

배차주기를 고려한MDPRP 최적화 연구

2017. 05. 02

경기대학교 산업경영공학과
박 기 웅

Contents

1 서론

| 연구 배경, 목적 및 연구환경

2 문헌연구

| VRP, PRP, ACO 문헌 연구

3 연구방법

| 연구방법, 수리모형, 온실가스 배출량 산정식, 알고리즘

4 결론

| 결론 및 한계점

→ 1. 서론



연구배경

- '92년 유엔기후변화협약(UNFCCC) 체결을 시작으로 국제적으로 온실가스 배출량 감축이 언급되기 시작됨
- '97년 교토의정서부터 '15년 COP21까지 국제환경회의를 통해 온실가스 배출량 감축이 중요시되고 있음
- 이에 국내에서는 '30년까지 BAU(Business As Usual) 대비 37%를 감축을 목표
- '17년 서울시에서는 노후 경유차 운행제한을 실시하였으며 '20년까지 수도권 전 지역으로 확대될 예정
- 또한 '15년 1월 1일부터 탄소배출권 거래제가 도입됨에 따라 기업에서는 온실가스 배출량을 감축할 필요가 있음

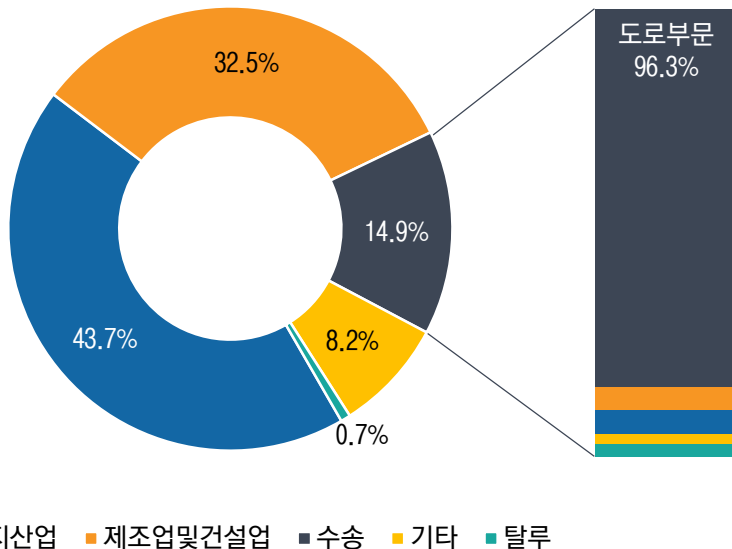


그림. 부문별 온실가스 배출량

(출처: 온실가스종합정보센터)

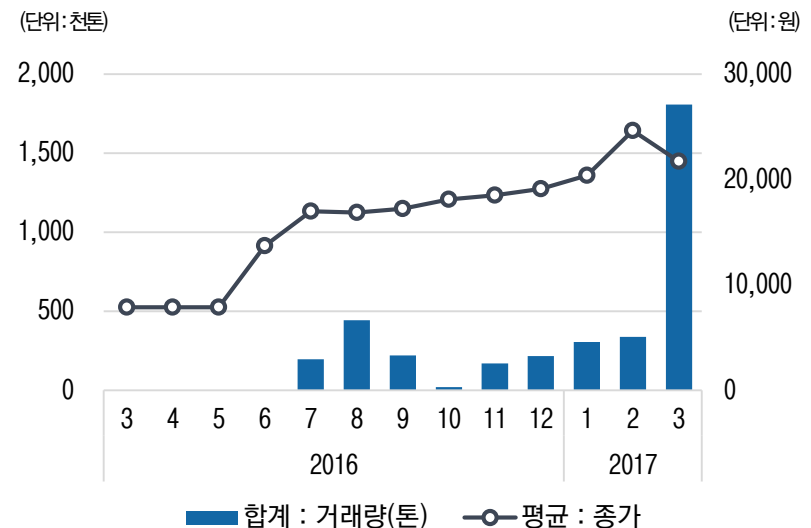


그림. 탄소배출권 거래현황

(출처: 한국거래소)

