

# 차동신호 전송방식 기반 고속 인터커넥트의 노이즈 저감 연구

김 명 회

한경대학교

## I. 서 론

차동신호 전송방식은 서로 상보적인 값을 가지는 두 개의 신호들(위상이 180도 차이가 나는 신호들)을 전송하고, 수신부에서는 그 둘의 차이를 이용하여 데이터를 복원하는 방식이다. 차동신호 전송 방식을 기반으로 한 신호 전송은 외부에서 인가되는 전기적 노이즈나, 내부에서 발생한 전원 스위칭 노이즈에 의한 데이터 왜곡에 강한 특성을 가지고 있다. 이런 장점으로 인하여 다수의 고속 데이터 통신 표준에 채택되어 사용되고 있으며, 특히 멀티미디어 장치 간 대용량의 데이터를 주고받는 고속 직렬 링크에서 활발하게 사용되고 있다.

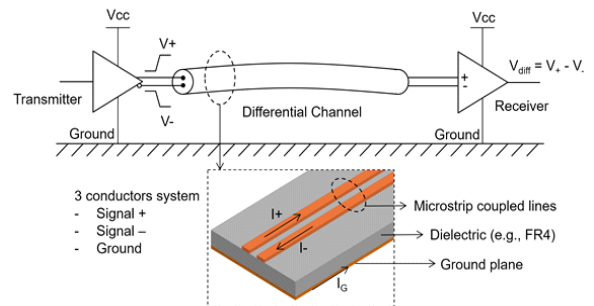
고속 직렬 링크 시스템의 인쇄회로 기판(Printed Circuit Boards; PCBs)상에 구현되는 차동신호 전송선 기반 인터커넥트는 흔히 두 개의 신호선과 하나의 접지면으로 구성되는 3-도체 구조를 이용한다. 3-도체 구조는 [그림 1]에서 보는 것처럼 유전체를 사이에 두고 접지면과 한 쌍의 마이크로 스트립 전송선로가 대면하는 구조이다. 전송선로에 인가되는 신호는 송신부의 전압모드 출력 드라이버로부터 생성된 상보적인 신호이다. 이때, 인가되는 신호의 형태를 차동 모드와 공통모드라는 두 개의 모드로 나누어 고려할 수 있다. 이상적인 차동신호 전송에서 차동모드 형태의 신호는 수신부에서 복원하는 신호이고, 공통모드 형태의 신호는 시간에 따른 변화가 없어야 한다. 다시 말해서, 공통모드 신호의 경우에는 주파수 영역에서 고조파 성분이 존재하지 않아야 한다. 하지만 최근 들어서, 차동신호 전송선 기반 인터커넥트를 통하여 주고받는 데이터 전송속도가 급격하게 증가함에 따라서 기존에 무시했던 차동신호 전송선의 미소한 불균형으로 인하여 발생하는 공통모드 노이즈 문제가 심각하게 되었다<sup>[1]-[7]</sup>. 특히 단위 시간에 대한 데이터 전송률이 기가 비트를 넘어서게 되면서 공통모드 노이즈의 경우도 광대역의 고주파 노이즈 성분을 가지게 되었다. 이런 광대역 고주파

노이즈는 심각한 전자파 장애의 원인이 잘 알려져 있다. 예를 들면, USB 3.0과 2.4 GHz 대역을 사용하는 무선 기기와의 간섭 문제이다<sup>[8]</sup>. USB 3.0 기기로부터 발생한 광대역 고주파 공통모드 노이즈로 인하여 2.4 GHz 대역의 노이즈 기준 레벨이 상승하여 이 대역을 사용하는 무선 마우스의 오동작을 초래하게 된다.

