



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

파쇄유체의 접촉 상태가 초기파쇄압에  
미치는 영향

The effects of Fracturing fluid contact state on breakdown pressure



지도교수 장 원 일

2017년 8월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

이 상 훈

본 논문을 이상훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 유 경 근 (인)

위 원 장 원 일 (인)

위 원 정 우 근 (인)



2017년 8월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	ii
List of Figures .....	iii
Abstract .....	iv
1. 서 론 .....	1
2. 셰일가스 특성과 수압파쇄	
2.1 셰일가스 .....	3
2.2 수압파쇄 .....	6
2.3 수압파쇄유체 .....	9
3. 수압파쇄시험	
3.1 수압파쇄시험 시험편 .....	11
3.2 실험 조건 .....	13
3.3 수압파쇄실험 결과 .....	15
4. 수치해석 모델링	
4.1 수치해석 모델링 .....	22
5. 결론 .....	33

## List of Tables

<b>Table 1</b>	The result of Hydraulic fracturing for Model #1,2,3 .....	20
<b>Table 2</b>	The result of Hydraulic fracturing for Model #4,5,6 (Mun et al., 2014) .....	20
<b>Table 3</b>	Physical properties value from labortory tests.(Mun et al, 2014) ..	23



## List of Figures

<b>Fig. 1</b> Differences of conventional gas and nonconventional gas .....	4
<b>Fig. 2</b> Global shale gas basins .....	5
<b>Fig. 3</b> Schematic diagram of time history of fluid injection pressure showing significant pressure .....	7
<b>Fig. 4</b> Various chemicals in hydraulic fracturing process to produce shale gas. Illustration is intended to emphasize the usages of chemicals in various purposes. ....	10
<b>Fig. 5</b> A Round bar and Experiment sample .....	12
<b>Fig. 6</b> A view of a hydraulic fracturing machine .....	14
<b>Fig. 7</b> The result of time verse pressure curve for Model #1,2,3 .....	16
<b>Fig. 8</b> The result of Fluid contact area ratio verse Initial break pressure ratio .....	21
<b>Fig. 9</b> Grid point of models .....	25
<b>Fig. 10</b> A Displacement history of models .....	28
<b>Fig. 11</b> A displacement distribution of Numerical modeling results .....	32

# **The effects of Fracturing fluid contact state on breakdown pressure**

Lee, Sang Hun

Department of Ocean Energy & Resources Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## **Abstract**

The shale gas is emerging as one of the oil and gas resources which can replace the traditional oil and gas resources. As the shale layer where the shale gas is deposited has low permeability, the hydrofracturing method is required to improve the productivity. This study is designed to conduct the laboratory hydrofracturing test on the samples which are modeled after the drilling hole having the general drilling hole and spiral groove. And compare the initial fracturing pressure and fluid contact between them in order to the result of the hydrofracturing depending on the shape of the drilling hole. In addition, the results were compared with the numerical modeling values from 3DEC and they were also compared with the data from the advance researches. It was found from the study that rather than the contact area of the high pressures water, the force concentration depending on the form of guide hole was more effective in the hydrofracturing.

**KEY WORDS:** Hydraulic fracturing, Guide hole, high Fractureing fluid contact state, 3DEC



## 제 1 장 서 론

비전통 자원은 기존의 석유자원 보다는 탐사위험은 낮지만 생산비용이 높았으나 생산기술의 발전으로 인해 전통석유자원을 대체 할 수 있는 자원으로 부상하고 있다. 국제에너지기구(IEA)에 따르면 전세계 비(非)전통적 천연가스(유정이 아닌 퇴적층에서 추출하는 가스)의 매장량이 920조 $m^3$ 로 이중 절반이 셰일가스로 추정된다. 나머지 절반은 사암층 및 석탄층에 저장된 가스다.

셰일가스는 탄화수소가 풍부한 셰일층에서 개발, 생산되는 천연가스로 저류층의 공극률이 매우 낮고 투과도가 불량하여 일반적인 시추기술로는 경제적인 생산이 어렵다. 따라서 낮은 투과성을 가진 저류층의 생산성을 향상시키기 위해 유정자극법(stimulation)이 실시된다. 유정자극법은 크게 수압파쇄법(hydraulic fracturing)과 산처리 기법(acidizing)으로 나눌 수 있다. 산처리 기법은 탄산염으로 이루어진 저류층에서 화학작용을 통해 탄산염을 용해시켜 저류층의 투과성을 향상시키는 방법이고 수압파쇄법은 유정에 높은 압력으로 유체를 주입하여 인위적으로 균열을 발생시켜 유체유입 경로를 확보하고 시추과정에서 발생한 이수에 의한 유정 인근의 저류층 손상을 복구함으로써 저류층의 생산지수를 극대화시키는 방법이다. 수압파쇄법은 기존 유전의 생산성 향상 방안 모색으로 사용되거나 최근 대형 전통유전의 발굴 감소로 인하여 비전통자원개발이 활성화됨으로써 2000년대 들어서 현장에 활발히 적용되고 있다(Kim et al., 2014).

수압파쇄의 매커니즘에 대한 균열발생에 대한 연구는 Hubbert와 Willis(1957)의 선형탄성모델을 시작으로 Haimson과 Fairhurst(1967)의 공극 탄성모델, Ito와 Hayash(1991)의 점응력 모델, 그리고 Rummel(1987)의 선형 탄성 파괴역학 모델등이 발표되었다.

그 외 국내외 연구를 살펴보면 Zoback 외(1977)는 균열개시압(crack initiation

pressure), 초기파쇄압(breakdown pressure)에 미치는 유체 점도의 영향을 고찰하였으며, Lockner와 Byerlee(1977)는 미소파괴음 측정을 이용하여 균열개시압을 추정하였다. 또 Ishida (2001)는 미소파괴음 측정을 통해 균열의 성장 방향을 예측하였다. 이후 많은 연구에서 미소파괴음 측정을 통한 수압파쇄 균열의 위치 추적 및 균열 특성 분석이 이루어지고 있다.

Rhee 외(1995)는 주입률과 온도가 암석의 수압파쇄특성에 미치는 영향을 연구하였고, Choi와 Lee (1995)는 인공슬롯을 고려한 수압파쇄 균열의 발전양상을 연구 하였으며, Choi (2011)는 수압파쇄 시험결과 해석에 대한 파괴역학모델의 적용성을 검토하였다.

Mun 등(2014)은 모의실험을 통해 인공적으로 시추공 내 유도홈을 만들어 초기파쇄압을 낮추게 하는 방법을 제시하였으나, 실제 현장에서 깊은 심도 내에 효과적으로 유도홈이 활성화되는 방법을 제시하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 별도의 유도홈 생성과정 없이 나선형비트를 사용하여 굴진과 동시에 유도홈을 만든 시추공을 모의하기 위해 삼각, 사다리꼴 모양의 홈을 가지고 있는 Round bar를 이용하였으며, 유도홈을 생성한 시추공과 유도홈이 없는 일반 시추공에 케이싱, 시멘팅 처리를 하여 현장과 유사한 수압파쇄 축소모델 시편을 만들고 각 모델의 초기파쇄압과 유체접촉면적을 비교 검토하였다. 또 그 결과를 3차원 개별요소 프로그램인 3DEC을 이용한 수치해석 모델링 값과 비교하였으며, 선행연구 자료와 비교하여 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

## 제 2 장 셰일가스 특성과 수압파쇄

### 2.1 셰일가스

셰일은 운반작용으로 인해 입자의 크기가 작은 진흙이 뭉쳐서 형성된 암석이며, 셰일가스는 이러한 셰일층에 포함된 천연가스를 말한다. 일반적인 전통가스는 형성된 셰일층에서 생성된 후 암석의 가스 투과도에 따라 오랜 세월동안 지표면 방향으로 이동하는 것과 달리 셰일가스는 셰일층 위의 불투과 암석층 때문에 지표면으로 이동하지 못하고 셰일층에 잔류하게 된다. 그래서 셰일가스는 유전이나 가스전에 농축되어 있지 않고 깊은 심도에 존재하며 암석의 미세한 틈새에 넓게 산포되어 있다. Fig. 1은 이런 전통가스와 셰일가스의 차이를 나타낸다. 또, 전통가스가 중동이나 러시아 등에 집중적으로 분포되어 있는 것과 다르게 셰일가스는 전 세계에 고르게 매장되어 있다. (정유경, 2012). Fig. 2는 셰일가스 매장량 분포를 나타낸다.

### Schematic geology of natural gas resources

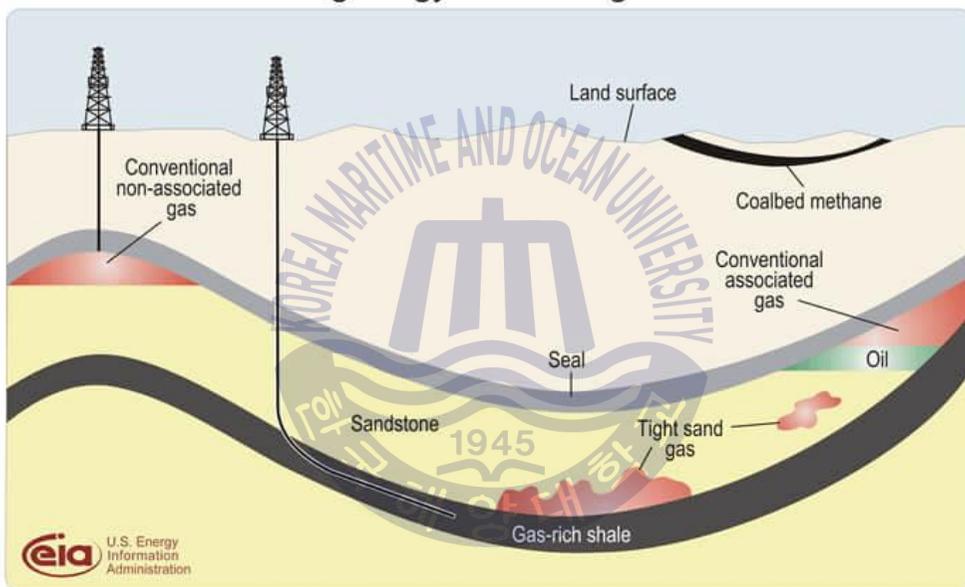


Fig. 1 Differences of conventional gas and nonconventional gas.

