

하이브리드 다중 Hub-and-Spoke 차량 경로 계획 모형 : 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 계획 최적화를 중심으로

†이용대* · 정현종* · 손영수** · 윤치환*

Hybrid Multiple Hub-and-Spoke Vehicle Routing Model for
Hyundai Mobis Automotive Service Parts Transportation Planning

†Yongdae Lee* · Hyunjong Jeong* · Young Soo Son** · Chiwhan Yoon*

■ Abstract ■

Hub-and-spoke transportation network is a powerful and useful network structure that takes full advantage of economies of scale on routes between hubs. In recent studies, the network structure is extended to hybrid hub-and-spoke that allows direct transportation between spokes. In this study, we considered more extended network structure which is called hybrid multiple hub-and-spoke that has multiple hubs and allows direct transportation between spokes. We developed a mathematical optimization model for automotive service parts transportation planning under hybrid multiple hub-and-spoke network structure. The model suggests a long-term transportation route planning and a short-term vehicle assignment planning.

The model is verified by simulation and validated in real world application to Hyundai Mobis automotive service parts transportation planning. From the simulation result, the model reduced the transportation cost about 24.7%, the total distance about 6.8% and the CO2 emissions about 8.8%. In real world application for 6 months from July to December 2010, the model reduced the transportation cost about 9.1% by changing the long-term transportation route without daily vehicle assignment planning.

Keywords : Hub-and-Spoke, Transportation Management, Supply Chain Management

논문접수일 : 2011년 02월 01일 논문수정일(1차 : 2011년 06월 29일, 2차 : 08월 04일)

논문게재확정일 : 2011년 08월 20일

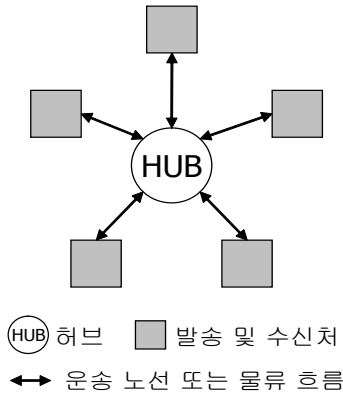
* 현대모비스 경영혁신실

** 현대모비스 부품물류지원팀

† 교신저자

1. 서론

운송 경로 문제는 단일 혹은 다수의 공급지에 모인 다양한 종류의 화물을 수요지까지 운송하기 위한 효율적인 경로와 차량의 유형을 결정하는 문제로써, 비용을 최소화하고 서비스 수준을 최대화하는 방향으로 결정하게 된다. 운송 비용을 최소화하기 위한 방향성은 운송 물량의 통합/대형화를 통해 규모의 경제를 실현하는 것이고, 왕복 운송 물량을 확보하여 차량의 활용률을 높이는 것이다. 이를 실현하기 위한 운송 경로 모형으로 <그림 1>과 같은 전통적인 hub-and-spoke 운송망이 있다.



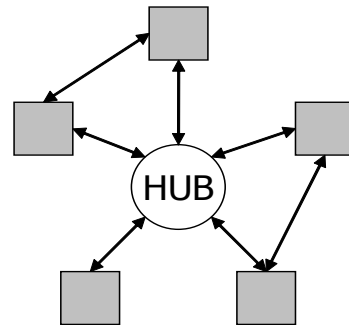
<그림 1> 전통적인 hub-and-spoke 시스템의 구조[6]

전통적인 hub-and-spoke 운송망은 특정 지역을 담당하는 각 발송 및 수신처(물류센터 또는 배송센터)들 사이의 운송을 허브(Hub)에서 서로 교환하는 운송 네트워크이다. 이 구조는 다수의 발송 및 수신처 사이의 운송 물량을 허브로 통합/집중화 함으로써, 통합/대형화를 통한 규모의 경제를 달성하고, 발송처와 수신처 사이의 불균형을 해소하여 왕복 운송 물량을 확보함으로써 차량 활용률을 높일 수 있는 장점이 있다[1].

한편 전통적인 hub-and-spoke 모형은 규모의 경제의 실현을 통하여 운송 비용을 절감할 수 있지만, 실제 운영에 있어 비효율적인 면도 존재한다. 먼저 비용의 측면에서, 발송 및 수신처 간 물량이 많은

경우 허브를 통하지 않고 직접 운송하는 것이 더 저렴한 경우가 발생할 수 있다. 또한, 발송 및 수신처 간 직송보다 운송 시간이 오래 걸리는 비효율이 발생할 수도 있는데, 발송 및 수신처 사이의 거리가 상대적으로 가까운 경우 운송 시간의 차이는 더욱더 커지게 된다. 특히 cross docking 형태의 운송의 경우 특정 시간대를 두고 화물을 교환하게 되는데 교환 시간을 놓칠 경우 운송시간은 다음 차편까지 늘어나게 된다. 이와 같은 운송 시간 및 유연성의 비효율적인 면은 고객 서비스 측면에서 경쟁력을 떨어지게 하는 원인이 될 수 있다[3, 6, 7].

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 <그림 2>와 같은 하이브리드 hub-and-spoke 시스템이 제시되었다. 하이브리드 hub-and-spoke 시스템은 순수 hub-and-spoke 형태의 운송망에 발송 및 수신처 사이의 직송노선을 포함하는 형태의 운송망을 갖는 모형이다[6].

