

Low Complexity 및 Low Cost의 차량용 실시간 Ethernet 네트워크 제안 및 성능 분석

*황미나, 유인재, 정재환, 김수현, 박인철
KAIST 전기 및 전자공학과
e-mail : mnhwang.ics@gmail.com

Performance Evaluation of Low Complexity and Low Cost Automotive Real-Time Ethernet Network

*Mina Hwang, Injae Yoo, Jaehwan Jung, Suhyun Kim, In-Cheol Park
Department of Electrical Engineering
KAIST

Abstract

An automotive Ethernet network characterized by low complexity and low cost is proposed for an automotive control domain in this paper. Special topology is defined for low cost and the performance of this network is evaluated by conducting simulation. The characteristics of network are modeled on the CAN and FlexRay which are the widely used automotive networks. The performance related with the number of ECUs and the cycle time is evaluated by a real-time constraint of the control data in the car. In addition, the guideline is proposed for using the automotive Ethernet network.

I. 서론

차량 내 ECU(Electronic Control Unit)간의 통신을 위한 네트워크는 기능과 애플리케이션에 따라 구분되어 있다. 대표적인 차량용 네트워크로는 엔진 및 브레이크 등의 제어 및 control unit 사이의 데이터 전송을 위한 Control Area Network (CAN), FlexRay와 멀티

미디어 기기 간의 효율적인 통신을 위한 Media Oriented Systems Transport (MOST) 등이 있다. 따라서 현재 차량용 네트워크의 구성은 기능으로 구분된 네트워크들이 domain을 형성하며 gateway가 cross-domain 통신을 담당하는 heterogeneous network이다 [1].

현재 차량 내에 최대 70개의 ECU가 사용되며, 각 바퀴에 제어를 위한 ECU가 달려있는 In-wheel system과 같은 distributed embedded system로 바뀌는 경향에 따라 한 차량 내의 ECU의 수는 급격히 증가하는 추세이다 [2]. 하지만 기존의 차량용 네트워크는 이러한 경향에 비효율적이다. 왜냐하면 ECU의 수가 증가할수록 bandwidth 한계 때문에 불가피하게 네트워크 내의 domain 수와 함께 Gateway의 수도 증가하기 때문이다. 그 결과로 네트워크의 복잡성 및 비용 또한 증가할 것이다. 실제로 CAN의 경우 한 Domain을 형성하는데 사용 가능한 최대 노드 수는 16개, FlexRay의 경우 64개이다 [3]. 차량 내의 네트워크 복잡성으로 인한 wire의 무게, 네트워크 구성비용 등은 자동차의 무게 및 비용에 직결되는 사항이기 때문에 미래 자동차에 적합한 네트워크의 필요성이 대두되고 있다.

이에 대한 대안으로 모든 ECU 등의 장비를 하나로 통합할 수 있는 고속의 네트워크로써 Ethernet이 주목받고 있다. 이미 차량용 Ethernet 네트워크 연구 및 개발이 진행되고 있지만 대부분 high bandwidth traffic을 가정한 multimedia data을 위한 용도로 초점을 맞추고 있다 [4]. 하지만 control data는 안정성과

밀접한 연관이 있기 때문에 control domain을 위한 Ethernet 네트워크에 대한 연구 또한 중요하다.

따라서 본 논문에서는 CAN 및 FlexRay를 대체 가능한 control domain의 차량용 Ethernet 네트워크를 목적으로 한다. 또한 control data의 real-time constraint를 만족하며 최소한의 복잡성과 비용을 가지는 topology 제안하고 시뮬레이션 결과를 통해 성능을 분석하여 차량용 네트워크로써 사용을 위한 가이드 라인을 제시한다.

