

친환경 말단배송 장비 운용을 위한 배터리 공유형 충전 스테이션 위치 최적화

2021 한국물류과학기술학회 · 한국로지스틱스학회 · 한국SCM 학회 공동학술대회

2021.11.01 | 경희대학교 시스템 최적화 연구실 | 한소림, 이태훈, 송병덕 교수, 김영주 박사(철도기술연구원)

srhan861@khu.ac.kr thlee94@khu.ac.kr bdsong@khu.ac.kr osot@krri.re.kr

1. 연구배경

- 현황 및 문제정의
- 배터리 공유 스테이션 소개

2. 연구목표

- 연구 대상
- 연구 목표

3. 문제 상황

4. 수리 모델

5. 수치 실험

6. 결론

1

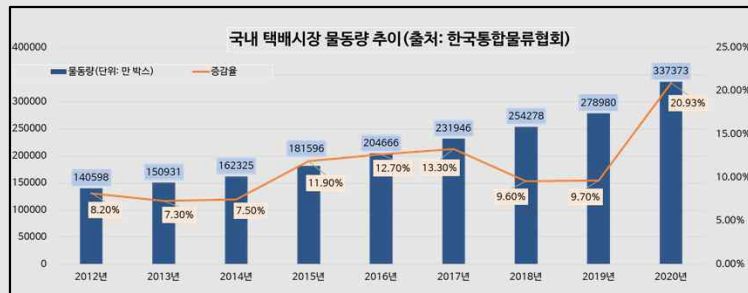
연구배경

1. 연구배경

현황 및 문제 정의: 친환경 운송 수단 필요성 대두

택배 운송량의 증가

- 택배 운송량 증가에 따라 화물트럭으로 인한 **오염물질 배출 심화**.
 - 도심 배송시 미세먼지, 대기오염물질 및 온실가스 배출 발생 심화.
- 콜드체인 확대에 따른 환경오염 문제 발생.
 - 냉동냉장 트럭의 경우 냉동기 압축기 구동을 엔진으로 수행.
 - 정차시에도 엔진이 구동함에 따라 온실가스 및 대기오염 배출.



일반인 배송 시스템에서의 문제점

- 배송기사 수급 어려움으로 인한 일반인 배송서비스가 유행함에 따라 말단배송수단 운용 확대 예상.
 - 이에 대응하는 **친환경 말단배송수단 인프라 부족**.

빠른 배송 서비스 수요 증가

- 새벽배송, 당일배송 등 퀵커머스 시장규모 연평균 **62%** 성장 예상. 운영에 필수요소인 오토바이를 비롯한 **말단배송장비 운용 증가**.
- 퀵커머스의 빠른 성장에 대응하는 **친환경 말단배송장비의 부족**.
 - 기존 이륜 오토바이
화석연료 구동으로 인한 환경오염 문제 발생.
 - 기존 전기 오토바이
배터리 충전시간, 등판능력 부족 등 문제, 다수 화물 배송에 부적합.



차종	배기량	대기오염물질 배출량(kg/년·대)			
		CO	NOx	VOC	계
이륜차	50cc 미만	81.80	0.04	36.27	118.11
	50cc 이상	79.19	1.08	11.88	92.15
소형승용	1600cc 미만	3.56	0.26	0.13	3.95

자료출처: 국토교통부(上左) 환경부(下) 이동주 국회의원실 제출자료, GS 리테일(上右)

1. 연구배경

현황 및 문제 정의: 친환경 운송 수단 필요성 대두

도입 현황

- 기존 대형 배송은 물론, 말단배송까지 친환경 운송수단 도입 추세
 - 배송용 전기트럭 도입: SSG, 롯데마트 등
 - 전기 바이크 도입: 맥도날드, 쿠팡이츠, 배달의민족(예정) 등.
- 전기 이륜차 보급에 초점, 충전 인프라 계획은 기획 및 시작단계.
 - 정부, 2025년까지 전기오토바이 11만대까지 보급을 목표로 삼고 있으나 이에 발맞춘 **충전 인프라 구축 계획 부족.**
 - 서울시, 성남시 30개 배터리 교환소 시범운영.
 - 광주 남구청, 부산 남구 등 일부 지자체, 공중전화부스 활용한 배터리 스테이션 계획.



맥도날드, 쿠팡이츠의 전기바이크

자료출처: 아시아경제



부산 남구에 설치된 전기배터리 교체 스테이션

자료출처: 오토타임스

철도기술연구원:친환경 말단배송 기술 개발

- 환경부하 저감을 위한 친환경 고효율 말단배송 기술개발' 진행.
 - 21.4~26.12 5년 9개월 간 진행.
 - (주)알톤스포츠, (사)한국스마트이모빌리티협회 등 참여.
 - 배송수단 개발, **배터리 스테이션 개발**부터 관련 법/제도 정비 등 전반적 인프라 개발.
- 에너지 과소비형 운송수단에서 친환경에너지 기반으로의 전환 대응.

1. M1 화물용 전기자전거 개발	2. M2 삼륜형 전기이륜차 개발
3. M3 작업자/자전거 추종형 스마트 트레일러 개발	4. M4 고효율 전기구동 냉동냉장 적재함 개발
5. S1 배터리 공유 스테이션 개발	6. S2 말단배송장비 관제 및 결제시스템 개발
7. 관련 법제도 개선 및 표준 가이드라인 개발	



자료출처: 철도기술연구원

1. 연구배경

배터리 공유/충전 스테이션 소개

- 친환경 정책 일환으로 전기오토바이 보급 확대 추진. 이에 발맞춘 배터리 인프라 계획 필요성 대두.
- 철도기술연구원 '환경부하 저감을 위한 친환경 고효율 말단배송 기술 개발' 사업 주관하여 진행중.
 - 배터리 공유 스테이션
 - ✓ 배터리 스테이션에 배터리를 미리 보관, 충전하여 운전자가 기기 배터리를 교환 및 공유하는 형식.
 - ✓ 기존 전기오토바이 단점인 충전시간 해결 기대.
 - 예시) 대만 '고고로': 대만의 전기스쿠터 제조사. '전기스쿠터계의 테슬라', 대만 현지 내 1,600여개 충전소 운영중
 - (주)선광 엘티아이, 명지대학교 배터리 공유 충전 스테이션 개발 연구. 6년내 상용화 노력.
 - 배터리 스테이션의 설치 위치 결정 문제 해결 필요.



