Monte Carlo 방법을 이용한 소구경용 밀도 존데의 반응 특성

원병호^{1,2} · 황세호^{2,3*} · 신제현² · 박창제⁴ · 김종만² · 함세영⁵

¹(주)희송지오테크

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

³과학기술연합대학원대학교 석유자원공학

⁴세종대학교 원자력공학과

⁵부산대학교 지질환경과학과

Response characterization of slim-hole density sonde using Monte Carlo method

Byeongho Won^{1,2}, Seho Hwang^{2,3*}, Jehyun Shin², Chang Je Park⁴, Jongman Kim², and Se-Yeong Hamm⁵

¹Heesong Geotek Co., Ltd.

²Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Petroleum Resources Technology, UST (University of Science and Technology)

⁴Nuclear Engineering, Sejong University

⁵Department of Geological Sciences, Pusan National University

요약: MCNP를 이용한 밀도검층에 대한 수치모델링을 수행하였고, 인공 모형 시추공에 대한 교정곡선과의 비교를 통하여 MCNP 수치모델링의 신뢰성을 검토하였다. 이를 바탕으로 케이싱의 유무와 종류, 공내수의 유무, 존데와 공벽과의 거리 변화 등 국내 물리검층 자료 취득 현장에서 쉽게 접하는 3인치 시추공 환경에 대한 밀도검층 수치모델링을 수행하였다. 수치모델링 결과는 케이싱과 공내수의 영향을 정량적으로 반영하고 있으며 공벽으로부터의 간격 변화에 따른 일정한 양상을 보여준다. 본 연구를 통하여 MCNP를 이용한 수치모델링의 적용성을 파악할 수 있었으며 이를 활용하여 효과적인 검층 보정이 가능할 것으로 판단된다.

주요어: MCNP, 밀도검층, 수치모델링, 교정곡선, 물리검층

Abstract: We performed MCNP modeling for density log, and examined its reliability and validity comparing the correction curves from physical borehole model. Based on the constructed numerical model, numerical modelings of density sonde in three-inch borehole were carried out under the various conditions such as the existence and type of casing or fluid, and also the stand-off between the sonde and borehole wall. These results of numerical modeling quantitatively reflect effects of casing and fluid in borehole, and moreover, demonstrate constant patterns with interval change from borehole wall. From this study, numerical modeling using MCNP shows a good applicability for well logging, and therefore, can be efficiently used for the calibration of well logging data under the various borehole conditions.

Keywords: MCNP, Density log, Numerical modeling, Correction curve, Well logging

2014년 8월 11일 접수; 2014년 8월 18일 수정; 2014년 8월 25일 채택

*Corresponding author

E-mail: hwangse@kigam.re.kr

Address: 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

©2014, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

초기 물리검층은 지하자원 탐사 목적으로 시작하였으나 현재 석유탐사 분야에서 기술 개발과 적용이 활발하게 진행되고 있다. 국내에서는 주로 지반, 지하수, 환경오염, 지질조사 등 3인치 규격의 시추공에서 주로 적용되어 왔으며, 대구경 시추공을 이용하는 온천 조사와 심부 지열 탐사에서도 적용이 되어 왔다(Hwang and Lee, 2008). 육상에서의 물리검층은 주로 소구경 시추공에 적합한 물리검층 시스템을 이용하여 자료 취득, 처리 및 해석을 직접 수행하였으며 해상에서는 주로 석유 가스 자원 탐사를 목적으로 Schlumberger와 같은 전문 서비스 기업에서 자료를 취득하였다. 대부분의 물리검층은 방사능 선원을 이용하지 않는 온도검층, 자연감마선검층, 전기비저항검층, 시추공영상화검층 등이 주로 적용되었으며 최근 ^{137}Cs 이나 ^{60}Co 선원을 이용하는 밀도검층이 주로 지반조사용으로 적용되기 시작하였다. 밀도검층에서 측정하는 원위치 밀도 값은 주로 암반 평가에 많이 이용되었으며 적용성이 높을 것으로 예상되는 연약지반 평가 분야는 아직 초보단계 수준이다. 이는 방사성 동위원소의 사용에 매우 엄격한 안전 관리 규제가 있어 사용도 어렵지만 근본적으로 나공(openhole) 상태가 아닌 경우, 정량적인 원위치 밀도 측정이 어렵고 특히 연약지반의 경우 완전히 포화된 지반 밀도 값의 활용에 대한 사례가 없어 정량적인 측정이 가능해도 활용이 어려운 실정이다.

