

## 밀도검층 이격 보정을 위한 기준선과 이격선의 특성 연구

김영화\* · 김종만

강원대학교 지구물리학과

### A Study on Spine and Rib Properties for Standoff Compensation, Density Log

Yeonghwa Kim\* and Jongman Kim

Department Geophysics, Kangwon National University

**요약:** 밀도가 알려진 4개의 모형시험공에서 이격실험을 하고 얻어진 비이격 및 이격 측정 자료를 분석함으로써 기준선과 이격선의 특성을 파악할 수 있었다. 특히 선원을 출발하여 검출기에 도달하기까지의 감마선 경로의 형태, 기준선과 이격선의 궤적 특성, 궤적에 미치는 밀도 및 검출기 조합의 영향을 추적할 수 있었으며 이격보정을 위한 최적의 검출기 조합까지 확인할 수 있었다. 기준선과 이격선의 기울기 모두 검출기 조합별 긴거리와 짧은거리 간의 선원-검출기 거리비에 비례하는 함수의 형태로 표시될 수 있음을 확인하였다. 이 연구는 기준선 및 이격선의 기울기에 대한 기본 개념 이해에도 효과적으로 적용되었다.

**주요어:** 기준선, 이격선, 검출기 조합, 선원-검출기 거리, 밀도검층

**Abstract:** A series of density log data were obtained from the standoff experiments made in the four physical model boreholes of different densities, and the properties of spine and rib curves have been derived by the analysis of the gamma-gamma data. Particularly, the shape of gamma ray propagation path between source and detector, the geometrical property of spine and rib curves, the influence of borehole density and the detector combination on the properties of the curves, and the adequate detector combination for standoff compensation could be discussed. It was also confirmed that spine and rib slopes can be expressed as proportional to source-to-detector distance ratio between far and near detectors. The result of this experiment was also effectively applied for understanding the basic concept of spine and rib slopes.

**Keywords:** spine, rib, detector combination, source to detector distance, density log

## 서 론

밀도검층은 시추공에서 인공 감마선을 이용하여 지층의 밀도를 구하는 검층방법으로, 인공 선원(gamma source)을 이용하여 감마선을 방출시키고 검출기에 도달하는 감마선의 크기를 측정한다는 의미에서 감마-감마검층으로도 불린다. 밀도검층으로부터의 밀도값 산출은 그 이론적 근거를 감마선과 전자 간의 콤프턴 산란 현상에 두고 있으므로(Pickell and Heacock, 1960) 물질의 산란 특성, 선원과 검출기의 배치, 지층의 자연 감마 방출량, 선원의 감쇠특성 등과 관련된 기초보정 연구가 정확한 밀도값 산출의 전제가 되고 있다. 지금까지 이들에 관

한 많은 연구들(Campbell and Wilson, 1958; Pickell and Heacock, 1960; Tittman and Wahl, 1965; Hearst and Carlson, 1969; Flaum *et al.*, 1987; 김기주, 2001, 김지훈, 2006, 황세호, 이상규, 1999)이 수행되었으며 나공 상태에서의 밀도검층 보정의 정밀도 문제는 대부분 해결되었다고 할 수 있다.

그러나 존재와 공벽 사이에 이격이 존재할 때 얻어진 밀도 검층자료에 관한 보정, 즉 이격 보정에 관한 연구는 아직까지도 초보적인 단계를 벗어나지 못하고 있다. 이는 무엇보다도 이격 보정에 관한 모든 접근 방법들(Scott, 1977; Samworth, 1992; Stoller *et al.*, 1999; 김영화외, 2004; Schneider *et al.*, 2006, 이성진외, 2008; 김영화외, 2009)이 모두 거친 공벽이나 진흙벽 위에서 실시된 밀도검층의 보정을 위하여 고안된 기준선-이격선 도표(spine and ribs plot)에 기초를 두고 있음에서 잘 나타나고 있다(Whal *et al.*, 1964). 결과적으로 이격보정의 핵심은 이격보정 도표를 구성하는 기준선과 이격선의 결정에 있다고 할 수 있다. 그러나 기준선과 이격선 자체도 지층과 이수와의 밀도 차, 공경 등 영향 요인이 다양할 뿐만 아니라 시

2012년 10월 18일 접수; 2012년 11월 13일 수정; 2012년 11월 19일 채택;  
\*Corresponding author

E-mail: yhkim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,  
Kangwondae-gil 1, Hyojadong, Chuncheon, Kangwondo,  
200-701 Korea

간에 따라서도 변하는 존재로, 아직도 그 특성이 완전하게 규명되지 못한 상태이다.

기준선 및 이격선은 각기 공벽 밀착 상태에서의 밀도 변화에 따른 감마-감마 반응의 궤적과 임의의 밀도 조건에서 이격 거리가 다를 때 나타나는 감마-감마 반응의 궤적으로서, 짧은 거리의 검출기 반응과 긴거리의 검출기 반응을 각각 X축과 Y축에 대수축적으로 도시하여 얻어진다(Scott, 1977). 따라서 선원과 검출기 사이의 거리(이하 선원-검출기 거리)가 큰 것(이하 긴거리)과 작은 것(이하 짧은거리)의 길이 조합 또한 이격 보정 도표의 특성 결정에 큰 영향을 미친다. 더욱이 긴거리와 짧은거리의 두 가지 종류의 검출기만으로 구성된 초기 밀도검층기와는 달리 밀도검층기의 대부분이 3 종류의 선원-검출기 거리로 운영되는 오늘날의 검출기의 조합에 따른 이격보정 도표의 특성까지 고려해야할 상황이다. 즉, 기존의 긴거리- 짧은거리 산점도는 긴거리-짧은거리, 긴거리-중거리, 중거리-짧은거리 검출기 조합의 3개 유형으로 나타날 수 있다. 검출기 조합의 문제는 컴퓨터를 이용한 이격보정에서 기준선과 이격선이 모두 일치함수로 표시될 수 있는지의 여부 결정과도 연관되어 중요한 의미를 가진다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 기존의 기준선-이격선 기법에 바탕을 둔 이격보정 도표에 대한 특성 분석을 수행하였다. 특히 3가지 유형의 검출기로부터 유도되는 기준선 및 이격선 궤적의 특성을 분석함으로써 기존의 기준선-이격선 기법의 보정 효과를 높이는 데 기여하고 향후 다른 유형의 효과적 이격보정 방안 마련을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

