

혼합 교통 환경에서 CAV의 전략적 개입을 통한 협력적 합류 제어

최 경 환¹⁾·신 성 재²⁾·서 민 석¹⁾

KAIST 조천식모빌리티대학원¹⁾·GIST 기계로봇공학과²⁾.

Cooperative Merging in Mixed Traffic Based on Strategic Influence of Connected Automated Vehicles on Human-Driven Vehicle Behavior

Kyunghwan Choi^{*1)}·Seongjae Shin²⁾·Minseok Seo¹⁾

¹⁾CCS Graduate School of Mobility, KAIST, 193, Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34501, Korea

²⁾Department of Mechanical and Robotics Engineering, GIST, 123, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea

Abstract : 커넥티드 자율주행차(Connected and Automated Vehicles, CAV)를 활용한 고속도로 진입로에서의 협력적 합류 제어는 교통 흐름 개선과 연료 효율 향상에 크게 기여할 수 있다. 그러나 CAV와 인간 운전차(Human-Driven Vehicles, HDV)이 혼재된 교통 환경에서는 HDV의 예측 불가능한 주행 행동이 안정성과 협력 제어에 있어 큰 도전 과제로 작용한다. 본 연구에서는 의도 불확실성을 가진 HDV 와의 상호작용을 고려하여, 제어 구역 내 모든 CAV에 대한 최적화 기반 협력 합류 전략을 제안한다. 핵심 아이디어는 HDV 앞에 위치한 CAV의 속도를 전략적으로 조절함으로써, 인접 차로의 다른 CAV 가 HDV 보다 앞서 안정적으로 진입할 수 있도록 HDV의 행동에 영향을 주는 것이다. 다양한 후보 감속 패턴에 대해 CAV의 통과율을 평가함으로써 최적의 패턴을 식별하며, 새로운 차량이 제어 구역에 진입할 때마다 동적 최적화를 수행하여 HDV의 불확실성을 효과적으로 관리한다. 혼합 교통 시나리오를 대상으로 한 실험 결과, 제안된 전략은 기존 최적화 기반 방식 대비 평균 통행 지연 시간을 최대 31%까지 감소시키는 것으로 나타났다..

Key words : Connected and automated vehicles(커넥티드 자율주행차), Cooperative control(협력 제어), Human-driven vehicles(인간운전차), Mixed traffic(혼합 교통), On-ramp merging(진입로 합류)

1. 서 론

커넥티드 자율주행차(Connected and Automated Vehicles, CAV)의 발전은 교통 흐름과 안정성을 향상시키고, 에너지 소비와 온실가스 배출을 줄이는 등 모빌리티 산업 전반에 긍정적인 변화를 가져올 것으로 전망된다. 특히 합류 구간이나 교차로와 같은 복잡한 교통 환경에서 커넥티드 자율주행차를 통해 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.^{1), 2), 3)} 그러나 지금까지 대다수의 연구는 CAV 가 전면적으로 보급된 상황을 가정하고 있으며, 특히 기존 방법들은 CAV 가 제어 구간에 진입할 때만 HDV 궤적을 예측하거나⁵⁾ CAV 가 주도하는 소대에 HDV 를 단순히 포함시키는 방법⁶⁾을 고려하였다.

혼합 교통 환경에서 인간 운전자의 다양한 주행

행동에 대응하는 CAV 의 전략적 의사결정은 해결해야 할 중요한 과제이다.

본 논문에서는 병목 현상과 사고가 발생하기 쉬운 합류 구간을 대표적인 사례로 삼아, 혼합 교통 환경에서 다수의 CAV 협력 문제를 다룬다. 또한 여러 차량 간의 상호작용을 고려하면서 CAV 가 HDV 와 어떻게 상호작용 하는지와 HDV 의 행동에 어떤 영향을 미치는지를 분석한다.

