콘크리트 내부결함 탐지를 위한 초음파 전파 해석

정 휘 권¹ · 이 인 규² · 김 재 민^{2†}

¹전남대학교 토목공학과 박사후 연구원, ²전남대학교 토목공학과 교수

Ultrasonic Wave Propagation Analysis for Damage Detection in Heterogeneous Concrete Materials

Hwee Kwon Jung¹, Inkyu Rhee² and Jae-Min Kim^{2†}

¹Postdoctoral Research Fellow, Department of Civil Engineering, Chonnam National Univ., Gwangju, 61186, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National Univ., Gwangju, 61186, Korea

Abstract

Ultrasonic investigation of damage detection has been widely used for non-destructive testing of various concrete structures. This study focuses on damage detection analysis with the aid of wave propagation in two-phase composite concrete with aggregate (inclusion) and mortar (matrix). To fabricate a realistic simulation model containing a variety of irregular aggregate shapes, the mesh generation technique using an image processing technique was proposed. Initially, the domains and boundaries of the aggregates were extracted from the digital image of a typical concrete cut-section. This enables two different domains: aggregates and mortar in heterogeneous concrete sections, and applied the grids onto these domains to discretize the model. Subsequently, finite element meshes are generated in terms of spatial and temporal requirements of the model size. For improved analysis results, all meshes are designed to be quadrilateral type, and an additional process is conducted to improve the mesh quality. With this simulation model, wave propagation analyses were conducted with a central frequency of 75 kHz of the Mexican hat incident wave. Several void damages, such as needle-shaped cracks and void-shaped holes, were artificially introduced in the model. Finally, various formats of internal damage were detected by implementing energy mapping based signal processing.

Keywords : two-phase composite concrete, ultrasonic wave propagation, void-shaped damage, image processing, damage detection

1. 서론

콘크리트는 물, 시멘트와 다양한 골재로 구성된 혼합물로 비균질성 재료이며, 경제적 이점과 우수한 압축강도 및 성형성으로 인해 대부분의 토목 및 건축 구조물 건설에 사용된다. 하지만 콘크리트 구조물은 건설 시 콘크리트 대량 타설 및 양생 과정과 함께 다양한 원인(지진, 알칼리-골재 반응 및 충격과 열손상 등)에 의해 내부 공극 및 균열이 발생하며, 공극으로 침투된 수분은 동결 및 융해과정을 반복하면서 구조물의 건전도를 저해시킨다(Cho *et al.*, 2016). 특히 원자력 발전소나 고위험 화학물질 취급소와 같은 구조물 붕괴 시 막대한 피해를 초래할 수 있기 때문에 건축 구조물뿐만 아니라 토목 구조물의 건전성

평가와 표면 및 내부 손상평가 필요하다(Khazanovich *et al.*, 2016). 초음파는 빠른 시간 내 넓은 면적 탐지가 가능하고 결함과 같은 작은 변화에도 민감하기 때문에 초음파 탐상 기반 비파괴 검사가 결함탐지 및 평가에 주로 사용된다(Giurgiutiu, 2014).

초음파 탐상을 통해 실험적으로 콘크리트 구조물 내부결함을 탐지한 연구사례는 다음과 같다. 초음파 속도법의 경우 주로 진행방향으로 압축-인장 변형이 발생하는 P파를 사용한다. 구조물 전반 물성에 따라 파의 관통속도가 달라지기 때문에 모르타르 내 공극이 강도에 미치는 영향을 평가하거나(Lorenzi *et al.*, 2007), 콘크리트 역타시공 시 이음부에 발생하는 공극을 검출하는 연구가 수행되었다(Park *et al.*, 2000). 위와 같이 선

[†]Corresponding author:

Tel: +82-62-530-1651; E-mail: jm4kim@chonnam.ac.kr

Received February 12 2020; Revised April 20 2020;

Accepted June 16 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

형 응력과 기반 초음파 기법은 민감도가 낮기 때문에 보다 작은 크기의 결함탐지를 위해 초음파 비선형 기법이 사용된다. 이 방법에서는 구조물 거동 시 미세균열 간 간섭에 의해 발생하는 비선형 음향효과를 활용하며, 콘크리트 내 미세균열 평가에 적용하는 연구가 진행 중이다(Lesnicky *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2012). 한편 초음파 탐사를 통해 내부 철근 또는 결함을 가시화하는 경우 Pulse-Echo 방식을 활용하며, 램파(Lamb wave) 또는 R파(Rayleigh wave)와 같은 표면파(surface wave) 보다는 P파 또는 S파와 같은 실체파(body wave)를 주로 사용한다(Hoegh *et al.*, 2011; Khazanovich *et al.*, 2016). 철근-콘크리트의 경우 내부에 설치된 철근과 콘크리트가 분리되거나 부식되는 결함이 발생하기 때문에 해당 결함을 탐지하는 연구도 진행되었다(Xu *et al.*, 2012; Zima, 2019). 이와 유사하게 복합재로 보강된 콘크리트 구조물에서도 분리결함(debonding)이 발생하기 때문에 이를 탐지하는 연구도 함께 진행되었다(Li *et al.*, 2017; Ng *et al.*, 2019).

