

論文2001-38TC-11-7

## 2차원 Open Cylindrical Cavity의 전자파 투과 및 산란특성연구

## (A Study of EM Wave Penetration and Scattering of Open Cylindrical Cavity)

金永柱\* , 趙榮基\*\*

(Young-Joo Kim and Young-Ki Cho)

## 요 약

2차원 open cylindrical cavity의 전자파 투과 및 산란특성에 대해 연구하였다. 이러한 구조는 cavity 및 aperture의 크기에 따라 전파의 투과나 산란특성에 특이한 현상이 나타남에도 불구하고 정확한 분석이 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 모멘트법의 확장형인 FMM 기법을 이용하여 비교적 광범위하게 open cavity의 특성을 계산하였다. 계산결과 open cylindrical cavity의 경우 closed cavity의 internal mode에 대응하는 external mode가 존재하고, 이때 공진 및 산란특성은 비공진시와 다른 특성을 나타냄을 확인하였다. 연구결과는 전자파의 차폐 및 RCS 통제분야에 응용할 예정이다.

## Abstract

Field penetration and scattering characteristics of two dimensional open cylindrical cavity is studied. Exact analysis for this sort of structure is not achieved even if there are unusual phenomena of field penetration and scattering with cavity and aperture size. In this paper, we calculate a wide range of open cavity characteristics by using of FMM method, which is extended method of MOM. We find external mode of open cylindrical cavity corresponding to internal mode of closed cavity. The characteristics of resonance and scattering of this region is different compare with non-resonant area. The result of study will apply to the EM wave shielding and RCS control.

## I. 서론

2차원 cylindrical open cavity의 전자파 투과 및 산란은 전자파 산란특성 해석 분야에 계속적인 관심사가 되어왔다<sup>[1-6]</sup>. 이를 해석하기 위한 근사법으로는 Quasistatic limit 혹은 high frequency limit가 언급되어 왔지만, 산란체의 크기가 공진 영역과 유사한 영역에서의 해석은 여전히 문제가 되었다. 이것은 공진영역

근처에서는 Field의 수렴속도가 느릴 뿐만아니라 정확한 값을 얻기 위한 해석학적 제한이 많이 있기 때문이었다.

Frenkel<sup>[5]</sup> 및 Senior<sup>[6]</sup>는 이러한 문제를 해결하기 위하여 closed cavity 내부공진의 internal mode에 대응하는 external mode를 제안하였고 문제를 어느 정도 해결하였다. 하지만, Frenkel의 경우는 Cheby-shev polynomials 및 Logarithmic kernel의 함수적 연관관계를 고려한 근사적 방법으로 external mode를 해석하려고 시도하였고, 단지 몇 가지 경우에만 결과를 제시하였다. Senior는 적분 방정식(EFIE)을 MOM 기법으로 해석하여 문제를 해결하였지만, 저자는 결과에 대한 정확도는 확인할 수가 없다고 하였다. 하지만, 언급한 두 가지 논문에서 cylindrical open cavity의 기본적인 특

\* 正會員, 國防科學研究所

(Agency for defence development)

\*\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronics Eng. Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字:2001年8月20日, 수정완료일:2001年10月11日

성은 파악이 되었다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 Senior가 시도한 것처럼 EFIE에 기초를 두고 해석을 하였지만, 수치해석 방법으로는 MOM의 확장형으로 최근에 많이 연구되고 있는 FMM(Fast Multipole Method) 기법<sup>[7]</sup>을 사용하여 해석하였다. 그리고 공진영역에서 수렴이 느린 것을 해결하기 위해 CGM 기법을 적용하였다. FMM 기법은 해석영역이 광범위하고 경우에 따라 많은 계산시간이 소요될 수 있기 때문에 계산시간을 줄이기 위하여 사용하였고, FMM 기법에 대한 것은 direct MOM과 비교 검증후 사용하였다. Cavity에 aperture가 존재할 경우, 좀더 일반적인 경우를 조사하기 위하여 산란체의 크기를 1차 공진영역의 크기( $ka=2.4$ )에서부터  $ka=10$ 까지 확장하고, aperture의 크기도  $10^\circ$  및  $30^\circ$  그리고 경우에 따라  $90^\circ$  까지 증가시켜 cavity 내부 및 aperture에서 field와 Far field에서의 산란특성을 조사하였다.

해석결과, cavity에 aperture가 있는 경우에도 내부 공진모드에 대응하는 영역에서 공진현상이 존재하고, 이것은 cavity 및 aperture 크기에 영향을 받을 수 있었다.

