

논문 2017-54-7-8

차량 내 신뢰성 있는 센서 (Sensor) 통신을 위한 온도보상 기반 이더넷 이퀄라이저 (Ethernet equalizer) 설계

(A Design of Temperature-Compensating Ethernet Equalizer for Reliable Automotive Sensor Communication)

서 석 태*, 변 영 재**

(Seoktae Seo and Franklin Bien[©])

요 약

본 논문에서는 넓은 작동 온도 범위를 위해 온도보상기능을 가지는 이더넷 이퀄라이저를 소개한다. 차량 내부에 서로 통신하는 센서가 많아지면서, 차량용 통신에 대한 중요성이 높아진다. 많은 통신 방법 중에 이더넷 프로토콜은 넓은 통신 대역폭과 호환성을 가지기 때문에 차량용 통신을 위해 가장 선호되는 기술이다. 그러나 차량용 규격인 AEC-Q100을 만족시키기 위해서 제안하는 이더넷 통신 시스템은 -40°C 에서 150°C 에 해당하는 온도 범위에서 작동해야한다. 본 논문에서는 100m길이의 CAT-5 케이블에서 데이터를 보상하는 이더넷 이퀄라이저를 설계한다. 또한, 넓은 온도 범위에서 작동하기 위해 피드백 시스템을 이용한다. 제안하는 이퀄라이저는 완전 차동형 구조로 31.25MHz의 대역폭을 가지고 Hynix 0.13 μm BCDMOS 기술로 구현한다.

Abstract

In this paper, an Ethernet equalizer that compensates for automotive temperature variations within a broad range is presented. Communications in automotive systems have become increasingly important because of the many electronics in vehicles. Ethernet protocols are a good candidate for automotive communications. However, they should satisfy the AEC-Q100 requirements that stipulate an operational temperature range from -40 to 150°C . This paper proposes an Ethernet equalizer that can recover data up until 100 m length of CAT-5 cable adaptively within a temperature range of -40 to 150°C . To support the wide temperature range, a feedback system is used. The proposed equalizer has a bandwidth of 31.25 MHz with a fully-differential structure and is implemented in a Hynix 0.13 μm BCDMOS technology.

Keywords : Automotive Electronics, IoT, AEC-Q100, Ethernet equalizer, Temperature-Compensating

I. 서 론

기존의 차량 시스템은 Machine Control Unit (MCU)로 제어되는 기계적인 요소들로 구성되어왔으나, 최근의 차량 구성 요소들은 Electronic Control Unit (ECU)에 의해 제어된다. ECU는 기계 시스템들을 제어하고 센서 (Sensor)를 이용해서 차량의 상태를 진단함으로써 위험한 상황을 운전자에게 알리는 기능을 한다. ECU는

가장 중요한 구동장치와 브레이크, 조향장치, 전조등, 와이퍼에 이르는 다양한 요소를 제어한다^[1].

사물인터넷 (Internet of Things, IoT)은 이용자 주변의 다양한 사물들이 서로 통신을 하여 이용자에게 편의를 제공하는 기술 또는 환경을 말한다. 사물인터넷은 일상을 이루는 모든 사물에게 적용되고, 특히 차량에도 적용되어 운전자에게 편의와 안전을 제공할 수 있다.

* 학생회원, ** 정회원, 울산과학기술원 전기전자공학과

(The school of electrical and computer engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

© Corresponding Author (E-mail : bien@unist.ac.kr)

※ 이 논문은 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업 (IITP-2017-2012-0-00641) 및 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구(선도연구센터)사업(NRF-2017R1A5A1015596)의 연구결과로 수행되었음.

Received ; May 24, 2017

Revised ; June 12, 2017

Accepted ; June 20, 2017

차량의 센서는 다른 센서들과 통신을 통해 이용자가 필요로 하는 주행상황을 파악하고 ECU를 통해 차량 상태를 수정 및 설정할 수 있다. 그리고 미래에는 차량과 다른 차량과의 통신을 통해 최적의 주행상황을 만드는 등 차량 내 통신기술은 앞으로 굉장히 주목받을 기술이다.

현재는 대부분의 차량용 통신은 20kbps의 통신 대역폭 (Bandwidth)을 가지는 Local Interconnect Network (LIN)^[2]과 10Mbps의 대역폭을 가지는 Controller Area Network (CAN)^[3]을 이용한다. LIN은 저렴하고 간단하지만 좁은 통신 대역폭 때문에 선루프, 창문, 와이퍼 제어 등에 제한되어 이용된다. CAN은 높은 신뢰성을 가진 효율적인 Controller지만 대역폭의 제한이 있다. Flex Ray는 차세대 차량용 통신 프로토콜^[4]이지만 설치 비용이 매우 높고 10Mbps로 대역폭이 제한된다. Flex Ray는 조향장치, 서스펜션, 구동장치에 이용될 수 있다. 하지만 차량을 위한 데이터 통신량이 증가하고, 운전자를 위한 실시간 통신능력을 위해서는 Flex Ray와 MOST^[5]는 차세대 통신 프로토콜로는 부적합하다. 이더넷 프로토콜은 100Mbps의 넓은 대역폭을 가지고 널리 이용되는 인터넷 시스템에 적용되기 때문에 차량용 통신^[6]으로 적합하다. 이더넷 프로토콜은 저렴하고 차량에 IP address를 제공하여 스마트 네비게이션 (Navigation), 자율 주행 차량 등에도 사용할 수 있다. 따라서 이더넷 프로토콜은 차량용 통신에 매우 적합하다.

다양한 이더넷 표준은 구리선과 광섬유를 이용하는 이더넷으로 나뉜다. 이더넷 표준 중 구리선을 이용하는 100BASE-TX 프로토콜은 가장 널리 이용된다. 100BASE-TX는 100Mbps의 대역폭을 의미하는 100, 베이스밴드 통신을 의미하는 BASE와 비차폐 연선 (Unshielded Twisted Pair, UTP)을 이용하는 송신기 (Transmitter, TX)의 TX로 구성된 합성어이다. 케이블은 100m 길이에 데이터를 전송하는 Category-5 (CAT-5)를 이용한다. 100m의 케이블은 저주파 통과 필터 (Low Pass Filter, LPF)와 같은 주파수 특성을 가지기 때문에 데이터 손실^[7]이 발생할 수 있다.

