

남한지역 검층밀도 자료의 특성 분석

김영화^{1*} · 김기환¹ · 김종만² · 황세호²

¹강원대학교 지구물리학과, ²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Frequency Distribution Characteristics of Formation Density Derived from Log and Core Data throughout the Southern Korean Peninsula

Yeonghwa Kim^{1*}, Ki Hwan Kim¹, Jongman Kim, and Se Ho Hwang²

¹Dept. of Geophysics, Kangwon National University

²Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 3 June 2015; received in revised form 17 June 2015; accepted 19 June 2015

남한 지역에서 수행된 검층밀도 자료를 수집하고 코어밀도 자료와 비교 분석하였다. 먼저 코어밀도와 검층밀도 자료의 비교로부터 검층밀도가 비이상적으로 낮은 현상이 일어났으며 이는 소선원 검층밀도 자료에서의 비이상적으로 낮은 밀도와 연관되어 있음이 밝혀졌다. 표준선원과 소선원 자료간의 큰 밀도 차이를 비롯하여 표준선원 검층밀도와 코어밀도 간의 상관성 비교에서 나타난 분포곡선의 형태, 평균값, 표준편차 등 모든 결과들이 소선원 밀도자료의 품질에 이상이 있음을 보였다. 소선원 밀도자료에서의 품질 이상은 검층밀도 결정에서 소선원 밀도검층기가 지나는 선원 특성과 연결되었으며 결론적으로 지금까지의 소선원 밀도자료는 정확성을 유지하기 위한 최소의 조건이 충족되지 못한 상태에서 얻어진 것으로 판단하였다. 끝으로 코어자료와 표준선원 자료를 사용하여 남한지역 주요 지층의 밀도 분포 특성이 결정되었다.

주요어: 검층밀도, 코어밀도, 표준선원, 소선원, 빈도분포

Log density data were collected and compared with the core density data throughout the southern Korean Peninsula. The comparison reveals that the log densities obtained from gamma-gamma log are much lower than the core densities obtained from laboratory density measurement of core samples. The anomalously low log densities can be attributed to the small-source density log data. Correlation analysis reveals differences between densities derived from the two methods, indicating that a data quality problem arises when using small-source log data. The problem is probably due to the fact that small-source data have not been obtained under ideal conditions for maintaining the appropriate relationship between gamma response and formation density. The frequency distribution characteristics of formation density in the southern Korean Peninsula could be determined using the core and the standard-source log data which are well-correlated.

Key words: core density, log density, standard source, small source, frequency distribution

*Corresponding author: yhkim@kangwon.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

밀도는 여러 분야에서 사용되는 가장 기초적이고 중요한 물성의 하나이며 암석의 밀도는 채취된 암석 시료를 이용한 실험실에서나 시추공에서의 측정을 통해서 얻어질 수 있으며 각기 실험실밀도와 검층밀도로 불린다. 실험실밀도의 측정은 대부분 시추코어 시료를 이용한 역학시험의 한 부분으로 행해지고 있어 코어밀도라고 불리며 이 명칭은 특히 검층밀도에 대비되는 용어로 잘 사용되고 있다. 코어밀도나 검층밀도 모두 구성 지질의 물성 특성을 반영한다는 점에서는 동일하지만 코어밀도가 수 cm의 작은 범위로 제한된 비손상 물성에 가까운 데 비해 검층밀도는 수십 cm 이상의 큰 체적에 대한 물성 반응이라는 점에서 차이가 있다. 즉, 코어밀도 측정 방법이 선정된 일부 구간에서의 암석 단위의 밀도값을 대표한다면, 검층밀도는 상대적으로 큰 암반 단위의 밀도를 대표한다.

코어밀도와 검층밀도간의 차이는 측정 방법에서도 찾을 수 있다. 코어밀도 측정은 밀도의 기본 개념에 따라 체적과 질량을 측정하고 그 비를 계산하는 방식으로 구해진다. 질량을 구하는 일은 단순측정 작업인 테다 정밀한 저울을 사용하게 된 이래 질량 측정에서의 오차는 거의 무시할 수 있게 되었다. 반면에 시료의 체적을 구하는 일은 측정 방법과 환경 또는 시료의 상태에 따라 오차 발생의 여지가 남아 있으며 아직도 측정 밀도자료의 품질 결정에 영향을 미치는 요소로 남아 있다. 코어밀도 측정에서 암석시료의 체적을 구하는 방법은 직접 측정하는 방법과 유체의 치환을 이용하여 부피를 구하는 방법으로 구분되나 대부분의 경우 유체 치환 방법으로 구해진다. 부피를 직접 측정하는 방법에는 캘리퍼법이 있으며 유체의 치환을 이용하는 방법으로는 수은치환법 또는 헬륨치환법(Fahey, 1961; ASTM, 1998; Tripathy et al, 2002; Torsaeter and Abtahi, 2003)이 있다. 수침법(Korean Society for Rock Mechanics, 2006) 또한 유체의 치환을 이용하는 방법에 속할 수 있으며 치환된 물의 질량을 측정하여 부피를 환산한다.

한편 밀도검층은 인위적으로 지층 속으로 감마선을 방출시켜 지층을 통과하여 되돌아오는 감마선의 양을 측정함으로써 지층의 밀도를 구하는 방법이다(Schlumberger, 1989). 이 방법은 ^{137}Cs 또는 ^{60}Co 선원에서 방출된 감마선과 지층간의 물리적 반응을 밀도로 환산하는 간접적인 밀도 측정 방법에 해당된다. 따라서 이 방법에서는 감마선과 지층간의 물리적 반응에 기초한 장비의 교정

과 방사능 선원관리(Hwang and Lee, 1999)가 전제되어야 하는 어려움이 있다. 그러나 밀도검층은 시료채취가 불가능한 경우에도 지층의 밀도를 연속적으로 구할 수 있으며 특히 원지반 상태에서의 물성조사라는 점에서 최근에 활용의 폭이 확대되었다.

