

## 케이싱 환경에서의 밀도자료 보정을 위한 기초연구

김영화<sup>1\*</sup> · 김지훈<sup>1</sup> · 이성진<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과

<sup>2</sup>(주)아시아지오컨설턴트

### A Preliminary Study on Correction for Density Log in Cased Boreholes

Yeonghwa Kim<sup>1</sup>, Ji Hoon Kim<sup>2</sup>, and Seungjin Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Deptment of Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>Asia Geo-Consultant Co. Ltd.

케이싱 시추공 구간의 밀도검층에서 정확한 밀도 값의 산출을 위한 기초연구의 일환으로 세 종류의 서로 다른 밀도를 가진 보정 실험공에서 공벽과 검출기 간의 이격 거리를 달리하면서 세 가지 다른 검출기 읍셋 거리에 따른 반응 값의 변화를 알아보았으며 과거 석유 검층에서 이수 보정에 활용되어 온 spine and ribs 기법을 활용함으로써 케이싱 속에서의 감마감마 측정치로부터 지층의 참 밀도를 찾아가는 효과적인 방안을 제시하였다.

**주요어** : 밀도검층, 보정, 케이싱, 감마감마, 이격

A preliminary study was made for density correction for the effect of separation between sonde and borehole wall due to the existence of casing in a borehole. Firstly, series of gamma-gamma measurements were obtained with 3 different separations in 3 different density models constructed in Kangwon National University. Secondly, density correction charts were made based on the 'spine and ribs' technique in mud cake correction. Using these charts, we could determine effectively the true density from the measurement in the thinly cased borehole.

**Key words** : density log, correction, casing, gamma gamma, separation

## 서 론

밀도 측정 방법은 크게 밀도검층으로 구하는 방법과 실험실에서의 코어 측정법으로 나누어 생각할 수 있다. 그 중에서 밀도검층은 지층의 원위치 특성을 그대로 반영하는 매우 효과적인 현장 원위치 시험법이다. 밀도검층은 감마 선원으로부터 방출되어 암석 속의 전자와 반응하여 콤프턴 산란을 일으키면서 검출기에 도달하는 감마선의 크기가 암석의 전자밀도의 함수로 나타나며, 궁극적으로 체적 밀도의 함수(Schlumberger, 1989)가 됨을 이용한다. 따라서 밀도를 구할 때 감마선량과 매질의 검출기 반응 특성(Pickell and Heacock, 1960; Hearst and Carlson, 1969; Flaum *et al*, 1987), 시추공경

(Tittman and Wahl, 1965), 자연감마(김영화, 김기주, 1999; 김영화 외, 2000), 지하수위 및 케이싱 여부(김지훈, 2006)등 많은 요소들의 영향을 보정해야 한다는 문제점이 있다. 그러나 이러한 문제점들은 국내에서도 이미 많이 해결되었으며(김기주, 김영화, 1999; 황세호, 이상규, 1999) 특히 검층 보정용 모형 시추공을 활용한 기초 밀도 보정식의 산출과 현장 자료의 비교 검토를 통한 연구(김영화 외, 2004) 등을 통해서 해결 방안이 제시된 상태로서 최소한 나공 상태에서 실시되는 밀도 검층에서는 더 이상 문제가 되지 않는다고 할 수 있다. 그러나 최근에 와서 철 케이싱, 플라스틱 케이싱, 투명관 등 다양한 형태의 케이싱 공에서 밀도검층이 이루어지는 경우가 증가되고 있어, 정확한 밀도 산출에 있어서

\*Corresponding author: yhkim@kangwon.ac.kr

의 문제점으로 대두하고 있다.

이러한 관점에서 케이싱 시추공 구간의 밀도검층에서 정확한 밀도 값의 산출을 위하여 세 가지의 서로 다른 밀도 구조로 이루어진 물리검층 보정 실험공에서 공벽과 검출기 간의 이격 거리를 달리하면서 세 가지 다른 검출기 읍셋 거리에 따른 반응값의 변화를 알아보았으며 여기에 과거 석유검층의 이수 보정에 활용되어온 spine and ribs 기법(James and Scott, 1977; Scott et al, 1961)을 활용함으로써 케이싱 속에서의 감마감마( $\gamma\gamma$ ) 측정치로부터 지층의 참 밀도를 찾아 가는 효과적인 방안을 연구하였다.

