

전자파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사

Nondestructive Testing of Concrete Structures Using Electromagnetic Wave Techniques



박석균*



임흥철**

1. 머리말

전자파시험법은 대부분 비접촉 주사방식에 의한 비파괴 검사기술로서, 현재는 물론 앞으로도 가장 주목 받는 검사기술이 될 것이다. 왜냐하면 다른 비파괴 검사법은 대부분이 측정 센서와 피측정물과의 접촉상태가 주요한 측정 영향인자로서 작용하게 되므로, 이에 대한 별도의 사전 준비작업이 필요하여 많은 측정 소요시간과 편차 등을 유발하게된다. 특히, 도로나 터널 등 넓은 면적을 갖는 구조물의 조사시에는 교통통제 등의 문제로 보다 신속한 검사기술의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 전자파 시험법에는 레이더법, 방사선법, 전자유도법, 적외선법 등이 같은 범주에 속해 있지만, 이들중에서도 상기의 추세로 미루어 레이더법과 적외선법이 최근 가장 크게 각광받는 검사기술로서 주목되고 있고, 그 중에서도 내부탐사가 가능한

레이더법에 대한 기대가 갈수록 커지고 있다.

본 고에서는 따라서 이러한 전자파시험법의 종류별 측정특성과 국내현황에 대하여 레이더법에 가장 큰 비중을 두었고 다음으로 적외선법에 대해서 간단한 국내현황과 적용사례를 중심으로 기술하였으며, 이들 기술에 대한 최근의 신기술 현황에 대하여도 간략히 소개하였다. 아울러 전자파의 컴퓨터 모델링 방법도 기술하였다.

2. 전자파시험법 종류별 측정특성과 국내현황

2.1 레이더법

레이더는 본래 2차대전중에 영국이 독일의 공습에 대비하기 위해 공중의 비행물체를 찾을 목적으로 개발한 기술이다. 그러나, 1960년대에 들어서는 베트남 전쟁중에 미군이 적의 지중 터널을 발견하지 위해

* 정희원, 대전대학교 토목공학과 전임강사

** 정희원, 연세대학교 건축공학과 조교수

여 지중탐사용 레이더개발에 적극적으로 앞장서게 되었다. 특히, Gabilla 등의 연구¹¹⁾에 의해, 지중통신에 있어 발신자와 수신자의 상대거리에 따라 변화가 있긴 하지만, 개략 0~10kHz 사이의 저주파수창(Low Frequency Window) 및 10MHz 이상(실제로는 수 MHz이상 부터)의 고주파수창(High Frequency Window)¹²⁾에서 전파손실이 작게되는 주파수영역이 존재하는 것이 알려지고부터 주로, 수 MHz~수백 MHz의 고주파수를 이용한 레이더가 지중탐사용으로 폭넓게 활용되기 시작하였다. 근래에는, 1GHz대의 분해능이 좋은 고주파수의 레이더가 등장하여 탐사도 지중분야에 국한되지 않고, 콘크리트 구조물 등의 분야에 까지 적용되기에 이르렀다.

그림 1에는 이들 각 레이더의 특성을 간단히 비교 정리하여 나타내었다. 본 그림에서는 각 경우의 측정 원리가 근본적으로 같으나(다만, 공중레이더의 경우는 대상 목표물이 움직임), 지중과 콘크리트내를 탐사하는 경우가 공중에서보다 안테나의 지향각이 크고 감쇄의 영향도 크며, 전파매질도 불균질·반공간인 점등으로 미루어 탐사에 많은 제약이 수반 됨을 알 수 있다. 따라서, 보다 정확한 탐사를 위해서는 안테나와 신호처리기술 등의 개발연구가 한층 더 활발히 진행될 필요가 있다.

그러면, 이하에 현재 지중 및 콘크리트내 탐사에 활용이 가능한 레이더 측정 시스템에 대한 대표적 기능과 그 종류 등에 대하여 논하기로 한다.

2.1.1 측정시스템의 신호처리기능

앞에서도 언급하였듯이 지중 및 콘크리트내 탐사용 레이더는 공중 레이더에 비해 많은 제약을 갖고 있다. 즉, 감쇄가 큰 점 이외에도 매질 표면에서의 반사파의 방해(경계면과 안테나의 정합(整合)문제), 주파수 특성에 의한 전파(傳播)중 파형의 흐트러짐(대상물의 관독이 곤란), 매질의 불균일성(목표물의 구별이 곤란), 좁은 펄스폭의 전파이용을 위한 넓은 주파수대 사용으로 안테나의 공진현상(펄스폭의 진동) 발생 등의 문제로 인해 얻어진 측정화상의 질이 좋지않아 물체의 식별 등 신호해석상의 어려움이 많다. 이와 같은 H/W상의 문제를 S/W상에서 해결하기 위해 현재 레이더 측정 시스템에서 채택되고 있는 대표적인 신호처리기능은 다음과 같은 것이 있다.

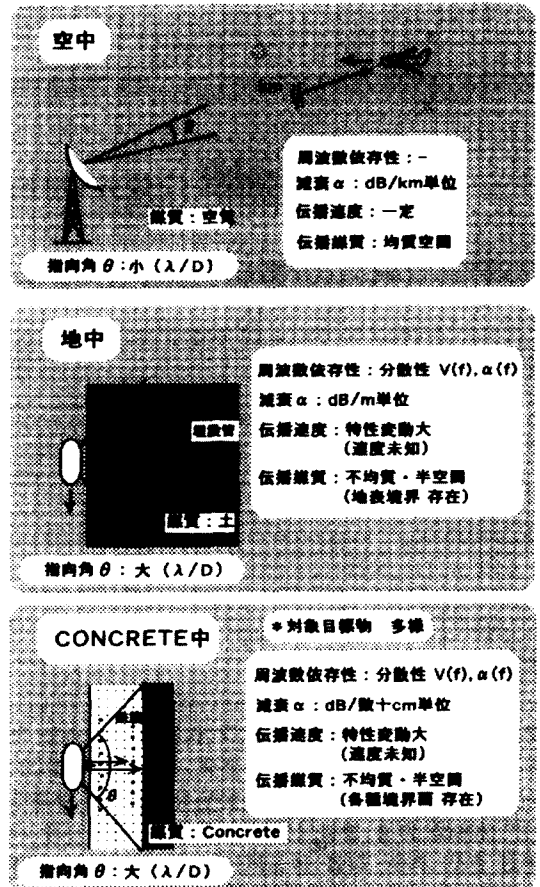


그림 1 각종 용도별 레이더의 특성비교

1) STC (Sensibility Time Control)

지중 및 콘크리트내에 전자파를 송신하여 반사되는 신호는 일반적으로 거리(또는 깊이)에 따라 지수함수적으로 감쇄한다. 때문에 비교적 깊게 매설된 물체로 부터의 반사신호, 즉 수신과형중에서 수신까지의 시간이 긴 부분에서는 수신파의 진폭치가 작게 나타나. 이 부분에서의 신호의 관독이 상대적으로 어렵게 된다.

이와 같은 현상을 막기 위하여 사용되고 있는 기능이 STC이다. STC는 S/W상에서 행하는 신호증대법으로서 레이더로 측정된 신호에 STC곡선을 승산하여 약해진 신호를 증폭시킨다. 이와 같은 감쇄보정용 STC곡선에는 그림 2 (a)에서와 같은 쌍곡선형과 (b)에서와 같은 S자(Sigmoid)형 함수가 많이 쓰인다. 여기서, S자형 함수의 경우를 예로들면, 그림 2

(b)상에서 (i,j) 점을 지나는 S자형 곡선을 정하여 이를 $STC(t)$ 로 정의한 후 얻어진 시간영역의 반사신호 $f(t)$ 에 대해서 다음식(1)과 같은 승산(乘算)처리를 행하는 것이다.