100BASE-TX는 앞서 말했듯이 100m의 전송거리를 지원하는데 실제의 전송선은 신호 왜곡을 발생시킨다. 그림 1에서와 같이 10m의 케이블에 임펄스 신호 (Impulse signal)를 보내면 데이터가 거의 완벽하게 전송되고 50m의 케이블에서는 약한 신호 왜곡이 일어난다. 100m의 케이블에서는 신호 감쇄가 심각해져 왜곡이 발생한다. 따라서 긴 전송거리를 가지는 이더넷 시스템에는 손상된 데이터를 보상하는 회로인 이퀄라이저가

필요하다. 본 논문에서는 100BASE-TX 이더넷 시스템을 위한 차량용 이더넷 이퀄라이저를 제안한다.

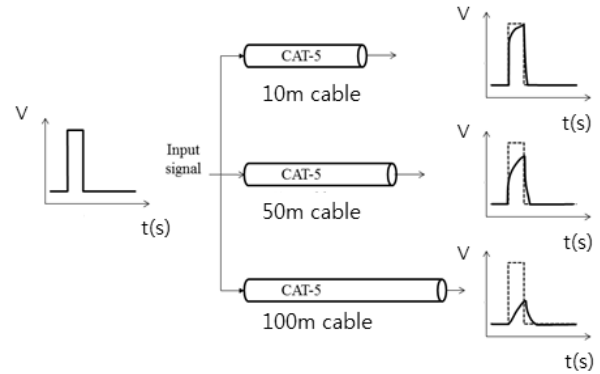


그림 1. 케이블 길이에 따른 신호 왜곡
Fig. 1. Signal distortion depends on cable length.

표 1. 적용 대상에 따른 전자부품 규제
Table1. Comparison of electronic area for application.

Category	Automotive	Consumer	Industry
Operating Temperature	-40°C ~ 150°C	0°C ~ 85°C	-10°C ~ 125°C
Life span	>10years	1 ~ 3years	5 ~ 10years
Humidity	0 ~ 100% (rainy season)	50%	Environmental
Allowable	0%	3%	<1%

차량용 집적회로는 일반적으로 Automotive Electronics Council (AEC)의 AEC-Q100표준을 만족시켜야한다. AEC-Q100은 집적회로 (Integrated circuit, IC)에 스트레스 테스트를 진행하여 품질과 신뢰성에 발생할 수 있는 불량 위험성을 검증하는 표준이다. 스트레스 테스트에는 저온에서 고온까지의 넓은 온도범위, 습도, 진동, 전자 방해 잡음 (Electro-Magnetic Interference, EMI) 등이 포함된다. 습도, 진동, EMI등은 전자 패키징 (Packaging) 기술을 통해 해결할 수 있지만 넓은 작동 온도범위는 해결하기 가장 어려운 문제이다. 표 1은 용도에 따라 전자부품이 만족시켜야할 스트레스 테스트 기준이다. 소비자용 전자부품의 온도 규정은 0°C ~ 85°C, 산업용 규정은 -10°C ~ 125°C에 비해 차량용은 -40°C에서 150°C까지 가장 넓은 작동 온도범위를 가진다. 본 논문에서는 넓은 작동 온도 범위를 위한 차량용 온도보상 이더넷 이퀄라이저를 소개한다.

II. 기존 이더넷 이퀄라이저의 차량 적용 연구

1. 배경

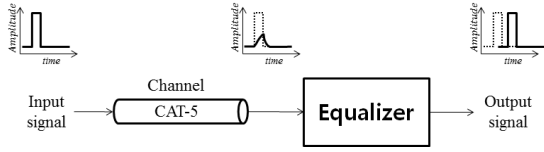


그림 2. 이퀄라이저 개념도
Fig. 2. Concepts of equalizer.

그림 2는 이퀄라이저의 개념을 보여준다. 신호가 100m 길이의 CAT-5 채널로 보내지면 신호가 왜곡되고 이퀄라이저를 통해 보상된다.

그림 3에서 채널과 이퀄라이저의 주파수 특성을 보여준다. 케이블의 주파수 특성은 저주파 통과 필터와 같기 때문에, 케이블을 통과하면 고주파 성분이 감소된다. 감소 신호가 고주파 통과 필터 (High pass filter, HPF)와 같은 주파수 특성을 가진 이퀄라이저를 통과하여 감소된 원래신호와 합쳐지면 출력 주파수 성분은 평이해진다. 따라서 감소된 고주파 성분이 보상된다. 하지만 출력 주파수 특성은 이상적인 평이한 형태가 아니다. 그림 3에서 나오는 점선이 실제 이퀄라이저 주파수 특성이다. 고주파 성분을 보상해주는 것이 이퀄라이저의 기본 개념이다.

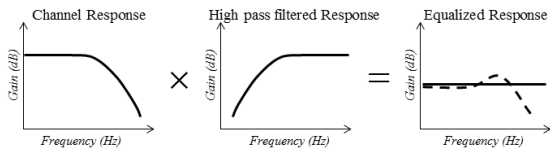


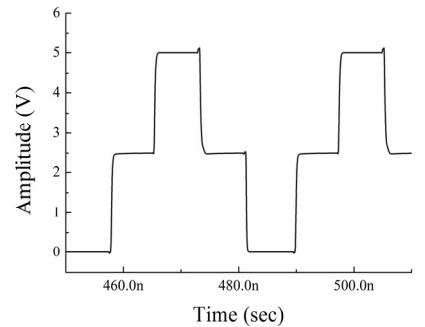
그림 3. 채널과 이퀄라이저의 주파수 특성
Fig. 3. Frequency response of channel and equalizer.

2. 차량용 작동 온도범위에서 이더넷 이퀄라이저의 한계

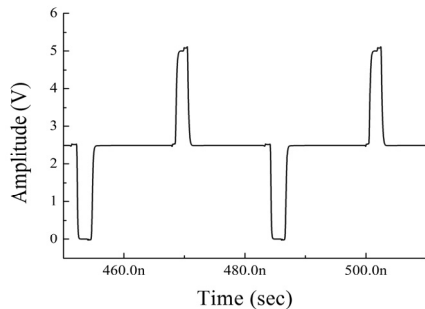
기존의 이더넷 이퀄라이저는 소비자용 전자제품 규격으로 개발되어 0°C~85°C의 온도범위를 가지는 것에 비해 차량용 이더넷 이퀄라이저는 저온 (-40°C)과 고온 (150°C)에서 모두 작동해야하기 때문에 온도보상 기능을 반드시 가져야 한다. 온도가 변하면 MOSFET과 같은 전자제품을 구성하는 반도체 내부의 전자 (Electron)와 정공 (Hole)의 이동도 (Mobility)가 변한다. 온도가 증가하면 포논 산란 (Phonon scattering)이 늘어나 전자와 정공의 이동도가 낮아진다^[8]. 높은 온도로 인해 낮은 이동도는 MOSFET의 증폭률을 저하시키고, 낮은 온도로 인해 높아진 이동도는 증폭률을 상승 시킨다^[9]. 증폭률의 변화는 이퀄라이저 성능에 치명적인 영향을

준다.

