

소구경 시추공에서의 밀도검층 수치모델링 연구

구본진¹ · 남명진^{1*} · 황세호²

¹세종대학교 에너지자원공학과

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

A study on slim-hole density logging based on numerical simulation

Bonjin Ku¹, Myung Jin Nam^{1*}, and Seho Hwang²

¹Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University

²Geological Environmental Divison, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 물리검층 중에서 매질의 밀도 측정을 통해 공극률을 계산할 수 있는 밀도검층에 대한 수치 연구 결과는 국내에서는 전무하다고 해도 과언이 아니다. 이 연구에서는 MCNP (Monte Carlo N-Particle) 알고리즘에 기초하여 밀도검층을 수치모델링하고 다양한 시추공 환경이 밀도검층 결과에 미치는 영향을 분석함으로써, 밀도검층 자료해석을 위한 기틀을 마련하고자 한다. 이를 위해, MCNP 알고리즘을 이용한 밀도검층 시뮬레이션의 적용성을 검토하기 위해 단순한 모형에서의 검층기 반응 연구를 수행하였다. 또한 수치 실험을 위해 한국지질자원연구원에서 사용하고 있는 상용 밀도검층기 (Robertson Geologging 사)에 기초하여 밀도검층기를 수치모델링하였다. 다양한 밀도의 매질에서 시추공 지름을 바꿔가면서 밀도검층 시뮬레이션을 수행함으로써, Robertson Geologging 사의 밀도검층기를 위한 교정곡선을 제시하였다. 이 교정곡선에 기초하여 매질의 밀도를 보다 정확히 분석하고 다양한 시추공환경 변화가 밀도검층에 미치는 영향을 분석하기 위해, 공내수 유무에 따른 밀도검층 반응의 변화 및 시추공 케이싱의 종류에 따른 밀도검층 반응의 변화를 수치모델링을 통해 분석하였다. 이 연구는 밀도검층 시 시추공환경 변화가 검층결과에 미치는 영향을 이해하는 것을 돕고, 향후 국내 시추공환경의 밀도검층에 대한 보다 정확한 해석을 위한 연구의 기초가 될 것으로 기대한다.

주요어: 물리검층, 밀도검층, 교정곡선, MCNP 알고리즘

Abstract: In this study, we make simulation of density log using a Monte Carlo N-Particle (MCNP) algorithm to make an analysis on density logging under different borehole environments, since density logging is affected by various borehole conditions like borehole size, density of borehole fluid, thickness and type of casing, and so on. MCNP algorithm has been widely used for simulation of problems of nuclear particle transportation. In the simulation, we consider the specific configuration of a tool (Robertson Geologging Co. Ltd) that Korea institute of geoscience and mineral resources (KIGAM) has used. In order to measure accurate bulk density of a formation, it is essential to make a calibration and correction chart for the tool under considerations. Through numerical simulation, this study makes calibration plot of the density tool in material with several known bulk densities and with boreholes of several different diameters. In order to make correction charts for the density logging, we simulate and analyze measurements of density logging under different borehole conditions by considering borehole size, density of borehole fluid, and presence of casing.

Keywords: well logging, density logging, calibration chart, Monte Carlo N-Particle (MCNP) algorithm

서 론

밀도검층(density logging) 혹은 감마-감마검층(gamma-gamma logging)은 중성자검층, 음파검층과 함께 지층의 공극률을 계산할 수 있는 물리검층법으로, 석유탐사에서 탄화수소 저류층의 공극률을 간접적으로 파악하기 위해 널리 이용되어

왔다. 또한, 탄성과 탐사의 자료처리에 이용하는 음파 임피던스를 계산하기 위해 사용된다. 정성적으로는 암상 지시자로 사용가능하며, 과압대와 단열 등의 정보를 제공하기도 한다 (Rider, 1996). 밀도검층과 중성자검층은 저류층의 공극률 측정과 함께 공극 내의 석유, 가스, 물의 함량을 평가할 수 있다. 국내에서는 주로 지반조사분야에서 지층의 밀도, 공극률 측정 뿐 아니라 암상해석 등을 위해 밀도검층을 이용해 왔으며, 산업체, 대학, 연구기관에서 장비를 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 밀도검층은 지반조사에서 음파검층과 함께 활용도가 높은 검층방법이다.

2012년 11월 16일 접수; 2012년 11월 22일 수정; 2012년 11월 24일 채택;
*Corresponding author

E-mail: nmj1203@gmail.com

Address: 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

국외에서 밀도검층에 관한 논문은 주로 감마선의 콤프턴산란을 밀도검층에 활용하는 이론(Tittman and Wahl, 1965; Samworth, 1974)과 보정(Samworth, 1992)에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 최근에는 탄화수소가 부존하는 지층을 분석하기에 가장 유용한 Litho-Density log의 자료 해석(Gardner and Dumanoir, 1980)에 대한 연구가 수행되었으며, 비전통석유 자원 탐사를 위한 치밀가스(tight gas)에서의 적용(Howard and Hunt, 1986)에 대한 연구도 수행되었다. 온실가스 지층저장에 대한 필요성이 증대됨에 따라 CO₂ 지층저장 분야에서 밀도검층 적용(Murray *et al.*, 2010)에 대한 연구도 수행되었다.

밀도검층에 대한 연구는 Monte Carlo N-Particle (MCNP)에 기초한 밀도검층 수치모델링 연구도 여러 차례 수행되었다. Heidari *et al.* (2009)은 MCNP로 계산한 flux sensitivity functions (FSFs)을 이용하였다. 수성이수, 유성이수 침입대의 영향을 받는 Upper Fort Riley의 치밀가스 층에서의 현장 자료와 합성 자료에 새로운 시뮬레이션 방법을 수행하였다. 이를 통해 점도, 이수침입, 유체밀도, 그리고 암석물성의 물리검층 자료에 대한 상대적인 효과를 정량화 할 수 있다. Mendoza *et al.* (2007)는 Longhorn 방사능 검층기를 MCNP로 모델링하여, 수직, 수평정에서 중성자검층과 밀도검층법으로 이수 여과손실의 영향을 정량화 하기 위한 시뮬레이션을 실시하였다. Ijisan (2010)은 얇은 지층에서의 가스의 영향으로 인한 밀도검층과 중성자 검층의 반응교차(gas crossover)의 오차를 감소시키고, 경사시추공과 수평시추공에서 경사와 공극률을 보다 정확하게 측정하기 위해 새로운 자료처리, 모델링 기법을 개발하였다. MCNP로 계산한 FSFs의 선형 반복 계산을 이용하여, 방사능 시추중 물리검층(Logging While Drilling; LWD)의 수치모델링 방법을 소개하였다. WenSheng (2008)은 정압유정과 저압유정에서 가스 저류층에 실시한 중성자검층과 밀도검층의 반응 차이를 MCNP 시뮬레이션으로 알아보았다. 중성자검층, 밀도검층, 공경, 공극률 사이의 관계, 그리고 정압유정과 저압유정에서의 가스 포화도 관계를 알아보았다.

