

차량제어기용 CAN 통신 이상상태 판별 및 처리기술에 관한 연구

금복희*, 최유준*, 김문식**, 김진규*
한국과학기술원 OLEV사업단*, 자동차부품연구원**

Study on CAN Anomaly Detection and Handling Method for Vehicle Controllers

Bokhee Keum*, Youjun Choi*, Moon-Sik Kim**, Jinkyu Kim*
KAIST OLEV Group*, Korea Automotive Technology Institute**

Abstract - 차량에 장착되는 전자제품 사이의 정보 교환용 통신방식으로 주로 사용되는 CAN 통신 프로토콜의 이상상태를 분석하고 차량제어기에 적용해야할 CAN 이상상태 검출 및 처리 기능에 대해 연구하였다. 이 연구결과는 CAN 통신 문제의 탐지와 대응 방법을 제시하여 차량운행 시 시스템의 안정성을 높이는 데 기여할 것으로 예상된다.

1. 서 론

차량시스템의 구동 장치에는 모터, 보조모터, 배터리, 공조기, 컨버터 등이 있으며 각 장치는 하드웨어와 이를 제어하는 제어기 (이하 차량제어기)로 구성된다. 차량제어기간 정보교환 방식으로 CAN (Controller Area Network) 통신을 주로 사용한다.

차량제어기는 입력되는 다양한 상태정보에 따라 제어 알고리즘을 수행하고 차량시스템에 오류가 발생한 경우 탑승자의 안전과 장치보호를 위해 적절한 대응을 할 수 있어야 한다. 이로 인해 차량제어기의 CAN 통신기능의 이상 또는 CAN 버스의 이상은 전체 차량 시스템 운용에 치명적이다. 특히 각 구성장치의 상태정보를 수집하여 제어결정을 내리고 제어명령을 발송하는 차량주제어기인 VCU (Vehicle Control Unit)는 CAN 통신 이상상태 검출 및 대응 기능을 필수 제공할 필요가 있다.

본 논문에서는 CAN 통신의 특징, 차량 통신에서 발생할 수 있는 CAN 이상상태를 분석하고 차량제어기에서 제공되어야 할 CAN 이상상태 검출 및 처리 기능, 그리고 구현된 결과를 차량제어기에 적용하여 시험한 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 CAN 프로토콜의 특징

표준에서 명시한 CAN의 최대 속도는 1Mbit/second이나 어떤 CAN 컨트롤러는 1Mbit/second보다 높은 속도를 처리하며 특별한 응용에 사용되기도 한다. 저속 CAN(ISO 11898-3)은 최대 125 kbit/s까지 지원한다. 단일 선으로 이루어진 CAN은 표준 모드에서 대략 50 kbit/s까지, 고속 모드에서 100 kbit/s까지 지원한다.

CAN 버스 케이블의 길이는 속도에 제한된다. 이것은 CAN의 중재 방식(arbitration scheme) 때문으로, 중재와 관련되어 있는 각 노드는 동일한 비트 타임 이내에 비트의 레벨을 샘플해야 하고 그 비트가 샘플되기 전까지 신호를 보낸 노드로 되돌아 와야 하기 때문이다. 예를 들어 양쪽 끝에 있는 두 개의 노드가 동시에 메시지 전송을 시도할 때 CAN 버스는 중재되어야 하며, 이때 중재를 위해서 한 비트 타임이내에 양쪽 끝의 두 노드 모두 동일한 비트 신호를 샘플할 수 있어야, 우선 순위가 높은 비트를 전송한 노드는 계속 전송하고 그렇지 못한 노드는 전송을 중단할 수 있다.

<표 1> CAN 전송속도에 따른 케이블 길이와 전송 메시지수

속도 kbps	케이블 길이		비트 전송 시간	프레임 전송시간 ms	전송주기(ms) / 최대 전송 메시지 수		
	m	ft			50	100	200
10	6000	20000	10 μ s	12.8	3	7	15
125	500	1600	8 μ s	1.024	48	97	195
250	200	650	4 μ s	0.512	97	195	390
500	100	330	2 μ s	0.256	195	390	781
1000	40	130	1 μ s	0.128	390	781	1562

(※ 케이블 길이는 대략적인 값임)

한 비트 타임이내에 중재 체계가 완료되기 위해서는 전파지연(propagation delay) 시간을 고려해야 하며 이로 인해 데이터 전송속도에 따라 케이블 길이가 제한된다. ISO11898에서는 CAN 트랜시버가 1Mb/s에서 40m의 케이블 길이 지원을 명시하고 있다.

