

지하수면 상·하부 환경에서의 PVC 케이싱 이격보정 비교 연구

김영화^{1*} · 황병철² · 박성근¹ · 김종만¹

¹강원대학교 지구물리학과, ²NIS 컨설턴트(주)

A Comparative Study of Density Compensation in Gamma-Gamma Log in PVC Casings between above and below Ground Water Tables

Yeonghwa Kim^{1*}, Byong Chol Hwang², Sung Geun Park¹, and Jongman Kim¹

¹Dept. of Geophysics, Kangeon National University

²NIS Consultant

케이싱 구간에서 얻어진 밀도검층 자료에 대한 보정연구의 일환으로 모형공에서 PVC 케이싱의 인위적 이격을 이용한 이격보정 연구를 실시하였다. 케이싱의 유형과 공벽으로부터의 이격의 정도, 공내 유체의 존재에 따른 검출기의 반응양상의 변화를 추적하였으며 특히 동일한 이격환경에서 시추공 내에 물이 있을 때와 물이 없는 상태에서 얻어진 이격반응에 대한 비교 분석이 집중적으로 수행되었다. 이로부터 PVC 케이싱에서 수행되는 밀도검층에서 공벽과 검출기 사이의 이격 거리에 따른 감마선 반응 특성을 정량화할 수 있었으며 이격보정 차트가 작성되고 지하수면 하부구간과 상부구간에서의 각 이격오차보정의 효과와 한계가 밝혀졌다.

주요어 : PVC 케이싱, 검출기 반응, 이격보정차트, 지하수면 상부, 지하수면 하부

A series of model borehole experiments and analyses for density compensation were performed to achieve the effective density correction of gamma-gamma log obtained from PVC cased boreholes. A follow-up survey was made for clarifying the variation property of detector responses depending on casing types, the presence of borehole fluid, and the degree of separation between probe and borehole wall. A special emphasis was placed on the comparison of gamma responses obtained from above and below ground water tables. Finally, we could quantify the detector responses as a function of separation between the probe and borehole wall, construct standoff compensation charts, and the limitations of the compensation have been discussed for the environments of both above and below ground water tables.

Key words : PVC casing, gamma response, standoff compensation chart, above ground water table, below ground water table

서 론

선원으로부터 방출된 후 지층 속의 전자와 충돌, 감쇄 하면서 검출기에 도달하는 감마선의 크기를 이용하여 밀도를 결정하는 감마감마검층(Schlumberger, 1989)은 감마선원 특성, 매질의 검출기 반응특성, 시추공경, 공내 충전 물질, 지층의 자연감마, 공벽 상태, 공벽으로부터의 검층봉(sonde) 이격 정도 등 여러 요소들에 의해 영향을

받는다. 그러나 그동안의 밀도검층 보정에 관한 연구 (Tittman and Wahl, 1965; Scott, 1977; 황세호, 이상규, 1999; 김기주, 2001, 김영화의, 2004)들에 의하여 이들 영향요인에 대한 문제가 거의 해결된 상태이나 케이싱 공에서 수행된 밀도검층값의 보정 문제만은 아직도 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

케이싱 공에서의 밀도검층에 대한 보정연구는 주로 석유분야에서의 LWD(Logging While Drilling) 이격보

*Corresponding author: yhkim@kangwon.ac.kr

정연구로 수행되어왔으며 이와 관련된 많은 부분이 특히 출원되어 있는 상태이다(Michael, 2003, Schneider et al., 2006). 이에 비하여 토목지질 및 지하수 환경조사용 시추에서 많이 사용되고 있는 PVC 케이싱에서의 밀도보정에 관한 연구는 매우 미진한 상태이다. 최근 소구경 PVC케이싱 공에서의 밀도보정에 관한 연구(김영화와, 2006; 이성진의, 2008)가 수행되었으나 지하수면 상부구간이 제외된 포화상태에서의 기초적인 실험연구 결과로서 전반적인 밀도보정에서의 신뢰성 확보까지는 이르지 못한 형편이다.

특히 지하수면 상부구간은 시추공에 물 대신 밀도가 0에 가까운 공기로 차 있는 곳으로서 지층밀도측정에서 시추공이 미치는 영향이 상대적으로 더 크게 미치는 환경이며 따라서 공벽으로부터의 검층봉 이격이 야기하는 오차의 폭이 현저히 증대할 것으로 예상되므로 그만큼 이격보정의 중요성은 커지게 된다. 더욱이 천부 지반에 대한 물성파악을 목적으로 실시되는 오늘날의 토목지질 조사용 밀도검층의 대부분이 지하수위 상부에 있는 케이싱 구간에서 수행되고 있음을 감안하면 지하수위 상부구간에서의 케이싱 보정 연구의 의의는 매우 크다고 할 수 있다.

이러한 관점에서 지하수 하부구간에서 실시된 선행연구(이성진의, 2008)를 토대로 지하수 상, 하부 구간에서의 PVC 케이싱 이격보정에 관한 비교 연구를 실시하고자 한다. 공내 유체 조건을 제외한 나머지 조건은 동일하게 한 상태에서 물이 있을 때의 이격반응과 물이 없는 상태에서 얻어진 이격반응을 비교 분석하고 특히 이수가 없는 시추공 환경에서 공벽과 검출기 사이의 이격 거리에 따른 감마선 반응 양상을 정량화하고자 한다. 이로부터 지하수면 상, 하부 환경에서 이격오차보정의 가능성과 한계를 알아보고, 효과적인 보정 방안을 제시하고자 하였다.

