

밀도검층 검출기 보정에 관한 기초 연구

김영화 · 김기주 · 임헌태 · 김지훈 · 공남영
강원대학교 지구물리학과

An Experimental Study on Density Tool Calibration

Kim, Yeonghwa · Kim, Kiju · Lim, Heontae · Kim, Jihoon · Kong, Nam-Young

Department of Geophysics, Kangwon National University, Korea

요 약 밀도 검층에 미치는 각 영향 요소들을 검토하고 현행 사용자 보정의 한계와 문제점 파악을 위한 기초 실험이 수행되었다. 간접 보정 방법에 속하는 현행 사용자 보정을 물과 알루미늄 블럭을 사용하는 사용자 보정과 반감기 식을 이용한 사용자 보정으로 구분하여 분석하였으며 국내에서 처음 시도된 지구물리모형 시추공을 이용한 직접 보정 방법의 적용 결과와 비교, 분석되었고 이로부터 기존의 사용자 보정의 한계와 가능성을 평가할 수 있었다.

주요어 밀도보정, 모형시추공, 방사능붕괴, 감마, 검출기반응

ABSTRACT Series of basic experiments for current density calibration by user process and for density calibration using geophysical model borehole were made. We tried to find the sonde response characteristics for current calibration using water and aluminium field jig, and using the equation of half life of ^{137}Cs source. The result of calibration test made in a geophysical model borehole built first in Korea shows a perfect linear calibration equation. By adopting this calibration equation we could estimate the limitation as well as possibility of current density calibration by user process.

Key words density calibration, model borehole, radioactive decay, gamma, sonde response

1. 서 론

밀도는 특히 토목지질 분야에서 사용 빈도가 높은 암석의 기본 물성 중의 하나이다. 암석의 밀도 측정은 실험실에서 이루어지는 코어 밀도 측정 방법과 현장 시험 방법으로서의 밀도검층 방법으로 구분될 수 있다. 특히 밀도검층 방법은 시추공 전 구간에서 연속적이며 원위치 암반 밀도 분포를 구할 수 있다는 큰 장점을 가진다. 그러나 밀도 검층은 감마선의 콤프턴 산란효과를 이용하여 이루어지기 때문에 매질에 따른 검출기의 반응 특성(Pickell and Heacock, 1960; Hearst and Carlson, 1969)을 비롯하여 시추공경(Tittman and Wahl, 1965) 및 시추공 속의 유체의 영향, 자연 감마의 영향(김영화, 김기주, 1999; Scott *et al.*, 1961)

등 여러 요소들의 영향으로 얻어진 밀도 값에 오차가 많이 포함될 가능성이 크다는 문제점을 가지고 있다.

따라서 밀도 값의 결정은 이들 영향 요소들에 대한 철저한 검증과 보정 과정을 거쳐 구해져야 하며 검출기의 보정은 가장 기본적인 보정 과정이다. 검출기 보정은 국제 원기 등 정밀하게 검증받은 calibration pit 을 이용하는 보정(이하 원기 보정)과 제조 회사에서 보정(제조사 보정) 및 일반 사용자가 하는 보정(사용자 보정)으로 구분할 수 있다. 이를 단계별 개념으로 보아 1차 보정, 2차 보정 및 3차 보정으로 구분하기도 한다 (Robertson Geologging, 1994; 황세호, 이상규, 1999).

일반 사용자 보정에 있어서는 원기 보정 또는 잘 검증 받은 제조사 보정에서의 검출기 보정과는 달리 소 규모 보정 물질을 이용한 사용자 보정에 의존 할 수밖에

에 없는 형편이며 자연히 신뢰성이 떨어지기 마련이다. 특히 국내에 있어서는 사용자 보정의 여건 불리로, 소스 규모가 작은(small source) 밀도검층 장비는 말할 필요도 없고 정상 소스(standard source)의 밀도검층 장비까지도 자료의 신뢰성을 보장해 주지 못하고 있는 실정이다. 이러한 현상은 풍화도가 증가하는 암반 일수록 심한 것으로 알려지고 있다. 밀도검층의 활용을 저해할 큰 장애요인이 되고 있는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 그동안 국내 검층 관련 대학, 연구소 및 회사 차원에서 밀도 보정을 고려한 시험 시추공 확보에 노력해 왔다(김영화 외, 2004; 유영철 외, 2004). 특히 최근에는 국내에서 처음으로 강원대학교 캠퍼스 내에 지구물리 모형 시추공 시설이 완성되어 1차 보정 차원에서의 사용자 보정이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 이를 계기로 밀도검층 검출기 보정에 미치는 영향 요소들에 대하여 재검토하고, 기존의 사용자 보정과 새로 적용된 모형 시추공 보정 결과를 비교, 분석하였다.