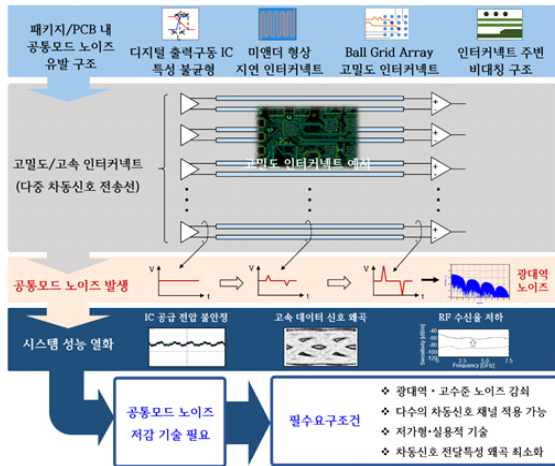
차동신호 전송선 기반 인터커넥트를 PCB 상에 구현할 때 발생하는 미소 불균형에는 출력 드라이버의 상승/하강 특성 불균형, 구불구불한 형태의 지연선로, Ball Grid Array(BGA) 패키지 연결 선로 라우팅, 차동신호 전송선로 한쪽에만 위치하는 구조물 등이 대표적이며, 이런 경우가 [그림 2]에 도시되어 있다.

## II. 공통모드 노이즈

5 Gbps 데이터 전송속도를 가지는 차동 신호선 기반 고속 인터커넥트에서 25 ps에 해당하는 intra-pair skew가 발생했을 때, 공통모드 노이즈가 발생하는 예를 [그림 3]에 소개하였다. [그림 3] (a)는 송신부에서 전송된 PRBS 신호가 차동신호 전송선을 전파할 때, 신호선 한쪽 내부에 25 ps 지연이 발생한 경우에 대하여 수신 파형을 임의로 시뮬레이션



[그림 1] 고속 PCB를 위한 차동신호 전송선 기반 고속 인터커넥트

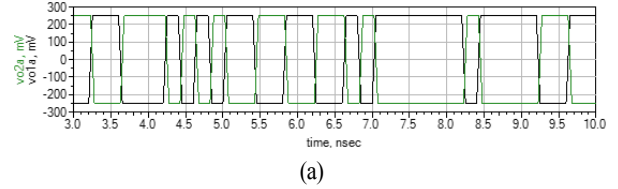


[그림 2] 차동신호 전송선 기반 고속 인터커넥트 내 공통모드 노이즈 발생 및 문제점

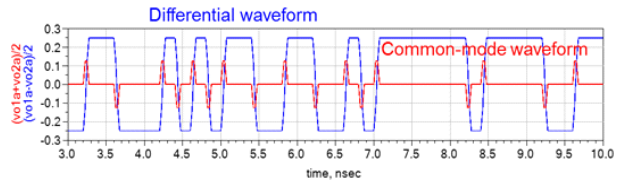
한 것이다. 그래프의 녹색선은 + 신호를, 검은색은 - 신호를 뜻한다. 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 한 쪽 신호선에만 발생한 25 ps 지연으로 인하여 두 신호가 교차하는 부분의 세로축 전압이 0이 아니게 된다. 이때 수신부에서 복원하는 차동신호는 [그림 3] (b)에 청색 그래프이고, 공통모드 노이즈는 적색 그래프이다. 공통모드 노이즈가 임펄스 형태로 발생하며, 시간축에 대하여 임의의 간격(PRBS 형태)으로 발생하게 된다. 수신된 차동신호와 공통모드 노이즈의 주파수 영역 특성을 살펴보면 [그림 3] (c), (d)와 같다. 그림에서 보는 것처럼 고주파 영역에서 GHz 이상의 광대역 주파수 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

이런 광대역 고주파 공통모드 노이즈의 경우, 기존의 공통모드 초크를 이용하여 억제하는 방식에는 한계가 있다. PCB 상에 실장하는 방식인 기존의 공통모드 초크의 경우, 신호 전파 경로상에 존재하는 기생성분으로 인하여 기가헤르츠 이상에서는 효율적인 노이즈 감쇠가 어렵다. 따라서 광대역 고주파 노이즈를 효율적이고, 경제적으로 저감시키기 위한 연구가 필요하게 되었으며, 이를 위해서 PCB 금속면에 패턴을 형성하고, 인터커넥트 자체가 노이즈 필터링 특성을 가지게 되는 방법을 이용하여 공통모드 노이즈를 저감시키려는 다수의 연구가 진행되고 있다.

