

밀도검층의 효과적인 현장 적용을 위한 모형 보정공 건설과 밀도 보정 기초연구

김지훈¹⁾, 공남영¹⁾, Weijun Zhao¹⁾, 김영화¹⁾

Construction of calibration models and calibrating experiment for efficient field application of density log

Ji-hoon Kim¹⁾, Nam-young Kong¹⁾, Weijun Zhao¹⁾ and Yeong-hwa Kim¹⁾

요약: 국내에서 처음으로 지구물리검층 보정을 위한 모형시추공이 건설되었으며 이들 모형시추공을 이용한 검출기 보정실험과 케이싱보정을 위한 기초실험을 실시하였다. 여기서는 세 가지 밀도와 세 가지 공경으로 구성되는 모형 시추공의 건설 과정과 재원을 소개하고 이를 이용하여 구해진 선형 관계의 밀도-검출기 반응식을 검토하였다. 아울러 케이싱 보정을 위한 기초연구 결과 이격 보정용 차트가 제시되었고 이를 이용하여 이격 정도를 모르는 현장 측정에서도 참 밀도를 구할 수 있음을 밝혔다.

주요어: 감마감마, 검출기 반응, 모형시추공, 물리검층, 밀도보정, 케이싱효과

Abstract: We constructed a series of calibration models in the campus of Kangwon National University. A series of experiment for calibrating sonde response as well as casing effect in field measurement. Here we explained the process of construction of calibrating facility which consists of three model holes of different density and three model holes of different diameter. It was discussed the calibration equations obtained from its sonde response calibration test. A density correction chart for different separation of detector from hole wall was suggested, and verified the possibility of determining true density from measurements in cased hole.

Keywords: gamma gamma, sonde response, model borehole, geophysical logging, density calibration, casing effect

1. 서론

지반공학 등 여러 분야에서 긴요하게 잘 이용되는 밀도는 밀도검층, 즉 물리검층방법으로 구하는 것과 실험실에서의 코어밀도 측정법으로 나누어 생각할 수 있다. 그 중에서 밀도검층은 특히 지층의 특성을 그대로 반영하는 현장 원위치 시험법으로서의 이점을 가지고 있다. 그러나 밀도검층은 감마 선원으로부터 방출되어 암석 속의 전자와 반응하여 컴프턴 산란을 일으킨 후 검출기에 도달하는 감마선량(γ_{obs})이 암석의 전자밀도(ρ_e)에 반비례하고, 암석의 전자밀도는 암석의 체적밀도와 비례하는 관계를 이용한 다음의 밀도 환산식 (1)에 근거하여 구해야 한다는 한계를 지닌다(Schlumberger, 1989).

1) 강원대학교 지구물리학과(Geophysics Department, Kangwon National University)
E-mail: forret@empal.com

$$\gamma_{obs} = \frac{\kappa}{\rho_e} \quad (\gamma_{obs} : \text{측정된 감마감마값}, \rho_e : \text{전자밀도}, \kappa : \text{상수}) \quad (1)$$

$$\rho_e = \rho_b \left(\frac{2Z}{A} \right) \quad (\rho_b : \text{체적밀도}, A : \text{원자량}, Z : \text{원자번호}) \quad (2)$$

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

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

이와 같이 밀도검층은 인공 감마선에 의한 매질의 콤프턴산란 효과를 이용하므로 감마선량과 매질의 검출기 반응특성에 좌우되며(Hearst and Carlson, 1969) 이외에도 시추공경(Tittman and Wahl, 1965), 지하수위, 케이싱 여부, 자연감마(김영화, 김기주, 1999)등 많은 요소들이 산출 밀도값에 영향을 주는 문제점이 있다. 따라서 밀도검층에 의하여 밀도값을 구하는 경우에는 정확한 보정이 생명이며 이는 검출기 보정과 시추공 환경보정으로 나누어 생각할 수 있다.

