

# 교외지역 통학버스 통합 운영 방안 연구

고영대\* · 오용희\*\*†

\*세종대학교 호텔관광경영학과

\*\*대전대학교 산업공학과

## A Study on Integrated Operation of School Bus in Suburbs

Ko, Young Dae\* · Oh, Yonghui\*\*†

\*Department of Hotel and Tourism Management, Sejong University

\*\*Department of Industrial Engineering, Daejin University

### ABSTRACT

**Purpose:** Generally, since the population density is lower in suburban areas, the distance to school is inevitably long. Therefore, schools in suburban areas often operate school buses to improve student welfare. However, since school buses are usually used only during going to and from school, the utilization rates are relatively low. Therefore, this study aims to establish integrated operation plan of public school bus covering all schools.

**Methods:** It is necessary to decide which school buses will serve the specific demand node which want to go to certain school in order to design an integrated operation plan for school buses. Therefore, a mathematical model is developed for minimizing the total number of vehicles and the distance of transportation by reflecting the characteristics of school buses and students as constraints. To solve the proposed mathematical model, CPLEX, a commercial solver, is applied.

**Results:** To validate and to confirm the proposed process, numerical example is designed with the comparison between before and after integrated operations of school buses in terms of total operation cost. The result shows that the integrated operation can lead the reduction of the number of school buses as well as the decreasing of the fuel cost.

**Conclusion:** This study provides the quantitative method to perform the integrated operation of school buses in suburban areas. The optimal operation strategy is required because there are more complex decision-making elements considering the integrated operation. It is expected to apply this research result at real situation to expand this services based on an optimal operation.

**Key Words :** Sharing Economy, Public School Bus Service, Integrated Operation, Cost Reduction

● Received 31 October 2018, 1st revised 24 November 2018, accepted 25 November 2018

† Corresponding Author(oryong@daejin.ac.kr)

© 2018, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 1. 서론

일반적으로 인구밀도가 높을수록 각종 공공시설이 밀집해 있어 국민들의 생활 편의성이 높은 경향이 있는 반면, 인구밀도가 낮은 지역의 경우 공공시설에 대한 접근성은 떨어질 수밖에 없어 해당 지역 국민들의 생활 편의성을 일정 수준 이상 보장해 줄 방안을 강구할 필요성이 있다 (Lee, 2005). 학교의 경우에도 마찬가지로 일종의 공공시설로써 지역별 인구밀도 편차에 따라 해당 지역에 거주하는 국민들의 생활 편의성에 영향을 미친다고 할 수 있는데, 우리나라의 경우 초·중학교는 의무교육으로 법률로써 정해져 있기 때문에 인구밀도가 낮은 교외지역에 거주하는 학생들의 초·중학교 접근성에 대한 심도 있는 고려가 요구된다.

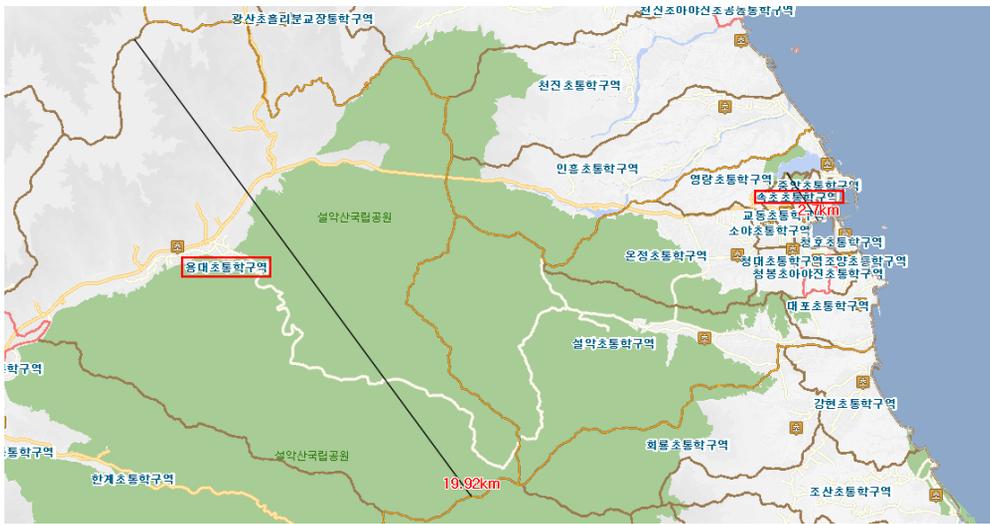


Figure 1. Transportation distances to the school in city area and suburban area(Korea Educational Development Institute)

통계청에 따르면 2015년 기준 인구밀도가 가장 높은 지역은 서울특별시로 16,364.0명/km<sup>2</sup> 인데 비해, 인구밀도가 가장 낮은 지역은 강원도로 90.2명/km<sup>2</sup> 에 불과하다. 강원도 지역이라 하더라도 도시지역과 교외지역의 인구밀도는 큰 편차를 보이는데, 그림 1과 같이 비교적 인구밀도가 높은 도시지역에 속하는 속초초등학교의 통학구역(초, 중등교육법 시행령에 따라서 교육장이 취학 아동 수, 통학거리 등을 감안하여 일정 지역 거주자를 특정의 공립 초등학교에 지정, 취학하도록 설정한 구역)의 가장 긴 거리가 2.7km인 반면 인구밀도가 상대적으로 낮은 지역인 설악산 인근의 용대초등학교의 통학구역은 가장 긴 거리가 19.9km에 이르는 것을 확인할 수 있다. 초등학교의 경우 일반적으로 적용되는 한계 통학거리가 1.5km임을 고려해볼 때, 용대초등학교의 경우 걸어서 통학하는 것은 불가능한 것으로 여겨진다. 그럼에도 불구하고 한국교육개발원에 따르면 강원도 지역의 초등학교 수는 2005년 366개, 2010년 353개, 2015년 351개로 꾸준히 감소하고 있으며, 이에 따라 교외지역에서 거주하는 초등학생의 통학거리는 증가 추세에 있음을 미루어 짐작할 수 있다.

