

■ 論 文 ■

군 항공화물수요 시계열 추정과 수송기 최적화 노선배정

Forecasting Air Freight Demand in Air forces by Time Series Analysis and Optimizing Air Routing Problem with One Depot

정 병 호
(공군본부)

김 의 기
(한양대학교 건설교통공학부 교수)

목 차

- I. 서론
 - II. 항공수송
 - 1. 운영개념
 - 2. 정기공수 노선결정 시 고려사항
 - III. 이론적 배경
 - IV. 모형의 개발
 - 1. 다회방문 모형
 - 2. 항공수송에서 경유기지의 의미
 - 3. 모형 변수의 정의와 개념
 - 4. 수리계획모형 및 알고리즘
 - V. 예측자료 생성 및 적용
 - 1. 수요물량에 대한 예측
 - 2. 최적 노선배정
 - 3. 분석 결과에 대한 해석
 - VI. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 항공수송, 차량경로모형, 시계열분석, 다회방문, 경유기지

요 약

현재 군 수송기는 매주 일정 대수가 각 기지 간 물자수송, 인원수송 그리고 조종사들의 훈련목적으로 정해진 스케줄에 의해 운항하고 있다. 일일 수송기 운행 경로는 모 기지에서 이륙하여 몇 개의 기지를 경유하여 임무를 수행한 후, 다시 모 기지로 돌아오는 패턴을 취하고 있다. 본 연구는 공군의 중앙물자를 저장하는 창에서 각 기지로 물자를 수송할 때 물량예측 및 적정노선에 대해서 시계열분석과 차량경로모형이라는 두 가지 방법을 통해 접근한다. 먼저 현재 공군에서 사용하고 있는 각종 규정과 교범상의 항공수송에 대한 제약사항 자료를 수집하여, 이를 바탕으로 본 연구에서는 다회방문이 가능하고, 경유회수에 대한 제약을 갖는 모형식과 알고리즘을 제안하였다. 또한 지난 몇 년간의 수송물량을 시계열 분석을 이용하여 예측하고, 예측된 수송소요를 제안된 알고리즘에 적용하여 적정노선을 계획하는 방법을 제안하였다. 제안된 모형과 알고리즘의 적합성과 경제성을 파악하기 위해 본 연구에서는 모형에서 계산된 수송물량과 필요 수송기 대수와 실제 공군에서 수행된 항공화물 수송 물량과 투입 수송기 대수를 비교함으로써 객관적인 모형의 우수성을 입증하고자 하였다.

1. 서론

OR(Operations Research)은 2차 세계대전 당시 군수물자의 수송과 관리를 위한 군사적 목적으로 태어나게 되었다. 특히 적기 적소에 신속한 물자수송은 2차 대전을 연합군이 승리하는 데 크게 기여하였다. 이후 세계 각국의 전사를 살펴보면 신속하고 정확한 물자수송이 전쟁의 승패를 판가름했던 많은 결과를 볼 수 있다. 이 연구는 이런 OR기법 중 차량경로문제를 적용하여 특정 창고(공항에 수송 기반을 둔)에서 국내 각 지역으로 물자를 수송하는 수송기 화물 노선배정에 관한 것이다. 지금까지 일반적인 연구들은 차량에 의한 화물수송에 따른 차량경로와 유통문제에 중점을 두어 왔었다. 그리고 이런 연구들은 실제적으로 많은 실용적인 적용을 거친 외관원문제로 일반화되어 왔고, 비용 및 수송거리 최소화에 중점을 두어 많은 연구와 발전이 있었다.

이러한 이론적 근거와 연구를 수송기에 적용하여 노선 선정의 객관성을 제공하는 것이 본 연구가 추구하는 바이다. 본 연구에서는 우선 시계열 분석을 통해서 수송수요를 예측하고, 수송기 용량, 운행제한 및 일일운행회수 제약 등의 제약을 가지면서 물자를 최대 수송할 수 있는 항공노선을 선정하게 된다. 이는 결국 수송기를 가장 적게 사용해서 정해진 물자를 각 기지에 수송하는 것을 의미하는 것으로 타 수송수단으로 수송될 물량의 전이와 수송기 대수의 절약으로 경제적인 이점을 얻을 수 있다. 또한, 화물 수송수요가 가장 많은 기지를 물자수송을 위한 중요한 기지로 인식하여, 물자수송에 따른 수송기 노선에 대한 우선순위도 제공한다.

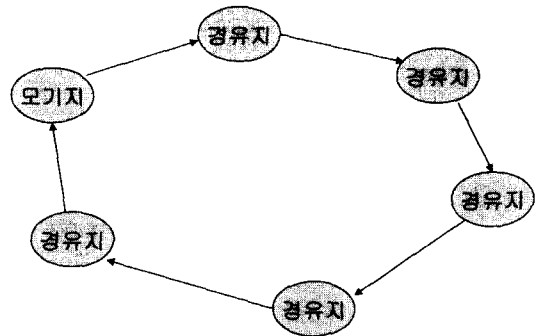
이 연구의 궁극적인 목적은 정기공수 노선배정에 대한 객관적 기준제시, 시계열 분석을 통한 기지별 화물수송 소요예측, 경유지점 최소화를 통한 소요 수송기 대수 절약, 타 수송수단(철도, 육로)으로부터 화물의 전이를 통한 경제성 제고이다.

