■ 論 文 ■

교통관리시스템의 실시간 교통자료를 이용한 고속도로 동적OD 추정기법의 개발

The Development of Estimation Technique of Freeway Origin-Destination Demand Using a Real Traffic Data of FTMS

김 주 영
(서울시립대학교 교통공학과 박사과정)

이 승 재
(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

목 차

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 기존문헌 고찰 및 문제제기
1. 기존문헌 고찰
2. 문제제기 및 연구방향 설정
Ⅲ. 동적OD 추정방법론
1. 동적OD 추정모델의 구성
2. 동적 교통류 구현
3. 동적OD 추정을 위한 최적해 알고리즘
Ⅳ. 동적OD 추정모델의 적용 및 평가
1. 평가척도
2. 대상네트워크 및 수집자료
3. 동적 교통류모델의 평가
4. 동적OD 추정결과
Ⅴ. 결론 및 향후과제
참고문헌

요 약

도시고속도로 혼잡구간의 원인분석, 교통정보제공전략 수립, 진입램프 제어전략 및 효과분석 등 보다 효율적인 교통관리를 위해서는 진출입램프간 동적OD의 구축이 요구된다. 이를 위해 모든 진출입램프에 AVI 시스템을 설치하기에는 경제성 측면에서 비효율적이므로 현실 적용이 용이하고 추정력이 높은 동적OD 추정모델의 개발이 적절한 대안으로 판단된다. 본 연구는 교통관리시스템(FTMS)에서 수집되는 실시간 검지기자료를 이용한 진출입램프간 동적OD 추정기법을 개발함에 있어서 시스템 탑재를 통하여 자동적으로 동적OD 추정이 가능하고 기존 모델에 비해 추정력을 높일 수 있는 방안을 마련하는데 주 목적을 두고 있다.

기존 동적OD 추정모델의 한계점은 2가지로 요약될 수 있다. 첫째, 교통류모델에서 추정하는 시간대별 링크분포비율과 최적해 알고리즘에서 추정하는 동적OD간 상호관련성으로 동적OD 추정모델은 두 모듈간 Bi-level 문제로 접근해야 한다는 것이며, 둘째, 관측지점의 수가 추정코자 하는 OD쌍의 수보다 적기 때문에 교통량의 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 다수의 OD해가 존재하는 과소식별문제이다. 본 연구에서는 검지기에서 수집되는 교통자료(교통량, 통행속도, 점유율)를 이용하여 동적 교통류를 구현함으로써 Bi-level 문제를 해결하였으며, 동적OD 추정을 위한 목적함수를 링크 및 진출램프 교통량의 추정치와 관측치간 오차를 최소화하도록 설정함으로써 보다 많은 제약을 통하여 추정력을 높일 수 있도록 유도하였다. 본 연구에서는 동적OD 추정을 위한 최적해 알고리즘으로 유전자알고리즘을 적용하였으며, 서해안고속도로 (당진IC→군산IC)의 실제 OD 및 교통자료를 이용하여 동적OD 추정모델을 평가하였다.

The goal of this paper is to develop freeway Origin-Destination (OD) demand estimation model using real-time traffic data collected from Freeway Traffic Management System (FTMS). In existing research, the micro-simulation models had been used to get a link distribution proportion by time process. Because of bi-level problem between the traffic flow model and the optimal OD solution algorithm, it is difficult for the existing models to be loaded at FTMS. The formulation of methodology proposed in this paper includes traffic flow technique to be able to remove the bi-level problem and optimal solution algorithm using a genetic algorithm. The proposed methodology is evaluated by using the real-time data of SOHAEAN freeway, South Korea.

Ⅰ. 서론

국내 주요 고속도로는 효율적이고 체계적인 교통관리를 위해 교통관리시스템(FTMS, Freeway Traffic Mangement Systems)을 구축·운영중이며, 교통량, 통행속도, 점유율 자료를 실시간으로 수집하고 있다. 효율적인 교통관리를 위해서는 지점 및 구간단위 교통자료뿐만 아니라 기종점 교통량자료의 구축이 요구된다. 이를 위해 AVI(Automated Vehicle Identifica- tion) 시스템을 모든 진출입램프에 설치함이 바람직하나 자료의 활용성에 비해 과다한 구축 및 유지관리비용으로 경제성이 낮을 것으로 판단된다. 이에 대한 대안으로 검지기에서 수집되는 실시간 교통자료를 이용한 OD 추정모델을 개발하는 것이 적절하다. OD 추정모델은 정적모델(static model)과 동적모델(dynamic model)로 구분할 수 있다. 정적모델은 교통류를 state-space 상태로 가정하여 교통류에 대한 고려없이 OD를 추정하는 반면, 동적모델은 시간대별 교통상황에 따라 차량의 위치를 추적하는 동적교통류모델과 최적해알고리즘을 이용하여 OD를 추정하게 된다. 동적OD 추정모델은 혼잡과 같은 교통상황에 대해 고려함으로써 정적OD 추정모델보다 높은 추정력을 보일 수 있다. 또한, 교통상황의 변화에 따른 교통관리를 위해서는 일정시간 단위의 동적OD를 지속적으로 구축할 필요가 있다. 본 연구에서는 FTMS에서 수집되는 실시간 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델을 개발하는데 주목적이 있으며, 세부 내용은 다음과 같다.

(a) 시스템 탑재 가능한 동적OD 추정모델의 개발

검지기에서 수집되는 교통량, 통행속도 및 점유율을 이용하여 시간대별 링크 및 진출램프 교통량을 추정할 수 있는 새로운 교통류 구현기법을 제안하고 FTMS에 탑재가 용이한 동적OD 추정모델을 개발한다.

(b) 추정력이 높은 동적OD 추정모델 제시

정확도가 높은 동적OD를 추정하기 위한 새로운 목적함수를 제안하고 유전자알고리즘을 이용하여 동적 OD 추정모델을 구축한다.

Ⅱ. 기존문헌 고찰 및 문제제기

1. 기존문헌 고찰

동적OD 추정모델은 교통류 모델과 최적해 알고리즘으로 구성된다. 교통류 모델은 진입램프, 진출램프, 출발시간대별 차량군이 시간의 흐름에 따라 어느 정도 주행하고 있는지를 설명하는 링크분포비율을 산출하는데, 이는 시간대별 링크 교통량을 추정하는데 활용된다. 최적해 알고리즘은 시간대별 링크 교통량의 추정치와 관측치간 오차를 최소화하는 OD를 추정하게 된다.

교통량 추정치는 식(1)과 같이 계산될 수 있다.

$$\bar{v}_a^t = \sum_{dt}\sum_{ij} T_{ij}^{dt} P_{ij,dt}^{a,t} \qquad 0 \le P_{ij,dt}^{a,t} \le 1 \tag{1}$$

여기서,

$\bar{v}_a^t$: 시간대t일때 링크 a의 교통량 추정치

T_{ij}^{dt} : 진입램프에서 진출램프로 시간대동안에 출발한 교통량(OD)

$p_{ij,dt}^{a,t}$: 시간대dt동안에 진입램프j에서 진출램프로 출발한 차량군 중 시간대t일때 링크a를 주행하는 차량의 비율(링크분포비율)

기존 동적OD 추정모델은 링크교통량의 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 목적함수를 일반적으로 적용하고 있으며, 과거 OD패턴을 반영한 새로운 목적함수를 제안하기도 하였다.(Yang(1992), 임용택외(2000), 윤일수외(2003))

$$\min Z(\bar{T}_{ij}^t) = \frac{1}{2}\sum_a (v_a^t - \bar{v}_a^t)^2 + \gamma \frac{1}{2}\sum_{ij}(T_{ij} - \bar{T}_{ij})^2 \tag{2}$$

여기서,

$\bar{T}_{ij}$: 진입램프i 에서 진출램j프로의 OD 추정치

T_{ij} : 진입램프i 에서 진출램프j로의 과거 OD

γ : 과거 통행OD의 신뢰성을 반영하는 변수

1) 교통류 모델(Traffic Flow Model)

시간대의 진행에 따른 차량군의 이동 정도를 설명하는 링크분포비율을 추정하기 위해서는 동적 교통류모델이 동적OD 추정모델에 포함되어야 한다. 기존 문헌에서는 일반적으로 교통시뮬레이션모형(CORSIM, PARAMICS,INTEGRATION,AIMSUN,MITSIM 등)을 적용하고 있으며, 강정규(1996)는 상하류부 링크의 밀도에 근거하여 교통류의 감속과 가속상태를 동적으로

표현하기 위한 2차원의 교통량-밀도의 관계식인 마코프구획모델(MARCOM)을 적용하여 동적OD 추정모델을 제안하였다. 교통시뮬레이션모델 및 교통류이론을 이용하여 동적 교통류를 구현하기 위해서는 진출입램프간 OD정보가 사전에 입력되어야 하는 문제점이 있다.

