

컨볼루션 기법을 이용한 콘크리트 배면 공동의 레이더 신호해석

Radar Signal Analysis of Voids under Concrete Using Convolution Technique

박 석 균* 한 자 경**
Park, Seok-Kyun Han, Ja-Kyung

ABSTRACT

The presence of voids under pavements or behind tunnel linings results in the deterioration. One method of 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 estimate the thickness of voids using radar, an analysis method based on radar signal processing using convolution technique is carried out with various void thicknesses in embedded layer which has different electromagnetic properties. The computed results were verified by comparing the test results.

As a result, a proposed method in this study has a possibility of estimating the thickness of voids with good accuracy.

1. 서론

도로나 터널은 대표적인 사회기반시설로서, 정기적인 진단과 보수에 의한 유지관리 필요성이 매우 큰 구조물이다. 특히 이들 구조물의 배면에 발생하는 공동은 육안으로는 발견할 수 없을뿐더러, 그대로 방치할 경우 함몰이나 붕괴등의 대형사고에 까지 이어질 가능성이 높다.

이들 공동을 조사하는 방법으로서는 여러 가지 비파괴검사방법을 들 수 있지만, 그 중에서도 레이더법은 비접촉 주사방식을 사용함에 따라 조사가 용이하고, 무엇보다 빠른 시간 내에 많은 면적을 조사할 수 있어 조사시 교통통제 등에 많은 문제가 따르는 도로나 터널 등의 진단조사기술로서 크게 각광받고 있다. 또한, 초음파나 탄성파법은 해당 파가 공기 중을 전파하지 못하는 성질을 갖고 있기 때문에, 매질내의 공동 표면에서의 반사신호는 얻어지나 저면(바닥)에서의 반사신호까지는 얻을 수 없어 공동의 유무정도밖에 알 수 없다. 이에 반해 레이더법은 전문적 해석기술을 활용하면 이러한 단점을 해결할 수 있어 공동의 두께에 관한 정보까지도 얻을 수 있을 것으로 사료되고 있다.

그러나, 대부분의 비파괴 검사법에서 공통적인 사항이지만, 콘크리트 구조물을 조사대상으로 하는 경우는 매질 특성상 감쇠 등의 영향이 커 배면공동과 같은 일정 깊이 이상을 탐사해야 하는 경우는 두

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 전임강사

** 정회원, 한국통신 가입자망 연구소 전임연구원

과성이 좋은 저주파수를 사용해야 하므로, 상대적으로 분해능이 좋지 않다. 특히, 공동의 두께까지를 해석해야 하는 경우는 사용레이더의 주파수에 따른 분해능이 조사대상의 공동 두께를 식별할 수 있어야 하지만, 대부분의 경우 고주파수의 사용이 곤란하고 이방성 복합재료인 콘크리트 매질을 통과하여야 하기 때문에 이 조건을 만족하기는 어렵다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 컨볼루션 기법을 이용하여 레이더의 주파수 특성 등에 따라 미리 해당 매질내의 목표물에 대한 레이더의 반사신호를 예측해 이를 바탕으로 공동으로부터의 신호와 그 두께까지를 보다 용이하게 식별해 낼 수 있는 해석기술을 개발코자 하였다.

2. 계산방법

2.1 경계면에 수직으로 입사하는 전자파의 반사와 투과

그림 1과 같이 유전체가 서로 다른 어떤 매질의 경계면을 평면전자파(평행편파)가 임의각을 갖고 입사할 때, 임의각이 수직을 이루는 경우에 대한 전계(電界)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_I(z) = \hat{x} E_0 e^{-jk_0 z} \quad (1)$$

$$E_R(z) = \hat{x} R E_0 e^{+jk_0 z} \quad (2)$$

$$E_T(z) = \hat{x} T E_0 e^{-\gamma z} \quad (3)$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (4)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (5)$$