(左) 개발중인 S1 배터리 공유형 충전 스테이션
(명지대학교 연구팀, (주) 선광 엘티아이)

(右) 대만 '고고로'의 배터리 교체 스테이션.
고고로는 대만 내 약 1600여개의 충전소를 운영중이다.



자료출처: (左) 철도기술연구원, (右) 고고로 홈페이지

2

연구목표

2. 연구목표

연구대상

친환경 단말배송 장비 대상 전기 배터리 공유/충전 스테이션

- 전기 삼륜자전거, 전기 삼륜차 등 전기배터리 기반 단말배송수단 대상 배터리 공유/충전 스테이션의 입지조건
- 배터리 공유/충전 스테이션 설치에 적합한 위치
 - 전기 배터리의 제한적 수명: 배터리 공유/충전 스테이션 입지에 따라 지속적 배송 서비스 제공가능.
 - 시간에 따른 단계적 충전 입지 확장 조건

연구목표

- 배터리 공유 충전 스테이션의 최적 위치에 대한 정량적 의사결정 방법 제공.
- 친환경 말단배송 서비스의 지속성 향상.
- 위치최적화 연구가 부재함에 따라 이에 관한 선제적 연구 진행을 통해 지속가능사회의 발전에 기여.

3

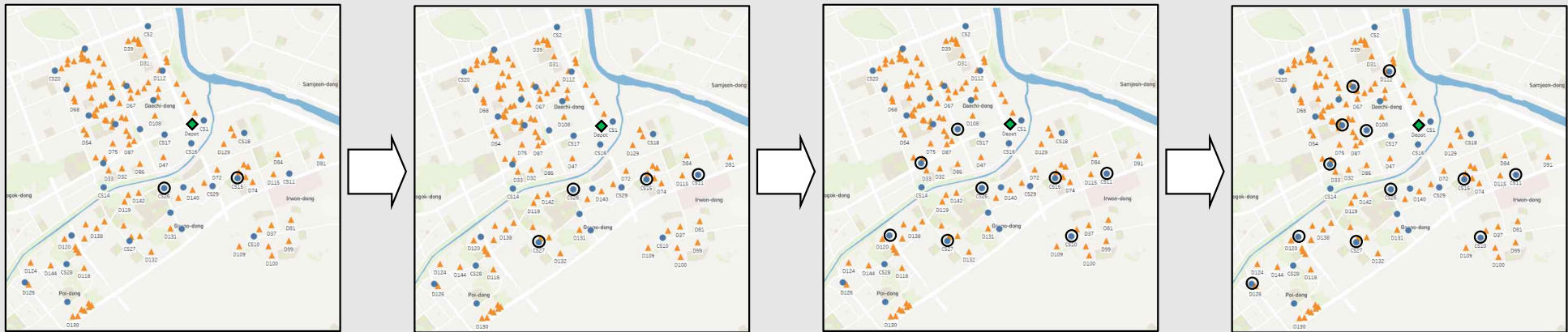
문제상황

3. 문제 상황

연구 목적

- 단계적& 다목적 배터리 교환형 충전소 인프라 구축
- 단계성: 서비스 보급 시나리오를 지원 가능한 단계적 배터리 교환형 충전소 위치 최적화
- 다목적성: 수요를 최대한 커버하고, depot으로부터 충전소까지 거리 최대화 (서비스 확장성)

시간에 따른 충전소 입지 확대 과정



3. 문제 상황

가정 사항

- Population node는 하나의 충전 스테이션에 커버되거나, 서비스 범위 내에 충전 스테이션이 없을 경우 커버되지 못한다
- Population node는 후보지로부터 전기배터리의 서비스 범위 $R(km)$ 내에 있어야 커버될 수 있다
- Candidate location j 에서 전체 기간 동안 시설은 한 번만 설립될 수 있다
- 1차년도에 짓는 충전 스테이션은 depot에서 서비스 범위 내에 위치해야 한다
- 1차년도 이후의 충전 스테이션은 이전에 지어진 스테이션으로부터 서비스 범위 내에 위치한 후보지 중에서 설치될 수 있다 (연결성 고려)
- 연도별 예산은 정해져 있다
- 충전 스테이션의 설치 비용은 설치 위치에 따라 다르다
- Coverage level에 따라 연결성의 수준이 결정된다

4

수리모델

4. 수리 모델

Notation

Sets

I	Set of population nodes
O	Set of distribution center
J	Set of candidate locations
T	Set of time periods

Indices

i, j, h	Index of all nodes
t, t'	Index of time period

Parameter

f_j	Fixed cost of building a battery-exchange station at candidate location j
d_{ij}	Distance from node i to node j (Include population node, candidate location, and depot)
C_{level}	Coverage level of battery-exchange station
D_i	The number of households at population node $i \in I$
B^t	Limited budget at time period $t \in T$
	1: If the distance between candidate i and candidate j is lower than R
	0: Others
A_{ij}	$A_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq R, i \neq j \\ 0, & d_{ij} > R \end{cases}$
M	Sufficiently large number
R	Range of service coverage of battery-exchange station

Decision Variables

X_{ij}^t	1: Demand node i was served by a candidate location j at time period t 0: Others
Y_j^t	1: Battery-exchange station was operated at candidate location j at time period t 0: Others

4. 수리 모델

Bi-Objective

Maximize $F1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} D_i X_{ij}^t$

(1) Battery-exchange station이 커버하는 세대 수 최대화

Maximize $F2 = \sum_{j \in J} \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} d_{jo} Y_j^t$