1. 서론



연구배경

- 온실가스 배출량과 더불어 **희귀금속 고갈 문제** 또한 전세계적으로 중요시되고 있음
- 국내에서는 부적당하게 처리되던 폐전기전자제품 개선을 통해 **희귀금속 자원 회수율을 높이고자** '09년 도시광산 산업 도입
- 도시광산 산업이란 폐전기전자제품에서 금, 은 등 **희귀금속 자원을 회수해 재활용**하는 산업

(단위: 톤)

년도	품 목	재활용률	평균 재활용률
'07년	냉장고	19%	17%
	세탁기	24%	
	에어컨	2%	
	TV	22%	
'08년	냉장고	22%	18%
	세탁기	28%	
	에어컨	2%	
	TV	19%	
'09년	냉장고	26%	20%
	세탁기	27%	
	에어컨	2%	
	TV	25%	

표. 국내 폐전기전자제품 재활용률

(출처: 환경부)

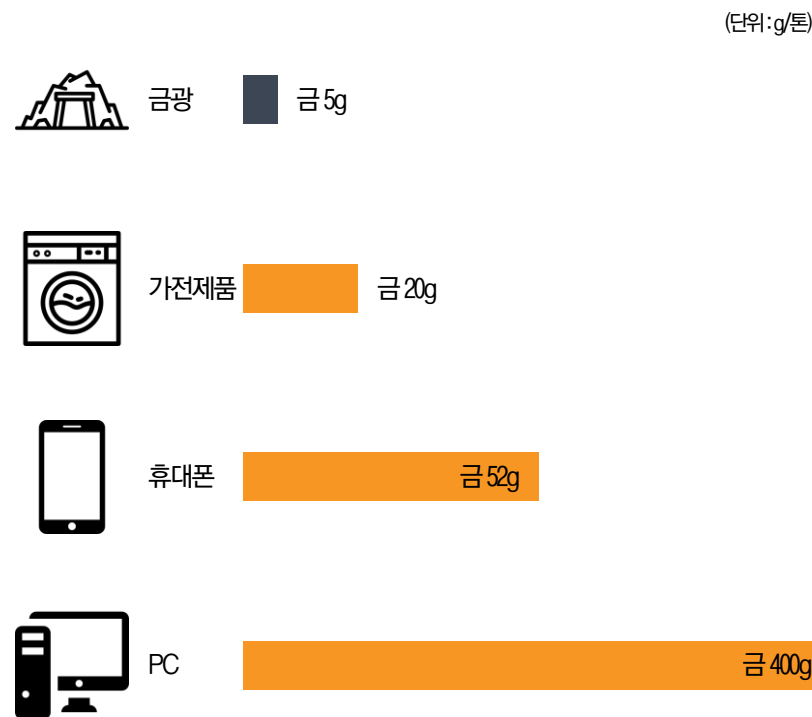


그림. 1톤당 금 채굴량 (출처 : 한국지질자원연구원)

1. 서론



연구배경

- 폐전기전자제품 방문수거 서비스(Door To Door;이하 DTD)는 수거기사가 직접 방문하여 무상으로 처리해주는 서비스
 - '12년 서울시 일부지역에서 시범사업을 시작하여 현재 전국에서 시행
 - 폐전기전자제품의 부적당한 처리를 사전에 차단하여 온실가스 감축효과 기대

01

새제품을 구입할 때
배출하는 경우

- 방법: 사용한 것과 같은 종류의 전자제품을 구입할 시에는 판매대리점 배송요원에게 요청 (무상)
- 대상: 생산자, 판매자 판매대리점

02

방문수거 서비스를
이용하여 배출하는 경우

- 방법: 폐전기전자제품 배출시 인터넷, 모바일 또는 콜센터등을 통해 배출 등록 후 희망하는 날짜에 배출(무상)
- 대상: 지방자치단체

03

지방자치단체(동사무소)를
이용하여 배출하는 경우

- 방법: 새제품을 구입하지 않고 기존에 쓰던 폐전기전자제품을 배출하고자 할 때에는 해당 지방자치단체의 동사무소 등에 수거 수수료를 납부하고 지정된 장소와 시간에 배출(유상)
- 대상: 지방자치단체

그림. 폐전기전자제품 배출경로

(출처 : 한국전자제품자원순환공제조합)