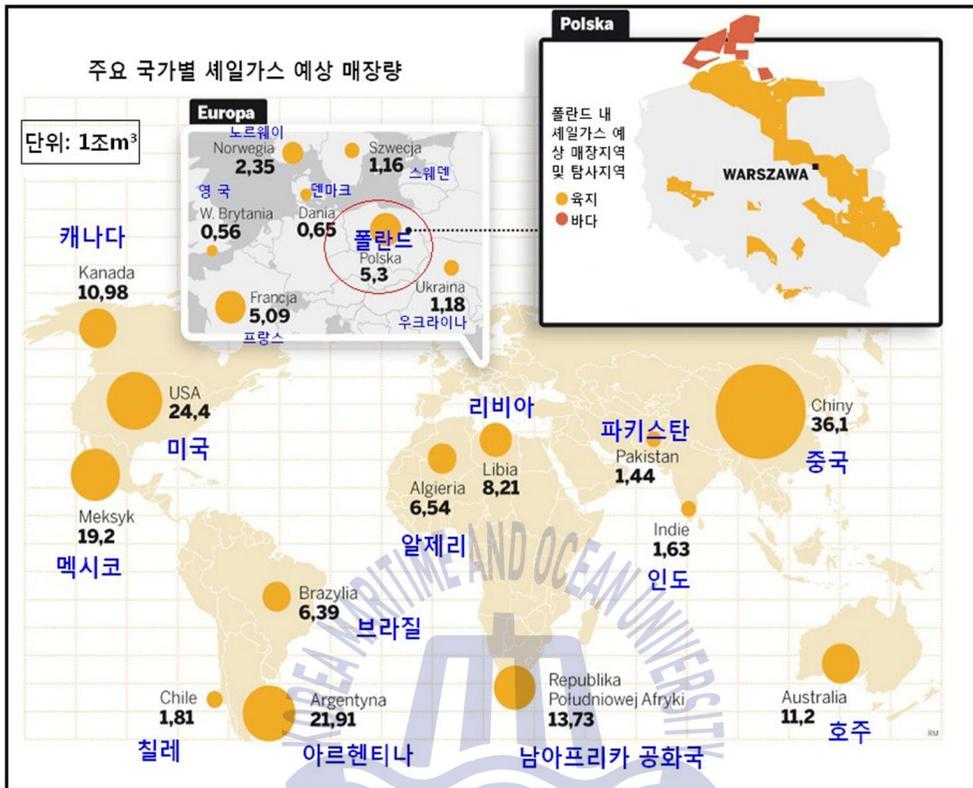


Fig. 2 Global shale gas basins (Kim, 2015)

셰일가스는 1800년대에 발견되었지만 앞에서 언급한 셰일가스의 넓은지역에 연속적인 분포 성향과 낮은 유체투과도 때문에 효율적인 개발이 어려웠지만, 수평시추로 인해 광범위하게 분포된 셰일가스를 채취할 수 있게 되었고, 수압파쇄기술로 낮은 유체투과도 문제를 해결할 수 있게 되었다.

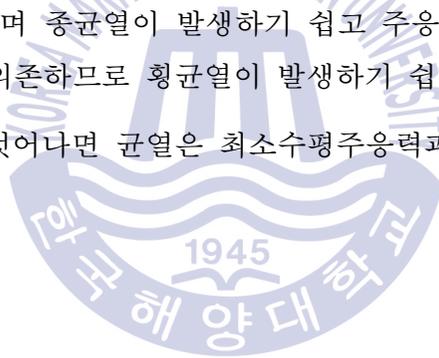
셰일가스는 전통가스와 생산방법만 다를 뿐 화학적 성분은 동일하며 메탄 70~90%와 에탄 5% 콘텐세이트 5~25%로 구성되어 있으며 메탄은 난방, 발전용 에탄은 석유화학의 원료로 콘텐세이트는 LPG제조에 쓰이게 된다 (정유경, 2012)

## 2.2 수압파쇄

균열을 생성시키는 방법은 대상지층의 내부마찰각을 낮게 하거나 대상지층에 작용하는 유효수직응력을 낮추면 된다. 그러나 전자는 현실적으로 힘들기 때문에 공극압력을 높여 유효수직응력을 낮춤으로써 균열을 생성시킬 수 있다 (Cheon & Lee, 2013).

수압파쇄 공법 시 일반적으로 시추공 축을 포함하는 균열(중균열)과 시추공과 교차하는 균열(횡균열) 중 하나의 균열이 발생하게 된다. 중균열과 횡균열 중 어느 것이 발생할 것인가는 균열의 발생이 시추공의 존재에 의존하는가, 천연의 균열에 의존하는가에 의해 좌우된다. 암반의 주응력차가 작을수록 시추공의 존재에 크게 의존하며 중균열이 발생하기 쉽고 주응력차가 클 때에는 천연의 균열에 보다 크게 의존하므로 횡균열이 발생하기 쉽다.

가압구간의 근방을 벗어나면 균열은 최소수평주응력과 수직하게 방향을 변해가며 발전한다.



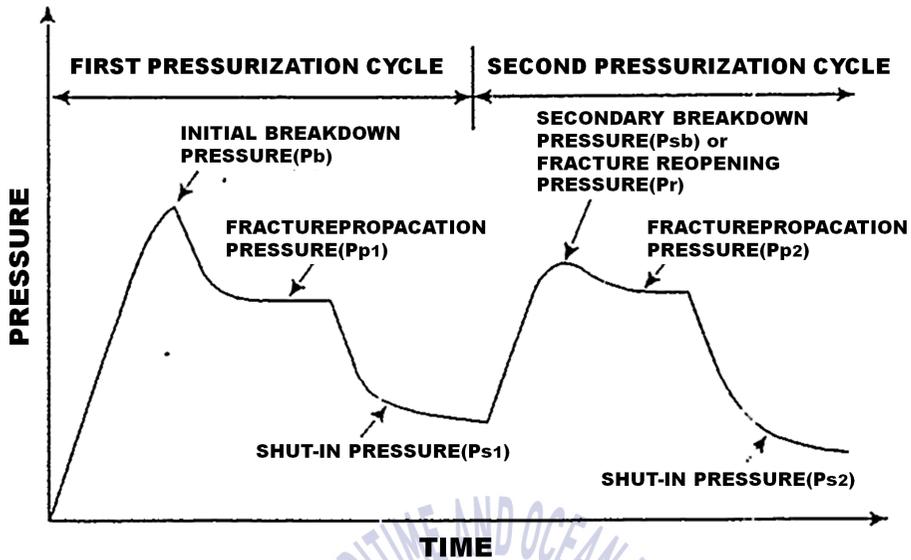


Fig. 3 Schematic diagram of time history of fluid injection pressure showing significant pressure (Lee, 1995)

Fig. 3은 수압파쇄과정에서 볼 수 있는 전형적인 균열 압력곡선이다.

초기파쇄압(initial breakdown pressure)  $P_b$ 는 균열이 발생하는 순간의 압력을 의미하며, 가압을 중지하면 일정 압력에 머무르게 되는데 이를 균열폐쇄압(shut-in pressure)  $P_s$ 라 한다. 이 압력은 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같거나 조금 크기 때문에 최소 수평주응력( $\sigma_{hmin}$ )을 나타낸다. 이후 다시 가압을 시작하면 초기파쇄압보다 낮은 압력에서 멈추게 되는데, 이를 2차파쇄압(secondary breakdown pressure)  $P_{sb}$  또는 균열개구압(fracture reopening pressure)  $P_r$ 이라 한다.

여기서 현지암반강도  $T$ 는 식(1)과 같이 초기파쇄압에서 2차파쇄압을 빼면 구할 수 있다.

$$T = P_b - P_{sb} \quad (1)$$

$T$ 는 균열이 발생한 개소의 인장강도이며, 시추공 벽면의 강도는 균일하지 않으므로  $T$ 의 값을 시험편으로 구해진 인장강도로 생각하기엔 문제가 있다.

균질 등방성이고 불투수성의 탄성체로 가정한 암반 내에 형성된 연직의 시추공에 대해 상부암반 자중에 의한 연직응력을 시추공의 축방향의 주응력으로 가정하였을 경우, 이때의 이차원적 수압파쇄조건식은 다음과 같이 주어진다 (Hubbert and Willis, 1957).

$$\sigma_p = -\sigma_{hmax} + 3\sigma_{hmin} - P_b = -T \quad (2)$$

$$\sigma_v = \gamma h \quad (3)$$

$\sigma_p$  = 시추공 벽면에 작용하는 최소접선응력(압축을 +로 함)

$\sigma_v$  = 연직방향의 주응력

$\gamma$  = 암반의 단위중량

$h$  = 지표로부터의 심도

$\sigma_{hmax}$  = 최대 수평주응력

$\sigma_{hmin}$  = 최소 수평주응력



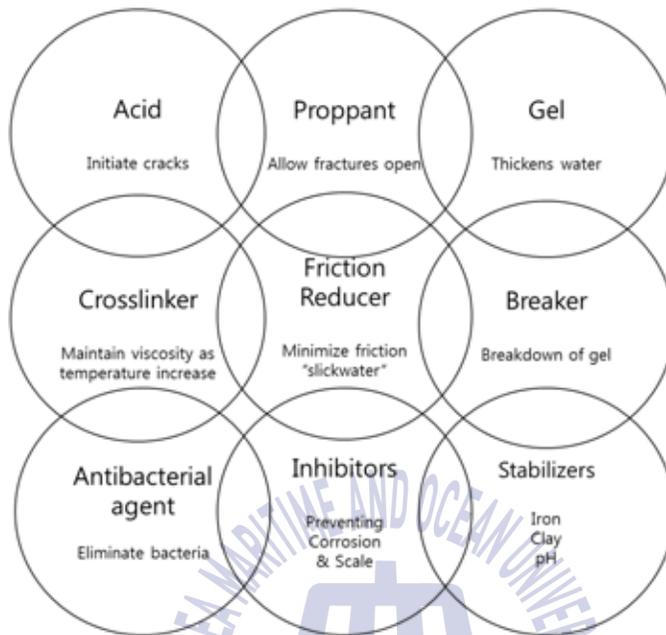
## 2.3 수압파쇄유체

수압파쇄에 사용되는 유체는 98% 이상이 물이며 용도에 따라 다양한 화학첨가제가 사용된다. 화학첨가제는 주로 균열에 유입되는 유체와 균열층 간의 마찰을 줄이고 프로판트라는 균열지지 물질이 균열 내로 잘 이동하도록하는 것이 주된 역할이다.

