한국ITS학회논문지 J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.

공사구간 교대통행 동적제어 알고리즘 개발

Development of Work Zone Traffic Control Algorithm for Two Lane Road

박 현 진* · 오 철** · 문 재 필***

* 주저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 박사과정
** 공저자 및 교신저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 교수
*** 공저자 : 한국건설기술연구원 수석연구원

Hyunjin Park* · Cheol Oh** · JaePil Moon***

* Dept. of Transportation and Logistics Eng., Univ. of Hanyang
** Dept. of Transportation and Logistics Eng., Univ. of Hanyang
*** Korea Institute of Construction Technology

† Corresponding author : Cheol Oh, cheolo@hanyang.ac.kr

Vol.16 No.2(2017)
April, 2017
pp.23~35

ISSN 1738-0774(Print)
ISSN 2384-1729(On-line)
https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.2.23

Received 9 May 2016
Revised 7 June 2016
Accepted 27 February 2017

ⓒ 2017. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

교대통행은 2차로 도로에서 한 차로를 점용한 공사 시, 다른 한 차로를 교대로 사용하여 교통류를 처리하는 공사구간 교통관리기법이다. 신호수를 이용한 교대통행 교통관리 방안은 작업자의 안전문제와 방향별 통과 교통수요에 능동적으로 대처하는데 한계가 있다. 이런 잠재적 문제점을 해결하기 위한 하나의 방안으로 이동식 교대통행 운영시스템을 개발·적용하는 것이다. 본 연구에서는 이 시스템의 교통제어 기법을 개발하였다. 검지기에서 수집되는 방향별 교통량을 이용하여 공사구간 교대통행에 적용 가능한 교통제어 운영변수를 도출하고, 공사구간 내 차량의 존재 유무를 고려한 알고리즘을 설계하였다. 또한 교대통행 제어시스템의 운영효율성 극대화를 위하여 제어변수 최적화를 실시하였다. 최적화방안으로 유전알고리즘 기법을 적용하였으며, 적용 유무에 따른 지체시간을 산출하여 운영효율성을 평가하였다. 그 결과, 최적화를 시행했을 때 총 지체시간과 차량 한 대당 지체시간 모두 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 교대통행 동적제어 알고리즘을 통하여 교대통행 공사구간을 통과하는 차량에게 지체시간 감소효과를 기대할 수 있다.

핵심어 : 교대통행 공사구간, 교통제어, 알고리즘, 최적화, 운영효율성

ABSTRACT

Work zone traffic control is of keen interest because both traffic operations and safety performances are directly affected by traffic management methods. In particular, work zone traffic on two-lane roads needs to be managed in more efficient and safer manners due to its unique characteristics of alternative right-of-way assignment. This study developed a dynamic control algorithm that can be used for real-time operations of two-lane work zone traffic. The performance of the developed algorithm was evaluated by VISSIM microscopic traffic simulator. An applied programming interface (API) based program was developed to plug-in the control algorithm onto the simulator. The results demonstrated the feasibility of the proposed control algorithm for two-lane work zone.

Key words : Two-Way Work Zone, Safety, Traffic Control, Algorithm, Optimization

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

교대통행은 주로 2차로 도로에서 적용되는 도로 공사구간 교통관리방안으로 도로작업으로 인해 한 차로를 점용하여 양방향 통행이 불가능할 때, 다른 한 차로를 사용하여 교대로 교통류를 처리한다. 이때 임시교통통제시설로 신호 통제수 또는 임시 교통 신호등을 설치하여 운영할 수 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012).

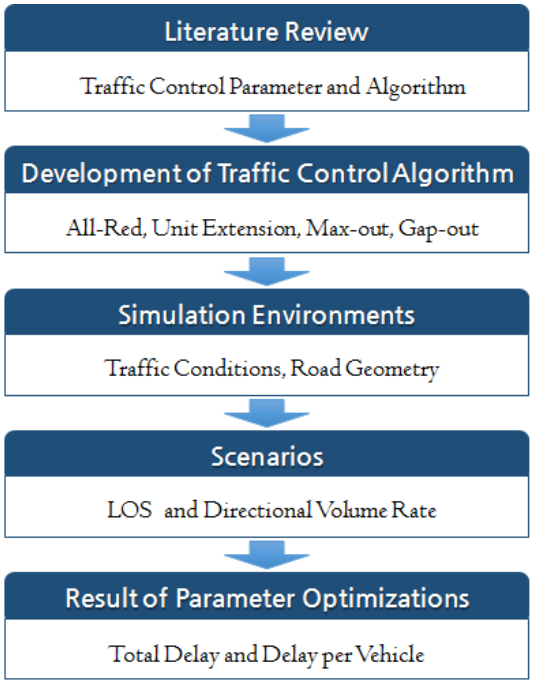
교통 통제수를 이용한 교대통행 교통관리의 경우, 작업자가 공사구간 진·출입부에서 수신호 또는 무전기를 이용하여 통행을 유도하고 있다. 이때 시거확보 및 무선불량의 문제와 작업자의 전문성 부족과 부주의로 인하여 차량의 통행안전을 충분히 확보하지 못하고 있는 실정이며, 통행속도 저하 및 지체의 원인이 되기도 한다. 또한 작업자가 도로에서 직접 교통통제를 하기 때문에 차량으로부터 노출된 위험이 상당히 높은 실정이다. 또한 교통 신호등 설치·운영 방안은 공사유형 및 도로·교통 조건에 따라 편익-비용측면에서 비효율적일 수도 있다.

실제로 2003년~2012년(10년간) 사이에 총 114건의 도로보수원 안전사고가 발생하였고, 이중 통행차량에 의한 교통사고가 51건이며, 사고피해는 부상 76명, 사망 10명으로 나타났다. 특히 사망사고 유형 중 차대사람 사고로 인한 인명피해가 9명으로 나타났는데, 이중 수신호 작업자가 3명으로 도로작업자에 대한 안전대책이 시급한 것으로 나타났다(Ministry of land, Infrastructure and Transport, 2013).

