

TVS Diode에 의한 안테나 무선감도 저하 분석

Degradation of RF Receiver Sensitivity Due to TVS Diode

황 윤 재 · 박 제 광* · 육 종 관

Yoon-Jae Hwang · Je-Kwang Park* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 이동통신 기기에서 ESD(ElectroStatic Discharge) 보호소자로 흔히 사용되는 TVS(Transient Voltage Suppressor) diode로 야기되는 잡음 신호가 안테나 무선감도 저하에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 다양한 기능을 가진 스마트폰의 경우, 좁은 실장 공간으로 인해 스피커가 안테나 영역 근처에 존재할 수 있고, 스피커로 유입되는 ESD로부터 오디오 증폭기를 보호하기 위한 TVS가 안테나 GND로 사용되어지는 영역에 위치할 수 있다. 스피커를 구동시키는 class-D 증폭기에서 발생하는 디지털 오디오 신호와 안테나에서 커플링되어 스피커로 전달되어진 CDMA(Code Division Multiple Access) RF(Radio Frequency) 통신 신호가 TVS에 의해 믹싱되고, 안테나의 GND로 누설되어 안테나 무선감도를 저하시키는 현상에 대해 실험적 분석후 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이를 통해 비선형적인 ESD 보호소자가 신호의 원치 않는 결합통로가 되는 문제를 사전에 차단할 수 있을 것으로 보인다.

Abstract

In this paper, a TVS diode which is commonly used as a ESD protector in wireless communication devices could cause antenna wireless sensitivity to decrease has been analyzed. When a smartphone doesn't have enough space to place many components, there would be its speaker near antenna area. In order to protect ESD coming through the speaker there also could be a TVS within antenna GND area. Digital audio signal which was sent to speaker and CDMA RF communication signal coupled from antenna was mixed by TVS. And this leakage current running through TVS resulted in decrease of antenna wireless sensitivity. The results of various experiments can be explained using circuit simulation. Following works will give us some insights that can reduce unwanted summation of digital and RF signal due to nonlinearity of ESD protectors.

Key words : ESD, TVS Diode, Antenna Wireless Sensitivity, Digital Signal, Communication RF Signal

I. 서 론

스마트폰을 포함한 이동통신 기기들의 성능이 향상될수록 이에 상응하는 AP(Application Processor)의 clock 및 high speed digital interface(USB3.0/MHL)들의 속도 또한 증가하고 있다.

CPU clock 속도의 급속한 증가에 따라 PCB(Printed Circuit Board)에서 EMI(ElectroMagnetic Immunity)/EMC(ElectroMagnetic Compatibility) 이슈에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. Clock의 체배 성분이 receiver 밴드 안으로 들어와 noise로 작용하여 감도를 저하시키는 현상은 매우 흔히 볼 수 있다. Return

연세대학교 전자공학과(School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*LG전자(LG Electronics)

· Manuscript received June 21, 2013 ; Revised August 29, 2013 ; Accepted September 2, 2013. (ID No. 20130621-058)

· Corresponding Author : Jong-Gwan Yook (e-mail : jgyook@yonsei.ac.kr)

current의 길이도 문제를 발생시키고, differential line에서 발생하는 common mode 신호가 EMI에 큰 영향을 주기도 한다. PDN(Power Distribution Network) 역시 chipset 및 제품 전체의 성능에 영향을 미치고 있고, 발열 문제도 더욱더 증가하고 있다. PI(Power Integrity), SI(Signal Integrity) 그리고 EMC가 복합적으로 맞물려 있는 문제에 대한 해결도 필요한 시점이다^[1]. EMC의 경우 동일한 digital 부품과 회로를 사용하더라도 PCB layout에 따라 큰 차이를 보여주는 논문도 있다^[2]. LNA(Low Noise Amplifier)의 비선형성으로 인해 원치 않는 신호가 receiver 밴드 안으로 들어와 noise를 기본적으로 발생시켜 감도 저하를 유발하며, CDMA와 같은 FDD(Frequency Division Duplexing) 시스템에서는 강한 Tx(transmitter) power가 isolation 부족으로 Rx(receiver) 경로로 유입되어 감도 저하현상을 발생하는 일이 흔하게 발생한다. 이를 보통 Tx Desensitization이라고 부른다^[3].

