

■ 論 文 ■

기종점 OD행렬의 추정력 향상을 위한 교통량 관측구간 선정

Selection of the Optimal Traffic Counting Links using Integer Program Method for
Improving the Estimation of Origin Destination Matrix

이 현 주

(교통개발연구원 책임연구원)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

박 용 길

(감사원 시설서기관)

목 차

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 <ul style="list-style-type: none"> 1. 연구배경 및 목적 2. 연구 방법 II. 기존 연구 고찰 III. 교통량 관측구간 선정 <ul style="list-style-type: none"> 1. 분석자료의 구성 2. 정수계획기법을 적용한 관측구간 선정 | <ul style="list-style-type: none"> IV. 기종점 OD행렬의 추정력 분석 <ul style="list-style-type: none"> 1. 기종점 OD행렬 추정모형 2. 추정력 분석 및 검증 방법 3. 관측오차 반영시 추정력 분석 4. 기존연구 결과와의 비교 V. 결론 <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 정수계획법, 교통량 관측구간, 관측교통량, 기종점 OD행렬, OD 추정력

요 약

관측교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정할 때 적절한 관측구간을 선정한 후 선정된 구간의 교통량을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정하는 것이 기종점 OD행렬의 추정력을 향상시키고 경제적인 효율성(관측비용 감소)을 제고하기 위한 방법이라고 판단하였다. 본 연구에서는 관측구간을 선정하기 위해 정수계획법을 이용하여 관측구간을 선정하는 모형식을 제시하였으며 이 기법을 이용하여 교통량 관측구간을 선정한 후, 선정된 관측구간의 교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하였다. 또한 적절한 관측구간으로 선정된 교통량으로부터 추정된 기종점 OD행렬의 추정력을 비교분석하기 위하여 임의적으로 관측구간을 선정하여 기종점 OD행렬을 추정한 기존의 연구결과와 비교하였다.

비교분석한 결과, 적절한 관측구간을 선정하여 추정한 구간교통량 및 추정 기종점 OD행렬의 추정력이 임의적으로 관측구간의 교통량을 이용한 결과의 오차보다 더 개선되는 것으로 분석되었다. 따라서 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정하기 위해서는 적절한 관측구간을 선정하여 선정된 구간의 교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하는 것이 오차를 줄일수 있으며 추정력을 향상시킬수 있는 방법이라고 하겠다.

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(R01-2002-000-00328-0)의 지원으로 수행되었음.

1. 서론

1. 연구배경 및 목적

관측구간의 교통량으로부터 기종점 OD행렬¹⁾을 추정하는 방법은 과거의 사전(prior) 기종점 OD행렬과 관측된 구간교통량과의 인과관계를 설정하여 관측구간 교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정한다. 구간(링크)상에서 관측되는 모든 정보는 똑같은 정보를 갖고 있지는 않으며, 어떤 관측구간²⁾의 교통량은 기종점 OD행렬을 추정하는데 효과적인 정보를 제공하지 못할 수 있다. 즉, 교통량 관측구간을 무작정 증가시킨다고 해서 추정 기종점 OD행렬의 추정력이 높아지고 관측 오차가 낮아진다고 볼 수는 없을 것이다. 때문에, 기종점 OD행렬의 추정의 정확도를 높이고 관측비용(검지기수)을 줄이기 위해서는 적절한 관측구간을 선정하여 기종점 OD행렬을 추정하여야 한다. 적절한 관측구간은 분석대상지역내의 모든 기종점 OD행렬쌍을 최소한으로 관측할 수 있어야 한다. 왜냐하면 어떤 특정한 기종점 OD행렬쌍이 관측되지 않으면 그 OD행렬쌍의 추정 교통량은 신뢰성이 낮아질 수 있기 때문이다.

따라서 관측교통량을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정하기 이전에 기종점 OD행렬의 추정력 및 신뢰성을 향상시키고 관측비용을 줄이기 위해서는 적절한 관측구간을 선정하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 관측구간을 선정하는 방법을 제시하고 이 방법을 이용하여 교통량 관측구간을 선정한 후, 선정된 관측구간의 교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하는 것이다. 또한 적절한 관측구간으로 선정된 교통량으로부터 추정된 기종점 OD행렬의 추정력을 비교하기 위하여 기존의 연구³⁾결과와 비교분석하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서 기종점 OD행렬의 추정력을 향상시키기 위해 교통량 관측구간을 선정하는 방법은 정수계획기법을 적용하여 관측구간 선정모형을 구축하였으며 정립된 모형을 분석가로망에 적용하여 관측구간을 선정하였다.

교통량 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정할 때 이용하는 기종점 OD행렬 추정모형은 이현주(2004) 및 이현주, 이승재(2004)가 Conjugate Gradient기법을 적용하여 구축한 모형을 이용하였다.

