

연속류 가변속도제어 모형개발 및 효과분석

Modelling and Evaluation of Traffic Flow with Variable Speed Limit on Highway

조혜림* 김영찬** 하동익***
(Hye-Rim Cho) (Young-Chan Kim) (Dong-Ik Ha)

요약

가변속도제어(Variable Speed Limit ; VSL)는 교통상황에 따라 속도를 차등 제한하여 혼잡 또는 사고지점에 도달하기 전 차량간, 차로간 속도편차를 감소시킴으로써 사고를 예방하고 총 지체를 최소화하기 위한 연속류 ITS 기법 중 하나이다. 본 연구에서는 가변속도 제어시 연속류 기본구간의 동적교통류에 대한 수학적 분석결과를 기초로 가변속도제어 수행모형을 제시하고 효과분석을 수행하였다. 가변속도제어모형은 병목현상 발생시 상류부에 전파되는 충격파의 속도를 최소화 함으로써 지체를 감소시킬 수 있도록 graphical solution을 적용하여 제시한다. 또한 가변속도 제어시 해당 지점으로부터 하류부로 전파되는 충격파의 생성 및 움직임을 모형화 하여 재현하며 그 방법론으로는 Cell-Transmission Model 및 Supply-Demand Method를 적용하였다. 가변속도제어 적용에 따른 효과분석으로는 제어를 통한 지체감소의 효용성 및 안전도 측면에서 각 Cell별 속도 및 밀도의 표준편차의 개선정도를 살펴보았다. 향후 본 연구의 이론적 검증 및 분석 결과를 토대로 다양한 가변속도제어모형 및 운영방안을 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract

Variable speed limit(VSL) is one of the highway ITS techniques designed to prevent accidents and traffic slow down by reducing congestion or speed variation between vehicles and lanes prior to arrive at the accident location by limiting speed. In Korea, while people have recognized the need for variable speed limit beginning with Seoul's urban expressway and installed facilities in order to provide guide for speed limit per lane and lane use, there has not been enough development of algorithm for internal administration as well as research on the basic principles behind administering variable speed limit. This study is for modeling and evaluating the VSL strategies based on the traffic flow theory. Supply-Demand method of the Cell Transmission Model is applied to demonstrate the traffic features and shockwaves to upstream of the bottleneck with/without VSL. We verified the explanation of Cell Transmission Model for the numerical example. and as the result, it is found that VSL strategies can reduce the total travel time in the congested section and variation of the speed. It means VSL is useful to improve the traffic condition and the safety on highway

Key words : Variable speed limit(VSL), cell transmission model, supply-demand method, freeway management

† 본 논문은 국토해양부의 2008년 건설기술혁신사업의 일환으로 현재 수행 중인 “SMART Highway 교통류 최적화 관리기술 개발-혼잡시 분선 교통관리 기술 개발(기술혁신A01)”의 지원을 받아 수행하였습니다.

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사과정

** 공저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

*** 공저자 : 인트라스 대표이사

† 논문접수일 : 2010년 12월 10일

† 논문심사일 : 2011년 2월 12일

† 게재확정일 : 2010년 2월 14일

I. 서 론

가변속도제어(Variable Speed Limit ; VSL)는 교통 상황에 따라 속도를 차등 제한하여, 혼잡 또는 사고 지점에 도달하기 전 차량간, 차로간 속도편차를 감소시킴으로써 사고를 예방하고 총지체를 최소화하기 위한 연속류 ITS 기법 중 하나이다. VSL은 이미 유럽의 여러 국가에서 적용, 운영되고 있으며 효과 분석 및 운영방안 등 관련연구개발도 활발히 수행되고 있다. 국내의 경우 서울시 도시고속도로를 필두로 가변속도제어에 대한 필요성을 인식하고 차로별 속도제어 및 차로이용 안내를 수행하고자 관련 현장시설물을 설치하였으나 내부 운영 알고리즘에 대한 개발은 물론 가변속도 제어가 운영되는 기본 원리에 대한 연구가 미흡하여 실제 효과적인 운영이 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 가변속도 제어시 연속류 기본구간의 동적교통류에 대한 수학적 분석결과를 기초로 가변속도제어 수행모형을 제시하고 효과분석을 수행한다. 분석범위는 현재 연속류 관리현황을 고려하여 집계자료 중심의 거시적 접근방법을 적용하였으며 교통류는 연속류를 중심으로 한다. VSL 적용 효과를 확인하기 위해 Cell-Transmission Model 및 Supply-Demand Method 이론을 이용한다. 사고발생과 같은 용량와해현상 발생시 가변속도를 적용할 경우 해당 지점으로부터 하류부로 전파되는 충격파의 생성 및 움직임을 모형화 하여 재현하며, VSL 제어에 따른 교통류의 변화 분석 및 개선효과를 파악하고자 한다.

II. 기존이론 및 관련연구 고찰

가변속도제어모형의 수립 방법론을 정립하기 위해 가변속도제어와 관련된 교통류 특성분석에 대한 기존연구와 제어 알고리즘 개발사례에 대해 고찰하였다. 그 결과 안전성 증진을 목적으로 한 모형개발과 관련한 연구가 다수를 이루었으며 이 외에 가변속도 적용방법에 따른 효과분석 및 교통류 상태에 미치는 영향에 대한 연구가 일부 진행되어 왔음을 알 수 있었다.

Lee et al. (2004)는 안전성 증진의 관점에서 VSL을 이용한 Real-Time Crash Prediction Model을 제시하였다. 본 논문에서는 고속도로 구간에서 차량의 평균속도에 따라 가변적으로 속도 제어를 적용하되 이때 잠재적인 충돌 위험(Crash Potential)을 판단하여 실시간으로 속도제어를 수행하는 모형을 개발하였다. 모형 검증을 위해 Microscopic Simulation을 이용하였고 분석결과 표본 고속도로 구간에서 충돌위험이 미제어시보다 감소하는 것으로 나타났다[1].

