

# 고속도로 동적 갓길차로제 알고리즘과 운영기법 연구

## A Study on Algorithm and Operation Technique for Dynamic Hard Shoulder Running System on Freeway

문 남 식\* · 신 언 교\*\* · 김 주 현\*\*\*

\* 주저자 : 안양대학교 도시정보공학과 박사과정  
\*\* 공저자 : 안양대학교 도시정보공학과 겸임교수  
\*\*\* 교신저자 : 안양대학교 도시정보공학과 정교수

Nam Sik Moon\* · Eon kyo Shin\*\* · Ju hyun Kim\*\*\*

\* Ph.D. Student, Dept. of Urban Information Eng., Anyang Univ.  
\*\* Adjunct Professor, Dept. of Urban Information Eng., Anyang Univ.  
\*\*\* Professor, Dept. of Urban Information Eng., Anyang Univ.

† Corresponding author : Ju-hyun Kim, jhkim@anyang.ac.kr

Vol. 23 No.4(2024)  
August, 2024  
pp.16~36

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.4.16>

Received 1 July 2024  
Revised 15 July 2024  
Accepted 13 August 2024

© 2024. The Korean Society of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

본 연구에서는 갓길차로제 운영시작속도 외에 종료속도와 최소운영시간 등을 포함하는 동적 갓길차로제 알고리즘을 개발하고 운영방안을 제시하였다. 알고리즘은 1단계는 red로 갓길차로의 차량통행이 금지된다. 2단계는 red amber로 운전자들에게는 갓길차로 통행을 예고해주고 운영자에게는 갓길차로에 차량통행을 방해할 요소가 있는지를 점검할 시간을 주게 된다. 3단계는 green으로 갓길차로의 차량통행이 허용되는 단계이다. 4단계는 amber로 차량통행은 허용되면서 갓길차로 종료가 임박했다는 신호를 운전자들에게 주게 된다. 그리고 green 과 red 에는 최소운영시간을 적용하되 red의 경우에는 정체가 심한 경우 조기 종료되도록 하여 정체가 악화되지 않도록 하고 본선램프미터링과 차로수 조화로 상·하류부 교통류를 안정적으로 관리되도록 하였다. 운영기준속도는 고속도로를 이용하는 차량과 운전자 특성을 반영하고 시뮬레이션한 결과를 토대로 소통측면과 안전측면을 고려하여 7090을 최적 운영기준속도로 선정하였다. 최소운영시간은 갓길차로가 운영되는 개별 링크거리를 최저속도로 나눈 통행시간을 제한하여 통행의 연속성이 확보되도록 하였다.

핵심어 : 갓길차로제, 운영기준속도, 본선램프미터링, 차로수조화

### ABSTRACT

This study, developed a dynamic hard shoulder running(HSR) algorithm that includes ending speed and minimum operation time in addition to the starting speed for HSR, and presented an operation plan. The first stage of the algorithm was red, which means vehicles are prohibited from HSR. The second stage is red/amber, in which drivers are notified of HSR, and operators are given time to check whether there is any obstacle to HSR. Stage 3 is green, which vehicles are permitted for HSR. Stage 4 is amber, in which a signal is given to drivers that the end of HSR is imminent. In addition, a minimum time is applied to green and red, but if congestion is severe, red is terminated early to prevent congestion from worsening. The upstream and downstream traffic flow is managed stably through main line ramp metering and lane number matching. The operating standard speed reflects the characteristics of vehicles and drivers, and based on simulation results, 7090 was selected as the optimal operating standard speed considering traffic flow and safety aspects. Therefore it is desirable to apply the travel time divided by the minimum speed of the HSR link as the minimum operating time in order to ensure continuity of traffic flow

Key words : Hard shoulder running, Operating standard speed, Main line ramp metering, Lane number matching

## I. 서론

### 1. 연구 배경 및 목적

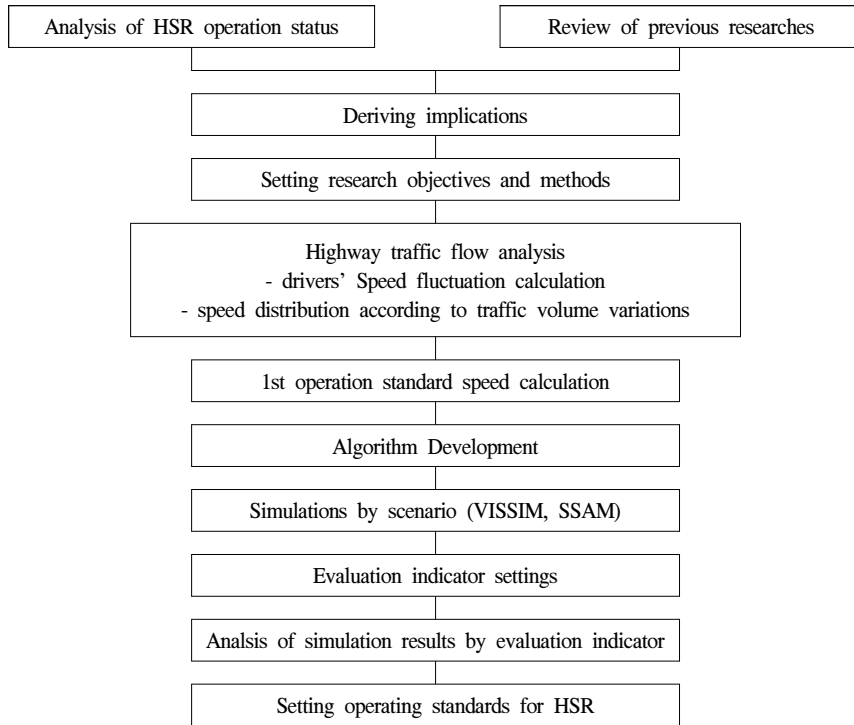
도시고속도로를 비롯하여 수도권과 대도시 주변 고속도로들은 특정 시간대(출퇴근시간, 주말 등)를 중심으로 극심한 교통체증을 겪고 있다. 이러한 특정 시간대 및 특정 구간을 중심으로 반복되는 교통혼잡을 해소하기 위해서 최근에는 기존 시설들을 시공간적이고 탄력적으로 이용하여 교통 혼잡을 완화하고 안전하고 원활한 교통서비스를 제공하기 위한 능동적인 교통관리전략이 다양하게 적용되고 있다. 우리나라도 이러한 능동적인 교통관리시스템 일환으로 고속도로에 2007년부터 갓길차로제(Hard Shoulder Running; HSR)를 도입하여 갓길차로 운영구간은 2023년 7월 기준 9개 노선 64개 구간의 255.92km (2021년 253.68km, 2019년 242.1km)에서 운영이 되고 있다.

이러한 갓길차로제는 반복적이지만 지속적이지 않는 용량 부족 구간의 정체를 완화하고 네트워크의 병목 현상을 해결할 수 있는 방안으로 갓길차로의 차량 통행을 허용하여 용량을 증대시켜 소통을 향상시키기 위한 고속도로 교통관리기법 중의 하나이다. 또한 도로 신설이나 확장 등 대규모 사업에 비해 비용절감은 물론 공사기간을 크게 단축하여 이들로 인한 혼잡 문제를 해소하고 이러한 대규모 사업의 시행 기간을 연기하여 도로투자사업의 효율성을 제고시킬 수 있다. 그러나 갓길차로의 차량 통행이 이루어지는 동안에는 교통사고 발생 등 돌발 상황 발생 시 신속하게 대응할 수 없기 때문에 신중하게 적용하여야 한다. 따라서 적절한 통행 속도도 유지하고 통행 마찰도 최소화하면서 갓길차로 본래의 교통관리도 적절하게 이루어지도록 하기 위해서는 갓길차로 운영속도 및 운영시간 등에 대한 기준 설정이 매우 중요하다. 또한 고속도로의 효율적인 교통관리를 위해서는 고속도로를 이용하는 운전자들의 주행속도 분포 특성을 고려한 교통류 특성을 잘 반영하고 실시간 교통상황에 맞게 교통류가 관리되어야 한다. 이러한 동적 교통류 관리가 가능한 갓길차로제 시스템을 구축하는데 본 연구의 목적이 있다.

### 2. 연구 방법

상기 목적을 달성하기 위하여 국내외 갓길차로 운영체계를 검토하고 기존 연구 고찰과 시사점을 도출하여 연구 목적과 방법을 설정하였다. 그리고 동적 교통류 관리가 가능한 갓길차로제를 구축하기 위해 본 논문에서는 검지기로부터 수집된 고속도로의 교통류를 분석하여 운전자 특성과 교통류 특성을 파악하였다. 이를 위해 교통량 변화에 따른 교통류 상태를 혼잡 발생 전, 혼잡 진행 단계, 정체 상황, 혼잡 회복 단계, 회복 후 단계로 구분하여 매 단계별 교통량과 속도 분포 특성을 분석하여 갓길차로제 운영효과를 최대화할 수 있는 갓길차로 운영기준속도를 설정하였다. 이를 토대로 실시간 교통상황에 따라 동적 갓길차로를 운영하고 모니터링 할 수 있도록 차량검지와 통행속도 산정, 통행속도 제어, 갓길차로 통행제어 등을 위한 감응식 신호제어를 위한 알고리즘을 구축하였다. 알고리즘은 단일링크 제어는 물론 본선 미터링 및 차로수 조화 등 상·하류부 링크 간 교통류를 효과적으로 제어하여 소통과 안전을 도모할 수 있도록 구축하되 수 개의 대안 알고리즘을 구축한 다음 평가를 거쳐 최적 알고리즘을 선택하였다. 이를 위해 본 고속도로 교통류 분석 결과를 토대로 교통류 특성에 맞는 운영기준속도를 1차적으로 산정하고 이들 기준이 포함된 시나리오를 작성하였다. 그리고 너무 빈번한 갓길차로 신호 변동에 따른 혼란을 방지하기 위해 갓길차로 최소운영시간에 대한 시나리오를 작성한 다음 시뮬레이션을 수행하였다. 마지막으로 최적 알고리즘과 운영기준속도를 산정하기 위한 평가지표를 설정하고 이들 지표 값들을 이용하여 동적 갓길차로 운영을 위한 알고리즘, 운영기준속도, 최

소운영시간 등을 산정하였다. 이러한 주요 연구과정을 도식화하면 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Research framework

## II. 갓길차로제 및 기존 연구 고찰

### 1. 갓길차로제 운영기준

고속도로 갓길차로제 설치 및 운영에 관한 기준과 운영을 위한 차로 개방 및 폐쇄 조건은 「갓길차로제 운영 업무 매뉴얼」(Korea Expressway Corporation, 2018)에 제시되어 있다. 이 매뉴얼에 따르면 갓길차로의 차로 개방 및 폐쇄는 기본적으로 운영시스템을 통한 자동 개방을 원칙으로 하고 있으며 운영자의 판단에 따라 필요시 수동으로 개방하는 방법으로 운영되고 있다. 차로 개방은 노선 축 단위의 정체 특성이 동질적이며 연속된 구간에 대하여 주중/주말로 구분하여 지점속도가 60km/h 이하로 감소하거나 60km/h 이하로 급격히 감소가 예상되는 경우 개방하게 되며, 갓길차로 개방으로 지점속도가 60km/h를 초과한 상태로 1시간이 경과한 경우 갓길차로를 폐쇄하게 된다. 한편, 운영자가 판단하여 필요시 갓길차로를 개방하거나 폐쇄할 수 있다.

### 2. 기존 연구 고찰

Ma et al.(2016)는 고속도로에서 교통사고 관리를 위한 동적 갓길차로제를 제안하였으며, 그 효과를 분석하였다. 분석을 위해 미시 교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM을 활용하였고 VISSIM의 Com-interface 기능을 활

용하여 사고 차량을 구현하였다. 분석결과 갓길차로제의 시행으로 평균 지체가 약 30%~80% 감소하고 통과 교통량이 20~40% 증가하는 효과가 나타났다.

Kim(2017)은 갓길차로제 시행구간의 교통류 특성과 교통사고 자료를 분석하고 그 결과로 효율적인 갓길차로 운영을 위한 적정 시행 속도를 제시하였다. 시행 전후의 교통량 변화, 속도 변화, 밀도 변화를 통해서 실제로 지·정체 완화 효과를 볼 수 있는 갓길차로 개방 시점을 분석하고 교통류이론을 토대로 갓길차로 개방 후 교통상황을 최대 교통류율로 만드는 시행 속도인 70km/h를 적정 시행 속도로 제시하였다. 또한 시행 전후 교통사고의 변화 추세를 분석하여 갓길차로제 시행이 안전성에 미치는 영향을 검토하였다.