→ 1. 서론

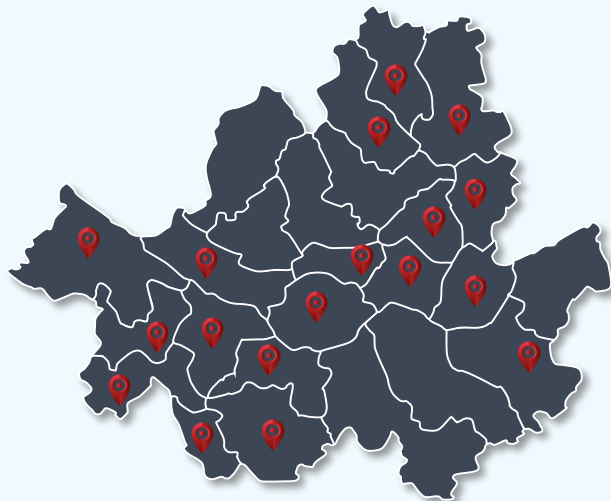


연구목적 및 연구환경

- 본 연구 목적은 다중 집하장 환경의 서울시 폐전기전자제품 무상방문수거에서 배차주기와 다중 집하장의 차량경로 분석을 통해 온실가스 배출량을 최소화(Multi Depot Pollution Routing Problem; 이하MDPRP) 시키고자 함

온실가스 감축을 위한 배차주기와 차량경로 최적화 연구 (다중 집하장 환경)

연구범위



연구환경

- 배차 주기 : 3일/주
- 평균 수거량 : 1,460개/주
- 집하장 수 : 18개
- 차량 대수 : 144대/주
- 속력 : 20 - 80 km/h 가정함
- 거리 : Rectilinear distance(km)

$$\text{직각거리} = (| \text{시작점위도} - \text{도착점위도} | \times 110996.8 + | \text{시작점경도} - \text{도착점경도} | \times 87754.2) / 1000$$

그림. 연구목적

→ II. 문헌연구



차량경로문제(Vehicle Routing Problem; 이하 VRP)

- Vehicle Routing Problem(VRP) – Dantzig, G. B. and Ramser, J.H.(1959)
 - Vehicle Routing Problem with Time Windows(VRPTW) – Toth and Vigo(2001), Cordeau et al.(2007)
 - VRP with Pickup and Delivery(VRPPD) – Toth and Vigo(2001)
 - Capacitated Vehicle Routing Problem(CVRP) – Cordeau et al.(2007)
-
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., & Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. Networks, 30(2), 105–119.
 - Brandao, J., & Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. European journal of operational research, 100(1), 180–191.
 - Wu, T. H., Low, C., & Bai, J. W. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. Computers & Operations Research, 29(10), 1393–1415.
 - Polacek, M., Hartl, R. F., Doerner, K., & Reimann, M. (2004). A variable neighborhood search for the multi depot vehicle routing problem with time windows. Journal of heuristics, 10(6), 613–627.
 - Ho, W., Ho, G. T., Ji, P., & Lau, H. C. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 21(4), 548–557.

→ II. 문헌연구



온실가스 배출량을 고려한 차량경로문제(Pollution Routing Problem; 이하PRP)

- 기존 PRP는 주로 **환경요인, 시간 제약**만을 고려한 온실가스 배출량의 최소화 연구가 대다수
-
- CO₂ emissions with **VRPTW** – Palmer(2007)
 - **Travel times** and CO₂ emissions – Jabali et al.(2012)
 - An **instantaneous** fuel consumption model – Akcelik and Besley(1996, 2003)
 - A **four-mode elemental** fuel consumption model – Bowyer et al.(1985)
 - A **running speed** fuel consumption model – Bowyer et al.(1985)
 - A **comprehensive modal** emission model – Barth et al.(2005)
 - Methodology for calculating transportation emissions and **energy consumption** model – Hickman et al.(1999)
 - **Computer programme** to calculate emissions from road transportation model – Ntziachristos and Samaras(2000)