## II. 이론

2차원 도체의 open cylindrical 구조는 그림1의 xy 평면에서 곡선 C에 의해 표현될 수 있다. Cylinder는 z축으로 평행하게 각도 폭  $2\alpha_c$ 의 slit aperture 가지고 있으며, shell은 매우 얇은 완전도체로 가정하였다. 따라서 좌표계는  $\rho=a$ ,  $\alpha_c \leq \phi \leq 2\pi - \alpha_c$ 로 정해지는 원통 좌표계  $\rho, \phi, z$ 로 정의할 수 있다. 평면파는 전장벡터가 Z축과 평행(E-편파)하게 입사가 된다고 가정한다. 이 경우, 문제는 2차원 문제가 되며 입사 전장벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_z^i = \hat{z} e^{-ik \cos(\phi - \phi_i)} \quad (1)$$

여기서, 전파는 각 주파수  $w$ 에 대해 단일하고, 시간 의존성  $e^{j\omega t}$ 는 생략하였다.

E 편파된 입사 평면파는 도체 cylinder 위의 Z축을 따라 표면전류  $J_z$ 를 유도하게 되고, 산란장  $E^s$ 를 발생하게 된다.

$$E_z^s(\rho) = -\hat{z} \frac{kaz_0}{4} \int_C J_z(\rho') H_0^{(1)}(k|\rho - \rho'|) dl' \quad (2)$$

(450)

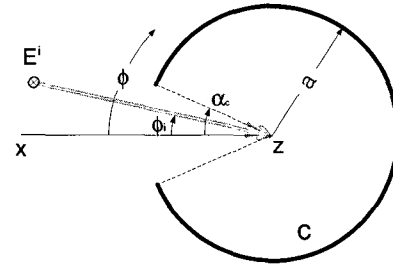


그림 1. Cylindrical Cavity 의 해석구조  
Fig. 1. Analysis Structure for Cylindrical Cavity.

여기서,  $z_0$ 는 자유 공간 임피던스,  $H_0^{(1)}$ 은 제1종 0차 Hankel 함수이며,  $\rho$  및  $\rho'$ 는 전원 및 관측점을 의미한다. 관측점  $\rho$ 를 cylinder cavity 표면으로 접근시키고, 완전도체에서의 경계조건  $E_z^i + E_z^s = 0$ 를 적용한 후 식 (2)를  $\phi$ 에 대한 적분방정식으로 변환할 경우 다음과 같다.

$$e^{ikz \cos(\phi - \phi_i)} = \frac{kaz_0}{4} \int_C J_z(\rho'(\phi)) H_0^{(1)}(\rho_{mn}) |\rho'(\phi)| d\phi, \rho \text{ on } C \quad (3)$$

여기서,  $\rho_{mn} = |\rho(\phi) - \rho'(\phi)|$ 로써 전원과 관측점사이의 거리이며, 적분영역은  $\alpha_c \leq \phi \leq 2\pi - \alpha_c$ 이다.

Cylinder shell 위의 모멘트법을 이용하여 미지의 전류  $J_z$ 를 구하기 위해 유한급수의 pulse basis 함수를 사용하였다.

$$P_n(\phi) = \begin{cases} 1 & \phi \in [\phi_n, \phi_{n+1}] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

$$J_z(\rho(\phi)) \approx \sum_{n=1}^N I_n P_n(\phi) \quad (5)$$

식 (4) 및 식 (5)를 사용하여 적분방정식 식 (3)을 이산 형태로 바꾸면 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m, m=1, 2, \dots, M \quad (6)$$

여기서,

$$Z_{mn} = \begin{cases} \frac{w\mu_0}{4} \left[ 1 + \frac{2i}{\pi} \ln \left( \frac{\gamma k \Delta_n}{4e} \right) \right] \Delta_n, n=m \\ \frac{w\mu_0}{4} \Delta_n H_0^{(1)}(k\rho_{mn}), n \neq m \end{cases} \quad (7)$$

$$I_n = J_z(\rho_n) \quad (8)$$

$$V_m = E_z^{inc}(\rho_m) \quad (9)$$

$$\rho_{mn} = |\rho_m - \rho_n|, (\gamma/4e) = 0.163805 \quad (10)$$

식 (6)은 반복법을 통하여 해를 구할 수 있으며, FMM 기법을 사용하여 행렬벡터의 연산을 가속화시킬 수 있다.

FMM의 개념은 임의의 산란체를 N개의 부산란체로 나누고, 이들 상호작용을 보다 효과적으로 고려하기 위해 부산란체들을 그룹으로 나눈다. 그리고 그룹내에 있는 각기 다른 부산란체의 산란중심을 addition theorem에 의해 그룹내의 산란중심으로 천이한다(집합, aggregation). 전원그룹의 산란중심에서 산란된 필드는 다른 그룹의 중심점으로 수신되고, 수신된 필드는 그룹내에 있는 부산란체에 재분배를 하게 된다(분배, disaggregation). 이에 대한 개념도는 그림 2와 같다. FMM 기법을 사용한다면, 행렬 벡터의 복잡성은  $O(N^2)$ 에서  $O(N^{1.5})$ 로, 계산시간 측면에서는  $O(N^3)$ 에서  $O(N^2)$ 로 줄어들게 된다.