(2) Depot로부터 Battery-exchange station j 까지 거리 최대화

4. 수리 모델

Equations

Subject to $\sum_{i \in I} X_{ij}^t \leq M \cdot Y_j^t, \quad \forall j \in J, t \in T$

(3) 충전소가 설립되어야 population node에 서비스 제공 가능

$$\sum_{t \in T} Y_j^t \leq 1, \quad \forall j \in J$$

(4) j 위치에 전체 기간 동안 facility는 1 번만 설립 가능

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X_{ij}^t \leq 1, \quad \forall i \in I$$

(5) Population node i는 하나의 facility j에 할당

$$\sum_{o \in O} d_{jo} Y_j^1 \leq R, \quad \forall j \in J$$

(6) 1 차년도 facility 설립 조건
Distribution center로부터 거리 제약 조건

$$\sum_{h \in J, h \neq j} \sum_{t=1}^{t'-1} A_{ij} Y_h^t \geq C_{level} \cdot Y_j^{t'}, \quad \forall j \in J, t' > 1$$

(7) 1 차년도를 제외한 time period t의 facility 설립 조건
Facility로부터 설립 가능 범위 내에 존재하는 candidate 중에서
이전에 지어진 facility가 존재할 때, Coverage level 이상 설립될 수 있다

연결성 제약

$$d_{ij} X_{ij}^t \leq R, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T$$

(8) Population node i와 candidate j 사이 거리 제약

$$\sum_{j \in J} f_j Y_j^t \leq B^t, \quad \forall t \in T$$

(9) Time period t별 최대 예산 제약

$$X_{ij}^t \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T$$

(10) 결정변수 조건

$$Y_j^t \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, t \in T$$

(11) 결정변수 조건

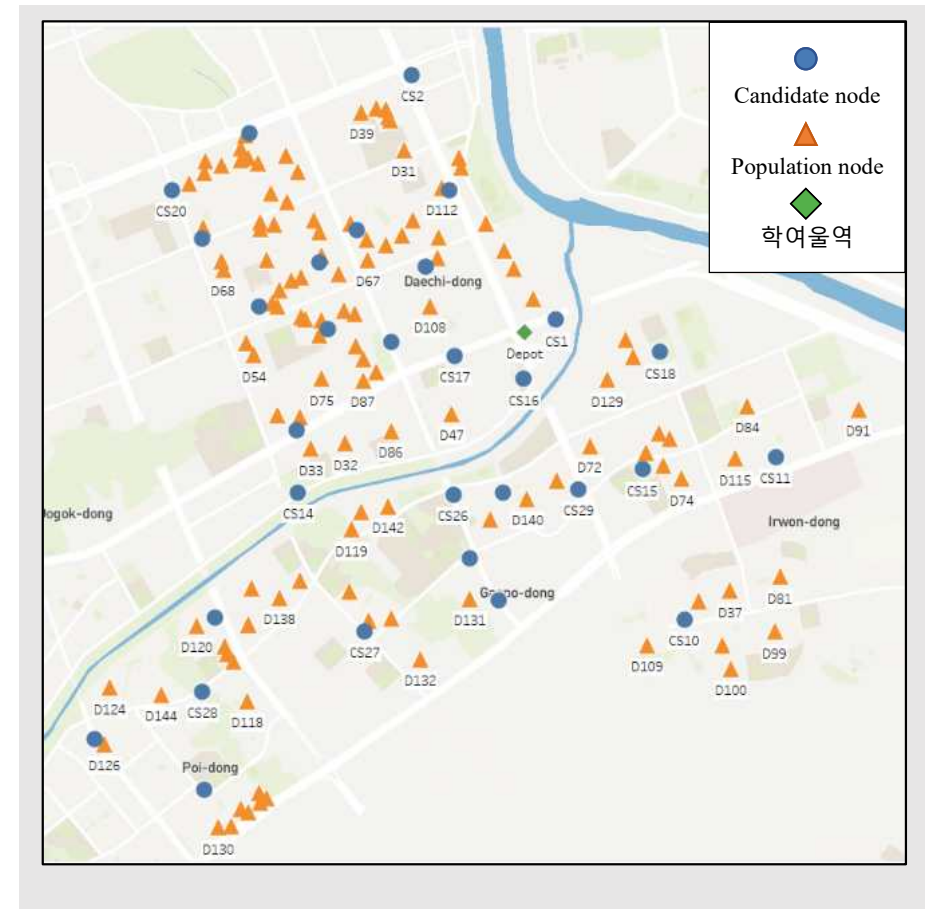
5

수치실험

5. 수치 실험

Parameters

- Service area: 서울시 지하철 3호선 학여울역 일대 (대치동, 개포동, 일원동)
- Population node: 120개
 - 아파트 & 주상복합 등으로 구성
- Candidate location: 30개
 - 공중전화(옥외) & 편의점 & 공영주차장 입구 & 아파트 입구 & 공원 등으로 구성
- Time period: 4
- R: 1 km
- Coverage level: 1



5. 수치 실험

Epsilon-constraint method

- Multi-objective optimization에서 최적해로 구성된 Pareto optimal solution들을 도출하기 위한 알고리즘.
- 목적함수 일부를 제약식으로 이동, 해 탐색 공간을 점진적으로 줄여 나가며 최적해들을 도출

References

- 1) Ko, Y. D., & Song, B. D. (2019). Sustainable service design and revenue management for electric tour bus systems: Seoul city tour bus service and the eco-mileage program. *Journal of Sustainable Tourism*, 27(3), 308–326.
- 2) Fan, Z., Li, H., Wei, C., Li, W., Huang, H., Cai, X., & Cai, Z. (2016, December). An improved epsilon constraint handling method embedded in MOEA/D for constrained multi-objective optimization problems. In 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) (pp. 1–8). IEEE.

