

# 전자파 레이더 모의해석에 의한 콘크리트 내부 공동형상별 화상검출 특성

## Detecting Image of Void Shapes in Concrete Using Simulation Analysis Model of Reflection Wave of Electromagnetic Radar

박석균\*

Park, Seok Kyun

---

### ABSTRACT

More than effectively judging the existence of voids behind concrete tunnel linings or under concrete pavements, this research aims to develop the analysis algorithm of radar capable of estimation of the shape of specific voids. To detect or estimate void shapes in non-reinforced concrete, the simulation analysis model of transmission and reflection wave of electromagnetic radar is used. This radar simulation model is carried out with various void shapes. As the results, a proposed method in this study has a possibility of detecting or estimating void shapes with good accuracy.

---

#### 1. 서론

레이더법에 의한 콘크리트의 비파괴검사는 적용부재에 대하여 제약이 비교적 적고, 측정도 다른 검사 방법 보다 빠르고 간단하기 때문에, 콘크리트 배면 공동의 검출에 최적의 검사방법으로서 각광받고 있다. 그러나 토목 구조물에 대하여 적용하는 경우에는 감쇠 및 산란 등의 영향이 크고, 고주파 성분의 사용이 곤란하기 때문에 분해능도 나빠진다. 특히 중요한 검출대상 목표물인 공동의 형상 등을 분해능이 좋지 않은 저주파수 레이더로 탐사하는 일은 매우 어려운 작업이다. 본 연구는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 레이더를 이용해 공동의 형상까지도 식별해석이 가능한 방법을 제시하였다.

#### 2. 모델 기본이론

##### 2.1 전자파의 반사와 투과

그림 1과 같이 어떤 매질의 경계면을 평면전자파(평행편파)가 임의각을 갖고 입사할 경우에 대한 전계(電界)는 식 (1)~(5)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

---

\*정회원, 대전대학교 공과대학 토목공학과 부교수

$$E_I(X, Z) = E_0 \left( \hat{X} \cos \theta_I - \hat{Z} \sin \theta_I \right) e^{-jk_1(X \sin \theta_I + Z \cos \theta_I)} \quad (1)$$

$$E_R(X, Z) = RE_0 \left( \hat{X} \cos \theta_R + \hat{Z} \sin \theta_R \right) e^{-jk_1(X \sin \theta_R + Z \cos \theta_R)} \quad (2)$$

$$E_T(X, Z) = TE_0 \left( \hat{X} \cos \theta_T + \hat{Z} \sin \theta_T \right) e^{-jk_2(X \sin \theta_T + Z \cos \theta_T)} \quad (3)$$

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_1} \quad (4)$$

$$k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_2} \quad (5)$$

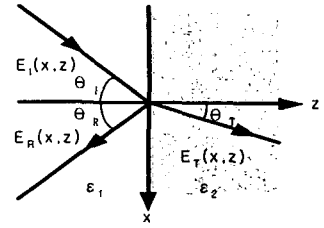


그림 1. 매질경계 입사파의 변화

여기서, 식(1)부터 식(3)은 각각 입사, 반사, 투과파의 전계를 나타내고,  $E_0$ 는 일정전계,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Z}$ 는 각축 방향의 단위벡터,  $k_1, k_2$ 는 각 매질의 파수(波數),  $\omega$ 는 각주파수,  $\mu_0$ 는 진공의 투자율(透磁率),  $\epsilon_1, \epsilon_2$ 는 각 매질의 유전율(誘電率)을 의미한다.