식 (7)에 Bessel의 addition theorem을 사용하여 정리한 결과는 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

$$H_0^{(1)}(k\rho_{mn}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha \tilde{\beta}_{m'l'}(\alpha) \tilde{\tau}_{l'l}(\alpha) \tilde{\beta}_{ln}(\alpha) \quad (11)$$

여기서,

$$\tilde{\tau}_{l'l} = \sum_{l'=1}^{N/M} \sum_{p=1}^P H_p^{(1)}(k\rho_{l'l}) \exp\left[-ip(\phi_{l'l} - \alpha - \frac{\pi}{2})\right], \quad l' = 1, 2, \dots, N/M, l \neq l' \quad (12a)$$

$$\tilde{\beta}_{m'l'}(\alpha) = \sum_{m=1}^M \exp[ik\rho_{m'l'} \cos(\alpha - \phi_{m'l'})], \quad l' = 1, 2, \dots, N/M, l \neq l' \quad (12b)$$

$$\tilde{\beta}_{ln}(\alpha) = \sum_{n=1}^M \exp[ik\rho_{ln} \cos(\alpha - \phi_{ln})], \quad l = 1, 2, \dots, N/M, l \neq l' \quad (12c)$$

식 (6)을 식 (11)로 대체하고, 식 (11)를 Q point 합으로 바꿀 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{l=1}^M \sum_{l'=1}^M Z_{mn} I_n + \left\{ \frac{W\mu_0}{4Q} \sum_{q=1}^Q \tilde{\beta}_{m'l'}(\alpha_q) \cdot \tilde{\tau}_{l'l}(\alpha_q) \cdot \tilde{\beta}_{ln}(\alpha_q) \right\} \Delta_n I_n = V_m \quad (15)$$

식 (15) 등식의 좌측의 첫째항은 self 그룹 혹은 이웃 그룹( $l-l' \leq$  이웃그룹의 범위)에 대한 관계를 나타내며, 두 번째 항은 self 그룹 혹은 이웃그룹을 제외한 그

룹간의 상호작용을 나타내며, 첫 번째항  $\tilde{\beta}_{m'l'}(\alpha_q)$ 은 source 그룹,  $\tilde{\beta}_{ln}(\alpha_q)$ 는 observation 그룹 및  $\tilde{\tau}_{l'l}(\alpha_q)$ 는 그룹간의 상호작용을 나타낸다. 그룹의 크기는  $N/M = \sqrt{N}$ 으로 하였다.

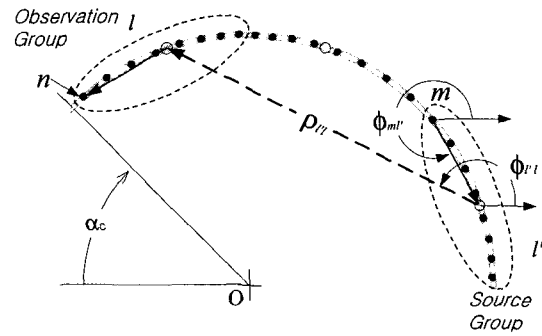


그림 2. Cavity Shell 그룹화  
Fig. 2. Grouping of Cavity Shell

### III. 수치해석 결과

#### 1. Cavity 내부 및 Aperture 에서의 전장

Cylinder에 aperture가 존재할 경우 cavity 내부 및 aperture 중앙에서의 전장을 구함으로써 입사파에 대한 내부공진 특성을 조사하였다. 식 (15)로부터 cavity shell 위의 전류분포를 계산할 경우, 입사파에 따른 전체 전장은 다음식으로 구할 수 있다.

$$E_z^t = E_z^i(\rho) + E_z^s(\rho) = E_z^i(\rho) - \frac{kaz_0}{4} \int_c J_z(\rho') H_0^{(1)}(k|\rho_{ml}) |\rho'| d\phi' \quad (16)$$

그림 3은 크기 1v/m의 평면파가 0°에서 입사할 때 식 (16)을 이용하여 ka의 크기에 따라 aperture 및 cavity 중앙에서 전계의 크기를 계산한 결과를 제시한 것이다.

그림 3(a)에서 보면 aperture 중앙에서의 전장은 closed cavity의 1차 공진 주파수 직전까지 계속 증가하다가 1차 공진 주파수에서 갑자기 떨어진다. 이러한 변화는 계산 전영역의 각 공진 주파수에서 비슷한 경향을 보여 주었다. 다만, aperture의 크기가 커질수록 ka에 따라 침투치의 크기가 작아지고, 왜곡 현상이 나타나기 시작했다.