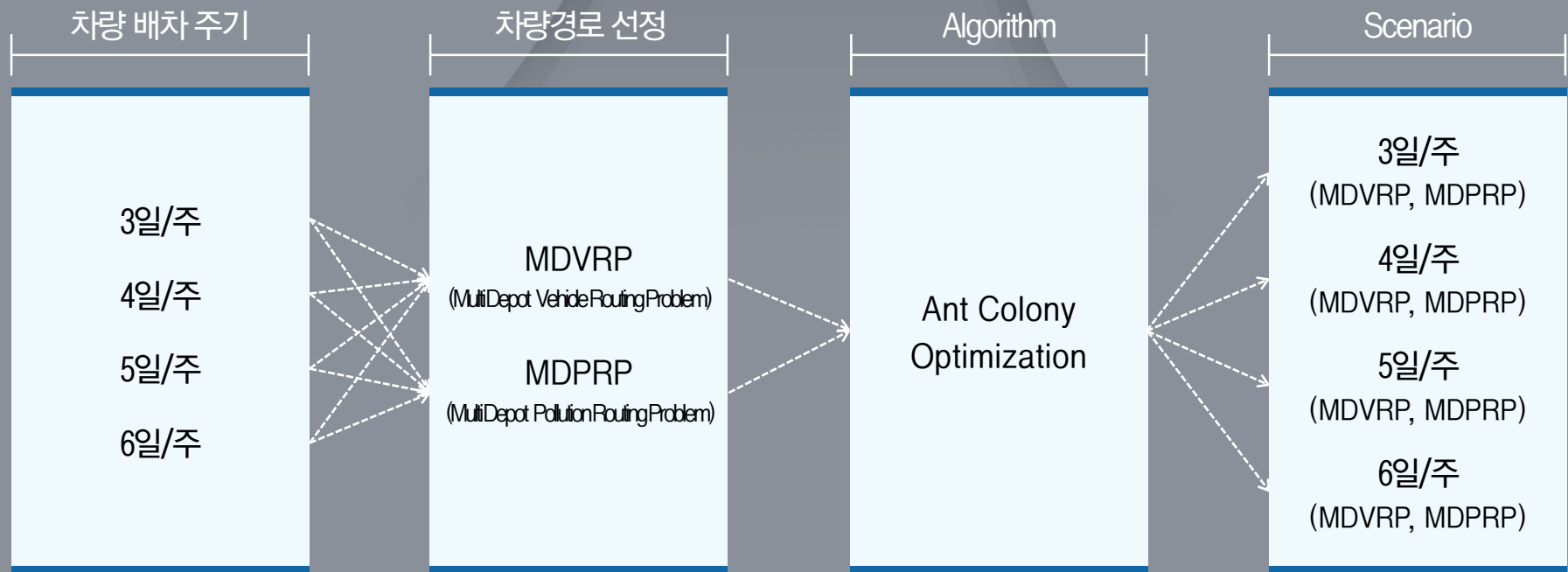
→ II. 문헌연구



Ant Colony Optimization(이하 ACO)

- ACO는 VRP 문제에 많이 쓰이는 metaheuristic 방법론으로 현재까지도 많이 쓰이고 있음
- Bell, J. E., & McMullen, P. R. (2004). Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. Advanced engineering informatics, 18(1), 41–48.
- Matos, A. C., & Oliveira, R. C. (2004, September). An experimental study of the ant colony system for the period vehicle routing problem. In International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence (pp. 286–293). Springer Berlin Heidelberg.
- Fuellerer, G., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Iori, M. (2009). Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem. Computers & Operations Research, 36(3), 655–673.
- Yu, B., Yang, Z. Z., & Yao, B. (2009). An improved ant colony optimization for vehicle routing problem. European journal of operational research, 196(1), 171–176.
- Yu, B., Yang, Z. Z., & Xie, J. X. (2011). A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, 62(1), 183–188.

온실가스 배출량 최소화





Multi Depot – VRP

Objective Function

$$\min \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

S.t

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1 \quad j \in J \quad (2) \text{ 단일경로}$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k \quad k \in K \quad (3) \text{ 차량 용량}$$

$$U_{ik} - U_{jk} + N x_{ijk} \leq N - 1 \quad i, j \in J, k \in K \quad (4) \text{ Sub tour 방지}$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0 \quad k \in K, i \in I \cup J \quad (5) \text{ 흐름보존}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1 \quad k \in K \quad (6) \text{ 각 노드 한번방문}$$

$$\sum_{j \in J} d_i z_{ij} \leq V_i \quad i \in I \quad (7) \text{ 집하장 용량}$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ukj}) \leq 1 \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (8) \text{ 할당된 노드만 저장}$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J, k \in K$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J$$

