

단거리 운항에서 로스터링을 위한 효율적인 패턴 생성 Efficient Pattern Creation of Rostering in Short-haul Routes

이주호, 조영래, 이영훈

연세대학교 정보산업공학과
서울특별시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 공과대학 정보산업공학과
Fax : 02-364-7807, E-mail : ise1999@yonsei.ac.kr

Abstract

항공기 운항 승무원의 로스터링 문제에서 패턴 생성은 승무원의 효율적인 운항스케줄 생성에 가장 중요한 부분이다. 본 연구는 패턴 생성을 다음의 두 단계로 진행한다. 먼저, 단위운항구간의 특성을 고려하여 특정 단위운항구간에 대한 부분 집합 패턴을 생성한다. 그리고 생성된 패턴을 제외한 단위운항구간의 집합에 대해서 목적함수의 가중치와 비용함수를 적절히 적용한 집합 분할 모형을 사용하여 부분 최적해 집합을 구하였다. 결과적으로, 항공 운항 승무원의 로스터링을 위한 성능이 우수한 실행 가능한 패턴을 생성하였다.

1. 서론

현대에 이르러 산업의 발달과 경제적 수준의 향상은 국가 간의 무역확대뿐만 아니라 기술 및 문화의 교류 또한 증진시켜왔다. 이러한 추세와 더불어 항공 산업은 눈부시게 발전을 하고 있다. 지난 수년간, 항공 산업의 성장률은 세계의 GDP 성장률보다 꾸준히 더 빠르게 성장하고 있다. 특히, 미국이나 유럽에 비해 아시아 항공 산업은 꾸준히 빠르게 성장하고 있다. 이러한 성장은 아시아 국가들의 높은 경쟁성장에 따른 항공 이용객들의 증가에 따른다. 뿐만 아니라, 동북·동남아시아권의 교류의 증가 등으로 인해 단거리 운항에 특화된 제주항공사와 같은 중소 항공사들이 설립되고 있다.

그러나 이러한 성장에도 불구하고, 유가 상승 및 항공사들의 심화된 경쟁 등으로 인해 많은 항공사들은 재정적 문제에 직면해 있다. 항공사들은 합병과 구조조정을 통해 경쟁에서 살아남으려 하지만, 이보다 많은 항공사들이 사라져가고 있다. 이에 따라 항공사들은 원가를 절감함으로써 상대적인 경쟁력을 확보하기 위해 노력하고 있다. 운항승무원에 소용되는 비용은 총 항공기 운영비용의 약 15%를 차지하는 중요한 요인이다. 따라서 운항승무원 비용을 줄이

는 것은 기업경쟁력을 높일 수 있는 기회를 제공한다. 운항승무원 비용은 비행과 직접 관계되는 비용뿐만 아니라 연결되는 승무를 위한 대기비용도 포함된다. 효율적인 운항승무원의 운용은 불필요한 대기시간을 줄여 부대비용을 줄일 수 있어야 한다.

운항 승무원 일정계획(Crew Scheduling)은 크게 패턴생성 단계와 생성된 패턴을 할당하는 로스터링 단계로 구성된다. 패턴생성은 이미 작성된 항공기 운항 스케줄에 따라 운항승무원이 연속해서 탑승할 수 있는 운항계획을 세우는 것이다. 일정한 조건에 부합하는 운항 스케줄, 즉 단위운항구간들을 이용하여 서울/부산/서울, 서울/제주/부산/제주/서울과 같은 일련의 패턴을 만드는 것이라고 볼 수 있다. 패턴 생성은 운항시간표 상의 모든 단위운항구간을 만족시키면서 승무원의 체류비용을 최소화 할 수 있도록 구성되어야 한다. 2개 이상의 단위운항구간으로 구성된 패턴에는 승무원들이 모기지가 아닌 타공항에서 대기하거나 숙박하는 비용이 발생한다.