한편, 상기식에서 전계의 연속성과 입사각과 반사각의 일치라는 경계조건을 적용하여 방정식을 풀면, 다음과 같이 유전율이 다른 매질간의 경계면에서의 반사계수  $R$ 과 투과계수  $T$ 에 관한 식이 얻어진다.

$$R = \frac{n_2 \cos \theta_T - n_1 \cos \theta_I}{n_2 \cos \theta_T + n_1 \cos \theta_I} \quad (6) \quad T = \frac{2n_2 \cos \theta_I}{n_2 \cos \theta_T + n_1 \cos \theta_I} \quad (7)$$

$$n_1 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_1} \quad (8) \quad n_2 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_2} \quad (9)$$

여기서,  $n_1, n_2$ 는 각 매질의 임피던스이고,  $\theta_I, \theta_T$ 는 입사각과 투과각을 나타낸다.

따라서, 식(6)~식(9)로부터,  $i$ 층부터  $i+1$ 층까지의 입사에 대한 일반식은 다음과 같이 얻어진다.

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_T - \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_I}{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_T + \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_I} \quad (10) \quad T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_T}{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_T + \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_I} \quad (11)$$

한편, 매질 중에서 전자파는  $+z$ 방향으로 위상속도  $v_p(\omega/\beta)$ 로 지수함수적으로 감쇠되면서 전파(투과)한다. 이 경우, 위상속도  $v_p$ 는 다음과 같이 전개된다.

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{2}{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2 + 1}} \quad (12)$$

그러나, 저손실유전체와 고주파수대에서는  $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ 이라 생각할 수 있으므로 다음 식과 같은 관계가 되고, 파장  $\lambda_p$ 도 같은 형식으로 나타낼 수 있어 자유공간에서의 파장  $\lambda_0$ 의  $1/\sqrt{\epsilon_r}$ 이 된다. 여기서,  $c$ 는 빛의 속도,  $f$ 는 중심주파수이다.

$$v_p \approx c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (13) \quad \lambda_p = v_p/f = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r} \quad (14)$$

이상의 기본 식을 근거로 하여 그림 2와 같은 다층경계구조의 경우에 관하여 전자파의 전파 모델을 검토해 보면, 임의의 안테나 이동거리( $x$ 방향) 위의 한점에서 깊이  $D_i$ ( $+z$ 방향)의 각층을 수직입사 및 투과하면서 각층 경계면 등으로부터 반사되어 돌아오는 전자파의 수신신호(왕복신호)의 강도  $RE_{S-B_i}$ 는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} RE_i &= IE_{\theta_i} R_{10} \\ RE_{B_1} &= IE_{\theta_{01}} T_{01} T_{10} R_{21} e^{-2\alpha_1 D_1} = IE_{\theta_{01}} (1 - R_{01}^2) R_{21} e^{-2\alpha_1 D_1} \\ RE_{B_2} &= IE_{\theta_{02}} = T_{01} T_{10} T_{21} R_{32} e^{-(2\alpha_1 D_1 + 2\alpha_2 D_2)} = IE_{\theta_{02}} (1 - R_{01}^2) (1 - R_{12}^2) R_{32} e^{-(2\alpha_1 D_1 + 2\alpha_2 D_2)} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $IE_{\theta_m}$ 는 안테나로부터 출력되는 초기입사신호를,  $R_{mn}$  와  $T_{mn}$ 에 있어서  $m, n$ 은 각 층의 경계 전후를 각각 의미한다.

## 2.2 신호처리(출력신호의 발생)

해석대상 시스템을 선형시불변(線形時不變)으로 가정하면, 상기 모델에 의해 계산된 결과는 컨볼루션(convolution)을 이용하여 출력신호로써 발생시킬 수 있다. 시스템의 출력  $y(t)$ 는 식(16), (17)과 같이 입력  $x(t)$ 와 시스템에 단위 임펄스를 가한 때의 응답  $h(t)$ 와의 컨볼루션에 의해 나타낼 수 있다. 여기서,  $\tau$ 는 적분변수,  $nT$ 는 출력신호의 샘플링주기,  $m$ 은 응답신호의 구간이다.

