

논문 2017-12-39

네트워크 토플로지에 따른 CAN-FD 통신 영향성 분석

(Performance Analysis of CAN-FD Based Network Against Network Topology)

서석현*
(Sukhyun Seo)

Abstract : The most common communication interface for automotive electronic control devices is CAN (Controller Area Network). Since CAN was first adopted to Daimler vehicles in 1991, all of automobile manufacturers use the CAN communication for in-vehicle networks. However, as the number of electronic control devices connected to the CAN network rapidly increases, the CAN protocol reaches the limit of technology. To overcome this limitation, Bosch introduced the new communication protocol, that is CAN-FD (Flexible Data-rate). In this paper, we analyze the characteristics and limitations of CAN-FD communication according to the topology under the in-vehicle wiring harness environment designed based on the existing classic CAN communication.

Keywords : CAN (Controller Area Network), CAN-FD (CAN Flexible Data-rate), In-vehicle network, Network validation

I. 서 론

현재 자동차 전자제어장치 (ECU)에 가장 많이 사용되는 통신 인터페이스는 CAN (Controller Area Network) 이다 [1-3]. 1991년 처음으로 Daimler 자동차에 양산 적용된 이후 현재 모든 자동차 제조사가 CAN을 사용하고 있다. 서로 독립적으로 동작하던 전자제어장치가 CAN 네트워크로 연결되어 정보를 주고받음으로써 새로운 기능들을 차량에 실현할 수 있게 되었다. CAN 통신은 이론적으로 최대 1Mbps의 통신 속도를 가지지만 사실상 차량내 wiring harness 설계의 자유도를 높이기 위해 500Kbps를 주로 사용해 왔다. 이는 통신 속도를 낮춤으로써 토플로지의 사이즈와 구조적인 변화

*Corresponding Author (shseo@kpu.ac.kr)

Received: July 8 2017, Revised: Aug. 3 2017,
Accepted: Oct. 18 2017.

S. Seo: Korea Polytechnic University

※ 본 연구는 2016년도 한국산업기술대학교 학술 연구진흥사업과 2017년도 정부 (미래창조과학부) 의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2017R1C1B1004322) 에 의하여 연구되었음

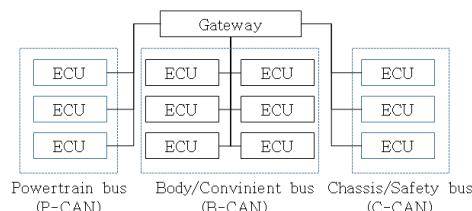


그림 1. 차량 내 네트워크 토플로지
Fig. 1 In-vehicle network topology

에 통신 신호의 강인함을 높이기 위함이다. 또한 CAN 네트워크로 연결된 전자제어장치의 개수가 늘어남에 따라 점차 부족해진 대역폭의 한계를 극복하기 위해 그림 1과 같이 각각의 제어 도메인 기반의 네트워크로 채널을 분리하여 여러 개의 CAN 서브 네트워크를 사용하는 방식으로 토플로지를 설계해 왔다 [4-6]. 이러한 노력에도 불구하고 최근 요구되는 최첨단 기능을 모두 수용하기에는 CAN 통신 자체가 갖는 기술적 한계, 즉 낮은 대역폭으로 인하여 높은 트래픽에 대해 점차 실시간성을 유지하기 어려워졌다. 이러한 한계를 극복하기 위해 2012년 Bosch사에서는 CAN 통신의 업그레이드 버전인 CAN-FD (CAN Flexible Data-rate)를

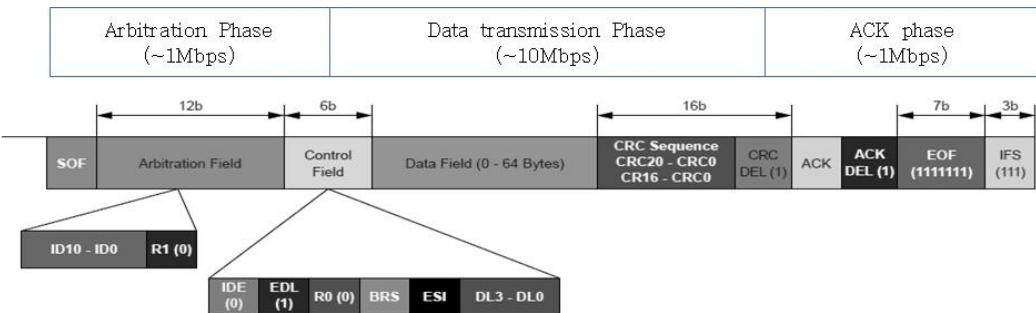


그림 2. CAN-FD 메시지 프레임 형식

Fig. 2 CAN-FD message frame format

소개하게 됐다 [7, 8].

