

*Route Extension of Wireless Charging Electric Vehicle in Multi-line Environment*

# 다중 노선 상황에서의 무선 충전 전기차량의 경로 확장 연구

손종환, 정봉주

[jonghwanson@yonsei.ac.kr](mailto:jonghwanson@yonsei.ac.kr), [bongju@yonsei.ac.kr](mailto:bongju@yonsei.ac.kr)

2022년 한국SCM학회 춘계 학술대회

# Contents

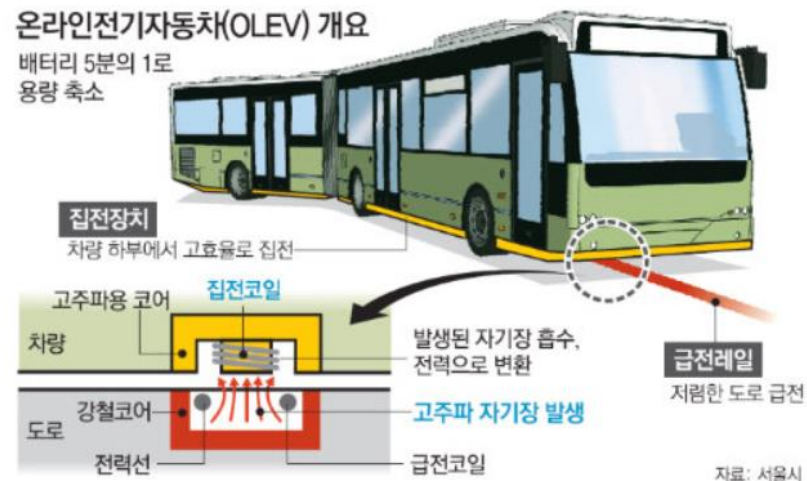
---

1. 연구 배경 및 필요성
2. 연구 내용 및 차별성
3. 기존 문헌 연구
4. 문제 개요
5. 접근 방법
6. 결과 및 실험 분석
7. 결론

# 1. 연구 배경 및 필요성

## 연구 배경

- 전기차의 아래와 같은 문제점들을 해결하기 위해 무선 충전 방식의 기술 등장.
  - 전기 차량 충전 설비에 부족.
  - 높은 배터리 가격 및 적은 배터리 용량.
  - 상대적으로 긴 충전 시간과 짧은 주행 거리.
- 무선 충전 전기차량은 크게 두 가지 방식 존재.
  - Stationary charging: 기존의 충전방식(Plug-in)에서 충전 케이블 없이 정지된 차량을 충전하는 방식
  - **Dynamic charging**: 충전 케이블이 필요 없을 뿐만 아니라 **운행 중인 차량도 충전할 수 있는 방식**으로 도로 안에 파워 트랙이라는 충전 설비를 매설.



<Fig1. Dynamic charging 방식 중 하나인 OLEV 개요>

# 1. 연구 배경 및 필요성

## 연구 필요성

- Dynamic charging의 경우 아래와 같은 특징이 존재.
  - 배터리 용량 절감으로 인한 차량 내부 공간 확보.
  - 충전 시간 대폭 단축.
  - 배터리 용량 절감을 통한 차량의 배터리 비용 절감.
  - **상대적으로 큰 초기 설비 비용 투자 비용.**
  - 도로안에 설비를 설치해야 하므로 대중교통이 아닌 일반 차량에 적용하기에 부적합.
- 기존의 충전 설비 할당 문제에서는 설비 투자 비용을 최소화하기 위한 연구가 주로 이루어 졌으나, 운행 경로와 설비 할당 문제를 동시에 다루는 연구는 다소 부족.
- 전기 버스 차량을 위한 운행 경로 확장에 관한 연구 역시 미미한 상태.

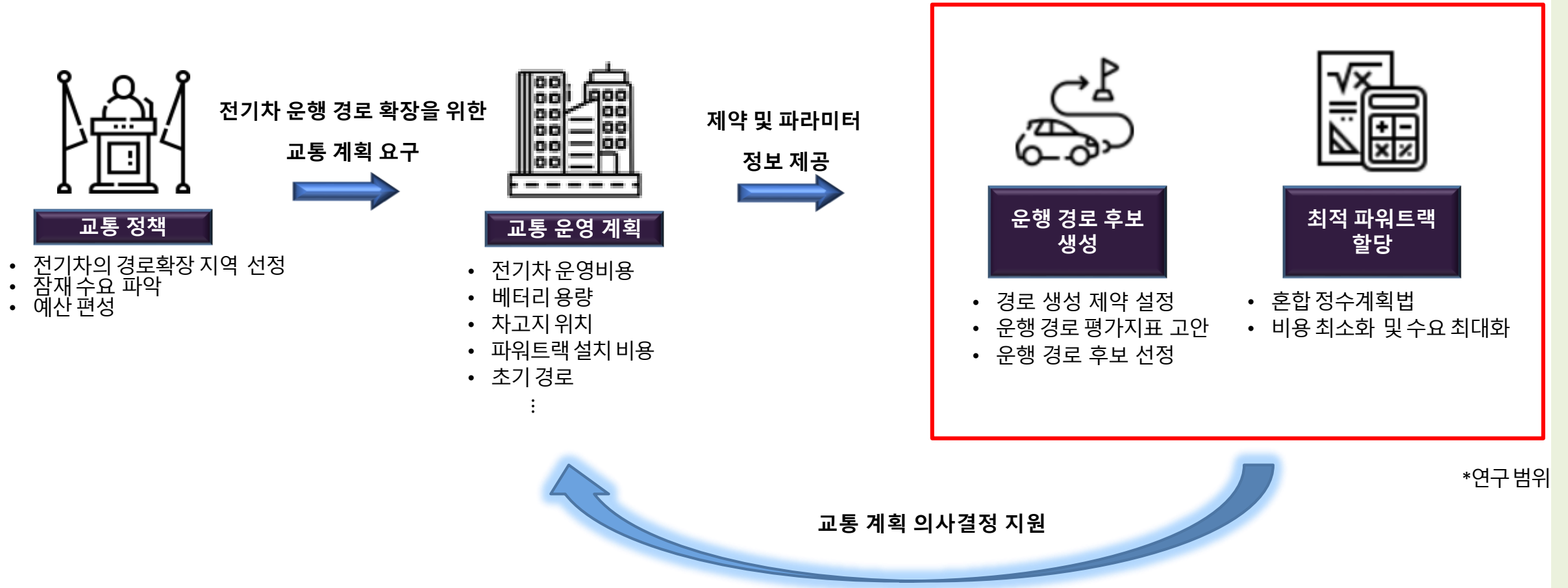
## 2. 연구 내용 및 차별성

### 연구 내용 및 차별성

- 본 연구에서는 **무선 전기 충전 버스 운행에** 있어서 **기존 운행 경로 확장을 위한 효율적 충전 설비 할당**에 관한 연구를 진행.
- **운행 경로와 충전 설비 할당 문제를 동시에 다루는 통합 모델 제시.**
- 운행 경로를 확장을 위해 아래와 같은 결과를 제공할 수 있는 의사결정 모델을 제공.
  - 추가로 운행 되어야할 지점.
  - 운행 경로의 순서.
  - 추가로 설치되어야 할 설비의 위치.
  - 최적 설치 비용.
- 차량의 배터리 용량 및 예산 제약을 고려한 실험을 통하여 대안 제시.

## 2. 연구 내용 및 차별성

### 연구 내용 및 차별성



<Fig 2. 시내버스의 노선 연장 절차>

### 3. 기존 문헌 연구

저자	문제 종류	차량/충전 타입	운행 타입	알고리즘	경로 문제와 통합 여부
Ko and Jang, 2013	설비 할당	Dynamic	단일 노선	메타휴리스틱(PSO)	x
Jang, Y. J., Jeong, S., & Ko, Y. D. 2015	설비 할당	Dynamic	단일 노선	혼합 정수계획법	x
Liu, Song and He, 2017	설비 할당	Dynamic	다중 노선	혼합 정수계획법	x
Hwang et al., 2018	설비 할당	Dynamic	다중 노선	메타휴리스틱(PSO)	x
Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. 2019	설비 할당 & 운행경로	Dynamic & Stationary	다중 노선	메타휴리스틱(GA)	o
Matisziw, Murray and Kim, 2006	경로 확장	내연기관 차량	다중 노선	혼합 정수계획법	x
Kang and Park, 2016	경로 확장	내연기관 차량	다중 노선	메타휴리스틱(GA)	x
Pylarinou, Iliopoulou and Kepaptsoglou, 2021	경로 확장	Plug-in	다중 노선	메타휴리스틱(GA)	x
본 연구	설비 할당 & 경로확장	Dynamic	다중 노선	휴리스틱(경로생성) & 혼합 정수계획	o

