

도체평판의 슬롯 침투 전자파 저감을 위한 개구면 차단필터

Aperture Cut-off Filter for Reduction of Electromagnetic Field Penetration through a Slot in Conducting Screens

(Invited Paper)

김기채

Ki-Chai Kim

요약

본 논문에서는 무한 도체평판의 슬롯을 통해 침투하는 침투 전자파를 저감(차단)시키기 위한 개구면 차단필터를 제안하고 슬롯으로 침투하는 전자파의 저감(차단) 특성을 검토하고 있다. 개구면 차단필터의 개념을 정립하기 위해 무한 도체평판에 있는 슬롯의 개구면 전개분포에 관한 적분방정식을 유도하고, 적분방정식의 해를 모멘트법으로 구하여 평면파가 슬롯 개구에 입사할 때 개구면 차단필터에 의한 침투 전자파의 저감(차단) 효과를 검토하였다. 이론해석의 결과, 도체평판의 슬롯으로 침투하는 침투 전자파를 저감(차단)시킬 수 있는 개구면 차단필터가 실현 가능함을 확인할 수 있었다. 개구면 차단필터의 개념 및 이론해석의 타당성을 검증하기 위해 폭이 좁은 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하여 침투 전자파의 저감(차단) 효과를 실험적으로 확인하였다.

Abstract

The purpose of this paper is to present the aperture cut-off filter for reduction of electromagnetic field penetration through a slot in conducting screen. The reduction characteristics of electric field penetration by the aperture cut-off filter are considered. In order to establish the concept of the aperture cut-off filter, the integral equation on the slot aperture field distribution is derived and solved by method of moments, and the reduction characteristics of penetration electric fields for the incident plane wave are calculated. The numerical results showed that the aperture cut-off filter for reduction of electric field penetration through the slot can be realized. To check the validity of the concept of an aperture cut-off filter and the theoretical analysis, the calculated electric field penetration of the metallic wall with narrow slot were compared with the experimental results.

Key words: Electromagnetic Penetration, Slot Aperture, Infinite Conducting Screen, Aperture Cut-off Filter, Aperture Filter

I. 서론

스마트 사회에서 사용되는 최근의 ICT(Information Communication Technology) 기기를 포함한 첨단 융복합 기기들은 고기능화와 고속화로 발전해가고 있으며, 이동성

과 휴대성을 높이기 위해 소형화와 저전력화를 지향하고 있다. 이러한 첨단 융복합 기기들은 우리의 생활 주변에 널리 분포되어 사용되고 있으며, 사용환경의 고밀도화와 네트워크의 연결로 인한 기기들 상호간의 전자파 장애(EMI: ElectroMagnetic Interference) 문제는 더욱 중요해지

영남대학교 전기공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

· Manuscript received October 31, 2014 ; Revised November 25, 2014 ; Accepted November 26, 2014. (ID No. 20141031-051)

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

고 있다. 전기전자기기를 포함한 첨단 융복합 ICT 기기들은 전기에너지를 공급받아 동작하므로 기본적으로 열이 발생하며, 열을 방출하기 위한 통풍용 구멍과 입출력선을 위한 커넥터 등으로 인해 전기 전자기기 및 ICT 기기의 케이스에는 슬롯과 같은 개구가 만들어진다. 이러한 슬롯 개구를 통하여 장해전자파가 기기의 내부로부터 방사되거나, 또는 외부로부터 장해전자파가 침투되어 기기의 오작동을 유발하게 된다.

특히, 국가 주요 기간시설의 EMP(ElectroMagnetic Pulse) 방호를 위한 전자파 차폐실의 구축에서는 공기주입 및 전원선과 신호선의 인입을 위해 필연적으로 개구가 형성되며, 이러한 개구를 관통하여 침입하는 강력한 전자파 에너지를 저감(차단)시키는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 전원선 또는 신호선을 따라 전도하는 장해전자파는 전원선 필터(power line filter) 또는 신호선 필터(signal line filter)를 사용하면 전도성 장해전자파(CE: Conducted Emission, CS: Conducted Susceptibility)를 저감(차단)시킬 수 있다. 그러나, 기기의 슬롯 개구면으로 방출되거나 침투하는 방사성 장해전자파(RE: Radiated Emission, RS: Radiated Susceptibility)는 슬롯 개구면의 크기를 소형화하거나, WBC (Waveguide-Below-Cutoff) 또는 허니컴 등을 사용하여 적절히 저감(차단)시키고 있으나, 슬롯 개구의 크기가 반파장의 정수배가 되는 주파수 이상의 장해전자파는 저감(차단)시킬 수 없다. 이와 같은 슬롯 개구면의 전자파 침투 문제는 무한 도체평판의 슬롯으로 모델화하여 여러 연구자들에 의해 연구되었으며^{[1]~[16]}, 평행 2선 선로를 슬롯 개구면에 부착하여 리액턴스로 동작하게 하면 슬롯의 개구면 전계분포가 제어되어 침투전계를 저감(차단)시킬 수 있음이 보고되어 있다^{[6],[7]}.

본 논문에서는 참고문헌 [7]에서 제시한 기본 원리를 바탕으로 슬롯 개구면을 통하여 방출되거나 침투하는 장해전자파를 저감(차단)시키기 위한 개구면 차단 필터(aperture cut-off filter)의 개념을 제안하고 직사각형 슬롯 및 원형 슬롯에 적용한 개구면 차단필터의 기본 특성을 검토하였다. 개구면 차단필터의 개념을 정립하기 위해 무한 도체평판의 슬롯 구조(직사각형 및 원형)에 대하여, 평면파가 입사할 때 슬롯 개구면에 형성되는 전계분포에 관한 적분방정식을 유도하였으며, 그 해를 모멘트법으로 구

하여 개구면 차단필터의 기본 특성을 계산하였다.