1990년대 말부터 일괄수주 방식의 토목공사 시작되면서 지반조사용으로 밀도검층이 시작되어 다양한 지역과 지질에 대한 밀도검층 자료도 상당히 많이 얻어졌으며(Hwang et al., 2000) 각종 역학시험의 한 부분으로 수행되어온 코어밀도의 경우에는 더욱 양적으로 풍부한 자료가 집적되어 있다. 검층밀도에는 코어밀도에 비해 양적으로 적다는 측면 외에도 표준선원(standard source) 밀도검층기로 측정된 밀도자료(이하 표준선원 밀도자료)와 소선원(small source) 밀도검층기로 측정된 밀도자료(이하 소선원 밀도자료)의 두 밀도 특성이 달리 나타나는 어려움도 있다. 코어밀도나 검층밀도 자료 모두 체계적인 정리나 분석은 부족한 편이다. 그나마 코어밀도의 경우에는 몇 명 연구자들에 의해서 전국 규모의 밀도자료가 정리되고 분석되어 있지만(Kim, 2002; Han, 2004; Kim 2004), 검층밀도의 경우는 다른 목적의 연구 중에서 부분적으로 수행된 소수의 연구 결과들이 있을 뿐이다(Kim and Kim, 1999; Park et al., 2000).

이러한 점들을 고려하여, 이 연구에서는 검층 밀도자료와 코어 밀도자료 사이, 표준선원 밀도자료와 소선원 밀도자료 사이, 그리고 코어밀도 자료와 표준선원 밀도자료 사이의 비교 분석을 시도하고 이로부터 국내 밀도자료의 분포 특성을 추적하고자 하였다.

자료 및 방법

밀도자료는 코어밀도 자료와 검층밀도 자료로 구성된다. 연구에 이용된 코어밀도 자료는 가장 최근에 분석된 Kim (2004)과 Han (2004)의 자료로서 1991년부터 약 15년간에 걸쳐 보고된 각종 지반조사 관련 보고서로부터 취합된 것이다. 검층밀도 자료는 과거 약 20년에 걸쳐 강원대학교 시추공지구물리실험실에서 얻어진 밀도검층자료에 한국지질자원연구원 및 국내 지반조사 관련 회사에서 얻어진 자료를 취합한 것이다.

현 상태에서 코어밀도 자료의 품질을 판단할 근거는 존재하지 않는다. 그러나 최근의 밀도 측정에서 질량 측정 오차는 물론이고 체적 측정상의 오차도 크지 않다고 볼 수 있고, 특히 코어밀도 자료의 규모를 감안할 때 통계처리 결과를 활용하는 수준에서의 정밀도는 확보된

것으로 보인다. 각 밀도 자료의 획득과정에 대한 설명이 없는 경우가 많아 분명하지는 않지만 대부분의 코어밀도는 참밀도를 나타낼 것으로 보인다.

검층밀도는 검층기에 도달하는 감마선의 강도(γ_{obs})가 지층의 체적밀도(ρ_b)에 반비례하는 원리를 이용하여 구한다(식 (1)).

$$\rho_b = k/\gamma_{obs} \quad (1)$$

Fig. 1은 식 (1)의 실험식에 해당되는 밀도검층기별 교정방정식을 구한 결과로서 강원대학교 표준선원 밀도검층기와 전문 조사업체에서 사용하는 소선원 밀도검층기를 사용해서 구해진 교정방정식이 함께 표시되었다. 이는 국제 원기역할을 하는 미광무국 밀도 교정공(Snodgrass, 1976)과 유사한 강원대학교 검층 교정시설(Kim et al., 2004)을 이용하여 구해졌으며 4개의 다른 밀도공에서의 밀도(ρ_b)와 감마강도(γ_{obs}) 자료를 반대수

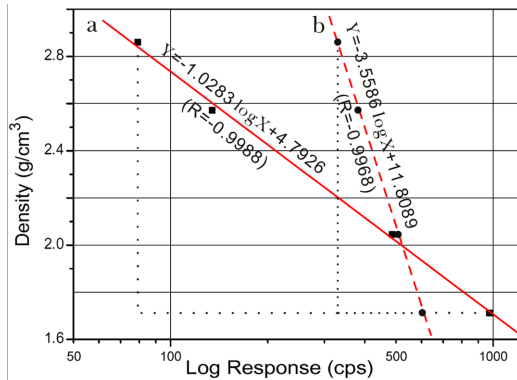


Fig. 1. Comparison of the calibration equations obtained from standard-source (a) and small-source (b) density loggers.

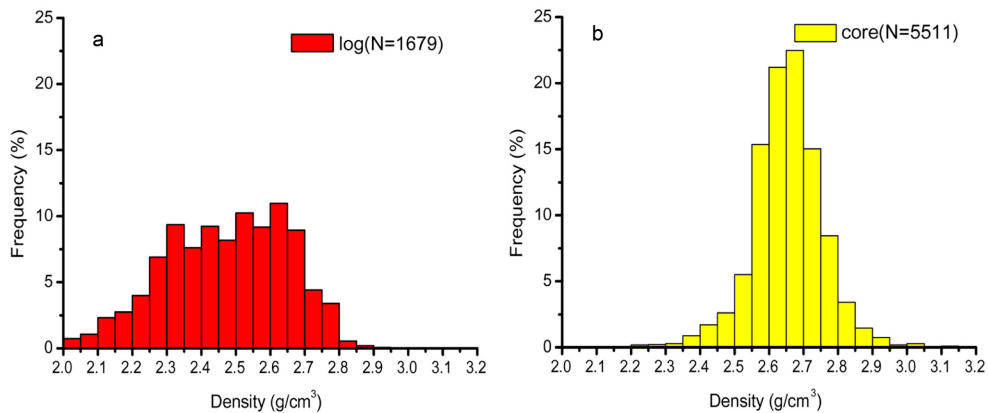


Fig. 2. Relative frequency distribution obtained from log (a) and core (b) density data.

스케일로 크로스플롯(cross plot)하여 구한 것이다.

교정방정식 산출에서의 상관계수(R)에 주목하면 표준선원에서 -0.9989이며 소선원에서 -0.9968로서 소선원에서 약간 떨어지는 경향을 보이나 두 경우 모두 거의 완벽한 상관성을 보여 주고 있다. 따라서 상관계수 측면에서 보면 표준선원과 소선원 모두가 체적밀도 유도를 위한 충분한 근거를 가진 것으로 보인다. 반면에 교정방정식의 기울기와 관련된 해상도 측면에서는 상당한 차이가 보인다. 즉, 동일한 밀도 차이를 표현하는데 이용된 표준선원의 강도가 소선원 밀도 측정에서의 감마강도의 3.5배 이상이 되어, 그만큼 소선원 측정에서의 해상도는 떨어지는 것으로 나타난다.