2. 밀도 보정의 원리

밀도검층에서 소스로부터 방출된 감마선은 공벽 주위의 지층을 통과할 때 경유지 주변의 전자와 콤프턴 산란을 일으켜 에너지가 감쇠하면서 검출기(detector)에 도달한다(Fig. 1). 따라서 검출기에서 측정된 감마선량(γ_{obs})은 암석의 전자밀도(ρ_e)에 반비례하는 관계를 보인다(민경덕외, 1987; Schlumberger, 1989; 전보현, 1994).

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

식(1)에서 k는 상수로서 암석의 전자밀도(ρ_e)는 체적밀도(ρ_b)와 비례관계를 보이므로 궁극적으로 감마선 값으로부터 체적밀도를 구하게 된다.

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

여기에서 Z 및 A가 각기 원자번호와 원자량인데 분자량(Mol.Wt) 및 분자를 이루는 각 구성 원자의 원자번호의 합($\sum Z's$)에 대하여 다시 표현하면 식(3)과 같

게 된다.

$$\rho_e = \rho_b \left(\frac{2 \sum Z's}{Mol. Wt} \right) \quad (3)$$

(2)와 (3) 어느 식으로 표현되든 간에 일반적인 규산염 지질에서 괄호 속의 값은 1에 가까이 접근함을 이용하면(Tittman and Wahl, 1965; Brock, 1983) 전자밀도는 체적밀도와 같게 된다.

$$\rho_e = \rho_b \quad (4)$$

따라서

$$\rho_b = \frac{k}{\gamma_{obs}} \quad (5)$$

결국 암석의 밀도 결정은 식(5)에서 보인 바와 같이 검출기에 들어오는 감마선의 양에 의해서 결정되며 지층의 체적밀도를 구하는데 있어서 반응 특성 k가 일정하다는 전제가 필요하다. 따라서 밀도를 구하기 위해서는 실질적으로 무한체로 고려될 수 있고, 이미 밀

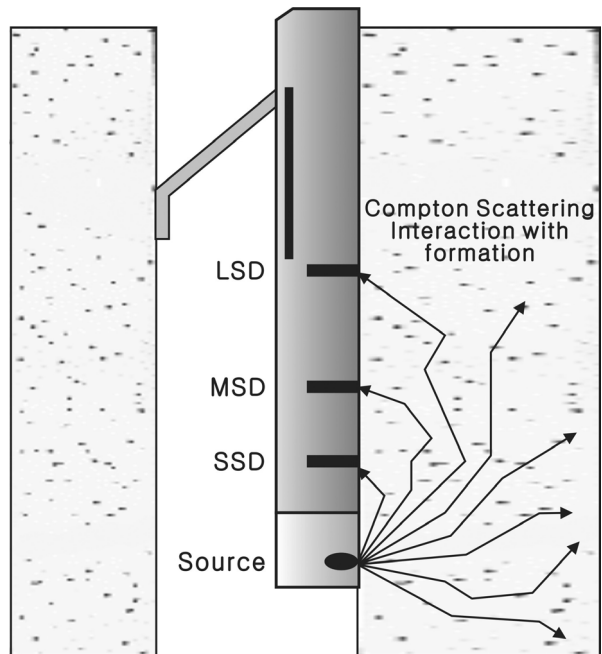


Fig. 1 Schematic diagram of density logging. LSD, MSD, and SSD represent for Long Spaced Detector, Medium Spaced Detector, and Short Spaced Detector, respectively.

도값이 알려져 있는 균질한 암반 또는 모형 물질에서의 방사능 반응으로부터 검출기의 반응 특성을 구하는 것이 필요하며 이것이 검출기 보정에 해당된다. 검출기 보정은 검출기의 반응 특성이 방사능 소스 강도에 따라 변하는 함수적 특성을 보임에 따라 측정 시점별로 이루어져야 한다. 따라서 밀도검층의 경우에는 측정 시점별로 식(5)에서의 반응계수 k 가 구해져야 한다. 이 경우 시점별 반응계수를 보정시설로부터 직접 구하는 방식(이하 직접보정)과 간단한 보정시설 또는 이론적인 방사능 감쇠특성을 이용하는 간접적으로 구하는 방식(이하 간접보정)이 있다. 믿을만한 밀도보정 시설에의 접근이 어려운 일반 사용자에게 있어서는 간접보정 방식이 일반적이며 물과 알루미늄 블록에 의한 측정 또는 방사능 반감기 식을 이용한 계산으로 가능하다.

