

혼잡 교통류 특성을 반영한 동적 O-D 통행량 예측 모형 개발

Dynamic O-D Trip estimation Using Real-time Traffic Data in congestion

김 용 훈* 이 승 재**
(Yonghoon Kim) (Seungjae Lee)

요 약

관측교통자료의 수집이 실시간으로 가능해짐으로써 혼잡교통류에 대한 교통류 관련 변수들 간의 전이 과정 등 교통류 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 관측교통량을 이용한 O-D 추정방법에 대해서도 관심과 연구가 집중되고 있다. 이와 같이 고속도로의 교통류 특성을 보다 명확히 파악하여 동적 O-D를 구축할 수 있다면, 계획, 설계, 운영, 관리 등 다양한 분야에서 효율화를 도모할 수 있다. 하지만 동적 O-D 구축을 위한 기존연구에서는 다음과 같은 문제점이 지적되고 있다. 첫째로, 동적 교통류 구현을 위해 교통시물레이션모형에 사전 O-D가 필요하며 동적 교통류모듈과 동적O-D추정모듈 간 Bi-level Problem으로 접근해야 한다는 점과 둘째로, 혼잡교통류 상황에 대한 특성이 반영되지 못하여 혼잡교통류 상황에 대한 예측력이 떨어지는 문제점이 지적되어 왔다. 본 연구에서는 기존의 문제점인 Bi-level Problem 접근 방법을 해결하기 위해, VDS자료를 이용한 차량의 궤적을 추적하여 링크분포비율을 계산함으로써 반복적 수행이 없도록 하였으며 혼잡교통류 상황을 반영할 수 있도록 교통류 예측모듈을 구성하여 동적 O-D 예측모형을 구축하였다.

혼잡교통류에 대한 특성을 반영하기 위해 속도와해현상 및 혼잡 확산등 실제 혼잡교통류에 대한 분석을 통해 속도, 점유율, 교통량 등 교통류 변수들의 관계를 교통상황별로 구분하여 규명하였다.

본 연구에 적용된 모형은 동적 O-D 예측 및 추정모형에서 기존의 Bi-level Problem을 해소할 수 있어 적용이 용이하여 실제 검지기 자료를 활용하여 교통상황을 예측하게 되므로 혼잡교통류에 대한 예측력이 향상되었다고 판단된다.

Abstract

In order to estimate a dynamic origin and destination demand between on and off-ramps in the freeways, a traffic flow theory can be used to calculate a link distribution proportion of traffics moving between them. We have developed a dynamic traffic estimation model based on the three-phase traffic theory (Kerner, 2004), which explains the complexity of traffic phenomena based on phase transitions among free-flow, synchronized flow and moving jam phases, and on their complex nonlinear spatiotemporal features. The developed model explains and estimates traffic congestion in terms of speed breakdown, phase transition and queue propagation. We have estimated the link, on and off-ramp volumes at every time interval by using traffic data collected from vehicle detection systems in Korea freeway sections. The analyzed results show that the developed model describes traffic flows adequately.

Key Words : Dynamic OD Prediction Model, FTMS, Dynamic Traffic Flow Model, Kalman Filter Algorithm, Speed breakdown

* 주저자 : 서울시립대 교통공학과
** 공저자 : 서울시립대 교통공학과 부교수
† 논문접수일 : 2005년 9월 22일

I. 연구개요

관측교통자료의 수집이 실시간으로 가능해짐으로써 혼잡교통류에 대한 교통류 관련 변수들 간의 전이 과정 등 교통류 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 관측교통량을 이용한 O-D 추정방법에 대해서도 관심과 연구가 집중되고 있다. 이와 같이 고속도로의 교통류 특성을 보다 명확히 파악하여 동적 O-D를 구축할 수 있다면, 계획, 설계, 운영, 관리 등 다양한 분야에서 효율화를 도모할 수 있다. 하지만 동적 O-D 구축을 위한 기존연구에서는 동적 교통류 구현을 위해 교통시물레이션모형에 사전 O-D가 필요하여 동적 교통류모듈과 동적O-D 추정모듈 간 Bi-level Problem으로 접근해야 한다.

Bi-level Problem의 접근방식은 각 모듈에서 산출된 결과를 타모듈의 입력값으로 사용하여 수렴조건을 만족할 때까지 반복적 수행을 하여야 함에 따라 시간과 계산과정상의 제약이 발생하며, 교통시물레이션모형 이용을 위해서는 항상 초기 O-D가 필요하며 초기 O-D 값에 따라 수렴속도 및 결과에 큰 차이를 가져오게 된다. 그리고 동적 교통류 예측모형에 대해서는 혼잡교통류상황에 대한 특성이 반영되지 못하여 예측력이 떨어지는 문제점이 지적되어 왔다.

본 논문에서는 김주영(2005) [1]에 의해 제안된 교통류 특성변수를 이용한 차량계적을 계산하는 방법을 적용하였으며 혼잡교통류에 대한 특성을 반영한 혼잡교통류 예측모형을 추가함으로써 동적 O-D 모형의 사용범위를 확장 하였다.

II. 문헌 고찰

1. 혼잡 교통류 모델

연속류 교통상황은 크게 자유교통류 상황과 혼잡교통류 상황으로 구분할 수 있으며 최근에는 혼잡교통류의 발생, 전이, 혼잡의 집중정도 등에 대해 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 실제 검지기 자료 획득이 실시간으로 가능해짐에 따라 복잡한 혼잡교통류 특성을 설명하는 많은 연구가 발표되고

있다.