앞서 언급한 바와 같이 대다수의 논문과 책들이 디지털 신호에 의한 EMI/EMC에 주로 초점이 맞추어져 있거나, 디지털 신호 clock의 체배 성분이 Rx 밴드대로 들어와 무선감도를 저하시키는 현상에만 집중한다. 한편으로는 Tx power에 의한 무선감도 저하에만 초점이 맞추어져 있다. 본 논문에서는 디지털 신호와 RF 통신 신호가 ESD 보호 소자로 사용되는 TVS diode에 의해 안테나 GND로 도통되면서 무선감도를 저하시키는 현상에 대해 분석한다. 다양한 기능을 가진 스마트폰의 경우, 좁은 실장 영역으로 인해 안테나 근처에 스피커가 위치할 수 있으며, 이 스피커를 타고 들어오는 ESD로부터 오디오 증폭기를 보호하기 위한 TVS diode가 존재한다. 이와 같이 좁은 실장 구조에 의해, 본 논문에서 언급할 class-D 오디오 증폭기의 PWM(Pulse Width Modulation) 신호로 대표되는 디지털 신호와 CDMA2000 1x 통신 신호로 대표되는 RF 신호가 공존할 가능성이 높아진다. 공존하는 두 신호들이 ESD 보호 소자의 비선형성에 의해 결합되어 제품상의 오동작을 유발할 수 있다. ESD 보호 소자는 다양한 형태로 회로 상에서 사용되고 있으므로 본 논문에서와 같이 ESD 보호 소자가 신호들의 원치 않는 결합통로가 되는 경우들에 대한 분석을 통해 chipset, PCB 혹은 제품상의 오동작에 대한 새로운 접근법을 제시할 수 있다.

II. 무선감도 저하 현상에 대한 실험적 판단

검토한 스마트폰의 구조는 그림 1과 같다. 폰 하단에 스피커를 위한 구멍이 있으며, 그 밑에 안테나가 위치한다. 그림 2는 안테나로부터 스피커에 field가 커플링되는 현상을 보여주고 있으며, 이는 상용 시뮬레이터를 이용하여 검증하였다^[5]. 그림 3은 스마트폰 구조에 대한 블록 다이어그램이다. 스피커는 class-D 오디오 증폭기로부터 디지털 오디오 신호를 받고, PIFA(Planar Inverted F Antenna)의 GND에 오디오 증폭기를 위한 ESD 보호용 TVS diode가 PIFA 근처에 위치하며, TVS의 GND는 안테나 GND에 붙어 있는 상태이다. 디지털 오디오 신호와 스피커로 커플링된 안테나 Tx 신호가 TVS의 GND를 통해 안테나 GND로 누설되었고, 이로 인해 표 1의 Case 1처럼 스피커가 on 상태(아무런 신호가 실리지 않은 상태)만 되어도 제품이 사용되어지는 북미 DCN 밴드

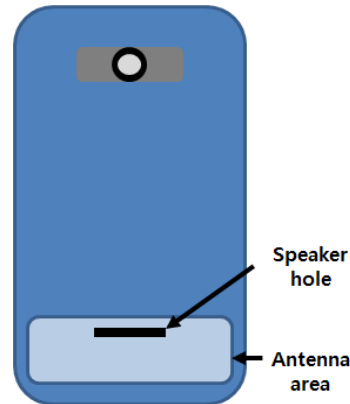


그림 1. 검토된 스마트폰 후면
Fig. 1. Rear case of the analyzed smartphone.

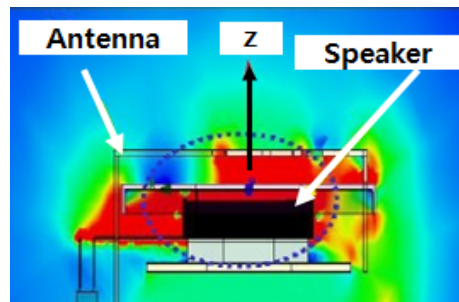


그림 2. 안테나로부터 스피커로 유기되는 E-field
Fig. 2. Coupled E-field from antenna to speaker.

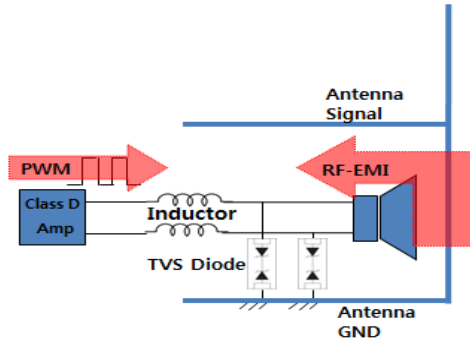


그림 3. 안테나 근처 스마트폰 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of smartphone near antenna.