검층밀도의 품질에 있어서 보다 심각한 오차는 시간 경과에 따른 적절한 교정 및 보정의 적용 여부(Park, 2010)일 터인데, 다행히 표준선원 밀도자료는 모두 강원대학교 검층교정공(Kim et al., 2004) 또는 한국지질연구원 교정시설(Lee et al., 1998)을 이용하여 주기적인 교정시험을 거쳐 산출된 것이다. 반면에 소선원 밀도자료의 경우는 강원대학교 검층교정공을 이용한 교정시험을 거쳐 얻어진 경우와 교정시험 정보가 불명한 경우가 혼재되어 있으며 각 자료에서 적절한 교정을 위한 노력의 정도를 파악할 수 없다는 문제점이 있다.

검층밀도와 코어밀도

전체 밀도자료 비교

Fig. 2는 남한 지역에서 얻어진 밀도자료로부터 백분율로 환산하여 그려진 밀도분포 히스토그램이다. Fig. 2a는 이번 연구 과정에서 수집된 1,679개의 검층밀도 자료로부터 만들어졌으며 Fig. 2b는 Kim (2004)과 Han

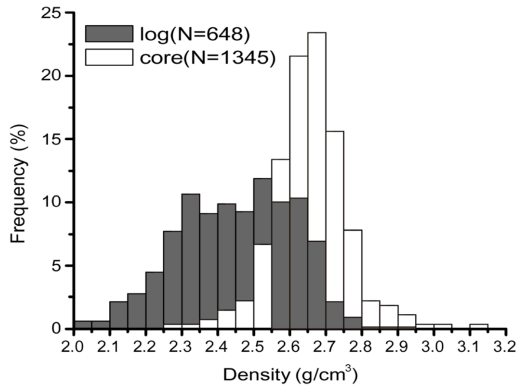


Fig. 3. Relative frequency distributions of the densities of igneous rocks obtained from log (solid) and core (open) data.

(2004)의 5,511개 코어밀도 자료로부터 작성되었다.

검층밀도와 코어밀도는 각기 2.00 g/cm³에서 2.93 g/cm³과 2.2~3.13 g/cm³에 이르는 분포를 보여 밀도분포의 폭은 같으나 코어밀도가 우측 고밀도 영역에 주로 분포하는 차이를 보인다. 밀도분포 곡선의 형태 또한 코어밀도가 양호한 정규분포를 보이는 데 비해, 검층밀도는 이봉분포(bimodal distribution)에 가까운 형태를 나타낸다. 자료의 집중도에 있어서도 큰 차이를 보여 구간 최대빈도에 있어서 코어밀도의 경우 22%를 상회하지만 검층밀도에서는 그 절반인 11% 범위에 머무르고 있다. 검층밀도는 평균값이 2.46 g/cm³이고 표준편차가 0.18임에 비해 코어밀도는 평균값이 2.65 g/cm³로서 검층밀도보다 0.19 g/cm³ 높고 표준편차는 0.10으로 거의 절반 수준으로 낮게 나타난다.

성인별 비교

이와 같은 검층밀도와 코어밀도 분포의 차이는 성인별로 구분한 경우에 더욱 뚜렷하게 나타난다. Fig. 3은 화성암으로 범위를 좁혔을 때의 밀도 분포로서, 전체밀도의 비교에서 나타난 바와 같이 코어밀도에서의 정규분포와 검층밀도에서의 이봉분포가 대조를 이룬다. Fig. 4는 성인별로 구분하여 구한 평균값(중앙선), 중앙값(원), 표준편차(상하선)를 도시함으로써 검층밀도와 코어밀도의 분포 특성치를 비교한 결과이다. 검층밀도의 평균값과 표준편차는 화성암에서 2.46 g/cm³와 0.16, 변성암에서 2.48 g/cm³와 0.19, 그리고 퇴적암에서 2.49 g/cm³와 0.19이다. 반면에 코어밀도의 평균값과 표준편차를 보면, 화성암에서 2.65 g/cm³와 0.10, 변성암에서 2.70 g/cm³와 0.10, 그리고 퇴적암에서 2.62 g/cm³와 0.10이다. 따라서

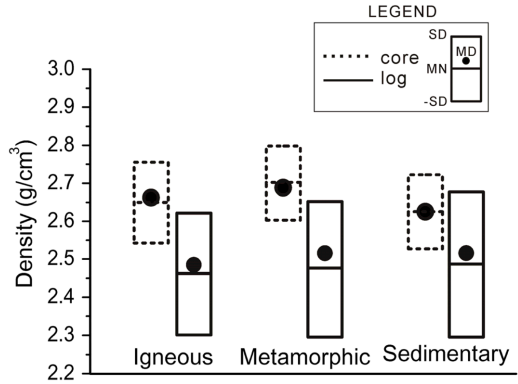


Fig. 4. Frequency distribution characteristics of the calculated densities of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks as derived from log (solid) and core (dotted) data. MD, MN and SD represent the median value, the mean value, and the standard deviation, respectively.

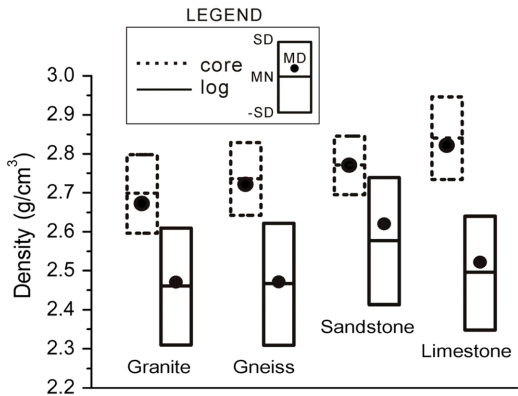


Fig. 5. Frequency distribution characteristics of the calculated densities of four main rock types as derived from log (solid) and core (dotted) data.

검층밀도가 코어밀도에 비하여 평균밀도는 0.2 g/cm³ 정도 낮으며, 같은 분포 폭을 가지면서도 표준편차는 약 2배 높게 나타난다.

