

감마-감마(밀도)검층의 품질관리

황세호*, 신제현*, 박권규*, 박윤성**, 이상규*, 조철현***

* : 한국지질자원연구원

** : 충남대학교

*** : 지하정보기술(주)

1. 서론

최근 물리검층은 지반평가, 지하수 및 환경오염조사, 지열 및 지하자원평가 등에 다양하게 이용되고 있다. 밀도검층은 1950년대 말 석유검층에서 지층의 체적밀도나 공극을 추정할 목적으로 개발되었으며 초기의 밀도검층 sonde는 방사능소스와 1개의 감마선검출기로 구성되며 시추공의 영향을 최소화하기 위하여 활 모양의 스프링으로 sonde를 공벽에 밀착시켜 측정하였다(Baker, 1957; Campbell and Wilson, 1958; Pickell and Heacock, 1958). 밀도검층에서 가능하면 정확하게 밀도를 측정하기 위해서는 sonde를 공벽에 밀착시켜 틈새를 없애주어야 하지만 공벽의 거칠기 또는 미고결층에서는 시추 이수에 의한 mudcake 등의 영향을 받기도 한다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 1960년대 초에 감마선 측정 검출기가 2개인 보상형밀도 sonde(compensated density sonde)가 개발되었다(Wahl et al., 1964). 개발된 sonde는 직경이 10 cm 이상으로 석유분야 검층에는 적절한 크기지만 보통 10 cm 이하의 소구경 시추공을 이용하는 지반조사나 자원탐사용 시추공에 적용하기에는 적절하지 않았다. 소구경 시추공에 대한 보상형밀도검층은 1970년 중반, 미국의 Comprobe사에서 sonde를 개발하여 가능해졌으며 당시에 개발된 sonde의 직경은 최근의 장비와 동일한 51 mm 였다.

최근 국내에서의 밀도검층은 주로 지반조사 목적으로 이용되고 있으며 점차 수요도 증가하는 추세이다. 100 mCi의 ^{137}Cs 을 이용하는 밀도검층은 방사능소스의 관리, 운반 등에 관한 법적인 규제를 받기 때문에 국내 기업에서 밀도검층을 수행하는데 많은 어려움이 있다. 최근에는 원자력법에 규제를 받지 않는 방사능선원(예, $100\mu\text{Ci } ^{60}\text{Co}$)을 이용하는 장비를 일부 제조회사가 개발하여 시판하고 있기도 하다. 현재 밀도검층은 지반의 동탄성계수 측정, 특히 내진설계가 필요한 연약지반에 대한 전단계수 (Shear modulus)의 계산에 이용된다. 밀도검층 자료를 정량적으로 이용하려면 밀도검층에서 측정되는 밀도값이 어떠한 과정을 통하여 측정되는지를 파악할 필요가 있다. 물론 체적 밀도와 전자밀도와 관계, ^{137}Cs 을 이용하는 경우 콤프턴 산란효과 등에 대한 이해가 필요하며 밀도검층의 일반적인 것은 민경덕 등 (1987), Hearst et al., (2000), 자료처리에 대한 것은 송윤호 등 (2000)에 기술되어 있다. 본 논문에서는 밀도검출기의 교정과정을 현재, 국내에서 이용하고 있는 영

국 Robertson Geologging사의 밀도검층 장비(Sidewall density gamma sonde)를 중심으로 간단하게 소개하며 감마-감마(밀도)검층에서 자연감마선의 영향에 대한 특성을 고찰하기로 한다.

