

유전체로 막힌 개구를 갖는 위성 전자 장비 함체의 차폐 효과 해석

김수한*, 이재현*

Analysis for shielding effectiveness of a satellite electronic equipment enclosure with a dielectric-backed aperture

Su-han Kim*, Jae-hyun Lee*

요약

본 논문에서는 위성용 전자 부품 또는 장비를 내장한 함체의 개구가 유전체로 막힌 경우 차폐효과를 계산하는 해석적 방법을 제안한다. 차폐효과는 주파수, 유전체의 유전율, 함체 내에서 차폐효과를 정의하는 위치에 영향을 받는다. 또한, 유전체 판의 일부가 도체로 막혀 있는 경우도 해석하였다. 계산 결과를 보면, 유전체에 의하여 함체 공진기의 Q 값이 감소되었으며, 개구에서 멀어질수록 차폐효과 개선되는 것을 확인 할 수 있었다.

키워드 : satellite component; shielding effectiveness; dielectric-backed aperture; quality factor; conductor.

ABSTRACT

In this paper, a new analytical formulation is presented for calculating shielding effectiveness (SE) of shielding enclosure including satellite electronic components and equipments. The shielding enclosure has a dielectric-backed aperture. The SE may be a function of frequency, dielectric constant, and position within the enclosure. And, the formulation has been extended for calculation of the SE of the structure where the one side of dielectric is partially backed by conductor. Our simulation results give that the dielectric material lowers the Q factor, and the further the observation point is from the aperture, the more SE increases.

I. 서론

위성부품은 가혹한 우주환경에서 정상동작을 하여야 하므로 그 신뢰도가 매우 중요하다. 따라서 설계초기부터 수명이 끝나는 시기까지의 다양한 외부환경은 위성부품의 신뢰도를 결정하는데 중요한 요인이 된다. 이때 외부환경은 조립 및 운반의 지상환경, 위성이 발사되는 동안 발생하는 발사환경, 최종환경인 우주환경을 의미한다. 특히, 위성 전자 부품과 장비는 전자파 차폐 기능(예, 전자파 차폐 함체)을 이용하여 부품과 장비의 전자파 방출(emission)을 감소시키고, 전자파 내성(immunity)을 향상시킨다.

함체는 신호전달과 공기 순환에 이용되는 통로, 다수의 이음부 및 접합부를 포함하고 이러한

개구를 통해 복사 전자파가 침투하게 된다. 침투된 복사 전자파는 함체의 전자파 차폐효과를 감소시키고 전자파간섭(EMI: electromagnetic interference)을 발생시킨다. 따라서 전자파간섭을 최소화 시킬 수 있는 함체 구조(개구 크기와 모양, 함체 크기, 함체 내 전자파 간섭원 위치 등)에 대한 이해가 필요하다.

함체를 이용한 차폐의 성능을 나타내기 위하여 차폐효과(SE: shielding effectiveness)를 이용하며, 이는 함체 내 임의의 지점에서의 전계 세기를 함체가 있을 때와 없을 때의 비율로 정의한 값이다.

위성 전자 부품과 장비의 고속 디지털화 기술 추세에 따라 전자파 차폐 함체 개구의 고주파 특성에 대한 이해가 중요해지고 있다[1].

* 충남대학교 전파공학과 위성초고주파통신연구실 (suhankim@cnu.ac.kr),
논문번호 : 논0801-13, 접수일자 : 2008년 5월 31일, 최종게재논문정보일자 : 2008년 6월 23일

속이 빈 사각구조 함체의 사각 개구에 대해서는 간단한 방법들이 많이 알려져 있다[2, 3]. 함체는 끝이 단락된 사각 도파관으로, 사각 개구는 양끝이 단락된 전송선로로 가정 할 수 있다.

한편, 전자장비의 표시창이나 LCD 모니터, 함체에서 사용하지 않는 개구를 덮는 플라스틱 덮개 등을 유전체판으로 막힌 개구로 가정할 수 있다. 이들을 통한 전자파 간섭에 대한 이해도 점점 중요해지고 있다.

본 논문에서는 유전체판으로 막혀 있는 개구를 갖는 함체에 대한 해석 방법을 제시한다. 유전체 판에 의한 효과를 고려하기 위하여 슬롯라인 임피던스를 이용하였다. 또한 유전체 판의 개구의 반대 면에 부분적으로 도체판을 위치시켜 함체 내 도체판에 의한 효과를 고려하였다.

