

무소음화학팽창제를 이용한 구조물 해체시 균열진전 촉진을 위한 천공홀의 배치

남 윤 민¹ · 김 경 진² · 박 상 현¹ · 손 동 우³ · 이 재 하^{4*}

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

Arrangement of Agent Holes for Enhancing Crack Propagation in Structure Demolition Process using Soundless Chemical Demolition Agents

Yunmin Nam¹, Kyeongjin Kim², Sanghyun Park¹, Dongwoo Sohn³ and Jaeha Lee^{4*}

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

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

³Division of Mechanical Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

⁴Department of Civil Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

Abstract

For demolition of offshore facilities, traditional methods such as jackhammer and explosive methods have been often used in construction industry. However, prohibitions for use of those methods are becoming more rigorous especially in environmentally and historically sensitive areas. It was also reported that the explosive demolition method on maritime bedrock can cause a disturbance of ecosystem. For those reasons, use of soundless chemical demolition agent(SCDA) is getting the spotlight. However, researches regarding the mechanical point of SCDA have seldom performed. There is no industrial standard for use of SCDA yet. In this study, a pilot experimental study in order to measure the required expansive pressure that could be generated from SCDA was conducted. Numerical models were developed in order to estimate the required expansive pressures of SCDA for initiating cracks depending on selected key parameters. Obtained results indicate that the required pressure does not decrease linearly as increasing the hole diameter, the number of holes, and the ratio of hole-distance to hole-diameter.

Keywords : soundless chemical demolition agents(SCDA), required pressure, structure demolition

1. 서 론

구조물이나 암반 해체를 위해 가장 많이 사용하는 공법은 다이나마이트를 이용한 발파공법과 잭해머를 이용한 공법이다. 하지만 이러한 기존의 공법들은 주거 밀집지역이나 문화재가 가까운 지역에서는 발파에 의한 소음과 진동으로 인해 사용에 많은 제약이 따른다. 특히 해양환경에서의 발파작업은 그 위험도가 더욱 높을 뿐만 아니라 생태계교란 등에 의해 지역주민·단체들로부터 많은 반발에 부딪히고 있다. 이러한 발파공법이 제한된 공사현장에서 사용가능한 무소음화학

팽창제(Soundless Chemical Demolition Agent, SCDA)의 필요성이 커지고 있다. Fig. 1은 무소음화학팽창제를 이용한 콘크리트 균열시험 결과를 나타낸다. 무소음화학팽창제란 포틀랜드 시멘트와 비슷한 형태의 분말가루로서, 수화반응 시 150℃ 이상의 열과 함께 Ettiringtonite 결정체를 생산하여 구속되어 있는 조건에서 서서히 팽창압을 발현한다. SCDA를 활용하기 위한 개념은 1970년대 초반부터 제안되어 왔으나 40여년이 지난 현재까지도 SCDA에 대한 표준이 정립되지 못하고 있으며 아직까지도 발파해체공법에 비하여 단가가 높아 그 필요성에 비하여 활용빈도가 극히 낮은 수준

* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4466; E-mail: jaeha@kmou.ac.kr
Received October 13 2015; Revised October 28 2015;
Accepted October 29 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.

