

교통상황별 터널부 VSL 표출제어 알고리즘 개발

Development of VSL Control Algorithms for Various Traffic Conditions in Tunnels

이 수 양* · 이 상 수** · 이 철 기***

* 주저자 : 한국도로공사 재난안전처 팀장

** 교신저자 : 아주대학교 교통공학과 교수

*** 공저자 : 아주대학교 교통공학과 교수

Soo-Yang Lee* · Sang-Soo Lee** · Choul-ki Lee***

* Korea Expressway Corporation

** Dept. of Transportation Eng., Ajou Univ.

*** Dept. of Transportation Eng., Ajou Univ.

† Corresponding author : Lee Sangsoo, sslee@ajou.ac.kr

Vol.18 No.3(2019)

June, 2019

pp.84~94

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.3.84)

2019.18.3.84

Received 15 May 2019

Revised 23 May 2019

Accepted 27 May 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 논문에서는 터널 진입부 도로에서 적용할 수 있는 교통상황별 VSL 제어 알고리즘을 개발하였다. 효과적인 VSL 제어를 위하여 3개의 갠트리에 적용될 제어속도와 완충속도를 계산하는 알고리즘과 표출시간을 계산하는 방법을 제시하였다. 제시된 알고리즘은 파이썬과 VISSIM COM-Interface를 이용하여 시뮬레이션 환경을 구축하여 평가하였다. 평가결과, 알고리즘 미적용시에는 정체 후미와 다음구간의 속도가 50km/h 이상으로 큰 차이가 났으나 적용시에는 속도 차이가 20km/h 이내로 크게 감소하였다. 그리고 알고리즘 미적용시 정체 후미의 길이가 터널 출구에서 800m지점까지 확산되었으나, 적용시에는 300m지점으로 축소되었다. 제시된 알고리즘을 적용시 전체적으로 각 구간별 평균속도와 속도편차가 모두 감소하여 터널부 교통사고 감소가 예상되고 나아가 정체시 차량운행의 안전을 향상하는데 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : VSL, 알고리즘, 터널, 정체, 시뮬레이션

ABSTRACT

This paper developed the VSL control algorithms for various traffic conditions in tunnels. Various algorithms determining control speed, buffer speed, and display time were suggested in order to apply three gantry locations. The algorithms were evaluated by constructing simulation environments using python and VISSIM Com-Interface. Results show that speed difference between congested flow and normal flow was 50 km/h without algorithm application, but the difference was reduced to 20 km/h with algorithm application. In addition, the length of congested region in the exit section of the tunnel was also reduced from 800m to 300m with algorithm application. It is expected that the traffic accidents in tunnels may be reduced since the average and standard deviation of the speed are greatly reduced after applying the algorithms suggested.

Key words : VSL, Algorithm, Tunnel, Congestion, Simulation

I. 서론

국내에서 발생하는 전체 고속도로 교통사고에서 터널 교통사고가 차지하는 비율은 '13년 4.0%에서 '17년 7.5%로 증가하였고, 터널사고 관련 사망자 수도 '13년 2.3%에서 '17년 6.5%로 큰 폭으로 증가하였다. 특히 2016년 5월 남해고속도로 창원1터널에서 터널내 정체상황을 인지하지 못한 버스가 승용차를 추돌한 사고(4명 사망, 56명 부상), 2016년 7월 영동고속도로 봉평터널에서 관광버스가 전방에 정체중인 승용차를 추돌한 사고(4명 사망, 16명 부상)가 발생하는 등 터널 교통사고는 대형사고로 이어지고 있다. 이와 같이 터널 교통사고가 증가하는 원인 중 하나는 최근 들어 고속도로의 터널이 증가하고 또한 장대 터널이 개설되어 교통 정체시 터널내 교통상황에 관한 정보가 부재하여 이에 따른 운전자의 유연한 대응에 어려움이 있기 때문이다.

가변속도 제어(Variable Speed Limit, VSL)란 교통상황에 따라 단계적으로 속도를 제한하여 혼잡 또는 사고 지점에 도달하기 전 차량간 및 차로간 속도편차를 감소시켜 사고를 예방하고 총 지체를 최소화하는 ITS (Intelligent Transport System) 기법중 하나이다(Cho et al., 2012). 그리고 VSL의 운영목적은 교통사고를 감소시키기 위한 안전성 제고 측면과 지체를 최소화하기 위한 도로운영의 효율성 증진 측면으로 구분하고 있다(Eo et al., 2013). 따라서 VSL을 터널 전방도로에 적용하여 운영시 터널에서 발생하는 교통사고를 감소시키는 효과를 얻을 수 있다고 판단된다. 그러나 이러한 VSL 제어 기법을 적용하기 위하여는 교통상황에 대한 정의와 판단, 상황별 제어 알고리즘, 그리고 표출속도의 결정등과 같이 실제적인 도로환경에서 적용되어야 하는 다양한 알고리즘에 대한 개발이 요구된다.

