

고속도로 자율주행 차량의 차로 변경 지원을 위한 V2I 기반 협력 주행 방안 시뮬레이션

옥 민 환*

A Cooperative Driving Scheme in V2I for Lane Changes of Autonomous-Driving Vehicles on Highways

Min-Hwan Ok*

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2501C1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다

요 약

차로 변경 시 타 차량의 협력이 요구되며 협력 주행은 통일되어야 안전주행이 저해되지 않는다. 통신 및 연산 성능의 실시간성을 위해 고성능 장비를 설치한 도로변 인프라로부터 V2I 통신으로 통일된 협력 주행을 하는 방안을 제안한다. 차로 변경에 적절한 크기의 여유공간이 가까이 없을 때 마련하는 협력 주행 방안으로 차로 사용률이 높을수록 고속도로 자율주행차의 안전주행에 도움이 될 것이다.

Abstract

When a vehicle is changing its lane the other vehicles should cooperate, and in the cooperation vehicles need be coordinated as one group not to deteriorate the driving safety. This paper proposes a cooperative driving coordination through V2I communication from roadside infrastructure equipped with high-performance facility for communication and computation in real-time. The cooperative driving scheme to prepare space sufficient for lane change would help the autonomous-driving vehicles on highways in driving safety where no sufficient space is nearby due to high usage of the lane.

Keywords

lane change, autonomous driving, leading vehicle, speed range, V2I communication

1. 서 론

자동차 자율주행 기술은 미국자동차공학회(SAE)에서 제시한 자율주행 Level 3에서 자율주행 Level 4를 목표로 기술 개발이 진행되고 있다. 고속도로 주행 중인 모든 차량의 주행상태를 상시 파악하고

있다면, 사고를 방지하거나 사고 수준을 낮출 수 있다. 그런 목적의 자율주행 지원(Guidance) 시스템을 제안하였으며[1] 이전 연구에서 미진했던 협력 주행(Cooperative driving)의 한 가지인 차로 변경을 위한 공간 확보를 차량들이 협력적으로 수행할 수 있는 기능을 제안한다. 차량이 개별적으로 차로 변경 가

* 철도기술연구원 HTX연구실 책임연구원
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2498-058X>

• Received: Aug. 27, 2025, Revised: Nov. 02, 2025, Accepted: Nov. 05, 2025
• Corresponding Author: Min-Hwan Ok
Dept. of HTX Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea
Tel.: +82-31-460-5287, Email: panflute00@naver.com

능공간임을 판단, 단독 변경하는 것보다 수월하다.

차로 사용률이 높아질수록(70%, 80%) 도로상 모든 주행 차량이 하나의 통신그룹으로 V2V 통신을 하려면 비례적으로 높은 통신 장치(device)의 성능이 요구되며, 그룹통신(One-to-many 등)의 중심 차량은 어떤 차량이라도 될 수 있으므로 중심 차량이 된 차량의 통신 성능이 그룹통신에 적합한 고성능이 아닐 경우 하나의 통신그룹이 안될 수 있다. 통신그룹이 다른 차량이 주위 차량일 경우 모든 차량이 통일된 협력 주행을 하는데 그룹 간 중계(Indirect) 통신이 필요하여 정보의 실시간성이 저하된다.

하나의 차량이 아닌 도로변 인프라에서 그룹통신의 중심 역할을 맡으면 고성능 통신 장비(Equipment)로 모든 주행 차량을 하나의 그룹으로 V2I 통신을 통해 통일된 협력 주행을 하는데 실시간성을 만족하기에 유리하다. 관련 연구[2]도 V2I와 유사한 통신방식인 LTE(Long Term Evolution)-V2X를 대상으로 통신 확장성 개선 제안을 하고 있다. LTE 같은 V2I 통신 형태는 이미 광범위하게 사용되는 기술이다.

II. 제안 기법

2.1 이전 연구

제안 기법의 목적은 차로 변경하려는 차량이 있을 때 인접 차로의 차량들이 적절한 자리에 빈 공간이 마련되도록 협력 주행하는 것으로서, 추종차량들의 주행에 영향을 최소화하도록 주행 속도의 1% 또는 2%, 즉 100km/h 기준으로 1km/h 또는 2km/h의 속도 변화량만으로 빈 공간이 마련되도록 한다.

