

Dial 알고리즘을 통한 자율주행 열차 경로탐색 연구

김경민[°], 고석준^{*}

Path Search for Autonomous Train via Dial Algorithm

Kyung Min Kim[°], Suk-Joon Ko^{*}

요약

자율주행 열차는 고장, 지연 등의 이례상황이 실시간으로 발생하는 상황에서 관리자의 개입 없이 각 열차가 스스로 경로 및 스케줄을 조정함으로써 안정적이고 효율적으로 운영이 가능하여야 한다. 이를 위해서는 이례상황에서 수초 이내에 동적으로 새로운 경로를 설정할 수 있어야 한다. 경로를 탐색하고 설정하는 수리적 방법론은 최단 경로를 탐색하는 단일경로 알고리즘과 K -최단경로와 같은 다중경로 알고리즘 등 다양하다. 본 연구에서는 다중경로 탐색 알고리즘 중 Dial 알고리즘을 통한 자율주행 열차시스템의 경로탐색 가능성을 분석하였다. Dial 알고리즘은 합리적 호의 조건을 사용하여 합리적인 경로만을 추출한다. 또한 호 비용에 인지오차를 반영할 수 있으므로 열차의 이동시간과 같은 불확실성이 반영 가능하다. 경부 1선 영등포역을 대상으로 한 실험 결과 탐색된 경로는 현실을 잘 모사하고 있는 것으로 분석되었다. 선로 및 열차 고장과 같은 이례 상황에서의 경로탐색 결과도 현실과 유사하였다. 다양한 실험 시나리오에서 1초 이내에 경로탐색이 가능하여 자율주행 열차의 실시간 스케줄링에 활용 가능한 것으로 분석되었다.

Key Words : Autonomous Train, Path Search, Dial Algorithm, Logit Model, Disturbance

ABSTRACT

In case of anomalies such as infrastructure failure or train delay, autonomous trains operate efficiently and reliably by adjusting the paths and schedules themselves without the intervention of the traffic manager. To do this, autonomous trains set up a dynamic path within a few seconds in an exceptional situation. There are various algorithms for searching the paths, such as a single-path algorithms and multipath algorithms. Among multipath algorithms, we suggest Dial algorithm for dynamic path search for autonomous trains. The Dial algorithm extracts only reasonable paths using rational conditions. In addition, the algorithm can capture an uncertainty about the travel time of the trains by perception error. Tested on the Yeongdeungpo station of the Gyeong-In line 1, the algorithm searched appropriate paths in a second on a regular and irregular situation.

1. 서론

열차 시스템은 대규모의 화물 및 승객 운송을 위한 중요한 교통수단이다. 수요 및 서비스 수준을 고려하여 철도운영자가 사전에 스케줄을 작성하면 기관사

및 관제사는 이를 최대한 준수하기 위하여 열차의 출도착 순서 및 시간을 결정하며, 열차 사이에 경합이 발생하지 않도록 열차를 제어하고 있다. 특히 운영 중 열차 혹은 선로의 고장이나 스케줄 상 도착시각의 미준수, 플랫폼에서의 사고 등 예기치 못한 상황이 발생

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

•° First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7491-9595)Korea Railroad Research Institute, kmkim@krii.re.kr, 정희원

* (ORCID:0000-0002-9642-9316)서울대학교 산업공학과, reclus85@snu.ac.kr

논문번호 : KICS2017-12-407, Received December 29, 2017; Revised March 5, 2018; Accepted March 13, 2018

했을 때, 이에 적절히 대처함으로써 서비스의 정시성 및 운영 안전성을 확보하는 것은 매우 중요하다.

현재 열차 시스템에서는 사고가 발생하는 경우 안전성 확보를 위해 해당 지역의 열차의 운영을 중단하고 관제사와 기관사간 통신에 의해 수동 운영하는 보수적인 방식으로 이례 상황에 대처하고 있다. 그러나 이러한 방식은 문제를 해결하는 데 상당한 시간이 필요하며, 특히 열차 간 시격이 매우 짧게 운영되는 상황에서는 2차 지연이 발생되어 정시성을 떨어트리게 된다. 또한 통신 과정에서 오류 발생 등 인적 사고가 발생할 위험이 존재한다. 그리고 안전한 시스템 운영을 위해 열차 사이의 안전거리를 폐색 단위로 제어하기 때문에 전체적인 효율성이 저하된다.

이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 자율주행 열차에 대한 연구들이 진행되었다. 국내 대부분의 연구들은 주로 무선통신을 기반으로 선·후행 열차간 시격을 단축시키는 연구들^[1-3]이다. 하지만 운영 및 관제 측면에서 자율주행 열차의 요구사항과 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 영국 RSSB의 연구개발 전략 보고서 Closer Running^[4]에서는 ERTMS Level 4인 열차간 통신기반의 시격단축 이후에 자율주행열차(ERTMS Level 5)의 핵심기술로 동적스케줄링(Dynamic Scheduling), 협업기반 경로설정(Co-operative Routing), 분산화 및 지능화(Distributed Intelligence)를 제시하였다.

