

論文95-32A-6-2

매질내의 원통형 공동에 의한 전자파 회절패턴

(Electromagnetic Wave Diffraction Pattern by a Circular Cylindrical Cavity in the Denser Medium)

李澤璟*, 金世潤**, 羅正雄***

(Taek-Kyung Lee, Se-Yun Kim, and Jung-Woong Ra)

요약

유전체 매질내에 존재하는 원통형 공동에 의하여 산란된 전자파의 회절 패턴을 해석하였다. 입사파의 파장이 공동의 반지름에 가까워지면 산란된 전자파의 회절 패턴에서 공동의 윗쪽과 아랫쪽에 해당하는 위치에서 강한 감쇄가 나타나며, 위상은 이들 위치에서 급격하게 변화한다. 입사파의 주파수 변화에 따라 수신된 전자파의 진폭과 위상패턴에서 나타나는 현상과 관측거리에 의한 영향을 밝혔다. 또한 매질의 유전율에 따른 회절패턴의 변화를 예측하였다.

Abstract

Diffraction patterns of the electromagnetic field scattered by a circular cylindrical cavity embedded in a dielectric medium are analyzed. When the wavelength of the incident wave is comparable to the radius of the cavity, strong double dips occur at the locations corresponding to the top and the bottom of the the cavity. Furthermore, the phase changes abruptly about the dip points. The changes of the amplitude and the phase patterns are observed as the measuring distance and the signal frequency varies. The effects of the change of the medium dielectric constant on the diffraction pattern is also presented.

I. 서론

지하 수십 미터의 암반에 존재하는 수 미터 크기의 공동을 탐지하고 크기와 모양을 알아내는 것은 대형

구조물의 사전 지반조사나 핵 폐기물 저장장소의 탐사에 필요하며, 지하자원의 탐사에도 이용된다. 전자파를 이용하여 지하에 존재하는 물체를 탐사하기 위한 방법으로는 지질 단층촬영 (geotomography) 기법^{[1], [2]}이 많이 연구되고 있으며, 성능을 개선하기 위하여 지하 암반내에서의 굴절 및 회절 현상을 고려하거나^[3], 회절단층촬영(diffraction tomography) 기법^{[4], [5]} 등을 이용한다. 그러나 이러한 방법들은 지하에 위치한 공동과 같이 주변 매질과의 유전율 차이가 큰 물체의 탐사에서는 오차의 한계를 넘으므로^[6] 적용을 하기가 곤란하며, 주변의 암반층이 매우 불균일한 실제의 경우에 있어서는 탐사가 거의 불가능한 경우가 많다.

* 正會員, 韓國航空大學校 航空電子工學科

(Dept. of Avionics, Hankuk Aviation Univ.)

** 正會員, 韓國科學技術研究院 情報電子研究部

(Div. Electron. & Inform. Tech., KIST)

*** 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1995年1月28日, 수정완료일: 1995年5月27日

연속전자파를 이용한 공동탐사법^{[7]-[9]}은 단일 주파수의 신호를 사용하므로 매질의 분산특성에 영향을 받지 않으며, 주변의 매질이 불균일하거나 매질과 유전율 차가 큰 물체의 탐사에도 적용할 수 있다. 이 방법에서는 전자파를 이용하여 입사파와 공동에 의한 산란파의 간섭패턴을 이용하여 지하에 존재하는 물체를 탐지하게 된다. 특히 입사된 전자파의 파장이 공동의 반경에 가까워지면, 순방향(forward direction)의 회절패턴에 두개의 강한 감쇄(double dips)가 생기게 되며, 이들은 각각 공동의 윗쪽과 아랫쪽에 해당하는 위치에서 발생한다. 지하 공동의 탐사는 이들 dip에서의 감쇄가 클수록 용이하며, 가장 큰 감쇄가 일어나는 송신 주파수 및 수신 위치를 알아내는 것은 매우 중요하다.

입사파의 주파수를 적절히 조절하면 공동에 의하여 산란된 전자파와 입사파의 세기가 같고 위상이 반대가 되어 총전장이 영이 되는 지점이 존재한다는 것이 알려져 있으며^{[10], [11]}, 이 주파수에서 감쇄의 크기가 무한대가 되어 공동의 탐사가 가장 용이하게 된다. 공동에 의한 회절패턴의 형태와 감쇄의 크기는 신호의 주파수와 관측거리에 따라서 달라지게 된다. 이들의 특성은 관측거리에 대해서 전장의 영(null)이 나타나는 주파수(null frequency)와 두 null간의 간격 등의 관계를 밝혀냄으로써 파악할 수 있다. 또한 이러한 특성을 이용하여 측정된 회절패턴으로부터 공동의 위치나 크기 등을 알아낼 수 있다.

연속 전자파에 의한 공동 탐사 방법은 주로 회절 전자파의 진폭패턴으로부터 공동의 유무를 판단하게 되지만 주변의 암반이 심하게 불균일 할 경우에는 이를 판단하기가 어려운 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우에 회절 전자파의 위상패턴으로부터 정보를 얻을 수가 있다. 매질내의 공동에 의한 회절파의 위상패턴은 dip이 나타나는 위치에서 180° 정도의 급격한 위상변화가 나타나게 된다.

