

# Drilling Fluid를 적용한 시추공의 안정성에 대한 수치해석

## Numerical Analysis of Borehole Stability Depending on Drilling Fluid

신춘원<sup>1\*</sup>, 유충식<sup>2</sup>  
Chun-won Sin<sup>1\*</sup>, Chung-Sik Yoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Member, the master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

<sup>2</sup>Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

### ABSTRACT

When a borehole is drilled, the load distributed by the removal is taken to re-establish equilibrium. As a result, the stresses around the borehole is redistributed. If there is no hydrostatic support pressure by drilling fluid (mud) introduced into the borehole, failure in the formation may take place. The mud pressure boundary that keeps the borehole stable is defined as a mud window. To predict the potential for failures around the borehole, a series of numerical analysis were performed and compared with a mud window. The effect of failure criterion and the initial stress ratio adopted on the mud window was also studied.

### 요 지

지반을 굴착하여 시추공을 형성할 때 공벽을 중심으로 응력의 재분배가 이루어지고 이 때 시추 안정액을 활용하여 공벽에 응력의 평형을 이루므로써 공벽의 안정성을 유지한다. 시추공 내에 주입하는 시추 안정액이 시추공의 안정성을 유지하기 위한 압력의 상한과 하한의 범위를 Mud window라고 정의하고 다양한 이론에 의해 계산된다. 본 연구에서는 수치해석을 활용하여 시추공의 안정성을 분석하여 Mud window를 작성하고 이론값과 비교 분석하여 모델링에 대한 검증을 수행하였다.

**Keywords** : Poroelasticity analysis, Mud window, Drilling fluid, Borehole

## 1. 서 론

깊은 심도에 형성되어 있는 석유나 가스를 채취하기 위하여 시추 유정을 굴착하거나 해상 구조물 시공시 깊은 기초 축, 말뚝 기초를 통해 구조물을 지지한다. 이때 가장 중요한 것은 시추공이 붕괴되지 않고 안정적으로 그 형상을 유지하는 것에 있다. Salehi et al.(2010)의 Drilling Fluid에 의해 유지되는 공벽의 안정성에 대한 연구에 따르면 지층은 자중에 의한 수직 압력과 수평 구속에 의한 수

평 압력을 받고 그에 따른 응력 평형상태를 유지한다. 이 상태에서 시추공 형성을 위해 지반을 굴착하게 되면 응력 평형이 깨지고 응력의 재분배와 재평형이 이루어지는데 이때 시추 공벽의 주변으로 응력의 집중이 발생한다. 지반의 강성을 넘어서는 응력의 집중은 시추공의 붕괴를 발생시키기 때문에 이를 방지하기 위해서는 Drilling Fluid에 의한 적절한 대응 압력이 Fig. 1과 같이 시추 공벽에 작용되어야 한다.

지반을 굴착하여 시추공을 형성할 때 공벽을 중심으로 응력의 재분배가 이루어지고 이 때 시추 안정액을 활용하여 공벽에 응력의 평형을 이루어 공벽의 안정성을 유지해야한다. 이 때 Fig. 2의 파괴 유형에서 나타났듯이 크게 두 가지의 공벽 붕괴 유형에 대하여 고려해야하는데 공벽

Received 16 Jan. 2017, Revised 21 Jun. 2017, Accepted 22 Jun. 2017

\*Corresponding author

Tel: +82-31-290-7537; Fax: +82-31-290-7549

E-mail address: scw97212@naver.com (C.-w. Sin)

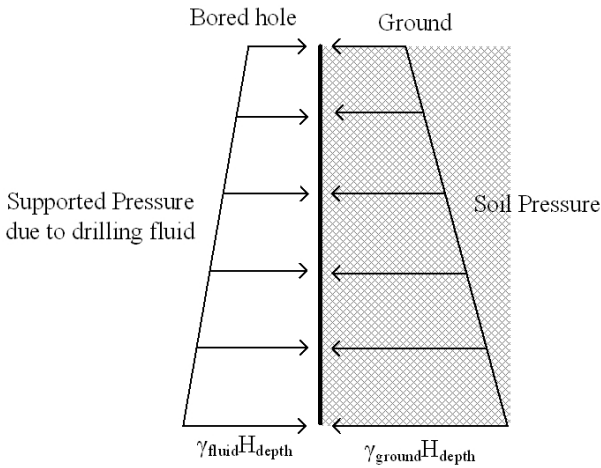


Fig. 1. Pressure balance during the borehole supported by mud pressure

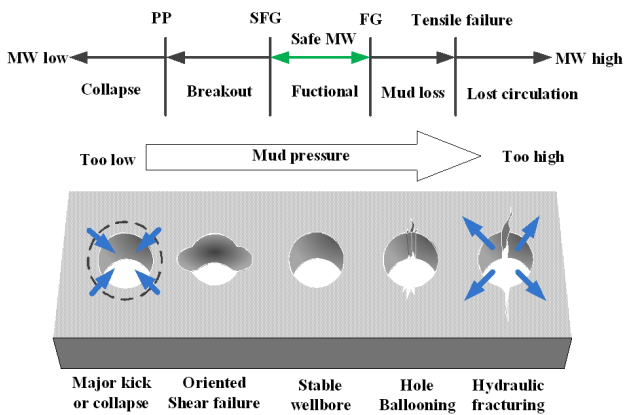


Fig. 2. Failure type depending on the Drilling Fluid pressure

에 시추 안정액이 가하는 압력이 부족하여 발생하는 붕괴(전단 파괴)와 반대로 시추 안정액에 의한 압력의 과다로 인해 발생하는 수압 파쇄(인장 파괴)가 있다.

따라서 시추공 내에 주입하는 시추 안정액이 시추공의 안정성을 유지하기 위한 Mud window라고 정의되는 압력의 상한과 하한의 범위를 다양한 이론에 의해 계산하여 실제 시공에서 철저히 관리하도록 해야 한다. 본 연구에서 사용한 이론은 기존 연구 내용에서 알아본 바와 같이 시추공의 안정성을 검토하기 위한 응력 해석으로 poroelasticity analysis를 시추공 주변 지반의 응력 산정에 활용한 후 압반의 파괴 기준을 통해 시추 공벽의 지반 굴착과 시추 안정액의 압력에 의한 응력 재분배를 계산하는 것이다.

