

정사각형 콘크리트 구조물의 파쇄도 향상을 위한 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 효과적인 배치

조 황 기¹ · 남 윤 민¹ · 김 경 진² · 이 재 하³ · 손 동 우^{4*}

¹한국해양대학교 기계공학과, ²한국해양대학교 토목환경공학과, ³한국해양대학교 건설공학과, ⁴한국해양대학교 기계공학부

Effective Arrangement of Non-explosive Demolition Agents and Empty Holes for Improving Fragmentation of Square Concrete Structures

Hwangki Cho¹, Yunmin Nam¹, Kyeongjin Kim², Jaeha Lee³ and Dongwoo Sohn^{4*}

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

³Department of Civil Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

⁴Division of Mechanical Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

Abstract

As an alternative to conventional explosive methods for demolition of concrete structures and rocks, the use of non-explosive demolition agents can be considered to reduce noise, vibration, and dust emissions during the demolition process. In this study, we conduct finite element analysis for crack initiation and propagation caused by the expansion of non-explosive demolition agents in square concrete structures. The predicted crack patterns are compared with the experimental results in the literature. The minimum values of the required expansion pressure of non-explosive demolition agents are also estimated, which depend upon the arrangement of non-explosive demolition agents and empty holes. Furthermore, we investigate the effect of empty holes on the fragmentation of concrete structures, and discuss the effective arrangement of non-explosive demolition agents and empty holes for fragmentation improvement.

Keywords : concrete structure demolition, fragmentation, non-explosive demolition agent, hole, minimum required pressure

1. 서 론

최근 토목, 건축, 해양플랜트 산업 현장의 구조물 해체 및 암반 굴착 공정에서 안전 및 환경 문제로 인하여 폭약이나 대형 기계를 사용하기 어려운 경우가 발생하고 있다. 화약류를 사용하는 경우 발파에너지 중 80~90%는 파쇄에 소비되지만, 5~10%는 발파진동, 폭음, 비석, 충격파동 등으로 소산된다(Ahn, 1991). 이와 같이 화약류와 대형 기계를 사용하는 기존의 해체 공법은 소음, 진동, 분진, 비석 등의 안전 및 환경

문제를 필연적으로 발생시킨다. 이에 따라 관련 법규가 강화되고 있으며, 기존 공법을 대체할 수 있는 다양한 공법이 개발되고 있다. 특히, 암반, 콘크리트 등의 해체 공정에서 안전성이 뛰어나고 특별한 기술없이 사용할 수 있는 비폭성 파쇄제(non-explosive demolition agent, NEDA)의 사용이 검토되고 있다. 무소음화학팽창제(soundless chemical demolition agent)와 같은 비폭성 파쇄제는 물과 혼합하여 슬러리가 되고, 화학반응을 일으켜 열이 발생하면서 서서히 팽창한다(Arshadnejad *et al.*, 2011; De Silva *et al.*, 2016;

* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4291; E-mail: dsohn@kmou.ac.kr
Received January 12 2017; Revised February 12 2017;
Accepted February 13 2017

©2017 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.



Fig. 1 Concrete demolition using the NEDAs (Archer Company USA, Inc., 2016)

Natanzi *et al.*, 2016). 이러한 특성을 바탕으로 구조물에서 해체가 필요한 부분에 천공을 하고 여기에 슬러리가 된 비폭성 파쇄제를 주입하면 구속된 조건에서 서서히 팽창압이 발생하면서 Fig. 1과 같이 구조물에 균열이 생성, 진전된다. 폭약을 사용하는 일반적인 발파공법에 비해 팽창시간이 상당히 길기 때문에 기존의 공법에서 발생하는 대부분의 문제들이 해결되고, 주변 환경 및 관련 법규에 대해 저촉되는 부분이 적다. 그러나 반대로 균열을 발생시키는 팽창압에 도달하기까지의 시간이 너무 많이 소요되기 때문에 경제성 측면에서 다이너마이트를 사용하는 일반적인 방법에 비해 20배 가량 높은 비용을 부담해야 하는 단점을 지닌다(Laefer *et al.*, 2010). 이러한 시간과 비용에 대한 단점을 완화시키는 방법 중 하나는 비폭성 파쇄제의 수는 감소시키면서 분리 조각의 수를 증가시킴으로써 파쇄 효율을 높이는 것이다. 파쇄 효율이 향상되면 비폭성 파쇄제의 낭비가 줄어들고, 과도한 잔해의 분할을 위한 추가파쇄가 필요하지 않아 해체 작업이 간편하게 되는 이점을 지닌다(Sunwoo *et al.*, 2001).