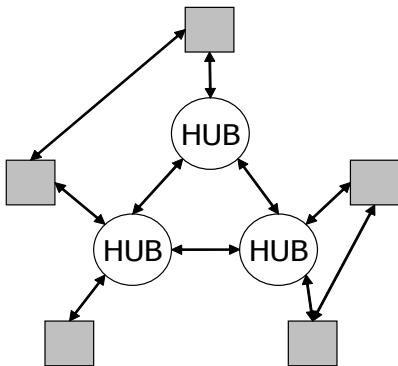


<그림 2> 하이브리드 Hub-and-Spoke 시스템의 구조[6]

순수 hub-and-spoke 망의 경우 모든 운송이 허브를 이용하게 되므로 운송 요구량이 주어지게 되면 운송 방법 및 노선들을 허브와 발송 및 수신처 사이의 왕복 및 편도 노선만을 고려하여 비교적 쉽게 결정할 수 있다. 그러나 하이브리드 hub-and-spoke의 경우 서로 다른 발송처와 수신처 사이의 직송노선을 운영할 수 있으므로 각 발송처 및 수신처 사이의 직송 노선을 운영할 것인가? 운영한다면 어떤 종류의 차량을 얼마나 운영해야 하는가를

함께 고려하는 경로 계획 문제가 된다. 즉, 허브를 통과하는 노선과 두 개 이상의 발송처 및 수신처 사이의 직송 노선들을 어떻게 운영하는 것이 가장 효과적인가를 결정하여야 하는데, 이 문제를 하재원, 이태원[3]은 하이브리드 hub-and-spoke 망의 차량 경로계획 문제(HHSVRP, Hybrid Hub-and-Spoke Vehicle Routing Problem)라 정의하였다.

한편 하이브리드 hub-and-spoke 망의 경우 발송 및 수신처 사이의 직송 노선의 물량이 부족할 경우 소형 차량을 이용하여 직송을 하거나 허브를 이용하여 물량을 통합 운송 하여야 하는데, 이 경우 순수 hub-and-spoke의 문제점처럼 운송거리와 시간이 증가하는 불가피한 비효율이 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 다수 허브를 이용하여 인근 지역간 운송 물량의 통합 중계 역할과 장거리 운송 물량의 중계지 역할을 갖도록 할 수 있다. 이와 같이 다중 허브를 활용한 hub-and-spoke 시스템은 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 구조

하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템은 다수의 허브를 운영하는 방안과 중앙에 주 허브(Main Hub)를 두고, 각 지역에 보조 허브(Sub Hub)를 두어 하이브리드 hub-and-spoke 망의 효율을 극대화하는 방안이 활용되고 있다. 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 운송 경로를 결정하는 문제는 각 허브와 허브 사이의 중계 운송을 담당하는 간선

노선과 허브와 발송처 및 수신처 사이의 운송을 담당하는 지선 노선, 그리고 각 발송처와 수신처 사이를 직접 운송하는 직송 노선의 차량 크기, 수, 계약 및 운영 형태(왕복 또는 편도, 장기 계약 또는 일별 용차 등)를 결정하게 된다. 이때 허브의 수가 증가하게 되면, 운송 비용과 운송 시간을 절감 할 수 있는 장점이 있지만, 추가적인 거점 운영에 따른 비용 증가 요인이 발생할 수도 있다. 허브의 수와 위치에 대한 대안이 다수 존재할 때는 입지 경로 문제가 되며, 대안이 소수 일 때는 대안 별 순수 경로 문제를 최적화 하여 해결할 수 있다. 본 연구에서는 허브의 수와 위치에 대한 대안이 소수일 때 순수 경로 문제를 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 차량 경로 계획 문제(HMHSVRP, Hybrid Multiple Hub-and-Spoke Vehicle Routing Problem)라 부르기로 한다.

HMHSVRP는 왕복 노선을 운행하는 장기 고정 계약 차량의 노선을 결정하는 장기 계획 문제와 편도 노선을 운행하는 일별 용차의 할당 계획을 수립하는 단기 계획 문제로 나눌 수 있다. 차량을 장기 계약하여 고정 노선에 투입할 경우 단위 운송 비용을 절감 할 수 있지만 운송 물량 변동에 따른 유연성은 떨어진다. 그러므로 안정적인 물량이 확보된 노선을 중심으로 장기 계약차(향후 계약차로 표시) 노선을 구성하고, 일별 물동량 변동은 단기 계획 모형에서 일별 편도 용차(향후 용차로 표시) 차량 할당을 통해 해결하여야 한다.

본 연구에서는 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 차량 경로 계획 문제(HMHSVRP)의 장, 단기 최적화 모형을 수립하고, 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내운송 최적화 문제에 적용한 현실 사례를 소개하고자 한다. 제 2장에서는 HMHSVRP 문제와 제약 및 가정사항을 정의하고, 제 3장에서는 혼합 정수계획법으로 수립한 HMHSVRP 최적화 모형을 제시한다. 제 4장에서는 수립된 최적화 모형을 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 최적화에 적용한 사례를 소개하고, 제 5장에서 결론 및 향후 연구과제를 제시한다.

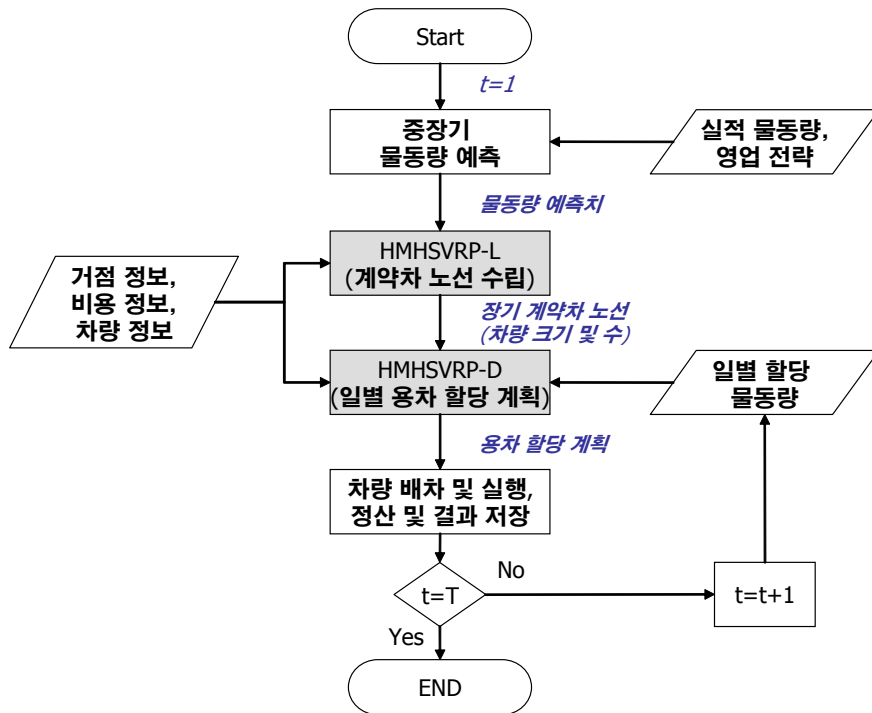
2. 문제의 정의

본 연구에서 다루는 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 차량 경로 계획 문제(HMHSVRP)는 허브의 수와 위치를 사전에 결정한 상태에서, 각 허브와 허브 사이의 중계 운송을 담당하는 간선 노선과 허브와 발송처 및 수신처 사이의 운송을 담당하는 지선 노선, 그리고 각 발송처와 수신처 사이를 직접 운송하는 직송 노선의 차량 크기, 수, 계약 및 운영 형태(계약차 또는 용차 등)를 결정하는 문제이다.

