

# 저주파수 레이더(GPR)에 의한 콘크리트 상판 및 터널 라이닝 배면 공동의 크기 및 두께 추정에 관한 실험 연구

An Experimental Study on Estimation of Size and Thickness of Cavitation(Void)s  
under Concrete Slabs and Tunnel Linings Using Low Frequency Type Radar(GPR)

박 석 균\*

Park, Seok-Kyun

## Abstract

The presence of cavitations under pavements or behind tunnel linings of concrete is likely to result in collapse. One method of detecting such voids by non-destructive means is low frequency type radar(GPR). By the way, the size and thickness of small cavitation can't be detected by the present radar technology with low frequency and low resolution when it apply to civil structures like that. To overcome these problems and limitations, this study aims to develop and propose a new analysis method for estimating the depth, cross-sectional size and thickness of cavitations using low frequency radar. A new proposed method is based on the experiments that are carried out for analyzing the correlation between the measurement values(the amplitudes of radar return) of low frequency radar and various type of cavitations. In this process, the threshold value for radar image processing which aims to represent only cavitations to be fitted size can be obtained. As the results, it is clarified that a proposed method has a possibility of estimating cavitation depth, size and thickness with good accuracy in laboratory scale.

## 요 지

콘크리트 도로 상판 또는 터널 라이닝의 배면 공동은 구조물의 함몰 또는 붕괴로까지 이어질 가능성이 있다. 이 공동을 비파괴로 검출하기 위한 방법 중의 하나가 저주파수대 레이더(GPR)의 사용이다. 그러나 이와 같은 토목구조물에는 분해능이 좋지 않은 저주파수대의 레이더를 사용할 수밖에 없기 때문에 작은 공동의 크기나 두께까지 탐사하는 일은 현재 기술로는 거의 불가능하다. 본 연구는 이와 같은 문제와 한계를 극복하기 위해 다양한 공동의 크기와 두께, 깊이를 대상으로 많은 량의 실측 실험을 통해, 저주파 레이더 측정치와 공동 간의 상관관계를 분석함으로써 해서 공동의 깊이, 크기와 두께까지를 추정하기 위한 새로운 해석방법을 제안하고 그 적용성을 검토하였다. 또한 본 검토에서는 공동만을 그 크기(횡폭)에 맞게 화상처리에 의해 나타낼 수 있는 역치를 산정하였다. 그 결과, 본 연구에서 제안된 방법에 의해 실험실 수준에서는 정도 좋게 공동의 깊이와 크기, 두께를 추정하는 것이 가능하였다.

**Keywords :** Low frequency radar, Nondestructive inspection, Concrete, Pavement slab, Tunnel lining, Cavitation

**핵심 용어 :** 저주파수 레이더, 비파괴 검사, 콘크리트, 도로 상판, 터널 라이닝, 배면 공동

\* 정회원, 대전대학교 공과대학 토목공학과, 부교수

E-mail : skpark@dju.ac.kr 042-280-2525

•본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

콘크리트 도로상판이나 터널 라이닝의 배면공동은 경우에 따라 구조물의 붕괴나 대형사고로까지 이어질 가능성이 있어 이의 비파괴 검사는 매우 중요하다. 레이더법에 의한 콘크리트의 비파괴검사는 비접촉 방식에 의한 주사(走査)가 가능하므로 적용부재에 대하여 제약이 비교적 적고, 측정도 다른 검사방법 보다 빠르고 간단하기 때문에, 이러한 배면 공동의 검출에 최적인 검사방법으로서 각광받고 있다. 그러나 토목 구조물에 대하여 적용하는 경우에는 감쇠 및 산란 등의 영향이 크고, 고주파 성분의 사용이 곤란하기 때문에 분해능도 나빠진다. 각종 경계와 이물질 등으로부터의 잡신호가 목표물로부터의 신호와 혼합되어 버리기 때문에, 현재의 레이더 기술로는 해당 구조물 배면공동의 크기까지 검출하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 저주파수대의 지중탐사용 레이더(GPR : Ground Probing Radar)를 이용해 다양한 공동의 크기와 깊이를 대상으로 실험을 하여, 공동만을 검출하고 그 크기(두께와 폭)를 추정하기 위한 새로운 화상처리방법을 개발하고 제안하는 것이 목적이다. 이를 위해 다양한 공동의 크기와 깊이를 대상으로 레이더 실험을 수행하였다.

지금까지 레이더법을 이용해 배면 공동을 검출하기 위한 분야의 연구는 다양하게 수행되어 왔지만(Parry N.S.&Davis J.L., 1992, A. Kovacs and R.M. Morey, 1983 ; C.L.Bertram et.al, 1974 ; J.R. Moore and J.D. Echard, 1980 ; Moore et. al, 1980 ; Steinuray et al., 1981, 박석균, 2005), 본 연구와 같이 깊이가 다른 각 공동의 크기(두께, 폭)와 레이더 반사파의 진폭특성치 간의 상관관계로부터 역치(threshold value)를 구해 해당 크기(폭)의 공동만을 화상처리하고 관계식으로부터 두께를 추정하는 방식의 연구는 아직 수행된 바 없다.

Table 1 각 대표 매질의 비유전율 값 및 범위

Air	Concrete*	Steel	Soil*	Water
1	7~11	∞	4~16	81

\* It depends on dry or wet condition.