본 논문에서는 매질내에 원통형 공동에 의한 회절패턴에서 double dip 이 나타나는 현상과 위상의 급격한 변화가 생기는 현상을 해석하고, 입사파의 주파수와 관측거리의 변화에 따라서 나타나는 현상을 제시하였다. 또한 매질의 비유전율의 변화에 대하여 가장 강한 dip 이 나타나는 주파수와 회절 패턴의 변화를 계산하였다. Null 이 나타나는 위치에서 위상은 180° 불연속이 나타나며, null 주파수 근방에서는 위상이 매우 급격하게 변한다. 매질의 유전율이 변화하더라도 null 이 나타나는 주파수의 궤적은 비슷한 형태로 나타나게 되며, 가장 강한 dip이 나타나는 주파수는 공동과 매질간의 굴절율 차이에 반비례한다.

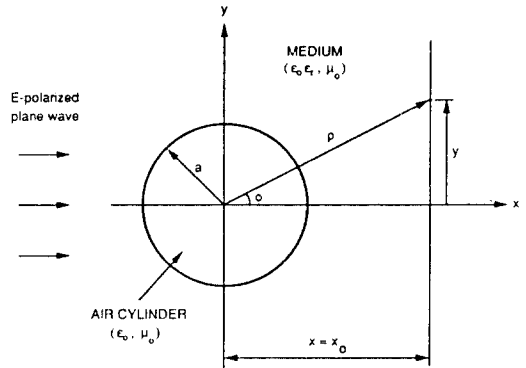


그림 1. 원통형 공동에 의한 전자파 산란
Fig. 1. Electromagnetic scattering by circular cylindrical cavity.

II. 근거리 회절 패턴

1. 진폭 패턴

그림 1에서 보는 바와 같이 z 방향으로 분극된 평면파가 손실이 없는 매질 내에서 원통형 공동에 입사되고 있다. 여기서 매질의 비유전율을 ϵ_c 을 2 로 가정하고, 공동의 반경을 1 m 로 고정하였다. 공동에 의한 전자파의 회절 패턴을 알아보기 위하여, $x=x_0$ 인 평면에서 360 MHz 이하의 신호 주파수에 대하여 총 전장에 대한 수치계산을 하였다. 그림 1에서 공동의 바깥에서의 총전장은 입사파 u^i 와 산란파 u^s 의 합으로써

$$u(x, y) = u^i(x, y) + u^s(x, y) \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다^[12]. 여기서 입사파가

$$u^i(x, y) = e^{jkx} \tag{2}$$

로서 평면파일 때 산란파의 해는 해석적인 형태로 매우 잘 알려져 있으며

$$u^s(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \tau_m (-j)^m b_m H_m^{(2)}(k\rho) \cos(m\phi) \tag{3}$$

이다. 여기서 τ_m 은 $m=0$ 일 때는 1이고 그 외의 경우에는 2가 되는 상수 (Neumann number) 이고, $H_m^{(2)}$ 는 m차의 제2종 Hankel 함수이다. k_c 는 공동내부의 빈 공간에서의 파수이고, k 는 주변 매질에서의 해당 주파수에 대한 파수 (wave number) 를 나타낸다. (3)식에서 각각의 차수에 대한 계수 b_m 은

$$b_m = -\frac{J_m(k_0 a) J_m(ka) - \epsilon_r^{1/2} J_m(k_0 a) J_m(ka)}{J_m(k_0 a) H_m^{(2)}(ka) - \epsilon_r^{1/2} J_m(k_0 a) H_m^{(2)}(ka)} \quad (4)$$

이다^[12]. 여기서 J_m 은 m 차의 Bessel 함수이며, prime(')은 괄호안의 변수에 대한 미분을 나타낸다. (3)식의 급수는 계산시 $b_N < 10^{-8} b_0$ 를 만족하는 N 항까지 계산하였으며, 가장 높은 주파수인 360 MHz 에서 $N=22$ 가 된다.

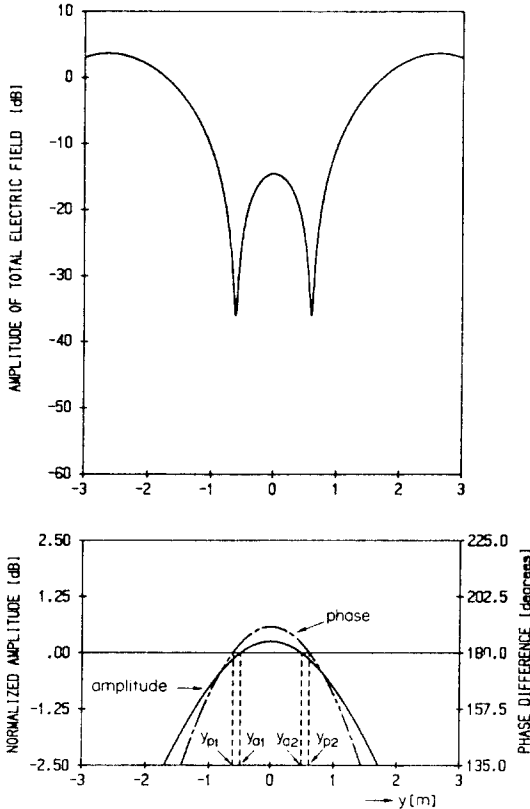


그림 2. 총전장의 진폭 (위쪽) 및 정규화된 산란파의 진폭과 위상 (아래쪽) 패턴. $x_0 = 4$ m. $f = 154$ MHz.