<Table 1. 무선 충전 차량의 충전 설비 할당과 경로확장에 관한 연구>

### 3. 문제 개요

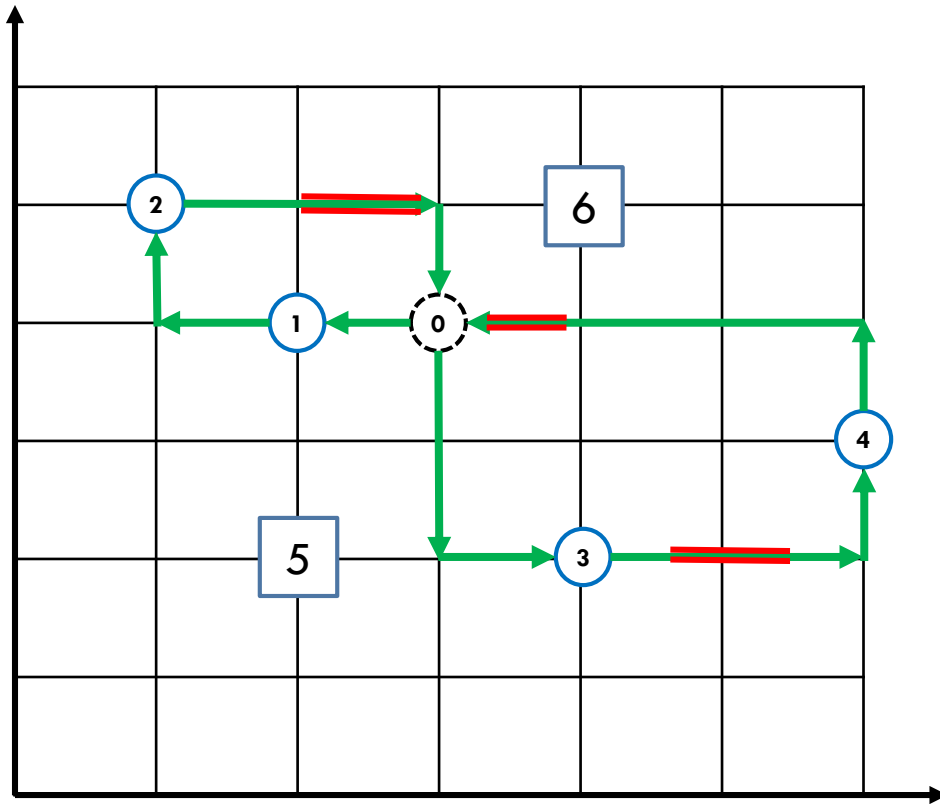
#### 문제 정의

- 본 연구의 목적은 기존의 설치된 인프라를 이용해 전기 버스를 운영하는 환경에서 추가로 충족해야 하는 수요가 주어졌을 때, 효율적인 설비 투자를 통해 최대한의 수요를 만족하는 운영 방법 (확장 노선, 충전 설비 할당 등)을 도출하는 데 있음
- 전기 버스 노선을 확장하고 해당 경로에 전기 충전 설비를 할당하는 두 가지 문제를 같이 해결하고자 함.
  1. 버스 노선의 초기 경로와 추가로 확보할 잠재 수요 정보를 통해 확장될 경로를 생성.
  2. 생성된 경로를 기반으로 최적 경로에 파워 트랙을 운행 경로 위에 할당.
- 최종적으로는 확장된 운행 경로 및 순서와 설비에 투자될 비용을 제시하여 의사결정을 지원.

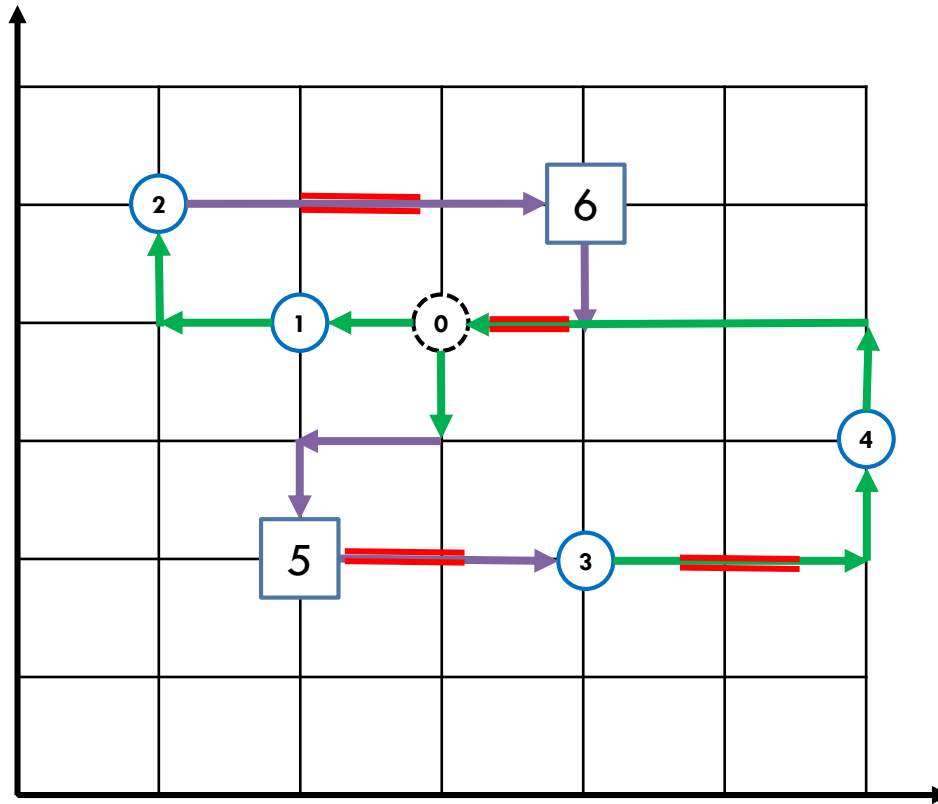


### 3. 문제 개요







#### 문제 정의



<(A). 초기 운행 경로 예>



<(B). 확장된 운행 경로 예>

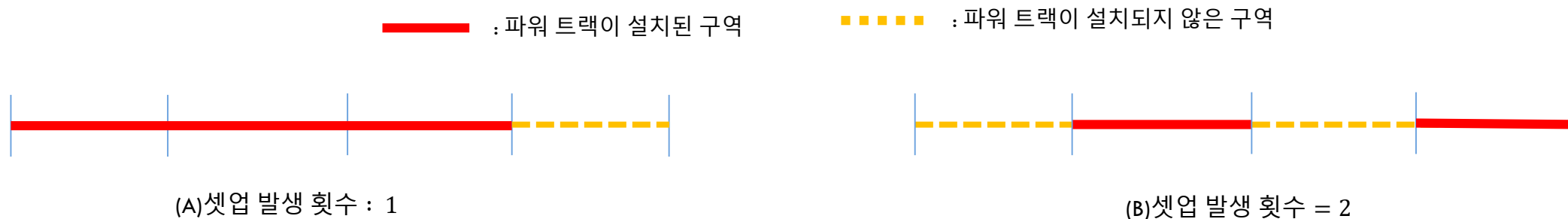
-  : 기존 경로
-  : 확장 경로
-  : 차고지
-  : 기존 수요
-  : 잠재 수요
-  : 파워 트랙

<Fig 3. 무선 충전 전기 버스 경로 확장의 예시>

### 3. 문제 개요

#### 문제 환경 및 가정

- 바둑판 형식으로 이루어진 도로를 통하여 초기 운행 정보와 잠재 수요 위치를 표현.
- **각 노선은 운행되어야 할 정거장의 순서가 존재**하며 확장된 운행 경로 또한 해당 순서를 만족.
- 하나의 도로 안에서 **연결되지 않은 파워 트랙에 대해서는 두 번 이상의 셋업**이 발생.
- 주,정차 관련된 시간적인 요소는 문제에서 제외.
- 차량은 운행 중에 배터리가 항상 최소와 최대 충전량 사이를 유지.



<Fig.4 파워트랙의 셋업 발생 횟수 예시>

### 3. 문제 개요

#### 문제 환경 및 가정

- 편의를 위해 **하나의 버스를 사용하여 다수의 노선을 운영하는 셔틀 버스**를 가정.
- **노선이 해당 지점을 포함하면 모든 수요를 충족.**
- 전력 충전량과 소비량은 선형으로 일정하게 충전되며 잠재 고객의 수요는 임의로 가정.
- 차량의 속력은 평균 속력을 사용하여 일정하다고 가정.
- 차량의 배터리는 최소 충전량과 최대 충전량은 상수로 가정.
- 모든 충전설비는 동일한 충전 성능을 갖고 있으며, 운행 중 연료 소비량은 거리에만 영향을 받는다고 가정.
- 차량 운행 시작시점에 일정량의 배터리가 충전되어 있다고 가정.
- 확장된 설비는 수년간 유지되어 운영된다고 가정.

