

혼승 및 시간대별 학생들의 동적유입을 고려한 스쿨버스 경로 문제

이영기¹ · 정석재² · 윤호영¹ · 김경섭^{1*}

School Bus Routing Problem with Mixed-Load and Dynamic Arrivals

Young-Ki Lee · Suk-Jae Jeong · Ho-Young Yun · Kyung-Sup Kim

ABSTRACT

The School Bus Routing Problem(SBRP) seeks to plan an efficient schedule of a fleet of school buses that must pick up student from various bus stops and deliver them by satisfying various constraints; maximum capacity of the bus, maximum riding time of students, arrival time between a school's time window. By extending the existing SBRP, we consider a case study of SBRP with allowance of mixed-loading and dynamic arrivals reflecting the school bus operation of university in Korea. Our solution procedure is based on constructing the initial solution using sweep algorithm and then improving solution within the framework of the evolutionary approach known as efficient meta-heuristics. By comparing the various scenarios through the constraints relaxation for reflecting the real operational strategies, we assess the merit of our proposed procedure.

Key words : School Bus Routing problem, Mixed-Loading SBRP.

요약

스쿨버스 경로문제는 학생들을 다수의 승차지점으로부터 학생들의 해당 학교까지 안전하고 효율적으로 수송할 수 있는 방법을 찾는 문제이다. 일반적인 스쿨버스 경로문제의 제약 조건으로는 차량의 용량, 학생의 최대 수송 시간, 학교의 도착 시간 제약 등이 있다. 본 연구에서는 기존의 혼승을 허용한 스쿨버스 경로 문제를 확장한 모델을 구축하고, 국내의 대학교 스쿨버스 운영 형태를 고려하여 학생들이 승차지점에 유동적으로 유입이 되는 상황을 고려한다. 본 연구에서 제시하는 모델에 대한 실험을 하기 위하여, 첫 단계로 Sweep Algorithm을 이용하여 초기 경로를 구성한다. 두 번째 단계에서는 전역탐색 능력이 있는 메타 휴리스틱 방법인 Genetic Algorithm을 이용하여 최선해를 도출 한다. 또한, 기존의 스쿨버스 경로문제에 적용되었던 현실 가능성 있는 제약들을 완화하여 다양한 시나리오를 구성하고 시나리오별 비교우위 평가를 한다.

주요어 : 스쿨버스 경로 문제, 혼승 허용 차량 경로 문제

1. 서론

학생들을 출발지에서 학교로 안전하게 수송하는 문제와 정확한 시간 및 경제성을 고려하는 문제는 사회적으로 점차 중요성이 증대되고 있다. 이러한 사회적 배경으로 인하여 학계에서는 안전성, 정시성 및 경제성을 고려한 스쿨버스 경로문제가 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있다.

스쿨버스 경로문제(School Bus Routing Problem, 이하 SBRP)는 여러 지역에 거주하는 학생들의 승차지점으로부터 최종목적지인 해당 학교까지 효과적으로 이동시키는 계획문제를 다루며, 효율적인 학생 수송은 스쿨버스 운영 비용 및 학생들의 이동시간 등을 줄일 수 있다. SBRP는 Location-Routing Problem(LRP)의 범주에 속하는 것으로, 버스 정류소 결정문제, 버스 경로 결정 문제, 그리고 버스 스케줄링 문제 등을 포함하고 있다. 일반적으로 널리 알려진 차량 경로 계획 문제(Vehicle Routing Problem, 이하 VRP)와 유사한 점을 갖추고 있으나, 일반적인 VRP 문제에서는 수송하여야 하는 대상이 화물이지만, SBRP는 단순 화물을 다루는 문제가 아닌 학생의 수송을 다루는 문제이므로 VRP와는 다른 성격을 지닌 제약 조건을 필요로

접수일(2012년 12월 7일), 심사일(2013년 2월 17일), 게재 확정일(2013년 3월 25일)

¹⁾ 연세대학교 정보산업공학과

²⁾ 광운대학교 경영학부

주 저 자 : 이영기

교신저자 : 김경섭

E-mail; kyungkim@yonsei.ac.kr

한다 (Park and Kim, 2010). 일반적인 화물의 특성상 수송되는 시간적 제약이 크지 않지만, 학생은 스쿨버스에 탑승하여 이동할 수 있는 시간의 범위가 화물보다 크지 않다. 또한, SBRP에서 일반적으로 사용되는 제약 조건으로는 차량의 용량(Vehicle Capacity), 학교에 도착하여야 하는 시간의 범위(Time Window), 혼승(Mixed Loading), 그리고 환승(Transfer) 등이 고려될 수 있다. SBRP 문제 가운데, 혼승(Mixed Loading)을 허용하는 SBRP문제는 동일 차량에 여러 학교로 향하는 학생들이 동시에 탑승하는 것을 허용하는 것으로 최근 일부 연구에서 고려하고 시작하였다. 또한, 환승의 경우도 기존 SBRP 연구에서 거의 다루어지지 않은 주제로서, 환승이 허용되면 학생들은 목적지 학교에 도착하기 위하여 다수의 버스를 이용하는 것이 가능해진다.

본 연구는 기존의 SBRP 모델을 확장하여, 넓은 지역에 걸쳐 거주지가 분산되어 있으며, 대중교통(버스, 지하철 등)을 이용하여 목적지 학교로부터 인접한 지역까지 이동한 후 해당 학교의 스쿨버스를 이용하는 대학교 학생의 스쿨버스 문제를 다루고자 한다. 이는 기존의 SBRP에서 다루고 있는 형태인 승차지점에서 탑승하는 학생 수가 일정하다는 가정을 탈피하여, 대중교통(버스, 지하철 등)을 이용하여 스쿨버스 승차지점으로 학생들이 도착하는 상황을 반영하여 일정한 시간간격으로 승차지점에 대기하는 학생 수가 동적으로 변화하는 모형을 대상으로 한다. 또한, Park and Kim(2010)은 학생 수의 변동성이 높은 상황에서 각 학교는 자체적으로 스쿨버스를 운영함으로써 시간 및 경제적인 손실이 발생할 수 있다고 언급하고 있지만, 시간의 흐름에 따라 변화하는 학생 수를 최대한 탑승시키기 위해서는 인접한 다수 대학교의 스쿨버스를 통합적으로 운영하는 경우 효과가 높을 것으로 기대되어 이를 반영한 시나리오 모델을 구성한다.