콘크리트는 내부에 골재, 철근 및 결함 등 다양한 요소로 구성되어 초음파 전파 시 다수 산란현상과 모드변형이 발생한다. 콘크리트 내부 초음파 거동해석에 대한 연구는 주로 철재 및 복합재 보강물이 내부에 설치된 경우를 대상으로 이루어졌다(Zheng *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2017; Vuong *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019). 그 중 Shen *et al.*(2018)은 콘크리트 구조물 내 철근의 부식결함에 따른 모드, 전파속도 및 감쇠양상을 관찰하였다. Zima(2019)는 실험을 통해 모델을 검증한 뒤 콘크리트 내부에 설치된 철근 부식에 의한 분리결함 상황을 해석하였다.

한편 내부 골재를 고려한 콘크리트 모델링 및 초음파 전파 해석 연구는 골재 형태의 복잡성으로 인해 상기 연구들에 비해 상대적으로 적다. 하지만 격자생성 기법의 발전과 다양한 메쉬생성 툴로 인해 최근 골재를 고려한 연구가 진행 중이다. Smolarkiewicz 등(2000)은 이미지처리와 함께 실제 골재형상을 고려한 2차원 콘크리트 모델을 생성하였고 압축하중에 따른 초음파 전파 속도 변화에 따른 해석을 수행하였다. Shah 등(2018)은 골재-콘크리트 기둥 단면에 대한 2차원 모델 생성 및 초음파 전파 해석 후 내부 가시화를 통한 결함탐지를 수행하였다. Yu 등(2017)과 Yu 등(2019)은 스펙트럴요소법(spectral element method)에 기반하여 개발된 SPECFEM S/W를 사용하여 골재-콘크리트 모델을 생성한 뒤, 다양한 골재 크기 및 분포에 따른 초음파 거동을 해석하였다. Chen 등(2018)은 원형 광관 내 콘크리트에서 골재 간 분리에 따른 초음파 전파상황을 해석하였다. Ariannejad(2019)는 다양한 형태의 골재와 타원형 결함을 모사하여 결함정도에 따른 초음파 거동신호 변화를 관찰하였다.

콘크리트 모델을 통한 초음파 전파 해석에 관한 연구는 다수 진행되었으나 주로 철재 구조물이 내부에 있는 경우가 대부분이며, 골재 형상을 세부적으로 묘사한 골재-모르타르 모델 생성에 대한 연구는 상대적으로 미미하다. 내부 골재까지 묘사하는 격자생성 기법은 다수 개발되었으나(Schlagen and Garboczi, 1996; Mohamed and Hansen, 1999; Wang *et al.*, 1999; Zhu *et al.*, 2005; Wriggers and Moftah, 2006), 해당 기법들은 하중에 따른 변형 및 파단 해석을 위한 모델생성 기법이다. 양질의 초음파 거동 해석을 위해서는 실제 골재형상을 반영한 골재-모르타르 모델이 필요하다.

본 연구에서는 골재를 포함한 콘크리트 구조물에 대한 2차원 모델생성 기법을 제안하고 결함 별 초음파 전파 해석과 내부결함 탐지를 수행하였다. 먼저 골재-모르타르 시편의 단면 사진을 대상으로 이미지처리를 수행한 뒤, 개별 골재와 모르타르 영역 및 영역 간 경계선 정보를 획득하였다. 이후 본 연구에서 개발된 격자생성 기법을 통해 2차원 골재-모르타르 모델을 생성하였다. 또한 모델을 반무한체로 모사하기 위해 경계 반사파 흡수 조건을 적용하였다. 다음으로 다양한 주파수 가짐에 대한 해석을 통해 적절한 가진 주파수와 신호형상을 결정하였다. 마지막으로 다양한 케이스에 대한 초음파 전파해석을 수행한 뒤, 신호처리를 통해 결함부를 가시화하였다. 본 연구를 통해 골재-모르타르 모델 생성과 초음파 탐상 기반 결함탐지의 가능성을 확인하였다.

2. 골재형상 고려 2차원 골재-모르타르 모델 생성

이 장에서는 이미지처리를 통해 골재-모르타르 시편의 단면 이미지로부터 골재와 모르타르를 영역을 인식하는 과정과 모델 생성을 위해 해당 영역 간 경계선 형상을 고려한 2차원 격자생성 기법을 제안한다.

2.1 격자 생성을 위한 이미지처리 기반 골재 및 모르타르 영역 인식

실제 골재형상을 고려한 모델 생성을 위해 골재-모르타르 시편의 단면 이미지를 대상으로 이미지처리를 수행하였다. Fig. 1과 같이 콘크리트는 내부결함을 제외하면 골재와 모르타르로 구성된 것으로 가정한다. 골재영역은 모르타르 영역에 비해 더 어두운 색을 갖기 때문에 해당 단면 이미지를 흑백화(gray scale)한 뒤, 색상 세기(threshold value)를 기준으로 Fig. 2와 같이 이진화 이미지를 생성하였다. Fig. 1의 경우, 골재와 모르타르 영역을 구분하기 위한 빛의 세기 기준은 100으로 설정되었다.