2. 감마-감마(밀도)검층기의 교정

밀도검층에서 측정하는 밀도는 다양한 환경, 즉, 밀도 및 공경변화, 방사능선원의 세기, 자연감마선의 영향, 방사능선원과 검출기와의 거리 등 다양한 환경에 대한 시험 결과를 이용한다. 밀도검층기의 교정에 대한 전반적인 것은 이상규 등(1998)에 기술되어 있는데 이상규 등(1998)에서는 장비의 제조사인 영국 Robertson Geologging사에서 제공하는 자료만을 이용하였기 때문에 보다 정확한 장비의 특성 이해에는 한계가 있었다. 그림 1은 영국 Robertson Geologging사의 1차 교정곡선으로 2~8 인치까지의 시추공경과 다양한 밀도에 대한 측정 결과이며 방사능선원은 100 mCi의 ^{137}Cs 이고 교정에서 이용한 매질은 균질, 등방성이다. 그림 1의 1차 교정곡선을 보면 밀도가 작을수록 측정되는 계수율이 높아 밀도가 높은 경우보다 자료의 통계적인 안정성이 높은 것을 알 수 있다. 그리고, 방사능소스와 밀도측정에 이용하는 감마선검출기와(LSD: Long Spaced Density로 표기)의 거리가 48 cm로 검출기에 측정되는 계수율이 감소하는 단점은 있지만 시추공의 공경변화 등에 대한 영향이 작은 장점이 있다. 그림 1의 교정곡선을 모든 감마-감마(밀도) sonde에 대하여 작성하기 어렵기 때문에 1개의 표준 sonde에 대한 반응곡선을 교정 표준 곡선으로 작성하고 그림 2와 같은 2차 교정 과정을 이용한다. 국내에서 이용하는 감마-감마(밀도) sonde는 감마선을 측정하는 검출기가 2개 또는 3개가 장착되어 있지만 2개의 검출기에서 측정되는 계수율을 이용하여 밀도로 환산하는 dual detector type은 아니며 single detector type인 점을 유념해야 하며, 따라서 다양한 시추공 환경에 대한 보정은 현실적으로 어려운 점이 많다.

그림 2는 밀도검층의 2차 교정곡선을 나타낸 것으로 가로축은 장비 사용자가 이용하는 sonde의 측정계수율(measured CPS)이고 세로축은 Aluminum과 물(water)에 대한 표준계

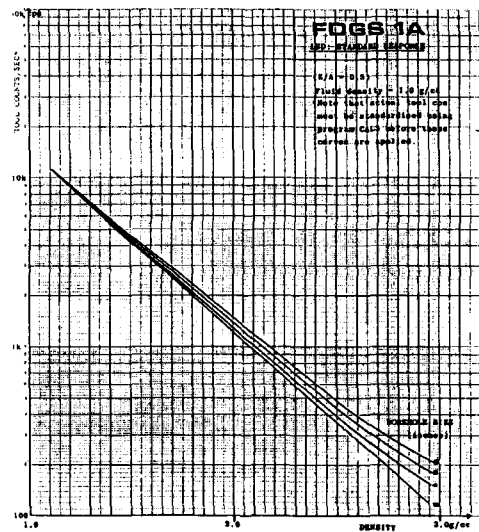


그림 1. 영국 Robertson Geologging사의 gamma-gamma(density) 검층 1차 교정 곡선.

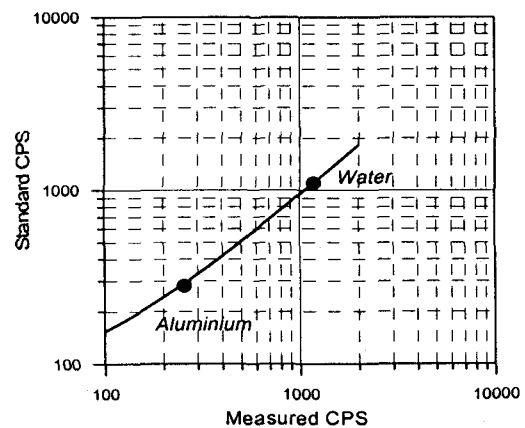


그림 2. 밀도검층 2차 교정 예.

수율(standard CPS)이다. 여기서 표준계수율은 밀도검층의 1차 교정에서 이용한 sonde를 2차 교정장치인 Aluminum과 물에서 측정한 계수율이며 장비 사용자가 측정한 계수율(CPS)과의 관계식 유도에 활용된다. 즉, 밀도검층에서 장비 사용자가 측정한 계수율을 표준 계수율로 환산하고 다시 표준계수율은 1차 교정결과를 이용하여 체적밀도로 환산한다. 이때, 그림 1의 교정곡선에서는 시추공경 변화에 대한 영향을 고려하여 밀도로 환산한다.