프로판트는 수압파쇄로 생성된 균열사이로 이동한 후 균열이 닫히지 않게하여 유체투과도를 유지시키는 물질이다. 초창기에는 프로판트 크기가 일정하지 않은 모래를 사용하였지만 현재는 약 85% 정도가 크기가 정해진 20/40 mesh 모래를 사용하고 있다.(R. Barati 2014). 그 밖에 다른 재료는 레진코팅 모래, 세라믹 재료, 그리고 고강도 재료가 쓰이고 있으며, 균열의 유체투과도는 프로판트의 원마도, 순도 그리고 분쇄도에 의해 결정된다.

유체에 물만 사용될 경우 프로판트를 균열까지 보내기 어렵기 때문에 프로판트를 유체에 실어 보내려면 유체에 점성을 갖게 하는 것이 유리하기 때문에 파쇄유체에 점성을 갖게하기 위해 젤화 유체라는 물질을 첨가한다. 이때 선형 혹은 가교결합구조의 고분자 첨가제를 사용한다. 선형구조를 갖는 젤은 주로 구아검과 구아유도체 그리고 셀룰로오스 유도체가 사용되며 가교결합구조의 젤은 주로 금속이온 가교 구아가 사용된다. 가교결합구조의 젤은 촉매 사용에 따른 비용이 더 들어가지만, 점성이 더욱 향상되어 적은양의 물이 사용되는 장점을 갖는다 (Kang et al., 2014).

그 밖에 기타 첨가제로는 수압파쇄 유체와 젤과의 결합을 끊어 점성을 낮추는 브레이크와 수압파쇄 유체 내에 박테리아가 서식할 수 있을 경우 사용할 항균제, pH를 조절하기 위한 pH 조절제, 마찰감소제 등을 사용한다. Fig. 4는 수압파쇄에 사용되는 첨가제와 간단한 용도설명을 나타낸다.



**Fig. 4** Various chemicals in hydraulic fracturing process to produce shale gas. Illustration is intended to emphasize the usages of chemicals in various purposes. (Kang et al., 2014).

## 제 3장 실험방법

### 3.1 수압파쇄시험 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 같은 실험실에서 실시한 이전 실험결과(Mun et al., 2014)와 비교하기 위해 동일하게 제작한 인공모의암체로 1종 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)와 물의 중량혼합비를 1:0.4로 하여 3일 동안 양생하여 제작한 시멘트 모르타르를 사용하였다.

시험편은 200mmX200mmX200mm의 정육면체 모양의 몰드에 Round bar를 조립한채 시멘트를 굳힌 후 빼내어 수압파쇄공을 모사하였다.

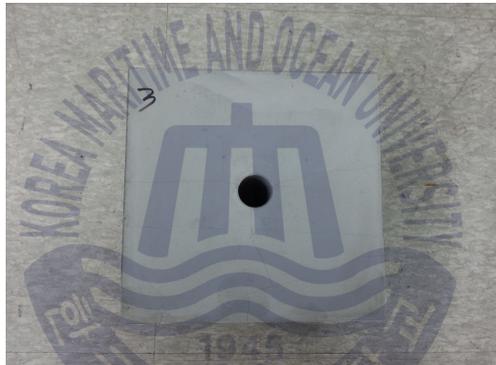
Round bar는 일반시추공과 유도홈을 가진 시추공이 같은 파쇄부피를 갖도록 직경 41mm와 46mm를 이용하였다. 또 각각 5mm길이의 산,골 차이를 가지고 있으며 나사형태는 삼각형, 사다리꼴 나선형으로 제작하였다. 그리고 유도홈을 갖는 시추공과 비교하기 위한 41mm의 원형 Round bar를 사용한 시험편을 제작하여 비교하였다. 그 후 외경 36mm,내경 26mm의 케이싱을 이용하여 시험편의 수압파쇄공을 연결하였다.

나선형 Round bar를 사용한 경우와 같은 수압접촉면적을 갖는 일반적인 Round bar를 사용한 경우를 비교하기 위해 일반적인 Round bar를 사용하여 만든 시험편을 Model #1, 삼각형 유도홈을 갖는 나선형 Round bar를 Model #2, 사다리꼴 유도홈은 Model #3 로 설정하여 각각 2개씩 시료를 만들어 초기 파쇄압을 비교하였다. 시험편에 사용된 Round bar(a)와 완성된 시험편(b), 파괴한 시험편 내부(c)는 Fig. 5와 같다.

모의암체를 제작 한 후, 시멘팅 상태를 묘사하기 위해 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하여 물과 중량혼합비를 (1:0.4)로 하여 주입하고 1일 동안 양생하였다.



(a) Round bar



(b) Experiment sample (1)



(c) Experiment sample (2)

Fig. 5 A Round bar and Experiment sample

### 3.2 실험조건

본래 현장의 지반 상황을 모사하기 위해서는 3축응력 상태로 수압파쇄실험을 실시하여야 하지만 시험편 내로 수압을 주기 위한 패커가 시험편 상부에 노출되어 있어 상부에는 압력을 주기 어렵고, 수압파쇄공과 수평한 방향으로의 재하는 수압파쇄 조건식과는 무관한 점을 고려하여 본 연구에서는 수평방향으로의 압력만 주는 이축재하실험을 실시하였다.

4개의 원형 플랫폼을 사용하여 수평압력을 가하였고 20mm 두께의 사각 스틸판을 이용하여 시험편에 고르게 압력을 가하였다. 또 패커는 물이 세지 않도록 고무링을 끼운 스틸패커를 사용하였다. 플랫폼을 사용한 측압은  $25.50\text{kgf/cm}^2$ 로 유지하였으며 유량을  $100\text{ml/min}$ 으로 일정하게 유지하였다. 사용한 수압파쇄 장비는 Fig. 6과 같다.

Model #1의 경우 직경 41mm의 시추공을 갖는 원기둥형의 경우고, Model# 2,3의 경우 직경 36mm의 원기둥형에 5mm의 나선형 유도홈을 갖는 경우이며, 나선형 유도홈의 경우 Model #2가 높이 5mm의 정삼각형모양이고, Model #3의 경우 윗변이 5mm, 밑변이 10mm의 사다리꼴 모양으로 설정하였다.

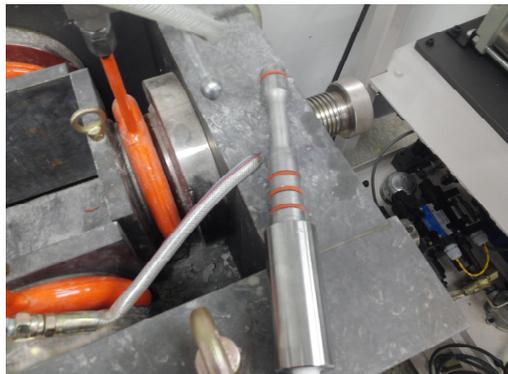
나선형 유도홈 모델의 유체접촉면적은 시료의 시추공 내 가압구간을 4cm로 고려하여, 나선형 유도홈의 반복주기의 유체접촉면적을 나누어서 예측한 값을 사용하였다.



(a) Experiment machine



(b) A casing



(c) A packer

**Fig. 6** A view of a hydraulic fracturing machine

### 3.3 수압파쇄실험 결과

나선형 시추공의 초기파쇄압 감소효과를 파악하기 위해 먼저 기존의 시추공 형태인 Model #1의 초기파쇄압을 측정 후 삼각형 나선의 모양을 갖는 Model #2, 사다리꼴 모양의 모양을 갖는 Model #3의 초기파쇄압을 측정하였다.

Fig. 7은 초기파쇄압의 양상을, Table 1은 각 모델의 수압파쇄실험, 유체접촉면적 계산 결과이며, 모델 별 평균 초기파쇄압은 Model #1이 45.04kgf/cm<sup>2</sup>, Model #2가 27.73kgf/cm<sup>2</sup>, Model #3가 10.64kgf/cm<sup>2</sup>으로 나왔으며, 삼각형과 사다리꼴 나선형 유도홈을 사용한 시추공이 일반시추공 보다 낮은 압력으로 수압파쇄가 이루어짐을 확인할 수 있었다. Model #1의 경우 최대압력에 이르기 전까지 몇 번의 작은 파쇄가 일어남을 확인할 수 있었는데, 이는 암반을 나타내는 시험편이 파괴에 이르기 전에 시멘팅이 먼저 파괴되어 나타나는 현상으로 사료된다.

또한 같은 모델의 주입량이 약 300ml가 차이가 나는 경우는 시멘팅처리를 한 부분이 굳어가면서 미세한 균열이 발생하여 가압 동안 약간의 고압수가 유출되는 경우가 발생하였기 때문으로 사료된다.

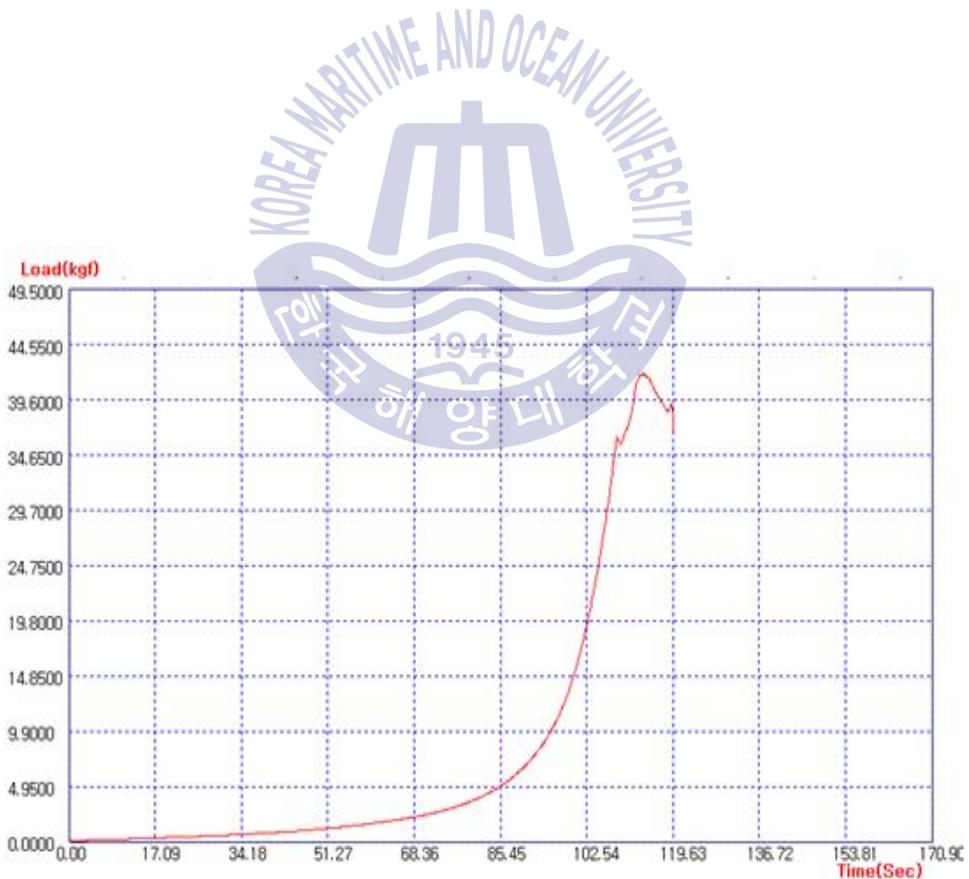
Table 2는 선행연구(Mun et al., 2014)의 수압파쇄실험, 유체접촉면적 계산 결과이며 모델 별 평균 초기파쇄압은 직경26mm 원기둥형의 Model #4는 40.27 kgf/cm<sup>2</sup>, 유도홈을 2개 가진 Model #5는 8.13kgf/cm<sup>2</sup>, 유도홈을 3개가진 Model #6은 7.04kgf/cm<sup>2</sup>의 초기 파쇄압을 나타내었다.

