

원통형 유전체와 공동에 대한 전자기파 공진산란이론의 배경성분

Background coefficients of the scattering from dielectric cylinder and cavity in the
Resonance scattering theory

정용화, 전상봉, 안창희, 최명선* · 영남대학교 전자정보공학부, 물리학과*
Yong-Hwa Jung, Sang-Bong Jeon, Chang-Hoi Ahn, Myoung-Seon Choi*
School of EECS, Dept. of Physics*, Yeungnam University

ABSTRACT

Resonance Scattering Theory (RST) offers us an interpretation of the resonance phenomena in the scattered field. It is shown that the scattered field consists of the resonance and background components in the RST. The suitable background is necessary in order to obtain the resonance component. In this study, the background coefficients are investigated to obtain resonance components from electromagnetic scattering field for cylindrical object with different permittivities. We show some valid results valid for two models; cavity and dielectric cylinder.

요약

공진산란이론은 산란장의 공진현상을 물리적으로 해석해주는 이론으로, 산란장은 공진성분과 비공진성분 즉 배경성분으로 구성되어 있다고 가정한다. 따라서 공진 성분을 산란장으로

부터 추출하기 위해서는 정확한 배경성분을 구하는 과정이 필요한데, 본 연구에서는 원통형 유전체와 공동에 의한 산란장으로부터 공진성분을 얻기 위한 배경성분을 제시하고, 수치 계산을 수행하여 타당성을 확인하였다.

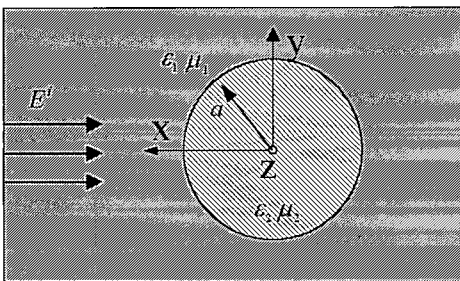
I. 서론

전자기파에 의한 산란장의 공진 현상은 그 물체의 형상과 그 물체의 특징, 즉 유전율 및 투자율에 관계되는데 이러한 공진성분의 특징은 원거리 감지, 비파괴 검사에 응용될 수 있다. 기존의 공진산란이론(Resonance Scattering Theory)에 의하면 산란장은 공진성분과 비공진성분 즉 배경성분으로 구성 되어있다고 가정하고, 적당한 배경성분을 사용하여 산란장으로부터 배경성분을 빼서 공진성분을 추출하였다[1]. 지난 수 십년 동안 음향학 분야에서 다양한 모델의 산란체에 의한 산란장으로부터 공진성분을 구하기 위해 실험 및 이론적 방법이 개발되고 수행되어 왔다. 배경성분에 대한 몇 가지 모델이 제안되고 성공적으로 수행되어 왔으나, 주파수 및 쉘의 두께 등에 제한 있어

정확한 이론이 제시되지 못했고, 공진성분의 위상성분은 바르게 얻지 못했다. 최근 음향학 분야에서 배경성분에 대한 이론이 개발되고, 공진성분의 위상성분을 바르게 얻을 수 있는 새로운 공진산란이론이 개발되었고, 성공적으로 적용되었다[2]. 새로운 공진산란이론에서는 산란장이 공진성분과 배경성분, 그리고 이들의 상호 간섭 항으로 구성되어 있다고 제안했다. 한편 음파와 유사한 전자기파 분야에서 유전체에 의한 산란장 문제에 새로운 공진산란이론을 적용하고 바른 결과를 얻었다. 본 논문에서는 원통형 유전체, 공동에 의한 산란장의 공진성분을 추출하기 위해 적당한 배경성분을 사용한 새로운 공진산란이론을 적용했다. 수치해석 결과 제시한 배경성분이 물리적으로 타당한 결과를 얻었다.

II. 산란계수

[그림 1]은 원통형 산란체에 전자기파가 x방향으로 수직으로 입사하는 경우를 나타낸다.