II. 이 론

2.1 개구만을 갖는 함체에 대한 해석

평면파가 입사되는 함체의 개구 구조와 전송선로를 통해 등가회로 회로는 그림 1 과 같다. 사각 도파관에서 장변 길이가 a 이고, 단변 길이가 b 인 경우 기본모드인 TE_{10} 만을 고려하고, 이때 전송선로 특성임피던스를 Z_g , 전파상수를 k_g 라고 한다. 개구를 폭 w 와 길이 $l/2$ 을 갖는 양끝이 단락된 두 개의 결합 선로로 가정한다.

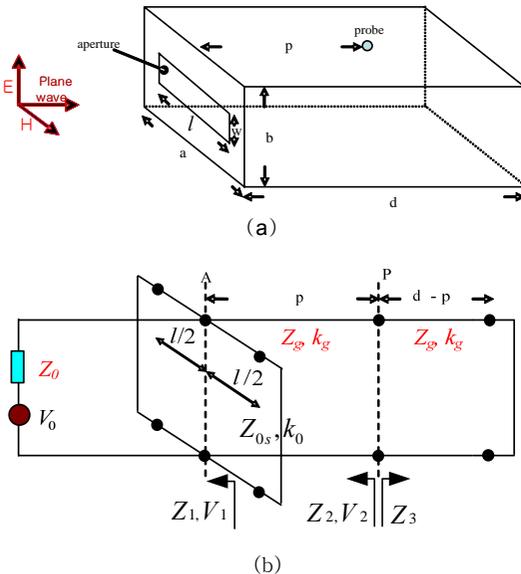


그림 1. 개구가 있는 함체와 등가회로; (a)함체 구조, (b)전송선로 등가회로

관찰위치(P)에서의 전압과 전류의 크기를 통해 내부에 아무것도 없는 함체에 관해서 분석하였다[2]. 개구의 특성임피던스를 계산하기 위하여, 개구를 중심에서 $l/2$ 만큼 떨어진 위치에 끝이 단락된 전송선로로 가정한다. 개구의 w_e (effective width)는 다음과 같다.

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{4\pi w}{t} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 t 는 함체의 두께이다. 식(1)을 통해 구한 w_e 가 $w_e < b/\sqrt{2}$ 이면 Gupta의 이론에 따라 개구의 특성임피던스 Z_{0s} 는 다음과 같다.

$$Z_{0s} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

따라서 개구 임피던스 Z_{ap} , 개구의 전압 V_1 과 임피던스 Z_1 은 다음과 같다.

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (3)$$

$$V_1 = V_0 \frac{Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} \quad (4)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0 Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} \quad (5)$$

V_0 는 공기 중에서 입사하는 평면파에 의한 전압원이고, Z_0 는 공기 중의 파동 임피던스로 377 Ω , k_0 는 전파상수로 $2\pi/\lambda$ 를 나타낸다. 따라서 사각 도파관을 표현하기 위한 특성임피던스 Z_g 와 전파상수 k_g 는 다음과 같다.

$$Z_g = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (6)$$

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (7)$$

관찰위치(P)에서의 전압 V_2 와 임피던스 Z_2 는 이다.

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos k_g p + j(Z_1/Z_g) \sin k_g p} \quad (8)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p} \quad (9)$$

관찰위치(P)에서 볼 때 종단 저항의 위치한 합체의 종단에 단락된 부분의 임피던스 Z_3 와 전압 V_p 는 다음과 같다.

$$Z_3 = jZ_g \tan k_g (d - p) \quad (10)$$

$$V_p = V_2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (11)$$

관찰위치에서 합체가 없다고 생각하면 입력 임피던스와 같은 종단 임피던스 Z_3 을 갖게 되므로 P위치의 전압은 $V_0/2$ 가 된다. 이를 이용하여 차폐효과를 계산하면 다음과 같다.