CAN-FD 통신은 기존 CAN이 갖고 있는 대역폭 문제를 해결하기 위해 가변 데이터 전송속도를 갖는 메커니즘을 사용하여 최대 10Mbps의 통신 속도를 지원할 뿐만 아니라 한 번에 보낼 수 있는 페이로드 데이터 크기도 기존 8바이트에서 최대 64바이트까지 확장할 수 있도록 하였다.

CAN-FD가 소개된 이후로 많은 자동차 제조사들이 차량 내 주요 통신 인터페이스를 CAN에서 CAN-FD로 전환을 준비하고 있다. CAN-FD가 기존 다른 통신 프로토콜과 달리 많은 자동차 제조사로부터 지지를 받은 이유는 향상된 성능 때문이기도 하지만 약 25년 동안 자동차 산업에서 지배적으로 사용해온 CAN통신에 대한 오랜 경험과 노하우를 그대로 이용할 수 있기 때문이다. 하지만 CAN-FD는 기존 CAN보다 높은 통신 속도로 동작해야하기 때문에 기존 CAN 통신 기반으로 설계된 물리계층 특성에 민감할 수 있다. 특히 토플로지 구성에 따라 달라지는 신호 왜곡 현상은 기존 CAN보다 세심하게 검토해 볼 필요가 있다. 일반적으로 하나의 CAN 네트워크에 연결된 제어기 개수가 많아지면 신호의 왜곡 현상이 커지는 것으로 알려져 있다. 그래서 네트워크의 크기는 이러한 부분을 고려하여 설계할 필요가 있다. 본 논문에서 기존 CAN 통신 기반으로 설계된 네트워크 wiring harness 환경 하에서 CAN-FD 통신이 어떤 특성을 나타내고 한계점은 무엇인지 분석하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 CAN-FD 통신에 대한 기술적 특성에 대해 설명하고, III장에서는 CAN-FD 네트워크의 물리적 환경에 따른 영향성을 분석하기 위한 실험환경 구축, 실험 시나리오에 대한 정의, 실험결과를 제시하고 분

석하여 IV장에서 결론을 맺는다.

II. CAN-FD 통신 개요

1. CAN-FD 데이터링크 계층

CAN-FD 통신 프로토콜은 2015년에 개정된 ISO11898-1에 정의되어 있다 [9]. 주요 특징은 그림 2와 같이 CAN-FD 메시지 프레임을 통해 설명된다.

첫째, 페이로드 데이터가 기존 CAN보다 높은 전송속도를 가질 수 있다. 하지만 CAN 메시지 헤더와 트레일러는 기존 CAN과 동일한 통신 속도로 전송된다. 헤더와 트레일러 속도가 기존과 동일한 것은 Arbitration 영역에서의 비동기화 문제를 해결하기 위한 것이다. 그림 2에서 보여 지듯이 CAN-FD는 Arbitration phase, Data phase, ACK phase로 구분하여 전송된다. Arbitration phase와 ACK phase는 기존 CAN과 같은 속도로 전송되며 Data phase은 최대 10Mbps까지 지원한다. Control Field의 BRS (baud-rate switch) 비트는 Arbitration Phase와 Data Phase를 구분하고 전송 속도가 변경되는 지점이다.

둘째, CAN FD 메시지에는 한 번에 최대 64바이트의 페이로드 데이터 (data field)를 가질 수 있다. 이는 기존 CAN보다 8배 많은 데이터를 한 번에 보낼 수 있음을 의미한다. 예를 들면 data field를 64바이트로 보내고 data phase의 속도를 4Mbps로 보내도록 설정하면 기존 CAN이 500Kbps 속도로 8byte를 보내는 시간과 거의 동일하게 된다. 이러한 점은 기존의 많은 경험과 노하우로 설계된 CAN 메시지 데이터베이스의 실시간적 특성이 그대로 유지될 수 있음을 의미한다.

