

전자파 레이더 주파수대역별 시뮬레이션 해석에 의한 콘크리트내 층간 연속 공동의 검출 특성

Detection Subsurface Voids in Concrete Using Simulation Analysis of Radar Responses for Frequency Variations

박석균

Park, Seok-Kyun

초 록 전자파 레이더 주파수변화에 의한 콘크리트내 층간 연속공동의 시뮬레이션 해석을 위한 모델을 제안하였다. 본 모델에서는 각 전기적 성질이 다른 다층 경계조건 하에서 전자파 레이더의 주파수 변화에 따른 분해능과 감쇠특성이 검토되었다. 이는 계산에 의한 모의 레이더 응답으로부터 콘크리트내 공동의 검출이 가능한 공동 두께의 한계와 최적주파수를 선정하고, 나아가 대상물체의 경계조건별 레이더의 전파한계를 구하는 데 유용하게 이용하기 위한 것이다. 본 모델에 의해 계산된 결과는 콘볼루션기법을 이용한 신호처리에 의해 레이더 화상으로 나타내었다.

주요용어: 모의해석, 레이더 응답, 공동, 콘크리트

Abstract This study introduces a simulation model of radar responses from subsurface voids in concrete for their frequency variations. In this model, resolution and attenuation characteristics due to frequency variations are analyzed at each material interface which has different electromagnetic property. This model aims at the selection of best frequency of radar which can analyze the thickness of voids in concrete from radar responses. It can also be applied to estimate the limitation of propagation depth of radar on subsurface voids in concrete. The computed results show the radar images obtained by using a radar signal processing technique using convolution.

Keywords: simulation analysis, radar response, subsurface void, concrete

1. 서 론

레이더법에 의한 콘크리트의 비파괴검사는 적용 무재에 대하여 제약이 비교적 적고, 측정도 다른 검사방법 보다 빠르고 간단하기 때문에 최근, 장래 유망한 기술로서 관심이 많아지고 있다. 그러나, 콘크리트와 같이 골재가 포함된 비균질성 매질에 대하여 적용하는 경우에는, 감쇠 및 산란등의 영향이

크고, 고주파 성분의 사용이 곤란하기 때문에 분해 능도 나빠진다. 각종 경계와 이물질등으로 부터의 잡신호가 목표물로부터의 신호와 혼합되어 버리기 때문에, 해석에 전문적인 지식과 경험이 요구된다. 특히, 포장도로와 같이 각 층별 구성재료(매질)가 다른 경우는 각 매질의 전기적 성질의 차에 의해 전자파의 위상속도와 반사 및 투과특성 등이 한층 복잡하게 변화하기 때문에, 이에 관한 전자파의 기

본전파 특성을 사전에 규명하여 해석을 병용하지 않는 한, 해석이 어려운 경우도 많다고 생각된다. 그럼에도 불구하고, 지금까지의 레이더법 해석은 주로, 측정결과에 대한 해석만으로 치우쳐 온 경향이 있다. 그러나, 콘크리트 구조물에 대한 레이더 탐사의 경우는 측정화상이 별로 분명하지 않기 때문에, 효과적인 화상처리를 실시하더라도 측정결과 해석에 많은 제약이 존재한다.

따라서, 효율적인 검사를 행하기 위해서는 우선, 가능한 한 충분한 사전정보, 즉, 구조물의 경계조건, 기하학적 특성, 전기적 성질 등을 활용하거나 예측함으로써 해당 구조물에 대한 레이더 신호의 사전 해석을 도입하는 것이 바람직하다. 물론, 이와 같이 다양한 정보를 사전에 완전하게 파악하는 것은 대부분 불가능 하지만, 그 대신에 여러 가지의 조건을 가상적으로 만들어, 각 조건에서의 레이더 전파 특성을 검토하는 시뮬레이션기법이 유효하다고 사료된다.