Ko et al.(2020)은 갓길차로의 운영 전후 효과 분석을 위해 시공도 기반 개별 갓길차로 운영 전후 효과분석 및 도로 축 단위 갓길차로 운영 전후 효과 분석으로 나누어 종합적인 분석을 수행하였다. 그리고 경부선 안성IC→남사IC 구간에서 7.2km/h, 동탄JC→기흥JC 구간에서 11.7km/h 속도가 개선되고 고속도로 전반의 소통 흐름 개선여부를 판단하기 위해 축 개념의 소통 분석을 통한 분석 결과 경부선 서울방향 11.5%, 부산방향 5.2%, 영동선 강릉방향 40.9%, 인천방향 24.9%의 통행시간 감소 효과를 분석 결과로 제시하였다.

Park et al.(2021)은 갓길차로제 시행에 따른 안전성 분석 결과 총 5개의 분석 대상 구간 중 3개 구간은 갓길차로제의 시행이 교통사고 감소에 영향을 끼치지 않으며, 2개의 구간은 영향을 미친다는 분석이 나왔지만 전체 구간을 분석했을 때에는 교통사고 감소에 영향이 없는 것으로 나타났다. 이동성 분석은 총 13개의 분석 대상 구간 중 3개 구간을 제외한 모든 구간이 속도가 개선되었으며, 서행 시간은 11개 구간에서 감소, 지체 시간은 7개 구간에서 감소하였다. 이는 갓길차로제의 시행 기준 속도와 서행 시간 기준 속도가 동일하기 때문에 갓길차로제의 실시로 인해 서행 시간의 감소 효과가 큰 것으로 나타났다.

Jeong et al.(2023)은 강화학습의 DQN을 활용한 갓길차로제 운영 알고리즘을 개발하였고 VISSIM으로 경부선 기흥IC-수원IC 구간의 데이터를 활용하여 강화학습 에이전트를 학습시켰고 그 효과를 평가하였다. 분석 결과 시간당 최대 26km/h의 속도 개선 효과가 발생하였으며, DQN 에이전트는 기존 운영기준인 60km/h 보다 약 10km/h 높은 속도로 갓길차로제를 운영하였다. 안전성 효과의 경우 기존 운영 방식과 DQN 기반 운영을 통해 발생하는 차량 간 상충 건수를 비교하였고 산출된 상충 건수의 차이가 크지 않아 10km/h의 운영 기준 속도의 차이가 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단하였다.

### 3. 연구 차별성

갓길차로제에 관한 연구는 효과분석에 관한 연구가 대부분이고 운영기준에 관한 연구는 대부분 갓길차로 운영기준속도에 국한되어 있는데 Kim(2017)과 Jeong et al.(2023) 모두 70km/h를 갓길차로 적정 운영속도로 제시하였다. 현재 「갓길차로제 운영 업무 매뉴얼」에 따르면 정체특성이 동질적인 영향권 구간의 지점속도가 60km/h 이하로 감소되면 갓길차로를 운영하고 갓길차로 운영으로 지점속도가 60km/h를 초과한 상태로 1시간이 경과하게 되면 갓길차로를 폐쇄하게 된다. 갓길차로에 차량통행이 이루어지는 동안에는 갓길차로 본래의 용도로 사용되지 못하므로 갓길차로 운영시간은 중요하다. 이러한 갓길차로 운영시간은 갓길차로 운영기준속도에도 영향을 받지만 갓길차로 종료 속도에도 영향을 받는다. 그런데 60km/h 회복 후 1시간이 경과한 후 속도는 교통상황에 따라 매우 다양하게 나타날 것이다. 이런 속도 차이를 고려하지 않고 일률적으로 갓길차로를 폐쇄하게 되면 갓길차로를 효율적으로 운영하기 어렵게 된다. 속도가 60km/h 보다 조금 클 경우 곧바로 갓길차로를 재개해야 할 수도 있고 속도가 너무 클 경우에는 갓길차로를 조기에 종결시켜 본래의 목적으로 갓길차로를 운영할 수도 있기 때문이다. 또한 갓길차로의 정체 특성이 동일한 영향권이라도 단일 구간별로 교통상황은 언제든지 달라질 수 있기 때문에 교통상황에 적절하게 대응하기 위해서는 갓길차로 운영

기준은 단일 링크를 기준으로 설정할 필요가 있다. 그리고 운영기준속도만으로 갓길차로를 자동으로 운영할 경우 갓길차로 운영이 너무 자주 바뀌게 되어 운전자들의 혼란으로 교통안전에도 나쁜 영향을 주게 된다.

갓길차로로 차량 통행이 허용되기 직전에는 갓길차로에 고장차량 등 차량 통행 장애요소가 있는지 점검할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 갓길차로 운영기준속도 외에 종료 속도와 최소운영시간 등을 포함하는 동적 갓길차로 운영방안을 제시하고자 한다. 그리고 갓길차로에 차량 통행이 임박한 시점에서 갓길차로에 차량 통행의 장애 요소가 있는지를 점검할 수 있는 모니터링이 가능한 신호체계를 제시하였다. 마지막으로 효율적인 동적 갓길차로제 운영을 위하여 소통지표(통행속도, 도착교통량, 미출발 교통량)와 안전지표(신호변경횟수, 상충횟수) 값과 이들 값들을 갓길차로 운영시간으로 나눈 효율성 지표 값을 종합적으로 평가하여 운영 알고리즘과 운영기준속도, 종료속도, 최소운영시간 등을 산정하고자 한다.

### Ⅲ. 운영기준 설정 및 알고리즘 구축

고속도로의 효율적인 갓길차로제 운영을 위해서는 고속도로를 이용하는 운전자 특성이 반영된 교통류 특성을 잘 파악하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 검지기로부터 수집된 고속도로의 교통류를 분석하여 갓길차로제 운영을 위한 운영기준속도와 다양한 운전자들의 속도 차이를 반영하기 위해 변동속도를 제시하였다. 본 논문에서는 고속도로 교통류분석 결과를 토대로 교통류 특성에 맞는 운영기준을 1차적으로 산정하고 이들 기준이 포함된 시나리오를 작성하여 시뮬레이션 결과를 분석하여 최종적으로 운영기준을 산정하였다.

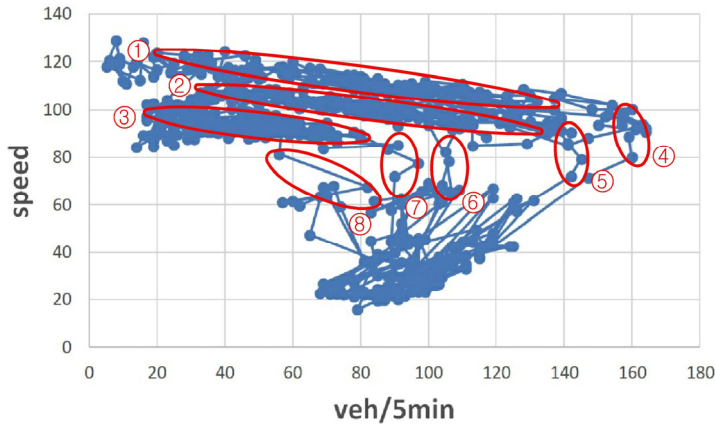
#### 1. 고속도로 교통류 분석

분석 구간은 고속도로 기본구간의 교통 특성이 제대로 반영되고 교통소통상태가 소통 원활/지체 서행/정체 상황을 모두 포함하는 구간(서평택<sup>ic</sup>→발안<sup>ic</sup>)<sup>1)</sup>을 선정하였다. 교통류 분석은 시간 경과에 따른 교통량과 속도 분포 변화에 대한 분석을 수행하였다. 교통량과 속도 분포는 <Fig. 2>과같이 시간 경과에 따라 매우 폭넓게 흩어져 속도와 교통량 분산이 각각 779.2, 1182.7로 분석되었다. 속도 분포 특성을 살펴보면 속도가 80kph 이상인 소통상태가 원활한 교통류 상태를 보면 시간 경과에 따라 교통량과 속도 분포도는 수평축으로 직선 형태의 3개 그룹으로 나누어지는 것을 알 수 있다. 이는 차로 별로 속도 분포가 차이가 나는 것으로 최상층이 1차로(①) 중간층이 2차로(②) 최하위층이 3차로(③) 교통량으로 나타났다. 속도 60kph~80kph 구간은 수직축으로 5개 그룹으로 구분되는데 이는 각 차로 별 혼잡 시작 구간과 혼잡 회복 구간으로 구분되는 것으로 나타났다. 맨 우측 구간은 1차로 교통량의 혼잡시작 시간대(④)이고 두 번째 구간은 2차로 혼잡 시작 구간(⑤)이고 3번째 구간이 1,2차로 혼잡 회복 구간(⑥)이다. 그리고 4번째 구간은 3차로 혼잡 시작 구간(⑦)이고 5번째 구간은 3차로 교통량 혼잡 회복 구간(⑧)이다. 이들 구간에 분포하는 교통량은 적고 혼잡이 시작되는 구간에는 교통량이 거의 없고 대부분 혼잡 회복 구간에 분포된 것을 알 수 있다. 정체구간인 40kph 이하 구간에서는 특별한 그룹으로 구분되지 않고 교통량이 밀집되어 있는 것으로 나타나 정체 시에는 차량 및 운전자들의 특성이 나타날 수 없기 때문에 강제류 상태에서 모든 차량들이 유사하게 이동하고 있다는 것을 알 수 있다.

속도별 교통량 분포를 보면 70kph-80kph 구간이 6대, 50kph-60kph 구간이 7대로 가장 적고 40kph-50kph,

1) 고속도로 공공데이터 포털(<https://data.ex.co.kr/>), VDS원시자료, 2023. 5. 19, 한국도로공사

60kph-70kph 구간이 각각 26대, 29대로 적게 나타났다. 특히 혼잡이 시작되는 단계에서는 60kph-80kph 구간이 아주 적고 80kph에서 70kph 상부 속도를 거쳐 60kph 이하로 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 혼잡 회복 단계에서는 60kph-70kph 구간이 다수 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 이러한 소통 수준별 교통량과 속도 분포 특성을 반영하여 갓길차로제 운영기준 속도 산정에 반영하였다.



<Fig. 2> Speed distribution according to traffic volume changes over time (all lanes)

혼잡 진행 시에는 어느 차로에서나 70kph 이상의 속도에서 60kph 이하의 속도로 큰 폭으로 감소된 후 진동 후 회복되는 것으로 나타났다. 회복 단계에서는 60kph~70kph 사이에서 진동 후 80kph 이상으로 회복된 후 정상 교통류 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 70kph 이상의 속도 유지 시 큰 폭으로의 속도 감소를 예방할 수 있고 속도 회복을 위한 시간을 단축할 수 있을 것으로 분석되었다. 소통이 원활한 정상 교통류 상태에서는 80kph 이상에서는 진동하지만 80kph에서는 혼잡 단계로 급속히 진행되기 때문에 혼잡을 예방하기 위해서는 80kph 이상의 속도를 유지할 필요가 있는 것으로 분석되었다. 혼잡이 시작될 때와 회복될 때 동일한 속도에서의 교통량이 혼잡이 진행될 때가 회복될 때의 교통량보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 그리고 그 차이는 <Fig. 2>에서 상위 차로로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 교통혼잡 초기 단계에서의 용량 증대 등 교통류 관리가 중요하다고 할 수 있다.