P. Allaby(2007)는 캐나다의 고속도로 구간을 대상으로 교통량, 점유율, 평균속도에 따른 가변 제한속도를 산정하는 기준(100km/h, 80km/h, 60km/h 중 선택)을 제시하였다. 본 연구에서는 20초 단위의 실시간 검지기 데이터를 기반으로 가변속도제어를 실시하였다. 고속도로 반복정체구간에 대해 침두시와 비침두시에 각각 표출 제한속도의 빈도수를 확인하고 가변속도제어 수행시 안전도 변화를 분석하였다. 그 결과, 가변속도제어시 상대적 안전도가 침두시에 39% 향상, 비침두시에 5% 감소되는 것으로 나타났으나, 평균통행시간은 교통량에 따라 오히려 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 이는 혼잡상황에 대해 교통상황에 따른 평균속도에 근접한 가변속도 제어를 수행함으로써 stop and go 현상을 감소시켜 주며, 보다 안정된 상태의 교통류를 유지시켜 준 결과라고 분석되었다[2].

가변속도가 교통류에 미치는 영향 및 지체관리를 목적으로 하는 연구로는 Papageorgiou의 연구가 대표적인 사례이다. Papageorgiou et al.(2007)는 가변속도제어시 교통량-밀도의 변화에 대해 분석하였다. 연구결과에 의하면 가변속도제어 적용 유무에 따른 교통량 변화의 비교분석 결과 가변속도제어 적용시 개별차량의 속도 변화 및 용량의 변화는 미미하나, 임계 점유율이 증가한다는 점을 제시하였다. 즉 제한속도를 낮추어 적용할수록 교통량-점유율간의 기울기 차를 감소시켜 주는 것으로 나타났다[3].

강경표(2006)는 공사구간들을 대상으로 공사구간과 상류부의 교통량, 속도 자료로 공사 영향구간과 속도경계 구간을 설정하여, 실시간 검지 데이터를 기반으로 가변속도제어를 실시하였다. 단계별 가변

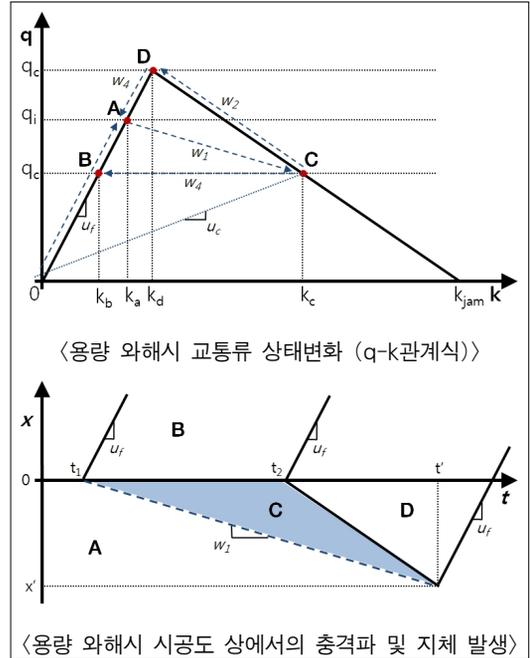
속도제어 수행과정은 가변속도제어 효과 분석 시 차로수와 공사로 폐쇄되는 차로수, 교통량 수준을 달리해 시나리오를 구성하여 가변속도제어를 실시한 경우와 실시하지 않은 경우에 대해 모의실험을 하였다. 공사로 2차로 도로에서 1차로가 폐쇄 시 교통량 수준을 2,500~4,500veh/h로 적용하여 분석한 결과, 교통량 수준이 3,000~4,000veh/h일 때 가변속도제어가 제어하지 않았을 때보다 통과교통량 증가, 평균통행속도 증가, 평균지체 감소 효과가 있는 것으로 분석되었다[4].

국내에서 수행된 관련연구를 살펴보면, 박지은(2009)은 사고로 인해 용량이 50%로 감소되었을 경우에 대해 가변속도제어 운영효과를 분석하고 이를 교통류 모형과 충격파 이론을 이용하여 설명하였다. 연구결과 100km/h의 환경에서 60km/h로 가변속도 제어시 사고지점에 도달하기 전 차량들이 속도를 미리 감소함으로써 대기행렬 생성 시간이 늦춰지는 효과를 확인하였다[5]. 또한 조혜림(2009), 이장훈(2010)의 연구에 의하면 가변속도 적용시 발생하는 충격파의 형태 및 교통류 상태변화를 시공도의 차량배치변화를 통해 설명하였으며 이를 q-k 곡선으로 표현함으로써 가변속도 효과에 대한 이론적인 검증을 수행하였다[6,7].

기존연구 고찰결과 가변속도제어는 안전성 증진에는 효과가 뛰어난 것으로 제시되어 있으나, 혼잡도 해소에 대해 효과가 있다고 제시한 논문도 있었으며, 일부 연구에서는 통행시간이 오히려 증가할 수도 있음을 제시하는 등 그 효과에 대해 명확한 되어있지 않았다. 이에 가변속도제어의 수행원리 및 교통류에 미치는 영향에 대한 기존 연구결과를 바탕으로 가변속도제어모형을 개발하고 지체감소 및 안전도 증진효과를 중심으로 분석을 수행하고자 한다.

Ⅲ. 교통류 특성분석에 따른 가변속도제어 기본전략 설정

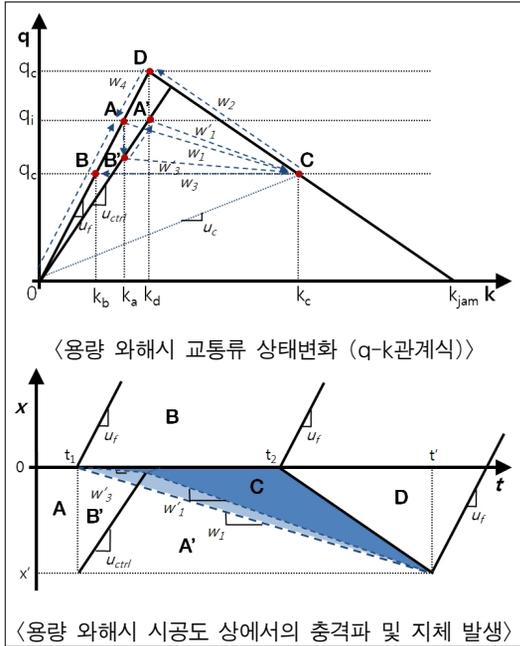
연속류 가변속도 제어에 대한 교통류 특성분석



〈용량 와해시 교통류 상태변화 (q-k관계식)〉
 〈용량 와해시 시공도 상에서의 충격파 및 지체 발생〉
 <그림 1> 용량 와해시 교통류 상태변화 및 충격파 발생
 <Fig. 1> Traffic feature and shockwaves with capacity has broken-down

및 모형개발을 용이하게 수행하기 위해 교통류 특성이 변화하여 서로 다른 속도, 밀도, 교통량 변화가 발생하는 충격파를 이용하여 설명하였다. 본 연구에서는 충격파의 발생형태를 시공도 및 q-k diagram을 통해 설명하는 graphical solution을 적용하였다(조혜림, 2009)[6]. 계산의 용이성을 위하여 교통량-밀도곡선은 Newell의 Simplified Traffic Flow Theory를 적용하였다. 일반적으로 연속류에서 사고와 같이 도로를 점유하는 이벤트가 발생하여 용량 저하가 발생하면 해당 구간의 상류부에는 ω_1 과 같은 충격파가 발생하게 된다. 시공도 상에 표시된 C에 해당하는 면적은 용량와해로 인해 병목구간 상류부에 발생하는 총 지체를 나타낸다.

