

3 다이폴 안테나 방식 레이더에 의한 콘크리트 터널 라이닝 배면 공동의 형상 추정

박석균^{1)*}

¹⁾ 대전대학교 토목공학과

(2004년 4월 15일 원고접수, 2005년 2월 15일 심사완료)

Estimation of Shape of Voids behind Concrete Tunnel Linings Using Radar of Three Dipole Antenna Type

Seok-Kyun Park^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Daejeon University, Daejeon, 300-716, Korea

(Received April 15, 2004, Accepted February 15, 2005)

ABSTRACT

The presence of voids behind tunnel linings is very likely to result in settlement or structural collapse. One proposed method of detecting such voids by non-destructive method is radar. More than effectively judging the existence of voids behind tunnel linings, this study aims to develop the analysis algorithm of radar capable of estimation of the shape of specific voids. To acquire directional information and estimate the shape of three-dimensional voids, the radar of three-dipole antenna type is used. As a foundation to this ongoing research, an investigation of microwave polarization methods using three-dipole antenna carried out with various void orientations and void geometries. As a result, it is clarified that the response of four microwave polarization modes depends on void geometry and thus there is a possibility of identifying the geometry and orientation (the shape) of specific voids using radar of three-dipole antenna type.

Keywords : non-destructive test, void shape, concrete tunnel lining, radar

1. 서 론

콘크리트 터널 라이닝이나 도로상판의 배면공동은 경우에 따라 구조물의 붕괴나 대형사고로까지 이어질 가능성이 있어 이의 검출을 위한 비파괴 검사는 매우 중요하다. 레이더법에 의한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사는 비접촉 주사방식에 의하기 때문에, 적용부재에 대해서 제약이 비교적 적고, 측정도 다른 검사방법 보다 빠르고 비교적 간단하여, 이러한 배면 공동의 검출에 최적인 검사방법으로서 각광받고 있다. 그러나 토목 구조물에 대하여 적용하는 경우에는 감쇠 및 산란 등의 영향이 크기 때문에, 고주파 성분의 사용이 곤란하여 분해능도 나빠진다.

터널 라이닝 배면에 발생한 공동은 터널의 안전상, 반드시 모르타르 주입에 의해 보수를 하여 주어야 하기 때문에 그 공동의 규모나 형상까지를 파악하는 일은 매우 중요하다. 그러나 현재 시판되어 사용 중인 발·수신용 2개의 다이폴 안테나 방식에 의한 패러렐(parallel) 모드에서

는 한번 측정으로는 이와 같은 공동을 검출했다 하더라도 그 공동의 규모나 방향성, 형상까지를 추정하기는 매우 어렵다. 설사 이를 추정한다 하더라도 360°의 전 방위에 대하여 여러 방위에 걸쳐 수차례의 측정을 하여야 하고, 측정치에 대한 결과의 해석이 매우 까다롭다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 3개의 다이폴 안테나를 이용한 3다이폴 모드의 레이더를 이용하여 한번 측정으로도 공동 규모의 대략적인 파악이 가능한 형상 추정 방법을 개발하고자 하였다. 터널 라이닝 배면 공동에 대한 레이더 탐사에 관한 기존의 연구 동향은 모두 발·수신용 2개의 안테나 방식에 의한 패러렐(parallel) 모드에서 이루어진 것으로서 대부분이 공동유무의 검출특성에 관한 것이고¹⁻⁷⁾, 저자이외에 본 연구에서와 같은 3다이폴 안테나 방식 레이더에 의한 공동의 형상 추정 해석방법에 관한 연구는 아직 보고된 바 없다⁸⁻¹¹⁾.

2. 해석방법

일반적으로 사용되고 있는 발·수신용 2개의 안테나에 의한 일방향 편파성분 패러렐 레이더 방식은 보다 간단한

*Corresponding author
E-mail : skpark@dju.ac.kr
©2005 by Korea Concrete Institute

원리로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 목표물의 방향까지 예측하기 위해서는 각 방위별로 측정을 반복하면서 측정하여야 하는 번거로움이 있다. 이에 반해 3개의 편파성분 안테나를 이용한 3 다이폴 방식의 장치는 1회 측정으로 얻을 수 있는 3가지 방향에 대한 산란행렬의 벡터연산에 의해 목표물의 각 방위별 평면형상에 관한 정보의 예측도 가능할 것으로 사료된다. 그러나 본 레이더장치는 매설관과 같은 선상(線狀) 물체의 방향 탐지용으로 설계되었기 때문에 본 연구의 대상인 공동과 같은 비선상(非線狀) 물체의 형상식별 등을 위해서는 별도의 계산 및 신호처리과정이 필요하다. 다음은 본 레이더 방식을 이용해 공동의 평면형상 식별방법에 대해서 설명한다.