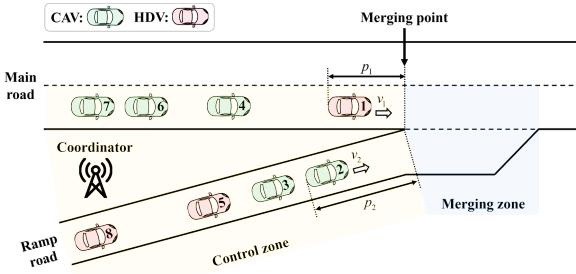


Fig. 1 합류 시나리오

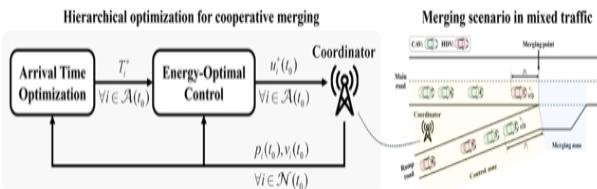


Fig. 2 계층적 최적화 접근법 구조

2. 문제 정의

2.1 모델링 프레임워크

본 논문에서는 Fig. 1 과 같이 주도로(main road)와 진입로(ramp road)가 교차하는 상황에서 다수 CAV 의 협력 주행 문제를 다룬다. 제어 구간(control zone)에서는 모든 CAV 와 HDV 의 상태를 모니터링 할 수 있으며, CAV 에 제어 신호를 전송할 수 있다. 합류 구간(merging zone)은 실제 합류가 이루어지는 구간으로, 본 연구에서는 제어 구간 내에서 협력적 합류 제어가 완료되면 이를 통해 충분한 간격을 확보한 뒤 안전하게 합류 지점(merging point)을 통과할 수 있다고 가정한다.

시간 t 에서 제어 구간에 진입하는 차량을 $\mathcal{N}(t) = \{1, \dots, N(t)\}$ 라고 하며, $N(t)$ 는 해당 시점에 제어 구간에 존재하는 차량 수를 의미한다.

$\mathcal{A}(t) \subset \mathcal{N}(t)$ 는 제어 구간 내에 있는 CAV 집합을 나타내며 $\mathcal{H}(t) \subset \mathcal{N}(t)$ 는 HDV 집합을 의미한다. 차량 인덱스 i 는 제어 구간 진입 순서에 따라 부여되며, 먼저 진입한 차량일수록 낮은 번호가 할당된다. 집합 $\mathcal{N}(t)$ 는 샘플링 시간마다 업데이트 되며 제어 구간 내 차량의 진입과 이탈을 지속적으로 추적한다.

차량의 동역학은 다음과 같이 이중 적분 모델로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{p}_i(t) &= v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t) \end{aligned} \quad (1)$$

각각의 변수는 차량의 종방향 위치 p_i , 속도 v_i , 제어 입력 u_i 를 의미한다. 제어 입력과 속도는 다음과 같이 제한된다.

$$u_{min} \leq u_i(t) \leq u_{max} \quad (2)$$

$$0 \leq v_i(t) \leq v_{max} \quad (3)$$

또한 인접 도로 상에서 차량 i 와 차량 j 의 측면 충돌을 방지하기 위해 다음 제약 조건이 적용된다.

$$|T_i - T_j| \geq T_{lat}, \forall j \text{ such that } r_j \neq r_i \quad (4)$$

T_i, T_j 는 각 차량의 합류 지점 도착 시간을 의미하며 이를 통해 안전 시간 간격 $T_{lat} > 0$ 이 정의된다. 또한 전·후방 충돌을 막기 위해 다음과 같은 제약 조건이 부과된다.

$$p_j(t) - p_i(t) \geq d_{safe} + t_{safe}^h v_i(t), \quad (5)$$

$$j = \max\{k \mid r_k = r_i, k < i\}$$

식 (5)는 다음과 같이 식 (4)와 같은 형태로도 정의할 수 있다.

$$T_i - T_j \geq T_{rear}, j = \max\{k \mid r_k = r_i, k < i\} \quad (6)$$

2.2 최적화 문제 설정

본 논문에서는 최적 조정 문제(optimal

coordination problem)를 상위 단계와 하위 단계로 구분하는 계층적 최적화 접근법(hierarchical optimization approach)을 제안한다. 전체 최적화 구조는 Fig. 2 와 같다.