Senior의 결과와 비교해 보면 1차 공진 주파수까지는

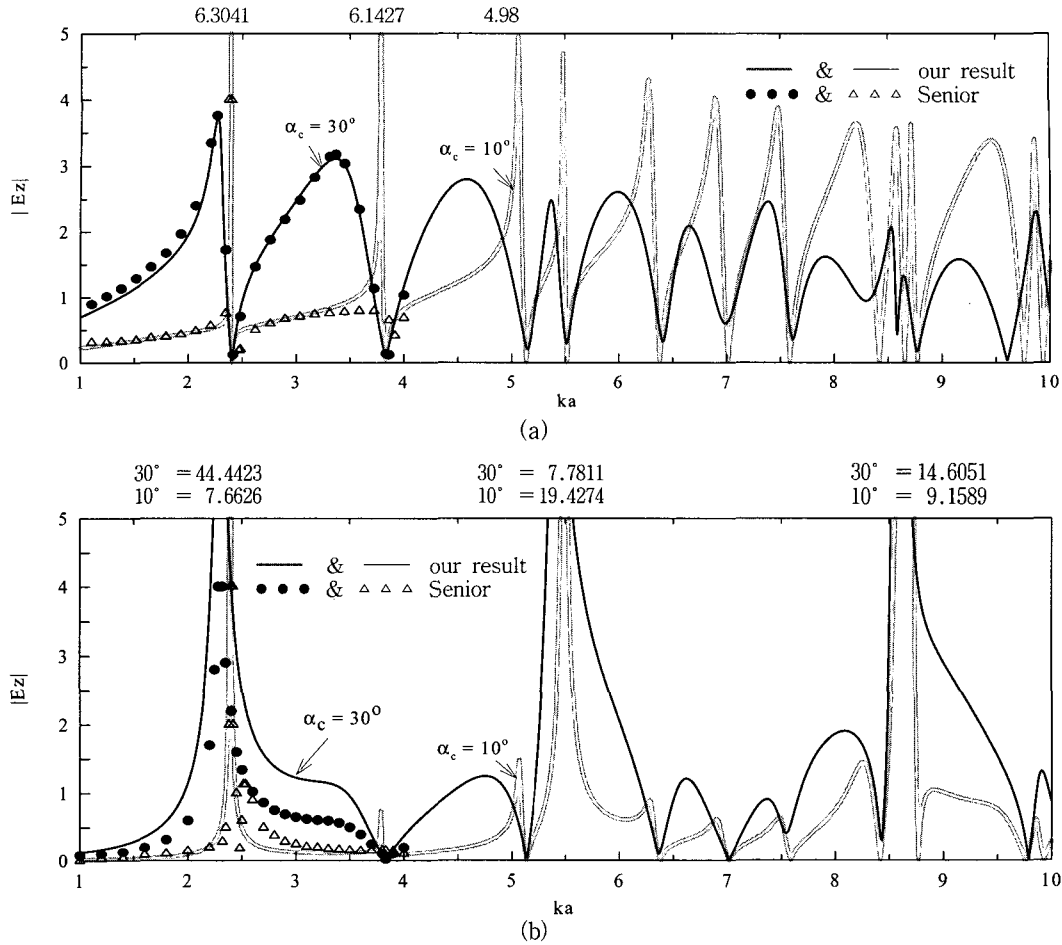


그림 3. Aperture 중심 및 Cavity 중심에서 전장  
 (a) Aperture 중심에서 전장 (b) Cavity 중심에서 전장  
 Fig. 3. Electric Field of Aperture Center and Cavity Center  
 (a) Electric Field of Aperture Center (b) Electric Field of Cavity Center

거의 일치하지만 2차 공진 지점의 결과는 10°에서 다르게 나타났다<sup>[6]</sup>. 즉, Senior는 aperture가 10°일 때 중앙에서 2차 공진 현상이 나타나는 것을 확인하지 못했다고 했지만, 계산결과 2차 공진현상도 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 지속적인 공진주파수 근처의 계산결과를 볼 때 2차 공진현상도 나타나는 것이 올바른 결과라고 판단된다. 이것은 그림 3(b)의 cavity 중앙에서의 전계 크기의 계산결과에서도 나타난다. 10° 및 30°에서 ka에 따른 |Ez|의 크기는 다소 차이가 나지만, 1차 공진 주파수 근처에서는 Senior가 예측한 것처럼 최대치가 발생했고, 2차 공진 근처에서도 공진현상이라고는 볼 수 없지만 Senior 결과와는 조금 다르게 나타났으며, 이러한 현상은 주기적으로 나타났다.

그림3의 결과를 종합 정리한 것이 표1 및 표2이다. 표에서 min 및 max의 값은 입사전계에 대한 상대적인 전계 크기 |Ez|이며, ( )안에 나타내었다. 그리고, 0°의 값은 참고문헌<sup>[9]</sup>에서 제시한 Bessel 함수  $J_m(x_{mn})=0$ 로 하는 ka의 값이다. 이것은 closed cavity와 open cavity의 특성을 비교하기 위해 참고적으로 제시하였다.