$$U_{ik} \geq 0 \quad i \in J, k \in K$$

Parameters

c_{ij} = i 에서 j 로의 이동거리

V_i = i 집하장의 최대 허용량

d_i = j 노드의 수요량

Q_k = k 경로의 허용량

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & i \text{에서 } j \text{로 이동} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & j \text{노드가 } i \text{집하장에 할당} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- VRP : 2대 이상의 차량이 한 개 Depot을 출발하여 고객들(node)을 방문하는 문제로 차량의 용량이 제한, 전체 이동거리를 최소화
- MD-VRP : 두 개 이상의 Depot, VRP 확장된 개념
- 도시의 수가 많아 합리적인 계산 시간 내 최적값 도출이 어려운 NP-Hard 문제로 metaheuristics 으로 접근

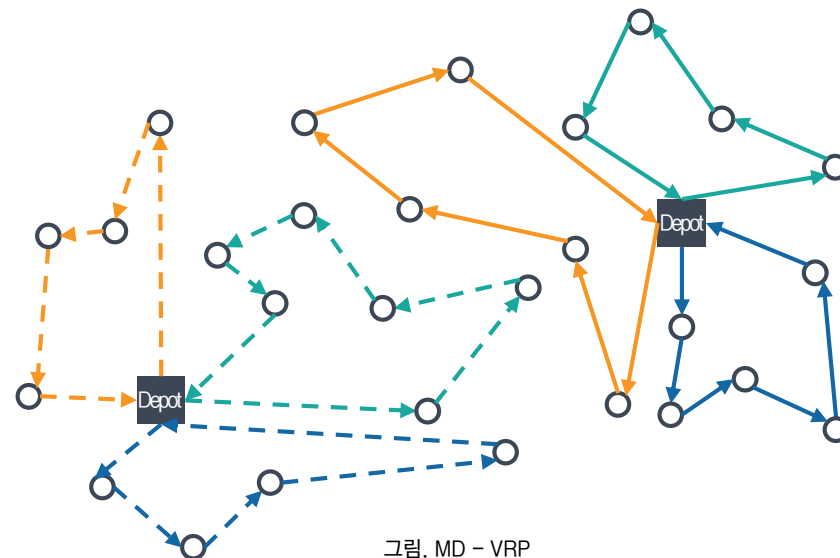


그림. MD - VRP

※ NP-Hard(Non-deterministic Polynomial-time hard) : 다항식으로 표현되지 않는 어려운 문제

※ heuristic : 정립된 공식없이 시행착오를 거쳐가며 주먹구구식으로 분석하는 과정

※ Subtour : 각 도시간의 경로가 다양함



Multi Depot - PRP

Objective Function

$$\min \sum_{(i,j) \in A} kNV\lambda d_{ij} \sum_{r=1}^R x_{ij}^r / \sqrt{v^r} + \sum_{(i,j) \in A} \omega \gamma \lambda \alpha_{ij} d_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \gamma \lambda \alpha_{ij} d_{ij} f_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \beta \gamma \lambda d_{ij} \sum_{r=1}^R x_{ij}^r (\overline{v^r})^2 + \sum_{j \in N_0} f_d s_j \quad (5)$$

S.t

$$\sum_{j \in N} x_{0j} = m \quad (6) \text{ m대 차량 이용}$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (7) \text{ 각 node 한번만 방문}$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N_0 \quad (8) \text{ Sub tour 방지}$$

$$\sum_{j \in N} f_{ji} - \sum_{j \in N} f_{ij} = q_i \quad \forall j \in N_0 \quad (9) \text{ 최초 생성되는 node값 초기화}$$

$$q_i x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (10) \text{ 차량의 용량제한}$$

$$y_j - y_i + t_i + \sum_{r \in R} d_{ij} x_{ij}^r / \sqrt{v^r} \leq K_{ij} (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N_0, j \in N_0, i \neq j \quad (11) \text{ 각 경로의 하한값}$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in N_0 \quad (12) \text{ 완전성}$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{r \in R} d_{j0} x_{j0}^r / \sqrt{v^r} \leq L(1 - x_{j0}) \quad \forall j \in N_0$$

$$\sum_{r=1}^R x_{ij}^r = x_{ij} \quad \forall (i,j) \in A$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0$$

$$x_{ij}^r \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A, r = 1, \dots, R$$

