

# 고속도로 진출램프 대기행렬 발생 현상 분석모형 개발

## Traffic Analysis Model for Exit Ramp Congestion at Urban Freeway

전 재 현\*                      김 영 찬\*\*  
(Jae-Hyeon Jeon)              (Young-Chan Kim)

### 요 약

고속도로 본선 정체의 원인으로 진출램프에서 발생한 대기행렬의 본선 역류가 크게 작용하며, 이에 고속도로 진출램프 대기행렬 발생으로 인한 본선 영향을 적절히 표현하는 연속류 모형과 실제 제어 시 기반이 되는 적용성 연구가 필요하다. 본 연구에서는 고속도로 용량 변화에 따른 공급과 수요 곡선을 탄력적으로 적용하여 진출램프 대기행렬 영향으로 인한 고속도로 본선 교통류를 표현할 수 있는 Supply-Demand 모형의 적용성을 평가하였다. 먼저 Supply-Demand 모형 적용 시 요구되는 입력자료인 구간별 Sending & Receiving function과 진출램프 대기행렬의 본선 영향 등을 고려한 고속도로 본선 용량제약을 처리하는 방안을 제시하였다. 실시간 data를 사용하여 Supply-Demand 모형을 적용하는 일련의 과정을 모형화한 후, 극심한 상승정체가 발생하는 내부순환로의 홍은진출을 포함하는 구간에 적용, 조정 및 발전시켜 분석하였다. 적용 결과, 대기행렬의 본선 영향 범위와 대기행렬 패턴이 실제 교통류와 유사하게 예측되었다. 즉, Supply-Demand 모형이 Sending & Receiving function을 탄력적으로 적용함으로써, 진출램프 대기행렬의 본선 역류 등으로 인한 고속도로 본선의 용량 변화가 적절히 반영되는 것으로 검증되었다.

### Abstract

The freeway congestion is largely generated by a mainline spillover of the exit ramp queue. So it is necessary to study for modeling of the phenomenon and applying the model. In this study, the authors evaluated applicability of the Supply-Demand model, which can express traffic flow for the freeway by applying flexibly supply and demand curves for capacity of the freeway. First the authors proposed methods processing input data required in the Supply-Demand model, such as sending & receiving functions and time-varying capacity constraints for the freeway mainline. After modeling the Supply-Demand application model, the authors applied the model to the site including congested Hongeun exit ramp in Seoul Ring-road, and improved the model by adjusting application techniques and calibrating parameters. The result of the analysis showed that the Supply-Demand model yielded a queuing pattern and queue location similar to them observed in the field data, and applicability of the Supply-Demand model was varified.

**Key words:** Supply-demand model, sending-receiving function, exit ramp queue, macroscopic flow model, newell's simplified flow-density model

† 본 논문은 2009년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

\* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 석사과정

\*\* 공저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

† 논문접수일 : 2010년 3월 29일

† 논문심사일 : 2010년 5월 20일

† 게재확정일 : 2010년 5월 22일

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

고속도로 본선 정체의 원인으로서는 고속도로 본선 용량을 초과한 수요뿐만 아니라 진출램프에서 발생한 대기행렬의 본선 영향도 크게 작용한다. 고속도로 진출램프 대기행렬 발생으로 인한 본선 영향을 적절히 표현하는 연속류 모형과 실제 제어 시 기반이 되는 적용성 연구가 필요하다.

연속교통류 거시적 모형들 중 Supply-Demand 모형은 해당 고속도로 구간의 교통량과 밀도 관계도에 따른 공급과 수요 곡선을 적용하여 시간에 따른 밀도를 산정하여 연속류를 표현한다. 이 모형은 시간대별 구간별 교통상황에 따른 용량 변화를 탄력적으로 적용할 수 있는 장점이 있어, 고속도로 정체의 주요인인 진출램프 대기행렬 영향으로 인한 고속도로 본선의 용량 감소를 표현할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 Supply-Demand 모형을 실제 고속도로에 적용함으로써 진출램프 대기행렬 등으로 인한 병목사항들을 어떻게 반영하여 고속도로 본선 교통류를 표현하는지 살펴보고자 한다.

### 2. 연구의 내용

본 연구에서는 고속도로 상의 병목요인을 파악하여 공급과 수요 곡선을 탄력적으로 적용하여 교통류 상태를 표현할 수 있는 Supply-Demand 모형을 실제 고속도로에 적용하여 분석하겠다.

이를 위해 먼저 관련 연속교통류 거시적 모형들과 실제 사례지역에 적용한 연구들을 고찰하였고, Supply-Demand 모형을 적용 시, 요구되는 입력 자료들을 처리하는 방안과, 고속도로 진출램프 대기행렬의 역류로 인한 본선 영향을 표현하는 방안을 제시하였다. 그리고 진출램프 대기행렬로 인한 본선 정체가 발생하는 지역을 포함하여 분석구간을 선정하고, Supply-Demand 모형을 적용하여 그 적용성을 평가하였다.

## II. 기존 관련연구 고찰

### 1. 연속교통류 거시적 모형

#### 1) Newell의 Simplified traffic flow theory

Newell(1993)은 종전의 포물선 중형 형태의 교통량과 밀도 관계를 안정교통류 상태와 불안정교통류 상태의 2개의 영역으로 나눠 간단하게 직선 형태의 교통량과 밀도 관계 모형을 제시하였다 [1, 2]. 이는 연속진행가능한 안정교통류 상태에서 속도는 용량에 도달할 때까지는 교통량에 민감하지 않으므로 'wave 속도=차량속도(wave속도=자유속도  $u_f$ )'로 가정, 불안정교통류에서는 교통량과 밀도 관계를 선형(wave속도 =  $-w$ 로 일정)으로 가정한 것이다. 이렇게 Simplified 교통량-밀도 관계도는 포물선 형태의 교통량-밀도 관계도에서 어려웠던 수학적 표현이 가능하고 계산이 편리한 이점이 있어 널리 적용되고 있다.

