

PSO-BFO 알고리즘을 통한 교통 신호 최적화 연구

A Study of Traffic Signal Timing Optimization Based on PSO-BFO Algorithm

안 흥 기* · 배 기 목**

* 주저자 : 퍼를리스 대학교 토목공학과 교수

** 교신저자 : 대진대학교 스마트건설환경공학부 교수

Hong Ki An* · Gimok Bae**

* Fac. of Civil Engineering & Technology, Universiti Malaysia Perlis

** Dept. of Smart-city Engineering, Daejin University

† Corresponding author : Gimok Bae, oneway@daejin.ac.kr

Vol. 22 No.6(2023)
December, 2023
pp.182~195

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.6.182>

Received 15 October 2023
Revised 24 October 2023
Accepted 9 November 2023

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

최근 인공지능 알고리즘을 활용한 교통 신호 제어에 관한 관심 증대와 함께, 관련 모델구축 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 독립 교차로를 대상으로, 교통량 변화에 연동되는 신호 주기 산정을 위한 이론 전개가 주를 이루고 있다. 본 연구에서는 신호제어 알고리즘 구축을 위한 실증 분석을 통해, 신호운영과 회전교차 방식의 실제 교차로를 대상으로 분석을 진행하였다. 기존 연구에서 많이 활용되는 GA와 PSO 알고리즘을 개선한 PSO-BFO 알고리즘을 제시하여 두 교차로의 운영 효과 증진을 위한 신호제어 방안을 강구 하였다. 그 결과, 158초의 신호 주기하에 신호 교차로의 경우, 용량 증대 3.4%, 지체도 및 정지횟수 감소는 각각 8.2%, 8.3%의 효과가 발생하고, 회전교차로에서는 용량증대 9.2%, 지체도 및 정지횟수 감소가 각각 7.1%, 27.2%에 이르는 효과가 발생하는 것으로 나타났다.

핵심어 : PSO-BFO Algorithm, 신호최적화, VISSIM

ABSTRACT

Recently, research on traffic signal control using artificial intelligence algorithms has been receiving attention, and many traffic signal control models are being studied. However, most studies either focused on independent intersections or are theoretical studies that calculate signal cycle length according to changes in traffic volume. Therefore, this study was conducted on a signalized intersection - roundabout in Gajwa-ro. The Particle Swarm Optimization - Bacterial Foraging Optimization (PSO-BFO) algorithm was proposed, which is developed from the GA and PSO algorithms for minimizing congestion at two intersections. As a result, optimum cycle length was determined to be 158 seconds. The *Verkehr In Städten - SIMulationsmodell* (VISSIM) results showed that there was 3.4% increased capacity, 8.2% reduced delay and 8.3% reduced number of stops at the Gajwa-ro signalized intersection. Additionally, at the roundabout, a 9.2% increase in capacity, a 7.1% reduction in delay, and a 27.2% decrease in the number of stops was observed.

Key words : PSO-BFO Algorithm, Traffic signal control Optimization, VISSIM

I. 서 론

1. 배경 및 필요성

도시화의 가속화에 따라 도로교통의 수요와 공급의 갈등이 급증하고 있으며, 교통혼잡은 도시개발에 영향을 미치는 주요 문제가 되고 있다 (Arel et al., 2010). 현대사회에서 자동차의 급격한 증가, 교통시설의 지체, 관리 미비 등으로 인해 교차로의 교통체증 문제가 더욱 심각해지고 있으며, 이는 도시 도로망의 용량에 영향을 미친다고 할 수 있다 (Sun et al., 2018). 특히 차량의 분기, 합류, 교차가 지속적으로 반복되는 교차로에서는 병목 현상이 가중되어 도시의 도로교통 기능을 제한하게 된다 (An et al., 2016). 따라서 도시 교통의 정상적인 운영을 유지하기 위해서는 교통통제 및 관리를 강화하고 교차로의 용량을 증가시키기 위한 노력이 필요하다.

1970년 이전에는 열악한 교통 인프라를 고려하여 교통학자와 실무자들은 주로 물리적 교통시설의 공급에 중점을 두게 되었다 (Cracknell 2000). 그러나 최근에는 새로운 시설물 공급, 특히 도로 확장도 중요하지만 기존 시설을 개선하여 혼잡을 최소화하는 교통관리에 대한 새로운 이해와 접근을 시도 중이다. 이는 새로운 교통시설물은 일시적으로 혼잡을 최소화할 수 있지만, 결국에는 더 많은 장래 수요를 끌어들이기 때문이다 (Hymel et al., 2010).

교통관리 측면에서 신호 주기 및 현시길이의 최적화는 도시 교통 혼잡을 완화하고 도시 교통 운영의 효율성을 향상시키는 대안으로 대두되었다. 1958년 Webster의 최적주기 이후 교차로 용량을 향상시키기 위한 주기 및 현시길이에 대한 연구는 지속적으로 진행되었다 (Sun et al., 2018). 그 결과 신호주기의 최적화를 통한 도시 교통 운영의 효율성은 점차 향상되고 있지만 여전히 교차로 주변의 정체 해소는 교통공학자들에게 큰 숙제라고 할 수 있다.

최근에는 Genetic Algorithm(GA ;유전알고리즘) 및 Particle Swarm Optimization(PSO ;입자군집최적화)로 대표되는 인공지능 알고리즘을 활용한 교차로 신호 최적화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 독립된 신호 교차로를 대상으로 신호 길이에 따른 효과를 분석하는 이론적인 연구가 대부분을 차지하고 있으며 연속된 교차로에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

특히 PSO는 초기화 - 목적함수 최적화 - 속도 및 위치 업데이트 - 적합성 평가 - 로컬 및 글로벌 탐색 - 최적화 반복의 과정을 수렴 기준이 충족될 때까지 계속한다. 이 과정에서 입자(Particle)는 정의된 목적함수를 최소화하는 방법을 향해 수렴하게 된다. PSO의 장점은 광범위한 솔루션 공간을 효율적으로 탐색하여 최적 신호 주기를 찾는 기능을 갖지만 최적해법(Global Optimum Point) 결정에 애로가 있다.