시추공의 역학적 안정성에 대한 평가는 시추로 인해 발생하는 주변의 응력을 평가하는 구성모델(constitutive model)이 필요하다. 선형탄성모델이나 탄소성모델을 이용하는 방법들이 제안되어 왔으나 선형탄성 모델이 가장 일반적으로 적용되고 있는데(Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

이는 진보된 모델을 사용할 경우 해의 정확도를 높일 수는 있다는 장점보다는 모델을 적용하기 위해 필요한 많은 지반정수(model parameter)가 필요하다는 단점이 더 크기 때문이라고 할 수 있다. Wang and Sterling (2007)은 수평 시추시 시추공 안정성에 관한 연구를 수행한바 있는데 여기서는 수치해석을 통해 필터 케이크를 모델링하여 다양한 조건에서의 시추공 안정성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Zang et al. (2010)이 여러 가지 암반 파괴 기준을 적용하여 시추공 내에 안정액을 주입하였을 때 공벽의 안정성을 평가하여 각각 파괴 기준이 안정액의 압력 통제 범위(wellbore pressure window)를 실제와 비교하였을 때 과다 평가 또는 과소 평가하고 있음을 분석하고 3D Hoek-Brown과 Mogi-Coulomb 기준이 가장 합리적이라고 서술하였다. Mogi-Coulomb 기준에 대하여는 Al-Ajmi and Zimmerman(2006)이 상세하게 다루었으며 다양한 암반조건에 적용, 분석하여 가장 적합한 안정성 평가를 할 수 있음을 발표하였다. Maleki et al(2014)는 실제 데이터를 바탕으로 암반 파괴 기준을 비교하였고 Mogi-Coulomb 파괴 기준이 중간 주응력을 효과적으로 고려하기 때문에 안정액의 압력 통제 범위를 가장 정확하게 예측할 수 있음을 검증하였다. 이외에도 지반의 응력 상태를 poroelastic analysis로 산정하고 암반 파괴 기준을 적용하여 안정액의 압력 통제 범위를 분석함으로써 공벽의 안정성을 평가하는 방법에 대한 많은 연구가 발표되어 있다.

## 2. Poroelasticity 해석을 이용한 대심도 시추공 안정성 검토 방법

### 2.1 Poroelastic 이론에 의한 응력 평가

본 논문에서는 일반적으로 연속체 모델에서 공벽의 주변부에 가해지는 압력을 파괴 기준과 연계하여 평가하는 기법 중 하나인 Poroelasticity에 대하여 다루었다. 지반 시추는 현장 주응력인 수직응력( $\sigma_v$ )과 최대 및 최소 수평응력( $\sigma_H, \sigma_h$ )이 새로운 응력 평형상태를 유지할 수 있도록 변화시키게 되며 이때 시추공 주변에 응력 집중이 발생하게 된다. 이에 따라 시추공의 파괴 또한 시추공벽에서 시작된다. 따라서 시추공 안정성 해석에서는 시추공벽에 발생하는 응력을 파괴기준(failure criterion)과 비교하여 시추공벽의 안정성 여부를 판정하여야 한다.

깊은 심도의 시추공을 형성할 때 Drilling Fluid를 적용

하여 응력 집중에 대응하는 압력을 공벽에 작용시켜준다. 마찬가지로 이때 시추공의 응력상태를 해석하기 위하여 Poroelasticity stress model을 적용하고 시추 안정액의 Mud window를 산정하여 실제 현장에서는 Drilling Fluid의 비중과 점성을 통해 공벽에 작용하는 압력을 관리한다.

Mud window를 산정하는 다양한 항목 기준 중에서 Mohr-Coulomb 파괴 기준에 따른 공벽에 작용하는 전단 응력과 유효 수직 응력은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

여기서,  $\tau$  : shear stress     $\sigma_n$  : normal stress  
 $c$  : cohesion     $\phi$  : internal friction angle

그리고 암반에서는 일축압축강도(unconfined compressive strength)와 내부마찰각을 사용하여 파괴를 평가하는데 이 관계는 주응력과 함께 표현된다.

$$\sigma_1 = \sigma_c + q\sigma_3 \quad (2)$$

$$q = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

$$\sigma_c = 2c \tan(45 + \frac{\phi}{2}) = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

Mohr-Coulomb 파괴 기준에 따른 전단파괴의 경우를 살펴보면  $F \leq 0$  인 경우에 발생한다. 이에 따라 시추공의 파괴를 방지하기 위한 Mud window를 산정할 수 있다.

$$F = (\sigma_c + q\sigma_3) - \sigma_1 \quad (5)$$

Poroelasticity를 적용한 응력해석을 Fig. 3과 같이 깊이 별로 단면에 대하여 2차원 유한 요소해석을 수행하여 구현하고자 하였다. 깊이별로 추출한 단면에서  $\sigma_H$ 와  $\sigma_h$ 에 의해 구속된 상태에서 초기 응력 평형 상태를 구현하고 굴착공을 모사한 후 Drilling Fluid에 의한 압력( $P_i$ )을 적용한다. 굴착공에 적용한  $P_i$ 의 값의 범위에 따라 지반이 파괴되는 상한과 하한값을 해석하고 이를 바탕으로 Modeling에 의한 Mud window를 산정한다.

파괴 기준에 따른 응력검토를 수행하기 위해서는 먼저 시추공 주변의 응력 분포를 극 좌표계에서 아래의 식을 활

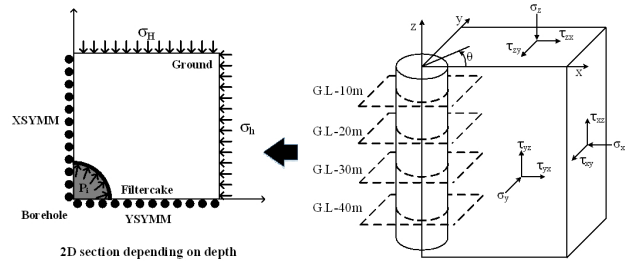


Fig. 3. Coordinate system for a vertical borehole

용하여 산정해야한다.

$$\sigma_x = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \cos^2 i + \sigma_v \sin^2 i \quad (6)$$

$$\sigma_y = \sigma_H \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha \quad (7)$$

$$\sigma_z = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \sin^2 i + \sigma_v \cos^2 i \quad (8)$$

$$\sigma_{xy} = 0.5(\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\alpha \cos i \quad (9)$$

$$\sigma_{xz} = 0.5(\sigma_H \cos^2 \alpha - \sigma_h \sin^2 \alpha - \sigma_v) \sin 2i \quad (10)$$

$$\sigma_{yz} = 0.5(\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\alpha \sin i \quad (11)$$

여기서,  $\sigma_v$  : vertical stress

$\sigma_H$  : maximum horizontal stress

$\sigma_h$  : maximum horizontal stress

$i$  : deviation of the borehole from  $\sigma_v$

$\alpha$  : corresponds to the deviation of the borehole from  $\sigma_H$

시추공은 일반적으로 원통형의 형상을 갖고 있으므로 극좌표계로 표현된 응력 분포를 원통형 좌표계로 변환하여 사용한다. 변환식은 아래와 같다. 각  $\theta$ 는  $x$ -axis로부터 시계방향으로 측정되며 tangential stress와 axial stress의 요소이다. 이는 굴착공 주변에서 방향에 따라 응력이 다르게 작용한다는 것을 말해주며 결과적으로 tangential stress와 axial stress이 사인곡선을 그리며 변화한다는 것을 알 수 있다. 식에 따르면 tangential stress와 axial stress는  $\theta = \pm \pi/2$ 에서 최대값을 갖고  $\theta = 0, \pi$ 에서 최소값을 갖는다. 따라서 좌표계에서 식에 따라 공벽의 파괴가 어느 위치에서 발생할지 알 수 있다. 좌표 변환한 시추공 주변 응력 값을 활용하여 주응력을 계산할 수 있고 최대 주응력이 유효 강도를 초과할 때 파괴가 발생한다고 판단할 수 있다.