**보정용 시추공**

본 연구가 진행된 곳은 강원도 춘천시 효자 2동 강원대학교 자연과학대학 2호관 옆에 설치된 지구물리검층 보정 시설이다. 이 연구를 위한 검층 보정 시험공은 3개의 NX 구경의 시추공인 K LW-3, K LW-4 및 K LW-5로서(Fig. 1) 각기 밀도가 1.714 g/cm<sup>3</sup> (저밀도 모델), 2.046 g/cm<sup>3</sup> (중밀도 모델) 및 2.572 g/cm<sup>3</sup> (고밀도 모델)인 시험체 내에 위치하고 있다. 깊이 약 5m의 시추공 중에서 심도 2.3 m와 4 m 사이의 1.76 m 구간

이 보정 시험에 사용되었다. Fig. 1에서 제시된 바와 같이 시추공은 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. 보정용 시추공에 대한 더 자세한 정보는 김영화의(2004) 및 김지훈의(2005) 및 김지훈(2006)을 참고 할 수 있다.

**자료획득**

기본적인 실험 진행은 측정기와 공벽 사이의 이격이 측정값에 어떠한 영향을 미치는지를 알기 위하여 밀도 분포를 알고 있는 강원대학교 캠퍼스 내 보정 시험공 K LW-3, 4 및 5(김영화 외, 2004)에서 이격량을 조절하면서 감마감마 측정값의 변화 양상을 살펴보는 방법으로 이루어졌다. 측정에 쓰인 장비는 영국의 Robertson Geologging사에서 개발한 Micrologger II 검층 시스템으로 실험은 일반적인 감마감마검층 방법에서와 동일하게 137Cs 인공감마선 선원을 사용해 공벽에 부착시키는 (side wall) 방식으로 수행되었다. 측정에 적용된 이격량은 0 mm, 6 mm와 12 mm의 세 가지 종류를 적용하였으며 이격을 위해서 밀도 검출기의 공벽과 맞닿는 면의 두 곳에 6 mm 두께의 PVC 조각을 부착하는 방법을 사용하였다. 즉 PVC 조각이 없는 상태(이격량 0 mm)에서의 측정으로부터, PVC 조각을 하나 또는 두 개를 부착함으로써 공벽과 검출기 사이가 6 mm 및 12 mm 떨어진 상태에서 측정이 될 수 있게 하였다. PVC 붙임 조각은 센서의 반응 값에 주는 영향을 최소화 할 수 있는 위치에 부착되었다(Fig. 2). Fig. 2에 나타난 바와 같이 측정에 이용된 밀도 검층기에는 선원(source)으로부터 각기 다른 거리에 설치되어 있는 3개의 검출기가 있으며 거리가 짧은 곳에 위치한 검출기부터 그 이름을 SSD(short spaced detector), MSD(medium spaced detector) 및 LSD(long spaced detector)로 명명되었다. 따라서 공벽으로부터의 이격량을 달리한 상태에서 감마

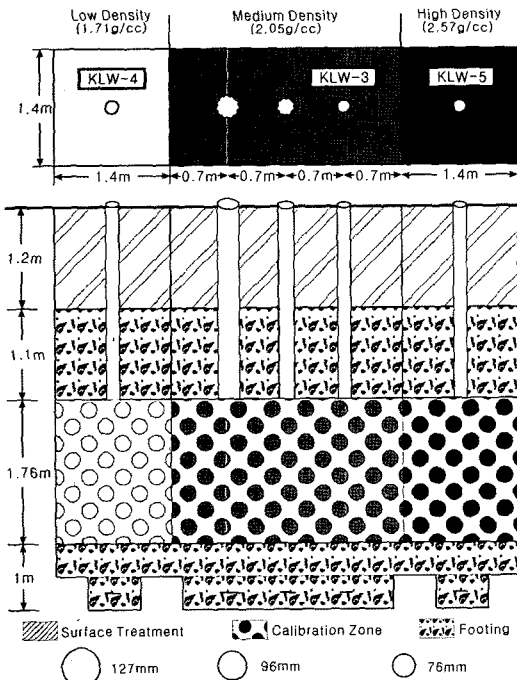


Fig. 1. Schematic view of model boreholes.

