

충격탄성파법을 이용한 콘크리트 내부의 결함탐상 기술개발

박 석 균* · 임 창 덕

〈쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실〉

1. 서 론

콘크리트의 내부검사를 위한 비파괴검사법에는 여러종류가 있으나, 현장실용성, 안전성, 경제성, 범용성 등의 측면에서 볼 때 초음파탐상법이 가장 널리 알려져 있다.

그러나 콘크리트와 같이 구성입자가 큰 재료에 대하여 초음파 탐상법을 실시할 경우에는 구성입자 등에 의해 산란되어지는 초음파의 신호가 크기 때문에 강한 에너지의 초음파펄스를 발생시켜야 한다.

이를 위해 강철구의 자유낙하와 스프링 햄머방식을 이용하여 충격탄성파를 발생시키나, 이때 얻어지는 신호는 저주파인 관계로 해석이 복잡하다.

결국 일반적으로 알려진 시간 대역에서의 파형분석이 곤란하기 때문에 새로운 분석기술이 요구되어지며 이를 해결키 위해 주파수 대역에서의 파형분석 방법에 대한 연구를 실시하였다.

2. 충격탄성파(Impact-echo)법의 원리

일반적으로 대상물체에 탄성파를 발생시키는 방법에는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 압전 소자를 이용하는 간접법과 강철구의 자유낙하나 스프링 햄머의 기계적 에너지를 이용하는 직접법으로 나눌 수 있다.

콘크리트와 같이 구성 입자가 큰 재료에 대하여 탄성파 시험을 실시할 경우에는 간접법에 의해 얻을 수 있는 출력 등에 한계가 있어 반사신호가 충분히

도달하기 어려우므로, 높은 출력을 얻기 용이한 저주파의 직접법을 쓴다.

이러한 충격탄성파(Impact-echo)법의 원리는 대상물체의 조건에 맞는 적절한 충격에너지를 주었을 때 여기서 발생된 탄성파가 물체내부의 결함 혹은 매질물동의 불연속면이나 異質面, 자유경계면을 만날 경우 물질의 impedance 차에 의해 반사되어지는 신호 특성을 이용하는 것으로, 이의 원리에 의해 반사된 곳의 위치와 크기 등의 정보를 얻을 수 있다.

또한 여기서 얻어진 시간대 파형의 신호를 해석이 용이한 주파수대의 신호로 변환시키기 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 실시하였다.

3. 실험장치

본 충격탄성파법에 의한 콘크리트내 결함탐상에 사용된 장비의 구성도는 그림 1과 같다.

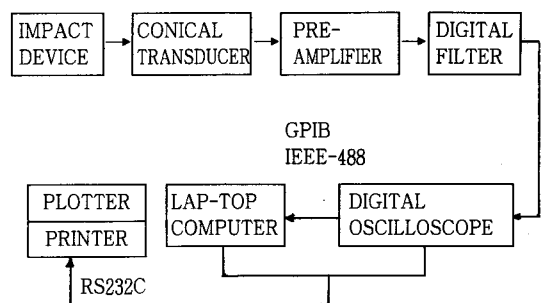


그림 1 충격탄성파 시험장비의 전체구성도

3.1 탐촉자 assembly

본 실험에 사용된 탐촉자는 광대역 원추형탐촉자 (Broad-band conical transducer)로서 filter와 preamplifier를 포함시켜 1set로 한국표준연구소에 의뢰하여 제작받았다.

3.1.1 탐촉자

압전소자는 원추형 PZT를 사용하였고, 황동 backing에 접합하여 원통형 plastic으로 molding 하였다. 후면에는 spring을 대어 압전 소자가 대상 시험편에 양호히 접촉할 수 있도록 하였다(그림 2).

