

포항 심부 지열 시추공의 안정성 분석 연구

이민정¹ · 장찬동¹ · 이준복¹ · 이태종^{2*} · 황세호²

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Stability Analysis for the Pohang Deep Geothermal Borehole

Min Jung Lee¹, Chandong Chang¹, Jun Bok Lee¹, Tae Jong Lee^{2*} and Seho Hwang²

¹Dept. of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University

²Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 2006년 시추되었으며 굴착 시 연약층 붕괴 및 공경수축 등의 잦은 시추공 불안정을 보인 포항 심부 지열 시추공(BH-4, 최종심도: 2,383 m)의 안정성에 대해 분석하였다. 안정성 분석을 위해 현장응력과 암석강도를 고려하여 최적의 수압력을 산정한 결과 최적이수압력의 상한은 연직응력으로, 하한은 붕괴압력 또는 공극수압으로 나타났으며, 암종에 따라 매우 다른 범위를 보였다. 시추공 최상부의 반고결 이암 구간은 이수압력의 조절만으로는 공의 붕괴를 방지할 수 없는 조건으로 나타났으며 그 하부의 일부 암종(염기성 암맥, 결정질 응회암)에서는 붕괴압력이 정수압보다 50~60% 높게 나타났다. 즉 이러한 구간에서는 정수압에 해당하는 이수밀도(0.98 g/cm³)를 사용 시 과도한 공벽 붕괴가 발생할 수 있기 때문에 이수밀도를 1.5 g/cm³ 이상으로 증가시켜 굴착해야 시추공 안정성을 확보할 수 있다.

주요어: 현장응력, 암석강도, 시추공 안정성, 최적이수압력

Abstract: This paper presents the analysis about the stability of the Pohang deep geothermal borehole drilled in 2006. Severe wellbore instability problems such as collapse and tight hole occurred in weak rocks while drilling. Optimal mud pressure (mud window) required to prevent instability problems during drilling is obtained from analysis on *in-situ* stress and rock strength. The window is bounded by vertical stress in its upper limit and by either collapse pressure or pore pressure in its lower limit. Mud window varies with different types of rocks. In the top-most semi-consolidated mudstone formation, no mud window can secure borehole stability. In some weak rock types (basic dyke and crystal tuff), the borehole pressure needs to be higher by 50~60% than hydrostatic pressure. That means a mud density of 1.5 g/cm³ or higher should be applied during drilling in order to prevent excessive collapse around the borehole.

Keywords: *in-situ* stress, rock strength, wellbore stability, mud window

서 론

시추공 굴착은 지반 응력장 상태를 교란시켜 시추공 주변으로 응력을 집중, 또는 이완시키며 이러한 상태가 공벽압반의 강도를 과도하게 초과할 때 공벽 붕괴 등의 시추공 불안정이 발생한다(Zoback *et al.*, 1985; Rahman *et al.*, 2000; Haimson and Chang, 2002; Paul and Zoback, 2006).

주로 변성암과 화성암 등의 결정질 암석으로 구성된 국내 암반의 특성과 심부 시추공이 흔치 않았던 국내 시추 상황 때문에 우리나라에서 진행된 시추에서는 시추공 안정성 분석이

크게 요구되지 않았다. 그러나 2003년부터 2006년까지 포항시 흥해읍에 총 4개의 심부 지열 시추공이 시추되었고 굴착과정에서 공경수축이나 과도한 시추공벽 붕괴 등의 시추공 불안정이 발생하여 체계적인 시추공 안정성 분석에 대한 요구가 제기되었다(송윤호 등, 2006).

본 연구에서는 굴착 시 포항 심부 지열 시추공의 안정성을 유지하는데 필요한 최적이수밀도 범위를 산정하여 시추공 안정성에 대한 분석을 시도하였다. 4개의 심부 시추공은 동일한 지역에 위치하고 각 시추공에 적용하는 안정성 분석 과정은 동일하기 때문에 본 논문은 4개의 시추공 중에서 가장 깊은 심도로 최근에 굴착된 시추공(BH-4, 최종심도: 2,383 m)에 대한 분석 결과를 논의하였다. 포항 심부 지열 시추공인 BH-4호 공의 최적 이수밀도 범위를 조사하기 위하여 포항지역의 현장 응력과 시추공 심도에 따른 암석강도를 분석하였으며 이 결과를 시추공 안정성 분석에 적용하였다.

2008년 7월 1일 접수; 2008년 7월 14일 채택

*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: Groundwater and Geothermal Resources Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),
92 Kwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

포항 시추공 및 시추공 불안정

심부 시추공이 위치한 포항시 흥해읍 지역은 고생대 말기의 화성활동에 기인한 화강섬록암을 기반으로 상부에 백악기에 퇴적된 사암 및 이암이 호층을 이루는 지역이다(이승구 등, 2007). 사암/이암 호층의 상부에는 화산암류인 백악기 화산력 응회암과 신생대 제 3기의 결정질 응회암이 교호하며 지표에서 심도 약 200~370 m까지는 신생대 제 3기의 반고결 이암이 두껍게 분포한다(송윤호 등, 2006; 황세호 등, 2007).

2003년 7월부터 2006년 11월까지 포항지역의 지열개발 타당성 조사 목적으로 총 4개의 심부 지열 시추공이 굴착되었으며 본 연구의 대상 시추공은 굴착 심도가 2,383 m인 BH-4호 공으로 이 시추공은 국내에서는 최초로 2,000 m 이상의 심도까지 굴착되었다(송윤호 등, 2006). 심도 2,000 m까지 시추가 진행된 2006년 8월 말에 공경검층(caliper log), 음파검층(sonic log, V_p), 자연감마(natural gamma-ray log), 전기검층(electrical

log, long normal), 온도검층(temperature log) 등의 물리검층을 수행하였으며 검층 센서의 온도 및 압력 한계에 의해 2,000 m 하부에 대한 검층은 이루어지지 않았다(황세호 등, 2007).

Fig. 1은 이들 물리검층 자료와 지층대비를 통해 구현된 주상도를 도시한 것이다. 전체적인 지층대비는 기본적으로 자연감마선검층 자료를 이용하였으며 해석이 모호한 구간은 전기비저항과 같은 다른 물성자료와 시추코어 및 시추 중 발생하는 슬러리를 이용하였다. 지표에서 심도 217.4 m까지 분포하는 제 3기 반고결 이암층(semi-consolidated mudstone)의 경계가 자연감마선에서 잘 확인되며 염기성 암맥(basic dyke)에 관입당한 결정질 응회암(crystal tuff)과 화산력 응회암(lapilli tuff)이 반복적으로 심도 548 m까지 분포하고 사암과 이암이 심도 1,361 m까지 교호하며 퇴적되었다. 화산력 응회암과 사암/이암 호층(sand & mudstone)의 지층경계는 자연감마선 자료에서는 구분이 어려워 전기검층 자료를 이용하기도 하였다(황세호 등, 2007). 사암/이암 호층 구간의 하부에는 심도