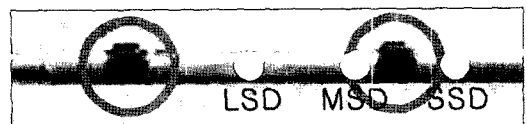


Fig. 2. Density sonde installed with two separators (circled). Locations of long spaced (LSD), medium spaced(MSD) and short spaced(SSD) detectors are shown with small circles.

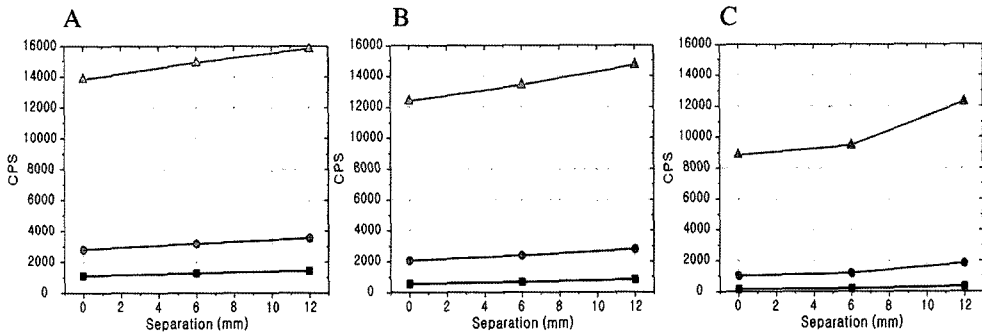
감마 측정을 실시하고 각 이격 거리에서 얻어진 SSD, MSD 및 LSD 자료들을 서로 비교함으로써 이격에 따른 SSD, MSD 및 LSD 값의 변화 특성을 추적하는 방식으로 진행되었다. 자료의 획득은 시험 구간의 중간 지점에 해당되는 심도 3.3m에서 이루어졌으며 시간 조절(time mode) 방식으로 측정되었다. 자료 획득에 사용된 소프트웨어는 Winlogger, 자료 처리에는 Viewlog 시스템이 사용되었다.

**이격거리에 따른 감마 반응값의 변화**

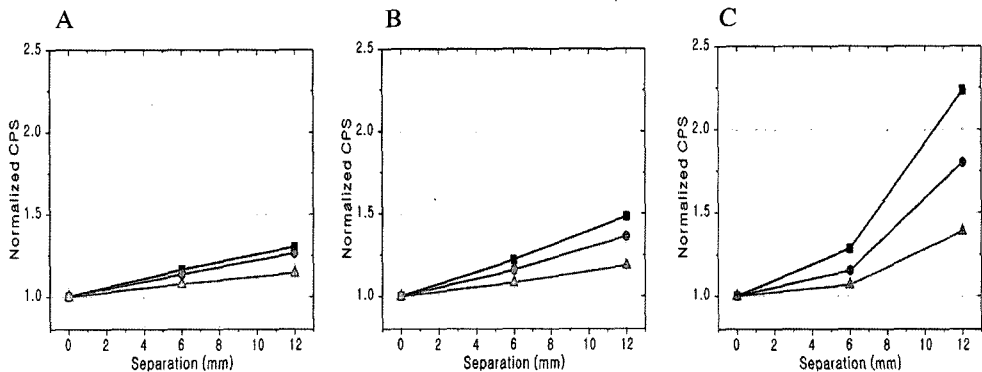
Fig. 3은 밀도가 알려져 있는 3개의 시추공인 KLV-4, 3 및 5공에서 측정기를 지층으로부터 각기 0mm, 6mm 및 12mm 이격시킨 상태에서 얻어진 감마감마 측정 결과로서, 실험 구간 내에서 SSD, MSD, LSD 검출기 반응값들의 변화 경향을 보여준다. 즉 Fig. 3(A)는 저밀도 모델에서의 실험 결과로서 이격 거리가 증가함