Table 1. Borehole collapse depending on Maximum pressure of drilling fluid

Case	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Maximum pressure of drilling fluid
1	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = (B - C) / q$
2	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = (A - C) / (1 + q)$
3	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = A - C - qB$

$$\sigma_{rr} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\sigma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\sigma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (13)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z - \nu [2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\sigma_{xy} \sin 2\theta] \quad (14)$$

$$\sigma_{r\theta} = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \sigma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (15)$$

$$\sigma_{rz} = \sigma_{xz} \cos \theta + \sigma_{yz} \sin \theta \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta z} = \sigma_{yz} \cos \theta - \sigma_{xz} \sin \theta \quad (17)$$

여기서,  $\sigma_{rr}$  : radial stress

$\sigma_{\theta\theta}$  : tangential stress

$\sigma_{zz}$  : axial stress

$\nu$  : Poisson's ratio

$\theta$  : clockwise angle from the x-axis

## 2.2 Mohr-Coulomb 파괴기준 기반의 안정성 평가 기법

Mohr-Coulomb 파괴 기준을 적용하여 시추공의 붕괴에 대한 안정성 평가는  $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$ ,  $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$ , 그리고  $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$ 의 응력 조건에 대해 검토하여 한다. 먼저,  $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$ 의 경우 시추공 주변부의 응력 상태는  $\sigma_1 = \sigma_z$ ,  $\sigma_3 = \sigma_r$ 이며 Mohr-Coulomb 파괴기준과 식 (2)을 적용하면 붕괴 방지를 위한 최소 시추공 압력  $P_{wb1}$ 은 식 (18)와 같이 표현된다.

$$P_{wb1} = (B - C) / q \quad (18)$$

여기서,  $A = 3\sigma_H - \sigma_h$

$$B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$$

$$C = \sigma_c - P_o(q - 1)$$

동일한 방법을 적용하여  $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$ , 그리고  $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$

에 대한 최소 시추공 압력  $P_{wb2}$ ,  $P_{wb3}$ 을 유도하면 Table 1과 같다.

한편, 시추공 압력이 감소할 경우 주응력이 서로 바뀔 수 있다. 따라서 시추공 붕괴는 이들 주응력 상태가 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 만족시킬 때만 발생하므로 Table 1으로 산정되는 시추공 압력을 가지고 주응력( $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$ )을 재산정하고 각 조건별로 이를 다시 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 만족시키는 최소 시추공 압력을 산정하는 반복적인 방법을 적용하여 산정한다. 다만 일반적인 현장 조건에서는 Case 1과 2의 조건에서 붕괴가 발생하므로 시추공 압력을 이 두 가지 조건과 연계시켜 수식을 유도하였다. 즉, 이러한 응력상태는  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_r$ 에 해당하며 여기서,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_z) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2}, \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_z) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (18)의 조건을 식 (19)에 대입하면 식 (20)과 같은 시추공 붕괴 방지를 위한 최소 시추공 압력 산정식이 도출된다.

$$P_{wb} = \frac{S + \sqrt{R}}{2(q + q^2)} \quad (20)$$

여기서,  $S = Aq - C(1 + 2q) + B(1 + q)$

$$\begin{aligned} R &= B^2(1 + 2q + q^2) - 2AB(q + q^2) - 2BC(1 + q) \\ &\quad + (Aq + C)^2 \end{aligned}$$

시추공 파쇄의 경우도  $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$ ,  $\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$ ; 그리고  $\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$  세 가지 조건에서 발생할 수 있으며 각 조건에 대한 시추공 파쇄 압력을 산정하여야 한다. 첫 번째  $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$  조건의 경우  $\sigma_1 = \sigma_r$ ,  $\sigma_3 = \sigma_z$ 이며 파쇄 방지를 위한 최대 시추공 압력  $P_{wf1}$ 은 식 (21)과 같이 표현된다.

Table 2. Maximum pressure of drilling fluid based on Mohr-Coulomb failure criterial

Case	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Maximum pressure of drilling fluid
1	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{WF1} = C + qE$
2	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{WF2} = (C + qD)/(1 + q)$
3	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{WF3} = (C - E)/q + D$

$$P_{WF1} = C + qE \quad (21)$$

나머지 두 번째 및 세 번째 조건에 대한 최대 시추공 압력도 같은 방법으로 산정할 수 있으며 Table 2는 이를 정리하고 있다.

한편, Mohr-Coulomb 파괴 기준은 인장강도를 과대 평가하는 경향이 있으므로 파쇄로 인한 인장파괴를 검토하기 위해서는 인장 컷오프 개념을 적용하는 것이 바람직하다. 인장 컷오프는 식 (22)와 같이 정의된다.

$$\sigma_3 - P_o = T_o \quad (22)$$

여기서  $T_o$ 는 일축인장강도이며 인장응력은 음(-)의 값을 갖는 것으로 정의된다. 수직 시추공의 경우 시추공벽에서의 접선응력이 인장응력의 형태로 발생하므로 인장 컷오프를 적용한 시추공 파쇄 방지 최대 압력은 식 (23)과 같이 표현된다.

$$P_{Wcutoff} = D - O_o - T_o \quad (23)$$

이렇게 산정된 시추공 최대 압력은 Table 2에 제시한 각각의 조건에 대한 시추공 최대 압력  $P_{WF}$ 과 비교하여 이중 작은 값을 최대 허용 시추공 압력으로 사용하여야 한다.

### 3. 2차원 유한요소 해석

#### 3.1 해석 대상

해석대상은 NASR 프로젝트의 시추지반조사 자료를 바탕으로 작성된 주상도 및 물성시험 데이터를 사용하였다. 아래 Fig. 4는 NASR 현장의 시추주상도 일부를 편집한 내용과 이를 바탕으로 그린 지층 분포도이다. 시추 조사 자료를 바탕으로 모래, 점토, 암반지반에 대하여 수치해석에서 활용할 대표 물성을 정하였다.