용량와해 발생시 가변속도제어를 적용할 경우 교통류 상태 및 상류부로 전파되는 충격파의 속도는 <그림 2>와 같이 변화한다. 속도 u_f 에서 u_{ctrl} 로 속도를 제어할 경우 (단, $u_f > u_{ctrl}$) 제어를 시작한 시점부터 병목구간으로 유입되는 교통량이 조절됨에

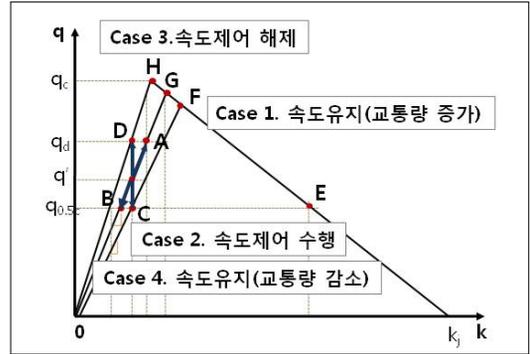


〈그림 2〉 VSL 적용시 교통류 상태변화 및 충격파 변화
 〈Fig. 2〉 Changes of traffic feature and shockwaves with VSL

따라 교통류 상태는 밀도는 동일하되 교통량이 감소하게 되며 이를 q-k관계식에서 표현하게 되면 A상태에서 B'상태로 변화하게 되는 것을 알 수 있다. 그 결과 초기 충격파 속도가 w_2 에서 w'_3 으로 낮아지게 됨을 알 수 있다. 결과적으로 시공도에서 밀도가 가장 높은 상태인 C 상태에 해당하는 면적이 감소될 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 가변속도제어를 통해 총 지체를 감소시킬 수 있음을 증명하였다.

본 연구에서는 graphical solution을 기준으로 가변속도제어를 통해 지체를 감소시킬 수 있도록 다음과 같이 제어전략을 제시한다.

우선 첫 번째 가변속도제어 수행원칙으로는 가변속도 제어에서 속도 변화에 대한 정의를 제시한다. 가변속도제어 수행시 발생 가능한 교통류 변화는 속도 제어시, 속도 미제어시로 구분하여 총 4가지 형태가 존재한다. 비포화시 교통류 상황에서 속도제어를 수행하지 않아 일정속도를 지속적으로 유지할 수 있는 경우 기대할 수 있는 교통상황의 변화는 교통량이 유입교통량까지 증가(case 1.)하거나



〈그림 3〉 가변속도제어 수행원칙
 〈Fig. 3〉 Rules of VSL control

아니면 감소(case 2.)하는 경우이다. 반면, 가변속도제어가 수행될 경우에는 기준속도에서 속도를 낮추어 제어속도를 감소(case 3.)시키던가 아니면 속도를 높여줌(case 4.)으로써 가변속도제어를 점차 해제시키는 제어전략이 수행될 수 있다. 이 4가지 형태의 교통류 상태를 교통량-밀도곡선을 이용하여 표현하면 아래 그림과 같다.

일정 구간에 대해 기준속도 u_1 에서 속도를 변화하지 않고 관찰할 경우 교통류 상태는 교통량, 밀도가 증가하거나(Point A), 아니면 감소하는 상태(Point B)를 나타내게 된다. 가변속도를 적용하여 u_2 로 속도가 제한될 경우 위의 그림과 같이밀도는 유지되며 교통량이 저하되는 현상(Point C)이 발생한다. 반대로 제어속도를 상향조정할 경우(Point D) 역시 밀도는 변화하지 않고 교통량이 증가하게 된다.

두 번째 총 지체를 감소시키기 위해 제어속도를 최대한 낮추어 줌으로써 충격파의 상류부 전파속도를 감소시킬 수 있도록 하는 제어전략을 제시한다. 총 지체 감소는 결국 <그림 2>에서 C의 면적을 최소화 할 수 있도록 w'_3 의 속도를 최소화 하는 것이다. 단, 급격한 속도 감소에 따른 안전사고 방지를 위해 일정속도단위를 적용하여 단계별 속도 제어를 수행할 수 있도록 제약조건을 설정한다.

IV. 가변속도제어 모형개발

본 연구에서는 앞서 제시한 두 가지 제어전략에 기

초하여 가변속도제어 모형을 제시하며, 가변속도 제어 시 교통류 특성 변화와 효과평가를 수행하기 위해 가변속도제어시의 교통류 특성을 모사할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 이장훈(2009)이 적용하였던 Cell-Transmission Model의 Supply-Demand Method 이론을 이용하여 교통류 특성을 살펴보았다[7]. Supply-Demand Method는 대상구간을 일정간격의 Cell로 구분하고 시간에 따른 cell별 밀도를 산정하여 연속류를 표현하는 Numerical Solution에서 유출입 교통량을 Demand-Supply function을 적용하여 산정하는 방법이다 (Daganzo, 1995)[8].

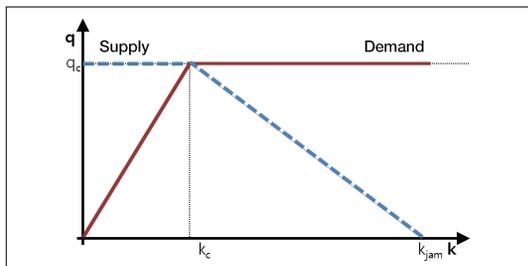
$$k_{i,t+1} = k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{i-\frac{1}{2},t} - q_{i+\frac{1}{2},t}] \quad (1)$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(D_{i-1,t}, S_{i,t}) - \min(D_{i,t}, S_{i+1,t})]$$

$q_{i-\frac{1}{2},t}, q_{i+\frac{1}{2},t}$: $i-1/2, i+1/2, j$ 에서의 유입교통량
 $k_{i,t}$: i 구간, j 시점의 밀도
 Δt : 단위분석시간
 Δx : 단위분석구간

Supply-Demand Method를 용량이 와해된 연속류 구간에 적용할 경우에는 용량와해구간을 기준으로 다음과 같이 4가지 유형으로 Supply-Demand diagram가 변화되며, cell별 밀도 산정식은 다음과 같다.