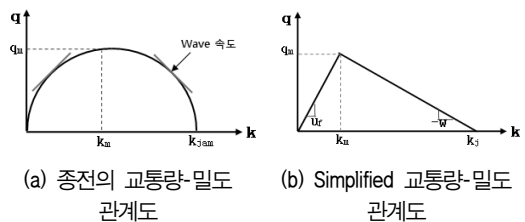
#### 2) Daganzo의 Supply-Demand(Sending-Receiving) 모형

Supply-Demand 모형(1995)은 유한차분법을 통한 시간에 따른 밀도를 산정하여 연속류를 표현하는데, 유출입교통량을 <그림 2>와 같이 Demand(Sending)와 Supply(Receiving) function을 적용하여 산정한다 [3, 4].

$$K^i(t + \Delta t) = K^i(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [Q^{i-1}(t) - Q^i(t)] \quad (1)$$

$$Q(x, t) = \min [S(k(x, t), R(k_j - k(x + d, t)))] \quad (2)$$

여기서,  $i$  : cell(segment) 번호



<그림 1> 교통량-밀도 관계도  
<Fig. 1> Flow-density relation

$d$  : cell(segment) 거리

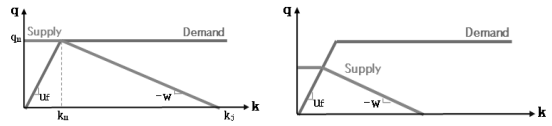
$S$  : Sending

(상류부 cell에서 보낼 수 있는 교통량)

$R$  : Receiving

(하류부 cell에서 받을 수 있는 교통량)

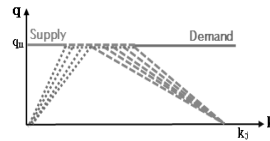
<그림 2> (a)에서 살펴보면, 하류부 cell의 Supply (Receiving)는 임계밀도에 도달하기 전에는 용량만큼 공급할 수 있으나 임계밀도를 초과하면서 공급량이 교통량-밀도 곡선에 따라 점점 감소하는 것이고, 상류부 cell의 Demand(Sending)는 임계밀도에 도달하기 전에는 상류부 cell의 교통량만큼 보낼 수 있으나 임계밀도를 초과하면서 상류부 cell에서 용량만큼의 교통량만 보낼 수 있는 것이다. Supply-Demand 모형은 각 시간대별 cell별 교통상황에 따라 용량 변화를 반영하여 탄력적으로 적용할 수 있는 장점이 있으며,



(a) Simplified  $q-k$ 관계도에 적용한 S & R function

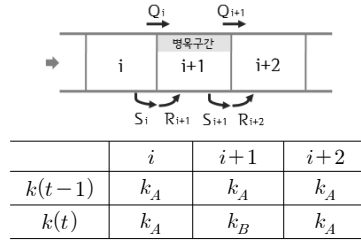
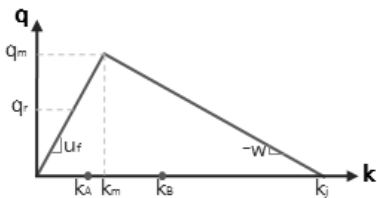
(b) 용량감소에 따른 Receiving function 변화

<그림 2> Sending & Receiving function  
<Fig. 2> Sending & Receiving function



<그림 3> 변형된 Sending & Receiving function  
<Fig. 3> Modified Sending & Receiving function

- 모든 구간들이 다음의 동일  $q-k$  관계도를 따른다고 가정 ( $q_r$  : 병목구간  $i+1$ 에서 감소된 용량)
- 구간  $i+1$ 이 병목구간이며, 구간별 시간별 밀도상태가 다음과 같음



- $k_{i+1}(t+1) = k_{i+1}(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [Q_i(t) - Q_{i+1}(t)]$  에서  $Q_i$ 와  $Q_{i+1}$  산정은 모형별로 다음과 같음

	Newell의 Simplified traffic flow theory 모형	Daganzo의 Supply-Demand(Sending-Receiving) 모형
$Q_i$	<p><math>Q_i(t) = Q(k_i(t))</math></p>	<p><math>Q_i(t) = \min [S_i(k_i(t)), R_{i+1}(k_{i+1}(t))]</math></p>
$Q_{i+1}$	<p><math>Q_{i+1}(t) = Q(k_{i+1}(t))</math></p>	<p><math>Q_{i+1}(t) = \min [S_{i+1}(k_{i+1}(t)), R_{i+2}(k_{i+2}(t))]</math></p>

<그림 4> Simplified traffic flow theory 모형과 Supply-Demand 모형 적용상의 차이 예  
<Fig. 4> Example of difference between Simplified traffic flow theory model and Supply-Demand model

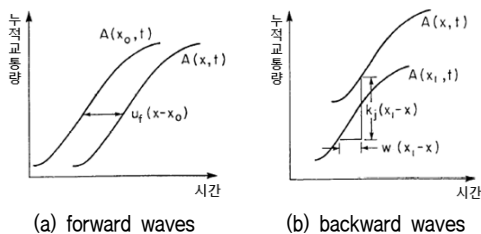
Newell의 Simplified  $q-k$ 관계도에 적용한 Sending과 Receiving function을 변형하여 <그림 3>과 같이 적용할 수 있는데, 이는 Daganzo의 Cell Transmission 모형을 포함하는 범용이다 [5-7].