그림 3은 AAA 지역에서 작중 물리검층 자료로 파쇄대 등의 공경변화가 있는 시추공에서의 공경검층, 자연감마선 검층, LSD와 HRD(High Resolution Density로 방사능선원과 검출기와의 거리가 24 cm임), LSD에 유도된 밀도검층, slowness(P파 속도의 역수), 완전 파형음파검층 자료를 나타낸 것으로 파쇄대 또는 연약대에서의 물리검층 반응이 매우 양호한 것을 알 수 있다. 그림 4는 그림 3의 자료 중에서 LSD와 HRD를 cross plot한 것으로 대부분의 자료가 선형의 관계를 보이거나 일부 자료들은 선형의 관계에서 벗어나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경우 HRD에 대한 1차 교정곡선이 있으면 석유검층에서 이용하는 방법을 적용하면 보다 정밀한 보정이 가능할 것이다. 현재 국내의 밀도검층 주요 활용분야는 지반조사

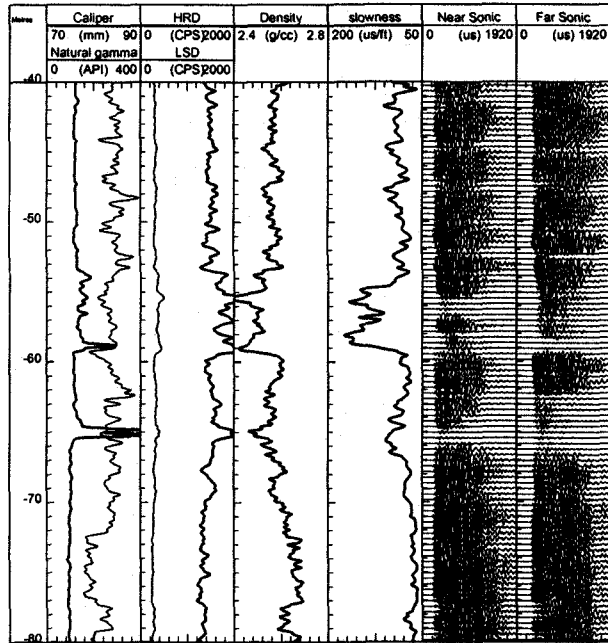


그림 3. AAA 지역에서의 물리검층 자료.

분야로 측정의 정밀도가 석유검층 분야보다는 낮으나 정밀하고 보다 신뢰성 있는 측정을 위해서는 LSD는 물론 HRD에 대한 1차 교정 곡선도 필요하다 할 수 있다.

gamma-gamma(density) 검층에서 고려해야 할 사항 중의 하나는 자연감마선의 영향이다. 콤프톤 산란 효과를 이용하여 체적밀도를 측정할 때 검출기에는 자연감마선은 물론 밀도검층기 장착된 방사능선원에 의해 시추공 주변에서 산란된 감마선도 동시에 측정되기 때문이다. 대부분의 밀도검층용 sonde는 자연감마선의 영향이 받지 않도록 장비를 제작하지만 장비특성에 따라서 자연감마선에 민감한 경우도 있다. 김기주 (2001)에 의하면 밀도검층 자료와 실내물리시험에 의한 밀도 측정값을 이용하여 자연감마선의 영향을 보정한 사례가 있다. 김영화와 김기주(1999), 김기주 (2001)는 100 mCi의 ¹³⁷Cs을 이용하는 영국 Robertson Geologging사의 Sidewall density gamma sonde를 측정 자료 중에서 밀도환산에 이용되는 LSD의 측정자료가 자연감마선에 영향을 받고 있음을 확인하고 자연감마선의 영향을 고찰한 사례가 있다. 콤프톤 산란효과를 이용하는 gamma-gamma(density)검층에서는 지층의 밀도측정에 이용되는 감마선 검출기가 자연감마선의 영향이 최소화되도록 설계한다. 그림 5는 한국지질자원연구원내에 위치하는 300 m 의 시추공에서 실시한 밀도검층과 자연감마선검층 자료를 대비도표로 나타낸 것으로 이 시추공이 위치한 지역의 지질은 화강암이며 높은 자연감마선을 보이는 것은 pegmatite이다. 그림에서 자연감마선의 세기에 따른

밀도의 종속적인 변화가 없는 것으로 판단되며 이와 같은 결과는 gamma-gamma (density)검층에서 자연감마선의 영향은 모든 장비에 나타나는 일반적인 현상이기보다는 장비의 고유한 특성으로 해석할 수 있다 (단, 100 mCi의 ^{137}Cs 를 이용하는 영국 Robertson Geologging사의 Sidewall density gamma sonde에 대한 결과임). 그러나, gamma-gamma(density)검층장비의 사용에 앞서, 자연감마선의 영향을 받는지의 여부 또는 받는 경우 보정을 어떻게 해야하는지에 대한 대책은 필요하다.

