

■ 論 文 ■

급유비용 차별하의 항공기 급유 최적화 모형  
 Aircraft fueling optimization model under a fueling cost differentiation

김 준 혁  
 (전남대학교 산업공학과 연구교수)

목 차

- I. 서론
- II. 연구현황
- III. 항공기 급유 최적화 모형
  - 1. 기본 가정
- 2. 선형계획 모형
- IV. 적용 및 분석
- V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words: 항공교통, 항공기, 급유비용, 최적화, 수리모형, 선형계획 모형  
 Air Transportation, Aircraft, Fueling Cost, Optimization, Mathematical Model, Linear Programming Model

요 약

항공교통시스템에서 핵심적 역할을 하는 항공사의 운영비 중 유류비용은 가장 큰 부분을 차지한다. 따라서 많은 항공사들은 유류비 절감을 위한 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다. 이 중 체계적인 항공기 급유계획 전략은 많은 비용절감 효과로 인하여 근래에 많은 주목을 받고 있다. 항공기 급유계획은 항공유의 급유비용이 각 운항공항 별로 상이할 때, 총 유류비를 최소화할 수 있도록 각 항공기의 운항공항에서 최적 급유량을 도출하는 계획이다. 본 연구에서는 항공기 급유계획에 관한 수리모형을 제시한다. 제시된 모형은 각 운항공항의 급유비용과 항공기 경로정보가 알려져 있을 때 각 운항공항에서 총비용을 최소로 하는 정확한 급유량을 계산하는 최적화 모형이다. 실험 결과, 제안된 모형은 직관적 형태의 발견적 기법보다 효과적인 비용절감이 이루어짐을 확인하였고, 향후 항공사를 비롯한 대형 운송시스템에서 유류관리 전략으로 중요한 역할을 할 것이라 기대된다.

Aircraft fuel cost is the largest airline expenses in airlines who play a major role in air transportation system. Airlines have been making a great effort to save fuel as much as they can. Among these efforts, the systematic fueling strategy has been taken a growing attention since it is recognized as a very cost-effective fuel management strategy. The systematic fueling strategy is the fuel saving strategy in which extra amount of fuel is loaded to utilize the fueling cost differentiation among the cities where the aircraft operate. In this paper, the aircraft fueling optimization model is proposed. The proposed model is to calculate precise amount of loaded fuel to minimize overall fuel cost assuming that the aircraft routing for all aircrafts and fueling cost in all airports where the aircraft fly are given. Compared with heuristic fueling strategy, the result of the proposed model is promising. Therefore, it is expected that the proposed model plays a major role in fuel management strategy in airline operation.

## I. 서론

최근 국제 유가급등으로 인해 대다수의 운송업체들이 적극적으로 비용절감에 나서고 있다(김민정 외, 2006, 하현구 외, 2006). 많은 유류를 소비하는 항공사와 같은 대형 운송업체들에 있어 국제유가 상승은 수익구조에 막대한 영향을 끼친다는 것은 명백한 사실이다. 따라서 체계적인 유류관리는 운송업계에서 많은 관심을 가지고 있는 분야 중 하나이다.

현재 전 세계 대부분의 대형항공사들은 전체 비용 중 항공유(jet fuel)구입에 가장 많은 비용을 지출하고 있으며 그 추세 또한 계속 증가하고 있다(홍석진, 2004). 이러한 증가는 이용객의 수요증가에서 원인을 찾을 수도 있지만 유가상승으로 인한 증가가 보다 큰 이유이다. 북미 항공사의 경우, 9.11.사태로 인하여 이용객이 꾸준히 감소한 시점인 2001년 이후 어메리칸항공(American Airlines)은 전체 운영비 중 항공유 구입이 차지하는 비중이 약 14%에서 2005년에는 약 26%로 크게 증가하였고 2003년 대비 2004년에는 약 10억 달러 이상 증가하였다(American Airlines, 2005). Kim(2005a)은 항공유 가격이 1센트 상승함에 따라 어메리칸항공은 연간 약 290만 달러, 유나이티드항공(United Airlines)은 약 220만 달러의 비용이 증가한다고 예측하였다. 국내 항공사의 경우, 대한항공의 총비용 대비 유류비 비중은 2007년에 32%에서 2008년 현재 34% 수준까지 증가하였고 국제유가 배럴당 1달러 상승 시 연간 약 300억원의 추가비용이 발생할 것으로 예측하고 있다(항공정보포탈시스템). 아시아나항공의 경우 2007년에 항공유 구입으로 매출액의 28%인 약 1조원을 사용하였고 배럴당 1달러 상승 시 연간 약 111억원의 손실이 발생하는 것으로 예측하고 있다(항공정보포탈시스템).