검출기 보정은 밀도검층에서 밀도산출을 위한 필수적인 요소로서 일반적인 사용자 보정과 보정 시설에 의한 직접 보정으로 구분 할 수 있다. 기존의 사용자 보정의 문제점은 김영화 등(2004)에서 제시된 바와 같이 우려할 수준이며, 더욱이 국내 small source 밀도 검층기의 보급에 따른 감마선 소스의 강도의 미약과 짧은 반감기에 의하여 보정은 더욱 심각한 문제점으로 등장하고 있다. 다행히 최근 강원대학교 내의 지구물리 검층 보정용 모형 시추공의 완성으로 이러한 문제는 크게 개선될 수 있게 되었다. 그러나 아직까지도 시추공경, 지하수위, 케이싱 여부, 자연감마 등의 영향에 대한 시추공 환경보정 문제 등으로 해결되어야 할 문제점들이 많이 남아 있다.

여기에서는 국내 최초로 만들어진 검층보정용 모형시추공 제작의 과정과 결과를 소개하고 검층공을 활용한 밀도기초보정과 각종 시추공환경보정에 대한 적용 결과를 검토하였다.

2. 지구물리 검층 보정용 시추공 제작

(1) 보정용 시추공 제작 설계 및 시공상의 고려

검층보정공의 설계를 위하여 다음과 같은 것들이 기본 사항으로 고려되었다. 1)보정 검층공은 밀도검층을 주 목적으로하며 음과검층, 전기비저항, 대자율 검층의 보정을 감안한다. 특히 밀도검층자료의 보정에 가장 큰 비중이 주어지며 고밀도, 중밀도, 저밀도의 밀도분포를 가지게 하며 고밀도는 고대자율-고속도-저비저항의 구조로, 저밀도는 저대자율-저속도-고비저항의 구조로 만들도록 한다. 2)검층보정시설은 3개의 NX 공경 실험공과 2개의 대구경 실험공으로 구성한다. 3)가로, 세로 및 높이 기준으로 한 각 보정체의 최소 규격은 70 cm이며 기초(footing), 실험체, 상부 피복체로 구성한다. 4)보정 검층공은 시멘트콘크리트로 형성한다.

지구물리검층 보정공 건설의 성패는 설계된 물성분포를 정확하게 그대로 실현할 수 있는가의 여부에 달려 있다. 고밀도-고대자율-고속도-저비저항의 실현은 철광석, 일반골재, 시멘트의 조합으로, 중밀도-중대자율-중속도-중비저항은 일반 콘크리트 사용으로, 저밀도-고대자율-저속도-고비저항은 경량골재인 실리카골재, 일반골재, 시멘트의 조합으로 계획되었다. 시멘트콘크리트에 의한 보정시설 건설에서 예상되는 최대의 문제점은 균질성 유지이다. 재료 선정에서 골재와 시멘트의 효율적인 배합, 타설과정에서의 골재분리현상 등 여러 면에서 세심한 배려를 하며, 함수비의 감소와 분산제 또는 점증제 사용 및 사전 시험을 강구하였다.

(2) 시험체 제작

시험체는 깊이가 1.8 m인 3개의 개별 시험체로 구성되며 각 시험체의 규격은 280 cm × 140 cm (Medium Density Model), 140 cm × 140 cm (Low density model), 140 cm × 140 cm (High density model)로 구성된다. 전체 시험체는 140 cm × 140 cm × 100 cm의 콘크리트 기초블럭 (footing) 위에 설치되었으며, 그 상부는 다시 140 cm × 140 cm × 110 cm의 콘크리트 블록으로 피복시켰다. 최상부 120 cm는 흙으로 피복되어 있다. 작업의 순서는 기초 블럭을 위한 콘크리트 타설 작업을 시작으로 일반 밀도모형체, 경량 밀도모형체, 중량 밀도모형체를 형성시키고 상부 덮개 블록, 케이싱 설치 및 토양피복, 시추공 보호장치의 순으로 이루어졌다(Fig. 1).

(3) 시험공 굴착

검층보정을 위한 시험공은 세 가지 다른 물성의 시험체에 착공된 NX 구경의 시추공 3공과, 동일 물성의 콘크리트 시험체에 마련된 다른 3가지 공경의 시추공 조합이 될 수 있도록 굴착되었다(Fig. 2, Fig. 3).