II. 항공수송

1. 운영개념

1) 정기공수

병참공수는 크게 정기공수(Scheduled Airlift)와 부정기 공수(Non-scheduled Airlift)로 나누어지는

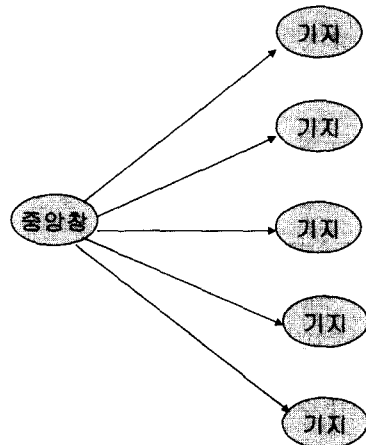


〈그림 1〉 정기공수 운영 개념도

데, 정기공수는 정기적으로 정해진 시각에 지정된 구간을 운항하는 병참공수 임무를 말하며, 부정기 공수는 정기공수 이외에 별도의 계획에 의하여 운항하는 병참공수 임무를 말한다. 그림 1에서 보는 것처럼 정기공수는 하나의 모 기지를 출발하여 하루 동안 여러 경유지를 운항하여 다시 모 기지로 돌아오는 형태이고, 그 시간표(schedule)는 1주일 단위로 정해져서 운영된다. 이 시간표는 전군이 사용할 수 있도록 공·육·해군에 모두 배포되며, 보통 1년 단위로 전면 갱신하고, 6개월 단위로 수정한다.^{2,3,4)}

2) 공군의 물자수송

물자수송은 기지 간 이동물자와 중앙 창에서 각 기지로 수송되는 중앙물자가 있다. 일반적으로 기지 간 이동물자는 중앙물자에 비해 물량이 극히 미미할 뿐 아니라 그 시기도 비정기적이어서 본 연구의 대상에서는 제외한다. 중앙물자는 현재 경험에 의한 적절한 수송수



〈그림 2〉 중앙물자 수송개념도

단의 부담율과 물자수송 시기를 고려하여 항공, 철도, 육로의 모든 수단을 이용한다. 이 중 철도는 소화물과 화차를 이용하는데 철도청과 요금을 정산하고, 육로수송의 경우 일반적으로 군 차량에 의해 수송되지만, 군능력초과 분에 대해서는 민간차량을 수배하여 요금을 지불하고 이용한다.

중앙물자는 <그림 2>에서 보듯이 창에서 각 기지로 수송되고, 이때 사용되는 수송수단은 항공, 철도, 육로가 이용된다. 본 연구는 정기 노선을 운항하는 수송기의 활용성을 높여 더 많은 화물을 수송하면, 철도와 육로를 이용하는 화물량이 줄게 되어 경제적인 효과가 있을 것이라는 데 착안하였다.

2. 정기공수 노선 결정 시 고려사항

정기 공수 노선은 여러 가지 사항을 고려하여 가장 합리적으로 결정하여야 한다. 정기공수 노선을 결정하기 위해서는 기지별 화물량, 인원수송 수요, 기지 간의 형평성 그리고, 정책적인 판단이 고려되어 종합적인 판단이 이루어져야 한다.

기지별 화물수송은 정기공수 노선 결정에 대한 가장 객관적인 자료로서 본 연구에서는 기지별 화물량 중에서 중앙물자를 대상으로 진행한다.

III. 이론적 배경

차량경로문제(VRP: Vehicle Routing Problem)의 가장 단순한 기본형태는 외판원문제(TSP: Traveling Salesman Problem)이다. 외판원 문제에 판매원 수가 여러 명이 되면 좀더 실제적인 문제에 접근하게 되는데, 이 경우 복수 외판원 문제(MTSP: Multiple Traveling Salesman Problem)가 된다. 복수 외판원 문제는 네트워크에서 N개의 노드(node)가 있고, M명의 판매원이 있을 때, 각 노드가 한명의 외판원에 의해 한 번만 방문되고, M명의 판매원에 의한 총 여행거리(비용) 최소화하는 M개의 경로를 찾는 것이다.

MTSP를 TSP 모형으로 변형 시킬 수 있음은 다음 2편의 논문에서 보여주었다. Svestca and Huckfelt¹¹⁾는 출발지를 M개로 복제한 후, M개의 출발지에서 각 노드까지의 거리를 원래의 출발지에서 각 노드까지의 길이와 같게 하고, 출발지 간의 거리를 무한히 크게 하여 서로 연결이 안 되게 만들었다. Bellmore and Hong¹²⁾은

복수 외판원 문제를 풀어서 해결될 수 있음을 보였는데, 이때 확대된 그래프를 만드는 과정에서 각 판매원에 따라 발생되는 비용개념을 도입함으로써 총 여행거리를 최소화하는 경로를 찾음은 물론 필요한 판매원 수도 구할 수 있었다.