한편 항공유 절약으로 얻어지는 효과를 살펴보면 많은 대형항공사의 기종(fleet) 구성에서 가장 큰 비중을 차지하는 중소형기종인 에어버스-320, 보잉-737 1기당을 대상으로 항공유 1% 절약은 연간 약 10만kg의 유류 절감효과가 있으며 이로 인해 약 5만달러의 비용절감이 달성될 수 있다고 보고되고 있다(American Airlines, 2005; Kim, 2005a). 이러한 이유로 인하여 많은 항공사에서 유류관리는 관련 부서만의 임무로만 인식되기 보다는 전사적이고 체계적인 유류관리 전략이 수행되고 있다. 일반적으로 많이 수행되고 있는 전략으로는 경제항로의 개발, 운항 중 경제속도, 경제고도 유지, 탑재 음용

수(portable water)의 양 조정, 항공기 지상 대기 시 보조전원장치(auxiliary power unit)의 사용 대신 지상전원장치(ground power unit)의 사용, 공항 유도로(taxiway)에서의 단일엔진 사용, 승객, 수화물의 균형 적재, 그리고 선물거래에 의한 유류 선구매(fuel hedging) 등이 있다(Morrell et al. 2006). 이러한 노력들 중 근래에 들어 체계적인 항공기 급유 최적화(aircraft fueling optimization)에 대한 필요성이 대두되었다. 항공기 급유 최적화란 급유비용이 각 운항공항별로 상이할 때, 총 유류비를 최소화할 수 있도록 각 운항공항에서 이륙 항공기에 대한 최적 급유량을 계산하는 문제이다. 본 연구에서는 각 운항공항별로 항공유 단위당 급유비용과 항공기가 운항할 운항공항의 순서, 즉, 항공기 경로(aircraft routing)정보가 알려져 있을 때, 총 급유비용의 최소화를 목적으로 하는 항공기 급유 최적화 모형을 제시한다.

## II. 연구현황

항공기 급유계획에 관한 기존 연구는 그리 많지 않은 편이다. Diaz(1990)는 각 운항공항에서 항공유 공급은 오직 단일 공급자에서만 수행되고 최대 공급량 제약이 존재한다고 가정하고, 이를 일반화된 네트워크 모형(generalized network formulation)을 통하여 정식화하였다. Stroup et al.(1992)도 일반화된 네트워크 모형을 통한 항공기 급유계획 문제를 다루었다. 이 연구에서는 단일 항공기의 경우와 다수의 항공기가 존재하는 두 가지 경우로 나눈 후, 항공유 공급자의 공급자 제약(supplier constraint)을 고려하였다. 그러나 실제 문제의 적용에 있어 이러한 추가적인 제약으로 인하여 네트워크 크기가 커짐에 따라 계산시간이 증가하였다. Diaz(1990)와 Stroup et al.(1992)의 연구는 비록 항공기 급유계획 모형에 관한 연구의 시발점으로서 매우 의미가 있으나, 운항공항별 급유비용의 차이와 비용이 낮은 공항에서 많은 양의 항공유를 탑재함에 따라 증가하는 연료소비량과의 트레이드오프 관계에 관한 문제는 다루어지지 않았다. Abdelghany et al.(2005)은 항공기 급유계획 문제를 위한 비선형계획 모형을 제안하였다. 제안된 모형은 제약조건에 연료소비량을 연료적재량, 소요시간의 비선형함수로 표현하고 이를 목적함수에 추가하였다. 이러한 모형화의 특징으로 인해 매우 복잡한 형태의 모형이 도출되었다. 한편, 각 항공편의 예비항공유(reserved fuel) 제약이 고려되지 않았지만 다양한

급유비용 패턴을 가정한 실험을 수행하였다. 본 연구는 기존의 연구와 달리 연료소모량 함수를 고려하여 모형을 선형계획으로 단순화 하였고, 이로 인해 현실적인 적용에 있어 많은 장점을 가짐과 동시에, 다수의 항공기와 항공편으로 이루어진 대형문제에서도 그 적용이 매우 용이하다.

