충격반향기법에서의 휨 모드 및 두께 모드의 영향인자에 대한 연구

오 태 근¹ · 박 종 일² · 변 요 셉³ · 이 영 학^{4*}

¹인천대학교 안전공학과, ²서울과학기술대학교 안전공학과, ³한국시설안전공단 시설안전연구소, ⁴경희대학교 건축공학과

A Study on the Influence Factors on Flexural and Thickness Modes in the Impact-echo Test

Tae-Keun Oh¹, Jongl-Il Park², Yoseph Byun³ and Young-Hak Lee^{4*}

¹Department of Safety Engineering, Incheon National Univ., Incheon, 22012, Korea

²Department of Safety Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

³Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Goyang, 10223, Korea

⁴Department of Architecture Engineering, Kyung Hee Univ., Yongin, 17104, Korea

Abstract

In this paper, various influence factors on the impact-echo test which is an effective method in characterizing defects such as such as the delamination in the concrete structures were studied. The side to thickness ratio(a/h), the relative position of impacting and sensing points over the delamination that have great effects on the flexural and impact-echo(thickness) modes were investigated and examined by the parametric finite element analysis. As a result, the flexural modes dominate in the case of $a/h > 2$ and the thickness mode was more evident when $a/h < 2$. With regard to the relative position of impact source and sensing point to the defect, the flexural modes dominate even when either the loading or sensing point was over the delamination defect. However, the thickness mode prevails when both the impacting and sensing points are over the solid region beyond the delamination area.

Keywords : impact-echo test, flexural mode, impact-echo mode, thickness mode, side to thickness ratio, delamination

1. 서 론

콘크리트 구조물에서 외부하중, 철근부식 등의 손상으로 내부에 층상박리균열이 존재할 경우 균열 상부 또는 부근에서 충격반향시험을 수행하면 균열 상부 부위는 단부가 부분 구속된 평판의 진동과 유사한 거동 특성을 보이게 된다(Oh *et al.*, 2013). 충격반향 기법은 이러한 박리균열위에서의 콘크리트의 진동 특성을 이용하여 손상 탐지 및 가시화에 이용하는 방법으로서, 특히 박리면의 크기가 작은 경우의 충격 반향모드(두께 모드)를 효과적으로 활용한다(Sansalone *et al.*, 1997).

충격반향기법에 있어 구조체 내부에 박리균열이 존재할 경우 균열의 폭 및 깊이는 각각 a 와 h 를 가지는 판으로 가정하여 판 이론을 적용할 수 있다. 판 이론에(plate theory) 따르면 판은 후판(thick plate), 박판(thin plate) 그리고 막(membrane)으로 구분될 수 있으며, 이는 판의 폭/두께 비(a/h)에 의해 Fig. 1과 같이 구분될 수 있다(Ventsel *et al.*, 2001). 일반적으로 a/h 값이 작아짐에 따라(e.g. $a/h < 10$) 전단변형과 회전강성의 영향을 무시하지 못하기 때문에 판의 휨 거동은 수치적으로 표현되기 힘들다(Mindlin, 1951)

층상박리균열은 다양한 폭과 깊이에서 존재하므로 다양한 a/h 값을 가질 수 있으며 a/h 의 변화에 따라 휨 모드 및 충

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-3815; E-mail: leeyh@khu.ac.kr
Received October 8 2015; Revised November 2 2015;
Accepted November 3 2015

©2015 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.

격반향모드(두께 모드)의 상대적 지배성이 변화한다. 일반적으로 a/h 값이 클 경우 휨 모드가 지배적이고 두께 모드의 진폭값은 상당히 작아 측정하기가 힘들다. 하지만 a/h 값이 작아짐에 따라 두께 모드의 크기가 증가하기 시작하고 a/h 에서 h 값이 판의 두께에 가까워질수록 두께 모드는 분명해지며 다른 모드의 값들과 쉽게 구분된다. 이와 같이 a/h 값의 변화에 민감한 휨 모드와 두께 모드에 대해 판의 동적거동을 연구하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 1 Criteria governing thick plate, thin plate, and membrane cases based on the side to thickness ratio a/h ($a \gg b$).