Kerner(2004) [2]는 교통류 상황을 3단계로 구분하였는데 자유교통류 상황과 혼잡상황을 다시 동시진행교통류(Synchronized flow)와 혼잡교통류(Jam flow)로 구분하였다. 동시진행교통류상황은 차량군의 차량 간 간격이 좁아져 운전자들이 원하는 속도를 내지 못함에 따라 차량군 전체 속도가 비슷한 상황으로 정의하였다. 혼잡교통상황은 동시진행교통류 상태에서 차량간 간섭에 의해 차량군의 압축현상(Pinch effect) 이 발생하여 차량의 속도가 급격히 떨어지는 상태라고 하였다. 이 상태는 속도가 현저히 떨어지며 교통량도 적게 관측되는 특징을 보인다고 하였다. 각 교통류상황과 속도, 밀도, 교통량 간의 관계를 검지기 자료를 통하여 규명함으로써 기존 거시적 모델이 가지는 문제점 및 한계점을 지적하였다.

Banks(1999) [3]는 교통량과 점유율 관계를 세 영역으로 구분하여 비혼잡 교통류, 혼잡교통류 I, 혼잡교통류 II의 단계로 구분하였다. 비혼잡 교통류는 교통량-점유율의 관계에서 양의 직선식을 가지며, 혼잡교통류 I는 양의 기울기를 가지는 경향이 보이지만 점유율변화가 적은 반면, 혼잡교통류 II의 단계는 점유율의 변화가 심하게 나타난다고 분석하였다.

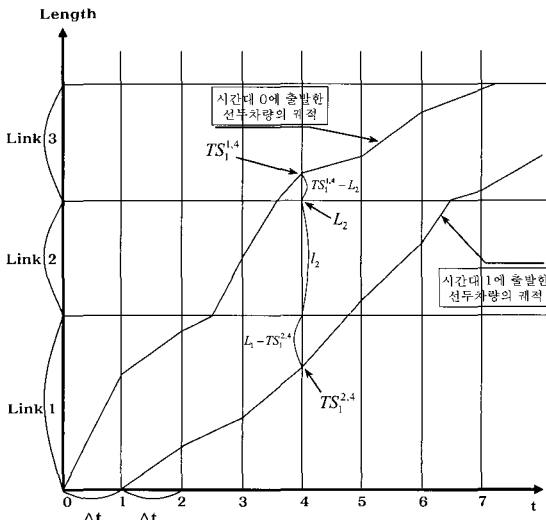
이현홍(2003) [4]은 도시부 고속도로의 전이과정에 대한 분석 및 거시적 교통류 모형의 적용에 대한 연구를 통해 거시적 교통류 모형이 차로별로 다르게 적용되어야 한다는 결론을 제시하였고, 차로 및 구간특성을 다르게 적용하여 거시적 모형을 제시하였다.

2. 차량계적을 이용한 교통류상황 예측모형

동적 O-D 예측 모형은 동적 교통류 모듈과 동적 O-D 예측 모듈이 구축되어야 한다. 하지만, 교통류 모듈을 구현하기 위한 시물레이션에서는 동적 O-D가 우선적으로 입력되어야 하고 다시 교통류를 구현하여 동적 O-D 구축모형으로 전달하는 Bi-level이나 Iterative 작업을 수행하여야 하기 때문에 계속적인 반복과정과 초기OD 값의 정확성에 따라 결과

값이 다르게 나타난다. 시뮬레이션 모형(VISSIM, CORSIM, PARAMICS) 등을 실제 적용하기 위해서는 복잡한 정산과정을 수행하여야 한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 VDS 자료를 이용하여 선두차량의 궤적을 추적하여 링크별 차량군 분포비율을 구하는 방법이 Iida(2004) [5]와 김주영(2005) [1]에 의해 개발되었다. 두 연구에서는 시간대별-링크별 검지된 통행속도를 이용하여 차량군의 선두차량 위치궤적을 추적하고, 이에 근거한 시간대별 링크별 차량분포비율을 추정하는 기법을 제안하였다.



<그림 1> 통행속도를 이용한 분포비율 추정 예
 <Fig. 1> example of a link distribution proportion using travel time

<그림 1>은 시간대별-링크별 통행속도자료와 링크거리를 이용하여 시간대별 차량군의 분포를 추정하는 예를 보여준다. 차량궤적 계산을 위해 다음과 같은 전제조건을 제시하였다.

- 가정1 : 각 링크의 교통량 및 통행속도는 링크의 중단부에서 관측
- 가정2 : 각 링크의 모든 차량이 동일한 속도로 주행하고 링크 전체의 밀도가 균일한 교통상태라고 가정
- 가정3 : 각 링크를 주행하는 차량은 first-in first-

out(FIFO)상태를 만족

<그림 1>에서 시간대 0에서 1사이엔 링크1을 출발한 차량군은 시간대 4에서 5사이엔 링크1, 링크2, 링크3에 분포하게 되는데, 각 링크별 이용비율은 링크 내 차량군의 분포거리와 점유율 곱의 비율로 대체할 수 있다. 시간대 dt 에 진입랩 i 를 출발한 차량군에 대해 시간대 t 일 때 링크 a 의 이용비율 ($P_{i,a}^{dt,t}$)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

Step1 : 시간대별-링크별 통행속도 관측치 (v_a^t) 매트릭스의 구축

Step2 : 시간대동안 링크별 이동거리 (S_a^t) 매트릭스의 계산

$$S_a^t = v_a^t \times \Delta t$$

Step3 : 선두차량의 위치 ($TS_i^{dt,t}$) 계산

$$\text{If } TS_i^{dt,t} + S_a^t > L_a$$

$$TS_i^{dt,t} = L_a + (\Delta t \frac{L_a}{v_a^t}) v_{a+1}^t$$

$$\tau_{i,a}^{dt,t} = 1$$

$$\text{Else } TS_i^{dt,t} = TS_i^{dt,t} + S_a^t$$

$$\tau_{i,a}^{dt,t} = 0$$

여기서, $TS_i^{dt,t}$: dt 시간대에 i 링크를 진입한 차량들 중 t 시간대에 선두차량의 위치

L_a : a 링크 종점부의 위치

$\tau_{i,a}^{dt,t}$: dt 시간대에 i 링크를 진입한 차량들 중 t 시간대에 선두차량의 a 링크 통과여부(통과시 1, 미통과시 0)

