

## 대기행렬이론을 이용한 병목지점 충돌위험 저감 가변속도제어 운영모형

이준형\* · 손봉수  
연세대학교 도시공학과

### A Variable Speed Limits Operation Model to Minimize Conflict at a Bottleneck Section by Cumulative Demand-Capacity Analysis

LEE, Junhyung\* · SON, Bongsoo

Department of Urban Planning & Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

#### Abstract

This study proposed a Variable Speed Limits(VSL) algorithm to use traffic information based on Cumulative Demand-Capacity Analysis and evaluated its performance. According to the analysis result, the total of delay consisted of 3 separate parts. There was no change in total travel time although the total of delay decreased. These effects was analysed theoretically and then, evaluated through VISSIM, a microscopic simulator. VISSIM simulation results show almost same as those of theoretical analysis. Furthermore in SSAM analysis with VISSIM simulation log, the number of high risk collisions decreased 36.0 %. However, the total delay decrease effect is not real meaning of decrease effect because the drivers' desired speed is same whether the VSL model is operated or not. Nevertheless this VSL model maintains free flow speed for longer and increases the cycle of traffic speed fluctuation. In other words, this is decrease of delay occurrence and scale. The decrease of speed gap between upstream and downstream stabilizes the traffic flow and leads decrease number of high risk collision. In conclusion, we can expect increase of safety through total delay minimization according to this VSL model.

본 연구에서는 검지기에서 수집가능한 교통정보를 이용한 대기행렬이론 기반 가변속도제어 운영모형과 그 효과를 제시하였다. 모형분석결과 가변속도제어를 실시할 때 총 지체가 3개 영역으로 나뉘어 발생하며, 총 통행시간의 증감없이 총 지체가 감소하였다. 이와 같은 가변속도제어 모형의 효과는 이론적 분석 후 VISSIM 미시 시뮬레이터를 통하여 검증하였으며, SSAM을 이용한 고위험 상충건수 분석이 이루어졌다. 분석결과 총 지체가 감소한 것으로 나타났으나, 총 통행시간이 동일하고 운전자의 희망통행속도는 가변속도제어 유무와 관계없이 동일하므로 실제 총 지체가 줄어든 것으로 볼 수 없다. 하지만 위 가변속도제어 모형은 자유속도 유지시간을 증가시키고, 속도편차발생 주기를 늘렸다. 이는 반복적인 지정체의 규모와 횡수 저감을 통해, 상하류부 교통류간 속도 차이를 줄여줌으로써 고위험 상충건수를 약 36.0% 저감하는 것으로 나타난다. 즉, 본 연구에서 제시한 가변속도제어값을 이용하여 가변속도제어를 실시할 경우 총 지체를 최소화함으로써 고위험 상충건수를 저감하는 안전성 향상효과를 기대할 수 있다.

#### Keywords

highway traffic management, high risk collision, queuing theory, speed fluctuation, variable speed limits  
고속도로 교통관리기법, 고위험 상충건수, 대기행렬이론, 속도편차, 가변속도제어

\* : Corresponding Author  
takion0424@yonsei.ac.kr, Phone: +82-2-2123-7237, Fax: +82-2-393-6298

Received 22 January 2015, Accepted 28 October 2015

## 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

연속류 교통관리 기법 중 하나인 가변속도제어는 보편적으로 상하류부 교통류 속도의 차이를 줄여주어 충돌(사고)위험을 줄여주는 효과와 정체관리 효과가 있는 것으로 알려져 있다.(P. Allaby, 2007) 특히 정체관리 효과 측면에서 정속주행성을 향상시켜주어 운전자의 피로도 저감과 연비향상 측면에서 최근 국내에서도 그 효과에 대한 인식이 이루어져 연구가 이루어지고 있으며 2010년 7월 도로교통법 시행규칙을 개정하여 가변속도 제어 운영을 위한 제도적 근거를 마련하였다.

가변속도제어를 통한 정체관리는 하류부 병목지점의 정체가 해소되는데 소요되는 시간만큼 상류부 교통류의 하류부 도달시간을 지연시키는 방식으로 이루어질 수 있다. 이 때 가변속도제어 운영자가 감안해야하는 요인은 크게 제어속도와 제어 시작시점 등으로 나누어볼 수 있다. 그러나 국내외에서 진행된 연구들은 아직 제어속도와 제어 시작시점 등과 같은 중요변수가 교통공학적 근거에 따라 산출된 사례가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 운영자가 관측하고 있는 도로의 교통수요에 따라 어느 수준의 가변속도제어를 실시하여야 하고, 가변속도제어를 통해 얻을 수 있는 정체감소효과와 충돌위험 감소효과를 제시하고자 한다.

### 2. 연구의 내용 및 방법

#### 1) 가변속도제어 및 정체관리효과

가변속도제어의 실시가 필요한 구간은 상습 지·정체 발생구간, 돌발상황 발생구간, 악천후구간, 작업구간, 교량·터널 등의 위험구간 등이 있다. 그러나 본 연구에서는 연구의 범위를 지·정체 발생 병목구간으로 한정하여 충지체의 감소효과를 확인하고자 한다.

운영자가 가변속도제어를 실시하기 위해서는 적절한 가변속도제어 시작시점과 제어값을 결정해야 한다. 본 연구에서는 가변속도제어 실시시점을 운영자가 판단하여 결정할 수 있도록 가변변수로 삼입한다. 병목지점에서 정체가 시작된  $t_s$ (min) 후에 가변속도제어를 실시할 때 적절한 가변속도제어값을 산출하는 것으로 연구의 범위를 한정한다.