에 따라 SSD, MSD, LSD값 모두가 좋은 선형의 증가 경향을 보이고 있다. Fig. 3(B)는 중밀도 모델에서의 실험 결과로서 마찬가지로 이격 거리가 증가함에 따라 SSD, MSD, LSD값 모두가 여전히 선형적인 증가 경향을 보이고 있다. Fig. 3(C)는 고밀도 모델에서의 실험 결과로서 이격 거리가 증가함에 따른 SSD, MSD, LSD 값이 증가되는 경향이 앞의 두 경우(A 및 B)에서와 동일하나 상용 스케일에서의 선형적 특성을 벗어나 대수, 또는 반대수 스케일 적용의 필요성을 시사하고 있다.

Fig. 3에서 나타나는 또 하나의 특성은 밀도가 증가함에 따라 SSD, MSD 및 LSD값이 감소하여 이격량이 커짐에 따라 감마 반응 값이 작아지는 것처럼 보인다는 것이다. 그러나 이는 어디까지나 밀도 증가에 따른 감마 감마 반응값의 감소에 따른 결과로서 각 이격 거리에서의 반응값을 이격 거리가 없을 때(0 mm)의 반응값에 대하여 정규화(normalization)한 결과(Fig. 4)에서 나타나는 반대 현상으로 잘 설명될 수 있다. 즉, 이격되



**Fig. 3.** Sonde responses obtained from different separation between detector and borehole wall in low(A), medium(B) and high(C) density model holes. Square, circle and triangle represent LSD, MSD and SSD data, respectively.



**Fig. 4.** Sonde responses normalized to the response obtained with 0 mm separation. Other figure explanations are the same as in Fig. 3.

지 않은 상태에서의 SSD, MSD 및 LSD 값을 각각 1로 삼고 이격 거리가 6 mm, 12 mm로 점점 커짐에 따라 나타나는 비율의 변화를 플랫폼 한 경우, 저밀도 모델(A)에서 중밀도 모델(B), 그리고 고밀도 모델(C)로 갈수록 감마값의 비율이 뚜렷이 증가함을 보여주고 있다.

이격 거리가 커질수록 감마 반응값이 일정한 비율로 증가하는 현상은 Fig. 3과 Fig. 4에서 공통적으로 나타나는 현상이지만 특히 Fig. 4에 의하면 이격 거리의 증가에 따른 SSD, MSD 및 LSD 반응 값은 모두 선형적인 증가 경향을 보이며, 측정 대상체의 밀도가 클수록 대수 스케일의 적용이 보다 효과적일 것으로 나타났다.

### Spine and Ribsp 기법의 적용

앞에서의 각 밀도에서의 이격 거리에 따른 반응 값의 변화 경향은 이수 보정을 위하여 제시된 spine and ribs 기법의 적용 가능성을 시사하고 있다. 따라서 본 연구에서는 소스로부터 긴 거리 검출기 반응 값에 대한 짧은 거리 검출기 반응 값의 관계를 추적하였으며 그 결과가 Fig. 5에서 Fig. 7까지에 제시되어 있다. Fig. 5는 종축과 횡축에 각기 MSD와 SSD 자료를 이용하여 산점도(scatter plot)로 표시한 것이며, Fig. 6은 LSD와 MSD, Fig. 7에서는 LSD와 SSD 자료의 산점도이다.

Fig. 5에서 7까지의 그래프에서 공통적으로 대각선 방향을 가로지르는, 즉 spine and ribs 기법에서의 spine과 같은 형태의 직선은 이격이 없을 때의 측정에서 각 검출기 반응 값들의 관계를 추적한 것이다. 즉 세 밀도 모델에서의 긴 거리 검출기와 짧은 거리 검출기의 반응

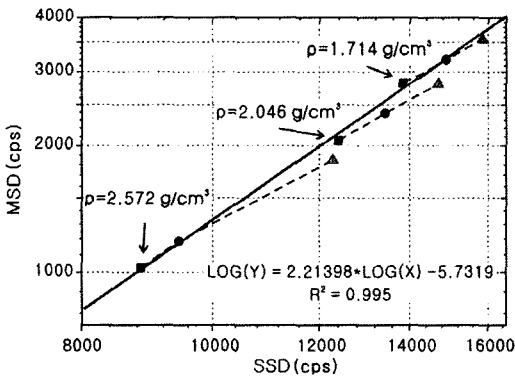


Fig. 5. Density correction chart for MSD-SSD data. Solid and dotted lines correspond to the spine and rib, correspondingly.