밀도검층은 이미 잘 알려진 바와 같이 방사성 동위원소에서 방출된 감마선 콤프턴 산란(compton scattering) 효과를 이용하는 것으로 밀도검층에서 측정하는 감마선의 계수율(count per second, CPS)은 지층의 전자밀도에 대한 반응이다. 방사성 동위원소를 이용하는 대부분의 물리검층 시스템은 제조사에서 측정된 계수율을 밀도나 공극률 값으로 환산하는 교정곡선(calibration curve)를 제공한다. 그러나 소구경용 검층 시스템을 제조, 판매하는 검층 회사는 매우 단순한 형태의 교정곡선만을 제공한다. 방사능검층 장비에 교정곡선은 주로 물로 채워진 시추공 내부에 존데가 위치할 때 공경변화에 대한 밀도나 공극률로 환산한다. 다양한 시추공 환경에 대한 시험은 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에 소규모 검층 장비 제조사에서 다양한 형태의 시추공 환경 보정곡선을 제작하여 사용자에게 제공하지는 않는다.

본 논문에서는 직경 3인치 시추공 규모를 중심으로 소구경 밀도검층 존데에 대한 수치모델링을 수행하고 인공 모형시추공에 대한 교정곡선과 수치모델링 방법으로 작성한 교정곡선을 비교, 수치모델링의 신뢰성을 검토하고자 하였다. 또한, 케이싱의 유무와 종류, 공내수의 유무, 공벽과 존데 사이의 간격 증가 등 국내의 물리검층 자료취득 현장에서 쉽게 접할 수 있는 시추공 환경에 대한 수치 모델링을 수행하였다. 수치모델링은 Monte Carlo 방법을 이용하였으며 이 방법은 미국 Los Alamos National Laboratory에서 MCNP (Monte Carlo N-

Particle) 코드로 개발되어 왔다.

국내에서 Monte Carlo 방법을 이용한 밀도검층 수치모델링은 Choi (2010)에 의해 처음으로 시도되었다. Choi (2010)는 밀도와 시추 공경 변화에 따른 계수율의 변화, 케이싱, 공내수의 유무, 진흙벽(mud cake)의 영향 등 다양한 시추공 환경에서 수치모델링을 수행하였다. Choi (2010)의 결과는 계수율 자체를 정량적으로 활용할 수는 없었으나 전반적인 경향을 잘 보여주고 있으며, Ku *et al.* (2012)에 의해 케이싱 시추공에 대한 모델링 결과가 일부 추가되었다. 본 논문에서 이용한 동일한 소구경용 밀도검층 존데에 대한 MCNP 수치모델링은 Souza *et al.* (2010)이 있으며 이들 연구 결과도 계수율을 정량적으로 활용하기 보다는 주로 다양한 시추공 환경에 대한 전형적인 반응을 보여주고 있다.

본 연구에서 적용한 밀도검층 존데는 Choi (2010)와 Ku *et al.* (2012)가 이용한 존데와 동일하나 일부 동위원소나 검출기의 원도 설정, tally의 분석 등에서 차이가 있다. 또한 기존의 연구자들의 정성적인 연구 결과와는 달리 MCNP 수치모델링이 실질적으로 다양한 시추공 환경에 대한 정량적인 분석 및 밀도검층 현장 자료처리에 활용됨을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 제조사의 2, 4인치 공경의 물리적 교정(physical calibration) 결과와 수치모델링 결과를 비교하였으며 이들 결과를 바탕으로 공내수의 유무, 케이싱, 공벽과 존데 사이의 간격 변화 등에 대한 영향을 수치모델링을 통해 고찰하였다.

