

논문 2015-52-10-4

철도차량용 분산형 제어시스템을 위한 네트워크 토폴로지 분석

(Analysis of Network Topology for Distributed Control System in Railroad Trains)

황 환 웅*, 김 정 태**, 이 강 원**, 윤 지 훈***

(Hwanwoong Hwang, Jungtai Kim, Kang-Won Lee, and Ji-Hoon Yun[©])

요 약

철도 차량의 전자화·무인화 시, 보다 높은 안정성을 위해 차량의 각 제어장치를 개별 컴포넌트로 분리하고, 이를 네트워크에 연결하여 분산형 제어시스템을 구성할 필요성이 높아지고 있다. 본 논문은 철도차량의 분산형 제어 시스템 구성을 위해 이더넷 망 이용 시 가능한 네트워크 토폴로지를 제시하고, 대상 토폴로지를 (1) 장애복구, (2) 장치별 필요 포트 수, (3) 차량 간 접속 케이블 수, (4) 성능의 네 가지 관점에서 비교·분석한다. 특히, 철도차량의 고유한 특성인 연결 차량 수의 변화 시, 이에 따른 네트워크 성능 효과를 고려하여 분석을 수행하고, 이에 맞는 네트워크 토폴로지를 제시한다. 이를 위해, 먼저 철도차량의 네트워크 토폴로지 구성을 차량 내와 차량 간 연결로 분류하여 여러 대상 조합을 고려한다. 또, 철도 차량 간 연결 수 증가로 인한 접속 단절/불안정 문제를 완화하기 위해 차량 간 연결에서 스타와 테이저체인을 복합 구성인 하이브리드 토폴로지를 제시한다. 시뮬레이션을 통해 토폴로지 간 성능을 비교하고, 차량 간 연결 수 제한 하에서도 하이브리드 토폴로지가 충분한 성능 개선이 있음을 보인다.

Abstract

For higher reliability against component failures in railroad trains with many electronic sensors and actuators, a distributed control system with which all electronic components are connected via a network is being considered. This paper compares and analyzes various topologies of Ethernet network for a railroad train in the aspects of (1) failure recovery, (2) the number of ports per device, (3) the number of cable connections between vehicles, and (4) performance. Especially, the unique characteristic of a train system that the number of vehicles changes is considered through analysis. Various combinations of in- and inter-vehicle topologies are considered. In addition, we introduce a hybrid of star and daisy-chain topology for inter-vehicle connection when the maximum number of inter-vehicle connections is limited to reduce possible failures of inter-vehicle connections. Simulation results show performance comparison between different topology combinations: the hybrid topology is shown to enhance delay performance even with a highly limited number of inter-vehicle connections.

Keywords : railroad train network, network topology, distributed control system, Ethernet network.

* 학생회원, *** 정회원, 서울과학기술대학교 전기정보공학

(Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

** 정회원, 한국철도기술연구원

(Korea Railroad Research Institute)

© Corresponding Author(E-mail: jhyun@seoultech.ac.kr)

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Received ; August 19, 2015 Revised ; September 10, 2015

Accepted ; September 24, 2015

I. 서 론

오늘날의 철도 차량은 많은 수의 전자 제어장치와 센서를 내장하고 있고, 이들은 서로 간의 데이터 교환을 위한 연결을 필요로 한다. 철도 차량 제어의 전자화는 철도 차량의 무인화와 맞물려 더욱 가속화되고 있다.

무인 주행을 위해서는 이를 보조하기 위한 다양한 전자장치(예: 측위 장치)가 추가로 필요하고, 따라서 기존 및 신규 장치 간의 연결이 필요할 뿐만 아니라 보다 정밀한 운영을 위해 이들 간의 데이터 교환량이 늘어날 수 있다.

철도 차량 내에서 많은 수의 전자장치가 서로 연결되는 환경에서 기존처럼 단일 중앙 제어장치가 다른 모든 장치를 관장하고 데이터 전달을 중계하기에는 연결이 과도하게 복잡해지고 중앙 장치의 로드가 클 수 있다. 따라서, 필요한 경우에는 중앙 컨트롤러를 거치지 않고 장치들이 서로 데이터를 직접 주고받고 제어 동작을 수행하는 분산형 시스템이 고려될 수 있다. 이러한 분산형 시스템은 중앙장치의 장애 발생 시 다른 장치들이 분산적으로 연계하여 동작할 수 있으므로, 보다 높은 안정성을 요구하는 무인 철도차량 시스템에 적용하기 적합하다.

이처럼 증가하는 제어장치와 장치 간 분산적 데이터 교환을 효율적으로 수용하기 위해서 철도 차량을 위한 단일 네트워크의 도입이 고려될 수 있다. 현재의 전자화된 철도 차량은 다양한 종류의 네트워크 기술이 복합적으로 이용되고 있다. 예를 들어, 철도차량을 위해 만들어진 네트워크 기술인 TCN(Train Communication Network)^[1]은 제어 신호 전송에 특화되어 있어 낮은 전송속도(1 또는 1.5Mbps)와 적은 수의 장치 연결(최대 32개)만을 지원한다. 따라서, 일반적인 철도차량은 고속 CAN 기술 등이 복합적으로 사용되고 있다. 이처럼 서로 다른 네트워크에 연결된 장치들 간 데이터 교환을 위해서는 중간 컨트롤러의 중계 및 데이터 변환이 필요하다. 이러한 비효율성은 단일 네트워크 기술을 이용해 모든 장치를 통합함으로써 해결될 수 있다.