^{137}Cs 방사능소스를 이용하여 밀도검층을 수행할 때 자연감마선의 영향을 보정하는 방법으로는 방사능소스를 부착 또는 방사능소스를 부착하지 않는 상태에서 밀도환산을 위한 검출기에서 측정되는 감마선을 비교하면 자연감마선의 영향을 쉽게 파악할 수 있다 (Hearst and Carlson, 1969). 송윤호 등 (2000)의 제 3장 물리검층에서 한국 지질자원연구원이 보유·운용중인 gamma-gamma(density)검층장비는 방사능소스를 부착 또는 부착하지 않은 상태에서 측정된 자료의 비와 자연감마선의 세기와의 관계를 보면 자연감마선이 높은 경우 4 % 정도까지의 영향이 있으나 자연감마선의 세기와는 별다른 상관성을 보이지 않았다. 따라서, 현재까지의 밀도검층 자료를 분석한 결과 밀도검층에서 자연감마선의 측정하는 장비에 따라서 편차는 있지만 현재 한국지질자원연구원에서 지층의 밀도 측정에 이용하는 밀도검층기는 자연감마선의 영향은 무시할 만한 수준인 것으로 판단된다. 그러나, 우라늄이나 희토류와 같이 감마선의 세기가 일반적인 수준보다 매우 높은 경우에는 자연감마선의 영향을 반드시 확인할 필요가 있다.

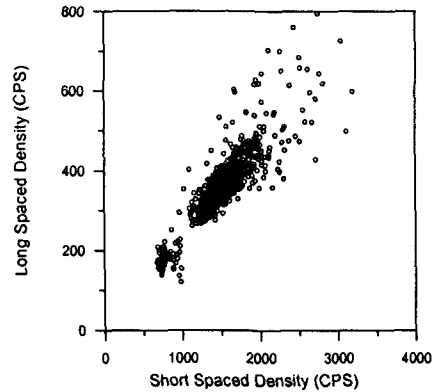


그림 4. LSD와 HRD의 대비.

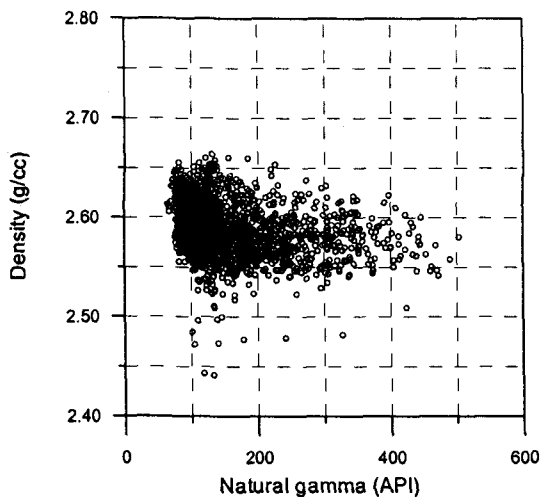


그림 5. 한국지질자원연구원에 위치한 시추공에서의 밀도검층 결과로 밀도 측정에 이용한 검층장비는 밀도와 자연감마선은 상관성을 보이고 있지 않다.

3. 방사능선원의 세기가 작은 gamma-gamma (density) 검층에서 자연감마선의 영향에 대한 고찰

최근에 지층의 밀도측정에 대한 필요성이 증가하고 있는데 gamma-gamma (density) 검층에서 100 mCi의 ^{137}Cs 을 이용하는 경우, 일반 지반조사회사는 방사능동위원소의 관리 등에 대한 어려움으로 100 mCi ^{137}Cs 을 이용한 밀도측정은 현실적으로 불가능할 정도이다. 석유검층에서는 자연감마선의 영향을 받지 않는 광전효과를 이용하여 지층의 밀도를 측정하고 있는데 이때의 선원은 주로 ^{60}Co 을 이용한다. 이와 같은 경우, gamma-gamma(density)검층과는 달리 litho-density 검층이라 한다. 최근 국내에서

는 방사능 이용에 대한 규제를 받지 않는 100 μ Ci의 60Co 방사능선원을 이용하는 gamma-gamma(density)검층기(영국 Roebertson Geologging)가 도입되어 운용되고 있다. 이 장비(small-source density sonde)는 방사능선원의 세기가 작아 규제의 대상에서는 자유롭지만 자연감마선의 영향에는 자유롭지 못한 양면성을 지니고 있다. 또한 137Cs보다 수배정도 반감기가 짧기 때문에 이에 대한 보정도 필요하다. 다음은 국내에 도입되어 지반 조사에 이용되고 있는 영국 Robertson Geologging사의 small source density sonde의 특성에 대한 분석 결과중의 일부이다.