[그림 1] 원통형 산란체에 수직으로 입사하는 전자기파

[Fig. 1] Geometry of a cylindrical object

여기에서 a 는 산란체의 반경이고, ϵ_1, ϵ_2 는 각각 외부 매질의 유전율과 산란체의 유전율이

다. 원통형 산란체의 산란장은 Rayleigh 정규 모드로 표현할 수 있고 전계의 방향에 의해 TM모드, TE모드로 나누어 생각할 수 있다. 또한 투자율은 $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 이다. 산란장의 산란계수는 경계조건에 의해 구할 수 있으며, TM모드의 경우 산란계수는 정규 임피던스 항으로 표현할 수 있다.[3]

$$R_n^{TM} = -\frac{x_1 J_n(x_1) - iZ_n x_1 J_n'(x_1)}{x_1 H_n^{(1)}(x_1) - iZ_n x_1 H_n^{(1)'}(x_1)} \quad (1)$$

식(1)은 TM모드의 산란계수로서 여기서 $x_1 = k_1 a$ 는 외부매질의 무차원 주파수이고, k_1 는 외부매질의 파수이다. 그리고 $H_n^{(1)}$ 은 원통형 1차 Hankel 함수이고, J_n 은 1종 Bessel 함수이고, J_n' 는 x_1 에 대한 미분을 나타낸다. 여기서 iZ_n 는 산란체의 특징을 가진 정규화된 임피던스이다. 원통형 산란체인 iZ_n 인 경우 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$iZ_n = \frac{k_1 \mu_2}{k_2 \mu_1} \frac{J_n(x_1)}{J_n'(x_1)} \quad (2)$$

여기서 $k_2 = nk_1$ 유전체의 전파상수이며, 굴절상수는 $n = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 / \mu_2 \epsilon_2}$. TE모드의 경우 산란계수는 어드미턴스의 항으로 표현된다.

$$R_n^{TE} = -\frac{x_1 J_n(x_1) - iY_n x_1 J_n'(x_1)}{x_1 H_n^{(1)}(x_1) - iY_n x_1 H_n^{(1)'}(x_1)} \quad (3)$$

여기서 iY_n 는 정규화된 표면 어드미턴스로서 식(4)와 같이 주어진다.

$$iY_n = \frac{k_1 \epsilon_2}{k_2 \epsilon_1} \frac{J_n(x_1)}{J_n'(x_1)} \quad (4)$$

Ⅲ. 공진산란이론

핵물리학에서 도입한 공진산란이론에서 부분파 산란함수는 식(5)와 같이 정의된다.

$$S_n = 1 + 2R_n \quad (5)$$

여기서 R_n 은 산란계수를 나타낸다. PEC, PMC의 TM모드의 산란함수는 식(6), 식(7)과 같이 주어진다.

$$S_n^{(1)} = -\frac{H_n^{(1)}(x_1)}{H_n^{(1)}(x_1)} = e^{(2i\xi_n^{(1)})} \quad (6)$$

$$S_n^{(2)} = -\frac{H_n^{(2)}(x_1)}{H_n^{(1)}(x_1)} = e^{(2i\xi_n^{(2)})} \quad (7)$$

원통형 유전체인 경우 산란 함수 S_n 을 식(6), 식(7)을 이용하여 식(8), 식(9)로 표현할 수 있다.

$$S_n = S_n^{(1)} \frac{F_n - z_n^{(2)}}{F_n - z_n^{(1)}} \quad (8)$$

$$S_n = S_n^{(2)} \frac{1/F_n - 1/z_n^{(2)}}{1/F_n - 1/z_n^{(1)}} \quad (9)$$

여기서 F_n 은 TM모드, TE모드에 대하여 각각 $x_1 i Z_n$, $x_1 i Y_n$ 이 된다. 식(6), 식(7)을 이용하여 산란장의 $S_n - 1 = 2R_n$ 항을 공진주파수 부근에서 근사화하면, 식(10), 식(11)와 같이 두 항으로 나눌 수 있다.