즉, 현재 조사 시추에서 표준 규격으로 사용되고 있는 NX 시추공은 고밀도 모델(high density model: K LW-5), 중밀도 모델(medium density model: K LW-1,2,3), 저밀도모델(low density model: K LW-4)의 세 가지 밀도로 만들어진 각 시험체의 한 가운데에 위치시켰다. 시추공 길이는 약 5 m로서 보정시험에 사용될 시험 구간은 심도 2.3 m와 5.7 m 사이의 중간 구간에 위치한다. 측정 지점을 중심으로 모든 방향으로 최소 70 cm의 측정 구간이 확보될 수 있도록 하여 실질적으로 균질 무한체 내에 방사능 선원과 검출기가 위치될 수 있도록 설계되었다. 공경보정을 목적으로 한 시추공경의 조합은 76 mm (K LW-3), 96 mm (K LW-2) 및 135 mm (K LW-1)로 설계되었다.

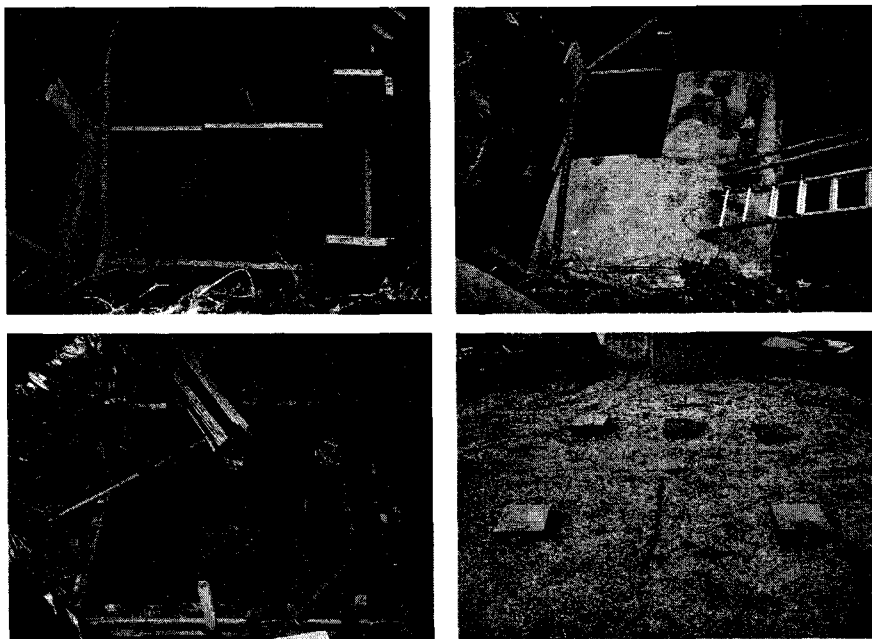


Fig. 1. Photos showing the process of construction of calibration facility.

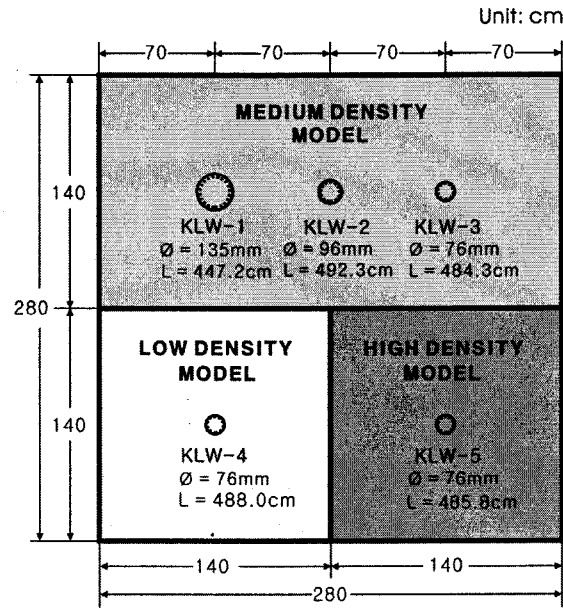


Fig. 2. Drilling plan for construction of density calibration test holes.

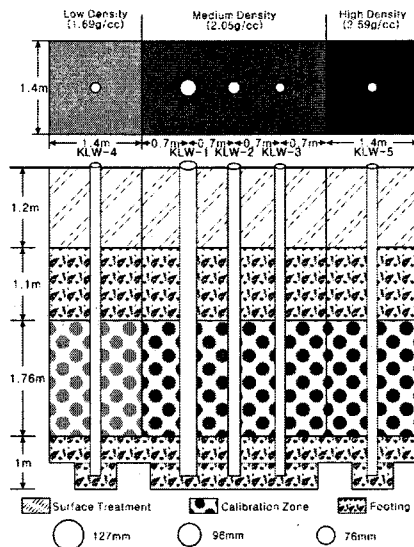


Fig. 3. Ground plan (upper) and sectional plan (lower) for test boreholes.