### III. 항공기 급유 최적화 모형

항공기 급유 최적화 문제는 주어진 항공기 경로에서 목적지의 급유비용이 상대적으로 높을 때 해당 목적지에서의 급유량을 줄이기 위해 출발지에서 목적지까지 도착하는데 필요한 양보다 더 많은 양을 출발지에서 급유하여 비용의 최소화를 목적으로 관련 제약을 만족하면서 전체 항공기를 대상으로 각 공항에서의 최적 급유량을 결정하는 문제이다. 그렇지만, 급유비용이 낮은 공항에서 너무 과도한 양을 급유하게 되면, 항공기의 중량이 높아져 연료소비가 증가하게 되므로 항공유의 소비량이 증가할 수 있다. 그러므로, 비용 최소화의 관점에서 출발지와 도착지의 비용 차이는 필요 이상의 항공유를 급유함에 따라 발생하는 항공유 소비비용보다 반드시 커야 한다.

#### 1. 기본 가정

본 연구에서 다루는 항공기 급유 최적화 모형에서는 다음 정보들은 미리 알려져 있다고 가정한다.

##### 1) 항공기 경로정보

항공기 경로는 운항 스케줄 상에서 각 항공기가 운항할 공항의 순서로서 흔히 운항시점 수 개월 전 미리 결정된다(김준혁, 2008). Hub-and-Spoke 네트워크 구조를 갖는 항공사의 항공기 경로는 다수의 항공기가 허브 공항을 통과하게 되므로 허브주기(hub cycle)가 상대적으로 짧게 나타난다(박용화 외, 2006). 반면에, 저가항공사에서 나타나는 점대점(point-to-point) 네트워크 구조는 허브주기가 상대적으로 길다고 볼 수 있다(Kim, 2005b). 항공기 경로 결정 시 고려해야 할 사항은 항공기 정비일정, 공항대기시간(turn time), 운항공항의 특성에 맞는 기종의 가용여부 등이다. 여기에서 공항대기 시간이란, 연속되는 항공편 사이에 급유, 승무원 교체 등을 위해 항공기가 공항에서 최소로 필요로 하는 시간을

의미한다. 본 연구에서는 경로상의 모든 운항공항에서 항공기의 급유가 가능하다고 가정한다.

##### 2) 항공기 급유비용

급유비용은 항공유 단위당 급유비용으로서 공급자(vendor)가 다수 존재하는 경우에는 항공사가 선택한 공급자가 제공하는 가격으로 결정된다. 한편, 급유시설을 항공사가 직접 운영할 경우 급유비용은 수송비용, 항공유 저장비용, 저유 시설 운영비등을 고려하여 결정된다. 본 연구에서는 각 운항공항의 급유비용은 미리 알려져 있다고 가정한다.

##### 3) 동적 교통량 정보

동적 교통량 정보는 항공기가 운항할 항공편의 승객 인원, 수화물 정보, 그리고 탑재되어야 할 예비항공유(reserved fuel)의 양 등이다. 이는 항공편 운항 시 실제 항공유 소비량을 예측하는데 필요한 정보로서 이륙시점에서 획득되는 정보이다. 예비항공유는 목적지까지 운항에 필요한 항공유의 양 이외에 운항 중 비상사태로 인한 항공기 우회(diversion) 등을 대비하여 항공기가 의무적으로 탑재하여야 할 항공유의 양이다.