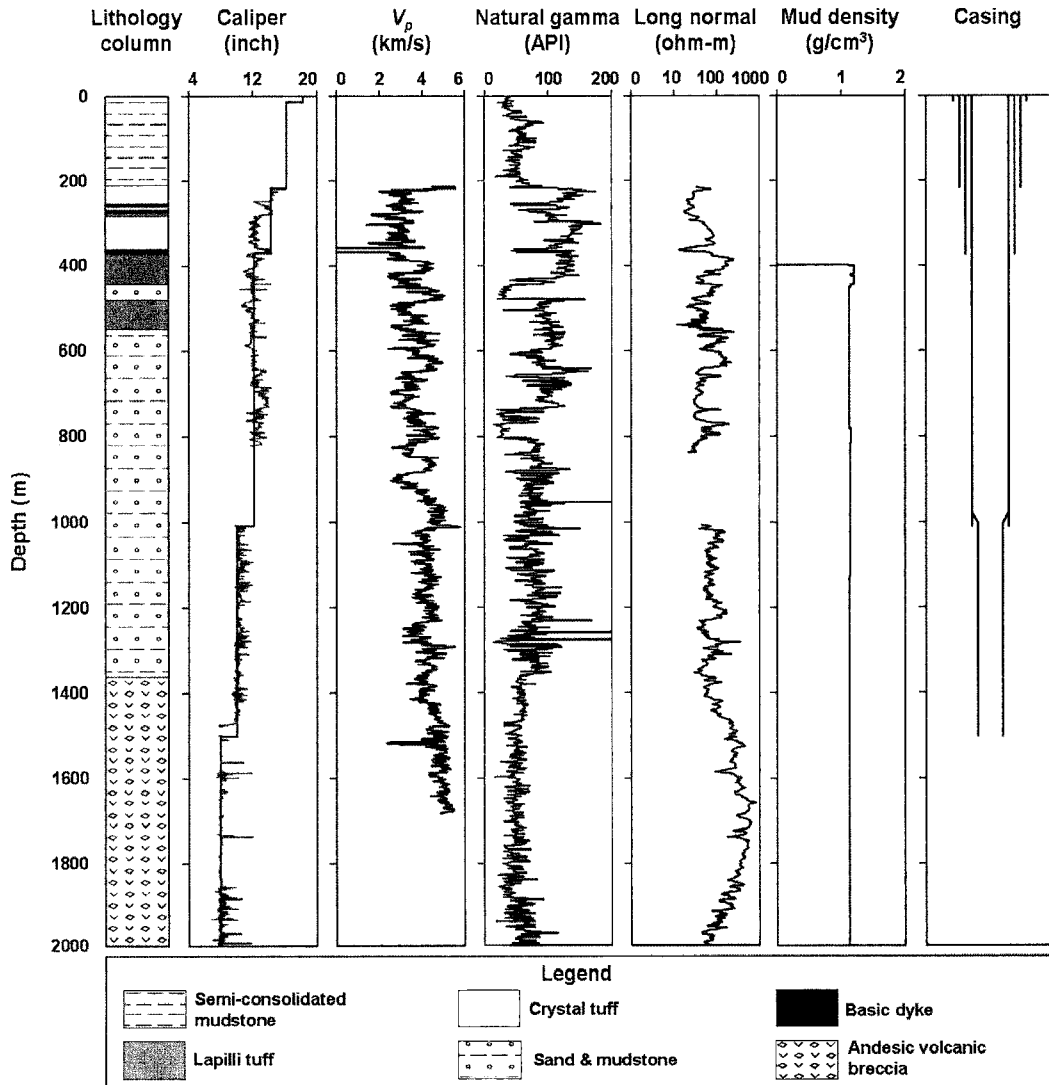


Fig. 1. Lithology, geophysical well logs and mud density log used for the borehole BH-4 in the study. Solid straight line in caliper log indicates the drill bit size.

2,265 m를 기준으로 상부에는 안산암질 화산각력암(andesic volcanic breccia), 하부에는 화강섬록암이 굴착심도인 2,383 m까지 확인되었다. 시추 시 사용된 이수의 비중과 케이싱 설치 제원 및 심도는 시추 작업일보를 이용하여 작성하였다.

지표에서 심도 400 m까지는 타격식 방법으로 시추공을 굴착하였으며 심도 400 m 이하부터는 회전수세식 방법을 이용하여 굴착하였다. 제 3기 반고결 이암층 내에 분포하는 사암층은 건조 상태에서는 매우 단단하지만 수분을 함유하면 강도가 현저하게 감소하여 시추공 불안정성을 유발할 수 있기 때문에 짧은 시간 내에 시추를 완료하기 위해 회전수세식 방법보다 굴진 속도가 빠른 타격식 방식을 사용하였다.

반고결 이암층 구간은 시추공이 매우 커서 국내에 보유중인 물리검층 장비의 적용이 어려웠기 때문에 나공 상태에서 물리검층의 자료취득은 수행되지 않았으며 시추 종료 직후, 곧바로 케이싱을 설치하여 시추공이 확대될 수 있는 영향을 최소화하고자 하였다.

결정질 응회암이 분포하는 217.4~230 m 구간에 공벽 압식의 과도한 파쇄에 의한 문제점이 발생했고 이를 해소하기 위해 해당구간에 시멘트그라우팅을 실시한 후 재굴진 하였다. 화산력 응회암이 퇴적된 심도 370 m 굴진 중 대수층의 영향으로 발생한 공벽 붕괴현상 및 공저의 파쇄대 발달로 굴진이 중단되었고 문제점을 해소하기 위해 370 m까지 케이싱을 설치하였다. 중생대 사암/이암의 호층 구간인 심도 640 m 굴진 중에 화산력 응회암 내에 약 35 m 두께로 퇴적된 중생대 사암/이암의 호층 구간인 심도 470 m 지점에서 붕괴가 발생하여 시멘트그라우팅을 실시한 후 재굴착 하였다. 안산암질 화산각력암이 분포하는 심도 1,503 m부터 최종 굴착심도까지는 시추공 조사 목적으로 케이싱을 설치하지 않았다.

최적이수압력 산정 이론

균질등방성이며 선형탄성의 성질을 갖는 지반에 연직시추공을 굴착할 경우 시추공벽에 작용하는 주응력장은 Kirsch에 의해 유도되었으며 다음과 같이 지반응력장과 시추 매개변수의 함수로 표현된다(Zoback, 2007 참조).

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= P_m - P_o \\ \sigma_{\theta\theta} &= (S_{Hmax} + S_{Hmin}) + 2(S_{Hmax} - S_{Hmin})\cos 2\theta - 2P_o - (P_m - P_o) \\ \sigma_{zz} &= S_v - 2\nu(S_{Hmax} - S_{Hmin})\cos 2\theta - P_o \end{aligned} \quad (1)$$

이때 σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} 은 각각 시추공벽에 작용하는 공경방향, 접선방향, 연직방향의 주응력이며 P_m 과 P_o 는 공내 이수압력과 공극수압, S_v , S_{Hmax} , S_{Hmin} 은 각각 연직응력, 최대 수평주응력, 최소 수평주응력이고 θ 는 최대 수평주응력 방향으로부터의 방위각, 그리고 ν 는 포아송비이다. 식 (1)을 통해 시추공벽의 위치에 따라 σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} 의 크기가 변화하고 시추공벽에서의 최대 응력집중이 S_{Hmin} 방향과 나란한 시추공벽 양쪽에서

발생함을 알 수 있다. 따라서 집중된 응력이 암반의 강도를 초과할 때 발생하는 공벽파쇄는 응력집중이 최대로 작용하는 S_{Hmin} 방향과 나란한 시추공 양 공벽에서 발생한다.