Fig. 2. Amplitude pattern of the total field (top) and the amplitude and phase patterns of the normalized scattered field (bottom) for $x_0 = 4$ m and $f = 154$ MHz.

그림 2의 위쪽 그림은 송신 주파수가 154 MHz 일 때 $x_0 = 4$ m 평면에서 총전장의 진폭패턴이다. 두 지점에서 매우 강한 신호의 감쇄가 나타나며, 감쇄된 지점의 진폭은 입사파의 진폭에 비하여 약 35 dB 낮게 나타난다. 또한 두 개의 강한 감쇄 (double dips)

는 각각 공동의 위쪽과 아래쪽에 해당하는 위치에서 나타난다. 총전장에서 강한 감쇄가 일어나는 현상을 해석하기 위하여 총전장을

$$u(x_0, y) = e^{-jk_0 x_0} [A(y)e^{jN\phi} + 1]$$

로 두어 입사파와 산란파의 진폭과 위상관계가 나타나도록 하자. 여기서 $A(y)$ 는 입사파로 정규화된 산란파의 진폭이고, $P(y)$ 는 입사파와 산란파의 위상차가 된다. 그림 2의 아래쪽 그림에서는 정규화된 산란파의 진폭 $A(y)$ 와 위상차 $P(y)$ 가 나타나 있다. 총전장의 진폭 패턴에서 나타나는 두 dip은 입사파와 산란파의 위상차가 180° 가 되는 지점인 $y=y_{p1}$ 과 y_{p2} 에서 발생한다. 이들 지점에서 산란파의 세기가 입사파에 비하여 미소하게 작고, 위상차가 180° 가 되어 dip 이 발생하게 된다.

고정된 관측거리 x_0 평면에서 산란파의 진폭은 신호의 주파수 변화에 따라 변화하게 되며, 산란파의 진폭이 입사파와 같아지는 지점인 y_a 도 주파수 변화에 따라 달라진다. 그림 2의 아래쪽 그림으로부터 순방향 영역의 산란파의 세기는 y 축 방향으로 급격하게 변화하지 않으며, 순방향 산란파의 진폭이 클수록 y_a 가 커진다는 것을 알 수 있다. 순방향 영역에서 입사파와 산란파의 위상차도 주파수에 따라 변화하며, 이들의 위상차가 180° 가 되는 위치인 y_p 도 주파수의 함수가 된다. 신호의 주파수를 적절히 조절하면 y_a 와 y_p 가 일치하는 지점이 나타나게 되며, 이 지점에서 입사파와 산란파의 크기가 같고 위상이 반대가 되어 총전장이 영(null)이 되므로 double null 패턴이 나타나게 된다^{[10], [11]}.

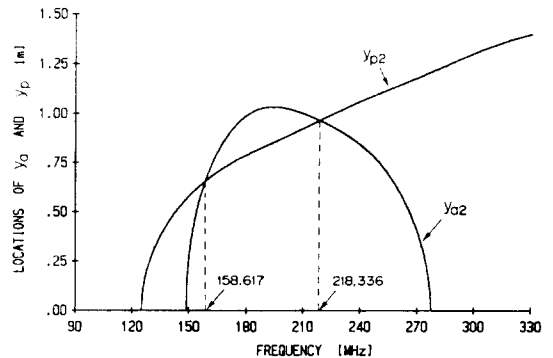


그림 3. 신호주파수의 변화에 대한 y_a 및 y_p 의 변화. $x_0 = 4$ m.

Fig. 3. y_a and y_p vs. signal frequency for $x_0 = 4$ m.

그림 3은 x_0 를 4 m 로 고정시키고 주파수를 변화시킬 때의 y_a 와 y_p 의 위치변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 두 개의 주파수에서 double null 패턴이 나타날 수 있다는 것을 알 수 있으며, 높은쪽 주파수 영역에서는 218.336 MHz 에서, 낮은쪽 주파수 영역에서는 158.617 MHz 에서 각각 $y_a = y_p$ 가 되어 null 이 발생하게 된다. Null 이 나타날 때 매질 내의 파장은 각각 0.972m 와 1.337m 이다. 높은쪽 주파수 영역의 double null은 각각 공동의 윗쪽과 아래쪽에 해당하는 위치에서 나타나지만, 낮은 쪽 주파수 영역의 null은 그보다 안쪽에서 발생한다.

