유전자 알고리즘을 활용한 선로배분 알고리즘 모델링

Railway Capacity Allocation Modeling using Genetic Algorithm

김현승*, 박동주*†, 정인재**

Hyunseung Kim*, Dongjoo Park*†, Injae Jeong**

Abstract Korea railway service has been operated only by Korea Railroad Corporation(Korail). Allocator did not need a railway capacity allocation model when it modifies the train schedules. However, from the end of this year, Suseo Railway(SR) will be one more organization in Korea railway service market. The Korail and SR will independently make a train schedule with no consideration for each other and therefore it is highly likely that there are conflicts between the proposed two train schedules. It needs to develop a railway capacity allocation model in order to modify train schedule where conflicts between two companies's original schedules are solved. This study employs genetic algorithm in order to solve the conflict within proposed train schedules. The objective function of this study is to maximize the number of trains allocated while satisfying basic safety-and railway operation-related constraints. It was found that the developed algorithm gave very promising results in terms of number of allocated trains while satisfying given constraints.

Keywords **:** Railway capacity allocation, Genetic algorithm, Railway capacity, Train schedule, Train timetabling problem

초 록 우리나라는 그동안 단독 철도운영사인 Korail만이 철도서비스를 제공함에 따라 열차운행계획 수립 및 선로배분 절차에 있어 상충이 생길 수 있는 상황이 아니었다. 최근 수서고속철도 운영사의 탄생과 함께 우리나라 최초로 복수의 철도운영사가 존재하게 됨으로써 선로배분절차의 중요성이 커지고 있다. 그러나 아직 국내에서는 복수의 철도운영사가 열차운영계획을 신청하였을 경우 선로배분절차에 의해 합리적이고 공정한 협의안 또는 선로배분 조정안을 도출해내는 알고리즘 및 모형이 없는 상황이다. 본 연구는 철도운영사가 신청한 열차운행계획을 최대로 수용하는 것을 목적함수로 설정하고, 유전자알고리즘을 활용한 철도선로배분 알고리즘 및 수리모형을 개발하였다. 본 연구결과에 의한 선로배분모형으로 국내 철도선로배분 업무의 신속성, 합리성이 증진될 것으로 기대된다.

주요어 : 선로배분, 유전자 알고리즘, 선로용량, 열차다이아, 선로사용권 조정

1. 서 론

우리나라는 철도산업발전기본법 제17조 제2항 및 동법 시행령 제24조에 의하여 국토교통부가 선로배분지침을 수립하고 있다. 선로배분지침에 따라 철도운영사가 신청한 선로사용계획과 철도시설관리자인 한국철도시설공단의 선로작업계획을 고려하여 한국철도시설공단이

† 교신저자: 서울시립대학교 교통공학과(djpark@uos.ac.kr)

* 서울시립대학교 교통공학과

** 한양대학교 산업공학과

선로배분을 집행하고 있다. 우리나라는 2016년 상반기까지는 단독 철도운영사인 Korail만이 철도서비스를 제공하여 왔기 때문에 사실상 선로배분권자(선로배분지침에 의한 선로배분권자는 국토교통부이나, 집행업무는 철도시설관리자인 한국철도시설공단이 대행하고 있다)의 선로배분업무는 단독 철도운영자와 선로작업시행자(철도운영자와 선로작업시행자를 선로사용자라 한다)간의 상충(동일한 선로구간에 대한 선로사용자간 선로사용시간대 중복) 해소에 그쳤다. 이러한 이유로 선로배분업무의 복잡성이 비교적 낮았고, 선로배분과 관련한 연구나 합리적이고 공정한 선로배분을 위한 모형 개발 등이 미흡한 실정이었다.