(4) 시험체 내역

Table 1은 각 시험체에서 시추공 굴착으로 획득된 코어 시료 중에서 일부를 측정해서 구한 포화단위 중량값을 나타낸다. 각 밀도체 즉, Low Density Model, Medium Density Model 및 High Density Model의 밀도 구성은 1.688 g/cm^3 , 2.046 g/cm^3 , 2.581 g/cm^3 로 나타났다. 저밀도와 중밀도의 분포는 좋으나 고밀도 모델에서 밀도값이 2.581 g/cm^3 로서 설계값에 크게 못 미친 결과로 나타났다. 이는 사전 실험에서와는 달리 비배수 상태에서 콘크리트 주입과 양생이 이루어졌음에 기인하며 고밀도 암석의 밀도 결정에 장애 요소가 될 수도 있다. 현재 또 하나의 추가 고밀도 시험체를 마련하고 시험공 굴착을 기다리고 있으나 지금까지의 시험은 이 3개 공으로 국한되어 있다.

3. 밀도 보정

(1) 장비 및 측정법

보정공에서의 지구물리검층 수행시 사용된 장비는 영국의 Robertson Geologging사의 Micrologger system을 사용하였다. 장비는 크게 Sonde, Micrologger, Encoder, Winch로 구성되어 있다(Fig. 4). 밀도보정실험은 일반적인 감마-감마 검층방법에서와 동일한 방법으로 137 Cs 인공감마선 source를 사용해 공벽에 부착시키는 sidewall방식으로 수행되었으며 검층속도는 3.0 m/min로 유지되었다. 자료 획득에 사용된 software는 Winlogger, 자료 처리에는 Viewlog system software가 사용되었다.

밀도 보정식의 산출을 위해 밀도를 달리하는 세 개의 시험체에 마련된 표준규격의 NX 시추공인 K LW-3, 4, 5가 이용되었다. 시추공의 길이는 약 5 m 정도이고, 시험구간은 2.3 m ~ 5.7 m이며(Fig. 3) 그 중에서 기준 심도 3.3 m 일대의 반응값들의 평균치가 밀도값 산출에 이용되었다.

(2) 보정식 산출

Fig. 5는 각 시험체에서의 감마반응과 밀도의 관계로서 긴 간격(LSD)의 자료를 춘천댐 상류에서 얼음을 뚫고 측정된 물에서의 측정 자료와 함께 플롯한 결과이다. 각 시험체에서의 감마 반응은 자연감마보정(김영화, 김기주, 1998)까지 수행된 결과이며 밀도를 상용 스케일로 하고 검출기 반응을 대수 스케일로 잡아 플롯할 때 $R^2 = 0.994$ 의 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기

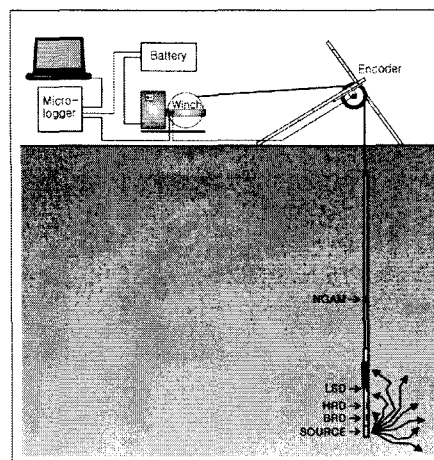


Fig. 4. Schematic of density log equipment.

Table 1. Design of calibration borehole model.