2.2.1 상위 단계: 도착 시간 최적화

도착 시간 최적화(arrival time optimization)는 현재 시작에서 CAV 의 최적 도착 시간 T_i^* 을 계산하여 교통 흐름을 향상시키고 측면 충돌과 전·후방 충돌을 방지한다. 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \min_{T_i, \forall i \in \mathcal{A}(t_0)} \sum_{i \in \mathcal{N}(t_0)} TTD_i^2 \\ & \text{subject to} (1), (2), (3), (4), (6), \forall i \in \mathcal{A}(t_0) \end{aligned} \quad (7)$$

문제 (7)은 전체 차량 집합 $i \in \mathcal{N}(t_0)$ 을 고려하여 모든 CAV 와 HDV 의 주행 시간 지연(Travel Time Delay, TTD)의 제곱합을 최소화한다. 차량 i 의 TTD는 다음과 같이 정의된다.

$$TTD_i = T_i - T_i^{des} \quad (8)$$

여기서 T_i^{des} 는 차량 i 가 제어 구역에 진입하는 순간 결정되는 원하는 도착 시간을 의미하며 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_i^{des} \\ = \text{Time of vehicle entering the control zone} \\ + \frac{\text{Control zone length}}{v_{max}} \end{aligned} \quad (9)$$

문제 (7)은 CAV 도착 시간 벡터를 사용하여 다음과 같이 벡터 형태로도 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{T}_{\mathcal{N}(t_0)}} \| \mathbf{T}_{\mathcal{N}}(t_0) - \mathbf{T}_{\mathcal{N}}^{des}(t_0) \|^2 \\ & \text{subject to } \mathbf{f}(\mathbf{T}_{\mathcal{A}}(t_0), \mathbf{T}_{\mathcal{H}}(t_0)) \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (10)$$

$\mathbf{T}_{\mathcal{X}}^{(des)}(t_0) = [T_i^{(des)}]_{\forall i \in \mathcal{X}(t_0)}$ 는 도착 시간 벡터를 의미하며 $\mathbf{f}(\cdot, \cdot)$ 는 모든 제약 조건을 벡터 형태로 표현한 것이다. 재정의된 식 (10)을 통해 문제의 해가 HDV 도착 시간에 의존하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 HDV 는 CAV 의 행동에 반응하기 때문에 HDV 의 도착 시간을 정확히 예측하는 것은 어렵다. 따라서 이 문제의 해는 CAV 와 HDV 간의 상호작용을 고려해야 하며, 그렇다고 HDV 의 미래 행동 예측에 과도하게 의존해서는 안된다.

2.2.2 하위 단계: 에너지 최적 제어

앞서 상위 단계에서 CAV 의 최적 도착 시간이 결정되면, 에너지 최적 제어 문제(energy-optimal control problem)는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \min_{u_i(t), t_0 \leq t \leq T_i^*} \frac{1}{2} \int_{t_0}^{T_i^*} u_i^2(t) dt, \text{ subject to} \\ & (1), (2), (3), (5) p_i(T_i^*) = 0, u_i(T_i^*) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 최적화 문제는 CAV i 가 최소한의 제어 입력으로 최적 도착 시간 T_i^* 에 합류 지점에 도달하도록 하며(즉, $v_i(T_i^*) = 0$), 최종 시점에서 제어 입력이 $u_i(T_i^*) = 0$ 이 되도록 한다. 식 (11)의 제약 조건 (5)에서 차량 j 가 HDV 이면 $p_j(t)$ 의 궤적 정보를 정확히 예측하기 어렵기 때문에 다음과 같이 완화된 제약 조건을 사용한다.