대중교통 수단이 승차지점 도착 시간 간격을 고려할 경우, 시간대별 승차지점에 어떤 차량이 방문하는지가 중요한 고려요소가 될 수 있으며, 또한 스쿨버스의 수는 비용과 높은 연관성을 갖고 있으므로 차량의 수 또한 중요한 인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 근접한 학교간의 통합적인 스쿨버스 운영 전략과 혼승을 허용하는 스쿨버스 경로 문제를 대상으로 하고 있으며, 총 탑승학생 수와 버스의 총 운행시간을 목적으로 시간대별 상이한 수로 승차지점에 도착하는 학생들을 최대로 수송하기 위하여 특정 시간대에 어떠한 정류소를 방문하여야 하는지에 대한 스쿨버스 경로 계획 문제를 다루고자 한다. 문제 해법으로 2단계 해 개선 과정을 고려하였으며, Sweep Algorithm

을 이용하여 초기 해를 생성하고, 해의 개선을 위해 변형된 진화 알고리즘을 제안하여 혼승과 시간대별 변화하는 학생 수를 고려한 스쿨버스 경로 계획 문제를 풀었으며, 부분 탑승 허용, 승차지점에서 차량의 여러 시간대 대기 가능, 상이한 차량의 한 승차지점의 중복 방문 가능 등과 같은 현실적인 스쿨버스 운영 전략을 기초로 다양한 시나리오를 수립하여 각 시나리오들의 효과성을 검증하고자 한다.

2. 기존연구

SBRP는 1969년 처음 Newton과 Thomas에 의해 제시된 후 현실적인 제약조건을 추가하면서 여러 형태의 변형된 연구로 진행되어 왔다. 승차지점 결정문제는 학생의 탑승위치 결정 계획으로, 학생의 탑승위치가 각 학생의 거주지로 할 것인지 또는, 특정 위치를 선정하여 여러 학생을 한 지점까지 이동시킬 것인지를 결정한다. Bodin and Berman(1979), Desrosiers et al.(1986)등의 연구에서는 Location- Allocating-Problem 방법으로 우선 버스 탑승 위치를 결정한 후 학생을 할당하여 버스 스탑 간의 경로를 결정하는 문제를 풀었다. Bowerman and Calamai (1995)는 Allocating-Location-Problem 방법을 적용하여 우선 학생 거주지역을 먼저 클러스터링한 후 버스 스탑에 학생을 할당하는 방식을 적용하였다. Schittekat et al.(2006)는 혼합 정수계획법을 이용한 수리적 모델을 만들어 버스 정류소를 결정하였으나, 이는 단일 학교와 매우 작은 규모의 실험이 이루어졌다. 버스 경로 생성문제(Bus Routing Generation)는 스쿨버스의 경로를 일반화하는 문제이다. Bodin and Berman(1979)는 탑승지점 분류를 먼저하고 경로 계획을 후에 Traveling Sales Problem(TSP) 방법을 이용하여 모든 버스 정류소를 방문하는 것으로 적용하였으며, Bowerman et al.(1995)는 탑승지점 분류를 먼저하고 분류된 학생의 수송이 만족 되는 경로를 설정하는 방법을 적용하였다. School Bell Time Adjustment 문제는 대부분의 연구에서 시간을 결정변수로 두고 버스의 수를 줄이기 위하여 한 대의 버스로 최대한 많은 학생을 수송할 수 있는 시간을 찾는 문제에 대하여 연구가 되어왔다. Fugenschuh(2009)는 학생이 수송되는 시간을 고려하여 학교 시작 시간에 대한 스케줄링 문제를 정수계획법(Mixed Integer Programming)을 이용하여 풀었다. Route Scheduling은 주어진 시작과 끝나는 시점 내에 버스의 경로를 설정하는 문제이다. Berman(1979)는 School Time Window를 분할하여 경로를 결정한 후 다시 합치는 방법을 적용하였다. Spada et al. (2005)는 다수의 학교에 대하여 경로 결정

문제를 휴리스틱을 이용하여 풀었다. 학교마다 다른 시작 지점을 가지고 있다는 가정하에 Greedy Algorithm으로 경로를 우선 결정하고, Simulated Annealing 과 Tabu Search를 이용하여 경로를 통합하는 방식을 사용하여 풀었다. 하지만 SBRP는 NP-Hard 문제로서 수리 모형을 이용하여 최적해를 도출하기 어렵고 일부 작은 크기 문제의 해만 도출한 바 있다. SBRP는 문제의 크기가 증가할수록 최적해를 구하는데 소요되는 시간이 기하급수적으로 증가하기 때문에 작은 크기의 문제에 대해서만 최적해를 찾을 수 있다.

이와 같이 최적해를 구하는데 많은 어려움이 따르므로 문제의 크기가 큰 경우라도 적절한 시간 내에 근사 최적해를 얻기 위한 여러 가지 휴리스틱 기법들이 연구되고 있다. Park and Kim(2010)은 Sweep Algorithm(Gillett and Miller, 1974)을 개선하여 차량 경로 결정 후 Hungarian Algorithm(Kuhn, 1955)를 이용하여 차량 할당 그리고 이전에 얻은 결과를 Greedy Algorithm을 이용하여 결과를 도출 하였다. 이러한 휴리스틱 기법과 더불어 최근에는 Simulated Annealing(SA), Tabu Search(TS), Genetic Algorithm(GA), Ant Colony Optimization(ACO), 그리고 Neural Networks(NN)과 같은 메타 휴리스틱 기법이 경로 문제를 푸는데 많이 적용되었다. Spada et al.(2005)는 초기 해를 개선하기 위하여 SA와 TS를 사용하였으며, Ripplinger(2005)는 초기해 개선을 위하여 TS를 사용하였다. 이러한 많은 연구들은 앞서 언급된 작은 크기의 SBRP모형을 통하여 진행해오던 문제들을 보다 현실적인 문제로서 문제를 해결하기 위한 연구가 진행되어 왔다. Table 1은 목적식에 따른 SBRP 유형을 보여주고 있다.

효율성 측면에서는 버스의 경제성과 연관되어 버스 운행 시간의 최소화 및 버스 차량 대수를 최소화하는 연구가 진행되어 왔으며, Bowerman et al.(1995)가 대표적이다. 그들의 연구에서는 연간 스쿨버스의 총 운영 시간과 거리에 대하여 고려하였다. 즉, 적은 수의 버스 운영과 짧은 이동거리 및 시간을 효율성의 척도로 판단하였다. 유효성 측면에서는 학생

이 버스에 탑승한 상태에서 머무는 이동시간에 관한 것과 다수의 학생 거주지에 단일 버스 스탑 결정시 버스 스탑까지 학생이 걸어서 도착 하는 시간들에 대하여 연구가 진행되어 왔다(Li and Fu, 2002). 한편, 공평성 측면에서는 다수 버스의 적재량 균형 및 버스 운행시간 균형에 대하여 연구가 진행되어 왔다. 이러한 목적식에 따라 Bowerman et al.(1995)과 Li and Fu(2002)가 연구를 진행 하였다.