2. 위상 패턴

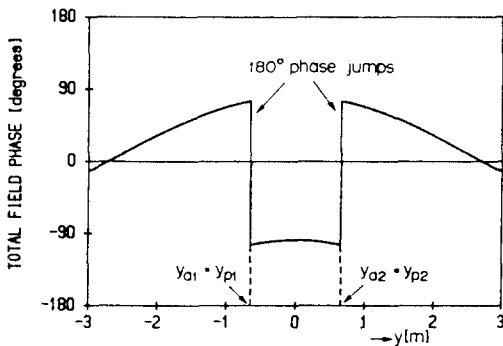
매질내의 공동에 신호의 파장이 공동의 반경에 가까운 전자파가 입사되면 순방향의 총전장 패턴에는 강한 double dip 이 나타난다.

180° 정도의 위상변화가 일어난다. 신호주파수가 double null이 나타나도록 조정이 되면 총전장의 위상패턴은 null의 위치에서 180° 의 불연속이 나타나게 된다. 그림 4(a)는 null 주파수 158.617MHz에서 총전장의 위상패턴에서 null 지점에 나타나는 180° 불연속을 보여주고 있다.

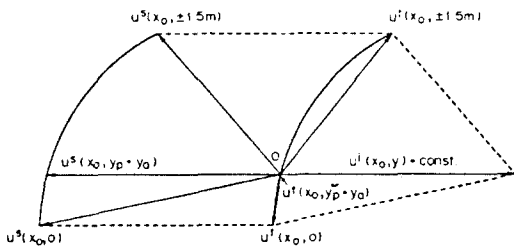
총전장의 위상패턴에서 나타나는 급격한 위상 변화는 측정지점에 따른 입사파와 산란파의 페이저 도로부터 이해할 수 있다. 그림 4(b) 는 x' 를 고정시키고 y 축 방향으로 관측지점을 이동할 때의 페이저 변화를 나타내고 있으며, 입사파의 위상은 일정하고 산란파의 페이저가 변화한다. 총전장이 영이 되는 지점에서 산란파의 크기는 입사파와 같아지고 위상은 반대가 된다. 관측점을 $y = 0$ 인 지점에서 y 를 증가시키면 입사파의 페이저는 고정되어 있는 반면에 산란파의 페이저는 그림 4(b) 에서와 같이 3상한으로부터 1상한으로 이동하면서 null 이 나타나는 지점에서 정확히 원점을 지나게 된다. 따라서 null 지점에서 180° 의 위상 불연속이 나타나게 된다.

신호의 주파수가 총전장의 null 을 발생시키는 주파수가 아닐 경우에는 총전장의 위상패턴에 불연속이 나타나지는 않으나, dip 근방에서 급작스러운 변화가 일어난다. null 주파수보다 높은 주파수와 낮은 주파수에 대해서 서로 다른 형태의 위상패턴이 나타나며, 그림 5에서 158.617 MHz의 null 주파수 근방에서 나타나는 두가지 위상패턴을 보여주고 있다. 관측지점이 $y=0$ 로부터 $+y$ 방향으로 이동할 때 신호주파수가 null 주파수보다 낮은 152 MHz 일 때는 dip 근방에서 총전장의 위상이 급작스럽게 증가하며, null 주파수보다 높은 166 MHz 에서는 급작스럽게 감소한다.

이와같은 두가지 위상패턴이 나타나는 현상도 페이저 도로부터 설명할 수 있다. 총전장의 null 이 나타나지 않을 때, y_p 지점에서 입사파와 산란파의 크기는 서로 같지 않으며, 총전장의 페이저는 원점을 지나지 않게 된다. 신호의 주파수가 152 MHz 일 때 y_p 지점에서 산란파의 크기가 입사파에 비하여 약간 작으므로 총전장의 페이저는 입사파와 같은 방향이 된다. 따라서 y_p 근방에서 y 를 증가시킬 때 총전장의 페이저는 3상한으로부터 4상한을 거쳐서 1상한으로 이동하며, 벡터의 방향은 원점을 중심으로 하여 시계 반대방향으로 급격히 회전하게 된다. 반대로 166 MHz 의 주파수에서는 y_p 지점에서 산란파가 입사파보다 약간 크므로 총전장의 페이저는 3상한으로부터 2상한을 거쳐서 1상한으로 이동하며, 벡터의 방향은 시계방향으로 급격히 회전한다. 158.617 MHz 와 218.336 MHz 사이의 주파수에서는 y_p 지점에서 산란파의 세



(a)

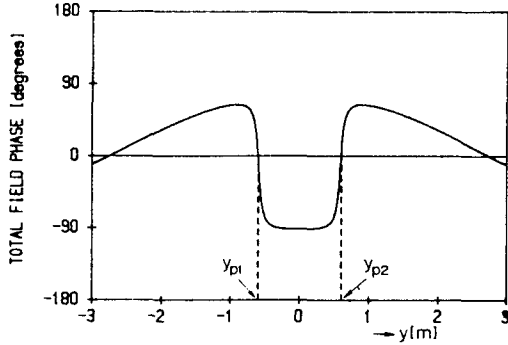


(b)

