

전자파 레이더법에 의한 콘크리트 내 철근위치 및 공동형상 해석에 관한 연구

Analysis for Location of Reinforcing Bars and Detection of Shape of Voids in Concrete Structures using Electromagnetic Radar

박 석 균*

Park, Seok-Kyun

ABSTRACT

The presence of voids under pavements or behind tunnel linings results in their deterioration. To detect these voids effectively by non-destructive tests, a method using radar was proposed. In this research, not only the detection of shape of voids, but also the location of reinforcing bars by radar image analysis is investigated. The experiments and image processing were conducted to detect voids and to locate reinforcing bars in or under concrete pavements (or tunnel linings) with reinforcing bars. From the results, the fundamental algorithm for tracing the reinforcing bars and voids, improving the horizontal resolution of the object image and detecting shape of objects, was verified.

1. 서 론

도로함몰이나 터널붕괴 등의 주된 원인이 되는 배면 공동은 대형사고로 이어질 가능성이 있어, 이에 대한 효율적인 검사방법이 절실히 필요하다. 레이더법은 비접촉 주사방식으로 넓은 면적의 구조물을 빠른 속도로 측정이 가능하기 때문에 공동 등의 탐사에 매우 적절하고 유효한 비파괴 검사방법이다. 그러나, 레이더법에 의해 콘크리트 내부 또는 배면 공동을 탐사하기 위해서는 감쇠와 산란 등의 특성으로 인해 분해능이 좋은 고주파수의 사용은 곤란하고, 투과력은 좋지만 분해능이 나쁜 저주파수를 이용하여야 한다. 이로 인해 공동의 탐사는 물론 고주파수 사용시는 탐사가 비교적 용이하던 철근의 검출도 어렵게 된다. 본 연구는 이와 같은 조건하에서 저주파수를 사용한 레이더법으로 철근의 위치는 물론 공동의 규모까지를 정량적으로 평가할 수 있는 해석기술을 개발코자 하였다.

2. 해석방법

2.1 철근위치

콘크리트내의 철근과 같이 배치간격이 좁고 복철근인 경우에는 반사신호의 산란 및 간섭 등에 의해 각 철근위치로부터의 반사신호의 구별이 어려워지기 때문에, 철근의 수평 분해능을 높이기 위한 합성개구처리 등

* 대전대학교 토목·환경공학부 토목공학전공 조교수

은 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 우선 철근위치를 검출할 수 있는 최적방법을 개발하고, 이로부터 구해진 철근의 중심위치만을 가중계수(=1)에 의해 강조하고, 다른 부분은 가중계수(=0)에 의해 화상의 배경신호로서 동일화시키는 2원화 화상처리방법을 이용하여 화상상에서 철근위치를 나타낼 수 있는 방법을 이용하였다. 그림 7에는 철근직경이 22cm(D22)이고 수평배간격이 20cm인 복철근(그림 5의 배근도 참고)에 대한 측정결과를 나타내었다. 여기서, 그림 1과 같이 그림 7의 측정된 횡방향 철근과 직교방향(T방향)의 데이터 배열에 대해 각 행(깊이)마다 선도(線圖)를 그린다(여기서, 그림 1(d)는 철근위치에서 최대의 피크신호가 얻어진 부분의 행선도(行線圖)를 나타내고 있다). 이 때, 각 행별 평균치 이상에 대해서 적분을 하여, 그림 3(d)와 같이 최대의 피크신호가 얻어진 행좌표를 화면상의 철근 피복두께(수직위치)로 하고, 각 피크의 열좌표(▼표시)를 배간격(수평위치)으로 한다. 이 방법의 타당성은 철근부위만을 레이더로 측정하여 그 화상을 화상강도에 따라 3차원 화상으로 나타낸 그림 2를 참고로 하면, 철근위치상에서 최대의 화상강도(▼표시)가 얻어짐을 알 수 있다. 이상의 과정에 대한 흐름도를 그림 5에 나타내었다.