3. 기존의 사용자 보정에 대한 검토

제조사 추천의 사용자 보정은 물과 알루미늄 블록을 사용하며 무한체로 고려되기에 부족한 모형체에서의 방사능 반응을 측정한다. 따라서 측정값에 크게 영향을 미치는 주된 요소는 보정 시험체의 크기 및 손드와의 접촉 조건일 것으로 예상된다. 사용자 보정에 대

한 검토는 그 중에서도 매체의 크기를 최대 영향 요인으로 설정하고, 사용자 보정에 사용되는 수조와 알루미늄 블록의 크기에 대한 분석으로부터 시작되었다. 물을 이용한 보정을 위하여 무한 균질 매체 상태 획득을 위한 호수에서의 측정과 함께 원통형 간이 물탱크에서의 측정을 병행하여 비교하였다. 알루미늄 블록은 밀도검층기 제작사인 Robertson사(Robertson Geologging Co. Ltd)에서 제공된 것을 사용했다. 실험에 사용된 시스템은 Micrologger 시스템이며 밀도검출기 소스로는 3.7GBq 규모의 ^{137}Cs 인공 감마 선원이 사용되었다.

3.1 물의 반응 특성

무한 매체에서의 반응을 확인하기 위한 방안으로, 수미터의 수심 및 측방 여유를 갖는 호수 환경을 찾아 소양담 수문 부근과 화천담 상류에서 검출기의 반응을 측정하는 실험을 수행하였다. Fig. 2(A)는 소양담에서의 측정 결과로서 수심 6m 위치에서부터 up mode 방식으로 측정했으며 반복 측정에서 동일한 결과를 얻었다. 전반적인 반응곡선의 형태는 수심 0.7m를 경계로 상부에서의 불안정 반응값과 하부에서의 안정된 반응값이 대조를 보인다. 특히 수심 0.7m 하부에서는

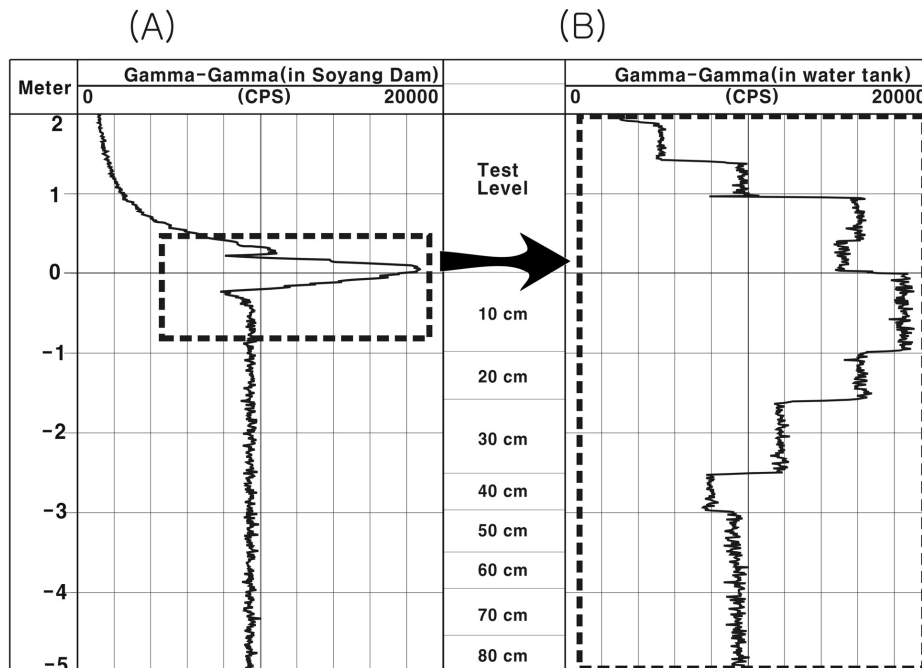


Fig. 2 Detector responses obtained from the water in lake(A) and in a water tank of 2.5 m radius and 1m height(B).

값의 변화 정도를 제시한 것으로, 손드와 접촉이 잘 된(well attached) 상태에서의 낮은 반응값과 손드 접촉이 잘 안된(poorly attached) 상태에서의 높은 반응값이 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 실험 중에서 접촉이 잘된 것인지 아닌지를 육안으로 판단하기는 어려웠으며 여러 번의 반복 관찰 값 비교에 의지할 수밖에 없었다.

