

■ 論 文 ■

VDS 및 AVI 자료를 이용한 고속도로 동적OD 추정

Dynamic Origin-Destination Demand Estimation Using Traffic Data of VDS and AVI

김 주 영

(서울시립대학교 교통공학과 박사과정)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

이 영 인

(서울대학교 환경대학원 교수)

손 봉 수

(연세대학교 도시공학과 부교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 문제제기 및 연구방향 설정
- II. 기존모델 고찰
- III. 동적OD 추정모델의 구축
 - 1. 변수정의
 - 2. 동적 교통류모델
- 3. 동적OD 추정모델
- IV. 동적OD 추정모델의 평가
 - 1. 분석 네트워크
 - 2. 분석결과
 - 3. AVI 설치범위에 따른 정확도 분석
- V. 결론
- VI. 참고문헌

Key Words : 다이나믹, OD, VDS, AVI, Bi-Level Problem

요 약

지난 몇 십년간 링크 단위의 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델의 개발에 대한 연구가 다수 수행되어 왔다. 동적OD 추정모델의 한계점은 크게 2가지로 요약될 수 있다. 첫째, 동적 교통류 구현을 위해 교통시뮬레이션모형을 이용함에 따라 사전에 OD가 요구되며, 이는 결국 동적 교통류모델과 동적OD 추정모델간 Bi-level Problem으로 접근해야 한다는 것이다. 둘째, 관측지점의 수가 OD쌍의 수보다 적기 때문에 교통자료의 추정치와 관측치간 오차를 최소화하는 다수의 OD쌍이 존재하는 과소식별문제로 귀결되며, 이로 인하여 추정된 OD와 실제 OD간 오차가 불가피하게 발생한다는 것이다. 본 연구에서는 기존의 Bi-level Problem을 해소하기 위해 VDS에서 수집되는 통행속도 및 점유율을 이용하여 동적 교통류를 구현하였으며, 동적OD 추정의 정확도를 제고하기 위해 VDS에서 수집되는 링크, 진출램프교통량의 관측치 및 일부 진출입램프에 설치된 AVI 자료를 복합적으로 이용한 동적OD 추정모델을 제안하였다. 칼만필터 알고리즘을 이용하여 사전에 설정된 iteration 동안 반복적으로 수행토록 하는 제안 모델은 진입램프에서 진출램프까지 소요되는 time-lag를 고려할 수 있으며 초기OD를 임의의 값으로 적용하는 경우에도 동적OD 추정의 정확도를 높일 수 있다. 서해안 고속도로를 대상으로 평가한 결과, VDS 자료만을 이용한 경우에 비해 더욱 좋은 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

The goal of this paper is to develop freeway Origin-Destination (OD) demand estimation model using VDS and AVI data. 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 kalman filter algorithm. The proposed dynamic OD estimation model use link and off-ramp volumes collected from VDS and partial OD collected from AVI data to raise the accuracy of dynamic OD estimation. The proposed model is evaluated by using the real-time data of SOHAEAN freeway, South Korea. The result of the proposed dynamic OD estimation model based on VDS and AVI data is better than that of based on VDS data. The more AVI systems are equipped at on and off-ramp, the more excellent result of estimation accuracy is expected.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

효율적인 도로교통체계 및 교통관리를 위해서는 고속도로의 진출입램프간 통행량(Origin-Destination, OD)의 구축이 요구된다. 고속도로의 OD를 보다 정확하게 수집하기 위해 모든 진출입램프에 AVI(Automated Vehicle Identification) 시스템을 구축해야 하지만, 수집자료의 활용성에 비해 과다한 구축 및 유지관리비용으로 경제성이 낮을 것으로 판단된다. 이에 대한 적절한 대안으로 지난 몇 십년간 링크 단위의 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델의 개발에 대한 연구가 다수 수행되어 왔다. 링크 단위의 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델은 일반적으로 관측된 교통량과 추정된 교통량간의 오차를 최소화하는 적정 OD를 추정하고 있는데, 이 경우 관측된 지점의 수가 추정코자 하는 진출입램프간 OD쌍의 수보다 적기 때문에 과소식별문제(undetermined problem)로 귀결되며, 이는 동적OD 추정력을 저하시키는 근본적인 원인으로 작용하게 된다.(Nihan and Davis, 1987; Garcia, 2002) 즉, 목적함수를 만족하는 다수의 OD해가 존재하여 링크 단위의 교통량만을 이용하여 동적OD를 추정할 경우, 정확도를 일정 수준 이상으로 확보하기에 많은 어려움이 있다. 추정된 동적OD의 활용목적 및 정책결정자의 요구정도에 따라서 링크 단위의 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델의 정확도를 보다 높일 수 있는 새로운 기법 마련이 요구될 수 있다.

본 연구에서는 동적OD 추정의 정확도를 제고하기 위한 방안의 일환으로 일부 진출입램프에 AVI(Automated Vehicle Identification) 시스템을 구축함으로써, VDS (Vehicle Detector System)에서 수집되는 링크 단위의 교통자료와 AVI에서 직접적으로 수집되는 일부 진출입램프간 OD 자료를 복합적으로 이용한 동적OD 추정모델을 개발하는데 주 목적이 있다.

2. 문제제기 및 연구방향 설정

동적OD 추정모델은 동적 교통류모델과 동적OD 추정모델로 구성되는데, 동적 교통류모델은 교통량을 추정하는데 필요한 링크분포비율(진입램프, 출발시간대별 차량군의 시간대 진행에 따른 링크별 분포비율)을 추정

하며, 동적OD 추정모델은 교통량 추정치와 관측치간 오차를 최소화하는 적정 OD를 추정하는 기능을 수행한다.

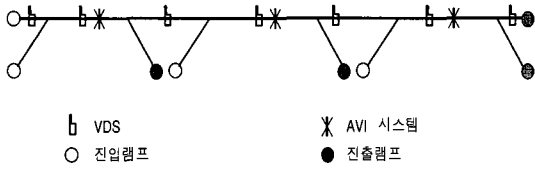
기존에 제안된 바 있는 동적OD 추정모델의 한계점은 크게 2가지로 요약할 수 있는데, 첫째, 동적 교통류 모델과 동적OD 추정모델간의 상호관련성으로 인한 Bi-level Problem이며, 둘째, 관측지점의 수가 OD쌍의 수보다 적기 때문에 발생하는 과소식별문제이다. 기존 동적OD 추정모델은 교통류를 구현하기 위해 사전에 OD가 요구되는 교통시물레이션모형을 이용함에 따라 초기에 입력된 OD와 최종 추정된 OD간의 오차를 줄이기 위해서는 동적 교통류모델과 동적OD 추정모델을 반복적으로 구동해야 한다. 이는 FTMS 탑재를 통한 지속적인 동적OD 추정을 어렵게 하는 원인으로 작용한다. 본 연구에서는 VDS에서 수집된 교통자료의 관측치인 통행속도와 점유율 자료를 이용하여 동적 교통류를 구현함으로써, 기존의 Bi-level Problem을 해소하였다. 또한, 과소식별문제를 보완하기 위해 VDS에서 수집되는 링크 및 진출입램프 교통량과 AVI에서 수집되는 일부 진출입램프간 OD 자료를 관측치 자료로 복합적으로 활용함으로써 가능한 많은 제약을 통하여 동적OD 추정의 정확도를 제고하고자 한다.

