

## 소구경 시추공에서의 중성자검층 수치모델링 연구

구본진 · 남명진 \*

세종대학교 에너지자원공학과

### A study on slim-hole neutron logging based on numerical simulation

Bonjin Ku and Myung Jin Nam\*

Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University

**요약:** 이 연구에서는 국내에서 연구가 미약했던 중성자검층 수치모델링을 이용하여 다양한 시추공 환경에서의 검층기 반응을 분석하였다. 이를 위해 중성자검층 환경을 MCNP 알고리즘으로 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다. MCNP 알고리즘은 방사선 수송 시뮬레이션이 및 3차원 기하구조 표현이 가능하여 다양한 분야에서 전세계적으로 많이 이용되고 있다. 먼저 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해, 기존 연구의 검층기반응 결과 그래프를 이용하여 비교 분석하였다. 중성자검층 반응 분석이 가능한 중성자 검층기의 일반적인 특성에 기초하여 수학적으로 중성자검층기 모형을 구성하여 반응을 계산하였다. 먼저, 석회암, 사암, 돌로마이트 등과 같은 매질에서 공극률을 다양하게 변화시켜 가며 수치 계산함으로써, 이 연구에서 고려하고 있는 중성자검층기의 교정곡선(calibration chart)을 도출하였다. 이에 기초하여, 실제 중성자검층 시 고려해야 할 공내수 유무에 의한 반응 변화, 염수가 중성자검층에 미치는 영향 등을 분석함으로써 시추공 환경 변화에 따라 보다 정확하게 공극률을 해석할 수 있는 기틀을 마련하고자 한다.

**주요어:** 공극률, 교정곡선, 물리검층, 중성자검층, Monte Carlo N-Particle (MCNP)

**Abstract:** This study provides an analysis on results of neutron logging for various borehole environments through numerical simulation based on a Monte Carlo N-Particle (MCNP) code developed and maintained by Los Alamos National Laboratory. MCNP is suitable for the simulation of neutron logging since the algorithm can simulate transport of nuclear particles in three-dimensional geometry. Rather than simulating a specific tool of a particular service company between many commercial neutron tools, we have constructed a generic thermal neutron tool characterizing commercial tools. This study makes calibration chart of the neutron logging tool for materials (e.g., limestone, sandstone and dolomite) with various porosities. Further, we provides correction charts for the generic neutron logging tool to analyze responses of the tool under various borehole conditions by considering brine-filled borehole fluid and void water, and presence of borehole fluid.

**Keywords:** porosity, calibration chart, well logging, neutron logging, Monte Carlo N-Particle (MCNP)

## 서 론

물리검층은 탄화수소의 정확한 부존 깊이와 지층 내 탄화수소 양을 평가하는 데 필요한 정보를 제공해 줄 수 있기 때문에, 1927년 프랑스의 Schlumberger 형제가 Pechelbronn 유전의 한 시추공에서 매질의 전기비저항을 측정 한 이후 지속적으로 발전되어 왔다(Doll, 1951). 초기 물리검층은 시추 작업할 때 수행되는 ‘Mechanical coring’과 구분하기 위하여 ‘Electric coring’이라 불렸으며, 1933년부터 미국에서는 ‘Electrical logging’이란 명칭으로 불렸다. 이러한 물리 검층은 송수신 신

호의 종류나 측정하고자 하는 매질의 물성에 따라 크게 전기 검층(electric logging), 음파 검층(sonic logging), 자기공명 검층(nuclear magnetic resonance logging), 방사능 현상에 기초한 검층(radioactivity logging) 및 기타 특수한 목적의 검층들로 분류할 수 있다. 방사능에 기초한 검층은 지층 내 방사능 동위원소에서 자연적으로 발생하는 감마선을 측정하는 자연감마선 검층(natural gamma logging), 인공적으로 감마선을 방출한 뒤 돌아오는 감마선 양을 측정하는 밀도(감마-감마) 검층(density ( $\gamma$ - $\gamma$ ) logging), 중성자를 송신원으로 하는 중성자검층(neutron logging) 등이 있다.

방사능에 기초한 물리검층 중 하나인 중성자검층은 1941년에 Pontecorvo에 의해 개발되었으며 초기에는 시추공들 사이의 층서학적인 연결성을 조사하는 데에 많이 적용되었으나, 1949년 이후부터 지층의 공극률에 대한 정보를 얻기 위해 주

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

로 사용되었다. 특히, 석유 산업에서 중성자검층은 음과검층, 밀도검층과 함께 지층의 공극률 측정에 많이 이용되어 왔다.

중성자검층은 정량적으로 지층의 공극률을 측정하고, 정성적으로 오일과 가스를 식별하기에 매우 유용하여, 주로 석유탐사분야에 널리 사용되고 있으며, 이외에 지하수조사, 광물탐사, 지열탐사, 지질공학, 환경공학적인 용도로도 사용되고 있다. 최근에는 CO<sub>2</sub> 지중저장이 이루어지는 저류층 내의 이산화탄소 포화율을 모니터링하는 분야에도 적용되고 있다(Xue, 2006). 중성자검층은 또한 밀도검층과 함께 실시할 때 지하매질의 암상 지시자로서도 유용하다(Rider, 1996).

중성자검층기는 상업적인 용도로 이용하기 시작한지 60년이 되었으며, 다양한 중성자검층기가 개발되었다(Alger *et al.*, 1978; Allen *et al.*, 1967; Arnold *et al.*, 1981; Scott *et al.*, 1982). 초기에 중성자검층기는 하나의 방사선원과 하나의 검출기로 구성되어 있었으나, 시추공환경에 영향을 많이 받는 단점이 있어, 이를 보완하기 위해 근거리 및 원거리 두 개의 검출기를 갖는 중성자검층 장비가 개발되었다. 두 개의 검출기를 사용함으로써 검출기에 도달하는 계수율(count rate)이 증가하고 공극률을 산출할 때 통계적 불확실성을 줄여 주는 장점이 있다.

