

콘크리트 내부의 결함 탐사를 위한 비파괴 검사 기법

Non-Destructive Testing Method for the Detection of Internal Defects inside Concrete

우상근*, 송영철*, 이상근*

*전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

**한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

본 연구에서는 콘크리트 내부의 결함 탐사를 위하여 전자기법과 탄성과 기법을 적용하여 비파괴 실험을 수행하였으며, 각 기법의 특성과 탐사 한계를 도출하기 위하여 기초시편과 응용시편을 각각 제작하였다. 내부결함 탐사에는 Styrofoam(2×10cm), 나무(2×10cm), Ø50mm의 쉬스(Sheath)관, Ø30mm의 PVC 파이프, 직경 25 및 55 mm의 철근 및 물통(15×30cm) 등을 콘크리트 시편 내에 각기 다른 피복두께로 매립하여 측정하였다. 연구결과 전자기법은 철근 탐사에는 유용하지만 내부결함 탐사는 어려운 것으로 나타났으며, 탄성과 기법은 철근의 탐사는 어렵지만 콘크리트 내부의 공동 및 철근 배면부의 공동, 그리고 부재의 두께를 탐사하는데 유용한 비파괴 검사기법으로 분석되었다.

Abstract

To detect the internal defects inside concrete, electromagnetic method and impact echo method have been used in this study. The equipments include one radar system and one impact echo method system. The internal defects are Styrofoam(2×10cm), wood(2×10cm), Ø50mm sheath, Ø30mm PVC pipe, 25 and 55 mm diameter steel bar, and water container(15×30cm) embedded at different cover depths from the surface of concrete specimens. And experimental results on various measurement cases are discussed. From this study, it is proved that electromagnetic method is good to detection of locating of steel bars and impact echo method effective to detection of locating of internal defects embedded in concrete.

1. 서 론

최근 토목·건축 구조물의 예기치 않은 여러 대형사고의 발생으로 인하여 기존 구조물에 대한 유지관리 및 안전성의 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다. 구조물을 항상 안전하고 사용 가능한 상태로 유지하기 위해서는 구조물을 정기적으로 점검하여 평가하고, 문제가 발생하기 전에 미리 조치를 취해야 한다. 따라서 정확한 점검을 통한 조사, 조사 결과의 올바른 평가, 그리고 평가 결과에 대한 적절한 대책 수립 등이 매우 중요하며, 본 연구에서는 원전 콘크리트 구조물의 내부결함을 측정하여 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 비파괴 검사 기법의 적용성을 파악해보고자 한다.

구조물의 평가는 구조물의 유지관리에 있어서 구조물 손상에 대한 객관적인 분석 및 보수, 보강 대책 등을 결정하는데 중요한 자료를 제공하여 준다. 여기서 평가란 이미 건설된 구조물의 손상 또는 결함, 건설 중인 구조물의 적정 시공 여부에 대한 조사를 포함하여, 구조물의 부실 시공방지과 유지관리를 위하여 구조물에 대한 전반적인 정보를 얻어내는 조사를 의미한다. 따라서 구조물의 시공 단계 및 사용 중에 대한 구조 건전성 평가가 지속적으로 수행되는 것이 구조물의 유지관리 및 사용수명 증진에 필수적이다.

특히, 원자력 발전소는 사고 발생시 엄청난 피해를 가져올 수 있는 중요 구조물이므로, 이에 대한 손상도 평가 및 안전성 확보를 위한 효과적인 비파괴 검사 기법의 개발 및 적용이 필요한 실정이다. 현재 국내에서는 여러 종류의 비파괴 검사 장비를 사용하여 비파괴 검사를 실시하고 있지만, 기본적인 작동원리와 사용방법에 대한 이해가 부족하고, 특히 검사 결과에 대한 분석능력이 미흡하여 장비의 효과적인 활용이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 비파괴 검사 분야 가운데 콘크리트 내부의 결함 탐사를 대상으로 전자기법과 탄성과 기법을 적용하여 비파괴 실험을 수행하였으며, 각 기법의 특성과 탐사 한계를 도출하기 위하여 기초시편과 응용시편을 각각 제작하였다. 비파괴 검사 기법별 특성을 파악하는 것이 본 연구의 목적이므로, 제조 회사나 장비명은 공개하지 않고, 다만 이해를 돕기 위하여 본 연구에 사용된 장비의 사진을 본 논문에 실었으며, 측정 결과는 사용된 장비의 평균값을 사용하였다.

2. 본 론

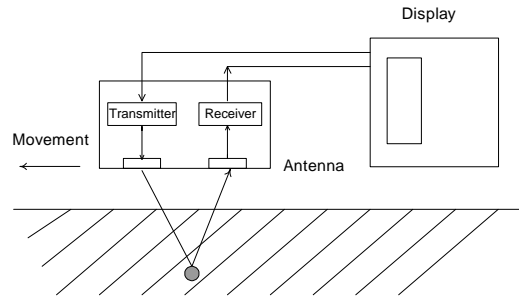
2.1 전자기법의 원리와 특성

전자기파를 이용한 레이더(Radar)의 측정 원리는, 마이크로파 대역의 전자파가 목표물 혹은 매질을 통과할 때, 그 전자파의 투과와 반사가 목표물 혹은 매질의 전자기적 특성과 모양에 영향을 받는다는 것에 기초를 두고 있다. 실제 측정 과정에서 송신 안테나로부터 탐사하고자 하는 콘크리트 실험체에 전자파를 방사하면, 이 전자파는 전자기적 성질이 다른 물질, 예를 들어, 철근, 공동 또는 내부 결함 등의 경계면에서 반사되어 수신 안테나에 도달한다. 이 전자파의 반사파형으로부터 매립된 물체의 모양과 재질을 판별할 수 있다. <그림 1>은 레이더 장비를 이용한 측정 개요를 나타낸 것이다.

이때, 콘크리트중의 전자파 속도 (ν)는 콘크리트의 전자기적 재료 특성인 유전상수 ϵ_r 에 따라 변화한다.

$$\nu = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/s)} \quad (\text{식 1})$$

여기서, C : 진공상태에서 전자파의 속도 ($3 \times 10^8 \text{m/s}$),
 ϵ_r : 콘크리트의 유전상수



<그림 1> 레이더 시스템 개요

매립된 목표물까지의 거리(D)는 입사파와 반사파의 왕복 전달시간(T)로부터 (식 2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$D = v \times \left(\frac{T}{2}\right) = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \left(\frac{T}{2}\right) (m) \quad (\text{식 } 2)$$

레이더법을 이용한 비파괴 검사 장비는 주로, 철근탐사, 공동 탐사, 배관 탐사, 터널 라이닝 배면탐사, 그리고 금속 파이프 탐사 등에 쓰이며, 측정심도는 수 미터에 달한다. <사진 1>은 이러한 레이더 측정 기기 가운데 본 연구에 사용된 장비의 실물 모습을 나타낸 것이다.