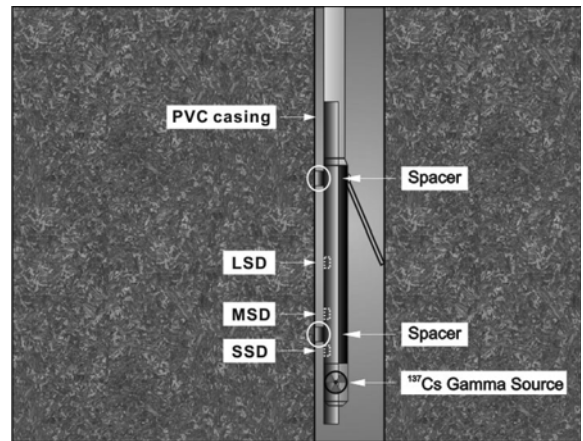
### 자료 획득

강원대학교 교내에 설치된 모형시험공을 이용하여 검출기 거리조합, 지층과 이수의 밀도 차, 이격량 등에 따른 기준선과 이격선의 변화 경향을 추적하기 위한 기초자료를 획득하였다. Table 1은 저밀도(KLW-1), 중밀도(KLW-2), 고밀도(KLW-3) 및 초고밀도(KLW-4)의 4개 시험공에 대한 기초 정보(이성진 외, 2008)를 나타내며, 각 모형시험공의 공벽이 1.90 g/cm<sup>3</sup>, 2.18 g/cm<sup>3</sup>, 2.59 g/cm<sup>3</sup> 및 2.84 g/cm<sup>3</sup>의 밀도로 구성됨을 보인다. 실험에 이용된 모든 시험공의 공경은 76 mm이다.

실험은 밀도가 다른 4개의 모형시험공에서 밀착상태에서의 기준선 획득과, 이격거리별 이격선 획득으로 이루어졌으며 시간 경과에 따른 특성 변화를 파악하기 위한 3년에 걸친 반복 측정이 함께 이루어졌다. 사용장비는 Robertson Geologging사의 밀도검층기 시스템이다. 측정에 사용된 감마선원은 약 2.45 GBq의 크기로서 3.7 GBq의 표준선원으로 설계된 최초 선원의 약 66%에 해당하는 크기이다. 얻어진 감마-감마 자료는 긴거리검출기(Long Spaced Detector; 이하 LSD), 중거리검출기(Medium Spaced Detector; 이하 MSD), 짧은거리검출기(Short Spaced Detector; 이하 SSD)의 3가지 감마반응이 획득되었다.

**Table 1.** Information of borehole models used for this study.

Hole Name	Model Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )
KLW-1	Low Density Model	1.90 g/cm <sup>3</sup>
KLW-2	Medium Density Model	2.18 g/cm <sup>3</sup>
KLW-3	High Density Model	2.59 g/cm <sup>3</sup>
KLW-4	Very High Density Model	2.84 g/cm <sup>3</sup>



**Fig. 1.** Schematic figure for standoff compensation experiment.

여기서 LSD, MSD, SSD에서의 선원-검출기 거리는 각각 47.5 cm, 27.5 cm, 13.5 cm이다.

측정의 기본적인 방법은 기존의 측벽밀착 밀도측정방식(Schlumberger, 1989)과 동일하다. 실험은 시험공에 물이 채워진 상태에서 실시되었다. 시험공 자체의 자연감마 값이 검출기에 미치는 영향을 제거하기 위하여 각 반응값들은 존데에 선원을 탈착하고 부착한 환경에서 교대로 측정된 후, 그 차이(선원부착 반응 CPS-선원탈착 반응 CPS)를 택하여 실제 반응값으로 결정하였다.

존데가 공벽으로부터 이격될 때의 영향은 공벽 이격에 관련된 것을 제외한 모든 조건을 공벽밀착 상태와 동일하게 유지한 상태에서 측정하는 방식으로 추적하였다. 이성진외(2008)의 연구결과에 근거하여 반원통형 PVC 케이싱을 이용한 이격 측정 방법이 적용되었다. 이격량의 조절은 케이싱 겉면에 부착되는 2.5 mm의 PVC 케이싱 조각의 증첩에 의하여 이루어졌으며 최대 이격량은 12.5 mm이다. 검출기의 기울어짐을 방지하기 위하여 상·하부 두 곳에 케이싱 조각을 부착했으며 그 위치는 검출기의 반응값에 영향을 주지 않는 곳으로 선정되었다(Fig. 1).

### 세 가지 유형의 이격보정 도표

실험에 사용된 밀도검층기는 선원-검출기 거리가 다른 3가지의 검출기(LSD, MSD, 및 SSD)로 구성되므로 이 3가지 종류의 감마-감마 자료로부터 기대 가능한 이격보정 도표는 LSD-MSD, LSD-SSD, 및 MSD-SSD의 3가지 유형이 된다.

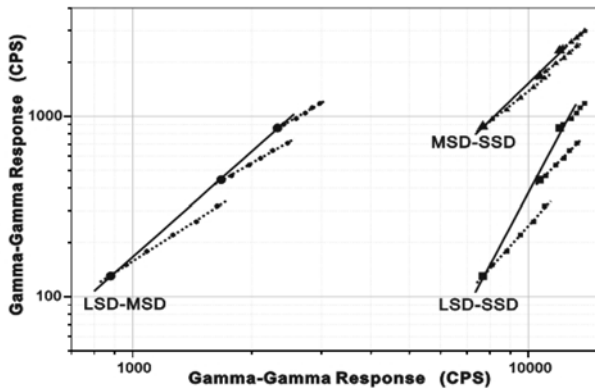


Fig. 2. Spine and ribs plots constructed from SSD, MSD, and LSD data obtained in 2009. Solid and dotted lines represent spine and rib, respectively. Gamma-gamma responses obtained from the long (LSD or MSD) and the short spacing (MSD or SSD) detectors are plotted on y-axis and x-axis, respectively.

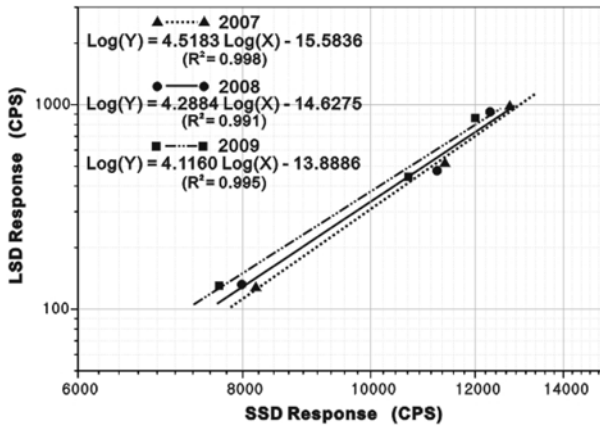


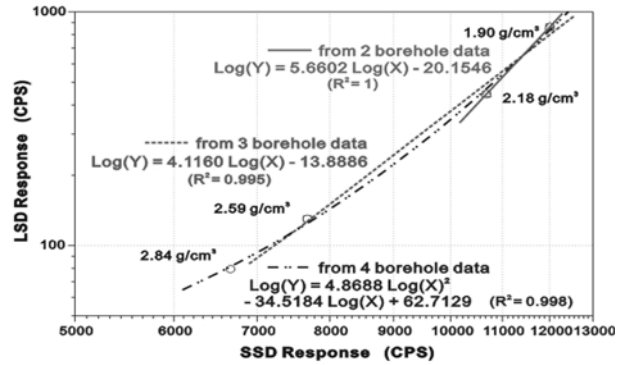
Fig. 3. Time lapse spine curves constructed from LSD data obtained during three years between April 2007 and September 2009. Borehole K LW-1 was used for this plot.