표 1. 케이스별 무선감도 저하 수준
Table 1. Degradation of receiver sensitivity in different cases.

	Receiver sensitivity Δ @ speaker ON	Receiver sensitivity Δ @ speaker OFF
Case 1	DCN : -14 dB PCS : -6 dB	無
Case 2	無	無
Case 3	無	無
Case 4	無	無

(Reverse Link: 869~894 MHz)에서 off 상태보다 14 dB, PCS 밴드(1,930~1,990 MHz)에선 6 dB 무선감도 저하현상이 실험적으로 발생하였다. 본 실험에서 사용된 class-D 오디오 증폭기는 TI社의 TPA2028D1으로 폰에서 사용되는 기준 전원 3.7 V에서 스피커가 8 ohm일 때 710 mW 출력값을 갖고, switching 주파수는 300 kHz를 갖는다. Inductor는 82 nH 값을 가지고 TVS diode는 Protek社의 PRSB6.8C로 5.7 V minimum breakdown voltage를 갖는다. Varistor는 Innchips社의 ICVS0505500으로 9~16 V의 varistor voltage를 갖는다.

그림 4의 Case 1은 무선감도 저하 현상이 발생한 기본 회로를 보여주고 있다. Case 2는 TVS의 위치를 inductor를 중심으로 바꾸었을 때 inductor에 의해 RF 신호가 영향받는지 보기 위한 회로이다. Case 3, 4는 breakdown voltage가 상이한 또다른 종류의 ESD 보호소자인 varistor로 바꾸었을 경우, 어떠한 결과가 발생하는지를 보기 위한 회로이다. 테스트 결과, Case 2~4 모두 감도 저하 현상이 발생하지 않았다. 또한,

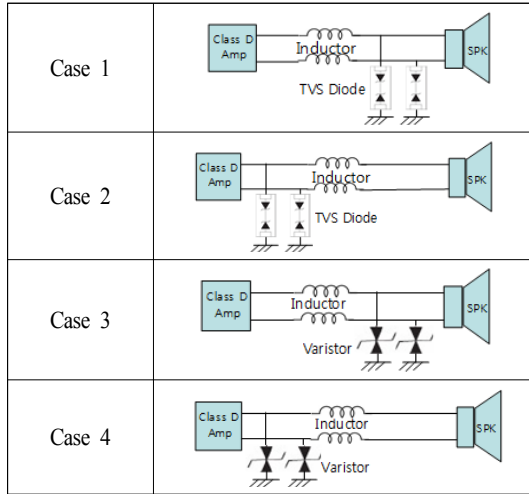


그림 4. TVS diode/varistor 위치 변경 블록 다이어그램
Fig 4. Block diagrams of TVS diode/varistor in different cases.

표 2. DCN Tx 출력 vs 무선감도 저하 수준
Table 2. DCN Tx power vs sensitivity degradation.

DCN Tx 출력 (dBm)	무선감도 저하 (dB)
24	-14
23	-3
22	無
21	無

표 2와 같이 계측장비를 이용하여 강제로 폰의 DCN Tx 출력을 각각 0 dbm, 10 dBm, 20 dBm, 24 dBm (max power)로 바꾸어가며 무선감도를 측정하여 보면, 최대 출력에 가까워질수록 감도 저하현상이 더 심하게 발생함을 알 수 있었다. 그림 5와 같이 안테나 패턴에 근접한 스피커를 측면으로 격리하여 측정하면 감도 저하 현상이 발생하지 않는다는 것이 실험적으로 관측되었다. 이를 통해서 그림 2의 시뮬레이션의 가정인 인접한 스피커로 안테나 신호가 커플링되는 것이 옳음을 실험적으로 확인할 수 있었다. TVS를 제거하여 측정하거나 TVS와 등가 capacitance 15 pF를 갖는 capacitor로 교체하여 측정하면 감도 저하 현상이 발생하지 않았다. 또한 100 pF를 갖는 capacitor로 교체하여도 감도 저하는 없었다. 이는 TVS의 capacitance에 의해 누설 전류가 발생하지 않는 것을 반증한다.