암반의 강도는 주어진 응력상태에 따라 변하기 때문에 이를 기술하기 위해서는 응력의 함수로 표현되는 파괴기준식을 이용해야 한다. 본 연구에서는 암반 역학적으로 가장 널리 이용되는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 이용하였으며 그 형태는 다음과 같다(Jaeger et al., 2007 참조).

$$\sigma_f = UCS + \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right) \quad (2)$$

σ_f 는 σ_3 (최소주응력)가 작용할 때의 파괴강도이며 UCS (uniaxial compressive strength)는 일축압축강도, Φ 는 내부마찰각이다.

시추공벽에 작용하는 주응력장과 암반의 강도는 굴착 시 시추공 안정성을 지배하는 중요한 역학적 요소이다. 이러한 역학적 요소 중 시추 시 인위적으로 조절 가능한 요소는 공내 이수압력(P_m)이며 공내 이수압력은 이수밀도가 커질수록 증가한다. 공내 이수압력이 증가하면 두 가지 측면에서 시추공 안정성 확보에 유리하다. 첫째, 이수압력 증가 시 시추공벽에 작용하는 공경방향의 응력(σ_{rr})이 증가하고 접선방향의 응력($\sigma_{\theta\theta}$)이 감소되어 시추공벽에서의 응력 집중 현상이 완화된다(식 (1)과 Fig. 2(a) 참조). 둘째, 시추공벽 파쇄가 발생할 수 있는 공벽 위치에 작용하는 유효구속압(최소주응력, σ_{rr})의 크기가 증가되어 해당 암반의 강도가 높아진다(식 (2) 참조). 이 두 가지 효과에 의해 높은 이수밀도를 이용할 경우 과도한 공벽파쇄를 감소시킬 수 있게 된다.

작은 폭으로 발생된 공벽 파쇄대는 시추공의 안정성을 위협

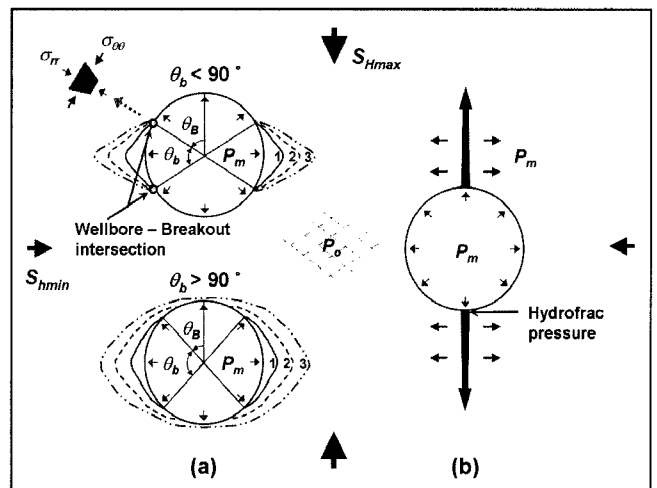


Fig. 2. Schematic diagrams of wellbore breakout and hydrofracturing inside a borehole. Optimal mud window is a pressure range between the collapse pressure, the lower bound pressure that prevents excess breakouts (a) and the hydrofracturing pressure that can be conservatively estimated from far-field minimum principal stress (b).

하지 않는다. 그러나 일정 폭 이상의 파쇄대가 형성되면 공벽 전체에서 파쇄가 발생하여 시추공을 유지할 수 없게 된다. 이를 시추공 붕괴라 하며 이러한 시추공 붕괴는 과도하고 지속적인 압편 등을 발생시켜 시추공 불안정을 야기한다. 석유업계의 많은 경험으로부터 연직 시추공의 경우에는 90°의 폭을 갖는 초기 압축파쇄대를 시추공 붕괴 형성의 기준으로 삼고 있다(Zoback, 2007). 이는 Fig. 2(a)에 묘사되어 있는 폭이 다른 생성 초기의 압축파쇄대(1)가 시간이 경과함에 따라 2와 3으로 성장될 때 그 성장 형태의 차이를 통해 확인 할 수 있다. 초기 발생 폭(θ_b)이 90° 이하일 때는 압축파쇄대가 깊이로만 성장하다가 안정화되기 때문에 시추공 안정성이 유지되나, 초기 발생 폭이 90° 이상으로 형성될 때는 압축파쇄대가 깊이와 함께 그 폭도 성장하여 시추공 붕괴를 유발한다. Fig. 2(a)에서 공벽파쇄가 발생한 부분은 응력이 암석강도를 초과하는 부분이며 파쇄가 발생되지 않은 부분은 응력이 암석강도보다 작은 부분이다(Zoback *et al.*, 1985; Rahman *et al.*, 2000; Haimson and Chang, 2002). 따라서 시추공벽과 압축파쇄대의 교차점은 암석강도와 교차점에 접선방향으로 작용하는 응력($\sigma_{\theta\theta}$)이 평형을 이루는 지점이다. 이에 착안하여 압축파쇄의 폭이 90°가 되도록 하는 이수압력(이를 붕괴압력, P_c 라 칭함)을 산정할 수 있으며 이 압력은 시추공 안정성을 확보하기 위한 시추공 내 압력의 하한치에 해당한다. 압축파쇄의 초기 발생 폭(θ_b)이 90°이므로 시추공벽에 접선방향으로 작용하는 응력($\sigma_{\theta\theta}$)식 (1)은 θ 대신에 $\theta_b(45^\circ)$ 로 치환되고 Mohr-Coulomb 강도기준식 (2)와 결합하여 붕괴압력을 산정할 수 있는 식 (3)이 된다.

$$(S_{Hmax} + S_{Hmin}) - 2(S_{Hmax} - S_{Hmin})\cos 90^\circ - P_o - P_c = UCS + \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\Phi}{2}\right) \quad (3)$$

시추공 내 이수압력이 증가할수록 공벽파쇄는 감소하지만 지나치게 과도한 이수압력은 공내 수압파쇄를 유발시켜 이수 손실을 초래하며 궁극적으로 공벽 붕괴현상을 발생시킨다(Moos *et al.*, 2003; Zoback, 2007). 수압파쇄에 의한 인장균열은 Fig. 2(b)와 같이 공벽에서 압축응력이 최소로 작용하는 최대 수평주응력 방향과 나란한 시추공벽 양쪽에 발생하며 균열의 진행 방향은 최대 수평주응력 방향과 일치한다. 이는 인장균열에 저항하는 수직응력의 크기가 최대 수평주응력 방향과 수직인 방향으로 가장 작게 작용하기 때문이다. 수압파쇄균열이 발생할 위치에 이미 기존의 균열들이 존재하면 이론적 수압파쇄압력이 되기 전에 균열 신장을 초래한다. 연구지역과 같은 반고결 암반이 우세한 지역에서는 시추공 안정성을 위해 상당히 보수적인 수압파쇄압력을 산정하는 것이 현명하기 때문에 본 연구에서는 인장균열에 저항하는 수직응력의 크기가 가장 작은 최소 주응력을 수압파쇄압력(인장파쇄압력)으로 결정하며, 이 압력은 시추공 안정성을 확보하기 위한 시추공 내 압력의 상한치이다.

붕괴압력과 인장파쇄압력으로 형성되는 이수압력 범위는 시추공 안정성을 유지할 수 있는 최적이수압력 범위이다. 따라서 연구 시추공 BH-4호공의 굴착 시 최적이수압력 범위를 산정하기 위하여 포항지역의 현장응력과 시추공 심도에 따른 암석강도를 분석하였다.