자율주행 열차시스템에서는 고장, 지연 등이 실시간으로 발생하는 상황에서 관리자의 개입 없이 각 열차가 스스로 경로 및 스케줄을 조정함으로써 안정적이고 효율적인 운영이 가능해야한다. 즉, 각 열차가 다른 열차의 고장, 사고나 지연 등 실시간으로 발생하는 상황에 대하여 운영자의 개입 없이 대처할 수 있어야하고 각 열차가 자신의 경로 및 스케줄을 실시간 상황에 따라 스스로 변경할 수 있다. 예를 들어, 그림 1과 같이 T1 열차가 고장 시 인근에 있는 T2, T3 및 T4 열차들 간 협업을 통해 T2 열차는 기존 경로를 수정하여 새로운 경로로 운행된다.

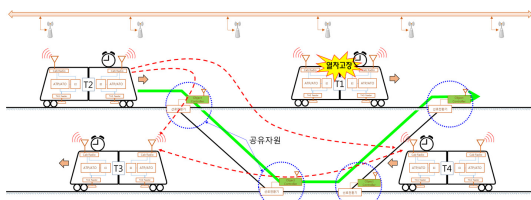


그림 1. 이례 상황 시 자율주행 열차의 동적 경로 탐색
Fig. 1. Dynamic path search of autonomous train in disturbance

본 연구에서는 자율주행 열차의 동적 경로설정을 위한 수리적 방법론을 제시한다. 경로를 탐색하고 설정하는 수리적 방법론은 크게 출발지-목적지간 한 개의 경로를 탐색하는 단일경로 방법과 여러 개의 경로를 탐색하는 다중경로방법으로 나눌 수 있다. 단일 경로는 최단경로(Shortest Path)가 일반적이며 Dijkstra^[5] 알고리즘 등을 사용한다. 단일 경로는 계산시간 측면에서는 유리하나 열차운영의 유연성 확보 면에서는 바람직하지 않는 것으로 판단된다. 다중 경로 방법은 출발지-목적지간 여러 개의 경로를 탐색하는 것으로 K-최단경로(K-Shortest Path)가 있다. K-최단경로는 K개의 최단경로를 탐색하는 것으로 Azevedo^[10], Eppstein^[11] 알고리즘 등을 사용한다. 하지만 몇 개의 경로를 탐색할지 여부인 K를 미리 설정해야하는 한계를 가진다. 표 1에 기존 경로탐색 방법론과 각 알고리즘별 특성 및 계산 복잡도를 정리하였다.

자율주행 열차 외에도 자율주행 장치 및 자동차 분야에서는 유전자 알고리즘, A* 알고리즘 등을 적용하여 경로를 탐색하는 연구들^[12-14]이 최근 진행되었다. 일련의 연구들에서는 자신의 위치 및 장애물을 인식하고 이를 고려하여 최적의 경로를 탐색하는 것이 중요한 요소이다. 하지만 자율주행 열차의 경우 위치 및 장애물은 실시간 검지되며 이동 가능한 경로들이 결정적이므로 차이가 있다. Automated Guided Vehicle

표 1. 경로탐색관련 기존 알고리즘
Table 1. Previous algorithms on path search

Class	Method	Algorithm	Network		Running time
			Loop	Modi fi.	
Single Path	Shortest	Dijkstra ^[5]	Acy.	×	$O(N^2)$
		Bellman & Ford ^[6]	Cycl.	×	$O(AN)$
Multi-Path	K-shortest	Yen ^[7]	Acy.	×	$O(KN^4)$
		Shier ^[8]	Acy.	×	$O(KN^4)$
		Martin ^[9]	Cycl.	○	$O(K^3 N^3)$
		Azevedo ^[10]	Cycl.	○	$O(K^2 N^3)$
		Eppstein ^[11]	Cycl.	×	$O(AN^2 + N^3 \log N + KN^3)$
Logit-based	Dial ^[18]	Acy.	×	$O(N^3 + AN)$	

K = num. of paths, A = num. of arcs, N = num. of nodes

(AGV) 분야에서는 지점간 이동시간을 최소화하는 경로 혹은 네트워크를 구성하는 연구들^{15,16,17}이 진행되었다. 분지한계법 (Branch-and-Bound) 및 Intersection graph method 등 수리계획 기법을 적용하였으나 네트워크의 형태가 격자형이고 지점간 이동시간에 대한 불확실성은 고려하지 못한 한계를 가진다.

본 논문에서는 다중경로 탐색 알고리즘 중 Dial 알고리즘¹⁸을 통한 자율주행 열차의 동적 경로설정 가능성을 분석하였다. Dial 알고리즘은 합리적 호의 조건을 사용하여 합리적인 경로만을 추출한다. 또한 호 비용에 인자오차를 반영할 수 있으므로 열차의 이동시간에 대한 불확실성이 반영 가능한 장점을 가진다. 경부 1선 영등포역을 대상으로 한 실험결과 이동시간에 대한 불확실성을 반영하더라도 탐색된 경로들의 선택확률은 현실을 잘 모사하고 있는 것으로 분석되었다. 이례 상황 발생 시 경로탐색 결과도 현실과 유사하였다. 계산 시간 또한 다양한 실험 시나리오에서 1초 이내에 경로탐색이 가능하여 자율주행 열차의 실시간 스케줄링에 활용 가능한 것으로 판단된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Dial 알고리즘과 Dial 알고리즘을 적용한 자율주행 열차의 경로탐색 방법을 소개한다. 3장에서는 Dial 알고리즘을 사용하여 경로탐색을 수행한 실험결과를 제시한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 연구를 소개한다.