$$\begin{aligned} & p_j(t_0 + t_s) - p_i(t_0 + t_s) \\ & \geq d_{min} + T_{min} v_i(t_0 + t_s), \\ & j = \max\{k \mid r_k = r_i, k < i\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 t_s 는 샘플링 시간을 나타낸다. 만약 상태 제약 조건 (3), (12) 및 입력 제약 조건 (2)가 활성화되지 않은 경우 문제 (11)의 비제약 해는 다음과 같다.

$$u_i^{uc}(t_0 + \Delta t) = 6a_i \Delta t + 2b_i \quad (13)$$

3. 최적 문제 해

3.1 상위 단계: 도착 시간 최적화

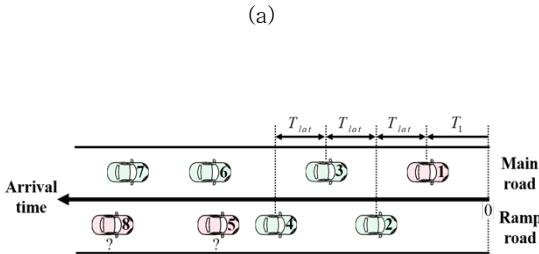
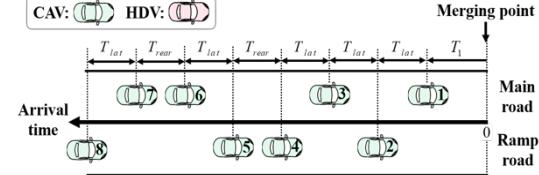
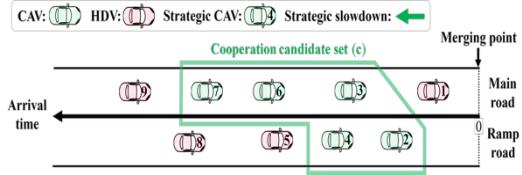


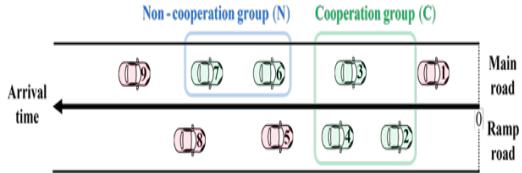
Fig. 3 합류 시나리오 예시

문제 (7) 또는 문제 (10)에서 제어 구역 내의 모든 차량이 CAV 일 경우에는 쉽게 최적해를 구할 수 있다. 이 경우에는 Fig. 3 (a)와 같이 CAV 간의 최소 시간 간격 T_{rear} 을 유지하도록 도착 시간을 배정하면 된다. 하지만 Fig. 3 (b)와 같이 HDV 가 존재하는 경우 HDV의 미래 궤적이 불확실하여 정확히 결정할 수 없다. 많은 기존 연구들에서는 HDV 의 미래 궤적을 예측하여 최적화 문제에 적용하였으나, 운전자의 미세한 조향 및 가속 입력을 정확히 예측하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 선행 CAV 의 감속을 통해 HDV 의 도착 시간을 제어하는 방법을 제안한다. Fig. 3 (b)에서 CAV 4가 속도를 줄이면 뒤따라 주행하는 HDV 5 역시 속도를 감속해야 하므로 이를 통해 HDV 의 도착 시간을 지연시키는 전략이다.

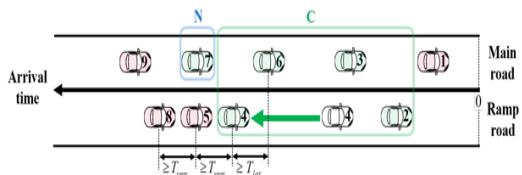
또한 Fig. 4 와 같이 인접 도로에 있는 CAV 와의 협력도 가능하며 Fig. 4(a)에서는 인접 도로에서 연속적인 CAV 그룹이 협력 후보 집합(cooperation candidate set)을 형성한다. 각 후보 집합에서 전략적 CAV 를 선택하고(Fig. 4 (a)에서는 CAV 4) 전략적 감속 결정에 따라 협력 패턴이 달라진다. 만약 Fig. 4 (b)와 같이 전략적 CAV 가 속도를 늦추지 않는다면(패턴 0) CAV 2, 3, 4 는 협력 그룹(cooperation group)을 형성하여 자신의 도착



