

論文 96-33A-4-11

# 유전체 내의 두개의 빈 원기둥에 의해 산란된 전자파의 감쇄패턴

## (Attenuation Pattern of the Electromagnetic Fields Scattered by Two Empty Circular Cylinders in a Dielectric Medium)

李澤環\*, 金世潤\*\*, 羅正雄\*\*\*

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

### 요 약

연속전자파에 의한 매질내의 공동 탐사시 주변 매질의 불균일성에 의한 영향을 계산하기 위하여, 유전체 내의 두개의 빈 원기둥에 의해 산란된 E-분극된 전자파의 감쇄패턴을 해석하였다. 하나의 원기둥에 대한 감쇄패턴에서는 원기둥의 상·하 경계면에 해당되는 지점에 이중 감쇄파형이 발생하였다. 다른 원기둥이 접근하거나 그 크기가 커질 경우에 대하여 원래의 이중 감쇄파형의 변형을 계산하였다.

### Abstract

The attenuation pattern of the E-polarized electromagnetic fields scattered by two empty circular cylinders in a dielectric medium is analyzed to calculate the effects of the inhomogeneity in the background medium. In the amplitude pattern of the electromagnetic field scattered by one cylinder, double dips occur at the locations corresponding to its top and bottom boundaries. The distortion of the original double dip pattern is calculated when other air cavity approaches or its size increases.

### I. 서 론

지표면에서 수십 미터 이상의 지하에 숨겨진 단면 크기가 1~2 m 내외인 공동을 찾기 위한 방법으로서 지질단층촬영(Geotomography) 등은 공동 주변 매질의 유전율이 높거나 주변 암반층이 매우 불균일한 경우에는 적용하기가 곤란하며, CBCW(Cross-Bore-hole Continuous Wave) 탐사기법<sup>11),12)</sup>이 주로 사용되고 있다. CBCW 탐사기법은 두 개의 시추공 사이

에 존재하는 지하 공동에 의한 연속 전자파의 회절 패턴으로부터 공동의 존재와 위치를 탐사하는 방법으로서, 실제의 측정 환경에서 나타나는 잡음이나 주변 매질의 불균일 등에 의한 영향이 적으며, 다음과 같은 방법으로 운영한다. 먼저 송·수신안테나를 인접한 두개의 서로 다른 시추공에 각각 삽입하여 동일한 심도에 설치한 후 송신안테나에서 CW 전자파를 복사시키고 지하 매질을 통과하여 수신 안테나에 도달한 CW 전자파의 전력을 측정한다. 다음 송·수신 안테나를 일정한 높이만큼 동시에 끌어올린 후 같은 방법으로 수신된 CW 전자파를 측정한다. 이러한 측정을 반복함으로써 시추공내의 심도별 수신 전력패턴을 얻을 수 있다. 그런데 지하 매질 내에서 CW 전자파의 파장이 송·수신 시추공 사이에 숨겨진 공동 단면의 크기와 비슷하게 되면 측정된 수신 전력패턴 상에서 공동의 상·하 경계면에 해당되는 심도에서 강한 감쇄가 발생한다. 이러한 수신 전력패턴 상의 강한 감쇄에 관한 이론적인 연구로서

\* 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: 1996年2月21日

입자의 균일한 유전체속에 숨겨진 하나의 공동에 의한 전자파 산란문제를 해석한 논문들이 발표되었다<sup>[13]-[15]</sup>.