II. 본론

2.1 Simulation Assumption

시뮬레이션 결과에 앞서 차량 내 네트워크 modeling 위한 가정 및 data traffic의 특징들을 설명한다. Full-duplex switched Ethernet을 가정하고 있기 때문에 각 노드들이 virtually one-to-one mapping 되고 CSMA/CD 방식을 사용하지 않는다. 따라서 실시간성을 보장하기 위한 방법으로 적합하다. 또한 속도는 100Mbps Ethernet이다.

차량용 data traffic의 특징은 frame size와 각 ECU가 1초안에 얼마나 많은 traffic을 생성하는지에 대한 cycle time로 나타낼 수 있다. 이러한 특징들은 네트워크상의 traffic load와 밀접한 연관이 있기 때문에 네트워크 성능과도 큰 관련이 있다. 따라서 control data traffic을 modeling 하기 위해 기존 차량용 네트워크인 CAN과 FlexRay의 특징들을 시뮬레이션에 반영하였다. 먼저 control data traffic의 frame size는 high bandwidth를 특징으로 하는 multimedia data와 반대이다. CAN은 최대 8byte, FlexRay는 최대 256byte를 사이즈로 설정할 수 있지만 CAN data의 60%이상, FlexRay data의 77%이상이 8byte 이하의 frame size로 설정되어 있다 [5]. 따라서 시뮬레이션에선 Ethernet의 최소 frame size인 64byte로 설정하였다.

Cycle time의 경우 유동적인 값이지만 확률적으로 CAN은 전체 시뮬레이션 중 52% 이상, FlexRay는 82%이상이 100ms의 cycle time을 가지므로 시뮬레이션 또한 100ms(10packets/s)로 설정하였다 [5].

마지막으로 각 ECU가 생성한 frame의 목적지는 random하게 정해진다. 실제 차량 내의 ECU는 애플리케이션에 따라 한정된 목적지를 가질 것이다. 하지만 본 논문에선 Random한 목적지를 설정하여 가장 먼 거리의 ECU들의 통신도 가정한 worst case를 고려하였다.

2.2 Proposed Topology

가장 delay가 적은 네트워크 topology는 switch에 여러 노드들이 연결되어 있는 star topology라 예상해 볼 수 있다. 왜냐하면 switch가 가장 빠른 경로를 찾아 데이터를 보내주는 중재 역할을 하기 때문이다. 하지만 Ethernet의 경우 충분히 큰 bandwidth를 가지고 있고 control data traffic이 가장 최소한의 Ethernet frame size를 가지므로 ECU가 매우 많은 상황에서도 control data의 real-time constraint를 만족할 것이다. 따라서 이점을 이용하여 본 논문에서는 복잡성을 최소화 할 수 있는 가장 간단한 ring topology를 가정으로 차량용 Ethernet 네트워크 성능을 분석하였다. 추가로 비용을 최소화하기 위해 각 ECU에 연결되어야 할 switch를 없애고 그 기능을 MAC단에 추가 시키면서 가장 간단한 topology를 바탕으로 한 저비용의 네트워크를 구성하였다.

각 ECU는 2개의 port를 가지고 있으며 각 port는 바로 이웃한 ECU들과 연결 되어 있다. 이 때 입력 port와 출력 port는 정해져 있다. 입력 port로부터 frame을 받은 뒤 MAC단에서 frame의 destination address를 확인한 뒤 자신의 address와 다를 경우 출력 port로 해당 frame을 전송한다. 이웃한 ECU로부터 들어온 frame을 통과시키다가 destination address가 일치하는 frame만 상위 단으로 보낸다. frame이 항상 같은 방향으로 전송되므로 Unidirectional ring topology이다.