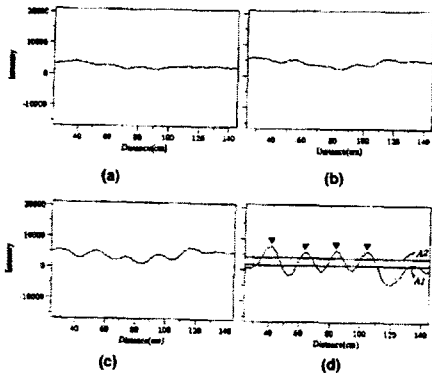


그림 1 철근탐사 레이더화상의 각 행선도(行線圖)

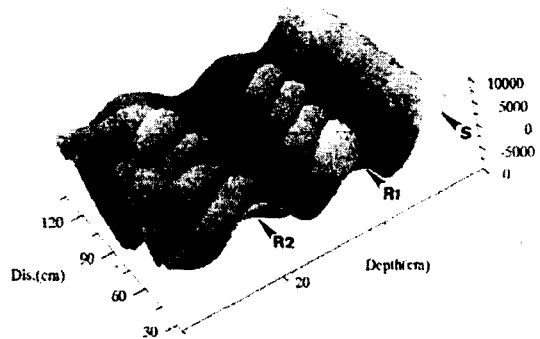


그림 2 철근탐사 레이더화상의 3차원도

2.2 공동형상

레이더로부터 발생된 신호는 일정 빔폭으로 퍼져나가 전파되어 목표물로부터 반사해 되돌아오기 때문에 이들 신호에 의해 얻어진 화상은 실제 목표물의 형상과는 다르다. 즉, 그림 3과 같이 원통형 단면을 갖는 공동에 대한 레이더 탐사결과는 굽은선으로 표시한 바와 같이 반사해 되돌아오지만, 화면상에서는 가는 점선의 궤적과 같이 왕복 전파된 신호의 시간차로서 깊이축에 표시되기 때문에 최종적으로는 그림 4와 같이 실제 공동의 형상보다 훨씬 퍼져 나타난다. 이 때 레이더와 공동간의 위치상에서 가장 가까운 경로에 따라 반사된 신호의 강도가 가장 크게 나타나게 되는데, 이는 공동에 대한 레이더의 접근거리와 방향에 따라 그 크기(신호강도)가 변화함을 의미한다. 따라서, 역으로 화상의 농담(濃淡)변화가 최대로 되는 방향은 레이더로부터의 신호가 공동의 임의면에서 반사해 되돌아오는 신호의 방향을 가리킨다고 가정하면, 다음과 같은 해석방법이 가능하다.

그림 4와 같이 얻어진 레이더 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 중심으로 하여 그린다. 이를 대칭구간의 반에 해당하는 0부터 m 까지의 구간에서 화상표시 좌표마다 구하는 일반식으로 표시하면, 식(1)과 같이 표시할 수 있다. 이어서, 좌표(x_n, y_n)에서의 화상의 농담(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 공극의 형상은 식(1)의 원과 식(4)의 직선이 만나는 교점중에서 하향치를 선택해 나가면 복원이 가능하고 형상을 검출할 수 있다. 이 때, 해석은 일정 화상강도(신호강도)이상의 신호에 대하여 실시하면, 계산량을 줄일 수 있다.

