

Cell Transmission Model 시뮬레이션을 기반으로 한 클라우드 환경 아래에서의 고속도로 교통 예측 및 최적 제어 시스템 개발

Development of Traffic Prediction and Optimal Traffic Control System for Highway based on Cell Transmission Model in Cloud Environment

탁 세 현*

(Se-hyun Tak)

(Korea Advanced Institute of
Science and Technology)

여 화 수**

(Hwasoo Yeo)

(Korea Advanced Institute of
Science and Technology)

요 약

자율주행 차량은 다양한 센서를 활용하여 사람과 유사한 수준으로 실시간 도로환경 변화를 인지, 환경 변화에 대한 적절한 판단 및 제어를 수행하여야 한다. 특히 영상센서는 차선인식 기능을 통해 주행방향 결정 및 차로이탈 방지 등 조향제어 수행을 위한 인지에 활용된다. 하지만 관련 성능기준은 ADAS(Advanced Driver Assistance System)와 연계된 ‘운전자 보조’ 역할에 초점이 맞춰져, 자율주행시 요구되는 ‘주체적 상황 인지’를 위한 성능조건과 다를 것으로 판단된다. 본 연구에서는 자율주행시 차선인식 기능이 정상적으로 작동되지 않는 상황이 지속될 때 차량 진행방향과 도로 선형 방향의 불일치에 따라 발생하는 횡방향 차로이탈을 차량의 이동 궤적을 기반으로 추정하고, 안전성 확보를 위한 차로이탈 허용 수준 및 영상센서 성능수준을 제시하였다. 분석 결과 승용차 조건에서 차선인식 기능이 1초 이상 연속적인 오작동을 일으킨다면 차로이탈에 의한 위험한 상황에 놓일 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 자율주행 차량을 위한 차선인식 기능 평가 시 현재 기준보다 큰 횡방향 차로이탈상황에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

핵심어 : 자율주행, 차선인식, 차로이탈, 영상센서, 도로 평면선형

ABSTRACT

This study proposes the traffic prediction and optimal traffic control system based on cell transmission model and genetic algorithm in cloud environment. The proposed prediction and control system consists of four parts. 1) Data preprocessing module detects and imputes the corrupted data and missing data points. 2) Data-driven traffic prediction module predicts the future traffic state using Multi-level K-Nearest Neighbor (MK-NN) Algorithm with stored historical data in SQL database. 3) Online traffic simulation module simulates the future traffic state in various situations including accident, road work, and extreme weather condition with predicted traffic data by MK-NN. 4) Optimal road control module produces the control strategy for large road network with cell transmission model and genetic algorithm. The results show that proposed system can effectively reduce the Vehicle Hours Traveled upto 60%.

Key words : Traffic Control, Genetic Algorithm, Onlie Simulation, Model Predictive Control, Cloud System

† 이 논문은 미래창조과학부 ICT 유망기술개발지원사업에 의하여 연구되었음

* 주저자 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연수연구원

** 공저자 및 교신저자 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

† Corresponding author : Hwasoo Yeo(Korea Advanced Institute of Science and Technology), E-mail : Hwasoo@kaist.edu

† Received 27 May 2016; reviewed 6 June 2016; Accepted 12 July 2016

I. 서론

그동안 여러 연구자들은 도로의 효율 향상 및 교통 정체 감소를 위해 관련 시스템을 개발하고 평가하여 왔다. 지금까지 교통 제어 관련 연구는 가변속도제한(Variable Speed Limit), 진입 교통량 제어(Ramp Metering), 도로전광표지판(Variable Message Sign) 기반의 통행 시간 정보 및 교통상황 정보 제공과 같은 개개 요소 기술 개발을 중심으로 진행되었다. 이러한 기술들은 차량 검지기 및 CCTV 등을 기반으로 획득한 정보를 바탕으로 교통을 제어하고 있으며 대부분 도로의 국지적인 지역 문제를 해결하고 효율을 높이는 것에 집중되어 있다.

최근 통신 기술을 활용하여, 이전에 개발되었던 요소 기술들이 협력하여 교통을 제어하는 것으로 연구가 확대되고 있으며, 이로 인한 도로의 효율 향상에 대한 분석이 활발히 진행되고 있다. 그러나 현재의 교통 제어와 관련한 연구들은 요소 기술들이 설치되어 있는 국지적 지역의 효율을 높이는 데에 집중되어 있어 도로 전반의 효율을 높이는 데에는 한계가 있다. 이와 함께 현재의 연구들은 실시간 데이터만을 기반으로 하고 있어 제어 전략이 미래의 교통 상황에 끼치는 영향까지 함께 고려하지 못하고 있다.

본 연구는 사고나 공사 등으로 인하여 극심한 정체가 예상될 경우 도로 전반의 효율을 높일 수 있는 교통 최적 제어 시스템을 개발하고, 다양한 상황에서 제안 시스템이 가져올 수 있는 도로의 효율향상을 분석하는데 그 목적을 두고 있다. 또한 본 시스템에서는 실시간으로 미래 교통상황에 최적화된 교통 제어의 해법을 산출하기 위하여, 클라우드를 기반으로 한 실시간 교통 상황 예측 시스템 및 이와 결합된 온라인 시뮬레이션을 개발하고자 한다.

본 연구는 대구~부산 간 경부선 및 대구~부산 간 중앙선(민자 노선)을 대상으로 하였다. 본 시스템은 대상 노선에 가변속도제한(Variable Speed Limit), 진입 교통량 제어(Ramp Metering), 도로전광표지판(Variable Message Sign)의 노선별 통행 시간 정보(Travel Time Information)와 같은 교통 제어 장치가

설치되었을 경우 교통 상황을 최적화하기 위한 해결책을 제공하는 것을 목적으로 한다.

본 연구에서는, 첫째, 교통 제어와 관련한 기존 개발 사례 및 관련 이론을 고찰하고, 둘째, 본 연구에서 제안하는 교통 최적 제어 시스템의 원리 및 체계를 설명하며, 셋째, 개발시스템의 성능을 평가하여, 마지막으로 결론 및 향후 연구과제를 제시하고자 한다.