통합하기 위한 단일 네트워크 기술로는 이더넷(Ethernet)이 대표적이다. 차량 내 전자 장치의 연결을 이더넷(Ethernet) 망으로 통합하기 위한 시도는 자동차 업계에서 먼저 시작되었다. 즉, 현재의 자동차 내에는 다양한 종류의 네트워크 망(예: CAN, LIN, MOST, FlexRay 등)이 혼재되어 있는 상태이므로 현대 자동차의 네트워크 구성 역시 위에서 언급한 한계를 갖는다. 이를 해결하고 장치간 풍부한 연결성과 케이블링 감소라는 상반된 목표를 동시에 달성하기 위해 오래전부터 자동차에 네트워크를 도입하기 위한 연구가 시도되었다. 대표적으로, 이더넷 기술의 차량 적용 시나리오

연구^[2~4]와 토폴로지 구성 및 패킷 우선순위를 통한 QoS(Quality of Service) 보장 연구^[5~7]가 있었다. 또, FlexRay와 산업용 이더넷이 복합적으로 이용된 자동차 망을 수학적으로 모델링하는 연구^[8], CAN/이더넷 게이트웨이 기법 연구^[9], 차량용 이더넷망의 실시간성 연구^[10]도 이루어졌다. 이더넷을 자동차에 적용하기 위해서는 멀티미디어를 포함한 복합 트래픽 전송, 전력 소모^[11] 등이 주된 이슈이지만, 철도 차량은 이와 다른 새로운 특성을 갖는다(II장 참조). 따라서, 철도 차량을 위한 별도의 이더넷 망 연구가 이루어져야 한다.

본 논문은 철도차량의 분산형 제어 시스템 구성을 위해 이더넷 망 이용 시 가능한 네트워크 토폴로지를 제시하고, 대상 토폴로지를 (1) 장애복구, (2) 장치별 필요 포트 수, (3) 차량 간 접속 케이블 수, (4) 성능의 네 가지 관점에서 비교·분석한다. 특히, 철도차량의 고유한 특성인 차량 수의 증감에 따른 네트워크의 확장 시 성능 효과를 고려하여 분석을 수행하고, 이에 맞는 네트워크 토폴로지를 제시한다. 이를 위해, 먼저 철도차량의 네트워크 토폴로지 구성을 차량 내와 차량 간 연결로 분류한다. 각 경우의 토폴로지로 링, 데이지체인, 스타, 그리고 버스를 고려한다. 링 토폴로지의 경우 고정된 방향과 최적 방향으로 패킷을 포워딩하는 두 경우를 고려한다. 뿐만 아니라, 철도 차량 간 연결 수 증가로 인한 접속 단절/불안정 문제를 완화하기 위해 차량 간 연결에서 스타와 데이지체인의 복합 구성인 하이브리드 토폴로지를 제시한다.

본 논문에서 제시한 토폴로지 및 성능 결과는 유/무인 철도, 트램 등 다양한 형태의 철도차량에 적용 가능하다. 이처럼 철도차량에 특화된 이더넷 토폴로지의 성능분석 연구는 본 논문이 처음인 것으로 조사되므로, 향후 철도차량의 미래화를 위한 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 철도차량을 위한 분산형 제어시스템의 고유한 특성을 분석하고, III장에서는 이를 위한 네트워크의 토폴로지를 분류한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 토폴로지별 성능 분석을 수행하고, V장에서는 결론을 맺는다.

II. 철도차량의 분산형 제어시스템 특성

본 장에서는 철도 차량을 위한 분산형 제어 시스템의

특성을 기술한다. 트래픽 특성 및 전송 요구사항은 자동차의 경우와 유사하지만, 연결 차량 수 변경으로 인한 토폴로지 변화 및 차량 간 접속은 철도 차량만의 고유한 특성이다.

1. 트래픽 특성 및 전송 요구사항

철도 차량은 수많은 제어장치와 센서를 내장하고 있고, 중앙 제어장치와의 데이터 교환 뿐 아니라, 각 제어 장치와 센서 사이의 데이터 교환이 있을 수 있다. 센서에 의한 환경 센싱과 그에 알맞은 제어 명령은 빠르고 정확하게 전달되어야 한다. 예를 들어 중앙 제어 장치가 정지 명령을 수행하는 제어장치에 정지 명령 데이터를 전송 할 때, 전송 딜레이가 길어 일정 시간 내에 전달되지 않거나 혹은 누락된다면 안전에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그렇기 때문에 철도 차량 내의 데이터 교환은 낮은 전송 딜레이를 갖고, 또 데이터의 누락이 적어야 한다.

