차량 군집 주행 시스템의 String Stability에 미치는 통신 지연의 동역학적 영향

김태우, 이동형, 박경준*

대구경북과학기술원

{vlzkcb0206, dh.lee, *kjp}@dgist.ac.kr

Dynamic Impact of Communication Delays on String Stability in Vehicle Platooning Systems

Tae-Woo Kim, Dong-Hyung Lee, Kyung-Joon Park*

DGIST

요 약

본 논문은 차량 군집 주행 중 통신 지연 시간이 군집의 안정성에 미치는 영향을 분석한다. 특히, 차량 간의 동적 반응이 통신 지연에 어떻게 영향을 받는지를 모델링하고, String Stability를 측정하여 지연 시간이 변동할 때 시스템의 안정성이 어떻게 변화하는 지를 확인한다. 이를 통해 통신 기술의 발전이 차량 군집 주행 시스템의 효율성과 안전성을 어떻게 향상시킬 수 있는지에 대한 이해를 증진시키고자 한다.

Ⅰ. 서론

차량 군집 주행은 교통 시스템의 지속 가능성, 효율성 및 안전성을 향상시키기 위한 혁신적인 접근법으로 부상하고 있다. 이 기술은 차량들이 서로 열차처럼 나열해 근접 운행하며, 통신 기술을 활용하여 상호 작용하는 것을 특징으로 한다. 이러한 상호 연결된 차량 시스템은 공기 저항 감소를 통해 연료 소비를 줄이고, 도로의 용량을 극대화하며, 교통사고 발생 빈도를 감소시킬 수 있는 잠재력을 지닌다 [1].

그러나, 차량 군집 주행의 안정성과 효과성은 통신 지연 시간과 같은 기술적 제약에 크게 의존한다. 차량 군집 주행에서 차량 간 거리는 매우 짧으며, 이런 환경에서 발생하는 통신 지연 시간은 군집 주행 유지에 큰 영향을 야기한다. 이는 군집 시스템의 동적 반응에 영향을 미치며, 이는 궁극적으로 군집의 안정성에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 3GPP는 릴리즈 17에서 이를 반영하여 5G 통신의 차량 군집 주행 통신에 대한 성능 요구사항을 제시하였고 [2], 이때 차량 간 최대 종단 지연은 군집 차량의 자동화 정도에 따라 10-25 ms의 낮은 시간으로 정의하였다.

이 논문은 차량 군집 주행의 동역학을 모델링하여 통신 지연 시간에 따른 차량 군집 주행의 String Stability를 측정한다. String Stability는 차량 사이에 발생하는 교란이나 변동이 대열의 앞쪽으로 전파될 때 그 영향이 어떻게 변화하는지를 나타내는 척도로, 이를 통해 지연 시간이 차량 군집 주행 시스템에 주는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다. 이러한 분석을 통해, 통신 지연 시간이 관리되고 최소화될 때 차량 군집 주행 시스템이 어떻게 최적화될 수 있는지에 대한 이해를 높일 수 있다.

Ⅱ. 차량 동역학 모델 설계

우선 군집을 이루는 차량의 Node dyamics와 제어 입력을 바탕으로 차량 군집 주행 동역학 모델을 설계하였다. 각 차량의 Node dyamics는 [3]를 바탕으로 다음과 같이 Third-order model을 설정하였다.

$$\tau \dot{a}_i(t) + a_i(t) = u(t) \tag{1}$$

τ는 시간 상수, $a_i(t)$는 i번째 차량의 가속도를 나타낸다. 시간 상수는 실제 차량의 액추에이터의 반응 및 속도를 변화시키는데 걸리는 시간과 같이 기계적인 지연을 반영한다. 이런 특징으로 인해 Third-order model은 실제 차량의 구동에 들어가는 기계적인 지연을 구현할 수 있다.
이어서 (1)에 대입할 제어 입력 $u(t)$는 다음과 같이 주어진다 [4].

$$\begin{aligned} u(t) = {} & k_a a_{i-1}(t-D) + k_v[v_{i-1}(t) - v_i(t)] \\ & + k_s[x_{i-1}(t) - x_i(t) - v_i(t)th - d_0] \end{aligned} \tag{2}$$

제어 입력은 군집 주행의 상태를 반영하기 위해 앞 차량의 가속도, 속도 차이, 거리 차이 항의 합으로 나타난다. k_a , k_v , k_s는 각각 가속도, 속도 차이, 거리 차이에 대한 반응을 조절하는 이득이고, D는 통신 지연 시간, th는 현재 차량 속도에 기반한 차량 간 헤드웨이, d_0는 각 군집 차량 간의 안전 거리를 나타낸다. 가속도 입력에 추가된 지연 D는 선두 차량이 뒤의 차량으로 자신의 상태 정보를 보내는 과정에서 발생하는 통신 지연을 반영하였다. 이때, $\dot{x_i}(t) = v_i(t)$, $\dot{v_i}(t) = a_i(t)$이고, 각 군집을 이루는 차량이 초기에 안전 거리를 유지, 즉 $x_{i-1}(0) - x_i(0) = d_0$라 하면, i-1번째 차량의 위치 입력과 i번째 차량의 위치 출력에 대한 전달 함수 $G(S)$는 식 (1)과 식 (2)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(S) = \frac{X_i(S)}{X_{i-1}(S)} = \frac{k_a s^2 e^{-Ds} + k_v s + k_s}{\tau s^3 + s^2 + (k_v + k_s th)s + k_s} \quad (3)$$

이때 해당 전달 함수가 String Stability를 만족하기 위해선 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\|G(jw)\|_{H_\infty} \leq 1 \quad (4)$$

이는 모든 주파수 응답에 대해서 전달 함수의 최대 이득이 1 이하임을 의미한다. 이를 만족해야 군집 주행의 모든 차량이 작은 교란에 대해 안정적으로 반응하며 교란이 차량 간에 전파되는 동안 증폭되지 않으므로 차량 군집 주행이 안정적으로 이루어질 수 있다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 매트랩을 통해 수행하였다. 전달 함수의 각 변수는 k_a = 0.2 ,k_v = 0.7, k_s = 0.5, τ = 0.5로 설정하였고, th는 0.9부터 1.0사이의 6개의 값의 분포로 설정하였다.