방 법

이성진 외의 실험(2008)이 실시되었던 동일한 보정시추공인 강원대학교 교정 내 지구물리검층용 시험시추공 K LW-1($\rho = 1.90 \text{ g/cm}^3$), K LW-2($\rho = 2.18 \text{ g/cm}^3$), K LW-3($\rho = 2.59 \text{ g/cm}^3$), K LW-4($\rho = 2.85 \text{ g/cm}^3$)에서 시추공 환경을 물 대신 공기로 치환한 상태를 추가하여 실험이 이루어졌다. 장비 또한 동일한 영국 Robertson Geologging사의 검층시스템이 사용되었다. 보정실험을 위해 모형시추공의 시험구간 중에서 반응 값이 가장 일정하게 나타난

두께 20 cm의 구간이 선정되었다. ^{137}Cs 인공감마선원을 사용하고, 검층봉(sonde)을 케이싱에 부착시키는 방식으로 수행되었으며 검층속도 1.5 m/min을 기준으로 자료 획득이 이루어졌다.

먼저 케이싱이 없이 공벽에 밀착시킨 상태에서의 검출기별 감마반응을 측정하여 밀도환산식과 이격기준선을 결정하였으며, 이어 이격에 따른 감마반응의 변화를 측정하였다. 이격시험은 케이싱 없이 측정기를 공벽으로부터 이격시키는 단순 이격실험과 케이싱을 사용한 이격시험을 함께 실시하였다. 케이싱 이격 실험에는 동일 재질의 두께 2.5 mm 통케이싱 및 반케이싱이 사용되었으며 케이싱과 동일 재질인 두께 2.5 mm PVC 조각을 이용하여 0 mm, 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm와 12.5 mm 이격된 상태에서 측정 실험을 수행하여 케이싱이격과 단순이격 시험의 결과를 비교할 수 있게 하였다. 이격반응 측정 시 지층조건은 시추공 내의 물의 존재에 상관없이 언제나 물로 포화시킨 상태를 유지시킴으로써 지하수위 상부와 하부 구간, 두 환경에서의 반응특성 차 비교를 용이하게 하였다.

밀도 환산식

물이 빠진 모형시추공에서 공벽밀착 상태에서 획득된 감마반응과 모형밀도의 관계를 플랫폼하였다(Fig. 1). 각 시험체에서의 감마반응은 자연감마보정(김기주 2001)이 수행된 결과이며 시험체의 코어밀도를 상용스케일로 하고 검출기 감마반응을 대수 스케일로 잡아 플랫폼한 결과이다. 긴 간격(Long Spaced Detector; 이하 LSD), 중간 간격(Medium Spaced Detector; 이하 MSD) 및 짧은 간격(Short Spaced Detector; 이하 SSD)으로부터 얻어진 결과가 모두 직선관계의 상관성을 보였으며 이로부터 검출기별 밀도-검출기 반응식을 얻어 각기 식 (1), (2) 및 (3)으로 제시하였다. 각 검출기에서의 감마선 반응식은 $R^2 = 0.98$ 이상의 높은 상관도를 가지고 얻어진 결과로서 이들을 NX시추공의 지하수면 상부구간에서 적용될 밀도 환산식으로 결정할 수 있었다.

$$Y = -0.8745 \times \log_{10}(X) + 4.5529 \quad (1)$$

$$Y = -1.5749 \times \log_{10}(X) + 7.3188 \quad (2)$$

$$Y = -3.2025 \times \log_{10}(X) + 15.1336 \quad (3)$$

이격기준선과 이격오차선

지하수 상부환경에서 이격거리 0 mm의 LSD, MSD, 및 SSD 자료를 Spine and ribs 기법(Scott et al., 1961)에

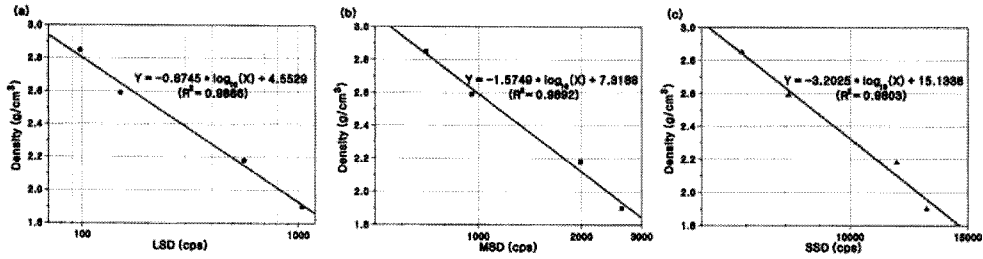


Fig. 1. Calibration equations obtained from test concrete boreholes above ground water table; from LSD (a), MSD (b) and SSD (c) measurements.

따라 양대수 스케일로 플롯하면 Fig. 2와 같이 나타난다. 플롯한 LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), 및 MSD-SSD(c) 산점도로부터 구한 회귀분석곡선을 이격시험에서의 기준선 (이하 이격기준선)으로 삼았다. 물로 포화된 시추공 상태(이성진외, 2008)에 이어 공기로 차 있는 상태에서도 이격기준선은 기존에 알려진 직선관계(Scott, 1977) 보다 곡선관계가 더 측정 결과에 부합하는 것으로 확인 되었으며, 이러한 현상은 특히 선원-검출기 간격이 가장 큰 LSD-SSD 자료(b)에서 현저한 것으로 나타났다. LSD-MSD, LSD-SSD, 그리고 MSD-SSD 자료로부터 구해진 이격기준선은 각기 식 (4), (5) 및 (6)과 같이 나타났다.

