(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0079515
(43) 공개일자 2021년06월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/04 (2006.01) *G01N 29/12* (2006.01)
G01N 29/14 (2006.01) *G01N 29/44* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/045 (2013.01)
G01N 29/12 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0171372
(22) 출원일자 2019년12월20일
심사청구일자 2019년12월20일

(71) 출원인
동아대학교 산학협력단
부산광역시 사하구 낙동대로550번길 37, 동아대학교 내 (하단동)
(72) 발명자
기성훈
부산광역시 강서구 명지국제5로 89, 206동 2004호 (명지도, 명지국제신도시 호반베르디움2차)
(74) 대리인
이형우

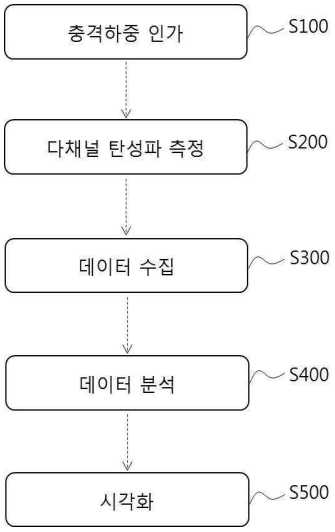
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 **다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법**

(57) 요 약

본 발명은 다채널 탄성파 측정을 지원하는 프로토타입 장비를 통해 실험실의 콘크리트 실험체에서 층분리 결함을 평가하고, IE 테스트에서 층분리 평가를 위해 중요한 파동 모드를 추출하기 위한 신호 처리 방법을 통해 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 관한 것이다. 본 발명에 따르면, 콘크리트의 층분리 결함을 검사하기 위한 방법으로서, 층분리 결함을 검사할 콘크리트에 인가한 충격으로부터 다채널의 탄성파 신호를 획득하고, 획득된 다채널 탄성파 신호를 위상변화 방법으로 주파수-위상속도 이미지로 변환하며, 변환된 주파수-위상속도 이미지로부터 램파 모드를 추출하여 그 추출된 램파 모드로부터 콘크리트의 층분리 결함을 분석하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법이 제공된다.

대 표 도 - 도3



(52) CPC특허분류
G01N 29/14 (2013.01)
G01N 29/44 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1615010731
부처명	국토교통부
과제관리(전문)기관명	국토교통과학기술진흥원
연구사업명	국토교통기술지역특성화사업
연구과제명	산업부산물을 활용한 시멘트계 불연성 흡음·단열·내화재 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	동아대학교 산학협력단
연구기간	2017.08.01 ~ 2019.10.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

콘크리트의 층분리 결함을 검사하기 위한 방법으로서,

층분리 결함을 검사할 콘크리트에 인가한 충격으로부터 다채널의 탄성파 신호를 획득하고,

획득된 다채널 탄성파 신호를 위상변화 방법으로 주파수-위상속도 이미지로 변환하며,

변환된 주파수-위상속도 이미지로부터 램파 모드를 추출하여 그 추출된 램파 모드로부터 콘크리트의 층분리 결함을 분석하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 추출된 램파 모드는 공진 모드 및 A0 램 모드이며,

상기 층분리 결함의 분석은 상기 추출된 램파 모드에서의 표면파 속도와 주파수에 근거하여 층분리의 두께와 크기 및 깊이를 분석하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 콘크리트의 층분리 결함의 분석 결과는, 표면파 속도, 피크 주파수 및 층분리 깊이의 값의 변화 값을 이용하여 표면파 속도 맵, 주파수 맵, 박리두께와 면적 맵으로 디스플레이부에 시각화하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 4

콘크리트의 층분리 결함을 검사하기 위한 방법으로서,

콘크리트에 충격 하중을 인가하는 충격하중 인가 단계;

복수의 가속도계를 포함하는 다채널 탄성파 측정 유닛을 통해 인가된 충격 하중에 따른 진동에 의해 생성된 입사 탄성파를 다채널로 측정하는 다채널 탄성파 측정 단계;

상기 측정된 다채널 탄성파의 데이터를 전송하여 하기 분석 단계를 실행하는 분석 장치에 수집되는 데이터 수집 단계;

상기 수집된 다채널 탄성파의 데이터를 분석하여 콘크리트의 층분리 결함의 두께와 크기 및 깊이를 획득하는 데이터 분석 단계; 및

상기 데이터 분석 단계에서 분석된 결과에 기반하여 콘크리트 층분리의 결함을 분석 장치의 디스플레이부에 시각화하는 시각화 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 다채널 탄성파 측정 단계는, 상기 충격이 가해지는 충격원 가진 위치와 가속도계 검출 위치를 포함하는 위치 인자와, 검출 시간 및 주파수를 측정하며,

상기 다채널 탄성파 측정 유닛은 복수의 다채널 센서 모듈이 센서 배열 프레임에 일렬로 배열되어 구성되고, 센서 하우징의 하부에 구비되는 가속도계, 상기 센서 하우징의 상부에 구비되는 댐핑 고무 및 상기 가속도계와 댐핑 고무 사이에 개재되는 압축 스프링을 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 데이터 분석 단계는, 상기 수집된 데이터에 기초하여 시간 영역 신호를 구하여 분산 이미지를 획득하고, 획득된 분산 이미지를 통해 공진모드 분석과 전파파 분석을 실행하여 두께와 크기 및 깊이를 포함하는 층분리 결함을 획득하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 데이터 분석 단계에서 시간 영역 신호는, 측정 위치에서 측정된 시간신호 u(r, s, t), r = (xr, yr) 및 s = (xs, ys)에서 두 가지 다른 크기의 윈도우 함수(hanning window)를 적용하여 전파 응력파와 비전파 응력파를 추출하고,

(여기에서, xr 및 yr은 다채널 탄성파 측정 유닛에서 복수의 센서 모듈이 배열된 배열 중심 위치이고, xs 및 ys는 충격 하중의 위치이며, t는 시간임),

상기 분석 이미지의 획득은 위상 이동법을 이용하여 충격원 가진 위치에서 발생된 신호 측정으로 얻은 신호 uj(r, s, t)를 아래 식과 같이 주파수 및 위상 속도 영역 Sj(ω, Vph)으로 전환하며, 적분변환으로 일련의 주파수 및 위상 속도에 대해 0에서 1 범위의 값을 생성하여 주파수와 위상속도 이미지를 획득하며,

$$S_j(w, V_{ph}, x_s) = \int e^{-i(\frac{\omega}{V_{ph}})x_r} [U_j(r,s,w)/|U_j(r,s,w)|] dx_r$$

(여기에서, $U_j(r,s,w)$는 $u_j(r,s,t)$의 푸리에 변환이고, j는 윈도우 함수의 유형이고, bw와 nw는 각각 넓은 윈도우 신호와 좁은 윈도우 신호이고, r은 가속도계 검출 위치이고, s는 충격원 가진 위치, t는 시간, ω는 각 주파수(=2πf), V_{ph}는 위상속도임)

상기 획득된 주파수-위상속도 이미지로부터 램파 모드를 추출하여 그 추출된 램파 모드로부터 콘크리트의 층분리 결함을 분석하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 시각화 단계는,

상기 주파수-위상속도 이미지로부터 표면파 속도의 변화, 피크 주파수의 변화 및 층분리 깊이의 변화값을 이용하여 표면파 속도 맵, 주파수 맵, 및 박리 두께와 면적의 시각화 맵으로 시각화하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는

다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 다채널 탄성파 측정을 지원하는 프로토타입 다채널 탄성파 측정 장비를 통해 콘크리트에 대한 층분리 결함을 신속하고 정확하며 일관된 결과를 얻을 수 있는 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 일반적으로 콘크리트는 다른 재료에 비하여 내구성 및 내열성이 우수하고 임의의 형상을 지닌 구조물을 현장에서 용이하게 시공할 수 있으므로, 일반 건축물은 물론 교량, 댐과 같은 산업용 구조물 및 원자력발전 설비, 군사시설과 같은 특수 구조물에도 널리 사용되고 있다.

[0004] 철근 콘크리트 구조물은 시간이 경과함에 따라 내, 외부적인 영향과 물리, 화학적인 요인 등에 의하여 구조재의 품질 및 성능 저하가 발생하고 그에 따른 열화현상이 발생하게 되는데, 철근 콘크리트 구조물에 발생하는 열화현상은 콘크리트 구조물에 대한 균열(crack) 및 콘크리트 박락, 철근 노출 등과 같은 현상을 수반하게 되며, 이러한 콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬워서 붕괴의 우려성을 내포하고 있다.

[0005] 콘크리트의 균열은 상기와 같은 여러 원인에 의하여 콘크리트의 경화를 전후로 하여 나타나는데, 균열이 표면에서 관측할 수 있을 때면 이미 콘크리트의 내부조직에는 미세 균열로 인하여 조직이 상당히 손상되어 있다.

[0006] 콘크리트 내에 균열이 생기면 이 콘크리트의 강도는 기대치에 미치지 못할 뿐만 아니라, 주위의 온습도의 변화, 소금물과 같은 화학성분의 침투로 균열이 점차 성장하고 부식되어 콘크리트의 안전도에 큰 문제를 일으키게 된다.

[0007] 이러한 콘크리트 구조물의 균열을 검사하는 방법은 주로 육안 검사, 광섬유, 압전 소자, CT 스캔, 음향 방출 센싱, 전도성 페인트 등을 이용하여 검사하고 있다.

[0008] 그러나 육안 검사는 외부 균열은 용이하게 파악할 수 있으나, 내부 균열에 대해서는 파악하지 못한다.

[0009] 격자형 광섬유를 이용한 방법은 광섬유를 통과하는 빛의 산란을 측정하는 것으로 빛의 파장의 변화 정도로부터 균열을 파악하는 것으로, 파장 변화에 따라서 균열이 발생된 것을 검출하기 때문에 정확하게 균열이 발생됐는지 알 수 없다.

[0010] 압전 소자는 압전 소자의 수명이 짧고 CT 스캔은 장비가 고가이며, 음향 방출 센싱은 균열 발생시 발생하는 소리를 검출하는 것으로, 소음이 큰 지역에 설치될 경우 검출이 불가한 문제점이 있다.

[0011] CT 스캔 또는 X-ray 스캔을 이용하는 방법은 콘크리트 구조물의 내부 균열까지 검출할 수 있다는 장점은 있으나, 실시간으로 균열의 발생 여부를 모니터링 할 수가 없고, 콘크리트 균열의 폭이 매우 가늘 경우에는 해상도가 매우 높은 고가의 장비를 사용할 경우에만 측정이 가능하다는 단점이 있다.

[0012] 음향 방출 센싱 방법은 초소형 마이크를 이용하여 균열이 발생할 때의 소리를 측정하는 것이다. 그러나 마이크의 손상 위험이 크고 소음이 큰 실제 공사 현장에서 적용이 제한적이며 마이크 및 음향정보 처리장치가 매우 고가이고 복잡하다는 단점이 있다.

[0013] 한편, 콘크리트 내부의 층분리(delamination) 결함은 콘크리트에 매입된 철근의 부식에 발생하는 콘크리트 표면과 평행으로 발생하는 균열을 의미한다.

[0014] 이러한 콘크리트 내부의 층분리 결함과 관련하여, 충격 반향 기법 또는 충격 반향 시험인 IE(Impact-Echo) 테스

트는, 다양한 깊이의 층분리 결함이 있는 콘크리트의 상태 평가, 즉 판형 콘크리트 부재의 내부 층분리 결함을 평가하는데 효과적인 방법으로 알려져 있다.

[0015] 도 1은 IE 시험의 충격원과 수신기 및 주파수 신호를 통해 얻어진 결과를 나타내는 도면으로, (a)와 (d)는 균열이 없는 콘크리트 판, (b)와 (e) 및 (c)와 (f)는 각각 비교적 깊고 얕은 층분리 결함을 갖는 콘크리트 판에서 얻은 결과를 나타내는 도면이다.

[0016] 도 1의 (b)와 (e) 및 (c)와 (f)와 같이 콘크리트 내부에 층분리 결함이 있다고 해서 반드시 구조적 결함을 의미하지는 않는다. 하지만, 층분리 결함 사이에 콘크리트의 수분 및 기타 유해 물질의 침투를 증가시켜 내구성 문제를 발생시킬 수 있다. 이는 콘크리트 부식 및 기타 열화 메커니즘(동결융해에 따른 피해 및 중성화)을 가속시킬 수 환경을 제공할 수 있음을 의미한다.

[0017] 특히, 적절하게 관리되지 않을 경우, 철근의 부식이 지속될 수 있고, 층분리 부위가 콘크리트 구조체에서 떨어져 나가는 박락(spalling)현상을 유발할 수 있다. 건물 및 토목 시스템에서 판형 콘크리트 요소(건물의 슬래브, 콘크리트 교량 데크 및 연속 콘크리트 포장)에서 층분리 결함은 콘크리트의 내구성 및 구조적 건전성에 중대한 영향을 끼칠 수 있으며, 사용자의 안전에 위협을 줄 수 있다.

[0018] 지금까지 많은 국가에서 신규 건설 분야 투자에 대하여 기존에 노후화 또는 손상된 콘크리트 구조물의 유지 보수에 상당한 예산을 배정하고 있는 실정이며, 특히 콘크리트에서 층분리 현상은 육안평가만으로는 관측이 어려워 관리적 측면에서 특별히 주의가 요구된다. 콘크리트 요소에서 층분리를 평가하고 필요한 경우 콘크리트 구조물의 유지 보수에 대한 적절한 결정을 내리는 것이 중요하다.

[0019] 콘크리트 내부의 층분리 결함을 평가하는데 있어, 상기에서 언급한 IE 시험은 충격하중 가진에 따라 생긴 응력파 전달에 따라 발생된 콘크리트의 동적 응답을 측정하는 방법이다.

[0020] 콘크리트 표면에 가한 기계적 충격은 콘크리트 판에 전파되는 체적파(P 및 S 파)와 표면파를 생성한다(도 1 참조). 다중반사 및 모드변환 된 체적파는 결국 무한히 많은 응력파 모드를 발생시킨다. 이와 같이 판의 단면에 에너지가 갇혀 발생한 응력파를 램파(Lamb waves)라고 하며, 이론적으로 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식에서 아래의 식 (1) 및 (2)와 같이 결정할 수 있다.

$$\frac{\tan\left[\frac{1}{2}\pi(\Omega^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}\right]}{\tan\left[\frac{1}{2}\pi(\Omega^2/K_0^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}\right]}=-\frac{4\xi^2(\Omega^2/K_0^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}(\Omega^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}}{(\Omega^2-2\xi^2)^2}$$

[0021] 식 (1)

$$\frac{\tan\left[\frac{1}{2}\pi(\Omega^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}\right]}{\tan\left[\frac{1}{2}\pi(\Omega^2/K_0^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}\right]}=-\frac{(\Omega^2-2\xi^2)^2}{4\xi^2(\Omega^2/K_0^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}(\Omega^2-\xi^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\Omega=\frac{2hf}{C_s}\,\xi=\frac{hk}{\pi}\,K_0=\sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}}$$

[0022] 식 (2)

[0023] 여기에서 h = 판 두께, f = 주파수, k = 파수 및 C_s = 전단파 속도를 의미한다.

[0024] 그리고 도 2는 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식의 첫 몇 가지 모드로서, (a)는 정규화된 주파수 및 정규화된 파수이고, (b)는 정규화된 위상 속도 및 정규화된 주파수를 나타내는 그래프이다.

[0025] 도 2의 (a)는 포아송비가 0.22인 콘크리트의 몇 가지 램파 모드를 보여주는 것으로, 이는 정규화 된 주파수(Ω = 2hf/Cs)와 정규화된 파수(ξ = hk / π) 도메인에서 표시된다. 층분리에 대한 콘크리트의 동적 응답은 일반적으로 충격원에 가깝게 위치한 한 개 센서(약 30-50mm)로 측정된다. 시간 신호의 푸리에 변환은 특정 주파수에서 피크를 보여주는데, 이는 램파의 주요 공명모드로 해석될 수 있다.