Newell의 Simplified traffic flow theory 모형과 Supply-Demand 모형의 차이를 살펴보고자 <그림 4>와 같이 모형별 적용과정을 표현하였다. Simplified traffic flow theory 모형은 단순히 상류부 cell에서 보내지는 통과교통량만 고려하여 cell의 경계지점에서 교통량이 누적되는 형태이다. 그리고 임계밀도 이상의 혼잡상태일 때는 동일한 backward wave 속도만큼 뒤로 전파하여 하류부 통과교통량이 감소하며 상류부 cell의 밀도가 증가하게 된다.

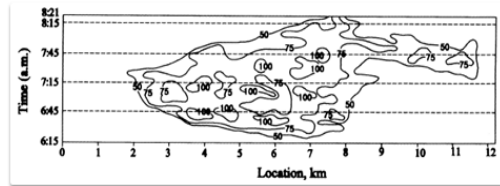
반면 Supply-Demand 모형은 각 cell의 경계지점에서 상류부 cell에서 보낼 수 있는 교통량과 하류부 cell에서 받을 수 있는 교통량의 비교를 통해 작은 값으로 통과교통량을 결정하는 형태이다. 즉, Supply-Demand 모형은 Simplified traffic flow theory 모형과는 달리 복합적으로 상류부와 하류부 cell의 밀도 상태를 모두 고려하여 각 cell의 통과교통량을 결정하고, 진출램프 대기행렬 등으로 인한 고속도로 용량변화도 시간별 구간별로 반영할 수 있어 실제 교통상황을 좀 더 유사하게 표현할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연속교통류 거시적 모형 적용 연구

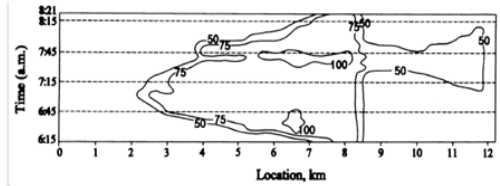
손봉수 외(2000)는 Newell의 Simplified traffic flow



<그림 5> Newell의 Simplified traffic flow theory기반 누적교통량  
 <Fig. 5> Cumulative flow based on Newell's Simplified traffic flow theory



(a) 실제 관측밀도



(b) 예측밀도

<그림 6> Newell의 Simplified traffic flow theory 사례 지역 적용결과

<Fig. 6> Results of application of Newell' Simplified traffic flow theory

theory를 적용한 모형을 실제 고속도로 지역에 분석한 연구를 하였다. Newell의 Simplified traffic flow theory를 기반으로 forward waves와 backward waves일 때의 구간별 누적교통량을 산출하며, 진출부와 진입부에서는 교통량을 가감하여 연속류를 거시적으로 표현하였다 [8-10].

실제 고속도로에 적용한 결과 대기행렬의 꼬리 위치는 유사하게 예측되었으나 대기행렬 패턴 등이 정확하게 예측 되지 않고, 진출램프 대기행렬의 본선 영향 표현이 미흡한 한계점이 있었다.

## III. Supply-Demand 모형 적용 분석

### 1. 분석 대상으로 선정

Supply-Demand 모형을 적용할 대상으로, 진출부 로 인한 상습정체 발생 구간이 존재하며, 서울 도시 고속도로 교통관리시스템의 구축으로 모형 적용을 위해 요구되는 자료 확보가 가능한 내부순환로를 선정하였다.

현재 내부순환로는 도시고속도로 본선에 영상검지기, 주요 진출입로에는 루프검지기를 설치하여

운영 중이다. 영상검지기는 도시고속도로 본선부에 평균 약 500m간격, 터널부에 약 250m간격으로 설치되어 있으며, 루프검지기는 램프 상류부 또는 하류부에 설치되어 있다. 이들 검지기로부터의 원시자료 수집 주기는 최소 30초 단위이며, 수집정보는 차로별 교통량, 속도, 점유율이다.

본 연구에서는 극심한 정체가 항시 발생하는 홍은 진출램프를 포함하는 내부순환로 외선(중암JC→성산)을 대상으로 분석을 수행하고자 한다.

## 2. 대상으로 기초분석

### 1) 원시자료 처리

Supply-Demand 모형에 적용 시 요구되는 자료를 얻기 위해 원시자료를 가공하는 과정이 필요하다. 우선 누락 및 오류자료를 시간적 추세법 등을 활용하여 보정하였다. 30초 단위 차로별 원시자료를 보정한 후, 지점교통량은 단순 차로별 교통량을 합산, 지점평균속도는 서울시 도시고속도로 교통관리시스템에서 활용중인 차로별 교통량 가중평균을 하여 산정하였다 [11].