기존의 선행연구들은 가변속도제어의 정체관리효과를 분석하기 위하여 충격파이론과 교통량-밀도 모형을 사용한 경우가 많다. 그러나 충격파이론과 교통량-밀도 모형의 적용을 위하여 필요한 교통밀도는 검지기 등을 통해 실제 현장에서 측정하기 어려운 지표로서 가변속도제어의 효과를 충분히 설명하지 못하는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 충격파이론과 동일한 분석결과를 도출하지만, 도로에 설치된 검지기를 통하여 쉽게 측정할 수 있는 교통 수요 교통류율과 도로의 용량으로 쉽게 분석이 가능한 대기행렬이론을 적용한 모형을 구축하였다.

#### 2) 충돌위험 감소효과

정체관리 효과를 극대화하기 위하여 산출된 가변속도제어 운영전략에 따라 미시 교통시뮬레이터 VISSIM을 이용하여 개별차량의 경로자료를 생산하였다. 이 경로자료는 SSAM에 입력되어 시나리오의 상충유형별 상충횟수를 산출 및 비교하였다.

## 기존 문헌 고찰

### 1. 가변속도제어에 관한 연구

Expressway & Transportation Institute(2013)은 가변속도제어를 “교통상황, 기상상태 등에 따라 최고 제한속도를 일시적 또는 시간대별로 변화시켜 교통류를 안정화시키는 교통류 관리전략”으로 정의하고 “운전자의 주행속도를 안전속도로 유지토록 함으로써 운영효율성 및 안전성을 향상시키기 위한 목적으로 운영한다”고 밝혔다. 그리고 지정체에 대응한 가변속도제어 운영방법론에서는 상습 지정체구간의 서비스수준이 C이하로 나타날 경우, 도로교통법 시행규칙 중 기상악화시 제한속도를 20-50% 감소하여 적용하는 법령을 준용하여 80kph, 50kph 등의 가변속도를 적용하였다.

Allaby P. et al.(2007)은 가변속도제어를 현재의 교통상황, 기상상황 등을 고려하여 Figure 1과 같이 교통관리센터와 통신하는 DMS(Dynamic Message Signs)에 제한속도를 표출하는 교통관리시스템으로 정의했다. Allaby P. et al.(2007)의 가변속도제어 알고리즘은 교통류율, 점유율, 평균속도에 따라 100kph, 80kph, 60kph의 가변속도제어를 실시한다. Allaby P. et al.(2007)은 가변속도제어의 효과를 안전성과

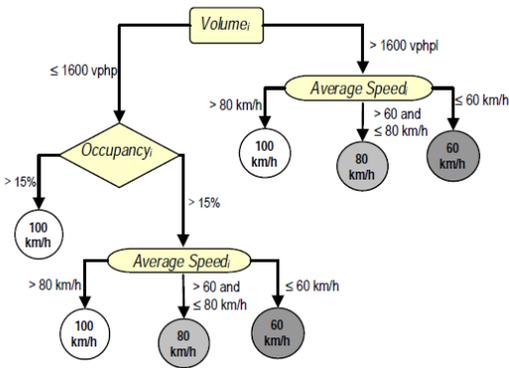


Figure 1. Allaby P. et al.(2007)'s VSL decision tree

교통류 관리효과를 설명하였는데, 가변속도제어가 교통류율과 통행시간을 증가시키지만, 안전도 증진과 운전자 스트레스 감소에 효과적이라고 밝혔다.

EO H. K. et al.(2013)은 Allaby P. et al.(2007) 알고리즘을 이용하여, 홍지문터널의 교통류 특성을 반영하여 가변속도제어기준을 과거 10분의 속도와 점유율이 연속적으로 감소할 때에만 가변속도제어를 실시하였다. 그 결과 평균속도와 통과교통량의 감소가 나타났는데 이는 Allaby P. et al.(2007)의 알고리즘에 따른 가변속도제어값이 다소 과한 측면이 있기 때문으로 분석된다.

Papageorgiou M. et al.(2008)은 60mph, 50mph, 40mph로 가변속도제어를 실시한 결과 임계밀도 이하에서 실시한 가변속도제어가 임계밀도 값을 올려주는 효과를 나타낸다고 밝혔다.

Hegy A. et al.(2005)는 유전자 알고리즘을 이용하여 교통류를 예측하고 총 통행시간을 최소화하는 가변속도제어 알고리즘을 제시하였다. 가변속도제어를 통해 10kph이상의 속도를 감속함으로써 안전성을 높이고자 하였다. 그러나 가변속도제어에 따른 총 통행시간의 변화는 발생하지 않는 것으로 보인다.

Jo Y. T. et al.(2010)은 다수의 스테이션에서 교통정보를 수집하여 병목지점의 위치와 가변속도제어 시작지점 및 운영구간을 결정하는 인성적인 알고리즘을 제시하였으나, 실제 제어값은 단순히 인접한 스테이션간의 중간값을 제시하여 지체 최소화와 같은 목적을 위한 전략이 부족한 것으로 판단된다.

이 외에 Son H. H. et al.(2012)와 Park J. H. et al.(2008)은 기상 및 도로환경조건에 따라 정지거리, 예상 사고위험도 등을 고려한 가변속도제어값을 제시하

였다. 그러나 Park J. H. et al.(2008)이 언급한 것과 같이 임의로 설정된 가변속도제어값을 실시간 도로자료를 이용하여 설정하고, 제어 기준값이 교통류에 미치는 영향을 추가로 규명할 필요가 있다.