실제의 지하매질은 파쇄대, 단층, 지질변화등에 의하여 매우 불균일한 매질을 형성하고 있다. CBCW 탐사 기법은 주변 매질이 불균일한 경우에도 탐사가 가능한 아주 현실적인 방법으로서 특히 지하 공동에 의한 회절 패턴과 단층이나 파쇄대 등의 지질에 의한 회절 패턴은 서로 매우 다른 특성을 나타내므로 이들을 구분해내는 것이 가능하다. 그러나 지하매질에서 나타나는 석영층은 그 크기가 지하 공동의 크기와 유사한 경우가 많으며, 특히 석영층의 비유전율이 암반에 비해 매우 낮아서 공기와 비슷하므로 속이 빈 공동에 의한 전자파의 회절 패턴과 유사하게 나타난다. 또한 지하 공동의 주변에 존재하는 이러한 석영층은 공동에 의한 전자파 회절패턴에 심각한 영향을 미치게 되며, 공동의 탐사를 어렵게 하는 중요한 요인이 된다. 이러한 지하매질의 불균일한 특성이 찾고자 하는 공동의 위치 정보에 해당되는 수신 전력패턴 상의 강한 감쇄에 미치는 영향을 살펴보는 것은 실제 상황에서는 매우 중요하다.

본 논문에서는 CBCW 탐사기법에 의한 공동의 탐사에 있어서 불균일한 주변매질이 회절 패턴에 미치는 영향을 단순화된 모델을 통하여 알아보았다. 매질의 불균일한 성질 가운데서 회절 패턴에 가장 큰 영향을 미치고 공동의 탐사를 어렵게 하는 석영층등에 의한 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 찾고자 하는 공동 주변에 다른 공동이 있는 것으로 문제의 상황을 단순화하여, 주변의 공동이 미치는 영향을 살펴보았다. 이러한 이론적인 모델은 매우 단순화된 것이지만 CBCW 탐사기법을 실제 운용할 경우 가장 어려운 문제 상황에 해당되는 것이므로 자세히 조사할 가치가 있다. 시간 표현은  $e^{j\omega t}$  로 취하였으며, 이 후 생략하도록 한다.

## II. 해석방법

지하 공동의 탐사를 위한 CBCW 탐사기법은 두 개의 시추공에 각각 송신 및 수신 안테나를 설치하여 수신된 신호의 패턴으로부터 공동의 유무와 위치를 알아내게 된다. 실제의 측정시에 송신 안테나는 수신 안테나와 함께 시추공을 따라 이동하면서 전자파를 복사하게 된다. 이러한 경우에 송신 및 수신 안테나가 항상 같은 높이에 있으므로 평면파 입사에 의한 회절 현상

과 같은 효과가 있으며 본 논문의 이론적 모델에서는 입사파를 평면파로 가정하여 해석한다. 송신 및 수신 안테나가 동시에 이동하는 경우의 회절 패턴에서는 평면파에 의한 회절 패턴에 비하여 더 먼 거리에서도 감쇄패턴이 나타나므로 실제의 공동 탐사시 유리하다. 그러나 두가지의 경우에 대하여 감쇄패턴이 나타나는 원리와 관측거리 및 송신주파수 등에 의한 영향은 같은 경향을 나타내므로 여기서는 이전에 발표된 논문들과 이론적 일관성을 유지하기 위하여 평면파 입사에 대하여 해석하였다. 석영층 등에 의한 주변 매질의 불균일로 인한 회절 패턴의 변형을 계산하기 위하여 원래의 찾고자 하는 공동의 주변에 다른 공동을 가정하여 해석하였다.

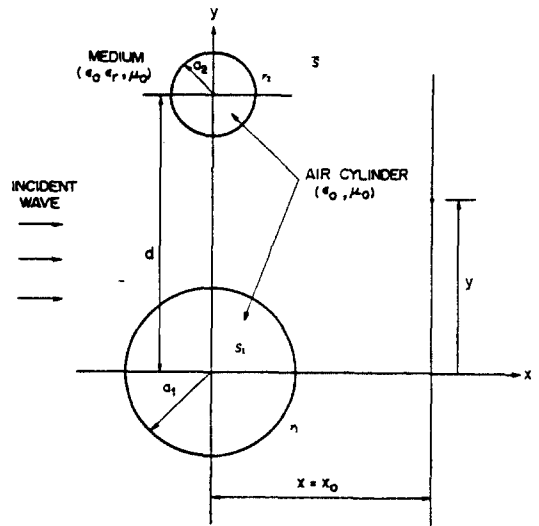


그림 1. 비유전율  $\epsilon_r$  인 유전체 내의 두 개의 빈 원기둥에 의한 E 분극된 전자파 산란

Fig. 1. E-polarized electromagnetic scattering by two empty circular cylinders embedded in a dielectric medium of relative dielectric constant  $\epsilon_r$ .