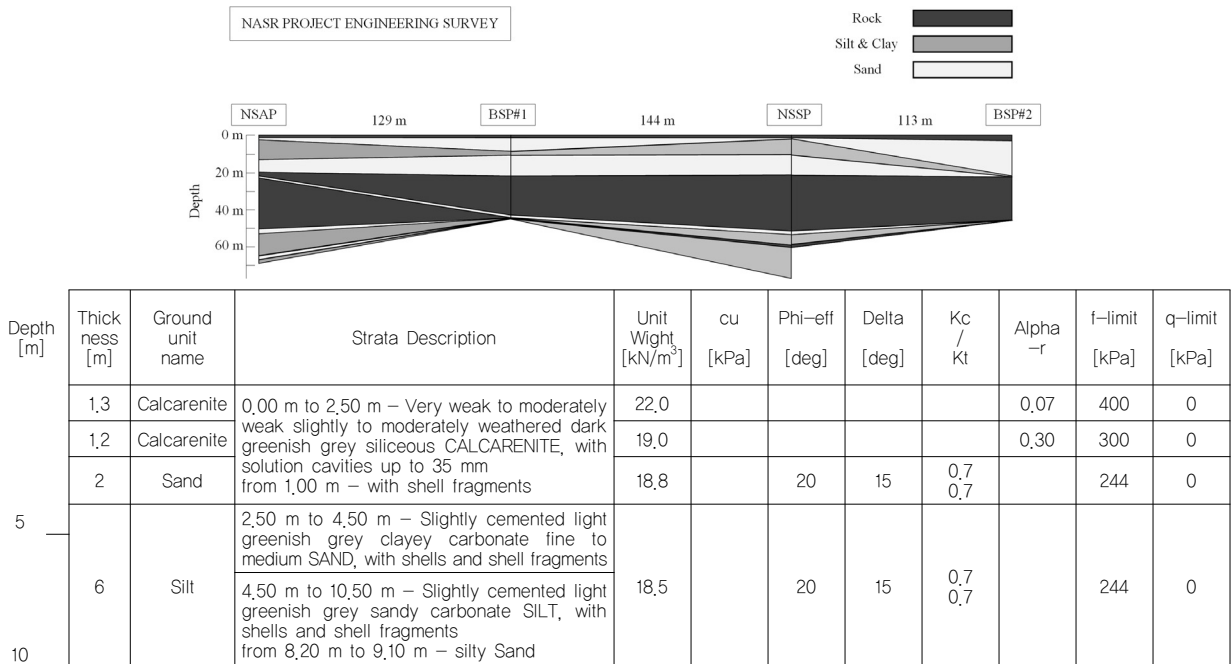


Fig. 4. NASR Drilling fluid columb and distribution chart

### 3.2 유한요소 해석 모델링

해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.13을 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이다. 시추공의 모델링에 있어서 해석의 편의상 2차원 단면을 가정하여 모델링하였으며 Fig. 5와 같이 시추공 중심축으로부터 상하, 좌우 대칭인 점을 고려하여 1/4단면에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 시추공의 직경은  $D=1m$ 이며 중심으로부터  $8D$ 의 거리에 측면과 상단의 경계면을 위치시키고 깊이조건에 따른 응력 경계조건을 적용하였고 좌측 경계는 수평방향의 변위 구속, 하단은 수직 변위를 구속하였다. 지반은 이산화에 있

어서 8절점 가감 적분 요소(CPE8R)를 적용하였고 Mohr-Coulomb 항복 기준을 따르는 탄소성 재료로 가정하였다.

### 3.3 재료 구성 모델

Mud window를 산정하기 위해 만든 모델링이 서로 다른 지반조건에서도 적용가능한지 검토하기 위하여 시추지반조사 자료에서 모래, 점토, 암반 조건에 대한 대표 물성값을 선정하여 적용하였다. 흙과 암반에 대한 연속체 탄소성 재료 모델링에는 Mohr-coulomb 파괴 기준과 Davis (1968)가 제안한 비관련흐름 법칙을 적용하였다.

Drucker-Prager 모델(Drucker 1952)에서 선형 항복면 모델은 흙과 암반과 같이 점착력과 내부마찰각의 파라메타로 강도특성이 표현되는 재료에 간편하게 적용할 수 있

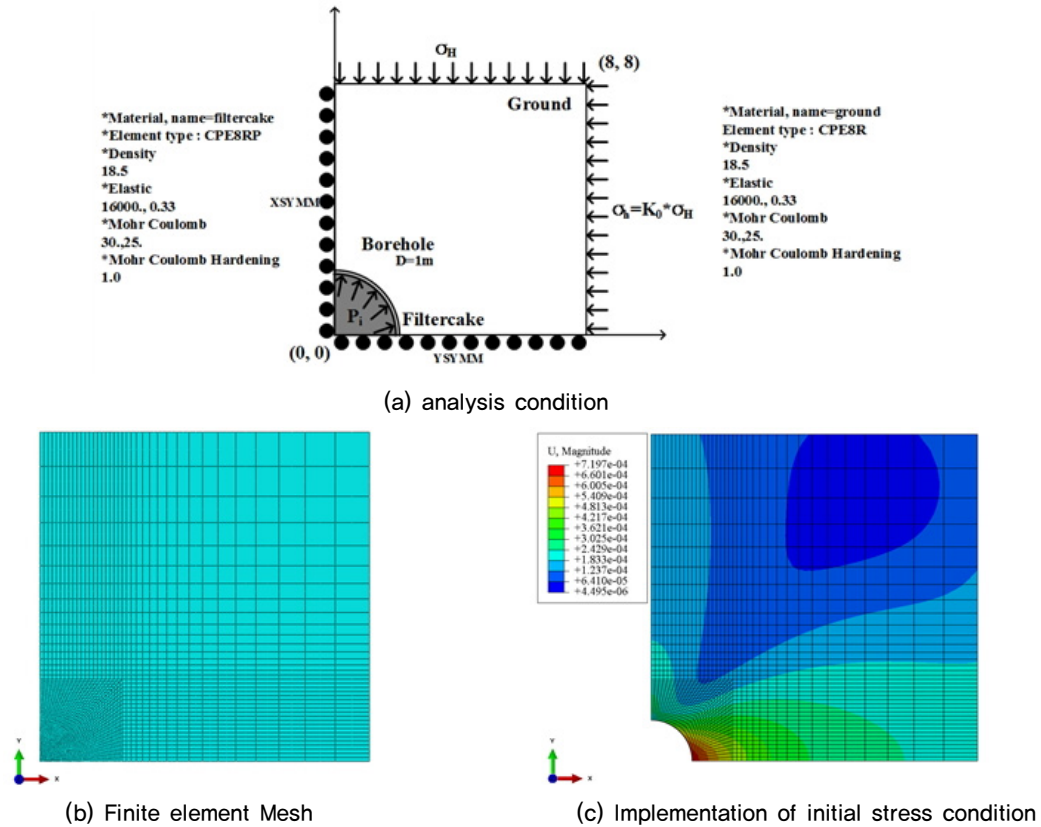


Fig. 5. Modeling domain and boundary condition

Table 3. Material property

Case	Density $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Elastic modulus E [kPa]	Internal friction angle, $\phi$ [ $^{\circ}$ ]	Dilation friction angle, $\psi$ [ $^{\circ}$ ]	Cohesion $c'$ [kPa]	Poisson's Ratio, $\nu$	Coefficient of earth pressure $K_0$
Sand	18,8	16000	20	15	1	0,33	0,7
Clay	18,5	16000	20	15	150	0,33	0,7
Rock	24,7	8000000	38	33	700	0,24	0,7

