삼각형 도체판 장하에 의한 무한 도체 평판 슬릿의 침투 전자파 저감 특성

Reduction Characteristics of Electromagnetic Penetration through a Slit in a Conducting Screen by a Loaded Triangle Plate

조병호 · 이승익* · 김효균** · 김기채**

Byung-Ho Cho · Seung-Ik Lee* · Hyo-Kyun Kim** · Ki-Chai Kim**

요 약

본 논문에서는 무한 도체 평판의 슬릿 부근에 도체판을 부가하여 슬릿으로 침투하는 전자파의 저감 특성을 검토하였다. 이론 해석에는 FDTD 법을 사용하였으며, 부가 도체판의 형상 및 길이, 간격, 두께의 변화에 따른 침투 전계의 특성을 계산하여 부가 도체판의 구조 변화가 침투 전자파의 저감 특성 및 차폐 효과 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과, 부가 도체판의 구조 변화에 따라 차폐 효과, 침투 전계의 특성이 변화하는 것을 관찰할 수 있었고, 침투 전계를 최소화하는 부가 도체판의 최적 구조가 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents the reduction characteristics of electromagnetic penetration through a slit in conducting screen by loaded plate. The FDTD method is used in theoretical analysis. And the characteristics of penetrated electric fields are calculated in terms of length, width, shape, position, and height of the loaded plate to find out how the geometry of plate influences the reduction characteristics of the electromagnetic penetration and shielding effectiveness. The results show that the characteristics of penetrated electric field and shielding effectiveness depend on the geometry of loaded plate. In particular, the optimal geometry of loaded plate which minimize penetrated electric field are verified.

Key words: Electromagnetic Penetration, Penetrated Electric Field, Infinite Conducting Screen, Shielding Effectiveness, Slit

I. 서 론

디지털 기술과 반도체 기술 등의 발달로 전기, 전자 산업은 급속하게 발전하고 있다. 전기, 전자 산업의 발달로 인하여 전기 전자기기는 디지털화, 고속화, 성전력화, 고밀도화, 소형화, 저전력화 되어가고 있으며, 전기 전자기기의 고속

화, 소형화, 저전력화는 전자파 장애(EMI: ElectroMagnetic Interference) 문제를 필연적으로 발생시킨다. 특히, 전기 전자기기에서 열을 방출하기 위한 통풍용 구멍, 입출력선을 위한 커넥터 등으로 인해 전기전자 기기에는 개구면이 형성되어진다. 이러한 개구면(슬릿)을 통하여 장애 전자파가 기기의 내부로부터 방사되며, 외부로부터 장애 전자파 침투문

유라코퍼레이션(YURA Coporation)

*(주)아이스펙(I-Spec Co., Ltd.)

**영남대학교 전기공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

· Manuscript received May 9, 2014 ; Revised June 27, 2014 ; Accepted June 30, 2014. (ID No. 20140509-044)

· Corresponding Author: Ki-Chai Kim (e-mail: kckim@ynu.ac.kr)

체를 야기시켜 기기의 오작동을 유발한다. 무한 도체 평판의 개구로 침투하는 전자파의 침투 문제는 여러 연구자들에 의해 연구되었다^{[1]~[10]}. 연구의 대부분은 외부 파원으로서 평면파 입사를 기초로 하고 있으며, 최근에는 다이폴 파원이 슬릿 부근에 놓인 경우의 전자파 침투에 관한 연구도 보고되어 있다^{[6]~[8]}. 이 중, 참고문헌 [6]에서는 평행 2선 선로를 슬릿에 장하여 리액턴스로 동작하게 하면 슬릿상의 자류 분포가 제어되어 침투 전계를 최소가 되게 할 수 있음을 보이고 있다.

본 논문에서는 무한 도체 평판의 슬릿으로 침투하는 침투 전계의 특성을 제어하기 위해 슬릿 부근에 삼각형 도체판을 장하는 구조를 검토하였다. 중심주파수뿐만 아니라 광대역에 걸쳐서 효과적인 리액턴스 값이 형성되도록 하기 위해 삼각형 도체판을 사용하였다. 삼각형 도체판은 무한 도체 평판과 평행하게 설치하여 참고문헌 [6]의 구조보다 저자세화가 가능한 장점을 가지도록 하였다. 무한 도체 평판의 개구로 침투하는 침투 전자파는 슬릿 개구면상의 전계 분포에 의존하므로 참고문헌 [6]에서 제안된 침투 전계 제어의 원리를 적용하면 침투 전계를 감소시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 개구면 전계 분포를 제어하기 위해 슬릿 부근에 도체판을 장하여 슬릿으로 침투하는 침투 전자파의 크기를 저감할 수 있음을 확인하였다. 또한, 이론 해석의 타당성을 확인하기 위해 차폐 효과의 측정치와 계산치를 비교 검토하였다.