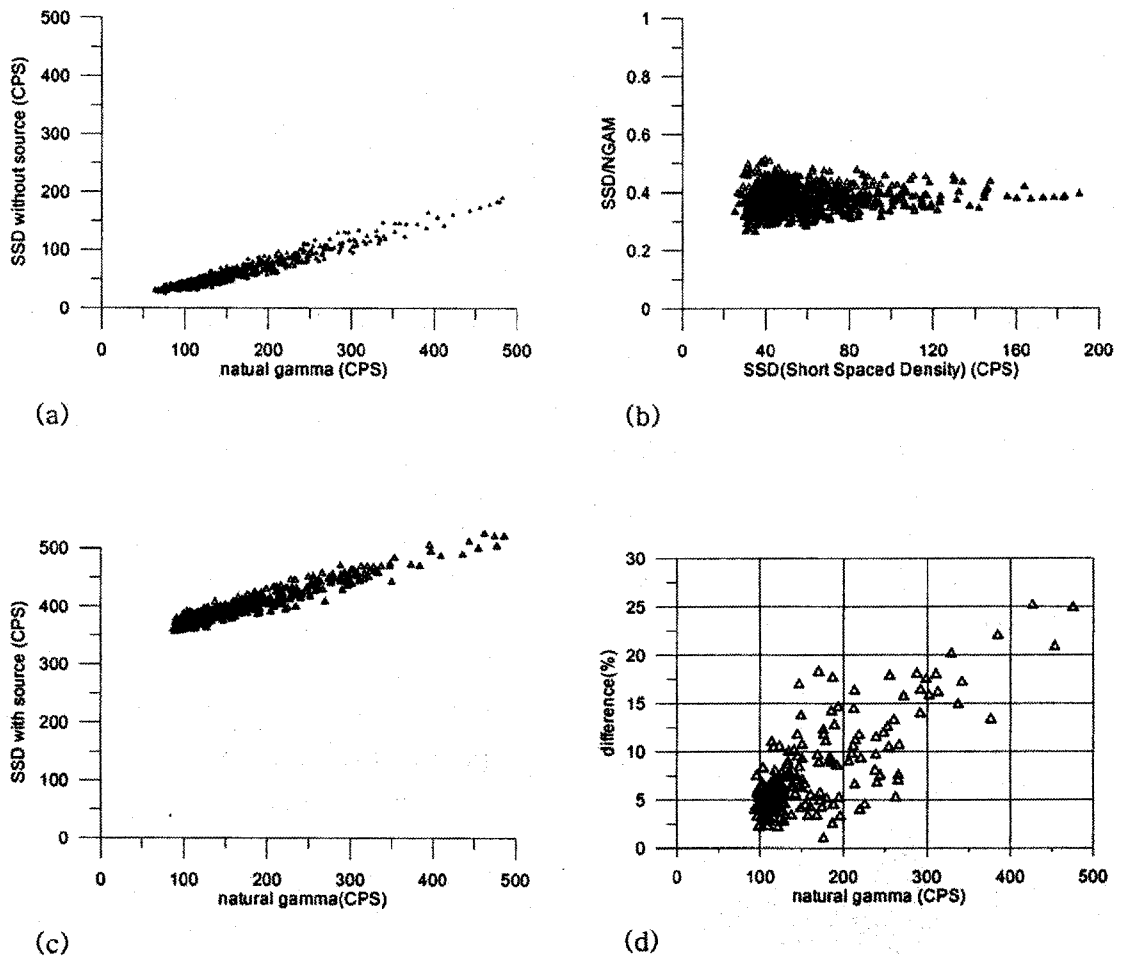


그림 6. 100 μ Ci의 60Co 선원을 이용하는 small-source density sonde의 자연감마선 영향. (a)와 (b) 선원이 없는 경우의 자연감마선의 영향, (c) 선원이 있는 경우의 자연감마선의 영향, (d) 자연감마선의 세기에 따른 100 μ Ci의 60Co 선원을 이용하는 small-source density sonde로 측정된 밀도오차.