표 1. 데이터 신호 대칭성 요구사항
Table 1. Data signal timing symmetry requirement

Parameter	Notation	Value	
		min (ns)	max (ns)
Transmitted recessive bit width at 2Mbps	$t_{Bit(Bus)}$	435	530
Received recessive bit width at 2Mbps	$t_{Bit(RXD)}$	400	550
receiver timing symmetry at 2Mbps	Δt_{Rec}	-65	+40

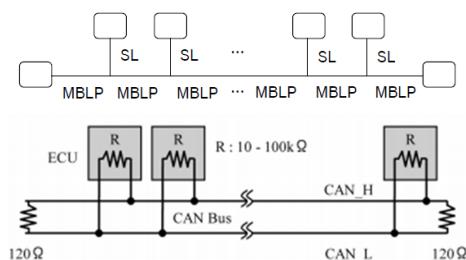


그림 3. CAN 버스 토플로지
Fig. 3 CAN Bus topology

2. CAN-FD 물리계층

CAN-FD 통신 프로토콜의 물리계층 사양은 2016년에 개정된 ISO11898-2에 정의되어 있다 [10]. 사양 정의 초기에는 CAN에서 CAN-FD로 업그레이드되면서 물리계층에 새롭게 요구되는 사양이 거의 없다고 볼 수 있었다. 기존 CAN 통신의 물리계층을 그대로 이용하기를 원했기 때문이다. 하지만 기준보다 높은 통신 속도로 신호를 전송할 때 한 비트의 길이가 줄어들면서 기존 CAN에서는 크게 문제시 되지 않았던 부분이 높은 속도에서는 민감하게 반응하게 되면서 대칭적인 비트 시그널에 대한 제약조건 [11, 12]이 새롭게 추가되었다. 표 1은 2Mbps에 통신 속도에서 송신측 bit time과 수신측 bit time에 대한 허용 가능한 최솟값, 최댓값과 timing symmetry 값을 나타내고 있다. timing symmetry $\Delta t_{Rec} = t_{Bit(RXD)} - t_{Bit(Bus)}$ 로 수신되는 노드에서의 bit time과 송신되는 노드에서의 bit time

표 2. 측정 포인트 정의
Table 2. Definition of measurements

measurement	description
Under shoot (V)	Lowest value after passing 0.5V
Over shoot (V)	Highest value after passing 0.5V
Settling time (ns)	Times between 90% of high voltage and last point passing 0.5V

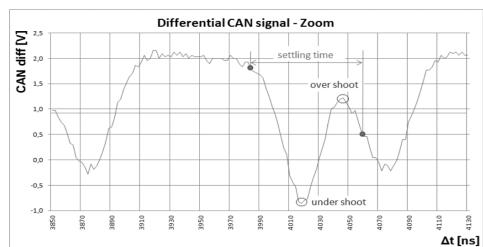


그림 4. CAN 통신의 1bit 파형
Fig. 4 1bit signal waveform

의 차이가 일정이상 발생하지 않도록 하고 있다.

ISO11898-2 표준에서는 토플로지에 대한 정의는 되어 있지 않다. 일반적인 CAN 버스의 토플로지는 버스, 스타 혹은 혼합된 형태의 토플로지를 갖는다. 가장 일반적인 버스 토플로지는 그림 3과 같이 2개의 종단저항을 메인버스라인 (MBL)의 양 끝단에 위치하고 중간에 노드들을 stub line (SL)을 통해 연결하는 방식을 취한다. 2개 이상의 노드를 가지는 CAN 혹은 CAN-FD 네트워크에서는 통신 물리 신호의 반사파에 의해 ringing 현상이 발생한다. 이 현상은 주로 신호 주파수와 네트워크의 임피던스의 mismatch로 인해 발생한다. ringing 현상은 통신 속도와 상관없이 토플로지의 구성, 즉 MBL의 길이, SL 길이 등에 영향을 받는다. 하지만 통신 속도가 높아지면 1 bit time이 짧아지면서 작은 ringing effect 만으로도 bit error가 발생할 확률이 높아지게 된다.