본 연구는 유전자 알고리즘을 활용하여 선로배분 알고리즘을 개발하고 선로배분을 위한 수리모형을 개발하고자 한다. 본론에서는 선로배분과 관련한 기존문헌을 고찰하고(2.1), 본 연구에서 활용한 유전자 알고리즘의 이론적 배경을 살펴보았다(2.2). 또한 선로배분업무에서 유전자 알고리즘 활용 시 유전자와 염색체 설정 및 선로배분 수리모형의 목적함수를 구성하고(2.3), 실제와 유사한 가상의 테스트 데이터를 구성한 뒤 테스트 데이터를 활용하여 본 연구에서 개발한 선로배분 알고리즘을 적용(2.4)하여 보았다.

2. 본 론

2.1 기존문헌고찰

철도선진국이라고 일컬어지는 유럽에서는 선로배분을 Train Timetabling Problem(TTP)라고 하여 다양한 연구가 수행되어 왔다. U. Brännlund et al. (1998)[1]은 열차의 특정시각, 특정선로구간 점유상태를 의사결정변수로 설정하고 열차계획에 따른 선로배분권자의 총수익을 극대화하는 Space-time network 모형을 개발하였고 이를 Lagrangian relaxation 알고리즘을 활용하여 최적해를 도출하였다. A. Caprana et al. (2002)[2], A. Caprana et al. (2006)[3]은 열차의 경로에 특정 아크(구간)의 포함여부를 의사결정변수로 설정한 Location-time network 모형을 개발하여 Lagrangian relaxation 알고리즘으로 접근하였다. V. Cacchiani et al. (2008)[4] 역시 Location-time network 모형으로 선로배분문제를 설정하고 Lagrangian relaxation과 Column generation을 혼용한 방법을 적용하였다. 특히 V. Cacchiani et al. (2008)[4]은 17개역으로 구성된 철도네트워크에 221대의 열차의 스케쥴링 문제를 풀어내었다(103분 소요). R.L. Burdett et al. (2010)[5]은 Jobshop scheduling에 사용하는 Disjunctive graph formuation의 확장형으로서 Space network 모형을 개발하여 Gantt Chart 방법론을 적용하였다.

선로배분문제(TTP)는 수학적 표현에 의해 최적해를 구하기 위한 목적의 수리모형과 이 수리모형의 해결하기 위한 방법으로써 사용되는 휴리스틱 수리모형으로 나눌 수 있다. 첫째, 문제의 최적해를 구하기 위한 수리모형은 철도네트워크의 표현방식에 따라 Space-Time Network 모형[1], Space Network 모형[5, 10], Location-Time Network 모형[2-4, 6-9]으로 구분할 수 있다. 모형의 복잡도, 다양한 목적과 제약의 수용 가능성 및 모형의 확장성, 모형의 구현용이성 등의 측면에서는 Location-Time Network 모형이 장점이 많은 것으로 판단된다. 둘째, 최적해를 구하고자 설정한 수리모형을 풀어내기 위한 방법론으로는 휴리스틱 방법론이 주로 사용된다. 일반적인 TTP(선로배분문제)는 합리적인 시간 안에 최적 계획을 찾는 것이 불가

능함, 즉 NP-hard 문제임이 증명되어 있다[2]. 따라서 TTP와 관련한 연구들은 휴리스틱(heuristic) 방법론을 중심으로 많은 연구들이 진행되고 있다. 기존연구에서 사용된 Lagrangian relaxation[1-4], Column generation[4], Jobshop scheduling[5] 등이 모두 휴리스틱 방법론이며 이 외에도 Greedy 휴리스틱[6], Local search 휴리스틱[7], 메타휴리스틱[8, 9] 등이 활용되고 있다.