이전 연구[1]에서 제안된 지원시스템은 도로변 인프라에 관할 구간(예, 1km 범위)을 주행하는 모든 차량으로부터 주행 중인 차로 등 주요 정보를 모은다. 통신상 충돌을 고려하여 동기식 통신으로 차량 정보를 받아 차로별 주행 차량 수에 따른 가능속도대를 계산하여 모든 차량에 방송하여 차량 안전주행을 돕는다. 매 1초마다 갱신되기 때문에 통신 성능과 연산 성능이 높은 도로변 인프라가 이용된다.

이전 연구와 유사한 형태의 관련 연구[3]에서는,

도로변 장치에서 레이더와 카메라 등으로 주행 차량들의 데이터를 모아 주행 차량들에 제공하고, 클라우드에 있는 C-ITS 플랫폼에서 수집해 교통 흐름을 원활하도록 관리할 정보로 이용하는 시스템을 구상한다. 실험 결과상에서 차량에서 도로변 장치로는 평균 수 ms (2.1ms), 차량에서 도로변 장치를 거쳐 클라우드 플랫폼까지는 평균 수십 ms (27.8ms)의 통신 지연을 보이는데 이런 부가된 지연이 실시간성에 부정적이므로 도로변 장치에 연산 장비를 함께 설치하여 도로변 장치에서 연산 결과를 곧바로 주행 차량들에게 제공하여 최대한 지연 시간을 줄일 수 있는 도로변 인프라로 시스템이 구성된다.

차량추종 행동에 대해 주로 차량 열을 대상으로 수학적 모델링이 되어 있는 연구[4]에서는 ACC-CACC 모델에서 통신하는 자율주행차가 통신 없는 자율주행차보다 선두차량에 두 배 가깝게 주행 가능하다고 분석된다. 그러나 물리적 조건으로 타이어 마찰력을 최대한 활용하는 것이 관건일 정도[5]로 도로 상태 변이(포트홀)와 기상 등을 고려해야 하여 이상적인 주행 조건만을 가정할 수는 없다.

2.2 연장 여유공간

적정 안전거리에 주행 차량을 포함한, 차로를 차지한 직사각형을 ‘주행 창’이라 부른다. 이어 달리는 두 차량 간의 거리가 주행 창 길이의 절반 초과면 두 차량은 같은 차량 열에 속하지 않는다고 결정한다. 따라서 한 차량 열의 앞쪽 빈 공간과 뒤쪽 빈 공간을 합치면 주행 창 하나가 들어갈 빈 공간이 마련된다. 선두차량의 속도를 낮추어 추종차량들도 선두차량만큼 감속하게 하며 차량 열 앞쪽 빈 공간을 추종차량 간의 빈 공간을 줄인 만큼씩 늘이는 방법을 ‘밀집화’라 부르기로 하며 밀집화로 생겨나는 주행 창 하나가 들어갈 수 있는 공간을 “연장 여유공간”이라 부르기로 한다. 밀집화를 마치면 밀집화 전의 가능속도대로 선두차량에서 재조정된다. 추종차량 간의 빈 공간이 거의 없더라도 차량 열 뒤쪽의 빈 공간이 있으므로 후행 차량 열에는 감속이 일어나지 않고 밀집화를 마친 차량 열과 이어지게 된다.

차로 변경하려는 차량과 상대 차량의 대상 선두 차량의 속도는 다르기에 차로 변경 시점 또한 고려되어야 한다. 가능속도대 조정에 알맞은 선두차량이 나타나는 것은 랜덤하며, 그 선두차량의 속도는 미리 알 수 없다고 전제하여, 차로 변경을 위한 밀집화를 차량 열들의 주행 시뮬레이션으로 평가해본다. 이전 연구[1]에서 개발된 시뮬레이터가 이용된다.