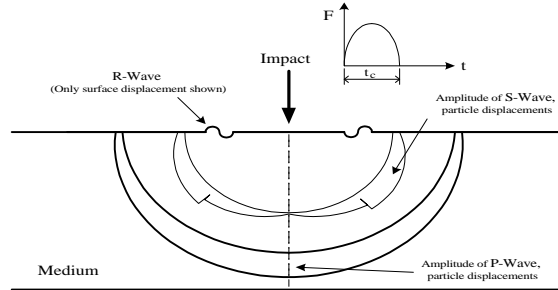
<사진 1> 레이더 장비 I

2.2 탄성파 기법의 원리와 특성

콘크리트와 같이 구성 성분의 입자가 큰 구조체는 구성 입자에 의한 파의 산란이 커서 금속 분야에서 널리 사용되는 초음파법을 사용하기가 어렵기 때문에 탄성파를 이용한 방법을 적용하는 것이 보다 바람직하다. 탄성파를 이용한 충격반향 기법은 실험체의 표면에 충격(impact)을 가하여 발생된 체적파가 불연속면이나 이질 매질층 간의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온 파형을 검토했으며, 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 균열 및 공동 탐사 등에 적용되는 방법이다.

탄성체의 표면에 충격을 가하면 <그림 2>와 같이 표면파(R)와 체적파(body wave)인 P파와 S파가 발생한다. 표면파는 충격이 가해진 곳으로부터 실린더 형태의 모양으로 탄성체의 표면을

따라 전파하며, 체적파는 반구형의 모양으로 탄성체 내부로 전파한다. 이때 체적파는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층 간의 경계면을 만나면 반사되어 응력파가 발생한 표면으로 돌아온다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 P파에 의한 입자 변위는 하중 작용점 바로 아래 부분에서 최대값을 나타내는 반면에 S파에 의한 입자 변위는 상대적으로 상당히 작은 값을 나타낸다.



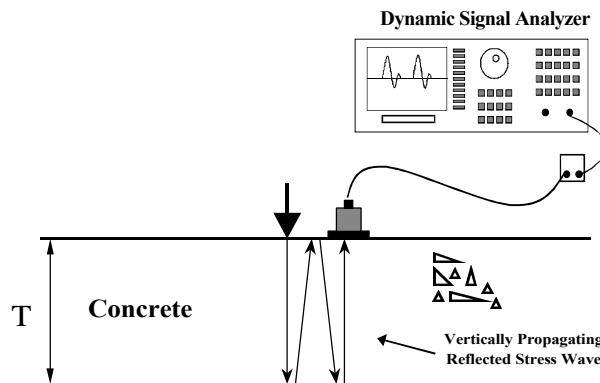
<그림 2> 충격에 의하여 발생하는 탄성파의 종류 및 전파특성

따라서 감지기가 가진점 근처에 가까이 위치한다면 균열, 공동과 같은 매질 내의 불연속체나 이질 매질층 간의 경계면에서 반사된 P파에 의한 표면 변위가 S파에 의한 표면 변위보다 훨씬 크므로, 표면에서 감지되는 파형은 반사된 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다.

이와 같은 원리에 의해 매질이 일정한 두께의 무한한 평판이라면 충격에 의해 발생한 탄성파가 매질 내부로 전파하다가 양쪽 경계면에서 반사하여 매질 내부를 왕복하게 되고, 이 탄성파들은 서로 간섭을 일으키게 된다. 이때 되돌아오는 시간 Δt 가 탄성파의 진동 주기 T 에 정수배가 될 경우에는 진폭이 커지고, 그렇지 못할 경우에는 진폭이 작아지게 된다. 따라서 공진이 일어날 조건은 (식 3)과 같이 주어진다.

$$\Delta t = nT = \frac{n}{f_n}, \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (\text{식 } 3)$$

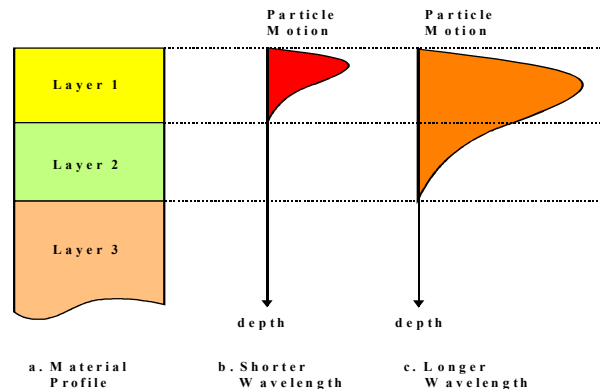
일반적으로 (식 3)의 조건 중에서 $n=1$ 일 경우 가장 큰 공진이 일어나며, 이를 기본 모드 (fundamental mode)라고 한다. 충격반향기법은 위와 같이 부재의 한쪽 표면에서 기계적 충격을 가하여 표면과 균열·공동과 같은 불연속체 사이 또는 표면과 이질 매질층 사이의 다중반사에 의해 유발된 공진 상태에서의 표면 변위를 측정하는 것을 기초로 한다. 이때, 실험체의 치수를 알고 있을 경우 구성 재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고, 재료의 P파 전파 속도를 알고 있다면, 반사파의 도달 시간을 측정하여 실험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다. <그림 3>은 충격반향 기법의 장비구성 및 개요도를 나타낸 것이다.



<그림 3> 충격반향 기법의 장비구성 및 개요도

2.3 표면파 기법의 원리와 특성

표면파 기법은 탄성과 중에서 대상물의 표면을 따라 전파되는 Rayleigh 파의 파장의 변화에 따라 전파속도가 달라지는 분산 특성을 이용하여 대상물(지반 혹은 구조체)의 특성을 파악하는 기법이다. 표면파 기법은 층상구조에서 분산된 표면파의 측정과 해석에 그 바탕을 두고 있다. 표면파의 분산이라는 것은 층상구조를 가지는 매질에서 파의 전파속도가 파의 주파수(또는 파장)에 따라 변한다는 것을 의미한다. 이러한 표면파의 분산특성은 깊이에 따른 매질입자의 거동분포에 기인한다. 보(beam)와 같은 형태의 부재의 경우 보(beam)를 우리가 실험하고자 하는 면에 평행한 여러 개의 층으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 이렇게 층이 진 구조에서 표면파를 어떻게 이용할 수 있는가를 살펴보기 위하여, 확연한 층상구조를 가지는 포장체에서의 표면파 실험을 고려해보면 다음과 같다. <그림 4>에서 볼 수 있듯이 파장이 증가함에 따라 포장체 단면의 점점 깊은 곳에서 입자의 거동이 생긴다. 표면파의 속도는 이러한 입자의 거동이 나타나는 깊이까지의 재료의 강성도에 의해 달라진다. 예를 들어 표층보다 짧은 파장을 가지는 파에 의한 입자의 거동은 이 층에만 국한되며 따라서 파의 속도는 surface layer의 강성도에만 영향을 받는다. 따라서 여러 크기를 가지는 파장에 대한 표면파 속도의 측정을 통하여 깊이에 따른 각 층의 강성도를 추정하는 것이 가능하다.