Fig. 1 Digital cross section image of typical two-phase composite concrete: aggregates and cement mortar (HiperFloor FINISH's diamond grind floors)

Fig. 2 Binary image(Red: Mortar/ Blue: Aggregate)

단면 이미지 이진화 후, 각 골재를 개별적으로 인식하기 위해 percolation 기법을 활용하였다(Jung and Park, 2019). 해당 이진화 이미지(Fig. 2)에서 총 235개의 개별 골재 영역이 인식되었으며, Fig. 3은 percolation 기법을 적용하여 개별 골재영역을 인식한 결과를 보여준다. 골재영역 인식 결과에서 골재와 모르타르에 해당하는 픽셀은 각각 1과 0으로 설정된다. 크기가 너무 작은 골재의 경우 초음파 거동에 크게 영향을 주지 않기 때문에 개별 골재영역 인식 결과에서 값이 1인 픽셀 개수가 기준 개수보다 낮은 경우, 모델생성 시 이를 반영하지 않도록 한다. 대상 단면 이미지의 경우, 기준 개수는 2,500개로 설정되었다.

이후 골재와 모르타르 영역 간 경계선 정보를 획득하기 위해 개별 골재영역 인식 결과에서 골재 외곽에 위치한 픽셀만 추출한다. 외곽선은 두께방향으로 단일 픽셀만 포함하며, 모델 생성 시, 외곽선 정보를 반영하기 위해 추출된 픽셀 위치, 모델 사이즈 및 단면 이미지 해상도를 고려하여 XY 좌표로 변환한다. Fig. 4는 차후 모델의 격자생성을 위해 미리 생성된 그리드(grid) 선과 이미지처리를 통해 생성된 골재 외곽선의 교차점을 보여준다. 이 과정에서는 그리드 선과 외곽선들의 교차점이 파악되며, 이후 2.2장에서 소개될 각 그리드 별 격자생성 과정에서 해당 교차점들이 사용된다.

   : identified as too small aggregates

Fig. 3 Identified individual aggregate regions

Fig. 4 Grid lines and outline of aggregates

2.2 영역 경계선 형상 적응형 2차원 격자 생성 기법

본 연구에서는 양질의 초음파 전파 해석 결과를 얻기 위해 모든 격자를 사각형으로 생성하고자 한다. 격자 생성을 위해 먼저 모델 영역 내 사각형 그리드를 생성하고 Fig. 5와 같이 그리드 선 및 영역 경계선의 교차점을 파악한다. 실제 골재는 형상이 복잡하기 때문에 격자 생성 시, 주변 격자와의 관계를 고려하기 복잡하기 때문에 격자생성이 어려워진다. 하지만 그리드를 먼저 생성할 경우, 주변 격자와 관계없이 개별 그리드 상황에 맞춰 격자생성이 가능하기 때문에 이를 보다 쉽게 해결할

Fig. 5 Cases of grid

Fig. 6 Strategy of mesh generation according to the grid cases

Initially generated meshes

Edited meshes (quality improvement)

Fig. 7 Comparison of mesh generation results

수 있다. Fig. 5는 그리드 내 골재 외곽선이 지나가는 4가지 경우를 보여주며, 각 그리드 case에 따른 사변형 격자(quadrilateral element)생성 전략은 Fig. 6과 같다.

제한된 기법으로 격자를 생성한 경우 영역 경계부분에서 격자 품질이 매우 낮아지는 현상이 발생한다. 이러한 문제해결을 위해 해당 격자에 대해 먼저 격자를 구성하는 노드(node) 중 영역 경계선에 해당하는 노드를 제외한 나머지 노드 위치를 변경하여 격자품질을 개선한다. Fig. 7은 개선 전 격자와 노드 변경 과정을 통해 품질이 개선된 격자에 대한 비교결과를 보여준다. 초기 생성된 격자는 골재 경계선과 그리드 간 간격이 좁은 경우 낮은 품질의 격자가 생성되거나 면적이 주변 격자에 비해 매우 작은 격자들이 생성된다. 하지만 노드변경 후 격자 형상은 더 균일해지며 품질은 더 향상됨을 볼 수 있다.

2.3 CALM 기반 경계부 흡수조건 적용

실제 콘크리트 구조물은 크기가 매우 크기 때문에 반무한체로 간주할 수 있다. 경계부에서 반사파 발생하는 상황을 억제하기 위해 골재-모르타르 모델에 경계흡수 조건을 적용하였다. 적용된 조건은 CALM(Caughey Absorbing Layer Method)으로 레일리-감쇠(Rayleigh damping)를 사용하여 경계로 나가

Fig. 8 CALM-based wave absorbing condition

는 웨이브 에너지를 흡수한다. 해당 경계 조건은 댐퍼를 사용하는 ABC(Absorbing Boundary Condition), PML(Perfect Matched Layer) 및 무한요소법(infinite element) 등 타 조건들에 비해 범용 유한요소 프로그램에서 손쉽게 안정적으로 적용 가능하다는 장점이 있다(Rodrigues and Dimitrovova, 2015). Fig. 8과 같이 대상 골재-모르타르 모델에 공극결합 및 스캔 표면을 제외한 경계부에 동일한 크기의 격자를 추가하였으며, 감쇠치는 해석 상 주파수 대역을 고려하여 α 와 β 로 적용하였다. 또한 격자 간 임피던스(impedance)를 고려하여 감쇠치는 경계부 격자층을 지남에 따라 점진적으로 상승되도록 설정하였다. 자세한 과정은 4.1절에서 소개한다.