##### 4) 항공기 제원정보

항공기 제원정보는 운항 기종의 구조적인 데이터이다. 필요한 정보는 해당 기종의 연료탱크용량(fuel tank capacity), 운용자중량(empty operating weight), 최대이륙중량(maximum takeoff weight), 그리고 최대착륙중량(maximum landing weight)를 포함한다. 연료탱크용량은 항공기에 최대로 급유할 수 있는 양을 나타내며 흔히 갤론(gallon) 또는 리터(liter)등의 부피단위로 표현된다. 운용자중량은 승무원, 물, 긴급용 장비 등 운항에 필요한 장비 및 인원을 포함시킨 항공기의 중량을 의미한다(항공정보포탈시스템). 최대이륙중량은 항공기의 이륙 가능한 최대중량을 나타내는 것으로 만일 이륙 시 항공기의 중량이 최대이륙중량보다 크면 추진력의 부족과 안전상의 이유로 이륙이 불가능하다. 최대착륙중량은 항공기의 착륙 가능한 최대중량을 나타내며, 항공기의 착륙 시 항공기 중량은 반드시 최대 착륙중량보다 적어야 한다. 항공기 최대이륙중량과 착륙중량은 파운드(pound) 또는 킬로그램(kilogram)등의 무게단위로 표현된다. 항공기 제원정보는 해당 항공기 제조업체로부터 제공된다.

2. 선형계획 모형

1) 모형 I

본 연구에서 제시되는 항공기 급유 최적화 모형은 관련 제약을 만족하면서 총 급유비용을 최소화하는 선형계획(linear program)모형이다. 사용된 기호와 모형은 다음과 같다.

- $i$  : 항공기
- $j$  : 항공편
- $\phi(j)$  : 항공편  $j$ 의 출발공항
- $C_{\phi(j)}$  : 공항  $\phi(j)$ 에서의 단위당 급유비용
- $\lambda$  : 중량 변환계수
- $X_{ij}$  : 항공편  $j$ 의 운항직전 항공기  $i$ 의 급유량
- $Y_{ij}$  : 항공편  $j$ 의 운항직전 항공기  $i$ 의 항공유 잔량
- $R_{ij}$  : 항공편  $j$ 의 운항을 위한 항공기  $i$ 의 항공유 소비량
- $SF_j$  : 항공편  $j$ 의 운항에 필요한 예비항공유의 양
- $FC_i$  : 항공기  $i$ 의 연료탱크용량
- $PL_{ij}$  : 항공기  $i$ 가 운항할 항공편  $j$ 의 승객, 수화물 등을 포함한 항공기 페이로드중량
- $OEW_i$  : 항공기  $i$ 의 운전자중중량
- $MTOW_i$  : 항공기  $i$ 의 최대이륙중량
- $MLW_i$  : 항공기  $i$ 의 최대착륙중량

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j C_{\phi(j)} X_{ij} \tag{1}$$

subject to

$$Y_{ij} + X_{ij} - R_{ij} = Y_{i(j+1)} \quad \forall i, j \tag{2}$$

$$Y_{ij} + X_{ij} - R_{ij} \geq SF_j \quad \forall i, j \tag{3}$$

$$Y_{ij} + X_{ij} \leq FC_i \quad \forall i, j \tag{4}$$

$$(Y_{ij} + X_{ij})\lambda + PL_{ij} + OEW_i \leq MTOW_i \quad \forall i, j \tag{5}$$

$$(Y_{ij} + X_{ij} - R_{ij})\lambda + PL_{ij} + OEW_i \leq MLW_i \quad \forall i, j \tag{6}$$

$$X_{ij} \geq 0, Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \tag{7}$$

식(1)은 각 항공기의 모든 공항에서 총 급유비용의 최소화를 나타내는 목적함수이다. 식(2)는 균형 제약(balance constraint)으로서 항공편  $j$ 의 운항을 위해 항공기  $i$ 에 급유된 항공유의 양과 급유시점에서  $i$ 에 남아있던 잔량의 합에서  $j$ 의 운항을 위해서 소비된 양  $R_{ij}$ 를 뺀 수치는  $j$ 의 다음 항공편  $j+1$ 의 운항 직전 잔량과 동일하여야 한다는 제약이

