



국제물류를 위한

복합일관운송시스템 최적화

제8회 한국 대학생 SCM 경진대회

공군사관학교 시스템공학과
양 규 승 [지도교수 : 김홍섭]



목 차

1 연구 배경 및 목적

2 문제의 정의

3 최적화 수리 모형

4 수치 실험

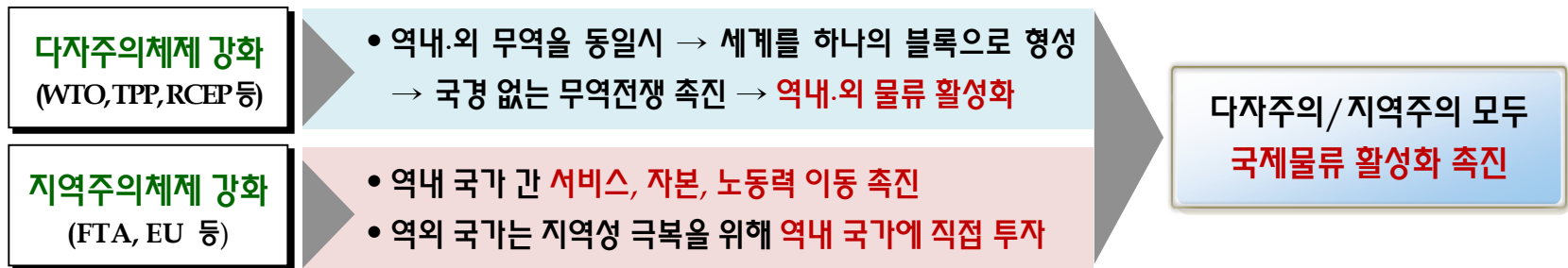
5 결론 및 향후 연구 방향

연구배경 및 목적 [1/2]

❑ **국제물류의 정의** : 2개국 이상에 걸친 생산과 소비의 시·공간적 차이를 극복하기 위한 유·무형 재화의 물리적인 국제 경제활동

❑ **국제물류의 중요성** : “세계무역의 발전과 글로벌 제조의 통합”

● 세계 무역구조의 변화로 인해 국제물류 활성화 촉진



● 글로벌 기업의 증가, 운송수단과 정보기술(IT)의 발전 등으로 국제물류량 지속 증가

● 국제물류를 기반으로 국제시장 발전 및 국제적인 제품경쟁력 향상

● 수출·입의 활성화를 통해 국가경제 성장과 물가의 안정 도모

● 국제물류의 효과적 관리를 통해 물류비 절감 및 서비스의 질적 향상 등

➡ 다품종 소량 생산체제 확대로 다빈도 배송, 리드타임 단축 등 국제운송의 고도화 필요

[삼성전자 휴대폰 생산국 분포]

