

10BASE-T1S PLCA 알고리즘의 QoS 확보를 위한 다중 ID 할당 기법

강연호, 정세화, 김민수, 김강민, 최지웅

대구경북과학기술원

dusgh7227@dgist.ac.kr, boxxerman@dgist.ac.kr, excel2001@dgist.ac.kr,

kjkj0513@dgist.ac.kr, jwchoi@dgist.ac.kr

Multi-ID Allocation Method for Provisioning QoS in 10BASE-T1S PLCA Algorithm

Yeonho Kang, Sehwa Jung, Minsu Kim, Gangmin Kim and Ji-Woong Choi

Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology

요약

10BASE-T1S는 멀티트롭 구조를 지원하는 차량용 이더넷 기술로, 배선 복잡도와 비용을 줄일 수 있다. 그러나 PLCA (Physical Layer Collision Avoidance) 알고리즘은 라운드 로빈 기반으로 전송 기회를 할당하여 트래픽 특성과 지연 요구를 충분히 반영하지 못한다. 본 논문에서는 PLCA 주기 내 전송 기회를 트래픽 특성에 따라 결정하는 가중치 기반의 다중 ID 할당 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 기존 PLCA 및 버스트 모드 대비 지연 성능과 QoS(Quality of Service) 개선을 확인하였다.

I. 서론

차량 내 네트워크는 자율주행 및 첨단 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)의 발전으로 인해 안전, 파워트레인, 멀티미디어 등 다양한 특성을 갖는 트래픽을 동시에 처리해야 한다[1]. 이러한 환경에서 Automotive Ethernet은 기존 CAN(Controller Area Network) 및 LIN(Local Interconnect Network) 기반 네트워크의 대역폭 및 확장성 한계를 극복할 수 있는 대안으로서 핵심 기술로 부상하고 있다[2]. 그중 10BASE-T1S는 단일 물리 매체를 다수의 노드가 공유하는 멀티트롭 토폴로지를 지원하여 배선 복잡도와 비용을 줄일 수 있다[3]. 이러한 공유 매체 환경에서 전송 충돌을 방지하기 위해, 10BASE-T1S는 PLCA(Physical Layer Collision Avoidance) 알고리즘을 적용하여 라운드 로빈 방식으로 모든 노드에게 공평하게 전송 기회를 부여한다[4]. 그러나 라운드 로빈 방식은 트래픽 간의 부하 차이나 지연 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 이에 본 논문에서는 이러한 한계에 대응하기 위해 PLCA 주기 내에서 노드에 부여할 전송 기회 개수를 트래픽 특성에 따라 조절하는 가중치 기반 다중 ID(Identifier) 할당 알고리즘을 제안한다.

PLCA 알고리즘은 주기(cycle) 단위로 동작하며, 각 주기는 비콘, 전송 기회(Transmission Opportunity, TO), 커밋, 그리고 데이터 전송 구간으로 구성된다. 비콘 구간에서는 PLCA 동기화가 이루어지며, 이후 노드에 할당된 ID 순서에 따라 TO가 순차적으로 제공된다[4]. 각 노드는 자신에게 할당된 ID에 해당하는 TO가 주어지면 커밋 구간을 통해 전송 여부를 확정하고, 이에 따라 데이터 전송을 수행한다.

PLCA 구조에서는 하나의 노드에 복수의 ID를 할당하는 것이 가능하며, 이 경우 해당 노드는 하나의 PLCA 주기 내에서 여러 번의 TO를 획득할 수 있다. 즉, 노드에 할당된 ID의 개수는 한 주기 내에서 확보할 수 있는 전송 기회 횟수를 결정하는 요소로 작용한다. 이러한 특성은 PLCA의 기본 동작을 변경하지 않으면서도 노드별 전송 기회 분배를 조절할 수 있는 유연성을 제공한다. 본 논문에서는 이러한 PLCA 구조의 특성에 착안하여, 각 노드에 부여할 전송 기회 개수를 트래픽 특성에 따라 결정하는 가중치 기반 다중 ID 할당 알고리즘을 설계 제안하였다. 제안 기법에서는 데드라인 특성과 페이로드 크기를 고려하여 각 노드 i 에 대한 우선순위 가중치 W_i 를 정의하였다. 이는 데드라인 가중치 $W_{dl,i}$ 와 페이로드 가중치 $W_{pl,i}$ 의 합으로 표현할 수 있으며, 그 표현은 다음과 같다.

$$W_i = W_{dl,i} + W_{pl,i} \quad (1)$$

II. 본론

그림 1은 10BASE-T1S에서 PLCA 알고리즘의 동작을 나타낸다.