Parameters

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \text{노드 } j \text{에서 서비스 시작시간} \\ \overline{v^r} &= \text{속도 수준} \\ s_j &= \text{총 이동시간} \\ x_{ij} &= \begin{cases} 1. i \text{에서 } j \text{로 이동} \\ 2. \text{Otherwise} \end{cases} \\ z_{ij}^2 &= \begin{cases} 1. i \text{에서 } j \text{로 속도 } r \text{로 이동} \\ 2. \text{Otherwise} \end{cases} \\ f_{ij} &= \begin{cases} 1. i \text{에서 } j \text{로의 물동량} \\ 2. \text{Otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

- PRP : 차량, 환경, 교통 등의 요소들을 적용하여 전체 이동거리 뿐만 아니라 온실가스 배출량을 최소화
- MD-PRP : 두 개 이상의 Depot을 출발하여 고객들을 방문하는 문제로 VRP 확장된 개념
- 누적 적재량에 따라 목적값이 달라지므로 정방향과 역방향의 차이가 있음

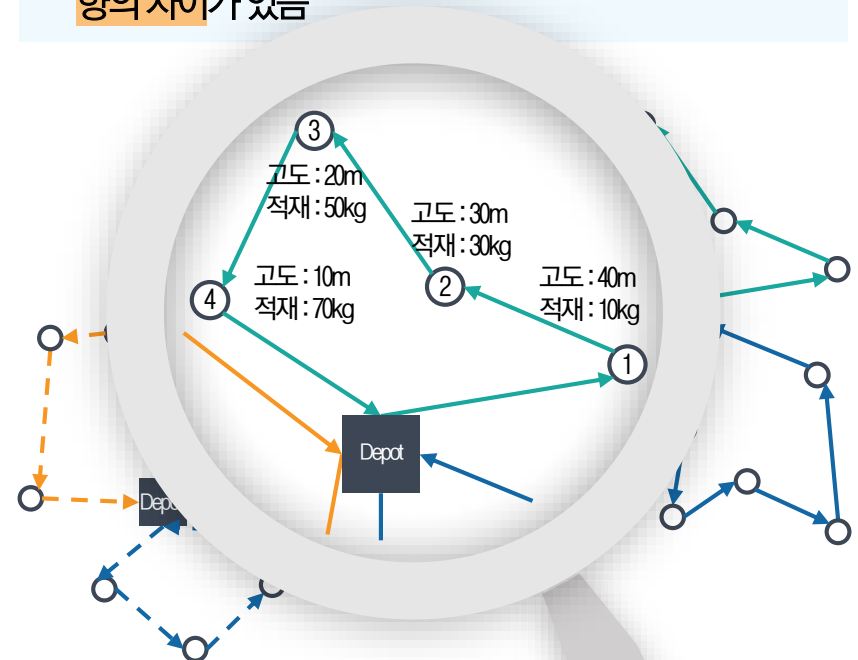


그림. MD - PRP



온실가스 배출량 산정 모델(A Comprehensive Modal Emission Model)

- 차량: 중량, 엔진 크기, 오일 점성, 가솔린 유형, 차량 모양, 보조전력량
- 환경: 도로경사도, 바람상태, 주위온도, 고도, 도로포장 유형, 표면 상태
- 교통: 속도, 가속도
- 3개의 모듈(엔진 힘, 엔진 속도, 연료 비율)로 구성

$$FR(g) = \varepsilon(kNV + P/\varphi)/44$$

※ 1g ≈ 1mL

구분	수식	설명
P_{tract}	$= (M\tau + Mg \sin \theta + 0.5C_d\rho Av^2 + MgC_r \cos \theta)v/1000$	엔진 동력 모듈(kW)
P	$= P_{tract}/\varphi_{tf} + P_{acc}$	초당 엔진 출력량(kW)
N	$= S(R(L)/R(L_g))v$	엔진 속도(rpm)

표 A Comprehensive Modal Emission Model 온실가스 배출량



Ant Colony Optimization(ACO)

- ACO는 metaheuristic 기법 중 하나로 '91년 M.Dorigo에 의해 처음 제안
- metaheuristic : 문제마다 특성에 맞춰 개발해야 하는 Heuristic과 달리 보다 범용적으로 사용 가능한 상위수준의 발견적 기법
- 실제 개미들의 집단행동에 대한 메커니즘을 응용한 기법
- 페로몬 양의 감소와 증가를 통해 최적값 도출

