

소구경 플라스틱 케이싱 공에서의 밀도검층 보정실험

이성진¹ · 김영화^{2*} · 황병철²

¹(주)지오브루그 코리아, ²강원대학교 지구물리학과

An Experimental Study on Density Log Correction for Plastic Cased Slim Boreholes

Seungjin Lee¹, Yeonghwa Kim^{2*}, and Byoung Chol Hwang²

¹Geobrugg Korea Co., Ltd.

²Department of Geophysics, Kangwon National University

강원대학교 구내에 설치된 4개의 보정시험공에서 플라스틱재질의 원통 및 반원통 케이싱을 이용한 이격오차 실험을 수행하였다. 이격실험 자료에 spine and ribs 기법을 적용한 결과 케이싱 두께 및 유형에 관계없이 하나의 밀도모델에서는 하나의 이격선이 얻어졌으며 그 기울기는 모델지층의 밀도에 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 이격특성을 이용하여 플라스틱 케이싱이 설치된 NX시추공에서의 효과적인 밀도보정 방안이 제시되었다.

주요어 : 밀도보정, 이격, PVC케이싱, 밀도기준선, 이격선

The stand-off errors due to the different separations between the sonde and the borehole wall were measured and analyzed in 4 physical borehole models located in Kangwon National University having different densities with cylindrical and half cylindrical PVC and/or acrylic casings. The analysis of the stand-off error data based on the "spine and ribs" technique suggests a well defined rib line for each model irrespectively of the types and thicknesses of the casing, and that the gradients of the ribs are proportional to the densities of the models. By using these characteristics successful density correction could be made for the plastic casings in NX sized boreholes.

Key words : density correction, stand-off, PVC casing, spine, rib

서 론

밀도검층은 감마선원으로부터 방출된 후 지층을 통과하여 검출기에 도달하는 감마선량을 이용한다. 감마선량은 지층의 전자밀도의 함수로 나타나며 전자밀도는 체적 밀도와 비례하는 관계를 보이므로(Schlumberger, 1989) 궁극적으로 검출기에서 얻어진 감마선량이 지층의 밀도 값 산출로 연결될 수 있다. 검출기에서의 감마선량은 선원특성 및 검출기 반응특성(Pickell and Heacock, 1960; Flaum *et al*, 1987; 황세호, 이상규, 1999), 시추공 경(Tittman and Wahl, 1965), 자연감마(김기주, 2001) 등에 좌우된다. 그동안 이들에 대한 효과적인 보정연구로(김영화외, 2004), 선원의 크기가 표준 이상인 검층기

를 사용하여 지층이 잘 접촉된 상태에서 얻어진 검층밀도는 그 신뢰성은 보장할 수 있게 되었다. 그러나 공벽의 굴곡이 심한 시추공(Hearst and Carlson, 1969)이나 케이싱 공에서의 정확한 검층밀도의 산출을 위해서는 아직 해결해야 할 과제가 많이 남아있다. 더욱이 토목시추를 중심으로 한 케이싱 속에서의 밀도검층 기회는 더 증가하는 추세를 보이고 있어, 케이싱 환경에서의 정확한 밀도 산출을 위한 연구가 시급한 실정이다.

케이싱 환경에서의 밀도보정에 대한 이론적인 근거는 spine and ribs 기법(Scott *et al*, 1961)에서 찾을 수 있으며 최근 LWD (logging while drilling) 분야에서의 이격 보정 연구(Stoller *et al*, 1999; Mickael, 2003; Schneider *et al*, 2006)들이 좋은 예가 된다. 김영화외(2006) 또한

*Corresponding author: yhkim@kangwon.ac.kr

케이싱 환경에서의 밀도보정의 기초연구로 케이싱의 존재 없이 공벽과 검층기 간의 거리를 단순히격시켜 이격 거리에 따른 검층기의 반응을 측정하고, 이를 spine and ribs 기법과 연결시킴으로써 저밀도 케이싱에 대한 보정이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 PVC 및 아크릴 케이싱 속에서의 이격에 따른 밀도검층기의 반응특성을 정량화하였으며 이로 부터 플라스틱 케이싱 공에서의 밀도검층에 대한 효과적인 보정 방안을 제시하였다.

실험 환경

보정실험공

보정실험은 밀도가 다른 4개의 NX공경 ($\Phi = 76 \text{ mm}$) 실험공으로 구성된다. 그 중 3개의 실험공은 김영화의(2006)에 의한 보정기초실험에서 사용된 저밀도모델 (low density model: K LW-1), 중밀도모델 (medium density model: K LW-2), 고밀도모델 (high density model: K LW-3)과 동일하며 추가 제작된 초고밀도모델 (very high density model: K LW-4)의 보정 시추공이 함께 사용되었다. 각 밀도 모델들은 시멘트콘크리트 시험체로 제작되었으며, 중밀도 모델이 일반 골재, 저밀도와 고밀도 모델이 각기 경량골재인 실리카골재와 중량골재인 철광석이 추가된 것이고, 고밀도 모델에 철광석의 함량이 더 높여진 것이 초고밀도 모델에 해당된다. 저밀도, 중밀도 및 고밀도 모델들이 각기 $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 503 \text{ cm}$ 의 육면체로 제작되었음에 반하여 추가 제작된 초고밀도 시험체는 지름 150 cm 와 깊이 160 cm 의 원통형이지만 보정체로서의 최소 규격 70 cm 이상을 충족시켜 시험체 크기가 미치는 영향은 없을 것으로 판단하였다. 각 보정 시험공 내에서도 안정된 반응값을 보이는 심도구간을 보정구간(calibration zone)으로 설정하였으며 K LW-1, 2, 3 및 4에서각기 $3.05 \sim 3.25 \text{ m}$, $3.40 \sim 3.60 \text{ m}$, $3.30 \sim 3.50 \text{ m}$, $0.95 \sim 1.25 \text{ m}$ 구간이 이에 해당되며 각 시험체의 밀도는 1.90 g/cm^3 , 2.18 g/cm^3 , 2.59 g/cm^3 및 2.85 g/cm^3 이다.

방법

아크릴 케이싱과 플라스틱 케이싱을 사용하여, 이격 거리에 따른 LSD, MSD, SSD 검층기(김영화의, 2006)의 반응값 변화를 정량화하였다. 이를 위하여 먼저 기초보정을 실시하여 검층기반응값과 밀도와의 관계를 밝혔다. 기초보정 위에서 단순히격보정을 실시하였으며, 케

이싱공의 영향을 확인하는데 필수적인 케이싱 직접 삽입에 의한 이격실험과 제한된 시험공 공간 내에서 가급적 많은 이격실험 자료의 확보를 위한 반원통케이싱의 이격에 관한 보정실험이 함께 수행되었다.