[0026] IE 시험을 통하여 콘크리트 슬래브 내부의 층분리 평가에서 두 가지 공명 모드(두께모드 및 휨진동 진동 모드)를 활용한다. 먼저 두께모드는 콘크리트 표면 가까이 층분리 결함을 포함하지 않는 경우 주파수 응답을 지배하는 것으로 알려져 있다(도 1 참조). 이론적으로 두께모드는 콘크리트 상부 표면과 하부 표면 사이의 P 파의 다중 반사에 기인한다. 두께모드는 도 2의 분산곡선에서 S1 모드의 차단주파수(cutoff frequency)에 대응한다. 이론적으로 두께모드 주파수와 판의 두께는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

[0027] $$h = C_P/2f_{thickness}$$ 식 (3)

[0028] 하지만, 기존의 IE 시험에서 측정된 주파수는 두께모드보다 약간 낮은 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 기존 연구자들은 해석과 실험적 연구를 통하여, IE 시험으로 얻은 탁월 주파수는 S1 램 모드에서 군속도(group velocity)가 소멸되는 점 중에서 가장 낮은 주파수(S1-ZGV 주파수, fs1ZGV)와 관련이 있다고 보고하였다. 따라서 실제 IE실험으로 측정한 탁월 주파수와 두께는 다음과 같이 S1-ZGV 주파수와 콘크리트의 P파 속도 Cp의 관계식을 갖는다.

[0029] $$h = \beta C_P/2f_{S1ZGV}$$ 식 (4)

[0030] 여기에서 β는 콘크리트의 포아송비에 따라 결정되는 보정계수이며, 포아송 비가 0.16 내지 0.25인 콘크리트에 대하여 0.945 내지 0.957의 범위에 있는 것으로 보고되었다.

[0031] 한편, 일부 연구자들은 감쇠 특성을 갖는 실질적인 재료의 IE 시험에서 지배적인 공명 주파수는 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식(식 1)에서 얻은 S1-ZGV 주파수보다 약간 높다는 것을 관찰하였다. 실제 공진 모드는 S1-ZGV 주파수 바로 위에서 매우 가까운 위상속도(phase velocity)를 갖는 두 개의 비전파 램 모드 (S1 및 S2b)의 간섭으로 발생한다. 여기서 S2b는 두 번째 대칭 램 모드의 "역파(backward waves)"이다. 사실상 fs1과 fs2b 사이의 차이가 거의 없기 때문에 실용적인 관점에서 콘크리트 판의 두께를 결정하는데 식 (3)은 유효한 것으로 판단되며, S1-ZGV 주파수를 두께모드 주파수로 간주하였다. 비교적 깊은 층분리를 갖는 콘크리트는 S1 ZGV 모드 분석으로 층분리의 특성을 파악할 수 있다. fS1ZGV 및 Cp를 알고 있다면, 비교적 깊은 층분리의 깊이는 식(3)을 사용하여 추정할 수 있다.

[0032] 한편, 비교적 얕은 층분리 결함은 판진동모드로 평가할 수 있다. 판진동 모드는 전파하는 램파(A0 또는 S0 램 모드)가 층분리 영역에 갇혀 결함의 가장자리에서 길이방향으로 다중반사의 결과 발생된 공진모드로 해석될 수 있다. 판진동모드 f_flex의 공진 주파수는 판 형상(측면 치수 및 깊이), 모양 및 경계 조건에 따라 달라진다. f_flex의 분석은 콘크리트에서 비교적 얕은 층분리 결함의 존재를 평가하고 얕은 결함의 면적을 추정하는데 효과적이다.

[0033] 그러나 실험실 및 현장 조사로 얻은 경험에 따르면, 종래의 한 개의 센서를 활용한 IE법은 실제 구조물에 적용에 다음과 같은 제한사항이 있다.

[0034] 첫째, 단일 채널 측정으로는 콘크리트 속도 정보를 얻을 수 없다. IE 시험을 현장에 적용할 경우, P파 속도는 코어로부터 결정되거나 알려진 치수를 가진 구조 영역에 대한 테스트를 수행한다. 그러나 이 접근법은 코어 추출 및 별도의 테스트 장비로 파동 속도 측정을 수행하는 데 추가적인 노력이 필요하다. 또한, 별도의 시험 방법으로 측정된 P 파 속도 값은 IE 시험 위치에서 속도값 또는 전체 콘크리트 구조물의 속도값을 대표한다고 볼 수 없다.

[0035] 둘째, 단일 센서를 사용하는 IE는 주로 콘크리트의 기계적 성질과 관련이 없는 소음 신호의 간섭으로 인해 실험실 및 현장 응용 분야에서 S1 ZGV 모드의 일관된 측정에 한계가 있음이 관찰되었다. 단일 채널 측정의 테스트 결과는 층분리 결함과 건전한 콘크리트 관련된 주요 파동 모드를 효과적으로 분리하기에 충분한 데이터를 제공하지 않는다. 실험실 및 현장 조사의 경험에 따르면 알 수 없는 원인으로 발생된 잡음이 포함된 신호로 인하여 단일 채널 IE 테스트의 신호 해석에 어려움이 있음을 확인하였다.

[0036] 셋째, point-by-point 방법은 IE 테스트 속도를 제한할 수 있다. IE는 임팩트 소스에 가까운 국부적인 공진 모드를 사용합니다. 결과적으로 단일 채널 IE 테스트가 너무 느려서 대형 콘크리트 인프라 시스템을 평가하는데 어려움이 생길 수 있다.

[0037] 지금까지 기존 IE 테스트를 개선하는 많은 연구가 수행되었다. 일부 연구자들은 표면파의 스펙트럼 분석(SASW) 테스트를 사용하여 두께 평가를 위해 콘크리트의 P파 속도를 평가하는 방법을 제안하였다. 종래 포아송 비를 가정하여 SASW에서 추정된 표면파 속도를 테스트 매체의 P파 속도로 변환하였다. 또한, 일부 연구자들은 다중 채널 탄성파 측정과 IE 테스트의 조합을 개발하였다. 표면파의 다중 채널 분석(MASW) 방법이 전파 및 비전파 응력파를 분석하기 위해 사용되었다. 다채널 응력파 측정결과에서 진폭 및 위상 정보를 모두 사용하여 콘크리트의 P파 속도를 추정하고 잡음이 포함된 신호에서 콘크리트 특성분석에 중요한 주파수신호를 효과적으로 추출하는데 효과적임이 실험적으로 입증되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0039] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허공보 10-2016-0074186(2016.06.28. 공개)

(특허문헌 0002) 대한민국 공개특허공보 10-2016-0085559(2016.07.18. 공개)

(특허문헌 0003) 대한민국 등록특허공보 10-1846504(2018.04.09. 공고)

(특허문헌 0004) 대한민국 등록특허공보 10-1144386(2012.05.10. 공고)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0040] 따라서, 본 발명은 앞서 언급한 배경 기술에 근거하여, 다채널 탄성파 측정을 지원하는 프로토타입 다채널 탄성파 측정 장비를 통해 콘크리트에 대한 층분리 결함을 신속하고 정확하며 일관된 결과를 얻을 수 있는 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0041] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급한 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0043] 상기 본 발명의 목적들 및 다른 특징들을 달성하기 위한 본 발명의 일 관점에 따르면, 콘크리트의 층분리 결함을 검사하기 위한 방법으로서, 층분리 결함을 검사할 콘크리트에 인가한 충격으로부터 다채널의 탄성파 신호를 획득하고, 획득된 다채널 탄성파 신호를 위상변화 방법으로 주파수-위상속도 이미지로 변환하며, 변환된 주파수-위상속도 이미지로부터 램파 모드를 추출하여 그 추출된 램파 모드로부터 콘크리트의 층분리 결함을 분석하도록 이루어지는 것을 특징으로 하는 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법이 제공된다.

[0044] 본 발명의 일 관점에 있어서, 상기 추출된 램파 모드는 공진 모드 및 A0 램 모드이며, 상기 층분리 결함의 분석은 상기 추출된 램파 모드에서의 표면파 속도와 주파수에 근거하여 층분리의 두께와 크기 및 깊이를 분석하도록 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0045] 본 발명의 일 관점에 있어서, 상기 콘크리트의 층분리 결함의 분석 결과는, 표면파 속도, 피크 주파수 및 층분리 깊이의 값의 변화 값을 이용하여 표면파 속도 맵, 주파수 맵, 박리두께와 면적 맵으로 디스플레이부에 시각화하도록 이루어질 수 있다.

[0046] 본 발명의 다른 관점에 따르면, 콘크리트의 층분리 결함을 검사하기 위한 방법으로서, 콘크리트에 충격 하중을 인가하는 충격하중 인가 단계; 복수의 가속도계를 포함하는 다채널 탄성파 측정 유닛을 통해 인가된 충격 하중에 따른 진동에 의해 생성된 입사 탄성파를 다채널로 측정하는 다채널 탄성파 측정 단계; 상기 측정된 다채널 탄성파의 데이터를 전송하여 하기 분석 단계를 실행하는 분석 장치에 수집되는 데이터 수집 단계; 상기 수집된 다채널 탄성파의 데이터를 분석하여 콘크리트의 층분리 결함의 두께와 크기 및 깊이를 획득하는 데이터 분석 단계; 및 상기 데이터 분석 단계에서 분석된 결과에 기반하여 콘크리트 층분리의 결함을 분석 장치의 디스플레이부에 시각화하는 시각화 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법이 제공된다.

[0047] 본 발명의 다른 관점에 있어서, 상기 다채널 탄성파 측정 단계는, 상기 충격이 가해지는 충격원 가진 위치와 가속도계 검출 위치를 포함하는 위치 인자와, 검출 시간 및 주파수를 측정하며, 상기 다채널 탄성파 측정 유닛은 복수의 다채널 센서 모듈이 센서 배열 프레임에 일렬로 배열되어 구성되고, 센서 하우징의 하부에 구비되는 가속도계, 상기 센서 하우징의 상부에 구비되는 댐핑 고무 및 상기 가속도계와 댐핑 고무 사이에 개재되는 압축 스프링을 포함하여 구성될 수 있다.

[0048] 본 발명의 다른 관점에 있어서, 상기 데이터 분석 단계는, 상기 수집된 데이터에 기초하여 시간 영역 신호를 구하여 분산 이미지를 획득하고, 획득된 분산 이미지를 통해 공진모드 분석과 전파파 분석을 실행하여 두께와 크기 및 깊이를 포함하는 층분리 결함을 획득하도록 이루어질 수 있다.

[0049] 본 발명의 다른 관점에 있어서, 상기 데이터 분석 단계에서 시간 영역 신호는, 측정 위치에서 측정된 시간신호 u(r, s, t), r = (xr, yr) 및 s = (xs, ys)에서 두 가지 다른 크기의 윈도우 함수(hanning window)를 적용하여 전파 응력파와 비전파 응력파를 추출하고, (여기에서, xr 및 yr은 다채널 탄성파 측정 유닛에서 복수의 센서 모듈이 배열된 배열 중심 위치이고, xs 및 ys는 충격 하중의 위치이며, t는 시간임), 상기 분석 이미지의 획득은 위상 이동법을 이용하여 충격원 가진 위치에서 발생된 신호 측정으로 얻은 신호 uj(r, s, t)를 아래 식과 같이 주파수 및 위상 속도 영역 Sj(ω, Vph)으로 전환하며, 적분변환으로 일련의 주파수 및 위상 속도에 대해 0에서 1 범위의 값을 생성하여 주파수와 위상속도 이미지를 획득하며,

$$S_j(w, V_{ph}, x_s) = \int e^{-i(\frac{w}{V_{ph}})x_r} [U_j(r,s,w)/|U_j(r,s,w)|] dx_r$$

(여기에서, $U_i(r,s,w)$는 $u_i(r,s,t)$의 푸리에 변환이고, j는 윈도우 함수의 유형이고, bw와 nw는 각각 넓은 윈도우 신호와 좁은 윈도우 신호이고, r은 가속도계 검출 위치이고, s는 충격원 가진 위치, t는 시간, ω는 각 주파수(=2πf), V_{ph}는 위상속도임), 상기 획득된 주파수-위상속도 이미지로부터 램파 모드를 추출하여 그 추출된 램파 모드로부터 콘크리트의 층분리 결함을 분석하도록 이루어질 수 있다.

[0050] 본 발명의 다른 관점에 있어서, 상기 시각화 단계는, 상기 주파수-위상속도 이미지로부터 표면파 속도의 변화, 피크 주파수의 변화 및 층분리 깊이의 변화값을 이용하여 표면파 속도 맵, 주파수 맵, 및 박리 두께와 면적의 시각화 맵으로 시각화하도록 이루어질 수 있다.

발명의 효과

[0052] 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 의하면, 콘크리트의 층분리를 효율적이고 신뢰성 있게 검사할 수 있는 효과가 있다.

[0053] 또한, 본 발명은 다채널 탄성파 측정으로 단일 채널 측정과 비교하여 콘크리트에서 층분리 결함의 평가를 보다 빠르고 정확하고 일관된 결과를 얻을 수 있는 효과가 있다.

[0054] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해되어 질 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0056] 도 1은 IE 시험의 충격원과 수신기 및 주파수 신호를 통해 얻어진 결과를 나타내는 도면으로, (a)와 (d)는 균열이 없는 콘크리트 판, (b)와 (e) 및 (c)와 (f)는 각각 비교적 깊고 얕은 층분리 결함을 갖는 콘크리트 판에서 얻은 결과를 나타내는 도면이다.

도 2는 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식의 첫 몇 가지 모드로서, (a)는 정규화 된 주파수 및 정규화 된 파수이고, (b)는 정규화 된 위상 속도 및 정규화 된 주파수를 나타내는 그래프이다.

도 3은 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 과정을 개략적으로 나타내는 플로차트이다.

도 4는 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법의 다채널 탄성파 측정 단계에서 이용되는 프로토타입의 다채널 탄성파 측정 유닛을 촬영한 사진이다.

도 5는 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법의 다채널 탄성파 측정 단계에서 이용되는 프로토타입의 다채널 탄성파 측정 유닛을 구성하는 다채널 센서 모듈의 구성을 개략적으로 나타내는 단면 구성도이다.

도 6은 시간과 센서 위치 간의 윈도우 신호를 나타내는 그래프로서, (a)는 넓은 윈도우 신호 ubw(r, s, t)를, (b)는 좁은 윈도우 신호 unw(r, s, t)를 나타내는 도면이다.

도 7은 윈도우 함수를 적용하여 얻은 시간 신호에 대한 위상이동법으로 생성된 분산이미지를 나타내는 도면으로서, (a)는 좁은 윈도우 함수가 적용된 것이며, (b)는 넓은 윈도우 함수가 적용되는 것을 나타내는 도면이다.

도 8은 시험을 위하여 콘크리트 주조 전에 플라스틱 박막을 철근 매트에 부착시켜 임의의 층분리 결함을 시뮬레이션 하기 위한 과정을 촬영한 사진이다.

도 9는 수평 및 수직 분포에서 다양한 크기와 깊이의 층분리 결함을 갖는 콘크리트 시편들을 나타내는 평면도이다.

도 10은 시험 시험체에 대하여 콘크리트 다채널 탄성파 측정을 위한 프로토타입 다채널 탄성파 측정 장비를 촬영한 사진이다.

도 11은 콘크리트 시험체 표면에서 다채널 탄성파 시험 계획을 나타내는 도면으로, (a)는 다채널 탄성파 측정을 위한 스캐닝 절차를 나타내며, (b)는 충격원 및 수신기 위치를 나타내는 도면이다.

도 12는 시험을 통한 다채널 데이터와 단일 채널 데이터에서 얻은 스펙트럼 진폭을 비교한 그래프이다.

도 13 내지 도 15는 콘크리트 시험체에 매입된 층분리 결함(DL 1 ~ 5 및 DL 7)에 대한 다채널 탄성파 측정으로 얻은 분산이미지를 나타내는 것이다.

도 16은 각 주파수에 대해 -5000m/s에서 -10000 m/s의 속도 범위에 걸쳐 분산 이미지의 진폭을 합산함으로써 생성된 스펙트럼 진폭의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 17은 층분리 결함 DL1 ~ DL7 및 고체 콘크리트에 대한 지배적인 전파파 모드(A0 Lamb 모드)를 나타내는 분산곡선의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 18은 3개의 콘크리트 시험체 표면에서 측정된 A0 Lamb 모드의 분석에서 얻은 표면파 속도의 변화를 나타내는 표면파 속도 지도를 나타내는 도면이다.