식 (2)는 해당구간이 병목발생영향을 받지 않는 자유로운 상태일 때 적용되는 밀도산정식으로 <그림 5>의 (a)에 해당한다. 여기서 적용되는 $q_m - D$ 및 $q_m - S$ 는 상기에서 제시한 Supply Demand Method에 의해 병목 발생 상황에 따라 달리 적용된다. 또한 현재 해당 Cell의 제어속도에 따라 U_{ctrl} 값이 적용되며, 이후 VSL 제어시 교통류 상태분석에서 산정할 교통



<그림 4> Supply-Demand Diagram (Daganzo, 1995)
 <Fig. 4> Supply-Demand Diagram (Daganzo, 1995)

류 해소 충격과 속도는 $k_{j-slope}$ 로 제시된다.

식 (3)은 해당 Cell이 병목구간 이전일 경우 적용되며 inflow 교통류가 기존 용량을 따르고, outflow 교통류는 기존용량에서 용량저하가 된 만큼 감소하기 때문에 k_j 를 αk_k (1차로 용량저하시 $\alpha=0.5$)를 적용하여 용량을 감소시킨 것이다.<그림 5>의 (b)

식 (4)의 경우 병목지점에서의 밀도산정식으로 <그림 5>의 (c)와 같이 용량이 저하된 상태에서 제한된 교통류가 유입될 경우를 나타내며, 식 (5)의 경우 병목지점의 직후의 cell에 해당하는 식으로 <그림 5>의 (d)에 해당한다. 유입교통량인 inflow 교통류는 기존 용량에서 병목구간으로 인해 감소된 유입 교통류를 처리하는 것으로 식을 대입한다.

$$k_{i,j+1} = k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{i-\frac{1}{2},t} - q_{i+\frac{1}{2},t}] \quad (2)$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(D_{i-1,t}, S_{i,t}) - \min(D_{i,t}, S_{i+1,t})]$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(u_{ctrl} \times k_{i-1}, q_c, \alpha \times (k_{jam} - k_i)) - \min(u_{ctrl} \times k_i, q_c, \alpha \times (k_{jam} - k_{i+1}))]$$

$$S_{i,j} = \begin{cases} q_c & , D_{i,j} = \begin{cases} u_{ctrl}k & \text{if } k_i \leq k_c \\ q_c & \text{if } k_i > k_c \end{cases} \end{cases}$$

$$k_{i,t+1} = k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{i-\frac{1}{2},t} - q_{i+\frac{1}{2},t}] \quad (3)$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(D_{i-1,t}, S_{i,t}) - \min(D_{i,t}, S_{i+1,t})]$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(u_{ctrl} \times k_{i-1}, q_c, \alpha \times (k_{jam} - k_i)) - \min(u_{ctrl} \times k_i, q_c, \alpha \times (k_{jam} - k_{i+1}))]$$

$$S_{i,j} = \begin{cases} q'_c & \text{if } k_i \leq k'_c \\ \alpha(k'_{jam} - k_i) & \text{if } k_i > k'_c \end{cases}, D_{i,j} = \begin{cases} u_{ctrl}k & \text{if } k_i \leq k_c \\ q_c & \text{if } k_i > k_c \end{cases}$$

$$k_{i,t+1} = k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{i-\frac{1}{2},t} - q_{i+\frac{1}{2},t}] \quad (4)$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(D_{i-1,t}, S_{i,t}) - \min(D_{i,t}, S_{i+1,t})]$$

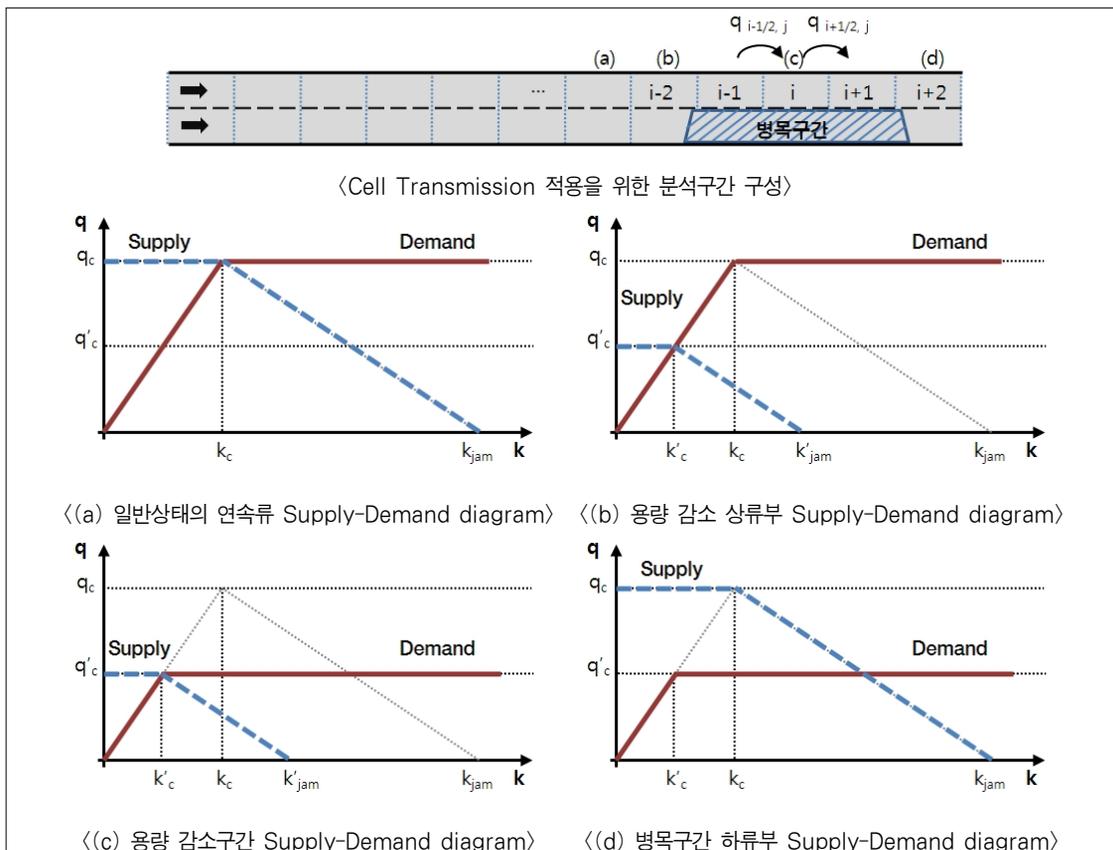
$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(u_{ctrl} \cdot k_{i-1}, q'_c, q_c, \alpha \cdot (k'_{jam} - k_i)) - \min(u_{ctrl} \cdot k_i, q'_c, q_c, \alpha \cdot (k'_{jam} - k_{i+1}))]$$