같은 원기둥형 시추공 형태를 가진 Model #1과 선행연구에서의 Model #4의 초기파쇄압은 각각 45.04, 40.27kgf/cm<sup>2</sup>로 직경, 유체 접촉면적이 더 큰 Model #1이 약간 더 높은 파쇄압을 나타내었으나 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.

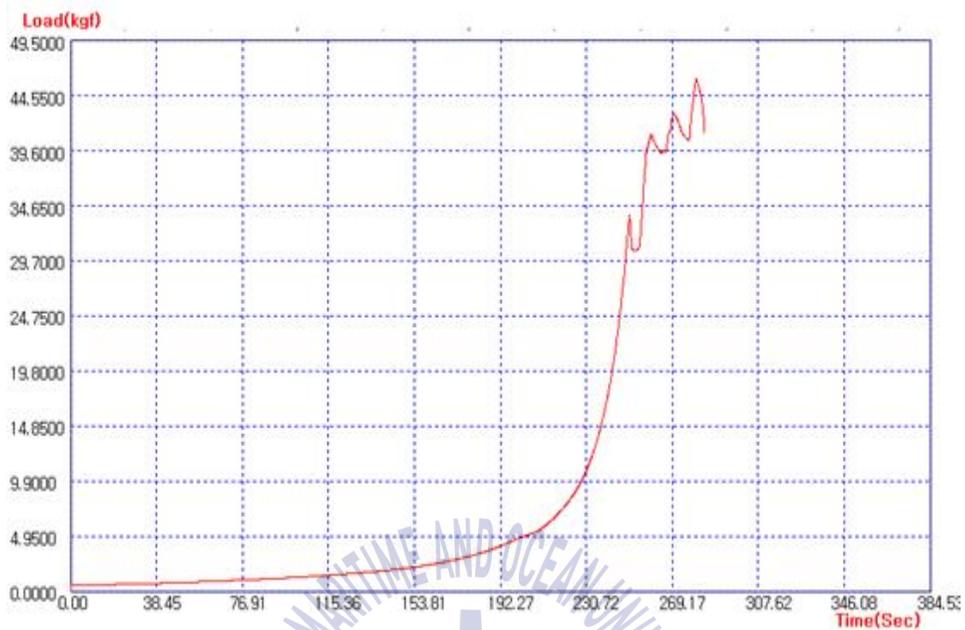
삼각형 나선 시추공 Model #2는 사다리꼴 나선 Model #3에 비해 비해 41% 더 큰 유체접촉면적을 가지고 있으며 초기파쇄압은 각각 27.73kgf/cm<sup>2</sup>, 10.64kgf/cm<sup>2</sup>으로 Model #2가 더 큰 초기 파쇄압을 나타낸다. Model #1, Model #4의 결

과와 비교해 봤을 때 유도흡이 있을 경우 초기파쇄압은 감소하는 것을 알 수 있고 그 이유는 응력집중에 의한 것으로 판단된다.

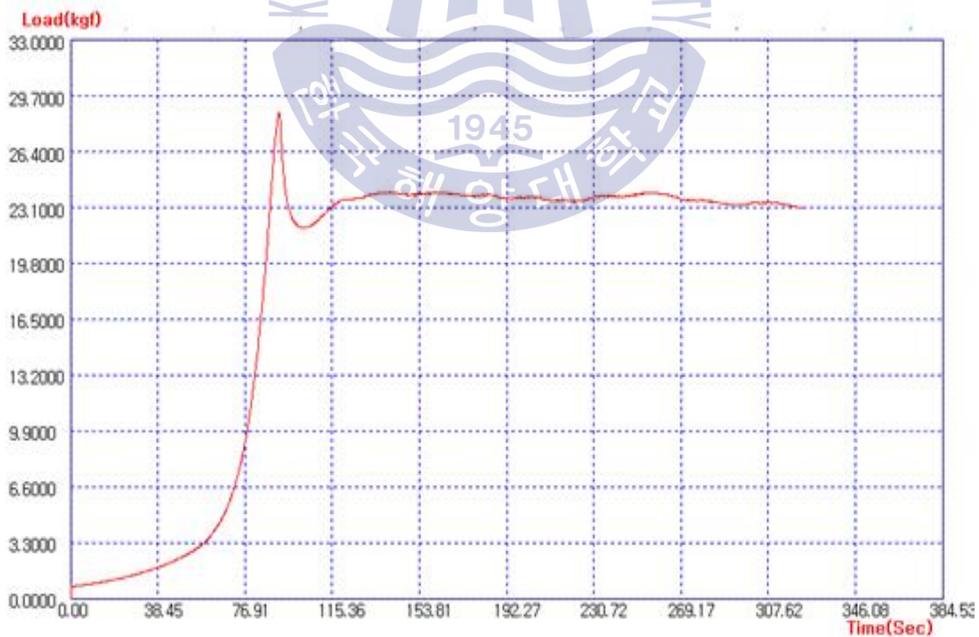
비슷한 형태의 유도흡 3개의 Model #6은 유도흡 2개의 Model #5에 비해 33% 큰 유체접촉면적을 가지고 있지만 초기 파쇄압은 7.04 kgf/cm<sup>2</sup>, 8.13 kgf/cm<sup>2</sup>으로 Model #6이 더 작은 초기파쇄압을 나타냈다.이 역시 접촉면적보다는 응력 집중이 파쇄압에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.