II. 기존문헌 고찰

AVI 시스템을 이용한 동적OD 추정은 1950년대부터 최근까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 초기에는 번호판 인식에 대한 기술력 및 인식을 등에 대한 연구가 주를 이루었으며, '80년대 후반 및 '90년대 초반에는 차량 번호판 인식상의 오류를 보완하는 연구가 주를 이루었다. 기술력이 첨단화 된 최근에는 동적OD 추정모델의 정확도를 제고하기 위한 방안의 일환으로 VDS 자료와 AVI 자료를 복합적으로 활용하는 연구가 다수 제안되고 있다.

1. Van der Zijpp의 기법

Van der Zijpp(1997)은 <그림 1>과 같이 본선 구간에 설치된 VDS와 AVI를 이용한 동적OD 추정기법을 제안하였다. AVI시스템에서 수집되는 차량계정정보와 VDS에서 수집되는 교통량 정보를 복합적으로 적용



〈그림 1〉 Van der Zijpp의 가상 네트워크

하는 기법을 제안하고 있다.

Van der Zijpp은 링크단위 통행매트릭스와 진출입 램프 OD비율간의 관계 및 링크 교통량과 진출입램프 간 OD 비율간의 관계는 다항 정규분포를 따르는 것으로 가정하여 베이지안기법을 이용하여 관측방정식을 구성하였다. AVI 자료와 VDS에서 수집되는 자료를 동시에 이용하는 관측방정식은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(t) \\ G(t) \end{bmatrix} b(t) + \begin{bmatrix} v(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$y(t) : e(t)$: 링크교통량의 관측치(VDS) 및 링크간 통행 매트릭스(AVI)

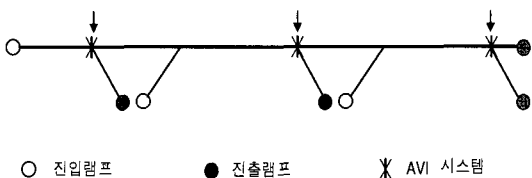
$H(t) : G(t) G'(t)$: 링크교통량 및 링크간 통행매트릭스와 OD비율간의 관계 매트릭스

$v(t) : z(t)$: 관측잡음

VDS 및 AVI 합성자료를 이용한 동적OD 추정모델의 평가를 위한 최적해 알고리즘으로 칼만필터(Kalman Filter) 기법을 적용하였다.

2. Dixon and Rilett의 기법

Dixon and Rilett(2000)는 〈그림 2〉와 같이 본선 분류부 지점에 설치된 AVI를 통하여 수집 가능한 링크 교통량, 링크 선택확률, OD 관측치 등의 정보를 이용하여 동적OD를 추정하는 기법을 제안하였다. VDS 정보를 사용하지 않기 때문에 분류부에 설치된 AVI 정보



〈그림 2〉 Dixon and Rilett의 적용 네트워크

만을 이용하여 링크교통량 및 OD비율을 계산하는 것으로 설명하고 있다.

동적OD 추정을 위해 링크 교통량의 관측치와 추정 시간 오차와 과거의 OD와 추정된 OD간의 오차의 합을 최소화하는 목적함수를 설정하였으며, 최적해 알고리즘으로 칼만필터를 적용하였다. 관측방정식은 식(2)와 같이 설정하고 있다.

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ b^H(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(t) \\ I \end{bmatrix} b(t) + \begin{bmatrix} \sum_{d=1}^{t-m_{lag}} P^d(t) O(d) b(d) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$y(t) : b^H(t)$: 링크교통량 관측치 및 과거의 OD 관측치

$H(t)$: 링크교통량과 OD비율간의 관계 매트릭스

$P^d(t)$: 시간대 d 에 출발한 차량군의 시간대 t 일때의 링크분포비율

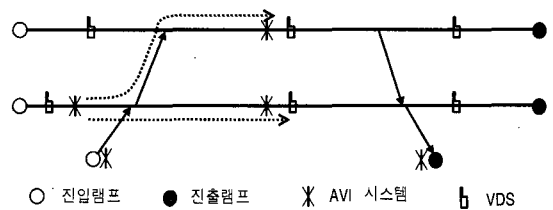
$O(t)$: 진출입램프별 진입교통량

Dixon and Rilett은 진출입 램프 분류부 지점의 본선 구간에 AVI가 설치된 것으로 가정하여, AVI 정보를 이용한 링크교통량, 링크 선택비율, OD 관측치 자료를 구축하는 것으로 가정하여 현실적으로 적용성은 매우 낮을 것으로 판단된다.

3. Antoniou의 기법

Antoniou의(2004)는 동적OD 추정 및 예측모델에 VDS 및 AVI 정보를 복합적으로 이용하는 기법을 제안하였다. VDS정보 이외에 링크에 설치된 AVI에서 수집 가능한 지점간 통행시간, 노선별 교통량(path flows) 등을 추가적으로 활용하는 기법이다.

동적OD를 추정하기 위해 state-space 모델로 접근



〈그림 3〉 Antoniou의 적용 네트워크

하였으며, 관측방정식은 링크교통량, 프로브차량의 OD, 노선별 교통량(path flow)를 이용하여 구성하고 있다. Antoniou가 제안한 모델은 동적OD의 추정 및 예측을 위한 모델로 상태방정식 및 관측방정식의 변수로 시간대별 OD비율간의 오차 및 관측자료의 오차(deviation)를 적용하고 있다. 본 모델을 적용하기 위해서는 대상 고속도로의 진출입램프 및 본선 구간에 AVI를 설치해야 하는 특성이 있다.

III. 동적OD 추정모델의 구축

1. 변수 정의(notation)

- $l_{i,a}^{n,t}$: i 진입램프를 dt 시간대에 출발한 차량군이 시간대 t 일때 링크 a 에 분포되어 있는 거리
- Occ_a^t : 시간대 t 일때 링크 a 의 점유율
- $P_{i,a}^{n,t}$: i 진입램프를 dt 시간대에 출발한 차량군 중 시간대 t 일때 링크 a 에 분포된 차량의 비율(링크분포비율)
- v_a^t : 시간대 t 일때 링크 a 의 교통량 관측치
- \bar{v}_a^t : 시간대 t 일때 링크 a 의 교통량 추정치
- vr_j^t : 시간대 t 일때 진출램프 j 의 교통량 관측치
- \bar{vr}_j^t : 시간대 t 일때 진출램프 j 의 교통량 추정치
- T_{od}^t : 시간대 t 일때 AVI가 설치된 진출입램프간 OD 관측치
- \bar{T}_{od}^t : 시간대 t 일때 AVI가 설치된 진출입램프간 OD 추정치
- n_{od} : 진입(origin)과 진출램프(destination)간의 OD쌍의 수
- n_l : 교통량이 관측된 링크의 수
- n_t : 분석시간대(time slice)의 수
- $b(t)$: 시간대 t 일때 OD비율 매트릭스로 $[n_{od}, 1, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $w(t)$: 시간대 t 일때 상태방정식의 오차항 매트릭스로 $[n_{od}, 1, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $v(t)$: $\bar{v}(t)$: 시간대 t 일때 링크교통량의 관측치 및 추정치 매트릭스로 $[n_l, 1, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $vr(t)$: $\bar{vr}(t)$: 시간대 t 일때 진출램프교통량의 관