암종별 비교

Fig. 5은 암종별로 구분한 경우에서의 평균값, 중앙값, 표준편차를 도시하고 비교한 결과이다. 대표적인 암종으로서 화성암 중의 화강암, 변성암 중의 편마암, 그리고 퇴적암 중의 사암과 석회암이 선택되었다. 화강암, 편마암, 사암과 석회암의 코어밀도 평균값이 각각 2.65 g/cm³, 2.69 g/cm³, 2.72 g/cm³, 2.77 g/cm³이며 검층밀도의 평균값은 각각 2.47 g/cm³, 2.49 g/cm³, 2.55 g/cm³, 2.47 g/cm³이다. 코어밀도가 검층밀도에 비해 0.2 g/cm³ 내외의

큰 값을 보인다. 반면에 표준편차는 검층밀도에서 크게 나타나고 있다. 코어밀도와 검층밀도의 차이가 비교적 일정하여 암종에 따라 밀도 값이 변하는 경향이 비슷하나 석회암이 이 경향에서 벗어나고 있다. 즉, 코어밀도에서는 화강암-편마암-사암-석회암 순으로 석회암의 밀도가 가장 크게 나타나지만 검층밀도에서는 오히려 석회암의 밀도가 가장 낮아 코어밀도와는 0.3 g/cm³의 큰 차이를 보인다.

표준선원 밀도와 소선원 밀도의 비교

배경 및 전체자료 비교

검층밀도와 코어밀도 자료의 비교분석 결과, 밀도분포의 형태, 평균값, 표준편차 등에서 현저한 차이를 보였다. 특히 검층밀도와 코어밀도간의 차이가 성인별, 암종별 차이보다도 더 크게 나타나 비정상적인 모습을 보였다. 전체밀도를 비롯하여 성인별, 암종별로 구분하여 분석한 결과는 분포의 형태나 밀도 값, 표준편차의 크기 측면에서 검층밀도 쪽에 문제가 있는 것으로 나타났다.

이러한 관점에서 검층밀도 자료를 선원의 유형에 따라 표준선원 밀도와 소선원 밀도로 구분하여 집중 분석할 필요성이 제기되었으며 Fig. 6은 표준선원 밀도검층기로 측정된 503개의 밀도자료와 소선원으로 측정된 1,144개의 밀도자료를 함께 빈도분포도로 나타낸 것이다. 그 결과, 이봉분포 형태를 보이던 전체 검층밀도 분포의 형태가 정규분포에 속하는 두 개의 검층밀도 분포 곡선으로 분리됨을 보였다. 두 검층밀도의 분포에서 최대 및 최소값이 거의 동일한 반면에 최대빈도의 크기가 중앙값, 평균값 등에서는 큰 차이를 보인다. 쉽게 인지되는 최대빈도의 경우만 하더라도 표준선원 자료와 소선원 자료에서 각기 2.60-2.65 g/cm³와 2.30-2.35 g/cm³로서 대체로 표준선원 밀도가 0.3 g/cm³ 크게 나타난다. 이 차이는 앞서 제시된 코어밀도와 검층밀도 사이의 차이보다도 큰 값으로 2개의 검층밀도 자료가 전혀 다른 성격을 가졌음을 말해준다.

성인별 비교

전체자료를 표준선원과 소선원 자료로 구분하여 생긴 양상은 밀도자료를 성인별로 구분한 경우에도 동일하게 나타나 화성암, 변성암, 퇴적암별로 구분하여 얻어진 표준선원과 소선원 밀도자료의 빈도분포가 모두 정규분포에 가까운 모습을 보인다. 표준선원과 소선원 밀도자료의 특성은 선원별, 성인별로 구분된 6개 그룹에서의 평

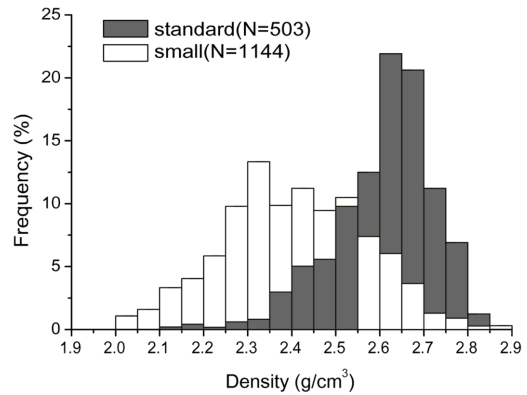


Fig. 6. Relative frequency distribution obtained from standard-source (solid) and small-source (open) log data.

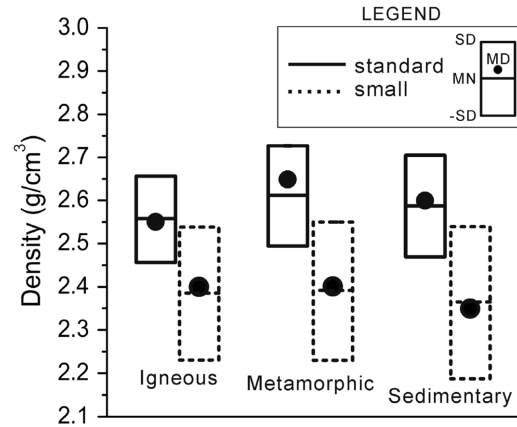


Fig. 7. Frequency distribution characteristics of the calculated densities of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks as derived from standard-source (solid) and small-source (dotted) log data.

균값, 중앙값, 표준편차를 비교함으로써 더욱 분명해진다(Fig. 7). 먼저 평균값 또는 중앙값을 보면 화성암 변성암, 퇴적암간의 밀도 차이는 표준선원 밀도에서 0.1 g/cm³ 이내이고 소선원 밀도에서는 0.05 g/cm³ 이하를 보인다. 반면에 표준선원과 소선원 밀도의 차이는 1.5 g/cm³ 이상으로 성인별 밀도 차이보다 1.5배 이상 크게 나타난다. 표준편차는 동일 선원에서의 성인별 구분에 따른 차이가 미미한 반면에 표준선원과 소선원 밀도간의 차이는 매우 크게 나타난다. 표준선원에 비해서 소선원 밀도자료에서 높은 값을 보인다.

연경별 비교

검층밀도는 연경별 구분이 되어 있는 자료이며 암석

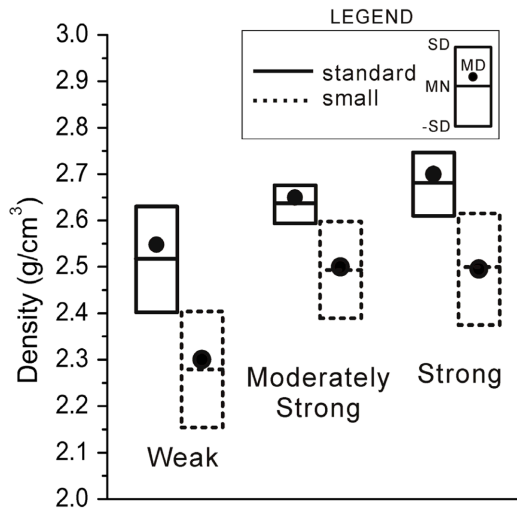


Fig. 8. Frequency distribution characteristics of the calculated densities of weak, moderately strong, and strong rocks as derived from standard-source (solid) and small-source (dotted) log data.

