

정확한 현장 원위치 밀도 측정을 위한 연구

김지훈	강원대학교 지구물리학과
공남영	강원대학교 지구물리학과
Weijun Zhao	강원대학교 지구물리학과
김영화	강원대학교 지구물리학과
임현태	한국수자원공사 수자원연구원

1. 서 론

밀도는 토목물리탐사에서 요구되는 물리량 중 사용 빈도가 가장 높은 물성 중의 하나로 특히 동적 지반 정수 산출에 필수적으로 이용되고 있다. 밀도는 물리검증으로서의 밀도검증 방법과 실험 시험 방법으로서의 코어밀도 측정 방법에 의하여 구해진다. 특히 밀도검증 방법은 현장 원위치 시험으로서 지층의 특성을 그대로 반영한다는 점에서 이점이 있으며 또한 시료 채취가 불가능한 시추공 상부 풍화대에서 지층의 밀도를 구하는 효과적인 수단으로서 사용 빈도가 점차 확대되는 경향을 보인다.

그러나, 밀도검증은 검출기의 감마선 컴프턴 산란효과에 대한 반응특성 및 시추공경, 공내 유체의 영향, 자연감마의 영향 등 다양한 요소들에 영향을 받아, 이를 영향 요인들이 밀도 값에 오차로 포함될 수 있는 문제점을 지닌다(Tittman and Wahl, 1965; 김영화, 김기주, 1999; 황세호, 이상규, 1999). 따라서 밀도 값의 결정은 이를 영향 요소들에 대한 정확한 분석과 보정을 거쳐서 구해야 한다. 그동안 국내에서는 제조회사에서 보정하는 일반 사용자 보정에 의존하여 밀도를 구했으며 신뢰도에 있어서 문제점이 있었다. 더구나 small source 밀도 검증기 사용의 확대로 이러한 문제점은 더욱 심각해지고 있다.

이러한 문제 해결을 위해 최근 국내에서 처음으로 강원대학교 내에 지구물리 검증 보정용 모형 시추공 시설이 완성되어 직접 보정이 가능하게 되었으며 이를 계기로 기존의 밀도보정을 검토하고 모형 시추공 보정의 성과를 검토하였다.

2. 밀도보정의 개요

밀도검증에서의 밀도 환산은 다음의 이론식(Schlumberger, 1989)에 근거한다.

$$\gamma_{obs} = \frac{\kappa}{\rho_e} \quad (1)$$

(γ_{obs} : 측정된 감마값, ρ_e : 전자밀도, κ : 상수)

즉 감마 선원으로부터 방출되어 암석 속의 전자와 반응하여 컴프턴 산란을 일으킨 후 검출기에 도달하는 감마선량(γ_{obs})은 암석의 전자밀도(ρ_e)에 반비례한다.

암석의 전자밀도는 체적밀도와 다음 식 (2)에서와 같은 비례관계를 보이므로

$$\rho_e = \rho_b \left(\frac{2Z}{A} \right) \quad (2)$$

(ρ_b : 체적밀도, A : 원자량, Z : 원자번호)

식 (1)과 식(2)로부터 체적밀도를 구하는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\rho_b \left(\frac{2Z}{A} \right) = \frac{\chi}{\gamma_{obs}} \quad (3)$$

식 (3)에서 괄호 속의 값은 탄화수소를 제외한 대부분의 경우 1에 가까운 값이 되므로(Tittman and Wahl, 1965, Brock, 1983),

$$\rho_b = \frac{\chi}{\gamma_{obs}} \quad (4)$$

의 관계가 성립되며 식 (4)에 의해서 밀도검출기에서 측정된 값으로부터 지층의 체적밀도가 구해진다.

즉, 감마선의 측정치와 암석 또는 지층의 밀도는 비례적인 관계가 있으며 그 비례상수를 구하는 보정 과정이 필요하다. 검출기의 보정은 방사선 선원의 강도에 따라 변하는 특성을 보이므로 각각의 영향 요소에 따른 반응계수 k가 구해져야 한다. k값을 구하는 데 있어 보정시설로부터 직접 구하는 방식과 간단한 소규모 보정물질 또는 방사선 감쇠 특성에 따른 변화를 이용하는 간접적인 보정이 있다(김영화, 외. 2004). 물론 간접적인 보정은 직접적인 보정이 불가능한 경우에 제한적으로만 사용이 가능하다.