2.2 유전자 알고리즘

2.2.1 메타휴리스틱 방법론

기존문헌에서 살펴본 선로배분문제를 풀기 위한 방법론 중 Lagrangian relaxation기반 휴리스틱 방법론은 Lagrangian profit이 높은 열차의 시간표(time table)를 우선적으로 배정시키고 multiplier의 값을 갱신시키는 과정을 반복한다. 이 방법론은 완화해야 할 필요성이 있는 모든 제약식이 선형수학식으로 표현되어야 한다. 또한 모든 시간이 slot으로 나뉘어있어야 적용이 가능하며 알고리즘이 복잡하고 모형 개발 기간이 길어질 가능성이 매우 높은 단점을 갖는다. Column generation기반 휴리스틱 방법론은 제약을 완화하고 열차가 선택된 상태에서 최적의 경로를 구하기 위한 변수를 추가하는 column generation과정과 완화된 제약을 위배하는지 체크하고 위배된 제약을 추가하는 separation과정을 반복적으로 수행한다. 이 역시 완화해야 할 필요성이 있는 모든 제약식이 선형수학식으로 표현되어야 하고, 모든 시간이 slot으로 나뉘어져 있어야 적용이 가능하다. 그러나 LP문제가 매우 커져서 계산시간이 오래 걸릴 가능성이 있으며, 알고리즘이 복잡하고 모형 개발 기간이 길어질 가능성이 매우 높은 단점을 갖는다. Greedy 휴리스틱 방법론은 열차를 순차적으로 배정하는 방법론으로 열차 우선순위 선정 및 출발도착시간 설정이 쉽고 가능해를 빨리 도출할 수 있는 장점이 있으나, 메타휴리스틱 방법론 보다 해가 좋다는 것이 보장되어 있지 않고 일반적으로 메타휴리스틱 방법론 보다 도출된 해가 좋지 못한 단점이 있다. Jobshop scheduling기반 휴리스틱 방법론은 현실적 제약이 반영된 Disjunctive graph가 제시되어 있지 않고 Greedy 휴리스틱과 같은 개념의 알고리즘만 존재한다. 또한 Disjunctive graph를 이용한 알고리즘을 개발기간이 길어질 가능성이 높다. 메타휴리스틱 방법론은 임의적(random)으로 해를 찾는 방법으로 항상 좋은 해를 찾아낸다는 보장이 없고, 시간이 다소 오래 걸릴 수 있다. 그러나 알고리즘이 쉽고 구현이 용이하며 다양한 형태의 제약을 반영하기 쉬운 장점이 있다. 본 연구에서는 국내 최초로 복수의 철도운영사가 생긴 이래 개정되는 선로배분지침이 어떠한 기준(선로배분문제에서는 제약조건)을 제시할지 알 수 없는 상황을 반영하여, 다양한 제약을 반영하기가 용이하며 모형 개발 및 알고리즘 구현이 쉬운 메타휴리스틱 방법론을 적용하기로 하였다.

2.2.2 유전자 알고리즘

대표적인 메타휴리스틱 방법론에는 유전자 알고리즘, Simulated annealing 알고리즘, Tabu search 알고리즘이 있다. Simulated annealing 알고리즘은 일반적으로 유전자 알고리즘에 비해 다양한 해를 고려하기 어려운 단점이 있다고 알려져 있다. 또한 Tabu search 알고리즘은 유전자 알고리즘과 같은 임의적 탐색(random search)보다 좋은 해가 도출된다는 보장이 없다고 알

려져 있다. 본 연구에서는 다양한 해를 고려할 수 있고 좋은 해의 도출 가능성이 높다고 알려져 있는 유전자 알고리즘을 적용하기로 한다.

2.3 유전자 알고리즘을 활용한 선로배분절차

2.3.1 유전자 알고리즘 적용을 위한 해의 표현

유전자 알고리즘은 해의 표현방식에 따라 성능이 좌우된다. 유전자 알고리즘을 활용하여 선로배분문제를 접근할 때 해의 표현방식은 Train-Station 기반 표현, Train 기반 표현, Train-type 기반 표현이 가능하다. Train-Station 기반 표현을 적용한 유전자 알고리즘은 Gene이 열차와 열차가 경유하는 역의 쌍으로 구성되며, Gene의 순서대로 모든 제약을 만족하는 가장 빠른 출발시간을 고정시켜 한 Chromosome안에 Gene의 수가 열차수와 역의 수의 곱만큼 구성된다. 이는 Gene의 수가 많아 알고리즘의 실행시간이 다소 길어질 수 있는 단점이 있다.