차량경로모형은 복수 외판원 문제에 차량 수용능력, 최대운행시간 등의 여러 제약조건을 첨가한 일반화된 문제이다. 즉 본점에서 여러 대의 차량이 있는데, 이들 차량으로 수요량이 알려진 모든 지점의 수요량을 만족시키면서, 전체차량에 의한 총 운행거리(또는 비용)를 최소화하기 위한 일단의 배달경로를 찾는 것이다.

차량경로문제는 Danzig and Ramser⁹⁾에 의해 최초로 고려되었는데, 그들은 LP개념과 노드를 묶는 발견적 기법을 개발하여 휘발유 트럭문제에 적용하였다. Clark and Wright⁸⁾는 절약(saving)의 개념을 적용한 발견적 기법을 개발하여 수용능력이 여러 가지인 트럭의 운행문제에 적용하였다. 송성현⁶⁾은 차량운행문제에 대해서 수용능력과 운행시간을 고려한 최적운행경로와 적정차량의 대수를 구하는 분기한계법을 개발하였다. 신해웅⁷⁾은 운 한 수요지점의 주문량이 차량의 적재용량보다 적더라도 필요하다면, 이를 복수차량에 나누어 적재한 후, 분할배달(split delivery)이 가능한 다회방문을 허용하는 발견적 해법을 제시하였다. 본 연구는 차량 경로모형을 수송기 노선배정에 적용하여 수송기가 운항하는 경유기지를 최소화하는 수송계획을 수립하는 것이다.

IV. 모형의 개발

1. 다회방문 모형

기존의 TSP 모형에서는 일회방문 원칙을 가정하고 있지만, 더 일반화된 모형인 VRP 모형에서는 일회방문 원칙의 제약을 풀은 문제이다. 일반적으로 일회방문 원칙은 너무 제한적이고, 그 결과 비용절감의 기회를 상실할 수 있다. 수요지점들이 인접한 경우일지라도 그 지점들의 수요 합이 차량의 적재용량을 초과한다면, 한 대의 차량에 의한 배달이 불가능하기 때문에 단일 경로로 편성할 수가 없다. 본 연구에서는 일회방문 원칙을 가정하고 있는 TSP 모형보다는 좀 더 일반화되어 분할배달이 가능한 다회방문 모형(multiple visits model)인 VRP 모형의 개념을 활용하였다.

2. 항공수송에서 경유기지의 의미

기존 VRP 모형은 차량이 일정경로를 순환하여 본점으로 돌아오고, 경로순환에 대한 총비용이나 거리의 최소화가 목적이다. 하지만, 우리나라 항공수송에 있어 거리나 시간은 큰 의미를 갖지 않는다. 수송기는 그 특성상 이착륙에 많은 시간이 소요되고, 공중에서의 이동 시간은 상대적으로 적게 소요된다. 경유기지 수에 대한 제약이 고려된 상황에서는 시간이 커다란 제약을 주지 못할 뿐 아니라, 전체거리의 최소화보다는 사용되는 수송기 대수를 줄이는 것이 훨씬 경제적이다. 결국 경유하는 기지의 개수를 최소화하고, 전체 수송수요를 모두 수송하는 것이 수송에 소요되는 수송기 대수를 줄일 수 있고, 경제적인 의미를 갖게 되는 것이다. 공군 규정에서는 하루 동안 수송기가 운행할 수 있는 소티(sortie)에 대한 제약을 두어 경유기지를 제약하고 있다.

또한, 본 연구에서는 수송기의 활용성 제고를 위해서 최소 몇 개의 기지를 경유해야한다는 제약조건을 추가하였다. 수송기가 수송하는 대부분의 물자는 중앙 창에서 각 기지로 수송하는 중앙물자이지만, 해외발송을 위한 수리순환품목이나 하자품은 다시 중앙 창으로 수송되어야하는 물자이기 때문에 보다 많은 기지를 경유하는 것이 각 기지에서 창으로의 물자수송 기회를 더 많이 제공한다. 그리고 부가적으로 수송기 조종사에 대한 훈련 목적까지 감안한다면, 최소 몇 개의 기지를 경유해야한다는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다. 이러한 경유지 개수에 대한 제약은 한 기지에 대한 물량 중에서 특정 수송기가 수송할 수 있는 물량의 제약을 통해서 이루어지도록 하였다.

3. 모형 변수의 정의와 개념

모형 구축에 앞서 단일의 중앙 창에서 $N-1(i=1, \dots, N-1)$ 개의 기지에 대한 수요물량을 M 대의 수송기 $k(k=1, \dots, M)$ 를 이용하여 각 기지에 수송한다고 가정하기로 한다. 수송기 k 의 적재용량은 P^k 이고, 특정 수송기 k 가 한 기지에 수송하는 수송물량은 q_i^k 라 정의하고, 수송기 k 가 한 기지에서 최대로 실을 수 있는 화물량을 C_k 로 제약하여 수송기가 최소한 몇 개 이상의 기지를 순회하도록 하였다. 기지 i 의 전체 수송수요는 Q_i 로 주어졌다고 가정하였다.