의 밀도가 지질적 요인보다는 풍화 파쇄에 따른 연경의 정도에 더 민감한 물성이므로 연경에 따른 표준선원 밀도와 소선원 밀도의 분포 특성이 비교되었다. Fig. 8은 편암 자료를 분석한 결과로서 연암, 보통암 및 경암으로 구분되어 있다.

표준선원에서는 연암, 보통암, 경암의 평균 밀도가 각기 2.55 g/cm^3 , 2.66 g/cm^3 , 2.70 g/cm^3 로서 연암과 경암의 밀도 차이가 0.15 g/cm^3 으로 나타났다. 소선원 자료에서는 연암, 보통암, 경암의 평균밀도가 각기 2.30 g/cm^3 , 2.52 g/cm^3 , 2.52 g/cm^3 로서 연암과 경암간의 밀도 차이가 0.22 g/cm^3 이다. 반면에 동일 연경도에서 소선원 밀도는 표준선원 밀도에 비해 $0.14\sim 0.25 \text{ g/cm}^3$ 낮게 나타난다. 이 결과는 동일 연경도에서의 표준선원과 소선원 밀도 차이가 동일 선원에서의 연암과 경암의 밀도 차이만큼이나 큼을 보여준다.

표준편차의 변화 경향을 보면 두 자료 모두 연암에서 큰 표준편차를 보이고 보통암과 경암에서는 상대적으로 작게 나타났다. 연암에서의 큰 표준편차는 연암 자료에 풍화암과 보통암의 일부 자료까지 포함되어 있을 가능성만큼 넓은 물성 범위를 반영하고 있기 때문으로 판단하였다. 상대적으로 암질이 일정한 보통암과 경암을 비교한 결과, 표준선원의 경우, 표준편차가 0.04와 0.07로 연경구분을 하지 않은 전체 밀도자료의 표준편차인 0.11에 비해서 거의 절반 수준으로 감소한 경향을 보였다. 소선원의 경우 또한, 전체자료에서 보통암, 경암으로 구

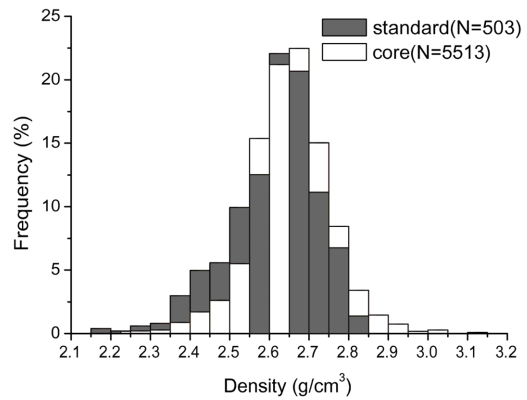


Fig. 9. Relative frequency distribution obtained from standard-source log (solid) and core (open) data.

분함에 따라 표준편차가 0.16에서 0.11, 0.12로 감소하여 경향은 동일하나 25% 이하의 작은 감소에 그쳐 표준선원 자료의 경우와 대조를 이룬다.

표준선원 검층밀도와 코어밀도

배경 및 전체 자료 비교

표준선원과 소선원 밀도자료의 비교에서 약 0.3 g/cm^3 의 비정상적인 큰 밀도 차가 얻어졌다. 동일한 풍화도에서의 표준선원 밀도와 소선원 밀도의 차이가 연암 경암의 밀도 차이만큼이나 큰 것으로 나타났다. 표준편차의 변화 경향 또한 전체자료에서 풍화도별로 구분할 때 표준편차가 현저하게 감소한 표준선원 밀도와 물성의 동일화가 진행되는 과정에서도 표준편차의 감소가 약하게 나타난 소선원 밀도가 대조를 보였다. 이외에도 표준선원 밀도와 코어밀도 분포에서의 표준편차가 서로 비슷한 반면 소선원 밀도 분포는 코어밀도 분포에 비해 두 배 정도로 큰 표준편차를 보였다. 이러한 결과들은 모두 소선원 밀도자료에 문제가 있음을 강하게 시사하는 것으로 생각된다.

따라서 검층밀도 자료에서 소선원 밀도자료를 제외시켜 표준선원 밀도만의 검층자료와 코어밀도 자료를 비교하고 확인해 볼 필요성이 제기되었으며 Fig. 9는 이러한 관점에서 표준선원 밀도자료만을 선택하여 코어밀도 자료와 함께 밀도분포 히스토그램으로 나타낸 것이다. 그림으로 제시된 바와 같이 소선원 밀도자료가 제거된 검층자료는 비교적 양호한 정규분포에 코어자료와 유사한 빈도분포를 보이고 있다. 평균값에 있어서도 코어밀도와 표준선원 검층밀도가 2.65 g/cm^3 과 2.58 g/cm^3 로서

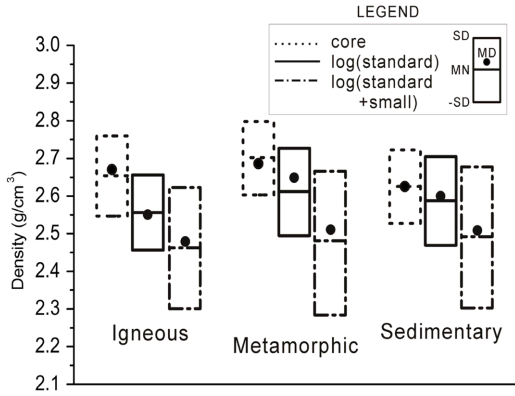


Fig. 10. Frequency distribution characteristics of the calculated densities of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks as derived from standard-source log (solid) and core (dotted) data. The results derived from the combined data of standard-source and small-source density logs (broken) are given together for comparison.

비손상암과 암반 평균 물성의 측면, 또는 침밀도와 체적 단위중량의 측면에서 이해될 수 있는 수준의 차이로 나타난다.