강원도교육청에서는 이에 대한 대책으로 ‘에듀버스’라는 명칭의 통학버스를 운행하고 있다. 기존에 일부학교에서 해당학교 학생들의 통학을 위해 자체 예산으로 운영하던 통학버스를 강원도교육청에서 강원도 전 지역의 학생들이 함께 이용할 수 있도록 통합 운영하는 ‘공유버스’ 방식으로 필요에 따라 한 학교에 여러 대의 통학버스가 배차되어

운영될 수도 있으며, 여러 학교에 다니는 같은 지역의 학생들이 하나의 통학버스를 통해 통학을 할 수도 있다 (Eom et. al. 2016). 2015년 철원, 삼척, 횡성, 평창 등 4개 지역을 시작으로 영월, 양구를 포함한 6개 지역을 시범운영한 후, 2016년에는 춘천, 원주, 홍천, 정선, 인제, 강릉, 속초 등 7개 지역을 추가로 확대 운영하였고, 2017년 3월부터 강원도내 17개 시군 모든 지역에서 전면 운영을 개시하였다. 2018년만 하더라도 강원도 내에 폐교가 예고되어 있는 초·중학교는 삼척 근덕초등학교 동막분교장 등 총 4개교로, 해당 학교에 다니던 학생들은 인근 학교로 편입되고 에듀버스를 통해 통학을 지원할 예정이다 (Financial news, 2018).

각 학교마다 통학버스를 개별 운행하는 경우, 학생들의 거주지 분포에 따라 통학버스의 정원에 여유가 있음에도 불구하고 등/하교 시간의 제약 때문에 두 대 이상의 차량이 필요할 수 있으며, 등/하교 이외 해당 학교의 행사가 없는 경우에는 장시간 유휴시간을 갖을 수밖에 없어 낮은 활용률을 보이게 된다. 또한 각 차량별 전담 운전기사가 필요하며, 해당 운전기사가 휴가, 병가 등의 이유로 출근하지 못하는 경우 대체 운전기사를 찾아야 하는 어려움이 있다. 유지보수의 측면에서도 개별 학교가 소수의 통학버스를 임차해야 하고, 주유 및 정비 등을 수행해야 하기 때문에 규모의 경제 측면에서 합리적이지 못한 비용을 지불할 수밖에 없다. 그러나 각 학교 단위가 아닌 강원도 교육청에서 통합 운영을 하는 경우, 전체 학생들을 대상으로 통학버스의 운행경로를 설계할 수 있기 때문에 정원 및 등/하교 시간의 제약을 고려할 때 최적의 효율을 갖도록 고려할 수 있으며, 각 학교가 행사날짜를 다르게 한다면 보유한 통학버스의 활용률을 극대화하는 방향으로 운영할 수 있다. 또한, 운전기사의 풀(pool)을 만들어 운영하면 특정 운전기사의 부재에 효과적으로 대응할 수 있으며, 유지보수 관점에서 임차나 주유, 정비에 규모의 경제를 고려하여 합리적인 비용을 지불할 수 있다. 추가적으로 차량의 고장 등 특정 차량에 문제가 생긴 경우에도 유동적으로 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다. 2015년부터 시범운영을 한 결과 2016년까지 통학지원 학생 수 2,010명이 증가하였고 2017년에는 1,744명 증가하여, 통학지원 및 교외 교육활동 지원 효과를 임차 차량 운영 경비로 환산할 경우 2015년 16억, 2016년 25억, 2017년에는 30억의 예산 절감 효과를 기대하고 있다고 발표하였다 (Gangwon general welfare newspaper, 2017).

그러나 강원도의 ‘에듀버스’는 예산의 문제로 현재 강원도 전 지역에서 서비스를 하지는 못하고 있는 상황이다. 통학버스를 통합 운영하는 방법을 통한 효과를 극대화하기 위해서는 전체 운영비용을 최소화하는 방향으로 통학버스 통합 운영체계가 설계되어야 하며, 이렇게 해서 절감되는 비용을 통해 더 많은 학생들이 통학버스 서비스를 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 이를 위해 본 연구에서는 전체 운영비용 최소화를 목적으로 하는 효율적인 통학버스 통합 운영체계를 수리모형 기반 최적화 기법을 통해 설계하고자 하며, 이를 통해 전체 수요를 커버할 수 있는 최소의 차량 수 및 차량별 최적 운행경로를 결정하고자 한다.