## 2. 해석방법

### 2.1 공동의 크기검출 화상처리방법의 기본 원리 및 개념

레이더 탐사 시 공동은 공기중의 비유전율값인 1로 간주할 수 있고, 주위 매질은 주로 지반재료로서 Table 1에서와 같이 공기중의 비유전율값보다는 비교적 큰 차이를 나타내기 때문에 공동과의 경계면으로부터는 + 위상의 비교적 강한 반사파를 얻을 수 있다. 특히, 터널, 도로 등의 배면공동 탐사 시에는 투과력은 좋지만, 분해능이 좋지 않은 저주파수대를 이용하기 때문에 배면재료 내에 잡석 등 작은 크기의 이물질이 존재하더라도 공동이 이들 크기보다 작지 않은 한 반사파는 충분히 얻어질 수 있다고 판단된다. 또한 공동은 강제 등과 같이 자신보다 비유전율이 커서 반사파가 - 위상으로 나타나는 물질과는 획득된 신호로부터 구분이 가능하므로, 탐사결과로부터 + 위상을 갖는 일정 반사강도 이상의 신호만을 화상처리하면 공동만의 검출도 가능하다고 판단된다.

이와 같은 일정 반사강도 이상의 값에 대한 2차화처리에 의해 공동의 검출뿐만 아니라 그 크기까지 처리화상에 나타낼 수 있는 개념은 다음과 같다. Fig. 1은 Fig. 8(a)조건인 공동에 대한 레이더 탐사결과인 Fig. 11(a)에 대하여 기울기 벡터를 구해 일정 크기 이상의 벡터를 나타낸 결과를 보이고 있다.

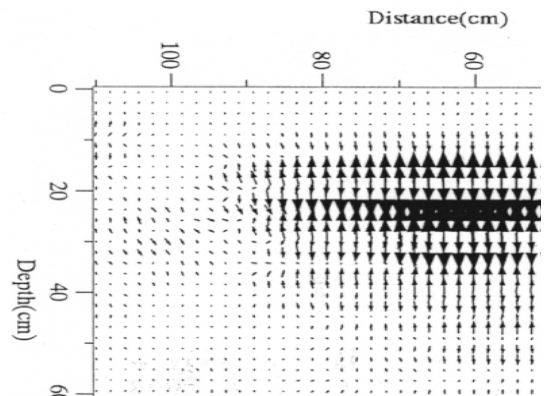


Fig. 1 공동에 대한 레이더 화상의 기울기 벡터

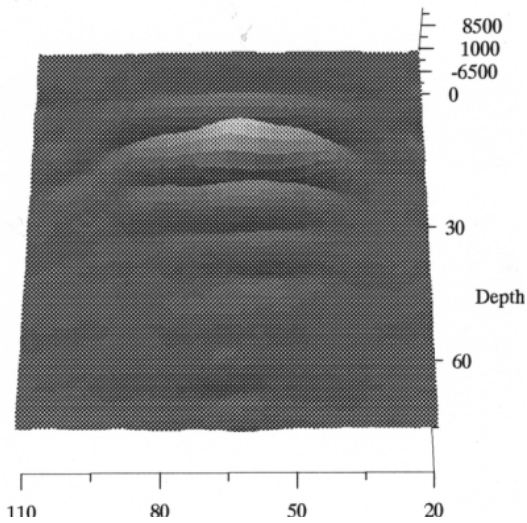


Fig. 2 공동에 대한 레이더 3차원 화상

또한, Fig. 2에는 이에 대한 화상의 농담(濃淡)분포를 3차원 변환으로 나타내었다.

Fig. 1로부터 알 수 있는 바와 같이, 일정 크기 이상의 벡터만을 나타내면 공동의 바로 위에서 반사된 신호의 기울기벡터 방향은 공동의 상부면에 대해 연직각을 이루고, 이 때의 기울기벡터 크기는 최대치 그룹을 형성하고 있다. 이는 레이더의 안테나 위치가 공동의 바로 위에 진입한 때부터 안테나로부터 수직으로 발신된 신호의 반사경로가 최단거리가 되고, 그 때 직진하는 발·수신 신호의 강도가 최대로 되기 때문이다. 따라서 이들 최대강도 그룹 내의 역치 이상의 신호만을 선택하면 공동 바로 위의 범위, 나아가 공동의 크기까지 알 수 있다. 이와 같은 개념은 Fig. 2의 3차원 표면화상의 농담분포에 나타낸 바와 같이 분포도 내의 어느 화상농담범위 이내의 값(역치 이상)만을 선택하고, 이들 값을 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 0과 1로 2치화 한 가중함수에 의해 역치처리하면 그 범위의 화상만을 나타낼 수 있다. 이 때, 그 역치를 많은 실험을 통해 공동의 크기에 맞추어 정하면 공동 크기만의 화상을 얻을 수 있다. 한편, 본 연구의 검출범위 이상(안테나의 수평 측정 반경 이상; 가로·세로 50cm 이상)의 공동에 대해서는 Fig. 6에서와 같이 공동의 수평 크기가 50cm 이상을 초과하더라도 안테나

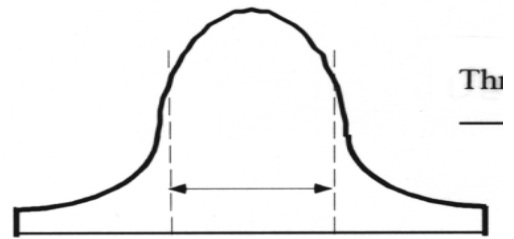


Fig. 3 역치설정(thresholding) 개념도

의 연속측정치는 계속해서 같은 화상농도가 유지되기 때문에, 공동의 크기를 검출하는 데에는 큰 문제가 없다.