<그림 4> 포장체에서의 파장길이에 따른 표면파 분포

2.4 충격반향-표면파 기법

2.4.1 적용 동기

충격반향 기법을 이용하여 구조물의 두께 및 결함을 추정하는데 있어서는 재료의 P파 속도를 미리 알고 있어야 한다. P파 속도는 경계조건과 두께를 알고 있는 부위에서 충격반향 기법을 통하여 알아낼 수 있다. 그러나 일반적으로 터널이나 바닥 슬래브와 같은 구조물은 한쪽 면만이 노출된 상태이므로 정확한 두께를 알고 있는 위치가 없기 때문에 코어를 채취하여 P파 속도를 구한 후 이를 전체 구조물의 대표 값으로 사용하여 충격반향 기법에 적용하게 된다. 그러나 경우에 따라서는 터널과 같이 구조물의 특성상 방수 및 손상 방지 등의 이유로 코어를 채취하지 못할 수도 있고, 같은 구조물이라도 위치에 따라 콘크리트의 물성치가 다를 수 있으므로 코어로부터 결정된 파 속도가 구조물 전체를 대표한다고는 볼 수 없다.

구조물의 P파 속도를 구하기 위하여 적용되는 다른 방법으로는 구조물 표면에 두 개의 감지기를 설치하여, 두 감지기에 도달한 P파의 시간 차이와 두 감지기 사이의 거리를 이용하여 P파 속도를 구하는 직접 측정법이 있다. 직접 측정법은 실험이 수행되는 위치에서 P파 속도를 비교적 신뢰성 있게 구할 수 있는 장점이 있지만, 도달되는 탄성파의 무리(wave group)중에서 P파를

구별할 수 있는 고도의 예민한 장비가 요구되며, 표면을 따라 전파되는 파의 속도만 측정하므로 표면이 불량한 부분에서는 전체 두께에 해당하는 P파 속도를 추정하는데 있어서 신뢰성이 결여될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 표면파 기법을 이용하여 P파 속도를 구하여 충격반향 기법에 적용하는 충격반향-표면파 기법(IE-SASW Method)을 적용하였다. 본 기법을 적용하는데 있어서는 재료의 포아슨비를 가정하는 단점이 있지만, 코어를 채취하지 않고 실험이 수행되는 위치에서 완전 비파괴적인 검사를 수행할 수 있고, 표면을 따라 전파되는 파의 속도가 아닌, 구조물 중간, 또는 전체 두께에 해당하는 파의 속도를 평균적으로 구할 수 있어, 직접 측정법에서 발생할 수 있는 단점을 보완할 수 있다.

2.4.2 적용 원리

일반적으로 다층 구조에서 표면파 기법을 수행하여 각 층에 따른 물성치를 구하기 위해서는 실험분산 곡선과 이론분산 곡선을 비교하여 일치할 때까지 반복 계산하는 역산과정이 필요하다. 그러나 콘크리트 구조물에서 비파괴 검사를 실시할 때는 콘크리트 층만의 물성치가 필요하고 콘크리트는 지반에 비하여 비교적 단일층으로 이루어진 재료이므로 역산기법을 수행하지 않고도 실험분산 곡선만으로 쉽게 표면파 속도를 구할 수 있다.

표면파 속도 (V_R)와 전단파 속도 (V_S), 그리고 P파 속도(V_P) 사이의 관계식은 포아슨비 (ν)의 함수이므로, 표면파 속도와 P파 속도 사이의 관계식은 (식 4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_P = \frac{1 + \nu}{0.87 + 1.12\nu} \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}} V_R \quad (\text{식 4})$$

포아슨비를 0.15에서 0.2의 범위로 가정했을 때 측방향 범위가 구속되어 있는 경우 (식 4)로부터 P파 속도와 R파 속도 사이의 관계는 (식 5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_P = 1.73 V_R \quad (\nu = 0.15) \quad (\text{식 5})$$

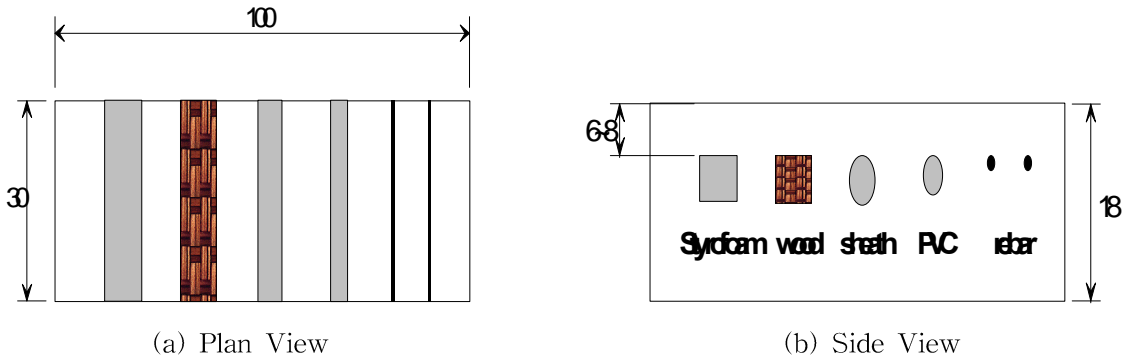
$$V_P = 1.79 V_R \quad (\nu = 0.2) \quad (\text{식 6})$$

즉, 콘크리트의 포아슨비 범위 내에서는 포아슨비에 따른 P파 속도의 변화가 크지 않으므로 일반적으로 콘크리트의 포아슨비를 0.2로 가정하여 P파 속도를 (식 6)을 이용하여 간단히 구할 수 있다. 이와 같이 실험이 수행되는 위치에서 표면파 기법을 통해 P파 속도를 구한 후 충격반향 기법에 적용하여 완전 비파괴적으로 구조물의 두께 및 구조물 내에 위치한 결함의 위치를 찾을 수 있다.

3. 실험체 제작

3.1 기초 시편

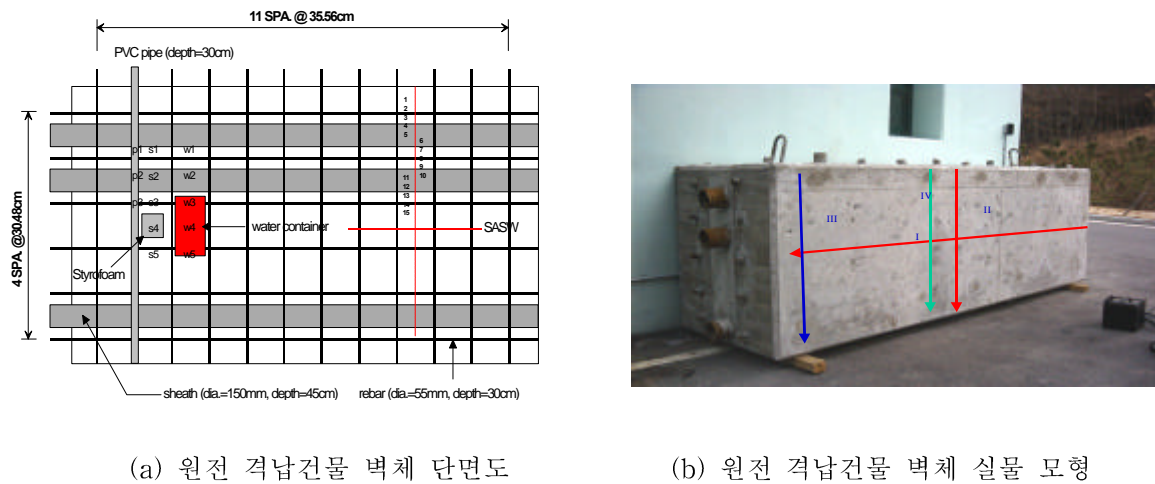
기초 실험을 위해 제작한 시편은 <그림 5>에 나타내었다. <그림 5>에서 보는 바와 같이 기초 시편에는 콘크리트 내부에 Styrofoam(2×10cm), 나무(2×10cm), Ø50mm의 쉬스(Sheath)관, Ø30mm의 PVC 파이프, 직경 25 mm의 철근 등이 매설되어 있으며, 실험은 이들 물체의 바로 윗면에서 수행하였다.