중성자검층의 수치모델링을 통한 연구는 해외에서는 활발한 연구가 이루어지고 있다. Parvaresh 등(2004)은 MCNP 수치모델링으로 중성자검층기를 디자인하고, 디자인을 바탕으로 제작된 실제 검층기의 검출기 반응과 수치모델링에서의 반응을 비교하는 연구를 수행하였다. 또한, 이수침입의 영향을 정량화하기 위한 연구(Mendoza *et al.*, 2007) 뿐만 아니라, 경사 및 수평 시추공에서 경사와 공극률을 정확하게 측정하기 위해 방사능 시추중 물리검층(logging while drilling) 연구(Ijasan, 2010), 일본 나가오카에서 물리검층으로부터 CO<sub>2</sub> 지중저장 모니터링을 실시하여 포화도를 알아보았던 연구(Xue, 2006) 등 다양한 연구가 수행되었다.

이상과 같이 해외에서는 중성자검층에 대한 연구가 활발히 진행되어온 반면, 국내의 경우 황세호 등(2006)이 제주 현무암 지역의 물리검층 자료의 해석에서 중성자검층을 일부 다룬 논문이 있을 뿐이다. 즉, 중성자검층에 대한 기초 연구는 전무한 상태라고 해도 과언이 아니다.

이 논문에서는 통계적인 방법으로 방사선원의 거동을 모사할 수 있는 Monte Carlo N-Particle (MCNP) 알고리즘을 이용하여 중성자검층을 수치 시뮬레이션을 통해 수행하고자 한다. 또한 중성자검층 반응의 이해를 돕기 위해 국내에서 자주 접할 수 있는 일반적인 소구경 시추공에서의 중성자검층기를 수치모델링하여 지층의 다양한 매질과 시추공 환경이 중성자 반응에 미치는 영향 등을 분석함으로써, 국내에서의 중성자검층 연구의 기초를 다지고자 한다.

이를 위해 먼저 중성자검층에 대해 소개하고, MCNP 알고리즘에 대해 알아보려고 한다. 이를 바탕으로 MCNP 알고리즘

들에 기초한 중성자검층 시뮬레이션 기법에 대해 설명하고 이 시뮬레이션 기법을 검증한 후, 다양한 환경에서의 중성자검층에 대해 수치실험을 수행하고자 한다. 실험 결과 시추공을 둘러싼 지층의 매질이 석회암, 사암, 돌로마이트로 변화함에 따라 중성자검층 교정곡선을 얻을 수 있었으며, 공내수 유무와 염수의 영향에 따라 검출기에서의 반응의 왜곡이 심해지는 것을 확인할 수 있었다.

## 중성자검층

지층매질 내 수소원자 양을 측정하여 매질의 원위치 공극률을 측정하는 중성자검층(neutron logging)은, 중성자원에서 방출된 고속 중성자(fast neutron)가 지층매질을 통과하여 검출기까지 도달한 중성자(혹은 감마선)를 측정함으로써 매질 내 수소원자량을 측정한다. 고속 중성자가 매질을 통과할 때, 고속 중성자는 매질 내 원자핵과 탄성 충돌하면서 에너지를 잃게 되어 고온열중성자(epi-thermal neutron; 0.1 ~ 100 eV)가 되며 에너지를 좀 더 잃게 되면 열중성자(thermal neutron; 0.001 ~ 0.1 eV)가 된다. 이 열중성자는 원자핵에 포획될 수 있으며, 이 열중성자를 포획한 원자는 원자 고유의 감마선을 방출하게 된다.

### 중성자검층 원리

중성자가 매질을 구성하는 원자와 탄성 충돌 시, 지층 원자핵은 일반적으로 중성자에 비해 질량이 매우 크기 때문에 에너지를 거의 잃지 않는 반면, 매질 내의 수소와 충돌 시에는, 수소원자의 질량이 중성자와 거의 동일하기 때문에 많은 에너지를 잃게 된다. 지층매질에서 수소 원자는 지층 공극 내의 공극유체 즉, 물(H<sub>2</sub>O)과 탄화수소(C<sub>2</sub>H<sub>2n+2</sub>)에만 포함되어 있으므로, 매질의 공극률이 높을수록 유체의 양이 많아지기 때문에 중성자는 에너지를 더욱 빨리 잃게 된다. 그러므로 중성자 검출은 공극률이 높은 매질에서는 검출기에서 측정되는 중성자 선속(neutron flux)이 줄어들어 계수율(count rate)이 낮아지게 된다.

### 공극률의 계산

중성자검층 시 검출기에서의 측정된 계수율을 분석하면 지층의 공극률을 추정할 수 있으며, 계수율에서 지층의 공극률을 계산하기 위해 각 검출기의 교정곡선(calibration chart)이 필요하다. 이러한 교정 곡선은 중성자검층기에 따라 다르기 때문에 각 검출기의 교정곡선을 확보하는 것이 공극률 계산에 있어 매우 중요하다. 이러한 교정곡선은 공극률을 알고 있는 여러 매질에서 중성자검층을 수행함으로써 구할 수도 있고, 수치 시뮬레이션을 통해 다양한 매질에서 공극률에 따라 측정된 값들에 기초하여 작성할 수도 있다.

중성자 검층을 통해 측정된 공극률을 일반적으로 중성자 공

극률( $\phi_N$ , PHIN, NPFI)이라 하며, 중성자 공극률은, 밀도검층으로 측정된 공극률(PHID)이나 음과검층을 통해 측정된 공극률(PHIS)처럼 매질의 종류에 따라 영향을 받는다. 일례로, 중성자 공극률은 지층 내 세일이 있는 경우 실제 지층의 공극률보다 크게 나타나며 가스가 있을 경우는 낮게 나타난다.