기본원리

밀도검층의 측정 원리

^{137}Cs 또는 ^{60}Co 등의 방사성동위원소에서 방출된 감마선은 지층을 구성하는 원자와 충돌하여 광전효과(photoelectric effect), 콤프턴 산란 효과, 쌍생성 효과(pair production effect) 등을 발생하며 밀도검층은 매질의 전자밀도와 관련된 콤프턴 산란 효과만을 이용한다(Baker, 1957; Tittman and Wahl, 1965). 일반적으로 밀도검층은 0.662 MeV의 ^{137}Cs 동위원소를 이용하여 쌍생성 효과를 배제시키고, 동위원소 저장 용기나 감마선 검출기 주변을 텅스텐 합금과 같은 밀도가 높은 금속으로 차폐(shielding)함으로써 광전효과 영향을 감소시키면서 콤프턴 산란 영역에서 측정한다. 밀도존데의 감마선 검출기로는 NaI(Tl) 신틸레이션 검출기(scintillation detector)가 많이 이용되며 측정 에너지 영역은 대략 0.2 ~ 0.6 MeV 이다. 초기 감마선량(Φ_0)이 거리(x)를 통과하여 검출되는 감마선량(Φ)은 식 (1)과 같이 표현되며

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\rho_b \frac{Z}{A} N_0 \sigma x} \quad (1)$$

위 식에서 ρ_b 는 체적밀도, A 는 지층의 원자량, Z 는 원자번호, N_0 는 아보가드로 상수, σ 는 콤프턴 산란의 반응 단면적이

다. 지층을 구성하는 원소 중에서 수소를 제외한 원자번호 20 이하의 원소들은 다음의 관계식을 보인다.

$$\rho_e \equiv \frac{2Z}{A} \rho_b \approx \rho_b \quad (2)$$

위 식에서 ρ_e 는 전자밀도이며 대부분의 원소에서 전자밀도와 체적밀도가 근사함을 이용하여 지층의 체적밀도를 측정한다(Gaymard and Poupon, 1968; Ellis, 2003).

Monte Carlo 방법을 이용한 밀도검층 수치모델링

Monte Carlo 방법은 난수를 기반으로 하여 함수의 값을 확률적으로 계산하는 알고리즘으로서 미국 Los Alamos National Laboratory에서는 이러한 Monte Carlo 방법을 이용하여 1949년 핵연구를 목적으로 MCNP 코드를 개발하여 현재까지 발전시켜오고 있다. MCNP 코드는 중성자, 광자, 전자 등 하나의 입자 혹은 두 개 이상의 입자 수송과정을 모사할 수 있는 프로그램으로서 방사능 입자와 매질 입자들 간의 반응을 구현하기 위해 확률론적 방법을 이용한다(LANL, 2008). MCNP 코드의 입력자료는 3차원 기하구조 또는 2차원 면구조를 지정하는 표면 카드(surface card), 표면 카드를 조합하여 셀을 만들고 밀도에 대한 정보를 입력하는 셀 카드(cell card), 원소(element) 또는 매질의 화학조성(chemical composition) 및 선원과 검출기에 대한 정보를 입력하는 데이터 카드(data card)로 나뉘며 매질의 밀도는 전자밀도와 체적밀도를 구분하여 입력이 가능하다. MCNP 모델링의 코딩 및 수행 절차는 Fig. 1과 같이 진행하였다.

본 연구에서는 영국 Robertson Geologging사의 밀도검층 존대인 FDGS (Formation Density Gamma Sonde)의 실제 크기, 선원 및 검출기의 위치 등을 3차원 기하구조 및 면을 조합한

형태로 모델링 입력 자료로 활용 하였으며 계산시간 및 통계적 오차를 줄이기 위해 분산감소기법을 활용하였다(LANL, 2008). 밀도검층 존대 하단에는 100mCi ^{137}Cs 선원이 위치하며 존대 내부에는 선원으로부터 24 cm와 48 cm의 거리에 검출기가 각각 위치한다. 본 논문에서 24 cm의 거리에 위치하는 검출기는 High Resolution Density (HRD), 48 cm 거리에 위치하는 검출기는 Long Spaced Density (LSD)라 한다. 밀도검층에서 측정한 체적밀도는 LSD에서 측정하는 감마선을 이용하여 계산하며 HRD는 시추공 환경 영향 보정에 활용된다. 선원과 검출기의 거리가 짧은 HRD는 지층의 두께가 얇은 경우의 밀도측정에 활용되기도 한다.

MCNP 수치모형 설정 및 모델링

밀도검층에서 MCNP 코드를 이용한 콤프턴 산란 효과의 고찰

지층을 구성하는 원소는 대부분이 원자번호 20 이하의 원소로 구성되어 콤프턴 산란 효과를 이용하는데 효과적이다. 밀도검층에서 콤프턴 산란 효과를 이용하는 이유는 식 (3)과 같이 0.662 MeV 에너지를 갖는 ^{137}Cs 선원의 경우, 산란 후의 에너지(E)는 입사 감마선의 에너지(E_o)와 충돌각(θ)의 함수로 매질의 원자번호(Z)와 관계가 없음을 의미한다(Zak and Smith, 1959).

$$E = \frac{E_o}{1 + \frac{E_o}{m_o c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (3)$$

위 식에서 m_o 는 전자의 질량(kg), c 는 빛의 속도(m/s)이다.