## 2. 운영기준속도 설정

### 1) 운영기준속도 설정

갓길차로제 운영기준속도는 갓길차로 개방을 위한 최저속도(minimum speed, min speed)와 갓길차로 폐쇄를 위한 최대속도(maximum speed, max speed)로 구분된다. min speed는 교통 혼잡으로 갓길차로의 차량 통행을 허용하는 속도이고 max speed는 갓길차로 차량 통행으로 속도가 회복되어 갓길차로의 차량 통행을 금지하는 속도이다. 이들 속도는 갓길차로 운영시간에 영향을 주게 되고 갓길차로 운영 효과에도 큰 영향을 미치게 된다. 검지기 데이터 분석 결과에 의하면 혼잡이 시작되는 단계에서는 소통이 원활한 상태의 정상 교통류 속도 80kph에서 70kph 근처로 감소된 후 60kph 미만으로 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 혼잡 상태에서 정상 교통류로 회복되는 단계에서는 70kph 이하 근처에서 많이 머무르는 점을 감안하여 70kph를 1차 min speed로 산정하고 60kph, 70kph, 80kph 세 개 속도를 min speed의 시나리오로 설정하여 시뮬레이션을 통하여

최적의 min speed를 산정하였다. max speed는 정상 교통류 상태에서 80kph~90kph 사이에서 많이 머무르고 80kph에서는 급격히 70kph 근처로 감소되는 점과 회복 단계에서는 70kph에서 80kph 이상으로 급격히 증가하는 점을 고려하여 정상 교통류 상태를 오랫동안 지속시키기 위해서는 max speed는 80kph보다는 커야 하므로 90kph를 max speed로 산정하였다. 즉 검지기 데이터 분석에 의해 산정된 갯길차로 운영기준속도 시나리오 (min speed, max speed)인 (60kph, 90kph : 6090), (70kph, 90kph : 7090), (80kph, 90kph : 8090)에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 최적의 운영기준속도를 산정하였다. 주요 국가의 혼잡 기준 미국 72-80kph 미만, 영국 80kph 미만, 일본 60kph 미만, 캐나다 75kph 미만으로 운영하고 있는 것을 감안하면 운영기준 속도 설정을 위한 상기 시나리오 설정은 적절하다고 할 수 있다.

그런데 운영기준 속도를 한 개의 특정 속도로 규정하게 되면 갯길차로 운영 신호가 자주 바뀌게 되어 교통안전에도 악영향을 줄 수 있다. 또한 어떤 운전자라도 항상 동일한 속도로 주행하기는 불가능하고 기준속도에서 약간 증감되는 속도 변동을 갖게 되며 차량 성능과 운전자 특성 차이로 도로를 주행하는 차량들의 속도는 모두 동일할 수 없다. 이러한 차량과 운전자 특성에 따라 기준속도를 중심으로 소폭 진동하게 되는 변동속도(gap speed)를 운영기준속도에서 가감하여 운영기준속도에 범위를 주어 잦은 신호변경을 방지하여 안정적인 갯길차로 운영이 가능하도록 하였다. gap speed는 운전자들의 주행속도 관련 통행특성이 제대로 반영되도록 혼잡이 발생되기 전의 소통 원활 상태에서 산정하였다. 전체 차로에 대한 속도 차이 평균값은 4.85kph로 산정되어 5kph를 gap speed로 산정하였다.

## 2) 최소운영시간 설정

동적 갯길차로 운영기준을 속도만 사용할 경우 교통류 상태를 그대로 반영하여 소통 측면에서는 최대의 효과를 얻을 수 있지만 갯길차로 운영 상태가 너무 자주 바뀌게 될 수 있다. 이로 인해 운전자들이 혼란스럽고 교통안전상에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 이를 방지하기 위하여 갯길차로에 일단 차량 통행이 허용되면 최소 운영시간 이상 차량 통행이 이루어지도록 할 필요가 있다. 이 최소 운영시간이 짧을수록 교통상황을 잘 반영하여 소통 효과는 증가할 수 있지만 운영 상태가 자주 바뀌게 되고 너무 길면 갯길차로 운영시간이 길어지게 되고 속도 변화에 따른 갯길차로 운영 효율이 저하될 수가 있기 때문에 적절한 최소 운영시간이 산정되어야 한다. 본 논문에서는 최소 운영시간으로 300초, 600초, 900초 세 가지 시나리오를 작성하여 시뮬레이션을 수행하여 적절한 최소 운영시간을 산정하고자 하였다.

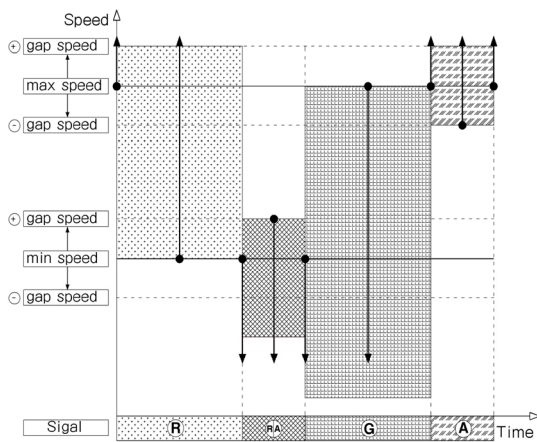
## 3. 알고리즘 구축

교통상황은 항상 무작위로 변하게 되고 돌발 상황 등으로 언제든지 예기치 못한 상황이 발생할 수 있기 때문에 본 논문에서는 이러한 실시간 교통상황을 반영할 수 있는 동적 갯길차로제 알고리즘을 개발하였다. 고속도로에서 갯길차로제는 병목구간 1개 구간에 대하여 실시할 수도 있지만 여러 구간에 걸쳐 실시할 수도 있기 때문에 본 논문에선 단일 링크뿐만 아니라 2개의 상·하류부 링크의 교통류를 소통과 안전 차원에서 관리할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 현재 우리나라 갯길차로 운영은 수 개의 링크로 구성된 영향권 기준으로 운영을 하기 때문에 개별 링크별 교통상황을 고려한 탄력적인 운영이 불가능하다.

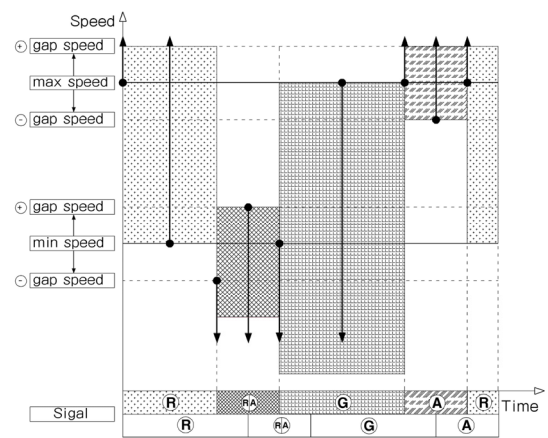
### 1) 단일 링크 제어 알고리즘

<Fig. 3a>와 같이 일반 상황에서는 속도가 max speed 이상이면 갯길차로 신호는 red가 되어 갯길차로 차량 통행이 금지되어 속도가 min speed 이상이 유지되는 동안 red가 계속 유지된다. red 최소 신호 시간이 경과되

고 속도가  $\text{min speed}$  이하가 되면  $\text{red amber}$ 가 되는데 이는 갭길차로 운영의 시작을 예고하는 단계로 운전자들에게는 갭길차로 통행을 예고하고 운영자에게는 갭길차로의 차량 통행을 방해할 요소가 있는지 CCTV 등을 통한 점검 시간을 준다. 계속해서 ' $\text{min speed} + \text{gap speed}$ ' 이하가 되면  $\text{red amber}$ 가 유지되면서  $\text{min speed}$  이하이면  $\text{green}$ 으로 변경된다. 속도가  $\text{max speed}$  이하로 유지되면  $\text{green}$ 이 지속된다. 속도가  $\text{max speed}$  이상이 되더라도 최소녹색시간이 만족될 때까지 녹색시간은 지속된다. 이후 속도가  $\text{max speed}$  이상이 되면  $\text{amber}$ 로 변경되는데 이는 차량 통행은 허용되면서 갭길차로 종료가 임박했다는 신호로 운전자들이 안전하게 차로 변경 등에 대비할 수 있게 해준다. 계속해서 ' $\text{max speed} - \text{gap speed}$ ' 이상인 경우  $\text{amber}$ 가 지속되며  $\text{max speed}$  이상이면  $\text{red}$ 로 변경되며 4단계 신호운영이 반복된다. 그러나 <Fig. 3b>와 같이 정체가 악화되어 속도가 ' $\text{min speed} - \text{gap speed}$ ' 이하가 되면  $\text{red}$  최소 신호시간 종료 전이라도  $\text{red amber}$ 가 되어  $\text{red}$  신호를 조기 종결되게 된다. ' $\text{min speed} + \text{gap speed}$ ' 이하가 되면  $\text{red amber}$ 가 유지되고 ' $\text{min speed}$ ' 이하이면  $\text{green}$ 으로 변경된다.