## 4. 접근 방법

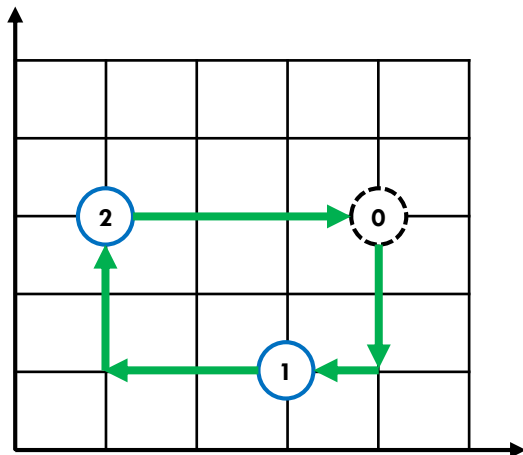
### 운행 경로 생성(Route generation)

- 편의를 위해 **하나의 버스를 사용하여 다수의 노선을 운영하는 셔틀 버스**를 가정.
- **노선이 해당 지점을 포함하면 모든 수요를 충족.**
- 전력 충전량과 소비량은 선형으로 일정하게 충전되며 잠재 고객의 수요는 임의로 가정.
- 차량의 속력은 평균 속력을 사용하여 일정하다고 가정.
- 차량의 배터리는 최소 충전량과 최대 충전량은 상수로 가정.
- 모든 충전설비는 동일한 충전 성능을 갖고 있으며, 운행 중 연료 소비량은 거리에만 영향을 받는다고 가정.
- 차량 운행 시작시점에 일정량의 배터리가 충전되어 있다고 가정.
- 확장된 설비는 수년간 유지되어 운영된다고 가정.

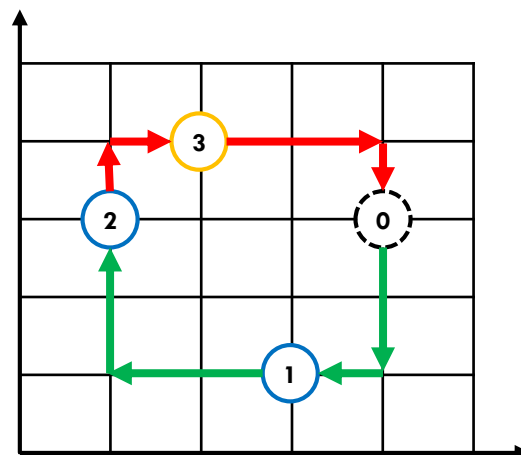
## 4. 접근 방법

### 운행 경로 생성(Route generation)

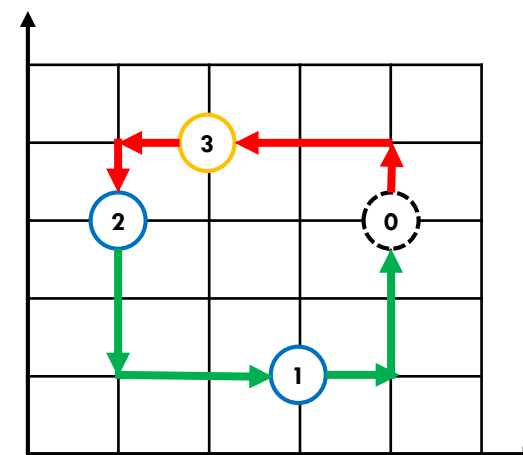
- 운행 경로 생성 규칙
  - 모든 운행 노선은 차고지에서 출발하여 차고지로 도착.
  - **기존의 운행 방향을 항상 유지.**
  - 하나의 운행 노선이 방문하는 수요지의 수에는 제한 없도록 설정.



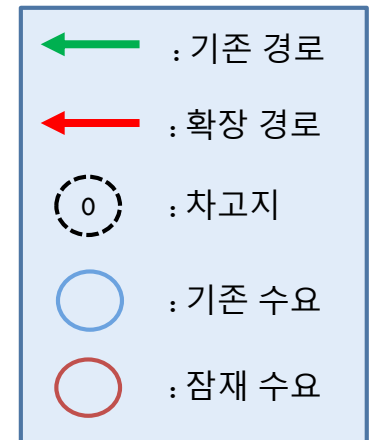
<A: 기존 경로>



<B: 올바르게 확장된 경로>



<C: 운행 방향이 바뀌어 잘못된 운행 경로>

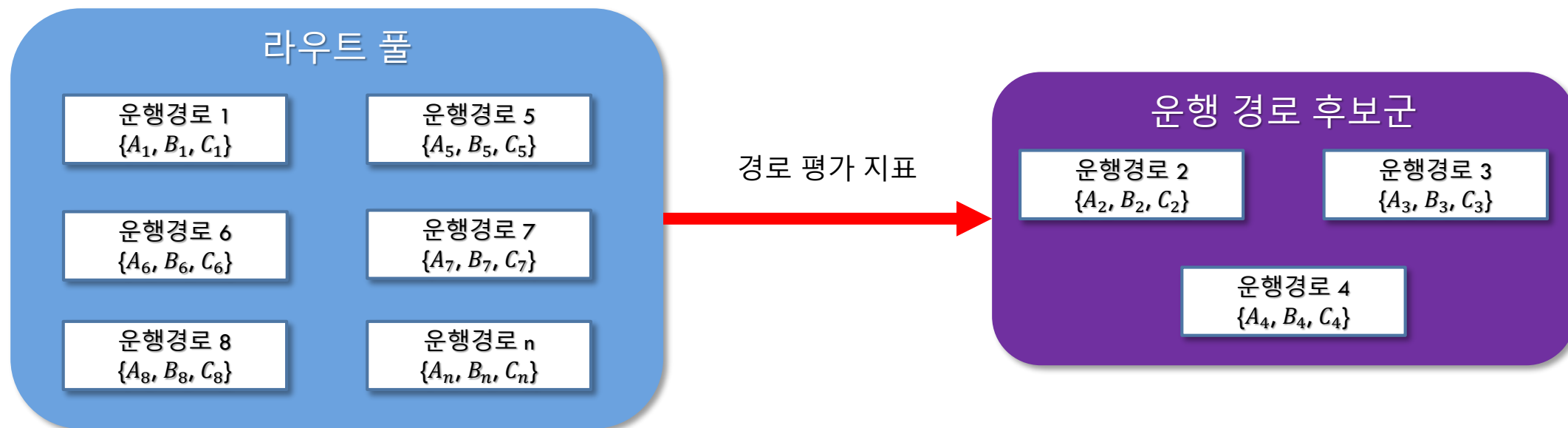


<Fig.6 운행 경로 생성의 예>

## 4. 접근 방법

### 운행 경로 생성(Route generation)

- 앞서 정한 운행 경로 생성 규칙을 통해 라우트 풀을 확보
- 라우트 풀 있는 모든 운행경로에 대하여 파워트랙 할당 문제를 푸는 것 아니라 운행에 적합한 후보들을 추려서 후보군을 생성하는 것이 운행 경로 후보 생성의 목적.
- 좋은 운행경로를 후보군에 포함시키는 것이 중요하며 이를 위해 **지표(경로 평가 지표)**를 도입.



<Fig.7 A,B,C 노선을 갖는 라우트 풀과 운행 경로 후보군>

## 4. 접근 방법

### 경로 평가 지표

- 파워 트랙 할당에 적합한 경로를 선별하기 위한 지표 개발
- 경로 평가 지표

$$\text{경로 평가 지표} = \frac{Min_{dis}}{Crr_{dis}} * weight + \frac{Crr_{dem}}{Max_{dem}} * (1 - weight)$$

→ 거리에 대한 부분

→ 경로의 수요에 대한 부분

$Min_{dis}$  : 라우트 풀에 있는 경로 중 가장 적은 이동 거리를 갖는 경로의 이동거리

$Crr_{dis}$  : 현재 경로의 총 이동거리

$Max_{dem}$  : 경로 확장을 통해 충족할 수 있는 전체 수요

$Crr_{dem}$  : 현재 경로가 충족하는 총 수요

$weight$  : 운행 거리와 충족된 수요의 중요도를 나타내는 가중치

※ 경로 평가 지표 ↑ = 거리 ↓ + 수요 ↑

## 4. 접근 방법

### 운행 경로 후보군의 크기 설정

- 앞서 구한 경로 평가 지표를 통하여 라우트 풀의 목적함수가 가장 좋은 값 별로 내림차순으로 정렬을 진행.
- 실제 최적해의 위치를 정확하게 경로 평가 지표가 가장 좋은 값에 해당하지는 않지만 **대략 경로 평가 지표의 값에 상위 2% 안에 위치하는 것을 안에 표를 통하여 확인**
  - 아래 표에서 만들어진 라우트 풀 개수는 독립적으로 확보.
  - 경로 평가 지표의 가중치(weight)는 0.1로 설정.