3. 연구 모형

본 연구에서는 여러 학교의 버스를 통합적으로 운영이 이루어지는 스쿨버스 경로 문제의 연구로 Mixed-Load SBRP(혼승 허용 스쿨버스 경로 문제)를 확장한 형태이다.

Mixed-Load에서는 한 버스에 동시에 여러 학교로 향하는 학생을 수송하는 것이 가능해진다. 학교별 정책적 문제로 인하여 대부분 개별적으로 스쿨버스를 운영하고 있으나, 지리적으로 근접한 지역의 스쿨버스를 통합하여 혼승이 허용되면 차량을 탄력적으로 운용할 수 있게 된다. Fig. 1은 혼승을 허용함으로써 버스의 수를 줄일 수 있는 예이다.

Fig. 1과 같이 2개의 학교와 7개의 승차지점이 있는 경우, 혼승을 허용하지 않는다면 2대의 버스가 요구되지만, 혼승 허용이 이루어짐에 따라 1대의 버스로 운영이 가능

Table 1. Performance indicators of SBRP

구분	내용
Efficiency	- 버스 운행시간 최소화 - 사용 버스 수 최소화
Effectiveness	- 버스를 탄 학생들의 이동 시간 - 버스 스탑까지 걸어서 이동하는 시간
Equity	- 버스 적재량 균형 - 버스 운행시간 균형

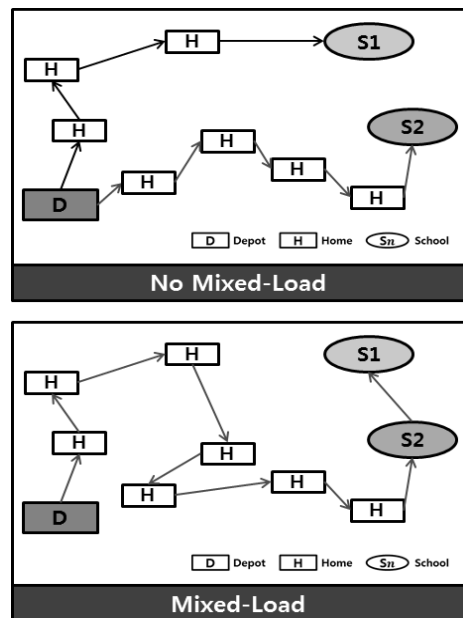


Fig. 1. Cases that allows mixed-load and NOT

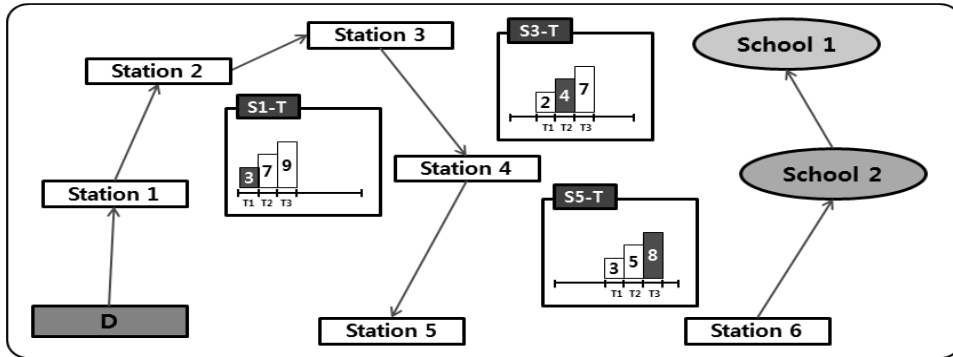


Fig. 2. SBRPMLDA

해진다.

본 연구는 기존의 Mixed-Load SBRP의 기본사항에서 승차지점에서의 학생들의 수가 시간의 흐름에 따라 변화하는 모델을 추가하여 탑승 학생 수를 최대화 하면서, 총 운행시간을 최소화할 수 있는 해를 구하고자 한다. Fig. 2는 본 연구에서 고려하는 확장된 Mixed - Load SBRP 모델인 SBRPMLDA (School Bus Routing Problem with Mixed-Load and Dynamic Arrivals) 모형을 보여주고 있다. 차고지에서 출발한 스쿨버스가 학생이 도착하는 대중교통 정류소를 방문한다. 이때 방문하는 정류소는 스쿨버스 방문 시간대에 따라 학생 수가 상이하게 된다. 이는 대중교통이 일정한 시간간격으로 정류소에 도착함으로써 기다리는 사람의 수가 누적되는 것을 반영한 모델이다. Fig. 2로 예를 들면 대중교통의 도착 시간 간격을 5분으로 가정했을 때, Station 1에 도착한 시간이 8시 05분(T1)이면, 정류장의 시간대별 도착 학생 수의 정보(S1-T)에 따라 3명의 학생을 탑승 시킨다. 만약 8시 10분(T2)에 도착을 한다면 이전 시간대에 도착한 학생 수와 현 시간대에 도착한 학생 수의 누적 학생 수가 정류소에서 대기하게 된다. 또한, 각 정류소의 시작 시간대는 대중교통의 흐름을 반영하여 상이하게 된다. 주어진 스쿨버스를 이용하여 방문하여야 하는 모든 정류소를 방문한 후 스쿨버스에 혼승되어 있는 학생들을 각 해당 학교로 수송하는 모델이다.

본 연구에서의 몇 가지 가정사항은 다음과 같다.

첫째, 각 대중교통 정류소에서의 대중교통 도착 간격은 동일하다.

둘째, 각 대중교통 정류소에서 대기하는 학생 수는 동일한 시간 간격에 따라 포아송 분포로 발생되며, 시간대가 변화함에 따라 누적 증가 한다.

셋째, 스쿨버스는 이기종 차량을 고려한다.

넷째, 각 스쿨버스의 학생 수송 용량은 스쿨버스의 용량을 초과할 수 없다.

다섯째, 각 대중교통 정류소는 한 번의 방문만을 허용한다.

여섯째, 각 스쿨버스는 차고지에서 출발하여 하나 이상의 대중교통 정류소를 방문하여야 한다.

일곱째, 학생이 버스에 탑승한 상태로 수송될 수 있는 최대시간은 제한되어 있다.

4. 연구 분석 절차

모형 구축을 위한 전반적인 순서는 다음과 같다. 실험 대상지역을 선정한 후 대상지역에 위치한 목적지 학교 및 지하철 역 그리고 임의의 차고지 간의 이동 시간 및 각 정류소에 도착하여 대기하는 학생 수에 대한 DB를 포아송 분포로 구축한다.

