



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

무소음화학팽창제를 이용한 콘크리트 구조물의 효과적인 해체방법 연구



2018년 02월 21일

한국해양대학교 해사산업대학원 토목/환경공학과

구재현

본 논문을 구재현의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 중 우 (인)
위 원 이 재 하 (인)
위 원 손 동 우 (인)



2018년 02월 21일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	v
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 연구 범위 및 구성	5
제 2 장 문헌 조사	7
2.1 국내·외의 연구 동향	7
2.1.1 팽창압 측정에 관한 연구	7
2.1.2 효과적인 균열 생성에 관한 연구	9
2.1.3 재료적 특성에 관한 연구	10
제 3 장 이론적 배경	14
3.1 팽창압 측정을 위한 이론적 배경	14
3.1.1 팽창압 측정	14
3.2 수치해석모델	15
3.2.1 재료모델 구성방정식(Damaged Plasticity Model)	15
3.2.2 접촉옵션(Contact)	21
제 4 장 실내 실험	22
4.1 팽창압 측정	22

4.1.1 개요	22
4.1.2 팽창압 측정 실험	23
4.1.3 팽창압 측정 결과	25
4.1.4 실내실험의 요약	29
4.2 국내제작 SCDA	30
4.2.1 국내제작 SCDA의 개요	30
4.2.2 국내제작 SCDA 평가	32
제 5 장 해석 모델 개발	33
5.1 균열진전 예측모델 개발	33
5.1.1 해석 모델링	33
5.1.2 해석 결과	34
5.2 모델검증	37
5.2.1 실험을 통한 모델 검증	37
5.3 해석모델을 활용한 최소요구팽창압 예측	44
5.3.1 모델변수연구	44
5.4 현장(포항신항 제4부두) 적용성 검토	65
5.5 모델실험의 요약	68
제 6 장 결론 및 고찰	69
감사의 글	71
참고문헌	73

List of Tables

Table 2-1 SCDA 성분비 (Huynh, M.P. and Laefer, D.F., 2009)	10
Table 2-2 다양한 SCDA의 특징 비교분석 (Gambaste, 2003)	11
Table 2-3 구조물 해체 시 필요한 단가 (Parsakhoo and Lotfalian, 2009)	13
Table 2-4 구조물 해체 시 발생하는 환경영향 (Parsakhoo and Lotfalian, 2009)	13
Table 3-1 사용가능한 콘크리트 재료모델	15
Table 3-2 콘크리트 압축강도에 따른 재료물성치 CEB-FIP(2010)	19
Table 3-3 Characteristic strength values of normal weight concrete (CEB-FIP, 2010)	20
Table 4-1 Dexpan의 종류	23
Table 4-2 실내 팽창압 측정 실험	25
Table 4-3 국내제작 SCDA의 성분분석표	30
Table 4-4 국내제작 SCDA의 배합표	31
Table 4-5 배합비	31
Table 5-1 변수해석 및 결과	50

List of Figures

Fig. 1-1 구조물 및 암반 해체 공법	1
Fig. 1-2 Dexpan사의 SCDA	2
Fig. 1-3 해양 구조물 피해 사례	2
Fig. 1-4 Cost advantage (Parsakhoo and Lotfalian 2009)	4
Fig. 1-5 연구 흐름도	6
Fig. 2-1 화학팽창제를 사용한 균열생성의 예	8
Fig. 2-2 SCDA 팽창압 측정방법	8
Fig. 2-3 흙의 간격 및 흙의 크기에 의한 최적화 설계 (Gambaste, 2003)	9
Fig. 2-4 Gambaste의 실험 (2003)	9
Fig. 2-5 SCDA를 이용한 콘크리트블럭 해체 실험 (Laefer et al., 2010)	11
Fig. 3-1 외관법을 이용한 SCDA 팽창압 측정법 (Hinze and Brown, 1994)	14
Fig. 3-2 Yield surface of concrete material (ABAQUS, 2014)	17
Fig. 3-3 Response of concrete to uniaxial loading in tension	18
Fig. 3-4 Response of concrete to uniaxial loading in compression	18
Fig. 3-5 Schematic representation of the stress-strain for uniaxial tension	20
Fig. 3-6 Stress-crack opening relation for uniaxial tension	20

Fig. 3-7 Hard contact & Exponential contact	21
Fig. 4-1 Soundless Chemical Demolition Agent (Dexpan)	22
Fig. 4-2 외관법을 이용한 팽창압 측정	24
Fig. 4-3 수화열 발산이 원활하지 않은 경우의 시간-팽창압 그래프	24
Fig. 4-4 강관의 길이와 외기온도	26
Fig. 4-5 수중에서의 강관의 길이에 따른 팽창압 비교	27
Fig. 4-6 열발산에 따른 팽창압	28
Fig. 4-7 외부의 수분 유입(W/Waterproof)과 차단(W/O Waterproof)에 의한 팽창압 비교 ...	29
Fig. 4-8 국내에서 제작한 SCDA와 수중불분리제	31
Fig. 4-9 국내생산 SCDA 팽창압	32
Fig. 5-1 균열제어 검증 모델 mesh 및 경계조건	34
Fig. 5-2 k-factor와 균열제어	36
Fig. 5-3 모델검증을 위한 콘크리트블럭 도면	38
Fig. 5-4 콘크리트블럭 파괴 시험 결과	39
Fig. 5-5 SCDA 배합 및 DAQ system	39
Fig. 5-6 모델검증 결과	40
Fig. 5-7 균열진전 결과	41
Fig. 5-8 균열진전 결과	43
Fig. 5-9 해석 모델 변수	45
Fig. 5-10 Kinetic Energy	45
Fig. 5-11 균열 측정 시점	45
Fig. 5-12 재료물성치	46
Fig. 5-13 Crack Propagation (가로)	47
Fig. 5-14 Crack Propagation (세로)	48
Fig. 5-15 최소요구팽창압 변수해석 결과	51
Fig. 5-16 최소요구팽창압 변수해석 결과 Normalized compression	53
Fig. 5-17 가로균열 최소요구 팽창압	56
Fig. 5-18 k-factor에 따른 최소요구 팽창압 (압축)	57
Fig. 5-19 최소요구팽창압 변수해석 결과	58
Fig. 5-20 최소요구팽창압 변수해석 결과 Normalized compression	59
Fig. 5-21 세로균열 최소요구 팽창압	61
Fig. 5-22 Offset에 따른 세로방향 최소요구 팽창압	62
Fig. 5-23 현장 적용성 검토를 위한 천공홀 배치 도면	64
Fig. 5-24 현장 적용성 검토	65

무소음화학팽창제를 이용한 콘크리트 구조물의 효과적인 해체방법 연구

구재현

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Demolition method have been developed for construction of new structures. Traditional methods for demolition of concrete structures and rocks are jackhammer and explosives methods. However, these traditional methods may not adequate specially for urban areas and historical places due to hazard of explosive and noise. For construction in this special area, use of soundless chemical demolition agent (SCDA) could be an option since it minimizes the noise and explosiveness at construction site. However, there is no guideline or design code for using SCDA but some manuals provided by manufacturers. In this study, effective design for demolition of the concrete structures using SCDA is proposed with developed models. Fracture mechanics based concrete model was used to predict the formation and propagation of the crack and it is verified by filed tests. For measuring pressure induced by SCDA, steel pipe with strain gages was used and required pressure to form the crack between adjacent holes was also estimated. Proposed equations in this study based on obtained results from

numerical analysis was used to plan the demolition of coastal infrastructure and application of SCDA on actual coastal structures was successfully performed.

KEY WORDS: Soundless Chemical Demolition Agent 무소음화학팽창제; Concrete Demolition 콘크리트 해체; Concrete Crack Propagation 콘크리트 균열 진전; Crack Control 균열 제어; Required pressure 요구 팽창압; Fracture Mechanics 파괴역학



제 1 장 서 론

본 장에서는 친환경적인 콘크리트 구조물 해체 방법으로 각광을 받고 있는 무소음화학팽창제(Soundless Chemical Demolition Agent, SCDA)의 연구를 수행하기 위한 연구배경, 목적, 연구 수행의 범위 및 구성에 대해서 기술하였다.

1.1 연구 배경

구조물이나 암반을 해체해야 할 경우 다이나마이트를 이용한 발파공법(Fig. 1-1(a))과 잭해머 방법(Fig. 1-1(b))이 빈번하게 사용된다. 하지만 이러한 기존의 공법들은 주거 밀집지역이나 문화재가 가까운 지역에서는 발파 및 해머 공법 사용 시 소음과 진동으로 인해 장기간 공사가 지연되기도 하며 특히, 해양환경에서의 발파작업은 그 위험도가 더욱 높을 뿐만 아니라 생태계 교란 등에 의해 지역주민·단체들의 많은 반발에 부딪히게 된다. 그 예로 제주도 해군기지 건설(Kim, 2012) 등의 현장을 들 수 있다.



(a) 다이나마이트를 이용한 구조물 해체



(b) 잭해머를 이용한 구조물 해체

Fig. 1-1 구조물 및 암반 해체 공법

이러한 발파공법의 사용이 용이하지 못할 경우 무소음화학팽창제(SCDA)의 사용(Fig. 1-2)을 고려해 볼 수 있다. SCDA를 사용하면 무소음의 장점과 더불어 기존의 발파공법과 비교하여 비교적 간편한 시공방법과 최소의 노동력으로 시공이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 미국이나 유럽에서는 이러한 장점 외에

도 테러의 위험에 노출되어 있는 폭약의 사용을 자제하기 위해 화학팽창제의 사용 사례는 꾸준히 증가하고 있다.



(a) Dexpan



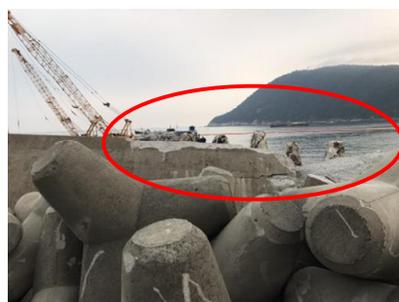
(b) Dexpan 분말(배합비 50:50)

Fig. 1-2 Dexpan사의 SCDA

2016년 10월에는 국내에 발생한 태풍 차바에 의해 부산의 다대포항과 감천항 방파제에서 활동 및 전도가 발생하여 구조적인 문제(Fig. 1-3(a))가 나타났으며 한국해양대학교 외측 방파제에 활동 및 전도가 발생하여 파손된 사례가 발생하였다(Fig. 1-3(b)). 이러한 유실 및 파손된 해양구조물의 경우 재사용이 불가능한 구조물은 파쇄 하여 폐기하는 것이 일반적이다. 그러나 해양 구조물을 파쇄하기 위한 기존 발파 해체 방법의 사용이 전술한 이유로 활용이 어렵다면 수해 현장에 본 연구에서 제안하는 천공홀 배열과 SCDA를 사용한 해체방법을 적용하여보다 콘크리트 구조물 해체가 가능할 것이다.



(a) 태풍에 의한 감천항 피해



(b) 해양구조물 파손사례
(한국해양대학교)

Fig. 1-3 해양 구조물 피해 사례

다만 SCDA의 설계는 주로 제조사(Manufacturers)의 데이터(Manual)에 의존하여 설계가 이루어져 왔으며 비숙련자의 경험에 의한 방법을 통해 SCDA를 이용한 해체설계가 진행되어 왔으므로 구체적인 해석결과에 따른 SCDA 천공홀 설계에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 안전하고 친환경적 해체공법인 무소음, 무진동 팽창제(Fig. 1-2 참조)를 적용, 구조물, 해양암반 등의 효율적인 해체 모델을 개발하고자 한다. 먼저 파괴역학모델에 근거한 균열발생 메커니즘을 수치해석적 방법으로 분석하여 최적의 천공홀 간격 및 배치를 도출하고 구조물 해체 설계자가 압축강도에 따른 최소요구팽창압 또는 천공홀 간 간격을 편리하게 산정할 수 있도록 하는 목표가 본 연구의 배경이다.

1.2 연구 목적

SCDA를 활용한 구조물 해체 공법은 1970년대 초반부터 활용되었으나 SCDA의 활용에 대한 표준이 아직 정립되지 못하고 있으며 기타 공법(Rock Cracker, CARDOX, Dynamite, Hydraulic hammer 등)에 비하여 재료 비용이 높지 않은 장점이 있음에도 국내에서는 제품의 생산이 되지 않으므로 그 활용이 미미한 수준이었다. 그러나 SCDA는 아래 Fig. 1-4과 같이 기존 잭해머 공법과 비교하여 비용 측면에서 이점이 최대 9배 이상인 것으로 확인되었고 다이내마이트에 비하여 1.5배의 비용 저감이 예상된다는 연구결과가 있으며 팽창압 성능, 환경영향 정도, 비용에 대한 종합적인 분석결과 가장 효과적인 해체방법은 잭해머(Hydraulic hammer), SCDA(expansive chemicals), 다이내마이트(Dynamite), CARDOX, Rock cracker순으로 나타났다(Parsakhoo and Lotfalian 2009). 따라서 환경적인 요인을 크게 고려할 경우 잭해머의 대체방법으로 SCDA가 활용되어야 한다.

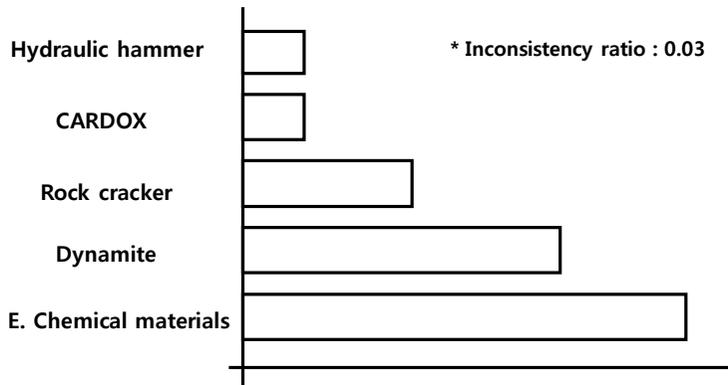


Fig. 1-4 Cost advantage (Parsakhoo and Lotfalian, 2009)

SCDA 관련시장에서 대표적인 제품으로는 미국의 BRISTAR, Dexpan, 일본의 Daigh사 등이 대표적이며 국내에서 쌍용 레미콘에서 관련 상품에 대한 연구를 수행하였으나 해체용 화학팽창제는 지금은 생산이 중단되어 판매되지 않는다. 그러나 전술한 바와 같이 각종 민원, 환경 문제 등으로 화학팽창제를 사용한 무소음 비파쇄 해체공법의 연구개발이 필요하며 본 연구를 통하여 지역 업체가 관련 기술을 개발함으로써 관련 기술을 선도 할 수 있을 것으로 판단된다. 구조물 및 암반 해체설계에 파괴역학 기반의 해석모델을 활용하여 해체 설계를 수행함으로써 무소음 비파쇄 해체기술의 기술력을 보유할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 더하여 최근에는 그 특허권이 소실되어 세계적으로 여러 업체에서 이 분야에 관심을 보이고 다양한 제품을 생산하기 위한 연구의 움직임이 있으나 국내에는 이러한 시도는 아직 없는 실정이다. 세계적인 연구동향을 볼 때에 SCDA를 활용한 연구개발은 주로 미국, 일본, 중국 등지에서 진행되어 왔으나 국내에서는 대부분 콘크리트의 수축균열 방지를 위한 팽창제 사용에 관한 연구가 대부분이다. 따라서 무소음, 무진동 해체에 SCDA를 활용하기 위한 국내 관련연구가 시급한 실정이다.

이에 본 연구에서는 전술한 바와 같이 상대적으로 전통적인 발파해체공법보다 단가가 높은 SCDA 재료의 효과적인 활용이 SCDA를 활용한 해체공법의 기술력을 재고하는데 필요한 연구라고 판단하여 제안된 조건에서 콘크리트의 균열을 발생시키기 위한 SCDA의 팽창압을 파괴에너지에 근거하여 예측하고 이를

실험을 통해 검증하기로 하였다. 검증한 모델을 활용하여 다양한 조건에서의 균열생성을 위한 최소요구팽창압의 변화를 검토하여 현장에서 활용이 가능한 간편식을 개발하고자 한다. 개발된 간편식은 SCDA의 효과적인 활용을 위한 홀 간 간격 등 홀의 배치를 결정하는데 활용될 수 있다. 개발된 간편식을 이용하여 포항신항 제 4부두 개축공사현장 구조물의 해체에 직접 적용함으로써 연구 결과의 최종 적용성을 평가하고자 한다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- 구조물 해체 시 고가의 SCDA 재료의 효과적인 활용을 위한 연구 수행
- 다양한 조건에서 구조물(콘크리트)의 균열 및 진전에 필요한 SCDA의 최소 요구팽창압 예측
- 주요 변수를 선정하고 변수연구를 통해 주요변수에 대한 최소요구팽창압의 민감도 검토
- SCDA의 효과적인 활용을 위한 홀 간 간격 등 홀의 배치를 결정

1.3 연구 범위 및 구성

본 연구에서는 무소음화학팽창제를 구조물 해체에 효과적으로 적용하기 위한 연구를 수행하였으며 본 연구의 범위 및 연구의 흐름도는 아래와 같다.

- 현장에서 본 연구의 필요성을 인식하여 연구의 목적을 설정. (1장)
- 무소음화학발파제에 대한 국내외에서 진행된 선행 연구를 조사. (2장)
- 무소음화학발파제의 팽창압 측정 방법을 선정 (3장)
- 실내 실험을 통한 무소음화학팽창제 특성 파악 (4장)
- 콘크리트 구조물해체 수리해석 모델 개발 (5장)
- 개발된 수리해석 모델은 실험을 통해 검증 (5장)
- 개발된 수리해석 모델을 이용하여 효과적인 구조물 해체를 위한 홀 간 간격확인 (5장)
- 개발된 식을 현장(포항신항 제4부두 개축공사현장 콘크리트 구조물)에 적용하여 scda를 활용한 효율적인 해체방법 검토 (5장)

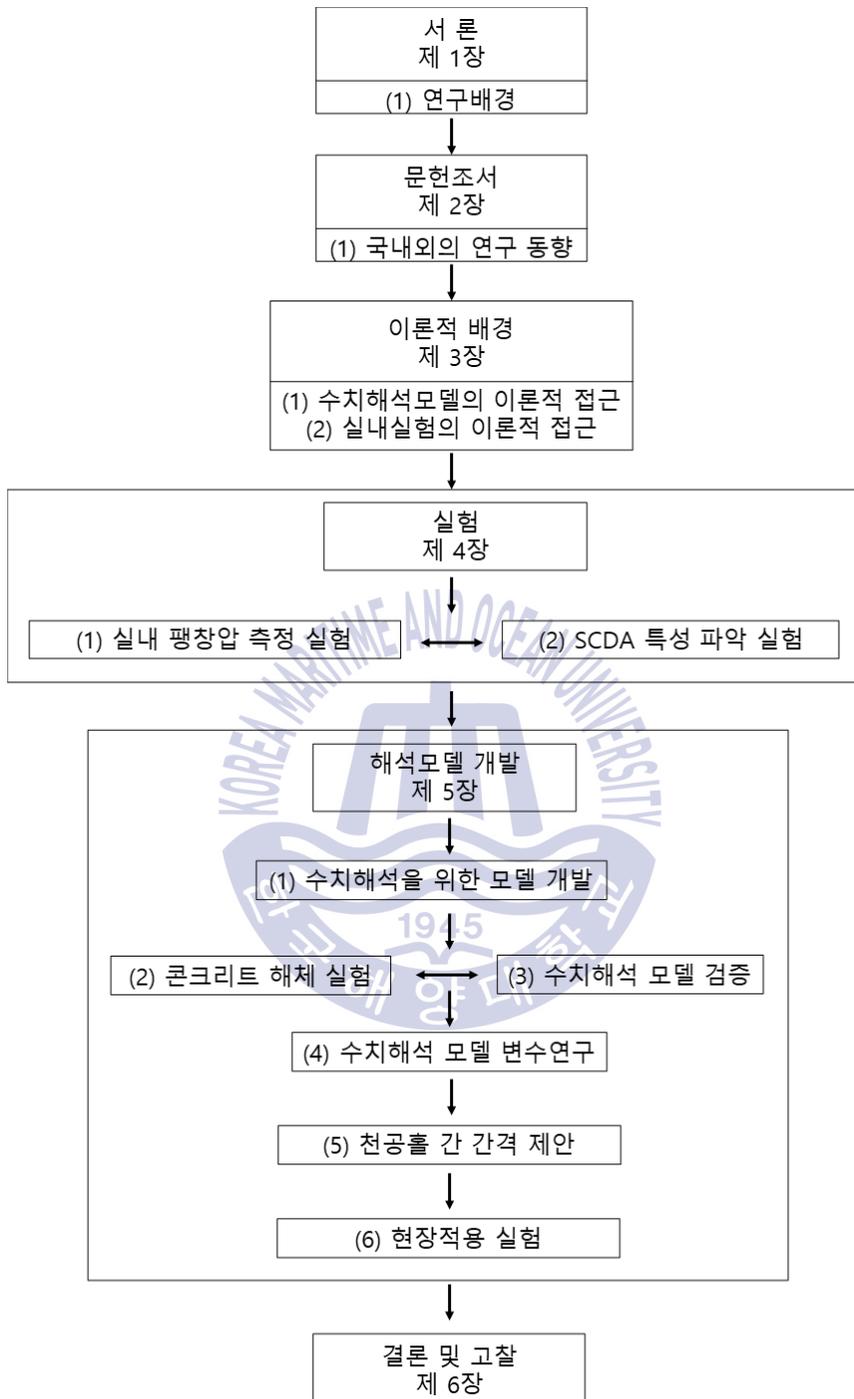


Fig. 1-5 연구 흐름도

제 2 장 문헌 조사

국내에는 SCDA의 생산업체가 전무한 실정이므로 전술한 바와 같이 기존 해체공법 대비 SCDA의 활용도는 기존 공법 대비 매우 떨어지는 반면 해체 비용이 타 공법 대비 저렴하며 발파에 의한 위험도가 적고 사회적으로 시공업체와 주민간 또는 시공업체와 환경단체간 민원 및 분쟁이 끊임없이 이어지면서 사회적비용이 증가되는 최근 추세에 따라 SCDA의 수요는 점진적으로 증가할 것으로 판단된다. 또한 최근 강화되고 있는 환경관련 법규와 소음관련 법규가 증가하면서 소음·진동 저감 대책의 새로운 대안으로 떠오를 것으로 예상된다. 본 장에서는 이처럼 구조물 해체시 대안으로 평가받는 SCDA의 국내외 관련 연구 배경 및 동향을 분석하고 다음과 같이 정리하였다. SCDA와 관련된 주요 연구 동향은 크게 팽창압과 관련된 연구(방법, 효과적인 흠 배치)와 SCDA의 재료적 특성에 대한 연구로 구분된다.