본 연구에서 다루는 항공수송문제는 수송기의 최소 대수와 최적의 경유기지를 결정하는 것으로 다음 조건을 만족시키도록 수식화 하였다.

- ① 수송기는 반드시 모기지에서 출발하여 모기지로 돌아온다.
- ② 창에서 한 번 물자를 선적한 수송기는 중간 기지에서 다른 중간 기지로 가는 추가 화물의 선적량은 없다고 가정한다.
- ③ 한 노선상의 수송기는 한 개의 기지에 한번 이상은 착륙하지 않는다.
- ④ 수송기는 물자수송 후에 반드시 중앙 창에 되돌아 온다.
- ⑤ 동일한 수송기가 동일한 기지를 반복 방문할 수는 없지만, 다른 수송기에 의해서는 동일한 기지라 할지라도 여러 회 방문이 가능하다.

목적함수는 전체 경유기지 개수의 최소화이며, 수송기의 용량, 경유기지, 소티(sortie)에 대한 제약을 갖는 수리계획모형(mathematical planning model)을 구축하고자 한다.

4. 수리계획모형 및 알고리즘

1) 수리계획모형

본 연구에서 제안한 모형에 적용된 기호의 정의는 다음과 같다.

- C_k : 수송기 k 에 실을 수 있는 기지 당 최대 적재량
- i, p, j : 수송기가 경유하는 임의의 지점
- N : 노드 수(기지 수)
- P^k : 수송기의 수용능력
- Q_i : 기지 i 의 수요량
- s : 순회 종착 기지 (창)
- r : 수송기 출발기지
- T : 수송기가 경유할 수 있는 최대 기지 수
- $y_i, y_j =$ 임의의 실수

여기서, 결정변수는 다음 세 종류이다.

- M : 수송기의 수
- q_i^k : 수송기 k 에 링크 기지 i 로 가는 수송물량
- $X_{ij}^k=1$: 링크 $i \rightarrow j$ 가 수송기 k 에 의해서 방문될 때
- $X_{ij}^k=0$: 그렇지 않을 때

본 연구에서 제한한 공군의 최적 항공화물 수송 노선을 찾아내는 수리계획 모형은 다음과 같다.

$$\text{Min. } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M X_{ij}^k \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^N X_{ij}^k \leq 1 \quad (j=2, \dots, N, k=1, \dots, M) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ip}^k - \sum_{j=1}^N X_{ij}^k = \begin{cases} -1 & \text{만일 } p \neq s, p = r \\ 0 & \text{만일 } p \neq s, p \neq r \\ 1 & \text{만일 } p = s, p \neq r \end{cases}$$

$$(k=1, \dots, m, p=1, \dots, N) \quad (3)$$

$$q_i^k \leq C_k \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N (q_i^k \sum_{j=1}^N X_{ij}^k) \leq P^k \quad (k=1, \dots, M) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_{ij}^k \leq T \quad (k=1, \dots, M) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M q_i^k X_{ij}^k = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (7)$$

$$y_i - y_j + N \sum_{k=1}^M X_{ij}^k \leq N - 1 \quad (i \neq j, j = 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$X_{ij}^k = 0 \text{ or } 1 \text{ for all } i, j, k \quad (9)$$

위의 모형은 차량경로문제의 기본 개념을 응용하면서 현 공군의 수송기 노선배정을 효율화하는데 공군의 특수한 목적과 제약조건을 고려한 모형을 구축한 것이다. 이와 같이 공군의 특수한 목적과 제약을 반영하기 위해서는 차량경로문제의 목적함수와 제약조건 일부에서 차이가 있게 되었다. 이와 같은 모형수식의 차이로 차량경로문제의 알고리즘을 그대로 적용할 수가 없어 새로운 알고리즘을 개발이 필요하다. 제한된 모형식이 기존의 차량 경로모형과 가장 다른 점은 한 지점을 한번만 방문하도록 한 제약식을 제거한 것과 수송기 활용성 증대를 위해서 몇 개 이상의 지점을 경유하도록 한 제약조건을 추가할 것이다.

제한된 모형식의 의미를 설명하면, 목적함수 식(1)은 전체 항공기의 경유기지를 최소화하는 것을 의미하며, 이는 전체 소요 수송기의 대수를 최소화하는 것과 같은 의미를 갖는다. 제약식(2)는 단일 수송기에 의한 중복방문 불허하는 제약식으로 특정 수송기가 어떤 기지를 방문하는 횟수는 1회 이하임을 의미한다. 제약식