$$Y = 0.3753X^2 - 0.5888X + 0.6355 \quad (4)$$

$$Y = 0.3853X^2 - 0.5888X + 0.6355 \quad (5)$$

$$Y = 0.3753X^2 - 0.5888X + 0.6355 \quad (6)$$

한편, 밀도를 달리하는 각 시험공에서 검층봉을 공벽으로부터 거리를 달리하여 이격시킨 상태에서 얻어진 반응값을 밀도기준선의 경우에서와 같이 Spine and ribs 기법에 따라 간격이 긴 검출기 반응값에 대한 짧은 검출기 반응값으로 플롯한 궤적(이하 이격궤적)을 구할 수 있었다. Fig. 3 은 통케이싱 상태에서 지하수위 상부조건에 해당하는 이격시험으로 획득된 LSD, MSD, 및 SSD 검

출기 반응값의 관계를 양대수 스케일로 표시한 것으로 직선에 가까운 이격궤적을 보인다. 밀도 1.44 g/cm³의 PVC, 밀도 0 g/cm³에 가까운 공기, 그리고 밀도 2 g/cm³ 이상의 지층으로 구성되는 뚜렷한 3층 구조에서 측정된 자료에서 지하수면 하부구간에서 얻어진 직선 궤적(이성진 외, 2008)에 비견될 수 있을 정도의 양호한 직선관계의 이격궤적을 보여 주목된다.

이러한 현상은 단순이격시험과 케이싱 이격시험 및 반케이싱 이격시험 등 수행된 모든 이격실험 자료를 함께 올려 비교할 때 더욱 분명해지는데(Fig. 4), LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), 및 MSD-SSD(c) 자료에서 동일밀도의 모든 이격 실험의 결과가 하나의 직선 궤적에 잘 일치하고 있다. 즉, 밀도가 낮고 두께가 얇은 케이싱을 사용하는 한, 통케이싱 이격실험에 의한 이격궤적이 반케이싱 이격실험에 의한 이격궤적과도 일치할 뿐만 아니라 단순이격실험 결과와도 거의 동일함을 보인다. 따라서 이격궤적에서 케이싱 자체의 영향은 무시할 수 있으며 케이싱에 의한 검층봉과 공벽 사이의 이격 효과만으로 케이싱 이격요인을 효과적으로 보정할 수 있는 것으로 판단되었다.

한편 이격 궤적의 기울기는 지층밀도가 클수록 기울기가 증대되는 경향으로 나타난다. 이러한 경향은 이격요차선의 기울기(Y)를 밀도(X)에 대하여 플롯하여 작성된 Fig. 5의 산점도에서 뚜렷이 제시되고 있다. 지하수 상부 및 하부

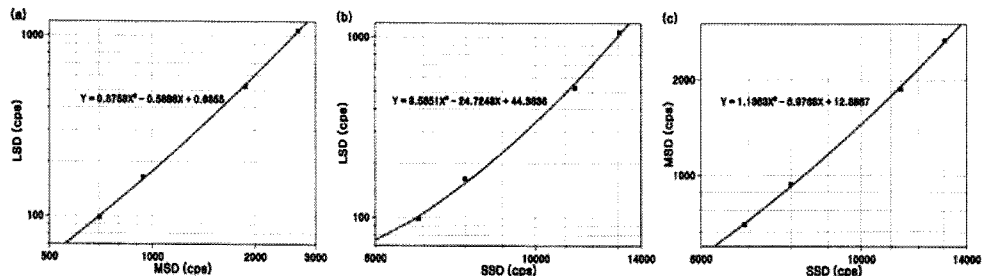


Fig. 2. Determination of spine equation for LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), MSD-SSD(c) data, above ground water table.

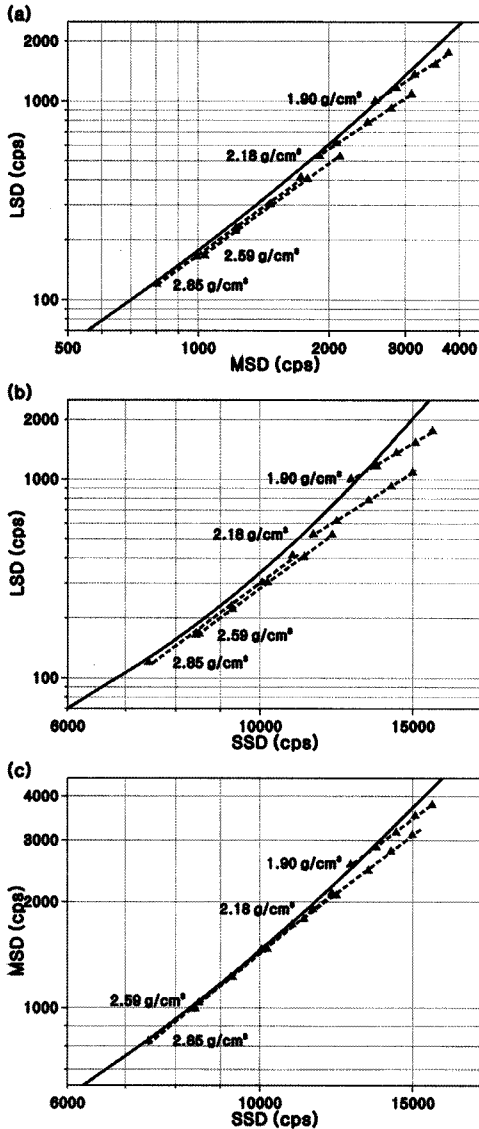


Fig. 3. Trace of ribs obtained from boreholes with a cylindrical PVC casing above ground water table; for LSD-MSD(a), for LSD-SSD (b), and MSD-SSD(c).