2. 토폴로지 변화

철도 차량은 운행 시마다 승객 수 또는 화물량에 맞추어 연결 차량의 개수를 바꿀 수 있다. 또, 특정 역에서 일부 차량을 분리하거나 추가하여 나머지 경로를 운행하는 경우도 있다. 이처럼 변화하는 차량 개수에도 불구하고 모든 차량이 연결된 네트워크가 구성되어, 다른 차량의 제어 장치 간에도 자유로운 데이터 교환이 가능해야 한다.

3. 차량 간 연결 접속

철도 차량은 앞/뒤 차량과 연결기(coupler)를 통해서 연결되어 있다. 이를 통해 일정 곡률을 갖는 철도를 운행할 수 있을 뿐만 아니라, 차량의 자유로운 탈부착이 가능해진다. 이에 따라 각 차량의 이더넷 망 또한 앞/뒤 차량의 망과 연결이 가능하도록 연결기 상에 접속 커넥터가 마련되어야 한다. 하지만, 철도 차량의 운행 시에는 연결기에 상당한 충격과 진동이 가해지므로, 이더넷 망 간 접속 부위에 손상이 발생해 망 간 접속이 끊기거나 불안정해질 가능성이 높다.

III. 철도차량용 네트워크 토폴로지 분류

본 논문에서는 철도차량의 네트워크 토폴로지 구성

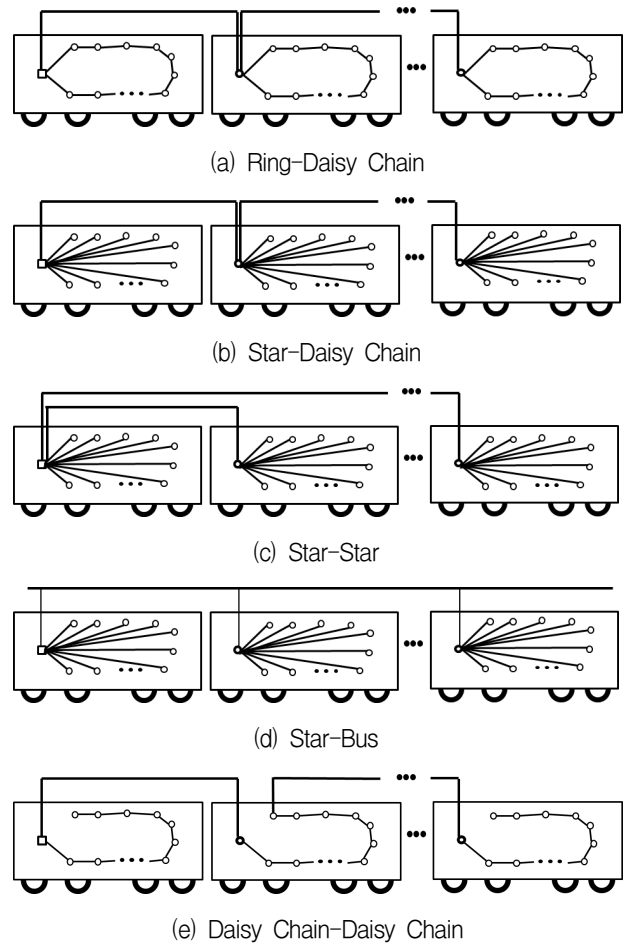


그림 1. 차량 내-차량 간 토폴로지 조합 예(○는 말단 제어장치, □는 중앙 제어장치를 의미)

Fig. 1. Illustrative combinations of in- and inter-vehicle topologies (○ indicates a terminal unit and □ indicates a central unit).

을 차량 내와 차량 간 연결로 분류한다. 각 경우의 토폴로지로 링, 데이지체인, 스타, 그리고 버스를 고려한다. 링 토폴로지의 경우 고정된 방향과 최적 방향으로 패킷을 포워딩하는 두 경우를 고려한다. 차량 내와 차량 간 연결 토폴로지의 조합 방법에는 여러 가지가 있을 수 있으나 차량 간 접속 특성과 시스템 자원을 고려할 경우 가능한 예는 그림 1에 보인 바와 같다(각 조합은 ‘차량 내 토폴로지-차량 간 토폴로지’로 지칭함). 그림 1(a)는 각 차량 내의 장치(노드)들은 링 토폴로지로 연결되어 있고, 차량 간에는 데이지체인 토폴로지로 연결되어 있는 경우를 도시한다. 그림 1(b), 1(c), 1(d)의 경우 차량 내에서는 스타 토폴로지로 각 노드들이 연결되어 있고, 차량 간 연결은 각각 데이지체인, 스타, 버스 토폴로지로 구성되어 있다. 그림 1(e)에서는 차량 내 및 차량

간 연결 모두 데이터체인으로 연결되어 있다.

각 토폴로지는 각각의 장단점을 지니고 있다. 본 장에서는 각 토폴로지의 장단점을 (1) 장애 복구, (2) 장치의 필요 포트 수, 그리고 (3) 차량 간 연결 케이블 수 관점에서 비교·분석한다. 성능 비교는 IV장에서 제시한다.

