



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

취성 구조물의 비폭성 파쇄 공정에서의
균열 경로에 대한 수치적 예측 및 제어

Numerical prediction and control of crack patterns in
non-explosive demolition process for brittle structures



한국해양대학교 대학원

기계공학과

남 윤 민

본 논문을 남윤민의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 조 종 래 (인)

위 원 이 재 하 (인)

위 원 손 동 우 (인)



2016년 12월 20일

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
1. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	3
2. 해석모델의 구성	5
2.1 해석 재료모델	5
2.2 해석 영역 모델링	8
2.3 선형 변수연구	9
2.3.1 밀도에 대한 변수 연구	10
2.3.2 팽창속도에 대한 변수 연구	11
2.3.3 동적효과 검증	12
3. 원형구조물에서의 균열진전 해석	14
3.1 구속조건에 대한 균열진전 해석	14
3.2 구조물의 크기에 따른 균열진전 해석	17
3.3 SCDA의 개수에 따른 균열진전 해석	19

4. 반무한 구조물에 대한 균열진전 해석	23
4.1 반무한 구조물의 모델링	23
4.1.1 유한요소 도메인 선정	24
4.2 SCDA의 배치	26
4.2.1 자유단과 평행한 방향으로 2개의 SCDA 배치	26
4.2.2 자유단과 수직한 방향으로 2개의 SCDA 배치	27
4.3 구멍의 배치	29
4.3.1 자유단과 평행한 방향으로 2개의 구멍 배치	30
4.3.2 자유단과 수직한 방향으로 2개의 구멍 배치	32
5. 균열 형상 및 진전 제어	34
5.1 SCDA 9개의 배치에 의한 영향 (Case 1)	34
5.2 SCDA 13개의 배치에 의한 영향 (Case 2)	38
6. 압축강도에 따른 균열진전	42
6.1 압축강도 및 SCDA 간의 거리 변수 설정	42
7. 결 론	48
참고문헌	50

Numerical prediction and control of crack patterns in non-explosive demolition process for brittle structures

남 윤 민
Nam Yunmin

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

A traditional method for demolishing large-scale structures such as buildings and bridges is the use of explosives. However, the explosive method leads to noise, vibration, and dust emissions during the demolition process. In particular, applying the method to marine structures may cause safety hazards and destroy ecosystems. Soundless chemical demolition agents (SCDAs), also known non-explosive demolition agents, can be considered a promising alternative to the explosives, because they can reduce environmental problems. The SCDAs are powdery materials similar to cement, which result in the generation of expansive pressure when contacting with water under constrained conditions.

Although the SCDAs have the environmental advantages, general guidelines for usage of the SCDAs have not been established yet. In this study, a series of numerical simulations of the SCDA-driven demolition process are conducted using a concrete damaged plasticity model. The tendency

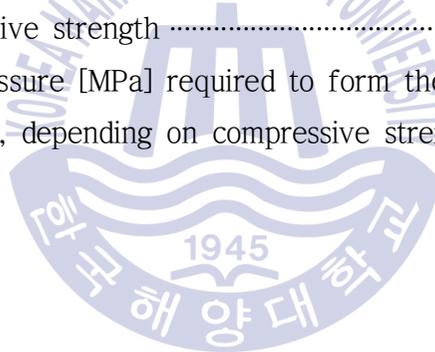
of crack initiation and propagation in brittle circular and semi-infinite structures is observed varying the dimensions, boundary condition, compressive strength of structures, and the number and spacing of the SCDA. Furthermore, considering the additional holes, in which the SCDA are not injected, the effect of distance between the SCDA and holes on the crack patterns is investigated. The effective arrangement of the SCDA and holes for controlling the desired crack patterns is also discussed.

KEY WORDS: Crack control 균열제어; Structure demolition 구조물 해체; Soundless Chemical Demolition Agent 무소음화학팽창제; Semi-infinite domain 반무한 영역



List of Tables

Table 1	Required pressure depending on structure size	17
Table 2	Result of required pressure each the number of SCDA in 10 m structure ·	20
Table 3	Required pressure depending on domain size	25
Table 4	Normalization between each SCDA distance	29
Table 5	Required pressure each SCDA at Case 1	38
Table 6	Required pressure each SCDA at Case 2	41
Table 7	U-shaped crack pattern with respect to the SCDA distance and compressive strength	43
Table 8	Minimum pressure [MPa] required to form the U-shaped crack pattern, depending on compressive strength	44



List of Figures

Fig. 1 Yield surface of concrete materials	6
Fig. 2 Bilinear stress-crack opening curve	7
Fig. 3 Explanation of minimum required inflation pressure	9
Fig. 4 The model of precede study	10
Fig. 5 The required pressure depending on mass density	11
Fig. 6 The required pressure depending on expansion speed	12
Fig. 7 Total energy according to time	13
Fig. 8 Kinetic energy according to time	13
Fig. 9 Three different boundary conditions varying the portion of fixed boundary	14
Fig. 10 Crack path of fixed boundary structure	15
Fig. 11 The required pressure depending on boundary condition	16
Fig. 12 Pressure history of 1 m structure	16
Fig. 13 Damaged configurations depending on the size of structure	18
Fig. 14 The required pressure depending on the structure dimension	19
Fig. 15 Description of 10.0 m structure	20
Fig. 16 Required pressure depending on d_1/d_2	21
Fig. 17 Crack path of 10.0 m structure with 10EA SCDA	21
Fig. 18 The required pressure depending on number of SCDA	22
Fig. 19 Connectivity between infinite elements and finite elements	24
Fig. 20 Analysis domain using the symmetry	25
Fig. 21 Crack paths of various size domains	26
Fig. 22 Crack paths depending on vertical distance between two SCDAs	27

Fig. 23 Crack paths depending on horizontal distance between two SCDAs	28
Fig. 24 Principal stress distribution during SCDA expansion	29
Fig. 25 Principal stress distribution during SCDA expansion with empty hole	30
Fig. 26 Effect of an empty hole in a vertical position at the SCDA	31
Fig. 27 Changes in required pressure with respect to the distance	32
Fig. 28 Effect of an empty hole in a horizontal position at the SCDA	33
Fig. 29 Arrangement for SCDA and empty hole at Case 1	36
Fig. 30 Crack propagation result of Case 1	37
Fig. 31 Crack propagation result of No. 5 SCDA without another SCDA	37
Fig. 32 Arrangement for SCDA and empty hole at Case 2	39
Fig. 33 Crack propagation result of Case 2	40
Fig. 34 Result of successful U-shaped crack propagation model	45
Fig. 35 Results of failed U-shaped crack propagation model	46
Fig. 36 Other result of failed U-shaped crack propagation	47

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

기계, 기구 및 금속 구조물에 있어 그 사용 환경에 따른 물리적, 환경적 영향은 항상 다양하게 변하고 있다. 이에 따른 기계적 요소들의 재료물성 또한 안정적인 것이 요구되고 있다. 하지만 설계에 있어서 충분히 안전한 영역에서 재료를 선택하였음에도 불구하고 예상치 못한 파괴가 발생하는 일이 많다(Park, et al. 1999). 이것은 파괴에 대한 불확정적 요인이 작용하고 있음을 알 수 있는데 특히 탄소강의 경우 인(P)의 영향으로 상온에서 취성이 올라가 균열진전에 의한 파괴에 취약해진다. 취성이 올라간 재료는 미세균열에도 쉽게 파괴가 이루어진다. 이때 기계 구조물의 작동 중에 파괴가 일어난다면 재산적 피해 뿐 아니라 인명피해까지 나타날 수 있다. 균열에 대한 연구를 통해 균열진전 및 이를 제어할 수 있다면 구조물의 안정성을 확보하거나 또는 그 반대로 구조물의 안정적인 파괴가 가능하다. 본 논문에서는 균열을 이용하여 구조물을 파괴, 해체시키는 것에 중점을 두었다. 특히 비폭성파쇄제의 팽창에 의한 균열생성, 진전에 초점을 맞추어 보았다. 교량 및 건물 등의 수명은 구조물 자체가 지닌 내구적 수명과 사회 경제적 여건이 변화하여 이에 따라 교체 또는 해체가 요구될 때까지의 기한을 의미한다. 지진, 태풍과 같은 각종 자연 재해로 인해 구조물의 내구성이 떨어지거나 보다 기능성이 높은 구조물이 필요하게 되면 기존의 구조물을 해체할 필요성이 있다(Kim and Kim, 1996). 수명이 다해 해체의 필요성이 요구되는 구조물이나 해양 절벽에서의 암반 해체를 위해 보편적으로 많이 사용되는 방법은 잭해머를 이용한 공법과 다이너마이트를 이용한 발파공법이 있다. 여타 다른 방법들에 비해 단가가 낮아 자주 이용되고 있는 이러한 방법들은 주거지역이나 문화재등과 가까운 지역에서는 발파에 의한 진동이나 소음으로 인해 사용에 제약이 있다(Min, 1996). 특히 해양환경에서의 발파작업은 환

경과피와 생태계교란 등의 이유로 지역주민들과 각종 환경단체들의 민원 역시 적지 않게 나오고 있는 것이 현실이다. 이러한 제한된 공사현장에서 진동 및 소음을 제거하여 발파하기 위한 방법으로 비폭성 파쇄제를 이용한 발파공법(Nam, et al. 2015)이 있다. 비폭성 파쇄제중 하나인 무소음화학팽창제(Soundless Chemical Demolition Agent, SCDA)는 포틀랜드 시멘트(Gambatese, 2003)와 유사한 가루의 형태이며 수화반응시 150°C 이상의 열을 내고, Ettringite 결정체를 생산하며 서서히 팽창하게 된다. 이때 구속되어있는 상태를 유지하면 서서히 팽창압을 발생시키고 이를 발파공법에 활용할 수 있다. SCDA를 실제 현장에서 사용하기 위한 연구는 1970년대 초반부터 진행되고 있었으나 현재까지도 SCDA의 사용에 대한 표준이 확립되어 있지 않으며 다이너마이트를 이용한 폭파공법에 비해 단가가 높아 실사용에 어려움이 있다. SCDA의 사용단가는 다이너마이트에 비해 20배 이상으로 확인 되고 있으나 기존 발파공법의 사용 시 발생하는 위에서 언급한 문제들을 해결하기 위해 SCDA를 이용한 해체공법이 주목을 받고 있다. SCDA에 대한 연구는 주로 미국, 중국, 일본 등의 국가에서 활발하게 수행되어 왔다. Gambatese(2003)의 연구내용을 보면 지름이 6.35 mm 이하인 SCDA 에서의 홀의 크기와 간격 등을 변수로 설정하여 해체작업에서의 효율성을 높인 연구였으나 이 연구는 해체대상이 매우 작은 구조물에 대한 연구이므로 실제 해체를 수행하는 구조물에 적용시키기에는 무리가 있다. 외기온도, 섞는 물의 비율 및 온도, 홀의 깊이 및 지름, 열 발산조건 등이 SCDA의 팽창압에 영향을 주는 주요인자라는 연구결과를 제시한 Laefer 등(2010)의 연구도 있고 Hinze 와 Brown(1994)의 외관법 및 직접측정장치를 통한 SCDA의 팽창압 측정법에 대한 연구도 있다. 하지만 아직까지 SCDA를 이용한 대형 구조물 해체시 효과적인 구조물 해체방법에 대한 연구는 많지 않다. SCDA의 팽창압에 의한 구조물 해체시 AE파의 특성을 규명한 연구에서는 콘크리트의 국부적인 수축에 의한 균열생성시 이를 방지하기 위해 SCDA를 사용하였고(Kim, 1998), 무소음, 무진동 공법에 대한 연구, 특히 각기 다른 구조물의 재료강도에 따른 해체특성을 다룬 연구 또한 충분히 수행되어 있지 않다.

1.2 연구목적 및 내용

최근 강화되고 있는 소음 및 환경관련 법규에 맞춰 해체현장에서의 SCDA를 이용한 발파공법의 사용이 요구되고 있으나 기존의 연구들은 크기가 고정되어 있는 소규모 구조물에 대한 해체나 하나의 재료물성을 이용한 해체공법에 대해 다루는 등 다양한 경계조건에서의 연구내용은 미미하다.

본 논문에서는 여러 가지 경계조건을 부여하여 다양한 변수에 대한 구조물에서의 균열진전을 알아보고, 해체에 필요한 최소요구팽창압을 예측하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 먼저 구속조건에 따른 균열진전의 특성에 대해 연구하였고 이에 따라 균열의 진전이 달라지는 것은 자명한 일이나 그 특성에 대한 연구를 통해 균열의 진전방향에 대한 예측이 가능할 것으로 판단되었다. 이때 SCDA의 직경은 실제 현장에서 사용되고 있는 0.038 m 를 채택하였고 구조물의 크기를 변수로 설정하여 이에 따른 팽창압의 변화에 대한 연구도 진행하였다. 다음으로 SCDA의 개수를 변경하는 것, 즉 일정한 크기의 구조물에서 SCDA간의 거리를 늘리거나 줄여보고 이에 따른 팽창압의 변화를 알아보았다.

SCDA를 이용한 발파공법은 관련 법규 및 민원 등의 여러 제약이 많은 현장에서 사용이 용이 하지만 다이너마이트를 이용한 기존 폭파공법에 비해 경제적인 측면에서 효율성이 떨어진다. 좀 더 효율적인 균열의 진전을 위해 SCDA가 들어가 있지 않은 구멍을 구조물에 추가하여 보다 경제적인 구조물의 해체가 가능하도록 하였다. 최종적으로 구조물의 재료강도를 변수로 설정하여 SCDA의 배치를 통해 목표로 하는 형상의 구조물 해체를 위한 효율적인 균열진전에 대한 연구를 진행하였다.

이전까지 이루어졌던 SCDA를 활용한 발파공법에 대한 연구에서는 유한영역 즉, 크기가 비교적 작은 영역에서의 연구가 중점적으로 진행되었다(Gambatese, 2003). 하지만 실제 건설 현장에서의 발파공법은 지표면이나 건물과 교량 등, 발파용 구멍에 비해 규모가 큰 구조물에서 시행되고 있다. 유한요소해석을 통해 큰 구조물의 전체를 모사하여 모델링 및 해석을 수행하는 것은 제약이 많아 이에 대한 연구가 부족한 것이 현실이다. 실제 구조물의 크기가 SCDA에 비해

클 경우 이를 그대로 모사하면 중요도가 떨어지는 부분이 발생한다. 특히 균열 발생 및 진전의 경우 SCDA가 타설된 부분이 중요하고, 그렇지 않은 부분은 중요도가 떨어져 전체를 모사하는 것은 해석의 효율성을 저하시킨다. 하지만 전체 영역의 크기에 의한 영향이 해석결과에 상당한 영향을 미치게 되므로 중요도가 떨어지는 부분의 모사가 반드시 필요하다. 이러한 해석에서의 어려움을 극복하기 위해 도입한 것이 무한요소(Infinite element(Baghbani and Gregory-Smith, 2003)) 이다. 해석의 중요도가 떨어지는 부분에 무한요소를 사용하게 되면 구조물이 무한하게 존재한다고 가정할 수 있고, 이를 통해 효율적인 수치해석이 가능하다.

균열해석에 있어서 초기균열의 위치 및 방향은 균열 형상을 만드는데 결정적인 역할을 한다(Chen et al., 2015). 즉, 같은 조건에서 해석을 수행하여도 초기균열의 위치 및 방향이 다르면 균열 전체의 형상이 달라진다. 초기 균열의 방향을 임의로 설정하여 균열진전특성을 해석하는 형태의 연구는 많이 이루어지고 있으나(Chen et al., 2015) 그 초기균열의 생성 위치와 방향을 제어하는 연구는 아직 미미하다. 따라서 본 논문에서는 SCDA의 발파를 모사하여 균열형상을 예측할 때 무한요소를 도입하여 반무한 영역에 대해 해석을 수행하였고 초기균열의 위치와 균열진전방향을 제어, 궁극적으로 균열진전의 제어를 목표로 하였다.