본 논문의 목적은 터널 진입부 도로에서 적용할 수 있는 효과적인 VSL 제어전략을 개발하고, 이를 구현하기 위한 다양한 제어 알고리즘을 제시하는데 있다. 이를 위하여 먼저 교통상황을 구분하여 정의하고, 각 상황별로 VSL을 표출하여 제어하는 알고리즘을 개발하였다. 제어 알고리즘은 터널부내에서 검지되는 속도를 기반으로 작동하고, 진입부 도로에 복수의 갱트리를 구성하여 점진적인 속도 감속이 유도되도록 구성하였다. 제시된 알고리즘은 시뮬레이션 기법을 활용하여 효과를 평가하였다. 본 연구에서 제시된 VSL 제어 알고리즘을 적용하여 향후 터널 교통사고를 감소하고 교통안전을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

II. 이론적 배경

Jo and Jung(2010)은 도로의 공사구간에 VSL를 적용하여 교통운영의 효율성을 높일 수 있는 효과를 메타 분석 기법으로 평가하였다. 연구에서는 통과교통량과 주행속도의 변화의 2가지 변수를 기반으로 하여 평가를 실시하였고, VSL 적용시 통과교통량은 16.4% 증가하고, 주행속도는 16.5% 감소하여 운영과 안전 측면에서 효과가 있는 것으로 분석하였다.

Jo and Jung(2010)은 도시고속도로와 같이 다수의 스테이션(Station)이 일정한 간격으로 설치되어 있는 환경에서 VSL를 활용하여 도로의 안전성을 높일 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 VSL 알고리즘은 크게 정체지점의 위치와 개소수를 결정하고, VSL값을 계산하는 과정으로 구성되었다. VSL 알고리즘 계산에 사용되는 데이터는 에러에 대해 충격을 완화하기 위해 1분 동안의 평균데이터 값을 사용하였다. 실험결과 스테이션간 속도분산이 감소되었고 최대속도 차이도 감소하여 도로 안전성을 향상시킬 수 있었고, 나아가 이동 시간도 약 1%가량 감소되어 교통 혼잡 완화 효과도 있는 것으로 제시하였다.

Eo et al.(2013)은 홍지문 터널을 대상으로 VSL 운영기법과 효과분석을 하였다. 지·정체 판단 알고리즘은

검지기를 통해 수집되는 속도와 점유율을 변수로 활용하여 현재시점에 검지된 검지값과 과거 평균값의 차이를 비교하여 발생여부를 판단하도록 구성하였다. 또한 VSL 연동제어를 개념화하여 가정 먼저 지·정체가 검지된 지점의 가변속도 제한표지를 Master, 상류부 인접지점은 Response, 그 이후 인접지점은 Transition 으로 정의하고 속도를 연동으로 표출하도록 구성하였다. 이를 통하여 상류부 접근 차량의 감속을 유도하고 안전을 높일 수 있는 운영효과를 기대하였다.

Lee et al.(2013)은 가변속도 제어시 준수율에 따른 사고위험도를 분석하였다. 해당 교통류에 제어속도를 준수하지 않은 차량이 많은 경우에는 오히려 차량간 속도 차이가 증가하여 사고 위험도가 높아질 수 있다는 가정을 증명하기 위하여 미시적 시뮬레이션 프로그램인 Paramics API를 활용하여 가변속도제어 시 준수율이 사고에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션 분석결과, 준수율이 높을수록 사고위험도는 낮아지고, 교통량이 많은 경우에는 같은 준수율이라도 더 높은 사고위험도를 나타냈다. 또한 감속률이 큰 경우 준수율에 따라 사고위험도는 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Lee et al.(2015)은 가변속도 제어시 주행속도 추정모형을 개발하여 제시하였다. 가변속도 제어시 제어속도를 준수하는 차량과 준수하지 않는 차량이 혼재하여 운행하는 경우 교통류에 발생하는 차량추종 모형과 유사하게 차량간의 통행속도의 변화가 발생한다고 가정하였다. 이러한 경우 제어속도를 준수하는 차량의 간섭으로 인하여 제어속도를 미준수하는 차량으로 영향이 전이되는 현상을 Markov-chain 이론을 기반으로 확률적으로 해석한 속도추정 모형을 개발하였다.

Cho and Kim(2010)은 연속류 도로에서 가변속도제어시 발생하는 교통류의 특성을 분석하고 이를 모형화해서 실제 충격파가 발생하는 현상을 묘사하고자 시도하였다. 사고발생에 따라 제한속도가 변경되는 상황을 교통량·밀도 관계식과 충격파 모형을 적용하여 교통류 전이현상 및 교통류 상태의 연속적인 변화를 파악하여 제시하였다.

