

IEEE 802.3cg 네트워크 성능 분석

김 규 민*, 최 은 민*, 최 지 웅^o

Network Performance Evaluation of IEEE 802.3cg

Kyumin Kim*, Eunmin Choi*, Ji-Woong Choi^o

요 약

본 논문에서는 차세대 버스형 차량 내부 통신 IEEE 802.3cg을 소개하고, 주요 특징과 동작 방식에 대해 설명한다. 그리고 IEEE 802.3cg가 차량 내부 통신으로 사용되기 위해 고려해야할 항목인 처리율과 지연 시간을 시뮬레이션을 통해 측정하여 IEEE 802.3cg 네트워크 성능을 분석한다.

키워드 : 차량 내부 통신, IEEE 802.3cg, 처리율, 지연시간, 성능 평가

Key Words : In-vehicle networks, IEEE 802.3cg, Throughput, Network latency, Performance evaluation

ABSTRACT

In this paper, we introduce IEEE 802.3cg, the next-generation bus-based in-vehicle networks, and describe its main features and operation methods. In addition, we evaluate the network performance of IEEE 802.3cg such as throughput and network latency, which are the metrics to consider in order to be used for in-vehicle networks by simulation.

1. 서 론

자율 주행 기술이 발전함에 따라 카메라, 레이더, LiDAR 등 자율 주행에 필요한 여러 센서나 그와 관련된 전자제어유닛의 수가 늘어나고 있다¹⁾. 이로 인하여 차량 내부에서 송수신되는 데이터 양이 많아졌고, 기존 차량 내부 통신은 한계에 도달하게 되었다. 기존의 차량 내부 통신은 대표적으로 CAN(Controller Area Network), CAN-FD, FlexRay, Eth-ernet 등이 사용된다. CAN은 1980년대 개발된 통신 프로토콜로써 수십 개의 전자제어유닛이 연결되어야 하는 차량 환경에 적합한 버스 토폴로지 및 브로드캐스팅을 제공한다. 그러나 CAN은 최대 데이터율을 1 Mbps까지 지원하므로²⁾ 많은 데이터가 송수신되는 자율 주행 환

경에는 적용하기 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해 CAN-FD(CAN with Flexible Data Rate)와 FlexRay 개발되었으나 마찬가지로 충분한 데이터율을 지원하지 못하거나 프로토콜 특성상 한계가 존재한다²⁾. 다른 방안으로 이미 상용화되어 사용하던 이더넷을 차량에 도입하게 되었는데, 이더넷은 상위 계층을 그대로 사용할 수 있고 충분한 대역폭을 제공할 수 있지만, 복잡한 배선으로 인해 설계가 어렵고 무게가 증가하는 단점을 가지고 있다²⁾. 따라서 이러한 환경에 맞는 새로운 차량 내부 네트워크가 필요하게 되었고, 이를 위해 IEEE 802.3 워킹 그룹에서 차량에 적합한 버스 형태의 새로운 이더넷 물리 계층 IEEE 802.3cg가 표준화 진행 중이다. 본 논문에서는 IEEE 802.3cg에 대해 소개하고 그 특징에 대해 설명한다.

※ 본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

• First Author : Defense Agency for Technology and Quality, kmkim@daq.re.kr, 정희원

o Corresponding Author : DGIST Department of Information and Communication Engineering, jwchoi@dgist.ac.kr, 정교수, 종신회원

* DGIST Department of Information and Communication Engineering, eunminchoi@dgist.ac.kr, 박사과정, 학생회원

논문번호 : KICS201908-175-B-RN, Received August 28, 2019; Revised December 22, 2019; Accepted January 7, 2020

그리고 IEEE 802.3cg가 차량 내부 네트워크에 사용될 경우에 고려해야 할 네트워크 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석한다.

