

복합 전략 요소를 반영한 DRT 실시간 배차 시뮬레이션 모델 제안

탁해성¹, 박무열²

¹씨엘모빌리티 책임연구원

²씨엘모빌리티 대표이사

takhs33@ciel.co.kr, muyoul@ciel.co.kr

Design of a Real-Time Dispatch Simulation Framework for DRT Considering Composite Strategy Elements

Haesung Tak¹, Muyoul Park²

¹CielMobility Inc.

²CielMobility Inc.

요 약

본 연구는 대기시간, 이동거리, 실차율, 접근거리의 네 가지 전략 요소를 통합한 복합 전략 기반 MOD/DRT 실시간 배차 최적화 모델을 제안하고, 실제 서비스 데이터를 활용해 차량 투입에 따른 다양한 전략 조합의 성능을 비교·분석하였다. 그 결과 복합 전략은 전반적 성능과 안정성을 확보했으며, 차량 수 증가에 따른 실험적 결과 분석을 통해 복합 전략에 따른 효율성을 검증하였다. 본 연구는 향후 실시간 가중치 조정 및 수요 예측 기반 차량 재배치 등 동적 운영 모델 개발의 기초 자료를 확립하는데 활용하고자 한다.

1. 서론

도시 교통 수요의 불균형성과 다양성은 기존 고정 노선 기반 대중교통의 효율성을 저하시켜 서비스 한계를 드러내고 있다. 이에 따라 이용자의 요청에 따라 노선과 운행을 탄력적으로 조정할 수 있는 수요응답형 교통(Demand Responsive Transit, DRT) 시스템의 필요성이 부각되고 있다. 이러한 DRT 시스템의 핵심은 다양한 수요 상황에 신속하면서도 효율적으로 대응할 수 있는 배차 알고리즘의 최적화에 있으며, 본 연구는 이에 대응하기 위해 복합 전략을 반영한 실시간 배차 최적화 모델을 제안하고, 시뮬레이션 기반의 실험을 통해 그 성능을 검증하고자 한다.

2. 관련 연구

DRT는 시간과 장소에 따라 변동하는 수요에 유연하게 대응하기 위해 설계된 교통 서비스로, 스마트 모빌리티 환경에서 주목받고 있다. 국내에서는 서울 연구원과 한국교통연구원을 중심으로 DRT 도입의 정책적 필요성과 배차 알고리즘 고도화의 중요성이 강조되고 있다. 또한, 여주 행복택시, 전북 농촌형 DRT 등 지자체 단위에서 다양한 실증 사례가 제시

되며, 지역 특성에 따른 DRT 운영의 필요성이 확인되고 있다 [1, 2]. 기술적 측면에서 다중 차량 기반 경로 탐색, 클러스터링 기반 배차 알고리즘 등 운영 효율을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있으며 [3], 최근에는 배차 및 운행 스케줄링을 시각적으로 분석할 수 있는 관리 시스템도 개발되고 있다 [4, 5]. 해외에서는 복합 전략적 접근과 실시간 반응성을 강화한 DRT 알고리즘 연구가 활발히 진행되고 있다. 전략 가중치 기반의 차량 배정, 실시간 교통 정보 반영, 경로 삽입 최적화 등 다양한 방식이 시도되고 있으며, 정류장 밀집도에 따른 차량 배치, 전략 간 상호작용 분석을 통한 복합 모델 개발 연구가 대표적이다 [6, 7]. 또한, 경로 기반 배정 방식과 단기·비단기 대응 전략의 결합 사례 [8], 신규 요청 발생 시 실시간 재삽입 알고리즘 [9], 복수 경로 계획을 활용한 배차 성공률 향상 연구 [10] 등 다양한 응용 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구들은 복잡한 운행 환경에서 배차 성능을 높이기 위한 다각적 접근을 제시하고 있다는 점에서 의의가 있다.