Model	Hole No.	Density (g/cm ³)
Low Density Model	K LW-4	1.688
Medium Density Model	K LW-1, K LW-2, K LW-3	2.046
High Density Model	K LW-5	2.581

반응식을 얻을 수 있었으며 식 (5)와 같은 보정식이 제시되었다.

$$Y = -0.9473 \times \log(X) + 4.6571 \tag{5}$$

중간 간격(HRD)과 짧은 간격(BRD)의 감마선 반응값을 실제 코어 밀도와 크로스 플롯한 경우에도 $R^2 = 0.98$ 이상의 높은 상관도를 보여주면서 식 (6), 식 (7)과 같은 다음의 보정식을 제시하였다.

$$Y = -1.9052 \times \log X + 8.3289 \tag{6}$$

$$Y = -4.8655 \times \log X + 21.8330 \tag{7}$$

여기서 짧은 간격(BRD), 중간간격(HRD), 및 긴 간격(LSD)의 측정이란 감마선원과 검출기와의 거리가 각기 22 cm, 32.5 cm, 및 55.5 cm 인 경우에 해당한다(Table 2).

이밖에도 물에서의 측정 자료를 제외하고 각 시험체에서의 감마반응과 밀도의 관계만을 플롯한 결과에서는 Fig. 5와는 약간의 차이가 인지되며 R^2 값도 0.99에서 0.96으로 약간 낮아짐을 보인다. 긴 간격(LSD), 중간 간격(HRD) 및 짧은 간격(BRD)에서 얻어진 보정식은 각기 식 (8), 식 (9), 식 (10)과 같이 나타났다.

$$Y = -1.0512 \times \log X + 4.9255 \tag{8}$$

$$Y = -2.0128 \times \log X + 8.6740 \tag{9}$$

$$Y = -4.3674 \times \log X + 19.8250 \tag{10}$$

(3) 밀도 보정식의 산출에 따른 효과

보정방정식을 검증하기 위하여 우선 보정식 (5)를 강원대학교 봉명 시험시추공 BM-2에서의 적용하여 보았다. 이 시추공은 코어 밀도 2.66 g/cm^3 의 매우 균질한 암반으로서 보정식 적용 결과, 평균 검층 밀도 2.50 g/cm^3 로서 전체적으로 0.16 g/cm^3 만큼 낮게 나타났다(Fig. 6, Density 2). 이에 비하여 식 (8)을 적용한 경우에는 평균 검층 밀도 2.67 g/cm^3 로서 코어 밀도에 매우 근

Table 2. Information for gamma ray detectors.

Detector	Sensor Position (cm)	Measurement Offset (cm)
LSD	55.5	31
HRD	35.5	20
BRD	22	14

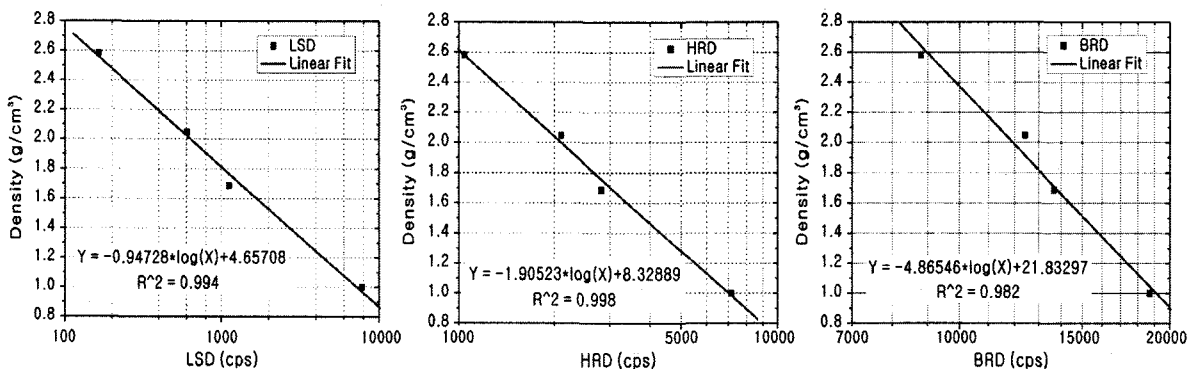


Fig. 5. Calibration equation reduced from LSD (left), HRD (middle) and BRD (right) measurements.