III. CAN-FD 네트워크 검증

1. 파라미터 정의

그림 4는 CAN 신호 중 1bit의 파형을 보여준다. 1bit 파형에서 dominant bit는 트랜시버에 의해 드라이브되기 때문에 빠른 응답성을 보이지만

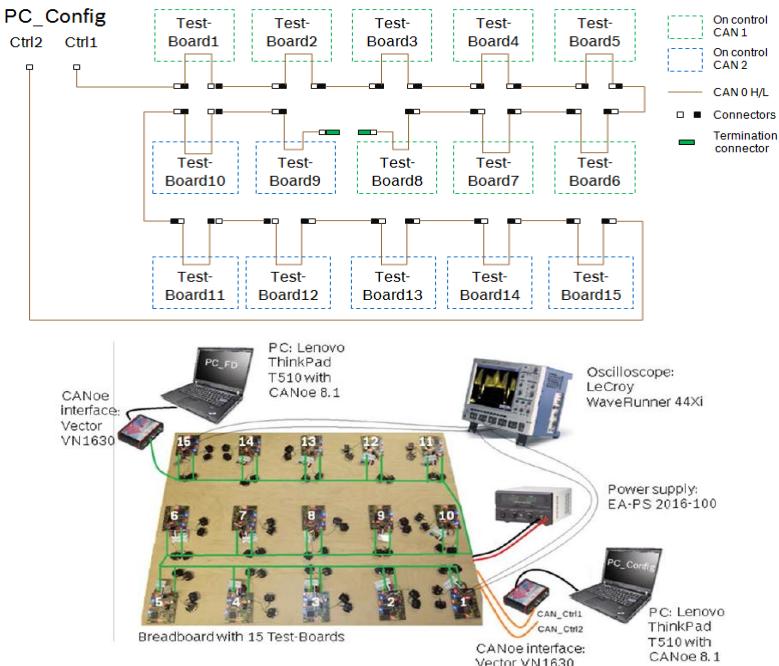


그림 5. 네트워크 검증 환경
Fig. 5 Network validation environment

표 3. CAN-FD 네트워크 검증 시나리오

Table 3. Scenarios for CAN-FD network validation

Scenario (SC)	Data phase data-rate	Main bus length (MBL)	Stub line length (SL)	Number of nodes
SC#1	1Mbps	40m	0.5m	30
SC#2	4Mbps	20m	0.5m	20

recessive bit에서는 그렇지 않게 된다. 그래서 1bit 파형을 정확히 분석하기 위해서 본 논문에서는 recessive bit에서 3가지 측정 포인트를 표 2와 같이 제시한다. CAN은 0.9V이상일 경우 논리적으로 high (dominant bit)라 판단하고 0.5V이하일 경우 논리적으로 low (recessive bit)라 판단한다. 여기에서 under shoot는 0.5V 지나서 이하로 떨어지는 최하 전압 값이며 over shoot는 0.5V를 지나서 올라가는 최대 전압 값이다. 두 수치는 ringing 현상이 얼마나 심하게 발생하는지 판단하는 기준 값으로 사용된다. 또한 settling time은 high voltage의 90% 지점부터 0.5V 마지막으로 지나는 지점까지의 시간으로 신호가 안정화 되는데 걸리는 시간을 나타낸다. 이 안정화 시간은 CAN통신에서 최적의

sampling point를 설정하는데 사용된다. sampling point는 1bit time 중에 high 혹은 low 신호 인지 판단하는 기준점으로서 CAN통신 프로토콜 설정에서 변경할 수 있는 값이다.

2. 네트워크 검증 환경 세팅

전체적인 실험환경은 그림 5와 같다. 토플로지는 기본적으로 bus 토플로지를 사용하며 버스 양 끝단에 종단저항이 연결되어 있고 중간에 branch 할 수 있는 커넥터를 통해 stub line을 연결하고 각 제어 노드들과 연결이 된다. 이 토플로지는 main bus의 길이 stub line의 길이를 조절할 수 있도록 케이블을 제작하여 연결할 수 있도록 하였다. bit 신호 계측을 위해 송신 그리고 수신하는 노드에