본 논문에서는 콘크리트 구조물의 비폭성 파쇄 공정에 대한 유한요소해석을 수행함으로써 많은 시간과 비용이 소요되는 실제 실험을 대체하고자 한다. 비폭성 파쇄 공정에서의 균열 생성 및 진전은 폭발에 의해 순간적으로 나타나는 것이 아니라 비폭성 파쇄제 슬러리의 팽창에 의해 느리게 진행되므로 준정적인(quasi-static) 거동으로 간주할 수 있다. 특히, 본 논문에서는 정사각형 콘크리트 구조물을 대상으로 비폭성 파쇄제가 채워지지 않은 천공 홀을 추가적으로 도입하여 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 배치에 따른 파쇄 경향을 분석하고, 기존 문헌에 보고되어 있는 실험결과와 비교한다. 또한, 비폭성 파쇄 공정에서 파쇄도 향상을 위한 천공 홀의 효과에 대해 고찰한다.

2. 비폭성 파쇄 공정의 유한요소해석

먼저 기존의 실험연구(Gambatese, 2003)를 바탕으로 총 4개의 정사각형 기본 모델을 선정하여 유한요소해석을 수행하고,

해석의 정확성 및 타당성을 검증하였다. 각각의 기본 모델에는 비폭성 파쇄제와 비폭성 파쇄제가 채워지지 않은 천공 홀이 동시에 존재한다.

2.1 해석 모델 선정 및 파쇄 공정 모사 방법

준정적 상태의 유한요소해석을 위해 동적효과를 최대한 배제하면서 대표적인 상용 소프트웨어인 Abaqus/Explicit를 이용하였고, Concrete damaged plasticity(Abaqus, 2014)를 적용하였다. 손상파라미터(DamageT)가 0.6 이상 발생한 요소에 강성이 제거되며, 이때 완전 균열이 발생한 것으로 설정하여 콘크리트 영역의 균열 생성 및 진전을 예측하였다(Nam *et al.*, 2015). 본 연구의 손상파라미터 값은 단조하중(monotonic load) 하에서 안정적인 수렴성을 보장하면서 해석결과에 큰 차이를 보이지 않는 범위에서 선정되었다. 기존 실험연구에는 포틀랜드 시멘트와 압축강도 20.7MPa의 콘크리트가 혼합 사용되었으며, 이에 따라 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도를 20MPa로 설정하였다.

해석 영역은 Gambatese(2003)에 의해 수행된 실험연구의 일부를 차용하여 한 변의 길이가 152.4mm인 정사각형 콘크리트 구조물로 선정하였다. 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 배치에 따라 4개의 해석 모델을 만들었는데, 각각의 모델에는 Fig. 2와 같이 비폭성 파쇄제와 천공 홀이 교차하면서 각각 6×6, 5×5, 4×4, 3×3의 격자 모양(grid pattern)으로 배치되어 있다. Table 1에 각 모델에 대한 비폭성 파쇄제와 천공 홀 사이의

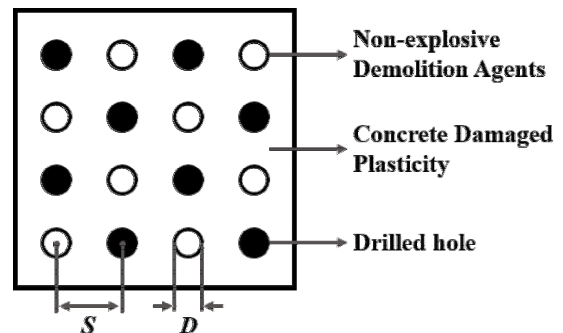


Fig. 2 A square domain with 4×4 NEDAs and holes

Table 1 Dimensions of four base models

Model	(a) 6×6	(b) 5×5	(c) 4×4	(d) 3×3
Hole spacing S (mm)	19.1	25.4	31.8	38.1
Hole diameter D (mm)	4.76			
Concrete structure (mm ²)	152.4×152.4			
S/D	4	5.3	6.7	8

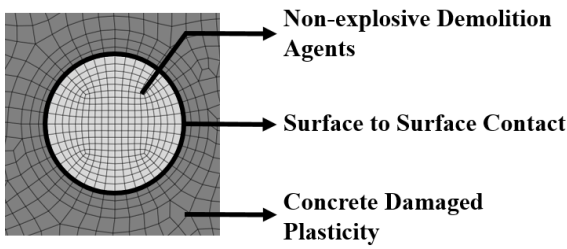


Fig. 3 Finite element modeling of the interface between NEDAs and concrete

간격 및 모델 크기를 나타내었다. 실험은 Fig. 1과 유사하게 3차원 구조를 대상으로 하고 있지만, 유한요소해석에서는 두께 방향의 영향을 고려하지 않고 감차적분이 적용된 2차원 평면 변형률 요소(CPE4R)를 사용하였다. 또한 요소의 손상과라미터에 의해 균열을 모사하기 때문에 요소의 형태, 배치 등에 따라 해석결과가 크게 달라질 수 있으므로 비폭성 파쇄제 주변 영역을 충분히 많은 수의 요소로 구성하여 보다 정확한 결과를 얻어내고자 하였다.