이처럼 기존의 수신호 작업자를 통한 교대통행 교통관리기법의 안전성 문제점 해결 및 작업 효율성 증진을 위해 FHWA(2009)에서는 PTS(Portable Traffic Sign)를 활용하여 운영하도록 제시하고 있다. 교대통행 상황에서 PTS의 운영효과에 대한 연구는 많이 진행되어왔으나(FHWA, 2009; Stout, 2013; Oregon DOT, 2013), 안전하고 효율적인 운영을 위한 PTS 운용방안에 대한 연구는 찾아볼 수 없었다.

교대통행 공사구간은 주로 지방부 2차로 도로에서 시행되는데, 이러한 도로의 교통조건은 일반적으로 교통량이 많지 않으며 일정하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 감응식 제어방식의 장점을 활용한 교대통행 동적 교통제어 기법을 개발하였다. 감응식 신호제어는 이미 결정된 주기 범위 내에서 교통상황 변동에 따라 신호제어변수를 미세하게 조정하여 교차로 안전성과 효율성을 높이는 제어방식으로 다양한 교통상황별 운영효율성이 뛰어난 장점을 가지고 있다(Korean National Policy Agency, 2011; Tarnoff et al., 1981; Lee and Lee, 1996).

공사장 교대통행 상황은 일반적인 교차로 환경과 다르기 때문에 교차로에서 통용되는 감응식 신호시스템 제어변수들을 그대로 적용하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 감응식 신호제어 시스템에서 사용되는 제어변수들을 교대통행 공사구간 의 교통관리에 적합하도록 수정 및 보완하여 동적 교통제어를 위한 알고리즘을 제시하였다. 교대통행 공사구간에서 동적 교통제어를 통하여 작업자에게는 안전한 공사환경을 제공하고 통과차량에게는 불필요한 정체를 줄이고자 하였다. 이를 위한 연구 흐름도를 <Fig. 1>에 도식화하였다.



〈Fig. 1〉 Study process

Ⅱ. 선행연구 고찰

1. 교대통행 공사구간 안전성 및 PTS 필요성

2003년부터 2012년 동안 국내에서 발생한 도로보수원 안전사고 중 통행차량에 의한 차대사람 사고로 9명이 사망하였는데 이중 3명이 신호수로 나타났다(Ministry of land, Infrastructure and Transport, 2013). 또한 국외에서도 이와 유사한 통계를 찾아볼 수 있었다. 미국 노동부의 통계자료(Bureau of Labor Statistics, 2013)에 따르면, 도로작업자의 교통사고가 442건 발생하였는데 이중 92건이 신호수 또는 교통통제를 하는 중 발생하였으며, 32명이 신호수였다. 이처럼 교통통제를 실시하는 도로작업자들은 도로에 노출되어있는 만큼 교통사고 발생 가능성이 높으며 사고 심각도가 매우 높은 것으로 판단된다.

미국 MUTCD(2009, FHWA)에서는 통제 신호수를 이동식 교통신호로 대체할 수 있으며, 이에 대한 이동식 교통신호의 시스템의 요구조건 및 교통관리 방안을 제시하였다. 우리나라 경찰청(Korean National Police Agency, 2013)에서도 교대통행 시 신호등을 설치할 수 있다고 제시하고 있지만, 구체적인 시스템의 필요조건 및 교통관리 방안은 제시하지 않았다.

미국 오리곤주(Oregon DOT, 2013)에서는 PTS를 운영하고 그 효과에 대한 보고서를 발간하였다. 이에 따르면 PTS는 교통량이 적을 때 공사구간에서 지체를 감소시키며 속도관리를 통하여 안전성을 높이는 효과가 있으나, 교통량이 많을 경우엔 지체 감소효과는 없는 것으로 보고되었다. 또한 Stout(2013)는 PTS가 신호수를 대체할 수 있으며, 이를 통해 작업자는 신호수 대신 다른 업무가 가능하여 작업장의 효율성을 향상시킬 수 있다고 주장하였다.

2. 동적 교통제어 및 제어변수 최적화 관련

동적 교통제어는 국내에서 개발한 COSMOS (Cycle, Offset, Split MOdel of Seoul) 시스템과 미국에서 제시하고 있는 NEMA(National Electrical Manufacturers Association) 시스템으로 분류할 수 있다. COSMOS 제어시스템은 검지기를 통해 교통정보를 소집하고, 그 상황에 적합한 통행시간을 산정하여 구동하는 시스템이다(Korean National Police Agency, 2010). COSMOS 시스템에서의 동적 교통제어 기능은 제한적으로 적용이 가능하나, NEMA 시스템에서는 전체 교통류에 대하여 제어가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 교대통행 공사구간 동적 교통제어 시스템으로 NEMA 교통제어 시스템이 적절한 것으로 판단하였다.

NEMA 교통제어의 주요 변수는 <Table 1>과 같이 최소녹색시간, 최대녹색시간, 단위연장시간, Gap-Reduction으로 구분되며, 이때 사용되는 교통제어 알고리즘은 주방향과 부방향의 차량 검지여부에 따라 통과시간을 부여하게 되며, 단위연장시간 이내에 다른 차량이 접근하게 되면 단위연장시간을 통과시간으로 추가하게 된다. 차량검지유부 및 통과시간 연장한계도달 여부에 따라 통행권을 대향차로의 차량에게 부여하게 된다.