지층 내에서 원소의 구성과 상관없이 전자밀도가 같게 되면 콤프턴 산란 영역에서 측정되는 감마선의 에너지당 계수율은 거의 일치하게 된다. 일반적으로 밀도검층 존대의 검출기에서 측정하는 감마선의 에너지 영역은 장비 제조사마다 차이가 있지만 광전효과와 쌍생성 효과를 적게 받는 0.2 ~ 0.6 MeV 사이의 에너지 영역을 이용한다. 콤프턴 산란 효과를 이용한 밀도검층의 측정 원리를 고찰하기 위하여 사암(sandstone), 석회암(limestone), 백운암(dolostone)을 수치모형에 구현하였으며 이들의 공극률을 조정하여 모두 동일한 2.6 g/cm³의 밀도 값을 갖도록 하였다. ^{137}Cs 선원으로부터 24 cm 거리에 위치하는 HRD 검출기에서 감마선을 측정하였는데, Fig. 2는 MCNP 수치모델링 결과로 사암, 석회암, 백운암에 대한 각각의 에너지 영역에서의 계수율이다. 콤프턴 산란 영역인 0.24 ~ 0.62 MeV 에너지 구간에서 각 매질을 구성하는 원소들의 영향을 받지 않으며 매질의 전자밀도가 같은 경우 계수율은 근사한 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 반면에 0.24 MeV 이하의 에너지 영역에서는 평균 원자번호(Z)가 낮으면 계수율이 높고, 평균 원자번호가 높으면 반대로 계수율이 낮게 된다. 본 논문에서는 Fig. 2의 결과를 토대로 콤프턴 산란 영역인 0.24 ~ 0.62 MeV

Fig. 1. The flow chart for MCNP simulation.

Fig. 2. The detected counting rate of gamma rays at the HRD detector for three formations. In Compton scattering effects section, counting rates for three formations are almost the same.

구간의 에너지 영역에서 계수율을 취득하였다.

소구경용 밀도검층 존대의 수치모형

MCNP 수치모델링을 위하여 현재 한국지질자원연구원에서 보유한 FDGS를 바탕으로 수치모형을 구성하였다. Fig. 3의 (a)는 FDGS의 기본 구조로서 100mCi ^{137}Cs 선원을 사용하며

Fig. 3. Geometry of Formation Density Gamma Sonde (FDGS) of Robertson geologging Ltd (a) and three-dimensional material model for MCNP simulation (b).

감마선 검출 효율이 좋은 NaI(Tl) 신틸레이션 검출기를 이용한다. ^{137}Cs 선원은 존대 하부에 위치하며 검출기의 위치는 선원으로부터 HRD는 24 cm에 LSD는 48 cm에 위치한다. 존대의 길이는 2.79 m이고 검출기와 공경검층용 암(arm)이 위치한 존대 하부 부분의 지름은 50 mm이다. 시추공에 밀착되는 공간을 제외한 나머지 검출기 주변의 하우징은 텅스텐으로 차폐되어 있으며 ^{137}Cs 선원이 장착되는 하부 구간은 직접적인 방사선 차폐를 위해 5 cm 두께의 텅스텐으로 채워져 있다. Fig. 3의 (b)는 MCNP 모델링을 위해 지름 3인치 시추공 안에 밀도검층 존대가 위치한 3차원 수치 모형이다. 수치모형 구성에 이용한 FDGS는 밀도측정을 위한 1차 교정곡선이 존재하며 LSD 검출기에서 측정된 계수율을 이용하여 시추공경 변화에 따라서 밀도로 환산한다. 밀도검층의 교정에 대한 자세한 절차와 내용은 Lee *et al.* (1998), Hwang *et al.* (2004) 등에 기술되어 있어 생략하기로 한다.