Fig. 3과 같이 원형의 비폭성 파쇄제 슬러리에 열팽창계수와 선형적인 온도 증가 조건을 부여하여 팽창을 모사하고, 비폭성 파쇄제와 콘크리트 사이에는 면대면(surface-to-surface) 접촉 조건을 부여하여 파쇄제의 팽창압을 콘크리트에 전달할 수 있도록 하였다. 여기에서 비폭성 파쇄제 슬러리의 선형적인 온도 증가 조건은 비폭성 파쇄제가 물과 혼합되면서 열이 발생하는 것을 모사한 것이 아니라 단순히 선팽창을 모사하기 위한 방법이기 때문에, 균열의 발생 및 진전에서 열에 의한 효과는 배제되었다. 또한, 균열이 발생하는 시점에서의 비폭성 파쇄제와 콘크리트 사이의 접촉압력을 비폭성 파쇄제가 균열을 일으킬 수 있는 최소요구팽창압으로 간주하였다.

모든 해석에서 준정적 상태를 구현하기 위하여 비폭성 파쇄제의 팽창속도를 충분히 느리게 주었으며, 전체 에너지(total energy) 중 운동 에너지(kinetic energy)가 차지하는 비율을 계산하여 검증하였다. 해석 시간 동안 전체 에너지가 급격하게 변하는 부분은 없었고, 운동 에너지가 차지하는 비율의 최대 값은 0.00063%로 준정적 상태를 충분히 구현하고 있음을 확인하였다.

2.2 실험과 유한요소해석 결과 비교 및 검증

유한요소해석의 결과를 균열의 발생 및 진전의 형태, 분리 조각의 개수 측면에서 Gambatese(2003)에 의한 실험결과와 비교 분석하였다. 각 모델에 대한 파쇄 양상은 Fig. 4와 같이 나타나는데, 이는 실험결과와 전반적으로 유사한 형태이다. 여기에서 균열 패턴은 손상과라미터를 이용하여 가시화되었다.

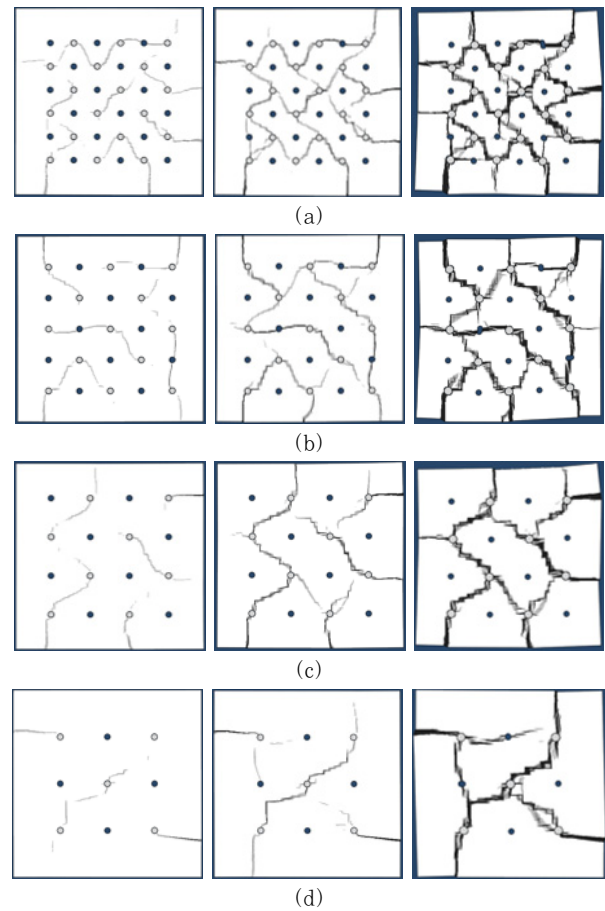


Fig. 4 Crack propagation results of four base models: (a) 6×6 grid model; (b) 5×5 grid model; (c) 4×4 grid model; and (d) 3×3 grid model

Table 2 The number of broken fragments of four base models

Model	(a) 6×6	(b) 5×5	(c) 4×4	(d) 3×3
Experiment	23	16	12	6
Finite element analysis	16	12	8	5