3. 모형 공을 이용한 보정

검증보정을 위한 모형시추공은 각기 다른 밀도를 가지는 콘크리트 블록에 설치된 NX 구경의 시추공 3공과 동일 물성의 콘크리트 블록에 설치된 서로 다른 공경을 가지는 3공의 시추공 조합으로 구성되어있다(Figure 1). Figure 1에서 KLW-1, 2, 3는 KLW-4와 5에 비하여 1.4미터 후방에 위치한 것이나 도면 작성의 편의상 동일면에 위치시킨 입면도로 도시한 것이다. 이 실험에서는 공경이 NX(76mm) 크기로 동일하나, 밀도를 달리하는 3개의 시추공을 이용하여 측정이 이루어졌다. 시험 체의 밀도 구성은 1.688g/cm^3 (low density) 2.046g/cm^3 (medium density) 및 2.581g/cm^3 (high density)이다. 시추공은 각 시험 체의 한가운데 위치하며 약 5 m의 심도로서 중간 구간인 2.3 m ~ 4 m 사이에 시험체가 위치한다. 이와 같은 배치는 측정 점을 중심으로 모든 방향으로 0.7 m의 측정 구간이 확보될 수 있도록 한 것이며 실질적으로 균질 무한체 내에 감마선원과 검출기가 위치하는 효과를 목적으로 하였다(김영화 외 2004).

밀도보정 실험은 각 시추공의 시험 구간에서 감마감마검증 기법에 의한 각 시험체의 감마반응을 측정하고 그 결과를 각 시험편의 밀도와 크로스 플롯함으로써 보정식을 얻는 과정으로 구성된다. 각 시험체의 검출기 감마반응은 depth mode와 time mode의 측정을 병행하였으며 방사능 붕괴 특성을 감안하여 보정식 유도에는 time mode 측정 자료를 주로 사용하였다. 아울러 밀도 1에서의 검출기의 반응 특성으로서 춘천댐 상류 물속에서 측정된 자료가 함께 사용되었다.

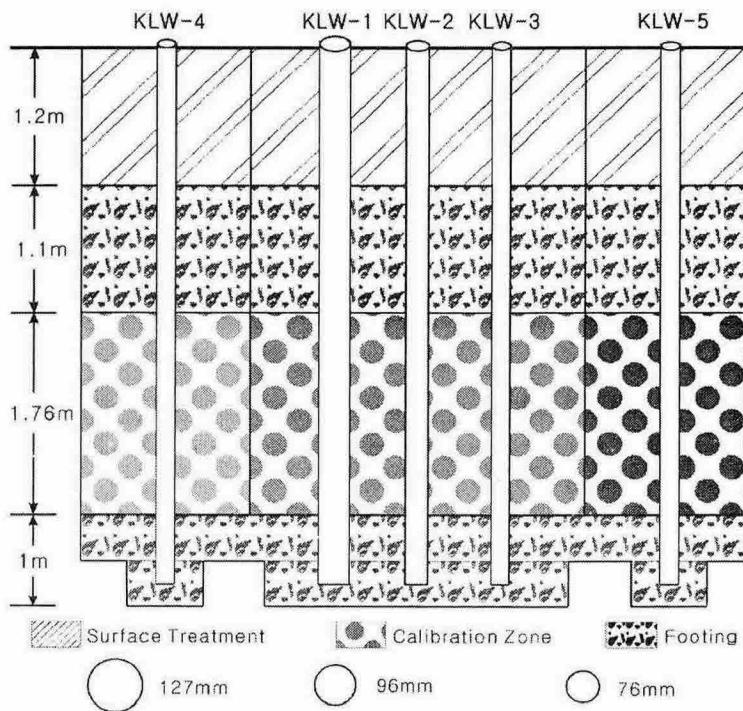


Figure 1. Sectional view of density calibration test models.