일반적으로 교통신호시간 계획은 교통수요와 포화교통량 등을 추정하여 현시체계, 주기 등을 결정한다. 과거, 녹색신호시간을 결정하기 위하여 지체도 모형, 통과폭 모형 등 이론적 모형을 바탕으로 최적 시간을 도출하였으나(Ministry of land, Transport and Maritime Affairs, 2013; Manual Highway Capacity, 2010), 제어방법, 기하구조 형태 및 용량, 차량 및 보행자 교통량 등에 따라 달라지기 때문에, 모든 상황에서 동일하게 적용하기 어려웠다. 특히 특정 지역이나 지구 또는 간선도로 차원에서 차량의 지체 최소화, 대기차량 길이 최소화 등 효율적인 교통제어가 필요함에 따라 그 의미가 더욱 중요해졌다(Korean National Policy Agency, 2011).

최근 컴퓨터 성능의 발달에 따라 교통제어시간을 계산할 수 있는 다양한 프로그램과 기법들이 연구되어 왔다. 특히 유전 알고리즘은 생물의 진화과정을 기반으로 한 최적화 탐색방법으로, 진화가 거듭될수록 주어진 환경에 더 적합한 유전자들만이 남는다는 개념을 바탕으로 하고 있다. 또한 휴리스틱 지식이 요구되는 분야의 최적화 문제해결에 있어 다양한 분야에서 응용되고 있다.

Park et al.(1998, 1999, 2000)와 Lee et al.(2005)는 유전 알고리즘을 활용하여 교통제어 변수(신호시간, 주기, 현시)를 최적화 하는데 활용되기도 하였다. 국내에선 Kim et al.(1998)와 Kim(2002)가 퍼지 교통 제어기의 최적 함수를 도출하기 위하여 유전 알고리즘을 활용하였으며, Lee et al.(2000, 2001)와 Choi(2002)는 교차로 대기차량 및 지체도를 최소화하기 위한 최적 신호시간을 산출하기 위하여 유전 알고리즘을 적용하기도 하였다. Kesur(2009)는 유전 알고리즘을 이용한 실시간 교통대응 신호시스템 최적화 연구도 진행되었다.

〈Table 1〉 Key parameters for NEMA adapted control

parameters	content
Minimum Green Time	Green time for initial queue delay (Min. green time = Initial Green time + Unit extension)
Maximum Green Time	Maximum allowable extension green time
Unit Extension	Extend the green interval based on the detector status
Gap Reduction	allowable headways between vehicles from a starting value to a lesser value

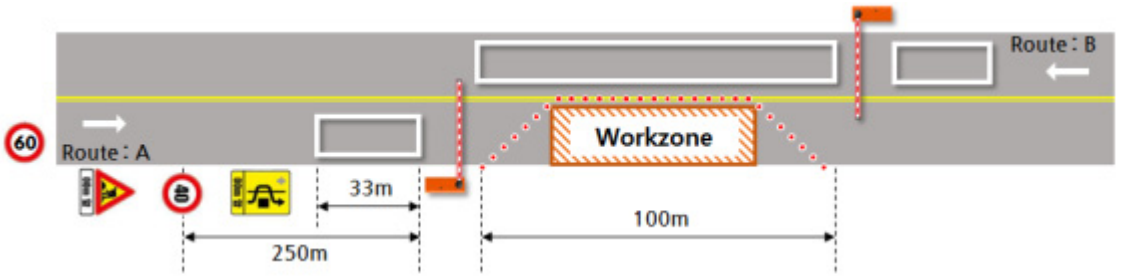
Ⅲ. 시뮬레이션 환경구현

실제 교대통행 공사구간에서 동적 교통제어 시스템 운영 및 실험을 하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 적용하여 동적제어 운영알고리즘의 운영효과를 평가하였다.

교대통행 공사구간 기하구조 조건 및 교통상황 변수는 도로 공사장 교통관리지침(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)을 검토하여 <Fig. 2>와 같이 설정하였다. 대상구간은 지방도이며 제한속도는 60kph이다. 공사구간에서의 제한속도는 40kph이며, 공사구간 길이는 100m로 가정하였다. 또한 모든 차량의 속도는 각 구간별로 가정한 제한속도에 준하여 주행한다.

동적 교통제어 시스템 운영을 위한 검지시스템은 접근로 대기행렬 차량대수, 공사구간 통과차량 존재 유무에 대하여 정확하게 검지한다고 가정하였다. 실제 교대통행 공사구간 현장에서 동적 교통제어 시스템 적용하기 위해서 검시시스템의 정확도는 매우 중요한 요소이다. 차량을 정확히 검지하지 못하면 운영효율성 저하는 물론이며 교대통행 구간에서 차량의 정면충돌 가능성이 높아져 교통안전 측면에서도 우려된다.

동적 교통제어 시스템의 검지영역 범위를 어떻게 설정하는지에 따라 초기통과시간, 단위연장시간, Gap-out, Max-out 상황판단 여부가 달라진다. 미국 FHWA(2008)에서는 감응식 신호시스템 운영 시 접근속도가 40kph일 때 루프검지기를 정지선으로부터 33m 이격하여 설치하도록 제시하고 있다. 이를 반영하여 본 연구에서는 <Fig. 2>와 같이 정지선으로부터 33m지점까지를 검지영역으로 설정하였다.



〈Fig. 2〉 Standard layout of workzone in a two-lane

Ⅳ. 분석방법론

1. 동적 교대통행 교통제어

본 연구에서는 일반적인 신호시스템의 운영제어 변수 및 운영 알고리즘을 수정・보완하여 교대통행 공사구간에서 동적 교통제어를 위한 운영 변수 및 알고리즘을 제시하였다.

또한 교대통행 동적 교통제어 시스템을 적용하기 위하여 다음과 같은 가정사항을 제시하였다.