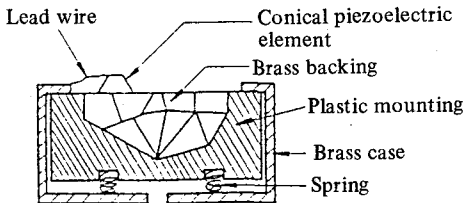


그림 2 충격탄성과 시험용 탐촉자 부분구성도

3.2 Digital oscilloscope Lap-top computer

본 실험시 얻어진 data의 수집 및 저장, FFT 분석등의 처리를 위해 175MHz 용량의 Digital oscilloscope와 HDD 20M Byte 용량의 Lap-top computer를 사용하였고 이들 기기들의 remote control을 위해 GPIB IEEE-488 interface를 부착하였다.

4. 실험분석

4.1 콘크리트 층간경계깊이 탐상

콘크리트의 포장두께 측정, 기초 콘크리트의 바닥깊이 측정, 층간분리 조사등에 활용코자 두층으로 이루어진 콘크리트의 경계층 깊이 탐상실험을 실시하였다.

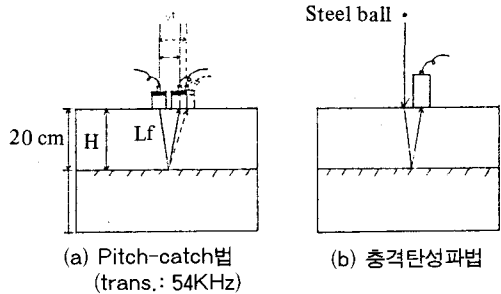
이의 실험에는 지금까지 논의된 충격 탄성파법 외에 Pitch-catch법을 병용하여 양방법의 특성을 비교검토 하였다.

여기서 Pitch-catch법을 사용할 경우, 콘크리트의 표면을 따라 전파하는 초음파와 내부로 전파하여

경계층에서 반사 되어오는 초음파신호가 중첩되게 나타나 후자만의 신호판독이 곤란하다.

따라서 그림 3에서와 같이 탐촉자간 거리 Lt를 파의 진행거리 Lf 변화를 거의 무시할 수 있게 변화시켜 가면서 표면파의 위상변화를 찾아내 반사파의 신호만을 분리 해석코자 하였다. 즉 기준파형과 거리변화후의 파형 peak가 서로 일치되는 시작점까지를 진행시간 Th로 산정하였다.

이들 방법에 의해 얻어진 탐상 데이터는 그림 4에서와 같다.



$$Th = Lf/Vc = \sqrt{4H^2 + Lt^2}/Vc \quad F = \frac{Vc}{2H}$$

(Th : Lf의 도달시간) (F : 경계층에서의 반사주파수)

그림 3 콘크리트의 층간경계깊이 탐상개략도

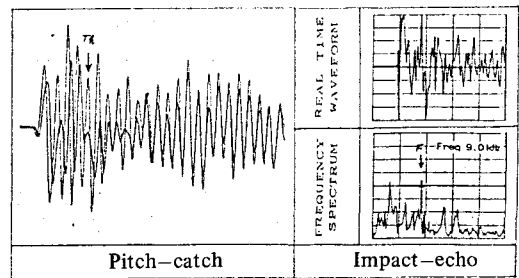


그림 4 콘크리트 층간경계깊이 탐상파형과 스펙트럼

그림 4의 측정데이터로 부터 이들 방법에 의해 계산된 결과를 표 1에 비교정리하였다.

콘크리트의 층간경계깊이 탐상精度

표 1

	Pitch-catch 법	충격탄성파법	비 고
실제깊이	20.5cm	20.5cm	콘크리트 초음파속도 Vc=3800m/sec
측정깊이	23cm	21cm	
오 차	+2.5cm	+0.5cm	

상기 방법들에 의한 비교적 얇은 깊이에서의 콘크리트의 층간 경계 깊이 탐상결과는 충격탄성과 (Impact-echo) 법이 Pitch-catch법보다 훨씬 양호하게 나타났으며, 검출 깊이도 거의 정확하였다.