Yang et al.(2013)은 고속도로 혼잡을 실시간으로 관리하는 전략을 구현하기 위한 방법으로 가변속도제어를 채택하였으며 이를 거시 교통류 모형과 연계하여 연구하였다. 또한 실제 상황을 구현하기 위해 검지된 준수율을 VISSIM 시뮬레이터에 반영하였고 그 결과 가변속도제어는 효과가 있으며 특히 준수율이 가변속도제어 시스템의 효과에 매우 중요한 요소인 것을 확인하였다.

Wang et al.(2016)은 가변속도제어 표지판을 복수의 지점에 설치한 후 정상교통류와 혼잡교통류의 통행속도를 비교하였다. 연구 결과, 가변속도제어를 운영했을 때의 통행시간은 소폭으로 증가하였지만 통행속도의 변화가 안정적이며 균일하게 나타남을 제시하였다. 따라서 가변속도제어를 적용시 정상교통류와 혼잡교통류의 속도 변화를 최소화할 수 있음을 주장하였다.

Kuhn et al.(2016)은 갓은 날씨가 혼잡 상황, 도로 공사 등의 상황일 때 가변속도제어가 교통류의 흐름과 안전성에 어떻게 영향을 미치는 지 연구하였다. 구체적으로 혼잡이 얼마나 감소했는지, 운전자들의 이해도는 어떠한지, 안전성은 어떻게 변화하였는지, 그리고 전반적인 비용과 효과가 어떠한지를 분석하였다. 분석 결과, 가변속도제어 시스템은 제시된 모든 상황에서 긍정적인 영향을 미치면서 안전성 측면에도 효과가 있으며, 운전자들은 가변속도제어의 목표를 명확하게 이해하는 것으로 파악되었다.

이와 같이 기존 연구를 살펴보면, 연속류 도로의 다양한 구간에서 가변속도제어가 적용되어 평가되었음을 알 수 있다. 이는 운전자 준수율과 사고위험도의 영향 분석, 차량추종 모형을 통한 교통류에 미치는 영향 분석, 그리고 악천후시 운영 효과 평가 사례들을 포함한다. 본 연구에서는 터널부를 대상으로 하여 실제 도로 환경에 적용시 필요한 시스템의 핵심 요소들을 개발하였고, 이에 관한 모의실험 평가 결과를 제시한 측면에서 기존 연구와 차별화된다. 이를 위하여 먼저 교통상황을 정의하였고, 3개의 갠트리에 대한 VSL 표출 속도를 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 이를 활용한 교통상황별 제어 알고리즘을 개발하여 적용하였다.

Ⅲ. VSL 제어 알고리즘 개발

1. 기본 개념

본 연구에서는 검지기를 활용하여 정보를 수집하는 체계를 수용하여 교통상황별 제어 알고리즘을 개발하였다. 터널내 교통상황을 판별하기 위한 목적으로 여러 검지기를 사용할 수 있지만, 정보의 신뢰도 및 설치와 관리의 용이성을 고려하여 레이더 검지기를 채택하여 설계되었다. 터널전 설치되는 VLS는 3개소이며, 각 갠트리별로 서로 다른 속도를 제공하여 점진적인 속도 감속이 이루어지도록 하였다. 이를 반영하여 제어속도와 완충속도를 각각 계산하도록 계획하였고, 결과를 표출하는 시간을 결정하는 과정이 함께 고려하였다. 또한 정상 및 혼잡 교통상황별로 제어 및 표출부를 구분하여 제어하는 알고리즘을 적용하도록 계획하였다.

현재 고속도로 교통류에 관련된 국토교통부의 소통상태 지표는 다음 <Table 1>과 같다. 이를 반영하여 교통류의 소통 상황은 크게 원활, 지체, 정체, 돌발의 4가지로 분류하였다. 원활한 교통상황은 속도가 80km/h 이상으로 규정하였고, 지·정체 판단은 KHCM(2013) 서비스 수준 'C' 밀도(14pcpkmpl→200m당 3pcpl)이하이면서 국토교통부 고속도로 지·정체 기준 속도에 도달 할 경우를 적용하였으며, 밀도와 속도를 복합적으로 적용함으로써 판단의 정확도를 향상시켰다.

<Table 1> The State of Traffic Conditions in Freeway (MOLIT)

Traffic Condition	Speed Threshold
Normal	over 80km/h
Light Congestion	between 40km/h and 80km/h
Heavy Congestion	below 40km/h
Incident	accident, work zone, etc

2. 제한속도 결정 알고리즘

제한속도는 크게 제어속도와 완충속도로 구분할 수 있다. 제어속도는 일반 구간의 속도와 터널 내부의 속도를 비교하여 산출한 속도다. 이때, 계산된 제어속도가 기존에 표출 중이었던 속도와 30km/h를 초과하는 급격한 속도변화가 있는 경우엔 완충속도를 계산한다.