그림 1은 계산하고자 하는 모델을 보여주고 있으며, 매질은 비유전율이  $\epsilon_r$  인 균일한 유전체로서 영역 S에 해당하고, 매질 내에 두개의 빈 원기둥이 z축 방향으로 놓여 있다. 여기서 원점에 위치한 반경  $a_1$ 의 원기둥은 찾고자 하는 원래의 공동이며, 반경이  $a_2$ 인 또하나의 공동이 원래의 공동으로부터 y축 방향으로 거리 d만큼 떨어진 지점에 위치하고 있다. 해석을 위하여 원래의 공동에 해당하는 영역을  $S_1$ 으로 두고 이

공동과 매질과의 경계면을  $r_1$ 이라 두었다. 또한 반경  $a_2$  인 또하나의 공동에 해당하는 영역은  $S_2$  로 두고 매질과의 경계면을  $r_2$ 로 두었다. 이 때  $z$ 방향으로 분극된 평면파  $u_i(x, y)$ 가  $+x$ 방향으로 입사하고 있으며,  $x=x_0$  평면상에서 입사파 및 산란파의 합인 전장  $u(x_0, y)$ 를 구하고자 한다.

매질과 두 원기둥의 비유전율이 균일하므로 경계적분식을 이용하여 해석하고자 한다. 먼저 원기둥 내부의 전장  $u(x, y)$ 는 다음과 같은 적분방정식으로 표현된다<sup>16)</sup>.

$$u(x, y) = \int_{S_1} d\Gamma [G(x, y, x', y'; k_0) \frac{\partial}{\partial n} u(x', y') - u(x', y') \frac{\partial}{\partial n} G(x, y, x', y'; k_0)] \text{ in } S_n \quad (1)$$

여기서  $r_n$ 과  $S_n$ 의 첨자  $n$ 은 1 또는 2 이다. 그리고  $\frac{\partial}{\partial n}$ 은 원기둥 경계면에서 외부방향으로의 수직방향 미분을 의미한다. 마찬가지로 원기둥 외부 영역에서의 전장  $u(x, y)$ 는 다음과 같은 적분방정식으로 나타낼 수 있다<sup>16)</sup>.

$$u(x, y) = u_i(x, y) - \int_{S_1, S_2} d\Gamma [G(x, y, x', y'; k_0) \frac{\partial}{\partial n} u(x', y') - u(x', y') \frac{\partial}{\partial n} G(x, y, x', y'; k_0)] \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $G$ 는 2차원 무한 평면에서의 그린 (Green)함수로 다음과 같다.

$$G(x, y, x', y'; k) = -\frac{j}{4} H_0^{(2)}(k\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}) \quad (3)$$

여기서  $H_0^{(2)}$ 는 제2종 제0차 Hankel 함수를 의미한다. 그리고 식 (1)에서  $k_0$ 는 공기 중의 파수(wave number)를 의미하고, 식 (2)의  $k_1$ 은 주변매질의 파수로서  $k_0\sqrt{\epsilon}$ 이다.

그림 1과 같은 두 원기둥에 의한 전자파 산란문제는 해석적인 방법으로 풀 수 없다. 따라서 본 논문에서는 식 (1) (3)을 이용한 경계요소법(boundary element method)<sup>17)</sup>을 적용하여 수치해석적인 방법으로  $x=x_0$  평면상에서의 전장  $u(x_0, y)$ 를 구하였다. 원기둥들에 의한 전자파 산란문제를 경계요소법으로 푸는 과정<sup>18)</sup>에 대해서는 기존의 발표된 논문<sup>13)</sup>에 이미 기술한 바 있으므로 여기서는 반복하지 않기로 한다. 경계요소법에 의한 수치계산시 원기둥  $S_1$ 의 경계면  $r_1$ 은  $N_1$ 개의 요소(element)로 나타내며, 원기둥  $S_2$ 의 경계면  $r_2$ 는  $N_2$ 개의 요소로 나타내었다. 각 요소에서의 기저함수(basis function)로서는 선형함수를 사용

하고, collocation 방법을 이용하였다.