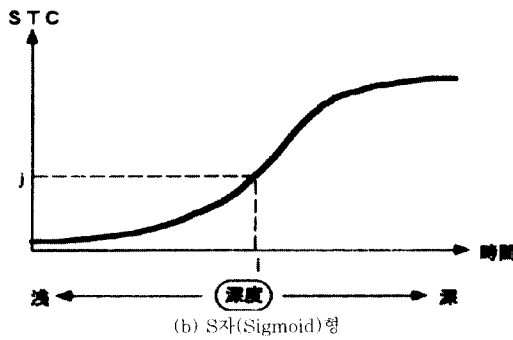
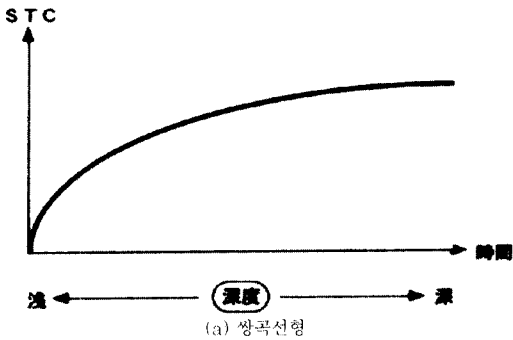


그림 2 STC 함수

$$G(t) = f(t) STC(t) \quad (1)$$

2) 차(差)처리

본 처리는 표면파나 배경신호를 제거하기 위한 기능이다. 레이더 화상에서는 항상 얇은 깊이 위치에 수평방향으로 일정한 형태의 반사파가 존재하게 되는데, 이는 송수신파의 직접결합(송신안테나로부터 수신안테나로 직접 파가 흘러 들어가는 것)과 측정 대상물 표면에서의 반사 등에 의해 발생하는 것이다. 따라서 이러한 성분을 제거하기 위해서는 수평방향의 평균치를 구해 이를 각각의 수신파형으로부터 빼주면 제거가 가능하게 되어, 특정 목표물로부터의 신호판별이 훨씬 용이해진다. 동일 기능으로서 공간 필터처리도 있다.

또한, 제조업체에 따라서는 기타 불요신호를 제거하기 위한 적(積)처리, 근접 매설물을 식별하기 위한

다계조(多階調) 처리, 매설물을 식별하기 위한 피크 처리 등을 실시하고 있다.

3) 펄스압축과 합성개구(合成開口, Synthetic aperture)처리

송신 안테나로부터 송출된 전자파는 그림 1에서와 같이 안테나의 지향각(θ)에 따라 주위로 퍼져 전파된다. 때문에 탐사대상 목표물(또는 일반물체)이 안테나 바로 아래에 위치하지 않더라도 목표물로 부터의 반사파가 얻어진다. 이 때 대상 목표물로부터의 신호는 안테나를 수평방향으로 이동시켜 나갈 경우, 안테나의 지향각으로 퍼져 나간 송출 신호중에서 제일 먼저 반사되어 온 신호부터 관측되기 시작한다. 따라서, 단면관측 패턴에서는 목표물(여기서는 매설관 또는 철근과 같이 단면상에서 한 점으로 표시가능한 선상(線狀)물체로 가정)로부터의 반사파는 쌍곡선상으로 된다. 그래서, 이 현상을 역으로 이용해서 쌍곡선상의 패턴으로부터 목표물의 반사파를 한 점으로 집중시키게 할 수가 있는데, 이를 합성개구처리라 한다.

최근에는 그림 3에 나타낸 바와 같이 전자파를 한

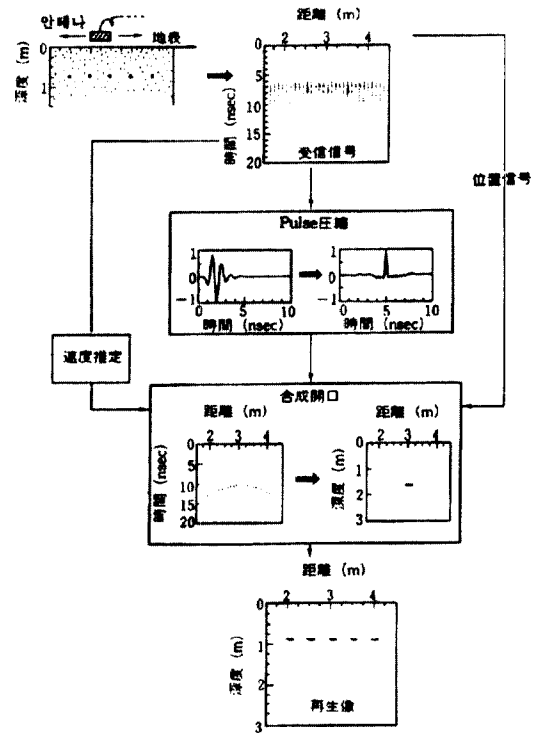


그림 3 펄스압축과 합성개구처리를 조합시킨 처리예

점에 집중시키기 직전에 수신파를 펄스압축(수신파형의 시간축 방향 파형의 호트리짐을 감소시키는 신호처리기술)시켜서 시간축상의 정도를 향상시키는 방법도 검토되고 있다. 그 결과, 합성개구처리후의 단면관측 패턴에서 목표물로부터의 반사파가 종래보다도 한 점에 집중되어 합성개구처리 효과가 향상되고 있다. 또, 합성개구처리 조건을 복수로 처리하여 이들을 비교한 후 목표물의 위치정도(精度)를 향상시키려고 하는 것과 같은 고도의 합성개구처리법도 검토되고 있다. 그러나, 이 처리방법은 대상물체간의 반사파의 중첩영향이 비교적 적은 지중 매설관 탐사시에 주로 효과적이다.

4) 기타

상기의 각 처리기능이외에도 목표물을 횡단하는 방향의 단면정보를 목표물의 길이방향으로 여러 단면 나누어 측정 한 후, 이들을 평면표시 혹은 다단면 투시해서 한층 정도높게 탐지할 수 있는 다단면(多断面)처리법이 검토되고 있다.

그 이외에도 주파수 해석처리를 이용한 패턴인식 기술로서, 목표물로부터의 주파수해석을 미리 실시해 두고, 목표물 이외의 주파수분포와의 차이를 이용하여 목표물만을 선별, 그 패턴을 인식하는 고도의 신호처리기술도 개발되고 있다.

그러나, 국내의 경우, 이상의 각 처리기능들이 콘크리트 탐사용 레이더에서 활용되고 있는 것은 주로 1)항의 STC기능과 2)항의 차처리기능 등에 국한되고 있어, 이분야의 지속적인 연구개발노력이 필요하다 하겠다.

2.1.2 펄스레이더와 FMCW레이더

레이더방식은 크게 펄스레이더와 FMCW레이더 방식으로 나눌 수 있다. 다음은 이들 두방식의 차이점을 비교검토해 본다.

펄스레이더방식은 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 레이더방식으로서, 매우 짧은 시간에 전자파 펄스를 안테나로부터 발생시켜 측정대상 매질로부터의 반사정보를 그대로 시간대의 화면정보로 이용하고 있다. 이에 반해, FMCW레이더방식은 주파수 변조된 연속파를 안테나로부터 발생시켜 그 주파수영역 데이터를 시간영역 데이터로 변환하는 과정을 거쳐

측정대상 매질로부터 반사정보를 얻고있다.