제 2 장 해석모델의 구성

해석에 사용된 모델은 Hypermesh 11 을 사용하여 모델링 하였고 SCDA의 팽창에 의한 결과를 예측하기 위하여 Abaqus 6.12 를 이용하여 수치해석을 실시하였다.

2.1 해석 재료모델

재료모델은 Abaqus에서 암반 및 콘크리트의 취성적 거동을 확인할 수 있는 Concrete Damaged Plasticity 를 사용하였다. Damaged Plasticity Model 은 파괴면 설정 그래프인 Fig. 1 을 바탕으로 미소 균열을 발생시키기 위한 파괴에너지로 평가된다. 파괴면 구성식은 Lubliner et al.(1989) 이 제안한 설정을 기반으로 Lee 와 Fenves(1998) 가 수정하였다. 기본적인 수식은 식 (1)~(4)에 나와 있으며 $\hat{\sigma}_{max}$ 는 최대 유효 주응력(Maximum principal effective stress), σ_{b0}/σ_{c0} 는 초기등가2축압축항복강도/초기일축압축강도(Initial equibiaxial compressive yield stress / Initial uniaxial compressive yield stress), K_c 는 편차면에서 항복면을 정의하기 위한 계수($K_c = 0.667$), $\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$ 는 유효인장응집응력(Effective tensile cohesion stress), $\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$ 는 유효압축응집응력(Effective compressive cohesion stress)이다.

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

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}; 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (2)$$

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

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

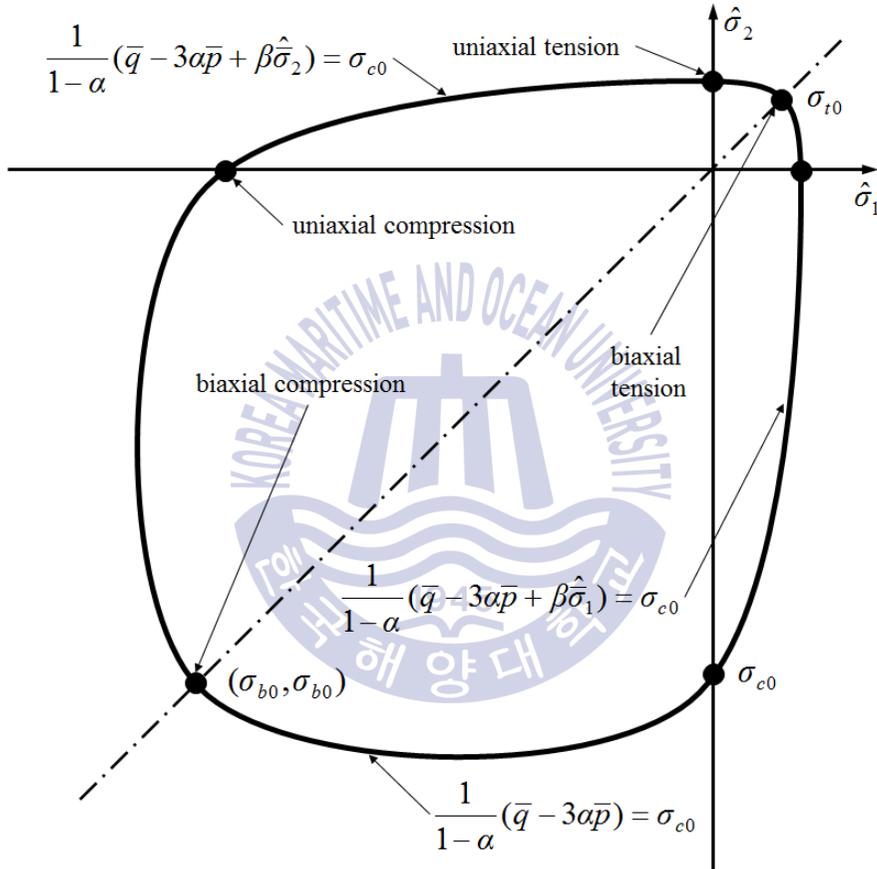


Fig. 1 Yield surface of concrete materials

SCDA의 팽창에 의해 미소요소에서는 인장 및 압축이 발생하게 된다. 이때의 주응력의 크기를 측정하고 그 크기가 Fig. 1의 그래프에 도달하게 되면 미소 균열을 발생시킬 수 있는 파괴에너지가 충분한 것으로 판단할 수 있다. 균열의 생성 및 진전을 확인하기 위해 인장응력이 발생한 부분의 손상정도를 확인할 수 있는 손상파라미터(DamageT)를 사용하였다. Fig. 2는 CEB-FIP(2010)에서

제시한 응력-균열폭 관계를 나타낸 그래프 이다. 인장응력이 예측인장강도에 도달하게 되면 균열이 생성되고 이후 진전됨에 따라 인장응력은 감소하며 완전히 균열이 진전되었을 때의 인장응력값은 0이 된다. 이때의 손상파라미터 값을 0.6 으로 설정하였고 이를 Damage Plasticity Model 에 적용시켜 SCDA에서의 균열 발생 및 진전시 필요한 팽창압을 유도하였다. 식 (5), (6) 은 CEB-FIP(2010)에서 제안한 식이며 f_{ctm} 는 콘크리트 예측인장강도, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, G_F 는 콘크리트 예측파괴에너지, f_{cm} 는 콘크리트 평균실험압축강도를 말한다.

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

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \tag{6}$$

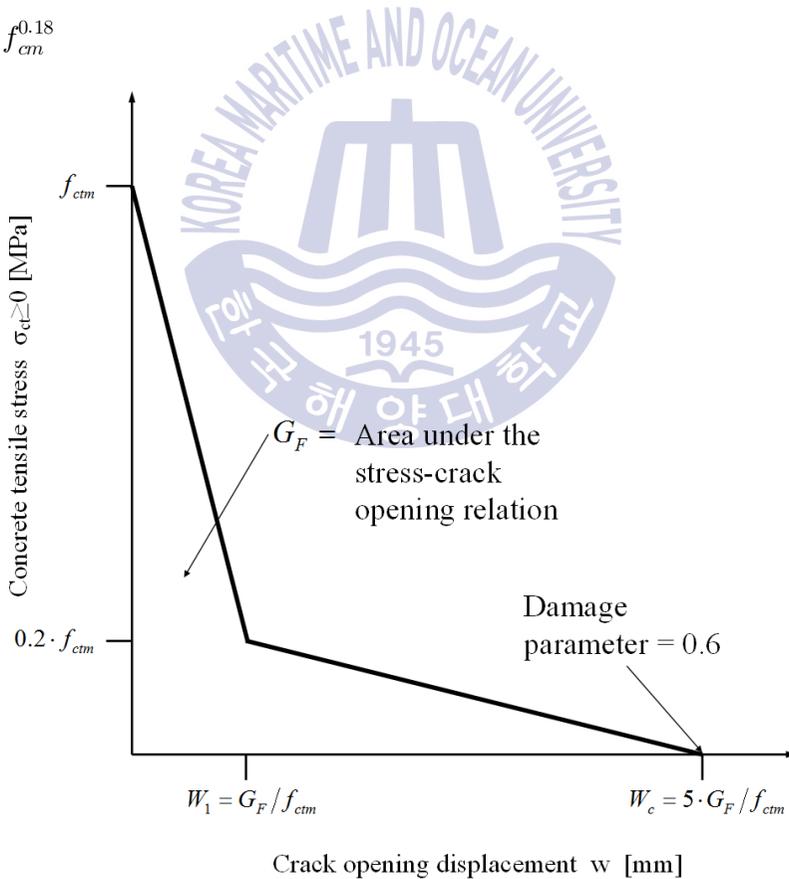


Fig. 2 Bilinear stress-crack opening curve

2.2 해석 영역 모델링

SCDA는 일반적으로 해체작업을 시행할 구조물에 구멍을 뚫고 여기에 물과 혼합하여 주입한다. 혼합된 SCDA는 서서히 팽창하고 그로인해 팽창압이 발생, 이를 이용하여 구조물의 해체가 가능하다. 이러한 해체과정을 유한요소해석으로 모사하기 위해 Abaqus를 이용해서 모델링 하였다. 실제 해체작업은 3차원이지만 구조물 및 SCDA의 모델링을 2차원 평면변형률 요소(CPE4)를 사용하여 2차원 문제로 단순화하였다. SCDA의 팽창을 표현하기 위해 열팽창계수($1 \times 10^{-11}/^{\circ}\text{C}$)를 적용시켜 온도하중을 시간에 따라 선형적으로 증가하도록 설정하였다. SCDA의 수화반응에 의한 팽창시 150°C 이상의 열을 발생시키나 이는 균열생성에 있어서 영향을 미치지 않으며 유한요소법을 통한 모델링시 SCDA의 팽창만을 모사하기 위해 열팽창계수를 부여하고 열하중을 주었을 뿐 균열진전 해석에 열하중이 미치는 영향 또한 없다. SCDA와 구조물의 접촉면에 면 대 면 접촉(Surface-to-Surface Contact)조건을 부여하여 SCDA의 팽창에 의해 구조물이 받는 팽창압을 도출하였다. SCDA의 팽창시 접촉조건에 의해 SCDA와 인접한 구조물의 요소들에 압력이 발생하게 되는데 각 요소들의 압력값의 평균을 팽창압으로 보았다. SCDA가 팽창함에 따라 팽창압 또한 서서히 증가하고 균열이 생성될 때 순간적으로 구조물에 전달되는 압력이 소멸하며 팽창압이 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이때 팽창압의 최대값을 균열생성이 가능한 최소 요구팽창압으로 판단하였다(Fig. 3).

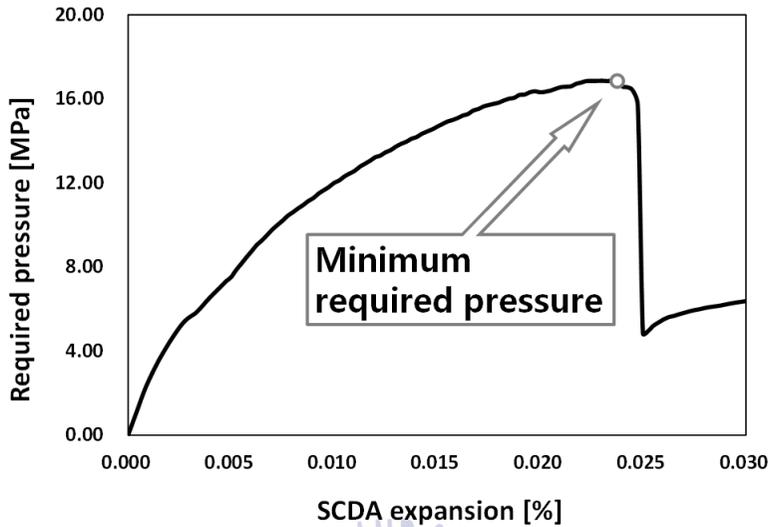


Fig. 3 Explanation of minimum required inflation pressure

구조물의 해체작업에 있어서 균열이 생성, 진전됨에 따라 동적에너지(Kinetic energy)의 발생은 필연적이거나 SCDA는 폭발성 물질이 아니므로 동적효과를 최소화 하는 것이 필요하다. Implicit로 해석을 하는 경우 준정적해석(Quasi-static)을 적용시켜 동적효과를 최소화 시킬 수 있지만 Explicit로 해석하는 경우 구조물의 밀도나 팽창속도에 따라 동적효과의 비중이 달라진다. 따라서 동적효과를 최소화하기 위해 Implicit를 이용한 해석을 기준으로 하였고, 불가능할 경우 Explicit를 사용하되 밀도 및 팽창속도에 따른 변수연구를 통해 적절한 값을 적용시켜 해석을 수행하였다.

2.3 선행 변수연구

Explicit해석에서 동적효과를 최소화하기 위해 동적에너지에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수인 구조물의 밀도와 SCDA에 부여하는 열팽창속도의 검증을 통해 동적에너지가 결과에 영향을 미치는가에 대한 선행연구를 실시하였다. 구조물의 형상은 바깥쪽 부분의 영향을 최소화하기 위하여 원형으로 설정하였고 직경이 0.4 m 인 구조물의 정중앙에 1개의 SCDA를 Fig. 4 와 같이 배치하여 팽창에 의한 균열진전을 유도하였다.

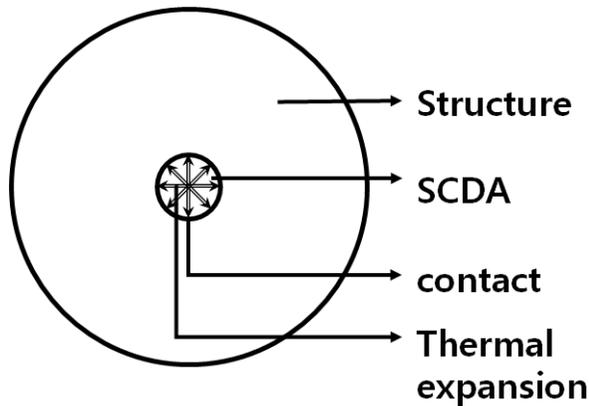


Fig. 4 The model of precede study

2.3.1 밀도에 대한 변수 연구

원형의 구조물에 1개의 SCDA를 정중앙에 배치하고 팽창속도를 동일하게 부여하여 해석을 수행하였다. 이때 실제 콘크리트의 밀도인 $2400\text{kg}/\text{m}^3$ 을 사용하여 해석을 수행시 Implicit 의 경우 동적효과의 제어가 가능하지만 Explicit 에서 는 제어방법이 없어 밀도가 결과값에 영향을 줄 것으로 예상되었다. 이러한 문제를 개선하기 위한 방법으로 Explicit 에서 구조물과 SCDA의 밀도를 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 와 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 로 줄여서 설정하고 구조물에 전달되는 팽창압과 균열이 일어나기 직전의 주응력을 확인하였다. Fig. 5 는 각각의 밀도에 대해 선형적으로 온도하중을 부여하였을 때의 팽창압을 나타낸 그래프이다. SCDA의 팽창에 의해 구조물에 전달되는 팽창압은 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 점차적으로 증가하다 균열이 발생하는 순간 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 각각의 밀도에 대해 최소 요구팽창압에는 큰 차이가 없어 해석결과에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었으나 이 값에 도달할 때 까지 걸리는 시간이 밀도가 작을수록 빨라지는 것을 확인하였다. 즉, 실제 콘크리트 밀도인 $2400\text{kg}/\text{m}^3$ 를 사용해도 동적효과 는 미미하지만 해석시간의 단축을 위해 Explicit 에서 해석수행시 최소요구팽창압에 영향을 미치지 않는 범위에서 가장 낮은 밀도인 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 를 사용하였다.