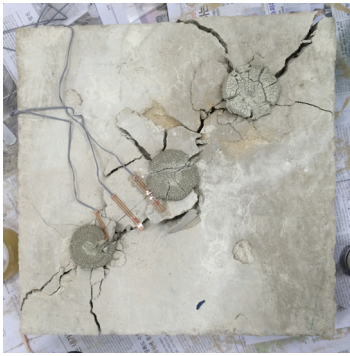


Fig. 1 Concrete block cracking test using the SCDA

이다(Huynh and Laefer, 2009). Laefer 등(2010)의 연구에 따르면 SCDA의 사용단가는 다이내마이트 사용에 비하여 20배 이상인 것으로 확인된다. 이와 같이 SCDA를 이용한 해체공법은 경제적 효율성 측면에서 사용에 제한을 받아 왔으나 최근 강화되고 있는 환경 및 소음관련 법규로 인해 주목을 받고 있다. 또한 주로 일본, 중국, 미국 등지에서 SCDA에 대한 연구가 활발하게 수행되어 왔다. Gambatese (2003)은 SCDA를 사용하여 지름이 6.35mm 이하인 홀의 간격 및 홀의 크기 등과 관련된 변수연구를 통해 최적화된 해체방법을 제시한 바 있으나, 이는 매우 작은 시험체에 대한 연구이므로 비교적 사이즈가 크고 단단한 암반의 해체를 위해서 적용하기에는 무리가 있다. Laefer 등(2010)은 외기 온도, 섞는 물, 물의 온도, 물시멘트비, 구멍지름, 깊이, 열 발산조건 등이 SCDA의 팽창압에 영향을 주는 중요인자라는 연구결과를 제시하였다. 또한 Hinze와 Brown(1994)은 외관법, 직접측정장치를 이용한 측정법 등 SCDA의 팽창압 측정방법을 연구하였다. 그러나 아직까지 SCDA를 이용한 효과적인 구조물 해체방법에 대한 연구는 많지 않다. 국내에서는 Kim(1998)의 팽창압에 의한 암석파괴시에 발생하는 AE 파의 특성을 규명하는 연구를 한 바 있다. 그러나 대부분 콘크리트의 수축균열 방지를 위한 팽창제 사용에 관한 연구가 대부분이고, 해양암반 및 구조물의 무소음, 무진동 공법에 관한 연구, 특히 구조물의 크기에 따른 요구팽창압에 대한 연구는 미미하다. 따라서 본 연구에서는 해양암반에서 균열진전 확인을 위한 경계조건을 구성하고, 다양한 경계조건에서 해양암반 및 구조물 해체에 필요한 최소요구팽창압 예측을 위한 유한요소해석을 수행하였다.

2. 해석 재료모델

재료모델은 콘크리트 및 암반의 취성적 거동을 확인하기 위해 Concrete Damaged Plasticity(Lee and Fenves, 1998)을 사용하였다. Damaged Plasticity Model은 미소

균열을 발생시키기 위해 이용된 파괴에너지로 평가되며, Fig. 2에는 파괴면 설정에 관한 그래프가 나타나있다. 파괴면 구성식은 Lubliner 등(1998)이 제안한 설정을 기반으로 Lee와 Fenves(1998)이 내용을 수정하였으며 기본적인 수식은 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - \alpha \bar{q} + \beta (\bar{\epsilon}^p)^n) < \hat{\sigma}_{\max} > - \bar{\sigma}_c (\bar{\epsilon}_c^p)^n = 0 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{(\sigma_{t0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{t0}/\sigma_{c0}) - 1}; 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c (\bar{\epsilon}_c^p)^n}{\sigma_t (\bar{\epsilon}_t^p)^n} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1} \quad (4)$$

여기서, $\hat{\sigma}_{\max}$ 는 최대 유효 주응력, σ_{t0}/σ_{c0} 는 초기등가이축압축항복강도/초기일축압축강도, K_c 는 편차면(deviatoric plane)에서 항복면을 정의하기 위한 계수(0.667), $\bar{\sigma}_c (\bar{\epsilon}_c^p)^n$ 는 유효인장응집응력, $\sigma_t (\bar{\epsilon}_t^p)^n$ 유효압축응집응력이다. 각 변수에 대한 상세한 설명은 ABAQUS manual 6.14를 통하여 확인할 수 있다.

균열의 생성 및 진전은 인장응력이 발생하여 손상이 생길 경우 확인이 가능한 손상파라미터(DamageT)를 사용하여 확인하였으며 손상파라미터가 0.6 이상일 경우 완전균열이 발생한 것으로 설정하였다. 또한 Fig. 3과 같이 CEB-FIP(2010)에서 제시한 응력-균열폭 관계를 활용하여 인장응력-균열폭 관계를 예측하였으며, 이를 Damaged Plasticity Model에 입력하여 균열발생시 필요한 SCDA의 팽창압을 계산하였다. CEB-FIP(2010)에서 제안한 식은 다음과 같다.

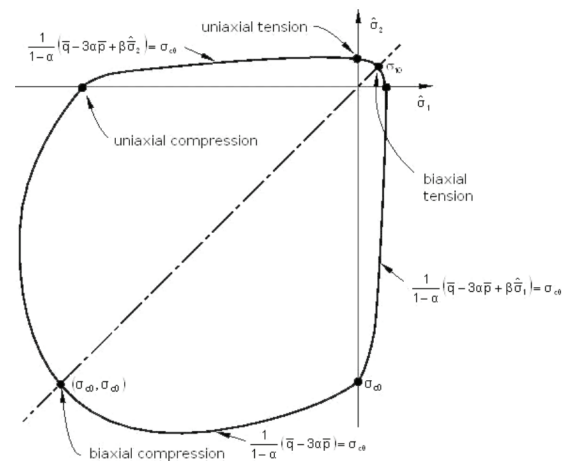


Fig. 2 Yield surface of concrete materials (Abaqus user manual 6.14)