본 연구에서는 신호제어 알고리즘 구축을 위한 실증 분석을 통해, 신호운영과 회전교차 방식의 실제 교차로를 대상으로 운영 효과 증진을 위한 신호제어 방안을 강구 하고자 하였다. 이를 위해 오후 첨두시간 교통량 불균형으로 혼잡이 발생하는 가좌로 신호 교차로-회전교차로를 대상으로 지체 최소화를 위한 PSO-BFO(Bacterial Foraging Optimization ;細菌採餌최적화) 알고리즘을 제시하고 이를 바탕으로 최적주기 및 현시길이를 산정하고자 하였다. 분석에 필요한 교통신호 정보, 교통량 및 대기행렬길이는 2023년 8월 18일 관측된 자료를 활용하였으며 Matlab을 통한 최적신호, VISSM을 이용한 효과분석을 시행하였다.

II. 선행연구 고찰

1. 관련연구 동향

Han et al.(2016)은 독립된 신호 교차로를 대상으로 교통량 변화에 따른 최적 신호제어 알고리즘을 제안하였다. Vehicle-to-Everything(V2X) 통신환경을 통한 교통량 정보 및 VISSIM 소프트웨어를 활용하여 주기 및 현시를 분석하였다. 교차로의 교통량이 1500대/시 이상일 때는 제안된 신호 알고리즘이 더 우수한 것으로 밝혀졌다.

Han et al.(2018)은 Vehicle-to-Infrastructure(V2I) 통신환경을 통해 수집된 차량 정보를 이용하여 연속된 신호 교차로 제어 알고리즘을 개발하였다. 차량의 도착 정보 및 교통신호를 추정하는 알고리즘으로부터 도출된 주기길이, 현시 순서 및 길이를 바탕으로 효과평가가 수행되었으며 VISSIM 소프트웨어를 활용하였다. 연구 결과 제안된 알고리즘은 서비스 수준 A, C, F에서 각각 2%, 2%, 6%의 평균 제어 지체 감소 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

Jia et al.(2019)은 독립된 신호 교차로를 대상으로 지체시간, 용량, 배기가스 CO를 최소화 하는 다목적함수 최적화 방법을 제안하였다. Particle Swarm Optimization(PSO)를 활용한 알고리즘을 사용하였으며 Genetic Algorithm(GA) 및 non-dominated sorting genetic algorithm(NSGA II)과 비교 시 우수한 것으로 나타났다.

Qadri et al.(2020)은 GA 모형을 활용하여 교통신호에 의해 운영되는 회전교차로를 대상으로 최적 주기 및 현시 길이를 연구하였다. 75초, 90초, 120초, 140초의 주기 길이에 대기행렬, 지체도 연구 결과 75초의 주기 길이의 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다.

Kim and Jeong(2019)은 기존 심층 강화학습 알고리즘을 개선한 알고리즘을 제안하고 16개의 연속된 신호 교차로를 대상으로 평균 대기시간을 비교하였다. SUMO 시뮬레이션 결과 개선된 알고리즘은 기본 심층 강화학습 알고리즘보다 약 2배 가까운 대기시간을 단축시키는 것으로 분석되었다.

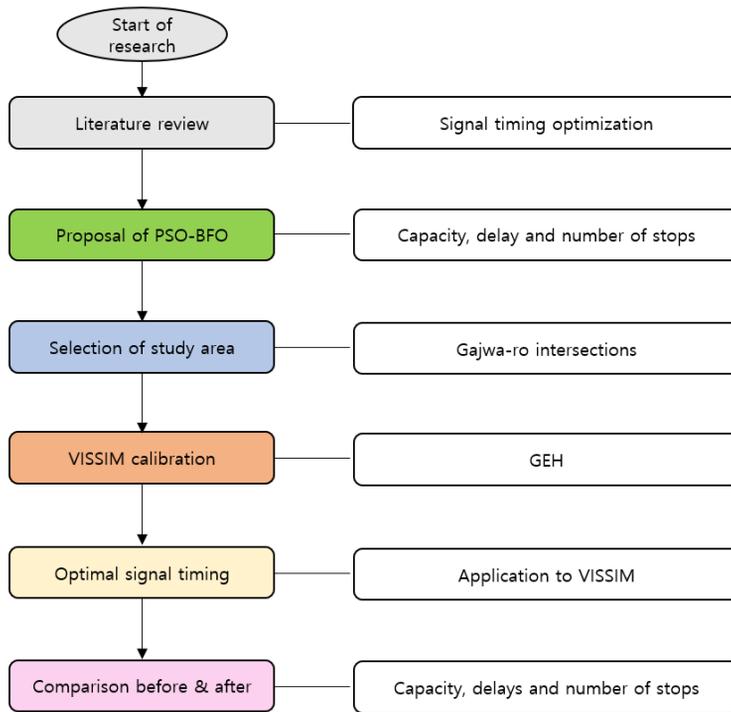
An et al.(2022)은 미터링기법을 적용한 독립된 회전교차로를 대상으로 Cuckoo search/Local search 알고리즘을 활용하여 최적의 주기길이 및 현시길이를 계산하였다. 알고리즘으로부터 도출된 신호정보는 Aimsun 시뮬레이션 모형을 활용하여 시행 전/후 대기행렬 길이를 분석하였다. 최적화된 주기길이 및 현시길이를 적용한 미터링 기법은 약 210미터의 대기행렬 길이를 감소시키는 것으로 나타났다.