표 1 및 표 2를 보면, aperture의 각이 10°일 경우, aperture 및 cavity 중앙에서의 전장이 0(최소값)인 지점은 ka에 따라 closed cavity의 공진 주파수와 거의 일치하지만, 30°의 경우는 ka의 값이 다소 적은 부분(m 및 n의 값이 적은 경우)에서만 일치하고 ka가 커질수록 다소 벗어나는 경향이 있다.

특이한 현상은 aperture가 있을 경우, aperture의 크

표 1.  $ka$  및 Aperture 크기에 따른 Aperte 중앙에서의 전계  
Table 1. Electric Field of Aperture Center with  $ka$  and Aperture Size.

n	m		0	1	2	3	4	5	6
1	0°		2.404	3.832	5.136	6.380	7.588	8.772	9.936
	10°	min	2.404(0.04)	3.832(0.008)	5.136(0.009)	6.380(0.015)	7.588(0.027)	8.772(0.016)	9.938(0.026)
		max	2.392(6.30)	3.788(6.143)	5.064(4.980)	5.486(4.696)	7.480(3.878)	8.716(3.635)	9.858(3.396)
	30°	min	2.404(0.04)	3.832(0.111)	5.148(0.205)	6.410(0.321)	7.616(0.354)	8.768(0.173)	9.604(0.037)
		max	2.268(3.73)	3.364(3.110)	4.580(2.792)	5.990(2.605)	7.384(2.459)	8.642(1.329)	-
2	0°		5.520	7.016	8.417	9.781			
	10°	min	5.520(0.008)	7.016(0.016)	8.418(0.024)	9.762(0.029)			
		max	5.486(4.696)	6.902(4.037)	8.206(3.648)	9.458(3.391)			
	30°	min	5.514(2.484)	6.990(0.604)	8.294(0.940)	9.604(0.037)			
		max	5.372(2.484)	6.652(2.089)	7.914(1.6121)	9.156(1.576)			
3	0°		8.654						
	10°	min	8.654(0.025)						
		max	8.578(2.574)						
	30°	min	8.582(0.426)						
		max	8.528(2.071)						

표 2.  $ka$  및 Aperture 크기에 따른 Cavity 중앙에서의 전계  
Table 2. Electric Field of Cavity Center with  $ka$  and Aperture Size.

n	m		0	1	2	3	4	5	6
1	0°		2.404	3.832	5.1357	6.380	7.588	8.772	9.936
	10°	min	-	3.832(0.001)	5.136(0.004)	6.38(0.0004)	7.588(0.001)	8.770(0.013)	9.934(0.023)
		max	2.392(44.44)	-	5.066(1.480)	-	-	8.712(9.612)	-
	30°	min	-	3.832(0.001)	5.134(0.002)	6.368(0.104)	7.544(0.407)	8.768(0.173)	9.604(0.037)
		max	2.30(7.6626)	-	4.75(1.245)	-	-	8.642(1.329)	-
2	0°		5.5201	7.016	8.417	9.781			
	10°	min	-	7.016(0.001)	8.418(0.015)	9.760(0.003)			
		max	5.488(19.43)	-	8.256(1.448)	-			
	30°	min	-	7.016(0.009)	-	9.624(0.017)			
		max	5.418(7.78)	-	7.914(1.612)	-			
3	0°		8.654						
	10°	min	-						
		max	8.604(9.16)						
	30°	min	-						
		max	8.574(14.61)						

기에 상관없이 closed cavity의  $m=0(n=1,2,3)$  모드의 근처에서만 강한 공진이 일어난다는 것이 확인되었다.

특히, 1차 공진인  $ka=2.392$ 의 경우는 중앙에서 입사 전계에 약 44배 정도의 크기의 전계가 발생하였다.

위의 결과를 종합해 보면, aperture가 존재할 경우에도 공진모드가 존재하며, 이는 내부공진 모드에 영향을 받을 수 있었다. 하지만, 내부 공진모드의 전체 모드에 대응하여 발생하지는 않으며 특정 모드에 국한된다는 것을 알 수 있었다.

2. 산란특성 계산

앞절에서 계산된 공진 주파수에서 open cavity의 산란특성을 분석하기 위하여  $ka$  및 aperture의 크기에 따른 전파 반사특성을 분석하였다.

Aperture가 있는 cavity의 전파 반사특성은 입사파에 대한 전자파의 산란전계의 크기를 구함으로써 계산

할 수 있다.

0°의 입사각으로 크기 1인 평면파가 입사할 때, closed cavity 및 open cavity의 aperture의 각도를 10° 및 30°, 그리고  $ka$ 의 크기를 1에서 10까지 변화시키며 계산한 결과는 그림 4와 같다.

그림 4에서  $ka$  및 aperture의 변화에 따른 RCS의 변화(관측각 0°)를 그림 3과 비교하면, closed cavity 경우는 일정하게 변화하는 반면, aperture가 있는 경우는 심한 변화를 보여 주고 있다. 이러한 변화는 중앙에서의 전계의 변화 곡선보다는 aperture의 전계변화 주기성과 거의 일치함을 알 수 있다.