4.2 대형 콘크리트블럭 시험체내의 각 유형별 결함탐상

4.2.1 시험체의 설계

다양한 결함조건에서의 탐상특성을 고찰하기 위하여 현장에 대형 콘크리트블럭을 타설하였다. 내부에는 각 유형별, 크기별, 깊이별로 나누어 총 22종의 인공결함을 제작배설하였고, 블럭크기는 단면을 4m×7m, 두께를 40cm로 하여 각 결함탐상시 측면경계로부터 나타나는 표면과의 반사신호 영향을 감소시켰다.

총 6개 section별로 나뉘어진 본 결함조건 상의 배치도는 그림 5, 6에서와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 section A-A와 section B-B의 일부에는 일정 깊이의 각 크기 변화별 원판형 결함을, section B-B에는 일정크기의 각 깊이변화별 원판형 결

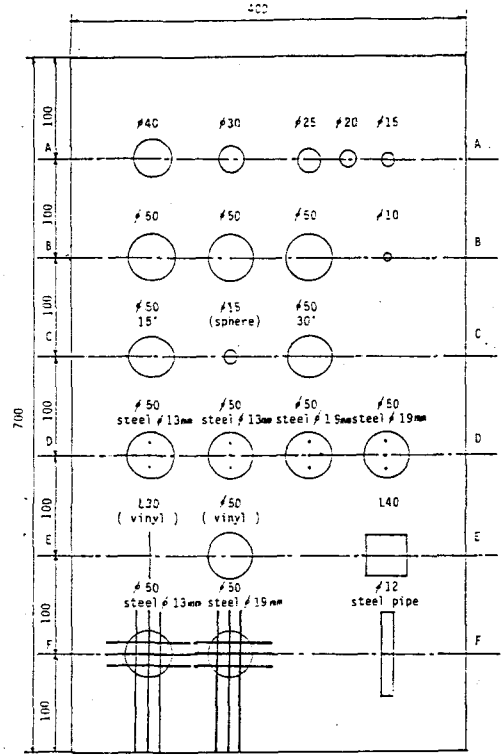


그림 6 대형 콘크리트 시험체내의 인공결함 배치도(II)

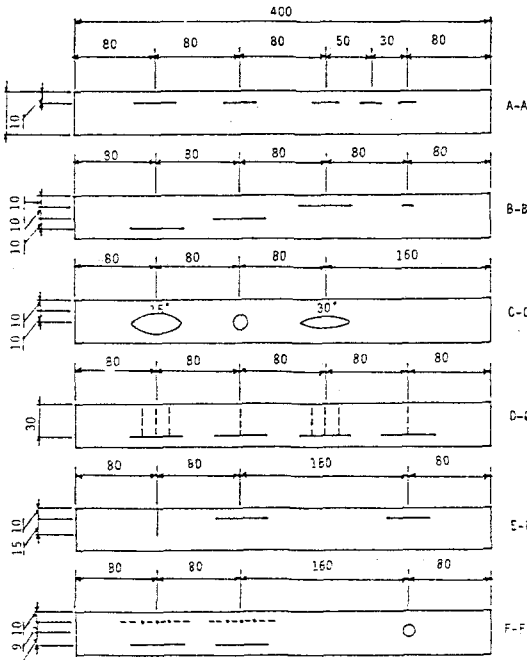


그림 5 대형 콘크리트 시험체내의 인공결함 배치도(I)

함을, section C-C에는 일정크기의 각 경사변화별 원판형 결함과球形 결함을 각각 배치하였다.

또한 section D-D와 F-F에는 철근 직경과 배치 조건 변화별 일정깊이의 원판형 결함을 배치하였는데, 일정크기의 원판형 결함에 각각 수직, 수평한 중방향, 횡방향 철근배근을 직경별로 변화시켰다.

section E-E에는 수직형 비닐결함과 원판형 비닐결함, 그리고 평판형(사각) 결함을, section F-F의 일부에는 Steel pipe를 배치하였다.