국내에서는 밀도검층과 관련하여 10편 가량의 논문이 발표되었고, 주요 분야는 품질관리(이상규 등, 1998; 황세호 등, 2004)와, 밀도검층 장비의 보정(김기주와 김영화, 1999; 김영화 등, 2000; 김영화 등, 2004; 김지훈 등, 2005; 김영화 등, 2006; 이성진 등, 2008; 김영화 등, 2009), 밀도검층기 반응특성(김영화와 김종만, 2010), 국내에서 주로 이용하는 소구경 시추공에 대한 연구(황세호 등, 2000)가 수행되었으며, 황세호와 이상규(2008)는 지반, 지하수환경 분야에서 국내 물리검층의 기술 현황을 분석하였으나, 수치모델링을 수행한 연구는 전무한 실정이다. 밀도검층은 시추공 환경이나 지층의 특성에 따라 반응이 달라지기 때문에, 밀도검층의 결과를 보다 정확하게 해석하여 지층의 밀도를 측정하기 위해서는, 다양한 시추공 환경에서의 검출기 반응변화에 대한 연구가 필수적이다.

이 논문에서는 밀도검층기를 모사하고 검층기 반응을 분석

하기 위해 상용 코드인 MCNP 알고리즘을 활용하여 밀도검층 수치 모델링을 수행하고자 한다. MCNP code는 컴퓨터 기술의 발전함에 따라 방사선 수송 및 해석에 가장 보편적으로 이용되어 왔으며, 원자력공학 및 의료분야 등에도 널리 쓰이지만 방사능검층 분야에서도 크게 각광 받고 있다. MCNP code는 난수(random value)를 발생시켜 통계학적인 방법으로 방사선의 생성부터 소멸까지의 거동을 모사하여 방사선 수송 및 해석에 이용한다. MCNP code는 Los Alamos 국립 연구소(Los Alamos National Laboratory; LANL)에서 개발·유지되고 있다.

이 연구에서는 영국 Robertson Geologging사에서 제조된 밀도검층기의 검출기를 모사하여 수치모델링을 수행하고자 한다. 이 밀도검층기는 박층분해 검출기(bed-resolution detector; BRD), 근거리 검출기(high-resolution detector; HRD)와 원거리 검출기(long-spacing detector, LSD)를 포함하는 3개의 검출기를 가지고 있다. LSD는 지층의 밀도를 측정하기 위해 사용하며 BRD, HRD는 시추공내에 지층수, 이수, 케이싱 등의 영향으로 왜곡된 자료를 보정하는데 사용한다. Robertson Geologging사의 밀도검층기를 모사하기 이전에, MCNP 알고리즘을 이용한 밀도검층기의 수치모델링의 적용성을 검토하기 위해 검층을 수행한 뒤, 밀도와 시추공너비의 변화에 따른 반응을 분석하여 Robertson Geologging사 밀도검층기의 교정곡선(calibration plot)을 작성하였다. 이에 기초하여, 정확한 지층의 밀도를 측정하기 위해 검층 결과에 영향을 미칠 수 있는 시추공 환경변화 중 공내수의 존재 유무와 케이싱 유무 및 종류에 따른 검층의 반응을 분석해 보고자 한다.

밀도검층의 원리 및 자료취득

밀도검층은 방사선원에서 나온 감마선이 지층을 통과해 돌아온 감마선양을 측정하여 지층의 밀도를 구하는 방법이다. 감마선은 에너지대역에 따라 매질 내 원자와 충돌하면 빛전자효과(광전효과, photo-electric effect), 콤프턴 산란(Compton scattering) 효과, 쌍생성(dual production)의 세 가지 반응을 일으키는데, 밀도검층은 이중 콤프턴 산란에 기초한다. 콤프턴 산란은 감마선이 원자 내 전자에 충돌할 때, 전자를 원자에서 튕겨 낸 뒤 에너지의 일부를 잃어 파장이 길어지는 현상이다.

기본 원리

암석의 밀도가 높다는 것은 지층을 구성하는 원자의 원자량(원자 질량)이 높다는 것을 의미하며 이는 원자에 양성자가 많다는 것이므로 밀도가 높은 지층일수록 지층 내 원자들이 많은 전자를 가지고 있다는 뜻이다. 그러므로 지층의 밀도가 높다는 것은 지층의 전자 밀도가 높다는 의미가 된다. 지층 내에 전자가 많을 수록 지층을 통과하는 감마선은 더욱 빈번한 충돌로 에너지 손실이 커지게 된다. 감마선이 에너지를 많이 잃게 되면 원자 내에 흡수되는 감마선도 증가하므로, 결국 검출

기에 도달하는 감마선의 수가 줄어들게 된다. 검출기에서 측정된 감마선량(γ_{obs})은 지층의 전자 밀도(ρ_e)와 다음과 같은 반비례 관계에 있다고 알려져 있다.

$$\gamma_{obs} = \frac{k}{\rho_e} \quad (1)$$

여기서, k 는 비례 상수이다.

지층 매질의 전자밀도(ρ_e)를 파악하면 전자밀도와 매질 체적 밀도(ρ_b) 사이의 다음 관계식을 통해 지층의 밀도를 계산할 수 있다.

$$\rho_e = \frac{2\bar{Z}}{\bar{A}}\rho_b \quad (2)$$

여기서, \bar{Z} 와 \bar{A} 는 각각 지층을 구성하는 광물의 평균 원자번호와 원자량이며 지층을 구성하는 대부분의 물질들의 $2\bar{Z}/\bar{A}$ 값은 1에 가깝다.