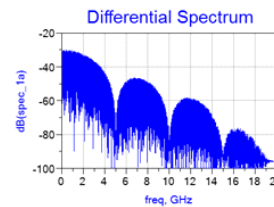
### Ⅲ. 공통모드 노이즈 저감 연구 동향



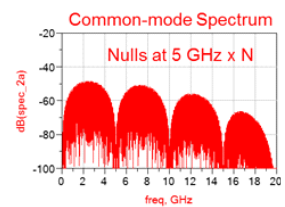
(a)



(b)



(c)



(d)

[그림 3] 미소 불균형 (intra-pair skew: 25 ps)으로 인하여 발생하는 공통모드 노이즈 시뮬레이션 결과 예시

차동신호 전송선 기반 고속 인터커넥트의 광대역 고주파 공통모드 노이즈 저감 연구는 다음과 같은 조건을 만족할수록 진행되고 있다.

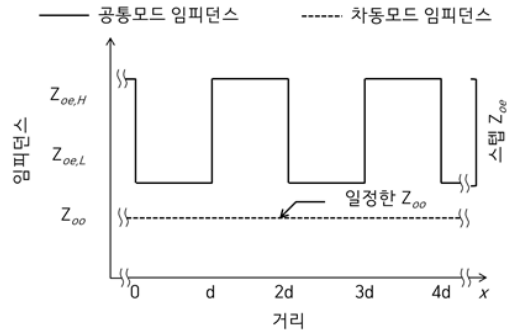
- 공통모드 노이즈 감쇠 대역의 광대역화: 고속 인터커넥트는 기가헤르츠(GHz) 이상의 데이터 전송속도를 가지며 이로 인해서 발생하는 공통모드 노이즈 역시 수 GHz 대역에 이르는 광범위한 주파수 성분을 가지고 있다. 따라서 고주파 대역에서 GHz 이상의 충분히 넓은 감쇠 대역 폭이 필요하다.
- 최소화 된 차동신호 전달 특성 왜곡: 노이즈 저감 구조가 고속 인터커넥트의 원래 목적인 차동 신호 전송에 영향을 주어서는 안 된다. 따라서 차동신호 전달특성을 왜곡하는 것은 최소화 되어야 한다.
- 다층구조 적용 가능: 고속 인터커넥트는 다층 구조의 패키지나 보드에서 사용되기 때문에, 노이즈 저감 구조의 특성이 다층 구조에서 저하되지 않아야 한다.
- 다중 신호선 적용 가능: 고속 인터커넥트는 다수의 차동

신호 전송선 쌍(multiple lanes)으로 구성된다. 따라서 단일 차동신호 인터커넥트(일대일 대응)가 아닌 다수의 인터커넥트(일대다 대응)에 동시 적용이 가능할수록 유리한 구조이다.

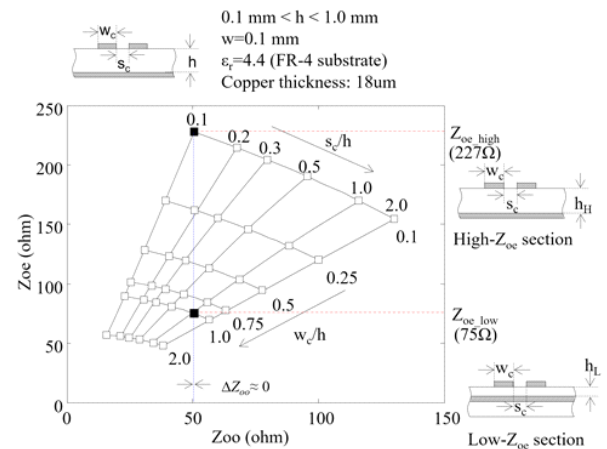
- 고밀도 구현 가능: 노이즈 저감 구조가 실용적으로 사용되기 위해서는 인터커넥트의 고밀도 구현이 가능해야 한다. 즉, 인터커넥트 신호 전송 방향과 수직인 방향으로 노이즈 저감 구조가 차지하는 면적이 적을수록 고밀도 구현에 유리하다.