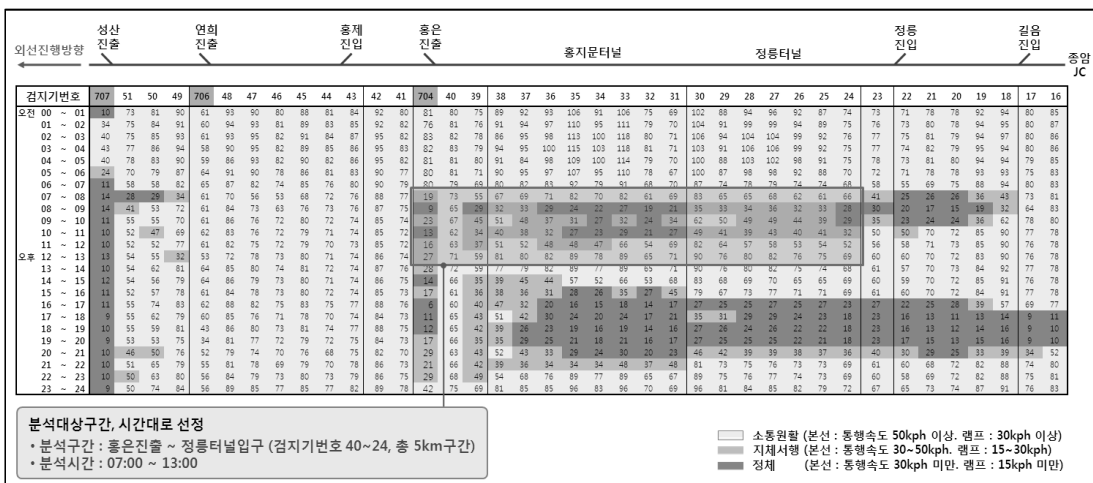
모형 적용을 위한 구간평균속도는 앞뒤검지기의 지점평균속도를 평균하고, 교통량은 지점교통량, 밀도는  $q = uk$  관계에 의해 앞서 계산된 교통량과 구

간평균속도를 사용하여 산정하였다.

### 2) 시간대별 교통류특성 분석

내부순환로 외선 성산~중암JC 구간(Det. 51~16)을 대상으로 혼잡지역과 혼잡시간대의 소통상황을 파악하기 위해 24시간(2006.05.12(금) 24시간) 시간대별 교통류특성을 분석하였다. <그림 7>은 1시간 단위 시간대별 평균속도로 서울 도시고속도로 교통관리시스템에서 적용하고 있는 소통상황(소통원활, 지체서행, 정체) 속도 기준으로 분석한 것이다.

성산진출과 홍은진출램프는 새벽시간대를 제외하고 전일 정체되는 것을 볼 수 있으며, 성산진출 혼잡은 본선에 크게 영향을 끼치지 않는으나 홍은진출 혼잡은 본선 상류부에 크게 영향을 끼치고 있었다. 참고로 <그림 7>에서 Det. 40 지점은 진출을 위한 추가차로가 시작되는 이후로 진출램프 대기행렬의 영향을 받지 않는 지점이고, Det. 39 지점부터 본선 상류부에 홍은진출램프의 영향을 받고 있는 것이다. Supply-Demand 모형의 적용성을 살펴보기 위해서 분석 적용구간을 진출램프에 혼잡이 발생하고 진출램프의 대기행렬이 본선으로 역류했다가 해소되는 구간과 시간대를 포함하였고, 이에 홍은진출~정릉터널 입구 구간과 07:00~13:00 시간대로 선정되었다.



<그림 7> 내부순환로 외선 성산~중암JC 구간 시간대별 평균속도 분석

<Fig. 7> Analysis of average speed for each interval in ring road(from Jongam JC to sungsan exit)

### 3. 분석구간 Supply-Demand 모형 적용

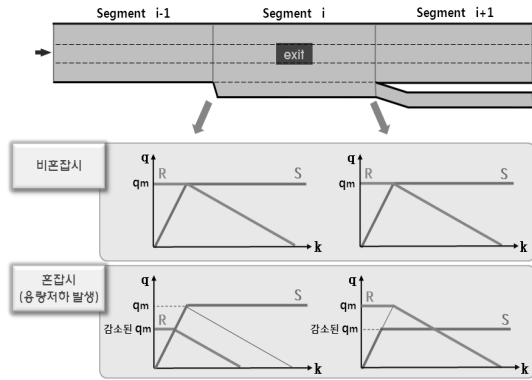
#### 1) Supply-Demand 모형 입력자료 처리

##### (1) 구간별 Sending과 Receiving function

Supply-Demand 모형을 적용 시, 고속도로의 구간별 Sending function( $S$ )과 Receiving function( $R$ )이 필요하다. 이 Sending과 Receiving function은 구간별  $q-k$  관계도에서 결정되며, 구간별  $q-k$  관계도는 최근 실제 검지자료를 기반으로 구축하고 보정되어야 한다.

본 연구에서는 Newell의 Simplified  $q-k$  관계도를 적용하였고, 향후 다른 형태의  $q-k$  관계도로 확장 적용이 가능하다. Simplified  $q-k$  관계도를 구축하기 위해서는 용량, 자유속도, 후방 wave 속도, 최대밀도( $k_{jam}$ )의 변수들을 설정해야하는데, 이 4가지 변수들을 적절하게 설정하는 것이 매우 중요하다. 이 변수들은 구간별 기하구조 등의 특성에 영향을 받는데, 구간별로 기하구조 등의 특성이 상이하지 않다면 전체 구간의  $q-k$  관계도를 동일하게 적용해도 무방하다.

본 모형 적용에서는 내부순환로의 선형과 터널부 존재 등을 고려해 구간별로  $q-k$  관계도를 다르게 적용하였으며, 각 구간별 검지자료를 기반으로 보정된 구간평균속도, 밀도, 교통량을 plot하여 용량, 자유속도, 후방 wave 속도, 최대밀도( $k_{jam}$ )을 설정하고 보정을 거쳐  $q-k$  관계도를 결정하였다.