예를 들면, 물로 포화된 석회암(limestone)에서 체적밀도와 전자밀도의 실험적인 관계식은 다음과 같다(Bigelow, 1995).

$$\rho_b = 1.01704\rho_e - 0.1883 \quad (3)$$

방사선원 및 검출기

밀도검층에서 감마선을 방출하는 방사선원으로 Cs¹³⁷ (0.662 MeV)과 Co⁶⁰ (1.17 MeV, 1.33 MeV)를 주로 이용하며, 일반적으로 방사선원으로부터 서로 다른 거리에 놓인 두개 이상의 검출기에서 매질을 통과하여 돌아온 감마선량을 측정한다. 이때 검출기는 광전효과를 이용하는 신틸레이션미터(scintillation meter)를 이용하는데, γ 선을 흡수하면 형광을 발하는 섬광결정체로는 NaI (TI), 안트라신(Anthracene), ZnS 등의 결정들을 이용할 수 있다. 이중 감마선의 검출 효율이 높고, 광전효과가 큰 NaI (TI) 결정이 검출기에 가장 널리 이용 된다. 원통형의 광전자증배관(photomultiplier) 하부에 부착된 탈륨(Tl) 처리된 sodium iodide (NaI) 결정에 감마선이 흡수되어 광자를 생성하고, 이 광자는 광자음극을 자극하여 전자를 방출한다. 이 방출된 전자는 몇 번의 증배를 거쳐 양극에 도달한다. 이렇게 양극에 도달한 전자들은 양극에 연결된 저항에 순간 전류가 흐르게 되고 이를 증폭시켜 전류계에 의해 검출하고 방사선량과 에너지분포를 측정한다. 최근 밀도검층기는 보다 효율적인 신틸레이션미터를 이용하여 에너지대역이 높은(high) 감마선과 낮은(low) 감마선을 분리 측정하여 보다 정확한 밀도측정과 동시에 빛전자 계수(photoelectric factor)값을 제공한다. 높은 에너지 영역은 콤프턴 산란에 의한 감마선으로 전통적인 방식의 밀도검층기와 동일하게 지층의 밀도를 측정할 수 있는 반면, 낮은 에너지 대역의 감마선은 빛전자 흡수(photoelectric absorption)에 의해 발생한 감마선을 측정한다. 빛전자 계수는 매질을 구성하는 원자의 원자 번호에 따라 고유한 에너지 대역을 가지기 때문에 지층을 구성하고 있는 원자들에 대한 정

보를 파악할 수 있어 지층의 암상 파악에 유용하다.

밀도검층기

초기 밀도검층기는 하나의 검출기만을 가지고 있었으나, 이후 시추공 지름 변화, 이수 등의 영향을 줄이기 위해 두개 이상의 검출기를 가진 밀도검층기가 1960년대 중반 소개 되었다. 근거리 검출기(short-spaced detector; SSD)는 탐사심도가 낮아 이벽에 민감하여 원거리 검출기(long-spaced detector; LSD)를 보정하는데 이용된다. 현대에 사용하는 지층의 밀도만을 측정하는 보상형 밀도검층기 장비는 Schlumberger사의 FDC (Formation Density Compensated), Western Atlas, Halliburton사의 CDL (Compensated Densilog), BPB사의 CDS (Compensated Density) 등이 있고, 가장 최근에는 지층의 밀도와 빛전자 계수를 측정하는 Schlumberger사의 LDT (Litho-Density Tool), Western Atlas사의 ZDL (Compansated Z-Density), BPB사의 PDS (Photoelectric Density), Halliburton사의 HSDL (Spectral Density Tool) 등이 있다. LDT는 Cs-137의 감마선원을 주로 이용하고, 근거리 검출기와 원거리 검출기를 가진 것은 기존의 일반적인 밀도 검층기와 동일하나 검출기가 보다 효율적이어서 높은 에너지(hard gamma rays: 0.25 ~ 0.662 MeV)와 낮은 에너지(soft gamma rays: 0.00 ~ 0.04 MeV)를 분리하여 측정가능 하다.

검층 자료 획득

밀도검층 시 일반적으로 시추공 환경의 영향을 최소화하기 위해 검층기를 시추공벽에 밀착시켜 측정하는 것이 가장 중요한 사항이다. 이를 위해 일반적으로 밀도검층기에서는 공경검층의 지층 측정용 팔을 이용하여 공벽에 잘 밀착되도록 하고 동시에 시추공 지름도 동시에 측정한다. 특히, 빠른 시추나 잘 부서지는 암석에서 발생할 수 있는 씻김(washout), 공벽의 거칠기 등에 의해 밀착이 잘되지 않는 경우가 있으므로 주의하여야 한다. 밀도검층은 시추공 환경에 많은 영향을 받으므로 사전에 케이싱 유무, 공내수의 유무, 이수의 비중 등을 파악해야 한다.

방사선원의 특성상 밀도검층에서는 감마선을 연속적으로 지층 내로 방사하지만, 감마선은 연속적으로 흐르지 않고 불규칙하게 거동(random manner)한다. 감마선 측정은 통계적 변이성(statistical variation)에 영향을 받을 수 있기 때문에 검층 속도를 너무 빨리하게 되면 변이성의 영향을 받을 수 있으므로 유의하여야 한다.

