

자기공명검층: 기본 이론 및 자료 측정

장재화 · 남명진 *

세종대학교 에너지자원공학과

A Review on nuclear magnetic resonance logging: fundamental theory and measurements

Jae Hwa Jang and Myung Jin Nam*

Sejong University, Department of Energy and Mineral Resource Engineering

요약: 석유탄사에서 자기공명검층은 저류층 내 유체의 양과 특성을 측정 및 평가 할 수 있는 물리검층 방법 중 하나로 평가되고 있다. 자기공명검층은 수소 원자의 자기모멘트와 외부 자기장을 이용하여 이 둘의 반응 즉, 분극과 이완을 측정, 분석하는 물리검층 방법이다. 측정된 자료는 저류층 내 유체의 수소밀도에 대한 정보와 감쇠 속도에 대한 정보를 포함 하고 있으며, 이를 바탕으로 적절한 자료 처리 과정을 거치면, 유체의 특성 및 유체의 양과 같은 저류층의 생산성과 관련된 중요한 정보를 취득할 수 있다. 뿐만 아니라 자기공명검층 결과를 이용한 투수성, 습윤성과 같은 생산공학적 측면의 해석방법에 대한 연구 또한 활발하게 진행되고 있다. 이 논문에서는 자기공명반응의 기본적인 이론과 자기공명검층의 역사 그리고 자기공명검층 장비를 통한 자료의 측정 원리에 대해 순서대로 알 아보도록 하겠다. 또한 랜덤워크를 이용한 자기공명반응의 시뮬레이션에 대해서도 간략하게 소개하고자 한다.

주요어: 자기공명검층, 분극, 이완, 자기공명검층 장비

Abstract: Nuclear magnetic resonance (NMR) logging has been considered one of the most complicated nevertheless, one of the most powerful logging methods for the characterization on of both rocks and natural fluids in formation. NMR measures magnetized signals (polarization and relaxation) between the properties of hydrogen nucleus called magnetic moment and applied magnetic fields. The measured data set contains two important petrophysical properties such as density of hydrogen in the fluids inside the pore space and the distinct decay rate for fluid type. Therefore, after the proper data processing, key petrophysical information, not only the quantities and properties of fluids but also supplies of rock characterization in a porous medium, could be archived. Thus, based on this information, several ongoing researches are being developed in estimating aspects of reservoir productivity information, permeability and wettability since it is the key to having correct interpretation. This study goes through the basic theory of NMR at first, and then reviews NMR logging tools as well as their technical characteristics. This paper also briefly discusses the basic knowledge of NMR simulation algorithm by using Random walk.

Keywords: Magnetic resonance logging, Polarization, Relaxation, Magnetic resonance logging tool

서론

자기공명검층은 외부 자기장에 의해 암석 내 물과 탄화수소에 주로 포함되어 있는 수소원자가 자기공명을 일으켜 발생하는 자기장 반응을 측정하는 것으로, 암상의 영향을 배제한 정보를 얻을 수 있다는 점이 가장 큰 강점이다.

자기공명검층의 연구는 1952년 Chevron에서 처음으로 시작 되었으나, 초기 자기공명검층 장비의 기계적 한계로 인해 측정된 자료는 보정이 필요하였을 뿐만 아니라 다른 물리검층 자

료와 결과가 일치하지 않는 등 현장적용에 제약이 많았다. 그러나 1990년 초반 코일대신 자석과 GPMG (Carr, Purcell, Meiboom, and Gill; Carr and Purcell, 1954; Meiboom and Gill, 1958) 신호를 적용한 상업용 자기공명검층장비가 도입됨에 따라 적용범위가 확대되고 더불어 해석기술이 발달되었으며 이를 토대로 공극 내 유체의 종류 및 생산공학적 정보 뿐만 아니라 지질학적 정보와 같은 구체적인 해석이 가능하게 되었다.

암석 내 물과 탄화수소에 주로 포함되어 있는 수소원자(H)는 자기장을 가하면 에너지를 흡수하여 강한 공명신호를 생성하며, 자기장을 제거하면 에너지를 방출하면서 원래 상태로 돌아가는데 자기공명검층은 원래 상태로 돌아가려는 자기장의 반응을 측정한다. 자기공명검층을 통해 측정된 자기장 반응은

2012년 9월 17일 접수; 2012년 11월 14일 수정; 2012년 11월 23일 채택;
*Corresponding author
E-mail: nmj1203@gmail.com
Address: 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