2.1.3 다이폴 안테나에 의한 편파모드의 산란행렬

Fig.1과 같이 각각의 안테나를 x, y축 상에서 독립하게 배치함으로써 4가지 편파모드를 얻을 수 있고, 그 산란행렬은 식(1)과 같이 정의된다. 여기서, 탐사대상 목표물은 선상물체를 예로 하였다. 안테나로부터의 방사전계(放射電界) 벡터를 E^T , 수신 벡터를 E^R 로 하고, 레이더 출력을 $\langle E_i^R | E_j^T \rangle$ 로 한다. i, j 는 수평면(지표면)상에서 취한 x, y좌표계의 성분이다. 산란행렬의 각 요소는 송신 T, 수신 R 안테나의 벡터 실효장(實效長)이 각각 S_{xx} 에서는 모두 x축에 평행하고, $S_{xy} = S_{yx}$ 에서는 서로 직교

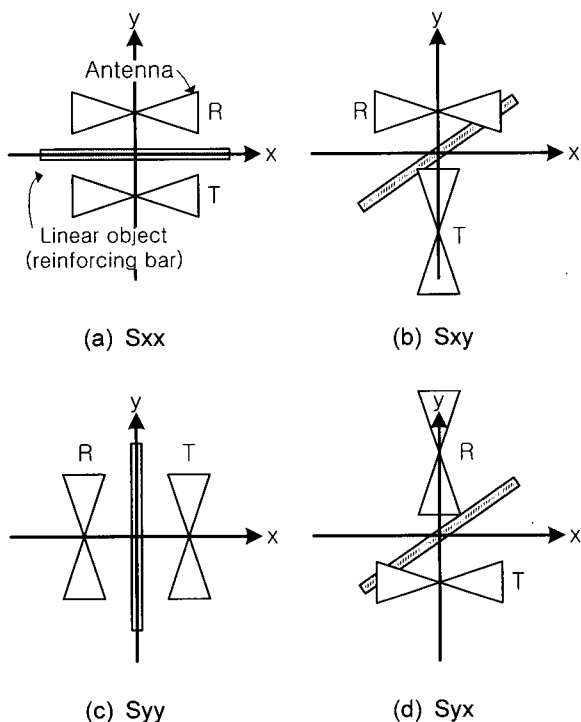


Fig. 1 Microwave polarization mode

하며, S_{yy} 에서는 모두 y축에 평행하는 것을 의미한다.

$$[s] = \begin{bmatrix} \langle E_x^R | E_x^T \rangle & \langle E_x^R | E_y^T \rangle \\ \langle E_y^R | E_x^T \rangle & \langle E_y^R | E_y^T \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix}$$

한편, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 이용한 3 다이폴 안테나에 의한 다중편파방식에서 x, y축에 평행한 단위벡터를 \bar{e}_x, \bar{e}_y , 소자 1, 2, 3의 벡터 실효장과 평행한 단위 벡터를 $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ 라 하면,

$$\bar{e}_1 = \bar{e}_x \quad (2)$$

$$\bar{e}_2 = -\frac{1}{2}\bar{e}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{e}_y \quad (3)$$

$$\bar{e}_3 = -\frac{1}{2}\bar{e}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{e}_y \quad (4)$$

의 관계가 성립한다.

따라서, $\langle E_1^R | E_2^T \rangle, \langle E_2^R | E_3^T \rangle, \langle E_3^R | E_1^T \rangle$ 는 x, y방향의 벡터 \bar{e}_x, \bar{e}_y 로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle E_1^R | E_2^T \rangle &= \langle \bar{e}_x, -\frac{1}{2}\bar{e}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{e}_y \rangle \\ &= -\frac{1}{2}\langle \bar{e}_x, \bar{e}_x \rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}\langle \bar{e}_x, \bar{e}_y \rangle \\ &= -\frac{1}{2}\langle E_x^R | E_x^T \rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}\langle E_x^R | E_y^T \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \langle E_2^R | E_3^T \rangle &= \langle -\frac{1}{2}\bar{e}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{e}_y, -\frac{1}{2}\bar{e}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{e}_y \rangle \\ &= \frac{1}{4}\langle \bar{e}_x, \bar{e}_x \rangle - \frac{3}{4}\langle \bar{e}_y, \bar{e}_y \rangle \\ &= \frac{1}{4}\langle E_x^R | E_x^T \rangle - \frac{3}{4}\langle E_y^R | E_y^T \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