II. 수치계산 결과 및 검토

그림 1은 무한 도체 평판의 슬릿 부근에 장한 삼각형 도체판의 구조와 좌표계이다. 삼각형 도체판은 폭 $d=150$ mm로 고정하고, 삼각형 도체판의 길이 L , 두께 w 및 간격 h 를 파라미터로 하였으며, 구조적 특징은 다음과 같다. 부가 도체판은 슬릿 중심과의 상대적인 변위(y 방향으로의 거리)를 가변하지 않고 슬릿의 가장자리 위치에 부가 도체판의 왼쪽 끝을 고정하였다. CD-ROM 드라이브 형태의 개구가 있는 경우는 부가 도체판이 개구의 중심을 가로 지를 수 없기 때문에, 부가 도체판의 위치는 그림 1과 같은 구조가 적합하다. 또한, 슬릿을 물리적으로 분할하지 않는 구조로 참고문헌 [6]에서 제안된 원리를 적용하기 위해서는 부가 도체판이 리액턴스 소자로 동작하도록

(a) Type - A

(b) Type - B

(c) Type - C

그림 1. 삼각형 도체판을 갖는 무한 도체 평판 슬릿의 구조와 좌표계

Fig. 1. Geometry and coordinate system of the slit with a loaded triangle plate in the conducting screen.

슬릿의 가장자리 위치에 고정시키는 것이 효율적이다^[11]. 또한, 본 논문에서 사용된 FDTD 법은 유한 체적에 대해서 시간과 공간으로 이산화하였으며, 계산 영역을 유한 범위로 정하기 위해서 흡수 경계 조건(Perfectly Matched Layer)을 사용하였다.

그림 2. 삼각형 도체판의 길이 L 에 대한 침투 전계 특성
Fig. 2. Characteristics of penetrated electric fields vs. the triangle plate length L .

그림 2는 평면파가 무한 도체 평판의 슬릿에 입사할 때, 주파수를 1 GHz로 고정하고, 삼각형 도체판의 간격 h

를 파라미터로 한 경우, 삼각형 도체판 길이 L 에 대한 침투 전계의 특성을 나타내고 있다. 그림 2에서 알 수 있는 것처럼, 삼각형 도체판의 형상 및 길이를 조절하면 침투 전자파의 크기를 감소시킬 수 있다.

그림 2(a)에서 알 수 있는 것처럼 Type-A인 경우는, 도체판의 길이가 $L=100\sim150$ mm일 때 침투 전계는 최대 값을 가지며, 도체판의 간격이 $h=10$ mm일 때 최소 값이 되고, $h=30$ mm일 때 최대가 된다. 또한, $L=170$ mm일 때 침투 전계는 최소 값을 가지며, h 가 증가할수록 침투 전계는 작아짐을 알 수 있었다.

그림 2(b)에서 알 수 있는 것처럼 Type-B인 경우는, 도체판의 길이가 $L=100\sim120$ mm일 때 h 가 증가할수록 침투 전계는 커지지만, $L=120$ mm 이상일 때는 h 가 증가할수록 침투 전계는 작아짐을 알 수 있었다.

그림 2(c)에서 알 수 있는 것처럼 Type-C인 경우는, 도체판의 길이가 $L=100\sim130$ mm일 때 L 이 증가할수록 침투 전계는 커지지만, $L=130$ mm 이상일 때는 침투 전계가 작아짐을 알 수 있었다.

즉, Type - A의 경우 삼각형 도체판의 길이 $L=170$ mm, 간격 $h=50$ mm일 때, Type - B의 경우 삼각형 도체판의 길이 $L=180$ mm, 간격 $h=50$ mm일 때, Type - C의 경우 삼각형 도체판의 길이 $L=200$ mm, 간격 $h=10$ mm일 때, 침투 전계의 크기는 가장 작은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 삼각형 도체판의 길이가 0.4λ 부근에서는 침투 전계가 최대가 되는데, 이는 슬릿과 삼각형 도체판이 결합하여 공진을 일으키기 때문인 것으로 판단된다.