CAN 통신으로 전송가능 한 메시지의 수는 전송속도에 의해 결정되며 각 전송속도에 따른 송신 메시지 수의 계산결과는 표 1와 같다. 표 1에서는 CAN 프레임의 최대 길이를 기준으로 계산한 결과로, 확장형 CAN을 쓰고 데이터길이가 8바이트인 경우 최대 프레임 길이는 128비트이다.

2.2 CAN 오류

2.2.1 CAN 버스 케이블 오류

ISO 11898 표준에서 정의하고 있는 CAN 버스 케이블의 오류 모드는 다음과 같다.

- (1) CAN_H 선의 오픈
- (2) CAN_L 선의 오픈
- (3) CAN_H 선의 VCC 단락
- (4) CAN_L 선의 VCC 단락
- (5) CAN_H 선의 GND 단락
- (6) CAN_L 선의 GND 단락
- (7) CAN_L 선과 CAN_H 선 단락
- (8) CAN_H 선과 CAN_L 선의 동일 위치 오픈
- (9) 네트워크의 중단 연결 상실

(8)의 경우를 제외하고 다른 문제 상황을 CAN 송수신기가 탐지할 수 있다. CAN 프로토콜 표준에서는 문제 상황 (1) ~ (6)과 (9)에 대해 낮은 신호 대 잡음비((S/N ratio)로 CAN 버스를 계속 사용할 수 있도록 권고하고 있다. CAN 프로토콜은 CAN_H, CAN_L 두 개의 신호가 전달되다가 한 쪽에 문제가 발생하는 경우 나머지 하나의 선으로 데이터 전송을 하는 방식으로 버스의 오류에 대한 견고성(fault-tolerance)을 지원하고 있으나 이는 저속 (최대 125 kbps)에서만 적용되는 것을 목적으로 하고 있으며, 오류에 대한 견고성을 지원할 수 있는 문제가 발생하면 모든 노드는 낮은 신호 대 잡음 비로 통신을 하다가 문제가 제거되면 자동으로 이격 신호 (CAN_H, CAN_L) 송신으로 재개한다. 오류 견고성을 지원하는 트랜시버에 대한 표준안은 ISO 11898-3에 정의되어 있다.

2.2.2 CAN 프레임 오류

앞서 언급한 CAN 버스 케이블의 물리적인 오류는 논리계층에서 다양한 오류를 발생시킨다. CAN 프로토콜에는 CAN 컨트롤러가 CAN 메시지에 있는 오류를 탐지하고 오류가 있는 메시지를 재전송하도록 정의하고 있다. CAN 버스 상에 있는 모든 CAN 컨트롤러는 메시지에 오류가 있는지를 동시에 검사하여 오류를 발견한 노드는 오류 플래그를 전송하여 버스 트래픽을 무효로 만든다. 오류를 아직 발견하지 못한 노드는 오류 플래그를 받을 경우 오류가 발생되었음을 알고 처리하고 있던 메시지를 버린다.

CAN 프레임의 오류에는 'Bit Error', 'Stuff Error', 'Form Error', 'Acknowledgement Error', 'CRC Error'가 있다. 메시지를 전송하는 CAN 컨트롤러는 전송하는 신호레벨을 모니터링하여(read-back) 비트 레벨이 전송한 것과 다를 경우 'Bit Error'를 발생시킨다.

정상적인 경우, CAN 송신 노드는 같은 레벨의 신호를 연속하여 5개 전송하는 경우, 6번째 비트에 반대 신호 레벨을 가지는 신호를 추가하여 전송하면 CAN 수신 노드는 추가된 6번째 비트는 삭제한다. 동일한 신호 레벨을 가지는 비트 스트림의 길이가 6비트 이상일 경우 'Stuff Error'가 된다.

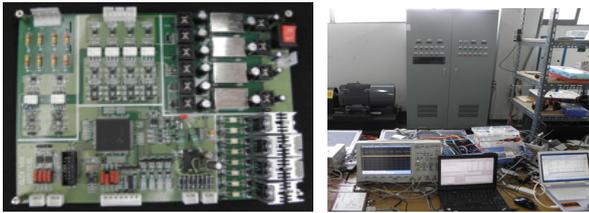
CAN 메시지에서 CRC Delimiter, ACK Delimiter, End of Frame과 Intermission 부분은 고정된 포맷을 가지며 이 부분의 값에 이상이 있는 경우 'Form Error'를 발생한다.