라우트 풀의 개수	최적해의 위치	퍼센트
100	0	0.00%
200	3	1.50%
400	2	0.50%
600	8	1.33%
800	4	0.50%
1000	0	0.00%

\* 위치 인덱스는 0부터 시작

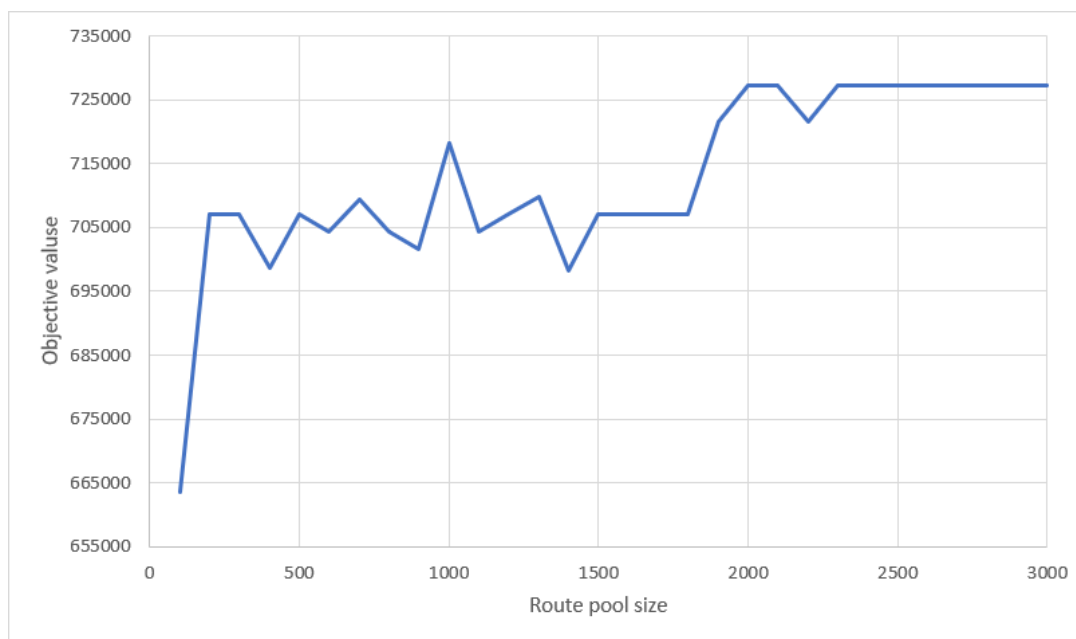
<Table 2. 경로 평가 지표를 통해 정렬하였을 때의 최적해의 위치 >



## 4. 접근 방법

### 라우트 풀의 크기 설정

- 전체 라우트 풀 중에서 경로 평가 지표를 기준으로 상위 2%안에 있는 후보들에 대해서 Allocation을 진행.
- 아래 그래프는 라우트 풀의 크기를 100개에서 3000개 까지 만들어 보면서 목적함수 값을 관찰 아래 표에서 만들어진 라우트 풀 개수는 독립적으로 확보.
- 2000~2500개 이상의 크기 부터 목적함수의 값이 수렴하는 것을 파악.



<Fig 8. 라우트 풀 크기에 따른 목적함수 그래프>

## 4. 접근 방법

### 최적 파워트랙 할당(Power track allocation)

- 앞서 생성된 경로를 이용하여 해당 경로 내에서 파워트랙 할당을 진행

① 운행 경로 선택

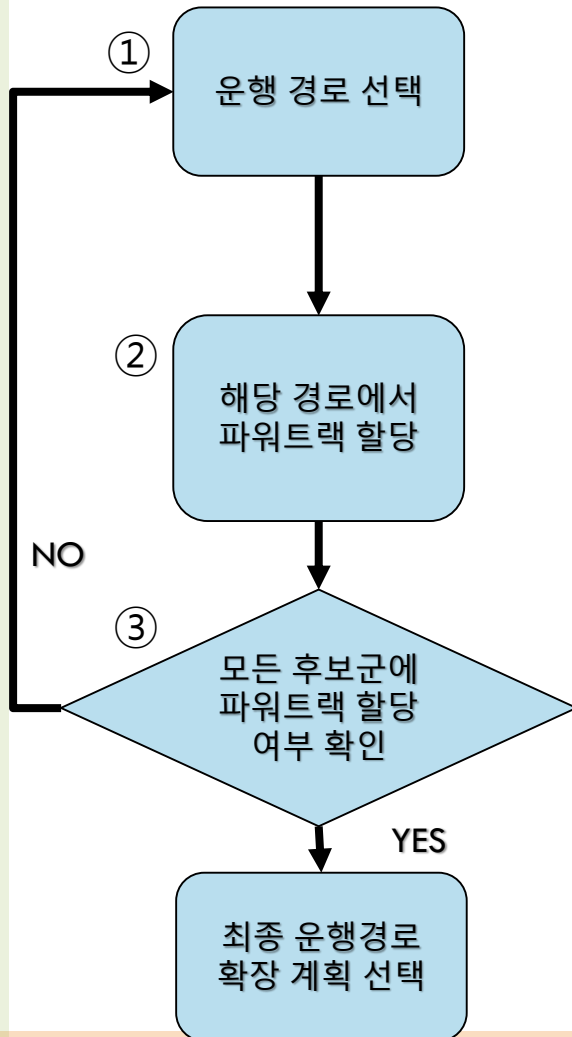
- 후보군에 있는 운행 경로를 임의로 선택

② 해당 경로에서 파워트랙 할당

- 선택된 경로 정보를 이용하여 파워트랙 할당을 진행
- 파워트랙 할당 문제는 혼합정수계획법을 이용하여 접근

③ 모든 후보군에 파워트랙 할당

- 후보군에 있는 모든 경로에 대하여 파워트랙을 할당
- 가장 수요를 최대화하며 파워트랙 설치 비용을 최소화하는 경로를 최종적으로 선택



<Fig.9 파워트랙 할당 절차>

## 4. 접근 방법

### 최적 파워트랙 할당(Power track allocation)

- 기호
  - 시점:  $t$
  - 도로 등분의 수:  $reg$
  - 도로 인덱스:  $i$
  - 도로  $i$  의 세부 인덱스:  $j$
  - 배터리 용량:  $Bat$
  - 운행 전 배터리 충전량:  $soc^{int}$
  - 최소 배터리 충전 상태:  $soc^{min}$
  - 최대 배터리 충전 상태:  $soc^{max}$
  - 단위 도로 길이:  $dis$
  - 전력 공급량:  $cr$
  - 충전 효율:  $ef$
  - 평균 차량 속도:  $speed$
  - 차량의 에너지 소비량:  $ec$
  - 설비 운영 기간:  $year$
  - 파워 트랙의 케이블 비용(\$):  $var_{cost}$
  - 파워 트랙의 설치 비용(\$):  $fix_{cost}$
  - 버스가 접근하는 도로 집합:  $R$
  - 초기 경로의 도로 집합:  $Init$
  - 임의의 큰 수:  $M$
- 확장된 경로의 도로 집합:  $R$
- 운행 운임 매출(\$):  $FR$
- 결정 변수
  - 도로  $i, j$  위치에 파워 트랙 설치여부:  $r_{ij}$ 
    - $r_{ij} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ 위치에 파워트랙이 설치된 경우} \\ 0, & \text{파워트랙이 설치되지 않은 경우} \end{cases}$
  - $t$  시점에서 배터리 충전 상태:  $S_t$  ( $s_t \geq 0$ )
  - 도로  $i, j$  위치에 셋업 발생 유무:  $z_{ij}$ 
    - $z_{ij} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ 위치에 셋업이 발생한 경우} \\ 0, & \text{셋업이 발생하지 않은 경우} \end{cases}$

## 4. 접근 방법

### 최적 파워트랙 할당(Power track allocation)

$$\max \underbrace{FR * year}_{\text{확보된 운임 매출*시설 이용기간}} - \underbrace{\left( var_{cost} * \left( \sum_{i,j \notin Init} r_{i,j} \right) \right)}_{\text{파워트랙의 길이*설비 변동비}} + \underbrace{\left( fix_{cost} * \left( \sum_{i,j \notin Init} z_{i,j} \right) \right)}_{\text{파워트랙 셋업 횟수*설비 셋업 비용}}$$

s. t

$$S_0 = Bat * soc^{max} * soc^{init}$$

(1) 초기 배터리 충전 상태

$$S_t = S_{t-1} + cr * \left( \frac{\frac{dis}{rseg}}{speed * 1000} \right) * r_{i,j} - ec * \frac{dis}{rseg * 1000} \quad (t \neq 0, \forall i, j)$$

(2) 위치에 따른 배터리 충전량

$$S_t \leq Bat * soc^{max} \quad (\forall t)$$

(3) 최소, 최대 배터리 충전량 제약

$$S_t \geq Bat * soc^{min} \quad (\forall t)$$

(4)

$$z_{i,j} * M \geq r_{i,j} - r_{i,j-1} \quad (\forall j, 0 \neq j)$$

(5) 셋업 발생 유부 판단 제약

$$z_{i,0} * M \geq r_{i,0} \quad (\forall j)$$

(6)

$$r_{i,j} = 1 \quad (i, j \in Init)$$

(7)

$$z_{i,j} = 1 \quad (i, j \in Init)$$

(8)