Fig. 2는 3개의 다른 밀도를 가진 모형시험공에서 얻어진 이격 실험 자료로부터 3가지 유형의 이격보정 도표를 작성하여 함께 표시한 결과이다. 제시된 이격보정 도표는 2007년에서 2009년까지 3년간에 걸쳐 얻어진 연도별 자료 중에서 2009년도 자료로부터 작성된 것이다.

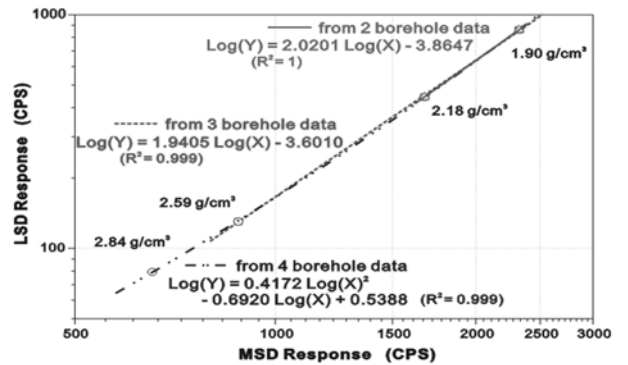
획득된 연도별 기준선 및 이격선에는 시간 경과에 따른 선원 감쇠에 의한 감마-감마 반응값의 감쇠 영향이 인지되고 있으며 그 영향은 이격선에 비해 기준선(Fig. 3)에서 더 크게 나타나고 있다. 그러나 시간에 따른 감마-감마 반응값의 감쇠에도 불구하고 그 형태적 특징만은 크게 바뀌지 않아, 상대적으로 변화가 큰 기준선까지도 시간의 경과에 무관하게 거의 동일한 수준의 직선 경향과 기울기 값을 보인다.

기준선 특성 분석

Fig. 2에서 제시된 기준선은 직선 궤적으로 표시되어 있다.



(a)



(b)

Fig. 4. Spines constructed from 2009 sidewall gamma gamma data. Straightness of spine can be compared between LSD-SSD plot (a) and LSD-MSD plot (b), and between different ranges of formation density.

이는 김영화 외(2004), 이성진 외(2008) 및 김영화 외(2009) 등에서 곡선으로 제시된 결과와는 다른 것으로, Scott(1977) 등의 연구에서 제시된 기준선의 형태와 비슷하다. 그러나 이 결과는 적용된 밀도 범위의 차이와 검출기 조합의 특성에 기인한 문제이며 Fig. 4가 이를 잘 나타낸다. Fig. 4(a)는 LSD-SSD 조합에서 밀도 범위가 미치는 영향을 보여주는 것으로, 4개의 시험공 자료 중에서 가장 큰 밀도인 2.84 g/cm<sup>3</sup> 밀도공 자료를 제외시켜 밀도 범위를 2.59~1.90 g/cm<sup>3</sup>으로 제한하면 상관성의 손실 없이 직선 관계의 기준선이 획득될 수 있음을 보여준다. 즉, 밀도범위 2.84~1.90 g/cm<sup>3</sup>일 때의 전형적인 곡선 궤적이 2.59~1.90 g/cm<sup>3</sup> 밀도범위에서는 직선 궤적으로 표시되었다. 아울러 2개의 밀도공 자료만을 사용하여 밀도 범위를 2.18~1.90 g/cm<sup>3</sup>로 한정시키면 직선의 경사가 더 크게 나타남을 보인다.

한편 선원-검출기 거리 차이가 상대적으로 작은 검출기 조합으로부터 작성된 LSD-MSD와 MSD-SSD 도표에서는 기준선의 궤적이 직선에 더 가깝게 나타나며 특히 LSD-MSD(Fig. 4(b))에서는 전체 밀도의 범위에서도 거의 완전한 직선관계가 인지될 정도이다. LSD, MSD, SSD 검출기의 선원-검출기 거리가 각각 47.5 cm, 27.5 cm, 13.5 cm이므로 LSD-SSD, MSD-SSD 및 LSD-MSD 검출기 조합에서의 선원-검출기 거리의 긴

**Table 2.** Summary of spine slope variations occurred with the change of detector combination as well as density range.

Detector Combination		Spine Slope	
Name	Source-to-detector Distance Ratio	density range 2.59 ~ 1.90 g/cm <sup>3</sup>	density range 2.18 ~ 1.90 g/cm <sup>3</sup>
LSD-SSD	3.52	4.418	5.660
MSD-SSD	2.04	2.152	2.802
LSD-MSD	1.73	1.941	2.020

거리/짧은거리 비(이하 선원-검출기 거리비)는 각기 3.52, 2.04, 및 1.73이다. 따라서 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 비교는 동일 밀도 범위 내에서 선원-검출기 거리비(긴거리검출기의 선원-검출기 거리/짧은거리 선원-검출기 거리)가 작은 검출기 조합을 사용할 때 더 직선에 가까운 기준선을 얻을 수 있음을 보여준다.

그러나 이 경우에도 밀도범위가 저밀도 쪽으로 갈수록 기준선의 기울기가 커지는 경향만은 여전하며, 넓은 밀도 범위에서 기준선의 형태가 포물선에 더 가까운 현상도 동일하다. 이와 같은 기준선의 기울기 변화 양상은 Table 2에서 더욱 잘 나타나 있다.

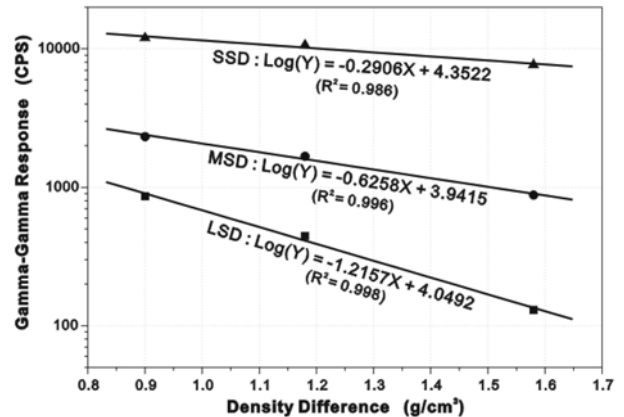
기준선이 직선 관계로 표시될 때, 기준선의 특성은 기울기로 대표된다. 식 (1)은 기준선의 기울기(m)를 나타내는 식으로서 저밀도와 고밀도 구간에서의 긴거리검출기 반응차와 짧은거리 검출기 반응차의 비로 정의될 수 있다. 여기서, G는 감마-감마 반응을, 위 첨자에서의 LDZ와 HDZ는 각기 저밀도(Low Density Zone), 고밀도구간(High Density Zone)에서 측정된 감마-감마 반응이며, 아래 첨자에서의 FR과 NR은 각기 긴거리 (Far Receiver)와 짧은거리 검출기(Near Receiver)로 측정된 결과를 나타낸다.

$$m = \frac{\log G_{FR}^{LDZ} - \log G_{FR}^{HDZ}}{\log G_{NR}^{LDZ} - \log G_{NR}^{HDZ}} \quad (1)$$

식 (1)에서의 상변과 하변은 모두 임의의 밀도 차를 가지는 두 구간에서 나타내는 감마-감마 반응값의 차이를 나타낸다.

