

## 이동식 충전소를 이용한 전기차 충전 스케줄링

Electric vehicle charging scheduling with mobile charging station

연세대학교

산업공학과

LI HUA,

li\_hua611@yonsei.ac.kr

정봉주

bongju@yonsei.ac.kr

2022년 한국SCM학회 춘계컨퍼런스

- ◆ 1장 서론
- ◆ 2장 기존 문헌 연구
- ◆ 3장 문제 정의
- ◆ 4장 수리 모형
- ◆ 5장 실험
- ◆ 6장 결론

---

# 1장 서론

## 1.1. Overview

## 1.2. 연구의 배경 및 필요성

## 1.3. 연구범위

# 1.1 Overview

## ❖ 연구목적

- 이동식 충전소 환경(Mobile charging station) 수요 충족, 이동식 충전소 디스패칭, 사용자 스케줄링을 통합하는 모델을 제시.

Set covering and Dispatching and Scheduling integrated Problem (SDSP)으로 정의.

## ❖ 문제상황

- 전기차 충전소 인프라 부족.
- 이동식 충전소 운영시 운영 비용 높음.

## ❖ 연구결과

- Solomon benchmarking data를 이용하여 문제 솔루션 얻음.
- 민감도 분석을 통해 시사점 도출.

#### ❖ 환경

- 환경오염과 에너지 문제를 해결하기 위해 교통수단 대안으로 전기차가 각광받고 있음.

#### ❖ 전기차가 직면한 장벽:

- 충전소 인프라 부족 (Kuby, Lim, 2007)
- 주행거리 제한 (Capar, Kuby, 2012)
- 충전서비스 불편함.
- 사용자 불안감 (Rauh .2015)

#### ❖ 현재까지 다수의 연구

- 전기차 충전소 위치 사이즈 등 인프라 계획 관련.
- 에너지 활용도,고객 만족도를 높이기 위한 스케줄링,VRP 운영 전략 (Future Gener. 2017).

## 1.2 연구의 배경 및 필요성

### 배경

- 해당 문제를 보완하기 위해 여러 형태의 충전방식이 나타나고 있는 가운데 본 연구는 **이동식 충전소 (Mobile Charing Station, MCS)**를 환경으로 문제 해결을 제시.

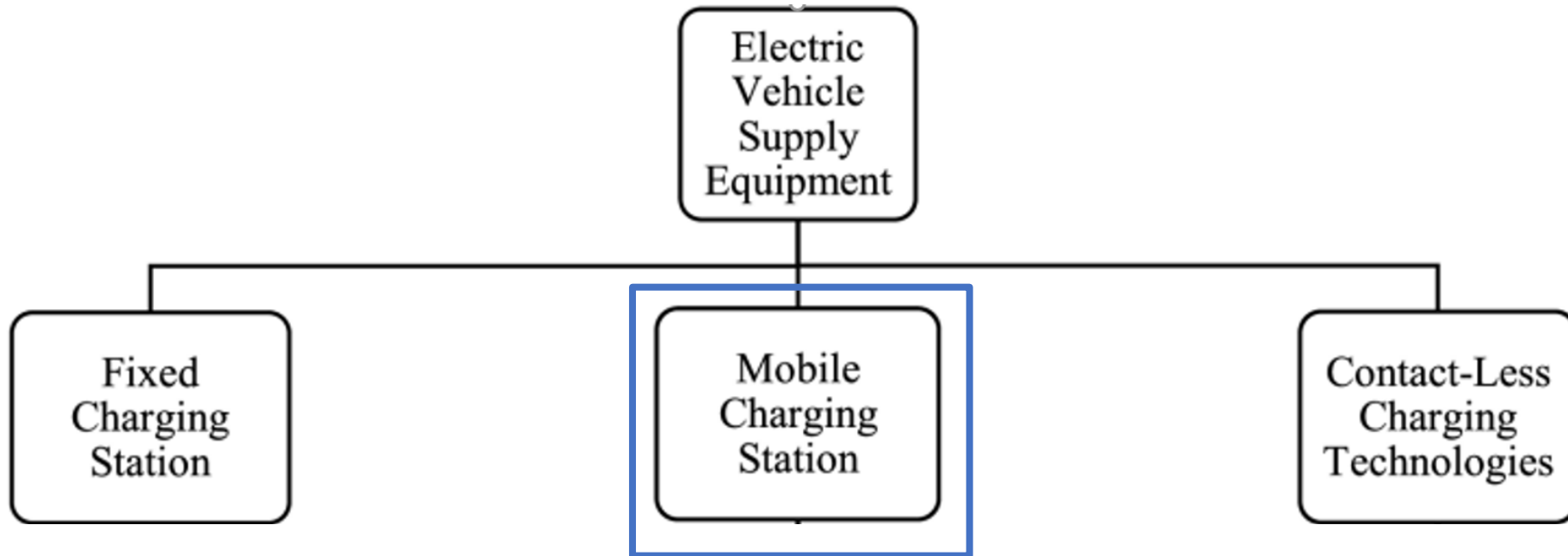


Fig. 1. Classification of charging methods

## 1.2 연구의 배경 및 필요성

### Mobile Charing Station State-Of-The-Art



(a)



(b)

- 미국, 유럽, 중국에서 운영중. (Cui Shaohua,2017)
- MCS 전기차 발전에 이득. (Y. Zhang ,2020)

#### ❖ MCS 장점:

- 사용자 주행 거리 불안해소
- 이동가능
- 공간 활용도 높음

#### ❖ MCS 문제:

- 운영비용 높음

#### ❖ 문제 이유

- 용량제한
- 배터리를 장착했기에 재충전 필요.
- 이동부하가 큼.

## 1.3 연구범위

### ❖ 본 연구는

- MCS환경에서 운영 최적화 하는 이동식 충전소 운영자 **통합 의사결정 모델 제안.**
- 운영자 **Profits**을 **최대화** 하는 동시에 **사용자 입장도 고려.**
- **수요커버링, MCS 디스패칭**과 **사용자 스케줄링 문제**
- 여러 의사결정을 통합하여 최적의 **해를 도출함.**

도메인	이동식 충전소 운영 방안
문제 유형	Demand response+ MCS dispatching + Scheduling
최적화 구분	Mixed Integer Linear Programming(MILP)



---

## 2장. 기존 문헌 연구

2.1. 이동식 충전소 서비스

2.2. 전기차 충전 스케줄링

2.3. 기존 연구와의 차별성

## 2.1. 이동식 충전소 서비스

### 이동식 충전소(MCS)관련 연구

Framework 제안	이동식 충전이 <b>경제적으로 이득.</b> 사용자가 충전소에서 낭비되는 시간 절약	Y. Zhang (2020)
VRP	<b>계획과 운영을 통합한</b> 시스템 구축. 계획: MCS의 배터리 용량, 수량 결정. 운영: MCS 경로를 정하는 VRP모델	Tang & He (2020)
	총 이동 거리를 최소화하는 MCS 라우팅 MILP 문제. 솔로몬의 벤치마크로 검증.	Cui & Zhao. (2018b)
	노드의 에너지가 시간이 지남에 따라 점차적으로 감소하는 라우팅 문제	Z. Wei(2020)
Planning	MCS의 <b>배터리 용량과</b> 충전 속도 결정 모델.	S. Huang(2015)
	운영비&충전용량 최소화 하는 이동충전소의 임시 <b>위치 계획.</b> 결론:이동 충전소가 전기 자동차의 평균 충전 <b>대기 시간을 단축.</b>	Raboaca(2020)