<Fig. 3a> HSR Algorithm for congestion

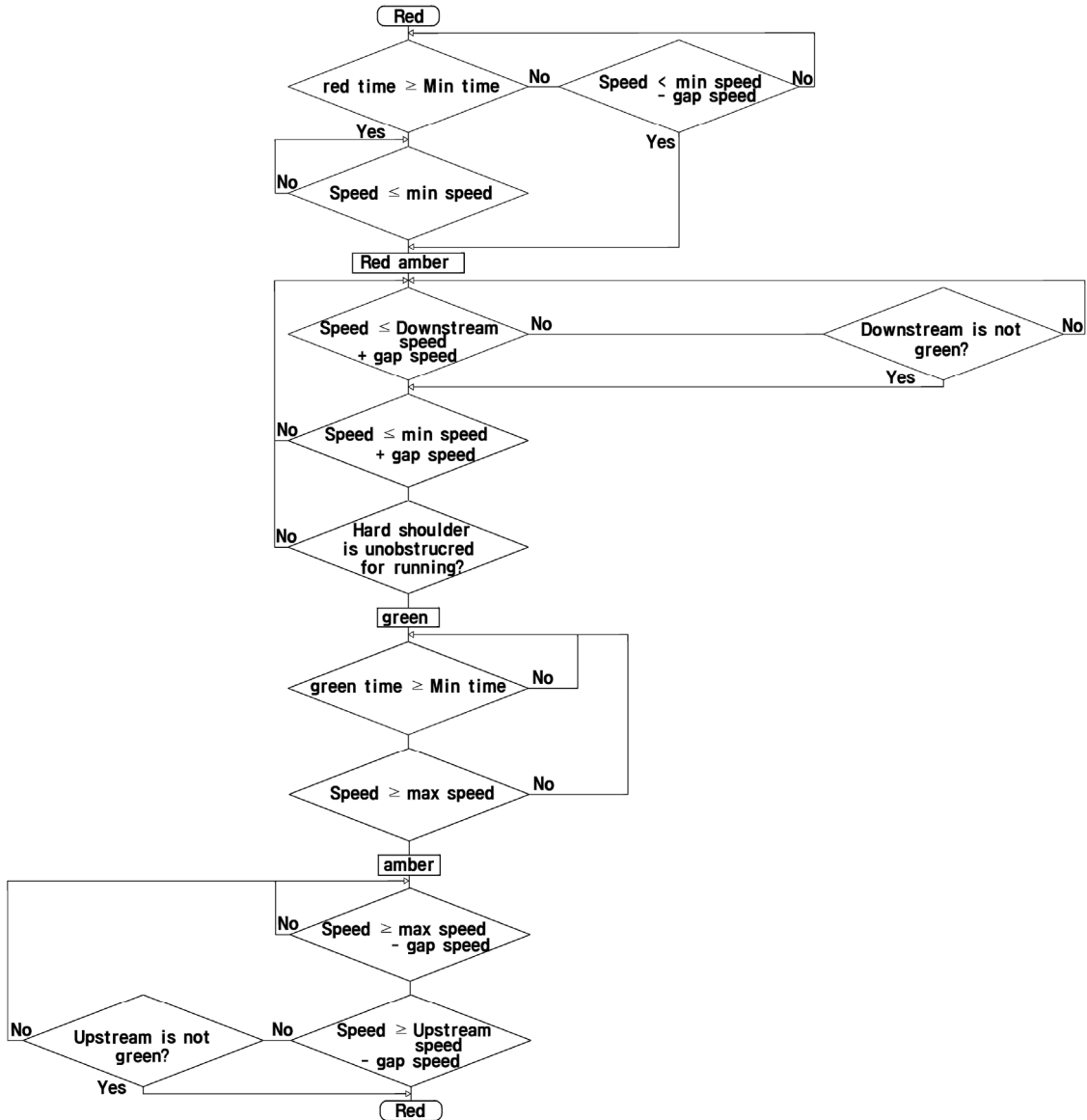


<Fig. 3b> HSR Algorithm for heavy congestion

## 2) 상·하류부 링크 연계 제어 알고리즘

갭길차로가 연속적으로 운영되는 경우는 상·하류부 링크 간 교통흐름에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 본선램프미터링 개념과 차로수 조화를 위한 알고리즘을 도입하여 인접된 상·하류부를 통합하여 교통류가 안정적인 흐름이 유지되도록 4가지 알고리즘을 구축하고 시뮬레이션을 통해 최적의 알고리즘을 선정하였다. 알고리즘1은 상류부 링크가  $\text{red amber}$ 에서  $\text{green}$ 으로 운영되는 상황이면 하류부 링크가  $\text{red amber}$ 이면  $\text{green}$ 이 운영되도록 하여 차로수를 일치시켜 교통류 흐름을 안정적으로 유지할 수 있도록 하였다. 그리고 상류부 링크가  $\text{red amber}$ 에서  $\text{green}$ 으로 바뀔 상황에서 하류부 링크가  $\text{green}$ 이고 상류부 속도가 하류부 속도보다 크면 상류부가  $\text{red amber}$ 를 유지토록 하는 본선램프미터링 개념을 도입하여 하류부의 정체 악화를 예방하고 상류부가  $\text{green}$ 이고 하류부가  $\text{amber}$  상태에서  $\text{red}$ 가 되려고 할 때 상류부 속도가 하류부 속도보다 클 때는  $\text{amber}$ 가 지속되도록 하여 차로수 조화가 유지되도록 하였다. 알고리즘2는 본선램프미터링기법 적용 시 알고리즘1과는 달리 “하류부 속도+ $\text{gap speed}$ ”를 이용하여 적용 속도를 더 크게 하였다. 알고리즘3은 알고리즘2 조건을 반영하되 알고리즘2와는 달리 적색시간의 경우에는 속도가 ' $\text{min speed} - \text{gap speed}$ ' 보다 작아 정체가 심한 경우 조기 종결할 수 있도록 하여 정체 악화를 방지할 수 있도록 하였다. 알고리즘4는 알고리즘1과 알고리즘4의 정체가 심한 경우 적색시간을 조기 종결할 수 있는 조건을 반영하였다.





<Fig. 4> Algorithm 3 for hard shoulder running

#### IV. 시뮬레이션

전절에서 구축된 알고리즘을 구현할 수 있는 미시적 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하여 시뮬레이션을 수행하고 사고 위험성에 대한 평가를 위하여 시뮬레이션으로부터 구한 차량 궤적 데이터를 SSAM으로 분석하였다. VISSIM 시뮬레이션은 random seeds에 변화에 따라 교통류 속성이 변하게 되므로 합리적인 결과를 도출하기 위해 시나리오 별로 6개 random seeds에 대하여 수행하였다. SSAM의 상층 유형은 후미추돌(30°), 차로변경(30° ~ 85°), 교차상충(85° 이상)으로 적용하고 TTC 1.5초, PET 5초를 적용하여 분석하였다.

## 1. 시뮬레이션 수행을 위한 자료 구축

### 1) network 구축

차로수는 갓길차로제를 운영하는 64개 구간 중 37개 구간으로 가장 많은 비중을 차지하고 있는 ‘본선 4차로+갓길 1차로’로 설정하였다. 링크 거리는 고속도로 IC 최소 간격 기준 2km와 도시고속도로 IC 표준 간격 2~5km를 감안하여 4km로 설정하였다. 시뮬레이션은 1시간 동안의 결과를 얻기 위해 network에 차량들이 채워지는 초기화 시간 400초를 추가하여 4000초 동안 시뮬레이션을 수행하고 교통량은 5분 단위로 입력하였다. 특히 소통 원활 상태에서 시작해서 혼잡 상황을 거쳐 소통 원활 상태로 시뮬레이션이 진행되도록 하여 갓길차로 운영시간대가 발생되도록 설계속도 110km/h인 편도 4차로 고속도로의 서비스수준 D수준 7,300대/시를 포함하도록 하고 용량인 9,000대/시까지 증가한 후 감소하는 것으로 5분 단위로 입력하였다. 램프 교통량은 제한속도 60kph의 용량인 1,800대/시가 포함되도록 하였다. 차종 구성비는 승용차 75%, 버스 15%로 가정하였다. 제한속도는 100kph에서 110kph로 상향 운영되고 있는 구간도 많기 때문에 본선은 110kph와 100kph, 연결로는 60kph로 하고 이에 따른 가속차로 220m, 감속차로 120m를 고려하여 Network을 작성하였다. 그리고 갓길차로 운영에 따라 가감속차로가 추가 설치되는 경우와 추가 설치되지 않는 경우를 구축하여 비교 평가를 하고자 하였다. 통행속도 측정을 위한 검지기는 도로용량편람에서 제시된 연결로 합·분류부 및 엇갈림구간의 영향권을 고려하여 램프 합류부에 갓길차로를 제외한 본선 4개 차로에 설치하되 영향권 내 속도를 골고루 산정하기 위해 안쪽 차로에서 부터 50m 간격으로 설치하였다. 갓길차로제를 구현하기 위해 상류부 링크에 있는 진출 램프 통과 직후 본선에 4차로 커넥터와 5차로 커넥터를 설치하여 갓길차로 폐쇄 시는 4차로로 통행하고, 갓길차로 개방 시는 5차로로 통행할 수 있도록 하였다. 이를 위해 4차로 커넥터의 경우 차로 변경을 할 수 있는 마지막 지점(emergency stop)을 커넥터 상류부 3750m에 설치하고 차로 변경 거리를 상류부 링크 4300m, 하류부 링크 4800m에 설정하여 갓길차로 폐쇄 시에는 갓길차로 이용을 못 하게 하였다. 차량 통행 경로는 갓길차로제와 상관없는 static route와 갓길차로 개폐 상태에 따라 변하는 partial route (갓길차로 폐쇄시 4차로, 개방시 5차로)로 구분하여 구축하였다.

### 2) network 정산

정산은 2단계로 수행하였는데 1단계로 차량통행과 관련된 변수들 값은 차량들의 흐름 상태가 안정화되도록 모니터링 통한 시행착오 정산 과정을 통하여 산정하였다. 갓길차로 운영 정보는 차로 변경 종점부(emergency stop)의 상류지점에 설치하여 갓길차로 운영 여부에 따른 통행 경로 선택이 가능하도록 하였다. 본선에 갓길차로 운영정보제공 지점과 차로 변경 지점과의 간격은 차량들이 갓길차로 운영 변화에 순응하는 범위 내에서 두 지점 간격을 최소화시켰다. 2단계는 속도 분포와 용량에 대한 정산으로 desired speed distribution 분포는 고속도로 검지기 데이터(110kph 구간 : 서평택IC-반월IC, 100kph 구간 : 송파IC-성남IC)를 토대로 운전자들의 특성이 잘 반영되는 혼잡 발생 전 안정 교통류 상태의 속도분포를 적용하였다. 그리고 용량은 driving behavior 요소 중 교통량이 많을 때 교통 용량에 큰 영향을 미치는 gap time distribution 값을 조정하여 속도 분포와 용량이 검지기 데이터와 가장 유사한 값을 선정하였는데 1.17일 때가 최대 통과 교통량은 2288pcph ‘Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013)’에서 제시된 제한속도 100kph와 120kph의 용량을 이용하여 보간법으로 산정한 110kph 용량 2250pcph과 유사하게 나타나고 속도분포가 적정 범위에 있고 정상 교통류에서 혼잡 교통류로 전이되는 구간이 검지기 데이터와 유사하게 80kph~90kph 구간 교통량은 많고 60kph~80kph 구간 교통량은 적은 것으로 나타나 검지기 데이터의 교통량 변화에 따른 속도분포와 가장 유사한 것으로 분석되었다.

## 2. 시뮬레이션 결과 분석

### 1) 통행속도

시뮬레이션은 7090을 적용하고 최소 운영시간별로 수행되었다. 통행속도는 시뮬레이션 동안 통행한 차량들의 통행거리를 감안한 평균통행속도이다. <Table 1>에서 속도는 차이는 작지만 알고리즘2, 1, 3, 4 순으로 증가하는 것으로 나타났고 최소 운영시간이 클수록 증가하는 현상을 보여주었다. 갓길차로 미운영 시보다 알고리즘1은 9.7%-16.3%, 알고리즘2는 9.9%-15.9%, 알고리즘3은 15.9%-17.4%, 알고리즘4는 16.3%-17.6% 증가하는 것으로 나타났다. 갓길차로 운영시간은 동일한 최소 운영시간에서는 알고리즘1, 2, 3, 4 순으로 증가하는 것으로 나타났다. 효율성 지표(모든 표에서 (b-a)/c)는 최소 운영시간이 길수록 작아지는 것으로 나타났는데 최소 운영시간이 길수록 실시간 소통상황을 잘 반영하지 못하기 때문이다. 램프 미추가 시(1 ramp)도 램프 추가 시(2 ramp)와 유사한 패턴을 보여주고 있다. 램프를 추가 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 대부분 속도는 증가하지만 그 차이가 매우 작아 속도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석되었다. 그 이유

<Table 1> Travel speed by algorithm

| minimum time (sec) | speed limit(kph)           |        | 110    |        |        |        | 100    |        |        |        |
|--------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | algorithm                  |        | 1      | 2      | 3      | 4      | 1      | 2      | 3      | 4      |
|                    | speed without HSR(kph) (a) |        | 76.0   |        |        |        | 69.0   |        |        |        |
| 0                  | speed with HSR (kph) (b)   | 2 ramp | 88.4   | 88.1   | 88.1   | 88.4   | 81.3   | 81.1   | 81.1   | 81.3   |
|                    |                            | 1 ramp | 87.8   | 87.0   | 87.0   | 87.8   | 81.0   | 80.0   | 80.0   | 81.0   |
|                    | HSR time (sec) (c)         | 2 ramp | 4729.7 | 4465.8 | 4465.8 | 4729.7 | 5329.2 | 5104.0 | 5104.0 | 5329.2 |
|                    |                            | 1 ramp | 4408.0 | 3989.2 | 3989.2 | 4408.0 | 5125.8 | 4677.0 | 4686.8 | 5105.0 |
|                    | (b-a)/c                    | 2 ramp | 9.4    | 9.8    | 9.8    | 9.4    | 8.3    | 8.5    | 8.5    | 8.3    |
|                    |                            | 1 ramp | 9.7    | 9.9    | 9.9    | 9.7    | 8.4    | 8.5    | 8.5    | 8.5    |
| 300                | speed with HSR (kph) (b)   | 2 ramp | 86.1   | 84.6   | 88.7   | 89.0   | 78.6   | 77.8   | 81.2   | 81.3   |
|                    |                            | 1 ramp | 83.9   | 83.2   | 89.1   | 89.2   | 76.7   | 75.5   | 81.4   | 81.5   |
|                    | HSR time (sec) (c)         | 2 ramp | 4468.0 | 4193.0 | 5438.8 | 5660.0 | 4764.0 | 4579.3 | 5716.8 | 5897.8 |
|                    |                            | 1 ramp | 3909.0 | 3777.3 | 5385.0 | 5519.0 | 4383.0 | 3965.3 | 5424.3 | 5575.8 |
|                    | (b-a)/c                    | 2 ramp | 8.1    | 7.4    | 8.4    | 8.3    | 7.2    | 6.9    | 7.7    | 7.5    |
|                    |                            | 1 ramp | 7.3    | 6.9    | 8.8    | 8.6    | 6.3    | 5.9    | 8.2    | 8.1    |
| 600                | speed with HSR (kph) (b)   | 2 ramp | 84.8   | 84.2   | 89.2   | 89.4   | 84.1   | 76.8   | 81.5   | 81.5   |
|                    |                            | 1 ramp | 84.6   | 84.4   | 89.2   | 89.3   | 77.5   | 74.5   | 82.1   | 82.3   |
|                    | HSR time (sec) (c)         | 2 ramp | 4248.0 | 4035.0 | 6153.8 | 6180.7 | 3897.0 | 4579.3 | 6140.0 | 6197.0 |
|                    |                            | 1 ramp | 3724.2 | 3689.8 | 5952.7 | 6047.7 | 4060.8 | 3874.2 | 6035.0 | 6135.2 |
|                    | (b-a)/c                    | 2 ramp | 7.5    | 7.4    | 7.7    | 7.8    | 13.9   | 6.1    | 7.3    | 7.3    |
|                    |                            | 1 ramp | 8.3    | 8.2    | 8.0    | 7.9    | 7.5    | 5.1    | 7.8    | 7.8    |
| 900                | speed with HSR (kph) (b)   | 2 ramp | 83.4   | 83.5   | 88.5   | 89.2   | 77.2   | 76.3   | 81.2   | 81.4   |
|                    |                            | 1 ramp | 84.5   | 83.9   | 90.2   | 90.3   | 77.3   | 77.0   | 82.1   | 82.3   |
|                    | HSR time (sec) (c)         | 2 ramp | 3819.8 | 3818.8 | 6411.3 | 6513.3 | 3860.8 | 3582.5 | 6114.8 | 6243.0 |
|                    |                            | 1 ramp | 3775.0 | 3717.8 | 6064.0 | 6081.0 | 3939.5 | 3878.2 | 6301.0 | 6317.5 |
|                    | (b-a)/c                    | 2 ramp | 6.9    | 7.1    | 7.0    | 7.3    | 7.6    | 7.3    | 7.2    | 7.1    |
|                    |                            | 1 ramp | 8.1    | 7.7    | 8.5    | 8.5    | 7.6    | 7.4    | 7.5    | 7.6    |

는 램프 미추가 시가 램프 추가 시에 비해 도착 교통량은 크게 감소하고 출발하지 못한 교통량은 크게 증가한 때문이다.