만약 휨과 두께 모드의 고유 주파수 및 진폭에 대한 a/h 의 영향이 명확하게 파악된다면, 특정 시험 조건에서 지배적인 모드를 예측할 수 있을 것이다. 휨과 두께 모드의 상대적인 진폭값은 a/h 비, 충격해머의 가진 주파수 범위, 센서의 종류(변위계, 속도계, 가속도계), 균열에 대한 충격해머 및 센서의 상대적 위치 등에 영향을 받는다(Shin *et al.*, 2012).

a/h 에 대한 휨과 두께 모드에 대한 영향을 파악하기 위해서는 다양한 조건의 변화를 고려하는 매개변수적 연구가 진행되어야 하며 이는 내부에 층상박리균열을 모사한 2차원 유한요소해석에 의해 분석될 수 있다. 변위보다는 속도와 가속도를 이용할 때 고주파 영역대의 성분을 잡아내는데 유리하지만 대부분의 충격반향시험은 표면에서의 면외 변위를 측정하고 있다. 따라서 이번 연구는 매개변수적 유한요소해석에 의해 충격반향기법에서의 다양한 인자의 변화에 따른 면외 변위반응을 기반으로 휨 모드와 두께 모드에 대한 영향을 분석하였다.

2. 충격반향기법(Impact-Echo Method)

충격반향기법은 1980년대에 Sansalone 등이 처음 제안한 이후로 콘크리트 구조물의 치수를 확인하고 내부 결함을 찾는 데 효과적인 비파괴방법 중 하나로 알려져 왔다(Carino *et al.*, 1986). 구체적으로는 콘크리트 구조물의 균열, 박리, 공극, 벌집골 터짐(honeycombing) 등의 결함의 위치,

범위, 깊이를 결정하는데 사용되어 왔다(Sansalone and Street, 1997). 충격반향기법은 충격 하중과 같이 접촉 시간이 짧은 순간하중의 전달로 콘크리트 표면에 물질파를 생성하고 구조물 반대편 또는 내부공극에서의 반사파를 측정하는 역학적 파동에 기반을 둔 비파괴 방법이다. 즉, 대상 구조체의 두께를 통한 진동 모드에 의해 생성된 표면 반응이 센서에 의해 측정되고 이 시간영역에서의 데이터가 고속푸리에 변환(Fast Fourier Transformation, FFT)에 의해 주파수 영역으로 전환되어 진폭의 최대값에 해당되는 최대 주파수를 알아낼 수 있다. 수식적으로 구조물의 두께(또는 내부 결함의 깊이, H)는 압축파의 속도(C_p)와 최대 주파수(f)의 함수로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \beta C_p / 2f \quad (1)$$

여기서, β 는 무한 평판 구조물에서는 대략 0.96을 갖는 형상계수이다.

충격반향기법은 시험 위치의 아래에 존재하는 공극(air)을 갖는 결함의 위치를 찾는 데 적용되며 닫힌 균열의 경우에는 효과적이지 못하다(Zhu and Popovics, 2007). 표면에 평행하고 넓은 면적을 가지는 층상균열에 대하여 식 (1)을 사용하여 깊이를 예측할 수 있다. 하지만 균열의 크기가 작거나 평행하지 않을 경우, 두께 모드를 구현해 내기 어렵다. 또한 박리균열이 표면 근처에 있을 경우(e.g. a/h 값이 클 경우) 휨 모드가 지배적이기 때문에 두께 모드를 구분해 내기 어려운 한계를 지닌다(Sansalone and Street, 1997).