그림에서 손상이 전혀 발생하지 않은 영역은 흰색이고, 손상 정도가 심해질수록 색이 진해져서 완전한 손상이 발생한 영역은 검은색으로 나타난다. 그러나 국부적으로는 실험결과와 다른 균열 패턴이 관찰되면서 최종적으로 분리 조각의 수에 차이가 난다. 실험에서는 하나의 비폭성 파쇄제 주변에서 2~5개의 균열이 발생하여 진전했지만, 해석에서는 최대 4개의 균열까지만 나타나는 것을 확인할 수 있다. 실제 실험에서는 분리된 조각 사이에서 접촉이 발생하면서 인접한 분리 조각이 지속적으로 구속력을 발생시킨다. 그러나 유한요소해석에서는 손상과라미터를 도입하여 균열을 모사했기 때문에 충분한 손상이 발생한 균열면의 강성이 제거되면서 분리된 조각 사이의 구속력을 완전하게 반영하지 못하며, 이러한 균열면으로 응력이 이완되면서 더 많은 수의 균열을 발생시킬 수 없게 된다. 또한

실험에서는 아주 작은 분리 조각들이 발생하고 경우에 따라 균열을 전혀 발생시키지 못하는 비폭성 파쇄제도 나타나지만, 유한요소해석에서는 이러한 것들을 모사할 수는 없었다.

결과적으로 유한요소해석을 통해 실험결과와 완전히 동일한 균열 패턴을 예측할 수는 없었지만, 유사한 균열 진전 형태를 얻을 수 있었고, 아주 작은 분리 조각을 제외하면 분리 조각의 수도 유사하게 예측할 수 있었다. 그러므로 유한요소해석을 통하여 전반적인 파쇄 경향을 예측하기에 큰 무리가 없다고 판단할 수 있다.

2.3 유한요소해석 결과 분석

본 논문의 기본 모델에서는 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 격자 모양 배치를 고려하고 있으므로 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 간격과 인접한 비폭성 파쇄제 사이의 간격이 동일하다. Fig. 4에서 나타나듯이 대부분의 균열 진전은 천공 홀을 향하지 않고, 비폭성 파쇄제 사이에서 일어남을 확인할 수 있었다. 비폭성 파쇄제에서 발생한 균열이 천공 홀을 향하는 것보다 인접한 비폭성 파쇄제에서 발생한 균열과 상호작용을 하여 진전하는 것이 더 적은 에너지를 필요로 하기 때문에 비폭성 파쇄제 사이를 연결하는 형태로 균열 패턴이 나타나는 것이다. 그러나 국부적으로는 비폭성 파쇄제 사이의 천공 홀을 통과하여 균열이 연결되기도 하는데, 천공 홀의 역할에 대해서는 다음 3장에서 분석하도록 한다.

더 나아가서, 기존 실험연구에서는 고려하지 못했던 균열 발생을 위한 최소요구팽창압을 비폭성 파쇄제의 지름과 간격의 비율(S/D)에 연관지어 분석하고 균열의 발생 순서와 진전 형태의 변화를 알아보았다. 각각의 모델에서 평균적인 최소요구팽창압은 Table 3에 정리한 것과 같이 비폭성 파쇄제의 지름과 간격의 비율(S/D)에 선형적으로 비례한다. 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 크기가 동일한 격자 모양의 배치이므로 비폭성 파쇄제의 간격의 증가에 따라 요구되는 팽창압도 증가하는 것이다. 그러나 균열의 발생 순서는 모델에 따라 다른 경향을 보인다.

Fig. 4(a), (b)의 경우 가장 바깥쪽의 비폭성 파쇄제가 콘크리트 영역의 사각형 경계보다 인접한 비폭성 파쇄제 및 천공 홀에 더 가깝게 위치하고 있다. 즉, 비폭성 파쇄제는 상대적으로 중심부에 조밀하게 배치되어 있다. 그러므로 균열이

중심부에서 먼저 발생하여 사각형 외곽으로 진전하는 형태를 나타낸다. 내부의 비폭성 파쇄제 및 천공 홀 사이의 상호작용이 외부의 콘크리트 외곽 부분과의 상호작용보다 강하고, 이로 인해 모든 비폭성 파쇄제에서 거의 동시에 균열이 발생해서 진전을 이루기 때문에 비폭성 파쇄제의 최소요구팽창압에는 적은 편차가 나타난다.

반면에 비폭성 파쇄제 및 천공 홀이 상대적으로 넓은 간격으로 배치되어 있는 Fig. 4(d)의 경우, 콘크리트의 사각형 경계의 영향이 커지므로 균열은 콘크리트 영역의 경계를 향하여 먼저 생성, 진전되고 이어서 중심부로 생성, 진전된다. 이와 같이 균열이 순차적으로 생성되기 때문에 각각의 비폭성 파쇄제에 대한 최소요구팽창압에는 상대적으로 큰 편차가 나타난다.

또한 Fig. 4(c)의 경우는 비폭성 파쇄제의 최소요구팽창압 편차가 가장 작게 나타나는데, 인접한 비폭성 파쇄제 및 천공 홀의 간격과 비폭성 파쇄제와 사각형 경계와의 간격이 비슷한 모델이다. 이는 내부의 비폭성 파쇄제 및 천공 홀 사이의 상호작용과 콘크리트 외곽 부분과의 상호작용이 균형을 이루는 간격이라고 생각할 수 있다.