II. 본 론

2.1 Dial 알고리즘

Dial 알고리즘은 이산선택(Discrete choice) 모형인 로짓(Logit)¹⁹ 모형에 기반하여 교통네트워크에서 통행배정을 위한 알고리즘으로 다음과 같은 특징을 지닌다. 첫 번째로 합리적인 개체라면 택하지 않을 비합리적인 호들을 경로에서 배제한다. 출발지-도착지간의 선택 가능한 대안경로를 미리 알아야 할 필요가 없으며, 따라서 경로 나열이 필요하지 않기 때문에 대규모 네트워크에서의 적용이 용이하다. 여기서 합리적인 호란, Dial 알고리즘에서 실제로 생성되는 경로를 구성하는 호로, 항상 출발노드에서 멀어지고 도착노드에는 가까워지는 호를 뜻한다. 먼저 Dial 알고리즘에서 쓰이는 표기법은 다음과 같다.

- r_i : 출발노드 s 에서 노드 i 까지의 최단거리
- s_i : 노드 i 에서 도착노드 t 까지의 최단거리
- d_{st} : 출발-도착 노드쌍 $s-t$ 에 대한 수요(경로탐색

에서는 1로 사용)

δ_i^+ : 노드 i 에서 나가는 모든 호의 집합

δ_i^- : 노드 i 로 들어가는 모든 호의 집합

c_{ij} : 호 (i, j) 의 비용(거리 혹은 시간)

x_{ij} : 호 (i, j) 의 통행량(경로탐색에서는 호를 이용할 확률)

합리적 호를 위의 기호를 사용하여 정의하면, 호 (i, j) 에 대해 $r_i < r_j$, $s_i > s_j$ 를 만족하면 합리적 호라 한다. 호 (i, j) 가 합리적인 이유를 표 2를 통해 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 표 2는 r_i 와 s_i 의 값에 따라 발생할 수 있는 모든 9가지 경우를 나타낸 것으로, 이 중에서 호 (i, j) 가 합리적 호의 조건을 만족하는 경우에만, 실제로 이용 가능한 경로를 구성하는 호가 될 가능성이 생기는 것을 알 수 있다.

예를 들어 그림 2에서 $r_i = 5$, $r_j = 3$, $s_i = 1$, $s_j = 3$ 일 경우, 각 대안경로의 비용은 $P_1 = 6$, $P_2 = 6 + c_{ij}$, $P_3 = 6$ 이다. 따라서 합리적인 개체라면 P_2 경로 대신 P_1 혹은 P_3 경로를 택할 것이다.

Dial 알고리즘은 준비단계, 전방진행 단계, 후방진행 세 단계를 거쳐 통행량을 배정한다. 그림 3과 같은 5×5 격자점 네트워크에서 Dial 알고리즘이 수행되는 방법을 살펴보면 다음과 같다. 그림 3에서 출발 노드

표 2. 호 (i, j) 가 합리적 호일 조건
Table 2. Conditions for reasonable arc (i, j)

	$s_i < s_j$	$s_i = s_j$	$s_i > s_j$
$r_i < r_j$	P_1	P_1	P_1 or P_2 or P_3
$r_i = r_j$	P_1	P_1 or P_3	P_3
$r_i > r_j$	P_1 or P_3	P_3	P_3

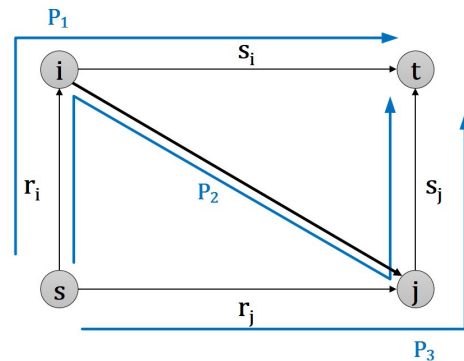


그림 2. 예시 호 (i, j) 와 3개 가능 경로
Fig. 2. Example of arc (i, j) and three alternative paths

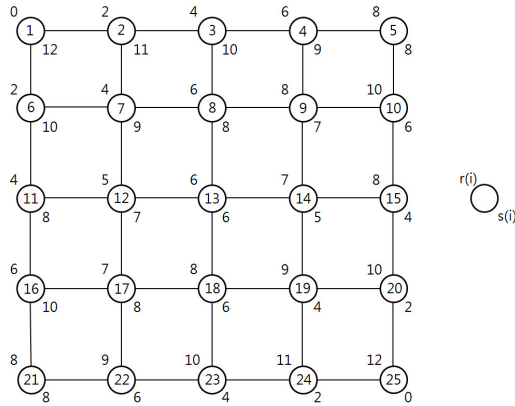


그림 3. 예제 네트워크 (5 × 5)
Fig. 3. Sample network (5 × 5)

는 1, 도착 노드는 25이고 호의 비용은 11번 노드부터 15번 노드를 잇는 호의 비용만 1, 나머지는 모두 2이다. 그리고 노드 i 의 왼쪽 위의 값은 r_i , 오른쪽 아래 값은 s_i 값이다.