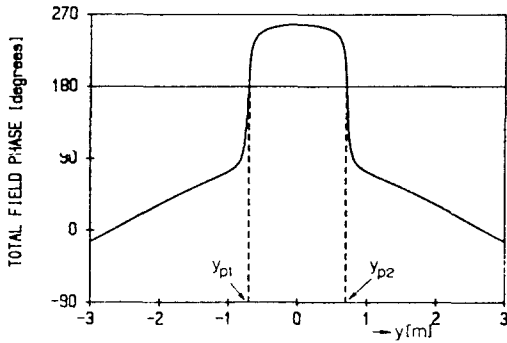
그림 4. Null 주파수에서 (a) 총전장의 위상 패턴 및 (b) 페이저 벡터. $f = 158.617$ MHz
Fig. 4. (a) Phase pattern and (b) phasor vector for $f = 158.617$ MHz.

총전장의 위상은 진폭의 강한 감쇄가 일어나는 지점 근방에서 급작스러운 변화를 하게 되며, dip 근방에서

기가 입사파보다 크므로 (그림 3 참조), 총전장의 위상패턴은 그림 5(b) 와 비슷한 형태를 보이게 된다. 그리고 158.617 MHz 이하 혹은 218.336 MHz 이상의 주파수에서는 그림 5(a) 와 비슷하게 나타난다.



(a)



(b)

그림 5. 총전장의 위상 패턴. (a) $f = 152$ MHz
(b) $f = 166$ MHz.

Fig. 5. Phase patterns of the total field for (a) $f = 152$ MHz and (b) $f = 166$ MHz.

III. 매질유전율에 따른 NULL 주파수의 변화

지금까지 매질의 비유전율이 2이고, 관측거리가 4 m 일 때의 회절패턴에 관하여 알아보았으며, 두 개의 주파수에서 null 이 나타나고, null 주파수를 경계로 하여 위상 패턴이 달라진다. 관측거리를 변화시키면 null 이 나타나는 주파수가 달라지게 되며, 관측거리의 범위에 따라서 서로 다른 현상들이 나타나게 된다¹¹⁰⁾

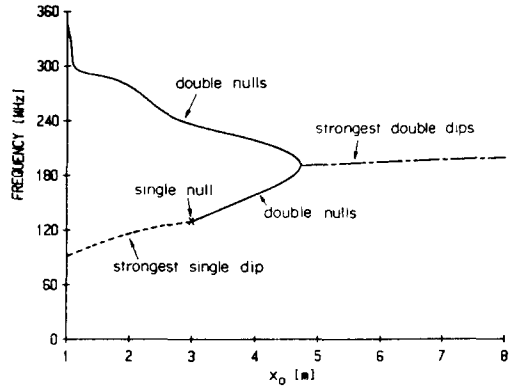


그림 6. Null 혹은 가장 강한 dip 이 나타나는 주파수

Fig. 6. Frequencies providing nulls or the strongest dips.

그림 6은 관측 거리의 변화에 대하여 가장 강한 신호 감쇄가 일어나는 주파수의 변화를 보여주고 있다. 관측거리가 4 m 일 때 두 개의 null 주파수가 있으며, 관측거리가 가까워지면 높은쪽의 null 주파수는 증가하고 낮은쪽의 null 주파수는 감소한다.

높은쪽의 null 주파수에서는 거리변화에 대해 두 null 간의 간격이 공동의 크기와 비슷하게 유지되지만, 낮은쪽의 null 주파수에서는 관측거리가 가까워지면 두 null 간의 간격이 점점 좁아져서 관측거리가 2.9917 m 에서 두 null 이 일치하게 되어 single null 이 된다¹¹⁰⁾. 관측거리가 더욱 가까워지면 아래쪽 주파수대에서는 null이 나타나지 않는다. 그림 7은 근거리에서 세가지의 대표적인 진폭 패턴을 보여주고 있다.

관측거리를 4m 로부터 증가시키면 높은쪽의 null 주파수는 점점 감소하고, 낮은쪽의 null 주파수는 증가하여 관측거리가 4.7215 m 에 도달하면 두 개의 null 주파수가 일치하게 된다. 관측거리가 4.7215 m 보다 멀어지면 null 패턴은 나타나지 않게 되며, 가장 강한 double dip 을 발생하는 주파수가 관측거리의 변화에 대해 거의 일정하다. 그림 8의 윗쪽 그림은 원거리에서 가장 강한 double dip 의 패턴을 보여주고 있으며, 아랫쪽의 그림은 입사파로 정규화된 산란파의 진폭과 위상패턴이다. 원거리에서 가장 강한 dip 은 입사파와 산란파의 위상차가 180° 가 되는 위치에서 산란파의 세기가 가장 강한 주파수에서 발생한다.