로스터링이란 생성된 패턴을 이용하여 승무원(기장 또는 부기장)에 할당이다. 규정에 제시되어 있는 승무원의 총 허용 근무시간/운항 시간, 휴식시간, 정기 휴가, 병가, 교육, 의료검진 등 안전한 운항을 위해 규정된 모든 법규를 만족하면서 운항시간을 공평하게 배정하고 전체 승무원의 근무에 대한 만족도를 최대화 하도록 구성되어야 한다.

본 연구에서는 운항승무원 계획의 패턴 생성 단계에 대한 연구를 통해 실행가능한 성능이 우수한 해를 구하는 방법을 제시한다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 운항승무원 일정계획에 대한 기존의 연구에 대해 살펴보고, 3절에서는 문제정의 및 패턴생성 방법을 제시한다. 4절에서는 실험을 통한 결과를 분석한다. 마지막으로 5절에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구 계획을 제시한다.

2. 기존연구

운항 승무원 일정계획은 패턴 생성과 로스터링으로 구분된다. 패턴생성 문제의 경우 일반적으로 최적화 기법으로 시도되어 발견적 기법과 병행하여 실용적인 해를 구한 방법으로 Rubin(1973)은 분해기법

을 사용하였고, Gerbracht(1978)는 라그랑지안 방법과 분지한계법에 기초를 둔 해법을 사용하였다. Kilbor et al(2000)은 제약조건식(Constraint Programming)을 사용하여 빠른 시간 내에 성능이 우수한 해를 구하는 방법을 제안했고, Lagerholm(2000)은 불확실한 위상(Non-trivial topology)을 가진 최적화 문제를 풀기 위해 신경망 네트워크(Potts Neural Networks)를 제안하여 이 네트워크 범위 안에서 성능이 우수한 해를 구하는 방법을 제시하였다. 일반적으로 가장 널리 사용된 기법은 행 생성(Column Generation) 방법을 응용한 해법으로 Lavoie et al.(1998)과 Crainic and Roussau(1987) 등이 있다. Chu et al(1997)은 행 생성시 그래프를 응용한 발견적 기법을 사용하여 가장 좋은 행을 선택함으로써 효율성을 제고한 해법을 제시하였고, Abramson et al.(1996)은 SPP와 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 기법을 결합한 해법을 제시하였다. Yan et al(2002)은 집합 분할 모형(Set Partitioning Problem, SPP)에 대해 행 생성방법을 응용하여, 타이완 항공사에서 사용하는 실제 조건을 바탕으로 최단거리법을 사용하여 효율적인 해를 제시하였다. Shaw Ching Chang(2002)은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)에 응용하여 단거리 비행의 최적화에 대해 다양한 실험 방법을 제시하였다. Mercier(2005)는 분해 모형(Benders Decomposition Methods)을 사용하여 패턴 생성 및 비행기 라우트 문제(Aircraft Routing Problem)를 풀었고, Yufeng Guo et al(2005)은 일주일 단위로 패턴 생성을 한 후, 이를 개별 승무원들에게 할당하는 두 단계 방법으로 해를 구하는 방법을 제안하였다. Sydney C. K. Chu(1998)은 홍콩 경전철의 실제 데이터를 가지고 승무원할당문제를 모델링하고 적용시켜보았다.

이 연구에서는 다른 연구와 구별되는 네 가지 특징을 가지고 있다. 첫째, 단위 운항 구간의 특성을 고려하여 성능이 우수한 실행가능한 해를 구하는 방법을 제시하였다. 그 결과, 성능이 우수한 전체 패턴을 생성할 수 있다. 둘째, 이 연구에서는 기존의 논문에서 사용한 SCP를 사용했다는 점에서 동일하나, 여러 가지 가중치를 고려한 비용함수를 사용하여 가중치의 변화에 따른 결과의 차이를 볼 수 있다. 셋째, 실패데이터를 이용하여 실제 패턴을 생성하여 보았다는 점에서 기존 연구와 구별된다고 본다. 넷째, 국내의 실정을 반영하여 국내선과 3시간 이내의 운항 시간을 갖는 국제선에 대해 실험을 실시했다는 점에서 다른 연구와 차별된다.