본 연구에서 제시한 SBRPMLDA 모델의 실험을 위한 초기 경로 구성을 Sweep Algorithm(Gillett and Miller, 1974)를 이용하여 초기 경로를 구한다. 초기 경로 구성 과정을 통하여 도출한 경로를 전역 탐색 능력이 있는 메타 휴리스틱 기법 중 하나인 Genetic Algorithm (Holland, 1975)을 이용하여 최적의 경로를 탐색한다.

4.1 초기경로 구성

Fig. 3은 Sweep Algorithm을 이용하여 구한 경로의 예를 나타낸 것이다. 차고지를 시작점으로 하고 차고지로부터 가장 가까운 지점을 첫 방문지로 선정한다. 그런 후에 경로에 포함되지 않은 승차지점 가운데 첫 방문지점으로부터 가장 가까운 지점과 목적지점을 포함하는 경로를 생성한다. 만약, 스쿨버스의 용량과 학생의 최대 수송 시

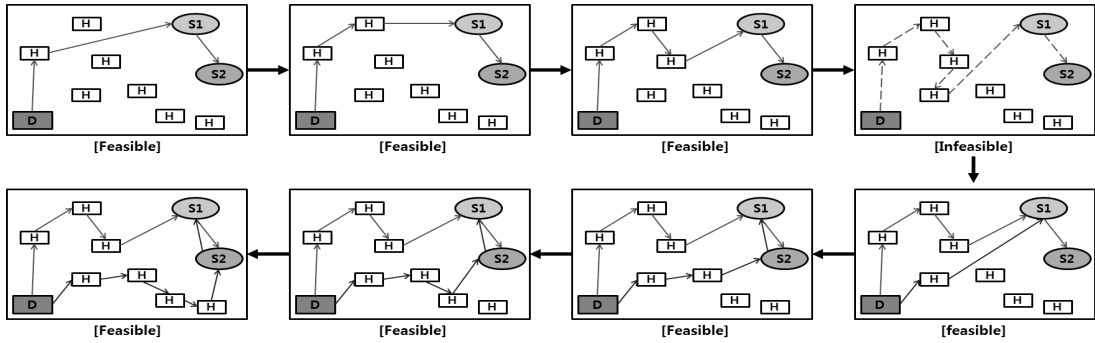


Fig. 3. Initial path generation by Sweep Algorithm

간 제약조건을 만족한다면, 첫 번째 방문한 승차지점으로부터 가장 근접한 거리에 위치한 정류소를 다음 방문지로 선정하고 제약조건을 위배사항을 다시 한 번 체크한다. 제약조건이 위배가 된다면, 이전까지 확정되었던 정류소를 최종 방문 지점으로 결정하고, 다른 스쿨버스를 추가하여 첫 번째 버스가 방문하지 않은 정류소 중에서 차고지로부터 가장 근접한 거리에 위치한 정류소를 두 번째 차량의 첫 방문 후보지로 선정한다. 이러한 방식으로 학생의 최대 수송 시간 제약 또는 차량용량을 초과하지 않을 때까지 작업을 반복 수행하여 모든 승차지점을 방문한다.

4.2 본 연구에 적용된 GA 절차

Sweep Algorithm을 통해 생성된 초기 경로의 개선을 위해 본 연구에서는 GA를 적용함에 있어, 2단계 교차 연산 과정을 고려하였다. 1단계 교차 연산은 스쿨버스의 방문 시간대를 교차하여 해를 탐색하는 과정으로 동일차량이 같은 정류소를 상이한 시간대에 방문하여 보다 많은 학생들을 탑승할 수 있도록 유도하였으며, 2단계 교차는 다양한 경로 탐색을 위해 해의 개선을 유도하였다. 본 연구에 적용된 유전자 알고리즘의 세부 절차는 Fig. 4와 같다.

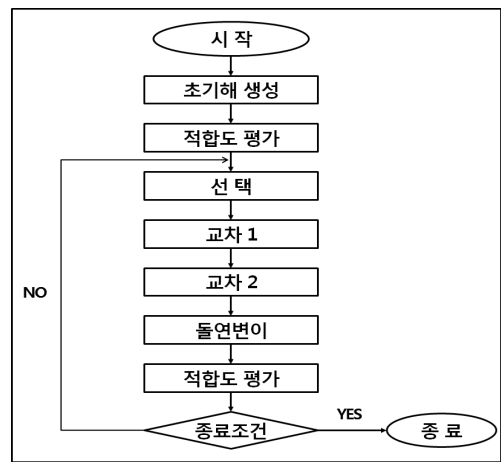


Fig. 4. Genetic algorithm procedure

4.2.1 유전자 표현

본 연구에서는 시간대에 따라 학생 수가 상이한 문제이므로 유전자 표현을 하나의 해가 방문 순서와 방문 시간대의 정보를 갖는 String 구조로 설정한다. 이는 정류소 간의 이동시 방문시간대에 따라 달라지는 학생 수를 반영할 수 있도록 다음의 Fig. 5와 같은 구조로 표현하였다. 여기서 A1은 A정류소의 첫 번째 시간대 방문을 의미하며, X~Z는 목적지점인 학교를 의미한다. 따라서, 한 대의 버스가 정류소 A의 1번 시간대 방문, 정류소 B의 2번 시간대 방문 그리고 정류소 C의 3번 시간대 방문을 순차적

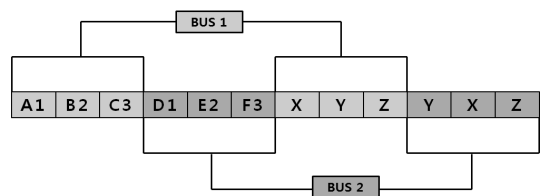


Fig. 5. Representation of chromosome

으로 방문한 후 목적지 X, Y, Z 순서로 이동하였음을 표현한 것이다.

4.2.2 초기모집단

이철문 (2005)은 GA에서 초기 모집단을 생성하는 방법은 크게 발견적 기법과 임의생성 방법들을 활용되는데, 발견적 기법에 의해 생성된 해들은 초기 수렴하여 해공간의 다양한 탐색을 방해하는 경향이 있고, 임의 생성방법

은 초기에 다수의 실행 불가능 해를 포함하고 있어 효과적인 해의 탐색이 어렵다고 언급하였다. 본 연구에서 초기 해는 하나의 실행 가능 해를 생성하고, 이 실행 가능해의 표현에 따라 임의생성 방법을 이용하여 실행 불가능 해를 감소시켜 효율적으로 해를 탐색하도록 유도하였다.