(3)은 경로연속성 규칙으로 식에서 0인 경우, 특정 수송기 k가 어떤 기지를 방문한 후 다른 기지 j로 떠나야만 하고, 방문하지 않은 경우라면 다른 기지로 떠날 수 없음을 의미한다. 또한 -1은 수송기의 출발기지 조건, 1은 종착기지에 대한 조건이다. 제약식(4)는 수송기 k가 각 기지의 수요량 중에서 실을 수 있는 최대량을 제약하는 식으로 수송기의 활용성을 높이기 위해서 최소한의 기지를 경유하도록 하는 것을 의미한다. 여기서 q_i^k 는 1부터 C_k 사이의 값을 갖는 결정변수이다. 제약식(5)는 항공기의 용량 제약으로 항공기 k가 수송할 수 있는 물량이 P^k 를 초과하지 못함을 의미한다. 여기서 P^k 는 운용되는 수송기마다 용량이 다를 수 있기 때문에 일반화를 위해서 사용되었지만, 본 연구에서는 C-130 수송기 기준으로 일괄 적용하였다. 제약식(6)은 항공기의 쏘티 수에 대한 제약으로 항공기 k가 경유할 수 있는 기지수는 T 이하임을 의미이다. 제약식(7)은 전체 수송기로 수송한 물량의 합과 전체 기지 수요의 합이 같다는 것을 의미한다. 제약식(8)은 외판원 문제에서 본점을 포함하지 않는 경로를 제거하도록 제약하는 식으로 Miller, Tucker, Zelman이 유도한 조건식이다.^{6,10)} 제약식(9)는 정수조건 식으로, 항공기가 해당 링크를 운행하면 1, 운행하지 않으면 0 이 된다.

2) 알고리즘

알고리즘으로 물량이 많은 기지를 중요한 기지로 인식하여 우선적으로 배정하는 Greedy 방법을 적용하였다. 이와 같은 알고리즘의 계산을 통해 얻을 수 있는 결과는 ① 전체 화물수송에 소요되는 수송기 대수, ② 화물량 기준에 따른 노선배정의 우선순위, ③ 수송기별 경유기지, ④ 수송기별 수송량이다. 모형식의 계산을 위한 알고리즘 수행절차는 다음과 같다.

(단계 0) 초기화

$$\text{수송기 선정 } k = 1$$

$$\text{수송기의 적재 물량 초기화 } q_i^k = 0$$

(단계 1) 수송물량에 따른 기지의 정렬

수송물량에 따라 기지를 내림차순으로 정렬

(단계 2) 경유가 가능한 기지 선정

정렬된 기지 중에서 물량이 가장 많은 곳부터 T-1개를 선정하고, 수송기 k가 경유 가능한 기지의 집합 V^k 에 포함

(단계 3) 가장 많은 기지 물량을 적재
 물량이 가장 많은 기지 i 에 대해서
 만약, 화물이 C_k 이상 ($Q_i \geq C_k$)이면,

$$\text{적재물량 } q_i^k = C_k.$$

만약, 화물이 C_k 미만 ($Q_i < C_k$)이면,

$$\text{적재물량 } q_i^k = Q_i$$

물량수송이 확정된 기지의 집합 B^k 에 삽입하고, 경
 유 가능기지의 집합 V^k 에서 삭제한다. 만약, V^k 가 공
 집합이면, 해당 항공기에 대한 적재를 종료하고,
 $k = k + 1$ 로 수송기 변경 후 단계 1로 간다.

(단계 4) 기지에 남은 잔여 수송물량 계산

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n - q_i^k \quad (n \text{은 반복계산 수})$$

만약, $\sum_{i=1}^N Q_i = 0$ 이면, 단계 6으로 간다.

(단계 5) 수송기에 적재된 물량 검사

적재 물량에 대해 P^k 의 초과 여부를 검사

만약, 적재 물량이 $\sum_{i=1}^N q_i^k \leq P^k$ 이면,

단계 3으로 돌아간다.

만약, 적재 물량이 $\sum_{i=1}^N q_i^k = P^k$ 이면,

해당 수송기에 대한 적재를 종료하고,

$k = k + 1$ 로 수송기 변경 후, 단계 1로 간다.

(단계 6) 종료

필요 수송기 대수 $m = k$;

수송기 k 의 경유지 집합 B^k ;

수송기 k 의 적재물량 $\sum_{i=1}^N q_i^k$.

알고리즘을 종료한다.

V. 예측자료 생성 및 적용

1. 수요물량에 대한 예측

공군 군수사령부 통계연보를 바탕으로 최근 6년간
 각 기지별 중앙물자 수송물량은 <표 1>과 같다. 이 자
 료에서의 단위는 중량톤이며, 기지 명은 군사목적 상
 기호로 사용한다.