2.1 국내외의 연구 동향

2.1.1 팽창압 측정에 관한 연구

SCDA의 팽창성질을 이용하여 구조물의 균열생성을 보인 그림은 다음과 같다. (Harada et al., 1987). Fig. 2-1과 같이 구조물 해체를 위한 균열을 생성하기 위해서는 SCDA가 들어갈 천공홀(적정 직경과 높이를 가지고 있는 공간)과 균기 전 SCDA를 천공홀에 주입한 후 수화반응을 유도하여 천공홀 내에서 팽창하는 성질을 이용한다. 이러한 방법은 열전도에 의한 강관의 팽창도 포함되므로 팽창압 측정시 이를 보정하여 고려하여야 한다.

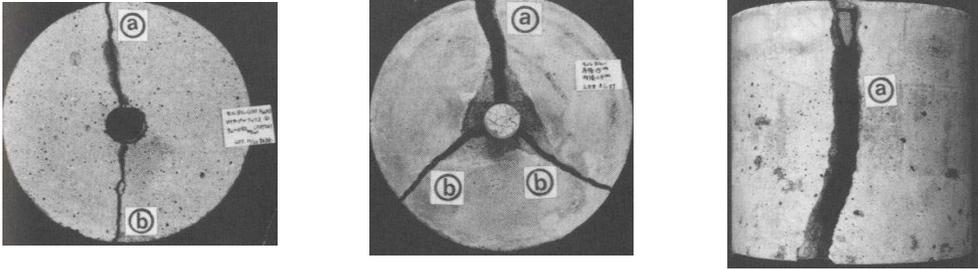


Fig. 2-1 화학팽창제를 사용한 균열생성의 예(Harada et al. 1987)

이러한 구조물의 해체를 위해서는 균열 발생에 필요한 팽창압에 대한 연구가 필요하며 이를 확인하기 위해 팽창압 측정방법에 대한 연구결과를 정리하였다. SCDA에서 발생하는 팽창압을 측정하기 위한 연구로는 크게 SCDA의 팽창압 측정방법과 효과적인 균열생성방법, SCDA의 재료적인 특성 등으로 나눌 수 있다. 팽창압 측정을 위한 연구로는 Harada et al. (1987)이 세 가지의 방법을 제안하였다. 강관을 SCDA내부에 삽입하여 측정하는 내관법, 강관 내부에 SCDA를 주입하여 강관에 발생하는 변형을 측정을 통해 팽창압을 유추하는 외관법, 직접 측정장치를 이용한 직접측정방법 등이다.

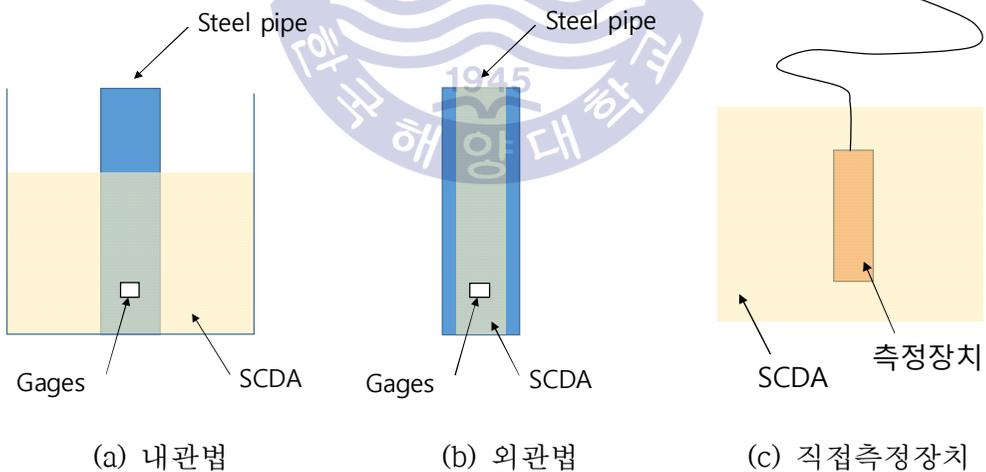


Fig. 2-2 SCDA 팽창압 측정방법

본 연구에서는 외관법을 이용하여 SCDA의 팽창압을 측정하였으며, 측정을 위한 이론식은 3장에 서술하였다.

2.1.2 효과적인 균열 생성에 관한 연구

Gambatese (2003)의 연구에서는 효과적인 구조물 해체를 위해 SCDA를 사용하여 지름이 6.35 mm이하인 홀의 간격 및 홀의 크기 등과 관련된 변수 연구를 통하여 최적화된 해체 설계방법을 제시하였다(Fig. 2-3). 그러나 Fig. 2-4에 나타난 바와 같이 홀의 직경이 매우 작고 간격 또한 매우 좁은 연구결과이므로 비교적 사이즈가 크고 단단한 암반의 해체를 위한 본 연구에 완벽하게 적용하기에는 무리가 있다고 판단된다.

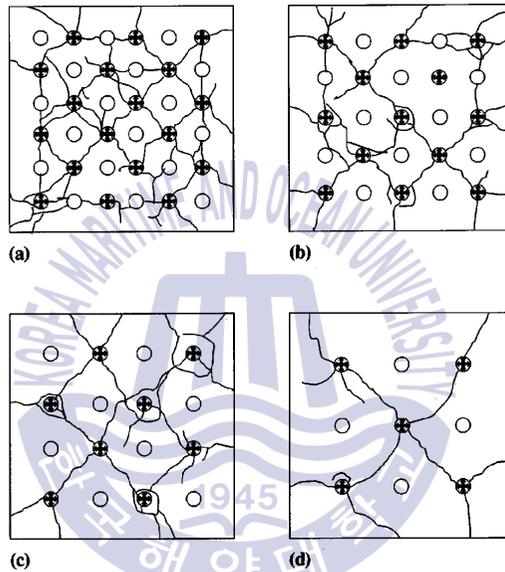


Fig. 2-3 홀의 간격 및 홀의 크기에 의한 최적화 설계 (Gambaste, 2003)

Test block	Hole grid, $N \times N$	Hole diameter, D (mm)	Hole spacing, S (mm)	Distance to free edge (mm)	MDT (h)	Final %CL (%)	Final %MIGR (%)
1	6×6	3.18	19.1	28.6	94	57	17
2	5×5	3.18	25.4	25.4	94	64	20
3	4×4	3.18	31.8	28.6	120+	58	0
4	3×3	3.18	38.1	38.1	120+	58	0
5	6×6	4.76	19.1	28.6	23	57	33
6	5×5	4.76	25.4	25.4	45	60	15
7	4×4	4.76	31.8	28.6	80	70	9
8	3×3	4.76	38.1	38.1	80	75	0
9	6×6	6.35	19.1	28.6	23	58	32
10	5×5	6.35	25.4	25.4	37	68	10
11	4×4	6.35	31.8	28.6	45	60	0
12	3×3	6.35	38.1	38.1	45	76	0

Fig. 2-4 Gambaste의 실험 (2003)

2.1.3 재료적 특성에 관한 연구

Gambatese (2003)의 연구에 따르면 SCDA는 주로 산화칼슘(CaO)으로 구성된 포틀랜드 시멘트와 유사한 분말 형태로 산화 알루미늄(Al₂O₃), 산화마그네슘(MgO), 산화철(Fe₂O₃), 실리카(SiO₂), 불화칼슘(CaF₂)이 첨가되어있어 밀폐공간에서 수화반응에 의해 높은 압력을 발생시키는 것으로 나타났다. Huynh and Laefer (2009)의 연구에서 일반적으로 사용되는 SCDA의 성분비(Table 2-1)는 산화칼슘(CaO)이 주원료인 것으로 나타났다. 또한 이들은 중국과 미국 등지에서 생산되는 다양한 SCDA의 특성 및 물성치 등을 비교분석하고 현재까지 진행된 연구의 State of Art를 기술하였다. Table 2-2는 다양한 SCDA의 특징을 비교 분석한 표이다.

Table 2-1 SCDA 성분비 (Huynh and Laefer, 2009)

Substance	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Composition (%)	1.5 - 8.0	0.3 - 5.0	0.2 - 3.0	81 - 96	0.0 - 1.6	0.6 - 4.0

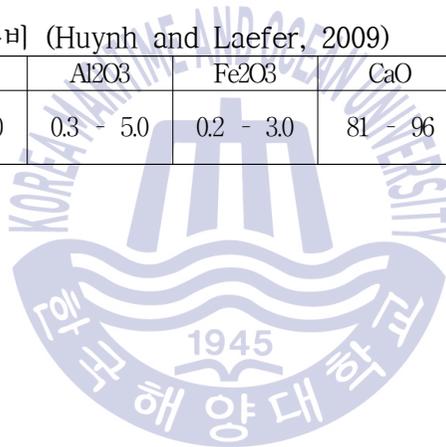


Table 2-2 다양한 SCDA의 특징 비교분석 (Gambaste, 2003)

Product	Performance expectations	Usage instructions			Application specifics			
		Materials	Water/scda	Kg/m ³	D (mm)	L (cm)	Depth	
1. Prostar	- Time required for crack formation in material at 20°C is about 3-6hrs - Crack width reaches 10-30mm after several days. - Type1: 25-40°C Type2: 10-25°C Type3: -5-10°C	Soft rock	30% (<34%) Water temp: 15°C	5-8	36-50	50-70	80% H	
		Medium rock		8-12		30-60	80% H	
		Hard rock		12-20		40-60	80% H	
		Plain conc.		5-8		40-70	90% H	
		RC less bars		10-25		30-40	90% H	
		RC much bars		20-35		25-35*	90% H	
		Anti-fire brick		10-25		N/A	90% H	
		Ambient temp. (°C)		Water temp. (°C)		Depth: Boulder 80%H; Bench:105%H * L for RC much bars should be 20-30cm when steel content >100kg/m ³		
		-5-10		40				
		10-30		20-25				
>30	<15							
2. CrackAG	- Crack appear in 6-8hrs (max. 48hrs expanding time) - Type1:20-35°C;Type2:10-25°C Type3: 5-15°C;Type4: -8~-5°C - Filling SCDA 15mm from the top of holes	Soft stone	1:3	8-10	35-50	40-60	H+5%H	
		Hard stone	Water temp: 15°C (<25°C)	10-15	35-65	40-60	H+5%H	
		Rock cutting		5-10	30-40	20-40	H	
		Plain concrete	8-15	35-50	40-60	80%H		
		RC	15-25	35-50	15-30	90%H		
		Materials	Water/scda	Kg/m ³	D (mm)	L (cm)	Depth	
3. Chemshine	- Crack appears 10-20hrs, reaches 10-30mm after several days. Super: crack at 40'-3hrs. -B100:15-35°C;B150:10-20°C B200:5-15°C;B300:-5~-5°C - Super2000: H:25-35; M:15-30; L:5-15°C	Soft stone	30% (<34%)	5	40-50	60-100	Any	
		Hard stone	B100,150:15°C			50-100		
		Presplitting	B200: 10°C			30-60		
		RC: found. pillar, beam	B300: 5°C			25-50		
		RC: wall, slab	H:25;M:20;L:15°C			20-30		
		Materials	Water/scda			Kg/m ³		D (mm)
4. Buster	N/A Temperature: 5-50°C	All	28-30%	8	30-65	30-65	80-85%H	
			10-12°C (<15°C)					
5. Dexpan	- Cracks appear after 2hrs (max. expanding time: 48hrs) -I: 25-40;II:10-25;III:-5~-10°C	Materials	Water/scda	Kg/m ³	D (mm)	L (cm)	Depth	
		All	1:3 (temp: N/A)	N/A	38-51	<=31 RC: <=25	80-90%H	



Fig. 2-5 SCDA를 이용한 콘크리트블럭 해체 실험(Laefer et al., 2010)

Laefer et al. (2010)의 연구에 따르면 SCDA의 팽창압에 영향을 주는 요소는 외기온도, 쉬는 물의 온도 및 물의 양 (물시멘트비), 구멍지름, 깊이, 열발산조

진 등이며 외기온도가 팽창압에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

이처럼 SCDA는 수화반응시 외기 온도에 매우 민감하게 반응하므로 대부분의 제조사에서 온도에 따라 다른 종류의 제품을 제시하고 있다. 예를 들어 낮은 외기온도용 SCDA(Type III Dexpan)를 하절기에 사용할 경우 수화반응이 급격하게 증가하여 폭발로 이어질 수 있으므로 온도에 적합한 타입의 SCDA 사용이 필요하다. Buster 제품의 경우 5°C~50°C 까지 범용적으로 사용가능한 것이 특징이다. 또한 Dexpan과 Buster의 경우 해체 대상의 종류에 상관없이 범용적으로 사용가능하다.

따라서 SCDA가 적절한 온도의 물이 배합된다면 혼합물은 150°C 이상의 발열과 동시에 수 시간에 걸쳐 배합 부피의 약 3배로 증가하게 된다. 이러한 특성을 이용하여 콘크리트 블록에 SCDA를 주입하여 균열 형상 및 해체 여부를 검토한 결과가 Fig. 2-5에 제시되어 있다.

Parsakhoo and Lotfalian (2009)의 연구에서는 구조물 해체 시 사용가능한 다양한 공법들의 단가와 환경영향을 비교하였다(Table 2-3, Table 2-4). 해체방법 적용 단가 비교 시(Table 2-3) SCDA를 사용할 경우 CARDOX 대비 98.7%가 감소하는 것으로 나타났으며, Dynamite 사용 단가 대비 66.6%까지 감소할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 이는 SCDA가 국내에서 생산되지 않아 해외구입에 의존해야 하는 국내 실정을 고려할 경우 SCDA 해체방법의 경제성은 차이가 있을 수 있으며 SCDA의 국내 생산이 가능한 경우 저렴한 해체공법으로 고려될 수 있을 것이다. 또한 구조물 해체 시 발생하는 환경영향을 살펴보면(Table 2-4) SCDA를 사용 시 소음 및 진동이 없으며 작업 안전성이 높고 파괴에 발생하는 비산물이 없는 것으로 나타나 SCDA는 환경적 측면에서 많은 이점이 있는 것으로 확인되었다.

Table 2-3 구조물 해체 시 필요한 단가 (Parsakhoo and Lotfalian, 2009)

Type of demolition agent	Delivered price	Unit cost
Expansive chemical material	1.08 (\$/kg)	1.09 (\$/kg)
Rock cracker	10869 \$	43.48 (\$/hole)
CARDOX	32608 \$	86.96 (\$/hole)
Dynamite	3.26 (\$/kg)	3.26 (\$/kg)
Hydraulic hammer	11000 \$	38.04 (\$/hour)

Table 2-4 구조물 해체 시 발생하는 환경영향 (Parsakhoo and Lotfalian, 2009)

Type of demolition agent	Noise	Vibration	Safety	Throwing of broken stones
Expansive chemical material	There is not	There is not	High	there is not
Rock cracker	Very low	There is hot	High	There is not
CARDOX	Very low	There is not	High	There is not
Dynamite	Very high	High	Low	Very high
Hydraulic hammer	Medium	Low	High	Very low



제 3 장 이론적 배경

3.1 팽창압 측정을 위한 이론적 배경

3.1.1 팽창압 측정

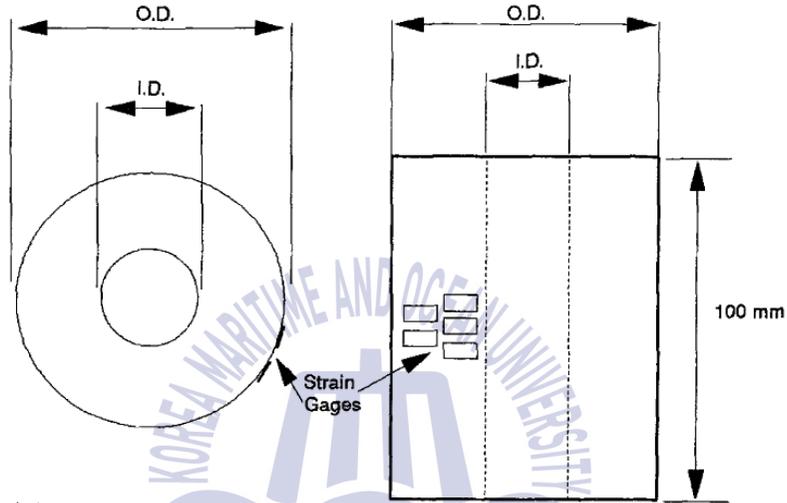


Fig. 3-1 외관법을 이용한 SCDA 팽창압 측정법 (Hinze and Brown, 1994)

SCDA의 팽창압을 측정하기 위한 방법으로는 앞장에서 설명한 바와 같이 내관법, 외관법, 직접측정법 등이 있다. 본 연구에서는 비교적 설치가 간단하면서도 정확한 결과를 예측할 수 있는 외관법을 이용하여 측정하였다. 아래 수식은 강관에 발생하는 변형률을 이용하여 팽창압을 유추하는 수식(Hinze and Brown (1994))이며 Fig. 3-1은 팽창압 측정에 사용된 강관과 실험 수행방법에 대해 나타내었다. 본 실험에서는 2개의 변형률 게이지를 강관 중간 높이에 가장 멀리 떨어지도록 하여 설치를 한 이후 2개 데이터의 평균값을 이용하여 팽창압을 추정하였다.

$$p_i = \frac{E\epsilon(r_0^2 - r_i^2)}{2r_i^2} \quad (1)$$

- r_i : 강관의 내경
- r_0 : 강관의 외경
- E : 강관의 탄성계수
- ϵ : 측정된 변형률

3.2 수치해석모델

3.2.1 재료모델 구성방정식(Damaged Plasticity Model)

Table. 3-1 사용가능한 콘크리트 재료모델

범용상용구조해석 프로그램	Built-in Material Models	콘크리트 균열 해석에 대한 적용성 검토	적용성
ABAQUS /Standard	Smeared Crack Model	반복하중에 대한 해석이 불가능, Standard(Implicit)이므로 균열 생성 이후 수렴성에 한계가 있음.	X
	Damage Plasticity Model	반복하중과 어떤 임의적 방향의 하중에 대해서 해석이 가능하나 Standard이므로 균열 생성 이후 수렴성에 한계가 있음.	X
ABAQUS /Explicit	Brittle Cracking Model	인장에 대해서만 고려되며 압축에 대해서는 비선형 재료구성방정식 이론을 적용할 수 없으므로 고압의 SCDA로부터 압축의 영향을 과소평가 할 수 있음, 단 인장 파괴되어진 요소를 제거할 수 있는 장점이 있으며 변형률 효과는 고려되지 않음	X
	Damaged Plasticity Model	반복하중과 어떤 임의적 방향의 하중에 대해서 해석이 가능하나 요소의 인장파괴나 압축파괴시 요소를 제거 할 수 없음, 요소를 제거 할 수 없음에도 파괴된 요소(파괴에너지를 소진하거나 모두 소진한 요소)를 확인 할 수 있어 균열 생성 및 진전의 효과적 검토가 가능 Explicit 수치해석법을 활용하므로 수렴성 개선	O

콘크리트 구조물의 해체를 위해서는 1차적으로 균열을 유발시켜야 하며 이러한 균열발생시점과 균열의 진전을 해석하기 위해서는 콘크리트 재료모델의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 ABAQUS 6.12를 사용하였으며 활용할 수 있는 콘크리트 재료모델은 다음과 같다. 다음과 같이 Smearred Crack Model (Standard), Damage Plasticity Model (Standard), Smearred Crack Model (Explicit), Damage Plasticity Model (Explicit)(ABAQUS Documentation, 2013)를 검토해 본 결과 Damaged Plasticity Model (Explicit)이 본 연구의 적용에 가장 적합한 것으로 분석되었다.

Damaged Plasticity Model에서는 소요된 파괴에너지에 따른 요소의 꺾적을 추적하여 균열을 검토할 수 있으며 이러한 요소의 파괴에너지는 아래 항복선을 초과함으로써(Lubliner et al., 1989, Lee and Fenves., 1998) 사용되기 시작하며 파괴에너지가 점차 소진됨에 따라 균열폭이 증가된다. 본 모델의 항복선(F)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$F = \frac{1}{1-\alpha}(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl})\langle \hat{\sigma}_{\max} \rangle - \gamma\langle -\hat{\sigma}_{\max} \rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}; 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\sigma_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})}(1-\alpha) - (1+\alpha) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c-1} \quad (5)$$

$\hat{\sigma}_{\max}$: Maximum principal effective stress

σ_{b0}/σ_{c0} : Initial equibiaxial compressive yield stress / Initial uniaxial compressive yield stress

$\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$: Effective compressive cohesion stress (소성변형률($\tilde{\epsilon}_c^{pl}$)에 따른 값)

$\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$: Effective tensile cohesion stress (소성변형률($\tilde{\epsilon}_t^{pl}$)에 따른 값)

K_c : 편차면에서 항복면의 형상을 정의하기 위한 계수 (0.667 사용)

여기서 유효응력($\bar{\sigma}$)은 아래와 같다.

$$\bar{\sigma} = \bar{S} - \bar{p} I \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl})$$

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{trace}(\bar{\sigma}), \text{ Hydrostatic pressure stress}$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{S} : \bar{S})}, \text{ Mises equivalent effective stress}$$

\bar{S} : Effective stress deviator

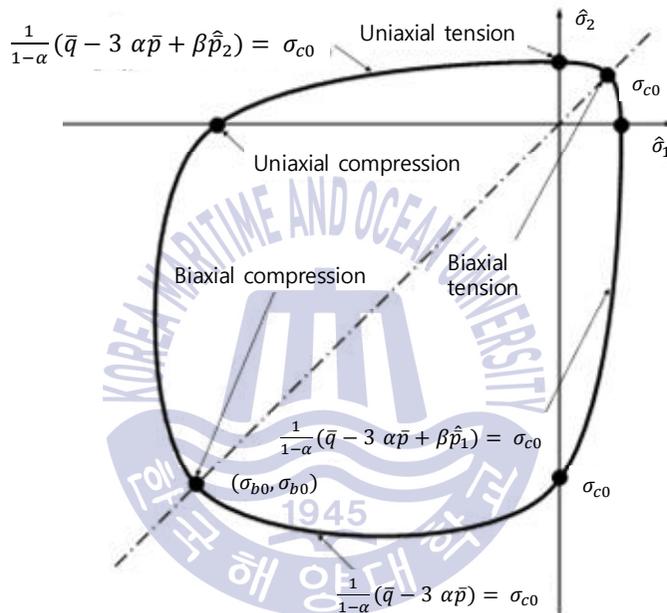


Fig. 3-2 Yield surface of concrete material (ABAQUS, 2014)

Fig. 3-3과 3-4는 Damaged Plasticity Model의 일축하중 작용 시 인장과 압축에서의 재료 거동에 관해 나타낸 그래프이다. 콘크리트의 파괴에너지는 단위 길이당 전파되는 인장균열에 요구되는 에너지로 정의되며 본 연구에서는 콘크리트의 파괴에너지를 CEB-FIP (2010)에서 제시하는 다음의 식으로 계산하였다.