초기 운행 경로 상태

$$s_t \geq 0 \quad (t = 0, 1, 2, \dots)$$

(9)

$$z_{i,j} = 0 \text{ or } 1 \quad (i \in R, j = 0, 1, 2, \dots, rseg - 1)$$

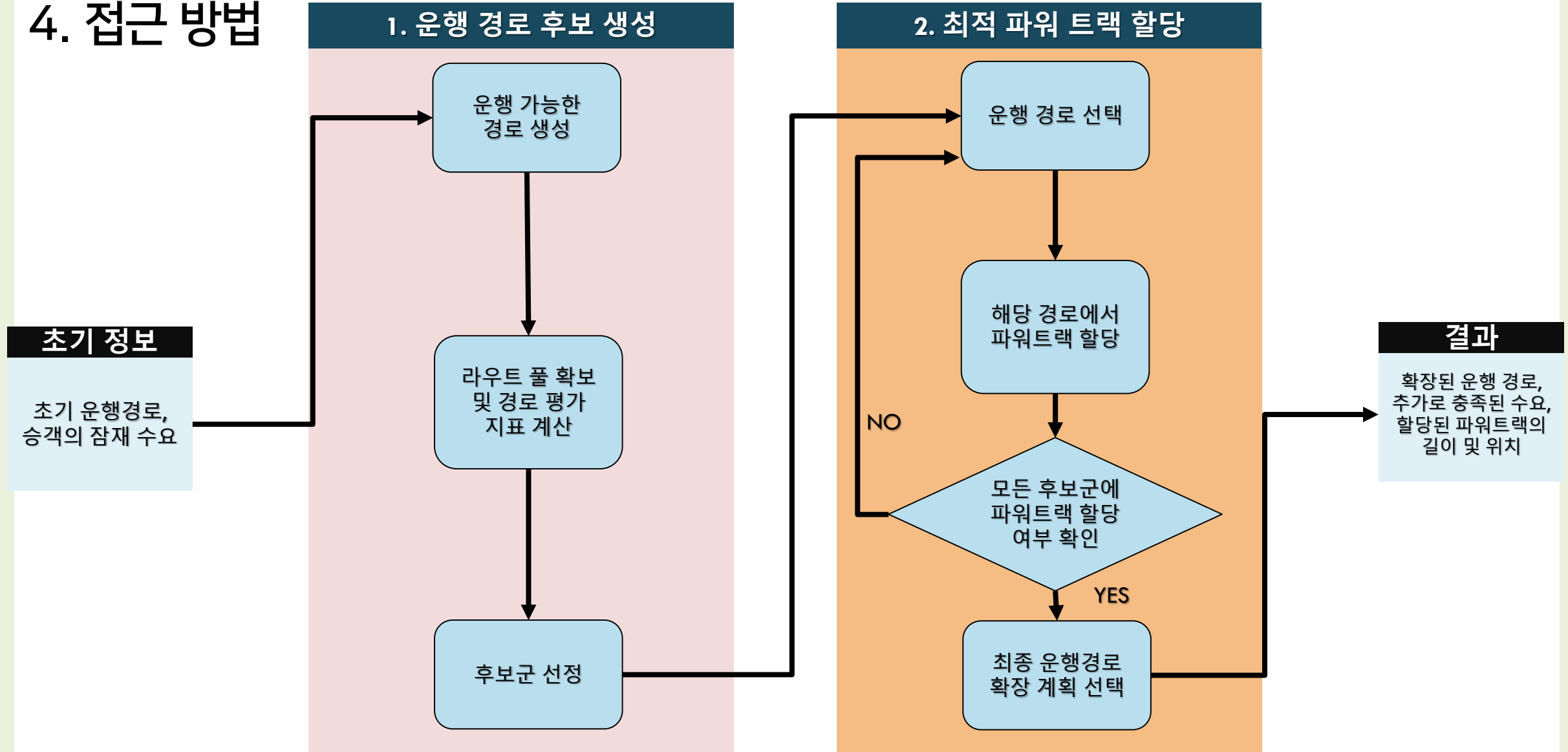
(10)

결정 변수 조건

$$r_{i,j} = 0 \text{ or } 1 \quad (i \in R, j = 0, 1, 2, \dots, rseg - 1)$$

(11)

## 4. 접근 방법



<Fig.10 전가 버스 경로 확장 모델의 전체 개요>

## 5. 실험 및 결과 분석

### 실험 파라미터 및 실험 환경

#### • 실험 파라미터 설정

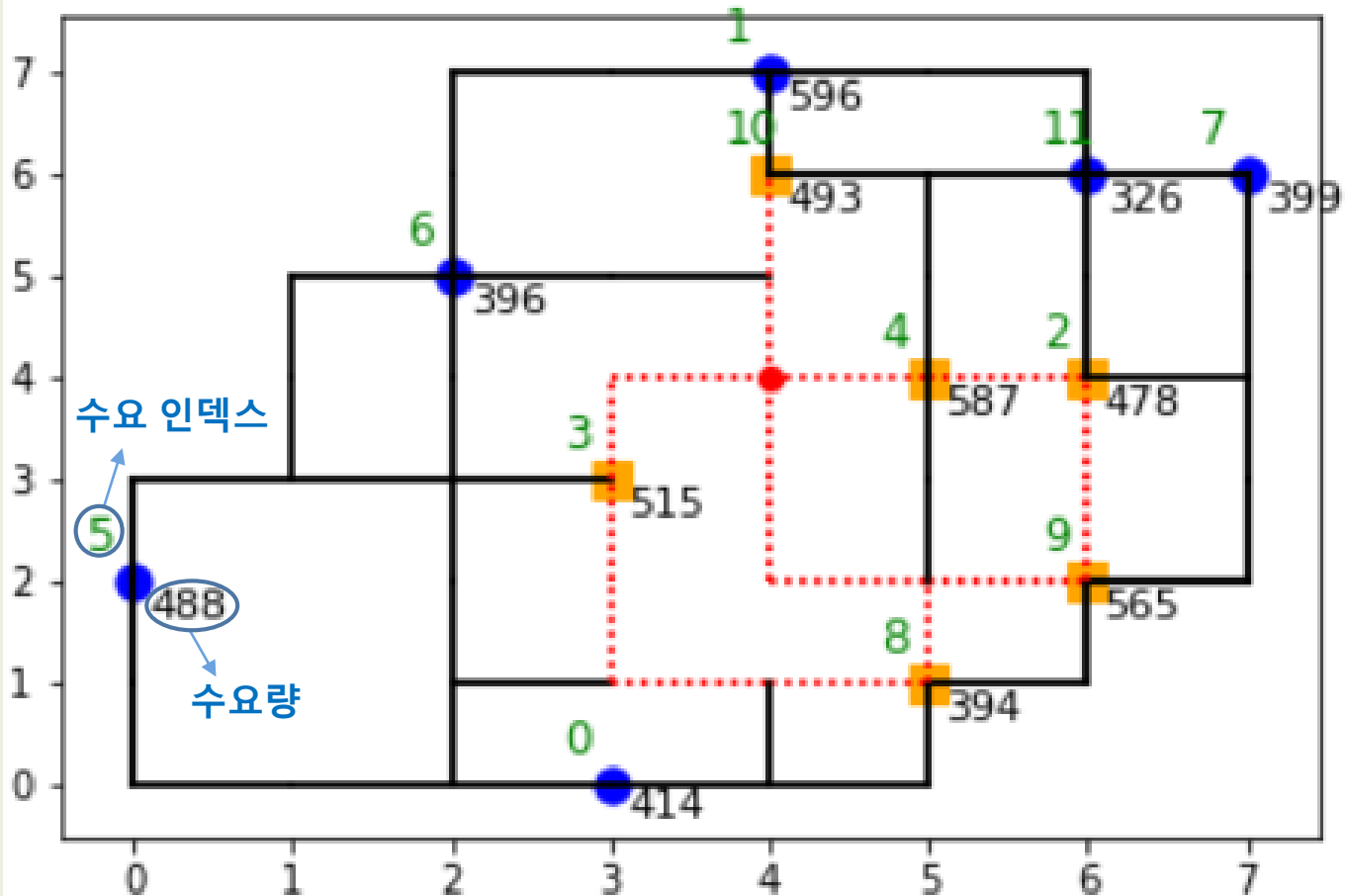
- $Bat$ : 60kwh
- $soc^{int}=0.8$
- $soc^{min}=0.3$
- $soc^{max}=0.9$
- $ef=75\%$
- $dis=700m$  (가정)
- $rseg=5$  (가정)
- $cr=100kwh$
- $speed = 15km/h$
- $ec = 2.5kwh/km$
- $year = 3$
- $var_{cost} = \$20$
- $fix_{cost} = \$500$

#### • 소프트웨어

- IBM의 최적화를 위한 기본 Python 모델링 라이브러리 'docplex'를 사용
- Python 3.7 버전
- docplex 2.23.222 버전