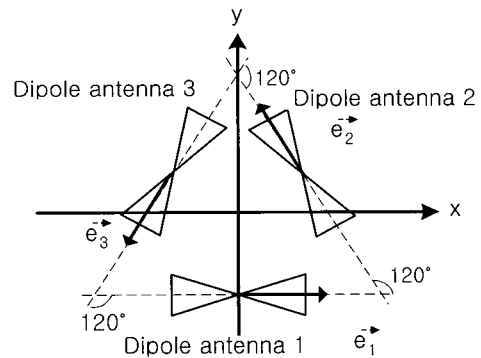


Fig. 2 Scheme of three-dipole antenna element

$$\begin{aligned} \langle E_3^R | E_1^T \rangle &= \left\langle -\frac{1}{2} \vec{e}_x - \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{e}_y, \vec{e}_x \right\rangle \\ &= \frac{1}{2} \langle E_x^R | E_x^T \rangle - \frac{\sqrt{3}}{2} \langle E_x^R | E_y^T \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

이들 식을 식(1)에 의해 $[S]$ 의 각 성분으로 나타내고, 각 편파성분에 관한 산란행렬로 정리하면 식(8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= -\langle E_1^R | E_2^T \rangle - \langle E_3^R | E_1^T \rangle \\ S_{xy} = S_{yx} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\langle E_1^R | E_2^T \rangle - \langle E_3^R | E_1^T \rangle) \\ S_{yy} &= -\frac{1}{3} \langle E_1^R | E_2^T \rangle - \frac{1}{3} \langle E_3^R | E_1^T \rangle - \frac{4}{3} \langle E_2^R | E_3^T \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

또한, Fig. 3과 같이 x, y 축에 대해서 각도 θ 만큼 좌표계를 회전시킨 신좌표계 X, Y 에서의 산란행렬 $[S']$ 는 식(9)에 의해 구할 수 있다.

$$[S]' = |\phi| |S| |\phi|^T \quad (9)$$

여기서, $|\phi| = \begin{vmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{vmatrix}$

2.2 다중 편파성분 안테나에 의한 공동의 표면형상 (방향성)의 추정

이상의 과정으로부터 추론해 보면 편파모드의 응답특성 상에서 일반적으로 알려져 있는 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 즉, 평행편파성분 S_{xx}, S_{yy} 에서는 신호의 검출대 상 범위가 넓어지고, 선상 물체의 방향이 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 의 경우에 최대반사강도를 갖는데 반해, 직교편파성분 $S_{xy} = S_{yx}$ 에서는 등축(等軸)형 물체에는 반응하지 않고 선상 물체의 방향이 $\theta=45^\circ$ 인 경우에 최대반사강도를 갖게 된다. 따라서 본 방식의 레이더를 이용하여 해당 공동의 표면 위를 탐사한 후에 평행편파성분 S_{xx}, S_{yy} 와 직교편파성분 $S_{xy} = S_{yx}$ 에 대한 산란행렬을 계산하면 해당 공동의 개략적인 형상 또는 방향성을 알 수 있다.

또한, 탐사대상 물체의 장축방향으로 X 축을 맞추어 x 축에 대해 θ 만큼 좌표계를 회전시킨 2개의 직교주축 X, Y 에서의 평행편파성분의 비, 즉 S_{XX} 에 대한 S_{YY} 의 비에 의한 형상식별계수(R)을 식(10)과 같이 정의해서 물체의 형상을 식별하는 것도 가능하다.

$$R = \frac{S_{YY}}{S_{XX}} \quad (10)$$

이들 방법에 의한 물체의 형상식별개념을 Fig. 4에 나타내었다. 한편, 본 연구에서는 레이더 탐사에서 물체의 형

상을 식별하는 상에서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 기본적인 물체형상을 축 대칭성에 따라 3종류로 대별하여 정의하였다.

먼저, 철근이나 파이프와 같이 거의 일축방향 성분만의 길이를 갖고 있는 경우를 선상(linear) 물체, 원이나 정방형 물체와 같이 중심주축 간의 각 방향 길이가 서로 동일한 경우를 등축형(co-axial) 물체, 이들 이외의 경우를 비선상·비등축형(non-linear & non-co-axial) 물체라 정의하였다.

