

승무원 교번 작성에 관한 연구

A study on the crew roster scheduling

김영훈*
Kim, Young-Hoon

김지표**
Kim, Ji-Pyo

ABSTRACT

The crew operation scheduling problem is divided into duty generation and duty allocation. The railway crew roster scheduling(duty allocation) is developed monthly for each crew's office, considering the car types and crew's driving ability. However, it is very difficult to make schedules which assign monthly working hours to each crew evenly.

The purpose of this thesis is to minimize the differences between each crew's total duty times and make a rostering table. To minimize the differences among monthly working hours of each crews are grouped according to car type and crew's driving ability and a rostering table which could be shared by the group members is developed.

Our approach is to apply the techniques of Constraint Programming in order to solve such problems efficiently. This algorithm is suitable to solve optimization problems which involve many complicated constraints. And including the concept of cost, we suggested the model which enable to make the rostering table with a minimum personnel.

1. 서론

항공, 철도, 버스 등과 같은 대중 교통 수단의 운행 계획 수립은 일반적으로 교통 매체의 운행노선과 운행을 담당하는 승무원에 대한 계획으로 나눌 수 있다. 일단 운행 노선이 결정되면, 노선에 따른 승무원 계획이 작성된다. 승무원 계획은 다시 승무사업계획(crew scheduling)과 승무교번계획(crew rostering)으로 나누어진다. 승무사업계획은 각 노선에 대한 출발시간 및 귀환 시간을 포함한 구체적인 승무행로에 대한 일정계획이며, 승무교번계획은 일정기간동안 각 승무원들이 수행해야 할 사업 순서에 대한 계획이다. 일반적으로 승무사업계획이 결정된 후 교번계획이 작성이 된다.

본 연구는 철도운행을 위해 이미 작성된 승무사업표를 바탕으로 일정 기간동안에 승무원이 수행해야 할 사업의 순서 결정에 대한 문제를 다루고 있다. 철도운영 문제 중에서 열차와 승무원의 스케줄링 업무는 가장 핵심적인 계획업무로 효율적인 철도 운영에 지대한 영향을 미치고 있다. 특히 승무 교번 계획문제는 노동조약 및 운행규약과 같은 복잡한 제약조건 때문에 실용적인 해를 얻기 힘들고, 폭발적인 조합 수를 고려해야 하기 때문에 어려운 문제로 인식되고 있다.

본 연구에서는 현재 우리 나라 철도청의 승무원 사무소에서 행해지고 있는 승무 교번계획 현황을 분석하고 이에 따라 각 승무원 사무소에서 작성되는 승무원 교번조건의 사업시간의 차를 최소화시키기 위한 알고리즘을 제약기법을 활용한 툴을 사용하여 프로그램 하였다. 또한 비용개념을 추가하여 최소한의 인원으로 승무사업을 수행하기 위한 모형을 제시하였다.

* 한국철도기술연구원, 주임연구원

** 서울산업대학교 산업공학과 교수

2. 승무원 교번표 작성

2.1 승무 교번표 작성 절차의 분석

일반적으로 열차 및 승무원 운용을 위해서는 여객의 수송통계를 기초로 수송기본계획이 우선적으로 수립된다. 이 계획을 바탕으로 열차운행 계획이 작성되며 열차운행에 승무원을 할당하는 업무가 순차적으로 진행된다.

다이아	운행표			사업시간						사업 키로	
				운전	편승	강시	대합	점검	계		
13062 운명 91360- 변3.2 (96.03.25) 시행일 (96.04.01)	용산	청량리	춘천								
	07:28 08:2 K5023 08:2 K5015 0 09:00 (정01-30) 10:30 373 12:07 (감1.23) 13:30 16:50 18:42 (감2.33) 21:15 21:39 K5092 21:39 K5120	08:48 08:40(일,공)	09:00 (정01-30) 10:30 373 12:07 (감1.23) 13:30 16:50 21:19(일,공) 21:19	03:29	00:40	03:56	03:30	02:00	13:35	CDC 건 185.8 회 0.0 일 0.0 계 185.8	

[그림 1] 승무원 사업표의 예

[그림 1]은 용산에서 출무한 승무원이 청량리에서 춘천을 거쳐 다시 용산으로 돌아오는 구체적인 승무행로를 나타내고 있다. 이렇게 작성된 승무사업표는 각 승무원 사무소에 할당되어 진다. 각 승무원 사무소에는 할당받은 승무원사업의 순서를 정하기 위해 승무원 교번표를 아래의 [그림2]와 같은 양식의 교번표를 작성하게 된다. [그림2]의 1번 S는 휴일을 나타내며 2번의 사업은 17:43분에 출근하여 다음날 11:54분에 퇴근하고, 근무시간은 총 18:11분을 근무하여 9:15분을 사업시간으로 인정받게 된다.