이와 같은 과정에서 역치를 결정하는 방법 중에는 다양한 방법이 있지만, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 모드법에 의하였다. 그러나 레이더 탐사에서는 얻어지는 특정신호의 강도 및 그 분포가 화상의 전 영역에서 항상 일정하게 유지되지 않는다. 예를 들면, 같은 물체에 대한 반사신호라도 화상 상의 깊이 축과 거리 축에 따라 신호의 강도 및 분포가 변화한다. 이는 신호가 깊이 방향에 따라서는 감소 영향을 받고 거리 방향에 따라서는 대상 물체의 단부에서의 신호 변화가 발생하기 때문이다(실제로는 레이더 화상의 역치 처리에서는 거리 축 상의 변화는 큰 문제가 되지 않는다). 따라서 본 경우의 역치 결정은 보다 다각적이고 가중적인 요소, 즉 화상상의 임의 위치, 형태에 따라서는도 포괄적인 적용이 가능한 상관함수에 의한 차등화 방법이 필요하다.

이상의 기본원리 및 개념으로부터 유추할 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 제안된 방법은 거의 평탄하게 배치된 등방성 공동에 대해서 유효하다.

다음은 본 연구방법의 제안배경을 공동의 두께를 추정하는 방법과 병행하여 이론적으로 설명하고, 본 방법의 전개과정에 대해 기술한다.

## 2.2 본 연구방법의 제안배경 및 공동의 두께 추정방법

측정대상 구조물이 콘크리트와 지반(모래)의 2층 경계 구조물이라고 가정하면, 그 배면공동에 대한 전

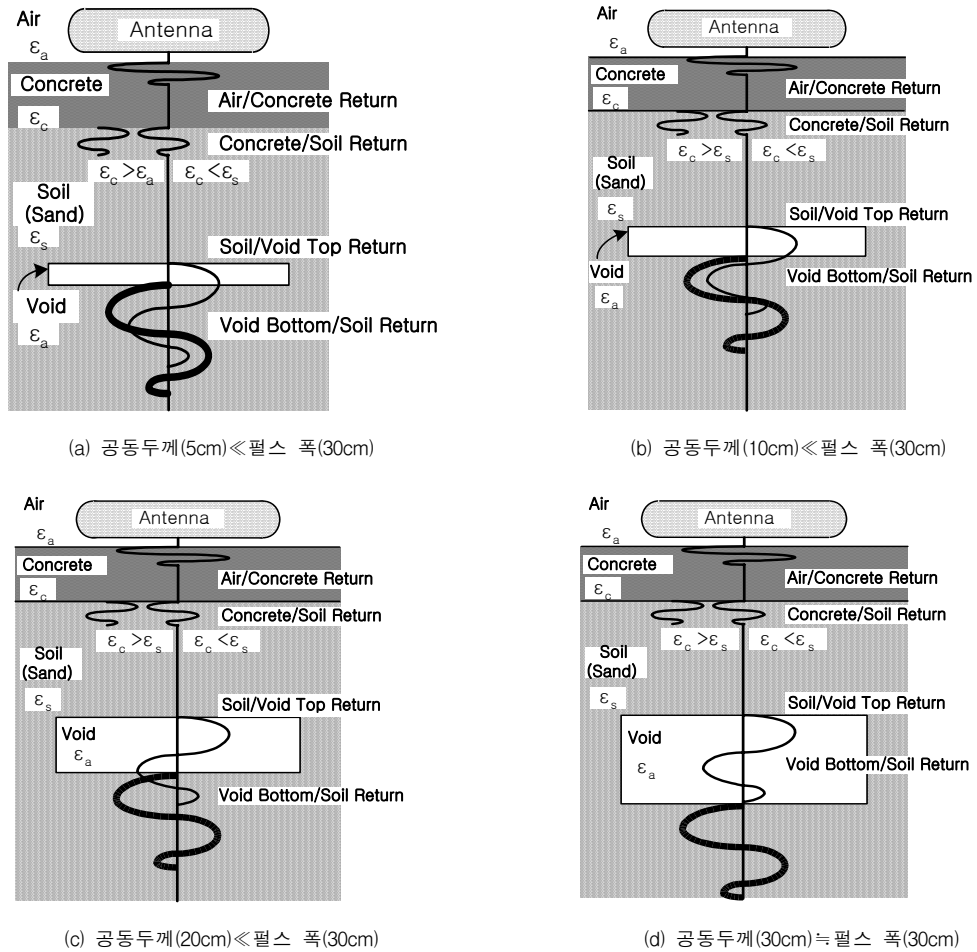


Fig. 4 다층경계조건에서의 레이더 반사파 거동

자파의 반사파형은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 제1파형은 공동과 콘크리트표면으로부터의 반사, 제2파형은 콘크리트 저면과 지반면으로부터의 반사, 제3파형은 지반면과 공동표면으로부터의 반사, 제4파형은 공동저면과 모래면으로부터의 반사 등 총 4종류의 대표적인 반사파형으로 대별된다.