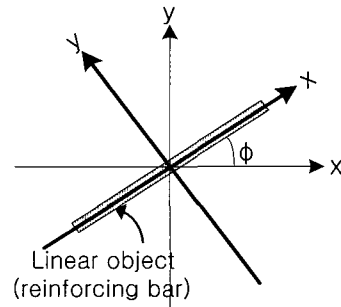


Fig. 3 Transformation to new coordinate system

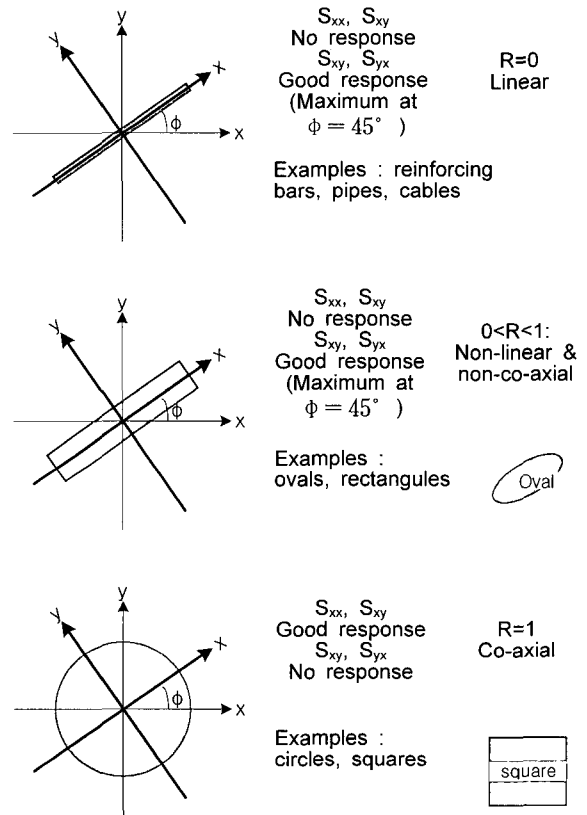


Fig. 4 Shape discrimination factors for objects (voids) by transformation of microwave polarization mode

3. 실험

3.1 시험체 제작

실험은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 10cm 두께의 무근 콘크리트 상판과 Figs. 6, 7에 나타낸 바와 같이 실험의 용이성을 위해 5cm 두께의 폴리우레탄 시트를 깔고 실시한 경우의 두 가지 조건으로 나누어 실시하였다. 배면 재료는 구조물 종류에 따라 다르고, 일반적으로 지반 또는 암반으로 구성되어 있는 경우가 많지만, 암반의 경우는 내부에 공동을 넣어 실험하는 것이 어렵기 때문에 지반을 대표하는 재료로서 모래를 선정하였다. 콘크리트 상판의 배합조건은 Table 1과 같이 하였다. 이 때 대상 매질로서 사용된 모래는 비중 2.6, 함수율 1.7~3.4%였다. 또한, 내부에 삽입한 공동은 전기적 성질이 실제 공동에 가까운 스티로폼을 사용하여 인공으로 제작하여 매설하였다.

3.2 측정장비

측정장비로는 3 다이폴 안테나 방식을 채용하고 있는 지중 탐사 레이더를 사용하였다. 본 레이더는 20MHz~1GHz의 광대역 주파수를 갖고 있다.

4. 결과 및 고찰

이상의 조건 하에서 얻어진 결과 중에서, 대표적으로 Fig. 5의 콘크리트 배면의 구형(矩形) 공동에 대한 조건을 선정하여 2절에서 논한 산란행렬의 계산결과를 구체적으로 논해 보기로 한다. 우선, 그 결과를 Figs. 8~14에 나타내었다. 또한, Fig. 1에 대한 측정 및 계산결과는 대표적인 결과만을 예를 들어 Figs. 15, 16에 나타내었다.

콘크리트 배면의 구형 공동에 대한 계산결과 중, Figs. 8~10은 각각 $\langle E_1^R | E_2^T \rangle = \langle \vec{e}_1, \vec{e}_2 \rangle$, $\langle E_2^R | E_3^T \rangle = \langle \vec{e}_2, \vec{e}_3 \rangle$, $\langle E_3^R | E_1^T \rangle = \langle \vec{e}_3, \vec{e}_1 \rangle$ 에 대한 3소자 안테나의 각 조별 산란행렬 화상을 나타내고 있다. 참고로, 일반 레이더의 패러렐 모드 측정에서 보이는 화상은 Fig. 13의 S_{yy} 모드이다. 따라서 Figs. 8~10에 대해서 식(8)에 의한 계산을 통하여 그 결과를 나타내면 Figs. 11~13과 같다. 또한, 대표적인 θ 각으로서 45°를 선택한 신좌표계에