즉, 그림 4에서 aperture가 있는 경우, RCS가 최대한 지점들은 외부공진이 일어나는 지점이며, 최소로 떨어졌다가 증가하면서 closed cavity RCS 곡선과 마주치는 부분은 내부공진 지점이다.

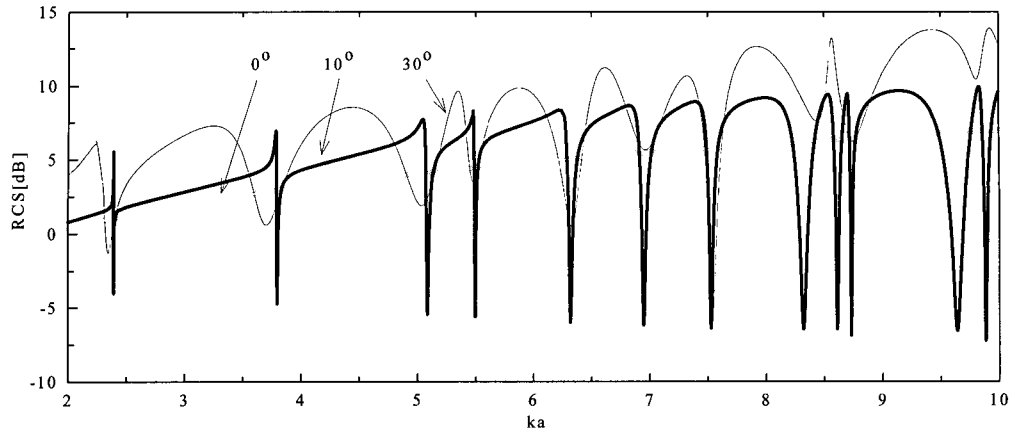
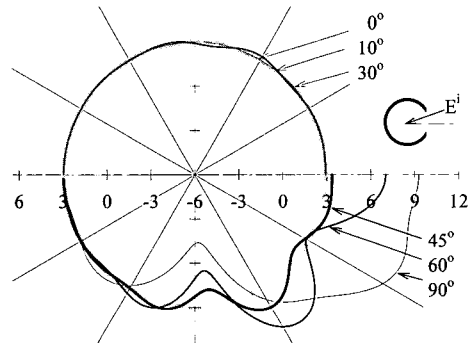
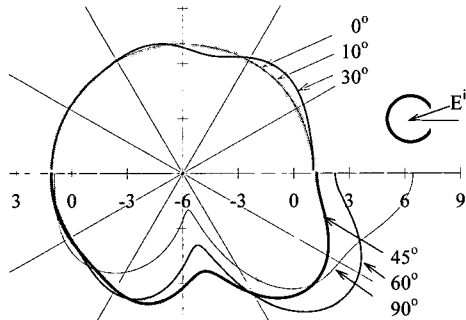


그림 4.  $ka$  및 Aperture 에 변화에 따른 RCS(입사각  $0^\circ$ , 관측각  $0^\circ$ )  
 Fig. 4. RCS with variation of  $ka$  and Aperture(incident and observation angle =  $0^\circ$ )

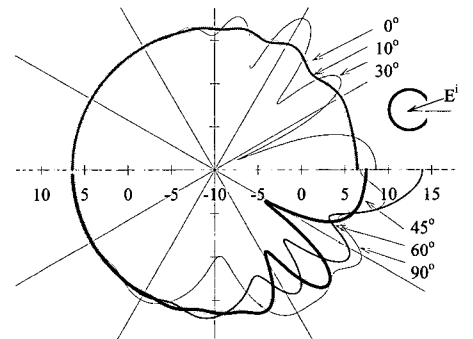
그리고, aperture가 작은 경우( $10^\circ$ )는 전계 및 RCS 변화곡선이 거의 일치하지만,  $30^\circ$  경우에는  $ka$ 가 8이하 일 경우에만 일치하고  $ka$ 가 8이상에서는 불일치하는 경향을 보여준다. 또한, 논문에서는 제시하지는 않았지만 aperture의 크기를 증가할 경우는 불일치하는  $ka$ 의 값도 점점 낮아진다. 이 결과는 aperture가 있더라도 각도가 작으면  $ka$ 의 값에 상관없이 closed cavity와 거의



(c)  $ka = 3.832 \phi_i = 0^\circ$ , monostatic



(a)  $ka = 2.404 \phi_i = 0^\circ$ , monostatic



(d)  $ka = 8.654 \phi_i = 0^\circ$ , monostatic

그림 5.  $ka$  및 Aperture 크기에 따른 monostatic RCS  
 Fig. 5. Monostatic RCS with  $ka$  and Aperture Size

동일한 특성을 가질 수 있으며, 계산결과 이 범위는  $ka$  8이하, aperture 각도가  $30^\circ$  이내이다.