4.2.3 적합도 평가

본 연구의 목적함수인 총 수송 학생 수를 최소화과 버스의 총 운행시간 최소화를 순차적으로 고려하기 위해, 식 (1)과 (2)의 적합도 평가 식을 활용하였다.

$$fitness = \frac{\sum \text{특정 경로의 수송 학생수}}{\sum \text{해집단의 수송 학생수}} \quad (1)$$

$$fitness = \sum \text{버스의 운행시간} \quad (2)$$

4.2.4 선택

유전자의 선택은 개체들의 적합도에 비례하여 선택하는 대표적인 방법인 룰렛 휠 선택 방법을 적용하였다. 룰렛 휠 선택은 개체들의 적합도의 합을 계산하여 각 개체의 선택확률을 계산한다. 각 개체의 고유영역을 분할하여 선택 확률을 0에서 1사이 값으로 지정한다. 이러한 과정을 통해서 적합도가 높은 개체는 넓은 영역으로 인하여 선택될 확률이 높아지고, 적합도가 낮은 개체일지라도 작은 영역의 확률을 부여받기 때문에 우성인자의 조기소멸을 방지한다.

유전자 알고리즘의 진화과정 속에서 확률적 속성 때문에 아주 높은 적합도를 지닌 개체가 다음세대로 진화하지 못하고 소멸되는 경우가 있다. 이를 방지하기 위하여 엘리트 보존 전략을 사용하였다.

4.2.5 교차

본 연구에서 효율적인 해 개선을 위해 2단계 교차 연산을 활용하였다. 첫 번째 교차는 복수 점 교차를 통하여 정류소의 방문 시간대를 교차하여 다양한 해 공간을 탐색한다. Fig. 6은 방문 시간대 변화를 위한 교차의 예를 보여주고 있다.

방문 시간대 교차를 위해 Fig. 6과 같이 이점 교차 과정이 적용되었다. 선택된 두 부모 개체에서 교차율에 의해 교차의 실시여부를 결정한 뒤, 임의의 두 절단점을 선정하게 되며, O1은 P1에서 처음과 마지막 부분을 상속받고, P2에서 중간 부분을 상속받게 된다.

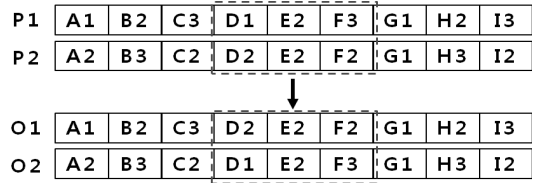


Fig. 6. 1st Crossover operator by each period

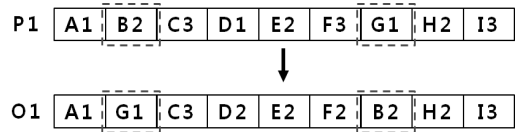


Fig. 7. 2nd crossover operator for path sequence changes

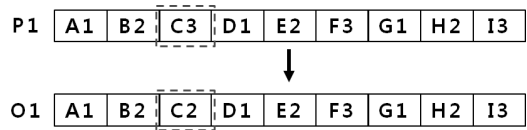


Fig. 8. Mutation operator by each period

2단계 교차과정은 차량 경로 순서를 교차한다. 차량 경로 순서를 교차함으로써 다양한 해공간의 탐색이 가능해진다. 차량 경로 순서의 교차과정은 일반적인 두 부모 개체의 교차 작업이 아닌 하나의 개체 내 경로의 순서를 교환하는 과정을 수행하였다. 이는 하나의 정류소에 대한 하나의 스쿨버스의 중복 방문을 제어하기 위함이다. 또한, 일반적으로 이러한 점 교차는 돌연변이 연산자에서 많이 사용이 되나, 본 연구에서는 경로 탐색의 다양성을 유지하고자 낮은 확률의 돌연변이 연산 보다 교차 연산을 하여 한 부모로부터 자손이 생성되는 교차 방법을 제시하였다. 그 예는 Fig. 7과 같다. 경로교차의 교차 방법은 임의의 두 점을 선택한 후 위치를 교환하여 주는 과정으로 경로 순서에 변화를 주었다.

4.2.6 돌연변이

본 연구에서는 실행 불가능한 해의 발생을 줄이기 위해, 돌연변이 연산을 수행함에 있어, 상이한 시간대를 가지는 동일한 유전자를 대상으로 점 돌연변이를 수행하였다. Fig. 8은 점 돌연변이의 예를 보여준다.

한편, 종료 조건으로는 GA를 수행하는 과정에서 현재 해보다 일정 횟수동안 해의 개선이 발생하지 않으면 종료하도록 설정하였다.

5. 사례 연구

본 연구 모형의 적용 가능성을 평가하기 위해 서울시 북서지역에 위치한 5개의 학교와 20개의 지하철역 그리고 임의의 지역에 위치한 차고지를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 대상의 각 지하철 역 명과 목적지 학교는 부록 1에서 소개하고 있다. 또한, 각 지하철역에서 시간대별 탑승하는 학생의 수를 사전에 포아송 분포를 이용하여 데이터를 수집하였다. 각 지하철의 상이한 T1의 시작 시점은 지하철의 흐름을 반영하였다. 또한, 각 역에서 기다리고 있는 학생들은 해당 학교에 대한 정보를 포함하고 있다. 이에 대한 자료는 부록 2에서 나타나 있다.

5.1 실험 조건 설정

본 연구의 실험에서 적용된 입력 자료는 Table 2와 같다.

Table 3은 3절 연구모형에서 언급된 가정사항을 반영한 기본적인 SBRPMLDA 모형에 대한 실험 결과를 보여

주고 있다. 실험 결과, 총 수송 학생수 391명, 스쿨버스의 평균 이동시간 37.7 분의 결과를 얻을 수 있었다.

5.2 제약 완화를 통한 시나리오 구성

본 연구에서는 현실적인 대안을 고려한 다양한 시나리오 구성 및 실험 결과를 비교 하고자 한다. Table 4는 본 연구의 실험을 위한 6가지 시나리오에 대한 설명을 나타낸다.