운영기준속도별 시물레이션은 알고리즘4를 적용하여 최소운영시간별로 수행하였다. <Table 2>와 같이 제한속도에 상관없이 운영속도가 6090, 7090, 8090순으로 통행속도가 증가하지만 그 차이는 아주 작은 것으로 나타났다. 그리고 제한속도가 10kph 증가했지만 통행속도 차이는 10kph 보다 작게 증가하여 제한속도 증가만큼 실제 통행속도는 증가하지 않는 것으로 나타났다. 갓길차로 운영시간도 운영기준 속도 6090, 7090, 8090 순으로 증가하는 것으로 나타났고, 램프를 추가한 경우가 추가하지 않은 경우보다도 갓길차로 운영시간이 오히려 크게 나타났는데 이는 램프 추가 설치에 따른 용량 증가로 갓길차로 운영 시 많은 교통량이 진입하게 되고 목적지 도착 교통량이 증가하는 등 통과 교통량이 크게 증가한 때문이다. 갓길차로 운영 효율성 지표 값은 제한속도가 110kph인 경우가 100kph인 경우보다 모두 크게 나타났고 운영기준 속도에 따라서는 램프 추가 설치시는 6090, 7090, 8090 순으로 작아지는 것으로 나타나지만 미추가 시는 7090이 가장 좋게 분석되었다.

<Table 2> Travel speed by operation speed

| minimum time (sec) | speed limit(kph)         |        | 110    |        |        | 100    |        |        |
|--------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | operation speed(kph)     |        | 6090   | 7090   | 8090   | 6090   | 7090   | 8090   |
| 0                  | speed with HSR (kph) (b) | 2 ramp | 87.2   | 88.4   | 89.3   | 79.9   | 81.3   | 81.4   |
|                    |                          | 1 ramp | 86.1   | 87.8   | 88.4   | 79.8   | 81.0   | 81.5   |
|                    | HSR time (sec) (c)       | 2 ramp | 4079.5 | 4729.7 | 5080.0 | 4640.7 | 5329.2 | 5830.7 |
|                    |                          | 1 ramp | 3877.3 | 4408.0 | 4852.8 | 4573.0 | 5105.0 | 5253.5 |
|                    | (b-a)/c                  | 2 ramp | 9.9    | 9.4    | 9.4    | 8.4    | 8.3    | 7.6    |
|                    |                          | 1 ramp | 9.3    | 9.7    | 9.2    | 8.5    | 8.5    | 8.6    |
| 300                | speed with HSR (kph) (b) | 2 ramp | 87.9   | 89.0   | 89.8   | 80.0   | 81.3   | 81.8   |
|                    |                          | 1 ramp | 86.2   | 89.2   | 89.5   | 79.6   | 81.5   | 82.1   |
|                    | HSR time (sec) (c)       | 2 ramp | 4854.7 | 5660.0 | 6221.3 | 5271.3 | 5817.2 | 6525.0 |
|                    |                          | 1 ramp | 4516.7 | 5519.0 | 6042.7 | 4789.2 | 5575.8 | 6387.8 |
|                    | (b-a)/c                  | 2 ramp | 8.8    | 8.3    | 8.0    | 7.5    | 7.6    | 7.0    |
|                    |                          | 1 ramp | 8.1    | 8.6    | 8.1    | 8.0    | 8.1    | 7.4    |
| 600                | speed with HSR (kph) (b) | 2 ramp | 89.0   | 89.4   | 89.7   | 80.4   | 81.5   | 81.7   |
|                    |                          | 1 ramp | 88.4   | 89.3   | 90.4   | 80.5   | 82.3   | 82.6   |
|                    | HSR time (sec) (c)       | 2 ramp | 5201.0 | 6195.7 | 6787.7 | 5349.5 | 6197.0 | 6769.2 |
|                    |                          | 1 ramp | 5361.0 | 6047.7 | 6456.2 | 5198.0 | 6135.2 | 6819.3 |
|                    | HSR time (sec) (c)       | 2 ramp | 9.0    | 7.8    | 7.3    | 7.7    | 7.3    | 6.7    |
|                    |                          | 1 ramp | 8.3    | 7.9    | 8.0    | 8.0    | 7.8    | 7.2    |
| 900                | speed with HSR (kph) (b) | 2 ramp | 88.5   | 89.2   | 90.1   | 80.8   | 81.4   | 81.7   |
|                    |                          | 1 ramp | 88.4   | 90.3   | 90.5   | 80.4   | 82.3   | 82.7   |
|                    | HSR time (sec) (c)       | 2 ramp | 5066.2 | 6513.3 | 7120.2 | 5467.8 | 6270.8 | 7169.0 |
|                    |                          | 1 ramp | 4996.2 | 6081.0 | 6608.3 | 5488.7 | 6317.5 | 6886.2 |
|                    | (b-a)/c                  | 2 ramp | 8.9    | 7.3    | 7.1    | 7.7    | 7.1    | 6.4    |
|                    |                          | 1 ramp | 8.9    | 8.5    | 7.9    | 7.5    | 7.6    | 7.1    |

Note : (a) is in <Table 1>

<Table 3>에서 최소운영시간별 통행속도는 추가 램프가 설치된 900초인 경우를 제외하면 최소운영시간이 길어질수록 증가하지만 효율성 지표는 최소운영시간이 길어질수록 대체적으로 감소하는 것으로 나타났다.

<Table 3> Travel speed for algorithm 4 and operation speed of 7090

| speed limit(kph)         |        | 110        |            |            |            | 100        |      |      |      |
|--------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------|------|------|
| minimum time (sec)       |        | 0          | 300        | 600        | 900        | 0          | 300  | 600  | 900  |
| speed with HSR (kph) (b) | 2 ramp | 88.4       | 89.0       | 89.4       | 89.2       | 81.3       | 81.3 | 81.5 | 81.4 |
|                          | 1 ramp | 87.8       | 89.2       | 89.3       | 90.3       | 81.0       | 81.5 | 82.3 | 82.3 |
| (b-a)/c                  | 2 ramp | <b>9.4</b> | <b>8.3</b> | <b>7.8</b> | <b>7.3</b> | <b>8.3</b> | 7.6  | 7.3  | 7.1  |
|                          | 1 ramp | 9.7        | 8.6        | 7.9        | 8.5        | 8.5        | 8.1  | 7.8  | 7.6  |

Note : (a) is in <Table 1>

## 2) 도착교통량

<Table 4>알고리즘별 도착 교통량은 최소운영시간 0초와 300초일 때는 모든 알고리즘에서 도착 교통량이 거의 비슷한 것으로 나타났는데 최소운영시간이 짧은 갓길차로 운영에 제약이 크지 않기 때문으로 분석되었다. 최소운영시간이 600초와 900초의 경우는 알고리즘3, 4가 알고리즘1, 2보다 도착 교통량이 훨씬 크게 증가하였다. 그러나 그 차이를 갓길차로 운영시간으로 나눈 효율성 지표 값은 알고리즘1, 2가 알고리즘3, 4보

<Table 4> Arrived vehicles by algorithm

| minimum time (sec) | speed limit(kph)                |        | 110    |        |        |        | 100    |        |        |        |
|--------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | algorithm                       |        | 1      | 2      | 3      | 4      | 1      | 2      | 3      | 4      |
|                    | arrived veh without HSR(veh)(a) |        | 8917.0 |        |        |        | 8859.0 |        |        |        |
| 0                  | arrived veh with HSR(veh) (b)   | 2 ramp | 9938.0 | 9939.0 | 9939.0 | 9938.0 | 9926.0 | 9927.0 | 9927.0 | 9926.0 |
|                    |                                 | 1 ramp | 9609.0 | 9703.0 | 9703.0 | 9609.0 | 9425.0 | 9566.0 | 9566.0 | 9425.0 |
|                    |                                 | 2-1    | 329    | 236    | 236    | 329    | 501    | 361    | 361    | 501    |
|                    | (b-a)/c                         | 2 ramp | 777.1  | 823.9  | 823.9  | 777.1  | 720.8  | 753.3  | 753.3  | 720.8  |
|                    |                                 | 1 ramp | 565.2  | 709.3  | 709.3  | 565.2  | 397.5  | 544.2  | 543.1  | 399.1  |
| 300                | arrived veh with HSR(veh) (b)   | 2 ramp | 9821.0 | 9785.0 | 9938.0 | 9938.0 | 9704.0 | 9704.0 | 9922.0 | 9926.0 |
|                    |                                 | 1 ramp | 9426.0 | 9467.0 | 9495.0 | 9486.0 | 9344.0 | 9363.0 | 9418.0 | 9376.0 |
|                    |                                 | 2-1    | 395    | 318    | 443    | 452    | 360    | 341    | 504    | 550    |
|                    | (b-a)/c                         | 2 ramp | 728.4  | 745.2  | 675.8  | 649.4  | 638.5  | 664.3  | 669.4  | 651.3  |
|                    |                                 | 1 ramp | 468.8  | 524.2  | 386.4  | 371.2  | 398.4  | 457.6  | 371.0  | 333.8  |
| 600                | arrived veh with HSR(veh) (b)   | 2 ramp | 9768.0 | 9746.0 | 9945.0 | 9943.0 | 9593.0 | 9713.0 | 9932.0 | 9933.0 |
|                    |                                 | 1 ramp | 9302.0 | 9329.0 | 9409.0 | 9395.0 | 9229.0 | 9214.0 | 9329.0 | 9312.0 |
|                    |                                 | 2-1    | 466    | 417    | 536    | 548    | 364    | 499    | 603    | 621    |
|                    | (b-a)/c                         | 2 ramp | 721.2  | 739.6  | 601.4  | 597.6  | 678.1  | 671.4  | 629.1  | 623.9  |
|                    |                                 | 1 ramp | 372.2  | 402.0  | 297.5  | 284.5  | 328.0  | 329.9  | 280.4  | 265.8  |
| 900                | arrived veh with HSR(veh) (b)   | 2 ramp | 9756.0 | 9756.0 | 9949.0 | 9949.0 | 9704.0 | 9633.0 | 9933.0 | 9933.0 |
|                    |                                 | 1 ramp | 9354.0 | 9348.0 | 9384.0 | 9380.0 | 9286.0 | 9269.0 | 9302.0 | 9290.0 |
|                    |                                 | 2-1    | 402    | 408    | 565    | 569    | 418    | 364    | 631    | 643    |
|                    | (b-a)/c                         | 2 ramp | 790.7  | 790.9  | 579.5  | 570.4  | 787.9  | 777.8  | 632.3  | 619.3  |
|                    |                                 | 1 ramp | 416.7  | 417.3  | 277.2  | 274.1  | 390.2  | 380.6  | 253.1  | 245.6  |

다 큰 것으로 나타났다. 램프 미추가 시는 최소운영시간이 0초일 때를 제외하면 알고리즘3, 4가 알고리즘1, 2보다 큰 것으로 나타났다. 램프 미추가 시는 램프 추가 시보다 도착 교통량이 236대~643대가 적은 것으로 나타났는데 갓길차로 운영 시 가속차로 없이 본선으로 진입해야 하기 때문에 합류부 용량이 부족한 때문이며 전절에서 램프 추가 설치 여부에 따라 통행속도가 큰 차이가 없었던 이유 중에 하나가 된다.