이와 같이 가변속도제어 모델을 설명한 국내외 다양한 연구가 진행된 바 있다. 위 연구들 다수는 가변속도제어값을 충분한 인과관계 없이 단일값으로 제시하였다. 그에 따라 충분한 효과를 나타내지 못한 경우도 있어, 가변속도제어에 대한 교통류 관리 효과가 일치하지 않고 연구별로 다르게 나타나고 있다.

## 2. 충격파를 이용한 가변속도제어 효과분석 연구

Lim K. S. et al.(2011)은 충격파 산출에 필요한 공간평균속도와 밀도를 산출하기 위하여 차량검지기에서 수집되는 교통량 및 시간평균속도 데이터를 가공하여 사용하였다. 검지기가 데이터를 수집하는 짧은 주기동안 시간평균속도와 공간평균속도가 동일하다는 가정을 하였으며, 밀도를 추정하기 위한 3가지 방법을 고려하였다. 그러나 충격파의 정확한 발생속도를 분석하기 위한 중요한 변수인 밀도를 추정하는 어떠한 방식도 개별차량의 전장정보 없이는 정확한 추정이 어렵다. 또한 Lim K. S. et al.(2011)의 가변속도제어는 제어속도와 유지시간을 분석가의 주관에 의하여 단일값으로 제시하고, 전후효과만을 비교하는데에 그쳐 한계를 가진다.

Cho H. R. et al.(2011)과 KAIA(2015)는 충격파 이론을 이용하여 가변속도제어의 총 지체 감소효과를 설명하였다. Cho H. R. et al.(2011)의 가변속도제어 모델은 가변속도제어시 밀도가 동일하게 유지된 상태에서 교통량의 변화만 발생한다는 기본가정을 내포하고 있다. 그러나 실제 가변속도제어시 교통류의 밀도와 교통량이 어떻게 변화할지에 대해서는 추후 연구가 필요한 사항으로 추정된다. 가변속도제어시 교통류-밀도 그래프의 변형이 예상되므로, Cho H. R. et al.(2011)과 KAIA(2015)가 제시한 병목구간 가변속도 적용시의 충격파와 충치체를 장담할 수 없다. 또한 이 경우 두 논문에서 제시된 것과 같이 충격파의 속도는 단계에 따라 discrete한 형태가 아닌 continuous한 형태를 나타낼 것으로 판단된다.

Li Z. et al.(2014)는 고속도로 병목구간에서 충돌 위험을 줄이기 위해 0.1마일 단위로 Cell을 구성하고

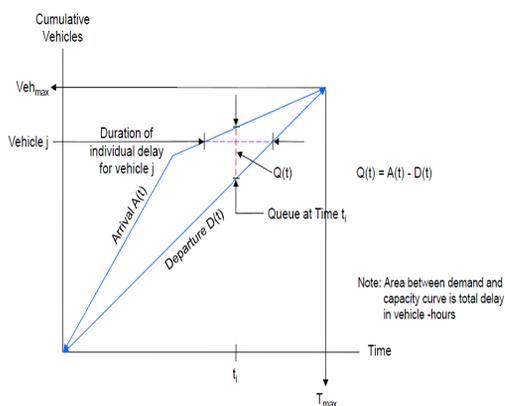


Figure 2. Cumulative arrival-departure curve with queuing theory

Cell Transmission Model(CTM)을 통한 교통류 예측과 유전자 알고리즘을 통해 최적의 가변속도제어 값을 찾아나가는 모델을 제시하였다. 그러나 Li Z. et al. (2014)의 모델 역시 실측이 어려운 교통밀도를 사용하여 교통류-밀도 그래프를 통해 해석이 이루어진다.

위 연구들은 공통적으로 가변속도제어의 전략수립과 효과설명에서 충격파이론을 사용하였다. 그러나 충격파 이론 설명을 위해서 필요한 교통밀도는 검지기 데이터를 통하여 구득하는 것이 매우 어려우며, 가변속도제어에 따라 교통류-밀도 그래프의 변화방향을 예측하기 어려워 정확한 충격파의 속도를 예측하는 것도 쉽지 않다.

### 3. 대기행렬이론

대기행렬이론은 누적 도착교통량이 누적 통과교통량보다 많을 경우 구간을 자유속도로 운행한 뒤 병목지점에 대기행렬이 수직으로 쌓이는 것으로 분석한다. 이 때 Figure 2에 나타난 것과 같이 개별 차량의 지체시간은 누적 도착곡선과 누적 출발곡선간의 수평길이와 같으며, 특정시점의 대기행렬의 길이는 동일시점의 누적 도착곡선과 누적 출발곡선 사이의 수직길이와 같다. 일정한 시간동안 지체를 경험한 전체차량의 총 지체시간은 누적 도착곡선과 누적 출발곡선간의 면적에 해당한다.

대기행렬이론에 버금가는 대표적 교통류 분석이론으로는 충격파이론이 있으며, Son B. S.(1996)에 따르면 충격파이론과 대기행렬이론으로 교통류를 해석할 때 혼잡이 감소하는 시점을 제외한 혼잡시간, 총 지체, 평균 지체 등의 해석결과는 두 이론 모두 일치한다.