포항지역의 현장응력 분석

시추공 불안정은 시추공벽에서의 과도한 암반 파괴와 이에 따른 압편 붕락이 주된 요인이다. 이러한 불안정 요인의 발생 조건을 분석하기 위해서는 현장응력 상태와 암석강도 특성의 역학적 성질을 파악하는 것이 중요하다. 포항 심부 지열 시추공에서 직접 측정된 응력 자료의 부재로 본 연구에서는 인접 지역에서 기존에 측정된 응력장 자료를 수집하여 간접적으로 포항지역의 응력장 유추를 시도하였다. 이러한 시도는 현장응력이 국지적으로 변화할 수 있지만 심부 시추공으로 국지적 영향보다는 지역적 경향이 더 우세할 것이라는 가정에 근거한다. 또한 주변 시추공의 응력측정 심도는 분석 대상 시추공에 비하여 천부에 해당하지만 현실적으로 대상 시추공의 연구 심도까지 응력 측정이 어렵기 때문에 주변 시추공의 응력 분포 특성을 대상 시추공에 적용할 수 있다고 가정하기로 한다. 본 연구에서는 포항 주변의 17개 지역의 총 48개 시추공에서 측정된 117개의 수압파쇄법에 의한 응력자료(Fig. 3)를 사용하여 광역적인 응력특성을 파악하고자 하였다. 광역적인 응력특성은 일관된 형태를 보일지라도 심도 500 m 이내의 현장응력은

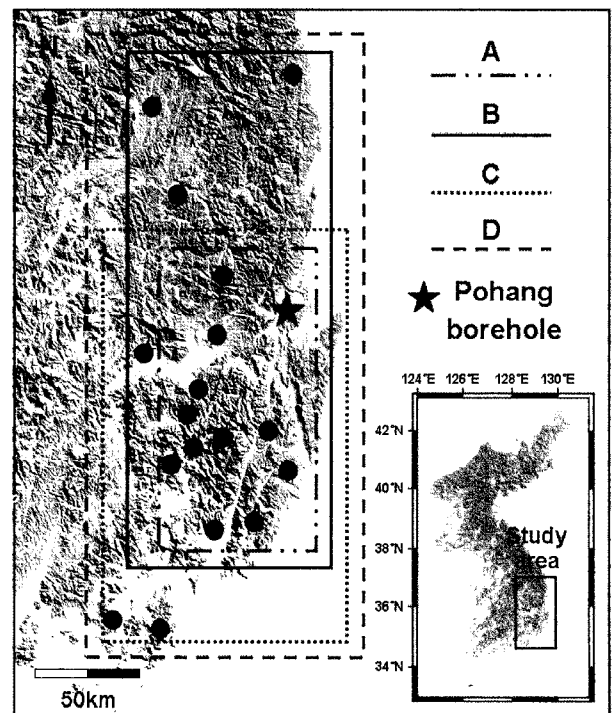


Fig. 3. Locations of *in-situ* stress measurement data (after Lee and Chang, 2007).

지형 또는 구조지질학적 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Goodman, 1989). 이 때문에 본 연구에서는 이러한 지형 또는 구조지질학적 오차를 줄이고 연구대상 시추공에서의 지반응력 특성을 보다 정확하게 반영하기 위해 Fig. 3과 같이 응력측정 지역에 따라 각기 다른 4개의 조합(Fig. 3의 A, B, C, D)을 만들어 심도에 대한 응력 크기 분포를 분석하였다. 연구지역인 포항을 중심으로 응력측정 지역을 남, 북으로 구분하여 B와 C의 조합이 지정되었으며 B조합은 가장 깊은 응력측정 심도(315 m)를 포함한다.

Fig. 4는 네 가지 다른 조합으로 분석된 각각의 수직 및 수평주응력 자료 결과이다. Fig. 4의 연직응력(S_v)은 밀도(ρ)검층 자료가 존재하지 않는 연구대상 시추공(BH-4)을 제외한 3개의 시추공(BH-1, 2, 3)에서 측정된 밀도검층 자료의 평균값을 이용하여 산정되었다. 최대 및 최소 수평주응력(S_{Hmax} , S_{Hmin})은 지역의 조합에 따라 추세선 기울기에 약간의 차이를 보인다. 그러나 모든 조합의 400 m 심도에서 추세선을 이용해 유추한 최대 수평응력은 16.6 ± 0.6 MPa, 최소 수평응력은 10.7 ± 0.4 MPa로 다른 조합간의 차이가 4% 이내로 서로 유사한 경향을 보인다. 이는 포항 주변의 응력자료가 그 지역의 광역적 경향을 보여주는 것으로 해석할 수 있으며 포항 지역도 이러한 응력상태에 있을 가능성이 높음을 시사한다. Fig. 4의 결과로 볼 때 포항을 포함한 한반도 남동부 대부분의 지역에서는 세 주응력의 상대적 크기가 $S_v < S_{Hmin} < S_{Hmax}$ 임을 알 수 있다. 따라서 인장균열에 저항하는 수직응력의 크기가 가장 작은 연직응력(S_v)을 시추공 안정성을 유지할 수 있는 이수압력의 상한선인 인장파쇄압력으로 결정하였다. 본 연구에서는 4개의 조합 중 추세선의 적합성을 나타내는 결정계수(coefficient of determination, R^2)가 가장 높고 최대 심도 응력측정 자료를

포함하는 B조합(S_{Hmax} 의 R^2 : 0.75, S_{Hmin} 의 R^2 : 0.77)에서 얻은 추세선을 이용하여 산정한 수평주응력 자료를 분석에 사용하였다.

암석강도

현장응력과 함께 시추공의 안정성을 분석하기 위해 필요한 또 하나의 요소는 암석의 강도특성이다. 암반의 강도는 응력상태에 따라 변하기 때문에 이를 기술하기 위해서는 응력의 함수로 표현되는 강도기준식을 필요로 한다. 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 강도기준식을 이용하였으며 그 형태는 식 (2)와 같다. Mohr-Coulomb 기준식은 비교적 간단하면서도 암석강도에 대한 보수적인 추정치를 제공하기 때문에 시추공 안정성 분석과 관련되어 유용하게 이용될 수 있다. 식 (2)는 일축압축강도(UCS)와 내부마찰각(Φ)으로 결정되기 때문에 실내시험(삼축압축, 일축압축시험)을 통하여 두 강도 정수의 측정을 시도하였다.

반고결이암

직접적인 일축압축시험이 어려울 정도의 낮은 강도를 갖는 상부 반고결 이암에 대해서는 삼축압축시험을 이용하여 강도정수를 구하였다. 연구대상 시추공에서는 코어링이 시행되지 않았기 때문에 실험에 이용된 반고결 이암 시료는 연구 시추공과 약 1 km 떨어진 거리에 위치한 시추공 BH-1호공의 시추코어를 사용하였다. 암석강도 측정에 사용된 시추코어가 대상 시추공과 일정 거리의 차이가 있으나 4개 시추공의 물리검층 자료에서 시추공 사이의 수평적인 층서 연속성이 확실하여 암석 물성자료도 수평적 일관성을 유지하리라 가정하였다.