2) 최적해 알고리즘(Optimal Solution Algorithm)

기존 동적OD 추정모델에서 링크 교통량의 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 OD를 추정하기 위한 최적해 알고리즘으로 베이지안기법, 최소자승법, 칼만필터, 유전자알고리즘 및 QUEENSOD 등 다양하게 제시되어 왔다.

베이지안기법(Baysian Approach)은 교통량 관측치와 추정치 모두 다변량 정규성을 가지는 것으로 가정하여 링크 교통량과 진출입램프간 OD간의 관계식을 베이즈의 정리를 적용한 기법으로 Maher(1983)에 의해 최초로 제안되었다. 이후 Van der Zijpp(1996)은 베이지안 기법 및 칼만필터를 이용하여 동적OD를 추정하였다.

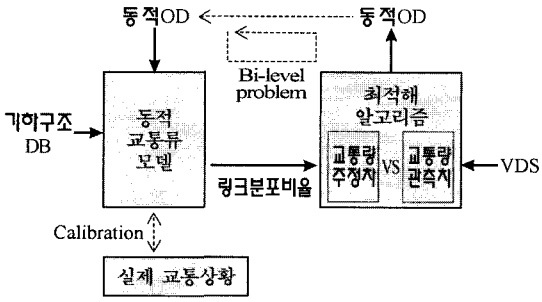
일반화 최소자승법(General Least Square)은 교통량 관측치와 추정치간의 오차를 최소화하는 OD를 추정하는 알고리즘으로 Cremer and Keller(1987), Nihan and Davis(1987)에 의해 제안되었다.

칼만필터기법은 동적시스템에서 순환반복적인 계수추정모델로 시간대별 OD의 변화를 설명하는 상태식(state equation)과 OD와 관측된 교통량과의 관계를 설명하는 관측식(measurement equation)으로 구성된다. Nihan and Davis(1987)는 칼만필터를 이용한 동적OD 추정모델이 gradient기법에 비해 빠른 수렴속도를 보인다고 제시하였다. Okutani(1987)는 소규모 네트워크의 동적OD를 추정하기 위해 칼만필터를 적용한 결과 교통량 관측지점이 많을수록 더 좋은 추정결과를 보인다고 제시하고 있다. 이후에 Ashok and Ben Akiva(1996), Hu(1996) 등이 칼만필터를 적용하였는데, 특히 Hu는 칼만필터 상태방정식에 교통상황에 따른 운전자의 반응을 고려한 동적OD 추정모델을 제안하였다.

유전자알고리즘은 적합도 검사(Fitness Test), 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 과정을 반복하여 적합도가 가장 좋은 최적해를 도출하는데, 재생산 과정에서 지정된 전략에 따라 새로운 세대를 발생시키고, 교배과정을 통하여 새로운 염색체를 형성한다. 또한, 돌연변이를 통하여 모체의 성질과는 전혀 다른 새로운 개체를 발생시킴으로써 광범위한 영역탐색을 통하여 광역해(groval solution)에 수렴할 수 있도록 유도한다. 임용택 외(2000)는 유전자 알고리즘의 재생산 규칙으로 엘리트 보존방법과 랭킹방법을 결합하여 목적함수 값이 우수한 상위 개체의 일정비율을 다음 세대에 그대로 복제하는 방법으로 정적OD를 추정하였다. 윤일수 외(2003)는 유전자알고리즘을 이용한 동적OD 추정모델을 제안한 결과, 대규모 네트워크 및 혼잡상태의 네트워크에 매우 효율적인 것으로 평가하고 있다. Van Aerde(1993)는 해당 시간대내에 반복적인 접근기법(Iterative approach)을 통하여 링크 교통량의 관측치와 추정치의 오차를 최소화하는 QUEENS-OD모델을 제안하였다.

2. 문제제기 및 연구방향 설정

기존 동적OD 추정모델의 한계점은 크게 2가지로 요약될 수 있다. 첫째, 교통류모델과 최적해 알고리즘간 Bi-level 문제이다. 기존 모델은 링크분포비율을 산출하기 위해 대부분 교통 시뮬레이션모델을 이용하였는데, 이 경우 사전에 OD가 입력되어야 한다. 교통류모델에 초기 입력된 OD값은 링크분포비율에 영향을 주고, 링크분포비율은 최적해 알고리즘에 전달되어 링크 교통량 추정치에 영향을 주고, 결국 최종 결과물인 동적OD에 영향을 주는 순환고리형의 관계를 가진다. 따라서, 동적OD 추정과정은 초기 입력된 OD와 최종 추정된 OD간 오차를 줄이기 위해 Bi-level 문제로 접근해야 한다. 본 연구에서는 교통류모델과 최적해 알고리즘간 Bi-level 문제를 해소할 수 있는 새로운 교통류기법을 제안코자 한다.



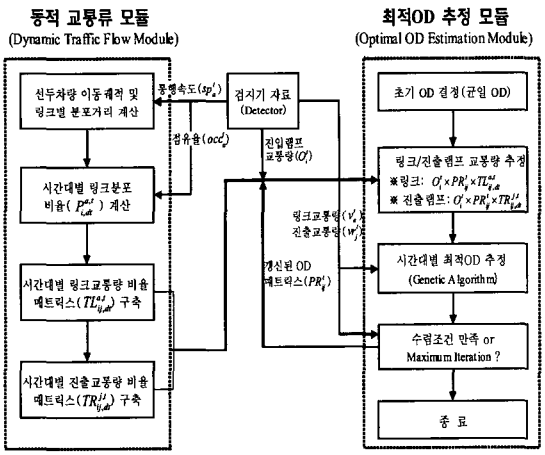
〈그림 1〉 기존 동적OD 추정모델의 Bi-level Problem

둘째, 교통량 관측지점의 수가 진출입램프간 OD쌍의 수보다 적기 때문에 동적OD 추정은 결국 과소식별문제(undetermined problem)로 귀결된다(Nihan and Davis (1987)). 이는 동적OD 추정력를 저하시키는 주요 원인으로 가능한 많은 제약을 통하여 추정력을 높이는게 중요하다. 본 연구에서는 목적함수의 재구성을 통하여 동적OD 추정모델의 정확도를 제고하고자 한다.