$$SE = 20 \log \left| \frac{V_0}{2V_p} \right| \quad (12)$$

2.2 유전체로 막혀있는 개구를 갖는 합체에 대한 해석

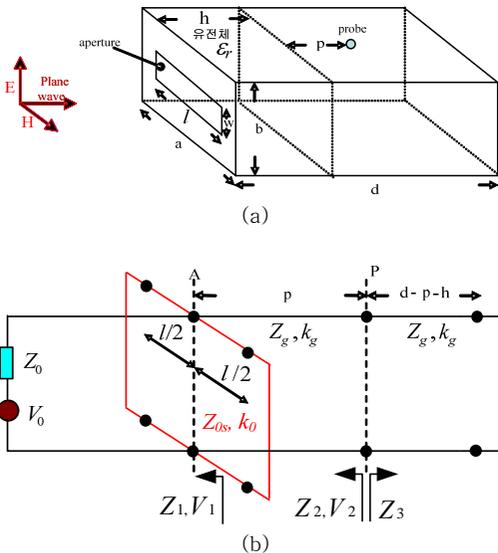


그림 2. 유전체로 막혀있는 개구가 있는 합체; (a)합체구조, (b)전송선로 등가회로

평면파가 입사되는 경우, 유전체로 막혀있는 개구를 갖는 합체 구조와 전송선로 등가회로는 그림 2와 같다.

개구 뒷면에 유전체가 위치한 경우 양끝이 단락된 개구 길이만큼의 슬롯 라인으로 볼 수 있다. 이때 슬롯 라인의 전체 폭은 합체 높이 b 와 동일하며, 슬롯 폭은 개구 폭인 w 와 동일하다.

유전체에 의한 슬롯 임피던스를 포함하는 개구 임피던스 Z_{op} 를 고려하고 위치를 등가회로 상에서 A로 나타내었다.

식 (3)에서 유전체를 포함한 슬롯 라인의 임피던스 Z_{os} 는 다음과 같다.

$$Z_{os} = \eta \frac{v}{v_g} \frac{\pi}{p} \frac{\Delta p}{\Delta \eta B_t} \quad (13)$$

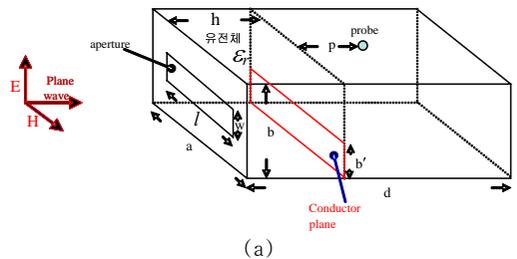
B_t 는 TE_{10} 모드에서 슬롯 면에서의 전체 서셉턴스(susceptance)를 나타낸다[6].

$$\eta B_t = \frac{l}{2a} \left[-q + u \tan \left(\frac{\pi h u}{ap} - \tan^{-1} \frac{q}{u} \right) \right] + \frac{1}{p} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} - p^2 \right) \ln \frac{2}{\pi \delta} \quad (14)$$

$\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377$ 이며, $\delta = w/b$, $u = \sqrt{\epsilon_r - p^2}$, $q = \sqrt{p^2 - 1}$, v 는 위상속도, $v_g = d\omega/d\beta$ 는 군속도이다. $\omega = 2\pi f$ 와 $p = \lambda/2l$ 이다.

2.3 개구 뒷면 유전체를 도체로 부분 코팅할 경우 해석

합체 개구를 막은 유전체 뒷면이 도체로 일부만 가려진 구조와 등가회로는 그림 3과 같다. 이 구조를 등가화하면 슬롯 라인 임피던스를 포함한 개구 임피던스와 도파관 내부에 존재하는 도체판의 서셉턴스, jB [7],의 병렬연결로 볼 수 있다.



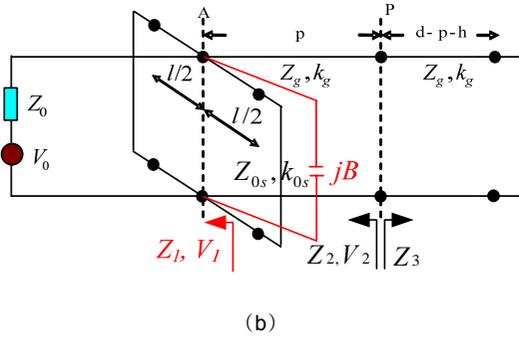


그림 3. 도체로 일부 코팅된 유전체로 막혀있는 개구가 있는 함체: (a)함체 구조, (b)전송선로 등가회로

jB 와 Z_{ap} 가 서로 평행하게 존재하게 되어 V_1 과 Z_1 이 새로운 값을 갖게 된다. 이 값을 $V_{1,new}$ 과 $Z_{1,new}$ 이라고 하면 다음과 같다.