Step4 : 차량군 분포거리 ($I_{i,a}^{dt,t}$) 계산

Step5 : 링크별 점유율 (Occ_a^t) 매트릭스 구축

Step6 : 링크별 차량군 분포비율 ($P_{i,a}^{dt,t}$) 계산

이와 같이 추정된 링크별 차량군 분포비율 ($P_{i,a}^{dt,t}$)

은 시간대별 링크 교통량 추정치를 계산하는데 활용된다.

3. 동적 O-D 예측모듈

일반적으로 동적 O-D 추정모델의 목적함수는 검지된 VDS 자료와 추정시간의 오차를 최소화 하도록 구성된다. 구축되는 모형에 따라 목적함수는 링크 교통량 혹은 진출램프 교통량 등 단일함수의 추정치와 관측시간의 오차 제곱을 최소화하는 비선형 볼록형태(nonlinear convex)의 형태를 가지게 된다. 하지만, 시간대별 O-D와 링크 교통량간의 관계식이 O-D 의 쌍보다 적기 때문에 동적 O-D 추정은 유일해가 존재하지 않는 문제점이 발생하기도 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 과거의 O-D 패턴을 목적함수에 가중 결합하여(Yang,1992) 분석하기도 하지만, 진출입램프간 O-D의 구축이 요일별, 시간대별 특성변수별 등 여러 O-D 패턴을 미리 구축하여야 하는 문제점이 발생한다.

동적 O-D를 추정하기 위해서는 동적 교통류기법과 더불어 링크 및 진출램프 교통량 관측치와 추정치의 오차를 최소화하는 적정 O-D를 탐색하는 최적해 알고리즘이 중요하며 지금까지 사용된 모델은 <표 1>과 같다.

<표 1> 기존연구의 최적해 알고리즘
<Table. 1> Existing optimal solution algorithm

알고리즘	연구자(연구년도)
베이지안추정	Maher(1983)
최우추정법	Speiss(1987)
일반화 최소자승법	Bell(1991)
칼만필터	Nihan and Davis(1987), Okutani(1987), Ben Akiva(1996)
QUEENSO-D	Van Aerde(1993)
유전자 알고리즘	임용택외(2000), Yun and Park(2003), 김주영(2005)

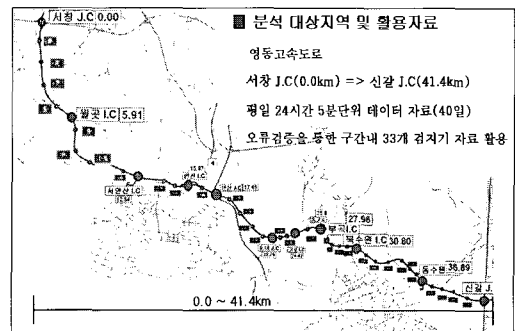
III. 혼잡교통류특성을 반영한 교통류 예측모형

1. 대상지역의 혼잡교통류 특성분석

1) 대상지역

동적 O-D 예측을 위한 대상지역은 영동고속도로 간 서창J.C에서 신갈J.C까지의 41.4km 구간을 선정하였다. <그림 2>는 분석대상지역을 나타내며 검지기 자료는 33개 지점의 집계간격 5분 자료를 활용하였다. 40일간의 자료에 대해 데이터의 오류발생을 점검하여 사용하였다.

<표 2>는 각구간의 IC 의 위치와 검지기 수를 나타내며 각 IC 는 O-D Trip의 발생존과 유입존으로 간주하였다.



<그림 2> 분석대상지역 및 분석자료
<Fig. 2> Research site (The Young-Dong Expressway)

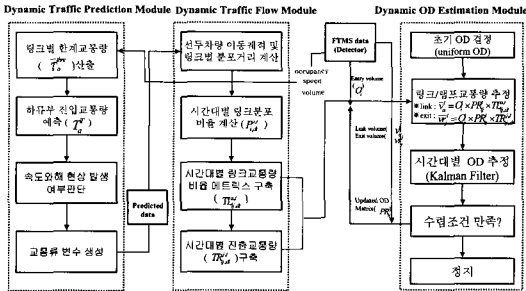
<표 2> IC 위치와 각 IC 사이의 검지기 수
<Table. 2> The freeway network

IC.NO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Station (km)	0	5.0	12.5	15.8	17.9	22.7	24.4	25.8	27.9	30.8	36.9	41.4
Number. of VDS		4	4	4	4	1	1	1	3	2	6	3

2) 연구방법론

<그림 3>은 전체모형의 흐름을 나타낸 것으로 교통류 예측모형과 링크별 차량분포비율계산, 동적OD 예측모형으로 구성되며 교통류 예측모형에서 예측

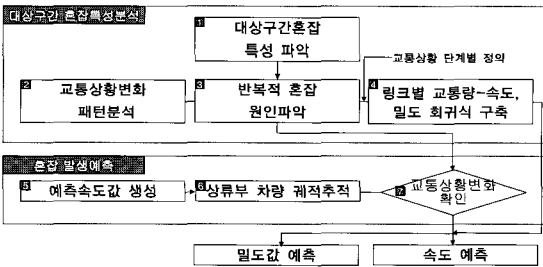
된 자료를 링크별 차량분포비율계산과정을 거친 후 동적 OD 예측모형으로 데이터를 전달하게 된다.



