모형은 목적함수식 자체가 관측교통량과 추정교통량의 차이만을 최소화하는 함수식으로 구성되어 있기 때문에 추정교통량은 실제 관측교통량에 가장 근접하게 추정되지만 CG모형은 목적함수식에 교통량 차이뿐만 아니라 기종점 OD행렬값의 차이도 최소화시켜주는 항이 더 포함되어 있으므로 상대적으로 교통량 차이가 Gradient 모형보다는 오차가 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.



<그림 7> 546개 관측링크



<그림 8> 1,092개 관측링크



<그림 9> 1,636개 관측링크



<그림 10> 2180개 관측링크



<그림 11> 2,724개 관측링크



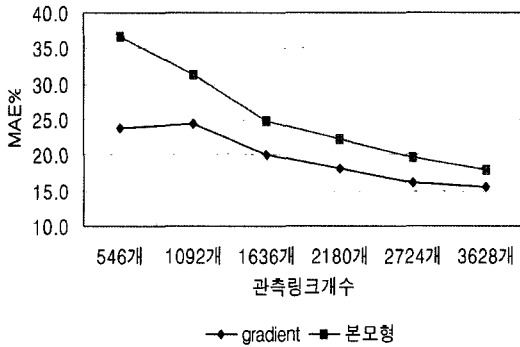
<그림 12> 3,628개 관측링크

주 : 굵은 링크가 관측링크임

〈표 5〉 관측링크개수별 관측과 배경교통량의 오차비교 (MAE%기준)

구분	546개 링크	1092개 링크	1636개 링크	2180개 링크	2724개 링크	3628개 링크
gradient	23.8	24.4	20.0	18.1	16.1	15.5
CG모형	36.7	31.4	24.9	22.2	19.7	17.9

주 : 수치는 각 개별 링크에 대한 관측과 배경교통량의 오차를 분석한 후, 평균치를 제시한 것임



〈그림 13〉 관측링크개수별 관측과 배경교통량의 오차비교 (MAE%기준)

2) 추정 기종점 OD행렬의 추정력 비교

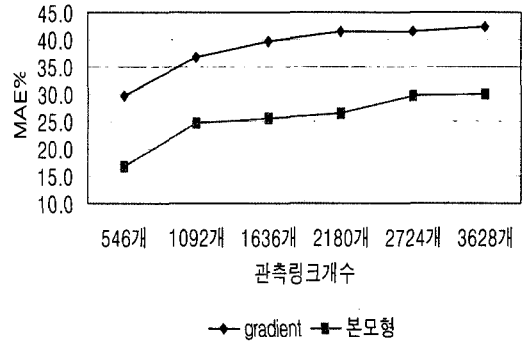
〈표 6〉과 〈그림 14〉는 관측링크수 변화에 따른 추정된 기종점 OD행렬의 추정력 변화를 분석한 것이다. gradient모형으로 추정된 결과가 CG모형의 결과보다 오차가 큰 것으로 분석되었다. 이는 두 모형간에 기종점 OD행렬을 추정하는 알고리즘상의 차이도 있겠지만 궁극적인 원인은 아마도 목적함수식의 차이에 기인한 것으로 여겨진다. 즉, 목적함수식이 Gradient모형처럼 교통량 차이만을 최소화하기 위한 함수식인지, 아니면 CG모형처럼 교통량 차이 및 기종점 OD행렬값 차이도 최소화하는 함수식인지에 따라서 추정결과가 달라질 수 있다고 판단된다. CG모형의 추정력 향상을 위해서는 앞으로 교통량 차이도 기존 모형보다 더 나은 결과가 도출될 수 있도록 지속적으로 알고리즘 성능개선이 필요하다고 판단된다.

〈표 5〉의 관측과 배경링크교통량의 오차변화와 비교해 볼 때, 관측링크수가 증가함에 따라 관측과 배경링크교통량의 오차는 감소하지만 추정된 기종점 OD행렬의 오차는 관측링크수가 증가함에 따라 오차도 서서히 증가하는 것으로 분석되어 결국은 기종점 OD행렬의 추정력을 향상시키기 위해서는 적절한 관측지점 및 개수를 이용할 필요가 있다고 보인다.