2. 기존 연구와의 차별성

기존의 교통 신호 최적화에 관한 연구는 GA 및 PSO 알고리즘을 기반으로 한 연구가 다수를 차지하고 있다 (Jabbarpour et al., 2018). 대부분의 연구는 독립된 교차로를 대상으로 하고 있으며 연동된 교차로에 관한 연구는 실제 교차로를 대상으로 한 연구보다는 이론적인 개념을 바탕으로 한 연구에 집중되고 있다. 본 연구는 실제 오후 첨두시간에 혼잡이 발생하는 가좌로 신호 교차로-회전교차로를 대상으로 PSO-BFO 알고리즘을 활용한 다목적함수 최적화 연구를 진행하고자 한다. 교차로의 대기행렬, 용량은 알고리즘을 통해 도출된 최적 주기를 바탕으로 VISSIM을 활용하여 분석되었다. 또한 30-240초의 신호 주기 변화에 따른 두 교차로의 지체도와 정지 횟수를 분석하였다.

Ⅲ. 연구 방법

본 연구는 <Fig. 1>과 같이 총 6단계로 구분된다. 첫째 기존연구 고찰을 통해, 신호최적화 방안의 기본 방향을 설정한다. 둘째, PSO-BFO 알고리즘의 제시와 함께 용량, 지체도, 정지 횟수의 목적함수 및 제약조건 설정을 수행한다. 셋째, 분석 대상지를 선정하여 관련 조사(교통량, 대기행렬, 교통신호 정보 등)를 수행한다. 넷째, VISSIM을 활용한 교차로 모델링 과정을 진행하며, 모형정산을 위해 관측된 대기행렬과 정산된 VISSIM의 대기행렬 길이에 대한 분석을 수행한다. VISSIM의 신뢰도와 적합도 판단을 위해 Geoff E. Havers (GEH) 분석을 수행한다. 다섯째, PSO-BFO 알고리즘을 통해 도출된 최적 주기 및 현시 길이를 VISSIM에 적용하여 분석하며, 마지막으로 최적화 전/후의 용량, 지체도, 정지횟수의 비교 분석을 수행한다.



<Fig. 1> Flow chart of study

Ⅳ. 교차로 신호 최적화 알고리즘

1. 다목적함수 선정

본 연구는 최적의 신호 주기와 현시길이를 제공하여 연속된 교차로의 지체를 최소화하고 각 교차로의 용량을 증가시키는 데 중점을 둔다. 따라서 PSO-BFO 알고리즘을 활용하여 용량, 지체시간, 정지횟수 총 3개의 다목적함수를 최적화하는 신호 주기를 도출하고자 한다.

첫 번째 목적함수는 교차로의 용량이며 식(1)과 같이 각 현시에서 접근로의 최대흐름 비율을 나타낸다.

$$Q = \sum_1^n Q_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서, Q 는 교차로 용량, Q_i 는 현시 i 에서 용량.

$$Q = S_i \lambda_i \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S_i 는 현시 i 에서 포화교통류율.

두 번째 목적함수는 Webster의 지체시간이며 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = \frac{(C - \lambda_i)^2}{2(1 - \lambda_i X)} + \frac{X^2}{2v(1 - X)} - 0.65 \left(\frac{C}{v}\right)^{1/3} X^{(2+5\lambda)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, d_i 는 현시 i 에서 평균 지체시간(초), C 는 신호주기(초), X 는 교통량 대비 용량비율, 그리고 v 는 도착 교통량(대/시).

마지막 세 번째 목적함수는 정지 횡수이며 식(4), (5) 와 같이 설명된다.

$$H_i = 0.9 \frac{1 - \lambda_i}{1 - y_i} \dots\dots\dots (4)$$

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, H_i 는 현시 i 에서 차량 정지 횡수, y_i 는 현시 i 에서 포화도, q_i 는 현시 i 에서 교통량, 그리고 H 는 현시 i 에서 평균 차량 정지 횡수.

2. 제약조건

첫 번째 제약조건은 신호주기 길이이며 녹색시간과 손실시간의 합은 식(5)와 같이 총 주기 길이와 같아야 한다.

$$\sum_i^n (g_i + L_i) = C \dots\dots\dots (6)$$

여기서, g_i 는 현시 i 에서 유효 녹색시간, L_i 는 현시 i 에서 총 손실시간, C 는 주기 길이.

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 C_{\min} 은 최소 주기 길이(30초 적용), C_{\max} 는 최대 주기 길이(240초 적용).

따라서 용량을 최대화하고 지체시간과 정지 횡수를 최소화하는 목적함수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며 PSO-BFO 알고리즘을 통해 3가지 목적함수가 최적화되는 신호현시를 찾게 된다.

$$f = \min(a_1 d_{i_{\min}} + a_2 H_{i_{\min}} + a_3(1 - Q_{i_{\max}})) \dots\dots\dots (8)$$

여기서, 다목적함수 가중치 값 a_1, a_2, a_3 는 각각 0.4, 0.3, 0.3을 가진다.

3. PSO-BFO 알고리즘 제안

PSO 알고리즘(Particle Swarm Optimization)은 새나 물고기의 사회적 행동에서 영감을 얻은 모 집단 기반 최적화 기술이다. 최적화에 대한 잠재적인 해결책을 나타내는 입자 무리로 구성되며 최적의 해결책을 찾기 위해 검색 공간에서 이동하게 되는 열개를 가지는데 교통신호 최적주기 설정에 효과적 알고리즘으로 평가된다. 입자의 속도와 위치의 동적 변화는 물론 최적화 과정에서 극단 값을 기억하고 적합도 함수를 비교하여 입자를 업데이트할 수 있는 메모리 기능이 있다. 적합도 함수값이 전회보다 나빠지면 최적화 프로세스가 원래 위치로 돌아간다. PSO 알고리즘은 단방향으로 정보를 전송하며, 입자는 글로벌 최적 위치($gbest$) 또는 로컬 최적 위치($pbest$)에 따라 동적으로 조정된다. 현재 최적값에 따라 탐색 과정을 조정하므로 수렴 속도가 빠른 장점이 있지만 속도 업데이트를 위한 메모리가 필요하며 low quality의 최적화 값이 드물게 도출되기도 한다 (Rahman et al., 2016). 반복 프로세스에서 입자는 속도 V_{id} 및 위치 X_{id} 를 업데이트하며 식 (9), (10)과 같이 표기된다.

$$V_{id}^{k+1} = w V_{id}^k + c_1 r_1 (pbest - X_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest - X_{id}^k) \dots\dots\dots (9)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \dots\dots\dots (10)$$

여기서, w 는 관성 중량, c_1, c_2 는 학습요인, V_{id} 는 업데이트 속도, X_{id} 는 위치, r_1, r_2 는 난수, k 는 반복횟수.