그림 3은 무한 도체 평판에 평면파가 입사할 때, $x=0$, $y=0$, $z=50$ mm 위치에서 Type - A, B, C에서의 침투 전계 크기를 주파수에 대하여 나타낸 것이다. 그림 3에는 슬릿 부근에 삼각형 도체판을 장하하지 않는 경우와 삼각형 도체판 A($d=150$ mm, $L=170$ mm, $h=50$ mm), 삼각형 도체판 B($d=150$ mm, $L=180$ mm, $h=50$ mm), 삼각형 도체판 C($d=150$ mm, $L=200$ mm, $h=10$ mm)를 장하한 경우를 동시에 나타내고 있다. 그림 3으로부터 알 수 있는 것처럼, 도체판을 장하하지 않은 경우, 침투 전자파는 1 GHz 부근에서 매우 크게 나타난다. 이는 폭이 좁은 슬릿의 길이가 반파장($a=15$ cm)이 되어 1 GHz에서 공진이 일어나기 때문이다. 삼각형 도체판을 장하하면 1 GHz 부근에서 침투

그림 3. 삼각형 도체판의 형상에 대한 침투전계의 주파수 특성

Fig. 3. The frequency characteristics of penetrated electric fields for a various triangle plate type.

그림 4. 침투 전계의 주파수 특성에 대한 측정치와 계산치 비교

Fig. 4. Comparison of calculated and measured values of penetrated electric fields.

전계의 저감 특성이 양호함을 알 수 있으며, 특히 Type - A의 삼각형 도체판을 장하할 때 침투 전계의 저감 특성이 가장 양호함을 확인할 수 있다.

그림 4는 삼각형 도체판이 없을 경우와 삼각형 도체판 Type-A를 장하하였을 경우에 대한 침투 전계의 계산치와 측정치를 나타내고 있으며, 계산치와 실험치는 비교적 그 경향이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

슬릿 부근에 설치한 삼각형 도체판에 의해 침투 전계의 크기가 감소한다는 것을 확인하였으며, 다음과 같은 차폐 효과를 정의하여 차폐 효과의 주파수 특성을 검토하였다.

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (1)$$

(a) Type - A

(b) Type - B

(c) Type - C

그림 5. 차폐 효과의 측정치와 계산치 비교

Fig. 5. Comparison of calculated and measured values of the shielding effectiveness.

여기서, E_1 은 무한 도체 평판이 없을 경우 관측점에서의 전계의 크기를 나타내며, E_2 는 무한 도체 평판이 있는 경우 슬릿을 통해 관측점에 침투되는 전계의 크기를 나타낸다.

그림 5는 식 (1)을 사용하여 계산한 차폐 효과의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 5에는 삼각형 도체판의 각 형상(Type - A, B, C로 표기)에 대한 차폐 효과의 주파수 특성의 계산치와 실험치를 동시에 나타내었다. 그림 5로부터 삼각형 도체판이 Type-A일 때 침투 전계 특성이 가장 양호함을 알 수 있다.

III. 실험 결과 및 검토

수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 그림 6과 같이 삼각형 도체판을 제작하고, 차폐 효과를 측정하였다.

실험에 사용한 무한 도체 평판은 가로=3 m, 세로=2 m이며^{[12],[13]}, 슬릿은 길이가 $a=150$ mm, 폭은 $b=1$ mm이다. 차폐 효과의 측정 방법은 IEEE STD 299^[14]를 참조하였으며, 혼 안테나와 루프 안테나를 네트워크 분석기에 연결하고, 도체 평판이 존재할 때와 그렇지 않을 때의 측정된 전계 값으로부터 차폐 효과를 측정하였다. 그림 5에서 보는 것처럼, 저주파 대역에서 계산치와 측정치가 큰 차이가 발생하고 있는데 이러한 차이가 발생하는 이유는 여러 가지를 생각할 수 있으나, 측정에 사용한 무한 도체 평판이 유한하며, 제작된 평판이 정확히 좌우 대칭이 되지

그림 6. 제작된 무한 도체 평판의 구조

Fig. 6. The fabricated slit structure of the infinite conducting screen with a slit and a plate.

않은 점, 평판을 완전 도체로 가정했으나 실제로는 손실이 있는 점, 케이블 손실과 제작상의 오차 및 측정 오차 등을 고려하면 이론 계산치는 측정치와 비교적 그 경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 평면파가 무한 도체 평판에 존재하는 동일한 크기의 슬릿에 입사할 때, 슬릿으로 침투하는 침투 전계의 크기를 제어하기 위해 슬릿 부근에 삼각형 도체판을 장하한 구조에 대하여 침투 전계의 특성을 FDTD 법으로 검토하였다.

무한 도체 평판에 존재하는 슬릿에 삼각형의 도체판을 장하하였을 때 침투 전계의 주파수 특성 및 차폐 효과 특성을 계산하고, 실험을 통하여 이론 해석의 타당성을 확인하였다.

