

레이다 탐사에 의한 小空洞의 단면형상 복원방법에 관한 연구

Radar Image Analysis for Detection of Shape of Voids
in or under Concrete Slabs

박 석 균

Park, Seok-Kyun

ABSTRACT

Deterioration of pavements or tunnels primarily from the existence of voids under the pavements or tunnel linings. To detect these voids effectively by non-destructive tests, a method using radar was proposed. In this research, the detection of shape of voids by radar image processing is investigated.

The experiments and simulation were conducted to detect voids in or under concrete pavements (or tunnel linings) with reinforcing bars. From the results, the fundamental algorithm for tracing the voids, improving the horizontal resolution of the object image and detecting shape of objects, was verified.

Keywords : Radar, Electromagnetic wave, Void, Concrete pavements, Tunnel linings

1. 서 론

도로나 터널은 국가의 대동맥에 해당하는 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.

실제로 일본에서는 1980년대 중반부터 배면공동에 의한 도로 함몰사례가 보고되고 있고, 이에 따라 1990년부터 4년동안 건설성이 주관하여 동경,후쿠오카,센다이 3개 대도시에 대한 배면공동조사를 실시한 바 있다. 그 결과, 조사연장 약 3천km에서 316개소의 공동이 발견되었다고 보고되고 있다¹⁾. 이 조사에서는 가로50cm×세로50cm×두께10cm이상의 공동에 대하여 실시되어 1m³미만의 小空洞[이하 '공동'이라 표기함]이 전체중에서 반이상을 차지하였다고 한다. 또한, 공동발견 상황시의 데이터를 비교한 결과, 발견된 공동중에서 60%이상의 개소가 전년도의 조사에서는 건전부로서 조사되었지만, 당해연도에서는 공동으로서 발견되었다고 하는 사실로부터 공동의 발생주기가 불규칙하거나 빠른 점과 조사精度에 문제가 있음을 알 수 있다.

한편, 이들 공동을 조사하는 방법으로서 1차로 공동의 유무를 레이다에 의한 비파괴검

*성희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원

사법에 의하고, 2차로 공동의 규모를 코야보링과 내시경 관찰등에 의해 개략적으로 판단하고 있다. 이 경우, 2차 조사시에는 코야보링시의 비트의 열을 식히기위해 사용하는 물이 공동부에 침투하게 되면 공동의 규모를 파악하기 어렵게 되므로, 건식코야보링방식이 사용되는데 이 때의 작업소요시간은 물을 사용하는 경우보다 수배~수십배가 더 요구된다. 따라서, 장시간의 교통통제가 불가피하게 되어 경제적 손실등의 문제점이 커진다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 레이다에 의한 비파괴검사법의 1차 조사만으로도 공동의 규모까지를 정량적으로 평가할 수 있는 해석기술의 개발에 관한 연구²⁾의 일부로서, 레이다탐사시의 가장 큰 문제점인 대상물체의 윤곽을 식별하기 어려운 문제점을 해결하여 탐사된 공동의 단면형상을 원래형상에 가깝게 복원하기 위한 연구이다.

2. 해석방법

레이다로부터 발생된 신호는 일정 빔폭으로 퍼져나가 전파되어 목표물로부터 반사해 되돌아오기 때문에 이들 신호에 의해 얻어진 화상은 실제 목표물의 형상과는 다르다. 즉, 그림 1과 같이 원통형 단면을 갖는 공동에 대한 레이다 탐사결과는 굽은선으로 표시한 바와 같이 반사해 되돌아오지만, 화면상에서는 가는 점선의 궤적과 같이 왕복 전파된 신호의 시간차로서 깊이축에 표시되기 때문에 최종적으로는 그림 2와 같이 실제 공동의 형상보다 훨씬 퍼져 나타난다. 이 때 레이다와 공동간의 위치상에서 가장 가까운 경로에 따라 반사된 신호의 강도가 가장 크게 나타나게 되는데, 이는 공동에 대한 레이다의 접근거리와 방향에 따라 그 크기(신호강도)가 변화함을 의미한다. 따라서, 역으로 화상의 濃淡 변화가 최대로 되는 방향은 레이다로부터의 신호가 공동의 임의면에 맞닿아 반사해 되돌아 오는 신호의 방향을 가리킨다고 가정하면, 다음과 같은 해석방법이 가능하다.