BFO 알고리즘(Bacterial Foraging Optimization)은 최적화 문제를 해결하기 위해 E.coil 박테리아의 채집 행동을 모형화하는데 적용되었고 최근 다중 목적함수의 최적화에 널리 사용되고 있다. 간략하게 대장균 자체의 섬모와 박테리아 사이의 상호작용에 따른 정보 교환을 통해 박테리아를 더 높은 영양 농도로 만들어 최적의 해결책을 찾는 것이다. BFO 알고리즘은 무작위 방향성을 가짐으로 알고리즘 최적화의 방향성을 최소화하여 빠른 수렴의 장점이 있다. 또한 초기화에 대한 둔감, 쉬운 적용, 정확한 결과치 도출 등의 장점으로 교통신호 분석에 유효하다 (Chen et al., 2011). 식(11)과 (12)는 degree function과 위치 업데이트에 관한 식을 나타낸다.

$$J(i, j, k, l) = \mathcal{J}(i, j, k, l) + J_{\alpha}[\theta^i(j, k, l), P(j, k, l)] \dots\dots\dots (11)$$

$$\theta^i = (j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \Delta(i)}} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, $\theta^i(j, k, l)$ 은 i 번째 이동에서 k 번째 복제의 j 번째 박테리아의 위치, $C(i)$ 는 박테리아의 보폭이며 $\Delta(i)$ 는 임의의 방향 벡터 값으로 -1 에서 1 사이의 값이 무작위로 선택.

그러나 속도 업데이트 및 위치 업데이트가 PSO 알고리즘보다 복잡하며, 상대적으로 복잡한 계산이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 개선된 방법을 제안한다. PSO 알고리즘에서 식(9)는 BFO 알고리즘에서 $C(i)$ 를 업데이트하는 데 사용되며 식(10)은 BFO 알고리즘과 PSO 알고리즘의 조합을 구현하기 위해

$i(j, k, l)$ 를 업데이트하는 데 사용된다. 이는 BFO 알고리즘의 위치 업데이트를 단순화하고 속도 업데이트를 위치 $gbest$ 및 $pbest$ 와 결합하여 BFO 알고리즘이 최적의 솔루션을 빠르게 찾을 수 있도록 한다. 따라서 PSO-BFO 알고리즘을 통해 복제 프로세스 중 분산 프로세스를 증가시키고 화학주성의 전체 검색 기능은 최적의 목적함수에 대한 계산을 가속화 한다. 개선된 알고리즘은 식(13)과 같이 나타난다.

$$\theta^i = (j+1, k, l) = X_{id}^k + [w V_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{gd}^k - X_{id}^k)] \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \dots\dots\dots (13)$$

PSO-BFO에서 주기길이는 $G_i = (G1, G2, G3, G4)$ 로 나타나며 G_i 는 현시 i 에서 녹색시간, G_1, G_2, G_3, G_4 는 각각 현시 1, 2, 3, 4에서 녹색시간을 나타내며 식(6)과 (7)을 만족시킨다.

따라서 PSO-BFO 알고리즘을 통해 동적 환경에서 교통 신호 최적화는 아래와 같이 8단계로 구분된다.

- 1단계: PSO 및 BFO의 매개변수 초기화
- 2단계: PSO 알고리즘을 통해 최적화를 진행하며 개인 및 그룹 정보를 통해 $pbest$ 와 $gbest$ 를 초기화
- 3단계: 식(11)을 통한 전체 최적화 및 식(12)를 통한 적합성 함수 계산
- 4단계: 박테리아의 적합성 함수값 비교, 현재 값이 최종값보다 작으면 3단계로 복귀
- 5단계: Chemotactic 연산주기 결정
- 6단계: Copy 연산주기 결정
- 7단계: Migration 연산주기 결정
- 8단계: 최대 반복 횟수 도달 여부 결정, 도달하지 않으면 4단계로 복귀

V. 교차로 분석

1. 연구대상지 특징

분석 대상 교차로는 신호 교차로와 회전교차로가 연동된 이천시 가좌로 교차로를 대상으로 하였다. 신호 교차로는 동, 서, 남, 북측 접근로로 이루어져 있으며 남측 접근로는 회전교차로와 연결이 되어 있다. 두 교차로의 거리는 295m로 매우 근접해 있으며 오후 침두시 SK 하이닉스에서 퇴근하는 통근자와 더불어 증가하는 교통량으로 인해 신호 교차로 및 회전교차로에서 혼잡이 발생한다 <Fig. 2 참조>.