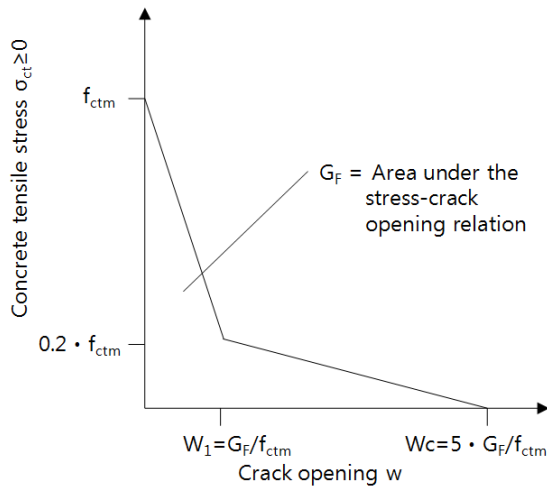


Fig. 3 Bilinear stress-crack opening curve (CEB-FIP, 2010)

$$f_{ctm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (5)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (6)$$

여기서, f_{ctm} 은 콘크리트 예측인장강도, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, G_F 는 콘크리트 예측파괴에너지, f_{cm} 는 콘크리트 평균 실험압축강도를 말한다.

3. 해석 영역 및 조건

본 장에서는 수치해석을 위한 모델 선정 및 검증을 수행하였다. 콘크리트 구조물에 먼저 천공홀(hole)을 내고 여기에 SCDA를 주입시키면 화학반응에 의해 SCDA가 팽창하며 콘크리트에 팽창압이 전달되면서 파괴된다. 이러한 파괴과정을 유한요소해석으로 모사하기 위하여 상용해석프로그램인 ABAQUS 6.14 Explicit을 이용하였다. 콘크리트 및 SCDA의 모델링에는 감차적분이 적용된 2차원 평면변형률 요소(CPE4R)를 사용하였으며 보다 세밀한 균열진전을 확인하기 위하여 최소 15000개 이상의 요소를 사용하였다. Implicit로 해석할 경우 균열발생 직후 데이터 수렴이 되지 않아 균열의 진전을 확인할 수가 없어 초기균열만 확인할 수 있으므로 균열의 진전을 확인하기 위해 Explicit로 해석하였다. 콘크리트 구조물은 천공홀과 구조물 외부경계와의 거리에 따른 영향이 적도록 원형으로 모델링하였다. SCDA의 팽창을 표현하기 위해 열팽창 계수 ($1 \times 10^{-11}/^{\circ}\text{C}$)를 적용한 뒤 천공홀에 온도하중을 가하여 선형 증가하도록 설정하였으며, 팽창압의 전달은 면-대-면 접촉 (Surface to Surface Contact)을 사용하여 팽창하는 SCDA

가 콘크리트 구조물과 접촉하여 팽창압을 전달하도록 모델링하였다. 콘크리트의 압축강도는 21MPa로 설정하였고, 앞 장에서 설명한 바와 같이 손상파라미터를 도입하여 균열의 생성 및 진전을 판단하였다.

SCDA는 발파성 물질이 아니므로, 점진적으로 팽창압을 발생시킨다. 따라서 해석에서 동적인 영향은 제거하는 것이 타당하다. 이를 확인하기 위하여 먼저, 질량에 대한 변수연구 (2400kg/m^3 , 100kg/m^3 , 10kg/m^3)와 팽창속도에 따른 변수연구 (5000°C/s , 10000°C/s , 15000°C/s , 20000°C/s , 30000°C/s)를 수행하였다.

3.1 질량에 대한 변수연구

질량을 2400kg/m^3 , 100kg/m^3 , 10kg/m^3 로 설정하여 해석을 수행하였다. 질량에 대한 변수연구의 해석결과, 질량의 크기에 관계없이 최소요구팽창압은 비교적 일정하게 나타남이 확인되었다(Fig. 4). Fig 5의(a), (b), (c)는 질량이 각각 2400kg/m^3 , 100kg/m^3 , 10kg/m^3 일 때 균열이 생성되기 직전의 주응력을 나타낸 것이다. 최소요구팽창압이 (a)에서는 16.9MPa, (b)에서는 16.8MPa, (c)에서는 16.9MPa로 나타나 차이가 미미하다는 것이 확인되었다. 해석결과에 차이가