3. 휨 모드와 두께 모드에 대한 a/h 의 영향

3.1 유한요소모델

충격반향시험의 도식적 유한요소모델은 Fig. 2(a)와 같다. 그림과 같이 층상박리균열 위의 절점(node)에서 충격이 가해지고 특정 거리가 떨어진 장소에서 변위가 계속된다. 이번 연구에서는 모든 경우에서 슬래브의 두께는 200mm로 설정하였다. 실제 유한요소모델은 Fig. 2(b)에서와 같이 2.5mm 크기의 축대칭 요소(axi-symmetric element)를 써서 3D 원판의 형태를 구현하였다. 층상박리균열은 해당되는 영역의 요소를 제거하여 모사하였다. 충격반향기법에 있어서 균열은 파동의 반사 경계조건으로 작용하기 때문에 FE 모델링에서 단순한 요소계거를 통해서 구현이 가능하며 균열의 폭의 영향을 받지 않는다(Oh, *et al.*, 2012). 균열의 반지름은 150mm로 고정하고 깊이를 10mm부터 바닥까지(200mm)

로 변화하여 그 영향을 살펴보았다. 이는 a/h 의 범위가 1.5 (thick plate)에서 30(thin plate)을 모사한다. 하중은 해석 대상 영역 중심 위치에서의 상부 표면에 최대 크기가 1N 이고 지속시간(duration)이 60 μ s인 cubic half-sine 함수 형태로 주어지고, 가진 점에서 100mm 떨어진 표면에서의 변위 응답이 1 μ s 간격으로 8ms 동안 추출되었다. 유한요소해석의 전처리과정으로는 Altair사의 Hyperworks 11.0이 이용되었고 해석엔진으로는 Abaqus 6.10이 적용되었다.

(a) schematic diagram

(b) FE model with 2.5mm mesh size

Fig. 2 Configuration of the FE simulation for IE tests

즉, 각 a/h 에 대해서 8ms 동안의 변위 이력이 유한요소 결과로 도출되었고 FFT 알고리즘에 의해 최종적으로 주파수 영역에서의 스펙트럼 진폭으로 변환되었다.

3.2 해석결과 및 분석

Fig. 3과 Fig. 4는 a/h 의 변화에 따른 유한요소해석에 의한 변위와 최대변위값으로 정규화된 변위에 대해 각각의 충격반향 스펙트럼을 보여주고 있으며 범례(legend)와 같이 노란색, 붉은 색 계열로 갈수록 진폭값이 크음을 의미한다. Fig. 3에서의 기본 변위 스펙트럼에서는 다양한 a/h 값에서의 진폭값 차이가 크기 때문에 다양한 모드의 변화를 확인하기 어렵다. Fig. 3(a)에서 보듯이 a/h 값이 20~30근방에서의 10kHz 미만에서의 휨모드의 진폭값이 지배적이어서 a/h 값 10미만에서의 지배 모드의 진폭값을 확인하기가 어렵다. 이에 반해 Fig. 4에서는 정규화된 진폭값의 적용으로 인해 a/h 값 10미만에서도 지배적인 주파수 영역을 확인할 수 있다. a/h 값이 10~30 사이는 thin plate theory에서의 양단 지

지원 판의 고유진동해석에 의해서 고유주파수를 확인할 수 있다. 예를 들어 Fig. 4(a)에서 a/h 값 30에서의 1, 3, 6kHz는 1,2,3차 모드에 해당되는 고유주파수를 의미한다.

전체적으로 스펙트럼에서 a/h 비가 클 때($10 < a/h < 30$), 휨 모드가 지배적이었고 1,2,3차 휨 모드에 해당되는 고유주파수들의 변화를 확인할 수 있었다. 하지만, 휨 모드에 해당되는 고유 주파수의 진폭 크기가 상대적으로 두께 모드에 해당되는 주파수의 진폭보다 훨씬 크기 때문에 두께 모드를 확인하기는 어려웠다. 또한 a/h 가 매우 클 때 두께 모드의 주파수는 순간 하중에 의한 가진 주파수(f_{max})보다 상당히 크므로 이를 확인하기 어려울 수 있다. 이는 식 (2)에 의해서 쉽게 이해될 수 있다.

$$f_{max} = 1.25 / t_c \quad (2)$$

여기서, t_c 는 해머 가진시 해머의 접촉 시간이다.