이러한 승무원 교번표에 표시된 사업은 같은 조내의 승무원이 공유하게 되며, 한달간 순환하며 사업을 수행하기 때문에 같은 조의 승무원은 근무하는 시간과 사업시간이 동일하게 된다.

	1	2	3	4	5	6	7	...
다이아	S	13086	~	13292	13096	~	13093	..
열차번호		1664-1646		1677-1678	1569-1552		1557-1582	..
출근시간		17:43		07:02	11:01		05:01	..
퇴근시간		11:54		19:54	07:34		19:24	..
근무시간		18:11		12:52	20:38		14:23	..
휴양시간		55:11		19:08	15:07		21:22	..
사업시간		09:15		12:52	12:35		12:57	..
야간근무시간					01:35		00:59	..
주행키로		115.2		178.0	184.0		180.7	..

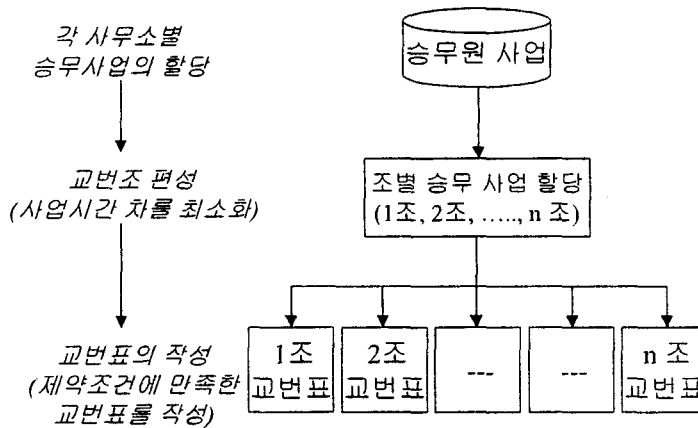
[그림 2] 승무원 사업 교번표의 예

각 승무원 사무소에서는 보통 150개에서 200개정도의 사업을 할당받아서 한 달간의 사업 교번계획을 작성하게 되는데, 각 차종 및 승무원의 운전기량에 따라 조별로 작성이 된다. 만일 조를 나누지 않고 승무원 사무소 당 한 개의 승무원 교번표를 작성하여 승무원이 주어진 사업을 기존의 방식대로 순환하여 수행한다면 한달 동안에 모든 사업이 순환 될 수 없게 되고, 이럴 경우 승무원마다 수행하게 되는 사업시간과 휴양시간이 다르게 되기 때문에 평등한 근무조건을 제공할 수 없게 된다.

현재 승무원 교번표를 작성할 때는 각 조별로 사업시간이 평준화될 수 있도록 작성자의 경험에 의존하여 수작업으로 작성되고 있다. 이러한 작성법은 유연성 제고라는 장점도 있지만 작성자 임의로 교번표가 작성되고 변경될 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 때문에 본 논문에서는 승무사무소에서 작성되는 교번표 작성시의 각 조별 승무사업시간의 차가 최소가 되도록 하는 교번표 작성을 위한 프로그램을 개발하였다.

2.2 문제 해결 절차

본 논문에서는 제기된 문제를 해결하기 위해 아래 [그림3]과 같이 크게 두 단계를 거쳐 문제를 해결하도록 하였다. 첫째, 각 사무소별로 할당받은 사업들을 노선별로 나누어 사업들을 조별로 할당하며, 이때 각 조별 사업시간의 차가 최소화가 되도록 하였다.