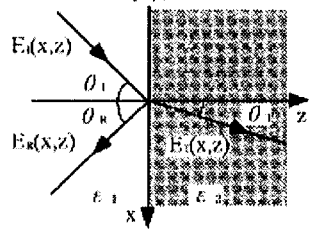


그림 1 매질경계면에서 입사파의 변화

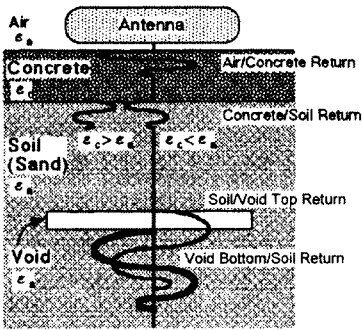


그림 2 이질 경계에서 전자파의 반사모의

여기서, 식(1)부터 식(3)은 각각 입사, 반사, 투과파의 전계를 나타내고, E_0 는 일정전계, \hat{x} 는 x 축 방향의 단위벡터, k_0 는 매질의 파수(波數), ω 는 각주파수, μ_0 는 진공의 투자율(透磁率), ϵ_0 는 매질의 유전율(誘電率)을 의미한다. γ 는 복소전파정수로서 정의되며, 전자파의 전파에 관한 감쇠 및 위상정수 (α 와 β)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu\epsilon/2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} - 1} \quad (6)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon/2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} + 1} \quad (7)$$

여기서, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 :진공의 유전율, ϵ_r :매질의 비유전율, $\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_r :매질의 비투자율, σ 는 도전율(導電率)을 나타낸다. 또, 콘크리트중 또는 지중과 같은 비금속성의 저손실유전체에서는 $\mu_r = 1$ 로 해도 좋기 때문에 $\mu = \mu_0 (= 1)$ 이 된다.

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

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} + 1}} \quad (8)$$

그러나, 저손실유전체와 고주파수대에서는 $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ 이라 생각할 수 있으므로 다음식과 같은 관계가 되고, 파장 λ_p 도 같은 형식으로 나타낼 수 있어 자유공간에서의 파장 λ_0 의 $1/\sqrt{\epsilon_r}$ 이 된다. 여기서, c 는 빛의 속도, f 는 중심주파수이다.

$$v_p \approx c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (9), \quad \lambda_p = v_p/f = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r} \quad (10)$$

한편, 입사각이 0° , 즉 경계면에 수직으로 전자파가 입사하는 경우의 반사계수 R 과 투과계수 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (11), \quad T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (12)$$

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (13), \quad T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (14)$$

한편, 그림 2에는 이질경계조건하에서 수직으로 입사된 전자파가 각 경계로부터 반사되는 형태를 가상적으로 나타내 보았다.

그러나, 레이더 신호의 모델링의 경우는 사용레이더의 시스템 특성을 고려해 주는 일이 중요하다.

2.2 컨볼루션기법에 의한 계산신호의 출력

해석대상 시스템을 선형시불변(線形時不變)이라 가정하면, 상기의 계산방법에 의해 본 연구의 실험 조건에 맞게 계산된 결과는 컨볼루션기법을 이용해서 출력신호로서 나타낼 수 있다. 시스템 출력 $y(t)$ 는 다음 식과 같이 입력 $x(t)$ 와 시스템에 단위 임펄스를 가한 때의 응답 $h(t)$ 와의 컨볼루션에 의해 나타낼 수 있다. 여기서, τ 는 적분변수이다.

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau = x(t) * h(t) \quad (15), \quad y(nT) = \sum_{n=0}^m x(nT) \delta(t-nT) \quad (16)$$

한편, $h(t)$ 가 임펄스에 대한 응답이기 때문에 본 시스템은 식(16)과 같이 전개시킬 수도 있다. 여기서, nT 는 출력신호의 샘플링주기, m 은 응답신호의 구간이다.