## 2. 기존 연구

강원도교육청에서는 이에 대한 대책으로 ‘에듀버스’라는 명칭의 통학버스를 운영하고 있다. 기존에 일부학교에서 해당학교 학생들의 통학을 위해 자체 예산으로 운영하던 통학버스를 강원도교육청에서 강원도 전 지역의 학생들이 함께 이용할 수 있도록 통합 운영하는 ‘공유버스’ 방식으로 필요에 따라 한 학교에 여러 대의 통학버스가 배차되어 운영될 수도 있으며, 여러 학교에 다니는 같은 지역의 학생들이 하나의 통학버스를 통해 통학을 할 수도 있다 (Eom et. al. 2016). 2015년 철원, 삼척, 횡성, 평창 등 4개 지역을 시작으로 영월, 양구를 포함한 6개 지역을 시범운영한 후, 2016년에는 춘천, 원주, 홍천, 정선, 인제, 강릉, 속초 등 7개 지역을 추가로 확대 운영하였고, 2017년 3월부터 강원도내 17개 시군 모든 지역에서 전면 운영을 개시하였다. 2018년만 하더라도 강원도 내에 폐교가 예고되어 있는 초·중학교는 삼척 근덕초등학교 동막분교장 등 총 4개교로, 해당 학교에 다니던 학생들은 인근 학교로 편입되고 에

듀버스를 통해 통학을 지원할 예정이다 (Financial news, 2018).

각 학교마다 통학버스를 개별 운행하는 경우, 학생들의 거주지 분포에 따라 통학버스의 정원에 여유가 있음에도 불구하고 등/하교 시간의 제약 때문에 두 대 이상의 차량이 필요할 수 있으며, 등/하교 이외 해당 학교의 행사가 없는 경우에는 장시간 유휴시간을 갖을 수밖에 없어 낮은 활용률을 보이게 된다. 또한 각 차량별 전담 운전기사가 필요하며, 해당 운전기사가 휴가, 병가 등의 이유로 출근하지 못하는 경우 대체 운전기사를 찾아야 하는 어려움이 있다. 유지보수의 측면에서도 개별 학교가 소수의 통학버스를 임차해야 하고, 주유 및 정비 등을 수행해야하기 때문에 규모의 경제 측면에서 합리적이지 못한 비용을 지불할 수밖에 없다. 그러나 각 학교 단위가 아닌 강원도 교육청에서 통합 운영을 하는 경우, 전체 학생들을 대상으로 통학버스의 운행경로를 설계할 수 있기 때문에 정원 및 등/하교 시간의 제약을 고려할 때 최적의 효율을 갖도록 고려할 수 있으며, 각 학교가 행사날짜를 다르게 한다면 보유한 통학버스의 활용률을 극대화하는 방향으로 운영할 수 있다. 또한, 운전기사의 풀(pool)을 만들어 운영하면 특정 운전기사의 부재에 효과적으로 대응할 수 있으며, 유지보수 관점에서 임차나 주유, 정비에 규모의 경제를 고려하여 합리적인 비용을 지불할 수 있다. 추가적으로 차량의 고장 등 특정 차량에 문제가 생긴 경우에도 유동적으로 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다. 2015년부터 시범운행을 한 결과 2016년까지 통학지원 학생 수 2,010명이 증가하였고 2017년에는 1,744명 증가하여, 통학지원 및 교외 교육활동 지원 효과를 임차 차량 운영 경비로 환산할 경우 2015년 16억, 2016년 25억, 2017년에는 30억의 예산 절감 효과를 기대하고 있다고 발표하였다 (Gangwon general welfare newspaper, 2017).

그러나 강원도의 '에듀버스'는 예산의 문제로 현재 강원도 전 지역에서 서비스를 하지는 못하고 있는 상황이다. 통학버스를 통합 운영하는 방법을 통한 효과를 극대화하기 위해서는 전체 운영비용을 최소화하는 방향으로 통학버스 통합 운영체계가 설계되어야 하며, 이렇게 해서 절감되는 비용을 통해 더 많은 학생들이 통학버스 서비스를 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 이를 위해 본 연구에서는 전체 운영비용 최소화를 목적으로 하는 효율적인 통학버스 통합 운영체계를 수리모형 기반 최적화 기법을 통해 설계하고자 하며, 이를 통해 전체 수요를 커버할 수 있는 최소의 차량 수 및 차량별 최적 운행경로를 결정하고자 한다.

### 3. 수리모형 개발

본 연구에서는 교외지역 통학차량의 전체 운영비용을 최소화 할 수 있는 효율적인 통합 운영 방안을 제시함으로써 통학차량 운행 서비스의 지속적 운영을 확보하고자 한다. 이를 위해, 수리모형 기반 최적화 방법을 사용하여 전체 통학 수요를 커버할 수 있는 최소의 차량 수 및 차량별 최적 운행경로를 결정하고자 한다.

#### 3.1 모델 상황

특정 교외지역에  $N$ 개의 학교가 위치해 있으며, 각 학교에 통학을 하는 학생의 위치와 수는 정해져 있다. 도시지역에서는 각 학교에 통학하는 학생들의 통학거리가 짧아 대부분의 경우 걸어서 다닐 수 있는 반면, 교외지역에서는 인구밀도가 낮아 각 학교에 통학하는 학생들의 통학거리도 길어질 수밖에 없기 때문에 각 학교마다 통학버스를 구매 혹은 임차하여 학생들의 통학을 도와주고 있는 상황이다. 즉, 각 학교에 소속된 통학버스는 특정학교를 출발하여 해당 학교에 소속된 학생들의 탑승위치로 순차적으로 이동하여 모든 학생을 태우고 다시 해당 학교로 되돌아오게 된다. 이때, 각 통학버스는 태울 수 있는 학생의 총 수인 탑승인원에 대한 제약을 가지고 있으며, 등교를 하는 경우에는 수업시작시간 전에 각 학교에 도착하여야 하고 학생들이 차량에 과도하게 오래 탑승하고 있는 경우를 방지하기 위해

각 운행별 가능한 운행시간의 상한이 존재한다. 이와 같이, 각 학교별로 통학버스를 개별 운행하는 경우에는 1) 소속된 학생들의 탑승위치를 어떤 순서대로 운행할 것인지에 대한, 즉, 각 통학버스별 운행 경로에 대한 의사결정만 수행하면 된다.