$$V_{1,new} = V_0 \frac{jB Z_{ap}}{Z_0 Z_{ap} + jB(Z_0 + Z_{ap})} \quad (15)$$

$$Z_{1,new} = Z_0 \frac{jB Z_{ap}}{Z_0 Z_{ap} + jB(Z_0 + Z_{ap})} \quad (16)$$

식 (15), (16)을 앞 2.1 에서 설명한 방법과 동일하게 적용하여 개구와 일부분이 도체로 가려진 유전체를 갖는 경우에 대한 해석을 할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

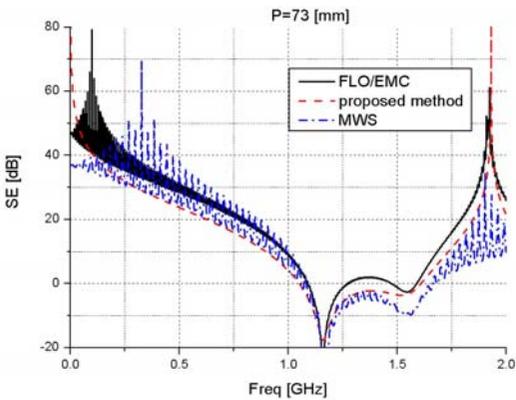


그림 4. 그림 1 구조의 해석 결과

본 논문에서 새롭게 제안된 방법을 상용 프로그램인 FLO/EMC, MWS 를 이용하여 비교검증 하

였다.

그림 1 구조에서 함체 크기를 $222 \times 55 \times 146 \text{ mm}^3$, t 는 1mm, 개구 크기를 $100 \times 4 \text{ mm}^2$ 로 가정하였다. 결과는 그림 4 와 같다.

표 1. 그림 4 의 함체 공진주파수 비교

mode	이론값	수치해석 값
TE ₁₀₁	1.23[GHz]	1.16[GHz]
TE ₂₀₁	1.70[GHz]	1.55[GHz]

수치해석 주파수가 이론적으로 구한 주파수보다 낮았다. 이론값은 개구가 없는 함체의 공진주파수이고, 수치해석 값은 개구를 갖는 함체의 공진주파수이기 때문이다.

그림 4 에서 함체의 SE 값이 1.2 GHz 에서 음의 값이 나타나는 것은 이 주파수에서 함체 공진이 발생하여 입사된 에너지보다 큰 에너지를 갖기 때문이다.

1.9 GHz 에서 SE 가 급격히 증가한 것은 관찰 위치 73mm 에서 함체의 끝까지의 거리가 약 $\lambda/2$ 가 되어 관찰위치가 단락된 것과 같은 효과가 나타나기 때문이다.

그림 2 에서 유전율을 5.5 로 가정하여 관측 위치(P)의 변화에 따른 SE 변화를 확인하면 그림 5 와 같다. 관측위치와 개구의 거리가 멀어질수록 SE 가 증가하였다. 그러나 그림 4 에서 설명한대로 관찰위치와 함체 종단면까지의 거리가 $\lambda/2$ 가 되는 주파수(관측위치 16mm 인 경우 1.25 GHz)에서 SE 가 급격히 증가하기 때문에 상기한 일반적인 추세가 부분적으로 어긋남을 볼 수 있다.

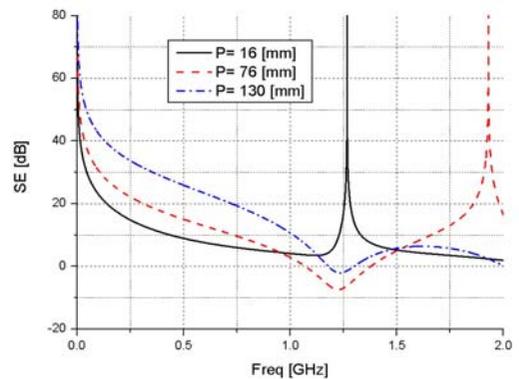


그림 5. 유전율(ϵ_r)의 변화에 따른 SE 변화

그림 4 와 그림 5 에서 관측위치 73 mm 결과를 비교하면 유전체의 유전율이 증가함에 따라 공진의 Q(Quality Factor)가 낮아짐을 알 수 있다.