측치 및 추정치 매트릭스로 $[n_l, 1, n_t]$ 크기의 행렬로 구성

- $p^t(t)$: 시간대 t 에 출발한 차량군에 대해 시간대 t 일때의 링크분포비율 매트릭스
- $q^t(t)$: 시간대 t 에 출발한 차량군에 대해 시간대 t 일때의 진출램프교통량 비율매트릭스
- $O(t)$: 시간대 t 일때 진입교통량 매트릭스
- $L(t)$: 시간대 t 일때 링크교통량 관측방정식의 오차항($l(t)$)의 공분산으로 $[n_l, n_l, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성
- $M(t)$: 시간대 t 일때 진출램프교통량 관측방정식의 오차항($m(t)$)의 공분산으로 $[n_l, n_l, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성
- $N(t)$: 시간대 t 일때 AVI에서 수집되는 OD 관측방정식의 오차항($n(t)$)의 공분산으로 $[n_{od}, n_{od}, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성
- $e(t)$: AVI 설치 진출입램프간 OD의 관측치 매트릭스로 $[n_{od}, 1, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $z(t)$: AVI 설치 진출입램프간 OD의 관측치 관계매트릭스로 $[n_{od}, n_{od}, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $H(t)$: 관측방정식의 선형관계매트릭스(linear connection matrix)로 $[n_l + n_l + n_{od}, n_{od}, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성
- $H_l(t)$: 링크교통량 관측방정식의 관계매트릭스로 $[n_l, n_{od}, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $H_r(t)$: 진출램프교통량 관측방정식의 관계매트릭스로 $[n_l, n_{od}, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $K(t)$: Kalman gain 매트릭스로, $[n_{od}, n_l + n_l + n_{od}, n_t]$ 크기의 행렬로 구성
- $P(t)$: 모형의 오차공분산(error covariance)으로, $[n_{od}, n_{od}, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성
- $R(t)$: 시간대 t 일때 관측방정식 오차항의 공분산으로 $[n_l + n_l + n_{od}, n_l + n_l + n_{od}, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성
- $Q(t)$: 시간대 t 일때 상태방정식 오차항($w(t)$)의

공분산으로, $[n_{od}, n_{od}, n_t]$ 크기의 대각행렬(diagonal matrix)로 구성

$$= E[w(t)w'(t)] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ Q(t), & i = j \end{cases}$$

2. 동적 교통류모듈

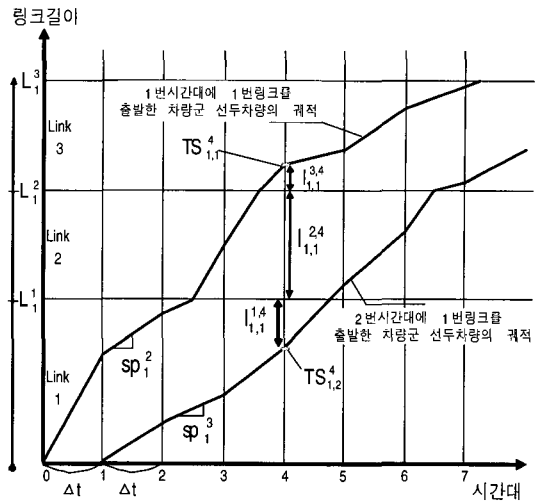
동적 교통류모듈은 동적OD 추정시 필요한 시간대별 교통량 추정치를 계산하기 위해 요구되는 링크분포비율을 추정하는 역할을 수행한다. 동적OD 추정모델을 FTMS에 탑재하여 자동적으로 OD를 추정하기 위해서는 기존 동적OD 추정모델의 한계점인 Bi-level 문제를 해소할 수 있는 새로운 교통류 구현기법의 개발이 요구된다. 이를 위해서는 진출입램프간 OD정보 없이 교통류를 구현할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 검지기에서 실시간으로 수집되는 통행속도, 점유율을 이용하여 진입램프별, 출발시간대별 차량군의 이동계적을 추적하고, 차량군의 이동계적을 이용하여 링크분포비율을 추정하는 새로운 교통류 구현기법을 제안한다. 제안된 모형은 연속류의 거시적(Macro-scopic) 교통류 모델에 근간을 두고 있으며 몇 가지 가정을 전제로 한다. (김주영외 (2005))

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 구간 내 링크별 점유율에 비례하여 차량이 분포함

(그림 4)는 검지기에서 수집된 시간대별 링크의 평균통행속도를 이용하여 차량군별 선두차량의 위치계적을 표현하고 있다. 예로써, 1번시간대 1번 진입램프를 출발한 차량군 선두차량의 궤적과 2번시간대 1번 진입램프를 출발한 차량군 선두차량의 궤적을 링크별 평균통행속도를 이용하여 추적하는 과정을 보여주고 있는데, 1번시간대 1번 진입램프를 출발한 차량군은 4번 시간대에서는 선두차량이 3번 링크상에 후미차량은 1



〈그림 4〉 평균통행속도를 이용한 차량궤적 Diagram

번 링크상에 위치하게 된다. 선두차량 및 후미차량의 위치계적에 근거하여, 차량군이 링크별로 분포된 거리를 계산한다.

1번 시간대에 1번 진입램프를 출발한 차량군은 4번 시간대일때 링크1, 링크2 및 링크3에 분포하게 되는데, 링크별 분포비율은 링크별 분포거리와 링크별 점유율의 곱에 비례한다고 볼 수 있다. 즉, 차량군의 링크 분포거리와 링크별 점유율을 이용하여 링크분포비율은 식(3)와 같이 계산된다.

$$P_{i,dt}^{a,t} = \frac{l_{i,dt}^{a,t} \times Occ_a^t}{\sum_{a \in A} (l_{i,dt}^{a,t} \times Occ_a^t)} \quad (3)$$

차량군별 링크분포비율을 계산하기 위해 링크별 밀도자료를 이용함이 바람직하지만 실시간으로 수집하기에는 어려움이 있으므로 검지기에서 수집되는 점유율 자료로 대체 적용토록 한다. 제안된 교통류 구현기법은 진출입램프간 OD 정보없이 VDS 관측치를 이용하여 링크분포비율을 추정 가능하기 때문에 기존 동적OD 추정모델의 근본적인 한계점으로 지적되는 동적 교통류 모듈과 동적OD 추정모델간 Bi-level의 문제점을 해결할 수 있다. 즉, 최적해 알고리즘에 의해 추정된 동적OD의 값이 갱신되더라도 본 교통류 모델에 의해 추정된 링크분포비율은 변화하지 않기 때문에 단 한번의 컴퓨팅 프로그램을 수행함으로써 해당시간대의 동적OD를 추정 가능하게 한다. 따라서, 동적OD 추정의 계산 시간을 절감할 수 있는 장점이 있다.