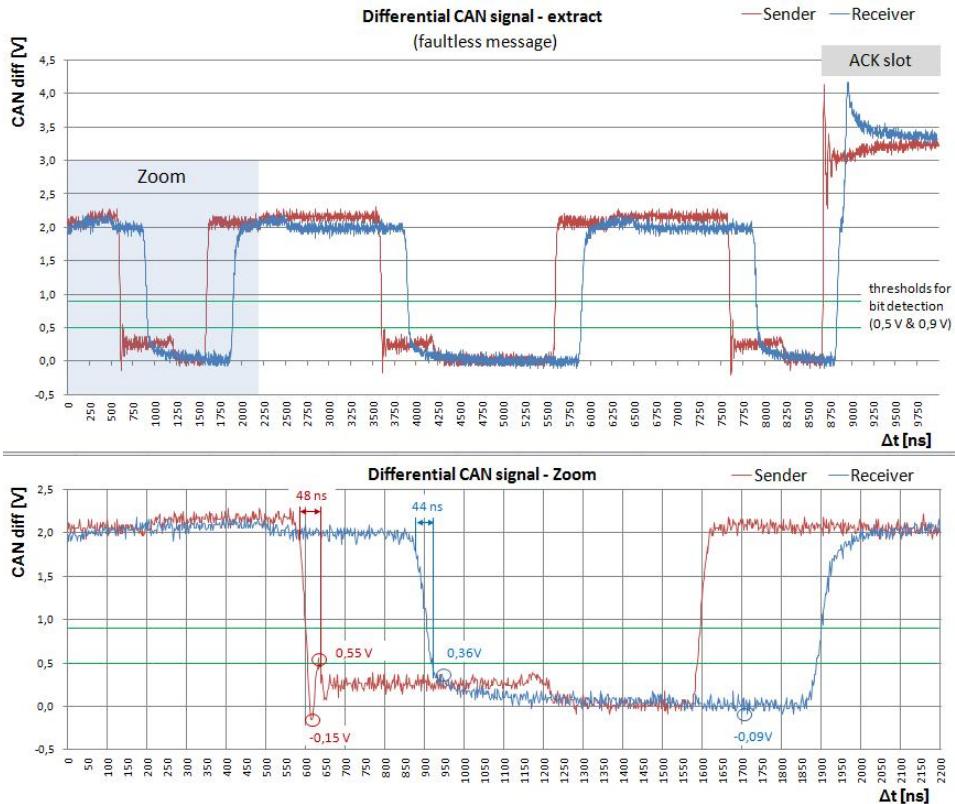


그림 6. 시나리오1 (SC#1)의 CAN-FD 신호 파형 분석 결과

Fig. 6 Waveform of scenario1 (SC#1) CAN-FD network

오실로스코프를 연결하고 에러 프레임 검출을 위해 CAN-FD 인터페이스 장비를 연결하였다. 본 논문에서는 기존 CAN 통신 기반으로 설계된 wiring harness가 CAN-FD에서도 동일하게 사용될 수 있는지 과학하고 문제점이 무엇인지 분석하기 위해 위와 같은 실험환경을 사용한다.

실험을 위해 CAN-FD 통신이 가능한 총 15개 실험 보드를 그림 5와 같이 구성하였다. 각각의 보드는 2개의 CAN-FD 인터페이스를 가지고 있어 최대 30개 노드를 한 네트워크에 연결할 수 있다.

실험 시나리오는 표 3과 같이 2가지로 선정하였다. 두 시나리오는 실제 차량에서 많이 쓰이고 있는 토플로지 이면서 기존 CAN 통신에서 안정적인 통신 성능이 검증된 환경으로서 현재 차량의 wire harness를 대변한다고 할 수 있다. 제시된 시나리오는 다음과 같다. 첫번째 네트워크 토플로지 시나리오 (SC#1)는 Data phase의 통신 속도를 1Mbps, main bus의 길이 40m, 제어기 개수는 총 30개,

stub line 길이는 0.5m로 구성하였다. 이 시나리오는 현재 기존 CAN 네트워크 사용하는 차량 환경에서 가장 널리 사용되는 네트워크 토플로지다. 두 번째 네트워크 토플로지 시나리오 (SC#2)는 data phase 통신 속도는 4Mbps, main bus의 길이는 20ms, 제어기 개수는 20개, stub line의 길이는 0.5m로 구성하였다. SC#2는 그림 1에서 제시된 것처럼 도메인 기반 아키텍처에서 널리 사용되는 네트워크 토플로지이다. SC#2는 SC#1보다 통신 속도를 높이고 제어기 수를 줄이는 형태로 통합제어기 형태로 아키텍처가 설계될 경우를 가정하고 설계하였다.