$$S_{i,j} = \begin{cases} q'_c & \text{if } k_i \leq k'_c \\ \alpha(k'_{jam} - k_i) & \text{if } k_i > k'_c \end{cases}, D_{i,j} = \begin{cases} u_{ctrl}k & \text{if } k_i \leq k'_c \\ q'_c & \text{if } k_i > k'_c \end{cases}$$

$$k_{i,t+1} = k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{i-\frac{1}{2},t} - q_{i+\frac{1}{2},t}] \quad (5)$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(D_{i-1,t}, S_{i,t}) - \min(D_{i,t}, S_{i+1,t})]$$

$$= k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(u_{ctrl} \cdot k_{i-1}, q'_c, q_c, \alpha \cdot (k'_{jam} - k_i)) - \min(u_{ctrl} \cdot k_i, q'_c, q_c, \alpha \cdot (k'_{jam} - k_{i+1}))]$$



〈그림 5〉 용량 감소시 구간별 Supply-Demand diagram 변화

〈Fig. 5〉 Variation of Supply-Demand diagrams when the capacity has broken down

$$S_{i,j} = \begin{cases} q & \text{if } k_i \leq k_c \\ \alpha(k_{jam} - k_i) & \text{if } k_i > k_c \end{cases}, \quad D_{i,j} = \begin{cases} u_{ctrl}k & \text{if } k_i \leq k'_c \\ q'_c & \text{if } k_i > k'_c \end{cases}$$

- $q_{i-\frac{1}{2},t}, q_{i+\frac{1}{2},t}$: $i-1/2, i+1/2, j$ 에서의 유입교통량
- $k_{i,t}$: i 구간, j 시점의 밀도
- $\Delta t, \Delta x, \Delta u$: 단위분석시간, 단위제어구간, 단위제어속도
- $D_{i,t}$: i 구간, j 시점의 유입교통량(demand)
- $S_{i,t}$: i 구간, j 시점의 용량(supply)
- u_{ctrl} : 적용 제어속도
- k_c, k'_c : 임계밀도
- k_{jam}, k'_{jam} : 혼잡밀도
- q_c, q'_c : 일반상태에서의 용량 및 와해용량
- α : 충격과 속도(km/h)

앞서 제시한 두 가지 제어전략에 기초하여 가변속도제어 모형을 제시하되 식 2~5와 같이 Supply-Demand Method를 이용하여 Cell별 교통특성을 묘사할 수 있도록 가변속도제어 시뮬레이션을 위한 모형 수행절차를 다음과 같이 제시한다.

Step 0. 초기자료 입력

- D : 제어구간, Δd : 분석단위구간,
- Δu : 단위제어속도, Δt : 분석단위시간,
- $u_f = u_{max}$: 최대속도, β_t : 용량감소비율
- $u_{i,t}k_{i,t}v_{i,t}$: i 구간 t 시간대 속도, 밀도, 교통량

Step 1. 분석자료 초기화

$$u_{i,1} = u_f, \quad k_{i,1} = \frac{q_{input}}{u_f}$$

Step 2. 병목구간 발생유무 확인 / 용량갱신

$$C_{cp}(t) = \min [C_{cp}(t-1), q_t(t-1)]$$

$$\beta_t = \frac{C_{cp}(t)}{C_{cp}}$$

Step 3. 속도제어전략 적용

- if $\beta_t < 1, \beta_t - \beta_{t-1} < 0$ and $u_{i,t} > u_{min-ctrl}$
: 속도하향제어 수행

$$u_{it} = u_{it-1} - \Delta u$$

if $\beta_t = 1, \beta_t - \beta_{t-1} \geq 0$ and $u_{it} < u_f$
 : 속도상향제어 수행

$$u_{it} = u_{it-1} + \Delta u$$

if $\beta_t = 0, \beta_t - \beta_{t-1} \geq 0$: 속도미제어

$$u_{it} = u_{it-1}$$

단, $|u_{i,t} - u_{i-1,t}| \leq \Delta u, |u_{i,t} - u_{i,t-1}| \leq \Delta u$

Step 4. 속도제어에 따른 밀도 k_{it} , 교통량 q_{it} 계산

$$k_{i,j+1} = k_{i,t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\min(D_{i-1,t}, S_{i,t}) - \min(D_{i,t}, S_{i+1,t})]$$

여기서, $D_{it} = u_{it} \cdot k_{it}, S_{it} = \beta_t \cdot u_{it} \cdot k_{it}$

$$q_{it} = u_{it} \cdot k_{it}$$

Step 5. 시간 및 유입교통량 갱신

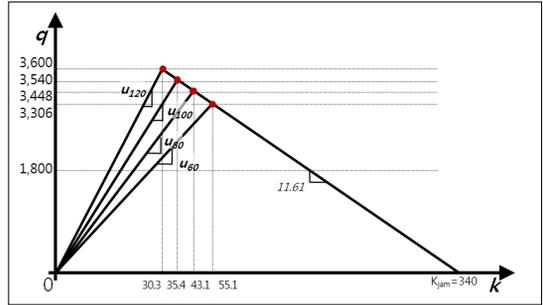
if $x_i(t) \leq D, t = t+1$ and $v_{int}(t+1) = \max(v_i(t))$ GOTO Step 2

V. 수치적 분석을 통한 효과분석 평가

본 장에서는 가변속도제어 수행시 충격파가 도로를 따라 확산되는 형태 및 수행효과를 확인하기 위해 수치적 분석을 수행한다. 우선 가변속도제어 모형 개발에 따른 교통류 관계식을 설정하기 위해 모형개발조건을 기준으로 제한속도를 적용하였을 때의 용량 및 임계밀도를 분석하였다. 본 분석에서 적용할 제한속도는 다양한 교통류 상태 파악을 위해 120, 100, 80, 60km/h까지 20km/h씩 차등을 두어 설정하였다. 분석자료는 micro-simulator인 VISSIM을 이용하여 편도 2차로 연속류의 상태에서 각각의 속도를 적용하였을 때 개별차량의 데이터를 수집하여 수행하였으며 그 결과 <표 1>과 같은 기초데이터를 구축하였다. 또한 계산을 용이하게 하기 위해 Newell의 Simplified Traffic Flow Theory를 이용한 q-k diagram을 적용하였다.