<Table 5>에서 운영기준 속도별 도착 교통량은 제한속도 110kph이 100kph보다 미시행시를 포함하여 모든 시나리오에서 많은 것으로 나타났다. 운영기준속도에 따라서는 6090보다는 7090, 8090이 크게 많은 것으로 나타났고 7090과 8090은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 효율성 지표 값은 램프 추가 설치 시가 훨씬 크게 나타났다. 운영속도에 따른 효율성 지표 값은 6090, 7090, 8090 순으로 작아지는 것으로 분석되었는데 8090은 6090, 7090에 비해 크게 떨어지는 것으로 나타났다.

<Table 5> Arrived vehicles by algorithm

| minimum time(sec) | speed limit(kph)              |        | 110    |        |        | 100    |        |        |
|-------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | operation speed(kph)          |        | 6090   | 7090   | 8090   | 6090   | 7090   | 8090   |
| 0                 | arrived veh with HSR(veh) (b) | 2 ramp | 9883.0 | 9938.0 | 9935.0 | 9877.0 | 9926.0 | 9932.0 |
|                   |                               | 1 ramp | 9497.0 | 9609.0 | 9601.0 | 9406.0 | 9425.0 | 9419.0 |
|                   | (b-a)/c                       | 2 ramp | 852.5  | 777.1  | 721.4  | 789.7  | 720.8  | 662.5  |
|                   |                               | 1 ramp | 538.5  | 565.2  | 507.4  | 430.6  | 399.1  | 383.7  |
| 300               | arrived veh with HSR(veh) (b) | 2 ramp | 9905.0 | 9938.0 | 9938.0 | 9862.0 | 9926.0 | 9937.0 |
|                   |                               | 1 ramp | 9402.0 | 9486.0 | 9475.0 | 9308.0 | 9376.0 | 9333.0 |
|                   | (b-a)/c                       | 2 ramp | 732.7  | 649.4  | 590.8  | 685.0  | 660.3  | 594.8  |
|                   |                               | 1 ramp | 386.6  | 371.2  | 332.4  | 337.5  | 333.8  | 267.1  |
| 600               | arrived veh with HSR(veh) (b) | 2 ramp | 9937.0 | 9943.0 | 9948.0 | 9869.0 | 9933.0 | 9936.0 |
|                   |                               | 1 ramp | 9393.0 | 9395.0 | 9385.0 | 9283.0 | 9312.0 | 9279.0 |
|                   | (b-a)/c                       | 2 ramp | 706.0  | 596.2  | 546.8  | 679.7  | 623.9  | 572.8  |
|                   |                               | 1 ramp | 319.6  | 284.5  | 261.0  | 293.7  | 265.8  | 221.7  |
| 900               | arrived veh with HSR(veh) (b) | 2 ramp | 9947.0 | 9949.0 | 9955.0 | 9924.0 | 9933.0 | 9946.0 |
|                   |                               | 1 ramp | 9382.0 | 9380.0 | 9351.0 | 9298.0 | 9290.0 | 9271.0 |
|                   | (b-a)/c                       | 2 ramp | 731.9  | 570.4  | 524.8  | 701.2  | 616.6  | 545.9  |
|                   |                               | 1 ramp | 335.1  | 274.1  | 236.4  | 287.9  | 245.6  | 215.4  |

Note : (a) is in <Table 4>

<Table 6>에서 최소운영시간별 시뮬레이션은 알고리즘4와 운영기준속도 7090을 적용하여 수행하였다. 도착 교통량은 램프 추가 설치시는 최소운영시간이 길어질수록 증가하지만 램프 추가 미설치 시는 반대로 나타났다.

<Table 6> Arrived vehicles by algorithm

| speed limit(kph)              |        | 110    |        |        |        | 100    |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| minimum time(sec)             |        | 0      | 300    | 600    | 900    | 0      | 300    | 600    | 900    |
| arrived veh with HSR(kph) (b) | 2 ramp | 9938.0 | 9938.0 | 9943.0 | 9949.0 | 9926.0 | 9926.0 | 9933.0 | 9933.0 |
|                               | 1 ramp | 9609.0 | 9486.0 | 9395.0 | 9380.0 | 9425.0 | 9376.0 | 9312.0 | 9290.0 |
| (b-a)/c                       | 2 ramp | 777.1  | 649.4  | 596.2  | 570.4  | 720.8  | 660.3  | 623.9  | 616.6  |
|                               | 1 ramp | 565.2  | 371.2  | 284.5  | 274.1  | 399.1  | 333.8  | 265.8  | 245.6  |

Note : (a) is in <Table 4>

3) 미출발 교통량

미출발 교통량은 교통 혼잡으로 network에 진입조차하지 못한 교통량인데 <Table 7>과같이 갓길차로를 시행하면 미시행시보다 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 최소운영시간이 0초일 때는 미출발 교통량이 0으로 나타났다. 최소운영시간이 증가할수록 알고리즘1, 2는 미출발 교통량이 증가하나 알고리즘3, 4는 최소운영시간에 상관없이 미출발 교통량이 발생되지 않아 알고리즘1, 2보다 용량이 큰 것으로 분석되었다. 램프 미추가 시는 미출발 교통량이 크게 발생되어 램프 추가 설치 시보다 용량이 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 효율성 지표 값은 알고리즘1, 2에 비해 알고리즘3, 4가 크게 작은 것으로 분석되었는데 알고리즘3, 4는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 램프 미추가 시는 추가 설치 시보다 미출발 교통량이 훨씬 큰데 이는 갓길차로 시 가속차로가 없어서 진입이 어려운 때문이며 이 또한 램프 추가 설치 여부에 따른 속도 차이가 크지 않은 이유 중 하나이다.

<Table 7> Non-departure vehicles by algorithm

| minimum time(sec) | speed limit(kph)                       |        | 110    |        |        |        | 100    |        |        |        |
|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | algorithm                              |        | 1      | 2      | 3      | 4      | 1      | 2      | 3      | 4      |
|                   | Non-departure veh without HSR(vph) (a) |        | 611.5  |        |        |        | 578.8  |        |        |        |
| 0                 | Non-departure veh with HSR(vph) (b)    | 2 ramp | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
|                   |  | 1 ramp | 264.7  | 172.5  | 172.5  | 264.7  | 453.2  | 307.8  | 307.8  | 453.2  |
|                   | (b-a)/c                                | 2 ramp | -465.4 | -492.9 | -492.9 | -465.4 | -391.0 | -408.3 | -408.3 | -391.0 |
|                   |  | 1 ramp | -283.3 | -396.2 | -396.2 | -283.3 | -88.3  | -208.6 | -208.2 | -88.6  |
| 300               | Non-departure veh with HSR(vph) (b)    | 2 ramp | 0.0    | 18.7   | 0.0    | 0.0    | 60.8   | 60.8   | 0.0    | 0.0    |
|                   |  | 1 ramp | 381.8  | 329.7  | 394.5  | 422.0  | 404.2  | 367.2  | 472.2  | 518.8  |
|                   | (b-a)/c                                | 2 ramp | -492.7 | -509.0 | -404.8 | -388.9 | -391.4 | -407.2 | -364.5 | -353.3 |
|                   |  | 1 ramp | -211.5 | -268.6 | -145.1 | -123.6 | -143.5 | -192.2 | -70.8  | -38.7  |
| 600               | Non-departure veh with HSR(vph) (b)    | 2 ramp | 10.8   | 15.8   | 0.0    | 0.0    | 152.7  | 25.3   | 0.0    | 0.0    |
|                   |  | 1 ramp | 401.7  | 379.8  | 492.2  | 524.3  | 467.0  | 411.7  | 573.3  | 594.5  |
|                   | (b-a)/c                                | 2 ramp | -509.0 | -531.5 | -357.7 | -356.2 | -393.7 | -435.1 | -339.4 | -336.3 |
|                   |  | 1 ramp | -202.8 | -226.0 | -72.2  | -51.9  | -99.1  | -155.3 | -3.3   | 9.2    |
| 900               | Non-departure veh with HSR(vph) (b)    | 2 ramp | 40.3   | 40.3   | 0.0    | 0.0    | 46.3   | 58.3   | 0.0    | 0.0    |
|                   |  | 1 ramp | 416.8  | 417.5  | 535.8  | 538.3  | 473.0  | 464.3  | 605.0  | 613.0  |
|                   | (b-a)/c                                | 2 ramp | -538.3 | -538.4 | -343.4 | -338.0 | -496.5 | -523.0 | -340.8 | -333.8 |
|                   |  | 1 ramp | -185.6 | -187.9 | -44.9  | -43.3  | -96.7  | -106.3 | 15.0   | 19.5   |

<Table 8>과같이 운영기준속도별 미출발 교통량은 미시행시를 포함하여 모든 경우에서 제한속도 110kph 이 100kph보다 적은 것으로 나타났다. 추가로 램프를 설치한 경우는 미출발 교통량이 발생되지 않았지만 추가 설치를 하지 않은 경우에는 min time이 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 운영기준 속도 별로 살펴보면 6090, 7090, 8090 순으로 증가하는 것으로 나타나 효율성 지표 값은 6090, 7090, 8090 순으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 갓길차로 운영시간이 6090, 7090, 8090 순으로 증가하여 램프 미추가 시는 진입이 어려운 시간이 증가한 때문이다.

<Table 8> Non-departure vehicles by operation speed

| minimum time(sec) | speed limit(kph)                    |        | 110    |        |        | 100    |        |        |
|-------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | operation speed(kph)                |        | 6090   | 7090   | 8090   | 6090   | 7090   | 8090   |
| 0                 | Non-departure veh with HSR(vph) (b) | 2 ramp | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
|                   |                                     | 1 ramp | 267.7  | 264.7  | 275.7  | 433.2  | 453.2  | 452.2  |
|                   | (b-a)/c                             | 2 ramp | -539.6 | -465.4 | -433.3 | -449.0 | -391.0 | -357.4 |
|                   |                                     | 1 ramp | -319.2 | -283.3 | -249.1 | -114.7 | -88.6  | -86.8  |
| 300               | Non-departure veh with HSR(vph) (b) | 2 ramp | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
|                   |                                     | 1 ramp | 393.2  | 422.0  | 448.7  | 484.0  | 518.8  | 577.0  |
|                   | (b-a)/c                             | 2 ramp | -453.5 | -388.9 | -353.8 | -395.3 | -358.2 | -319.4 |
|                   |                                     | 1 ramp | -174.0 | -123.6 | -97.0  | -71.3  | -38.7  | -1.0   |
| 600               | Non-departure veh with HSR(vph) (b) | 2 ramp | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
|                   |                                     | 1 ramp | 492.7  | 524.3  | 536.2  | 572.2  | 594.5  | 623.5  |
|                   | (b-a)/c                             | 2 ramp | -423.3 | -355.3 | -324.3 | -389.5 | -336.3 | -307.8 |
|                   |                                     | 1 ramp | -79.8  | -51.9  | -42.0  | -4.6   | 9.2    | 23.6   |
| 900               | Non-departure veh with HSR(vph) (b) | 2 ramp | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
|                   |                                     | 1 ramp | 510.3  | 538.3  | 580.0  | 597.7  | 613.0  | 647.5  |
|                   | (b-a)/c                             | 2 ramp | -434.5 | -338.0 | -309.2 | -381.1 | -332.3 | -290.7 |
|                   |                                     | 1 ramp | -72.9  | -43.3  | -17.2  | 12.4   | 19.5   | 35.9   |

Note : (a) is in <Table 7>

<Table 9>과 같이 최소운영시간별 미출발 교통량은 램프 추가 설치 시는 발생되지 않았으나 미 설치시는 모든 경우에 발생하였고 최소운영시간이 길어질수록 많이 발생하였다.