지중이나 콘크리트내의 레이더탐사에서는 대상매질의 감쇄가 크기 때문에 유효탐사심도는 수m~수십cm이내인 경우가 많다. 이 거리를 전파(電波)의 매질내 전파(傳播)속도에 의해 시간대로 환산하면 수~수백ns라고 하는 지극히 짧은 시간에 해당한다. 그러나, 이 시간대에 존재하는 이들매질로부터의 반사신호를 일반 A/D변환기를 이용해서 데이터로서 직접 수집하는 것은 곤란하다. 그래서, 이러한 문제를 해결하기 위해서 펄스레이더방식에서는 그림 4에서 나타낸 바와 같은 샘플링방식을 이용해서 시간지연을 통하여 화면상에 표시하고 있다.

이에 반해, FMCW레이더방식에서는 그림 5에서 나타낸 바와 같이 발신시간이 펄스레이더와 달리 길기 때문에 데이터의 수집에 별도의 처리가 요구되지 않기 때문에 1초간에 수집가능한 데이터수는 펄스레이더방식보다 많고 계측속도도 상대적으로 빠르다. 그러나, 이러한 특성상의 차이로인해, 얻어지는 화상에 있어서는 펄스레이더방식에서 보다 불요신호가 많은 편이어서, 해석상에 보다 전문기술이 요구되는 단점이 있다.

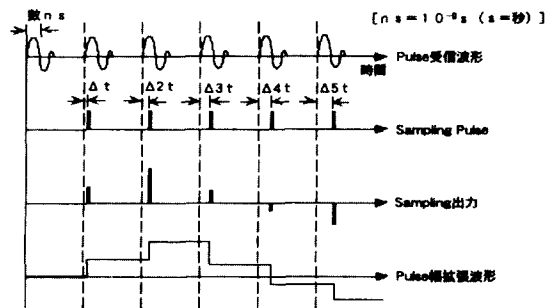


그림 4 펄스레이더의 데이터 샘플링

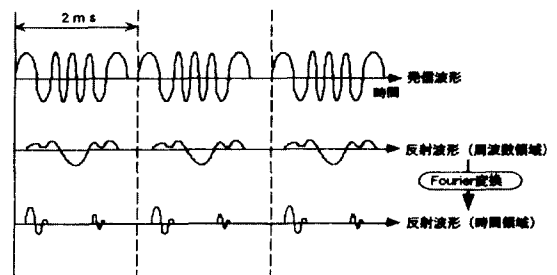


그림 5 FMCW레이더의 데이터 샘플링

이상, 이들 두가지 레이더방식의 주요특성을 표 1에 비교하여 정리하였다.

표 1 펄스레이더와 FMCW레이더의 특성비교

| 구분 | 펄스레이더 | FMCW레이더 |
|----------|--|---|
| 발신방식 | 매우 짧은 시간에 전자파펄스를 안테나로부터 발생시킴. | 주파수 변조된 연속파를 안테나로부터 발생시킴. |
| 데이터 처리방식 | 매질내로부터의 반사정보로부터 깊이와 상태를 화면에 표시함. 반사정보와 화면정보는 같음. | 매질내로부터의 반사정보는 연속적이고, 주파수영역 데이터이기 때문에 시간영역 데이터(펄스레이더와 등가인 것)로 하기 위해서는 Fourier 변환에 의해 펄스데이터로 가공함. |
| 계측속도 | 순간적인 현상을 취급하고 있기 때문에 데이터 수집에 별도의 수단이 필요하여 시간이 걸림. 계측속도*가 상대적으로 낮음. | 하나의 데이터에 대한 발신시간이 펄스레이더에 비해 길기 때문에 반사정보를 그대로 기억할 수 있음. 계측속도*가 상대적으로 빠름. |
| 주파수대 | 펄스형상 및 발신 안테나에 따라 주파수대가 결정됨. | 발신회로에서 주파수대 및 강도를 임의로 설정가능함. |

*계측속도)

· 일반 펄스레이더방식의 펄스반복회수는 1초당 최고 10만회 정도이고, 1파형을 구성하는 데이터수를 1,000개라 하면, 1초간에 10만(회)/1,000(개) = 100, 즉 100개의 파형계측이 가능하다.

계측속도 $V_p = 6 \times 60 \times 60 \times 100 \times 10^3 = 21.6(\text{km/hr})$

· FMCW레이더방식에서는 1초간에 500파형의 데이터 계측이 가능하고, 계측파치를 6cm라 하면

계측속도 $V_r = 6 \times 60 \times 60 \times 500 \times 10^3 = 108(\text{km/hr})$

2.1.3 패러렐(Parallel)모드와 3소자(素子) 다이폴(Dipole)모드

레이더 장비에는 안테나의 배치형태와 사용방식에 따라 패러렐모드와 3소자(소자수를 달리할 수도 있으나 여기서는 3개로 함) 다이폴모드로 나눌 수 있다. 다음은 이들의 주요특성을 간단히 비교검토해 보기로 한다.

그림 6(a)와 같이 발신기와 수신기가 평행인 패러렐모드(일반적으로 가장 많이 쓰임)의 안테나를 사용하는 방식에서는 전파의 편파방향이 고정되어 있기 때문에 전계(電界)벡터의 방향과 매질물(여기서는 매질판이나 철근같은 선상물체로 함)의 방향이 일치하는 경우에는 큰 반사파가 얻어지지만, 서로 벗어날수록 반사파가 얻어지지 않게 된다. 따라서, 매질물의 방향을 측정하기 위해서는 측정표면을 중심으로 일정간격을 둔 방위각별 측정횟수가 요구된다.

한편, 그림 6(b)와 같이 3소자의 3편파성분 안테나를 사용하는 3소자 다이폴모드에서는 매질물이 어느쪽 방향을 향하고 있더라도 계측된 3개의 서로 다른 편파면에 대한 산란파의 어느쪽 파형에도 매질판

의 반사를 포함한 신호가 포함되어지기 때문에 방향성에 의존하지않는 계측이 가능하게 된다. 즉, 1회의 측정만으로도 각 방위별 데이터가 산란행렬에 의한 벡터 계산으로부터 얻어져, 매질물의 방향까지도 예측할 수 있게 된다.

이 3편파성분 안테나는 그림 7에서와 같이 동일 평면상에서 벡터실효장이 같은 3개의 안테나가 서로 120°의 각도를 이루도록 구성되어있다. 각 안테나소자는 전파의 누전이 없도록 서로 간막이되어져 상호작용이 없도록 되어있다. 그래서, 먼저 120°간격의 양안테나를 1조씩 송신과 수신부로 구성된 후, 3개의 안테나소자중 한쪽을 송신회로와 접속하고 수신안테나로부터 120°회전한 안테나소자를 수신회로와 접속하며 나머지 안테나소자를 접지상태로 둔다. 그렇게 한 후 안테나계를 각각 순차적으로 조합시켜 교대로 바꿔나가면서 측정하면, 합계 3조의 데이터로부터 산란행렬이 얻어진다. 이들 산란행렬은 2계의 대칭텐서로 되기 때문에 안테나의 이동궤적을 알면 임의곡선상의 동좌표계로부터 정좌표계로의 변환이 가능하게

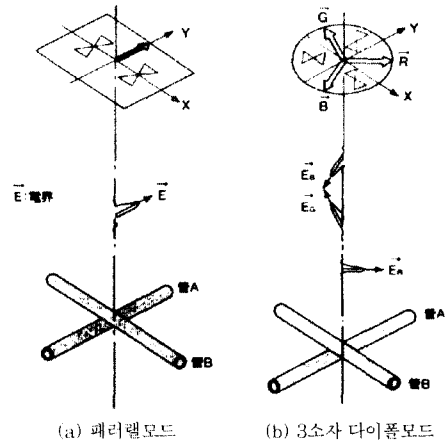


그림 6 안테나 모드별 계측개념

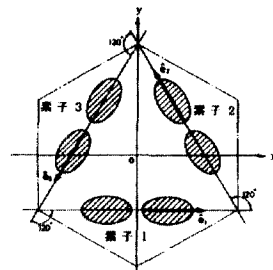


그림 7 120° 회전대칭인 3소자 다이폴 안테나의 배치형태

되는 원리를 이용하고 있다.