그림 2와 같이 얻어진 레이다 화상표시의 임의의 좌표(x_n, y_n)에 있어서 깊이 y_n 을 반경으로 하는 원을 그 좌표의 x 축(탐사표면)과 교차하는 좌표($x_n, 0$)를 중심으로하여 그린다. 이를 대칭구간의 반에 해당하는 0부터 m 까지의 구간에서 화상표시 좌표마다 구하는 일반식으로 표시하면, 다음식(1)과 같이 표시할 수 있다. 이어서, 좌표(x_n, y_n)에서의 화상의 濃淡에 대한 gradient 벡터 $G(x_n, y_n)$ 를 식(2)에 의해 구하고, 이 때의 벡터방향(기울기)도 식(3)에 의해 계산하면, 이 방향과 같은 기울기를 갖고 좌표($x_n, 0$)를 지나는 직선 y_n' 를 식(4)로부터 구할 수 있다. 즉, 원래 공동의 형상은 식(1)의 원과 식(4)의 직선이 만나는 교점에서 하향치를 선택해 나가면 복원이 가능하고 형상을 검출할 수 있다. 이 때, 해석은 일정 화상강도(신호강도)이상의 신호에 대하여 실시하면, 계산량을 줄일 수 있다.

한편, 콘크리트나 지중탐사에서와 같이 다층경계 또는 불균질한 매질내를 탐사대상으로

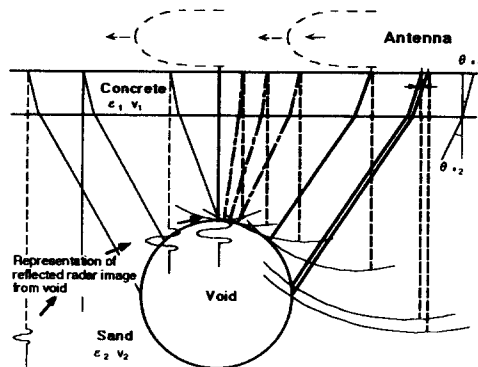


그림 1. 공동의 레이다화상 표시개념

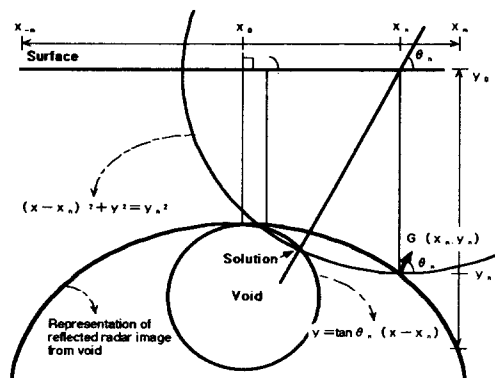


그림 2. 공동의 실행상복원개념

$$\sum_{n=0}^m (x-x_n)^2 + y^2 = y_n^2 \quad (1)$$

$$G(x_n, y_n) = \frac{\partial I(x_n, y_n)}{\partial x} / \frac{\partial I(x_n, y_n)}{\partial y} \quad (2)$$