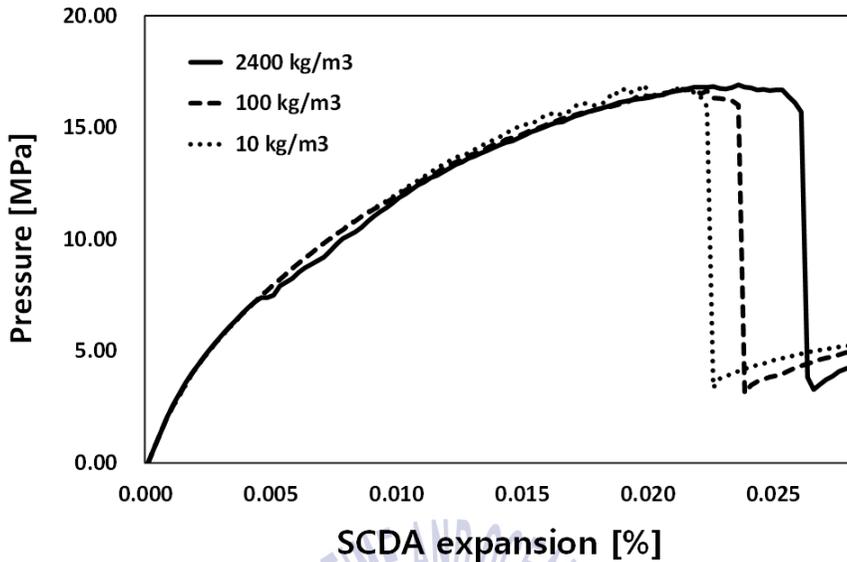


Fig. 5 The required pressure depending on mass density

2.3.2 팽창속도에 대한 변수 연구

Fig. 6 은 2.3.1 장에서 밀도가 10 kg/m^3 인 해석모델에 SCDA의 팽창속도를 각각 5000°C/s , 10000°C/s , 15000°C/s , 20000°C/s , 30000°C/s 로 설정하여 해석을 수행한 결과를 나타낸 그래프이다. 팽창속도에 대한 최소요구팽창압의 변화가 20000°C/s 까지는 크게 변화가 없는 것으로 확인되었다. 이후 가장 안정적인 5000°C/s 를 기준으로 연구를 진행하고 균열의 생성 및 진전이 어려울 것으로 판단되는 모델에 대해서는 팽창속도를 올리되 그 최대값을 20000°C/s 로 설정하였다.

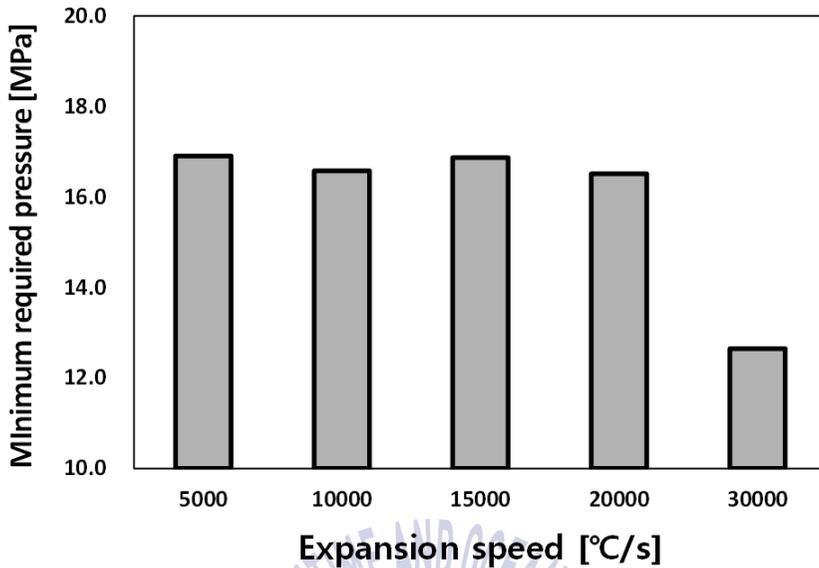


Fig. 6 The required pressure depending on expansion speed

2.3.3 동적효과 검증

동적에너지가 결과에 영향을 미치는가에 대한 검증을 위해 2.3.1장, 2.3.2장에서 나타난, 결과에 영향을 미치지 않는 변수의 최대값인 밀도 2400 kg/m^3 , 팽창 속도 $20000\text{ }^\circ\text{C/s}$ 를 적용한 원형의 구조물에 대한 수치해석을 수행하고 이때 시간에 따른 전체에너지와 동적에너지를 비교하여 동적에너지가 차지하는 비율을 알아보려고 하였다. Fig. 7 은 시간에 따른 전체에너지를, Fig. 8 은 동적에너지를 나타낸 그래프이다. 전체에너지는 시간이 갈수록 증가하는 것을 알 수 있었고, 동적에너지는 일정 시간대에 값이 최대치에 도달한 후 감소하는 것을 알 수 있었다. 동적에너지가 최대치에 도달하는 시간은 초기 균열이 생성, 진전되는 순간으로 이때 전체에너지에 대한 동적에너지의 비율은 0.000375% 로 전체에너지 대비 동적에너지의 값은 매우 작은 것으로 나타났다. SCDA의 팽창에 의한 동적에너지의 생성은 균열이 생성, 진전될 때에 크게 나타나지만 전체에너지에 비하면 그 값이 미미하므로 준정적상태를 잘 표현, 모사하고 있음을 확인하였다.

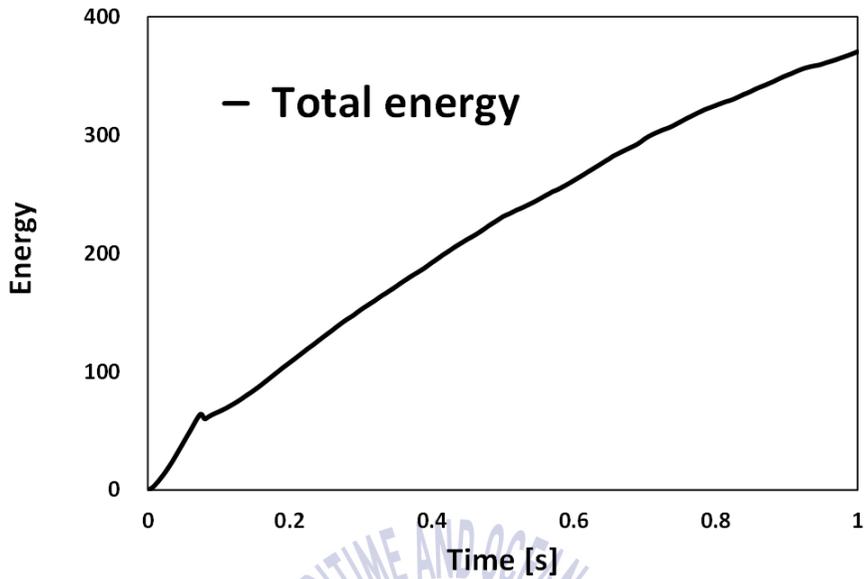


Fig. 7 Total energy according to time

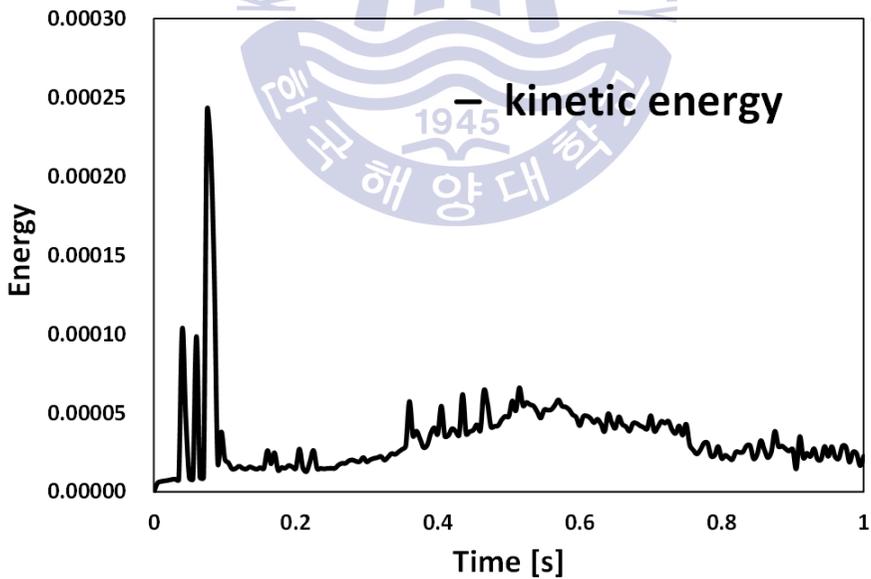


Fig. 8 Kinetic energy according to time

제 3 장 원형구조물에서의 균열진전 해석

2장에서 검증한 모델을 토대로 다양한 변수에서의 균열진전해석을 수행하였다. 먼저 구조물 바깥부분의 구속정도에 대한 해석을 통해 구속조건과 균열의 관계를 알아보았고, 다음으로 구조물의 크기와 SCDA의 개수를 각각 증가시키면서 균열진전에 대한 특성을 알아보았다.

3.1 구속조건에 대한 균열진전 해석

구조물의 형태와 크기는 직경 0.4 m, 1.0 m 인 원형으로 설정하고 SCDA의 직경은 0.038 m 인 조건에서 구속조건의 정도에 의한 균열의 진전양상을 확인하기 위해 원형 구조물의 외곽 부분에 변위 구속조건을 Fig. 9 와 같이 25%, 50%, 75% 로 부여하여 구속조건이 없는 경우와 각각의 경우를 비교 분석 하였다.

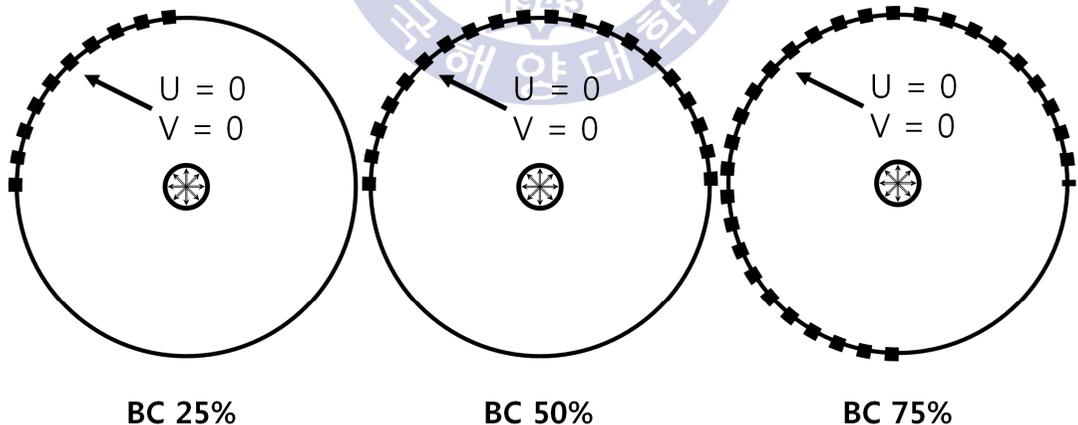


Fig. 9 Three different boundary conditions varying the portion of fixed boundary

Fig. 10 은 직경이 0.4 m, 1.0 m 인 구조물에서 구속조건의 정도에 따른 균열 진전의 결과를 나타낸 그림이다. 구속이 되어있는 방향으로 균열의 진전이 일어나지 않음을 확인할 수 있다. 구속조건이 50% 인 경우 0.4 m 의 구조물에서는 구속조건을 부여한 방향의 반대방향으로 균열진전 후 이와 수직한 방향으로 추가균열이 진전되어 2개의 분리된 조각으로 나누어졌고 1.0 m 의 경우 초기 균열의 방향이 좌우로 나누어지는 형태로 균열이 진전되었다. 구속조건이 25%, 75% 의 경우 0.4 m 와 1.0 m 의 균열은 유사하게 진전되었다. 모든 해석 모델에서 균열이 구속조건을 부여한 부분을 피해서 진전되는 것을 확인하였다.

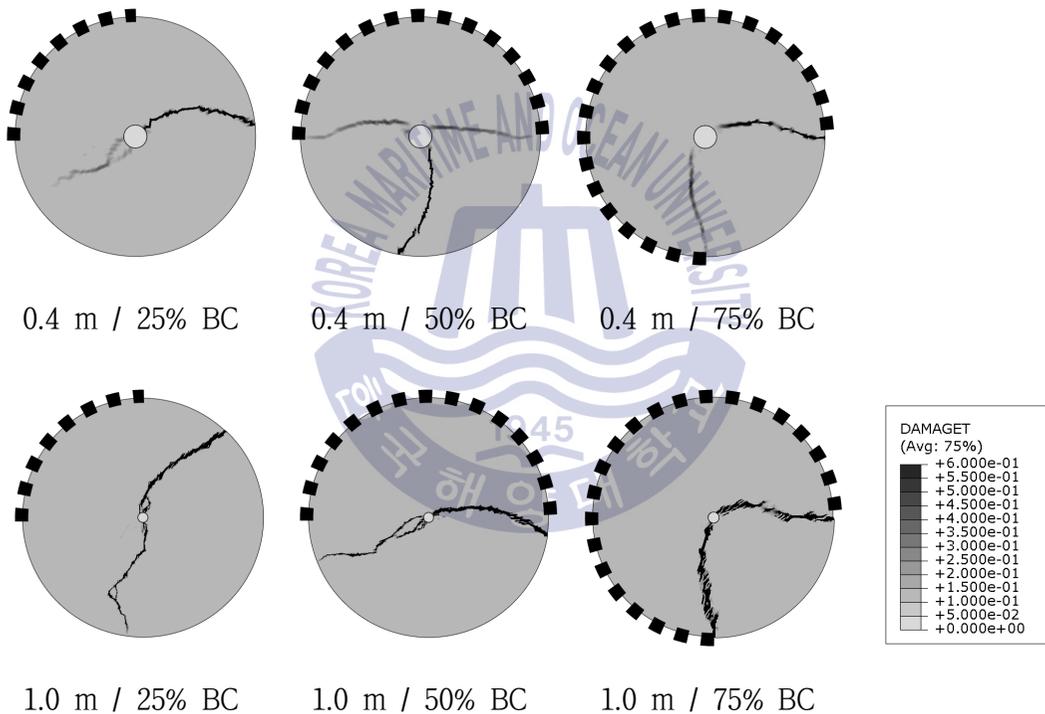


Fig. 10 Crack path of fixed boundary structure

Fig. 11 은 구속조건의 범위가 넓어짐에 따른 최소요구팽창압을 나타낸 그래프이다. 구속조건이 점차 과도하게 설정이 되면 최소요구팽창압의 값이 증가하는 경향을 보이기는 하나 그 차이는 미미하다는 것을 확인하였다.

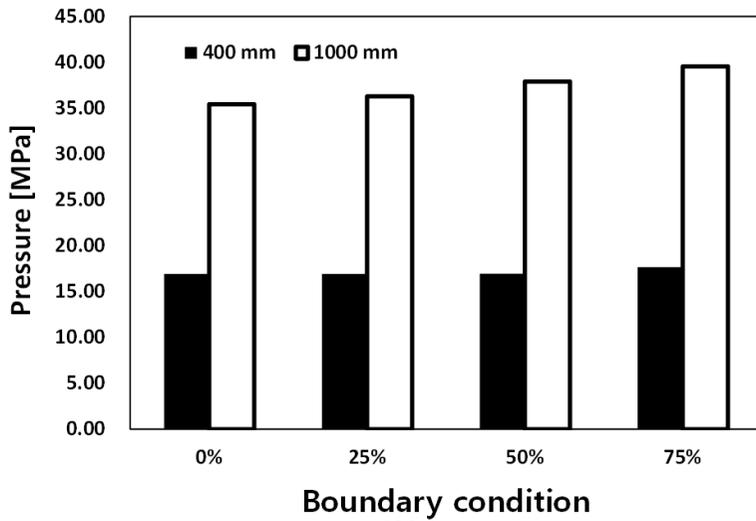


Fig. 11 The required pressure depending on boundary condition

Fig. 12 는 구조물의 크기가 1.0 m 인 해석모델에서 온도변화에 따른 최소요구 팽창압을 나타낸 그래프 이다. 구속조건이 점차적으로 많아짐에 따라 균열의 생성 시기가 앞당겨 지는 것을 확인할 수 있었다.