시나리오 2, 4, 그리고 6에서 적용되는 부분 탑승 허용

Table 2. Experimental conditions

구 분	설정 크기
Maximum Riding Time	45 분
Bus Capacity (총 학생의 100 %)	50 명
	30 명
# of Students	653 명

Table 3. Results of SBRPMLDA

번호	경로	수송 학생수	운영시간	차량 용량
1	차고지-무악재역-홍제역-명지대-연세대-이화여대	35 명	41.3 분	50 명
2	차고지-이대역-신촌역-서강대-홍익대-이화여대-연세대-명지대	44 명	31.67 분	50 명
3	차고지-홍대역-디지털역-명지대-연세대-이화여대-서강대-홍익대	33 명	40.1 분	50 명
4	차고지-망원역-마포구청역-중산역-명지대-연세대-서강대-홍익대	50 명	41.42 분	50 명
5	차고지-광흥창역-대흥역-서강대-연세대-이화여대-홍익대	45 명	30.75 분	50 명
6	차고지-충정로역-아현역-애오개역-이화여대-연세대-서강대	50 명	34.5 분	50 명
7	차고지-당산역-공덕역-서강대-연세대-이화여대-홍익대	50 명	39.92 분	50 명
8	차고지-합정역-상수역-홍익대-서강대-이화여대-연세대-명지대	45 명	37.75 분	50 명
9	차고지-독립문역-마포역-서강대-연세대-이화여대-홍익대	39 명	41.77 분	50 명

Table 4. A Scenario configuration

시나리오	학생수 변화	부분 탑승 허용	정류소 방문 허용 횟수	동일 버스의 재방문 허용	상이 버스의 재방문 허용
1 SBRPMLDA 모형	상이	×	1	×	×
2 부분 탑승 허용된 SBRPMLDA 모형	상이	○	1	×	×
3 동일 차량의 상이한 시간대 재방문 허용된 SBRPMLDA 모형	상이	×	N	○	×
4 동일 차량의 상이한 시간대 재방문 및 부분 탑승 허용된 SBRPMLDA 모형	상이	○	N	○	×
5 상이한 시간대 버스의 중복방문 허용된 SBRPMLDA 모형	상이	×	N	○	○
6 상이한 시간대 버스의 중복방문 및 부분 탑승 허용된 SBRPMLDA 모형	상이	○	N	○	○

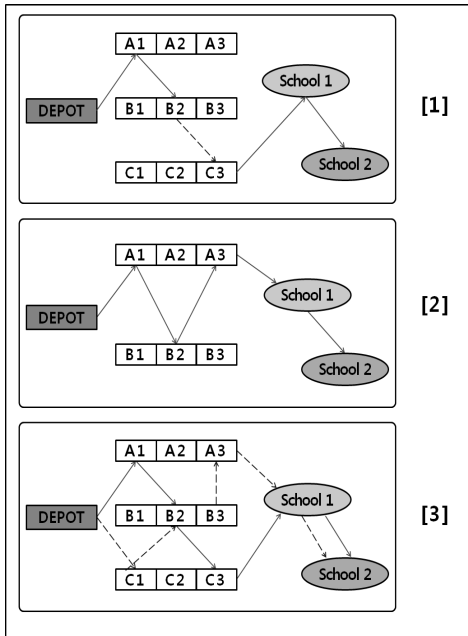


Fig. 9. The example of scenarios

이란 스쿨버스의 잔여 용량이 존재 하지만, 새로운 정류소를 방문 하였을 때 방문하는 정류소에 대기하는 학생 수가 스쿨버스의 잔여용량을 초과하더라도 방문을 허용하여 스쿨버스의 잔여용량 만큼 학생을 수송하는 모델이다. 이는 일반적인 SBRP모델에서 차량의 잔여 용량이 방문하고자 하는 탑승인원의 수보다 커야만 방문이 가능하다는 제약을 완화한 시나리오다. Fig. 9의 (1) 모델은 시나리오 2를 설명하는 것으로, B정류소의 두 번째 방문 시간 대까지 방문한 스쿨버스의 잔여용량이 3이고 C정류소의 3번째 시간대에 대기하고 있는 학생수가 5일 경우 잔여용량 3만큼 학생을 수송할 수 있는 상황을 의미한다. 또한, 시나리오 3에서 고려된 동일 차량의 동일 정류소 중복방문 허용은 시나리오 1에서 모든 정류소는 한번만

방문을 허용한다는 제약을 완화한 모델이다. 학생이 시간의 흐름에 따라 지속적으로 유입되기 때문에 한 정류소를 방문한 스쿨버스가 다른 정류소로 향하는 것보다 같은 정류소에서 여러 시간대에 걸쳐 학생들을 탑승할 수 있도록 함으로써, 더 많은 학생 수송이 가능할 경우를 고려한 것이다. Fig. 9의 (2)모델은 A정류소의 첫 번째 시간대를 방문한 스쿨버스가 B정류소의 두 번째 시간대를 방문한 후 다시 이전에 방문했던 A정류소의 세 번째 정류소의 유입되는 학생을 수송하기 위하여 재방문 하는 것을 설명한 모델이다. 시나리오 5는 시나리오 3에서 동일 차량만 중복 방문을 허용한 경우를 보다 완화하여 모든 차량에 대해 정류소의 중복 방문을 허용하는 모델이다. Fig. 9의 (3) 모델은 시나리오 5를 표현한 것으로, 실선으로 나타낸 버스의 경로와 점선으로 나타낸 버스의 경로가 동일한 정류소의 다른 방문 시간대를 방문할 수 있음을 보여주고 있다.

5.3 시나리오별 결과 분석

5.3.1 차량의 중복 방문 허용에 따른 효과분석

Table 5는 본 연구에서 제안한 SBRPMLDA 모형에 대해 차량 중복 방문을 허용할 경우의 효과를 검증하기 위한 실험 결과를 보여주고 있다. 먼저, GA를 통한 해 개선 효과를 검증하기 위해 Sweep Algorithm을 통해 도출된 초기 해와 GA를 통해 해를 개선한 결과를 비교하였다. 총 탑승 학생 수에서 358명에서 391명으로 약 9.2%의 개선 효과가 있는 것으로 나타나, GA를 통한 해 개선이 뚜렷함을 보였다. 한편, 차량의 중복 방문 허용에 대한 효과를 분석하기 위해 시나리오 1과 시나리오 3, 5를 비교하였다. 차량 중복을 허용하지 않는 시나리오 1에 비해 동일 차량에 대해 상이한 시간대에 재방문을 허용한 시나리오 3의 경우, 총 탑승 학생 수에서 약 4.3%, 버스의 평균 운행시간에 대해서는 5.8%의 개선 효과가 있는 것으로 보아 차량 중복 허용 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 5. Comparison of results according to duplicate visits of vehicles

구분	총 수송 학생수	평균 버스 운행시간	평균 승차율
Sweep Algorithm을 이용한 초기 경로	358 명	36.6 분	79.55 %
SBRPMLDA 모형(시나리오 1)	391 명	37.7 분	86.89 %
동일 차량의 상이한 시간대 재방문 허용된 SBRPMLDA 모형(시나리오 3)	408 명	35.6 분	85.00 %
상이한 시간대 버스의 중복방문 허용된 SBRPMLDA 모형(시나리오 5)	516 명	36.3 분	83.23 %