추정된 기종점 OD행렬의 추정력을 분석하기 위하여 관측구간으로 선정된 구간의 교통량에 관측오차($\pm 5\%$, $\pm 10\%$)를 반영하여 관측오차에 따른 기종점 OD행렬을 추정하였다. 이 결과를 임의적으로 선정된 관측구간의 교통량을 이용하여 추정된 기종점 OD행렬과 비교하였으며 여기에 이용한 평가지표는 MAE%의 통계지표를 이용하였다.

II. 기존 연구 고찰

H. Yang 등(1991b)은 최대가능상대오차(MPRE, Maximal Possible Relative Error)의 개념을 제시하여 추정 기종점 OD행렬의 신뢰성을 평가하는 지표로 정의하였다. MPRE는 노선선택비율이 정확히 설정되고 관측교통량의 오차가 없을 경우 특정한 기종점 OD행렬에 대한 현실적인 오차 한계로부터 추정된 기종점 OD행렬의 최대가능상대편차를 나타내는 것이다. Yang(1998)은 최대가능상대오차에 근거하여 구간교통량 관측위치에 관한 통행검지위치규칙(Location Rule)을 제시하고 이러한 규칙을 만족하는 링크를 결

- Origin-Destination Matrix는 기종점 통행량을 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)라고 정의하며, 기종점 통행행렬, 기종점 통행량이라고도 함. 본 연구에서는 기종점 OD행렬이라고 함.
 - 사전(prior) 기종점 OD행렬은 추정하기 이전의 기종점 OD행렬을 말하며 기존에 존재하는 historical OD행렬을 일컫음. 이를 선행 OD, 사전 OD, 통행행렬, 기종점 통행량이라고도 함. 본 연구에서는 사전(prior) 기종점 OD행렬이라고 정의함.
 - 추정(estimated) 기종점 OD행렬은 사전(prior) 기종점 OD행렬과 관측교통량을 이용하여 추정된 기종점 OD행렬을 말함. 이를 추정 OD, 사후(posterior) OD라고도 함. 본 연구에서는 추정(estimated) 기종점 OD행렬이라고 정의함.
- 본 연구에서의 교통량 관측구간(링크)에 대한 정의는 다음과 같음. 일반적으로, 교통량 '관측지점'은 매우 micro한 문제로서 도로기하구조, 속도프로파일, 주변 access 관리 정도 등을 검토하게 되는 문제이고 교통량 '관측위치'는 조사지점일수도 있고 조사구간일 수 있는 문제임. 따라서 관측위치는 어떤 지점일 수도 있고 일정 범위의 면적을 가진 장소일 수도 있음. 즉, 교통량 관측위치라고 할 경우에는 관측지점과 관측링크의 개념을 모두 포함하고 있음. 본 연구에서는 "교통량관측을 위한 동질적인 구간"이라고 정의를 하였으며 이를 '교통량 관측구간(traffic counting links)'이라고 표현하였음.
 - 이현주, 이승재(2004)는 관측교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하기 위하여 Conjugate Gradient방법을 이용하여 관측교통량기반 기종점 OD행렬 추정모형을 구축하였으며 추정모형의 적합성을 검증하기 위해 관측구간을 임의적으로 2개, 5개, 8개, 11개로 구분하여 각 관측구간 개수별로 기종점 OD행렬을 추정하였음.

정하기 위해 정수계획모형과 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. 그리고 Yang 등(2001)은 기종점 OD행렬 추정을 위해서 코든·스크린 라인의 최적위치를 결정하는 두 개의 정수계획모형을 제안하였다. 풀이방법은 유전자 알고리즘을 이용하여 가상의 가로망에 적용하였다.

Bianco(1997)는 관측노드와 그 노드에 연결되는 링크들의 집합인 영향권(influence basin)을 설정하여 검지기가 설치되지 않은 지점에 대해서도 링크교통량을 구하는 방법으로 완전한 교통량벡터를 구한 후 휴리스틱 방법을 통해 조합최적화모형으로 검지기 위치를 결정하였다. 또한 검지기위치문제의 하한(lower bound)과 상한(upper bound)에 대한 알고리즘을 제시하였다. 그러나 복잡한 최적화문제에 의해 관측위치를 구하고 가로망의 구성수준에 따라 최적위치가 변경될 수 있으며, 노드에서의 검지를 가정한다는 한계를 가지고 있다.

Tamin 등(2001)은 관측교통량(Traffic Counts)을 이용하여 교통량 관측위치를 선정하는 방법을 제시하였다. 즉 교통량 관측위치 선정기준을 3단계로 구분하여 매 단계별 교통량 관측위치를 선정하여 최종적으로 선정된 지점을 평가한 후 관측위치의 적정수를 결정하였다.

Lam과 Lo(1990)는 기종점 OD행렬을 추정하기 위해서 링크가 선택된다는 점에서 그 순서를 규정하기 위한 경험적인(heuristic)과정을 제안하였다. 또한 Lam 등(1998)은 기존의 관측지점 선정방법에 문제가 있는 것을 제시하여, 관측지점의 적정 우선순위를 결정하는 표본추출방법(sampling method)을 제안하였다. 이 연구는 순 기종점 OD행렬 확보 최대화규칙(maximal net OD captured)과 총 기종점 OD행렬 확보 최대화규칙(maximal total OD captured)을 제안하였다.