그림 6은 한국지질자원연구내에 위치하는 시추공에서 small-source density sonde를 이용하여 측정된 결과를 분석한 결과이다(측정은 선원을 부착 또는 미부착 상태에서 2회 측정 하였으며 반복구간은 없음). small-source density sonde에는 2개의 감마선검출기가 있으며 선원과 검출기 사이의 거리는 SSD(short Spaced Density)가 24cm, LSD(Long Spaced

Density)는 36cm이고 장비의 소개책자나 장비사용설명서에는 2개의 검출기에서 측정된 감마선 계수율의 비를 이용하여 지층의 밀도를 환산한다고 소개되어 있으나 실질적으로는 LSD는 이용하지 않으며 SSD에서 측정된 계수율만 이용한다. 이와 같은 이유는 선원의 세기가 100 mCi의 ^{137}Cs 을 이용하는 경우보다 상대적으로 작은 $100\mu\text{Ci}$ 의 ^{60}Co 선원을 이용하기 때문에 SSD와 LSD에서 자연감마선의 영향을 많이 받기 때문이다. 밀도환산에는 앞에서 소개한 공경변화에 대한 보정은 없으며 자연감마선의 영향을 보정하기 위하여 동일한 sonde에서 자연감마선을 측정한다. 자연감마선의 영향은 SSD 계수율(CPS)의 약 39%이며 김기주(2001)의 경우에는 약 38%로 매우 높은 것을 알 수 있다. 그림 6의 (a)는 선원이 없는 경우에 측정한 결과로 SSD에서의 자연감마선의 영향은 모든 자연감마선값의 범위에서 약 39% 정도이며 (b)는 (a)의 결과를 SSD와 SSD/NGAM(자연감마선)의 비로 나타낸 것이다. 전반적으로 SSD의 전범위에서 유사한 정도의 자연감마선 영향을 받는 것을 알 수 있다 (참고사항: 전처리 과정에서 자연감마선과 SSD의 측정 offset에 약간의 차이가 있어 수정하여 자료처리 한 결과임). 그림 6의 (c)는 선원이 있는 경우에 측정한 결과로 선원의 영향만큼 SSD의 계수율에 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그림 7은 측정 구간 중에서 60~80m 구간에 대한 결과로 굵은 실선은 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 장비(100 mCi의 ^{137}Cs 이용함)로 측정한 결과이고 가는 실선은 $100\mu\text{Ci}$ 의 ^{60}Co 선원을 이용한 장비로 측정한 결과이다. 전반적으로 낮은 밀도를 보이며 코어에 대한 실내시험과 비교하면 구간평균 약 0.1 g/cm^3 의 차이를 보인다(구간은 64.0~64.7m이고 자세한 내용은 송윤호 등(2002)의 표 3.1 참조).

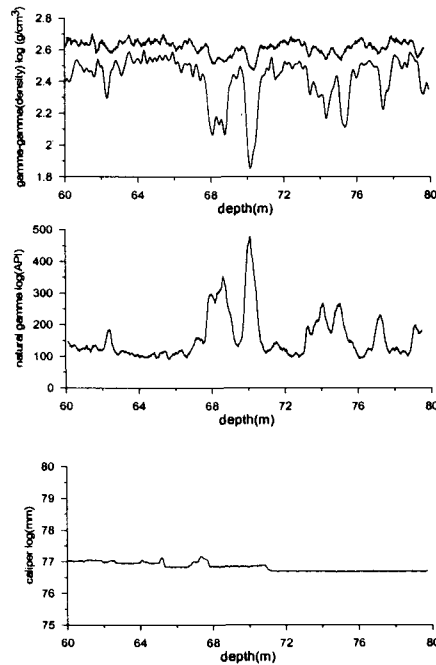


그림 7. 구간 60~80m 구간에 대한 gamma-gamma(density)검층 결과로 ^{60}Co 를 이용하는 small-source density sonde의 경우, 자연감마선의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