Ⅲ. 동적OD 추정방법론

1. 동적OD 추정모델의 구성

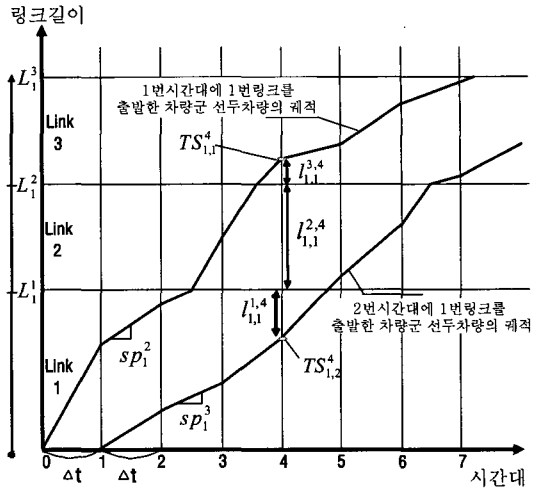
제안된 동적OD 추정모델은 동적 교통류모듈과 동적 OD 추정모듈로 구성된다. 동적 교통류모듈은 시간대별 링크분포비율을 산정하여 동적OD 추정모듈에 전달하며, 동적OD 추정모듈은 링크분포비율을 이용하여 교통량을 추정하고, 교통량의 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 동적OD를 추정하게 된다.



〈그림 2〉 동적OD 추정모델의 구성

2. 동적 교통류 구현

동적OD 추정모델을 FTMS에 탑재하여 자동적으로 OD를 추정하기 위해서는 기존 동적OD 추정모델의 한계점인 Bi-level 문제를 해결할 수 있는 새로운 교통류 구현기법의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 검지기에서 실시간으로 수집되는 교통량, 통행속도, 점유율의 관측치를 이용하여 시간대별 차량의 이동궤적을 추적함으로써 링크분포비율을 추정할 수 있는 새로운 교통류 구현기법을 제안한다. 제안된 모형은 연속류의 거시적



〈그림 3〉 평균통행속도를 이용한 차량궤적 Diagram

(Macro-scopic) 교통류 모델에 근간을 두고 있으며 몇 가지 가정을 전제로 한다.

가정1 : 검지기가 위치한 셀내의 모든 차량은 셀내 평균 통행속도로 동일하게 주행하며, 셀내 전체의 밀도가 균일한 교통상태임

가정2 : 본선상의 링크를 주행하는 차량은 First-In First-Out(FIFO) 조건을 만족함

가정3 : 동일한 시간대에 동일한 진입램프를 출발한 차량군은 선두차량과 후미차량의 사이 구간내 셀별 점유율에 비례하여 차량이 분포함

〈그림 3〉는 검지기에서 수집된 시간대별 링크의 평균통행속도를 이용하여 차량군별 선두차량의 위치궤적을 표현하고 있다. 링크별, 시간대별 차량궤적의 기울기는 평균통행속도를 의미하며, 각 시간대 간격 동안 선두차량이 이동 가능한 거리(S_a^t)는 차량이 위치한 링크의 평균통행속도(sp_a^t)와 시간대 간격($\triangle t$)의 곱으로 표현할 수 있다.

$$S_a^t = sp_a^t \times \triangle t \tag{3}$$

소통원활한 경우, 차량군은 한 시간대 간격동안 2개 이상의 링크를 통과할 수 있으므로, 차량군이 해당시간대내에 각 링크의 종점부를 통과하는지 여부를 판단하는 루틴이 교통류 모델에 반영되어야 한다. 선두차량 이동궤적의 계산방법은 다음과 같다.

• 차량군별 선두차량의 이동궤적 산출

Step1 : 해당 링크의 통과여부 판단

$$If \quad S_a^t > L_i^a - TS_{i,dt}^{t-1}, \quad Go\ to\ Step\ 2$$

$$Else \quad TS_{i,dt}^t = TS_{i,dt}^{t-1} + S_a^t, \quad Stop \qquad (4)$$

여기서, L_i^a : 진입램프i에서 링크a 까지의 거리

$TS_{i,dt}^t$: 시간대dt 동안에 진입램프i를 출발한 차량군의 선두차량이 시간대t에 위치하는 지점까지의 누적통행거리

Step2 : 다음 링크$(a+1)$에서 주행 가능한 잔여시간 갱신

$$\triangle t' = \triangle t - \frac{L_i^a - TS_{i,dt}^{t-1}}{sp_a^t} \qquad (5)$$

Step3 : 다음 링크의 통과여부 판단

$$If \ L_i^a + \triangle t' \times sp_{a+1}^t > L_i^{a+1}, \ Go\ to\ Step\ 4$$

$$Else \ TS_{i,dt}^t = L_i^a + (\triangle t' \times sp_{a+1}^t), \ Stop \qquad (6)$$

Step4 : 다음 링크$(a+n)$에서 주행 가능한 잔여시간 갱신하고, 다음 링크에 대해 Step3을 수행

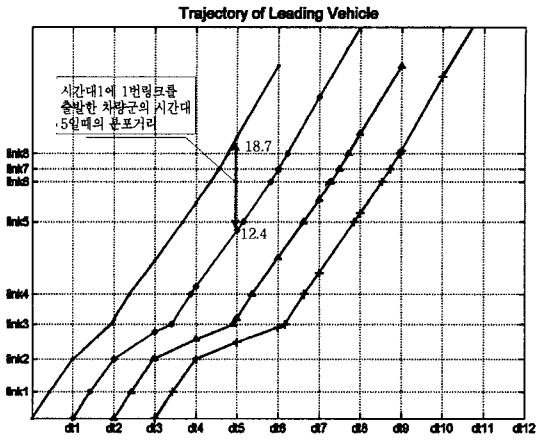
$$\triangle t'^{\,n} = \triangle t'^{\,(n-1)} - \frac{L_i^{a+n}}{sp_{a+n}^t} \qquad (7)$$

• 차량군별 링크분포거리의 산출

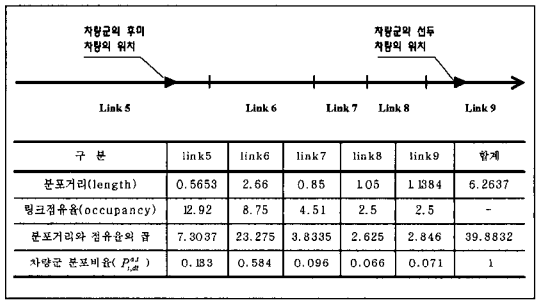
선두차량의 이동궤적을 계산한 후 링크별 분포거리를 산정한다. 링크별 분포거리는 차량군별 선두차량의 위치과 후미차량의 위치를 이용하여 산정하는데, 후미차량의 위치는 다음 출발시간대 차량군 선두차량의 위치와 동일한 것으로 가정한다. 진입램프i를 시간대dt동안 출발한 차량군이 시간대t일때 링크a에 분포되어 있는 거리$(l_{i,dt}^{a,t})$는 식(8)과 같이 산출된다.

$$\begin{aligned}
&If \ TS_{i,dt}^t \le L_i^a \ \text{and} \ TS_{i,dt+1}^t > L_i^{a-1} \\
&\quad l_{i,dt}^{a,t} = TS_{i,dt}^t - TS_{i,dt+1}^t \\
&If \ TS_{i,dt}^t > L_i^a \ \text{and} \ TS_{i,dt+1}^t > L_i^{a-1} \\
&\quad l_{i,dt}^{a,t} = L_i^a - TS_{i,dt+1}^t \\
&If \ TS_{i,dt}^t \le L_i^a \ \text{and} \ TS_{i,dt+1}^t \le L_i^{a-1} \\
&\quad l_{i,dt}^{a,t} = TS_{i,dt}^t - L_i^{a-1} \\
&If \ TS_{i,dt}^t > L_i^a \ \text{and} \ TS_{i,dt+1}^t \le L_i^{a-1} \\
&\quad l_{i,dt}^{a,t} = L_i^a - L_i^{a-1}
\end{aligned} \qquad (8)$$

링크분포비율은 각 링크별 분포거리$(l_{i,dt}^{a,t})$와 점유율(Occ_a^t)의 곱에 비례하는 것으로 가정한다.