레이더법에 의한 콘크리트 구조물을 대상으로 한 이 분야의 연구는 활발하지 않은 상태이지만, 비교적 꾸준한 연구가 진행되고 있는 실정이다 [1-4]. 그러나, 다수의 연구[1,2]는 콘크리트의 배면 공동이나 토질 층을 대상으로 현장 측정결과 해석의 일부 참고자료로서의 활용을 위한 것이다. 본 연구는 전기적 성질이 다른 각 층간 재료의 변화에 의한 콘크리트내의 레이더 전파 및 그 신호 응답 특성을 주파수대역별로 고려하여 시뮬레이션 해석을 전문으로 한 것이다. 또한, 콘크리트내의 층간 연속공동의 두께까지를 탐사할 수 있는 주파수대역 및 콘크리트의 바닥까지를 대상으로 할 경우의 검출한계까지도 고려함으로써, 대상 현장 구조물에 대해 사전에 최적 주파수대역의 장비를 선정할 수 있도록 하였다.

2. 모델 기본이론

2.1. 전자파의 반사와 투과

2.1.1. 경계면에 비스듬히 입사하는 경우

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

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

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

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

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

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

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), ω 는 각주파수, μ_0 는 진공의 투자율(透磁率), ϵ_1 , ϵ_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.

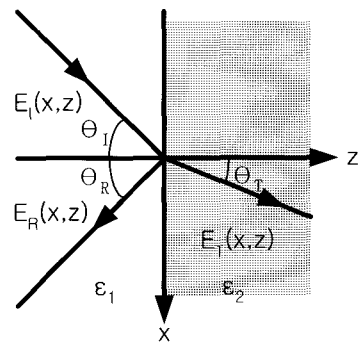


Fig. 1 Incidence of plane wave at dielectric interface

$$R = \frac{\eta_2 \cos \theta_T - \eta_1 \cos \theta_I}{\eta_2 \cos \theta_T + \eta_1 \cos \theta_I} \quad (6)$$

$$T = \frac{2\eta_2 \cos \theta_I}{\eta_2 \cos \theta_T + \eta_1 \cos \theta_I} \quad (7)$$

$$\eta_1 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_1} \quad (8)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_2} \quad (9)$$

여기서, η_1, η_2 는 각 매질의 고유(intrinsic) 임피던스이고, θ_i, θ_T 는 입사각과 투과각을 나타낸다.

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

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

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

2.1.2. 경계면에 수직으로 입사하는 경우

입사각 θ_i 이 0° 로 되는 경우 즉, 경계면에 전자파가 수직으로 입사하는 경우에는 위의 식은 다음과 같이 된다.

$$E_I(z) = \int_x E_0 e^{-jk_1 z} \quad (12)$$

$$E_R(z) = \int_x R E_0 e^{+jk_1 z} \quad (13)$$

$$E_T(z) = \int_x T E_0 e^{-jk_2 z} \quad (14)$$

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (15)$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (16)$$

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (17)$$

$$T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (18)$$

또한, 식 (19)와 같이 복소전파정수 감쇠 및 위상정수(α 와 β)에 의해 γ 를 정의하여 z 의 정방향으로 진행하는 투과파를 복소함수로서, 식 (22)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (19)$$

여기서,

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu\epsilon/2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} - 1} \quad (20)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon/2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} + 1} \quad (21)$$

$$E_{T(z)} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (22)$$

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. 또한, 콘크리트내 또는 지중과 같은 비금속성의 저손실유전체에서는 $\mu_r = 1$ 로 해도 좋기 때문에 $\mu = \mu_0$ 가 된다.

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.