Fig. 3(B)는 알루미늄 블록의 측면에 다른 물체를 가까이 위치시켰을 때 나타난 손드 반응의 변화를 보여준다. 측면에 위치시킨 물체는 두께 1.5cm 내외의 납판 (plate A)과 두께 10cm의 알루미늄 판 (plate B)이다. 알루미늄 블록만의 반응값이 269cps인데 측면에 납판이 1cm 이내의 거리로 접근했을 때 232cps, 작은 알루미늄 블록이 밀착되는 경우 210cps, 좌우 양 측면으로 납판과 알루미늄 블록을 가까이 한 경우에는 185cps까지 측정치가 감소함을 보여 주었다. 이 측정 결과들은 소스로부터 나온 감마선이 주변 다른 매질의 영향을 너무나 많이 받고 있음을 보이며 이는 방사능 소스로부터 10cm의 여유도 안 되는 보정 블록의 작은 폭에 기인하는 것으로 나타났다.

이에 비하여 측정 블록을 바닥으로부터 일정한 간격으로 단계별로 들어 올려 측정한 결과에서는(Fig. 3C) 지면에 접촉해 있는 상태에서 지면으로부터 각기 5cm, 10cm, 15cm, 20cm 이격시켰을 때 반응값이 모두 217cps에서 209cps 범위의 거의 비슷한 값을 보인다. 제시된 반응 값들은 여러 번의 반복 측정에서 접촉 상태가 좋은 것으로 판단된 낮은 반응값들을 모은 것이기 때문에 다른 가능성도 있으나 일단 보정 블록의 높이가 결정적인 문제는 안 되는 것으로 판단하였다.

그러나 A와 B의 두 그림에서 제시된바와 같이 폭의 규모가 절대적으로 부족하며, 손드의 밀착 조건 차이에서 야기될 오차까지 감안한다면, 현재의 보정 능력으로는 직접 보정은 말할 것도 없고 간접 보정에서도 매우 조심스럽게 적용되어야 하며, 이 경우 측정 장소와 손드 접촉에 있어서 동일한 조건 유지에 각별한 주의가 필요함을 보였다.

4. 간접 보정 방법의 적용 결과 비교

검출기 보정에 있어서 간접 보정은 믿을 수 있는

보정시설에서의 보정실험과 연계된 초기검출기 반응값으로부터 방사능 소스의 강도 변화를 감안하여 시점별 반응합수를 구하는 방법으로 측정 또는 이론식 적용이 가능하다. 물과 알루미늄 보정 블록을 이용하는 기존의 사용자 보정 방법(Robertson, 1994)이 대표적인 간접 보정 방법으로 동일한 물과 알루미늄 블록에서 얻어진 각 시점별 반응값과 초기 반응값의 크로스 플롯으로부터 각 측정값(measured cps)을 표준화된 반응값(standard cps)으로 바꾸어 줌으로써 밀도를 구한다. 그러나 이 방법은 앞에서 설명된 바와 같이 보정 물질의 규모 부족이나 방사능 측정의 어려움, 접촉 조건 등에 의한 큰 오차 등으로 효과적인 보정이 되지 못할 가능성이 제시되었으며 그 동안의 많은 현장 적용 경험에서도 적용 곤란한 것으로 확인되었다. 특히 손드와 벽면의 접촉 상태 차이에서 오는 오차가 크면서도 확인할 방법이 마땅치 않다는 점이 가장 큰 문제점으로 지적되었다.

방사능 소스의 강도 변화 특성을 구하는 가장 쉬운 방법은 방사능 감쇠 방정식을 이용하는 방법이다. 이 방법은 다음의 식(6)로 주어진 감쇠 방정식을 사용하여 소스 변화를 구하고 이 소스의 변화가 검출기 반응을 결정한다고 가정하는 것으로 이론값이 실제에 어느 정도로 접근 하는지를 확인할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 하나의 시추공에서 시간 경과에 따른 반복적 측정으로 검출기 반응 특성의 변화를 추적한 시추공 측정 결과와 비교하였다. 이를 위하여 지층의 밀도가 시간에 따라 크게 변화하지 않는다는 전제가 가능한 시험공을 선정하였으며 그 중에서도 시간에 따른 물성 변화율이 작은 지층 구간을 선정하였다.