따라서 배면공동의 두께를 검출하기 위해서는 먼저 제3파형과 제4파형간의 신호구분이 필요하다. 이론적으로 공동의 표면과 저면으로부터의 신호를 각각 구분할 수 있는 공동두께와 레이더 신호특성과의 관계는 식(1)과 같다.

$$t = \frac{2D}{v} = \frac{2D\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 전자파의 왕복전파시간,  $D$ 는 공동까지의 거리(깊이),  $v$ 는 전자파의 매질내 전파속도,  $\epsilon_r$ 은 매질의 비유전률,  $c$ 는 빛의 속도이다. 이 식을 정리하면 식(2)와 같이 된다.

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

위식에서 공동내의 신호를 기준으로 하는 경우에는  $\epsilon_r$ 이 1이 되기 때문에 식(2)는  $D$ 만의 관계식이 된다. 식(2)에서  $t$ 를 펄스의 시간폭(ns),  $D$ 를 공동의 두께(cm)로 바꾸어 정리하면 구하고 싶은 공동의 두께와 레이더 신호와의 관계식이 얻어진다.

따라서 인접한 경계간의 각 반사신호의 피크가 중첩되지 않고 상호 구분이 가능하기 위해서는 각 경계간의 최소두께( $D$ )(이를 한계두께라 정의한다)는 사용 레이더의 펄스폭( $t$ )과 탐사대상매질의 비유전률과의 관계에 의한 식(2)의 조건을 만족해야 한다. 이에 의하면 레이더펄스의 시간 폭이 보통의 지중탐사 레이더에서와 같은 2ns이상(주파수 500MHz이하)에서는 30cm이하의 공동두께를 반사신호의 식별에 의해 해석할 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 이유로 인해 공동의 두께를 반사신호에 대한 해석방법에 의존하지 않고 실험적인 상관관계로부터 추정하는 방법을 적용하였다.

### 2.3 본 연구방법의 전개과정

본 연구에서는 공동의 임의 두께(1cm이상) 및 크기(표면적, 두께)에 관계없이 공동에 대해서 측정된 레이더의 최대반사강도로부터 공동의 두께를 추정하는 방법에 대해서 검토하였다.

Table 2 공동크기(W, D, H : Fig. 8)와 두께 추정을 위한 실험계획

Void conditions ( Unit: cm )		
	Fixed factor	Variable factor
Change in void depth	W40, D40, H10	Depth 10,30,50,70
Change in void surface area	Depth30, H10 W10 W40 D10 D40 W20 W30 W50	D10,20,30,40 D10,20,30,40 W20,30,40 W20,30,50 D20 D30 D50
Change in void thickness[H]	Depth30, W40, D40	H10,20,30

이를 위해 Table 2에 나타난 실험조건에서와 같이 먼저 동일 두께(H) 및 동일 표면적(W×D)의 공동에 대해서 각 깊이(Depth)별로 공동으로부터의 레이더 최대반사강도와와의 변화특성(상관관계)을 검토하였다. 다음으로 상기 조건하에서 동일 깊이 및 동일 두께의 공동에 대해서 공동의 표면적 변화별 상관관계를 분석하였다. 끝으로 동일 깊이 및 동일 표면적 공동에 대해서 공동의 두께특성을 검토함으로써 이들 각 검토항목별로 얻은 상관관계식을 비례식 원리에 의해 종합하여 식(3)과 같은 일반식을 도출하였다.

$$T_{STC} (cm) = \frac{4020 - R_{m/STC} \cdot \frac{A}{1.6 \times 10^6 B} e^{-0.037D_t (cm)}}{49.1} \quad (3)$$

여기서,  $T_{STC}$ 는 사용장치 특성하에서의 공동의 추정두께,  $R_{m/STC}$ 는 STC(하기에 설명)처리를 하지 않은 경우의 최대반사강도,  $A, B$ 는 식(4)에 의해 STC처리를 한 경우의 사용 장치의 깊이별 반사신호 특성을 기준으로 하여 공동의 깊이와 최대반사강도와와의 관계식으로 얻어진 계수,  $D_t$ 는 공동까지의 깊이이다. 한편, 본 식(3)은 상관계수가 0.96이므로 높은 상관성을 얻었다.

한편, STC(Sensibility Time Control)란 레이더의 깊은 깊이 탐사시에 전자파신호의 감쇠를 보정하기 위해 설정한 기능으로서 깊은 깊이탐사형 레이더의 경우는 대부분 이 기능을 보유하고 있다. 깊은 깊이의 목표물로부터 반사된 레이더 신호는 지수함수적으로 감쇠하여 도달되기 때문에 신호가 약하게 나타난다. 이와 같은 문제를 극복하기 위해 Fig. 5와 같은 시그모이드형 STC곡선을 측정화상 데이터에 대해 승산함으로써 약해진 신호를 증폭하는 기능을 말한다.