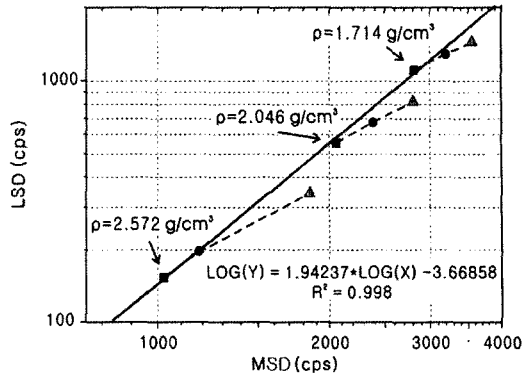


Fig. 6. Density correction chart for LSD-MSD data. Solid and dotted lines correspond to the spine and rib, correspondingly.

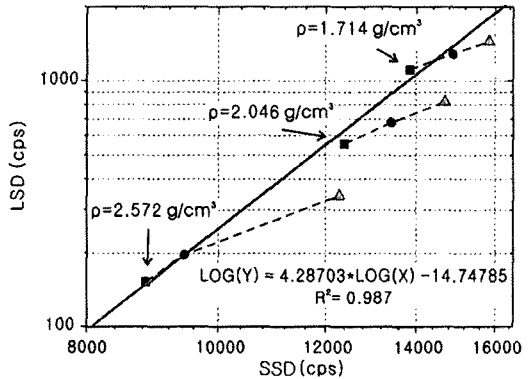


Fig. 7. Density correction chart for LSD-SSD data. Solid and dotted lines correspond to the spine and rib, correspondingly.

값에 대한 상관식(regression equation)을 구하고 이를 각 그래프에서의 기준선(이하 기준선)으로 삼았다. 기준선을 위한 상관식 결정에서 R2 값이 모두 1에 접근하는 매우 높은 상관을 보였다 이 기준선은 김영화의(2004)의 연구 결과를 이용하여 밀도 기준선으로 활용할 수 있었다.

기준선에서 더 기울어져 rib 형태의 점선으로 표시된 것은 이격 거리를 0 mm, 6 mm 및 12 mm로 변화시키면서 측정된 각 감마 반응값의 제적(이하 이격선)이다. Fig. 5에서는 두 검출기 간 거리가 135 mm인 MSD와 SSD 자료로부터 그린 이격선이 나타나 있으며 Fig. 6에서는 두 검출기 간 거리 200 mm의 LSD-MSD, 그리고 Fig. 7에서는 두 검출기 간 거리 335 mm의 LLD-SSD

자료로부터 그려진 이격선이 나타나 있다. MSD-SSD, LSD-MSD 및 LSD-SSD의 세 경우 모두 이격선의 기울기가 일정한 경향성을 보인다.

아울러 제시된 각 그래프 내에서는 이격이 커질수록 이격선이 기준선에서 멀어지는 경향이 잘 나타나고 있다. 즉, 검출기 사이의 offset 거리를 기준으로 볼 때 offset 거리가 가장 짧은 경우(MSD-SSD)에서, 기준선과 이격선이 이루는 각이 가장 작게 나타나는 반면에 offset 거리가 긴 경우(LSD-SSD)로 갈수록 기준선과 이격선이 이루는 각도가 더 커지는 현상을 보이고 있다. 이는 검출기 간의 offset 거리에 의한 영향이 정상적으로 반영된 결과로서 일반적인 보정인 경우 offset 거리가 큰 LSD-SSD 또는 LSD-MSD 자료를 이용하는 것이 자료의 안정성 측면에서 유리할 것임을 시사하고 있다.