Table 1 Concrete mix condition

W/C (%)	S/a (%)	Unit content (kgf/m ³)				f _{ck} (N/mm ²)	Slump (cm)	G _{max} (mm)	Air (%)
		W	C	S	G				
55	46	173	318	790	980	40	5	20	2.6

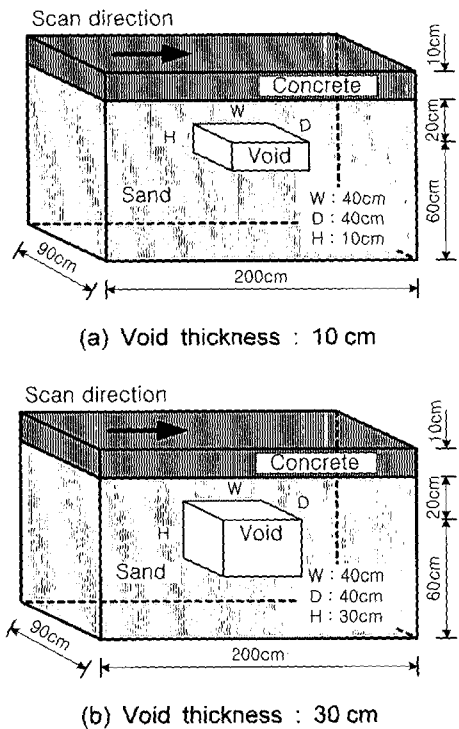


Fig. 5 Experimental conditions for detecting voids of square plane form (co-axial type) under non-reinforced concrete slab

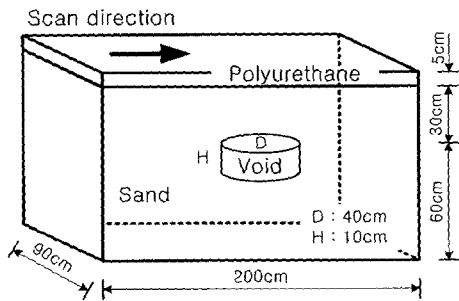


Fig. 6 Experimental conditions for detecting voids of circular plane form (co-axial type) under polyurethane sheet

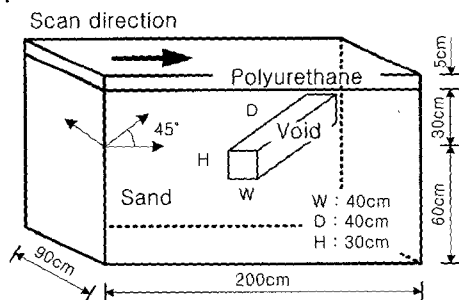


Fig. 7 Experimental conditions for detecting voids of rectangular for (non-linear and non-co-axial type) under polyurethane sheet

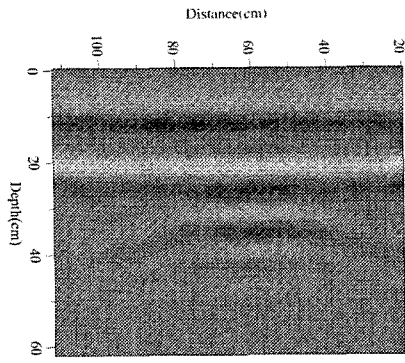


Fig. 8 $\langle E_1^R | E_2^T \rangle = \langle \vec{e}_1, \vec{e}_2 \rangle$ of Fig. 5 (a)

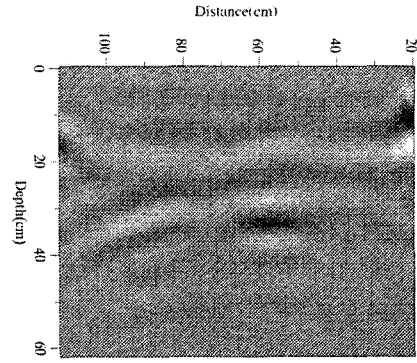


Fig. 12 $S_{xy} = S_{yx}$ of Fig. 5(a)

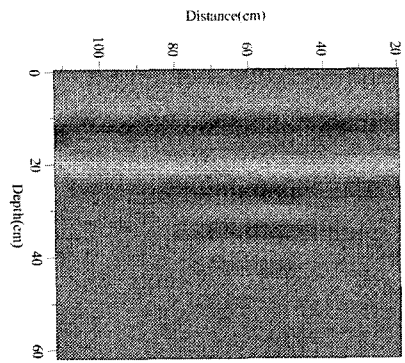


Fig. 9 $\langle E_2^R | E_3^T \rangle = \langle \vec{e}_2, \vec{e}_3 \rangle$ of Fig. 5(a)