## 5. 실험 및 결과 분석

### 운행거리 및 투자 비용



#### <초기 운행 경로>

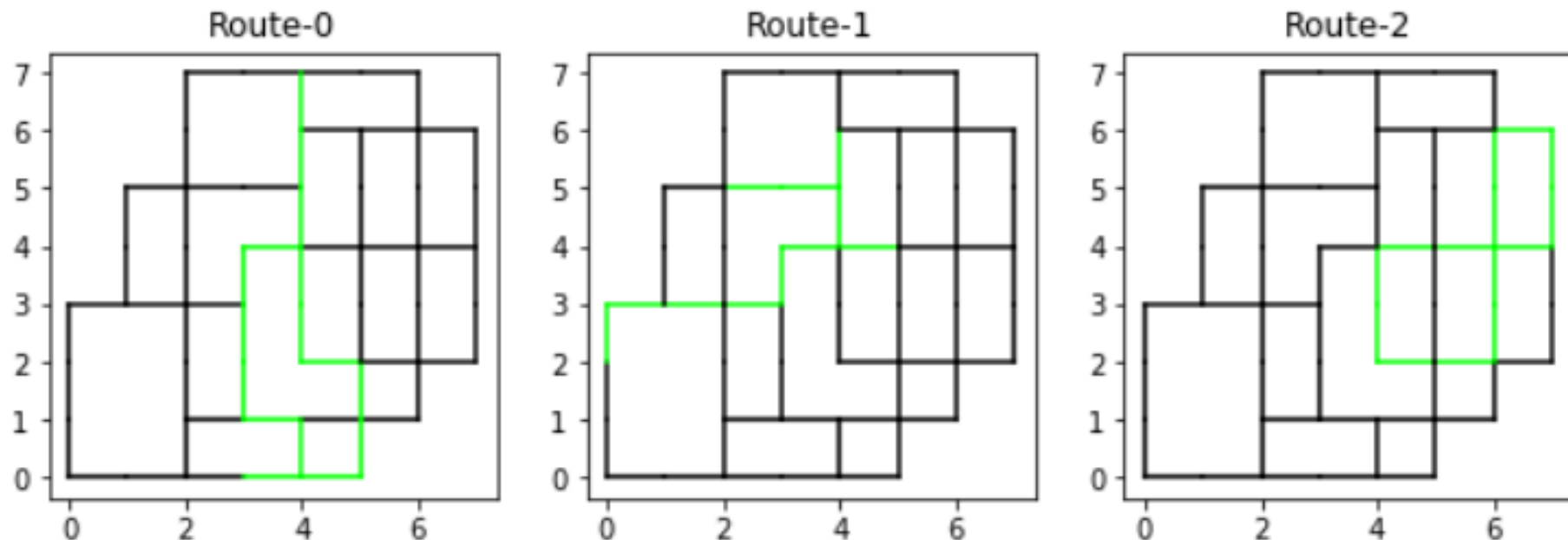
- ㉞ (차고지) -> (3) -> (8) -> (차고지)
- ① (차고지) -> (4) -> (10) -> (차고지)
- ② (차고지) -> (2) -> (9) -> (차고지)

<Fig 11. 초기 운행경로 및 승객 수요>

## 5. 실험 및 결과 분석

### 운행거리 및 투자 비용

- 실험 결과 값
  - 운행된 도로 거리: 43.4km
  - 추가적으로 설치된 도로의 개수: 5
  - 추가적으로 설치된 도로의 길이: 2.8km
  - 확장에 필요한 설비 비용: \$58,500
  - 확장을 통한 총 운임 매출: \$785,700



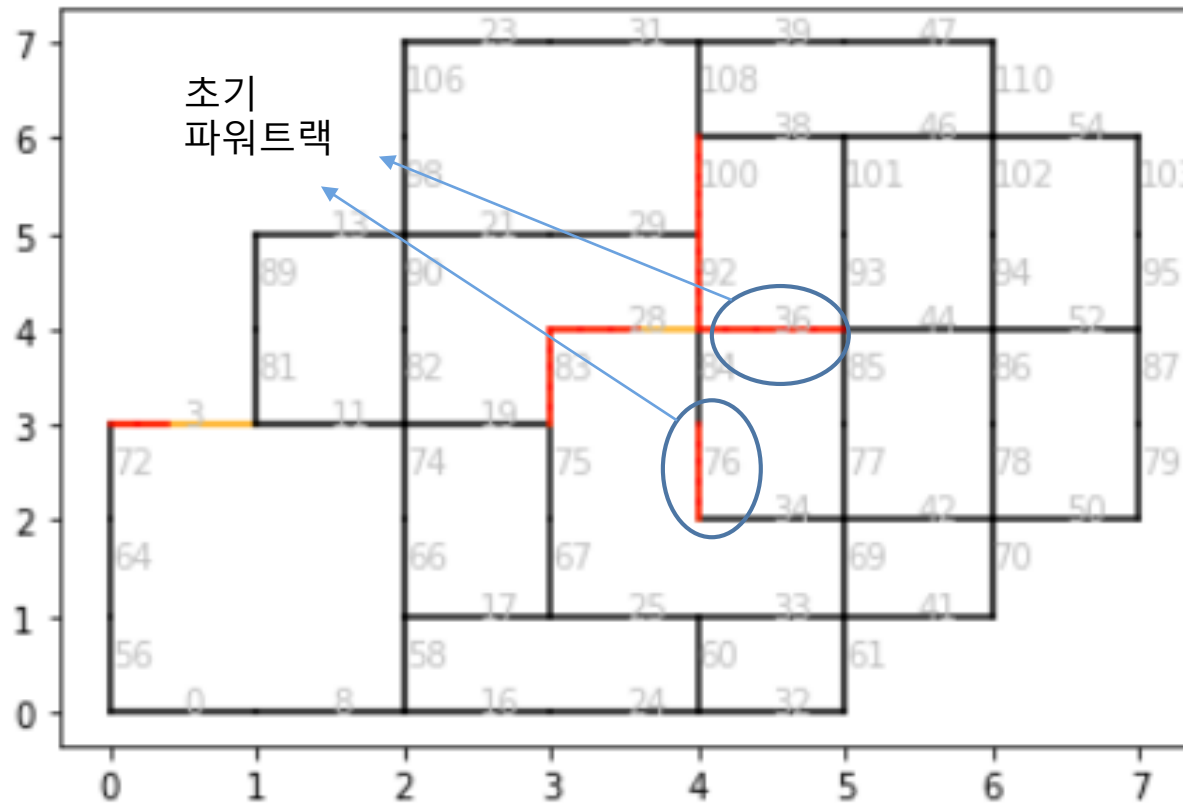
<Fig.12 각 노선 별 확장된 운행 경로>



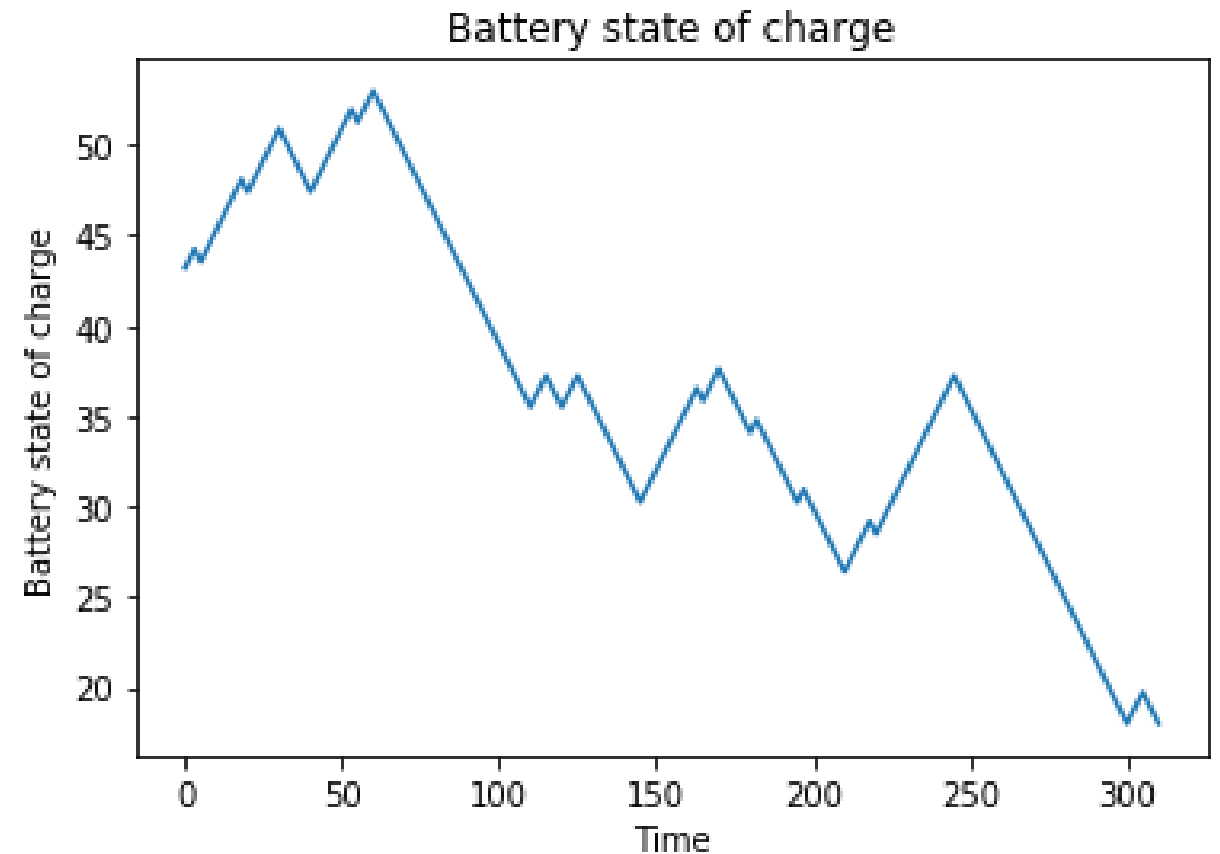
## 5. 실험 및 결과 분석

### 충전 설비 위치 및 운행 중 차량의 배터리 상태

- Fig.12의 회색의 번호는 도로번호를, 주황색 부분은 해당 도로에는 설비가 설치 되었으나 일부 설치되지 않은 부분
  - 3번 도로와 28번 도로의 경우 부분적으로 충전 설비가 설치.