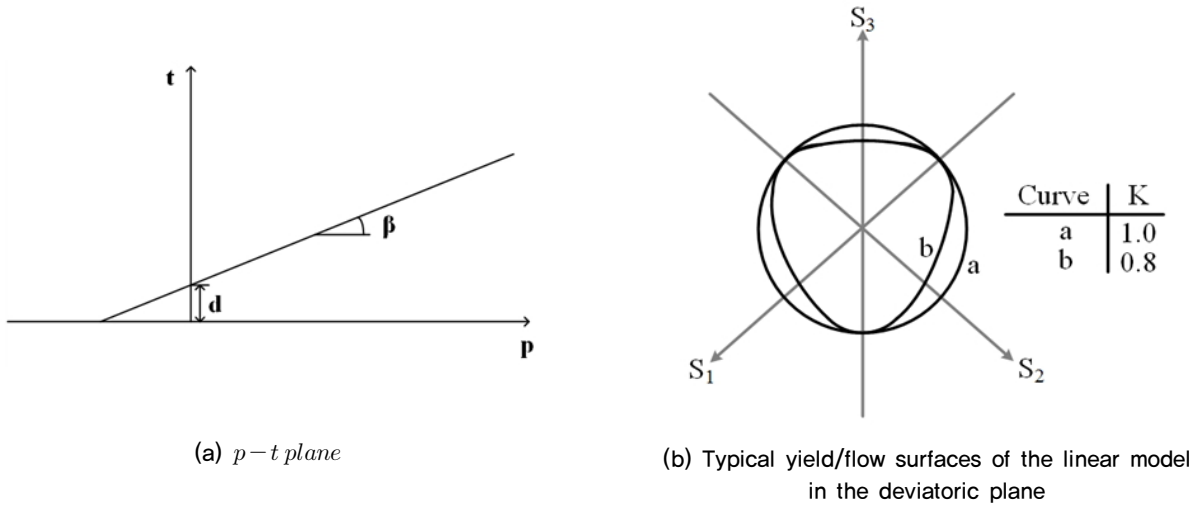


Fig. 6. The linear Drucker-Prager criterion

다는 장점이 있다. 단, 파라메타는  $p-t$  plane 에서 기존의  $\phi$ 를 사용하여 새롭게 계산되어야 한다. Fig. 6 (a)의 그래프에서 내부마찰각  $\beta$ 는  $p-t$  plane 에서 항복면의 기울기이고 점착력  $d$ 는  $t$ 축과의 교점을 나타낸다. (b)의 그래프에서  $K$ 는 삼축 인장 상태의 항복 응력과 삼축 압축 상태의 항복 응력의 비로서 항복면의 중간주응력에 대한 의존도를 나타내며  $K=1.0$ 의 경우 von Mises 모형으로 일반화된다. 그리고 선형 Drucker-Prager 항복규준은 아래의 식과 같이 정의된다.

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (24)$$

$$\text{여기서, } t = \frac{1}{2}q \left(1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K}\right) \left(\frac{r}{q}\right)^3\right)$$

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

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{3} \sin \phi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \phi}}$$

$$\frac{d}{c} = \frac{\sqrt{3} \cos \phi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \phi}}$$

#### 4. Collapse Pressure와 Hydraulic-Fracture 산정 모델링

Drilling Fluid에 의한 시추공벽에 작용하는 압력  $P_i$ 의 하한선을 검토하기 위한 모델링 방법은 굴착 후 평형 압력을 작용시켜 지반의 초기 응력 상태 구현을 시킨 단계에서

하중을 10 Time increment 동안 0kPa로 수렴시킨다.

상한선에 대한 모델링은 하한선과 동일하게 초기 응력 상태를 조성하고 반대로  $P_i$ 값을 시간에 따라 tabular amplitude를 활용하여 선형으로 증가시켜준다. 이때 최종 단계에서 작용하는 최대  $P_i$ 값은 시추공의 변위가 급격하게 증가하여 파괴에 이르는 압력값(항복 상태)을 사용한다. Fig. 7에 Mud window 산정을 위해 수행한 모델링의 개념도를 순서대로 자세하게 표현하였다.

이론식에서 검토하였듯이 시추공 주면의 응력분포는 시추공과 지반이 완전한 대칭형이라 하여도  $x-axis$ 에서부터 시계방향으로 측정된 각도인  $\theta$ 에 따라  $\sin$ 곡선을 그리며 분포한다. 이때 가장 큰 응력상태를 보이는 위치인  $\theta = 0^\circ$ 에서 변위와 응력을 최종 해석 단계에서 추출하였다. 지반의 파괴 시점은 변위의 크기가 급격히 증가하는 해석 단계로 판단하였으며 구체적인 방법은 다음과 같다. 먼저 시간-변위 그래프를 작도하고 지수함수로 그려지는 변위그래프에서 두 접선을 작도하여 접선의 교점을 파괴의 시점으로 고려하였다.

Fig. 8은 모래 조건, 깊이 20m인 조건의 해석 결과 그래프이다. (a)와 같이 시간-변위 그래프에서 두 접선의 교점을 통해 시추공이 파괴된 해석 단계를 검토하고 (b)의 시간-응력 그래프에서 시추공의  $\theta = 0^\circ$ 위치에 작용하는 응력을 추출하였다. 해석 결과에 따른 mud window의 하한  $P_i$ 는 278kPa으로 Mohr-coulomb 이론식에 따른  $P_i$ 는 261kPa과 6.1%의 오차를 갖는 것으로 검토되었다.