<그림 5> 기초 시편 단면도

3.2 응용 시편

응용 실험을 위해 제작한 시편과 관련 도면은 <그림 6>에 나타내었다. 원전 격납 구조물 내부에는 <그림 6>에 제시된 바와 같이 직경 55mm의 중철근 및 횡철근이 배근되어 있으며, 직경 150mm의 쉬스(Sheath)관 3개가 가로 방향으로 설치되어 있다. 그리고 내부 결함으로서 PVC 파이프가 연직 방향으로 깊이 30cm에, Styrofoam(10cm × 10cm × 10cm의 정육면체) 및 물통이 깊이 30cm에 각각 매설되어 있다.



(a) 원전 격납건물 벽체 단면도

(b) 원전 격납건물 벽체 실물 모형

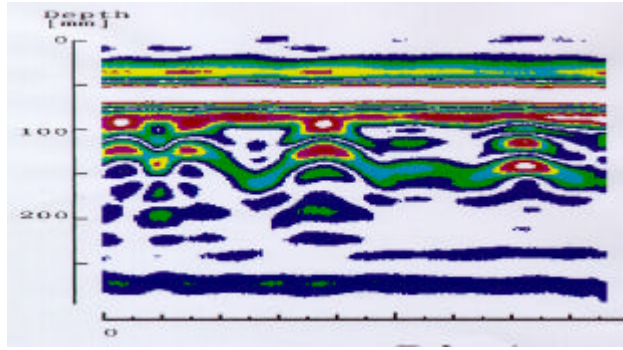
<그림 6> 응용 시편 단면도

4. 실험결과 및 분석

4.1 기초 시편

4.1.1 전자기법

전자기법을 이용하여 콘크리트 내부의 결함을 탐사한 결과는 <그림 7>과 같다. 기초 시편에 대한 콘크리트 내부의 결함 탐사 결과, 전자기법을 이용한 경우 Styrofoam, 나무 및 PVC 파이프 등은 탐사가 불가능하였으며, 쉬스(Sheath)관은 철근과 비슷한 형태로 나타나, 콘크리트 내부에 결함이 있는 경우 그 재질 및 철근과의 구별이 어려운 것으로 분석되었다.

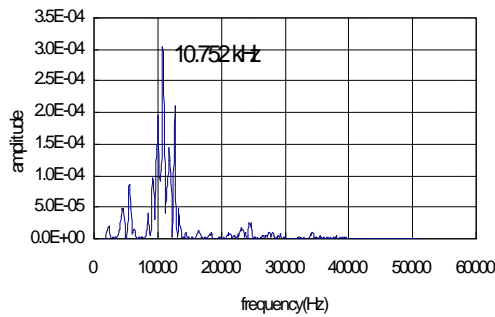


<그림 7> 기초 시편에 대한 전자기법 실험 결과

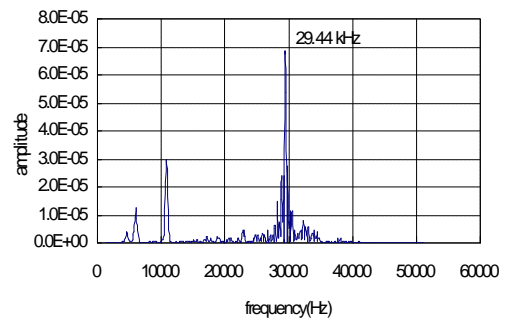
4.1.2 충격반향-표면파 기법

기초 시편에 대한 충격반향-표면파 기법 실험 결과는 <그림 8>의 (a), (b), (c) 및 (d)에 나타내었다. (a)는 나무와 쉬스(Sheath) 사이에서의 실험 결과이며, 실험 부재의 P파 속도를 4,000m/sec로 가정할 때, 부재의 두께는 $depth = V_p/2f = 4,000/(2 \times 10752) = 0.186m$ 로 실제 부재의 두께와 비슷한 결과를 제공해 주고 있다.

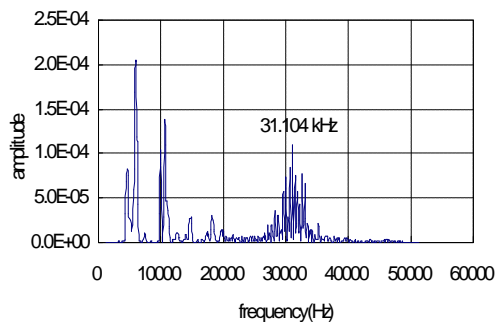
이와 같은 방법으로 Styrofoam 및 나무의 위치를 계산해 보면 각각 6.8cm 및 6.4cm로서 실제 깊이인 6cm와 근사한 값을 보이고 있다. 한편, PVC 파이프의 위치를 계산해 보면 9.2cm로서 실제 매설 깊이인 8cm와 다소 차이를 보이고 있는데, 이는 PVC 파이프의 단면 형상이 원형으로서 파의 일부가 PVC 파이프를 타고 돌아오기 때문에 발생하는 오차라고 판단된다.