[그림 3] 문제 해결 절차

아래의 코드는 조별 사업시간의 차가 최소가 되도록 하는 코드를 나타낸다. 여기서 totalGap이라는 변수를 선언하고, 조의 수인 NbGroup까지 사업과 조를 가진 2차원 배열 x[g]와 사업시간으로 할당된 값 Times를 곱해서 각조별 평균화의 기준시간으로 계산된 stLevel과의 차와 값이 같이 지도록 제약을 부과하였으며, 이러한 알고리즘은 제약만족기법 툴인 ILOG Solver와 C++을 사용하여 프로그래밍 하였다.

```

IlcIntExp totalGap = IlcIntVar(m,0,0);
for(g = 0; g < NbGroup; g++) {
    m.add (IlcScalProd(x[g],Times) + gap[g] == stLevel);
    totalGap = totalGap + IlcAbs(gap[g]);
}
  
```

이와 같은 방법으로 조별 사업시간이 평준화된 이후에는 각조별 사업순서를 결정하기 위해 <표1>과 같은 제약조건을 만족하는 사업순서를 결정하였다. 이러한 사업순서를 결정하기 위해 제약조건

종류를 규정상 반드시 지켜야 하는 hard constraint와 권장사항에 속하는 soft constraint로 나누어 제약을 부여하여 여러 종류의 대안의 해를 얻을 수 있도록 하였다.

<표 1> 승무원 교번표 작성시 적용되는 제약조건

번호	조 건	제약의 종류	제약의 대상
①	1주에 44시간이상 52시간이하의 사업시간을 확보하여야 한다.	soft constraint	사업 시간
②	한 달에 5일 이상의 휴일을 부여한다.	soft constraint	휴 일
③	휴일전의 근무종료시각은 전일 18시 이전으로 한다.	soft constraint	
④	휴일후의 근무개시시각은 아침 8시 30분 이후로 한다.	soft constraint	
⑤	사업이 끝난 승무원은 최소 13시간 이상의 휴양시간을 확보하여야 한다.	hard constraint	휴양시간
⑥	임의의 사업을 종료한 후 다음 사업개시까지의 휴양시간은 이전사업의 근무시간보다 많이 확보하여야 한다.	soft constraint	
⑦	야간근무시간을 2시간이상 포함하는 경우에는 연속하여 야간근무를 하지 않도록 한다.	hard constraint	야간근무시간 (22:00~06:00)
⑧	하루에 2개의 사업을 수행할 수 없다.	hard constraint	사업수행 규칙

사업순서를 결정하게 될 때는 <표1>의 제약조건들이 순서규칙(sequencing rule)으로서 휴양시간, 휴일, 야간근무시간에 대한 제약조건이 주로 사용되었다. 휴일과 관련된 제약조건중 ② 항목은 사용자가 임의대로 휴일의 수를 조정할 수 있도록 하였다. 또한 제약조건 ③, ④ 항목은 휴일전후에 더 많은 휴양시간을 확보할 수 있도록 제약조건을 줄 수 있도록 하였다.

사업 i를 수행하고 난 후 사업 j를 수행하기 위해서는 제약조건 ⑤를 만족하여야 하는데 이러한 제약조건을 코드로 표현하면 다음과 같다.

$$m.add(Day[i]-Day[j] \geq 1 \ \&\& \ 1440*(Day[j]-Day[i]) - duty[i].getEnd() + duty[j].getStart() \geq 780);$$

위의 식은 날짜 Day가 하루이상 차이가 발생할 경우, 선행한 사업의 종료시각(duty[i].getEnd())에서 다음사업의 시작시간(duty[j].getStart())까지의 차가 13시간(780분)이상 차이가 발생해야 한다는 제약식을 표현한 것이다.

3. 모형의 설정

3.1 연구 배경

우리 나라의 승무원 교번표 작성은 비용절감 측면보다는 승무원간 작업량의 형평성위주로 작성되고 있다. 따라서 교번표 작성의 핵심은 승무원 사업소에 할당된 사업을 조별 총 사업시간의 차이가 가능한 최소화 되도록 교번조에 배분하며 조별간의 사업시간의 차등은 곧 임금의 차등이 발생하는 원인이 되므로 조 내에서는 이를 바탕으로 순환이 가능한 교번표를 작성한다.

승무원 스케줄링문제는 철도, 항공, 장거리 노선 버스등과 연관되어 오래 동안 연구가 진행되고 있

는 분야이다. 이 문제는 Balas와 Padberg에 의해 고찰된 것처럼 일반적으로 Set Partitioning Problem(SPP)이나 Set Covering Problem(SCP)과 같은 형식으로 모형화될 수 있다[2]. 그러나 폭발적인 조합 수의 처리문제와 복잡한 제약조건들을 공식화하기 어렵고 대형문제의 경우, 정수계획법으로 정확히 풀기에는 비용과 시간이 많이 소요되어 해를 찾기 위한 방법으로 발전적 기법이 자주 사용되고 있다. 승무원 교번표 작성에 관해서는 Sakaguchi와 Nozue가 제약충족이론과 논리프로그램인 CHIP(Constraint Handling In PROLOG)를 사용하여 승무원 교번표 작성을 시도하였다[4].