$$API_t = API_o \exp\left(-t \frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right) \quad (6)$$

t : 반감기 붕괴시간

API_t : t 시간후의 API 값

API_o : 초기 API 값

T_{1/2} : 방사능 원소의 자연 반감기

Fig. 4는 풍암분지에 위치한 시험시추공 PABH-1에서 시간을 달리한 3회의 감마감마 측정을 실시하여 소스의 실제 감쇠곡선(measured decay curve)을 파악하고 이를 이론적인 감쇠곡선(computed decay curve)과 비교한 것이다. 시추공은 풍암분지에 위치한 PABH-

1 공이며 동일한 암질의 분포 구간이 넓고 신선한 화강 편마암 구간(김영화 장승익, 1998)에서 측정이 이루어졌다. 반감기 곡선은 제작사 제공의 최초 보정 기록인 1994년 11월의 270.8 cps를 기준으로 구해졌으

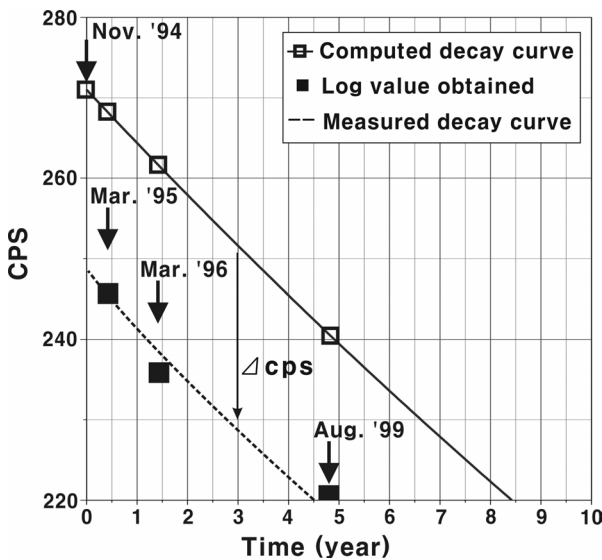


Fig. 4 Comparison of gamma ray decay curves between computed and measured in a test borehole.

며, 시추공에서의 감마감마 측정치의 실제 밀도검층 결과 나타난 감마감마 값의 전반적인 감쇠 경향과 비교적 잘 일치하고 있다. 이 결과는 시추공 측정 자료에서의 편차 또는 오차를 감안할 때 비교적 좋은 결과로서 감쇠방정식을 이용한 사용자 보정의 효과를 예측할 수 있다.

Fig. 5는 시추공 PABH-1에서 감쇠방정식을 이용하여 시점별 밀도를 구하여 비교한 결과이다. 각 시점에서 반감기 보정을 거쳐 얻어진 밀도는 동일 구간에서 대부분 0.01g/cm³ 이내의 밀도 차를 보여 반감기를 이용한 보정의 결과가 나쁘지 않음을 보여주고 있다. 일부 심도에서의 비교적 큰 차이는 손드와 공벽 사이의 접촉 상태 변화에 의한 결과로 보이며 이를 포함하는 경우에도 평균값에서 0.003g/cm³ 이내의 미세한 편차로 나타났다.

5. 직접 보정 방법의 적용과 간접보정 방법과의 비교

강원대학교 캠퍼스에 마련된 검층보정 시설은 3가지 유형으로 물성 조절된 콘크리트 시험체에 굴진된 NX

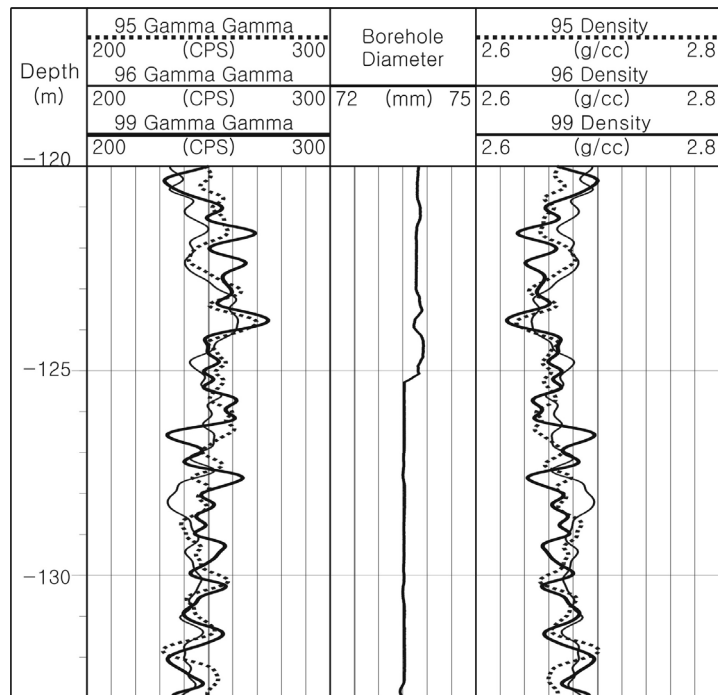


Fig. 5 An example of calibration result by adopting decay curve of a radioactive source in the borehole, PABH-1.