II. 관련 이론 및 문헌 고찰

1. 기존의 교통 제어 관련 연구 고찰

Hou et al.(2007)은 진입 교통량 제어 기법과 가변속도 표출 장치를 기법을 활용한 Iterative Learning Control기반의 고속도로 교통 제어 알고리즘을 제안하였다[1]. 본 모델은 주기적으로 유사하게 발생하는 교통 패턴을 활용하여 조금씩 변화하는 교통의 변화를 회분공정이 반복될 때마다 에러를 최소화하는 방향으로 제어한다. 본 알고리즘은 과거 데이터의 획득이 제한적인 경우에도 비교적 빠른 속도로 도로의 효율을 상당히 향상시키는 결과를 보여주고 있다. 하지만 사고 혹은 도로 공사 등에 의해서 발생하는 이례적인 상황에 대해서는 대응력에 한계를 보여주고 있다.

Hegy et al.(2005)은 진입 교통량 제어 기법과 가변 속도 제한 기법을 바탕으로 도로의 효율을 최적화 하는 알고리즘을 제안하였다[2]. 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)를 통하여 본선 교통량과 램프 교통량의 15~18% 성능향상을 이루었다. 하지만 진입 교통량 제어가 존재하는 구간 인근의 정보만을 기반으로 제어를 하고 있어 효율 향상에 한계가 있고, 이러한 제어가 상류부와 하류부의 교통에 끼치는 영향을 함께 고려하고 있지 않다. 뿐만 아니라, 제어의 예측시간의 길이 (Prediction Horizon)가 7분으로 도로 네트워크 전반에 끼치는 영향을 평가하기에는 한계를 가지고 있다.

Papageorgiou et al.(1991)은 진입 교통량 제어를 기반으로 하여 주도로의 정체를 최소화하는 알고리즘을 제안하였다[3]. 해당 알고리즘의 경우 본선에서 발생하는 정체를 억제할 수 있지만 램프가 위치하고

있는 지역 정보에만 의존하여 제어를 하기 때문에 제어 구간 전후에 발생하는 도로 전반의 교통 상황 변화를 함께 고려하지 못한다. 또한, 진입 교통량 제어기에서 수천 미터 앞에 존재하는 검지기 정보에 의존하여 제어하기 때문에 램프 구간으로부터 멀리 위치한 곳에서부터 전파되어 오는 교통량 변화에는 대응하지 못하여 효율증대의 한계가 있다.

Kotsialos et al.(2001)은 기존의 진입 교통량 제어에 대한 연구를 발전시켜 고속도로 전반의 효율을 높이기 위해 21개 지점의 램프의 진·출입량을 통합 조절하는 알고리즘을 개발하였다[4]. 본 알고리즘은 제어하지 않았을 때와 비교하여 43.5%의 효율 증대를 성취하였다. 하지만 본 논문은 해당 네트워크에 대한 수요를 알고 있다는 가정 하에 이루어지고 있어 네트워크에 대한 수요 예측의 정확도에 따라 효율이 크게 좌우되는 한계점을 가지고 있다.

Daha et al.(2013)은 퍼지와 결합한 인공신경망(Artificial Neural Systems)을 기반으로 하여 3개 이상의 주도로가 만나는 비교적 큰 네트워크의 최적 제어 방법론을 제안하였다[5]. 본 논문에서는 전체 네트워크를 몇 개의 하위 네트워크로 구분하고 각각의 하위 네트워크는 인공신경망 기법을 통하여 해당 교통상황에서의 최적 제어 전략을 산출한다. 각각의 하위 네트워크는 조정자(Coordinator)에 의해서 하위 네트워크 간의 상관관계를 분석하고 이를 기반으로 전체 네트워크를 위한 최적의 제어 전략을 산출한다. 본 연구는 비교적 넓은 공간적 범위에서의 최적 제어 전략을 도출한다는 면에서 기존 연구와 차별성을 보이고 있다. 하지만 현재의 교통 상황만을 기준으로 제어 전략을 수립하고 있어 다양하게 변화하는 미래 교통 상황에 대응할 수 없는 한계가 있다.

기존의 교통 제어와 관련된 연구들은 크게 두 가지 한계를 가지고 있다. 첫 번째는 제어를 하는 영역이 제한적이라는 부분이다. 기존 알고리즘은 교통 정체 발생의 원인을 국소지역으로 한정하여 각각의 국소지역에서 발생하는 정체 발생을 억제하는 것에 초점이 많이 맞추어져 있다. 이에 국소지역의

제어가 도로 네트워크 전반에 끼치는 영향에 대한 분석이 미비하여 상황에 따라 국소지역에 발생하는 정체를 해결하였다 하더라도 도로 네트워크 전반의 효율에는 효과가 미비한 경우가 있다. 두 번째는 제어 예측 시간의 길이(Prediction Horizon)가 짧은 까닭에 도로 네트워크 전반에 끼치는 영향을 산출하는데 한계가 있다는 점이다. 종래의 연구들은 예측 기반의 교통 제어를 과거의 반복적인 패턴을 활용하거나 5~10분 정도의 교통상황을 모델 기반으로 예측하여 활용해 왔다. 그러나, 효율적인 교통 제어를 위해서는 1시간 이상의 정확한 예측 정보가 필요함에도 불구하고 예측 정보의 불확실성으로 인하여 짧은 시간만을 고려한 최적 제어 해법을 제시해 왔다.

이러한 선행 연구들의 단점 보완을 통한 교통 제어 효율성 증진을 위해, 본 연구에서는 이력 데이터를 기반으로 4시간 이상의 미래를 예측하고, 이를 교통 제어에 활용한다. 이를 통하여 미래의 교통 상황에 선제적으로 대응하고 도로 네트워크 전반의 효율을 향상시킬 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

2. 제안 시스템과 관련된 이론 고찰

교통 제어 시스템의 방법론을 정립하기 위해 제어 시스템의 구축에 필요한 세부 알고리즘에 대한 기존 연구를 고찰하였다. 본 연구에서 제안하는 교통 제어 시스템은 크게 K-Nearest Neighbor Classifier (K-NN Classifier)를 기반으로 한 교통 예측 알고리즘, Cell Transmission Model(CTM)을 기반으로 한 거시적 교통 시뮬레이션, 유전 알고리즘(GA)을 기반으로 한 최적 제어 해법 탐색 알고리즘으로 구성된다.