〈그림 4〉 진입시간대별 선두차량의 궤적(예)



구 분	link5	link6	link7	link8	link9	합계
분포거리(length)	0.5653	2.66	0.85	1.05	1.1384	6.2637
링크점유율(occupancy)	12.92	8.75	4.51	2.5	2.5	-
분포거리와 점유율의 곱	7.3037	23.275	3.8335	2.625	2.846	39.8832
차량군 분포비율($P_{i,dt}^{a,t}$)	0.183	0.584	0.096	0.066	0.071	1

〈그림 5〉 차량군의 링크분포비율 산정방법(예)

$$P_{i,dt}^{a,t} = \frac{l_{i,dt}^{a,t} \times Occ_a^t}{\sum_{a \in A}\left(l_{i,dt}^{a,t} \times Occ_a^t\right)} \qquad (9)$$

차량군별 링크분포비율을 계산하기 위해 밀도자료를 활용함이 바람직하지만, 링크별 밀도를 실시간으로 수집하기에는 어려움이 있으므로, 검지기에서 수집되는 점유율 자료로 대체 적용토록 한다.

〈그림 4〉는 실제 검지기자료를 이용하여 차량의 이동궤적을 산출한 예를 보여주고 있다. 차량의 이동궤적의 기울기는 시간대별, 링크별 검지기에서 수집되는 통행속도값이며, 각 셀별로 상이한 값이 적용되고 있음을 알 수 있다. 〈그림 5〉는 〈그림 4〉에서 1번 시간대에 1번 링크를 출발한 차량군에 대해 시간대 5일때 링크분포비율을 계산하는 예를 보여주고 있다.

링크분포비율을 계산하기 위해 진출입램프간 OD정보가 사전에 요구되지 않기 때문에 기존 동적OD 추정모델의 근본적인 한계점으로 지적되는 동적 교통류모듈과 동적OD 추정모듈간 Bi-level의 문제점을 해결할 수 있다. 즉, 최적해 알고리즘에 의해 추정된 동적OD

의 값이 갱신되더라도 본 교통류 모델에 의해 추정된 링크분포비율은 변화하지 않기 때문에 단 한번의 컴퓨터 프로그램을 수행함으로써 해당시간대의 동적OD를 추정 가능하게 한다. 따라서, 동적OD 추정의 계산시간을 절감할 수 있는 장점이 있다.

2. 동적OD 추정을 위한 최적해 알고리즘

1) 목적함수의 구성

일반적으로 동적OD 추정모델의 목적함수는 링크 혹은 진출램프의 교통량 등 단일함수의 추정치와 관측치 간의 오차를 최소화하는 비선형 볼록형태(nonlinear convex)가 이용되었다. 동적OD 추정모델은 교통량 관측지점의 수가 OD의 쌍보다 적기 때문에 목적함수를 만족하는 다수의 OD해가 존재하여 유일해 문제로 접근하기 어렵고(Nihan and Davis(1989)), 실제 OD와 오차가 큰 OD를 추정하는 오류를 범할 우려가 있다. Yang(1992)은 이와 같은 문제를 개선하기 위해 식(2)와 같이 과거OD와 링크교통량 관측치의 가중 결합형태의 목적함수를 제안하였는데, 시간대별 통행패턴의 변화가 큰 고속도로의 경우 추정된 OD의 신뢰성이 저하될 수 있는 단점을 내포하고 있다. 본 연구에서는 식(10)과 같이 링크 및 진출램프교통량의 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 새로운 목적함수를 적용하였다.

$$\min\ Z=\frac{1}{2}\sum_{a}(\bar{v}_a^t-v_a^t)^2+\frac{1}{2}\sum_{j}(\overline{vr}_j^t-vr_j^t)^2 \quad (10)$$

여기서,

$\bar{v}_a^t$, v_a^t : 시간대t 일때 링크a 의 교통량 추정치와 관측치

$\overline{vr}_j^t$, vr_j^t : 시간대t 일때 진출램프j 의 교통량 추정치와 관측치

2) 교통량 추정치 및 관측치

링크 및 진출램프 교통량의 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 동적OD를 추정하기 위해서는 교통류모듈에서 계산한 링크분포비율을 이용하여 시간대별 교통량을 추정하여야 한다. 동적OD 추정모듈에서 OD의 초기치가 설정되면 진입교통량과 OD비율을 이용하여 링크 및 진출램프 교통량을 추정할 수 있다.

• 링크 교통량 추정

링크 교통량은 링크, 진입램프 및 진출램프 번호부여방식(〈그림 6〉참조)에 근거하여, 해당 링크 상류부의 모든 진입램프와 하류부의 모든 진출램프에 대해 링크분포비율, 진입교통량 및 OD비율을 이용하여 식(11)과 같이 추정될 수 있다.

$$\bar{v}_a^t=\sum_{i<a}\sum_{j>a}\sum_{dt}(P_{i,dt}^{a,t}\times O_i^{dt}\times PR_{ij}^{dt}) \quad (11)$$

여기서,

$\bar{v}_a^t$: 시간대t일때 링크a의 교통량 추정치

$P_{i,dt}^{a,t}$: 시간대dt에 진입램프i를 출발한 차량군이 시간대t일때 링크a에 분포하는 비율

O_i^{dt} : 시간대dt에 진입램프i를 출발한 교통량

PR_{ij}^{dt} : 시간대dt에 진입램프i에서 진출램프j로의 OD비율

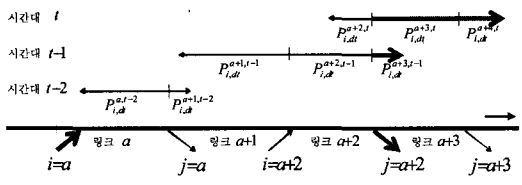
• 진출램프교통량 추정

제안된 교통류 구현기법에서 추정되는 링크분포비율은 특정한 목적지 정보가 반영되지 않은 값으로 차량군별 이동가능한 비율을 의미한다. 따라서, 링크와 진출램프간 번호부여체계에 근거하여 특정 진출램프 하류부의 모든 링크에 분포하는 비율만큼 진출한 것으로 판단할 수 있다. 〈그림 6〉에서와 같이, 진출램프 교통량($\overline{vr}_j^t$)은 시간대t동안 진출램프j의 모든 하류부 링크의 총분포비율 증가분만큼 진출한 것으로 볼 수 있으며, 식(12)와 같이 계산된다.

$$\overline{vr}_j^t=\sum_{i}\sum_{dt}\left[(O_i^{dt}\times PR_{ij}^{dt})\times\left(\sum_{a>j}P_{i,dt}^{a,t}-\sum_{a>j}P_{i,dt}^{a,t-1}\right)\right] \quad (12)$$

여기서,

$\overline{vr}_j^t$: 시간대t일때 진출램프j로 진출하는 교통량 추정치



〈그림 6〉 시간대별 링크분포비율

• 교통량 관측치의 보정

동적OD 추정을 위해서는 교통량의 관측치와 추정치를 동일한 기준으로 비교해야 하는데, 교통류모델에 의한 교통량 추정치는 해당 링크내에 위치하고 있는 밀도 개념의 교통량이므로, 검지기에서 수집되는 지점교통량을 밀도 개념의 구간교통량으로 보정하여야 한다.