**중성자검층 방사선원 및 검출기**

중성자검층에 이용되는 고속중성자 방사선원은 일반적으로 중성자검층기(Fig. 1) 하부에 위치한다. 주로 아메리슘(ameri-cium; Am)과 베릴륨(beryllium; Be)의 화학적인 반응을 이용하여 고속중성자(평균 에너지 약 4 MeV)를 발생시키거나, 고전압 발전기로 동위원소인 중수소(듀테륨; deuterium; D)와 삼중수소(트리티움; tritium; T)를 가속시켜 융합 반응시킴으로써 고속중성자(14 MeV)를 발생시킨다.

중성자검층기의 종류는 검출기에서 측정하는 중성자 혹은 감마선의 종류에 따라 분류한다. 즉, 검출기에서 고온 열중성자 혹은 열중성자를 측정하는 검층기를 중성자-중성자 검층기(neutron-neutron type; n-n type)라 하며, 감마선을 측정하는 검층기를 중성자-감마선(neutron-gamma type; n-g type) 검층기라 한다. 동일한 매질이라도 검출기에서 고온열중성자, 열중성자 혹은 감마선을 측정함에 따라 검출기 계수율도 달라진다. 특정 검출기에서의 계수율은 매질 내 수소 함량에 의해 결정되지만, 검층 환경과 검층 변수 즉, 지층의 암상, 시추공 환경, 중성자선원과 검출기 사이의 거리, 검출기 종류 등에 따라서도 영향을 받게 된다.

**MCNP 알고리즘에 기초한 중성자검층 시뮬레이션**

중성자검층을 시뮬레이션 하기 위해서는 먼저 중성자검층기 존데와 검출기를 구성하고, 검층기의 송신원에서 방사되는 고속 중성자를 구현할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 지층 매질의

구성 물질과 중성자의 반응을 모사할 수 있어야 한다. 고속 중성자의 방출 및 방사된 중성자와 지층 구성 물질과의 반응을 모사하기 위해 Los Alamos National Laboratory에서 개발한 상용 코드인 MCNP 알고리즘을 이용하였다. MCNP 알고리즘은 난수(random value)를 발생시켜 통계학적인 방법으로 중성자, 광자(photon), 전자(electron) 등 하나의 방사능 입자 혹은 두 개 이상의 입자의 매질 내 이동, 매질과의 반응, 입자의 소멸까지 모사할 수 있으며, 컴퓨터 기술의 발전함에 따라 보편화 되어 원자력공학 및 의료분야 등에서 방사선 입자의 수송 및 이에 대한 해석에 많이 이용되어 왔다. 이러한 MCNP 알고리즘은 3차원 기하구조 모델링이 가능하기 때문에, 시추공 환경도 구현할 수 있어 중성자 검층 시뮬레이션에 적합하다.

MCNP 알고리즘을 이용한 중성자 검층 모델링을 위해서는 검층기 및 검층 환경의 실제 기하구조를 설계하고, 송신원 구성 및 검출기에서의 측정값의 설정이 중요하다. MCNP에 기초한 중성자와 지층매질 구성 원자 사이의 반응들을 모사하는 과정은 관련 방사능 입자와 원자와의 반응자료를 이용하게 된다. 중성자검층 뿐 아니라 밀도검층 및 자연감마검층 등도 방사능의 매질 내 이동 및 반응에 기초하기 때문에, MCNP 알고리즘을 이용하여 효율적으로 시뮬레이션할 수 있다.

**송신선원 및 검출기에서의 중성자 선속 측정**

MCNP는 고정소스, 표면소스, 셀소스, 임계(criticality) 소스 등을 제공하며 사용자가 정의할 수도 있다. 이러한 소스 중 고정소스와 표면소스를 주로 중성자검층이나 밀도검층 시뮬레이션에 이용한다(Forster *et al.*, 1990). 이 연구에서는 중성자선원으로 고속중성자를 방출하는 AmBe를 이용하는데, AmBe에 의해 방출되는 중성자를 모사하기 위해서 고정소스를 이용하여 모사하였다.

일반적으로 AmBe의 에너지를 스펙트럼 분석하면, 여러 에너지대역에서 피크값을 보이며 분포가 복잡하다(Fig. 2). AmBe

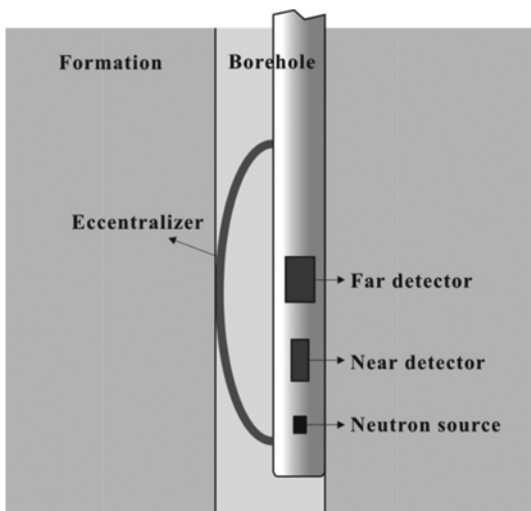


Fig. 1. Schematic image of a generic thermal neutron logging tool.

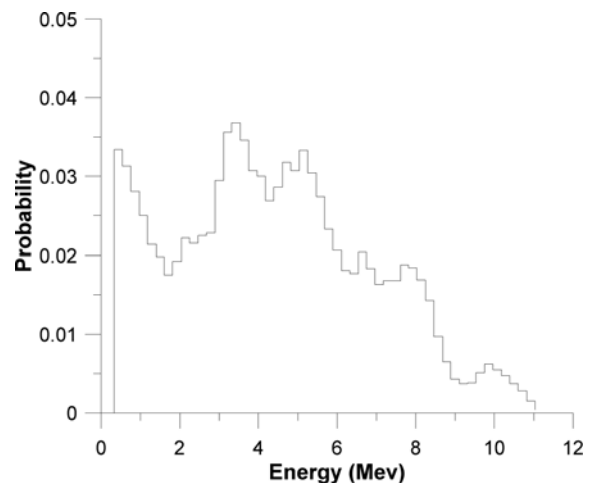


Fig. 2. Energy spectrum of the neutrons emitted from AmBe source (drawn using data given in Roberts (2001)).