두께 모드는 Fig. 3(b) 또는 진폭에 대한 정규화된 Fig. 4(b)에서 나타난바와 같이 $a/h < 5$ 일 때 더욱 분명해진다. 여기서 두께 모드에 해당되는 충격반향주파수(Impact-Echo Frequency)는 식 (1)에 의해서 자주색 점선으로 나타내었다. 즉, $a/h > 5$ 일 때 휨 모드가 지배적이고 $a/h < 5$ 일 때 두께 모드를 구분할 수 있다는 사실을 확인하였으며 휨 모드, 두께 모드의 진폭은 a/h 의 함수로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

(a)

(b)

Fig. 3 Displacement spectral contour plots: (a) whole signal (b) portion of the signal between 5 to 40 kHz up to $a/h = 5$; The pink dashed line indicates the expected behavior for the IE frequency corresponding to the stretch mode of the delaminated section. The colors indicate the spectral amplitude, with arbitrary units.

Fig. 4 Normalized displacement spectral contour plots; (a) whole signal (b) portion of the signal between 5 to 40kHz up to $a/h = 5$; The dashed pink line indicates the expected behavior of the IE frequency corresponding to the stretch mode of the delaminated section. The colors indicate the normalized spectral amplitude.

Fig. 5 The spectral amplitudes of the fundamental flexural and stretch modes corresponding to the a/h value of the plate: (a) raw data (b) the data normalized by the maximum value among the flexural and stretch modes.

이런 두 모드의 상대적인 스펙트럼 진폭은 Fig. 5에서 보다 잘 표현될 수 있다. 두께 모드 진폭의 절대 값은 대부분의 a/h 범위에서 휨 모드보다 상당히 작음을 알 수 있다. 두께 모드 주파수는 $a/h < 5$ 에서 구분될 수 있고 $a/h > 2$ 에서 휨 모드 보다 지배적이다. 그러나 유한요소해석 결과는 층상 박리균열이 완벽한 반사경계로 작용하고 있어 현장 실험결과와 다를 수 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 즉, 유한요소모델링에서 층상박리균열 아래로 어떤 에너지도 투과될 수 없다는 것을 의미한다. 실제 현장에서는 층상박리균열이 부분적으로 닫혀 있는 경우가 많다. 하지만 보통의 층상박리균열의 실제 접촉 조건을 유한요소에서 모델링하기에는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 유한요소해석 결과는 a/h 값의 함수로 휨 모드와 두께 모드의 상대적 가진성과 지배성에 대한 유용한 정보를 줄 수 있다.

4. 휨 모드 및 두께 모드에 대한 가진 점, 측정 점의 균열과의 상대적 위치에 대한 영향

이번 절에서는 층상박리균열위에서의 동적 거동에 대한 가진 점과 측정 점의 상대적 위치의 영향에 대한 유한요소결과를 살펴보았다. 층상박리균열에 대한 충격반향시험의 상대적 가진 및 측정 위치의 영향은 유한요소해석에 의해 비교적 정확히 예측될 수 있다. 하나의 예로 층상박리균열의 존재는 균열의 범위를 넘어서도 측정될 수 있다. 즉, 슬래브, 교량바닥판 등에 대한 충격반향시험의 적절한 해머의 가진위치 및 센서의 측정 위치를 설정하는데 유용하게 활용될 수 있다. 예를 들어 층상박리균열에 대한 가진 점과 측정 점의 접근에 따라 추가적인 주파수가 도출될 수 있어 이에 대한 사전정보가 필요한 것이다.

4.1 유한요소모델

가진 점과 측정 점의 상대적 위치에 따른 층상박리균열 위에서의 동적거동은 균열 위에서의 상대적 가진과 측정 위치 뿐만아니라 a/h 값에 따라 달라지므로 이를 모사하기 위해서는 앞 절과 마찬가지로 매개변수적 유한요소해석이 필요하다.

2D 축대칭 유한요소해석이 사전에 정해진 매개변수에 따라 수행되었다. 300mm의 직경의 원형 층상박리균열을 포함하고 있는 200mm 두께의 슬래브에 대하여 박리균열의 위치를 10mm부터 200mm(바닥면)까지 변화를 주었다. 이는 a/h 값이 1.5에서 30까지 변화하는 것이다. 각 박리균열별 깊이에서의 유한요소모델에 대해서 가진 위치와 측정 위치를 변화하였고 이에 대한 변위 값을 도출하였다. 즉, Fig. 6에서 보이듯이 층상박리균열의 중앙에서부터 건전한 부분까지

의 처짐 양상(또는 1차 모드 형상)에 대한 가진 점과 측정 점의 위치의 다양한 조합에 대한 영향이 검토되는 것이다.

