

# 다중 편파모드 방식 레이더에 의한 콘크리트 터널 라이닝 배면공동의 형상추정

## Estimation of Shape of Voids behind Concrete Tunnel Linings using Microwave Polarization Radar

박 석 균\*  
Park, Seok Kyun

### ABSTRACT

The presence of voids behind tunnel linings results in their deterioration. One proposed method of effectively detecting such voids by non-destructive means is radar. This research is devoted to quantitatively evaluating the efficiency of such non-destructive tests with radar. As a foundation to this ongoing research, which aims to acquire directional information and estimate the shape of specific voids using radar of three-dipole antenna type, an investigation of microwave polarization methods is carried out with various void orientations and void geometries. As the results, it is clarified that the response of microwave polarization modes depends on void geometry and thus there is a possibility of identifying the geometry and orientation of specific voids using radar of three-dipole antenna type.

### 1. 서 론

터널 라이닝 배면에 발생한 공동은 터널의 안전 상, 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) 모드에서는 한번 측정으로는 이와 같은 공동을 검출했다 하더라도 그 공동의 규모나 방향성, 형상까지를 추정하기는 매우 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 3개의 다이폴 안테나를 이용한 3다이폴 모드의 레이더를 이용하여 한번 측정으로도 공동 규모의 대략적인 파악이 가능한 형상 추정 방법을 개발코자 하였다.

### 2. 해석방법

#### 2.1 3다이폴 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. 안테나

\*정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수

로부터의 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  $x, y$ 좌표계의 성분이다. 산란행렬의 각 요소는 송신  $T$ , 수신  $R$  안테나의 벡터 실효장(實效長)이 각각  $S_{xx}$ 에서는 모두  $x$ 축에 평행하고,  $S_{xy} = S_{yx}$ 에서는 서로 직교하며,  $S_{yy}$ 에서는 모두  $y$ 축에 평행한 것을 의미한다.

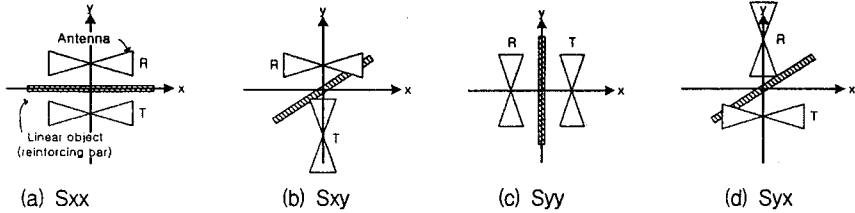


Fig. 1 Microwave polarization mode

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

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

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

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

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

의 관계가 성립한다.

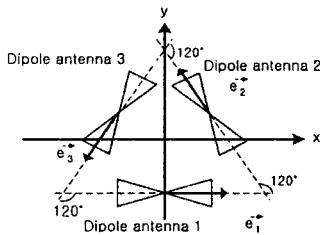


Fig. 2 Scheme of three-dipole antenna element

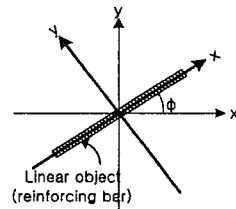


Fig. 3 Transformation to new coordinate system

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  $x, y$ 방향의 벡터  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$ 로부터 각 편파성분에 관한 산란행렬로 정리하면 식(5)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= -\langle E_1^R | E_2^T \rangle - \langle E_3^R | E_1^T \rangle \\ S_{xy} = S_{yx} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\langle E_1^R | E_2^T \rangle - \langle E_3^R | E_1^T \rangle) \\ S_{yy} &= -\frac{1}{3}\langle E_1^R | E_2^T \rangle - \frac{1}{3}\langle E_3^R | E_1^T \rangle - \frac{4}{3}\langle E_2^R | E_3^T \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

또한, Fig. 3과 같이  $x, y$ 축에 대해서 각도  $\phi$ 만큼 좌표계를 회전시킨 신좌표계  $X, Y$ 에서의 산란행렬  $[S']$ 는 식(6)에 의해 구할 수 있다.

$$[S'] = |\phi| [S] |\phi|^T \quad \text{여기서, } |\phi| = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

이들 방법에 의한 물체의 형상식별개념을 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서는 레이더 탐사에서 물체의 형상을 식별하는 상에서 먼저, 철근이나 파이프와 같이 거의 일축 방향성분만의 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. 또한, 형상식별계수( $R$ )을 식(10)과 같이 정의해서 물체의 형상을 식별하는 참고 기준으로 하였다.

$$R = \frac{S_{yy}}{S_{xx}} \quad (10)$$

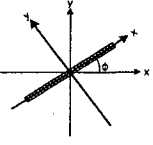
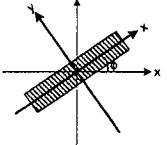
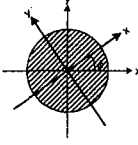


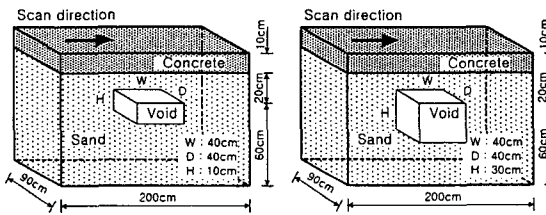
					
S <sub>xx</sub> , S <sub>xy</sub> No response S <sub>xy</sub> , S <sub>yx</sub> Good response (Maximum at $\phi = 45^\circ$ )	R=0 Linear	S <sub>xx</sub> , S <sub>xy</sub> No response S <sub>xy</sub> , S <sub>yx</sub> Good response (Maximum at $\phi = 45^\circ$ )	$0 < R < 1$ : Non-linear & non-co-axial	S <sub>xx</sub> , S <sub>xy</sub> Good response S <sub>xy</sub> , S <sub>yx</sub> No response	R=1 Co-axial
Examples : reinforcing bars, pipes, cables	Examples : ovals, rectangles		Examples : circles, squares		