그러나 통합 운영을 하는 경우에는 각 통학버스가 출발지로 지정된 학교에서 출발하여 학생들의 소속 학교와 상관 없이 각 통학버스별 할당된 학생들의 탑승위치로 순차적으로 이동하여 할당된 모든 학생들을 태우고, 그 학생들이 소속되어 있는 학교에 차례로 들러 학생들을 하차시켜주고 다시 출발지로 지정된 학교로 복귀하게 된다. 통합 운영을 하는 경우에는 통학버스의 전체 수를 줄여 운행할 수 있기 때문에 일부 학교만 통학버스의 출발지로 지정되어 운영될 수 있으며, 각 통학버스별 출발지로 지정된 학교는 서로 다를 수 있다. 본 연구에서는 특정 학교에 소속된 학생들이 서로 다른 통학버스를 이용하여 등교하는 것이 가능하도록 가정되었으며, 이에 각 학교는 하나 이상의 통학버스에 의해 학생 등교를 도와줄 수 있다. 그러므로 각 통학버스에는 하나 이상의 학교의 학생들이 할당 될 수 있으며, 각 통학버스별 운행하는 학교가 중복되는 것이 가능하다. 이와 같이 통학버스를 통합 운영하는 경우에는 1) 각 통학버스별 출발지 학교를 지정해야 하며, 2) 각 통학버스별 어떤 학교의 학생들의 통학을 위해 운행될지 결정되어야 하며, 3) 정해진 학교의 학생들 중 각 통학버스별 어떤 탑승위치의 학생들을 할당해서 운행할지를 결정해야 하며, 마지막으로 4) 각 통학버스별 할당된 학생들의 탑승위치를 어떤 순서대로 운행할 것인지에 대한 의사결정이 수행되어야 한다. 즉, 통합 운영을 하는 경우 전체 운영비용을 최소화 할 수 있는 장점이 있는 반면 의사결정 요소들이 보다 많아 복잡하기 때문에 효율적인 통합 운영 방안을 도출하는 정량적 방법의 적용이 시급한 실정이다.

### 3.2 시스템 및 결정 변수

수리모형의 개발을 위해 아래와 같은 색인, 시스템 변수 및 결정 변수가 설정되었다.

$i, j$  : 통학버스가 방문할 학생의 탑승위치 노드 혹은 학교 위치 노드의 색인

$s$  : 학생들이 소속된 학교를 나타내는 색인

$k$  : 각 통학버스를 나타내는 색인

$N$  : 학생의 탑승위치를 나타내는 노드의 개수

$M$  : 학교의 위치를 나타내는 노드의 개수

$c_{vehicle}$  : 통학버스의 임차비용 (₩/일)

$c_{fuel}$  : 통학버스의 단위시간당 연료비용 (₩/분)

$t_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로 통학버스가 운행되는 데 걸리는 시간 (분)

$t_{max}^k$  : 통학버스  $k$ 의 최대운행 가능시간 (분)

$capa_i^k$  : 통학버스  $k$ 가 노드  $i$ 에 방문을 마친 시점의 전체 탑승 학생 수 (명)

$capa_{max}^k$  : 통학버스  $k$ 의 최대 탑승 가능 학생 수 (명)

$d_j$  : 노드  $j$ 에서 탑승하는 학생 수 (명)

$BM$  : 수리모형 개발을 위해 도입한 매우 큰 수

$t^k$  : 실수 결정변수, 통학버스  $k$ 가 노드  $i$ 에 도착한 시각 (분)

$y^k$  : 통합 운영 후 통학버스  $k$ 가 운영되면 1, 아니면 0의 값을 갖는 0-1 이진 결정변수

$x_{ij}^k$  : 통합 운영 후 통학버스  $k$ 가 노드  $i$ 와 노드  $j$ 를 순차적으로 운행하면 1, 아니면 0의 값을 갖는 0-1 이진 결정변수

$z_i^k(s)$  : 노드  $i$ 가 탑승위치인 학생이 학교  $s$ 에 소속되어 있고, 이 학생이 통학버스  $k$ 에 의해 등교를 하게되면 1, 아니면 0의 값을 갖는 0-1 이진 결정변수

### 3.3 수리모형

본 연구에서는 교외지역 통학차량의 통합 운영을 통해 전체 운영비를 최소화하는 것을 그 목적으로 하고 있기 때문에, 목적함수는 통학차량의 통합 운영에 따른 전체 운영비를 최소화하는 형태로 개발되었다. 즉, 통합 운영에 따른 통학버스 임차비용과 연료비용의 합을 최소화하기 위해 식 (1)과 같이 목적함수를 도출하였다.