슬롯 개구의 기본 형상인 직사각형 및 원형 슬롯에 대한 이론해석 결과, 도체평판의 슬롯에 침투하는 장해전자파를 저감(차단)시킬 수 있는 개구면 차단필터가 실현 가능함을 확인할 수 있었다.

개구면 차단필터의 개념과 이론해석의 타당성을 검증하기 위해 도체평판의 슬롯에 개구면 차단필터를 구성하여 실험을 실시하였으며, 이론해석 결과는 실험결과와도 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

II. 개구면 차단필터의 개념과 원리

일반적으로 전원선 또는 신호선을 따라 전달되는 전도성의 장해전자파를 저감(차단)시키기 위해 전원선 필터 및 신호선 필터를 사용하며, 기기의 인입부에 장착하여 외부의 장해전자파가 기기 내부로 침입하는 것을 억제 또는 저감(차단)시킨다.

이와 같은 관점에서, 공간을 통하여 기기의 슬롯 개구부로 침입하는 방사성 장해전자파를 저감(차단)시키기 위해 슬롯 개구부에 장착하여 외부의 장해전자파가 기기 내부로 침투하는 것을 억제 또는 저감(차단)시키기 위한 “개구면 차단필터”의 개념을 제안한다.

먼저, “개구면 필터”를 다음과 같이 정의하기로 한다.

개구면 필터: 슬롯의 개구 면적을 물리적으로 손상하지 않으면서 슬롯 개구면 엣지 부근에 부착되어 입사 전자파를 효율적으로 저감(차단)시키거나, 또는 입사 전자파를 효율적으로 통과시키는 소자를 “개구면 필터(Aperture Filter: AF)”라 한다.

이와 같이 정의한 “개구면 필터”는 “개구면 차단필터”와 “개구면 통과필터”로 구분할 수 있고, 각각 다음과 같이 정의한다.

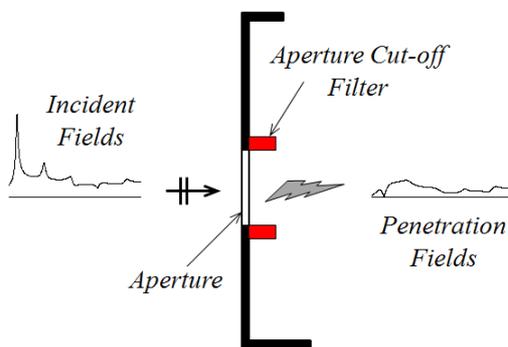
- (1) 개구면 차단필터: 슬롯의 개구 면적을 물리적으로 손상하지 않으면서 슬롯 개구면 엣지 부근에 부착되어, 특정 주파수 또는 특정 주파수 대역을 차단하는 개구면 필터를 “개구면 차단필터(Aperture Cut-off Filter: ACF)”라 한다.
- (2) 개구면 통과필터: 슬롯의 개구 면적을 물리적으로

손상하지 않으면서 슬롯 개구면 엣지 부근에 부착되어, 특정 주파수 또는 특정 주파수 대역을 통과시키는 개구면 필터를 “개구면 통과필터(Aperture Pass Filter: APF)”라 한다.

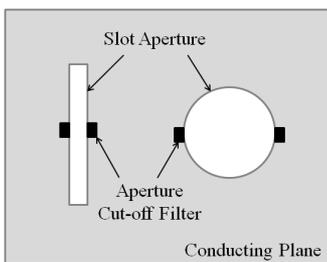
개구면 필터(AF)는 위의 2가지(ACF와 APF)를 포함하며, 침투하는 장애전자파를 방호하는 관점에서는 개구면 차단필터(ACF)가 매우 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 개구면 필터 중에서 개구면 차단필터만을 논의하기로 하며, 장애전자파가 외부에서 기기의 내부로 침입하는 경우를 상정하여 개구면 차단필터를 검토한다.

그림 1(a)에서 보는 것처럼, 외부에서 기기로 침입하는 방사성 장애전자파는 기기의 슬롯 개구부에 개구면 차단필터를 장착하여(그림 1(b) 참조) 외부의 장애전자파가 기기의 내부로 침입하는 것을 저감(차단)시킬 수 있다.

그림 2는 개구면 차단필터의 원리를 나타내고 있다. 그



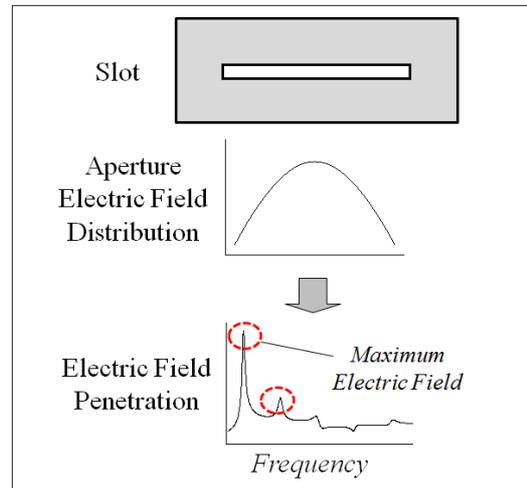
(a) 개구면 차단필터의 개념
(a) Concept of aperture cut-off filters



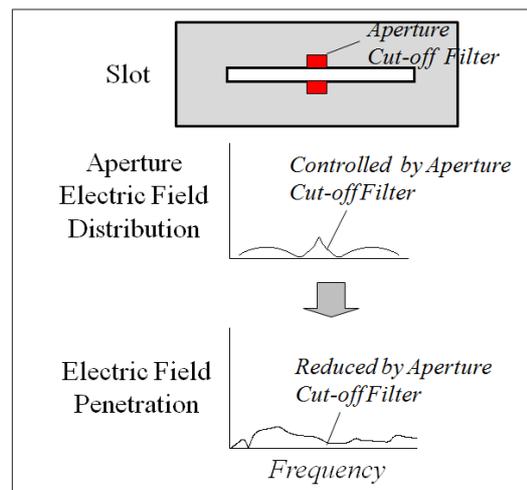
(b) 개구면 차단필터의 부착 위치
(b) Mounting position of aperture cut-off filters

그림 1. 개구면 차단필터의 개념과 부착 위치
Fig. 1. Concept of aperture cut-off filters and mounting position.