진행된 각각의 실험에 대한 결과를 토대로 다음

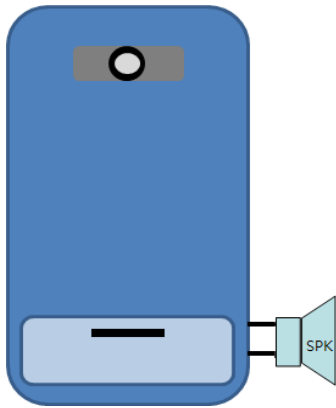


그림 5. 스피커를 안테나로부터 격리
Fig. 5. Isolation of speaker from antenna.

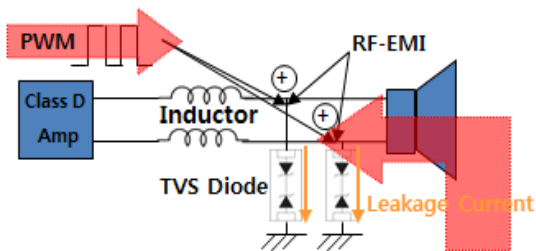


그림 6. TVS diode에 의한 누설 전류 발생
Fig. 6. Leakage current by TVS diode.

과 같은 판단을 내릴 수 있다. 그림 6을 보면 PWM 신호가 최대일 때와 RF 신호가 최대일 때 TVS diode가 turn on이 되면서 mixing된 신호가 TVS를 통해 antenna GND로 전달되는 경로가 생긴다. 안테나 GND로 전달된 누설 신호는 noise floor를 상승시켜 S/N(signal to noise ratio)를 저하시키고, 무선감도 저하 현상을 발생시킴을 알 수 있다. 스피커가 꺼져 있는 상태에선 PWM 신호가 존재하지 않으므로 저하 현상이 발생하지 않고, 그림 4의 Case 2와 같이 TVS가 inductor 뒤쪽에 있을 경우에는 inductor가 그림 7처럼 RF choke로 작용하게 되어 RF-EMI를 약화시켜 저하 현상이 발생하지 않게 된다. 그림 8은 일반적인 TVS diode와 varistor의 I~V 특성을 보여주며, V_{br} (breakdown voltage @1 mA)가 높은 varistor가 쉽게 turn on 되지 않음을 알 수 있다. 예를 들면, TVS와 varistor의 V_{br} 이 각각 6.5 V, 12.5 V일 경우, PWM 신호의 최대점과 RF 신호의 최대점이 결합되어 9 V가 될 경우, TVS는 turn on이 되어 누설 전류가 흐르

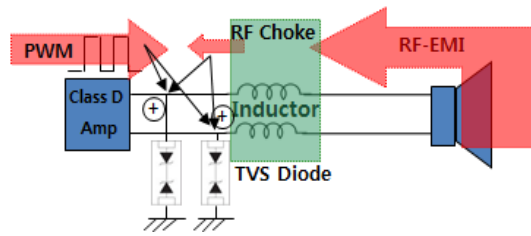


그림 7. Inductor에 의한 RF choking
Fig. 7. RF choking by inductor.

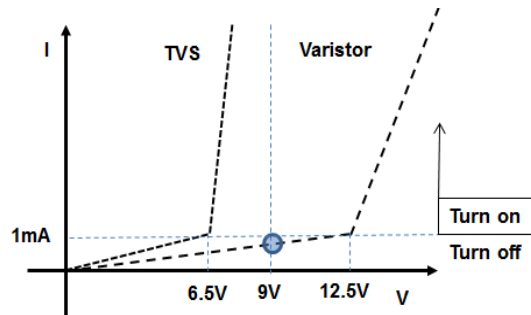


그림 8. TVS diode vs varistor I-V 일반적 특성
Fig. 8. TVS diode vs varistor I-V characteristic.

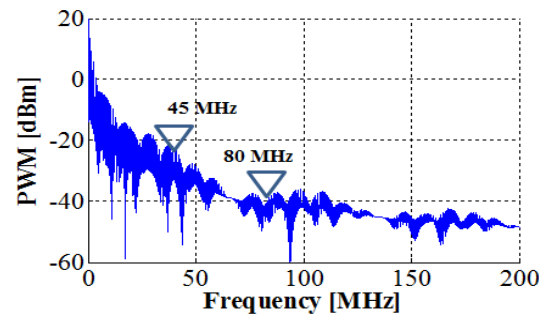


그림 9. PWM 주파수 특성
Fig. 9. PWM spectrum.