결함의 재질은 두께 2cm의 스티로폴과 50μm의 비닐을 사용하였고, 제작된 인공 결함은 프래쉬한 콘크리트의 타설시 流動에 충분히 전달 수 있도록 설치하였다.

4.2.2 탄성과 속도의 측정

콘크리트 내부결함의 깊이를 계산하기 위해 결함이 없는 부위에 대하여 충격탄성과의 P파가 콘크리트 내부를 진행하여 얻어지는 속도를 측정하였다.

그 대표적인 측정결과가 그림 7에 나타나 있으며, 시간대의 신호로부터 FFT 분석을 실시한 결과 4.1KHz에서 뚜렷한 주파수 신호가 얻어졌다. 이를 콘크리트표면에서 바닥까지 왕복하는 Fundamental resonant frequency라 하면, 콘크리트의 타설두께가 40cm이므로 속도는 3280m/sec가 된다.

그러나 콘크리트의 타설상태와 품질상태등에 따라 속도에 다소의 변동은 예상되며 그 폭은 약±100m/s 이내로 추정된다.

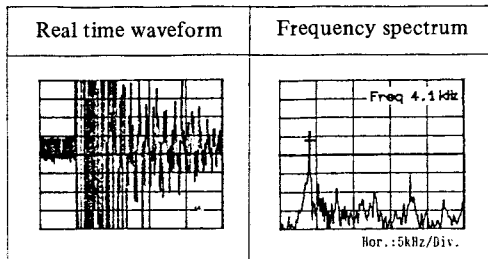


그림 7 결함이 없는 콘크리트부 탐상시의 시간대 파형과 주파수 스펙트럼

4.2.3 각 결함유형별 탐상분석

각 결함이 매설되어 있는 위치의 콘크리트 표면을 연마한 후, 결함의 형상을 표면에 표시하였다. 탐상은 수평 위치를 x, y 방향으로 양분한 후 횡단 탐상하였다. 이때의 탐상 point는 결함의 크기에 따라 적의 선정하였는데, point간의 간격은 결함중심부분은 5cm 단위로 크게하였고, 결함의 경계 근처는 2.5cm 단위로 세분하였다. 이의 탐상도를 그림 8에 예로 나타내었다.

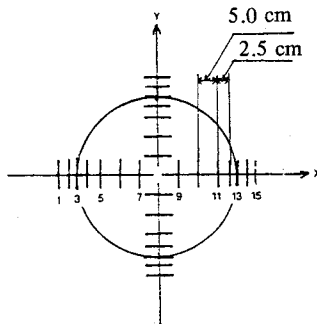


그림 8 결함(직경 40cm) 위 콘크리트 표면의 x, y방향 횡단 탐상도

특히 탐측자는 piezoelectric element부를 x, y 의 해당 point에 맞추어 이동시켰고, 이에 따른 강철구의 낙하지점은 이동축의 수직방향위치로 하였다.

이상의 조건 하에 실시된 각 결함 유형별 탐상분석결과는 다음과 같다.

여기서 결함의 측정점에서 마다 얻어진 시간대 파형과 FFT spectrum 자료의 분석 예시는 각 경우에서의 탐상분석 경향이 유사하여 대표적인 예에 대해서만 일부 언급하였고, y축 방향의 분석도 x축 방향의 결과와 유사하게 나타나 생략하였다.

1) 결함 크기 변화에 따른 탐상 특성

본 탐상법에 의해 탐상이 가능한 결함의 크기 한계를 검토하기 위해 원판형 결함의 크기 변화별 탐상분석을 실시하였다.