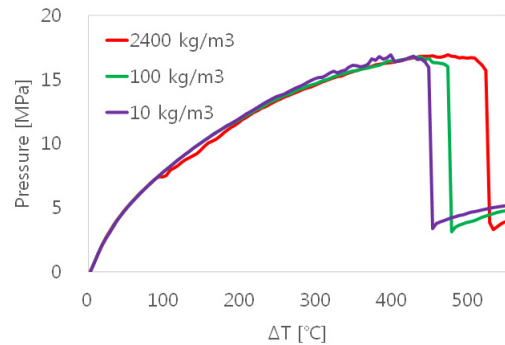


Fig. 4 The required pressure depending on mass density

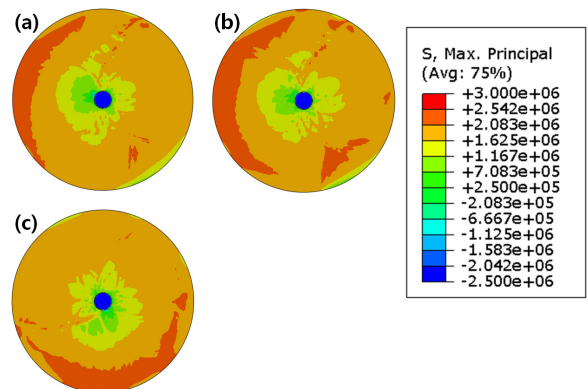


Fig. 5 Principal stress of 400mm structure before crack initiation

없는 범위에서 해석 시간을 단축하기 위해서는 구조물의 질량을 크게 설정할 필요가 있다.

3.2 팽창속도에 대한 변수연구

팽창속도를 각각 5000℃/s, 10000℃/s, 15000℃/s, 20000℃/s, 30000℃/s로 설정하고 해석을 수행하였다. 해석 결과, Fig. 6과 같이 20000℃/s 이하의 속도에서는 팽창 속도에 따른 팽창압의 변화가 미미한 것으로 확인되었다. 이후 해석수행 시 동적인 영향을 최소화하기 위해서 팽창속도는 20000℃/s 이하의 속도로 해석을 수행할 것이다.

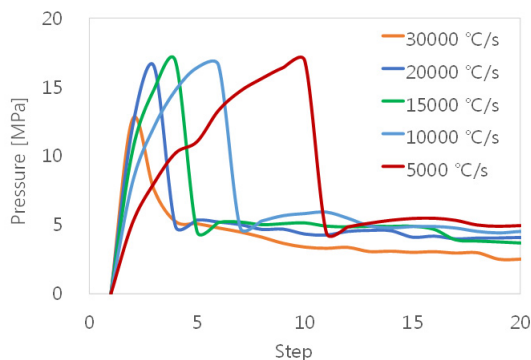


Fig. 6 The required pressure depending on expansion speed

4. 주요변수에 대한 민감도 해석

여기에서는 구조물의 균열생성 및 진전에 영향을 미치는 주요 변수를 설정하고, 변수 변화에 따른 해석결과를 고찰하였다. 전체 해석결과는 Table 1에 나타나 있으며, 구속조건, 구조물의 크기, 천공홀의 지름, 천공홀의 간격, 천공홀의 수에 대한 변수연구를 수행하였다.

4.1 구조물의 구속조건에 의한 최소요구팽창압 예측

구조물의 형태는 원형, 직경 400mm와 1000mm, 천공홀의 직경은 38mm인 조건에서 구조물 전체 측면의 25%(Fig. 7(a)), 50%(Fig. 7(b)), 75%(Fig. 7(c))에 구속조건을 적용하여 구속조건이 없는 경우와 각각의 경우를 비교 분석하였다.

Fig. 8은 구속조건을 달리하였을 경우 계산된 최소요구팽창압을 비교한 그래프이다. 구속면적이 증가할수록 최소요구팽창압이 증가하는 경향을 보이지만 그 차이는 미미함을 확인할 수 있다. Fig. 9는 구조물의 크기가 1000mm일 때 구속조건에 따른 팽창압을 그래프로 나타낸 것이다.

Table 1 Obtained analytical results

Structure diameter (mm)	Hole diameter (mm)	Mass (kg/m ³)	Boundary condition	Distance of each hole (mm)	require pressure (MPa)
400	38	2400	Free	-	16.9
		100	Free	-	16.8
		10	Free	-	16.9
			1/4	-	16.9
			1/2	-	16.9
			3/4	-	17.7
1000	38	10	Free	-	35.4
			1/4	-	36.3
			1/2	-	37.9
			3/4	-	39.6
	50	10	Free	-	28.8
	75	10	Free	-	20.2
2000	38	10	Free	-	60.4
5000	38	10	Free	-	87.3
10000	38	10	Free	-	98.9
	38×2	10	Free	50	45.3
	38×2	10	Free	75	39.6
	38×2	10	Free	125	39.1
	38×2	10	Free	250	38.0
	38×2	10	Free	375	38.5
	38×2	10	Free	-	84.7
	38×3	10	Free	-	71.8
	38×4	10	Free	-	67.0
	38×5	10	Free	-	58.4
	38×10	10	Free	-	36.6
	38×20	10	Free	-	20.5
	38×30	10	Free	-	14.0