MCNP 알고리즘 및 이에 기초한 밀도검층 시뮬레이션

밀도검층 수치 시뮬레이션을 실시하는 주된 이유는 검층결과를 예측하고 보다 자세히 이해하고, 특수한 환경에서의 검출기 반응특성을 알아보고, 시추공내 환경변화에 따른 밀도검층

장비의 반응을 정확히 계산하여 분석하는 데 있다. 이 연구에서 밀도검층을 수치모델링하기 위해 사용하고 있는 MCNP 알고리즘은 중성자, 광자, 전자 등 하나의 입자 혹은 두 개 이상의 입자의 수송과정을 시뮬레이션 할 수 있는 상용 프로그램이다(LANL, 2009; 구본진과 남명진, 2012). 방사능 입자와 매질 입자들 간의 반응을 구현하기 위해 NCMP 알고리즘은 관련 핵반응 자료들에 기초하여 확률론적인 방법을 이용한다. 즉, MCNP 알고리즘은 방사선 입자의 수송현상을 지배하는 수송방정식을 이용하는 결정론적인 방법과는 달리 통계학적인 방법으로 각각의 입자의 입자이력(particle history)을 시뮬레이션한다. 또한 MCNP 알고리즘은 직교좌표계(cartesian system of coordinates)에 기초한 3차원 기하구조 모델링이 가능하여 시추공 환경에서의 방사능검층 시뮬레이션에 적용가능하다. 즉, MCNP에서는 직교좌표계에 기초하여 모델 구성을 위해 다양한 기하구조(구, 원통, 육면체 등)를 제공하고 있다. 또한 방사선원(감마선, 고속중성자, 전자 등)으로 고정소스, 표면소스, 셸소스 등 다양한 종류가 있고 특정 위치에서의 감마선속(gamma flux), 중성자 선속(neutron flux)이나 방사선들의 흐름 등 방사선의 측정과 관련된 다양한 함수들을 제공한다. 일반적으로 MCNP를 이용한 수치 시뮬레이션 시, 계산 시간은 구현 환경이 복잡할수록 증가하기 때문에 통계적 변동과 계산 시간을 줄일 수 있도록 즉, MCNP 시뮬레이션의 수렴 속도를 좋게 할 수 있는 분산감소(variance reduction) 기법들을 제공하고 있다. 이러한 분산감소 기법들을 적용함에 있어서는, 수치 시뮬레이션하고자 하는 물리적 현상 특성에 적용 가능한 기법들을 적절히 잘 이용하여야 한다.

이 연구에서는 MCNP 알고리즘을 이용한 밀도검층 수치 시뮬레이션을 위해서는 실제 검층 환경과 유사한 기하구조 설계하고, 밀도검층에서 사용하고 있는 검출기 존재, 소스 및 검출기 등을 기하학적 구조를, MCNP에서 제공하는 기하구조들을 이용하여 최대한 실제에 가깝게 구현하였다. 또한, 검층기 하부에 고정소스를 설정하여 0.662 MeV의 감마선을 방출하는 Cs¹³⁷의 방사선원을 밀도검층 수치 시뮬레이션에서 이용하였다. 검층기 및 검층 모델을 구성하기 위해, 검층기 및 지층 매질을 구성하고 있는 각 물질의 화학식과 원자번호, 동위원소번호 등을 고려하고 있는 기하구조에 맞게 계산하여 MCNP에 포함된 핵반응 자료를 이용한다. 실제 검출기(수신기)에서 측정하고 있는 감마선속 측정을 구현하기 위해 MCNP 알고리즘을 이용한 시뮬레이션에서도 검출기에서 감마선속을 계산할 수 있도록 설정하였다. 또한 복잡한 검층 환경으로 인한 계산 시간을 줄이기 위해 기하 분열(Geometry splitting)과 러시안 룰렛 기법에 기초한 분산감소 기법을 이용하였다.

수치 실험

단순모형 시뮬레이션

MCNP 알고리즘을 이용한 밀도검층 수치 시뮬레이션의 정확도를 검증하기 위하여 먼저 단순 투과 모형을 구성하여 검출기에서의 감마선 반응을 분석하고, 이를 Rider (1987)에서의 원자번호의 변화에 따른 감마선 에너지대역과 CPS/KeV 그래프에서의 반응과 비교함으로써, 이 연구에서 수행하고 있는 수치 시뮬레이션의 타당성을 확인하고자 한다.

단순 투과 모형

단순 투과 모형(Fig. 1)의 가운데에는 0.662 MeV의 감마선을 전 방향으로 방출하는 방사선원 Cs¹³⁷이 위치한다고 가정하였다. 또한 방사선원으로부터 z방향으로 각각 48 cm와 -48 cm 떨어진 곳에 NaI 검출기를 각각 위치시켰다. 단순 투과 모형을 구성하고 있는 매질로는 밀도가 서로 다른 물(1.00 g/cm³), 메틸렌 염화물(1.32 g/cm³), 황(2.07 g/cm³), 석회석(2.71 g/cm³)인 경우를 상정하였다.

각 단순 투과 모형 매질에서 검출기에 도달한 감마선의 에너지대역에 따른 pulses를 분석하면(Fig. 2), 밀도가 가장 높은 석회석인 경우에는 밀도검층에서 측정하는 감마선 에너지대역인 0.2 ~ 0.6 MeV에서 검출기로 돌아오는 감마선량이 가장 적게 나타났다. 이러한 감마선량은 황, 메틸렌 염화물, 물로 매질의 밀도가 낮아짐에 감마선속이 높게 측정되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2). 이러한 양상은 Rider (1987)에서의 결과와 유사하게 나타나고 있다. 밀도검층에서 측정하는 감마선의 에너

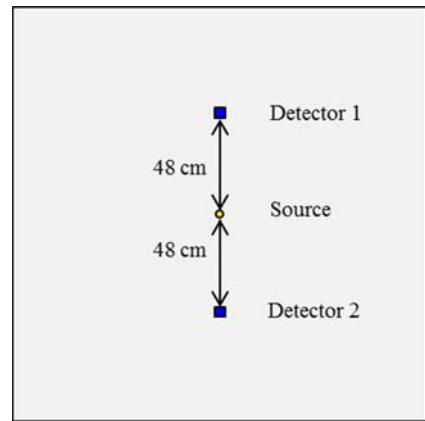


Fig. 1. Top cross-sectional view of simple model.

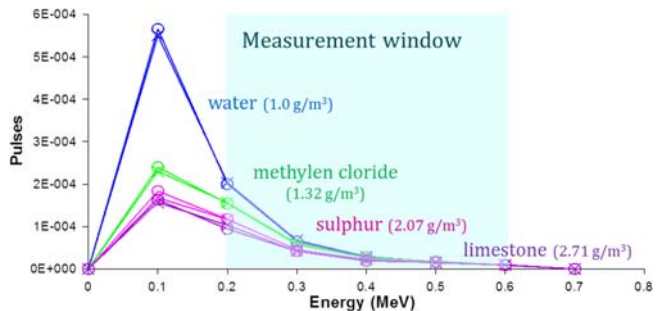


Fig. 2. γ -ray energy spectrum of NaI (TI) detector for ¹³⁷Cs.