CAN 메시지를 전송하는 컨트롤러는 ACK(Acknowledgement) Slot에 recessive level의 신호를 전송하고 이 메시지를 정상적으로 수신한 모든 노드는 ACK Slot에 dominant level의 신호를 메시지에 전송하도록 되어 있다. CAN 메시지를 전송한 노드가 메시지를 수신했을 때, ACK Slot의 신호가 dominant level이 아닐 경우 'Acknowledgement Error'를 발생한다.

2.3 차량제어기 CAN 기능 구현 및 시험

2.3.1 차량제어기 CAN 기능 구현

차량제어기의 CAN 기능으로 구현되어야 할 사항은 첫째, CAN 오류 상태 정보 확인기능이다. 차량제어기는 CAN 오류 발생 상태를 상세히 알 필요가 있으므로 차량제어기 구현 시 단순히 오류의 발생여부를 알리는 기능보다는 발생한 오류에 대한 상세 정보도 함께 상위계층에 제공하는 CAN 하드웨어와 드라이버가 제공하는 DSP 칩을 선정하는 것이 바람직하다. 2.2.2에서 언급한 오류에 대한 검출기능은 ISO11898의 정의 사항으로 비트 단위 오류검출 기능과 프레임단위 오류검출에 의해 일반적으로 CAN 칩에서 제공되는 기능이지만 상위계층에 오류의 종류에 대한 상세정보는 제공되지 않는 경우도 있다. 그림 1의 보드는 차량제어기로 TMS320F28335 DSP 칩과 SN65HVD23x3.3-V CAN 모듈을 사용하였다. TMS320F28335 인터페이스에서 제공하는 CAN 모듈의 CANES(Error and Status) 레지스터는 2.2.2.에서 언급한 각 오류에 대해 상태 비트를 제공하고 있다.



〈그림 1〉 (좌) 차량 주제어기(VCU), (우) CAN 기능 시험 환경

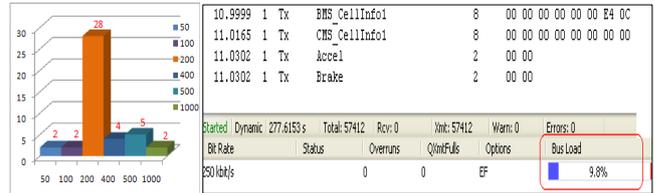
둘째, CAN bus-off 자동 복원이 가능하도록 구현되어야 한다. CAN 버스 케이블이나 모듈에 오류가 발생하면 CAN 모듈의 '송신 오류 카운터'는 증가하게 되고 이 카운터가 256에 도달하면 bus-off 상태가 된다. 이는 한 노드의 CAN 오류 때문에 정상인 다른 노드가 CAN 버스를 사용하지 못하는 상황을 방지한다. 이와 같은 오류처리체계를 'Error Confinement Mechanism'이라 하며 이는 ISO11898에 정의되어 있다. CAN 모듈이 bus-off 상태로 진입한 상황에서 자동 복원 기능을 적용하지 않으면 오류가 해결된 상황에서도 계속 bus-off 상태에 머물러 있게 된다. 따라서 차량운행 시 일시적 문제발생으로부터 차량제어기가 CAN 기능을 신속하게 정상 상태로 복원하기 위해 bus-off 자동 복원 기능을 적용할 필요가 있으며 이는 시스템 안정성 향상에 기여한다. 구현에 사용된 칩에서는 CAN Master Control Register에 이 기능을 제공하며 ABO (Auto Bus On) 비트를 1로 설정하면 bus-off 상태에서 128 * 11 개의 recessive (1) 비트를 수신한 후 다시 bus-on 상태가 된다. 표 1에서 CAN 모듈이 250kbps 전송 속도인 경우, 1비트 전송시간이 4 μs이므로, 128 * 11비트를 전송하는데 소요되는 시간은 5.6ms (128 * 11 * 4)이므로 bus-off에서 다시 bus-on 상태로 되는 최소 소요 시간은 5.6ms임을 예측할 수 있다.

셋째, CAN 버스에 연결된 각 노드의 활성화 상태 검출 기능을 지원해야 한다. CAN 버스의 특정노드가 메시지 송수신 기능에 문제가 있는 경우 차량제어기는 이 노드로부터 제어 로직에 필요한 정보를 더 이상 수신할 수 없다. 따라서 CAN 통신 기능이 중단된 노드의 존재여부를 확인하여 갱신이 중단된 정보에 따라 제어 로직을 수정하거나 시스템을 중단해야 한다.