Fig. 5는 식 (1)의 상변과 하변의 변수 특성을 고려하여, 모형시험공의 공벽과 이수의 밀도차에 따른 각 검출기별 감마-감마 반응값을 도시한 결과이다. 모든 검출기에서의 감마-감마 반응값은 모형시험공과 이수의 밀도차에 비례하는 관계임을 잘 보이며 그 비례상수가 SSD, MSD 및 LSD 검출기에서 각각 -0.2906, -0.6258, -1.2157로 나타났다.

감마-감마 반응값을 모형시험공의 공벽과 이수의 밀도차에 따라 도시했을 때 구해진 각 검출기별 비례상수는 단위밀도 차에 있어서의 감마-감마 반응값 차에 대응하며 이는 바로 식 (1)에서의 상변과 하변에 대입시킬 수 있는 값이다. 검출기 조합이 LSD-SSD인 경우, 긴거리(FR)와 짧은거리(NR)에 해당하는  $\log G_{FR}^{LDZ} - \log G_{FR}^{HDZ}$  과  $\log G_{NR}^{LDZ} - \log G_{NR}^{HDZ}$  값으로는 -1.2157 과 -0.2906이 대응된다. 따라서 4.19의 기울기(m) 값이 얻어지며 같은 방법으로 MSD-SSD 검출기 조합과 LSD-MSD 조



**Fig. 5.** Gamma gamma response showing constant decrease with the increase of density difference between borehole wall and fluid. Data obtained from KWL-1 ( $\Delta\rho=0.90 \text{ g/cm}^3$ ), KWL-2 ( $\Delta\rho=1.18 \text{ g/cm}^3$ ), and KWL-3 ( $\Delta\rho=1.54 \text{ g/cm}^3$ ) were used for this plot.

합인 경우에서 각각 2.15와 1.94의 기울기 값이 얻어진다. 이 결과는 선원-검출기 거리비가 큰 순서로 큰 기울기가 나타남을 보인다.

### 이격선 특성 분석

이격선은 공벽으로부터 존데의 이격거리 변화에 따른 긴거리검출기와 짧은거리 검출기에서의 감마-감마 측정치의 변화 경향을 나타내는 궤적으로 밀도검층에서 이격 효과를 표시하는 가장 일반적인 방법이다. 그러나 이격효과는 감마-감마 측정치를 존데의 이격거리 변화량에 대하여 직접 도시함으로써 더 효과적으로 나타난다. Fig. 6은 이러한 관점에서 이격거리별 감마-감마 측정치의 변화를 각 검출기별로 구분하여 도시한 결과로서, 12.5 mm의 이격 범위 내에서 이격량에 대한 감마-감마 반응값의 변화가 이격량에 비례하여 증대하는 양상을 보인다. 그 기울기는 검출기별로 달리 나타나 선원-검출기 거리가 가장 큰 LSD 검출기에서 가장 크게 나타났고, 선원-검출기 거리가 가장 작은 SSD 검출기에서 가장 작은 기울기를 보였다. 제시된 그림은 밀도 1.90 g/cm<sup>3</sup>인 모형시험공에서 획득된 하나의 예이며 동일한 현상이 다른 밀도의 모든 모형시험공 자료에서 관찰되었다.

Fig. 6에서의 결과를 전체 3개의 모형시험공으로 확대하여 이격량 증대에 따른 감마-감마 측정치의 변화율을 구한 후, 이를 공벽과 이수간의 밀도 차의 함수로 도시하면 Fig. 7과 같이 나타난다. 이 결과는 공벽과 이수간의 밀도 차가 클수록 감마-감마 변화율이 증대하는 경향을 보인다. 밀도 차에 따른 감마-감마 측정치의 증대 경향은 선원-검출기 거리가 가장 작은 SSD 검출기에서 가장 낮고 가장 큰 LSD 검출기에서 가장 높게 나타났다. 즉, 이격량 증대에 따른 감마-감마 측정치의 변화율은 공벽과 이수간의 밀도차 영향과 함께 검출기 조합의

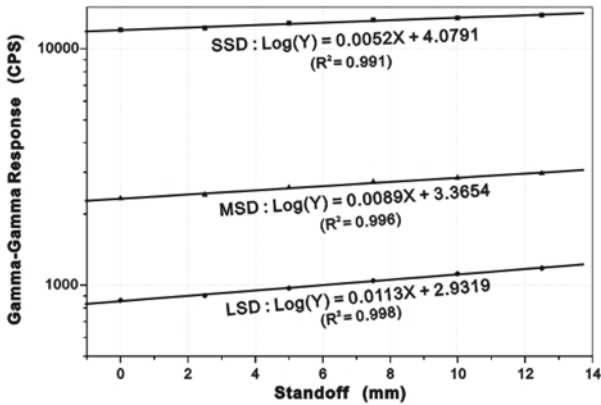


Fig. 6. Gamma-gamma responses showing constant increase with the standoff between borehole wall and sonde. Data obtained from the K LW-1 in 2009 were used for this plot.

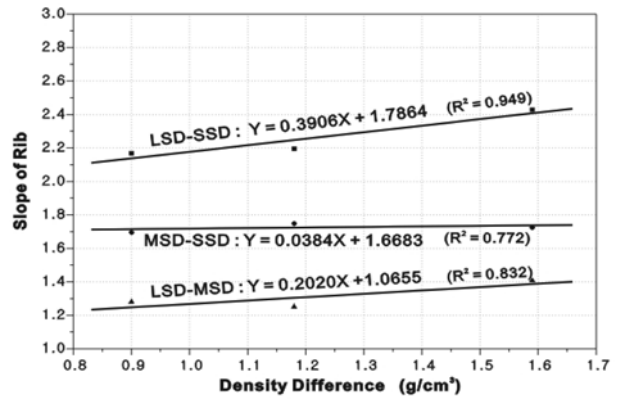


Fig. 8. Rib slope variation showing constant increase with density difference observed in three types of detector combination.