지층의 밀도 및 시추공 지름 변화에 따른 밀도 측정

물리검층 장비 제조사에서 제공하는 밀도검층 존대의 교정곡선은 검출기에서 측정된 감마선 계수율을 전자밀도로 환산하는데 이용한다. 즉 일반적으로 교정곡선은 가로축은 전자밀도, 세로축은 계수율이며 교정곡선은 다양한 시추공경과 밀도로 제작된 모형 시추공에서 밀도 변화에 따른 계수율의 변화를 측정하여 작성한다. 이와 같은 과정은 새로운 밀도검층 존대가 개발될 때 수행하는 1차 교정에 해당된다(Theys, 1991).

Fig. 4. The simulation results for various borehole diameters. The conditions of environment are the same as those of calibration curves provided by the manufacturing company.

Table 1. Density and photoelectric parameters for materials in MCNP modeling.

Material	Bulk density (g/cm ³)	Electron density (g/cm ³)	Z	A	Component ratio (%)	Electron density index 2Z/A
Water (H ₂ O)	1.00	1.11	H	1	1.008	11
			O	8	15.999	89
Magnesium (Mg)	1.74	1.72	12	24.305	100	0.987
Sulphur (S)	2.00	2.00	16	32.065	100	0.998
Silicon (Si)	2.33	2.32	14	28.086	100	0.997
Aluminum (Al)	2.70	2.60	13	26.982	100	0.964

1차 교정곡선은 표준화된 계수율을 밀도로 환산하는 경우에 이용되며 보통 알루미늄과 물을 이용하는 2차 교정의 결과를 표준화된 값으로 이용하여 1차 교정곡선에 적용한다 (Samworth, 1992). 이와 반대로 밀도검층 존대의 사용자는 측정된 계수율을 밀도로 환산하는데 밀도-계수율의 교정곡선을 계수율-밀도 관계로 변형하여 밀도 값을 측정한다.

MCNP 모델링에 이용한 수치모형은 시추공 지름이 각각 2, 4인치, 시추공 내부는 물로 채워져 있으며 시추공 주변 매질은 100%의 물, 마그네슘, 황, 규소, 알루미늄이다. 교정곡선 구현을 위해 수치모델에 이용한 각 매질의 체적밀도와 전자밀도는 Table 1에 나타내었으며 수치모델링을 통해 구현된 교정곡선은 Fig. 4와 같다.

제조사에서 제작한 FDGS의 1차 교정곡선은 밀도 2.6 g/cm³까지는 밀도가 증가할수록 계수율이 일정한 비율로 감소하며 밀도 값이 2.6 g/cm³ 이상인 구간에서는 밀도와 계수율과의 관계는 곡선의 형태를 보인다. 이들 교정곡선은 4개의 매질 (H₂O, Methylene Chloride, Sulphur, CaCO₃)에서 측정된 계수율을 최대, 최소값을 제외하고 평균하여 68.3%의 신뢰구간에 포함되는 계수율을 나타낸 것이다(Lee *et al.*, 1998). 일반적으로 밀도검층에서 전자밀도와 계수율과의 관계는 다음과 같은 관계로 표현된다.

$$\rho_e = A \times \ln(CPS) + B \quad (4)$$

전자밀도가 2.6 g/cm³보다 작은 경우 제조사의 교정곡선에서 A와 B는 다음과 같다.

$$A = -1/(2.511 - 0.02753d - 0.001063d \times d) \quad (5)$$

$$B = -9.306 \times A + 1.1$$

위 식에서 d는 시추공의 지름으로 단위는 인치이다.

위 식을 이용하여 2인치 시추공에서 계산한 계수율은 물에서는 약 11,000 CPS, 알루미늄은 약 282 CPS의 값을 보인다. MCNP 모델링 결과, 물인 경우 약 10,700 CPS, 알루미늄은 약 285 CPS이며 두 매질 사이의 밀도를 가지는 마그네슘, 황, 규소는 각각 약 2,280 CPS, 1,128 CPS, 516 CPS를 보인다 (Fig. 4).

시추공 지름이 2인치와 4인치인 모형 시추공에서 MCNP 코드를 이용한 수치모델링 결과와 식 (4)을 이용하여 역으로 계

Table 2. The ratio of count rates using MCNP modeling and equation (4). M is the counting rate from MCNP and R is the counting rate from Robertson Geologging Ltd. The numbers (2, 4) are borehole size (inch), respectively.