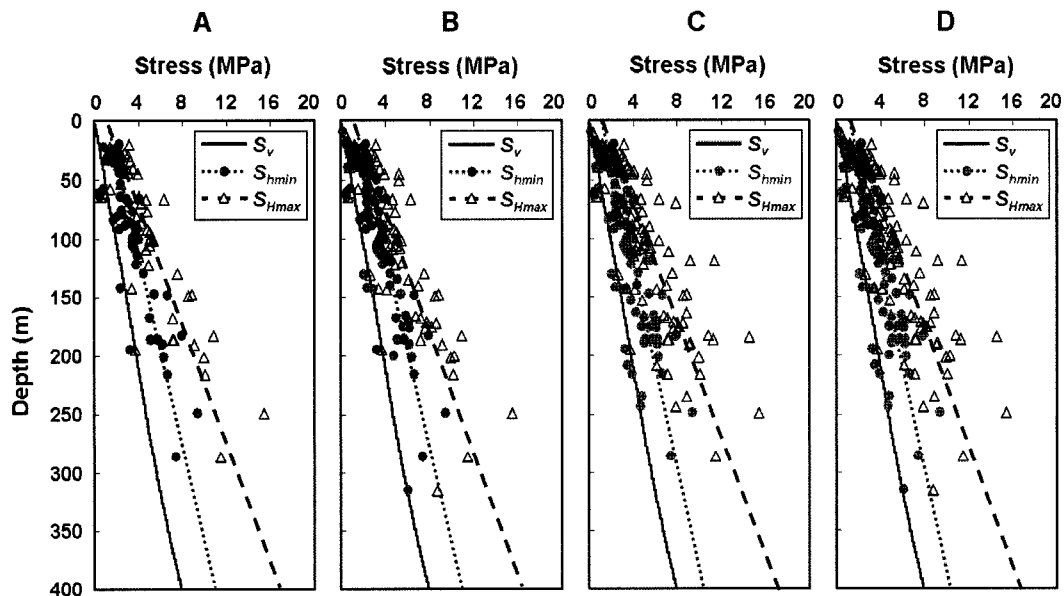


Fig. 4. Magnitudes of the *in situ* principal stresses estimated from different regional groups of *in-situ* stress measurement and density log data. Data in A, B, C and D are from the corresponding regional groups shown in Fig. 2.

Table 1. Results of triaxial compression tests in semi-consolidated mudstone in borehole BH-1.

Group	Sample number	Depth (m)	Dry density (g/cm ³)	Confining pressure (MPa)	Pore pressure (MPa)	Effective confining pressure (MPa)	Strength (MPa)
A	A-1	113.2	1.6	0.60	0.55	0.05	1.53
	A-2	118.5	1.6	0.70	0.18	0.52	1.61
	A-3	118.5	1.6	0.78	0.01	0.77	4.09
B	B-1	155.5	1.8	0.41	0.26	0.15	0.99
	B-2	165.0	1.8	0.79	0.21	0.58	3.43
	B-3	165.1	1.8	0.99	0.00	0.99	2.45
C	C-1	289.6	2.7	0.40	0.21	0.19	17.80
	C-2	292.4	1.9	0.80	0.32	0.48	2.68
	C-3	293.4	2.0	0.99	0.00	0.99	4.04

현장의 응력 상태를 구현하기 위해 포화상태의 암석 시료에 공극수압을 주었으며 동시에 구속압을 가한 상태에서 축방향으로 하중을 가하여 실험을 수행하였다. 반고결 이암 시료는 채취된 심도에 따라 세 그룹(A, B, C)으로 나누어지고 축방향 압축속도는 모든 시료에 0.3 mm/min의 조건으로 주어졌다. 각 시편에 대해 적용된 시험조건과 결과를 Table 1에 기재하였다. Table 1에 기재된 이암의 밀도는 심도가 깊어짐에 따라 대체로 증가함을 확인 할 수 있다. 이 중 C-1 시료는 밀도 값과 강도 값이 지나치게 높아 전체 반고결 이암에서 볼 수 있는 경향과는 거리가 먼 것으로 여겨져 강도자료 분석에서 제외시켰다.

유효구속압(구속압과 공극수압의 차)에 따른 암석 강도를 Fig. 5에 도시하였다. 삼축압축시험을 통해 얻은 강도자료는 약간의 분산을 보이지만, 유효구속압이 증가함에 따라 강도가 대체로 증가하는 경향을 보인다. 또한 심도에 따른 시편들 간에 뚜렷한 강도의 차이가 보이지 않았으며 대체로 하나의 강도 기준식으로 정리됨을 알 수 있다. Mohr-Coulomb 파괴기준식 (2)에 Fig. 5의 자료를 적용하여 $UCS = 0.7 \text{ MPa}$, $\Phi = 30^\circ$ 의 결과를 얻었다.

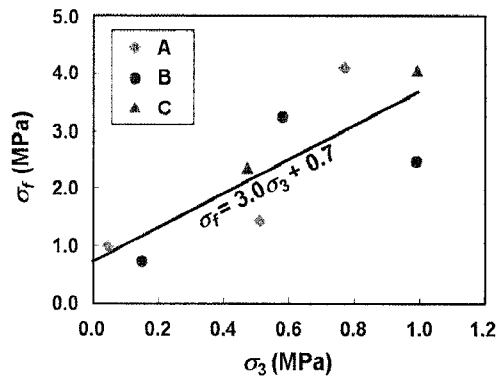


Fig. 5. Relationship between rock strength and effective confining pressure from triaxial tests of semi-consolidated mudstone in borehole BH-1 (data C-1 excluded).

Table 2. Seismic P wave velocities and rock strength constants measured by laboratory experiments using rock specimens in borehole BH-1 (after Song *et al.*, 2005).

Lithology	Sample number	Depth (m)	V_p (km)	UCS (MPa)	Φ (deg)
Lapilli tuff	1	438	2.28	59	
Lapilli tuff	2	443	3.63	73	
Lapilli tuff	3	449	4.64	139	
Basic dyke	4-1	858 ~ 860	2.41	9	43.8
	4-1		3.26	21	43.8
Sand & mudstone	5-1	884 ~ 887	4.54	166	41.7
	5-2		3.54	158	41.7
Sand & mudstone	5-3	888 ~ 891	4.37	150	41.7
	6-1		1.76	20	47.3
	6-2		1.19	23	47.3
Sand & mudstone	6-3	910 ~ 912	0.67	11	47.3
	7-1		3.12	135	44.3
	7-2		3.59	134	44.3
Sand & mudstone	7-3	954 ~ 956	3.98	130	44.3
	8-1		4.32	114	43.8
	8-2		4.95	140	43.8
Sand & mudstone	8-3	990 ~ 992	4.84	162	43.8
	9-1		4.41	188	43.6
	9-2		4.05	189	43.6
Sand & mudstone	9-3	1016 ~ 1019	4.41	193	43.6
	10-1		2.98	125	55.1
	10-2		2.27	98	55.1
Sand & mudstone	10-3	1039 ~ 1040	3.06	153	55.1
	11-1		5.23	270	43.2
	11-2		5.62	302	43.2
Sand & mudstone	11-3	1045 ~ 1046	5.23	237	43.2
	12-1		4.69	197	54.1
	12-2		4.73	246	54.1
Sand & mudstone	12-3	1063 ~ 1065	4.69	185	54.1
	13-1		2.86	110	48.2
	13-2		4.59	113	48.2
Sand & mudstone	13-3		2.76	90	48.2