II. 본 론

2.1 IEEE 802.3cg

IEEE 802.3cg는 이더넷의 물리 계층에 관한 표준으로, 현재 표준화 진행 중에 있으며 2019년 9월에 표준화가 완료될 예정이다. IEEE 802.3cg는 목적과 사양에 따라 10 Mbps 급의 10BASE-T1L, 10BASE-T1S로 구분된다. 10BASE-T1L은 공장 자동화 등 산업용을 목표로 하고 있으며, 점대점 방식, 전이중 통신을 지원한다. 10BASE-T1S는 차량 내부 통신을 목표로 하고 있으며, 10BASE-T1L과 마찬가지로 점대점 방식과 전이중 통신을 지원하고, 또한 버스 토폴로지를 지원하여 브로드 캐스팅이 가능하고 이러한 환경 하에서 반이중 통신을 지원한다^[3]. 본 논문에서는 차량 내부 통신에 관하여 논할 것이므로 10BASE-T1S의 버스 토폴로지 및 반이중 통신 모드에 관해서 다룬다.

그림 1은 OSI 7계층 모형을 이용해 IEEE 802.3과 IEEE 802.3cg의 관계를 보여준다. IEEE 802.3cg는 최하위 계층인 물리 계층에 대한 표준으로, 이 계층은 5개의 부계층으로 구성된다. 데이터 링크 계층의 MAC 부계층과 물리 계층의 논리적 매핑을 담당하는 RS(Reconciliation Sublayer), MAC 부계층과 물리 계층 간에 데이터를 코딩, 디코딩해주는 PCS(Physical Coding Sublayer), PCS로부터 전달 받은 신호를 물리

신호로 변환해 하위 부계층으로 전달하여 데이터 직렬/병렬 변환을 수행하는 PMA(Physical Medium Attachment), 실제 물리 매체와 연결되어 각 매체에 적합한 실제 물리적 신호를 송수신하는 PMD(Physical Medium Dependent Sublayer), 전송 속도나 이중화 등이 혼재되어있는 상황에서 최적의 통신모드를 설정하는 AN(Auto Negotiation)으로 이루어져 있으며 부계층들 사이에 인터페이스를 제공하기 위한 MII(Medium Independent Interface), MDI(Medium Dependent Interface)로 구성된다^[3].

2.2 라운드로빈 방식

IEEE 802.3cg의 가장 큰 특징은 버스 토폴로지를 지원하고 브로드캐스팅이 가능하다는 점이다. 이는 가장 점유율이 높은 차량 내부 통신 CAN의 주요 특징으로, 배선의 무게나 설계 측면에서 차량에 효율적이다. 하지만 두 개 이상의 노드에서 동시에 데이터를 전송하여 충돌이 많이 일어날 수 있으므로 이를 해결할 수 있는 방법이 필요하다. 일반적인 이더넷은 충돌이 일어났을 때 MAC 부계층에서 CSMA/CD 기반의 이진지수 백오프 알고리즘을 통해 데이터가 재송신된다^[4]. 하지만 지연 시간이 중요한 차량 내부 통신에서^[5], 버스 토폴로지에서도 이진지수 알고리즘을 적용한다면 지연 시간이 지나치게 늘어날 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 방안이 필요한데, IEEE 802.3cg는 데이터 링크 계층 이상을 수정하지 않고 오직 물리 계층에서 데이터 충돌을 제어하여 일반적인 상황에서의 지연 시간을 보장할 수 있는 PLCA(PHY-Level Collision Avoidance)를 지원한다.

PLCA은 노드 별로 송신 기회를 차례대로 제공하여 송신 시 충돌을 방지하고, 송신 기회를 균등하게 제공한다. 일반적으로 이것을 라운드로빈 방식이라 하며, 이를 통해 각 노드가 제한된 지연 시간을 가질 수 있다. 다시 말해, 모든 노드가 한 번씩 송신하는 시간을 1 사이클이라고 한다면, 라운드로빈 방식은 각 노드는 1 사이클 동안 1번의 송신 기회를 가진다. 이를 위해 IEEE 802.3cg는 TO(Transmit Opportunity)를 도입하였다. IEEE 802.3cg는 각 노드에서 채널에 송신되는 신호를 읽어 본인의 차례가 되었을 때만 신호를 송신하도록 본인의 TO를 카운트한다. 이 결과, 각 노드는 본인 차례에만 신호를 송신하므로 채널 내 물리적 충돌이 없어지게 된다. 송신할 데이터가 있는 모든 노드는 1 사이클당 1번의 송신 기회를 가지게 되고 송신할 데이터가 없는 노드는 자신의 TO를 사용하지 않는다. IEEE 802.3cg는 오직 물리 계층의 MII 신호