성인별 비교

표준선원 검층밀도와 코어밀도간의 유사성은 성인별 비교에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 표준선원 검층밀도의 평균값은 화성암에서 2.58 g/cm³, 변성암에서 2.63 g/cm³, 그리고 퇴적암에서 2.61 g/cm³로 나타난다. 코어밀도의 평균값이, 화성암에서 2.66 g/cm³, 변성암에서 2.69 g/cm³, 그리고 퇴적암에서 2.62 g/cm³이므로 성인별 코어밀도와 표준선원 검층밀도의 차이는 0.01~0.08 g/cm³이다. 성인별 소선원 검층밀도와 코어밀도의 차이가 0.24~0.29 g/cm³였음과 비교하면 1/3 이하 규모의 현저한 감소라고 할 수 있다. 코어밀도와 표준선원 밀도에서의 표준편차는 0.10과 0.11로서 여전히 동일한 수준을 보인다.

Fig. 10은 코어밀도와 표준선원 검층밀도 간의 유사성을 표현하기 위해 성인별 평균값, 중앙값, 표준편차를 함께 도시한 결과로, 소선원 밀도가 제외된 검층밀도와 코어밀도 사이에서의 유사성이 소선원 밀도가 포함된 검층밀도 자료와 코어밀도 자료사이에서의 큰 차이와 좋은 대조를 보인다.

암종별 비교

앞에서 인지된 경향과 동일하거나 보다 강화된 경향

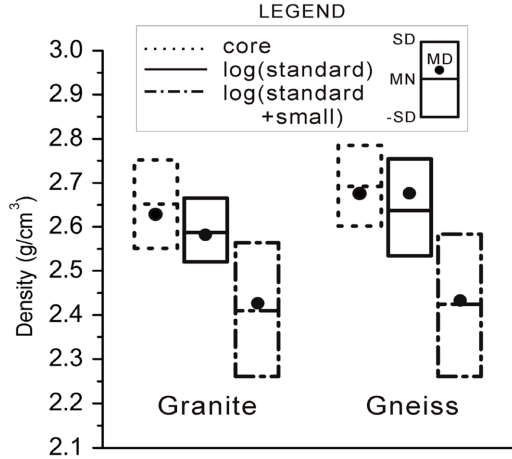


Fig. 11. Frequency distribution characteristics of the calculated densities of granite and gneiss as derived from standard-source log (solid) and core (dotted) data. The results derived from the combined data of standard-source and small-source density logs (broken) are given together for comparison.

이 화강암과 편마암을 이용한 암종별 비교에서도 반복되고 있다(Fig. 11). 화강암의 표준선원 검층밀도의 평균값이 2.58 g/cm³으로서 코어밀도의 평균값(2.65 g/cm³)보다 0.07 g/cm³ 작게 나타나며, 편마암의 표준선원 검층밀도는 2.64 g/cm³로 코어밀도(2.69 g/cm³)보다 0.05 g/cm³ 작게 나타난다. 즉, 여기에서도 소선원 밀도가 제외된 검층밀도와 코어밀도 사이에서 나타나는 평균밀도와 표준편차의 유사성과 소선원 밀도가 포함된 검층밀도와 코어밀도 사이에서 나타나는 평균밀도와 표준편차의 상이성이 크게 구분되고 있다.

토 의

코어밀도는 일반적으로 지름 7.6 cm 이하의 작은 크기의 코어시료를 대상으로 하며, 주로 풍화와 파쇄의 영향이 적은 상태의 코어가 측정대상으로 자주 활용되는 경향이 있다. 반면에 검층밀도는 30 cm 이상의 상대적으로 큰 규모의 암반시료를 대상으로 하며, 풍화파쇄 정도에 상관없이 시추 구간 전체에서 측정이 이루어진다. 더욱이 검층밀도는 연직방향으로 연속 측정된 자료로부터의 평균밀도 형태로 얻어지므로 실질적으로는 수 미터에 이르는 큰 조사 체적을 가진 것으로 볼 수 있다.

따라서 암석단위 밀도로서의 코어밀도와 암반단위 밀도로서의 검층밀도 사이에는 어느 정도 밀도 차이가 예

상될 수 있으며 오히려 이 차이는 암반의 불균질 정도나 절리지수 등을 나타내는 자료가 될 수 있다. 아울러 체적단위중량의 형태로 구해지는 검층밀도에 비해 주로 참밀도의 형태로 얻어지는 코어밀도가 상대적으로 높은 값을 보이는 것은 자연스러운 경향이라 할 수 있다. 그러나 코어자료와 검층자료 사이에 나타난 약 0.2 g/cm^3 의 밀도 차는 이로써 설명하기에는 너무 큰 규모이며 결과적으로 최소한 어느 한 자료에서의 오차 가능성이 제기된다.

그런데 코어밀도는 측정방법의 단순성과 5,000개 이상의 큰 자료, 그리고 정규밀도 분포에다 작은 규모의 표준편차까지 감안할 때 일단 통계 자료로서의 문제는 크게 없어 보인다. 반면에 검층밀도는 복잡한 이론에 근거하여 철저하게 유도되는 물성이라는 측면에다 얻어진 모든 밀도분포가 정규분포의 형태를 보이지 않고 표준편차 또한 코어밀도의 배에 육박하는 등 여러 면에서 코어밀도와 대비되면서 이상 밀도의 원인이 될 가능성이 커지고 있다.

표준선원과 소선원 밀도자료를 비교 분석한 결과는 그 가능성을 더욱 구체화시킨다. 즉, 같은 검층밀도에 속하는 표준선원과 소선원에서의 평균밀도 차이(0.3 g/cm^3)가 검층밀도와 코어밀도의 차이(0.2 g/cm^3)보다도 클 뿐만 아니라 동일 풍화도 자료에서의 표준선원과 소선원 자료의 밀도 차이가 연암과 경암의 밀도 차이만큼이나 커서 두 검층자료가 전혀 다른 성격을 가진 것으로 나타나기 때문이다.

밀도자료의 통계 처리 결과로 얻어진 표준편차의 변화 경향 또한 표준선원과 소선원 밀도자료의 차이를 더욱 뚜렷하게 하고 있다. 특히 밀도 값의 수렴이 예상되는 암석의 연경별 구분에서 뚜렷한 표준편차의 감소가 인지되는 표준선원 자료에 비해 소선원 자료에서는 표준편차 감소가 미미하게 인지됨은 바로 소선원 밀도자료에 문제가 있음을 보여주는 분명한 신호가 될 수 있다. 표준선원 밀도자료와 코어밀도 자료의 표준편차는 비슷한 반면 소선원 밀도자료는 코어밀도 자료에 비해 두 배나 큰 표준편차를 보이는 현상 또한 그 가능성을 지지하고 있다.