Electron density (g/cm ³)	M/R_2 (%)	M/R_4 (%)
2.60	102.44	107.46
2.32	93.36	92.60
2.00	93.13	91.03
1.72	94.75	94.67
1.10	96.92	97.17

산한 계수율의 비는 Table 2와 같다. Table 2의 첫 번째 행에서 M은 MCNP 모델링으로 계산한 계수율, R은 식(4)를 이용하여 역으로 계산한 계수율, 숫자는 시추공의 지름(단위는 인치)을 의미한다. 시추공경 2 ~ 4인치 구간에서 물리적 모형 시추공에 대한 FDGS 반응과 비교할 때 최대 9% 정도 차이가 있다.

국내 대부분의 시추는 3인치로 진행되는 점을 고려하여 3인치 수치모형 시추공을 대상으로 위에서 검토된 존대 수치모델을 이용해 공벽과 존대와의 거리 변화, 케이싱의 영향, 공내수의 유무에 대한 모델링을 수행하였다. 결과 값은 밀도가 아닌 현장 자료취득 과정에서 쉽게 접하는 상황인 계수율로 나타내었다.

결과 및 고찰

시추공벽과 존대와의 거리 영향

밀도검층은 일반적으로 방사성동위원소와 검출기가 일렬로 배열된 존대를 공벽에 밀착시켜 자료를 취득하는데(Pickell and Heacock, 1960), 시추이수(drilling mud)로 인하여 공벽에 생성되는 진흙벽의 영향이나 단순히 존대가 공벽에서 일정 거리로 멀어지는 경우가 발생하기도 한다. 이와 같은 경우, 다양한 물리적 모형 시추공에서 밀도검층 존대를 이용하여 시험, 반응곡선의 작성, 영향 보정 등을 수행한다(Scott *et al.*, 1988). 그러나 이와 같은 시험은 많은 시간과 비용이 소요되어 수치모델링을 이용한 방법이 유용하게 적용될 수 있다. 진흙벽의 영향이 아닌 존대와 공벽 간에 일정한 거리가 발생하는 경우

Fig. 5. The numerical results for sonde stand-off. (a) The calibration chart with stand-off (0, 2, 4, 8, 12 mm) and density (Water, Sulphur, Aluminum). (b) Counting rates with stand-off (0, 2, 4, 8, 12 mm) in limestone formations (2.3 ~ 2.7 g/cm³).

는 지름이 작은 시추공 내에서 공경 측정용 팔을 벌리지 못하고 자료를 취득하는 경우에 발생한다. 이와 같은 경우 측정 속도나 간격을 조절하여 계수율을 높이거나 반복 측정하여 자료의 S/N비를 높이려고 한다. 3인치의 시추공 내에서 직경 50 mm의 밀도검층 зонде가 시추공 중앙에 위치하면 공벽에서 약 12 mm 정도의 거리가 떨어지게 된다. 따라서 공벽에서 밀도검층 зонде까지의 거리를 2, 4, 8, 12 mm로 하여 모델링을 수행하였으며 시추공 안에는 물로 채워져 있는 것으로 가정하였다. Fig. 5의 (a)는 수치모델링의 결과로서, 공벽과 зонде와의 거리가 증가함에 따라 상대적으로 밀도가 낮은 물의 영향으로 계수율이 증가한다. 이와 같은 변화는 실제 밀도 값으로 환산하면 영향이 어느 정도인지 파악할 수 있음을 지시한다. Fig. 5의 (b)는 체적밀도의 범위가 2.3 ~ 2.7 g/cm³인 석회암에서 зонде와 공벽 사이의 간격이 멀어짐에 따른 계수율을 나타낸 것이다. 거리가 0 mm인 경우는 각각의 석회암 밀도에 대한 계수율이며 간격이 증가함에 따라서 계수율도 증가하고 각각의 석회암에 대한 차이도 거리가 0 mm인 경우와 비교할 때 작아지는데 이는 зонде와 공벽 사이의 낮은 밀도를 가진 물의 영향이다.