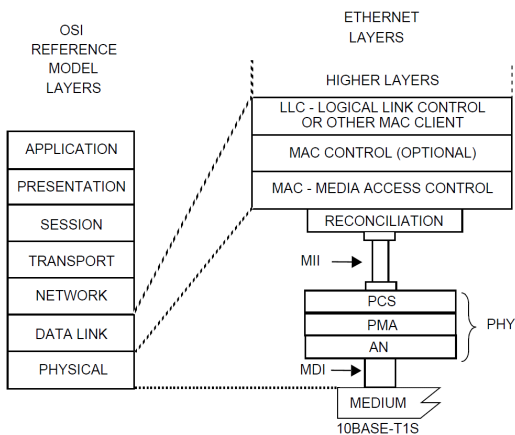


그림 1. IEEE 802.3 OSI 7 계층^[3]
Fig. 1. Relationship to the OSI reference model for IEEE 802.3

의 일부를 강제적으로 제어하고, 각 노드에서 TO 사용을 알리는 COMMIT 신호와 1 싸이클의 시작을 알리는 BEACON 신호를 추가하여 라운드로빈 방식을 구현한다. 원칙적으로 IEEE 802.3에서는 MAC 부계층에서 물리 계층으로 데이터를 전달하기 위해 TX_EN=1이 되면, 이 상태를 유지하는 동안 TXD를 통해 데이터가 물리 계층으로 전달된다. 이 때 채널의 사용 여부를 감지하는 MII 신호인 CRS(Carrier Sense)는 1이 되는데, CRS=1인 동안에는 TX_EN=1이 될 수 없다. 그리고 TX_EN 신호는 물리적 충돌이 발생했을 때 이를 알려주는 MII 신호인 COL(Collision Signal)에 의해 이진지수 백오프 알고리즘이 적용되어 지연될 수 있다⁴⁾. 이러한 원칙 하에 IEEE 802.3cg는 물리 계층에서 강제적으로 COL과 CRS를 조절해 물리적 충돌을 피한다.

그림 2는 노드 0, 1이 있는 상황을 가정한다. 두 노드의 상위 계층으로부터 MAC 부계층으로 데이터가 동시에 전달된다면, 노드 0의 MII 신호는 정상적으로 동작하여 송신하게 되지만, 노드 1은 물리 계층에서 강제적으로 COL=1로 만들어 이진지수 백오프 알고리즘을 동작시키고, CRS=1인 상태를 본인의 TO까지 유지하여 노드 0 송신이 완료된 후 IPG(Interpacket Gap)동안 본인의 COMMIT신호를 송신하고 데이터를 송신하게 된다³⁾.

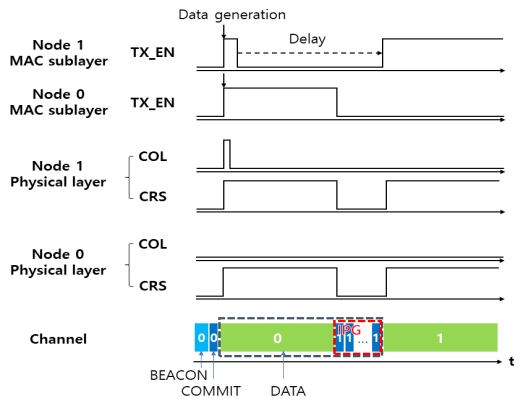


그림 2. MII 신호에 따른 PLCA 타이밍도
Fig. 2. Timing diagram of PLCA with MII signals

2.3 네트워크 성능 지표

IEEE 802.3cg의 네트워크 성능을 분석하기 위해 최대 네트워크 지연 시간과 처리율을 고려한다.