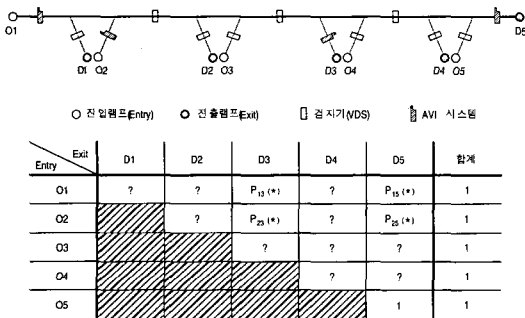
3. 동적OD 추정모델

동적OD 추정모델은 동적 교통류모델에서 추정된 링크분포비율을 이용하여 시간대별 교통량을 추정하고 교통량 추정치와 관측치간 오차를 최소화하는 동적OD를 추정하게 된다. 본 연구에서는 VDS 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델의 정확도를 제고시키기 위한 방안의 일환으로 주요 진출입램프에 AVI 시스템을 추가적으로 설치한 경우, VDS 및 AVI 자료를 복합적으로 이용한 동적OD 추정모델을 개발하는데 주안점을 두고자 한다. 즉, 서울시 내부순환로 등과 같이 FTMS가 구축되어 VDS를 통하여 링크 및 진출입램프 교통량을 실시간 수집 가능한 고속도로를 대상으로 동적OD를 추정코자 할 경우, 일부 진출입램프에 직접적으로 OD를 수집할 수 있는 AVI 시스템을 구축하고 VDS정보 및 AVI 정보를 복합적으로 활용함으로써 추정된 동적OD의 정확도를 향상시킬 수 있는 방안을 마련하는데 주목적이 있다. 동적OD 추정모델을 구현하고 분석함에 있어서 다음과 같은 가정을 전제로 한다.

- 본선 및 모든 진출입램프에 검지기가 설치되어 시간대별 진출입교통량 및 링크교통량 수집이 가능
- 동적OD 추정의 정확도 제고를 위해 일부 진출입램프에 AVI 시스템을 설치
- AVI 시스템의 번호판인식 및 매칭(matching) 과정에서 발생하는 오류는 없다고 가정

(그림 5)의 네트워크 및 OD표에서 AVI을 통하여 일부 진출입램프간 OD를 직접적으로 수집 가능한 경우, OD와 진출입교통량의 관계에 근거하여 많은 제약을 가함으로써 다수해의 범위를 감소시키고 보다 정확도를 향상시킬 수 있다는데 근거를 두고 있다.

동적OD 추정을 위한 목적함수는 식(4)와 같다.



(그림 5) 가상 네트워크 및 OD 매트릭스

$$\min \sum_a (\bar{v}_a^t - v_a^t)^2 + \sum_j (\bar{vr}_j^t - vr_j^t)^2 + \sum_{od} (\bar{T}_{od}^t - T_{od}^t)^2 \quad (4)$$

$a \in \text{all link}, j \in \text{all off-ramp}, od \in \text{all AVI station}$

VDS 및 AVI 자료를 이용한 동적OD 추정모델의 최적해 알고리즘으로는 칼만필터 알고리즘을 적용토록 한다. 칼만필터를 적용하기 위해서는 우선적으로 상태방정식(statetion equation)과 관측방정식(measurement equation)이 요구된다. 칼만필터 알고리즘은 상태방정식을 이용하여 다음시간대의 OD를 예측하고, 예측된 OD와 관측된 교통자료간의 관계를 설명하는 관측방정식을 이용하여 교통자료를 추정한다. 또한, 추정된 교통자료와 관측된 교통자료간 오차를 최소화하는 칼만게인(Kalman Gain)을 계산하여 관측갱신을 수행하는 과정을 시간대별로 반복한다.(강정규, 1996; Okutani, 1987) 동적OD 추정모델은 관측지점의 수가 추정코자 하는 OD쌍의 수보다 적기 때문에 유일해로 풀기 어려운 과소식별문제(undetermined problem)로 귀결되는데, 칼만필터 알고리즘은 시간대별 OD의 시계열적인 관계를 가정함으로써 과소식별문제를 어느 정도 개선할 수 있는 장점을 가지고 있다 (Garcia, 2002).

본 연구에서 제안하는 동적OD 추정모델은 과거 OD에 대한 정보없이 적용하기 위한 것으로 시간대별 OD 패턴에 대한 사전 정보는 없는 것으로 가정한다. 따라서, 이전 시간대 OD와 현재 시간대의 OD와의 관계를 표현하는 상태방정식은 식(5)와 같다.

$$b(t) = b(t-1) + w(t-1) \quad (5)$$

관측방정식에 활용하는 변수는 링크교통량, 진출입 교통량 및 일부 진출입램프간 OD비를 3가지로 구성된다. 링크교통량 및 진출입교통량은 교통류모델에서 추정된 시간대별 링크분포비율을 이용하여 추정할 수 있는데, 칼만필터모형은 시간대별 순차적으로 수행되기 때문에 이전 시간대에 출발한 차량에 대해서는 이전 시간대에 기추정된 OD비율을 적용하여 계산한다. 시간대별 링크교통량 및 진출입교통량의 추정치는 식(6)과 같이 계산된다.

$$\bar{v}(t) = p^t(t)O(t)b(t) + \sum_{d=t-1}^{t-m_{max}} p^d(t)O(d)b(d) + k(t)$$

$$\bar{vr}(t) = q^t(t)O(t)b(t) + \sum_{d=t-1}^{t-m_{max}} q^d(t)O(d)b(d) + m(t) \quad (6)$$

또한, AVI 시스템을 이용하여 수집된 일부 진출입 램프간 OD에 대한 관측방정식을 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$e(t) = z(t)b(t) + n(t) \tag{7}$$

종합적으로 식(8)과 같은 관측 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ vr(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_f(t) \\ H_r(t) \\ z(t) \end{bmatrix} b(t) + \begin{bmatrix} \sum_{d=T-1}^{t-m_{os}} p^d(t) O(d)b(d) \\ \sum_{d=T-1}^{t-m_{os}} q^d(t) O(d)b(d) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k(t) \\ m(t) \\ n(t) \end{bmatrix} \tag{8}$$

여기서, $H_f(t) = p^t(t)O(t)$

$$H_r(t) = q^t(t)O(t)$$

이와 같이, 상태방정식과 관측방정식이 정의되면, 칼만필터기법을 이용한 동적OD 추정은 t-1시간대의 OD 비율을 이용하여 t시간대의 OD비율을 예측($b(t/t-1)$)로 표현)하고, 관측방정식을 이용하여 t시간대의 관측치와 추정치의 차이인 innovation을 계산한다. t시간대의 innovation을 결정하면 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 칼만게인(kalman gain)을 추정한 후, t시간대의 OD비율을 갱신($b(t/t)$)로 표현)하는 과정을 반복하게 된다.