두 시나리오 모두 stub line을 0.5m로 고정한 것은 stub line 길이에 의한 ringing effect가 가장 크게 나타나기 때문이다. 또한 한 네트워크에서 stub line 길이가 모두 같게 설계할 경우 ringing effect가 가장 극대화되어 신호 왜곡 현상이 크게 나타나 때문에 worst-case에 대한 검증이 이뤄질

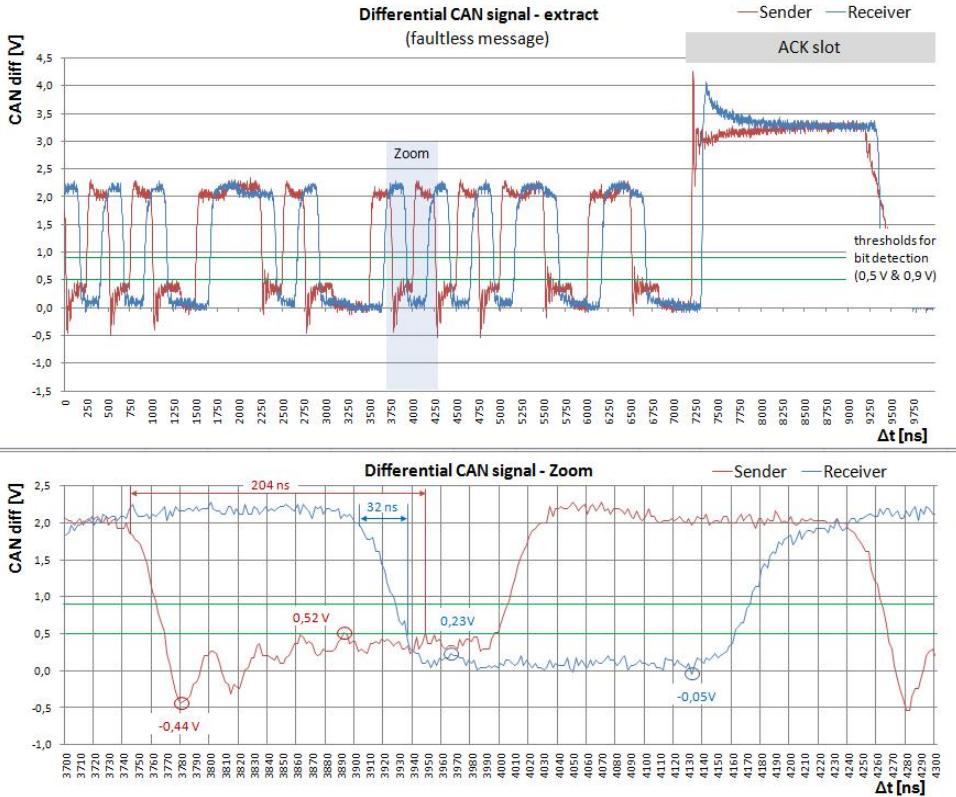


그림 7. 시나리오2 (SC#2)의 CAN-FD 신호 파형 분석 결과

Fig. 7 Waveform of scenario2 (SC#2) CAN-FD network

수 있기 때문이다. 또한 두 시나리오 모두 CAN-FD의 Arbitration phase 통신 속도를 기존 CAN통신으로 가장 널리 사용되는 500Kbps로 고정하고 sampling point는 75%로 모두 설정하였다. 이러한 토플로지 시나리오 기반으로 1bit 시그널의 변화와 에러 프레임 발생 유무를 확인하였다.

2. 토플로지 검증 결과

첫 번째 시나리오 (SC#1)의 검증 결과는 그림 6과 같다. 메시지 전송 노드에서의 over shoot는 0.55V, under shoot은 -0.15V이고 settling time은 48ns이다. 수신노드 측에서는 over shoot가 0.36V, under shoot는 -0.09V, settling time은 44ns로 측정되었다. 에러 프레임은 발생하지 않았으며 안정적인 통신이 이루어 졌다. 통신 속도를 1Mbps로 설정하였기 때문에 1bit의 길이가 1000ns이다. settling time이 송신노드 측에서 48ns이기 때문에 한 비트 중 초반 4.8%만이

ringing 영향을 받았다고 할 수 있다. sampling point 이 지점 이후를 설정하면 통신 에러가 발생할 확률이 거의 없다고 할 수 있다.