2.1.4 측정상의 주요특성

지중 및 콘크리트내 레이더 탐사에서 데이터 측정 시에 특히 알아두면 유익한 몇가지 특성에 대하여 고찰해 보기로 한다.

1) 레이더의 분해능

일반적으로 레이더의 분해능이라고 하는 것은 예로서 2개의 접근한 물체를 2개로 식별하는 능력을 말하지만, 지중 및 콘크리트내 탐사 레이더의 경우는 다음과 같은 특징을 갖는다. 참고로, 여기서 ϵ_r 은 지중 또는 콘크리트내의 비유전율(比誘電率)을 의미하는 것으로 하고, 실제로 이들 각 매질의 비유전율 범위는 다르나 변수는 같이 표기하기로 한다.

- 지중 또는 콘크리트 내에서의 전파의 속도는 공중의 $1/\sqrt{\epsilon_r}$ 배로 되기 때문에 같은 펄스폭이면 거리방향의 분해능은 공중의 $\sqrt{\epsilon_r}$ 배 향상된다.
- 지표면 또는 콘크리트표면 가까이 놓여진 안테나의 지중 또는 콘크리트내로의 방사패턴은 자유 공간에서의 방사패턴보다 좁아진다.

지금 거리방향상에서 2개의 물체의 간격을 δR 이라고 하고, 수신파형은 주파수 f_c 의 캐리어를 갖는 폭 Δt 의 펄스로하여, 2개의 물체에 의한 에코의 지연시간을 각각 τ_1, τ_2 라 하면

$$\tau_1 = 2R_1 / v_{gc}$$

(여기서, v_{gc} 는 지중 또는 콘크리트내에서의 전파의 전파속도),

$$\tau_2 = 2(R_1 + \delta R) / v_{gc} \quad (2)$$

가 되므로, 이들 간의 시간차 δt 는

$$\delta t = \tau_2 - \tau_1 = 2\delta R / v_{gc} \quad (3)$$

로 된다. 여기서, 거리분해능을 ΔR 이라 하고, 이를 시간차 δt 가 펄스폭 Δt 와 같게 되는 거리로 정의하면, $\delta t \rightarrow \Delta t, \delta R \rightarrow \Delta R$ 로 두어

$$\Delta R = v_{gc} \Delta t / 2 \approx 1/\sqrt{\epsilon_r} \cdot c \Delta t / 2 \quad (4)$$

(여기서, c 는 빛의 속도)

가 얻어진다.

상식에서 제2항은 자유공간(공중)에서의 분해능을 나타내므로 상기의 첫 번째 특징이 성립한다.

예를 들면, 펄스폭 $\Delta t = 1ns$ (주파수 1GHz)의 분해능을 구하면 공중에서는 $\Delta R = 15cm$ 이지만, $\epsilon_r = 12$ 인 건조한 콘크리트내에서는 그 $1/\sqrt{12}$ 배, 즉 $\Delta R = 4.3cm$ 가 된다. 그러나, 실제로는 지중이나 콘크리트내의 전파특성은 현대역이므로 파형이 호트러져 분해능은 이보다 훨씬 좋지 않다. 또한, 이들 매질 내에서의 전자파는 감쇄정수 $\alpha(1/\sqrt{\epsilon_r})$ 에 비례)와 전파의 진행방향거리 z 에 따라 지수함수적($e^{-\alpha z}$)으로 감쇄되며 전파되므로 공중전파에 비해 감쇄의 영향도 크다.

2) 링잉(Ringing)

레이더 측정 데이터를 관찰해 보면, 반사파가 일정 간격까지 다중으로 계속해서 나타나는 것을 알 수 있는데, 이러한 현상을 소위 링잉(Ringing)이라고 한다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 다양한 원인에 의한 것으로 사료되지만, 주된 원인은 레이더내의 시스템을 통과해서 송출된 신호가 그 과정에서 각 요소의 비선형성과 주파수특성에 따라 변형되어 나타나기 때문이다. 이를 간단히 도식화해서 나타내면 그림 8과 같다. 즉, 레이더의 펄스가 특정 주파수대역을 갖는 안테나 등의 시스템계에 들어오면 그 시스템계의 고역통과(High pass: f_H)와 저역통과(Low pass: f_L) 필터의 주파수특성에 따라 이 계를 통과하면서 파형이 변형되어 생기는 현상이다.

이외에도 링잉이 발생하는 이유에는 송신기와 송신안테나, 수신기와 수신안테나 등의 미스매칭 또는 이들 양자간 신호의 다중반사, 그리고 송신안테나와 측정표면간의 왕복 등에 따라서도 발생한다. 따라서, 이 현상은 이와 같이 다양한 원인에 의하므로 완전한 제거는 어렵고, 다만 시스템계의 H/W의 개선에 의해서 어느 정도 제어가 가능할 것으로 보인다.

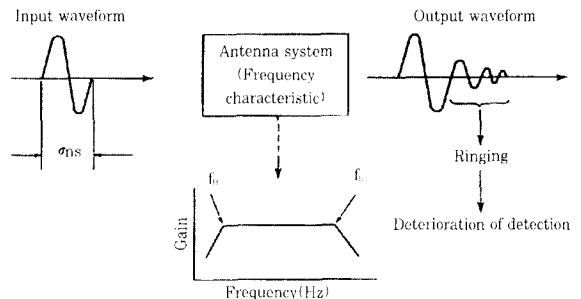


그림 8 레이더 장치내 시스템계에서의 링잉(Ringing)의 발생과정

2.1.5 국내현황 및 적용사례

다음은 레이더 검사기술에 대한 개략적인 국내현황 및 적용사례를 알아보고자 한다. 적용사례에서는 비교적 많이 공개된 일반적인 내용보다 공동 등의 탐사예나 가능성이 있는 신기술의 적용예를 중심으로 소개하였고, 이상의 원칙은 적외선 검사법에서도 마찬가지로 하였다.

1) 사용장비현황

현재 국내에서 주로 사용되고 있는 지중 또는 콘크리트내 탐사용 레이더 장비로는 다음과 같은 것들이 있다. 이를 각 제조업체 로 분류하여 간단한 특징위주로 기술하였다.

(1) SIR 시스템 (미국 GSSI)

임펄스방식의 GPR(Ground Penetrating Radar)탐사장비로서, 미국 Geophysical Survey System Inc. 제품으로 GPR장비로는 세계적으로 널리 보급되어 있고 가장 지명도가 높은 제품이나, 가격이 고가이다. 주로 지중탐사용 레이더이나, 사용안테나에 따라 철근탐사 등 다용도의 활용이 가능하다. 크게 SIR-10과 SIR-2(포터블형) 시스템이 시판되고 있다. 국내에는 콘크리트 구조물 진단분야 등에 약 10대 이상이 보급되어 사용되고 있는 것으로 추산된다. 디지털 신호처리 기법을 응용한 'RADAN' 이라고 하는 데이터 분석용 S/W가 있어 다각적 데이터 분석 및 판독이 가능하다.