기타 암석

BH-1호공의 반고결 이암 하부에 분포하는 화산력 응회암, 염기성 암맥, 사암/이암 호층 등의 코어 시료에 대한 UCS, Φ 그리고 V_p 의 실내시험 결과는 송윤호 등(2005)이 보고하였다. 일축압축시험 방법을 사용하여 측정된 UCS, Φ 그리고 초음파를 이용한 코어 시료의 탄성파속도(V_p)를 Table 2에 제시하였다. 시추공 안정성 구현을 위해서는 지정된 심도의 강도 자료가 아닌 시추공 전 심도에 대한 연속적인 강도 정수가 요구되는데 이들 코어 시료의 UCS, Φ 그리고 V_p 자료는 시추공에서 연속적으로 암석강도를 추정하기 위한 기준 자료로 이용될 수 있어 중요하다. Fig. 6는 V_p 의 함수로 UCS와 Φ 자료를 도시한 결과로 화산력 응회암과 사암/이암 호층의 UCS는 V_p 와 상관성을 보이고 있어 V_p 자료를 이용하여 간접적으로 UCS를 유추할 수 있을 가능성이 높다. 염기성 암맥의 경우에는 자료의 갯수가 적어 V_p -UCS 상관관계를 알 수 없어 자료의 평균범위(평균 \pm 표준편차)를 지정하여 UCS를 유추하였다. 사암/이암의 호층($47 \pm 5^\circ$)과 염기성 암맥(44°)의 Φ 는 V_p 에 따른 상관관계를 보이지 않아 각 암석 자료의 평균범위를 사용했다.

결정질 응회암, 안산암질 화산각력암에서는 일축, 삼축압축 시험과 V_p 측정이 수행되지 않았다. 그러나 시추공 전 구간의 안정성 조사를 위해 결정질 응회암의 강도 정수와 V_p 는 유사한 암종인 화산력 응회암의 값을 이용하였다. 안산암질 화산각력암은 음파검층 및 전기검층 결과, 음파 V_p 속도는 4.6 ± 0.4 km/s, 전기비저항은 258 ± 154 ohm-m로 다른 암종에 비해 높아 암석의 강도 정수도 높을 것으로 예상하였다. 실내시험에서 측정된 V_p 와 각 암종별 강도 정수의 관계성에 BH-4호공 내에서 시행된 음파(V_p)검층의 암종별 결과를 적용하여 연구 시추공 전구간의 강도 정수를 산정하였다. 시추공 안정성의 보수적인 판단을 위하여 시추공 전 구간에서 산정된 강도 정수 중, 최소값을 최적이수압력 산정에 적용하였다.

최적이수압력 산정

식 (3)을 이용하여 계산한 붕괴압력(P_c), 정수압으로 가정된

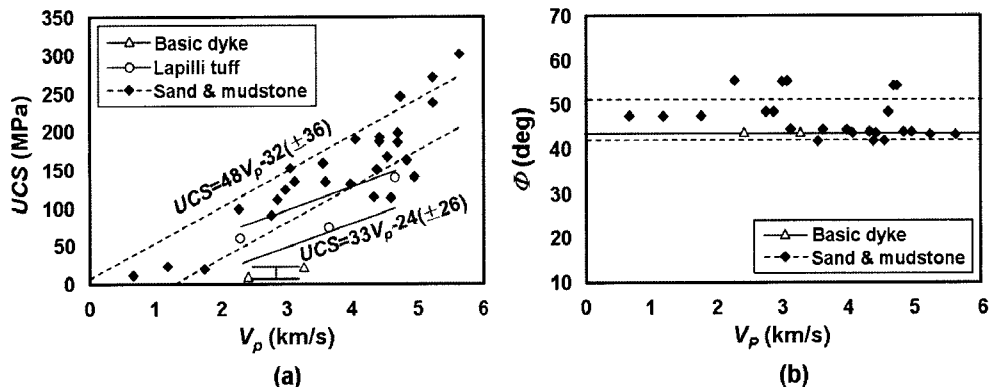


Fig. 6. Correlations between UCS and V_p (a), and between Φ and V_p (b) from laboratory test data of borehole BH-1.

공극수압(P_o), 인장파쇄압력(S_v) 그리고 시추공 굴착 시 사용된 이수압력(P_m)은 심도로 정규화되어 압력구배(stress gradient)의 형태로 Fig. 7에 도시되었다. 이수압력은 지하수가 공내로

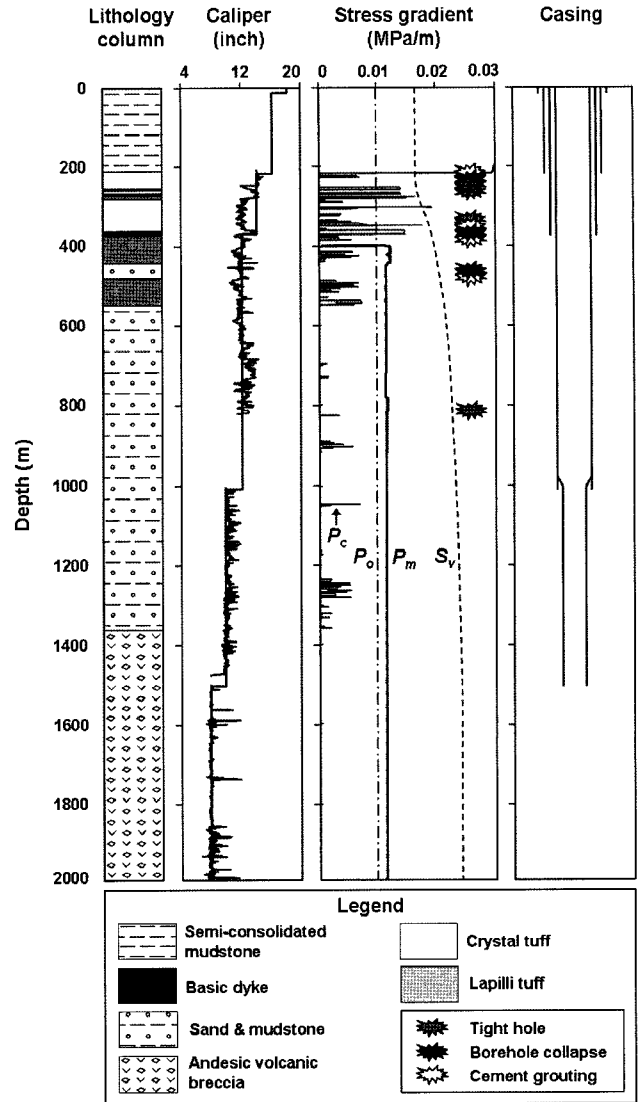


Fig. 7. Mud windows (shaded area) suggested by stability analysis of the borehole BH-4 in this study in comparison with well conditions from drilling log.

유입되는 현상을 방지하기 위해 공극수압보다 커야 하며 시추공 붕괴를 유발하는 붕괴압력보다도 커야 한다. 또한 이수압력은 공내 수압파쇄를 유발시켜 이수손실을 초래하는 인장파쇄압력보다는 낮아야 한다. 따라서 연구 시추공(BH-4)의 굴착 시 안정성을 유지하기 위해 요구되는 최적이수압력의 범위는 Fig. 7의 음영부분이다. 시추공 상부(0 ~ 217.4 m)에 위치하는 반고결 이암의 경우에는 붕괴압력(P_c)이 인장파쇄 한계 값인 S_v 를 초과하기 때문에 최적이수압력 범위가 형성되지 않는다. 이는 주어진 지반응력 상태와 암석강도에서는 이수밀도의 값을 변화시켜도 굴착 시 발생하는 과도한 시추공 붕괴를 막을 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 굴착 시 시추공 불안정 문제를 사전에 방지하기 위해 타격식 방식으로 빠른 시간 내에 굴진하고 케이싱을 설치하였다.