지금까지의 국내외 연구는 주로 대기시간 단축, 이동거리 최소화 등 단일 최적화 요소에 집중하는 경향이 강하다. 그러나 실제 서비스 환경에서는 대기시간, 이동거리뿐 아니라 차량의 실차율, 이용자의

접근거리 등 다양한 요소가 동시에 고려되어야 한다. 특히 실제 운행 데이터를 활용한 전략 조합 실험은 상대적으로 부족하여, 운영 현장에서 활용 가능한 실질적 기준 마련에는 한계가 있다. 이에 본 연구는 대기시간, 이동 거리, 실차율, 접근 거리의 네 가지 요소를 통합한 가중치 기반 복합 전략 모델을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 전략 조합별 성능을 비교·분석함으로써 실질적인 DRT 운영 기준 수립에 기여하고자 한다.

3. 복합 전략 최적화 모델의 방법론

본 연구에서는 MOD/DRT 환경에서의 배차 문제를 해결하기 위해 복합 전략 기반의 최적화 모델을 설계하였다. 이 모델은 다양한 서비스 전략 간의 균형을 고려하여 운행 효율성과 사용자 만족도를 동시에 향상시키는 것을 목표로 한다.

3.1. 전략 점수 정의

모델의 핵심은 전략 점수(Strategy Score)를 정의하고, 이를 최소화하는 방향으로 배차 결정을 수행하는 것이다. 전략 점수는 각 전략 요소에 해당하는 성능 지표에 가중치를 곱해 합산한 형태로 구성되며, 수식은 다음과 같다.

$$Score = w_1 \cdot W_i + w_2 \cdot D_i + w_3 \cdot (1 - S_i) + w_4 \cdot U_i$$

〈표 1〉 전략 점수 산출 주요 지표

지표	명칭	설명
W_i	대기 시간 (Waiting time)	사용자 요청 시점부터 차량 도착까지 걸리는 시간으로, 신속한 대응성을 나타냄
D_i	이동 거리 (Travel distance)	차량이 요청을 처리하기 위해 추가적으로 이동해야 하는 거리로, 운영 비용에 영향을 미침
S_i	실차율 (Occupancy rate)	차량의 유휴 구간을 최소화하고 수송 효율을 높이기 위한 핵심 지표
U_i	접근 거리 (User access distance)	사용자가 정류장 또는 승차지점까지 도보로 이동해야 하는 거리

전략 점수 산출에 따른 주요 지표는 표 1과 같으며, 네 항목은 서로 보완적이면서도 충돌하는 경향이 있으며, 가중치는 각 전략의 중요도에 따라 조정된다.

3.2. 배차 제약 조건 설계

최적화 과정에서는 다음과 같은 현실적인 제약조건을 반드시 고려하였다.

- 우회율 제한(Detour Constraint)

- 차량이 기존 운행 경로에 새 요청을 삽입할 때 발생하는 경로 변경 폭, 즉 우회율(Detour Ratio)은 차량에 지정된 값 이하로 유지되어야 한다. 이는 기존 승객의 불편을 최소화하기 위한 조건이다.

- 차량 정원 제한(Capacity Constraint)

- 차량이 수용할 수 있는 최대 탑승 인원은, 요청 시점까지 누적된 승객 수 이상이어야 하며, 이를 위반할 경우 배차 대상에서 제외된다.

- 대기시간 제한(Waiting Time Constraint)

- 사용자가 요청 후 허용 가능한 최대 대기시간 이내에 차량이 도착하지 못할 경우, 해당 차량은 배차 가능성에서 제외된다.

- 실시간성 제약 (Real-Time Constraint)

- 각 요청 처리의 전체 연산시간은 최대 1초로 제한하며, 1초를 초과할 경우 해당 요청은 재요청 절차를 수행하도록 구성한다. 이 과정을 통해 계산 지연 시에도 서비스 연속성을 유지하며, 실시간 응답성 및 안정성을 확보한다.