3. 문제 정의 및 패턴 생성

3.1. 문제정의

본 연구에서는 국내선 및 3시간 이내의 운항 시간을 갖는 국제선을 가지고 운항승무원 일정계획의 패턴생성을 하였다. 운항승무원 일정계획에서 사용되는 용어는 다음과 같다.

■단위운항구간(Leg): 항공기가 공항을 이륙하여 동일 공항이 아닌 타 공항에 착륙시 그 운항구간을 단위운항 구간이라 한다.

■패턴(Pattern): 1주일 단위로 반복되는 운항 계획상의 모든 단위운항 구간들 중 승무 규정을 충족시키면서 일정기간 동안 운항하도록 하기 위하여 모기지를 출발하여 모기지로 돌아오기까지의 운항계획상 구성한 일련의 단위운항구간들의 조합을 말한다.

■승무시간(Flight Time): 운항승무원이 항공기에 탑승하여 비행 임무를 수행하는 시간이다.

■대기시간(Waiting Time): 운항승무원이 승무를 마치고, 다음 승무를 위해 대기하는 시간이다.

■근무시간(Working Time): 운항승무원이 회사업무에 종사하는 시간을 말한다.

■편승시간(Deadhead Time): 운항승무원이 다음 승무를 위해 또는 승무를 마치고, 공항과 공항 간을 항공기에 편승하여 운송되는 비임무 이동시간을 말한다.

■레이오버가중치(Layover Weight): 레이오버가 발생할 경우, 비용처리를 위해 만든 가중치이다.

■편승가중치(Deadhead Weight): 편승시간이 발생할 경우, 비용처리를 위해 만든 가중치이다.

패턴 선택을 위해 최근에 가장 많이 쓰이는 방법은 SPP와 집합 할당 모형(Set Covering Problem, SCP)이다. SPP에서 단위운항구간은 모든 패턴에서 한번만 선택되어진다. 즉, 편승시간이 발생하지 않는다. 편승시간이 발생했다는 의미는 하나의 단위운항구간이 두 개 이상의 패턴에 선택된다는 것을 의미한다. 편승 시간을 허락하지 않는 경우, 조건을 만족하는 결과 값이 도출되지 않는 경우가 발생하는데, 이 경우 편승 시간을 허락하는 SCP로 조건을 이완하여 문제를 해결할 수 있다. 다음은 패턴 선택을 위한 SCP Formulation이다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_i C_i X_i + \beta \times \sum_j \sum_k A_{jk} X_k \\ \text{s.t. } & 1 \leq \sum_i A_{ij} X_i \leq 2 \quad \forall j \\ & X_i = 0 \text{ or } 1 \quad \forall i \end{aligned}$$

위 모형에서 i 는 승무경로, j 는 단위운항구간을 나타낸다. A 는 0과 1을 나타내는 인덱스 값으로 패턴 i 가 단위운항구간 j 를 포함하고 있으면 1, 그렇지 않으면 0을 의미한다. 따라서 위 모형은 선택된 단위운항구간 j 에 대해 X 의 값이 1을 가지게 되는 형태의 해를 구할 수 있다. β 는 편승가중치이며, C_i 는 아래 식과 같이 대기시간에 α (레이오버가중치)를 고려한 체류비용을 나타낸다.

$$\begin{aligned} C_i &= \text{Waiting Time} + \alpha \times \text{Layover} \\ \text{Layover} &= 1 \text{ or } 0 \end{aligned}$$

목적함수는, C_i 에서 레이오버를 줄이고 β 값으로 편승횟수를 최소화하는, 선택된 패턴의 비용을 최소화하는 식이다. 이는 비록 편승을 최소화하지는 못하지만, 생성된 모든 단위운항구간의 수가 줄어든다는 것은 중복된 단위운항구간의 수가 줄어든다는 것을 의미하므로 결과적으로 편승횟수가 줄어든다. 즉, 운항 규정 및 회사규정을 고려한 체류비용을 최소화하기 위한 승무경로를 만드는 과정이라고 볼 수 있다.

3.2. 패턴생성

패턴 생성은 일정한 조건에 부합하는 일렬의 단위운항구간의 집합을 구하는 것이다. 다음은 패턴 생성에 필요한 제약사항이다.