심도 217.4 ~ 368 m에 존재하는 결정질 응회암은 일정한 붕괴압력을 보이지 않아 공극수압보다 작은 붕괴압력 구간도 있으며 인장파쇄압력보다 높은 구간도 존재한다. 결정질 응회암에 관입한 염기성 암맥의 붕괴압력은 정수압으로 가해진 공극수압보다 50 ~ 60% 높은 0.015 MPa/m의 값을 갖는다. 이는 BH-4호공의 400 m 이하에서 굴착 시 사용한 이수압력(약 0.011 MPa/m)보다 상당히 높은 값이다. 결정질 응회암과 염기성 암맥은 붕괴압력이 다른 암종에 비해 높은 값으로 요구되지만 인장파쇄압력을 초과하지는 않는다. 따라서 결정질 응회암과 염기성 암맥에서는 약 0.015 MPa/m 이상에서 인장파쇄압력 이하의 범위가 최적이수압력 구간이다. 높게 요구되는 붕괴압력에 의해 발생한 시추공 불안정성은 굴착 후 측정된 공경검층과 드릴 비트의 직경 비교로 확인할 수 있다. 결정질 응회암이 분포하는 심도 중 약 240 ~ 370 m에서는 드릴 비트 직경에 비해 수축된 공경의 크기를 확인할 수 있으며 이는 시추공 불안정성 중 쇄석 및 점토가 공내로 밀려들어오는 현상으로 연약지반에 나타나는 공경수축 현상이다. 심도 약 240 ~ 370 m에서 굴착 시 사용된 드릴 비트 직경은 14 inch이며 공경검층 결과 굴착 직후 시추공의 크기는 12 inch로 2 inch의 공경수축 현상이 발생하였다. 200 ~ 400 m 심도에서 발생한 시추 시 문제점(시추공 붕괴, 공경수축)들과 시추공 붕괴가 발생하여 지지력 보강을 위해 시행된 시멘트그라우팅 구간은 붕괴압력이 높게 요구되는 결정질 응회암과 염기성 암맥의 심도와 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 결정질 응회암과 염기성 암맥에서 시추공 굴착 시 안정성을 유지하기 위해서는 400 m 이하에서 사용한 약 1.1 g/cm³의 이수밀도(이수압력: 약 0.011 MPa/m)보다 상당히 높은 값인 약 1.5 g/cm³ 이상의 이수밀도를 사용해야 한다.

화산력 응회암과 사암/이암의 호층은 공극수압보다 작은 붕괴압력에 의해 공극수압(정수압)이 붕괴압력이 되며 이로 인해 최적이수압력 범위가 0.010 MPa/m(이수밀도: 약 0.98 g/cm³) 이상에서 인장파쇄압력 이하로 산정되었다. 안산암질 화산각력암은 강도를 분석할 수 있는 자료가 없었으나 물리검층의

자료로 보아 암석의 강도가 높을 것으로 예상되어 붕괴압력을 산정하지 않았다. 따라서 이 구간도 공극수압이 붕괴압력이 되어 최적이수압력 범위가 0.010 MPa/m 이상에서 인장파쇄압력 이하로 산정되었다. 세 암종에서는 산정된 최적이수압력 범위 내로 시추 시 이수압력(약 0.011 MPa/m, 이수밀도: 1.1 g/cm³)이 사용되었으며 443 ~ 480 m에 퇴적된 사암 구간과 사암/이암의 호층이 분포하는 800 m를 제외하고 특별한 시추공 불안정성을 보이지 않는다.

이러한 결과는 시추 시 사용하는 이수밀도를 최적이수압력 범위 내로 조절함으로써 시추공에서 발생하는 문제점들을 감소시킬 수 있으며 결과적으로 굴착 시 시추공 안정성을 높일 수 있음을 시사한다.

토 의

본 논문에서는 실내실험으로 측정된 V_p 와 각 암종별 강도 정수의 경향성에 연구 시추공에서 음파검층으로 측정된 암종별 P파 속도를 적용하여 시추공 전 구간의 강도 정수를 유추하였다. 그러나 시추공 전 구간의 강도 정수를 구현하기 위해 사용된 이러한 방법은 탄성파속도를 비교한 심도차이에 의해 그 자체적으로 문제점을 포함할 수 있다. 또한 실내에서 초음파를 이용한 코어 시료의 V_p 측정 결과와 시추공에서 음파검층을 이용한 V_p 측정 결과는 여러 요인에 의해 그 결과 값에 차이가 발생할 수 있으며 이런 측정값의 차이는 강도 정수를 구현하기 위해 사용된 방법에 문제가 있을 수 있음을 의미한다.

실내에서 초음파를 이용한 코어 시료의 V_p 측정 결과는 연구 시추공 일부심도에 국한된 자료이며 시추공에서 음파검층을 이용한 V_p 측정 결과는 시추공 전 구간에 해당하는 자료이다. 특히 다양한 심도로 실내시험이 시행된 사암/이암의 호층을 제외한 결정질 응회암과 염기성 암맥에서 코어 시료의 V_p 와 강도 정수의 관계성은 심도에 따른 암석의 전 구간을 대표하기 보다는 일부 심도에서 보여지는 경향성이라 할 수 있다. 국한된 심도에서 나타나는 관계성에 암종에 따라 시추공 전 구간에서 측정된 V_p 자료를 적용하는 것은 그 자체적으로 오차를 야기할 수 있다. 즉 실내 및 실외에서 측정된 탄성파속도를 비교한 심도 차에 의해 시추공 전 구간에서 강도 정수를 구현하기 위해 사용된 방법이 문제점을 포함할 수 있다는 것이다.

동일한 심도에서 탄성파속도가 측정되었다 할지라도 실내 및 실외시험에서 발생할 수 있는 몇 가지 요인에 의해 그 결과 값에 차이가 발생할 수 있다. 첫째, 검층 시 사용된 주파수의 대역에 따라 측정값의 차이가 발생한다. 탄성파속도 측정값은 측정 시 사용된 주파수 대역이 저주파수에서 고주파수로 갈수록 증가하는 것으로 알려져 있다(Biot, 1956; Spencer, 1981; Dvorkin *et al.*, 1995). 따라서 연구 시추공에서 음파검

층에 사용된 주파수(23 kHz)보다 고주파수(500 kHz)를 사용한 실내 탄성파속도의 측정값이 현저하게 높을 수 있다. 둘째, 현장에 작용하는 응력과 실내 탄성파속도 측정 시 가한 응력의 차에 의해 측정 결과 값에 차이가 유발될 수 있다. 현장압반이 지중응력을 받고 있는 상태와는 달리 실내실험 시 사용된 시료에 가해진 응력은 거의 0 MPa에 가깝다. 셋째, 현장압반은 불연속면을 포함하는 반면 실내에서 이용된 시료는 주로 무결압이기 때문에 측정값의 차이가 발생할 수 있다. 이런 3 가지 영향에 의해 본 연구에서 사용된 실내 및 실외 탄성파 측정 결과 값에 차이가 발생할 수 있다.