HMHSVRP는 장기 계약 차량의 크기 및 수를 결정하는 장기 계획 모형과 계약 차량 노선을 고정하고 용차를 할당하는 일별 계획 모형으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 장기 계획 모형을 HMHSVRP-L(HMHSVRP Long-term), 단기(일별 계획) 모형을 HMHSVRP-D(HMHSVRP Daily)라 부르기로 한다.

본 연구에서 다루는 제약 및 가정 사항은 다음과 같다.

- 1) 전체 운송망의 거점(Node)은 발송처, 허브, 수신처로 구성된다.
- 2) 같은 거점이 발송처, 허브, 수신처의 역할을 모두 수행할 수 있다.
- 3) 중계 허브 가능 거점은 사전에 정의된다.
- 4) 장기 계약 차량은 왕복 노선만 운영한다.
- 5) 장기 계약 차량은 매일(근무일) 정해진 노선을 운행한다.
- 6) 용차는 편도로 운행한다(왕복으로 할당할 경우 편도를 2회 할당하는 것과 같다).
- 7) 용차는 매일 필요한 크기의 차량을 필요한 수만큼 할당할 수 있다.
- 8) 발송처에서 최종 수신처까지 이동하는 각 화물은 최대 2개 이하의 허브만을 경유할 수 있다(허브를 경유하지 않고 직송도 가능하고, 1개의 허브를 경유할 수도 있다).



〈그림 4〉 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 차량 경로 계획 수립 의사결정 프로세스

9) 당일 할당된 물동량은 당일 차량 노선에 할당하는 것을 원칙으로 한다(지연 상차 등을 통한 물량 통합을 고려하지 않는다).

위와 같은 제약 및 가정 사항에서 차량 경로 최적화 계획 및 운영 절차는 <그림 4>와 같다.

<그림 4>와 같이 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 차량 경로 계획은 우선 과거 실적 물동량 및 영업 전략 등을 고려하여 중장기 물동량을 예측한다. 이 예측 물동량과 각 발송처 및 수신처, 허브 등의 거점 정보, 각 거점 사이의 차량 크기 별 비용 정보, 차량 크기 별 최대 적재 가능 화물의 양 등의 차량 정보를 기초로 HMHSVRP-L 최적화 모형을 수행하여 계약차 노선을 결정하게 된다. 즉 장기 계약을 통해 매일 특정 구간을 왕복 운영하는 차량의 크기 별 수를 결정한다.

실제 일별 물동량의 운송 경로를 최적화는 문제는 HMHSVRP-D 최적화 모형을 통해 해결하는데, HMHSVRP-L 최적화 모형 모형을 통해 도출된 계약차 노선의 차량 크기와 수를 고정시키고, 추가적인 용차의 투입 노선과 크기 및 수를 결정한다. 즉 각각 발송처와 수신처가 있는 물동량을 계약차와 용차 노선에 할당하는 역할을 담당한다. 이렇게 수립된 용차 할당 계획을 기초로 실제 차량 배차와 실행이 이루어지고 비용이 정산되어 집계된다. 일별 용차 할당 계획은 매일 매일 반복 수행된다.

HMHSVRP-L 및 HMHSVRP-D 최적화 모형은 비용 최소화 목적을 갖게 되며 비용은 고정비와 변동비로 나뉘며 차량의 크기에 따라 운행 거리별로 책정된다. 그리고 서비스 수준은 당일 할당된 물동량은 당일 차량 노선에 할당하는 것을 원칙으로 함으로써 운송 지연이 크게 발생 하지 않도록 제약 한다.

구체적인 HMHSVRP 최적화를 위한 수학 모형은 제 3장에 기술하였다.

3. 수학적 모형의 수립

HMHSVRP 최적화를 위한 수학 모형은 장기 모

형과 단기 모형으로 나뉘며, 혼합 정수 계획 모형(Mixed Integer Linear Programming Model)으로 수립되었다.

수학 모형의 집합과 결정변수는 대문자, 상수는 소문자로 표현하였고, 집합 내의 원소는 소문자 형태의 위, 아래 첨자로 표현하였다.

3.1 집합의 정의

N : 전체 거점의 집합, 중계 허브 포함

H : 중계 허브의 집합

M : 차량 크기의 집합(0:5톤, 1:8톤, 2:9.5톤, 3:11톤)

R : 계약차, 용차 구분 집합(0: 계약차, 1: 용차)

3.2 인덱스의 정의

$m \in M$: 차량 크기 구분 인덱스(0:5톤, 1:8톤, 2:9.5톤, 3:11톤)

$r \in R$: 계약차, 용차 구분 인덱스(0: 계약차, 1: 용차)

$s \in N$: 발송처 인덱스

$d \in N$: 도착처 인덱스

$i, j \in H$: 중계 허브 인덱스

$a, b \in N$: 거점 인덱스(발송처, 수신처, 중계 허브 모두에 사용 함)