단순이격보정은 케이싱의 존재 없이 검층기와 지층간의 단순히격(이하 단순히격)에 의한 영향만을 측정하는 실험으로 김영화의(2006)에서 실시한 실험과 동일하게 실시되었다. 케이싱 이격실험을 위해서는, 토목시추에서 사용되고 있는 아크릴 재질의 두께 3 mm 외경 70 mm 의 케이싱이 사용되었다. 케이싱은 길이 약 1.5 m 로 잘라 LSD, MSD, SSD 및 소스를 함께 덮을 수 있는 위치에 부착되었으며, 케이싱 측면에 홈을 만들어 줌으로써 케이싱 밖으로 공경팔이 퍼져 측정시스템이 공벽에 부착할 수 있도록 하였다(Fig. 1a). 반원통케이싱 이격실험은 원통형 아크릴 케이싱을 세로로 2등분하여 만든 반원통형 케이싱을 검층기에 부착시키는 방법으로 수행되었다(Fig. 1b). 반원통케이싱 이격실험에서는 두께가 2.5 mm 그리고 5.5 mm 인 두 종류의 PVC 재질의 케이싱이 함께 사용되었다.

이격실험은 보정시험공 K LW-1, 2, 3 및 4에서 케이싱과 측정기를 3 mm 간격으로 이격시키면서 감마감마 측정을 실시하는 방식으로 이루어졌으며 이격거리는 공벽과 측정기간의 거리를 기준으로 하였다. 보정실험에서 사용된 장비는 영국의 Robertson Geologging 사의 검

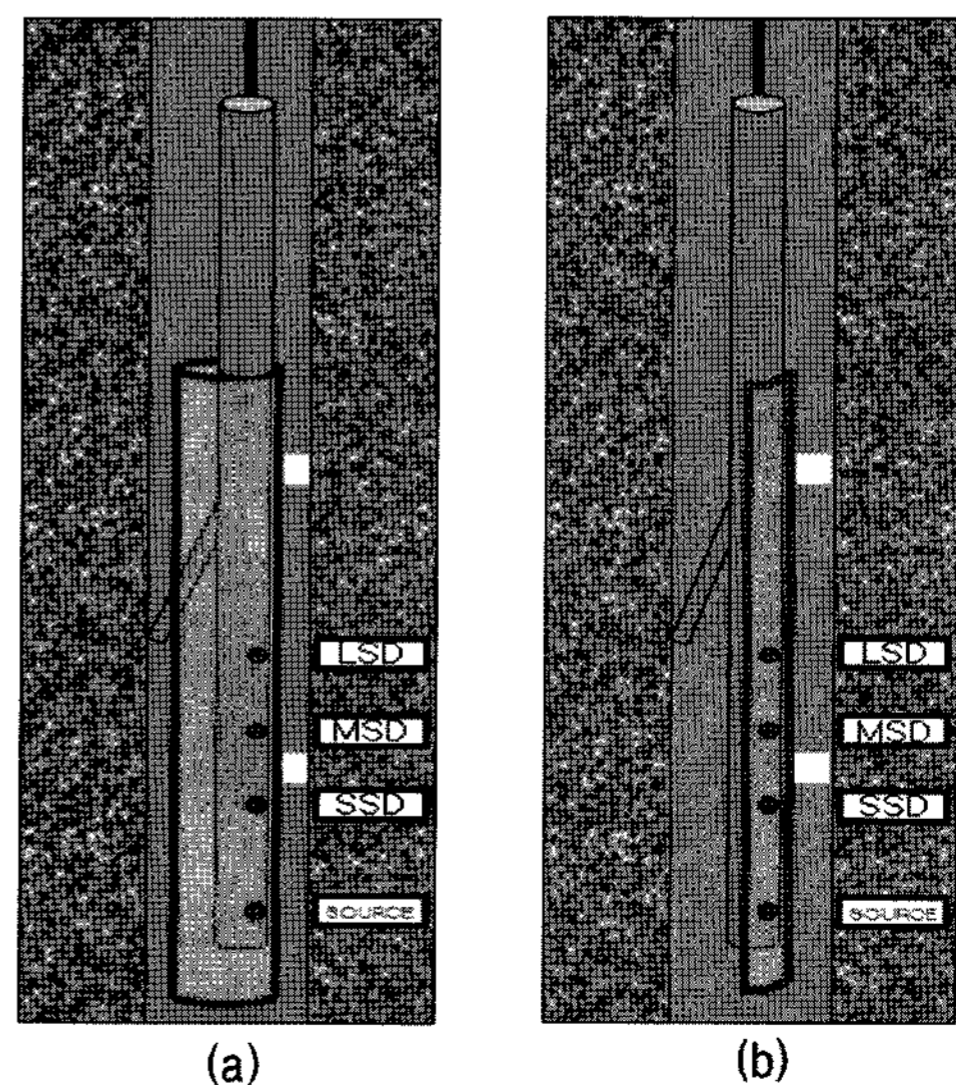


Fig. 1. Schematic figure of the density log for stand-off correction in cylindrical(a) and half cylindrical(b) casings.

층시스템(Robertson, 1994)이며, ¹³⁷Cs 인공감마선 선원을 사용해 1.0 m/min의 검층속도로 수행되었다.

밀도기준선

Fig. 2는 밀도 기초보정의 결과로서 LSD 검출기 반응을 대수스케일로 하고 밀도를 상용스케일로 하여 각기 x축과 y축에 플롯한 것이다. 점선으로 표시된 3개의 시추공만을 이용한 기존의 실험(김영화외, 2006) 결과와 비교할 때 특히 고밀도 영역에서의 밀도차이가 주목되었으며 그만큼 지층의 밀도 보정에 있어 신뢰성이 향상되었음을 보인다. 얻어진 밀도보정식은 식 (1)로 제시되었으며 R²=0.99의 완벽한 선형관계를 보였다.