현재 국내에서는 승무원 교번표 작성을 지원할 수 있는 시스템으로 KROIS(Korean Railroad Operation Information System)가 있다. 하지만 외국에서 사용되는 승무원 스케줄링 시스템과 같이 승무사업의 생성(Duty generation)과 생성된 승무사업의 교번할당 및 교번작성(Duty allocation and rostering)을 지원하지는 못하고, 승무원 사무소의 승무업무를 지원하는 업무지원 성격이 강한 시스템이다.

철도사업은 국가별, 지역별 특성에 따라서 운행조건 및 규정의 차이가 심하기 때문에 외국의 연구 결과를 그대로 받아들이기에는 한계가 있다. 그러므로 우리 실정에 맞는 승무원 교번표 작성에 대한 체계적인 분석 및 연구가 필요하며, 본 연구는 그 첫 단계로 현재 우리 나라 철도청에서 시행되고 있는 교번표 작성에 대한 분석 및 문제 해결을 위한 모형화를 시도하였다.

3.2 모형의 설정

본 절에서는 교번표 작성 시 목표를 사업시간 균등화와 더불어 사업 수행에 필요한 최소한의 인원으로 교번표를 작성할 수 있도록 하여 비용 개념을 추가하였다. 즉 근무 규정과 같은 제약조건을 만족하면서 조내의 승무원의 사업시간 균등화를 제공하는 사업순서 작성 시 사업수행에 필요한 최소 인원을 구할 수 있도록 모형을 설정하였다.

승무원 교번표 작성 문제를 모형화하기 위해서 네트워크 $G=(V, A)$ 를 정의한다. 여기서 V 는 노드(node)의 집합으로 $V=\{1, 2, \dots, n\}$ 으로 표시되며 A 는 노드와 노드사이를 연결하는 아크(arc)의 집합을 의미한다. 여기서 n 을 할당된 총 사업의 수라고 할 때 아크(i, j)는 사업 i 와 사업 j 를 연결하며 사업 i 다음 사업으로 사업 j 가 지정됨을 의미한다. 따라서 실행 가능한 교번표는 n 개의 노드로 구성된 네트워크로 표현될 수 있으며, 승무원교번표 작성 문제는 모든 노드가 한번씩 사용되고 노드사이에 순서가 존재한다는 면에서 최소비용 tour를 결정하는 TSP(Traveling Salesman Problem)와 동일한 형태를 띠게 된다.

아크(i, j)는 두 개의 값 a_{ij} 와 b_{ij} 를 가지고 있는데 a_{ij} 는 사업 i 의 종료시간과 사업 j 의 시작시간 사이에 필요한 최소한의 휴식시간을 나타내며 b_{ij} 는 사업 i 와 사업 j 사이에 휴일이 포함될 때 사업 i 의 종료시간과 사업 j 의 시작시간 사이에 필요한 최소한의 시간을 나타낸다. 따라서 a_{ij} 와 b_{ij} 값을 계산할 때 <표 1>에 있는 제약조건 중 3, 4, 5, 6, 7번이 고려되어야 한다.

a_{ij} 로 구성된 행렬을 A라고 할 때, A는 두 사업이 교번표 상에서 순차적으로 연결되기 위해 필요한 소요시간을 원소로 가지고 있으며, 이때 $a_{ij}=\infty$ 이다. 마찬가지로 b_{ij} 를 원소로 하며 $b_{ij}=\infty$ 인 행렬 B를 정의할 수 있다.