이런 목표를 달성하기 위하여 많은 연구들이 이루어지고 있다<sup>[3],[7],[8]~[16]</sup>. 최근 연구의 접근 방식을 외형적 특징을 기준으로 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 우선 첫 번째는 마이크로스트립 형태의 차동 신호선 자체에 변화를 주는 것이다. 참고문헌<sup>[13],[14]</sup>에서 볼 수 있듯이, 결합된 마이크로스트립 선로의 간격을 물결모양으로 변화시켜서 높은 공통모드 임피던스를 가지는 영역과 낮은 공통모드 임피던스를 가지는 영역을 구현한다. 공통모드 임피던스가 주기적으로 고/저를 반복함으로써 스텝 임피던스 공진기를 형성한다. 또, 다른 방법은 차동신호 전송선 아래에 위치하는 접지면에 특정 패턴을 식각하는 것이다<sup>[7]</sup>. 여기서 특정 패턴이란 차동모드에 대해서는 영향이 적고 공통모드의 경우, LC 공진기로 동작하는 것을 말한다. 접지면에 식각을 하기 때문에 Defected Ground Structure(DGS)로 불리기도 한다. 또, 다른 방식은 서로 다른 층에 배치된 접지면 패치를 이용하여 스텝 임피던스 구조를 형성하는 방법이다<sup>[16]</sup>. 공통모드 임피던스의 값을 차동신호 전송선과 접지면 사이의 거리로 조절하는 방식이다. 접지면 패치가 배선층을 달리하여 번갈아 위치함으로써 공통모드 임피던스의 고/저를 형성하는 것이다. 이때, 차동신호 전달특성 왜곡을 최소화하기 위해서 차동모드 임피던스는 일정한 값을 유지하도록 한다. 그림 4를 살펴보면, 신호 전파 방향에 대해서 일정한 차동모드 임피던스와 스텝 특성을 가지는 차동모드 임피던스 그래프를 확인할 수 있다.

[그림 5]는 앞에서 제시한 결합형 마이크로스트립 선로를 이용하여 스텝 임피던스 공진 구조를 설계하기 위한 차동모드/공통모드 임피던스 그래프 예시를 보여준다. 전송선을 설계하기 위하여 필요한 구조 변수는  $S_c$ ,  $W_c$ ,  $h$ 로 주어지



[그림 4] 스텝 임피던스 공진기를 이용하는 방식의 모드별 임피던스 특성



[그림 5] 결합형 마이크로스트립(coupled microstrip) 선로의 스텝 임피던스 공진기 설계를 위한 차동/공통 모드 임피던스 그래프

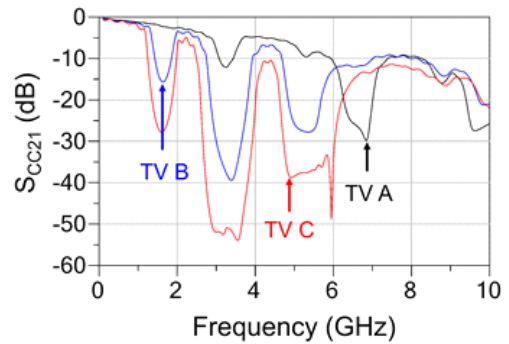
는데, 차동 모드 임피던스를 동일하게 유지하면서 공통모드 임피던스는 고/저의 특성을 갖도록 설계할 수 있는 값이 그래프에서 제시되어 있다. 그림을 통해서 알 수 있는 것처럼, 일정한 차동모드 임피던스 값을 가지면서 스텝형 공통모드 임피던스 값을 가지는 경우는 제작 공정을 고려하게 되면 다소 제한적인 경우의 수를 갖는다.