여기서, $I(x_n, y_n)$: 화상의 濃淡강도

$$\tan \theta_n = \frac{1}{G(x_n, y_n)} \quad (3)$$

$$\sum_{n=0}^m y_n' = \tan \theta_n (x - x_n) \quad (4)$$

$$y_n'' = c_s c_r y_{n0} \quad (5)$$

여기서, c_s : 굴절영향보정계수, c_r : 사용레이더의 특성보정계수, y_{n0} : 보정전 y_n , y_n'' : 보정후 y_n

하는 경우에는는 각 경계나 매질의 변화에 따른 비유전율의 차가 생기기 때문에 이에 따른 전자파의 굴절등의 영향을 고려해야 할 필요가 있다. 이를 위해서, 식(5)와 같이 굴절영향보정계수를 정의해서 보정을 행한다. 각 경계에서의 굴절영향보정계수는 안테나의 빔폭을 알면 Snell법칙으로부터 계산할 수 있다³⁾. 또한, 실제 탐사화상에서는 매질의 분산성 및 장치의 형편등에 따라 목표물의 원래형상이나 크기대로 잘 복원되지않는 경우가 있기 때문에, 미리 안테나의 실제 빔폭이나 指向性등의 특성에 맞추어 보정을 실시할 필요가 있다. 이를 위해서는 표본목표물을 대상으로해서 복원된 결과로부터 목표물의 형상이나 크기에 더욱 가깝게 복원될 수 있도록 사용레이더의 특성보정계수를 정의해서 식(5)에 따라서 보정을 실시한다. 이상의 각 영향을 보정하면 복원화상의 收束度가 보다 향상된다.

그러나, 이상의 해석방법은 단순히 탐사에 의해 얻어진 화상 데이터로부터 직접 실시될 경우, 여러 가지 잡음등의 영향으로인해 원하는 결과를 얻기가 힘든 경우가 있다. 이 경우는 해석에 들어가기 앞서 얻어진 1차 화상데이터에 대해 각종 잡음의 영향을 제거하기 위한 기본 화상처리 과정이 필요하다. 이는 얻어진 화상데이터의 잡음 중첩등의 특성에 따라 적절한 화상필터를 선택하여 처리할 수 있다. 또한, 잡음의 제거는 탐사화상의 거리방향과 깊이방향에서 각각의 잡음의 성질차를 차동화해서 고려한 비대칭 필터를 이용하면 효과적이다.

3. 실험

실험은 크게 두가지 조건으로 나누어 실시하였다. 첫 번째는 철근콘크리트조건하의 공동탐사를 模擬하여, 그림 3의 a)b)에서와 같이 모래내에 철근과 폴리우레탄계 재료로 인공제작한 矩形공동을 각각 배치하였다. 이 경우의 철근(D22)은 상하배근형태가 각각 다른 [a]상하철근수평간격:0cm, b)상하철근수평간격:10cm] 복철근조건으로 하였고, 공동은 가로 40cm×세로40cm×두께10cm 크기의 것을 30cm 깊이에 매설한 후 탐사를 실시하였다. 이와 같이 모래를 매질로 하더라도 전자파는 매질의 비유전율에 가장 크게 영향을 받으므로 철근콘크리트 조건하와 유사한 모의실험이 가능하다. 따라서, 모래를 콘크리트의 비유전율에 비교적 가깝게 하고 매설작업에 지장이 없도록 함수율 범위를 1.7~3.4%로 하여 실험하였다. 두 번째는 실제 무근콘크리트 배면조건하에서 깊이가 다른 경우의 공동탐사를 模擬하기 위해, 그림 4의 a)b)에서와 같이 10cm두께의 콘크리트상판[W/C:55%, 슬럼프:5cm, s/a:46%, 굵은골재최대치수:20mm]을 제작한후, 그 배면(모래)에 상기와 동일한 크기의 공동을 콘크리트 배면으로부터 각각 깊이 20cm(표면으로부터 30cm)와 50cm(표면으로부터 60cm)에 매설한 후 탐사를 실시하였다.