$$K(t) = P(t/t-1)H(t)(H(t)P(t/t-1)H(t) + R(t))^{-1} \tag{9}$$

$$b(t/t) = b(t/t-1) +$$

$$K(t) \left\{ \begin{bmatrix} v(t) \\ vr(t) \\ e(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_f(t) \\ H_r(t) \\ z(t) \end{bmatrix} b(t/t-1) - \begin{bmatrix} \sum_{d=T-1}^{t-m_{os}} p^d(t) O(d)b(d) \\ \sum_{d=T-1}^{t-m_{os}} q^d(t) O(d)b(d) \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \tag{10}$$

$$P(t/t) = P(t/t-1) - K(t)H(t)P(t/t-1) \tag{11}$$

$$P(t+1/t) = P(t/t) + Q(t) \tag{12}$$

여기서,

$$H(t) = \begin{bmatrix} H_f(t) \\ H_r(t) \\ z(t) \end{bmatrix}, \quad R(t) = \begin{bmatrix} L(t) & 0 & 0 \\ 0 & M(t) & 0 \\ 0 & 0 & N(t) \end{bmatrix}$$

일반적으로 칼만필터 알고리즘은 추정변수의 초기값을 어떻게 설정하든지 간에 관측갱신 과정을 통하여 시간대의 진행에 따라 추정치와 관측치간 오차가 점차적으로 감소하는 장점을 가지고 있다. 그러나, 동적OD 추정모델에서는 링크 및 진출램프 교통량 등 관측된 교통자료가 추정코자 하는 OD를 완전히 설명할 수 없기 때문에 추정변수의 초기값을 어떻게 설정하느냐 하는 것이 추정의 정확도에 큰 영향을 미치는 특성을 가지고 있다. (Muthuswamy et al. (2002)) 관측된 교통자료가 추정변수인 OD를 충분히 설명하기 어려운 원인은 다음과 같다. 첫째, 관측지점의 수가 진출입램프간 OD쌍의 수보다 적기 때문에 관측치와 추정치간 오차를 최소화하는 다수의 OD해가 존재하게 되며, 이는 시간대별 관측갱신을 통한 초기의 오차를 해소하기에 많은 한계가 있다. 둘째, 칼만필터 알고리즘은 상태방정식(state equation)을 이용하여 이전시간대의 OD값에 근거하여 다음시간대의 OD값을 예측하고, 관측방정식(measurement equation)을 이용하여 예측된 OD값을 갱신하는 과정을 거치게 되므로, 이전시간대에 추정된 OD값에 크게 종속받는 특성을 가지고 있기 때문이다.

본 연구에서는 FTMS 구축으로 링크 및 진출입교통량의 자료 수집이 가능하고 과거의 OD 정보가 없는 고속도로를 대상으로 적용 가능한 모델을 구축하는데 주안점을 두고 있으므로, 동적OD를 추정하기 위해서는 OD의 초기값을 균일한 분포로 적용하는 것을 전제로 한다. 이를 위해서는 칼만필터를 이용한 동적OD 추정 모델 구축시 OD의 초기값에 따른 오차를 감소시킬 수 있는 새로운 기법이 마련되어야 한다. 또한, 새로이 제안된 목적함수에서 진출램프교통량의 추정치와 관측치간 오차를 최소화하도록 하기 위해서는 진입한 차량이 목적지로 진출할 때까지 소요되는 시간(time lag)을 모형에 반영할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 <그림 6>과 같이 사전에 설정된 회수

만큼 반복적으로 수행하는 기법을 적용하였다. 첫 번째 iteration의 초기값($b^1(1)$)은 균일한 분포로 적용되며, 다음 iteration에서의 초기값은 이전 iteration에서의 진출램프교통량의 추정치 대비 관측치 비율을 적용토록 함으로써 iteration이 수행됨에 따라 점차적으로 OD 초기값의 오차를 감소시키도록 유도하였다.

$$w^n(1) = \alpha \times b^{n-1}(1) \times [vr(k) / \overline{vr}^{n-1}(k)]$$

$$b^n(1) = b^{n-1}(1) + w^n(1) \tag{13}$$

여기서,

$w^n(1)$: iteration n 에서 시간대 1의 상태방정식 오차
 $b^{n-1}(1)$: iteration $n-1$ 에서 시간대 1의 OD비율

$vr(k), \overline{vr}^{n-1}(k)$: iteration $n-1$ 에서 시간대 1의 OD쌍에 대해 해당 진출램프의 진출 예상시간대 k 일때의 진출램프교통량 관측치 및 추정치

α : 조정계수(0.05)

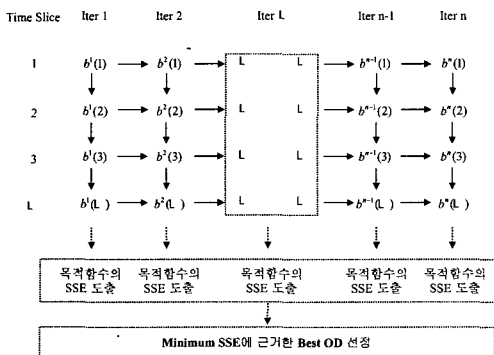
초기 시간대 이후의 시간대에 대한 상태방정식은 이전 iteration을 감안하여 식(14)와 같이 적용한다.

$$w^n(t) = \beta \times \{ b^{n-1}(t) \times [rv(k) / \overline{rv}^{n-1}(k)] - b^{n-1}(t-1) \}$$

$$b^n(t) = b^{n-1}(t-1) + w^n(t) \tag{14}$$

여기서, β : 조정계수(0.23)

관측방정식의 오차항인 관측잡음은 링크, 진출램프



〈그림 6〉 칼만필터를 이용한 반복적 기법

교통량 및 AVI에서 수집된 OD의 관측치와 실제값간의 허용 가능한 오차를 의미하는데, 그 값이 작을수록 최종 추정된 OD 적용시 관측변수의 추정치와 관측치간 오차가 적어지는 결과를 보여준다. 관측변수의 오차항은 식(15)와 같이 각 변수의 innovation 즉, 관측치와 추정치간 오차값의 일정비율을 적용하였다.

$$l(t) = \gamma_l \times \{ v(t) - H_l(t)b(t/t-1) - \sum_{d=T-1}^{t-m_{lag}} b^d(t)O(d)b(d) \}$$

$$m(t) = \gamma_r \times \{ rv(t) - H_r(t)b(t/t-1) - \sum_{d=T-1}^{t-m_{lag}} a^d(t)O(d)b(d) \}$$

$$n(t) = \gamma_{od} \times \{ e(t) - z(t)b(t/t-1) \}$$

$$L(t) = E[l(t) \times l'(t)] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ L(t), & i = j \end{cases}$$

$$M(t) = E[m(t) \times m'(t)] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ M(t), & i = j \end{cases}$$

$$N(t) = E[n(t) \times n'(t)] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ N(t), & i = j \end{cases}$$