### III. 인접 공동의 간섭 효과

그림 1의 구조에서 찾고자 하는 공동의 반경  $a_1$ 은 1 m, 매질의 비유전율  $\epsilon$ ,은 2라고 가정하고, 관측거리  $x_0 = 4$  m 인 평면에서 전장의 패턴을 계산하였다. 우선 공동의 주변 매질이 균일한 경우의 전자파 회절 패턴은 두번째 원기둥의 반경  $a_2$ 를 영으로 두고 계산할 수 있다. 이와 같이 균일한 매질 내에 하나의 원기둥만 존재하는 구조에서 평면파에 의한 전자파 회절 패턴은 해석적인 방법으로 구할 수 있으며<sup>19)</sup>, 여기서 사용하는 경계요소법에 의한 해는 해석적인 해와 잘 일치한다. CBCW 탐사기법은 균일한 매질내의 단일한 공동에 의한 회절패턴에 관한 연구 결과를 바탕으로 확립된 탐사방법으로서 이러한 경우에 대한 회절 패턴은 이론적으로 이미 확립되어 있다<sup>13)</sup>. 균일한 매질내에 단일한 원통형 공동이 있을 경우에 신호의 주파수가 공동의 반경과 비슷해지면 수신신호의 패턴에서는 두개의 강한 감쇄가 나타난다. 고정된 관측거리에서 특정한 주파수의 송신신호에 대하여 수신신호의 Null이 나타나지는 지점이 발생하게 되며, 이 주파수 근방에서 수신신호의 강한 감쇄가 발생하여 공동의 탐사가 용이해진다.

단일한 공동에 대하여 관측거리  $x_0 = 4$  m 에서는 송신 신호의 주파수  $f=158.617$  MHz 에서 그림 2와 같은 이중(double) null 패턴이 나타나며, 원래의 공동의 상·하 경계면인  $y = \pm 1$ m 보다 조금 안쪽에 해당되는 두 지점에서 수신 전장세력의 영(null)이 발생한다<sup>11)</sup>. 수신 전장패턴에서 나타나는 인접한 두 지점의 강한 세력감쇄는 CBCW 탐사기법으로 지하에 숨겨진 공동의 존재 및 위치를 탐지하는 데 가장 중요한 분석기준이 되고 있다. 실제 CBCW 탐사기법의 운영에서는 수신 전장세력의 측정에 사용되는 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)나 회로망 분석기(network analyzer)의 감도에 의하여 측정 가능한 최소세력수준이 제한되므로 double null의 측정은 불가능하다. 그러나 null 주파수인 158.617 MHz 근방의 송신 주파수에 대해 그림 2의 이중 null이 존재하는 지점에서 30 dB 이상의 강한 세력 감쇄가 발생하므로 숨겨진 공동의 존재 및 위치 파악에는 문제가 없다. 공동에 의한 회절 패턴임을 나타내는 대표적인 몇 개의 신호주파수에 대

한 수신 전장세력패턴을 측정함으로써 공동의 존재 및 위치를 탐사하게 된다.