<Fig. 2> Congestion at Gajwa-ro roundabout

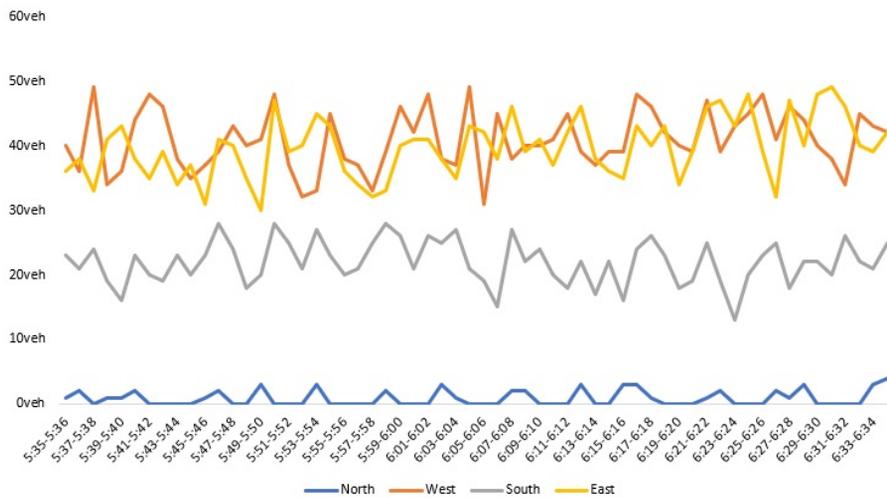
가좌로 신호 교차로 서측 및 동측의 경우 오후 첨두시간 450m, 280m의 대기행렬이 관측되었다. 회전교차로의 경우 남서측 접근로는 110m의 대기행렬이 관측되었으나 남동측 접근로는 교통량 불균형 현상으로 인해 약 550m의 대기행렬이 발생하였다 <Fig. 3 참조>. 결과적으로 신호 교차로 남측의 대기행렬 길이는 총 845m(295m + 550m)인 것으로 나타났다.



<Fig. 3> Queue length at study area

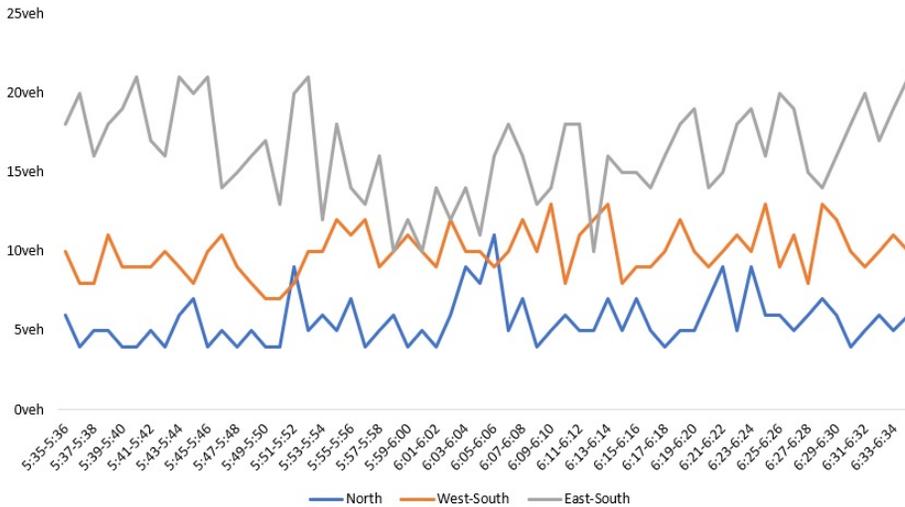
2. 교통량 및 신호 특징

오후 첨두시간(17:35~18:35) 가좌로 신호 교차로의 교통량은 총 6205대/시로 관측되었다. 신호 교차로의 중차량 비율은 20%, 회전교차로의 중차량 비율은 12%로 나타났다. <Fig. 4>와 같이 가좌로 신호 교차로의 접근로별 교통량은 북측 접근로의 경우 5대/분 미만으로 확인되며, 남측 접근로는 약 20대/분으로 나타났다. 그의 접근로에서는 30대/분에서 50대/분의 교통량 분포를 보인다.



<Fig. 4> Traffic volume at Gajwa-ro signalized intersection

<Fig. 5>와 같이 가좌로 회전교차로의 동일 시간 교통량은 1895대/시로 나타났으며 남동측 접근로를 통과하는 교통량이 976대/시로 가장 높게 관측되었다. 그다음 남서, 남동측 접근로 순으로 나타났다. 가좌로 회전교차로는 남동측 접근로에서 북측 접근로를 통과하는 교통량이 다른 접근로를 통과하는 교통량과 비교시 많으며 전체 회전교통량 대비 53%로 매우 높아서 교통량 불균형으로 인한 혼잡이 발생한다.



<Fig. 5> Traffic volume at Gajwa-ro roundabout

<Table 1>은 가좌로 신호 교차로의 현시 및 길이를 알려주는 것으로 4 현시로 구성되고 총 150초의 주기로 운영되고 있다. 동-서방향의 직진 교통량을 위한 녹색 신호가 110초를 차지하며 회전교차로와 연결된 남측 접근로는 상대적으로 짧은 15초의 녹색시간이 배정되었다. 따라서 회전교차로의 남측 접근로의 혼잡이 가중되는 것으로 보인다.

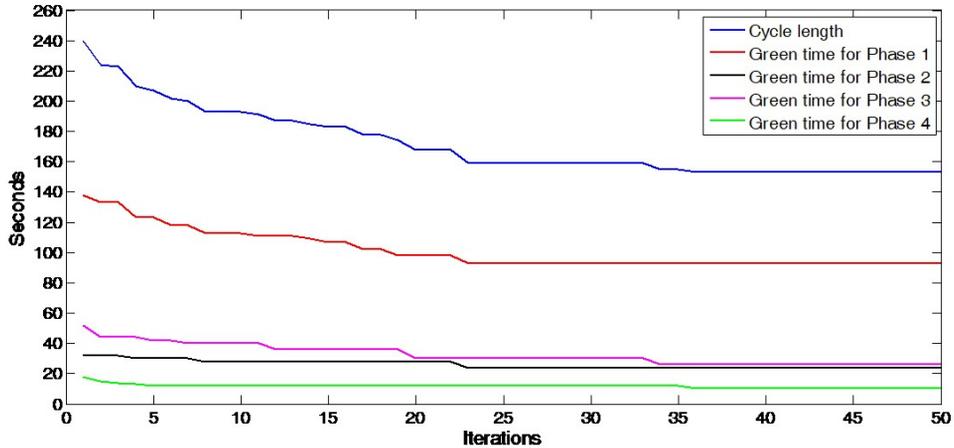
<Table 1> Design of phase scheme at Gajwa-ro signalized intersection