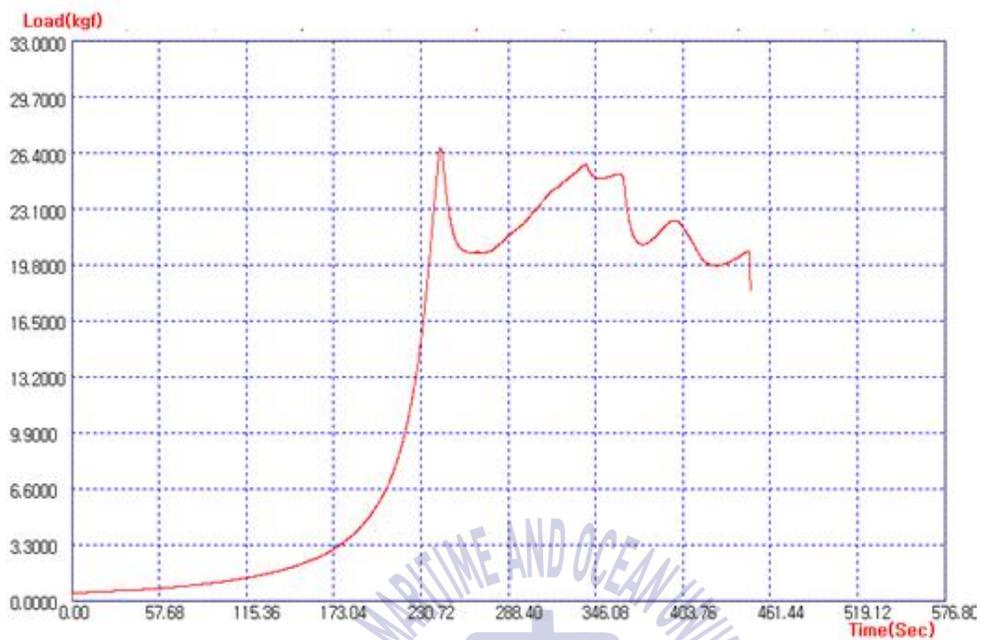
Model#1-1



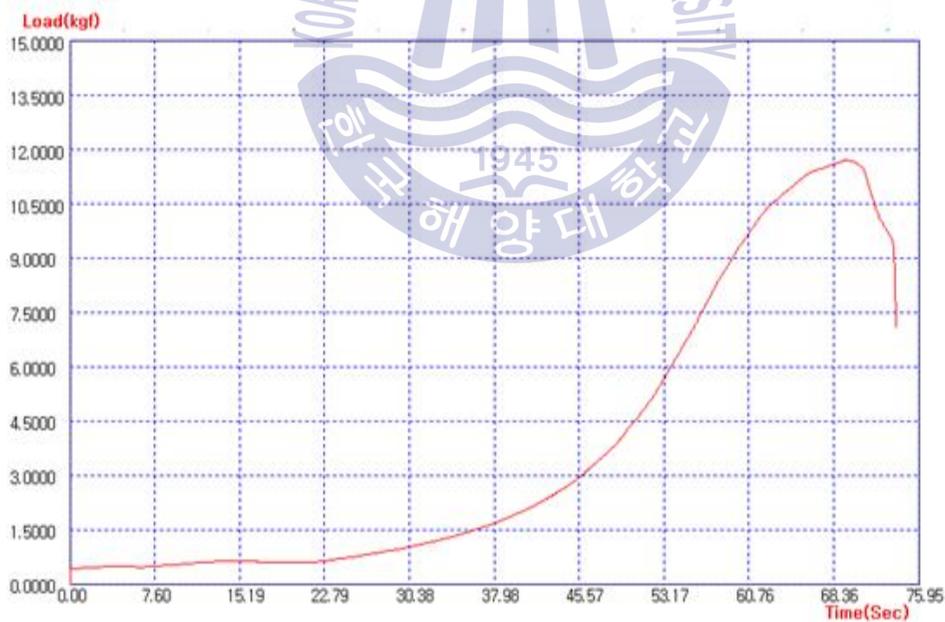
Model#1-2



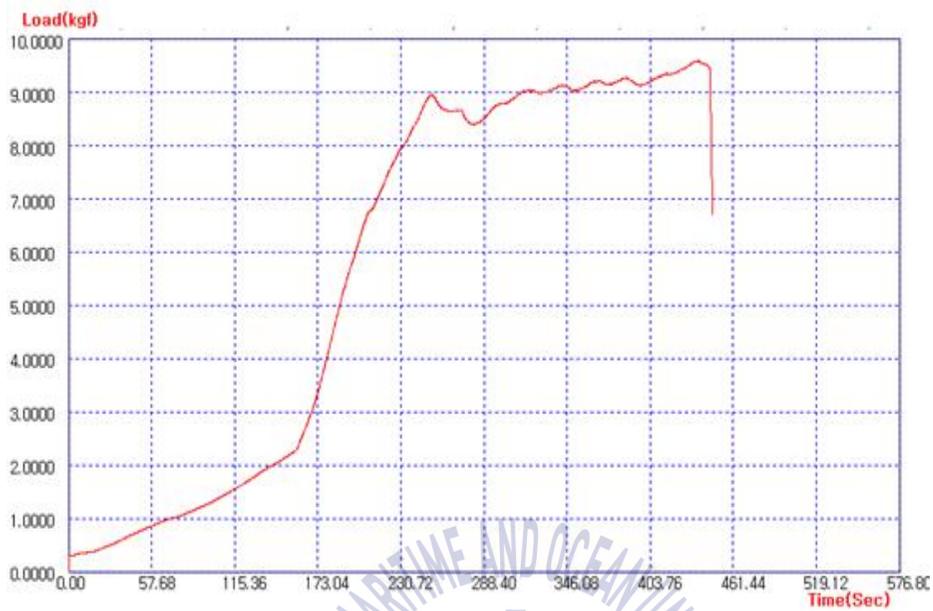
Model#2-1



Model#2-2

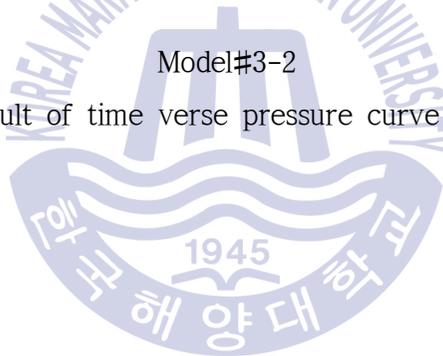


Model#3-1



Model#3-2

Fig. 7 The result of time verse pressure curve for Model #1,2,3



**Table 1** The result of Hydraulic fracturing for Model #1,2,3

	최대압력(kgf/cm <sup>2</sup> )		주입량(ml)	유체 접촉면적(cm <sup>2</sup> )
Model #1	41.94	45.04	609.41	51.52
	48.14		318.65	
Model #2	28.71	27.73	135.29	103.02
	28.75		129.65	
Model #3	11.71	10.64	135.67	72.83
	9.59		143.89	

**Table 2** The result of Hydraulic fracturing for Model #4,5,6 (Mun et al., 2014)

	최대압력(kgf/cm <sup>2</sup> )		주입량(ml)	유체 접촉면적(cm <sup>2</sup> )
Model #4	40.29	40.27	144.32	32.67
	40.24		151.00	
Model #5	7.88	8.13	341.81	49.01
	8.37		362.82	
Model #6	6.94	7.04	727.34	65.35
	7.14		309.02	

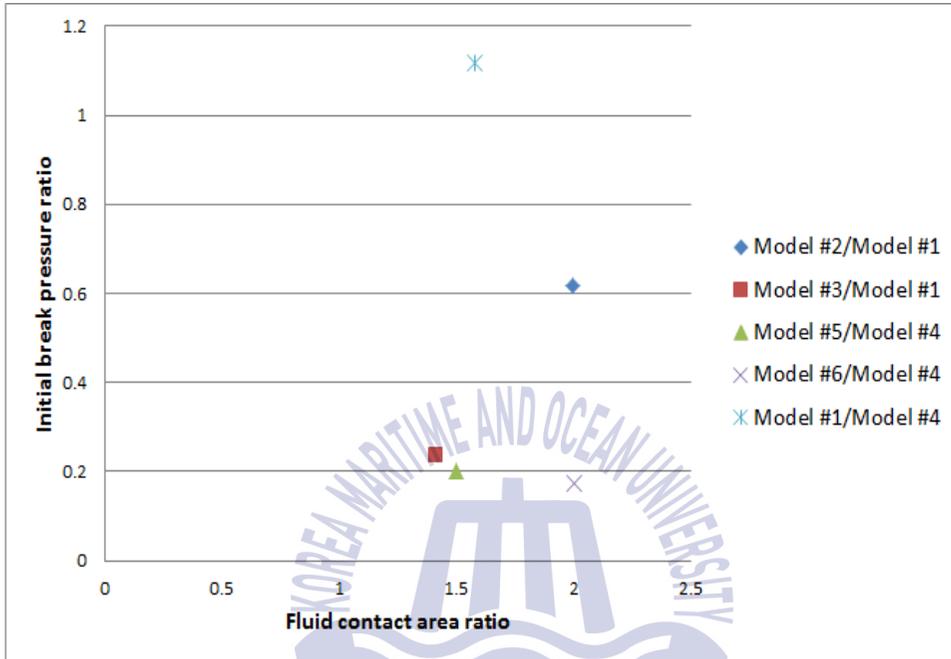


Fig. 8. The result of Fluid contact area ratio verse Initial break pressure ratio

Fig. 8은 시추공의 유체접촉면적의 비와 초기파쇄압의 비를 나타낸 것이다. 가로축은 비교한 두 모델의 유체접촉면적비, 세로축은 비교한 두 모델의 초기파쇄압비이다. 유도흡이 없는 기존의 시추공 형태에서 직경을 키워 유체접촉면적을 증가시킨 경우(Model #1/Model #4) 유체접촉면적 증가량에 비해 초기파쇄압은 큰 차이를 보이지 않지만, 유도흡을 사용한 시추공과 기존 형태의 시추공을 비교한 경우 유체접촉면적이 증가한 양에 비해 큰 초기파쇄압 차이를 보였다. 대부분의 유도흡 모델의 경우 20% 전후로 비슷하나 삼각형 나선형의 Model #2는 60%의 초기파쇄압 비를 보인다. 이는 역시 유도흡 형태에 따른 응력집중의 차이로 보인다.

## 제 4 장 수치해석 모델링

### 4.1 수치해석 모델링

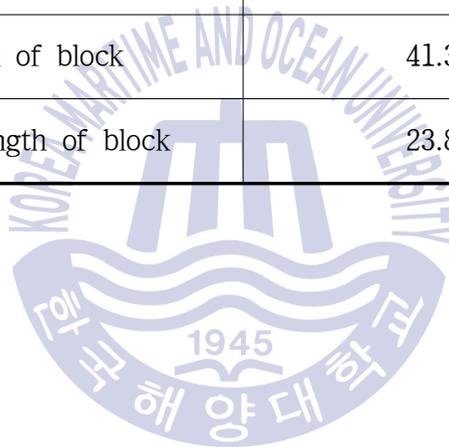
수치해석 프로그램은 개별요소법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램인 3DEC을 이용하여 수압파쇄시험을 모델링하였다. 시험 모델은 deformable body로 제작하여, 시험편 내에 압력이 가해졌을 때의 정해진 Gridpoint에서의 변위를 파악했다.

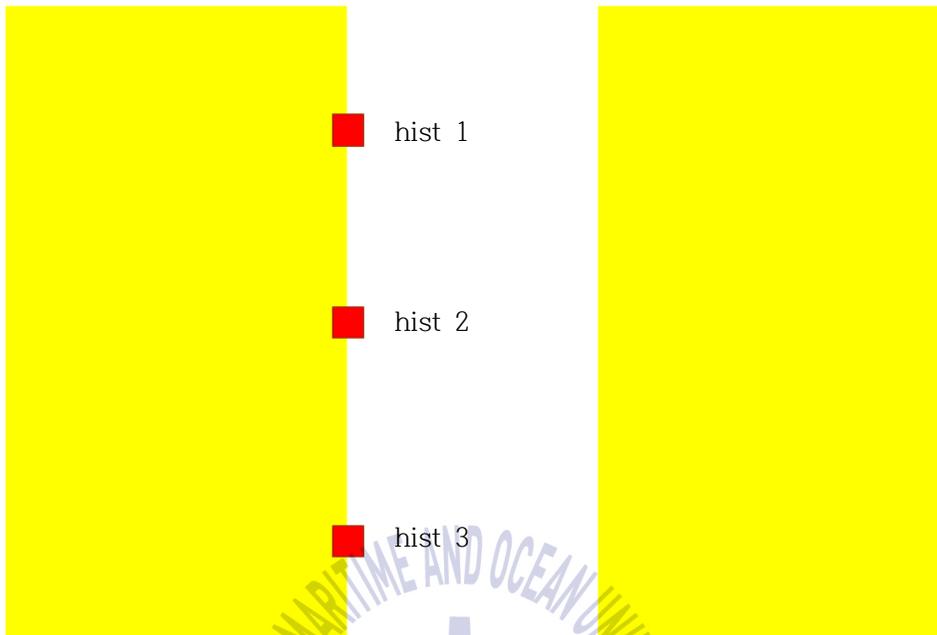
수치해석 모델링에 사용된 물성은 수압파쇄시험의 경우와 마찬가지로 선행연구와 동일하며 Table 3과 같다.

수압파쇄의 위치는 시추공 내 80mm~120mm의 깊이라고 가정하였으며, Model #1의 Gridpoint는 가압구간의 처음과 끝, 중간지점이고 Model #2,3의 Gridpoint는 가압구간의 처음과 끝, 가압구간 중간의 안쪽 꼭지점과 바깥쪽 꼭지점으로 설정하였다. 모델의 Gridpoint는 Fig. 9와 같다.