1. 승무원의 모기지는 김포 및 인천이다.
2. 모든 패턴은 모기지에서 출발하여 모기지로 돌아온다.
3. 하루 동안 착륙회수는 총 5회를 넘지 않는다.
4. 승무원이 다음 비행을 하기 위해서는 최소 30분이상의 휴식을 취해야 한다.

위의 제약사항을 만족하면서 모든 단위운항구간을 포함하는 패턴을 생성하여야 한다.

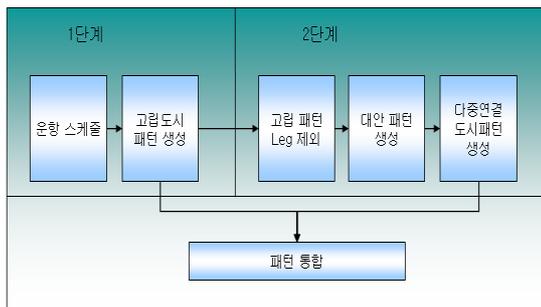


Figure 1. 패턴생성

패턴생성을 <Figure 1>과 같이 2단계로 진행한다. 1단계에서 단위운항구간의 특성을 고려하여 특정 단위운항구간에 대한 부분 집합 패턴을 생성한다.(고립도시 패턴) 2단계에서는 생성된 패턴을 제외한 단위운항구간의 집합에 대해서 2·3·4·5개의 단위운항구간을 연결한 가능한 모든 패턴을 생성하여 SPP를 통하여 최적해를 구한다.(다중연결도시 패턴) 1,2단계에서 생성된 패턴을 통합하여 전체 패턴을 생성한다.

3.2.1. 고립도시 패턴생성

본 연구에서는 효율적인 패턴 생성을 위해 단위운항구간의 특성을 분석했다. 각 도시를 아래 <Figure 2>와 같이 다중연결도시, 지방고립도시, 모기지 고립도시 3가지로 분류하였다.

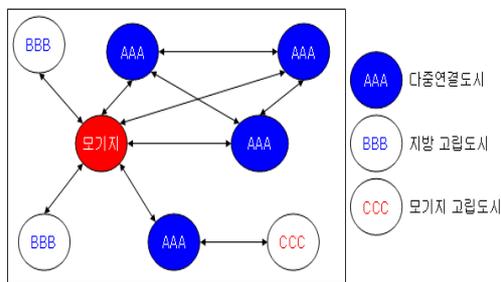


Figure 2. 도시의 특성

고립도시는 각 도시에 연결된 타도시가 단 하나 존재하는 경우를 말한다. 고립도시에는 지방 고립도시와 모기지 고립도시가 있다. 이러한 고립도시를 포함한 패턴은 고립도시 패턴(Isolated Pattern)이라 한다.

지방 고립도시는 모기지외의 도시에는 연결되지 않고 오직 모기지에만 연결된 도시를 나타낸다. 지방 고립도시는 모기지에서 지방 고립도시로 가는 단위운항구간과 다시 모기지로 돌아오는 단위운항구간의 조합으로만 패턴이 생성되어진다.

반면, 모기지 고립도시는 다중연결도시 한곳과만 연결된 도시를 의미한다. 모기지 고립도시는, 모기지에서 다중 연결도시로 운항한 후 모기지 고립도시로 운항하고 다시 돌아 나와 모기지로 돌아가는 패턴이 생성될 것이다. 이렇게 모기지 고립도시에서는 4개의 단위운항구간으로 이루어진 패턴이 생성된다.

고립도시를 운항하는 단위운항구간에 대해 다음과 같은 절차로 지방 고립도시 패턴, 모기지 고립도시 패턴을 생성한다.

- ① 조건을 만족하는 모든 패턴을 생성한다.
- ② 먼저 출발하는 단위운항구간부터, 비용함수가 가장 작으면서 선택되어지지 않은 단위운항구간으로 연결된 패턴을 선택한다.
- ③ 고립도시로 운항하는 모든 단위운항구간이 선택될 때까지 ②를 반복한다.