지대역 내의 감마선속도의 총 감마선속도를 밀도가 서로 다른 각 매질에 따라 도시하면 매질의 밀도가 증가함에 따라 검출기로 들어오는 감마선량이 선형으로 감소함을 확인할 수 있다(Fig. 3). 이러한 곡선을 교정곡선이라 할 수 있으며, 이 곡선을 이용하면 밀도를 알지 못하는 매질에서의 감마선속 값에서 밀도값을 계산할 수 있다.

밀도검층 수치 실험

밀도검층에 대한 보다 현실적인 수치 실험을 수행하기 위해, 국내에서 널리 이용되고 있는 장비를 조사하여 이 장비에 대한 교정곡선을 제시한 후, 다양한 시추환경에서의 반응을 분석하고자 한다.

밀도검층기 모델링

밀도검층 반응을 MCNP 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션 하기 위해서, 먼저 한국지질자원연구원에서 보유하고 있는 영국 Robertson Geologging (www.geologging.com)사의 밀도검층 장비(Fig. 4)를 수치 모델링하고자 한다. Robertson Geologging 사의 밀도검층기는 0.662 MeV의 낮은 에너지 감마선을 방사하는 100 mCi 세슘-137 (Cs^{137}) 선원이 검출기 하부에 위치한다.

방사선원로부터 각각 14, 24, 48 cm 떨어진 곳에 3개(BRD, HRD, LSD)의 NaI 신틸레이션 검출기가 위치 한다. 또한 방사

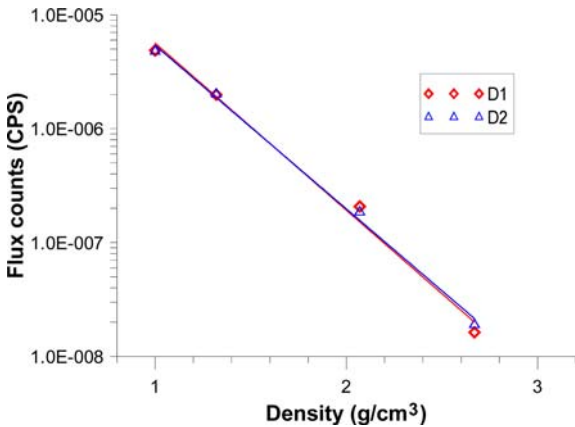


Fig. 3. Calibration plot for simple model with variation densities.

선원으로부터 검출기까지 감마선이 직접 이동하지 않도록 텅스텐으로 차폐(tungsten shield) 시킨다. 밀도 검층기의 지름은 50 mm이며, 길이는 2.75 m이다.

이와 같은 Robertson Geologging사의 실제 밀도검층 장비를 MCNP에서 제공하는 기하구조에 기초해 실제검층기를 단순화하여 기하구조를 수치 모델링 하였다(Fig. 5). 이때 밀도 검층기 모형의 지름은 50 mm, 길이는 2.75 m로 설정하였다. 또한 검층기 모형 하부에 0.662 MeV의 감마선을 방출하는 방사선원 Cs^{137} 이 위치시켰으며, 실제 검층장비와 마찬가지로 방사선원로부터 각각 14, 24, 48 cm 떨어진 곳에 3개(BRD, HRD, LSD)의 검출기를 위치시켰다. 이때 검출기의 물질도 실제 검출기에서 이용하고 있는 NaI로 설정하였다. 실제 밀도검층기와 마찬가지로 방사선원에서 검출기까지 감마선이 직접 이동을 텅스텐으로 차폐(tungsten shield)하기 위해, 방사선원과 BRD 사이의 물질을 텅스텐으로 설정하였다. 시추공은 케이싱이 없는 물로 포화된 나공으로 가정하였다. 시추공 주변은 물(1.00 g/cm^3), 메틸렌 염화물(1.32 g/cm^3), 황(2.07 g/cm^3), 석

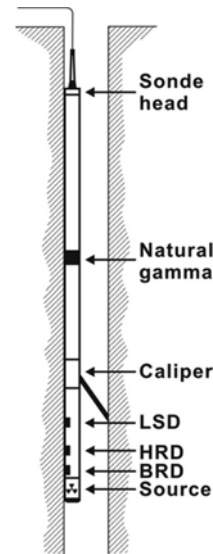


Fig. 4. Sidewall density probe (Robertson Geologging Co. Ltd) has multiple detectors to provide an borehole-compensated density measurement.

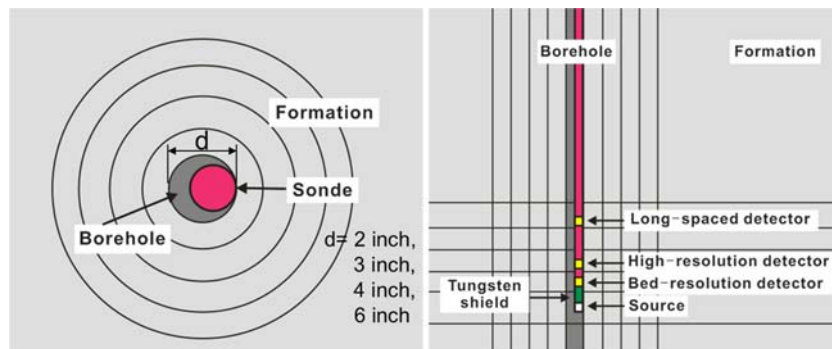


Fig. 5. Graphical description of a density logging tool. The tool consists of BRD, HRD, and LSD detectors, and an Cs source.

회석(2.71 g/cm³)으로 설정하여 공극이 없는 균질한 매질로 설정하였다.