3.3 상수의 정의

$cost_{sd}^{mr}$: 발송처 s 에서 수신처 d 구간을 운행하는 m 차량 크기(차량 톤수) 계약차($r = 0$) 또는 용차($r = 1$)의 운송비(고정비+변동비)

q_{sd} : 발송처 s 에서 수신처 d 구간으로 운송되어야 하는 물량

$capa^{mr}$: 차량 크기 m (0:5톤, 1:8톤, 2:9.5톤, 3:11톤) 차량의 계약차($r = 0$) 또는 용차($r = 1$)별 적재 가능 팔레트 수

r_{sd}^m : 발송처 s 에서 수신처 d 구간을 운행하는 m 차량 크기(차량 톤수) 장기 계약 차량수

(장기 계획 모형에서 차량 수를 결정된 노선을 일별 운영 모형에 입력할 때 적용됨)

3.4 결정 변수의 정의

X_{ds}^{mr} : 발송처 s에서 수신처 d 구간을 운행하는 m 차량 크기(차량 톤수) 계약차($r = 0$) 또는 용차($r = 1$)의 수

$R2_{sd}^{ij}$: 발송처 s에서 발송하여 수신처 d로 수신되는 물량 가운데, 중계 허브 i와 j를 경유하는 물량

$R1_{sd}^i$: 발송처 s에 발송하여 수신처 d로 수신되는 물량 가운데, 중계 허브 i를 경유하는 물량

$R0_{sd}$: 발송처 s에 발송하여 수신처 d로 수신되는 물량 가운데, 중계 허브를 경유하지 않고 직접 운송되는 물량

Q_{sd} : 발송처 s에서 수신처 d 구간으로 운송되는 총 물량(중계 운송 물량 포함)

3.5 수학적 모형

3.5.1 HMHSVRP-L

$$\text{Minimize } \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} \sum_{s \in N} \sum_{d \in N - \{s\}} \text{cost}_{sd}^{mr} X_{sd}^{mr} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i \in H - \{s, d\}} \sum_{j \in H - \{s, d, i\}} R2_{sd}^{ij} + \sum_{i \in H - \{s, d\}} R1_{sd}^i + R0_{sd} = q_{sd} \quad \text{for } s \in N, d \in N - \{s\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in H - \{a, b\}} \sum_{d \in N - \{a, b, j\}} R2_{ad}^{bj} + \sum_{s \in N - \{a, b\}} \sum_{d \in N - \{a, b, s\}} R2_{sd}^{ad} + \sum_{s \in N - \{a, b\}} \sum_{i \in H - \{a, b, s\}} R2_{sd}^{ia} + \sum_{d \in N - \{a, b\}} R1_{sd}^b \quad (3)$$

$$+ \sum_{s \in N - \{a, b\}} R1_{sd}^a + R0_{ab} = Q_{ab}$$

$$\text{for } a \in N, b \in N - \{a\}$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \text{capa}_{sd}^{mr} X_{sd}^{mr} \geq Q_{sd} \quad (4)$$

$$\text{for } s \in N, d \in N - \{s\}$$

$$X_{sd}^{m0} = X_{ds}^{m0} \quad \text{for } s \in N, d \in N - \{s\}, m \in M \quad (5)$$

$$\text{All } X_{sd}^{mr}, R2_{sd}^{ij}, R1_{sd}^i, R0_{sd}, Q_{sd} \text{ are integer} \quad (6)$$

식 (1)은 목적함수로서 총 운송비를 최소화하는 목적함수이다. 식 (2)는 발송처 s에서 수신처 d 구간으로 운송되어야 하는 물량(q_{sd})을 직접 운송되거나 중계 허브를 거쳐 운송될 수 있도록 정의하는 식이다. 이때, 계약차 노선을 결정하기 위한 장기 계획 모형(HMHSVRP-L)의 운송 물량(q_{sd})은 향후 운송 물량의 대표 값으로써 과거 1년간의 일별 운송 물량 평균 또는 예측치를 활용할 있다. 식 (3)은 발송처 a와 수신처 b 사이의 물동량(중계 운송 물량 포함)을 a, b거점 사이의 물동량 Q_{ab} 로 정의하는 식이다. 이 물동량은 중계 허브를 2번 거쳐 운송되는 물동량의 발송처와 중계 허브, 중계 허브와 중계 허브, 중계 허브와 수신처가 a, b거점으로 구성된 경우, 중계 허브를 1번 거쳐 운송되는 물동량의 발송처와 중계 허브, 중계 허브와 수신처가 a, b거점으로 구성된 경우, 그리고 중계 허브를 거치지 않고 직송되는 물량의 발송처와 수신처가 a, b거점인 경우의 물동량을 모두 합한 값이다. 식 (4)는 발송처 s와 수신처 d 사이의 물동량(Q_{sd})을 차량 크기별 적재 가능 용량을 고려하여 차량에 할당하는 제약식이다. 식 (5)는 계약차량은 왕복으로 운행해야 함을 정의하는 제약식이다. 식 (6)은 모든 결정 변수는 정수임을 정의하는 제약식이다.

3.5.2 HMHSVRP-D

일별 운영 계획 모형(HMHSVRP-D)은 장기 운영 계획에서 설정된 계약차 노선을 고정시킨 후 일별 물동량을 계약차 노선과 용차 노선에 할당하는 모형이다. 이 모형은 장기 계획 모형(HMHSVRP-L)의 목적식 및 제약식(식 (1)~식(6))에 다음 식 (7)을 추가하여 구성된다.

$$X_{sd}^{m0} = r_{sd}^m \quad \text{for } s \in N, d \in N - \{s\}, m \in M \quad (7)$$

식 (7)은 일별 운영 계획 모형(HMHSVRP-D)의 계약차 노선을 장기 운영 계획에서 설정된 계약차 노선(r_{sd}^m)으로 고정시키는 제약식이다. 즉 (HMHSVRP-L)에서 제시된 장기 운영 계획의 계약차 노선

을 유지하는 의미를 갖게 된다.

한편, 식 (2)에 적용되는 운송 물량(q_{sd})은 일별 물동량의 예측치를 적용한다. 일별 물동량의 예측치는 도착지에서 출발지로 청구한 주문 자료를 기초로 각 출발지에서 불출/분류 작업 계획을 바탕으로 추정된 물동량으로써 비교적 불확실성이 적은 특성을 갖고 있다.