1) 제어속도 결정

일반도로 구간과 터널 내에서 검지된 속도 차이를 기반으로 구간의 제어속도 결정하는 알고리즘을 설계하였다. 차량의 급정거를 방지하기 위하여 정체류와 접촉되는 교통류 간 속도 감속은 작고, 상대적으로 속도가 높은 하류부에서의 속도 감속은 크도록 계획하였다. 계산식에 의해 만들어진 제한속도의 경우 1의 자리에서 올림 하도록 하였다. 이때 터널 입구에서 가장 멀리 있는 VSL을 VSL_1 , 두 번째로 멀리 있는 것을 VSL_2 , 가장 가까운 것을 VSL_3 라 하였다.

VSL_3 의 제어속도는 터널 내 속도를 그대로 반영하였다. 반면 VSL_1 의 제어속도는 터널내 속도와 일반구간 속도차이의 50%를 산출하여 터널내 속도를 더하는 것으로 설정하였으며, VSL_2 의 제어속도도 터널 내 속도와 VSL_1 속도 차이의 50%를 산출하여 터널 내 속도에 더한 값으로 설정하였다. 현재 경찰청 VSL 규정에는 가변속도 운영구간과 미운영 구간사이에는 중간의 적절한 값을 설정하도록 하고 있으며, 위의 계수들은 이

를 반영하여 선정된 값이다. 수식은 다음과 같다.

$$C VSL_1 = V_i + (V_j - V_i) \times 0.5 \quad \text{<식 1>}$$

$$C VSL_2 = V_i + (C VSL_1 - V_i) \times 0.5 \quad \text{<식 2>}$$

$$C VSL_3 = V_i \quad \text{<식 3>}$$

여기서, $C VSL_i$ = i 지점의 제어속도

V_i = 터널내 속도

V_j = 일반구간속도

2) 완충속도 결정

경찰청의 가변형 속도제한시스템 설치·운영 매뉴얼에 따르면, VSL 운영 시 시·공간적으로 급격한 속도의 변화가 있어서는 안 된다고 명시되어있다. 즉, 계산된 제어속도가 현재 표출중인 속도와 30km/h 초과 급격한 속도 차이를 보일 경우, 완충속도를 결정하여 완만한 속도 변화를 나타내도록 하였다. 하지만 완충속도를 산출하였음에도 속도 변화가 30km/h초과일 경우는 긴급한 감속이 필요한 경우라고 판단하고 결정된 완충속도 그대로 사용하도록 하였다.

VLS₁의 완충속도는 계산된 VSL₁의 제어속도와 현재 표출 중이었던 VSL₁의 속도의 차이가 30km/h를 초과할 경우 <식 4>를 이용하여 산출한다. 즉, 계산된 VSL₁의 제어속도와 현재 표출 중이었던 VSL₁의 속도 차이의 50%를 산출한 후, 계산된 VSL₁의 제어속도에 더하도록 하였다. VSL₂의 완충속도는 계산된 VSL₂의 제어속도와 현재 표출 중이었던 VSL₁의 속도의 차이가 30km/h를 초과할 경우 <식 5>를 이용하여 산출한다. VSL₃도 VSL₂와 마찬가지로, <식 6>에서 계산된 VSL₃의 제어속도와 현재 표출 중이었던 VSL₂의 속도의 차이에서 50%를 산출한 후, 계산된 VSL₃의 제어속도에 더하도록 하였다.

$$B VSL_1 = C VSL_1 + (N \cdot VSL_1 - C VSL_1) \times 0.5 \quad \text{<식 4>}$$

$$B VSL_2 = C VSL_2 + (N \cdot VSL_1 - C VSL_2) \times 0.5 \quad \text{<식 5>}$$

$$B VSL_3 = C VSL_3 + (N \cdot VSL_2 - C VSL_3) \times 0.5 \quad \text{<식 6>}$$

여기서, $B VSL_i$ = i 지점의 완충(buffer) 속도

$N \cdot VSL_i$ = i 지점의 현재표출속도

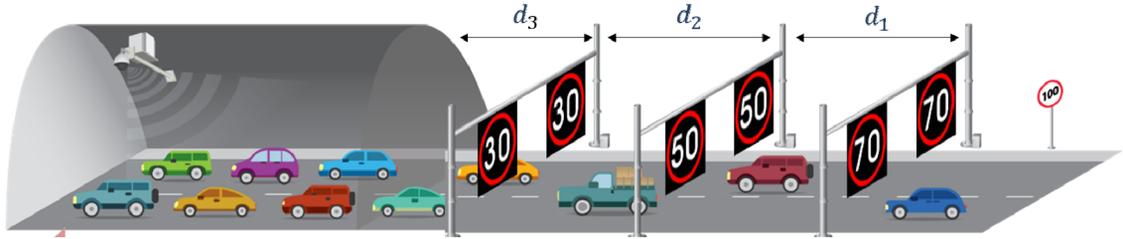
3) 표출시간 결정

경찰청의 가변형 속도제한시스템 설치·운영 매뉴얼에 따르면 VSL과 VSL 사이에서 운전자가 통과하는 최소한의 시간을 확보하는 것이 필요하다고 명시되어있다. 이는 운전자에게 2개 이상의 정보를 주지 않아야 하고 제한속도 변경 시에 정보를 부여받은 마지막 차량이 해당 구간 내에서 소거될 시간이 필요하기 때문이다.