### 현장 밀도자료를 이용한 보정

밀도검층에서의 이격에 따른 보정은 먼저 앞에서 만들어진 밀도 보정 차트(density correction chart) 위에 현장에서 얻어진 각 검출기 센서들의 반응값을 표시하는 방법을 이용하여 수행되었다. 즉, 각 측정에서 이격선의 기울기를 따라 평행 이동시켜 기준선과의 교점을 구하였으며, 각 교점에서의 반응값이 나타내는 밀도 값으로부터 보정된 밀도를 구할 수 있었다(Fig. 8). 전체

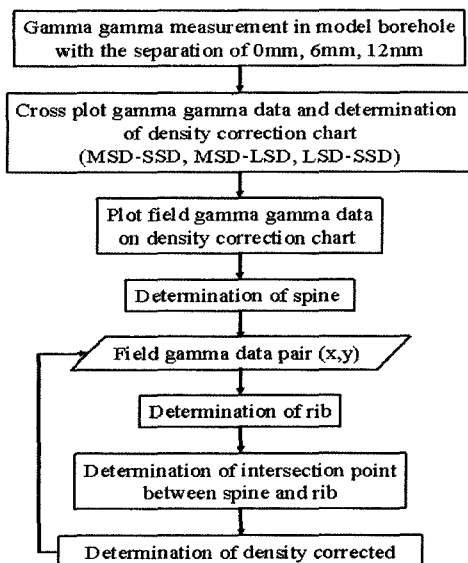


Fig. 8. Flow chart showing the procedure of density correction for separation between sonde and borehole wall.

시추공에서의 밀도 보정은 이와 같은 과정을 모든 심도의 감마감마 자료에 적용함으로써(Fig. 8) 이루어졌다.

아울러 본 연구에서는 각 심도별 보정을 일괄적으로 구할 수 있는 해석학적 접근 방법이 함께 시도되었다. 이는 임의의 감마감마 측정 자료의 x, y점을 지나면서 이격선의 기울기를 가지는 직선 방정식을 결정하고, 기준선과 이격선의 두 연립방정식을 풀어 교점 및 보정 밀도를 구하는 방법으로 이격선의 방정식 결정이 이 방법의 핵심이다. 측정점 이격식의 결정을 위하여 Fig. 9 와 Fig. 10에서와 같이 먼저 각 이격선에 대한 회귀방정식을 구하였다. Fig. 9와 10에 표시된 각 3조의 이격선은 모두 도학적으로는 거의 동일한 기울기를 가진 것으로 나타나나 회귀 방정식으로 나타나는 실제의 기울기는 밀도 값의 증가에 따라 함께 커지는 경향을 보였다. 단순화를 위하여 본 연구에서는 밀도별 이격선의 기울기 평균값을 사용하고 각 측정별 좌표를 이용하여 측정점별 이격선의 방정식을 결정하였다.

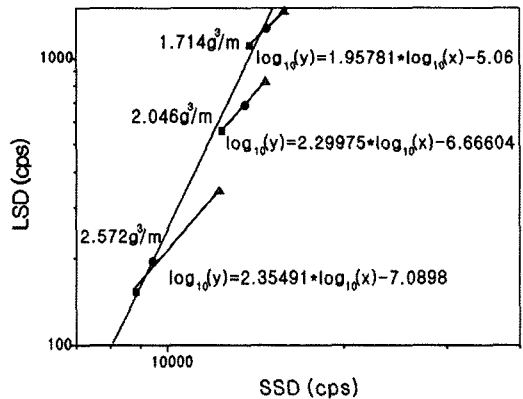


Fig. 9. Determination of rib equations for LSD-SSD data.

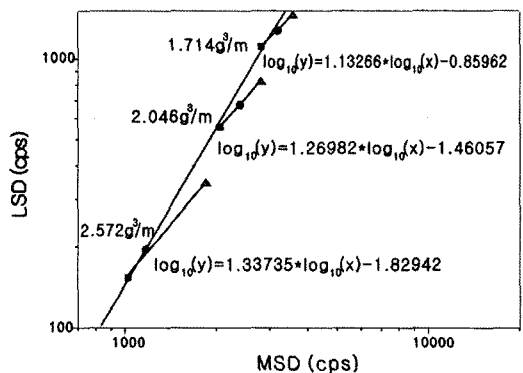


Fig. 10. Determination of rib equations for LSD-MSD data.