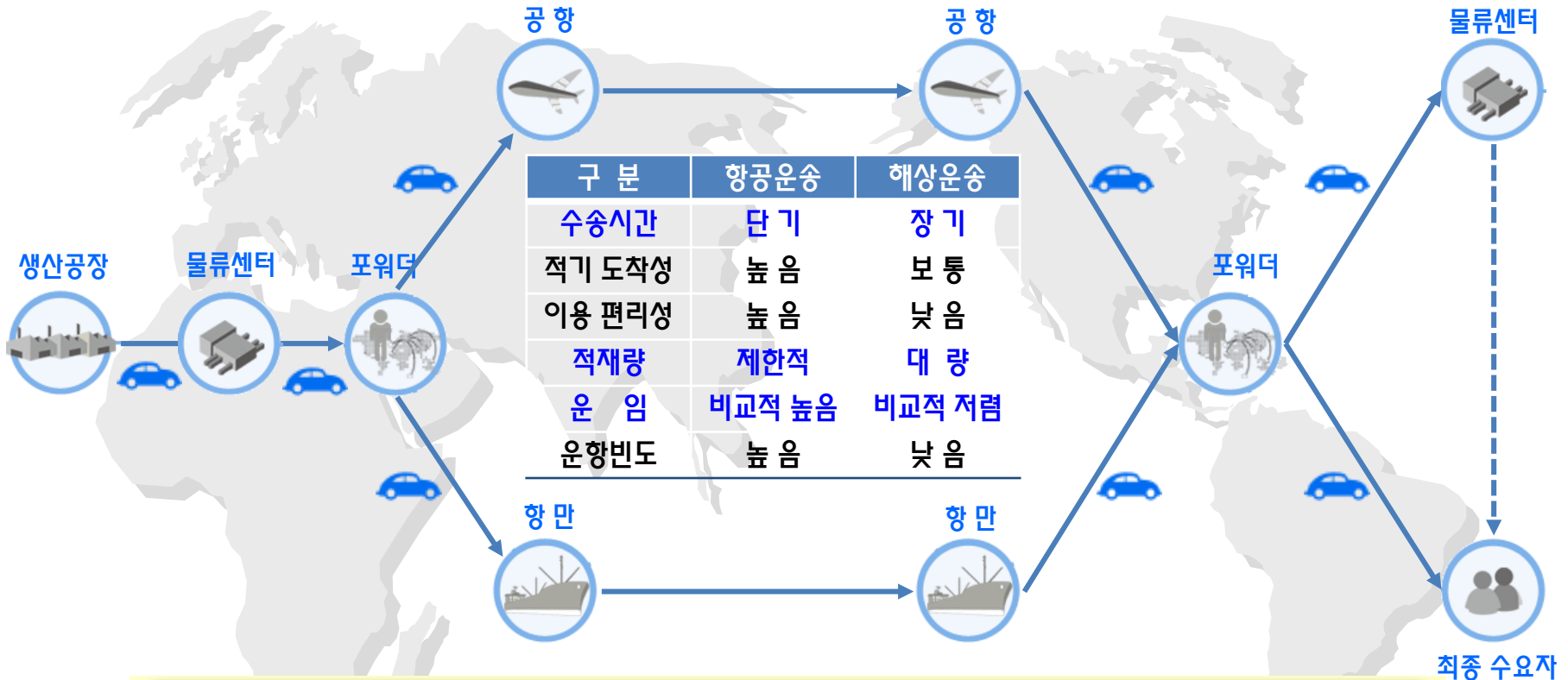


❑ **국제운송 추세** : “Port to Port”의 해상운송합리화 → “Door to Door”의 복합일관운송시스템

※ 복합일관운송시스템 : 여러 종류의 운송수단을 이용하여 국제물류의 운송을 진행하도록 만들어진 시스템

연구배경 및 목적 [2/2]

□ 복합일관운송시스템



복합일관운송시스템의 효율화를 위한 최적화 수리모형 개발

- 목적함수 : 운송비용(고정비 + 변동비) 최소화
- 운송경로 상에서 여러 운송수단(지상, 해상, 항공)의 활용 및 전환수송 가능
- 다품종의 운송, 최종 수요자의 제품수령 요구시간(Time window) 고려 등

문 제 의 정 의

VRPSDP-TW

Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up under Time Window

[문제가 고려하는 환경]

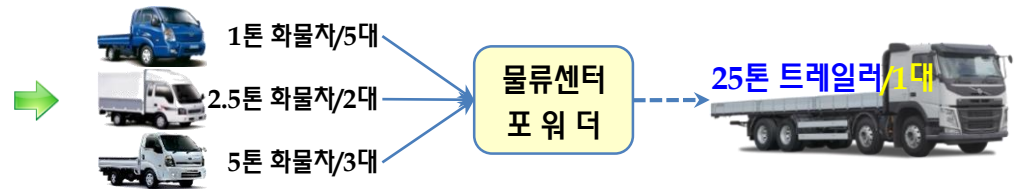
다수의 생산지(물류센터)가 여러 곳에 분포되어 있고, 다양한 운송수단을 이용하여 고객들이 원하는 시간대에 방문하여 제품을 배송하거나 회수하기 위한 최소 수송비용의 차량 경로를 탐색