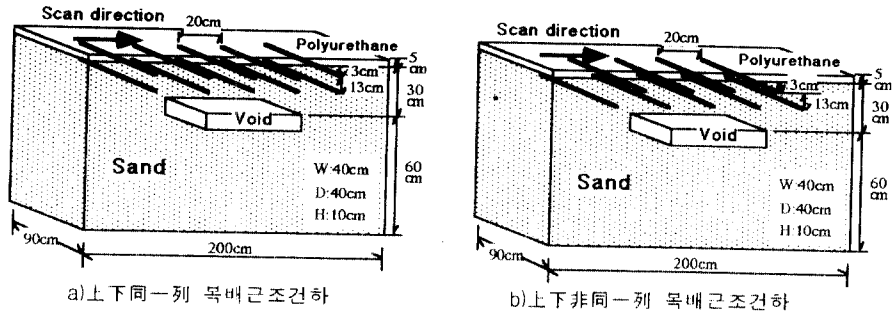


그림 3. 목철근 배근조건하의 공동탐사용 모의시험체

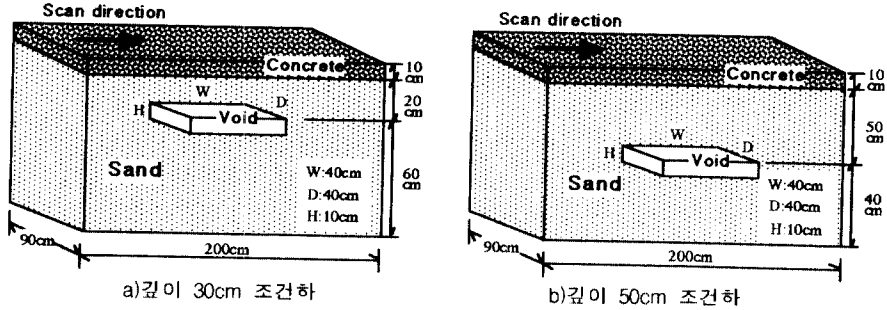


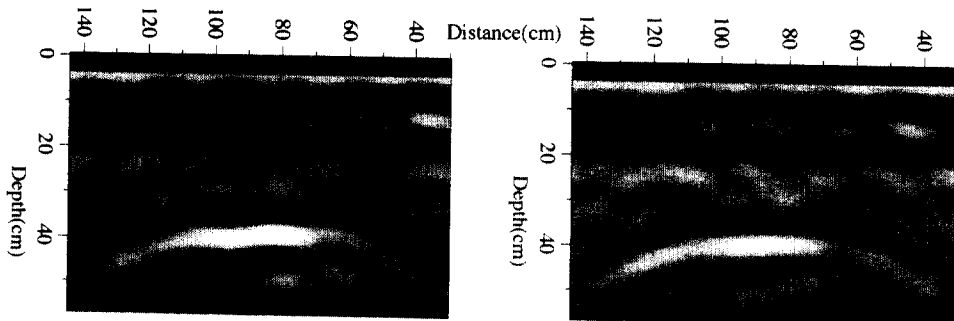
그림 4. 무근콘크리트 배면조건하의 깊이별 공동탐사용 모의시험체

탐사는 3-dipole 안테나방식을 채용하고 있는 지중탐사 레이더를 이용하였다. 본 레이더는 20MHz~1GHz의 광대역(중심주파수 약600MHz) 주파수를 이용하기 때문에 동일 중심주파수대의 비광대역 일반형 레이더에 비해 고분해능형의 특성을 가지고 있다.

4. 결과 및 고찰

이상의 실험조건에 대한 레이더 탐사결과를 각각 그림 5와 6에 나타내었고, 이들에 대하여 2절의 해석방법에 따른 해석결과를 각각 그림 9와 10에 나타내었다.

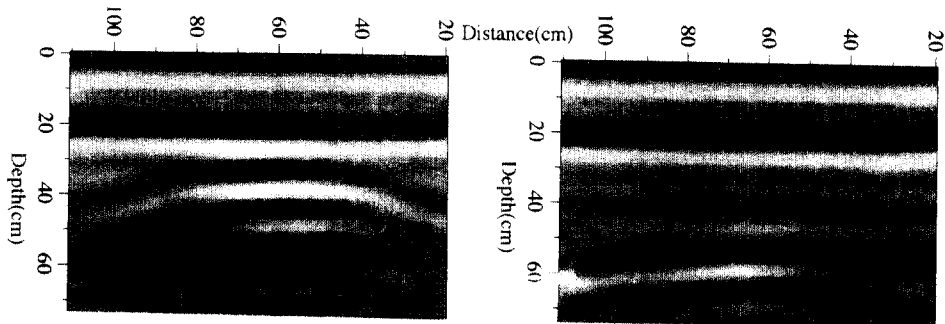
또한, 참고로 그림 3 b)를 표본으로하여 그의 탐사결과인 그림 5 b)에 있어 공동부에 대한 gradient벡터(식(2)에 의함)를 구하여 그림 7에 나타내었고, 그림 5 b)의 윤곽부 좌표