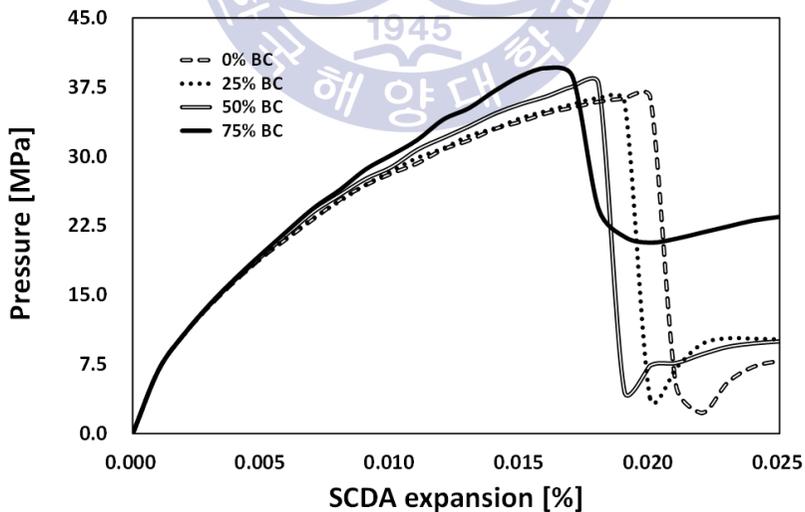


Fig. 12 Pressure history of 1 m structure

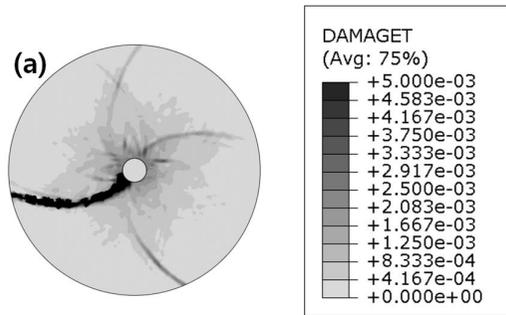
SCDA를 사용하여 구속조건이 부여된 구조물 해체시 균열의 진전은 구속조건에서 자유로운 방향으로 진전되고, 이때 최소요구팽창압은 크게 달라지지 않음을 확인하였다.

3.2 구조물의 크기에 따른 균열진전 해석

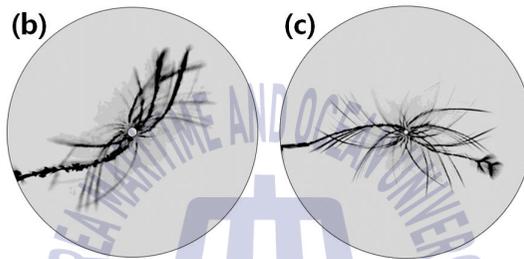
구조물의 크기를 직경이 각각 0.4 m, 1.0 m, 2.0 m, 5.0 m 그리고 10.0 m 인 원형으로 모델링하고 정중앙에 크기가 0.038 m 인 SCDA 1개를 배치 후 팽창시켜 구조물의 크기에 대한 변수연구를 실시하였다. Table 1 은 SCDA에 의한 균열진전시 구조물의 크기에 따른 최소요구팽창압을 나타낸 표이고 Fig. 13 은 균열진전의 형상을 나타낸 것이다. 구조물의 크기에 비례하여 최소요구팽창압이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 14 는 구조물의 크기에 따른 최소요구팽창압의 경향을 나타낸 그래프이다. 균열이 생성될 때 요구되는 최소요구팽창압은 구조물이 커질수록 증가하나 구조물의 크기가 10 m 이상 커질 경우 일정값에 수렴한다고 볼 수 있다. 즉, 구조물의 크기가 10 m 이상이 될 경우 크기에 의한 영향이 감소하였다고 볼 수 있으며, 이때 SCDA의 팽창에 의한 균열진전시 구조물의 크기를 변수에서 상수로 설정 가능한 것으로 확인되었다.

Table 1 Required pressure depending on structure size

Structure size [m]	Required pressure [MPa]
0.4	16.9
1.0	35.4
2.0	60.4
5.0	87.3
10.0	104.7

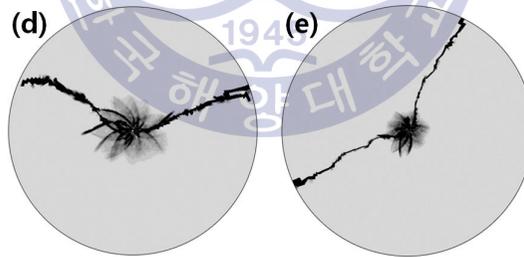


(a) 0.4 m



(b) 1.0 m

(c) 2.0 m



(d) 5.0 m

(e) 10.0 m

Fig. 13 Damaged configurations depending on the size of structure

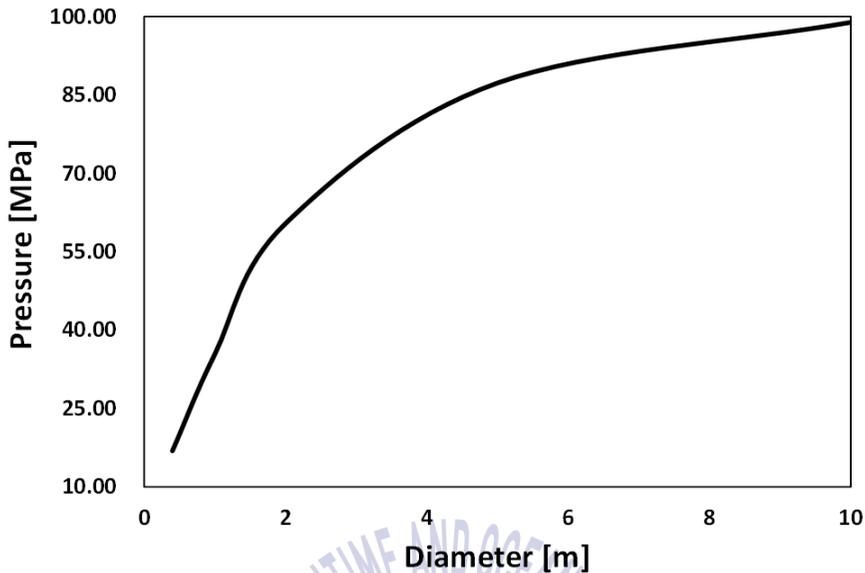
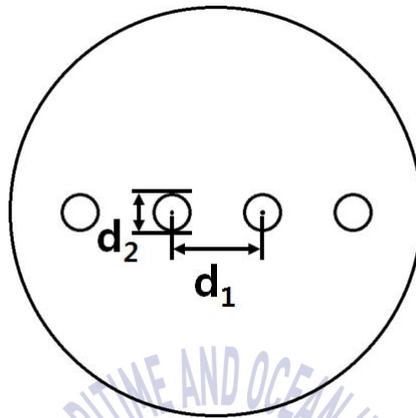


Fig. 14 The required pressure depending on the structure dimension

3.3 SCDA의 개수에 따른 균열진전 해석

SCDA에 의한 균열진전시 Fig. 14 에서 볼 수 있는 것처럼 구조물의 크기가 10 m 이상일 때 최소요구팽창압에 영향이 적은 것으로 판단되었다. 따라서 이번 장에서의 해석 수행시 구조물의 크기를 10 m 로 설정하고 해석을 수행하였다. Fig. 15 는 직경이 10.0 m 인 구조물에 SCDA의 배치를 도식화한 것이다. 원형의 구조물에 다수의 SCDA를 중심선상에 등간격으로 배치하여 SCDA간의 상호작용에 의한 균열진전에 대해 알아보았다. SCDA를 등간격으로 배치할 경우 구조물 바깥 부분과의 거리가 3.2장에서 확인하였던 5 m 에 비해 매우 짧은 거리지만 다수의 SCDA를 배치함으로써 구조물 외곽부분과의 작용보다 SCDA의 상호작용이 더 지배적이므로 구조물 외곽부분과의 작용을 무시할 수 있다. Table 2 는 균열이 일어날 때의 최소요구팽창압의 평균값과 SCDA간의 거리(d_1)를 직경(d_2)으로 나눈 값을 SCDA 의 개수별로 정리한 표이고 Fig. 16 은 d_1/d_2 값에 대한 최소요구팽창압을 그래프로 표현한 것이다. SCDA의 개수가 많아질

수록 최소요구팽창압의 값은 지수함수의 그래프를 그리며 감소하고 d_1/d_2 의 값이 증가할수록 최소요구팽창압의 값은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.



d_1 = distance between each SCDA
 d_2 = SCDA diameter

Fig. 15 Description of 10.0 m structure

Table 2 Result of required pressure each the number of SCDA in 10 m structure

Number of SCDA	Required pressure [MPa]	d_1/d_2
1	98.9	2.603
2	84.6	2.228
3	71.8	1.890
4	67.0	1.764
5	58.4	1.537
10	36.6	0.964
20	20.6	0.541
30	14.0	0.368

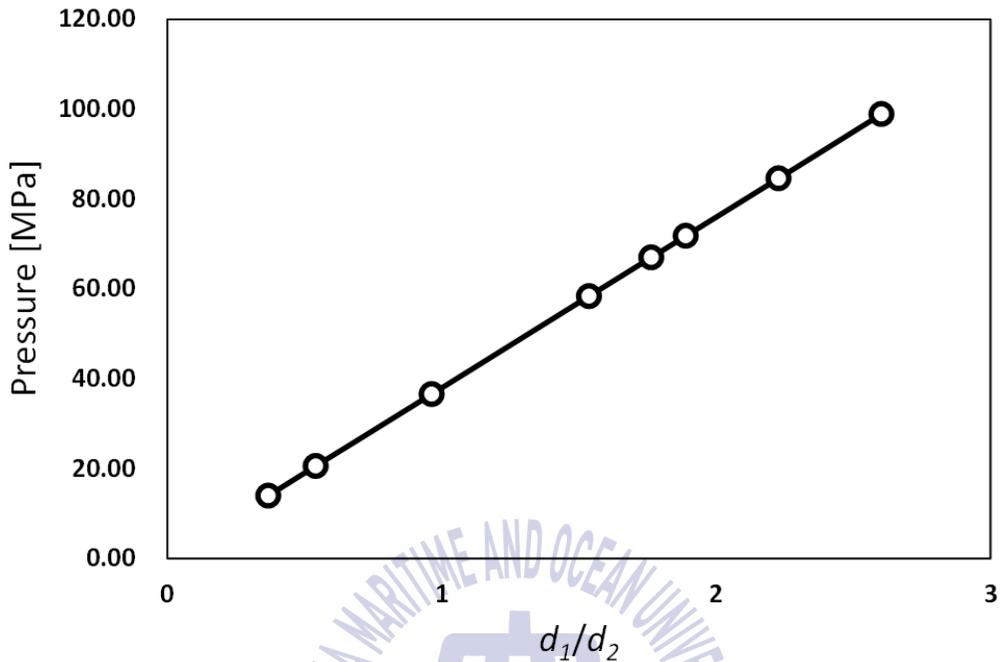


Fig. 16 Required pressure depending on d_1/d_2

균열의 생성 및 진전의 경우 구조물 안쪽의 SCDA에서 먼저 생성되고 마지막에 구조물 바깥쪽으로 균열이 진전되었고 이는 Fig. 17 을 통해 확인할 수 있다. Fig. 18 은 SCDA를 20개와 30개를 배치하여 해석 후 최소요구팽창압을 각 SCDA별로 나타낸 그래프이다. 구조물의 바깥쪽 부분과 가장 가까운 SCDA의 최소요구팽창압이 가장 높게 나왔고 균열의 생성 역시 구조물 안쪽의 SCDA에서 먼저 생성되고 마지막에 구조물 바깥쪽으로 균열이 진전되었다.

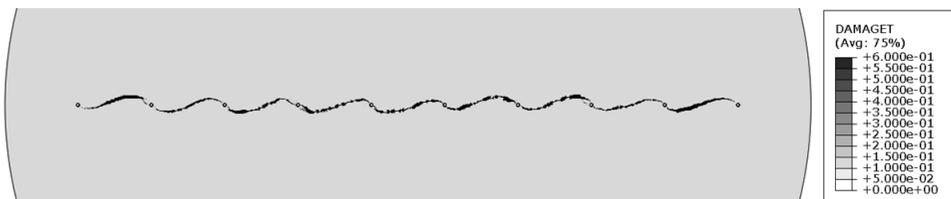


Fig. 17 Crack path of 10.0 m structure with 10EA SCDA

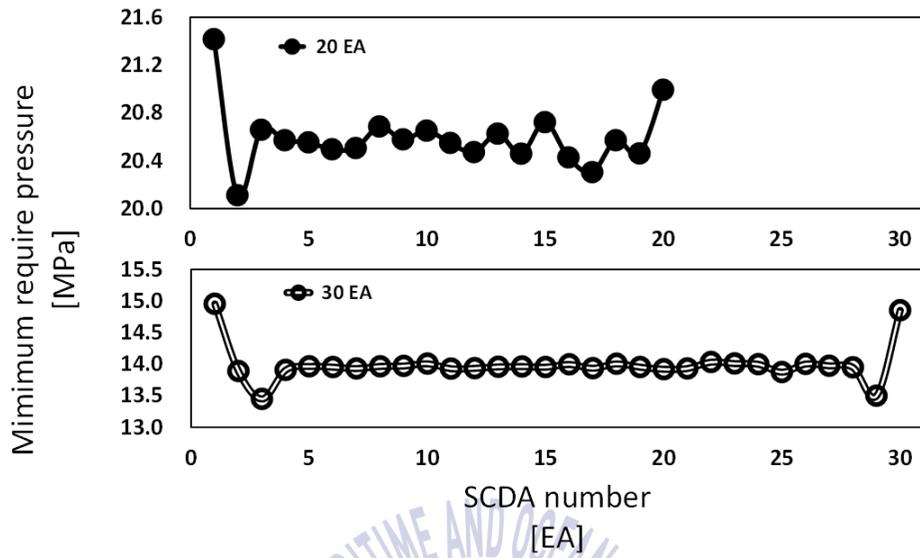
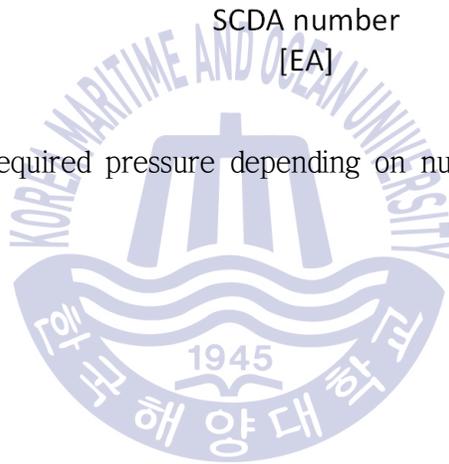


Fig. 18 The required pressure depending on number of SCD



제 4 장 반무한 구조물에 대한 균열진전 해석

대형 구조물에 대한 해석을 수행함에 있어 유한요소만을 사용한 모델링에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 4장에서는 앞서 수행한 여러 연구를 바탕으로 무한요소를 도입하여 대형구조물의 한쪽부분을 무한히 존재한다고 가정한 반무한 구조물을 모델링하여 균열진전해석을 수행하고 SCDA간의 상호작용과 SCDA와 구멍간의 상호작용에 대한 연구를 진행하였다.

4.1 반무한 구조물의 모델링

무한요소는 유한요소해석에서 해석대상인 구조물이 한쪽 방향으로 무한히 존재한다고 묘사하는 것으로 하나의 요소에서 두 절점간의 거리가 무한하도록 수학적으로 보간하는 방법이다. 무한요소를 적용시킬 때 확인할 점이 몇 가지 있다. 첫째로 유한요소영역의 일정한 크기 이다. 무한요소를 사용하여 무한도메인을 묘사하고 해석을 수행한다고 해도 적절한 크기의 유한요소영역이 존재하지 않으면 정확한 해석결과를 도출해낼 수 없다. 둘째로 유한요소와 무한요소의 연결성(Astly and Hamilton, 2006)을 확보해야 한다. Fig. 19 와 같이 유한요소와 무한요소가 만나는 부분의 연결성을 확보하여 수학적 보간이 쉽게 일어날 수 있도록 하여야 한다.