4. 모형 적용 및 효과 분석

제 3장에서 제시한 HMHSVRP 최적화 모형을 검증하고, 현실성을 검증하기 위하여 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 최적화에 적용하고, 그 결과를 분석하였다.

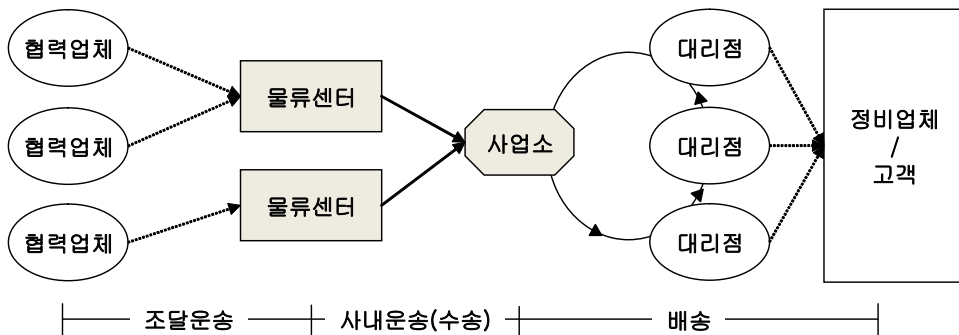
4.1 자동차 보수용 부품 사내 운송 현황

현대모비스는 국내 최대 자동차 부품기업으로써 자동차 보수용 부품 판매, 모듈부품 및 핵심 부품 제조, 부품 수출을 담당하는 기업이다. 현대모비스 자동차 보수용 부품의 유통 단계는 <그림 5>와 같다.

<그림 5>에서 물류센터는 협력업체에서 생산된 제품을 납품 받아 저장하고, 전국 각 사업소에 보충하는 역할을 담당한다. 사업소는 물류센터에서 공급받은 순정부품을 보관하고, 대리점의 청구가 발생할 때 배송하는 역할을 담당한다. 대리점은 최종 고객인 정비업체와 고객의 접점으로써, 고객의

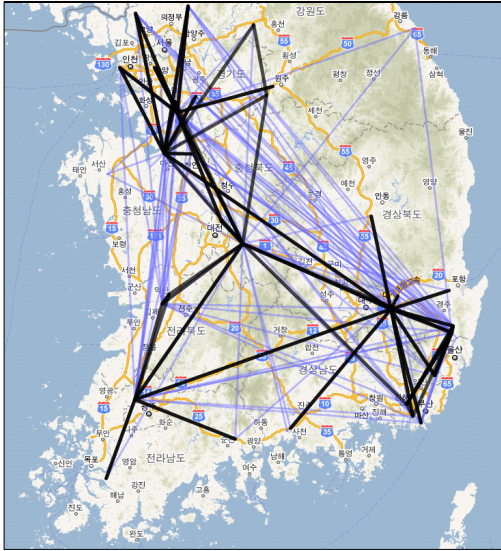
소요가 발생할 때 판매하는 역할을 담당한다. 협력업체에서 물류센터에 납품하는 운송을 조달운송이라 하며, 물류센터에서 사업소에 부품을 보충하는 운송을 사내운송(수송)이라 한다. 사내 운송은 전용 용기(Pallet)를 이용하며, 전용 용기는 1/4 크기로 접어서 통합하여 회송된다. 사업소에서 대리점 또는 정비공장에 부품을 공급하는 운송을 배송이라 하며, 1회 운송시 다수의 대리점을 방문한다. 한편 정비업체는 일반적으로 재고를 보유하지 않고 있으며, 정비 차량의 입고 후 진단을 통해 대리점에 소요 부품을 주문을 하게 된다. 주문된 부품은 통상 30분 이내에 배달되어 신속한 정비를 지원하며, 수요가 자주 발생하지 않는 노후 차량의 특수 부품은 사업소 및 물류센터의 재고를 불출하여 1일 이내에 배송 된다. 현대모비스는 2010년 말 현재 8개 물류센터, 28개 부품사업소, 1429개 대리점이 있으며 각 거점의 위치는 현대모비스 홈페이지 ([Http://www.mobis.co.kr](http://www.mobis.co.kr))를 통해 확인 할 수 있다. 물류센터와 사업소는 수십 종의 차종과 연식별 다른 부품을 관리 보관하고 있으며, 관리 품목은 약 100만 품목이상이 존재한다. 이를 효과적으로 관리하기 위해서는 거점 별 적정 재고 수준 결정과 최적의 수배송 전략이 요구된다. 본 연구에서는 HMHSVRP 최적화 모형을 적용하여 8개 물류센터와 28개 부품사업소 사이의 사내운송(수송) 최적화를 진행하였다.

HMHSVRP 최적화 모형 적용 전 운송 네트워크



<그림 5> 현대모비스 자동차 보수용 부품 유통 단계

현황은 <그림 6>과 같다.



— 계약차 운행 노선 — 용차 운행 노선
 <그림 6> HMHSVRP 최적화 모형 적용 전 사내 운송 노선

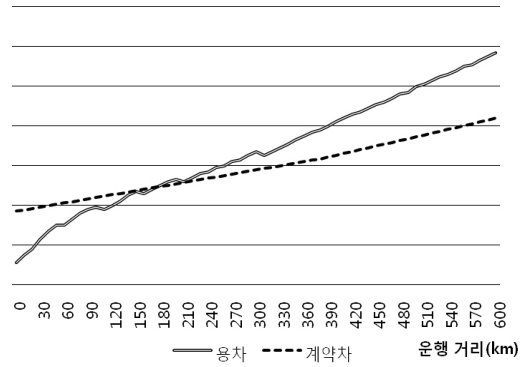
<그림 6>을 보면 HMHSVRP 최적화 모형 적용 전 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 노선은 대전 인근에 허브를 갖고 출발지와 도착지 사이의 직송 노선이 존재하는 하이브리드 hub-and-spoke 형태이다. 이 운송 노선은 계약차 노선과 용차 노선으로 구성되며 계약차 노선은 동일한 구간을 매일 왕복 운송하며, 용차 노선은 편도 노선으로써 물동량의 변화에 따라 매일 노선이 결정된다. 운송비 비중은 계약차가 약 18.3%를 차지하고 있었으며, 용차 노선은 81.7%를 차지하고 있었다. 이는 물류센터에서 사업소로 부품이 공급되는 일 방향 유통 및 소규모 운송 용기 회송을 고려한 결과이다.