Table 1. Station 1 arrival flow rate at station 1

Period	Duration	Flow Rate
P1	until t1(min)	q1 veh/h
P2	after P1	q2 veh/h

## 가변속도제어 모형설정

### 1. 모형의 설정

자유속도  $V_f(kph)$ 로 주행할 수 있는 구간길이  $l(km)$ 의 연속류 도로를 가정한다. 이 도로의 상류부 Station 1과 병목지점인 Station 2에 각각 검지기를 설치하여 도착교통류율과 출발교통류율을 관측한다. 상류부 Station1에 도착하는 교통류율은 Table 1과 같으며, 병목지점인 Station 2의 용량은  $C veh/h$ 이다. ( $q_2 \leq C \leq q_1$ ) 용량은 병목지점 Station 2에 설치된 검지기 이력자료 중 최대치를 사용할 수 있으며, 상류부 Station 1 검지기에 검지된 누적 도착교통량과 병목지점 Station 2 검지기의 누적출발교통량 비교를 통해 분석대상 구간에 분포하고 있는 대기차량의 수를 산정할 수 있다.

가변속도제어는 Station 2에 정체발생시점으로부터  $t_s(min)$ 이 지난 후 실시하게 되는데 가변속도제어값  $V_{VSL}(kph)$ 는 총 지체를 최소화할 수 있는 값을 적용한다. 총 지체를 최소화하는 값을 가변속도제어값으로 설정하는 이유는 지체를 최소화함으로써 상하류부 교통류간 속도차이를 최소화하고 나아가 안전성 향상에 도움을 줄 수 있기 때문이다.

### 2. 가변속도미제어(대조군)

Figure 3와 같이 주어진 구간에서 대기행렬이론을 이용하여 가변속도미제어시의 교통류를 분석한 결과, 교통류율이  $q_2 veh/h$ 로 변화한 이후 정체가 종료될 때까지의 시간  $t_2$ 는 식(1)-식(2)를 따르며, Station 2에 발

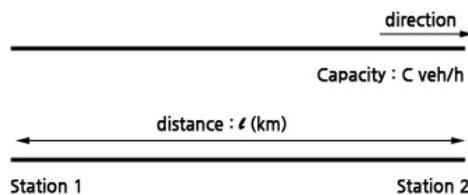


Figure 3. Modeling area

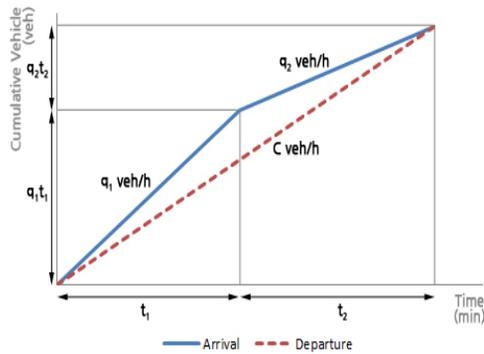


Figure 4. Cumulative arrival-departure curve at station 2 without VSL

생하는 정체는 Figure 4와 같이  $t_1 + t_2$ 의 시간동안 발생한다. 이 때 지체가 발생하는 시간 범위  $t_1 + t_2$ 는 식(3)과 같고, 총 지체는 식(4)와 같다.

$$q_1 t_1 + q_2 t_2 = C(t_1 + t_2) \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{(q_1 - C)t_1}{(C - q_2)} \quad (2)$$

$$t_1 + t_2 = \frac{(q_1 - q_2)t_1}{C - q_2} \quad (3)$$

$$TD_{non\ VSL} = \frac{(q_1 - C)}{2} t_1 (t_1 + t_2) = \frac{(q_1 - q_2)(q_1 - C)t_1^2}{120(C - q_2)} \quad (4)$$

### 3. 가변속도제어

가변속도제어를 실시할 경우의 총 지체는 초기영역, 제어영역, 복구영역의 3개 영역으로 나뉘어 발생한다. 가변속도제어를 시작하는 시간  $t_s(min)$ 는 운영자가 판단하게 되며, 모든 차량은 가변속도제어 실시와 동시에 단말기를 통해 이를 전달받고 모두 제어속도를 준수한다고 가정한다. 이와 같은 가정은 실시간 교통정보 제공 네비게이션 단말기의 이용이 확대되고 있는 현재상황과 완벽한 Vehicle to Infra(V2I)가 구현된 미래여건을 고려한 것이다.

#### 1) 초기영역

초기영역에 해당하는 총 지체는 가변속도제어를 적용받지 않으며 주행하던 차량군이 지체 발생이후 가변속도제어를 받기 시작하는 영역으로 Figure 5와 같다.

운영자가 가변속도제어의 실시여부를 결정하는데 소요되는 시간은  $t_s(min)$ 으로 정의한다. 가변속도제어는

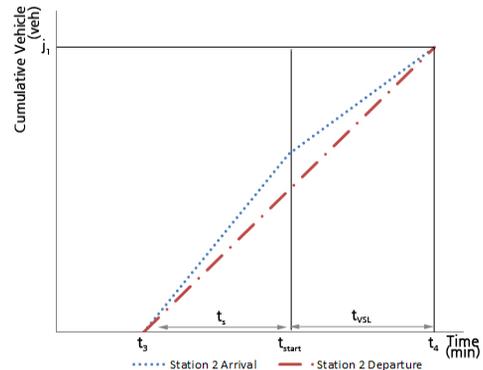


Figure 5. 1<sup>st</sup> Delay at station 2 with VSL

$$t_3 = \frac{60l}{V_f} (min) \quad (5)$$

$$t_{start} = t_3 + t_s \quad (6)$$

$$q_1 \cdot t_{start} = C(t_s + t_{VSL}) \quad (7)$$

$$q_1 \left( \frac{60l}{V_f} + t_s \right) = C(t_s + t_{VSL}) \quad (7')$$

$$t_{VSL} = \frac{60lq_1}{CV_f} + \frac{q_1 t_s}{C} - t_s \quad (7'')$$

$$V_{VSL} (kph) = \frac{60l}{t_{VSL}} = \frac{60CV_f}{60q_1 l + (q_1 - C)t_s V_f} \quad (8)$$