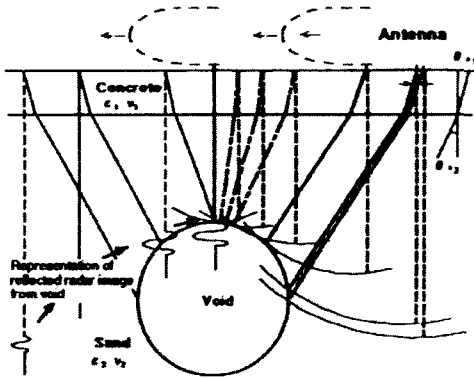


그림 3 원통형 공동의 레이더화상 표시개념

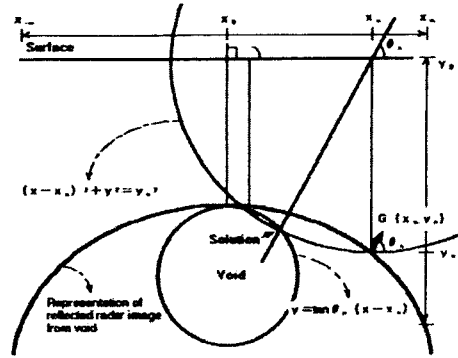


그림 4 원통형 공동의 실제영상 복원개념

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

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

여기서, $I(x_n, y_n)$: 화상의 농담(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

한편, 콘크리트나 지중탐사에서와 같이 다층경계 또는 불균질한 매질내를 탐사대상으로 하는 경우에는 각 경계나 매질의 변화에 따른 비유전율의 차가 생기기 때문에 이에 따른 전자파의 굴절 등의 영향을 고려해야 할 필요가 있다. 이를 위해서, 식(5)와 같이 굴절영향보정계수를 정의해서 보정을 행한다. 각 경계에서의 굴절영향보정계수는 안테나의 빔폭을 알면 Snell법칙으로부터 계산할 수 있다. 또한, 실제 탐사화상에서는 매질의 분산성 및 장치의 형편 등에 따라 목표물의 원래형상이나 크기대로 잘 복원되지 않는 경우가 있기 때문에, 미리 안테나의 실제 빔폭이나 지향성(指向性) 등의 특성에 맞추어 보정을 실시할 필요가 있다. 이를 위해서는 표본 목표물을 대상으로 하여 복원된 결과로부터 목표물의 형상이나 크기에 더욱 가깝게 복원될 수 있도록 사용 레이더의 특성보정계수를 정의해서 식(5)에 따라서 보정을 실시한다. 이상의 각 영향을 보정하면 복원화상의 수축도(收束度)가 보다 향상된다.

그러나, 이상의 해석방법은 단순히 탐사에 의해 얻어진 화상 데이터로부터 직접 실시될 경우, 여러 가지 잡음 등의 영향으로 인해 원하는 결과를 얻기가 힘든 경우가 있다. 이 경우는 해석을 들어가기에 앞서 얻어진 1차 화상데이터에 대해 각종 잡음의 영향을 제거하기 위한 기본 화상처리 과정이 필요하다. 이는 얻어진 화상데이터의 잡음 증척 등의 특성에 따라 적절한 화상필터를 선택하여 처리할 수 있다. 또한, 잡음의 제거는 탐사화상의 거리방향과 깊이방향에서 각각의 잡음의 성질 차를 차등화해서 고려한 비대칭 필터를 이용하면 효과적이다. 이상의 과정에 대한 흐름도를 그림 5에 나타내었다. 또한, 상기의 철근위치 선정 및 공동형상 복원 해석은 각각의 해석알고리즘에 의해 해석한 후, 해석된 각 결과를 합성하여 한 화상에 나타낼 수 있다. 그 전체과정에 대한 흐름도도 그림 5에 나타내었다.