$$Y = -0.8299 * \log_{10}(X) + 4.3932 \quad (1)$$

밀도기초보정을 거친 각 시험체에서의 이격거리 0 mm 검출기 반응값에 spine and ribs 기법을 적용하여 긴거리검출기 반응값에 대한 짧은거리검출기 반응값을 대수스케일로 플롯한 결과가 Fig. 3으로 제시되었다. Fig. 3에서는 물에서 측정된 반응값이 함께 포함되어 있으며 회귀분석에 의하여 밀도기준선(spine)을 결정할 수 있었다. (a)는 LSD와 MSD 자료를 이용한 산점도(scatter plot)이며 (b)와 (c)는 각기 LSD와 SSD 및 MSD와 SSD 간의 산점도이다. 대수스케일로 표시된 긴거리-짧은거리 검출기반응값의 관계는 직선(점선) 또는 곡선(실선)의 상관으로 분석할 수 있으나 곡선 형태의 상관에서 보다 높은 상관성이 얻어졌다. 곡선상관은 기존의 Spine 방정식들에서 제시되었던 직선 상관과 대조를 보인다. 그러나 이번 실험처럼 저밀도에서 고밀도에 이르기까지 넓은

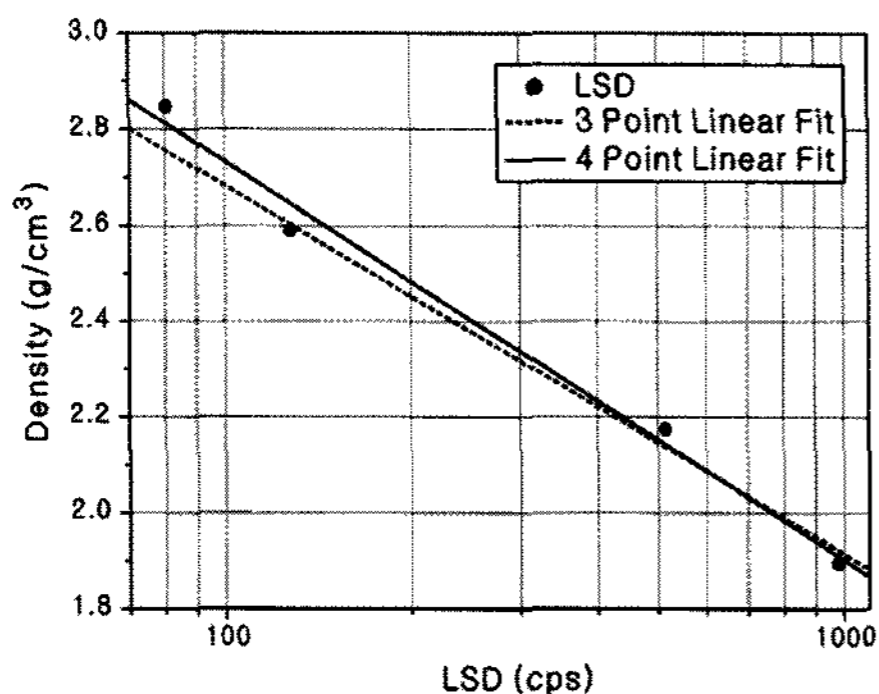


Fig. 2. Comparison of calibration equations between 3 points linear fit and 4 points linear fit obtained from LSD measurement.

밀도영역을 포함하는 밀도검층에서의 밀도기준선은 곡선형태의 상관으로 표시하는 것이 더 합리적인 것으로 판단되었으며 따라서 본 연구에서는 polynomial fitting을 통한 2차 방정식 형태의 밀도기준선 방정식을 결정하였다.

이격시험

단순이격시험

Fig. 3에서 밀도를 달리하는 4개 시험체에서의 단순이

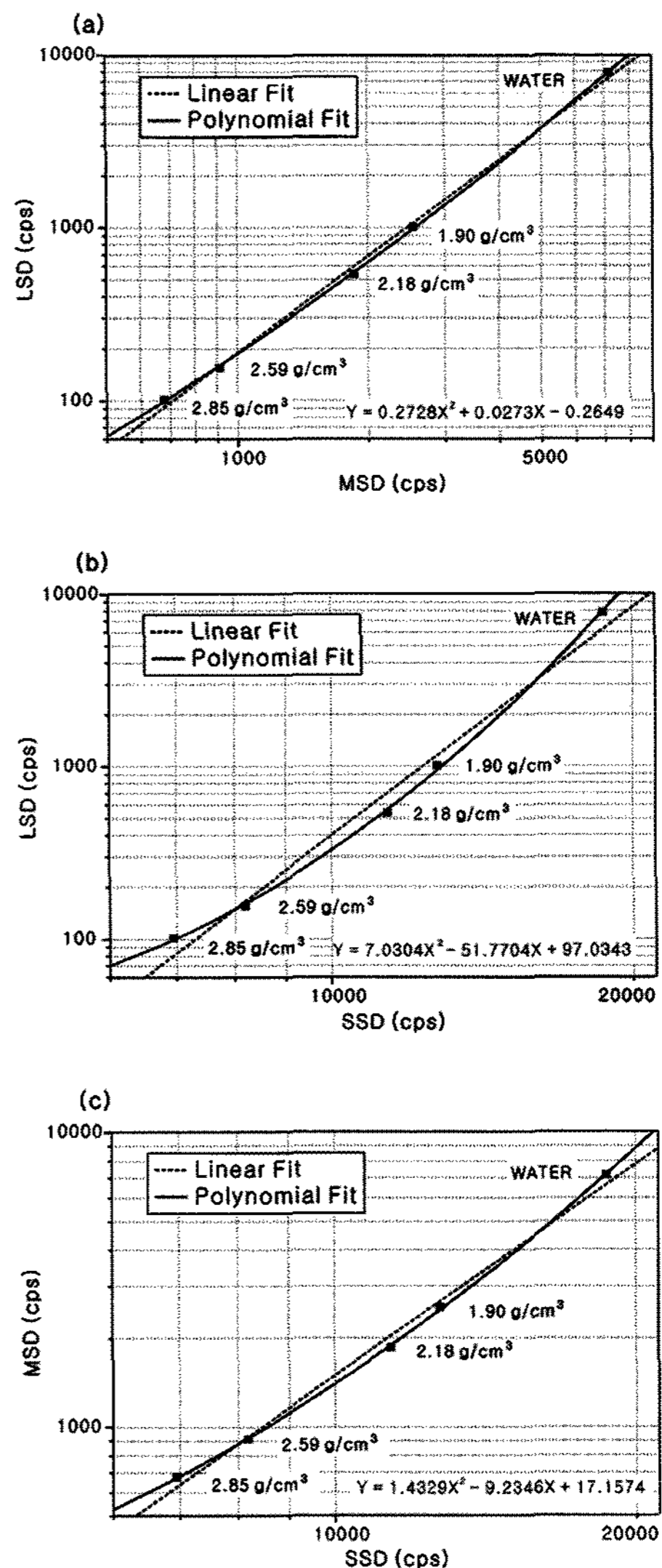


Fig. 3. Determination of spine equation for LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), MSD-SSD(c) data.