$$t_4 = t_{start} + t_{VSL} \quad (9)$$

Station 1과 Station 2사이의  $l(km)$ 구간에서 일정한 가변속도제어값  $V_{VSL}(kph)$ 으로 실시하며, 가변속도제어가 실시되면 구간내의 모든 차량은 즉시 이에 따른다. 이후 구간의 정체가 모두 해소되는 시점에 가변속도제어는 종료되어 제한속도가 자유속도인  $V_f(kph)$ 로 회복된다. Figure 2에서 주어진 구간을 통과하는 교통류는 식(5)와 같이 상류부 Station 1으로부터  $\frac{60l}{V_f}(min)$ 이 지난  $t_3(min)$ 에 Station 2에 도착한다. 이때부터 정체가 발생하기 시작하며 식(6)과 같이  $t_3$ 로부터  $t_s$ 의 시간이 지난  $t_{start}$  시점부터 가변속도제어를 실시한다. 이 때 가변속도제어값인  $V_{VSL}(kph)$ 은 초기  $t_s$ 의 시간동안 형성된 대기행렬을 식(7)와 같이  $t_{VSL}$ 의 시간동안 해소하여  $t_4$ 에 완전히 해소될 수 있도록 식(8)과 같이 설정한다.

$t_4$ 는 초기영역에 해당하는 지체가 종료되는 시점을 의미하며 식(9)와 같다.

2) 제어영역

제어영역은 구간진입부터 구간진출까지 일정하게 가변속도제어를 적용받은 차량군에 해당한다. 제어영역의 가변속도제어는 병목지점인 Station 2에 발생한 지체가 해소될 때까지 지속되며 Figure 6과 같다.

제어영역은 식(9)와 같이 초기 가변속도제어 실시에 의해 일시적으로 지체가 종료된  $t_4$ 부터 시작된다. 분석 교통류는  $t_1$ 의 시간 후 Station 1에 도착하는 교통류율이 Table 1에 제시된 것과 같이  $q_1 \text{ veh/h}$ 에서  $q_2 \text{ veh/h}$ 로 변화한다. 따라서  $q_2 \text{ veh/h}$ 에 해당하는 교통군이 Station 2에 도착하는 시간  $t_5$ 는 식(10)과 같이  $t_1$ 과  $t_{VSL}$ 만큼의 차이가 발생한다.

식(11)과 같이  $t_4$ 와  $t_5$ 의 시간차이를  $a$ , 식(12)와 같이  $t_5$ 와  $t_6$ 의 시간차이를  $b$ 로 정의할 때  $b$ 는 식(13)에 의하여 식(14)와 같이 정리된다. 이 값을 식(12)에 대입하여  $t_6$ 를 구할 수 있으며 이때의 시간  $t_6$ 는 가변속도제어를 통하여 정체가 해소된 시점이다. 이때부터 가변속도제어값  $V_{VSL}(\text{kph})$ 은 해제되고  $V_f(\text{kph})$ 로 운행하게 된다.

$$t_5 = t_1 + t_{VSL} \tag{10}$$

$$a = t_5 - t_4 = t_1 - t_s - \frac{60l}{V_f} \tag{11}$$

$$t_6 = t_5 + b \tag{12}$$

$$q_1 a + q_2 b = C(a + b) \tag{13}$$

$$b = \frac{q_1 - C}{C - q_2} a \tag{14}$$

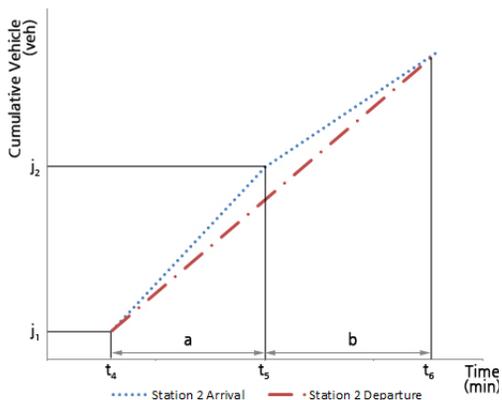


Figure 6. 2<sup>nd</sup> Delay at station 2 with VSL

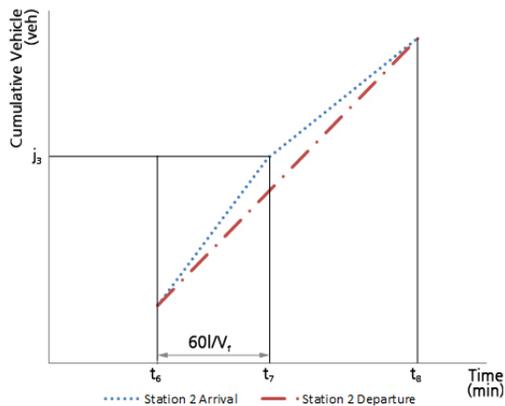


Figure 7. 3<sup>rd</sup> Delay at station 2 with VSL

3) 복귀영역

복귀영역에 해당하는 지체는  $t_6$  이후에 가변속도제어를 해제하고 제어이전의 자유속도  $V_f$ 로 복귀할 때 일시적으로 발생하는 충격파에 의해 형성되는 지체로서 Figure 7과 같다.