2.3.1 최대 네트워크 지연 시간

최대 네트워크 지연 시간은 차량 관련 네트워크에

서 안전과 관련된 중요한 요소이다. 대표적인 차량 내부 통신인 CAN은 각 ECU의 메시지들이 테드라인을 가지고 있으며 이를 만족하지 못하면 전송 실패로 간주한다⁵⁾. 이러한 이유로 기존의 여러 차량 내부 통신은 최대 네트워크 지연 시간과 관련된 많은 연구가 진행되었다^{5,6)}. 따라서 차세대 차량 내부 통신인 IEEE 802.3cg 또한 최대 네트워크 지연 시간에 관한 분석이 필요하다. 최대 네트워크 지연 시간은 각 데이터들이 가지는 모든 네트워크 지연 시간 중 가장 큰 값을 의미하며, 네트워크 지연 시간은 송신기가 데이터가 전송을 시작한 시간부터 수신기가 데이터를 완전히 받는 시간까지를 말한다. 네트워크 지연 시간은 전송 지연, 전파 지연, 처리 지연, 대기 지연으로 구성된다⁷⁾.

$$\text{네트워크지연시간} = \text{전송지연} + \text{전파지연} + \text{처리지연} + \text{대기지연} \quad (1)$$

전송 지연은 한 프레임 내 모든 비트가 송출될 때까지 걸리는 시간을 의미하며, 이는 데이터율에 의해 좌우된다. 전파 지연은 채널을 통해 송신기에서 수신기까지 물리적으로 전파될 때 걸리는 시간을 의미한다. 처리 지연은 스위칭이나 라우팅에 의해 소요되는 시간을 의미한다. 그리고 대기 지연은 라우터 등에서 패킷의 큐가 쌓이며 야기되는 지연 시간을 의미하며 본 논문에서는 각 노드의 상위 계층에서 데이터가 생성되어 MAC 부계층으로 전송된 후 채널로 송신될 때까지를 지연 시간으로 계산하였다.

2.3.2 처리율

자율주행 차량에는 카메라나 레이더, 라이다 등의 센서가 탑재되며 이러한 센서들은 대용량 데이터를 생성한다. 따라서 IEEE 802.3cg가 새로운 차량 내부 통신으로 사용되기 위해서 대용량 데이터를 다루기 위한 처리율에 관해 분석이 필요하다. 처리율은 단위 시간 당 성공적으로 전송되는 비트 수를 의미한다⁸⁾.

$$\text{처리율} = \frac{\text{페이로드}}{\text{전송시간}} \quad (2)$$

예를 들어 10 Mbps 급의 이더넷의 경우에는 최대 프레임 사이즈가 페이로드, 프리앰블, CRC, 헤더, 그리고 주소 등을 포함하여 1526 byte이다. 이 중 페이로드는 1500 byte를 차지하며, IPG이 12 byte이므로 최대 처리율은 1500/(1526+12)=9.75 Mbps가 된다.

III. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 구성

본 논문에서는 MathWorks사의 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 IEEE 802.3cg D2.3을 기준으로 물리 계층 중 RS 층의 PLCA를 구현하였다. 본 시뮬레이션은 물리 계층을 모두 고려해야 하며 차량 내부 환경들(EMI, EMC, DC 노이즈 등)을 고려해야 하지만, 해당 부분은 802.3cg의 범위에서 벗어나기에 차량 내부 환경들은 이상적이라 가정하였고, PLCA 동작 방식에 따른 네트워크 지연 특성을 분석한 것으로 물리 계층의 동작은 이상적이라 가정하였다. 채널 내 모든 노드의 신호 중 최대 네트워크 지연 시간을 측정하였으며, 시뮬레이션 전체 시간 중 송신된 전체 페이로드를 측정해 처리율을 계산하였다. 또한, 차량 내부 통신이므로 길이가 짧고, 게이트웨이가 없는 상황을 가정하여 네트워크 지연 시간 구성 요소 중 전송 지연과 대기 지연만을 고려하였다. 그리고 각 노드의 버퍼는 무한하다고 가정한다.