표출시간은 VSL에서 표출된 제한속도로 다음 VSL까지 주행했을 때의 통행시간을 산출한 값들 중 최댓값을 이용하였다. 이는 한 차량이 두 개의 정보를 받지 못하도록 막기 위함이다. 아래의 <Fig. 1>과 같은 조건 하에서 VSL의 표출시간을 산출하는 방법은 다음 <식 7>과 같다.

$$S_n = \frac{d_n}{VSL_n / 3.6} \quad \text{<식 7>}$$

여기서, S_n : 최소표출시간(sec)
 d_n : n 번째 VSL에서 $n+1$ 번째 VSL까지의 거리(m)
 VSL_n : 산출된 표출속도(km/h)



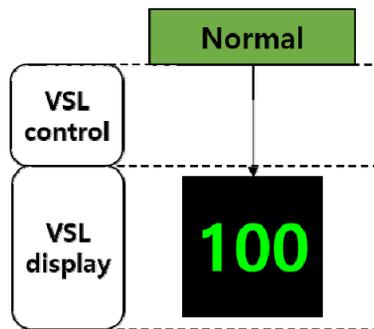
<Fig. 1> Configuration of the simulated test site

3. 교통상황별 제어 알고리즘 개발

교통 상황별 제어전략은 크게 검지부와 제어부로 구분하여 구성하였다. 검지부에서는 수집된 데이터를 이용하여 정보발생 지점의 위치, 차로, 속도, 교통상황의 유형 등을 이용하여 교통상황을 판단한다. 제어부에서는 정보발생지점의 데이터와 검지기 데이터의 입구부 교통상황을 비교하여 운영 방안을 결정한다. 또한, 운전자에게 한 지점에서 2번이상의 급격한 제한속도 변경이 되지 않도록 VSL을 표출하였다.

1) 소통원활 상황시 제어 알고리즘

터널 내 차량의 평균통행속도가 80km/h 이상으로 검지되었을 때를 원활한 상황이라 규정하였다. 이 경우엔 제한속도를 100km/h 값으로 표출하도록 하였다. 원활한 교통상황에서 100km/h 미만의 제한속도를 제공할 경우 구간 속도를 감속시키는 문제점이 발생하고 운전자의 시스템에 대한 신뢰성을 낮출 수 있기 때문이다. 다음 <Fig. 2>는 소통원활시 VSL 제어 알고리즘을 나타낸다.

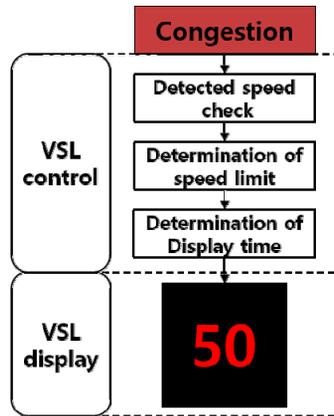


<Fig. 2> VSL control algorithm for normal conditions

2) 지·정체상황 시 제어 알고리즘

터널 내 평균통행속도가 40km/h 이상 80km/h 미만으로 검지된 경우를 지체상황으로 규정하였으며, 40km/h 미만으로 검지된 경우를 정체상황으로 규정하였다. 지·정체상황 시 돌발 상황이 아닌 교통 흐름 자

체로 평균통행속도가 낮아진 경우, 각 갠트리별 제한속도를 계산하고 표출시간을 결정하여 운영한다. 이때 갠트리별 제한속도와 표출시간은 앞서 소개한 제한속도 결정과 표출속도 결정 식에 의해 산출된다. 그 후엔 80km/h 미만의 속도들이 정해진 시간동안 각 갠트리에 연동되어 표출된다. <Fig. 3>은 지·정체 상황 시 적용되는 제어 알고리즘의 적용 절차를 나타낸다.