3. 맵핑 기반 내부결합 탐지 기법

전산해석을 통해 골재-모르타르 모델에서 초음파 신호를 획득한 뒤 이를 통해 결합부 위치를 가시화할 수 있는 신호처리 기법을 개발하였다. Fig. 9와 같이 모델을 통한 초음파 전파 해석 과정에서 가진기와 탐촉자 쌍이 구조물 표면을 지나면서 가진을 통해 초음파를 생성하고 탐촉자는 구조물 내 골재 및 결합에 의한 반사와 신호를 획득한다. Shah 등(2018)의 연구를 볼 때 내부 골재에 의한 산란파로 인해 결합 반사와 신호 강도가 현저히 감소한 점을 고려하여 해당 모델에서는 가진 점으로부터 각각 -6mm, -4mm, 0mm, 6mm, 10mm로 총 5개 지점에서 초음파 신호를 획득하였다. 또한 가진 및 측정 간격은 10mm로 설정하였다.

Fig. 9 Strategy for scanning the internal defects

전산해석을 통해 표면 스캔을 모사한 후 결합 가시화를 위해 에너지 맵핑 기반 신호처리를 모델로부터 획득한 초음파 거동신호에 적용하였다. 신호 전처리 과정으로 먼저 초음파가 가진점-특정점-측정점 순으로 이동하는데 해당하는 시간구간을 추출한다. 해당 과정을 위해 파의 속도정보가 필요한데 이는 4.3절에서 자세히 다루었다. 신호 전처리 과정 후 가진기와 센서 위치, 초음파 속도 및 도달시간(ToF; Time Of Flight)을 고려하여 가능한 궤적을 도출한 뒤 해당 궤적에 상응하는 픽셀에 신호 값을 적용한다. 상기 과정을 모든 1개 가진 및 측정 점에 대해 수행하며, 최종 신호 에너지 맵의 픽셀 값(I)은 다음과 같이 표현된다. 식 (1)과 (2)에서 i 와 j 는 맵핑 과정에서 각 픽셀에 해당하는 특정점의 X 및 Y 방향의 위치 순번을 의미하며, n 과 m 은 X 및 Y 방향 내 존재하는 특정점들의 개수를 의미한다. 그리고 식 (2)에서 wave signal은 각 센서에서 측정된 초음파 신호를 의미한다.

$$TOF(i,j) = \frac{Path(i,j)}{Wave\ velocity} \quad (1)$$

$$I(i,j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Wave\ signal(TOF(i,j)) \quad (2)$$

4. 콘크리트 모델링 및 초음파 전파 해석을 통한 결함탐지

이 장에서는 모델생성 기법을 통해 다양한 경우의 결함을 포함한 골재-모르타르 모델을 생성하고 초음파 전파해석을 수행한 뒤, 내부결함을 탐지한 결과를 보여준다.

4.1 골재-모르타르 전산해석 모델 생성

2.1와 2.2절에서 소개된 기법을 통해 골재-모르타르 시편의

단면 사진으로부터 골재 형상을 반영한 격자를 Fig. 10과 같이 생성하였으며, 각 격자 위치에 기반하여 모르타르와 골재 영역을 구분하였다. 모델 사이즈는 300×300mm로 설정되었으며 최종 모델에서는 총 29개의 골재가 모사되었다. 공간 상에서 원활한 초음파 거동 해석을 위해 먼저 파장(L_{wave})은 콘크리트 물성(밀도 ρ , 영률 E , 프아송 비 ν)을 통한 웨이브 속도(V_{wave})와 주파수를 고려한 식(3)과(4)를 사용하여 도출하였다. ABAQUS의 경우, 파장의 1/10 이하로 격자크기(h) 설정이 필요하기 때문에 아래 식을 통해 최대 격자 크기를 결정하였다. 본 연구에서는 이를 참고하여 가진 주파수(f)가 100kHz 미만, 또는 이상인 경우 격자 크기를 각각 2mm와 1mm로 설정하였다.

$$V_{wave} = \sqrt{\frac{(1-\nu) \times E}{\rho \times (1+\nu) \times (1-2\nu)}} \quad (3)$$

$$L_{wave} = \frac{V_{wave}}{f}, \quad h \leq \frac{L_{wave}}{10} \quad (4)$$

또한 반무한체 모사를 위해 CALM 기반 경계 흡수 조건을

Fig. 10 Final mesh layout for two-phase concrete

Table 1 Damping ratio profile

Mesh layer number	modal damping ratio(%)
1	1
2	4
3	9
4	16
5	25
6	36
7	49
8	64
9	81
10	100

모델 경계부에 적용하였으며, 감쇠를 위한 경계층은 총 10개이다. 모델 생성 시 격자 크기와 초음파 전파 해석인 점을 고려하여 20~100kHz 주파수 영역의 감쇠치가 Table 1에 표기된 각 층별 감쇠값과 일치하도록 α 와 β 값을 설정하였다. 구체적인 α 와 β 값 도출과정은 식 (5)와 같다. 여기서 ζ 는 감쇠값, ω_i 와 ω_j 는 각각 감쇠값 ζ 를 갖는 하한 및 상한 주파수를 의미한다.