3.3. 경로 최적화 방안 설계

본 모델은 단순히 최단 경로를 재계산하는 방식이 아니라, 기존 운행 경로 내에 새로운 승하차 요청을 동적으로 삽입할 수 있도록 설계되었다. 이를 위해 각 차량의 현재 경로를 기준으로 다음을 수행한다.

- 각 차량 경로에 대해 삽입 가능한 승하차 위치 쌍을 순회하며, 요청을 추가했을 때 발생하는 우회 거리, 운행 시간 증가량을 계산한다.
- 우회율이 기존 이하이고, 정원과 시간 조건을 만족하는 경우 해당 차량에 요청을 삽입한다.
- 여러 차량이 조건을 만족할 경우, 전략 점수가 최소가 되는 차량을 선택하여 배정한다.

이 방식은 경로의 동적 재구성을 기반으로 하므로, 다수의 요청을 하나의 차량 경로에 유연하게 삽입할 수 있으며, 실시간 수요 대응성과 시스템 전체 효율성을 동시에 향상시킬 수 있다.

3.4. 전략 가중치 조정 및 실험 설계 기반 분석

전략 간 우선순위는 서비스 지역, 시간대, 이용자 특성에 따라 다르게 적용될 수 있다. 이를 반영하기 위해 본 연구에서는 전략 가중치를 다양한 조합으로 설정하고, 실험을 통해 각 조합의 성능을 비교 분석하였으며, 아래와 같은 전략 조합을 기반으로 실험을 설계하였다.

- 균형형 (Balanced)

- 전략 요소(대기시간, 이동거리, 실차율, 접근거리)에 동일한 중요도를 부여한 조합

- 대기시간 우선형 (Speed-first)

- 요청 이후 차량 도착까지의 응답 속도를 최우선으로 고려하는 전략

- 접근성 우선형 (Accessibility)

- 사용자가 승차지점까지 이동해야 하는 거리를 최소화하는데 중점을 두는 전략

• 실차율 우선형 (Efficiency)

• 공차율을 줄이고 수송 효율을 확장하는 전략 이를 통해 환경 조건 변화에 따라 어떤 전략이 유리한지를 파악하고, 향후 동적 가중치 조정 기반 실시간 배차 모델 개발의 기반을 마련하였다.

4. 시뮬레이션 기반 실험 설계

제안된 최적화 모델의 효과성을 검증하기 위해, 다양한 운영 환경을 반영한 시뮬레이션 기반 실험을 설계하였다. 실험 프레임워크는 배차 알고리즘의 전략별 성능 비교 및 민감도 분석을 가능하도록 구성되었으며, 시나리오 유형, 실험 변수, 측정 지표로 구성된다.

4.1. 시뮬레이션 설정 및 활용 데이터

본 실험은 시뮬레이션 설정에 따른 복합 전략 병가를 위해 설계되었다. 실험에는 인천 영종도 지역에서 서비스한 I-MOD의 2021년 5월 7일 배차 요청 데이터를 사용하였으며, 이는 표 2와 같다.

〈표 2〉 실험에 활용된 MOD 실 서비스 데이터 요약

구분	내용
배차 요청 발생 일자	2021-05-07
배차 요청 건수	6,299
배차 성공 건수	347
배차 실패 건수	5,952
배차 성공률 (%)	5.51

4.2. 실험 변수 및 측정 지표

실험은 차량 투입 수 및 전략 조합에 따른 판별 기준을 변수로 설정하여 8가지 시나리오에 대한 배차 성능을 평가하는 방식으로 진행하였다.

- 차량 수 : 4대, 8대
 - 전략 조합
 - 균형형
 - 대기시간 우선형
 - 접근성 우선형
 - 실차율 우선형
- $w_1 : w_2 : w_3 : w_4 = 1 : 1 : 1 : 1$
 $w_1 : w_2 : w_3 : w_4 = 1 : 1 : 3 : 1$
 $w_1 : w_2 : w_3 : w_4 = 1 : 1 : 1 : 3$
 $w_1 : w_2 : w_3 : w_4 = 1 : 1 : 1 : 3$

모델의 성능 평가는 다음의 네 가지 정량 지표를 중심으로 수행하였다.