준비단계에서는 모든 노드 i 에 대하여 r_i 값과 s_i 값을 계산한다. 그리고 합리적 호의 조건을 만족하는 호들에만 양수의 효용치(Link likelihood)를 부과한다. 호 (i, j) 의 효용치는 식(1)과 같이 계산된다. 그림 4는 $l_{(7,12)}$ 를 계산하는 예시이다.

$$l_{ij} = \begin{cases} \exp[\theta(r_j - r_i - c_{ij})], & \text{if } r_i < r_j, s_i > s_j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

이때 θ 는 호의 비용의 인지오차를 반영하는 파라미터로 θ 의 값이 0이면 합리적 호로 구성된 모든 경로에 대해 동일한 통행량을 배정하며, θ 의 값이 커지면 커질수록, 비용이 작은 합리적 호로 구성된 경로에 배정하는 통행량이 증가한다. 준비단계가 끝나면, 전방진행 단계에서는 호의 가중치(Link weight)를 계산한다. 호의 가중치는 출발노드 s 를 시작으로 도착노드 t 에 도착할 때 까지, r_i 값이 커지는 순서(Ascending

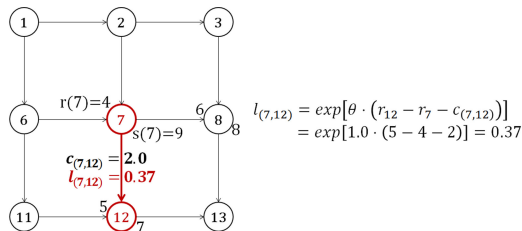


그림 4. 호(7,12)에서의 호 효용치 계산
Fig. 4. Link likelihood on Arc(7,12)

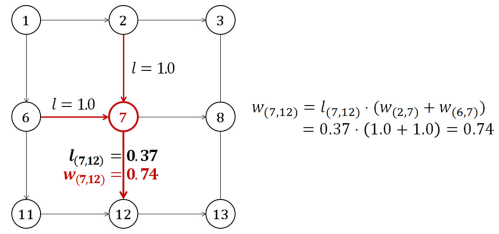


그림 5. 호(7,12)에서의 호 가중치 계산
Fig. 5. Link weight on Arc(7,12)

order)로 가중치를 계산한다. 노드 i 에 대하여, 호 $(i, j | j \in \delta_i^+)$ 의 가중치 w_{ij} 는 식(2)와 같이 계산된다. 그림 5는 $w_{(7,12)}$ 를 계산하는 예시이다.

$$w_{ij} = \begin{cases} l_{ij} & , \text{if } i = s \\ l_{ij} \sum_{m \in \delta_i^-} w_{mi} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

전방진행 단계가 끝나면, 후방진행 단계에서는 호에 통행을 배정한다. 호의 통행량은 도착노드 t 를 시작으로 출발노드 s 에 도착할 때 까지, s_j 값이 커지는 순서(ascending order)로 각 호의 통행량을 계산한다. 노드 j 에 대하여, 호 $(i, j | i \in \delta_j^-)$ 의 통행량(Traffic volume) x_{ij} 는 식(3)과 같이 계산된다. 그림 6은 $x_{(7,12)}$ 를 계산하는 예시이다.

$$x_{ij} = \begin{cases} d_{st} \frac{w_{ij}}{\sum_{m \in \delta_j^-} x_{jm}} & , \text{if } j = t \\ \left(\sum_{m \in \delta_j^-} x_{jm} \right) \frac{w_{ij}}{\sum_{m \in \delta_j^-} x_{jm}} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

위와 같은 과정을 거쳐, Dial 알고리즘은 경로를 미리 생성하지 않더라도 합리적 호의 정의를 이용하여 출발-도착 노드에 존재하는 통행량을 배정한다. 또한 Dial 알고리즘은 합리적 호의 정의를 이용하여 네트워

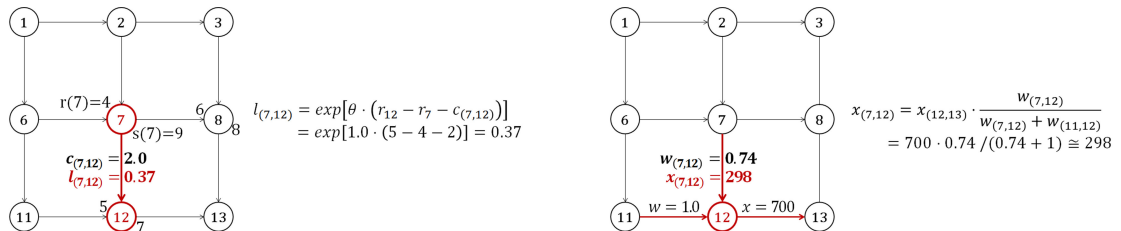


그림 6. 호(7,12)에서의 통행량 계산
Fig. 6. Traffic volume on Arc(7,12)

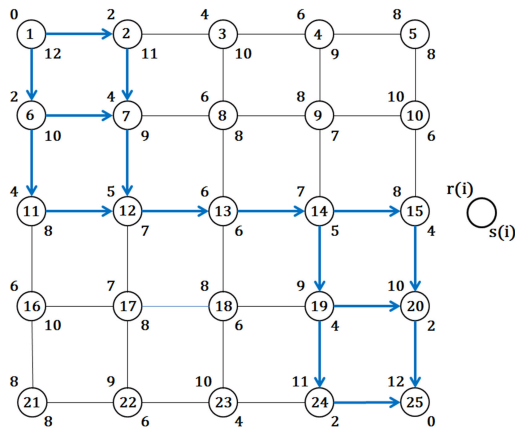


그림 7. 예제 네트워크에서의 합리적 경로
Fig. 7. Reasonable paths in sample network

크에서 실제 개체가 이용하지 않을 호를 효과적으로 제거한다. 앞서 그림 3에서 가능한 대안경로 수는 $\frac{8!}{4!4!} = 70$ 개이지만, Dial 알고리즘은 그림 7과 같이 총 9개의 경로만 생성한다.