$$S_n - 1 = 2ie^{2i\xi_n^{(1)}} \left(\frac{-\Delta_n}{F_n - r_n - i\Delta_n} \right) + \left(e^{i\xi_n^{(1)}} \sin \xi_n \right) \quad (10)$$

$$S_n - 1 = 2ie^{2i\xi_n^{(2)}} \left(\frac{-1/\Delta_n}{1/F_n - 1/r_n - 1/i\Delta_n} \right) + \left(e^{i\xi_n^{(2)}} \sin \xi_n^{(2)} \right) \quad (11)$$

여기서 r_n , Δ_n 은 각각 $x_1 H_n^{(1)'}(x_1)/H_n^{(1)}(x_1)$ 의 실수 성분과 허수 성분을 나타낸다.

식(10)과, 식(11)의 우변의 첫번째 항은 Breit-Wigner 형태의 함수로써 공진성분을 나타내며, 두번째 항은 배경성분을 나타낸다. 기존의 공진산란이론에 의하면 각 모드의 산란함수는 공진성분과 배경성분의 합으로 나타낸다. 즉 공진성분은 배경성분을 제거함으로 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 반면에 새로운 공진산란이론에 의하면 산란함수는 식(12)과 같이 주어진다.[4]

$$S_n = S_n^{(b)} S_n^{(reso)} \quad (12)$$

윗식에서 각각의 산란함수는 unitary조건에 의해 $|S_n| = |S_n^{(b)}| = |S_n^{(reso)}| = 1$. 여기서 배경 산란함수 $S_n^{(b)}$ 는 식(13)으로 정의된다.

$$S_n^{(b)} = 1 + 2R_n^{(b)} \quad (13)$$

또한 공진산란 함수는 식(14)로 주어진다.

$$S_n^{(reso)} = 1 + 2R_n^{(reso)} \quad (14)$$

식(8), 식(9) 그리고 식(12)을 사용하여 식(15), 식(16)로 표현되는 공진산란계수를 얻을 수 있다.

$$R_n^{(reso)(1)} = \frac{-i\Delta}{z_n^{(1)} - F_n} \quad (15)$$

$$R_n^{(reso)(2)} = \frac{-i1/\Delta_n}{1/z_n^{(1)} - 1/F_n} \quad (16)$$

식(12)에 주어진 공진산란함수는 공진산란계수로 표현할 수 있다.

$$R_n = R_n^{(b)} + R_n^{(reso)} + 2R_n^{(reso)}R_n^{(b)} \quad (17)$$

식(17)에서 전체 공진산란계수는 세 성분으로 구성되어 있다. 즉 공진, 배경, 그리고 상호간섭성분으로 이루어져 있다. 결과적으로 새로운 공진산란이론에서는 기존의 공진이론에서 제시한 성분과 상호간섭항이 추가되어 위상성분이 다름을 알 수 있다. 비손실 매질에서 산란함수 $|S_n^{(b)}| = |1 + S_n^{(b)}| = 1$ 에 의하여 식(17)에서 공진성분의 절대치는 식(18)과 같이 표현된다.

$$|R_n - R_n^{(b)}| = |1 + R_n^{(reso)}| = 1 \quad (18)$$

식(18)은 수치계산에서 공진산란계수에 의해 공진스펙트럼을 바로 구할 수 있음을 보여준다.

IV. 배경성분

산란장에서 공진성분을 계산하기 위해서 배경성분이 요구되어 진다. 전자기파 문제에서 동일한 모델에서 전자기파가 내부로 침투할 수 없는 경우의 산란계수를 배경성분으로 사용할 수 있다. 본 논문에서는 원통형 PEC, PMC의 산란계수를 이용하였다.