가변속도제어를 해제할 경우  $t_6$  시점에 Station 1에 도착한  $j_3$ 의 교통류는 식(15)와 같이  $\frac{60l}{V_f}(\text{min})$ 의 시간간격을 두고  $t_7$ 의 시간에 Station 2에 도착한다. 이후 지체는 식(16)–식(17)을 통해 식(18)과 같이  $t_8$ 의 시간에 완전히 해소된다.

$$t_7 = t_6 + \frac{60l}{V_f} \tag{15}$$

$$C(t_8 - t_3) = q_1 t_1 + q_2 (t_6 - t_1) + q_2 (t_8 - t_7) \tag{16}$$

$$t_8 - t_7 = \frac{q_1 - q_2}{C - q_2} t_1 - t_6 \tag{17}$$

$$t_8 = \frac{q_1 - q_2}{C - q_2} t_1 + \frac{60l}{V_f} \tag{18}$$

4) 종합

가변속도제어 실시를 통해 초기영역, 제어영역, 복귀영역 3개로 나누어진 지체를 종합하면 Figure 8과 같다.

$t_{start}$ 부터  $t_6$ 의 시간동안 가변속도제어를 운영하며 지체는  $t_3$ 부터  $t_8$ 까지의 시간으로 식(19)와 같으며, 가변속도제어를 실시하였을 경우의 총 지체는 식(20)과 같이 산출된다.

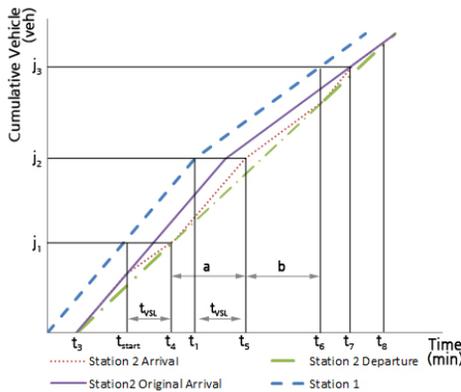


Figure 8. Cumulative arrival-departure curve at station 2 with VSL

$$\text{정체발생시간} = t_8 - t_3 = \frac{(q_1 - q_2)t_1}{C - q_2} = t_1 + t_2 \quad (19)$$

$$TD_{VSL} = \frac{(q_1 - C)\{t_s(t_s + t_{VSL}) + a(a+b)\}}{120} - \frac{(C - q_2)(t_8 - t_7)(t_8 - t_6)}{120} \quad (\text{대}\cdot\text{분}) \quad (20)$$

## 시뮬레이션 분석

### 1. 분석조건 설정

본 연구에서 제시한 가변속도제어 모형의 검증을 위한 시뮬레이션은 대표적 미시 교통 시뮬레이터인 PTV VISSIM F 7.0을 사용하였다. 시뮬레이션 구간은 Figure 9, Figure 10과 같이 차로폭 3.5m, 편도 2차로, 직선 구간길이 10km의 가변속도제어 운영구간과 500m의 진입램프 합류부로 구성하였으며, 진입램프 합류 후에는 직선 구간길이 5km의 하류부 도로를 설계하였다. 또한 가변속도제어를 운영하게 되는 10km구간에서 매 5초마다 각 차량의 속도변화를 관측하고, VISSIM의 Vehicle Travel Time 기능을 이용하여 각 차량의 Travel Time과 Delay를 측정하였다.

시뮬레이션은 40개의 랜덤시드를 이용하여 각각 약 6,000초 동안 수행하였으며 Figure 10의 시뮬레이션 구간에서 Table 2와 같이 반복적인 실험을 수행한 결과 본선의 용량은 약 2,300veh/h·lane인 것으로 나타났다. 또한 병목지점 형성을 위하여 진입램프에서 800veh/h의 차량을 진입시켜 본선의 용량이 1,600veh/h·lane인

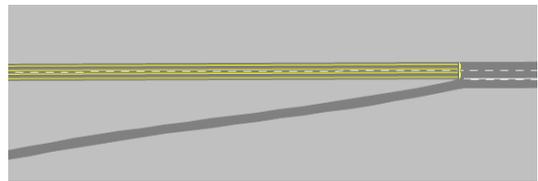


Figure 9. VSL operating simulation area



Figure 10. On Ramp simulation area

Table 2. Throughput vehicle in simulation area(2 lane)

Input Vehicle	Throughput
4,700 veh/h	4,501 veh/h
4,750 veh/h	4,568 veh/h
4,770 veh/h	4,457 veh/h
4,800 veh/h	4,574 veh/h
4,850 veh/h	4,481 veh/h
4,900 veh/h	4,463 veh/h

Table 3. Traffic demand in simulation area

Period	Flow Rate
0-30 (min)	3,600 veh/h
30~ (min)	2,600 veh/h
Capacity(2lane)	3,200 veh/h

병목지점을 형성하였다. 가변속도제어를 실시하지 않을 때 차량의 희망 통행속도는 100kph이며 이 구간의 교통수요는 Table 3와 같이 초기 30분 동안에는 3,600veh/h, 이후에는 2,600veh/h로 나타난다.