다음 표 2에는 참고로 시판중인 각 안테나 타입과 중심주파수대별 용도를 나타내었다.

표 2 GSSI의 주안테나 사양과 용도일람

| 송수 방식 | 타입 | 중심주파 (MHz) | 펄스폭 (ns) | 주용도 |
|-------|----|----------------|-----------|-----------------------------|
| BD | D | 15,20,30,40,80 | 前項3.5,2.2 | 지질구조(얕은 수도) |
| M | BT | 80 | 12 | 지질구조(심도30cm이 상) |
| M,BD | BT | 100 | 10 | 지질구조, 배설관(약간 깊은 경우) |
| M | BT | 120 | 8 | 호수, 강, 저수지, 하부지층 |
| BS | BT | 300 | 3 | 도로하 공동, 배설관 |
| M,BD | BT | 300 | 3 | 송수분리형 각종측정 |
| BS | BT | 500 | 2 | 배설관탐사와 도로, 터널, 세방 등의 배터널선사용 |
| BS | BT | 900 | 1.1 | 배설관(얕은 깊이), 콘크리트, 아스팔트두께 |
| BS | BT | 1000 | 1 | 철근탐사 |
| BS | H | 2500 | 0.4 | 고정도(高精度)포장두께 |

M: 송수일체형, BS: 송수분리형(1케이스), H: 송수분리형(케이스별)
D: Dipole형, BT: Bow tie형, H: TEM horn형

(2) 지중탐사레이더와 RC레이더 (일본무선(주))

임펄스 방식으로서, 국내에서는 철근탐사용으로 포터블형의 JEJ-60A 모델이 처음으로 보급되어 현재 많이 사용되고 있다. 지중탐사용으로는 NJJ-67모델이 있으며, 저심도용(0.15~1m)과 고심도용(2m이상), 그 중간용(0.5~2m)의 3가지 타입이 있다. 지중탐사용의 경우, A모드(반사파형 표시), B모드(수직단면 표시) [이상 두가지 기능은 JEJ-60A 공동], C모드(평면표시), B-A모드(수직단면과 반사파형의 동시표시)의 4종류 표시방식이 있고, 차처리, 적처리, 차적(差積)처리, 공간필터처리, 피크처리 등의 신호처리기능을 가지고 있다.

(3) 아이언씨커 (일본 고마즈일렉트로닉스(주))

임펄스 방식으로서, 비교적 최근에 개발된 제품이다. 포터블형으로서는 노트북PC를 직접 본체로 활용하고 있어 가벼운 편이다. 다양한 철근배치조건별 실험을 통하여 그 정도(精度)와 탐사한계 등의 실험자료를 문헌 등에 공개하고 있다. 모델은 IRS-150(심도15cm)과 400(심도40cm)의 2종류가 있다. 차처리 등에 의해 철근반사파형만을 표시할 수 있는 기능은 상기의 RC레이더(JEJ-60A)에서와 같으나, 철근으로 부터의 반사파형의 2차 곡선을 평가하여, 자동적으로 매질의 비유전율을 계산하여 철근 피복두께를 실제에 가깝게 연산할 수 있는 기능과 앞에서 설명한 STC기능 등을 탑재하고 있다.

RC레이더와 아이언씨커는 두기종을 합쳐 약 250~300대 정도 또는 그 이상이 국내에 보급되어 있는 것으로 추산된다.

(4) 기타

이들 장비외에도 임펄스 방식의 GPR장비로서는 역시 다양한 주파수대의 안테나를 사용할 수 있는 스웨덴 ABEM인스트루먼트사의 RAMAC GPR시스템이 국내에도 몇대 도입되어 있다.

그러나, 앞서 소개한 FMCW방식이나 다소자 다이폴안테나 방식의 레이더장비는 아직 보급되어있지 않은 것으로 추정된다.

2) 적용사례

국내에서 콘크리트 구조물에 대한 레이더탐사는 주로 철근배근조사에 가장 많이 적용되고 있고, 도로의 포장두께나 터널의 라이닝두께, 또 이들 구조물의 배

면공동조사에 일부 활용되고 있다. 장비보급현황도 학계와 연구소, 공단, 건설회사, 진단 용역회사등 각 분야별로 다양하게 분포되어 있으며, 연구사례는 비교적 적은 편이나, 적용사례등은 많은 것으로 예상된다.

참고로, 그림 9와 10에는 (주)대우 기술연구소와 (주)아주지오시스템이 공동으로 연구한 과제⁴⁾ 중 터널 라이닝내 구형(矩形)공동을 모의 제작한 후 측정된 결과를 나타내었다. 본 결과는 GSSI사의 SIR시스템을 이용하여 중심주파수가 900MHz인 안테나로 측정된 결과로서, 그림 9는 공동이 비어있을 때를, 그림 10은 공동내에 물을 채운 경우를 각각 비교한 것이다. 이때의 라이닝 두께는 30cm, 공동의 크기는 평면도상에서 좌로부터 각각 가로10cm×세로10cm×두께10cm, 가로20cm×세로20cm×두께20cm, 가로30cm×세로30cm×두께20cm의 3종류였다. 주목할 사실은 공동내에 물이 채워진 경우의 반사신호강도가 훨씬 강하게 나타남을 알 수 있는데, 이는 공기의 비유전율이 1이고 물은 80이므로, 매질(콘크리트)과 매질(공동:공기와 물)간의 각각의 비유전율값의 차승근의 차에 비례하는 전자파의 반사계수가 각각 다르게 나타났기 때문이다. 이와 같은 성질을 이용하면, 특히

도로 등의 경우에는 비가 내린 후, 일정시간이 지나면 정상부에는 물의 침투가 덜하고 침투되더라도 바로 증발되나, 열화부나 공동 또는 균열부에는 수분이 상대적으로 더 장시간 남아있게 되므로, 레이더 측정시 이들 결함부로 부터의 반사신호가 더욱 강해져 상대적으로 탐사가 다소 용이해질 것으로 예상된다. 이러한 아이디어를 바탕으로 일본등에서는 이미 이에 대한 연구가 실험실적 위주로 진행되어오고 있다.

다음은 새롭게 개발한 화상처리기술⁵⁾을 이용하여 측정화상을 보다 알기쉽게 해석할 수 있는 예를 소개하였다. 그림 11은 상하부 복철근 배근조건하에 있는 가로40cm×세로40cm×두께10cm의 구형(矩形)공동을 측정된 결과이고, 그림 12는 이에 대한 화상처리 결과를 나타내었다. 그림 12의 처리결과로부터 알 수 있는 바와 같이 그림 11의 측정결과만으로는 해석하기 어려운 철근의 배근위치와 공동의 크기와 형상을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 최근의 레이더 탐사기술은 S/W상에서는 측정된 결과로부터 정량화된 해석이 가능하도록 한 연구가 진행되고 있으며, 앞서의 H/W상에서 다소 조자 다이폴안테나를 이용하고 S/W상에서 다중편파