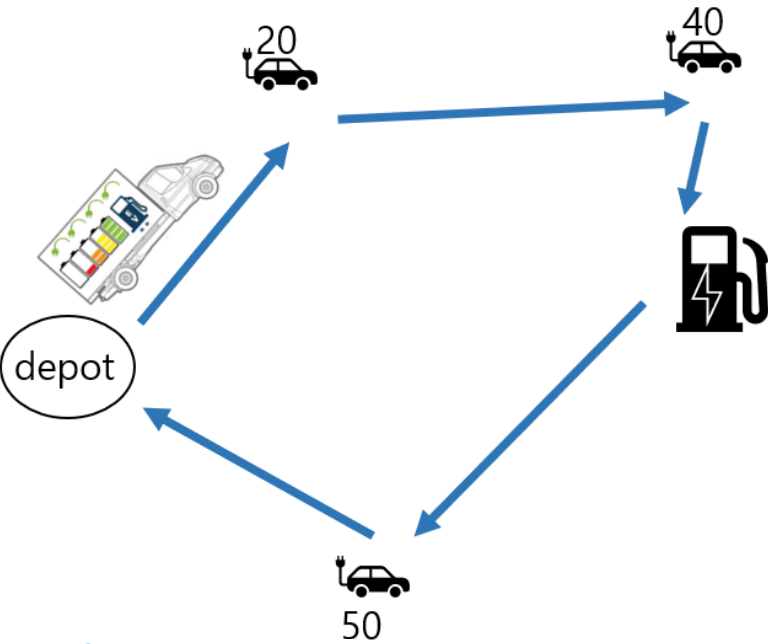
## 2.2. 전기차 스케줄링

### 전기차 스케줄링 관련 연구

전기차 오너 입장	사용자 비용을 최소화하기 <b>스케줄링 알고리즘</b> 을 제안.	Xiaohong.Huang (2020)
	전기자동차 주행거리의 타당성을 평가하는 시뮬레이션 모델 제시.	Muhammad.Usman (2020)
	비용을 최소화 스케줄링 솔루션.	Yifeng.He(2012)
그리드 입장	<b>에너지 사용 균형을</b> 유지하고 EV의 대기 시간을 최소화.	Jihene.Rezgui (2017)
	전압 강하 감소, 전력 손실 감소, 부하 곡선 최적화 하여 최적의 전략을 사용하는 충전 스케줄링 제안.	Y. Luo(2016)
주차장 오너 입장	불규칙한 차량 이동 패턴을 고려한 스케줄링.	M.S.Kuran(2015)
	수요반응 기반 에서 <b>불확실성</b> 을 고려한 stochastic programming.	M. Shafie&Khah (2016)
Aggregator& 전기차 오너	<b>애그리게이터의 수익</b> & 고객의 수요를 공동으로 고려하여 <b>고객의 관점</b> 에서의 EV 충전 스케줄링.	Jin & Tang(2013)

## 2.3. 기존 연구와의 차별성

### 기존 문제



고정충전소



이동식 충전소(충전 트럭)



사용자 위치와 수요량

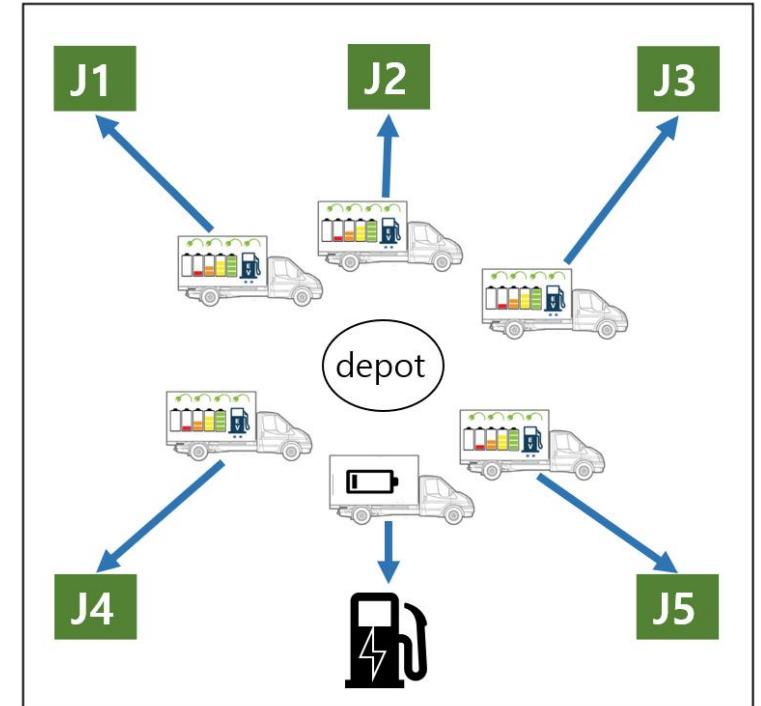
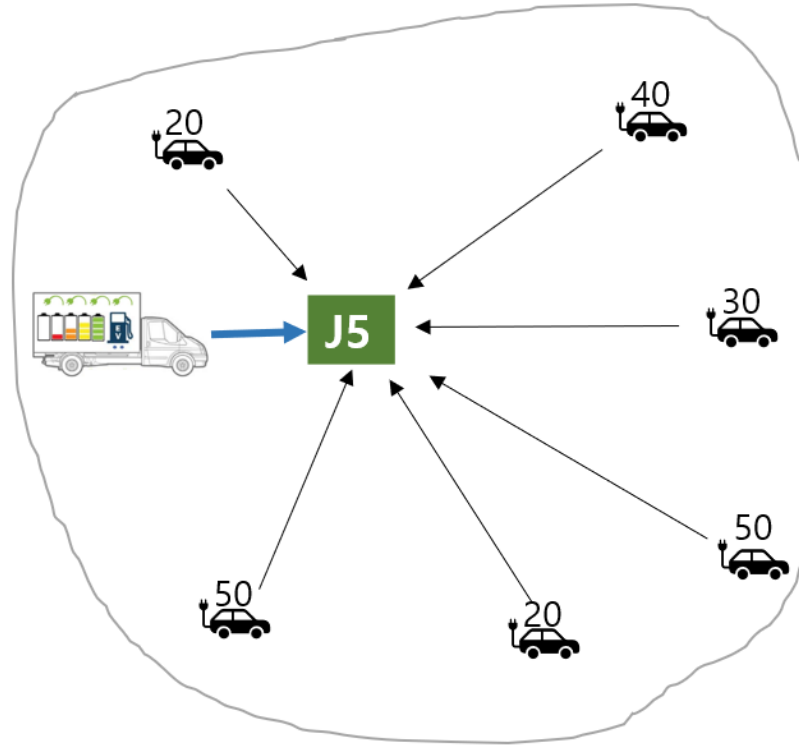


MCS 이동

◆ MCS가 유저 일일이 방문.

◆ 유저 비용 입장 고려 안함

### 본연구



→ 사용자 이동



충전할 위치(오픈 된 위치)

◆ 사용자를 한곳에 집중 :

- 1.MCS이동 비용 줄어 듦.
- 2.제한된 시간에 더 많은 유저에게 서비스를 제공 .

◆ 사용자 입장 고려

- 1.사용자 수요 충족 수준.
- 2.사용자 이동비용 고려.