<그림 3> 전체 모형의 흐름도

<Fig. 3> Data flow of a proposed dynamic OD estimation model

교통혼잡을 예측하기 위한 교통류 예측모형의 방법은 <그림 4>와 같다.



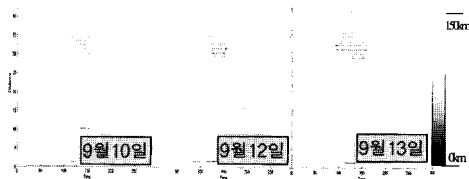
<그림 4> 속도와해 현상 예측 모형

<Fig. 4> Prediction model of speed-breakdown

2. 동적 교통류 예측 모형의 적용

1) 혼잡발생지점 및 시점 파악

영동고속도로의 시공간 분석에 의해 분석구간의 교통류 상태를 파악할 수 있으며 특히, 혼잡교통류의 발생과 전이양상을 파악할 수 있다.



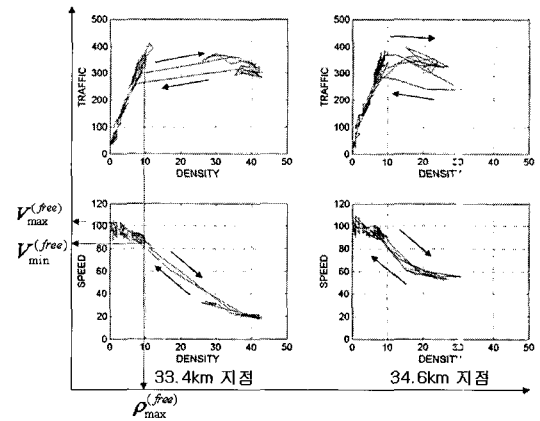
<그림 5> 시·공간적 속도변화분석

<Fig. 5> Spatiotemporal features of congested pattern

분석구간의 교통류 상태를 나타내면 <그림 5>와 같은 혼잡패턴을 나타냈다. 교통상태의 전이현상(혼잡발생)인 속도와해 현상(Speed Breakdown)은 공간적으로 동수원 IC와 인접한 33.4km와 34.6km에서 가장 먼저 발생하여 상류부로 전이되어 가며 혼잡 시점부의 위치는 이동되지 않고 고정되어 있는 특성을 나타냈다. 이러한 원인은 동수원 IC로의 유출입차량에 의한 본선 구간으로의 차량간섭에 의한 영향으로 분석된다.

2) 속도와해 현상 파악

영동고속도로의 교통류 변화 패턴을 분석하기 위해 혼잡발생시점지역인 동수원 IC 인접링크의 점유율-교통량, 점유율-교통량의 관계를 시간진행에 따른 변화를 통해 파악하였다.



<그림 6> 교통류 상태전이과정 분석

<Fig. 6> Congested pattern features

<그림 6>은 교통류 상태가 전이되는 시점에서의 교통류 변수들의 변화를 나타내는 것으로 교통상황이 전이될 경우 큰 변화가 일어남을 알 수 있다.

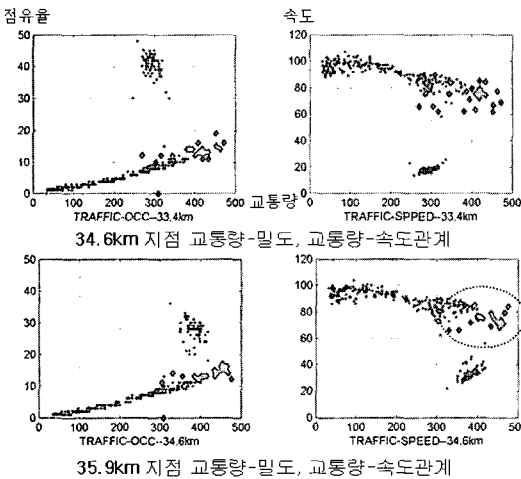
3) 교통상태 구분 및 교통상황 전이 파악

교통상황을 예측하기 위해 분석대상지역의 교통상황을 VDS 속도자료를 통해 3단계로 구분하였다. 본 연구에서는 교통류 상황을 자유교통류와 혼잡교통류 I, 혼잡교통류 II의 세 단계로 구분하였다.

교통상황간의 전이현상(속도와해현상)은 교통류 상태의 변화가 10분 이내의 짧은 시간에 발생하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 5분 간격동안 속도의 변화량이 자유교통류단계→혼잡교통류 I 단계로는 10km, 혼잡교통류 I 단계→혼잡교통류 II 단계로는 15km 이상의 차이가 날 경우에 대해 속도와해 현상이 일어나는 것으로 판단하여 전이가 발생하는 시점의 교통류 변수만을 선별하였다. 즉, 각 링크의 한계교통량(용량)으로 파악될 수 있으며 (1)과 같은 조건을 이용하여 전이과정의 변수만을 추출하였다.

$$\left[S_a^{T-\Delta t} - S_a^T \right]_{j,k} > 10km \text{ or } \left[S_a^{T-2\Delta t} - S_a^T \right]_{j,k} > 15km \quad (1)$$

여기서, S_a^T : a 링크의 시간간격 T와 T+ Δt의 속도 (j→k 교통상태로의 전이)



<그림 7> 속도와해시의 교통류 변수관계
<Fig. 7> Breakdown phenomenon in the traffic variable

<그림 7>은 속도와해 시작지점에 대해 혼잡 I 단계에서 혼잡 II 단계로 전이할 때의 교통류 변수들의 관계를 나타낸 것이다. 34.6km와 35.9km 링크의 속도와해현상이 발생하는 시점(수식(1)의 방법에 의해)의 교통량에 대해서도 데이터화 하였다.