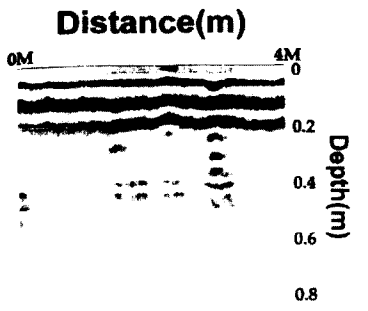


그림 9 라이닝내 공동(공기로 채움) 측정결과

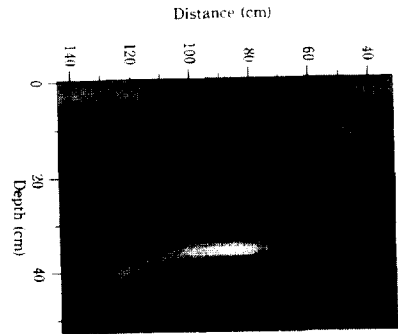


그림 11 복철근 조건하 구형(矩形)공동 측정결과

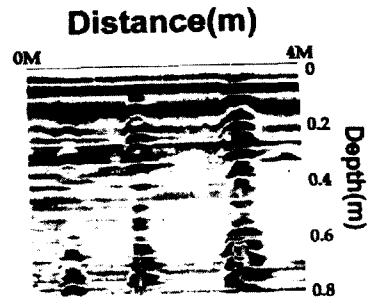


그림 10 라이닝내 공동(물로 채움) 측정결과

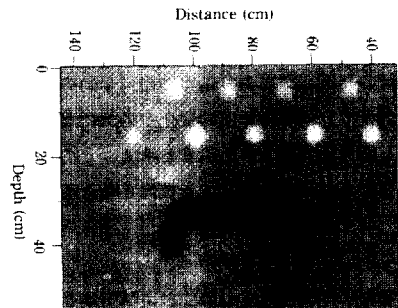


그림 12 「그림. 11」에 대한 처리결과

해석기술을 개발하여 공동의 체적까지도 추정하는 연구도 시도되고 있다.⁵²⁾

2.2 적외선법

2.2.1 국내현황

현재 국내에서 많이 쓰이고 있는 적외선 측정장비는 일본 AVIONICS사 제품(TVS)과 독일 AGEMA사 제품(THV), 그리고 FLIR사 제품(IQ) 등이 있다. 이들 제품이 국내에는 약 300~400대 정도가 보급되어 있고, 이중 콘크리트 구조물 진단을 목적으로 보급된 장비수는 약 20~30대에 이르는 것으로 추산된다.

구조물 진단분야의 용도로는 주로, 박리 또는 열화부, 누수부의 진단 등에 많이 쓰이고 있으며, 선진국에서는 반복하중 조건하의 부재의 피로에 따른 열에너지(온도)를 측정하여 열화상태를 역추정하거나, 거푸집 배면의 콘크리트의 충전상태 확인, 탄소섬유시트의 보강상태점검 등의 연구에도 활용되고 있다. 미국에서는 도로부의 열화예상지역을 헬리콥터 등에 적외선 장비를 탑재하여 조사하는 연구가 진행되고 있으며, 여러 가지 화상처리기술 등의 활용에 의해 보다 정량적으로 열화부를 선별해석하는 연구에 많은 관심을 쏟고 있다.

2.2.2 적용사례

건물, 교량, 터널 등에 많은 적용사례가 있지만, 대

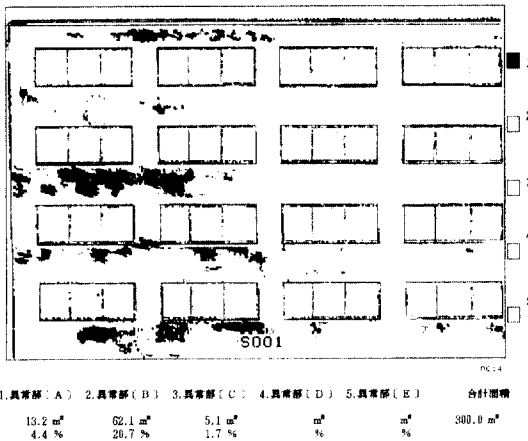


그림 13 타일박리부 화상처리 결과
 [1:시급한 개선 필요(타일박리), 2:부착면의 강도저하(E-일 하지부 변질), 3~5:이상징후 없음]

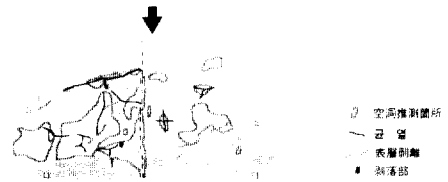
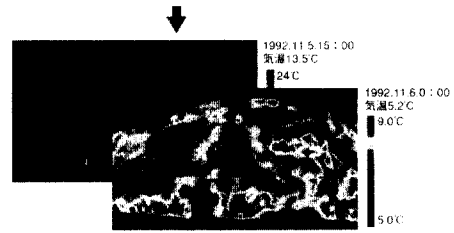


그림 14. 공동, 균열, 박리, 박락부의 측정 및 화상처리 결과
 [상:조사면 가시화상, 중:적외선 조사, 하:처리결과]

부분이 측정후 결과를 거의 그대로 이용해 결합부를 정성적으로 비교 추정하는 선에서 해석을 내리고 있다. 여기서는 적외선 측정 데이터를 이용해 재차 화상처리를 실시하여 결합부만을 선별적으로 해석한 결과에 대한 예를 각각 그림 13과 14에 나타내었다.

이는 결합부에 대한 온도의 역치(域値)를 주변 환경조건 등에 의한 영향을 고려한 후, 해당값의 범위를 통계적으로 설정하여 미리 정해둔 후, 그 역치이상 또는 일정범위의 역치만을 화상에 표시(나머지 값들은 배경색으로 처리)하여 그 면적을 구하는 것이 기본적인 알고리즘으로 되어있다.

3. 전자파시험을 위한 컴퓨터 모델링

전자파를 이용한 비파괴 검사법의 개발은 이론에 기초한 컴퓨터 모델링을 통해서도 이루어 질 수 있다. 전자파가 검사대상 물체인 콘크리트 안에서 진행하는 모습을 영상화 할 수 있다면 이는 레이더 실측 자료를 분석하는데 도움을 줄 수 있다. 전자파의 모델링은 여러 방법으로 시도될 수 있는데 그 중에서 시간영역에서 전자파의 진행을 시각화 할 수 있는 finite difference-time domain(FD-TD) 방법을

소개키로 한다. 이 방법은 Maxwell의 방정식을 시간의 함수로 풀이하여, 계산영역 안에서 전기장과 자기장의 값을 구하는데 그 기초를 두고 있다.^{12), 13)}

FD-TD 방법을 이용하여 콘크리트 시편에 전자파를 보냈을 때 나타나는 현상을 예를들어 살펴보기로 한다.¹⁴⁾

3.1 Incident Wave

모델링에는 Gaussian pulse가 사용되었다.

$$V(t) = e^{-2(t-t_0)^2/T^2}$$

위 식은 시간 t 에서 시간의 지연값이 t_0 이고 pulse width가 T 일때, 전기장의 값 $V(t)[V/m]$ 을 표시한다.

Gaussian pulse가 모델링에 사용된 이유는 주파수 영역에서 광폭레이다가 갖고 있는 광범위한 주파수대역을 나타낼 수 있기 때문이다. 모델링에 사용된 Gaussian pulse의 시간영역과 주파수영역에서의 값은 그림 15과 16에 각각 표시되었다.

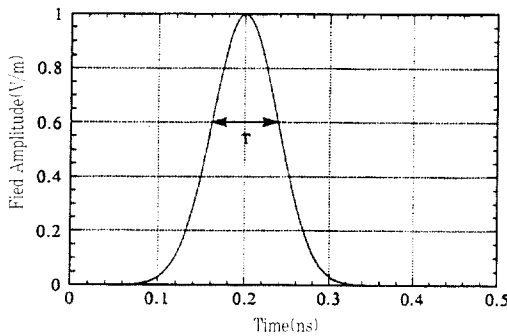


그림 15 The incident wave of a Gaussian pulse centered at the time delay of 0.2 ns with an amplitude of 1 V/m. The pulse width (T) is 0.0762 ns.