구간에서 얻어진 이격오차선 기울기(Y)와 지층밀도(X)와의 관계는 각기 식(7) 및 식(8)로 나타낼 수 있으며, 동일 밀도의 경우 지하수면 하부 구간에 비하여 상부구간에서 이격오차선의 기울기가 현저하게 커짐을 잘 나타낸다.

$$Y = 0.6881 \times X + 1.2275 \quad (7)$$

$$Y = 0.5901 \times X + 0.8209 \quad (8)$$

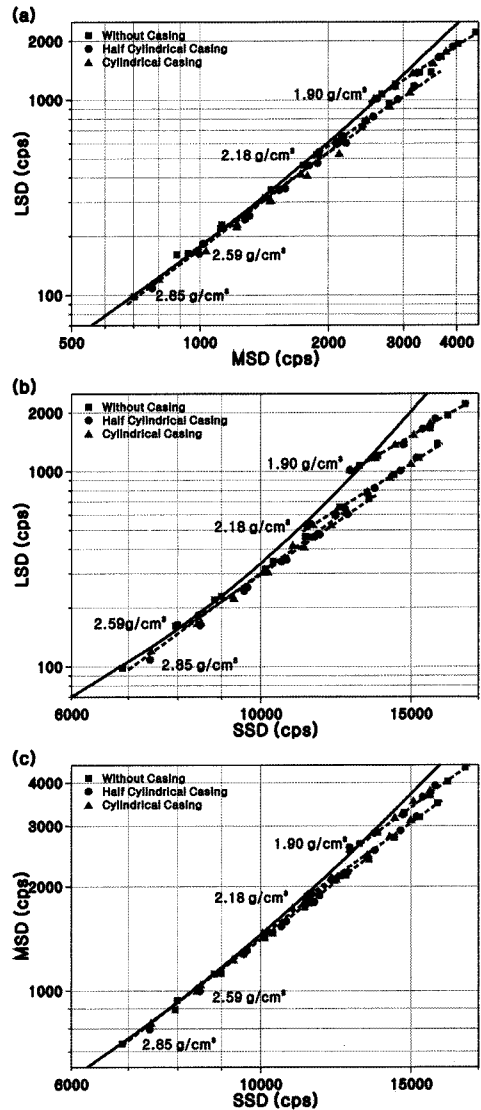


Fig. 4. Composite of rib data obtained from boreholes with different types of casings above ground water table; for LSD-MSD (a), LSD-SSD(b), and MSD-SSD(c).

식 (7)과 (8)은 임의의 밀도에 대한 이격오차선을 결정하게 하며 먼저 결정된 이격기준선과 함께 케이싱 이격오차 보정 차트(이하 이격보정차트) 작성의 토대가 된다.

지하수위 상 · 하부에서의 검출기 반응 비교

지하수위 상부 케이싱 환경에서의 검출기 감마반응값은

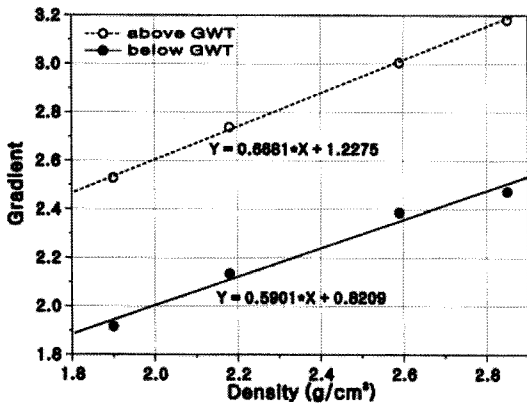


Fig. 5. Crossplot showing the linear relationship between gradient of rib and formation density. Two equations were determined from least square fittings for the values from above and below ground water tables.

지하수위 하부 케이싱 환경에서의 감마반응과 대체로 경향은 유사하나 동일 지층밀도에서 반응값이 크게 나타나는 것으로 설명될 수 있다. 지하수위 상부에서의 감마반응 값 증가 현상은 케이싱이 없는 각 모형시추공에서 공벽에 밀착하여 측정된 감마감마 반응값을 비교한 Fig. 6으로 단순화하여 나타낼 수 있다. Fig. 6에서 제시된 바와 같이 LSD, MSD 및 SSD의 세 검출기 반응은 지하수면 하부환경에서 상부환경으로 변화함에 따라 공통적으로 증가하는

경향을 보인다. 이 결과는 각 검출기 반응이 지층을 통과하는 감마선량과 시추공을 통과하는 감마선량으로 구성되며 공벽 밀착형 측정인 경우에 있어서도 시추공을 통한 감마선 이동이 상당량 포함되고 있음을 보인다.

물이 존재하지 아닐 경우, 지층에 비해 시추공을 통과하여 도달하는 감마선의 비율이 증대하는 현상은 지하수면 상부와 하부 환경에서 별도로 얻어진 밀도환산식을 비교한 Fig. 7에서 더욱 잘 나타나고 있다. 즉 밀도와 검출기 감마반응 값을 크로스 플롯한 결과, 모든 검출기에서 공통적으로 지하수면 상부구간에서 얻어진 자료가 하부구간에서 얻어진 자료의 우측에 존재하며 밀도 증대에 따른 검출기 감마 감쇄의 기울기는 시추공 속의 물의 존재에 관계없이 검출기별로 대체로 동일하게 나타난다. 이는 임의의 밀도에서 지하수면 상부에서의 검출기 감마반응 값이 지하수면 하부에 비하여 일정 크기만큼 증대되는 현상에 일치한다. 이 실험에서는 지하수 상, 하부 상태에 관계없이 지층밀도 조건을 동일하게 유지하였으므로 측정된 감마반응값의 변화는 바로 시추공을 따른 감마선의 이동량 변화에 해당되며, 시추공을 따른 감마선의 이동량 변화는 시추공 내 유체의 밀도 변화가 반영된 것으로 설명될 수 있다.