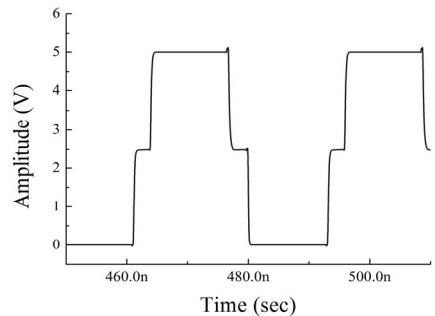
상온인 27°C에서 이퀄라이저의 증폭률은 17dB를 가진다. 온도가 -40°C로 저하되면 20dB의 증폭률로 오작동이 발생하지 않지만 150°C로 작동 온도가 상승하면 증폭률이 0dB로 감소한다. 그림 4(a), (b), (c)는 27°C, -40°C, 150°C의 세 온도에서 기존 이더넷 이퀄라이저의 작동 결과를 표시한다. 27°C에서는 정상적인 작동 결과를 보여준다. 저온인 -40°C에서는 “0” 값을, 고온인 150°C에서는 “-1”, “1” 값을 구분할 수 없다. 결과적으로 온도가 변하면 데이터 전송에 오류가 발생한다. 이는 차량 통신의 안정성에 치명적이어서 온도보상기능을 통해 반드시 해결해야 될 문제이다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. (a) 27°C, (b) -40°C, (c) 150°C에서 이퀄라이저 작동 결과
Fig. 4. Equalized waveform at (a) 27°C, (b) -40°C, and (c) 150°C

3. 베이스라인 원더 (Baseline wander)를 피하기 위한 이더넷 구성

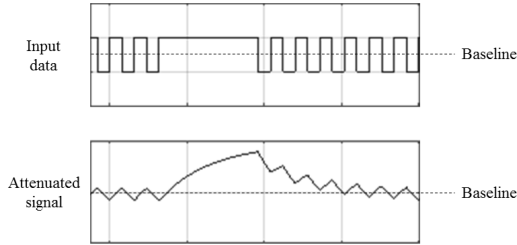


그림 5. 베이스라인 원더 현상
Fig. 5. Baseline wander situation.

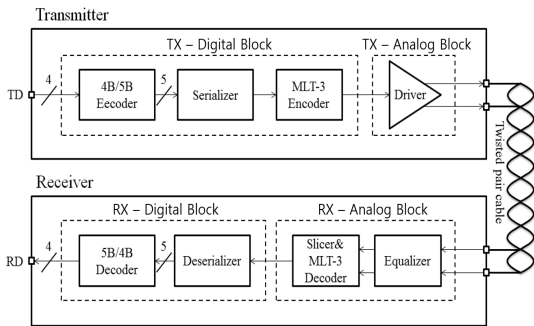


그림 6. 베이스라인 원더를 피하기 위한 이더넷 블록 다이어그램
Fig. 6. Block diagram of Ethernet physical layer.

베이스라인 원더는 차량용 이더넷 이퀄라이저의 한 계 중 하나이다. 일반적으로 데이터는 “0” 과 “1” 값으로 구분된다. “0”에서 “1”로 “1”에서 “0”으로만 데이터가 변한다면 베이스라인은 일정하다. 그러나 그림 5에서처럼 같은 데이터가 반복되면 베이스라인이 상승하거나 하강한다. 이퀄라이저는 베이스라인을 기준으로 신호 크기를 비교하는데, 베이스라인이 변하면 데이터를 잘

못 읽을 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 4-to-5 비트 인코딩 (4-to-5 bit encoding)과 MLT-3 인코딩을 사용한다. 그림 6은 베이스라인 원더를 피하기 위한 이더넷 블록 다이어그램을 보여준다. 처음에 4비트의 병렬신호가 송신기에 보내진다. 이후 4-to-5비트 인코더에서 5비트의 병렬신호로 변환되기 때문에 100Mbps의 데이터 대역폭이 125Mbps로 증가한다. 직렬 변환기 (Serializer)를 통해 병렬 신호는 직렬로 변환되어 MLT-3 인코더로 보내진다. MLT-3 인코더로부터 신호는 MLT-3 신호로 변환되고 아날로그 드라이버 (Driver)가 신호를 CAT-5 채널로 보낸다. 위의 송신단계 이후 수신단계에서는 송신단계의 반대 구조로 신호 수신을 진행한다. 이퀄라이저는 수신단계의 처음부분에

표 2. 4-to-5비트 인코딩 변환결과
Table2. Result of 4-to-5 bit encoding.

4bit	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
5bit	11110	01001	10100	10101	01010	01011	01110	01111

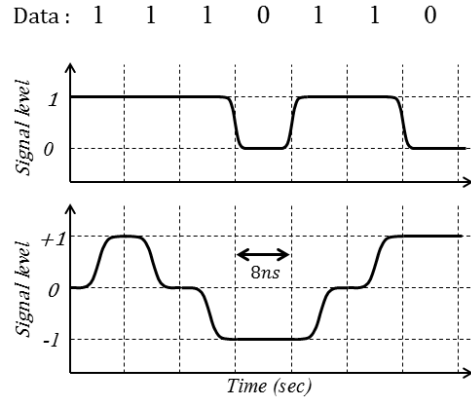


그림 7. MLT-3 인코딩 파형
Fig. 7. MLT-3 encoding waveform.

서 신호를 복구한다.

4-to-5비트 인코딩은 표 2의 방법으로 “0”값의 반복을 방지한다. 4비트 신호에서 변환된 5비트 신호는 “0”의 반복이 3번 이상 일어나지 않는다.