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad \text{concrete grades} \leq C50 \quad (7)$$

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot \ln(1 + 0.1 \cdot (f_{ck} + \Delta f)) \quad \text{concrete grades} > C50 \quad (8)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (9)$$

f_{ctm} : 평균인장응력

f_{cm} : 평균압축응력

f_{ck} : 설계기준압축강도

$\Delta f = 8 \text{ MPa}$

G_F : 인장파괴에너지

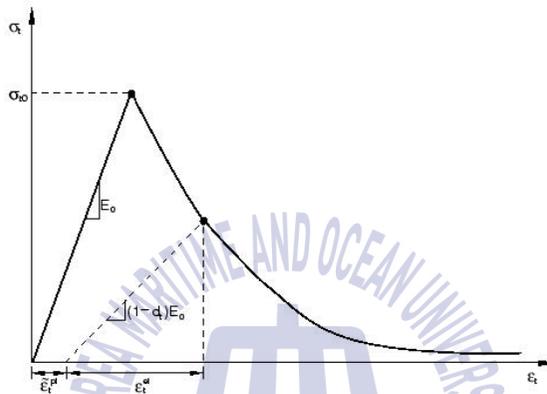


Fig. 3-3 Response of concrete to uniaxial loading in tension

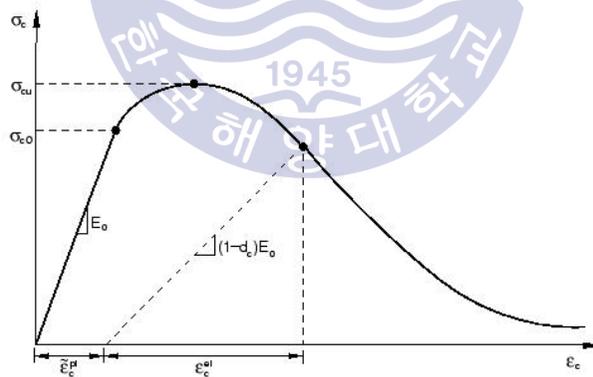


Fig. 3-4 Response of concrete to uniaxial loading in compression

본 연구에서 콘크리트의 인장응력-균열폭 (tensile stress-crack opening graph) 관계는 CEB-FIP (2010)를 따라 예측하였으며 일축압축에서는 압축에 따

른 연화를 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = - \left[\frac{k \cdot \eta \cdot \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} \right] \text{ for } |\epsilon_c| < |\epsilon_{dim}| \quad (10)$$

$$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$$

$$k = E_{ci} / E_{c1}$$

ϵ_{c1} : The strain at maximum compressive stress (Table 3-2)

E_{c1} : The secant modulus from the origin to the peak compressive stress (Table 3-2)

k : Plasticity number (Table 3-2)

Table 3-2 콘크리트 압축강도에 따른 재료물성치 (CEB-FIP, 2010)

Concrete grade	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
E_{ci} (GPa)	27.1	30.3	33.6	36.3	38.6	40.7	42.6	44.4	46.0	47.5	48.9	50.3
E_{c1} (GPa)	11.1	13.3	16.5	20.0	23.2	26.2	28.9	31.4	33.8	36	39.3	42.7
ϵ_{c1} (‰)	-1.8	-2.1	-2.3	-2.4	-2.5	-2.6	-2.7	-2.8	-2.9	-3.0	-3.0	-3.0
ϵ_{dim} (‰)	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.4	-3.3	-3.2	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
k	2.44	2.28	2.04	1.82	1.66	1.55	1.47	1.41	1.36	1.32	1.24	1.18

$$\epsilon_{k1} = -k_k \cdot \frac{f_{lck} + 8}{E_{lc}} \quad (11)$$

f_{lck} : Concrete strength value of lightweight aggregate (표 3-3)

E_{lc} : 탄성계수

K_{lc} : 1.1 (Light sand)

1.3 (Natural sand)

Table 3-3 Characteristic strength values of normal weight concrete (CEB-FIP, 2010)

Concrete grade	LC 12	LC 20	LC 30	LC 40	LC 50	LC 60	LC 70	LC 80	LC 90	LC 100	LC 110	LC 120
f_{ck}	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f_{ck,cube}$	15	25	37	50	60	75	85	95	105	115	130	140

인장에서의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ct} = E_{ci} \cdot \epsilon_{ct} \quad (\sigma_{ct} \leq 0.9 \cdot f_{ctm}) \quad (12)$$

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \cdot \left(1 - 0.1 \cdot \frac{0.00015 - \epsilon_{ct}}{0.00015 - 0.9 \cdot f_{ctm}/E_{ci}}\right) \quad (0.9 \cdot f_{ctm} < \sigma_{ct} \leq f_{ctm}) \quad (13)$$

E_{ci} : Tangent modulus of elasticity

ϵ_{ct} : 인장변형률

σ_{ct} : 인장응력

f_{ctm} : 인장력

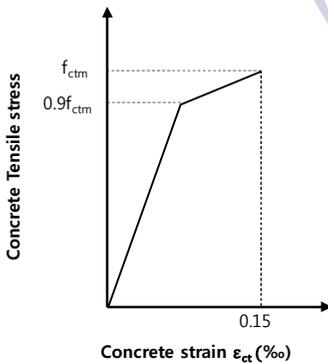


Fig. 3-5 Schematic representation of the stress-strain for uniaxial tension

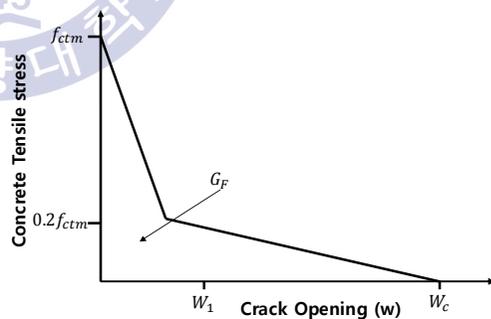


Fig. 3-6 Stress-crack opening relation for uniaxial tension

3.2.2 접촉옵션(Contact)

SCDA와 콘크리트 구조물 사이에 발생하는 접촉(Contact)은 SCDA 팽창 시 발생하는 압력을 구조물에 전달하는 매우 중요한 조건이다. ABAQUS explicit에서 활용가능한 Contact은 hard contact과 exponential contact이 있다.

Fig. 3-7(a)에는 hard contact의 formulation에 대해서 나타나 있다. hard contact은 접촉면의 접촉이 발생하기 전 응력이 0이고 접촉이 발생한 순간부터 응력이 발생하는 알고리즘을 이용한다. 또한 요소간의 침투를 허용하지 않는 강경한 접촉조건으로서 접촉 형상이나 메쉬(mesh)가 복잡한 조건에서는 수렴성이 좋지 않다. 반면 exponential contact은 Fig. 3-7(b)와 같이 요소간의 일정부분 침투를 허용하는 알고리즘이다. 변수연구를 수행한 결과 침투를 허용함으로 인해 마찰면의 저항력이 예상치에 벗어남을 확인하였으나 hard contact의 경우 적정하게 모사하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 SCDA에 의한 팽창압이 구조물에 전달되는 것이 매우 중요한 조건이며 요소의 침투가 없어야 팽창으로 인한 응력전달 시 응력 손실이 계된다 따라서 마찰을 적정하게 모사한 hard contact이 본 연구에 적절한 것으로 판단된다.

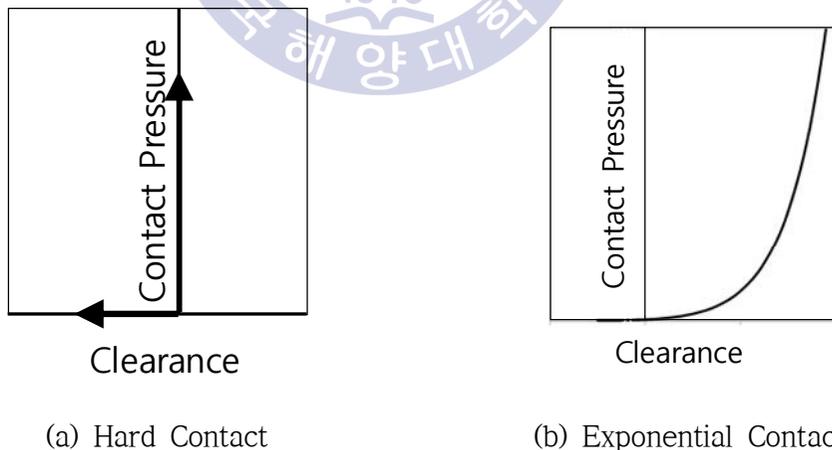


Fig. 3-7 Hard Contact & Exponential Contact

제 4 장 실내 실험

4.1 팽창압 측정

4.1.1 개요

구속된 조건에서 SCDA의 팽창압 측정을 위해 실내실험을 수행하였다. 실험에 사용된 SCDA는 미국 Dexpan (Fig. 4-1)을 선정하였으며 Table 4-1에 외기온도에 따른 Dexpan의 종류가 나타나있는데 본 연구에서는 현장 환경을 고려하여 해석모델을 검증하기 위한 콘크리트 슬래브실험에 1번과 현장 적용성 시험에 3번을 선정하여 사용하였다. 실험을 통하여 얻어진 결과를 다음 장의 수치 해석 모델 검증에 활용하였다.



Fig. 4-1 Soundless Chemical Demolition Agent (Dexpan)

Table 4-1 Dexpan의 종류

Types of Dexpan	Available
1	25 ~ 40℃
2	10 ~ 25℃
3	-5 ~ 10℃

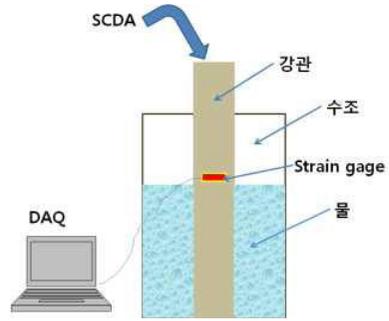
4.1.2 팽창압측정 실험

실내 팽창압 측정 실험은 외관법을 이용하여 수행하였다(Fig 4-2). 홀의 지름 및 깊이에 따라 팽창압의 변화를 측정하고 내부 수화열 발산조건을 변경하였을 경우 수화속도의 변화에 대해서 평가하였다. 사용된 강관의 길이는 각각 10cm, 20cm, 30cm 와 15cm 이며 외경 34mm 내경 28mm의 강관의 중심에 변형률계 이지를 부착하였다. 또한 실제 해양환경에서의 팽창압 조건을 고려하기 위하여 SCDA가 관입된 강관 전체를 수중에서 양생 시킨 후 그 팽창압을 측정하는 실험을 수행하였다. 이때 해수 유입여부에 따른 영향을 확인하기 위하여 강관 끝단을 개방하거나 폐합한 경우를 비교하였다. 수행된 실내 팽창압 실험의 경계 조건은 Table 4-2에 정리하여 나타내었다.

약 15℃의 공랭조건에서는 수화열을 발산하지 못하여 내부에 150℃ 이상의 열을 발생시키며 급작스런 팽창압의 증가로 폭발이 일어나는 것으로 확인이 되었다. Fig. 4-3에서와 같이 열의 원활한 발산이 이루어지지 않음에 따라 짧은 시간에 급작스런 팽창이 빠른 압의 증가를 발생시키며 이는 폭발과 함께 강관 내부 SCDA의 유실을 유발하여 팽창압 효과를 잃는 것으로 나타났다. 따라서 강관 내부에 축적되는 열을 적절하게 발산시키기 위하여 강관의 1/1, 1/2, 1/3 높이까지 수중에 관입하여 실내 실험을 수행하였다.



(a) 사용된 강관



(b) 팽창압 측정



(c) 외관법을 이용한 팽창압 측정 실험의 모습

Fig. 4-2 외관법을 이용한 팽창압 측정

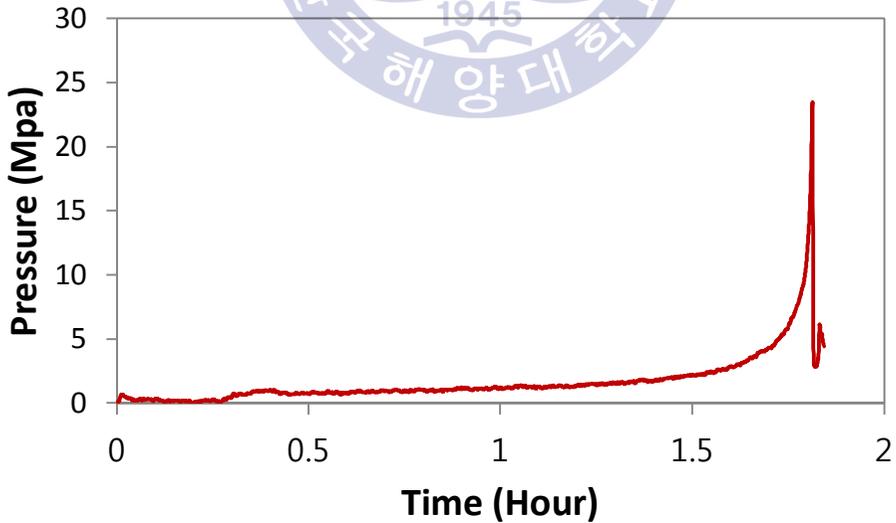


Fig. 4-3 수화열 발산이 원활하지 않은 경우의 시간-팽창압 그래프

Table 4-2 실내 팽창압 측정 실험

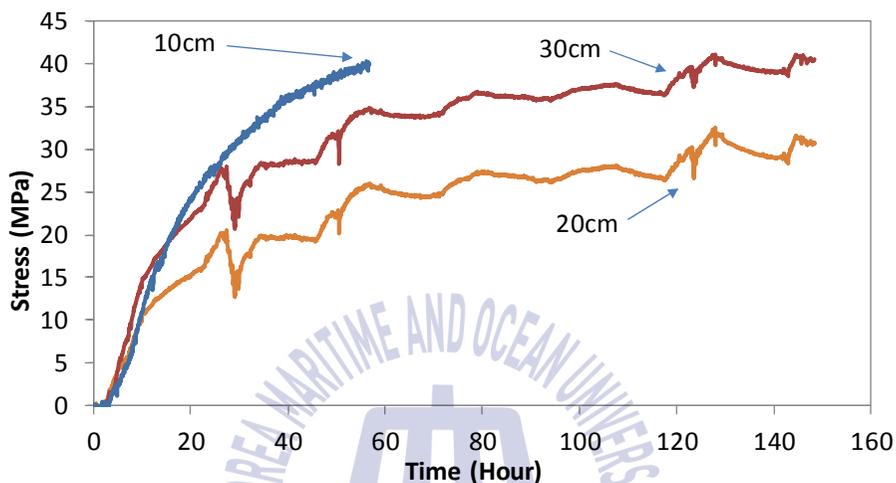
사용된 강관의 길이(cm)	수중 관입 위치 (관입길이/전체길이)	끝단 개방 유무
10(배합비s/w: 0.77:0.23)	1/1	X
20(배합비s/w: 0.57:0.43)	1/3	X
30(배합비s/w: 0.77:0.23)	1/3	X
30(배합비s/w: 0.77:0.23)	1/2	X
15(배합비s/w: 0.77:0.23)	1/1	X
15(배합비s/w: 0.77:0.23)	0	X
15(배합비s/w: 0.77:0.23)	1/2	X
15(배합비s/w: 0.77:0.23)	1/1	O

4.1.3 팽창압 측정 결과

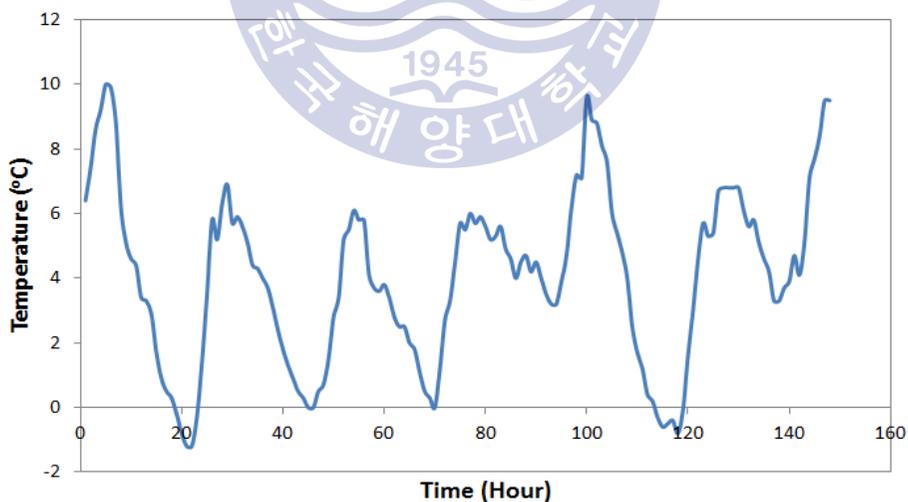
먼저 강관의 길이에 따라 측정된 팽창압을 Fig. 4-4(a)에 비교하였다. 열의 원활한 발산을 통해 폭발을 방지하기 위하여 강관 일정길이를 물에 관입하여 실험을 진행하였다. 물에 관입 시킨 경우 안정적으로 팽창압의 변화를 확인 할 수 있으며 팽창에 따른 압의 증가속도도 크게 느려짐을 확인 할 수 있다. 10cm의 경우 강관 전체가 물에 잠기가 하여 수냉식으로 열의 전달 및 발산을 원활하게 하였으며 20cm와 30cm 조건에는 길이의 1/3만 잠기게 하여 실험을 수행하였다. Fig. 4-4(b)에 그 결과를 나타내었는데 전체가 물에 잠긴 10cm 높이의 강관의 경우 외기온도에 영향이 미미하여 비교적 포물선에 가깝게 응력이 증가하였음을 확인할 수 있다. 이와는 반대로 외기에 노출되었던 20cm 와 30cm 강관의 경우 시간대별 그래프의 변동(Up and down)을 확인할 수 있다. 그래프의 변동은 실제 외기온도에 따른 강관과 SCDA의 온도변형률에 기인한 것으로 본다. 외기온도에 민감하게 강관이 반응하며 외기온도에 따라 팽창 압의 변화가 발생하는 것을 Fig. 4-4(a)와 (b)를 비교함으로써 알 수 있다. 실험결과 온도의 변화가 적었던 24시간 동안 10cm 강관과 30cm 강관은 비교적 유사한 경향을 보였으며 SCDA배합비가 상대적으로 적은 20cm 강관(80%)은 약26% 줄어든 팽창

압의 경향을 나타내는 것으로 확인되었다.

팽창압은 150시간 이후에도 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있었으며 시간에 대한 응력의 증가량은 점차 줄어들어 온도의 영향을 제거한다면 포물선의 시간-응력 관계를 나타내었다. 10cm와 30cm 강관의 SCDA 팽창압은 24시간 후 약 26.3 MPa을 발생시키는 것으로 확인되었다.



(a) 강관의 길이에 따른 팽창압



(b) 외기온도

Fig. 4-4 강관의 길이와 외기온도

강관 길이에 따른 팽창압 측정의 차이는 확인하기 위하여 강관의 길이에 따른 팽창압 비교를 하였다. 강관이 15cm 이상인 경우 강관의 길이에 의한 팽창압의 차이는 없는 것으로 확인되어 본 연구에서는 15cm의 강관을 사용하기로 하였다.