1. 장애 복구

스타 토폴로지는 스위치 노드에 다른 노드가 연결되는 구조로 하나의 말단 노드에 문제가 발생해도 망 전체가 영향을 받지 않는 반면, 스위치 노드에 문제가 생기면 전체 망이 불능이 되는 단점이 있다. 링 토폴로지의 경우 단일 노드에 장애가 발생하더라도 반대 방향 연결을 통해 모든 노드가 서로 간의 연결을 유지할 수 있다. 반면 데이터체인 토폴로지는 노드 간 데이터 교환을 위한 경로가 한 방향만 존재하므로 장애가 발생한 노드의 위치에 따라서 전체 망의 연결이 큰 영향을 받는다. 버스 토폴로지는 시스템의 구축이 간단하고 저렴할 뿐만 아니라, 노드에 장애가 발생하더라도 나머지 노드들은 정상적으로 통신을 할 수 있다.

2. 장치별 필요 포트 수

망 토폴로지에 따라 각 제어장치가 필요로 하는 이더넷 포트의 수가 달라진다. 필요 포트의 수가 늘어날수록 제어장치는 더 많은 이더넷 트랜시버, 트랜스포머, 커넥터가 필요하므로 제조 비용 및 장치 부피가 증가하게 된다. 뿐만 아니라, 트랜시버 간의 연계를 위한 MCU(MicroController Unit)의 프로세싱이 증가하고, 따라서 포트 수가 일정 이상이 되면 별도의 스위치 칩을 사용해야 할 수 있다.

표 1은 데이터체인, 링, 스타 토폴로지에 대한 노드의 필요 포트 수를 보인다. $N_{in_vehicle}$ 은 차량 내 연결에 필요한 포트의 수이고, $N_{inter_vehicle}$ 은 차량 간 연결을 위한 포트 수이다. 차량 내 시스템 연결을 데이터체인으로 구성할 경우, 첫 번째와 마지막 노드는 1개, 중간 노드는 앞·뒤 노드와 연결할 2개의 포트를 필요로 한다. 링의 경우는 모든 노드가 앞·뒤 노드와 연결되므로 2개의 포트가 필요하다. 스타 토폴로지로 구성할 경우 스위치 노드가 별도로 필요하고 다른 노드는 이 스위치 노드와 연결되므로, 스위치 노드는 차량 내부 노드 수(M_{node}) 만큼, 다른 노드는 하나의 포트 만을 필

요로 한다.

차량 간 연결에서 데이터체인 토폴로지를 사용할 경우, 첫 번째 차량과 마지막 차량에는 1개, 중간 차량에는 2개의 포트가 필요하고, 링은 모든 차량의 2개의 포트를 필요로 한다. 스타 토폴로지에서는 처음 차량의 노드(예: 중앙 제어장치)에서 다른 모든 차량으로 연결되어야 하므로, 처음 차량에서는 총 차량의 수($M_{vehicle}$) - 1개의 포트가, 나머지 차량에서는 각 1개의 포트가 필요하다.

최종적으로 특정 장치가 필요로 하는 포트 수는 최대 $N_{in_vehicle} + N_{inter_vehicle}$ 이 되고, 이는 적용 토폴로지, 차량 내에서 장치의 역할, 차량 위치, 차량 간 연결에서 장치의 역할에 따라 산출될 수 있다.

3. 차량 간 접속 케이블 수

앞서 설명한 것처럼 차량 간 접속 케이블 수가 많을수록 연결 부위의 단선, 불안정한 접촉에 노출될 가능성이 커진다. 표 1에서 $C_{inter_vehicle}$ 은 해당 토폴로지를 이용해 차량을 연결할 때 차량 간 필요한 접속 케이블 수를 의미한다. 데이터체인과 링 토폴로지에서는 각각 1개와 2개의 접속이 필요한 반면, 스타 토폴로지의 경우 i 번째 차량에서 $M_{vehicle} - i$ 개가 필요하므로 연결 장에 훨씬 취약하다고 할 수 있다.

표 1. 토폴로지 별 필요 포트 수와 차량 간 링크 수
Table 1. Required numbers of ports and inter-vehicle links for different topologies.

	$N_{in_vehicle}$	$N_{inter_vehicle}$	$C_{inter_vehicle}$
Daisy chain	$\begin{cases} 1 (1st, last) \\ 2 (others) \end{cases}$	$\begin{cases} 1 (1st, last) \\ 2 (others) \end{cases}$	1
Ring	2	2	2
Star	$\begin{cases} M_{node} (SW) \\ 1 (others) \end{cases}$	$\begin{cases} M_{vehicle} - 1 (1st) \\ 1 (others) \end{cases}$	$M_{vehicle} - i$

IV. 철도차량용 네트워크 토폴로지 성능 분석

본 장에서는 토폴로지 간의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하고 분석한다.