매질의 비유전율이 2일 때 근거리에서 나타나는 null 주파수는 관측거리에 따라 변화하게 되며, 원거리에서는 가장 강한 dip 을 발생하는 주파수의 변화가

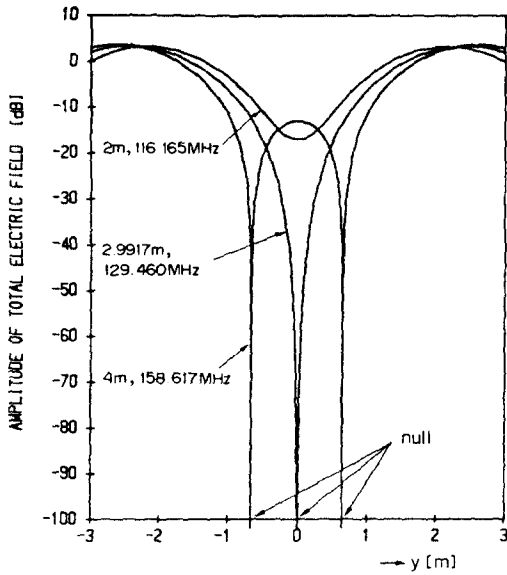


그림 7. 세가지의 대표적인 진폭패턴
Fig. 7. Three typical amplitude pattern

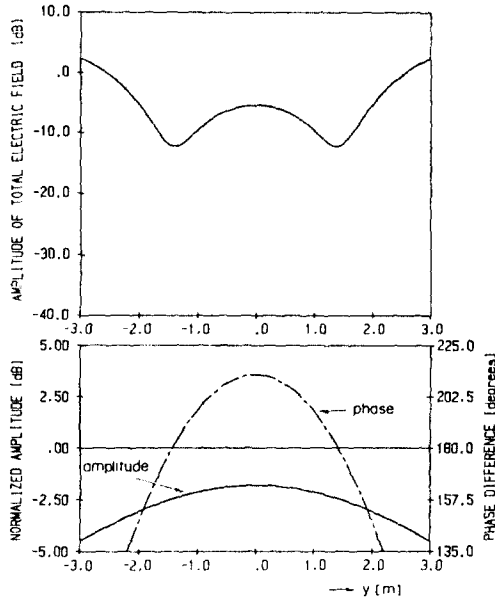


그림 8. 원거리에서의 수신 패턴. $x_0 = 10$ m. $f = 210$ MHz.
Fig. 8. Field patterns in the far field region for $x_0 = 10$ m and $f = 210$ MHz.

거의 없다. 매질의 유전율이 달라지면 가장 강한 신호의 감쇄를 일으키는 주파수가 달라지게 되지만, null

및 가장 강한 dip 이 발생하는 주파수의 궤적은 같은 형태를 지니고 있다. 그림 9는 매질의 비유전율이 각각 1.8, 2, 3, 4 일 때의 가장 강한 신호의 감쇄를 일으키는 주파수의 궤적을 보여주고 있다. 매질의 유전율이 높아질수록 근거리와 원거리의 경계에 해당하는 거리가 가까워지며, 강한 dip 을 발생하는 주파수가 낮아지게 된다.

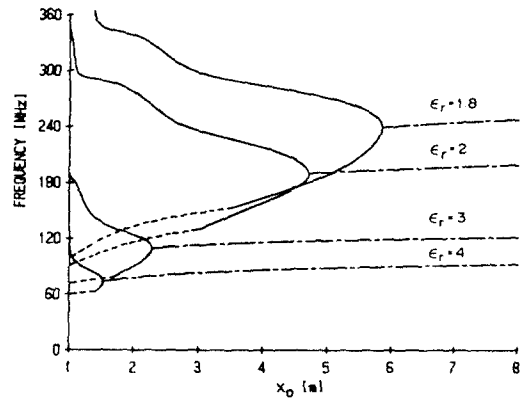


그림 9. 서로 다른 매질의 유전율에 대한 null 주파수
Fig. 9. Null frequencies for different dielectric constants of the medium.

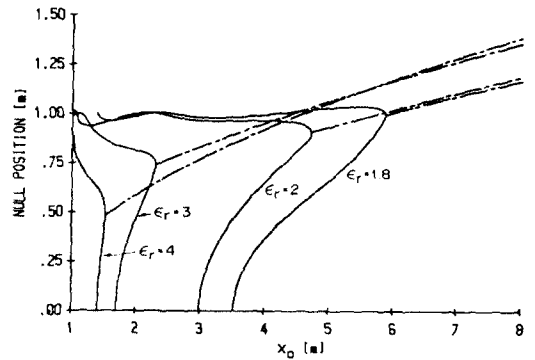


그림 10. 서로 다른 매질의 유전율에 대한 null 및 dip 의 위치
Fig. 10. Null positions for different dielectric constants of the medium.