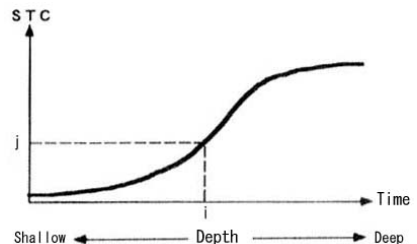


Fig. 5 STC 함수 (Sigmoid형)

식(3)에서 STC처리를 하지 않은 경우의 최대반사 강도를 변수로 한 이유는 탐사장치별 STC기능 차에 의한 영향을 고려하고, STC기능을 보유하고 있는 장치에서는 STC처리를 하지 않은 경우의 데이터도 간단히 얻을 수 있는 것을 감안했기 때문이다.

$$R_{m/STC_z} = Ae^{-BD(cm)} \quad (4)$$

여기서,  $R_{m/STC_z}$ 는 STC처리를 한 경우의 사용장치에 따른 최대반사강도이다.

참고로, 본 연구에서 사용한 탐사장치의 STC처리등급은 “약”부터 “강”까지 7등급(구분상 STC 1, 5, 10, 20, 40, 80, 160으로 표기되어 있다)으로 편의상 나누어져 있고, 그 중, 대표로서 STC 1, 20, 80의 각 등급별 깊이에 따른 신호의 강도특성 비교예를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 동일 탐사결과에 대한 깊이별 신호강도에도 불구하고, 각 STC처리특성(등급)에 따라 깊이별 신호강도가 강조되는 모양이 다르게 나타나고 있기 때문에, 본 기능을 탑재한 장치에서는 그 장치에 맞는 STC처리특성을 식(4)에 의해 구하여 반드시 이의 보정을 하여야 한다.

한편, 본 방법은 가로, 세로의 크기가 각각 40cm이상이고, 두께가 10cm이상인 공동에 대한 두께의 추정

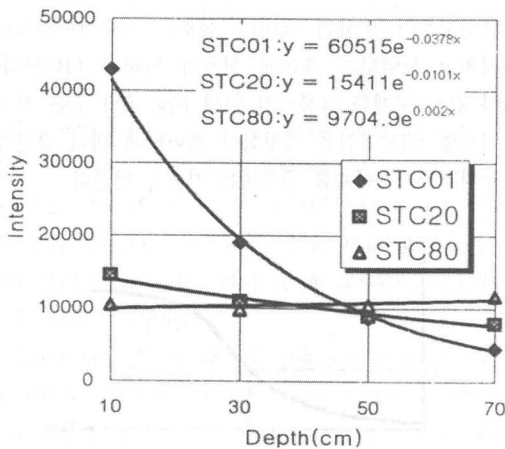


Fig. 6 STC 1, 20, 80 적용시 공동깊이와 레이더 반사파의 최대진폭 관계

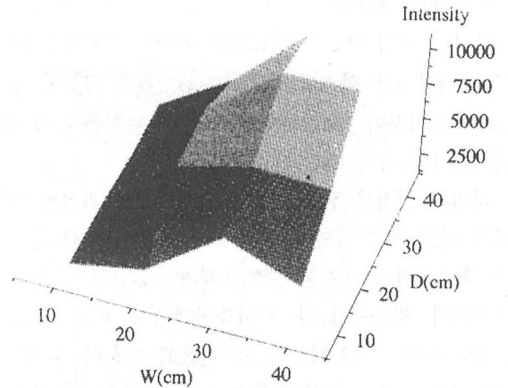


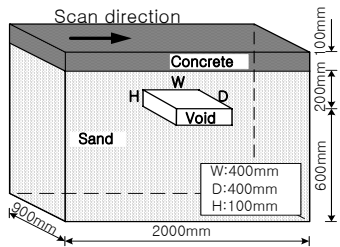
Fig. 7 공동 표면적과 레이더 반사파의 최대진폭 관계

에 유효하다. 왜냐하면, 본 방법에 의한 실험조건 중 동일 깊이에서의 공동의 표면적 크기별 최대반사강도의 변화특성(상관관계)을 검토한 Fig. 7의 실험결과에 의하면, 공동의 표면적은 레이더 안테나의 크기에 의하기도 하지만 가로, 세로의 크기가 각각 40cm(또는 직경 40cm)전후 크기 이상에서는 공동에 대한 최대반사강도의 변화가 거의 일정하게 유지(수렴)되는 특성을 나타냄을 알 수 있어, 이 크기 이상의 공동에 대해서는 표면적 변화에 의한 영향을 무시할 수 있다. 아울러 본 연구의 대상 공동은 평탄하게 배치된 등방성 공동에 대해 유효하다. 또한, 본 연구에서는 탐사대상 공동의 최대 깊이를 70cm까지로 한정하였다.

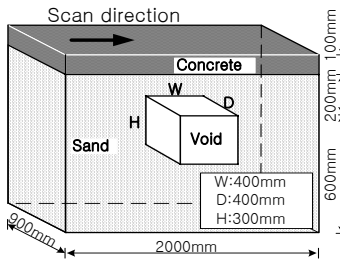
### 3. 실험조건

#### 3.1 시험체

본 연구를 위한 시험체의 예는 Fig. 8과 같이 제작하였다. 두께 10cm의 무근 콘크리트 상판 하에 배면 재료로서 모래를 채운 후 그 안에 공동을 스티로폼으로 인공제작한 후 매설하여 레이더탐사실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험체의 종류는 Table 2와 같이 각 깊이별 공동의 크기와 두께에 따라 다양한 조건으로 하였다. 공동은 모두 등방성의 직육면체형만을 대상으로 제작하였다.