여기서,

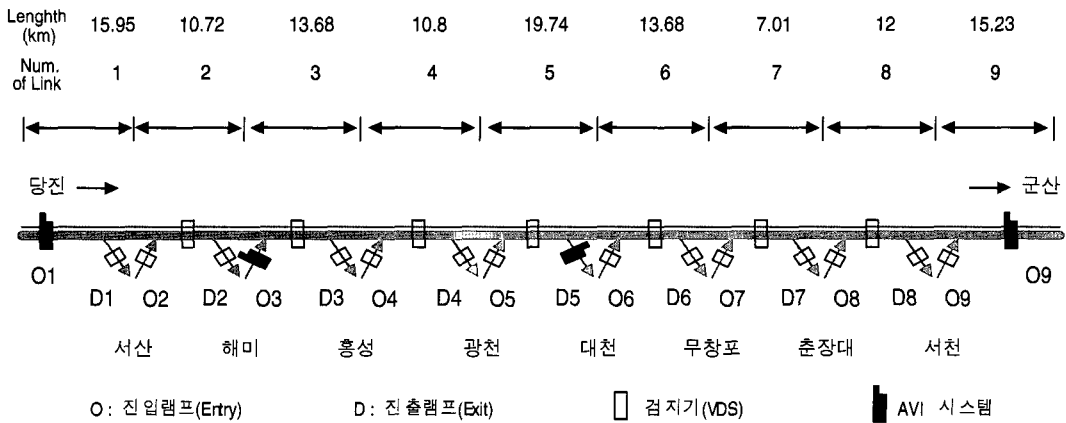
$\gamma_l, \gamma_r, \gamma_{od}$: 관측잡음 조정계수(각 0.01, 0.01, 0.001 적용)

각 iteration별 목적함수값을 평가하여 최소값을 가지는 iteration의 추정OD를 최적값으로 선정하게 된다.

IV. 동적OD 추정모델의 평가

1. 네트워크 및 평가지표

제안된 동적OD 추정모델을 평가하기 위한 대상 네트워크는 서해안고속도로 일부구간(당진→군산, 119km)에 대해 적용토록 한다. 〈그림 7〉과 같이 각 9개씩의 진입부, 진출부 및 링크로 구성되어 있으며, '05.2.5(토) 14:00-19:00 동안의 VDS 및 TCS 교통자료를 활용토록 한다. 단, 1번 진입부(본선), 3번 진입부, 5번 진출부 및 9번 진출부(본선)에 AVI 시스템이 구축된 것으로 가정하며, 해당 진출입램프간 동적 OD가 직접적으로 수집되는 것으로 가정한다. 동적OD 추정모델의 평가지표로는 SSE(Sum of Squared Error), RMSE(Root



〈그림 7〉 분석 네트워크(서해안고속도로)

집되는 것으로 가정한다. 동적OD 추정모델의 평가지표로는 SSE(Sum of Squared Error), RMSE(Root Mean Square Error), RMAE (Relative Mean Absolute Error) 등으로 설정하였다.

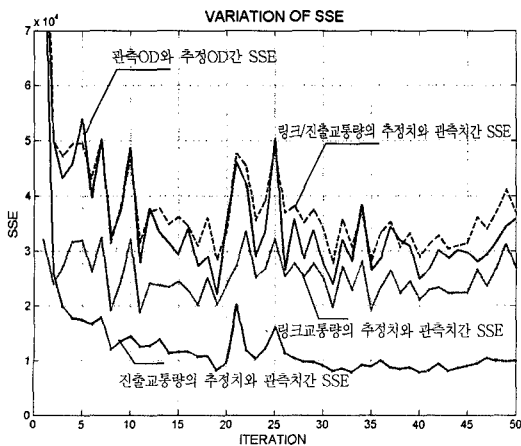
2. 분석 결과

〈그림 8〉은 OD 초기값을 균일분포로 적용하여 동적OD를 추정하는 과정에 있어서 iteration별 OD, 링크교통량, 진출램프교통량, 링크/진출램프교통량의 추정치와 관측치간 SSE의 변화를 도시한 것이다.

링크 및 진출램프교통량의 추정치와 관측치간 SSE 값의 변화가 OD의 추정치와 관측치간 SSE의 변화를 가장 잘 설명하는 것을 알 수 있는데, 이와 같은 내용이 시사하는 바는 기존의 링크교통량에만 기반한 목적함수보다 링크 및 진출램프교통량에 기반한 목적함수가

동적OD 추정모델에 더욱 적합하다는 것이다.

칼만필터 알고리즘을 이용한 동적OD 추정모델의 평가를 위해 크게 2개의 관점에 따라 4가지의 시나리오로 구성하였다. 〈표 1〉에서와 같이, 교통자료 관측치를 링크 교통량만 적용한 경우에 비해 링크, 진출램프 교통량 및 부분적인 AVI 자료를 적용한 경우가 훨씬 더 좋은 결과를 보이고 있다. 이는 많은 관측치 자료를 적용함에 따라 과소식별문제에 따른 다수해의 범위를 줄임으로써 추정상의 오차를 감소시키기 때문인 것으로 판단된다. 동적OD 추정모델의 교통량 관측치에 동적 교통류모델에서 추정한 링크 및 진출램프 교통량을 적용한 경우가 VDS 실측자료를 적용한 경우에 비해 좋은 결과를 보이고 있는데, 이는 전자의 경우 동적 교통류 구현상에서 발생하는 오차를 배제시키기 때문이다. 칼만필터를 이용한 동적OD 추정모델은 초기치를 어떻게 적용하느냐에 따라 정확도에 큰 영향을 미치는데,



〈그림 8〉 iteration별 총제곱오차(SSE)의 변화

〈표 1〉 동적OD 추정결과

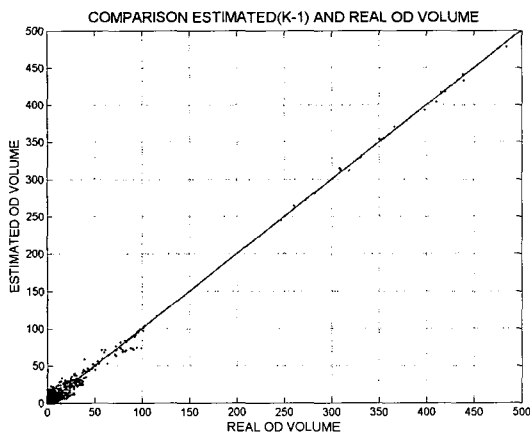
| 모델 | 동적OD 추정모델에 적용된 관측교통량 | 평가척도 | OD |
|--|------------------------|---------|----------|
| 링크교통량 기반 동적OD 추정모델 (※ 과거의 OD를 초기치로 적용) | 동적 교통류모델 추정 교통량 (K1-1) | SSE | 7.41E+04 |
| | | RMAE(%) | 27.1 |
| | | RMSE | 7.6 |
| 링크/진출램프교통량 및 AVI(진출입 2개소씩) 기반 동적OD 추정모델 (※ 초기치를 균일OD로 적용) | VDS 실측 교통량 (K1-2) | SSE | 2.13E+05 |
| | | RMAE(%) | 48.9 |
| | | RMSE | 12.8 |
| 동적OD 추정모델 (※ 초기치를 균일OD로 적용) | 동적 교통류모델 추정 교통량 (K2-1) | SSE | 1.83E+04 |
| | | RMAE(%) | 8.5 |
| | | RMSE | 5.1 |
| | VDS 실측 교통량 (K2-2) | SSE | 3.36E+04 |
| | | RMAE(%) | 11.1 |
| | | RMSE | 6.8 |

본 연구에서 제안된 모델의 경우 초기치를 균일한 OD를 적용하더라도 초기치를 과거OD를 적용한 기존모델보다 훨씬 더 좋은 결과를 보이고 있다.