[주요 제한사항]

- 하나의 경로 상에서 운송수단이 변경되는 전환수송 적용 불가
- 한 지점에 있는 대량의 물품들을 여러 운송수단을 이용하는 분할수송 미고려
- 물류센터 등 제한적인 노드(Node)에 한해 운송수단 보유 가능

VRPSDP-TW의 보완사항

- 국제물류에서는 공급자부터 구매자까지의 운송경로 상에 육로(차량, 철도), 항공, 해상운송을 동시에 고려 필요
→ “임의의 운송경로 구성에 여러 운송수단이 활용
- 대량 물자를 취급하는 중간 집하소(물류센터, 포워더)에서는 운송수단의 변경 가능



- 또한, 임의 노드의 물량을 운송하기 위해 다수의 운송수단에 의한 분할수송 고려 → “노드별 다수의 중복방문 허용”
- 임의 노드에서 운송수단 간의 물품 적·하역이 발생함에 따라 “운송수단별 경로 연속성” 외에 추가적으로 “물품별 물류량 연속성” 보장을 위한 제약 필요



최적화 수리 모형 (1/3)

□ 표기(Notation)

- P : 생산지 Node의 집합
 - T : 공항, 항만 Node의 집합
 - C : 수요지 Node의 집합
 - N : 전체 Node의 집합 ; $N = \{P, T, C\}$
 - K : 운송수단 유형 k 의 집합 ; $k \in K$
 - S : 각 운송수단 보유량 집합 ; $s \in S$
 - G : 물품 종류 g 의 집합 ; $g \in G$
 - M : Big M
 - R_{ij} : Node i 에서 j 까지의 거리
 - F_k : 운송수단 유형 k 의 고정 비용
 - V_k : 운송수단 유형 k 의 변동비 (적재량 당 비용)
 - Q_k : 운송수단 유형 k 의 적재용량
 - a_k : 운송수단 유형별 물품 무게 당 적하역 소요시간
 - H_{ik} : Node i 에서 보유하고 있는 운송수단 유형 k 의 대수
 - D_i^g : Node i 로 배송할 물품 g 의 수요량(무게)
 - L_i^g : Node i 에서 적재해야 하는 물품 g 의 무게
 - Vel_k : 운송수단 유형 k 의 평균 속도
 - T_i^s, T_i^e : Node i 에 배송하여야 하는 시간대(Time windows)
- [결정변수(Decision variables)]
- $x_{ijks} = \begin{cases} 1, & \text{운송수단 유형 } k \text{의 } s \text{번째가 Node } i \text{에서 } j \text{로 이동하면,} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$
 - q_{ijks}^g : 운송수단 유형 k 의 s 번째가 Node i 에서 j 로 이동할 때, 물품 종류 g 의 적재량
 - d_{iks}^g : 운송수단 유형 k 의 s 번째가 Node i 에 배송하는 물품 g 의 양
 - l_{iks}^g : 운송수단 유형 k 의 s 번째가 Node i 에서 적재하는 물품 g 의 양
 - t_{iks} : 운송수단 유형 k 의 s 번째가 Node i 에 도착하는 시간
 - B_i : 운송수단 변경 시, Node i 에서의 출발시간; 제약식 (14) 참조

최적화 수리 모형 [2/3]

Minimize $\sum_{i \in \text{PUT}} \sum_{j \in \text{N}} \sum_{k \in \text{K}} \sum_{s \in \text{S}} F_k \cdot x_{ijks} + \sum_{i \in \text{N}} \sum_{j \in \text{N}} \sum_{g \in \text{G}} \sum_{k \in \text{K}} \sum_{s \in \text{S}} V_{ijk} \cdot q_{ijks}^g$

subject to

운송 수단

$$\sum_{i \in \text{N}} x_{ijks} \leq 1, \quad \forall j \in \text{N}, \forall k \in \text{K}, \forall s \in \text{S}$$