측정범위 내 수소원자의 밀도에 대한 정보와 반응의 속도에 대한 정보를 포함하고 있으며, 이를 바탕으로 매질의 공극률과 공극 유체의 종류 및 공극 분포 정보를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 자기공명검층으로 취득한 공극률과 유체에 대한 정보는 다른 물리검층과 비교하여 상대적으로 정확하기 때문에 이를 기초로 유체투과도(Seevers, 1966; Timur, 1968, 1969a, b; Kenyon *et al.*, 1988; Hidajat *et al.*, 2002; Xie *et al.*, 2006), 습윤성(Kubica, 1995; Kenyon, 1997; Freedman *et al.*, 2003; Flaum *et al.*, 2005)과 PVT (pressure/volume/temperature; Freed *et al.*, 2005) 등도 예측할 수 있다.

자기공명검층 자료의 보다 정확한 해석을 위해서는 자기공명검층 반응의 자료처리와 모델링기술도 매우 중요하다. 자료처리란 측정된 자기장 반응을 T_2 스펙트럼 그래프로 변환하는 것으로, T_2 역산이라고 하며 역산 방법에 따라 스펙트럼 그래프의 모양이 달라지기 때문에 정확한 해석을 위해서는 정확한 자료처리가 필요하다. 자기공명검층에서 공극 내 유체의 수소 병진 운동은 블로치토리 방정식(Bloch-Torrey equation; Hürlimann, 1998; Appel *et al.*, 1999, 2001; Shafer *et al.*, 1999; Dunn *et al.*, 2002; Sun and Dunn 2002; Zhang *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2009)을 랜덤워크방식(Ramakrishnan *et al.*, 1999; Toumelin, 2002; Toumelin *et al.*, 2003, 2004a, b, 2006, 2007)으로 풀어 모델링할 수 있으며, 보다 정확한 계산을 위해 암석과 유체의 모델을 구성하고(Hazlett, 1995; Ams *et al.*, 2004; Adler *et al.*, 1990; Liang *et al.*, 1998; Okabe and Blunt, 2004, 2005; Bryant *et al.*, 1993; Bakke and Øren, 1997; Øren and Bakke, 2003; Jin *et al.*, 2003) 이 모델에서 자기공명반응을 시뮬레이션 한다.

자기공명검층은 대부분의 저류층에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 다른 물리검층으로 해석이 불가능한 특수한 저류층에서도 적용이 가능하다. 실제로 자기공명검층으로 탄층매탄의 생산성(Sigal and Odusina, 2010; Clennell *et al.*, 2010, Yao *et al.*, 2010a, b)을 평가한 연구 및 2008년 북해 내 유성기수(oil-base mud)에 침해가 일어난 가스 컨덴세이트 저류층이라고 추정되던 저류층이 자기공명검층을 통해 가스와 경유(light-oil) 저류층이었다는 것을 밝힌 사례(Akkurt *et al.*, 2009) 등도 있었다.

이와 같이 자기공명검층 기술이 급속하게 발전하고 또 그 중요성은 커지고 있는 현 시점에도, 국내에서는 자기공명검층의 중요성에 대한 인식이 부족할 뿐만 아니라, 자기공명검층의 이론이나 기술적 특성에 대한 지식 또한 부족한 실정이다. 이 논문에서는 자기공명검층에 대한 이해를 돕기 위해 자기공명검층에 대한 기초이론 및 자기공명검층 자료의 측정 등에 대한 문헌과 논문에 대한 분석에 기초하여, 먼저 자기공명의 기본적인 이론을 설명하고, 자기공명검층방법 및 자료의 측정방법, 자기공명검층장비의 발전 과정과 현재 가장 대표적으로 이용되고 있는 두 장비들에 대해 소개하고자 한다.

자기공명

자기공명현상은 자기장내에서 원자핵이 가진 자기 쌍극자 모멘트와 각운동량 때문에 생기는 현상으로, 특히 수소 원자에서 강하게 나타난다. 양성자 하나와 전자 하나로 구성되어 있는 수소 원자 내 양성자의 회전은 다른 원자에 비해 큰 자기 모멘트를 발생하기 때문이다. 이러한 수소 원자에 정자기장(static magnetic field, B_0)을 걸어주면(z 방향이라 가정, Fig. 1(a)), 수소의 자기 모멘트가 B_0 방향(순방향)과 반대방향(역방향)으로 향하며(에너지 갈라짐 현상; Keller, 1991; Fig. 1(b)) 세차운동을 하게 된다. 이러한 현상을 종축분극이라 하며, 이때 세차운동은 B_0 크기(B_0)에 비례하는 라머주파수(Larmor Frequency, f_L)로 운동하게 된다.

$$f_L = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \tag{1}$$

여기서 γ 는 수소의 자기회전비($\gamma/2\pi = 42.58$ MHz/telsa; Cowan, 1997)이며 모든 원자는 고유한 자기회전비 값을 갖는다.