그림 10은 서로 다른 매질의 유전율에 대해 그림 9의 주파수에 해당하는 null 이나 가장 강한 dip 이 일어나는 y 방향의 위치를 나타내고 있다. 매질의 유전율이 낮을 경우에는 높은쪽의 null 주파수에 해당하는

null 은 공동의 윗쪽과 아랫쪽에 해당하는 위치에서 일어난다는 것을 알 수 있다. 그러나 아랫쪽의 null 주파수에 해당하는 null 의 위치는 거리가 가까워질수록 공동의 중심으로 이동하게 되어 single null 이 되었다가 감쇄의 크기가 유한한 dip 으로 변화한다.

원거리에서 가장 강한 double dip 을 발생하는 주파수는 관측거리의 변화에 대해서 거의 영향을 받지 않으며, 특정한 매질의 유전율 값에 대하여 강한 dip 이나 null 이 발생하는 주파수는 이 주파수를 기준으로 하여 지금까지 제시된 방식으로 나타난다. 따라서 원거리에서 가장 강한 dip 을 발생하는 주파수 f_{dip} 을 예측하는 것은 공동의 탐사에서 매우 필요하다. 그림 8 의 아랫쪽 그림에서 본 바와 같이 원거리 영역에서 산란파의 세기는 입사파에 비하여 항상 작기 때문에 입사파와 산란파의 위상이 반대가 되는 y_p 지점에서 산란파의 세기가 가장 큰 주파수에서 가장 강한 double dip 이 발생한다. 신호의 주파수에 따라서 y_p 지점은 일정하지 않으므로 이 지점에서의 산란파의 세기를 일반적으로 규정하기가 곤란하다. 그러나 그림 8 에서와 같이 순방향 영역에서 산란파의 세기는 급작스럽게 변화하지 않으므로 y_p 지점의 산란파 대신에 $y = 0$ 지점에서의 산란파의 세기가 가장 큰 주파수를 구하면, 원거리에서 가장 강한 dip 을 발생하는 주파수를 예측할 수 있을 것이다. 원거리에서 순방향 산란 단면적 σ_F 를 식 (1)-(3) 으로부터 구하면

$$\sigma_F = 2\pi \lim_{\rho \rightarrow \infty} \rho \frac{|U'(\rho, \phi=0)|^2}{|u'(\rho, \phi=0)|^2} = \frac{4}{k} \left| \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m b_m \right|^2 \quad (5)$$

이 된다.

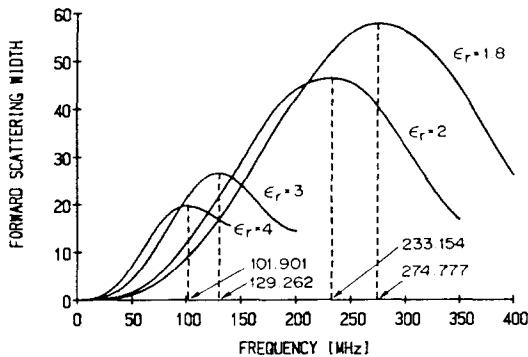


그림 11. 주파수 변화에 대한 순방향 산란 단면적
Fig. 11. Forward scattering width vs. signal frequency.

그림 11 은 매질의 비유전율이 1.8, 2, 3, 4 인 경

우에 대하여 주파수 변화에 대한 σ_F 의 변화를 나타내고 있으며, 매질의 유전율이 클수록 σ_F 가 최대가 되는 주파수 f_{max} 가 낮아진다. 그림 12 에서는 매질의 굴절율을 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 의 변화에 대하여 원거리에서 가장 강한 dip 이 나타나는 주파수 f_{dip} 과 순방향 산란 단면적이 최대가 되는 주파수 f_{max} 를 보여주고 있다. 원거리에서 가장 강한 dip 이 나타나는 주파수는 순방향 산란 단면적이 최대가 되는 주파수보다 약간 낮은 값을 가진다. 이 그림으로부터 fdip 은 매질과 공동의 굴절율 차이가 클수록 작아진다는 것을 알 수 있다.

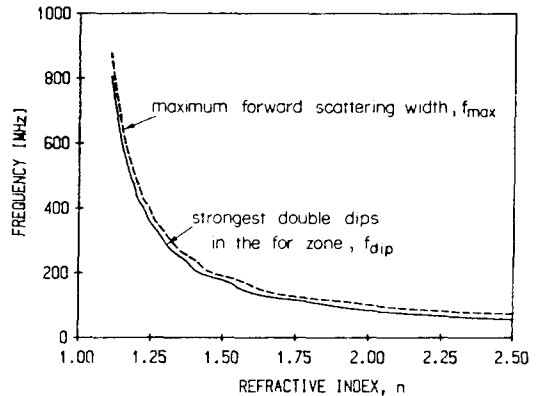


그림 12. 매질의 굴절율 변화에 대한 fdip과 fmax
Fig. 12. fdip and fmax vs. the permittivity of the medium.