---

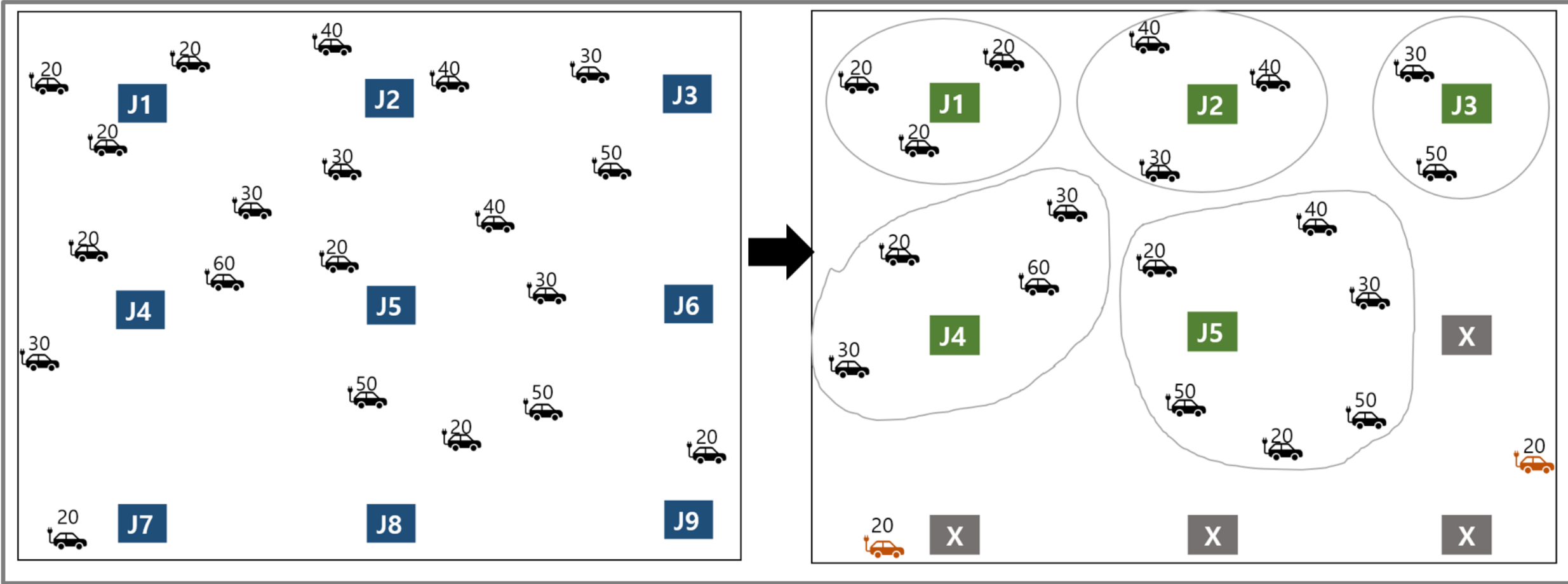
## 3장. 문제 정의

3.1. 이동식 충전소 운영 방안

3.2. 가정

### 3.1. 이동식 충전소 운영 방안

#### 1. 충전할 위치 생성



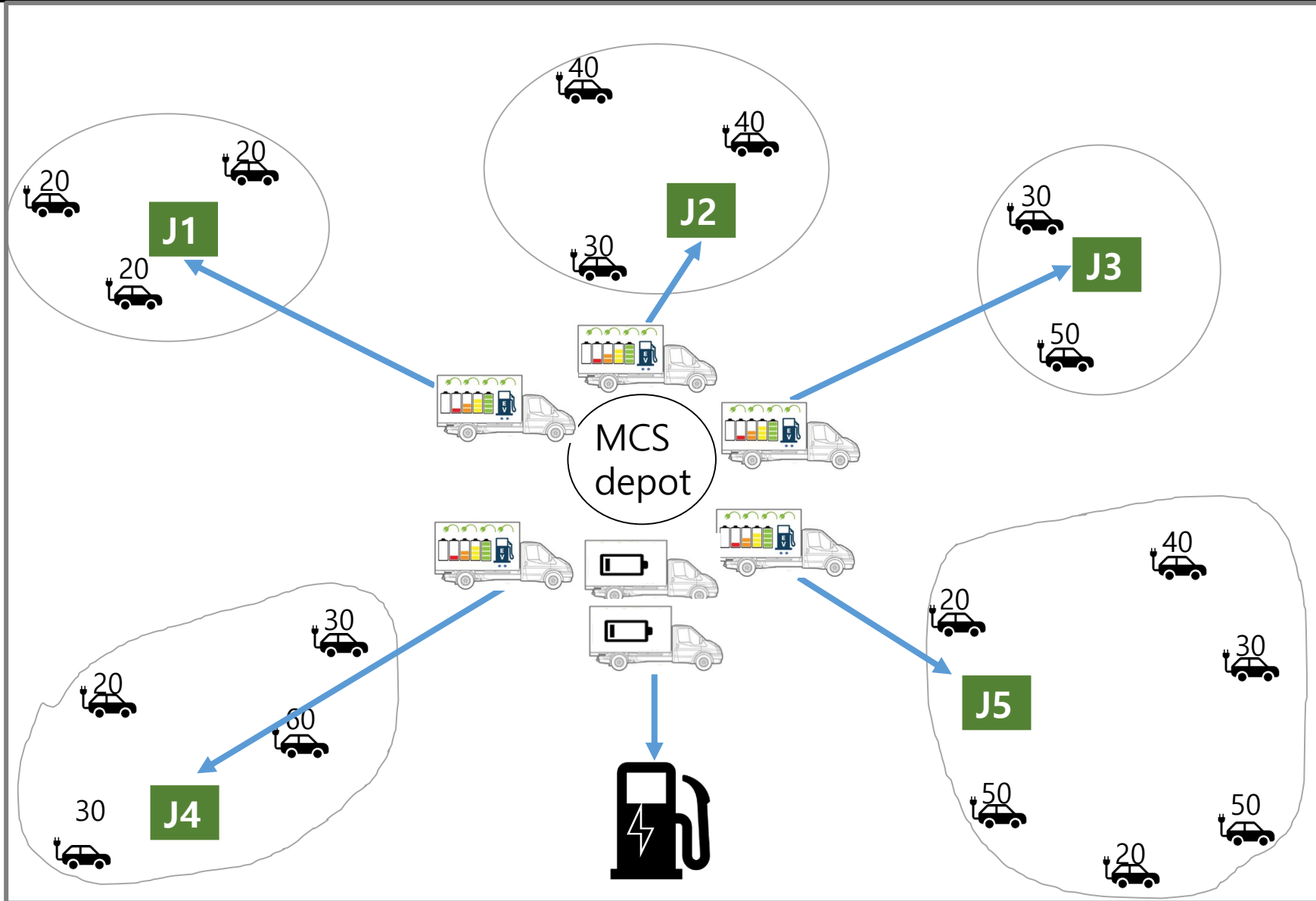
#### Demand covering&위치 생성

➤ 사용자와 충전위치 사이 **거리**, **충전량**에 의해 결정됨. 일부 사용자는 커버되지 않을수 있음.