본 연구에서는 단기 예측에 가장 많이 사용되는 지
 수 평활법 (Exponential smoothing Method)을 이
 용하였다.⁵⁾ 부족한 시계열 자료를 활용하여 미래 수요

<표 1> 중앙물자 수송물량

(출처: 공군군수사령부 통계연보¹⁾)

	1996	1997	1998	1999	2000	2001
B1	512	328	304	232	281	253
B2	485	298	287	318	289	228
B3	211	107	95	34	337	59
B4	718	739	737	530	547	417
B5	440	375	371	324	307	304
B6	337	310	331	293	251	235
B7	529	457	420	318	343	334
B8	431	399	406	265	312	458
B9	490	420	312	303	320	278
B10	275	336	313	289	326	231
B11	795	581	682	503	503	487
B12	724	521	454	436	376	386
B13	56	461	651	510	376	467
계	7,943	6,868	6,710	5,844	6,192	5,671

를 예측하여야 하는 본 연구 자료의 특성에 적용하기에
 는 지수평활법이 가장 적합한 방법이라고 판단하여 본
 연구에 적용하였다. 지수평활법에 의한 예측은 부대임
 무 변화나 이동 등으로 각 기지에 대한 수송수요가 과
 거의 자료보다는 현재의 자료에 가중치를 더 부여하게
 된다.

그리고 항공기 노선이 1주일 단위로 순환되는 것을
 고려하여, 항공기 운항이 가능한 주를 45주로 계산하
 여 주당 수송물량을 배정하고, 수송기는 일반적인 육로
 수송 수단보다 용적에 대한 제약이 더 심한 점을 감안
 하여, 실제 작업 현장에서 사용하는 환산단위(용적톤
 = 중량톤 × 2.7)에 의해서 중량톤으로 되어 있는 주
 당 수송물량을 용적톤으로 가공된 자료를 준비하였다.

<표 2> 예측을 통한 항공수송자료

	2002년 예측자료	주당 수송물량	용적고려 물량	입력물량*
B1	152.16	3.38	9.13	9
B2	143.58	3.19	8.61	9
B3	27.71	0.62	1.67	2
B4	373.87	8.31	22.44	22
B5	260.17	5.78	15.61	16
B6	214.86	4.77	12.88	13
B7	268.02	5.96	16.10	16
B8	422.91	9.40	25.38	25
B9	208.97	4.64	12.53	13
B10	246.42	5.48	14.80	15
B11	383.58	8.52	23.00	23
B12	261.24	5.81	15.68	16
B13	660.77	14.68	39.64	40
계	3,624.26	80.54	217.47	219

*: 모형 적용을 위해서 반올림을 통해 정수로 생성

계산결과는 <표 2>와 같다.

2. 최적 노선배정

예측자료를 가지고 제안된 노선 최적화 수리계획모형에 적용하여 알고리즘에 의해 계산된 결과는 <표 3>과 같다. 이 자료는 예측된 모든 물자를 항공기로 수송할 수 있는 경우를 나타낸다. 항공기에 대한 적재물량 제약(P^k)은 C-130 항공기 적재정량인 18톤을 적용하였다. 또한 경유기지 제약을 위해서 한 기지에 대한 특정 항공기의 수송물량은 6톤을 넘지 못하도록 적용하였으며, 항공기가 경유할 수 있는 순수 경유기지의 수(T)는 공군 규정에서 한정하는 7개의 기지 중에서 창과 모 기지에 대한 경유를 제외하고 4개까지로 한정하

고 분석하였다.

<표 3>은 1주일 전체의 물량을 수송할 경우 노선배정결과이다. <표 3>에서 순번은 기지별 물량을 가장 중요한 요소로 보았을 경우 중요한 노선 순서를 의미하는 것이다. 이 연구에서는 2002년을 기준으로 일주일에 C-130수송기 6대와 CN-235 수송기 12대가 정기공수에 배정된 점을 감안하여 이 중 C-130 수송기 5대만 중앙물자 수송에 배정한 결과는 <표 4>와 같다.

이 결과에서 보면 예측에 의한 노선배정 중 상위 5개 노선을 선택하여 중앙물자를 대입해 본 결과 총 1498.95톤을 수송할 수 있는 것으로 나타났다.

<표 4>에서 총 13개기지 중 8개 기지에만 노선이 배정되어, 5개의 누락 노선이 존재하는 것처럼 결과가 보일 수 있으나, 현재 C-130 6대, CN-235 12대의 총 18대 가운데 5대의 C-130 수송기로 대부분의 화물 수송이 이루어졌음을 보여주는 분석 결과인 것이다. 즉 누락된 5개 노선은 배정되지 않은 12개의 여유 수송기로 소수의 화물을 수송할 수 있음은 물론 현재 트럭 및 철도로 수송되고 있는 화물을 여유 수송기가 감당할 수가 있음을 분석 결과가 보여주고 있는 것이다. 즉 현재 공군이 도로, 철도, 항공을 통한 화물 수송비용을 어차피 훈련 목적으로 비행하고 있는 수송기를 이용할 경우 더 많은 물량과 인원을 항공으로 수송할 수 있는 최적 노선을 설계할 수가 있으며, 그 결과 공군 전체의 화물 수송비용을 감소시킬 수가 있음을 시사하고 있다.