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} + 1}} \quad (23)$$

그러나, 손실유전체와 고주파수대에서는 $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ 이라 생각할 수 있으므로 다음 식과 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.

$$v_p \approx c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (24)$$

$$\lambda_p = v_p/f = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r} \quad (25)$$

2.2. 다층경계조건하 전자파의 전파 모델

이상의 기본 식을 근거로 하여 Fig. 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_2}

는 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우의 반사와 투과계수 R, T는 식 (17,18)에 의해 구해지고, 수직으로 입사한 신호만을 고려하기 때문에 $\cos \theta_{ij} = 1$ 로 되었다. 이 때, 입사각 θ_{ij} 에서의 i 는 z 방향의 각층에서의 변화이고, j 는 안테나의 이동에 의한 x 방향의 변화를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 RE_s &= IE_{\theta} R_{10} \\
 RE_{B_1} &= IE_{\theta_0} T_{01} T_{10} R_{21} e^{-2\alpha_1 D_1} \\
 &= IE_{\theta_0} (1 - R_{01}^2) R_{21} e^{-2\alpha_1 D_1} \\
 RE_{B_2} &= IE_{\theta_0} = T_{01} T_{10} T_{12} T_{21} R_{32} e^{-(2\alpha_1 D_1 + 2\alpha_2 D_2)} \\
 &= IE_{\theta_0} (1 - R_{01}^2)(1 - R_{12}^2) R_{32} e^{-(2\alpha_1 D_1 + 2\alpha_2 D_2)}
 \end{aligned} \tag{26}$$

여기서, IE_{θ_i} 는 안테나로부터 출력되는 초기입사 신호를, R_{mn} 와 T_{mn} 에 있어서 m, n 은 Fig. 2의 우측에 수치로 나타내고 있는 각 층의 경계 전후를 각각 의미한다.

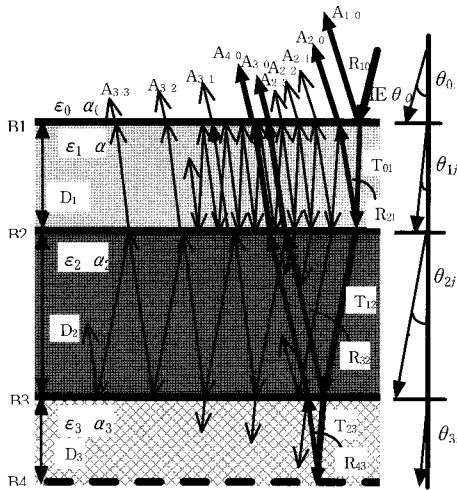


Fig. 2 Illustration of radar reflection and transmission in embedded layer

또한, 철근과 같이 판정된 크기의 물체에서의 반사수신신호(왕복신호)의 강도 RE_R 에 관한 식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우의 반사와 투과계수 R, T는 식 (10,11)에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned}
 RE_R &= \sin(90 - \theta_{0j}) IE_{\theta_0} (1 - R_{01}^2)(1 - R_{12}^2)(1 - R_{23}^2) \\
 &\times R_{43} e^{-2(\alpha_1 D_1 / \cos \theta_{1j} + \alpha_2 D_2 / \cos \theta_{2j} + \alpha_3 D_3 / \cos \theta_{3j})}
 \end{aligned} \tag{27}$$

여기서, $\sin(90 - \theta_{0j})$ 는 Fig. 2의 하단에 나타난 바와 같이, 안테나로부터 발생된 입사각에 의해 변화하는 안테나의 지향성계수이다. 즉, θ_{0j} 가 90° 로 되는 경우(안테나로부터 수직입사하는 경우)에는 그 값이 1로써, 최대치를 나타내게 된다.