<Fig. 3> VSL control algorithm for congested conditions

IV. 분석 결과

1. 시뮬레이션 평가 개요

본 연구에서 제시한 알고리즘을 평가하기 위하여 VISSIM을 활용한 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 우선적으로 실제 고속도로 터널을 조사하여 평가에 가장 적합한 대상지를 위험도 평가를 통하여 선정하였다. 선정된 터널구간은 영동고속도로 178.5k ~ 180.0k 구간에 위치하고 있는 봉평터널로서 강릉방향 2차로와 인천방향 2차로의 분리형 터널이다. 인천방향 터널은 일정수준 이상의 교통량이 지속적으로 발생하고 주말의 경우, 수도권으로 진입하는 차량으로 반복적 상습 지·정체 발생 구간으로 다양한 도로교통 상황별 시나리오를 구현하기에 적합하였다. 터널입구부(180.0k)부터 평창IC(182.4k) 구간에 3개의 VSL을 각각 180.1k, 180.8k, 181.3k 지점에 설치하여 후미에서 접근하는 차량에게 권고속도의 제공 및 차량의 운행속도를 간접적으로 제어하였다

파이썬과 VISSIM COM-Interface를 이용하여 봉평터널 정체상황을 구축하여 10회 반복하여 효과분석을 시행하였다. 봉평터널 부근 교통 정체의 주요 패턴인 면은IC에서부터 정체가 시작되어 봉평터널까지 영향을 미치는 상황을 시뮬레이션을 구현하였으며 시뮬레이션 상 차량들이 전체적으로 안정화될 초기화 시간을 고려하였고, 시뮬레이션 시작 후 420초 후에 봉평터널 출구부에서 처음으로 지·정체가 검지되었다. 그리고 급격한 속도차이가 발생하지 않도록 하여 완충속도를 반영하지 않는 시나리오를 구성하였다. 우선 터널 내부 속도 변화에 따른 지·정체 상황별 제어속도 결정 및 전이시간 산정 등 알고리즘 계산 및 표출결과를 파악하였다. 그리고 시스템 운영 전과 후에 관측되는 차량의 구간속도의 변화를 비교하여 시스템의 운영 효과를 분석하였다.

2. 알고리즘 평가 결과

터널 내 정체 구간 평균 속도와 VSL₁의 전방 평균 속도를 이용하여 각 갠트리별 제어속도를 계산한 결과에 관한 하나의 사례는 다음 <Table 2>와 같다. 완충속도가 발생하지 않는 시나리오를 적용하여 실제 표출된 속도는 제어속도와 동일한 값으로 나타난다. 시뮬레이션 시작 420초 후에 최초로 지체가 발생하고, 각 갠트리별 제어속도는 70/80/90으로 계산되어 표출된다. 이때 최소표출시간은 27초로 계산되고 이는 250초 까지 유지된다. 450초 후에 터널내 속도가 다시 감소하여 표출속도는 60/70/80으로 계산되어 운영되었다. 540초가 되어 터널내 속도가 40km/h 이하로 떨어진 정체상황이 발생하였고, 이에 따라 표출속도는 40/50/70으로 결정되었다. 이때 최소 표출시간은 43초로 계산되었다. 570초에 새로운 표출속도가 계산되었으나, 13초동안은 기존의 40/50/70의 표출속도가 유지되고, 이후에 30/50/70의 새로운 표출속도가 적용되는 것을 확인하였다. 660초후에는 터널내 속도가 20km/h이하로 감소되고 VSL₁ 지점의 속도는 높지만 본 연구의 알고리즘이 작동하여 표출속도는 20/40/60으로 교통상황과 부합하도록 결정된 것을 확인할 수 있다.

<Table 2> An Example of Display Speed

Time, s	Average speed in tunnel, km/h	VSL ₁ speed, km/h	Control speed			Display speed			Min. display time
			VSL ₁	VSL ₂	VSL ₃	VSL ₁	VSL ₂	VSL ₃	
390	85.2	103.8	100	100	100	100	100	100	-
420	66.7	104.1	70	80	90	70	80	90	27s
447	-	-	-	-	-	70	80	90	-
450	57.3	105.2	60	70	80	60	70	80	27s
477	-	-	-	-	-	60	70	80	-
480	47.6	105.2	50	60	80	50	60	80	36s
510	41.4	105.2	50	60	80	50	60	80	6s
516	-	-	-	-	-	50	60	80	-
540	33.3	105.0	40	50	70	40	50	70	43s
570	28.6	105.1	30	50	70	40	50	70	43s-30s=13s
583	-	-	-	-	-	30	50	70	-
600	24.5	105.1	30	50	70	30	50	70	-
660	19.8	104.6	20	40	60	20	40	60	54s

시뮬레이션 평가 결과를 활용하여 터널구간내 정체 발생 후 본 알고리즘의 적용시와 미적용시의 속도의 변화를 분석하였다. 이를 위하여 터널 출구로부터 200m 간격으로 5개구간을 정의하였고, 각각은 1구간(S1), 2구간(S2), 3구간(S3), 4구간(S4), 5구간(S5)으로 구분하였다. 분석결과를 정리한 내용은 <Table 3>에 나타내었다. 본 알고리즘의 미적용시에는 지체가 발생한 420초 이후에도 510초까지 2구간에서 5구간까지 주행속도가 100km/h가 넘는 정상류 상태의 속도로 운영되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 알고리즘 적용시에는 동일한 구간의 속도가 100km/h 이하로 감소되어 운행되고 있다. 그리고 본 알고리즘의 미적용시 결과에서 1,020초 이후에도 4구간과 5구간의 속도는 100 km/h 이상으로 파악되나, 적용시에는 40km/h의 속도로 운행하는 것을 볼 수 있다.