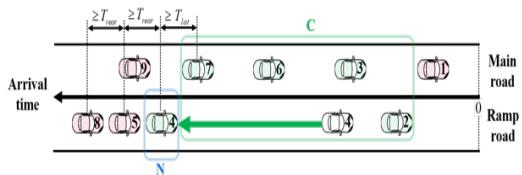
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 전략적 CAV 에 따른 다양한 협력 패턴

시간을 조정한다. 이때 CAV 6, 7 과 같은 비협력 그룹(non-cooperation group)은 HDV 5, 8 과의 측면 충돌을 피하기 위해 독립적으로 도착 시간을 계산해야 한다. Fig. 4 (c)와 같이 전략적 CAV 가 속도를 늦춘다면(패턴 1) CAV 6 도 협력 그룹에 포함되어 HDV 사이로 합류할 수 있게 된다. 이 경우 CAV 7 은 여전히 개별적으로 HDV 와의 측면 충돌을 회피해야 한다. Fig. 4 (d)의 경우처럼 전략적 CAV 가 더 많이 감속한다면(패턴 2) CAV 7 또한 그룹 C 에 포함되어 HDV 사이로 합류할 수 있다. 이러한 패턴들

중 가장 좋은 협력 패턴은 평가를 통해 결정된다.

이러한 전략적 감속(strategic slowdown)⁷⁾ 개념이 CAV에서는 처음 도입되었으며, 이전 연구에서는 합류 순서를 용이하게 하는 데만 초점을 맞추었으며, HDV 궤적의 불확실성 완화는 다루지 않았다.

3.2 하위 단계: 에너지 최적 제어 해

문제 (11)의 비제약 해는 식 (13)과 같이 제시되었다. 제약 조건 (3)은 이미 도착 시간 최적화 문제에서 비제약 도착 시간 T_i^{uc} 을 계산할 때 고려되었으므로, 제어 입력 제약 조건 (2)와 완화된 전·후방 충돌 방지 제약 조건 (12)만 고려하면 된다. 제약 조건 (12)는 이산 시간 도메인(discrete time domain)에서 입력 제약 조건으로 재구성 될 수 있다. 따라서 차량 i 의 위치와 속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i(t_0 + t_s) = p_i(t_0) + t_s v_i(t_0) + \frac{1}{2} t_s^2 u_i(t_0) \quad (14)$$

$$v_i(t_0 + t_s) = v_i(t_0) + t_s u_i(t_0) \quad (15)$$

차량 j 의 위치는 등속 가정 하에서 다음과 같이 계산된다.

$$p_j(t_0 + t_s) = p_j(t_0) + t_s v_j(t_0) \quad (16)$$

위 식들을 식 (12)에 대입하면 다음과 같은 입력 제약 조건이 도출된다.

$$\begin{aligned} u_i(t_0) &\leq \\ \frac{p_j(t_0) - p_i(t_0) + t_s(v_j(t_0) - v_i(t_0)) - d_{min} - T_{min} v_i(t_0)}{T_{min} t_s + t_s^2 / 2} & \quad (17) \\ &:= u_{safe}(t_0) \end{aligned}$$

제약 조건 (2)가 활성화되면 제약된 해는 비제약 해가 제약 조건을 위반하지 않도록 제약 조건 범위 내에서 유지해야 한다. 이 경우 나머지 시간 동안은 해의 크기를 증가시켜 제약 위반을 보상해야 한다. 따라서 제어 입력 제약 조건 (2)를 고려할 때, 해당 시각에서의 제약된 해는 비제약 해를 제약 조건 범위 내로 제한한 형태로 다음과 같이 정의된다.