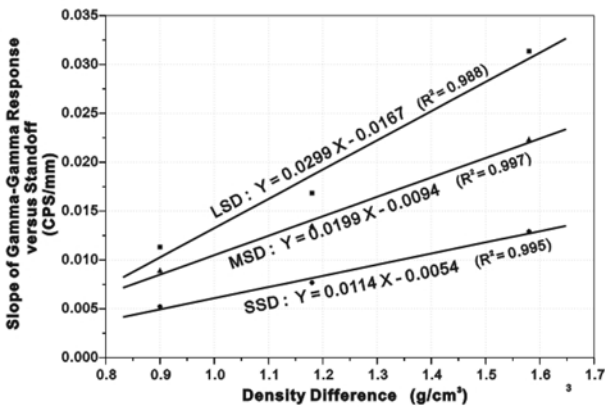


Fig. 7. Variation of the slope of gamma-gamma response versus standoff as a function of density difference showing constant increase of the slope with the increase of density difference observed from three types of detectors. The slope of gamma variation was determined by plotting with logarithmic scale on the y-axis and linear scale on the x-axis as shown in Fig. 6.

영향까지 함께 받고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 검출기 조합별 이격량에 대한 감마-감마 변화율의 양상은 다음에 제시된 이격선의 기울기 식(식 2)과 관련하여 이격선의 특성 규명에 효과적으로 이용될 수 있다.

$$n = \frac{\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS}}{\log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}} \quad (2)$$

여기에서 LS와 SS는 검출기 조합에서의 큰 이격(Large Separation)과 작은 이격(Small Separation), FR과 NR은 긴거리와 짧은거리 측정기를 표시하므로 분자와 분모에 해당하는  $\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS}$  와  $\log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}$  는 각각 긴거리와 짧은거리 검출기에서 나타나는 큰 이격과 작은 이격 사이의 감마-감마 반응차를 나타낸다. 이 식은 비의 형태로 나타나 있으므로 Fig. 6에서 구해진 긴거리 및 짧은거리 검출기에서의 감마-감

마 측정치의 변화율 값을  $\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS}$  와  $\log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}$  값으로 적용할 수 있다. Fig. 6에서 구해진 LSD, MSD 및 SSD 검출기에서의 이격거리에 대한 감마-감마 변화율이 각각 0.01132, 0.00885, 0.00522 CPS/mm이므로, LSD-SSD 검출기 조합인 경우, 0.01132와 0.00522가 각각  $\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS}$  과  $\log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}$  의 값에 대응된다. LSD-MSD 검출기 조합인 경우에는 0.01132와 0.00885가 각각  $\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS}$  과  $\log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}$  의 값으로 대응된다.

이와 같이 식 (2)의 상, 하변에 이격거리별 감마-감마 변화율을 대입하는 방법으로 이격선의 기울기를 구하면 밀도 1.90 g/cm<sup>3</sup>의 시추공에서의 LSD-SSD 검출기 조합에서 n = 2.17, LSD-MSD 검출기 조합에서 n = 1.28, 그리고 MSD-SSD 조합에서 n = 1.70의 값을 얻을 수 있다. 기울기는 n<sub>LSD-SSD</sub> > n<sub>MSD-SSD</sub> > n<sub>LSD-MSD</sub>로서, LSD-SSD, MSD-SSD, LSD-MSD 조합의 순으로 감소함을 보인다. 이는 기울기의 크기가 작음에도 불구하고 양상은 기준선의 경우와 마찬가지로 선원-검출기 거리비가 클수록 이격선의 기울기가 크게 나타남을 뜻한다.

Fig. 8은 위에서의 결과를 밀도 2.18 g/cm<sup>3</sup>와 2.54 g/cm<sup>3</sup>의 시추공까지 확대하여 구한 후, 이격선의 기울기를 공벽과 이수간의 밀도 차의 함수로 도시한 것이다. 이 결과는 이격선의 기울기 또한 공벽과 이수간의 밀도차 영향과 검출기 조합의 효과를 함께 받고 있음을 잘 보여주고 있다. 밀도차의 영향은 모든 검출기 조합에서 공통적으로 밀도차 증대에 따른 이격선의 기울기 증대로 나타나며 기울기 변화의 정도는 LSD-SSD 조합에서 가장 크고 MSD-SSD 조합에서 가장 작게 나타난다.

한편 이격에 따른 감마-감마 반응값의 증가율이 짧은거리에서보다 먼거리 검출기에서 크게 나타남은  $\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS} > \log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}$  의 관계로 연결되며, 이는 이격선 기울기가 1보다 크게 나타나는 현상과 선원-검출기 거리비가 큰 검출기 조합일수록 이격선 기울기가 크게 나타나는 현상의 근거가 된다.

### 선원-검출기 거리에 따른 감마-감마 반응값

Fig. 9는 선원을 떠나 지층을 통과한 후 검출기에 도달하는 감마선의 반응값이 선원-검출기 거리에 어떻게 영향 받고 있는지를 확인하기 위하여 모형시험공의 공벽-이수 경계면에서 측벽밀착 방식으로 측정된 감마-감마 반응값을 선원-검출기 거리의 함수로 도시한 결과이다. 그 결과, 감마-감마 반응값은 모든 시추공에서 선원-검출기 거리가 증가함에 따라 일정한 경향으로 감소하는 모습을 보인다. 감소하는 경향은 양대수 스케일로 표시했을 때 직선으로 나타난다. 이와 같은 모습은 밀도 결정에 있어서 감마-감마 반응값의 유일성 문제(Samworth, 1992)가 확보되었음을 보여주고 있다. 시추공벽과 이수간의 밀도차가 클수록 직선의 기울기가 커지며 이는 Fig. 10에서의 양호한 비례관계로부터 잘 확인 할 수 있다. 이러한 결과들은 이론적으로 감마선의 전파를 역산란 현상으로 설명해야 하는 밀도검층기 구조에서 감마선의 평균 이동 거리가 선원-검출기 거리에 정확히 비례하고 있음을 말해준다.

공벽과 이수 경계면에서 측정된 감마-감마 반응값이 선원-검출기 거리와 강한 음의 상관을 보이는 현상은 감마선의 콤프턴 산란이론을 감안할 때 밀도검층기에서의 평균적인 감마선 이동거리와 선원-검출기 거리가 비례 관계에 있음을 말해준다. 밀도검층기의 선원으로부터 방출된 감마선의 초기방향이 선원과 검출기의 연장선에 직교하는 방향으로 설정된 상태에서 선원-검출기 거리에 비례하는 관계로 나타난 감마선 전파경로의 기하학적인 형태는 반원, 즉 선원-검출기 거리를 지름으로 하는 반원에서의 원호 형태로 대표된다. 아울러 선원을 나와 검출기로 돌아오는 감마선의 평균경로의 길이가 선원-검출기 거리에 비례한다는 사실은 감마선이 선원을 출발하여 산란, 역산란을 반복하면서 검출기로 들어오는 경로를 개략적으로 반원 형태로 표시해 온 기존의 개념(Johnson and Pile, 1988; Gorbachev, 1995)과도 일치된다.