한편 지하수면 상부와 하부구간에서의 이격기준선을 비교하면(Fig. 8), 모든 형태의 긴 간격·짧은 간격의 조합에서 지하수면 상부에서 얻어진 이격기준선이 하부에서

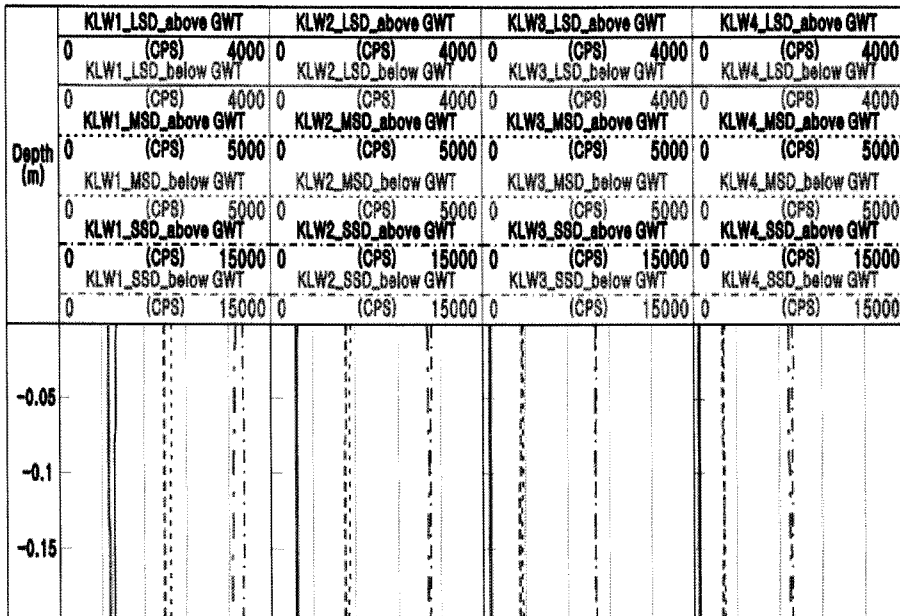


Fig. 6. Gamma-gamma log responses obtained from four model boreholes above and below ground water tables.

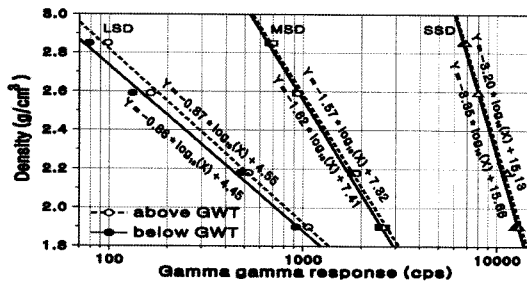


Fig. 7. Comparison of calibration equations between above and below ground water tables.

언어진 이격기준선의 좌측에 존재하는 경향을 보인다. 이는 지하수 상부구간에서 긴 간격 및 짧은 간격의 검출기 감마 반응값이 모두 증대되지만 특히 긴 간격의 검출기에서의 반응값이 더 크게 증대되는 현상으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 지하수면 상부 환경의 시추공에서 감마선의 감쇄 정도가 낮아져 긴 간격으로 갈수록 시추공을 통한 감마선의 이동 부분이 상대적으로 증대되기 때문으로 설명할 수 있다. 지층밀도가 클수록 큰 차이를 보이고 있음 또한 지층을 통한 감마선량이 그만큼 더 감쇄되어 시추공을 따라 이동된 감마선 양이 상대적으로 커진 데 따른 결과로 설명된다.

지하수면 상부구간이 지하수면 하부구간에 비하여 큰 경사의 이격오차선을 가진 것은 이미 제시된 Fig. 5에서 가장 잘 나타나 있다. 이는 시추공에 물이 존재하지 않음으로 해서 생기는 지층과 검출기-공벽 사이의 큰 밀도차가 시추공을 통한 감마선 이동량의 증대를 가져오며 긴 간격의 검출기 일수록 그 상대적 효과가 크게 나타나는 것으로 설명될 수 있다. 이격오차선의 기울기는 지층밀도가 클수록 커지며 특히 지하수 상부 구간, 밀도 2.85 g/cm³ 시형체의 경우, 기울기 증대로 밀도 2.59 g/cm³의 이격오차곡선과 겹치는 현상까지 보인다.

지층밀도에 따라 이격오차곡선의 경사가 변하는 현상은 밀도에 따라 감마선의 감쇄율이 달라지는 현상에, 이격량 변화에 따른 시추공과 지층의 영향 체적 비율의 변화가 복합적으로 작용된 결과로 보인다. 즉, 짧은 간격의 검출기일수록 시추공의 영향을 많이 받는 특성 때문에 이격증대에 따른 감마선량의 변화가 지층 영향을 많이 받는 긴 간격 검출기에서의 이격 증대에 따른 감마선량의 증대 비율 보다는 상대적으로 작게 나타나며 이러한 영향은 지층밀도가 커질수록 심화되어 결과적으로 고밀도 지층에서 이격오차 곡선의 기울기 증대로 연결되고 있다.