격(simple separation) 상태에서 얻어진 반응값을 플롯하여 얻어진 결과가 Fig. 4에 제시되어있다. 이격거리가 커짐에 따른 각 긴거리-짧은거리 검출기 반응값이 이루는 선상배열(이하 이격선)이 잘 관찰되며, 이는 주어진 이격거리 내에서 직선의 관계로 나타났다. LSD-MSD와 LSD-SSD 산점도에 비해 MSD-SSD 산점도에서는 고밀도와 초고밀도 시험체에서 얻어진 이격선의 간격이 상당히 근접해 있음이 관찰되었다. 이 결과는 선원-검출기 간격의 차이가 작은 조합에서 밀도별 이격에 대한 영향이 예민하게 감지되지 못함을 지시하고 있다.

원통 및 반원통 케이싱 이격시험

케이싱을 이용한 보정실험을 위해서 외경 70 mm, 두께 3 mm의 투명 아크릴 케이싱을 사용하여 단순이격시험에서와 동일하게 3 mm 간격으로 실험이 이루어졌으나 NX 규격의 보정시험공에서 외경 70 mm의 원통케이싱에게 허용하는 6 mm의 이격한계 내에서의 자료가 획득되었다.

이에 비하여 아크릴케이싱을 세로로 이등분하여 만든 반원통아크릴케이싱을 부착한 경우 12 mm까지 이격이 가능하게 되었으며 Fig. 5에서 나타난바와 같이 두 실험에서의 검출기 반응특성을 비교할 수 있었다. 즉, 원통케이싱에서 획득된 반응값들은 반원통케이싱을 사용하여 구해진 값에 비하여 상대적으로 상부영역에 플롯되는 양상을 보였다. 이는 반원통케이싱에 비해 원통케이싱을 이용할 경우에 나타나는 상대적으로 높은 감마감마 측정값을 반영하며, 이는 원통케이싱을 사용한 경우, 선원으로부터 나온 감마선이 지층 쪽으로의 균등발산보다는 케이싱 속을 따라 이동한 부분이 더 있음을 시사한다. 그러나 두 경우 모두 거의 동일한 기울기의 회귀선 위에 위치하여 비록 케이싱의 유형에 따른 측정값의 차이는 있지만, 각 검출기별 반응값의 변화율이 일정하여 동일 이격선의 궤적으로 나타났다. 이는 반원통케이싱을 이용한 이격시험이 원통케이싱을 이용한 이격시험을 대신할 수 있는 근거가 될 수 있다.

PVC 반원통케이싱 이격시험

일반적으로 NX시추공에서 주로 사용되고 있는 외경 70 mm의 PVC 케이싱 중에서 두께 2.5 mm와 5.5 mm의 두 가지 재질 사용하여, 3 mm씩 이격거리를 증가시켜 가며 시험을 수행한 결과 11.5 mm까지 이격시험 자료가 획득될 수 있었다.

Fig. 6은 두께 2.5 mm와 5.5 mm의 반원통케이싱을 이용한 이격시험을 통해 얻어진 자료이다. 두 케이싱의 두께 차이가 3 mm이므로 측정시스템과 지층간의 이격거

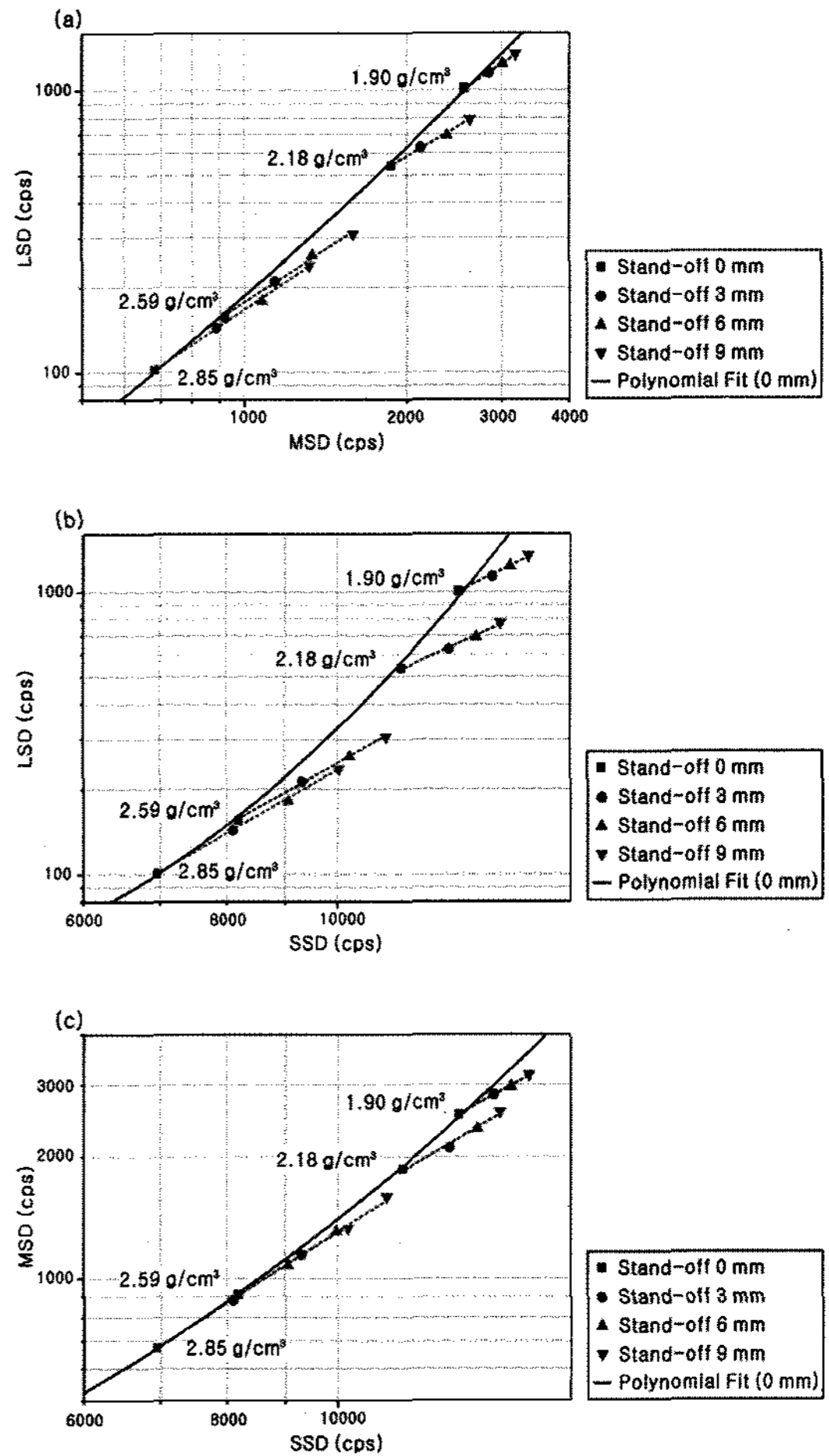


Fig. 4. Stand-off errors on LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), MSD-SSD(c) crossplots obtained from simple separation.