### 기준선과 이격선의 종합분석

Fig. 2에서 제시된 바와 같이 이 연구에서 나타난 기준선의 궤적은 포물선으로서 고밀도에서 저밀도 쪽으로 갈수록 기울기가 증가하는 양상을 보인다. 이는 기준선을 직선 궤적으로 처리하고자 하는 경우, 밀도 범위가 작아야 유효하며 보정 대상인 지반의 밀도범위가 넓은 경우에는 밀도 범위에 따라 기준선의 기울기를 달리 적용해야 함을 가리킨다. 아울러 기준선 궤적의 직선화 정도는 검출기 조합에 따라서도 크게 다르게 나타났다.

검출기 조합별 직선화 정도는  $LSD-SSD < MSD-SSD < LSD-MSD$ 의 순서로서 LSD-MSD 검출기 조합에서의 직선 경향이 가장 크다. LSD, MSD, SSD 검출기의 선원-검출기 거리가 각각 47.5 cm, 27.5 cm, 13.5 cm이므로 LSD-SSD, MSD-

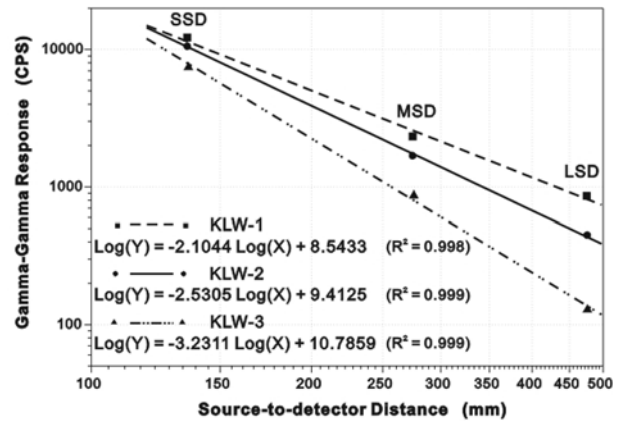


Fig. 9. Gamma-gamma responses showing constant increase with the increase of source-to-detector distance.

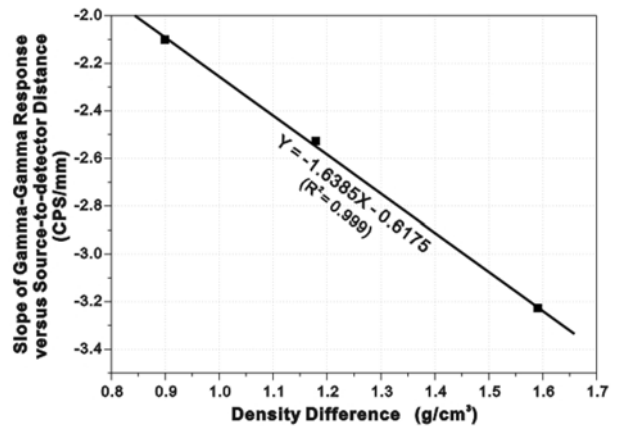


Fig. 10. Variation of the slope of gamma-gamma response versus source-to-detector distance showing constant decrease of the slope with the increase of density difference between borehole wall and fluid. The slope of gamma-gamma response versus source-to-detector distance was determined by plotting with log-log scale as shown in Fig. 9.

SSD, 및 LSD-MSD검출기 조합에서의 긴거리/짧은거리 선원-검출기 거리비는 각각 3.52, 2.04 및 1.73이다. 이 결과는 검출기 조합의 선원-검출기 거리비 순서가 바로 기준선의 직선 또는 곡선 경향을 나타냄을 가리킨다. 즉, 선원-검출기 거리가 작아질수록 기준선은 넓은 밀도범위에 걸쳐서 직선으로 나타낼 수 있음을 뜻한다. 결과적으로, 비교적 넓은 밀도범위를 대상으로 기준선을 직선 궤적으로 처리할 필요가 있는 경우에는 선원-검출기 거리비가 큰 검출기 조합(LSD-SSD)보다는 선원-검출기 거리비가 상대적으로 작은 검출기 조합(MSD-SSD, 또는 LSD-MSD)을 선택하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

한편 기준선의 기울기 값(m)은  $m_{LSD-SSD} > m_{MSD-SSD} > m_{LSD-MSD}$ 의 순으로 나타났다(Table 2). 여기에서 구한 각 검출기 조합별 m 값을 검출기 조합별 선원-검출기 거리비에 따라 도시하면 Fig. 11(a)에서 나타나는바와 같이 두 인자 사이에 양호한 직선관계가 존재함을 보인다( $R^2 = 0.998$ ). 즉 기준선의

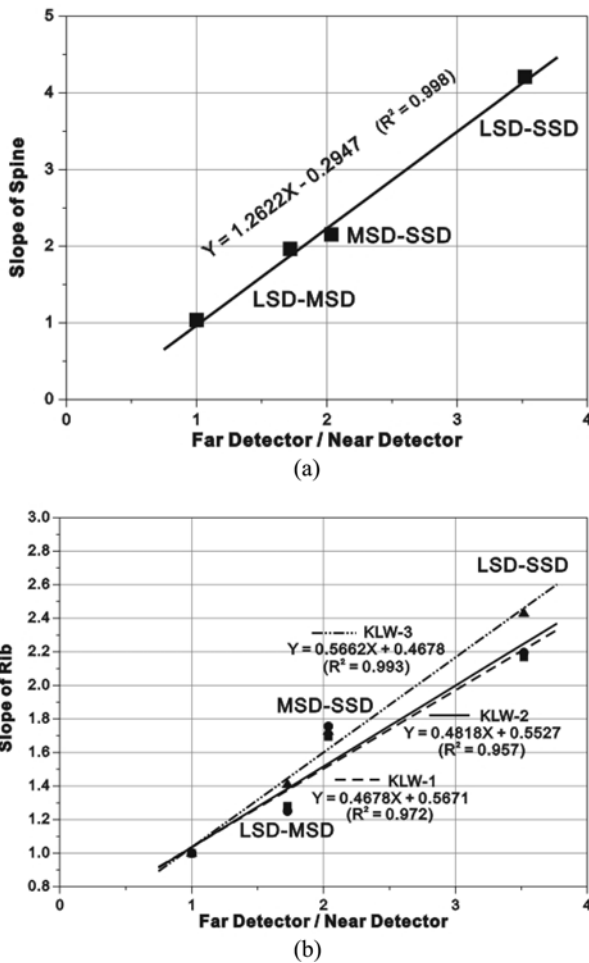


Fig. 11. Constant increase in spine slope (a) and rib slope (b) with the change of source-to-detector distance ratio.