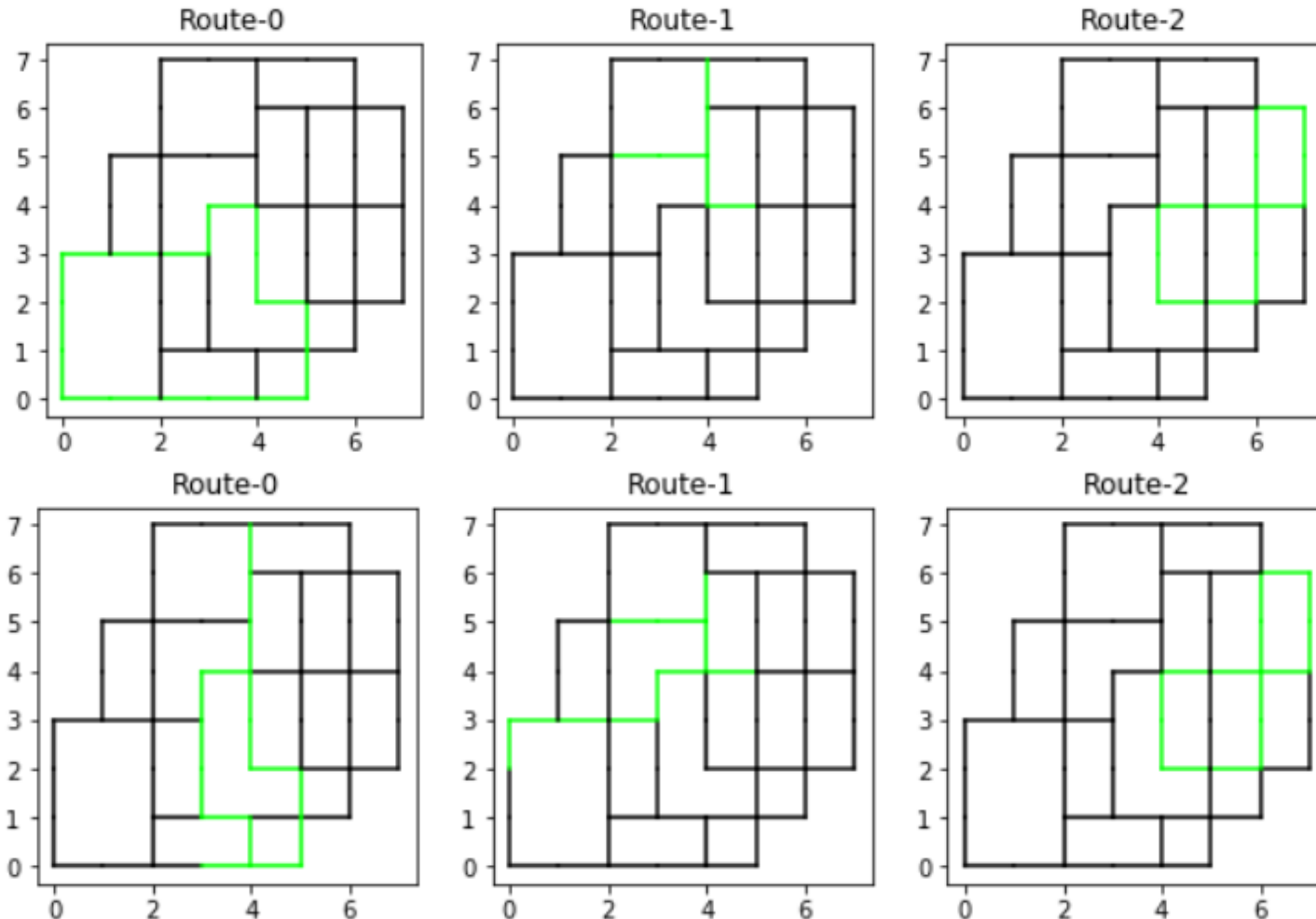
<Fig.13 설치된 파워 트랙의 위치>



<Fig.14 차량의 배터리 상태>

## 5. 실험 및 결과 분석

### 경로간 충전 설비 공유 효과



운행 거리	설비 비용
32.2km	\$67,400

<Fig.15 라우트 풀 중 임의의 경로에 대한 실험결과>

운행 거리	설비 비용
43.4km	\$58,500

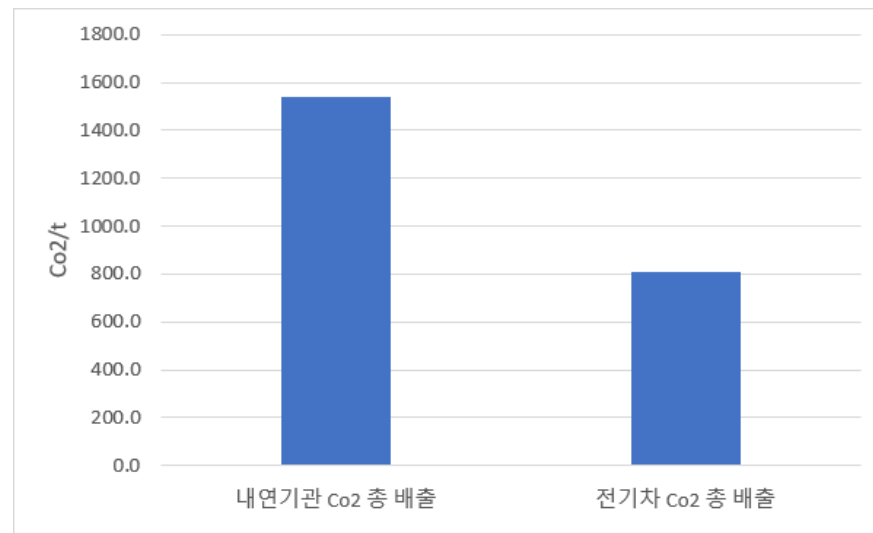
<Fig.16 라우트 풀 중 가장 좋은 해를 갖는 경로에 대한 실험결과>

- 위의 결과를 토대로 **운행 거리가 더 길지라도 운행이 공유되어지는 길을 지나도록 설치하는 전략이 더 경제적인 것을 확인.**

## 5. 실험 및 결과 분석

### 전기 버스를 이용한 환경적 효과 비교

Route	추가 확보 수요 (100명)	내연기관 운행시 이산화탄소배출량 (t)	전기차 운행시 이산화탄소배출량 (t)
0	1010	632.6	332.1
1	884	498.3	373.7
2	725	408.7	102.2



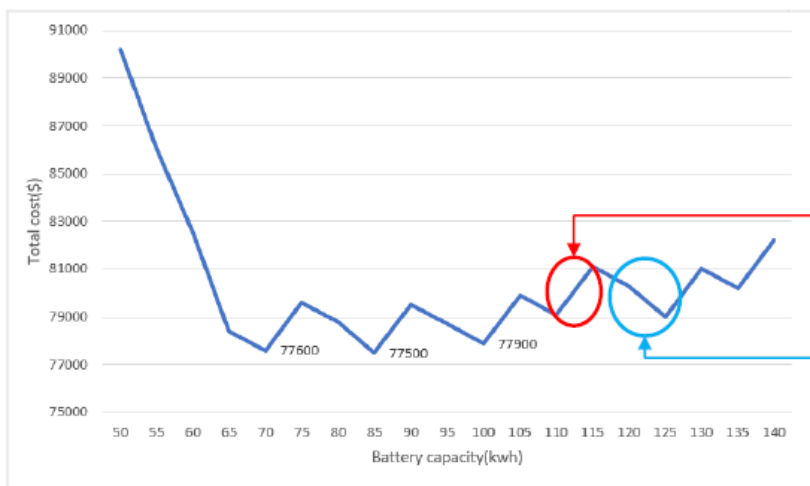
<Fig.17 무선 충전 버스의 경로 확장을 통한 이산화탄소 감소량 비교>

- **경로 확장 없이 내연기관 차량으로 모든 잠재 수요를 충족시킬 경우와**, 무선 충전 전기차를 통한 경로확장을 할 때 이산화탄소( $CO_2$ ) 절감 수준을 계산.
- 이산화탄소 배출량은 내연기관 차량의 경우 480g/mi, 전기차량의 경우 180g/mi의 데이터를 사용.
- 전기차량을 이용할 경우 약 731.6 톤의 이산화탄소 감축 효과를 얻을 수 있으며, 비용으로 계산할 경우 \$4104 정도의 절감 효과가 있을 확인.

## 5. 실험 및 결과 분석

### 배터리 용량에 따른 비용 분석

- 배터리 용량 증가에 따른 설비 투자비용의 변화를 확인하기 위한 실험을 진행.
- 배터리 용량이 증가하더라도 확장비용이 반드시 감소하는 것이 아니기에 전체 비용이 증가하는 구간(빨간 구간)이 존재.
- 반대로 배터리 용량 증가 효과로 인해 확장 비용이 감소할 때에는 전체 비용이 감소하는 구간(파란 구간)이 존재.