- 사용자 위치와 수요량
- 커버 안된 사용자
- Candidate
- Open 14
- Close

### 3.1. 이동식 충전소 운영 방안

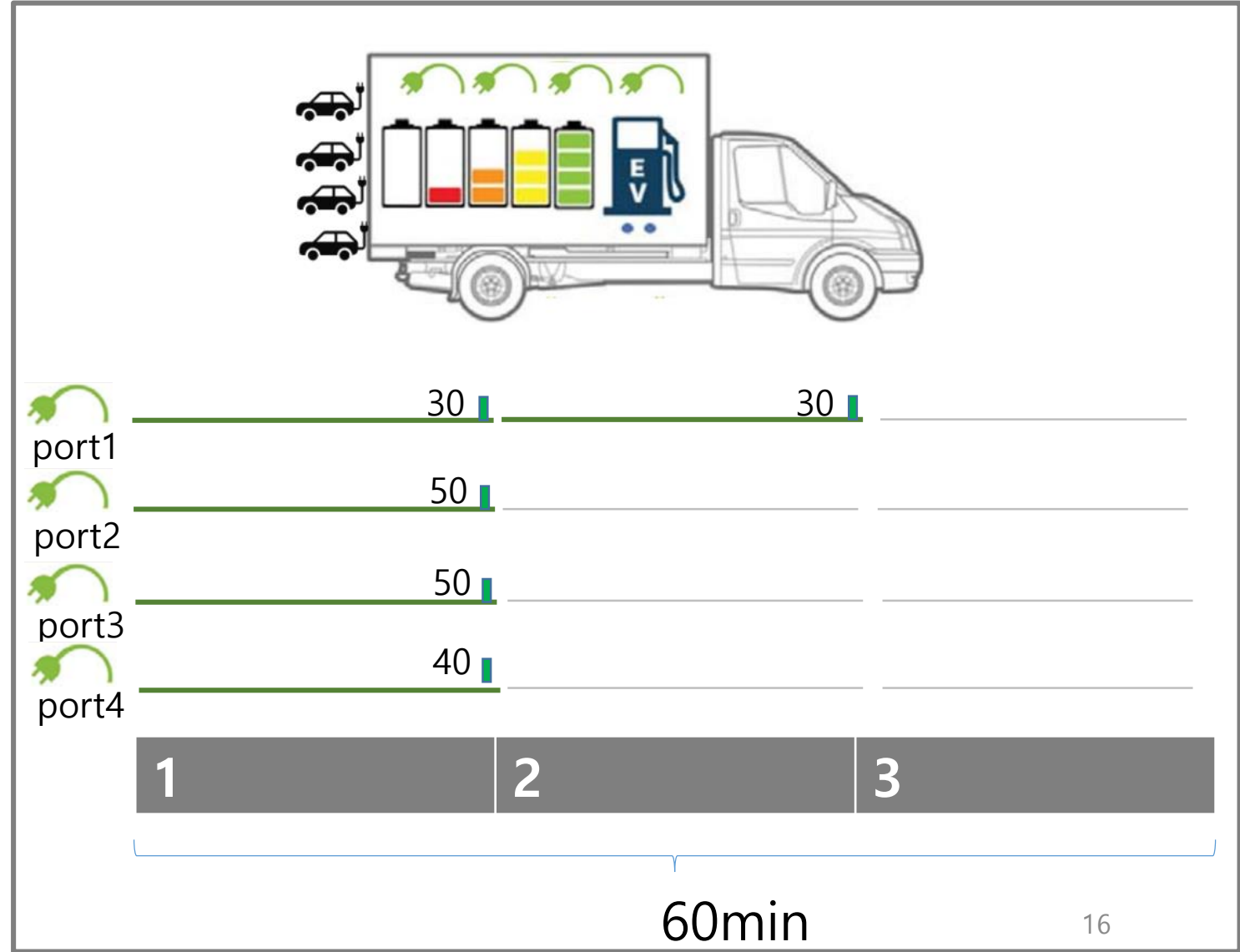
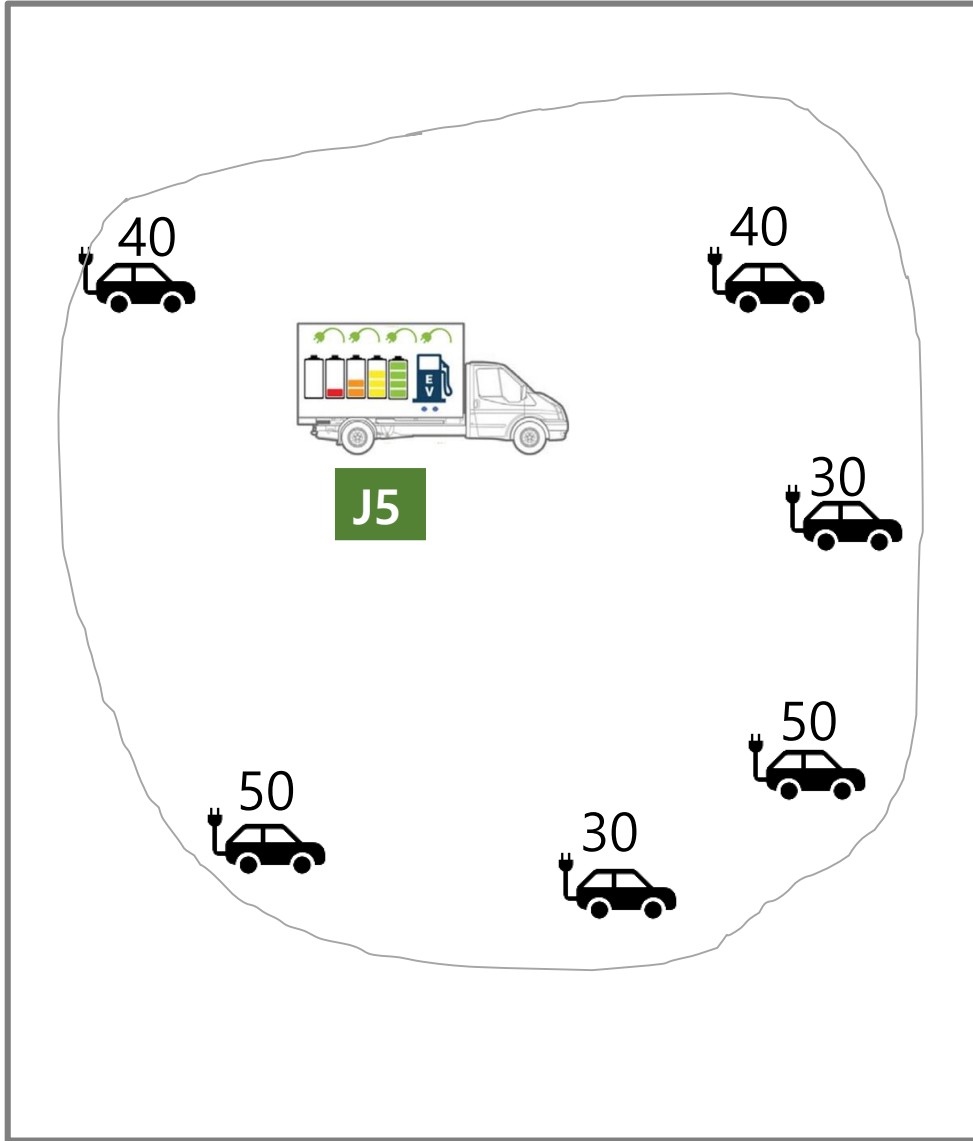
#### 2.MCS 디스패칭



- J** 충전할 위치(오픈 된 위치)
- 이동식 충전소(충전 트럭)
- 사용자 위치와 수요량
- MCS 이동
- 고정충전소
- 이동식 충전소(배터리부족)

## 3.1. 이동식 충전소 운영 방안

### 3.사용자 스케줄링





## 3.1. 이동식 충전소 운영 방안

### Integrated problem

#### MCS 디스패칭 (Time index I)



	1 8:00	2	3	1 9:00	2	3	1 10:00	2	3	1 11:00	2	3	1 12:00	2	3
Port 1															
Port 2															
Port 3															
Port 4															

#### 유저 스케줄링(Time index T)

## 3.2. 가정

Constant	이동 속도	MCS
		사용자 전기차
	에너지 소모율	MCS 이동
		사용자 전기차 이동
	파워	MCS가 FCS에서 재충전 할때 파워
		사용자가 MCS에서 충전할때 파워
시간	MCS 디스패칭간격	60min
	사용자 충전 수요제한	최소 20min에서 10min씩 증가하여 최대 60min.
운영	MCS	대기장소에서 디스패칭되고 완료시 대기장소 돌아옴.
		FCS에서 재충전할때 충전량은 고정.
		사용자 수요를 무조건 다 커버할 필요 없음.