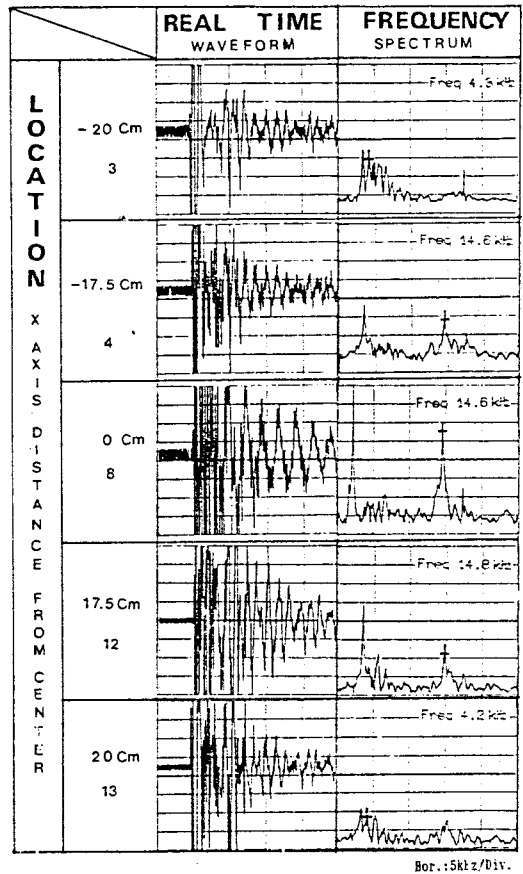


그림 9 결함 크기변화별 탐상시의 시간대 파형과 주파수 스펙트럼 (대표위치)

결합 크기는 10cm로 일정하게 유지하고 각 결합 크기는 직경 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 40cm의 총 6종으로 변화시켜 실험을 실시하였다.

직경 40cm의 결합에 대하여 그림 8에서와 같이 x축 방향으로 총 15개 위치점에서 탐상을 실시하였고, 이 중 탐상위치번호 3, 13에서는 4.2~4.3KHz의 저주파가 존재하고, 이를 깊이로 환산하면 38~39cm가 되어 콘크리트 시험체의 설계깊이 40cm보다 1~2cm 작게 나타난다. 또한 결합의 윗면에 해당하는 번호 4~12까지는 14.6~14.9KHz의 주파수가 뚜렷이 나타나 약 11cm의 깊이에 해당되고 있어 결합의 설계깊이 10cm 보다 1cm 크게 나타나고 있다(17.4KHz의 주파수는 noise). 특히 결합의 경계에 해당하는 번호 13의 위치에서는 결합대에서 나타나는 주파수(15.1KHz)와 콘크리트바닥에서 나타나는 주파수(4.2KHz)가 약하게나마 공존하고 있어 본 위치가 결합의 경계에 해당함을 알 수 있다.

그리고 결합이 있는 위치에서 뚜렷이 나타나는 2~4KHz의 저주파는 결합과 콘크리트표면 사이층이 원형막의 고유진동현상을 일으켜 나타나는 주파수에 해당된다.

이상과 같은 방법에 의해 얻어진 각 결합크기변화별 탐상분석결과를 횡단면 mapping하여 그린 것이 그림 10과 그림 11의 일부에 나타나 있다.

(-실제결합, * 탐상결과)

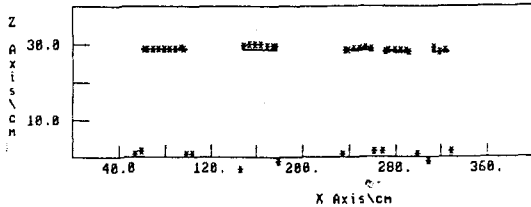


그림 10 결합 크기변화별 탐상결과와의 횡단면 mapping

(-실제결합, * 탐상결과)

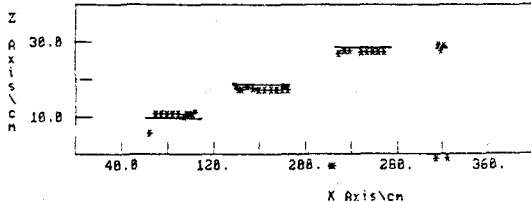


그림 11 결합 깊이변화별 탐상결과와의 횡단면 mapping

따라서 각 결합 크기변화별 깊이 탐상결과, 결합의 깊이에 대한 직경비(D/H)가 1이상인 경우, 본 탐상법에 의한 결합탐상은 가능한 것으로 판단되며 그 비가 커질수록 탐상精度는 향상되었다.