Minimize

$$c_{vehicle} \cdot \sum_{k=1}^K y^k + c_{fuel} \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{N+M} t_{i,j} \cdot x_{i,j}^k \tag{1}$$

제약식은 각 통학버스의 운행경로 설정을 위한 기본 규칙, 각 학교에 소속된 학생의 통학버스별 할당, 각 노드별 통학버스의 도착 시각, 각 통학버스의 탑승 가능 인원 설정을 고려하여 개발되었다. 우선 각 통학버스가 학생 노드 혹은 학교 노드를 방문하는 기본 규칙을 반영하기 위해 식 (2) ~ (9)가 제안되었다. 식 (2)와 (3)은 각 학생 노드에는 하나의 통학버스만 할당되어야 한다는 것을 나타내며, 식 (4)는 각 통학버스가 하나의 학교를 출발지로 설정할 수 있다는 것을 나타낸다. 식 (5)는 각 통학버스가 운행 후 다음날의 운행을 위해 출발지로 설정된 학교로 되돌아 와야 하는 것을 의미한다. 식 (6)은 학교 노드 사이의 서브 투어 생성을 방지하기 위해 제안되었으며, 식 (7)은 각 학교 노드로 적어도 하나 이상의 통학버스가 배정되어야 하는 것을 나타낸다. 식 (8)은 각 통학버스가 특정 학교에 1회만 방문할 수 있도록 설정하기 위해 제안되었으며, 식 (9)는 통학버스가 같은 노드에서 출발하고 도착할 수 없는 기본 사항을 반영하기 위해 개발되었다.

Subject to

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N+M} x_{i,j}^k = 1, \quad i = 1 + M, \dots, N + M \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N+M} x_{i,j}^k = 1, \quad j = 1 + M, \dots, N + M \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1+M}^{N+M} x_{i,j}^k \leq 1, \quad \forall k \tag{4}$$

$$\sum_{j=1+M}^{N+M} x_{i,j}^k \leq \sum_{j=1}^{N+M} x_{j,i}^k, \quad i = 1, \dots, M, \quad \forall k \tag{5}$$

$$x_{i,j}^k + x_{j,i}^k \leq 1, \quad i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, M, \quad \forall k \tag{6}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N+M} x_{i,j}^k \geq 1, \quad j = 1, \dots, M \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{N+M} x_{i,j}^k = \sum_{i=1}^{N+M} x_{j,i}^k, \quad j = 1, \dots, M, \quad \forall k \tag{8}$$

$$x_{i,j}^k = 0, \quad i = j, \quad \forall k \tag{9}$$

식 (10) ~ (15)는 각 학교에 소속된 학생의 통학버스별 할당을 위해 개발되었다. 식 (10)과 (11)은 특정 노트에 특정 학교 소속의 학생들이 위치해 있을 때, 이들은 하나의 통학버스에 의해 탑승이 되어야 함을 나타내며, 식 (12)

와 (13)은 통학버스에 특정 학교 소속의 학생이 탑승했다면 해당 학교에 도착하여야 하며, 특정 학교 소속 학생이 탑승하지 않은 경우 해당 학교에는 도착할 수 없음을 의미한다. 식 (14)는 각 학교에 소속된 학생이 위치한 모든 노드가 하나의 특정 통학버스에 의해 서비스가 되어야 한다는 것을 나타내기 위해 개발되었으며, 식 (15)는 특정 통학버스에 하나의 학생 노드라도 할당되면 그 통학버스는 통합 운영 체계 하에서 운행되는 버스임을 표현하기 위해 제안되었다.

$$\sum_{s=1}^M z_j^k(s) = \sum_{i=1}^{N+M} x_{i,j}^k, \quad j = 1+M, \dots, N+M, \forall k \quad (10)$$

$$\sum_{s=1}^M z_j^k(s) = \sum_{i=1}^{N+M} x_{j,i}^k, \quad j = 1+M, \dots, N+M, \forall k \quad (11)$$

$$\sum_{j=M}^{N+M} z_j^k(s) \leq BM \cdot \sum_{i=1}^{N+M} x_{i,s}^k, \quad s = 1, \dots, M, \forall k \quad (12)$$

$$BM \cdot \sum_{j=M}^{N+M} z_j^k(s) \geq \sum_{i=1}^{N+M} x_{i,s}^k, \quad s = 1, \dots, M, \forall k \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^M z_i^k(s) = 1, \quad i = 1+M, \dots, N+M \quad (14)$$

$$\sum_{i=1+Ms=1}^{N+M} \sum_{s=1}^M z_i^k(s) \leq BM \cdot y^k, \quad \forall k \quad (15)$$

식 (16) ~ (24)는 각 노드별 통학버스의 도착 시각과 각 통학버스의 탑승 가능 인원 설정을 위해 개발되었다. 식 (16)은 학생 노드를 거친 후 다른 노드로 이동한 경우 노드와 노드 사이의 운행시간을 고려해야 함을 나타내며, 식 (17)은 학교 노드를 거친 후 학교 노드로 이동하는 경우 마찬가지로 노드와 노드 사이의 운행시간을 고려해야 함을 나타낸다. 유사한 방법으로 식 (18)은 학교 노드를 거친 후 학생 노드로 이동하는 경우 노드와 노드 사이의 운행시간을 고려해야 함을 나타내며, 식 (19)와 (20)은 시간 제약 하에 학생 노드와 학교 노드의 방문을 마치는 상황을 반영하였다. 식 (21)과 (22)는 각 노드를 방문할 경우 최대 탑승인원 제약을 만족해야 하는 것을 의미하며, 마지막으로 식 (23)과 (24)는 결정변수 중 이진변수와 실수인 것을 구분하여 선언하기 위해 제안되었다.