림 2(a)는 개구면 차단필터를 부착하지 않은 슬롯에 대한 침투 전계의 크기와 개구면 전계분포를 나타내며, 그림 2(b)는 개구면 차단필터를 부착한 슬롯에 대한 침투 전계의 크기와 개구면 전계분포를 나타낸다. 그림 2(a)에서 보는 것처럼, 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하지 않은 경우는 슬롯이 공진하는 길이의 주파수에서 슬롯 개구면이 효과적으로 여기되어 슬롯의 개구면 전계분포의 크기가



(a) 개구면 차단필터를 부착하지 않은 경우
(a) Without aperture cut-off filters



(b) 개구면 차단필터를 부착한 경우
(b) With aperture cut-off filters

그림 2. 개구면 차단필터의 원리
Fig. 2. Principles of the aperture cut-off filter.

크게 나타나고, 매우 큰 전자파가 슬롯을 통하여 침투한다. 그러나, 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하면 그림 2 (b)에서 보는 것처럼, 슬롯의 개구면 전계분포의 크기가 제어되어 작아지고 침투 전자파가 효과적으로 저감(차단)된다.

슬롯의 개구면 전계분포를 제어하여 침투 전자파를 저감(차단)시키는 개구면 차단필터는 슬롯의 개구면적을 물리적으로 손상하지 않도록 하여 개구면 부근에 부착시킨다(그림 1(b) 참조). 이러한 개구면 차단필터는 슬롯의 개구면적을 손상함이 없도록 구성되는 것이 특징이다.

개구면 차단필터를 적절히 설계하여 슬롯에 부착하면 개구면적을 손상시키지 않으면서 슬롯을 물리적으로 분할한 것과 동일한 특성을 얻을 수도 있다^[13].

III. 개구면 차단필터의 이론해석

그림 3은 무한 도체평판에 슬롯(길이: a , 폭: b)이 설치되어 있는 구조와 좌표계를 나타낸다. 영역 I에서 평면파가 슬롯을 향하여 입사하고 있으며, 슬롯에 입사한 전자파는 슬롯 개구면에 전계분포를 형성시켜 영역 II로 전자파가 침투하게 된다. 개구면 차단필터로는 길이가 l 인 평행 2선 선로를 사용하였으며, 원점에서 c 의 위치에 부착되어 있다. 이러한 평행 2선 선로는 슬롯의 개구면적을 손상함이 없이 슬롯에 부착되어 리액턴스 소자로 동작하

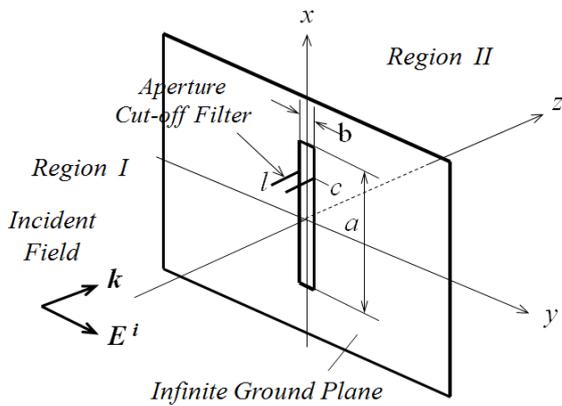


그림 3. 개구면 차단필터가 부착된 무한 도체평판의 슬롯 구조와 좌표계

Fig. 3. Structure and geometry of a slot with aperture cut-off filter in an infinite conducting screen.

며, 침투 전자파를 저감(차단)시키는 개구면 차단필터의 역할을 한다^{[6],[7]}.

그림 3에서 평면파가 슬롯으로 입사할 때 슬롯의 개구면에 형성되는 개구면 전계분포 E_a 에 관한 적분방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} & \hat{z} \times \left\{ \left(\overline{H}_i + \overline{H}_r \right) + \hat{y} I_y \delta(x-c) \right. \\ & \left. + \frac{1}{j\omega\mu_0} \iint_{S'_a} \overline{K}_m^I(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \left(\hat{z} \times \overline{E}_a \right) dS'_a \right\} \\ & = \hat{z} \times \frac{1}{j\omega\mu_0} \iint_{S'_a} \overline{K}_m^II(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \left(-\hat{z} \times \overline{E}_a \right) dS'_a \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, \overline{H}_i 는 입사 자계, \overline{H}_r 은 반사 자계를 나타내며, 적분핵 $\overline{K}_m^{I,II}$ 는 반무한 공간의 다이아디 그린함수이다. \hat{y} 및 \hat{z} 는 각각 y 방향 및 z 방향의 단위벡터이며, ω 는 각 주파수, μ_0 는 진공의 투자율을 나타낸다.

위의 식 (1)에서 I_y 는 개구면 차단필터가 부착되는 위치에서의 전류값이며, 개구면 차단필터의 임피던스와 개구면 차단필터가 부착되는 위치에서의 전압에 의해 결정된다^[7].

적분방정식 (1)의 해는 구분적 정현함수를 사용한 Galekin의 모멘트법으로 구하였으며, 슬롯 개구를 통하여 영역 II로 침투하는 전계는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\overline{E} = - \iint_{S'_a} \nabla \times \overline{G}_m^II(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \left\{ -\hat{z} \times \overline{E}_a(\vec{r}') \right\} dS'_a \quad (2)$$

슬롯 개구면 전계분포가 구해지면 영역 II로 침투되는 전자파의 크기를 식 (2)로부터 구할 수 있으므로 개구면 차단필터의 부착에 의한 슬롯 침투 전자파의 저감(차단) 효과를 계산할 수 있다. 구체적인 내용은 참고문헌 [7]을 참조하기 바란다.