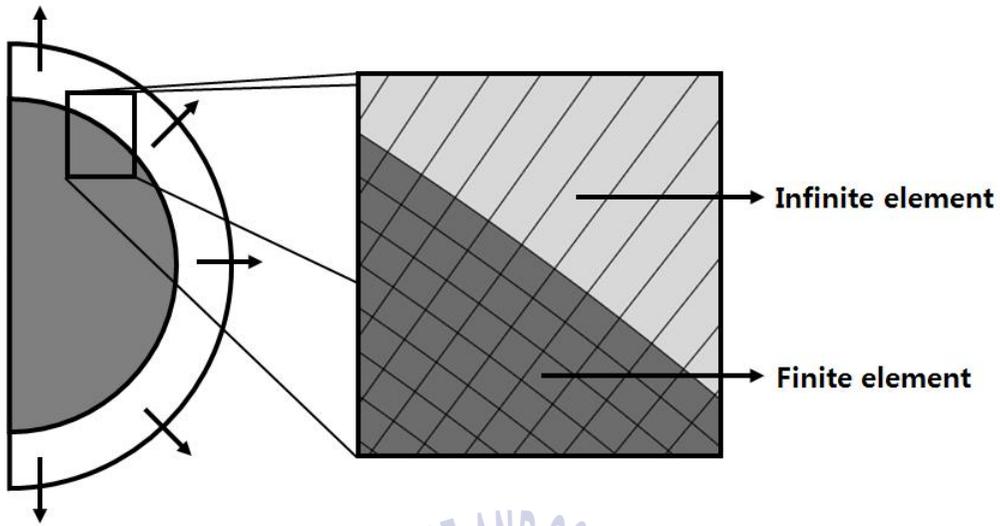


Fig. 19 Connectivity between infinite elements and finite elements

4.1.1 유한요소 도메인 선정

먼저 무한요소를 적용시킬 유한요소영역의 적절한 크기를 선정하기 위한 해석을 수행하였다. Fig. 20 과 같이 자유단과 팽창제 간의 거리를 1 m 로 고정하고 반원형인 유한요소영역에서 반지름을 5 m 부터 60 m 까지 점차적으로 증가시키면서 균열 발생 및 진전특성과 최소요구팽창압의 값을 비교하는 연구를 시행하였다.

Table 3 은 유한요소영역의 반지름에 따른 균열발생을 위한 최소요구팽창압을 나타낸 것이다. 최소요구팽창압의 경우 20 m 에서부터 72.34 MPa 로 수렴하는 것으로 나타났다. 하지만 균열진전의 경우 Fig. 21 에서 확인할 수 있듯이 도메인 크기가 40 m 이상에서부터 동일한 경로로 균열이 발생하였다. 유한요소영역의 크기가 40 m 이상일 경우 이에 대한 영향이 줄어들어 결과가 수렴하는 것으로 판단되었고 이후 해석시간단축과 연구 효율성 향상을 위해 유한요소영역의 최소크기인 40 m 로 선정하여 해석을 수행하였다.

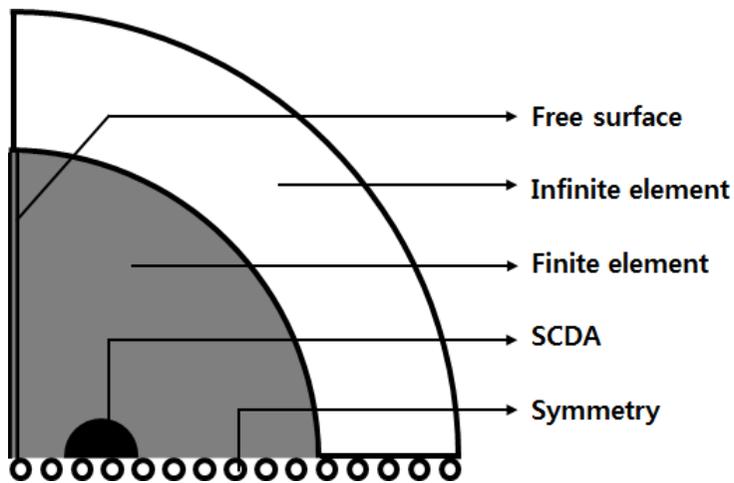


Fig. 20 Analysis domain using the symmetry

Table 3 Required pressure depending on domain size

Domain size [m]	Minimum requirement expansion pressure [MPa]
5	70.73
10	71.83
20	72.34
30	72.39
40	72.41
50	72.41
60	72.42

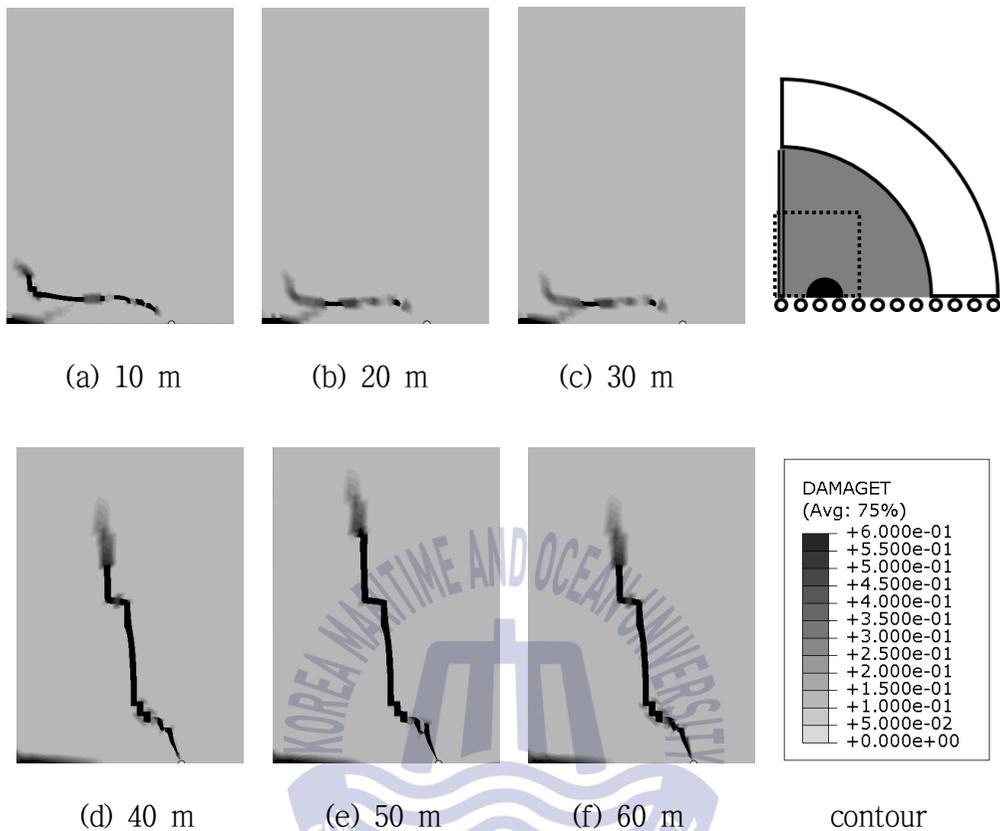


Fig. 21 Crack paths of various size domains

4.2 SCDA의 배치

SCDA간의 상호작용에 의한 균열진전을 알아보기 위해 4.1.1장에서 선정한 도메인을 기준으로 해석을 진행하였다. 2개의 SCDA를 자유단과 평행, 수직한 방향으로 배치하고 SCDA간의 간격을 조절하여 균열이 생성될 때의 최소요구팽창압과 균열진전을 알아보았다.

4.2.1 자유단과 평행한 방향으로 2개의 SCDA 배치

4.1.1장에서 확인한 유한요소영역의 크기(40 m)를 바탕으로 팽창제를 자유단에서부터 1 m 띄운 상태에서 자유단과 평행한 방향으로 2개를 배치하고 팽창

제간의 거리를 1 m , 2 m , 2.5 m , 3 m , 4 m 로 점차적으로 늘려가면서 균열진전의 형태를 알아보는 해석을 진행하였다. 팽창제간의 거리가 2 m 까지는 팽창제 간의 상호작용으로 인하여 팽창제 사이에 균열이 이어짐을 Fig. 22(a) 에서 확인할 수 있고, 2.5 m 에는 상호작용이 점차 약해지면서 균열이 연결되지 않음을 보였으며 3 m 이상부터는 두 팽창제 간의 간섭이 사라져 균열이 이어지지 않음을 Fig. 22(b) 에서 확인할 수 있다.

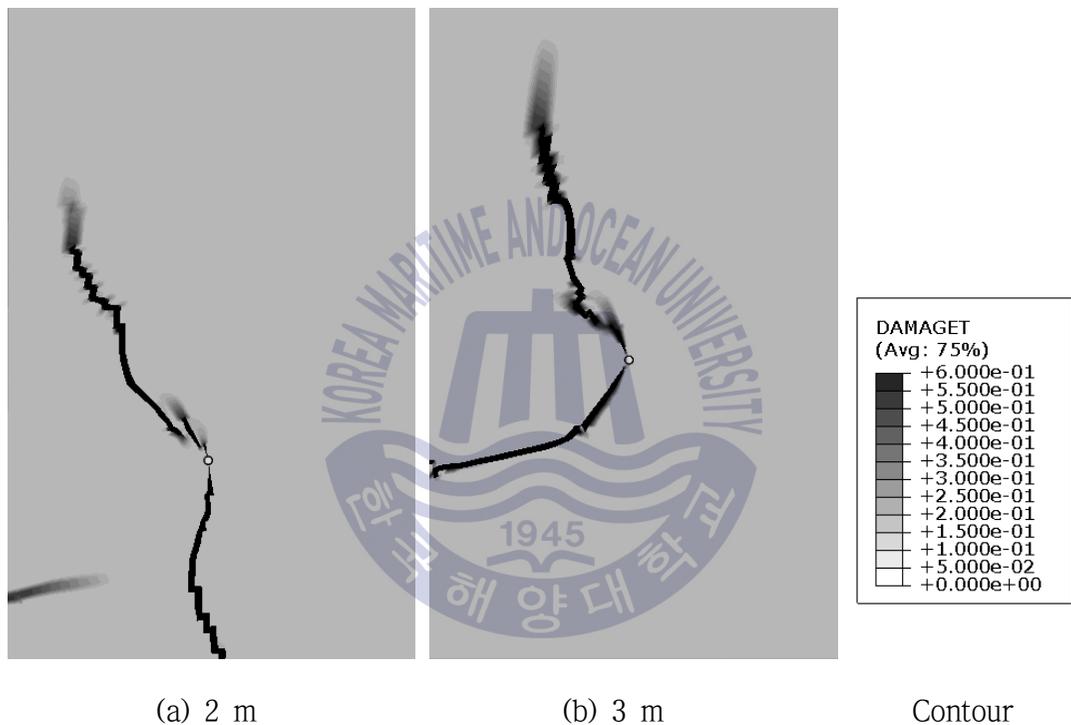
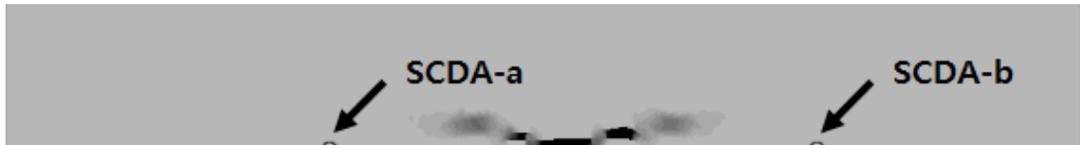


Fig. 22 Crack path depending on vertical distance between two SCDA

4.2.2 자유단과 수직한 방향으로 2개의 SCDA 배치

SCDA 1개를 자유단에서 1 m 떨어진 곳에 배치, 고정하고 도메인 안쪽 방향으로 SCDA를 1개를 추가 배치할 때 두 SCDA간의 거리를 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m, 4 m로 조절해가면서 해석을 수행, 균열진전의 형태를 알아보았다. 자유단에서 1 m 떨어진 곳에 배치한 SCDA를 SCDA-a 로, 거리를 조절할 SCDA를

SCDA-b 로 지정하였다. 1.5 m 까지는 두 SCDA 사이에 균열이 먼저 발생한 후 SCDA-a 에서 자유단 방향으로 균열이 일어난 것을 Fig. 23(a) 와 (b) 에서 확인할 수 있으며 2 m 부터는 SCDA-a 에서 자유단 방향으로 균열이 먼저 진전된 후, SCDA 사이에 균열이 발생한 것을 Fig. 23(c) 와 Fig. 23(d) 에서 확인할 수 있다.



(a) 1.5 m (First crack path between SCDA-a and SCDA-b)



(b) 1.5 m (Second crack path from SCDA-a to free surface)



(c) 2 m (First crack path from SCDA-a to free surface)



(d) 2m (Second crack path between SCDA-a and SCDA-b)

Fig. 23 Crack path depending on horizontal distance between two SCDAs

자유단과 1 m 떨어진 부분에서 2개의 SCDA를 이용하여 균열을 진전시킬 경우 자유단과 평행한 방향으로 2 m, 자유단과 수직인 방향으로 1.5 m 이내로 SCDA를 배치해야 상호작용으로 인해 SCDA사이의 균열이 먼저 진전되었다. 이후 이 거리를 Table 4 와 같이 정규화 하여 표현할 것이다.

Table 4 Normalization between each SCDA distance

Distance between SCDA that is parallel to the free surface	distance	normalized
v	2 m	1
Distance between SCDA that is vertical to the free surface	distance	normalized
h	1.5 m	1

4.3 구멍의 배치

실제 발파시 파손을 피해야 되는 부분에 균열이 발생하는 것을 막기 위해 균열진전의 제어가 필요하다. 그러나 Fig. 24 에서 볼 수 있듯이 SCDA의 팽창에 의한 주응력은 균일하게 증가한다. 이처럼 SCDA 만을 이용한 균열진전은 초기 균열의 발생위치를 예측하기 힘들어 목표한 형상으로 균열을 진전시키기 어렵다. 이를 해결하기 위해 SCDA 주변에 구멍을 추가로 배치하여 초기균열발생위치를 유도하였다.

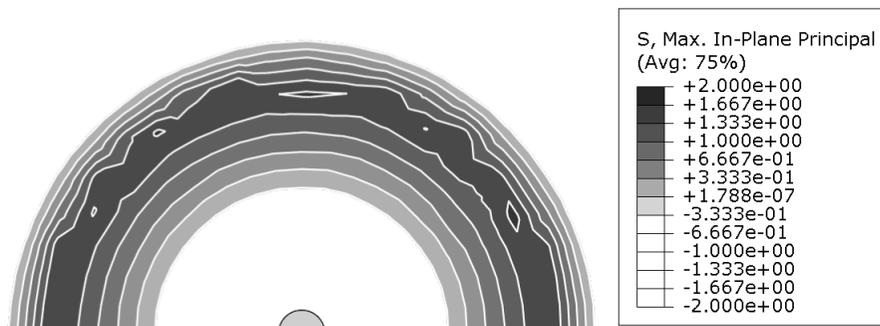


Fig. 24 Principal stress distribution during SCDA expansion

Fig. 25 와 같이 SCDA 주변에 구멍을 배치하게 되면 SCDA의 팽창에 의한 주응력이 구멍에 집중되어 균열이 먼저 생성되고, 방향은 팽창제에서부터 구멍의 방향으로 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

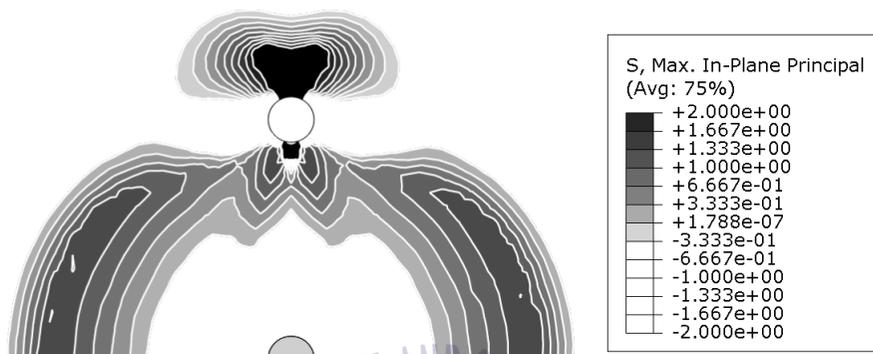


Fig. 25 Principal stress distribution during SCDA expansion with empty hole

이를 근거로 초기 균열의 방향을 제어하기 위해 SCDA와 동일한 직경을 가진 구멍을 배치하여 균열의 진전을 유도하고 최소요구팽창압의 변화를 알아보았다.