이격 실험 자료의 분석에서 offset 거리가 큰 상태에서 얻어진 자료를 이용하는 것이 안정성 측면에서 유리한 것으로 나타났음을 감안하여 LSD-SSD 관계(Fig. 9)를 이격 보정의 기준으로 삼았으며 비교를 목적으로 LSD-MSD 관계(Fig. 10)도 함께 적용하여 보았다. Fig. 11은 엑셀을 이용하여 상기의 과정을 거쳐 얻어진 현장 밀도 보정의 한 결과로서, PVC로 처리된 봉적층, 풍화토 및 풍화암 구간에 이르는 심도 20미터까지의 자료를 보정한 것이다. 이 결과는 NX 규격으로 굴진된 시추공에서 내경 70 mm 두께 3 mm의 PVC 케이싱 상태에서 얻어진 것으로 보정된 자료와 비보정 자료 밀도 차이는  $0.1 \text{ g/cm}^3$ 에서 최대  $0.2 \text{ g/cm}^3$ 에 이르는 밀도 차이를 보여주고 있다. 특히 밀도 차이가 많이 나는 심도 약 9 mm에서 12 mm까지의 구간은 굴진 및 케이싱 작업 중에 공벽 유실(wash-out)이 많이 되었거나 PVC 케이싱이 비이상적으로 공벽과 멀리 떨어진 구간으로 판단된다. 이 시추공에서 현장 흙 밀도에 대한 직접 밀도 측정 자료를 얻을 수 없어 보정된 검층밀도와와의 비교는 이루어지지 못하였다. 그러나 LSD-MSD 자료를 이용한 결과와 LSD-SSD 자료를 이용한 결과의 비교에서 일부 구간을 제외한 대부분의 경우 거의 동일한 결과가 얻어져 일단 밀도 보정에서 최소한의 신뢰성은 확보된 것으로

판단하였다.

## 결론

시추공의 전부 또는 일부 구간에서 아크릴, PVC 또는 철 케이싱 등이 설치되어 있을 때의 공벽-측정기 사이의 불규칙적인 이격에 의한 오차 보정을 목적으로 이수 환경의 석유 검층에서 적용되어온 spine and ribs 기법의 적용을 시도하였다. 먼저 밀도를 달리하는 3개의 모형 보정공을 이용한 측정과 분석 결과, 효과적인 보정용 차트가 제시되었다. 현장 보정은 만들어진 밀도 보정 차트(density correction chart) 위에, 현장에서 얻어진 각 검출기 센서들의 반응값을 플롯한 후, 이격선의 기울기를 따른 평행 이동에 의하여 기준선과의 교점을 구하고, 각 교점에서의 반응 값이 나타내는 밀도 값으로부터 보정된 밀도를 구할 수 있음을 보였다.

한편 보정 차트를 이용하는 방법에서 나타나는 각 심도에서의 별도 보정의 번거로움을 해결하기 위하여 임의의 측정 점을 지나는 이격선의 식을 결정하고, 기준선 식과의 연립방정식을 풀으로써 각 심도별 보정을 일괄적으로 할 수 있는 해석학적 보정 방법이 함께 적용되었다. 이격식 결정은 모형실험에서 얻어진 이격선의 기울기와 측정 점 좌표를 이용한 직선 식으로 결정할 수 있었으며 안정성 측면에서 상대적으로 유리한 것으로 나타난 LSD-MSD 및 LSD-SSD 자료가 사용되었다. 본 연구에서 이격선의 기울기는 세 밀도 값에서의 기울기 평균값을 적용함으로써 편의성과 정확성 측면에서 긍정적인 보정 결과를 얻은 것으로 판단되었다. 이 방법은 토목 현장에서 많이 관찰되는 PVC 시추공에서 바로 적용함으로써도 밀도 값의 정밀도 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서 얻어진 보정 차트는 케이싱이 없는 상태에서의 이격 실험의 결과로서 얇은 PVC 케이싱 등에서는 그 영향을 무시 가능하다는 전제 하에서 실험이 이루어졌다. 따라서 이 부분은 케이싱을 사용한 직접 보정 실험의 결과와 비교할 필요가 있으며 이러한 관점에서 현재 추진 중인 케이싱을 이용한 보정 실험 결과가 나오면 케이싱 보정에 대한 보다 확실한 해결이 가능할 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

김기주, 김영화, 밀도검층의 소스보정에 대한 실험적 고찰. 지구물리학회 정기학술발표회, 25p.