Algorithm. Epsilon constraint method

```
1   CS( $\epsilon$ )   Maximize  $F_1$ 
2           Subject to  $F_2 > \epsilon$ ,
3            $x \in O$ 
4   Initialize the parameters related to the algorithm: OptF2, InputF2, ParetoF2t, O, t
5   OptF2 is the optimal value of F2 single objective
6   InputF2 is input data
7   ParetoF2t is solution value of F2 in iteration t
8   O is set of feasible solutions
9   t is iteration of algorithm
10  O :=  $\emptyset$ , t = 0
11  ParetoF20 = 0
12  InputF2 = ParetoF20
13  While (OptF2  $\geq$  InputF2), do
14      if (CS( $\epsilon$ ) has a feasible solution), do
15          X* = ParetoF2t
16          O = O  $\cup$  {X*}
17      for all x  $\in$  O
18          if (X* > x), then O = O - x
19      end if
20      t  $\leftarrow$  t + 1
21      InputF2  $\leftarrow$  InputF2 + ParetoF2t
22  end while
23  Return Result of Set O
```

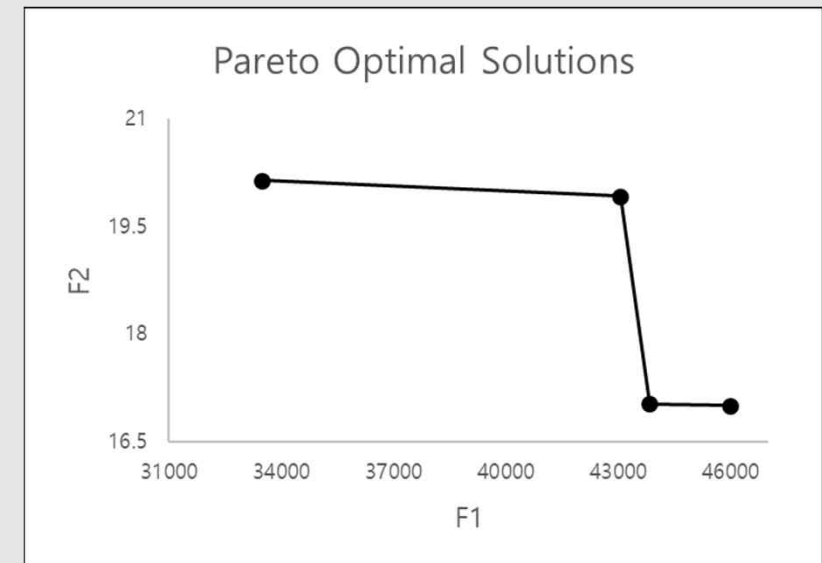
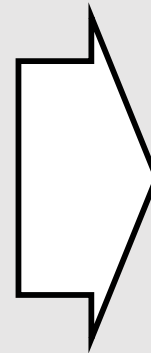

5. 수치 실험

Result: Pareto Solutions

	F1 Obj (population)	F2 Obj (km)
1	45970*	16.99635
2	43817	17.02003
3	43036	19.92197
4	33465	20.14169*

* F1 Single object로 구했을 때 나온 optimal solution
 ** F2 Single object로 구했을 때 나온 optimal solution

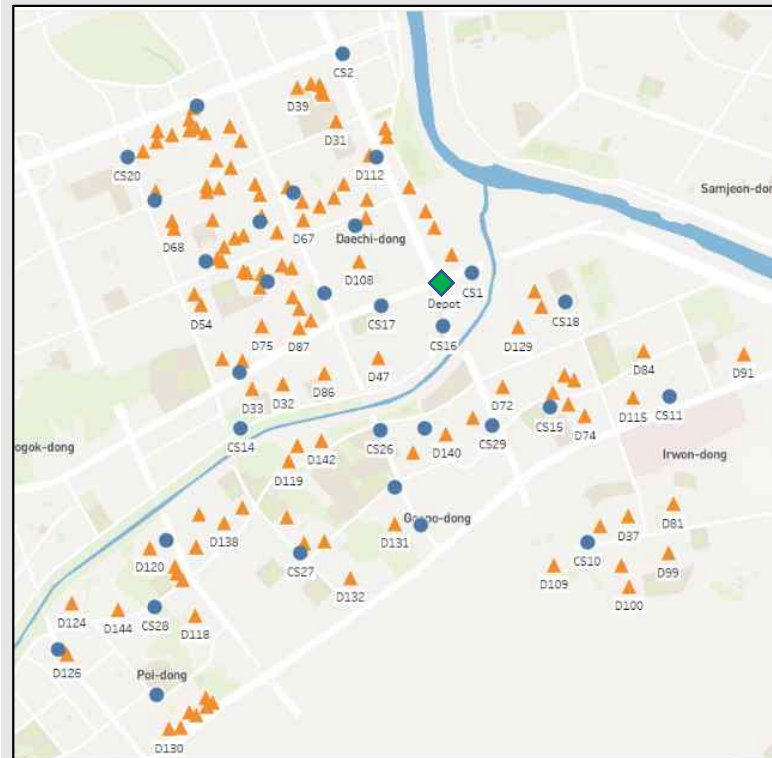
CPU Time: 11.23 sec
 CPLEX 20.1.0
 Computational Environment: Intel Core i7-10700 CPU, 32GB RAM