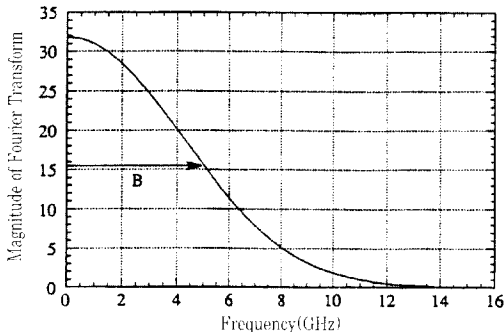


그림 16 The incident wave in frequency domain with a half power bandwidth of 5 GHz.

3.2 모델링을 위한 계산영역 설정

전자파의 지배식인 Maxwell의 방정식¹⁵⁾을 시간의 함수로 풀기 위한 계산영역은 모델링에 사용되는 목표물의 크기와 주파수에 따라 좌우된다. 또한 모델링은 2차원과 3차원으로 행해질 수 있는데, 계산시간을 고려 대개 2차원 모델링이 사용된다. 2차원 모델링에서는 조사대상인 목표물이 계산영역의 경계에 가깝게 배치될 경우 수치적 오차가 발생하므로 계산영역의 중심에 배치되도록 한다.¹⁶⁾ 모델링에 사용된 계산영역이 그림 17에 표시되었다. 가로 800×세로 1400의 격자로 계산 영역이 세분화되어 있고, 각각의 격자는 실제 길이로 1.524mm×1.524mm에 해당한다. 콘크리트 목표물이 계산 영역의 중앙에 위치되면 계산 영역의 상부 경계에서부터 Gaussian파가 아래쪽으로 목표물을 향하여 진행하게 되고 얼마 후 콘크리트 목표물의 표면에 부딪히면 파의 일부는 반사되고, 나머지는 콘크리트 내부를 통과하게 된다. 이때 반사되는 파는 다시 수직 위 방향으로 역진행하여 그림 17의 상단에 표시된 A점으로 돌아가게 된다. A점에서는 반사되어 오는 파를 시간의 함수로 모두 기록 저장하여, 목표물의 형상을 파악하는데 쓰이게 된다.

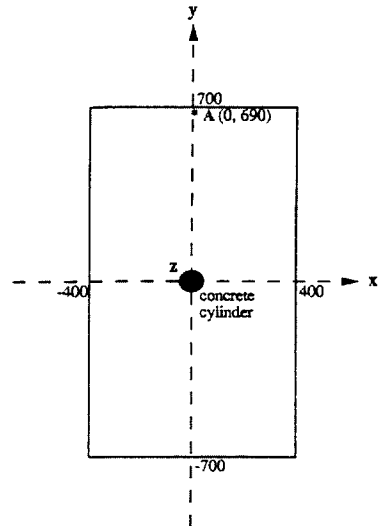


그림 17 A computational domain for the 2-D FD-TD modeling. The domain is discretized by 800×1400 square grids, where each grid size is 1.524mm×1.524mm. A concrete specimen is located at the center of the computational domain. A cylindrical concrete specimen is shown as an example. Z direction is pointing out of the figure.

3.3 콘크리트 시편

FD-TD 모델링의 장점은 여러 형태의 콘크리트 시편을 목표물로 사용할 수 있다는 점이다. 시편의 크기가 모양, 그리고 시편 안에 들어가는 철근이나 공동이 정해지면 이를 계산 영역에 입력 목표물 설정 과정을 마치게 된다.

모델링에는 직경 152.4mm의 원통형 시편에 직경 25.4mm의 철근과 원형 공동을 중앙부에 갖음으로써, 이의 탐지 가능성을 알아보게 된다.

따라서 모두 3개의 콘크리트 시편이 모델링에 목표물로 사용되었고, 그림 18에 표시되었다.

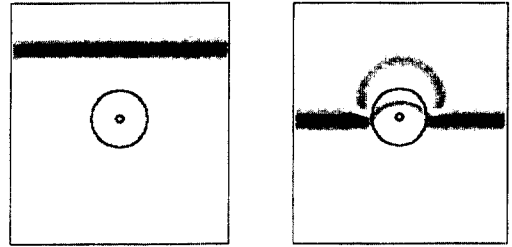


그림 18 Laboratory size concrete specimens used for the modeling. Cylindrical specimens with a 152.4 mm diameter with no inclusion, a 25.4 mm diameter rebar at the center, and a 25.4 mm diameter void at the center.

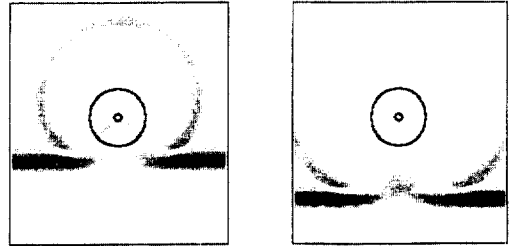
3.4 콘크리트내 전자파 진행과 분산

FD-TD 방법을 이용한 2차원 모델링 결과는 그림 19에서와 같이 나타난다. 직경 152.4mm의 원통형 콘크리트 목표물 안에 직경 25.4mm의 철근이 있는 경우이다. 전자파의 진행에 따른 전기장의 세기가 콘크리트 목표물과 함께 그림에 나타나 있으며 시간의 경과에 따라 (a), (b), (c), (d)의 순서로 표시된다.

그림 19(a)에 보이는 굵은 테의 선은 상단으로부터 수직 아래 방향으로 진행하는 Gaussian Pulse이다. 그림 19(b)에서는 콘크리트 목표물에 전자파가 부딪치면서 그 일부가 반사되어 수직위 방향으로 되돌아가고, 나머지는 콘크리트 안으로 들어가고 있음을 볼 수 있다. 이때 콘크리트 밖, 즉 공기를 지나는 전자파는 콘크리트의 영향을 받지 않고 계속 수직 아래 방향으로 진행하고 있다. 이어 그림 19(c)에서는 시간이 더 지남에 따라 콘크리트로부터 반사된 파가 더 넓게 멀리 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다. 전자파가 콘크리트 시편의 아래쪽을 지나면서 또 한번의 반사가 이루어진다. 끝으로 그림 19(d)에서 육안으로는 구별이 안되지만, 콘크리트와 그 안의 철근으로부터 반사되는 파가 컴퓨터 모델링 결과로 모두 저장된다.



(a) A plane wave is directed from the top. (b) The wave hits the concrete cylinder



(c) The wave propagates through the cylinder (d) The wave leaves the cylinder

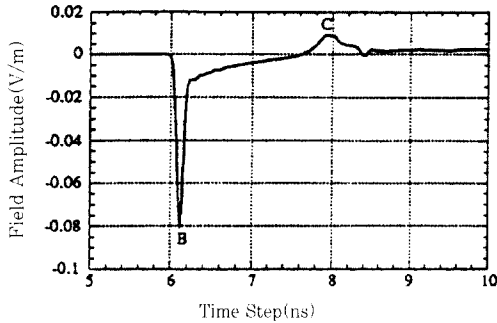
그림 19 Two-dimensional FD-TD simulation of wave scattering by a 152.4 mm diameter concrete cylinder with a 25.4 mm diameter steel reinforcing bar at the center. The electric field is polarized perpendicular to the picture. The dielectric constant of concrete is 4.8 and conductivity is 0.15 mhos/m. The time width of the incident Gaussian pulse is 0.0762 ns.