2) 결합 깊이변화에 따른 탐상특성

동일 크기의 결합에 대하여 깊이변화에 따른 탐상특성을 검토하기 위해 원관형 결합의 깊이변화별 탐상분석을 실시하였다.

결합 크기는 직경 50cm로 일정하게 유지하고 각 결합 깊이는 표면으로부터 10cm, 20cm, 30cm의 총 3종으로 변화시켜 실험을 실시하였다.

이의 탐상결과를 앞서와 같은 분석방법을 통하여 횡단면 mapping하여 그린 것이 그림 11이다.

본 조건에서의 탐상결과 깊이 탐상시는 약 1~2cm의 오차로, 크기탐상시는 약 1~5cm의 오차로 탐상되었고, 역시 결합이 표면으로부터 깊을 경우 즉 바닥에 가까운 경우는 바닥신호의 영향에 의해 탐상精度는 저하되었다.

3) 결합 경사도 변화에 따른 탐상특성

결합이 경사져 있을 때의 탐상특성을 검토하기 위해 동일크기의 원관형 결합에 대하여 경사도 변화별 탐상분석을 실시하였다.

결합 크기는 직경 50cm로 일정하게 유지하고 각 결합의 경사도는 15°와 30°의 총 2종으로 변화시켜 실험을 실시하였다.

이의 탐상결과를 그림 12, 13에 나타내었다.

(-실제결합, * 탐상결과)

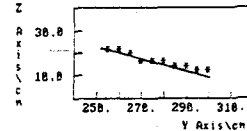


그림 12 경사도 15° 결합에 대한 탐상결과와의 횡단면 mapping

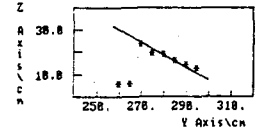


그림 13 경사도 30° 결합에 대한 탐상결과와의 횡단면 mapping

본 조건에서의 탐상결과, 결합의 경사도 변화에 따른 탐상경향성은 분명히 나타나고 있으나, 경사도가 클수록 탐상精度는 저하하였다.

또한 수평으로 놓인 결합의 탐상결과에서 보다 탐상精度는 낮았다.

그러나 본 탐상법에 의한 경우 경사진 결합에 대해서도 탐상은 가능하다고 판단된다.

4)球形 결함의 탐상특성

지금까지는 원판형결함에 대한 탐상분석을 실시하였으나, 결함의 형태가球形일 경우의 탐상특성을 검토하기 위하여, 직경 15cm의 공을 이용하여 본 탐상분석을 실시하였다.

역시 같은 분석방법에 의해 이의 탐상결과를 횡단면 mapping하여 나타내면 그림 14에서와 같다.

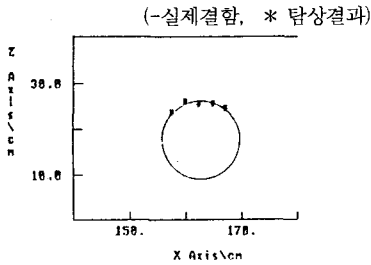


그림 14 球形결함에 대한 탐상결과와 횡단면 mapping

5) 수직형 결함, 얇은 결함, 평판형(사각) 결함
결함이 표면에 수직으로 나있는 경우와 50 μ m의 얇은 두께를 갖는 경우, 그리고 평판형(사각) 결함의 경우에 대한 탐상 특성을 검토하기 위하여 각 결함에서의 탐상분석을 실시하였다. 결함의 제작은 50 μ m의 비닐을 사용하여 각각 표면에 수직한 깊이 25cm, 폭 30cm의 사각형결함과 깊이 10cm에 수평한 직경 50cm의 원판형결함으로 하였다. 또 평판형(사각) 결함은 깊이 10cm에 변40cm의 정사각형 스티로폴로 제작하였다.