2.3.2 차량제어기 CAN 기능 시험

개발한 차량제어기의 CAN 기능 시험을 위해 사용한 하드웨어 및 소프트웨어는 다음과 같고 시험환경은 그림 1 (우)와 같이 모터, 배터리, 차량 주제어기(VCU)로 구성된 테스트베드이다.

- CANCheck: CAN 버스 케이블 구성 상태(임피던스, 길이, 신호레벨 등) 확인
- CANStressDR: CAN_H, CAN_L 신호선의 GND 혹은 VCC 단락, CAN 라인 저항 증가(신호선 길이 확장 효과) 등 '2.2.1 CAN 버스 케이블 오류'에 언급한 다양한 물리적인 오류 생성
- PCAN-Explorer: CAN 통신상태 확인 및 제어, 프레임 확인



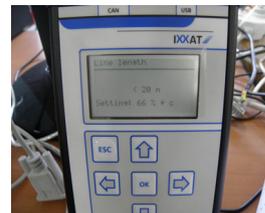
〈그림 2〉 시험환경의 CAN 트래픽 특성: (좌) 프레임 길이 분포, (우) 트래픽 로드 7% < Bus Load < 15% (시험시간 277초, 총프레임 57412개, 오류프레임 0개)

시험에 앞서 테스트베드에 구축한 CAN 버스 및 트래픽의 상태(그림 2)를 확인하여 배선상태가 정상임을 확인하였고(표 2) CAN 버스 케이블의 길이가 정상범위 이내에 있음을 확인하였다(그림 3).

〈표 2〉 시험용 CAN 버스의 배선상태 확인결과

(※ CANCheck 툴사용)

확인 항목	수치	결과	
라인 임피던스	104Ω	OK	
배선상태	CAN_H 기준		
	CAN_L	60Ω	OK
	CAN_GND	>1MΩ	OK
	CAN_SHLD	>1MΩ	OK
	GND	>1MΩ	OK
	CAN_L 기준		
	CAN_GND	>1MΩ	OK
	CAN_SHLD	>1MΩ	OK
	GND	>1MΩ	OK
	CAN_V+ 기준		
	CAN_H	>1MΩ	OK
	CAN_L	>1MΩ	OK
	CAN_GND	>1MΩ	OK
CAN_SHLD	>1MΩ	OK	
GND	>1MΩ	OK	
종단저항	60Ω	OK	



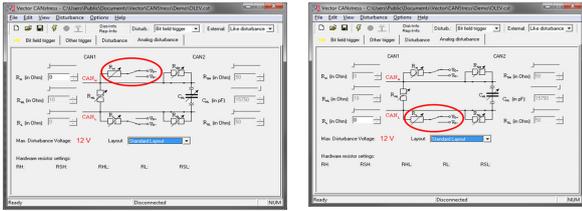
〈그림 3〉 CAN 버스 케이블 길이 확인결과 (20m 이하)

가. CAN 오류 탐지 기능 시험

CAN 스트레스 장비인 CANStressDR을 이용하여 CAN 버스 케이블에 다양한 물리적 구성조건을 임의로 생성하여(그림 4) 차량제어기가 CAN 오류를 탐지하는지 시험하여 그 결과, CAN 상태 및 오류 정보 레지스터인 CANES의 BE (Bit Error), .SE (Stuff Error), FE (Form Error), ACKE (ACK Error), CRCE (CRC Error) 비트가 각각 정상적으로 변화하는 것을 확인하였다.

차량제어기가 전송하는 CAN 메시지에 ACK 응답을 보내는 시험장비의 설정을 Listen Only로 설정하거나 ACK 전송기능을 비활성화한 경우, 차량제어기는 전송한 메시지에 대해서

Acknowledgement 신호를 받지 못하여 ACK Error를 발생시키는 것을 확인하였다.