표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다. 각 노드에서 생성되는 데이터는 평균 주기가 β 인 푸아송 분포를 따르는 노드들만 있는 환경과 푸아송 분포와 CAN, CAN-FD와 같이 제어 메시지, 우선 순위 기반의 데이터를 보내는 것을 고려하여 이벤트 기반 burst로 데이터 생성하는 노드가 혼합되어있는 시뮬레이션 환경을 설정하였다. Burst 데이터를 생성하는 노드의 경우, 푸아송 분포의 평균 주기에 기반하여 생성된 신호들을 랜덤 횟수 동안 축적하여 burst로 보내도록 한다. 푸아송 + burst 데이터 노드가 혼합된 시뮬레이션 환경에서 burst 데이터 노드를 생성하는 노드의 수는 (전체 노드 수)/2으로 정하였으며, 전체 노드가 홀수 개의 노드일 경우 burst 데이터 노드는 (전체 노드 수-1)/2이다. 페이로드는 이더넷 규격에 따라 46~1500 byte 사이의 균등 분포를 따르며, burst 데이터는 푸아송 분포와 평균적으로 동일한 데이터 크기

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

| Simulation Parameter | Value |
|----------------------------|--------------|
| Symbol rate | 10 Mbps |
| BEACON signal | 20 bit |
| COMMIT signal | 5 bit |
| Average period (β) | 10/5/3 ms |
| Number of nodes | 1~8 |
| Payload | 46~1500 byte |

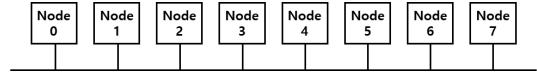


그림 3. 시뮬레이션 노드 환경
Fig. 3. Node Configuration for simulation

를 갖도록 하였다. 시뮬레이션은 그림 3처럼 각 평균 주기 별로 하나의 유선 채널 내에서 노드 수를 최소 1개부터 최대 8개까지 변경해가며 진행하였으며, 이는 802.3cg에서 권장하는 하나의 네트워크 내 최대 노드 수를 참고하였다³⁾.

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

3.2.1 노드 수에 따른 네트워크 성능

그림 4, 5는 각 평균 주기에 따라 노드 수를 변화시키며 측정한 최대 네트워크 지연 시간이다. 그림 4은 평균 주기가 10 ms, 5 ms일 때 최대 네트워크 지연 시간이다. 푸아송 분포의 경우, 데이터 평균 주기와 관계없이 노드 수가 증가할수록 최대 네트워크 지연 시간이 증가하는데, 이는 노드 수가 늘어날수록 1 싸이클이 길어지기 때문이다. 또한, 노드 수와 관계없이 평균 주기 5 ms일 경우가 평균 주기 10 ms인 경우보다 최대 네트워크 지연 시간이 큰 것을 알 수 있는데, 이는 평균 주기가 5 ms일 때 데이터가 더 자주 생성되어 각 노드에서 1 싸이클에 내 더 많은 데이터가 생성될 수 있고 이로 인해 대기 지연이 증가하기 때문이다. 푸아송 + burst 데이터 전송의 경우, 푸아송 분포에 비해 전체적으로 최대 네트워크 지연 시간이 증가하였는데, 이는 burst 데이터 전송 노드의 전송 시간에 축적되었던 데이터를 전송함으로써 나머지 노드들의 전송 지연 시간이 증가하였기 때문이다. 또한, 평균 주기가 5 ms, 노드 수가 8일 때, 최대 네트워크 지연 시간이 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 하나의 노드의 평균 데이터 전송 시간/평균 페이로드 = (46+1500)/2이 약 0.65 ms, 노드 수가 8인 경우 1 싸이클에 걸리는 시간이 약 5.12 ms로 노드에서 데이터가 생성되는 주기보다 1 싸이클의 시간이 더 길어 지연 시간이 누적되기 때문이다. 이러한 현상은 burst 데이터 전송 노드가 있을 경우 더욱 두드러지는데, 이는 1 싸이클에 걸리는 시간이 더 길어지기 때문이다.