<표 1> 제한속도별 용량, 밀도임계값(2차로 기준)
 <Table 1> Capacity, critical density with variable speed

제한속도구분	용량(대/시)	임계밀도(대/km)
120km/h	3,600	30.3
100km/h	3,540	35.4
80km/h	3,448	43.1
60km/h	3,306	55.1



<그림 6> 속도에 따른 교통량-밀도곡선 data 설정
 <Fig. 6> q-k diagram as the control speed

<표 2> 분석을 위한 전제조건
 <Table 2> Basic assumption for example

구분	내용
도로특성	- 총 12.0km의 연속류 기본 구간 - 차로수 : 편도 2차로
교통특성	- 승용차 기준 분석 - 유입교통량 시나리오 1 : 3,600대/시 시나리오 2 : 3,000대/시 - 기본속도제한 : 120km/h
기타분석 기준	- 분석시간간격 : 30초(Δt) - 속도제어단위 : 20km/h(Δu) - 1km 간격 검지기 및 VSL 설치 - 운전자의 속도준수율 100% - 안전제어단위속도: 20km/h로 가정함

평가를 위한 전제조건으로 분석 대상지에 대한 구조적 조건 및 교통특성은 다음과 같이 설정한다.

기 제시한 가정 및 관계식을 기준으로 가변속도제어모형의 적용성 및 효과를 판단할 수 있도록 가변속도제어 미적용시, 적용시에 대한 분석을 유입교통량에 따라 2개 시나리오를 작성하였으며 이를 기준으로 수치적 분석을 수행하였다. 분석 시작 10분 후 25분간 1차로가 폐쇄됨에 따라 용량저하가 발생할 때 가변속도제어를 적용하되, 유입교통량에 따라 시나리오 1은 용량상태의 교통량 유입시, 시나리오 2는 용량보다 적은 교통량 유입시로 구분하여 적용하였다.

가변속도제어 적용에 따른 효과분석척도로는 지체감소 및 안전도 두 가지 요인을 검토하였다. 제어를 통한 통행시간, 지체시간을 기준으로 지체감소의 효용성을 검토하였으며, 안전도 측면에서 각

〈표 3〉 속도제어 설정
 〈Table 3〉 VSL for example and evaluation

- 병목발생 25분 이후 병목 해제
- 병목 발생 직후 병목구간 최상류부 10km지점부터 가변속도제어 수행(시나리오 1, 2)
- 최소제어속도 = 60km/h
- 속도제어전략 수행예시

공간 시간	10	9	8	7	...	병목 구간
t-1	120	120	120	120	120	
t	100	100	100	100	100	
t+1	100	80	80	80	80	
t+2	100	80	60	60	60	
t+3	100	80	60	60	60	
...						

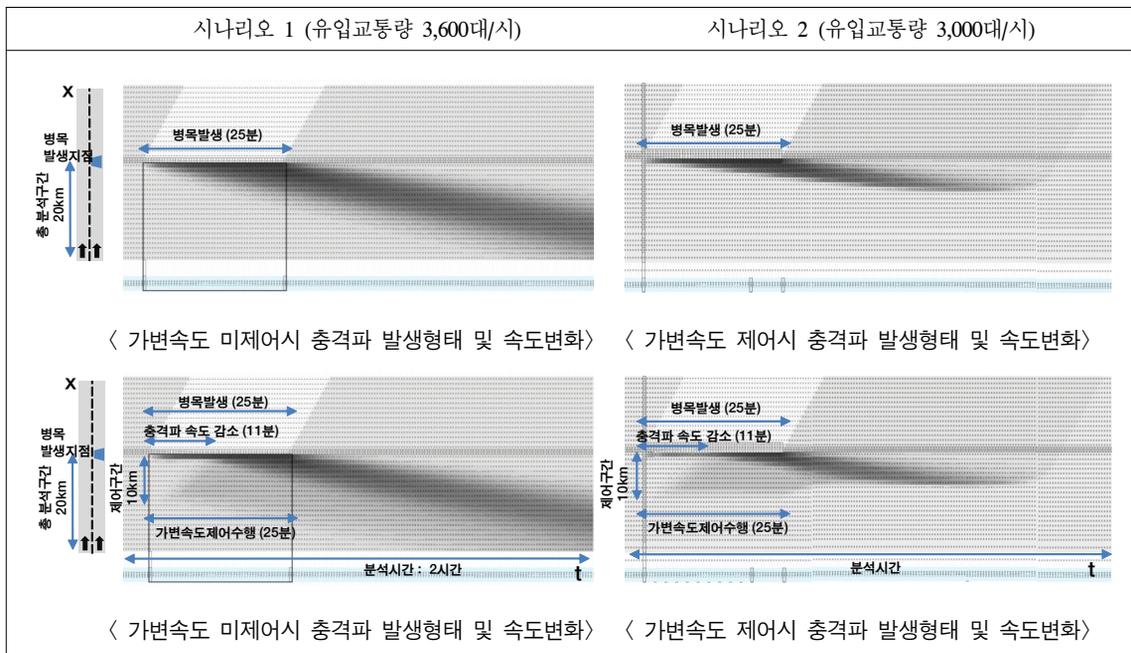
-병목구간 해제 후 제어종료

Cell별 속도 및 밀도의 변화를 살펴보았다[4,9,10].