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Sequency				
Duration	Green 107s Yellow 3s	Green 7s Yellow 3s	Green 12s Yellow 3s	Green 12s Yellow 3s

VI. 분석 및 결과

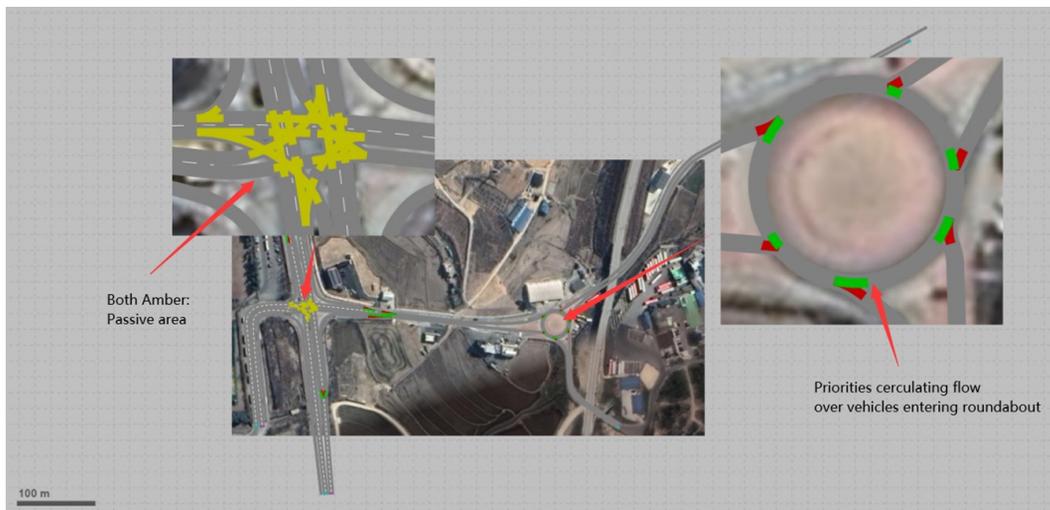
제안된 알고리즘은 연속된 두 교차로의 효율성을 극대화하기 위해 각 현시의 녹색시간을 탐색한다. <Fig. 6>은 각 현시에 필요한 최적의 녹색시간을 찾는 반복 횟수를 나타내며 36회 반복 후 158초의 주기 길이로 수렴이 되었다. 결과적으로 현시 1은 98초, 현시 2는 24초, 현시 3은 26초, 현시 4는 10초의 녹색시간이 산출

되었다. 총 주기길이는 기존보다 8초 증가하였으며 현시 1은 12초 감소, 현시 2는 14초 증가, 현시 3은 9초 증가, 현시 4는 5초 감소 되었다.



<Fig. 6> Number of iterations

PSO-BFO 알고리즘을 통해 도출된 주기 및 현시 길이는 VISSIM software를 활용하여 분석되었다. 아래 <Fig. 7>은 가좌로 신호교차로-회전교차로를 모델링 한 것으로 회전교차로에는 회전 차량에 우선권을 부여 하였다.



<Fig. 7> VISSIM modeling

또한 편중되지 않은 결과치 도출을 위해 5개의 Random Seed를 무작위로 선택하여 평균값을 사용하였다. VISSIM에서 도출된 대기행렬 길이는 수집된 대기행렬 길이를 기준으로 모형정산이 이루어졌으며 <Table 2>와 같은 주요변수를 보정하였다.

<Table 2> Adjusted values for VISSIM calibration

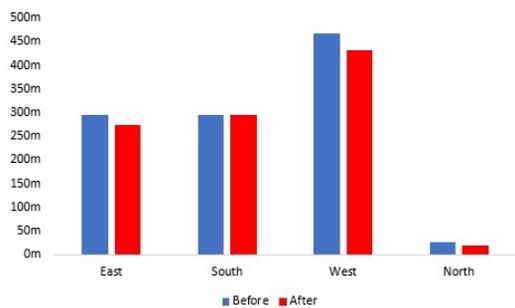
Parameters		Default value	Adjusted value	
Look ahead distance(m)	Minimum	0	110	
	Maximum	250	450	
	Number of observed vehicles	4	5	
Look back distance (m)	Minimum	0	35	
	Maximum	150	150	
Driving behavior parameter	Wiedemann 74 car following model	Average standstill distance (m)	2	1.5
		Additive part of safety distance	3	0.5
		Multiplicative part of safety distance	3	0.35
Lane change	Waiting time before diffusion (s)	60	50	
	Minimum headway (min)	0.5	0.3	
Lateral behavior	Desired position at free flow	Middle	Any	
	Observe adjacent lane (s)	No	Yes	
	Diamond shaped queuing	No	Yes	
	Consider next turn	No	Yes	

<Table 3>은 GEH를 통해 대기행렬을 분석한 것으로 각 교차로의 모든 접근로에서 GEH의 값이 5 이하로 나타났다. 가장 혼잡이 심한 회전교차로의 동남측 접근로는 2.89로 나타났고 최대 3.16의 GEH 값이 측정되었다. 이는 정산된 VISSIM의 결과값이 현장 데이터를 적절하게 반영하며 정산이 잘 이루어졌다고 할 수 있다.