Table 6. Comparison of results by case that allow the partial boarding

구분	총 수송 학생수	평균 버스 운행 시간	평균 승차율
SBRPMLDA 모형	391 명	37.7 분	86.89 %
부분 탑승 허용된 SBRPMLDA 모형(시나리오 2)	393 명	39.1 분	98.25 %
동일 차량의 상이한 시간대 재방문 및 부분 탑승 허용된 SBRPMLDA 모형(시나리오 4)	431 명	38.1 분	95.77 %
상이한 시간대 버스의 중복방문 및 부분 탑승 허용된 SBRPMLDA 모형(시나리오 6)	544 명	37.9 분	90.66 %

한편, 앞서 언급한 버스의 통합 관리의 효과를 보기 위해 모든 차량에 대해 모든 승차지점에 중복 방문을 허용하는 시나리오를 검토해 본 결과, 중복 방문을 허용하지 않는 시나리오 1에 비해서는 약 32%의 총 탑승 학생 수 증가 효과가 나타났으며, 버스의 운행 시간 또한 미비하나 감소되는 효과를 볼 수 있었다. 또한, 동일차량만을 중복 방문 허용하는 시나리오 3에 비해서도 총 탑승 학생 수에서 408명에서 516명으로 약 26%가 넘는 개선효과가 있는 것으로 나타났다.

5.3.2 부분 탑승 허용에 따른 효과 분석

Table 6은 각 시나리오에 대해 부분 탑승을 허용할 경우에 대한 효과를 검증한 결과를 보여주고 있다. 시나리오 2는 시나리오 1에 부분 탑승만을 허용한 모형으로 총 탑승 학생 수가 일부 증가하지만, 버스의 운행시간이 1.4 분 증가하는 것으로 보아 비교 우위를 말하기 어려웠다. 하지만, 차량 중복방문과 부분 탑승을 동시에 고려하는 시나리오 4와 6의 결과를 보면, 동일차량의 중복방문과 부분 탑승을 허용하는 시나리오 4의 경우, 시나리오 1에 비해 버스 운행시간이 미미하게 증가하였지만, 총 수송 학생수 측면에서는 약 10% 이상의 개선 효과가 있는 것으로 나타났으며, 평균 승차율에서도 약 9% 증가되는 것으로 볼 수 있었다. 한편, 상이한 차량의 중복방문과 부분 탑승을 모두 허용할 경우(시나리오 6), 시나리오 1에 비해 약 40%에 가까운 증가를 볼 수 있었다. 따라서, 차량의 중복방문이나 부분 탑승을 허용하는 것이 실제 탑승 학생 수를 개선하는 데 큰 효과를 보임을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 기존의 혼승을 허용한 스쿨버스 경로 문제 (Mixed-Load SBRP)의 확장한 모델에 대한 검증으로 기존의 혼승을 허용한 스쿨버스 경로 문제의 승차지점에 한

번의 방문으로 모든 학생을 수송할 수 있는 모델을 시간의 흐름에 따라 동적으로 학생 수가 변화하는 모델을 구축하고 현실에서 실현 가능한 기존의 스쿨버스 경로문제에 적용된 제약사항들을 완화하여 다양한 시나리오를 구성하였다. 또한, 사례연구를 통하여 제약완화를 통한 시나리오별 비교우위를 평가하였다. 평가결과 기존의 스쿨버스 경로문제에서는 학생들의 승차지점에서의 대기 학생 수가 스쿨버스의 잔여용량을 초과할 경우 방문 하지 못하였던 제약을 완화하여 스쿨버스의 잔여용량만큼 학생을 수송하는 제약과 차량의 방문 허용 제약을 완화한 중복 방문 허용을 통하여 기본적인 SBRPMLDA 모델보다 약 26% 이상의 학생을 수송하는 결과를 도출 하였다.

추후에는 본 연구에서 제안한 SBRPMLDA의 현실 적용 가능성을 검증하기 위하여 더욱 큰 규모의 사례연구와 GA의 종료 시간을 계산하기 위한 추가적인 알고리즘 개발에 대한 연구가 이루어져 현실 가능한 스쿨버스 경로 문제에 대한 더욱 심도 있는 연구가 이루어 질 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Bodin, L.D. and Berman, L.(1979), Routing and Scheduling of School Buses by Computer, *Transportation Science*, Vol.13, pp.113-129.
2. Bowerman, Rm Hall., and Calamai, P.(1995), A multi-objective optimization approach to urban school bus routing : Formulation and solution method. *Transportation Research Part A*, Vol. 29, No.2 , pp. 107-123.
3. Desrosiers, J., Ferland, J. A., Rousseau, J. M., Lapalme, G., and Chapleau, L. (1986), TRANSCOL : a Multi-period School Bus Routing and Scheduling System, *TIME Studies in the Management Sciences*, Vol.22, pp.47-71.
4. Fugenschuh, A. (2009), Solving a school bus scheduling problem with integer programming, *European Journal of Operational Research*, Vol.193, No.3, pp.867-884.

5. Gillett, B.E. and Miller, L.R. (1974), A Heuristic Algorithm for the Vehicle Dispatch Problem, *Operations Research*, Vol. 22, pp. 340-349.
6. Lee, C(2005). The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, Thesis of masters degree, Korea National Defense University.
7. Li, L. and Fu, Z. (2002), The School Bus Routing Problem : a Case Study, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, pp. 552-558.
8. Park, J., Tae, H., and Kim, B. (2009), The Effects of Allowing Mixed Loads in the Commuter Bus Routing Problem, *Proceedings of the 10th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, Kitakyushu, Japan, pp.1353-1359.
9. Park, J. and Kim, B. (2010), The School Bus Routing Problem : A Review, *European Journal of Operational Research*, Vol.202, No.2, 311-319.
10. Ripplinger, D. (2005), Rural School Vehicle Routing Problem, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1922, pp. 105-110.
11. Schitterkar, P., Sevaux, M., and Sorensen, K. (2006), A mathematical formulation for a school bus routing problem, *Proceedings of the IEEE 2006 International Conference on Service System and Service Management*.
12. Spada, M., Bierlaire, M., Liebling, and Th. M. (2005), Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem, *Transportation Science*, Vol. 39, pp. 477-490.
13. Harold W. Kuhn (1955), The Hungarian Method for the assignment problem, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 2, pp. 83-97.
14. Holland, J (1975), Adaptation In Natural and Artificial Systems. *University of Michigan Press*, Ann Arbor.