기울기는 선원-검출기 거리비가 큰 검출기 조합일수록 큰 값을 보인다. 기준선의 기울기가 언제나 이격선의 기울기보다 크게 나타나므로, 기준선의 기울기 증가는 일단 이격보정에서의 오차 줄이기에서 유리한 요인으로 작용한다. 따라서 선원-검출기 거리비가 작은 LSD-MSD 또는 MSD-SSD 검출기 조합에 비해서 선원-검출기 거리비가 큰 LSD-SSD 검출기 조합의 적용이 이격보정의 오차 줄이기에 가장 유리한 것으로 볼 수 있다. 그러나 문제는 Fig. 11(b)에서 구해진 이격선의 기울기 값 (n)도  $n_{LSD-SSD} > n_{LSD-MSD} > n_{MSD-SSD}$ 의 순으로 증가하여 선원-검출기의 거리비 증가에 따른 기준선의 기울기 증가 경향과 비슷하게 나타난다는 점이다. 기준선의 경우에 비해 상대적으로 상관정도가 약하게 나타나나 그 경향만은 분명하다.

선원-검출기 거리비가 큰 검출기 조합일수록 이격선의 기울기가 크게 나타남은  $\log G_{FR}^{LS} - \log G_{FR}^{SS} > \log G_{NR}^{LS} - \log G_{NR}^{SS}$ 의 관계로부터 설명되며 이는 짧은거리 검출기에서 일정한 밀도의 이수의 영향을 많이 받아 밀도차가 있는 지층 영향을 많이 받는 긴거리 감마-감마 반응값에 비하여 변화가 작게 나타나는 현상에 기인되고 있다. 결과적으로 검출기 조합의 선원-검출기

거리비가 증가할 때는 기준선과 이격선의 기울기가 모두 증가하는 경향을 보인다. 물론 이격선 기울기의 변화량이 기준선의 기울기에 비해 작지만 선원-검출기 거리비에 따른 기울기 증가 경향만은 분명하다. 결과적으로 검출기 조합의 특성에 따라 증가된 기준선에서의 기울기가 보정오차 줄이기에 미치는 효과는 제한적이다. 따라서 기준선의 기울기보다는 기준선과 이격선의 교차각이 더 효과적인 매개변수로 간주된다. 교차각은 기준선과 이격선의 기울기가 함께 반영된다는 점에서 효과적이며 기존의 이격보정이 기준선과 이격선의 교점을 구하는 방식에 근거한다는 점에서 두 직선의 교차각은 보정의 정밀도 결정에서 결정적인 역할을 한다. 교차각은 그 값이 클수록 정밀도가 향상된다.

기준선과 이격선의 교차각 크기( $\theta$ )는 Fig. 2에서 관찰할 수 있듯이  $\theta_{LSD-SSD} > \theta_{LSD-MSD} \gg \theta_{MSD-SSD}$ 이다. 즉, LSD-SSD 검출기 조합과 LSD-MSD 검출기 조합의 경우에서 큰 값을 보이며 그 중에서도 LSD-SSD 검출기 조합이 조금 더 크게 나타났다. 반면에 MSD-SSD 검출기 조합에서는 다른 두 검출기 조합에 비하여 매우 작은 교차각이 얻어졌다. 얻어진 교차각의 크기는 선원-검출기 거리 차가 큰 순서로 나타남을 알 수 있다. 이론상으로 선원-검출기 거리 차가 거의 없어지는 경우, 기준선은 물론 이격선의 기울기가 최소값인 1에 접근하게 되며 그 교차각은 0의 값에 접근한다. 이는 동일한 선원-검출기 거리로 측정된 동일한 감마-감마 자료의 비교도표에서 기준선과 이격선이 모두 기울기 1인 직선이 되는 현상에서 잘 나타난다. 이는 역으로 검출기 조합에서 긴거리와 짧은거리 간의 선원-검출기 거리 차이가 많이 날수록 기준선과 이격선의 교차각이 커지는 현상을 예상하게 한다. 결과적으로 선원-검출기 거리차가 가장 큰 LSD-SSD 조합이 이격보정에 가장 유리하며 LSD-MSD 조합도 비교적 양호한 결과를 기대될 수 있다. 반면에 가장 작은 선원-검출기 거리차를 보이는 MSD-SSD 조합에서의 보정 정밀도는 매우 낮은 수준으로 기대된다.

그러나 이격보정에서의 최적의 검출기 조합을 결정하는 문제는 앞에서 언급된 기준선의 직선 경향이 함께 고려되어야 한다. 선원-검출기 거리차가 크게 나는 검출기 조합의 사용은 큰 교차각이 주는 이점과 심한 곡선화 경향이 주는 불리한 조건이 충돌하기 때문이다. 따라서 선원-검출기 거리차가 너무 크게 나는 검출기 조합의 사용은 자제되어야 한다. 이러한 관점에서 LSD-SSD보다는 LSD-MSD 검출기 조합을 이용한 도사에서 보다 양호한 보정결과를 보일 것으로 기대된다. 만일 기준선의 직선 경향이 주요 고려 대상에 포함되지 않을 때에는 당연히 긴거리와 짧은거리 간의 선원-검출기 거리 차이가 많이 나는 검출기 조합이 최선의 선택이 된다.

이격 실험에서 가장 중요한 요소는 기준선과 이격선의 궤적이다. 본 연구에서는 기준선과 이격선의 기울기가 검출기 조합별 선원-검출기 거리비에 비례하는 함수로 나타나는 것을 확인하였다. 거리차가 아니라 거리비로 나타남이 주목되는 특징

**Table 3.** Comparison of rib slopes constructed from the standoff correction experiment 2009 using four model boreholes of different densities.

Detector Combination	Source-to-Detector Distance Ratio	Slope of Rib			
		1.90 g/cm <sup>3</sup>	2.18 g/cm <sup>3</sup>	2.59 g/cm <sup>3</sup>	2.84 g/cm <sup>3</sup>
LSD-SSD	3.52	2.139	2.190	2.425	2.535
MSD-SSD	2.04	1.687	1.750	1.724	1.795
LSD-MSD	1.73	1.272	1.251	1.406	1.415

이다. 이는 기준선 기울기와 선원-검출기 거리비의 도표에서 측정치의 연장선이 대체로 기울기의 최소값에 해당하는 (1, 1) 점을 지나는 현상(Fig. 11)에서도 잘 확인된다. 따라서 선원-검출기 거리비의 함수는 기준선의 직선 정도를 나타내는 척도로서도 매우 효과적이다. 이러한 현상은 2007년에서 2009년에 걸쳐 획득된 모든 연도별 기준선과 이격선, 그리고 밀도를 달리하는 모든 이격선에서 동일하게 반복되고 있다. 따라서 비록 4개의 시추공에 국한된 자료이지만 여기에서 제시된 경향은 이격보정에서의 전반적인 특성을 대표하는 것으로 판단된다.