Table 1 Design of geophysical test models for density calibration.

Classification	Material	Density	Hole No
Low Density Model	Sands + Silica Aggregate	1.688	KWL-4
Medium Density Model	Sands + Dolomite Aggregates	2.046	KWL-2
High Density Model	Sands + Iron Ore Aggregates	2.581	KWL-5

구경의 시추공 3공과, 동일 물성의 콘크리트 시험체에 마련된 3가지 공경의 시추공 조합으로 구성된다(Fig. 6). 밀도검층의 검출기 보정은 현재 조사 시추에서 표준 규격으로 사용되고 있는 NX 시추공에서의 효과적인 보정을 위하여, 밀도를 달리하는 3개의 NX 시추공을 이용하여 이루어졌다. 보정공은 고밀도 모델(high density model), 중밀도 모델(medium density model), 저밀도모델(low density model)의 세 가지 밀도로 만들어진 시험체의 한 가운데에 위치한다. 시추공 길이는 약 5m로서 보정시험에 사용될 시험구간은 심도 2.3m와 5.7m 사이의 중간 구간에 위치한다. 측정 지점을 중심으로 모든 방향으로 최소 70cm의 측정 구간이 확보될 수 있도록 하여 실질적으로 균질 무한체 내에 방사능 선원과 검출기가 위치될 수 있도록 설계되었다. Table 1은 밀도보정에 사용된 시험체의 내역을 나타낸 것이다. 밀도는 시추공 형성 과정에서 얻어

진 코어 시료의 포화단위 중량 값이다.

Fig. 7은 각 시험체에서의 감마반응과 밀도의 관계를 플롯한 결과로서 춘천댐 상류에서 얼음을 뚫고 측정된 물에서의 측정 자료가 함께 이용되었다. 각 시험체에서의 감마반응은 자연감마보정(김영화, 김기주, 1998)까지 수행된 결과이며 밀도를 상용 스케일로 하고 검출기 반응을 대수 스케일로 잡아 플롯할 때 $R^2=0.99$ 의 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기 반응식을 얻을 수 있었으며 식(9)과 같은 보정식이 제시되었다.

$$Y = -0.9374 \log X + 4.6363 \quad (7)$$

이 결과에 따라서 보정 식(7)을 2개의 시추공 밀도검층 자료에 적용하였다(Fig. 8). Fig. 8(A)는 강원대학교 봉명 시험시추공 BM-2에서의 적용 예로서 코어 밀도 2.66g/cm^3 의 매우 균질한 암반에서 실선으로 표시된 검층밀도 분포(Density 1)를 얻었다. 평균 검층 밀도 2.67g/cm^3 로서 코어 밀도에 근접함을 보였으며 점선으로 표시된 반감기를 이용하여 보정된 밀도

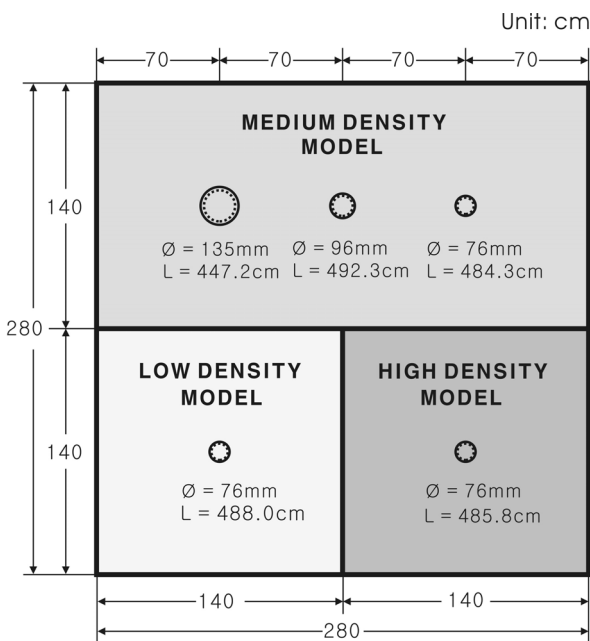


Fig. 6 Construction details of density calibration test models.