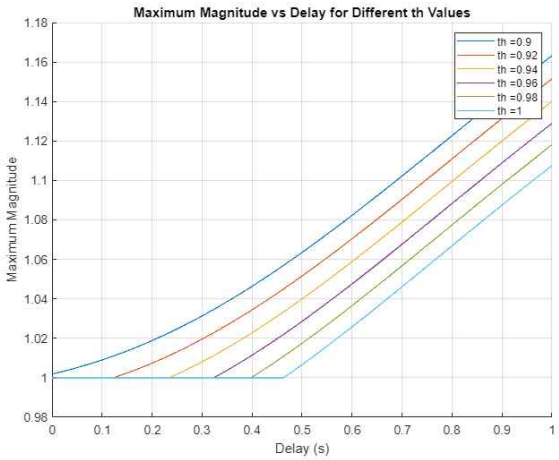

Figure 1. Delay-Magnitude graph

Figure 1.은 차량 전달 함수의 magnitude를 각 지연 시간 별로 계산하여 결과를 그래프로 도식화한 것이다. 시뮬레이션 결과에 따르면 특정 지연 시간 이전까지는 magnitude가 1보다 작은 값을 가지며 큰 변동을 보이지 않다가, 특정 지연 시간 이후부터 전달 함수의 magnitude가 1보다 크게 증가하는 경향을 관찰하였다. 이는 각 헤드웨이 별로 특정 시간보다 통신 지연 시간이 커지면 군집 주행 중의 교란이 증폭되어 시스템이 불안정해짐을 의미한다. 이를 자세히 분석하기 위해 각 헤드웨이 별로 magnitude가 1보다 커지는 시점을 도출하여 Table 1.에 정리하였다.

th(s)	Max delay for String Stability(s)
0.9	0
0.92	0.123
0.94	0.235
0.96	0.324
0.98	0.399
0.1	0.464

Table 1. Result for headway

같은 상황에서 차량 간의 시간 헤드웨이가 줄어들면서, 시스템이 허용하는 최대 통신 지연도 감소했다는 것을 관찰했다. 헤드웨이의 감소는 군집 주행 중인 차량이 서로 더 가까운 거리를 유지하고 있음을 나타내며, 이는 운전 중인 차량 군집의 안전 거리가 줄어들었음을 의미한다. 결과적으로, 차량 간 거리가 좁아짐에 따라, 급격한 속도 및 위치 변화에 따른 군집 주행의 안정성이 감소한다. 이러한 안정성을 유지하기 위해서는 시스템이 더 빠른 응답을 할 수 있도록 지연 시간이 짧은 패킷 전송이 필요하다.

Ⅵ. 결론

본 논문은 차량 군집 주행 중 통신 지연이 시스템의 안정성에 미치는 영향을 차량 동역학 시스템을 통해 분석했다. 차량 동역학을 바탕으로 지연을 포함하는 군집 주행 차량의 전달 함수를 설계했고, 통신 지연이 차량 군집 주행의 String Stability에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 통해 군집 주행의 안정성을 위해 통신 지연을 최소화하는 것의 중요성을 강조하였다.

추가적으로 공기 저항 감소와 고속도로 확보 등의 이유로, 실제 차량 군집 주행은 시뮬레이션에서 설정한 것보다 더 짧은 헤드웨이와 안전거리를 가지고 주행해야 한다. 결과적으로, 저지연 통신이 차량 군집 주행 시스템의 안정성을 유지하고 향상시키는 데 중요하다는 결론을 내렸다.

본 논문의 결과는 미래의 교통 시스템 설계와 관련 정책 결정에 중요한 정보를 제공하여, 보다 안전하고 효율적인 교통 시스템으로 나아갈 수 있는 기초를 마련하였습니다. 추후 연구에서는 지연 시간을 더욱 줄이기 위한 저지연 네트워킹 통신 기술의 발전뿐만 아니라, 이러한 기술이 실제 도로 환경에서 어떻게 적용될 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP) (2021-0-01277-003, Development of attack response and intelligent RSU technology for vehicle security threat prevention)

참 고 문 헌

[1] Ahmad Alalewi, Iyad Dayoub, Soumaya Cherkaoui. On 5G-V2X Use Cases and Enabling Technologies: A Comprehensive Survey. IEEE Access, 2021, 9, pp.107710 - 107737. ff10.1109/ACCESS.2021.3100472ff. ffhal-03311360f

[2] 3GPP TR 22.186 V15.2.0, Technical Specification Group Services and System Aspects. Enhancement of 3GPP Support for V2X Scenarios, Release 15, 2017.

[3] Rajamani, R., 2011. Vehicle Dynamics and Control. Springer, New York.

[4] VanderWerf, J., Shladover, S., Kourjanskaia, N., et al., 2001. Modeling effects of driver control assistance systems on traffic. Transportation Research Record 1748, 167-174.