2.3 여유공간 연장을 위한 차량 열 선택

연장 여유공간으로 연장시킬 빈 공간을 선택하는 것은 크게 두 가지 과정으로 이루어진다. 첫 번째로 상대적으로 짧은 길이의 차량 열들을 후보로 하기 위해, 상대 차량의 가장 가까운 차량 열부터 시작하여 차량 열들을 정렬(Sort)한다. 정보 통신 및 처리량을 줄이기 위해 선두차량만 구분하여 종방향 위치(Longitudinal distance)만으로 계산한다. 종방향 위치는 전자지도상의 임의의 junction, interchange 등의 공통된 지점부터의 도로상 거리다. 한 선두차량의 종방향 위치가 h_i 이면 그 선두차량의 선행 차량 열의 선두차량의 종방향 위치가 h_{i-1} 이다. 선두차량들 사이의 거리를 구한다(식 (1)).

$$\Delta h_i = h_{i-1} - h_i \quad (1)$$

Δh_i 가 작은 선두차량일수록 우선적인 후보가 된다. 하속 차로로 차로 변경 시에는 앞 방향으로 후보를 찾고 상속 차로로 차로 변경 시에는 뒤 방향으로 후보를 찾는다.

선두차량 간의 거리가 멀다고 선두차량들 사이의 추종차량들이 많다고 가정할 수는 없으나, 밀집화가 필요한 수준의 차로 사용률이 전제되어 있으므로 한 선두차량과 다음 선두차량 사이가 멀면 그만큼 추종차량들이 많다고 간주한다.

두 번째로 정렬해놓아 파악된 짧은 주행 열부터 차로 변경하려는 차량이 생겨날 연장 여유공간에 도달하기 전에 밀집화가 마쳐지는 후보를 찾는다(식 (2)).

$$\min(k_i - CT) > 0 \quad (2)$$

$$k_i = \frac{|h_i - h_e|}{v_e} \quad (3)$$

$$CT = \frac{W_C}{SA} \div \frac{1,000m}{3,600sec} \quad (4)$$

상대 차량의 대상 선두차량의 종방향 위치 h_i 와 차로 변경하려는 차량의 종방향 위치 h_e 차이를 차로 변경하려는 차량의 속도로 연장 여유공간이 생겨날 위치(Longitudinal distance)에 차량이 도달하는데 걸리는 시간 k_i (식 (3))와, 가능속도대 조정으로 밀집화에 드는 시간 CT (식 (4))에 의해 밀집화 대상 차량 열이 결정된다. 생겨나는 연장 여유공간에 들어갈 주행 창 길이는 W_C 이며, 가능속도대 조정으로 발생하는 속도 변화량 SA 는 1km/h 또는 2km/h인데 본 논문의 시뮬레이션에서는 2km/h를 적용하였다.

차로 변경하려는 차량은 연장 여유공간이 생겨날 위치에 도달하기 전에 연장 여유공간 마련됨에 대한 통지를 받을 수 있어야 한다.

2.4 밀집화를 위한 차량 열 속도 조정

상속 차로로 차로 변경하려는 경우 연장 여유공간을 마련하기 위해 밀집화하는 데 드는 시간을 알아보았다. 차로 사용률에 따른 평균 시간들이 그림 1에 나타나 있다.

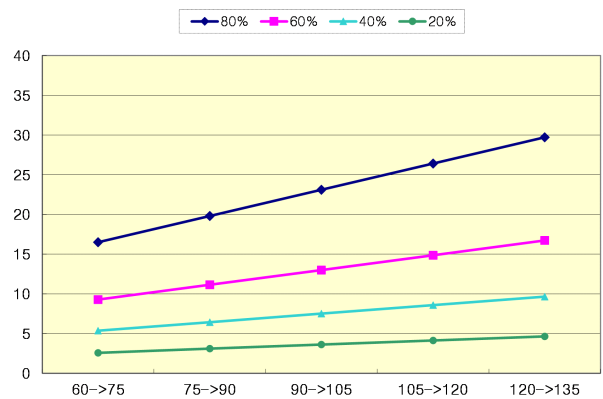


그림 1. 상속 차로로 차로 변경을 할 수 있도록 밀집화를 수행하게 되는 차로 사용률별 평균 시간(초)

Fig. 1. Average compaction time for shifting the lane to a higher-speed one according to the lane usage(second)

가능속도대가 높을수록 주행 창 길이가 길어 밀집화로 마련할 연장 여유공간도 마찬가지로 길어 주행 창 길이에 비례하여 밀집화에 시간이 든다.