---






# 4장. 수리 모형

4.1. Notation

4.2. 수학적 모델

## 4.1. 수학적 모델

### Notation

Index		
J		Set of charging service place candidate ( $j \in J$ )
M		Set of MCSs ( $m \in M$ )
F		Set of Fixed charging stations ( $f \in F$ )
U		Set of users ( $u \in U$ )
p		Set of port( $p \in P$ )
I		Time index ( $i \in I$ ) for MCS dispatching
T		Time index ( $t \in T$ ) for EV user scheduling

## 4.1. 수학적 모델

### Notation

Decision variables	
$AD_j^i$	Gathered energy amount of users demand at place J.
$RE_j^i$	Real discharging amount of MCS at place J after scheduling.
$X_{m,j}^i$	Binary ,1 if MCS is assigned to place J for discharging , 0 otherwise.
$C_{m,f}^i$	Binary ,1 if MCS assigned to FCS for charging , 0 otherwise.
$Y_{u,j}^i$	Binary ,1 if user's demand is assigned to place J for charging , 0 otherwise.
$SH_{j,p,u}^{i,t}$	Binary , 1 if user is scheduled at time index T , location J, port P

## 4.1. 수학적 모델

Notation	
Parameters	
<b>PI</b>	Price of EV charging on MCS.
<b>PF</b>	Price of electricity .
<b>Penal</b>	Penalty of unscheduled demand.
<b>SPU</b>	battery capacity of standard MCS.
<b>UC</b>	User's uncomfortable rate.
<b>Amin</b>	Lower bound of MCS's energy state.
<b>Acap</b>	Capacity of MCS's battery.
$SD_{m,j}^i$	Distance of MCS to service place.
$FD_{m,f}^i$	Distance of MCS to Fixed charging station.
$ZD_{u,j}^i$	Distance of user to service place.
$D_u^i$	Energy demand of user .
$SOC_m^i$	Battery energy state of MCS .
<b>Pmin</b>	Lower bound of gathered demand energy.
<b>Pmax</b>	Upper bound of gathered demand energy.
$AG_f^i$	Charging amount of MCS at Fixed charging station.
<b>b</b>	Energy consumption rate of MCS.
<b>c</b>	Energy consumption rate of electric vehicle.

## 4.1. 수학적 모델

### Objective function

Maximizing Benefits of MCS			
Revenue	$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J AD_j^i * PI * GPM$	(a)	매출액
Cost	$-\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^m \sum_{j=1}^J X_{m,j}^i * SD_{m,j}^i * \frac{Acap}{SPM} * PF * b$	(b)	MCS가 충전위치 까지 이동
	$-\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^m \sum_{f=1}^F C_{m,f}^i * FD_{m,f}^i * \frac{Acap}{SPM} * PF * b$	(c)	MCS가 고정충전소까지 이동
	$-\sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^u \sum_{j=1}^J ZD_{u,j}^i * Y_{u,j}^i * PF * c * UC$	(d)	사용자의 이동 불편함.
	$-\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (AD_j^i - RE_j^i) * Penal$	(e)	페널티 : 최종 스케줄에 실패된 사용자.

## 4.1. 수학적 모델

### Constraints 1

#### Charging place J selection

(2)	$\sum_{u=1}^U D_u^i * Y_{u,j}^i = AD_j^i$	$j \in J, i \in I$	J위치 오픈시 충전해줘야 할 전체 에너지양
(3)	$\sum_{j=1}^J Y_{u,j}^i \leq 1$	$u \in U, i \in I$	사용자 충전 위치 1곳 이상 배정 불가
(4)	$AD_j^i - \text{argmin}(AD_j^i, 1) * P_{min} \geq 0$	$j \in J, i \in I$	J위치 오픈시 수요 에너지 하한치 제약
(5)	$P_{max} - AD_j^i \geq 0$	$j \in J, i \in I$	J위치 오픈시 수요 에너지 상한치 제약



## 4.1. 수학적 모델

### Constraints 2

MCS dispatching		
(6)	$(SOC_m^i - AD_j^i) * X_{m,j}^i \geq 0 \quad m \in M, j \in J, i \in I$	MCS 에너지 상태가 전체 수요 에너지보다 클때 배정 가능
(7)	$(SOC_m^i - AD_j^i)X_{m,j}^i - X_{m,j}^i * b * SD_{m,j}^i \geq A_{min} \quad m \in M, j \in J, i \in I$	MCS가 사용자한테 충전하고 주행완료할때 에 너지 상태 하한치 제약
(8)	$\sum_{m=1}^m X_{m,j}^i = argmin(AD_j^i, 1) \quad j \in J, i \in I$	위치J가 오픈하면 무조건 MCS 하나에 배정.
(9)	$\sum_{j=1}^J X_{m,j}^i + \sum_{f=1}^F C_{m,f}^i \leq 1 \quad m \in M, i \in I$	MCS는 고정충전소,충전소위치J로 배치 혹은 대 기,3가지중 하나의 상태에 놓임.
(10)	$C_{m,f}^i + argmax((SOC_m^i - P_{min}), 1) > 1 \quad m \in M, f \in F, i \in I$	MCS 에너지 상태가 Q보다 작으면 고정충전소 에 배정.
(11)	$SOC_m^i * C_{m,f}^i + AG_f \leq A_{cap} \quad m \in M, f \in F, i \in I$	MCS가 고정충전소에서 충전할때 최대용량 초 과불가.

## 4.1. 수학적 모델

### Constraints 3

Selected demands scheduling		
(12)	$\sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T D_u^i * Y_{u,j}^i * SH_{j,p,u}^{i,t} \leq 60$ $j \in J, p \in P, i \in I$	스케줄링 최대 시간 60분 초과불가.
(13)	$\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P SH_{j,p,u}^{i,t} \leq Y_{u,j}^i$ $j \in J, u \in U, i \in I$	사용자가 충전소 위치에 배정되면 4개 pile중에서 T 시간텀중에 스케줄링.
(14)	$\sum_{p=1}^P \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T (SH_{j,p,u}^{i,t} * D_u^i * Y_{u,j}^i) = RE_j^i$ $j \in J, i \in I$	스케줄 되고 실제 커버한 수요 양.
(15)	$RE_j^i \leq AD_j^i$ $j \in J, i \in I$	스케줄된 수요는 충전 위치에 배정된 수요보다 클수 없음.
(16)	$SOC_m^i - X_{m,j}^i * RE_j^i - C_{m,f}^i * AG_f^i = SOC_m^{i+1}$ $j \in J, i \in I$	다음 time index i+1시점을 위한 MCS에너지상태 업데이트
(17)	$X_{m,j}^i, C_{m,f}^i, Y_{u,j}^i, SH_{j,p,u}^{i,t} \in \{0, 1\}$	결정변수 binary