2.2 Dial 알고리즘을 적용한 자율주행 열차 경로 탐색

자율주행 열차의 실시간 재스케줄링 과정을 살펴보면 이례상황 발생시 먼저 목적지까지의 대안경로를 탐색한다. 다음으로 대안경로 이동시 다른 열차와의 경합이 발생하는지 여부를 체크하고 경합이 발생하는 경우 열차간 협업을 통한 출도착 시간 조정 후 대안경로에 대한 이동을 결정한다. 이 모든 과정이 수초 이내에 가능해야하므로 대안경로 탐색은 1초미만의 시간 안에 완료되어야 한다.

본 연구에서 제안한 Dial 알고리즘은 자율주행 열차의 동적 경로탐색 시 다음과 같은 장점을 가진다. 첫 번째로 단일 경로가 아닌 다중 경로를 탐색한다. 단일 경로만 탐색하는 경우 다른 열차와의 경합이 발생할 확률이 높기 때문에 다중경로를 한 번에 탐색하는 것이 바람직하다. 두 번째로는 확률적 모형에 기반하므로 각 대안경로 별로 효용(utility)값에 따라 선택 확률을 알 수 있다. 실제 구현에서는 선택 확률이 높은 순서대로 이동가능 여부를 체크하거나 우선순위를 주게 한다. 이러한 특징은 시뮬레이션 시에도 유용하게 적용가능하다. 마지막으로 실제 역간 혹은 지점간 열차의 이동시간은 열차위치에 대한 오차 및 차량별 특성 차이로 인하여 불확실성이 존재한다. 즉 주어져거나 계획된 이동시간을 지키지 못한다. Dial 알고리

표 3. 자율주행열차를 위한 Dial 알고리즘 파라미터
Table 3. Parameters in Dial algorithm for autonomous train system

Node (s, t)	Demand ($d_{s,t}$)	Arc cost ($c_{i,j}$)	Arc flow ($x_{i,j}$)
Point machine or Platform	1	Traveling time or distance between nodes	Probability of belong to reasonable path

즘은 호 비용에 대한 인지도차를 반영할 수 있으므로 열차의 이동시간에 대한 불확실성이 반영 가능하다.

하지만 Dial 알고리즘은 교통 네트워크에서 통행배정을 위한 모형으로 철도 네트워크에서의 동적 경로 탐색에 적용하기 위해서는 표 3과 같이 파라미터들에 대한 재정의가 필요하다.

먼저 출발 및 도착 노드는 선로분기점(Point machine)과 정거장에서의 플랫폼(Platform)이 된다. 예를 들어 경부 1선 영등포역의 선로배선도를 간략화한 그림 8에서보면 100번 노드는 선로분기점에 해당하며 112번 노드는 플랫폼을 의미한다. 자율주행 열차시스템의 실제 구현에서는 선로분기점과 플랫폼에 위치 태그가 설치되고 스케줄상에 출발노드와 도착노드 정보를 포함하게 된다.

두 번째는 출발 및 도착 노드사이의 수요이다. 경로 탐색에서는 흐름량을 구하는 것이 목적이 아니므로 수요는 항상 1로 본다. 호의 비용은 노드와 노드 사이의 열차운행 거리 혹은 시간으로 본다. 호(100, 104)과 같이 건널선의 경우 속도제한 및 이동에 제한이 발생하므로 비용을 2배로 설정하였다. 마지막으로 호의 흐름량은 수요를 1로 고정시켰으므로 호가 합리적 경로로 이용할 확률로 볼 수 있다.

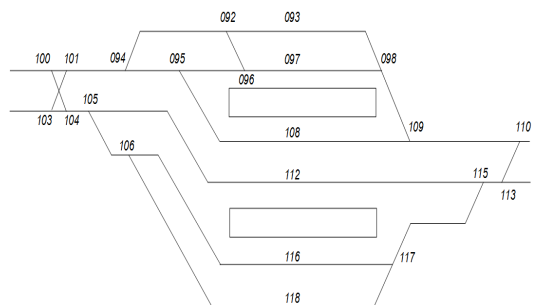


그림 8. 경부 1선 영등포역 선로배선도
Fig. 8. Station layout at Yeongdeungpo station in Kyung-bu line 1.