K-NN Classifier는 분류가 되어 있지 않은 데이터들을 분류하는 것에 사용되는 비모수 방식의 분류 방법으로 데이터 중에 k 개의 가장 비슷한 데이터를 찾고 이를 분류 혹은 회귀하는 데에 사용하는 알고리즘이다. K-NN Classifier는 알고리즘의 높은 직관성, 비교적 간단한 실행 기법, 기본적인 분포 가정의 불필요성 등의 이유로 인하여 Clark(2003), Davis et al.(1991), Smith et al.(2002) 등에 의해서 통행 시간 및 미래 교통 상황을 예측하는 데에 많이

사용되었다[6-8]. 특히, K-NN 기반의 예측 알고리즘은 유사 패턴이 비교적 반복적으로 발생하는 상황에서 안정적인 정확성을 보임과 동시에 과거 데이터에 손실 부분이 존재할 때에도 최근접 이웃의 개수인 k 를 조절함으로써 데이터 손실에 의한 정확성 저하를 극복하는 등의 장점을 가지고 있다.

CTM은 Daganzo(1994, 1995)가 제안한 거시적 교통 시뮬레이션 모델로 도로 네트워크를 일정간격의 셀로 구분하고 단위 시간에 따른 셀 간의 이동 교통량 및 셀별 밀도를 산정하여 연속류를 표현한다 [9, 10]. CTM은 다른 교통 시뮬레이션과 비교하였을 때 빠르게 교통 상황을 시뮬레이션 하여 거시적 변수의 변화를 도출할 수 있다는 특성을 가지고 있다. 이러한 장점 때문에 CTM은 도로 상황의 재현을 위하여 사용될 뿐만 아니라 도로의 교통제어에도 활용되었다. Gomes et al.(2006)은 CTM을 기반으로 하여 고속도로의 효율을 증가시키기 위하여 고속도로의 진출입량을 제어하는 알고리즘을 제안하였으며[11], Lo(2001)는 CTM을 기반으로 신호를 최적 제어하여 도심의 교통 정체를 줄이는 알고리즘을 제안하였다[12].

유전 알고리즘은 자연계의 생명체 진화를 모방한 알고리즘으로 선택(Selection), 교차(Crossover), 변이(Mutation), 도태 등의 연산을 기반으로 하여 최적화 문제를 해결한다. 일반적으로 NP-hard 문제와 같이 문제가 계산 불가능할 정도로 지나치게 복잡할 경우 혹은 문제의 해결을 위해 지나치게 많은 시간이 필요한 경우에 사용된다. 이러한 이유로 교통의 제어에서도 복잡한 문제를 비교적 빠르게 해결하기 위하여 유전 알고리즘을 사용하였다. Teklu(2007)은 유전 알고리즘을 기반으로 한 교통 신호 최적화 알고리즘을 제안하였으며[13], Ceylan(2006)은 유전 알고리즘과 Hill-Climbing 최적화 기법을 바탕으로 지역 교통 제어 알고리즘을 제안하였다[14].

기존 연구에 대한 고찰 결과 K-NN Classifier, CTM, 유전 알고리즘은 도로의 교통 제어에서 부분적으로 사용되고 있으며 제한된 조건 안에서 도로의 효율 향상 효과가 뛰어난 것으로 볼 수 있다. 하지만 기존 연구의 경우 수 km 지역적 문제를 해결

하기 위해서 각각의 알고리즘을 사용하고 있고, K-NN Classifier, CTM, 유전 알고리즘의 통합적 접근이 이루어지지 않고 있다는 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 적게는 수십 km에서 많게는 100km 이상의 광역 고속도로에 적용할 수 있는 교통 제어 시스템을 개발하고자 한다. 또한, 빠르고 정확한 제어 해법의 산출을 위하여 K-NN Classifier, CTM, 유전 알고리즘의 세 알고리즘이 통합된 교통 제어 시스템을 개발하고자 한다.

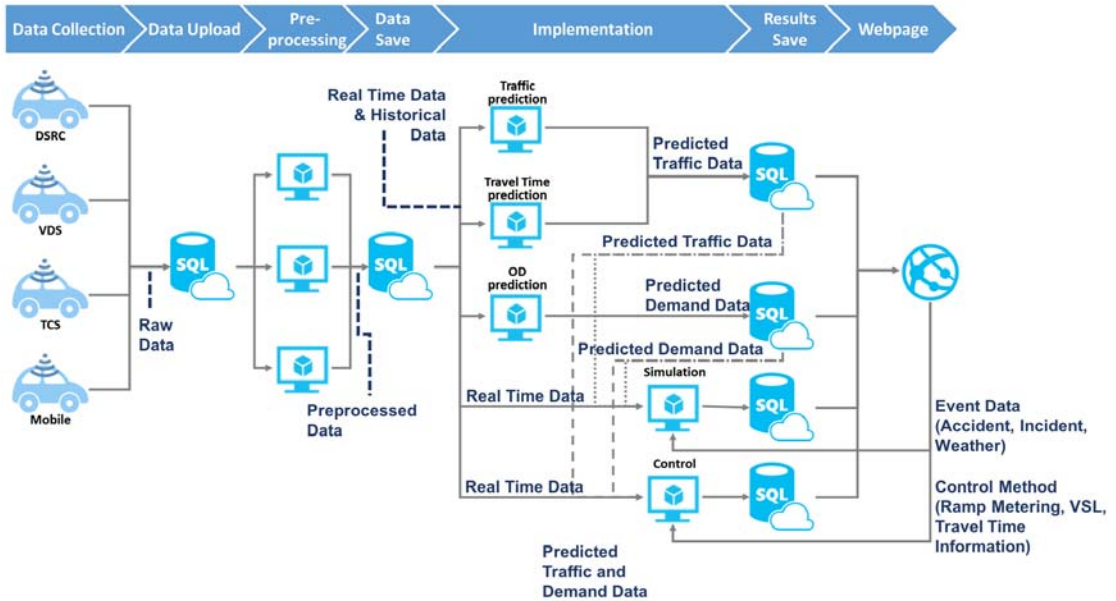
III. 교통 제어 시스템의 개발

1. 개발시스템의 개요

본 연구에서 제안하고 있는 클라우드 환경에서의 교통 제어 시스템은 도로에 설치되어 있는 차량 검지 센서(VDL : Vehicle Detection Loop, DSRC : Dedicated Short Range Communication)와 통행료 지불 시스템(TCS : Toll Collection System)에서 수집된 데이터를 통해 미래 교통 상황을 예측한다. 이어서 예측되는 데이터를 기반으로 사고, 공사와 같은 도로의 다양한 상황을 시뮬레이션하고 이를 통하여 도로의 교통 흐름을 최적화 하는 운영 전략을 도출한다.