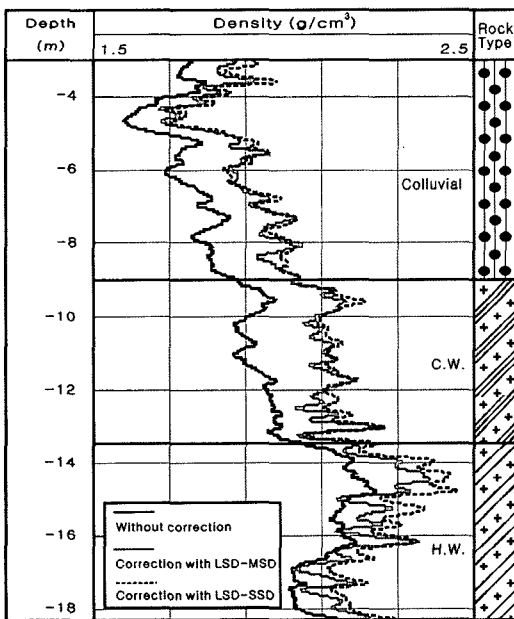


Fig. 11. An example of field density correction in a PVC cased borehole. C.W. and H.W. represent completely weathered and highly weathered bedrocks, respectively.

김영화, 김기주, 1999, 갑산층 석회암 지역에서의 코어물  
성과 검층물성의 비교, 지질공학, 9, pp.253-265.  
김영화, 김기주, 서백수, 2000, 밀도검층에서의 자연감마  
영향과 효과적인 보정방안, 대한지구물리학회 제3차  
정기총회 및 학술발표회, 39p.  
김영화, 김기주, 임헌태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검층  
검출기 보정에 관한 기초연구, 지구물리, 7권4호,  
pp.237-245.  
김지훈, 공남영, Weijun Zhao, 김영화, 2005, 밀도검층의  
효과적인 현장적용을 위한 모형 보정공 건설과 밀도  
보정 기초연구, 한국물리탐사학회 제7회 특별심포지  
엄, pp.73-82.  
김지훈, 2006, 밀도검층의 효과적인 현장적용을 위한 모  
형시추공 건설과 밀도검출기 보정에 관한 기초연구.  
강원대학교, 이학석사학위논문, 54p.  
황세호, 이상규, 1999, 물리검층에 의한 파세대 인식과  
동적지반정수의 산출, 한국지구물리학회 정기학술발  
표회, pp.156-175.  
C. Flaum, J. E. Galford, A. Hastings, 1987, enhanced  
vertical resolution processing of dual detector  
gamma-gamma density logs, SPWLA Twenty-Eighth  
Annual Logging Symposium. M1-M25.  
Hearst, J. R. and Carlson, R. C., 1969, The RIDS-A den-  
sity logger for rough holes: Geophysics, 34, no. 02,  
pp.222-234.  
James H. Scott, 1977, Borehole Compensation Algo-  
rithms for a Small-diameter, Dual-detector Density  
Well-logging Probe, SPWLA Eighteenth Annual  
Logging Symposium, S1-S17.  
Pickell, J. J. and Heacock, J. G., 1960, Density logging:  
Geophysics, 25, 4, pp.891-904.  
Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/  
Applications, Schlumberger Educational Services,  
Houston. pp.13-19.  
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, pp.182-  
191.

Tittman, J. and Wahl, J. S., 1965, The physical foun-  
dations of formation density logging (gamma-  
gamma): Geophysics, 30, 2, pp.284-294.

---

2006년 11월 23일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인

**김영화**

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

**김지훈**

(주)아시아지오컨설턴트  
Tel: 02-563-3232  
Fax: 02-563-3234  
E-mail: forret@empal.com

**이성진**

강원대학교 지구물리학과  
200-701, 강원도 춘천시 효자동 강원대길 1  
Tel: 033-243-5417  
Fax: 033-244-8580  
E-mail: stim1503@naver.com