1. 시뮬레이션 환경

토폴로지는 그림 1에 제시된 것을 대상으로 하고, 특히 1(a)의 링 토폴로지의 경우 고정된 방향 전송 (simplex)과 최적 방향으로 패킷을 포워딩하는 경우

(duplex)를 포함하여, 총 6가지의 경우를 비교한다. 각 노드는 고정된 레이트로 패킷을 생성하고, 각 패킷의 크기는 500 바이트이다. 각 노드에서 생성 되는 패킷의 절반은 차량 내의 다른 노드(링 토폴로지의 경우 전송 노드에서 가장 멀리 있는 노드, 테이지체인 토폴로지의 경우 연결된 총 노드 수의 절반에 해당하는 거리의 노드)로 전송하며, 나머지 절반은 첫 번째 차량에 위치한 중앙 제어장치 노드로 전송한다. 모든 토폴로지에서 각 차량 내의 노드 수는 20개이다. 각 링크는 100Mbps 전송 속도를 갖는 Fast Ethernet 기술을 기반으로 하고, 전파 지연시간(propagation delay)은 1ms로 간주한다. 특별한 언급이 없는 경우, 차량은 10개로 구성되고, 각 노드는 1200kbps의 레이트로 패킷을 생성한다(현재 철도차량의 경우 대비, 이 생성레이트는 높은 수준인데, 이는 미래에 철도차량 내 디스플레이 시스템, IP CCTV 등이 인터넷 네트워크에 통합되는 경우를 포함하고, 또 어느 정도의 큐잉 및 패킷 로스가 발생할 때의 토폴로지 간 성능차를 비교하기 위함이다). 시뮬레이션은 ns-2 시뮬레이터^[12]를 이용해 수행한다.

2. 평균 결과

그림 2는 트래픽 생성 레이트 변화에 따른 토폴로지 별 평균 패킷 지연시간을 나타낸 것이다. 대부분의 경우에서 생성 레이트가 증가함에 따라 패킷 지연시간 또한 길어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Daisy chain-Daisy chain의 경우 패킷 지연시간이 1800kbps에서 오히려 소폭 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 PER(Packet Error Rate)이 49%(1200kbps)에서 75%로 상승하기 때문이다. 이로 인해 중앙제어장치에서 상대적으로 가까운 노드의 패킷이 주로 전송에 성공하고 보

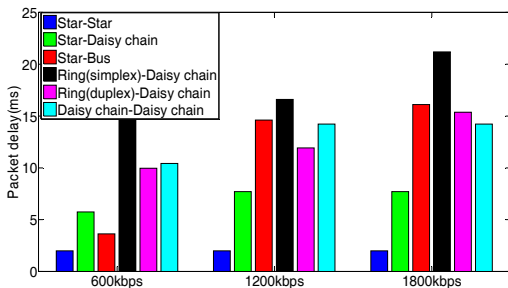
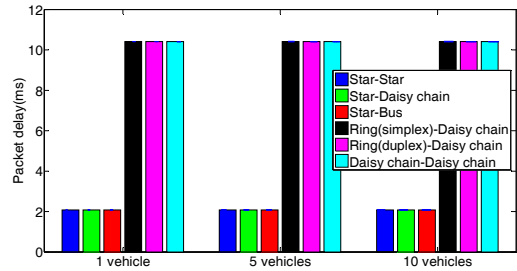
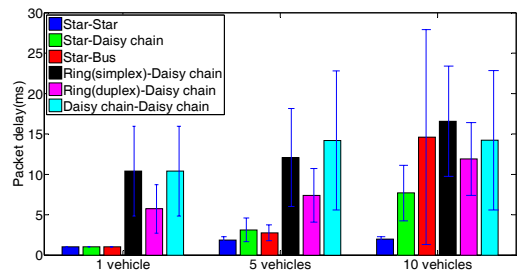


그림 2. 트래픽 생성 레이트에 따른 평균 패킷 딜레이
Fig. 2. Average packet transmission delay for various packet generation rates.



(a)



(b)

그림 3. 토폴로지 별 패킷 딜레이 평균, 표준편차:
(a) 차량 내 전송, (b) 차량 간 전송

Fig. 3. Average and standard deviation of packet transmission delay for different topologies:
(a) in-vehicle transmission,
(b) inter-vehicle transmission.

다 먼 노드의 패킷은 전송에 실패하여 지연시간 산출에 포함되지 않게 된다. 1800kbps일 때, Star-Star는 PER이 0%이지만 이 외의 모든 경우에는 PER이 33% 이상이다.

그림 3은 연결된 차량 개수의 변화에 따른 패킷 지연시간의 평균과 표준편차를 보이고 있다. 그림 3(a)는 차량 내에서 노드 간 데이터 교환에서 발생하는 패킷 딜레이를 보인다. 차량 내의 노드들이 스타 토폴로지 연결되어 있을 경우 전송 노드에서 스위치로, 스위치에서 도착 노드로 전송되며 따라서 큐잉이 없는 경우 2ms의 패킷 딜레이(링크 전파 지연시간×2)가 발생한다. 링 토폴로지의 경우, 고정 방향(simplex)과 최적 방향(duplex) 모두 약 10ms의 패킷 딜레이를 갖는데, 이는 연결 노드가 20개이고 두 경우의 모두 전송 노드와 도착 노드 사이의 링크 수가 10개로 같게 되기 때문이다. 이는 테이지체인의 경우도 마찬가지이다.