<Fig. 1>은 제안하고 있는 교통 제어 시스템의 시스템 구성도 및 데이터 흐름을 나타낸다. 그림에 보이는 것처럼 제안하는 교통 제어 시스템은 클라우드 환경에서 구현된다. 각각의 차량 검지기와 통행료 지불 시스템을 통하여 수집된 데이터는 1차적으로 각각의 Structured Query Language 데이터베이스(SQL Database)에 저장된다. 저장된 데이터는 클라우드에 구현되어 있는 가상 컴퓨터를 통하여 전처리(Pre-process) 되며, 이 과정에서 이상 데이터 및 손실 데이터가 탐지 및 보정된다. 보정된 데이터는 다시 SQL Database에 저장되어 이후 데이터 기반의 교통 예측 알고리즘에 활용된다.

데이터 기반의 교통 예측은 크게 속도와 같은 교통 상태 예측 (Traffic State Prediction), 통행시간 예측 (Travel Time Prediction), 교통수요 예측 (Origin-



〈Fig. 1〉 System Architecture and Data Flow of Proposed Real Traffic System

Destination Demand Prediction)의 세 부분으로 구성된다. 속도 예측과 통행 시간 예측은 사용자에게 관련 〈Fig. 2〉 Examp서비스를 제공하기 위한 부분으로 SQL Database의 저장고 웹페이지에 결과 정보를 표출한다. 교통량 예측과 교통 수요 예측은 클라우드 기반의 가상 컴퓨터에서의 시뮬레이션(Simulation)에 대한 입력값으로 사용되며, 이를 기반으로 사고 및 공사 등 도로 상에서 발생하는 다양한 이벤트에 대한 교통 상황의 변화를 예측한다. 해당 이벤트들은 웹페이지를 통하여 시뮬레이션 모듈로 입력되어 진다.

제어(Control) 모듈은 시뮬레이션 모듈과 동일하게 교통량 예측치, 수요 예측치, 사고 및 공사와 같은 이벤트 정보를 입력값으로 사용하며, 시뮬레이션 및 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 통하여 주어진 교통 상황을 최적화 하는 제어 방법을 도출한다. 도출된 최적 제어 방법은 다시 SQL Database에 저장되어 웹페이지에 표출된다.

2. 개발시스템의 구성 및 기능

1) 데이터 수집 및 전처리

데이터 수집 및 전처리 모듈은 도로의 차량 검지기에서부터 수집된 데이터의 에러를 탐지하고 손실 데이터를 보정한다. 〈Fig. 2〉는 도로에서 수집되는 장치의 에러 유형에 대한 예시이다. 그림에 보이는 것처럼 차량 검지기로부터 수집된 데이터에는 크게 두 종류의 에러를 가지고 있다. 〈Fig. 2(a)〉에서 나타나는 에러는 DSRC 기반의 센서에서 나타나는 것으로 VDS 기반의 센서에서는 속도 저하 현상이 없는 반면, DSRC 기반의 센서에서만 속도 저하 현상이 관측된다. 이는 DSRC의 경우 탑재 차량의 숫자가 갑자기 증가하는 등의 트래픽 증가 현상이 발생할 경우 일부 탑재 차량에 대한 속도 산출에 에러가 발생하여 0에 가까운 속도 값을 생성하기 때문이다. 〈Fig. 2(b)〉의 에러는 DSRC 기반의 센서와 VDS 기반의 센서 모두에서 관측되는 현상으로 일시적으로 관련 센서가 작동되지 않거나 혹은 장애물 등에 의해서 시스템 장애가 발생할 경우에 속도를 0으로 산출하기 때문에 발생한다.



(Fig. 2) Examples of Data Error

데이터 수집 및 전처리 모듈에서는 이와 같은 이상 데이터 및 손실 데이터를 처리한다. 본 시스템에서는 1차적으로 VDS 데이터와 DSRC 데이터의 융합을 통해서 데이터를 보정한다. 예를 들어 VDS 기반의 데이터가 손실 되었을 경우 해당 지역, 해당 시간의 DSRC 기반의 데이터로 손실 데이터를 대체한다. 반대로 DSRC 기반의 데이터가 손실되었을 경우 해당 지역, 해당 시간의 VDS 기반의 데이터로 손실 데이터를 대체한다. VDS와 DSRC 데이터 모두가 손실되어 있는 데이터 포인트는 이후 데이터 기반 교통 예측 알고리즘에서 가중 평균을 통하여 보완한다.

2) 데이터 기반 교통 예측

데이터 기반의 교통 예측 모듈은 K-NN Classifier를 통하여 비슷한 과거 교통 패턴을 찾고 미래의 교통 상황을 예측한다. 교통 제어의 효과를 향상시키기 위해서는 교통 예측 알고리즘의 높은 정확도가 요구된다. 이를 충족시키기 위하여 본 시스템에서는 Multi-level K-Nearest Neighbor(MK-NN)을 활용하여 교통 상황을 예측한다. MK-NN은 Tak et al.(2014)에 의해서 제안된 알고리즘으로 계층적 구조를 기반으로 하여 4시간에서 6시간의 미래를 7% MAPE 수준으로 예측한다[15].

MK-NN은 날짜 특성 분류(Classification), 광역 매칭(Global Matching), 구역 매칭(Local Matching)의 3단계 계층으로 구성된다. 날짜 특성 분류에서는 요일 분류, 휴일 분류, 날씨 분류를 통하여 전체 데이터에서 비슷한 특성을 나타낸 날짜를 1차적으로 분류한다. 광역 매칭에서는 1차적으로 분류된 날짜 안에서 K-NN 알고리즘을 기반으로 비슷한 수요 패턴(TCS 데이터)과 통행량 패턴(VDS 데이터)을 보이는 날짜를 수만미터의 광역권에서 찾는다. 구역 매칭에서는 광역 구역에서 분류된 날짜 안에서 K-NN 알고리즘을 기반으로 비슷한 속도 패턴(VDS 데이터와 DSRC 데이터)과 점유율 패턴(VDS 데이터)을 보이는 날짜를 수천 미터의 지역권에서 찾는다. 최종적으로 구역 매칭의 결과를 기반으로 도로의 각 링크별 속도 및 교통량을 다음의 식으로 예측한다.

$$P^l(t+\sigma) = \frac{\sum_{k=1}^K V_k^l(t+\sigma)}{\sum_{k=1}^K d_k^l(t+\sigma)} \dots\dots (1)$$

- 여기서, $P^l(t+\sigma)$: 도로 링크 l 의 시간 $t+\sigma$ 에서의 예측 속도 혹은 예측 교통량
- K : 사용되는 최근접 이웃의 수
- $V_k^l(t+\sigma)$: 도로 링크 l 의 시간 $t+\sigma$ 에서 과거 데이터 k 의 속도 혹은 교통량
- $d_k^l(t+\sigma)$: 실시간 데이터와 과거 데이터 k 의 도로 링크 l 의 시간 $t+\sigma$ 에서의 유클리드 거리
- σ : 예측 구간의 길이

이와 같이 본 교통 제어 시스템에서는 MK-NN 알고리즘을 기반으로 하여 도로의 각 구역별 속도(Speed), 통행량(Flow), 밀도(Density), 수요(Demand)를 예측하며, 예측된 속도를 기반으로 개별 차량의 출발지-도착지 간 통행 소요 시간을 산출한다.