에서 방출되는 중성자의 평균 에너지는 4.2 MeV로, 에너지 스펙트럼을 분석해보면 약 0.3 MeV에서 시작한 에너지 대역은 꾸준히 감소하다가 2 MeV부터 증가하여 약 3.8 MeV에서 극대치를 보이고 감소하다가 약 4.5 MeV 다시 증가하여 약 5.5 MeV에서 두 번째 극대치를 보인 뒤 꾸준히 감소하여 약 11 MeV 이상부터는 에너지가 존재하지 않게 된다(Roberts, 2001). 이러한 복잡한 양상을 모사하기 위해, 이 연구에서는 에너지대역에 따른 에너지 스펙트럼을 구현할 수 있도록 방사선원을 설정하였다.

MCNP는 입자흐름, 입자 속 등의 총 8가지 서로 다른 종류의 측정이 가능한데, 중성자검층 시뮬레이션에서는 실제 검출기에서 일어나는 반응을 모사하기 위해 검출기를 지나는 중성자 선속(neutron flux)을 얻을 수 있도록 설정하였다.

**검층 모델의 구성: 방사능 입자 반응 자료 설정**

MCNP 알고리즘 통계학적인 방법으로 하나 혹은 두 개 이상의 방사능 입자의 매질 내 이동, 매질과의 반응을 모사하기 때문에, 검출기 및 지층 모델을 구성하기 위해서는 먼저 MCNP에서 제공하는 다양한 기하구조를 이용하여 검층 환경의 3차원 기하 구조를 구현한 후 각 매질을 구성하는 물질을 구성하는 원자들의 원자번호 Z, 질량수 A 등에 대한 정보를 입력함으로써 모델을 구성하게 된다. 이로부터 MCNP 알고리즘은 기 결정된 중성자선원에서 발생하는 고속 중성자가 매질과 반응하는 것을 구현하기 위해 연속적인 에너지의 핵 데이터와 원자 데이터 라이브러리를 이용한다. 핵 데이터 테이블은 핵종 간의 상호작용, 중성자 유도 감마선, 감마선 상호작용, 중성자 선량측정, 중성자 활성화, 열중성자 산란 등의 자료 등이 있다.

**수치 실험**

지층의 암상, 검출기 종류, 검출기에서의 측정 대상, 중성자선원과 검출기 사이의 거리 등이 중성자검층의 반응에 미치는 영향을 분석하기 위해, MCNP 알고리즘에 기초하여 중성자검층 시뮬레이션을 수행하고 분석하고자 한다. 이를 위해 먼저 MCNP 알고리즘을 이용한 중성자검층의 검증한다.

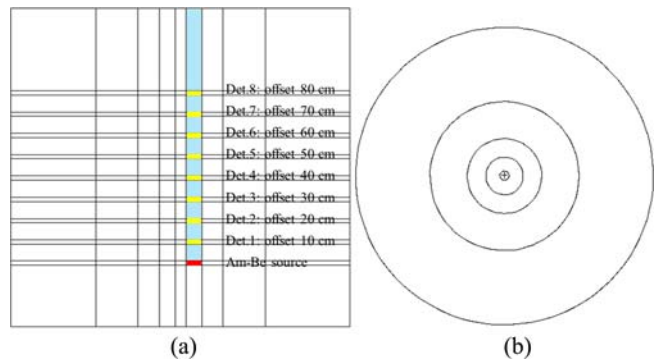
**MCNP를 이용한 중성자검층 시뮬레이션 검증**

MCNP 코드의 중성자검층 시뮬레이션의 적용성을 검증하여 신뢰성을 확보하기 위해, Ellis (2003)가 이용한 방법을 따라 단순모형을 구성하여 중성자 반응 결과를 분석하고 Ellis (2003)의 결과와 비교하였다. Ellis (2003)는 중성자 방사선원에서 검출기까지의 거리를 10 cm에서 80 cm까지 늘려가며 중성자 선속(neutron flux)반응을 분석함으로써 중성자검층 시뮬레이션의 정확도에 대해 검증하였다. 이때 모형의 매질은 물로 포화된 석회암으로 공극률은 0, 5, 10, 20, 30 p.u.로 설정

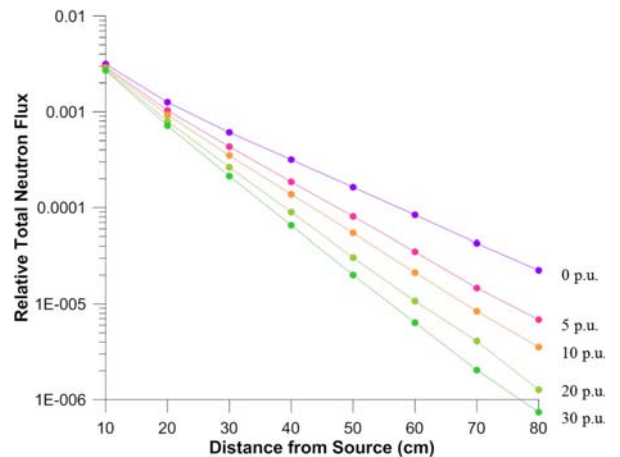
하였다.