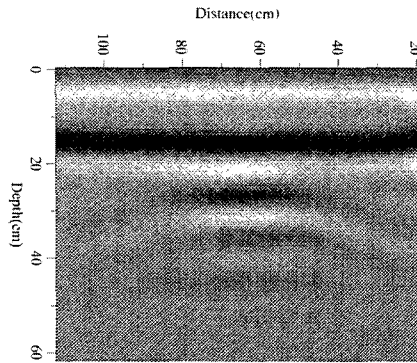


Fig. 13 S_{yy} of Fig. 5(a)

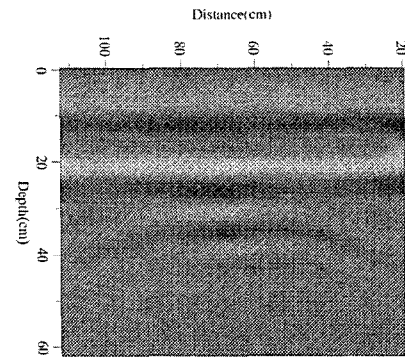


Fig. 10 $\langle E_3^R | E_1^T \rangle = \langle \vec{e}_3, \vec{e}_1 \rangle$ of Fig. 5(a)

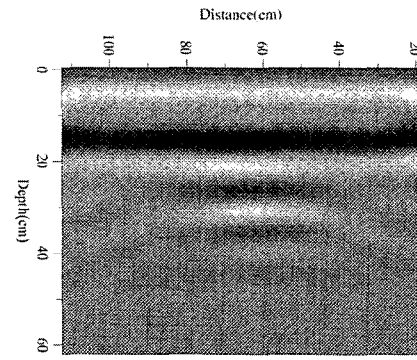


Fig. 14 $S_{yy} (\vartheta=45^\circ)$ of Fig. 5(a)

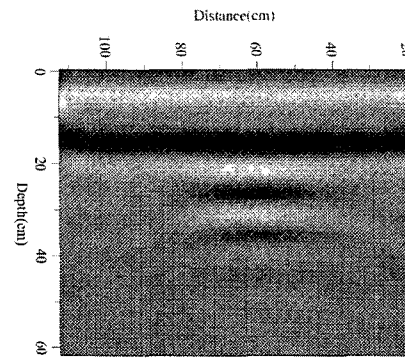


Fig. 11 S_{xx} of Fig. 5(a)

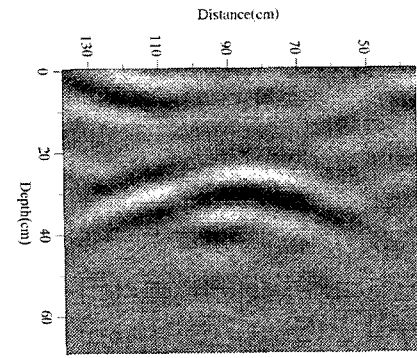


Fig. 15 $S_{xy} = S_{yx}$ of Fig. 7

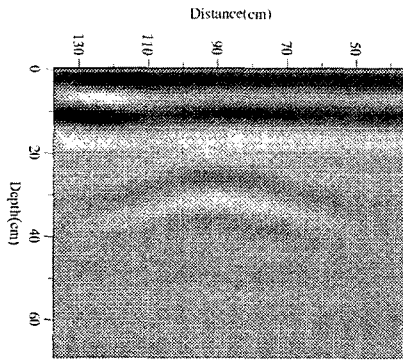


Fig. 16 S_{yy} of Fig. 7

서의 산란행렬 계산결과를 Fig. 14에 나타내었다. 이 경우의 계산은 S_{xx} 의 산란행렬에 대한 식(9)를 이용하였다.