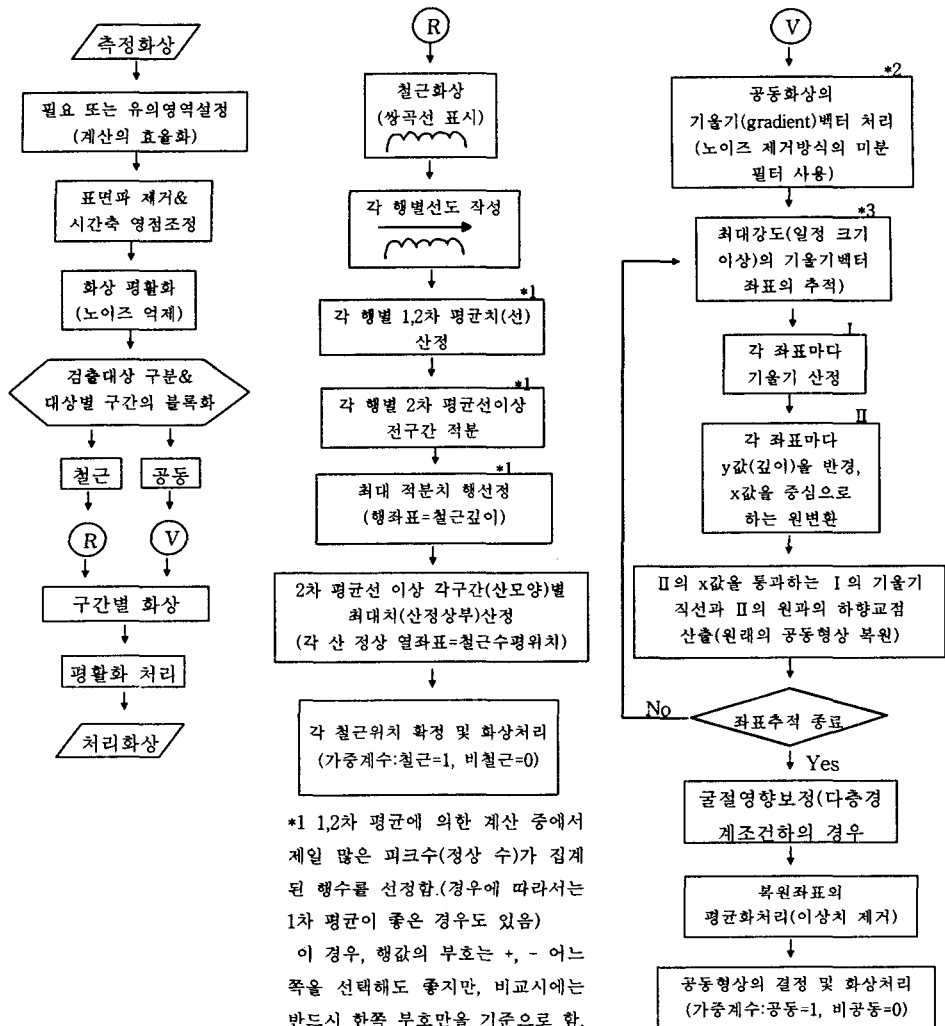


그림 5 철근위치 선정 및 공동형상 복원을 위한 해석 알고리즘 및 흐름도

3. 실험

상기 해석방법을 적용할 시험체는 철근콘크리트조건하의 공동탐사를 모의하여, 그림 6에서와 같이 콘크리트와 비유전율이 거의 같은 모래를 대상 전파매질로 선정하고, 그 내부에 철근과 스티로폼 재료로 인공제작한 구형(矩形) 공동을 배치하였다. 이 경우의 철근(D22)은 복배근으로 하여 상하 배근 모두 각 철근의 수평간격을 20cm로 하고, 상부근과 하부근은 수평 10cm의 차로 서로 엇갈리게 배치하였다. 공동은 가로40cm×세로40cm×두께10cm 크기의 것을 표면으로부터 30cm 깊이에 매설한 후 탐사를 실시하였다.

이와 같은 조건하에서 탐사 레이더장비는 중심주파수 600MHz의 지중탐사용 레이더를 이용하여 측정하였다.