이동 경로

$$\sum_{i \in \text{N}} x_{ihks} - \sum_{j \in \text{N}} x_{hjks} = 0, \quad \forall h \in \text{C}, \forall k \in \text{K}, \forall s \in \text{S}$$

관련 제약

$$\sum_{j \in \text{N}} \sum_{s \in \text{S}} x_{hjks} \leq H_{hk} + \sum_{i \in \text{N}} \sum_{s \in \text{S}} x_{ihks}, \quad \forall h \in \text{P} \cup \text{T}, \forall k \in \text{K}$$

$$x_{iiks} = 0, \quad \forall i \in \text{N}, \forall k \in \text{K}, \forall s \in \text{S}$$

재화흐름과

운송경로의

연계 제약

$$M \sum_{i \in \text{N} \setminus h} x_{ihks} \geq l_{hks}^g, \quad \forall h \in \text{N}, \forall g \in \text{G}, \forall k \in \text{K}, \forall s \in \text{S}$$

$$M \sum_{i \in \text{N} \setminus h} x_{ihks} \geq d_{hks}^g, \quad \forall h \in \text{N}, \forall g \in \text{G}, \forall k \in \text{K}, \forall s \in \text{S}$$

$$\sum_{i \in \text{N}} \sum_{k \in \text{K}} \sum_{s \in \text{S}} q_{ijks}^g - \sum_{k \in \text{K}} \sum_{s \in \text{S}} (d_{iks}^g - l_{iks}^g) \leq \sum_{j \in \text{N}} \sum_{k \in \text{K}} \sum_{s \in \text{S}} q_{hjks}^g,$$

$$\forall h \in \text{N}, \forall g \in \text{G}$$

적재량과

수요량의

충족 제약

$$\sum_{k \in \text{K}} \sum_{s \in \text{S}} l_{iks}^g = d_{iks}^g + L_i^g - D_i^g, \quad \forall i \in \text{P}, \forall g \in \text{G}$$

$$\sum_{i \in \text{N}} q_{ijks}^g \geq d_{jks}^g, \quad \forall j \in \text{N}, \forall g \in \text{G}, \forall k \in \text{K}, \forall s \in \text{S}$$

(1) } **목적함수 : 총 운송비용 최소화**
운송 수단 운용에 따른 고정비용과
운송 무게 및 거리에 따른 변동비용의 합 최소화

(2) } 각 운송수단은 각 Node를 1회 이하 방문

(3) } 각 운송수단의 경로 연속성 제약
[수요지들의 경로(Route)에 적용]

(4) } **출발 대수 ≤ 보유 + 도착 대수**
[임의 Node에서 운송수단 교환 적재 가능]
Node가 보유하고 있는 차량과 들어온 차량만 이용

(5) } 각 운송수단은 임의 Node에 머물지 않음

(6) } 방문하는 생산지에 한해 상품 적재 가능

(7) } 방문하는 수요지에 한해 상품 배송 가능

(8) } **각 Node의 재화흐름의 연속성 제약**
[유입량 = 유출량]

(9) } **각 운송수단별 적재량 산정**
각 생산지에서 발송할 물량 및 다른 차량이 임시로
하역한 물량은 모두 운송수단에 적재되어야 함

(10) } 각 Node에 하역하는 물량은 운송수단에
적재되어 있는 양 이하임

최적화 수리 모형 [3/3]

수요량의
충족 제약

$$\sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{s \in \mathbf{S}} d_{iks}^g \geq D_i^g,$$

$$\forall i \in \mathbf{C}, \forall g \in \mathbf{G} \quad (11) \quad \left. \vphantom{\sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{s \in \mathbf{S}} d_{iks}^g} \right\} \text{수요지의 상품별 수요량은 충족되어야 함}$$