〈표 6〉 추정 기종점 OD행렬의 추정력 비교(MAE%기준)

구분	546개 링크	1092개 링크	1636개 링크	2180개 링크	2724개 링크	3628개 링크
gradient	29.7	36.9	39.8	41.5	41.5	42.4
CG모형	16.7	24.6	25.7	26.4	29.6	30.0

주 : 값은 각 행렬쌍에 대한 사전과 추정OD의 오차를 분석한 후, 평균치를 제시한 것임



〈그림 14〉 추정 기종점 OD행렬의 추정력 비교(MAE%기준)

V. 결론

관측교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하는 방법 중 범용적으로 이용하고 있는 Gradient방법에 기반한 기종점 OD행렬 추정모형(Spiess, 1990)은 목적함수식이 관측교통량과 배경교통량의 차이만을 최소화하는 함수식으로 구성되어 있어서 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정할 때 관측교통량과 배경교통량의 차이는 최소화되지만 추정 기종점 OD행렬은 사전(prior) 기종점 OD행렬의 OD구조를 대부분 유지하지 못할 경우가 많았다. 이헌주, 이승재(2004.2)는 추정된 기종점 OD행렬이 사전 기종점 OD행렬의 OD행렬 구조를 반영하면서 관측교통량과 추정교통량의 오차는 허용오차범위내에서 오차를 최소화시켜주도록 하는 기종점 OD행렬 추정모형을 개발하기 위해 기존의 Gradient 방법인 steepest descent method에 의한 step size의 해를 찾는 알고리즘 과정을 탈피하여 기종점 OD행렬 추정 알고리즘 전체에 대한 추정 과정은 Conjugate Gradient 방법을 적용하고 step length 계산은 Coordinate Descent Method(Chen & Florian, 1995)를 적용한 새로운 기종점 OD행렬 추정모형을 개발하였다. 개발된 모형의 타당성 확보를 위해서 모의 분석 가로망에서 OD추정 모형과 하부 모형인 통행배정모형간 유기적으로 작동되는지를 분석하기 위한 모형의 일관성

분석을 실시하였으며 모형내 내부적으로 일치하는 것으로 분석되었다. 또한 관측링크 개수에 따른 관측 교통량을 이용하여 모형의 추정력을 분석하였으며, 기존의 모형으로 추정된 결과보다 양호하게 추정되는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구는 이헌주, 이승재(2004.2)의 후속 연구로서 개발된 모형이 현실 상황에서도 일관성 및 안정성이 확보되는지를 검토해 볼 필요가 있다고 판단되어 기종점 OD행렬 추정모형(이헌주, 2004.2)이 대규모 가로망에서도 모형의 일관성, 안정성 및 적용 가능성이 있는지를 판단하기 위하여 246개준 기준 전국 가로망 및 기종점(O/D) 통행량(KOTI, 2001)에 적용하여 MAE%에 의한 모형의 추정력을 분석하였다.

먼저 CG모형이 대규모 가로망에서도 모형의 일관성을 유지하는지를 분석하였다. 그리고 관측교통량으로 이용할 관측링크의 개수에 따른 기종점 OD행렬의 추정력 변화 및 관측링크교통량과 배경링크교통량의 오차를 분석하였다.

대규모 가로망에서의 모형의 일관성을 분석한 결과, 오차범위(MAE%기준) 1%내에서 초기의 배경링크교통량과 사전 기종점 OD행렬(전국 OD)을 재도출하는 것으로 분석되어 기종점 OD행렬 추정모형과 통행배정 모형간에 내부적으로 일치하여 개발된 모형이 대규모 가로망에서도 적용가능성에 대한 타당성을 확보하였다고 판단된다.

관측링크개수의 변화에 따라 관측링크교통량과 배경링크교통량의 오차(MAE%)를 비교한 결과, gradient 모형의 오차가 CG모형의 오차보다 낮게 분석되어 추정교통량에 대한 오차에는 gradient모형이 CG모형보다 조금 더 양호하게 추정되는 것으로 분석되었다. 이는 모형상의 구조적인 차이라고 판단되는데, Gradient 모형은 목적함수식 자체가 관측교통량과 추정교통량의 차이만을 최소화하는 함수식으로 구성되어 있기 때문에 추정교통량은 실제 관측교통량에 가장 근접하게 추정이 되지만 CG모형은 목적함수식에 교통량 차이뿐만 아니라 기종점 OD행렬값의 차이도 최소화시켜주는 항이 더 포함되어 있으므로 상대적으로 교통량 차이가 Gradient모형보다는 오차가 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

관측링크수 변화에 따른 추정된 기종점 OD행렬의 추정력은 gradient모형으로 추정된 결과가 CG모형의 결과보다 오차가 큰 것으로 분석되었다. 이는 두 모형간에 기종점 OD행렬을 추정하는 알고리즘상의 차이도 있겠지

만 궁극적인 원인은 목적함수식의 차이라고 보여지는데 즉, 목적함수식이 Gradient모형처럼 교통량 차이만을 최소화하기 위한 함수식인지, 아니면 CG모형처럼 교통량 차이 및 기종점 OD행렬값 차이도 최소화하는 함수식인지에 따라서 추정결과가 달라질 수 있다고 판단된다.

Gradient모형과 CG모형은 관측링크수가 증가함에 따라 관측과 배경링크교통량의 오차는 감소하지만 추정된 기종점 OD행렬의 오차는 관측링크수가 증가함에 따라 오차도 서서히 증가하는 것으로 분석되어 결국은 기종점 OD행렬의 추정력을 향상시키기 위해서는 적절한 관측지점 및 개수를 이용할 필요가 있다고 보인다.