이렇게 고립도시 패턴을 생성하여 단위운항구간을 줄여줌으로서 빠른 시간에 다중연결도시 패턴을 생성할 수 있도록 한다.

3.2.2. 다중연결도시 패턴생성

고립도시 패턴에서 운항되어진 단위운항구간을 제외한 나머지 단위운항구간으로 패턴을 생성한다. <Figure 2>에서 다중 연결도시는 모기지뿐만 아니라, 하나 이상의 지방도시와 연결된 도시를 나타낸다. 다중 연결도시는 여러 가지 패턴이 생성될 수 있다. 이에 모기지와 다중연결도시를 연결하여, 2·3·4·5개의 단위운항구간을 연결된 가능한 모든 패턴을 생성한다.(대안패턴) 생성된 대안패턴의 비용함수를 고려하여 SCP로 최소의 비용을 갖는 패턴의 집합을 다중연결도시 패턴으로 생성한다.

이렇게 생성되어진 고립도시 패턴과 다중연결도시 패턴을 통합하여 전체 패턴을 결정할 수 있을 것이다.

4. 실험 및 실험결과

실험에는 현재 국내에서 운영되는 A사의 실제 2003년 하계 운항 스케줄 중, B737기를 운항하는 국내선 및 3시간 이내의 운항 시간을 갖는 국제선 1189개의 일주일 스케줄을 사용하였다. 또한 JAVA와 ILOG사의 OPL Studio를 사용하였다.

고립도시 패턴과 다중연결도시 패턴의 실험에서 α (레이오버가중치)는 1000으로 설정하였다. β (편승가중치)는 고립도시 패턴에서는 편승이 발생하지 않아 고려되지 않았고, 다중연결도시 패턴에서는 여러 가지 변화를 주어가며 실험을 하였다.

<Table 1>, <Table 2>에서 평균대기시간은 시간을 백분위한 것을 의미한다. 예를 들어 2.5는 2시간 30분을 의미한다.

4.1 고립도시 패턴

고립도시 패턴은 총 207개의 패턴이 생성되었다. <Table 1>은 단위운항구간의 특성을 나타낸 고립도시 패턴의 결과이다.

패턴	패턴수	편승 횟수	레이오버 횟수	평균대기시간 (시간)
지방	175	0	17	0.548
모기지	32	0	2	2.187
합	207	0	19	0.801

[Table 1] 고립도시 패턴
 (지방 : 지방 고립도시 패턴,
 모기지 : 모기지 고립도시 패턴)

<Table 1>에서 보듯이 고립도시 패턴은 편승이 발생하지 않고 레이오버만 발생한다. 오전에 모기지로 귀환하는 단위운항구간을 운항하기 위해서는 그 전날 출발도시로 운항하는 단위운항구간과 연결되어야 하기 때문에 레이오버가 발생한다. 지방 고립도시 패턴은 2개의 단위운항구간으로 연결된 패턴이고, 모기지 고립도시 패턴은 4개의 단위운항구간으로 연결되므로 고립도시 패턴에서 총 478개의 단위운항구간이 사용되어 졌다.

4.2 다중연결도시 패턴

고립도시 패턴에서 운항된 단위운항구간을 제외하여 다중연결도시패턴에 사용될 단위운항구간이 1189개에서 711개로 줄어들어, 대안패턴의 개수가 6843개에서 3704개로 줄어들었다. 그 결과, ILOG사의 OPL Studio을 사용하여 최적해를 구할 때 적절한 시간 안에 결과가 도출되었다. 유사한 결과를 아주 빠른 시간에 해를 구하였다는 것에 큰 의의가 있다고 하겠다. 다중연결도시 패턴은 편승을 허용하지 않을 경우, SPP로는 문제의 해를 일정 시간 내에 구할 수 없는 경우가 다수 존재한다. 그러므로 목적함수에 편승을 최소화하기 위한 식을 추가하고 제약식을 보완한 SCP로 문제를 풀었다.