3) 온라인 교통 시뮬레이션(예측 데이터 기반)

온라인 교통 시뮬레이션은 데이터 기반 교통 예측 모듈에서 산출된 예측 데이터를 기반으로 사고, 공사 등과 같은 다양한 이벤트가 발생하고나 혹은

예견되었을 때의 교통상황을 시뮬레이션 한다. 본 교통 제어 시스템에서는 기본적으로 Daganzo(1994, 1995)가 제안한 거시적 변수 기반 시뮬레이션 모델인 Cell Transmission Model (CTM)을 바탕으로 이벤트 발생 시의 교통 상황을 시뮬레이션 한다[9, 10]. CTM은 대상 네트워크를 일정간격의 셀로 구분하고 시간에 따른 셀 간의 차량 이동량 및 셀 별 밀도를 다음의 식을 기반으로 산정하여 연속류의 교통 흐름을 시뮬레이션 한다.

$$q_{n \rightarrow n-1}(t) = \min(n_n(t), Q_{n-1}(t), \delta[N_{n-1}(t) - n_{n-1}(t)]) \quad \dots (2)$$

$$n_n(t+1) = n_n(t) + y_n^N(t) - y_n^{OUT}(t) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\delta = w/v$$

여기서, $q_{n \rightarrow n-1}(t)$: 시간 t 의 셀 n 에서 $n-1$ 로의 교통량

$n_n(t)$: 시간 t 의 셀 n 에 위치한 차량의 수

$Q_n(t)$: 시간 t 의 셀 n 에서 도로 용량

$N_n(t)$: 시간 t 의 셀 n 의 최대 접거 가능 차량 수

$y_n^N(t)$: 시간 t 의 셀 n 으로 진입하는 차량 수

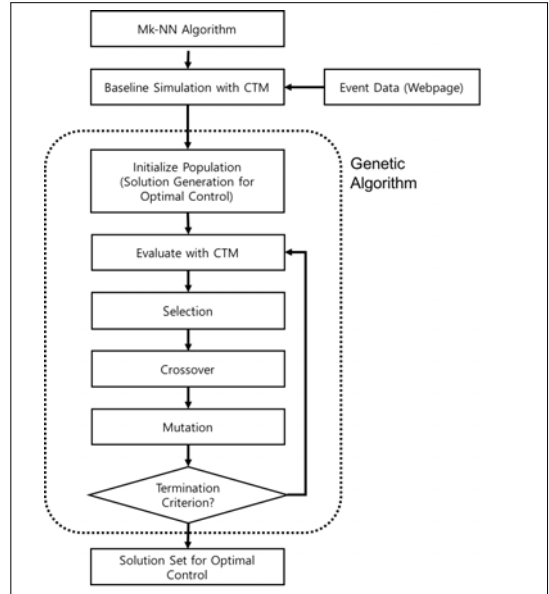
$y_n^{OUT}(t)$: 시간 t 의 셀 n 에서 진출하는 차량 수

w : 충격파의 전파 속도

v : 자유 흐름 속도

CTM을 기반으로 다양한 고속도로 상황을 시뮬레이션 하기 위해서는 미래 수요 데이터 및 미래 통행량 데이터, 네트워크의 분할, 관련 변수(도로 용량, 이벤트 발생 시 용량 저하량, 자유 흐름 속도 등)의 정의 등의 과정이 필요하다. 본 시스템에서는 데이터 기반의 예측 모듈에서 미래 수요 데이터 및 미래 교통량 데이터를 산출한다. 즉, 시뮬레이션에 필요한 데이터를 예측 모듈과 자동으로 연동시킴으로써 추가적인 동작 없이 실시간 데이터를 기반으로 한 시뮬레이션이 가능하다.

CTM에서는 시뮬레이션 시간 간격 및 자유흐름 속도를 기반으로 해당 도로 네트워크를 나누어야 한다. 제안하는 제어 시스템에서 시뮬레이션은 시간 간격은 30초를 기준으로 수행되며 최대 자유 흐름속도는 120km/h로 정의되었다. 셀의 최소 길이는



(Fig. 3) Genetic Algorithm with Cell Transmission Model for Searching Optimal Control Solution

시뮬레이션의 시간 간격 동안 자유 흐름속도로 이동할 수 있는 길이 보다 커야 하므로 1km로 설정되었고, 도로에 설치되어 있는 VDS 및 DSRC 센서와의 정보 융합을 위하여 최대 5km로 설정되었다.

CTM으로 다양한 교통 상황을 시뮬레이션하기 위해서는 관련 변수의 정의가 필요하다. 본 논문에서는 같은 시뮬레이션 대상지를 연구한 Park(2015)의 연구결과를 기반으로 도로의 용량, 충격파의 전파 속도, 자유 흐름 속도, 혼잡밀도 등의 변수를 설정하였다[16]. 이와 함께 공사 및 사고 시나리오에서의 용량 저하는 이벤트에 따라 봉쇄되는 차선의 숫자에 비례하여 산출되며 날씨에 의한 용량저하는 날씨의 유형에 따라 각각 1(맑음), 0.8(비), 0.7(안개), 0.6(눈)의 비율을 본래 용량에 곱하여 산출하였다.

CTM 모델의 특징은 광역의 네트워크를 미시적 교통 시뮬레이션 보다 비교적 빠른 속도로 시뮬레이션할 수 있는 점과 사고, 공사, 날씨 등에 의한 도로의 용량 저하에 의한 교통상황의 변화를 시뮬레이션할 수 있다는 점이다. 본 교통 제어 시스템은 사고, 공사, 날씨 등의 이벤트에 의한 용량 저하를

웹페이지로부터 실시간으로 다운로드 하여 시뮬레이션의 입력값으로 활용한다.