IV. 개구면 차단필터의 특성

4.1 직사각형 슬롯에 대한 단일 개구면 차단필터

그림 3과 같이 직사각형 슬롯에 1개의 개구면 차단필터가 부착된 구조에 대하여 침투 전자파의 저감(차단) 특성을 검토한다. 수치계산에 사용한 슬롯은 $a=15$ cm, $b=1$

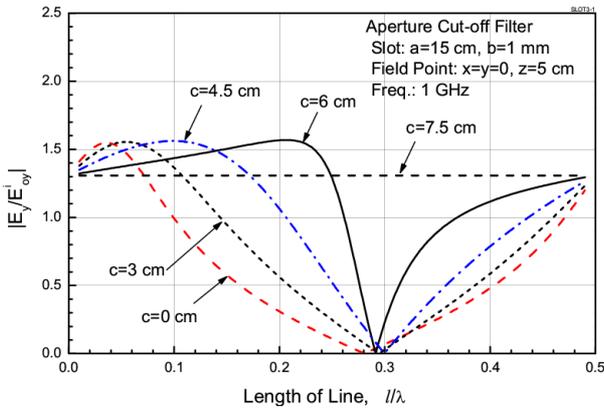


그림 4. 개구면 차단필터의 부착 위치를 파라미터로 했을 때 개구면 필터의 길이에 대한 침투 전계
Fig. 4. Penetration electric fields versus length of the aperture cut-off filter as a parameter of mounting position.

mm이며, 1 GHz에서 반파장이 되는 길이이다. 영역 I에서 입사한 평면파는 슬롯 개구를 통과하여 영역 II로 침투하며, 개구면으로부터 $z=5$ cm 떨어진 위치에서의 침투 전계를 계산한다.

그림 4는 개구면 차단필터의 부착위치 c 를 파라미터로 했을 때, 개구면 차단필터로 사용한 리액턴스 소자(평행 2선 선로)의 길이에 대한 침투 전계의 크기를 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있는 것처럼, 리액턴스 소자를 슬롯의 가장자리(슬롯 길이방향의 끝쪽)에 부착하면 침투 전자파의 저감(차단) 효과가 나타나지 않지만, 슬롯의 중심부($c=0$)에 길이가 $l=0.278 \lambda$ (1 GHz에서 8.34 cm)인 리액턴스 소자를 부착하면 개구면 차단필터로 동작하게 된다. 즉, 슬롯의 개구면적을 물리적으로 손상함이 없이 대상 주파수인 1 GHz에서 침투 전계를 0으로 저감(차단)시킬 수 있다.

그림 5는 길이가 $l=0.278 \lambda$ (8.34 cm)인 개구면 차단필터를 슬롯의 중앙($c=0$)에 부착하였을 때, 슬롯을 침투하는 침투 전계의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 5에는 비교를 위해 개구면 차단필터를 부착하지 않았을 때의 침투 전계와 실험결과도 함께 나타내었다. 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하지 않으면 1 GHz에서 매우 큰 전자파가 침투되지만, 개구면 차단필터를 슬롯의 중앙에 부착하면 침투 전계의 크기가 0으로 저감(차단)된다는 것을 알

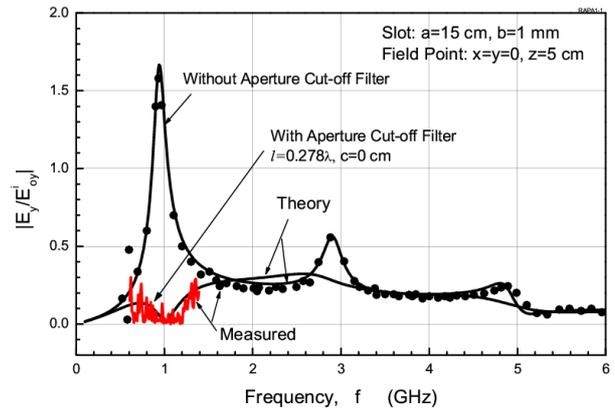


그림 5. 침투 전계의 주파수 특성 측정치와 계산치
Fig. 5. Measured and calculated frequency characteristics of electric field penetrations.

수 있다. 또한, 1 GHz 부근에서 침투 전계가 효과적으로 저감(차단)되고 있음을 실험적으로도 확인할 수 있다.

그림 6은 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하지 않았을 때와 길이가 $l=8.34$ cm인 개구면 차단필터를 슬롯의 중앙($c=0$)에 부착하였을 때, 슬롯 개구면에 형성되는 전계분포를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는 것처럼, 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하면 부착하지 않았을 때와 비교하여 개구면 전계의 크기가 약 93 % 감소한다.

그림 5에서 논의한 바와 같이, 1 GHz에서 침투 전계의 크기가 거의 0으로 저감되는 데, 그 이유는 개구면 차단필터의 부착에 의해 슬롯의 개구면 전계분포가 효과적으로 제어되어 그림 6과 같이 개구면 전계분포의 크기가 작아

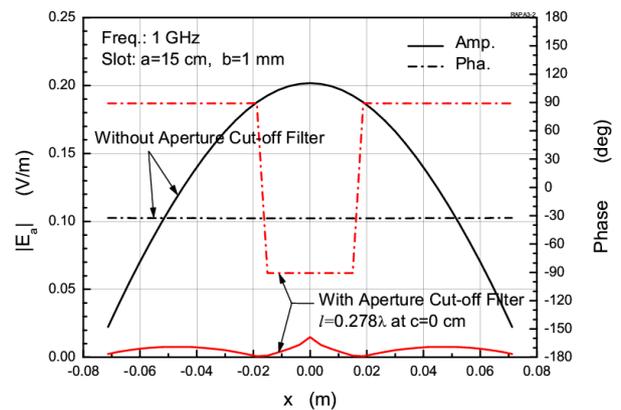


그림 6. 슬롯 개구면의 전계분포
Fig. 6. Aperture electric field distributions on the slot.