4.3.1 자유단과 평행한 방향으로 2개의 구멍 배치

4.1.1장에서 선정된 도메인에서 자유단과 평행한 방향으로 먼저 균열을 내보 고자 하였다. SCDA 1개를 자유단에서 1 m 떨어진 곳에 배치하고 SCDA 위 아 래에 구멍을 배치할 때 SCDA-구멍 사이의 거리를 0.1 m 부터 1 m 까지 0.1 m 간격으로 배치하여 해석을 수행하였다.

구멍을 뚫어 해석을 진행할 경우 SCDA-구멍 간의 거리가 0.1 m 부터 0.6 m 까지는 SCDA의 팽창에 의한 주응력이 구멍에 충분히 집중되었다. 이로 인하여 Fig. 26(a) 에 2개의 균열은 초기균열이 제어가 된 자유단과 평행한 방향으로 초기균열 진행 후 자유단방향으로 추가균열이 진행됨을 확인할 수 있었다. 이 때 Fig. 27 에서 알 수 있듯이 최소요구팽창압은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 26(b) 는 SCDA-구멍 간의 거리가 0.7 m 이상일 경우의 균열진전 결 과이고 이때 구멍으로 균열의 유도가 되지 않았으며 최소요구팽창압 또한 구멍

이 없을 때와 같은 결과를 나타내었다.

SCDA와 구멍 사이의 거리가 0.7 m 이상으로 증가할 경우 SCDA의 팽창에 의한 응력집중이 구멍에 집중되지 않았고 이로 인해 자유단과 평행함 방향으로 진전되어야 할 균열이 구멍의 균열진전억제로 인하여 구조물 안쪽으로 균열이 전전되는 것을 확인할 수 있었다. 구멍을 SCDA의 반경 0.7 m 이상으로 배치할 경우 균열진전의 억제가 가능한 것이 확인되었다.

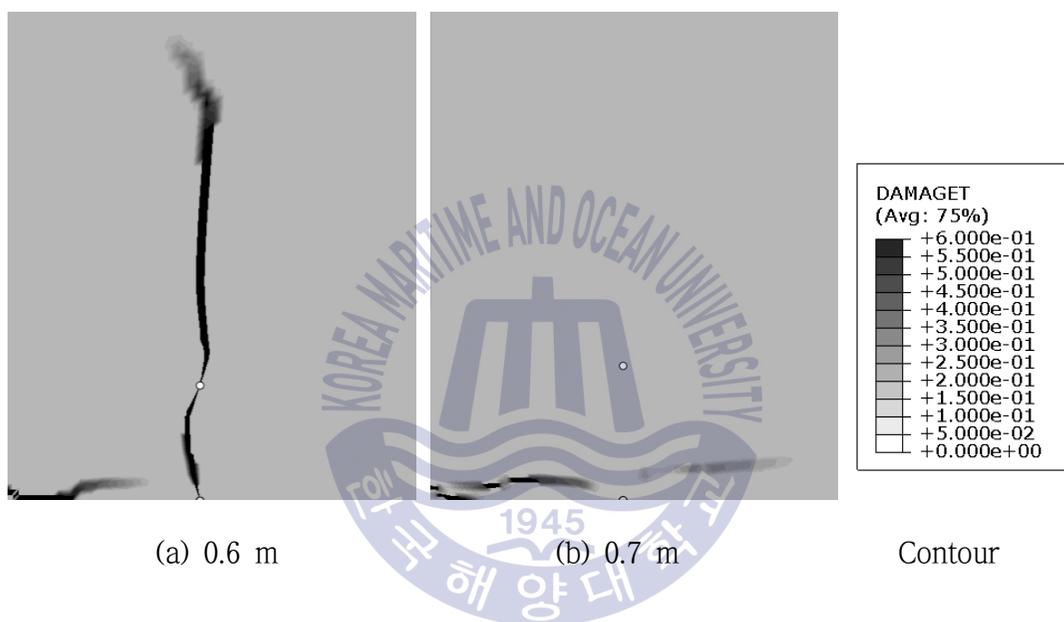


Fig. 26 Effect of an empty hole in a vertical position at the SCDA

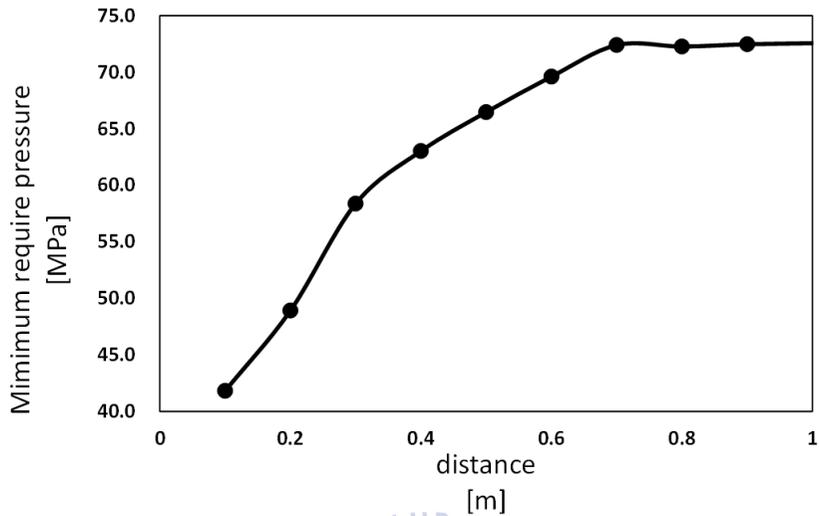
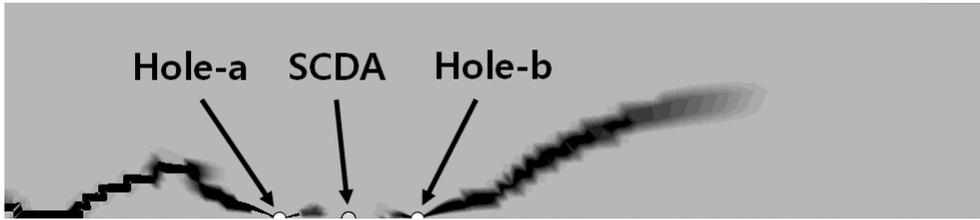


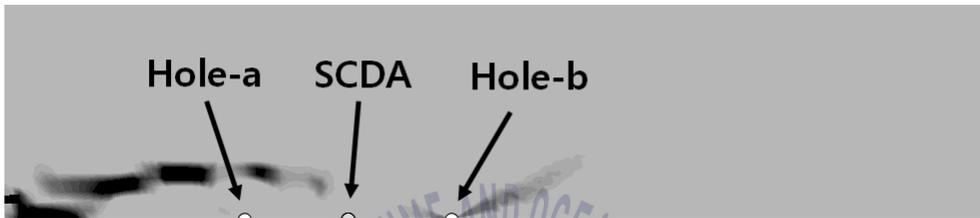
Fig. 27 Changes in required pressure with respect to the distance

4.3.2 자유단과 수직한 방향으로 2개의 구멍 배치

자유단과 수직한 방향으로 구멍을 배치하여 균열을 제어하고자 하였다. 4.1.1 장에서 선정한 도메인에 SCDA 1개를 자유단에서 1 m 떨어진 곳에 배치하고 구멍 2개를 SCDA의 좌우 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m 로 배치하여 해석을 수행하였다. SCDA를 기준으로 자유단쪽 구멍을 Hole-a, 구조물 안쪽 구멍을 Hole-b 로 지정하였다. SCDA와 구멍간의 거리가 0.2 m 의 경우 균열유도가 되었으나(Fig. 28(a)) 0.3 m 부터는 Hole-a 를 피해서 균열이 진전되는 것이 확인되었다(Fig. 28(b)). 이때 최소요구팽창압은 0.2 m 일때 72.94 MPa, 0.3 m 일때 72.95 MPa 로 구멍이 없을 때와 비교해서 큰 차이가 없었다. Fig. 21(d) 의 결과에서 볼 수 있듯이 자유단 방향으로 균열이 먼저 일어나는 모델에 Hole-a 를 추가해서 균열진전의 경향을 알아본 이번 해석에서는 최소요구팽창압과 균열진전의 제어에 대해 큰 이득을 볼 수는 없었지만 Fig. 28(b) 의 결과에서 볼 수 있듯이 SCDA 기준, 자유단과 수직한 방향으로 0.3 m 이상에 구멍을 배치하면 자유단과 평행한 방향으로 0.7 m 이상에 구멍을 배치 한 것과 같이 균열의 진전을 억제하는 것으로 판단되었다.



(a) Empty hole 2EA (0.2 m)



(b) Empty hole 2EA (0.3 m)

Fig. 28 Effect of empty hole in a horizontal position at the SCDA

SCDA 주변의 적절한 거리 즉, 자유단과 평행한 방향으로 0.2 ~ 0.6 m, 자유단과 수직인 방향으로 0.2 m 거리에 구멍을 배치하여 균열진전해석을 수행하였을 경우 SCDA의 팽창에 의한 주응력이 구멍 주변에 집중되어 초기균열을 유도하였으며 특히 자유단과 평행한 방향으로 구멍을 배치하였을 경우 최소요구팽창압이 감소함을 보였다. 자유단과 수직, 평행한 방향 모두 0.2 m 일 때 초기균열의 방향을 유도할 수 있음을 확인하였고 이를 근거로 SCDA-구멍 간의 거리를 0.2 m 로 설정하여 연구를 진행하였다.

제 5 장 균열 형상 및 진전 제어

선정된 도메인 및 SCDA-구멍간의 거리 등 4장까지 나온 결과를 토대로 SCDA와 구멍의 배치를 변경하여 균열형상을 제어하고자 하였다.

Table 4 에서 정규화한 SCDA 간의 거리를 근거로 하여 Fig. 29, 32 와 같이 2가지 모델을 만들어 해석 수행 후 몇 개의 SCDA를 제거한 결과와 비교해보고 마지막으로 구멍을 추가하여 최종적으로 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열을 진전시켜 구조물을 해체시키는 것을 목표로 해석을 수행하였다.

5.1 SCDA 9개의 배치에 의한 영향 (Case 1)

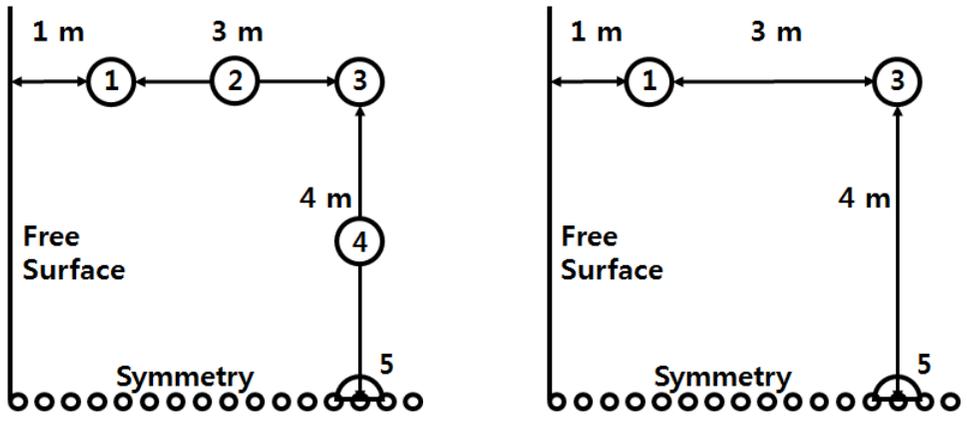
4 m × 8 m 의 공간에 9개의 SCDA를 Fig. 29(a) 의 형태로 배치하고 이를 Case 1 의 초기모델로 선정하였다. 초기모델을 토대로 Fig. 29(b) 와 같이 2,4,6,8번, 총 4개의 SCDA를 제거한 해석결과를 최소요구팽창압과 균열진전 형상의 변화를 확인하였다. 초기모델의 경우 최소요구팽창압은 61.45 ~ 68.02 MPa 로 나왔으며 균열의 진전은 Fig. 30(a) 처럼 ‘ㄷ’ 자 형태로 나타나는 것이 확인되었다. Fig. 31 은 SCDA 1개를 자유단과 4 m 떨어진, 즉 Fig. 29 에서의 5번 SCDA와 동일한 위치에 배치하고 해석을 수행하여 나온 균열진전결과이다. Fig. 31 에서의 최소요구팽창압은 167.24 MPa 로 나왔으나 Fig. 29(a) 에서 4,6번 SCDA의 상호작용으로 인해 68.02 MPa 로 나왔다.

SCDA를 Fig. 29(b) 에 나타낸 것처럼 4개를 제거한 경우 최소요구팽창압은 1번 SCDA에서 70.45 MPa, 3번 SCDA에서 107.47 MPa, 5번 SCDA에서 110.49 MPa 로 나왔으며 균열의 진전은 목표로 했던 ‘ㄷ’ 자로 나지 않았고 자유단과 가장 가까운 1번과 9번 SCDA에서 구조물의 바깥방향으로 균열이 진전됨을 알 수 있었다.

4.3.1 장에서의 결과를 토대로 3,5번 SCDA의 최소요구팽창압을 줄이기 위해

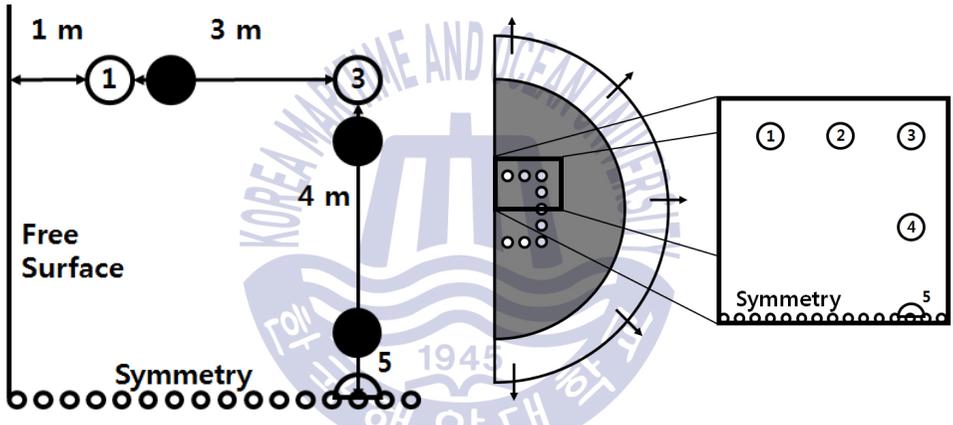
Fig. 29(c) 와 같이 SCDA 주변에 구멍을 추가하여 해석을 수행하였고 4.3.2 장에서의 결과를 토대로 1번 SCDA에서부터 자유단과 평행한 방향으로 진전되는 균열을 구멍을 추가하여 3번 SCDA를 향하여 진전되도록 유도하였다. 구멍이 없을 때 영역을 벗어나 구조물의 바깥방향으로 진전되던 1번 SCDA에서의 균열이 구멍을 추가한 후에는 3번 SCDA를 향해 진전되는 것을 Fig. 30(c) 에서 확인하였다. 반면에 최소요구팽창압은 70.82 MPa 로 구멍 배치전과 크게 차이를 보이지 않아 응력 집중에 의한 힘의 이득은 볼 수 없었다. 3번과 5번 SCDA의 경우 균열의 진전은 목표로 했던 ‘ㄷ’ 자 형태로 균열진전을 보였으며 구멍의 추가로 인해 3번 SCDA는 77.24 MPa, 5번 SCDA는 90.25 MPa로 최소요구팽창압이 감소한 것을 확인하였다. Table 5 는 Case 1의 세 모델에서의 SCDA별 최소요구팽창압의 값을 정리한 표이다.