도 19는 세 가지 콘크리트 시험체에서 획득한 피크 주파수의 변화를 시각화한 주파수 지도의 실시 예시들을 나타내는 도면들이다.

도 20은 콘크리트 시험체의 영역 1, 2 및 3에서 측정 된 피크 주파수 값의 분포를 나타내는 히스토그램이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0057] 본 발명의 추가적인 목적들, 특징들 및 장점들은 다음의 상세한 설명 및 첨부도면으로부터 보다 명료하게 이해될 수 있다.

[0058] 본 발명의 상세한 설명에 앞서, 본 발명은 다양한 변경을 도모할 수 있고, 여러 가지 실시 예를 가질 수 있는바, 아래에서 설명되고 도면에 도시된 예시들은 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0059] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.

[0060] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도는 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0061] 또한, 명세서에 기재된 "...부", "...유닛", "...모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0062] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일한 참조부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0063] 또한, 본원 명세서 전체에서, 어떤 단계가 다른 단계와 "상에"또는 "전에" 위치하고 있다고 할 때, 이는 어떤 단계가 다른 단계와 직접적 시계열적인 관계에 있는 경우 뿐만 아니라, 각 단계 후의 혼합하는 단계와 같이 두 단계의 순서에 시계열적 순서가 바뀔 수 있는 간접적 시계열적 관계에 있는 경우와 동일한 권리를 포함한다.

[0064] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 대하여 첨부 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0065] 도 3은 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 과정을 개략적으로 나타내는 플로차트이다.

[0066] 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법은, 도 3에 나타낸 바와 같이, 크게 충격하중 인가 단계(S100); 다채널 탄성파 측정 단계(S200); 데이터 수집 단계(S300); 데이터 분석 단계(S400); 및 시각화 단계(S500);를 포함하여 구성된다.

[0068] 구체적으로, 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법은, 도 3에 나타낸 바와 같이, 콘크리트의 층분리 결함을 검사하기 위한 방법으로서, 검사 대상의 콘크리트에 충격 하중을 인가하는 충격하중 인가 단계(S100); 복수의 가속도계를 포함하는 다채널 탄성파 측정 유닛을 통해 상기 충격하중 인가 단계(S100)에서 인가된 충격 하중에 따른 진동(슬래브 진동)에 의해 생성된 다채널 입사 탄성파를 측정하는 다채널 탄성파 측정 단계(S200); 상기 다채널 탄성파 측정 단계(S200)에서 측정된 다채널 탄성파를 디지털 데이터화하여 분석 장치(예를 들면, 휴대용 컴퓨터)에 수집 저장하는 데이터 수집 단계(S300); 상기 데이터 수집 단계(S300)에서 수집된 다채널 탄성파의 데이터를 분석하여 콘크리트의 층분리 결함의 크기와 깊이를 획득하는 데이터 분석 단계(S400); 및 상기 데이터 분석 단계(S400)에서 분석된 결과에 기반하여 콘크리트 층분리의 결함을 분석 장치의 디스플레이부에 시각화하는 시각화 단계(S500);를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0070] 보다 구체적으로, 상기 다채널 탄성파 측정 단계(S200)는, 복수의 가속도계를 포함하는 다채널 탄성파 측정 유닛을 통해 상기 충격하중 인가 단계(S100)에서 인가된 충격 하중에 따른 진동(슬래브 진동)에 의해 생성된 다채널 입사 탄성파를 측정하는 것으로, 상기 다채널 탄성 측정 단계(S200)는 충격이 가해지는 충격원 위치(가진 위치)과 검출 위치(가속도계 위치)를 포함하는 위치 인자(position factor)와, 검출 시간(수집 시간) 및 주파수를 측정하여 상기 데이터 수집 단계(S300)의 분석 장치로 전송된다.

[0071] 상기 다채널 탄성파 측정 단계(S200)의 다채널 탄성파 측정 유닛은 측정된 진동 신호를 신호 컨디셔너를 통해 증폭하며, 오실로스코프를 통해 출력되는 신호(주파수)를 디지털신호로 변환시켜 출력하도록 이루어진다.

[0072] 상기 다채널 탄성파 측정 단계(S200)에서 이용되는 다채널 탄성파 측정 유닛에 대하여 도 4 및 도 5를 참조하여 설명한다. 도 4는 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법의 다채널 탄성파 측정 단계에서 이용되는 프로토타입의 다채널 탄성파 측정 유닛을 촬영한 사진이고, 도 5는 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법의 다채널 탄성파 측정 단계에서 이용되는 프로토타입의 다채널 탄성파 측정 유닛을 구성하는 다채널 센서 모듈의 구성을 개략적으로 나타내는 단면 구성도이다.

[0073] 상기 다채널 탄성파 측정 유닛은 복수의 다채널 센서 모듈(100)이 센서 배열 프레임(101)에 일렬로 배열되어 구성되며, 상기 다채널 센서 모듈은 가속도계(110), 센서 하우징(120), 압축 스프링(130), 및 댐핑 고무(140)로 구성된다.

[0074] 구체적으로, 상기 센서 하우징(120)에는 가속도계(센서)(110)가 눌렸을 때 압력을 가하는 압축 스프링(130)이 구비되며, 콘크리트의 동적응답과 관련된 유용한 신호로 노이즈 신호의 간섭을 줄이기 위하여 센서 하우징(120)의 하단에 댐핑 고무(140)가 구비된다.

[0075] 상기 다채널 센서 모듈(100)은 다채널 탄성파 측정 장비의 일 구성요소를 구성한다.

[0077] 다음으로, 상기 데이터 분석 단계(S400)는, 수집된 데이터에 기초하여 시간 영역 신호를 구하여 분산 이미지를 획득하고, 획득된 분산 이미지를 통해 공진모드 분석과 전파파 분석을 실행하도록 이루어진다.

[0078] 상기 데이터 분석 단계(S400)에서 시간 영역 신호를 구하여 분산 이미지를 획득하는 과정에 대하여 설명한다.

[0079] 측정 위치에서 측정된 일반적인 시간신호 u(r, s, t), r = (xr, yr) 및 s = (xs, ys)에서 두 가지 다른 크기의 윈도우 함수(hanning window)를 적용하여 전파 응력파와 비전파 응력파를 추출하도록 이루어진다.

[0080] 여기에서, xr 및 yr은 다채널 탄성파 측정 유닛에서 복수의 센서 모듈이 배열된 배열 중심 위치(평면상의 x축과 y축에 대한 중심 위치)를 나타내고, xs 및 ys는 충격 하중의 위치(평면상의 x축과 y축에 대한 위치)를 나타내며, t는 시간을 의미한다.

[0081] 도 6은 시간과 센서 위치 간의 윈도우 신호를 나타내는 그래프로서, (a)는 넓은 윈도우 신호 ubw(r, s, t)를, (b)는 좁은 윈도우 신호 unw(r, s, t)를 나타내는 것으로, 본 발명에서는 ubw(r, s, t)와 unw(r, s, t)가 각각 공진 모드(얕은 층분리에 대한 휨진동 모드 또는 두께모드)와 전파 램 모드(A0 램 모드)를 추출하는 데 효과적임을 아래에서 설명될 시험을 통해 확인하였다.

[0082] 계속해서, 분석 이미지의 획득에 있어서, 본 발명은 위상 이동법(phase shift method)를 활용하여 xs에 위치한 충격원으로 발생된 신호 측정으로 얻은 신호 uj(r, s, t)를 주파수 및 위상 속도 영역 Sj (ω, Vph)으로 전환한다.

[0083] $$S_j(w, V_{ph}, x_s) = \int e^{-i(\frac{w}{V_{ph}})x_r}[U_j(r,s,w)/|U_j(r,s,w)|]dx_r$$ 식 (5)

[0084] 여기에서, $U_i(r,s,w)$는 $u_i(r,s,t)$의 푸리에 변환이고, j는 윈도우 함수의 유형을 의미한다. 그리고 각각 넓은 윈도우 신호와 좁은 윈도우 신호에 대하여 bw 및 nw로 표시한다. 또한, r은 센서의 위치, s는 충격원의 위치를 의미하며, t는 시간, ω는 각 주파수(=2πf), V_{ph}는 위상속도를 의미한다. 적분변환은 일련의 주파수 및 위상속도에 대해 0에서 1 범위의 값을 생성하여 분산 이미지를 획득하게 된다.

[0085] 도 7은 윈도우 함수를 적용하여 얻은 시간 신호에 대한 위상이동법으로 생성된 분산이미지를 나타내는 도면으로서, (a)는 좁은 윈도우 함수가 적용된 것이며, (b)는 넓은 윈도우 함수가 적용되는 것을 나타내는 도면으로, 본 발명은 아래와 같이 주어진 주파수에 대해 수직축을 따라 탁월 주파수를 찾아서 짧은 전파 시간 신호의 분산 이미지에서 우세모드를 추출한다.

[0086] $$I_{nw}(w, x_s) = \mathrm{arg}max S_{nw}(w, V_{ph}, X_s)$$

[0087] 결과 분산 곡선 $I_{nw}(w, x_s)$는 도 7의 (a)에서 파란색 점선으로 표시되며 A0 Lamb 모드와 일치하는 것임을 아래에서 설명될 시험을 통해 확인하였다. 또한, 다음과 같이 주어진 위상 속도에 대해 수평 축을 따라 피크 진폭을 찾아 지배 모드를 추출한다.

[0088] $$I_{bw}(V_{ph}, x_s) = \mathrm{arg}max S_{bw}(w, V_{ph}, X_s)$$

[0089] 결과 분산 곡선 $I_{bw}(V_{ph}, x_s)$은 도 7의 (b)에서 빨간색 점선으로 표시되며, 주파수는 5.5kHz 내지 6.5kHz의 좁은 주파수 범위 내에서 2000m/s 에서 10000m/s 및 -2000m/s에서 -10000m/s의 다양한 위상 속도를 갖는다.

[0090] 여기에서, 본 발명은 감쇠를 갖는 고체 물질의 램파 이론에 따라, 분산 이미지의 진폭을 각 주파수에 대한 속도 범위(후진파)에 걸쳐서 주파수를 결정하도록 이루어지며, 각 주파수에 대해 설정된 속도 범위에 걸쳐 분산 이미지의 진폭을 합산함으로써 생성된 스펙트럼 진폭의 변화를 얻도록 이루어진다.

[0091] 비전파파(non-propagating waves, 두께 신장 모드 및/또는 굴곡 진동 모드)와 전파파(propagating waves, A0 Lamb 모드)의 분산 곡선은 층분리 결함의 크기와 깊이에 따라 상이한 분산 곡선으로 얻어지는데, 분산 이미지로부터 얻어진 피크 주파수는 깊은 층분리 결함의 두께모드(결함의 크기)로 해석되며, 전파파는 층분리 결함의 깊이로 해석되게 된다.

[0093] 다음으로, 상기 시각화 단계(S500)는, 상기 데이터 분석 단계(S400)에서 분석된 결과에 기반하여 콘크리트 층분리의 결함을 분석 장치의 디스플레이부에 시각화하는 것으로, 상기 시각화 단계(S500)는 콘크리트의 층분리 결함을 표면파 속도, 피크 주파수 및 층분리 깊이의 값의 변화 값을 활용하여 시각화하도록 이루어진다. 여기에서. 측정된 데이터 사이의 데이터 값은 보간법 'kriging algorithm'으로 보간될 수 있다.

[0094] 이러한 시각화 단계(S500)는, 측정된 A0 램(Lamb) 모드의 분석에서 얻은 표면파 속도의 변화를 나타내는 표면파 속도 맵(표면파 속도 지도), 획득한 피크 주파수의 변화를 시각화한 주파수 맵(주파수 지도), 및 박리두께와 면적의 시각화 맵으로 시각화하도록 이루어진다.

[0096] 상기한 바와 같은 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법을 정리하자면 다음과 같다.

[0097] 본 발명에서 콘크리트의 층분리 결함은 다채널 탄성파 신호의 분석에 의해 이루어지는데, 콘크리트 표면의 탄성파 측정을 위해 다채널 탄성파 측정 모듈을 통해 다채널 탄성파 신호를 측정하게 된다. 상기 다채널 탄성파 신호는 위상변화 방법으로 주파수-위상속도 이미지로 변환되고, 분산이미지로부터 2개의 이용 램파모드(A0 및 S1 제로 그룹 속도 램파 모드)를 추출하며, 이로부터 콘크리트의 층분리 결함(두께, 크기, 깊이)을 판단할 수 있게 된다.

[0099] 한편, 본 발명의 발명자(들)은 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 대하여 프로토타입 다채널 측정 장비 및 데이터 해석 방법의 유효성을 시험 결과를 비교하여 확인하였다. 다채널 탄성파 측정으로 단일 채널 측정과 비교하여 콘크리트에서 층분리 결함의 평가를 보다 빠르고 정확하고 일관된 결과를 얻을 수 있는 것을 다음과 같이 시험적으로 확인하였다.

[0100] 콘크리트 시험체의 준비

[0101] 도 8은 시험을 위하여 콘크리트 주조 전에 플라스틱 박막을 철근 매트에 부착시켜 임의의 층분리 결함을 시뮬레이션 하기 위한 과정을 촬영한 사진이며, 도 9는 수평 및 수직 분포에서 다양한 크기와 깊이의 층분리 결함을 갖는 콘크리트 시편들을 나타내는 평면도이다.

[0102] 시험을 위하여 3개의 콘크리트 시험체를 준비하였다. 콘크리트 시험체의 크기는 1500mm(길이)×1500mm(너비)×300mm(깊이)로 설계되어 국내 도시철도 콘크리트 궤도에서 실물 크기의 TCL(traffic control layer)를 효과적으로 모사하였다. 콘크리트 시험체는 각각 50mm 및 250mm 깊이에서 철근을 매입하였다. 철근은 D13 철근(직경 13mm)을 양방향 300mm 간격으로 배치하였다. 콘크리트는 Type 1 포틀랜드 시멘트 (440kg /m^3), 강 모래 (701kg/m3), 부순골재 (1049kg/m^3) 및 물 (165kg/m^3)을 활용하여 제조하였다.

[0103] 콘크리트는 최소 28 일 압축 강도가 35 MPa가 되도록 설계하였다. 콘크리트 타설 후 7일 동안 수중양생을 수행하였으며, 실제 측정 된 28일 강도는 37.5 MPa보다 높게 측정되었다. 콘크리트 타설 전, 다양한 크기의 이중 플라스틱 박막을 거푸집에 고정하여 인공적으로 층분리 결함이 생길 수 있도록 하였다. 층분리 깊이는 깊이 50mm의 얕은 층분리 결함과 깊이 250mm의 깊은 층분리 결함을 고려하였다.

[0104] 다채널 탄성파 측정을 위한 테스트 설정

[0105] 도 10은 시험 시험체에 대하여 콘크리트 다채널 탄성파 측정을 위한 프로토타입 다채널 탄성파 측정 장비를 촬영한 사진이다. 다채널 탄성파 측정 장비는 8 개의 탄성파 측정 모듈이 있는 멀티 채널 센서 배열이며, 탄성파 측정 모듈은 앞서 설명한 바와 같이 신호 컨디셔너, 데이터 수집 시스템 및 휴대용컴퓨터, 가속도계, 센서 하우징 및 댐핑 고무로 구성된다(도 4 및 도 5 참조). 센싱장치(모델: PCB 352C33)의 가속도계의 직경은 15.7mm, 광대역(0.5Hz ~ 10kHz), 높은 공명 주파수 (≥ 50kHz) 및 높은 감도(10.2mV/(m/s^2))를 갖는다.