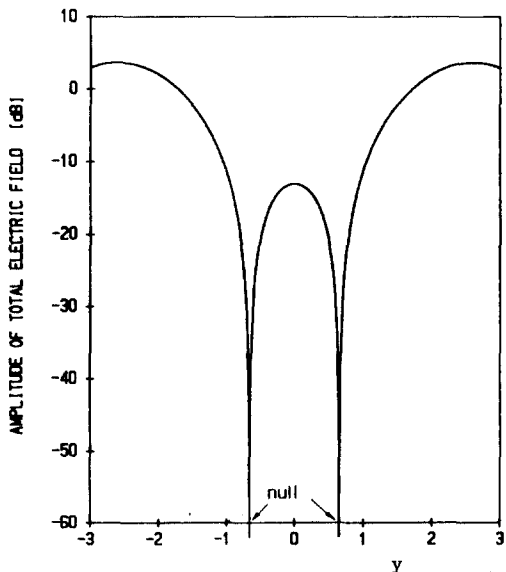


그림 2.  $\epsilon_r=2, a_1=1.0m, d=5.0m, a_2=0.0m, x_0=4m, f=158.617MHz$  인 경우의 수신 전장 세력패턴  
 Fig. 2. Amplitude pattern of the received electric fields for  $\epsilon_r=2, a_1=1.0m, d=5.0m, x_0=4m,$  and  $f=158.617MHz$ .

숨겨진 공동 주변의 지하매질이 불균일하여, 공동이 존재하지 않는 지점에서 수신 전장세력패턴의 강한 세력감쇄가 나타나게 되면, 공동의 존재 및 위치 탐지는 어려움을 겪게 된다. 특히 찾고자 하는 공동의 주변에 유전율이 암반보다 낮고 공기와 유사한 석영 암맥이 존재하면 공동과 석영 암맥과의 상호결합에 의해 수신 전장세력패턴 상에 공동에 의한 세력감쇄가 뚜렷이 나타나지 않는 경우가 있다. 공동의 주변에 석영층 등이 존재하여 전자파 회절 패턴에 미치는 영향을 계산하기 위하여 원래의 공동 주변에 다른 공동을 가정하고 이 추가된 공동의 크기 및 원래 공동과의 거리를 변화시켜서 그 영향을 조사하였다. 그림 1의 구조에서 매질의 비유전율은 2, 공동의 반경은 1 m, 두 공동간의 거리 d 는 5 m 로 고정하고, 송신 신호의 주파수가 160 MHz 일 때 인접공동의 반경  $a_2$ 를 0.2 에서 0.8 m 까지 변화시켜서 관측거리  $x_0 = 4$  m 에서 나타나는 수신 전장세력패턴을 경계요소법을 이용하여 수치계산하였다. 원래 공동의 경계면  $r_1$  에 대해서는 기저함수의

숫자  $N_1$  을 50 으로 하여 해가 충분히 수렴하도록 하여 계산하였으며, 인접공동의 경계면  $r_2$  에 대한 기저함수의 숫자  $N_2$  는 반경  $a_2$  의 크기에 비례하는 값을 사용하였다.

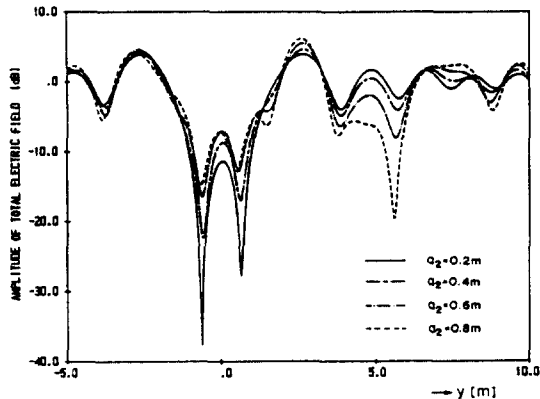


그림 3.  $\epsilon_r=2, a_1=1.0m, d=5.0m, x_0=4m, f=160MHz$ 에서  $a_2$  를 0.2 에서 0.8 m 까지 증가시 수신 세력패턴에 미치는 영향  
 Fig. 3. Effects of  $a_2$  change on the amplitude pattern of the received signal for  $\epsilon_r=2, a_1=1.0m, d=5.0m, x_0=4.0m,$  and  $f=160MHz$ .