- 검지시스템은 접근로 대기행렬 차량대수, 공사구간 통과차량 존재 유무에 대하여 정확하게 검지함
- 모든 운전자는 교통제어수단(신호기, 차단기, VMS 등)의 통제를 절대 준수하며 위반하지 않음

1) 교통제어 운영 변수

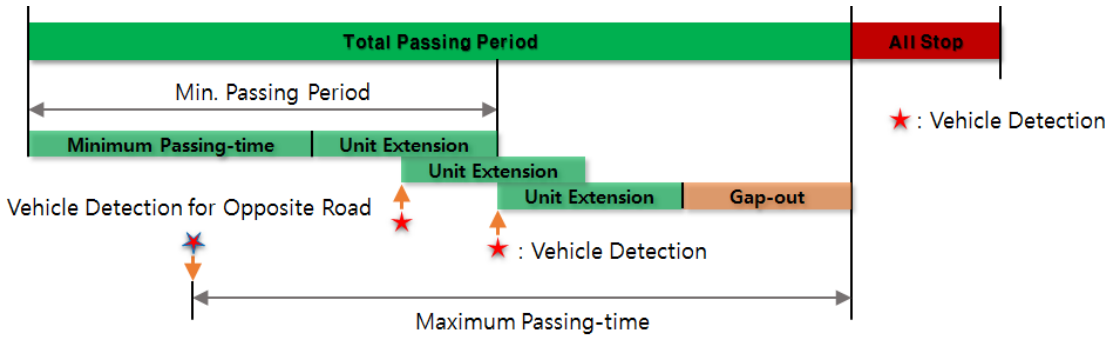
일반적인 신호시스템의 운영제어 변수는 초기녹색시간, 최소녹색시간, 단위연장시간 황색시간, 적색시간 등 다양하게 있다. 이들 중 교대통행 공사구간에 적절한 운영 변수를 도출하여 적용하였다. 본 연구에서는 교대통행 공사구간의 교통제어 운영 변수로 초기통과시간, 단위연장시간, 최소통과시간, 최대통과시간을 제시하였으며 <Table 2>와 <Fig. 3>에 변수의 의미와 개념도를 나타냈다.

특히 최대통과시간, 허용차두시간 변수는 교대통행 교통제어를 위한 핵심 운영변수로 연속으로 접근하는 차량군의 교통흐름을 유지하고 대향 차로에 대기하는 차량군의 지체시간을 최소화하는 것이 중요하다. 지나치게 짧을 경우, 공사구간으로 진입하는 차량군의 흐름을 방해하며 안전한 접근을 저해하는 요인이 된다. 반대로 지나치게 길 경우, 대향차로의 차량의 지체시간을 늘리며 대기행렬이 길어지는 요인이 된다.

또한 공사구간의 교통제어 운영 변수인 All Red 는 운영효율성 측면과 교통안전성 측면에서 모두 중요한 변수이다. All Red 시간을 짧게 운영하면 공사구간을 통과하는 차량과 반대편에서 접근하는 차량과의 정면 충돌이 우려되어 교통안전성 측면에서 문제를 야기하게 된다. 반대로 All Red 시간을 길게 운영하게 되면 공사구간에 진입한 차량에게 통과시간을 불필요하게 부여하게 된다. 이는 대기차량의 지체시간 증가 및 운전자의 신호준수 불이행 가능성 증가로 인한 운영·안전 측면에서의 문제를 야기하게 된다.

〈Table 2〉 Traffic control parameters

Variable	Descriptions
Initial Passing-time	▪ A phase timer that ends a phase when the time from the last detector output exceeds the timer setting. ▪ Perception Reaction Time + Saturation Headways × Number of Vehicle in Queue
Unit Extension	▪ The extension parameter extends the green interval for each vehicle actuation up to the maximum green. ▪ It begins timing when the vehicle actuation is removed; that is, when the vehicle passes over the detector. ▪ It is the passage time for vehicles to enter the work zone
Min. Passing-time	▪ Initial Passing-time + Unit Extension
Max. Passing-time	▪ A type of actuated operation for a given phase where the phase terminates due to reaching the designated maximum green time for the phase. ▪ After max. passing-time, provide all stop time for safety
Allowable Headway	▪ A type of actuated operation for a given phase where the phase terminates due to a lack of vehicle calls within a specific period of time ▪ When vehicle can not be detected in allowable headway, provide all stop time for safety
All Stop	▪ The period for vehicles to passing the work zone safely ▪ When vehicle can be detected in work zone, provide all stop time on end for safety

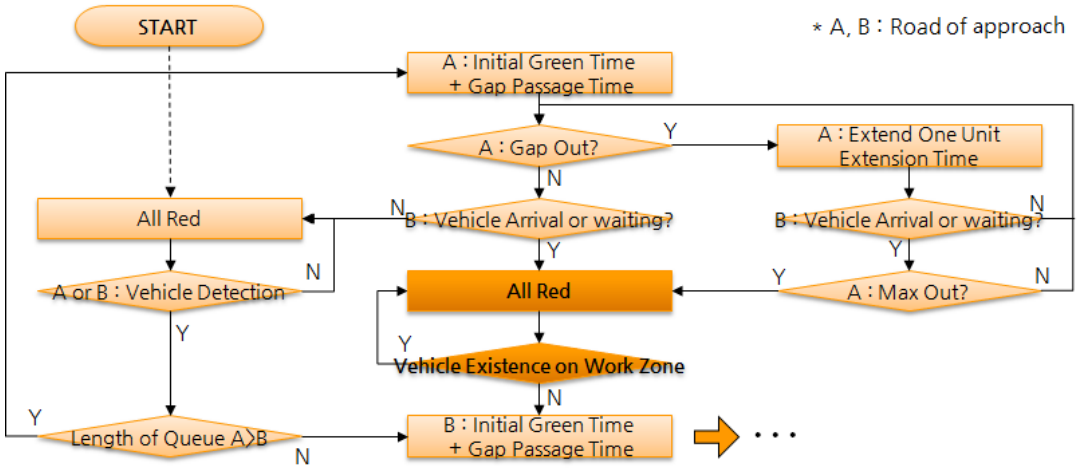


〈Fig. 3〉 Conceptual illustration of traffic control

2) 교대통행 제어 알고리즘

교대통행 동적제어 알고리즘은 미국의 NEMA에서 제시한 감응식 신호시스템 알고리즘(<Fig. 4>)을 고려하여 제시하였다. 특히 교대통행에서 공사구간 내 차량의 존재 유무는 진입 및 통과하는 차량들의 안전과 밀접한 관계가 있기 때문에 중요한 고려요소이다. 따라서 이를 반영한 교통제어 및 통제 알고리즘이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 감응식 신호시스템 알고리즘을 수정·보완한 공사구간에서의 교대통행 동적제어 알고리즘을 <Fig. 4>에 제시하였다.