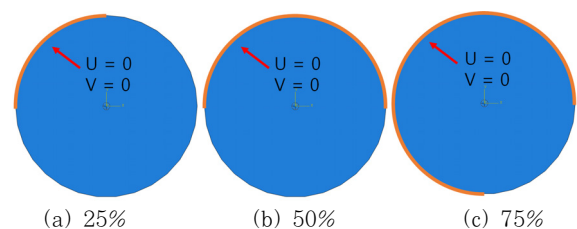


Fig. 7 Three different boundary conditions varying the portion of fixed boundary

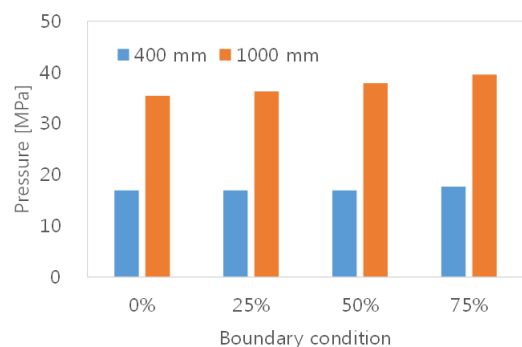


Fig. 8 The required pressures depending on the boundary conditions

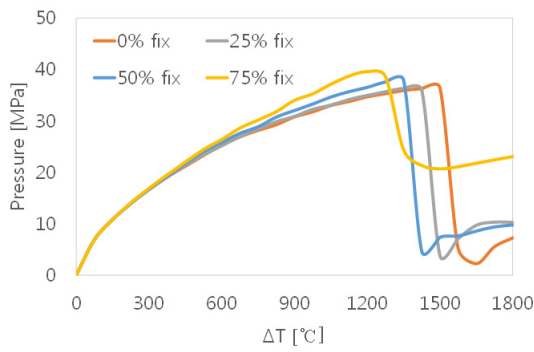


Fig. 9 Pressure history of 1000-mm structure

구조물에 있어서 구속이 많아짐에 따라 최소요구팽창압은 유사하게 발생하나, 균열발생 시간은 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 실제 현장적용 시 구속이 많은 경우 더욱 빠른시간에 암반을 파괴할 수 있을 것으로 예상된다. 추후 구속조건에 따른 균열제어(Crack control)를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

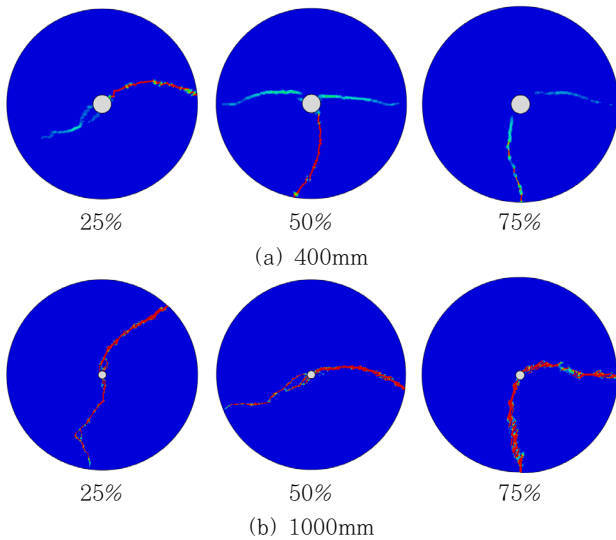


Fig. 10 Configurations of crack propagation, depending on the portion of the fixed boundary

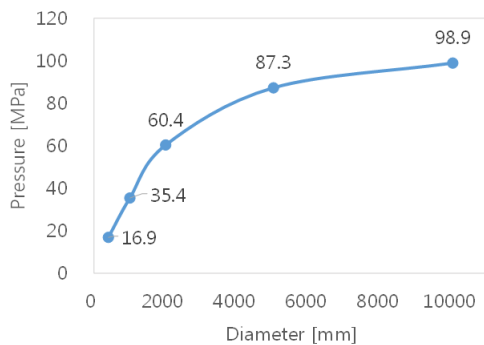


Fig. 11 The required pressure depending on the structure dimension

Fig. 10은 각각의 해석결과에 따른 균열의 진전을 나타낸 것이다. 해석결과 구속된 부분을 제외한 지역에 인장에 의한 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다.