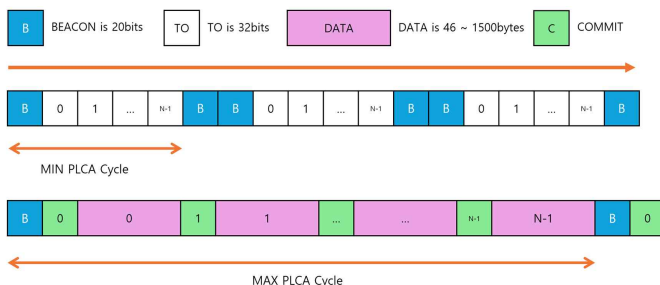


그림 1. 10BASE-T1S PLCA 알고리즘

데드라인 가중치 $W_{dl,i}$ 는 데드라인이 짧을수록 높은 값을 갖도록 정의되며, 페이로드 가중치 $W_{pl,i}$ 는 페이로드 크기에 비례하도록 설정된다. 두 가중치의 상대적인 중요도는 조정 계수 γ_{dl} 과 γ_{pl} 을 통해 반영되며, 데드라인 가중치에 대한 민감도를 조절하기 위해 지수 계수 $\gamma_{exp,dl}$ 을 추가로 도입하였다. 이는 다른 노드에 비해 데드라인이 상대적으로 매우 짧은 노드에 전송 기회가 과도하게 집중되는 현상을 완화하기 위한 것이다. 이에 대한 수식은 다음과 같다.

$$W_{dl,i} = \gamma_{dl} \times \left(\frac{1}{\text{Deadline}_i} \right)^{\gamma_{exp,dl}} \quad (2)$$

$$W_{pl,i} = \gamma_{pl} \times (\text{TrafficRate}_i)$$

각 노드 i 의 TrafficRate는 트래픽 도착률이며, 여기서 overhead는 Preamble, SFD(Start of Frame Delimiter), Header, FCS(Frame Check Sequence), IFG(Inter-frame Gap)를 포함한 38byte로 설정하였다. 해당 수식은 아래와 같다.

$$\text{TrafficRate}_i = \frac{\text{Preamble} + \text{SFD} + \text{Header} + (\text{Payload}_i) + \text{FCS} + \text{IFG}}{\text{Average ArrivalTime}_i \times \text{Bitrate}} \quad (3)$$

계산된 가중치 W_i 를 기반으로 전체 전송 기회 수 K 를 노드별로 분배하여 각 노드에 할당되는 ID의 개수를 결정한다. 이때 전체 ID 수의 합은 K 를 초과하지 않도록 제한하며, 모든 노드는 최소 1개의 ID를 할당받도록 설정하였다. 이를 통해 가중치가 높은 노드는 한 PLCA 주기 내에서 더 많은 전송 기회를 확보할 수 있다.

시뮬레이션 환경은 MATLAB으로 구성하였으며, 10BASE-T1S 멀티드롭 토폴로지를 기반으로 한다. 시뮬레이션 시간은 50s, 노드 수는 8개, Btirate는 10Mbps, 전체 전송 기회 수 K 는 32로 설정하였다. 또한 조정 계수 γ_{dl} 과 γ_{pl} 의 비율은 1:1이며, 지수 계수 $\gamma_{exp,dl}$ 은 0.5로 설정하였다. 다음으로 각 노드는 실제 차량 센서 환경을 반영하여 표 1과 같이 구성하였으며, 성능 비교를 위해 기존 PLCA 모드와 버스트 모드를 비교 기법으로 설정하였다. 버스트 모드는 IEEE 802.3cg 표준에 정의된 선택적 기능으로, 하나의 전송 기회 동안 여러 패킷을 연속적으로 전송할 수 있다 [5]. 본 시뮬레이션에서는 Max Burst Count 값을 4로 설정하여, 하나의 전송 기회 동안 최대 4개의 패킷을 연속적으로 전송하도록 구성하였으며, 성능 평가는 패킷이 노드에서 생성된 시점부터 전송이 완료될 때까지의 평균 대기 시간을 기준으로 수행하였다.