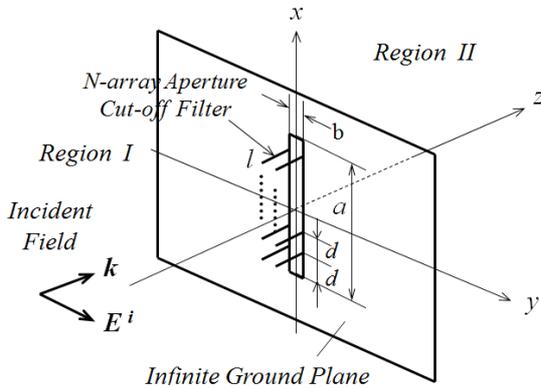


그림 7. N 개의 개구면 차단필터가 배열된 무한 도체평판의 슬롯 구조와 좌표계
 Fig. 7. Structure and geometry of a slot aperture in the infinite conducting screen with N -array aperture cut-off filter.

지기 때문이다.

이러한 결과는 II장에서 언급한 슬롯의 개구면 전계분포 제어에 의한 침투 전계의 저감(차단) 원리를 잘 설명해 주고 있다.

4-2 직사각형 슬롯에 대한 배열형 개구면 차단필터

그림 7은 무한 도체평판에 폭이 좁은 직사각형 슬롯(길이: a , 폭: b)에 개구면 차단필터(길이가 l 인 평행 2선 리액턴스 소자)가 슬롯의 길이방향으로 N 개 배열되어 있는 구조와 좌표계를 나타낸다. 수치계산에 사용한 슬롯은 $a=15\text{ cm}$, $b=1\text{ mm}$ 이며, 1 GHz에서 반파장이 되는 길이이다. 영역 I에서 입사한 평면파는 슬롯 개구를 통과하여 영역 II로 침투하며, 개구면으로부터 $z=5\text{ cm}$ 떨어진 위치에서의 침투 전계를 계산한다.

그림 8은 슬롯에 부착하는 개구면 차단필터의 개수 N 을 파라미터로 했을 때, 개구면 차단필터의 길이에 대한 침투 전계의 크기를 나타낸다. 그림 8에서 보는 것처럼, 개구면 차단필터의 길이가 $l=0.26\lambda$ 부근에서 침투 전계가 차단되어 거의 0이 됨을 알 수 있다. 즉, $l=0.26\lambda$ 부근의 길이를 가지는 개구면 차단필터를 슬롯 개구면에 복수개($N=3, 7, 9, 19$ 등)를 부착하면 침투 전계를 0으로 만들 수 있다.

개구면 차단필터의 소형화를 위해서는 필터의 길이를

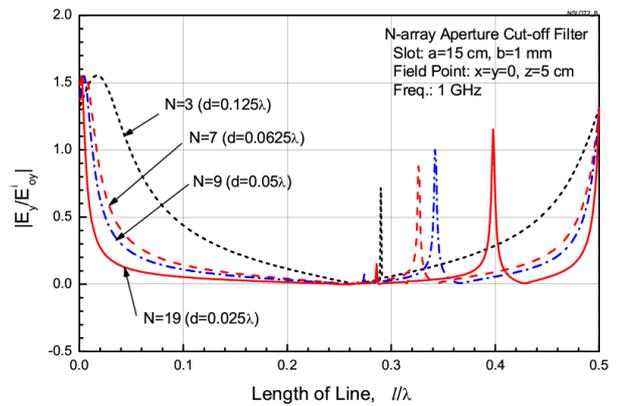


그림 8. 개구면 차단필터의 배열 개수를 파라미터로 했을 때 차단필터의 길이에 대한 침투 전계
 Fig. 8. Penetration electric fields versus length of the aperture cut-off filter as a parameter of array number.

0.26λ 보다 짧게 할 필요가 있다. 본 논문에서는 개구면 차단필터의 길이가 0.1λ 인 경우에 대하여 검토하였다.

그림 9는 개구면 차단필터의 길이를 $l=0.1\lambda$ 로 고정하고 배열하는 개구면 차단필터의 개수 N 을 파라미터로 했을 때, 슬롯 개구를 침투하는 침투 전계의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 9에 나타난 것처럼, 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하지 않으면 1 GHz에서 매우 큰 전자파가 침투되지만, 개구면 차단필터를 복수개 배열하여 슬롯에 부착하면 침투 전계의 크기가 저감(차단)되는 것을 확인할 수 있다.