$$u_i^*(t_0) \leftarrow \min(\max(u_i^{uc}(t_0), u_{min}), u_{max}) \quad (18)$$

제약된 해는 다시 한 번 재구성된 충돌 방지 조건에 의해 제한되어야 하며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$u_i^*(t_0) \leftarrow \min(u_i^*(t_0), u_{safe}(t_0)) \quad (19)$$

4. 실험 결과

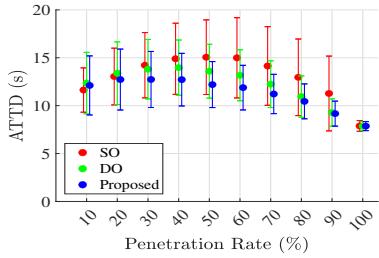
제안한 방법은 Fig. 1 과 같은 환경에서 검증되었으며, 제어 구간의 길이는 200m로 설정하였다. 합류 구간의 길이는 50m로 설정하였다.

HDV는 IDM(Intelligent Driver Model)을 사용하여 모델링하였으며 실험에서는 제안 방법이 교통 흐름을 향상 시키는지 확인하기 위해 20 대의 차량(주도로에 10 대, 진입로에 10 대)이 존재하는 상황에서 CAV 차량의 비율(penetration rate)을 조절하며 이를 검증하였다. 차량 i 의 제어 구간 진입 시각은 $iT_g + 0.8T_gx$ 에 따라 무작위로 결정되는데 여기서 x 는 -1 과 1 사이에서 균일하게 분포하는 난수이며, 이를 통해 제어 구간에 진입하는 두 차량 간의 간격이 $0.4T_g$ 보다 크도록 보장하였다. 실험에서는 $T_g = 0.5, 1, 1.5, 2$ 를 사용하였다. 제안한 방법을 FIFO(First-In-First-Out)과 DO(Dynamic Optimization)과 비교하였으며, FIFO는 제어 구간에 진입하는 차량들의 진입 순서에 따라 차량 사이에 안전 시간 간격 T_{safe} 을 부여하는 방식으로 구현하였다. 실험에서는 평균 주행 지연 시간(Average Travel Time Delay, ATTD)을 비교 지표로 사용하였다.

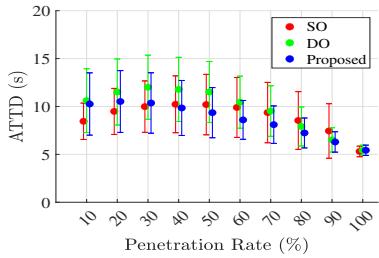
4.1 평균 주행 지연 시간

$$ATTD = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M TTD_i \quad (19)$$

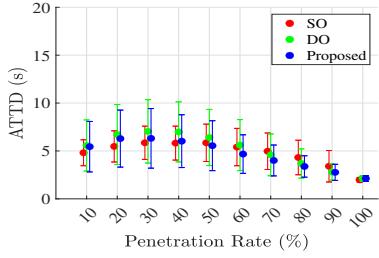
Fig. 5 는 FIFO 와 DO, 제안 방법을 ATTD를 사용하여 비교한 결과이다. 모든 전략에서 CAV 차량 비율이 증가할수록 ATTD 가 감소하였는데, 이는 CAV 차량이 증가할수록 차량 간 충돌 가능성을 줄여주기 때문이다. FIFO 는 CAV 비율이 50%일 때까지는 ATTD가 증가하다가 이후 급격히 감소하는



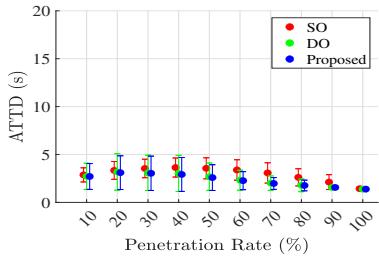
(a)



(b)



(c)