케이싱 영향

시추공 굴착 시, 미고결 충적층이나 단층 파쇄대 구간에는 시추공 붕락 방지를 위해 케이싱을 설치한다. 굴착 깊이가 증가하고 대상 구간이 심부인 경우, 장기적인 시추공 활용을 위해 상부 구간에 케이싱을 설치하는 것이 일반적이다. 또는 긴급히 자료를 취득해야 하는 경우, 케이싱 설치 전에 시추 로드 내에서 자료를 취득하는 경우도 빈번히 발생한다. 이와 같은 경우 시추 로드 내에서 자료를 취득하고 1 ~ 2개의 시추 로드를 제거하고 나공 상태에서 자료를 취득하여 시추 로드의 영향을 제거하기도 한다. 이와 같은 방법으로 도출되는 결과는

적용한 밀도зонде의 특성이나 ^{137}Cs 및 ^{60}Co 동위원소의 세기에 따라서 변하는 단점이 있다. 또한 연안지역이나 미고결 지층 구간에서 굴착하는 경우도 시추공 붕락 방지를 위해 PVC 케이싱을 설치한다. 이와 같은 경우는 steel 케이싱이 설치되는 암반 구간과 비교할 때, 측정되는 밀도 값의 변화가 크지는 않지만 케이싱 영향 보정이 현실적으로 더 어려운 환경이다. 따라서 수치모델링 결과와 현장시험 결과의 지속적인 비교, 보완 과정을 통해 케이싱 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 본 논문에서는 물로 채워진 3인치 시추공에서 두께가 2.2 mm

Fig. 6. Comparison of CPS for openhole, steel and PVC cased hole, respectively.

인 steel 및 PVC 케이싱의 영향을 MCNP 코드를 이용하여 모델링을 수행하였다. 케이싱이 설치되는 주변 지층은 물, 황, 알루미늄이고 PVC의 체적밀도는 1.40 g/cm^3 , steel 케이싱은 7.87 g/cm^3 이다. MCNP 모델링 결과, 지층의 밀도와 큰 차이를 가지는 steel 케이싱은 나공의 경우와 비교하여 계수율이 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. PVC 케이싱의 경우, 밀도가 높은 경우에는 계수율이 약간 증가하고 지층과 PVC의 밀도가 같아지는 1.40 g/cm^3 범위에서는 동일한 계수율 값을 보이며 PVC 밀도보다 지층의 밀도가 작아지는 구간에서는 계수율이 나공의 지층보다 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 6). 이와 같은 결과는 현장에서 케이싱과 나공 상태에서 취득한 시험결과를 기준으로 지속적으로 비교, 분석 과정을 반복한다면 MCNP 수치모델링을 이용한 방법도 신뢰성 높은 케이싱 영향 보정이 가능할 것으로 판단된다.

공내수 유무의 영향

물리검층 자료를 취득하는 시추공 내부는 지하수면을 기준으로 하부는 지하수(물), 상부는 지하수가 없는 구간(공기)으로 단순화 할 수 있다. 지하수면 하부는 100% 물로 포화된 구간이며 상부는 0% 또는 이와 근사한 불포화대로 가정할 수 있는데 본 MCNP 모델링에서는 공극률이 0%인 지층을 대상으로 시추공 내에 물이 있거나 없는 경우에 대한 모델링을 수행하였다. 모델링의 입력 자료로 이용한 공기의 체적밀도는 2.2

$\times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 이며 주변 지층의 밀도는 각각 알루미늄, 황 그리고 물이다. Fig. 7은 모델링 결과로 시추공 내의 공기의 영향으로 계수율이 증가한 것을 알 수 있으며 밀도가 감소할수록 차이도 감소한다. 이러한 공내수 유무의 수치모델링 통해 공내를 채운 매질의 밀도와 화학조성에 따른 반응곡선 구현이 가능함을 보여준다. 물에서도 차이가 있는 것은 시추공 지름에 해당하는 구간을 공기로 설정한 결과로써 일반적인 자연현상에서는 나타날 수 없으나 공내를 채운 매우 낮은 밀도의 공기의 영향으로 계수율이 증가한 결과로 볼 수 있다.

이러한 공내수 유무의 영향 평가를 통해 밀도가 높은 구간에 수위가 형성되지 않는 경우나 석회암 지대에서 시추공과 연결된 공동이 하부에 존재하는 경우에도 지하수위가 매우 낮게 형성되어 지하수가 없는 시추공에서의 영향을 파악하는데 유용할 것으로 판단된다.

결론

Monte Carlo 방법을 이용하여 소구경 밀도검층 상용 존대에 대한 반응 특성을 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 장비제조 회사의 교정곡선과 MCNP를 통해 구현된 2, 4인치 수치모델의 결과는 약 9% 이내의 오차를 보인다. 이는 제조사 교정곡선의 신뢰구간을 고려할 때 상당히 일치하는 결과로서 MCNP 수치모델링의 적용성을 보여준다. 이를 바탕으로 국내에서 가장 많이 굴착되는 3인치 시추공에 대한 수치모델링을 수행하였다.