운송수단
적재량
관련 제약

$$q_{ijks}^g + l_{hks}^g - d_{hks}^g - M(1 - x_{ijks}) \leq \sum_{h \in \mathbf{N}} q_{jhks}^g,$$

$$\forall i, j \in \mathbf{N}, \forall g \in \mathbf{G}, \forall k \in \mathbf{K}, \forall s \in \mathbf{S} \quad (12)$$

방문하는 Node에서의 각 운송수단의
적재량 산정 제약

[각 운송수단이 현재 적재되어 있는 물량 - Node에서 적재하는 물량 + Node에서 하역하는 물량 = Node를 출발할 때 운송수단의 적재되어 있는 물량]

$$\sum_{g \in \mathbf{G}} q_{ijks}^g \leq Q_k,$$

$$\forall i, j \in \mathbf{N}, \forall k \in \mathbf{K}, \forall s \in \mathbf{S} \quad (13)$$

각 운송수단의 적재량은 자신의 용량을
초과할 수 없음

운송/배송
시간 관련
제약

$$B_i \geq \text{Max}(t_{hks}) - M \left(\text{Max} \left(1, \sum_{g \in \mathbf{G}} l_{jks}^g \right) - \sum_{g \in \mathbf{G}} l_{jks}^g \right)$$

$$\forall h \in \mathbf{N}, \forall k \in \mathbf{K}, \forall s \in \mathbf{S} \quad (14)$$

공항/항만 및 운송물품을 교환하는
Node의 시간 산정 제약

[물품수송 수단이 A수단에서 B수단으로 전환될 때 물건을 싣는 수단은 내리는 수단보다 늦게 출발함]
Loading이 일어나는 Node에서만 결정변수 B 산정

$$\text{Max}(B_i, t_{iks}) + \frac{R_{ij}}{\text{Vel}_k} + a_k \left(\sum_{g \in \mathbf{G}} d_{jks}^g + \sum_{g \in \mathbf{G}} l_{jks}^g \right) - M(1 - x_{ijks}) \leq t_{jks},$$

물품의 적하역 소요시간(물량에 비례)

$$\forall i, j \in \mathbf{N}, \forall k \in \mathbf{K}, \forall s \in \mathbf{S} \quad (15)$$

각 운송수단별 방문하는 Node에 도착
시간 산정 제약

평균 이동시간(거리/속도)과 적·하역하는 시간의 합
[공항/항만 및 물품이 운송수단을 전환하는 Node에서는 결정변수B를 사용하여 적·하역 가능시간 만족]

$$T_i^s \leq t_{iks} \leq T_i^e,$$

$$\forall i \in \mathbf{C}, \forall k \in \mathbf{K}, \forall s \in \mathbf{S} \quad (16)$$

배송시간(Time windows) 준수 제약

결정변수들의 범위(이진형, 실수형, 비음조건) 등은 표기 참조



수 치 실 험 [1/6]

□ 수치실험 1 : “국내·외 수요지에 대한 운송계획”

생 산 지 / 수 요 지 관 련 정 보

| Node | 구분 | 지 역 명 | 위 도 | 경 도 | 생산/수요량 | | 배송시간 |
|------|-------|------------|-----------|------------|--------|------|---------|
| | | | | | 물품 1 | 물품 2 | |
| (1) | 생산지 | [韓] 포 향 | 36.0937°N | 129.3698°E | 250 | 300 | - |
| (2) | 항만/공항 | [韓] 부 산 | 35.1036°N | 129.0413°E | - | - | - |
| (3) | 항만/공항 | [美] 롱비치 | 33.7479°N | 118.2144°W | - | - | - |
| (4) | 수요지 | [韓] 대 구 | 35.8675°N | 128.5942°E | 50 | 70 | [0, 5] |
| (5) | 수요지 | [韓] 창 원 | 35.2267°N | 128.6796°E | 100 | 30 | [0, 5] |
| (6) | 수요지 | [韓] 대 전 | 36.3504°N | 127.3874°E | - | 20 | [0, 10] |
| (7) | 수요지 | [美] 로스엔젤레스 | 34.0281°N | 118.2676°S | 70 | 90 | [0, 30] |
| (8) | 수요지 | [美] 샌디에고 | 36.2114°N | 115.2794°S | - | 10 | [0, 36] |
| (9) | 수요지 | [美] 라스베이거스 | 32.8092°N | 117.1433°S | 30 | 80 | [0, 25] |