(a) 공동두께: 10cm



(b) 공동두께: 30cm

Fig. 8 무근콘크리트 상판하의 정방향(co-axial type) 공동 탐사 실험을 위한 시험체 배치 예

Table 3 콘크리트 배합조건

$f_{ck}$	W/C	S/a	Slump	$G_{max}$
24N/mm <sup>2</sup>	55%	46%	5cm	25mm

콘크리트 상판의 주요 배합조건은 Table 3과 같이 하였다. 또한, 이 때 사용된 배면재료인 모래의 함수율은 1.7~3.4%였다.

### 3.2 실험장비

본 실험에서는 지중탐사형 레이더인 GPR(Ground Probing Radar)을 사용하였다(Fig. 9). 주파수 범위는 20MHz~1GHz의 광대역이고 중심주파수는 600MHz이다. 안테나는 3다이폴 타입이고 신호획득은 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)방식이다.



Fig. 9 사용 레이더 장치

## 4. 공동만의 검출을 위한 화상처리절차

이상에서 얻어진 방법을 이용하여 탐사된 레이더 화상으로부터 공동만의 신호 및 그 크기를 검출하기 위한 2차화 화상처리절차를 현장 구조물에 대해 적용하는 경우를 중심으로 Fig. 10에 나타내었다.

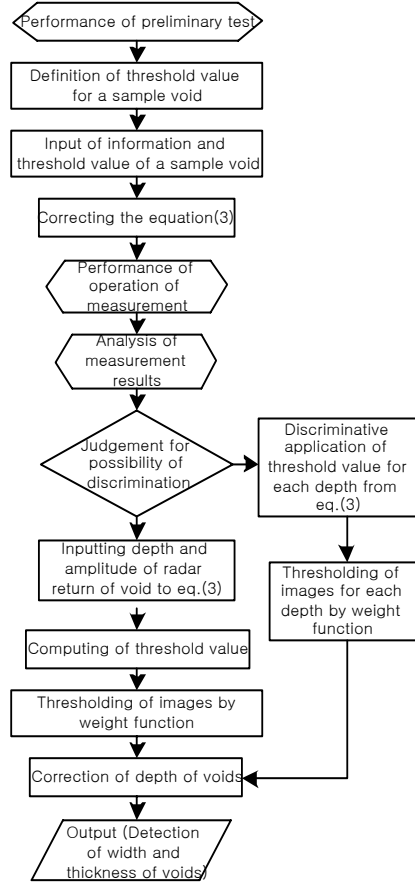


Fig. 10 공동의 반사신호와 크기 추정을 위한 역치선택에 의한 화상처리절차 흐름도

### (1) 탐사대상 매질특성에 맞는 예비실험의 실시

대상 현장의 측정대상 조건에 대한 대표 특성치를 얻기 위해 일정 크기와 두께를 갖는 표준 공동을 일정 깊이에 배치하고 이에 대한 측정작업을 실시한다. 이 때, 표준 공동은 스티로폼으로 제작하여 배치한다. 단, 이 경우에는 스티로폼에 대한 비유전율(약1.5)과 실제 공동

에 대한 비유전율(1)의 차를 고려하여 보정하여 준다.

### (2) 공동에 대한 반사강도의 역치 설정

이상의 실제 탐사대상 조건하에서의 표본 공동에 대한 예비실험 후, 표본 공동의 크기에 맞추어 그 공동만의 가로크기(거리축상)의 신호가 얻어지도록 역치를 설정해 둔다. 이 작업은 공동의 가로크기에 해당하는 반사화상상의 구간(기울기벡터가 수직방향을 이루는 구간)을 선정하고 그 구간거리를 이용하면 된다.

### (3) 표본 공동의 규모와 역치 입력 및 측정대상 조건하의 식으로의 보정

상기에서 정한 표본 공동의 깊이와 두께와 더불어 반사강도 역치를 식(3)의 상관관계식에 대입해서 해당 깊이에서의 공동의 크기와 두께에 대한 실제 기준치로 하면, 대상 현장에서의 공동의 각 깊이에 대한 역치가 얻어지게 된다. 이 때, 기준치에서의 깊이, 즉, 표본 공동의 깊이를 레이더 반사화상상의 화면표시에 맞추어 두면 측정대상 조건에 맞는 실제 깊이 값을 얻을 수 있다.

상기 과정에서 얻어진 표본 공동의 규모(공동의 두께, 깊이)와 역치를 이용하여 측정대상 현장조건에 적합한 식(3)으로 보정한다.

### (4) 탐사작업의 실시

이상의 과정을 마쳤으면, 실제 현장 구조물의 원하는 구간에 대해 레이더 탐사작업을 실시한다.

### (5) 공동의 식별 가능성 판단 및 역치 적용 자동화

이상의 과정에서 얻어진 화상을 공동식별의 형편에 따라 다시 화상처리 한다. 측정화상으로부터 공동의 식별이 가능한 경우는 공동영역의 깊이를 입력함으로써 역치를 미리 지정하는 것이 가능하다. 공동의 식별이 곤란한 경우는 식(1)에 의해 각 깊이별 역치를 차등 적용해서 자동적으로 공동검출이 가능하도록 한다.