(a)

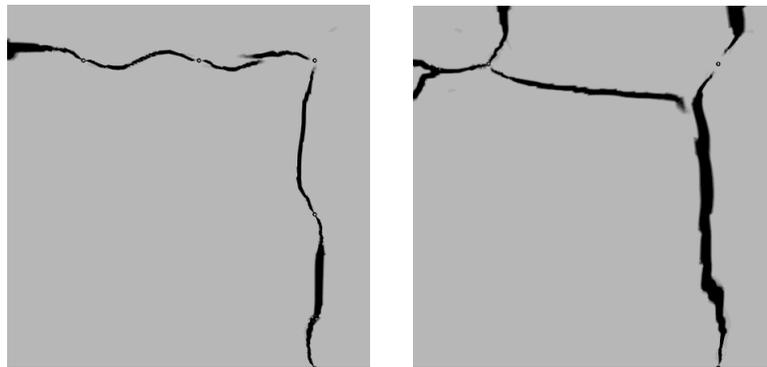
(b)



(c)

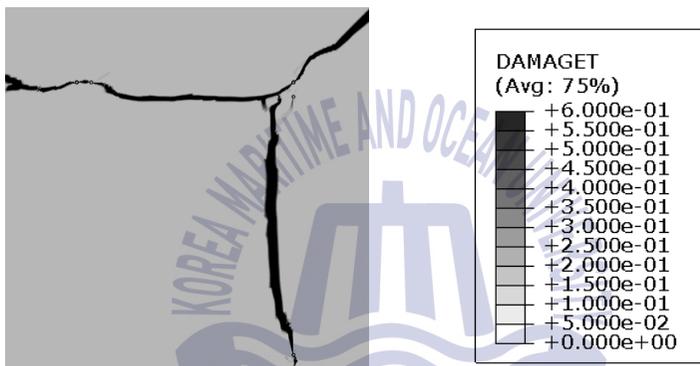
○ : SCDA ● : Hole

Fig. 29 Arrangement for SCDA and empty hole at Case 1



(a) 9 SCDAs

(b) 5 SCDAs



(c) 5 SCDAs with holes

Fig. 30 Crack propagation result of Case 1

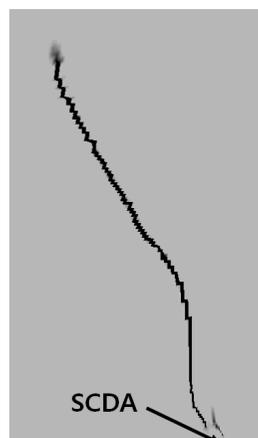


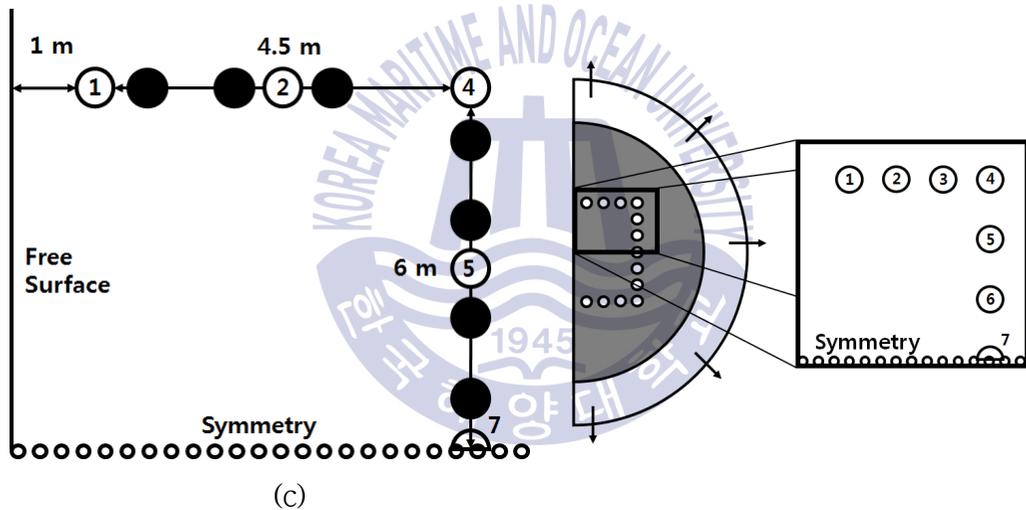
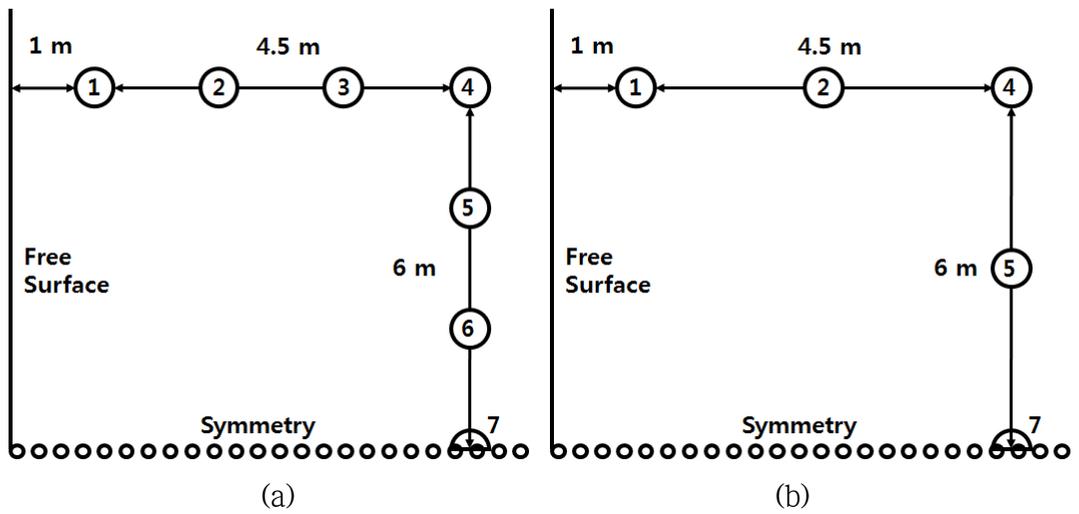
Fig. 31 Crack propagation result of No. 5 SCDA without another SCDA

Table 5 Required pressure each SCDA at Case 1

SCDA	Minimum requirement expansion pressure [MPa]		
	9 SCDA (Fig. 30(a))	5 SCDA (Fig. 30(b))	5 SCDA with Holes (Fig. 30(c))
No. 1	61.45	70.45	70.82
No. 2	62.88	-	-
No. 3	63.85	107.47	77.24
No. 4	66.65	-	-
No. 5	68.02	110.49	90.25
No. 6	66.65	-	-
No. 7	63.85	107.47	77.24
No. 8	62.88	-	-
No. 9	61.45	70.45	70.82

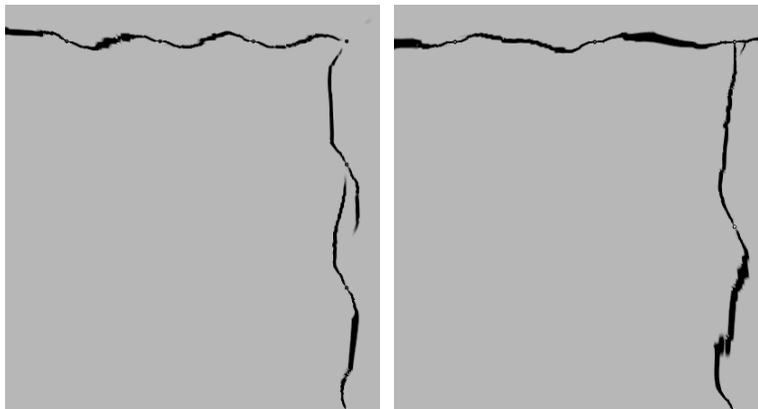
5.2 SCDA 13개의 배치에 의한 영향 (Case 2)

5.5 m × 12 m 공간에 Fig. 32(a)의 형태로 13개의 SCDA를 배치한 모델을 Case 2의 초기모델로 선정하여 해석을 수행하고 같은 크기의 공간에 SCDA의 개수를 9개로 줄여서 배치한 Fig. 32(b)와 해석결과를 비교해 보았다. 두 모델의 해석 결과는 Fig. 33(a), (b)에서 나타나듯이 ‘ㄷ’자 형태의 균열진전을 이루었으나 최소요구팽창압이 Fig. 32(a)는 59.81 ~ 66.44 MPa, Fig. 32(b)는 68.36 ~ 98.20 MPa로 나왔다. Fig. 32(a)에 비해 Fig. 32(b)의 최소요구팽창압이 과도하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 최소요구팽창압의 감소를 유도하여 균열진전에서의 힘의 이득을 얻기 위해 Fig. 32(c)와 같이 구멍을 추가한 해석을 수행하였다. 구멍을 추가함으로써 최소요구팽창압은 68.20 ~ 79.08 MPa로 감소하였고 Fig. 32(b)와 비교했을 때 힘의 이득을 보았다는 것을 Table 6을 통해 확인할 수 있다.



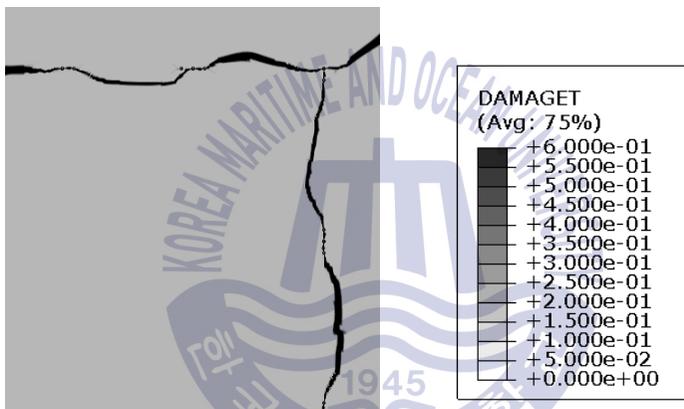
○ : SCDA ● : Hole

Fig. 32 Arrangement for SCDA and empty hole at Case 2



(a) 13 SCDA

(b) 9 SCDA



(c) 9 SCDA with hole

Fig. 33 Crack propagation result of Case 2

Table 6 Required pressure each SCDA at Case 2

SCDA	Minimum requirement expansion pressure [MPa]		
	13 SCDAs (Fig. 33(a))	9 SCDAs (Fig. 33(b))	9 SCDAs with Holes (Fig. 33(c))
No. 1	59.81	68.36	68.20
No. 2	60.59	73.01	71.37
No. 3	61.23		
No. 4	62.28	75.58	72.11
No. 5	63.88	97.74	78.76
No. 6	65.85		
No. 7	66.44	98.20	79.08
No. 8	65.85		
No. 9	63.88	97.74	78.76
No. 10	62.28	75.58	72.11
No. 11	61.23		
No. 12	60.59	73.01	71.37
No. 13	59.81	68.36	68.20

제 6 장 압축강도에 따른 균열진전

4.2장에서 정규화한 각 SCDA 간의 거리를 기준으로 Case 1(Fig. 29(a)) 과 같은 형태로 배치하고 CEB-FIP(2010)에서 제시한 인장응력과 균열 폭의 변위의 관계를 나타낸 선도에서의 압축강도와 SCDA간의 거리(자유단과 평행한 방향인 v 방향과 자유단과 수직한 방향인 h 방향)를 조절해가면서 SCDA로부터 생성된 균열이 인접한 SCDA로 이어져 ‘ㄷ’ 자 형태로 균열이 연결되는 압축강도별 최대거리를 알아보려고 하였다.

6.1 압축강도 및 SCDA간의 거리 변수 설정

5.1장의 결과에 따르면 압축강도가 20 MPa 이고 정규화 된 SCDA간격이 1 (자유단과 평행한 방향 $v=2$ m, 자유단과 수직한 방향 $h=1.5$ m)인 모델 Fig. 29(a) 에서 SCDA간의 균열이 이어짐을 확인할 수 있었다. 이를 근거로 SCDA간격과 압축강도를 증가, 감소시키면서 균열진전을 확인하였다. 같은 배치에서 압축강도를 증가시킬 경우 SCDA의 상호작용이 적어질 것으로 예상하고 SCDA간의 간격을 줄여가면서 해석을 진행하였다.

Table 7 은 정규화된 SCDA간의 간격과 압축강도에 따른 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열진전 유무에 대해 나타낸 표이다. 압축강도가 증가할수록 각 SCDA에서 생성된 균열이 ‘ㄷ’ 자 형태로 균열이 연결되는 간격이 줄어들었고 70 MPa 이상의 압축강도를 지닌 모델에서는 균열의 진전이 ‘ㄷ’ 자 형태로 연결되지 않음을 확인하였다.

Table 8 은 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열진전이 가능한 결과 중 재료강도별로 SCDA 간 최대 거리를 갖는 모델에서의 최소요구팽창압을 요약한 것이다. 강도가 증가할수록 최소요구팽창압의 값은 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 34 는 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열패턴을 만들 수 있었던 모델의 예시이다.

SCDA간의 균열이 자유단-SCDA간의 균열보다 먼저 발생하여 목표로 한 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열을 유도할 수 있었다. Fig. 35 는 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열진전이 나타나지 않는 모델이다. 동일한 압축강도를 기준으로 SCDA간의 거리를 넓혔을 때 나타난 균열진전으로 1번 SCDA에서 자유단 방향으로 진전되는 균열이 SCDA간의 균열보다 먼저 발생하여 1,2,3번 SCDA를 잇는 균열이 구조물 안쪽으로 계속 진전하고자 하는 경향이 강해져서 4번 SCDA와 균열이 이어지기 전에 구조물의 안쪽 방향으로 균열이 진전되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 36 은 또 다른 형태로 목표로 한 균열진전이 되지 않은 모델이다. 이 모델은 SCDA간의 거리를 가깝게 한 모델로써 이때의 균열은 1,2,3번 SCDA사이에 균열이 먼저 생성되긴 하지만 2번과 4번 SCDA의 거리가 가까워져서 서로간의 상호작용이 발생한다. 이로 인해 3,4번 SCDA사이의 균열진전이 자유단방향으로 블록한 형태로 진전 되고 3번 SCDA주위의 균열의 형상이 첨예하게 생성되어 구조물 안쪽 방향으로 균열진전이 쉬워졌다. 결과적으로 4,5번 SCDA간의 균열 진전보다 구조물 안쪽 방향으로 먼저 균열이 진전되었다.