MLT-3 인코딩은 “1”의 반복을 막는 기술이다. MLT-3은 Multi-level Transmit의 MLT와 3단계 신호의 3의 합성어이다. 일반적인 신호는 두 단계 신호, “0”과 “1”을 사용하지만 MLT-3의 신호는 “0”, “1”, “-1”의 세 단계 신호를 이용한다. “0”의 신호가 입력되면 MLT-3은 데이터를 유지하고, “1”의 입력은 MLT-3가 데이터를 변환한다. 그림 7에서와 같이 “1”의 신호가 입력되면 “0”의 신호에서 “1”의 신호로 상승하고, 연속해서 “1”의 신호가 두 번 입력되면 “1”의 신호에서 “0”으로, “-1”로 하강한다. 5비트의 신호는 “0”이 최대 2번 반복되기 때문에 MLT-3 인코딩을 통해 “1”의 반복 역시 최대 2번 일어난다. 하지만 MLT-3인코딩으로 신호가 세 단계로 나뉘기 때문에 이더넷 이퀄라이저 또한 세 단계의 신호를 복구해야하고 이는 어려움이 따른다.

III. 차량용 온도보상 이더넷 이퀄라이저 설계

1. 연속시간 선형 이퀄라이저 (Continuous-time linear equalizer)

이퀄라이저는 이산시간 선형 이퀄라이저 (Discrete-time linear equalizer)와 연속시간 선형 이퀄라이저로 나뉜다. 이산시간 선형 이퀄라이저는 유한 임펄스 응답 필터

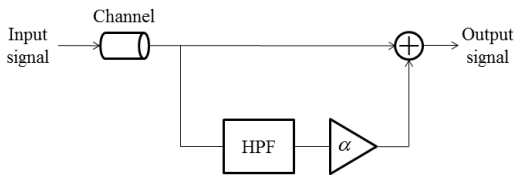


그림 8. 연속시간 선형 이퀄라이저의 블록 다이어그램
Fig. 8. Block diagram of continuous-time linear equalizer.

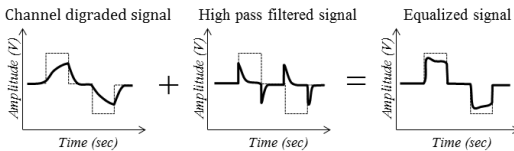


그림 9. 연속시간 이퀄라이저의 주파수 응답
Fig. 9. Frequency response of continuous-time linear equalizer.

(Finite impulse response filter, FIR filter)를 이용한다. 네 개 이상의 지연 셀 (Delay cell)을 이용하여 각 신호를 증폭하고 증폭된 신호들이 합쳐져 보상된다. 이산시간 선형 이퀄라이저는 정확한 지연시간 값과 이득이 필요하다. 연속시간 선형 이퀄라이저는 그림 8에서와 같이 간단하다. 채널을 통과한 왜곡된 신호는 전압 가산기 (Voltage adder)와 고주파 통과 필터로 나누어 진행한다. 고주파 통과 필터를 지난 신호는 고주파 성분의 주파수만 통과시킨 후 증폭된다. 기존 신호와 증폭된 고주파 성분을 가진 신호가 전압 가산기에서 더해져 신호가 보상된다. 그림 9에서 연속시간 선형 이퀄라이저의 주파수 특성을 볼 수 있다.

이산시간 선형 이퀄라이저는 쉽게 프로그램 되고 많은 전력을 소모하여 연속시간 선형 이퀄라이저보다 높은 성능을 가질 수 있다. 본 논문에서는 저전력에서 구동되고 쉬운 구조를 가진 연속시간 선형 이퀄라이저를 이용하여 차량용 이더넷 이퀄라이저를 구성한다. 여 차량용 이더넷 이퀄라이저를 구성한다.

2. 온도보상기능을 가진 차량용 이더넷 이퀄라이저

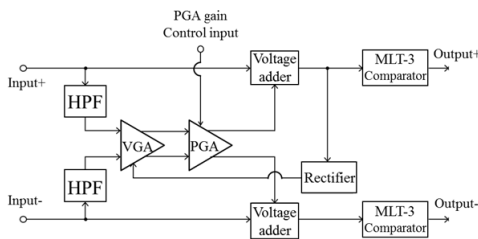


그림 10. 온도보상기능을 가진 차량용 이더넷 이퀄라이저의 블록 다이어그램
Fig. 10. Block diagram of proposed Ethernet equalizer for automotive application

그림 10은 차량 환경에서 변하는 온도 때문에 저하된 이퀄라이저의 성능을 보상하는 이퀄라이저의 블록 다이어그램이다. 신호는 전압 가산기와 고주파 통과 필터로 보내지고 4-to-5비트 인코더를 통해 데이터는 100Mbps에서 125Mbps이 대역폭으로 변환된다. MLT-3 신호는 전이 (transition)에 8ns가 필요하기 때문에, 파형은 31.25MHz의 작동 주파수를 가진다. 31.25MHz의 신호를 보상하기 위해서 고주파 통과 필터는 31.25MHz보다 낮은 차단 주파수를 가진다. 고주파 통과 필터를 지난 신호는 Variable gain amplifier, VGA와 Programmable gain amplifier, PGA로 입력된다. VGA는 온도보상을 위해 이득을 제어하고 PGA는 전송거리에 따라 이득을 변화시킨다. 100m의 케이블에 신호를 전송 할 때 PGA는 20dB의 이득을 가지게 제어된다. PGA를 지난 신호는 전압 가산기로 가서 왜곡된 신호와 보상된 신호가 합쳐진다. 합쳐진 신호는 처음보다 가파른 신호를 가지게 된다. 이후 MLT-3 비교기 (Comparator)는 신호단계를 결정한다. 만약 가산기 이후 신호가 충분히 증폭되지 않으면 비교기는 신호를 구분할 수 없다. 높은 온도는 각 블록의 증폭률을 낮춰 가산신호의 전압도 낮아진다. 이 때 정류기 (Rectifier)가 낮아진 가산신호를 직류 전압으로 정류하고^[10], 낮은 직류 전압은 VGA에 입력되어 증폭률을 증가시킨다. 증가된 증폭률덕분에 비교기가 신호를 구분할 수 있게 된다. 낮은 온도는 정류기로부터 높은 전압을 출력하게 하여 VGA의 증폭률을 감소시킨다. 이런 과정으로 온도에 따른 신호세기를 보상한다. 상온인 27°C에서 VGA의 증폭률은 0dB이다.