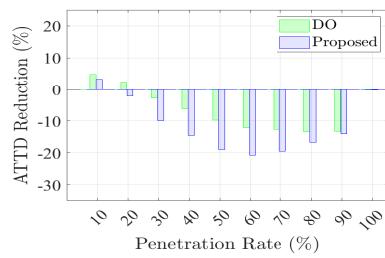


(d)

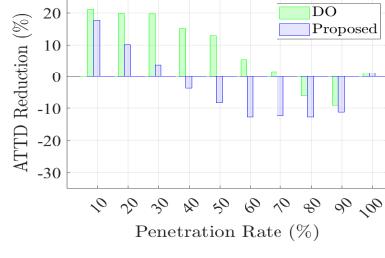
Fig. 5 FIFO, OD, 제안 방법의 ATTD 비교

반면 DO 와 제안 방법은 전반적으로 FIFO 보다 낮은 ATTD 를 보였다.

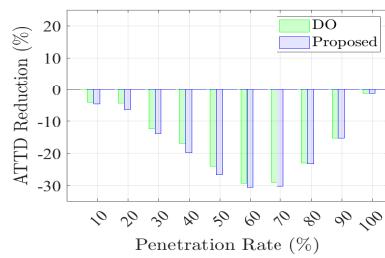
Fig. 6 은 FIFO 와 비교 시에 DO 와 제안한 방법의 ATTD 감소율을 나타낸 그라프로 두 방법 모두 CAV 비율이 50 ~ 70% 까지 증가함에 따라 감소율이 증가하였으며 이는 50 ~ 70% 의 비율이 가장



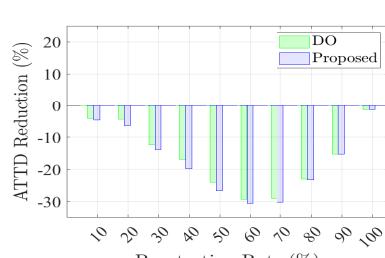
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 FIFO 대비 OD, 제안 방법의 ATTD 감소율 비교

효과적임을 나타낸다. DO 와 제안한 방법의 감소율 차이는 $T_g = 1$ 과 $T_g = 1.5$ 에서 가장 두드러졌으며 이는 이러한 조건에서 제안한 방법의 전략적 감속이 중요한 영향을 미쳤음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 혼합 교통 환경에서 CAV의 협력적 합류를 위한 최적화 기반 전략을 제안하였다. 제안한 방법은 계층적 최적화 프레임워크를 활용하여 상위 단계에서는 CAV의 도착 시간을 최적화하고, 하위 단계에서는 각 CAV의 에너지 제어 입력을 결정하였다. 이러한 결과는 제안한 전략이 교통 흐름 개선 및 에너지 효율성 확보에 효과적임을 보여주며, 특히 혼합 교통 환경에서 중간 수준의 CAV 보급률에서도 뚜렷한 성능 향상을 달성할 수 있음을 시사한다. 다만 실제 도로 적용을 위해서는 통신 지연, 인프라 제약과 같은 현실적 요인을 반영한 연구가 필요하다.

References

- 1) J. Rios-Torres, A. A. Malikopoulos, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles 2018, 3, 4 453.
- 2) J. Ding, H. Peng, Y. Zhang, L. Li, IET Intelligent Transport Systems 2020, 14, 1 56.
- 3) W. Lin, X. Hu, J. Wang, Advanced Intelligent Systems 2024, 2300692.
- 4) A. Alessandrini, A. Campagna, P. Delle Site, F. Filippi, L. Persia, Transportation Research Procedia 2015, 5 145.
- 5) V.-A. Le, H. M. Wang, G. Orosz, A. A. Malikopoulos, In 2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2023 4150–4155.
- 6) J. Shi, K. Li, C. Chen, W. Kong, Y. Luo, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2023, 24, 10 11185.
- 7) Z. Sun, T. Huang, P. Zhang, Transportation research part C: emerging technologies 2020, 120 102764.