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau = x(t)*h(t) \quad (16)$$

$$y(nT) = \sum_{k=0}^m x(kT)\delta(t-nT) \quad (17)$$

## 3. 해석대상 시험체

본 연구의 모의해석에서 사용된 형상별 내부공동의 시험체 개요를 그림 3에 나타내었다. (a)에는 수평으로 배치된 구형(矩形) 공동을, (b)에는 경사지게 배치된 구형(矩形) 공동을, (c)에는 곡면 형상변화 공동을 각각 콘크리트 내부에 발생한 공동으로 모의하여, 이들 형상 변화에 따른 레이더 반사신호 특성을 검토해 보는 것으로 하였다. 해석에 사용한 레이더장비의 중심 주파수는 800MHz로 하였다.

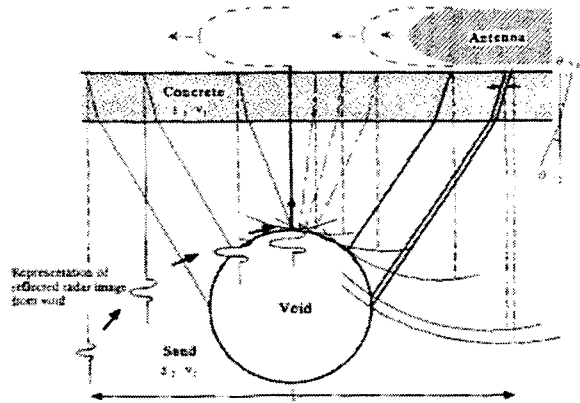
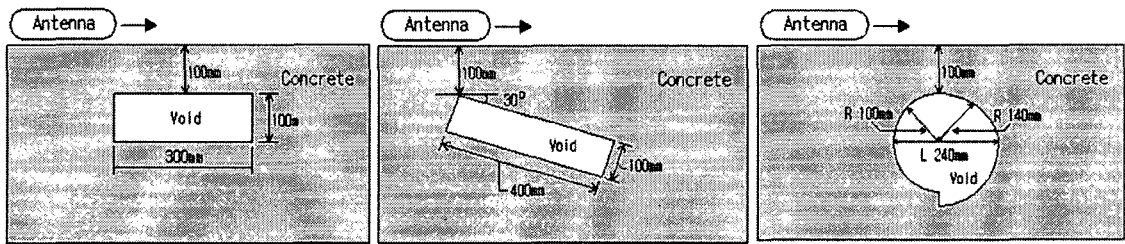


그림 2. 콘크리트 내부 공동의 전자파레이더의 반사



(a) 수평배치 구형(矩形) 공동

(b) 경사배치 구형(矩形) 공동

(c) 곡면 형상변화 공동

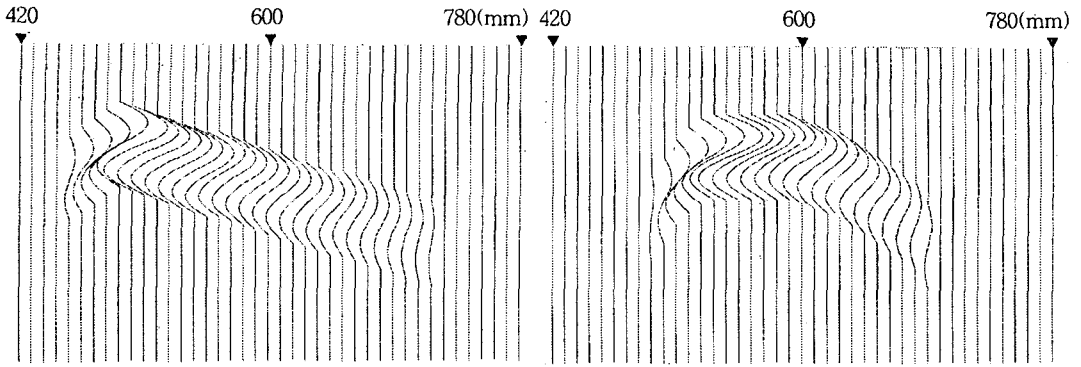
그림 3. 형상별 콘크리트 내부공동 구성단면

## 4. 해석결과 및 고찰

그림 4, 5에 이상의 형상별 내부공동에 대해 모의해석 한 결과를 나타내었다. 그림 4에는 파형모드로 해석한 결과의 대표적인 예를, 그림 5에는 이를 화상모드로 해석한 결과를 나타내었다.