a) 上下同一列 목배근조건하

b) 上下非同ー列 목배근조건하

그림 5. '그림 3 목철근 배근조건하의 공동탐사용 모의시험체' 탐사결과



a) 깊이 30cm 조건하

b) 깊이 50cm 조건하

그림 6. '그림 4 무근콘크리트 배면조건하의 깊이별 공동탐사용 모의시험체' 탐사결과

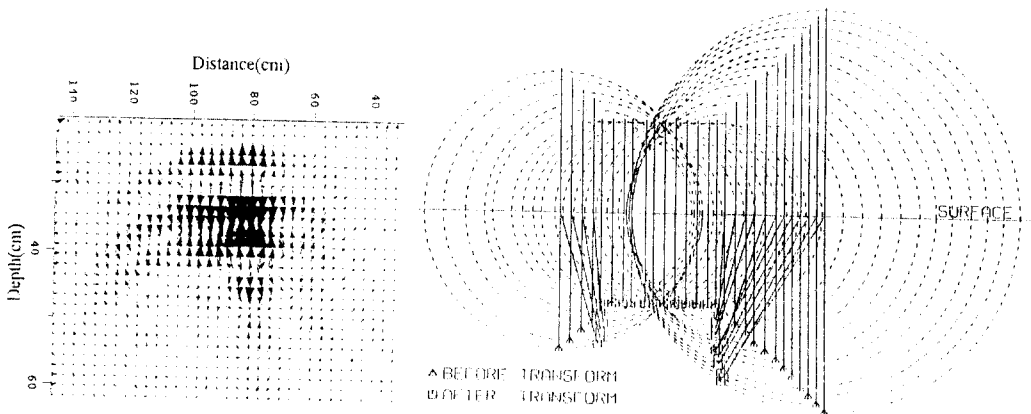


그림 7. '그림 5 b)'에 대한 gradient벡터

그림 8. 공동의 原形復元概念의 圖式化

에 대해 구한 gradient벡터를 이용하여 식(1)~식(5)의 보정단계를 거쳐 최종 계산된 결과를 도식화하여 그림 8에 나타내었다.

이상의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 제안된 공동의 단면형상 복원에 관한 신해석방법은 탐사결과만으로는 구별하기 어려운 공동의 원래형상(크기)을 예측하는데 매우 유효함을 알 수 있고, 복철근(철근경:D22,핏치:20cm이상) 조건하 또는 콘크리트 배면조건하에서도 적용이 가능함을 알 수 있다. 다만, 그림 10 b)와 같이 공동의 깊이가 60cm이상의 경우는 탐사신호의 감쇄 및 상대적인 매질의 분산성의 영향을 크게 받아 공동에 대한 원 탐사화상 자체가 희미하게 나타나고 그에 따른 해석결과도 실제 공동의 폭보다 약 10cm정도 크게 화상화되어 공동의 원래형상을 정확히 예측하기 곤란하였다. 그러나, 이 경우는 안테나의 빔폭에 비례하여 해당깊이에서의 증가된 수평분해능만큼을 보정해 줄 경우, 공동의 원래 크기에 가깝게 해석이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 그림 9에서 해당 철근의 위치를 검출하여 표시한 화상처리기술은 참고문헌 2)에 의한 것으로 본 논문에서는 따로 취급하지 않고 그 결과만을 나타낸 것이고, 그림 9와 10에서는 그림 5와 6의 탐사결과에 대하여 해석전에 미리 표면파와 콘크리트 바닥층등으로 부터의 연속 동일형태의 반사파를 제거하여 처리한 결과를 나타낸 것이다.