백승걸, 임강원, 이승재(1998)는 기종점 추정을 위한 최적관측위치로서의 존코든라인(Zone Cordonline) 원칙을 제시하였다. 기종점(OD) 추정을 위한 존 코든라인 관측방법(Zone Cordonline Counting Method)은 모든 노드에 연결된 링크를 관측대상으로 하는 기존의 방법 대신 존 경계선을 따라 코든라인을 설정하고 코든라인이 통과하는 링크에서 교통량을 관측하였고, 존이 세분화될수록 관측위치가 증가하는 경향이 있다.

이승재, 김종형, 이현주 등(2001)은 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정함에 있어 관측교통량을 이용할 때 관측지점의 위치를 11개의 관측교통량 집합으

로 구분하여 각각의 관측교통량 집합을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정하였다. 추정된 기종점 OD행렬에 대하여 관측링크 집합별 오차평가 결과 관측링크 1,164개부터 수렴하기 시작하여 관측구간의 링크 수가 증가함에 따라 오차는 급속히 수렴하다 일정한 관측구간수가 넘으면 관측구간수가 증가해도 오차는 개선되지 않는 것을 보여 주었다. 따라서 오차가 개선되지 않는 부분의 관측링크 집합을 적정 관측구간수로 선정하고 있다.

이승재, 이현주(2003)는 교통량 관측구간의 위치와 개수에 따라 기종점 OD행렬 추정이 변하기 때문에 관측구간의 적절한 위치와 개수를 선정하는 연구가 필요하다고 판단하여 기종점 OD행렬을 추정하기 위해 교통수요추정의 정확도에 직접적으로 영향을 미치는 교통량 관측구간의 적정위치와 개수를 선정하였다. 대안별 교통량 관측위치가 선정된 결과를 통계적인 평가지표를 이용하여 사전 기종점 OD행렬과 추정 기종점 OD행렬 간의 오차를 평가하였다. 오차평가결과, 관측교통량을 이용하여 사전 기종점 OD행렬을 추정(갱신)할 때 관측교통량에 대한 관측구간의 위치 및 개수가 적정하게 반영되어 추정된 OD행렬이 사전 기종점 OD행렬의 통행패턴을 어느 정도 잘 반영하고 있음을 검증하였다.

III. 교통량 관측구간 선정

1. 분석자료의 구성

교통량 관측구간을 선정하기 위하여 본 절에서는 H.Yang(1995)이 이용한 가로망 및 입력자료를 이용하였다.

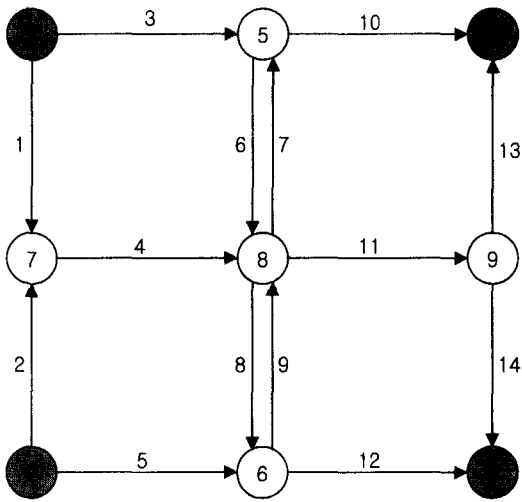
(1) 분석가로망 및 기종점 OD행렬

관측구간 선정 알고리즘을 적용하기 위해 <그림 1>의 가상의 가로망을 가정하였다. 이 가로망은 9개의 노드와 14개의 링크로 구성되어 있으며 9개의 노드중 음영으로 된 노드는 존(zone) 노드를 의미한다.

분석가로망의 통행저항함수는 BPR(Bureau of Public Road)식을 이용하였으며, 각 링크에 대한 속성은 <표 1>과 같다.

$$T_a = T_a^0 \{1 + 0.15(V_a / (C_a * L_a))\}^4 \quad (1)$$

여기서, T_a 와 T_a^0 는 각각 링크 a 의 통행시간과 자



〈그림 1〉 모의 분석가로망

〈표 1〉 가로망의 입력속성

링크 번호	시점 노드	종점 노드	거리 (km)	차로수 (L_a)	T_a^0	1차로용량 (C_a)
1	1	7	3.5	1	4	70
2	2	7	1.5	3	4	70
3	1	5	1.0	1.5	12	100
4	7	8	2.0	2	10	100
5	2	6	3.0	2.5	11	100
6	5	8	7.0	2	3	70
7	8	5	7.0	2	4	70
8	8	6	5.0	2	4	70
9	6	8	5.0	2	5	70
10	5	3	4.0	2.5	12	100
11	8	9	2.2	2	12	100
12	6	4	3.8	1.5	11	100
13	9	3	3.3	3	4	70
14	9	4	2.9	1	3	70

〈표 2〉 기종점(OD) 통행량

기점 노드	종점 노드	통행량(대)
1	3	210
1	4	140
2	3	135
2	4	185

유통행시간을 의미하며 v_a 와 C_a 는 각각 링크 a 의 배정교통량과 용량, L_a 는 차선수를 의미한다. 예제 풀이에 이용된 기종점 통행량(OD)은 〈표 2〉에 제시되어 있다.