초기 운영은 All Red로 시작한다. All Red동안 접근로별 접근하는 차량이 대기행렬을 생성하게 된다. 그리고 대기행렬 길이에 따라 통행 우선 접근로를 판단하고 초기통행시간과 허용차간시간을 부여하게 된다. 단위연장시간 이내 차량이 추가로 도착하게 되면 한 단위연장시간동안의 통과시간이 추가된다. 이때 반대편 접근로에서 차량이 검지되면, 기존의 통과시간이 부여된 접근로에서 연장한계(Max. Out)에 도달하였는지를 판단하며, 도달하였으면 All Stop 시간을 부여하여 공사구간에 진입한 차량들이 안전하게 완전히 통과할 때까지 시간을 연장한다. 그 후, 반대편 접근로에서 대기하는 차량에게 통행권을 부여한다.



〈Fig. 4〉 A proposed algorithm

2. 제어변수 최적화 방안

1) 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전 알고리즘에서 주어진 문제에 대한 가능한 해들은 각각의 개체가 되며, 이러한 개체는 개체군(population) 집합을 이루게 된다. 유전 알고리즘의 기본 연산자인 선택(selection) 연산자, 교배(crossover) 연산자, 변이(mutation) 연산자를 통해 최적해에 접근하게 된다. 유전 알고리즘의 유전 연산자별 다양한 기법들이 있으며, 적절한 연산자 및 초기 집단의 수와 교배 및 변이 확률을 결정해야 된다. 그렇지 않으면 조기 수렴의 위험이 발생하거나 해를 찾는데 오랜 시간이 소요될 수도 있다. 그렇다고 어떤 특정 연산자 기법 또는 파라미터 값이 우수하다고 하기는 어렵다.

유전 알고리즘은 활용분야 및 목적함수에 따라 적절한 연산 기법과 파라미터 값들이 다르다. 본 연구에서는 최적해를 도출하기 위한 연산자 기법 또는 파라미터 값을 찾는 것이 목적이 아니다. 따라서 <Table 3>에

제시한 바와 같이 유전 알고리즘 분야에서 일반적으로 사용되는 연산자 파라미터 값을 적용하였으며, 분석 도구는 MATLAB에서 제공하는 유전 알고리즘 Toolbox 기능을 활용하였다.

〈Table 3〉 Parameters of Genetic Algorithm

Parameters	Adopted values and method
Population Size	10
Selection Function	Roulette wheel
Crossover Rate	80%
Mutation Rate	0.5%

2) 최적화 적용 방안

본 연구에서는 교대통행 동적제어시스템을 최적화하기 위한 대상 변수로 단위연장시간과, Gap Out, Max Out 시간을 설정하였다. 목적함수는 Ministry of land, Transport and Maritime Affairs(2013)에서 제시하고 있는 교차로 서비스 수준 효과평가 지표인 지체시간을 사용하여 지체시간 최소화로 설정하였다. 거시적 분석에서는 임의성을 배제하고 차량 도착 분포로 균일분포함수를 이용하기 때문에 지체시간 산정식을 이용하여 산출한다. 그러나 미시적 시뮬레이션 프로그램은 개별차량의 지체시간 수집이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 미시적 시뮬레이션 프로그램에서 직접 수집되는 개별차량의 지체시간을 이용하여 총 지체시간을 산출하였다.

3. 시뮬레이션 수행

1) 시나리오 구축

교대통행 공사구간에 유입되는 교통량은 Ministry of land, Transport and Maritime Affairs(2013)에서 제시한 2차로도로 서비스 수준 A(650vph)일 때와 D(2600vph)일 때를 기준으로 설정하였다. 서비스 수준 A는 교대통행 기법이 교통량이 적은 지방부 도로 공사구간에 적용되기 때문에 시나리오 변수로 설정하였으며, 지방부 2차로도로의 설계 서비스 수준이 D이므로 이를 또 다른 시나리오 변수로 설정하였다. 또한 방향별 다양한 교통상황을 반영하기 위하여 방향별 교통량 비율을 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1로 구분지어 시나리오를 구성하였다.

위의 조건에 따라 교대통행 공사구간에서의 교통 조건에 따른 최적 신호시간 도출 시나리오를 <Table 4>와 같이 구성하였다.

〈Table 4〉 Simulation scenarios

Directional volume	LOS	
	A	D
1:9	Scenario 1	Scenario 6
3:7	Scenario 2	Scenario 7
5:5	Scenario 3	Scenario 8
7:3	Scenario 4	Scenario 9
9:1	Scenario 5	Scenario 10

2) 수행방안

본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 개별차량의 지체시간 자료를 수집하였다. 이를 통하여 시나리오별 총 지체시간을 산출하여 최적의 교대통행 동적제어변수를 도출하였다. 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 시나리오별 Random seed(난수) 값을 다르게 적용하였으며, 이 과정을 총 5회 반복 실시하였다. 실제 도로환경을 최대한 유사하게 구현하기 위하여 Warm-up time을 10분, Clearance time을 5분으로 설정하였다.

Ⅴ. 분석결과

1. 교대통행 동적제어 최적변수

공사구간 교대통행 동적제어를 위한 최적 운영시스템 변수를 도출하기 위하여 유전 알고리즘 기법을 적용하였다. 시나리오별 최적 변수를 도출하였으며, 분석 결과를 <Table 5>에 제시하였다.