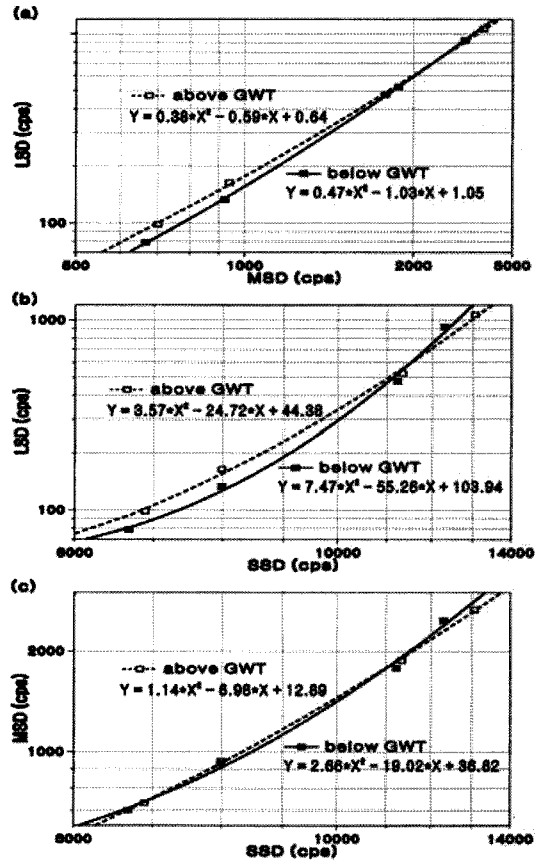


Fig. 8. Comparison of spines between above and below ground water tables.

이격오차 보정차트

이수떡(mudcake) 위에서의 밀도 측정 결과를 보정하기 위한 Spine and ribs 기법(Scott et al., 1961)을 케이싱 이격에 동일하게 적용하여, 이격이 없는 상태에서 이격기준선을 구하고 케이싱 이격 상태에서 이격보정선을 구하여 함께 플롯함으로써 이격오차보정차트(Fig. 9)를 작성하였다. 즉, 이격기준선은 케이싱이 없는 상태에서 검출봉을 공벽에 접촉시킨 상태에서 얻은 긴 거리짧은 거리 검출기의 반응곡선이며 이격보정선은 식 (7)과 (8) 및 이격기준식으로부터 밀도별 이격오차선 방정식을 구하고 그 결과를 도시한 것이다.

제시된 이격오차보정차트(Fig. 9)는 꺾적의 일치 정도가 좋고 이격기준선과 이격오차선이 큰 각으로 만나는 LSD-SSD 산점도 자료로부터 작성된 것이며 지하수면 상부와 하부 구간을 분리하여 작성된 것이다. 이격오차선에서

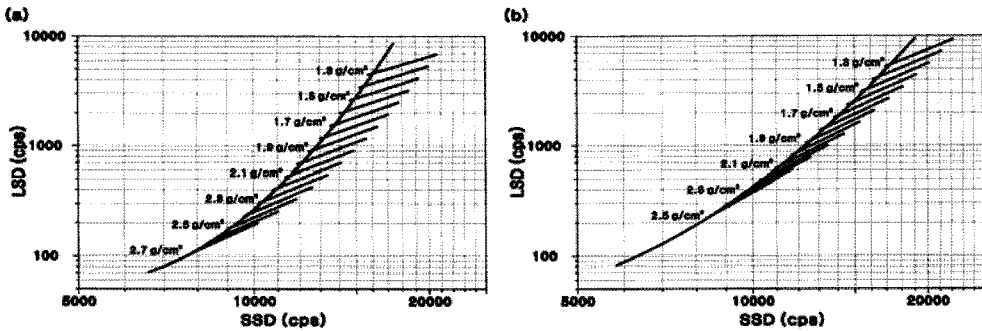


Fig. 9. Standoff compensation chart for PVC cased boreholes for the zones above(b) and below(a) water table; LSD-SSD crossplot.

지하수 하부구간의 경우 밀도 2.7 g/cm³ 범위까지 도시된 반면에 지하수면 상부구간의 경우 2.5 g/cm³ 범위까지 제시되었다. 이는 고밀도 구간, 특히 지하수 상부의 고밀도 구간에서 이격기준선과 이격오차선간의 기울기 차가 감소되고 이격오차선 간의 구분이 곤란하여 보정의 신뢰성이 확보되지 않았음을 고려한 결과이다.

이격보정의 효과와 한계

이격보정의 효과를 분석하기 위하여 Fig. 9의 이격보정 차트를 사용하여 이격실험이 이루어진 모형시추공 KWL-1, 2, 3, 4에서의 자료에 대한 자체 보정을 수행하였다. 지하수 상부와 하부 구간에서의 보정효과를 비교하였으며 보정 밀도와 미보정밀도의 비교 및 지층밀도와 보정의 효과에 대한 분석이 이루어졌다.

Fig. 10은 지하수위 상부와 하부 구간에서의 보정 밀도와 미보정밀도를 비교한 것으로 일관성 있는 비교를 위하여 모든 밀도를 공벽밀착상태에서 얻어진 밀도(이하 지층밀도)에 대한 상대밀도(normalized density)로 나타내었다. 이격의 크기가 증대함에 따라 미보정 밀도값이 지층밀도에 비하여 낮아지는 경향을 잘 보인다. 아울러 지층밀도가 크고 시추공 유체 밀도가 작을수록 코어밀도와 미보정 밀도간의 값의 차이가 커짐을 보인다. 이와 같은 경향은 지하수위 상, 하부의 구분에 관계없이 공통적으로 나타났다.