Figure 2는 강원대학교에서 보유하고 있는 Cs137 standard source와 Robertson 밀도검증기 손드를 이용하여 각 밀도에 따른 검출기의 감마반응을 플롯한 결과로서 자연감마보정(김영화, 김기주, 1998)이 수행된 결과이다. 밀도를 상용 스케일로 하고 검출기 반응을 대수 스케일로 잡아서 플롯할 때 $R^2 = 1$ 인 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기 반응식을 얻을 수 있었으며 식(5)과 같은 보정식이 제시되었다.

$$Y = -0.9374 \log X + 4.6363 \quad \text{---} \quad (5)$$

한편 2004년 11월에 얻어진 위의 결과 외에 2005년 4월에 다시 측정하여 아래와 같은 식이 얻어졌으나 실질적으로 밀도에 미치는 차이는 무시 가능한 수준이다.

$$Y = -0.9473 \log X + 4.6571 \quad \text{---} \quad (6)$$

Figure 3은 국내 검증 회사가 보유하고 있는 Co60의 small source 검증기를 위한 보정 실험 중에서 비교적 최근에 구입하여 소스의 경도가 상대적으로 높은 장비에 대한 실험 결과를 제시한 것이다. 마찬가지로 자연감마보정이 수행된 결과이며 밀도를 상용 스케일로 하고 검출기 반응을 대수 스케일로 잡아서 플롯할 때 다음과 같은 선형 관계의 밀도-검출기 반응식이 얻어졌다.

$$Y = -0.4668 \log X + 14.5201 \quad \text{---} \quad (7)$$

Figure 4는 3개의 모형 시추공에서 밀도보정을 적용한 결과이다. Time 모드 측정으로 얻어진 보정 식(5)를 depth mode로 얻어진 gamma gamma 검증 자료에 적용한 결과(new)를 기존의 간접 보정 방법(김영화와 2004)을 적용하여 얻어진 결과(old)와 비교한 것이다. 직접보정의 경우 실제의 밀도와 거의 일치하고 있는 반면에 사용자 보정에서의 밀도가 실제 밀도와 $0.07\text{g}/\text{cm}^3$ -

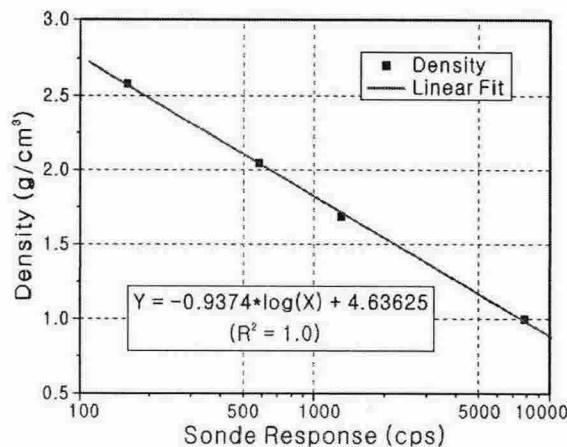


Figure 2 Density-sonde response relationship obtained from a standard source(Cs137) density logger.

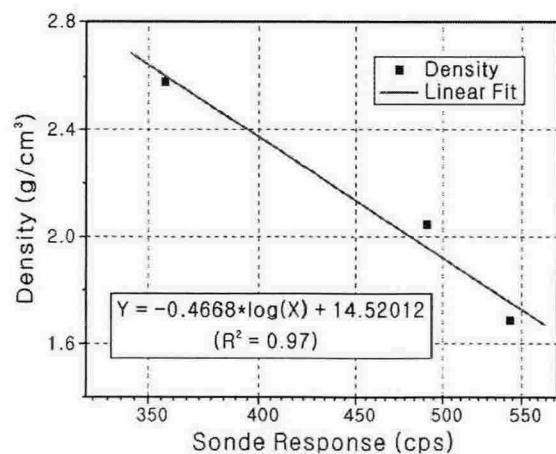


Figure 3. Density-sonde response relationship obtained from a small source (Co60) density logger.