실험	패턴수	편승 횟수	레이오버 횟수	평균대기 시간 (시간)	계산 시간
1	296	17	57	0.880	561.63
2	295	16	58	0.879	537.45
3	292	9	67	1.073	513.36

[Table 2] 다중연결도시 패턴
 (실험 1 : $a > \beta$,
 실험 2 : $a = \beta$,
 실험 3 : $a < \beta$)

<Table 2>는 레이오버가중치와 편승가중치를 조정하여 선택된 다중연결도시 패턴의 결과이다. 실험 1,2,3에서 동일하게 a 는 1000으로 설정하고, β 는 각각 500, 1000, 5000으로 설정하고 실험을 진행하였다.

대안 패턴이 3704개 생성되었지만, 최적화를 통해 각각 296, 295, 292개의 다중연결도시 패턴이 생성되었다. 레이오버가중치가 편승가중치보다 크거나(실험1) 같을 때(실험2)는 편승횟수가 늘어난 대신 레이오버가 줄어든 반면, 레이오버가중치가 편승가중

치보다 작을 때(실험3)는 편승횟수가 줄어들고 레이오버횟수가 늘어나는 결과를 보인다. 편승과 레이오버 비용의 관계에 따라 가중치를 조절함으로써 좋은 결과를 구할 수 있을 것이다.

실험 1,2,3중 원하는 결과를 가지는 패턴과 고립도시 패턴을 통합하면 전체 패턴이 결정되어질 것이다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구는 단위 운항구간의 특성을 고려하여 최적화 기법을 응용하여 단거리운항에서 효율적인 로스터링을 위한 패턴을 생성했다는데 의미가 있다. 기존의 연구들이 모든 가능한 패턴을 생성한 후 최적화 기법을 사용한다에 비해, 본 연구에서는 단위운항구간의 특성을 나타낸 패턴을 생성한 후, 나머지 부분 집합 패턴을 가지고 최적화 기법을 적용하였다. 그 결과 문제의 크기를 줄여 단시간에 실행 가능한 우수한 성능을 갖는 패턴을 생성했다. 또한, 패턴생성 과정에서 SCP모형을 도입함으로써 실용적인 해의 도출 및 최적화 접근의 두 가지 방향의 상충적인 문제를 해결했다.

다음연구에는 생성된 패턴을 가지고 운항 승무원에게 균등하게 할당하는 로스터링을 실행하여 운항 승무원 일정계획에 대한 총체적인 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 실제로 생성된 패턴을 적용하기 위해서는 정량화되지 못한 수많은 제약조건을 추가한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Abramson, D., H. Dang and M. Krishnamoorthy, 1996, A comparison of two methods for solving 0-1 integer programs using a general purpose simulated annealing algorithm
- [2] Anne Mercier etc, 2005, A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem
- [3] Chu, H.D. etc, 1997, Solving large scale crew scheduling problem
- [4] Coleman, W.S.,1997, Statement of the President of the Regional Airline Association, before the National Civil Aviation Review Commission, U.S.A.
- [5] Crainic, T.G. and J. Roussau, 1987, The column generation principle and airline crews
- [6] Erik Kilbor, 2000, Aircraft Scheduling and Operation a Constraint Programming Approach
- [7] Gerbracht, R., 1978, A new algorithm for very large crew pairing problems
- [8] Kim and Lee, 2001, Cockpit Crew Scheduling using Set Partitioning Problem
- [9] Lavoie, S., M. Minoux and E. Odier, 1988, A new approach for crew pairing problem by column generation with and application to air transportation
- [10] Martin Lagerholm etc, 2000, Airline crew scheduling using Potts mean field techniques

2005 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회
2005년 5월 13일 ~ 14일, 충북대학교

- [11] Rubin. J., A technique for the solution of massive set covering problems, with application to air crew scheduling
- [12] Shaw Ching Chang,, 2002, A new aircrew-scheduling model for short-haul routes
- [13] S. Yan etc, 2002, Optimal construction of airline individual crew pairings
- [14] Sydney C. K. Chu etc, 1998, Crew scheduling of light rail transit in hong kong: from modeling to implementation
- [15] Yufeng Guo etc, 2005, A partially integrated airline crew scheduling approach with time-dependent crew capacities and multiple home bases