3. 천공 홀의 역할 분석 및 효과적인 천공 홀의 배치

앞서 2장에서는 비폭성 파쇄제와 비폭성 파쇄제가 채워지지 않은 천공 홀이 동시에 존재하는 모델을 대상으로 유한요소 해석을 통해 균열 패턴을 분석하였다. 기존의 실험결과와 유사한 균열 패턴을 얻을 수 있었으며, 주로 천공 홀을 피해 균열이 연결되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 천공 홀의 역할을 명확하게 분석할 수 없었으므로 여기에서는 천공 홀을 모두 제거하여 천공 홀의 효과를 역으로 추정하고자 한다. 또한, 천공 홀의 역할을 확인하여 최소요구팽창압 감소 및 파쇄도 향상을 위한 천공 홀의 배치에 대해 알아보하고자 한다.

3.1 천공 홀의 역할에 대한 고찰

Fig. 4와 같이 선정한 해석 모델에서 천공 홀의 역할을 명확히 알아보하고자 다른 모든 조건을 동일하게 부여하고 천공 홀만을 제거하여 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다. 천공 홀이 존재하는 경우에도 대부분의 균열이 천공 홀을 향하지 않고 진전됐듯이, 천공 홀이 없는 Fig. 5에서도 전체적인 균열 패턴은 유사하게 나타났다. 평균적인 최소요구팽창압은 앞서 천공 홀이 존재하는 조건에서 미세하게 낮게 나타났으나 큰 차이는 없었고, 균열의 발생 순서도 천공 홀의 유무에 따라 차이를 보이지 않았으며 분리 조각의 수 또한 큰 차이가 없었다. 그러나 천공 홀의 영향을 국부적으로 살펴보았을 때,

Table 3 Required pressure of four base models

Model		(a) 6×6	(b) 5×5	(c) 4×4	(d) 3×3
Required pressure (MPa)	Minimum	9.19	12.22	15.31	18.17
	Maximum	12.77	15.93	17.12	23.99
	Average	10.67	14.17	16.26	22.58

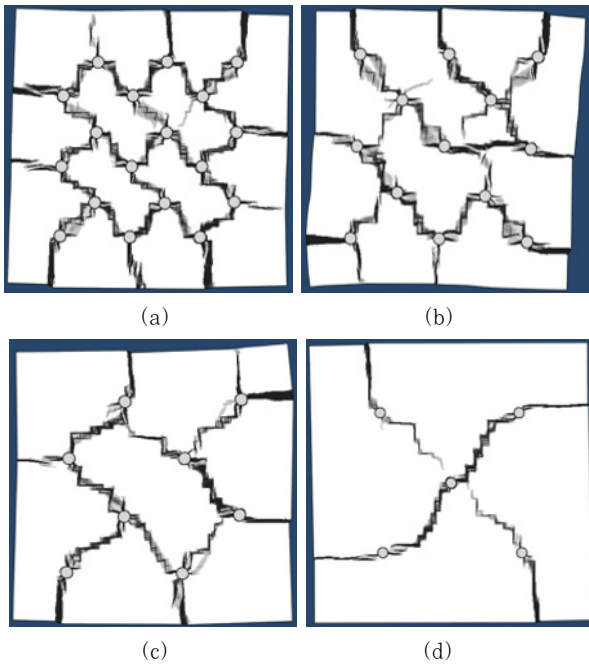


Fig. 5 Simulation results removing holes, based on: (a) 6×6 grid model; (b) 5×5 grid model; (c) 4×4 grid model; and (d) 3×3 grid model

균열을 유도하는 영향이 나타나는 것과 하나의 팽창제에서 발생하는 균열의 수를 증가시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

비폭성 파쇄제와 천공 홀이 3×3 격자 모양으로 배치된 Fig. 4(d)의 경우 왼쪽 상단의 비폭성 파쇄제가 천공 홀로 향하는 균열이 나타나는데, 천공 홀이 제거된 Fig. 5(d)에서는 균열이 중심부로 향하고 있다. 또한 비폭성 파쇄제와 천공 홀이 6×6 격자 모양으로 배치되어 있는 Fig. 4(a)를 천공 홀이 제거된 Fig. 5(a)와 비교해 보면, 왼쪽 최하단부에 위치한 비폭성 파쇄제에서 천공 홀의 균열 유도로 인해 더 많은 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 천공 홀이 균열의 연결을 촉진시키는 역할을 할 수 있는 것이다. 이는 천공 홀의 적절한 배치를 통해 균열을 유도, 제어할 수 있음을 의미한다.