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad \beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5)$$

경계흡수 효과를 극대화하기 위해 감쇠층 개수 및 층별 감쇠값에 대한 사례연구(case study)를 수행하였고, 그 결과 Table 1과 같이 총 10개 감쇠층에서 층별 감쇠값은 1%에서 100%까지 각 층의 제곱승으로 증가하도록 설정되었다.

한편 골재 물성치 결정을 위해 골재영역에 해당하는 요소면적을 합산하여 골재가 전체 영역에 차지하는 부피분율(volume fraction, V_f)을 도출하였다. 이후 콘크리트 복합체, 골재, 모르타르 물성치를 종합한 식 (6)과 (7)을 통해 골재 물성치를 도출하였다.

$$\rho_{aggregate} = \frac{\rho_{concrete} - (1 - V_f) \times \rho_{mortar}}{V_f} \quad (6)$$

$$E_{aggregate} = \frac{E_{concrete} - (1 - V_f) \times E_{mortar}}{V_f} \quad (7)$$

Table 2 Material properties of concrete, mortar and aggregate

Material name	Density (kg/m^3)	Young's modulus (Gpa)
Concrete	2,300	25.811
Mortar	2,100	20
Aggregate	2,738	38.55

Table 3 Numerical sieve analysis

Sieve size (mm)	frequency	Passing weight(%)	Sieve size (mm)	Residual weight(%)
5	0	0	0.15	100
10	21	42	0.3	100
20	9	60	0.6	100
25	7	74	1.2	100
30	4	82	2.5	100
35	3	88	5	100
40	2	92	10	100
45	2	96	20	28
50	2	100	40	12
Max. size of aggregates = 40mm			F.M.=7.4(6~8)	

생성된 골재-모르타르 모델에서 골재의 부피분율은 0.38이었으며, 콘크리트, 모르타르와 이를 통해 도출된 골재의 각 물성은 Table 2에 표기되어 있다. 그리고 Table 3은 그 면적이 90~1,886mm²로 분포된 50개의 비정형성 골재를 모형화한 것을 보여준다. 이러한 비정형 골재의 직경을 Fig. 11과 같이, 등가면적을 갖는 환산 직경, d_i 를 정의하여, Table 3과 같은 수치체가를 해석을 하였다. 통과중량 백분율의 90%에 해당하는 굵은골재 최대치수, d_{max} 는 40mm이고, 각 체 치수에 잔류중량 백분율로 계산한 조립률(Fineness Modulus; F.M.)은 7.4로 보통 굵은 골재의 조립률 분포인 6~8사이에 분포하고 있어, 적절한 모델링으로 사료된다. Fig. 12는 환산직경에 따른 골재분포

Fig. 11 Transformed aggregates diameter, d_i

Fig. 12 Numerical sieve analysis for fineness and aggregates distribution: (a) aggregates frequency at different diameter, (b) passing weight% vs. aggregate diameter

와 잔류중량 백분율과 골재직경의 관계를 나타내고 있다.

4.2 모델 해석을 위한 가진 주파수 선정 및 신호형상 설계

모델의 콘크리트 시편을 효율적으로 가진하기 위해 적절한 가진 주파수 선정에 대한 해석을 진행하였다. 관련 연구 사례에서는 20~200kHz 범위 및 50kHz 가진 신호가 주로 사용된다 (Khazanovich *et al.*, 2016; Sa *et al.*, 2017). 고주파 신호의 경우, 원활한 가진을 위해 고 전압과 고 전류를 요구하지만 실제 상황에서 이를 충분히 확보하기 어렵다. 또한 낮은 SNR(Signal to Noise Ratio) 및 파형 모사가 안되는 경우도 대부분이기 때문에 다양한 주파수로 가진 해석 시, 최대 가진 주파수는 200kHz, 최소 가진 주파수는 50kHz로 선정하였다. 가진 주파수는 임펄스 신호(Impulse signal)에 50~200kHz 범위의 필터를 적용하여 Fig. 13과 같이 생성하였다. 가진에 따른 모델의 초음파 거동을 관찰하기 위해 forward marching method를 활용하여 해석을 수행하였으며, Fig. 14와 같이 각 3개 점에서 초음파 거동 신호를 획득한 뒤 scalogram을 분석하였다. Fig. 15는 각 측정 신호의 시간에 따른 주파수 변화를 보여준다. Point 1 신호는 표면

Fig. 13 Input signal for band frequency excitation(50~200kHz)

파로 인해 반사 및 산란과 관찰이 어렵지만 모델 내부에서 측정된 point 2 & 3 신호에서는 50~100kHz 성분이 두드러짐을 관찰할 수 있다. 해석 결과를 통해 중심 주파수는 75kHz로 설정하였으며, 이후 해석에서 격자 크기는 2mm로 설정하였다.