지만, varistor는 turn off가 되어 누설 전류가 흐르지 않는다. 표 1의 Case 1에서 PCS 대역보다 DCN 대역에서 훨씬 큰 폭으로 감도 저하가 발생하는 이유는 그림 9처럼 PWM 신호의 DCN 밴드에 영향을 주는 주파수 성분이 PCS 밴드에 영향을 주는 주파수 성분보다 크기 때문이다. 디지털 신호의 보다 큰 주파수 성분이 믹싱되어 PCS 대역보다 DCN 대역에서 누설 전류가 크게 흐르게 되고, noise floor가 더 상승하게 되어 더 큰 감도 저하를 유발하게 된다.

그림 10은 diode의 정류 작용에 의한 믹싱 동작을

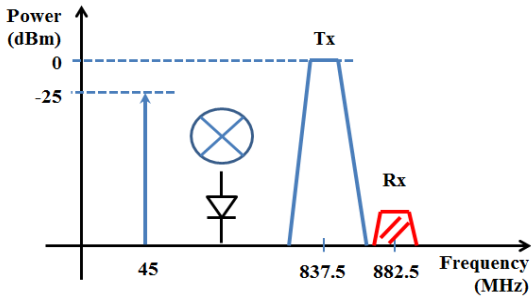


그림 10. Diode 믹싱 동작
Fig. 10. Diode mixing operation.

보여준다^[4]. PWM 신호를 주파수 변환하면 광대역의 주파수 성분이 존재하고, 이 신호중에서 DCN Tx 신호와 Rx 신호의 이격 거리인 45 MHz의 신호가 존재할 수 있다. 최대출력의 강한 Tx 신호가 45 MHz PWM 신호에 믹싱이 되면, 원치 않는 이 신호가 Rx 신호에 잡음으로 작용하여 S/N를 저하시켜 안테나 무선 감도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 45 MHz를 중심으로 CDMA 대역폭 1.25 MHz만큼 PWM 신호의 주파수 성분이 더 존재하므로 더 큰 문제가 야기될 수 있다.

III. 회로 시뮬레이션을 통한 실험 검증

그림 11은 검토된 구조에 대해 상용 시뮬레이터^[6]을 사용하여 구성된 회로도이다. TPA2028D1 class-D 오디오 증폭기의 enable 상태에서의 기본 출력은 $V_{high}=3.7$ V, $V_{low}=-3.7$ V, rise/fall time은 15 nsec, duty cycle은 50 %, switching 주파수 300 kHz이다. 시뮬레이터에 있는 디지털 파형 생성기를 이용하여 그림 12(a)처럼 디지털 오디오 신호를 만들었다. RF-EMI는 시뮬레이터의 library에 있는 CDMA_IS95_Reverse에 대한 carrier power 정보를 바탕으로 정현파를 생성하였다. 그림 12(b)는 DCN Tx 중간 주파수 837.5 MHz, 출력 24 dBm일 때 파형이다. 이것을 6 V의 크기를 가진 정현파로 설정하였다. 스피커에 커플링되는 Tx 출력은 이보다 작게 형성될 것이지만, 해석의 편의를 위해서 상기와 같이 설정하였다. Inductor는 스마트폰에서 일반적으로 사용되는 82 nH 값을 사용했으며, 이 때 인덕터 내부 저항은 1.4 ohm이었다. TVS diode는 시뮬레이터 내부의 diode model을 사용하였고, $V_{br}=5.7$ V, $I_{br}=1$ mA로 설정하였다.

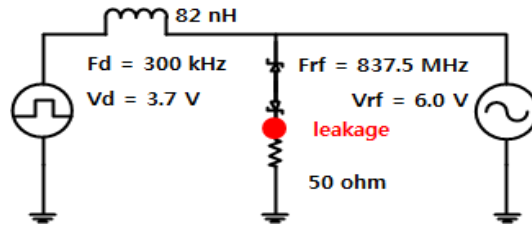


그림 11. 상용 시뮬레이터로 구성된 등가 회로
Fig. 11. Equivalent circuit of ADS.

transient 해석을 위해서 stoptime=10 us, steptime=0.5 ns로 하였고, 해석후 푸리에 변환(Fourier Transform)을 통해 주파수 정보를 얻을 수 있었다.