3.2 균열 연결을 위한 천공 홀의 배치

천공 홀을 이용하여 비폭성 파쇄제 간 균열 연결을 촉진하기 위해 Fig. 6과 같이 비폭성 파쇄제의 위치는 고정하고, 대각선 방향으로 인접한 파쇄제 사이에 천공 홀을 배치하였다. 앞서 Fig. 4와 Fig. 5로부터 대부분의 균열 패턴은 가장 인접한 비폭성 파쇄제에서 발생된 균열끼리 연결되어 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, 인접한 파쇄제 사이에 천공 홀을 배치함으로써 균열 진전 및 연결을 더욱 강하게 유도하고 이때의 최소요구팽창압 변화를 확인하고자 하였다.

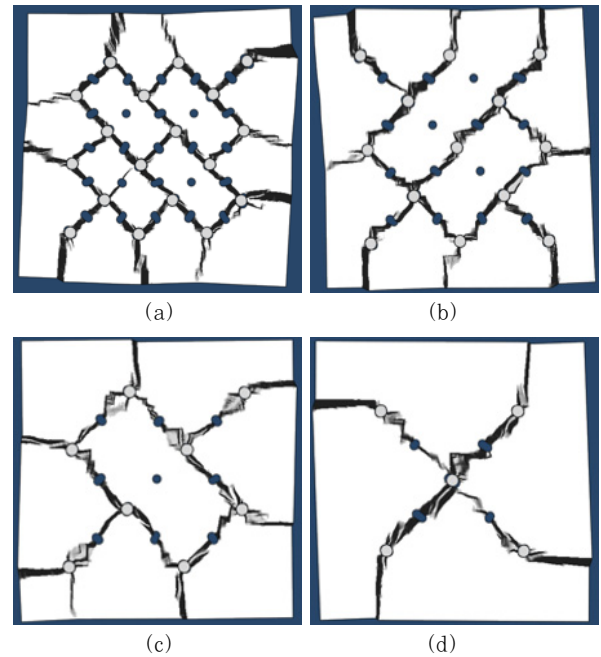


Fig. 6 Simulation results adding holes between adjacent NEDAs, based on: (a) 6×6 grid model; (b) 5×5 grid model; (c) 4×4 grid model; and (d) 3×3 grid model

Fig. 6의 모든 모델은 앞서 얻은 Fig. 4와 Fig. 5의 경우와 비슷한 균열 패턴을 보이지만, 이전의 결과에 비해 균열 패턴이 더 진하고 두껍게 나타난다. 이는 균열의 손상 정도가 증가한 것으로, 특히 천공 홀이 없는 경우와 비교했을 때 Fig. 5에서 흐릿한 균열들이 Fig. 6에서 더 뚜렷하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 대각선 방향에 위치한 천공 홀이 균열의 발생을 도와 Table 4와 같이 최소요구팽창압을 감소시켜 균열의 발생을 앞당기고, 동시에 균열의 연결을 유도했기 때문이다. 천공 홀이 없는 모델의 최소요구팽창압에 대비하여, 대각선 방향으로 천공 홀이 배치된 모델의 최소요구팽창압 감소비율은 Table 4에 나타난 바와 같다. 이러한 감소비율은 비폭성 파쇄제 사이의 거리 또는 비폭성 파쇄제와 천공 홀 사이의 거리에 반비례한다. 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 간격이 작은 모델일수록 인접한 천공 홀의 영향이 커지면서 최소요구팽창압이 크게 감소하는 것이다. 이로부터 적절한 천공 홀의 배치를 통해 균열의 발생 및 진전을 촉진시킬 수 있으며, 궁극적으로 비폭성 파쇄제를 이용한 구조물 해체 시간을 줄일 수 있음을 유추할 수 있다.

Table 4 Average required pressure of the models without empty holes and with additional holes

Model		(a)6×6	(b)5×5	(c)4×4	(d)3×3
Average required pressure (MPa)	Without empty holes	10.76	14.46	16.31	22.79
	With additional holes	9.91	13.40	15.22	22.14
Pressure decrease ratio(%)		7.88	7.29	6.69	2.85

3.3 천공 홀을 이용한 균열 패턴 제어

다음으로는, 천공 홀의 영향이 가장 큰 6×6 모델의 결과를 토대로 비폭성 파쇄제를 고정하고 천공 홀의 개수와 배치를 달리하여 균열 패턴을 유도 및 제어해 분리 조각의 증가를 이루고자 하였다. 6×6 모델에서 천공 홀이 전혀 없는 경우, Fig. 5(a)와 같이 중심부에 모양이 유사한 4개의 직사각형 조각이 발생한다. 여기에 천공 홀을 추가하면서 천공 홀의 효과를 관찰하고, 궁극적으로 중심부의 직사각형 조각을 더욱 세분화시킬 수 있는 천공 홀의 배치를 찾아본다.