VISSIM을 이용한 시뮬레이션의 각 차량주행 데이터는 FHWA의 Surrogate Safety Assessment Model(SSAM)에 입력한 뒤 상충각도에 따라 직각충돌(상충각도 45도 이상), 측면충돌(상충각도 2도 이상 45도 미만), 후방추돌(상충각도 2도 미만) 등 3가지 유형의 고위험 상충건수로 나누어 분석하였다. SSAM을 이용한 고위험 상충여부를 결정하는 지표로는 Time to Collision(TTC)와 Post Encroachment Time(PET) 등의 지표가 사용되었다. 이 지표들 중 TTC값은 낮을수록, PET값은 클수록 충돌 가능성이 높은 상충으로 분석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FHWA(2008)의 권고에 따라 고위험상충 여부를 구분하는 기준값으로 최대 TTC값을 1.5초, 최소 PET 기준값을 5초로 채택하였다.

## 2. 가변속도미제어

### 1) 이론적 분석

Figure 9, Figure 10에서 설계한 분석대상 도로는 가변속도제어를 실시하지 않을 경우 대기행렬이론에 의하여 식(3), 식(4)와 같이 총 50분의 시간동안 83.33 대·시의 총 지체가 발생한다.

### 2) VISSIM 시뮬레이션 수행결과

6,000초의 시뮬레이션 시간 중 약 590-3740초의 시간에 해당하는 52.5분 동안 지체가 발생하였으며 총 지체는 89.71대·시로 나타났다. 이것은 50분의 시간동안 83.33대·시의 총 지체가 발생하는 이론적 분석결과와 유사하게 시뮬레이션이 설계되었음을 나타낸다.

또한 시뮬레이션시간동안 발생된 차량들은 Figure 11과 같이 평균적으로 약 290초 동안 103kph 내외의 속도로 주행한 뒤 대기행렬에 합류하여 속도가 급감하는 형태를 나타낸다.

### 3) SSAM 분석결과

SSAM을 이용한 고위험 상충건수 분석을 실시한 결과 직각충돌, 측면충돌, 후방추돌의 3가지 상충유형 중 직각충돌은 발생하지 않았다.

Table 4는 가변속도제어를 실시하지 않았을 때의 고위험 상충건수를 SSAM을 통하여 분석한 결과를 보여준다. 총 4,220건의 상충 중 측면충돌이 114건, 후방추돌이 4,106건 발생하였다.

Table 4. No VSL conffiction analysis by SSAM

Conffiction	Total	Crossing	Lane Changing	Real-end
No VSL	4,220	-	114	4,106

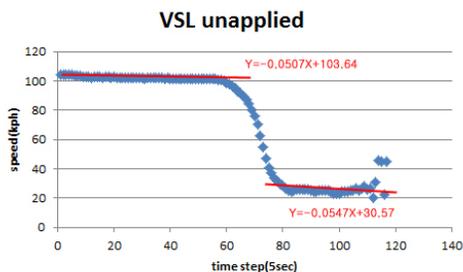


Figure 11. Average speed fluctuation under the No-VSL

## 3. 가변속도제어

### 1) 이론적 분석

위 모형에서  $t_s$ 를 5분으로 세팅하고 가변속도제어를 실시할 경우 식(8)에 의하여  $V_{VSL}$ 은 81.36kph로 산출된다. 그리고 식(6)과 식(12)에 의해  $t_{start}$ 가 11분,  $t_6$ 가 50.05분으로 산출되어 660-3003초의 시간동안 가변속도제어를 실시한다. 따라서 가변속도제어를 실시했을 때 식(19)와 식(20)에 의하여 총 50분의 시간동안 36.84대·시의 총 지체가 발생한다.

### 2) VISSIM 시뮬레이션 수행결과

가변속도제어에 대한 시뮬레이션 수행을 위하여 VISSIM의 Reduce Speed Area기능을 이용하여 660-3003초의 시간동안 80kph로 가변속도제어를 실시하였다.

6,000초의 시뮬레이션 시간 중 585-3782초의 시간에 해당하는 53.3분 동안 지체가 발생하였으며 총 지체는 33.75대·시로 나타났다.

가변속도제어를 실시한 경우 Figure 12와 같이 평균 약 330초 동안 97.51kph 내외의 속도로 주행한 뒤 대기행렬에 합류한다.

Figure 13은 Figure 11과 Figure 12를 오버랩한

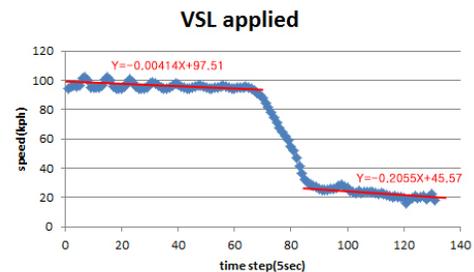


Figure 12. Average speed fluctuation under the VSL

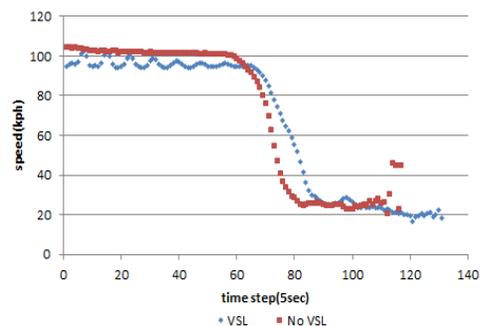


Figure 13. Compare speed fluctuation whether VSL or not

**Table 5.** VSL Conflict Analysis by SSAM

Confliction	Total	Crossing	Lane Changing	Real-end
VSL	2,702	-	97	2,605
Rate of Change	-36.0%	-	-14.9%	-36.6%

그래프이다. Figure 13에서 확인할 수 있는 것처럼 가변속도제어시 자유속도가 감소하지만 자유속도 유지시간이 증가하는 것으로 나타난다. 또한 속도의 변동주기가 증가하였다.