콘크리트 내부공동 등의 결함을 모의하기 위해 각 결함의 형상별 레이더 탐사 해석결과를 모의한 결과, 각 결함의 형상과 크기별로 전자파의 반사특성을 잘 나타내어주고 있다. 이를 통해 레이더 장비의 사용 주파수대별로 실제 결함의 형상과 크기에 따라 어떻게 반사화상이 얻어지는가를 미리 확인해 볼 수 있어, 실제 현장 탐사 시 본 해석방법을 이용할 경우, 결함의 개략적인 형상이나 크기를 파악하는

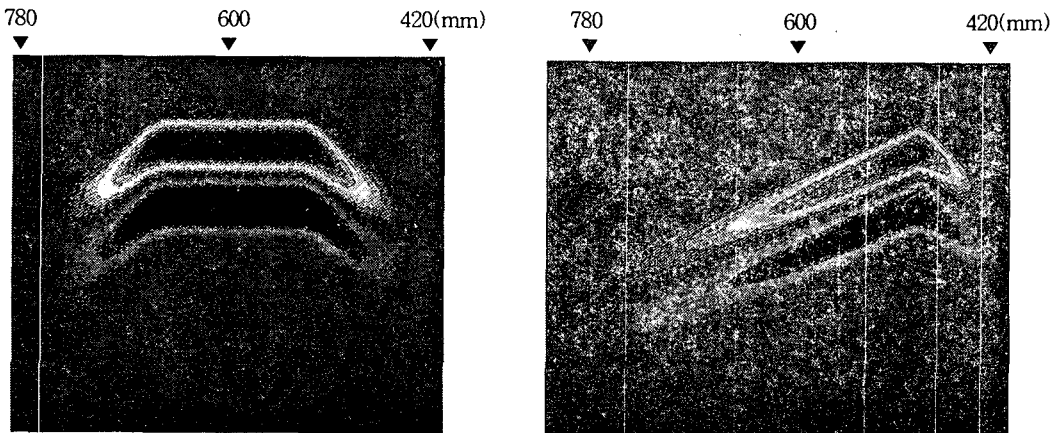
데 많은 도움이 될 것으로 전망 된다.



(a) 경사배치 구형(矩形) 공동

(b) 곡면 형상변화 공동

그림 4 형상별 내부공동 모의해석결과(파형)



(a) 수평배치 구형(矩形) 공동

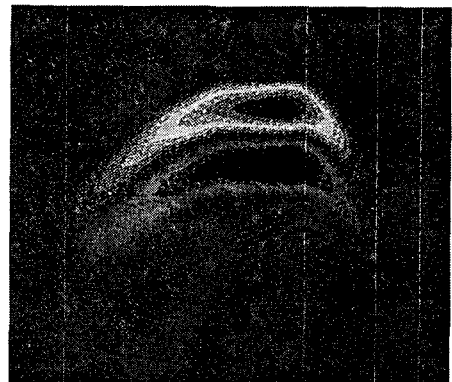
(b) 경사배치 구형(矩形) 공동

## 5. 결론

본 모델에서는 각 공동의 형상별로 반사되어 되돌아오는 파의 강도(진폭)와 위상 등도 안테나와 공동의 위치에 따라 변화하는 것을 잘 나타내고 있고, 형상별로 차이를 보여 이를 통해 공동의 원래 형상을 예측하는 데 유효하게 활용 가능함을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 산학연 공동연구개발사업에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.



(c) 곡면 형상변화 공동

그림 5 형상별 내부공동 모의해석결과(화상)