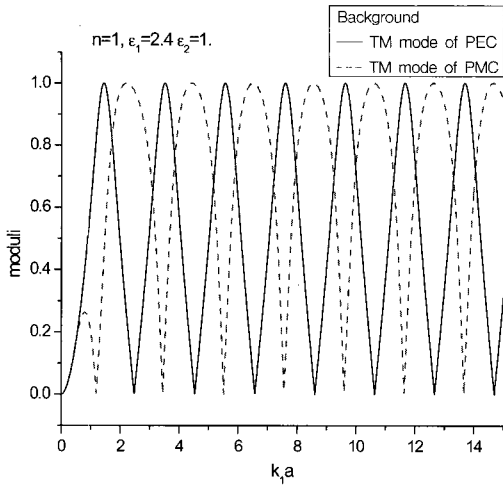
$$R_n^{(b)} = -\frac{J_n(x_1)}{H_n^{(1)}(x_1)} \quad (19)$$

$$R_n^{(b)} = -\frac{J_n'(x_1)}{H_n^{(1)'}(x_1)} \quad (20)$$

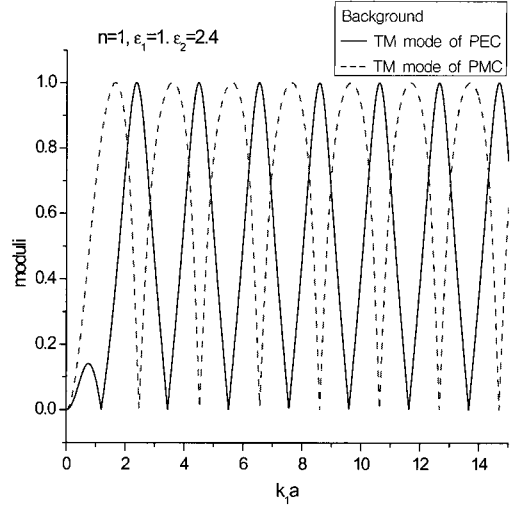
식(19)은 PEC에서 TM모드의 산란계수를 나타내며, 식(20)은 PMC에서 TM모드의 산란계수를 나타낸다. TE모드의 경우 식(19)과 식(20)은 교체된다.

V. 수치해석결과

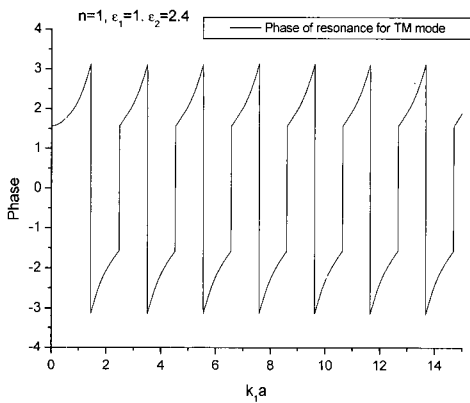
본 연구에서는 원통형 유전체와 공동에 의한 전자기파 문제를 새로운 공진산란이론을 적용하여 계산하였다. [그림 2]와 [그림 3]은 원통형 산란체의 유전율이 $\epsilon_2 = 2.4$ 이고 모드 $n=1$ 인 경우 계산한 결과를 나타낸다. [그림 2]와 [그림 3]의 (a)는 각각 TM 모드, TE모드의 전체 산란장에서 PEC(solid line) 배경성분과 PMC 배경성분 (dashed line)을 적용하여 얻은 결과이다. 결과에서는 PEC 배경성분이 적당하다는 것을 보여준다. 주파수에 따른 공진 성분의 크기가 Breit-Wigner 형태로 나타나 물리적으로 타당함을 보여준다. 또한 [그림 2], [그림 3]의 (b)는 각 모드에서 공진성분의 위상을 나타낸다. 위상성분은 각각 공진주파수에서 위상의 도약이 있음을 알 수 있다. [그림 4]와 그림 5는 외부 매질의 유전율이 $\epsilon_1 = 2.4$ 이고, 공동이 공기인 경우 공진스펙트럼을 얻은 결과이다. 배경성분은 PEC 및 PMC의 산란계수를 적용하여 계산결과를 비교하였다. [그림 4]와 [그림 5]의 (a)에서 PMC의 배경성분을 적용하여 얻은 공진스펙트럼이 물리적으로 타당한 결과를 보여주고 있고, [그림 4]와 [그림 5]의 (b)의 위상 결과에서도 공진주파수에서 위상도약이 있음을 보여준다. 수치 계산 결과에 의하여 <표 1>에 각 모드와 모델에 대한 배경성분을 나타냈다. 결과적으로 원통형 유전체와 공동의 전자기파 산란장에서 공진스펙트럼을 얻기 위해 <표 1>의 배경성분을 각각 이용할 수 있다.