III. 실험

3.1 실험대상 네트워크 및 시나리오

Dial 알고리즘을 적용하여 자율주행 열차시스템에서의 경로탐색 실험을 실시하였다. 실험대상 네트워크로는 그림 8와 같이 경부 1선 영등포역 구내를 선정하였다. 이는 경부 1선의 서울-금천구청 구간의 경우 상대적으로 다른 구간에 비해 역내 배선이 복잡하고 운행되는 열차종이 다양하며 운행 시격이 짧아 열차 지연이 빈번하게 발생하기 때문이다. 실험대상 네트워크의 노드의 수는 22개이고 호의 개수는 24개이다.

실험 시나리오는 크게 네 가지로 첫 번째는 임의의 출발지-목적지간 Dial 알고리즘의 경로탐색이다. 이 실험에서는 최단경로와 K -최단경로와 같은 기존 경로탐색 방법론과 Dial 알고리즘의 경로탐색 결과를 비교하고 Dial 알고리즘에서 탐색한 합리적 조건을 만족하는 경로의 타당성 및 현실 적용 가능여부를 분석한다. 두 번째 시나리오는 인지오차 파라미터(θ) 변화에 의한 합리적 경로별 선택확률 변화를 분석한다. 세 번째 시나리오로 열차 혹은 선로 고장으로 인한 외란이 발생하여 특정 선로구간을 사용하지 못하는 경우의 경로탐색 변화를 분석한다. 마지막 시나리오로 임의의 출발지-목적지 쌍 100개에 대하여 Dial 알고리즘에서 탐색한 경로의 수를 분석한다.

3.2 실험결과

첫 번째 실험에서는 기존 경로 탐색 방법론과 Dial 알고리즘을 사용하여 임의의 출발지-목적지간 경로탐색 결과를 비교 분석한다. Dial 알고리즘이 비회로 네트워크에서 네트워크를 변경하지 않는 특성을 가지므로 같은 조건하에서 비교 가능한 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘과 Yen 알고리즘을 비교 방법론으로 선택하였다.

출발지는 그림 9에서 100번 노드로 하였고 도착지는 110번 노드이다. Dijkstra, Yen 그리고 Dial 알고리

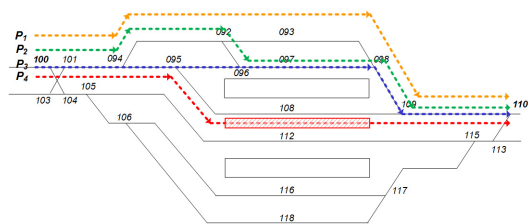


그림 9. 100번 노드에서 110번 노드 사이의 합리적 경로 탐색 결과 및 108번 노드에서 사고발생
Fig. 9. Reasonable paths from node 100 to node 110 and the disturbance occur at node 108

즘을 적용하여 경로 탐색한 결과는 표 4와 같다. 먼저 Dijkstra 알고리즘의 경우 이동 거리가 805.5로 최소화 되는 경로를 탐색하였다. Yen 알고리즘에서 K 를 1~7까지 변경하여 출발지-도착지간 7개의 모든 가능한 경로를 탐색하고 각 경로의 이동시간을 구할 수 있었다. 하지만 K 를 4 이상으로 하는 경우 호(100번-104번)를 이용하여 반대 선으로 넘어가는 경로들을 탐색하게 되고 이러한 경로들을 제거해주기 위해서는 개별 출발지-도착지간 적정 경로 수를 결정해야하는데 현실적으로 모든 출발지-도착지별로 이를 계산하는 것은 불가능하다. Dial 알고리즘을 적용하여 경로 탐색한 결과 총 4가지 합리적 경로가 생성된다. 또한 생성한 경로들은 K 를 4로 하였을 때의 K -최단 경로와 일치한다. 그림 9에 이를 도식화 하였다. Dial 알고리즘에서는 호(100번-104번)를 이용하여 반대 선으로 넘어가는 경로의 경우 합리적 호 조건을 만족하지 못하여 합리적 경로에서 배제하였다. 계산시간의 경우 Dijkstra 알고리즘이 가장 적게 소요되었으나 실험 네트워크에서는 3가지 알고리즘 모두 1초 미만으로 자율주행 열차시스템에서의 요구사항을 만족시켰다.

표 4. 알고리즘에 따른 경로탐색 결과
Table 4. Results of Path Search according to algorithm

Algorithm	Path	Cost	Computation Time (sec.)
Dijkstra	[100-101-94-95-107-108-109-110]	805.5	0.003
	[100-101-94-95-107-108-109-110]	805.5	
	[100-101-94-95-96-97-98-109-110]	806.8	
	[100-101-94-92-93-98-109-110]	811.4	
Yen ($K=7$)	[100-101-94-92-96-97-98-109-110]	819.5	0.02
	[100-104-105-112-115-113-110]	849.3	
	[100-104-105-106-116-117-115-113-110]	884.5	
	[100-104-105-106-118-117-115-113-110]	899.6	
Dial ($\theta=0.0$)	[100-101-94-95-107-108-109-110]	805.5	0.01
	[100-101-94-95-96-97-98-109-110]	806.8	
	[100-101-94-92-93-98-109-110]	811.4	
	[100-101-94-92-96-97-98-109-110]	819.5	

표 5. 인지오차 파라미터 변화에 따른 경로별 선택확률 변화
Table 5. Probability of choosing path on perception error

Parameter (θ)		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Prob. of path	P_1	0.25	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P_2	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P_3	0.25	0.33	0.21	0.12	0.07	0.04	0.02
	P_4	0.25	0.64	0.79	0.88	0.93	0.96	0.98

두 번째 실험 시나리오로 100번 노드가 출발지 110번 노드가 도착지 일 때 인지오차 파라미터(θ)를 0.0 ~ 3.0까지 조정하면서 Dial 알고리즘을 수행, 경로별 선택 확률을 표 5에 정리하였다. 먼저 θ 가 0.0일 때는 4개의 합리적 경로의 선택확률이 0.25로 같다. 모든 합리적 경로의 효용이 같은 상태이다. 즉, 경로별 거리에 대한 인지오차가 큰 상황으로 볼 수 있다.