그림 3은 인접공동의 반경  $a_2$  를 변화시키면서 나타나는 수신 전장의 세력패턴을 보여주고 있으며,  $a_2 = 0.2m$  인 경우에서와 같이 인접공동의 반경이 찾고자 하는 공동의 반경  $a_1$ 에 비해 작을 경우는 원래 공동의 상·하 경계면 근방에 해당되는 y축 상의 지점에 비대칭적이기는 하지만 강한 이중(double) dip이 존재함을 볼 수 있다. 여기서 두 개의 dip 가운데 공동 윗쪽 경계면에 해당하는 위치의 세력감쇄가 줄어드는 것은  $y = \pm 5m$  지점에 존재하는 인접 공동과의 상호결합에 의한 영향이 원점에 있는 원래 공동의 윗쪽에 강하게 미치기 때문이다. 그러나  $a_2 = 0.2m$ 인 경우는 원래의 공동의 상·하 경계면에 해당되는 수신지점에서의 이중 dip의 세력감쇄가 모두 20 dB 이상이어서 비대칭적인 패턴 특성은 큰 문제가 되지 않는다. 그림 3의 결과로부터  $a_2 = 0.2m$  인 인접 공동이 5 m 거리에 존재하더라도  $a_1 = 1m$ 인 원래의 공동의 존재 및 위치 탐지에는 별다른 문제가 없음을 알 수 있다. 인접 공동의 반경  $a_2$ 를 점차 증가시키면 원래의 공동 근방에서의 세력감쇄 현상은 점차 줄어드는 반면 인접 공동 근방

에서의 세력감쇄는 점차 증가하는 추세를 보인다. 이 경우에도 원래의 공동의 상·하 경계면에 해당되는 지점에서 이중 dip이 발생한다. 그러나  $a_2 = 0.8 m$ 로 인접 원기둥의 크기가 원래의 원기둥 크기에 근접하면 가장 강한 세력감쇄가 일어나는 지점이 원래의 공동 근방이 아니라 인접 공동이 존재하는 지점에서 발생하는 것을 그림 3은 잘 보여준다. 따라서  $a_2 = 0.8 m$ 인 경우는 가장 강한 감쇄가 일어나는 지점만을 가지고 공동을 찾는다면 원래의 공동의 탐지는 실패하게 된다.

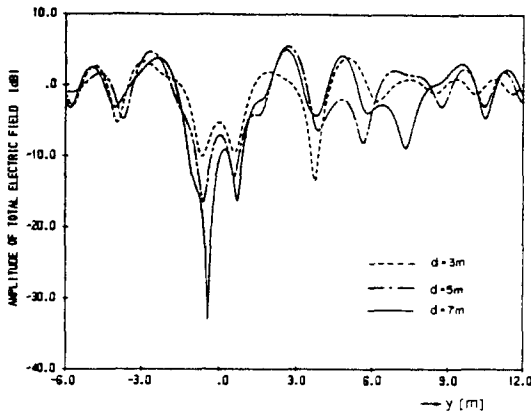


그림 4.  $\epsilon_r = 2, a_1 = 1.0m, a_2 = 6.0m, x_0 = 4m, f = 160MHz$ 에서 d 를 7 에서 3m 로 감소시 수신 세력패턴에 미치는 영향  
 Fig. 4. Effects of d change on the amplitude pattern of the received signal for  $\epsilon_r = 2, a_1 = 1.0m, a_2 = 0.6m, x_0 = 4m,$  and  $f = 160MHz$ .