4) 최적 교통 제어

최적 교통 제어 모듈은 온라인 교통 시뮬레이션의 CTM 모델과 유전 알고리즘 (GA)을 기반으로 도로의 교통흐름의 최적화 제어 해법을 도출한다. 본 시스템에서는 여러 가지 도로 제어 기법 중 가변 속도 제한 (VSL), 진입 교통량 제어 (Ramp Metering), 통행시간 정보 제공 (Travel Time Information)의 기법을 통하여 도로를 제어한다. 가변 속도 제한은 도로의 상황에 따라 도로의 속도 제한을 조정하는 기법으로 본 시스템에서는 60km~110km의 범위에서 가변 속도를 조절한다. 진입 교통량 제어는 도로에 유입되는 교통량을 조절하는 방법으로 본 시스템에서는 30~100%의 범위에서 진입 교통량을 조절한다. 도로 전광 표지판을 통한 통행 시간 정보 제공은 서로 다른 두 가지 경로에 대한 통행시간 제공을 통하여 각 경로를 이용하는 사용자의 수요를 조절하는 방식으로 각각의 경로에 대한 예상 통행 시간을 0~100%의 범위 안에서 임의로 조정하여 각 경로의 이동수요를 조절한다. 통행 시간 정보 제공을 기반으로 한 수요 조절에 대한 탄력성은 Park(2015)의 연구결과를 기반으로 한다[16].

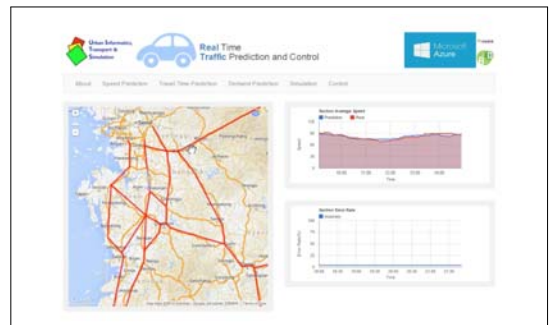
<Fig. 3>은 최적의 제어 해법을 찾기 위한 유전 알고리즘의 순서도이다. 그림에서 보이는 것처럼 MK-NN에서 예측된 데이터와 웹에서 입력된 이벤트 데이터를 기반으로 시뮬레이션하여 최적 제어의 성능 평가를 위한 기준 값을 생성한다. 이후 도로의 교통 제어에 대한 초기 값을 생성하고 CTM 시뮬레이션을 통해 부모해(mother population)의 성능을 평가한다. 이후 선택 연산, 교차 연산, 변이 연산의 유전 과정을 통하여 새로운 해를 생성하고 다시 각각의 해를 CTM 시뮬레이션을 통해 평가한다. CTM 시뮬레이션 기반의 유전 알고리즘은 네트워크 전체의 차량들의 총 통행시간 (VHT : Vehicle Hours Traveled)을 최소화하는 방향으로 진행된다.

3. 개발시스템의 결과 표출 방법

본 연구에서 제안하고 있는 클라우드 환경에서의 교통 제어 시스템은 웹페이지를 통하여 속도 예측 데이터, 통행 시간 예측 데이터, 수요 예측 데이터, 시뮬레이션 데이터, 최적 제어 결과 데이터의 5가지 정보를 표출한다. 각각의 데이터는 고유의 웹페이지로 구성되며 다음과 같은 세부 정보를 표출한다.

1) 속도 예측 데이터의 표출

속도 예측 데이터 페이지에서는 주요 고속도로 네트워크의 각 링크에 대한 속도 예측 정보를 지도와 그래프를 통하여 표출한다. <Fig. 4>에서 보이는 것처럼 지도의 빨간색 링크를 선택하면 우측 상단 그래프 창에서 해당 링크에 대한 미래 속도 예측치를 보여주며, 이와 함께 과거 예측 데이터의 정확도를 함께 표출하여 속도 예측 모듈의 성능을 모니터링 한다.

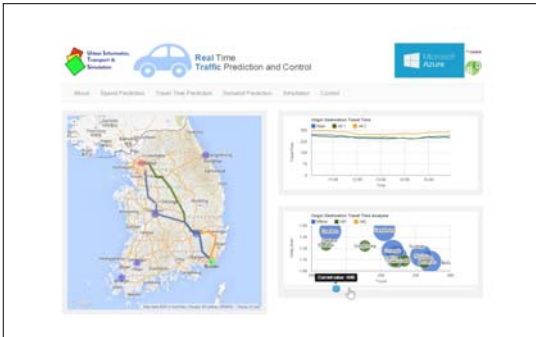


<Fig. 4> Display of Speed Prediction Result

2) 통행 시간 예측 데이터의 표출

통행 시간 예측 페이지에서는 고속도로의 주요 출발지-목적지간의 통행시간을 지도와 그래프를 통하여 표출한다. <Fig. 5>처럼 지도의 파란색으로 표시되어 있는 지점을 출발지와 목적지로 지정하면, 우상단의 그래프 창에서는 해당 출발지에서 목적지를 갈 수 있는 3가지 경로에 대한 통행시간 예측치를 보여주며, 이와 함께 우하단의 그래프에서

는 출발 시간대에 따른 정체체감지수와 출발지-목적지에 대한 출발시간 적합도를 함께 표출한다. 정체체감지수는 미래 출발시간에서의 예측 통행시간과 향후 6시간 동안의 최소 예측 통행시간 비율로 산출되며, 1보다 높으면 높을수록 정체 체감이 커지는 것을 나타낸다.



〈Fig. 5〉 Display of Travel Time Prediction Result



〈Fig. 6〉 Display of Traffic Demand Prediction Result

3) 수요 예측 데이터의 표출

수요 예측 데이터 페이지는 지도와 그래프를 통하여 고속도로의 수요예측 결과를 표출한다. <Fig. 6>의 좌상단 지도 그래프는 전체 고속도로를 8개의 구역으로 나누고 각 구역의 총 진입량과 진출량의 예측치를 표출한다. 우상단 그래프에서는 각 광역 구역에서 진입량 및 진출량 측면에서 상위 5위 안에 드는 영업소를 표출하고, 우하단 그래프는 광역 구연간의 이동 예측량을 표출하여 관리자가 영업소의 미래 이용현황을 관찰하기 쉽게 한다.