Aperture의 전계변화에 대한 RCS 변화를 보다 자세히 분석하기 위해 mono-static 및 bi-static RCS와 forward 및 backward 산란특성을 계산하였다. 먼저, 공

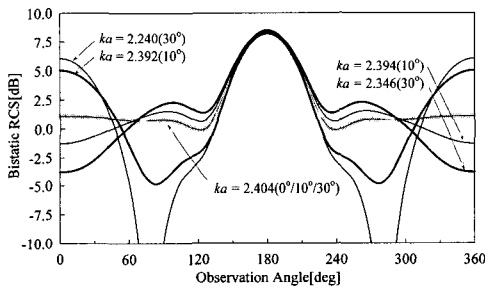
진 및 비공진 주파수 및  $ka$ 의 크기에 따른 산란특성을 비교하기 위하여,  $ka=2.404$ (1차 내부공진,  $m=0, n=1$ ),  $3.0$ (비공진 지점),  $3.8318$ (2차 내부공진,  $m=1, n=1$ ) 및  $8.654$ (12차 내부공진,  $m=0, n=3$ )에 대한 monostatic을 계산하였고 결과는 그림 5에 제시하였다. Monostatic 계산에서는 aperture의 각도를  $90^\circ$ 까지 확장하여 그 변화를 분석하였다.

그림 5(a) 및 (c)는 1 및 2차 내부공진이 일어나는 지점에 대한 변화로서, aperture가  $10^\circ$  및  $30^\circ$  일때에도 closed cavity의 RCS 특성과 거의 동일하다. 따라서, 앞에서 언급한바와 같이 aperture가 존재하더라도 일정한 각도만 유지한다면 closed cavity의 반사특성과 동일한 특성을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이것은 그림 5(b) 및 (d)의 결과를 보면 더 욱 잘 알 수

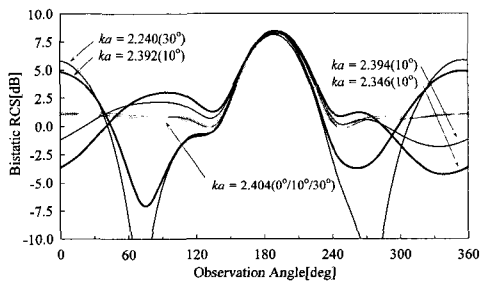
있으며, 그림 (b) 및 (d)에서  $10^\circ$ 에서는 어느 정도 closed cavity와 비슷한 특성을 보여 주지만  $30^\circ$  이상이 되면 완전히 달라지기 시작한다

Aperture의 반대쪽에서 forward 산란특성은  $ka$  및 aperture 크기에 상관없이 closed cavity와 동일한 반사 특성을 유지하지만, 변화가 일어나는 각도는 aperture의 각도와 관계가 있다.

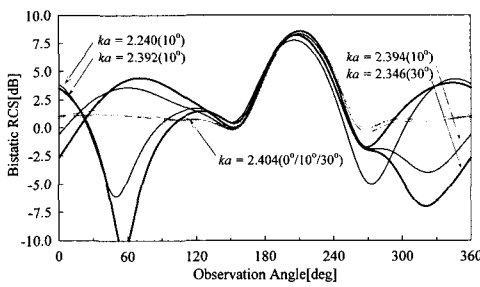
내부 및 외부 공진 주파수 근처에서 forward scattering 특성을 조사하기 위해 평면파 입사각도에 따른 Bistatic RCS를 계산하였고 그림 6 및 그림 7에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 내부공진 주파수에서 aperture가 존재해도 입사각에 따른 Bistatic RCS 값은 closed cavity와 완전히 동일하다. 하지만, 내부 공진주파수 근처(외부 공진주파수 포함)에서  $ka$ 의 작은