탐상실험은 먼저 표면에 수직한 깊이의 결함탐상 경우 그림 15에서와 같은 탐상방법으로 하였다.

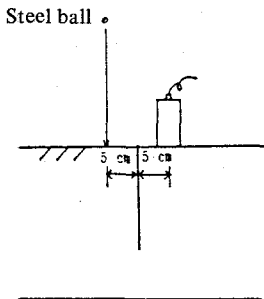


그림 15 표면에 수직한 깊이의 결함탐상 개략도

이에 의해 탐상된 시간대 파형과 FFT 스펙트럼 데이터는 그림 16에서와 같다.

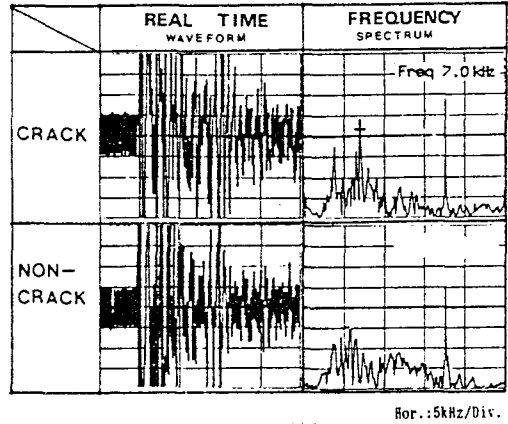


그림 16 표면에 수직한 결함탐상시의 시간대 파형과 주파수 스펙트럼

본 자료에 의해 해석된 결과, 결함의 깊이는 약 23cm로 실제깊이 25cm보다 2cm작게 나타났다 (17.4Hz의 주파수는 noise).

결국 본 탐상방법에 의해서도 비교적 깊은 깊이의 수직결함에 대한 탐상이 가능하며, 일반 초음파 Pitch-catch법(PUNDIT 사용)에 의한 수직균열 탐상시의 제약성을 극복할 수 있을 것으로 판단되므로, 이러한 유형의 결함에 대해 더욱 양호한 精度의 탐상이 기대된다.

다음으로 나머지 두 결함에 대한 탐상은 기존의 실험 및 분석방법과 동일하게 실시하였다.

이들의 탐상결과를 횡단면 mapping하여 그린 것이 그림 17이다.

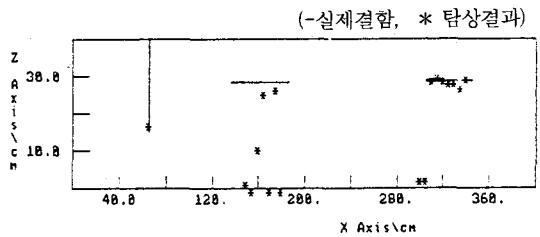


그림 17 수직형결함, 얇은 결함, 평판형(사각) 결함 탐상 결과의 횡단면 mapping

이 결과로부터 두께가 얇은 비닐 원판형 결함은 콘크리트 타설시에 비닐이 한쪽 방향으로 기울어져 이에 따른 경향대로 탐상된 것으로 판단되며, 일부의 측정점에서는 설계깊이에서와 근접되게 나타나

두께가 얇은 경우에서도 탐상은 가능할 것으로 사료된다.

또한 평판형(사각) 결함은 원판형결함에 비하여 탐상精度는 저하되나, 비교적 양호히 탐상되어 결함의 형상변화에 따라서도 탐상이 가능함을 보여줬다.