한편, Fig. 7에 대한 측정 및 계산결과인 Figs. 15, 16은 각각 직교성분 $S_{xy} = S_{yx}$ 의 산란행렬과 평행성분 S_{yy} 의 산란행렬 결과를 나타내고 있다. 이상의 결과를 해석하면 다음과 같다. 먼저, Fig. 16에서는 Fig. 7의 공동의 방향이 45°가 되어 있기 때문에, S_{yy} 에서는 신호가 약하고 물체형상까지의 추정이 곤란하지만, Fig. 15의 $S_{xy} = S_{yx}$ 에서는 강한 신호가 얻어져, 해당 공동의 형상이 선상(線狀)에 가까운 것과 그 방향이 45°에 있음을 알 수 있다. 그리고 평행성분에서 각 회전각별로 산란행렬을 계산하여 비교한 결과, $\theta=45^\circ$ 부근에서 비교적 최대강도에 가까운 반사신호가 얻어졌지만, 예상보다는 전방위에서의 각 회전각별 특성 차는 명확히 나타나지 않았다. 이는 대상 물체가 공동으로서 매질과 동과 같은 완전한 선상 물체가 아닌 점과 각 측정위치에서 전방향의 방위를 공동에 대해 등거리 개념으로 계산하는 상의 오차로 사료된다. 또한, Fig. 15에서는 예상대로 등축성 경계로부터의 반사신호(표면파)가 거의 나타나지 않음을 알 수 있고, Fig. 16에 비해 신호의 위상이 반전되어 있는 것은 산란행렬의 계산에 의한 변화 때문이다.

한편, Fig. 13의 S_{yy} 결과에 비해 Fig. 12의 $S_{xy} = S_{yx}$ 로 변환한 결과는 각 해당 신호가 크게 흩어져 나타나 검출대상 물체가 등축형임을 알 수 있다. Fig. 17에는 Fig. 6의 원형 공동(원주형)의 경우에서 전방위에 대한 신호의 각 회전각별 신호표계에서의 산란행렬을 나타내고 있다. 이들 결과로부터 전방위에 대한 신호의 각 회전각별 신호표계에서의 산란행렬이 거의 같은 패턴으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 구형이나 원형 등과 같은 등축성에 속하는 형상에 대해서는 거의 같은 각 회전각(방위)별 산란행렬과 화상의 농담(濃淡)강도(반사강도)별 빈도수가 얻어져 본 레이다 장치의 사용 주파수(중심주파수 600 MHz)에 의한 수평분해능으로는 이들 형상변화까지를 정도 좋게 추정하

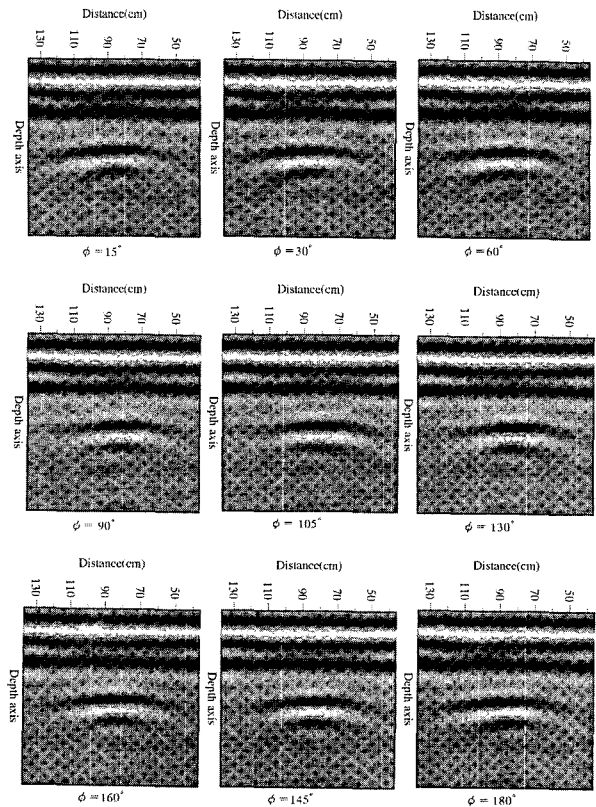


Fig. 17 S_{yy} of Fig. 6 at each transformation angle θ

는 것은 한계가 있음을 알 수 있다. 그러나 등축성과 비선형·비등축형 형상 사이에는 명확히 구별이 가능하기 때문에 본 방법에 의한 공동의 형상추정도 개략적인 판단 범위 내에서는 유효하다고 판단된다. 이 범위라고 하는 것은 등축성 공동에 대해서 구형이나 원형 등의 형상간 구분이 곤란한 점과 구형의 형상을 갖는 등축성 공동에 대해서 전 방향각별로 같은 형상으로 취급되는 정도의 오차가 인정된다는 의미이다.