2. 정수계획기법을 적용한 관측구간 선정

1) 선정함수식

H.Yang은 교통량 관측구간을 선정하기 위한 문제를 두 단계로 구분하여 문제를 정식화하였다. 첫 번째 단계는 분석가로망에서 최소한의 관측구간수를 산정하는 것이며 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 선정된 개수를 두 번째 단계의 제약조건식으로 이용하여 관측구간을 선정하는 문제를 정립하였다. 다음으로 두 개의 정립된 관측구간 문제를 해결하기 위하여 Heuristic Greedy 알고리즘을 이용하여 관측구간을 선정하는 단계를 거쳐 관측구간을 선정하였다. H.Yang은 단계적으로 교통량 관측구간을 선정하였으나, 본 연구는 계산과정을 단순화시켜 정수계획기법을 적용하여 관측구간 선정모형을 정립하였다. 다음으로 H.Yang(1998)은 최대가능상태오차에 근거하여 링크교통량 관측위치에 관한 4가지 통행검지위치규칙을 제시하여 교통량 관측구간을 선정하였고, 본 연구에서는 H.Yang의 4가지 통행검지위치규칙중 기종점 OD행렬 확보규칙(OD Covering Rule), 최대 교통량 관측 규칙(Maximum Flow Intercepting Rule), 링크독립규칙(Link Independence Rule)을 만족하도록 해주는 모형식이다.

본 연구의 구간교통량을 이용하여 정수계획기법을 적용하여 교통량 관측구간을 선정하기 위한 모형의 구체적인 함수식은 식(2)와 같다.

$$Max G(l) = \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} f_r l_a \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{a \in R} f_{ra} l_a \leq 1, \quad r \in R \quad (2a)$$

$$l_a = 0, 1 \quad a \in A \quad (2b)$$

여기서, 식(2)는 최대교통량 관측규칙(maximal flow intercepting rule)에 의하여, 총 관측되는 순교통량(net flows)을 최대화하는 함수식이다. 이는 그 경로에서 관측되는 최대교통량을 갖는 관측구간이 여러 지점에서 관측되더라도 오직 한 개만의 관측링크를 선정해 준다. f_r 은 사전 기종점 OD행렬쌍과 연관된 경로교통량이고, l_a 는 a 링크를 의미한다. f_{ra} 는 기종점 OD행렬쌍 $r \in R$ 간에 교통량이 링크 a 를 지나면 1, 그렇지 않으면 0이다.

식(2a)는 f_{ra} 가 경로 $r \in R$ 상에 관측지점이 위치해 있으면 $l_a=1$, 그렇지 않으면 $l_a=0$ 이 될 것이라는 것을 의미하며 모든 기종점 OD행렬쌍 $r \in R$ 간에 각 경로당 1개의 관측지점이 선정되도록 하는 제약식으로서 기종점 OD행렬 확보규칙(OD covering rule)을 반영하는 제약조건식이다. 식(2b)는 관측지점이 링크 a 에 위치해 있으면 1, 그렇지 않으면 0을 의미한다.

2) 교통량 관측구간 선정

(1) 링크배정교통량 정리

〈표 2〉를 이용하여 각 링크에 통행배정된 교통량은 다음의 〈표 3〉과 같다. 이를 이용하여 정수계획기법에 의해 구축된 목적함수식과 제약조건식은 식(3)과 같다.

(2) 풀이 함수식

교통량기준 관측구간을 선정하는 함수식 및 제약조건식은 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } G(l) &= 210l_3 + 210l_{10} + 117l_1 + 117l_4 + 117l_{11} + 117l_{14} \\
 &+ 12l_1 + 12l_4 + 12l_8 + 12l_{12} + 11l_3 + 11l_6 + 11l_8 \\
 &+ 11l_{12} + 83l_2 + 83l_4 + 83l_{11} + 83l_{13} + 43l_5 + 43l_7 \\
 &+ 43l_9 + 43l_{10} + 9l_2 + 9l_4 + 9l_7 + 9l_{10} + 180l_5 \\
 &+ 180l_{12} + 5l_2 + 5l_4 + 5l_{11} + 5l_{14}
 \end{aligned}$$