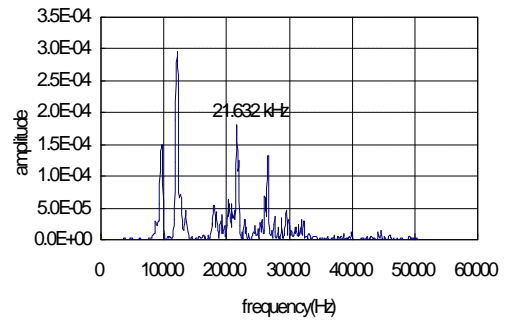
(a) 나무와 쉬스(Sheath) 사이



(b) Styrofoam



(c) 나무



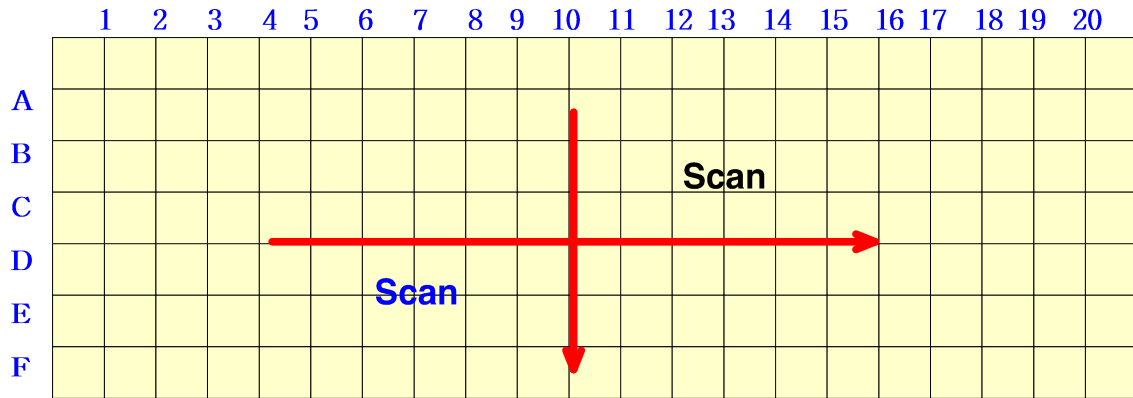
(d) PVC 파이프

<그림 8> 기초 시편에 대한 충격반향-표면파 기법 실험 결과

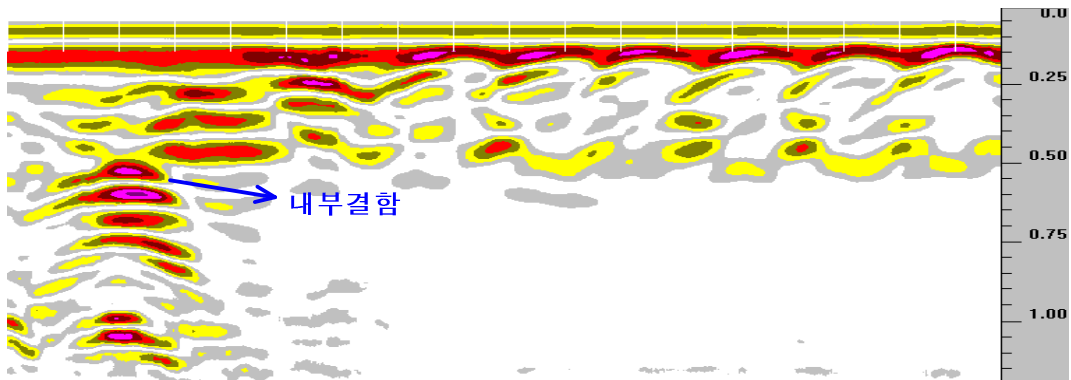
4.2 응용 시편

4.2.1 전자기법

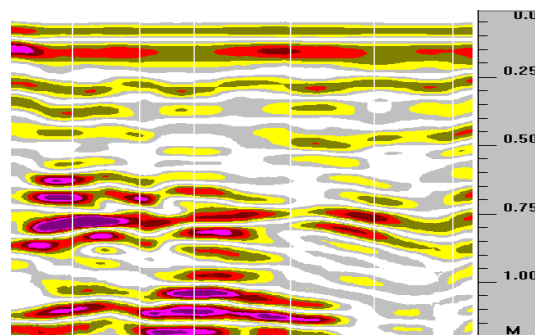
응용 시편에 대한 실험은 <그림 9>에서 보는 바와 같이 먼저 시편에 20 cm 간격으로 grid를 나누는 후, 각 부분을 400 MHz의 안테나를 사용하여 수평, 수직 방향으로 scan 하여 내부 결함을 탐사하였으며, 전자기법을 이용하여 콘크리트 내부의 결함을 탐사한 결과는 <그림 10>에 나타내었다.



<그림 9> 응용 시편의 Grid 분할과 Scan 방향



(a) 수평방향 Scan (Line D)



(b) 수직방향 Scan (Line 3)

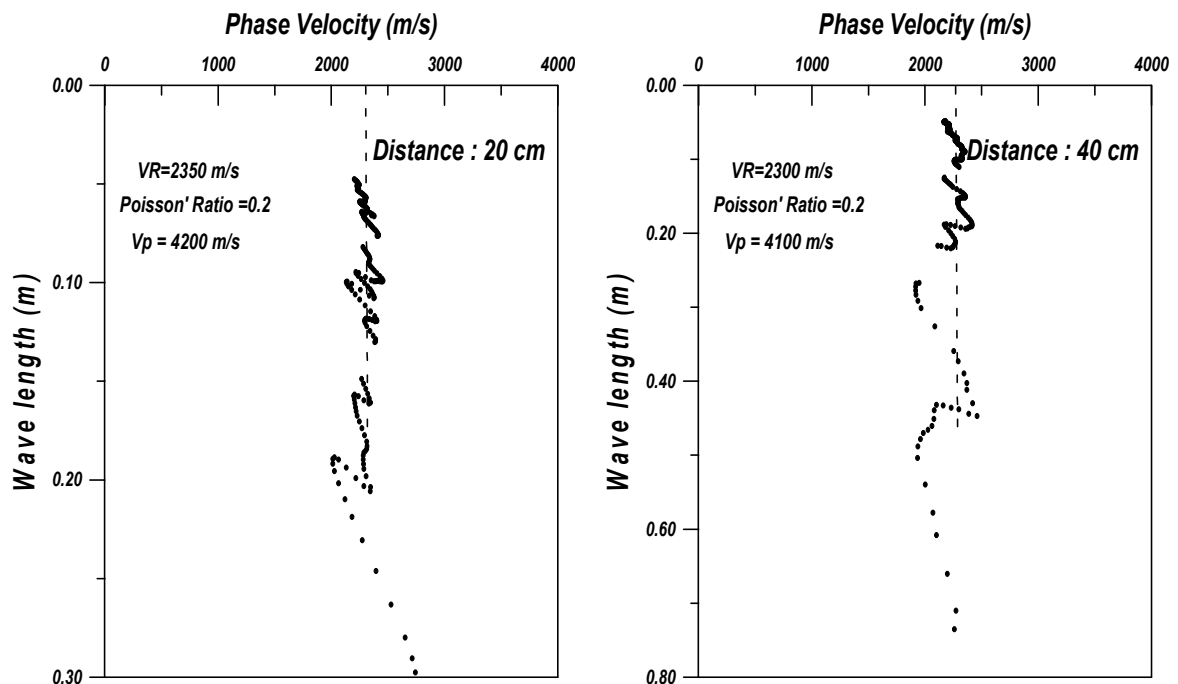
<그림 10> 응용 시편에 대한 전자기법 실험 결과

실험 결과, No. 1~20의 수평방향 scan과 A~F로의 수직방향 scan을 통하여, 수평방향에서는 C와 D 사이에 내부 결함이 삽입되어 있는 것으로 나타났다. 또한 수평방향의 내부결함 위치는 거의 정확하게 찾아낼 수 있었지만, 수직방향의 위치는 찾아내기가 어려운 것으로 나타났다. 그 이유는 수직으로 scan하는 방향으로 콘크리트 내부에 철근이 배근되어 있어서, 그 간섭에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

4.2.2 충격반향-표면파 기법

4.2.2.1 P파 속도의 측정

응용 시편에서 직접 코어를 채취할 수 없었기 때문에 충격반향 기법을 적용하기 전에, P파 속도를 구하기 위하여 표면파 기법을 적용하였다. <그림 6>에 제시한 바와 같이 표면파 기법(SASW)의 실험 측선은 건전부의 충격반향 기법 측선을 중심으로 설정하였으며, 가진원과 1번째 감지기, 그리고 두 감지기 사이의 거리를 각각 20cm와 40cm로 하여 SASW 실험을 실시하였고, 그 결과를 <그림 11>에 나타내었다. <그림 11>은 두 감지기 사이의 위상차로부터 구한 위상속도의 파장에 따른 분산 곡선으로서, 먼저 감지기 사이의 간격이 20cm인 경우에 관해 살펴보면 위상속도는 전체 파장에서 평균적으로 대략 2350m/s 임을 알 수 있다. 따라서 콘크리트의 포아손 비를 0.2로 가정하면 (식 6)으로부터 P파 속도를 4200m/s로 구할 수 있다. 감지기 사이의 간격이 40cm인 경우에는 전체 파장에서 평균적인 위상속도는 2300m/s로서, 같은 방법을 이용하여 P파 속도를 4100m/s로 결정할 수 있다. 두 경우 모두 비슷한 P파 속도를 추정함으로써 본 실험에 적용할 P파 속도는 두 값의 평균인 4150m/s로 결정하였다.