3-1 TVS + DCN 출력 24 dBm

그림 12(c)를 보면 TVS가 turn on이 되어 흐르는 누설 전류를 확인할 수 있다. 누설된 전류의 주파수 특성을 살펴 보면 DCN Rx 밴드에도 누설 전류가 존재함을 알 수 있다. 일반적인 스마트폰의 최저 무선 감도가 -104 dBm 근처임을 감안할 때 그림 12(d)처럼 -85 dBm 수준의 Tx 믹싱 잡음 신호가 안테나 GND에 존재할 경우 S/N을 떨어뜨리고, 안테나 무선 감도 저하 현상을 유발할 것으로 보인다. 그림 13은 디지털 펄스 유무에 따른 Tx 믹싱 잡음 신호 수준의 차이를 명확하게 보여준다. 디지털 펄스가 인가되지 않을 경우 광대역에 걸친 diode의 믹싱이 발생하지 않으므로 noise floor는 낮게 형성되고, 이것은 무선 감도에 영향을 주지 않게 된다.

3-2 TVS + DCN 출력 0 dBm

그림 14(a)는 0 dBm에 상응하는 Tx 파형을 보여준다. 이와 유사한 0.4 V의 정현파를 이용하여 디지털 펄스와 같이 인가했을 때, TVS에 흐르는 누설 전류의 수준이 pA이므로, 이는 누설 전류가 거의 없음을 의미한다. 당연히 이를 주파수로 변환시키면 DCN Rx 밴드에 유기되는 잡음 신호는 없다. 이 때 무선감도 저하 현상은 발생하지 않는다.

3-3 Varistor + DCN 출력 24 dBm

Varistor의 V_{br} 은 12.5 V로 설정하였다. TVS 5.7 V보다 높은 V_{br} 을 가진 varistor의 경우 turn on이 되려

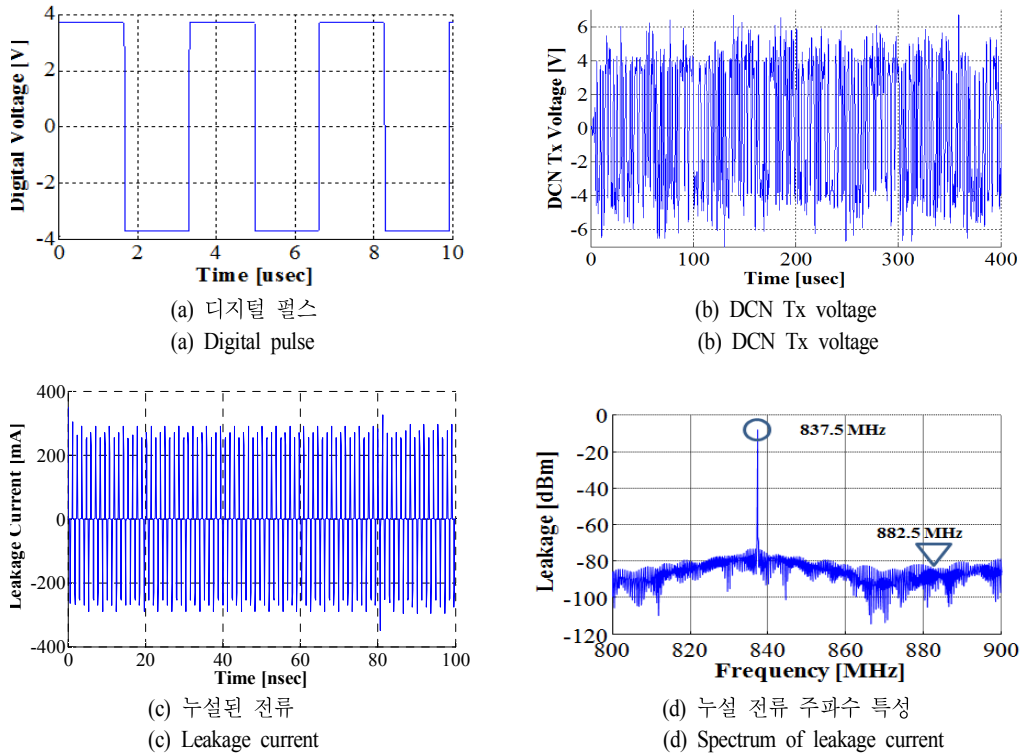


그림 12. DCN Tx 24 dBm 인가시 TVS에 누설된 전류
 Fig. 12. Leakage current through TVS when DCN Tx 24 dBm.