$$t_i^k + t_{i,j} \cdot x_{i,j}^k \leq t_j^k + BM \cdot (1 - x_{i,j}^k), \quad i = 1+M, \dots, N+M, j = 1, \dots, N+M, \forall k \quad (16)$$

$$t_i^k + t_{i,j} \cdot x_{i,j}^k \leq t_j^k + BM \cdot (1 - x_{i,j}^k), \quad i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M, \forall k \quad (17)$$

$$t_{i,j} \cdot x_{i,j}^k \leq t_j^k, \quad i = 1, \dots, M, j = 1+M, \dots, N+M, \forall k \quad (18)$$

$$t_i^k + t_{i,j} \cdot x_{i,j}^k \leq t_{\max}^k, \quad i = 1, \dots, N+M, j = 1, \dots, M, \forall k \quad (19)$$

$$t_i^k \leq t_{\max}^k, \quad i = 1, \dots, N+M, \forall k \quad (20)$$

$$c_i^k + d_j \cdot x_{i,j}^k \leq c_j^k + BM \cdot (1 - x_{i,j}^k), \quad i = 1+M, \dots, N+M, j = 1+M, \dots, N+M, \forall k \quad (21)$$

$$c_i^k \leq c_{\max}^k, \quad i = 1+M, \dots, N+M, \forall k \quad (22)$$

$$x_{i,i'}^k, z_j^k(s), y^k \in 0, 1, \quad i = i' = 1, \dots, N+M, j = 1+M, \dots, N+M, s = 1, \dots, M, \forall k \quad (23)$$

$$t_i^k, c_j^k \geq 0, \quad i = 1, \dots, N+M, j = 1+M, \dots, N+M, \forall k \quad (24)$$

### 3.4 해법

본 연구에서는 교외지역 통학차량 통합 운영 방안의 효율적인 설계를 위해 수리모형 기반 최적화 기법을 적용하였으며, 통합 운영에 따른 의사결정 요소가 개별운영의 경우에 비해 현저히 증가한 복잡한 상황에도 불구하고 전체 수리모형이 혼합정수계획모형의 형태로 개발되었다. 그렇기 때문에 IBM사의 CPLEX와 같은 상용 최적해 도출 소프트웨어를 사용하여 수리적으로 최적인 해를 도출할 수 있었으며, 본 문제의 특성 상 특정 교외지역에 있는 학교들을 대상으로 통합 운영 체계를 설계하는 상황이 일반적인 것이며, 큰 규모의 문제 보다는 적당한 사이즈의 여러 독립적인 문제가 존재할 가능성이 높기 때문에 상용 최적해 도출 소프트웨어로도 충분히 적용 가능한 해를 도출할 수 있다.

## 4. 수치 예제

### 4.1 시스템 변수 값 설계

본 연구에서 사용될 시스템 변수의 값을 획득하기 위해 실제 데이터를 얻으려는 다양한 시도를 하였지만, 학생의 탑승위치와 소속 학교와 같은 정보들은 개인정보와 관련된 사항들이기 때문에 획득할 수 없어, 부득이 가상의 데이터를 생성하여 적용할 수밖에 없었다. 본 연구의 적용 대상이 교외지역임을 감안하여, 가로-세로 각 30km 크기의 지역을 설정하였으며, 가로-세로 각 0m ~ 30,000m 평면에 3개의 학교 위치를 임의의 값으로 발생시켜 사용하였다. 또한 학생의 위치는 각 소속 학교에서 가로-세로 -10,000m ~ +10,000m 평면에 15개의 좌표를 임의의 값으로 발생시켜 사용하였다. 각 학교별 소속 학생의 상대적 위치가 문제의 해에 중요한 영향을 미칠 수 있기 때문에 각 학교별 소속 학생 수 및 학교 위치 대비 각 소속 학생의 상대적 위치는 3개의 학교가 공히 동일한 것으로 가정하였다. 각 학교 및 소속 학생들의 위치좌표는 표 1과 같다.

Table 1. Location coordinates for each school and belonging students

	horizontal	vertical		horizontal	vertical		horizontal	vertical
school 01	13,187	8,187	school 02	19,493	9,316	school 03	19,729	19,896
student 04	18,937	25,367	student 19	25,243	16,496	student 34	25,479	27,076
student 05	9,027	23,952	student 20	15,333	15,081	student 35	15,569	25,661
student 06	9,098	13,052	student 21	15,404	4,181	student 36	15,640	14,761
student 07	16,309	12,613	student 22	22,615	3,742	student 37	22,851	14,322
student 08	11,634	10,981	student 23	17,940	2,110	student 38	18,176	12,690
student 09	7,523	24,252	student 24	13,829	15,381	student 39	14,065	25,961
student 10	18,228	19,948	student 25	24,534	11,077	student 40	24,770	21,657
student 11	11,761	14,142	student 26	18,067	5,271	student 41	18,303	15,851
student 12	16,006	21,752	student 27	22,312	12,881	student 42	22,548	23,461
student 13	22,037	18,868	student 28	28,343	9,997	student 43	28,579	20,577
student 14	12,651	12,290	student 29	18,957	3,419	student 44	19,193	13,999
student 15	3,933	14,205	student 30	10,239	5,334	student 45	10,475	15,914
student 16	5,906	17,281	student 31	12,212	8,410	student 46	12,448	18,990
student 17	12,704	15,200	student 32	19,010	6,329	student 47	19,246	16,909
student 18	11,005	16,860	student 33	17,311	7,989	student 48	17,547	18,569