그림 11은 온도보상기능을 가진 차량용 이더넷 이퀄라이저의 과도신호 시뮬레이션 결과이다. 파란 선은 가산기 이후 신호이다. 파란 선의 크기는 800ns전까지 비교기에서 구분할 수 없다. 빨간 선은 피드백 (feedback) 신호로 정류기에서 출력되어 VGA에 입력된다. 800ns

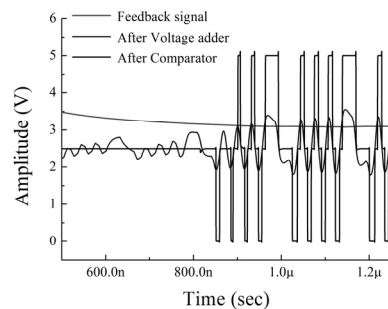


그림 11. 온도보상 이더넷 이퀄라이저의 과도신호 시뮬레이션 결과
Fig. 11. Proposed system transient simula.

전까지는 고온으로 인한 낮은 증폭률이 낮은 가산신호를 만들고 따라서 피드백 신호도 낮아진다. 900ns 이후에는 피드백신호가 증폭기의 이득을 보상하여 가산신호가 신호를 구분할 수 있을 만큼 커진다. 제안하는 이퀄라이저는 MATLAB (SIMULINK)을 통해 시뮬레이션되었다. 그림 12는 제안하는 시스템의 아이 다이어그램 (Eye diagram) 시뮬레이션 결과이다. 입력 아이 다이어그램은 열려있지만 채널을 통과한 후에는 완전히 닫혀 있다. 이퀄라이저를 지난 후의 아이 다이어그램은 거의 열려있다. 이 결과를 통해 제안하는 온도보상 이더넷 이퀄라이저의 시스템 단계는 성능이 입증되었다.

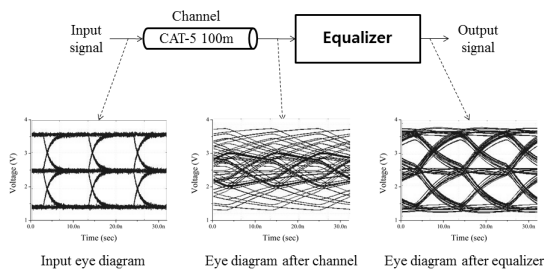


그림 12. 온도보상기능을 가진 이더넷 이퀄라이저의 아이 다이어그램 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Eye diagram simulations of proposed automotive equalizer modeling.

3. 온도보상기능을 가진 이더넷 이퀄라이저 회로 설계

제안하는 시스템을 설계하기 위해서 VGA, PGA, 전압 가산기, MLT-3 비교기를 구성해야한다. 가장 중요한 블록인 VGA는 작은 제어 신호에서는 증폭률이 선형적으로 변해야하고, 큰 제어 신호에서는 증폭률이 기하급수적으로 변해야한다. PGA는 케이블 길이에 따른 네 가지 증폭률을 가진다. 전압 가산기는 채널을 통과한 신호와 고주파 통과 필터를 지난 신호를 합해야한다. MLT-3 비교기는 고정된 기준 값 (Reference value)을 가지기 때문에, 전압 가산기의 공통 모드 출력 (Common mode output)은 안정되어야 한다. MLT-3 비교기는 세 가지 신호 단계를 가지므로 기존 비교기와 다르다.

가. 온도보상기능을 위한 피드백 시스템 설계

그림 13에서처럼 본 시스템의 VGA는 전류 스티어링 (Current steering)으로 제어된다. 증폭률을 제어하기 위해, 반대의 값을 가진 두 개의 제어 전압이 필요하다. 만약 V_{CTRL+} 이 감소하면 M10에 흐르는 전류가 증가한다. V_{CTRL-} 의 값은 V_{CTRL+} 의 반대 값을 가지기 때문에 M9에 흐르는 전류를 감소시킨다. 따라서 구동

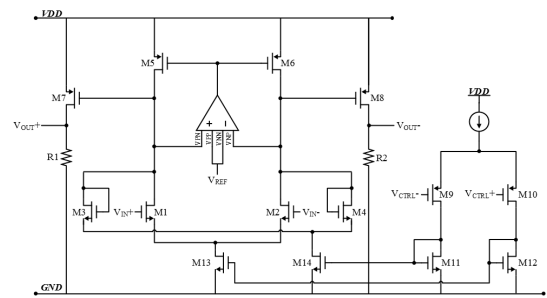


그림 13. 제안하는 VGA의 회로 설계
Fig. 13. Schematic of variable gain amplifier in proposed equalizer.

MOSFET (Driving MOSFET), M1과 M2의 전류가 증가되고 다이오드 MOSFET (Diode connected MOSFET), M3과 M4의 전류는 감소된다. 결과적으로, 증폭기의 이득이 증가된다. 본 VGA에서는 안정된 공통모드 전압을 위해 Common mode feedback, CMFB 블록이 이용되었다. CMFB 블록을 이용함으로써 $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 온도 범위에서 안정된 출력 전압을 가질 수 있다.

그림 14는 제어 전압에 따른 증폭률 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 온도가 변하면 이득의 변화율도 커지지만, VGA는 모든 온도 범위에서 20dB가 넘는 이득 변화율을 가져야한다. 또한 제어 전압이 0.1V 이내로 변하면 선형적으로 이득이 변해야하고 제어 전압이 0.2V 이상 변하면 기하급수적으로 이득이 변한다. 결과적으로 온도가 변해도 일정한 전압을 보상할 수 있게 된다^[11].

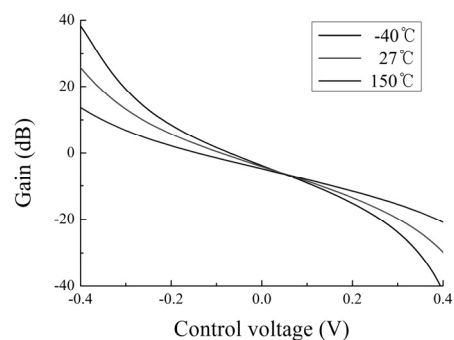


그림 14. 제어 전압에 따른 증폭률의 시뮬레이션 결과
Fig. 14. Simulation result of variable gain depends on control voltage.