다. 식(3)은 항공편  $j$ 의 운항을 위한 급유량의 제약으로서  $j$ 의 운항을 위해 필요한 총 항공유의 양은  $j$ 의 운항에 필요한 예비항공유의 양  $SF_j$ 보다 크거나 같아야 한다는 것을 의미한다. 즉, (3)은 항공기에 운항을 마친 시점에서 예비항공유의 양보다 더 많은 양이 존재할 만큼의 충분한 양의 항공유가 급유되어야 한다는 것을 의미한다. 식(4)는 항공기 연료탱크용량에 의한 급유량의 제약으로 잔량을 포함한 급유량은 항공기  $i$ 의 탱크용량  $FC_i$ 를 초과할 수 없다는 제약이다. 식(5)는 항공기가 급유를 마치고 이륙시점에서 항공기 중량은 최대이륙중량을 초과할 수 없다는 제약이다. 식(6)은 착륙시점에서 항공기의 중량이 최대착륙중량을 초과할 수 없다는 제약이다. 식(7)은 선형계획(linear program) 모형의 비음제약이다. 만일, 급유량  $X_{ij}$ 에 정수제약이 존재한다면 제안된 모형은 혼합정수계획(mixed integer program) 모형이 된다.

2) 모형 II

항공기  $i$ 가 항공편  $j$ 의 운항 중 소비된 연료소비량- $R_{ij}$ -는 운항시점의 기상상태, 페이로드중량을 포함한 항공기의 이륙중량(takeoff weight), 그리고 비행고도(flight altitude)등의 함수로서 정확한 값의 추정이 불가능하다. 따라서 일반적으로 과거 운항데이터를 기반으로 통계적 분석을 통해 얻어지거나 또는 경험적 수치를 사용한다. 본 연구에서는 연료소비량은 항공기 이륙중량(takeoff weight)에 비례한다는 가정을 두어 식(8)과 같은 연료소비량 계산식을 도출하였다.

$$R_{ij} = TOW_{ij} \cdot B_i \cdot D_j \tag{8}$$

$TOW_{ij}$  : 항공기  $i$ 의 항공편  $j$ 운항 시 이륙중량(lb)

$B_i$  : 항공기  $i$ 의 중량 · 시간 당 연료소비량 (gal/hour/lb)

$D_j$  : 항공편  $j$ 의 운항소요시간(hour)

$TOW_{ij}$ 는 이륙 시점에서의 항공기 총 중량으로서 승객, 수화물 중량과 연료중량을 포함한다. 연료소비량  $B_i$ 는 항공기의 시간 당 연료소비량을 평균이륙중량(average takeoff weight)으로 나눈 수치이다.  $D_j$ 는 항공편 소요시간을 소수로 표현한 수치이다. 식(8)에서  $TOW_{ij}$ 는 승객, 수화물 중량과 연료중량을 더한 수치이므로 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$TOW_{ij} = (Y_{ij} + X_{ij})\lambda + PL_{ij} + OEW_i \quad (9)$$

식(9)에서 첫 번째 항은 이륙 전 탑재된 연료량을 중량으로 표현한 것이고 나머지 항은 각각 승객, 수화물 중량과 항공기 공기중량을 나타낸다. 따라서 식(9)를 식(8)에 대입하면 연료소비량은 식(10)과 같이 표현된다.

$$R_{ij} = \{(Y_{ij} + X_{ij})\lambda + (PL_{ij} + OEW_i)\} \cdot B_i \cdot D_j \quad (10)$$

도출된 식(10)을 식(1)~식(7)의 모형 I에 적용하면 식(11)~식(17)과 같은 선형계획 모형 II가 정립된다. 결국 모형 II는 모형 I에서 연료소비량을 항공기 탑재중량으로 바꾸어 표현한 형태라고 볼 수 있다. 식(13)에서  $\alpha$ 는 예비항공유의 양을 계산하기 위한 파라미터로서 시간으로 표시된다. 예를 들어  $\alpha=0.5$ 이면 항공기가 비상사태를 대비하여 예정된 목적지까지 도착하는데 필요한 연료량 이외에 30분을 더 운항할 수 있는 연료를 탑재해야 한다는 의미이다.