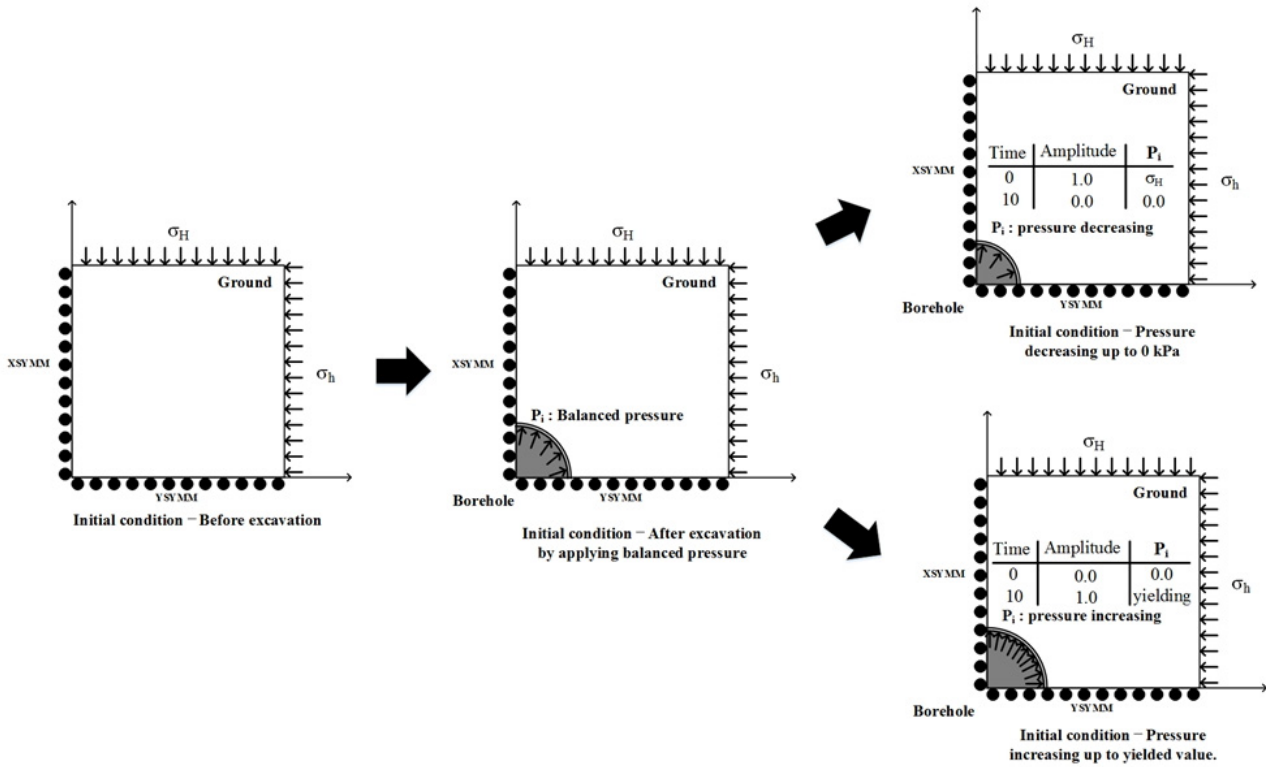


Fig. 7. Conceptual modeling for estimating the Mud window

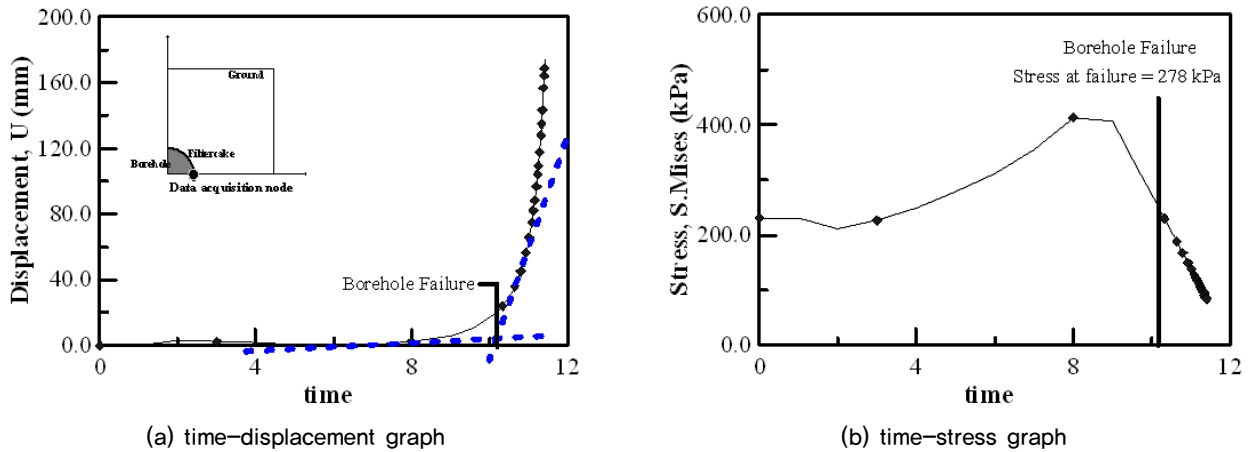


Fig. 8. Result of modeling

## 5. 해석 결과 및 분석

먼저 유한요소 해석 결과를 살펴보고 이론식과 유한요소 해석 결과를 활용하여 작성한 Mud window 값을 각각 수행 조건에 따라 비교하여 모델링을 검증하였다.

### 5.1 Mud window에 따른 응력분포도

모델링 수행 결과 굴착공벽에 작용하는 Drilling Fluid

의 압력  $P_i$ 의 변화에 따른 굴착공 주변 지반의 응력 변화를  $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$ , Mises stress와 PEMAG에 대하여 각각의 분포도에서 최대값과 최소값을 고정시키고 붕괴부터 수압 파쇄 상태까지 5단계로 나누어 Fig. 9에 정리하였다. 대상 조건은 모래 지반, 심도 20m이며 특히 지반의 소성 변형에 대한 분포도를 나타내는 PEMAG 그림에서 붕괴시  $\theta = 90^\circ$ 의 위치, 수압파쇄시  $\theta = 0^\circ$ 에서 각각 응력이 집중되어 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다. 더불어  $P_i$ 에 따른 굴착공 주변 지반의 응력 변화를 검토할 수 있다.