나. 케이블 길이에 따라 이득이 변하는 증폭기 설계
이더넷 프로토콜은 100m 통신 길이를 지원한다. 케이블 길이가 길어질수록 신호의 감쇄가 심하게 발생한다. 그림 15에서 제안하는 시스템의 PGA는 소스 축퇴 (Source degeneration)를 이용하고 네 가지 저항을 이용해 이득

을 0dB, 11dB, 14dB, 20dB로 조정한다. 0m~30m는 0dB, 30m~50m는 11dB, 50m~80m는 14dB, 80m~100m는 20dB의 이득을 가진다. PGA는 낮은 증폭률로 인해 세 단계 (stage)를 가지고 안정성을 위해 피드백 선로를 가진다^[12].

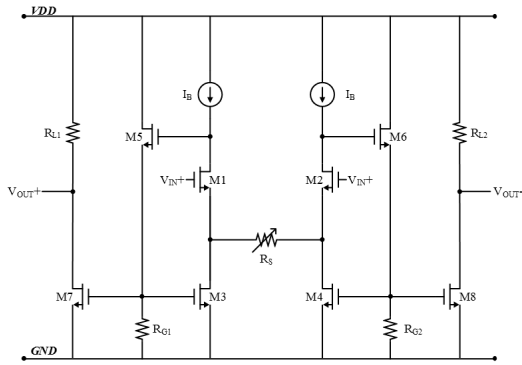


그림 15. 제안하는 PGA의 회로설계
Fig. 15. Schematic of PGA in proposed equalizer.

그림 16은 저항 변화에 따른 PGA 이득 변화를 주파수 응답으로 시뮬레이션 결과이다. 20dB의 이득을 위한 검정 선은 20dB보다는 조금 낮지만 최소한의 손실로 100m 데이터 전송은 가능하다. 0dB, 11dB, 14dB, 20dB의 증폭률은 각각 분홍, 파란, 빨간, 검정색으로 표현된다.

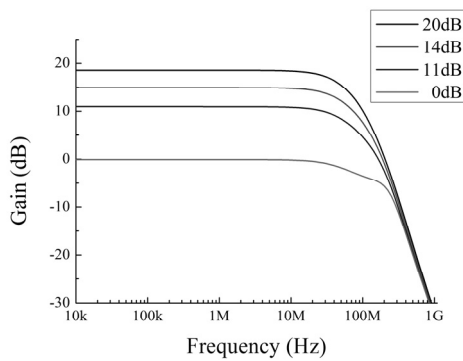


그림 16. 저항에 따른 PGA 이득 변화의 주파수 응답 시뮬레이션 결과
Fig. 16. Frequency response simulation result of PGA gain depends on programmed resistor.

다. 공통모드 출력의 안정성을 위한 전압 가산기 설계

그림 17은 전압가산기의 회로 설계도이다. MOSFET인 M1, M2, M3, M4가 입력 전압을 전류로 바꾸고 M5, M6, M7, M8로 복사된다. 마지막으로 다이오드로 연결된 M9, M10이 복사된 전류를 전압으로 다시 변환한다. 그림 18은 전압가산기의 과도응답 시뮬레이션 결과이다.

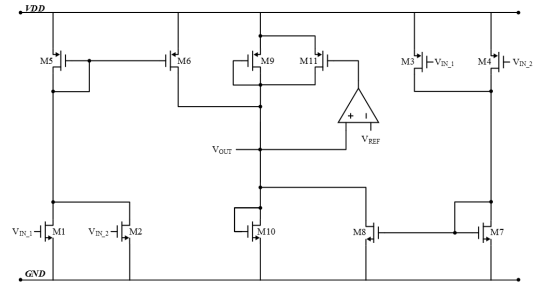


그림 17. 제안하는 전압 가산기 회로 설계
Fig. 17. Schematic of voltage adder in proposed equalizer.

두 개의 사인파형의 전압이 서로 다른 주파수를 가지고 출력 파형으로 합쳐진다^[13]. 제안하는 이퀄라이저에서는 공통모드 출력전압의 안정성이 매우 중요하다. 따라서 CMFB 블록이 추가로 포함된다. 그림 19는 공통모드 전압의 시뮬레이션 결과를 보여준다. Process and temperature variation (PVT)가 존재하는 상황의 시뮬레이션 결과이다. 분홍색 선은 최악의 상황으로 150°C에서 빠른 P-type MOSFET과 느린 N-type MOSFET의 결과이다. CMFB 블록 덕분에 공통모드 전압은 안정되어 있다.

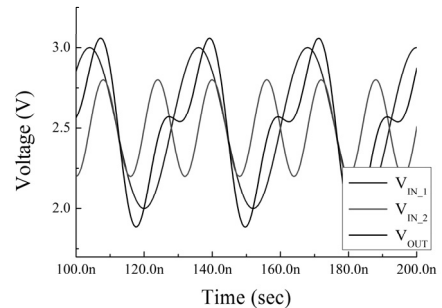


그림 18. 전압 가산기의 과도응답 시뮬레이션 결과
Fig. 18. Transient simulation result of voltage adder.

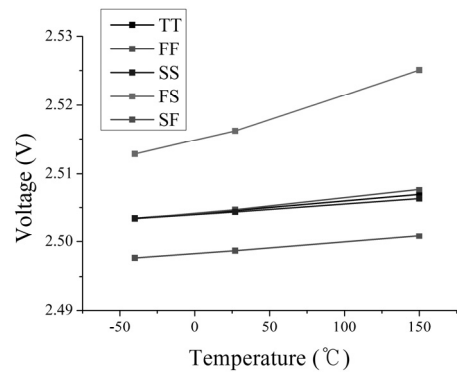


그림 19. 온도와 공정변화에 따른 전압 가산기의 공통모드 전압의 시뮬레이션 결과
Fig. 19. Simulation result of voltage adder common mode level depends on temperature and process variation.

라. 이더넷 파형을 위한 비교기 설계

일반적인 비교기는 기준 전압과 입력신호를 비교해서 두 개의 단계, “0”, “1”로 나뉜다. MLT-3의 경우에는 세 가지 단계, “-1”, “0”, “1”로 데이터를 출력한다. 그림 20은 MLT-3 비교기의 블록 다이어그램이다. MLT-3 비교기는 2V와 3V의 기준전압을 가지는 일반 비교기를 가진다. 신호가 입력되면 두 개의 일반 비교기는 각 기준전압과 신호를 비교한다. 결과는 0V를 “0”값으로, 5V를 “1”값으로 읽는다. 비교 후에 멀티플렉서 (Multiplexer)가 MLT-3 비교기의 출력을 결정한다. 그림 21은 MLT-3 비교기의 시뮬레이션 결과이다. 입력 신호가 2V 이상 3V 이하이면 멀티플렉서의 결과는 “0”이다. 간단한 구조이지만 기준전압의 문제가 된다. 본 비교기에는 2V, 2.5V, 3V의 기준전압이 있는데, 그 중 데이터의 전이 때문에 2.5V의 기준전압은 특히 불안정하다. 그래서 설계에 필터링 기법으로 기준전압을 보호했다.