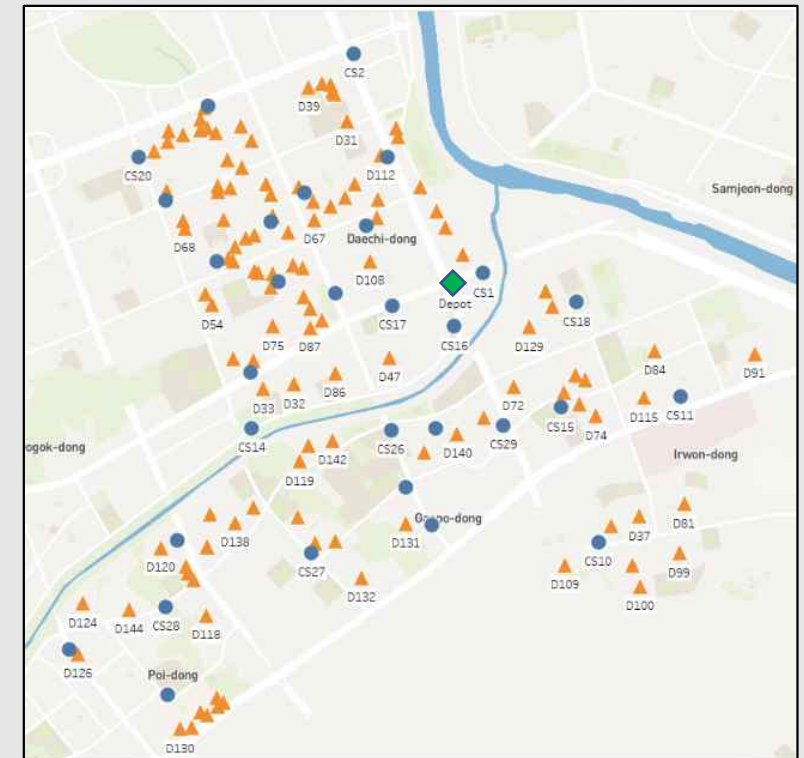
5. 수치 실험

Result (시각화)

Facility location		
T	F1 Max	F2 Max
1	15, 26	3, 13, 26
2	11, 27	4, 6, 7, 27
3	4, 6, 10, 25	5, 8, 20, 25
4	3, 5, 7, 24	23, 24
Sum	12	13



F1 Max



F2 Max

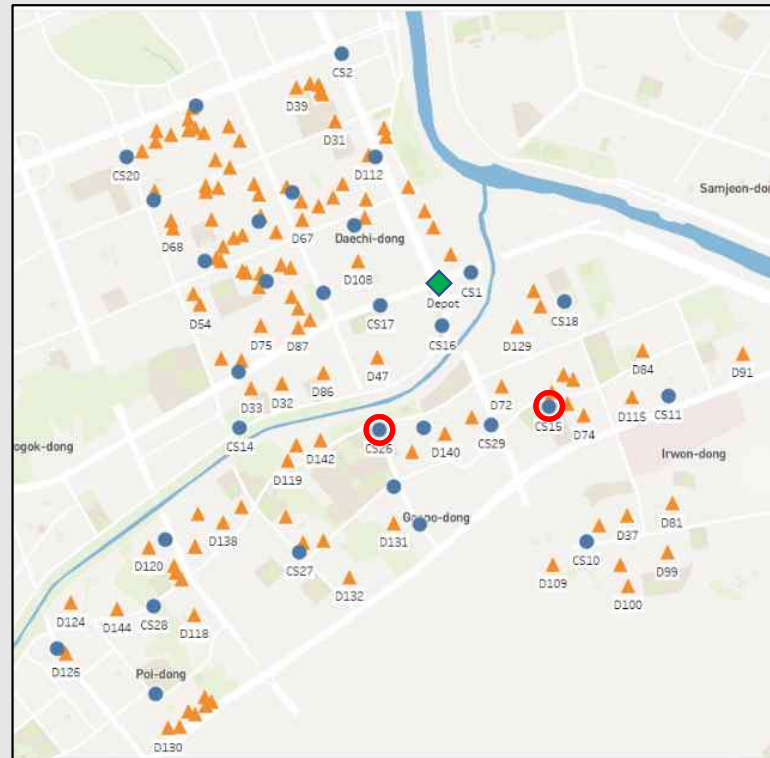
5. 수치 실험

Result (시각화)

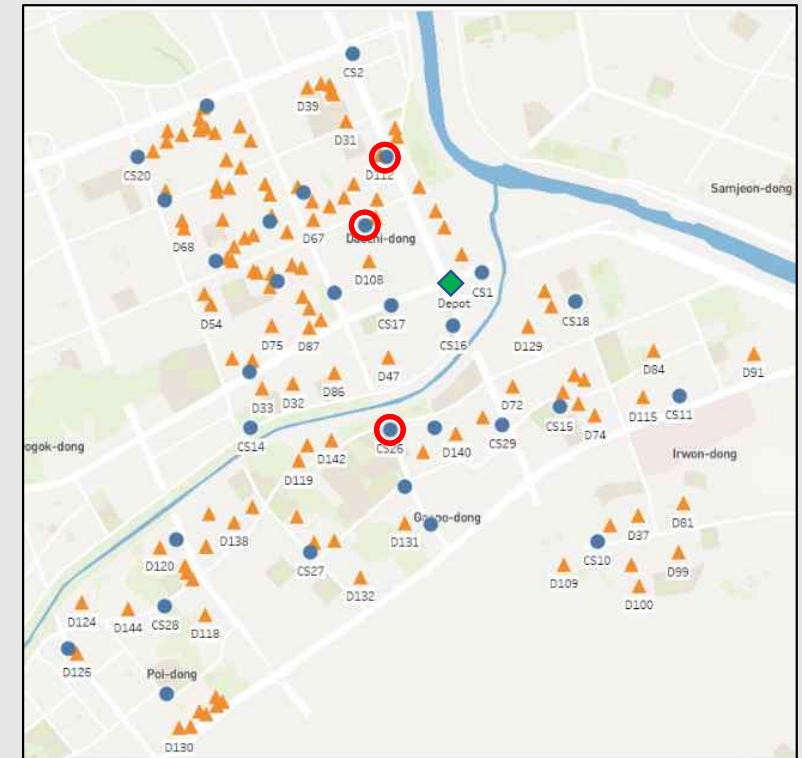
T = 1 일 때

Facility location		
T	F1 Max	F2 Max
1	15, 26	3, 13, 26
2	11, 27	4, 6, 7, 27
3	4, 6, 10, 25	5, 8, 20, 25
4	3, 5, 7, 24	23, 24
Sum	12	13