리의 차원에서 본다면 두께 5.5 mm인 케이싱에서의 이격시험의 첫 번째 및 두 번째 자료가 각기 두께 2.5 mm 케이싱 이격시험의 두 번째 및 세 번째 자료에 대비될 수 있다 결과적으로 두께 5.5 mm 케이싱의 경우가 두께 2.5 mm 케이싱의 경우에 비하여 낮은 검출기 반응값을 보이며 이는 케이싱 두께에 의한 상대적으로 높은 감마 감쇄에 기인된 것으로 나타난다. 그럼에도 불구하고 두께 및 이격거리가 다른 모든 케이싱에서의 측정 자료가 긴거리-짧은거리 검출기반응 산점도 상에서 동일한 직선 위에 놓이거나 거의 동일한 기울기의 직선위에 위치함을 보인다.

이것은 선원-검출기 거리 차에 의한 세 개의 조합에서 공통적으로 나타나는 경향이나 거리 차이가 가장 작은 조합인 MSD-SSD 산점도로 갈수록 동일직선상으로부터의

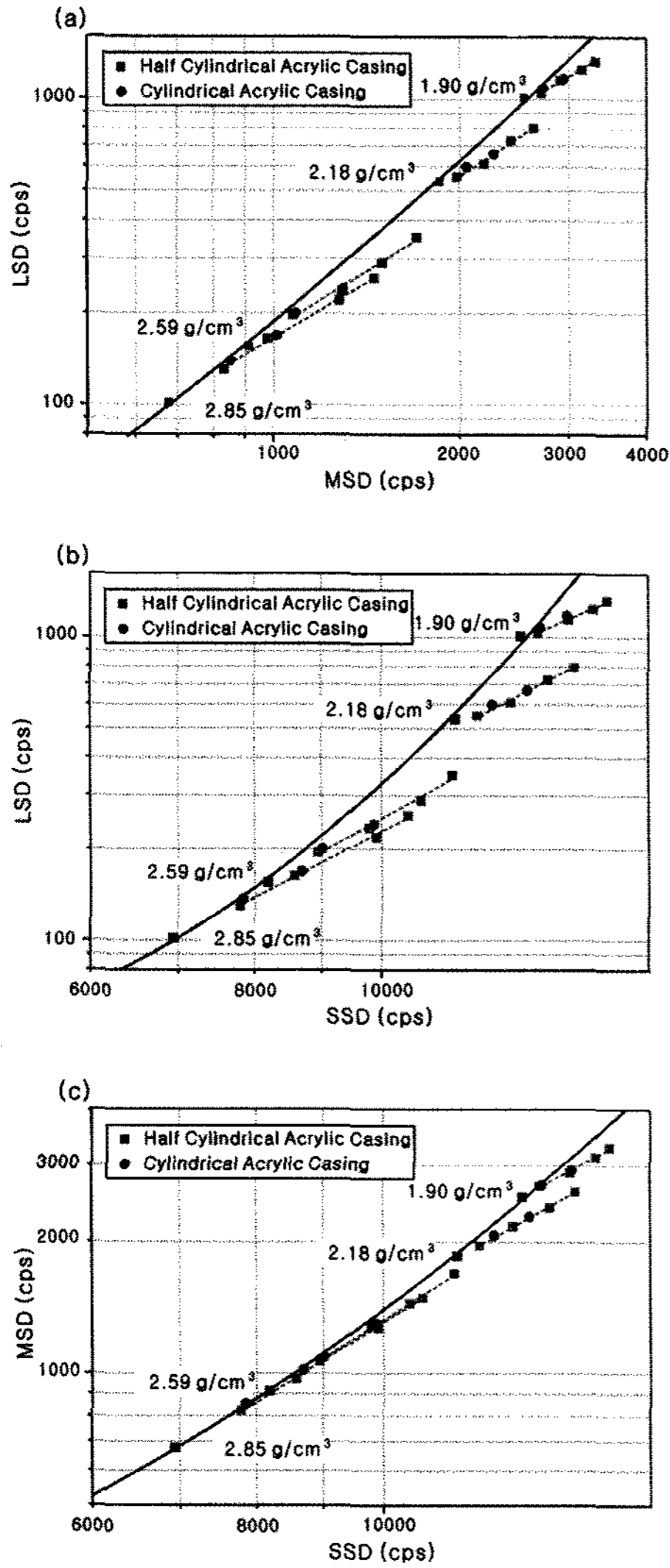


Fig. 5. Stand-off errors on LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), MSD-SSD(c) crossplots obtained from acrylic casings.