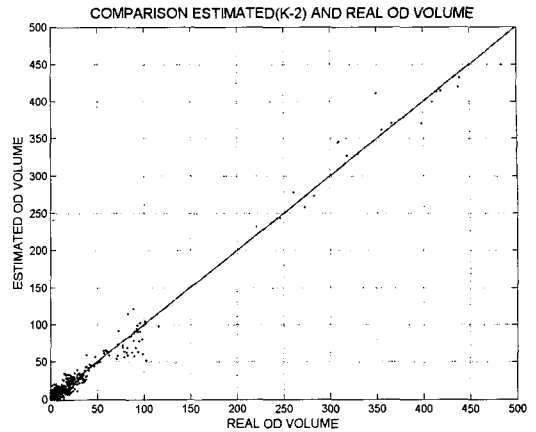
각 9개씩의 진출입램프중 2개씩의 진출입램프에 AVI를 설치하여 실제 VDS에서 수집된 교통자료를 적용한 경우, 추정된 OD와 실제 OD간 RMAE값이 11.1%인 것으로 분석되어 정확도가 매우 높아지는 것으로 판단된다. <표 1>의 분석결과는 FTMS가 구축된 고속도로에 동적OD를 추정하기 위해서는 사전에 목표된 정확도를 달성할 수 있도록 적정량의 AVI 시스템을 구축할 필요성이 있음을 시사한다. 즉, 본 장에서 제시한 동적OD 추정모델을 이용하여 해당 고속도로를 대상으로 AVI 설치수 및 설치지점에 따른 OD 추정력의 변화를 분석하고, 목표치로 설정한 정확도 수준을 만족하는 적정 AVI 설치량 및 설치지점 설정시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

<그림 9>와 <그림 10>은 시나리오 K2-1과 시나리오 K2-2에 대해 모든 시간대 동안의 OD 추정치와 관측치간을 비교한 것이다. 교통류 구현상의 오차를 배제한 시나리오 K2-1은 대체적으로 OD 추정치와 관측치 비율이 1인 직선에 근사하게 분포하는 것으로 분석되었다. 교통류 구현상의 오차를 포함한 시나리오 K2-2는 시나리오 K2-1에 비해 분산되는 양상을 보이고 있지만 기울기가 1인 직선에 근접하여 분포하고 있어 추정력이 양호한 것으로 나타났다.

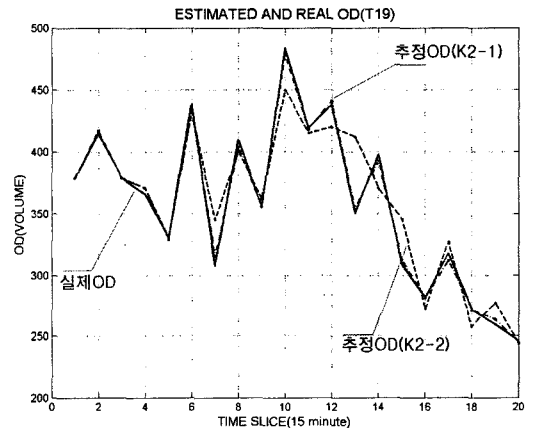
<그림 11>과 <그림 12>는 T19, T23에 대해 시간대별 실제OD와 시나리오별 추정OD를 도시한 결과이다. AVI시스템이 설치되어 직접적으로 수집되는 T19



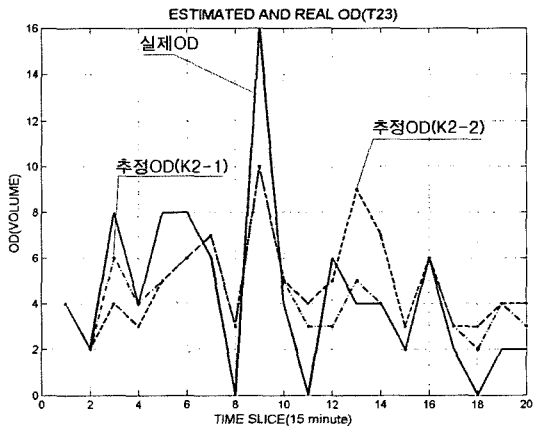
<그림 9> OD의 추정치와 관측치의 비교(K2-1)



<그림 10> OD의 추정치와 관측치의 비교(K2-2)



<그림 11> 시간대별 OD의 변화(T19)



<그림 12> 시간대별 OD의 변화(T23)

의 경우 거의 동일하게 추정하고 있으며, 직접적으로 OD가 수집되지 않는 T23의 경우 거의 유사한 수준을 추정하고 있음을 알 수 있다.

3. AVI 설치범위에 따른 추정력 비교

AVI 및 VDS 교통자료를 복합적으로 이용한 동적OD 추정모델이 VDS 교통자료를 이용한 동적OD 추정모델에 비해 더 좋은 결과를 보이는 것으로 분석되었다. 이는 AVI를 이용하여 일부 진출입램프간 OD를 직접적으로 수집할 경우, OD와 진출입교통량간의 관계에 근거하여 나머지 OD의 값이 가질 수 있는 해의 범위가 감소한다는데 있다. 그러나, 미지의 OD를 추정하는 문제에 있어 AVI 시스템의 확대를 통하여 많은 진출입램프간 OD를 수집한다고 해서 반드시 OD 추정력이 높아진다고 할 수 없다. 왜냐하면, 전체 OD가 가질 수 있는 해의 범위는 감소되더라도 반드시 오차가 감소되지 않기 때문이다. <그림 13>은 각 9개의 진입램프, 진출램프, 링크로 구성된 서해안고속도로를 대상으로 진입램프 및 진출램프에 AVI 설치범위에 따른 동적OD 추정력을 비교한 결과이다. 진입램프 및 진출램프 교통량 수준에 근거하여 많은 진출입램프에 우선적으로 AVI를 설치하는 것으로 가정하여 분석하였다. 관측OD와 추정OD간 RMAE의 변화를 보면, VDS 교통자료만 이용한 경우 15%, 2개의 진입램프와 진출램프에 AVI를 설치한 경우 8.5%, 4개의 진입램프와 진출램프에 AVI를 설치한 경우 7.4%, 5개의 진입램프와 진출램프에 AVI를 설치한 경우 7.1% 정도의 오차가 발생하는 것으로 분석되었다.