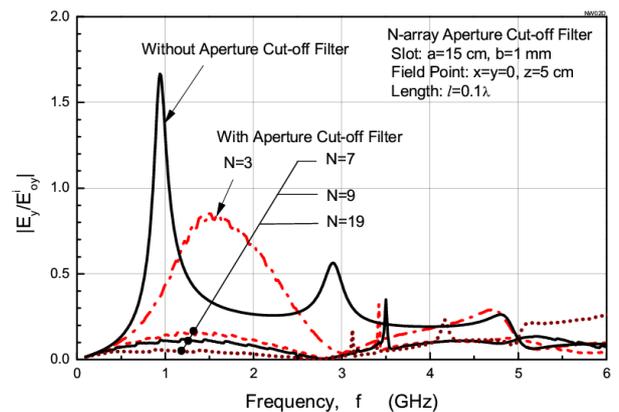
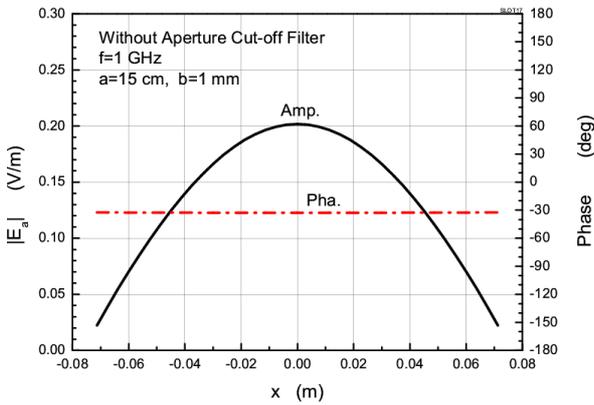
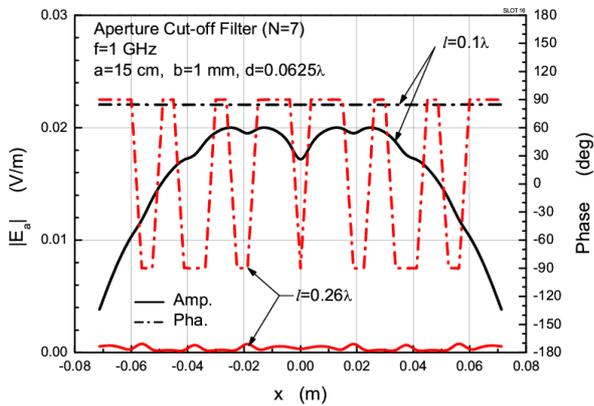


그림 9. 침투 전계의 주파수 특성
 Fig. 9. Frequency characteristics of electric field penetrations.



(a) 개구면 차단필터를 부착하지 않은 경우
(a) Without aperture cut-off filter



(b) 개구면 차단필터를 부착한 경우
(b) With aperture cut-off filter

그림 10. 슬롯 개구면의 전계분포
Fig. 10. Aperture electric field distributions on the slot.

그림 10(b)는 개구면 차단필터를 등간격(0.0625λ)으로 $N=7$ 개 배열하였을 때, 개구면 차단필터의 길이가 $l=0.1\lambda$ 및 $l=0.26\lambda$ 에 대한 슬롯의 개구면 전계분포를 나타낸다. 그림 10(b)로부터 알 수 있는 것처럼, 길이가 $l=0.26\lambda$ 인 개구면 차단필터를 $N=7$ 개 배열한 경우의 슬롯 개구면 전계분포 크기는 개구면 차단필터가 없는 경우의 전계분포(그림 10(a))에 비교하여 약 99% 감소한다. 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하지 않으면 매우 큰 전자파가 침투되지만, 개구면 차단필터를 슬롯에 등간격으로 배열하면 개구면 전계분포가 효과적으로 제어되어 침투 전계의 크기가 0으로 저감(차단)된다는 것을 알 수 있다. 배열

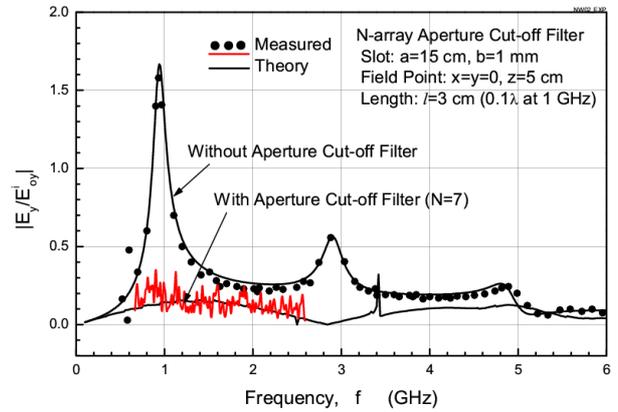


그림 11. 7개의 개구면 차단필터에 대한 침투 전계의 주파수 특성 측정치와 계산치

Fig. 11. Measured and calculated frequency characteristics of penetration electric fields by 7-array aperture cut-off filter.

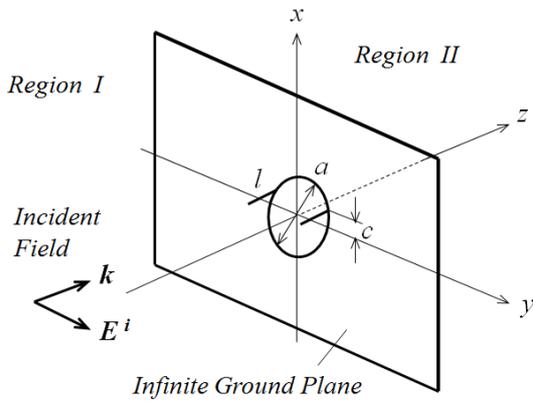
구조에 대한 침투 전계의 구체적인 특성은 참고문헌 [12]를 참조하기 바란다.

그림 11은 길이가 $l=0.1\lambda$ 인 개구면 차단필터를 슬롯 개구면에 등간격(0.0625λ)으로 $N=7$ 개 부착한 경우, 침투 전계의 측정치와 이론 계산치를 함께 나타낸다. 그림 11에서 보는 것처럼, 1 GHz 부근에서의 침투 전계가 효과적으로 저감되고 있음을 확인할 수 있으며, 단일 개구면 차단필터와는 달리 광대역에 걸쳐서 침투 전자파가 저감(차단)되는 것을 알 수 있다. 또한, 배열 구조의 개구면 차단필터에 대한 침투 전자파의 저감 효과를 실험적으로도 확인할 수 있다.

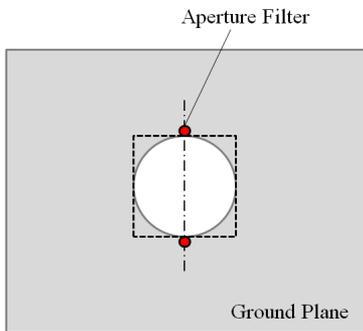
개구면 차단필터는 슬롯 개구의 양쪽 영역(입사영역 및 침투영역)에 부착할 수도 있으며^[10], 폭을 가지는 판 형태의 리액턴스 구조를 개구면 차단필터로 사용할 수도 있다^[11]. 특히, 저자세의 개구면 차단필터를 구현하기 위해 삼각형 판을 개구면 차단필터로 사용하기 위한 검토 결과도 보고되어 있다^{[17][18]}.