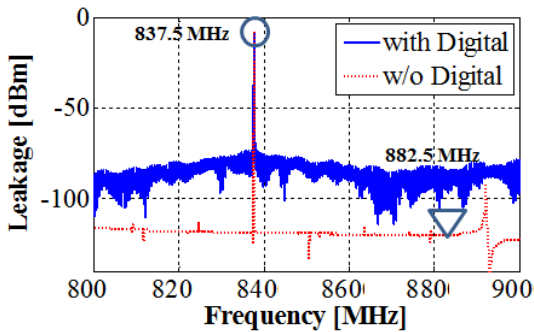


그림 13. 디지털 펄스 유무에 따른 누설 전류 차이
 Fig. 13. Different leakage current on whether having digital pulse or not.

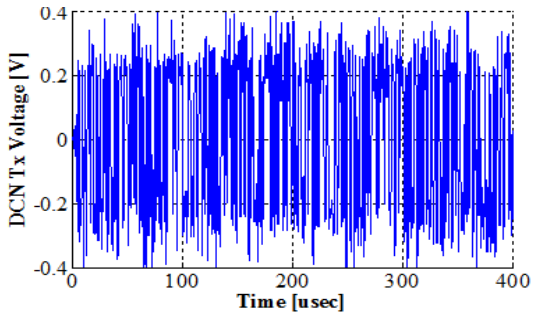
면 훨씬 큰 디지털 펄스와 정현파가 필요하므로 주어진 수준의 신호로는 turn on이 되지 않을 것이다. 따라서 그림 15처럼 varistor에 흐르는 누설 전류는 거의 없다. 이는 TVS를 사용한 상태에서 DCN 대역의 출력이 0 dBm일 때와 마찬가지로 무선감도 저하 현상이 발생하지 않음을 의미한다.

3-4 TVS + PCS 출력 24 dBm

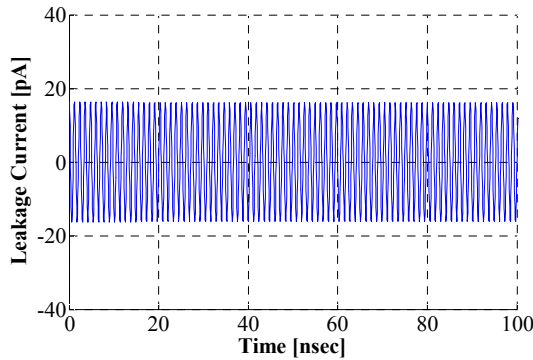
PCS Tx 대역의 중간주파수인 1,880 MHz를 인가할 경우, DCN처럼 그림 16(a)와 같이 TVS에 흐르는 누설 전류를 확인할 수 있다. 그림 16(b)를 보면 광대역에 걸쳐 Tx 신호와 디지털 펄스의 믹싱된 유기 전류가 분포함을 알 수 있다. 관심 있는 PCS 수신 주파수 대역 내에도 -90 dBm 수준의 잡음 신호가 존재하므로 무선감도 저하가 발생할 것으로 예상할 수 있다.

IV. 결 론

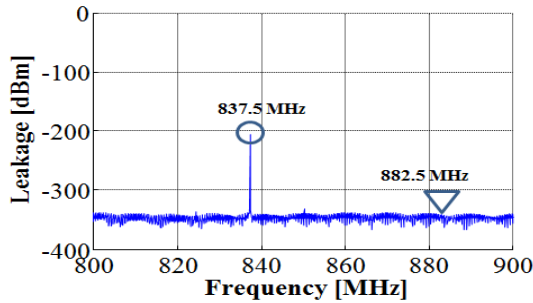
본 논문에서는 ESD 보호소자로 사용되는 TVS diode가 디지털 신호와 RF 통신 신호의 결합통로로 작용하며, 비선형성에 따른 주파수 혼합을 유발하여 안테나 무선감도의 저하를 발생시킬 수 있음을 실험적으로 검토하고, 상용 시뮬레이터를 이용하여 증명하였다. 검토된 스마트폰에서는 기존 TVS보다 V_{br}