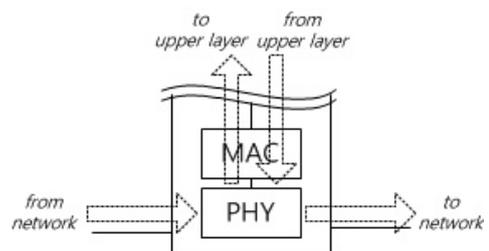


그림 1. Unidirectional Ring Topology 구현

III. 구현 및 시뮬레이션 결과

네트워크 시뮬레이터는 OMNeT++과 INET Framework 2.1을 사용하였다 [6]. 성능 분석의 metric은 차량 내 control data의 real-time constraint인 end-to-end delay이다. Control data는 반드시 특정 시간 내에 목적지 ECU로 전달되어야 안정성을 보장할 수 있기 때문에 end-to-end delay는 중요한 지표이다. 차량용 Ethernet 네트워크 관련 논문에서 control

data의 real-time constraint 기준을 10ms로 설정하므로 본 논문에서도 10ms의 end-to-end delay을 기준으로 성능을 평가하였다 [1]. Simulation assumption 및 제한한 topology를 바탕으로 한 시뮬레이션 시나리오와 결과는 아래와 같다.

3.1 Performance related with the number of ECUs

Unidirectional ring topology 상에서 ECU 수를 증가시키며 각 ECU의 max end-to-end delay 수치를 통해 경향을 분석하였다. 한 ECU에서 받은 frame들의 end-to-end delay 값 중 하나라도 10ms의 기준을 넘지 않아야 하기 때문에 max값을 고려하였다. 이를 통해 네트워크상의 ECU 수 증가에 따른 end-to-end delay 증가 경향과 10ms 기준을 만족하는 조건을 확인할 수 있다.

FlexRay의 최대 노드 수인 60부터 100, 120, 140, 150개의 ECU를 네트워크상에 연결하였다. 만약 100개의 ECU가 달린 경우라면 100개의 ECU에서 max end-to-end delay(총 100개)를 측정한 뒤 delay 값들의 분포를 확인하기 위해 평균 및 표준편차를 계산하였다. 그 결과는 아래의 표 1과 같다.

표 1. Max End-to-end Delay의 평균과 표준편차

	60 ECUs	80 ECUs	100 ECUs	120 ECUs	140 ECUs	150 ECUs
평균 (ms)	1.35	2.25	3.24	4.84	6.79	7.69
표준 편차 (ms)	0.19	0.43	0.61	0.85	1.11	1.56

그림 2의 분포를 살펴보면 ECU수가 증가할수록 max end-to-end delay의 평균과 표준편차가 동시에 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 normal distribution의 특성상 평균을 기준으로 3배의 표준편차의 범위의 값이 나올 확률이 99.7%이므로 이를 통해 ECU 수에 따른 max end-to-end delay의 수치적인 범위 또한 예상할 수 있다. 이는 표 2에 나타내었다. 140 개 이상의 ECU를 연결하면 10ms 기준을 만족하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 Performance related with the cycle time

Cycle time은 각 ECU가 frame을 전송하는 주기이며 cycle time이 짧을수록 네트워크상의 많은 frame으로 인해 end-to-end delay가 증가할 것이다. FlexRay의 최대 노드 수인 60개를 기준으로 cycle time을 증가에

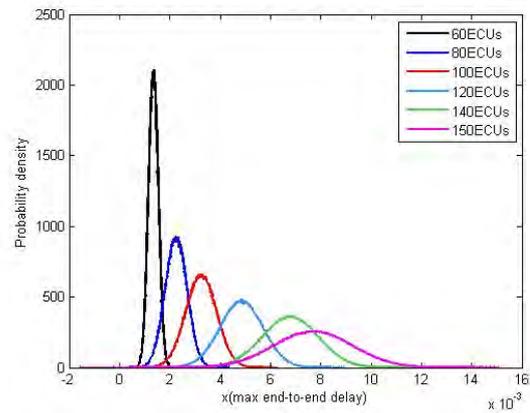


그림 2. Max End-to-end Delay의 Probability Density Function

표 2. Max End-to-end Delay Range

	Max End-to-end Delay Range
60 ECUs	(0.77ms,1.92ms)
80 ECUs	(0.95ms,3.55ms)
100 ECUs	(1.41ms,5.07ms)
120 ECUs	(2.29ms,7.39ms)
140 ECUs	(3.46ms,10.12ms)
150 ECUs	(3.01ms,12.37ms)

