

강화 학습을 이용한 출퇴근 시간대 열차 정차 시간 최적화

최수정¹, 임유진²

¹숙명여자대학교 IT공학과 석박통합과정

²숙명여자대학교 인공지능공학부 교수

suzzang77@sookmyung.ac.kr, yujin91@sookmyung.ac.kr

Optimizing Train Dwell Times during Commuter Hours using Reinforcement Learning

SuJeong Choi¹, Yujin Lim²

¹Dept. of IT Engineering, Sookmyung Women's University

²Division of Artificial Intelligence Engineering, Sookmyung Women's University

요약

대중교통은 현대 사회에서 필수적인 요소이며 특히 출퇴근 시간대에는 도로 교통 상황에 영향을 덜 받는 지하철의 수요가 높은 편이다. 그러나 제한된 물리적 자원으로 인해 열차 내 혼잡도 증가와 열차 운행 지연은 불가피한 상황이다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위한 한 가지 방법으로 강화학습 기반 DQN 알고리즘을 이용한 열차 정차 시간 최적화 기법을 제안했다. 열차 정차 시간과 승차 인원 모두 고려하면서 최적화를 진행했을 때와 그렇지 않았을 때를 비교하면서 실험을 진행하여 성능을 분석했다.

1. 서론

현대 도시에서 대중교통은 우리 생활의 필수적인 요소로 자리 잡고 있다. 특히 출퇴근 시간대에는 대중교통 수단 중에서도 도로 교통 상황의 영향을 덜 받는 지하철이 버스보다 높은 이용률을 보인다. 이에 따라 출퇴근 시간대의 지하철 수요는 상당히 높아지지만, 물리적인 자원은 제한되어 있어 열차 내 혼잡도가 증가하고, 열차 운행이 지연되는 문제가 발생하고 있다.

이를 해결하기 위한 한 가지 방법으로 열차 정차 시간을 최적화하는 방법이 있다. 이를 통해 승객들의 이용 편의성을 향상하고 지하철 운행의 효율성을 증대시킬 수 있다.

열차 정차 시간 최적화에 대한 이전 연구[1]에서는 주로 열차 승객들의 이동 시간만을 고려하였지만, 본 논문에서는 열차 내 승객들의 대기시간을 고려해 정차 시간을 최소화하는 동시에 승차 인원을 최대화하는 두 가지 목표를 함께 고려하여 강화 학습 기법인 DQN(Deep Q Network)을 통해 최적의 정차 시간을 찾고자 한다.

2. 시스템 모델

2-1. 실험 환경

실험 환경은 사람이 많은 출퇴근 시간대로 설정했다. 그 외의 시간대에서는 승강장에서 열차를 기다리는 승객들이 다 승차하지 못하는 상황이 상대적으로 텔 하기 때문이다. 그리고 열차의 속도 프로파일은 고정되어 있으며 이에 따라 에너지 소비량이 일정하고 안전 간격 또한 유지된다고 가정했다. 마지막으로 1초당 12명의 사람이 승차하거나 하차한다고 가정했다.

그리고 열차 혼잡도를 고려하기 위해 혼잡도 기준을 보았을 때, 허용할 수 있는 최대 혼잡도는 150%이고[2] 1량당 100%의 정원을 160명으로 가정하여, 6량 열차일 때 열차의 최대 수용 인원을 1,440명으로 설정했다. 우리나라 지하철 환경과 유사하게 설정하기 위해 하나의 열차가 정차하는 전체 역의 개수를 총 50개라고 설정하였고, 서울교통공사에서 제공한 2023년 1월 1일부터 2023년 4월 30일까지의 공휴일, 주말을 제외한 오전 6부터 오후 9시, 오후 5시부터 오후 8시까지의 서울 지하철 5호선, 9호선의 승하차 데이터를 활용하였다[3][4].