그림 3(b)는 각 노드가 중앙 제어장치로 전송하는 경우에 대한 결과이다. 단일 차량(1 vehicle)인 경우, 차량 간 연결이 없기 때문에 토폴로지 별로 그림 3(a)와 유

사한 패킷을 보인다. 단, 링 토폴로지의 경우 고정 방향은 10ms, 최적 방향은 5.7ms의 지연을 보인다. 이러한 차이를 보이는 이유는 고정 방향의 경우 노드가 중앙 제어장치와 가깝더라도, 반대 방향으로 많은 링크를 거쳐서 전송할 수 있기 때문이다. 차량의 수가 증가할수록 패킷이 거치는 중간 노드의 수 역시 증가하고 그에 따라 패킷 지연이 평균과 표준편차 모두 증가하는 양상을 보인다. 한편, 버스 토폴로지는 다른 토폴로지 대비 지연 시간의 평균 및 표준편차가 훨씬 큰 폭으로 증가하는 것을 보인다. 이는 버스로 인가되는 트래픽이 증가하여 전송 충돌 및 이로 인한 백오프 타임이 증가하기 때문이다. 이처럼, TDMA 버스 기반의 기존 산업용 네트워크(TCN 등)와는 달리, CSMA로 동작하게 되는 이더넷 버스 구조는 트래픽 증가 시 큰 성능 저하를 보인다.

3. CDF 결과

토폴로지 별 패킷 지연 특성을 보다 자세히 분석하기 위해 차량 5, 10개에 대한 패킷 지연시간의 CDF를 그림 4에 나타내었다. 차량 내에서 노드 간 데이터 교환은 패킷 별로 큰 편차를 보이지 않으므로, 각 그림에서는 차량 간 데이터 교환만을 대상으로 한다.

그림 4(a)는 5개 차량에 대한 CDF를 보인다. 여기에서 Star-Star의 경우 패킷 지연시간이 최소 1ms부터 최대 2.8ms까지로 가장 좋은 성능을 보여준다. 다음으로 Star-Daisy chain이 최소 1ms에서 최대 6ms까지의 지연시간을 보인다. 이어서 Ring(duplex)-Daisy chain이 1ms에서 최대 14.8ms의 패킷 지연시간을 갖는다. 고정 방향(simplex)의 경우 앞서 설명한 이유로 인해 최적 방향(duplex)보다 더 긴 24.3ms를 최대 패킷지연 시간으로 갖는다. Daisy chain-Daisy chain은 모든 노드가 일렬로 연결되어 있기 때문에 차량이 증가하면 경우 링크 추가로 인해 패킷 지연시간이 크게 늘어난다. 하지만, 그래프 상에서는 패킷 지연시간이 약 32ms까지 인데, 이것은 중앙 제어장치로부터 많은 홉이 떨어진 노드에서 보내는 패킷들이 중간 링크의 큐 오버플로우로 인해 상당 수 손실되어 CDF에 포함되지 않았기 때문이다. 한편, 버스의 경우 대부분의 패킷은 5ms 이내의 지연시간을 갖지만 충돌 및 백오프로 인해 일부 패킷들은 15ms 이상의 큰 지연시간을 갖는다.

그림 4(b)는 10개 차량에 대한 결과이다. Star-Star의

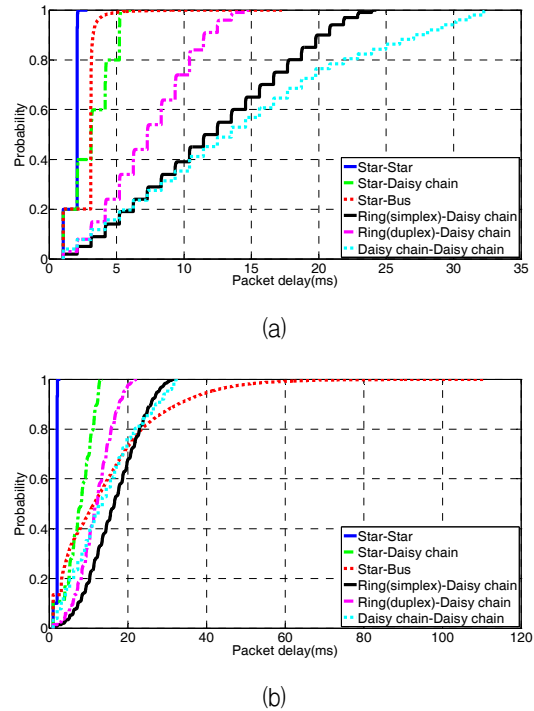


그림 4. 토폴로지 별 차량 간 패킷 전송 딜레이 CDF: (a) 5개 차량, (b) 10개 차량

Fig. 4. CDF of inter-vehicle transmission delay for different topologies: (a) 5 vehicles, (b) 10 vehicles.