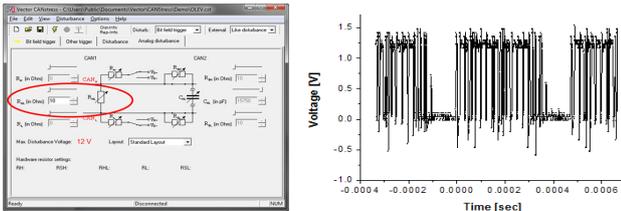
〈그림 4〉 (좌) CAN_H 신호선의 Vcc 단락 조건 발생, (우) CAN_L 신호선의 Vcc 단락 조건 발생

(0)= EW	0x0000
(0)= EP	0x0000
(0)= BO	0x0000
(0)= ACKE	0x0001
(0)= SE	0x0000
(0)= CRCE	0x0000
(0)= SA1	0x0000
(0)= BE	0x0000
(0)= FE	0x0000

〈그림 5〉 CAN 오류 상태 비트

나. CAN Bus-Off 발생 및 자동복원 기능 시험

CANStressDR로 CAN_H, CAN_L 라인 사이의 저항을 조정하여 CAN 통신불능 상태를 생성하여 Bus-Off 상태를 만들어 CANES 레지스터의 BO(Bus-Off) 플래그가 켜짐을 확인하였으며, 저항을 정상상태로 조정하여 자동으로 통신이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.



〈그림 6〉 (좌) CAN_H, CAN_L 사이 저항 조정, 10Ohm, (우) MAX=1.5365V, MIN=-0.5885V

(0)= TM	0x0000
(0)= RM	0x0000
(0)= rsvd1	0x0000
(0)= PDA	0x0000
(0)= CCE	0x0000
(0)= SMA	0x0000
(0)= rsvd2	0x0000
(0)= EW	0x0001
(0)= EP	0x0001
(0)= BO	0x0001
(0)= ACKE	0x0000
(0)= SE	0x0000
(0)= CRCE	0x0000
(0)= SA1	0x0000
(0)= BE	0x0000
(0)= FE	0x0000

CAN 통신 Warning State, 송신 혹은 수신 오류 카운터 = 96
 CAN 통신 Error Passive State, 송신 오류 카운터 = 128
 Bus-off State, 송신 오류 카운터 = 256

〈그림 7〉 CAN 라인저항 증가 시 차량제어장치의 CAN 모듈 Bus-off

다. CAN 노드 비활성화 검출 기능 시험

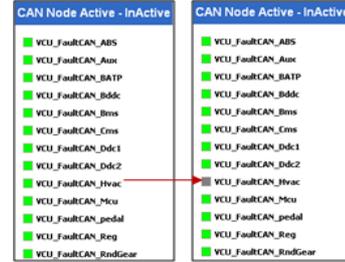
특정 CAN 노드의 통신 단절상태 검출기능 시험을 위해 먼저, PCAN-Explorer에서 차량시스템 CAN 인터페이스의 모든 메시지를 주기적으로 전송하도록 설정한 후(그림 8), 차량제어기에서 모든 노드의 정상적 통신 연결상태를 확인하였다. PCAN-Explorer에서 특정노드에 대한 전송중단을 실시했을 때(그림 9), 차량제어기에서 그림 10과 같이 노드의 통신 단절상태를 검출하는 것을 확인하였다.

CAN-ID	DLC	Symbol	Data	Cycle Time	Count
0C410067h	4	HVAC_MainInfo	HVAC_I_In = 0	200	5138
0C410167h	7	HVAC_Status		200	5110
18F0E221h	4	LCD_Board		100	9068
0CF50264h	6	MCU_Fault		200	4782
0CF50064h	8	MCU_Main1		200	4835
0CF50164h	8	MCU_Main2		200	4811
0C310049h	8	REG_MainInfo		200	3563
0C310249h	2	REG_PickUp		200	5167
0C310149h	2	REG_kWh	REG_kWh = 0.0 kWh	1000	1051
0C101305h	3	RND_Gear	RND_Status = 0	1000	945
04F10278h	6	VCU_EnergyLimit1		400	2829
04F10378h	6	VCU_EnergyLimit2		400	2235
04F10178h	8	VCU_MainInfo		400	2842
04F13078h	1	VCU_RunStopAux	VCU_RunStopAux = 0	500	1849
04F16078h	1	VCU_RunStopHVAC	VCU_RunStopHVAC = 0	500	1838
04F12078h	1	VCU_RunStopMCU	VCU_RunStopMCU = 0	500	1870
04F12278h	1	VCU_RunStopRegen	VCU_RunStopRegen = 0	500	1862