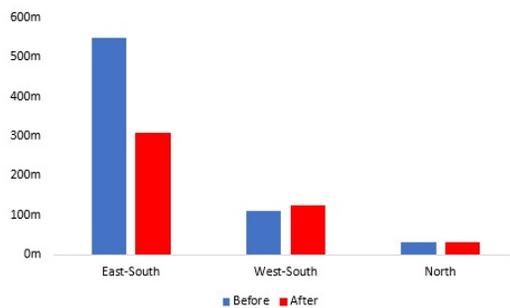
<Table 3> GEH for queuing lengths

Intersection	Approach	Queue from field	Queue from VISSIM	GEH	Description
Signalized Intersection	East	280m	315m	2.02	Accepted
	South	295m	330m	1.97	Accepted
	West	450m	475m	1.16	Accepted
	North	25m	20m	1.05	Accepted
Roundabout	North	30m	15m	3.16	Accepted
	East-South	550m	620m	2.89	Accepted
	West-South	110m	100m	0.97	Accepted

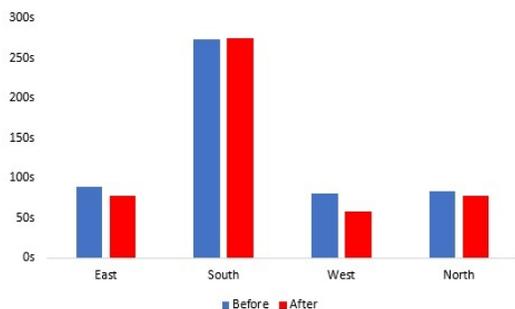
VISSIM을 통해 분석된 가좌로 신호 교차로와 회전교차로의 대기행렬 길이, 용량의 변화는 <Fig. 7~14>과 같이 나타났다. 최적화 이후 가좌로 신호 교차로의 대기행렬은 최적화 후와 비교 시 동, 서측 접근로의 대기행렬 길이가 감소하였고 북측 접근로의 대기행렬 길이는 소폭 증가하였으며 전체적으로 5.8%의 감소가 나타났다 <Fig. 8>. 회전교차로 남측 접근로의 대기행렬은 240m 감소하는 것으로 나타났으며 25.6%의 대기행렬이 줄어들었다 <Fig. 9>. 결과적으로 두 교차로에서 약 230m의 대기행렬 길이 감소 효과가 나타났다. 용량은 가좌로 신호 교차로에서 3.4% 증가, 회전교차로에서 9.2% 증가하였고, 지체시간은 8.2%, 7.1%의 감소가 각각 발생하였다. 정지 횟수 역시 8.3% (가좌로 신호 교차로)와 27.2% (회전교차로)에서 감소하였다. 결과적으로 용량, 지체시간, 정지 횟수 모두 회전교차로에서의 효과가 큰 것으로 분석되었다 <Fig. 10~15>.



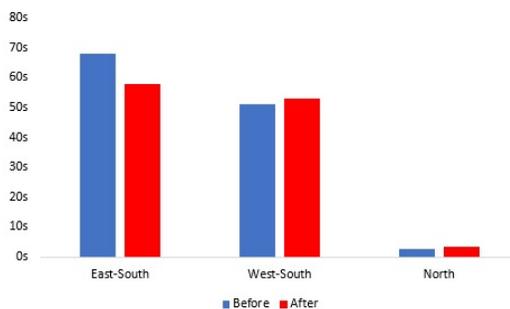
<Fig. 8> Queue at signalized intersection



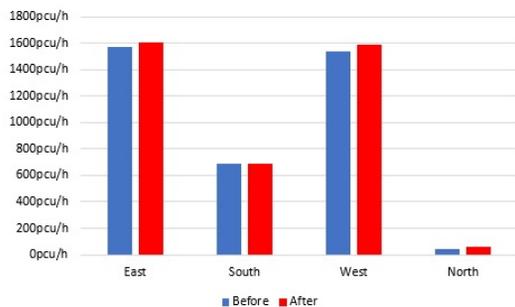
<Fig. 9> Queue at roundabout



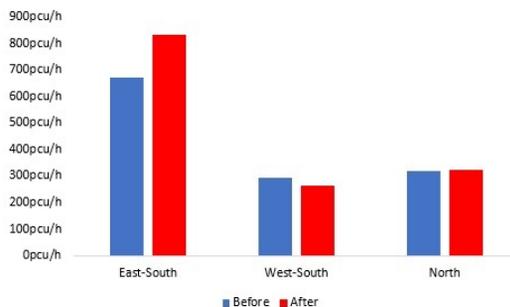
<Fig. 10> Delay at signalized intersection



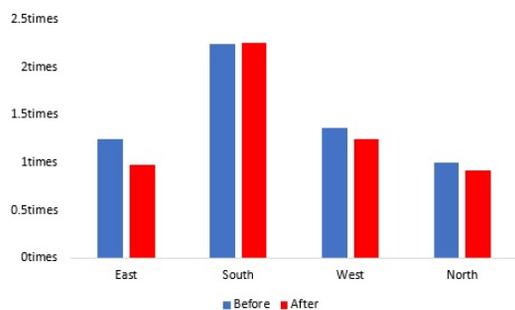
<Fig. 11> Delay at roundabout



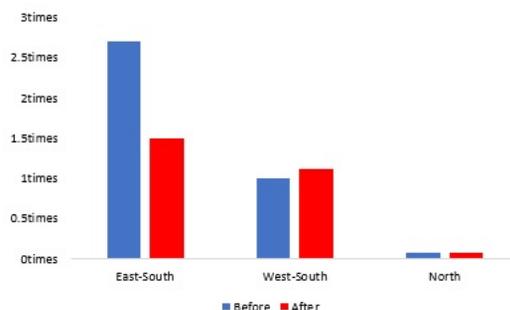
<Fig. 12> Capacity at signalized intersection



<Fig. 13> Capacity at roundabout

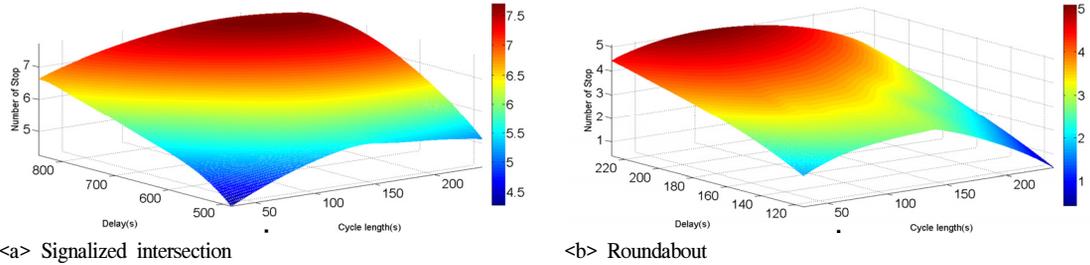


<Fig. 14> No. of stops at signalized intersection



<Fig. 15> No. of stops at roundabout

<Fig. 16>은 신호 주기의 변화에 따른 각 교차로의 지체시간, 정지 횟수를 분석한 결과이다. 신호 교차로 <Fig. 16(a)>, 회전교차로 <Fig. 16(b)> 모두 주기가 짧을수록 두 지표가 증가하며 혼잡이 발생하는 것을 볼 수 있다. 160초를 초과하여 240초에 가까워질수록 지체도 및 정지 횟수가 다시 증가하며 교차로 운영에 비효율적인 것으로 분석되었다.