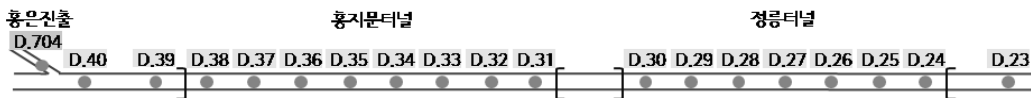
<그림 8> 본선 용량제약에 따른 Sending과 Receiving function 처리

<Fig. 8> Sending and Receiving function for capacity constraint of mainline

##### (2) 고속도로 본선 용량제약

Supply-Demand 모형 적용에서 진출램프를 표현할 때 본선교통량에서 진출교통량을 단순히 빼주는 것으로는 부족하며, 진출램프의 정체가 극심하면 진출램프 대기행렬이 본선에까지 영향을 끼쳐 본선 용량저하를 초래하므로 이를 반영하고자 하였다.

이에 본 연구에서는 진출램프 대기행렬의 본선 영향을 표현하기 위해서 진출램프 직전 상류부 지점의 검지기 자료를 활용하였다. 그 검지기의 속도가 50kph(서울 도시고속도로 교통관리시스템의 본선 소통원활과 지체서행의 경계속도) 미만일 때 본선의



<그림 9> 분석구간(홍은진출~정릉터널입구) 검지기 위치도

<Fig. 9> Location of detectors in the section for analysis

<표 1> 구간별 교통변수(자유속도, 용량, 후방 wave 속도,  $k_{jam}$ ) 결정

<Table. 1> Decision of traffic parameters(free speed, capacity, backward wave speed,  $k_{jam}$ ) for each segment

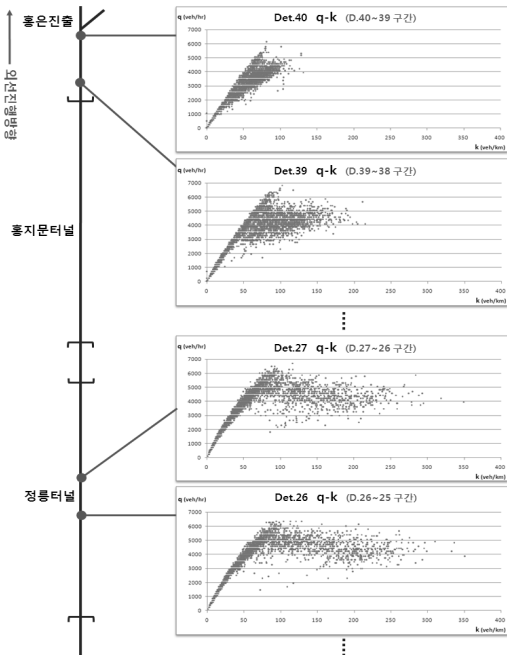
구 분	D.40	D.39	D.38	D.37	D.36	D.35	D.34	D.33	D.32	D.31	D.30	D.29	D.28	D.27	D.26	D.25	D.24
자유속도 (kph)	76.5	73	78	80	81	81	81	75	70	75	74	72	75	75	71	70	66
용량 (vph)	6120	6351	6240	5760	6120	6318	6399	6300	6300	6300	5920	6048	6000	6150	6177	6300	6270
후방 wave 속도 (-)(kph)	21.9	23.3	22.3	20.0	21.5	17.0	17.2	17.2	17.5	20.6	21.1	21.9	21.4	20.0	20.4	21.0	21.3
$k_{jam}$ (최대밀도) (veh/km)	360	360	360	360	360	450	450	450	450	390	360	360	360	390	390	390	390

용량이 감소된다고 보았고, 그 시간대의 평균교통량을 감소된 용량으로 설정하였다. Supply- Demand 모형 적용 시, 고속도로 진출램프 대기행렬로 인한 본선 용량제한은 <그림 8>과 같이 Sending과 Receiving function을 처리하였다.

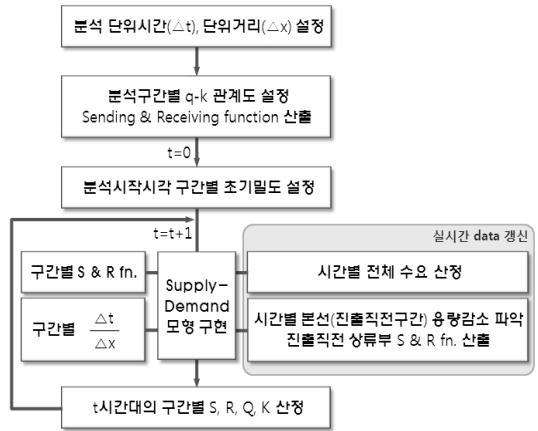
2) Supply-Demand 모형 적용

Supply-Demand 모형 적용 분석구간은 내부순환로 외선 홍은진출~정릉터널입구(Det.40~Det.23) 구간이며, 약 5km 거리이다. 본 구간에는 <그림 9>와 같이 본선에 18개의 영상검지기가 설치되어 있고, 각 검지기간 간격은 137~678m로 다양하였다.

분석단위시간  $\Delta t$ 는 대기행렬의 생성과 소멸 과정을 놓치지 않고 살펴보기 위해 작게 선정하는 것이 필요하여 본 적용에서는  $\Delta t$ 를 5초로 설정하였고,  $\Delta x \geq \Delta t \times u_f$ 에 충족하도록 하여 분석단위거리  $\Delta x$ (각 segment 거리)를 검지기간 간격을 고려하여 설정하였다.