2-2. 제안 알고리즘

본 논문은 DQN을 사용하여 열차 정차 시간을 최적화하는 알고리즘을 제안한다. 하나의 열차는 에이전트로서 역에 정차할 때마다 열차의 정보와 역의 정보를 관찰하여 목표를 달성하기 위해 최적의 정차 시간을 결정한다. 본 논문에서 정의한 상태(S_i) 행동(A_i), 보상(R_i)의 정의는 다음과 같다. 먼저 $stations_i = \{1, \dots, 50\}$ 로 정의 내릴 수 있다. 하나의 열차가 i 번째 역에 도착했을 때, 열차에 타고 있는 승객 수 ($P_{onboard,i}$), 전 역에서 출발한 때부터 현재 역에서 출발하기 전까지의 시간을 나타내는 역 간 소요시간 ($T_{btw-stations,i}$), 현재 역 승강장에서 기다리는 승객 수 ($P_{waiting,i}$), 그리고 현재 역에서 열차의 총 하차 인원 수 ($P_{total-alight,i}$)를 관찰할 수 있다고 가정하였다. 따라서 상태 $S_i = \{P_{onboard,i}, T_{btw-stations,i}, P_{waiting,i}, P_{total-alight,i}\}$ 로 표현이 가능하다.

열차는 현재 상태 S_i 를 고려하여 행동 A_i 를 선택하고 그 행동을 수행한다. 행동은 정차 시간을 나타내며, 출퇴근 시간대에는 그 외 시간대와는 다르게 최소 50초에서 최대 1분 10초까지 정차가 가능하다고 설정했다. 그러므로 행동 $A_i = \{50, 55, 60, 65, 70\}$ 로 정의를 했다.

i 번째 역에 정차한 열차는 행동 A_i 를 수행함으로써 보상 R_i 을 얻는다. 본 논문의 목표인 열차 정차 시간 최소화와 승차 인원 최대화를 이루기 위해 구성한 보상 함수는 식 (1)과 같다. D_i 는 i 번째 역에서의 열차 정차 시간을 의미하며 $P_{boarding,i}$ 는 i 번째 역에서 열차의 승차 인원을 의미한다. ω 는 두 개의 항의 중요도를 조절하기 위한 가중치이다.

$$reward_i = \omega \left\{ 1 - \left(\frac{D_i + \delta_i}{T_{btw-stations,i} + \delta_i} \right) \right\} + (1 - \omega) \left(\frac{P_{boarding,i}}{P_{waiting,i}} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 첫 번째 항은 정차 시간을 고려하기 위한 항이고, 두 번째 항은 승차 인원을 고려하기 위한 항이다.

이상적인 승차 인원($P_{ideal-board,i}$)의 경우 정차 시간 중 하차 시간($T_{alight,i}$)을 뺀 나머지 시간에 1초당 12명이 승차하므로 12를 곱한 것이다. 만약 승차 후 열차 내부 인원이 열차의 최대 수용 인원인

1,440명을 초과한다면 1,440명에서 하차 후 열차 내부 인원수($P_{after-alight-onboard,i}$)를 뺀 나머지를 실제 승차 인원($P_{real-board,i}$)으로 보았다. 따라서 $P_{boarding,i}$ 을 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{after-alight-onboard,i} = \begin{cases} P_{onboard,i} - P_{total-alight,i} & (\text{if } P_{onboard,i} \geq P_{total-alight,i}) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{boarding,i} = \begin{cases} P_{ideal-board,i} & (\text{if } P_{after-alight-onboard,i} + P_{ideal-board,i} \leq 1440) \\ P_{real-board,i} & (\text{else}) \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{ideal-board,i} = (D_i - T_{alight,i}) \times 12 \quad (4)$$

$$P_{real-board,i} = 1440 - P_{after-alight-onboard,i} \quad (5)$$

$$T_{alight,i} = \left\lceil \frac{P_{total-alight,i}}{12} \right\rceil \quad (6)$$