[0106] 예비시험을 통하여 압축 스프링에 의한 압력은 추가적인 커플링제를 적용하지 않고 콘크리트 표면에 센서의 안정적인 커플링을 제공하는데 효과적임을 확인하였다. 다채널 센서와 건식접촉기술을 사용하여 콘크리트에서 탄성파 측정의 테스트 속도가 크게 향상될 수 있음을 확인하였다. 충격원으로 직경이 15mm인 쇠구슬을 활용하였다. 충격원으로 발생된 콘크리트 슬래브 진동은 8개의 가속도계로 측정하였고, 이 신호는 2개의 신호

컨디셔너(480E09)에 의해 증폭시켰다. 출력 신호는 NI-USB 5132 오실로스코프를 사용하여 500kHz의 샘플링 주파수에서 디지털신호로 변화하였다. 각 동적 신호는 10ms동안 수집되었으며, 획득된 신호는 휴대용 컴퓨터로 전송되어 저장되었다. 데이터 수집 및 저장 절차는 LabVIEW 기반 컴퓨터 프로그램으로 제어되었다. 모든 장비는 카트에 실어 두 사람이 운영하였다.

[0107] 시험 절차

[0108] 프로토타입 다채널 탄성파 측정 장비를 활용하여 세 개의 콘크리트 시험체에서 콘크리트의 동적 응답을 측정하였다. 8채널 센서 배열을 사용한 각각의 측정에서는 길이 200mm의 조사영역을 대상으로 한다. 도 4에 나타낸 바와 같이 본 시험에서 센서 배열의 중심은 각 조사영역에서 중심에 위치하고, y축에 평행하게 유지하였다. 각 테스트 지점에서 충격원은 대상 조사영역의 양쪽에 위치하였다.

[0109] 먼저 센서 배열의 왼쪽 S1 위치에 적용된 충격 하중으로 입사 탄성파가 생성되었으며, 이 신호는 센서배열에 포함된 8 개의 가속계로 측정되었다. 다음으로 센서 배열의 오른쪽 S2에 충격 하중을 가하여 개별적인 테스트를 반복하였다. 개별 조사영역에서 시험이 끝나면 다음 테스트 지점으로 센서배열을 이동하여 시험을 반복하였다. 동일한 열의 모든 시험을 완료하면 다음 열로 이동하여 열마다 반복적으로 시험을 수행하였다. 결과적으로 각 시험체에서 데이터 스캔은 총 54개의 테스트 영역에서 수행하였다.

[0110] 다채널 탄성파 신호 분석

[0111] 전형적인 시간 신호

[0112] 도 11은 콘크리트 시험체 표면에서 다채널 탄성파 시험 계획을 나타내는 도면으로, (a)는 다채널 탄성파 측정을 위한 스캐닝 절차를 나타내며, (b)는 충격원 및 수신기 위치를 나타내는 도면이다.

[0113] 각 시험위치에서 측정된 일반적인 시간 신호는 u(r, s, t), r = (xr, yr) = (1.35m, 0.975m) 및 s = (xs, ys) = (1.35m, 콘크리트 시편 1에서 1.2 m)이다. 여기에서 xr 및 yr은 센서 배열의 중심의 위치를 나타내며, xs 및 ys는 충격하중의 위치를 나타내고, t는 시간을 의미한다. 본 시험의 시간 신호에서 두 가지 다른 크기의 윈도우 함수(hanning window)를 적용하여 전파 응력파와 비전파 응력파를 추출하고자 하였다. 도 6에 나타낸 바와 같이, 넓고 좁은 윈도우 신호 ubw(r, s, t)와 unw(r, s, t)를 보여주는 것으로, 본 시험에서는 ubw(r, s, t)와 unw(r, s, t)가 각각 공진 모드(얕은 층분리에 대한 휨진동 모드 또는 두께모드)와 전파 램 모드(A0 램 모드)를 추출하는데 효과적임을 확인하였다.

[0114] 위상 이동 법(phase shift method)에 의한 분산 이미징 획득

[0115] 본 시험에서는 앞서 설명한 바와 같이 위상 이동법(phase shift method)를 활용하여, xs에 위치한 충격원으로 발생된 신호 측정으로 얻은 신호 uj(r, s, t)를 주파수 및 위상 속도 영역 Sj (ω, Vph)으로 전환하였다.

[0116] $$S_j(w, V_{ph}, x_s) = \int e^{-i(\frac{w}{V_{ph}})x_r} [U_j(r,s,w)/|U_j(r,s,w)|] dx_r$$

[0117] 여기에서, $U_j(r,s,w)$는 $u_j(r,s,t)$의 푸리에 변환이고, j는 윈도우 함수의 유형을 의미하며, 각각 넓은 윈도우 신호와 좁은 윈도우 신호에 대하여 bw 및 nw로 표시하였다. 한편 r은 센서의 위치, s는 충격 원의 위치를 의미하며, t는 시간, ω는 각 주파수 (= 2πf), Vph는 위상속도를 의미한다. 적분변환은 일련의 주파수 및 위상 속도에 대해 0에서 1 범위의 값을 생성한다. 도 7은 짧은 윈도우 함수와 긴 윈도우 함수로 얻은 시간 신호로부터 얻은 전형적인 분산 이미지를 보여준다. 본 시험에서는 다음과 같이 주어진 주파수에 대해 수직축을 따라 탁월주파수를 찾아서 짧은 전파 시간 신호의 분산 이미지에서 우세모드를 추출했다.

[0118] $$I_{nw}(w, x_s) = \mathrm{arg}max S_{nw}(w, V_{ph}, X_s)$$

[0119] 결과 분산 곡선 $I_{nw}(w, x_s)$는 도 7의 (a)에서와 같이 파란색 점선으로 표시되며 A0 Lamb 모드와 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 다음과 같이 주어진 위상 속도에 대해 수평 축을 따라 피크 진폭을 찾아 지배 모드를 추출하였다.

[0120] $$I_{bw}(V_{ph},x_s) = \arg max S_{bw}(w,V_{ph},X_s)$$

[0121] 결과 분산 곡선 $I_{bw}(V_{ph},x_s)$은 도 7의 (b)에서와 같이 빨간색 점선으로 표시하였다. 주파수는 5.5kHz 내지 6.5kHz의 좁은 주파수 범위 내에서 2000m/s에서 10000 m/s 및 -2000m/s에서 -10000m/s의 다양한 위상 속도를 갖는다. 본 시험에서는 감쇠를 갖는 고체 물질의 램파 이론에 따라, 분산 이미지의 진폭을 각 주파수에 대한 속도 범위(후진파)에 걸쳐서 주파수를 결정했다. 분산 이미지로부터 얻어진 스펙트럼 진폭은 5.8kHz에서 명확한 피크를 나타내며, 이러한 결과는 식 (3)을 활용하여 293mm의 추정 두께를 산출하였다. 비교를 위해 단일 채널 시간 신호의 푸리에 변환에 의해 얻어진 스펙트럼 진폭을 도 12에 표시하였다. 다수의 스펙트럼 피크는 IE 테스트로부터의 데이터의 정확한 해석에 어려움이 있는 것으로 관찰되었다. 도 12는 시험을 통한 다채널 데이터와 단일 채널 데이터에서 얻은 스펙트럼 진폭을 비교한 그래프이다.

[0122] 층분리 결함에 대한 공진모드 분석

[0123] 도 13 내지 도 15는 콘크리트 시험체에 매입된 층분리 결함(DL 1 ~ 5 및 DL 7)에 대한 다채널 탄성파 측정으로 얻은 분산이미지를 나타내는 것이다. DL 6에 대한 분산 이미지는 DL 1에 대한 분산 이미지와 유사하여 생략하였다. 도 13 내지 도 15에 표시된 결과는 도 11에서 각각 원과 사각형으로 표시된 위치에 배치된 센서와 충격원으로 얻은 것이다. 지배적인 비전파파(non-propagating waves, 두께 신장 모드 및/또는 굴곡 진동 모드)와 전파파(propagating waves, A0 Lamb 모드)의 분산 곡선은 도 13 내지 도 15에서 각각 빨간색과 파란색 점선으로 표시된다. 층분리 결함의 크기와 깊이에 따라 상이한 분산 곡선을 얻을 수 있었다.

[0124] 도 16은 각 주파수에 대해 -5000m/s에서 -10000 m/s의 속도 범위에 걸쳐 분산 이미지의 진폭을 합산함으로써 생성된 스펙트럼 진폭의 변화를 나타내는 그래프이다. 비전파파의 피크주파수는 도 16에서 보여주고 있으며, 아래의 표 1(콘크리트 시편의 층분리 결함에 대한 요약 결과표)에 요약하였다.

표 1

[0125]

ID	As-built dimensions [mm]			f [Hz]	Estimated dimensions [mm]			Error [%]		
	c_x	c_y	d		$c'c'$	$d'_{1-}d'_{1+}$	$d'_{2-}d'_{2+}$	e_c	e_{dA0}	e_{dS1ZGV}
Solid	-	-	300	5800	-	191	297	-	36.3	1.0
DL1	300	300	50	2200	286	87	785	4.6	74.0	1470.0
DL2	150	150	50	4100	167	106	421	11.3	112.0	742.0
DL3	300	300	250	8100	-	143	213	-	42.8	14.8
DL4	150	150	250	4700	-	136	367	-	45.6	46.8
DL5	600	600	50	2100	522	47	822	13.0	6.0	1544.0
DL6	600	300	50	2300	277	56	751	7.6	12.0	1402.0
DL7	600	300	250	6600	-	175	261	-	30.0	4.4

[0126] 측면 치수가 비교적 큰 깊은 층분리 결함인 DL 3 및 DL7은 건전한 콘크리트 (5.8 kHz)보다 상대적으로 높은 주파수 응답(각각 6.6 kHz 및 6.7 kHz)이 발생하였다. 식 3에 따른 추정 깊이는 각각 약 260mm 및 257mm로, 이는 본 시험에서 깊은 층분리 결함의 실제 깊이(250mm)에 가깝다. 즉, 도 15의 분산 이미지로부터 얻어진 피크 주파수는 깊은 층분리 결함의 두께모드로 해석될 수 있다. 하지만, 비교적 작은 크기의 깊은 층분리 DL 4는 약 4.7 kHz의 피크 주파수를 나타내며, 이는 건전한 콘크리트의 두께모드 주파수보다 다소 낮은 값을 보인다. 추정된 깊이는 건전한 콘크리트 판두께 300mm는 넘는 값으로, 깊은 층분리의 실제 두께값을 정확하게 추정하지 못하였다. 이러한 관측은 S1 ZGV Lamb 모드가 안정적으로 발생하기 위해서는 층분리의 크기가 충분히 큰 치수를 갖고 있어야 한다는 것을 보여준다.

[0127] 대조적으로, 얕은 층분리 결함 DL1 및 DL2는 각각 약 2.1 kHz 및 4.1 kHz의 낮은 피크 주파수 값을 발생하였고, 이는 건전한 콘크리트에서 측정된 두께모드보다 작은 값이다. 비교적 큰 측면 치수인 DL5의 얕은 층분리 결함의 경우, 약 0.86kHz, 2.1kHz, 3.23kHz 및 4.26kHz의 피크 주파수에서 여러 탁월주파수가 관찰되었으며, 이는 판진동 모드의 기본 및 고차 모드인 것을 보여준다.

[0128] 표 1에 나타낸 추정 측면 치수는 구축된 측면 치수의 더 작은 폭과 잘 일치하며, 이는 저주파 공진이 얕은 층분

리 결함에 대한 판진동 모드와 관련됨을 보여주는 결과이다.

[0129] 층분리 결함에 대한 전파파 분석

[0130] 도 17은 층분리 결함 DL1 ~ DL7 및 고체 콘크리트에 대한 지배적인 전파파 모드(A0 Lamb 모드)를 나타내는 분산 곡선의 변화를 나타내는 그래프이다. 콘크리트에 층분리가 있으면 A0 Lamb 모드의 전파에 영향을 주는 것을 확인하였다. 본 발명은 시험을 통하여 A0 Lamb 모드의 분산 곡선에서 표면파 속도와 층분리 결함 깊이의 두 가지 중요한 매개 변수를 추출하였다.

[0131] 이론적으로 A0 램파 모드의 위상 속도는 주파수가 0에서 무한대로 증가함에 따라 위상속도는 0에서 표면파 속도 Vr까지 점차적으로 증가하고, 일정 주파수 이상에서는 Vr값에 수렴한다. 이러한 특징에 기반하여 본 시험에서 콘크리트의 표면파 속도는 10kHz ~ 15kHz의 주파수 범위에서 A0 Lamb 모드의 위상 속도를 평균하여 얻었다. 층분리 결함에 대한 결과 표면파 속도는 아래 표 2(k-S 시험 결과 및 세 그룹의 데이터 세트의 평균, 표준 편차 및 변동 계수 요약)와 같다.

표 2

[0132]

ID	K-S test results		Mean [m/s]	Standard deviation [m/s]	COV [%]
	H	P			
Group 1 over solid concrete	0	0.3040	1845	97.0	5.3
Group 2 over deep DL	0	0.6710	1850	74.1	4.1
Group 3 over shallow DL	0	0.6926	1582	169	10.7

[0133] 얕은층 분리의 경우 표면파 속도가 건전한 콘크리트에서 얻은 값보다 다소 낮은 값을 보였다.

[0134] 한편, 본 시험에서는 실험을 통하여 얻은 A0 Lamb 모드의 분산곡선과 비교하고, 최소 오차(root mean square error, RMSE)를 보이는 이론모델을 찾는 방법으로 얕은 층분리 결함의 깊이(RMSE(h))를 추정하였다.

[0135] $$RMSE(h) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\Psi_i - \Psi_i')^2}$$

[0136] 여기에서 Ψi는 Ωi에 해당하는 실험 데이터에서 얻은 정규화된 위상속도이고, i는 실험 데이터의 인덱스이며, N은 데이터 수이며, Ψi' 는 이론모델의 정규화된 위상속도이다. 이 시험에서 Ψ와 Ω에 관한 근사식은 다음과 같이 포아송비 0.2에 대한 Rayliegh-Lamb 주파수 방정식의 비선형 회귀 분석에 따라 제안하였다.

[0137] $$\Psi_i' = \frac{\sum_{i=0}^{4} a_i \Omega^i}{\sum_{i=0}^{4} b_i \Omega^i}$$

[0138] 여기에서, a0 = 3.3, a1 = 2026, a2 = 2492, a3 = 6494, a4 = -45.91, b0 = 291.9, b1 = 3378, b2 = 3337, b3 = 6714 및 b4 = 1이다. 위의 표 2는 추정된 층분리 깊이를 요약한 것이다. 본 시험에서, A0 램파로부터의 추정 깊이는 비교적 얕은 층분리(즉, 층분리 깊이가 100mm 미만)를 효과적으로 예측하는 것을 확인하였다.

[0139] 콘크리트 층분리 결함의 시각화

[0140] 본 시험에서는 콘크리트 층분리 결함을 표면파 속도, 피크 주파수 및 층분리깊이의 변화 값을 활용하여 시각화하였다. 층분리지도는 100×100 그리드 포인트를 기준으로 구성하였다. 측정된 데이터 사이의 데이터 값(총 6×9 포인트)은 보간법 'kriging algorithm'으로 보간되었다.

[0141] 표면파 속도 맵

[0142] 도 18은 3개의 콘크리트 시험체 표면에서 측정된 A0 Lamb 모드의 분석에서 얻은 표면파 속도의 변화를 나타내는 표면파 속도 지도를 나타내는 도면이다.

[0143] 첫 번째, 두 번째 및 세 번째 행의 그림은 각각 콘크리트 시편 1, 2 및 3의 결과를 나타낸다. 한편, 첫 번째 및 두 번째 열은 각각 가진원 1 및 2에 의해 생성된 신호로부터 얻어진 결과를 나타내고, 두 결과의 평균은 세 번

째 열에 표시되었다. 깊은 층분리 결함(DL3, DL4 및 DL7)은 건전한 콘크리트와 명확하게 구별되지 않았다. 하지만, 실험체 내의 모든 얕은 층분리 결함(DL1, DL2, DL5 및 DL6)은 낮은 표면 속도로 건전한 콘크리트 영역과 명확하게 구분할 수 있었다.