<그림 10> 분석 구간별 교통량 밀도 관계  
 <Fig. 10> Relation between flow and density for each segment



<그림 11> Supply-Demand 모형 적용 수행과정  
 <Fig. 11> Procedure for application of Supply-Demand model

내부순환로는 도시고속도로로 선형이 좋지 않고 터널부가 존재하는 등 구간별로  $q-k$ 관계도가 상이하게 나타날 것이다. 이에 모형 적용 시  $q-k$ 관계도를 전체구간을 동일하게 적용하지 않고 구간별로 파악하여 달리 설정하였다. 분석구간별 24시간 이력검지자료를 보정한 후 <그림 10>과 같이 교통량과 밀도를 plot하였다. 이 교통량과 밀도 관계를 토대로 구간별로 자유속도, 용량, 후방 wave 속도,  $k_{jam}$ 을 설정하여 Simplified  $q-k$ 관계도를 결정하였고, 구간별  $q-k$ 관계도를 통해 구간별 Sending과 Receiving function을 결정하였다. 구간별 교통변수의 결과는 <표 1>에 요약되어 있다.

기본적인 입력 자료들을 처리하고 난 후 <그림 11>과 같이 Supply-Demand 모형을 적용하였다. 적용 과정에서 시간별 수요와 진출램프 직전 상류부 본선 구간의 용량제한은 실시간으로 자료를 갱신한다. 수요는 전체 분석구간의 상류부 진입지점 검지기(Det. 23)의 시간별 교통량 자료를 사용하였다. 진출램프 대기행렬 본선 역류로 인한 고속도로 본선 용량감소는 진출부의 직전 상류부 본선구간 검지기(Det. 39)의 속도를 10분 단위로 파악하여 50kph미만인 시간대를 선정하고 그 시간대의 평균교통량을 감소된 용량으로 설정하였다. 이렇게 산정된 진출램프 상류부 본선구간의 감소된 용량을 그 다음 시간대에 반영하도록 하였다.

이러한 입력 자료들을 시간대별로 처리하고 시간대별로 Supply-Demand 모형의 유출입교통량과 밀도 계산 과정을 걸쳐, 시간대별 구간별 Sending, Receiving, 교통량, 밀도를 출력한다.

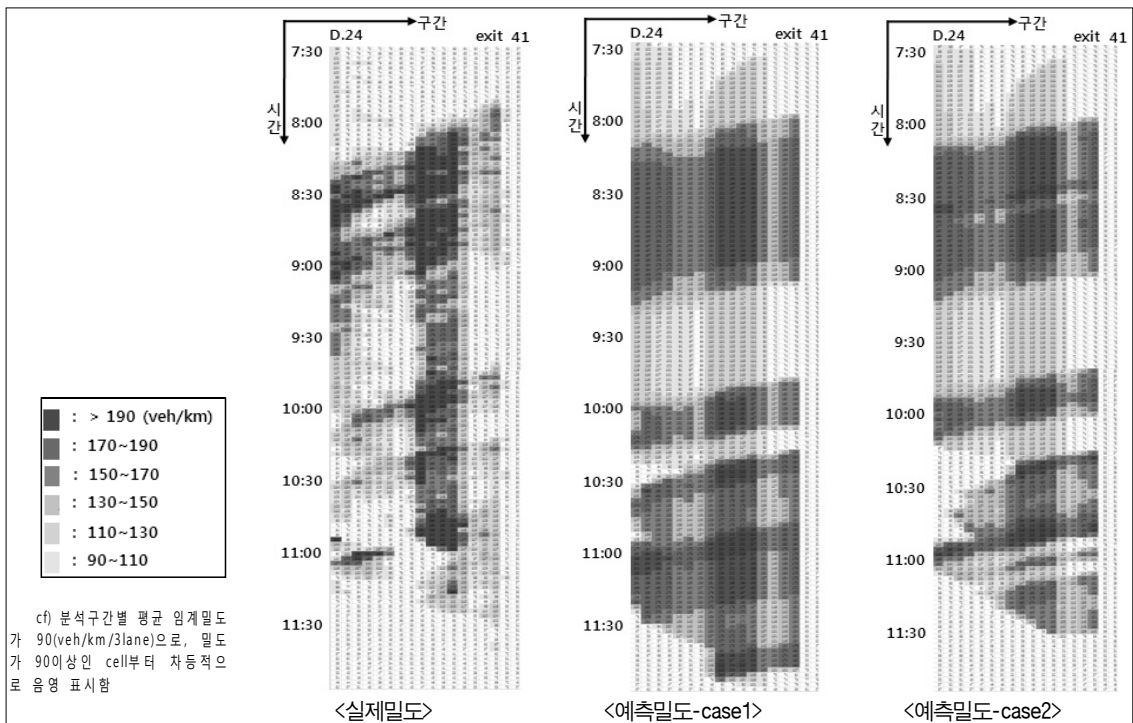
#### 4. Supply-Demand 모형 적용 결과

Supply-Demand 모형의 교통류 예측력을 살펴보기 위해 <그림 12>와 같이 실제밀도와 Supply-Demand 모형 예측밀도를 비교하여 나타내었다. 음영이 진할수록 밀도가 높은 것을 의미하며, 밀도가 높은 구간과 시간대에서 대기행렬이 형성된 것으로 볼 수 있다.

앞서 설명한 방법으로 Supply-Demand 모형을 구현한 결과(case1), 진출부로 인한 본선용량 제약을 반영 시에 10분의 시간차집이 발생함을 감안하면 실제 대기행렬 패턴과 상당히 유사하게 예측된 것을 확인할 수 있다. 그리고 진출부 구간 상류부 방향으로 진출램프 대기행렬의 본선 영향이 실제와 유사하게 표

현되는 것을 볼 수 있다. 이는 진출램프 직전 상류부 본선구간의 검지기 자료로 진출램프 대기행렬로 인한 본선 용량저하를 판단한 방법이 적절했음을 의미한다. 단, 실제밀도는 세부적인 변화가 있는 반면 예측밀도는 모두 밀도 변화가 균집적으로 발생하는 것으로 표현됐는데, 이것은 개별 운전자 행태 등의 반영이 되는 미시적 모형과는 다른 거시적 모형의 특성인 것이다.