Fig. 6 Illustration of the FE simulation model considering different loading points: (a) shallow delamination and (b) deep delamination. The dashed lines indicate the expected fundamental flexural mode shapes, and the dot-dashed lines indicate the plane on which the delaminations lie. The red arrows indicate the combined loading/sensing points (the center of the delamination, the edge of the delamination, and the solid region).

4.2 해석결과 및 분석

Fig. 7부터 Fig. 9는 유한요소해석에 의한 표면에서의 정규화된 스펙트럼 진폭을 보여주고 있다. a/h 값의 클 경우 휨 모드의 진폭 값이 다른 주파수의 성분보다 커서 구분하기가 어렵기 때문에 최댓값에 의해 정규화된 스펙트럼이 사용되었다. Fig. 7은 층상박리균열의 중심에 가진되었을 때의 유한요소결과를 보여주고 있다. 휨 모드의 진폭은 층상박리균열에 대한 a/h 값뿐만 아니라 측정 점에 의해서도 상당히 영향을 받는다. 휨 모드는 $a/h > 2$ 인 대부분의 경우에서 지배적이고 측정 점이 층상박리균열과 떨어져 있을 경우에도 나타나는 것으로 나타났다. 이는 가진 에너지의 대부분이 완벽한 반사경계로 작용하는 층상박리균열 위에서 구속되어 있기 때문이라고 볼 수 있다.

슬래브 두께에 해당되는 두께 모드 주파수(충격반향모드 주파수)는 10kHz로 확인되었으며 층상박리균열 위에서 측정하였을 때도 미약하게 나타났다(Fig. 7(c)). 층상박리균열의 위치에 대한 두께 모드 또한 확인되었으나 이는 측정 위치가 균열 위에 있을 때에 한정되었다(Fig. 7(b)).

Fig. 8은 가진 위치가 층상박리균열의 끝단에 위치하였을 때의 유한요소해석 결과이다. 휨 모드에 해당되는 스펙트럼 진폭은 측정 위치가 균열 위에 있을 때 지배적이었다(Fig.

Fig. 7 Normalized displacement spectral contour plot at different sensed points when the transient load is applied at the center of the circular delamination: (a) 10mm(over delamination) (b) 150mm(edge of delamination) and (c) 200mm(solid region). The pink dashed lines indicate the expected behavior of the IE frequencies corresponding to the stretch mode of the delaminated section. The colors indicate the normalized spectral amplitude.

8(a)). 반대로 슬래브 두께에 해당되는 두께 모드 주파수는 측정 위치가 건전한 부분(균열 밖의 부분)에 있을 때 10kHz 근처에서 붉은 색 띠로 확인할 수 있었다(Fig. 8(c)). 그러나 휨모와 두께 모드의 중첩이 발생하므로 균열과 건전한 부분의 경계영역은 설명하기가 어렵다(Fig. 8(b)). 이와 같이 가진 점이 층상박리균열의 끝단에 위치할 경우 얻어진 지배적 주파수 진폭 값은 균열 위치에 대한 측정 점의 상대적 위치에 따라 달라지고, 이는 현장시험에서는 파악하기 어려운 실정이다. 미리 예상했듯이, 측정 위치가 균열위에 있을 때 휨 모드의 절대 진폭값은 슬래브 두께에 해당하는 두께 모드 진폭값에 완전히 지배적이었고 이는 균열의 위치를 모를 경우에도 지배적인 휨 모드의 유무에 따라 균열의 존재를 파악할 수 있는 증거가 될 수 있다.

Fig. 8 Normalized displacement spectral contour plot at different sensed points when the transient load is applied at the edge of the circular delamination as illustrated in Fig. 5; (a) 10mm(over delamination) (b) 150mm(edge of delamination) and (c) 200mm(solid region). The pink dashed lines indicate the expected behavior of the IE frequencies corresponding to the stretch mode of the delaminated section. The colors indicate the normalized spectral amplitude.