이 연구에서도, Ellis (2003)와 같이 석회암이 물로 포화된 매질을 가정한 뒤 매질의 공극률을 0, 5, 10, 20, 30 p.u.로 증가시키면서 중성자 선속을 측정하였다(Fig. 3). 이때 검출기는 방사선원에서 10 ~ 80 cm까지 10 cm 간격으로 검출기를 위치 시켰으며 검출기의 두께는 2 cm로 가정하였다. 방사선원에서 검출기에 직접적으로 중성자가 이동하지 않도록 방사선원과 검출기 사이, 검출기들 사이에 열중성자 흡수체를 위치시켜 중성자를 최대한 차폐하였다. 그러나 Ellis (2003)가 연구에 사용한 방사선원에 대한 정보를 제공하고 있지 않기 때문에, 이 연구에서는 소구경에서 가장 흔히 이용하는 AmBe 방사선원에 기초하여 검출기와 중심이 같게 놓이도록 위치시켰다.

수치 실험 결과(Fig. 4) 방사선원에서 검출기까지의 거리가 증가할수록 중성자가 더 먼 거리를 이동하므로 이 과정에서 더 많은 에너지를 잃게 되고 검출기에 도달하는 중성자 선속이 감소함을 보였다. 특히, 30 ~ 70 cm 구간에서는 오프셋이 증가함에 따라 중성자 속이 선형으로 감소함을 보였고, 중성자검층기의 오프셋 거리도 이 사이에 위치한다. 또한, 물로 포화



**Fig. 3.** Model geometry for verification of neutron simulation: (a) section view and (b) top view with respect to offset.



**Fig. 4.** Results of MCNP simulation of the radial dependence of the total neutron flux in limestone formations with water-saturated porosity ranging from 0 to 30 p.u.

된 공극률이 증가할수록 중성자의 에너지 손실이 커지므로, 검출기에 도달하는 중성자 선속은(Ellis (2003)의 검증 결과와 동일하게) 공극률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여 이 연구에서 수행한 MCNP 알고리즘에 기초한 시뮬레이션의 정확성을 확인할 수 있었다. 단, 앞서 언급한 바와 같이, Ellis (2003)와 동일한 방사선원을 이용하고 있지는 못하기 때문에, 중성자 선속 값이 완전히 일치하지는 않는다.

**중성자검층 반응 분석**

중성자검층기는 오랜 시간 여러 분야에서 상업적으로 이용되어 왔으며, 매우 다양한 종류의 중성자검층기가 존재한다. 이 연구에서는 특정 회사의 검층기를 기초하여 중성자 검층기를 모사하기 보다는 다양한 상업용 중성자검층기의 특징들을 대표할 수 있는 중성자검층기 모델을 구성하여 수치 실험하였다.

일반적으로 가장 널리 사용되는 열중성자 검층기는 두 개의 검출기를 가지고 있으며, 검출기 하부에 위치한 방사선원에서 검출기들까지의 거리는 각각 35 cm, 60 cm이다. 방사선원으로는 주로 화학적 화합물인 AmBe를 이용함으로써 고속 중성자를 연속적으로 방출시킨다. 또한 중성자검층에서는 방사선원에서 방출된 고속 중성자가 지층 매질을 통과한 후 검출기로 도달하는 중성자(혹은 감마선)를 측정하기 때문에, 고속중성자가 존데 내 방사선원에서 존데 내부를 따라 직접적으로 검출기로 이동하는 것을 방지하기 위해서 고속중성자를 차폐한다. 실제 중성자검층 시 존데는 시추공의 영향 및 공내수의 영향을 최소화하기 위해 검층기는 시추공벽에 부착시켜 검층을 수행하게 된다.

**중성자검층기 모델링**

이 연구에서는 MCNP 알고리즘에 기초한 중성자검층 시뮬레이션을 위해, 방사선원으로는 AmBe를 하여 존데 하부에 위치시켰으며, 방사선원에서 상부로 32 cm, 62 cm 떨어진 곳에 근거리 검출기(near detector)와 원거리 검출기(far detector)를 위치시켰다(Fig. 5). 또한 방사선원에서 발생한 고속 중성자가 존데 내부를 따라 근거리 검출기와 원거리검출기로 직접적으로 이동하는 것을 막기 위해, 방사선원과 근거리검출기 그리고

원거리검출기 사이를 열중성자 흡수체(thermal absorber) 등으로 구성하여 중성자가 존데 내부를 통해 곧바로 검출기로 이동하는 것을 (검층을 위한 모델 구성에서와 같이) 차폐할 수 있도록 하였다. 위와 같이 구성한 중성자검층기로 수치검층을 수행함에 있어, 실제 검층 수행과 유사하게 존데를 시추공벽에 밀착시켜 실험이 수행 되도록 하였다(Fig. 5).

**수치 실험 모델**

수치 실험을 수행하기 위한 지층 모델은 균질하다고 가정하였으며, 석회암, 사암, 돌로마이트를 된 지층을 상정하였다. 각 매질에서 공극률을 0, 10, 20, 30 p.u.로 변화한다고 가정하고 공극은 민물(fresh water)나 염수로 100% 포화 되어 있다고 가정하였다. 시추공은 민물 혹은 염수로 차 있거나 비어있다(공기로 찬 경우)고 가정하였다. 모든 실험에서 시추공의 지름은 3 인치로 고정하였다.

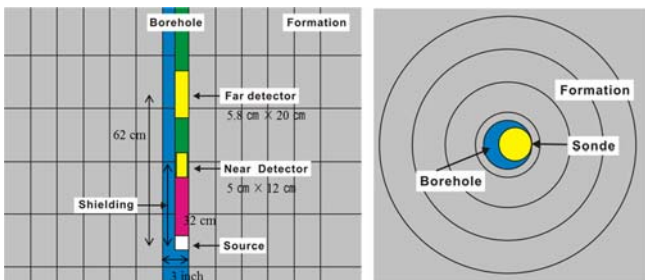
**중성자검층 반응 및 공극률 계산을 위한 교정곡선**

중성자검층기의 근거리 검출기와 원거리 검출기에서 측정된 중성자 선속에 기초하여 공극률을 계산하기 위해서는 검층을 수행한 중성자검층기를 위한 교정곡선이 있어야 한다. 교정곡선은 공극률을 알고 있는 실제 모델에서의 측정 값을 이용해서 구할 수도 있지만 다양한 공극률을 가진 실제 모델을 구성하는 것이 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이에 비해 시뮬레이션에 기초하면 비교적 저렴한 비용으로 다양한 매질에 대해 교정곡선을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 교정곡선의 구성을 위해 석회암, 사암, 돌로마이트 각 매질이 민물로 포화되어 있을 때, 공극률에 따른 중성자 반응을 계산하였다.