수치 실험 모델

수치 실험을 위해 지층은 균질하다고 가정하였으며, 구성 매질로는 밀도가 다른 물(1.00 g/cm³), 메틸렌 염화물(1.32 g/cm³), 황(2.07 g/cm³), 석회석(2.71 g/cm³)을 상정하였고, 각 매질의 공극률은 0이라고 가정하였다. 지층 내 시추공의 너비(d)는 2, 3, 4, 6 인치의 네 가지 서로 다른 시추공을 고려했으며, 시추공의 공내수는 물(1.00 g/cm³)로 차 있거나 이수가 없다고(공기(0.001293 g/cm³)로 차 있는 경우) 가정하였다. 또한 시추공은 나공이거나, PVC 또는 철재 케이싱이 되어 있다고 가정하였으며, 케이싱이 있는 경우 케이싱의 두께는 0.3 mm라 설정하였고, PVC 케이싱의 밀도는 1.65 g/cm³, 철재 케이싱의 밀도는 7.87 g/cm³로 설정하였다. 이러한 모델에 기초하여, 지층의 밀도, 시추공 크기, 공내수의 유무, 케이싱 등이 밀도검층에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 모든 경우에서, 밀도검층기는 시추공벽에 부착되어 있다고 가정하고 반응을 계산하였다.

지층 밀도와 시추공 지름에 따른 반응 분석

지층의 밀도와 시추공 너비가 변함에 따른 검출기에서의 반응변화로부터 교정곡선을 도출하기 위해, 매질이 물, 메틸렌 염화물, 황, 석회석일 때, 각 매질 내 시추공의 너비(d)를 2, 3, 4, 6 인치로 바꾸어가며 밀도검층 반응을 분석하고자 한다. 모든 경우 공내수는 물이라고 가정하였다.

지층의 밀도의 변화에 따라 HRD와 LSD에서의 감마선속를 각각 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 도시하였다(Fig. 6). 그래프에서 수평 축은 밀도를 수직 축은 감마선속을 타나내며, 각각의 심벌은 서로 다른 시추공 크기를 나타낸다(○: 6 인치, +: 4 인치, △: 3 인치, ◇: 2 인치). 모든 결과에서, 매질의 밀도가 1.00 ~ 2.71 g/cm³로 증가하면서 검출기에서 측정되는 감마선속이 선형에 가깝게 감소함을 보인다. 이는, 앞서 논의한 바와

같이 지층의 전자밀도 클수록 방사선원에서 방출된 감마선이 매질 내에서 콤프턴 산란(Compton scattering)을 많이 일으켜 에너지를 많이 잃게 되기 때문에 검출기로 들어오는 감마선량이 감소하기 때문이다.

시추공의 너비가 넓을수록, 지층에 비해 밀도가 낮은 시추공을 따라 이동한 감마선의 양이 늘어나게 되어, HRD와 LSD 모두에서 검출기로 들어오는 감마선량이 증가함을 보인다(Fig. 6). 한편, 방사선원으로부터의 짧은 HRD가 상대적으로 거리가 먼 LSD보다 감마선속이 큰 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 방사선원으로부터 방출된 감마선은 이동거리가 짧을 수록 매질 내에서 콤프턴 산란이 덜 일어나기 때문에 HRD에서 더 많은 감마선이 측정되게 된다. 이러한 특징을 보이는 교정곡선(Fig. 6)을 이용하면 각각의 시추공에서 측정된 밀도검층 반응으로부터 매질의 밀도를 계산할 수 있다.

공내수의 영향 분석

이 연구에서 고려하고 있는, 국내에서 현재 사용되는 밀도검층기는 소구경 검층기로 시추공내의 공내수의 영향을 받는다고 알려져 있다. 즉, 실제 밀도검층을 수행할 때 공내수가 존재하지 않는 구간이 존재하기 때문에, 공내수가 물일때와 공내수가 없을 때(공기로 차 있을 때) 검출기에서의 감마선량이 달라지게 되어 이에 대한 고려를 하지 않으면, 매질의 밀도를 정확하게 측정할 수 없게 된다. 이에 대한 분석을 수행하기 위해, 네 개의 서로 다른 매질(물, 메틸렌 염화물, 황, 석회석)에 3 인치 지름의 시추공이 있을 때 공내수 유무에 따른 밀도검층 반응을 시뮬레이션한다.

공내수가 존재하지 않을 때(△) 검출기에 도달하는 감마선량이 공내수가 존재할 때(◇)에 비해 HRD에서는 약 10배 가량 증가하였으며(Fig. 7(a)), LSD에서는 약 2배 가량 증가하였다(Fig. 7(b)). 이러한 양상은 시추공이 비어 있는 경우, 시추공을 따라 이동한 감마선은 콤프턴효과가 최소로 일어나기 때문에 물로 차 있는 경우보다 많은 감마선이 검출기에 도달할 수 있기 때문이다. 또한 공내수 유무에 따른 검출기에서의 감마선속

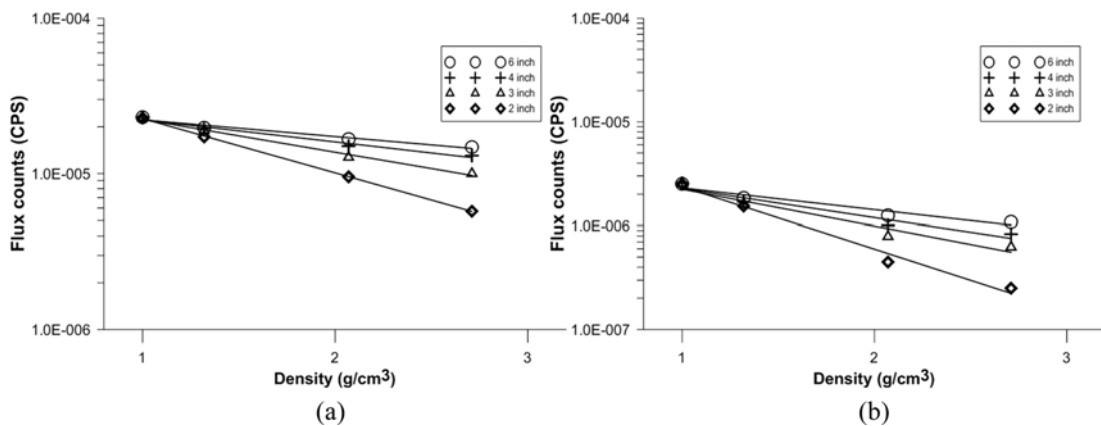


Fig. 6. Calibration plot for different borehole sizes with respect to densities; (a) HRD (b) LSD detector.