(a) 감지기 간격 20cm일 때의 분산 곡선

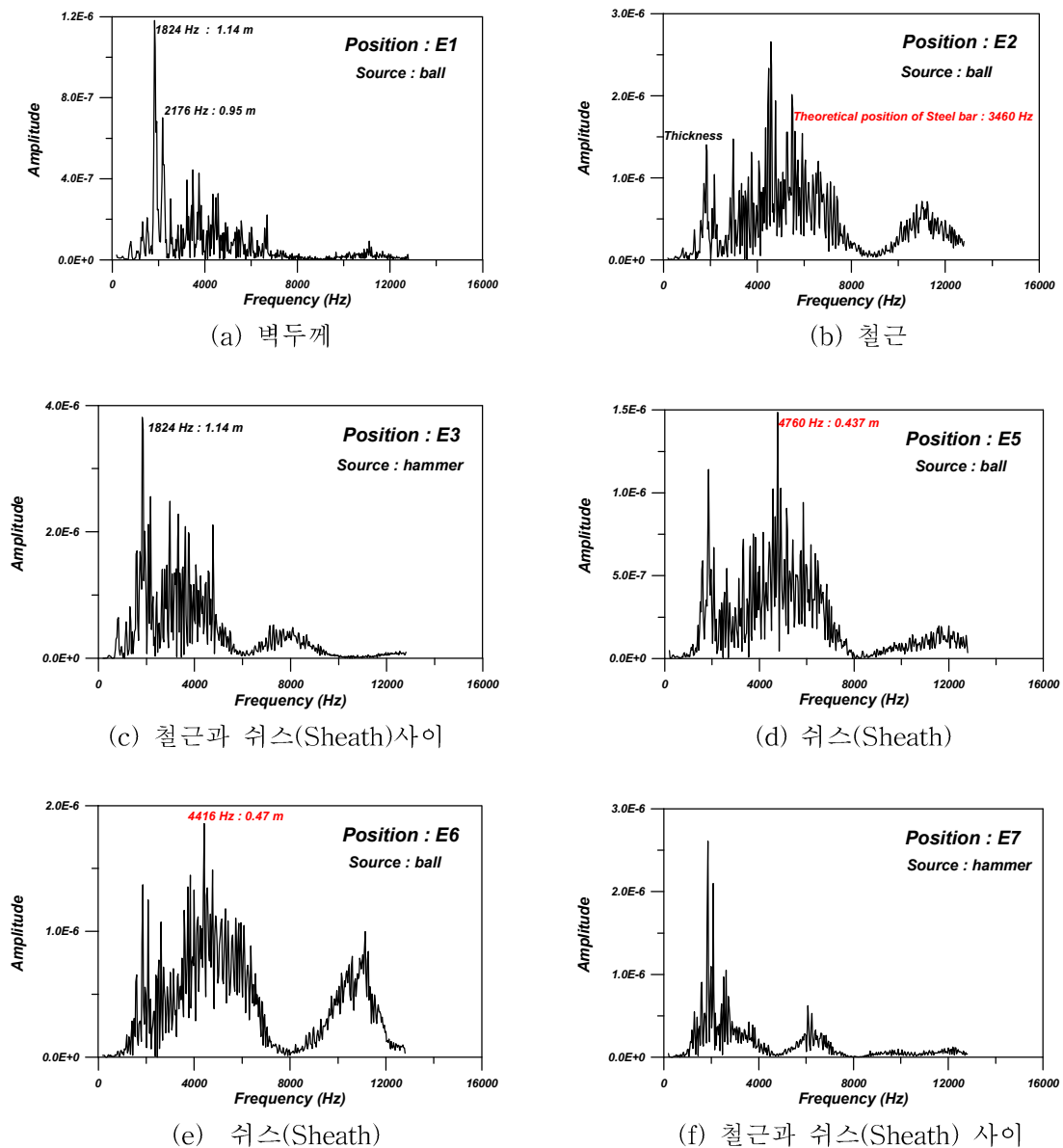
(b) 감지기 간격 40cm일 때의 분산곡선

<그림 11> P파 속도를 결정하기 위한 표면파 기법의 실험 결과

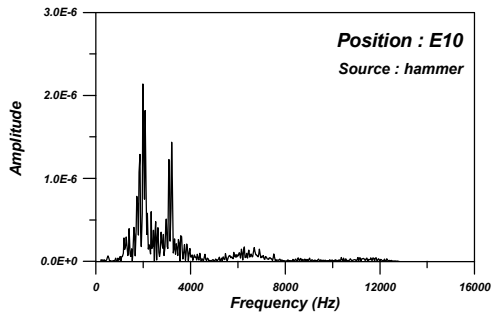
4.2.2.2 건전부에서의 실험 결과

먼저 응용 시편의 건전한 부분에 대해 충격반향 기법 실험을 수행하였으며, 실험 결과는 <그림 12>의 (a)~(j)까지 나타내었다. (a)는 벽 두께에 해당하는 실험 결과로서 P파 속도를 4,150m/sec로 하여 벽 두께를 계산하면 1.14m로서 실제의 두께 1.2m와 비교적 근사한 값을 제공해 주고 있다. (d), (e), (h), (i)는 쉬스(Sheath)에 대한 신호로서 대략 4,400~4,900Hz에 해당하는 공진 주파수를 가지며, 이로부터 깊이를 산정해 보면 0.43~0.47m로서 실제 쉬스(Sheath)의 매설 깊이인 0.45m와 잘 맞는 것으로 나타났다. 그러나 철근의 경우 이론적 공진 주파수가 3,460Hz(매설깊이: 0.3m)이지만, 실험 결과는 (b)에 제시되어 있는 바와 같이 이 보다 큰 4,800Hz를 보이고 있어 충격반향 기법으로 철근의 위치를 추정하는 데는 어려움이 따르는 것을 알 수 있다. 이것은 콘크리트의 P파 속도(약 4,000m/sec)와 철근의 P파 속도(5,200m/sec) 차이가 크지 않기 때문에 나타나는 결과라고 분석된다.

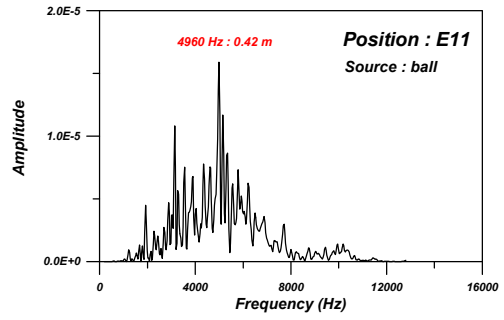
<그림 13>은 <그림 12>의 결과를 하나의 그래프에 도시한 것으로서, 특히 쉬스(Sheath)가 있는 경우에는 그에 해당하는 공진 주파수의 진폭이 크게 나타남을 알 수 있다.