4.3 원형 슬롯에 대한 개구면 차단필터

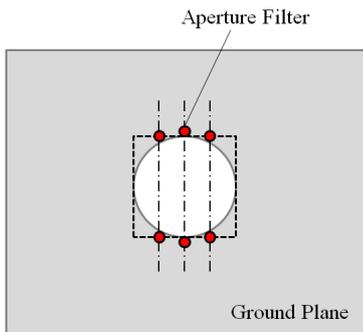
그림 12는 무한히 넓은 도체평판 위에 설치된 원형 슬롯에 개구면 차단필터를 부착한 구조를 나타내고 있다. 원형 슬롯의 크기는 지름이 a 이며, 크기가 $a \times a$ 인 정사각



(a) 원형 슬롯 개구의 구조와 좌표계
(a) Structure and geometry



(b) 개구면 필터가 1개 부착된 원형 슬롯 개구
(b) Attached to one aperture cut-off filter



(c) 개구면 필터가 3개 부착된 원형 슬롯 개구
(c) Attached to the three aperture cut-off filter

그림 12. 원형 슬롯의 구조와 좌표계 및 부착 위치
Fig. 12. Structure and geometry of circular aperture with aperture cut-off filters and mounting position.

형 슬롯으로 근사하여 해석할 수 있다. 이러한 원형 슬롯에 길이가 l 인 평행 2선 선로를 개구면 차단필터로 사용

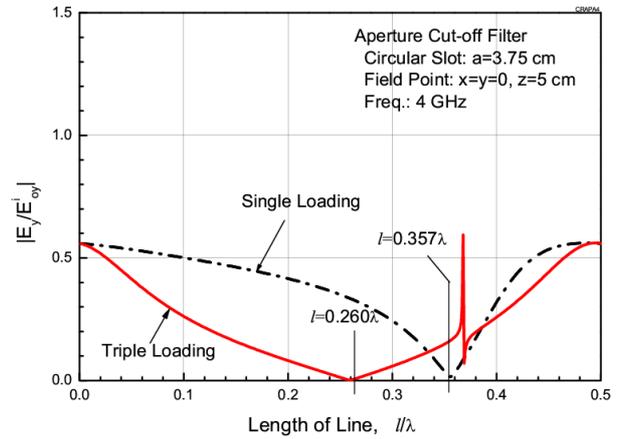


그림 13. 개구면 차단필터의 개수를 파라미터로 했을 때 차단필터의 길이에 대한 침투 전계
Fig. 13. Penetration electric fields versus length of the aperture cut-off filter as a parameter of number of cut-off aperture filters.

하였으며, 원점에서 c 의 위치에 부착되어 있다.

그림 12에서 평면파가 영역 I에서 원형 슬롯으로 입사할 때, 정사각형 슬롯 개구로 근사한 개구면에 생성되는 개구면 전계분포에 관한 적분방정식을 유도하고, 그 해를 모멘트 법으로 해석하여 영역 II로 침투하는 침투 전계의 크기를 이론적으로 계산하였다.

그림 12(a)는 개구면 차단필터 1개가 원형 슬롯의 중심 선상에 부착된 구조를 나타내며, 그림 12(b)는 원형 슬롯에 등간격으로 3개의 개구면 차단필터가 배열된 구조를 나타낸다.

그림 13은 원형 슬롯 개구면의 직경이 $a=3.75$ cm(4 GHz에서 0.5λ)인 경우, 원형 슬롯에 부착하는 개구면 차단필터의 개수(1개 및 3개)를 파라미터로 했을 때, 개구면 차단필터의 길이에 대한 침투 전계의 크기를 나타낸다. 그림 13에서 보는 것처럼, 개구면 차단필터 1개를 원형 슬롯의 중심선상에 부착하면 개구면 차단필터의 길이가 $l=0.357\lambda$ (4 GHz에서 2.68 cm)에서 침투 전계가 차단되어 거의 0이 됨을 알 수 있다. 즉, $l=0.357\lambda$ 의 길이를 가지는 개구면 차단필터 1개를 원형 슬롯에 부착하면 침투되는 전계를 0으로 만들 수 있다.

또한, 개구면 차단필터 3개를 등간격으로 슬롯에 배열하면 개구면 차단필터의 길이가 $l=0.260\lambda$ (4 GHz에서

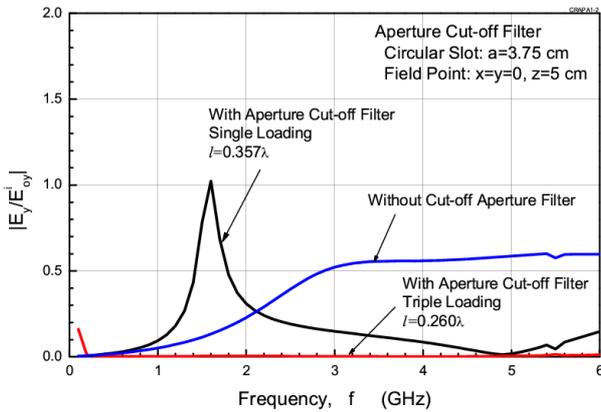


그림 14. 침투 전계의 주파수 특성
Fig. 14. Frequency characteristics of electric field penetrations.

1.95 cm)에서 침투 전계가 차단되어 거의 0이 됨을 알 수 있다. 즉, $l=0.260\lambda$ 의 길이를 가지는 개구면 차단필터 3개를 원형 슬롯에 등간격으로 배열하여 부착하면 침투되는 전계를 0으로 저감(차단)시킬 수 있다.