이와 같은 운송 네트워크를 운송비용, 물동량 등의 요소를 고려하여 HMHSVRP 최적화 모형을 통해 개선하고, 실제 운송 노선의 변경을 진행하였다.

4.2 운송 비용 구조 및 물동량

계약차와 용차의 운송 거리에 따른 비용 구조는

<그림 7>과 같다. <그림 7>은 비용 구조의 추세를 보여주며, 구체적인 비용은 기업의 영업 비밀을 보호하기 위하여 생략하였다.

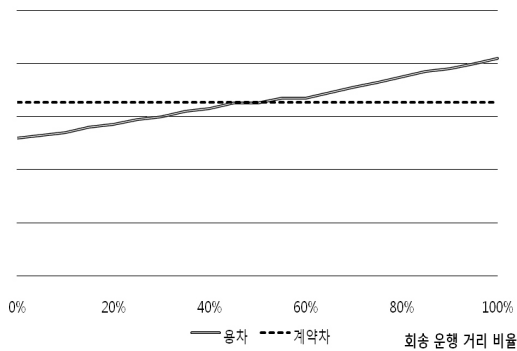


<그림 7> 운송 거리에 따른 운송 비용 구조 (계약차, 용차, 9.5톤 기준)

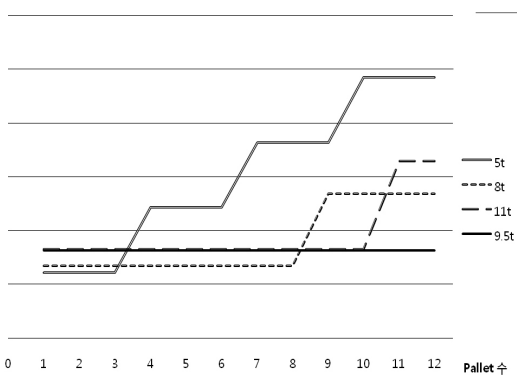
<그림 7>의 운송 비용의 구조는 고정비와 변동비로 구성되며, 시장 원리와 경제 원리에 따라 계약차와 용차의 고정비와 변동비의 구성이 다르게 나타난다. 예를 들면, 계약차의 경우 고정비에 차량 감가 상각비 등이 포함되어 있지만, 용차의 경우 차량 감가상각비는 변동비에 포함되어 있다. 계약차와 용차의 운송 거리에 따른 비용 구조는 단거리 구간에서는 고정비용이 적은 용차의 비용이 저렴하지만, 장거리 구간의 경우 거리에 따른 변동비가 적은 계약차의 비용이 저렴하다. 그러므로 장거리 고정 물량이 있거나, 단거리 구간이 통합 또는 반복되는 구간에서는 계약 차량이 유리하다. 하지만 계약차량은 왕복구간에 대해서 매일 같은 구간을 운송하는 것을 기준으로 계약이 이루어지므로 회송 물량이 일정 비율 확보되거나, 일정 구간 이상의 회송 구간이 존재 하여야 한다. <그림 8>은 회송 운행 거리에 따른 계약차와 용차의 운송 비용의 차이를 나타낸다.

<그림 8>을 보면 회송 운행 거리가 50%가 되지 않는 경우 계약차는 오히려 용차에 비하여 운송비 단가가 높게 나타난다. 그러므로 계약차 및 용차 운행 구간을 효과적으로 설정하기 위해서는 운송

거리, 운송 물량, 회송 물량 확보 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 한편 차량 크기에 따라 운송비용은 다르게 나타나는데, 일반적으로 적재 허용 중량이 적은 차일수록 운송비용은 비싸지만, 많은 화물을 운송할 수 있으므로 단위 운송비는 저렴하게 나타난다. 차량 적재 허용 중량 별 단위 운송비는 <그림 9>와 같다.



<그림 8> 회송 운행 거리 비율에 따른 운송비 비교 (왕복 400km 기준)



<그림 9> 차량 크기에 따른 단위 운송 비용의 변화

<그림 9>를 보면 3개의 Pallet까지는 5톤 차량이, 8개까지는 8톤 차량이, 그 이상에서는 9.5톤의 단위 운송비가 가장 저렴함을 확인 할 수 있다. 11톤 차량의 경우 9.5톤 보다 적재 허용 중량은 크지만, 적재 가능 부피가 저장 초장축 9.5톤에 차량에 비하여 적은 단점이 있다. 그러므로 일반적으로 사내 운송에서는 구간별 물동량을 고려하여 9.5톤, 8

톤, 5톤 차량을 운영하고 있다.

물류센터와 사업소간 운송 물동량 및 회송 물동량의 분포는 <표 1>과 같다.

<표 1>은 각 거점간 운송 및 회송 물동량의 분포로써, 기업의 영업 비밀을 보호하기 위하여 전체 운송 구간의 일 평균 운송 및 회송 물동량으로 각 구간간의 일 평균 물동량을 나눈 값을 나타내었다. 하지만 <표 1>을 통해 각 구간별 발송 및 수신 물동량의 분포와 편차를 확인할 수 있다. 한편 회송 물동량의 경우 운송 용기(Pallet)을 1/4로 접어서 운송하는 특성을 고려하여 물동량을 회송 운송 용기의 1/4로 나누어 계산하였다.

<표 1>을 보면 발송 물동량은 E, F, I, V, X, AA, AE 등에 집중되어 있음을 확인할 수 있고, 이 거점들의 발송량 대비 수신 물동량은 상대적으로 적음을 확인할 수 있는데, 이는 물류센터의 주요 특징이다. 한편 사업소에 해당하는 다른 거점의 수신 물동량도 거점간 편차를 보이는데, 가장 많은 수신량을 보이는 P는 127을 수신 받지만, 가장 적은 AB의 경우 7을 수신 받아 18배의 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 또한 각 구간별로 작은 물동량을 보이는 거점의 경우 5톤 차량으로도 매일 운송할 수 있는 운송 단위 물동량이 부족하다. 즉 통합 운송을 통한 운송 간격의 축소가 요구된다.