- 배차 성공률 : 요청 대비 성공적으로 배차된 비율
- 평균 대기시간 : 요청 시점부터 차량 도착까지 소요된 평균 시간
- 평균 이동거리 : 차량이 요청을 처리하기 위해 이동한 평균 거리
- 실차율 : 차량이 승객을 태운 상태로 운행한 비율

5. 실험 결과 및 분석

전략별 시나리오 실험 결과는 복합 전략의 효율성과 전략별 특성을 명확히 보여주었다. 다음 표 3은 차량 제약 조건 설정에 따른 전략별 주요 실험 결과에 대한 분석 결과이다.

균형형 전략은 차량 4대 기준에서 실차율 중심의 성능이 강점이었지만, 차량 8대로 증가하면서 배차 처리율(99.24%)과 실차율 간의 균형성이 더욱 명확하게 나타났다. 평균 대기시간은 17.24분으로 개선되었고, 이동거리도 1.24km 수준으로 효율적인 운행이 가능함을 보여준다.

대기시간 우선형 전략은 8대 투입 시에도 최고의 배차 성공률(14.45%)과 짧은 이동거리(1.206km)를 기록하며 빠른 응답성과 효율적 배차를 동시에 실현하였다. 대기시간은 17.27분으로, 균형형과 유사한 수준에서 안정적으로 유지되었다.

접근성 전략은 가장 짧은 평균 대기시간(14.05분)과 최단 이동거리(1.093km)를 기록하며, 이용자 친화적인 배차 전략으로 매우 우수한 성과를 보였다. 반면 실차율은 시간 기준 64.83%, 거리 기준 77.31%로, 운송 효율 측면에서는 상대적으로 낮은 편이다. 실차율 우선형 전략은 여전히 가장 높은 거리 실차율(79.52%)을 기록하였으나, 대기시간(34.26분)은 모든 전략 중 가장 높고, 처리율도 97.32%로 다소 낮았다. 이는 차량을 효율적으로 채우는 데 집중한 결과로, 빠른 응답성보다는 공차 최소화와 운영비 절감에 유리한 특성을 지닌다.

〈표 3〉 차량 4대 기준 전략별 성능 평가 결과

전략 구분	배차 성공률 (%)	배차 처리율 (%)	평균 대기 시간 (분)	평균 이동 거리 (km)	시간 실차율 (%)	거리 실차율 (%)
균형형	11.67	35.52	35.34	1.618	94.99	95.11
대기시간 우선형	11.94	38.70	35.76	1.569	94.85	94.76
접근성 우선형	11.89	33.56	37.15	1.588	94.24	94.26
실차율 우선형	11.91	37.69	36.04	1.638	94.35	94.41

〈표 4〉 차량 8대 기준 전략별 성능 평가 결과

전략 구분	배차 성공률 (%)	배차 처리율 (%)	평균 대기 시간 (분)	평균 이동 거리 (km)	시간 실차율 (%)	거리 실차율 (%)
균형형	14.43	99.24	17.24	1.241	63.41	79.06
대기시간 우선형	14.45	99.02	17.27	1.206	64.03	78.29
접근성 우선형	14.45	98.17	14.05	1.093	64.83	77.31
실차율 우선형	14.40	97.32	34.26	1.451	61.69	79.52

추가적으로, 제안된 모델의 실시간 처리 성능을 검증하기 위해 각 배차 요청에 대한 평균 연산 소요시간을 측정하였다. 전체 6,299건의 요청 중 배차 연산에 소요된 시간은 총 3초로 전체 요청에 대해 평균 0.47ms의 내부 처리 시간을 가지며, API 구성 시 1회 평균 150ms로 사용자 요청을 처리하는 것으로 확인하였다.