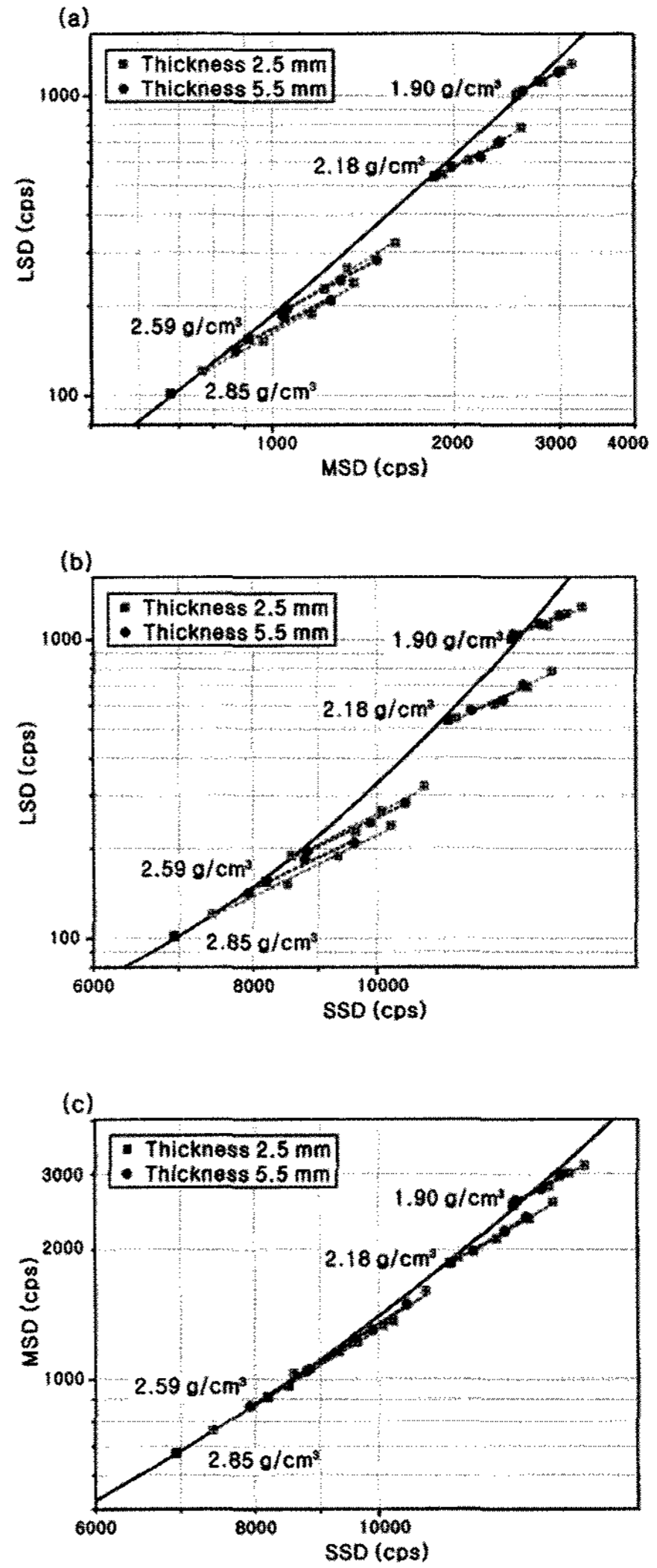


Fig. 6. Stand-off errors on LSD-MSD(a), LSD-SSD(b), MSD-SSD(c) crossplots obtained from half cylindrical PVC casings.

이탈 및 이격선 기울기의 증가에 따른 밀도기준선과의 기울기차 감소가 심화하는 현상이 나타난다. 이러한 경향은 보정 적용에 불리한 조건에 해당되며, 따라서 선원-검출기 거리 차가 가장 큰 조합인 LSD-SSD 산점도가 보정에 사용하기에 가장 좋은 조건으로 나타났다.

이격선 특성

단순이격시험과 아크릴 및 PVC 케이싱을 이용한 모든 이격시험 결과의 가장 큰 특징은 모든 이격시험에서 동일시험체 내 이격선 궤적이 거의 동일한 점이다. 즉, 동

일한 시추공밀도 환경 내에서는 케이싱의 유형에 관계 없이 검출기별 감마반응 값의 변화율이 동일한 것으로 이는 단순이격 및 반원통케이싱 시험자료를 원통케이싱 이격결과와 함께 사용할 수 있음을 보이는 좋은 근거가 된다.

따라서 이러한 관점에서 지금까지 수행된 모든 이격시험의 반응값을 함께 플롯하였으며, 그 중에서 케이싱 보정에 가장 좋은 조건으로 나타난 LSD-SSD 관계를 이용한 결과가 Fig. 7에 제시되었다. 이격선 1, 2, 3 및 4는 각각 시험체 KLV-1, 2, 3 및 4에서 획득된 이격선을

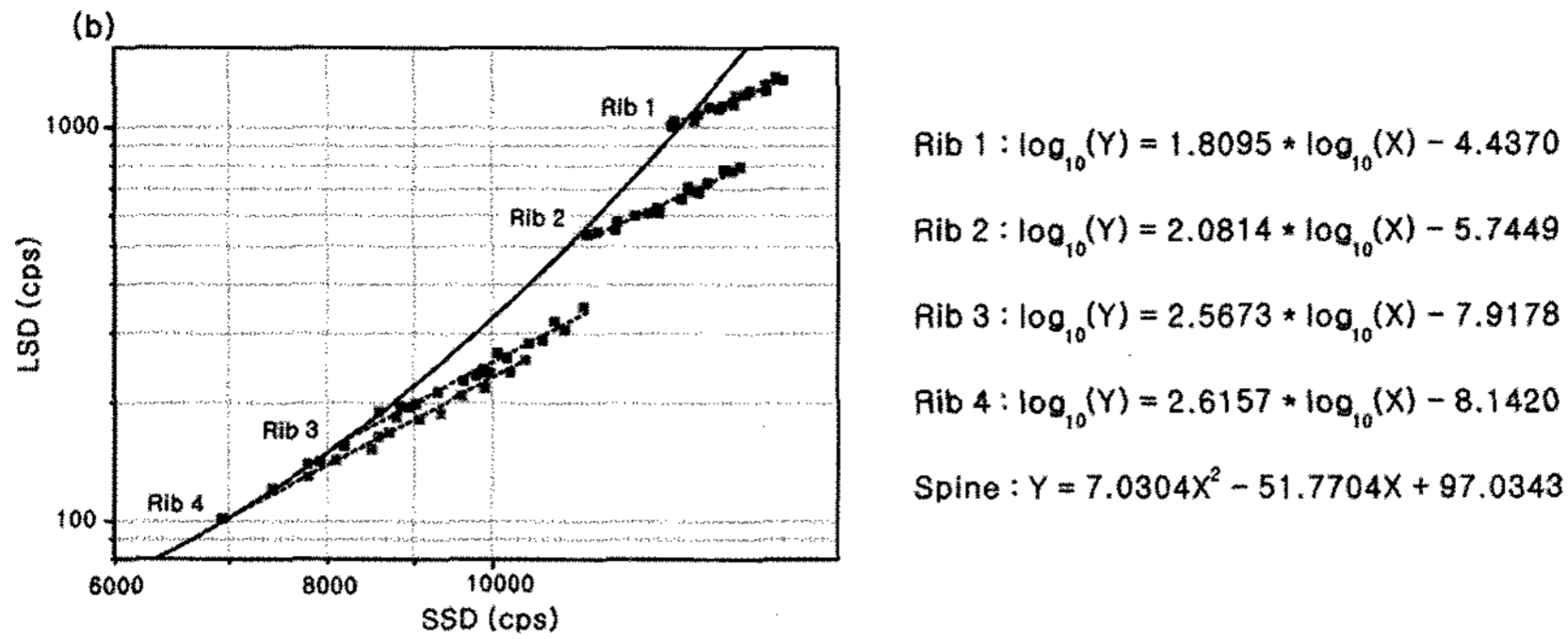


Fig. 7. Determination of rib lines from LSD-SSD crossplot.