교통조건이 LOS A(650veh)일 때 단위연장시간은 3.9~4.9초, 최대통과시간은 30.2~63.3초, 허용차두시간t은 3.4~5.3초가 최적 제어변수 값으로 도출되었다. 또한 교통조건이 LOS D(2,600veh)일 때 단위연장시간은 3.9~5.8초, 최대통과시간은 53.8~100.8초, 허용차두시간은 2.6~4.7초가 최적 제어변수 값으로 도출되었다.

교통량이 적을 때가 교통량이 많을 때보다 단위연장시간과 최대통과시간이 대체로 낮게 도출되었으며, 반대로 허용차두시간은 교통량이 많을 때 낮게 도출되는 경향을 보였다. 또한 단위연장시간과 허용차두시간은 교통량이 적을 때, 접근 교통량 비율에 따른 시간의 변동 폭이 적게 나타났다. 반면 최대통과시간의 경우, 접근 교통량 비율에 따른 최적 값의 변동 폭이 크게 나타났다.

유전 알고리즘 적용 결과, 도출된 최적 변수 값은 실수 값으로 실제 현장에 적용 시 어려움이 따를 수 있으므로 정수화하여 제시하였다. 서비스 수준 A일 때의 최적 정수 값은 단위연장시간 4초, 최대통과시간 42초, 허용차두시간 5초로 제시하며, 서비스 수준 D일 때의 최적 정수 값은 단위연장시간 3초, 최대통과시간 100초, 허용차두시간 4초로 제시하였다.

〈Table 5〉 Result of parameter optimizations

Traffic condition			Optimal value(sec)		
LOS	Volume (vph)	Directional volume Rate	Unit Extension	Max. Passing-time	Allowable Headway
A	650	1:9	4.9245	50.7289	5.1771
		3:7	3.9074	30.2783	5.2170
		5:5	3.9104	32.2783	5.1051
		7:3	4.8637	43.9109	3.4013
		9:1	4.0110	63.3089	5.3679
Average			4.3234	44.1011	4.8537
D	2,600	1:9	5.6128	100.8199	2.6973
		3:7	3.9415	54.9231	4.7188
		5:5	4.9576	95.2357	4.7426
		7:3	4.3638	53.8322	3.8733
		9:1	5.8865	95.4217	3.9753
Average			4.9524	80.0465	4.0015

2. 최적화 적용 결과(with GA vs without GA)

교대통행 동적제어를 위한 최적 변수의 효과를 분석하기 위하여 유전 알고리즘을 이용한 최적 변수 값을 적용했을 때와 일반적으로 사용되는 제어변수 값을 적용했을 때의 총 지체시간을 비교하였으며, 그 결과를 <Table 6>과 <Fig. 5>에 제시하였다.

서비스 수준 A의 교통조건인 경우, 유전 알고리즘을 적용한 최적 동적 교통제어 변수 값을 사용한 평균 총 지체시간은 약 1,457초로 나타났다. 적용하지 않은 동적 교통제어변수 값을 사용한 평균 총 지체시간은 약 1,674초로 총 지체시간 대비 약 13%(216초) 감소한 것으로 나타났으며, 이는 차량 한 대당 약 1.3초의 지체시간이 되는 것을 의미하며 한다.

또한 서비스 수준이 D의 교통조건의 경우, 최적 동적 교통제어변수 값을 사용한 평균 총 지체시간은 약 35,167초로 나타났으며, 적용하지 않은 값을 사용한 평균 총 지체시간은 약 37,078초로 나타났다. 이는 총 지체시간 대비 약 5.2%(1,911초) 감소한 것이며, 차량 한 대당 약 2.9초의 지체시간이 단축된 것을 의한다.

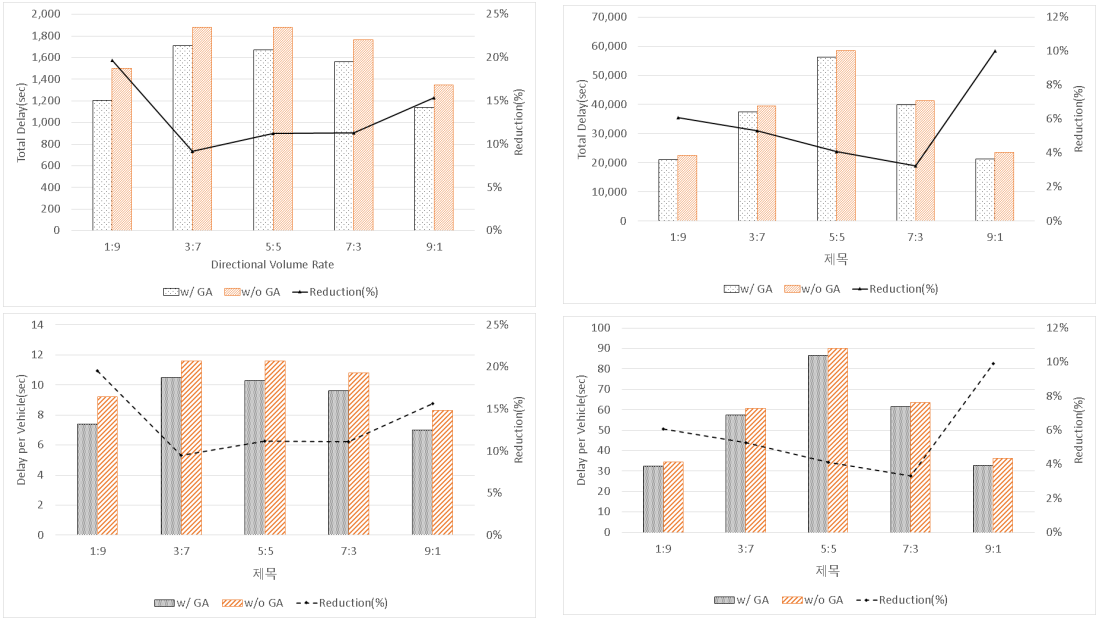
전반적으로 낮은 교통량 수준보다 높은 교통량 수준에서 총 지체시간이 더 많이 감소되었으며, 차량 한 대당 지체시간 감소량 또한 더 많이 감소된 것으로 나타났다. 또한 교통량과 관계없이 접근 교통량 비율의 차이가 클수록 운영 효율성이 높은 것으로 나타났다.