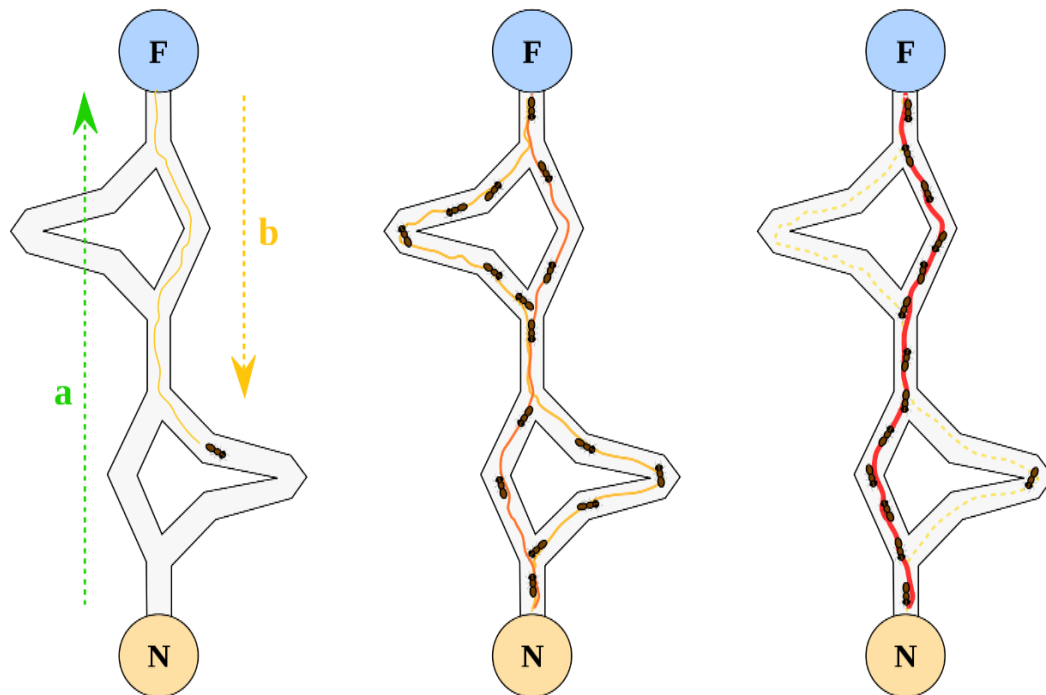


그림. Ant Colony Optimization

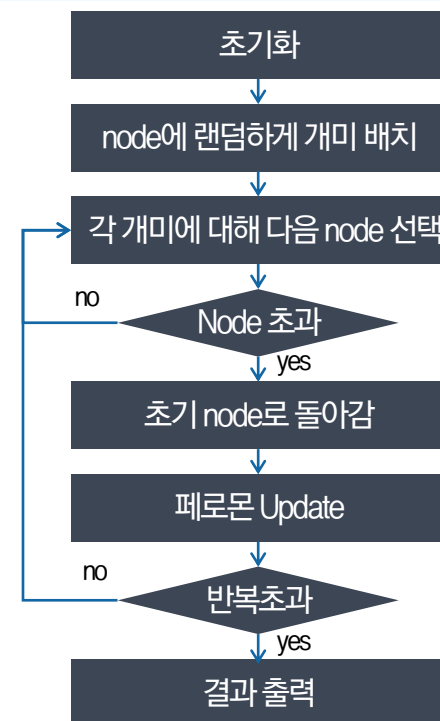


그림. ACO flow chart



Ant Colony Optimization(ACO)

Step 1: 개미 node 탐색

Step 1-1: 0~1사이 난수를 발생 $\rightarrow q_0$ 보다 작으면 페로몬 변경

$$\text{Max}\{\tau_{i,j}^\alpha \eta_{i,j}^\beta\}$$

q_0 : 파라미터, 개미가 기존 node를 선택 할 확률, 0~1 사이의 값
 q : 0~1 사이의 확률변수

Step 1-2: 0~1사이 난수를 발생 $\rightarrow q_0$ 보다 작으면 페로몬 유지

$$p_{i,j} = \frac{\tau_{i,j}^\alpha \eta_{i,j}^\beta}{\sum_{l \in S} \tau_{i,l}^\alpha \eta_{i,l}^\beta}$$