밀도는 검지기에서 수집되는 점유율값에 비례하는 것으로 가정하며 셀내에 위치하고 있는 교통량은 셀 길이, 점유율 및 차로수의 곱으로 계산할 수 있다.

$$v_a^t = \lambda \times \sum_{k \in a} (D_k^t \times L_k \times C_k) \qquad (13)$$

여기서,

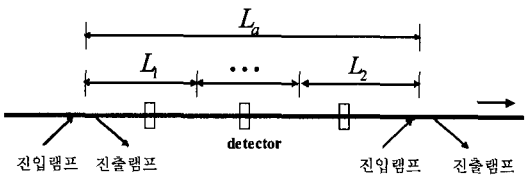
v_a^t : 시간대t일때 링크a를 주행하고 있는 교통량 관측치

D_k^t : 시간대t일때 셀k의 점유율

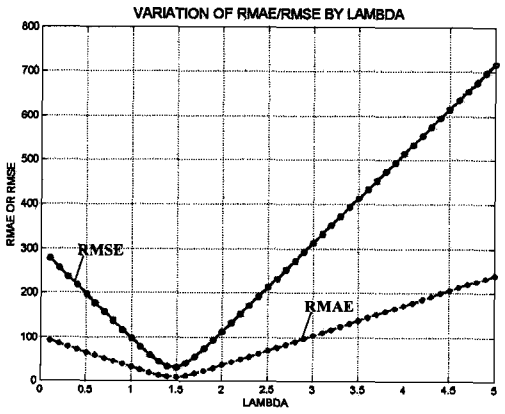
L_k : 셀k의 길이

C_k : 셀k의 차로수

λ : 밀도와 점유율의 관계를 나타내는 변수



〈그림 7〉 링크내 셀의 구성



〈그림 8〉 λ 값에 따른 링크 교통량 추정치와 관측치간 오차의 변화

λ는 검지기가 위치한 셀별로 밀도값과 점유율값을 이용하여 계산함이 바람직하지만 밀도를 조사하기에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 서해안 고속도로의 실제 OD와 링크분포비율을 이용하여 λ값의 변화에 따른 링크 교통량의 관측치와 추정치간의 오차(RMSE, RMAE)를 분석하고, RMAE 및 RMSE가 최소가 되는 λ값인 1.5를 적용하였다.

3) 유전자알고리즘을 이용한 동적OD 추정모델의 구축

유전자알고리즘은 John Holland(1975)에 의해 처음으로 개발된 이후에 최적화 문제에 자주 이용되는데, 동적OD 추정과 같이 수학적인 함수로 표현이 다소 어려운 확률적인 시스템에 근거한 교통분야에 많이 이용된다. 유전자 알고리즘은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 세 가지 과정을 반복함으로써 최적해를 도출하는 전역 탐색알고리즘으로 비선형 비볼록(nonlinear nonconvex)형태의 목적함수를 풀기에 적절한 알고리즘이다. 유전자 알고리즘을 이용한 동적OD 추정방법은 다음과 같다.

• 염색체의 구성

유전자의 모집단 수는 1,000개로 설정하였으며, 각 유전자의 열벡터는 전체 시간대의 OD 비율이 모두 나열되므로 〔시간대 크기×OD쌍의 수, 1000〕 크기의 행렬로 구성된다.

$$\begin{array}{l} \\ \text{시간대1} \\ \\ \\ \text{시간대2} \\ \\ \\ \vdots \\ \\ \end{array} \begin{bmatrix} b_{11,1}^1 & b_{11,1}^2 & \cdots & b_{11,1}^{999} & b_{11,1}^{1000} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ b_{99,1}^1 & b_{99,1}^2 & \cdots & b_{99,1}^{999} & b_{99,1}^{1000} \\ \hline b_{11,2}^1 & b_{11,2}^2 & \cdots & b_{11,2}^{999} & b_{11,2}^{1000} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ b_{99,2}^1 & b_{99,2}^2 & \cdots & b_{99,2}^{999} & b_{99,2}^{1000} \\ \hline b_{11,3}^1 & b_{11,3}^2 & \cdots & b_{11,3}^{999} & b_{11,3}^{1000} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ b_{99,20}^1 & b_{99,20}^2 & \cdots & b_{99,20}^{999} & b_{99,20}^{1000} \end{bmatrix}$$

유전자 2 유전자 2 유전자 999 유전자 1000

• 선택(Select) 및 정렬(Sorting)

동적OD 추정모델에서는 한 유전자내에 모든 시간대의 OD비율 염색체가 나열된다. 본 연구에서는 각 유전자의 염색체에 대해 시간대 단위로 재분류하여 적합도 검사를 수행하고 선택 및 정렬시키는 기법을 적용하였다. 프로그램을 구축하여 유전자 단위의 우수 염색체를 선택하는 기법에 비해 수렴속도 및 성능이 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

• **교배(Cross-over)**

염색체간 교배방식은 여러 유형이 있는데, 본 논문에서는 적합도가 가장 높은 염색체와 각 개별 염색체의 평균값을 적용하였으며, 교배율은 50%로 설정하였다.

• **돌연변이(Mutation)**

돌연변이는 추정된 값이 국지해에 해당되는 것을 방지하기 위하여 임의의 값을 설정토록 하는 과정이다. 유전자의 한 염색체가 변경될 경우, 동일한 시간대, 동일한 진입램프인 타 염색체에 영향을 주게 되므로 큰 변화를 수반하는 돌연변이과정은 오히려 적합도를 저하시키는 결과를 초래할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 돌연변이 발생유형을 2가지로 구분하였는데, 첫째, 일정비율(8%) 이하의 염색체에 대해 해당 진입램프 및 출발시간대에 근거하여 진출시간대를 추정하고, 추정된 진출시간대의 진출램프교통량 추정치 대비 관측치의 비율만큼 조정함으로써 근사적으로 적합도를 조정하는 기법을 선택하였으며, 둘째, 일정비율(2%) 이하의 염색체에 대해 난수를 발생시켜 임의의 값을 적용토록 하였다.

• **유전자 알고리즘을 이용한 동적OD 추정절차**

【step 0】 초기화(Random Generation)

(1) set parameter : 돌연변이 확률(mutation ratio)
최대 반복수(maximum itetion)
세대수 ($n=1$)

(2) 염색체 $b_n[m][dt,ij]$에 대해 임의 값 부여
- n번째 세대, m번째 유전자에 대해 시간대dt에 진입램프i에서 진출램프j로의 통행비율 염색체 값을 부여

$(0 \le b_n[m][dt,ij] \le 1)$

(3) 초기 염색체 값에 대한 선택확률값 변환

$$b_n^*[m][dt,ij]=\frac{b_n[m][dt,ij]}{\sum_j b_n[m][dt,ij]},\ \forall i,j,dt \quad (14)$$

여기서, $\sum_j b_n^*[m][dt,ij]=1.0\ \forall i,dt$

【step 1】 적합도 검사(Fitness Calculation)

(1) 통행비율$b_n[m][dt,ij]$를 이용하여 출발시간대별 진출입램프간 통행량$T_n[m][dt,ij]$ 계산

$$T_n[m][dt,ij]=b_n[m][dt,ij]\times O_i^{dt} \quad (15)$$

(2) 링크 교통량 추정치($\bar{v}_a^t$) 및 진출램프 교통량 추정치($\overline{vr}_j^t$) 계산
- 식(11)과 식(12)를 이용

(3) 유전자별 적합도(Fitness) 계산
- 목적함수에 교통량 추정치와 관측치 대입을 통하여 적합도를 계산

(4) 적합도 선택 및 정렬(Selecting and Sorting)
- 각 유전자별 시간대 단위의 염색체 집단에 대한 적합도 서열을 부여하며, 시간대 단위로 적합도가 낮은 유전자를 선택

【step 2】 교배(Cross-over)

(1) 선택된 유전자 중 적합도가 가장 높은 유전자의 염색체와 각 유전자의 염색체의 중간값을 선택하게끔하여 새로운 유전자를 구성

$$b_{n+1}^*[m][dt,ij][m][dt,ij]$$
$$=\alpha b_n^*[1][dt,ij]+(1-\alpha)b_n^*[m][dt,ij] \quad (16)$$