Fig. 9는 균열 밖의 건전한 부분에서 가진되었을 때의 유한요소결과를 보여준다. 슬래브 두께 0.2m에 해당되는 두께 모드 주파수 10kHz에서의 붉은 수직 띠가 확인된다. 이는 측정위치가 층상박리균열의 끝단으로 접근할수록 분명해지고 (Fig. 9(b)) 측정 점이 균열 밖의 건전한 위치로 이동되면 지배적이게 된다(Fig. 9(c)). 그러나 측정 점이 균열 단에 위치할 때 휨 모드의 일부가 나타나고 휨 모드/두께 모드의 혼재가 나타난다. 가진 위치가 균열 밖이고 측정 위치가 균열 위일 경우에도 휨 모드는 여전히 지배적이다. 즉, 휨 모드는 균열 위에서 가진되었을 때 뿐 아니라 균열 밖에서 측정되었을 때조차 분명히 확인되었다. 이는 유한요소모델에서의 층상박리균열은 완벽한 반사경계로 작용하여 에너지 손실 없이 휨 모드를 유도하였기 때문이다. 이와 같이 가진 위치 또는 측정 위치가 균열 위일 경우 휨 모드가 지배적이다. 이는 Fig. 6에서의 모드 형상에 의해서 설명될 수 있다.

Fig. 9 Normalized displacement spectral contour plot at different sensed points when the transient load is applied at the solid region as illustrated in Fig. 5; (a) 10mm(over delamination) (b) 150mm(edge of delamination) and (c) 200mm(solid region). The pink dashed lines indicate the expected behavior of the IE frequencies corresponding to the stretch mode of the delaminated section. The colors indicate the normalized spectral amplitude.

상반이론에 의해서 균열 위에서 가진되고 건전한 위치에서 측정되는 경우의 반응은 가진위치와 측정위치를 바꿀 경우의 반응과 일치한다. 이와 같이 가진 점 또는 측정 점이 모드 형상의 영향 범위에 있을 경우 휨 모드가 지배적이다. 반대로, 가진과 측정위치 둘 다 균열 밖 건전한 위치에 존재할 경우 두께 모드가 지배적일 것이다. 그러므로 충격반향시험에서 휨 모드가 지배적이라면 가진 점 또는 측정 점이 균열 위에 있을 것이지만 그 중 어떤 점이 균열 위에 존재할 지는 확인하기가 힘들다. 대부분의 현장 시험경우에 있어서 균열 위치는 사전에 알 수 없기 때문에 추가적 시험이 필요할 것이다.

이번 절에서는 충격반향 스펙트럼 데이터에서 상대적 가진 점, 측정 점, 균열위치의 영향이 조사되었다. 유한요소해석에서 균열은 완벽한 반사경계로 작용하기 때문에 실제 현장의

균열의 상태와는 다를 수 있다. 실제 현장에서는 하중의 유무에 따라서 균열이 닫힐 수도 열릴 수도 있는 부분 닫힘 경우가 상당 부분 존재하기 때문이다. 또한 균열의 위치와 크기를 사전에 알기 힘들다. 그러므로 이에 대한 완벽한 이해를 위해서는 추가적인 실험이 요구된다. 그러나 이번 연구에서의 유한요소해석 결과는 a/h 값, 가진 점, 측정 점, 균열의 상대적 위치의 변화에 따른 휨 모드와 두께 모드의 일반적인 거동에 대한 이해를 줄 수 있는데 그 의미를 둘 수 있다.

5. 결 론

이번 연구에서는 층상박리균열 위에서의 동적 거동에 대한 유한요소해석이 수행되었다. 우선 층상박리균열 위에서 휨 모드와 두께 모드에 대한 a/h 의 영향이 유한요소해석을 통해 분석되었다. 층상박리균열은 완전히 분리된 면으로 파동 에너지의 완벽한 반사경계로 작동한다는 조건하에 다음의 결론이 도출되었다.