### (6) 가중함수에 의한 화상의 2치화 처리

이상의 역치를 이용하여 그 역치 이상=0(흑), 역치 미만=1(백)의 가중함수에 의해 2치화 처리를 한다.

### (7) 2치화 처리화상에서의 표면과 신호성분의 제거

이상의 2치화 처리결과, 그 처리화상에 나타난 신호는 역치 이상의 신호, 즉 공동만의 신호가 얻어진다. 그러나 일반적으로 레이더의 측정대상표면으로부터의 반사파와 배면경계로부터의 반사파는 다른 신호보다 강한 반사강도를 갖고 있기 때문에 2치화 처리 화상에 남을 가능성이 있다. 특히 어느 깊이의 공동에 대한 역치를 기준으로 하여 화상처리를 하는 경우에는 그 해당 깊이가 측정표면으로부터 일정거리 이상인 경우에 이와 같은 현상이 잘 나타난다. 이 문제를 해결하기 위해서는 각 깊이별 역치를 차등화해서 공동을 검출하는 방법을 이용하는 쪽이 권장된다. 또한 측정신호에 STC처리를 실시함으로써 표면근처의 반사신호를 약하게 해서 본 처리를 행하는 방법도 있고, 사전에 표면과 처리를 하는 방법도 있다. 그러나 기본적으로 표면파와 공동으로부터의 반사파는 위상이 서로 다르기 때문에 구분이 가능한 점을 이용하여 신호처리를 할 수도 있다.

### (8) 공동 위치의 보정

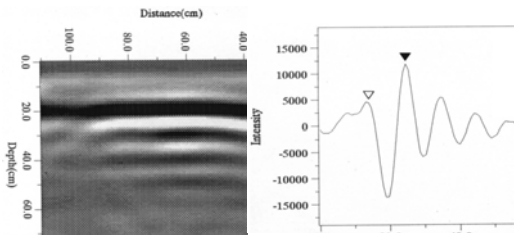
첫 번째 공동으로부터의 반사파는 반파장 신호에 의해 신호강도가 약하게 나타나기 때문에 이 첫 번째 신호를 기준으로 하는 경우에는 불요신호까지도 검출될 가능성이 많다. 그래서 공동의 반사신호 중에서 +위상의 최대반사신호가 얻어지는 신호군, 즉 2번째 신호를 기준으로 하여 역치를 정하는 것이 바람직한 경우가 있다. 이 경우에는 같은 측정조건에 대해 공통으로 실제 공동 깊이에 대한 보정을 실시하여 준다.

## 5. 결과 및 고찰

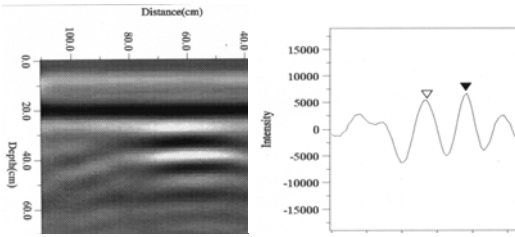
### 5.1 측정 및 화상처리결과

이상의 처리수순에 따라 측정결과 중에서 대표적인 경우를 선정해 화상처리를 실시한 결과를 Fig. 11~12에 나타내었다. Fig. 11에는 레이더 측정결과로서, 좌측은 레이더화상(B스캔)을, 우측은 파형모드(A스캔)를 나타내며, ▽와 ▼표시는 각각 공동 표면으로부터의 1, 2차 반사신호의 최대진폭(최대반사강도)을 나타낸다.