그러므로 승차 인원이 줄어든 만큼 승차 시간도 줄어들었기 때문에 이상적인 승차 시간과 실제 승차 시간과의 차이를 δ_i 로 표현했고 식 (7)과 같다. 만약 승차 후 열차 내부 인원이 1,440명을 초과하지 않았다면 이상적인 승차 인원과 실제 승차 인원은 같으므로 승차 시간도 서로 같다고 보아 δ_i 는 0의 값을 가진다.

$$\delta_i = T_{ideal-board,i} - T_{real-board,i} \quad (7)$$

$$T_{ideal-board,i} = \left\lceil \frac{P_{ideal-board,i}}{12} \right\rceil \quad (8)$$

$$T_{real-board,i} = \begin{cases} T_{ideal-board,i} & (\text{if } P_{after-alight-onboard,i} \leq 1440) \\ \left\lceil \frac{P_{real-board,i}}{12} \right\rceil & (\text{else}) \end{cases} \quad (9)$$

3. 실험 및 결과 분석

본 논문에서 제시한 정차 시간을 최소화하는 동

시에 승차 인원을 최대화하고자 하는 목표를 위해 식(1)에서 승차 인원(Boarding Passenger)만을 고려했을 때, 정차 시간(Dwell Time)만을 고려했을 때 그리고 승차 인원과 정차 시간 모두 고려하여 학습했을 때로 나눠서 실험해 비교하였다. 실험을 위해 식 (1)의 가중치 ω 는 0.4와 0.7로, 최대 에피소드 수는 300으로 설정했고 1 step 당 1개의 역에 정차하는 시나리오로 구성했다. ω 는 0.4일 때는 승차 인원에 좀 더 높은 가중치를 부여하는 동시에 정차 시간도 함께 고려하였고, ω 는 0.7일 때는 정차 시간에 좀 더 높은 가중치를 부여하는 동시에 승차 인원도 함께 고려하였다.

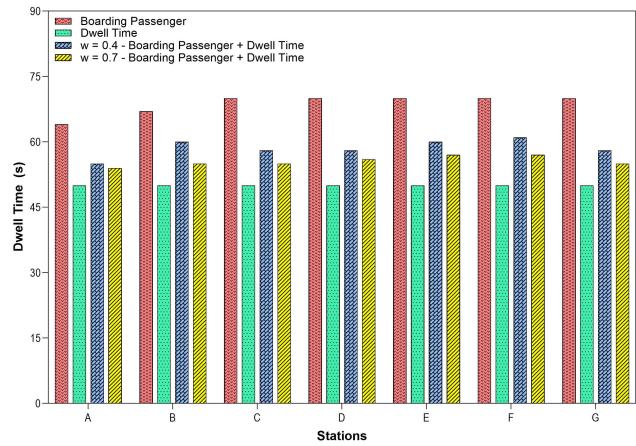
(그림 1)은 정차 역에서 승차 인원만을 고려했을 때, 정차 시간만을 고려했을 때 그리고 승차 인원과 정차 시간 둘 다 고려했을 때의 결과인 정차 시간을 나타낸 것이다. 이를 통해 승차 인원만 고려했을 때의 정차 시간은 64초에서 70초로 가장 길고 정차 시간만을 고려했을 때의 각 정차 역마다 정차 시간은 모두 50초이므로 가장 짧은 것을 알 수 있다.

승차 인원, 정차 시간 모두 고려했을 때의 결과를 보면, ω 는 0.4보다 0.7일 때 정차 시간에 더 높은 가중치를 부여했으므로 0.4일 때 보다 정차 시간이 더 짧았다. 반면에 정차 시간만 고려했을 때의 결과 보다 약 5초에서 10초 정도 정차 시간이 더 길었다. 하지만 승차 인원만 고려했을 때보다는 10초에서 20초 정도 더 짧은 정차 시간을 가지므로 평균적으로 약 16%의 성능 향상을 확인할 수 있다.