4.2 구조물 및 천공홀 크기에 따른 최소요구팽창압 변화

4.2.1 구조물의 크기에 대한 변수 연구

천공홀의 지름은 38mm로 고정하고 구조물의 지름을 변수로 하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 구조물의 크기는 400mm, 1000mm, 2000mm, 5000mm 그리고 10000 mm이며 Fig. 11은 최소요구팽창압에 대한 해석결과를 그래프로 나타낸 것이다. 각각의 결과에서 나온 최소요구팽창압은 400mm에서는 16.9MPa, 1000mm에서는 35.4MPa, 2000 mm에서는 60.4MPa, 5000mm에서는 87.3MPa, 10000 mm에서는 104.7MPa로 나타났다. 구조물의 크기가 증가할수록 요구되는 최소팽창압이 증가하나 구조물의 크기가 10000mm 이상이 된다면 최소팽창압이 일정 수치에 수렴한다고 볼 수 있다. 따라서 천공홀과 구조물 직경비가 0.00038 이상일 경우 측면 거리에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있으므로, 무한(infinite) 크기의 경계조건에서 필요한 요구팽창압을 계산하기 위해서는 천공홀과 구조물 직경 비를 0.00038 이하로 하거나 원하는 구조물의 주변에 무한요소

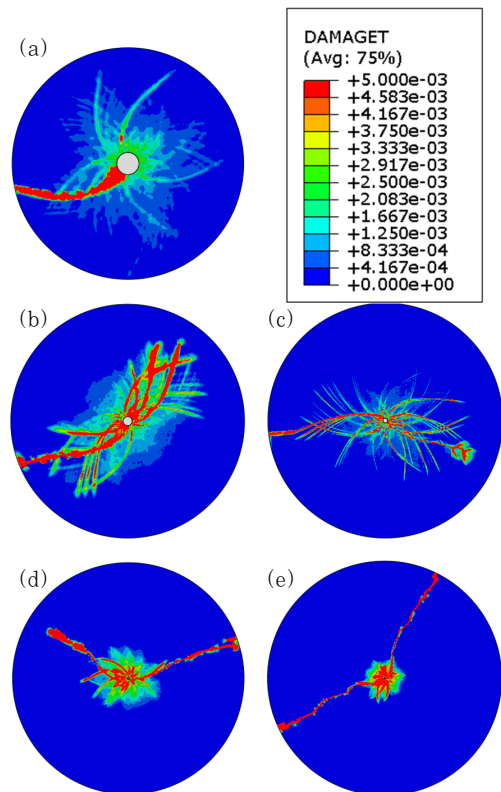


Fig. 12 Damaged configurations depending on the size of structures

(Infinity element)를 배치하여 해석을 수행할 필요가 있다.

Fig. 12는 구조물의 각각의 크기에 따른 균열의 형상을 나타낸 것이다. 여기에서 (a)는 400mm, (b)는 1000mm, (c)는 2000mm, (d)는 5000mm, (e)는 10000mm에 대한 해석 결과이다. 천공홀에서 미소균열이 진전되어 인장균열이 발생한 것을 볼 수 있다.

4.2.2 천공홀의 크기에 대한 변수연구

여기에서는 4.2.1절과 반대로, 구조물의 크기를 고정시키고 천공홀의 지름을 변수로 하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 천공홀의 크기는 38mm, 50mm 및 75mm이며 구조물의 크기는 1000mm이다. Fig. 13은 각 해석에서의 최소요구팽창압을 그래프로 나타낸 것이다.

천공홀의 크기가 38mm, 50mm, 75mm일 때 최소요구팽창압이 각각 35.4MPa, 28.8MPa 및 20.2MPa로 나타나, 천공홀의 직경이 1.31배 1.97배 늘어나는 동안 최소요구팽창압은 0.81배, 0.57배 줄어들어 천공홀의 직경과 요구팽창압 사이에는 선형의 관계가 적용되지 않는 것으로 확인되었다. 효율적인 천공홀 지름의 선정과 배치를 위해서는 이러한 관계를 명확하게 규명할 필요가 있으며, 추후 연구에서 홀간 간격과 지름에 대한 적정값을 제시하는 상세한 연구가