최적화를 통하여 도출된 변수를 적용했을 경우, 그렇지 않은 경우 보다 운영 효율성 측면에서 효과가 뛰어났다. 따라서 효율적인 동적 교통제어를 위해서는 실제 현장에 적용하기 이전, 시뮬레이션을 통하여 동적 교통제어 변수를 최적화하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

〈Table 6〉 Delay analyses by optimized parameters

Traffic conditions			Total Delay(sec)			Delay per vehicle(sec)		
LOS	Volume (vph)	directional volume Rate	w/ GA	w/o GA*	Difference(%)	w/ GA	w/o GA*	Difference(%)
A	650	1:9	1,204.9	1,500.4	-295.6 (-19.7)	7.4	9.2	-1.8 (19.7)
		3:7	1,708.7	1,880.8	-172.1 (-9.2)	10.5	11.6	-1.1 (9.2)
		5:5	1,668.4	1,879.5	-211.1 (-11.2)	10.3	11.6	-1.3 (11.2)
		7:3	1,563.4	1,762.0	-198.6 (-11.3)	9.6	10.8	-1.2 (11.3)
		9:1	1,140.3	1,346.8	-206.5 (-15.3)	7.0	8.3	-1.3 (15.3)
Average			1,457.1	1,673.9	-216.8 (-13.0)	9.0	10.3	-1.3 (13.0)
D	2,600	1:9	21,134.9	22,505.3	-1,370.4 (-6.1)	32.5	34.6	-2.1 (6.1)
		3:7	37,361.7	39,462.4	-2,100.7 (-5.3)	57.5	60.7	-3.2 (5.3)
		5:5	56,179.8	58,566.3	-2,386.4 (-4.1)	86.4	90.1	-3.7 (4.1)
		7:3	39,920.7	41,259.8	-1,339.1 (-3.2)	61.4	63.5	-2.1 (3.2)
		9:1	21,237.9	23597.6	-2359.7 (-10.0)	32.7	36.3	-3.6 (10.0)
Average			35,167.0	37078.3	-1911.3 (-5.2)	54.1	57.0	-2.9 (-5.2)

* without GA parameter : Unit Extension = 3sec, Max-out = 60sec, Gap-out = 3sec



〈Fig. 5〉 Comparison of Delay analyses

Ⅵ. 결 론

본 연구에서는 교대통행 공사구간에서 제기된 교통안전 및 운영효율성 문제에 대하여 이동식 동적 교통제어기 설치를 통하여 해결하고자 하였다. 현재 적용되고 있는 동적 교통제어에 대하여 검토 후, 벤치마킹 요소를 도출하였으며, 교대통행 공사구간에 적용할 수 있는 방안을 모색하고 기존의 교통제어 변수 및 알고리즘을 수정・보완하여 제시하였다. 또한 미시적 시뮬레이션을 활용하여 동적 교통제어 변수를 최적화하였다. 이를 통하여 운영효율성에 대한 효과를 평가하고 현장 적용가능성을 검토하였다.

교대통행 공사구간 동적 교통제어 변수로 단위연장시간(Unit Extension), 허용차두시간, 최대통과시간을 제시하였으며, 공사구간 내 차량의 존재 유무를 고려하여 교대통행 운영 알고리즘을 설계하였다. 교대통행 동적제어 시스템의 운영효율성 극대화를 위한 최적화 방안으로 유전 알고리즘 기법을 적용하였으며, 최적화 적용 유무에 따른 지체시간을 산출하여 운영효율성을 비교・분석하였다. 그 결과, 최적화된 교대통행 동적제어 변수 적용 시 총 지체시간과 차량 한 대당 지체시간 모두 감소하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 동적 운영제어변수 및 알고리즘을 적용할 경우 공사구간을 통과하는 차량의 지체시간 감소가 기대된다.

본 연구에서 제시한 알고리즘을 실제 현장에 적용하기 위하여 다음과 같은 기술적 제약사항 문제 해결 및 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 본 연구에서는 대기행렬 차량대수, 공사구간 통행차로 내 차량 존재 유무 검지를 정확하게 검지한다고 가정하였다. 이는 현재 기술수준을 고려했을 경우, 현실적으로 어려움이 있는 것으로 판단되나, 교대통행 공사구간에서 검시시스템의 기술적 정확도는 동적 교통제어 시스템 적용하기 위한 중요사항이다. 따라서 실제 현장 적용을 위해서는 검지시스템의 기술적 제약사항을 고려한 운영제어방안이 필요하다.

둘째, 모든 운전자들이 동적 교통제어 시스템의 정보를 쉽게 인지하고 준수해야하나 현실적으로 어려움이

따른다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용했기 때문에 모든 운전자들이 제어 수단의 통제를 따른다고 가정하였다. 이는 시뮬레이션에서 제어 수단의 통제를 준수할 수밖에 없는 한계로 시뮬레이션을 통하여 안전성을 평가하는데 제한적이다. 차량을 완벽히 통제하지 못하면 정면충돌의 위험이 우려되기 때문에 이를 반드시 고려해야 한다. 신호기의 경우, 인지하기 쉬우나 물리적으로 통제하지 않기 때문에 준수하지 않을 가능성이 있다. 반면, 차단기의 경우, 접근하는 차량이 차단기와 충돌할 가능성이 있기 때문에 사전에 인지할 수 있는 안내 시설이 추가로 필요할 것이다.