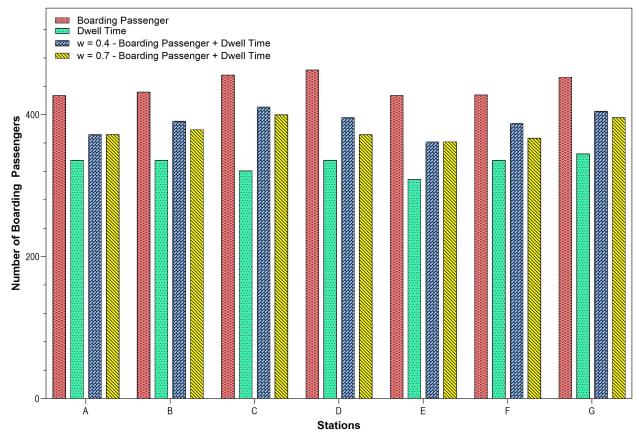
(그림 2)는 정차 역에서 승차 인원만을 고려했을 때, 정차 시간만을 고려했을 때 그리고 둘 다 고려했을 때의 결과인 승차 인원을 나타낸 것이다. 승차 인원만 고려했을 때 각 정차 역에서 427명에서 463명의 승차 인원을 확인할 수 있고 모든 역에서 승차 인원이 가장 많은 것을 알 수 있다. 그리고 정차 시간만을 고려했을 때는 309명에서 345명의 승차 인원을 확인했고 모든 역에서 승차 인원이 가장 적은 것을 알 수 있다.

승차 인원, 정차 시간 모두 고려했을 때의 결과를 보면, ω 는 0.7일 때 보다 0.4일 때 승차 인원에 더 높은 가중치를 부여했으므로 0.7일 때 보다 승차 인원이 더 많았다. 반면에 승차 인원만 고려했을 때 보다 좀 더 낮은 인원인 것을 확인할 수 있다. 그러나 정차 시간만 고려했을 때보다는 평균적으로 약 50명 더 많은 것을 알 수 있다. 따라서 모두 고려했을 때와 정차 시간만을 고려했을 때의 비교를 통해

평균적으로 약 15%의 성능 향상을 확인할 수 있다.



(그림 1) 정차 역에 따른 정차 시간 비교



(그림 2) 정차 역에 따른 승차 인원 비교

4. 결론

본 논문에서는 승차하려는 사람이 많은 출퇴근 시간대에 정차 시간을 최소화하는 동시에 승차 인원의 최대화를 목표로 강화 학습 기법인 DQN을 이용하여 열차 정차 시간을 최적화하는 기법을 제안했다. 승차 인원과 정차 시간 둘 다 고려하여 최적화를 수행했을 때, 그렇지 않았을 때보다 처음 설계했던 목표에 가까워질 가능성이 높은 것을 확인했다. 그러나 본 논문은 역과 열차에 대한 환경이 실제보다 단순화되어 있어서 좀 더 다양한 요소들을 고려하지 못했다는 한계점이 있다.

추후 연구에는 열차가 정차하는 역을 실제와 더 유사하고 더 복잡한 환경인 환승역으로 가정하여 여러 노선 열차의 정차 시간을 최적화하는 연구를 진행하고자 한다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1F1A1047113).

참고문헌

- [1] Z. Wang, Z. Pan, S. Chen, et al., "Shortening Passengers' Travel Time: A Dynamic Metro Train Scheduling Approach Using Deep Reinforcement Learning," IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, vol. 35, no. 05, pp. 5282–5295, 2023.
- [2] 더스쿠프, "승객 넘치는 지하철의 합법 가장한 과밀," 2022.12.07.
- [3] 서울교통공사 연도별 일별 시간대별 역별 승하차 인원,
<https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-12921/F/1/dataSetView.do>.
- [4] 서울교통공사 9호선 2,3단계 역별 일별 시간대별 승하차 인원,
<https://www.data.go.kr/data/15060424/fileData.do>.