Fig. 3은 입사파가 매질의 경계면에 수직입사하는 경우, 각 경계에의 반사파와 투과파의 파형에 대해서 변위 및 폭의 변화를 중심으로 나타낸 것이다. 이 예를 보면, 변위 h_0 , 폭 w_0 의 입사 펄스(여기서는, 편의상 모노사이클펄스형을 예로 하였지만, 임펄스형에 대해서도 개념은 동일하다)는 시간이 경과함에 따라 우측으로 진행하여 경계에 도달한다. 경계 1에서는, $\epsilon_0 < \epsilon_1$ 이 되므로, 반사파는 변위가 $h_1 = R_{10} h_0$ 와 입사파에 대하여 반전(-)되어 좌측으로 진행하고, 투과파는 변위가 $h_2 = T_{01} h_0$ 로 감소되고, 폭도 $w_0 \times \epsilon_0 / \epsilon_1$ 이 된다. 그러나, Fig. 3과 같은 예는 이상적인 경우이고, 실제로는 매질의 비균질성 등에 의한 파형의 흐트러짐과 왕복전파에 의한 수신파형의 변화 등으로 인하여, 예와 같은 폭 등의 변화 파형은 얻어지기 어렵다. 그렇기 때문에, 본 모델에서는 콘크리트의 단일매질을 파가 진행하는 경우의 파장을 기본파장(폭)으로서 가정하였다.

식 (26)과 식 (27)은 전기적 성질이 다른 각 경계를 투과하는 파의 강도(변위 또는 진폭)에 각 경계면에서의 반사에 의한 왕복 수가 손실량이 고려되어 표현되고 있다.

예를 들면, 각 계수만을 고려하는 경우, 경계 3에서의 반사파는 매질 1과 2를 투과한 파에 대하여 반사파 $[T_{01} \times T_{12} \times R_{32}]$ 로 나타내어지지만, 이 반사파는 안테나로 되돌아 올 때까지는 투과파로 변하기 때문에, $T_{21} \times T_{10}$ 의 투과계수의 영향이 추가된다. 단, 이 경우에는 투과파이기 때문에 위상에는 변화(반전)가 없다. 이와 같이, 본 모델에서는 일정한 크

기의 입사파에 대해서 각 경계에서 반사되는 기본파만을 고려하고, 각 층 내에 반복되어 반사하는 부속 신호(다중에코)와 링잉 등의 영향은 무시한다.

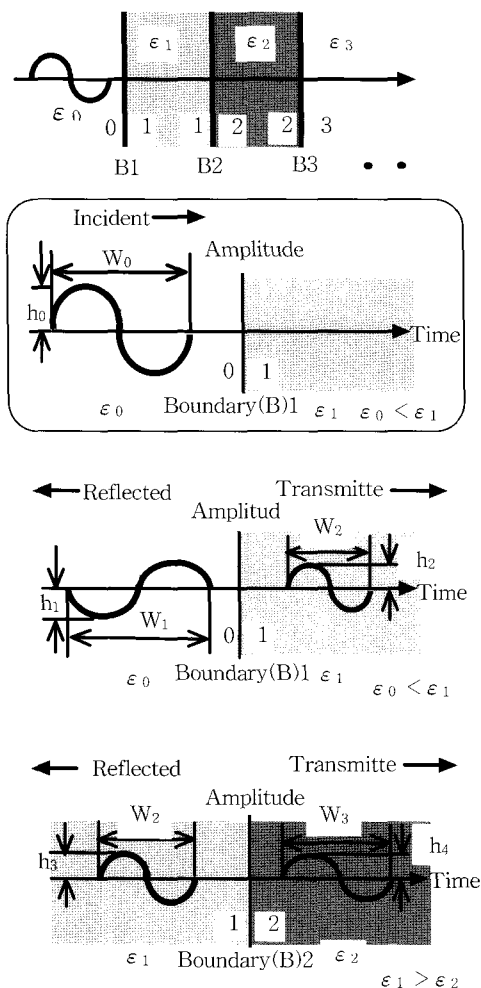


Fig. 3 Wave propagation in embedded layer

3. 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 다음 식 (28)과 같이 입력 $x(t)$ 와 시스템에 단위 임펄스를 가한 때의 응답 $h(t)$ 와의 컨볼루션에 의해 나타낼 수 있다. 여기서, τ 는 적분변수이다.