한편 모델 특성 상 가진과 동시에 표면파가 발생하는데 표

면파 신호와 골재 및 결함에 의한 반사파 신호가 겹칠 경우, 반사파 처리가 어렵게 된다. 저주파 신호일수록 해당 어려움이 더욱 심각해지기 때문에 본 연구에서는 Fig. 16과 같이 가진신호를 설계하였다.

4.3 Case 별 모델의 초음파 전파 해석 및 결함탐지

생성된 골재-모르타르 모델을 통해 초음파 전파 해석 후 개발된 결함 가시화 기법을 통해 결함탐지를 수행하였다. 각 case 별 모델 생성을 위해 골재와 case에 따른 결함이 포함된 이미지를 사용하였다. 그리고 해석 모델의 간결성을 위해 모델 경계와 밀접한 골재는 모델에서 제거하였다. 공극결함의 경우 결함 영역에 해당하는 격자를 제거하여 모사하였다. 각 case 별 결함은 다음과 같이 골재 형상을 지닌 결함 3가지, 일자형 균열, 실제 형상 균열 및 2개의 원형 결함이 존재하는 경우로 총 6개이다. 각 case 모델을 통한 초음파 전파 해석과 에너지 맵핑을 통한 결함탐지를 수행하였다. 맵핑 시 신호 전처리 과정에서 필요한 파의 속도는 3000m/s로 설정되었는데, 이는 모르타르 모델 해석으로부터 도출된 값이다. 2차원 모델에서 초음파는 내부를 투과하는 P파, S파 및 표면에서 발생하는 P파로 크게 3가지 파가 발생한다. 이 중 P파의 속도가 가장 높기 때문에 Fig. 14와 같이 직사각형 모델 좌측면 중앙에서 가진 후 point 3에서 신호를 측정하면 P파가 가장 먼저 도달한다. 따라서 가장 먼저 측정되는 신호의 도달시간과 가진 및 측정점 간 거리를 통해 속도를 도출하였다. 이때 가진신호는 Fig. 16와 같다.

Figs. 17~22는 6가지 결함 case의 모델 및 결함탐지 결과를 주며, 왼쪽 노란색 점선으로 표시된 영역이 오른쪽에 보이는 신호 에너지 맵핑을 수행한 영역이다. 결함 골재에 의한 다수

Fig. 14 3 sensing points
(At point 1, actuation and sensing are conducted)

Fig. 15 Scalogram of signals at the 3 points

Fig. 16 Input signal for ultrasonic scanning(Mexican hat wavelet)

Fig. 17 Case 1 (aggregate-shaped defect)

Fig. 20 Case 4 (Slit-like crack)

Fig. 18 Case 2 (aggregate-shaped defect)

Fig. 21 Case 5 (Branched crack)

Fig. 19 Case 3 (aggregate-shaped defect)

Fig. 22 Case 6 (2 small holes as an internal voids)

반사 및 산란현상에도 불구하고 결함위치 추정 가능성이 있었는데, 이는 골재보다 공극결함에 의한 반사파가 더 크기 때문이다. 2개 원형 결함 case의 경우, 이전 case처럼 결함위치가 뚜렷하지 않지만 결함부에서 신호 에너지가 가장 크게 나타난다(Fig. 22). 한편 균열 결함의 경우 실제 구조물에서는 균열 폭이 작기 때문에 추후 균열 두께를 반영한 모델생성이 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 골재-모르타르 모델을 생성하는 기법을 제안하였으며, 초음파 전파 해석을 통해 다양한 내부 결함 탐지를 수행하였다. 골재-모르타르 시편 사진으로부터 이미지 처리를 기반으로 골재와 모르타르 영역을 구분한 뒤, 영역 경계선 형상에 맞게 격자를 생성한다. 격자 생성에 앞서 그리드를 생성하며, 그리드와 영역 경계선 간 교차하는 경우에 맞춰 사변형 요소가 생성되도록 한다. 이후 생성된 골재-모르타르 모

델에 내부 공극결함을 모사한 뒤, 초음파 전파 해석을 수행하여 결함탐지를 수행하였다. 결함 가시화를 위해 신호 에너지맵을 생성하였다. 이 과정에서 사용되는 파의 속도정보가 실제와 다를 경우, 맵핑 결과 영상에 스케일 변동은 있으나 결함을 포함한 전반적인 영상의 형태는 유사하다. 정확한 위치추정을 위해 파의 속도정보를 추정하는 부분은 더 연구가 필요하지만 우선 결함 유무와 형상 파악에 충분히 활용될 수 있을 것으로 보인다. 제안된 기법으로 결함탐지를 수행한 결과, 각 결함 case 해석에서 모두 결함 파악이 가능하였다. 특히 가늘고 긴 형상을 갖는 균열의 경우, 형상 가시화도 가능하였다.