[0144] 또한, 콘크리트의 층분리 결함을 평가하기 위한 중요한 파라미터로 표면파 속도값의 유효성을 확인하기 위해 통계 분석을 수행하였다. 3개의 콘크리트 시편에 대한 테스트 영역은 3개의 그룹으로 분류하였다. 건전한 콘크리트 상부에서 얻은 데이터 '그룹 1', 얕은 층분리 결함 상부에서 얻은 데이터 '그룹 2', 깊은 층분리 결함의 경우 '그룹 3'. 세 그룹의 표면파 속도 데이터는 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 테스트 결과, 모두 정규 분포를 따르는 것을 확인하였다. 위의 표 2는 K-S 테스트의 결과와 세 개의 데이터 그룹에서 표면파 속도 값의 평균, 표준편차 및 변동 계수(COV)를 보여준다. t- 검정에 따라 5% 유의 수준에서 그룹 1과 3의 평균 간에 유의한 차이가 있는 것으로 관찰되었다. 이 통계 결과는 표면파 속도가 건전한 콘크리트에서 얕은 층분리 결함이 있는 콘크리트를 식별하는데 유용한 매개 변수가 될 수 있음을 보여준다. 하지만 그룹 1과 그룹 2 사이에는 큰 차이가 없었다.

[0145] 실제 콘크리트 구조물에서 콘크리트의 표면파 속도는 감소시키는 다양한 원인이 있다(열화 재료로 인한 탄성 계수 감소). 따라서 낮은 표면파 속도는 반드시 현장의 실제 콘크리트 부재에서 얕은 층분리 결함이 있음을 의미한다고 볼 수는 없다. 그럼에도, 본 발명에서는 본 시험에서 관찰된 현장에서 측정할 수 있는 낮은 표면파 속도의 한 가지 이유를 효과적으로 설명할 수 있다는데 의미가 있다. 한편, 얕은 박리 해석에 주로 공진모드를 활용하는 종래의 IE시험에 전파램파의 분석 결과가 함께 활용될 수 있음을 보여준다.

[0146] 주파수 맵

[0147] 도 19는 세 가지 콘크리트 시험체에서 획득한 피크 주파수의 변화를 시각화한 주파수 지도의 실시 예시들을 나타내는 도면들이다. 도 19에서 첫 번째 및 두 번째 열은 각각 충격원 1 및 2에 의하여 생성 된 신호로부터 획득한 주파수 지도를 나타내고, 첫 번째 및 두 번째 열의 두 주파수 값의 평균은 세 번째 열에서 보여주고 있다. 전반적으로, 주파수 지도는 건전한 콘크리트 영역과 층분리 영역을 구분하는데 효과적임을 확인할 수 있었다.

[0148] 도 20은 콘크리트 시험체의 영역 1, 2 및 3에서 측정된 피크 주파수 값의 분포를 나타내는 히스토그램이다. 각 영역은 건전한 콘크리트 및 깊고 얕은 층분리 결함에 대한 테스트 영역을 의미한다. Kolmogorov-Smirnov 테스트에 따르면 테스트 영역 1 및 2의 피크 주파수 데이터는 정규 분포를 따르는 것으로 확인하였다(K-S 시험 결과 및 세 그룹의 데이터 세트의 평균, 표준 편차 및 변동 계수를 요약한 아래 표 3 참조)

표 3

[0149]

ID		K-S test results		Mean [Hz]	Standard deviation [Hz]	COV [%]
		H	P			
Group 1		0	0.2550	6003	437	7.3
Group 2		0	0.8710	6445	760	11.8
Group 3	core	0	0.0843	3298	362	10.9
	perimeter	0	0.3435	5658	606	10.6

[0150] 그러나 테스트 영역 3으로부터 얻은 피크 주파수 데이터의 히스토그램에서 2개의 피크가 명확하게 관찰되었다(얕은 층분리 결함). 히스토그램의 두 피크는 결과 데이터에 서로 다른 두 가지 특성을 갖는 데이터가 복합되어 있음을 보여준다. 본 시험에서는 테스트 영역 3의 주파수 데이터를 5000Hz의 임계 주파수 값에 따라 두 그룹으로 세부적으로 나누었다. 임계주파수 이상에서 얻은 데이터는 주로 얕은층 분리의 가장자리에서 관측되었다. 본 시험에서는 얕은 층분리 결함을 특성화하기 위해 5000Hz 미만의 주파수 데이터만 사용하였다. Kolmogorov-Smirnov 검정은 검정 영역 3의 저주파 데이터가 정규 분포를 따른다는 것을 보여준다. 표 3은 4개 그룹 (고체 콘크리트, 깊은 층분리 결함, 얕은 층분리 결함의 저주파 및 고주파 데이터)에서 주파수 값의 평균 및 표준 편차를 정리하였다. t- 검정에 따르면 5% 유의 수준에서 그룹 1과 3의 평균과 그룹 1과 2의 평균 차이가 있는 것을 확인하였다.

[0151] 박리두께 및 면적의 시각화 맵

[0152] 콘크리트 구조물의 유지관리 관점에서, 층분리 결함의 면적과 깊이를 추정하는 것은 손상된 영역의 부피를 산정

하는데 중요한 절차이다.

[0153] 도 21은 층분리의 면적과 깊이를 나타내는 층분리 지도를 보여주는 도면이다. 본 시험에서, 층분리 결함의 깊이 정보는 A0 램파 분석과 S1 ZGV 모드의 주 주파수의 조합을 사용하는 접근법에 의해 이루어졌다. 본 시험에서, 건전한 콘크리트의 두께(또는 층분리 결함의 깊이)는 식 (3), A0 램파 분석으로부터의 두께 결과가 100㎜보다 클 때. 그렇지 않으면, 깊이 정보는 A0 Lamb 분석에 기초하여 결정되었다.

[0154] 도 22는 층분리 결함 깊이와 플레이트 두께의 추정 및 실제값을 비교결과를 보여주는 도면이다. 전반적으로, 추정 깊이는 구축된 깊이와 잘 일치하는 것임이 확인되었다. 건전한 콘크리트 및 깊은 층분리 결함의 경우, 추정된 두께의 평균은 각각 약 280㎜ 및 230㎜이다. 그 값은 식 (3)을 통하여 조립된 깊이를 다소 과소평가하는 것으로 판단하였다.

[0156] 상기한 시험을 통해 다채널 탄성파 신호를 활용하여 분산 이미지를 생성하고, A0 Lamb 모드에 대한 분산곡선을 추출하였다. 균열이 없는 영역과 깊은 층분리 영역에서 측정한 표면파 속도값 사이에는 통계적으로 유의미한 차이가 없다는 것을 확인하였다. 하지만, 얕은 층분리 결함의 위치는 위상 속도가 낮은 영역으로 명확히 구분될 수 있었다.

[0157] 지배적인 비전파 램파의 분산 곡선은 위상 시프트 방법으로부터의 분산 이미지와 다중 채널 신호의 스펙트럼 진폭을 조합함으로써 얻어진 분산 이미지로부터 추출되었다. 주파수 맵은 다양한 크기와 깊이를 가진 층분리 결함이 있는 테스트 영역을 차별화하는 데 효과적인 것을 확인하였다.

[0158] 또한, 콘크리트에서 층분리 결함을 평가하기 위해 다채널 탄성파 측정을 사용하였을 때 다음과 같은 두 가지 중요한 장점을 발견하였다. 먼저, 두 가지 중요한 램파모드(A0 Lamb wave 및 두께모드/휨진동모드)를 동시에 추출할 수 있었다. 둘째, 두 가지 중요한 파동 모드에서 얻은 결과를 융합하면 콘크리트에서 층분리 결함에 대한 보다 정확하고 일관된 결과를 얻을 수 있다.

[0160] 이상에서 설명한 바와 같은 본 발명에 따른 다채널 탄성파 측정에 기반한 콘크리트 층분리 검사 방법에 의하면, 콘크리트의 층분리를 효율적이고 신뢰성 있게 검사할 수 있으며, 다채널 탄성파 측정으로 단일 채널 측정과 비교하여 콘크리트에서 층분리 결함의 평가를 보다 빠르고 정확하고 일관된 결과를 얻을 수 있는 이점이 있다.

[0162] 상기한 바와 같은 실시 예들은 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기를 기초로 다양한 기술적 수정 및 변형을 적용할 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

[0163] 본 명세서에서 설명되는 실시 예와 첨부된 도면은 본 발명에 포함되는 기술적 사상의 일부를 예시적으로 설명하는 것에 불과하다. 따라서, 본 명세서에 개시된 실시 예는 본 발명의 기술적 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이므로, 이러한 실시 예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아님은 자명하다. 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당업자가 용이하게 유추할 수 있는 변형 예와 구체적인 실시 예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

[0165] S100: 충격하중 인가 단계

S200: 다채널 탄성파 측정 단계

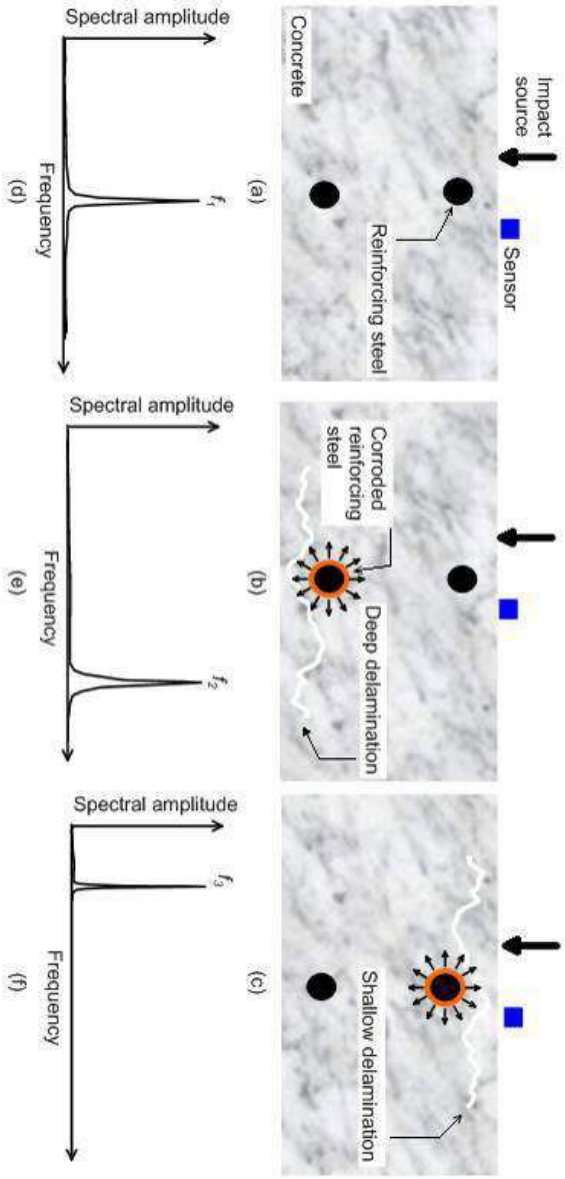
S300: 데이터 수집 단계

S400: 데이터 분석 단계

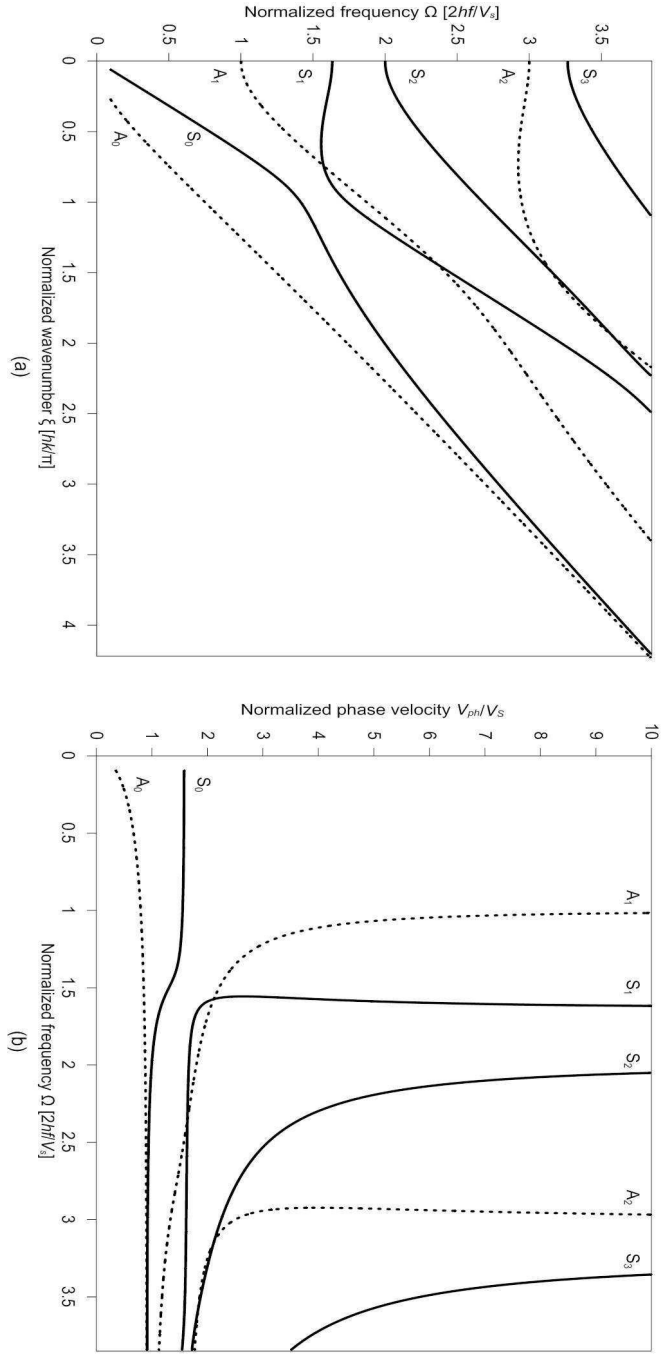
S500: 시각화 단계

도면

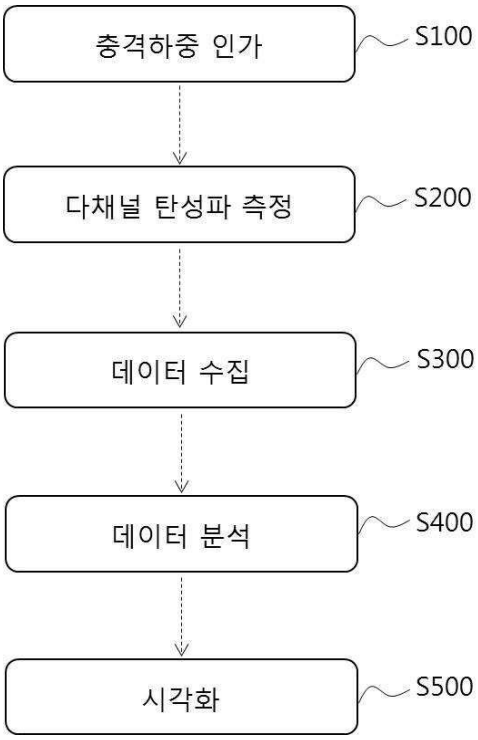
도면1


Spectral amplitude
Frequency
(d)
(a)
Concrete
Impact source
Sensor
Reinforcing steel
Spectral amplitude
Frequency
(e)
(b)
Corroded reinforcing steel
Deep delamination
Spectral amplitude
Frequency
(f)
(c)
Shallow delamination

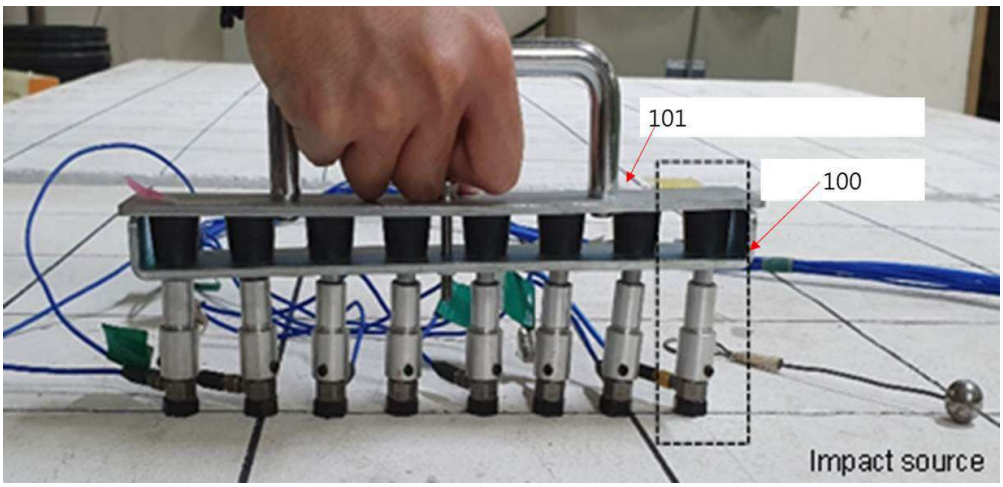
도면2


Normalized frequency Ω [2hf/V_s]
Normalized wavenumber ξ [hk/π]
(a)
A0
S0
A1
S1
S2
A2
S3
Normalized phase velocity V_ph/V_S
Normalized frequency Ω [2hf/V_s]
(b)