$p_{i,j}$: 개미가 i에서 j로 이동할 확률
 $\tau_{i,j}$: i, j까지 페로몬 양
 $\eta_{i,j}$: i, j까지 중요도
 S : 개미가 방문한 node
 α, β : 파라미터

Step 1-3: 개미가 node 이동시 페로몬 생성 및 증발

$$\tau_{i,j} = (1 - \varphi)\tau_{i,j} + \varphi\tau_0$$

τ_0 : 파라미터, 페로몬 초기값
 φ : 파라미터, 페로몬 증감비율

Step 2: 1회 종료시 최적값 찾은 경로의 페로몬으로 Update

$$\tau_{i,j} = (1 - \varphi)\tau_{i,j} + \Delta\tau^{i,j \text{ best}}$$

$$\tau^{i,j \text{ best}} = \begin{cases} 1/c_{\text{best}} \\ 0 \end{cases}$$

c_{best} : 최적경로의 목적값

Step 3: 지정한 반복 횟수까지 Step 1 ~ Step 2를 반복하며 최적값 Update

→ IV. 결론



MDVRP vs MDPRP

- MDVRP와 MDPRP를 적용하였을 때 이동거리와 온실가스 배출량을 비교
- 이동거리: 1,600.3km → 1,690.0km (5.6% 증가)
- 온실가스 배출량: 459.0kgCO₂ → 440.1kgCO₂ (4.1% 감소)
- MDPRP로 적용하였을 경우 이동거리는 증가하였지만 온실가스 배출량은 감소함

구분	노드 수	차량 대수	이동거리(km)	온실가스 배출량(kgCO ₂)
MDVRP	1,460	144	1,600.3	459.0
MDVRP	1,460	144	1,690.0	440.1
증감률			5.6%	-4.1%

표 MDVRP vs MDPRP

→ IV. 결론



MDVRP vs MDPRP

- 배차주기를 변경하였을 때 이동거리와 온실가스 배출량을 비교
- 4회/주 = 이동거리 : 1,690.0km → 1,614.8km (4.4% 감소), 온실가스 배출량 : 440.1kgCO₂ → 421.4kgCO₂ (4.3% 감소)
- 5회/주 = 이동거리 : 1,690.0km → 1,418.2km (16.1% 감소), 온실가스 배출량 : 376.5kgCO₂ → 421.4kgCO₂ (14.5% 감소)
- 6회/주 = 이동거리 : 1,690.0km → 1,435.2km (15.1% 감소), 온실가스 배출량 : 440.1kgCO₂ → 376.6kgCO₂ (14.4% 감소)
- 5회/주로 적용하였을 경우 이동거리와 온실가스 배출량 모두 가장 큰 감축을 보임

구분	노드 수	차량 대수	이동거리(km)	온실가스 배출량(kgCO ₂)
3회/주	1,460	144	1,600.3	459.0
4회/주	1,460	126	1,614.8 (-4.4%)	421.4 (-4.3%)
5회/주	1,460	105	1,418.2 (-16.1%)	376.5 (-14.5%)
6회/주	1,460	96	1,435.2 (-15.1%)	376.6 (-14.4%)

표 배차주기별 MDPRP

→ IV. 결론



결론

- MDPRP 적용하였을 경우 MDVRP에 비해 보다 온실가스 배출량을 감축시킬 수 있음
 - 이동거리: 1,600.3km → 1,690.0km (5.6% 증가), 온실가스 배출량: 459.0kgCO₂ → 440.1kgCO₂ (4.1% 감소)
- 배차주기를 5회/주로 적용하였을 경우 3회/주에 비해 보다 온실가스 배출량을 감축시킬 수 있음
 - 이동거리: 1,690.0km → 1,418.2km (16.1% 감소), 온실가스 배출량: 376.5kgCO₂ → 421.4kgCO₂ (14.5% 감소)



기여점

- 본 연구의 목적은 다중 집하장의 온실가스 배출량을 최적화로 배차주기와 차량경로를 개선하는 연구를 진행함
- 본 연구를 통해 도로부문의 온실가스 배출량을 감축하는 방안을 제시
- 배차주기와 MD-PRP를 통한 온실가스 배출량 최적화 연구는 진행되어있지 않은점에 의의가 있음



Q & A

감사합니다.