〈Fig. 7〉 Display of Simulation Result

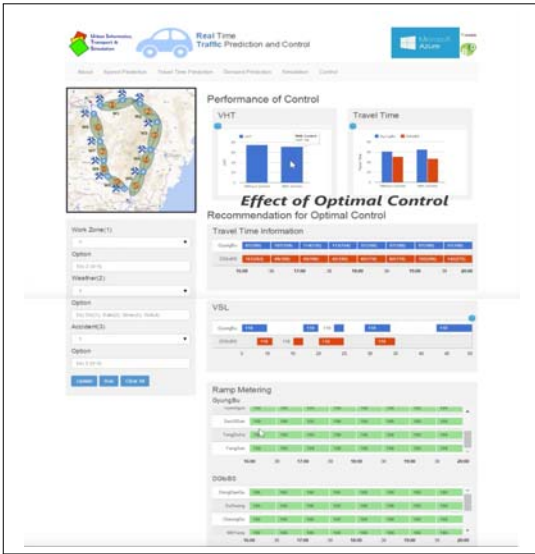
4) 시뮬레이션 데이터의 표출

시뮬레이션을 위한 화면은 시뮬레이션을 위한 입력값 입력을 위한 공간과 시뮬레이션 결과 그래프의 표출을 위한 공간으로 구분된다. <Fig. 7>의 왼쪽은 시뮬레이션의 입력값 입력을 위한 공간으로 사고의 유무와 사고의 심각도, 공사의 유무 등의 이벤트 정보를 입력한다. 이후 시뮬레이션을 실행하면 해당 이벤트의 입력 전·후의 도로 상황 변화를 토대로 각 경로의 통행 시간 예측치를 계산하고, 우상단 그래프에 이를 표출한다.

5) 최적제어 결과 데이터의 표출

최적 제어의 결과를 표출하는 화면도 시뮬레이션을 위한 화면과 유사하게 제어 관련 변수 입력을

위한 공간과 결과의 표출을 위한 공간으로 구성된다. <Fig. 8>에서 왼쪽은 입력란으로 공사의 유무와 범위, 사고의 유무와 심각도, 날씨 등의 이벤트 정보를 입력한다. 이후 최적 제어를 실행하면 유전 알고리즘을 통하여 최적제어 방안을 도로에 실행한 결과와 이를 위한 제어 해법의 자세한 사항을 우측에 함께 표출한다.



<Fig. 8> Display of Optimal Control Result

제어의 효과는 최적제어 전후의 VHT와 각 경로에 대한 통행 시간을 함께 표출하여 표현된다. 이와 함께 통행 시간 제공, 가변 속도 제한, 진입 교통량 제어가 설치되어 있는 공간의 추천 제어 방법을 30분 단위로 표출하여 도로 네트워크의 최적 제어 전략을 알려준다.

2. 효과 검증 결과

<Table 1> The Effect of Proposed Control System on VHT

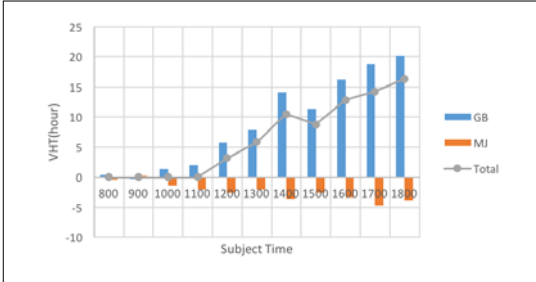
	Without control (min)			With Control (min)			Reduction Rate
	GB	MJ	Total	GB	MJ	Total	
Normal Case	46	18	64	22	24	46	28 %
Work Zone (Minja)	46	140	186	25	38	63	66 %
Accident (GB)	59	18	77	32	24	56	27 %
Accident(GB) and Rainny (MJ)	59	41	99	32	27	59	40 %

<Table 1>은 경부고속도로(GB)와 민자고속도로(MJ)에서 시나리오 별로 제어 전후의 도로 효율의 변화를 VHT를 기반으로 하여 보여주고 있다. 이 표를 통해 도로에 사고, 공사의 이벤트가 발생하거나 날씨의 변화와 같은 도로의 용량 저하와 관련된 현상이 발생하였을 때, 제안하는 제어 시스템을 적용하면 어떠한 효과를 얻을 수 있는지를 알 수 있다. 표에서 나타나는 것처럼, 제안하고 있는 제안 시스템을 통하여 정상상황에서는 평균 28% VHT 감소 효과, 민자고속도로에 공사 중일 때에는 66% VHT 감소 효과, 경부 고속도로에 사고가 발생하였을 때에는 27% VHT 감소 효과, 경부 고속도로에 사고가 발생하고 민자 고속도로에 비가 올 경우에는 40% VHT 감소 효과를 달성할 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 시스템은 민자 고속도로에 용량 저하와 관련한 이벤트가 발생하였을 경우 민자 고속도로의 수요를 경부 고속도로로 이동시킴으로써 민자 고속도로에서 발생하는 정체를 선제적으로 막아 전체 고속도로의 효율을 향상 시키는 것을 관측할 수 있다.

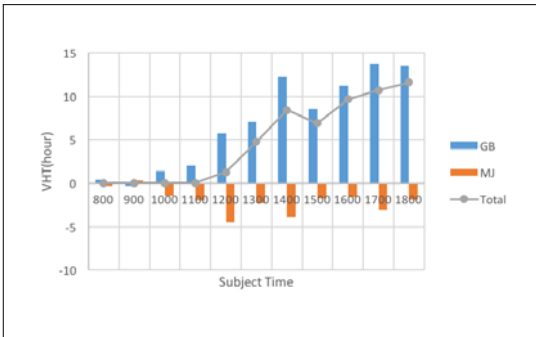
제안 시스템의 도로 성능 개선 효과는 제어 시간 대별 VHT 저감 그래프 및 통행시간 저감 그래프에서 더욱 쉽게 관측된다. <Fig. 10-13>에서 보이는 것처럼 제어 시스템을 통하여 모든 시나리오에서 도로의 전체 효율을 향상시키는 것을 관측할 수 있다. 특히 전체 수요가 적은 오전 시간대 보다는 전체 수요가 많은 오후 시간대에 제어의 효과가 더 커지는 것을 관측할 수 있다.

제안시스템의 성능 향상 패턴을 보면 전반적으로 민자 고속도로의 VHT 증가를 통하여 경부 고속도로의 통행량을 완화하는 것을 관측할 수 있다. 즉, 민자고속도로에서 정체 발생하지 않는 최대

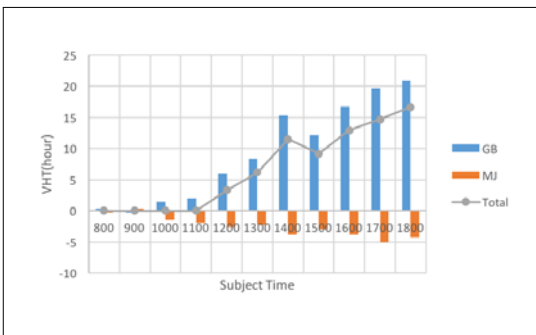
한 용량을 활용하기 위한 제어 전략을 수행하고, 경부 고속도로에서의 VHT를 낮춤으로써 전체 도로의 성능을 향상시킨다.