4.3 문제의 해법

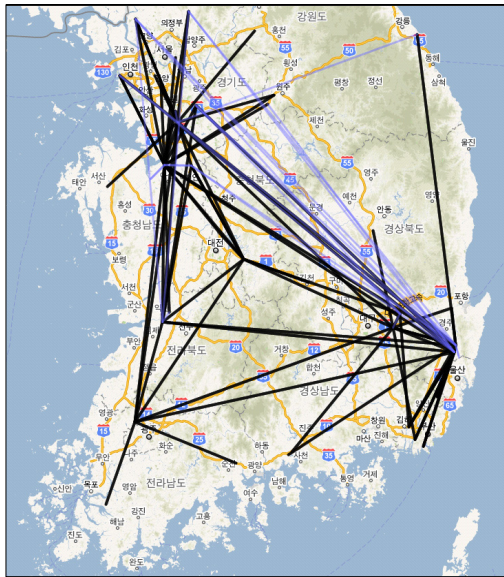
본 연구에서는 ILOG Concert technology library 2.6을 기반으로 Microsoft Visual Studio 8.0 C#으로 모형을 생성하고, ILOG CPLEX 11.1을 이용하여 그 해를 도출 하였다. 자료의 입출력은 Microsoft Access 2003을 이용하여 수행 되었다. 입력 자료는 1) 거점 정보; 2) 차량 정보; 3) 운송비 정보(구간별, 차량 톤수 별, 계약차/용차 별); 4) 구간별 물동량 정보 등이며, 출력자료는 1) 구간별 운송 물동량; 2) 구간별 계약차/용차 수, 운송거리, 비용; 3) 발송처/수신처 별 물동량의 운송 경로(경유 허브 정보) 등이다.

HMHSVRP-L 최적화 모형의 경우 총 36개 거점과 4개 차량 차량 크기(차량 톤수), 계약차/용차 여부, 7개 허브 후보지 등을 고려한 최적화 모형은 214,434개의 정수형 결정 변수와 237,177개의 제약식으로 구성된 방대한 최적화 문제가 된다. 이 문제를 Microsoft Windows XP를 기반으로 Intel Core2 Duo CPU 2.40GHz와 2GB RAM을 장착한 PC에서 최적 허용 오차(Optimality GAP)를 0.05%로 설정하여 수행했을 때, 최적해를 도출하는데 약 15분 24초의 시간이 소요되었다.

한편 HMHSVRP-D 최적화 모형은 2009년 작업 일수(243일) 만큼 수행되었는데, 같은 조건에서 약 2분에서 6분(일별 구간별 물동량 변화에 따라 수행 시간이 다르게 나타남)의 수행 시간이 소요되었다.

4.4 모델 수행 결과

HMHSVRP 최적화 모형을 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 최적화에 적용하여 도출된 차량 운행 노선은 <그림 10>과 같다.



— 계약차 운행 노선 — 용차 운행 노선
 <그림 10> HMHSVRP 최적화 모형 수행 후 사내 운송 노선

<그림 10>을 보면 HMHSVRP 최적화 모형을 적용한 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 노선은 7개 물류센터를 물류 허브로 설정하고, 각 물류센터(허브) 사이의 계약차 운송 노선을 갖고 각 거점 간 직송이 허용되는 하이브리드 다중 hub-and-spoke 운송망이다.

<그림 6>에서 제시된 기존 노선과 <그림 10>에서 제시된 최적화 모형을 적용한 노선의 가장 큰 차이는 각 물류센터가 허브가 되어 인근 사업소로 공급되는 물량을 모아 통합하여 공급하는 체계이다. 즉 기존에는 다른 사업소로 Point-to-Point 방식으로 직송되던 물량을 허브(타 물류센터)로 보내 중계/통합 운송을 진행하는 형태이다. 이때 사용되는 허브는 단일 허브가 아니라 다중 허브를 운영하게 된다. 허브(물류센터)간 운송은 각 물류센터 상호 공급 물량의 균형을 통해 회송 물량이 확보됨으로써 계약차 활용을 극대화 한다. 단, 협력업체의 생산 시설이 집중된 영남권과 수요처가 집중된 수도권 사이의 물량 불균형을 고려하여 불균형 물량은 장거리 용차로 운송하는 결과를 얻었다. 즉 다중 hub-and-spoke 형태의 모델과 point-to-point 방식이 현실에 맞게 정리된 하이브리드 다중 hub-and-spoke 운송망을 갖추게 된 것이다. 한편 인근 사업장의 경우는 운송 용기 회송을 고려하여 계약차를 운영하도록 결과가 도출되었다. 이때 운송 거리가 짧은 단거리 구간을 묶어 한대의 계약 차량이 순차적으로 운행할 수 있도록 하였다.

<그림 4>에서 제시된 하이브리드 다중 hub-and-spoke 시스템의 차량 경로 계획 수립 의사결정 프로세스에 따라 2009년 물동량을 기초로 HMHSVRP 최적화 모형의 적용 효과 및 특징을 분석한 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2>를 보면 계약차 비율이 기존 18.3%에서 58.2%로 증가함으로써, 운송비의 24.7%가 감소함을 확인 할 수 있다. 또한 운송 노선 최적화를 통해 총 운행 거리를 6.8% 감소시키고, 에너지원 별 CO₂ 발생 기준[2]으로 이산화탄소 배출량을 계산한 결과 8.8%의 이산화탄소를 감소시켰으므로 지구 온난화