3.5 모델링 결과

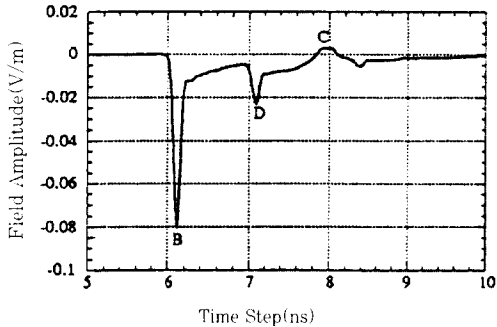
콘크리트 목표물로부터 반사되어 오는 전자파는 그림 17의 A점에 모두 기록 저장되어 시간의 함수로 그 값을 그림 20에서와 같이 나타낼 수 있다. 전자파를 이용한 콘크리트 시편에 대한 측정은 모두 10nanosecond(10×10^{-9} 초) 이내에 이루어졌고 그림 18의 (a), (b), (c) 세 개 시편에 대한 측정 결과가 그림 20에 나타났다.

그림 20(a)를 보면 원통형 콘크리트 시편 첫 표면으로부터의 반사가 B점, 그리고 뒤 표면으로부터의 반사가 C점이다. 이와 같은 해석은 반사되는 값의 부호를 전자파가 진행한 매질의 비유전율과 비교함으로써 가능하다. 따라서 B점과 C점의 시간 차이가 콘크리트 목표물의 직경, 즉 두께를 의미한다.

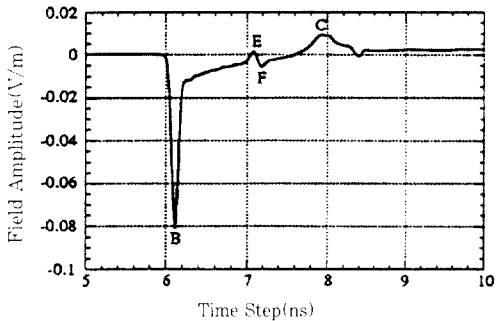
그림 20(b)에서는, 콘크리트 시편 안에 철근이 있는 경우의 모델링 결과이다. 시편의 직경을 나타내는 B점과 C점의 위치는 변함이 없지만 새로운 D점이 나타난다. 이는 철근으로부터의 전자파 반사를 나타



(a) Cylindrical specimen with no inclusion



(b) Cylindrical specimen with a 25.4mm diameter rebar at the center



(c) Cylindrical specimen with a 25.4mm diameter void at the center

그림 20 One-dimensional images of 152.4 mm diameter cylinder concrete specimens.

낸다. 그리고 그림 20c)에서는 철근 대신 빈 공간이 원통형으로 들어 있을 경우의 결과이고, E점과 F점은 콘크리트와 공동내 공기, 그리고 공동내 공기에서 다시 콘크리트로 들어가는 위치를 각각 나타낸다.

3.6 모델링 결과의 활용

모델링은 레이더 실측을 하지 않고도 검사 결과를 예측하는데 사용될 수 있으며, 레이더 실측 후 그 결과를 해석하는데 비교값으로도 사용될 수 있다. 보다 다

양한 측정 상황의 모델링은 전자파를 이용한 검사방법에 도움을 줄 수 있다.

4. 맺음말

국내에도 최근 몇 년 동안 사회적 관심도의 증가로 콘크리트 구조물에 대한 비파괴검사기술의 보급이 눈에 띄게 증가되었다. 초기에는 주로 강도조사나 배근조사가 주를 이루었으나, 이제는 내부결함이나 두께조사, 각종 열화진단 등 그 적용분야도 훨씬 다양화 되어지고 있고, 그에따라 신형 또는 고가장비의 보급도 눈에 띄게 증대되고 있다. 그러나, 그 용도의 중요성과 경제적인 잇점 등에도 불구하고, 이의 기술을 보다 정확하고 효과적으로 활용하기 위한 연구는 아직 활발히 진행되어지고 있지 않다고 판단된다. 그것은 비파괴검사에 대한 일반적 인식이 관련 장비를 도입하여, 매뉴얼대로 측정하고 해석만 하면 되는 것으로 오해하고 있거나, 깊이 있는 연구를 위해서는 비토목 또는 비건축 분야의 전공지식을 필요로 하고 있기 때문이 아닌가 싶다. 실제, 비파괴검사는 국내의 실정과 환경에 맞게 검증되거나 제안된 아무런 지침이 없이 그 결과에 대한 해석이 남용되고 있는 측면이 없지 않다. 이는 하루빨리 시정되어야 할 과제라 판단된다. 따라서 이 분야에 대한 관심과 연구가 한층 심도있게 이루어지기를 기대한다.

참고 문헌

1. R.Gabillard, Pierre Degauque, and James R. Wait : Subsurface Electromagnetic Telecommunication, IEEE Transactions on Communication Technology, December 1971
2. 山下榮吉編著 : 應用電磁波工學, 近代科學社, 1992
3. Osumi N. and Ueno K. : Microwave holographic imaging of underground objects, IEEE Transactions on Antennas & Propagation, AP-33, Febraury 1985
4. (주)대우 건설기술연구소, (주)아주지오시스템 : 터널안 전관리를 위한 정밀 안전진단 시스템 개발, 과학기술처
5. 朴錫均 : レーザ法によるコンクリート背面空隙の非破壊検査, 東京大學大学院工学系研究科 博士學位論文, 1996.6
6. S.K.Park, T.Uomoto : Radar Image Processing

- for Detection of Shape of Voids and Location of Reinforcing Bars in or under Reinforced Concrete, *Journal of Insight*, Vol.39, No.7, The British Institute of Non-destructive Testing, July 1997
7. S.K.Park, T.Uomoto : Radar Image Analysis for Subsurface Void Detection by The Microwave Polarization Method, 7th International Conference Structural Faults and Repair, University of Edinburgh, July, 1997
 8. 村澤聡彦ら4人 : 3アンテナ素子を有する地中埋設物探査レーダ, 『造船技術報』, 第152号
 9. 日本エレクトロニクス : 会社案内Brochure
 10. 田中弘三 : 地中レーダアンテナ系周波数特性と波形シンキング, 『計測自動制御学会論文集』, Vol.24, No.10, 1988
 11. 通信土木コンサルタント(株) : ライフラインと都市トンネルに関する技術, 講習会テキスト1988, 11.
 12. Taflov, A., "Review of the Formulation and Applications of the Finite-Difference Time-Domain Method for Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Interactions with Arbitrary Structures," *Wave Motion*, Vol. 10, pp. 547-582, 1988.
 13. Li, K., Tassoudji, M.A., Shin, R.T., and Kong, J.A., "Simulation of Electromagnetic Radiation and Scattering Using a Finite Difference-Time Domain Technique," *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 1 (1), pp. 45-63, September/October 1992.
 14. Buyukozturk, O. and Rhim, H.C., "Modeling of Electromagnetic Wave Scattering by Concrete Specimens," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 5, pp. 1011-1022, 1995.
 15. Shen, I.C. and Kong, J.A., *Applied Electromagnetism*, 2nd Ed., PWS Engineering, Boston, Massachusetts, 1987.
 16. Engquist, B. and Majda, A., "Absorbing Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Waves," *Mathematics of Computation*, Vol. 31, No. 139, pp. 629-651, July 1977. 