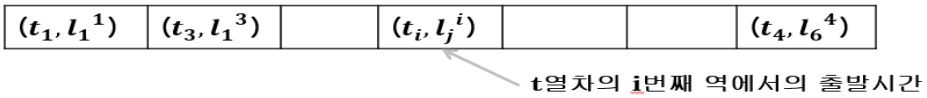


Fig. 1 Train-Station based genetic algorithm solution representation

Train 기반 표현을 적용한 유전자 알고리즘은 Gene이 개별 열차로 구성되며, Gene에 나타난 열차의 순서대로 모든 제약을 만족하는 역의 출발시간을 역의 순서대로 고정시켜 한 Chromosome안에 Gene의 수가 열차수가 된다. 이는 다양한 해를 찾는데 한계가 있어 성능의 문제가 생길 수 있는 단점이 있다.

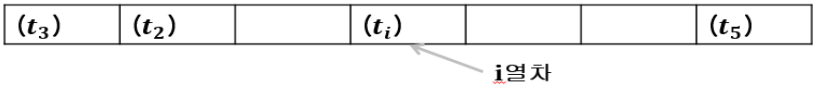


Fig. 2 Train based genetic algorithm solution representation

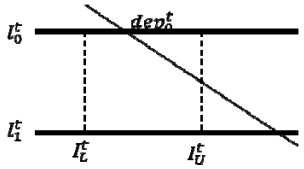
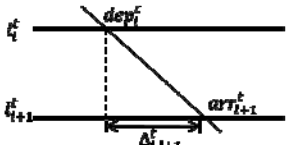
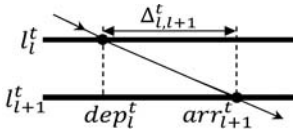
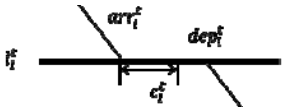
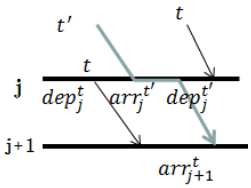
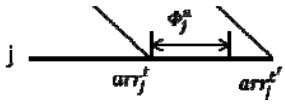
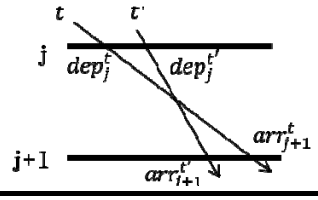
Train-type 기반 표현을 적용한 유전자 알고리즘은 Gene의 수가 너무 많아 해의 성능과 해를 찾는데 소요되는 시간이 선로배분문제 전체에 미치게 될 영향이 클 경우에 적용 가능한 방법이며, Train 기반 표현에서 개별열차 대신 열차 type별로 Chromosome을 구성하여 알고리즘을 적용한다. 이 방법은 실제 열차 계획은 열차 type별 계획을 필요한 수만큼 반복해서 완성되므로 열차의 패턴이 반복되어도 해의 성능에 큰 영향을 미치지 않는다는 가정이 필요하다. 본 연구에서는 Train 기반 표현을 적용하고자 한다.

2.3.2 선로배분을 위한 제약조건

본 연구에서는 총 9가지 제약을 고려하였다. 이들 9가지 제약은 선로배분과정에 있어 열차안전을 위해 꼭 지켜져야 할 사항으로 크게 열차와 관계된 제약조건, 역(지점)에서 적용되는

제약조건, 선로구간에서 적용되는 제약조건 등 3가지로 나눌 수 있다. 제약조건을 만족하도록 제약식을 수식으로 표현하여 알고리즘에 반영하였다.