의 차이는 매질의 밀도가 증가하면서 로그 스케일에서 미미하게나마 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 공내수 존재에 여부에 따라 검출기에 도달하는 감마선량이 변화하며, 밀도검층 시 측정된 지층의 밀도 값이 실제지층의 밀도와 다를 수 있으므로 이를 보정해 줄 필요가 있다. 특히, 공내수 존재유무의 영향은 시추공 환경의 영향을 보정하기 위해 사용되는 HRD에서 LSD에서보다 더 크게 나타나고 있으므로 각각의 검출기에서 보정을 수행할 필요가 있다.

케이싱의 영향 분석

시추공 굴착 후 주변 매질이 연약 지반인 경우 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 케이싱을 사용하는데, 이러한 케이싱은 물리검층 수행이 불가능하게 하는 경우도 있지만, 밀도검층은 케이싱 된 시추공에서도 수행할 수 있다. 그러나 케이싱의 존재는 밀도검층의 결과에 영향을 미치게 된다. 국내에서는 주로 PVC 케이싱을 하지만 석유탐사 시에는 철재 케이싱을 하기도 한다. 이러한 케이싱의 영향을 분석하기 위해 나공일 때, PVC 또는 철재 케이싱을 할 때의 밀도검층 반응을 분석하고자 한다. 물, 메틸렌 염화물, 황, 혹은 석회석 매질에 지름이 3 인치인 시추공이 있을 때, 나공인 경우와 PVC 혹은 철재 케이싱

이 되어 있는 경우의 밀도검층 반응을 시뮬레이션하여 분석한다.

나공(◇)일 때 HRD (Fig. 8(a))와 LSD(Fig. 8(b))에 도달하는 감마선속에 비해, PVC 케이싱이 있을 때는 큰 변화를 보이지 않지만, 철재 케이싱에서는 상대적으로 큰 감소를 보인다. 이는 PVC 케이싱에 비해 철재 케이싱이 상대적으로 밀도가 높기 때문에, 케이싱을 통과하여 매질을 거쳐 다시 케이싱을 통과하여 검출기에 도달하는 감마선량의 양이 케이싱이 철재인 경우에 더욱 급격하게 감소하였기 때문으로 분석할 수 있다. 철재 케이싱을 하였을 때는 정확한 지층의 밀도를 측정하기 위해 보정이 필요함을 알 수 있다. 이와같이 PVC 케이싱이 철재 케이싱보다 밀도검층에 미치는 영향이 적으므로, 밀도검층을 수행하고자 하는 시추공에서는 PVC 케이싱을 설치하는 것이 철재 케이싱 하는 것보다 밀도검층만을 고려했을 때는 더욱 적합함을 알 수 있다.

결 과

이 연구에서는 MCNP 알고리즘을 이용하여 밀도검층의 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 수치 시뮬레이션의 타당성

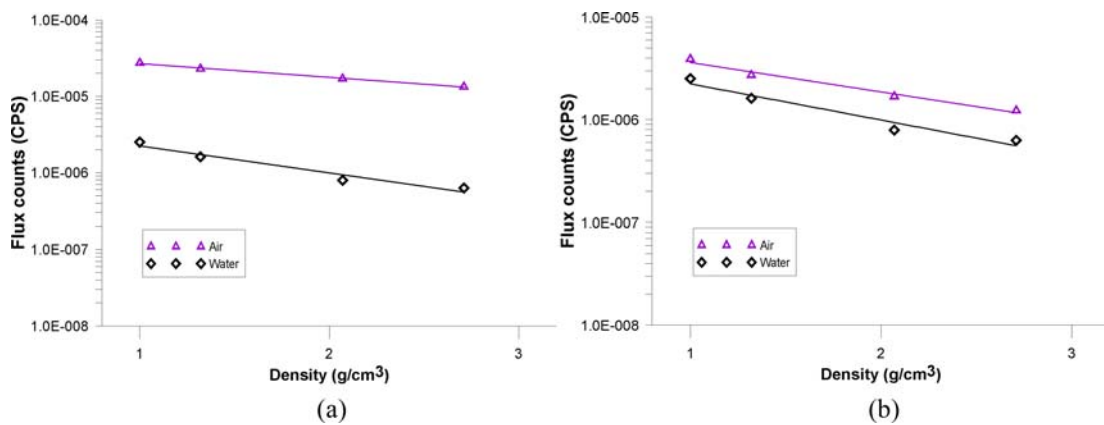


Fig. 7. Influence of well fluid (air or water) on (a) HRD detector and (b) LSD detector.

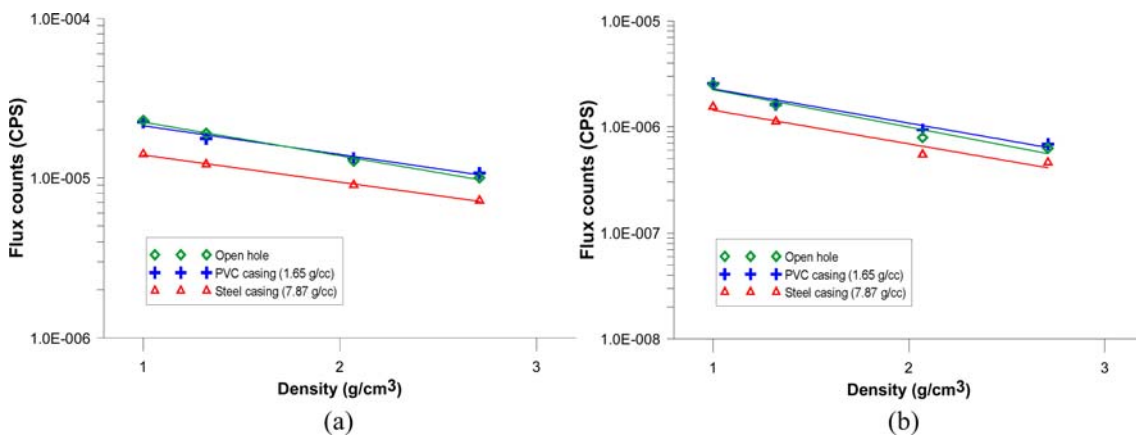


Fig. 8. Influence of PVC/steel casing on (a) HRD detector and (b) LSD detector.