<Table 9> Non-departure vehicles by minimum time

| speed limit(kph)                    |        | 110    |        |        |        | 100    |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| minimum time(sec)                   |        | 0      | 300    | 600    | 900    | 0      | 300    | 600    | 900    |
| Non-departure veh with HSR(vph) (b) | 2 ramp | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
|                                     | 1 ramp | 264.7  | 422.0  | 524.3  | 538.3  | 453.2  | 518.8  | 594.5  | 613.0  |
| (b-a)/c                             | 2 ramp | -465.4 | -388.9 | -355.3 | -338.0 | -391.0 | -358.2 | -336.3 | -332.3 |
|                                     | 1 ramp | -283.3 | -123.6 | -51.9  | -43.3  | -88.6  | -38.7  | 9.2    | 19.5   |

Note : (a) is in <Table 7>

#### 4) 상충횟수

상충 횟수는 6개 random seeds 별로 발생된 상충횟수를 합한 값이다. <Table 10>에서 갓길차로 운영 시가 미운영 시보다 상충 횟수가 줄어들어 갓길차로를 운영할 경우 소통상태가 크게 개선되어 상충 횟수를 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 최소운영시간이 0초인 경우를 제외하면 알고리즘3, 4가 알고리즘1, 2보다 상충횟수를 크게 줄이는 것으로 나타났다. 알고리즘3과 알고리즘4는 그 차이가 크지 않고 엇치락뒤치락 하게 나타났다. 최소운영시간이 증가할수록 상충 횟수는 대부분 증가하는 것으로 나타났으나 램프를 추가로 설치한 경우와 추가로 설치하지 않은 경우는 엇치락뒤치락 하게 나타났는데 최소운영시간이 길수록 램프를 추가



로 설치한 경우가 불리해지는 것으로 분석되었다.

<Table 10> Conflicts by algorithm

| minimum time(sec) | speed limit(kph)               |        | 110     |         |        |        | 100     |         |        |        |
|-------------------|--------------------------------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
|                   | algorithm                      |        | 1       | 2       | 3      | 4      | 1       | 2       | 3      | 4      |
|                   | conflicts without HSR(num) (a) |        | 14710   |         |        |        | 15201   |         |        |        |
| 0                 | conflicts with HSR(num) (b)    | 2 ramp | 5691.0  | 5788.0  | 5788.0 | 5691.0 | 6100.0  | 5995.0  | 5995.0 | 6100.0 |
|                   |                                | 1 ramp | 5517.0  | 5938.0  | 5938.0 | 5517.0 | 5773.0  | 6360.0  | 6360.0 | 5773.0 |
|                   | (b-a)/c                        | 2 ramp | -1.9    | -2.0    | -2.0   | -1.9   | -1.7    | -1.8    | -1.8   | -1.7   |
|                   |                                | 1 ramp | -2.1    | -2.2    | -2.2   | -2.1   | -1.7    | -1.8    | -1.8   | -1.8   |
| 300               | conflicts with HSR(num) (b)    | 2 ramp | 7976.0  | 9134.0  | 5816.0 | 5663.0 | 8766.0  | 9762.0  | 6389.0 | 6347.0 |
|                   |                                | 1 ramp | 8484.0  | 8484.0  | 4671.0 | 4777.0 | 9371.0  | 11028.0 | 5596.0 | 5634.0 |
|                   | (b-a)/c                        | 2 ramp | -1.5    | -1.3    | -1.6   | -1.6   | -1.4    | -1.2    | -1.5   | -1.5   |
|                   |                                | 1 ramp | -1.6    | -1.6    | -1.9   | -1.8   | -1.2    | -0.9    | -1.7   | -1.6   |
| 600               | conflicts with HSR(num) (b)    | 2 ramp | 9800.0  | 10096.0 | 5815.0 | 5527.0 | 9094.0  | 11514.0 | 6272.0 | 6413.0 |
|                   |                                | 1 ramp | 8081.0  | 7952.0  | 4582.0 | 4724.0 | 9145.0  | 13669.0 | 5273.0 | 4885.0 |
|                   | (b-a)/c                        | 2 ramp | -1.2    | -1.1    | -1.4   | -1.5   | -1.6    | -0.8    | -1.5   | -1.4   |
|                   |                                | 1 ramp | -1.8    | -1.8    | -1.7   | -1.7   | -1.4    | -0.3    | -1.6   | -1.6   |
| 900               | conflicts with HSR(num) (b)    | 2 ramp | 10016.0 | 9789.0  | 7264.0 | 6183.0 | 10328.0 | 11351.0 | 6461.0 | 6337.0 |
|                   |                                | 1 ramp | 7771.0  | 8396.0  | 3974.0 | 4032.0 | 9163.0  | 9503.0  | 5193.0 | 4826.0 |
|                   | (b-a)/c                        | 2 ramp | -1.2    | -1.3    | -1.2   | -1.3   | -1.3    | -1.1    | -1.4   | -1.4   |
|                   |                                | 1 ramp | -1.8    | -1.7    | -1.8   | -1.8   | -1.4    | -1.3    | -1.5   | -1.6   |

운영기준속도별 상충 횟수는 <Table 11>에서 모든 시나리오에서 6090, 7090, 8090 순으로 상충 횟수는 감소하는 것으로 나타났다. min time 900초인 경우를 제외하면 min time이 클수록 상충 횟수가 감소하는 것으로 나타났다. 효율성 지표는 7090이 대체적으로 크고 8090이 가장 적은 것으로 분석되었다.

<Table 11> Conflicts by algorithm

| minimum time(sec) | speed limit(kph)            |        | 110    |        |        | 100    |        |        |
|-------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | operation speed (kph)       |        | 6090   | 7090   | 8090   | 6090   | 7090   | 8090   |
| 0                 | conflicts with HSR(num) (b) | 2 ramp | 6072.0 | 5691.0 | 4739.0 | 6798.0 | 6100.0 | 6290.0 |
|                   |                             | 1 ramp | 6779.0 | 5517.0 | 5408.0 | 6472.0 | 5773.0 | 5863.0 |
|                   | (b-a)/c                     | 2 ramp | -1.8   | -2.0   | -2.2   | -1.6   | -1.8   | -1.7   |
|                   |                             | 1 ramp | -1.8   | -2.3   | -2.3   | -1.7   | -2.0   | -2.0   |
| 300               | conflicts with HSR(num) (b) | 2 ramp | 5953.0 | 5663.0 | 5057.0 | 7177.0 | 6347.0 | 6072.0 |
|                   |                             | 1 ramp | 6580.0 | 4777.0 | 4417.0 | 6452.0 | 5634.0 | 5073.0 |
|                   | (b-a)/c                     | 2 ramp | -2.0   | -2.2   | -1.8   | -1.7   | -1.9   | -1.6   |
|                   |                             | 1 ramp | -2.1   | -2.6   | -1.9   | -2.0   | -2.4   | -1.9   |
| 600               | conflicts with HSR(num) (b) | 2 ramp | 5710.0 | 5527.0 | 5324.0 | 6571.0 | 6413.0 | 6404.0 |
|                   |                             | 1 ramp | 5089.0 | 4724.0 | 4129.0 | 6412.0 | 4885.0 | 5297.0 |

| minimum time(sec) | speed limit(kph)            |        | 110    |        |        | 100    |        |        |
|-------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | operation speed (kph)       |        | 6090   | 7090   | 8090   | 6090   | 7090   | 8090   |
| 900               | (b-a)/c                     | 2 ramp | -2.1   | -2.3   | -1.5   | -2.2   | -1.9   | -1.4   |
|                   |                             | 1 ramp | -2.6   | -2.7   | -1.8   | -2.2   | -2.7   | -1.6   |
|                   | conflicts with HSR(num) (b) | 2 ramp | 6251.0 | 6183.0 | 5264.0 | 6390.0 | 6337.0 | 6226.0 |
|                   |                             | 1 ramp | 5181.0 | 4032.0 | 4184.0 | 6229.0 | 4826.0 | 4827.0 |
| (b-a)/c           | 2 ramp                      | -2.2   | -2.2   | -1.5   | -2.3   | -2.5   | -1.5   |        |
|                   | 1 ramp                      | -2.5   | -2.9   | -1.7   | -2.3   | -2.7   | -1.6   |        |

Note : (a) is in <Table 10>

최소운영시간별 상충 횟수는 <Table 12>에서 추가 램프 설치 시가 미설치 시보다 많이 발생하였고 최소운영시간과는 램프 추가 설치 시와 미설치 시가 다른 패턴을 보이지만 일정한 관계를 보이지는 않았다.

<Table 12> Conflicts by minimum time

| speed limit(kph)            |        | 110    |        |        |        | 100    |        |        |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| minimum time(sec)           |        | 0      | 300    | 600    | 900    | 0      | 300    | 600    | 900    |
| conflicts with HSR(num) (b) | 2 ramp | 5691.0 | 5663.0 | 5527.0 | 6183.0 | 6100.0 | 6347.0 | 6413.0 | 6337.0 |
|                             | 1 ramp | 5517.0 | 4777.0 | 4724.0 | 4032.0 | 5773.0 | 5634.0 | 4885.0 | 4826.0 |
| (b-a)/c                     | 2 ramp | 1.3    | 1.4    | 1.4    | 1.6    | 1.2    | 1.4    | 1.4    | 1.8    |
|                             | 1 ramp | 1.4    | 1.3    | 1.3    | 1.1    | 1.2    | 1.4    | 1.3    | 1.2    |

Note : (a) is in <Table 10>

## V. 알고리즘과 운영기준 평가

소통 측면 평가지표로는 통행속도와 목적지에 도달한 도착 교통량과 교통 혼잡으로 출발지에서 출발조차 하지 못한 미출발 교통량을 고려하였다. 안전 측면에서는 상충 횟수를 중심으로 갓길차로 운영시간 및 신호 변경 횟수를 포함시켜 분석한 결과 갓길차로 운영시간은 각 평가지표 값을 나누는데 사용하여 효율성 지표 산정에 반영하였고 신호변경 횟수의 경우 상충 횟수와 큰 연관성이 없는 것으로 판단되어 평가에서는 제외하였다.

### 1. 알고리즘 평가

평가는 각 평가지표와 효율성 지표별로 효과가 큰 순으로 1, 2, 3, 4 점을 부과하여 이들을 합산한 값을 기준으로 최적 알고리즘을 설정하였다. <Table 13>에서 효과지표와 효율성 지표 값은 제한속도가 110kph인 경우와 100kph인 경우가 비슷한 패턴을 보여주고 있다. 통행속도 효과지표는 알고리즘4가 가장 크고 도착교통량은 알고리즘3이 가장 크고 미출발 교통량은 알고리즘3, 4가 동일하게 크게 산정되었다. 전체 값은 알고리즘4가 가장 큰 것으로 나타났다. 통행속도 효율성 지표는 알고리즘3과 4가 가장 크고 도착교통량과 미도착교통량은 알고리즘2가 가장 크게 나타났다. 전체 값은 알고리즘3이 가장 크게 나타났다. 효과지표 값과 효율성 지표 값을 합한 총 지표 값은 알고리즘3이 가장 큰 것으로 나타나 알고리즘3을 최적 알고리즘으로 선정하였다.

<Table 13> Algorithm evaluation results

| speed limit(kph)      |                | 110           |    |            |    |            |    |    |    | 100           |    |            |    |            |    |    |    |
|-----------------------|----------------|---------------|----|------------|----|------------|----|----|----|---------------|----|------------|----|------------|----|----|----|
| Evaluation indicators |                | Effectiveness |    |            |    | Efficiency |    |    |    | Effectiveness |    |            |    | Efficiency |    |    |    |
| algorithm             |                | 1             | 2  | 3          | 4  | 1          | 2  | 3  | 4  | 1             | 2  | 3          | 4  | 1          | 2  | 3  | 4  |
| traffic flow          | speed          | 9             | 6  | 11         | 16 | 7          | 9  | 13 | 13 | 12            | 5  | 11         | 15 | 12         | 9  | 13 | 9  |
|                       | arrivals       | 8             | 8  | 16         | 13 | 12         | 16 | 10 | 5  | 7             | 9  | 15         | 14 | 10         | 14 | 12 | 6  |
|                       | non departures | 12            | 8  | 16         | 16 | 12         | 16 | 10 | 5  | 9             | 9  | 16         | 16 | 11         | 16 | 10 | 5  |
|                       | total          | 29            | 22 | 43         | 45 | 31         | 41 | 33 | 23 | 28            | 23 | 42         | 45 | 33         | 39 | 35 | 20 |
| safety                |                | 9             | 6  | 11         | 16 | 8          | 10 | 13 | 14 | 8             | 7  | 14         | 13 | 10         | 7  | 15 | 12 |
| total                 |                | 38            | 28 | 54         | 61 | 39         | 51 | 46 | 37 | 36            | 30 | 56         | 58 | 43         | 46 | 50 | 32 |
| effect + efficiency   |                | 77            | 79 | <b>100</b> | 98 |            |    |    |    | 79            | 76 | <b>106</b> | 90 |            |    |    |    |

Note : Scores are the sum of simulation runs by 6 random seed.