운 송 수 단 관 련 정 보

| 구 분 | 적재용량 | 평균 속도 | 운 임 | | 구 분 | 적재용량 | 평균 속도 | 운 임 | |
|------|------|-------|-----|-------|-----|--------|-------|-----|-------|
| | | | 고정비 | 변동비 | | | | 고정비 | 변동비 |
| 차량 1 | 150 | 100 | 10 | 0.025 | 항공기 | 600 | 916 | 300 | 0.01 |
| 차량 2 | 300 | 90 | 15 | 0.027 | 선 박 | 48,000 | 46 | 400 | 0.001 |

수 치 실 험 [2/6]

□ 수치실험 1 결과



주요 내용

- [국내운송] “포항-대구-창원-부산”을 경유하는 차종1은 **창원에서 차종2가 하역해 놓은 물품2[130]를 재적재하여 부산공항으로 이동 : 현실적이고 경제적인 운송**
- [복합일관운송] 차종1 2대가 물품 [100/180]을 부산공항으로 운송하고 (美)롱비치까지 **항공운송한 후, 미국 내에서 차량으로 각 수요지에 배송 (다수 수요지 방문 가능)**



수 치 실 험 [3/6]

□ 수치실험 1의 세부 결과

| 운송지역 | 구분 | 운송경로 계획에 대한 세부 정보 | | | |
|-----------------|----------|---|--|--|---|
| 대한민국 | 차종 1 (1) | (1 : 포항) [적재 : 50 / 70] | → [도착 : 3.33] (4 : 대구) [하역 : 50 / 70] | → [도착 : 4.99] (5 : 창원) [적재 : 0 / 130] | → [도착 : 8.03] (2 : 부산) [하역 : 0 / 130] |
| | 차종 2 (1) | (1 : 포항) [적재 : 100 / 200] | → [도착 : 3.21] (5 : 창원) [하역 : 100 / 180] | → [도착 : 5.15] (6 : 대전) [하역 : 0 / 20] | |
| | 차종 1 (2) | (1 : 포항) [적재 : 100 / 50] | → [도착 : 8.03] (2 : 부산) [하역 : 100 / 50] | <div>[도착시간] (노드 : 지역명) [적재·하역 : 물품 1 / 물품 2]</div> | |
| 대한민국 → 미국 (항공기) | | [출발 : 8.03] (2 : 부산) [적재 : 100 / 180] | → [도착 : 18.45] (3 : 롱비치) [하역 : 100 / 180] | | |
| 미 국 | 차종 1 (3) | (3 : 롱비치) [적재 : 30 / 80] | → [도착 : 24.15] (9 : 라스베이거스) [하역 : 30 / 80] | | |
| | 차종 2 (2) | (3 : 롱비치) [적재 : 70 / 100] | → [도착 : 27.90] (7 : 로스엔젤레스) [하역 : 70 / 90] | → [도착 : 30.00] (8 : 샌디에고) [하역 : 0 / 10] | |

수 치 실 험 (1/6)

□ 수치실험 2 : “다수 국가, 다수 수요지에 대한 운송계획”