Table 1 Constraints of Train Timetabling Problem

Type	Constraint	Graphical representation	Constraint	Graphical representation
Train constraint	Departure time window constraint		Journey time constraint	
Location constraint	Time between stations constraint		Departure headway constraint	
	Commercial stop constraint		Arrival and departure headway constraint	
	Arrival headway constraint		Platform constraint	
Segment constraint	Prohibiting crossing constraint		-	-

2.3.3 목적함수의 설정

본 연구에서 개발하는 선로배분 알고리즘 모형은 3단계의 목적함수를 구성하였다. 첫번째 철도운영사들이 신청한 초기 열차시각표(열차다이아)로부터 시발역에서 ±5분의 범위 내에서 열차 출발시각을 조정하여 상충이 해소되어 스케쥴된 열차의 수가 최대가 되도록 하였다. 두번째는 첫번째 목적함수가 같다는 조건하에서 스케쥴된 각 열차들의 시발역에서의 출발시각 조정폭의 총합이 최소가 되도록 하였다. 세번째는 첫번째와 두번째 목적함수가 같다는 조건하에서 총운행시간의 지연이 최소가 되도록 하였다.

2.3.4 해의 탐색 방법

하나의 Chromosome은 철도운영사들이 신청한 열차 수와 같은 Gene들로 구성된다. 초기모집단의 수만큼 Chromosome을 만들어내고 Gene의 순서대로 제약을 모두 만족하는 열차스케

줄을 순차적으로 만들어가는 과정에서 제약을 만족하지 못하는 열차(Gene)은 제외된다. Chromosome 내의 모든 Gene들의 열차스케줄을 검토한 후 최종적으로 스케줄된 열차(Gene)의 수가 해당 Cheomosome의 Fitness value가 된다. 다음 세대로 살아남는 Chromosome을 결정하는 선별(Selection)과정에서는 2개의 Chromosome 간 Tournament 방식을 적용하였다. 선별(Selection)과정을 통해 살아남은 Chromosome은 교차(Crossover)를 통해 형질 상속을 받도록 하였고 교차확률은 80%로 하였다. 마지막으로 Chromosome내 임의의 Gene을 다른 위치로 옮겨서 돌연변이(Mutation)을 일으키는 과정을 통해 해의 다양성을 유지하도록 하였고 돌연변이 확률은 5%로 설정하였다.

2.4 모형 적용 테스트

2.4.1 테스트 데이터 및 테스트 조건 설정

본 연구에서 개발한 알고리즘과 모형을 적용하기 위해 Korail의 경부선, 호남선 KTX열차 258개와 SR 경부선 고속열차 130개, 총 388개 가상의 열차시각표를 신청된 열차시각표, 즉 선로사용신청계획으로 만들었다. 이들 가상의 데이터는 신청된 상태에서 290개의 상충이 발생하도록 하여 신청된 상태에서 상충없이 스케줄 가능한 열차는 98개이다. 이들 열차들의 운행구간 중 경부선 구간, 서울~부산 구간을 대상으로 유전자 알고리즘을 적용하여 최대한 상충을 해소하여 열차가 스케줄되도록 하였다. 또한 유전자 알고리즘의 성능을 살펴보기 위하여 안전시격이 2분, 3분인 경우로 나누어 2개의 테스트 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오별 테스트는 신청된 열차들의 방향별, 시간대별(오전/오후)로 나누어 진행하였다.

2.4.2 테스트 결과

테스트 결과 Chromosome들의 세대를 거치는 진화의 과정이 10회 이내에서 대부분 안정적인 해를 도출하는 것으로 나타났다. 방향별로, 오전/오후시간대별로 열차시각표를 분리하여 테스트를 진행하였는데, 양방향 오전/오후 열차 대상 테스트 소요시간을 모두 합해 150분 이내에 안정적인 해를 도출하였다. 테스트 시나리오1(안전시격 2분)에서는 총 388개의 열차 중 341개의 열차가 스케줄 되어, 상충 열차수는 290개에서 47개로 줄었다. 시나리오 2(안전시격 3분)에서는 총 303개의 열차가 스케줄 되어, 상충 열차수는 290개에서 85개로 줄었다.