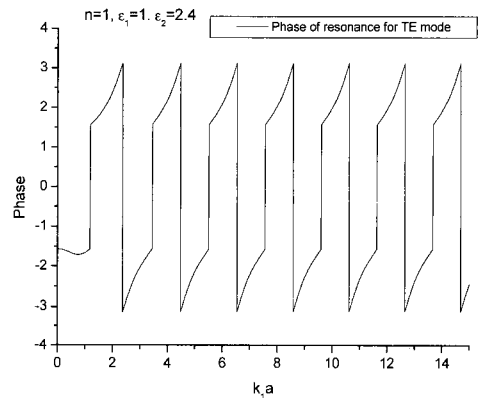
(a)



(a)



(b)



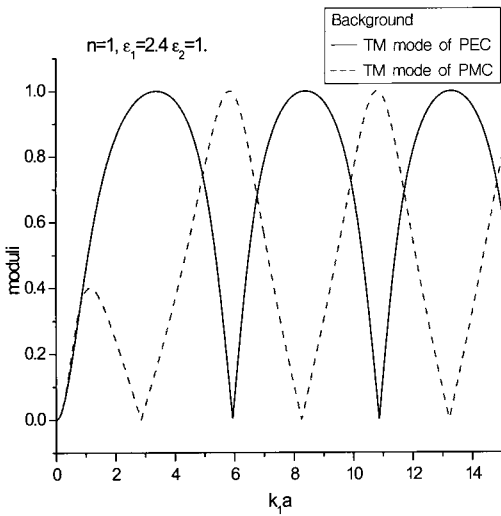
(b)

[그림 2] TM모드의 PEC, PMC 산란계수를 이용한 배경성분의 비교

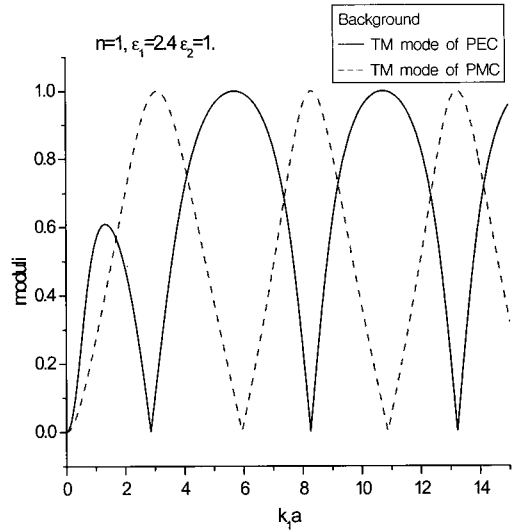
[Fig 2] (a) Moduli using the scattering coefficients of PEC (solid line) and PMC (dashed line) (b) phases of resonance using the new RST with PEC background coefficient for TM mode of dielectric cylinder ($\epsilon_2 = 2.4$)

[그림 3] TE모드의 PEC, PMC 산란계수를 이용한 배경성분의 비교

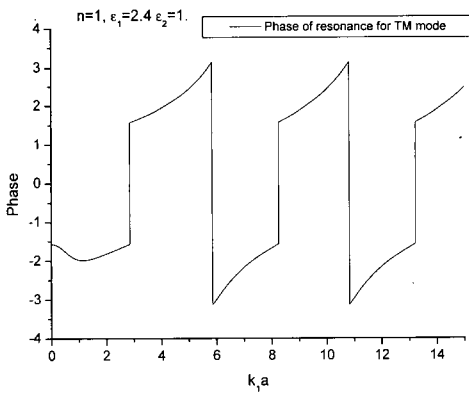
[Fig 3] (a) Moduli using the scattering coefficients of PEC (solid line) and PMC (dashed line) (b) phases of resonance using the new RST with PEC background coefficient for TE mode of dielectric cylinder ($\epsilon_2 = 2.4$)