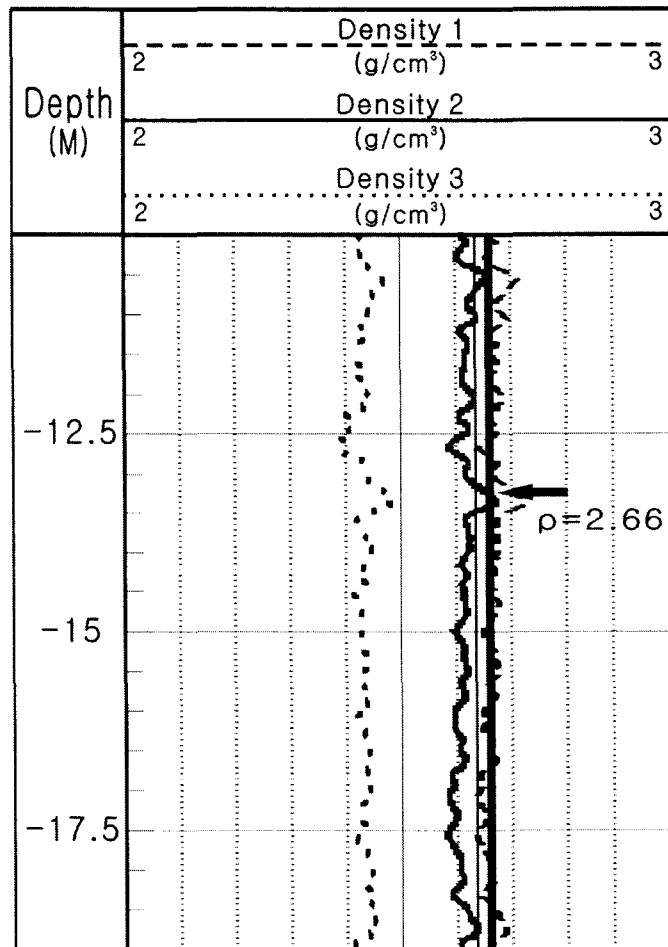


Fig. 6. Comparison of the calibration results obtained from calibration equation-8 (density 1), equation-5 (density 2) and from density calibration by user process using water tank and aluminum jig (density 3).

접하는 좋은 효과를 얻었다(Fig. 6, Density 1). 물과 알루미늄 보정 블록을 이용한 기존의 사용자 보정(김영화 등, 2004) 결과에서는 0.2 g/cm^3 이상의 가장 큰 밀도 차를 보였다. 이러한 결과는 고밀도 암석을 대상으로 한 보정식 유도에서 상관도가 상대적으로 떨어지지만 물을 측정된 자료를 제외하는 것이 좋음을 보여주고 있다. 아울러 이와 같은 직접보정은 중간 간격(HRD) 및 짧은 간격(BRD) 측정방법에 의한 밀도측정의 가능성을 열어 두고 있으며, 긴 간격(LSD) 측정자료와 함께 비교할 때 지층 변화가 심한 구간에서의 밀도 구조를 보다 정확하게 알 수 있게 한다.

4. 손드-지층 간 이격에 따른 오차 보정을 위한 기초 실험

(1) 목적 및 문제점

밀도검층은 나공 상태에서 실시하는 것이 바람직하다. 그러나 최근의 상황은 이와 반대로 점차 스틸 케이싱, 플라스틱 케이싱 그리고 투명관 등 다양한 케이싱 공에서 밀도검층이 이루어지는 경우가 점차 증가되고 있으며, 그만큼 정확한 밀도 산출이 어려운 상태이다. 케이싱 공에서

의 밀도검층은 두 가지 시추공 환경, 즉 1)공벽과 케이싱이 밀착된 환경과 2)케이싱 공벽이 분리되어 있는 환경으로 구분하여 고려해야 한다. 1)의 경우는 비교적 보정이 용이한 편이나 2)의 경우는 지층 밀도와 이격 거리가 함께 미지수인 상태로서 일반적으로 정량적 보정이 매우 어려운 것으로 간주하고 있다. 여기에서는 소스-검출기 간격을 달리하는 3가지 종류의 방사능 반응자료(LSD, HRD, BRD)를 이용하여 지층밀도는 구하는 보정 기초 실험연구를 소개한다.

(2) 실험 방법

공벽과의 이격에 따른 문제의 해결을 위해 밀도 분포를 알고 있는 보정시험공 KLV-3, 4, 5에서 각기 6 mm와 12 mm를 공벽에서 이격시킨 상태에서 감마감마 측정을 실시하고 그 결과를 살펴보았다. 탐사장비와 측정방법 등 이격을 제외한 다른 모든 것들은 앞선 보정실험에서와 동일하게 적용되었다.