부 록

부록 1. 실험 대상 지하철역 및 목적지 학교

지점	지하철역	지점	학교	지점	차고지
1	충정로역	1	연세대학교	1	임의의 차고지
2	아현역	2	이화여자대학교		
3	이대역	3	서강대학교		
4	신촌역	4	홍익대학교		
5	홍대역	5	명지대학교		
6	당산역				
7	합정역				
8	홍제역				
9	무악재역				
10	독립문역				
11	애오개역				
12	공덕역				
13	마포역				
14	대흥역				
15	광흥창역				
16	상수역				
17	망월역				
18	마포구청역				
19	디지털미디어시티역				
20	중산역				

부록 2. 각 정류소 시간대 및 대기 학생수

지하철 정류소	시간대		연세대	이화여대	서강대	홍익대	명지대
충정로역	T 1	12분	3 명	5 명	1 명	0 명	0 명
	T 2	17분	7 명	7 명	3 명	0 명	0 명
	T 3	22분	8 명	8 명	4 명	0 명	0 명
아현역	T 1	10분	2 명	4 명	1 명	0 명	0 명
	T 2	15분	5 명	7 명	4 명	0 명	0 명
	T 3	20분	9 명	9 명	7 명	0 명	0 명
이대역	T 1	8분	3 명	4 명	2 명	1 명	2 명
	T 2	13분	8 명	9 명	7 명	3 명	4 명
	T 3	18분	13 명	14 명	9 명	4 명	6 명
신촌역	T 1	7분	3 명	3 명	3 명	1 명	3 명
	T 2	12분	9 명	8 명	6 명	4 명	5 명
	T 3	17분	12 명	9 명	10 명	6 명	7 명
홍대역	T 1	5분	2 명	1 명	3 명	5 명	1 명
	T 2	10분	5 명	4 명	6 명	9 명	3 명
	T 3	15분	10 명	8 명	7 명	14 명	5 명
합정역	T 1	7분	2 명	2 명	1 명	3 명	2 명
	T 2	12분	6 명	3 명	4 명	6 명	5 명
	T 3	17분	9 명	5 명	7 명	10 명	7 명
당산역	T 1	12분	0 명	0 명	0 명	8 명	0 명
	T 2	17분	0 명	0 명	0 명	17 명	0 명
	T 3	22분	0 명	0 명	0 명	25 명	0 명
홍제역	T 1	15분	0 명	0 명	0 명	0 명	7 명
	T 2	20분	0 명	0 명	0 명	0 명	17 명
	T 3	25분	0 명	0 명	0 명	0 명	25 명
무악재역	T 1	13분	2 명	2 명	0 명	0 명	6 명
	T 2	18분	4 명	3 명	0 명	0 명	11 명
	T 3	23분	7 명	5 명	0 명	0 명	15 명
독립문역	T 1	11분	5 명	2 명	2 명	0 명	0 명
	T 2	16분	7 명	6 명	4 명	0 명	0 명
	T 3	21분	12 명	8 명	7 명	0 명	0 명
애오개역	T 1	14분	4 명	2 명	3 명	0 명	0 명
	T 2	19분	7 명	6 명	4 명	0 명	0 명
	T 3	24분	11 명	9 명	5 명	0 명	0 명
공덕역	T 1	15분	6 명	3 명	2 명	1 명	0 명
	T 2	20분	11 명	5 명	6 명	3 명	0 명
	T 3	25분	15 명	10 명	11 명	6 명	0 명
마포역	T 1	17분	3 명	0 명	3 명	2 명	0 명
	T 2	22분	7 명	0 명	5 명	6 명	0 명
	T 3	27분	12 명	0 명	9 명	9 명	0 명

지하철 정류소	시간대		연세대	이화여대	서강대	홍익대	명지대
대흥역	T 1	13분	4 명	2 명	6 명	3 명	0 명
	T 2	18분	10 명	4 명	9 명	6 명	0 명
	T 3	23분	12 명	7 명	15 명	10 명	0 명
광흥창역	T 1	11분	5 명	3 명	5 명	3 명	0 명
	T 2	16분	8 명	5 명	8 명	6 명	0 명
	T 3	21분	13 명	9 명	11 명	10 명	0 명
상수역	T 1	9분	2 명	1 명	2 명	2 명	0 명
	T 2	14분	5 명	3 명	4 명	8 명	0 명
	T 3	19분	9 명	5 명	8 명	13 명	0 명
망원역	T 1	9분	2 명	0 명	3 명	4 명	2 명
	T 2	14분	5 명	0 명	6 명	7 명	5 명
	T 3	19분	6 명	0 명	9 명	11 명	8 명
마포구청역	T 1	11분	1 명	0 명	0 명	3 명	3 명
	T 2	16분	2 명	0 명	0 명	4 명	7 명
	T 3	21분	4 명	0 명	0 명	7 명	11 명
디지털미디어시티역	T 1	13분	0 명	0 명	0 명	2 명	8 명
	T 2	18분	0 명	0 명	0 명	4 명	17 명
	T 3	23분	0 명	0 명	0 명	7 명	23 명
증산역	T 1	15분	0 명	0 명	0 명	0 명	10 명
	T 2	20분	0 명	0 명	0 명	0 명	17 명
	T 3	25분	0 명	0 명	0 명	0 명	26 명



이 영 기 (younggal@yonsei.ac.kr)

2010 대진대학교 산업경영공학과 학사
2011~현재 연세대학교 정보산업공학과 석사과정

관심분야 : 물류시뮬레이션, SCM, Reverse logistics



정 석 재 (sjeong@kw.ac.kr)

2002 한국해양대학교 물류시스템공학과 학사
2002 연세대학교 정보산업공학과 석사
2009 연세대학교 정보산업공학과 박사
2010~현재 광운대학교 경영학부 조교수

관심분야 : 공급사슬관리, 재난 물류네트워크, 친환경 생산



윤 호 영 (yhy900211@yonsei.ac.kr)

2012 한성대학교 산업경영공학과 학사
2012~현재 연세대학교 정보산업공학과 통합과정

관심분야 : 시뮬레이션 모델링 및 분석, Meta Heuristics, Reverse Logistics,



김 경 섭 (kyungkim@yonsei.ac.kr)

1982 연세대학교 기계공학과 학사
1986 University of Nebraska-Lincoln 산업공학과 석사
1993 North Carolina State University 산업공학과 박사
1994~1995 삼성데이터시스템 선임연구원
1995~2004 연세대학교 정보산업공학과 부교수
2004~현재 연세대학교 정보산업공학과 교수

관심분야 : 물류시뮬레이션, 시뮬레이션 모델링 및 분석, SCM