통학차량의 통합 운영 전에는 3개의 학교에서 각각 30인승 통학버스를 1대씩 운영한 것으로 가정하였으며, 각 통학버스의 최대 운행가능 시간은 60분으로 가정하였다. 또한 1일당 통학버스 임차비용은 ₩500,000, 연료비용은 분당 ₩2,000으로 가정하였으며, 1분에 평균 2,000m를 운행할 수 있는 것으로 가정하였다. 각 노드별 이동거리는 유클리드 거리 방법으로 계산하였으며, 각 노드별 학생 수는 1명으로 가정하였다.

## 4.2 수치 예제 결과

3개의 학교에서 각각 30인승 통학버스를 개별 운영하는 경우 최적 운행경로를 도출하기 위해서 본 연구에서 개발된 수리모형을 적용하였다. 일반적으로 통학버스의 운행은 개별 운전기사 혹은 운영 담당자의 직관에 기반 하여 이루어지고 있으나, 통합 운영 후의 경우 본 연구에서 제안한 수리모형에 대한 최적해를 도출하여 비교를 할 것이기 때문에, 합리적인 비교를 위해 개별 운영하는 경우에도 전체 비용을 최소화 하는 운행경로를 산출하여 사용하였다. 통합 운영 전과 후를 비교한 수치 예제의 결과는 표 2와 같다.

**Table 2.** Results comparison of before/after integrated operation of school buses

before integrated operation			
bus #	covered school #	operation route	fuel cost
1	1	01-18-17-11-07-14-08-06-15-16-09-05-12-04-13-10-01	₩65,850
2	2	02-33-32-26-22-29-23-21-30-31-24-20-27-19-28-25-02	₩65,850
3	3	03-48-47-41-37-44-38-36-45-46-39-35-42-34-43-40-03	₩65,850
Total cost		$(₩500,000 \times 3) + (₩65,850 \times 3) = ₩1,697,550$	
after integrated operation			
bus #	covered school #	operation route	fuel cost
1	1,3	03-10-48-12-04-35-39-05-09-16-15-06-11-45-18-46-01-03	₩55,780
2	1,2,3	02-33-32-26-29-23-21-30-31-08-14-17-24-20-36-07-38-44-41-47-13-40-42-34-43-19-37-27-25-28-22-02-01-03-02	₩123,840
3	-	not operated	-
Total cost		$(₩500,000 \times 2) + (₩55,780 + ₩123,840) = ₩1,179,620$	

통학차량의 통합 운영 전에는 3개의 학교에서 각각 30인승 통학버스를 1대씩 운영하였으며, 시스템 변수 값 설계 절에서 설명한 바와 같이 학교별 소속 학생의 위치 분포는 동일한 것으로 상정하였기 때문에 각 통학버스의 운행경로와 소요되는 연료비용은 동일하게 산출되었다. 각 통학버스가 하나의 학교를 위해서만 운행되며, 그에 따른 전체 비용은 통학버스 임차비용 ₩1,500,000과 연료비용 ₩197,550이 되어 총 ₩1,697,550이 소요된다. 통학차량의 통합 운영 후에는 표 2에서 나타내는 바와 같이 2대의 버스만 운영이 되며, 버스 1이 학교 1과 학교 3의 일부 학생들을 할당 받아 운행되고 버스 2가 학교 1, 학교 3의 나머지 학생들과 학교 2의 모든 학생들을 할당 받아 운행된다. 그에

따른 전체 비용은 통학버스 임차비용 ₩1,000,000과 연료비용 ₩179,620이 되어 총 ₩1,179,620이 소요된다.