본 알고리즘의 미적용시에는 구간별 속도가 상류부부터 감소되는 것으로 나타났지만 실질적으로는 정체 후미가 길어지며 속도가 감소된 것이고, 정체 후미와 다음구간과 50km/h 이상 속도 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 반면 적용시에는 정체 발생 후부터 구간별로 통행속도가 되었고 정체 후미와 다음구간과의 속도차이

가 20km/h 이내로 진행되어 정체시 교통류와 정상류간의 속도 차이가 크게 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 알고리즘 미적용시 정체발생 후 900초 후 정체 후미가 터널 출구에서 800m지점까지 확산되었으나, 적용시에는 300m지점에서 더 이상 정체꼬리가 확산되지 않았다. 사전사후 조사된 S2에서 S5 구간의 평균속도를 통계적으로 분석한 결과 신뢰수준 95%에서 속도차이가 유의한 것으로 나타났다. 이와 같이 분석된 속도 변화를 평가하면 본 알고리즘의 적용시 전체적으로 각 구간별 평균속도의 크기와 구간별 속도편차가 모두 감소하여 터널에서 교통사고 감소가 예상되고 나아가 정체시 차량운행의 안전을 향상하는데 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

<Table 3> Comparison of before and after section speed

Time, s	Before Section Speed, km/h					After Section Speed, km/h				
	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
420	66.7	103.3	103.0	104.1	102.9	66.7	103.3	104.1	102.9	105.8
450	57.0	104.0	104.0	103.2	105.6	57.0	104.0	102.5	103.8	101.3
480	46.3	103.7	102.7	103.8	103.9	47.6	102.8	101.3	99.8	97.5
510	35.7	102.6	102.6	103.7	104.2	41.4	92.7	99.7	96.8	97.5
540	28.6	98.5	102.6	103.7	104.2	33.3	92.7	98.9	93.4	93.4
570	24.2	98.2	102.5	103.9	103.5	28.6	86.8	98.9	93.7	92.8
600	21.2	93.1	102.7	103.9	103.9	24.5	87.3	97.9	92.6	91.8
630	18.4	90.5	103.1	103.0	103.9	21.6	86.4	96.8	91.3	81.9
660	16.3	80.9	103.2	103.2	103.8	19.8	86.4	95.5	80.6	72.4
690	14.6	68.7	103.1	103.6	104.9	18.8	82.9	83.9	72.8	71.8
720	13.3	61.7	102.8	103.3	104.1	18.8	74.3	78.7	72.2	65.7
750	12.3	51.9	102.9	103.6	104.3	18.1	72.8	78.7	67.4	62.2
780	11.5	42.7	102.5	103.4	104.4	17.2	72.8	70.9	64.2	60.5
810	10.8	34.7	100.9	103.8	104.6	16.8	64.9	67.9	62.3	54.9
840	10.3	28.2	100.8	103.6	104.6	16.7	62.6	64.7	58.1	49.6
870	9.8	23.8	96.3	103.6	105.3	16.5	59.9	61.4	50.6	48.3
900	9.4	20.5	89.4	103.4	105.2	16.4	59.4	52.3	47.3	44.9
930	9.1	18.2	78.9	103.2	105.3	16.2	50.1	48.8	44.2	43.3
960	8.8	16.4	68.4	103.1	105.4	16.4	43.7	45.9	42.3	40.6
990	8.6	15.1	59.4	103.0	105.4	16.1	41.3	44.0	39.5	39.5
1020	8.3	14.0	50.8	102.5	105.3	15.4	39.2	41.0	38.2	39.1
1050	8.1	13.3	43.3	101.8	105.2	14.4	37.4	38.4	37.9	38.0
1080	7.9	12.5	36.9	100.2	105.3	13.6	33.6	38.2	36.7	37.1
1110	7.7	11.9	31.8	95.3	105.2	12.8	30.9	37.1	36.2	36.3
1140	7.5	11.3	28.2	90.8	105.1	12.1	28.7	36.1	35.2	35.6
1170	7.3	10.8	25.2	83.2	104.9	11.5	26.2	35.1	34.6	35.0
1200	7.2	10.4	22.8	73.1	103.7	11.0	23.1	34.6	33.9	34.6
1230	7.1	9.9	21.0	59.2	103.4	10.5	20.7	33.8	33.5	34.6
1260	7.0	9.6	19.5	49.6	101.6	10.2	18.9	32.3	33.5	34.5
1290	6.8	9.3	18.4	41.9	96.8	9.8	17.4	31.2	33.5	34.4