두 번째 시나리오 검증 결과는 그림 7과 같다. 메시지 전송 노드에서의 over shoot는 0.52V, under shoot은 -0.44V이고 settling time은 204ns이다. 수신노드 측에서는 over shoot가 0.23V, under shoot는 -0.05V, settling time은 32ns로 측정되었다. 에러 프레임이 간헐적으로 발생하는 현상이 계측되었다. 통신 속도를 4MBps로 설정하였기 때문에 1bit의 길이가 250ns이다. settling time이 송신 노드 측에서 204ns이기 때문에 한 비트 중 초반 81.6%가 ringing 현상으로 안정된 신호를 보장할 수 없게 되었다. sampling point를 약 82%미만으로 설정할 경우 에러 발생 확률이 매우 높아진다는 것을 의미한다. 또한 82% 이상으로 sampling point를 설정하더라고 토플로지의 작은 변화에 통신 에러가 발생할 수도 있다는 것을 의미한다.

표 4. CAN-FD 네트워크 검증 결과
Table 4. Experimental result for CAN-FD network validation

Scenario (SC)	Location	Over shoot [V]	Under shoot [V]	Settling time [ns]	Error frame
SC#1	Transmitter	0.55	-0.15	48	None
	Receiver	0.36	-0.09	44	None
SC#2	Transmitter	0.52	-0.44	204	Partly
	Receiver	0.23	-0.05	32	Partly

이러한 결과는 기존 CAN통신 기반으로 설계된 wiring harness 및 네트워크 토플로지는 높은 통신 속도에서 취약할 수 있음을 알려준다. 즉 CAN-FD로 통신 속도를 높일 수 있지만 네트워크 토플로지의 구성에 따라 발생하는 ringing 현상으로 인해 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 기존의 CAN통신의 설계된 네트워크 토플로지에 대한 물리 계층 분석을 통해 실현 가능한 CAN-FD 통신의 data phase 영역 통신 속도를 결정할 필요가 있다.

3. 실험 결과에 대한 고찰

본 논문에서 실시한 실험에 대한 결과는 표 4와 같다. 특히 SC#2 시나리오의 경우 부분적으로 에러 프레임이 발생하여 좀 더 실험을 실시하였다. 시나리오 SC#2 와 동일 조건에서 통신 속도만 6Mbps로 설정하여 관측하였을 경우, 에러 프레임이 계속 발생하여 통신을 할 수 없는 상황까지 이르렀다. 이러한 현상은 통신 속도가 높아짐에 따라 1 bit time이 짧아지지만 ringing 현상에 의한 settling time은 여전히 길게 유지되기 때문이다. 결국 통신 속도와 상관없이 토플로지의 모양에 따라 ringing 현상이 그대로 유지되는 문제가 CAN-FD의 한계로 여겨진다. 따라서 CAN-FD를 차량에 적용하기 위해서는 우선 현재 CAN기반으로 설계된 차량 토플로지에서 발생하는 ringing 현상의 발생 정도를 settling time이라는 기준으로 분석한 후 1 bit time을 얼마나 줄일 수 있는지 예측해야 한다. 안정적인 통신이 가능한 1bit time의 크기가 결정되면 그것이 곧 CAN-FD 통신이 적용 가능한 최대 통신 속도가 된다고 볼 수 있다.

반대로 목표로 하는 CAN-FD 통신 속도가 있다면 현재 토플로지를 최적화 하여 ringing 현상을 최소화으로 줄여야 한다. ringing 현상은 한, 두 개의 파라미터로 정의할 수 없는 복잡한 형태로 생성되기 때문에 다양한 조건을 만들고 변화를 주면서 관측해야 한다. 본 논문에서는 main bus 길이,

stub line 길이, 제어기 수를 기준으로 토플로지에 변화를 주었지만 각각의 조건이 ringing 현상에 얼마만큼 영향을 주는지 파악하기에는 데이터가 부족하다. 따라서 각각의 평가 기준별로 독립 조건을 설정할 수 있는 실험환경에서 충분한 데이터를 수집한 후에 토플로지 최적화가 이루어져야 한다.