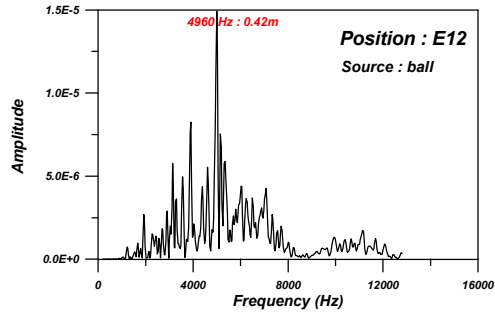
<그림 12> 응용 시편 건전부에서의 충격반향-표면파 기법 실험 결과(계속)



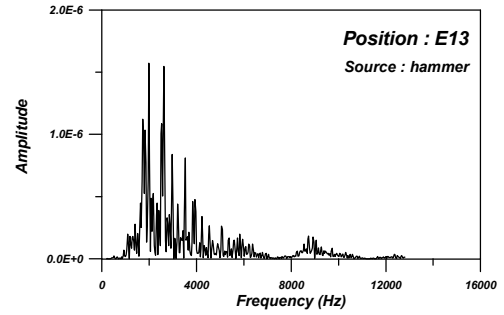
(g) 철근과 쉬스(Sheath) 사이



(h) 쉬스(Sheath)

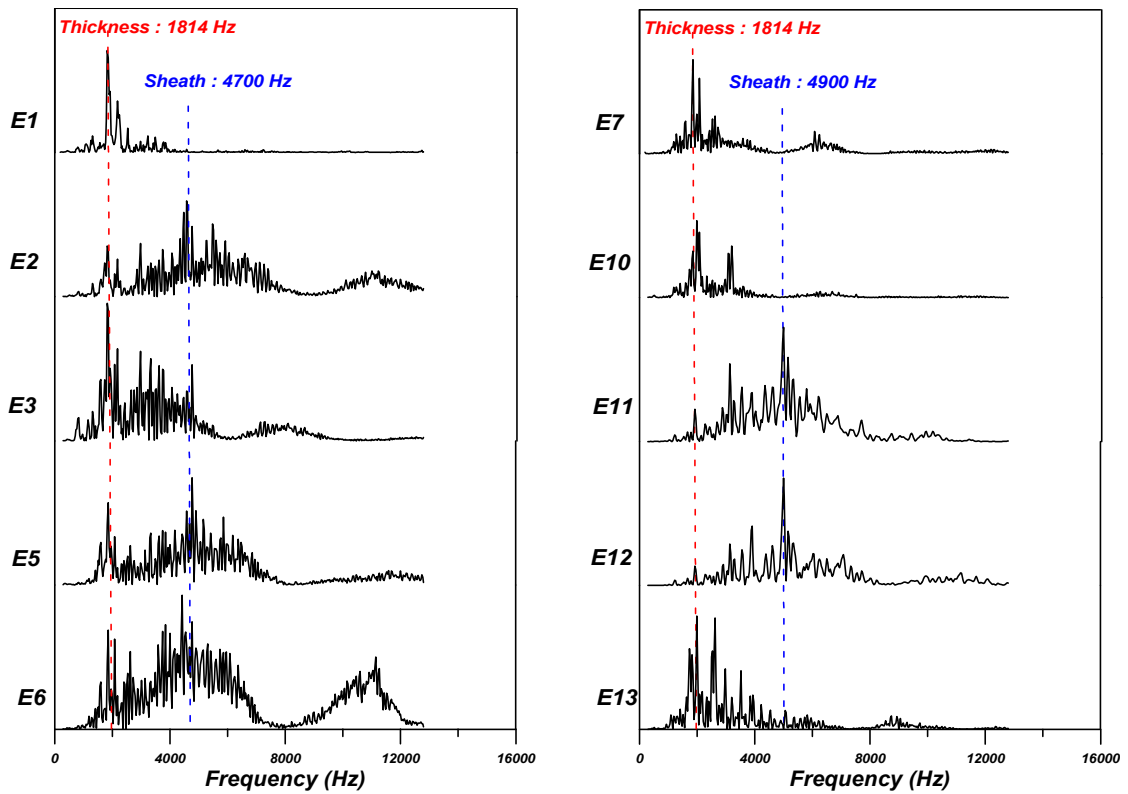


(i) 쉬스(Sheath)