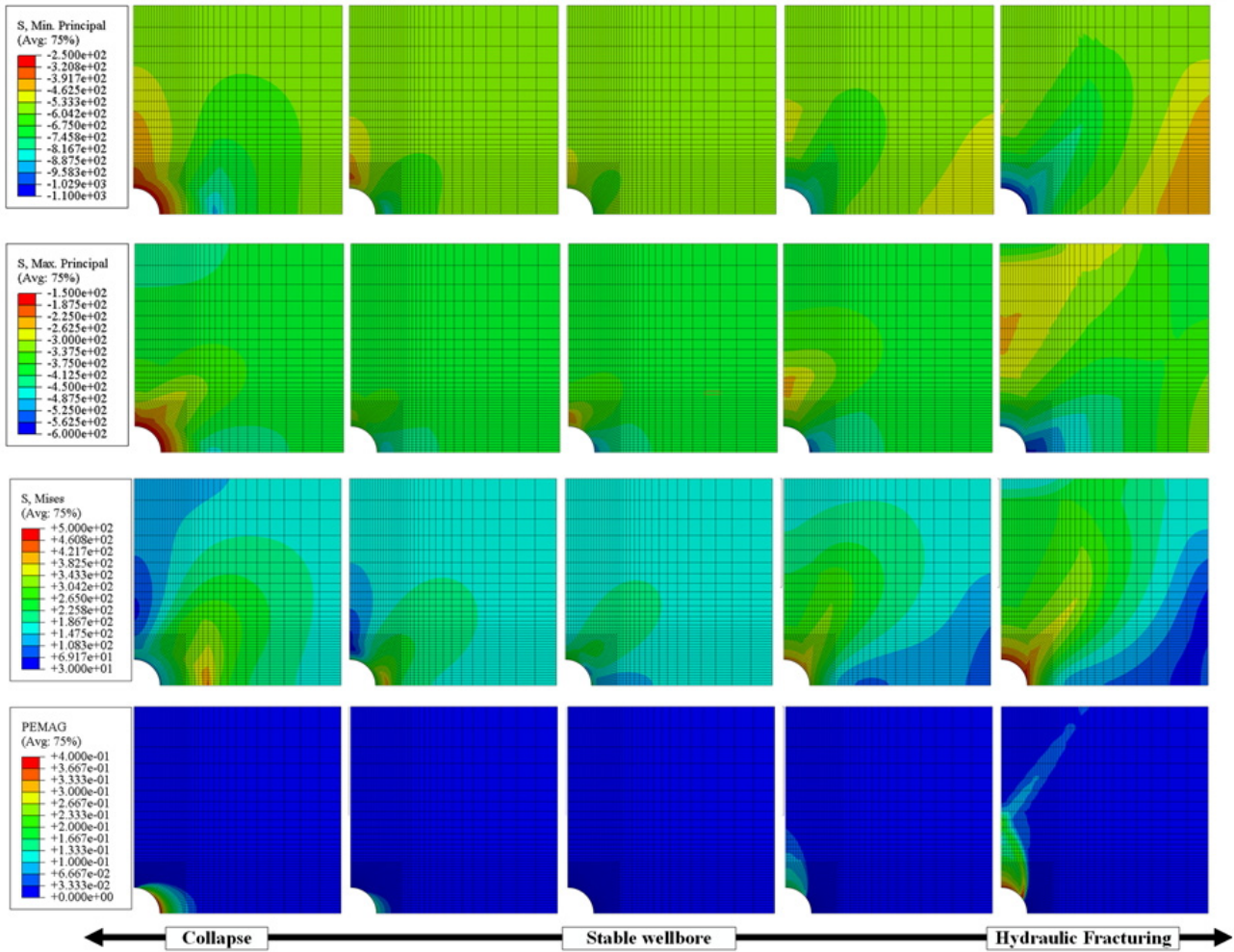


Fig. 9. Stress Contour depending on  $P_i$

## 5.2 지반조건에 대한 Mud window 비교 분석

Mohr-coulomb 파괴 기준에 따른 Mud window 산정 이론식에 의한 결과와 모델링 해석 결과를 비교 분석하여 모델링을 검증하고자 하였다. Fig. 10은 각 지반 조건에 따른 Mud window를 이론식과 함께 작성한 것으로 모래의 경

우  $\pm 5\%$  내외의 오차율로 가장 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 점토와 암반의 경우 최대 10%까지 오차가 발생 하였으나 깊이에 따른 Mud window 상하한의 증감에 대한 그래프의 경향이 매우 유사하게 분석되는 것으로 검토 된다.

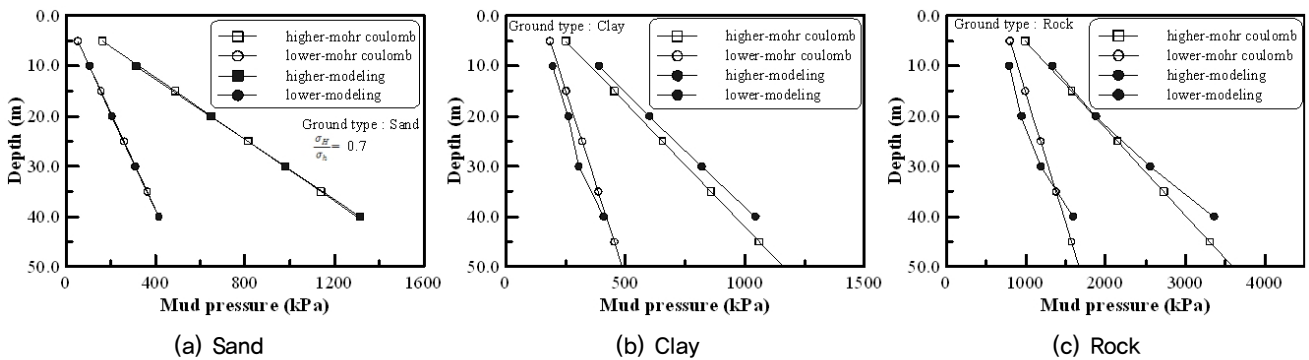
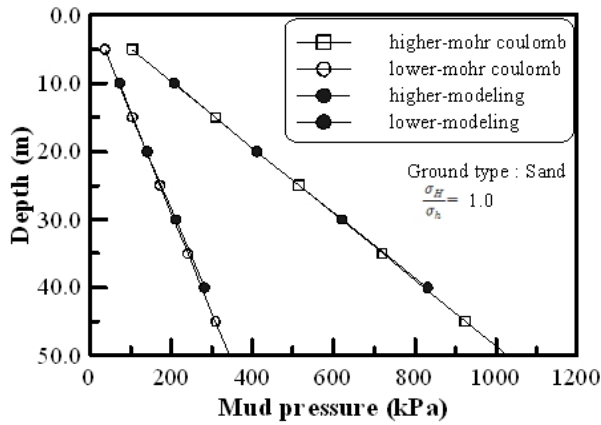
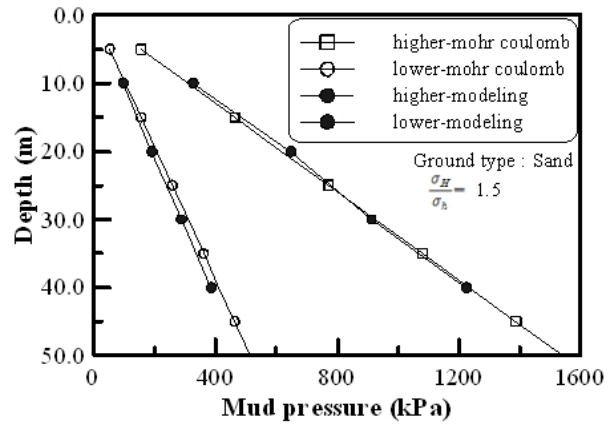


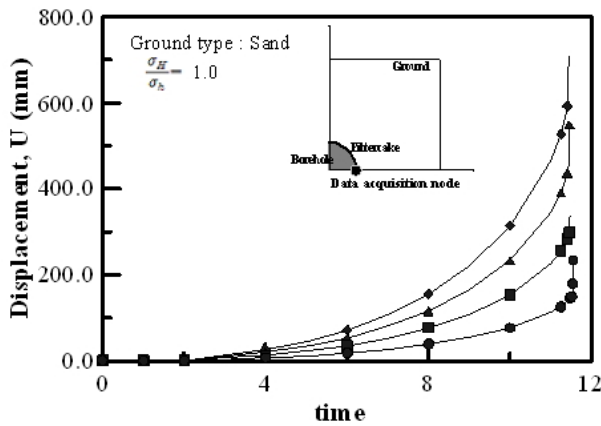
Fig. 10. Mud pressure chart depending on the ground condition



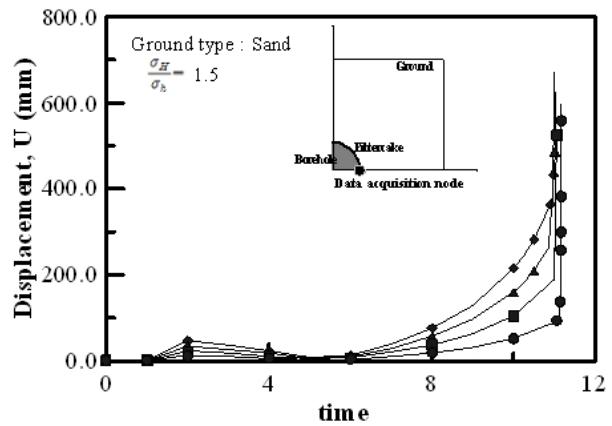
(a) Mud window,  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.0$



(b) Mud window,  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.5$



(c) Displacement graph,  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.0$



(d) Displacement graph,  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.5$

Fig. 11. Analysis results depending on the ratio between  $\sigma_H$  and  $\sigma_h$

### 5.3 $\sigma_H$ 와 $\sigma_h$ 의 비율에 대한 Mud window 비교 분석

본 장에서는 최대, 최소 수평 응력의 비율을 변화시킨 조건에서 모델링이 이론식과 유사한 해석 결과를 보여주는지 검증하였다. 앞서 지반 조건별 유한요소 해석시 최대, 최소 수평 응력의 비율( $\frac{\sigma_H}{\sigma_h}$ )은 0.7로 수행하였고 5% 내외의 오차를 보였다.  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.0$  인 조건에서는 Fig. 11. (a)와 같이 최대 3% 오차로 매우 유사한 경향을 도출할 수 있었다. 반면,  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.5$  인 조건에서는 최대 오차가 8% 까지 발생하였다.