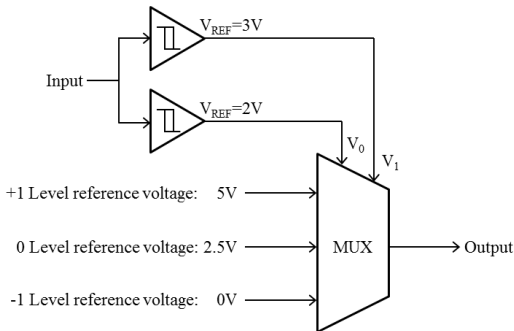


그림 20. 제안하는 MLT-3 비교기의 블록 다이어그램
Fig. 20. Block diagram of MLT-3 comparator in proposed equalizer.

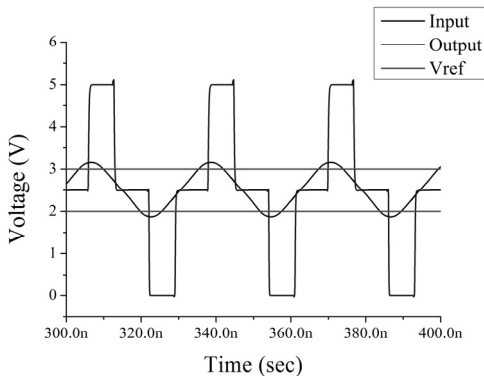


그림 21. 제안하는 MLT-3 비교기의 과도응답 시뮬레이션 결과
Fig. 21. Transient simulation result of MLT-3 comparator in proposed equalizer.

IV. 실험 결과 및 성능 분석

1. 제안하는 이퀄라이저의 아이 다이어그램

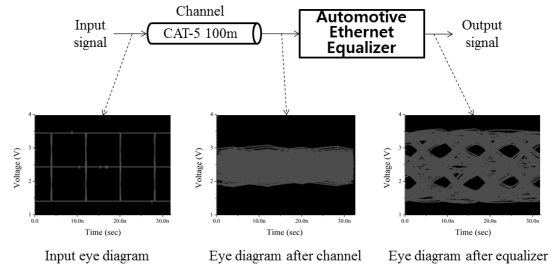


그림 22. 제안하는 이퀄라이저의 아이 다이어그램
Fig. 22. Eye diagram of proposed automotive temperature compensating Ethernet equalizer.

그림 22는 제안하는 이퀄라이저의 아이 다이어그램이다. 아이 다이어그램은 반복적으로 샘플링 되는 신호를 보여준다. 만약 아이 다이어그램이 많이 열려있다면 신호가 잘 전송됨을 의미한다. 첫 번째 아이 다이어그램은 입력 전압, 두 번째는 CAT-5 케이블을 100m 지났을 때의 아이 다이어그램이다. 채널 왜곡 때문에 아이 다이어그램은 거의 닫혀있다. 그러나 제안하는 이퀄라이저를 통과한 후에는 데이터가 복구되어 열려있다. 제안하는 시스템은 피드백 구조를 가지고 있기 때문에 위상 여유가 중요하다. 정류기의 피드백은 42.74°의 위상여유를 가진다. 발진을 막기 위해서는 위상여유가 60° 이하여야 한다.

2. 차량용 작동 온도범위에 따른 결과

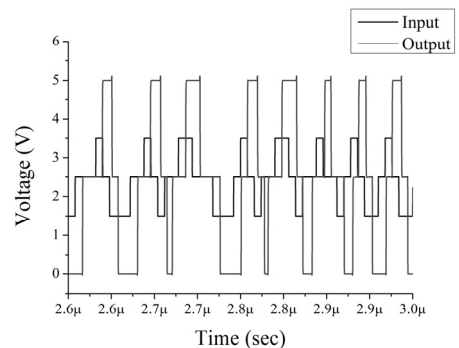


그림 23. 27°C에서의 피드백이 없는 이더넷 이퀄라이저 결과
Fig. 23. Results of non feedback Ethernet equalizer at 27°C.

본 논문은 차량의 작동 온도범위인 $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 에서 사용할 수 있는 이더넷 이퀄라이저를 소개한다. 그림 23은 27°C 에서 피드백 시스템이 없을 때의 입출력 결과이다. 파란색 선은 입력신호이고 빨간색 선은 출력 신호이다. 제안하는 이퀄라이저가 없어도 상온인 27°C 에서는 정상적으로 작동한다. 그러나 그림 24에 나오듯이 온도가 150°C 일 때는 $2.725\mu\text{s}$ 와 $2.825\mu\text{s}$ 에서 “-1”로 전이되어야 할 신호가 왜곡되었다. 만약 그림 25에서처럼

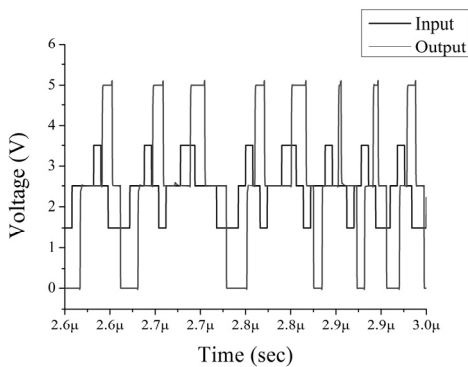


그림 24. 150°C 에서의 피드백이 없는 이더넷 이퀄라이저 결과
Fig. 24. Results of non feedback Ethernet equalizer at 150°C .

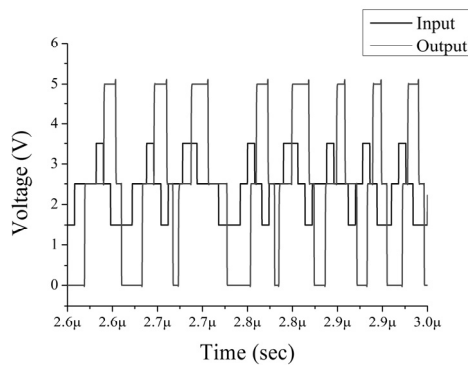


그림 25. 150°C 에서의 온도보상기능을 가진 이더넷 이퀄라이저 결과
Fig. 25. Results of feedback Ethernet equalizer at 150°C .