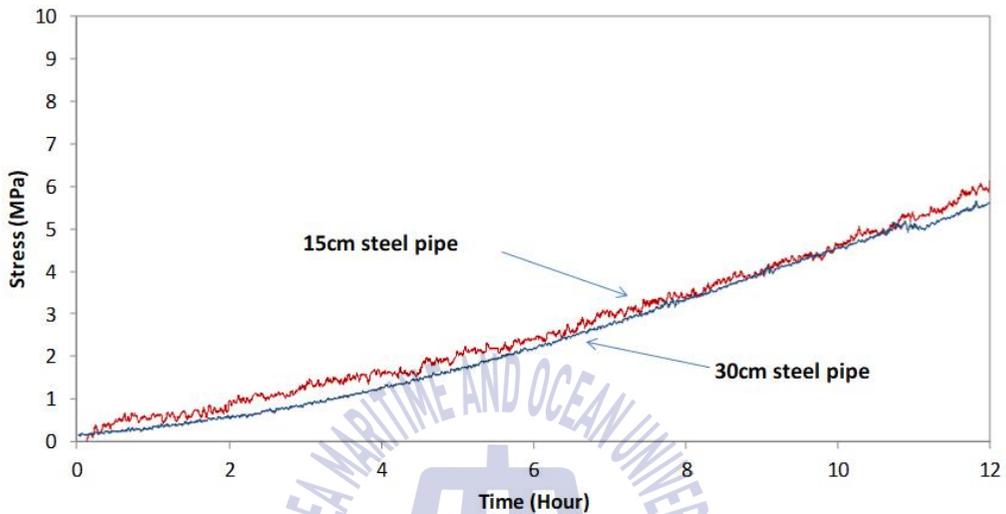
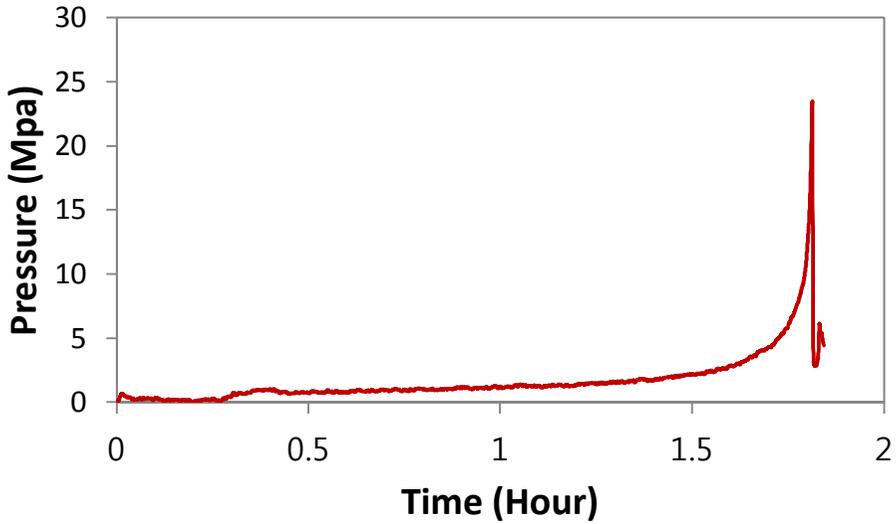
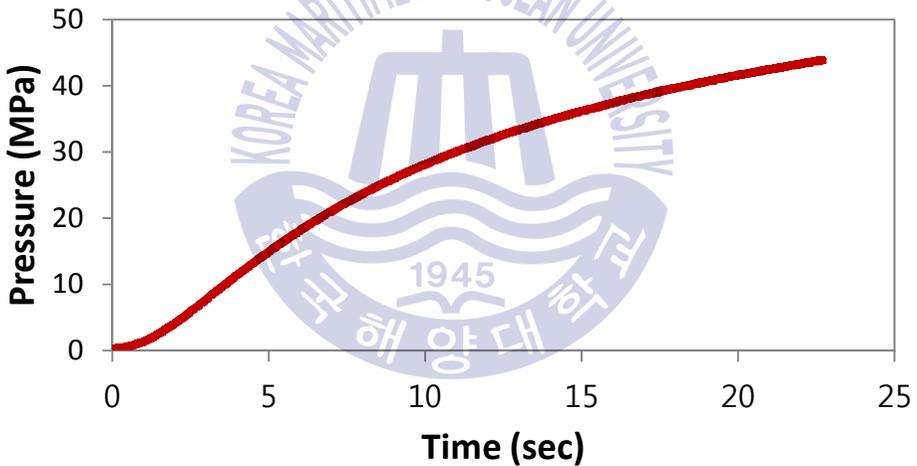


Fig. 4-5 수중에서의 강관의 길이에 따른 팽창압 비교

열발산 여부에 따른 팽창압 증가 경향의 차이를 Fig. 4-6에 나타내었다. Fig. 4-6(a)와 같이 공랭식으로 수화열을 발산하지 못하여 내부에 높은 온도(150℃)를 발생시키면 급작스런 팽창압의 증가로 폭발(a)이 발생하여 변형률이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 외기온도에 맞는 SCDA를 구매하는 것이 중요하며 실제 해체작업 중에는 순간적인 폭발에 대비한 눈과 머리를 보호할 수 있는 기구를 착용하여야 할 것이다.



(a) 열 발산이 원활하지 않은 실험의 팽창압 그래프



(b) 열 발산이 원활한 실험의 팽창압 그래프

Fig. 4-6 열발산에 따른 팽창압

Fig. 4-7는 외부에서의 수분의 유입과 차단 시(끝단 개방 유무) 팽창압 증가 경향을 비교한 그래프이다. 15시간이 경과한 후 외부 수분 유입을 허용한 SCDA의 경우 팽창압이 10MPa, 외부 수분 유입을 차단한 SCDA는 팽창압이 20MPa로 2배 이상의 차이를 나타내었다. 또한 외기온도 변화에 의해 순간적으로 증가하였다 감소하는 경향이 확인되었으며(12시간부근) 40시간 경과 시 각

각 11MPa과 23MPa로 2배가 넘는 팽창압을 보였다. 예상대로 외부의 수분이 유입되는 것보다 차단하는 것이 SCDA의 교란을 막아 팽창압 발생에 유리한 조건이고, 실제 해양환경에서는 파도에 의해 암반에 주입한 SCDA가 유실될 우려가 있으니 해수의 유입을 차단 할 수 있는 외부 보호막 또는 수중불분리제 혼합 등의 방법을 고려해야 할 것으로 판단된다.

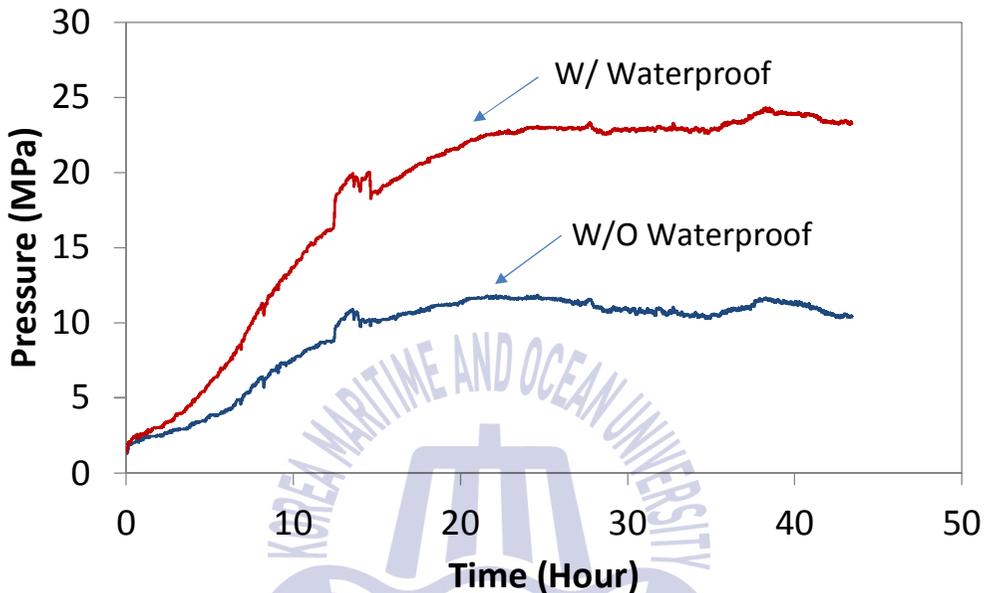


Fig. 4-7 외부의 수분 유입(W/ Waterproof)과 차단(W/O Waterproof)에 의한 팽창압 비교

4.1.4 실내 실험의 요약

앞서 강관길이에 따른 팽창압과 외부노출 및 수분 유입과 차단에 따른 비교 분석 결과로 유추해 볼 때 수화열 발산을 제어하지 않는다면 천공 홀을 통해 주입된 SCDA가 폭발할 수 있으므로 팽창압 측정시 발생하는 수화열에 대한 제어가 필요하다. 또한 외부 수분이 유입될 경우 SCDA의 팽창압 저하의 원인이 되므로 해양환경에서 SCDA를 활용할 경우 수중불분리제를 사용하거나 수분 유입을 차단하는 것이 팽창압 발현에 유리할 것으로 판단된다. 팽창압 측정 시 사용되는 강관의 길이(15cm, 30cm)에 따른 팽창압은 큰 차이가 없어 효율적인 실험계획이 가능한 15cm 강관을 사용하고 수분에 1/2이상 잠기게 한 상태에서 끝단을 막아 수분의 유입을 차단하는 방법으로 팽창압을 측정하기로 하였다.

4.2 국내제작 SCDA

4.2.1 국내제작 SCDA의 개요

본 실험은 미국에서 제작된 SCDA인 Dexpan을 이용한 실험을 수행함과 동시에 해외수입에 의한 단가상승 등의 문제점을 줄이기 위하여 국내에서 SCDA를 직접 제작하였다. Table 4-3는 국내제작 SCDA의 성분 분석표이며, Table 4-4는 배합표를 나타냈다. 수중에서의 SCDA를 사용하기 위해 국내에서 개발한 수중 불분리제를 사용하였으며 배합 비율을 Table 4-5에 나타냈다.

Table 4-3 국내제작 SCDA의 성분분석표

항목	사용범위 (중량%)	세부내용	특성
생석회	100		CaO
물	50		
혼화제	0.1~5		수중불분리성혼화제
유동화제	70	폴리카계	분말폴리카본산계유동화제 유동성증가, 물비 감소
소포제	5	실리콘계	내부기포제거, 안정성 향상
지연제	10	구연산, 글루콘산, 주석산	수화지연
증점제	15	셀룰로스계	증점성향상

Table 4-4 국내제작 SCDA의 배합표

구분	생석회	100	100	100
배합조성	물	50	50	50
	유동화제			1.05
	소포제			0.075
	지연제			0.15
	증점제		1.5	0.225
측정결과	불분리성	흐트리짐	양호	양호
	유동성	불량	불량	양호
	팽창성	양호	양호	양호



Fig. 4-8 국내에서 제작한 SCDA와 수중불분리제

Table 4-5 배합비

SCDA type	SCDA	물	수중불분리제	
			S1	S2
국내제작 SCDA	100	50	1.6	0
국내제작 SCDA	100	50	0	0.63

4.2.2 국내제작 SCDA 평가

Fig. 4-9는 국내제작 SCDA의 수중에서의 팽창압을 나타낸 그래프이다. 팽창압 측정결과 국내 제작 SCDA의 경우 수중에서 타설시 발열로 인하여 팽창력이 감소하는 것으로 확인이 되었다. 이는 과소생석회를 제거하고 일반 생석회를 사용함으로써 발생한 결과로, 과소생석회를 함양한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 개발된 수중불분리제의 경우, S1은 배합 시 유동성이 매우 떨어져 워커빌리티가 매우 낮아지므로 실용성이 없다는 판단하에 본 연구에서는 S2만을 이용한 실험을 수행하였다.

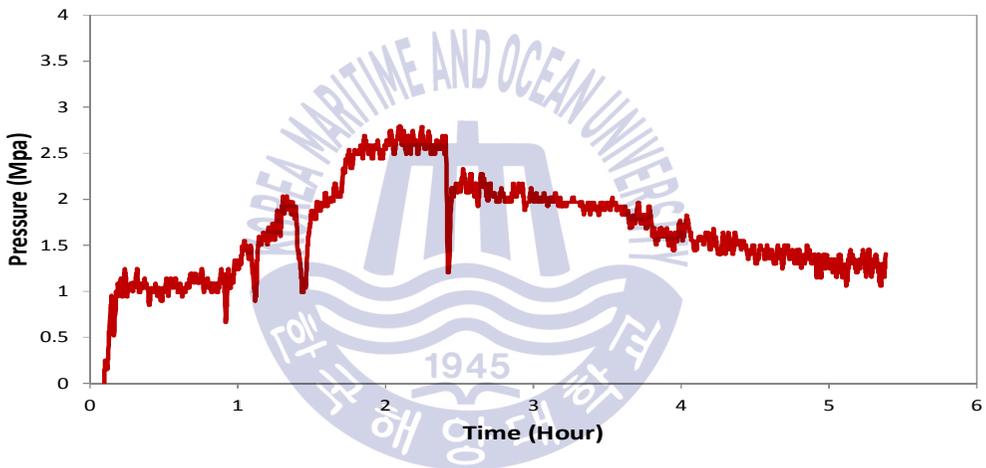


Fig. 4-9 국내생산 SCDA 팽창압

제 5 장 해석 모델 개발

5.1 균열진전 예측모델 개발

ABAQUS Explicit 6.12의 콘크리트 재료모델인 Concrete damaged plasticity model을 이용하여 여러개의 천공홀을 가진 콘크리트 구조체 모델을 개발하였다. 천공홀에 SCDA의 팽창압이 작용하였을 경우 콘크리트 구조체 균열발생시 필요한 SCDA의 최소 요구 팽창압(Minimum required pressure)을 개발된 ABAQUS 모델을 이용하여 추산하였으며 균열진전이 계획된 방향으로 제어되는지 확인하였다. 개발된 모델에 대해서는 동일한 위치에 SCDA 천공홀을 만든 실제 콘크리트 슬래브의 균열제어 실험을 통해 모델 검증을 수행하였다.

5.1.1 해석 모델링

개발된 해석모델이 균열의 생성 및 진전 또한 균열패턴을 의도한 대로 발생 시키는지 확인하기 위하여 천공홀이 있는 균열검토 모델을 만들었다. Fig. 5-1은 균열검토 모델의 Mesh와 boundary condition이 나타나있다. Fig. 5-1에서와 같이 1/2 모델을 검토하였으며 균열진전의 불확실성을 확인하고자 1/4모델을 검토하지 않았다.

콘크리트의 응력-균열폭 연화 곡선은 CEB-FIP (2010)의 식을 이용하여 관계를 규정하였다. 고려된 콘크리트 구조체(슬래브)의 크기는 1.0m 의 정육면체에 직경 38mm의 홀을 만들어 균열의 진전을 확인하였다. 콘크리트의 물성치중 파괴에너지가 균열발생 및 균열길이 진전에 주요변수로 작용하므로 2단선형 파괴에너지 응력-균열폭 곡선(Bilinear tensile stress-crack opening displacement graph)을 사용하여 콘크리트의 균열을 모사하였다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 콘크리트의 압축강도(30MPa)를 기준으로 하였으며 파괴에너지는 140 N/m 이다.

2D element(CPE4)를 사용하였으며, 홀의 지름은 현장에서 활용도가 가장 높은 38mm로 고려하였다. 팽창압의 경우 홀 내부에 SCDA를 모델링하여 온도하중을 적용함으로써 팽창을 유도하였다. SCDA 팽창제와 콘크리트의 접합부는

Tie가 아닌 Contact로 고려하였다. 접촉 옵션은 전술한 General contact을 사용하였으며 마찰계수는 0.4를 사용하여 SCDA에서 팽창 시 응력 불균형으로 발생하는 회전(rotation)을 최소화하였다.

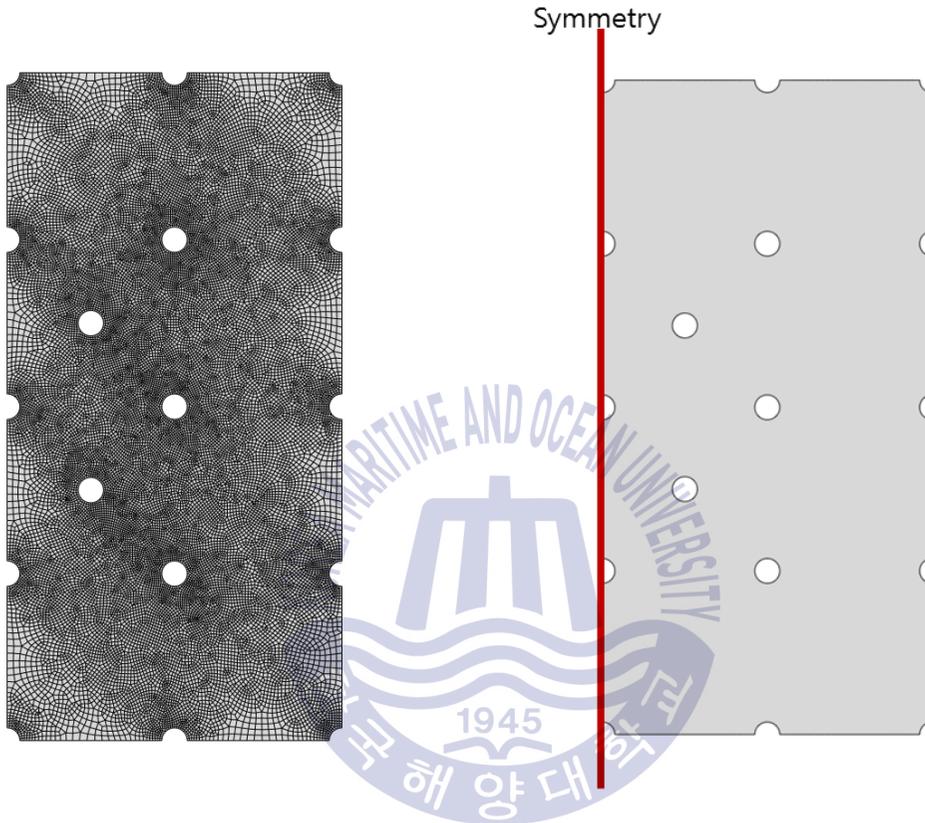


Fig. 5-1 균열제어 검증 모델 mesh 및 경계조건

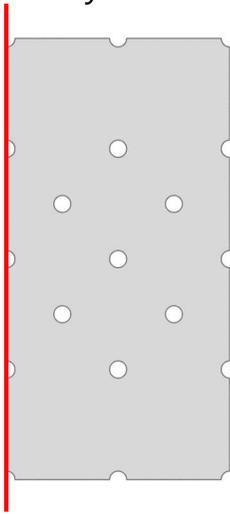
5.1.2 해석 결과

SCDA에 의해 발생하는 팽창압으로 인하여 콘크리트 균열진전에 대한 해석을 수행하였다. 다양한 패턴과 k-factor(홀의 지름과 홀간 간격의 비)의 조합에 따른 균열생성 여부를 검토한 결과 k-factor(홀의 지름과 홀간 간격의 비)가 6.6일 경우 홀과 홀 사이 잔 균열(Secondary cracks)이 생성되지 않고 주요균열(Main crack)이 잘 생성되었으나 균열의 방향을 바꾸는 제어가 필요한 경우 k-factor 6.6에서 4.7까지 감소시켜야 하는 것으로 확인되었다. 이러한 해석결과에 따라

Fig. 5-2과 같이 SCDA를 배치하고 해석결과를 비교하였다. 해석 결과 균열은 Pattern-3에서 약 9.2 MPa의 팽창압에서 급격하게 진전되었다. 추가적인 팽창압은 필요하지 않은 것으로 판단된다. 홀의 패턴에 따른 균열 형상을 비교분석한 결과를 홀의 갯수와 필요압력의 상관관계를 볼 때, 홀의 지름과 홀 간 간격의 비가 6.6(k factor)인 경우 팽창압 15.6 MPa에서 구조체에 균열을 효과적으로 형성시키는 것으로 확인되었다. 앞에서 수행된 강관 실험으로부터 팽창압을 측정된 결과 26.3 MPa 이상의 팽창압을 발생시켰으므로 해당 SCDA홀의 지름 및 간격은 실제 동일 SCDA로 실험을 수행할 경우 균열을 발생시킬 것으로 예상된다. 실험결과와의 비교분석은 다음 장에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 홀의 지름과 k-factor 6.6 및 4.7을 150 MPa 강도까지 적용하였을 경우 원하는 방향으로 균열이 잘 생성됨을 확인 할 수 있었다.

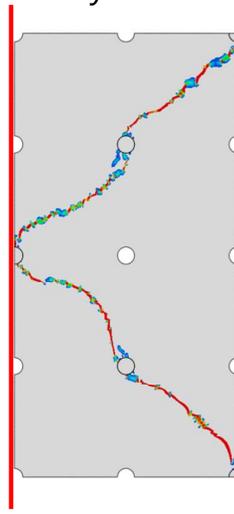


Symmetry



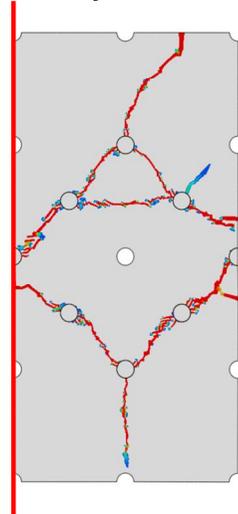
(a) 콘크리트 슬래브 모델

Symmetry



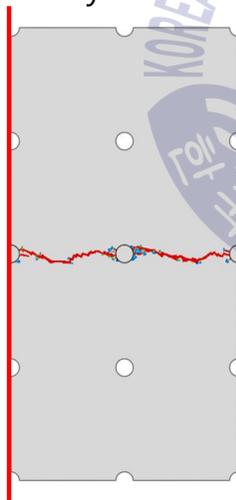
(b) Pattern 1

Symmetry



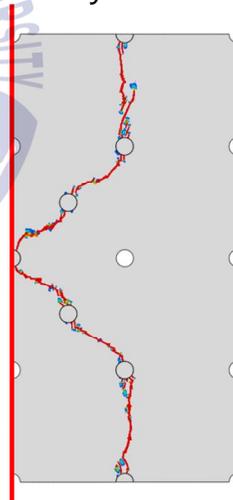
(c) Pattern 2

Symmetry



(d) Pattern 3

Symmetry



(e) Pattern 4

Fig. 5-2 k-factor와 균열제어

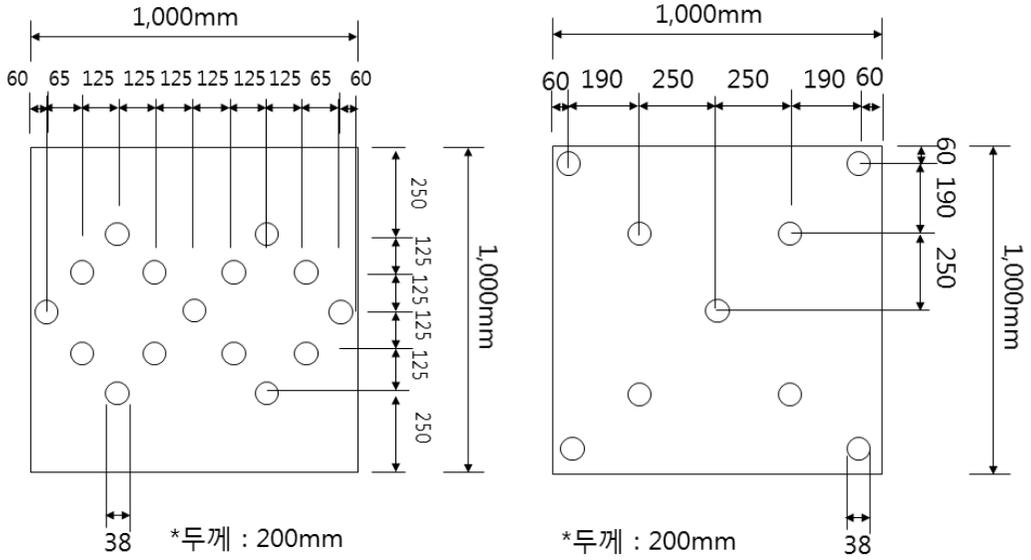
5.2 모델검증

개발된 해석모델이 콘크리트의 균열진전과 균열 발생에 필요한 최소요구팽창압을 비교적 유사하게 예측하는지 확인하기 위한 모델검증을 수행하였다. 모델검증은 앞에서 수행된 개발모델에 대하여 이와 동일한 비율(1:1)로 실제 실험을 수행하고 발생한 균열 및 최소요구팽창압을 해석결과와 비교분석하였다