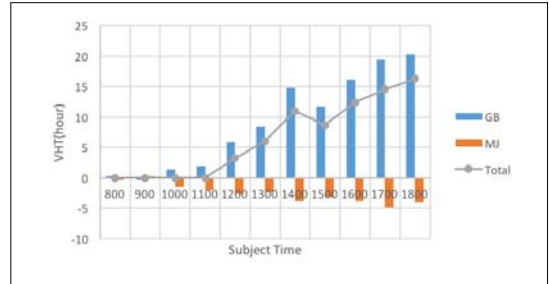
〈Fig. 10〉 Changes in VTH and Travel Time with/without Optimal control (Normal Situation)



〈Fig. 11〉 Changes in VTH and Travel Time with/without Optimal Control (Work Zone in Minja)



〈Fig. 12〉 Changes in VTH and Travel Time with/without Optimal Control (Accident in GyungBu)



〈Fig. 13〉 Changes in VTH and Travel Time with/without Optimal Control (Accident in GyungBu and Rainny in Minja)

V. 결론

본 연구에서는 클라우드 환경에서 거시적 시뮬레이션 기법인 CTM과 유전 알고리즘을 통하여 최적으로 도로를 제어할 수 있는 시스템을 제안하였다. 그리고 본 시스템의 효과를 대구~부산을 연결하는 경부 고속도로와 민자 고속도로를 기반으로 검증하였다. 시스템 검증 결과 제안 시스템을 통하여 도로를 제어하였을 경우 VHT 측면에서 평균 26%에서 66%의 성능 향상을 보였다. 특히 본 시스템은 도로에 사고 및 공사와 같은 이벤트가 발생하였을 경우 더욱 큰 효과를 발휘하는 것이 관측되었다.

이 도로 최적 제어 시스템은 기존의 서버 기반의 시스템과 비교하였을 때 클라우드를 기반으로 구현되어 장소의 구애를 받지 않으며, 시스템의 확장성이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 또한 본 연구에서 제안하는 클라우드 기반의 시스템은 각각의 시스템이 SQL 데이터베이스를 기반으로 하여 정보만을 공유하므로, 모듈별로 독립적으로 기능을 수행할 수 있어 일부 시스템의 고장에 대해서 안정적으로 관련 서비스를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 제시한 클라우드 기반의 교통 예측 및 최적 제어 시스템은 과거에 발전되어 온 센터 기반의 교통 운영 전략을 클라우드 기반으로 확장하는 장점이 있으며, 아직 물리적인 토대가 부족한 개발도상국 등에 지능형 교통 시스템(Intelligent Transportation System)을 빠르게 적용할 수 있다는 장점을 함께 가지고 있다.

REFERENCES

- [1] Hou Z., Xu J. X. and Zhong H.(2007), “Freeway traffic control using iterative learning control–based ramp metering and speed signaling,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 2, pp.466–477.
- [2] Hegyi A., De Schutter B. and Hellendoorn H.(2005), “Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 13, no. 3, pp.185–209.
- [3] Papageorgiou M., Hadj–Salem H. and Blosseville J. M.(1991), “ALINEA : A local feedback control law for on–ramp metering,” *Transportation Research Record*, (1320).
- [4] Kotsialos A. and Papageorgiou, M.(2001), “Efficiency versus fairness in network–wide ramp metering,” *In Intelligent Transportation Systems, 2001, Proceedings, 2001 IEEE*, pp. 1189–1194.
- [5] Dahal K., Almejalli K. and Hossain M. A. (2013), “Decision support for coordinated road traffic control actions,” *Decision Support Systems*, vol. 54, no. 2, pp.962–975.
- [6] Clark S.(2003), “Traffic prediction using multivariate nonparametric regression,” *Journal of transportation engineering*, vol. 129, no. 2, pp.161–168.
- [7] Davis G. A. and Nihan N. L.(1991), “Nonparametric regression and short–term freeway traffic forecasting,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 117, no. 2, pp.178–188.
- [8] Smith B. L., Williams B. M. and Oswald R. K.(2002), “Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecasting,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 10, no. 4, pp.303–321.
- [9] Daganzo C. F.(1994), “The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory,” *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 28, no. 4, pp.269–287.
- [10] Daganzo C. F.(1995), “The cell transmission model, part II : network traffic,” *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 29, no. 2, pp.79–93.
- [11] Gomes G. and Horowitz R.(2006), “Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 14, no. 4, pp.244–262.
- [12] Lo H. K.(2001), “A cell–based traffic control formulation : strategies and benefits of dynamic timing plans,” *Transportation Science*, vol. 35, no. 2, pp.148–164.
- [13] Teklu F., Sumalee A. and Watling D.(2007), “A genetic algorithm approach for optimizing traffic control signals considering routing,” *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 22, no. 1, pp.31–43.
- [14] Ceylan H.(2006), “Developing combined genetic algorithm–hill–climbing optimization method for area traffic control,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 132, no. 8, pp.663–671.
- [15] Tak S., Kim S., Jang K. and Yeo H.(2014), “Real–time travel time prediction using multi–level k–nearest neighbor algorithm and data fusion method,” *Computing in civil and building engineering*, pp.1861–1868.
- [16] Park J.(2015), “A study on toll cost policy for optimizing travel time of multi–routed highway section,” Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST), Master’s Thesis.

저자소개



탁 세 현(Tak, Se-Hyun)

2015년 한국과학기술원 박사 졸업(교통공학전공)

2011년 한국과학기술원 석사 졸업(건설 및 환경공학과)

2008년 홍익대학교 졸업(건축공학전공)

2015년 9월~현재 : 한국과학기술원 응용과학연구소 연수연구원

e-mail : taksehyun@kaist.ac.kr



여 화 수 (Yeo, Hwasoo)

2008년 UC Berkeley 박사 졸업(교통공학전공)

2004년 UC Berkeley 석사 졸업

1996년 서울대학교 졸업(교통공학전공)

2009년 7월~현재 : 한국과학기술원 교수(건설 및 환경공학과)

e-mail : hwasoo@kaist.edu