여기서,$b_n^*[1][dt,ij]$:적합도값이 가장 작은 유전자
α :조정변수(0.5)

【step 3】 돌연변이(Mutation)

(1) 각 유전자 $b_{n+1}^*[m][dt,ij]$별로 (0,1)사이의 난수 R을 발생

(2) $R \le mutation\ ratio$인 경우, 각 유전자 $b_{n+1}^*[m][dt,ij]$에 대해 (0,1) 사이의 새로운 난수를 발생

【step 4】 적합도 검사(Fitness Calculation)

(1) $n+1$세대의 $b_{n+1}^*[m][dt,ij]$를 이용한 $T_{n+1}[m][dt,ij]$ 를 계산
$T_{n+1}[m][dt,ij]=X_{n+1}[m][dt,ij]\times O_i^{dt}$

(2) 링크 교통량 추정치($\bar{v}_a^t$) 및 진출램프 교통량 추정치($\overline{vr}_j^t$) 계산

(3) 유전자별 적합도(Fitness) 계산

(4) 적합도 정렬(Fitness Sorting)

【step 5】 수렴조건 만족여부 검사(Stopping Criteria)

(1) 최대 반복횟수(100)을 초과할 경우 정지

(2) 각 유전자별 적합도의 변화가 없는 경우 정지

$$\frac{Best_Fitness^{n-5} - Best_Fitness^{n}}{Best_Fitness^{n-5}} \leq 0.00001$$

and

$$\frac{Mean_Fitness^{n} - Best_Fitness^{n}}{Best_Fitness^{n}} \leq 0.00001 \quad (17)$$

여기서, $Best_Fitness^{n}$: n 세대에서의 최적의 적합도값

$Mean_Fitness^{n}$: n 세대에서의 모든 해의 평균 적합도값

n : 세대수 (n>10)

(3) 수렴조건을 만족하지 않을 경우 【step 2】로 이동

Ⅳ. 동적OD 추정모델의 적용 및 평가

1. 평가척도

OD 관측치와 추정치간의 비교를 위해 일반적으로 활용되는 효과척도로는 SSE(Sum of Squared Error), RMSE(Root Mean Square Error), RMAE(Relative Mean Absolute Error) 등이 있다. 각 효과척도별 계산식은 다음과 같다.

$$SSE = \sum_{a}\sum_{t}(v_a^t - \bar{v}_a^t)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(v_a^t - \bar{v}_a^t)^2} \quad (18)$$

$$RMAE = \left(\frac{\sum|\bar{v}_a^t - v_a^t|}{\sum v_a^t}\right)\times 100$$

2. 대상네트워크 및 수집자료

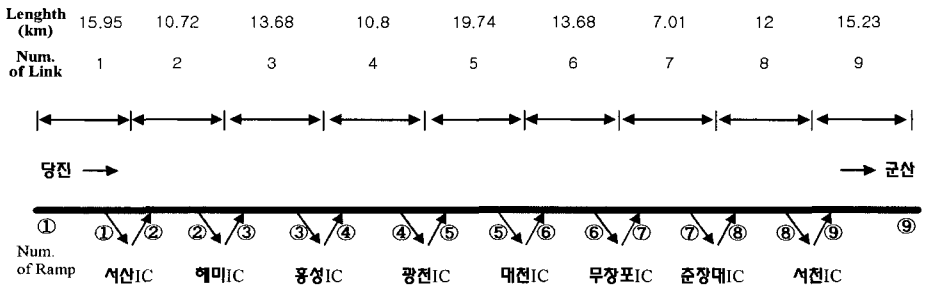
고속도로 동적OD 추정모델을 평가하기 위한 대상구간은 진출입램프간 실제 OD 수집이 용이한 서해안고속도로(당진IC→군산IC, 119km)를 선정하였다. 〈그림 9〉에서와 같이 대상구간은 각 9개씩의 진입부, 진출부 및 링크로 구성되어 있다. '05.2.5(토) 14:00~19:00 동안의 TCS 및 검지기 자료를 이용하여 진출입램프간 OD 및 통행시간, 링크별 교통량, 통행속도 및 점유율 자료를 수집하였다. 시간대 간격(time slice)은 15분으로 설정하였다.

3. 동적 교통류모델의 평가

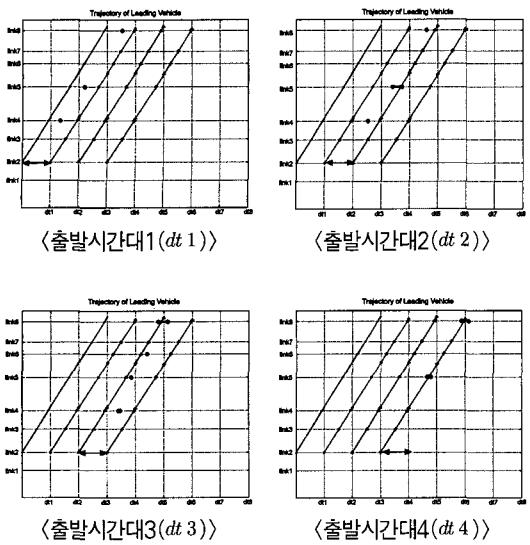
고속도로 검지기에서 수집되는 통행속도 및 점유율을 이용한 동적 교통류모델은 MATLAB(version 6.5)을 이용하여 구현하였다. 동적 교통류의 평가를 위해 링크 및 진출램프교통량, 진출입램프간 통행시간에 대해 추정치와 관측치의 비교를 수행하였다.

1) 기종점간 통행시간 추정력의 평가

검지기에서 수집되는 통행속도와 점유율을 이용하여 차량군의 링크분포비율을 추정하는 동적 교통류모듈의 평가를 위해 기종점간 통행시간의 추정치와 실측치를 비교하였다. 〈그림 10〉은 서해안고속도로 해미IC에서 목포방면으로 출발한 차량에 대해 시간대 1(dt1,14:00~14:15)에서 시간대4(dt4,14:45~15:00) 사이에 출발한 차량군의 궤적을 도시하고 TCS에서 수집된 해미IC에서 각 진출램프간 최소통행시간과 최대통행시간(점으로 표시)의 실측치를 도시한 것이다. '실제 진출입



〈그림 9〉 대상 네트워크



〈출발시간대1(dt 1)〉 〈출발시간대2(dt 2)〉

〈출발시간대3(dt 3)〉 〈출발시간대4(dt 4)〉

〈그림 10〉 진출입램프간 통행시간 추정에 대한 평가

램프간 통행시간이 대체적으로 차량궤적을 이용한 예상 통행시간범위에 포함되고 있어 추정력이 양호한 것으로 평가된다.

2) 링크 및 진출램프 교통량 추정력의 평가

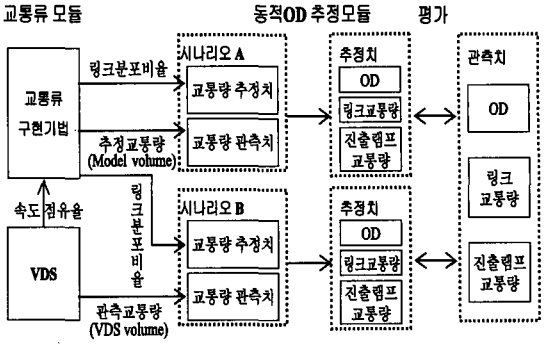
링크 교통량의 추정치와 관측치를 비교한 결과, 대부분의 시간대 및 링크에 대해 RMAE 값이 10% 이하인 것으로 분석되어 링크교통량의 추정력은 양호한 것으로 나타났다. 반면, 진출램프 교통량의 경우 링크 교통량에 비해 관측치와 추정치의 RMAE 값이 높은 것으로 나타났다. 이는 진출램프 교통량은 링크 교통량과는 달리 개별차량의 통행속도 차이에 대한 민감도가 크기 때문에 상대적으로 높은 RMAE의 값을 가지는 것으로 판단된다. 전체 시간대별 링크별 교통량 관측치와 추정치의 RMAE는 7.6%, RMSE는 약 30대 수준이며, 진출램프 교통량은 RMAE가 약 9.4%, RMSE가 6.2대 수준으로 나타나 양호한 결과를 보이고 있다.