그림 13에서 선택한 $l=0.357\lambda$ (2.68 cm)의 길이를 가지는 개구면 차단필터 1개를 슬롯에 설치하였을 때, 그리고, $l=0.260\lambda$ (1.95 cm)의 길이를 가지는 개구면 차단필터 3개를 등간격으로 나란히 설치하였을 때, 각각에 대한 침투 전계의 주파수 특성은 그림 14와 같다. 그림 14로부터 알 수 있는 것처럼, 개구면 차단필터를 1개 부착하면 1.5 GHz 부근에서 침투 전계가 커지는 현상이 나타난다. 이러한 경우는 개구면 통과필터(APF)에 해당한다. 그러나, 개구면 차단필터 3개를 등간격으로 나란히 부착하면 침투 전계가 커지는 현상은 나타나지 않으며, 광대역에 걸쳐서 침투 전계가 거의 0인 매우 양호한 저감(차단) 효과를 얻을 수 있다.

이상의 결과로부터, 원형 슬롯에서 개구면 차단필터를 구성하기 위해서는 반드시 복수개의 개구면 차단필터를 부착하는 것이 중요하다. 원형 슬롯에 개구면 차단필터를 1개 부착하는 경우는 특정 주파수에서 공진을 일으켜 큰 전계가 침투되는 현상이 나타나며, 개구면 통과필터의 작용을 하므로 주의해야 한다.

V. 결 론

특정 주파수 또는 특정 주파수 대역을 차단하는 “개구

면 차단필터”와 특정 주파수 또는 특정 주파수 대역을 통과시키는 “개구면 통과필터”의 개념을 제안하고, 도체평판의 슬롯을 통해 침투하는 침투 전자파를 저감(차단)시키기 위한 개구면 차단필터의 기본 특성을 검토하였다.

개구면 차단필터의 개념 정립을 위해, 무한 도체평판에 슬롯이 있는 구조를 상정하고, 개구면 전계분포에 관한 적분방정식을 유도하고, 그 해를 모멘트법으로 구하였으며, 평면파가 입사할 때의 침투 전자파 크기를 계산하여 개구면 차단필터의 기본 특성을 검토하였다.

직사각형 슬롯 및 원형 슬롯에 대한 검토 결과로부터, 도체평판에 설치된 슬롯에 적용할 수 있는 개구면 차단필터가 실현 가능성을 확인하였다. 개구면 차단필터의 개념 및 원리의 타당성을 검증하기 위해 도체평판의 슬롯에 개구면 차단필터를 부착하여 침투 전자파의 저감(차단)특성을 실험적으로도 확인하였다.

본 논문에서 제안한 개구면 차단필터는 전기전자기기 및 ICT 융복합기기의 방사성 장애전자파 차단용으로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, EMP 방호시설에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] C. D. Taylor, "Electromagnetic pluse penetration through rough 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", *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, M. S. Kim, "On the reduction technique of electromagnetic penetration through narrow slots in conducting screen", *Korea-Japan AP/EMC/EMT Joint Conference*, pp. 107-110, Sep. 2001.
- [7] 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.
- [8] S. M. Lim, G. H. Jung, and K. C. Kim, "Reduction technique of electromagnetic penetration through narrow slots in conducting screen by double wire loading", *Proceedings of APMC '03*, pp. 1344-1347, Seoul, Nov. 2003.
- [9] S. M. Lim, G. H. Jung, and K. C. Kim, "Reduction characteristics of electromagnetic penetration through narrow slots in conducting screen by wire array loading", *Proceedings of EMC'04/Sendai, 3C2-3*, pp. 629-632, Jun. 2004.
- [10] E. J. Park, C. H. Ju, and K. C. Kim, "On the reduction characteristics of electromagnetic penetration through narrow slots by wire loading", *Proceedings of ISAP-2005*, vol. 1, pp. 15-18, Aug. 2005.
- [11] E. J. Park, K. C. Kim, "Reduction characteristics of electromagnetic penetration through narrow slots in conducting screen", *Journal of KEES*, vol. 6, no. 2, pp. 130-134, Jun. 2006.
- [12] K. C. Kim, S. M. Lim, "Reduction characteristics of electromagnetic penetration through narrow slots in conducting screen by loading parallel wire arrays", *Journal of KEES*, vol. 6, no. 2, pp. 123-129, Jun. 2006.
- [13] B. J. Lim, J. H. Cho, S. M. Lim, and K. C. Kim, "Non-destructive slot splitting methods for reducing penetration electromagnetic fields", *Proceedings of APEMC 2011*, May 2011.
- [14] J. I. Lee, C. H. Lee, and Y. K. Cho, "Electromagnetic coupling mechanism to a conducting strip through a narrow slit in a parallel-plate waveguide", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-49, no. 4, pp. 592-596, Apr. 2001.
- [15] 이종익, 조영기, "도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자파 최대 투과 현상", *한국전자과학회논문지*, 19(8), pp. 832-836, 2008년 8월.
- [16] 조영기, "전자기적 결합 현상의 응용", *경북대학교출판부*, 2012년.
- [17] 조병호, 정성우, 김기채, "도체판을 부가한 무한 도체 평판 슬릿의 침투 전자파 저감 특성", *한국전자과학회논문지*, 23(9), pp. 1094-1099, 2012년 9월.
- [18] 조병호, 이승익, 김효균, 김기채, "삼각형 도체판 장하에 의한 무한 도체평판 슬릿의 침투 전자파 저감 특성", *한국전자과학회논문지*, 25(7), pp. 767-773, 2014년 7월.

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 1월~2012년 12월: 한국전자파학회 회장

2013년 1월~현재: 한국전자파학회 명예회장

1988년: IEICE Japan, Young Scientist Awards

1994년: IEE Japan, Paper Presentation Awards

[주 관심분야] EMC 안테나 및 전자파 차폐, 전자파 이론 및 응용