θ 가 커짐에 따라 인지오차가 작아지므로 가장 짧은 경로인 경로 4의 선택 확률이 커짐을 확인할 수 있다. 경로 2의 경우 선로전환기가 3번 반위로 설정되므로 실제로 이동하기 어려운 경로인데 θ 가 0.5이상으로 커지면 선택확률이 0으로 나타나므로 철도 네트워크의 특성을 잘 반영한다고 볼 수 있다. 또한 선로전환기가 1번만 반위로 설정되는 경로 3과 경로 4는 θ 가 변화하더라도 선택확률이 0보다 크므로 θ 값에 민감하게 선택확률은 변화하더라도 확률 값에 따른 우선순위를 적용하면 현실에서 크게 문제는 없을 것으로 보인다.

다음으로 열차 혹은 선로 고장이 발생하여 특정 선로구간을 사용하지 못하는 경우의 경로탐색 변화를 실험하였다. 실험 시나리오는 앞선 상황과 동일하게 100번 노드가 출발지 110번 노드가 도착지이며 그림 9와 같이 108번 노드에서 열차 혹은 선로 고장이 발생한 상황을 가정하였다. 실험 결과 표 6과 같이 경로 4는 사용할 수 없으므로 경로 1~경로 3까지의 합리적 경로를 사용하도록 경로별 선택 확률이 조정되었다. 실험결과 경로 4 다음으로 짧은 경로인 경로 3이 선택 확률이 높은 상위 경로로 분석되었으며 인지오차 파라미터가 1.5 이상인 경우 경로 3만이 합리적 경로로 분석 되었다.

마지막 실험은 자율주행 열차시스템 설계시 동적 경로를 어느 수준으로 탐색하고 관리해야하는 지를 분석하는 실험이다. 이를 위하여 임의의 출발지-목적지 쌍 100개에 대하여 Dial 알고리즘에서 탐색한 경로의 수를 분석하였다. 앞선 실험들과 마찬가지로 인

표 6. 이례상황 발생에 따른 합리적 경로 탐색 및 경로별 선택확률 변화
Table 6. Probability of choosing path in the disturbance

Parameter (θ)		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Prob. of path	P_1	0.33	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	P_2	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P_3	0.33	0.91	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00

지오차 파라미터 θ 가 0.5이상이면 탐색된 경로는 크게 변화하지 않았다. 물론 탐색된 경로의 선택확률은 변화한다. 인지오차 파라미터 θ 가 0.5일 때, 실험결과는 그림 10과 같이 대안 경로가 1개인 출발지-목적지 쌍이 53개, 2개인 출발지-목적지 쌍은 19개, 3개 및 4개인 출발지-목적지 쌍은 각각 19개 및 9개로 나타났다. 경로가 5개 이상인 출발지-목적지 쌍은 발생하지 않았다. 이러한 실험결과를 통해 자율주행 열차시스템에서는 대안 경로의 수를 5개 정도의 수준으로 관리하는 것이 바람직하다고 판단된다.

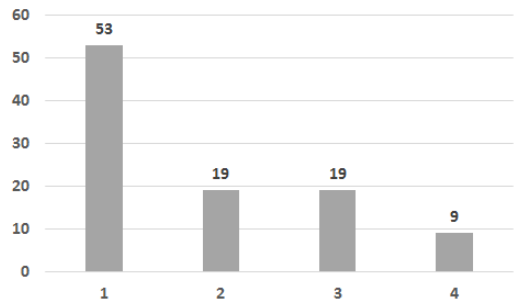


그림 10. 100개 출발지-도착지 쌍에서의 합리적 경로수 히스토그램
Fig. 10. Histogram of reasonable paths for 100 OD pairs

IV. 결론

본 논문에서는 교통 네트워크에서의 통행배정 알고리즘인 Dial 알고리즘을 사용하여 자율주행 열차의 동적 경로탐색 방법론을 제시하였다. Dial 알고리즘은 합리적인 호 조건을 만족하는 호들만을 이용하여 출발지-목적지간 여러 개의 경로를 탐색하고 열차의 이동시간에 대한 불확실성과 같은 인지오차를 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 경부 1선 영등포역을 대상으로 한 실험결과에서도 Dial 알고리즘은 탐색할 경로의 수를 미리 지정해야하는 기존 알고리즘과 다르게 비합리적인 경로들은 제외하고 경로를 탐색하였다.