5.2.1 실험을 통한 모델 검증

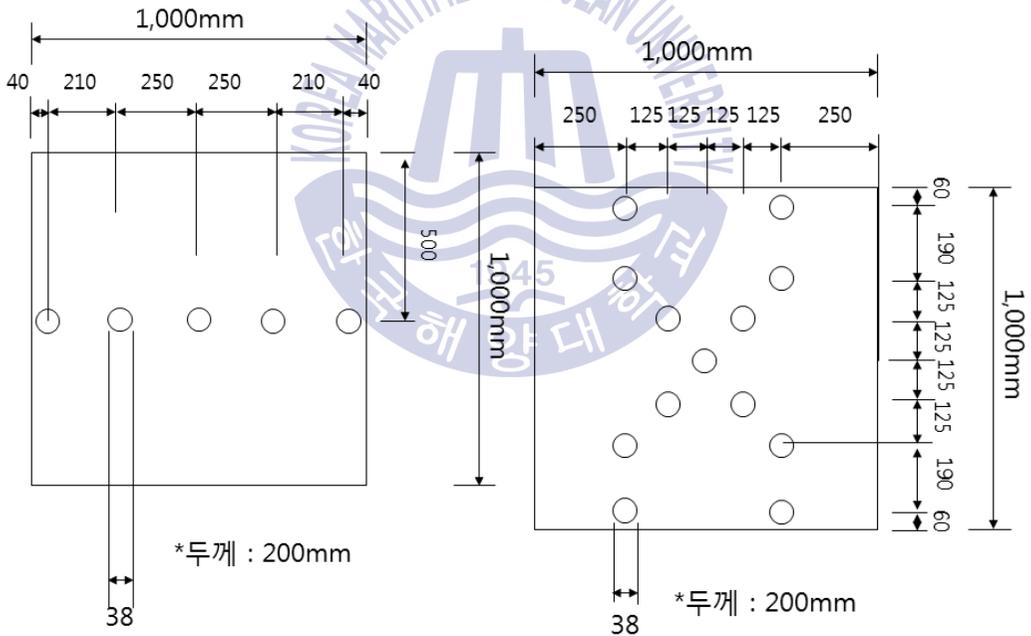
전술한 수치해석 모델 결과를 검증하기 위하여 팽창압 측정시험에서 사용한 SCDA와 동일한 제품을 이용하여 실험을 수행하였다. 모델검증을 위해 제작된 콘크리트 블록은 총 4종류이며 의도한 대로 균열진전이 발생할 것인지 확인하기 위한 추가 시편을 2종류를 더 제작하여 SCDA 사용에 의한 콘크리트 블록(30MPa)의 균열진전도 확인하였다. 홀간 간격이 좁을 경우 빈홀의 영향이 있음이 사전 연구를 통하여 확인된 바 있다(Gambaste, 2003). 그러나 본 연구에서는 해석모델과 다르게 실제 실험에서는 빈 홀을 고려하지 않고 시편을 제작하였다. 이는 빈 홀에서는 응력집중이나 균열 진전 등 해석 결과에 민감하게 영향을 주는 위치가 아닌 것이 해석결과로 확인되었기 때문이다. 또한 시험체에 홀의 수가 많으면 시험체 타설과정에서 의도치 않은 균열을 발생시킬 우려가 있어 시험에서는 이를 고려하지 않았다.

실험에 사용된 SCDA는 Dexpan 제품이며 10월의 외기온도(15°C~25°C)를 고려하여 Dexpan type 2 (10°C~25°C)을 사용하였다. 제작된 슬래브는 깊이가 20cm인 점이 해석모델과 차이점이며 천공홀의 크기, 위치는 아래 Fig. 5-4와 같이 모두 동일하게 제작하였다. 실험을 수행하면서 외관법을 이용하여 콘크리트에 가해질 팽창압을 유추하였으며 홀과 홀사이 중심부에 변형률게이지를 부착하여 균열생성 시점을 확인하였다. Fig. 5-5는 사용된 Dexpan SCDA의 배합과 변형률 측정을 위한 DAQ 시스템을 나타낸 것이다.



(a) Pattern-1

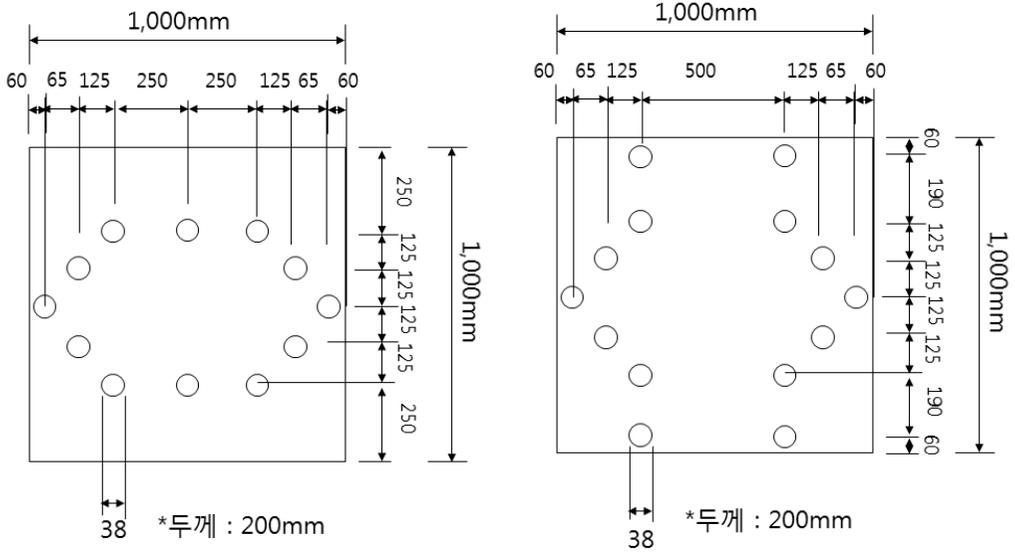
(b) Pattern-2



(c) Pattern-3

(d) Pattern-4

Fig. 5-3 모델검증을 위한 콘크리트블럭 도면



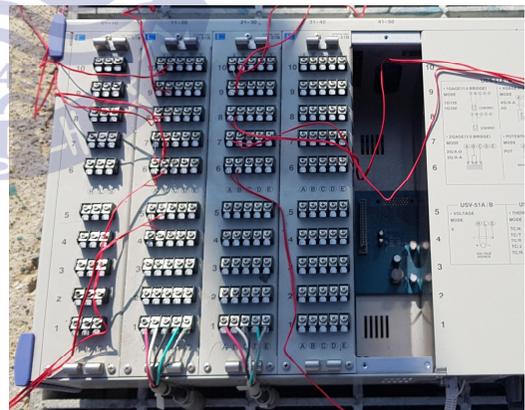
(a)

(b)

Fig. 5-4 콘크리트블럭 파괴 시험 결과

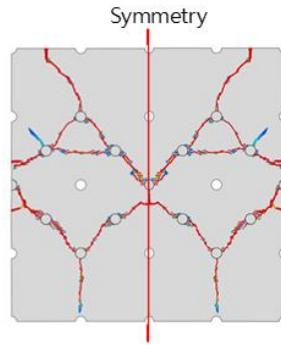


(a) SCDA 배합

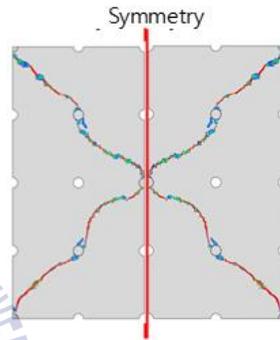
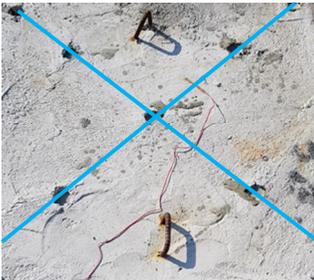


(b) DAQ system

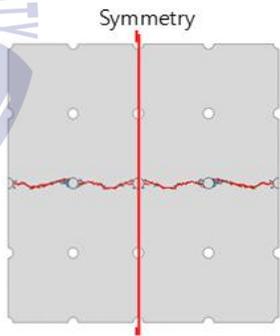
Fig. 5-5 SCDA 배합 및 DAQ system



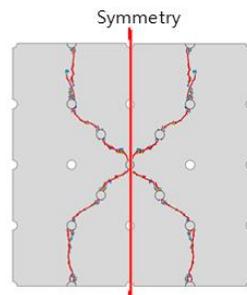
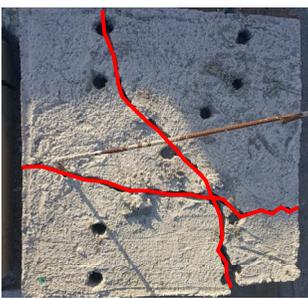
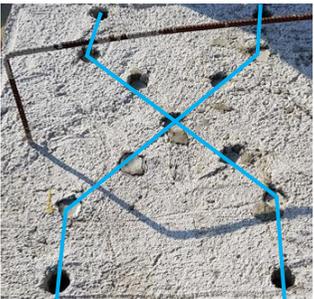
(a) Pattern-1



(b) Pattern-2



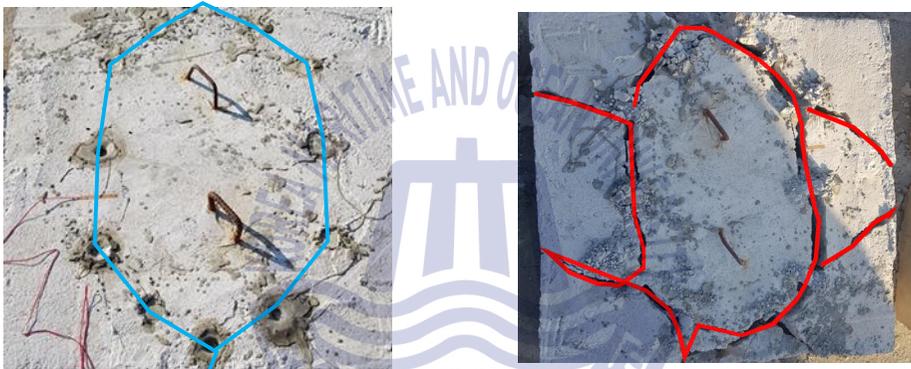
(c) Pattern-3



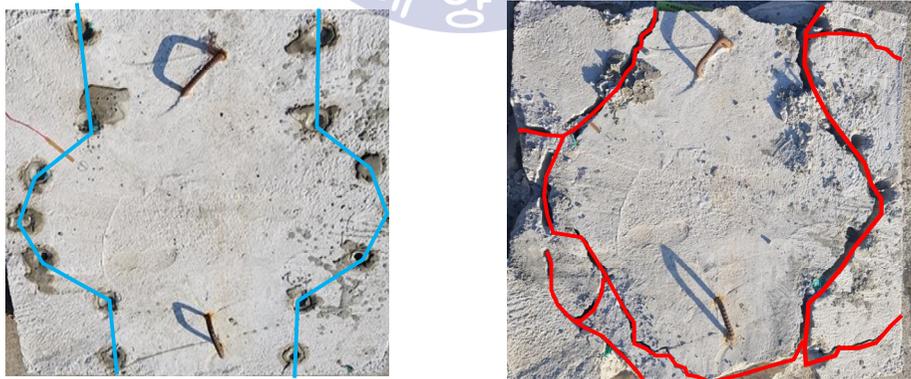
(d) Pattern-4

Fig. 5-6 모델검증 결과

실험결과 나타난 균열 패턴을 해석결과와 비교한 그림을 Fig. 5-6에 나타냈다. Fig. 5-6(a)~(c)의 실험결과에서는 SCDA에 의해 콘크리트에 발생한 균열형상이 해석과 매우 유사하게 나타난 것으로 확인되었다. SCDA가 위치하지 않은 홀과는 균열형성 시점이나 모양이 다소 차이가 있으나 SCDA가 위치한 천공홀 사이에는 예상한 대로 균열이 생성되었다. 다만 모델검증 4(Fig. 5-6(d))에서는 예상보다 높았던 외기온도(약 25℃)로 인해 내부온도의 상승과 함께 내부압력이 급작스레 상승하여 시료가 폭발하였고 이로 인해 SCDA가 외부로 유출되어 팽창압을 잃으면서 일부 구간에 예상했던 균열이 발생되지 않았다. 그러나 외부로 유출되지 않은 일부 천공홀에서는 해석결과와 매우 유사한 균열 형상을 나타냈다.



(a) 시편1



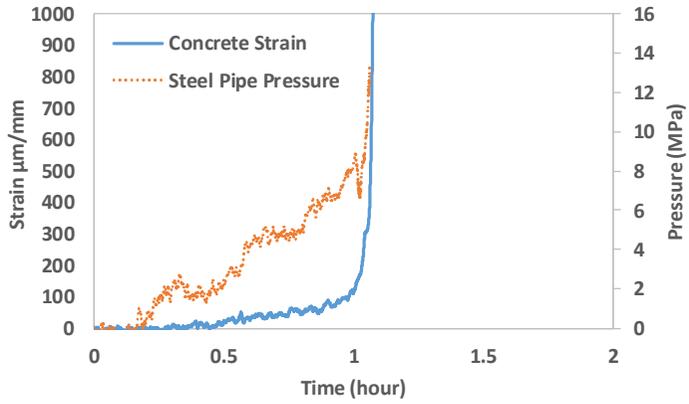
(b) 시편2

Fig. 5-7 균열진전 결과

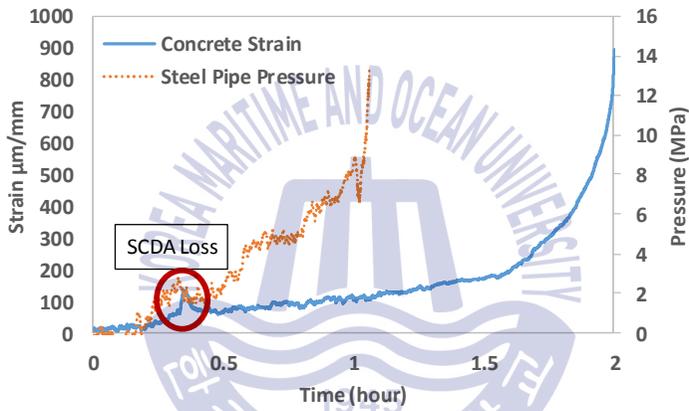
추가적으로 복잡한 균열패턴을 의도하여 실험한 결과 Fig. 5-7와 같이 시편 1과 시편 2도 의도했던 방향으로 균열이 발생하였음을 확인하였다. 추가로 Fig. 5-8의 Pattern-1(모델검증1)과 시편-1,2 에서 홀사이 중앙 지점 콘크리트 상부 표면에서 발생하는 변형률을 강관 외관법으로 측정된 팽창압을 나타내었다.

예상(약 15°C-20°C)보다 따뜻했던 외기온도(약 25°C)의 영향으로 배합 후 약 1시간 뒤 강관에서 순간적으로 높은 변형률(팽창압)이 발생하였으며 콘크리트 시편에서도 마찬가지로 약 1시간 후 높은 변형률을 발생시켰음을 Fig. 5-8(a)와 (c)를 통해 확인할 수 있다. 따라서 배합 1시간 후 콘크리트에 균열이 난 것으로 볼 수 있다. 다만 시편-1에서는 콘크리트에 발생하는 변형률이 늦은 시점에 발생하여 배합 약 2시간 후부터 급격하게 발생하였다. 시편 1의 경우 외기온도에 의한 SCDA의 급격한 반응에 따른 폭발로 인해 SCDA의 유실이 발생하여 감소된 팽창압으로 인하여 균열생성 시간이 지연된 것으로 판단된다.

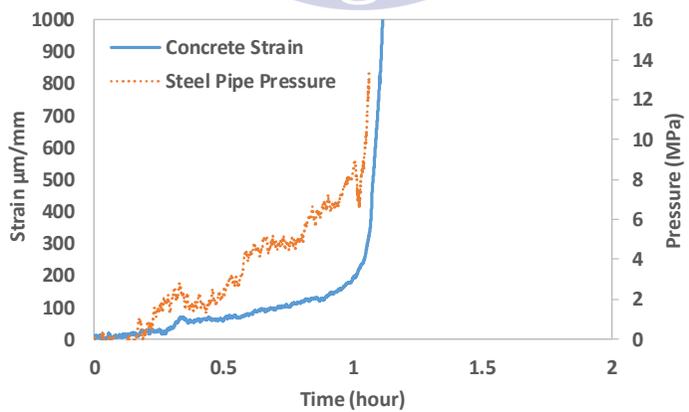




(a) Pattern-1



(b) 시편-1



(c) 시편-2

Fig. 5-8 균열진전 결과

5.3 해석모델을 활용한 최소요구팽창압 예측

5.3.1 모델변수연구

콘크리트구조물 균열 발생에 필요한 최소요구팽창압 확인을 위한 변수연구를 수행하였다. 변수는 Fig. 5-9와 같이 콘크리트의 압축강도(f_{ck}), 천공홀 간 간격(k-factor, s), 자유단과 가장 가까운 천공홀 중심까지의 거리(a), 그리고 사용된 천공홀의 수로 선정하였다. 이러한 변수 연구는 간격과 천공홀의 수 그리고 압축강도에 따른 최소요구팽창압의 변화를 확인하기 위함이다. 또한 구조물 해체를 위해서는 콘크리트를 자유단으로부터 해체시키는 것이 효과적인 구조물 해체방법이므로 자유단으로부터 가로방향 균열과 세로방향 균열로 나뉘어 해석을 수행하였다. 2개의 가로균열과 1개의 세로균열을 조합하면 자유단으로부터 ‘ㄷ’ 형태의 균열을 발생시킬 수 있으며 자유단으로 부터는 구속효과가 없으므로 콘크리트 블록 해체에 유리하다. 콘크리트의 재료모델은 전술한 바와 같이 콘크리트의 균열진전 확인에 적합한 Damaged Plasticity Model을 사용하였으며 파괴에너지 예측식은 유럽의 CEB-FIP(2010)을 참고로 하였다. 이와 관련된 상세한 설명 및 관련 이론은 3장에 기술하였다. 균열 진전 해석 시 해석의 수렴성을 위해 외연적(Explicit) 해석방법을 수행하다. 따라서, 동적인 영향을 최소화하기 위하여 준정적 해석을 수행하였으며 해석 시 발생한 Kinetic energy를 Fig. 5-10에 나타냈다. Kinetic energy가 실험 변수에 대한 내용과 해석결과를 Table 5-1에 나타냈다. 동적 에너지가 최대치가 되는 시간은 초기 균열이 생성 진전되는 순간으로 이 때 전체 에너지(Total energy)에 대한 Kinetic energy의 비율은 0.00594%로 나타나 동적인 영향은 매우 미소한 것으로 확인되었다. 관련 변수(압축강도)에 따른 재료 물성치의 경향을 Fig. 5-12에 나타냈다. Fig. 5-12(a)는 압축하중 하에서 콘크리트의 거동을 나타내며 압축강도가 증가함에 따라 최대응력이 증가하는 것을 확인할 수 있고 Fig. 5-12(b)에서는 인장 작용 시의 콘크리트의 거동을 나타낸다. 최소요구팽창압은 콘크리트에 균열이 생성되면서 압력이 급격하게 떨어지는 시점을 기준으로 하였다.