이번에는 그림 1의 구조에서  $a_1 = 1 m, \epsilon_r = 2, x_0 = 4.0 m, f = 160MHz$  로 앞에서와 같은 값을 사용하고 인접 공동의 반경  $a_2$ 를 0.6 m 로 고정하여 두 원기둥 간의 간격 d 를 7 m 에서 3 m 로 변화시켜 수신 전장세력패턴에 나타나는 현상을 경계요소법으로 수치 계산하였다. 그림 4에서 보듯이  $d = 7 m$  인 경우는 원래의 공동에 해당하는 위치에서 비대칭적이지만 강한 세력감쇄를 볼 수 있으나, d 가 줄어들수록 두 원기둥 간의 상호 결합이 강하게 일어나  $d = 3 m$  인 경우는 가장 강한 세력감쇄가 원래의 원기둥에 해당하는 위치에서 나타나지 않고 인접 원기둥의 위치에서 발생한다. 특히  $d = 3 m$ 인 경우는 원래의 공동에 의해 생기는 이중 dip의 세력감쇄가 10 dB 정도밖에 되지 않기 때문에 강한 세력 감쇄라고 볼 수 없다.

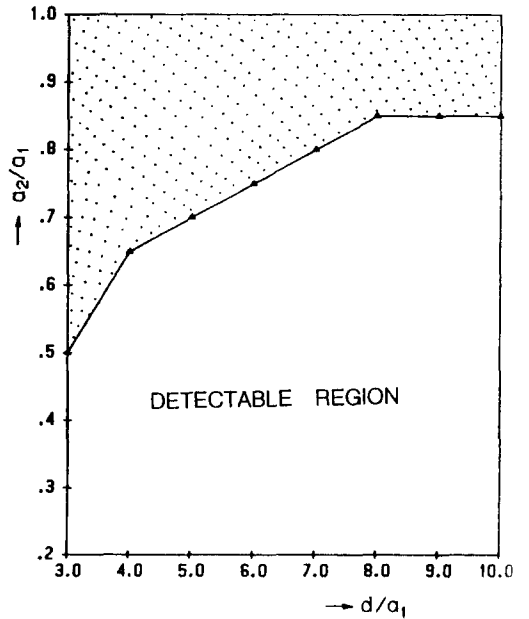


그림 5.  $\epsilon_r = 2, a_1 = 1.0m, x_0 = 4m, f = 160MHz$  일 때 공동의 탐지가 가능한  $a_2$  와 d의 범위  
 Fig. 5. The range of  $a_2$  and d where the original cavity can be detectable for  $\epsilon_r = 2, a_1 = 1.0m, x_0 = 4m,$  and  $f = 160MHz$ .

그림 5에서는 그림 1의 구조에서 원점에 찾고자 하는 공동이 있고 주변에 인접한 공동이 존재할 경우에 인접 공동의 크기나 두 공동 간의 거리 변화에 대하여 원래의 공동에 대한 탐사가 가능한 영역을 나타내고 있다. 여기서 찾고자 하는 공동의 반경은 1m, 주변 매질의 비유전율  $\epsilon_r = 2,$  측정거리  $x_0 = 4m,$  인가 주파수  $f = 160 MHz$ 로 하였다. 그림 5는 원래의 공동 중심으로부터 d 만큼 떨어진 위치에 반경이  $a_2$ 인 인접 공동이 존재할 때, 원점에 위치한 공동의 상·하 경계면에 해당되는 지점에서 발생하는 이중 dip의 세력감쇄가 전체 수신 전장세력패턴 상에 최소가 되는 영역을 나타내고 있다. 즉 그림 5에서 점으로 표시한 영역은 수신 전장세력패턴 상에서 반경  $a_2$ 의 인접 공동에 의한 세력감쇄가 반경  $a_1$ 의 원래 공동에 의한 두 지점의 세력감쇄보다 더 큰 경우를 표시한 것이다. 따라서 그림 5에서 점으로 표시하지 않은 빈 영역에서는 수신 전장세력패턴 상에서 세력감쇄가 가장 큰 두 지점이 바로 반경  $a_1$ 을 갖는 공동의 상·하 경계면에 해당되는 지점이므로 찾고자 하는 원점에 위치한 공동을 탐지할 수 있다.