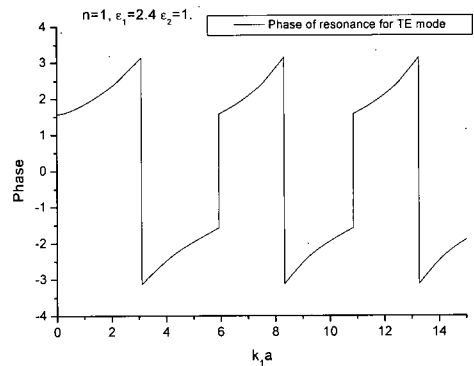
(a)



(a)



(b)



(b)

[그림 4] TM모드의 PEC, PMC 산란계수를 이용한 배경성분의 비교

[Fig 4] (a) Moduli using the scattering coefficients of PEC (solid line) and PMC (dashed line) (b) phases of resonance using the new RST with PEC background coefficient for TM mode of cavity ($\epsilon_1 = 2.4$)

[그림 5] TE모드의 PEC, PMC 산란계수를 이용한 배경성분의 비교

[Fig 5] (a) Moduli using the scattering coefficients of PEC (solid line) and PMC (dashed line) (b) phases of resonance using the new RST with PEC background coefficient for TE mode of cavity ($\epsilon_1 = 2.4$)

< 표 1 > 모드와 유전율에 따른 배경성분

< Table 1 > Background components

Model \ mode	TM mode	TE mode
Cavity	TM mode of PMC	TM mode of PMC
Dielectric cylinder	TM mode of PEC	TM mode of PEC

■ 참고문헌

[1] L. Flax, L. R. Dragonette, H. Uberall,

"Theory of elastic resonance excitation by sound scattering", J. Acoust. Soc. Am. 63, pp. 723-731, 1978.

[2] M. S. Choi, "New formulation of the resonance scattering theory", J. Acoust. Soc. Am. 101, pp. 2491-2495, 1997.

[3] D. E. Barrick, *Radar Cross Section Handbook*, PLENUM Press. Vol. 1, New York, 1970.

[4] P. L. Marston, "Product expansion of the S function for scattering from elastic spheres having multiple resonance", J. Acoust. Soc. Am. Suppl. 84, pp. 185. 1988.

저자 소개



전 상 봉

2001년 2월 영남대학교 전자공학과
(공학사)

2003년 2월 영남대학교 전자공학과
(공학석사)

2003년 3월~현재 영남대학교 전
자공학과 박사과정

[주 관심분야] 전자과 공학



안 창 회

1985년 2월 서울대학교 전기공학
과(공학사)

1992년 8월 한국과학기술원(공학
박사)

1992년 8월~1993년 2월 KAIST
정보전자연구소

1997년 2월~1998년 2월 미국 Univ.
of Illinois post-doctor

1993년 3월~현재 영남대학교 전
자정보공학부 부교수

[주 관심분야] 전자장론 및 수치해
석, 마이크로과



정 용 화

1994년 2월 영남대학교 전기공학과
(공학사)

1996년 2월 영남대학교 전기공학과
(공학석사)

1996년 3월~현재 영남대학교 전
기공학과 박사과정

[주 관심분야] 전자과 이론



최 명 선

1983년 2월 연세대학교 물리학과
(이학사)

1985년 2월 한국과학기술원 물리
학과(이학석사)

1992년 2월 한국과학기술원 물리
학과(이학박사)

1985년 3월~1998년 2월 한국 원
자력연구소 선임 연구원

1997년 3월~현재 영남대학교 자
연과학부 교수

[주 관심분야] 전자 초음파 물리학