(a) DCN Tx voltage
(a) DCN Tx voltage



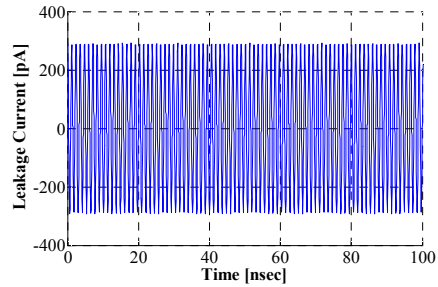
(b) 누설된 전류
(b) Leakage current



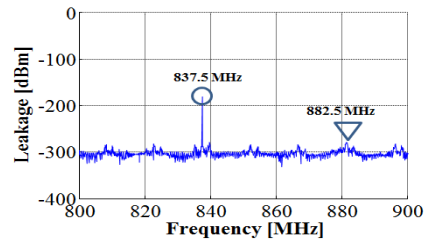
(c) 누설 전류 주파수 특성
(c) Spectrum of leakage current

그림 14. DCN Tx 0 dBm 인가시 TVS에 누설되지 않는 전류
Fig. 14. No leakage current through TVS when DCN Tx 0 dBm.

이 높은 TVS를 사용함으로써 무선감도 저하 현상을 해결할 수 있었다. PCB상의 다양한 장소에서 사용되는 ESD 보호소자에 의해 원치 않는 신호의 결합이 발생할 수 있고, 이로 인한 신호의 왜곡 및 오동작이 발생할 수 있으므로 이에 대한 명확한 분석과 이해를 통해 상기 문제들을 사전에 예방할 수 있을 것

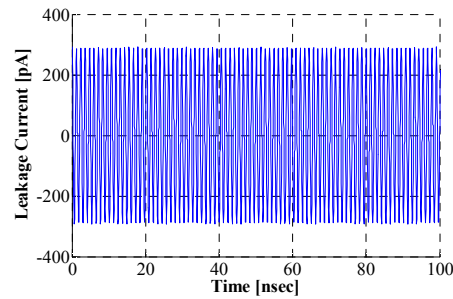


(a) 누설된 전류
(a) Leakage current

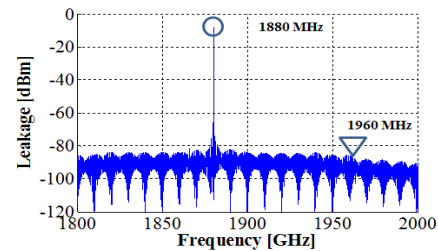


(b) 누설 전류 주파수 특성
(b) Spectrum of leakage current

그림 15. DCN Tx 24 dBm 인가시 varistor에 누설된 전류
Fig. 15. No leakage current through varistor when DCN Tx 24 dBm.



(a) 누설된 전류
(a) Leakage current



(b) 누설 전류 주파수 특성
(b) Spectrum of leakage current

그림 16. PCS Tx 24 dBm 인가시 TVS에 누설된 전류
Fig. 16. Leakage current through TVS when PCS Tx 24 dBm.

으로 보인다.

References

[1] Bruce Archambeault, Colin Brench, and Sam Connor, "Review of printed-circuit-board level EMI/EMC issues and tools", *IEEE Transactions on Electro-Magnetic Compatibility*, vol. 52, no. 2, pp. 455-461, May 2010.

[2] Yang Zhao, Kye Yak See, "A practical approach to EMC education at the undergraduate level", *IEEE Transactions on Education*, vol 47, no. 4, pp. 425-429, Nov. 2004.

[3] B. Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall Inc., pp. 118-122, 1998.

[4] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp. 559-576.

[5] SEMCAD X, Speag, 2011.

[6] Advanced Design System, Agilent, 2009 Update.

황 윤 재



2000년 2월: 연세대학교 기계전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2002년 3월~2004년 5월: 현대시스템 연구원
 2004년 6월~현재: LG전자 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, Computational Electromagnetics, EMI/EMC

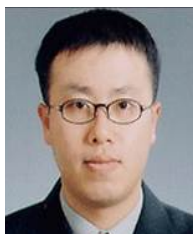
육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월~1998년 9월: University of Michigan Research Fellow

1998년 10월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
 1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
 2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC society)
 [주 관심분야] 마이크로파 시스템 해석 및 설계, 안테나 시스템, RF MEMS, Bio-radar and Sensors, Computational Electromagnetics, EMI/EMC, HEMP

박 제 광



2001년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 3월~현재: LG전자 책임연구원
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, EMI/EMC