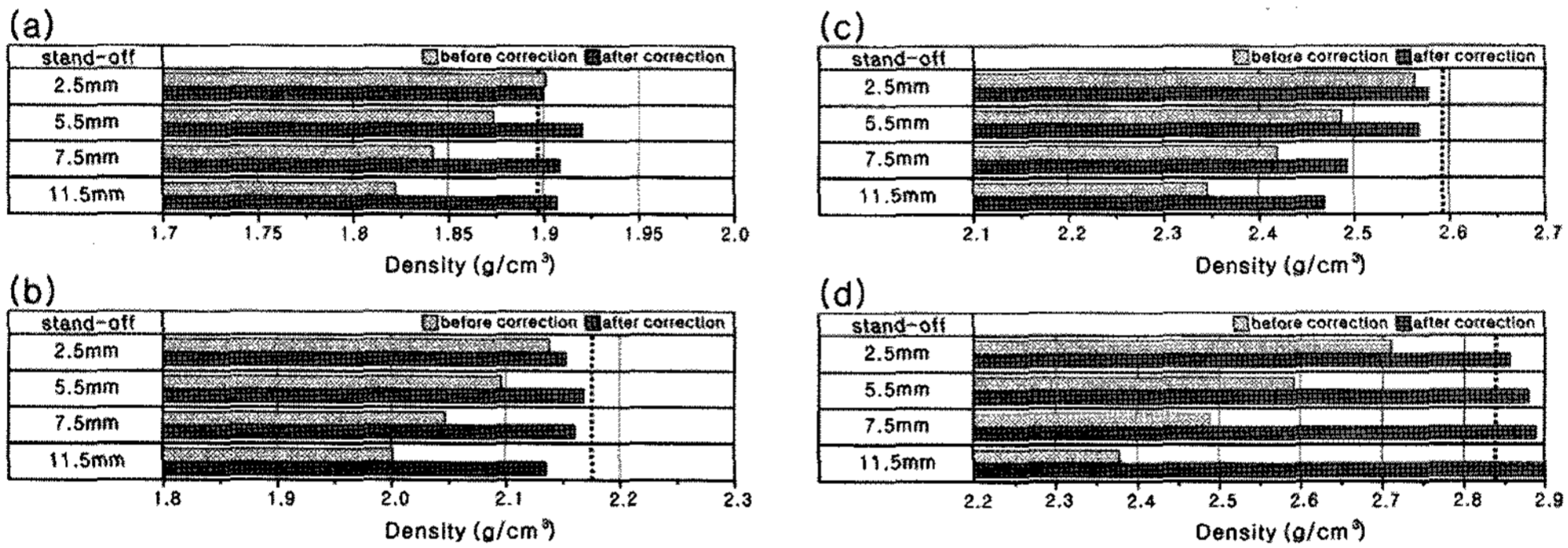


Fig. 8. Comparison between log densities before and after the stand-off correction in low(a), medium(b), high(c) and very high(d) density models. Core density is shown as the dotted line.

표시하며, 여기에서의 이격선들은 회귀분석에 의하여 직선으로 표시할 수 있었다. 낮은 밀도모델의 이격선(Ribs 1, 2)에 비하여 높은 밀도모델(Ribs 3, 4)로 갈수록 이격선의 기울기가 커지는 경향이 주목된다. 밀도 증가에 따른 이격선 기울기의 증가는 밀도증가에 따라 밀도기준선의 기울기 차이가 감소하는 경향으로 나타났다.

이러한 밀도 증가에 따른 이격선 기울기의 증가는 Fig. 7에서 구해진 회귀방정식으로 잘 나타나, LSD-SSD 산점도에서 나타난 이격선 1, 2, 3, 4에서의 각 이격선 기울기는 1.81, 2.08, 2.57, 2.62로 점차 증대되는 경향을 잘 보이며 이들 이격선 기울기(Y)가 밀도(X)와 가지는 상관식은 다음과 같이 나타났다.

$$Y = 0.8426 * X + 0.2264 \quad (2)$$

즉, 이격시 나타나는 긴거리검출기와 짧은거리 검출기에서의 반응비, 즉 기울기는 검출기와 시추공벽 사이의 이격거리에 상관없이 일정한 값으로 표시할 수 있으며 그 값은 밀도의 함수로 정의될 수 있었다.

기법의 적용과 검증

본 연구에서 참밀도의 결정은 LSD-SSD 산점도에서의 밀도기준선 결정, 각 감마감마 측정점(x, y)점을 지나는 이격선 방정식 결정, 이격방정식과 밀도기준선과의 교점 구하기, 그리고 교점에서의 밀도값 구하기의 4 과정으로 이루어진다. 밀도기준선 결정은 앞 절에서 설명된바와 같으며, 가장 중요한 부분은 이격방정식의 결정이다. 밀도에 따라 달리 나타나는 이격선 기울기를 차등 적용하기 위해서는 밀도값이 결정되어야 하지만 밀도는 미지수인 상태이기 때문에 이격선의 평균 기울기를 적용해 밀도기준선과의 교점을 구해 임시 밀도를 구하고, 그 밀도에서의 이격선 기울기(식 2)를 측정점에 적용하여 밀도기준선과의 교점을 구하는 방법을 사용하였다. 최종적인 보정밀도는 교점에서의 LSD감마값을 밀도보정식(식 1)에 대입함으로써 쉽게 구할 수 있었다.

Fig. 8은 각 모형 실험공 PVC케이싱 속에서 얻어진 LSD 자료를 이용하여 케이싱보정을 거쳐 얻어진 결과

로서 케이싱보정 없이 구한 밀도와 코어밀도 값을 함께 비교하고 있다. 우선 기존의 밀도보정식만 적용하여 밀도를 산출하였을 경우, 모든 보정공에서 이격거리가 늘어날수록 밀도가 낮아짐을 보인다. 11.5 mm 이격의 LSD 밀도를 예로 들 경우, 코어밀도에 비하여 저밀도공인 K LW-1은 약 0.14 g/cm^3 , 중간밀도인 K LW-2는 0.18 g/cm^3 , 고밀도인 K LW-3는 0.25 g/cm^3 , 초고밀도인 K LW-4는 0.47 g/cm^3 정도의 차이를 보여 지층 밀도가 높아짐에 따른 오차 증대현상이 뚜렷하게 나타났다.