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau = x(t)*h(t) \quad (28)$$

한편, $h(t)$ 가 임펄스에 대한 응답이기 때문에 본 시스템은 다음 식 (29)와 같은 종합적인 형태의 식으로 나타내어 질 수가 있다.

$$y(nT) = \sum_{m=0}^n x(nT)\delta(t-nT) \quad (29)$$

여기서, nT 는 출력신호의 샘플링주기, m 은 응답신호의 구간이다.

4. 해석대상 시험체 조건

상기 개념의 모델이론을 통해 계산에 적용하기 위한 대상 시험체의 조건은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 전체 두께 30 cm의 무근콘크리트 판으로 하여, 깊이 10 cm 위치에 두께 10 cm의 연속된 공동 을 갖는 것으로 가정하였다. 이 때, 콘크리트의 비 유전율은 9로 가정하였으며, 레이더는 임펄스 방 식으로 하고, 계산대상 주파수는 콘크리트 구조물에 목적별로 적용이 가능한 600, 800, 1,000, 1,500 MHz의 4종류로 하였다. 또한, 입사파의 강도는 실 제 사용할 레이더의 특성에 따라 임의의 조정이 가능 할 수 있도록 본 계산에서는 1을 최대치로 가정해 계산하였다.

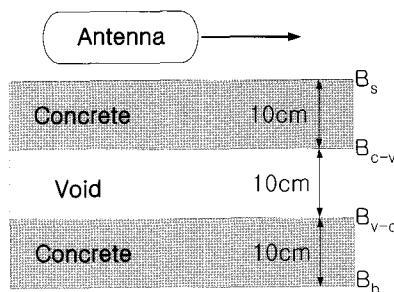


Fig. 4 Simulation condition of subsurface void in concrete

5. 계산결과 및 고찰

Fig. 5~8에는 이상의 조건을 고려하여 계산한 결과를 나타내었다.

Fig. 5에는 중심주파수 600 MHz에서 60 cm거리를 레이더로 측정된 경우를 모의 해석한 결과 화상(a)과 그 중 임의의 한 측정점에서의 펄스(b)를 모

의 해석한 결과를 나타내었다. 이와 동일한 출력 형태에 대해 Fig. 6에는 800 MHz인 경우, Fig. 7에는 1,000 MHz인 경우, Fig. 8에는 1,500 MHz인 경우의 해석결과를 각각 나타내었다. 각각의 결과를 검토해 보면, 실제 사용 레이더의 제품 특성(입사파의 강도, 링잉, STC 기능 등)을 고려하지 않고 이상적인 조건하에서의 결과이지만, 각 주파수대별로 Fig. 4의 조건을 조사할 경우에 각 경계로부터의 반사파의 특성이 비교적 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 각 화상에서 처음 나타나는 반사파의 피크는 위상이 “-”부호로 반전되어 입사파가 대기

(공기: 유전율 1)로부터 콘크리트(유전율 9로 가정) 표면(B_s)에서 반사됨에 따른 것임을 알 수 있고, 그 다음 파형 피크는 “+”부호로 다시 전환되어 콘크리트 표면을 투과한 입사파가 콘크리트 내부를 전파해 가는 중에 공동(공기)부를 만나 그 경계(B_{c-v})로부터 반사된 것임을 알 수 있다. 이와 같은 추세로 Fig. 4 조건하의 각 경계로부터의 반사파형을 해석하기 위해서는 각 반사파형의 피크가 구분이 가능하여야 하는데, Fig. 5~7과 같이 중심주파수가 1000 MHz이하인 경우까지는 공동부의 상층경계(B_{c-v})와 하층경계(B_{v-c})로부터의 각각의 반사파형이 육안