#### IV. 공통모드 노이즈 저감 구조 소개

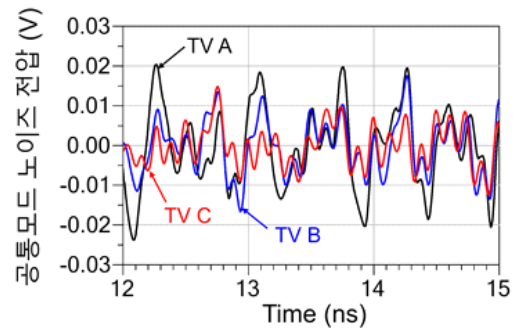
앞서 언급한 유한한 경우의 수에 대한 문제를 해결하기

위하여 신호선의 폭을 변경하는 방식을 추가로 적용할 수 있다. [그림 6]은 스텝 임피던스 구조를 적용한 차동 신호 지연선로를 보여준다. 미앤더 형태 차동 신호 지연선로는 차동 신호 채널 간 시간 차이(skew)를 보상하기 위하여 흔히 사용되는 구조이다. 이 구조는 시간 차이를 손쉽게 보상할 수 있는 구조이지만, 공통모드 노이즈를 유발하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 차동 신호 지연선로에 스텝 임피던스 구조를 적용할 수 있는데, [그림 6]에는 일반적인 지연선로 (TV A), 선로 폭을 이용하여 스텝 임피던스를 구현한 경우 (TV B), 그리고 파형 접지면을 적용하여 스텝 임피던스 특성을 향상시킨 지연선로 구조(TV C)를 보여주고 있다.

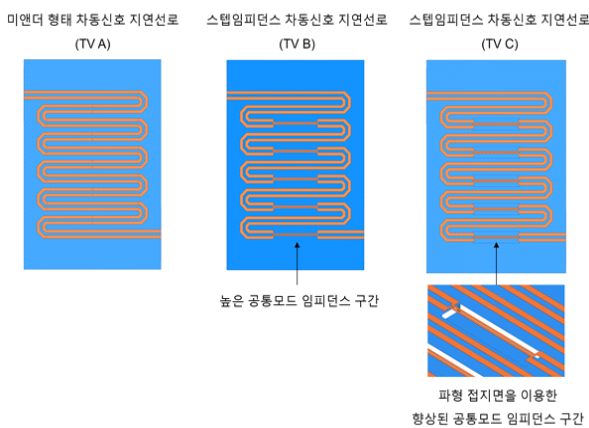
세 가지 TV의 공통모드 노이즈 감쇠 특성과 차동 신호 전달 특성을 시뮬레이션을 통하여 확인해 볼 수 있다. [그림 7]은 각 TV별 SCC21 시뮬레이션 결과이다. 그래프에서 알 수 있는 것처럼 스텝 임피던스 구조를 적용했을 때, 공통모드 노이즈가 감쇠될 것을 예측할 수 있다. 특히 파형 접지면을 적용하여 공통모드 임피던스 차이를 향상시킨 구조(TV C)는 공통모드 노이즈 감쇠 특성도 향상된 것을 알 수 있다. [그림 7]에서는 주파수 영역에서 감쇠 특성을 검증하였고, [그림 8]에서는 시간 영역에서 노이즈 감쇠 특성을 확인할 수 있다. 각 TV의 입력에 6 Gbps의 PRBS 신호를 인가하였을 때, 출력단에서 발생하는 공통모드 노이즈를 시뮬레이션한 결과가 [그림 8]에 도시되고 있다. 검은색 그래프는 일반적인 미앤더 형태 지연 선로에서 발생하는 공통모드 노이즈이다. 청색 그래프는 선로 폭을 이용한 스텝임피던스 지연선