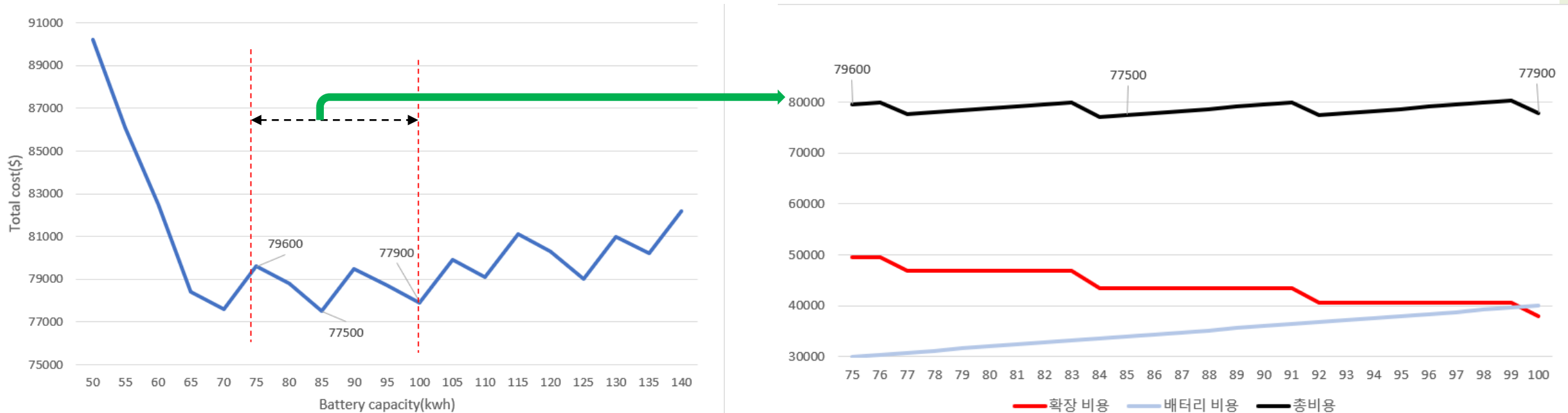
Battery size	확장 비용	배터리 비용	총비용
50	70200	20000	90200
55	64100	22000	86100
60	58500	24000	82500
65	52400	26000	78400
70	49600	28000	77600
75	49600	30000	79600
80	46800	32000	78800
85	43500	34000	77500
90	43500	36000	79500
95	40700	38000	78700
100	37900	40000	77900
105	37900	42000	79900
110	35100	44000	79100
115	35100	46000	81100
120	32300	48000	80300
125	29000	50000	79000
130	29000	52000	81000
135	26200	54000	80200
140	26200	56000	82200

<Fig.18 배터리 용량 증가에 따른 비용 그래프 및 표 >

## 5. 실험 및 결과 분석

### 배터리 용량에 따른 비용 분석

- 기존의 배터리 용량 별 비용 그래프에서 배터리 용량이 75~100kwh인 구간에 대하여 1kwh씩 배터리 용량을 조절해가며 결과를 확인.
- 배터리 비용은 1kwh 당 400\$이므로 선형적으로 증가하지만 확장비용은 Step function과 같은 형태로 배터리 용량 증가해도 줄어들지 않다가 특정 지점에 도달했을 때 크게 감소.

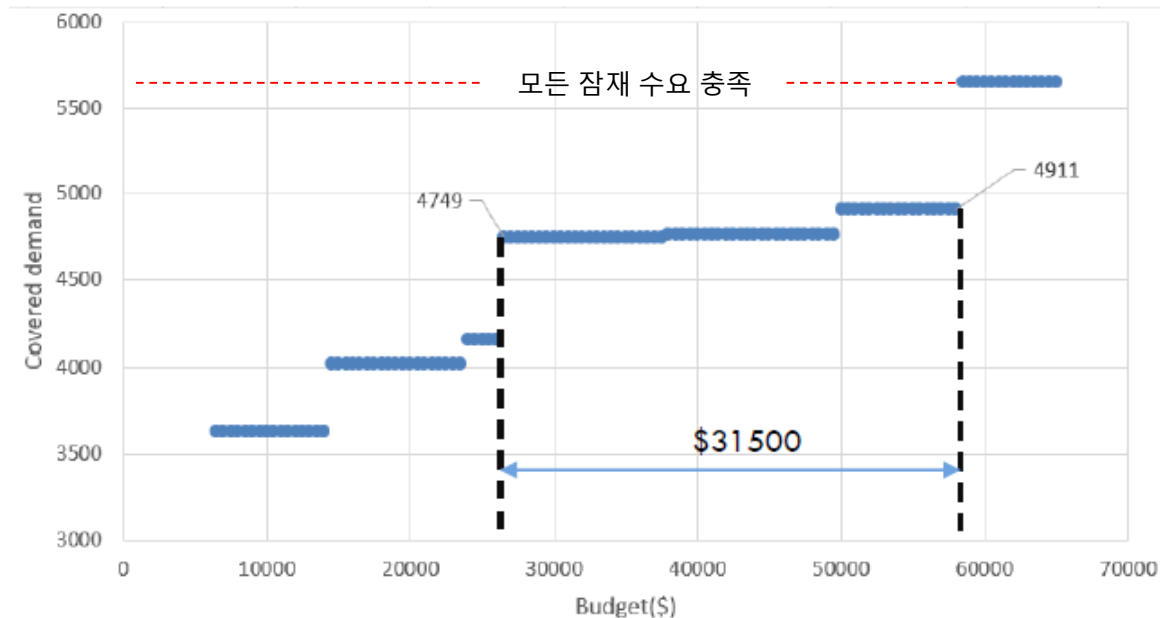


<Fig 19. 75~100kwh 구간에서의 배터리 용량 증가에 따른 비용 >

## 5. 실험 및 결과 분석

### 예산 제약에 따른 수요 변화

- 사용가능한 예산을 \$6,500 부터 \$500 단위로 증가시키며 어느 지점 부터 추가적으로 수요를 더 충족시킬 수 있는지를 확인.
- 예산 제약이 \$6,100 미만 일 경우에는 추가로 수요를 확보 불가능.
- 모든 수요를 충족시키는데 최소 확장비용이 \$58,500가 필요.
- 화살표 구간에서 예산 제약을 상당히 완화시키더라도 추가 수요에 대한 상승폭이 상대적으로 미미하다는 것을 확인.



<Fig.20 예산 제약에 따른 수요 변화 그래프 >

## 6. 결론

- 본 연구에서는 추가적인 승객의 수요를 충족시키기 위한 무선 충전 전기 버스의 경로 확장에 대한 연구를 진행.
  - 차량의 확장된 운행 경로 생성 및 충전 설비 할당 문제를 통합해서 해결하기 위한 접근 방법 제안
  - 실험결과, 차량의 운행거리가 길어도 각 운행 경로간 충전 설비가 공유되는 지점이 많을 수록 비용적으로 경제적인 것을 확인.
  - 민감도 분석 결과, 배터리 비용과 확장 비용 간에 trade off가 있다는 점을 확인.
  - 예산에 제약이 있는 상황에서는 예산 제약을 상당히 완화시키더라도 추가 수요에 대한 상승폭이 상대적으로 미미한 구간이 있다는 것을 발견.
- 추가적으로 실제 무선 충전 버스차량이 운행 중인 노선과 도로 데이터를 이용하고, 운행중 차량의 배터리 충전량과 소비량 또한 상수가 아닌 확률적 혹은 지형 정보를 이용한다면 더 현실적인 결과 분석이 가능할 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] Ko, Y. D. and Jang, Y. J. (2013) ‘The optimal system design of the online electric vehicle utilizing wireless power transmission technology’, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 14(3), pp. 1255–1265. doi: 10.1109/TITS.2013.2259159.
- [2] Liu, Z., Song, Z. and He, Y. (2017) ‘Optimal Deployment of Dynamic Wireless Charging Facilities for an Electric Bus System’, *Transportation Research Record*, 2647(1), pp. 100–108. doi: 10.3141/2647-12.
- [3] Hwang, I. *et al.* (2018) ‘System Optimization for Dynamic Wireless Charging Electric Vehicles Operating in a Multiple-Route Environment’, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 19(6), pp. 1709–1726. doi: 10.1109/TITS.2017.2731787.
- [4] Jang, Y. J., Jeong, S., & Ko, Y. D. (2015). System optimization of the On-Line Electric Vehicle operating in a closed environment. *Computers & Industrial Engineering*, 80, 222-235
- [5] Iliopoulou, C. and Kepaptsoglou, K. (2019) ‘Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Pergamon, 77, pp. 178–197. doi: 10.1016/J.TRD.2019.10.016.
- [6] Matisziw, T. C., Murray, A. T. and Kim, C. (2006) ‘Strategic route extension in transit networks’, *European Journal of Operational Research*. North-Holland, 171(2), pp. 661–673. doi: 10.1016/J.EJOR.2004.09.029.
- [7] Kang, Y. and Park, S. (2016) ‘Extension of bus service areas using genetic algorithm’, *Spatial Information Research*. Korean Spatial Information Society, 24(6), pp. 719–732. doi: 10.1007/s41324-016-0068-0.
- [8] Pylarinou, C., Iliopoulou, C. and Kepaptsoglou, K. (2021) ‘Transit route network redesign under Electrification: Model and application’, *International Journal of Transportation Science and Technology*. Tongji University and Tongji University Press, 10(4), pp. 366–379. doi: 10.1016/j.ijtst.2021.01.001.