(j) 철근과 쉬스(Sheath) 사이

<그림 12> 응용 시편 건전부에서의 충격반향-표면파 기법 실험 결과

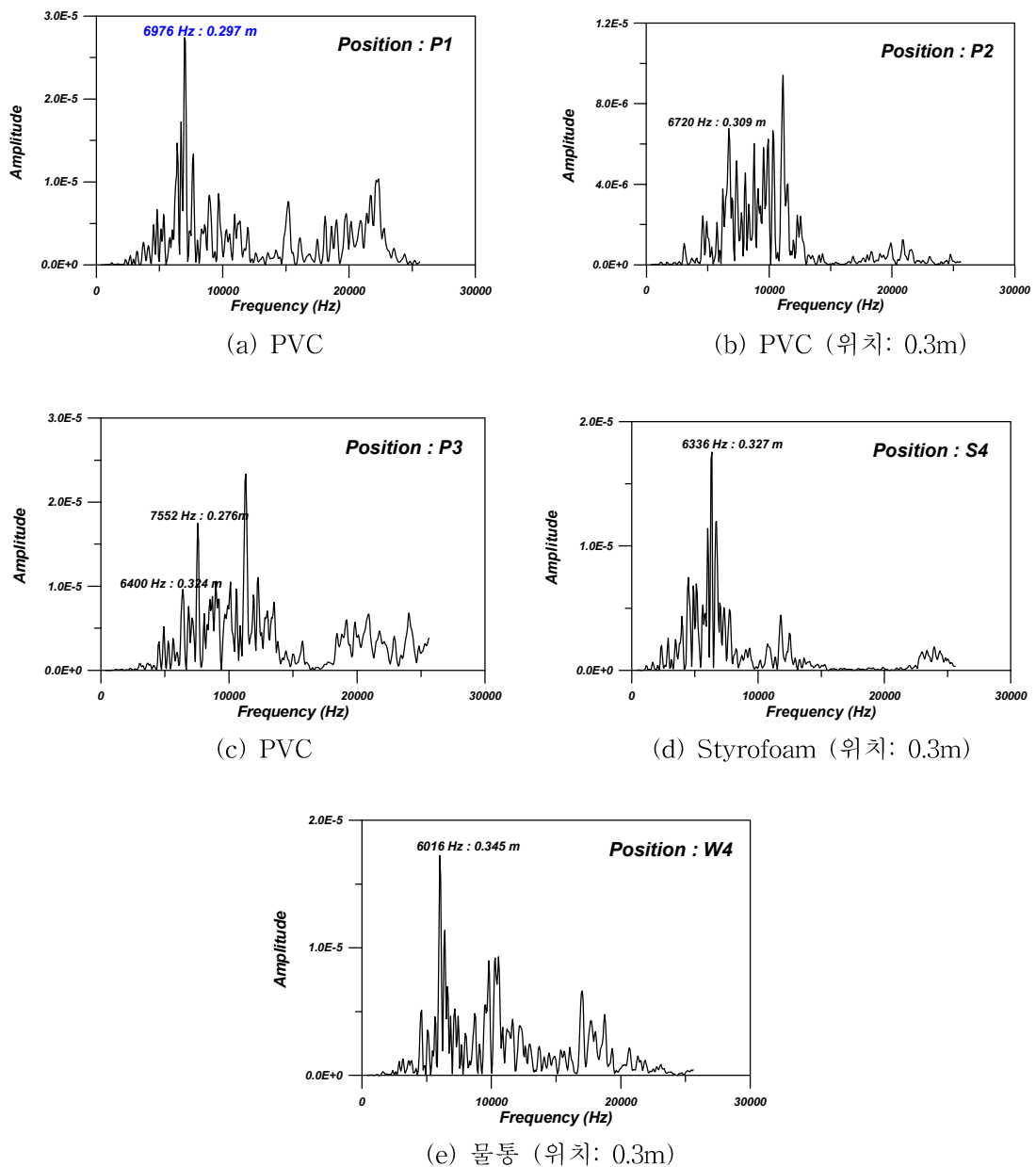


<그림 13> 응용 시편 건전부에서의 충격반향-표면파 기법 실험 결과(종합)

4.2.2.3 결함부에서의 실험 결과

응용 시편 내부에 연직으로 설치되어 있는 PVC 파이프에 대한 충격반향 기법 실험결과는 <그림 14>의 (a)~(c)에 제시되어 있으며, P1, P2, P3의 각 지점에서 얻은 결과를 토대로 PVC 파이프의 매설 심도를 계산해 보면 각각 0.297m, 0.309m, 0.276m로서 실제 PVC 파이프 매설 심도와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

그리고 <그림 14>의 (d)는 Styrofoam의 실험 결과이며, 이로부터 깊이를 계산해 보면 0.327m로 실제 매설 심도인 0.3m와 다소 차이를 보이고 있는 것으로 파악되었다. 또한, <그림 14>의 (e)는 물통에 대한 실험 결과이며, 물통의 위치에 해당하는 공진 주파수를 가지고 깊이를 계산해 보면 0.345m로 실제 매설 심도인 0.3m와 약간의 차이를 보이고 있다. 이와 같이 차이를 보이고 있는 이유는 Styrofoam과 물통을 고정시킨 후 콘크리트를 타설하는 과정에서 위치가 약간 어긋났을 가능성도 배제할 수 없으므로 얻어진 결과는 심각한 오차라고 생각되지는 않는다.



<그림 14> 응용 시편 결함부에서의 충격반향-표면파 기법 실험 결과

5. 결 론

본 연구는 콘크리트 내부의 결함 탐사를 위한 전자기법과 탄성과 기법의 특성과 탐사 한계를 도출하기 위한 연구로서, 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 전자기법을 이용하여 기초 시편에 대한 내부 결함 탐사 결과, 콘크리트 내부의 Styrofoam, 나무, PVC 파이프 등은 탐사가 불가능하였으며, 쉬스(Sheath)관은 철근과 비슷한 형태로 나타나, 콘크리트 내부에 결함이 있는 경우 그 재질 및 철근과의 구별이 어려운 것으로 분석되었다.
- 2) 한편, 응용 시편의 경우 수평방향의 내부결함 위치는 거의 정확하게 찾아낼 수 있었지만, 수직방향의 위치는 찾아내기가 어려운 것으로 나타났다. 그 이유는 수직으로 scan 하는 방향으로 콘크리트 내부에 철근이 배근되어 있어서, 그 간섭에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다.
- 3) 탄성과 기법을 이용하여 기초 시편에 대한 내부 결함 탐사 결과, Styrofoam 및 나무는 비교적 정확하게 탐사하는 것으로 나타났으나, PVC 파이프는 실제 매설 깊이와 다소 차이를 나타내었다. 이것은 PVC 파이프의 단면 형상이 원형으로서 파의 일부가 PVC 파이프를 타고 돌아오기 때문에 발생하는 오차 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 한편, 응용시편의 경우 건전부에서의 실험 결과, 응용 시편의 두께 및 쉬스(Sheath) 등은 비교적 정확하게 탐사하는 것으로 나타났으나, 철근 탐사는 어려운 것으로 파악되었다. 이것은 콘크리트의 P파 속도와 철근의 P파 속도가 크게 차이가 나지 않기 때문에 나타나는 결과라고 분석된다. 결함부에서의 실험 결과, PVC, Styrofoam 및 물통 등은 약간의 오차는 있으나 비교적 정확하게 탐사하는 것으로 나타났다.
- 5) 본 연구를 통하여, 전자기법은 철근의 위치 탐사에 유용한 탐사 기법으로 판별되었으며, 탄성과 기법은 콘크리트 내부의 공동 및 철근 배면부의 공동, 그리고 부재의 두께를 탐사하는 데 매우 효과적인 탐사기법으로 나타났다. 특히 충격반향 기법과 표면파 기법을 병행하여 적용하면 콘크리트 내부의 결함을 보다 정확하게 탐사할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구개발 사업의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 이상균, 송영철, 이상근, 조철희, “콘크리트 내부의 철근 탐사를 위한 측정과 분석”, 한국원자력학회 학술발표회 논문집, October 2000.
- 2) Chong, K. P., Scalzi, J. B., and Dillon, O. W., “Overview of Nondestructive Evaluation Projects and Initiative at NSF,” Journal of Intelligent Materials, System and Structures, Vol. 1, pp. 422-431, October 1990.
- 3) “건축 토목 구조물의 비파괴 검사방법,” 한국콘크리트학회지, 제10권, 제2호, pp. 5-64, 1998.
- 4) Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., “Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range,” ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 3, pp. 262-271, May-June 1998.
- 5) 박석균, 임홍철, “전자파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사”, 콘크리트학회지, 제10권, 2호, pp. 27-39, 1998.
- 6) 윤재진, “구조물 진단의 이론과 실제”, 기문당, 1999.
- 7) 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.
- 8) Rhim, H. C. and Park, K. H., “Imaging of Steel Bars Embedded inside Mortar Specimens for Nondestructive Testing,” KCI Concrete Journal, Vol. 12, No.1, pp. 139-144, January 2000.
- 9) 임홍철, 김우석, “레이더를 이용한 콘크리트 시편내 수평 배근 간격 탐사 (Measurement of Horizontal Rebar Spacing in Concrete Specimens Using Radar),” 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 65-71, 2000년 6월.
- 10) 김동수, 이광명, (1998) “탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사,” 콘크리트학회지, 제10권 2호, pp. 40-49.
- 11) 김동수, 서원석, 김지상, 이광명, (1999) “콘크리트부재의 비파괴검사를 위한 IE-SASW 병행 기법의 적용성 연구,” 대한토목학회논문집, 제19권 I-4호, pp.591-601.
- 12) 이광명, 이회근, 김동수, 김지상, (1998), “콘크리트의 P파 속도에 영향을 주는 인자에 관한 연구,” 콘크리트학회 학술발표회, 제10권 2호, pp. 725-730.
- 13) 배성호, 김학수, 윤운상, (1996), “지반공학과 구조물 진단 분야에서의 GPR기술 응용”, 한국지반공학회지, 제12권, 제4호, pp. 179-193.