(3)

subject to

$$\begin{aligned}
 l_3 + l_{10} &\leq 1 \\
 l_1 + l_4 + l_{11} + l_{14} &\leq 1 \\
 l_1 + l_4 + l_8 + l_{12} &\leq 1 \\
 l_3 + l_6 + l_8 + l_{12} &\leq 1 \\
 l_2 + l_4 + l_{11} + l_{13} &\leq 1 \\
 l_5 + l_7 + l_9 + l_{10} &\leq 1 \\
 l_2 + l_4 + l_7 + l_{10} &\leq 1 \\
 l_5 + l_{12} &\leq 1 \\
 l_2 + l_4 + l_{11} + l_{14} &\leq 1
 \end{aligned}$$

(3a)

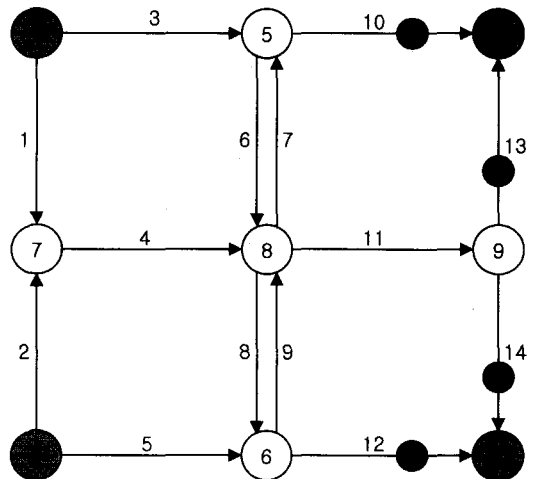
$$l_a = 0, 1 \tag{3b}$$

식(3)에서 목적함수는 최대교통량 관측규칙(maximal flow intercepting rule)을 만족시키도록 해 주는 식으로서, 같은 경로(path)내에서 다수개의 관측구간이 선정되더라도 한 개의 관측구간만 고려하는 순수교통량(net flow)을 최대화하는 목적함수식이다.

제약식(3a)는 기종점 OD행렬 확보규칙(OD covering rule)을 만족시켜 주기 위한 제약식으로서 모든 기종점 OD행렬쌍을 통과시키도록 하기 위한 교통량 관측구간 수 이상이 되도록 해 주는 제약식이다.

(3) 관측구간 선정결과

정수계획기법을 적용하여 교통량 관측구간으로 선정된 링크는 10번 링크, 12번 링크, 13번 링크, 14번 링크로 총 4개의 링크가 관측구간으로 선정되었다. 〈그림 2〉는 관측구간으로 선정된 링크를 표시한 것이다.



〈그림 2〉 정수계획법을 이용한 관측구간 선정결과

●표시는 관측구간으로 선정된 링크임

〈표 3〉 기종점 OD행렬쌍간 경로의 링크에 배정된 교통량

OD교통량	경로교통량	링크 번호																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
1→3	210	R1	210			210									210					
1→4	140	R2	117	117			117									117				117
		R3	12	12			12						12				12			
		R4	11				11			11			11					11		
		R5	83			83			83							83			83	
2→3	135	R6	43					43		43			43	43						
		R7	9			9				9				9						
		R8	180						180								180			
2→4	185	R9	5			5									5				5	
		계		670	129	97	221	226	223	11	52	23	43	262	205	203	83	122		

교통량 관측구간으로 선정된 구간은 목적지 근처의 링크가 주로 선정되었는데, 이는 목적지 근처의 링크들이 다른 링크들의 값들에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 기종점 OD행렬쌍간 각 경로당 여러개의 링크가 있더라도 1개만 관측링크로 선정되는 것이 관측비용의 감소 측면에서 바람직하다고 볼 때 결과에서 보듯이 각 경로당 모두 1개씩만 선정되었으며 이는 또한 H.Yang (1998)의 기종점 OD행렬 확보규칙을 만족시키고 있다고 하겠다. 선정된 결과는 모든 링크들을 기준으로 최적화시키면서 관측지점을 선정하였다. 이러한 과정에서 상대적으로 교통량이 많은 중요한 링크들이 선정이 되지 않은 결과를 보였다. 그러나, 기종점 OD행렬 확보규칙을 만족시키는 것으로 나타났고 최대교통량 관측규칙 및 최대교통량 비율규칙은 부분적으로 만족시키지 못하는 것으로 분석되었다.

IV. 기종점 OD행렬의 추정력 분석

1. 기종점 OD행렬 추정모형

본 연구에서는 위에서 교통량 관측구간으로 선정된 교통량을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정할 때 이용한 모형은 이현주(2004), 이현주, 이승재(2004)가 구축한 추정모형을 이용하였고 추정절차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } F(t, v) \\ = \frac{1}{2} \sum_{ij \in OD} (t_{ij} - \bar{t}_{ij})^2 + \frac{1}{2} \sum_{a \in A} (v_a - \bar{v}_a)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

subject to

$$t_{ij} \geq 0, \quad ij \in OD \quad (4a)$$

$$v \equiv v^* = (\dots, v_a, \dots) = \text{assign}(t) \quad (4b)$$

$i \in O$: 출발지 존

$j \in D$: 도착지 존

a : 가로망의 구간(링크)

$k \in K_{ij}$: i 와 j 를 연결하는 경로

δ_{ak} : 경로 k 에 구간 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 : 구간(링크) a 의 배정교통량

\bar{v}_a : 구간(링크) a 의 관측교통량

h_k : 경로 k 의 교통량

식(4)의 최적해를 도출하기 위한 추정 알고리즘 수행과정은 이현주(2004)가 Conjugate Gradient Method(S.Rao, 1996)의 기능을 EMME/2의 매크로로 기능과 접목시켜 개발한 매크로를 이용하였다. 구체적인 수행과정은 다음과 같다.