Table 7 U-shaped crack pattern with respect to the SCDA distance and compressive strength

Compressive strength [MPa]	Normalized distance between the SCDAs								
	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.10	1.15	1.4
12	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○	○	×	×
30	○	○	○	○	○	×	×	-	-
40	○	○	○	○	○	×	-	-	-
50	×	×	○	○	×	×	-	-	-
60	-	×	○	○	×	-	-	-	-
70	-	×	×	×	×	-	-	-	-
100	-	×	×	×	×	-	-	-	-

Table 8 Minimum pressure [MPa] required to form the U-shaped crack pattern, depending on compressive strength

		Compressive strength [MPa]					
		12	20	30	40	50	60
SCDA number	1	46.03	61.44	77.29	87.38	105.68	120.02
	2	52.29	62.88	78.75	89.11	107.28	121.86
	3	54.69	63.85	79.83	90.36	108.57	123.22
	4	60.03	66.65	83.75	94.18	109.13	123.83
	5	62.08	68.01	85.30	95.91	109.32	123.74
	6	60.03	66.65	83.75	94.18	109.13	123.83
	7	54.69	63.85	79.83	90.36	108.57	123.22
	8	52.29	62.88	78.75	89.11	107.28	121.86
	9	46.03	61.44	77.29	87.38	105.68	120.02
Average		54.24	64.18	80.50	90.89	107.85	122.40

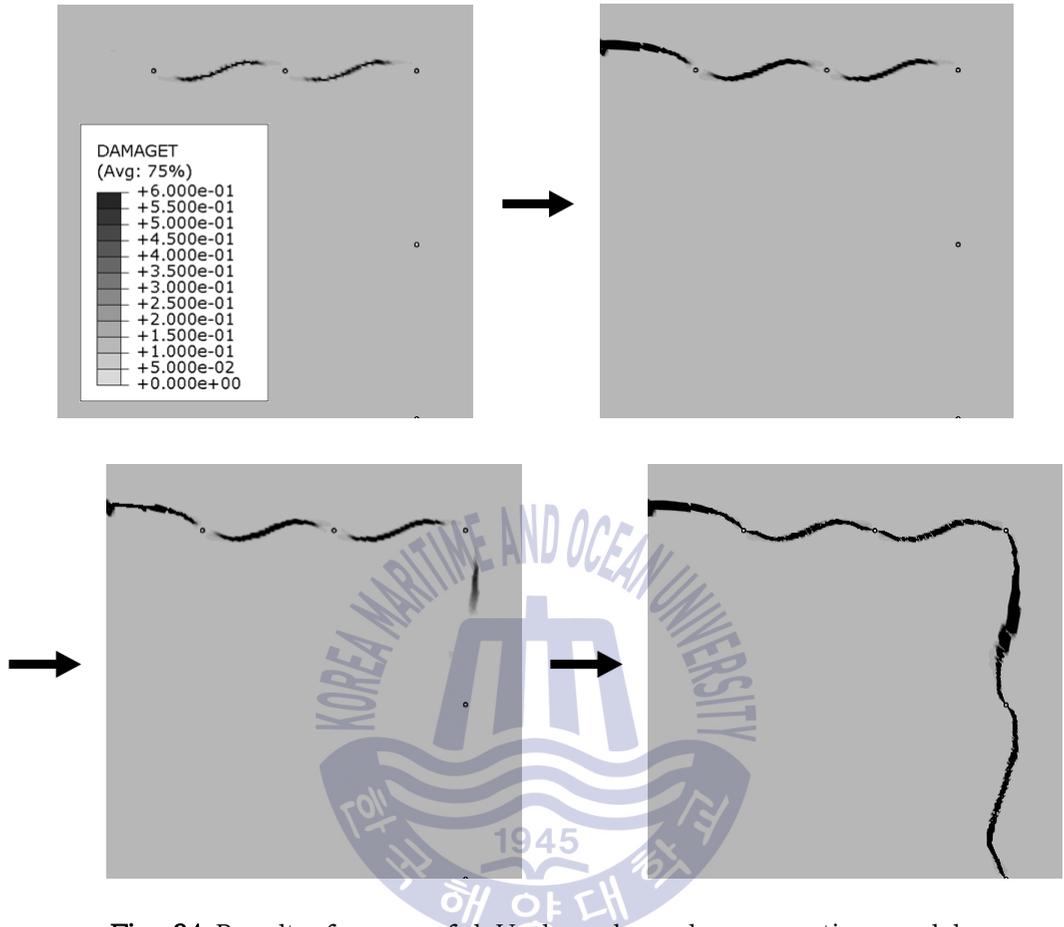


Fig. 34 Result of successful U-shaped crack propagation model

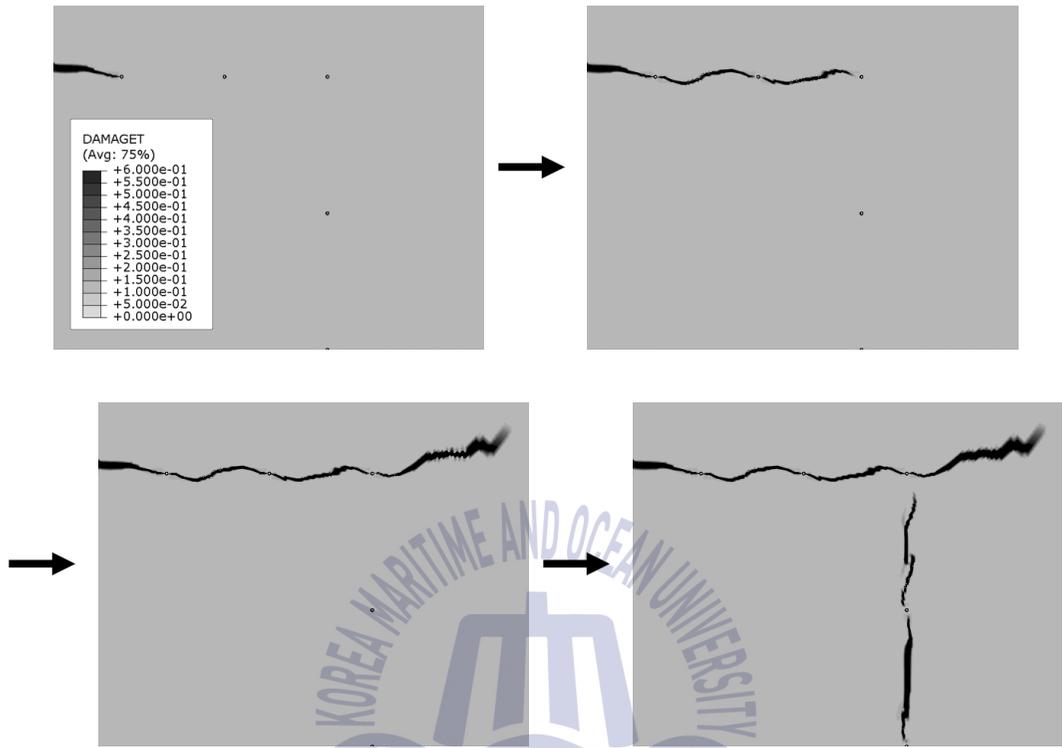


Fig. 35 Results of failed U-shaped crack propagation model



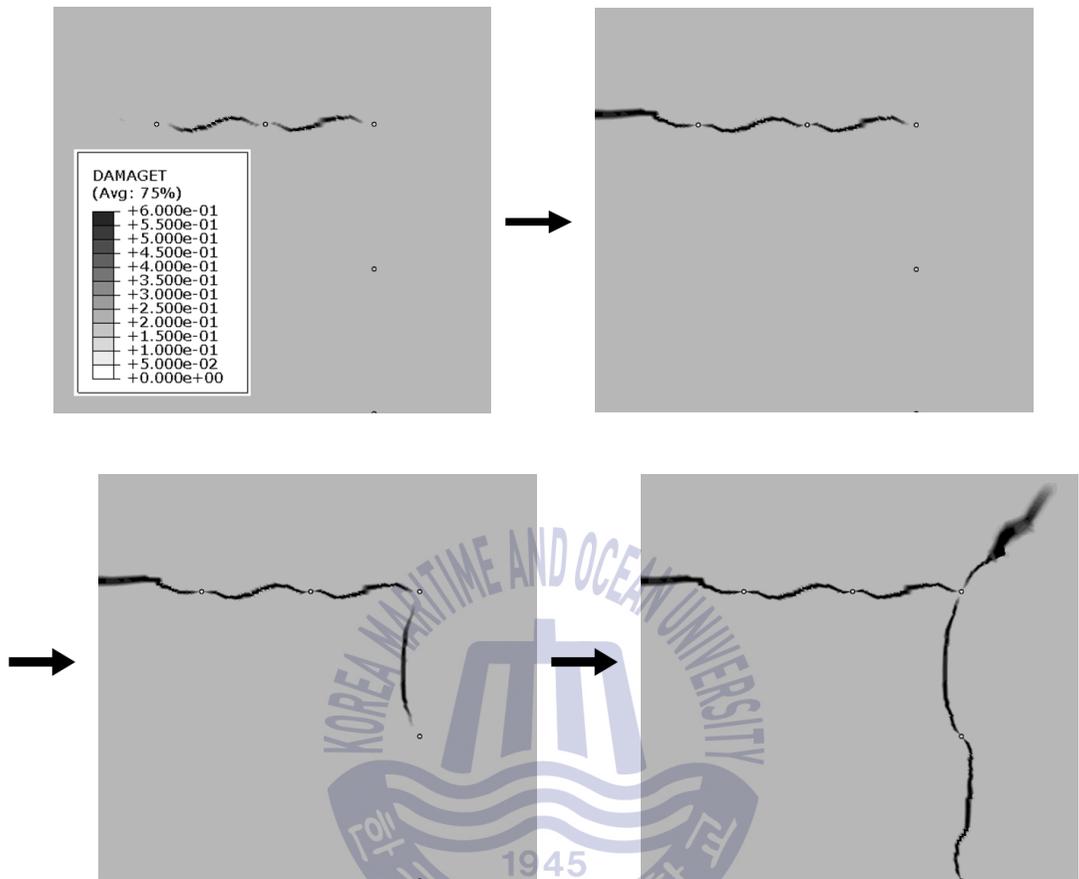


Fig. 36 Other result of failed U-shaped crack propagation

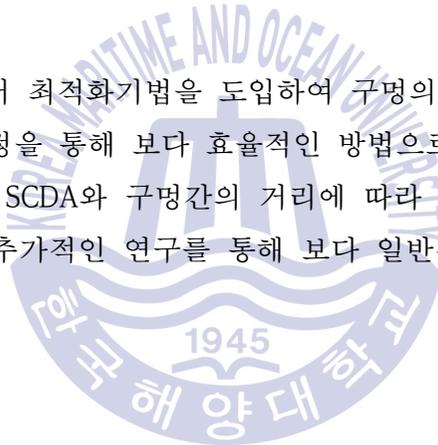
제 7 장 결 론

본 논문에서는 취성 구조물에서의 무소음화학팽창제(SCDA)의 팽창에 의한 균열생성 및 진전을 모사하고 다양한 변수를 적용하여 SCDA에 의한 균열진전 해석을 수행하였다. 또한 구조물의 압축강도를 바꿔가면서 균열진전을 유도하였고 이때 목표로 한 패턴으로 균열진전을 제어하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 구조물에서 구속조건을 증가시킬 경우 SCDA에 의한 최소요구팽창압은 크게 차이가 없으나 균열발생시간이 단축된다.
- 최소요구팽창압은 구조물의 크기가 커질수록 증가하나 10.0 m 이상으로 증가할 경우 일정한 값에 수렴한다.
- SCDA의 간격을 직경으로 나눈값(d)과 최소요구팽창압은 선형적인 관계를 나타내었고 d 값이 증가할수록 최소요구팽창압 역시 증가함을 나타내었다.
- SCDA를 이용한 균열진전시 구멍을 통해 초기균열방향을 유도할 수 있고 이를 통해 균열진전의 제어가 가능하다. 또한 자유단과 평행한 방향으로 구멍 배치시 최소요구팽창압이 감소한다. 하지만 SCDA의 직경이 0.038 m 일 때 0.7 m 이상의 간격으로 배치시 최소요구팽창압의 감소효과가 사라지고 균열진전을 억제하는 효과가 나타난다.
- 구조물의 물성치를 달리하여 SCDA를 통한 발파공법을 수행하였을 경우 구조물의 압축강도가 70 MPa 이상일 경우 SCDA에 의한 균열이 이어지지 않으며 구조물의 압축강도가 12 ~ 60 MPa 일 경우 SCDA간의 거리가 자유단과 수직인 방향으로는 1.275 ~ 1.350 m, 자유단과 평행한 방향으로는 1.70 ~ 1.80 m 범위에서 SCDA간의 상호작용을 통해 균열이 진전된다.

취성 구조물에서의 SCDA를 이용한 균열진전제어를 통해 목표로 한 형상으로 구조물을 분리하여 이에 따른 안정성을 확보할 수 있고, 이때 구조물의 물성에 따라 균열진전제어가 가능한 SCDA의 배치를 제시하였으며 이를 실제 현장에서의 지침으로 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 SCDA의 팽창에 의한 균열 생성의 방향, 즉 초기균열의 방향을 임의로 생성하지 않고 SCDA의 상호작용에 의해 균열이 생성되는 것에 대한 연구를 하였다. 향후 연성이 높거나 불순물이 섞이는 등, 다양한 물성을 가진 구조물에서의 균열진전특성 연구를 통해 각각의 물성에 대한 정립된 결론을 내릴 수 있을 것이다. 또한 구조물에 노치를 추가로 배치하여, 즉 초기균열의 방향을 임의로 설정한 후의 균열진전에 대한 연구를 통해 구조물의 파괴가 아닌 안정성을 확보할 수 있는 균열진전의 제어를 할 수 있을 것이다.

구멍을 배치함에 있어 최적화기법을 도입하여 구멍의 개수와 그 위치에 대한 가장 효율적인 위치선정을 통해 보다 효율적인 방법으로 균열의 진전이 가능할 것으로 생각되며 이때 SCDA와 구멍간의 거리에 따라 균열의 진전을 유도, 억제 등의 영향에 대한 추가적인 연구를 통해 보다 일반적인 결론을 낼 수 있을 것으로 판단된다.



참고문헌

- [1] Astly, R.J., Hamilton, J.A., 2006, The stability of infinite element schemes for transient wave problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, pp.3553-3571
- [2] Baghbani, A. and Gregory-Smith, D., 2003, A new infinite element for unbounded water wave problems. *Applied Ocean Research*, 25, pp.213-223
- [3] CEB-FIP 2010, 2010, Final Draft CEB-FIP Model Code 2010, *Bulletin Information Committee Euro International*, Beton, p.203.
- [4] Chen, G. et al., 2015, Effects of initial crack positions and load levels on creep failure behavior in P92 steel welded joint, *Engineering Failure Analysis*, 47, pp.56-66
- [5] Gambatese, J.A. 2003, Controlled Concrete Demolition using Expansive Cracking Agents. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(1), pp.98-104
- [6] Hinze, J. and Brown, J. 1994, Properties of Soundless Chemical Demolition Agents, *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), pp.816-827
- [7] Kim, G.W. 1998, Characteristics of Acoustic Emission by Expansive Cement Induced Rock Fractures, *The Journal of Engineering Geology*, 8(3), pp.207-213.
- [8] Kim, M.H. and Kim H.J., 1996, Current Status of Demolition work for Concrete Structures & Development of Recycling System Necessary for Concrete Debris, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 8(3), pp.5-18

- [9] Laefer, D.F. et al., 2010, Expansive Fracture Agent behaviour for Concrete Cracking, *Magazine of Concrete Research*, 62(6), pp.443-452.
- [10] Lee, J., and Fenves, F.L., 1998. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), pp.892-900.
- [11] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Onate, E. 1989, A Plastic-Damaged Model for Concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), pp.299-326.
- [12] Min, B.R, 1996, Demolition Methods of RC Structures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 8(3), pp.19-28
- [13] Nam, Y.M. et al., 2015, Arrangement of Agent Holes for Enhancing Crack Propagation in Structure Demolition Process using Soundless Demolition Chemical Agents. *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 28(6), pp.683-690.
- [14] Park, K.D. et al., 1999, A Study on the Characteristics of Fatigue Crack Growth of A516 Steel for Pressure Vessel at Low Temperatures, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 13(3-1), pp.108-113.