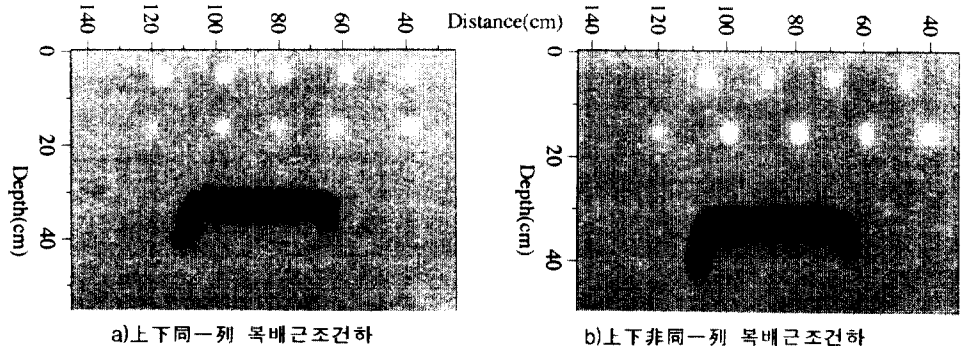


그림 9. 그림 5 목철근 배근조건하의 탐사결과에 대한 해석결과

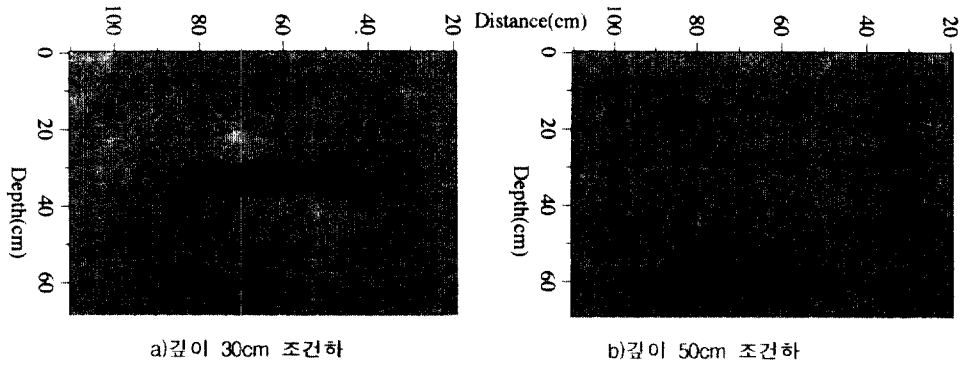


그림 10. 그림 6 무근콘크리트 배면조건하의 깊이별 탐사결과에 대한 해석결과

5. 결 론

- (1) 본 연구에서 제안된 레이더 탐사물체의 단면형상 복원에 관한 신해석방법은 20cm이하의 횡방향 목철근(D22) 또는 콘크리트 배면조건하에서의 깊이 30cm이내의 공동에 대해 적용이 가능하며, 탐사결과만으로는 구별하기 어려운 물체의 원래형상 및 크기를 예측하는데 유효하다.
- (2) 공동의 깊이가 60cm이상의 경우는 탐사신호의 감쇄 및 상대적인 매질의 분산성의 영향을 크게 받아 공동의 원래형상을 정확히 예측하기 곤란하였다. 그러나, 이 경우는 안테나의 빔폭에 비례하여 해당깊이에서의 증가된 수평분해능만큼을 보정해 줄 경우, 공동의 원래 크기에 가깝게 해석이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 村松敏光外 2 人 : 路面下地中探查技術, 日本土木学会誌, Vol.80, No.8, 1995.8
- 2) 朴錫均 : 레이더法による콘크리트背面空隙の非破壊検査, 東京大学大学院社会基盤工学専攻博士学位論文, 1996. 9
- 3) 朴錫均, 魚本健人 : 레이더法による多層콘크리트床版の非破壊検査のシミュレーション解析, 日本土木学会論文集, No.538/V-31, 1996.5