각 시나리오별 테스트 결과로 도출된 열차시각표(열차다이아)에 스케줄되지 않은 상충 열차들을 대상으로 강제로 스케줄링을 시도하였을 때 각 시나리오별 안전시격이나 제약조건을 완화하지않고서는 스케줄 가능한 열차가 존재하지 않았다. 신청된 열차시각표의 최초 운행시각과 최종 운행시각 중 선로작업시간을 제외한 1일 중 열차운행시간 17시간을 각 방향별 상충해소 열차수(스케줄된 열차수)로 나누어 평균 운행시격을 검토한 결과 5.8분~6.2분으로 나타났다. 현재 운행중인 KTX의 평균 운행시격이 7.18분(경부선, 경전선, 동해선, 호남선, 전라선의 서울역 및 용산역 출발 하행 KTX 144개 열차의 1일 17시간 중 평균 운행시격)임을 고려할 때, 본 연구에서 테스트한 열차시각표는 Korail과 SR의 고속열차를 대상으로 하였으므로 본 연구에서 개발한 선로배분 알고리즘 및 모형의 성능은 적절한 것으로 판단된다.

Table 2 Results of Test

		Two-way Trains								
		Trains scheduled in A.M.			Trains scheduled in P.M.			Total Trains		
		Korail	SR	Tot.	Korail	SR	Tot.	Korail	SR	Tot.
Original Test Data Train Time Table	Total # of Trains	98	51	149	160	79	239	258	130	388
	# of Trains with conflicts	64	46	110	107	73	180	171	119	290
	# of Trains without conflicts	34	5	39	53	6	59	87	11	98
Scenario 1 (safety gap = 2min)	# of Scheduled Trains without conflict	86	43	129	143	69	212	229	112	341
	Scheduling Running Time	38 min			110 min			148 min		
Scenario 2 (safety gap = 3min)	# of Scheduled Trains without conflict	70	44	114	120	69	189	190	113	303
	Scheduling Running Time	26 min			103 min			129 min		

3. 결 론

유전자 알고리즘은 선로배분문제(TTP)들이 주로 사용하고 있는 휴리스틱 방법 중 해의 다양성과 도출된 해의 성능, 해를 찾는 속도 측면에서 일반적으로 우수하다고 평가된다. 본 연구는 유전자 알고리즘을 활용하여 선로배분 알고리즘 및 수리모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 알고리즘과 수리모형은 테스트를 통해 검토한 결과 어느정도 합리적인 해를 도출해내는 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] U. Brännlund, P. O. Lindberg, A. Nõu, J.-E. Nilson (1998) Railway timetabling using lagrangian relaxation, *Transportation Science*, Vol. 32(4), pp.358-369.

[2] Alberto Caprana, Matteo Fischetti, Paolo Toth (2002) Modeling and solving the train timetabling problem, *Operation Research*, Vol.50(5), pp.851-861.

[3] Alberto Caparana, Michele Monaci, Paolo Toth, Pier Luigi Guida (2006) A lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem, *Discrete Applied Mathematics* 154, pp.738-753.

[4] Valentina Cacchiani, Alberto Caprana, Paolo Toth (2008) A column generation approach to train timetabling on a corridor, *4OR* 6(2), pp/125-142.

[5] R.L. Burdett, E. Kozan (2010) A disjunctive graph model and framework for constructing new train schedules, *European Journal of Operational Research* 200(1), pp.85-98.

[6] X. Cai, C.J. Goh and Alistair I. Mees (1998) Greedy heuristics for rapid scheduling of trains on a single track, *IIE Transactions* 30, pp.481-493.

[7] A. Higgins and E. Kozan (1997) Heuristic techniques for single line train scheduling, *Journal of Heuristics* 3, pp.43-62.

[8] P. Tormos, A. Lova, F. Barber, L. Ingolotti, M. Abril and M.A. Salido (2008) A genetic alogorithm for railway scheduling problem, *Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications*, Vol. 128, 255-276.

[9] Ji-Won Chung, Seog-Moon Oh, In-Chan Choi (2009) A hybrid genetic algorithm for train sequencing

in the Korean railway, *Omega* 37(3), pp.555-565.

[10] Liu, Shu Qiang & Kozan, Erhan (2009) Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem, *Computers and Operations Research*, Vol. 36(10), pp.2840-2852.