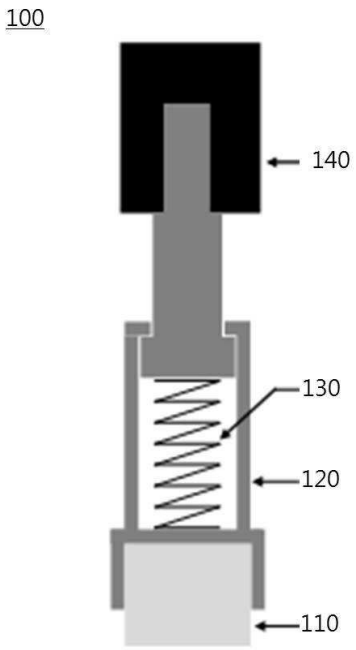
도면3


충격하중 인가
S100
다채널 탄성파 측정
S200
데이터 수집
S300
데이터 분석
S400
시각화
S500

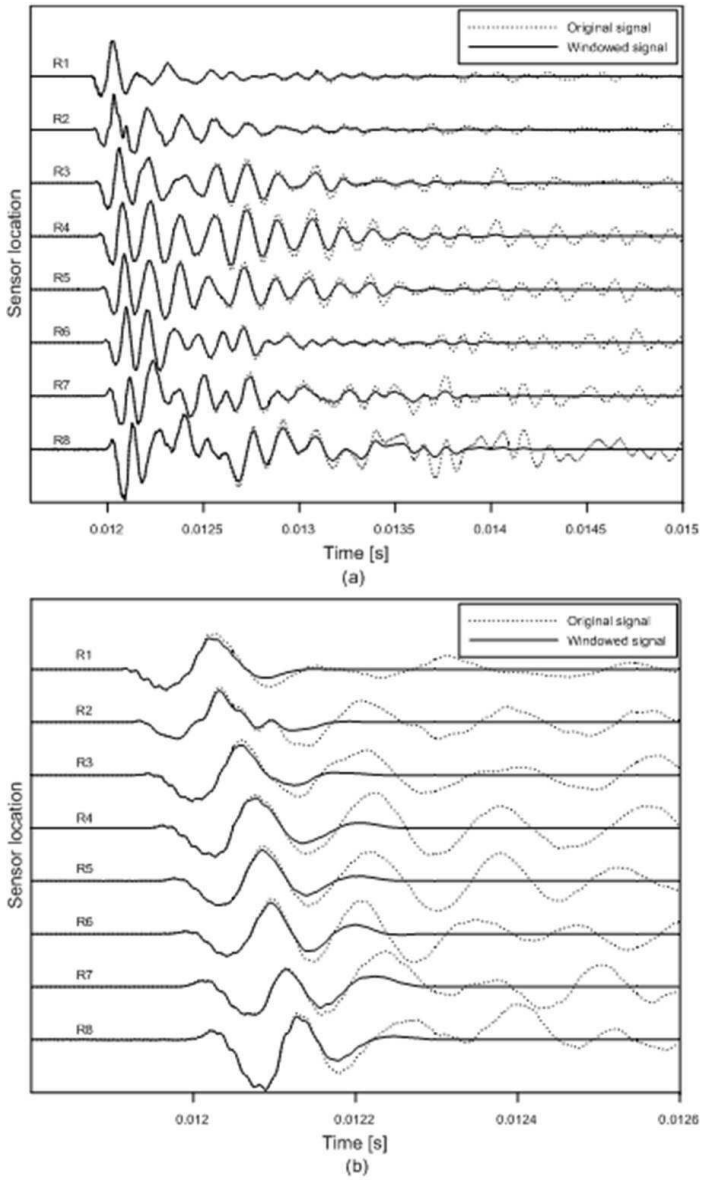
도면4


101
100
Impact source

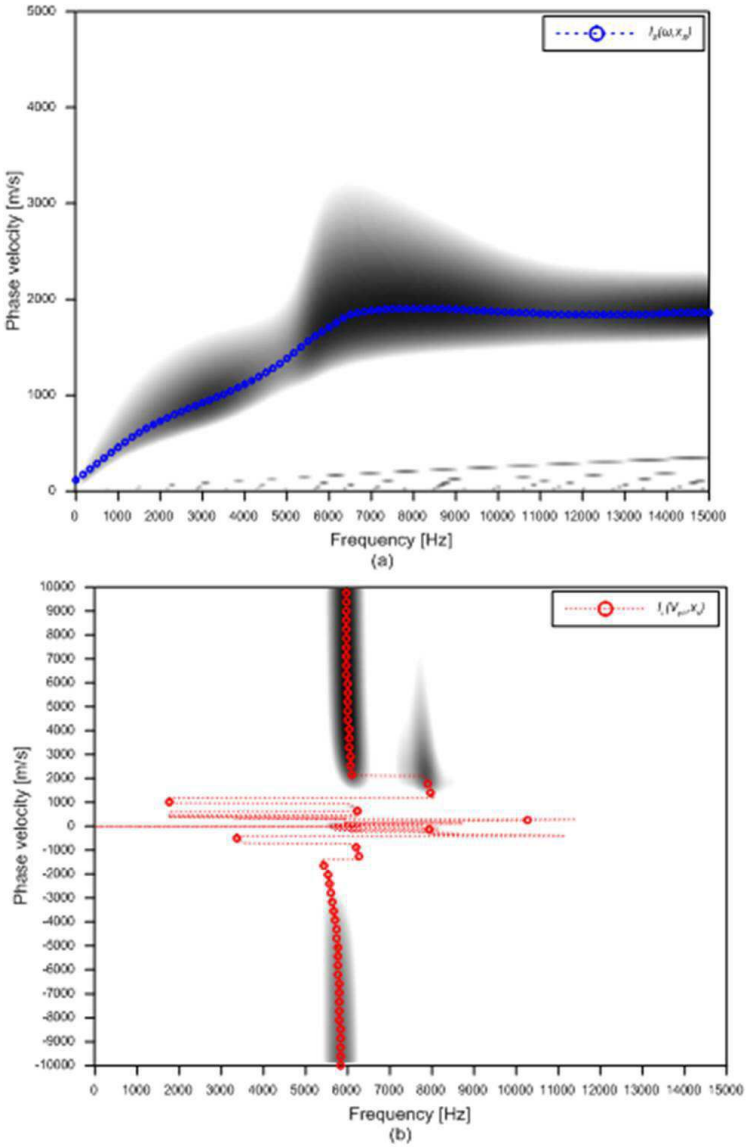
도면5



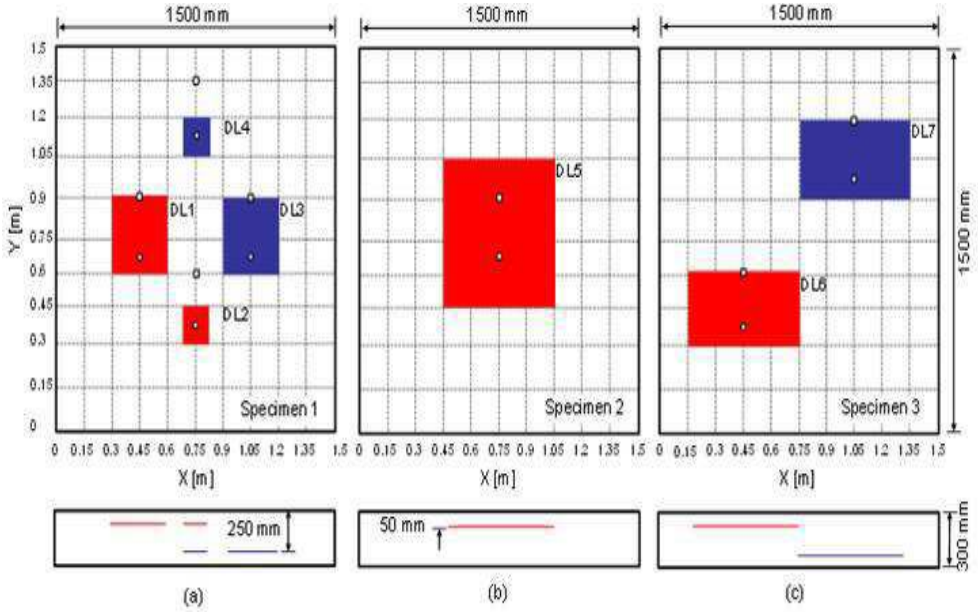
도면6


Original signal
Windowed signal
R1
R2
R3
R4
R5
R6
R7
R8
Sensor location
0.012
0.0125
0.013
0.0135
0.014
0.0145
0.015
Time [s]
(a)
Original signal
Windowed signal
R1
R2
R3
R4
R5
R6
R7
R8
Sensor location
0.012
0.0122
0.0124
0.0126
Time [s]
(b)

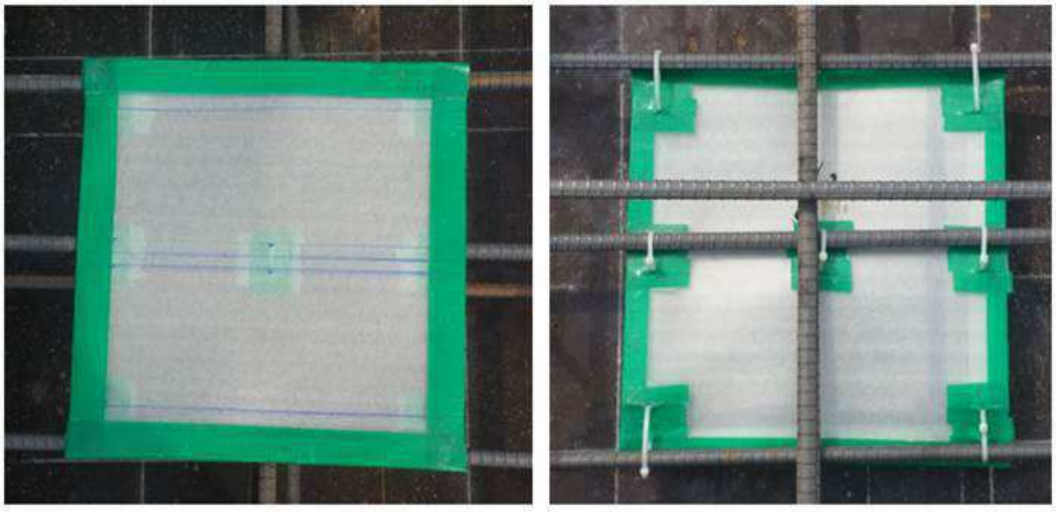
도면7


Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]
(a)
Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]
(b)

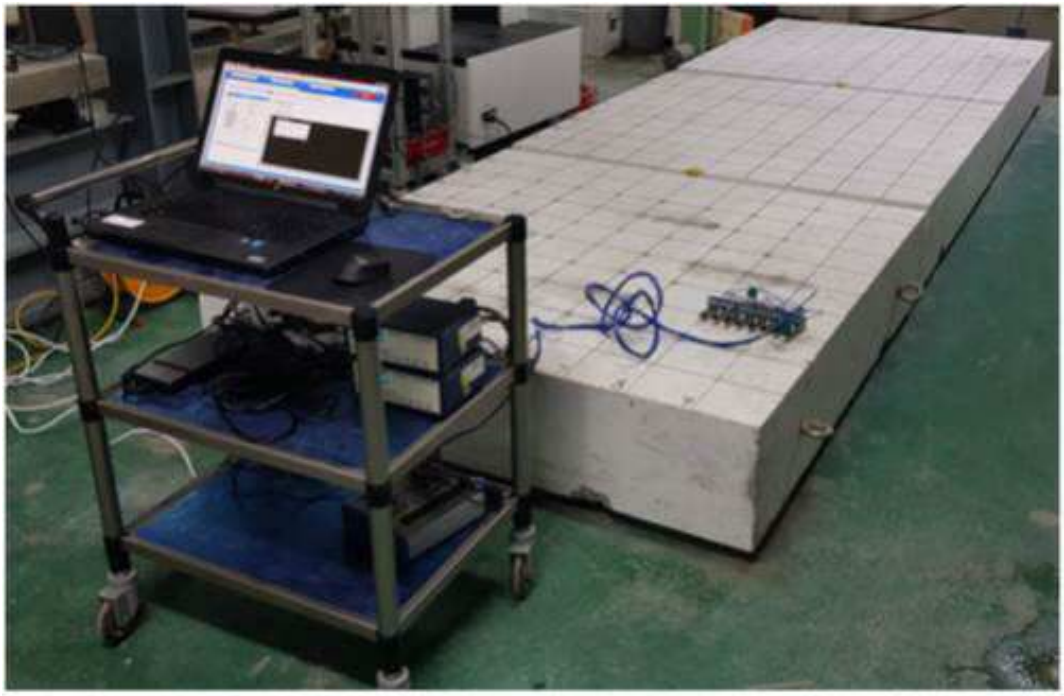
도면8


1500 mm
1500 mm
1500 mm
DL4
DL1
DL3
DL2
DL5
DL7
DL6
Specimen 1
Specimen 2
Specimen 3
Y [m]
X [m]
X [m]
X [m]
1500 mm
250 mm
50 mm
300 mm
(a)
(b)
(c)

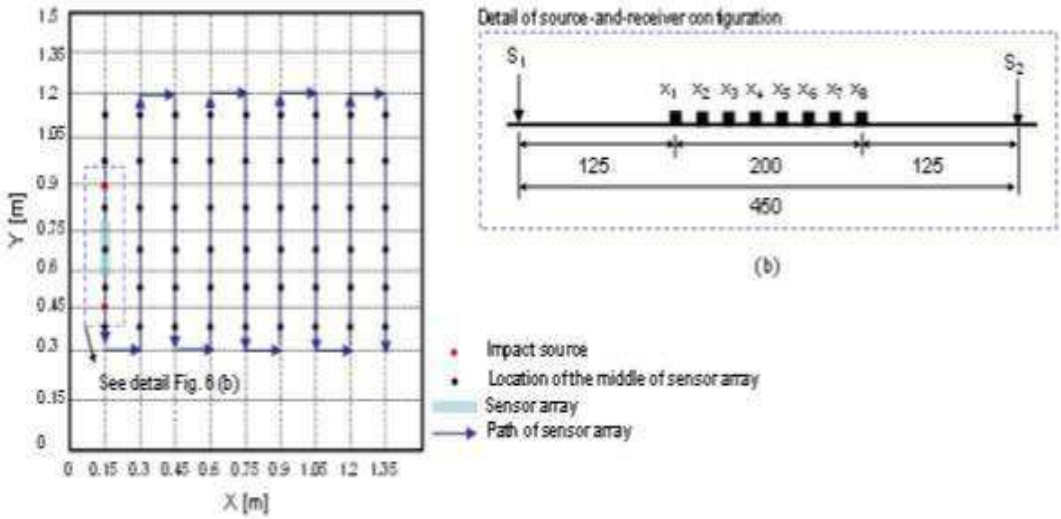
도면9


(a)
(b)