---

# 5장. 실험

5.1. 파라미터 세팅

5.2 실험 방법

5.3. 실험 결과

## 5.1. 파라미터 세팅

### Setting

Index	설정 방식
J	(1, 2, 3...16)
M	(1, 2, 3...12)
F	(1, 2, 3...9)
U	(1, 2, 3...50)
p	(1, 2, 3, 4)
I	(1, 2, 3, 4, 5)
T	(1, 2, 3)

Parameters	설정 방식
PI	2RMB/min
PF	0.2RMB/KM
Penal	4RMB/min
SPU	144min
UC	Weight 0.4
$SD_{m,j}^i$	유클리디안 거리
$FD_{m,f}^i$	유클리디안 거리
$ZD_{u,j}^i$	유클리디안 거리
$D_u^i$	Solomon data+ random generated
$SOC_m^i$	앞 상태에 따라 계산되어 나옴
$AG_f$	=Acap-Pmin
Acap	참고논문 단위 환산
Amin	30min
Pmin	60min
Pmax	240min
c	0.15kwh/km
b	0.11kwh/km

◆ **Solving program:** MATLAB 2022a

◆ **Datasets:** Solomon benchmarking

❖ **논문/실 사례 참고하여 설정**

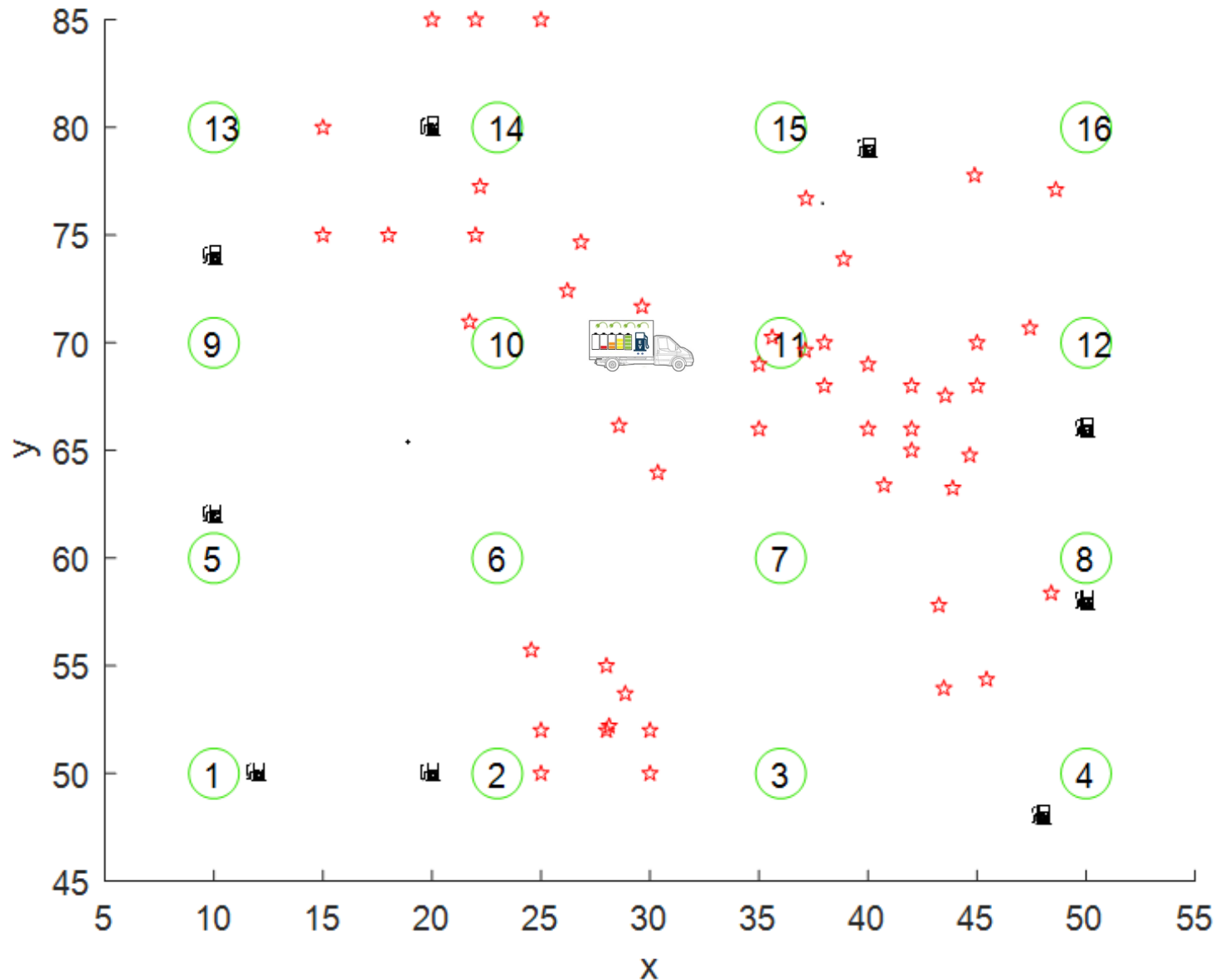
➤ 본 모델에 맞게 가공 계산/변환.