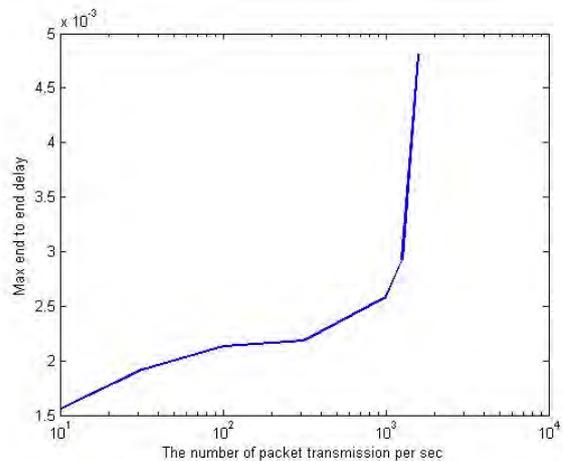


그림 3. Cycle time에 따른 Max End-to-end Delay 변화 (60 ECUs)

따른 max end-to-end delay를 통해 Ethernet 네트워크를 성능을 분석하였다. Cycle time은 100ms(10packets/s)부터 0.6ms(1585packets/s)까지 설정하였다. 결과는 그림 3과 같다.

1000packets/s 이상이 되면 max end-to-end delay가 급격히 증가한다. 1585packets/s의 경우

max end-to-end delay가 4.81ms로 10ms 기준을 만족한다. 하지만 급격히 변하는 경향으로 볼 때 이보다 짧은 cycle time은 10ms 기준을 만족한다는 보장이 없을 것이라 예상할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

Control domain을 목적으로 한 차량용 Ethernet 네트워크를 시뮬레이션 결과를 통해 분석하였다. 통합된 고속의 Ethernet 네트워크를 이용하여 네트워크상의 복잡성을 줄일 수 있으며 뿐만 아니라 본 논문에선 하드웨어 비용을 최소화 할 수 있는 unidirectional ring topology을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 제안한 차량용 Ethernet 네트워크에서 ECU수는 140개 미만까지 control data의 real-time delay constraint 기준을 만족하였다. 이보다 더 큰 수의 ECU를 연결해야 할 경우 추가의 switch 등의 장치를 이용하여 hierarchical한 구조로 네트워크를 구성할 수 있을 것이다. 이는 여전히 control data의 real-time constraint를 만족하며 최소한의 장비를 이용한 네트워크이다. 또한 cycle time에 따른 성능을 제시하여 차량용 Ethernet 네트워크 구성 시 참고할 수 있는 가이드라인을 제시하였다.

본 논문의 결과를 바탕으로 복잡성과 하드웨어 비용을 최소화 한 unidirectional ring topology 지원할 수 있는 Ethernet MAC controller을 내장한 ECU 설계할 수 있다.

Acknowledgement

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013006603)

참고문헌

[1]J. Sommer, "Ethernet - A Survey on its Fields of Applications", in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 12, NO. 2, Second Quarter 2010.

[2]T. Steinbach, "Tomorrow's In-Car Interconnect? A Competitive Evaluation of IEEE 802.1 AVB and Time-Triggered Ethernet (AS6802)", in *VTC 2012-Fall*, 2012.

[3]Fujitsu Microelectronics Co.,Ltd., "Next Generation Car Network-FlexRay", June 2006.

[4]H. T. Lim, "Challenges in a Future IP/Ethernet-based In-Car Network for Real-Time Applications", in *Design Automation Conference(DAC)*, June 2011.

[5]BMW Group, "Real-Time Communication in an IP/Ethernet-based In-Car Network", 2011.

[6] www.omnetpp.org