○ T=1에 추가된 스테이션



F1 Max



F2 Max

5. 수치 실험

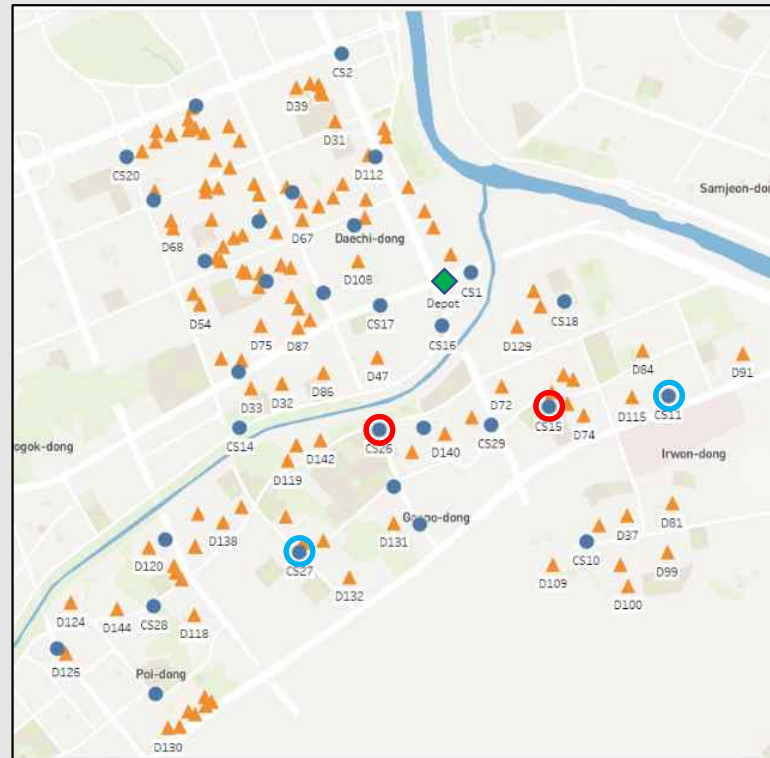
Result (시각화)

T = 2 일 때

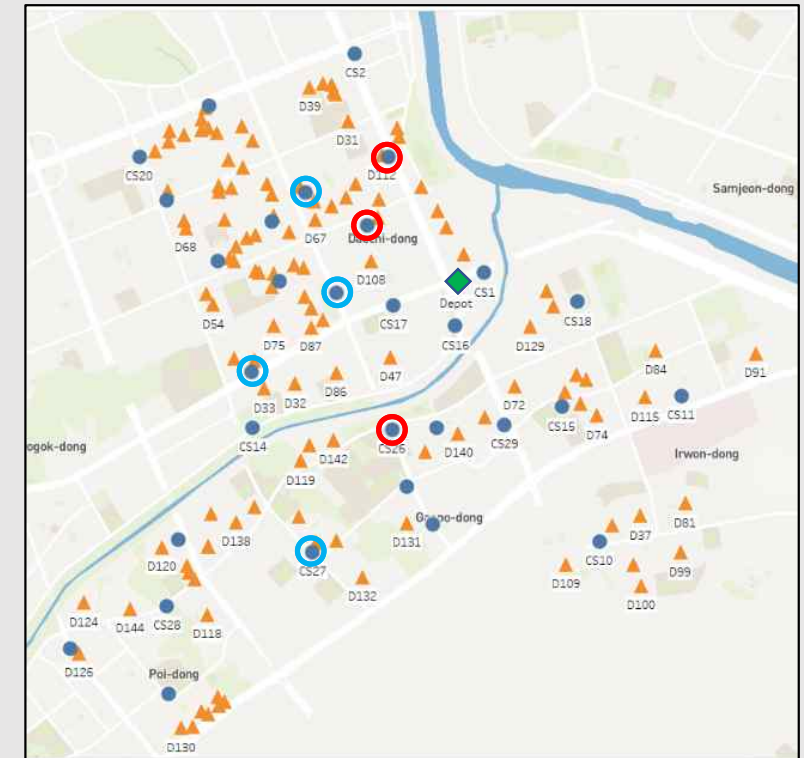
Facility location		
T	F1 Max	F2 Max
1	15, 26	3, 13, 26
2	11, 27	4, 6, 7, 27
3	4, 6, 10, 25	5, 8, 20, 25
4	3, 5, 7, 24	23, 24
Sum	12	13

○ T=1에 추가된 스테이션

○ T=2에 추가된 스테이션



F1 Max



F2 Max

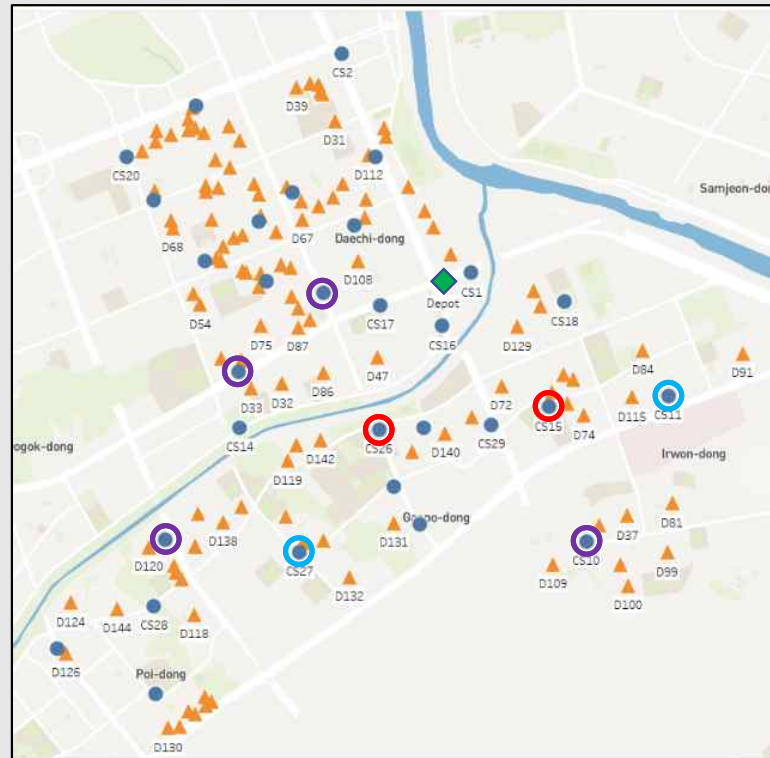
5. 수치 실험

Result (시각화)