❖ **운영자로서 정책으로 판단**


➤ 가격, Weight, 용량 등


## 5.1. 파라미터 세팅


### 문제사이즈




범위: 4km\*4km

 유저요청 수량 50orders

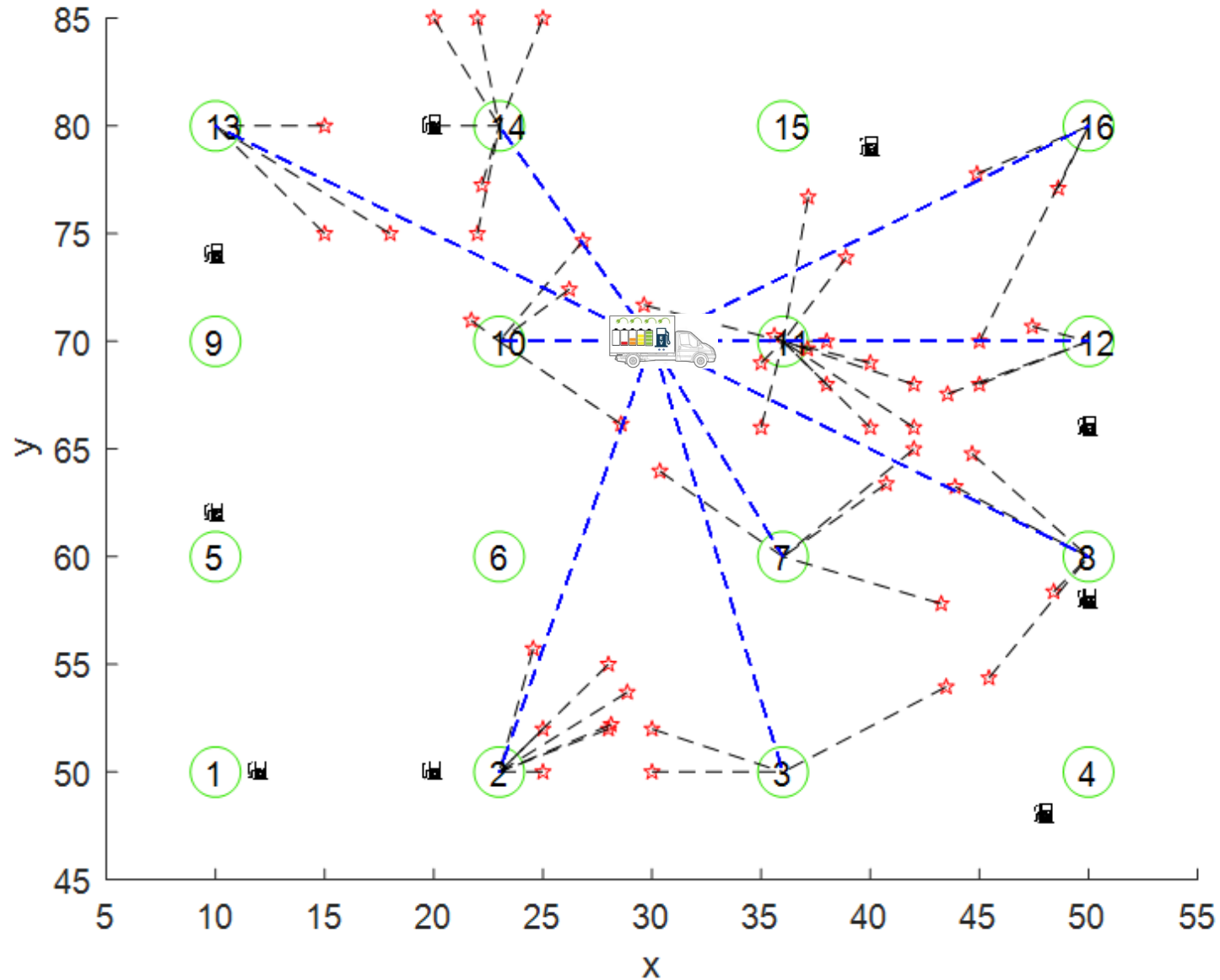
 MCS 수량 12개

 고정충전소 수량 9개

 충전후보위치 16개

## 5.1. 파라미터 세팅

### 해 표현



#### ◆ 실험 Parameter :

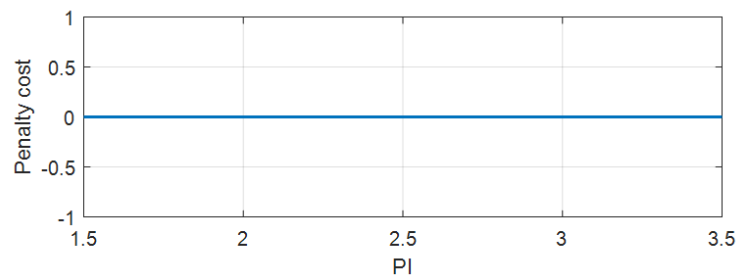
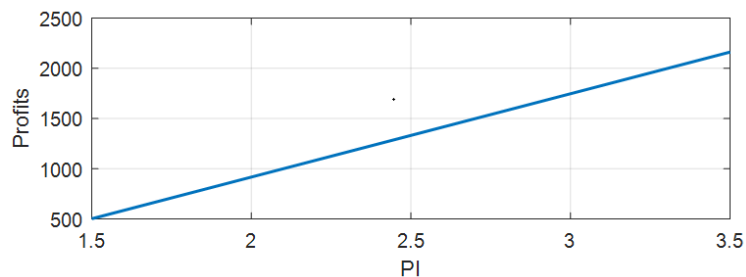
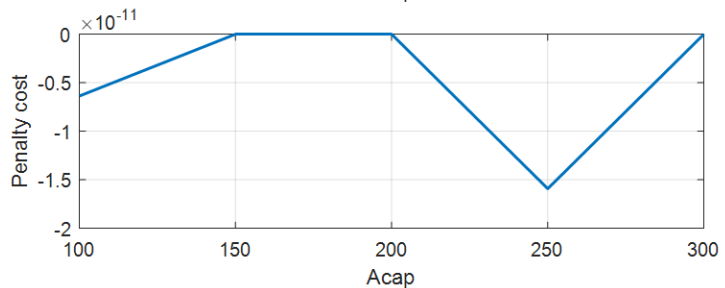
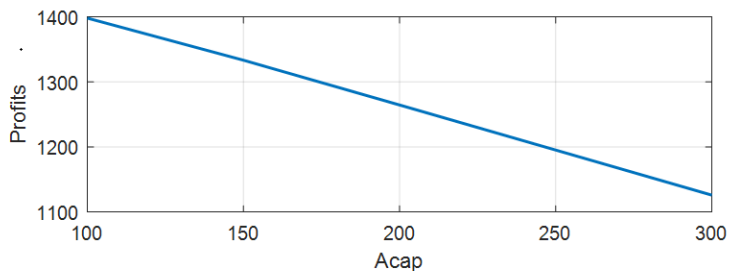
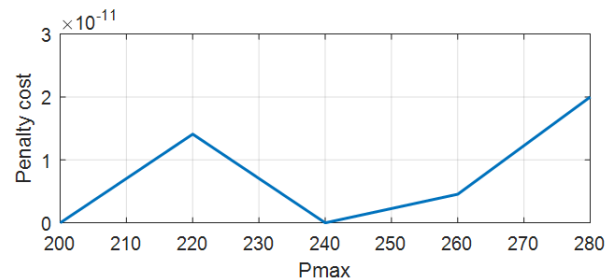
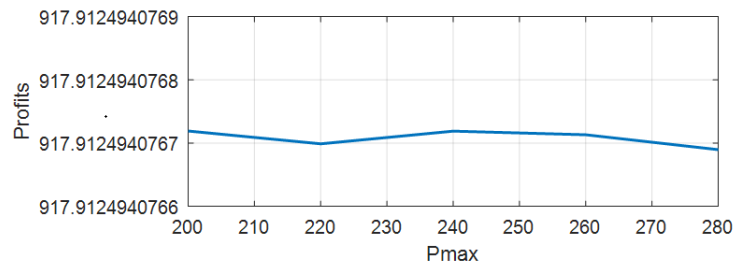
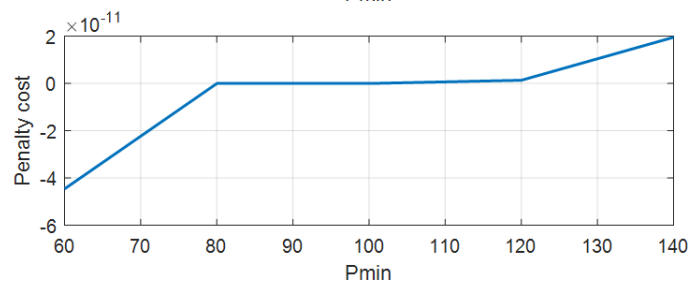
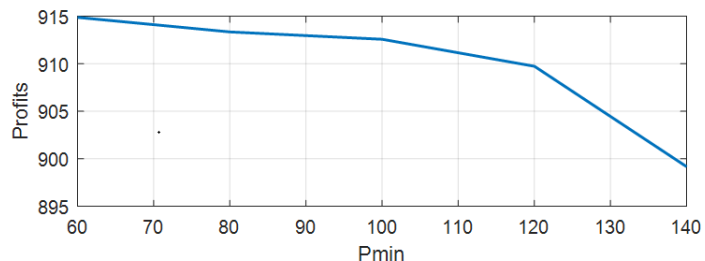
1. Pmin    충전위치 **오픈 하한** 값    (60/80/100/120/140)
2. Pmax    충전위치 **오픈 상한** 값    (200/220/240/260/280)
3. Acap    **배터리 용량**    (100/150/200/250/300)
4. PI       MCS **충전단가**    (1.5/2/2.5/3/3.5)

#### ◆ 실험 포인트:

MCS운영자의 **benefits** , 사용자 스케줄링 미충족으로 인한 **penalty cost**, MCS와 사용자 **이동거리**가 각각 어떻게 변화가 생기는지 분석.