이격을 위해서는 밀도검출기에 PVC 케이싱 조각을 부착하여 일반적인 sidewall 방식으로 측정하는 방법을 사용하였다. 두께 6 mm의 PVC 조각을 하나 또는 두개씩 부착함으로써 공벽과 검출기 사이가 6 mm 및 12 mm 떨어진 상태에서 측정이 될 수 있게 하였다. PVC 조각은 센서의 반응값에 영향을 주지 않는 위치에 부착하였다(Fig. 7).

(3) 이격거리에 따른 반응값의 변화와 참 밀도 값의 결정

Fig. 8, Fig. 9는 KLV-4(A), 3(B), 5(C) 공에서 지층으로부터의 손드 이격거리(0 mm, 6 mm, 12 mm)에 따라 LSD, HRD, BRD 반응값이 변화하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 10에서는 이격이 없을 때의 측정값에 대한 각 검출기 반응값의 비율을 제시한 것으로 공벽 밀도 및 이격 거리의 증대에 따라 그 비율이 증가하는 경향이 매우 일률적임을 보여준다. 또한, 이러한 반응특성을 이용하여 측정 간격 달리하는 검출기 반응값으로부터 참밀도를 결정하는 모델을 제시하고 있다. 여기에서 중축은 LSD 값을 횡축은 HRD값을 이용하였으며 두 값이 모두 밀착된 상태에서의 측정값이 밀도에 비례하는 관계를 보이고 있으며 이격이 커질수록 각 밀도 점에서 떨어지는 경향이 일률적으로 변한다. 따라서 이 차트를 이용하는 경우 두 반응값으로부터 지층의 참 밀도를 결정할 수 있게 됨을 보인다.



Fig. 7. Density logger attached with two PVC separators.

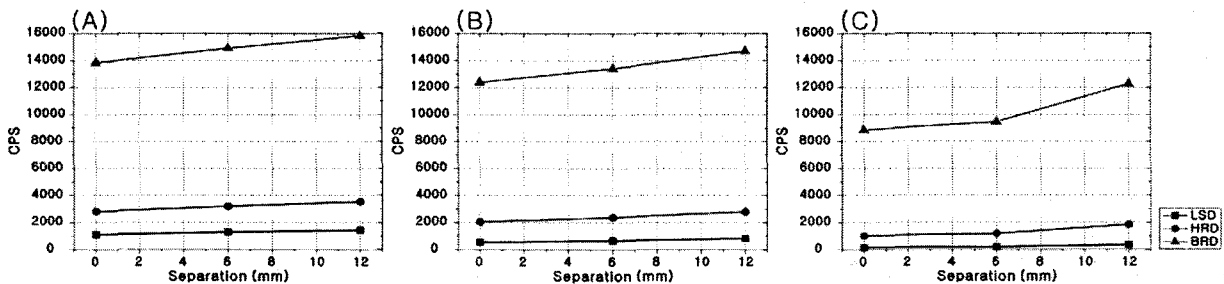


Fig. 8. Sonde responses according to separation between detector and formation in low (a), medium (b) and high (c) density model holes.

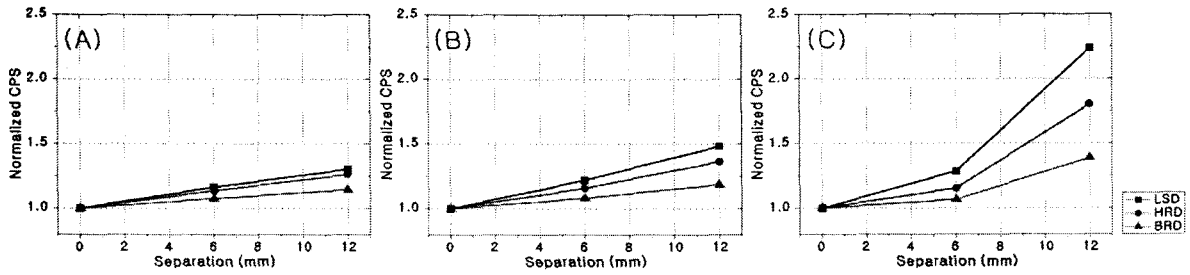


Fig. 9. Sonde responses normalized to those obtained in 0 separation. It shows well the increase of response value with increase of separation between source and detector in low (a), medium (b) and high (c) density model holes.