표 1. 노드들의 종류와 특징

노드	종류	Payload (byte)	Period (ms)	Deadline (ms)
1	Power train	46	5	5
2	Safety	46	1	1
3	Chassis	46	1	1
4	Multimedia	1000	2	5
5	Passenger	46	100	100
6	Comfort	46	250	250
7	Diagnosis	100	100	100
8	Radar	1000	2	2

시뮬레이션 결과, 그림 2에서 테드라인이 1ms인 노드 2를 기준으로 관찰했을 때, 기본 PLCA 모드의 평균 대기 시간이 3402ms로 나타났다. 버스트 모드의 경우 평균 대기 시간이 1.15 ms로 감소하였으나, 여전히 테드라인을 초과하는 지연이 발생하였다. 반면, 다중 ID 할당 모드의 경우 평균 대기 시간이 0.47 ms로 테드라인 이하로 유지되어, 비교 기법 중 유일하게 테드라인 조건을 만족하는 성능을 보였다. 이 과정에서 테드라인이 100ms인 노드 5의 평균 대기 시간이 3.54ms로 증가하는 trade-off가 발생하였으나, 테드라인 여유 구간 내에서 발생한 지연으로, 전체 QoS(Quality of Service) 관점에서는 수용 가능한 수준으로 평가된다.

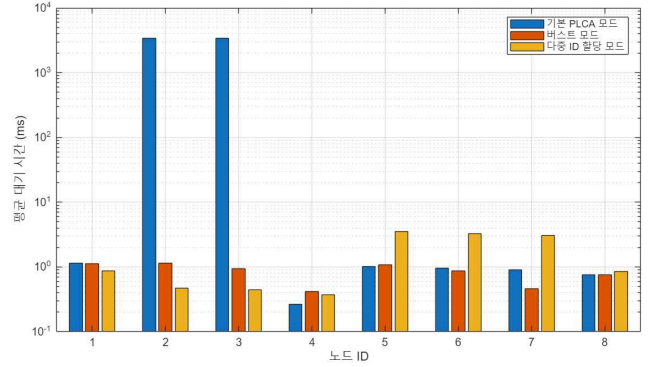


그림 2. 각 모드에 따른 노드별 평균 대기 시간

III. 결론

본 논문에서는 10BASE-T1S 기반 차량 내 네트워크에서 PLCA 알고리즘의 전송 기회 분배 한계를 개선하기 위해 가중치 기반 다중 ID 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안 기법은 PLCA의 기본 동작을 변경하지 않고도 트래픽 특성에 따라 전송 기회 분배를 조절함으로써 QoS 관점에서 지연 성능을 개선하였다. 향후 연구에서는 다양한 트래픽 조건과 실제 차량 환경을 고려한 추가 검증을 통해 제안 기법의 활용 가능성을 평가할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00442085, 자율주행 차량 서비스 보호를 위한 V2X 무선통신 인프라 보안 핵심기술 개발, No. RS-2024-00398157, AI-Native 응용서비스 지원 6G 시스템 기술개발).

참 고 문 헌

- [1] H. Park, M. Cho, Y. Jang and J. -W. Choi, "Latency Analysis of In-Vehicle Network for Advanced Driver Assistance System," in Proc. IEEE. 100th Vehicular Technology Conf. (VTC2024-Fall), Nov. 2024, pp. 1-7.
- [2] J. Min and Y. Park, "Performance Enhancement of In-Vehicle 10BASE-T1S Ethernet Using Node Prioritization and Packet Segmentation," IEEE Access, vol. 10, pp. 103286-103295, Sep. 2022.
- [3] E. Choi, H. Song, S. Kang and J. -W. Choi, "High-Speed, Low-Latency In-Vehicle Network Based on the Bus Topology for Autonomous Vehicles: Automotive Networking and Applications," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 17, no. 1, pp. 74-84, Mar. 2022.
- [4] D. A. Nascimento, S. Bondorf and D. R. Campelo, "Modeling and Analysis of Time-Aware Shaper on Half-Duplex Ethernet PLCA Multidrop," IEEE Transactions on Communications, vol. 71, no. 4, pp. 2216-2229, Apr. 2023.
- [5] IEEE Standard for Ethernet—Amendment 6: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced Pair of Conductors, IEEE Std. 802.3cg-2019, 2019.