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j C_{\phi(j)} X_{ij} \quad (11)$$

subject to

$$(1 - \lambda \cdot B_i \cdot D_j) \cdot (Y_{ij} + X_{ij}) - (PL_{ij} + OEW_i) \cdot B_i \cdot D_j = Y_{i(j+1)} \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$(1 - \lambda \cdot B_i \cdot D_j) \cdot (Y_{ij} + X_{ij}) \geq \alpha \cdot B_i \cdot D_j \quad \forall i, j \quad (13)$$

$$Y_{ij} + X_{ij} \leq FC_i \quad \forall i, j \quad (14)$$

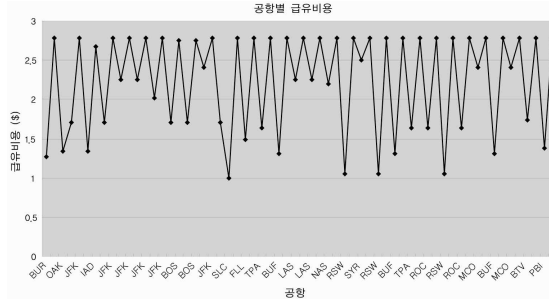
$$(Y_{ij} + X_{ij}) \cdot \lambda + PL_{ij} + OEW_i \leq MTOW_i \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$(1 - \lambda \cdot B_i \cdot D_j) \cdot \{\lambda \cdot (Y_{ij} + X_{ij}) + (PL_{ij} + OEW_i)\} \leq MLW_i \quad \forall i, j \quad (16)$$

$$X_{ij} \geq 0, Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (17)$$

#### IV. 적용 및 분석

본 연구에서는 비교알고리즘과의 비교분석을 통하여 제안된 모형의 성능을 검증하였다. 비교알고리즘으로는 체계적인 급유계획을 시행하지 않는 경우를 가정한 급유 전략으로서 출발공항에서 해당 항공편 운항에 필요한 최소 연료량만 급유하는 전략이다.



<그림 1> 공항별 급유비용

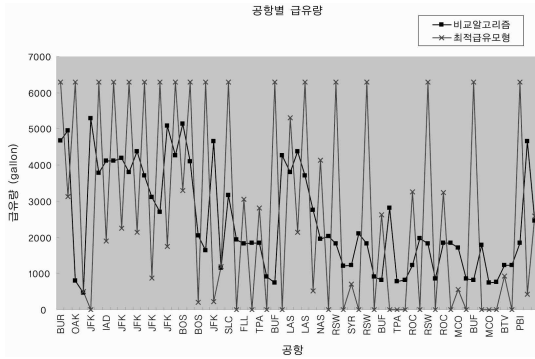
<표 1> 실험 파라미터

항공기	A320
최대이륙중량(lb)	162000
최대착륙중량(lb)	142200
운용자중중량(lb)	90400
탱크용량(gal)	6300
무게 · 시간 당 연료소비량(gal/hour/lb)	0.00526
승객정원(명)	156
탑승률(%)	80
중량변환계수	6.84

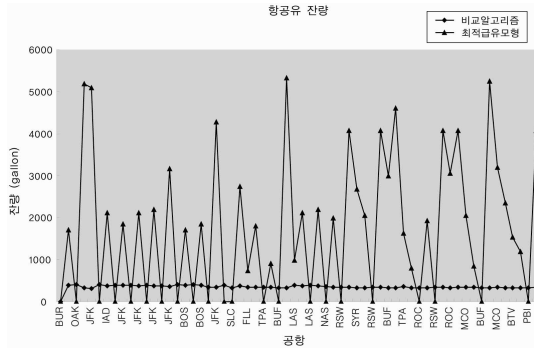
비교분석을 위하여 본 연구에서 제안된 모형과 비교알고리즘을 복미 저가항공사인 J항공사의 실제 운항데이터에 적용하였다. J항공사의 운항 네트워크는 Hub-and-Spoke 네트워크 형태와 점대점 네트워크 형태의 중간 형태를 띠는 구조를 가지고 있다. 즉, 허브공항이 존재하지만 허브주기가 전통적인 Hub-and-Spoke 구조와 비교하여 비교적 긴 형태의 운항 네트워크 구조이다. 운항 데이터는 항공기 1기가 62개의 항공편을 운항하고 있으며 운항도시는 18개로 이루어져 있다. 운항도시의 최대급유비용은 갤런 당 \$2.78, 최소급유비용은 \$1로서 평균급유비용은 \$2.22이다. <그림 1>은 예제 문제의 운항공항 순서별 급유비용을 보여준다.