Fig. 11의 (c)와 (d)는  $\theta = 0^\circ$  인 공벽의 노드에서 시간-변위 그래프를 나타낸 것으로  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.0$ 인 조건에서는 굴착 후 평형 압력( $P_i = \sigma_H$ 인 상태)을 가하는 단계인 step time=2 까지 변위가 매우 미미하다는 것을 알 수 있다. 그러나  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.5$  조건에서는 공벽에 작용하는 압력  $P_i$ 와 수

평 압력의 불균형으로 최대 46.4mm의 변위를 수용하고 있다. 이를 통해 최대, 최소 수평 응력의 비율이 1.0과 크게 차이가 날수록 굴착 후 초기 응력 상태 구현이 불완전해지고 Mud window에 대한 해석에도 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그러나 동일한 경향을 도출하고 오차율이 8% 내외이므로 충분히 적용가능하다고 판단된다.

### 5.4 구성 모델에 의한 차이

지반 요소의 구성 모델을 Mohr-coulomb과 Drucker-Prager로 각각 적용하여 해석 결과를 분석하였다. 물성은 모래 조건을 적용하였으며 해석 결과를 아래 그림 4-10에 시간-변위, 시간-응력 그래프로 나타냈다. 또한 각각의 항목 기준에 따라 도출된 Mud window를 작성하였다.

결과를 비교해보면 하한선에 대한 해석 결과는 매우 유사하게 2% 내외의 오차로 변위와 응력이 도출되는 것을

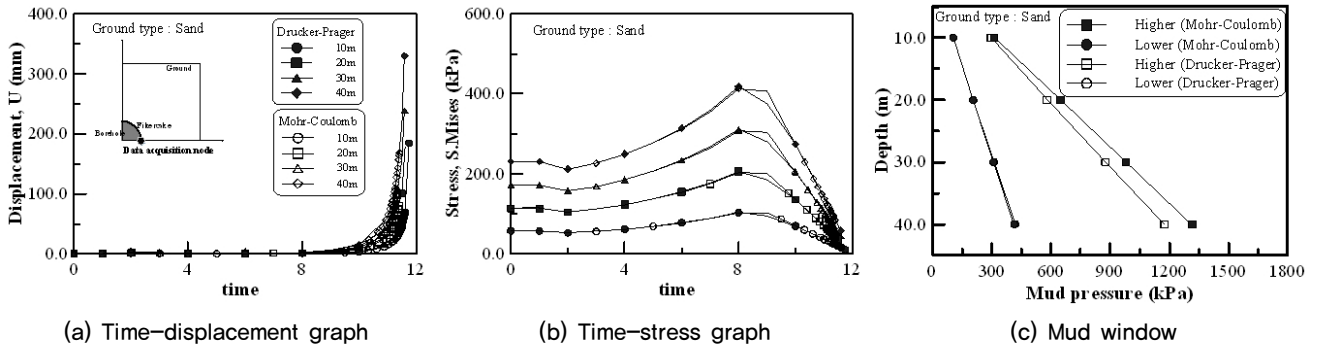


Fig. 12. Comparison the result between Mohr-Coulomb and Drucker-Prager

알 수 있다. 단, Drucker-Prager 항복 기준을 적용한 경우에서 Stress의 변화 경향이 더 부드러운 곡선을 나타냈으며 Time increment에 따른 최대 변위가 최종 스텝에서 더 크게 해석되었다. 그러나 동일한 시점에서는 그래프의 개형에서 확인하였듯이 유사한 결과를 보였다.

반면 상한선을 도출하기 위한 해석 결과에서는 하한선에서보다 큰 차이인 최대 10%의 오차를 보였다. Mohr-Coulomb에 의한 결과에 비하여 작은 값으로 도출되어 다소 보수적인 결과를 보였다고 할 수 있다. 따라서 구성 모델에 의한 차이는 미미하거나 보수적인 결과를 보이기 때문에 두 가지 항복 기준 모두 Mud window를 산정하는데 활용할 수 있다고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 굴착공 시공시 Drilling Fluid를 활용하여 공벽을 유지할 때 발생하는 굴착공 주변부 지반의 응력 변화를 2차원 수치해석 모델링을 통해 분석하고 이론식과 비교하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반 굴착시 발생하는 응력의 재분배 현상에 대한 모델링을 모래, 점토, 암반 지반에 대한 대표 물성을 선정하여 수행하여 대표적인 이론식 검토에 활용되는 Mohr-Coulomb 파괴 기준과 비교한 결과 경향은 동일하고 수치의 차이는 5% 내외로 유사한 Mud window를 산출하였다.
- (2) 최대 최소 수평 응력의 비율에 따른 모델링 검토에서는  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.0$ 인 조건에서 이론식과 가장 일치하는 결과를 보였다. 이는 굴착 후 초기 응력상태 구현이 가장 완벽하기 때문이고 비율값이 커질수록 오차율이 증가

하였으나 동일한 Mud window의 경향을 보였으며 차이가 미미하여 충분히 적용가능하다고 판단되었다.

- (3) 지반 구성 모델을 Drucker-prager로 적용하여 Mohr-Coulomb과 비교한 결과에서도 유사한 결과를 보여 모델링에서 Drucker-prager 파괴 기준을 적용할 수 있다고 판단된다.

## Acknowledgement

This research is supported by Hyundai industry and Grant No. 2014004636 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation. The financial supports are gratefully acknowledged.

## References

1. Saeed Salehi, Geir Hareland and Runar Nygaard (2010), "Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells", Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 72, Issue 3-4, pp.229-235.
2. Al-Ajmi and Zimmerman (2006), "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume 43, Issue 8, pp.1200-1211.
3. X. Wang and R. L. Sterling (2007), "Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling", Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 22, pp.620-632.
4. Lianyang Zhang, M. ASCE and Radha KC (2010), "Stability Analysis of Vertical Boreholes Using a Three-Dimensional Hoek-Brown Strength Criterion", Civil Engineering and Engineering Mechanics, pp.283-292.
5. Shahoo Maleki, Raof Gholami, Vamegh Rasouli, Ali Moradzadeh, Reza Ghavami Riabi and Farhad Sadaghzadeh (2014), "Comparison of different failure criteria in prediction

- of safe mud weigh window in drilling practice”, Earth-Science Reviews, Volume 136, pp.36-58.
6. Davis, E. H. (1968), “Theories of plasticity and the failure of soil masses”. Soil mechanics: Selected topics, Butterworth’s London, pp.341-380.
7. Drucker, J.M and Prager, W. (1952), “Soil Mechanics and Plastic Analysis in Limit Design”, Quarterly of Applied Mathematics, Volume 10, No.2, pp.157-165.