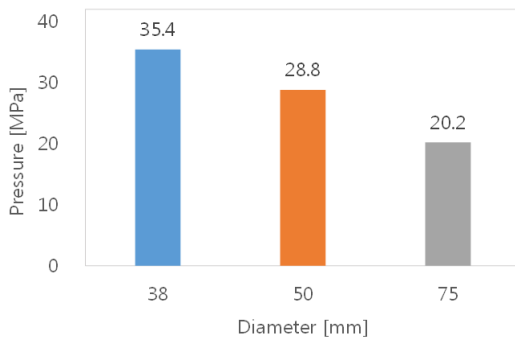


Fig. 13 The required pressure, depending on the hole size

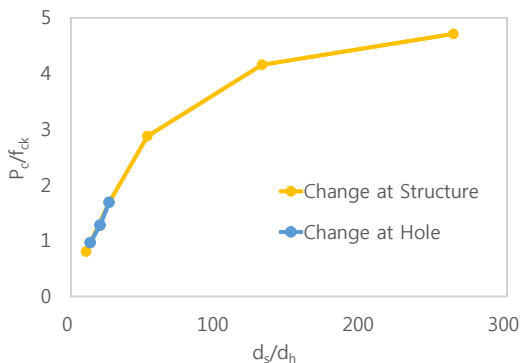


Fig. 14 The normalized pressure vs. the structure-to-hole size ratio

진행될 예정이다.

Fig. 14는 4.2.1절 및 4.2.2절의 결과를 하나의 그래프로 정규화하여 나타낸 것이다. 여기서, d_s 는 구조물의 크기, d_h 는 천공홀의 크기, P_c 는 균열발생시의 최소요구팽창압, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도를 나타낸다. 구조물의 크기를 변수로 한 해석결과와 천공홀의 크기를 변수로 한 해석결과가 동일하다는 것을 알 수 있다.

4.3 천공홀의 수에 따른 최소요구팽창압 측정

천공홀의 개수에 따른 최소요구팽창압을 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 구조물의 크기는 10000mm, 천공홀의 크기는 38mm로 설정하고 천공홀간의 간격을 등간격으로 구조

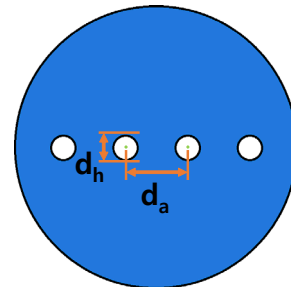


Fig. 15 The multi-hole structure

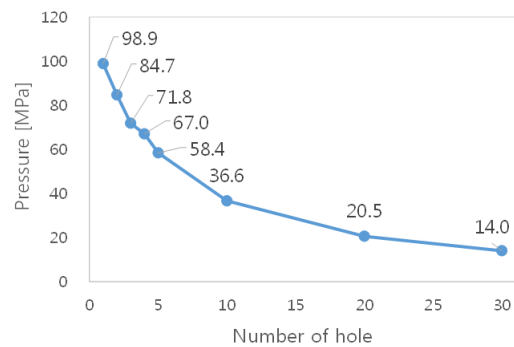


Fig. 16 The required pressure depending on the number of holes

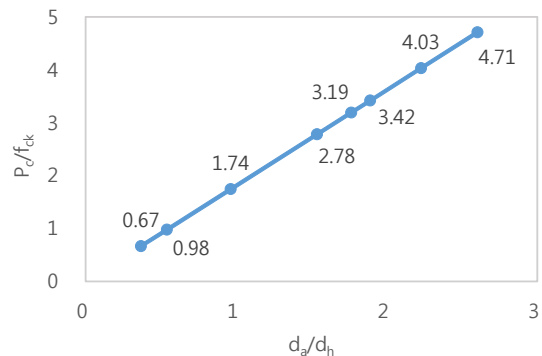


Fig. 17 The required pressure depending on the ratio of hole-distance to hole-diameter

물의 중앙에서부터 일직선으로 배치하여 해석을 수행하였다. Fig. 15는 천공홀을 등간격으로 배치했을 때의 구조물의 형상을 나타낸 것이다. 여기에서 d_a 는 천공홀간의 간격, d_h 는 천공홀의 크기를 나타낸다.