〈그림 8〉 PCAN-Explorer 설정: 모든 CAN ID 전송

CAN-ID	DLC	Symbol	Data	Cycle Time	Count
0C410067h	4	HVAC_MainInfo	HVAC_I_In = 0	200	6575
0C410167h	7	HVAC_Status		200	6531
18F0E221h	4	LCD_Board		100	11991
0CF50264h	6	MCU_Fault		200	5467
0CF50064h	8	MCU_Main1		200	5515
0CF50164h	8	MCU_Main2		200	5488
0C310049h	8	REG_MainInfo		200	4227
0C310249h	2	REG_PickUp		200	52
0C310149h	2	REG_kWh	REG_kWh = 0.0 kWh	1000	1343
0C101305h	3	RND_Gear	RND_Status = 0	1000	1237
04F10278h	6	VCU_EnergyLimit1		400	3560
04F10378h	6	VCU_EnergyLimit2	00 00 00 00 00 00	400	2966
04F10178h	8	VCU_MainInfo		400	3573
04F13078h	1	VCU_RunStopAux	VCU_RunStopAux = 0	500	2116
04F16078h	1	VCU_RunStopHVAC	VCU_RunStopHVAC = 0	500	2104
04F12078h	1	VCU_RunStopMCU	VCU_RunStopMCU = 0	500	2135

〈그림 9〉 PCAN-Explorer 설정: 공조기(HVAC) 용 모든 CAN ID 전송중단



〈그림 10〉 차량제어기가 전송이 중단된 노드를 탐지하여 알림

3. 결론

본 연구에서는 시험환경에 적용된 CAN 케이블의 물리적 특성을 측정장비로 확인한 후, 다양한 CAN 강도시험 및 프레임 오류 확인 시험, 비활성 노드 검출 시험을 실시하여 차량제어장치가 CAN 통신상태를 정확하게 모니터링하고 오류상태를 판별하여 적절한 대응을 수행할 수 있도록 차량제어기를 개발하였다.

CAN 통신의 경우 다양한 오류발생 조건하에 BE(Bit Error), SE(Stuff Error), FE(Form Error), ACKE(ACK Error), CRCE(CRC Error)와 같은 오류가 탐지되더라도 CAN_H, CAN_L 사이의 차등전압으로 신호를 판별하는 체계에 의해 통신이 이루어질 수 있어서 차량제어기용 통신 방식으로써 견고성을 지원하는 것을 확인하였다.

시험을 통해 차량제어기의 CAN 오류 대응 시 차량시스템 운영중단 조건을 설정할 수 있었다. 차량제어기가 CAN bus-off로 될 수 있는 조건은 1) 이 제어기의 CAN 커넥터가 버스에 연결되지 않은 경우, 2) 이 제어기로 ACK 신호를 보내는 노드가 없는 경우, 3) 내/외부 노이즈나 케이블의 물리적 결함으로 정상적인 신호전달이 불가능한 경우로 분류할 수 있다.

1)의 경우 bus-off 자동복원 기능을 적용하더라도 CAN 모듈은 계속 bus-off 상태에 있게 되고, 2)와 3)의 경우, 문제가 일시적으로 발생하면 bus-off 상태도 일시적으로 일어날 것이다. 따라서 시스템 운영중단에 대한 결정은 bus-off의 지속시간도 함께 고려하여 이루어져야 한다.

또한 CAN은 스트레스에 견고한 특성이 있으므로 오류 플래그나 On 되더라도 메시지 전송주기에 큰 영향을 주지 않는 경우가 있으므로 오류 비트 On 시에는 경고를 발생하고 CAN 노드의 비활성화 상태가 검출될 경우 시스템 운영을 중단하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 CAN 노드의 비활성화 상태 검출은 각 노드 및 메시지의 전송주기 정보를 이용하여 확인하였다.

본 논문에서 제시한 CAN 이상 상태 탐지 기능과 시스템 운영중단 결정방식을 차량제어기에 적용하면 통신 이상 상태를 명확히 확인할 수 있고 보다 정확한 제어결정을 내릴 수 있어, 차량시스템의 운행 안정성을 증대시킬 수 있을 것으로 기대한다.

[참고 문헌]

[1] TMS320F28xxx Peripherals II: ePWM / HRPWM / eQEP / eCAP / SCI / SPI / eCAN / I2C / McBSP, Texas Instruments
 [2] P.E. Dumont, A. Aitouche, R. Merzouki, M. Bayart, "Fault Tolerant Control on an Electric Vehicle", Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, pp.2450-2455.
 [3] R. Isermann, "Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance", Springer
 [4] James Larminie, John Lowry, "Electric Vehicle Technology", Wiley
 [5] http://www.iso.org/, ISO 11898