2) PVC와 steel 케이싱에서의 수치실험 결과는 케이싱의 밀도에 의한 계수율 변화를 보여준다. 본 수치모델링에서 사용된 PVC와 steel 케이싱뿐만 아니라 다양한 두께, 재질, 밀도를 가진 케이싱 구현이 가능하며 이는 MCNP 수치모델링을 통한 케이싱 영향 보정의 가능성을 보여준다.

3) 공벽으로부터 존대가 멀어질수록 시추공을 채운 공내수(물)의 영향으로 밀도가 일정하게 감소함을 확인하였으며 이러한 변화는 거리 변화에 따른 영향 파악이 가능함을 지시한다.

4) 공내수 유무의 영향에 대한 수치모델링을 통해 공을 채운 매질에 따른 반응 곡선의 변화를 확인하였다. 본 연구에서 다루어진 지하수위를 기준으로 고려된 물과 공기의 영향 외에도 시추공 공벽 붕괴 방지를 위해 사용되는 폴리머(polymer)와 시추이수 등의 영향도 고려될 수 있으며 이들의 성분과 밀도를 이용하여 각각의 상황에 대한 보정곡선이 작성되어 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통해 MCNP를 이용한 수치모델링의 신뢰성 있는 적용성을 파악할 수 있었으며 MCNP 수치모델링 방법을 이용하여 밀도존대의 반응 예상 곡선과 효과적인 검층 보정이 가능할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 다루어진 일반적인 시추공 환경에 대한 반응 특성 연구 외에도 시추공과 연결된

Fig. 7. Comparison of CPS for borehole filled with water and air, respectively.

공동 구현을 통한 존테의 반응 연구 및 다양한 공극과 이들 공극을 채운 oil 또는 gas 등의 유체를 가진 지층 구현에 대한 반응 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20122010300060). 지원기관과 원고에 대한 세심한 조언을 해주신 세분의 익명의 심사위원님들께 감사의 말씀을 전합니다.

References

- Baker, P. E., 1957, Density logging with gamma rays, *Petrol. Trans AIME*, **219**, 289-294.
- Choi, H., 2010, Borehole environmental correction of density log using Monte Carlo simulation for a slimhole, Master Thesis, Hanyang University, 53.
- Ellis, D. V., 2003, Formation porosity estimation from density logs, *Petrophysics*, **44**, 306-316.
- Gaymard, R., and Poupon, A., 1968, Response of neutron and formation density logs in hydrocarbon-bearing formations, *The Log Analyst*, **9**, 3-12.
- Hwang, S., and Lee, S. K., 2008, A review on the geophysical well logging for geotechnical and groundwater environmental applications in Korea, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, **45**, 67-82.
- Hwang, S., Shin, J., Park, K. G., Park, Y. S., Lee, S. K., and Cho, C. H., 2004, Quality control of gamma-gamma (density) log, *Joint Symposium of Geophysics and Exploration Geophysics*, 32-39.
- Ku, B., Nam, M. J., and Hwang, S., 2012, A study on slim-hole density logging based on numerical simulation, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **15**, 227-234.
- Lee, S. K., Hwang, S., Hwang, H. S., and Park, I. H., 1998, *Quality control for quantitative geophysical logging*, KIGAM Research report KR-98(C)-10, 40-41.
- Los Alamos National Laboratory, 2008, *MCNP Manual*, **1**, 1-2, 8.
- 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.
- Scott, J. H., Muller, D. C., and Jiajin, L., 1988, A compensated density tool for mineral logging, *The Log Analyst*, **29**, 123-131.
- Souza, E. M., Correa, S. C. A., Silva, A. X., Lima, I. C. B., Rocha, P. L. F., and Lopes, R. T., 2010, Simulation of density curve for slim borehole using the Monte Carlo code MCNPX, *13rd Brazilian of Thermal Science and Engineering, Proc. of ENCIT*.
- Theys, P. P., 1991, *Log data acquisition and quality control*, Editions Technip, 330.
- Tittman, J., and Wahl, J. S., 1965, The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma), *Geophysics*, **30**, 284-294.
- Zak, A. J., and Smith, J. E., 1959, Gamma ray-density logging, *AIME*, Reprint no. 1253-G.