IV. 결 론

현재 많은 자동차 회사들이 경쟁적으로 차량에 최첨단 기능들을 도입하면서 오랫동안 사용해온 CAN 통신은 한계에 직면하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 CAN-FD 통신이라는 새로운 방식의 통신 프로토콜이 소개됐고 많은 자동차 제조사들이 앞 다투어 CAN-FD 통신으로 전환을 계획하고 있다. 하지만 본 논문에서 제시한 바와 같이 기존의 CAN 통신 기반의 토플로지에 대한 정밀한 분석 없이 높은 통신 속도만을 추구한다면 성공적으로 CAN-FD 통신을 차량에 적용하기는 어려울 것이다. 계속적으로 늘어나는 전자제어장치간의 전체적인 아키텍처 설계와 네트워크 토플로지에 대한 최적화 작업, 그리고 wiring harness에 대한 통신신호 영향성 분석 등이 병행된 후 적용되어야만 성공적으로 차량에 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로 CAN-FD 네트워크 토플로지에 대한 다양한 검증 시나리오를 실시하고 설계 제약사항을 좀 더 상세히 정의할 수 있는 가상 시뮬레이션 환경을 구축하여 다양한 토플로지에 대한 분석을 저비용에 효율적으로 진행할 수 있도록 할 계획이다.

References

- [1] J. Kim, J. Baek, K. Kwon, S. Lee, "Fast ECU Software Update Algorithm Using by Extending AUTOSAR CAN Interface," IEMEK, J. Embed. Sys. Appl., Vol. 8, No. 3,

- pp. 163–169, 2013 (in Korean).
- [2] W. Zeng, M.A.S. Khalid, S. Chowdhury, “In-vehicle Networks Outlook: Achievements and Challenges,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, No. 3, pp. 1552–1571, 2016.
- [3] B. V. Kumar, J. Ramesh, “Automotive in Vehicle Network Protocols,” Proceeding of International Conference on Computer Communication and Informatics, 2014.
- [4] J.H. Kim, S. Seo, N. Hai, B.M. Cheon, Y.S. Lee, J.W. Jeon, “Gateway Framework for In-vehicle Networks Based on CAN, FlexRay, and Ethernet,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 64, No. 10, pp. 4472–4486, 2015.
- [5] N. Nowdehi, P. Kleberger, T. Olovsson, “Improving In-vehicle Network Architectures Using Automated Partitioning Algorithms,” Proceeding of IEEE Vehicular Networking Conference, pp. 259–266, 2015.
- [6] G. Andrei, S.V. Alexandru, “On the Communication Network Inside Vehicles,” Proceedings of International Conference on Electronic, Computers and Artificial Intelligence, pp. WW-13–WW-18, 2015.
- [7] F. Hartwich, “CAN With Flexible Data-Rate,” Proceedings of International CAN Conference, pp. 1–9, 2012.
- [8] O. Esparza, W. Leichtfried, F. Gonzalez, “Transitioning Applications From CAN 2.0 to CAN FD,” Proceedings of International CAN Conference, 2015.
- [9] ISO11898-1:2015-Road Vehicles – Controller Area Network (CAN – Part1:Data Link Layer and Physical Signalling).
- [10] ISO11898-2:2016-Road Vehicles – Controller Area Network (CAN – Part2:High-speed Medium Access Unit).
- [11] M. Hell, “The Physical Layer in the CAN FD World,” CAN Newsletter, 2014.
- [12] F. Hartwich, “Bit Time Requirements for CAN FD,” Proceedings of International CAN Conference, 2013

Sukhyun Seo (서 쑥 현)



He is received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 2005, 2007, and 2011, respectively, all in electronic, electrical, and computer engineering.

From 2011 to 2016, he was a Senior Researcher with Hyundai Motors, Hwaseong, Korea. He is currently a assistant Professor with the department of Electronics Engineering at Korea Polytechnic University, Siheung, Korea. His research interests include in-vehicle networks, electrical / electronic architecture, automotive control unit, and automotive open system architecture (AUTOSAR, GENIVI).

Email: shseo@kpu.ac.kr