을 검토하기 위해, 단순투과 모형을 설정하여 방사선원 및 방사능 검출기의 반응특성 등의 모사 적용을 검증하였다. 이러한 MCNP 알고리즘에 기초한 밀도검층 시뮬레이션 기법에 기초하여, 실제로 국내에서 이용하고 있는 밀도검층기와 유사한 모형을 구성하여 밀도검층의 반응 분석 수행하였다. 시뮬레이션에서 Robertson Geologging사 밀도 검층기와 최대한 비슷하도록 검층기를 모사하였으며, 밀도가 서로 다른 4가지 지층 매질 내에서 시추공 크기의 변화에 따른 검출기 반응을 바탕으로 교정곡선을 도출하고 반응을 분석하였다. 또한, 공내수가 물일 때와 비어 있을 때, 검출기에 더욱 많은 감마선속이 검출됨을 알 수 있었으며, 철재 케이싱이 PVC 케이싱에 비해 검출기에 도달하는 감마선속을 더욱 급격히 감소시키는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 개발한 MCNP에 기초한 밀도검층 시뮬레이션 기법은 향후 국내에서 다양한 시추공 환경변화에서 측정된 밀도검층 자료의 분석 및 해석의 정확도 향상에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2012T100201588). 남명진은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0014684)을 일부 받아 연구를 수행하였습니다.

참고문헌

구본진, 남명진, 2012, 소구경 시추공에서의 중성자검층 수치모텔링 연구, 지구물리와 물리탐사, **15**, 219-226.
 김기주, 김영화, 1999, 밀도검층의 소스 보정에 대한 실험적 고찰, 대한지구물리학회 정기총회 및 학술발표회 논문집, 15-16.
 김영화, 서백수, 김기주, 2000, 밀도검층에서의 자연감마 영향과 효과적인 보정 방안, 대한지구물리학회 정기총회 및 학술발표회 논문집, 39.
 김영화, 김기주, 임헌태, 김지훈, 공남영, 2004, 밀도검층 검출기 보정에 관한 기초연구, 지구물리와 물리탐사, **7**, 237-245.
 김영화, 김지훈, 이성진, 2006, 케이싱 환경에서의 밀도자료 보정을 위한 기초연구, 지질공학회지, **16**, 429-435.
 김영화, 황병철, 박성근, 김종만, 2009, 지하수면 상·하부환경에서의 PVC케이싱 이격보정 비교연구, 지질공학회지, **19**, 217-225.
 김영화, 김종만, 2010, 모형실험에 기초한 매질 경계면에서의 밀도검층 반응 특성 분석, 지질공학회지, **46**, 473-483.
 김지훈, 공남영, Weijun Zhao, 김영화, 2005, 밀도검층의 효과적인 현장 적용을 위한 모형 보정공 건설과 밀도 보정 기초연구, 한국지구물리탐사학회 정기총회 및 특별 심포지움 논문집, 73-82.
 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, 1998, 지하물성의 정보화를 위한 물리검층 품질관리 연구, 지질자원연구원.

이성진, 김영화, 황병철, 2008, 소구경 플라스틱 케이싱 공에서의 밀도검층 보정실험, 지질공학회지, **18**, 137-144.
 황세호, 박 찬, 이상규, 신희순, 2000, 소구경 시추공에서의 밀도검층, 한국자원공학회 · 대한자원환경지질학회 · 한국지구물리탐사학회 춘계 공동학술발표회 논문집, 298-300.
 황세호, 신제현, 박권규, 박윤성, 이상규, 조철현, 2004, 감마-감마(밀도)검층의 품질관리, 대한자원환경지질학회 · 한국지구물리탐사학회 공동학술발표회 논문집, 32-39.
 황세호, 이상규, 2008, 지반, 지하수환경 분야에 대한 국내 물리검층 기술의 현황, 한국지구시스템공학회지, **45**, 67-82.
 Bigelow, E., 1995, *Introduction to wireline log analysis*, Western Atlas International, Inc, Houston, Texas.
 Gardner, J. S., and Dumanoir, J. L., 1980, Litho-density log interpretation, *Trans., SPWLA 21st. Annual Logging Symposium*, Lafayette, LA.
 Heidari, Z., Torres-Verdín, C., Mendoza, A., Ijasa, O., and Voss, B., 2009, Rapid, interactive assessment of petrophysical and geometrical effects on density and neutron logs acquired in vertical and deviated wells, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 124879.
 Howard, W. E., and Hunt, E. R., 1986, Travis peak: an integrated approach to formation evaluation, *Paper SPE 15208 prepared for presentation at the SPE Unconventional Gas Technology Symposium*, Louisville, Kentucky, 18-21.
 Ijasa, O., 2010, *Rapid modeling of LWD nuclear measurements acquired in high-angle and horizontal wells for improved petrophysical and geometrical interpretation*, Master of Science in Engineering, The University of Texas at Austin.
 LANL. 50th anniversary article: Evolving from calculators to computers. 2009. URL <http://www.lanl.gov/history/atomicbomb/computers>.
 Mendoza, A., Preeg, E. W., Torres-Verdín, C., and Alpak, O. F., 2007, Monte Carlo modeling of nuclear measurements in vertical and horizontal wells in the presence of mud-filtrate invasion and salt mixing 1, *Petrophysics*, **48**, 28-44.
 Murray, D., Wang, Y. X., Horie, T., Yoshimura, T., and Mito, S., 2010, CO₂ sequestration monitoring in a low formation water salinity reservoir, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 130773.
 Samworth, J. R., 1974, The radiation density log applied to the resolution of thin beds in coal measures, *Third SPWLA European Symposium*, R1-R12.
 Samworth, J. R., 1992, The dual-spaced density log - characteristics, calibration, and compensation, *The Log Analyst*, 42-49.
 Tittman, J. and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma), *Geophysics*, **30**, 284-294.
 Rider, M. H., 1996., *The geological interpretation of well logs*, 2ed, Whittles Publishing.
 WenSheng, W., 2008, Neutron and density logging responses to gas reservoir for well-balanced and under-balanced logging: Gas reservoirs of sandstone in a western China field, *Science in China Series D: Earth Sciences*, **51**, 201-206.