(a)  $\phi_i = 0^\circ$

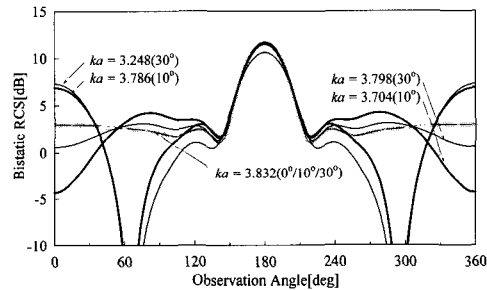


(b)  $\phi_i = 10^\circ$

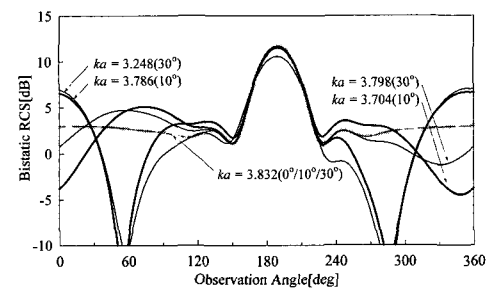


(c)  $\phi_i = 30^\circ$

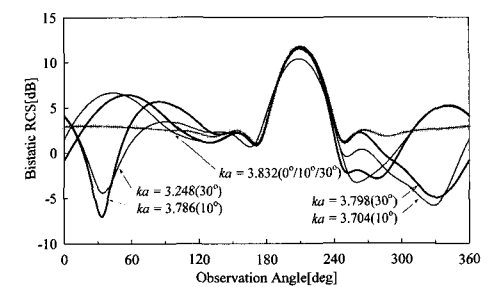
그림 6. 공진주파수( $ka=2.404$ ) 근처에서의 Bistatic RCS  
Fig. 6. Bistatic RCS near the resonant frequency ( $ka=2.404$ ).



(a)  $\phi_i = 0^\circ$



(b)  $\phi_i = 10^\circ$



(c)  $\phi_i = 30^\circ$

그림 7. 공진주파수( $ka=3.832$ ) 근처에서의 Bistatic RCS  
Fig. 7. Bistatic RCS near the resonant frequency ( $ka=3.832$ ).

변화에도 backward scattering의 변화가 매우 심함을 확인할 수 있다.

이 결과를 통해 공진 주파수를 중심으로  $ka$  및 aperture의 각도를 조절할 경우 RCS의 값을 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 그림 6 및 그림 7의 각 공진 주파수 근처의  $ka$  값의 선택은 그림 4에서 공진 주파수에서 monostatic RCS의 최대 및 최소값이다.

#### IV. 결 론

2차원 도체 open cylindrical cavity의 field 투과 및 산란특성에 대한 FMM 기법을 이용하여 광범위한 연구를 수행하여 결과를 제시하였다.

Aperture가 있는 경우에 closed cavity 내부 공진 모드에 대응하는 외부 공진모드가 존재하고 이것은 cavity의 크기 및 aperture의 크기에 밀접한 영향이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 외부 공진모드에서 cavity 내부 및 aperture 중앙에서의 field는 내부 공진에 강하게 영향을 받으며 입사전계에 비해 수십배에 달하는 field가 발생한다는 것도 확인되었다. 이 현상은 cavity의 크기가 작은 경우뿐만 아니라 크기가 비교적 큰 경우에도 발생하며 이러한 현상은 cavity의 내부 field 뿐만 아니라 far field에서의 산란특성에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이 경우 내부 field 보다는 aperture에서의 field가 far field에 더 많은 영향을 미친다. 이러한 현상에 대한 해석결과는 비교적 처리가 하기가 어려운 전자파 차폐 문제나 실린더형 구조의 전파 산란을 억제하기 위한 RCS 통제분야에 응용이 가능하리라 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T.B.A. Senior and G.A. Desjardins, "Electromagnetics penetration into a spherical cavity", IEEE trans. Electromagn. Copmpat, Vol. EMC-16, pp. 205-208, Nov 1974.
- [2] L.L., Wilton D.R., Herrison M.G. and Wright E. H., "A comparison of GTD and integral equation for analysis of reflect antennas", IEEE Trans., AP-20, pp 705-712, 1972.
- [3] Bulter, C.M., and Wilton D.R., "General analysis of narrow strips", IEEE Trans., AP-28, pp. 42-48, 1980.
- [4] M. G. Andreasen, "Scattering from parallel metallic cylinders with arbitrary cross sections", IEEE Trans., Vol. AP-12 No 6, pp746-754, Nov. 1964.
- [5] A. Frenkel, "External modes of two-dimensional thin scatters", IEEE Proc., Vol. 130, Pt. H, No 3, pp 209-214, April 1983.
- [6] Senior, T.B.A. "Electromagnetic field penetration into a cylindrical cavity", ibid, EMC-18, pp. 71-73, 1976.
- [7] C.C. Lu and W.C.Chew, "Fast algorithm for solving hybrid integral equations", IEE Proc.-H, Vol. 140 No 6, pp. 455-460, December 1993.
- [8] R. F. Harrington, "Field computation by moment methods", MacMiian Company, pp 41-61, 1968.
- [10] C.A.Balanis, "Advanced engineering electro magnetics", John Wiley & Sons, pp 470-490, 1989.

#### 저 자 소 개



金永柱(正會員)

1984년 2월 : 경북대학교 전자공학과(학사). 1986년 2월 : 경북대학교 전자.전기공학부(공학석사). 1995년 3월~현재 : 경북대학교 전자.전기공학부(박사과정). 1986년 2월~현재 : 국방과학연구소 제2체계개발본부 선임연구원. [주관심 분야] 레이더 공학, 전자파 산란, RCS 예측/분석 및 감소설계



趙榮基(正會員)

1978년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사). 1981년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1998년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 1981년 9월~현재 : 경북대학교 전자.전기공학부 교수. [주관심 분야] 안테나 이론, 마이크로파 공학, 전자기 산란 및 전자기 이론