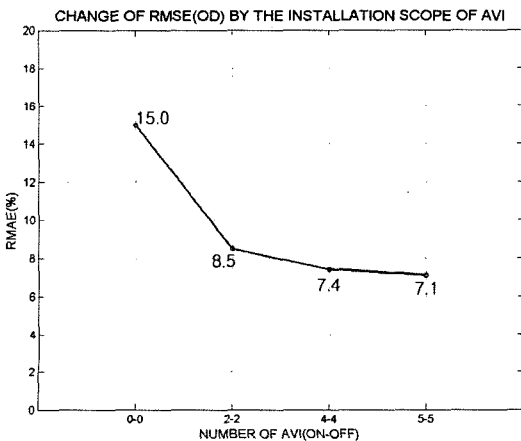
AVI 설치범위 확대에 따른 OD 추정력은 대상 네트워크의 구성, 진출입램프별 교통량 수준, AVI 설치범위 등에 따라 영향을 받을 것으로 판단되는데, 교통량 수준이 높은 진출입램프순으로 AVI를 설치하는 것으로

가정함으로써 AVI 설치범위에 따라 추정력이 향상되는 것으로 나타났다. 실제 고속도로의 동적OD 추정을 위해 일부 진출입램프에 AVI를 구축할 경우, 제안된 동적OD 추정모델을 이용하여 AVI 설치범위에 따른 추정력의 변화를 분석하고 AVI 시스템의 구축 및 운영비용과 추정력 향상에 따른 효율성 등을 종합적으로 검토하여 설치범위를 결정해야 한다.

V. 결론 및 향후과제

링크교통량의 관측치와 추정치의 오차를 최소화하는 동적OD 추정모델은 관측지점의 수가 OD쌍의 수보다 적기 때문에 목적함수를 만족하는 다수의 OD쌍이 존재하게 되며, 이로 인하여 추정된 OD와 실제 OD간 오차가 불가피하게 발생하는 한계점이 있다. 이로 인하여 링크 및 진출입램프교통량 등 VDS 자료만을 이용한 동적OD 추정의 정확도를 일정 수준 이상으로 확보하기에는 다소 한계가 있기 때문에 동적OD 추정력을 제고할 수 있는 새로운 방안 마련이 요구된다. 본 연구에서는 일부 진출입램프에 AVI시스템을 구축함으로써 수집 가능한 OD자료와 링크 및 진출입램프의 VDS자료를 복합적으로 활용하는 새로운 동적OD 추정모델을 제안하였다.

AVI자료 및 VDS자료를 활용한 동적OD 추정모델의 최적해 알고리즘으로는 칼만필터를 적용하였는데, 기존에 제시된 모델을 적용할 경우 다음과 같은 몇가지 한계점이 존재한다. 첫째, 본 연구에서 최적OD 추정을 위한 목적함수 중 진출입램프교통량의 추정치와 관측치의 오차를 최소화하는 효과를 제대로 반영하기 어렵다. 칼만필터모델은 상태방정식을 이용한 다음시간대의 OD비율을 예측하고 관측방정식을 이용하여 관측갱신을 수행하는 과정을 거치게 되므로 시간대 진행에 따라 분석과정을 수행하게 된다. 따라서, 진입차량이 목적지로 진출할 때까지 소요되는 time-lag으로 인하여 현재 시간대의 OD를 추정함에 있어서 향후의 시간대의 진출입교통량의 추정치와 관측치를 비교할 수 없는 한계가 있다. 둘째, OD의 초기값을 균일 분포로 적용하기에 어려움이 있다. 칼만필터 알고리즘은 관측변수가 추정코자하는 변수를 충분히 설명할 수 있는 경우, 초기값을 균일분포로 적용하더라도 시간대가 진행됨에 따라 관측치와 추정치간 오차를 점차적으로 해소하는 장점이 있다. 그러나, 동적OD를 추정함에 있어서는 링크교통량이 OD를 완전히 설명할 수 없기 때문에 시간대의 진행에 따라 OD의 추



<그림 13> AVI시스템 설치범위에 따른 정확도의 변화

정치와 관측치의 오차를 감소시키는데 한계가 존재한다.

이와 같은 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 칼만필터기법을 반복적으로 수행하되, 이전 iteration에 추정된 시간대별 OD를 다음 iteration에서 OD의 초기값 및 상태방정식의 오차항 계산시 활용하는 방안을 적용하였다. 그 결과, OD의 초기값을 균일분포로 적용함에 따른 문제점을 해소할 수 있었으며, OD 추정력을 높일 수 있는 것으로 나타났다. 제안된 동적OD 추정모델은 부분적인 AVI시스템 및 FTMS가 구축된 고속도로의 진출입램프간 OD를 추정하는데 활용될 수 있다. 또한, 동적OD 추정을 위해 일부 진출입램프에 AVI시스템 구축방안을 설계할 경우에 AVI 구축량 및 구축지점 등에 따른 OD 추정력 변화분석 등에 유용하게 활용될 수 있다.

VI. 참고문헌

1. 김주영·이승재(2005), 교통관리시스템의 실시간 교통 자료를 이용한 고속도로 동적OD 추정기법의 개발, 대한교통학회지, 제23권 제4호, 대한교통학회, pp.57~69.
2. 강정규(1996), 칼만필터를 이용한 도시고속도로 교통량예측 및 실시간O-D 추정, 대한교통학회지, 제14권 제3호, 대한교통학회, pp.7~26.
3. Van der Zijpp, N.(1997), Dynamic OD matrix Estimation from Traffic Counts and Automated Vehicle Identification Data, TRB 1607.
4. Dixon, M. and Rilett, L.R.(2000), Real-Time Origin-Destination Estimation Using Automatic Vehicle Identification Data. TRB 79th Annual Meeting.
5. Antoniou, C., Ben-Akiva, M. and Koutsopoulos, H.N. (2004) Incorporating Automated Vehicle Identification Data into Origin-Destination Estimation, TRB 2004 Annual Meeting.
6. 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.
7. 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.
8. Hellenga, B.R. and Van Aerde, M. (1996) Estimating Dynamic O-D Demands for a Freeway Corridor Using Loop Detector Data, Uni. of Waterloo.
9. Ashok, K. (1996) Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows, PhD. thesis, Uni. of MIT.
10. 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 Vol.36 No.2.
11. 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.
12. 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.
13. Garcia, R.C. (2002) Implementing a Dynamic OD Estimation Algorithm within the Microscopic Traffic Simulator Paramics, University of California at Irvine, 94720 CA.

✉ 주 작 성 자 : 김주영

✉ 교 신 저 자 : 이승재

✉ 논문투고일 : 2005. 7. 27

논문심사일 : 2005. 10. 7 (1차)

2005. 11. 9 (2차)

심사판정일 : 2005. 11. 9

✉ 반론접수기한 : 2006. 4. 30