경우 5개 차량에 대한 결과와 동일하고 PER은 0%이다. Star-Daisy chain은 1ms에서 최대 13.6ms의 패킷 지연시간을 보여 5개 차량 대비 2배 이상의 증가를 보인다. 차량 간 전송에서 중간 링크의 개수 증가뿐만 아니라 중간 링크를 거치는 트래픽의 증가로 인해 큐잉 또한 증가하기 때문이다. 반면, 차량 내 전송에서의 지연시간은 증가가 없으므로, 전체 지연시간의 변화는 차량 간 지연시간 증가에 의해 주된 영향을 받는다. PER은 6.6%이다. 다음으로 Ring(duplex)-Daisy chain이 1ms에서 최대 22.65ms의 패킷 지연시간을 갖고 PER은 6.7%로서 Star-Daisy chain의 경우와 유사하다. Ring(simplex)-Daisy chain는 1ms에서 최대 패킷 지연시간은 32.13ms로 이전 토폴로지보다 높고 PER은 6.7%이다. Daisy chain-Daisy chain은 그림 5(a)와 유사한 결과를 얻을 수 있는데, 이것은 앞선 이유와 동일하게 많은 링크를 거치는 패킷의 경우 상당수가 큐에서 손실되기 때문이다. 버스 토폴로지의 경우 차량 증가 시 PER이 25.7%까지 증가 되며, 약 20%의 패킷이 다른 토폴로지 대비 상당히 큰 지연시간을 갖는다.

4. 하이브리드 토폴로지 결과

앞의 시뮬레이션 결과로부터 모든 경우에 대해 가장 좋은 지연시간 및 PER 성능을 보이는 토폴로지 조합은 Star-Star이다. 하지만, 표 1에서 보인 것처럼, 스타 토폴로지의 경우 차량 내 연결에서 스위치가 필요하고, 차량 간 연결에서는 첫 번째 차량에서 다른 모든 차량으로 연결 링크가 필요하다. 예를 들어, 10개 차량으로 구성된 경우, 차량 간 접속 케이블의 수는 최대 9개에 달한다. 즉, 특히 차량 간 연결에서 스타 토폴로지는 연결점의 접속 장애 가능성을 극대화한다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 토폴로지 설계에서 차량 간 최대 연결 케이블 수를 제한할 수 있다. 이 경우, 첫 번째 차량은 제한된 연결 수까지의 차량들과만 스타 토폴로지로 직접 연결된다. 스타 토폴로지로 연결된 마지막 차량은 다음 차량들과 새로운 스타 망을 이용해 연결된다. 이러한 구성은 차량 간 연결에서 스타와 데이지체인 구성이 복합된 것으로 볼 수 있으므로, 본 논문에서는 이를 하이브리드 토폴로지라고 칭한다. 그림 5는 차량 간 최대 연결 케이블 수를 2개로 제한했을 때의 하이브리드 토폴로지 예를 보이고 있다. 이러한 하이브리드 토폴로지는 두 개 이상의 차량 그룹을 운행 구간에 따라 연결/분리하여 운행하는 중련 편성에도 적합하다(예: KTX-산천). 이 경우, 각 차량 그룹 내에서 차량 간 연결은 스타 토폴로지, 그룹 간 차량 연결에는 데이지체인 토폴로지로 구성할 수 있다.

그림 6은 차량의 수가 10개일 때의 차량 간 연결 수 제한값 $C_{inter_vehicle}$ 에 따른 하이브리드 토폴로지의 패킷 지연시간 평균과 표준 편차를 나타낸다. 시뮬레이션 환경은 이전과 동일하고, 차량 내에서 노드들의 연결은 링 토폴로지를 이용한다. 하이브리드 토폴로지에서 $C_{inter_vehicle}$ 이 1인 경우는 차량 간 연결이 데이지체인 토폴로지

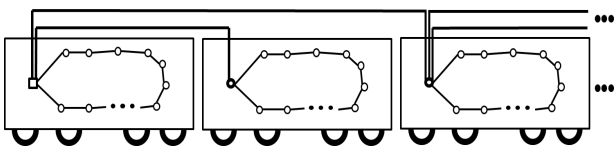


그림 5. 하이브리드 토폴로지 구성 예(차량 간 최대 연결 케이블 수: 2개, 차량 내 연결: 링 토폴로지인 경우)

Fig. 5. Illustrative example of the hybrid topology when the maximum number of inter-vehicle connections is two and the in-vehicle topology is ring.

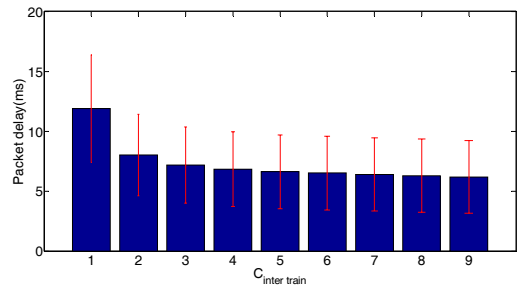


그림 6. 차량 간 연결링크 수 제한에 따른 하이브리드 토폴로지의 패킷전송 지연시간 평균과 표준편차

Fig. 6. Average and standard deviation of inter-vehicle transmission delay for the hybrid topology.

폴로지와 동일하고, $C_{inter_vehicle}$ 이 9인 경우는 스타 토폴로지와 동일하다. 나머지 경우는 스타와 데이지체인 토폴로지가 복합적으로 이용된다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 $C_{inter_vehicle}$ 가 커질수록 지연시간은 낮아진다. 하지만, 이와 함께 차량 간 연결 케이블 수 또한 증가한다. 데이지체인 대비 $C_{inter_vehicle}$ 를 2로 확장했을 때 큰 폭의 지연시간 감소를 얻을 수 있다. $C_{inter_vehicle}$ 를 더 확장할수록 지연시간은 감소하지만 감소폭은 줄어든다. 따라서, 적절한 $C_{inter_vehicle}$ 를 설정하여 하이브리드 토폴로지를 이용하는 것이 지연 시간 뿐만 아니라 연결 안정성에도 이득이 될 수 있다.