하속 차로로 차로 변경하려는 경우 연장 여유공간을 마련하기 위해 밀집화하는 데 드는 시간을 알아보았다. 차로 사용률에 따른 평균 시간들이 그림 2에 나타나 있다.

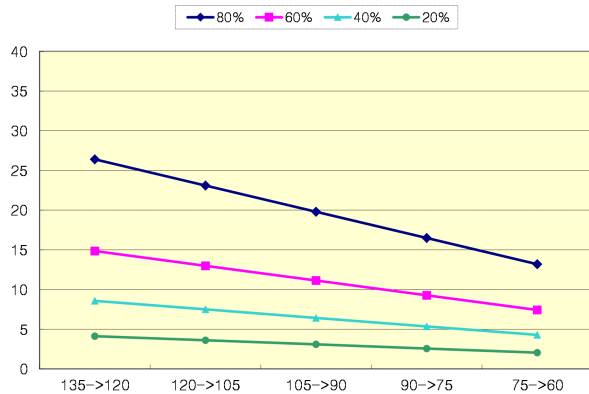


그림 2. 하속 차로로 차로 변경을 할 수 있도록 밀집화를 수행하게 되는 차로 사용률별 평균 시간(초)

Fig. 2. Average compaction time for shifting the lane to a lower-speed one according to the lane usage(second)

가능속도대가 낮을수록 주행 창 길이가 짧아 밀집화로 마련할 연장 여유공간도 마찬가지로 짧아 주행 창 길이에 비례하여 밀집화에 시간이 든다.

차로 사용률이 20%와 40%인 경우에는 빈 공간이 80%와 60%라서 상대 차량이 비어 있는 확률이 높으나 20%이더라도 어떤 차량이 차로 변경하려는 차량과 나란히 달리고 있는 상황에 상정하여 무조건 밀집화를 수행하도록 한 것이다.

상속 차로로 차로 변경을 하는 경우와 하속 차로로 차로 변경을 하는 경우 둘 다 차로 사용률이 낮으면 차량 열 간 빈 공간이 넉넉하여 밀집화가 차량이 도달할 때까지만 진행되어도 걱정 크기의 연장 여유공간이 마련되는 영향이 있었다.

III. 결 론

차로 변경 등에서 주변의 모든 차량들의 통일된 협력 주행이 가능한 도로변 지원시스템은 차로 변경에 적절한 크기의 여유공간이 가까이 없을 때

마련하는 방법으로 개별 차량의 대응이 아닌 다수 차량의 공동 대응으로 자율주행 차량의 고속주행 안전에 기여할 것으로 기대된다. 차량 내비게이션의 차로 변경 요구에 맞게 대응하며 전체 차량흐름을 안전하고 원활하게 조정하는 지원시스템을 목표로 한다.

References

- [1] M.-H. Ok, "A Simulator Implementation of Highway Driving Guidance System for Longitudinal Autonomous Driving of ADAS-Driving Vehicles", Journal of KIIT, Vol. 17, No. 11, pp. 27-35, Nov. 2019. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2019.17.11.27>
- [2] G. Shah, M. Zaman, M. Saifuddin, B. Toghi, and Y. Fallah, "Scalable Cellular V2X Solutions: Large-Scale Deployment Challenges of Connected Vehicle Safety Networks", Automotive Innovation, Vol. 7, pp. 373-382, Jul. 2024. <https://doi.org/10.1007/s42154-023-00277-6>.
- [3] E. Vieira, J. Almeida, J. Ferreira, T. Dias, A. V. Silva, and L. Moura, "A Roadside and Cloud-Based Vehicular Communications Framework for the Provision of C-ITS Services", Information, Vol. 14, No. 3, pp. 153, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/info14030153>.
- [4] H. Sadid and C. Antoniou, "Modelling and simulation of (connected) autonomous vehicles longitudinal driving behavior: A state-of-the-art", IET Intelligent Transport Systems, Vol. 17, No. 6, pp. 1051-1071, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1049/itr2.12337>.
- [5] H. Lee and S. B. Choi, "Model Predictive Control Based Multifunctional Advanced Driver-assistance System Specialized for Rear-end Collision Avoidance", Int. Journal of Automotive Technology, Vol. 24, pp. 799-809, May 2023. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0066-x>.