〈그림 7〉에서 살펴보면 가변속도 미제어시 120km/h속도를 유지하던 교통류는 분석 시작 10분 경과후 사고가 발생함에 따라 용량이 3,800대/시에서 1,600대/시로 감소하였다. 사고 발생에 따라 상류부로의 충격파가 -11.61km/h로 발생하였으며, 병목 발생 25분 이후 병목이 해제됨에 따라 상류부 혼잡 해소 충격파가 발생하였다. 시나리오 1의 경

우 용량만큼의 교통량이 유입되는 상태에서, 단계별 제어를 수행하는 제약조건에 의거하여 120km/h에서 60km/h까지 단계별로 속도제어를 수행한 결과 제어수행 시작 시점으로부터 약 11분 가량 상류부로 혼잡이 전파되는 속도를 늦출 수 있었으며 그 이후에도 혼잡밀도구간이 현격하게 줄어있음을 알 수 있었다. 이는 앞서 살펴보았던 가변속도제어에 따른 교통류 특성이론 중 graphical solution에서 제시한 충격파의 형상과 동일하게 나타나는 결과이다. 시나리오 2의 경우에는 용량보다 적은 교통량이 유입됨에 따라 상류부로 혼잡이 전파되었다가 단시간내 해소되는 경우에 해당한다.

그 결과 <표 4>와 같이 총 통행시간은 약 -2.4% 감소한 것으로 나타났다. 이는 제어구간 유입 교통량을 감소시키기 위하여 가변속도제어를 수행하면서 지체충격파가 도달하지 않은 구간에 강제로 속도를 저하시킴에 따라, 미제어시 병목구간 최하류부에 집중되는 교통혼잡을 상류부로 분산시킨 결과 통행시간이 큰 폭으로 개선되지 않은 원인으로 분석된다. 그러나 속도가 50km/h 이하로 감소되는 지



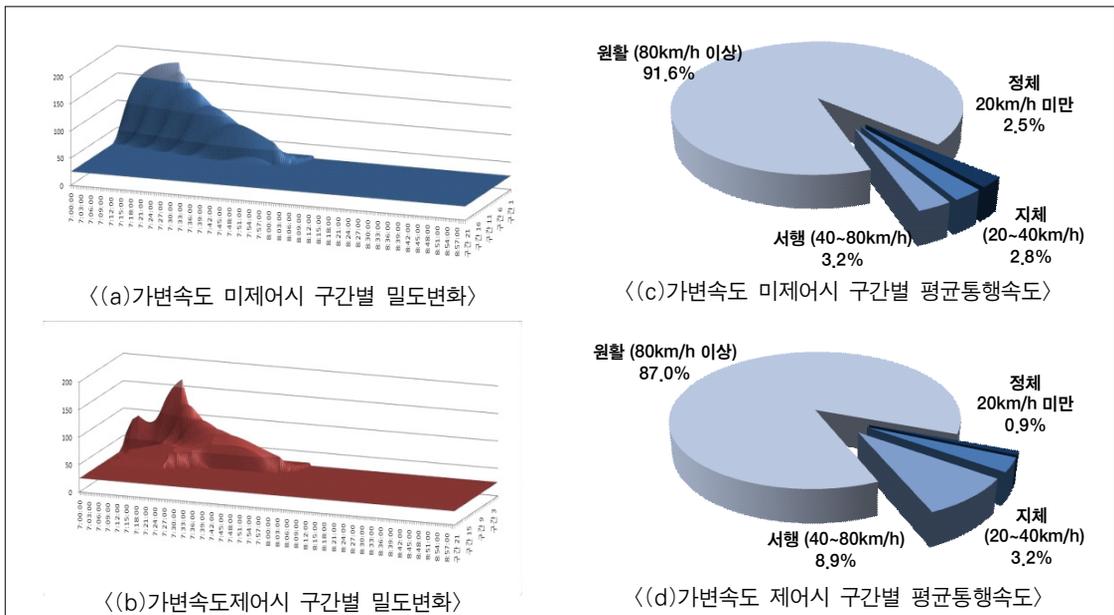
〈그림 7〉 가변속도제어/미제어시 시공도에서의 충격파 분석
 〈Fig. 7〉 Shockwaves occurred with/without VSL in time-space diagram

체구간 내에서의 통행시간 감소는 약 -12.5%로 나타나 운전자가 실제 지체를 체감하는 시간에 대한 개선효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 지체구간 병목이 발생하지 않았을 정상교통류 대비 감소된 지체시간은 약 5.1%로 나타났으며, 밀도 및 속도 표준편차가 각각 15.97%, 8.6% 감소한 것으로 나타나 전체적으로 가변속도제어가 지체감소 및 안전도 증진에 효용성이 있음을 뒷받침한다. 시나리오 2의 경우에는 유입교통수요가 적어 상대적으로 짧은 지체가 발생되었다가 해소되는 경우로 이 경우 밀도 표준편차는 약 18.8% 감소하였으나 전체

분석구간의 총 통행시간 및 평균통행시간에 대한 변화는 없는 것으로 분석되었다. 이는 가변속도제어를 통해 유입교통량의 진입속도를 조절함으로써 혼잡밀도 및 속도가 병목구간 상류부로 분산되었으며 병목구간의 용량이 복구되면서 해당 교통류가 처리됨에 따라 통행시간 절감분이 상쇄된 것으로 분석된다. 이는 시나리오 2 적용시의 밀도, 속도변화를 나타내는 <그림 8>에서 확인할 수 있다. <그림 8>의 (a), (b)를 살펴보면 병목으로 인해 증가되는 구간별 밀도가 가변속도제어를 적용함으로써 시공간적으로 분산되는 효과를 나타내고 있다. (c), (d)

〈표 4〉 가변속도제어 적용에 따른 효과분석결과
 〈Table 4〉 Result of evaluation of scenarios with/without VSL

시나리오		밀도평균 (대/km)	밀도 표준편차	총통행시간 (분-대)	평균 통행시간(분)	총 지체시간 (분-대)	속도 표준편차
시나리오 1	미제어시	56.32	35.53	169,263	28.12	-78,963	39.95
	제어시	54.97	29.85	165,215	27.44	-74,915	36.52
증감		▽2.4%	▽15.97%	▽2.4%	▽2.4%	▽5.1%	▽8.6%
시나리오 2	미제어시	31.74	29.85	95,476	27.44	-75,250	24.28
	제어시	31.74	19.69	95,476	15.86	-75,250	24.49
증감		0.00%	▽18.71%	0.00%	0.00%	0.00%	▽0.8%



〈그림 8〉 시나리오 2 : 가변속도제어/미제어시 구간별 평균통행속도, 밀도 변화 분석(시나리오 2 : 교통량 3,000대/h)
 〈Fig. 8〉 Scenario 2 : Average speed & density with/without VSL (Scenario 2 : Demand-3,000veh/h)

의 구간별 평균통행속도 역시 가변속도제어 전 40km/h 미만에 해당하는 지, 정체구간이 전체 구간의 약 5.3%를 차지하는 반면 가변속도제어 수행을 통해 지정체구간이 4.1%까지 감소함에 따라 운전자가 실제 지체를 체감하는 시간에 대한 개선효과가 있는 것으로 분석되었다. 단, 80km/h 이상인 원활상태의 구간은 91.6%에서 87.0%로 감소함에 따라 총통행시간 측면에서는 절감분이 상쇄된 결과를 나타내었다.