## IV. 검토 및 결론

CBCW 공동탐사 기법에 의한 실제의 지하 공동탐사에서 지하의 매질은 매우 복잡한 구조로 이루어져 있으며, 그 중 수신 전력패턴에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파쇄대층이나 석영층 등이다. 송·수신 안테나간에 파쇄대층이 걸쳐있는 지점에서는 전자파가 이 파쇄대층을 통과시 심하게 감쇄하여 수신 전장패턴에는 극도의 세력감쇄가 나타나게 된다. 단순히 수신 전장패턴 상에서 가장 세력감쇄가 큰 두 지점만을 찾는다면 공동에 의한 이중 dip과 파쇄대층에 의한 신호의 감쇄를 구분하지 못하게 되는 경우가 있다. 그런데 지하의 파쇄대층은 공동과는 달리 대부분 단층(layer)구조로 존재하기 때문에 수신 전장세력패턴 상에서 이중 dip형태로 나타나지 않으며, 주파수를 바꾸더라도 세력감쇄형태가 거의 변하지 않는 특성이 있다. 그러나 공동의 경우에는 인가 주파수에 따라 수신 전장세력패턴 상에 나타나는 감쇄형태가 이중 dip, 단일(single) dip등의 형태로 변화하게 되며, 그 특성은 이전에 발표된 논문들에서 잘 해석되어 있다<sup>[3], [4]</sup>. 따라서 공동탐사시 여러 개의 주파수에 대한 수신전력 패턴을 비교함으로써 파쇄대층에 의한 세력감쇄 지점은 공동에 의한 패턴과 구분할 수 있다. 지하의 매질에서 공동탐사에 가장 많은 어려움을 주는 것은 석영층으로서 찾고자 하는 공동과의 상호 결합에 의한 영향을 분석하는 것은 매우 중요하다. 여기서 제시한 공동 판별 기준은 실제의 탐사에서 다양한 주파수를 사용하고, 지층구조에 대한 사전정보를 적절히 활용함으로써 유용하게 사용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

[1] R. J. Lytle, D. L. Lager, E. F. Laine, and D. T. Davis, "Using cross borehole electro-

magnetic probing to locate highcontrast anomalies," *Geophys.*, vol. 44, pp. 1667-1676, 1979.

- [2] 나정웅, "전자파를 이용한 곡물더미 내의 공동탐사에 관한 연구." 농수산부 수탁과제, KAIST 보고서, 1980
- [3] 이택경, 김세운, 송재원, 이수영, 나정웅, "매질내의 공동에 의해 산란된 전자파의 강한 감쇄에 관한 해석" 대한전자공학회 논문지, vol. 26, No. 3, pp. 365-376, 1989
- [4] T. K. Lee, S. O. Park, J. W. Ra, and S.-Y. Kim, "Near field diffraction pattern by an underground void of circular cylinder," *Microwave Opt. Tech Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 179-183, 1989.
- [5] T. K. Lee, S.-Y. Kim, and J.-W. Ra, "Diffraction pattern by a trapezoidal cylindrical cavity," *IEEE AP S International Symposium*, Dallas, Texas, U.S.A., May 7-11, 1990, pp. 1346-1349.
- [6] C. A. Brebbia, *The Boundary Element Method for Engineers*. London: Pentech Press, 1978.
- [7] S. Kagami and I. Fukai, "Application of boundary-element method to electromagnetic field problems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT 32, no. 4, pp. 455-461, 1984.
- [8] K. Yashiro and S. Ohkawa, "Boundary element method for electromagnetic scattering from cylinders," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP 33, no. 4, pp. 383-389, 1985.
- [9] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*. New York: McGraw-Hill, 1961, CH. 5.

## 저 자 소 개

李 澤 璟(正會員) 第 32 卷 A編 第 6 號 參照  
현재 한국항공대학교 항공전자공학과 부교수

金 世 潤(正會員) 第 29 卷 A編 第 12 號 參照  
현재 한국과학기술연구원 정보전자연구부 책임연구원

羅 正 雄(正會員) 第 29 卷 A編 第 12 號 參照  
현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수