이와 같은 판단은 검층밀도에서 소선원 밀도자료를 제거하여 표준선원만의 검층밀도와 코어밀도간의 상관성을 비교한 결과로부터 강력한 지지를 받는다. 소선원 밀도자료가 제외되었을 때 검층밀도와 코어밀도 사이에 빈도분포의 형태를 비롯하여 평균값, 중앙값, 표준편차가 거의 유사하며 이러한 현상이 전체자료나 암상에 따

라 세분한 경우를 막론하고 일관되게 나타나기 때문이다. 결과적으로 모든 분석결과가 소선원 밀도자료에 이상이 있음을 보이고 있다.

한편, 소선원 검층밀도를 제외한 검층밀도와 코어밀도를 비교한 결과, 코어밀도의 평균값(2.65 g/cm^3)이 검층밀도의 보통암의 평균밀도(2.66 g/cm^3)와 거의 동일한 반면에 검층밀도의 평균값(2.58 g/cm^3)은 거의 연암(2.55 g/cm^3)의 평균밀도에 가까운 것으로 나타났다. 이는 코어밀도가 비손상 물성을 반영하지만 평균적으로 경암과 보통암 차이만큼의 풍화 영향을 포함하고 있음을 의미한다. 코어밀도와 검층밀도 사이의 비교적 일관된 밀도 차이를 활용하면 신선한 암반의 밀도값이 추정될 수 있을 것으로 기대된다.

분석결과에서 제시된 소선원 밀도자료에서의 이상은 표준선원에 비해 100배 정도 작은 소선원 밀도검층기의 선원 세기와 연관된 낮은 해상도 문제와 함께 자연 감마선의 영향(Kim and Kim, 1999; Hwang et al., 2004)도 작용했을 것으로 보이며 특히 ^{60}Co 의 짧은 반감기 문제와 밀접하게 연관되어 있을 것으로 보인다. 소선원 밀도검층의 경우에는 반감기(Krane, 1987)가 매우 짧아 6개월 주기의 교정에서도 6.4%의 오차까지 예상해야 하기 때문이다. 이는 ^{137}Cs 표준선원에 비해 5배 이상 큰 ^{60}Co 소선원 밀도검층에서의 오차 가능성을 실측 자료로 확인한 약 5년간에 걸친 교정공 관측결과에서 잘 나타나고 있다(Fig. 12). 결론적으로 소선원 검층밀도는 선원의 특성상 오차를 크게 포함할 가능성을 지니고 있다고 말할 수 있으며 수집된 밀도자료의 분석결과는 그러한 가능성이 현실화했음을 보여준 예라 하겠다.

결 론

남한 지역에서 수행된 검층밀도 자료를 수집하고 기존의 코어밀도 자료와 비교 분석하였다. 선원 구분을 하지 않은 검층밀도 자료를 코어밀도와 비교한 결과, 비정상적인 규모의 큰 밀도 차이가 나타났으며 밀도값의 크기, 분포 형태, 그리고 표준편차의 변화경향으로부터 검층밀도 자료에서 이상이 있음을 밝혀졌다. 이는 검층밀도 내에서의 측정 선원에 따른 밀도 차이가 연암과 경암의 밀도 차만큼이나 크게 나타난 현상으로 재확인되었다. 소선원 밀도에서의 압도적으로 큰 표준편차와 성인과 암종 그리고 풍화도에 따른 표준편차의 변화 경향은 검층밀도에서의 이상이 소선원 밀도자료에 있음을 보였다. 소선원 밀도자료에서의 이상은 표준선원 검층밀도

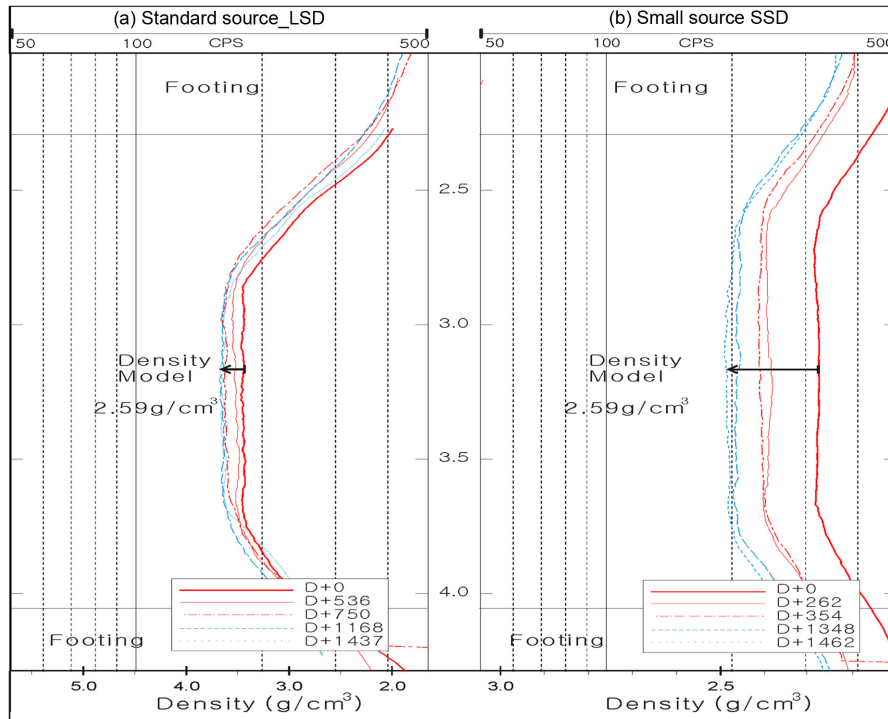


Fig. 12. Comparison of the gamma responses obtained from standard-source (a) and small-source (b) density loggers. The gamma response data were collected from the high density model borehole over a period of 2071 days. The arrow length represents the reduced density variation over four years due to the radiometric decay of cesium (a) and cobalt (b) sources.

와 코어밀도간의 상관성 비교에서 나타난 분포곡선의 형태, 평균값, 그리고 표준편차에서의 유사성으로부터도 확인할 수 있었다.