운항공항 간 평균 운항소요시간은 약 3시간 20분으로 전형적인 저가항공사의 운항 네트워크 형태를 갖는다고 볼 수 있다. 운항 항공기는 에어버스의 A320 기종으로 최대 탑승인원은 156석이며 중소형급 항공기이다. 실험에서 가정한 파라미터는 표 1과 같다. 실험 문제의 모형 정립결과 변수는 125개, 제약식의 수는 311개가 생성되었다. 실험은 ILOG사의 최적화 소프트웨어인 CPLEX 10.1을 사용하였고 Pentium 2.40GHz PC에서 수행되었다.

<그림 2>와 <표 2>는 각각 공항별 최적 급유량과 총 급유량을 비교알고리즘과 비교하여 보여주고 있다. 제안된 모형에 의해 얻어진 공항별 급유량은 비교알고리즘과



<그림 2> 공항별 급유량



<그림 3> 항공유 잔량

<표 2> 공항별 총 급유량

공항	단위당 급유비용(\$)	비교알고리즘	최적급유모형
JFK	2.78	67554.68	13450.44
BOS	2.75	7188.32	3505.64
IAD	2.67	4119.48	1902.38
SYR	2.50	1219.70	705.65
MCO	2.41	4080.94	6857.22
LAS	2.25	15003.93	24214.17
NAS	2.20	1947.34	4133.96
DEN	2.02	2690.19	6300.00
BTV	1.74	1228.16	939.12
LGB	1.71	14088.21	20591.91
TPA	1.64	2611.49	2803.89
ROC	1.64	3078.94	6491.96
FLL	1.49	1831.86	3046.00
PBI	1.38	1845.43	6300.00
OAK	1.34	4568.77	12600.00
BUR	1.27	4664.15	6300.00
RSW	1.05	5492.04	18900.00
SLC	1.00	3158.85	6300.00

비교하여 많은 편차를 보여주고 있다. 이러한 이유는 제안된 모형이 공항별 급유비용의 차이에서 오는 정보를 잘 활용하고 있다는 것을 보여준다. 즉, 급유비용이 상대적으로 높은 공항은 급유를 줄이면서 낮은 공항에서 급유량을 높이는 전략이다. <그림 3>은 공항별 항공유 잔량을 나타낸다. 제안된 모형은 비교알고리즘과 비교하여 상대적으로 높은 잔량을 유지한다.

<표 3>은 제안된 최적 급유모형의 성능을 보여준다. 개선률은 비교알고리즘에 대한 최적모형 수치의 우수성을 의미하고 (c)={((a)-(b)/(a))×100(%)에 의해 얻어진 값이다. 제안된 모형은 <표 3>과 같이 최적 급유전략을 사용하지 않는 비교알고리즘과 비교하여 급유비용 면에서 약 19.35%의 감소를 보였다. 이는 실제 대다수의

<표 3> 최적 급유모형의 성능

	비교 알고리즘(a)	최적모형(b)	개선률(c)
평균 급유량	2463.17	2589.70	-5.14%
총 급유량	152716.44	160567.71	-5.14%
평균 잔량	349.80	1718.83	-391.38%
총 잔량	21687.42	106567.71	-391.38%
평균 급유비용	5659.37	4564.44	19.35%
총 급유비용	350881.05	282995.26	19.35%

항공사가 다수의 항공기를 동시에 운영하기 때문에 급유비용 감소의 효과는 더욱 높을 거라 판단된다. 흥미로운 사실은 제안된 모형의 급유량과 잔량은 비교알고리즘에 비해 높은 수치를 보임에도 불구하고 급유비용은 더 낮다는 사실이다. 또한, 항공유 잔량은 제안된 모형에서 더욱 높게 나타나는데 이 이유는 제안된 모형이 총 급유비용 최소화 목적이므로 급유비용이 상대적으로 낮은 공항에서 많은 항공유를 급유하기 때문이다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 항공기 운항에 있어 운항공항별로 상이한 급유비용을 가정하고 총 유류비용의 최소화를 목적으로 하는 항공기 급유 최적화 모형을 다루었다. 그리고 제안된 모형을 실제 운항데이터를 대상으로 적용 분석하였다. 모형의 성능은 체계적인 급유계획을 시행하지 않는 경우를 가정한 급유전략과 비교하여 월등한 비용절감 효과를 보여주었고, 향후 실제 문제에 적용 시 더욱 많은 비용감소가 기대된다. 따라서 제안된 모형은 많은 항공사들의 유류비용 감소를 위한 전략으로 그 의미가 매우 크다고 판단된다.