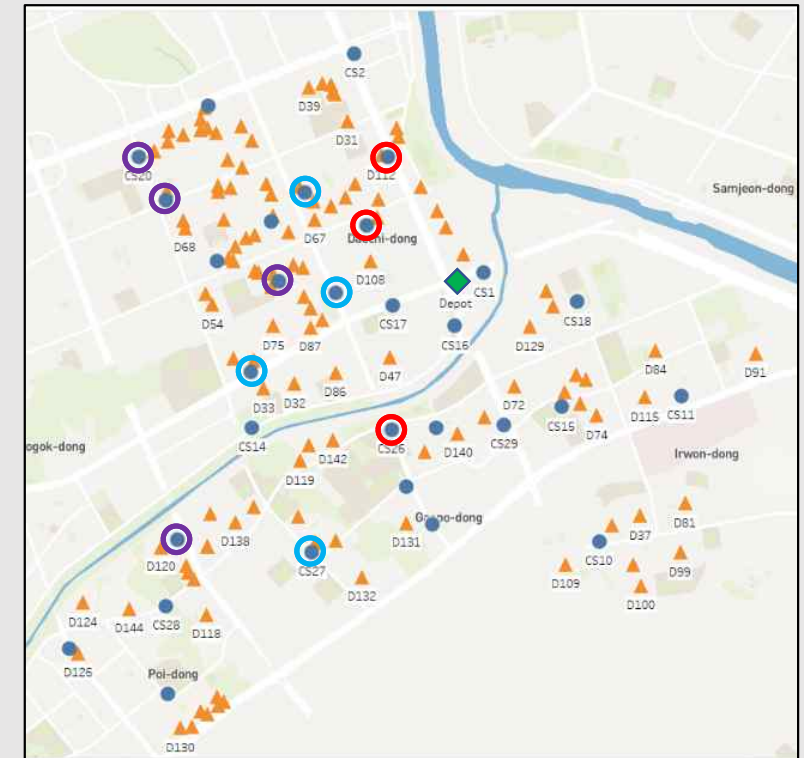
T = 3 일 때

Facility location		
T	F1 Max	F2 Max
1	15, 26	3, 13, 26
2	11, 27	4, 6, 7, 27
3	4, 6, 10, 25	5, 8, 20, 25
4	3, 5, 7, 24	23, 24
Sum	12	13

- T=1에 추가된 스테이션
- T=2에 추가된 스테이션
- T=3에 추가된 스테이션



F1 Max



F2 Max

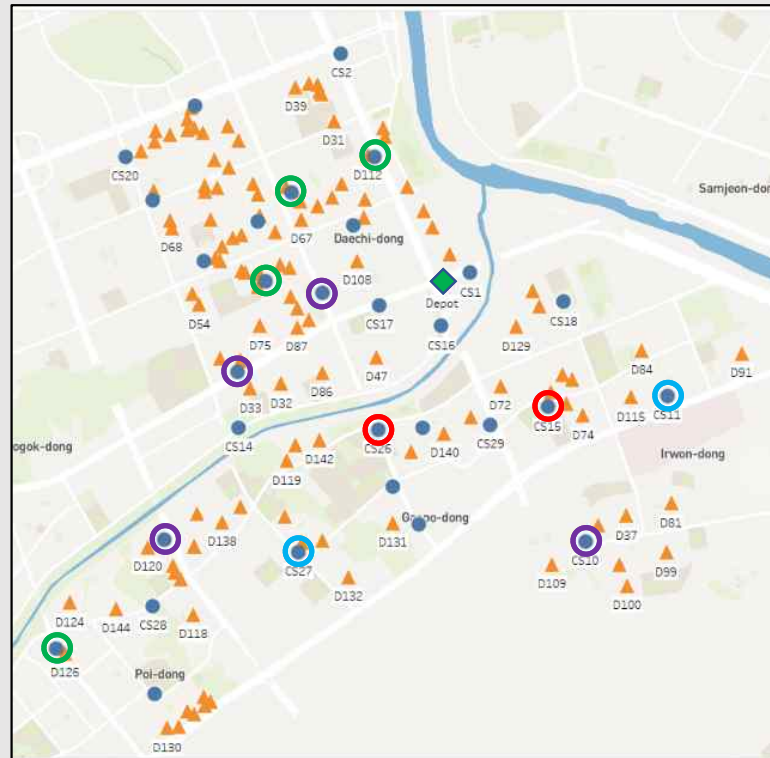
5. 수치 실험

Result (시각화)