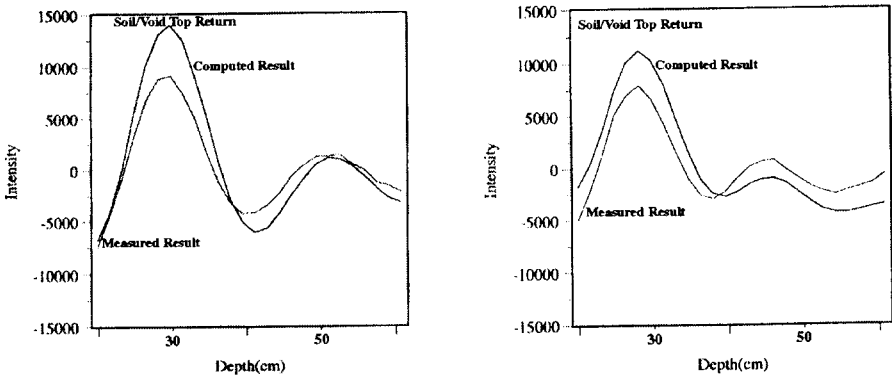
3. 실험개요

본 연구를 위한 시험체는 그림 2에 나타낸 바와 같이 두께 10cm의 무근콘크리트 슬래브 배면에 가로 40cm×세로 40cm의 크기와 두께가 각각 20cm, 30cm인 직육면체 모의 공동(아이소핑크로 인공제작)을 슬래브 표면으로부터의 전체깊이 30cm (슬래브 바닥으로부터 20cm)에 매설하여 측정용 실시하고, 이 실험조건에 따라 앞의 계산방법에 따라 계산을 실시하여 측정결과와 비교하였다. 여기서, 사용

된 콘크리트의 배합조건은 호칭강도 240kg/cm², 슬럼프 10cm, W/C 43%, S/A42로 하였다. 배면재료로서는 함수율 2~3%의 강모래를 이용하였다. 공동 측정장비는 중심주파수 600MHz의 레이더를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 3에는 이상의 조건에 대한 레이더 측정결과와 계산결과를 같이 나타내어 비교하였다. 특히, 본 연구에서 사용한 레이더의 중심주파수는 650MHz로서 파장을 계산해 보면 공기(공동) 중에서 약 46cm가 되어, 본 실험조건인 공동 두께(20, 30cm)한계를 넘게 되므로, 측정신호결과 만으로는 두께간(윗면과 바닥면) 반사신호를 구분하기 어려움을 알 수 있다. 따라서, 사용 레이더의 출력파에 대한 정보를 역해석으로 구한 후, 이 출력파를 이용해 상기 본 연구의 계산방법대로 공동 조건을 모의한 계산결과와 측정결과를 비교 해석함으로써 공동 두께를 추정할 수 있다. 그림 3의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 공동 두께별 측정과 계산결과가 비교적 동일한 양상을 나타내어 본 연구의 계산방법을 이용하면 저주파 레이더사용에 따라 해석이 곤란한 공동의 일부 두께까지도 해석이 가능함을 알 수 있다.



(a) 깊이 30cm, 두께 20cm의 배면공동

(b) 깊이 30cm, 두께 30cm의 배면공동

그림 3 콘크리트 배면공동 레이더 측정 및 계산결과 (공동부 반사신호만 추출)

5. 결론

본 연구에서 제안된 계산방법을 이용하면, 사용 레이더에 대한 출력파에 대한 정보를 역해석으로 구한 후, 임의 조건의 측정조건에 대한 레이더 반사파형을 모의할 수 있어, 저주파 레이더사용에 따라 분해능 저하로 해석이 곤란한 콘크리트 배면 공동의 일부 두께까지도 해석이 가능함을 알 수 있다

참고문헌

- 1) 朴錫均, 魚本健人 : 레이다法による多層콘크리트床版의非破壞檢査의シミュレーション解析, 日本土木學會論文集, No.538/V-31, pp95-104, 1996.5