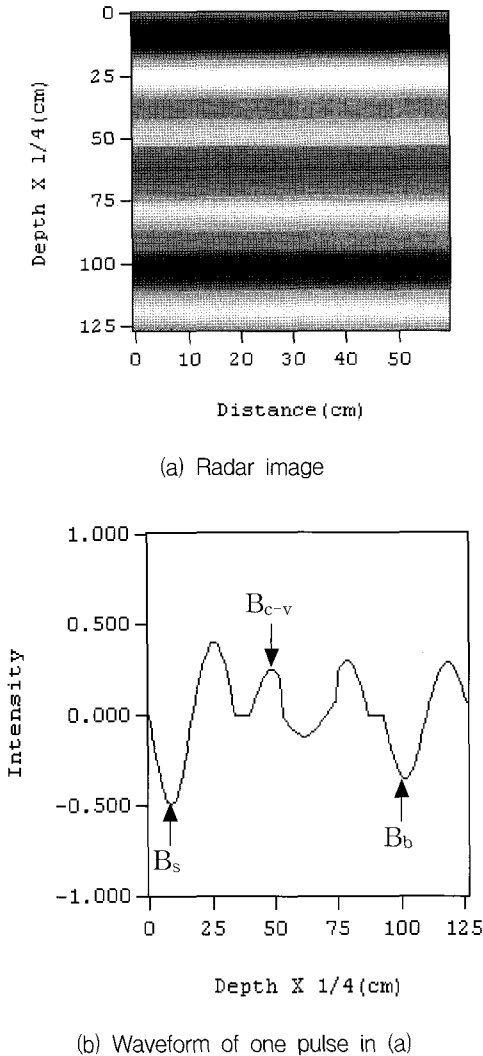


Fig. 5 Results of simulation analysis for Fig. 4 in case of 600 MHz as central frequency of radar

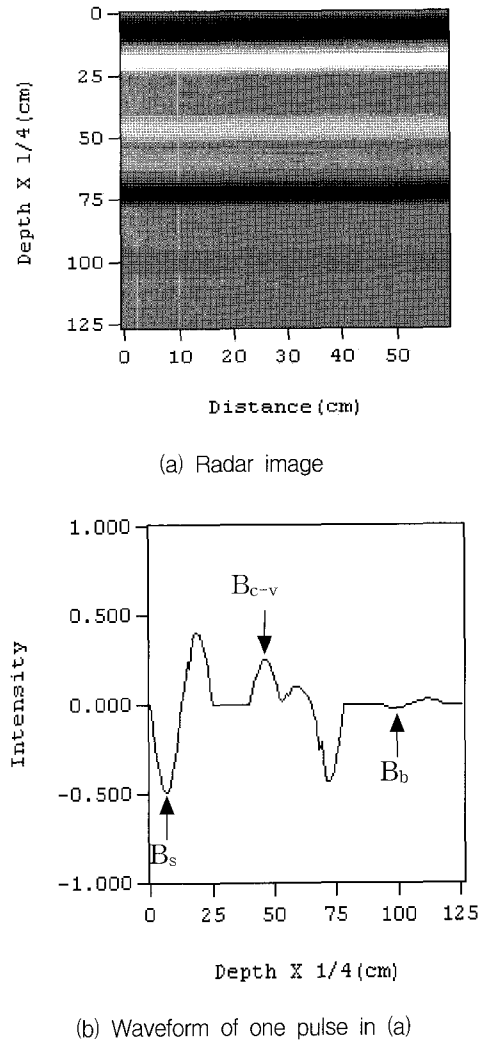


Fig. 6 Results of simulation analysis for Fig. 4 in case of 800 MHz as central frequency of radar

상으로는 뚜렷이 구별되지 않고 중첩되게 나타나 공동층의 두께까지를 식별하기에는 본 주파수대역에서는 한계가 있음을 알 수 있다.