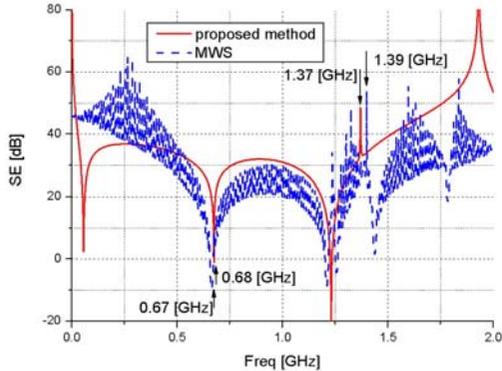


그림 6. 유전율 5.5, 유전체 뒤 도체 높이 30 mm인 경우

그림 3 의 구조에서 유전체의 유전율 5.5, 유전체 뒤쪽 도체 높이 30 mm 인 경우 SE 는 그림 6 과 같다.

제안된 방법의 경우 1 차 공진점이 0.68 GHz, 2 차 공진점이 1.37 GHz 에서, MWS 의 경우 0.67 GHz 에서 1 차 공진, 1.39 GHz 에서 2 차 공진이 발생하였다. 이처럼 제안된 방법이 상용 소프트웨어와 유사한 결과를 확인하였다.

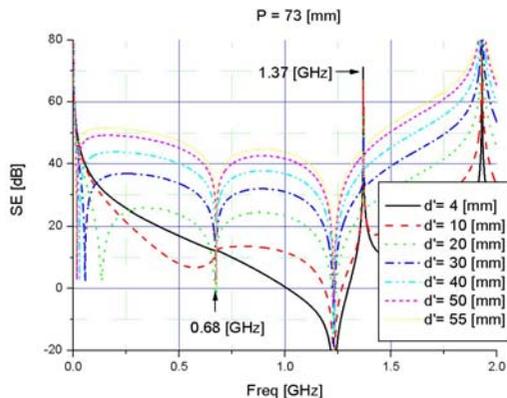


그림 7. 유전율($\epsilon_r=5.5$)의 뒤에 삽입된 도체의 높이에 따른 SE 변화

그림 3 구조에서 유전체의 유전율 5.5 일 때 도체 코팅의 높이 b' 의 변화에 따른 SE 를 그림

7 에 나타내었다. 도체면 높이 b' 이 높아짐에 따라 SE 가 증가하였다.

IV. 결 론

본 논문은 유전체를 갖는 개구를 해석하기 위하여 슬롯 라인 임피던스를 이용하는 새로운 방법을 제시 하였다. 개구면에 부착된 유전체 유전율의 증가에 따라 Q 가 감소하고, 관측위치가 개구로부터 멀어짐에 따라 SE 가 감소하였다. 또한, 유전체 반대면에 코팅된 도체의 높이가 증가함에 따라 SE 가 증가 하였으며, 코팅 도체면에 의한 추가적인 공진이 발생하였다. 즉, SE 는 함체 구조와 함체 내부에 존재하는 PCB(Printed Circuit Board)에 의하여 영향을 받게 됨을 알았다. 따라서 제시한 방법을 이용하여 개구를 통한 외부 복사전자파 영향을 빠르게 확인할 수 있으며, 함체 공진이 함체 내부 회로에 영향을 주지 않는 함체 구조 설계가 가능하다.

사 의

"본 연구는 지식경제부의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITA-2008-(C1090-0801-0034))

참 고 문 헌

- [1] 김수한, 이재현, "도체로 일부 코팅된 유전체로 막힌 개구를 갖는 함체의 차폐효과 해석", *한국통신학회 마이크로파 및 전파연구회, 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집*, 30(2), pp. 687-690, 2007
- [2] M P Robinson, J D Turner, D W P Thomas, J F Dawson, M D Ganley, A C Marvin, S J Porter, T M Benson and C. Christopoulos, "Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture," *IEEE electron Lett.*, 32(17), pp. 1559-1560, 1996.
- [3] M P Robinson, T M Benson, J F Dawson, C. Christopoulos, M D Ganley, A C Marvin, S J Porter, D W P Thomas, "Analytic formulation for the shielding effectiveness of enclosure with apertures," *IEEE Trans., on EMC*, vol. 40, No. 3, pp. 240-248, 1998.
- [4] Su-han Kim, Dong-chul Park, Jae-hyun Lee, "Shielding effectiveness of an enclosure with a