먼저 Fig. 7(a)와 같이 중심부에 하나의 천공 홀을 추가하고 해석을 수행하였다. 균열 발생 순서에 따라 전체적인 균열 패턴이 달라질 수는 있지만, 그림에 표시한 것과 같이 거리가 가장 가까운 대각선 방향으로 가장 많은 6개의 비폭성 파쇄제가 배열되어 있기 때문에 이 방향으로 균열이 연결되기 쉬울 것으로 예상할 수 있다. 천공 홀이 없는 Fig. 5(a)의 결과와 비교해보면, 중심부의 천공 홀이 대각선 방향으로 균열을 연결시키려는 경향을 더욱 강화시키고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)의 해석 모델은 Fig. 5(a)의 중심부에 발생한 4개의 직사각형 조각을 더 분할할 수 있도록 각각의 직사각형 영역 중심에 천공 홀을 하나씩, 총 4개 추가한 것이다. 이때 천공 홀의 영향으로 인해 그림에 표시된 가장 긴 대각선 방향으로 균열이 먼저 발생하고, 이어서 이와 평행한 2개의 대각선 방향의 균열이 발생하여 영역이 크게 나누어진다. 이러한 균열

면으로 대부분의 응력이 이완되면서 분리조각을 더욱 세분화시킬 수는 없었다. 다음으로, Fig. 7(b)의 중심부에서 크게 나타난 직사각형 조각을 세분화시키기 위하여 Fig. 7(c)와 같이 총 8개의 천공 홀을 도입하였다. 그 결과, 모든 비폭성 파쇄제에서 거의 동시에 균열이 발생하여 진전하므로 목표한 바와 같이 중심부의 분리 조각이 세분화되는 양상이 나타났다. 해석 결과에서 전체적인 분리 조각의 수는 16개로, 천공 홀이 없는 모델의 15개에 비해 큰 증가를 이루지 못했으나, 실제 실험에서는 분리된 조각 사이의 균열면에서 접촉력이 지속적으로 작용하기 때문에 더 많은 균열이 발생하고 분리 조각이 더욱 세분화될 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 7(a), (b), (c)의 결과로부터 순차적으로 균열이 발생하여 지배적인 균열로 크게 연결되면 분리 조각을 세분화시킬 수 없는 것을 알 수 있었다. 마지막으로, 균열 생성 및 진전을 제어하기 위하여 Fig. 7(d)와 같이 일렬로 4개의 비폭성 파쇄제가 배치되어 있는 대각선 중심에 각각 하나씩, 총 2개의 천공 홀을 추가한 모델을 고려하였다. 그림에 점선으로 표기한 바와 같이 6개의 비폭성 파쇄제가 인접하여 배치되어 있는 대각선 방향과 이에 평행하게 4개의 비폭성 파쇄제가 배치되어 있는 대각선 방향에서 최소요구팽창압의 균형을 맞추으로써 지배적인 균열이 먼저 생성되는 것을 억제시키기 위한 것이다. 이때 균열은 3개의 대각선 방향을 포함하여 전체 비폭성 파쇄제에서 동시에 발생하였고, 분리 조각을 총 18개로 세분화시킬 수 있었다. 이와 같이 균열이 순차적으로 발생하는 것보다 동시에 발생하는 것이 분리 조각 수 증가에 유리하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 천공 홀을 효과적으로 도입함으로써 가장 균열이 발생하기 쉬운 부분과 어려운 부분의 균형을 맞추어, 목표했던 균열을 동시에 발생시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한한 정사각형 콘크리트 영역을 대상으로 비폭성 파쇄제에 의한 균열 발생과 진전을 유한요소해석으로 예측하였으며, 기존 문헌의 실험결과와 전반적으로 유사한 균열 패턴을 확인할 수 있었다. 또한 비폭성 파쇄제와 천공 홀의 배치에 따른 조각 분리 특성을 확인하여 균열 형상 변화에 작용하는 천공 홀의 역할을 고찰함으로써 균열 유도 및 제어의 가능성을 제시하였다. 즉, 천공 홀의 추가를 통해서 균열 발생 순서와 균열 경로를 유도하여 제어할 수 있으며, 동시에 최소요구팽창압을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 비록 해석 모델 및 기법 측면에서의 한계로 인하여 정량적으로 일반화된 결론을 주장할 수는 없으나, 본 연구는 적은 수의 비폭성 파쇄제를 사용하면서 콘크리트 구조물의 파쇄도를