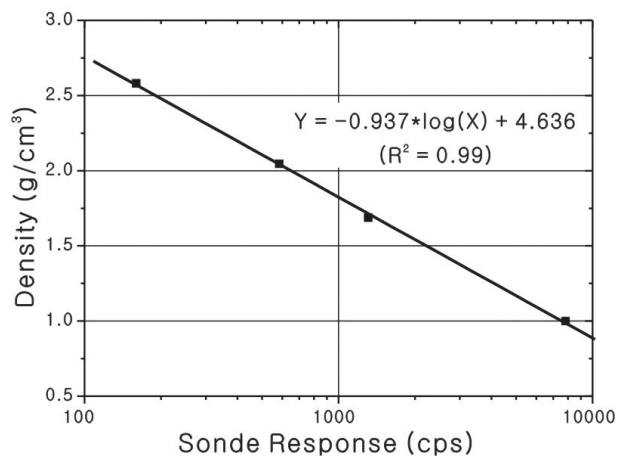


Fig. 7 Density-sonde response relationship obtained from density calibration models constructed in Kangwon National University.

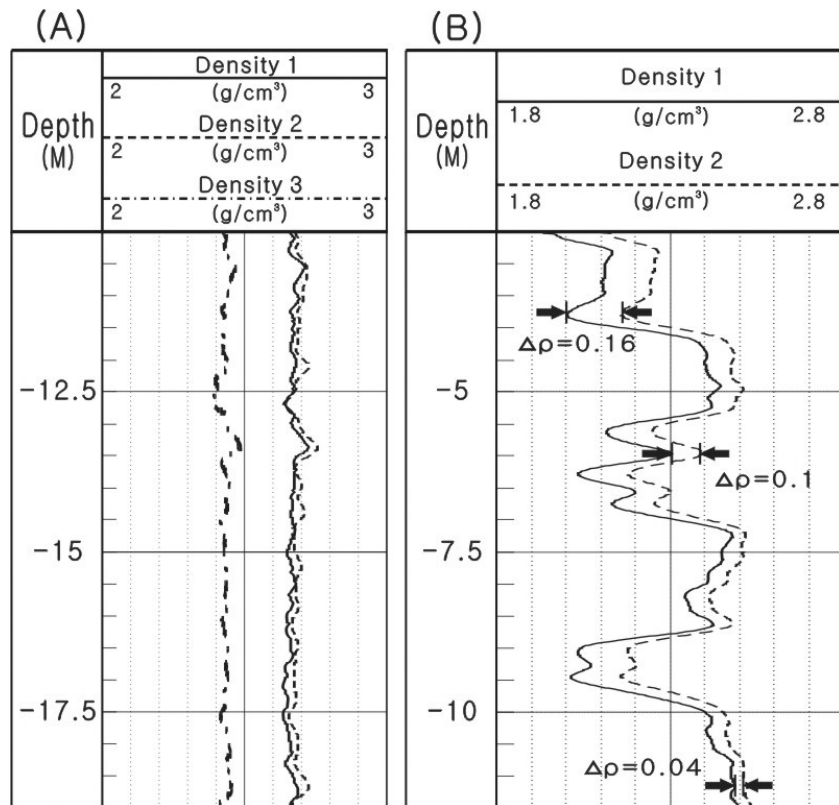


Fig. 8 Comparison of the calibration result obtained from the newly built calibration facility(Density 1) with the calibration result obtained from adopting decay curve of a radioactive source(Density 2), in the borehole, PABH-1. Density3 obtained from density calibration by user process using water tank and aluminum jig is shown for comparing with the other two calibration results in figure(A).

(Density 2)에서 나타난 평균 밀도는 2.69g/cm^3 로서 0.02g/cm^3 의 차이를 보였다. 한편 물과 알루미늄 보정 블록을 이용한 보정 결과 얻어진 밀도(Density 3)는 0.2g/cm^3 이상의 큰 밀도 차를 보여 반감기를 이용한 이론적 보정에 비해서도 오차가 크게 나타났다.

한편 Fig. 8(B)는 또 하나의 다른 시추공인 MB-9에서의 결과로서 모형 시추공을 이용한 직접 보정 보정과 반감기 식을 이용한 간접 보정의 결과를 비교한 것이다. 신선한 암반에 가까운 경우는 BM-2 시추공에서와 같은 규모의 작은 차이가 있었으나 풍화도가 커짐에 따라 두 보정 결과 사이에 점차 편차가 커지고 있음을 보이고 있다. 이러한 경향은 간접 보정의 경우 저밀도 영역에서 밀도가 상대적으로 높게 나타났음을 가리키고 있으며, 이는 과거 풍화암, 풍화토 및 토사 구간에서 검층 밀도 값이 언제나 높게 나타났던 사실과도 잘 통한다.