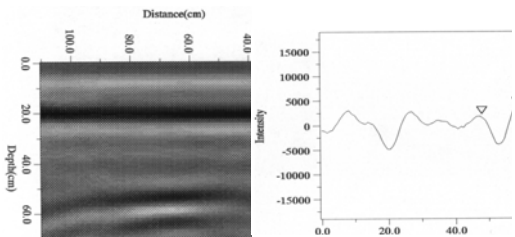




(a) W40,D40,H10,깊이10cm (b) 공동 (a)의 레이더반사 신호의 최대진폭



(c) W40,D40,H10,깊이20cm (d) 공동 (c)의 레이더반사 신호의 최대진폭

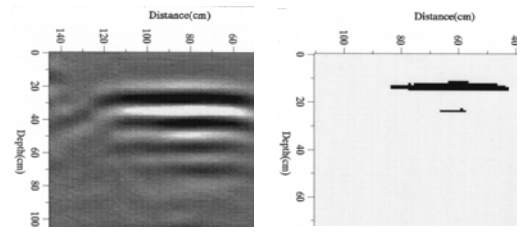


(e) W40,D40,H10,깊이30cm (f) 공동 (e)의 레이더반사 신호의 최대진폭

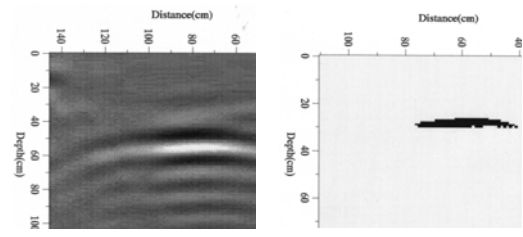
Fig. 11 공동깊이변화(10,20,30cm)별 레이더 화상 예

## 5.2 공동의 크기 검출정도

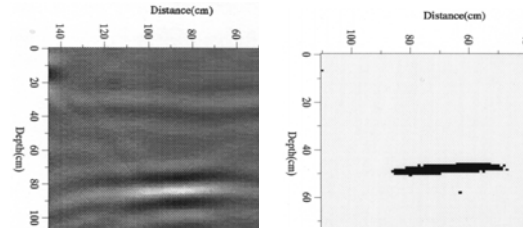
이상의 각 조건별 화상처리기법을 이용하여 공동의 크기(폭)를 검출한 결과를 Table 4에 나타내었다. 이 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 가로, 세로 각각 40cm, 두께 10cm의 일정 크기의 공동에 대해서 깊이를 10~70cm의 범위 내에서 변화시킨 경우는 크기(폭)검출시의 평균오차가 -1.5cm, 공동 두께 10cm의 일정조건하에서 공동의 수평면적을 변화시킨 경우는 평균오차가 +3.5cm, 가로, 세로 각각 40cm의 일정 수평면적 크기의 공동에 대해서 두께를 변화시킨 경우는 평균오차가 -4.0cm, 이들을 종합한 전체의 경우는 상대오차의 평균이 -1.4cm(절대 평균치는 2.6cm)로 나타나, 전반적으로 양호한 결과가 얻어졌다.



(a) Fig. 11(a)의 표면파 제거 (b) W40,D40,H10,깊이10cm



(c) Fig. 11(c)의 표면파 제거 (d) W40,D40,H10,깊이20cm



(e) Fig. 11(e)의 표면파 제거 (f) W40,D,40,H10,깊이30cm

Fig. 12 Fig. 11에 대한 공동 화상처리 결과 예

Table 4 본 연구의 화상처리기법을 이용한 각 조건별 공동의 크기(폭) 검출 결과 (unit : cm)

	Experimental Conditions	Void size (Width)	Results	Relative error	Average error
Change in void depth	W40,D40,H10	40	40	0	-1.5
	Depth 10	30	36	-4	
		50	39	-1	
		70	39	-1	
Change in void surface area	W10,D40,H10	10	-	-	+3.5
	W20,D40,H10	20	23	+3	
	W30,D40,H10	30	34	+4	
Change in Void thickness	W40,D40,H20	40	34	-6	-4.0
	W40,D40,H30	40	37	-3	

한편, 공동의 두께검출은 앞서 기술한 바와 같이 가로, 세로 각각 40cm의 일정 수평면적 크기 이상의 공동에 대해서만 가능하고, 식(3)에 의해 10~70cm의 깊이와 10~30cm의 두께 범위의 공동에 대해 검출한 결과, -2.0~+1.5cm의 오차범위를 나타내었다.

따라서 본 방법에 의한 공동신호만의 검출을 위한 화상처리방법은 실험실적 수준에서는 유효한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제안된 레이더 화상처리방법을 이용하면 레이더 탐사화상으로부터 공동의 크기만을 화상에 나타내는 것이 가능함을 알 수 있었다. 이 경우, 각종 크기의 모의 공동에 대해 공동의 깊이변화별, 수평면적별, 두께별로 실험한 후 공동만의 크기를 검출한 결과, 전체 상대오차의 평균이 -1.4cm(절대 평균치는 2.6cm)로 나타났다.
- 2) 두께 추정방법에 의한 검출결과도 가로, 세로 각각 40cm의 일정 수평면적 크기 이상의 공동에 대해서 10~70cm의 깊이와 10~30cm의 두께 범위의 공동에 대해 검출한 결과, -2.0~+1.5cm의 오차범위를 나타내었다.
- 3) 따라서, 전반적으로 양호한 결과가 얻어져, 본 방법에 의한 공동신호만의 검출을 위한 화상처리방법은 실험실적 수준에서는 유효한 것으로 판단된다. 따라서 향후 현장조건에서의 적용 가능성에 대

한 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구의 일부는 한국건설기술평가원 산학연 공동 연구개발사업에 의한 연구비 지원에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 박석균 : 3다이폴 안테나 방식 레이더에 의한 콘크리트 터널 라이닝 배면공동의 형상 추정, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.17, No.2, pp.221~227, 2005. 4.
2. A. Kovacs, and R.M.Morey : Detection of Cavities Under Concrete Pavement, CRREL Report 83-18, pp.1-41, 1983. 7.
3. C.L.Bertram et.al : Feasibility Study for Rapid Evaluation of Airfield Pavements, AFWL-TR-71-178, pp.1-94, 1974. 6.
4. J.R. Moore, J.D. Echard, Radar Detection of Voids under Concrete Hiways, IEEE International Radar Conference, pp.131-135, 1980.
5. Moore et. al : Radar Detection of Voids under Concrete highways, Georgia Institute of Technology, NCHRP 10-14, 1980.
6. Steinuray, Echart, Lake : Locating Voids Beneath Pavement using Pulsed Electromagnetic Waves, Georgia Inst. of Tech., April 1981.
7. Parry N.S.&Davis J.L. : Ground Probing Radar Systems for Roads and Bridges, Geological Survey of Finland, Special paper 16, 1992.

(접수일자 : 2006년 3월 28일)