0.1g/cm³의 차이를 보이고 있어 모형시추공을 이용한 직접 보정의 효과를 잘 보여주고 있다. 또 하나의 특기할 사항은 측정 대상 구간의 밀도가 낮을수록 밀도가 적을수록 두 보정 결과 사이의 편차가 커지는 경향으로, 이는 연암 풍화암, 풍화토 영역에서 예상보다 높은 검증밀도값이 나타난다는 과거 검증 관계자들의 우려가 근거 있었음을 보여주고 있다.

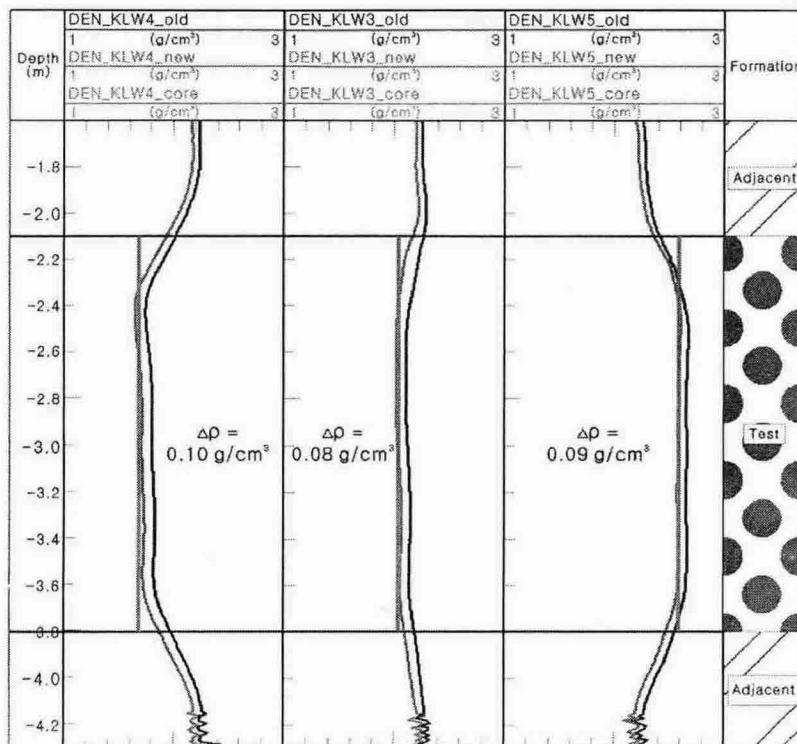


Figure 4. Comparison of the calibration result obtained from the direct calibration (DEN_new) with the calibration result obtained from indirect calibration(DEN_old) in the density calibration models constructed in Kangwon National University.

4. 결 인

국내에서 처음 건설된 지구물리모형 시추공에서 밀도검출기의 검출기 보정실험을 실시하고 이로부터 직접 보정 방법의 적용 결과와 기존의 간접보정 결과를 비교, 분석하였다. 연구 결과는 모형 시추공을 이용한 직접 보정의 결과에서 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기 반응식을 얻을 수 있었으며 향후 암반의 정확한 밀도 분포를 구할 수 있음을 물론이고 그동안 문제점으로 지적되고 있던 연암 및 풍화암, 그리고 토사 구간에서의 밀도 분포까지 정확하게 구할 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

이 연구는 지오텍컨설팅(주), (주)한국지우, (주)한라엔지니어링, 지하정보기술(주)
한국지반물탐센터, KTECH 및 태광상역의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드린다.

참고문헌

- 김영화, 김기주, 1999, 갑산층 석회암 지역에서의 코어물성과 검출물성의 비교, 지질공학, 9, 253-265.
- 김영화, 김기주, 임현태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검출 검출기 보정을 위한 기초연구, 지구물리, 7권 4호, 237-246.
- 황세호, 이상규, 1999, 물리검출에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출, 한국지구물리학회 1999년도 제2회 학술발표회, 161-162
- Tittman, J. and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma), Geophysics, 30, No. 02, 284-294.