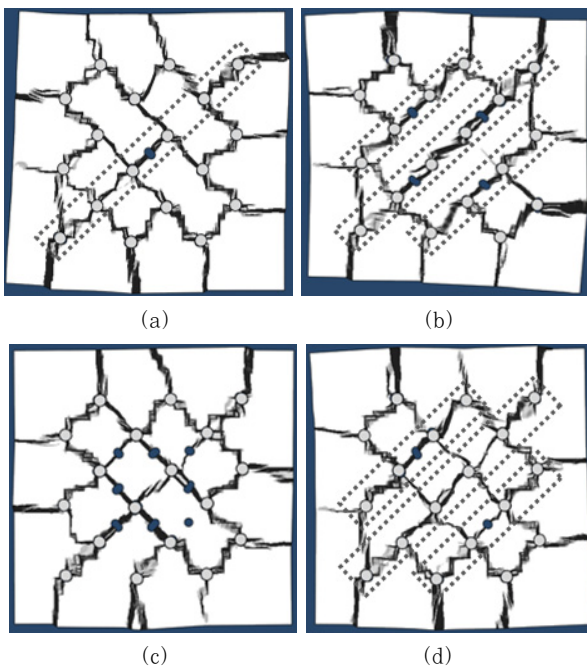


Fig. 7 Simulation results with additional holes, based on 6×6 grid model: (a) one hole; (b) four holes; (c) eight holes; and (d) two holes

향상시키기 위한 기초 연구로 활용될 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 보다 일반적인 결론을 얻기 위하여 더욱 다양한 비폭성 파쇄제 및 천공 홀의 조합을 고려할 예정이다. 유한요소해석을 통해 균열 발생 순서와 균열 경로를 제어함으로써 많은 수의 조각을 발생시킬 수 있는 효과적인 비폭성 파쇄제 및 천공 홀의 배치를 찾아내고, 실험을 병행함으로써 해석의 정확성을 검증하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2014R1A1A2058549)의 성과물입니다.

References

- Abaqus** (2014) *ABAQUS Documentation*, Dassault Systems, Providence, RI, U.S.A.
- Ahn, M.S.** (1991) A Study of the Safe Measure Industrial Explosives, *Explosives and Blasting*, 9(4), pp.13~21.
- Archer Company USA, Inc.** <http://www.dexpan.com/dexpan-non-explosive-controlled-demolition-agent-silent-cracking-breaking.aspx> (accessed Dec. 28, 2016).
- Arshadnejad, S., Goshtasbi, K., Aghazadeh, J.** (2011) A Model to Determine Hole Spacing in the Rock Fracture Process by Non-explosive Expansion Material, *Int. J. Miner. Metall. & Mater.*, 18, pp.509~514.
- De Silva, R.V., Gamage, R.P., Perera, M.S.A.** (2016) An Alternative to Conventional Rock Fragmentation Methods Using SCDA: A Review, *Energies*, 9(11), p.958.
- Gambatese, J.A.** (2003) Controlled Concrete Demolition Using Expansive Cracking Agents, *J. Construct. Eng. & Management*, 129(1), pp.98~104.
- Laefer, D.F., Ambrozevitch-Cooper, N., Huynh, M.P., Midgette, J., Ceribasi, S., Wortman, J.** (2010) Expansive Fracture Agent behaviour for Concrete Cracking, *Mag. Concr. Res.*, 62(6), pp.443~452.
- Nam, Y., Kim, K., Park, S., Sohn, D., Lee, J.** (2015) Arrangement of Agent Holes for Enhancing Crack Propagation in Structure Demolition Process Using Soundless Demolition Chemical Agents, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(6), pp.683~690.
- Natanzi, A.S., Laefer, D.F., Connolly, L.** (2016) Cold and Moderate Ambient Temperatures Effects on Expansive Pressure Development in Soundless Chemical Demolition Agents, *Constr. & Build. Mater.*, 110, pp.117~127.
- Sunwoo, S., Ryu, C., Choi, B.** (2001) Blast Fragmentation Measurement Using the Image Based Granulometry System, *Explos. & Blasting*, 19(2), pp.5~18.

요 지

콘크리트 구조물 또는 암석의 해체 공정에서 소음, 진동, 분진 등의 발생을 초래하는 기존의 발파공법을 대신하여 비폭성 파쇄제의 이용을 고려할 수 있다. 본 연구는 유한한 정사각형 콘크리트 구조물을 대상으로 하여 비폭성 파쇄제의 팽창이 준정적으로 균열을 발생, 진전시키는 과정을 유한요소해석으로 예측하고 기존 문헌에 보고된 실험결과와 비교함으로써 해석결과의 정확성을 검증하였다. 또한 비폭성 파쇄제 및 천공 홀의 배치에 따른 영향을 최소요구팽창압 관점에서 분석하였다. 더 나아가서 비폭성 파쇄제가 채워지지 않은 천공 홀이 비폭성 파쇄 공정에 미치는 영향을 분석하고, 분리 조각의 수를 증가시켜 파쇄도를 향상시키기 위한 비폭성 파쇄제 및 천공 홀의 효과적인 배치에 대하여 고찰하였다.

핵심용어 : 콘크리트 구조물 해체, 파쇄도, 비폭성 파쇄제, 천공 홀, 최소요구팽창압