그림 12의 결과로부터 원거리에서 가장 강한 dip 을 발생하는 주파수 f_{dip} 에 대하여 근사식 F_{dip} 을

$$f_{dip} \sim F_{dip} = \frac{\alpha}{n-1} \quad (6)$$

로 가정하자. 이 근사식에서 상수 α 를 구하기 위해 최소자승오차법 (least square error method) 을 적용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{i=1}^m (F_{dip}(\alpha, n_i) - f_{dip}(n_i))^2 = 0 \quad (7)$$

여기서 m 은 데이터의 개수이고, n_i 는 i번째 데이터에 해당하는 매질의 굴절율을 나타낸다. 식 (7)에 의하여 상수 α 는

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{f_{dip}(n_i)}{n_i - 1}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{(n_i - 1)^2}} \quad (8)$$

로 구할 수 있다. 140 개의 데이터를 이용하여 구한 f_{dip} 에 대한 상수 α 는 87.715×10^6 으로 계산되었으며,

최대 오차는 12.308 MHz 이다.

IV. 결 론

지하에 존재하는 매질과의 유전율 차가 큰 물체를 탐사하기 위하여, 연속전자파를 이용한 공동탐사법에 대하여 속이 빈 공동에 의한 회절패턴을 계산함으로써 이론적인 해석을 하였다. 매질내에 공동이 있을 때, 공동의 크기와 비슷한 파장을 지닌 전자파가 입사되면 수신신호의 진폭패턴에서 공동의 윗쪽과 아래쪽에 해당하는 위치에서 강한 감쇄가 일어난다. 특정한 주파수에 대해서 근거리에서 수신신호의 null 이 존재하며, 이 때 수신신호의 위상패턴에는 불연속이 발생한다. 원거리에서는 신호의 감쇄가 유한하며, 가장 강한 감쇄를 일으키는 주파수가 거리에 관계없이 거의 일정하다. 매질의 유전율이 증가하면 가장 강한 감쇄를 일으키는 주파수가 낮아지며, 매질과 공동의 굴절율 차에 반비례하는 근사식으로 이 주파수를 구할 수 있다. 이 논문에서 제시된 회절패턴의 특성을 잘 이해함으로써, 복잡한 신호처리나 많은 계산시간을 소요하는 역산란 기법을 적용하지 않고서도 지하에 존재하는 공동의 위치나 크기 등을 알아낼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H.J. Scudder, "Introduction to computer aided tomography," *Proc. IEEE*, vol. 66, pp. 628-637, 1978.
- [2] K.A. Dines and R.J. Lytle, "Computerized geophysical tomography," *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 471-480, 1979.
- [3] R.J. Lytle, "Iterative ray tracing between boreholes for underground image reconstruction," *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, vol. GE-18, pp. 234-240, 1980.
- [4] A.J. Devaney, "A computer simulation study of diffraction tomography," *IEEE Trans. Biomedical Eng.*, vol. BME-30, pp. 377-386, 1983.
- [5] A.J. Devaney, "Geophysical diffraction tomography," *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, vol. GE-22, pp. 3-13, 1984.
- [6] M. Slaney, A.C. Kak, and L.E. Larsen, "Limitations of imaging with first-order diffraction tomography," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 860-874, 1984.
- [7] R.J. Lytle, E.F. Laine, D.L. Lager, and D.T. Davis, "Cross-borehole electromagnetic probing to locate high-contrast anomalies," *Geophysics*, vol. 44, pp. 1667-1676, 1979.
- [8] R.J. Lytle and M.R. Portnoff, "Detecting high-contrast seismic anomalies using cross-borehole probing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-22, pp. 93-98, 1984.
- [9] T.K. Lee, S.Y. Kim, and J.W. Ra, "Resonant scattering of CW electromagnetic wave by an underground tunnel of circular cross section," in *Proc. Third Technical Symp. on Tunnel Detection* (Golden, CO), Jan. 12-15, 1988, pp. 104-122.
- [10] 이택경, 김세운, 송재원, 이수영, 나정웅, "매질내의 공동에 의해 산란된 전자파의 강한 감쇄에 관한 해석," *대한전자공학회 논문지*, 제26권, 제3호, pp. 365-376, 1989
- [11] T.K. Lee, S.O. Park, S.Y. Kim, and J.W. Ra, "Near-field diffraction pattern by an underground void of circular cylinder," *Microwave Optical Tech. Lett.*, vol. 2, pp. 179-183, 1989.
- [12] D.S. Jones, *The Theory of Electromagnetism*, Pergamon, New York, pp. 451-456, 1964.

저 자 소 개



李澤璟(正會員)

1958년 1월 11일생. 1983년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1990년 3월 ~ 1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연구원. 1990년 5월 ~ 1991년 4월 Univ. of Texas at Austin 에서 Post-Doc. 1991년 9월 ~ 1992년 2월 한국과학기술원 정보전자연구소 연구원. 1992년 3월 ~ 현재 한국항공대학교 항공전자공학과 조교수. 주관심 분야는 초고주파 집적회로, 전자파 전파 및 산란, 안테나, 레이더 등임.

金世潤(正會員)

제29권 A편 제12호 참조
현재 한국과학기술연구원 정보전자연구부 책임연구원

羅正雄(正會員)

제29권 A편 제12호 참조
현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수