$$\left[\tilde{T}_a^{thre} \right]_{j,k} = \sum \left[\bar{T}_a^T \right]_{j,k} / n \quad (2)$$

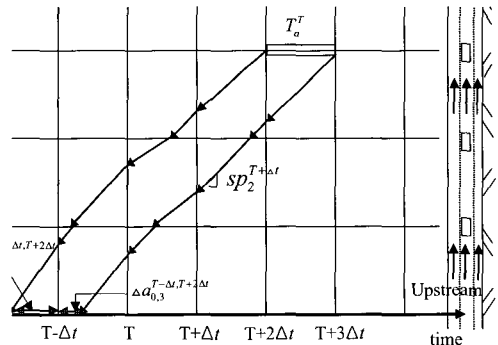
여기서, $\left[\tilde{T}_a^{thre} \right]_{j,k}$: 링크 a의 교통상황 j에서 k로의 임계교통량(링크용량)

n: 혼잡 발생 횟수 (S_a^T , T_a^T 는 T시간 a링크의 속도, 교통량 검지기 자료)

4) 진입교통량 예측

교통류상황을 예측하는데 있어 가장 중요한 부분은 각 교통류상황의 전이발생 즉, 속도변화가 급격히 일어나는 속도와해 현상에 대한 예측이라고 할 수 있다. 교통류 상황의 전이가 발생하지 않는 시점에서의 교통류 변수들의 변화는 크지 않았다. 같은 교통상황에서의 교통류 변수들에 대한 예측값은 회귀분석식을 이용하여 예측된 교통량과 속도 및 밀도의 관계를 통해 예측할 수 있다고 가정하였다. 따라서 동적 교통류 예측모형에서는 우선적으로 교통상황 변화를 판단하는 것이 우선되어야 한다.

본 연구에서는 속도와해 현상이 일어나는 지점으로 유입하게 되는 상류부에 위치한 차량궤적을 추적하여 진입교통량을 예측하였다. 즉, dt (과거시간)의 상류부 i링크자료를 이용하여 예측시간대 t의 하류부 a링크의 진입교통량을 예측하게 된다. <그림 8>에서 예측시간대 $t(= T + \Delta t)$ 에 도착하는 교통량을 예측하기 위해 검지될 차량의 가상의 궤적을 추적하여 상류부 링크에서의 교통량자료를 이용하여 구할 수 있다.



<그림 8> 차량궤적에 의한 진입교통량 계산
<Fig. 8> Trajectory of traffic flow using real time traffic data

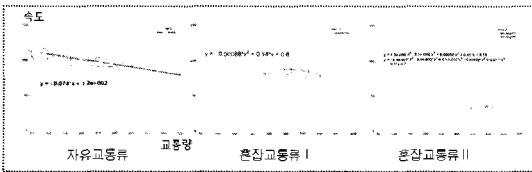
$$T_a^T = \sum_{\Delta t} \sum_i (a_{i,a}^{dt,t} \times q_i^{dt} \times \lambda_a^T \times \omega) \quad (3)$$

여기서, T_a^T : t시간에 a 링크에 도착하는 차량
 $q_{i,a}^{dt}$: (a)링크로 (t)시간에 진입하는 (i)링크의 (dt) 시간대 차량유입비율 (역추적된 좌표비율)
 q_i^{dt} : (i)번 링크의 (dt)시간의 교통량
 λ_a^t : (a)링크에 (t)시간대에 진입하는 차량 집단이 존재하는지의 여부(0,1)
 ω : 유출입 비율 (q_i^{dt} +유입교통량-유출교통량)

33.4km, 지점과 34.6km지점의 예상교통량 (T_a^T)과 유출교통량이 기준 값을 넘을 경우 속도를 교통상황별 교통량 대비 속도 회귀식에서 다시 도출하였다. 실제 동수원 IC 진입교통량을 함께 분석하였을 때 예측력이 높은 결과를 나타냈다. 이후의 교통상황전이는 Shockwave 속도식을 적용하였다.

5) 교통류 변수 관계에 대한 회귀분석

본 연구에서는 교통량에 대한 예측을 차량궤적추적에 의해 할 수 있으므로 나머지 교통류변수들에 대해서는 교통상황별, 링크별로 교통량에 따른 속도 및 점유율의 관계를 회귀모형을 이용하여 구축하였다.



<그림 9> 지점 33.4km 지점의 회귀분석에 의한 교통량과 속도관계

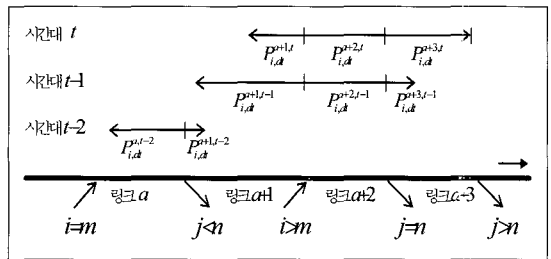
<Fig. 9> Regression analysis of traffic-speed each traffic phase at link 33.4km

<그림 9>은 34.6km지점의 자유교통류, 혼잡교통류 I, 혼잡교통류 II에 대해 교통량-속도관계의 회귀식을 나타낸 것이다.

최종적으로 속도, 점유율 데이터를 생성하여 교통류 구현 모듈에 데이터를 입력하였다.

3. 동적 OD 구축을 위한 링크별 분포비율

예측되어진 속도자료를 통하여 각 링크마다 교통량 및 밀도를 계산하게 되고 예측 검지기 자료를 이용하여 링크별 차량분포비율을 계산하게 된다.