그림 7에서 위의 그림과 중간의 그림을 비교하면 자연감마선의 세기가 큰 구간일수록 밀도의 차이가 큰 것을 알 수 있으며 이와 같은 차이는 아래의 그림인 공경검층 결과와 비교할 때, 밀도자료의 차이는 자연감마선의 영향인 것을 알 수 있다. 물론 그림 6의 (d)와 같이 자연감마선이 낮은 경우에도 실제 밀도값과 수 % 이상의 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며 좀더 다양한 환경에 대한 측정치와 이에 대한 자료처리를 수행해야 신뢰성 있게 자연감마선의 영향을 파악 할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, LSD와 같이 밀도측정에 불필요한 감마선검출기는 장비 구입의 단가를 높이는 요인이며 반감기가 짧은 ^{60}Co 선원을 이용하는 경우, 밀도 calibrator의 제작이 필수적이라 할 수 있다. 밀도 calibrator는 등방, 균질의 매질로 정확한 전자밀도를 알 수 있는 매질을 이용해야 한다.

4. 결론

지층의 정확한 밀도를 측정하기 위해서는 측정원리와 장비의 교정과정 및 장비특성에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 국내에서 많이 이용되는 gamma-gamma(density) 검층기를 중심으로 교정에 대한 전형적인 과정을 기술하였으며 최근 국내에서 이용되기 시작한 영국 Reoberston Geologging사의 small-source density sonde에 대한 자연감마선의 영향을 고찰하였다. 이 장비는 방사능 이용에 대한 규제를 받지 않지만 자연감마선의 영향을 파악할 필요가 있어 넓은 범위의 자연감마선을 보이는 지질 내에 위치하는 시추공에 대한 검층 결과를 분석하였다. 자연감마선의 영향은 밀도를 측정할 SSD 검출기 계수율의 약 39%이며 자연감마선의 세기에 따라서 실제밀도와 오차는 선형으로 증가하였다. 따라서, 장비의 운용에 앞서 gamma-gamma(density) 검층에 대한 품질관리가 필수적임을 알 수 있다.

사사

이 연구는 과학기술부 국책연구개발사업인 자연재해방재기술개발(M1-0324-00-0006)의 일부입니다.

참고문헌

- 김기주, 2001, 밀도검층에서의 보정계수 산출을 위한 기초실험과 자연감마 보정, 강원대학교 석사학위논문, p.53.
- 김영화, 김기주, 1999, 갑산층 석회암 지역에서의 코아물성과 검층물성의 비교, 지질공학회지, 9, 253-265.
- 김영화, 박정빈, 김지훈, 김기주, Weijun Zhao, 2004, 밀도검층을 중심으로한 보정 검층공의 특성과 설계, 2004 대한 지질공학회 학술발표회 논문집, 21-26.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1987, 응용지구물리학, 우성문화사, 772p.
- 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명종, 설순지, 박인화, 2000, 지반 물리탐사 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서 1999-R-TI02-P-01, 111p.
- 신희순, 외 54인, 2000, 질리 암반의 열 환경 거동 특성 연구, 한국자원연구소, KR-00(연차)-05, 745.

- 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, 1998, 지하물성의 정보화를 위한 물리검층 품질관리 연구, 한국자원연구소 KR-98(C)-10.
- 황세호, 이상규, 1999a, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출, 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 1999년도 제2회 한국지구물리탐사학회 학술발표회, 156-175.
- 황세호, 이상규, 1999b, 물리검층에 의한 터널설계변수의 산출, 제 73회 한국자원공학회 발표논문집, 41-44.
- Baker, P. E., 1957, Density logging with gamma rays, *Transaction AIME*, 210, 289-294.
- Campbell, J. L. P., and Wilson, J., 1958, Density logging in the Gulf coast area, *Journal of Petroleum Technology*, 10, 21-25.
- Hearst, J. R., and Carlson, 1969, The RIDS, a density logger for rough holes, *Geophysics*, 34, 222-234.
- Hearst, J. R., Nelson, P. H., and Paillet, F. L., 2000, *Well logging for physical properties, A handbook for geophysicists, geologists, and engineers*, John Wiley & Sons Ltd., 483p.
- Pickell, J. J. and Heacock, J. G., 1958, Density logging, *Geophysics*, 25, 891-904.
- Wahl, J. S., Tittman, J., Jonstone, C. W., 1964, The dual spacing formation density log, *Journal of Petroleum Technology*, 16, 1411-1416.