**반응 분석**

이 연구에서 고려하고 있는 검층기를 위한 교정곡선을 시뮬레이션을 통해 계산하기 전에 먼저, 석회암, 사암, 돌로마이트에 대한 근거리검출기와 원거리검출기에서 중성자 선속에 대한 중성자 선속을 비교 분석하고자 한다(Fig. 6). Fig. 6에서 수직 축은 검출기에서 측정된 열중성자 중성자 선속 값을 로그 스케일로 나타내었으며, 수평축은 공극률(p.u.) 값을 나타낸다.

석회암의 경우 공극률이 0 p.u.일 때, 즉 석회암(Fig. 6(a))만으로 매질이 구성된 경우 근거리검출기에서 중성자 선속 값(0.0060)이 원거리검출기의 중성자 선속 값(0.0039)보다 약 1.51% 크게 나타났으며, 중성자 선속은 공극률 증가할수록 두 검출기 모두에서 감소되며 로그스케일 상에서 원거리검출기에서의 중성자 선속이 더욱 빨리 감소한다. 사암(Fig. 6(b))과 돌로마이트(Fig. 6(c))에서도 전체적으로 비슷한 양상을 관찰할 수 있으나, 0 p.u.인 경우 사암에서는 근거리검출기와 원거리검출기에서의 중성자 선속 값(각각 약 0.0070과 0.0061) 차이가 가장 작고, 돌로마이트에서 그 값(각각 0.0080과 0.0043)의 차이가 가장 크다. 한편 0 p.u.에서 근거리검출기에서의 값이



**Fig. 5.** Graphical description of a generic neutron logging tool. The tool consists of near and far detector, and an AmBe neutron source.

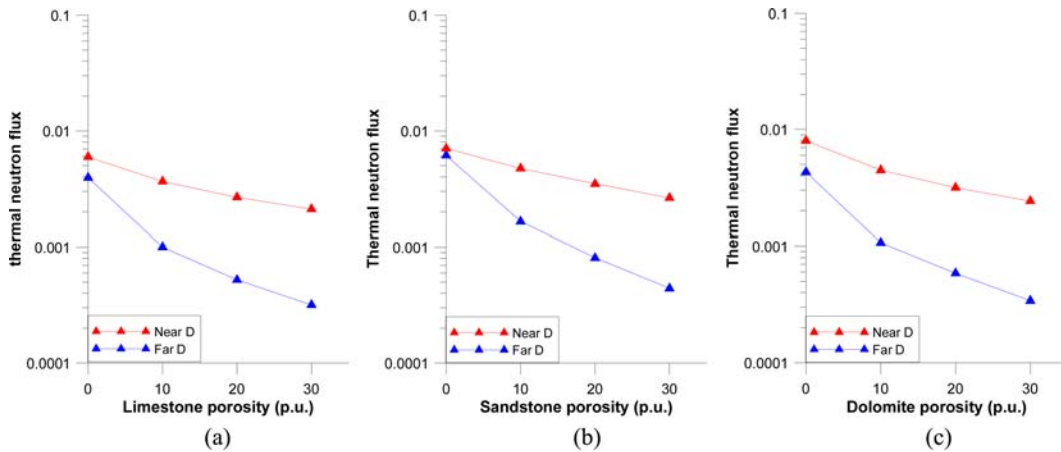


Fig. 6. Count rates of generic neutron tool with respect to porosities in a formation of (a) limestone, (b) sandstone or (c) dolomite.

가장 큰 매질은 돌로마이트로 0.0080이며, 가장 값이 작은 것은 석회암으로 0.0060이다. 이와 달리 원거리검출기에서의 값이 가장 큰 매질은 사암으로 0.0061이며 가장 작은 매질은 석회암으로 0.0039이다. 즉, 석회암은 근거리검출기와 원거리검출기 모두에서 가장 작은 값을 보여, 중성자의 감쇠가 가장 큰 매질임을 알 수 있으며, 돌로마이트는 근거리에서는 0.0080로 사암의 0.0070보다 높지만, 원거리에서는 0.0043로 사암의 0.0061보다 작다. 이와 같이 공극률이 0 p.u.일 때, 즉 순수한 석회암, 사암, 혹은 돌로마이트일 때의 근거리검출기와 원거리검출기에서의 값의 변화가 서로 다르다는 점에서 중성자검층에 의한 공극률 값 계산을 위해서는 매질에 따라 다른 검출곡선이 필요하다는 것을 알 수 있다.