## 5.3. 실험 결과

### 민감도 분석 결과1-profits/penalty



➤ Pmin:에너지 하한 값.  
충전 위치 오픈 에 영향. profits큰 영  
향을 준다. 60최적

➤ Pmax:에너지 상한 값.  
200-280범위유지.

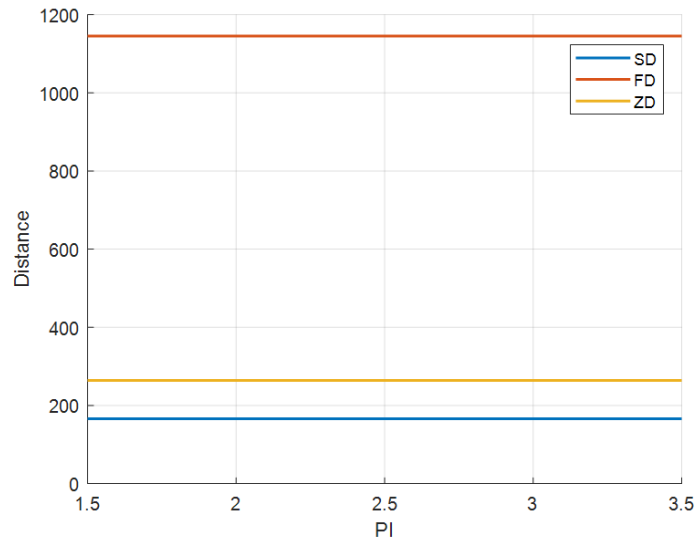
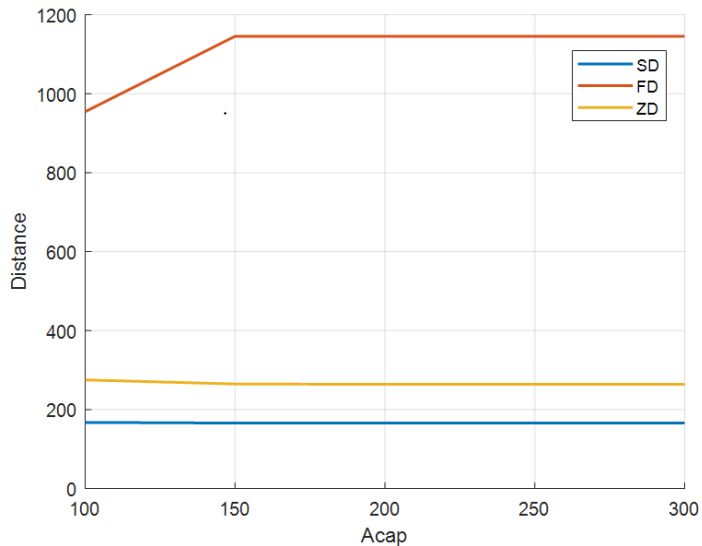
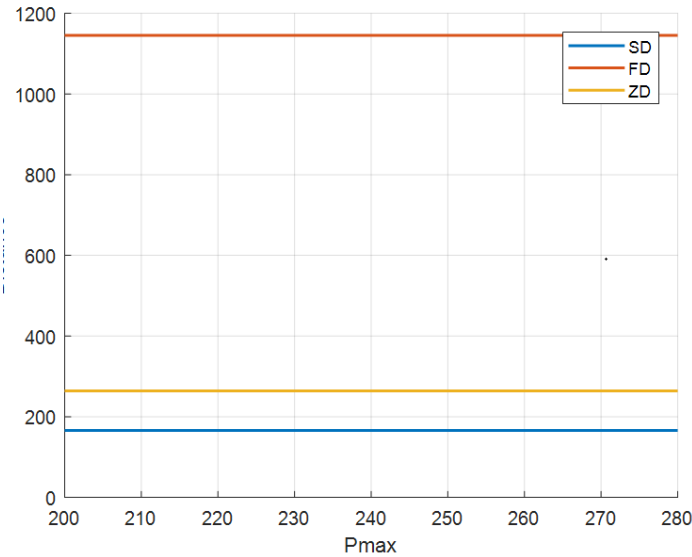
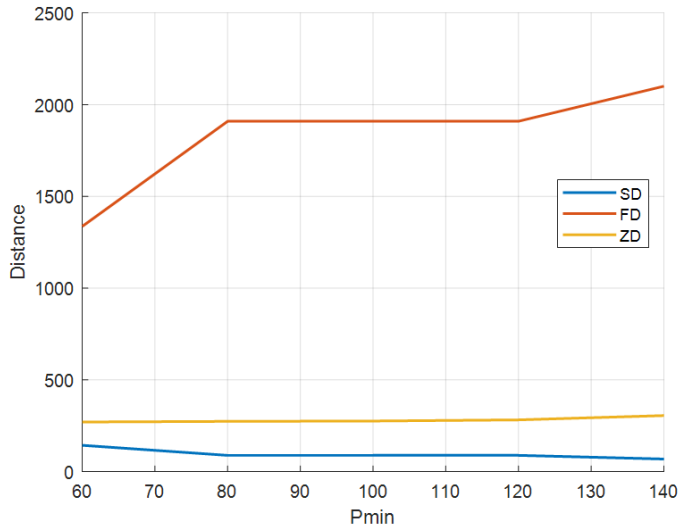
➤ Acap:배터리 용량  
100일때 현재 오더 커버 충분.  
이동비용만 늘어나서 profits 줄어듬.

➤ PI:충전단가  
모델에 큰 영향이 없음. 커짐에 따라  
linear하게 profits도 증가.



## 5.3. 실험 결과

### 민감도 분석 결과 2-distance



SD: MCS to service place  
FD: MCS to FCS  
ZD: User to service place

➤ Pmin:에너지 하한값.  
증가-위치 오픈 적음-고정충전소 배치  
많아 짐.

➤ Pmax:에너지 상한 값.  
변화 없음.수치 안정적인 범위값.

➤ Acap:배터리 용량  
너무 적으면 오히려 디스패칭이 잘 안  
이루어짐. 재충전도 적음.

➤ PI:충전단가  
이동 거리에 영향 없음.

---

# 6장. 결 론

6.1. 결론

6.2. 향후 연구일정 및 내용

# Thank you!

소중한 시간 내주셔서 감사합니다.

Q&A

---

- ✓ 이동식 충전소를 이용한 충전 최적화 모델을 제안.
  - ✓ 사용자의 입장을 고려 하여 모델에 반영.
  - ✓ Solomon benchmarking 데이터로 수리모델의 타당성을 검증하고 다양한 실험을 통해 의사결정할때 고려해야 하는 시사점들을 도출.
  - ✓ 민감도 분석 결과에 의하면 배터리 용량이 클수록 이득을 보는건 아님. Cost가 발생해서 손해를 볼수 있기에 고객 수량 오더에 맞는 용량을 정하는것이 관건.
  - ✓ 한곳에 집중하여 동시에 충전하는 경우 하나씩 충전 하는것보다 이득. 그 위치를 오픈할지에 관한 제약이 (하한값) 결과에 크게 영향.
- 
- ◆ 불확실성을 고려한 동적 스케줄링.
  - ◆ 시간에 따른 실제 교통도로 혼잡도 고려.
  - ◆ 다양한 사이즈의 이동식 충전소 운영 모델