그림 5는 평균 주기가 3 ms일 때의 최대 네트워크 지연 시간이다. 노드가 5개가 되는 순간을 기준으로 10 ms, 5 ms의 경우보다 매우 큰 값을 가지게 되는데, 이는 앞서 언급한 것과 같이 각 노드가 데이터를 생성하는 주기가 너무 짧아 각 노드에서 송신하는 속도보

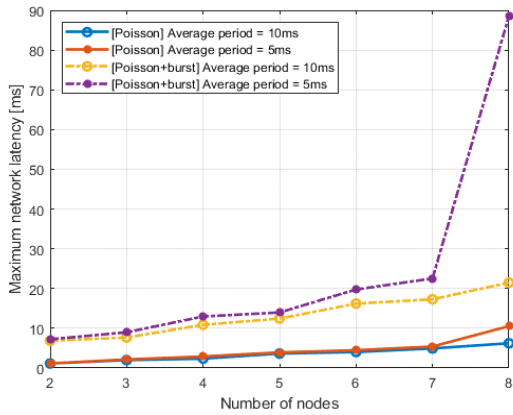


그림 4. 평균 노드 수에 따른 최대 네트워크 지연 시간(평균 주기 10 ms, 5 ms)
Fig. 4. Maximum network latency vs. the number of nodes ($\beta=10$ ms, 5 ms)

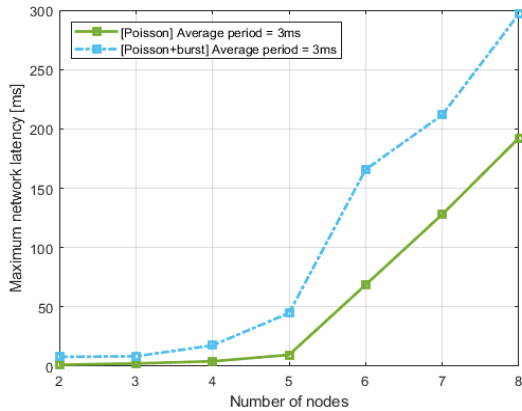


그림 5. 노드 수에 따른 최대 네트워크 지연 시간(평균 주기 3 ms)
Fig. 5. Maximum network latency vs. the number of nodes ($\beta=3$ ms)

다 1 싸이클 내에 데이터를 생성하게 되는 속도가 더 빠르기 때문이다. 따라서 각 노드에 버퍼가 계속 쌓임으로써 대기 지연이 누적되어 증가하게 된다. 이 경우에도 노드가 4개일 때까지는 정상적인 네트워크를 유지하였으나 5개 이상일 때부터는 정상적으로 네트워크가 동작하지 않게 된다.

그림 6은 각 평균 주기에 따라 노드 수를 변화해가며 측정된 처리율이다. 평균 주기에 관계 없이 노드 수가 증가할수록 처리율은 증가하는데, 이는 노드 수가 적을 때는 송수신되는 데이터가 적어 채널이 사용되지 않는 비율이 많지만, 노드 수가 많아질수록 같은 시간 동안 채널이 사용되는 시간이 많아지고 송수신