교정곡선

각 매질에서 공극률 계산을 위한 교정곡선은 매질의 공극률에 따른 근거리 검출기에서 중성자 선속을 원거리 검출기에서 중성자 선속으로 나눈 Near/Far ratio를 수직축으로 매질의 공극률 값을 수평축 그래프에 도시한 곡선이다. 이 연구에서 고려하고 있는 석회암, 사암, 돌로마이트에서의 교정곡선을 하나의 그래프에 나타내어 Fig. 7에 도시하였다. 이 그래프에서 세 모는 사암, 다이아몬드는 석회암, 십자가는 돌로마이트를 나타내며 모든 매질에서 공극률이 증가할수록 Near/Far ratio가 증가함을 알 수 있다. 석회암의 교정곡선을 보면, 공극률이 10 p.u. 이상에서는 교정곡선은 공극률이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 반면, 돌로마이트에 대한 교정곡선은 공극률과의 선형성이 가장 적게 나타나고 있다. 즉, 돌로마이트에서의 중성자 선속 비율에서 매질의 공극률을 계산하기 위해서는 더욱 많은 공극률 값에 대한 Near/Far ratio를 계산할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 한편 각 교정곡선의 Near/Far ratio 값은 사암이 가장 작고 다음이 석회암 다음이 돌로마이트 순이다. 즉, 각 매질마다 보정곡선이 다르므로, 석회암 중성자검층을 수행하여 사암층의 보정곡선을 이용해 공극률을 계산하

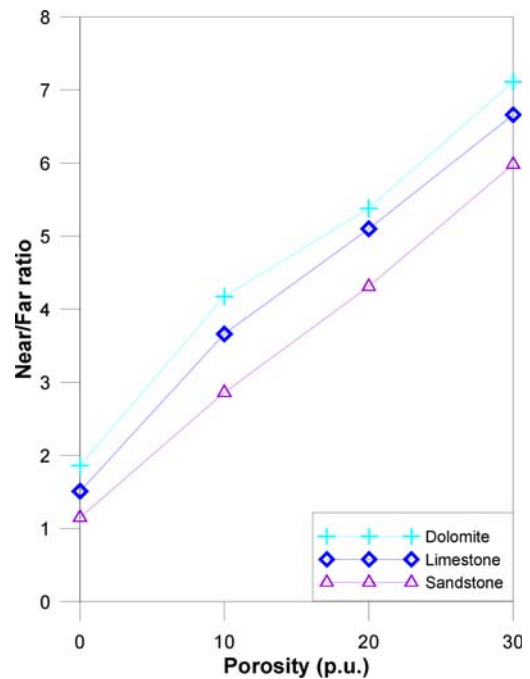


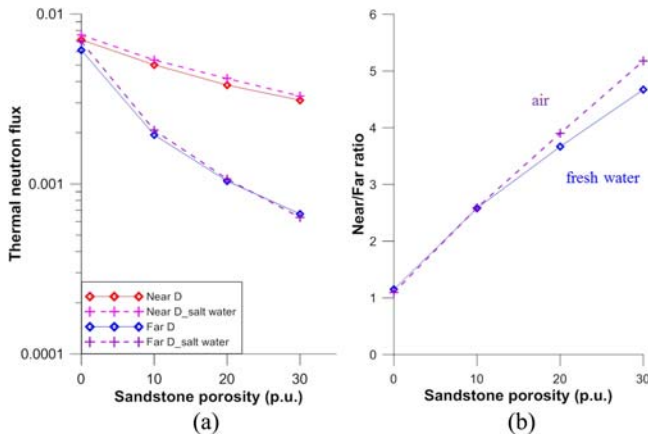
Fig. 7. The Near/Far ratio of generic neutron logging tool in (a) limestone, (b) sandstone, (c) dolomite formation.

게 되면 실제 공극률보다 더욱 크게 나타나게 되므로, 중성자 검층에서 공극률을 보다 정확히 계산하기 위해서는 측정 매질의 암상을 파악하는 것이 중요함을 알 수 있다.

공내수 유무의 영향 분석

물리검층을 실시할 경우 시추공이 물로 차 있는 구간도 있지만 공내수가 존재하지 않는 경우도 있으며 공내수의 유무는 중성자검층에 영향을 미칠 수 있으므로, 이를 위해 균질한 사암에서 공내수의 유무에 따른 중성자 반응을 매질의 공극률에 따라 수치 시뮬레이션하였다.

공내수가 없는 경우(공기로 찬 경우) 공내수가 물인 경우보다 검출기에 도달하는 열중성자의 중성자 선속은 근거리검출



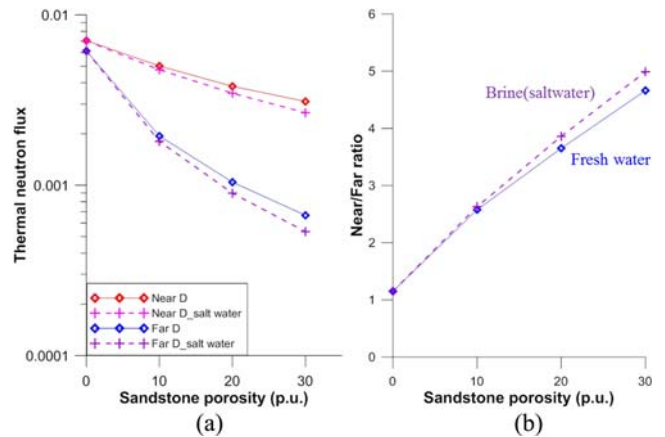
**Fig. 8.** Comparison between responses of generic neutron logging tool for borehole filled air or sea water: (a) neutron flux, (b) Near/Far ratio.

기에서는 모든 공극률에서 평균 7.7% 증가(Fig. 8(a))한 반면, 원거리검출기에서도 공극률 0 p.u. 일 때는 3.9% 증가했다. 이러한 증가폭은 근거리검출기에서는 공극률에 따라 큰 차이가 없는 반면, 원거리검출기에서는 공극률이 커지면서 감소하여 공극률이 20 p.u. 일 때는 큰 차이가 없게 되며, 공극률 30 p.u.에서는 오히려 물인 경우보다 줄어든 양상을 보인다. 이러한 특징은 Near/Far ratio에서 공내수가 있는 경우보다 없는 경우, 공극률이 증가함에 따라 값이 더욱 큰 폭으로, 즉 더욱 큰 기울기로 증가한다(Fig. 8(b)). 즉, 공내수가 물일 때보다 공기일 때 Near/Far Ratio가 0 p.u.일 때 4.8% 작지만, 10 p.u.에서 0.3%, 20 p.u.에서 6.4%, 30 p.u.에서는 10.8% 더 크게 나타나 공내수의 유무가 공극률 계산에 영향을 미침을 알 수 있었다.