Fig. 16은 천공홀의 수에 대한 최소요구팽창압을 그래프로 나타낸 것이다. 천공홀의 수가 많아짐에 따라 최소요구팽창압이 작아지는 것이 확인되었다. 또한, Fig. 17은 Fig. 16의 결과를 천공홀 간 간격과 천공홀의 크기 비에 대한 최소요구팽창압의 형태로 다시 나타낸 것으로 P_c 는 균열발생시의 최소요구팽창압, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, d_a 는 천공홀간의 간격, d_h 는 천공홀의 크기이다. 최소요구팽창압과 압축강도의 비로 나타내지는 정규화 값은 천공홀의 간격과 구조물 크기 비의 1.81배로 나타났으며 선형증가하였다. 이 관계는 동일한 천공홀의 크기에 의한 것이므로 다른 크기의 천공홀과 구조물 크기 등에 대한 변수연구가 추후 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 무소음화학팽창제를 이용한 해양암반에서의 균열의 생성 및 진전을 위한 해석조건을 구성하여 구조물 해체에서의 최소요구팽창압을 알아보는 해석을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻어낼 수 있었다.

- 구조물에서 더 많은 구속이 발생할 경우 최소요구팽창압은 유사하지만 균열 발생시간이 단축되는 것이 확인되었다.
- 천공홀과 구조물의 직경비가 0.00038 이하인 경우 측면 경계조건에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.
- SCDA를 이용한 구조물 해체 시 천공홀의 크기를 증가시킬 경우 증가된 천공홀의 직경에 비례하여 최소요구팽창압은 감소하지 않는다.
- 구조물 해체를 위한 최소요구팽창압은 구조물의 크기와 천공홀의 직경의 비에 지배적인 영향을 받는 것을 확인하였으며 이러한 주요설계변수에 따른 일반적인 요구팽창압을 예측하기 위한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 구조물의 직경과 천공홀의 직경비에 따라 최소요구팽창압이 비선형으로 민감하게 반응하나 경계면 구속조건에 따른 변화는 없는 것으로 확인되었다.
- 천공수가 많아질수록 최소요구팽창압은 줄어들며 최소요구팽창압은 천공홀의 간격과 크기의 비에 선형적으로 비례한다
- 본 연구결과는 구조물 해체를 위해 무소음팽창제를 이용

해야 하는 경우, 천공홀의 위치 및 간격조정을 위한 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

- 향후 SCDA의 팽창압을 측정하고 천공홀간 간격과 직경에 대한 상세한 연구가 추후 수행된다면 구조물 해체를 위한 천공홀의 최적설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2015년도 정부(교육부 및 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(Nos. 2014R1A1A2058549, 2015R1C1A1A02036617)임.

References

- ABAQUS (2014) *ABAQUS Documentation*, Dassault Systemes, Providence, RI, U.S.A.
- CEB-FIP 2010 (2010) *Final Draft CEB-FIP Model Code 1010*, Bulletin Information Committee Euro-International, Beton, p.203.
- Gambatese, J.A. (2003) Controlled Concrete Demolition using Expansive Cracking Agents, *J. Constr. Eng. Manag.*, 129(1), pp.98~104.
- Hinze, J., Brown, J. (1994) Properties of Soundless Chemical Demolition Agents, ASCE, *J. Constr. Eng. & Manag.*, 120(4), pp.816~827.
- Huynh, M.P., Laefer, D.F. (2009) Expansive Cements and Soundless Chemical Demolition Agents : State of Technology Review, *11th Conference on Science and Technology*, Ho Chi Minh City, Vietnam.
- Kim, G.W. (1998) Characteristics of Acoustic Emission by Expansive Cement Induced Rock Fractures, *The J. Eng. Geol.*, 8(3), pp.207~213.
- Laefer, D.F., Ambrozevitch-Cooper, N., Huynh, M.P., Midgette, J., Ceribasi, S., Wortman, J. (2010) Expansive Fracture Agent behaviour for Concrete Cracking, *Mag. Conc. Res.*, 62(6), pp.443~452.
- Lee, J., Fenves, F.L. (1998) Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *J. Eng. Mech.*, 124(8), pp.892~900.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E. (1989) A Plastic-Damaged Model for Concrete, *Int. J. Solids & Struct.*, 25(3), pp.299~326.

요 지

해양암반이나 구조물 해체를 위한 전통적인 방법은 다이나마이트를 이용한 발파공법, 잭해머(Jackhammer)를 이용한 공법이다. 이러한 방법은 소음이나 폭발의 위험등으로 인해 사용에 많은 제약이 따른다. 이런 제한된 상황에서 사용할 수 있는 무소음화학팽창제(SCDA)의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 무소음화학팽창제의 사용에 관한 규격이나 설계 및 시공에 대한 제안서는 현재 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 조건(구조물의 구속, 천공홀의 크기, 천공홀의 수 등)에서 콘크리트 구조물에 균열이 생성, 진전될 수 있는 최소요구팽창압을 예측하였다.

핵심용어 : 무소음화학팽창제(SCDA), 요구팽창압, 구조물 해체