<그림 10> 차량분포비율의 개념
 <Fig. 10> The numbering scheme of link, on and off-ramp

<표 3> 차량군 분포비율 계산 방법

<Table. 3> Calculation of trip distribution proportion method

구분	link5	link6	link7	link8	link9	합계
분포거리(km)	0.5658	2.66	0.85	1.05	1.384	6.2637
링크 점유율(%)	12.92	8.75	4.51	2.5	1.5	-
분포거리와 점유율의 곱	7.3037	23.275	3.8335	2.625	2.146	39.8832
차량군 분포비율($P_{i,d}^a$)	0.183	0.584	0.096	0.066	0.771	1

$$P_{i,d}^{a,t} = \frac{l_{i,a}^{dt,t} \times Occ_a^t}{\sum_{a \in A} (l_{i,a}^{dt,t} \times Occ_a^t)} \quad (4)$$

여기서, $l_{i,a}^{a,t}$: 출발시간대 dt에 i 진입램프를 출발한 차량군이 시간대 t일때 링크 a에 위치하고 있는 분포거리

Occ_a^t : 시간대 t일때 링크 a의 점유율 값(VDS)
 A : 특정 차량군이 분포하고 있는 모든 링크의 집단

VDS에서 수집되는 평균통행속도, 점유율의 자료

를 이용하여 추정된 링크별 차량분포비율은 목적지 정보가 반영되지 않은 값이다. 즉, 시간대별 링크별 통행속도에 근거하여 목적지에 상관없이 고속도로 본선을 계속 주행할 경우, 차량군이 이동 가능한 링크별 차량분포비율로 볼 수 있다. 링크별 차량분포 비율에 목적지정보를 반영하기 위해서는 진입램프, 진출램프 및 링크의 관계로 제어할 수 있다. 즉, 진입램프 i 와 진출램프 j 간의 차량군에 대한 링크별 차량분포비율은 진입램프 i 와 진출램프 j 사이에 있는 링크에 대한 링크별 차량분포비율만을 고려하면 된다. 진입램프별 시간대별 진입교통량과 진출입 램프간 OD 통행량비를 이용하여 본선구간의 링크별 교통량은 식(5)에 의해 추정될 수 있다.

$$\bar{v}_a^t = \sum_{i < a} \sum_{j > a} \sum_{dt} (P_{i,a}^{dt,t} \times O_i^{dt} \times PR_{ij}^{dt}) \quad (5)$$

여기서, \bar{v}_a^t : 시간대 t 일때 링크 a 의 교통량 추정치

$P_{i,a}^{dt,t}$: 출발시간대 dt 에 진입램프 i 를 출발한 차량군이 시간대 t 에서 링크 a 에 위치하고 있을 비율 (링크별 차량분포비율)

O_i^{dt} : 출발시간대 dt 에 진입램프 i 를 출발한 교통량

PR_{ij}^{dt} : 출발시간대 dt 에 진입램프 i 를 출발한 교통량 중 진출램프 j 로의 교통량 비율

계산된 링크별 차량분포비율은 동적 O-D 예측모듈의 입력자료로 사용하게 된다.

4. 동적 O-D 예측 모듈

동적 O-D 예측모듈은 관측교통량과 예측교통량의 오차값을 최소로 하는 O-D를 구축하는 모듈이다.

모듈의 구축을 위하여 칼만필터를 이용하여 관측 교통량과 예측교통량의 오차가 최소가 되도록 하였다. 칼만필터는 시간대별 동적 O-D 비율의 변화식

에 근거하여 과거의 O-D비율에 따른 다음 시간대의 O-D 비율을 예측하고, 예측된 O-D 비율을 이용하여 다음시간대의 모든 링크교통량을 추정하여 관측치와 오차를 계산하게 된다. 또한, 링크교통량의 관측치와 추정치를 최소화하는 칼만게인(Kalman gain)을 계산하여 예측된 O-D 비율을 재 갱신하는 과정을 시간대별로 반복적으로 수행하게 된다. 목적 함수는 다음과 같다.

$$\min \sum_a (v_a^t - \bar{v}_a^t)^2 + \sum_j (vr_j^t - \bar{vr}_j^t)^2 \quad (6)$$

여기서, v_a^t, \bar{v}_a^t : 시간대 t 의 본선링크 a 의 예측교통량과 관측교통량

vr_j^t, \bar{vr}_j^t : 시간대 t 의 램프 j 의 예측교통량과 관측교통량

본 논문에서는 검지기 자료를 이용하여 실시간 OD비율 매트릭스를 추정하는데 주안점을 두고 있으며, 시간대별 OD 패턴에 대한 사전 정보는 취득하기 불가능한 것으로 가정한다. 따라서, 이전 시간대와 현재 시간대의 OD비율간의 관계를 표현하는 매트릭스 $F(k)$ 는 고유벡터(eigenvector)로 대체하여 적용하였다.

$$b(t/t-1) = b(t-1/t-1) + w(t-1) \quad (7)$$

여기서, $b(t/t-1)$: 상대방정식을 이용하여 예측한 시간대 t 의 OD비율

$b(t-1/t-1)$: 관측갱신된 시간대 $t-1$ 의 OD비율

관측방정식은 다음과 같이 수식화될 수 있다.

$$v(t) = H(t)b(t/t-1) + \sum_{d=t-1}^{t-m_{lag}} p^d(t)O(d)b(d) + r(t)$$

$$E[r(t)] = 0$$

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

$$E[r(i)w(t)] = 0$$

(8)

여기서, $v(t)$: 시간대 t 의 링크 교통량의 관측치
 $H(t)$: 시간대 t 의 OD비율과 링크교통량과의 관계매트릭스로 링크분포비율 매트릭스와 시간대별 진입교통량 매트릭스의 곱을 의미함

$p^d(t)$: 시간대 d 에 출발한 차량군이 시간대 t 일 때 링크분포비율

$O(t)$: 시간대 t 일때 진입램프교통량

$r(t)$: 시간대 t 의 관측잡음(measurement noise)

$R(t)$: 관측잡음 $r(t)$ 의 공분산 매트릭스

칼만필터를 이용한 동적OD 추정 절차는 다음과 같은 절차를 다음과 같다.