## 2. 운영기준속도 평가

평가는 각 평가지표와 효율성 지표별로 효과가 큰 순으로 1, 2, 3점을 부과하여 이들을 합산한 값을 기준으로 최적 운영기준(시작속도, 종료속도)을 설정하였다. <Table 14>에서 효과지표와 효율성 지표 값은 제한속도가 110kph인 경우와 100kph인 경우가 비슷한 패턴을 보여주고 있다. 통행속도 와 도착 교통량 효과는 6090, 7090, 8090 순으로 증가하고 미출발 교통량은 램프 추가 설치 시 발생되지 않아 모두 동일하게 산정되었다. 안전 지표인 상충 횡수도 6090, 7090, 8090 순으로 증가하였다. 전체 효과지표 값은 8090이 가장 효과가 큰 것으로 나타났다. 효율성 지표는 통행속도, 도착 교통량, 미출발 교통량 등 소통지표는 모두 효과지표 값과는 반대로 8090, 7090, 6090 순으로 증가하였다. 상충 횡수는 7090이 가장 효과가 있고 6090, 8090 순으로 나타났다. 전체 효율성 지표는 6090이 가장 좋게 나타났는데 갓길차로 운영시간이 가장 작기 때문에 판단된다. 효과지표 값과 효율성 지표 값을 합한 총 지표 값은 7090이 가장 큰 것으로 나타나 7090을 최적 운영기준속도로 선정하였다.

<Table 14> operation speed evaluation results

| speed limit(kph)      |                | 110           |           |      |            |      |      | 100           |           |      |            |      |      |
|-----------------------|----------------|---------------|-----------|------|------------|------|------|---------------|-----------|------|------------|------|------|
| Evaluation indicators |                | Effectiveness |           |      | Efficiency |      |      | Effectiveness |           |      | Efficiency |      |      |
| operation speed(kph)  |                | 6090          | 7090      | 8090 | 6090       | 7090 | 8090 | 6090          | 7090      | 8090 | 6090       | 7090 | 8090 |
| Traffic flow          | speed          | 4             | 8         | 12   | 12         | 8    | 5    | 6             | 8         | 10   | 11         | 9    | 4    |
|                       | arrivals       | 4             | 10        | 11   | 12         | 8    | 4    | 4             | 8         | 12   | 12         | 8    | 4    |
|                       | non departures | 12            | 12        | 12   | 12         | 8    | 4    | 12            | 12        | 12   | 12         | 8    | 4    |
|                       | total          | 20            | 30        | 35   | 36         | 24   | 13   | 22            | 28        | 34   | 35         | 25   | 12   |
| safety                |                | 4             | 8         | 12   | 8          | 11   | 6    | 4             | 9         | 11   | 8          | 11   | 5    |
| total                 |                | 24            | 38        | 47   | 44         | 35   | 19   | 26            | 37        | 45   | 43         | 36   | 17   |
| effect + efficiency   |                | 68            | <b>73</b> | 66   |            |      |      | 69            | <b>73</b> | 62   |            |      |      |

Note : Scores are the sum of simulation runs by 6 random seed.

### 3. 최소운영시간 평가

최소운영시간은 각 평가지표와 효율성 지표별로 효과가 큰 순으로 1, 2, 3, 4점을 부과하여 이들을 합산한 값을 기준으로 평가하였다. 소통 측면에서 효과지표 값은 600초와 900초가 크고 효율성 지표 값은 0초와 300초에서 크게 나타났다. 안전측면에서 효과지표 값은 110kph에서는 600초가 가장 크고 900초가 가장 작지만 효율성 지표 값은 100kph에서는 0초가 가장 크고 900초가 2위로 나타나 일괄성이 없게 나타났다. 효과지표 값과 효율성 지표 값을 합한 총 지표 값은 110kph에서는 600초가 가장 크고 100kph에서는 0초가 가장 크게 나타났다. 그러나 최소운영시간 0초에서는 갓길 운영신호 변경 횟수가 148회~199회로 너무 많아 갓길차로제 운영이 어렵다. 그리고 최소 운영시간별 값들이 큰 차이가 없이 골고루 분포된 것을 알 수 있다. 따라서 최소 운영시간은 하나의 최적값을 선정해서 적용하기보다는 운영시간이란 특성을 고려하여 갓길차로제가 운영되는 개별 링크 거리를 운영기준속도인 최저속도로 나눈 통행시간을 최소 운영시간으로 적용하여 운영하는 것이 통행의 연속성 확보 차원에서 바람직하다고 판단된다.

<Table 15> minimum time evaluation results

| speed limit(kph)      |                | 110           |     |           |     |            |     |     |     | 100           |     |           |     |            |     |     |     |
|-----------------------|----------------|---------------|-----|-----------|-----|------------|-----|-----|-----|---------------|-----|-----------|-----|------------|-----|-----|-----|
| Evaluation indicators |                | Effectiveness |     |           |     | Efficiency |     |     |     | Effectiveness |     |           |     | Efficiency |     |     |     |
| algorithm             |                | 0             | 300 | 600       | 900 | 0          | 300 | 600 | 900 | 0             | 300 | 600       | 900 | 0          | 300 | 600 | 900 |
| Traffic flow          | speed          | 1             | 2   | 4         | 3   | 4          | 3   | 2   | 1   | 1             | 2   | 4         | 3   | 4          | 3   | 2   | 1   |
|                       | arrivals       | 1             | 1   | 3         | 4   | 4          | 3   | 2   | 1   | 2             | 2   | 4         | 4   | 4          | 3   | 2   | 1   |
|                       | non departures | 4             | 4   | 4         | 4   | 4          | 3   | 2   | 1   | 4             | 4   | 4         | 4   | 4          | 3   | 2   | 1   |
|                       | total          | 6             | 7   | 11        | 11  | 12         | 9   | 6   | 3   | 7             | 8   | 12        | 11  | 12         | 9   | 6   | 3   |
| safety                |                | 2             | 3   | 4         | 1   | 1          | 2   | 3   | 4   | 4             | 2   | 1         | 3   | 1          | 2   | 3   | 4   |
| total                 |                | 8             | 10  | 15        | 12  | 13         | 11  | 9   | 7   | 11            | 10  | 13        | 14  | 13         | 11  | 9   | 7   |
| effect + efficiency   |                | 21            | 21  | <b>24</b> | 19  |            |     |     |     | 24            | 21  | <b>22</b> | 21  |            |     |     |     |

## VI. 결론 및 제언

본 연구에서는 갓길차로제 운영기준속도 외에 종료속도와 최소운영시간 등을 포함하는 동적 갓길차로제 알고리즘을 개발하고 운영방안을 제시하였다. 알고리즘은 상 하류부 링크의 교통류를 통합 제어할 수 있도록 구축하였다. 갓길차로 신호운영은 1단계는 red로 갓길차로의 차량 통행이 금지된다. 2단계는 red amber로 차량들의 주행속도가 갓길차로 운영을 위한 최저속도를 만족하여 운전자들에게는 갓길차로 통행을 예고해 주고 운영자에게는 갓길차로의 차량 통행을 방해할 요소가 있는지를 점검할 시간을 주게 된다. 3단계는 green으로 갓길차로의 차량 통행이 허용되는 단계이다. 4단계는 amber로 갓길차로의 차량통행은 허용되면서 갓길차로 종료 임박했다는 신호를 운전자들에게 주게 된다. amber 상태에서 갓길차로 운영 종료를 위한 최대 속도를 만족시키게 되면 red 단계로 전환되어 반복되게 된다. 그리고 green과 red에는 최소 운영시간을 적용하되 red의 경우에는 정체가 심한 경우 조기 종료되도록 하여 정체가 악화되지 않도록 하였다. 상 하류부 링크간 연속적인 교통류에서 갓길차로가 운영 중인 하류부 링크의 속도가 갓길차로가 운영되지 않은 상류부 링크 속도보다 작은 경우에는 본선미터링기법 개념이 적용되어 상류부의 속도가 갓길차로 운영조건에 만족되더라도 갓길차로 운영이 금지되도록 하였다. 그리고 하류부 링크가 갓길차로 종료 직전일 때 상류부 링크가 갓길차

로 운영 중이고 속도가 하류부 속도보다 큰 경우는 갓길차로 운영이 지속되도록 하였다. 또한 하류부가 갓길차로 시작 전이고 속도가 최저속도 보다 클 때 상류부가 갓길차로 운영 중이면 갓길차로가 운영되도록 하여 차로수 조화가 이루어지도록 하였다. 운영기준 속도는 고속도로를 이용하는 교통류 특성을 분석하여 혼잡 발생 초기 단계의 정상 교통류 속도 80kph가 70kph 근처로 감소된 후 60kph 미만으로 급격히 떨어지는 교통류 특성과 교통혼잡 상태에서 회복될 때 70kph 이하 근처에서 많이 머무르는 점을 감안하여 70kph를 1차 최저속도로 산정하였다. 그리고 정상 교통류 상태에서는 80kph~90kph 사이에서 많이 머무르고 80kph에서는 급격히 70kph 근처로 감소되는 점과 회복 단계에서는 70kph에서 80kph 이상으로 급격히 증가하는 점을 고려하여 80kph보다는 큰 90kph를 최대속도로 산정하였다. 1차 선정된 운영기준속도 7090(최저속도, 최대속도)을 토대로 6090, 7090, 8090 세 개 운영기준속도 시나리오에 대하여 시뮬레이션한 결과를 토대로 소통측면에서 통행속도, 도착교통량, 미출발 교통량 지표와 안전 측면에서 상충 횟수를 고려하여 각 지표 값과 이들 값을 갓길차로 운영시간으로 나눈 효율성 지표 값을 합산하여 값이 가장 큰 7090을 최적 운영기준속도로 선정하였다. 최소 운영시간에 대한 평가 결과는 값이 큰 차이가 없고 운영시간이란 특성을 고려하여 갓길차로가 운영되는 개별 링크거리를 최저 속도로 나눈 통행시간을 최소운영시간으로 적용하는 것이 통행의 연속성 확보차원에서 바람직하다고 판단된다. 본 논문에서 제 시된 갓길차로제 운영기법 적용시 갓길차로제 운영에 따른 효과 향상에 기여가 예상된다. 향후에는 본 논문에서 제시된 최적 운영기법을 고속도로 현장에 적용하여 그 적용성 및 적용 효과 등에 대한 분석이 이루어질 필요가 있다.

## REFERENCES

- Jeong, H. R., Park, S. M., Kang, S. K. and Yun, I. S.(2023), “Study on the development of an expressway hard shoulder running algorithm using reinforcement learning”, *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 22, no. 4, pp.63-77.
- Kim, J. S.(2017), *Evaluation of traffic flow efficiency and safety hard shoulder runnings for freeway*, Ph.D. Thesis in Engineering, University of Seoul.
- Ko, E. J., Lee, S. J. and Kim, H. J.(2020), “Comparison before and after implementation of travel speed in shoulder-use lanes on expressway”, *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 19, no. 2, pp.36-47.
- Korea Expressway Corporation(2016), *Improvement of hard shoulder running operation guideline*, pp.137-143.
- Korea Expressway Corporation(2018), *Hard shoulder running operation manual*.
- Ma, J., Hu, J., Hale, D. K. and Bared, J.(2016), “Dynamic hard shoulder running for traffic incident management”, *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2554, no. 1, pp.120-128.
- MinistryofLand, Infrastructure, andTransport(2013), *KoreaHighwayCapacityManual(KHCM)*, SouthKorea.
- Park, S. H., Lee, Y. S., Kang, S. K., Cho, H. B. and Yun, I. S.(2021), “Analysis of safety and mobility of expressway land control system”, *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 3, pp.1-19.
- Yun, I. S., Park, S. M., Heo, N. W., Yoon, J. E., Kim, Y. S. and Lee, S. S.(2015), “Study of feasibility analysis for the protected-permissive left-turn signal control in three-leg signalized intersections using a microscopic traffic simulation model”, *International Journal of Highway Engineering*, vol. 17, no. 4, pp.89-98.