<표 3> 새로운 모형에 의한 노선배정 결과

	노선	물량
1	모 기지 - 창 - B13 - B8 - B11 - 창 - 모 기지	18
2	모 기지 - 창 - B13 - B4 - B8 - 창 - 모 기지	18
3	모 기지 - 창 - B13 - B11 - B4 - 창 - 모 기지	18
4	모 기지 - 창 - B13 - B7 - B12 - 창 - 모 기지	18
5	모 기지 - 창 - B13 - B5 - B10 - 창 - 모 기지	18
6	모 기지 - 창 - B8 - B6 - B9 - 창 - 모 기지	18
7	모 기지 - 창 - B11 - B13 - B5 - 창 - 모 기지	18
8	모 기지 - 창 - B7 - B12 - B4 - 창 - 모 기지	18
9	모 기지 - 창 - B10 - B1 - B2 - 창 - 모 기지	18
10	모 기지 - 창 - B8 - B6 - B9 - 창 - 모 기지	18
11	모 기지 - 창 - B11 - B12 - B4 - B7 - 창 - 모 기지	17
12	모 기지 - 창 - B5 - B13 - B10 - B1 - 창 - 모 기지	14
13	모 기지 - 창 - B2 - B3 - B6 - B9 - 창 - 모 기지	7
14	모 기지 - 창 - B8 - 창 - 모 기지	1
전체 경유회수(창과 모기지 제외): 43회		219

<표 4> 노선 배정표에 대입 결과

	1	2	3	4	5	계	중량톤	연간물량
B1	-	-	-	-	-	-	-	-
B2	-	-	-	-	-	-	-	-
B3	-	-	-	-	-	-	-	-
B4	-	6	6	-	-	12	4.44	199.8
B5	-	-	-	-	6	6	2.22	99.9
B6	-	-	-	-	-	-	-	-
B7	-	-	-	6	-	6	2.22	99.9
B8	6	6	-	-	-	12	4.44	199.8
B9	-	-	-	-	-	-	-	-
B10	-	-	-	-	6	6	2.22	99.9
B11	6	-	6	-	-	12	4.44	199.8
B12	-	-	-	6	-	6	2.22	99.9
B13	6	6	6	6	6	30	11.11	499.95
계	18	18	18	18	18	60	22.2	999

3. 분석 결과에 대한 해석

1) 모형의 적절성

예측에 의해 계산된 2002년도 수송물량과 실제 2002년도 수송물량에 대한 내용을 비교한 결과가 <표 5>에 요약 정리되었다. 예측된 물량과 실제 물량 자료는 B2, B8, B11, B12에서 많은 차이를 보이는데, 이는 단기적인 수송물량 소요(대규모 군사력 증강 사업, 부대이동 등)로 시계열 자료로 예측이 불가능한 부분이었으며, 나머지 기지에 대한 물량은 예측치와 실제 값이 어느 정도 근사한 값을 보이고 있다.

모형에 의해 계산된 총 수송물량은 1498.95톤으로 실제 수송한 물량 873.9톤 보다 약 625톤이 많게 계산되었다. 이와 같이 모형에 의해 계산된 총 수송물량이 이와 같이 더 많은데도 불구하고 수송기 5대만이

〈표 5〉 2002년 물량비교

	알고리즘을 통한 예측 물량		실제 수송물량	
	중양물자	항공수송물량 (5대)	중양물자	항공수송물량 (전체)
B1	152.16	-	174.16	111.36
B2	143.58	-	478.92	6.85
B3	27.71	-	70.06	24.04
B4	373.87	199.8	359.41	43.39
B5	260.17	99.9	263.11	84.97
B6	214.86	-	306.03	86.82
B7	268.02	99.9	277.48	39.52
B8	422.91	199.8	558.32	113.72
B9	208.97	-	264.90	56.36
B10	246.42	99.9	149.61	15.81
B11	383.58	199.8	769.10	114.19
B12	261.24	99.9	395.98	59.10
B13	660.77	499.95	590.17	117.77
계	3,624.26	1498.95	4657.25	873.9

물량수송에 투입하였다는 사실을 볼 때 본 연구에서 제시한 최적 노선배정 모형과 알고리즘이 적합한 분석 결과를 제시하고 있음을 보여주는 것이다.

2) 모형의 경제성

모형에 대한 경제성은 실제 다른 수송수단으로 물자를 수송했던 실적을 기준으로 톤당 수송원가를 비교하여 평가하였다. 〈표 6〉은 1999년도 수송수단별 톤당 수송단가표이다.

〈표 6〉에서 보여주듯이 톤당 수송원가는 5,700원이다. 하지만, 이 중에서 화차의 경우 하나의 기지에 대해서 대량으로 물자를 보내는 경우에 사용되므로 일반적인 물자보다 수송대기기간이 길어진다. 따라서 실제 항공수송 수요 중에는 철도(소화물)와 육로(민간용역)를 이용하던 수송물자가 항공기로 전이될 가능성이 매우 높다. 그러므로 항공으로 전이될 수 있는 물량의 톤당 수송비의 절약은 34,983원이라고 가정할 수 있다.