종축분극에서, 순방향 자기모멘트가 역방향 자기모멘트보다 에너지 준위가 낮고 서로 반대 방향으로 분극된 수소원자 자기 모멘트들의 벡터 합은 순방향을 향하며 이때의 크기를 순자화(net magnetization, M_0 ; Fig. 1(b))라 한다. M_0 는 B_0 , γ , 부피당 수소원자의 밀도(N), 볼츠만상수(Boltzmann constant, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹), 플랑크 상수(Planck's constant, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)와 수소의 양자수(I)에 비례하고 절대 온도(T)에 반비례하며(Cowan, 1997) 다음과 같다.

$$M_0 = N \frac{\gamma^2 \hbar^2 I(I+1) B_0}{3(3\pi^2)kT} \tag{2}$$

종축분극 상태에 있는 수소원자에 라머주파수와 동일한 주파

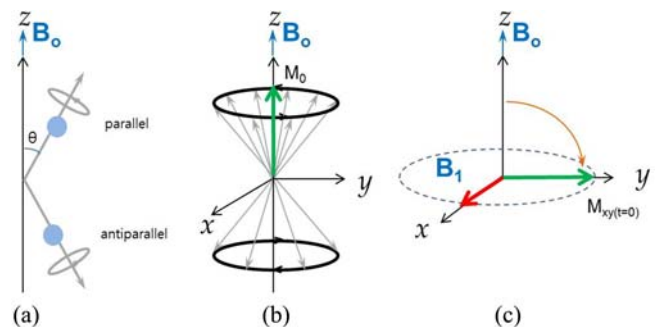


Fig. 1. Interaction between Hydrogen protons and applied magnetic fields (a) In the presence of an external magnetic field B_0 , spins are precessing about B_0 aligned parallel or antiparallel. (b) The population of protons in the lower energy state is usually higher than the higher energy state. The summation of magnetic moments between the numbers of spins aligned parallel and anti-parallel, called net magnetic moment (M_0), is co-linear with the applied B_0 . (c) After applying 90° oscillating magnetic field B_1 at the Larmor frequency, the magnetization will tip to the xy -plane.

수(공명주파수, resonance frequency; 이하 RF)의 진동자기장 (\mathbf{B}_1)을 \mathbf{B}_0 에 수직방향으로 걸어주면(x방향이라 가정; RF \mathbf{B}_1) 자기공명현상이 일어나 모든 수소원자는 \mathbf{B}_0 과 RF \mathbf{B}_1 에 수직인 방향(y방향; Fig. 1(c))으로 동일위상(inphase) 세차운동을 하게 된다. 이러한 상태를 횡축분극(Fig. 1(c))이라 하며, 이때 수소 자기모멘트에 의한 자화($M_{xy}(t=0)$)는 최대가 되는데 이를 횡축자화라 한다.

자기공명검층 반응

횡축분극 상태에 있는 수소에 공명주파수의 자기장 $90^\circ\text{RF } \mathbf{B}_1$ 을 끊어 주면 횡축자화의 감소 현상 즉 이완이 일어난다. 이 완에는 종축이완과 횡축이완이 있는데, 자기공명검층에서는 이들 각각에 관련된 에코트레인(echo train)과 대기시간(wait time; TW)을 측정한다. 특히 횡축이완과 관련된 에코트레인을 주로 많이 측정한다. 이 장에서는 먼저 이완에 대해 이해한 뒤, 자기공명반응인 에코트레인과 대기시간에 대해 알아본다.

이완

이완 과정에는 종축자화를 다시 회복하는 과정에서(횡축자화 견지에서는 종축으로 자화를 잃는 것이므로) 나타나는 종축이완(Bloembergen *et al.*, 1948)과 수평면(xy 평면) 상에서 자화를 잃어가는 횡축이완이 있다.

종축이완은 자기공명에 의해 흡수한 에너지를 방출하며 종축분극 상태로 돌아가기 때문에 스핀격자(spin-lattice)이완이라고도 불리며, 종축자화값(M_z)은 이완시간(t)에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_z(t) = M_0(1 - e^{-t/T_1}) \tag{3}$$

여기서 T_1 은 자기공명현상 전의 종축자화(M_0 , 식 (2)) 값의

63%까지 회복하는데 걸리는 시간으로 종축이완시간이라 하며, $2T_1$ 에서는 91%, $3T_1$ 에서는 95%의 종축자화가 회복된다.