6) 철근배근 영향에 따른 결함탐상 및 철배관의 탐상특성

실제 콘크리트 구조물은 구조체의 경우 대부분 철근이 배근되어 있다.

따라서 철근이 배근된 경우의 결함 탐상특성을 검토하는 일은 매우 중요하다.

본 탐상에서는 철근의 배근형태에 따른 탐상특성을 검토하기 위하여 직경이 13mm, 19mm의 2종류의 철근에 대해 각각 종방향, 횡방향 배근형태별 결함탐상분석을 실시하였다. 결함은 직경 50cm의 원판형으로 표면에서 30cm의 깊이에 매설하고, 그 위에 종방향 배근의 경우는 수직으로 각각 3가닥, 5가닥의 길이 25cm의 철근을, 횡방향 배근의 경우는 수평으로 가로·세로 각 3가닥씩으로 묶은 철근을 배치하였다.

또한 철배관의 탐상특성을 검토하기 위하여 속이 텅빈 직경 12cm의 steel pipe 표면에서 배관 중심 깊이 19cm 위치에 매설하였다.

탐상결과 종방향 배근의 영향은 거의 없다고 판단되나, 횡방향 배근시는 철근과 콘크리트의 타설 상태에 따라 영향을 받는 것으로 판단되며, 탐상精度도 낮았다.

따라서 횡방향으로 배근된 콘크리트 구조물의 탐상시에는 실험 및 해석시 주의가 필요하다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 비교적 깊이가 얇은 콘크리트 층간 경계깊이를 탐상한 결과, 충격탄성과(Impact-echo)법이 초음파 Pitch-catch법 보다 훨씬 양호하게 나타났으며, 검출깊이도 0.5cm의 오차로 측정되었다.

2) 현장에 타설된 대형 콘크리트 블럭시험체에 대하여 내부에 총 22종의 각 유형별 결함을 인공매설

하여 탐상한 결과,

- 결함의 직경과 깊이의 비(D/H)가 1이상이면 매우 양호하게 검출되었다.

- 결함이 기술어진 경우에 대해서도 경사도에 따른 탐상경향성이 뚜렷이 나타났으나, 비경사형에 비해 탐상精度는 저하하였다.

- 球形과 평판형(사각) 결함도 비교적 양호히 검출되었으나, 원판형 결함에 비해 탐상精度는 저하하였다.

- 깊이 20cm이상의 표면에 수직으로 나 있는 비닐형 결함(균열)도 깊이가 양호히 검출되어, 일반초음파 Pitch-catch법이 갖는 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단되었다.

- 철근의 배근영향에 따른 결함탐상특성은 결함면에 수직인 종방향배근의 경우 철근수나 두께에 상관없이 결함탐상에 영향을 받지 않았으나, 결함면에 평행한 횡방향 배근의 경우 철근과 콘크리트의 타설상태에 따라 탐상精度가 저하되어 실험 및 해석시 별도의 주의가 필요하다.

결론적으로 충격탄성과법에 의한 콘크리트의 저주파탐상은 고주파탐상법으로는 불가능한 내부결함에 대한 탐상도 가능하다.

<참 고 문 헌>

1. 이세경, 김영환, "콘크리트 구조물에 대한 초음파탐상법 개발(I~III)", 과학기술저, 한국표준연구소, 1987~1989
2. Young Hwan Kim, "Effects of attenuation and dispersion on frequency spectrum of vibration in multiphase materials", KAIST, 1990.
3. Nicholas J. Carino, Mary Sansalone, and Nelson N. Hsu, "A point source-point receiver, pulse-echo technique for flaw detection in concrete", ACI Journal title no. 83-20, March-April 1986
4. Nicholas J. Carino, Mary Sansalone, and Nelson N. Hsu, "Flaw detection in concrete by frequency spectrum analysis of impact-echo waveforms", International Advance in Nondestructive Testing
5. Robert Resnick, David Halliday, "Sound wave" PHYSICS for students of science and engineering