VI. 결론 및 맺음말

본 연구에서는 가변속도제어를 적용 하였을 때 나타나는 교통류 현상에 대하여 이론적으로 검증하고 이를 모형화 해서 실제 충격파가 발생하는 형상의 모사를 주요 내용으로 하였다. 사고발생에 따라 제한속도가 변경되는 상황을 교통량-밀도 관계도와 충격파이론을 이용하여 교통류 전이 현상 및 교통류의 연속적인 전이상태를 파악하였다.

또한, 모의실험을 통해 얻어진 이력자료를 기반으로 가변속도 제어시 해당 지점으로부터 하류부로 전파되는 충격파의 생성 및 움직임을 모형화 하여 재현하였으며 그 방법론으로는 Cell-Transmission Model 및 Supply-Demand Method를 적용하였다. 제시된 모형을 기반으로 가변속도제어 적용에 따른 효과분석적도로는 지체감소 및 안전도 두 가지 요인을 검토하였다. 제어를 통한 통행시간, 지체시간을 기준으로 지체감소의 효용성을 검토하였으며, 안전도 측면에서 각 Cell별 속도 및 밀도의 변화를 살펴보았다. 그 결과 밀도분포 및 속도분포에서는 절감효과가 있는 것으로 분석되었으나 총 통행시간의 변화는 상대적으로 미미한 것으로 분석되었다. 이는 가변속도제어가 유입교통량의 진입속도를 조절함으로써 및 속도가 병목구간 상류부로 분산되었으며 병목구간의 용량이 복구되면서 해당 교통류가 처리됨에 따라 통행시간 절감분이 상쇄된 결과로 분석된다. 그러나 밀도 및 지체도의 급격한 증가를 방지하고 시공간적으로 분산시킴으로써 운전자가 실제 지체를 체감하는 시간에 대한 개선효과가 있

는 것으로 분석되었다. 즉, 가변속도제어를 통해 불안정 교통류를 안정교통류로 전환시켜 전체적으로 교통류를 안정시키는 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

단, 본 연구에서 분석 수행시 가정하였던 안전제어 단위속도 및 적정 제어구간 산정에 대해서는 지속적인 연구를 통해 보완해야 할 과제로 남아있다. 또한 실제 가변속도제어의 적용성을 고려할 경우 운전자의 속도 준수율에 따른 제어효과에 대한 연구 역시 연구과제로 남아있다.

향후 보다 발생 가능한 시나리오를 추가 구성하여 적용성에 대한 평가를 완료하고 PARAMICS API를 통해 micro-simulator로 구현할 수 있도록 연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 완료될 경우 본 연구의 이론적 검증 및 분석 결과를 토대로 다양한 가변속도제어모형 및 운영방안을 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] C. Lee, B. Hellenga and F. Saccomanno, "Assessing safety benefits of various speed limits," *TRR*, no.1897, pp.183~190, 2004.
- [2] P. Allaby, B. Hellenga and M. Bullock, "Variable speed limits : safety and operational impacts of a candidate control strategy for freeway applications," *IEEE*, vol.8, no.4, pp.671~680, December, 2007.
- [3] M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, and I. Papamichail, "Effect of variable speed limits on motorway traffic flow," *TRR*, no. 2047, pp.37~48, 2008.
- [4] K. Kang, "Development of optimal control strategies for freeway workzone operations," University of Maryland, pp.34~35, 2006.
- [5] 박지은, "연속류에서의 가변속도제어 운영효과," 서울시립대학교, 2009. 2.
- [6] 조혜림, "연속류 가변속도제어 분석 및 모형개발," *한국ITS학회 춘계학술대회*, 2009. 4.

- [7] 이장훈, “연속류에서의 가변속도제어 운영효과,” 서울시립대학교, 2010. 2.
- [8] C. F. Daganzo, “Fundamentals of transportation and traffic operations,” *Pergamon*, 1995.
- [9] M. Riffkin, T. McMurtry, S. Heath and M. Saito, “Various speed limits signs effects on speed and speed variation in work zones,” *UDOT Connecting Communities Research*, Utah Department of Transportation Research and Innovation Division, January, 2008.
- [10] K. Kang, G. Chang and N. Zou, “Optimal dynamic speed-limit control for highway work zone operations,” *TRR*, no.1877, pp.77~84, 2004.

저자소개



조혜림 (Cho, Hye-Rim)

2007년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 박사과정(교통공학 전공)
 2001년 6월 ~ 2007년 8월 : SKC&C ITS사업팀
 1999년 2월 ~ 2001년 5월 : 한국교통개발연구원 광역교통계획팀
 1997년 3월 ~ 1999년 2월 : 홍익대학교 대학원 도시계획학과 석사(교통계획 전공)
 1993년 3월 ~ 1997년 2월 : 홍익대학교 대학원 도시계획학과 학사(도시공학 전공)



김영찬 (Kim, Young-Chan)

1996년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
 1993년 3월 ~ 1996년 2월 : 명지대학교 교통공학과 조교수
 1991년 12월 ~ 1993년 2월 : 도로교통안전협회 연구소 연구위원
 1991년 1월 ~ 1991년 12월 : 교통개발연구원 선임연구원
 1987년 1월 ~ 1990년 11월 : 미국 Texas A&M University 토목공학과 박사(교통공학)
 1983년 3월 ~ 1985년 2월 : 서울대학교 토목공학과 석사(도시공학 전공)



하동익 (Ha, Dong-Ik)

1981년 2월 : 홍익대학교 공과대학 도시공학과 졸업
 1983년 2월 : 홍익대학교 대학원 도시공학과 공학석사
 1992년 1월 : Polytechnic Institute of New York, U.S.A. 교통공학박사
 2000년 8월 ~ 현재 : 제온이엔에스 연구소장
 현재 : 인트라스 대표이사