한편 이격거리에 따른 보정밀도 값의 변화 경향은 지하수면 상, 하부 구간에 따라 매우 다르게 나타났다. 지하수 하부구간에서는 지층밀도 값의 높고 낮음에 크게 관계 없이 오차범위 1.5% 이내의 정밀 보정이 가능한 것으로 나타났다. 지하수면 상부구간의 경우는 저밀도 공(KLW-1, KLW-2)에서 나타나는 보정밀도 - 지층밀도 간의 좋은 일

치와 고밀도(KLW-3, KLW-4)에서 나타나는 상당한 불일치가 대조를 보인다. 즉, 2.18 g/cm³ 이하의 저밀도 지층에서 오차범위 2% 이내의 보정밀도를 얻은 반면에 2.59 g/cm³ 이상의 고밀도공에서의 보정에서는 최대 18%까지의 큰 오차가 포함되는 것으로 나타난다. 분석 결과 비교적 이격보정의 적용이 무난한 범위를 지층밀도 2.35 g/cm³까지로 결정하였다.

결론

먼저 모형 시추공 내에서 획득된 감마반응과 모형밀도의 관계로부터 지하수면 상부 구간에서 적용 가능한 밀도 환산식을 결정할 수 있었으며 이격거리 0mm의 LSD, MSD, 및 SSD 자료를 Spine and ribs기법에 따라 풀롯한 후 그 회귀분석 곡선으로부터 이격기준선을 결정하였다. 기존의 직선관계보다는 곡선 관계의 이격기준선이 측정 결과에 더 부합함을 확인하였으며 특히 소스-검출기 간격이 가장 큰 LSD-SSD 자료에서 현저한 것으로 나타났다. 이격오차는 저밀도에서 양호한 직선의 궤적을 보인 반면에 고밀도에서는 약간의 궤적 불일치 현상을 보였다. 궤적의 불일치는 검출기 간 거리 차가 작은 조합일수록 커지는 경향을 보인다. 또한 거리 차가 작은 조합의 산점도로 갈수록 이격기준선과 이격오차선이 만나는 각도가 작아지는 경향까지 나타나 이격보정에서 검출기 간 거리차가 가장 큰 LSD-SSD 자료의 이용이 가장 바람직한 것으로 나타났다.

지하수위 상부와 하부에서의 검출기 감마반응값의 경향은 대체로 유사하나 지하수위 상부 환경에서 전반적인 반응값 증대가 나타났다. 감마반응 값의 증대는 바로 지하수위 변동에 따른 시추공 내 유체의 밀도 변화만큼 시추공을 따른 감마선의 이동량이 증대된 것으로 설명되며 이는

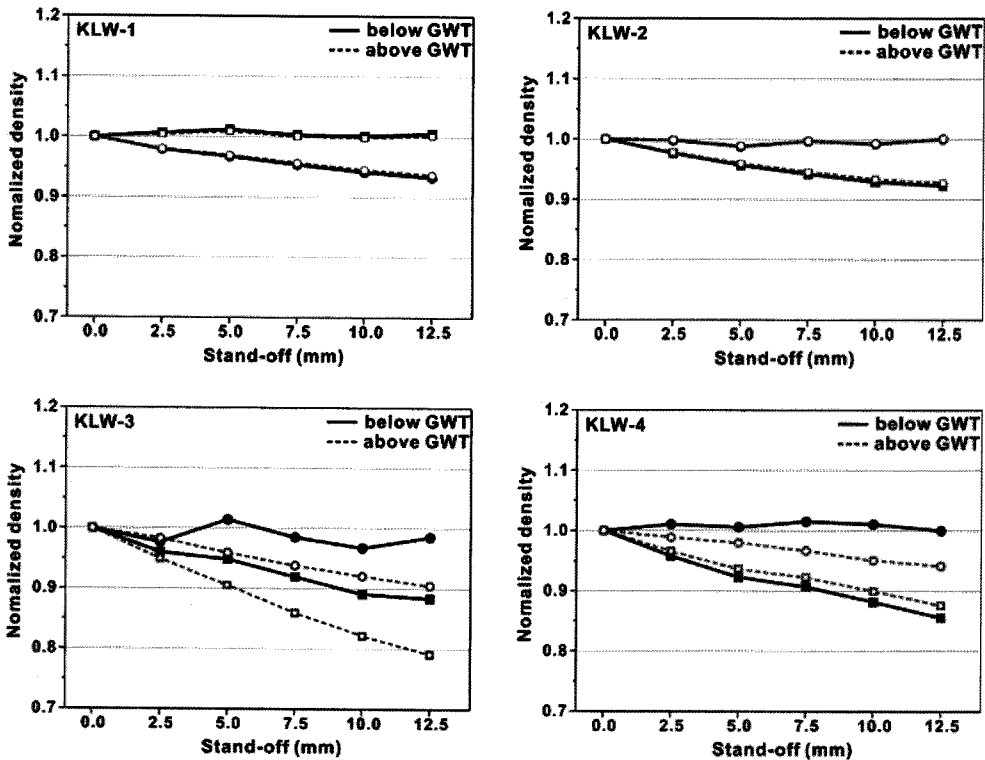


Fig. 10. Comparison between log densities before and after the stand-off correction in low(a), medium(b), high(c) and very high(d) density models with a cylindrical PVC casing in air. Log density is normalized to the formation density. Square and circle represent densities obtained before and after standoff compensation, respectively.