V. 결 론

본 논문에서는 터널 진입부 도로에서 적용할 수 있는 효과적인 VSL 제어전략을 개발하고, 이를 구현하기 위한 다양한 제어 알고리즘을 제시하였다. 터널 진입부 도로에는 3개의 갠트리를 구성하여 점진적인 속도 감속이 유도되도록 구성하였고, 이를 구현된 알고리즘에 반영하였다. 제시된 알고리즘의 효과를 분석하기 위하여 시뮬레이션 평가를 통하여 실시하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

VSL 제어를 위한 고속도로 교통류의 소통 상황은 크게 원활, 정체, 돌발의 4가지로 분류하였고 지·정체 판단은 밀도와 속도를 복합적으로 적용하였다. 그리고 3개의 갠트리에 적용될 제어속도와 완충속도를 계산하는 알고리즘과 표출시간을 계산하는 방법을 제시하였다. 또한, 터널 내 차량의 평균통행속도가 80km/h 이상으로 검지된 원활 상황에는 제한속도를 100km/h 값으로 표출하였다. 지·정체상황 시에는 각 갠트리별 제한속도를 계산하고 표출시간을 결정하여 운영되도록 제어 알고리즘을 설계하였다.

제시된 알고리즘을 파이썬과 VISSIM COM-Interface를 이용하여 시뮬레이션 환경을 구축하여 평가하였다. 평가결과, 본 알고리즘의 미적용시에는 정체 발생시 정체 후미가 길어지면서 구간별 속도가 상류부부터 하류부로 감소되었지만, 정체 후미와 다음구간의 속도가 50km/h 이상으로 큰 차이가 났다. 반면 알고리즘 적용시에는 정체 발생 시부터 구간별로 통행속도가 감소되었고 정체 후미와 다음구간의 속도차이가 20km/h 이내로 운행되어 정체시 교통류와 정상류간의 속도 차이가 크게 감소되었다. 또한, 알고리즘 미적용시 정체 후미의 길이가 터널 출구에서 800m지점까지 확산되었으나, 적용시에는 300m지점으로 축소되어 나타났다. 이와 같이 제시된 알고리즘 적용시 전체적으로 각 구간별 평균속도의 크기와 구간별 속도편차가 모두 감소하여 터널에서 교통사고 감소가 예상되고 나아가 정체시 차량운행의 안전을 향상하는데 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

향후에는 실제 현장 자료를 기반으로 한 알고리즘 효과를 평가하는 관련 연구가 필요하다. 또한 운전자의 VSL에 대한 순응도를 높이기 위하여 운전자들에게 VSL 홍보 강화와 VSL을 규제화하는 방안에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Cho H. R. and Kim Y. C.(2010), "Modeling and analysis of traffic flow with variable speed limit on highway," *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, vol. 58, no. 9, pp.45-52.
- Cho H. R., Wee. J. R. and Kim Y. C.(2012), "Modeling of phased variable speed limit on highway," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 66, pp.191-196.
- Cho Y., Youn S. M. and Oh C.(2016), "Effectiveness analysis of Variable Speed Limit systems (VSL) in work zones based on meta-analysis," *Journal of Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 4, pp.91-103.
- Eo H. K., Park B. J., Kim T. H. and Heo J. N.(2013), "Operational strategy and effectiveness evaluation of variable speed limits system in tunnel: Focused on Hongjimun tunnel," *Journal of Transport Research*, vol. 20, no. 2, pp.137-151.
- Jo Y. T. and Jung I. B.(2010), "Real-time variable speed limits for urban freeway," *Journal of KIISE : Computing Practices and Letters*, vol. 16, no. 10, pp.962-974.

- Kuhn B., Balke K., Brydia R., Theiss L., Tsapakis L., Ruback L. and Le M.(2016), "Evaluation of Variable speed limit pilot projects for Texas department of transportation," *Transportation Research Procedia*, vol. 15, pp.676-693.
- Lee D. H., Lee K. Y., Lee S. B. and Oh Y. T.(2013), "Accident risk analysis based on compliance rate of variable speed limit," *Journal of Transport Research*, vol. 20, no. 3, pp.33-45.
- Lee S. B., Chang H. H., Lee Y. I. and Lee K. Y.(2015), "Development of speed estimation model under variable speed limit," *Journal of Transport Research*, vol. 22, no. 1, pp.1-14.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Highway Capacity Manual*, Korea
- Wang X., Seraj M., Bie Y., Qiu T. Z. and Niu L.(2016), "Implementation of variable speed limits: Preliminary test on whitemud drive, edmonton, Canada," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 142, no. 12.
- Yang X., Lin Y., Lu Y. and Zou N.(2013), "Optimal variable speed limit control for real-time freeway congestions," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp.2362-2372.