온도보상기능을 가지는 이더넷 이퀄라이저를 이용하면 데이터가 복구된다. 결과적으로 150°C 에서는 온도보상기능을 가진 이퀄라이저를 통해 데이터를 반드시 복원해야 한다.

회로는 Hynix $0.13\mu\text{m}$ BCDMOS 기술로 제작되었고 그림 26은 실제 회로 사진이다.

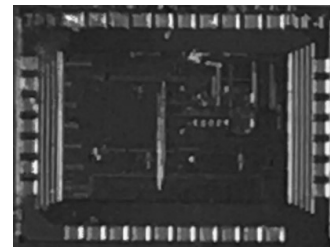


그림 26. Hynix $0.13\mu\text{m}$ BCDMOS로 제작된 차량용 온도보상기능을 가진 이더넷 이퀄라이저
Fig. 26. Temperature-compensating Ethernet equalizer IC chip fabricated by Hynix $0.13\mu\text{m}$ BCDMOS.

V. 결 론

본 논문에서는 차량의 작동 온도범위인 $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 에서 정상적인 데이터 통신을 위한 온도보상기능을 가진 이더넷통신용 이퀄라이저를 제안한다. LIN과 CAN을 이용해 이용하던 기존 차량용 통신은 충분한 통신 대역폭을 확보할 수 없어 한계가 있었다. 차량 내부에 장착되는 센서가 늘어나고 각 센서들간 통신을 위해 넓은 통신 대역폭을 가지는 이더넷 프로토콜이 차량용 통신으로 적합하다. 이더넷 프로토콜은 100Mbps와 IP 주소를 지원하고 인터넷에 적용될 수 있다. 이더넷은 데이터를 100m길이의 케이블로 전송할 수 있어야 하는데, 긴 전송선로로 인해 신호 왜곡이 일어난다. 따라서 신호를 보상하는 이퀄라이저 블록이 반드시 필요하다. 또한 차량용 반도체 표준인 AEC-Q100을 만족시키기 위해서 넓은 작동 온도 범위, $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 에서 이퀄라이저 블록이 신호를 보상해야 한다. 그러나 고온에서는 반도체의 특성이 바뀌어 데이터의 손실이 발생하므로 온도에 따라 데이터를 보상하는 이퀄라이저가 반드시 적용되어야 한다. 제안하는 이퀄라이저는 31.25 MHz의 대역폭을 가지고 완전 차동 구조를 가진다. 나아가 이더넷 시스템이 차량에 완전히 적용되기 위해 습도에 대한 보상도 이뤄져야 함으로 습도보상기능을 갖춘 이퀄라이저에 대한 연구도 진행되어야 한다.

REFERENCES

- [1] H. Lajmi, A. M. Alimi, S. Ajili, "Using ethernet technology for in-vehicle's network analysis," Computational Intelligence Communication Systems and Networks (CICSvN), pp. 353-358, Madrid, Spain, June 2013.
- [2] M. Ruff, "Evolution of local interconnect network (LIN) solution," 2003 IEEE 58th Vehicular Technology

- Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No. 03CH37484), pp. 3382-3389 Vol. 5., Orlando, FL, USA, Oct 2003,
- [3] M. Farsi, K. Ratcliff and M. Barbosa, "An overview of controller area network," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 113-120, June 1999.
- [4] R. Makowitz and C. Temple, "Flexray - A communication network for automotive control systems," 2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, pp. 207-212, Torino, Italy, 2006.
- [5] MOST Cooperation. (2004, August) MOST Specification Revision 2.3. [Online]. Available: <http://www.mostnet.de>
- [6] T. Steinbach, F. Korf and T. C. Schmidt, "Real-time Ethernet for automotive applications: A solution for future in-car networks," 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics -Berlin (ICCE-Berlin), pp. 216-220, Berlin, Germany, 2011.
- [7] J. Everitt, J. F. Parker, P. Hurst, D. Nack, K. Rao Konda, "A CMOS transceiver for 10-Mb/s and 100-Mb/s Ethernet," *Solid-State Circuits* Vol. 33, No. 12, pp. 2169-2177, Dec 1998.
- [8] Robert. F. P.: 'Semiconductor device fundamentals second edition', Addison-Wesley Publishing company, pp. 79-84, 1996.
- [9] J. Singh, G. Wadhwa, "MOSFET mobility model at nanoscale including temperature effects," in *International Conference on Computer Research and Development ICCRD*, Vol. 3, pp. 325-330, Shanghai, China, 2011.
- [10] H. Goncalves, J. Fernandes, M. Martins, "A study on MOSFET rectifiers maximum output voltage for RF power harvesting circuits," pp. 2964-2967, in *International Symposium on Circuits and Systems ISCAS*, Beijing, China, 2013.
- [11] P. C. Huang, L.-Y. Chiou, C.-K. Wang, "A 3.3-V CMOS wideband exponential control variable-gain-amplifier," in *ISCAS*, Vol. 1, pp. 285-288, Monterey, CA, USA, 1998.
- [12] S.-H. Park, J.-H. Lee, S.-W. Kim, S.-K. Choi, C.-H. Kim, M.-U. Seong, S.-G. Kim, and J.-Y. Ryu, "A new low-power programmable CMOS gain amplifier," *CES-CUBE*, Vol. 25, pp. 77-80, Guam, USA, 2013
- [13] A. Monpapassorn, "High frequency/low voltage CMOS adder," *Thammasat International Journal of Science Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 48-52, 2000.

 저 자 소 개



서 석 태 (학생회원)

2016년 울산과학기술원 전기전자공학
학과 학사졸업.

2016년~현재 울산과학기술원 전기
전자공학과 석·박사통합
과정 재학.

<주관심분야: 집적회로, 통신, 무선전력전송>



변 영 재 (정회원)

1997년 연세대학교 전자공학과 학사
졸업.

2000년 조지아공과대학교 전기전자
컴퓨터공학과 석사 졸업.

2006년 조지아공과대학교 전기전자
컴퓨터공학과 박사 졸업.

2000년~2002년 Agilent Technologies 연구원.

2003년~2004년 Quellan, Inc, 수석연구원.

2007년~2009년 Staccato Communications 수석연
구원.

2009년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과
부교수.

<주관심분야: 의료전자, 아날로그 IC, 무선전력전송>