【step 0】 초기화(Initialization)

- (1) set $t=0$
- (2) OD matrix의 초기값 및 추정치 설정
 - OD matrix의 초기값($b(0)$)은 균일분포로 가정
 - OD matrix의 초기 추정치는 초기값과 동일한 것으로 가정

$$\bar{b}(0/0) = b(0)$$

- (3) OD matrix 오차의 공분산 초기치를 설정

$$P(0/0) = P(0)$$
- (4) OD변화에 대한 사전정보가 없다고 가정하고, 상태함수 오차의 초기치 평균 및 분산값을 0으로 설정

$$F(t) = I \text{ (고유벡터)}$$

$$w(0) = 0, \quad Q(0) = 0$$

【step 1】 시간외삽(Time Extrapolation) 및 추정단계

- (1) 이전 시간대 OD matrix를 이용, 현재 시간대 OD 추정

$$b(t/t-1) = b(t-1/t-1) + w(t-1) \quad (9)$$

- (2) 상태방장식의 오차 공분산(error covariance) 추정

$$P(t/t-1) = P(t-1/t-1) + Q(t-1) \quad (10)$$

【step 2】 링크 교통량을 추정하고, 관측치와의 오차인 innovation 및 관측잡음(measurement error)의 공분산(covariance) 추정

- (1) 교통류 모델을 이용한 링크 교통량 추정

$$\bar{v}(t) = H(t)b(t/t-1) - \sum_{d=t-1}^{t-m_{na}} p^{d(t)} O(d)b^d \quad (11)$$

- (2) innovation($Z(t)$) 결정 및 관측잡음의 공분산($R(t)$) 계산

$$Z(t/t-1) = 0.01 \times [v(t) - \bar{v}(t)] \quad (12)$$

$$R(t) = E[Z(t/t-1) \times Z^T(t/t-1)]$$

【step 3】 칼만게인(Kalman gain) 매트릭스 계산

$$K(t) = P(t/t-1) H^T(t) [H(t)P(t/t-1) H^T(t) + R(t)]^{-1} \quad (13)$$

【step 4】 관측갱신(measurement update)

- (1) 현재 시간대의 추정된 OD 갱신

$$b(t/t) = b(t/t-1) + K(t)Z(t/t-1) \quad (14)$$

- (2) 상태방정식 오차($w(t)$) 및 공분산($Q(t)$) 계산

$$w(t) = b(t/t) - b(t/t-1) \quad (15)$$

$$Q(t) = E[w(t) \times w^T(t)]$$

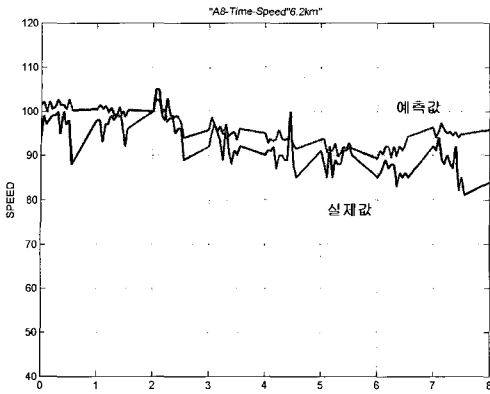
- (3) 현재 시간대의 추정된 오차 공분산(error covariance) 갱신

$$P(t/t) = P(t/t-1) - K(t)H(t)P(t/t-1) \quad (16)$$

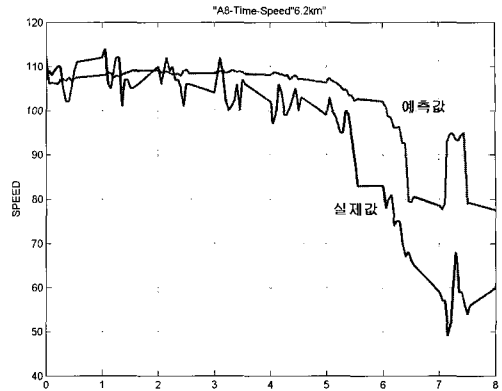
IV. 결과 및 향후과제

1. 동적 교통류 예측 모형 평가

예측모형에 대한 결과비교는 동적교통류 예측모형에 대한 평가와 동적OD 예측모형으로 구분하여 분석하여 제시하였다. 동적교통류는 속도와해 현상이 발생한 링크와 그렇지 않은 링크의 속도와 교통량을



혼잡이 발생하지 않은 구간의 속도비교



혼잡이 발생한 구간의 속도비교

<그림 11> 속도예측값과 관측속도값의 비교

<Fig. 11> Estimated link speed vs real speed

이용하였다. <그림 11>은 동적교통류 예측모형에 의해 예측된 값으로 혼잡이 발생하지 않은 구간의 예측속도와 실제속도를 비교한 것으로 예측력에서 큰 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다.

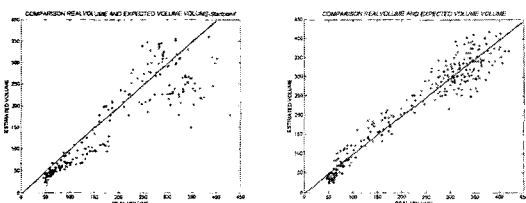
혼잡이 발생한 지점의 예측속도와 실제속도를 비교한 경우는 6시 25분에 속도외해 현상이 발생하는 것을 예측하기도 하였지만 속도 변화폭에 대한 예측 면에서는 차이를 나타내었다.