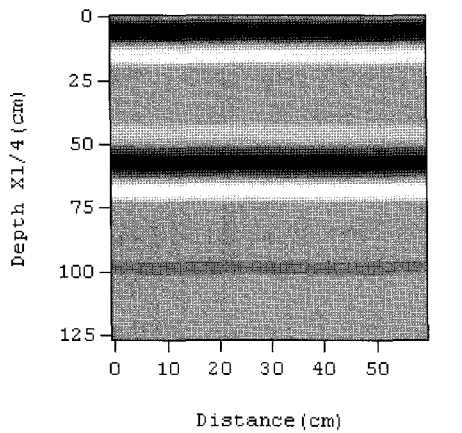
그러나, 중심주파수가 1500 MHz인 경우의 주파수 범위에서는 공동부의 상층경계(B_{c-v})와 하층경계(B_{v-c})로터의 각각의 반사파형이 육안 상으로 뚜렷이 구별이 가능하여 식 (26)을 이용하여 공동의 두께를 구할 수 있다.

이상의 결과로부터 건조 콘크리트 내에서 깊이 10 cm, 두께 10 cm를 갖는 층간 연속공동에 대하여 레이더 측정결과로부터 공동의 두께까지를 식별 (B_{c-v} 와 B_{v-c} 의 각 경계로부터의 반사신호 분리검출

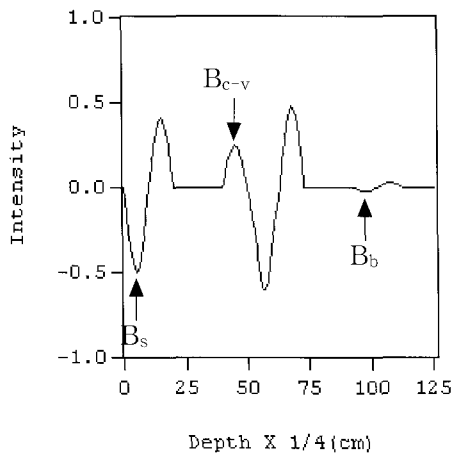
가능)할 수 있는 중심주파수의 한계는 1500 MHz 이나, 이 주파수대에서는 30 cm 깊이의 콘크리트 바닥면으로부터의 반사신호(B_b)가 감쇠 등으로 인해 너무 약하게 나타나 콘크리트의 두께를 판단하기에는 곤란함을 알 수 있다.

$$t = \frac{2D}{v_p} = \frac{2D\sqrt{\epsilon_r}}{c} = \frac{D\sqrt{\epsilon_r}}{15} \quad (30)$$

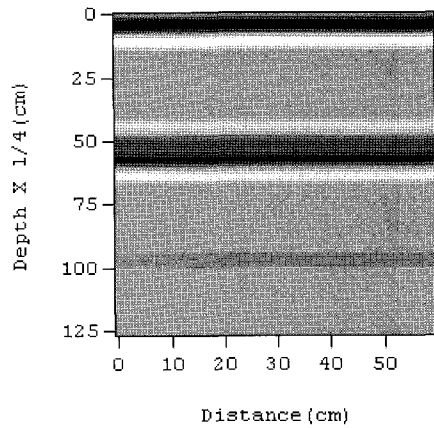
여기서, t (nanoseconds)는 반사파 사이의 시간차 (pulse separation), D (cm)는 비유전율이 ϵ_r 인 매질에서의 반사파 사이의 거리(분해능)를 나타낸다.



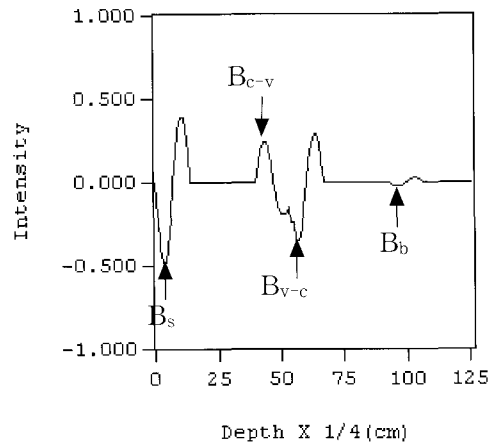
(a) Radar image



(b) Waveform of one pulse in (a)