[그림 7] 각 TV별  $S_{CC21}$  시뮬레이션 결과. 스텝 임피던스 구조를 통한 공통모드 노이즈 감쇠 효과를 주파수 영역에서 검증



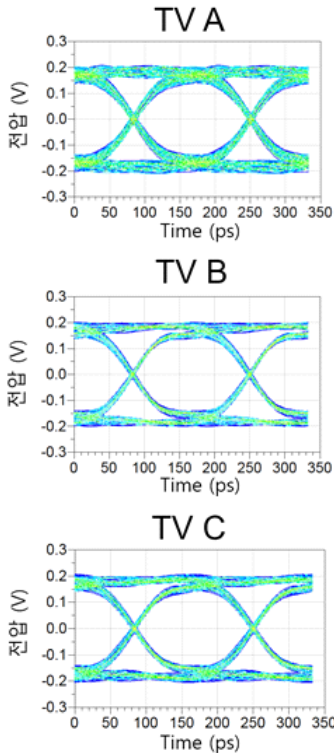
[그림 8] 6 Gbps 신호를 인가했을 때 발생하는 각 TV별 공통모드 노이즈 전압. 파형 접지면 구조를 이용한 스텝 임피던스 차동 신호선의 노이즈 저감 효과를 시간영역에서 검증



[그림 6] 스텝 임피던스 공진 구조 기반 차동 신호 전송선

로 구조를 나타내고, 적색 그래프는 파형 접지면 방식을 적용한 지연선로에서 발생하는 공통모드 노이즈이다. 스텝 임피던스 구조를 적용하였을 경우, 공통모드 노이즈가 크게 감쇠된 것을 확인할 수 있다. 공통모드 노이즈 감쇠와 더불어 중요한 것은 차동 신호 왜곡이 최소화되어야 하는 것이다. 이것을 검증하기 위하여 출력단에서 수신되는 신호의 eye-diagram을 시뮬레이션하였다. [그림 9]는 각 TV별 수신되는 신호의 eye-diagram을 보여주고 있으며, 차동 신호 전달 특성이 왜곡되지 않음을 알 수 있다.

본 장에서는 스텝 임피던스 구조를 차동 신호 전송선로에 적용하여 차동 신호 왜곡 없이 공통모드 노이즈를 감쇠할 수 있음을 알아보았다.



[그림 9] 각 TV별 6 Gbps 신호를 인가했을 때 출력되는 신호의 eye-diagram. 파형 접지면을 이용했을 때에도 차동신호 왜곡이 최소화 됨을 검증