〈표 1〉 링크 및 진출램프교통량의 추정치와 관측치 비교

링크교통량		진출램프교통량	
RMSE	RMAE(%)	RMSE	RMAE(%)
30	7.6	6.2	9.4

4. 동적OD 추정결과

동적OD 추정모델을 평가하기 위해서는 교통류모듈



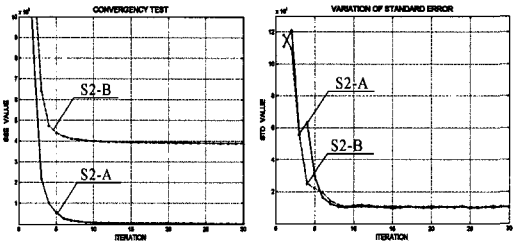
〈그림 11〉 동적OD 추정모델의 평가방법

〈표 2〉 동적OD 추정결과

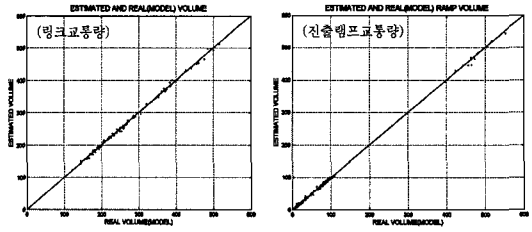
유형	관측치 적용교통량	분석척도	OD	링크 교통량	진출램프 교통량
링크 교통량 기반 (S1)	교통류모듈 추정치 (S1-A)	SSE	1.49E+05	1.06E+04	-
		RMAE(%)	35.3	2.4	-
		RMSE	10.7	8.8	-
	검지기 실측치 (S1-B)	SSE	3.46E+05	5.27E+04	-
		RMAE(%)	50.5	4.8	-
		RMSE	16.4	69.8	-
링크 및 진출램프 교통량 기반 (S2)	교통류모듈 추정치 (S2-A)	SSE	5.74E+04	4.01E+03	2.23E+03
		RMAE(%)	18.1	1.4	3.1
		RMSE	6.7	5.3	4.0
	검지기 실측치 (S2-B)	SSE	7.95E+04	7.81E+04	3.42E+04
		RMAE(%)	23.8	6.1	8.1
		RMSE	7.8	71.8	13.2

에서 발생하는 오차와 동적OD 추정모듈에서 발생하는 오차에 대해 고려할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 동적OD 추정모듈에서 교통량 관측치 적용시 검지기에서 수집된 교통량을 적용한 경우(교통류 구현시 발생하는 오차를 반영)와 교통류 구현기법에 의해 추정된 교통량을 적용한 경우(교통류 구현시 발생하는 오차를 배제)로 구분하여 분석하였다.

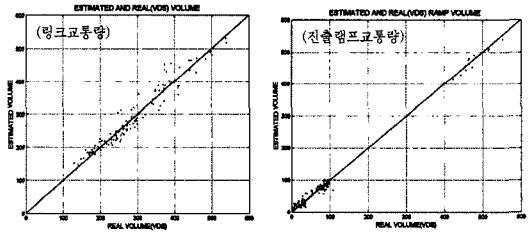
〈표 2〉는 유전자알고리즘을 이용한 동적OD 추정모델 중 링크교통량 기반 추정기법(S1)과 링크 및 진출램프교통량 기반 추정기법(S2)간 분석결과를 비교한 것이다. 전자에 비해 후자가 실제OD에 더욱 근접한 결과를 보여주고 있는데, 전자의 경우 진출램프 교통량에 대한 제약이 전혀 반영되지 않음에 따라 특정 진출램프의 경우 실측치와 오차가 큰 OD가 추정되는 것으로 분석되었다. 2가지 기법 모두 최적해알고리즘의 교통량 관측치에 교통류모델에서 추정한 교통량을 적용한 경우가 VDS 실측치를 적용한 경우에 비해 더욱 좋은 결과를 보여주고 있다. 종합적으로, 링크 및 진출램프교통



〈그림 12〉 Iteration별 목적함수의 변화



〈교통류모델 추정교통량 적용시(S2-A)〉



〈VDS 실측교통량 적용시(S2-B)〉

〈그림 13〉 교통량의 추정치와 관측치 비교

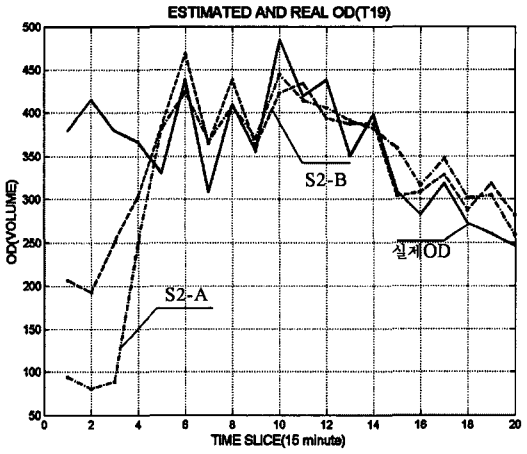
량 기반 동적OD 추정기법은 링크 교통량 기반 동적 OD 추정기법에 비해 많은 제약을 가함으로써, 목적함수를 만족하는 다수해의 범위를 감소시켜 추정력이 높은 것으로 나타났다.

〈그림 12〉는 링크 및 진출램프 교통량기반 동적OD 추정의 Iteration별 적합도의 수렴과정을 보여주고 있다.

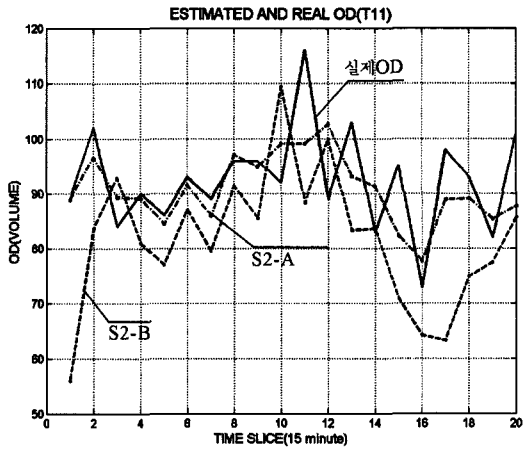
〈그림 13〉은 동적OD 추정 과정의 교통량 관측치와 추정치간의 일치 정도를 보여주고 있다.

링크 및 진출램프교통량 기반 동적OD 추정모델은 기존 모델의 링크교통량 기반 동적OD 추정모델보다 추정력이 좋은 결과를 보여주는데, 이는 관측지점의 수가 OD쌍의 수보다 적은 과소식별문제(undetermined problem)에서 많은 제약을 통하여 다수해의 범위를 감소시킴으로서 오차를 줄일수 있기 때문이다.