(a) Radar image



(b) Waveform of one pulse in (a)

Fig. 7 Results of simulation analysis for Fig. 4 in case of 1000 MHz as central frequency of radar

Fig. 8 Results of simulation analysis for Fig. 4 in case of 1500 MHz as central frequency of radar

참고로 Table 1에는 식 (30)에 의해 레이더 반사 신호로부터 물체간(여기서는 공동의 상부면과 하부면)의 식별이 가능한 거리 분해능을 대상 매질의 비유전율 및 주파수대별로 구분하여 나타내었다. 예를 들면, Table 1에서 공동(공기)층의 경우는 레이더의 안테나 중심주파수가 1000 MHz라면, 공동층의 두께가 15 cm 이상이 되어야 레이더 반사신호로부터 공동층의 두께까지를 식별할 수 있음을 의미한다. 물론, 공동의 두께가 아닌 공동의 검출(유무확인)만을 위한 경우는 본 Table 1과는 별개로 고려하여야 한다.

Table 1 Distance resolution of radar for frequency and relative dielectric variations

Central frequency (MHz)	Distance resolution (cm)	
	$\epsilon_r = 9$ [Dried concrete]	$\epsilon_r = 1$ [Air]
100	25.0	75.0
400	12.5	37.5
600	8.4	25.1
800	6.3	18.8
1000	5.0	15.0
1500	3.4	10.1

6. 결 론

본 연구에서 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 모델에 의한 계산결과, 건조 콘크리트 내에서 깊이 10 cm, 두께 10 cm를 갖는 층간 연속공동에 대하여 레이더 측정결과로부터 공동의 두께까지를 식별할 수 있는 중심주파수의 한계는 1,500 MHz이나, 이 주파수대에서는 30 cm 깊이의 콘크리트 바닥면으로부터의 반사신호가 감쇠 등으로 인해 너무 약하게 나타나 콘크리트의 두께를 판단하기에는 곤란할 것으로 예측되었다.
- (2) 본 모델에서는 각층으로부터 반사되어 되돌아오는 파의 강도(진폭)와 위상 등도 각 재료의 전기적 성질이 변함에 따라 변화하는 것을 잘 나타내고 있다. 게다가, 각 매질을 투과하는 파의 강도(진폭)가 거리에 의한 감쇠만이 아니라, 각 층경계로부터의 반사에 의한 투과량의 누적손실로

나타나, 매질중의 파의 반사 및 투과한계에 대한 예측도 어느 정도 가능성을 알 수 있다.

- (3) 본 연구에서 제안된 계산방법을 이용하면, 사전에 실험이나 예비조사를 실시하지 않고도 해당 콘크리트 구조물의 조건과 검출 대상 목표물의 특성과 범위에 따라 적용이 가능한 최적의 레이더 주파수대를 선정할 수 있을 것으로 사료되어, 보다 효과적이고 효율적인 레이더 조사에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원에 의한 연구의 일부입니다.

참고문헌

- [1] G. G. Clemena and K. H. McGhee, "Applicability of Radar Subsurface Profiling in Estimating Sidewalk Undermining," Transportation Research Record 752, pp. 21-28, (1980)
- [2] J. R. Moore, J. D. Echard, "Radar Detection of Voids under Concrete Hiways," IEEE International Radar Conference, pp. 131-135, (1980)
- [3] Seok-Kyun Park and Taketo Uomoto, "Verification of Simulation of Radar Response on Subsurface Objects in Concrete," Journal of Japan Society of Civil Engineering, Vol. 31, No. 538, pp. 95-104, (1996)
- [4] 임홍철, 이지훈, 손병오, "레이더를 이용한 콘크리트의 두께 측정과 유효 측정범위 설정에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 4, pp. 296-304, (2000)
- [5] David M. Pozar, "Microwave Engineering," pp. 12-55, Addison-Wesley Publishing Company, (1990)