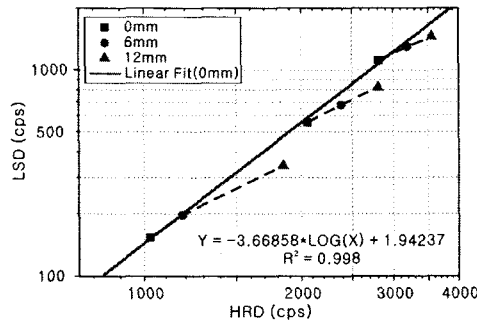


Fig. 10. Density correction chart for separation between detector and formation.

5. 결론

밀도를 달리하는 3개의 모형시추공과 공경을 달리하는 3개의 모형시추공이 완성되었으며 각 모형시추공 건설과정과 모형시추공 채원을 제시하였다. 이들 모형시추공의 완성으로 향후 밀도 보정을 위한 기초 환경이 마련되었으며 검출기 직접보정을 실시하였다. 모형 시추공을 이용한 직접 보정의 결과, 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기 반응식을 얻을 수 있었으며 이로부터 향후 암반의 밀도 분포를 구할 수 있음은 물론이고 그동안 문제점으로 지적되고 있던 연암 및 풍화암, 그리고 토사 구간에서의 밀도까지 비교적 정확하게 구할 수 있음을 보여주었다. 그러나 완벽한 선형 관계의 밀도-검출기 반응식에도 불구하고 반응식 결정에서 개선의 필요가 인지되었으며 특히 고밀도 시험체의 밀도가 2.581 g/cm³로서 설계값 보다 훨씬 낮게 형성되었음이 고밀도 암석의 밀도 결정에서 큰 약점으로 나타나고 있다. 현재 추가적으로 건설하고 있는 시험공의 보강 이후에 보다 확실한 보정식의 획득이 가능할 것으로 기대된다.

이격 거리에 따른 실험은 현장에서의 공벽 상태가 항상 깨끗하지 못하고, 때에 따라서는 매우 불규칙적인 시추공 상태와 특히 약한 암반 상태로 각종 케이싱 속에서, 그것도공벽과 송드 사이에 불규칙적인 이격이 생기는 경우에 대비하여 좀 더 정확한 밀도값을 산출하고자 실시되었다. 실험 결과 초보적인 수준의 보정용 차트가 제시되었고 소스-검출기 간격이 다른 감마-감마 측정자료로부터 이격 정도를 모르는 경우에도 참 밀도를 구할 수 있을 보였다. 초기 단계의 실험이지만, 지금까지의 실험만으로도 가능성이 충분히 입증되었으며 앞으로 보다 정밀한 반복 측정과 더불어 각종 케이싱류(PVC, STEEL, ACRYL)에 대한 직접 보정실험이 함께 이루어지면 더욱 효과적인 결과가 나올 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구에서의 검층 보정시설은 지오택컨설파트주식회사, (주)한라엔지니어링, (주)아시아지오 컨설파트, (주)한국지우, 지하정보기술주식회사, 태광상역, 한국지반물탐센터 및 KTECH의 지원을 받아 건설되었으며 지원에 감사드린다.

참고문헌

- 김영화, 김기주, 1999, 갑산층 석회암 지역에서의 코어물성과 검층물성의 비교, *지질공학*, **9**, 253-265.
- 김영화, 박정빈, 김지훈, 김기주, 2004, 밀도검층을 중심으로한 보정 검층공의 특성과 설계, *대한지질공학회 정기학술발표회*, 21-26.
- 김영화, 장승익, 1998, 물리검층공에서의 심도오차 분석과 보정, *지질공학*, **8**, 87-98.
- 김영화, 김기주, 임헌태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검층 검출기 보정에 관한 기초연구, *지구물리*, **7**, 237-245.
- 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, 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**, 222-234.
- Pickell, J. J., and Heacock, J. G., 1960, Density logging, *Geophysics*, **25**, 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*, **26**, 182-191.
- Tittman, J., and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma), *Geophysics*, **30**, 284-294.