〈표 2〉 HMHSVRP 최적화 모형의 적용 효과 및 특징

구 분		기존 운송 노선	최적화 노선
특징		대전 인근 중앙 허브와 거점간 직송이 허용된 하이브리드 hub-and-spoke	7개 물류센터를 허브로 활용한 하이브리드 다중 hub-and-spoke
노선	계약차	인근 권역 사업소 중심 운영, 운송 용기 회송 고려, (계약차 비율 : 18.3%)	허브(물류센터) 간 중계운송 노선, 인근 권역 사업소 통합 운송 노선 (계약차 비율 : 58.2%)
	용차	장거리 구간, 회송 물량 부족 구간 (용차 비율 : 81.7%)	권역간 생산/소비 물량의 불균형 구간 (영남 : 생산 > 소비, 수도권 : 생산 < 소비) (용차 비율 : 41.7%)
개선 효과	총 운송비	운송비 24.7% 감소 (계약차 140% 증가, 용차 62% 감소)	
	운행 거리	총 운행 거리 6.8% 감소 (5톤 84.1% 감소, 8톤 31.9% 감소, 23.4% 증가, 11톤 81.1% 감소)	
	CO ₂ 배출량	CO ₂ 배출량 8.8% 감소 (에너지관리공단 에너지원 별 CO ₂ 발생 기준 적용)	
	운송 시간	소규모 사업장 운송 시간 단축 (기존 2~3일 운송 → 매일 운송)	

방지에 기여 할 수 있음을 확인하였다. 한편 운송 서비스에 해당하는 운송시간은 전체적으로 큰 변화는 없었으나, 소규모 사업장의 운송 간격이 기존 2~3일에 한번 운송에서 매일 운송으로 단축되는 개선 효과를 얻을 수 있었다.

한편 HMHSVRP-L 최적화 모형에서 제시된 운송 노선과 운송망 운영 방안을 2010년 7월 실제 현대모비스 보수용 부품 사내 운송에 적용하였다. 2010년 7월~2010년 12월까지 약 6개월 간의 적용 결과를 분석해 보면 운송비는 약 9.1% 절감되고, 소규모 사업장의 운송 서비스가 개선됨을 실제 확인할 수 있었다. 더욱이 이 결과는 HMHSVRP 최적화 모형을 시스템화 하지 않아 HMHSVRP-D에서 매일 제시되는 용차 운송 노선의 최적화 결과가 반영되지 않은 결과로써, HMHSVRP 최적화 모델이 현실에서도 효과적으로 작동하며, HMHSVRP 최적화 모델이 시스템화 되면 시뮬레이션을 통해 제시된 효과를 현실적으로 달성할 수 있음을 기대할 수 있게 한다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 하이브리드 hub-and-spoke 모델

을 확장하여 하이브리드 다중 hub-and-spoke 운송 모델을 설계하고, 최적 계약차/용차 운송 노선, 노선 별 차량의 수 및 중계 운송 경로를 결정하는 HMHSVRP 최적화 모델을 장기 계획과 일별 계획으로 나누어 수립하여 제시하였다. 이 모델을 현대모비스 자동차 보수용 부품 사내 운송 최적화에 적용하였다. 그 결과 운송비를 24.7% 절감하고, 운행 거리를 6.7%, 이산화탄소 발생량을 8.8% 절감할 수 있다는 시뮬레이션 결과를 얻었고, HMHSVRP-L에서 제시된 운송 노선과 운송망 운영 방안을 실제 적용한 결과 약 9.1%의 비용 절감 효과를 달성하였으며, 소규모 사업장의 운송 서비스가 개선됨을 실제 확인할 수 있었다. 또한 매일 용차 노선을 최적화 하는 HMHSVRP-D의 시스템화를 통해 시뮬레이션에서 제시된 효과를 기대할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시된 모델을 더욱 효과적으로 적용하기 위해서는 실제 운영 과정에서 발생할 수 있는 문제에 대하여 현업 실무 담당자와의 지속적인 의사소통이 필요하며, 실무 담당자가 활용하기 편리하도록 시스템을 구축하여 실무자의 큰 어려움 없이 활용 될 수 있도록 하는 것이 필요하겠다. 또한 지속적인 모니터링을 통해 최적화 모델을 보완

발전시킬 필요가 있다고 판단된다.

한편 본 연구에서 제시한 HMHSVRP-L은 예측 물동량을 연간 평균 물동량을 적용한 확정론적 최적화(Deterministic Optimization) 기법을 적용하였으나, 실제 일별 물동량 변동에 따라 최적화 효과가 달라 질 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 문제를 보완하기 위하여 최근에 시나리오 기반의 추계학적 최적화(Stochastic Optimization) 기법이 활발히 연구되고 있다[4, 5]. 시나리오 기반의 추계학적 최적화 모형의 적용을 통해 물동량의 변화에 따른 최적 계약차/용차 운송 노선 수립을 통해 더욱 정교한 최적화 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 비용만을 고려한 단일 목적 최적화 모형을 수립하여 최적화를 진행하고, 운송 서비스는 정책적으로 반영하는 방법을 적용하였다. 하지만 좀더 정교한 의사결정을 지원하기 위해서는 대기시간과 운송시간을 고려한 서비스 시간과 운송비를 고려한 다중목적 최적화 기법의 적용이 요구된다.

참 고 문 헌

[1] 신경석, 김여근, 공생 진화 알고리즘을 이용한 확장된 hub-and-spoke 수송 네트워크 설계, 『경

영과학회지』, 제31권, 제2호(2006), pp.141-155

[2] 에너지관리공단, <http://co2.kemco.or.kr/directory/toe.asp>, 2010.

[3] 하재원, 이태한, Hybrid Hub-and-Spoke 운송망의 차량 경로문제, 『로지스틱스 연구』, 제17권, 제1호(2009), pp.95-111.

[4] Lee, Y., S.-K. Kim, and I.H. Ko, "Multistage stochastic linear programming model for daily coordinated multi-reservoir operation," *Journal of Hydroinformatics*, Vol.10, No.1(2008), pp. 23-41.

[5] Shapiro A., D. Dentcheva, and R.A. Andrzej, *Lectures on Stochastic Programming*, SIAM, Philadelphia, 2009.

[6] Zapfel G. and M. Wasner, "Planning and optimization of hub-and-spoke transportation networks of cooperative third-party logistics provider," *International Journal of Production Economics*, Vol.78(2002), pp.207-220.

[7] Zapfel G. and M. Wasner, "An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning service," *International Journal of Production Economics*, Vol.90(2004), pp.403-419.