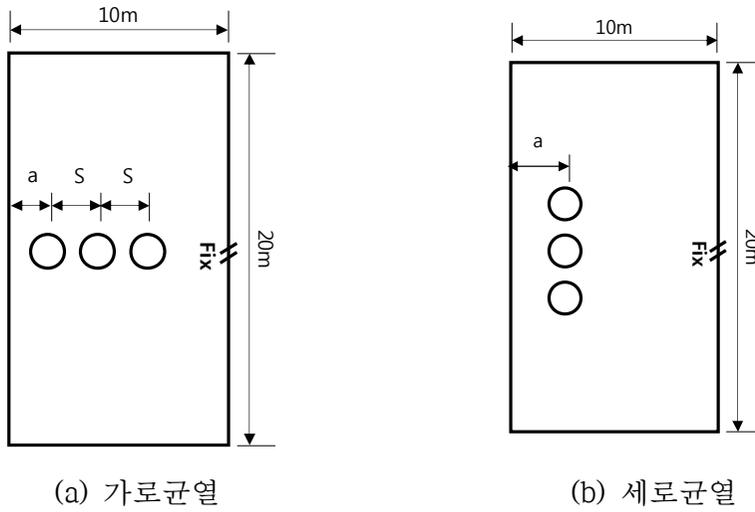


Fig. 5-9 해석 모델 변수

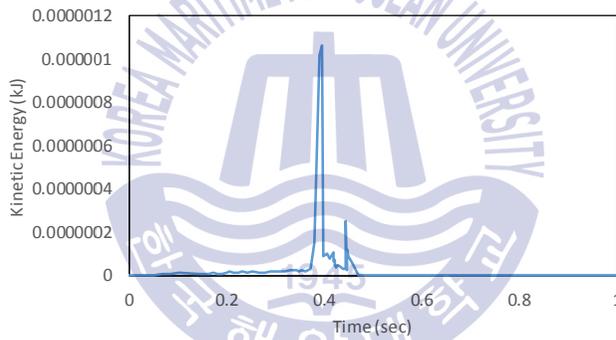


Fig. 5-10 Kinetic Energy

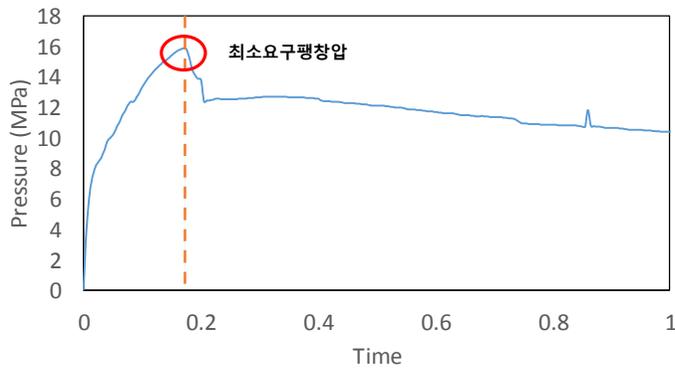
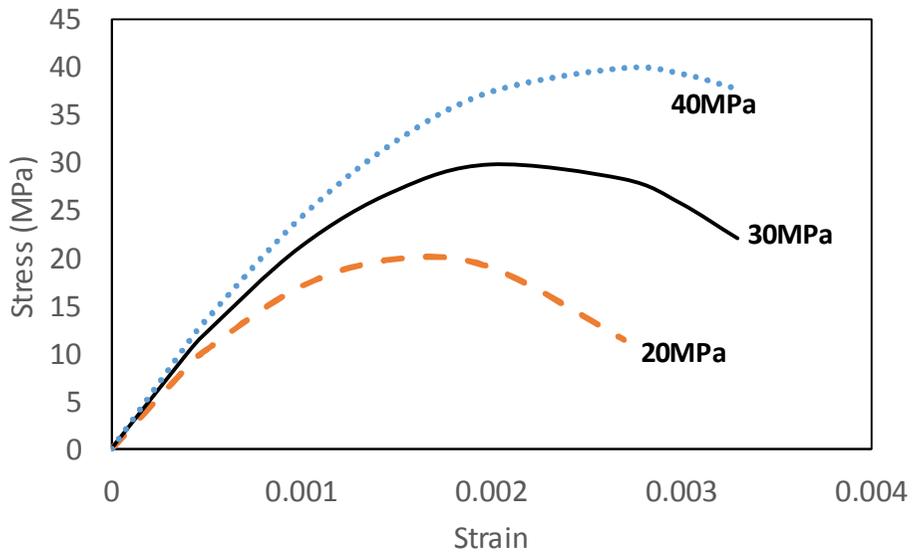
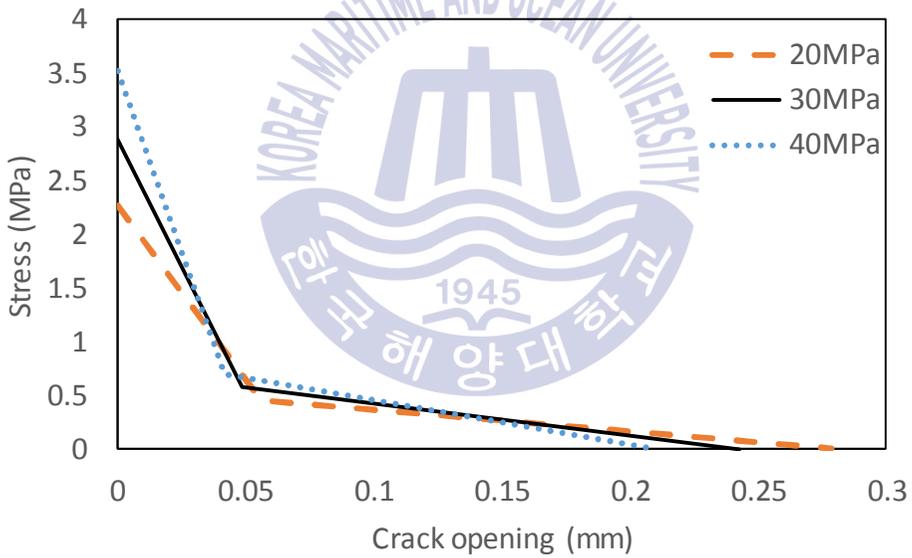


Fig. 5-11 균열 측정 시점

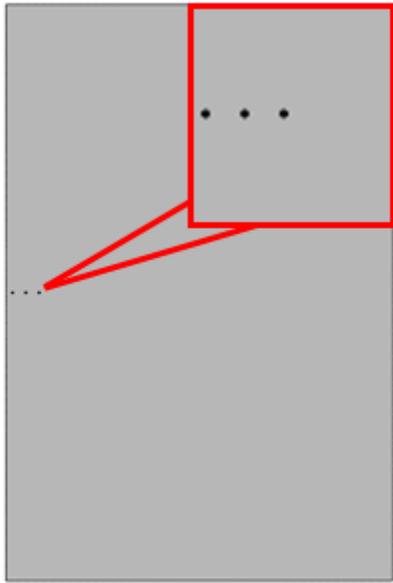


(a) Hognestad compressive stress-strain curves

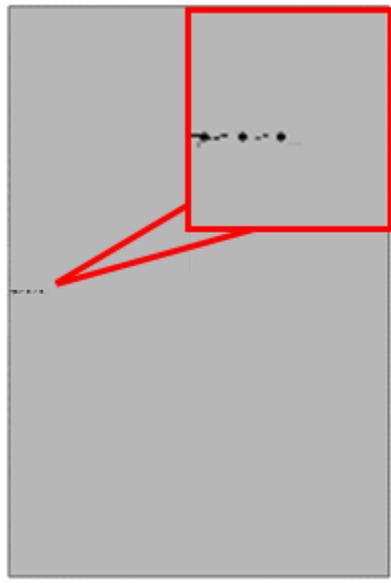


(b) Bilinear tensile stress-crack opening curves

Fig. 5-12 재료물성치



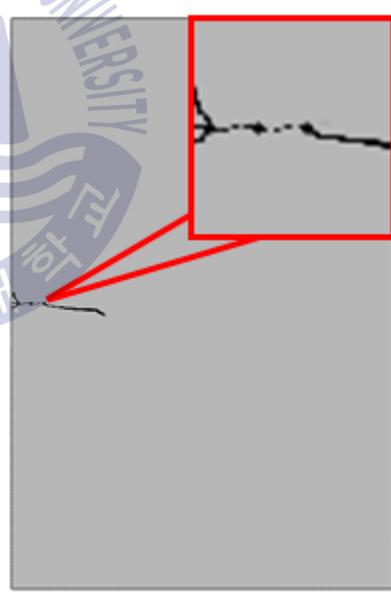
(a) Applied Pressure (0MPa)



(b) Applied Pressure (3MPa)

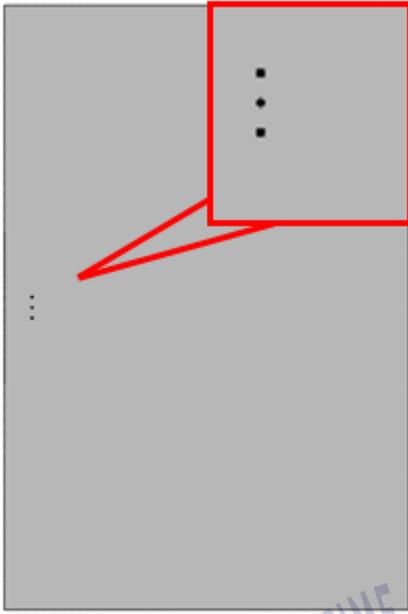


(c) Applied Pressure (8MPa)

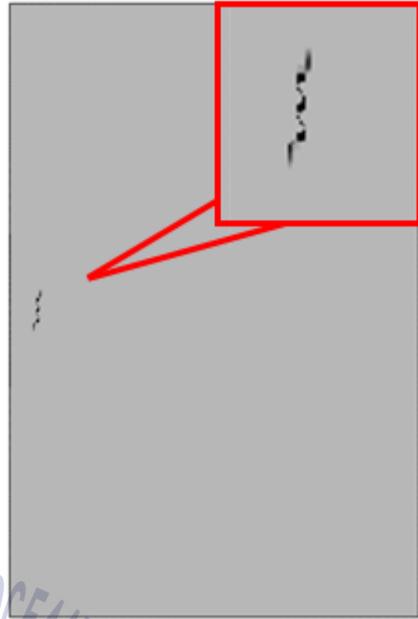


(d) Applied Pressure (13.6MPa)

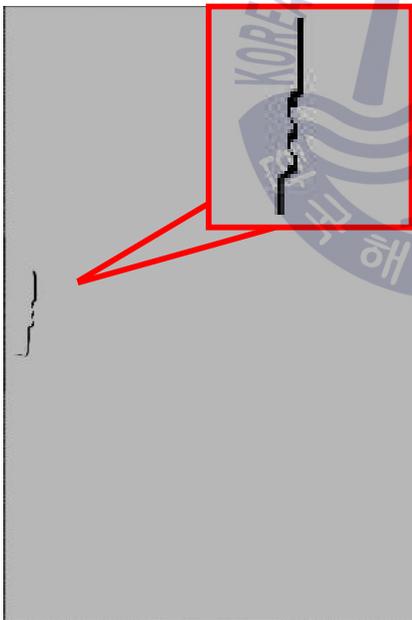
Fig. 5-13 Crack Propagation (가로)



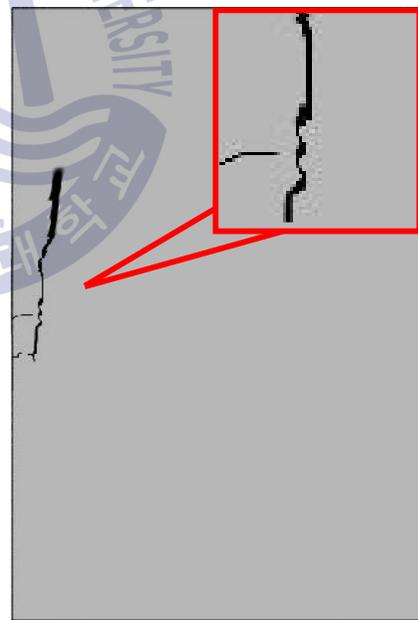
(a) Applied Pressure (0MPa)



(b) Applied Pressure (2MPa)



(c) Applied Pressure (5MPa)



(d) Applied Pressure (8.3MPa)

Fig. 5-14 Crack Propagation (세로)

Table 5-1 변수해석 및 결과

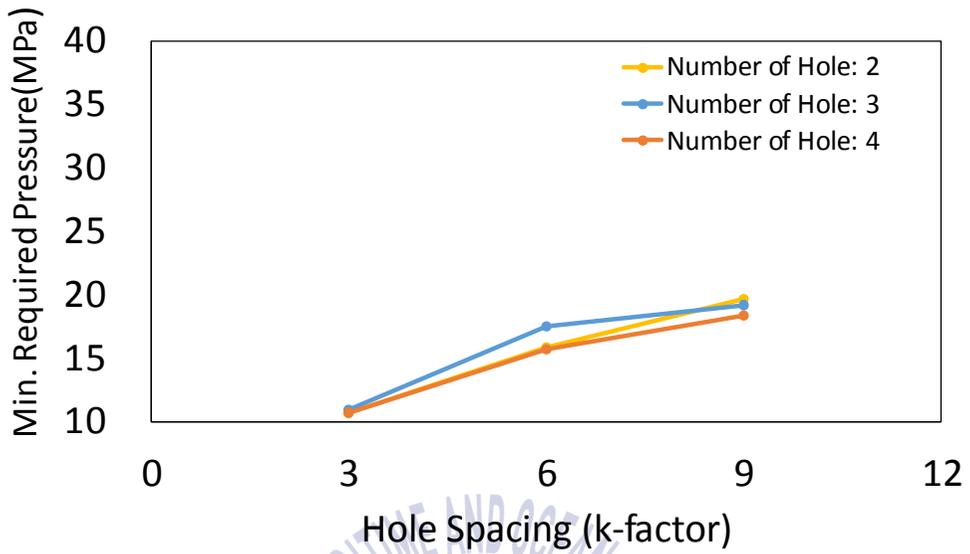
Crack Type	Number of Hole	k-factor (1=38mm)	a (Distance from free surface)	Concrete Compressive Strength (MPa)	Minimum Required Pressure
Horizontal	2	3	0.5s	20	10.8
				30	13.7
				40	15.8
		6		20	15.9
				30	19.5
				40	21.5
		9		20	19.7
				30	24.6
				40	27
	3	3		20	11
				30	13.6
				40	15.5
		6		20	17.6
				30	21.4
				40	21.3
		9		20	19.2
				30	26.2
				40	26
	4	3		20	10.8
				30	13.4
				40	15.1
		6		20	15.8
				30	20
				40	23
9		20	18.4		
		30	22.6		
		40	23.9		
Vertical	3	3	0.5s	20	4.5
				30	5.9
				40	6.4
			1.0s	20	5.9
				30	7.9
				40	7.5
			1.5s	20	6.9
				30	9.1
				40	9.7
		2.0s	20	8.3	
			30	10.3	
			40	11.9	
		6	0.5s	20	9.7

			1.0s	30	12.3
				40	14.5
				20	10.6
				30	13.4
				40	15.5
				20	11.7
			1.5s	30	14.8
				40	16.9
				20	12.4
			2.0s	30	15.5
				40	18.7
				20	15
		9	0.5s	30	19
				40	22.5
				20	15.7
			1.0s	30	20
				40	23.5
				20	16.8
			1.5s	30	21.1
				40	24.8
				20	18.1
			2.0s	30	22.5
				40	26.1

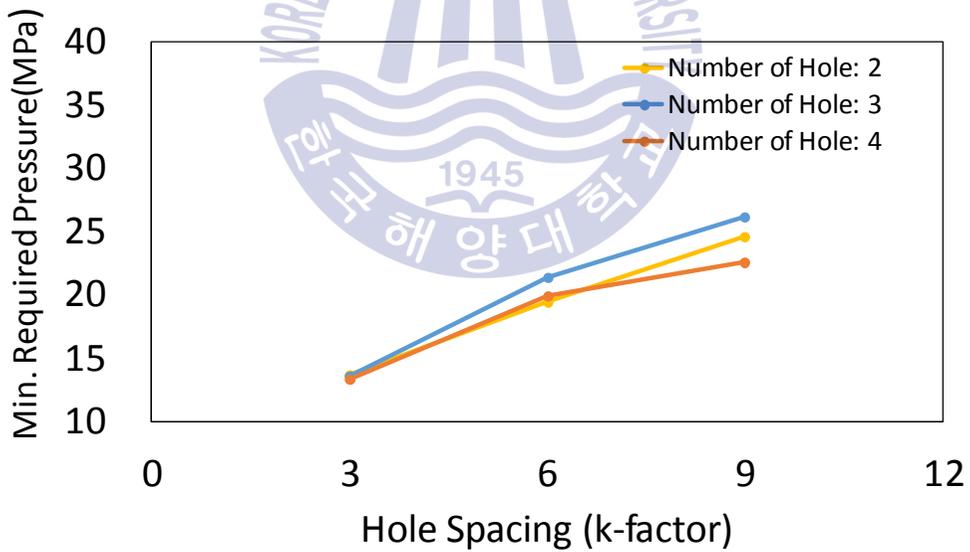
* s : 천공홀 간격

Fig. 5-13 및 5-14에 시간에 따른 해석 모델의 균열 발생을 나타냈다. 가로균열의 경우(Fig. 5-13) 자유단으로부터 가장 가까운 천공홀에서 균열이 발생하고 생성된 균열로 인해 천공홀을 기준으로 새로운 자유단이 생성되고 다시 균열이 발생하는 순서로 균열이 내측으로 진전되는 것을 확인할 수 있다.

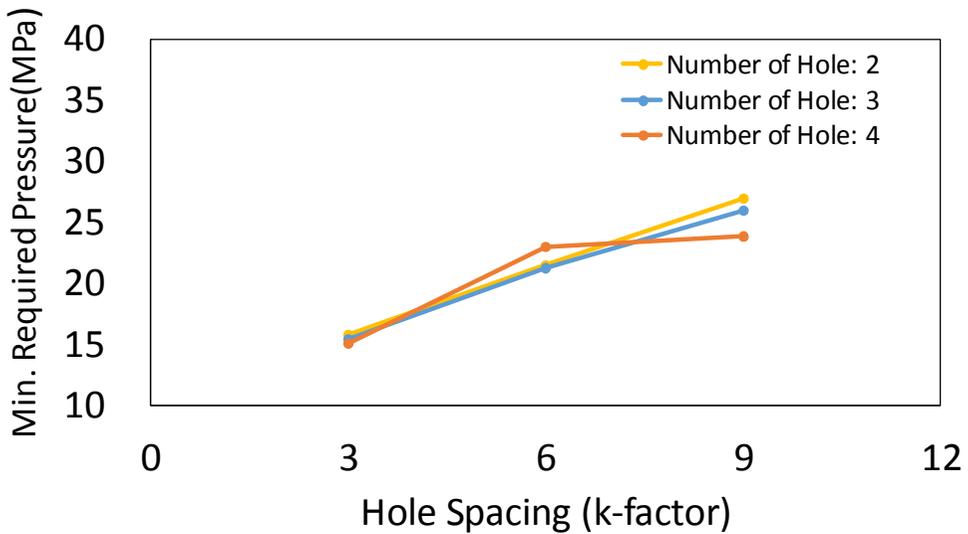
세로균열의 경우(Fig. 5-14) 중심에 있는 천공홀을 기준으로 위와 아래로 동일하게 초기균열이 발생하고 이후 균열이 최외각 천공홀 외측으로 진전됨이 확인되었다. 초기균열생성 및 진전은 요소망의 영향을 받기 쉽고 요소망의 영향이 클 경우 비대칭으로 균열생성 및 진전이 발생할 수 있으나 본 해석에서는 상하 대칭적으로 초기균열이 발생하였으므로 균열의 진전에 대한 요소망의 영향을 무시할 만한 수준인 것으로 판단된다.



(a) 20MPa



(b) 30MPa



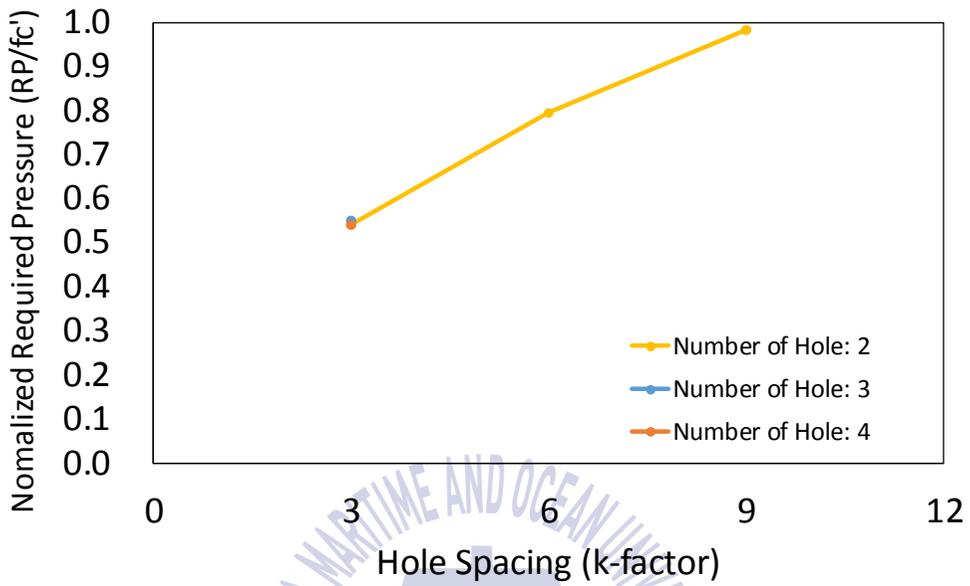
(c) 40MPa

Fig. 5-15 최소요구팽창압 변수해석 결과

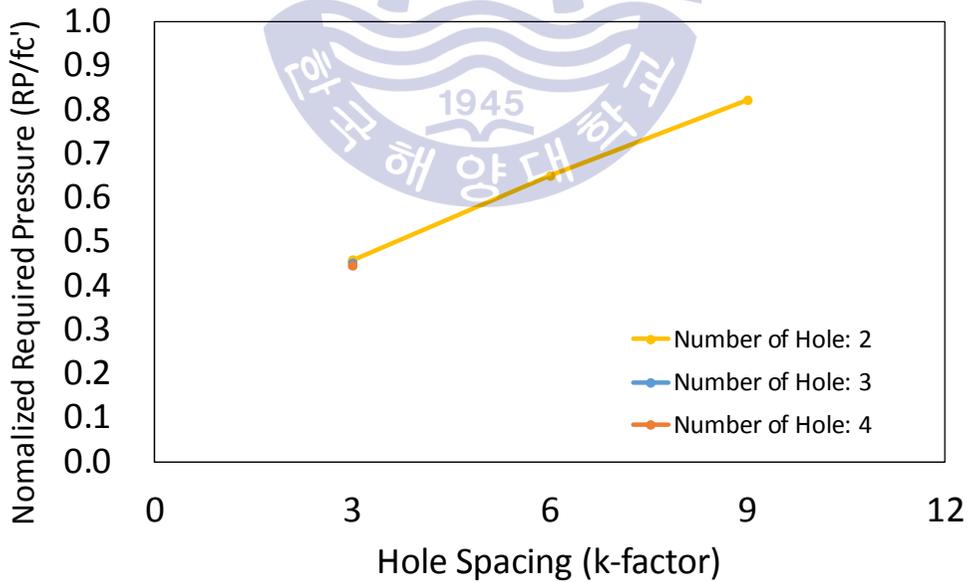
Fig. 5-15는 압축강도 및 홀 간 간격(k-factor)에 따른 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과 천공홀의 수가 2개에서 3개인 경우 천공홀 간격이 최소간격(k-factor 3)에서 2배(k-factor 6)와 3배(k-factor 9)로 증가하는 동안 균열 생성을 위한 최소요구팽창압은 평균적으로 1.5배, 1.7배로 증가함을 보였으며 천공홀 수가 증가하여도 균열 발생에 필요한 최소요구팽창압은 크게 감소하지 않는 것으로 나타나 천공 홀 수와 최소요구팽창압 사이의 상관관계는 낮은 것으로 나타났다. 그러나 천공홀 수가 3개 이상이고 k-factor가 6 이상인 경우는 의도한 균열의 길이가 최대 1.197m로 본 연구에서 제시되어 있는 구조물 크기대비 11.97%에 해당되는 조건이다. 해석결과 구조물의 끝단에 가까워 질수록(9m이내) 최소요구팽창압이 미소하게 감소하는 것으로 확인되었다. 그래프에서 선형적으로 증가하지 않는 해석결과들이 이러한 끝단 경계조건에 의한 영향으로 확인된다.