**염수 영향 분석**

교정곡선 작성을 위한 수치실험에서는 공내수와 지층수를 물로 가정하였으나, 실제 검층 환경에서의 공내수와 지층수는 다양한 광물질이 녹아 있게 마련이다. 다양한 원소들 중 붕소 (boron.; B), 염소(chlorine; Cl)는 열중성자를 흡수하는 열중성자 흡수체의 특성이 있다. 붕소는 주로 셰일층에 함유되어있고, 염소는 해수 등에 포함되어 있다. 만약 지층에 해수가 침투한 경우는 염수에 의해 중성자검층 결과는 영향을 받게 된다. 이와 같은 중성자 검층에서 해수의 영향을 분석하기 위해 공내수와 지층수가 민물인 경우와 해수인(혹은 NaCl의 농도가 해수와 동일한 지층수) 경우 공극률에 따른 중성자 검층의 살펴보았다.

공내수와 지층수가 염수일 때 열중성자 검층기에서 측정하는 열중성자가 열중성자 흡수체인 염소에 흡수됨에 따라 검출기에 도달하는 중성자 선속은 공내수와 지층수가 물일 때 보다 더 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 9(a)). 또한 Near/Far ratio가 공내수와 지층수가 물일 때보다 염수일 때 열중성자 흡수증가에 따라 기울기가 더 크게 나타난다(Fig.



**Fig. 9.** Comparison between responses of generic neutron logging tool for borehole filled with fresh water or salt water: (a) neutron flux, (b) Near/Far ratio.

9(b)). 공내수가 물일 때보다 염수일 때, 공극률이 0 p.u.일 때 동일했던 Near/Far Ratio 값은 공극률이 10, 20, 30으로 증가함에 따라 각각 2.1%, 5.7%, 7.1%로 증가하였다. 따라서, 염수의 농도가 높은 경우 열중성자보다 높은 에너지 대역의 고온열중성자를 측정하는 고온열중성자검층기를 이용하는 것이 효율적임을 알 수 있다. 예를 들어, 해양탐사에서 검층이 실시되는 경우나, 최근 온실가스 감축을 위해 각광 받고 있는 CO<sub>2</sub> 저장을 위한 모니터링에는 열중성자 검층기를 이용한다.

**결론**

이 연구에서는 MCNP 알고리즘을 이용하여 국내에서 처음으로 중성자검층을 수치 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 방사선원으로부터 검출기까지의 거리가 일정하게 증가하는 단순모형을 설정하고 석회암에서 물로 포화된 공극률이 증가함에 따라 검출기에서의 중성자 선속의 반응 변화를 Ellis (2003)의 논문과 비교하여 검증하였으며 이에 기초하여, 소구경 시추공에서의 중성자검층에 대한 기초반응분석 및 시추공 환경영향을 분석하기 위해 중성자검층에 대한 수치 실험을 수행하였다. 시추공 주변 지층의 매질이 석회암, 사암, 돌로마이트로 변화함에 따라 중성자검층 교정곡선에 반응이 다르게 나타났다. 또한, 열중성자 흡수체인 염소를 포함한 공내수와 지층수의 영향으로 검출기 반응에 왜곡이 증가함을 알 수 있었다. 이 연구에서 수행한 MCNP에 기초한 중성자검층 시뮬레이션 기법을 토대로 CO<sub>2</sub> 지층저장, 석유 생산 혹은 EOR (Enhanced Oil Recovery) 등에 적용 가능한 저류층 모니터링 등에 따른 중성자 검층기의 적용성 연구 등을 수행할 예정이다.

**감사의 글**

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기

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

### 참고문헌

- 황세호, 신제현, 박기화, 박인화, 고기원, 2006, 제주 현무암 지역에서 물리검층 자료 해석, 지구물리와 물리탐사, **9**(3), pp. 231-240.
- Alger, R. P., Locke, S., Nagel, W. A., and Sherman, H., 1971, The dual-spacing neutron log-CNL, *SPE 46th Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 3565.
- Allen, L. S., Tittle, C. W., Mills, W. R., and Caldwell, R. L., 1967, Dual-spaced neutron logging for porosity, *Geophysics* **32**, 60-68.
- Arnold, D. M. and Smith H. D., 1981, Experimental determination of environmental corrections for a dual-spaced neutron porosity log, *Trans SPWLA 22nd Annual Logging Symposium*, paper w.
- Doll, H. G., 1951, The laterolog: a new resistivity logging method with electrodes using an automatic focusing system, *Petroleum Transactions, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, **192**, 305-316.
- Ellis, D. V., Case, C. R., and Chiaramonte, J. M., 2003, Porosity from Neutron Logs I: Measurement, *Petrophysics*, **44**, 383-395.
- Forster, R. A., Little, R. C., Briesmeister, J. F., and Rendricks, J. S., 1990, MCNP capabilities for nuclear well logging calculations, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **37**, 1378-1385.
- Ijasan, 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.
- Mendoza, A., Preeg E. W., Torres-Verdn, 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.
- Parvaresh, P. and Sohrabpour, M., 2004, Design and testing of a neutron porosity probe using MCNP code, *Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry*, **260**, 335-337.
- Rider, M. H., 1996, *The geological interpretation of well logs*, 2nd Ed, Whittles Publishing.
- Roberts, N. J., 2001, MCNP calculations of correction factors for radionuclide neutron source emission rate measurements using the manganese bath, National Physical Laboratory report.
- Scott, H. D., Flaum, C., and Sherman, H., 1982, Dual porosity CNL count rate processing, *SPE 57th Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 11146.
- Xue, Z., Tanase, D., and Watanabe, J., 2006, Estimation of CO<sub>2</sub> saturation from time-lapse CO<sub>2</sub> well logging in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan, *Exploration Geophysics*, **37**, 19-29.