삼각형 도체판을 슬릿 부근에 무한 도체 평판과 평행으로 설치하면 저자세 구조로 침투 전자파의 저감이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 무한 도체 평판의 슬릿이 1 GHz 부근에서 공진하는 길이인 경우, 삼각형 도체판 Type-A($w=0.1$ mm, $d=150$ mm, $L=170$ mm, $h=50$ mm)의 경우 1 GHz 부근에서 침투 전계의 저감 특성이 가장 양호함을 알 수 있었다.

References

- [1] C. D. Taylor, "Electromagnetic pulse penetration through small apertures", *IEEE Tran. on Electromagnetic Compa.*, vol. EMC-15, no. 1, pp. 17-26, Feb. 1973.
- [2] C. M. Butler, K. R. Umashankar, "Electromagnetic excitation of a wire through an aperture-perforated conducting screen", *Angk IEEE Tran. on Antenna and Propag.*, vol. AP-24, no. 4, pp. 456-462, Jul. 1976.
- [3] C. M. Butler, Y. Rahmat-Samii, and R. Mittra, "Electromagnetic penetration through apertures in conducting surfaces", *IEEE Tran. on Antenna and Propag.*, vol. AP-26, no. 1, pp. 291-301, Jan. 1978.
- [4] Y. Rahmat-Samii, R. Mittra, "Electromagnetic coupling through small apertures in a conducting screen", *IEEE*

- Tran. Antennas and Propagat.*, vol. AP- 25, no. 3, pp. 180-187, Mar. 1977.
- [5] E. R. Reed, C. M. Butler, "Time-domain electromagnetic penetration through arbitrarily shaped narrow slots in conducting screens", *IEEE Tran. Electromagnetic Compat.*, vol. 34, no. 3, pp. 161-172, Aug. 1992.
- [6] K. C. Kim, S. M. Lim, and M. S. Kim, "Reduction of electromagnetic penetration through narrow slots in conducting screen by two parallel wires", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E88-B, no. 4, pp. 1743-1745, Apr. 2005.
- [7] K. C. Kim, "Field penetration into a metallic wall with a narrow slot due to nearby dipole source", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E92-B, no. 9, pp. 2987-2991, Sep. 2009.
- [8] 임성민, 김기채, "배열 도체 장하에 의한 슬릿 개구면 침투 전자파의 저감 특성", 2004년도 춘계마이크로파 및 전파 학술대회논문지, pp. 591-594, 2004.
- [9] 정성우, 김기채, "접지평판의 개구를 통과하는 길이가 다른 전송선로의 삽입 손실 특성", 한국전자과학회논문지, 19(2), pp. 237-243, 2008.
- [10] 임병진, 정성우, 조병두, 김기채, "HEMP 파원에 의한 무한도체평판 개구의 침투 전계 특성", 한국전자과학회논문지, 21(12), pp. 1454-1459, 2010년 12월.
- [11] 조병호, 정성우, 김기채, "도체판을 부가한 무한 도체 평판 슬롯의 침투 전자파 저감 특성", 한국전자과학회논문지, 23(9), pp. 1094-1099, 2012년 9월.
- [12] A. S. Meier, W. P. Summers, "Measured impedance of vertical antennas over finite ground planes", *Proc. of the IRE*, vol. 37, pp. 609-616, Jun. 1949.
- [13] Z. Zivkovic, D. Senic, C. Bodendorf, J. Skrzypczynski, and A. Sarolic, "Radiation pattern and impedance of a quarter wavelength monopole antenna above a finite ground plane", *In Proc. of 20-th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2012.
- [14] Standards Committee of the IEEE Electromagnetic Compatibility Society, "IEEE standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures", *IEEE Std 299-1997*, *IEEE Standards Board*, Approved 9 Dec. 1997.

조 병 호

2012년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
 2014년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
 2014년 2월~현재: 유라코퍼레이션 부품 설계 연구원(갑)
 2012년: 한국전자과학회 우수논문상 수상

[주 관심분야] EMC/EMI

이 승 익

2007년 2월: 계명대학교 전기공학과 (공학사)
 2013년 8월: 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
 2013년 10월~현재: (주)아이스펙 생산기술 주임연구원
 [주 관심분야] EMC/EMI

김 효 균

2012년 8월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
2013년 8월~현재: 영남대학교 전기공학과 석사과정
[주 관심분야] EMC/EMI

김 기 채

1984년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 3월: Keio University 전기공학과 (공학석사)
1989년 3월: Keio University 전기공학과 (공학박사)
1989년 4월~1993년 3월: 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원
1993년 4월~1995년 8월: 일본 후쿠오카 공업대학 정보공학과 조교수
1995년 9월~현재: 영남대학교 전기공학과 교수
2012년: 한국전자과학회 회장
[주 관심분야] EMC/EMI 관련 안테나 및 전자파 차폐, 전자파 이론 및 응용