생 산 지 / 수 요 지 관 련 정 보

| Node | 구분 | 지 역 명 | 위 도 | 경 도 | 생산/수요량 | | 배송시간 |
|------|-------|-----------|-----------|------------|--------|------|----------|
| | | | | | 물품 1 | 물품 2 | |
| (1) | 생산지 | [韓]구 미 | 36.0923°N | 128.4057°E | 250 | 300 | - |
| (2) | 항만/공항 | [韓]인 천 | 37.4651°N | 126.4472°E | - | - | - |
| (3) | 항만/공항 | [韓]부 산 | 35.4652°N | 129.0971°E | - | - | - |
| (4) | 항만/공항 | [濠]시드니 | 33.9402°S | 151.1773°W | - | - | - |
| (5) | 항만/공항 | [美]롱비치 | 33.7545°N | 118.2215°E | - | - | - |
| (6) | 수요지 | [濠]뉴캐슬 | 32.9435°S | 151.7027°E | 50 | 70 | [0, 17] |
| (7) | 수요지 | [濠]센트럴코스트 | 33.3515°S | 151.4420°E | 40 | 30 | [0, 20] |
| (8) | 수요지 | [濠]캔버라 | 35.3009°S | 149.1245°E | 60 | 20 | [0, 24] |
| (9) | 수요지 | [美]로스엔젤레스 | 34.0445°N | 118.2547°W | 50 | 60 | [0, 230] |
| (10) | 수요지 | [美]피닉스 | 33.4261°N | 112.1519°W | 20 | 40 | [0,250] |
| (11) | 수요지 | [美]라스베거스 | 36.1173°N | 115.0865°W | 30 | 80 | [0,250] |

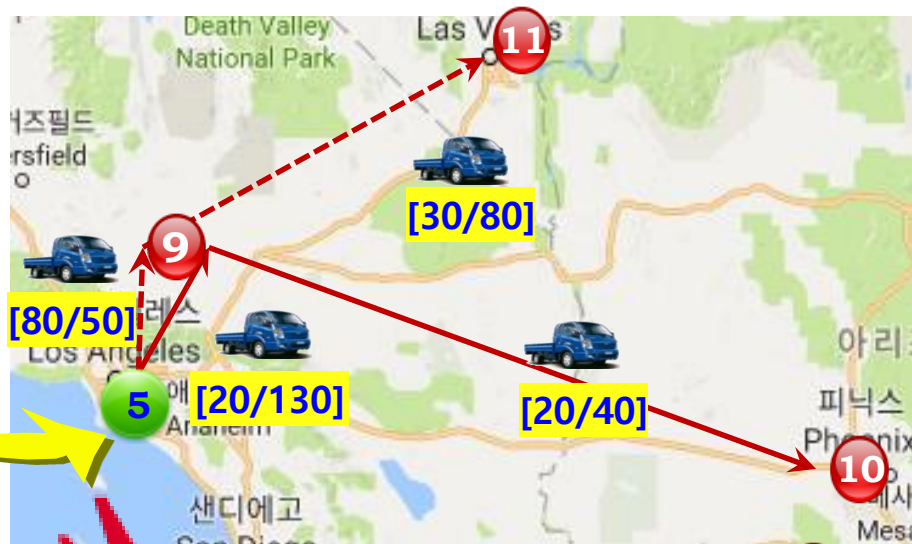
운 송 수 단 관 련 정 보

| 구 분 | 적재용량 | 평균 속도 | 운 임 | | 구 분 | 적재용량 | 평균 속도 | 운 임 | |
|------|------|-------|-----|-------|-----|--------|-------|-----|-------|
| | | | 고정비 | 변동비 | | | | 고정비 | 변동비 |
| 차량 1 | 150 | 100 | 10 | 0.025 | 항공기 | 600 | 916 | 300 | 0.01 |
| 차량 2 | 300 | 90 | 15 | 0.027 | 선 박 | 48,000 | 46 | 400 | 0.001 |

수 치 실 험 (5/6)

수치실험 2 결과

 : 차종 1
  : 차종 2
  : 항공기
  : 화물선
 적재량 [물품1 / 물품2]