본 논문에서 사용된 실내 및 실외 탄성파속도 측정값의 차이를 확인하기 위해 Fig. 8을 제시하였다. Fig. 8은 실내실험 시 사용된 코어 시료의 V_p 측정 결과와 실외실험으로 시추공 전 심도에서 측정된 V_p 자료를 각 암종(화산력 응회암, 염기성 암맥 그리고 사암/이암 호층)에 따라 비교한 그림이다. 각 암종이 분포하는 시추공 전 심도에서 측정된 탄성파속도를 Fig. 8에 적용하였으므로 Fig. 8을 이용하여 탄성파속도의 비교 심도 차에 의해 발생할 수 있는 오차도 확인할 수 있다. 실내 실험의 결과는 암종에 따라 도형으로 표시하였고 시추공에서 암종에 따라 전 심도에서 측정된 V_p 자료는 평균범위를 지정하여 선으로 도시하였다. 시추공에서 측정된 화산력 응회암의 V_p 평균범위는 실내측정 자료의 분포구간에 위치한다. 염기성 암맥에서는 원위측정 자료의 범위가 실내측정 자료가 분포하는 범위보다 약 0.3 km/s 높게 분포하나 원위측정 자료의 평균값이 실내측정 자료의 분포 범위 내에 존재한다. 사암/이암 호층의 실내측정 자료는 분산되어 나타나지만 3~5 km/s 구간에 밀집되어 있으며 이는 V_p 의 평균범위가 4.0 ± 0.6 km/s로 나타나는 시추공 측정 자료와 상당히 일치한다. 세 암종에서 측정된 실내 탄성파 자료와 시추공에서 측정된 자료의 평균범위는 비슷한 분포범위를 보이며 암종에 따른 자료의 경

향성이 상당히 유사함을 알 수 있다. 따라서 시추공의 연속적인 암석 강도를 구현하기 위해 실내실험으로 측정된 시료 코어의 V_p 와 암석강도 정수의 경향성에 원위치로 측정된 음파검층 결과를 적용하는 것은 공학적 실제 목적상 큰 문제가 없을 것이라 판단된다.

결 론

본 연구에서는 현장응력과 암석강도를 분석하여 심부 시추공의 안정성을 유지하는 최적이수압력 범위를 산정하였다. 시추공 상부에 위치하는 반고결 이암은 최적이수압력 범위가 형성되지 않았으며 염기성 암맥과 결정질 응회암의 붕괴압력은 붕괴압력이 정수압으로 요구되는 다른 암종에 비해 50~60% 높게 나타났다. 시추 시 문제점(시추공 붕괴, 공경수축)들이 발생한 구간과 시멘트그라우팅이 시행된 구간은 붕괴압력이 높은 결정질 응회암과 염기성 암맥의 심도와 상당히 일치하였다. 따라서 이러한 심도에서 시추공 안정성을 유지하기 위해서는 약 1.5 g/cm^3 이상의 이수밀도를 시추공 굴착 시 사용해야 한다. 붕괴압력이 공극수압이 되어 최적이수압력 범위가 0.010 MPa/m(이수밀도: 약 0.98 g/cm^3) 이상에서 인장파쇄압력 이하로 산정된 화산력 응회암, 사암/이암의 호층 그리고 안산암질 화산각력암 구간은 최적이수압력 범위 내의 이수압력(약 0.011 MPa/m, 이수밀도: 1.1 g/cm^3)을 시추공 굴착 시 사용하여 시추 시 상당히 안정적이었다. 이는 시추 시 이수압력을 산정된 최적이수압력 내로 조절함으로써 굴착 시 시추공 안정성을 높일 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 “지열수 자원 실용화 기술 개발”의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- 송운호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성곤, 박인화, 이태종, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 기원서, 현혜자, 손정술, 황세호, 오재호, 이윤수, 박찬, 정용복, 김통권, 이진수, 고동찬, 안은영, 윤욱, 2005, 심부 지열에너지 개발 사업, OAA2003001-2005(3), 한국지질자원연구원, 139-147.
- 송운호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성곤, 박인화, 이태종, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 황세호, 이상규, 이윤수, 김통권, 이진수, 안은영, 윤욱, 김연기, 임현철, 이병대, 2006, 심부 지열에너지 개발 사업, OAA2003001-2006(4), 한국지질자원연구원, 90-120.
- 이승구, 조동룡, 이창범, 이태종, 김통권, 송운호, 이진수, 2007, 포항시 흥해읍 지하 2300 m 화강섬록암 시추코어내 저어콘의 U-Th 연대: 포항분지 기저암의 생성시기에 대한 고찰, 추계지질과학연합학술대회.

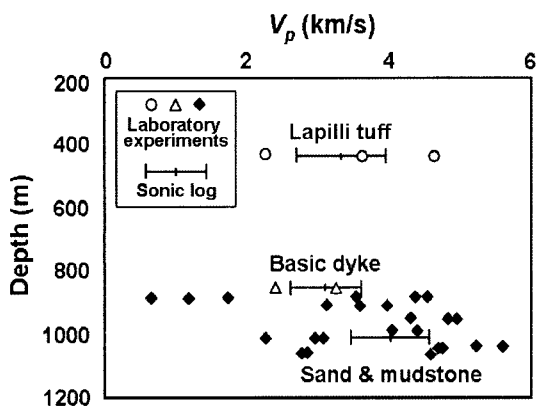


Fig. 8. Comparison of seismic P wave velocities measured by laboratory experiments using rock specimens and by sonic log. Symbols \circ , \triangle , and \blacklozenge indicate laboratory-measured P wave velocities for lapilli tuff, basic dyke, and sand & mudstone, respectively. Velocity ranges marked by solid lines are those of logged P wave velocities.

- 이준복, 장찬동, 2007, 한반도 남동부의 현생 응력장, *지질공학*, **17**, 299-307.
- 황세호, 박인화, 송윤호, 2007, 포항 심부 지열 시추공에 대한 물리검층 자료해석, *물리탐사*, **10**, 332-344.
- Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. low-frequency range, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **28**, 168-171.
- Dvorkin, J., Mavko, G., and Nur, A., 1995, Squirt flow in fully saturates rocks, *Geophysics*, **60**, 97-107.
- Goodman, R. E., 1989, *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- Haimson, B. C., and Chang, C., 2002, True triaxial strength of the KTB amphibolite under borehole wall conditions and its use to estimate the maximum horizontal in situ stress, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 2257.
- Jaeger, J. C., Cook, N. F. W., and Zimmerman, R. W., 2007, *Fundamentals of Rock Mechanics*, Blackwell Publishing, 90-103.
- Moos, D., Peska, P., Finkbeiner, T., and Zoback, M., 2003, Comprehensive wellbore stability analysis utilizing quantitative risk assessment, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **38**, 97-109.
- Paul, P., and Zoback, M. D., 2006, Wellbore stability study for the SAFOD borehole through the San Andreas Fault, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
- Rahman, M. K., Naseby, D., and Rahman, S. S., 2000, Borehole collapse analysis incorporating time-dependent pore pressure due to mud penetration in shales, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **28**, 13-31.
- Spencer, J. W., 1981, Stress relaxations at low frequencies in fluid-saturated rocks: attenuation and modulus dispersion, *Journal of Geophysical Research*, **86**, 1803-1812.
- Zoback, M. D., Moos, D., and Mastin, L., 1985, Well bore breakouts and in situ stress, *Journal of Geophysical Research*, **90**, 5523-5530.
- Zoback, M. D., 2007, *Reservoir Geomechanics*, Cambridge.