[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 경로통행비율 h^0 가 계산됨

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

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

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

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

여기서, 최대경사값(maximum absolute gradient,

$$g_{\max}) \text{ 계산} = \left| \frac{d_{ij}}{t_{ij}} \right|$$

[단계 3] step length λ^0 값 계산

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

subject to

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

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

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

[단계 5] 반복과정

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

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

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

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 5]로 감

2. 추정력 분석 및 검증 방법

정수계획기법을 적용하여 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 기종점 OD행렬 추정모형으로 기종점 OD행렬을 추정한 추정 기종점 OD행렬이 사전(prior) 기종점 OD행렬을 얼마나 잘 반영하는지를 분석하였다. 또한 관측오차(±5%, ±10%)를 반영하였을 경우 추정 기종점 OD행렬의 추정력 변화 및 배정링크 교통량의 오차를 분석하였다. 오차 및 추정력을 분석하기 위한 평가지표는 MAE%를 이용하였다.

1) 관측구간의 오차 반영

관측구간의 교통량 오차는 모형의 추정력에 영향을 많이 주는 변수이다. 본 모형의 추정력을 분석하기 위해 설정한 교통량 관측오차는 ±5%, ±10%인 경우로 설정하여 분석하였다.

2) 모형 추정력 평가인자

추정된 기종점 OD행렬의 추정력을 비교분석하기 위해 이용하는 평가지표는 MAE%(Relative Mean Absolute Error)를 이용하여 분석하였다.

$$MAE(\%) = \left(\frac{\sum |v_{est} - v_{obs}|}{\sum v_{obs}} \right) \times 100 \quad (5)$$

여기서,

v_{obs} : 관측교통량(또는 사전 기종점 OD행렬)

v_{est} : 추정교통량(또는 추정 기종점 OD행렬)

3) 기존 연구결과와 비교

본 연구에서 교통량 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 분석된 결과를 이현주, 이승재(2004)의 연구에서 분석된 결과와 비교하도록 한다. 이현주, 이승재(2004)의 연구는 교통량 관측구간을 임의로 2개, 5개, 8개, 11개의 관측구간으로 설정하여 관측구간의 교통량에 관측오차를 반영하여 추정 기종점 OD행렬의 추정력을 분석하였다.

3. 관측오차 반영시 추정력 분석

1) 관측과 배정링크교통량의 오차분석

교통량 관측오차(±5%, ±10%)를 적용하여 추정된 기종점 OD행렬로 분석가로망에 통행배정하여 각 구간별 오차를 분석하였다. <표 4>를 보면 관측오차 ±5%를 반영한 경우 평균 MAE%는 3.1%이며 관측오차 ±10%를 반영한 경우 MAE%는 10.7%로 분석되었다. 이중 13번 링크구간(9→3)만이 22.3%로서 허용오차범위(4)를 벗어났으며 그 외 구간은 허용오차범위내에서 양호한 추정력을 보이는 것으로 분석되었다.

<표 4> 배정링크교통량의 오차분석 결과

시점 노드	종점 노드	초기 배정	관측오차 ±5%			관측오차 ±10%		
			관측 링크	배정 교통량	MAE (%)	관측 링크	배정 교통량	MAE (%)
1	5	221		219			216	
1	7	129		127			126	
2	6	223		218			214	
2	7	97		103			111	
5	3	262	249	256	3.0	236	259	9.6
5	8	13		13			20	
6	4	203	213	208	2.4	223	212	5.1
6	8	43		34			25	
7	8	226		230			237	
8	5	53		51			62	
8	6	23		23			23	
8	9	205		203			197	
9	3	83	87	83	4.1	91	71	22.3
9	4	122	116	119	2.8	134	126	5.8
			665		3.1	684		10.7

주 : 1) 굵은 실선은 관측오차가 반영된 관측링크임
2) 음영부분은 허용가능한 오차범위를 벗어나는 링크임.

2) 추정 기종점 OD행렬의 추정력 분석

<표 5>는 관측구간으로 선정된 구간의 교통량에 ±5%, ±10%의 관측교통량 오차를 적용하였을 경우 추정 기종점 OD행렬의 추정력을 분석한 결과를 나타낸 것이다.