향후 연구계획은 다음과 같다. 제안된 격자생성 기법은 2차원 모델을 대상으로 하지만 실제를 고려할 경우 3차원 형상에 대응 가능한 격자생성 기법이 개발되어야 한다. 이를 위해서는 3차원 골재형상 정보를 대상으로 한 신호전처리 기법 개발도 필요하다. 한편 실제 균열은 폭이 작기 때문에 본 연구에서 개발된 방법으로 모사하기에 적절하지 않은 것으로 판단된다.

따라서 이와 같은 결함인 경우 작은 균열 폭을 반영하는 2차원 및 3차원 격자생성 기법이 요구되며, 외부하중에 따라 결함 성장 해석도 요구된다. 추가로 실험 또는 타 연구결과와 비교를 통한 모델 검증도 필요하다. 관련 연구가 지속될 경우, 검증된 골재-모르타르 모델을 통한 초음파 전파 해석을 통해 충분한 정확도를 지닌 강도평가가 가능하다. 해당 모델을 통해 초음파 탐상 기반 내부결함 탐지 기법을 개발할 경우, 실제 구조물에도 개발된 기법 적용이 가능할 것으로 예상된다.

실제 콘크리트는 내부에 공극이 많고 골재 형태나 크기도 다양하므로 실제 적용성 향상을 위해서는 결함 크기에 대한 정의가 필요하다. 이를 위해 결함 크기에 따른 콘크리트 모델의 응력해석이나 실험적 조사도 수반되어야 한다. 골재와 공극의 크기 및 분포에 따른 해석은 하드웨어나 실험 장비 확보 등을 고려하여 추후에 진행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2019 3110 1000020, 해외 내진분석 기술기준을 적용한 표준형 원전 설계 초과지진 대응 기술개발).

References

- Ariannejad, H. (2019) *Numerical Simulation of Diffuse Ultrasonic Waves in Concrete*, Master's thesis, University of Nebraska.
- Chen, H., Xu, B., Mo, Y., Zhou, T. (2018) Multi-Scale Stress Wave Simulation for Aggregates Segregation Detection of Concrete Core in Circular CFST Coupled with PZT Patches, *Mater.*, 11(7), p.1223.
- Chen, H., Xu, B., Zhou, T., Mo, Y.L. (2019) Debonding Detection for Rectangular CFST using Surface Wave Measurement, *Mech. Syst. & Signal Process.*, 117, pp.238~254.
- Cho, Y.J., Rhim, H.C., Kim, D.Y. (2016) Ultrasonic Testing of Voids Inside Mortar for Structural Integrity Evaluation, *Korea Inst. Build. Constr.*, 16(1), pp.90~91.
- Giurgiutiu, V. (2014) *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA.
- Hoegh, K., Khazanovich, Lev., Yu, H.T. (2011) Ultrasonic Tomography Technique for Evaluation Concrete Pavements, *J. Transp. Res. Board*, 2233, pp.85-94.
- Jung, H.K., Park, G. (2019) Rapid and Non-Invasive Surface Crack Detection for Pressed-Panel Products based on Online Image Processing, *Struct. Health Monit.*, 18(2019), pp.1928~1942.
- Khazanovich, L., Freeseaman, K., Salles, L., Asadollahi, A. (2016) *Damage detection techniques for concrete applications*, University Transportation Center for Highway Pavement Presentation.
- Lesnicki, K.J., Kim, J.Y., Kurtis, K.E., Jacobs, L.J. (2011) Characterization of ASR Damage in Concrete using Non-Linear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy Technique, *NDT&E Int.*, 44(8), pp.721~727.
- Li, J., Lu, Y., Guan, R., Qu, W. (2017) Guided Waves for Debonding Identification on CFRP-Reinforced Concrete Beams, *Constr. & Build. Mater.*, 131, pp.388~399.
- Lorenzi, A., Tisbirek, F.T., Silva, L.C.P.F. (2007) Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Concrete Specimens, *Conf. IV Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos*, Buenos Aires, ARG, pp.1~13.
- Mohamed, A.R., Hansen, W. (1999) Micromechanical Modeling of Crack-Aggregate Interaction in Concrete Materials, *Cem. Concr. Compos.*, 21, pp.349~359.
- Ng, C.T., Mohsensi, H., Lam, H.F. (2019) Debonding Detection in CFRP-Retrofitted Reinforced Concrete Structures using Nonlinear Rayleigh Wave, *Mech. Syst. & Signal Proc.*, 125, pp.245~256.
- Park, S.J., Yim, H.J., Kwak, H.G. (2012) Evaluation of Microcracks in Thermal Damaged Concrete using Nonlinear Ultrasonic Modulation Technique, *J. Korea Concr. Inst.*, 24(6), pp.651~658.
- Park, S.K., Baek, U.C., Lee, H.B., Kim, M.M. (2000) Non-Destructive Inspection of Top-Down Construction Joints of Column in SRC Structure using Ultrasonic Method, *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, 20(4), pp.290~295.
- Rodrigues, A., Dimitrovova, Z. (2015) The Caughey Absorbing Layer Method-Implementation and Validation in Ansys Software, *Lat. Am. J. Solids & Struct.*, 12(8).
- Sa, M.H., Yoon, Y.G., Lee, I.B., Woo, I.S., Oh, T.K. (2017) A Study on the Statistical Distribution of Rebound Number and Ultrasonic Pulse Velocity in RC and PSC Concrete Structure, *J. Korean Soc. Saf.*, 32(4), pp.53~58.
- Schlangen, E., Garboczi, E. (1996) New Method for Simulating Fracture using an Elastically Uniform Random Geometry Lattice, *Int. J. Eng. Sci.*, 34, pp.1131~1144.
- Shah, J.K., Majhi, S., Mukherjee, A. (2018) Ultrasonic based Crack Imaging in Concrete, *The 11th International Conference on Structural Integrity and Failure 2018*, University of Western Australia, Australia.
- Shen, W., Dongsheng, L., Jinping, O. (2018) Numerical simulation of guided wave propagation in reinforced concrete structures with debond damage, *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Denver, Colorado, USA.