이에 비하여 케이싱보정 기법의 적용 결과는 모든 경우에 있어서 보정 밀도가 코어밀도에 근사해짐을 보였다. 보정밀도와 코어밀도를 비교하였을 때 0.05 g/cm^3 이내의 작은 오차를 보였고, 대체적으로 낮은 밀도의 공일수록 이 오차는 줄어들어 저밀도(K LW-1)와 중밀도(K LW-2) 공에서는 0.03 g/cm^3 이내의 상대적으로 매우 작은 오차를 보였다.

결 론

본 연구에서는 강원대학교 내에 위치한 지구물리검층 보정용 시추공 K LW-1, 2, 3 및 4를 이용해 밀도보정식을 산출하였고, 케이싱 공 상황을 염두에 둔 이격시험을 실시하고 케이싱 영향을 보정하는 방안을 제시하였다.

이 실험의 핵심은 실제 현장의 케이싱 공과 유사한 보정공 환경의 구현과 검층기의 효과적인 이격방법의 선택에 있었으며 이를 위해 외경 70 mm, 두께 3 mm, 길이 1.5 m의 아크릴 케이싱을 검출기 위에 부착시키고 그 반대편에서 공경팔을 펴게 하여 측정하는 방법을 사용하였다. 아울러 실제의 시추공환경 구현과 NX 시추공 내 제한된 공간에서의 이격거리 확보란 두 가지 목적을 달성하기 위해 반원통형의 케이싱을 제작하여 함께 사용하였다. 원통케이싱과 반원통케이싱에서 측정된 감마반응값과 비교한 결과, 케이싱 형태에 따른 감마반응값의 차이가 분명히 존재하는 반면에, 각 검출기별 감마반응값의 변화율만은 케이싱의 형태에 무관하게 동일한 것으로 밝혀졌다. 이는 반원통케이싱만으로도 케이싱 환경을 충분히 대신할 수 있음을 나타내는 중요한 근거로서, 반원통케이싱 자료와 단순이격실험자료가 함께 케이싱 환경에서의 밀도보정에 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

이를 근거로 모든 이격시험 자료를 사용하여 이격선을 작성 비교한 결과, 이격선은 케이싱의 종류와 이격거리에 상관없이 동일 밀도모델에서 동일한 기울기의 직선

으로 제시되었으며 이격선의 기울기는 밀도의 함수로 나타낼 수 있는 것으로 밝혀졌다. 이격물질의 종류와 모양을 달리한 모든 측정에서 긴거리검출기반응 대 짧은거리검출기 반응의 비가 일정하게 관찰된 현상은 케이싱의 유무와 종류에 따라 이격선의 기울기가 변화할 수도 있다는 실험전의 우려를 불식시킨 결과로서, 이는 선원으로부터 케이싱, 유체, 지층, 유체, 케이싱을 거쳐 검출기로 들어오는 감마선의 경로가 대체로 일치하기 때문인 것으로 보이나 아크릴과 플라스틱 케이싱의 밀도(1.21 g/cm^3 및 1.48 g/cm^3)가 공극유체의 밀도(1.0 g/cm^3)에 비하여 크게 차이가 나지 않음도 영향을 미친 것으로 판단된다. 밀도차가 미치는 영향에 대해서는 향후 철케이싱 환경에서의 밀도보정 연구가 수행된다면 보다 확실한 결론이 가능할 것으로 예상된다.

한편 밀도기준선은 기존에 알려진 직선의 관계보다는 곡선의 관계로 나타났으며, polynomial fitting을 통한 2차 방정식 형태의 밀도기준식이 산출되었다. 결과적으로 밀도기준선과 밀도에 따라 기울기가 차등 적용된 이격선과의 교점을 구하는 방식으로 케이싱 영향이 보정된 밀도값을 구하는 방법이 제시되었다. 실험에 활용된 4개의 모형공을 이용한 검층실험에서는 거의 모든 경우 0.05 g/cm^3 이내의 오차 범위 안에서 참 밀도에 근사한 보정밀도를 구할 수 있었으며, 특히 경량 밀도(K LW-1)와 일반 밀도(K LW-2) 시험체만으로 국한하였을 경우의 보정밀도는 참밀도와 0.03 g/cm^3 이내의 오차 범위에 있는 것으로 나타났다. 실제 현장 케이싱 환경에서의 지층 밀도가 2.4 g/cm^3 이하의 저밀도 구간임을 감안한다면, 이 밀도보정 방법은 PVC 토목시추공에서의 현장밀도 측정에 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 김기주, 2001, 밀도 검층에서의 보정계수 산출을 위한 기초실험과 자연감마 보정, 강원대학교, 이학석사학위논문. 53p.
- 김영화, 김기주, 임헌태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검층 검출기 보정에 관한 기초연구, 지구물리, 7, 237-245.
- 김영화, 김지훈, 이성진, 2006, 케이싱 환경에서의 밀도 자료 보정을 위한 기초연구, 대한지질공학, 16, 429-435.
- 황세호, 이상규, 1999, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출, 한국지구물리학회 1999년도 제2회 학술발표회, 161-162.
- Flaum, C., Galford, J. E., Hastings, A., 1987, Enhanced vertical resolution processing of dual detector gamma-gamma density logs, SPWLA Twenty-Eighth Annual Logging Symposium. M1-25.

- Hearst, J. R., Carlson, R. C., 1969, The RIDS-A density logger for rough holes: *Geophysics*, 34, 222-234.
- Mickael, M. W., 2003, Standoff compensation for nuclear measurements, United States Patent, Patent No. US 6590202 B2.
- Pickell, J. J., Heacock, J. G., 1960, Density logging: *Geophysics*, 25, 891-904.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/Applications, Schlumberger Educational Services, Houston, 13-19p.
- Schneider, D. M., Efremov, S. V., 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., 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.
- Stoller, C., Urmi, D. G., Philip, O. G., Nihal, I. W., Wraight, P. D., 1999, Method for determining formation density photo-electric factor with a multi-detector-gamma-ray tool, United States Patent, Patent No. US 5912460.
- Tittman, J. and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma): *Geophysics*, 30, 284-294.

이성진

(주)지오브러그 코리아

157-832 서울시 강서구 내발산2동 704-15

Tel: 02-3665-0631

Fax: 02-3665-2827

Email: isj@geobrug.co.kr

김영화

강원대학교 지구물리학과

200-701, 강원도 춘천시 효자동 강원대길 1

Tel: 033-250-8582

Fax: 033-244-8580

Email: yhkim@kangwon.ac.kr

황병철

강원대학교 지구물리학과

200-701, 강원도 춘천시 효자동 강원대길 1

Tel: 033-250-8582

Fax: 033-244-8580

Email: choly01@hanmail.net