〈표 6〉에서 실제 수송 자료와 예측 자료를 이용하여 최적화된 노선에 실제 물량을 대입하여 분석한 결과를 비교하였다. 모형에 의한 예측과 최적 노선배정을 통해 비록 수송기 5대만이 물자수송을 위해 투입한다고 할

〈표 6〉 수송수단별 비용

	철도 (소화물)	육로 (민간용역)	소계	철도 (화차)	계
수송량	334	232	566	4,215	4,781
금액	4,465,600	15,334,866	19,800,466	7,453,700	27,254,166
톤당비용 (원/톤)	13,370	66,098	34,983	1,768	5,700

지라도 추가적으로 625톤의 물량이 더 수송될 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 물자수송에 더 이상의 항공기를 투입하지 않더라도 약 21,864,375원의 예산을 절약하는 효과가 있게 된다. 더욱이 현재 비교하는 노선은 수송기가 8개의 기지만 경유하는 것이므로, 모든 수송기를 동원하여 모든 기지에 대한 항공화물 수송이 최적화될 경우 훨씬 더 많은 예산의 절약을 가져올 수 있다.

Ⅵ. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 차량경로문제를 실제 군 수송기의 정기공수 노선에 적용해보고자 하는 의도에서 시작되었다. 제안된 항공화물 수요예측 모형과 최적 항공노선 배정 모형에 의한 분석 결과는 적용성과 경제성 측면에서 좋은 결과를 보여주고 있다. 하지만 일부 기지에서의 수송물량 예측은 큰 차이를 보였다. 이는 실제로 수송기의 노선을 배정하는 데 있어서 시계열적 요인 외에 대규모 신규사업, 부대이동, 부대임무 변화 등의 기타 요인이 수요 변동에 중요하게 영향을 줄 수 있음을 나타내는 것이다. 이는 정책적인 고려가 수송기의 정기공수 노선 배정에 중요한 요소가 될 수 있음을 보여주는 것이다.

본 연구에서는 차량경로문제의 기본 개념을 응용하면서 현 공군의 수송기 노선배정을 효율화하는데 공군의 특수한 목적과 제약조건을 함께 넣고 계산하고자 하였다. 이와 같이 공군의 특수한 목적과 제약을 반영하기 위해 차량경로문제의 목적함수와 제약조건의 일부를 변형하여 새로운 수리계획모형을 제안하였다. 목적함수와 제약조건이 차량경로문제의 달라짐에 따라 차량경로문제를 푸는 알고리즘을 그대로 적용할 수가 없어 새로운 알고리즘을 본 연구에서 개발하여 제시하게 되었다.

이와 같이 개발된 항공화물 노선배정 최적화 기법을 이용하여 현재 공군에서 수송하고 있는 노선배정과 모형에 의한 최적화 노선배정을 비교하여 모형의 적합성과 화물 수송의 경제성을 실제적인 예제를 통하여 분석 결과를 본 연구에서는 제시하였다.

향후 공군의 항공화물수송 계획을 수립함에 있어 시계열적 화물 수요예측 외에도 기지별 화물량, 인원수송소요, 기지 간 형평성, 정책적 판단 등의 기타 요인을 고려할 수 있는 종합적 항공수송 계획 기법이 연구되어야 할 것이다.

또한 공군기지를 중심(hub)으로 하는 육군, 해군의

물자 수송을 통합한 항공화물 수송에 대한 고려와 철도, 육로의 적절한 수송수단의 분담도 함께 고려할 수 있는 통합된 군 화물 수송체계에 대한 연구도 필요하다고 고려된다.

참고문헌

1. 공군 군수사령부(1998-2002), 공군 군수사령부 통계연보.
2. 공군본부(1993), "공군교범(6-171) 항공수송".
3. 공군본부(2000), "공군규정(5-41) 공수항공기 운영".
4. 공군본부(2001), "공군규정(6-172) 항공수송".
5. 김연형(2001), 시계열 예측, 형설출판사.
6. 송성현(1983), "차량운행문제에 대한 분기한계법의 개발," 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
7. 신해웅(1987), "다회방문이 가능한 차량경로문제의 최적해법," 한양대학교 대학원 석사학위 논문.
8. Clark, G. and J. W. Wright(1964), "Scheduling

- of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points," Operations Research, Vol.12, pp.568~581.
9. Danzig, G. B. and J. H. Ramser(1959), "The Truck Dispatching Problem," Management Science, Vol.6, pp.80~91.
10. Golden, B. L., T. L. Magnanti and H. Q. Nguyen(1977), "Implementing Vehicle Routing Algorithm," Networks, Vol.7, pp.113~148.
11. Svestca J. A. and V. E. Huckfeldt(1972), "Computational Experience with an M-Salesman Traveling Salesman Algorithm," Management Science, Vol.19, pp.790~799.
12. Bellmore, M. and S. Hong(1974), "transpormation of Multisalesmen Problem to standard Traveling," j. of Association for computing Machinery, Vol.21, pp.500~504.

✉ 주 작 성 자 : 정병호

✉ 논문투고일 : 2004. 4. 19

논문심사일 : 2004. 6. 9 (1차)

2004. 9. 25 (2차)

심사판정일 : 2004. 9. 25

✉ 반론접수기한 : 2005. 2. 28