구속되어 있는 경계조건에 영향을 받지 않으며 반무한체의 조건에서 대부분의 해체설계가 보수적인 상황과 함께 고려된다고 가정을 한다면 위의 해석결과 중 경계조건에 의한 영향은 제외하고 그래프를 다시 그려볼 수 있다. 아래 Fig

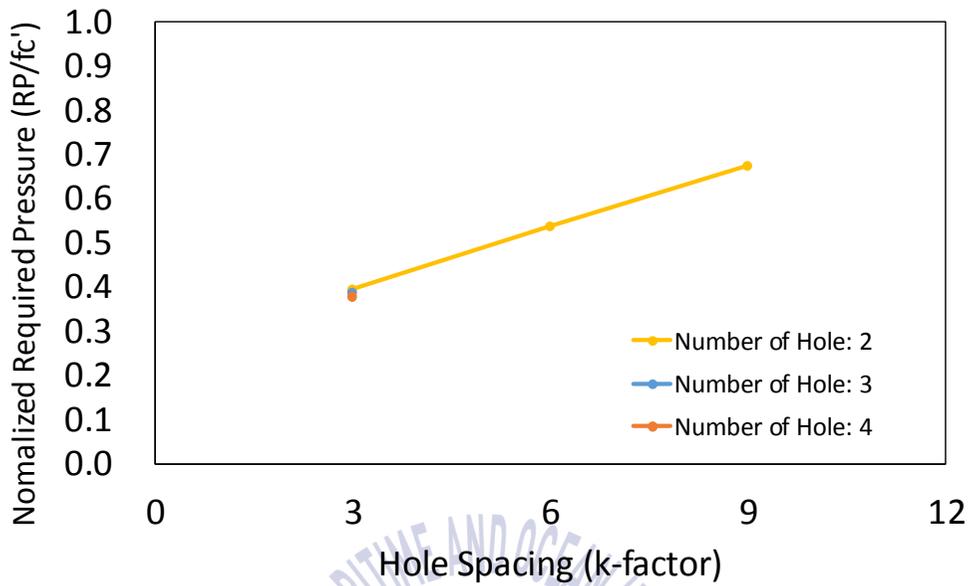
5-16이 경계조건에 의한 영향을 제외하고 콘크리트의 압축강도(f_c')로 표준화 (Normalized)한 곡선으로 재 산정하여 나타낸 그래프이다.



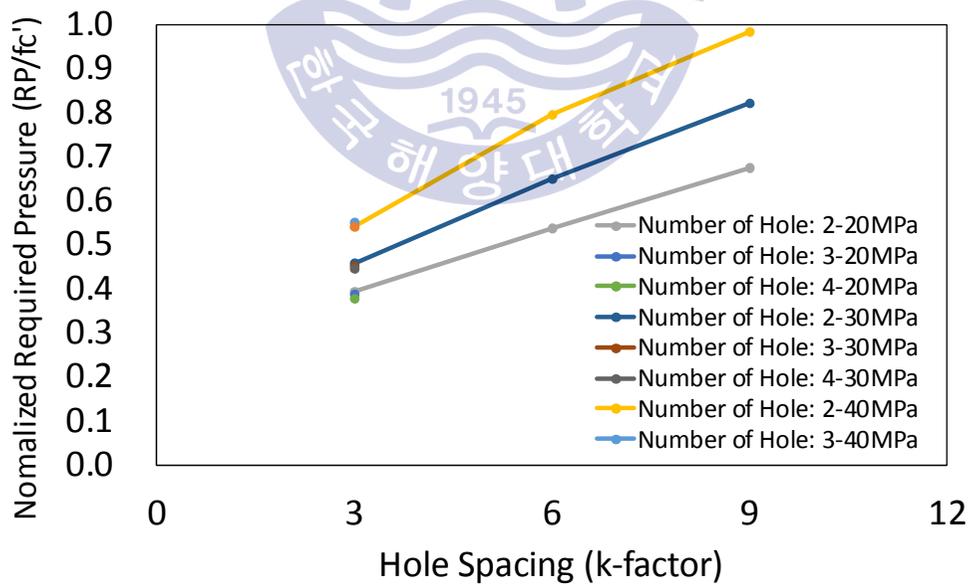
(a) 20MPa



(b) 30MPa



(c) 40MPa



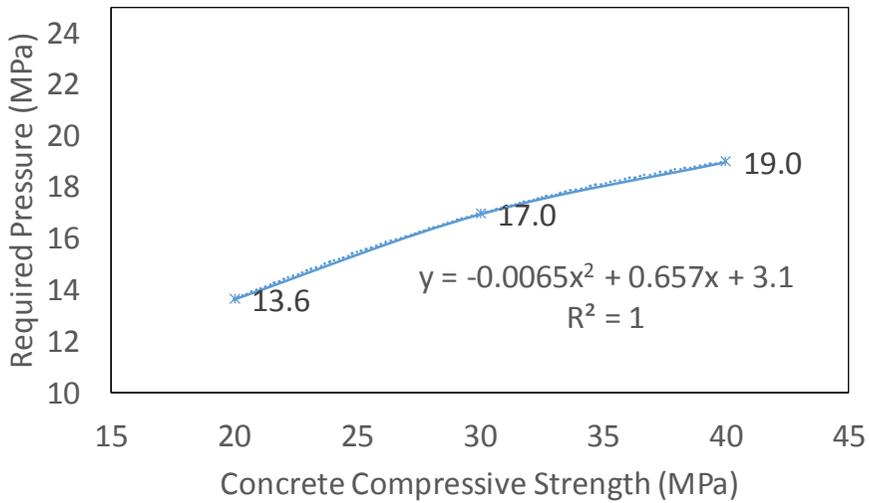
(d) Total

Fig. 5-16 최소요구팽창압 변수해석 결과 Normalized compression

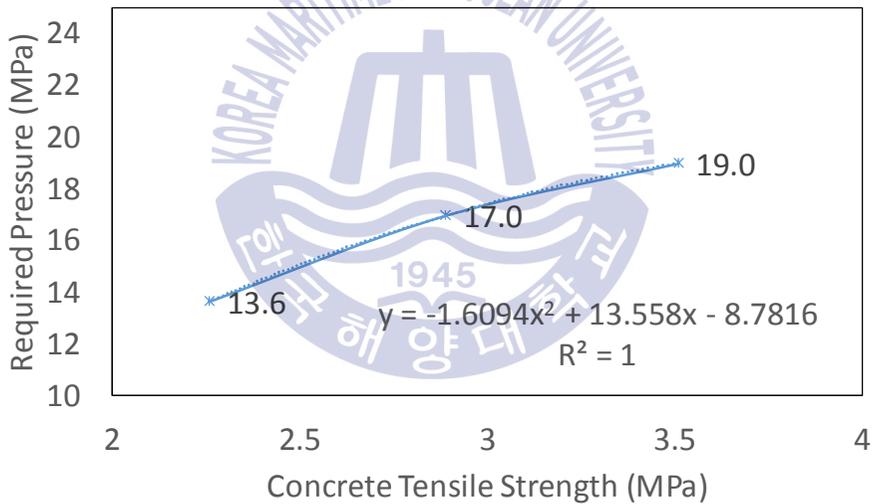
Fig. 5-16(d) 그래프를 보면 정규화된 상태에서 홀 간 간격에 따른 최소요구 팽창압은 선형적으로 증가한다고 볼 수 있다.

Fig. 5-16의 결과를 분석하여 압축강도와 인장강도에 따른 최소요구팽창압의 변화를 그래프로 나타내고 3개의 데이터에 대한 해석결과를 2차 다항식의 관계로 고려할 경우 상관계수(R)값 1.0에 근접하는 수식제시가 가능하다(Fig. 5-17).

콘크리트 압축강도에 따른 최소요구 팽창압은 Fig 5-16에서와 같이 20Mpa에서 30Mpa로 증가(50%)할 때 25% 40MPa로 증가(100%)할 때 40% 증가하는 것으로 나타났다. 인장에 대해서도 그래프로 추세를 나타내었으며 인장응력은 CEB-FIP(2010)에 따라 압축강도로부터 추정하였다. 본 장의 해석결과는 일반적인 콘크리트 강도(20-40MPa)와 홀 간격(3-6 k-factor)에 대하여 수행한 결과이므로 이 범위를 벗어나는 경우 추가적인 연구가 필요할 것이다. 압축강도값을 활용하여 CEB-FIP(2010)식을 이용 인장강도를 산정하고 인장강도에 따른 최소요구팽창압도 함께 비교하였다. 인장강도가 2.26MPa(압축강도 30MPa)에서 2.89(압축강도 40MPa)로 28% 증가하는 동안 최소요구팽창압은 25% 증가하였고 3.51(50MPa)로 55% 증가하는 동안 최소요구팽창압은 40% 증가하여 압축강도보다 인장강도에 더욱 민감한 것으로 확인되었다.



(a) 압축강도에 따른 최소요구팽창압



(b) 인장강도에 따른 최소요구팽창압

Fig. 5-17 가로균열 최소요구 팽창압

천공홀 2개의 경우 20 MPa의 콘크리트에서는 k-factor가 9에서 콘크리트 압축강도와 같은 최소요구팽창압이 필요한 것으로 나타났으며 본 연구에서 고려한 SCDA(Dexpan)을 사용할 경우 외기온도에 따라서는 균열생성이 되지 않는 범위로 고려될 수 있다.

k-factor에 대한 최소요구팽창압의 변화를 Fig. 5-18에 나타냈다. k-factor가 3배 증가하는 동안 최소요구팽창압은 1.79배 증가함을 알 수 있으며 이는 천공홀의 간격이 1/3로 감소할 경우 최소요구팽창압은 45% 감소하여 천공홀 간격이 좁을수록 구조물의 균열 발생이 쉬워짐을 알 수 있다.

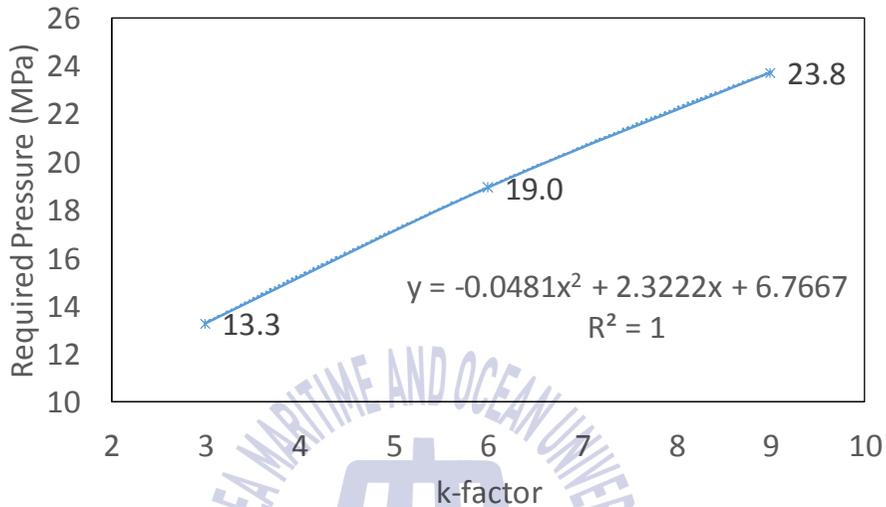
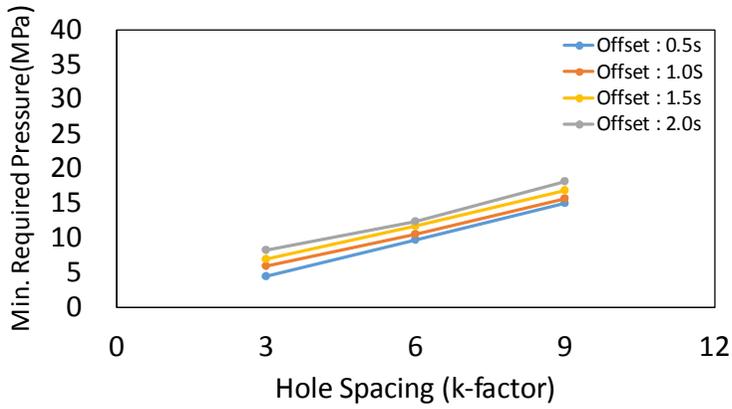
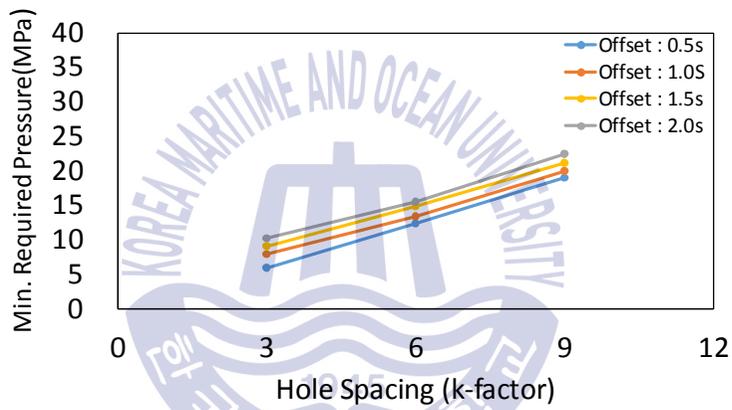


Fig. 5-18 k-factor에 따른 최소요구 팽창압 (압축)

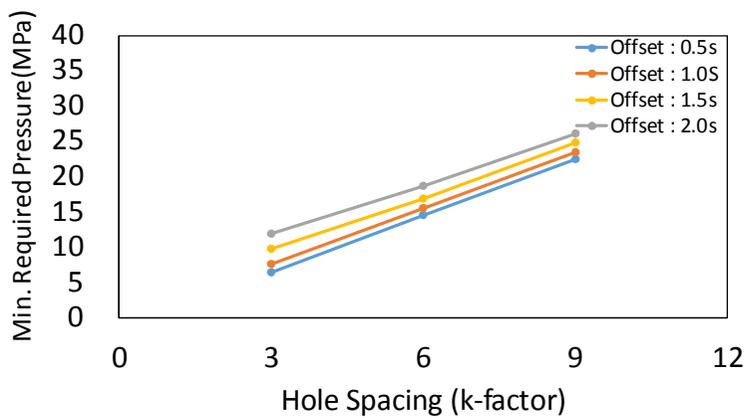
이후 세로 방향 균열생성 시 필요한 최소요구팽창압 해석결과를 Fig 5-19에 나타내었다. 세로방향의 경우 경계조건에 영향을 받지 않으며 대부분의 결과가 홀 간격에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 확인되었으며 자유단으로부터 떨어진 거리(L_{off})가 가까울수록 작은 최소요구팽창압이 산정되었다.



(a) 20MPa

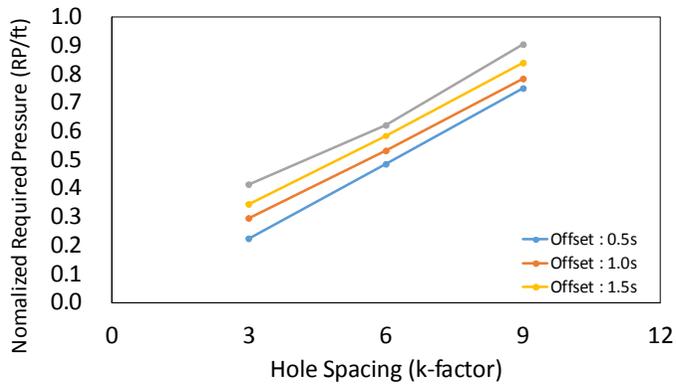


(b) 30MPa

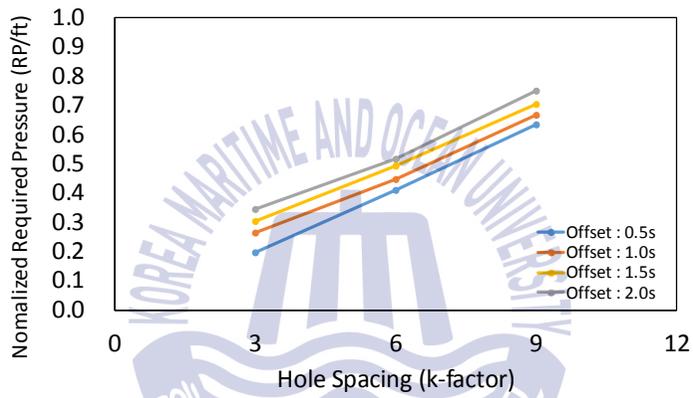


(c) 40MPa

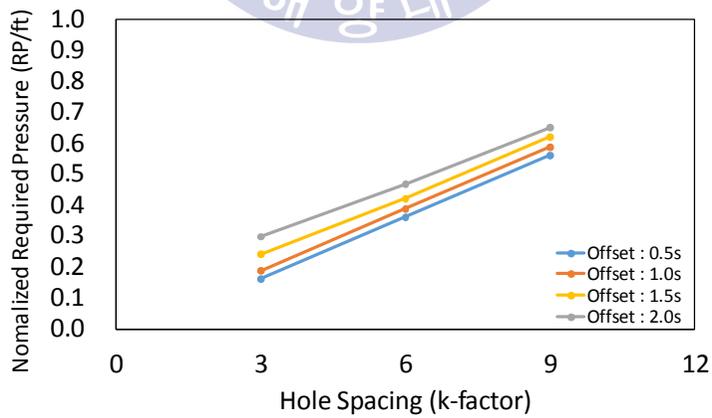
Fig. 5-19 최소요구평창압 변수해석 결과



(a) 20MPa



(b) 30MPa

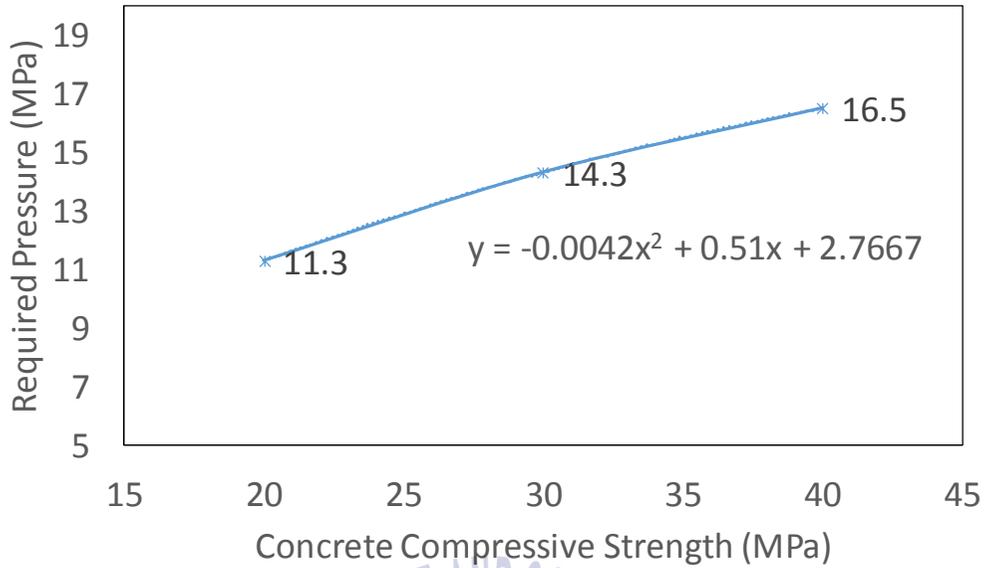


(c) 40MPa

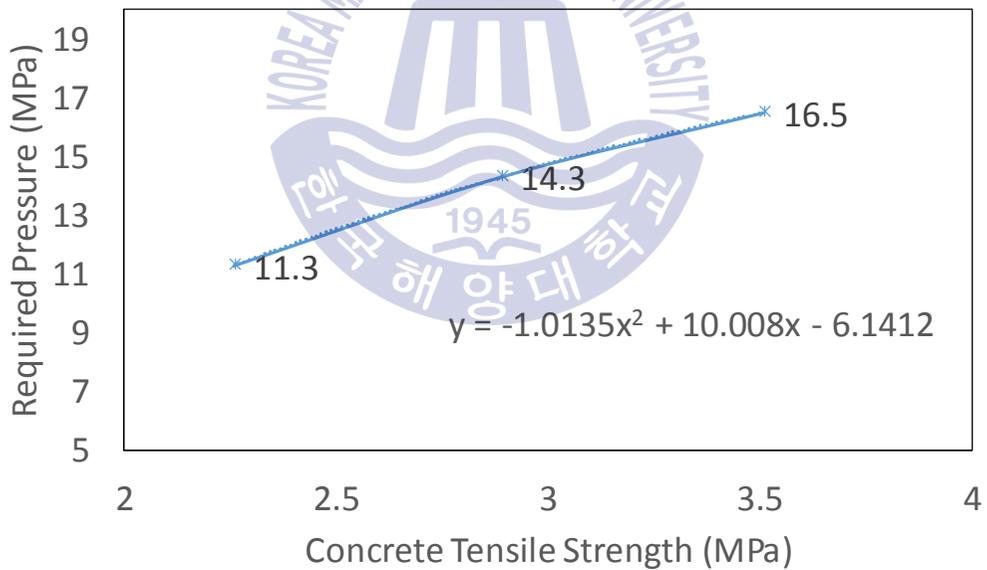
Fig. 5-20 최소요구팽창압 변수해석 결과 Normalized compression

Fig. 5-20의 결과를 분석하여 세로방향 균열에 대해서도 압축강도와 인장강도에 따른 최소요구팽창압의 변화를 그래프로 나타내고 3개의 데이터에 대한 해석결과를 2차 다항식의 관계로 고려할 경우 상관계수(R)값 1.0에 근접하는 수식 제시가 가능하다. 팽창압은 Fig. 5-21에서와 같이 20Mpa에서 30Mpa로 증가(50%)할 때 27% 40Mpa로 증가(100%)할 때 46% 증가하는 것으로 나타났다. 인장에 대해서도 그래프로 추세를 나타내었으며 인장응력은 CEB-FIP(2010)에 따라 압축강도로부터 추정하였다. 인장강도에 따른 그래프를 역시 인장강도가 2.26 MPa(압축강도 30MPa)에서 2.89(압축강도 40MPa)로 28% 증가하는 동안 최소요구팽창압은 27% 증가하였고 3.51(50MPa)로 55% 증가하는 동안 최소요구팽창압은 46% 증가하여 압축강도 변화에 더욱 민감한 것으로 확인되었다.





(a) 압축강도에 따른 최소요구팽창압



(b) 인장강도에 따른 최소요구팽창압

Fig. 5-21 세로균열 최소요구 팽창압

Fig. 5-21의 결과를 분석하여 자유단으로부터 떨어진 거리(L_{off})에 따른 최소요구팽창압의 변화도 아래와 같이 그래프(Fig. 5-22)로 나타내었다. 여기서는

20MPa, 30MPa, 40MPa의 해석결과의 평균을 이용하여 자유단으로부터 거리에 따른 최소요구팽창압의 변화를 검토하였다. 평균적으로 자유단으로부터 57mm 균열 형성 위치가 이격됨에 따라 31%의 팽창압 증가가 필요한 것으로 확인된다. 이는 1mm 이격됨에 따라 0.544%의 팽창압 증가가 주어진 콘크리트의 압축강도 범위에서 선형적으로 증가됨을 말해준다.