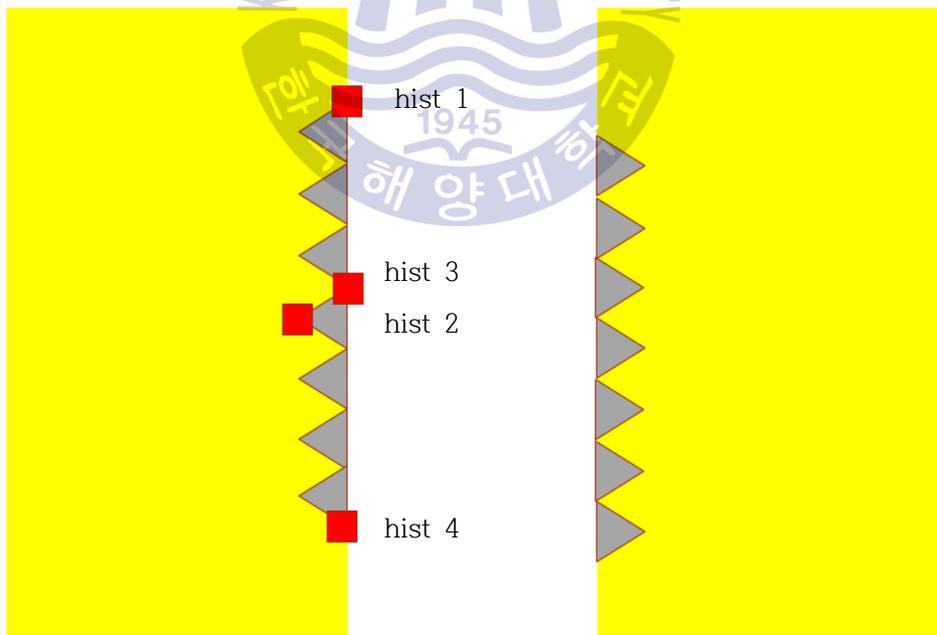
**Table 3.** Physical properties value from laboratory tests.(Mun et al, 2014)

Property	Value
block mass density	1955 kg/m <sup>3</sup>
bulk modulus of block	$22.87 \times 10^4$ kgf/cm <sup>2</sup>
shear modulus of block	$13.46 \times 10^4$ kgf/cm <sup>2</sup>
friction angle of block	57.75°
cohesion of block	41.30kgf/cm <sup>2</sup>
tensile strength of block	23.86kgf/cm <sup>2</sup>

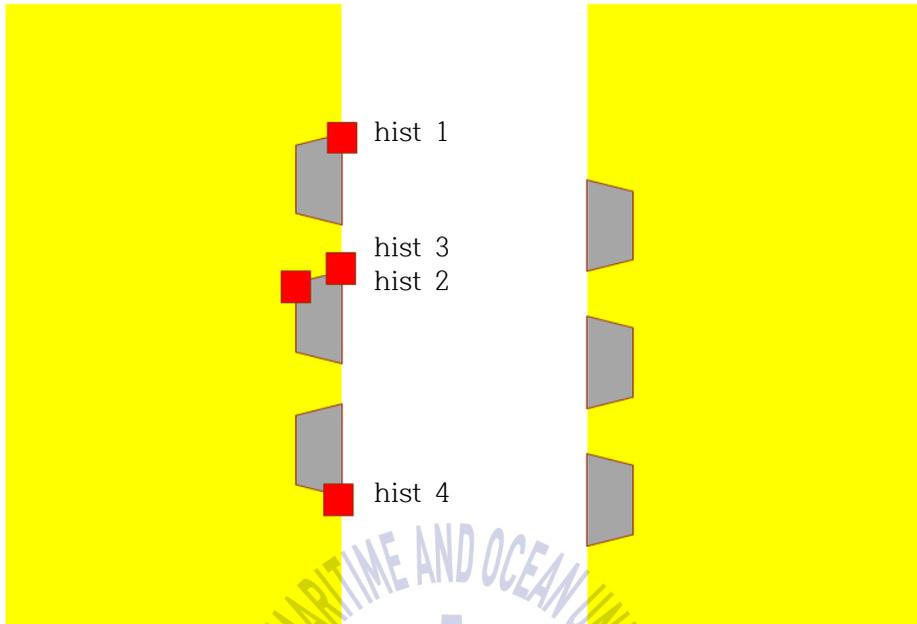




(a)Model #1



(b)Model #2



(c)Model #3

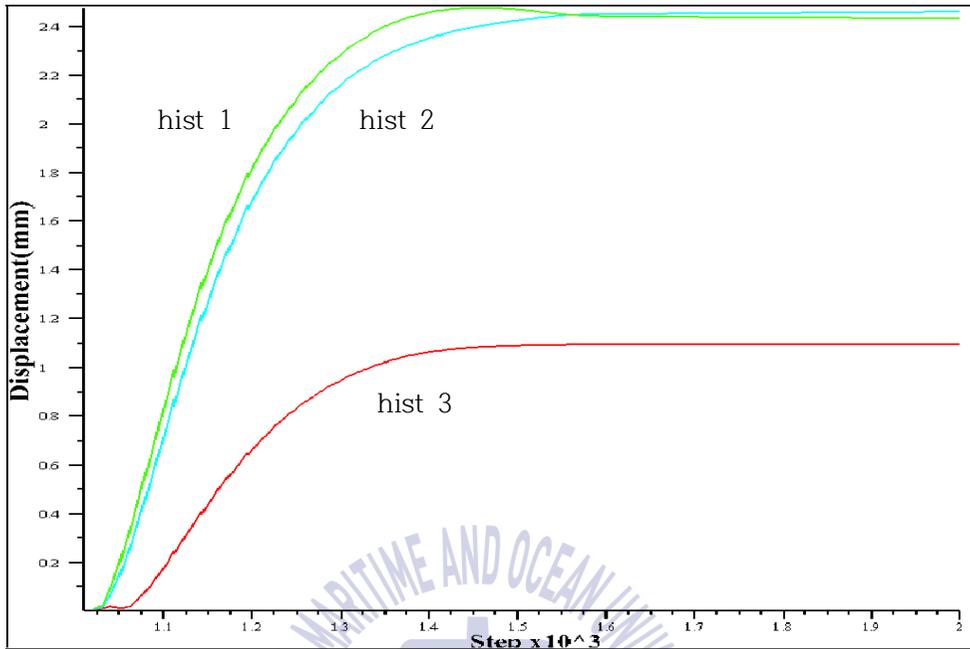
Fig. 9 Grid point of models

각 지점의 변위 분포 결과는 Fig. 10과 같다. 발생된 변위를 보면 일반 시추공 형태의 Model #1의 경우 Hist 1지점에서 2.48mm의 최대 변위가, 패커 중심부에서 1.10mm의 변위가 나타났다. 삼각형 나선 모델의 Model #2의 경우 Hist 4 지점에서 9.42mm의 최대 변위가, 패커 중심부에서 2.49mm의 변위가 나타났다. 사다리형 나선 모델의 Model #3의 경우 Hist 4지점에서 16.46mm의 최대 변위가 패커 중심부에서는 4.53mm의 변위가 나타났다. 세 모델 모두 공통적으로 패커 최 외곽부에서 가장 큰 변위가 발생하였다. 또 나선형 시추공을 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 같은 압력을 주었을 때 더 큰 변위가 발생하였다. 따라서 나선형 시추공을 이용할 시 적은 수압으로 효과적인 균열을 생성할 것으로 보여진다.

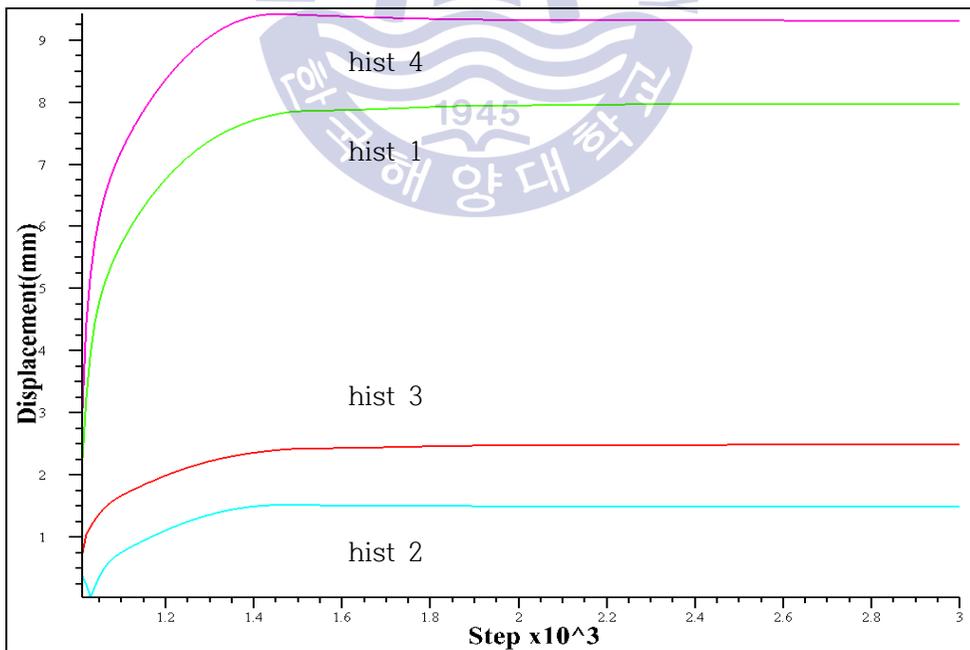
Fig. 11은 수치해석 모델링이 끝난 후 변위분포 양상을 나타낸 그림이다. (a),(b),(c)의 변위양상은 선행연구 (d),(e),(f)와 비교 해 보았을 때, 시험편 내 변

위 분포의 형상이나 전체적으로 벽면 부근보다 패커부근에 높은 변위를 나타내는 결과를 나타내었는데 이는 유도흡으로 인한 수압파쇄의 결과가 실험에 의한와 유사함을 나타낸다. 따라서 수치해석적 방법을 파쇄유체의 접촉에 따른 수압파쇄의 양상을 예측 가능할 것으로 사료된다.