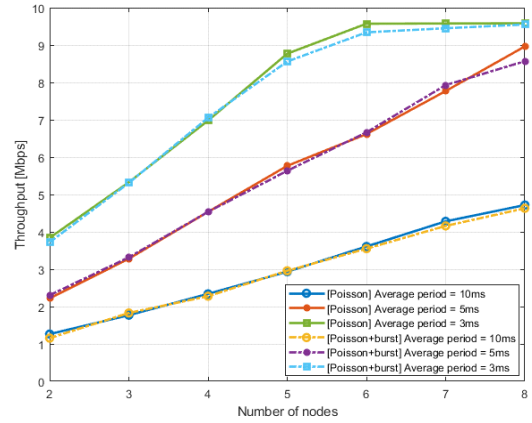


그림 6. 노드 수에 따른 처리율
Fig. 6. Throughput vs. the number of nodes

되는 데이터가 많아지기 때문이다. 평균 주기가 3 ms 일 때 노드가 5개 이상인 경우에는 처리율이 포화되는데, 이는 최대 네트워크 지연 시간의 경우와 마찬가지로 데이터가 빈번하게 생성되어 1 싸이클 내 모든 노드가 계속 데이터를 송신하여 채널이 계속 사용되기 때문이다. 이러한 경우에 처리율은 10 Mbps급 이더넷의 최대 처리율인 9.75 Mbps로 포화된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 현재 개발 중인 차세대 버스형 차량 네트워크 IEEE 802.3cg의 동작 방식에 대해 알고 있고 이로 인해 야기되는 네트워크 성능에 대해 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 생성되는 데이터 양이 적은 일반적인 경우에는 노드 수가 늘어날수록, 데이터 생성 주기가 짧을수록 최대 네트워크 지연 시간과 처리율이 증가하였다. 그러나 처리율이 포화될만큼 데이터 생성이 많은 환경 하에서는 대기 지연 시간에 의해 네트워크 지연 시간이 매우 커져 전체 네트워크가 정상적으로 동작하지 않게 되므로 차량 네트워크 설계 시 처리율과 네트워크 지연 시간을 고려하여 설계해야함을 알 수 있다. 실제 자율주행을 위해서는 차량 내부 통신과 차량 사물 통신 V2X의 지연을 복합적으로 고려해야 하며, 이러한 결과는 실시간 차량 통신 설계시 참고할 수 있다. 본 논문에서는 게이트웨이 없이 하나의 유선 채널에 모든 노드가 연결되어있다고 가정하였으나 실제 게이트웨이가 있는 경우에는 게이트웨이의 라우팅에 따른 영향 등이 존재하므로 추후 이에 대해 연구할 예정이다. 그리고 네트워크 성능에 대한 분석은 차량 외에도 다른 공유 네트워킹 분야에서 적용

할 수 있으므로 타 분야 적용 가능성에 대해 추후 검토할 예정이다.

References

- [1] J. Elfring, R. Appeldoorn, S. Van den Dries, and M. Kwakkernaat, "E-ffective world modeling: Multisensor data fusion methodology for automated driving," *Sensors*, vol. 16, no. 10, p. 1668, Oct. 2016.
- [2] S. Tuohy, M. Glavin, C. Hughes, E. Jones, M. Trivedi, and L. Kilmartin, "Intra-vehicle networks: A review," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 534-545, Apr. 2015.
- [3] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, IEEE Std 802.3cg™ / D2.3, Jan. 2019.
- [4] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, IEEE Std 802.3™, Sep. 2015.
- [5] R. I. Davis, A. Burns, R. J. Bril, and J. J. Lukkien, "Controller area network (CAN) schedulability analysis. Refuted, revisited and revised," *Real-Time System*, vol. 35, no. 3, pp. 239-272, Apr. 2007.
- [6] H. S. Hwang and B.-J. Youm, "Communication reliability test of IEEE1212 based RTU through WCRT analysis of CAN," in *Proc. KIEE Conf.*, pp. 1331-1332, Muju, Korea, Jul. 2015.
- [7] R. Ramaswamy, N. Weng, and T. Wolf, "Characterizing network processing delay," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1629-1634, Texas, USA, Nov. 2004.
- [8] J. Wang and S. Keshav, "Efficient and accurate Ethernet simulation," in *Proc. 24th Conf. Local Computer Netw.*, pp. 181-191, Massachusetts, USA, Oct. 1999.

김 규 민 (Kyumin Kim)



2016년 8월 : 경북대학교 전자공학부 졸업
 2019년 8월 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 석사
 2019년 8월~현재 : 국방기술품질원 연구원
 <관심분야> 통신공학

[ORCID:0000-0002-6481-9010]

최 은 민 (Eunmin Choi)



2014년 8월 : 경북대학교 전자공학부 졸업
 2017년 2월 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 석사
 2017년 3월~현재 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 박사과정

<관심분야> 통신공학

[ORCID:0000-0001-9313-2317]

최 지 웅 (Ji-woong Choi)



1998년 2월 : 서울대학교 전기공학부 졸업
 2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
 2004년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2004년 9월~2005년 10월 : 서울대학교 반도체 공동연구소 박사후연구원

2005년 10월~2007년 7월 : Stanford Univ. 박사후연구원

2007년 8월~2010년 10월 : Marvell Semiconductor 책임연구원

2010년 10월~현재 : DGIST 정보통신융합전공 교수

<관심분야> 통신공학

[ORCID:0000-0001-9109-3860]