셋째, 교대통행 동적 제어변수 최적화에 대하여 시나리오별 분석을 수행하였다. 이는 특정 시나리오에 대한 최적화 변수를 도출한 것으로 서비스 수준과 접근비율 등 다양한 교통상황을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 특히 본 연구에서 유전알고리즘 적용 시 지역해에 수렴되지 않도록 5개의 Random seed 표본을 사용하였다. 향후 더 많은 표본을 사용하여 분석한다면 지역해에 수렴될 가능성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 최적화를 위한 목적함수로 지체만을 고려하였는데, 통과교통량과 통행속도를 활용한 다각적인 분석을 실시한다면 보다 최적화된 동적 교통제어변수가 도출될 것으로 판단된다.

넷째, 본 연구의 운영효율성 평가지표로 지체시간을 사용하였다. 이는 미시적 평가지표로 서비스수준과 접근 교통량비의 변화에 따른 시스템의 변화를 평가한 것이다. 본 연구에서 제시한 시스템의 거시적인 평가를 위해서는 대기행렬도(Queueing diagram)를 활용할 필요가 있다. 이 두 가지 분석방법을 활용한다면 보다 체계적이고 종합적으로 시스템 운영효율성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구는 미시적 시뮬레이션을 이용하여 교대통행 공사구간의 기하구조 및 교통조건에 대한 한 가지 여건만을 고려하였다. 그러나 실제상황에서는 기하구조와 교통상황, 공사유형이 다양하게 나타날 수 있다. 따라서 이러한 실제 현장을 최대한 반영할 수 있는 체계적인 분석방안이 필요하다. 또한 본 연구는 가상의 교통조건 및 기하구조조건을 고려하여 시뮬레이션 환경을 구현하였다. 향후 교대통행 공사구간 현장조사를 통하여 실제 교대통행 교통특성에 대한 자료를 수집하고, 교통류 시뮬레이션에 교통특성이 제대로 반영될 수 있도록 검증(Calibration 및 Validation)절차를 반영해야 한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(16TLRP-C096228-02)의 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

Bureau of Labor Statistics(2013), An analysis of fatal occupational injuries at road construction sites, 2003 - 2010. http://www.bls.gov/opub/mlr/2013/article/an-analysis-of-fatal-occupational-injuries-at-road-construction-sites-2003-2010.htm, 2016.03.12.

Choi W. S. and Lee Y. I.(2002), “Development of a Bi-objective Cycle-free Signal Timing Model Using Genetic Algorithm,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 20, no. 5, pp.81-98.

FHWA(2008), Traffic signal timing manual, Federal Highway Administration.

FHWA(2009), Manual of Uniform Traffic Control Devices.

Kesur, K. B.(2009), “Advances in genetic algorithm optimization of traffic signals,” *Journal of*

Transportation Engineering, vol. 135, no. 4, pp.160-173.

Kim B. M., Kim J. and Huh N. C.(2002), "Fuzzy Traffic Controller with Control Rules and Membership Functions Generated by Genetic Algorithms," *The Journal of Intelligence and Information Systems*, vol. 12, no. 2, pp.123-128.

Kim J., Kim B. M. and Kim J. Y.(1998), "Traffic Signal Control with Fuzzy Membership Functions Generated by Genetic Algorithms," *The Journal of Intelligence and Information Systems*, vol. 8, no. 6, pp.78-84.

Korean National Police Agency(2010), National Project for Advanced Traffic Operation and Management Final Report.

Korean National Police Agency(2013), Rule for Installation and Maintenace of Traffic Safety Facilities.

Korean National Policy Agency(2011), Traffic Signal Installation and Maintenance Manual.

Lee J., Abdulhai B., Shalaby A. and Chung E. H.(2005), "Real-time optimization for adaptive traffic signal control using genetic algorithms," *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, no. 3, pp.111-122.

Lee S. and Lee J.(1996), "Consideration of 24-hr volumes in selection of traffic signal control strategies for isolated intersections," TRR, 1553, TRB, pp.18-27.

Lee Y. I., Choi W. S. and Lim J. S.(2001), "Development of a Cycle-free Based, Coordinated Dynamic Signal Timing Model for Minimizing Delay (Using Genetic Algorithm)," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 19, no. 1, pp.115-129.

Lee Y. I., Lim J. S. and Yoon K. S.(2000), "Development of a Cycle-free Based, Coordinated Dynamic Signal Timing Model for Minimizing Queue-Lengths (Using Genetic Algorithm)," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 18, no. 2, pp.73-89.

Manual Highway Capacity(2010), HCM2010. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

Ministry of land, Infrastructure and Transport(2013), Development of Technique for Reducing Road Traffic Accidents.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012), Road Work Zone Traffic Control Guiding Principle.

Ministry of land, Transport and Maritime Affairs(2013), Guide on Road Capacity.

Oregon DOT(2013), Oregon Work Zone Safety Audit Summary Report.

Park B.(1998), "Development of genetic algorithm-based signal optimization program for oversaturated intersections," Ph.D. dissertation. Texas A&M University, College Station.

Park B., Messer C. and Urbanik T.(1999), "Traffic signal optimization program for oversaturated conditions: genetic algorithm approach," TRR, 1683, TRB, pp.133-142.

Park B., Messer C. and Urbanik T.(2000), "Enhanced genetic algorithm for signal-timing optimization of oversaturated intersections," TRR, 1727, TRB, pp.32-41.

Stout L.(2013), "Implementing Portable Traffic Signals in the Problem Work Zone," *IMSA Journal*, vol. 1, no. 2, pp.54-60.

Tarnoff P. J. and Parsonson P. S.(1981), Selecting traffic signal control at individual intersections, NCHRP Report 233.