위와 같은 정의를 바탕으로 승무원 교번표 작성문제를 다음과 같이 0-1 정수계획법(0-1 Integer Linear Programming)으로 모형화 할 수 있다.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}y_{ij} \quad (1)$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} + \sum_{i=1}^n y_{ij} = 1, \quad j=1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} + \sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij} \geq 5 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \bar{S}} (x_{ij} + y_{ij}) \geq 1 \text{ for each } (S, \bar{S}) \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (7)$$

목적함수 (1)은 각조에 할당된 사업 수행에 필요한 시간의 최소화를 목표로 한다. 이는 곧 사업 수행에 필요한 최소한의 승무원 수를 찾는 것과 동일하다. 예를 들어 n개의 사업을 수행하기 위해 k일이 소요가 되면, 이는 곧 해당 조에 최소한 k명이 필요하다는 의미가 되기 때문이다. 또한 (1)에서 a_{ij} 값을 갖는 아크(i, j)가 최적해에 속하면 $x_{ij}=1$ 이고, 아니면 $x_{ij}=0$ 이다. 마찬가지로 b_{ij} 값을 갖는 아크(i, j)가 최적해에 속하면 $y_{ij}=1$ 이고, 아니면 $y_{ij}=0$ 이다.

제약식 (2)와 (3)은 각 노드가 반드시 하나의 인풋과 아웃풋 값을 갖도록 하며 제약식 (4)는 <표1>에서 휴일에 관한 제약조건 2번을 만족시키기 위한 식이다. 제약식 (5)는 subtour의 발생을 방지하기 위한 제약식으로 (S, \bar{S}) 는 $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 의 nontrivial partition을 의미한다.

위 모형은 <표1>의 제약조건에서 1, 8번을 제외하고는 다 포함하고 있다. 이 중에서 1은 권장사항에 속하는 soft constraint이고 반드시 지켜야 하는 hard constraint는 8번이다. 그러나 8번의 경우는 사업이 만들어 질 때 보통 8시간 기준으로 작성되므로 실제 상황에서 거의 발생되지 않는 실정이다. 현재 TSP와 같은 형태를 띠고 있는 위 모형의 해를 위해 CSP(constraint satisfaction programming)을 이용한 휴리스틱 알고리즘이 개발 중에 있다.

4. 결론

현재 수작업으로 진행되고 있는 승무원교번표 작성 업무는 승무원 사업시간 균등화를 주요 목적으로 작성되고 있다. 우리나라의 경우 철도사업이 정부 주도하에 이루어지고 있어 공공적 성격이 매우 강하다. 따라서 승무원 교번표 작성도 경제적인 측면보다 자연히 형평성에 중점을 두고 이루어지고 있는 실정이다. 그러나, 선진국의 경우에서 보듯이 점차 철도 사업도 민영화가 되어 가는 추세이므로 장차 철도 업무 계획시 비용절감이나 수익률 극대화 같은 경제적 원칙이 적용될 가능성을 배제할 수 없다. 그러한 측면에서 본 연구는 승무원 교번표 작성업무를 분석하고 모형화 함으로서 승무원의 사업시간 균등화 및 총작업시간 최소화를 통한 승무원 수 최소화 문제를 살펴보았다.

사업시간 균등화를 위하여 조를 나누고 조별로 작성된 승무원 교번표를 순환하여 사용하는 현 방식은 문제를 2단계로 나누어 단순화시키는 장점은 있으나 조별 사업시간의 차이가 존재하는 한 실질적인 최적해를 얻기는 힘들다. 따라서 승무 사무소 내의 사업시간 균등화의 최적화를 위해서는 조의 구분 없이 사무소에 할당된 사업 전체를 대상으로 모형이 작성되어야 하며 동시에 승무원의 운전 기량 및 경비 절감 문제도 같이 고려되어야 할 것이다. 그밖에 휴양시간의 균등화도 승무원의 근로조건 측면에서 중요한 사항으로 함께 고려될 수 있으며, 또 예기치 못한 사정으로 인하여 불가피하게 일정은 변경해야 할 경우, 손쉽게 교번표 내용을 수정할 수 있는 방안에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

1. Capara, A, Paolo Toth, Daniele Vigo, and M. Fischetti "Modeling and Solving the Crew Rostering Problem", Operation Research, Vol46, No.6, 1998
2. K.Kataoka & K.Komaya : "Crew operation scheduling based on simulated evolution technique" Computers in Railway VI, p277-285, 1998

3. Morgado, Joao P. Martins; "CREWS_NS : Scheduling Train Crew in The Netherlands", AAAI97, p893-902, 1997
4. Takashi SAKAGUCHI, Naotugu NOZUE : "Crew Rostering Scheduling Based on Constraint Logic", RTRI report Vol.10, No. 4, '96.4
5. Robert J. Tykulsker, Katherine K. O'neil, Avishai Ceder, Yossef Sheffi : "Commuter rail crew assignment/work rules model", computer scheduling of public transport 2, 1985.