- $a/h > 5$ 일 경우 두께 모드의 스펙트럼 진폭값은 휨 모드에 비해 상당히 작았다.
- a/h 값이 5보다 작아짐에 따라 두께 모드의 진폭값은 점점 증가하기 시작했다.
- a/h 값이 2보다 작아짐에 따라 두께 모드의 진폭값은 휨 모드와 유사해지다가 이를 넘어서서 지배적으로 변한다.
- 두께 모드는 균열이 반접촉 상태일 때 더욱 더 분명해질 것이며 이는 유한요소모델에서의 완전히 분리된 경우보다는 실제 현장에 가깝다고 판단된다.

다음으로, 휨 모드와 두께 모드에 대한 균열에 대한 측정 점, 가진 점의 상대적 위치의 영향이 유한요소 매개변수 해석에 의해 수행되었고 다음의 결론을 얻었다.

- 상반이론에 의해 가진 에너지가 동일하다는 가정하에 가진 점과 측정 점의 위치가 바뀌어도 동적 반응은 동일하다. 그러나 앞서서도 언급했듯이 반접촉 균열일 경우 투과 에너지의 변화 때문에 상반이론이 완벽히 적용되지 않을 수 있다.
- 가진 점 또는 측정 점이 휨 모드의 형상에 있어서 최대 변위를 나타내는 파복(anti-node)에 가까울수록 휨 모드는 지배적이다. 휨 모드는 층상박리균열 위에서의 가진 에너지가 간혀 있기 때문에 대부분의 경우에서 두께 모드에 비해 지배적이다.

- 두께 모드는 가진 점과 측정 점 둘다 균열 밖 건전한 위치에 존재할 때 지배적이다.
- 현장에서의 층상박리균열의 접촉조건은 유한요소해석 조건과 다르기 때문에 이는 추후의 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2013년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A2A2A01067754).

References

- Carino, N.J., Sansalone, M., Hsu, N.N. (1986) A Point Sourcepoint Receiver, Pulse-echo Technique for Flaw Detection in Concrete, *ACI Journal*, 832, pp.199~208.
- Mindlin, R.D. (1951) Influence of Rotary Inertia and Shear on Flexural Motions of Isotropic, Elastic Plates, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 18, pp.31~38.
- Oh, T., Popovics, J.S., Ham, S., Shin S.W. (2012) Practical Finite Element Based Simulations of Nondestructive Evaluation Methods for Concrete, *Computers & Structures*, 98, pp.55~65
- Oh, T., Popovics, J.S., Sim, S. (2013) Analysis of Vibration for Regions above Rectangular Delamination Defects in Solids, *Journal of Sound and Vibration*, 332, pp.1766~1776.
- Sansalone, M.J., Streett, W.B. (1997) Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, 1997.
- Ventsel, E.S., Krauthammer, T. (2001) Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Application, Marcel Dekker, Inc., New York
- Shin, S., Popovics, J.S., Oh, T. (2012) Cost Effective Aircoupled Impact-Echo Sensing for Rapid Detection of Delamination Damage in Concrete Structures, *Advances in Structural Engineering*, 15, pp.887~896,
- Zhu, J., Popovics, J.S. (2007) Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 133, pp.628~640.

요 지

본 논문에서는 콘크리트 구조물의 층상박리균열 위에서의 손상탐지에 효율적인 충격반향기법에 대해 영향을 끼치는 다양한 영향요소들에 대한 분석을 수행하였다. 충격반향기법에서의 균열 가시화를 위해 층상박리균열위의 동적거동 및 두께를 나타내는 휨 모드 및 충격반향모드(두께 모드)에 영향을 끼치는 균열의 폭/두께(a/h) 비, 균열위의 상대적 가진 점, 측정 점의 위치 등의 시험설정 변수 등을 매개변수적 유한요소해석을 통하여 조사하였다. a/h 비는 2보다 클 경우 휨 모드가 지배적이었으며 작을 경우 두께 모드가 지배적이었다. 또한 가진 점, 측정 점 중 어느 하나만 균열 위에 존재할 때도 휨 모드가 지배적이었으며 균열 밖의 범위의 건전한 영역에는 가진 점, 측정 점이 모두 위치하여야 두께 모드가 지배적이었다.

핵심용어 : 충격반향기법, 휨 모드, 충격반향모드, 두께 모드, 폭/두께 비, 층상박리균열