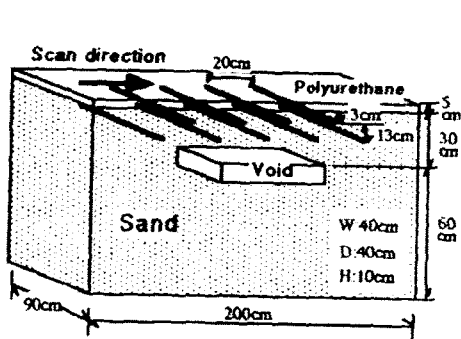


그림 6 복철근 및 공동탐사용 모의시험체

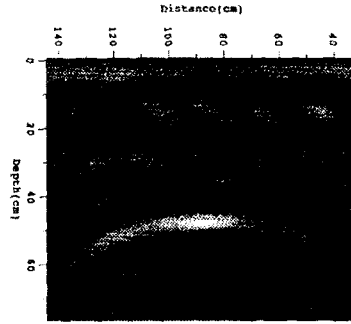


그림 7 「그림 6」 조건 시험체의 레이더 탐사화상

4. 결과 및 고찰

이상의 실험조건에 대한 레이더 탐사결과를 그림 7에 나타내었다. 철근위치 선정을 위한 해석과정은 상기 2.1항에서 나타낸 바와 같고, 그 결과를 그림 10에 나타내었다.

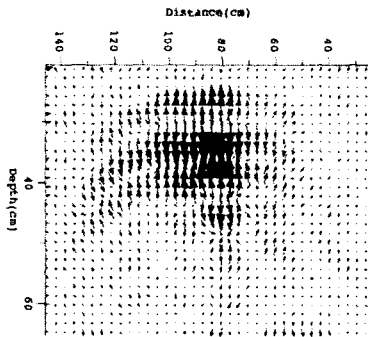


그림 8 「그림 5」의 공동부 화상에 대한 기술기 벡터

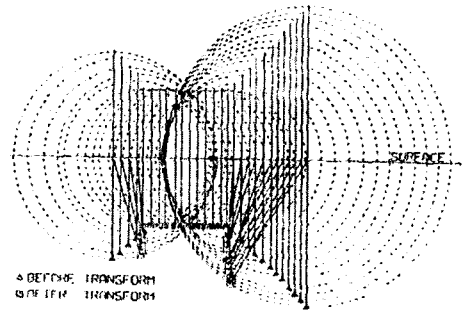


그림 9 공동형상 복원과정의 도식화

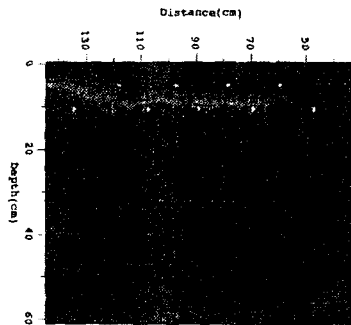


그림 10 「그림 7」 화상에 대한 해석결과(철근위치 선정 및 공동형상 복원결과)

또한, 공동형상 복원을 위한 해석과정 상에서, 공동부에 대한 기울기(gradient)백터를 구하여 그림 8에 나타내었고, 이의 결과를 이용하여 식(1)~식(5)의 보정단계를 거쳐 공동형상을 복원하는 과정을 도식화하여 그림 9에 나타내었다.

이와 같은 과정을 거쳐 그림 10에 철근위치 선정결과와 더불어 공동형상 복원의 최종 해석결과를 나타내었다. 이상의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 제안된 철근위치 선정 및 공동의 단면형상 복원에 관한 신해석방법은 탐사결과만으로는 구별하기 어려운 철근위치 및 공동의 원래형상(크기)을 예측하는데 매우 유효함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 제안된 레이더 탐사시의 철근위치 선정 및 단면형상 복원에 관한 신해석방법은 중심주파수 600MHz인 지중탐사용 레이더를 사용할 경우, 수평배근간격 20cm이상의 횡방향 복철근(D22)과 깊이 30cm이내의 공동에 대해 적용이 가능하며, 탐사결과만으로는 구별하기 어려운 철근의 위치 선정 및 공동의 원래형상 및 크기를 예측하는데 유효함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 해석은 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Seok-Kyun Park, Taketo Uomoto : Radar Image Processing for Detection of Shape of Voids and Location of Reinforcing Bars in or under Reinforced Concrete, The Journal of Insight, The British Institute of Non-destructive Testing, 1997.7
2. Seok-Kyun Park, Taketo Uomoto : Estimation of The Volume of Three-Dimensional Subsurface Voids Using Three-dipole Radar, Concrete Library International, No.33, 1999.6