6. 결론

밀도 검층에 미치는 각 영향 요소들을 검토하고 현행 사용자 보정의 한계와 문제점 파악을 위한 기초 실험이 수행되었다. 간접 보정 방법에 속하는 현행 사용자 보정을 물과 알루미늄 블록을 사용하는 사용자 보정과 반감기 식을 이용한 사용자 보정으로 구분하여 분석하였으며 국내에서 처음 시도된 지구물리모형 시추공을 이용한 직접 보정 방법의 적용 결과와 비교, 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 모형 시추공을 이용한 직접 보정의 결과는 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기 반응식을 얻을 수 있었으며 향후 암반의 정확한 밀도 분포를 구할 수 있음은 물론이고 그동안 문제점으로 지적되고 있던 연암 및 풍화암, 그리고 토사 구간에서의 밀도 분포까지 정확하게 구할 수 있음을 보여주었다.

2) 간접 보정의 결과는 모형 시추공을 이용한 직접 보정의 결과와 상당한 차이가 있었으나 반감기 식을 이용한 보정의 경우에는 코어 밀도 자료 등을 잘 활용하는 경우 하나의 보정 방안으로 활용할 수 있는 여지가 있음을 보였다.

3) 물과 알루미늄을 이용하는 기존의 보정 방법은 작업의 용이성과 자료의 신뢰성 모두 효과적이지 못한 것으로 나타났으며, 적용의 경우에는 아래의 특성을 고려하여 조심스럽게 접근해야 할 것으로 나타났다.

4) 저수지 또는 댐에서의 검출기 반응은 자료의 반복성이 양호했으며 반경 70cm 이상의 구형체인 경우에 자료의 안전성이 확보됨을 보였다. 높이 1.2m 지름 2미터 이상의 간이 수조를 이용하는 경우 소스를 70-80cm 지점에 위치시켜 얻은 자료를 사용할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 비하여 현행 제작사 제공의 알루미늄 블록은 동일 접촉 조건의 구현과 시험 블록의 크기 부족으로 소스 감소 경향의 파악에서도 어려움이 있음을 보였으며 특히, 주변 조건과 접촉 조건의 동일화에 각별한 주의가 필요함을 보였다.

감사의 글

이 연구는 지오테크컨설팅(주), (주)아시아지오컨설팅, (주)한국지우, (주)한라엔지니어링, 지하정보기술(주), 태광상역, 한국지반 물탐센터, KTECH 및 강원대학교 부설 자원개발연구소의 지원을 받아 이루어졌으며 지원에 감사드린다.

참고문헌

- 김영화, 김기주, 1999, 갑산층 석회암 지역에서의 코어물성과 검층 물성의 비교, 지질공학, 9, 253-265.
- 김영화, 박정빈, 김지훈, 김기주, 2004, 밀도검층을 중심으로한 보정검층공의 특성과 설계, 대한지질공학회 정기학술발표회, 21-26.
- 김영화, 장승익, 1998, 물리검층공에서의 심도오차 분석과 보정, 지질공학, 8, 87-98.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1997, 응용지구물리학, 서울.
- 유영철, 이상태, 송무영, 2004, 다목적물리검층 및 시험용 공개시험용 프로젝트 소개, 대한지질공학회 정기학술발표회, 33-38.
- 전보현, 1994, 석유물리검층, 인하대학교 출판부, 인천.
- 황세호, 이상규, 1999.8, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출, 한국지구물리학회 1999년도 제2회 학술발표회, 161-162
- Hearst, J. R. and Carlson, R. C., 1969, The RIDS - A density logger for rough holes: Geophysics, 34, no. 02, 222-234.
- Pickell, J. J. and Heacock, J. G., 1960, Density logging: Geophysics, 25, no. 04, 891-904.
- Robertson, 1994, RG Portalog III Software & Logging Operations Manual, Robertson Geologging co., Deganwy.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/Applications, Schlumberger Educational Services, Houston.
- Scott, J. H., Dodd, P. H., Drouillard, R. F. and Mudra, P. J., 1961, Quantitative interpretation of gamma-ray logs: Geophysics, Soc. Of Expl. Geophys., 26, 182-191.
- Tittman, J. and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma): Geophysics, 30, no. 02, 284-294.