본 연구의 향후 과제는 다음과 같다.

첫째, 개발된 CG모형의 추정력을 향상시킬 수 있도록 추정 알고리즘에 대한 개선이 지속적으로 요구된다.

둘째, 기존(Prior) OD행렬의 OD구조를 크게 변경시키지 않고 CG모형의 추정력을 향상시키기 위해서는 적절한 관측지점 및 개수를 이용하여 추정하는 것이 바람직하며 또한 기존의 G방법과 CG방법에 대한 비교분석이 필요하다고 판단된다.

셋째, 단일 차종 기반 기종점 OD행렬 추정 모형을 다차종 기반 추정 모형으로 확장하는 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 김종형(2000), Gradient방법에 의한 통행량기반 수요추정 연구, 서울시립대학교 박사학위 논문.
2. 백승걸(2001), 유전자알고리즘을 이용한 링크관측 교통량으로부터 기종점 통행행렬 추정, 서울대학교 박사학위 논문.
3. 이헌주(2004), 적정 관측지점 선정에 의한 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형 개발에 관한 연구 - Conjugate Gradient Algorithm 적용을 중심으로, 서울시립대학교 박사학위 논문.
4. 이헌주-이승재(2004), "Conjugate Gradient 기법을 이용한 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형 개발", 대한교통학회지, 제22권 제1호, 대한교통학회, pp.43~61.
5. 한국건설기술연구원(2001), 상시조사 자료에 의한 교통량 관측위치 및 관측지점수 산정 연구.
6. 교통개발연구원(2001), 2001년 전국교통DB구축사업.
7. Brenninger-Gothe M., Jorntern K.O. and Lundgren J.T.(1989) Estimation of origin -

- destination matrices from traffic counts using multiobjective programming formulation, *Transpn. Res.*, 23B, pp.257~269.
8. Crainic et al(2001), Demand matrix adjustment for multimodal freight networks. *Transpn. Res.*, Record 1771, pp.140~147.
 9. Chen, Y. & Florian, M.(1991). The Nonlinear Bilevel Programming Problem: A General Formulation and Optimality Condition. Publication No. 794, CRT, University of Montreal.
 10. Chen, Y. & Florian, M.(1995). A Coordinate Descent Method for the bi-level O-D Matrix Adjustment Problem. *Int. Trans. Opl Res.* Vol.2. No. 2, pp.165~179.
 11. J. Doblaz, F G. Benitez(2001) An approach for estimating and updating origin-destination matrices based on traffic counts preserving prior structure, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*.
 12. E. Cascetta and S. Nguyen(1988). A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts, *Transportation Research*, 22B.
 13. Fisk,C.S.(1988). On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment. *Transpn. Res.* Vol. 22B, pp.69~73.
 14. Fisk,C.S.(1989). Trip Matrix Estimation from Traffic Counts : the Congested Network Case. *Transpn. Res.* Vol. 23B, pp 331~336.
 15. Florian, M.(1986). Nonlinear cost network models in transportation analysis. *Mathematical Programming Study*, pp.167~196.
 16. H.Yang, Iida Y. and T.Sasaki(1991b) An Analysis of the reliability of an OD trip matrix estimated from traffic counts. *Transpn. Res.* 26B, pp.351~363.
 17. H.Yang(1995). Heuristic Algorithm for the Bilevel Origin-Destination Matrix Estimation Problem, *Transpn. Res.* Vol. 29B, pp.231~242.
 18. INRO Consultants Inc.(1999). EMME/2 Users' Manual. Montreal, Quebec : INRO.
 19. J. Doblaz, F G. Benitez(2001) An approach for estimating and updating origin-destination matrices based on traffic counts preserving prior structure, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*.
 20. J. Wardrop(1952), Some theoretical aspects of road traffic research, In *Proc. Inst. Civil Engr.*, Part II, pp.325~378.
 21. Nguyen,S.(1984). Estimating Origin -Destination Matrices from Observed Flows. In M.Florian(Ed) *Transportation Planning Models*, pp.363~380.
 22. Spiess,H.(1990). A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem, INRO.
 23. S.Rao(1996), *Engineering Optimization (Theory and Practice Third Edition)*, John Wiley & Sons.
 24. Torgil Abrahamsson(1998). Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts-A Literature Survey, www.iiasa.ac.at.
 25. Van Zuylen, J.H. & Willumsen, L.G.(1980). The most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts. *Transpn. Res.* Vol. 14B, pp.281~293.

✉ 주 작 성 자 : 이현주
 ✉ 논문투고일 : 2004. 11. 25
 논문심사일 : 2005. 1. 25 (1차)
 2005. 4. 26 (2차)
 2005. 5. 4 (3차)
 심사판정일 : 2005. 5. 4
 ✉ 반론접수기한 : 2005. 10. 31