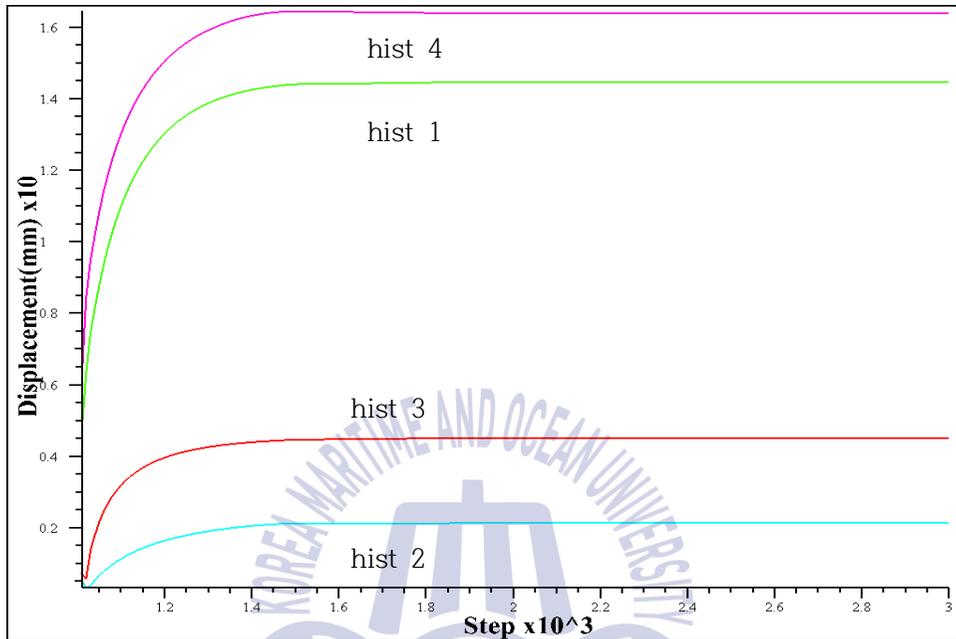




(a) Model #1

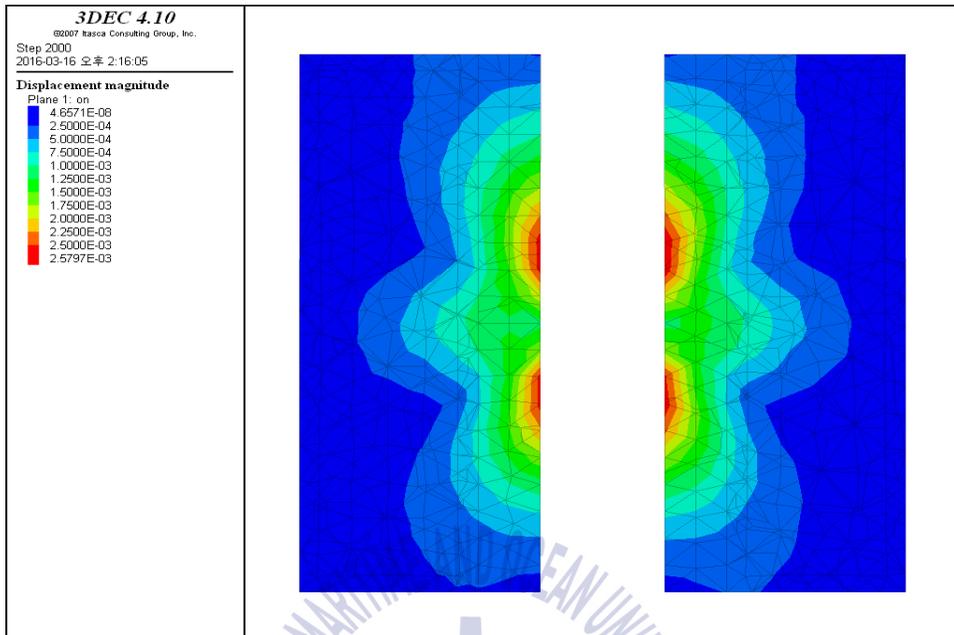


(b) Model #2

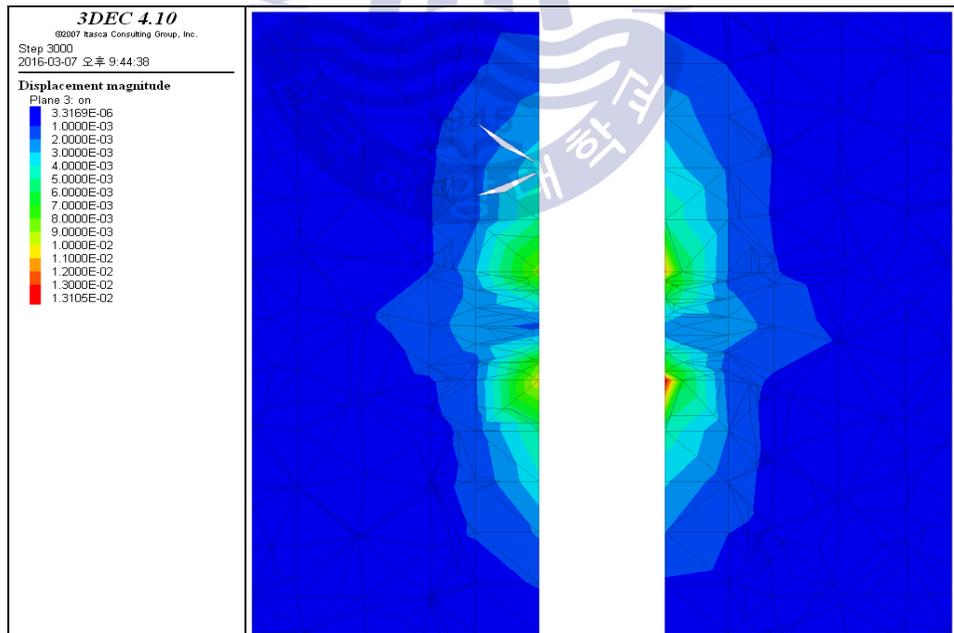


(c) Model #3

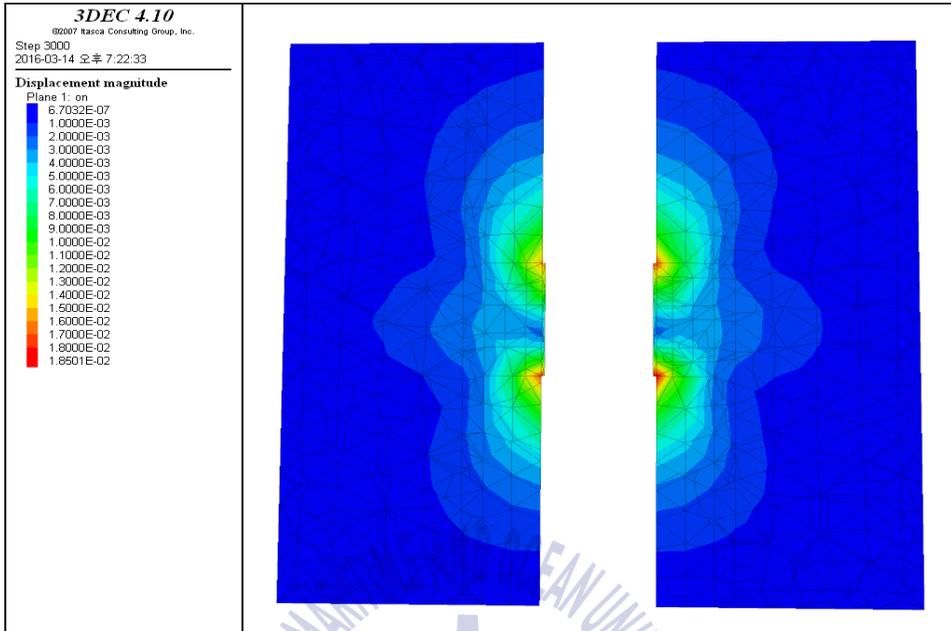
Fig. 10 A Displacement history of models