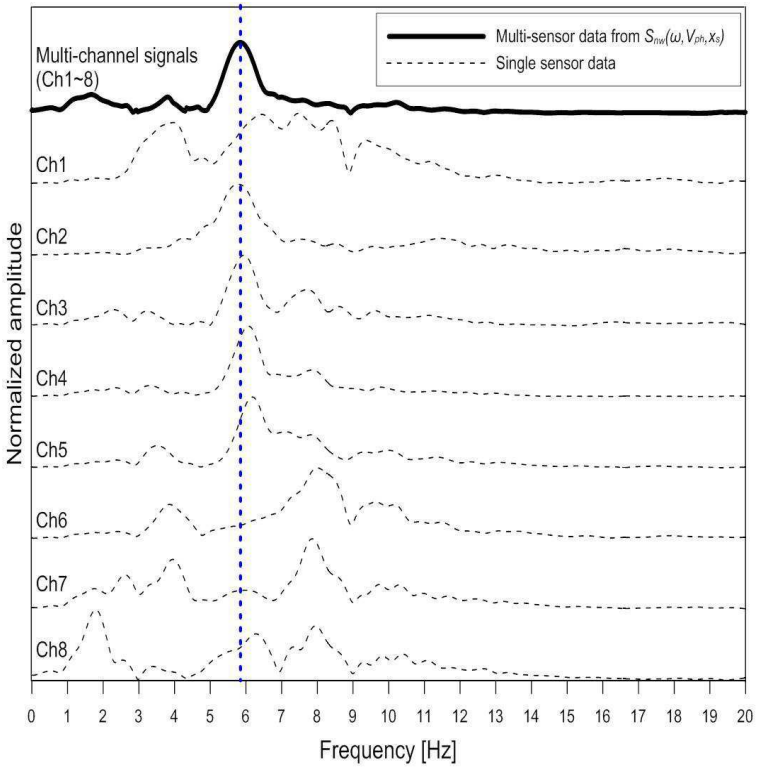
도면10



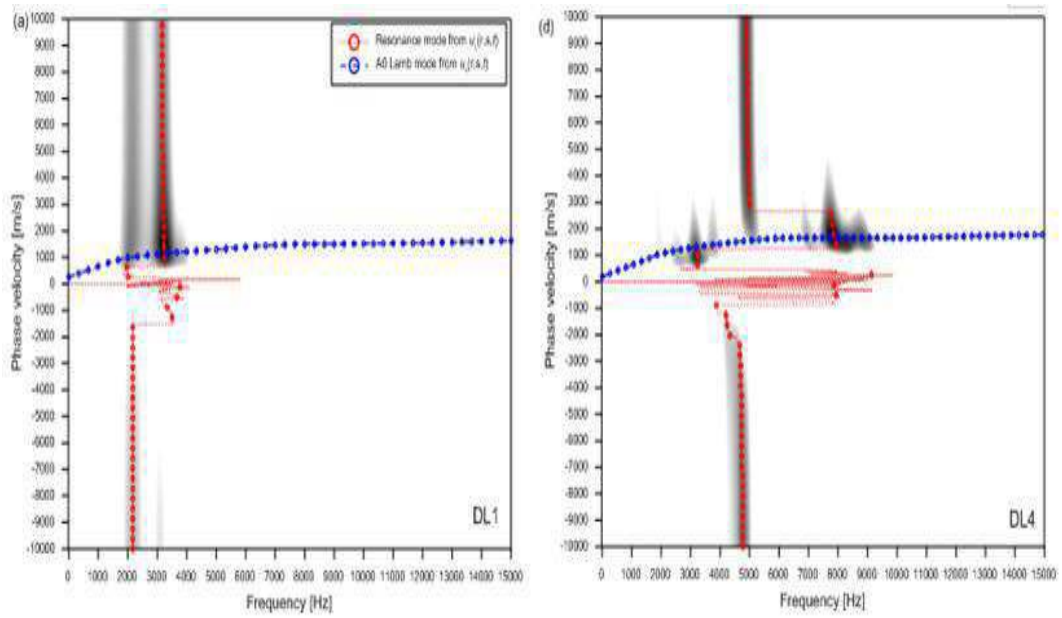
도면11


Detail of source-and-receiver configuration
S1
S2
x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8
125
200
125
450
(b)
Y [m]
X [m]
See detail Fig. 6 (b)
Impact source
Location of the middle of sensor array
Sensor array
Path of sensor array

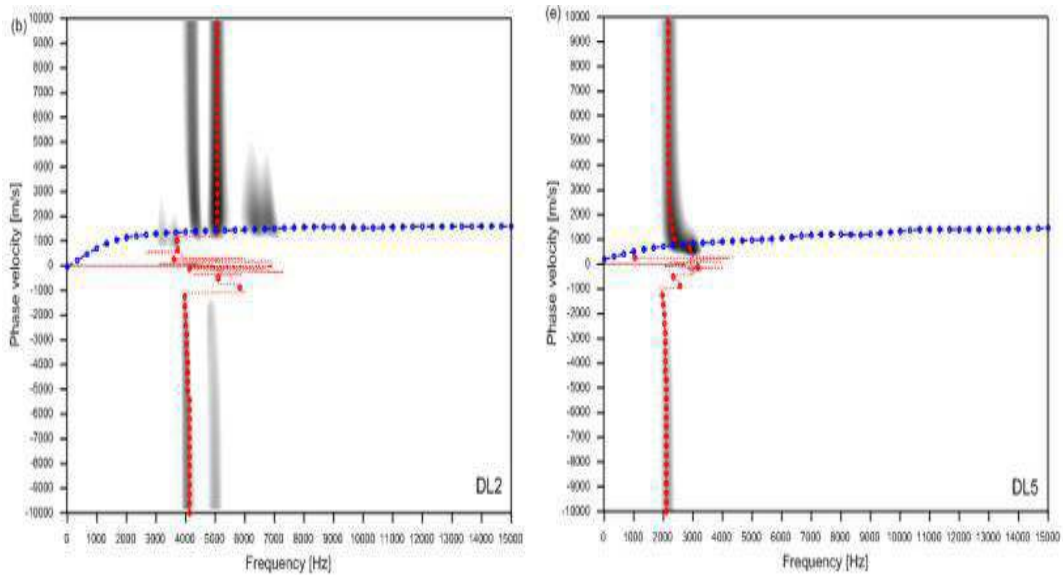
도면12


Multi-channel signals
(Ch1~8)
Multi-sensor data from $S_{nw}(\omega, V_{ph}, x_s)$
Single sensor data
Ch1
Ch2
Ch3
Ch4
Ch5
Ch6
Ch7
Ch8
Normalized amplitude
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Frequency [Hz]

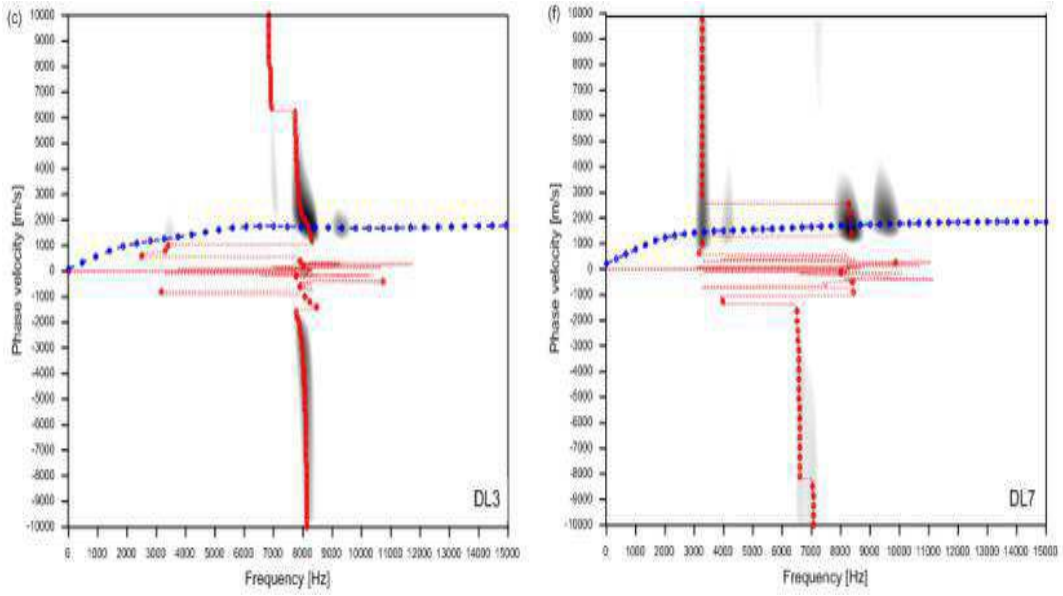
도면13


(a)
Resonance mode from $u_z(r,\omega,f)$
A0 Lamb mode from $u_z(r,\omega,f)$
Phase velocity [m/s]
DL1
Frequency [Hz]
(d)
Phase velocity [m/s]
DL4
Frequency [Hz]

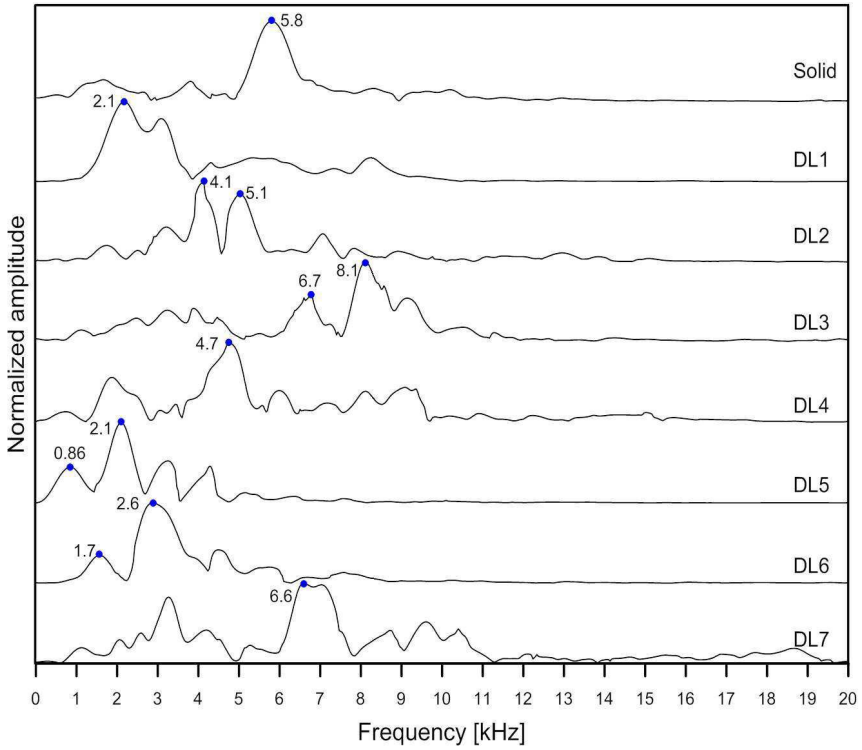
도면14


(b)
DL2
Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]
(e)
DL5
Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]

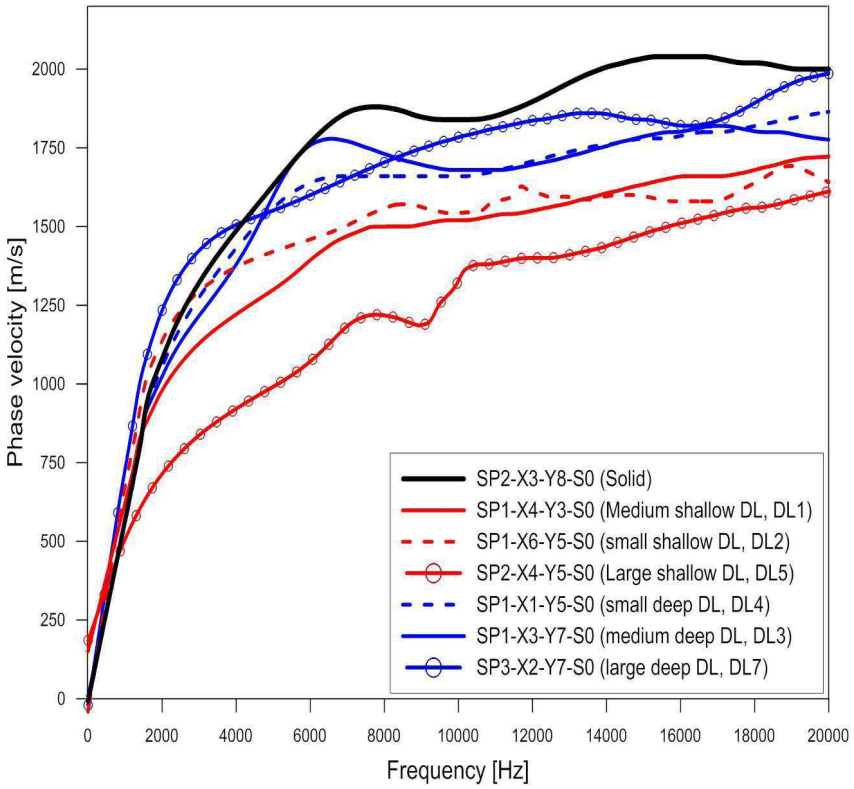
도면15


(c)
DL3
Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]
(f)
DL7
Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]

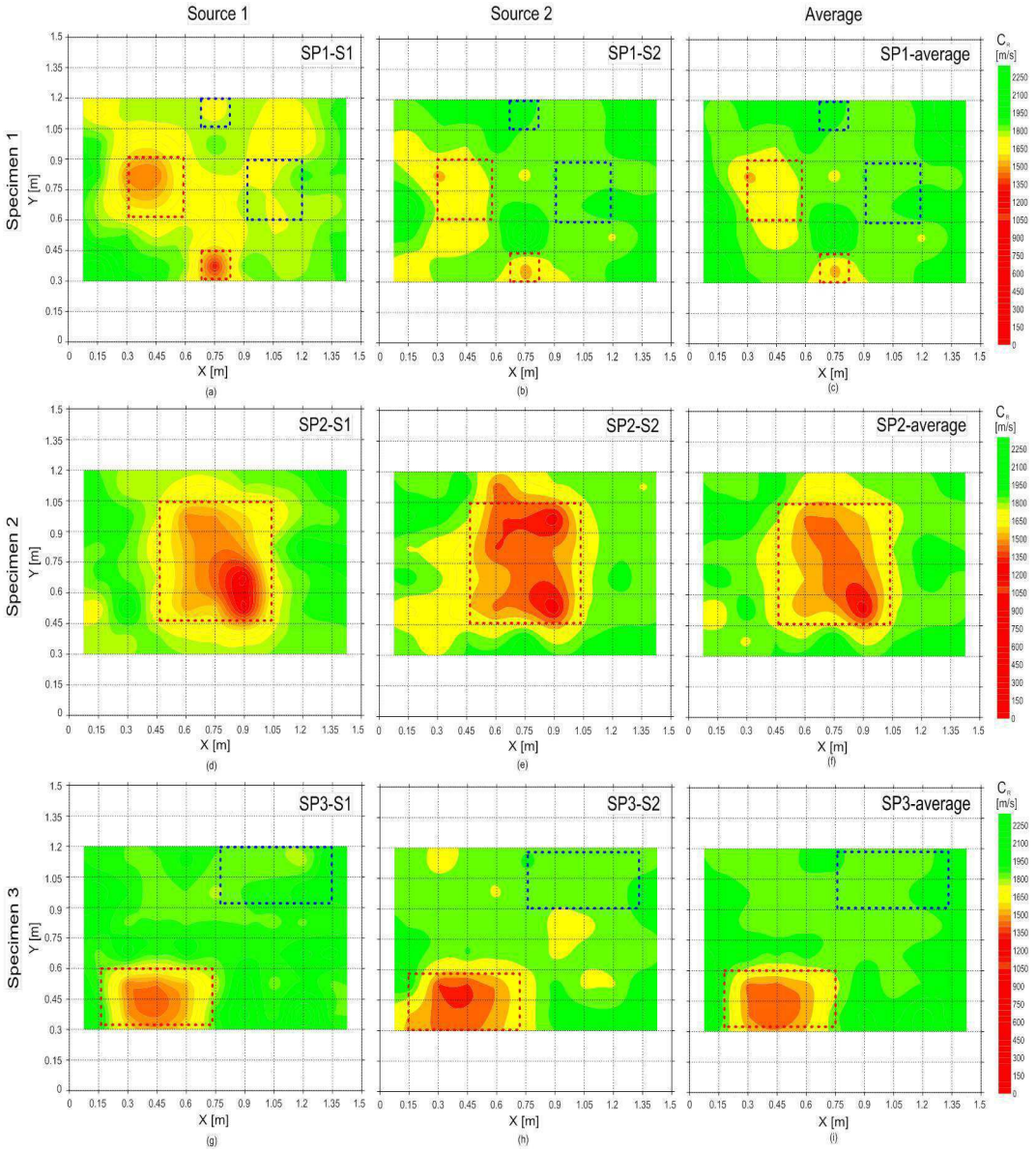
도면16


Normalized amplitude
Frequency [kHz]
Solid
DL1
DL2
DL3
DL4
DL5
DL6
DL7
5.8
2.1
4.1
5.1
6.7
8.1
4.7
2.1
0.86
2.6
1.7
6.6
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