<그림 11>은 예측 교통량과 실제 관측교통량을 비교한 것으로 실제 속도외해 현상이 일어나는 지점 보다는 속도와해 현상이 일어나지 않는 지점의 예측 교통량이 좀 더 정확한 것으로 분석되었다.

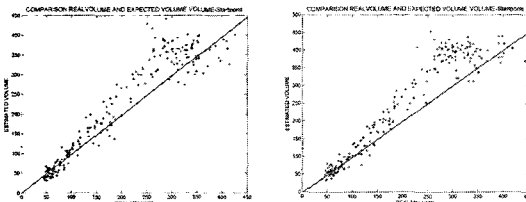
2. 동적 OD 모형 평가

최종적으로 1시간의 동적 O-D를 생성하였고 TCS를 이용해 구해진 실제 O-D와 비교하였다. 비교는 RMAE (Relative Mean Absolute Error) 값을 이용하였다.

$$RMAE = \left(\frac{\sum |v'_a - v_a|}{\sum |v'_a|} \right) \times 100 \quad (15)$$



<속도와해 현상이 없는 link의 진입교통량 비교>



<속도와해 발생한 link의 진입교통량 비교>

<그림 12> 예측 교통량 vs 실제 관측교통량

<Fig. 12> Estimated vs real link volume

<표 4> 동적 OD의 예측력 비교

<Table. 4> Result of OD prediction model

구분		RMAE(%)
교통상황	분석방법	
비혼잡 교통류	예측교통류를 이용한 모형 (TCS자료와 비교)	0.737
	실제검지기자료를 이용한 모형(TCS자료와 비교)	0.336
혼잡교통류	예측교통류를 이용한 모형 (TCS자료와 비교)	0.783
	실제검지기자료를 이용한 모형(TCS자료와 비교)	0.396

예측된 O-D Trip과 실제 관측된 O-D Trip에 대해 예측교통류모형의 사용한 경우와 실제검지기를 이용한 경우로 분류하여 분석하였다. 이는 예측교통류모형을 사용하였을 경우의 오차가 발생하는지를 판단하기 위해서이며 교통류상황에 대해서도 혼잡 상황과 비혼잡상황으로 분류하였다. 분석 결과는 예측교통류모형을 사용하였을 경우 오차가 실제 검지기 자료를 이용하였을 때보다 크게 발생하였는데 이는 예측모형을 사용함으로써 오차가 누적되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 혼잡교통류상태가 비혼잡교통류의 경우 보다 오차가 좀 더 크게 발생하였는데 혼잡교통류 상황이 좀 더 복잡하고 불규칙적 성향을 가지고 있기 때문으로 해석되었다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에 적용된 모형은 동적 O-D 예측 및 추정모형에서 기존의 Bi-level Problem을 해소할 수 있는 방법론의 문제점인 예측모형의 부재를 해결하는데 목적을 두었다. VDS 자료를 이용하기 위해 교통류 변수들의 상호관계를 파악하며 각 변수들을 예측하여 교통류 예측모형을 구축하였으며 혼잡발생에 대한 예측이 정확하도록 역점을 두었다. 하지만, 향후에는 동적 O-D 예측의 정확도를 향상시키기 위한 노력이 필요하며 이러한 분석을 위해 다양한 형

태의 모형 평가가 필요하다고 판단된다. 또한 각 모형의 예측력을 높이기 위한 노력이 뒷받침되어야 하리라 판단된다. 그 예로, 속도와의 예측모형에 영향이 크다고 판단되는 IC의 진·출입교통량을 고려할 필요가 있으며 차량군의 분포 및 확산에 대한 연구가 진행되어야 하리라고 판단된다. 그리고 다양한 모형의 동적 O-D 예측모형이 사용되어야 하리라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 김주영(2005), 교통관리시스템의 실시간 교통자료를 이용한 고속도로 동적OD 추정기법의 개발
- [2] Kerner, B.S., *The Physics of Traffic*, Springer, Berlin.
- [3] Bank J. (1989), Freeway Speed-Flow- Concentration Relationship: More Evidence and Interpretations, *Trans.Res.*, 1225, 53-60
- [4] 이현홍(2003), 도시부 고속도로 교통류 전이과정 분석 및 거시적 교통류 모형의 적용성 검토
- [5] Iida, Y., Kurauchi, F. and Li, L. (2004) A Simple Method for Estimating Dynamic OriginDestination Matrix on the Urban Expressway: the Extension of the Combined MLS Model. Kyoto Uni.

〈저자소개〉



김 용 훈 (Yonghoon Kim)

2003.02 서울시립대학교 교통공학과 공학사
2006.02 서울시립대학교 대학원 교통공학과 석사
서울시정개발연구원 도시교통부 근무



이 승 재 (Seungjae Lee)

1988. 2 인하대학교 산업공학과 공학사
1990. 2 서울대학교 환경대학원 도시계획학 석사
1995. 4 런던대학 토목공학과 교통공학 박사
- 논문주제: 平衡 通行 配定을 위한 數理的인 알고리즘에 관한 研究
(Mathematical Programming Algorithms For Equilibrium Road Traffic Assignment)

경력

1989. 3 서울대학교 환경대학원 부속 환경계획연구소
1990. 7 유신 건설 공사
1995. 3 런던대학 통계학과 명예연구원(Honourary Research Fellow)
1995. 10 런던대학 통계학과 책임연구원(Research Fellow)
1996. 9 교통개발연구원 책임연구원
1998. 9 서울시립대학교 도시공학과 전임강사
2002. 9 서울시립대학교 교통공학과 조교수
2002. 7 전공주임교수: 서울시립대학교 건축도시조경학부 교통전공
현재 서울시립대학교 건축도시조경학부 교통전공 부교수