<표 5> 추정 기종점 OD행렬의 추정력 분석결과

가점	종점	사전OD	관측오차 ±5%		관측오차 ±10%	
			추정OD	MAE (%)	추정OD	MAE (%)
1	3	210	206	1.83	197	6.08
1	4	140	139	0.57	145	3.71
2	3	135	134	0.97	132	2.12
2	4	185	188	1.54	193	4.19
		670	667	1.23	667	4.03

4) KDI(2001)의 지침에서는 관측교통량과 배정교통량과의 수락 가능한 허용오차 범위를 30%라고 명시하고 있음. 본 연구에서의 허용오차 범위는 20%를 기준으로 하여 분석하였음.

관측오차 ±5%일 때 평균 MAE%는 1.23%, 관측 오차 ±10%일 때는 4.03%로서 비교적 사전 기종점 OD행렬값을 크게 변경시키지 않고 추정되는 것으로 분석되었다.

4. 기존연구 결과와의 비교

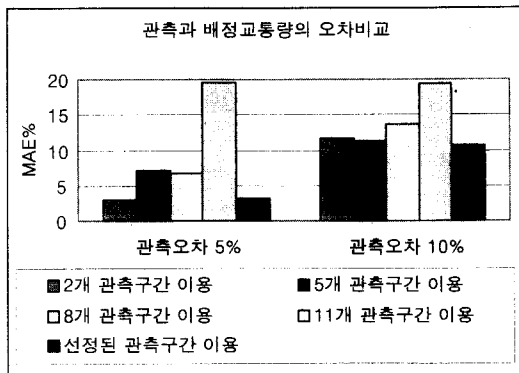
1) 관측과 배정교통량의 오차변화 비교

〈표 6〉과 〈그림 3〉은 본 연구에서 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 관측오차를 반영한 결과와 이현주,이승재(2004)의 연구에서 도출된 결과를 비교분석한 것이다. 〈표 6〉에서 보듯이 임의적으로 관측구간을 선정하여 추정된 교통량의 오차는 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 추정된 교통량의 오차보다 전반적으로 MAE% 오차가 크게 분석된 것을 알 수 있다. 즉, 관측교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정할 때 임의적으로 관측구간을 선정하여 기종점 OD행렬을 추정하기 보다는 적절한 관측구간을 선정하여 선정된 관측구간의 교통량을 이용하여 교통량을 추정하는 것이 교통량의 MAE% 오차도 줄일 수 있으며 또한 추정력을 향상시킬 수 있는 방법이라고 판단된다.

〈표 6〉 관측과 배정교통량의 오차변화 비교

관측구간 오차	임의적으로 관측구간 선정시 MAE%(*)				선정된 관측구간 이용시 MAE%
	2개	5개	8개	11개	
±5%	2.9%	7.1%	6.8%	19.6%	3.1%
±10%	11.6%	11.3%	13.7%	19.4%	10.7%

주 : (*) 이현주,이승재(2004)의 연구결과



〈그림 3〉 관측과 배정교통량의 오차변화 비교

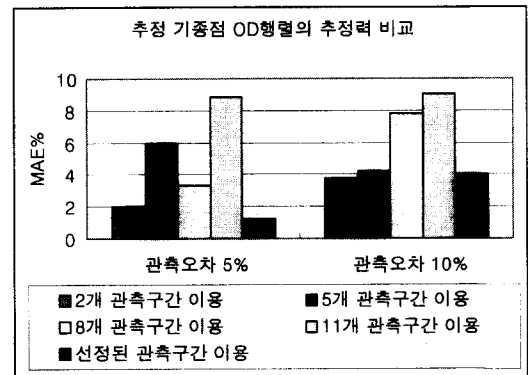
2) 추정 기종점 OD행렬의 추정력 변화 비교

마찬가지로 〈표 7〉과 〈그림 4〉는 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 관측오차를 반영한 후 기종점 OD행렬을 추정한 결과로서 이현주,이승재(2004)의 연구에서 추정된 기종점 OD행렬의 결과를 비교분석한 것이다. 결과에서처럼 임의적으로 관측구간을 선정한 교통량을 이용하여 추정한 기종점 OD행렬의 MAE%는 적절한 관측구간으로 선정된 구간의 교통량을 이용하여 추정한 기종점 OD행렬의 오차보다 크게 분석되었다. 즉 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정할 때 추정력을 극대화시키기 위해서는 적절한 관측구간의 교통량을 이용하여야 한다는 것을 암시하는 것이라고 판단된다.

〈표 7〉 추정 기종점 OD행렬의 추정력 변화비교

관측구간 오차	임의적으로 관측구간 선정시 MAE%(*)				선정된 관측구간 이용시 MAE%
	2개	5개	8개	11개	
±5%	2.0%	6.0%	3.3%	8.9%	1.2%
±10%	3.8%	4.2%	7.8%	9.0%	4.0%

주 : (*) 이현주,이승재(2004)의 연구결과



〈그림 4〉 추정 기종점 OD행렬의 추정력 변화비교

V. 결론

관측교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정할 때 적절한 관측구간을 선정한 후 선정된 구간의 교통량을 이용하여 기종점 OD행렬을 추정하는 것이 기종점 OD행렬의 추정력을 향상시키고 경제적인 효율성(관측비용 감소)을 제고하기 위한 방법이라고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 관측구간을 선정하기 위해 정수계획법을 이용하여 관측구간을 선정하는 모형식