### V. 결 론

차동신호선 기반 고속 인터커넥트는 고성능 컴퓨팅(High-Performance Computing; HPC) 시스템 플랫폼 등을 설계하는데 있어서 핵심적으로 필요한 기술이다. 하지만 전송속도의 급격한 증가로 인하여 공통모드 노이즈 문제가 심각해지고 있고, 이를 해결하기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히 인터커넥트 자체가 노이즈 감쇠 특성을 가지는 구조에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 현재의 연구들은 광대역 노이즈 감쇠, 차동신호 왜곡 최소화, 다층 구조 적용, 고밀도 집적화 가능 여부 등의 목표를 제각기 달성한 연구만 있을 뿐, 고성능과 실용성을 모두 만족하는 연구는 미미한 실정이다. 따라서 앞으로의 연구는 노이즈 저감 특성의 고도화뿐만 아니라, 실용성에도 초점을 맞추어 진행될 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. Archambeault, J. C. Diepenbrock, and S. Connor, "EMI emissions from mismatches in high speed differential signal traces and cables", *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 1-6, Jul. 2007.
- [2] F. de Paulis, B. Archambeault, M. H. Nisanci, S. Connor, and A. Orlandi, "Miniaturization of common mode filter based on EBG patch resonance", *Proc. IEC DesignCon 2012*, Santa Clara, USA, Jan. 2012.
- [3] F. De Paulis, M. Cracraft, D. Di Febo, M. H. Nisanci, S. Connor, B. Archambeault, and A. Orlandi, "EBG-based common-mode microstrip and stripline filters: Experimental investigation of performances and crosstalk", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(5), pp. 996-1004, 2015.
- [4] A. Jaze, B. Archambeault, and S. Connor, "Differential mode to common mode conversion on differential signal vias due to asymmetric GND via configurations", *2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 735-740, 2013.
- [5] B. Archambeault, "Predicting and controlling common mode noise from high speed differential signals", *Presentation*, May 2014.
- [6] J. H. Choi, P. W. C. Hon, and T. Itoh, "Dispersion analysis and design of planar electromagnetic bandgap ground plane for broadband commonmode suppression", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 24(11), pp. 772-774, Nov. 2014.
- [7] S.-J. Wu, C.-H. Tsai, T.-L. Wu, and T. Itoh, "A novel wide-band common-mode suppression filter for GHz differential signals using coupled patterned ground structure", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 57(4), pp. 848-855, 2009.
- [8] Intel, "USB 3.0\* radio frequency interference impact on 2.4 GHz wireless devices", *White Paper*, Apr. 2012.
- [9] EE Times, Intel Metamaterials Breakthrough, Jan. 2016, available on [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1328710](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1328710)
- [10] Y.-J. Lin, Y.-C. Tseng, C.-Y. Hsiao, and T.-L. Wu, "A SMD-



type filter solution for EMI/RFI mitigation on high-speed digital interfaces and its application", *APEMC 2015*, May 2015.

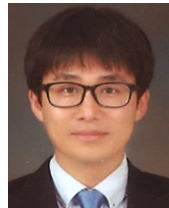
- [11] C.-Y. Hsiao, C.-H. Cheng, and T.-L. Wu, "A new broadband common-mode noise absorption circuit for high-speed differential digital systems", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(6), pp. 1894-1901, 2015.
- [12] T.-W. Weng, C.-H. Tsai, C.-H. Chen, D.-H. Han, and T.-L. Wu, "Synthesis model and design of a common-mode band-stop filter (CM-BSF) with an all-pass characteristic for high-speed differential signals", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62(8), pp. 1647-1656, 2014.
- [13] P. Vélez, J. Bonache, and F. Martín, "Differential microstrip lines with common-mode suppression based on electromagnetic band-gaps (EBGs)", *IEEE Antennas and Wireless*

*Propagation Letters*, 14, pp. 40-43, Sep. 2014.

- [14] P. Velez, M. Valero, L. Su, J. Naqui, J. Mata-Contreras, J. Bonache, and F. Martin, "Differential microstrip lines with wideband common-mode rejection based on chirped-EBGs", *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2015 International Conference*, pp. 855-858, 2015.
- [15] S. Oh, J. Jeong, and J. Lee, "Wideband common noise suppression filter based on coupled microstrip lines and edge-coupled coplanar waveguides", *IET Electronics Letters*, 51(25), pp. 2123, 2015.
- [16] M. Kim, "Periodically corrugated reference planes for common-mode noise suppression in high-speed differential signals", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(2), pp. 619-622, 2016.

≡ 필자소개 ≡

김 명 회



2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2012년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2005년~2008년: 국방과학연구소 연구원

2011년: Silicon Image(CA, USA) 방문연구원

2012년~2015년: 한국전자통신연구원 선임연구원

2015년 9월~현재: 한경대학교 조교수

[주 관심분야] EMI/EMC, 고속 패키지/인터커넥트 설계, Signal/Power Integrity