또한 탐색된 경로들의 선택확률은 현실을 잘 모사하고 있는 것으로 분석되었다. 이레 상황 발생 시 경로 탐색 결과도 유사한 결과를 나타내었다. 다양한 출발지-도착지 쌍을 대상으로 수행한 분석 결과 자율주행 열차시스템에서는 대안 경로의 수를 5개 정도의 수준으로 관리하는 것이 바람직하다고 판단된다. 경로 탐색 시간 역시 1초 이내에 경로탐색이 가능하여 실시간 스케줄링에 활용 가능한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 Dial 알고리즘은 회로가 없는 비회로 네트워크에서만 적용이 가능하다. 따라서 자율주행 열차가 양방향 운전이 가능하다면 네트워크에 더미 노드 및 호를 추가하는 네트워크 수정이 필요하다. 또한 호의 비용으로 본 연구에서는 이동거리로 가정하였으나 열차 종별 특성 및 운영조건(속도제한, 정차여부 등)을 고려한 이동시간을 적용 시에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 향후 연구로는 열차운영 시뮬레이터를 활용하여 본 연구에서 제시한 동적경로 탐색으로 인한 열차지연 감소 효과 등 운영효율성 향상 분석 연구가 있다.

References

[1] S. Oh, K. Kim, S.-H. Lee, J.-Y. Kim, and Z.-H. Quan, "Headway calculation and train control algorithm for performance improvement in radio based train control system," *J. Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, vol. 16, no. 10, pp. 6949-6958, 2015.

[2] S. Oh, K. Kim, and H. Choi, "Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system," *J. Korea Academia-Ind. cooperation Soc.*, vol. 42, no. 09, pp. 1-9, 2016.

[3] S. Oh, K. Kim, and H. Choi, "Shared resource allocation scheme and interval control algorithm for the T2T-based autonomous train control system," *J. KICS*, vol. 17, no. 11, pp. 1781-1791, 2017.

[4] RSSB, *Closer Running (Reduced Headways - Preparing a Road Map to Further Develop the Closer Running Concept (T1095 Report)*, Retrieved Nov. 30, 2017, from <https://www.rssb.co.uk/>

[5] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in

connexion with graphs," *J. Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269-271, Dec. 1959.

[6] L. R. Ford jr. and D. R. Fulkerson, *Flows in Networks*, Princeton University Press, 1962.

[7] J. Y. Yen, "Finding the k shortest loopless paths in a network," *Management Sci.*, vol. 17, pp. 712-716. 1971.

[8] D. Sheir, "On algorithms for finding the k shortest paths in a network," *Networks*, vol. 9, pp. 195-214, 1979.

[9] E. Q. Martins, "An algorithm for ranking paths that may contain cycles," *Eur. J. Operational Res.*, vol. 18, pp. 123-130, 1984.

[10] J. A. Azevedo, M. E. Costa, J. J. Madeira, and E. Q. Martins, "An algorithms for the ranking of shortest paths," *Eur. J. Operational Res.*, 69, pp. 97-106, 1993.

[11] D. Eppstein, "Finding the k shortest paths," *SIAM J. Computing*, vol. 28, pp. 652-673, 1998.

[12] C.-B. Noh, M.-H. Kim, and M.-C. Lee, "Path planning for the shortest driving time considering UGV driving characteristic and driving time and its driving algorithm," *J. Korea Robotics Soc.*, vol. 8, no. 1, pp. 43-50, 2013.

[13] J.-H. Im, S.-H. You, G.-I. Jee, and D.-H. Lee, "A path generation algorithm for obstacle avoidance in waypoint navigation of unmanned ground vehicle," *J. Inst. Control, Robotics and Syst.*, vol. 17, no. 8, pp. 843-850, 2011.

[14] J. Kim, J. Heo, S. Jung, and S. Kim, "Path-planning using modified genetic algorithm and SLAM based on feature map for autonomous vehicle," *Int. J. Fuzzy Logic and Intell. Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 381-387, 2009.

[15] R. J. Gaskins and J. M. A. Tanchoco, "Flow path design for automated guided vehicle systems," *Int. J. Production Res.*, vol. 25, no. 5, pp. 667-676, 1987.

[16] M. Kaspi and M. A. Tanchoco, "Optimal flow path design of unidirectional AGV systems,"

- Int. J. Production Res.*, vol. 28, no. 6, pp. 1023-1030, 1990.
- [17] D. Sinriech and M. A. Tanchoco, "Intersection graph method for AGV flow path design," *Int. J. Production Res.*, vol. 29, no. 9, pp. 1725-1732, 1991.
- [18] R. B. Dial, "A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration," *Transportation Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 83-111, 1971.
- [19] W. H. Greene, *Econometric Analysis*, 7th Ed., Boston: Pearson Education. pp. 803-806, 2012.

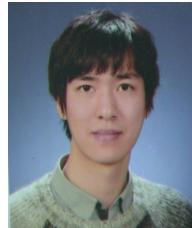
김 경 민 (Kyung Min Kim)



2004년 2월 : 한국과학기술원
산업공학 학사
2016년 2월 : 서울대학교 산업
공학 박사
2006년 4월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

<관심분야> 철도운영, 최적화 모형, 통행배정

고 석 준 (Suk-Joon Ko)



2012년 2월 : 서울대학교 전기
공학부 학사
2012년 9월~현재 : 서울대학교
산업공학과 석박사통합과정
<관심분야> 최적화 모형, 게임
모형, 분산 알고리즘