을 제시하였으며 이 기법을 이용하여 교통량 관측구간을 선정한 후, 선정된 관측구간의 교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하였다. 또한 적절한 관측구간으로 선정된 교통량으로부터 추정된 기종점 OD행렬의 추정력을 비교분석하기 위하여 임의적으로 관측구간을 선정하여 기종점 OD행렬을 추정한 기존의 연구결과와 비교하였다. 비교분석한 결과, 적절한 관측구간을 선정하여 추정된 구간교통량 및 추정 기종점 OD행렬의 추정력이 임의적으로 관측구간의 교통량을 이용한 오차보다 더 개선되는 것으로 분석되었다. 따라서 관측교통량으로 기종점 OD행렬을 추정하기 위해서는 적절한 관측구간을 선정하여 선정된 구간의 교통량으로부터 기종점 OD행렬을 추정하는 것이 오차를 줄일수 있으며 추정력을 향상시킬수 있는 방법이라고 하겠다.

본 연구의 향후과제는 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서 교통량 관측구간을 선정하기 위하여 정수계획법을 적용하였으나 효율적이고 대규모 가로망에서도 관측구간을 선정할 수 있는 기법개발이 요구된다.

둘째, 정수계획기법에 의한 관측구간 선정은 순교통량(net flow)을 최대화하면서 선정하는 방법이나 분석 가로망에서의 중요한 관측구간은 교통량이 상대적으로 많은 구간이라고 볼 때 총교통량(total flow)을 최대화하면서 관측구간을 선정하는 방법이 필요하다.

참고문헌

1. 백승걸·임강원·이승재(1998) "기종점 추정을 위한 최적관측위치로서의 존 코드라인", 대한국토및도시계획학회지, 제33권 제6호.
2. 이승재·김종형·이헌주·장현호·변상철·최도혁(2001) "관측 TCS data 및 AADT 교통량을 이용한 기종점 교통량 보정에 관한 연구", 대한교통학회지, 제19권 제5호, 대한교통학회, pp.49~59.
3. 이승재·이헌주(2003), "기종점 수요추정을 위한 교통량 관측지점의 적정위치 선정", 대한교통학회지, 제21권 제1호, 대한교통학회, pp.53~63
4. 이헌주·이승재(2004), "Conjugate Gradient 기법을 이용한 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정 모형 개발", 대한교통학회지, 제22권 제1호, 대한교통학회, pp.43~61.
5. 이헌주(2004), 적정 관측지점 선정에 의한 관측교통량 기반 기종점 OD행렬 추정모형 개발에 관한 연구 - Conjugate Gradient Algorithm 적용을 중심으로, 서울시립대학교 박사학위 논문.
6. Bianco L. et al. (1997) "Optimal location of traffic counting points for transport network control", IFAC97.
7. Frederick S. Hiller and Gerald J. Lieberman (1997), "Introduction to Operations Research", McGraw-Hill Book Co.\
8. Hai Yang, Iida Y. and T. Sasaki (1991b) "An Analysis of the reliability of an O-D trip matrix estimated from traffic counts". Transpn. Res. 25B, pp.351~363.
9. H. Yang(1998), "Optimal traffic counting locations for O/D estimation", Transpn. Res. 25B, pp.351~363.
10. Hai Yang, Liping Gan and Wilson H. Tang (2001), "Optimal selection of cordon - screen lines in road networks for origin - destination trip studies", Transportation Science.
11. H. Yang, Liping Gan and Wilson H. Tang (2001), "Optimal selection of cordon screen lines in road networks for origin destination trip studies", Transportation Science.
12. Herbert A.David : "Order Statistics", John Wiley & Sons, Inc., 1981.
13. Lam, W.H.K. and Lo, H.P. (1990) "Accuracy of O-D estimates from traffic counts". Traffic engineering and control 31, pp.358~367.
14. Ofyar Z. Tamin, Titi L. Soedirdjo and Rudi S. Suyono(2001), "The impact of location and number of traffic counts in the accuracy of O-D matrices estimated from traffic counts". Journal of the eastern asia society for transportation studies, vol.4 No.2, pp.335~349.
15. Paul K.N.Yim and William H.K.Lam(1998). "Evaluation of count location selection methods for estimation of O-D matrices, Journal of Transportation Engineering". July

and August, pp.376~383.
16. S.Rao(1996), Engineering Optimization

(Theory and Practice Third Edition), John
Wiley & Sons.

♣ 주 작 성 자 : 이현주

♣ 논문투고일 : 2003. 11. 10

논문심사일 : 2004. 1. 9 (1차)

2004. 3. 3 (2차)

2004. 7. 1 (3차)

2004. 9. 1 (4차)

2004. 12. 8 (5차)

심사판정일 : 2004. 12. 8

♣ 반론접수기한 : 2005. 4. 30