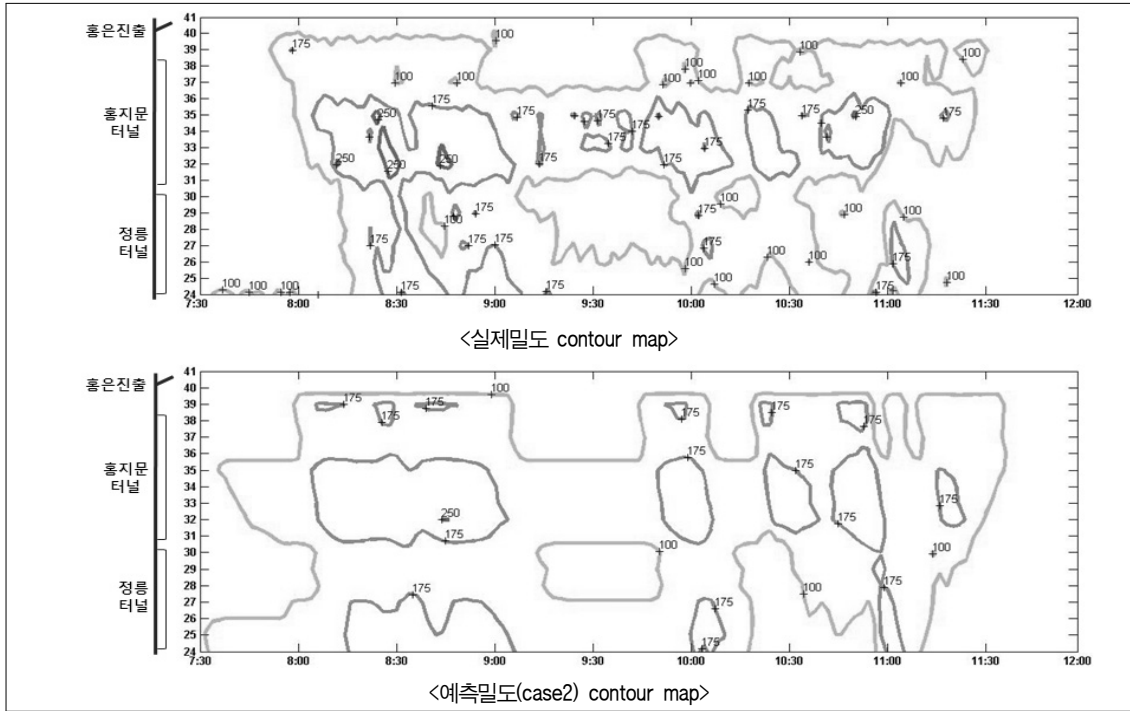
그러나 Supply-Demand 모형으로 예측한 교통류 상태에서, 약 11:00 시간대 이후로 실제보다 대기행렬이 과다 추정되었고 전체적으로 실제보다 밀도가 과다하게 예측된 것으로 나타났다. 이에 Supply-Demand 모형의 적용성을 더 좋게 하기 위해 적용 방법을 조정해보았다. Supply-Demand 모형 적용 결과에 크게 영향을 끼치는 사항은 입력 자료에서 구간별  $q-k$ 관계도에 의한 Sending & Receiving function 과 시간별 진출부 직전 상류부 본선의 용량 제약이다. 이 중 구간별  $q-k$ 관계도는 이전에 여러 번 보정



<그림 12> 실제밀도와 Supply-Demand 모형 예측밀도 비교

<Fig. 12> A comparison of actual density with density predicted by Supply-Demand model





<그림 13> 실제밀도와 Supply-Demand 모형 예측밀도(case2) contour map 비교

<Fig. 13> A comparison of actual density with density predicted by Supply-Demand model(case2) in contour map

을 거쳐 Supply-Demand 모형을 적용했다. 따라서 시간별 진출부 직전 상류부 본선의 용량제한 사항에 대해 조정을 실시하였다. 이전 적용(case1)에서는 진출부 직전 본선 검지기 속도자료를 10분 단위로 50kph 미만인 시간대를 용량이 저하된다고 판단했었는데, 10분 내에 용량저하 정도가 여러 번 변할 수 있을 것이라 사료된다. 이에 case2에서는 용량 감소 여부 판단을 5분 단위로 세분화하여 하고 5분 단위로 평균한 교통량을 감소된 용량으로 적용하였다.

Supply-Demand 모형을 조정하여 적용(case2)한 결과, 대기행렬 패턴이 case1보다 실제와 좀 더 유사하게 나타났고 대기행렬이 생성된 구간 및 시간대가 세부적으로 잘 표현되었다. case1에서 약 11:00 시간대 이후로 밀도가 과다 추정되었는데 case2는 실제와 유사하게 예측되었다. 이것은 진출부로 인한 본선 용량 감소 여부 파악 시간대를 세분화함으로써 감소된 용량이 실제 상황과 유사하게 측정된 것으로 사료된다. 또한 예측밀도와 실제밀도의 밀도오차를 산

정한 결과, Supply-Demand 모형 이전 적용(case1)의 분석시간대 전체 평균 밀도오차가 39.0%, 적용 조정(case2) 후에는 23.1%로 조정 후 밀도 예측력이 더 우수한 것으로 나타났다.

$$\text{밀도오차}(\%) = \frac{\text{예측밀도} - \text{실제밀도}}{\text{실제밀도}} \times 100 \quad (3)$$