5. 결 론

이상에서와 같이, 본 연구의 해석방법에 의해 정해진 각종 형상의 배면공동에 대해 검출특성을 검토하여 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 방향이 45°인 막대모양의 비선상·비등축형(non-linear & non-co-axial) 공동에 대한 편파성분 산란행렬의 계산결과, S_{yy} 나 S_{xx} 에서는 반사신호가 약하였으나 $S_{xy} = S_{yx}$ 에서는 강한 반사신호가 얻어져 해당 공동의 형상이 특정 방향성을 갖는 막대형(선상)에 가깝고 그 방향도 $\theta=45^\circ$ 에 위치하고 있음을 예측하는 것이 가능하였다.
- 2) 등축형(co-axial) 콘크리트 배면공동에 대한 3편파성분 산란행렬의 계산결과, S_{yy} 나 S_{xx} 의 결과에 비해 $S_{xy} = S_{yx}$

로 변환한 결과에서는 각 해당 신호가 크게 흐트러져 검출대상 물체가 등축형임을 예측할 수 있었다.

- 3) 등축형 콘크리트 배면공동에 대해 얻어진 신호의 진방위에 걸친 각 회전각별 신호표계의 산란행렬은 거의 동일하게 나타나 등축형 공동의 형상검출특성을 보다 뚜렷이 파악할 수 있었으나, 구형(矩形)이나 원주형과 같은 동일한 등축형 그룹 내에서는 그 형상 차이를 구분하기 곤란하였다.
- 4) 비선상·비등축형(non-linear & non-co-axial) 그룹과 등축형(co-axial) 그룹간에는 뚜렷한 형상검출특성 차를 나타내고 있어 이들 형상 간에는 공동의 형상구분 추정이 가능하며, 본 연구에서 제안된 해석방법에 의할 경우 공동의 규모나 방향성 등을 예측하는 데 유효함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Moore, J. R., Echard, J. D., and Neill, C. G., "Radar Detection of Voids under Concrete Highways," *IEEE International Radar Conference*, 1980, pp.131~135.
2. Kovacs, A. and Morey, R.M., *Detection of Cavities Under Concrete Pavement*, CRREL Report 83-18, 1983, pp.1~41.
3. Moore, J. R. and Echard, J. D., "Radar Detection of Voids under Concrete Hiways," *IEEE International Radar Conference*, 1980, pp.131~135.
4. Clemena, G. G., Sprinkel, M. M., and Robert, R. Long, *Use of Ground-Penetrating Radar for Detective Voids Under a Jointed Concrete Pavement*, Transportation Research Record 1109, pp.1~10.
5. Bertram, C.L., et.al, *Feasibility Study for Rapid Evaluation of Airfield Pavements*, AFWL-TR-71-178, 1974, pp.1~94.
6. Moore, et. al, *Radar Detection of Voids under Concrete highways*, Georgia Institute of Technology, NCHRP 10-14, 1980.
7. Steinuray, Echart, and Lake, *Locating Voids Beneath Pavement Using Pulsed Electromagnetic Waves*, Georgia Inst. of Tech., 1981.
8. Murasawa, K., Nishizaki, H., Jyomuta, C., Kimura, N., and Obara, H., "Subsurface Radar with Three Antenna Elements Based on Scattering Theory", Michuizousengibo, Japan, No.152, 1994.
9. Olver, A. D., et al., "Portable FM-CW Radar for Locating Buried Pipes," *Proc. International Conference Radar-82*, 1982, pp.413~418.
10. Ueno, K. and Osumi, N., "Underground Pipe Detection based on Microwave polarization Effect," *Proc. ISNCR*, 1984, pp.673~678.
11. Park, S. K. and Uomoto, T., "Radar image Processing for Detection of Shape of Voids and Location of Reinforcing Bars on or under reinforced concrete," *International Conference Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE '97) Proc.*, Vol. 1 and 2, Liverpool, UK, 1997.

요 약

콘크리트 터널 라이닝의 배면 공동은 구조물의 붕괴로까지 이어질 가능성이 있다. 이와 같은 공동을 비파괴로 조사하기 위한 방법 중의 하나가 레이더법이다. 본 연구는 레이더를 이용해 공동을 정량적이고 효율적으로 검사하기 위한 것이다. 본 목적에 부합되도록 3 다이폴 안테나 방식의 레이더를 이용해 특정된 공동의 방향성과 형상을 추정할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 이를 위해 3 다이폴 안테나로부터 얻을 수 있는 전자파의 편파모드방식의 해석방법을 이용해 다양한 방향성과 기하학적 형상을 갖는 공동에 대하여 측정 및 해석을 수행하였다. 그 결과, 전자파의 각 편파모드가 공동의 기하학적 특성에 따라 다르게 응답하는 것을 확인하였고, 이를 통해 특정된 공동의 방향성 및 기하학적 형상을 구분하는 것이 가능하였다.

핵심용어 : 비파괴검사, 공동 형상, 콘크리트 터널 라이닝, 레이더