### 결론

모형시험공의 공벽과 이수 경계면에서의 감마-감마 측정으로부터 반응값과 선원-검출기 거리 간에 강한 음의 상관관계를 확인하였으며 이로부터 감마선 초기 방출방향이 선원과 검출기의 연장선에 직교하는 방향으로 설정되어 있는 밀도검층기 구조에서 감마선의 평균적인 전파경로가 선원-검출기 거리를 지름으로 하는 원호에서의 원호 형태로 대표될 수 있음을 제시하였다. 밀도검층에서 감마선의 전파경로가 선원-검출기 거리를 지름으로 하는 원호의 형태를 보임은 측정 범위의 결정뿐만 아니라 향후 밀도검층 자료에서 심도 결정의 정량화 시도에 매우 효과적으로 활용될 것으로 보인다.

기준선의 궤적은 고밀도에서 저밀도 쪽으로 갈수록 기울기가 증가하는 포물선의 형태이며 밀도범위를 축소하는 경우에 한해서 직선 궤적으로 표시할 수 있는 것으로 나타났다. 만일 보정의 편의를 위해 기준선을 직선 궤적으로 처리하고자 하는 경우에는 밀도범위를 가능한 좁게 잡고 밀도에 따라 기준선의 기울기를 달리 결정해야 하는 것으로 보인다. 아울러 기준선의 직선 경향을 고려한 검출기 조합의 선택 또한 중요한 요소로 나타났다.

기준선이 직선임을 전제로 이격보정에 접근할 때에 고려해야 할 주요 요소는 검출기 조합별 기준선의 직선 경향과 기준선과 이격선이 이루는 교차각 크기이다. 기준선의 직선 경향은 LSD-MSD 검출기 조합에서 가장 크고 MSD-SSD, LSD-SSD의 순서로 작아지는 것으로 나타났다. 교차각 크기에서는 LSD-SSD 검출기 조합에서 가장 큰 값을 보이고 LSD-MSD 검출기 조합에서 약간 감소하며, MSD-SSD 검출기 조합에서 매우 작은 각이 얻어졌다. 이 결과는 기준선의 직선 경향과 기준선 이격선의 교차각이 크게 나타나는 최적의 조합이 LSD-

MSD 검출기 조합임을 뜻한다. 반면에 기준선이 직선임을 전제하지 않은 경우에는 교차각 크기만이 중요한 요소가 되며, 결과적으로 LSD-SSD 검출기 조합의 적용이 절대적으로 유리한 것으로 나타난다.

한편, 본 연구에서는 감마-감마반응 값을 검출기별로 공벽과 이수의 밀도차에 따라 도시하여 얻은 각 기울기를 단위 밀도차에 있어서의 감마-감마반응 값의 차이로 생각하고 긴거리/짧은거리 검출기 반응비로 연결시킴으로써 기준선의 기울기에 대한 기본적인 개념 이해에 효과적으로 이용할 수 있었다. 아울러, 기준선의 기울기는 언제나 1보다 크게 나타나며 선원-검출기 거리 차가 작아져서 검출기 거리차가 거의 없어지면 기준선의 기울기가 1에 접근함을 확인하였다. 기준선의 기울기가 1보다 크게 나타나는 현상은 상대적으로 지층의 영향을 많이 받는 긴거리 검출기 반응에서, 지층의 밀도 감소에 따른 변화가 많이 반영되는 반면에, 짧은거리 검출기에서는 상대적으로 많은 영향을 주는 이수의 밀도가 고정되어 그만큼 반응값의 변화가 적음에 기인한 것으로 설명되었다.

이러한 개념은 이격선의 기울기 결정에서도 마찬가지로 적용할 수 있었으며, 모든 밀도구간에서 LSD-MSD, MSD-SSD, 그리고 LSD-SSD 조합의 순서로 이격선의 기울기가 커짐을 보였다. 이는 이격거리 변화에 따른 감마-감마 반응값의 변화율이 SSD, MSD, LSD 검출기의 순으로 증가함이 그 원인인 것으로 밝혀졌으며 이와 같은 증가 현상은 짧은 거리 검출기가 긴거리 검출기보다 상대적으로 이수의 영향을 많이 반영하는 현상에 기인된 것으로 설명할 수 있었다. 아울러 기준선과 이격선의 기울기 모두 검출기 조합별 긴거리와 짧은거리간의 선원-검출기 거리비에 비례하는 함수의 형태로 표시될 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구과제는 2011년도 강원대학교 학술연구조성비로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

김기주, 2001, 밀도 검층에서의 보정계수 산출을 위한 기초실험과 자연감마 보정, 강원대학교, 이학석사학위논문, 53.  
 김영화, 김기주, 임헌태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검층 검출기 보정에 관한 기초연구, 지구물리, 7, 237-245.



- 김영화, 황병철, 박성근, 김종만, 2009, 지하수면 상·하부 환경에서의 PVC 케이싱 이격보정비교 연구, *대한지질공학*, **19**, 217-225.
- 김지훈, 2006, 밀도검층의 효과적인 현장적용을 위한 모형시추공 건설과 밀도검층기 보정에 관한 기초 연구, 강원대학교, 이학석사학위논문, 54.
- 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.
- Campbell, J. L. P. and Wilson, J. C., 1958, Density logging in Gulf Coast area, *J. Petroleum Technology*, July, 21-25.
- Flaum, C., Galford, J. E., and Hastings, A., 1987, Enhanced vertical resolution processing of dual detector gamma-gamma density logs, *SPWLA Twenty-Eighth Annual Logging Symposium*, M1-25.
- Gorvachev, Y. I., 1995, Well logging - Fundamentals of Method, John Wiley & Sons Ltd.
- Hearst, J. R. and Carlson, R. C., 1969, The RIDS-A density logger for rough holes, *Geophysics*, **34**, 222-234.
- Johnson, D. E. and Pile, K., 1988, Well logging for the nontechnical person, PennWell Books.
- Pickell, J. J. and Heacock, J. G., 1960, Density logging, *Geophysics*, **25**, 891-904.
- Samworth, J. R., 1992, The dual spaced density log - characteristics, calibration, and compensation, *The Log Analyst*, **33**, 42-49.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/Applications, Schlumberger Educational Services, Houston. p. 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 7129477.
- Scott, J. H., 1977, Borehole Compensation Algorithms for a Small-diameter, Dual-detector Density Well-logging Probe, *SPWLA Eighteenth Annual Logging Symposium*, S, 431.
- Stoller, C., Urmi, D. G., Philip, O. G., Nihal, I. W., and Wraight, P. D., 1999, Method for determining formation density photoelectric factor with a multi-detector-gamma-ray tool, United States Patent 5912460.
- Tittman, J. and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma), *Geophysics*, **30**, 284-294.
- Wahl, J. S., Tittman, J., Johnstone, C. W., and Alger, R. P., 1964, The dual spacing formation density log, *J. Pet. Tech.*, **16**, 1411-1416.