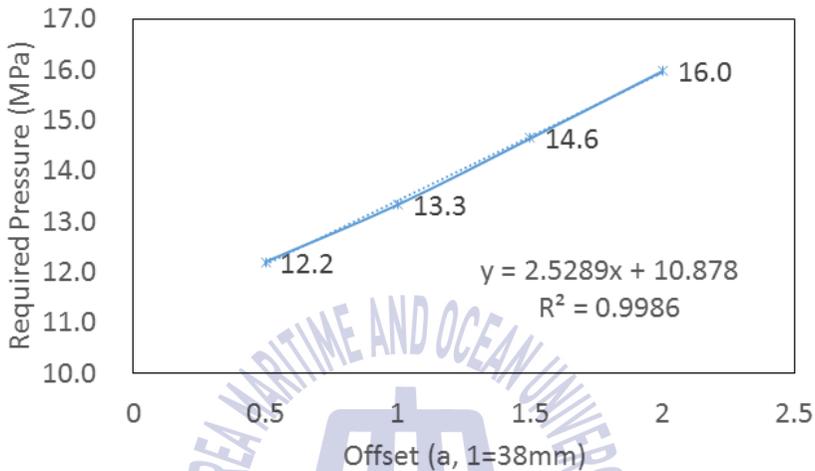


Fig. 5-22 Offset에 따른 세로방향 최소요구 팽창압

위의 해석결과 분석을 통해 다음과 압축강도에 따른 정규화된 최소요구팽창압(Normalized minimum required pressure)에 대한 가로와 세로의 식을 제안하였다. 콘크리트 압축강도의 범위는 20MPa에서 40MPa로 고강도 콘크리트나 암반 등에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

$$\text{Horizontal crack} : -0.0065f_{cm}^2 + 0.657f_{cm} + 3.1 \quad (14)$$

$$\text{Vertical crack} : -0.0042f_{cm}^2 + 0.51f_{cm} + 2.7667 \quad (15)$$

여기서,

f_{cm} : 평균압축강도

무소음화학팽창제 중 본 연구에서 고려한 Dexpan의 경우 최대 124 MPa의 팽

창압을 발생시킨다고 명시되어 있으나 현장타설조건, 본 연구를 통해 외관법으로 확인된 실제 팽창압, 팽창압 발생시간 등의 불확실성을 고려하여 실제 이의 1/3인 41.3 MPa의 팽창압을 발생시킬 것으로 가정하였다. 이를 이용하여 발생 팽창압보다 작은 최소요구 팽창압이 필요한 경우 균열을 발생시킬 것으로 판단되며 이를 이용하여 천공홀의 적정 간격을 예측하는 식을 다음과 같이 수평방향(Horizontal crack)과 수직방향(Vertical crack) 균열 형성 식을 제안하였다. 수직방향에 대해서는 자유단과 떨어진 거리에 따른 경향을 확인하여 2.0s를 기준으로 1.5s일 때 평균 0.9, 1.0s일 때 평균 0.8, 0.5s일 때 평균 0.7의 계수를 곱하여 주어야 정확한 L_{off} 에 따른 최소요구팽창압의 값을 예측할 수 있으나 실제 현장에서 2d 이하의 L_{off} 값은 효과적인 천공홀의 배열이 아니므로 모든 적용에 대해 2.0s 이상을 적용할 것이라는 판단에 따라 L_{off} 에 대한 영향은 수식에서 제외하였다. 최대한 현장업무 적용에 용이한 간편식을 만들기 위해 선형관계로 수식을 가정하였으며 해석값과 본 식으로 산정된 요구팽창압의 편차를 분석해본 결과 가로식(16)에 대해서는 최소 0.7%에서 최대 17.7% 보수적으로 예측하였으며 세로식(17)에 대해서는 최소 0%에서 최대 21% 보수적으로 예측하였다.

$$\text{Horizontal crack} : 2.0 \frac{S}{D} + 0.26f_{cm} < 41.3 \text{MPa (Min. required pressure)} \quad (16)$$

$$\text{Vertical crack} : 1.6 \frac{S}{D} + 0.18f_{cm} < 41.3 \text{MPa (Min. required pressure)} \quad (17)$$

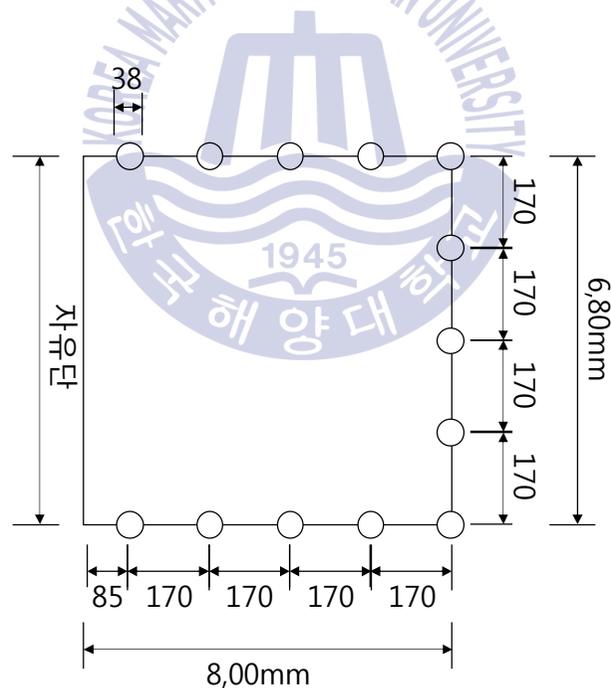
여기서, S : 천공홀 간격 (mm), D : 천공홀 직경 (38 mm), f_{cm} : 콘크리트 평균압축강도 (MPa)을 나타낸다.

위에 제시된 식을 기준으로 본 연구에서 수행된 Fig5-6 의 Pattern-1 실험에 적용해 볼 경우 Pattern-1의 홀간 간격(k-factor)은 177mm (4.65)로서 위의 식 (16)에 대입할 경우 균열 형성은 17.1MPa에서 발생하는 것으로 확인된다. 균열의 형상이 대각선인 점을 고려하여 식 (17)에 대해서도 계산을 수행해 본 결과 균열형성에 필요한 최소 요구팽창압은 12.84 MPa로 계산된다. 세로 균열이 자유단으로부터 영향을 많이 받으므로 더 낮은 압에서 균열이 형성됨을 확인할 수 있다.

실제 외관법에 따라 측정된 균열 형성시(콘크리트 변형률 게이지의 급격한 상승 시점, 63분) 팽창압은 13.4 MPa로 식1과 식2 결과의 평균값(14.9 MPa)에 해당한다고 볼 수 있다. 이는 현장 여건을 감안할 때 보수적으로 적정하게 예측한 것으로 판단된다.

5.4 현장(포항신항 제4부두) 적용성 검토

본 연구에서 제안하는 최소요구팽창압 예측 식 (16)과 (17)을 이용하여 현장 적용성 검토를 수행하였다. 현장 적용성 검토를 수행할 구조물은 포항신항 제4부두 개축공사현장에 있는 해체 예정 상치콘크리트를 선정하였다. 콘크리트의 강도는 35MPa이고 적용두께는 700mm로 하였다. 구조물을 해체하기 위해서는 1면이 자유단인 ‘ㄷ’ 자 형태의 균열을 생성할 경우 가장 효과적인 해체가 될 것이므로 가로방향 2개와 세로방향 1개의 균열을 아래 Fig. 5-23과 같이 계획하였다.

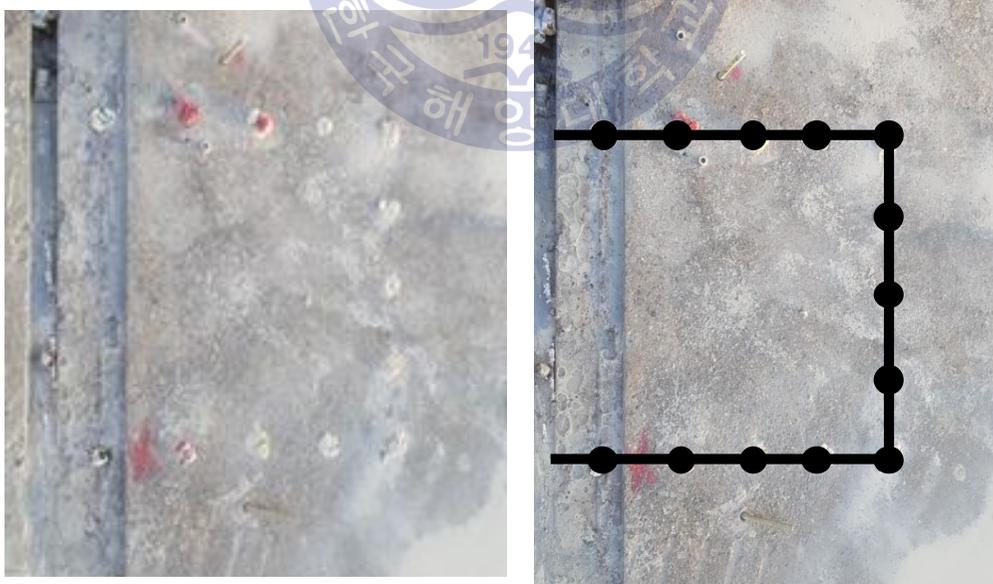


*두께 : 700mm

Fig. 5-23 현장 적용성 검토를 위한 천공홀 배치 도면

예측 식 (16)과 (17)을 이용한 결과 가로방향의 최소요구팽창압은 16.7MPa, 세로방향의 최소요구팽창압은 12.6MPa로 모두 41.3MPa보다 요구팽창압이 낮아 균열을 효과적으로 생성할 것으로 판단된다. 계산된 결과를 이용하여 현장에 천공홀을 시공하고 SCDA를 주입하였다. 사용된 SCDA는 계절과 현장 타설 외 기온도를 고려하여 -5 ~ 10°C의 조건에 타설가능한 Dexpan type 3을 사용하였다.

실험결과 12시간 이후 균열이 발생하였으며 최종적으로 의도한 ‘ㄷ’ 형태의 균열형상이 발생함을 Fig. 5-24(d)와 같이 확인하였다. Fig. 5-24는 구조물 해체를 위한 홀의 천공작업과 SCDA 주입, 주입 이후 균열의 형성과정을 나타낸다. 현장 적용성 검토 결과 본 연구에서 제시한 설계식을 적용할 경우 적절하게 균열을 형성하는 것으로 확인된다. 다만 본 연구조건에서 자유단에 콘크리트 절단수로 인한 침전층이 형성되어 부분적으로 자유단을 구속하여 균열폭의 확대를 방해하고 SCDA 주입시 3개 홀에서 SCDA의 유실이 발생하였음에도 의도한 대로 균열이 발생하였다. 이와 같이 실제 현장에 본 해체 방법을 적용할 경우 자유단으로부터 “ㄷ”자 형태로 순차적으로 해체해 나가는 것이 효과적일 것으로 보인다.

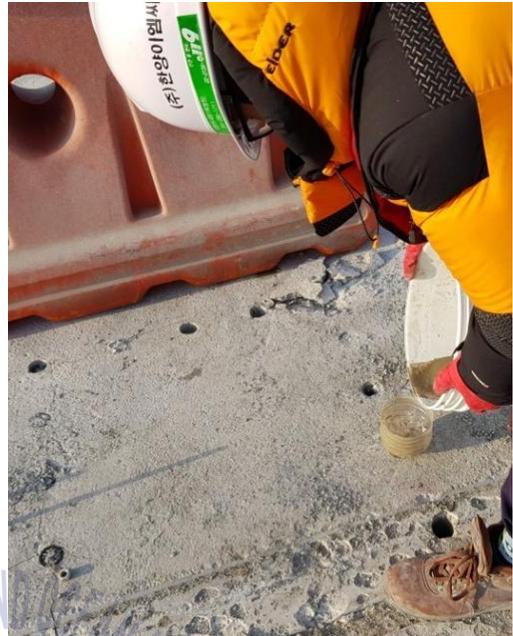


(a) 천공홀 배치

(b) 예상 균열 형상



(c) SCDA 배합



(d) SCDA 주입



(e) 실제 균열 형상



(d) 균열 패턴

Fig. 5-23 현장 적용성 검토

5.5 모델실험의 요약

본 장에서는 SCDA를 활용한 구조물 해체를 위해 개발된 모델을 검증하고 검증한 모델을 활용하여 최종적으로 천공홀간 간격과 콘크리트 압축강도에 따른 균열생성에 필요한 최소요구팽창압 예측식을 제시하였다.

1. Concrete Damage Plasticity 모델에 근거하여 SCDA를 이용한 구조물 해체 모델을 개발하였다. 측정되지 못한 콘크리트의 주요 물성치인 인장강도와 파괴에너지는 CEB-FIP(2010)의 식으로 유추하였다.
2. 개발된 모델을 이용하여 다양한 SCDA위치에 따른 균열 패턴을 확인하고 이를 실외 실험을 통하여 확인한 결과 SCDA 사이에 위치하는 균열은 비교적 적절하게 예측을 함을 확인하였다.
3. 검증된 모델을 활용하여 천공홀 간격과 콘크리트 압축강도에 따른 가로방향 및 세로방향 균열생성시 요구팽창압에 대한 변수연구(Parametric study)를 수행하였다.
4. 콘크리트 압축강도에 따라 2차 다항식의 형태로 최소요구팽창압의 변화가 확인되었으며 천공홀 간격에 따라서는 선형적으로 증가함을 확인하였다.
5. 세로방향 균열이 자유단에 영향을 많이 받음에 따라 상대적으로 영향이 적은 가로방향 균열에 비해 더 낮은 팽창압에서 균열이 생성됨을 확인하였다.
6. 개발된 식을 이용하여 실내실험에서 측정된 최소요구팽창압을 유추해본 결과 팽창압을 만족할 만한 수준으로 측정하였음을 확인할 수 있었으며 현장(포항신항 제4부두) 적용실험을 통해 개발식의 적용성을 최종 검토하였다.

제 6 장 결론 및 고찰

본 연구에서는 SCDA를 활용한 효과적인 구조물 해체 기술 개발을 위해 SCDA의 팽창압 측정방법, 해체 모델 개발 및 실외실험을 통한 모델 검증 후 개발된 모델을 이용, 주요변수 연구를 통해 최종적으로 콘크리트의 압축강도와 홀간 간격에 따른 최소요구팽창압 예측식을 제안하고 제안식의 현장적용성을 검토 하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- SCDA는 타설 시 외기온도에 매우 민감하며 빠른 강도발현을 위해서는 열의 발산을 적절하게 조절할 필요가 있다. 열의 발산을 조절하지 않을 경우 SCDA 내부 화학작용으로 발생한 열로 인해 수증기 등이 함께 팽창압을 급격하게 증가시키는 것으로 확인되었다.
- 팽창압 측정 시 사용되는 강관의 길이에 따른 팽창압은 큰 차이가 없음을 확인하였으며 수화열의 효과적인 발산을 위하여 강관을 일정 부분 수중에 잠기게 하는 것이 효과적임을 확인하였다.
- 국내에서 제작한 SCDA는 팽창압이 낮게 측정이 되었으며 이를 보완한 추가적인 연구가 필요하다. 이는 SCDA의 제작 시 과소생석회를 재료에서 제거하고 일반 생석회를 사용함으로써 발생한 결과로 판단된다.
- SCDA를 활용한 효과적인 구조물 해체 설계를 위해 해석모델을 개발하고 이를 실외 실험을 통해 최소요구팽창압과 최종 균열 패턴을 비교 함으로써 검증하였다.
- 천공홀 간격(k-factor)이 6.6일 경우 잔 균열(Secondary cracks)없이 주요균열(Main crack)이 생성되었으나 균열의 진행방향을 바꿀 경우 4.7까지 비율을 감소 시켜야 하는 것으로 확인 되었다.
- 콘크리트 압축강도(20MPa~40MPa)와 천공홀 간격(k-factor)에 따른 최소요구 팽창압의 관계를 검토한 결과 가로균열이나 세로균열 모두 2차 다항식의 형태로 나타났으며 자유단으로부터 이격된 거리에서 발생하는 세로균열에 대해서는 이격거리에 따른 최소요구팽창압이 선형관계에 있음을 확인하였다.
- 콘크리트 압축강도와 천공홀 간격에 따른 가로방향 및 세로방향 균열 생성

에 필요한 최소요구팽창압에 대한 변수연구를 수행하여 SCDA를 이용한 콘크리트 구조물의 효과적인 해체를 위한 천공홀 배열에 필요한 식을 제안하였다.

- 제안식을 이용하여 현장 적용성(포항신항 제4부두)을 검토한 결과 의도한 균열(ㄷ자)이 발생하였음을 최종 확인하였다.
- 본 연구에서는 홀의 지름이 38mm이며 홀간 간격(k-factor)이 3에서 9에 대해 20MPa에서 40MPa의 콘크리트 구조물의 압축강도 연구결과를 제시한 것으로 이러한 범위를 벗어나는 구조물의 해체 설계시에는 본 연구결과의 적용성에 한계가 있을 것으로 사료된다. 이러한 경우 균열 생성에 필요한 최소요구팽창압 산정을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



감사의 글

당시 시공을 맡고 있었던 현장에서 고민을 시작으로 흥분과 기대감으로 무척 대고 알아보고 조사하게 되었던 논문이 어느덧 4년이란 시간이 지나오면서 그동안 중간 중간 포기할 뻔도 했고 무엇보다 끝까지 해낼 수있을지 스스로도 확신이 부족했던 제 논문이 나오기까지 수많은 분들의 도움을 받았습니다. 이 자리를 빌어 다시 한번 감사의 인사를 드리하고자 합니다.

논문 시작부터 마지막까지 큰 틀을 잡아주시고 아낌없는 조언과 질책 해주신 이재하 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 연구자로서 부족한 저에게 질적 연구와 실험을 경험하게 해주시고 교수님의 역량과 노하우를 알기 쉽게 지도 전달 해주신 점 논문을 떠나 실험 과 연구의 즐거움 또한 느낄 수 있었습니다. 그리고 타 연구 및 보고서로 바쁜 와중에 제 논문의 부족한 실측데이터 및 측정방법에 대하여 같이 머리 맞대어준 김경진 에게도 정말 고맙고 아무 상관없었지만 단지 밥 한끼 얻어먹었던 죄로 제 논문에 코끼어 여러 가지 준비하는데 종종 도와준 박상민도 진심으로 고마웠습니다.

그리고 한번씩 볼 때 마다 따뜻하고 진심어린 조언해주신 이종우 교수님. 처음부터 저를 대학원으로 이끌어 주셔서 이렇게 용기 내어 논문을 진행 할 수 있게 되었던 점에 대해 깊은 감사드립니다.

대학원 생활 중 제 인생도 참 많은 변화가 있습니다.

주로 바다현장과 외지현장으로 다니면서도 직장과 학업 그리고 논문 진행으로 어려움도 있었지만 사랑스런 가족, 직장동료, 후배님들이 있어 무사히 마무리 할 수 있었습니다. 늘 응원하고 격려해준 제 처와 직장에서 자리 비울 때 마다 배려해주신 사장님, 그리고 제 업무를 대신 맡아줬던 구부장등 진심으로 고맙고 또 감사했습니다.

마지막으로 저의 연구실험에 허락하고 배려해주신 한라건설 김용균 소장님, 그리고 기장군청 해안도로 공사 감독관인 김정균 주사님께도 진심으로 감사드립니다.

부족하고 미미한 이 논문이 해안공사 및 각종현장에서 고군분투 고생하시는

해상작업근로자와 환경문제로 야기될 수 있는 문제 그리고 현장주변 피해민원
으로부터 미약하게나마 도움이 되길 바랍니다.

끝으로 지면을 통해 미처 언급하지 못한 많은 분들께도 진심으로 감사하다는
말씀을 전합니다.

2018년 2월



참고문헌

ABAQUS, ABAQUS Documentation, Dassault Systemes, Providence, RI, U.S.A., 2013

CEB-FIP 2010, 2010, Final draft CEB-FIP model code 1010, Bulletin Information Committee Euro-International, Beton 203

Gambatese J.A., Controlled Concrete Demolition Using Expansive Cracking Agents, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 129, No. 1, 2003, pp.98-104

Harada T., Idemitsu T., Watanabe A., Takayama S., The Design Method For The Demolition of Concrete with Expansive Demolition Agents, SEM-RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, Houston, Texas, U.S.A, 1987

Hinze, J. & Brown, J., Properties of Soundless Chemical Demolition Agents, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 120, No. 4, 1994, pp 816-827

Huynh, M.P & Laefer, D.F., Expansive cements and soundless chemical demolition agents : state of technology review, 11th Conference on Science and Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2009

Kim B., Sound of Jeju News “<http://www.jejusori.net/news/articleView.html?idxno=119142>” , 2012

Kim J., The Busan Ilbo “<http://news20.busan.com/controller/newsController.jsp?newsId=20161006000361>” , 2016

Kim, K., Lee, J., Koo, J., Kim, M. & Jung, S., Prediction of required Expansive Pressure of SCDA for Initiating Cracks in Maritime Bedrock, Computational Structural Engineering Institute of Korea Fall Conference, Vol, 2014, No. 10, 2014, pp. 264-265

Laefer, D.F. & Ambrozevitch-Cooper, N. & Huynh, M.P. & Midgette, J. & Ceribasi, S. & Wortman, J., Expansive fracture agent behaviour for concrete cracking, *Magazine of Concrete Research*, vol. 62, No. 6, 2010, pp 443-452

Lee, J. & F. L. Fenves, Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, no.8, 1998, pp.892-900

Lee, J., Koo, J., Kim, K., Kim, M., & Ha, C., Measuring Technique of Expansive Pressure of Soundless Chemical Demolition Agent, Computational Structural Engineering Institute of Korea Spring Conference, Vol. 18, No. 1, 2014, pp. 288-289

Lubliner, J., J. Oliver, S. Oller, & E. Onate, A Plastic-Damaged Model for Concrete, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, 1989, pp. 299-329

Parsakhoo A. and Lotfalian M., Demolition Agent Selection for Rock Breaking in Mountain Region of Hyrcanian Forests, *Research Journal of Environmental Sciences*, Vol. 3, No. 3, 2009