6. 결론 및 향후 연구

본 연구는 수요응답형 교통(DRT)의 효율적인 운영을 위해, 복합 전략 요소를 반영한 실시간 배차 시뮬레이션 및 최적화 모델을 제안하고, 실제 서비스 데이터를 기반으로 다양한 전략 조합에 대한 성능을 비교·분석하였다. 특히, 배차 전략 요소인 대기시간, 이동거리, 실차율, 접근거리 간의 상호작용과 전략적 우선순위 설정의 효과성을 정량적으로 검증하였다. 차량 투입 조건에 따른 실험 결과를 기반으로 전략별 특성을 아래와 같이 분석하였다.

- 복합 전략 조합은 전체적인 서비스 품질과 수송 효율을 고르게 유지하며, 안정적인 운영에 유리
 - 차량 수 증가는 대기시간과 배차율 향상에 긍정적인 영향을 주었으나, 일정 수준을 초과하면 실차율은 오히려 정체 또는 악화되는 포화 현상이 관찰됨
 - 특히, 실차율 우선형 전략은 수송 효율은 높지만 사용자 응답성에서는 열세를 보여, 서비스 만족도 관점에서 보완이 필요한 전략임을 확인
- 복합 전략 기반 시뮬레이션 모델을 기반으로 향후 아래와 같은 방향으로 연구를 확장하고자 한다.
- 실시간 가중치 조정 알고리즘 개발 : 강화학습 기반 정책을 활용한 환경 적응형 전략 가중치 조정
 - 수요 예측 기반 차량 재배치 : 예측 모형과 연계한 사전적 차량 배치 및 운영 패턴 최적화

사사의 글

본 연구는 한영공동R&D과제인 “모빌리티원: AI 기반 수요예측 및 의사결정을 위한 공공교통 디지털트윈(P0025822)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 홍상연, 박세현, “서울시 수요응답형 이동서비스(DRT) 도입방안,” 정책리포트, 2024.
- [2] 임서현, 홍성진, “대중교통 부족지역 등 DRT 도입 지침(안) 연구,” 한국교통연구원 연구보고서, 2024.
- [3] 이정호, 오재학, “지방자치단체의 대중교통 소외지역 수요응답형 교통수단(DRT) 제도 도입에 따른 모형 및 기여도 분석,” 한국교통연구원 정책보고서, 2023.
- [4] 한상욱, 김동규, 문세동, “수요응답형 교통 시스템의 승객 편의성 및 운영 효율성 제고를 위한

인센티브 전략 수립,” 한국교통학회논문지, 제42권 제2호, pp. 180 - 195, 2024.

- [5] J. Kim, J. Jeong, and S. Park, “A Clustering Based Multi-Vehicle Routing Methodology for Demand Responsive Transit Systems,” Journal of the Korean Society for Intelligent Transportation Systems, vol. 19, no. 6, pp. 85 - 93, 2020.
- [6] D. Guan et al., “Vehicle Dispatch and Route Optimization Algorithm for Demand-Responsive Transit,” Processes, vol. 10, no. 12, 2022.
- [7] X. Wu, L. Yang, and L. He, “Optimizing Multi-Vehicle Demand-Responsive Bus Dispatching,” Sustainability, vol. 15, no. 7, 2023.
- [8] J. Zhao et al., “Path-Based Dynamic Vehicle Dispatch Strategy for Demand-Responsive Transit Systems,” Transportation Research Record, vol. 2675, no. 7, pp. 445 - 456, 2021.
- [9] S. Valle, A. Oulamara, and W. R. Cherif-Khettaf, “New Online Reinsertion Approaches for a Dynamic Dial-a-Ride Problem,” Journal of Computational Science, vol. 47, p. 10119, 2020.
- [10] C. Ackermann and J. Rieck, “Multiple Plan Approach for a Dynamic Dial-a-Ride Problem,” OR Spectrum, vol. 47, 2025.