교통류 예측력이 좋았던 case2에 대해 <그림 13>과 같이 contour map으로 나타내어 실제밀도와 비교해보았다. 분석구간별 평균 임계밀도가 90(veh/km/3lane)임을 고려해 밀도가 100일 때 대기행렬이 생성된다고 보고 밀도가 100이상인 시간대와 구간대를 표현하였다. 그 결과, Supply-Demand 모형 적용(case2)의 대기행렬의 생성과 소멸지점이 실제와 매우 유사하게 나타났다. 생성된 대기행렬 내의 밀도도 유사하게 예측된 것을 볼 수 있다. 이 결과는 Supply-Demand 모형 적용 시에 진출램프 대기행렬의 영향으로 인한 본선 용량 변화를 시간대별로 적절히 반영해 줄 수 있

었기 때문이라 판단된다.

#### IV. 결론 및 향후 연구과제

교통상황에 따른 고속도로 용량 변화를 탄력적으로 적용하여 연속교통류를 표현할 수 있는 Supply-Demand 모형을 실제 고속도로에 분석하여 그 적용성을 검증하였다.

적용할 고속도로의 실제 검지 이력자료를 통해 Simplified  $q-k$ 관계도를 설정하여 구간별로 Sending & Receiving function을 산출하였고, 진출램프 대기행렬의 본선 영향을 표현하기 위해 진출램프 직전 상류부 구간의 검지자료를 통해 실시간으로 용량감소를 파악하여 적용하였다.

Supply-Demand 모형을 적용한 결과, 고속도로 진출램프 대기행렬의 본선 역류로 인한 본선 대기행렬의 생성 및 소멸 구간과 시간대, 본선 대기행렬 패턴 등의 교통류 상태가 실제와 유사하게 예측되었다.

이렇게 Supply-Demand 모형은 Sending & Receiving을 구간별 시간대별로 탄력적으로 적용함으로써 고속도로 정체의 주요인인 진출램프 대기행렬 영향으로 인한 고속도로 본선의 용량 감소를 표현할 수 있는 것으로 분석되었고, 본 Supply-Demand 모형의 적용성이 검증되었다.

본 연구에서는 Supply-Demand 모형 적용 시 구간별  $q-k$ 관계도를 모두 Newell의 Simplified  $q-k$ 관계도 형태로 적용하여 Sending & Receiving function을 산출하였다. 향후 이를 앞의 <그림 3>와 같이  $q-k$ 관계도 형태를 세부적으로 달리 적용하고 보정하여 Supply-Demand 모형의 적용성을 높일 수 있을 것이다. 그리고 진출램프 대기행렬의 본선 영향에 따른 본선 용량감소를 좀 더 정확하게 파악하는 방안 연구나, 다른 고속도로 구간에 추가로 적용하여 본 모형의 추가 검증 연구 등이 요구된다.

#### 참고 문헌

[1] M. J. Lighthill and G. B. Whitham, "On kinematic

waves. I: Flow movement in long rivers. II: A theory of traffic flow on long crowded roads," *Proc. Royal Society, A* 229, pp. 281-345, 1955.

- [2] G. F. Newell, "A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory; Part II: Queuing at freeway bottlenecks; Part III: Multi-destination flows," *Transportation Research Board*, vol. 27, pp. 281-314, Aug. 1993.
- [3] C. F. Daganzo, "A finite difference approximation for the kinematic wave model of traffic flow," *Transportation Research Board*, vol. 29, pp. 261-276, Aug. 1995.
- [4] S. K. Godunov, "Bounds on the discrepancy of approximate solutions constructed for the equations of gas dynamics," *J. Computers Mathematics and Mathematical Physics I*, pp. 623-637, 1961.
- [5] C. F. Daganzo, "The cell-transmission model: A simple dynamic representation of highway traffic," *Transportation Research Board Part B*, vol. 28, no.4, pp. 269-287, Aug. 1994.
- [6] C. F. Daganzo, "The cell transmission model. Part II: network traffic," *Transportation Research Board*, vol. 29, pp. 79-93, Apr. 1995.
- [7] Y. H. Kim, *Online traffic flow model applying dynamic flow-density relations*, Ph. D. Dissertation, University of Munchen, 2002.
- [8] V. F. Hurdle and B. S. Son, "Road test of a freeway model," *Transportation Research Part A* vol. 34, no. 7, pp. 537-564, Sept. 2000.
- [9] 손봉수, "고속도로의 교통류해석을 위한 컴퓨터 알고리즘 개발: 이론적 배경을 중심으로," *대한교통학회지*, 제14권, 제4호, pp.131-154, 1996. 12.
- [10] 손봉수, 김보현, "도시고속도로 구간소통상황 판단을 위한 지점데이터 가공방법," *대한토목학회지*, 제24권, 제3D호, pp. 363-363, 2004. 7.
- [11] 이승준, *도시고속도로 차로별 교통류특성에 관한 연구*, 서울대학교 석사학위논문, 1998.

저자소개



전 재 현 (Jeon, Jae-Hyeon)

2009년 8월 ~ 현재 : 서울시정개발연구원 위촉연구원  
2009년 8월 : 서울시립대학교 일반대학원 교통공학과 (공학석사)  
2006년 2월 : 서울시립대학교 교통공학과 (공학사)



김 영 찬 (Kim, Young-Chan)

1996년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수  
1990년 12월 : 미국 Texas A&M University 토목공학과(교통공학박사)  
1985년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 졸업(도시공학석사)  
1983년 2월 : 서울대학교 토목공학과 졸업(도시공학학사)