〈그림 14〉와 〈그림 15〉는 링크 및 진출램프교통량 기반 동적OD 추정모델을 이용하여 추정한 OD와 실제



〈그림 14〉 OD교통량의 실측치와 추정치간 비교(T19)



〈그림 15〉 OD교통량의 실측치와 예측치간 비교(T11)

OD간의 시간대별 패턴을 보여주고 있다. 추정 OD는 실제 OD와 유사한 패턴을 보이고 있는데, 교통류 구현과정에서 발생하는 오차를 배제한 경우(S2-1)가 VDS 교통량자료를 이용한 경우(S2-2)에 비해 좋은 결과를 보여주고 있다. 초기시간대에 실제 OD에 비해 추정 OD가 차이가 많이 나는 이유는 링크상에 기존에 존재하는 차량에 의한 영향, 초기시간대의 진출램프교통량이 반영되지 않음에 따른 영향 등에 의한 것으로 분석된다.

V. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 검지기 자료인 통행속도, 점유율, 교통량 등을 이용한 새로운 교통류 구현기법을 제안하고

유전자 알고리즘을 이용한 동적OD 추정모델을 구축하였다. 제안된 동적OD 추정모델은 검지기에서 실시간으로 수집되는 교통자료 관측치를 이용하여 교통류를 구현함으로서, 기존 동적OD 추정모델의 한계점인 교통류 모듈과 동적OD 추정모듈간 Bi-level 문제를 극복할 수 있었다. 또한, 동적OD 추정모델의 목적함수를 링크 및 진출램프 교통량의 관측치와 추정치간의 오차를 최소화하도록 설정함으로서 많은 제약을 통하여 동적OD 추정력을 제고하였다. 서해안고속도로를 대상으로 동적OD 추정모델을 평가한 결과, 실제 OD와 추정 OD간 RMAE값이 약 20% 수준인 것으로 분석되었다.

제안된 동적OD 추정모델은 관측지점의 수가 추정코자 하는 OD쌍의 수보다 적기 때문에 발생하는 다수해의 문제를 근본적으로 해결하지 못하는 문제가 남아 있으며, 고속도로에 실제로 적용하기 위해서는 추정력을 더욱 높일 수 있는 방안 마련이 요구된다. 동적OD 추정력을 제고할 수 있는 방안으로는 교통량이 많은 일부 진출입램프를 대상으로 AVI시스템을 설치하여 해당 진출입램프간 OD를 직접적으로 수집하고 VDS 자료와 복합적으로 활용하여 동적OD를 추정하는 기법이 적용될 수 있다. 본 연구에서 제안된 동적OD 추정모델은 노선선택을 반영한 교통류모델을 구현하지 않았기 때문에 단일 축의 고속도로에 적용이 가능하다. 고속도로 네트워크에 적용하기 위해서는 노선선택을 반영한 동적 교통류의 구현이 요구된다.

참고문헌

1. 임용택 · 김현명 · 백승걸(2000), 유전알고리즘을 이용한 OD 추정모형의 개발과 적용에 관한 연구(서울시 내부순환도로를 대상으로), 대한교통학회지, 제18권 제4호, 대한교통학회, pp.117~126.
2. 이승재 · 조범철 · 김종형(2000), 고속도로 네트워크에서 동적기종점수요 추정기법 비교연구, 대한교통학회지, 제18권 제5호, 대한교통학회, pp.83~97.
3. 강정규(1996), 칼만필터를 이용한 도시고속도로 교통량예측 및 실시간O-D 추정, 대한교통학회지, 제14권 제3호, 대한교통학회, pp.7~26.
4. Yun I. and Park, B. (2003) Development of ITS Evaluation Test-Bed Using Microscopic Simulation-City of Hampton Case Study, UVACTS-15-0-45.
5. Van Aerde, M., Hellinga B. and Mackinnon G. (2003) QUEENSOD : A Method for Estimating Time Varying Origin-Destination Demands for Freeway Corridors/Networks, Annual TRB Meeting 2003.
6. Van Der Zijpp, N.J. (1996) Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation on Motorway Network, PhD.Thesis, University of Delft.
7. Sun, C. (2000) Dynamic Origin/Destination Estimation Using True Section Density, UCB-ITS-PRR-2000-5.
8. Antoniou, C., Ben-Akiva, M. and Koutsopoulos, H.N. (2004) Incorporating Automated Vehicle Identification Data into Origin-Destination Estimation, TRB 2004 Annual Meeting.
9. Muthuswamy, S., Davis, G.A., Levinson, D.M. and Michalopoulos, P.G. (2002) Freeway Origin Destination Matrix, not as simple as they seem, TRB 2004 Annual Meeting.
10. Iida Y., Kurauchi, F. and Li, L. (2000) A Simple Method for Estimating Dynamic Origin-Destination Matrix on the Urban Expressway : the Extension of the Combined MLS Model, Kyoto Uni.
11. Hellinga, B.R. and Van Aerde, M. (1996) Estimating Dynamic O-D Demands for a Freeway Corridor Using Loop Detector Data, Uni. of Waterloo.
12. Bhattacharjee, D., Sinha, K.C. and Krogmeier, J.V. (2001) Modeling the Effects of Traveler Information on Freeway Origin-Destination Demand Prediction, TR Part C9.
13. Sherali, H.D. and Arora, N. (1997) Parameter Optimization Methods for Estimating Dynamic Origin-Destination Trip-Tables, TR Part B, Vol.31 No.2.
14. Van Der Zijpp, N. (1996) Dynamic OD matrix Estimation from Traffic Counts and Automated Vehicle Identification Data, TRB 1607.
15. Lo, H.P. and Chan, C.P. (2003) Simultaneoul Estimation of an Origin-Destination Matrix and Link Choice Proportions Using Traffic

Counts, TR Part A37.
16. Ashok, K. (1996) Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows, PhD. thesis, Uni. of MIT.
17. Ashok, K. and Ben-Akiva, M.E. (2002) Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows with a Stochastic Mapping to Path Flows and Link Flows, Transportation Science Vlo.36 No.2.
18. Bierlaire, M. (2002) The Total Demand Scale : A New Measure of Quality for Static and Dynamic Origin-Destination Trip Tables, TR Part B 36.
19. Ashok, K. and Ben-Akiva, M.E. (2000) Alternative Approaches for Real-Time Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows, Transportation Science Vol.34 No.1.
20. Hellinga, B.R. (1994) Estimation Dynamic Origin-Destination Demands from Link and Probe Counts, PhD. thesis, Queens University.
21. Yang, H., Akiyama, T. and Sasaki, T. (1992) A Neural Network Approach to the Identification of Real Time Origin- Destination Flows from Traffic Counts, Proceeding of the International Conference on Artificial Intelligence Applications in Transportation Engineering, pp.253~269.
22. Maher, M.J. (1983) Inferences on Trip Matrices from Observation on Link Volumes : A Bayesian Statistical Approach. Transportation Research Vol. 17B, No.6. pp.437~447.
23. Cremer, M. and Keller, H. (1984) A Systems Dynamics Approach to the Estimation of Entry and Exit O-D Flows, 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
24. Nihan, N.L. and Davis, G.A. (1987) Recursive Estimation of Origin-Destination Matrices from Input/Output Counts. Transportation Research Vol. 21B, No.2. pp.149~163.
25. Okutani, I. (1987) The Kalman Filtering Approaches in Some Transportation and Traffic Problems. Proceeding of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Elsevier, Newyork, pp.397~416.
26. Hu, S. (1996) An Adaptive Kalman Filtering Algorithm for the Dynamic Estimation and Prediction of Freeway Origin-Destination Matrices. Ph.D. Thesis, Uni. of Purdue.
27. Nihan, N.L. and Davis, G.A. (1989) Application of Prediction-error Minimization and Maximum Likelihood to Estimate Intersection O-D Matrices from Traffic Counts. Transportation Science, Vol.23, No.2, pp.77~90.

♧ 주 작 성 자 : 김주영
♧ 논문투고일 : 2005. 3. 28
논문심사일 : 2005. 5. 27 (1차)
2005. 7. 10 (2차)
심사판정일 : 2005. 7. 10
♧ 반론접수기한 : 2005. 12. 31