이 수치 예제를 통해 교외지역 통학차량 통합 운영으로 운행되는 통학버스 수 자체를 줄일 수 있음을 알 수 있으며, 일반적으로 통학버스 수가 줄어들면 이동거리는 늘어날 것으로 생각할 수 있지만 본 수치 예제에서 도출된 바와 같이 소속 학교와 상관없이 유사한 위치에 있는 학생들을 함께 태워 운행함으로써 전체 운행거리 또한 줄일 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있다. 하지만 통합 운영을 하는 경우 통학버스의 수 및 전체 운행거리가 모두 감소하는 것은 본 수치 예제에 한정된 것이며, 기본적으로 통합 운영을 한다는 것 자체가 각 학교가 개별 운영을 한다는 제약을 없앤 상황에서 해를 도출하는 것이기 때문에 더 넓은 해 영역 중 최적해를 탐색하는 상황으로 통합 운영을 하는 경우 전체 운영비용은 대부분 감소할 것으로 사료되지만, 경우에 따라 통학버스의 수는 감소되지만 연료비용은 증가하거나, 통학버스의 수는 그대로인 상황에서 연료비용만 감소할 수도 있으며, 이는 각 학교의 위치 및 소속된 학생의 상대적 위치에 따라 다르게 도출될 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 교외지역 통학차량의 지속적인 운영 및 서비스 지역 확대를 위한 전체 운영비용 최소화를 목적으로 통학차량의 최적 통합 운영 방안을 설계할 수 있는 방안을 제시하였다. 수리모형 기반 최적화 기법을 적용하여 교외 지역의 통학버스 운영 상황을 모델링 하였으며, 통학버스의 최대 운행가능 시간 및 최대 탑승인원 등 현실적인 사항을 반영하여 모델의 실제 적용가능성을 높였다. 개발된 혼합정수계획 수리모형에 대해 상용 최적해 도출 소프트웨어인 CPLEX를 통해 최적해를 도출하였으며, 통학버스의 통합 운영 상황에서 필요한 의사결정사항 - 1) 각 통학버스별 출발지 학교 지정, 2) 각 통학버스별 어떤 학교의 학생들의 통학을 위해 운행될지 결정, 3) 정해진 학교의 학생들 중 각 통학버스별 어떤 탑승위치의 학생들을 할당해서 운행할지 결정 4) 각 통학버스별 할당된 학생들의 탑승위치를 어떤 순서대로 운행할 것인지 결정 - 에 대한 최적 의사결정을 도출 할 수 있었다. 수치 예제를 통해 본 연구에서 제안한 교외지역 통학차량 통합 운영 최적 방안을 검증하였으며, 주어진 시스템 변수 값 하에서는 운영하는 통학버스의 수 및 운행거리 모두의 측면에서 개선을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과를 실제 국내 교외지역 학교들의 통학차량 통합 운영에 적용한다면, 보다 저렴한 비용으로 통학차량 운행 서비스를 제공할 수 있을 것으로 사료되며 이를 통해 서비스를 지속하고 확대 적용하는 것도 가능하리라 생각한다.

향후 연구로서 단순히 전체 운영비용 측면뿐만 아니라 친환경적인 측면을 고려한 통학차량 운영 방안에 대해서도 다뤄보고자 하며, 학생들에게 통학차량 운행 서비스를 제공함에 있어 개인별 탑승시간에 따른 불만족도 및 탑승시간이 이른 시각이나 늦은 시각이나에 따른 불만족도 등 고객인 학생의 만족도 측면을 추가적으로 반영한 연구를 수행해보고자 한다. 또한 실제 데이터를 확보할 수 있다면 이를 통해 좀 더 실제 상황을 반영한 결과를 도출해 보고자 한다.

## REFERENCES

- Financial News. 2018. "The number of closed schools in Gangwon-do this year, all 4 schools... Took action using school bus etc." January 2, 2018. <http://www.fnnews.com/news/201801021018265942>
- Bögl, M., Doerner, K. F., Parragh, S. N. 2015. "The school bus routing and scheduling problem with transfers." *Networks* 65(2):180-203.
- Braca, J., Bramel, J., Posner, B., Simchi-Levi, D. 1997. "A computerized approach to the New York City school bus routing problem." *IIE transactions* 29(8):693-702.
- Caceres, H., Batta, R., He, Q. 2017. "School bus routing with stochastic demand and duration constraints." *Transportation science* 51(4):1349-1364.
- Chen, D. S., Kallsen, H. A., Chen, H. C., Tseng, V. C. 1990. "A bus routing system for rural school districts." *Computers & Industrial Engineering* 19(1-4):322-325.
- Ellegood, W. A., Campbell, J. F., North, J. 2015. "Continuous approximation models for mixed load school bus routing." *Transportation Research Part B: Methodological* 77:182-198.
- Eom, Suwon, Song, Miryeong, Seong, Juin, Yun, Jeongmi, and Lee Minsu. 2016. Quality of life in rural areas for balanced rural and urban development. *Urban Information Service* 408:3-14.
- Financial News. 2018. "The number of closed schools in Gangwon-do this year, all 4 schools... Took action using school bus etc." January 2, 2018. <http://www.fnnews.com/news/201801021018265942>
- Gangwon General Welfare Newspaper. 2017. "Increase in number of students using 'Gangwon Edubus'" May 15, 2017. <http://www.gwelfare.co.kr/news/articleView.html?idxno=910>.
- Hargroves, B. T., Demetsky, M. J. 1981. "A computer assisted school bus routing strategy: A case study." *Socio-Economic Planning Sciences* 15(6):341-345.
- Lee, Yong-Jae. 2005. "An Study on the Inequality of Health Care Resources Distribution Affected by Regional Characteristics" *Journal of Critical Social Welfare* 21:49-78.
- Newton, R. M., Thomas, W. H. 1974. "Bus routing in a multi-school system." *Computers & Operations Research* 1(2):213-222.
- Park, J., Kim, B. I. 2010. "The school bus routing problem: A review." *European Journal of operational research* 202(2):311-319.
- Russell, R. A., Morrel, R. B. 1986. "Routing special-education school buses." *Interfaces* 16(5):56-64.
- Schittkat, P., Kinable, J., Sörensen, K., Sevaux, M., Spieksma, F., Springael, J. 2013. "A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection." *European Journal of Operational Research* 229(2):518-528.
- Spada, M., Bierlaire, M., Lieblich, T. M. 2005. "Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem." *Transportation Science* 39(4):477-490.
- Sun, S., Duan, Z., Xu, Q. 2018. "School bus routing problem in the stochastic and time-dependent transportation network." *PloS one* 13(8):e0202618.