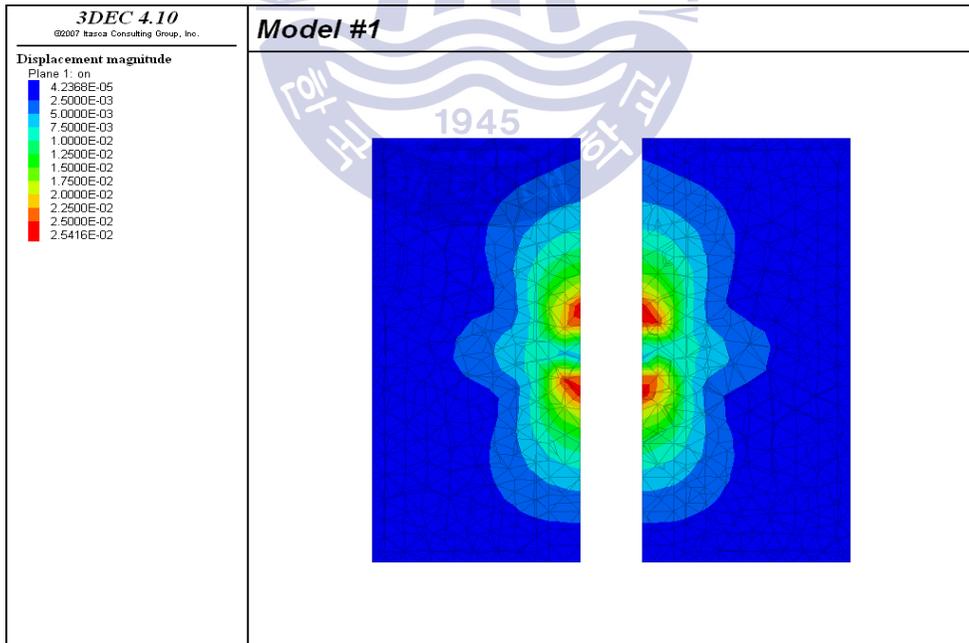
(a) Model #1



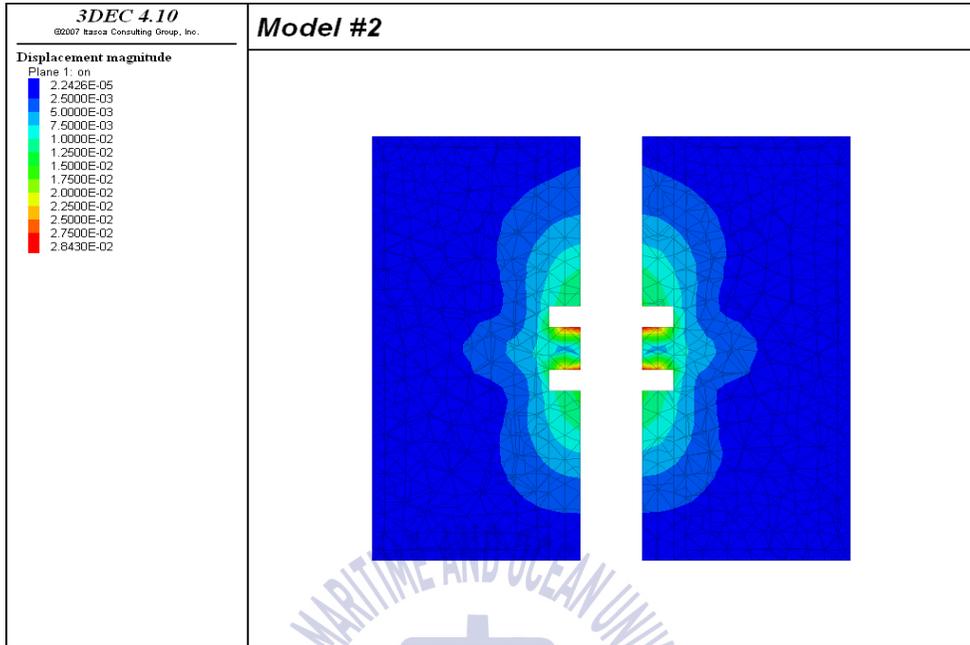
(b) Model #2



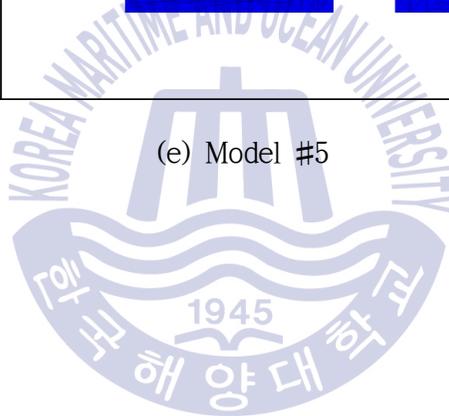
(a) Model #3

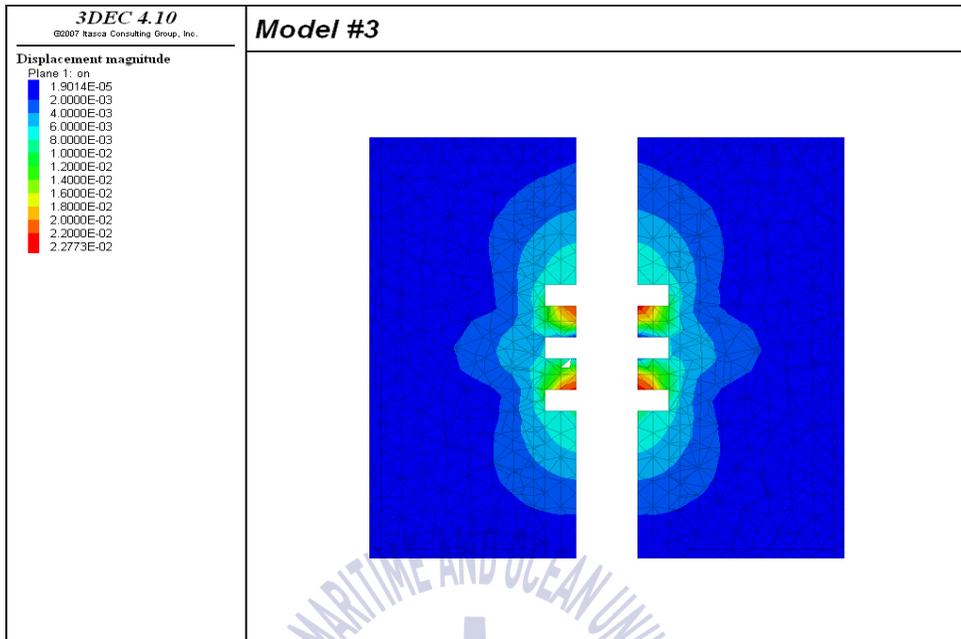


(d) Model #4



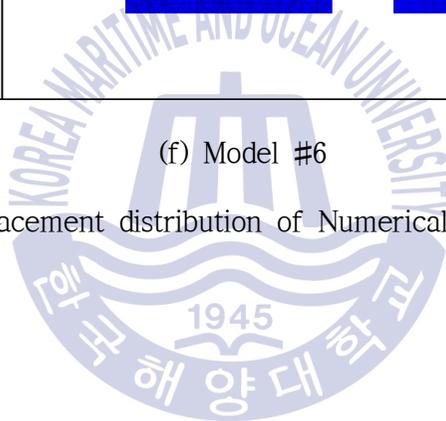
(e) Model #5





(f) Model #6

Fig . 11 A displacement distribution of Numerical modeling results



## 제 5 장 결론

본 연구에서는 Round bar를 이용하여 나선형 유도홈을 만든 후 실내 수압파쇄시험을 실시하여 수압파쇄 효과에 유도홈이 미치는 영향을 검토하고, 이를 동일한 형상으로 접촉면적을 달리한 선행연구의 초기파쇄압, 고압수 접촉면적과 비교하였다. 또한 3차원 개별요소법에 근거한 3DEC으로 수압파쇄시험을 모사하여 특정지점에서 발생하는 변위를 관찰하였다.

수압파쇄시험 결과 일반 시추공 형태의 Model #1이 평균 45.04kgf/cm<sup>2</sup>의 초기 파쇄압을 나타냈으며, 삼각나선형의 Model #2가 27.73kgf/cm<sup>2</sup>로 Model #1의 62.97%의 압력으로, 사다리형 나선의 Model #3가 10.64kgf/cm<sup>2</sup>로 Model #1의 24.16%의 압력으로 파쇄되었다. 이는 유도홈이 수압파쇄효과에 효율적임을 알 수 있다.

동일한 형상의 유도홈의 경우는 접촉면적에 따라 수압파쇄 효과가 다르나 유도홈의 형태에 따른 수압파쇄 효과는 고압수 접촉면적 보다는 응력집중을 발생시킬 수 있는 형태에 의해 수압파쇄 효과가 결정되었다. 따라서 유도홈을 응력집중을 고려한 형태로 주어지는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3DEC을 이용한 수치해석 결과는 일정압력을 가하였을 때 최대변위가 공통적으로 패커 최외곽부에서 일어났으며 Model #1의 경우 2.48mm, Model #2의 경우 9.42mm, Model #3의 경우 16.46mm를 갖는다. 패커 중심부에서는 Model #3가 4.53mm로 가장 큰 변위가 발생하였고, Model #2는 2.49mm로 Model #3의

54.97%, Model #1의 경우 1.10mm로 Model #3의 24.28%를 나타냈다. 또 각 모델의 변위분포 양상을 살펴볼 때 유도흡으로 인한 수압파쇄의 효과가 실험에 의한 결과와 유사함을 나타낸다. 따라서 수치해석적 방법을 파쇄유체의 접촉에 따른 수압파쇄의 양상을 예측 가능할 것으로 사료된다



## 참고문헌

1. 정유경, 2012, “세일가스가 가져올 3대 변화“ SERI 경영노트 제 143호
2. Cheon, D.S. and Lee, T.J., 2013, *Theoretical Background and Design of Hydraulic Fracturing in Oil and Gas Production*, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 23, No. 6, pp. 538-546.
3. Choi, S.O. and Lee, H.K., 1995, *The Analysis of Fracture Propagation in Hydraulic Fracturing using Artificial Slot Model*, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 5, pp. 251-265
4. Choi, S.O., 2011, *Numerical Approach for Determination of shut-in Pressure in Hydrofracturing Test*, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 21, No. 2, pp. 128-137.
5. Haimson, B.C. and Fairhurst, C., 1967, *Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks*, *SPE*, 7, pp. 301-318
6. Hubbert, M. K. and Willis, D.G., 1957, *Mechanics of hydraulic fracturing*, *Trans. AIME.*, 201, pp. 153-163
7. Ishida, T., 2001, *Acoustic emission monitoring if hydraulic fracturing in laboratory and field*, *Construction and Building Materials*, 15, pp. 283-295

8. Ito T, Hayashi K. *Physical background to the breakdown pressure in hydraulic fracturing tectonic stress measurements. Int J Rock Mech Min Sci* 1991;28: pp. 285–93.
9. Kang, B.Y. and Oh, K.S., 2014, *Review on the chemicals used for hydraulic fracturing during shale gas recovery, J. of Korean Oil Chemists' Soc., 1 Vol. 31, No. 3. September, 2014. 517~524*
10. Kim, G.T., Chung, K.Y. and Park, J.K., 2014, *Recent Water Treatment Technology for Unconventional Natural Resource Development, Korean Chem. Eng. REs., 52(2), pp. 154–165.*
11. Kim, M.S., 2015, *“Influence of Shale Gas Development on Offshore Plant Business and Countermeasures”, M.Phil diss., Pohang University of Science and Technology,*
12. Lockner, D., Byerlee, J.D., 1977, *Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress, J. Geophys. Res., 82(14), 2018–2026*
13. Lee, H.K., 1995, *A Study on the Development of the Geothermal Energy through the Hydraulic Fracturing Method, KOSEF.*
14. Mun H.J. Jang W.Y Shin S.R Lim J.S and Jeong W.K., 2014 *A Study on the Model for Effective Hydraulic Fracturing by Using Guide Hole, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 24, No. 6, 2014, pp. 440–447*

15. R. Barati, J.-T. Liang, A Review of Fracturing Fluid System Used for Hydraulic fracturing of oil and gas wells, *J. Appl. Polym. Sci.*, 131, 40735 (2014.)
16. Rhee, C.G. Song, M.Y Choi, W.H Chang, C.J and Lee, J.U., 1995, *Effects of Injection and Temperature Variations on the Breakdown Pressure of Rocks*, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 5, No 2, September., 1995, pp. 129-138
17. Rummel F., 1987, *Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements*. In: *Fracture Mechanics of Rock* (ed. Atkinson), 6, 217-239.
18. Zoback, M.D., Rummel, F., Jung, R. and Raleigh, C.B., 1977, *Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 14, pp. 49-58