공벽밀착형 밀도측정의 경우에도 각 검출기에서의 감마 반응이 지층을 통한 감마이동 외에 상당량의 시추공 통과 부분이 있음을 보인다. 이격기준선 비교에서도 간격 및 짧은 간격의 검출기 모두 지하수면 상부 구간에서 검출기 반응값의 증대가 관찰되었으며 특히 큰 긴 간격의 검출기에서의 반응값 증대가 현저한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 지층을 통한 감마선 감쇄가 큰 반면에 시추공을 통하여 전달되는 감마선의 감쇄가 상대적으로 작아 긴 간격일수록 시추공의 감마선 통과 역할이 증대되며, 지층밀도가 클수록 지층을 통한 감마선량은 그만큼 더 감소되어 상대적으로 시추공을 따른 감마선 이동 비율이 커지는 것과 연관시켜 설명되었다.

이격오차선에서도 지하수면 하부에 비하여 상부 구간에서 큰 경사의 이격오차선이 얻어졌다. 이격 오차선의 경사는 지층밀도에 비례하는 것으로 나타났다. 이에 대해서는 시추공 유체와 지층 간의 밀도 차와 연관된 시추공과 지층의 감마 감쇄율, 그리고 짧은 간격과 긴 간격 검출기에서의 이격에 따른 시추공 영향체적과 지층 영향체적의

비율 변화에서 이론적 근거를 찾을 수 있었다.

제시된 지층밀도와 이격오차선의 기울기 상관관계로부터 밀도별 이격오차선 기울기를 결정하였으며 이격기준선과의 연립방정식 해법에 의하여 이격오차를 나타내는 방정식을 결정하고 이를 이격보정선으로 도식하였다. 지하수 상부와 하부 구간에서 각기 밀도 2.5 g/cm³와 2.7 g/cm³ 이내의 범위에서 이격보정선이 작성되었으며 여기에 이격기준선을 함께 표시함으로써 이격오차보정차트가 작성되었다. LSD-SSD 산점도 자료가 이용되었으며 지하수면 상부와 하부 환경으로 구분하여 제시되었다.

끝으로 이격보정의 효과 분석을 위한 자체 검증을 위하여 모형시추공에서의 측정자료에 이격보정차트를 적용한 결과, 지하수위 상부 구간과 하부구간 모두에서 이격의 크기가 증대함에 따라 미보정 밀도값이 감소하며 그 감소의 폭은 지층밀도가 클수록 커지는 현상을 확인하였다. 지하수면 하부에서는 밀도 2.59 g/cm³ 이하의 대부분의 구간에서 오차범위 2% 이내의 비교적 정밀한 보정이 가능한 것으로 나타난 반면에 지하수면 상부구간에서는 2.35 g/cm³ 이

상의 고밀도공으로 갈수록 오차가 급격히 증대하는 것으로 나타나 고밀도 공에서의 케이싱 보정에 매우 세심한 주의가 필요함을 보였다.

참고문헌

- 김기주, 2001, 밀도 검층에서의 보정계수 산출을 위한 기초실험과 자연감마 보정, 강원대학교, 이학석사학위 논문, 30-45.
- 김영화, 김기주, 임헌태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검층 검출기 보정에 관한 기초연구, 지구물리, 7, 237-245.
- 김영화, 김지훈, 이성진, 2006, 케이싱 환경에서의 밀도자료 보정을 위한 기초연구, 대한지질공학, 16, 429-435.
- 김지훈, 2006, 밀도검층의 효과적인 현장적용을 위한 모형시추공 건설과 밀도검출기 보정에 관한 기초 연구, 강원대학교, 이학석사학위논문, 18-34.
- 이성진, 김영화, 황병철, 2008, 소구경 플라스틱 케이싱 공에서의 밀도검층 보정실험, 대한지질공학, 18, 137-144.
- 황세호, 이상규, 1999, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출, 한국지구물리학회 1999년도 제2회 학술발표회, 161-162.
- Mickael, M. W., 2003, Standoff compensation for nuclear measurements, United States Patent, Patent No. US 6590202 B2.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/Applications, Schlumberger Educational Services, Houston, 13-19.
- Schneider, D. M., Efremov, S. V., and Sale, M. J., 2006, Method of processing data from a dual detector LWD density logging instrument coupled with an acoustic standoff measurement, United States Patent, Patent No. US 7129477 B2.
- Scott, J. H., 1977, Borehole compensation algorithms for a small-diameter, dual-detector density well-logging probe, SPWLA Eighteenth Annual Logging Symposium, S, 431.
- 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.

2009년 5월 3일 원고접수, 2009년 6월 16일 게재승인

김영화

강원대학교 지구물리학과
200-701-강원도 춘천시 퇴계동 강원대길 1
Tel: 033-250-8582
Fax: 033-244-8580
E-mail: yhkim@kangwon.ac.kr

황병철

NIS 컨설턴트(주)
431-810 경기도 안양시 동안구 관양2동 1503-3
Tel: 031-423-6161
Fax: 031-426-4121
E-mail: choly007@naver.com

박성근

강원대학교 지구물리학과
200-701-강원도 춘천시 퇴계동 강원대길 1
Tel: 033-255-5417
Fax: 033-244-8580
E-mail: butterbear22@kangwon.ac.kr

김종만

강원대학교 지구물리학과
200-701-강원도 춘천시 퇴계동 강원대길 1
Tel: 033-255-5417
Fax: 033-244-8580
E-mail: jm9899@kangwon.ac.kr