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

## 3. 실험

실험은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 10cm 두께의 무근 콘크리트 상판과 Fig. 6, Fig. 7에 나타난 바와 같이 실험의 용이성을 위해 5cm 두께의 폴리우레탄 시트를 깔고 실시한 경우의 두 가지 조건으로 나누어 실시하였다. 배면 재료는 지반을 대표하는 재료로서 모래를 선정하였다. 공동은 전기적 성질이 실제 공동에 가까운 스티로폼을 사용하여 인공으로 제작하여 매설하였다.



(a) Void thickness: 10cm

(b) Void thickness: 30cm

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

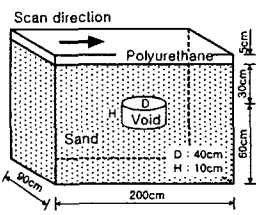


Fig.6 Experimental conditions for detecting voids of circular plane form (co-axial type) under polyurethane sheet

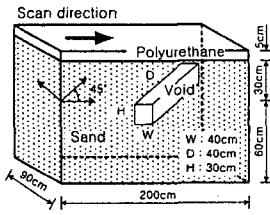


Fig.7 Experimental conditions for detecting voids of rectangular for (non-linear and non-co-axial type) under polyurethane sheet

측정장비로는 3다이폴 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 결과를 Fig. 8~Fig. 12에 나타내었다. 참고로, 일반 레이더의 패러렐 모드 측정에서 보이는 화상은 Fig. 9의  $S_{yy}$  모드이다. Fig. 5의 측정결과에 대해 식(5)에 의한 계산 결과를 나타내면 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

한편, Fig. 7에 대한 측정 및 계산결과인 Fig. 11, Fig. 12는 각각 직교성분  $S_{xy}=S_{yx}$ 의 산란행렬과 평행성분  $S_{yy}$ 의 산란행렬 결과를 나타내고 있다. 이상의 결과를 해석하면 다음과 같다.

먼저, Fig. 12에서는 Fig. 7의 공동의 방향이  $45^\circ$ 가 되어 있기 때문에,  $S_{yy}$ 에서는 신호가 약하고 물체 형상까지의 추정이 곤란하지만, Fig. 11의  $S_{xy}=S_{yx}$ 에서는 강한 신호가 얻어져, 해당 공동의 형상이 선상(線狀)에 가까운 것과 그 방향이  $45^\circ$ 에 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 11에서는 예상대로 등축성 경계로부터의 반사신호(표면파)가 거의 나타나지 않음을 알 수 있고, Fig. 12에 비해 신호의 위상이 반전되어 있는 것은 산란행렬의 계산에 의한 변화 때문이다.

한편, Fig. 10의  $S_{yy}$  결과에 비해 Fig. 9의  $S_{xy}=S_{yx}$ 로 변환한 결과는 각 해당 신호가 크게 홀어져 나타나 검출대상 물체가 등축형임을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 등축성과 비선형·비등축형 형상 사이에는 명확히 구별이 가능하기 때문에 본 방법에 의한 공동의 형상추정도 개략적인 판단 범위 내에서는 유효하다고 판단된다.

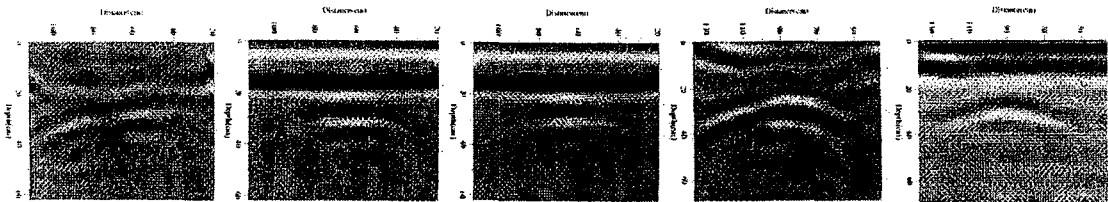


Fig. 8  $S_{xy}=S_{yx}$  of Fig. 5(a)

Fig. 9  $S_{yy}$  of Fig. 5(a)

Fig. 10  $S_{yy}$  ( $\theta=45^\circ$ ) of Fig. 5(a)

Fig. 11  $S_{xy}=S_{yx}$  of Fig. 7

Fig. 12  $S_{yy}$  of Fig. 7

#### 5. 결론

- (1) 방향이  $45^\circ$ 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) 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 의한 경우 공동의 규모나 방향성 등을 예측하는 데 유효함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. K. Murasawa, H.Nishizaki, C.Jyomuta, N.Kimura and H.Obara, "Subsurface Radar with Three Antenna Elements Based on Scattering Theory", Michuizousengibo, Japan, No.152, 1994.6
2. A.D.Olver et al., "Portable FM-CW Radar for Locating Buried Pipes", Proc. International Conference Radar-82, pp.413-418, 1982
3. K.Ueno, N.Osumi, "Underground Pipe Detection based on Microwave polarization Effect", Proc. ISNCR, pp.673-678, 1984