- Smolarkiewicz, P.P., Nogueira, C.L., Willam, K.J. (2000) Ultrasonic Evaluation of Damage in Heterogeneous Concrete Materials, *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Spain, pp.1~13.
- Vuong, L.T., LE, C., Nguyen, D.S. (2019) A Two-Dimensional Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete using Finite Element Method, *Int. J. Civil Eng. & Technol.*, 10(3), pp.566~580.
- Wang, Z., Kwan, A., Chan, H. (1999) Mesoscopic Study of Concrete I: Generation of Random Aggregate Structure and Finite Element Mesh, *Comput. & Struct.*, 70, pp.533~544.
- Wriggers, P., Moftah, S. (2006) Homogenisation and Damage Behaviour, *Finite Elements in Anal. & Des.*, 42, pp.623~636.
- Xu, B., Zhang, T., Song, G., Gu, H.C. (2012) Active Interface Debonding Detection of a Concrete-Filled Steel Tube with Piezoelectric Technologies using Wavelet Packet Analysis, *Mech. Syst. & Signal Process.*, 36, pp.7~17.
- Yu, T., Chaix, J.F., Audibert, L., Komatitsch, D., Garnier, V., Henault, J.M. (2019) Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete based on a Two-Dimensional Numerical Model Validated Analytically and Experimentally, *Ultrasonics*, 92, pp.21~34.
- Yu, T., Chaix, J.F., Komatitsch, D., Garnier, V., Audibert, L., Henault, J.M. (2017) 2D Numerical Modeling of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete: A Parameterization Study in a Multiple-Scattering Medium, *43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Atlanta, Georgia, USA.
- Zheng, Z., Lei, Y., Xin, X. (2014) Numerical Simulation of Monitoring Corrosion in Reinforced Concrete based on Ultrasonic Guided Waves, *The Sci. World J.*
- Zhu, W., Tang, C., Wang, S. (2005) Numerical Study on the Influence of Mesomechanical Properties on Macroscopic Fracture of Concrete, *Struct. Eng. & Mech.*, 19, pp.519~533.
- Zima, B. (2019) Guided Wave Propagation in Detection of Partial Circumferential Debonding in Concrete Structures, *Sensors*, 19(9), pp.1~21.

요 지

초음파 탐상은 다양한 콘크리트 구조물의 비파괴검사에서 활용된다. 본 연구에서는 골재형상을 고려한 골재-모르타르 모델 생성과 초음파 전파 해석을 수행하였다. 실제 골재형상을 반영하기 위해 이미지처리를 통한 골재-모르타르 단면으로부터 모르타르와 골재 영역을 파악하고, 영역 경계형상을 보존하면서 격자를 생성하는 기법을 개발하였다. 개발된 기법에서는 모든 격자가 4각형으로 생성된다. 골재-모르타르 모델을 통해 초음파 전파 해석을 수행하였고 모델을 반무한체로 간주하기 위해 CALM 기반 경계흡수 조건을 적용하였다. 골재 및 결함을 포함한 이미지로부터 격자를 생성한 뒤, 결함 영역에 포함된 격자를 제거하여 공극결함을 모사하였다. 본격적인 결함탐지 전 선행 해석을 통해 모델 동특성을 고려한 적절한 가진 주파수를 결정 및 가진 신호형상을 설계하였다. 이후 case 별 초음파 전파 해석을 통해 신호를 획득하고 신호 에너지 맵핑 작업을 통해 내부 결함을 가시화 하였다. 가시화 결과, 골재에 의한 다수 반사 및 산란현상이 관찰되지만 결함부에서 신호 에너지는 가장 높게 나타났으며 모든 해석 case에서 결함위치 추정 가능성이 있었다. 또한 균열의 경우 형상파악도 가능하였다.

핵심용어 : 골재-모르타르, 초음파 전파, 공극결함, 이미지처리, 결함탐지