이와 같은 남한지역의 밀도자료의 분석 결과는 검층밀도 결정에서 소선원 밀도검층기가 표준선원 밀도검층기에 비해 1/6 정도로 짧은 교정 유효기간과 1/3.5 이하의 낮은 해상도 등 소선원 밀도검층이 가진 근원적 문제와 연결될 수 있었다. 결론적으로 지금까지 수집된 소선원 밀도자료는 정확성을 유지하기 위한 최소의 조건이 충족되지 못한 상태에서 얻어진 것으로 판단되었다. 표준선원 밀도검층기의 활용이 여의치 않은 국내 여건을 감안할 때 소선원 밀도검층기의 오차 줄이기를 위한 각별한 노력이 필요한 것으로 나타났다. 코어자료와 표준선원 검층밀도 자료를 사용하여 다음과 같이 남한에 분포하는 지층의 밀도 분포 특성을 결정하였다.

남한 지역에서 구해진 전체 평균밀도 값은 코어밀도와 검층밀도가 각기 2.65 g/cm³과 2.59 g/cm³으로 나타났다. 성인별 평균값으로 본 코어밀도와 검층밀도는 화성암이 2.65 g/cm³과 2.58 g/cm³, 변성암이 2.69 g/cm³과

2.63 g/cm³, 그리고 퇴적암이 2.62 g/cm³과 2.61 g/cm³로 나타난다. 대표적인 암종인 화강암과 편마암의 평균값으로 보면 각각 2.65 g/cm³과 2.58 g/cm³, 2.69 g/cm³과 2.64 g/cm³으로 나타났다. 코어밀도와 연경별 검층밀도로부터 구한 신선한 암반의 평균밀도는 약 2.70 g/cm³일 것으로 예상된다. 성인별, 암종별 풍화특성까지 고려한 결과 화성암이 2.69 g/cm³, 변성암이 2.73 g/cm³, 퇴적암이 2.68 g/cm³의 밀도가 되며, 신선한 화강암과 편마암의 평균밀도는 각각 2.68 g/cm³과 2.73 g/cm³으로 대표될 수 있을 것으로 나타났다.

사 사

이 연구는 많은 분들로부터의 밀도 자료 수집에 도움을 받아 이루어졌다. 자료 수집에 협조해 주신 모든 분들의 도움에 깊은 감사를 드린다. 이 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-120140149)로 연구되었다.

References

- ASTM, 1998, Test method for shrinkage factors of soils by mercury method (D427), Annual book of ASTM standards, 04.08, Soils and rocks (II), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 157-162.
- Fahey, J. J., 1961, A method for determining the specific gravity of sand and ground rock or minerals, U.S. Geological Survey Professional Paper 424-C, C372-C373.
- Han, W. J., 2004, A study on the physical and mechanical properties of igneous, metamorphic rocks in Korea, MSc thesis, Kangwon National University, 122p (in Korean with English abstract).
- Hwang, S. and Lee, S. K., 1999, Application of geophysical well logging to fracture identification and determination of in-situ dynamic elastic constants, 2nd Conference of Korean Society of Exploration Geophysicists, 161-162 (in Korean).
- Hwang, S., Park, C., Lee, S. K., and Shin, H. S., 2000, Density logging in slim-borehole, Conference of Korean Society of Exploration Geophysicists, 298-300 (in Korean).
- Hwang, S., Shin, J., Park, K., Lee, S. K., Park, Y. S., and Cho, C. H., 2004, Quality control of gamma-gamma (density) log, Joint Symposium of Korean Society of Exploration Geophysicists and the Korean Geophysical Society, 32-39 (in Korean).
- Kim, D. N., 2004, A study on physical, mechanical properties for sedimentary rock, MSc thesis, Kangwon National University, 144p (in Korean with English abstract).
- Kim, S. J., 2002, A study on the estimation of design parameters appropriate to Korean rock masses, PhD Thesis, Kungpook National University, Korea, 319p (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. and Kim, K., 1999, Comparison of physical properties obtained from geophysical well log and core property measurement in Gabsan formation, The Journal of Engineering Geology, 9(3), 253-265 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Kim, K., Lim, H., Kim, J., and Kong, N. Y., 2004, An experimental study on density tool calibration, Journal of Korean Geophysical Society, 7(4), 237-245 (in Korean with English abstract).
- Korean Society for Rock Mechanics (KSRM), 2006, Standard test method for porosity and density of rock, Tunnel and Underground Space, 16(2), 95-98 (in Korean).
- Krane, K. S., 1987, Introductory nuclear physics, John Wiley and Sons, 845p.
- Lee, S. K., Hwang, S., Hwang, H. S., and Park, I. H., 1998, Quality control for quantitative geophysical logging, KIGAM Research Report KR-98(C)-10, 65p (in Korean).
- Park, J. B., Yang, Y. G., Kim, K. J., Lim, H. T., and Kim, Y., 2000, Comparison of log and core properties and fracture index, 10th Anniversary Conference of the Korean Society of Engineering Geology, 221-229 (in Korean).
- Park, S. G., 2010, Variation property of spine and rib curves and time lapse standoff compensation, MSc thesis, Kangwon National University, 47p (in Korean with English abstract).
- Schlumberger, 1989, Log interpretation principles/applications, Schlumberger Educational Services, Houston, 13-19.
- Snodgrass, J. J., 1976, calibration models for geophysical borehole logging, U.S. Bureau of Mines Report of Investigation R.I. 8148, 21p.
- Torsaeter, O. and Abtahi, M., 2003, Experimental reservoir engineering laboratory workbook, Dept. of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology, 102p.
- Tripathy, S., Subba Rao, K. S., and Fredlund, D. G., 2002, Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils, Canadian Geotechnical Journal, 39(4), 938-959.

김영화

강원대학교 지구물리학과
강원도 춘천시 강원대길 1번지, 효자동
Tel: 010-9204-5417
E-mail: yhkim@kangwon.ac.kr

김기환

강원대학교 지구물리학과
강원도 춘천시 강원대길 1번지, 효자동
Tel: 010-5046-3899
E-mail: mykyh0917@nate.com

김종만

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
대전광역시 유성구 과학로 124번지
Tel: 010-7188-5322
E-mail: jm9899@kangwon.ac.kr

황세호

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
대전광역시 유성구 과학로 124번지
Tel: 042-868-3158
E-mail: hwangse@kigam.re.kr