<Fig. 16> Delay and number of stop following cycle length changes

VII. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 효과적 교차로 운영 알고리즘 제시를 위해 신호 교차로와 회전교차로가 연동된 도로를 대상으로 지체 최소화를 강구 하는 PSO-BFO 알고리즘을 제안하였다. 오후 침두시 회전교차로에서 심각한 혼잡이 발생하는 이천시 가좌로 신호 교차로-회전교차로를 대상으로 2023년 8월 12일 17:50-18:50 수집된 교통 신호 정보 및 교통량을 활용한 분석을 시행하였다.

그 결과 158초의 주기가 산정되었으며 이를 바탕으로 가좌로 신호 교차로의 경우 8.2%의 지체도가 감소 하였으나 회전교차로의 경우 9.2%의 용량이 증대되고 7.1%의 지체도가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 혼잡이 가장 심각한 회전교차로의 동남측 접근로는 22%의 용량 증대, 14%의 지체시간 감소, 31%의 정지 횟수 감소의 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 가좌로 신호 교차로의 주기가 짧을수록, 그리고 160초를 초과 하여 240초에 가까울수록 가좌로 신호교차로-회전교차로 전체의 효율성은 떨어지는 것으로 나타났다. 신호 교차로의 최적화를 통해 근접해 있는 회전교차로의 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 독립 교차로에서의 최적화 알고리즘에 의한 신호 교차로 운영방안 외에도 신호 교차로와 연동되는 회전교차로의 운영효율을 고려하는 방안을 강구 하였다. 이를 통해 상호 다른 유형의 교차로간 연동 운영효율을 높일 수 있는 실증적 분석 기틀을 제공할 수 있어 관련 연구의 기초가 될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 보다 다양한 분석을 위해 링 다이어그램과 National Electrical Manufacturing Association의 비교, 전통적인 Fully Actuated Control 및 Volume-Density Control과의 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

An, H. K., Liu, Y. and Kim, D. S.(2022), “Operational optimization at signalized metering roundabouts using cuckoo search/local search algorithm”, *Measurement & Control*, vol. 55, pp.1110-1123.

- An, H. K., Yue, W. L. and Stazic, B.(2016), “An Analysis of a Partially Signalized Roundabout using SIDRA 6 Software”, *Asian Transport Studies*, vol. 4, pp.314-329.
- Arel, L., Liu, C., Urbanik, T. and Kohls, A. G.(2010), “Reinforcement learning-based multi-agent system for network traffic signal control”, *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 4, pp.128-135.
- Chen, H., Zhu, Y. and Hu, K.(2011), “Adaptive bacterial foraging optimization”, *Abstract and Applied Analysis*, vol. 2011, pp.1-27.
- Cracknell, J. A.(2000), *Experience in urban traffic management and demand management in developing countries*, No. Final Report 2000.
- Han, E., Park, S. M., Jeong, H. Lee, C. and Yun, I.(2016), “The Development of an Algorithm for the Optimal Signal Control for Isolated Intersection under V2X Communication Environment”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 15, pp.90-101.
- Han, E., Yun, I., Lee, S. S., Jang, K. and Park, B.(2018), “Development of Real-time Traffic Signal Control Strategy for Coordinated Signalized Intersections under V2I Communication Environment”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 17, pp.59-71.
- Hymel, K. M., Small, K. S. and Dender, K. V.(2010), “Induced demand and rebound effects in road transport”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 44, pp.1220-1241.
- Jabbarpour, M. R., Zarrabi, H., Khokhar, R. H., Shamshirband, S. and Choo, K. K. R.(2018), “Applications of computational intelligence in vehicle traffic congestion problem: A survey”, *Soft Computing*, vol. 22, pp.2299-2320.
- Jia, H., Lin, Y., Luo, Q., Li, Y. and Miao, Y.(2019), “Multi-objective optimization of urban road intersection signal timing based on particle swarm optimization algorithm”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, pp.1-9.
- Khadhir, A., Vanajakshi, L. D. and Bhaskar, A.(2020), “A Microsimulation-Based Stochastic Optimization Approach for Optimal Traffic Signal Design”, *Transportation in Developing Economies*, vol. 6, p.19.
- Kim, D. H. and Jeong, O. R.(2019), “A Study on Cooperative Traffic Signal Control at multi-intersection”, *Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, vol. 23, pp.1380-1386.
- Qadri, S. S. S. M., Gökçe, M. A. and Öner, E.(2020), “State-of-art review of traffic signal control methods: Challenges and opportunities”, *European Transport Research Review*, vol. 2020, pp.1-23.
- Rahman, I., Vasant, P. M., Singh, B. S. M. and Abdullah-Al-Wadud, M.(2016), “On the performance of accelerated particle swarm optimization for charging plug-in hybrid electric vehicles”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp.419-426.
- Sun, L., Tao, J., Li, C., Wang, S. and Tong, Z.(2018), “Microscopic Simulation and Optimization of Signal Timing based on Multi-Agent: A Case Study of the Intersection in Tianjin”, *Korea Journal of Civil Engineering*, vol. 22, pp.3373-3382.
- Webster, F. V.(1958), “Traffic signal settings”, *Road Research Technical Paper*, pp.1-44.