V. 결론

본 논문은 철도차량의 분산형 제어 시스템 구성을 위해 이더넷 망 이용 시 가능한 네트워크 토폴로지를 제시하고, 대상 토폴로지를 다양한 관점에서 비교·분석하였다. 특히, 철도차량의 고유한 특성인 차량 수의 증감에 따른 네트워크의 확장 시 성능 효과를 고려하여 분석을 수행하였다. 이를 위해, 철도차량의 네트워크 토폴로지 구성을 차량 내와 차량 간 연결로 분류하였다. 또, 철도 차량 간 연결 수 증가로 인한 접속 단절/불안정 문제를 완화하기 위해 하이브리드 토폴로지를 제시하고, 차량 간 연결 수 제한 하에서도 충분한 성능 개선이 있음을 보였다.

REFERENCES

[1] Electronic railway equipment - Train

- communication network (TCN), IEC 61375, 2012.
- [2] Peter Hank, Steffen Muller, Ovidiu Vermesan, Jeroen Van Den Keybus, "Automotive ethernet: in-vehicle networking and smart mobility," in Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, pp. 1735-1739, 2013.
- [3] Ovidiu Vermesan et al., "Advanced Electronic Architecture Design for Next Electric Vehicle Generation," Springer Lecture Notes in Mobility, pp. 117-141, 2015.
- [4] S. Tuohy et al., "Intra-Vehicle Networks: A Review," IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, no. 2, pp. 534-545, 2015.
- [5] Hyung-Taek Lim, Lars Volker, and Daniel Herrscher, "Challenges in a future IP/Ethernet-based in-car network for real-time applications," in Proceedings of the 48th Design Automation Conference, pp. 7-12, 2011.
- [6] M. Manderscheid and F. Langer, "Network Calculus for the Validation of Automotive Ethernet In-vehicle Network Configurations," in Proceedings of the International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, pp. 206-211, 2011.
- [7] Mohammad Ashjaei et al., "Improved Message Forwarding for Multi-Hop HaRTES Real-Time Ethernet Networks," Journal of Signal Processing Systems, 2015.
- [8] T. Steinbach, F. Korf, and T.C. Schmidt, "Comparing time-triggered Ethernet with FlexRay: An evaluation of competing approaches to real-time for in-vehicle networks," in Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, pp. 199-202, 2010.
- [9] Christian Herber, Andre Richter, Thomas Wild, and Andreas Herkersdorf, "Real-time capable CAN to AVB ethernet gateway using frame aggregation and scheduling," in Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, pp. 61-66, 2015.
- [10] Mina Hwang et al., "Performance Evaluation of Low Complexity and Low Cost Automotive Real-Time Ethernet Network," IEIE Conference, Vol. 36, no. 1, pp. 428-431, 2013.
- [11] Stefan Kunze, Rainer Pöschl, and Andreas Grzember, "Comparison of Energy Optimization Methods for Automotive Ethernet Using Idealized Analytical Models," Springer Lecture Notes in Mobility, pp. 187-198, 2015.
- [12] The Network Simulator - ns-2, [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

저 자 소 개



황 환 응(학생회원)
2014년 서울과학기술대학교 전기
정보공학과 학사 졸업.
2014년~현재 서울과학기술대학교
전기정보공학과
석사 과정.

<주관심분야 : 데이터네트워크>



김 정 태(정회원)
1997년 2월 서울대학교
전기공학부(공학사)
1999년 2월 서울대학교
전기공학부(공학석사)
2011년 8월 KAIST 전기및전자
공학과(공학박사)

1999년 2월~2012년 7월 (주)LIG넥스원
수석연구원

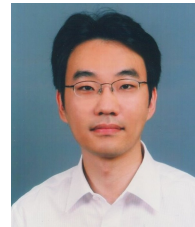
2012년 8월~현재 한국철도기술연구원
선임연구원

<주관심분야 : 열차제어, 신호처리, 임베디드시스
템>



이 강 원(정회원)
1995년 충북대학교 전기공학과
학사졸업
2000년 충북대학교 전기공학과
석사 졸업
2005년 충북대학교 전기공학과
박사 졸업

2003년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
<주관심분야 : 철도차량용 제어기 설계, 고전압 신
호처리>



윤 지 훈(정회원)
2000년 서울대학교 전기공학부
학사 졸업.
2002년 서울대학교 전기컴퓨터
공학부 석사 졸업.
2007년 서울대학교 전기컴퓨터
공학부 박사 졸업.

2007년~2009년 삼성전자 네트워크사업부
책임연구원.

2009년~2010년 미시건대학교 박사후연구원.

2010년~2012년 금오공과대학교 조교수.

2012년~현재 서울과학기술대학교
전기정보공학과 조교수.

<주관심분야 : 통신망 설계, 무선통신>