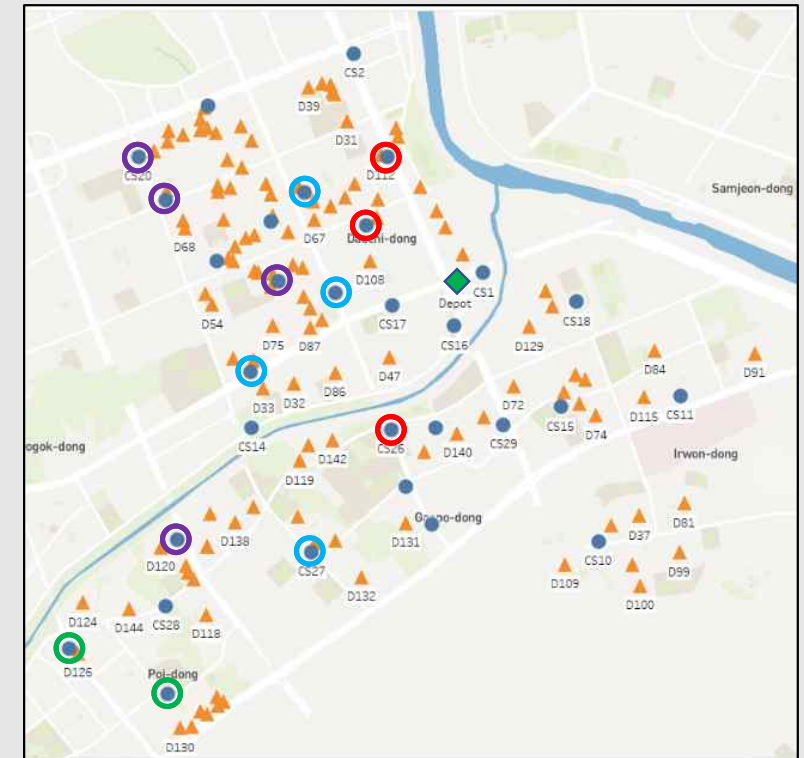
T = 4 일 때

Facility location		
T	F1 Max	F2 Max
1	15, 26	3, 13, 26
2	11, 27	4, 6, 7, 27
3	4, 6, 10, 25	5, 8, 20, 25
4	3, 5, 7, 24	23, 24
Sum	12	13

- T=1에 추가된 스테이션
- T=2에 추가된 스테이션
- T=3에 추가된 스테이션
- T=4에 추가된 스테이션



F1 Max



F2 Max

5. 수치 실험

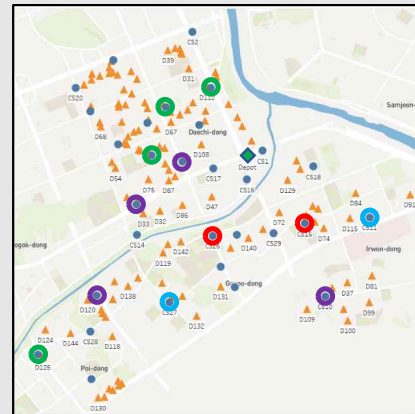
Result (시각화)

Result

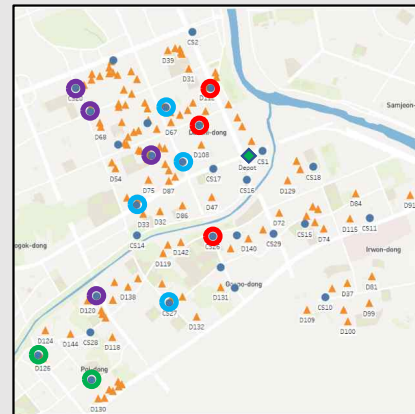
	$C_{level} = 1$		$C_{level} = 2$	
	F1 Obj (세대 수)	F2 Obj (km)	F1 Obj (세대 수)	F2 Obj (km)
F1 Max	45970	16.99	42846	11.25
F2 Max	33465	20.14	33379	15.33

- T=1에 추가된 스테이션
- T=2에 추가된 스테이션
- T=3에 추가된 스테이션
- T=4에 추가된 스테이션

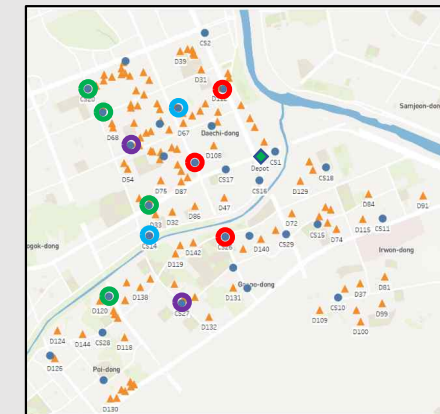
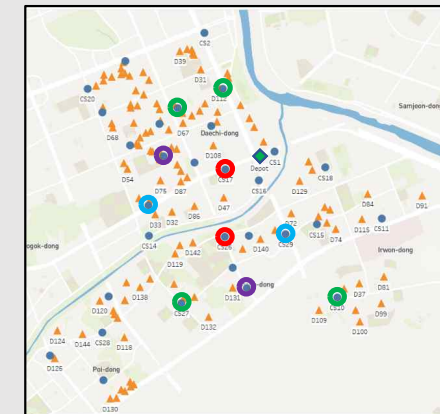
F1 Max



F2 Max



$C_{level} = 1$



$C_{level} = 2$

6

결론

Conclusion

- 친환경 말단 배송 장비의 지속적인 활용을 위한 배터리 공유형 충전스테이션의 입지 선정 연구가 진행되었음
- Bi-objective, multi-period 기반의 수리 최적화 모델을 개발하였음
- 서비스 예정 지역인 학여울역 근처를 대상으로 case study를 진행하여 타당성을 검증하였음
- 충전 스테이션 간 연결성, 서비스 확대 시나리오, 예산 제약 등을 만족하는 Pareto optimal solution들이 도출되었음
- 각각의 optimal solution 들은 서로 다른 network configuration을 지니며, 각 configuration의 장단점 분석에 기반한 서비스 확대 의사 결정을 지원 가능함
- 장비 및 스테이션 개발 완료 후 모델 parameter (R, coverage level 등)의 정확한 산출이 필요하며, 다양한 서비스 확충 목적함수 등의 추가 개발이 요구됨
- 향후 서비스 확대에 의해 수리최적화 모델을 활용한 최적해의 도출이 제한적일 경우, 휴리스틱 등의 개발이 필요함