### 3) SSAM 분석결과

가변속도제어에 대하여 실시한 SSAM 고위험 상충건수 분석결과는 Table 5와 같다. 전체 상충건수는 2,702건이며, 그 중 측면충돌은 97건, 후방추돌 2,605건이다. 전체적인 상충건수는 약 36.0% 감소하였다.

## 결론

가변속도제어를 실시하지 않았을 경우 정체가 발생하는 시간의 범위는 식(5)에 제시된 것과 같이 총  $\frac{(q_1 - q_2)t_1}{C - q_2}$  (min) 동안 정체가 발생한다. 가변속도제어를 실시할 경우 정체가 발생하는 시간은 식(21)과 같이  $t_3$  부터  $t_8$ 까지의 시간으로 총  $\frac{(q_1 - q_2)t_1}{C - q_2}$  (min)에 해당한다. 즉, 가변속도제어 실시여부와 무관하게 지체가 발생하여 종료되는 시점은 동일하다. 다만, 본 연구에서 식(10)을 통하여 제시한 최적의 가변속도제어 값  $V_{VSL}$ 보다 낮은 운영 값을 적용할 경우 총 통행시간이 증가할 수 있다.

이와 같은 이론적 교통류 제어효과는 VISSIM 시뮬레이션 분석결과에서도 확인할 수 있다. 가변속도제어를 실시하지 않았을 경우 발생하는 89.71대·시의 총 지체는 위 모델에서 제시하는 바와 같이 가변속도제어를 실시한 결과 33.75대·시로 총 지체가 감소하였다. 또한 가변속도제어를 실시하였을 때 자유속도가 감소하였으나 자유속도의 유지시간이 증가하였고, 반대로 대기행렬에 따른 정체시간은 감소함을 확인하였다. Figure 13에서 보여주는 속도의 변동주기 증가는 교통류 안정화 효과가 이루어진 것으로 분석된다.

그러나 이론적 분석 및 시뮬레이션 분석에서 산출된 총 지체는 분석구간에 설정되어있는 제한속도에 대비한 총 지체를 의미한다. 그러나 가변속도제어를 실시한 구간에서 제어값에 따라 감속한 운전자의 희망속도는 가

변속도제어를 받지 않은 시나리오의 차량운전자 희망속도와 같다. 따라서 산술적 총 지체가 아닌 실제 운전자 희망속도에 대비한 총 지체가 줄어들었다고 분석하기는 어렵다.

다만 본 모형에서 제시하는 가변속도제어에 따른 총 지체 감소효과는 고위험 상충건수 분석에서 약 36.0%의 상충을 감소시킨 것으로 분석되었다. 이것은 가변속도제어를 통해 반복적인 지정체를 줄이고 차량군의 정속운행성을 높인 데에 따른 결과로 볼 수 있다. 즉, 고위험 상충건수를 줄이기 위해서는 가변속도제어 총 지체를 줄여야 하며, 이 값은 본 연구에서 밝힌 것과 같이 식(22)에 해당한다. 정체 감지이후 가변속도제어를 실시하는데에 소요되는 시간  $t_8$ 와 가변속도제어 구간길이  $l$ 과 같은 가변속도제어 적용구간의 물리적 특징과 용량, 교통류 등의 교통상황을 식(10)에 입력하여 가변속도제어값  $V_{VSL}$ 을 도출하면 식(22)의 가변속도제어 총 지체를 최소화 할 수 있다.

즉, 본 연구에서 제시하는 가변속도제어값은 가변속도제어 구간을 통과하는데 소요되는 시간에 변화를 주지 않으므로 운영효율성 측면에서는 아무런 차이가 발생하지 않지만 총 지체를 최소화함으로써 충돌위험을 최소화하는 안전성 향상효과가 발생하는 것으로 판단된다.

또한 가변속도제어를 실시하였을 때 발생하는 제어영역에 대하여 재차 가변속도제어를 반복적으로 수행하면 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서 제시한 가변속도제어값보다 높은 속도로 제어할 경우 총 지체 저감효과가 감소되어 충돌위험을 줄이는 안전성 효과가 감소할 것으로 예상되며, 더 낮은 값으로 제어할 경우 구간의 총 통행시간이 증가할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 가변속도제어의 시작시점을 운영자의 판단에 맡겼다. 그러나 가장 효과적인 가변속도제어를 실시하기 위해서는 운영자의 주관이 아니라 객관적인 가변속도제어 시작시점을 설정하여야 한다. 즉, 본 연구에서 제시한 가변속도제어 운영모형을 실제 적용하기 위해서는 가변속도제어의 시작시점 설정에 대한 추가 고찰이 필요하다. 또한 가변속도제어를 실시하였을 때 운전자의 준수율을 제고할 수 있는 방안을 도출하고, 이론분석 및 시뮬레이션을 통하여 제시한 효과가 실제로 도로상에서 나타나는지 여부에 대한 실험 수행도 요구되는 바이다.

본 가변속도제어를 실제 도로에서 운영할 때 교통류 분석 소요시간에 따른 시간차 문제, 검지기 교통정보 수집 중 결측정보에 대한 추정문제 등 발생 가능한 여러 문제점들에 대한 보완방안 제시도 요구된다.