향후 연구방향으로서 첫째, 항공편 별로 정확한 연료

소비량의 예측방법이나 이에 필요한 데이터 확보에 대한 연구가 필요하다. 그 이유는 정확한 연료소비량의 예측은 매우 중요한 요소로서 좋은 해의 도출에 큰 영향을 미치기 때문이다. 둘째, 제안된 모형에 다양한 추가제약을 고려하는 경우도 매우 중요한 연구주제가 될 것이다. 가능한 추가제약으로 급유량의 정수 제약의 추가, 수량할인 정책, 그리고 운항공항의 급유용량의 한계 제약 등이 고려될 수 있다. 셋째, 제안된 모형의 현실적인 적용에 있어 실시간 의사결정 지원시스템의 구축은 더욱 많은 비용감소 효과가 지속적으로 가능할 것이며, 이는 항공사의 전사적이고 체계적인 유류관리시스템에 매우 중요한 역할을 할 것이라고 판단된다. 마지막으로, 본 연구에서 제안된 모형은 항공기를 대상으로 하였으나, 향후 일 반차량, 대중 교통시스템, 그리고 화물 수송을 목적으로 하는 대형 물류/수송 시스템의 유류관리에 대한 적용도 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김민정·김제철(2006) “항공운송산업의 비용구조 분석(밀도, 규모 및 범위의 경제성 도출을 중심으로)”, 대한교통학회지 제24권 3호, p.143~153.
2. 김준혁(2008) “항공기 운항계획에 관한 연구”, 로지스틱스 연구 제16권 제2호, p.27~48.
3. 박용화·김성영·김종엽(2006) “허브공항의 환승연계성 분석연구(인천국제공항을 대상으로)”, 대한교통학회지 제24권 6호, p.75~85.
4. 하현구·오세훈(2006) “AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용한 항공여객의 항공사 선택속성 분석(국내선을 중심으로)”, 대한교통학회지 제24권 3

- 호, p.133~142.
5. 항공정보포털시스템, www.airportal.co.kr
6. 홍석진(2004) “항공화물 부문과 항공사 효율성에 관한 연구 (자료포락분석(DEA) 모형의 이용)”, 대한교통학회지 제 22권 3호, p.17~26.
7. American Airlines (2005), “American Airlines Flagship News”, vol. 63. p.1~3.
8. Abdelghany, K., Abdelghany, A., Raina, S. (2005) “A model for the airlines’ fuel management strategies”, Journal of Air Transport Management, vol. 11, pp.199~206.
9. Diaz, A. (1990) “A network approach to airline fuel allocation problems”, Annuals of the Society of Logistics Engineering, vol. 2, p.39~54.
10. Kim, J. (2005a) “Recent Advances in airline fuel management strategies”, Internal Report, Navitaire, Austin, TX.
11. Kim, J. (2005b) “An Agent-based Model for Airline Evolution, Competition, and Airport Congestion”, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, VA.
12. Morrell, P., Swan, W. (2006) “Airline Jet Fuel Hedging: Theory and Practice”, Transport Reviews, vol. 26(6), p.713~730.
13. Stroup, J.S., Wollmer, R.D. (1992) “A fuel management model for the airline industry”, Operations Research, vol. 40(2), p.229~237.

✉ 주 작 성 자 : 김준혁  
 ✉ 교 신 저 자 : 김준혁  
 ✉ 논문투고일 : 2008. 11. 20  
 ✉ 논문심사일 : 2009. 1. 17 (1차)  
                   2009. 4. 8 (2차)  
 ✉ 심사판정일 : 2009. 4. 8  
 ✉ 반론접수기한 : 2009. 10. 31  
 ✉ 3인 익명 심사필  
 ✉ 1인 abstract 교정필