주요내용

- [미국 운송] “롱비치-LA-라스베가스”를 경유 하는 차종1은 LA에서 다른 차종1이 하역해 놓은 물품2[30]를 재적재하여 라스베가스로 이동 : 현실적이고 경제적인 운송
- [복합일관운송] 각 차량이 인천공항, 부산항 까지 물품을 운송한 후 각각 [濠]시드니, [美] 롱비치까지 항공운송 후, 호주와 미국 내에서 차량으로 각 수요지에 배송 : 다수 국가, 국가별 다수 수요지 운송계획



수 치 실 험 [6/6]

□ 수치실험 2의 세부결과

| 운송지역 | 구분 | 운송경로 계획에 대한 세부 정보 | | | |
|-----------------|----------|---|---------------|---------------|--|
| 대한민국 | 차종 2 (1) | (1 : 구미) → (2 : 인천) [적재 : 150 / 120] [하역 : 150 / 120] | [도착 : 3.28] | | |
| | 차종 2 (2) | (1 : 구미) → (3 : 부산) [적재 : 100 / 180] [하역 : 100 / 180] | [도착 : 3.303] | | |
| 대한민국 → 호주 (항공기) | | [출발 : 5.53] (2 : 인천) → (4 : 시드니) [적재 : 150 / 120] [하역 : 150 / 120] | [도착 : 13.47] | | <div>[도착시간] (노드 : 지역명) [적재.하역 : 물품 1 / 물품 2]</div> |
| 대한민국 → 미국 (화물선) | | [출발 : 5.63] (3 : 부산) → (5 : 롱비치) [적재 : 100 / 180] [하역 : 100 / 180] | [도착 : 211.22] | | |
| 호 주 | 차종 1 (1) | (4 : 시드니) → (7 : 센트럴코스트) → (8 : 캔버라) [적재 : 100 / 50] [하역 : 40 / 30] [하역 : 60 / 20] | [도착 : 16.66] | [도착 : 20.84] | |
| | 차종 2 (3) | (4 : 시드니) → (6 : 뉴캐슬) [적재 : 50 / 70] [하역 : 40 / 30] | [도착 : 16.67] | | |
| 미 국 | 차종 1 (2) | (5 : 롱비치) → (9 : 로스엔젤레스) → (11 : 라스베거스) [적재 : 80 / 50] [하역 : 50 / 0] [하역 : 30 / 80] [적재 : 0 / 30] | [도착 : 213.84] | [도착 : 219.17] | |
| | 차종 1 (3) | (5 : 롱비치) → (9 : 로스엔젤레스) → (10 : 피닉스) [적재 : 20 / 130] [하역 : 0 / 90] [하역 : 20 / 40] | [도착 : 213.51] | [도착 : 219.17] | |



결론 및 향후 연구방향

□ 연구성과

● 국제물류 “복합일관운송시스템” 최적화 수리모형 제안

- 목적함수 : 전체 운송비용 최소화

- VRPSDP-TW의 개념적 확장/변경

- ① 물품중심경로 산정을 통해 2개 이상 운송수단을 이용하는 “복합일관운송시스템” 달성
- ② 각 Node에 운송해야 할 대량의 물품을 여러 운송수단 및 차량으로 분할 수송 가능
- ③ 공항/항만 및 운송물품을 교환하는 Node활용 가능

➡ 랜드브릿지(Land bridge), 내륙컨테이너 기지를 포함한 국제운송 환경 모델링

● 수치실험을 통해 국내, 국제 운송 동시 고려한 최소비용경로 산정가능 확인

- “Door to Door”의 복합일관운송시스템 가능 다품종 소량 생산 체제에 맞는 운송시스템 구축

● 다양한 수단을 활용한 최소비용경로 산정가능 확인

- 공항/항만 및 운송물품을 교환하는 Node를 이용 “복합일관운송시스템”달성

□ 향후 연구방향 : 합리적이고 신뢰할 수 있는 수준의 해(Solution)를 신속하게 탐색하기 위한 해법(휴리스틱 등) 연구 필요