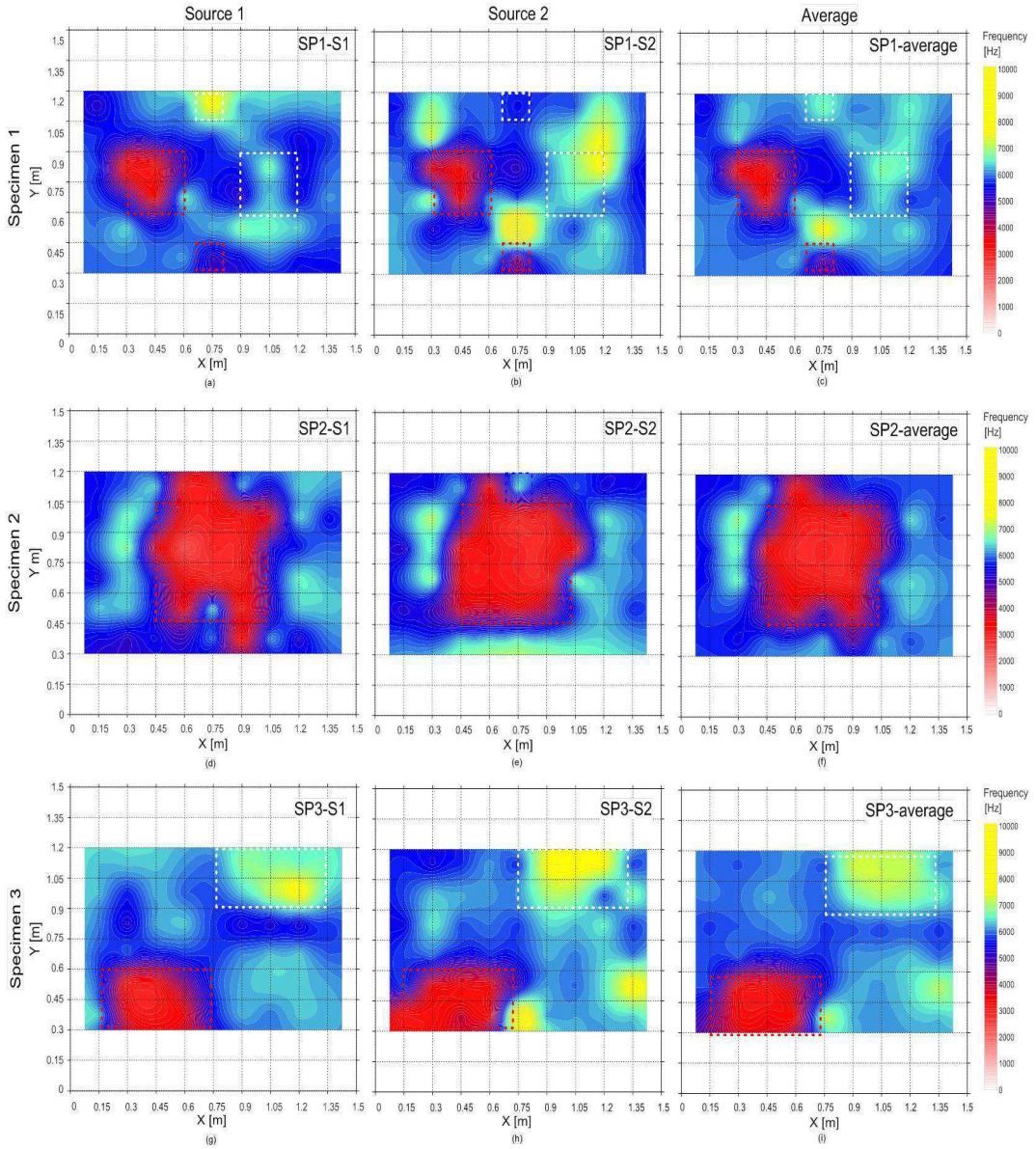
도면17


Phase velocity [m/s]
Frequency [Hz]
SP2-X3-Y8-S0 (Solid)
SP1-X4-Y3-S0 (Medium shallow DL, DL1)
SP1-X6-Y5-S0 (small shallow DL, DL2)
SP2-X4-Y5-S0 (Large shallow DL, DL5)
SP1-X1-Y5-S0 (small deep DL, DL4)
SP1-X3-Y7-S0 (medium deep DL, DL3)
SP3-X2-Y7-S0 (large deep DL, DL7)
0 250 500 750 1000 1250 1500 1750 2000
0 2000 4000 6000 8000 10000 12000 14000 16000 18000 20000

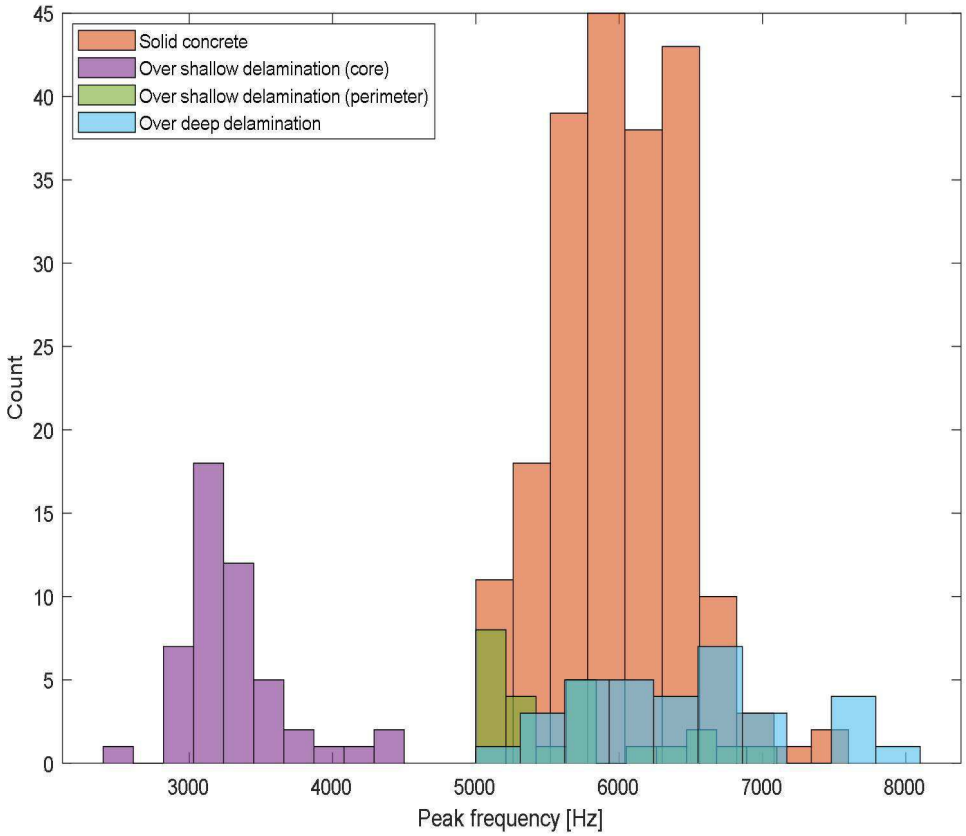
도면18


Source 1
Source 2
Average
SP1-S1
SP1-S2
SP1-average
SP2-S1
SP2-S2
SP2-average
SP3-S1
SP3-S2
SP3-average
Specimen 1
Specimen 2
Specimen 3
Y [m]
X [m]
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)

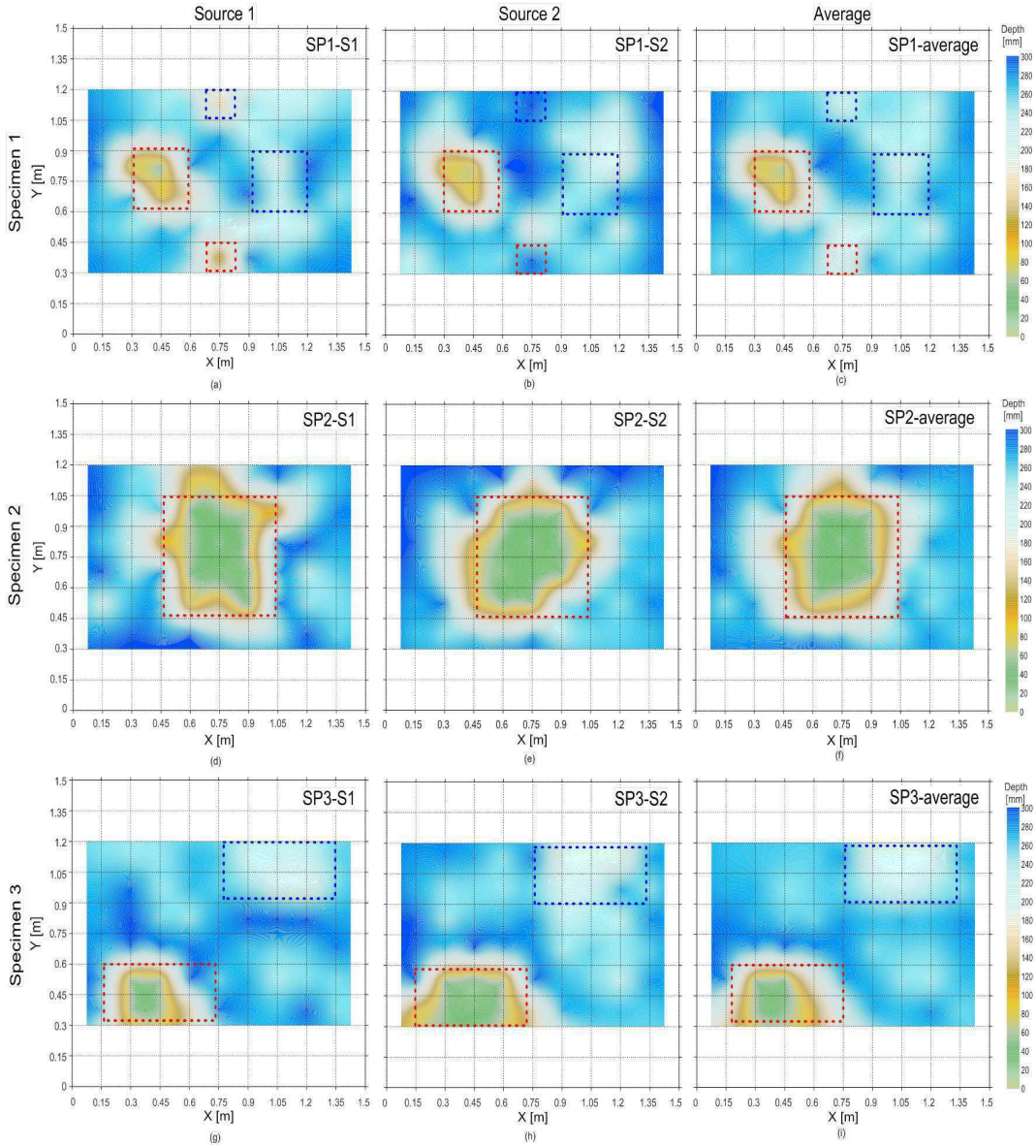
도면19


Source 1
Source 2
Average
SP1-S1
SP1-S2
SP1-average
SP2-S1
SP2-S2
SP2-average
SP3-S1
SP3-S2
SP3-average
Specimen 1
Specimen 2
Specimen 3
Y [m]
X [m]
Frequency [Hz]
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)

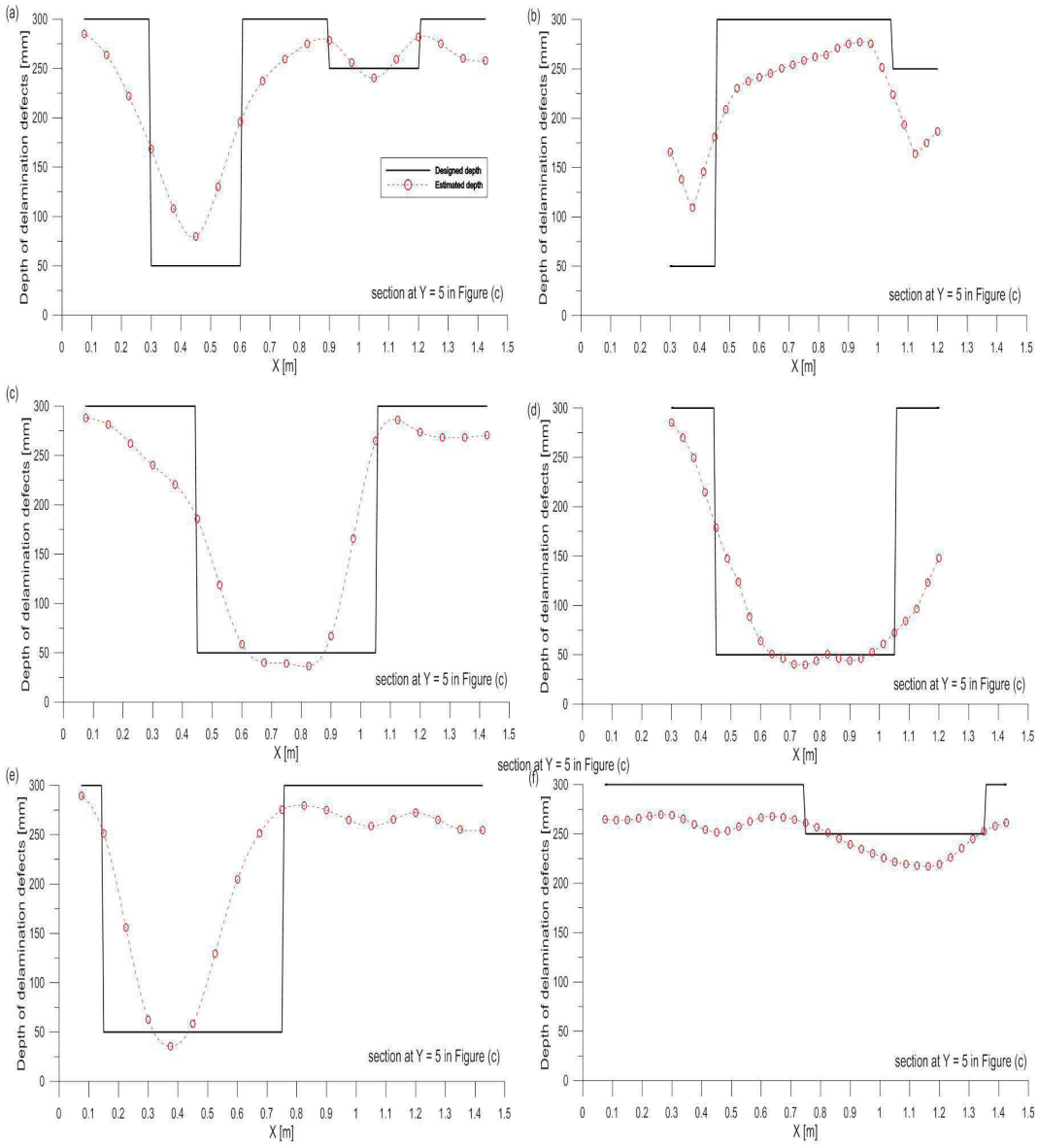
도면20


Solid concrete
Over shallow delamination (core)
Over shallow delamination (perimeter)
Over deep delamination
Count
Peak frequency [Hz]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
3000
4000
5000
6000
7000
8000

도면21


Source 1
Source 2
Average
Specimen 1
Specimen 2
Specimen 3
SP1-S1
SP1-S2
SP1-average
SP2-S1
SP2-S2
SP2-average
SP3-S1
SP3-S2
SP3-average
Y [m]
X [m]
Depth [mm]
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)

도면22


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
Depth of delamination defects [mm]
X [m]
Designed depth
Estimated depth
section at Y = 5 in Figure (c)