횡축이완은 자기공명에 의해 자화가 놓였던 xy평면 상에서 수소원자들이 동위상을 잃는 탈위상화(depahsing)에 의해 발생한다. 탈위상화는 서로 다른 에너지 상태의 자기 모멘트 사이의 상호 에너지 전달과 \mathbf{B}_0 크기의 공간적 차이로 인한 확산의 차이로 발생한다. 이때, 탈위상화에 의한 자화의 감소를 자유유도감쇠(free induction decay; FID)라 하며, 자유유도감쇠의 감쇠속도가 수십 μs 로 매우 빨라(Fig. 2) 측정이 어렵다.

에코트레인

자유유도감쇠를 측정하기는 어렵기 때문에, 자기공명검층에서는 스핀에코(spin echo) 현상에 기초한 에코트레인을 측정한다. 스핀에코란, $90^\circ\text{RF } \mathbf{B}_1$ 을 제거한 뒤 일정시간(τ) 동안 탈위상화가 진행되었을 때, $90^\circ\text{RF } \mathbf{B}_1$ 의 반대방향(-x방향)으로 다시 공명주파수의 진동자기장($180^\circ\text{RF } \mathbf{B}_1$)을 걸어준 뒤 제거하면 탈위상화가 진행된 시간과 동일한 시간(τ)이 지난 뒤에 수소원자들이 반대방향(-y방향)으로 동위상의 세차운동하는 자화를 의미한다(Cowan, 1997). 이때, 스핀에코가 생성되는 때 걸리는 시간을 에코간격(inter echo spacing; TE)이라 하고 ($TE = 2\tau$), 스핀에코를 연속적으로 형성하기 위한 일련의 자기장 신호를 발견자 이름을 따라 CPMG 신호라 하며(Fig. 2), CPMG 신호에 의해 형성된 스핀에코들을 에코트레인이라 한다.

스핀에코 현상에서, 횡축이완을 야기하는 탈위상화 중 자기모멘트 사이의 에너지 이동에 의한 자화의 감쇠는 회복되지 않기 때문에, 스핀에코의 크기는 점차 감소한다. 이러한 스핀에코의 최고점들을 연결한 곡선을 이완감쇠곡선 혹은 횡축이완곡선이라 한다. 횡축이완곡선에서 자기공명에 의해 형성된 횡축자화($M_{xy}(t)$)는 시간에 따라 다음과 같이 변화한다.

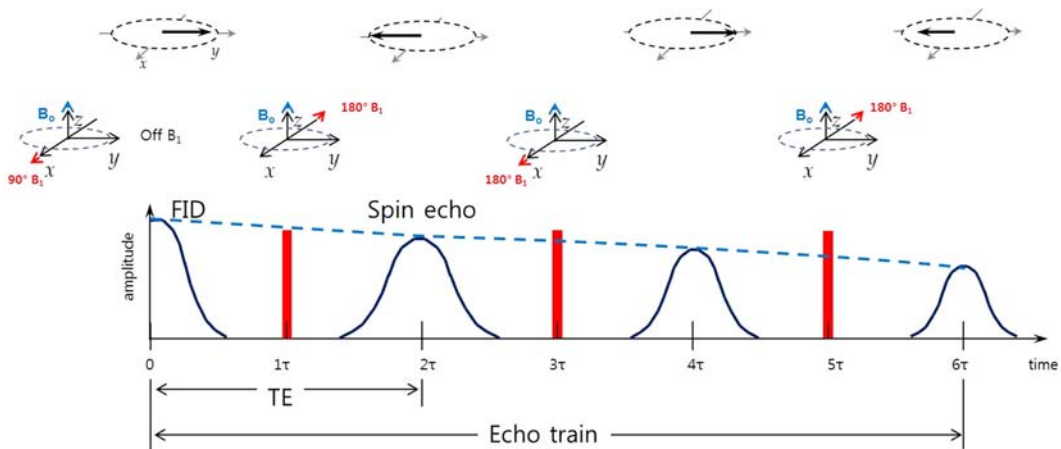


Fig. 2. Free induced decay called FID, series of spin echoes and echo train using CPMG sequence consisted of consists of one $90^\circ\text{RF } \mathbf{B}_1$ pulse followed by a series of $180^\circ\text{RF } \mathbf{B}_1$ pulses. The amplitude of series of spin echoes are decreasing, called T_2 relaxation, owing to molecular interaction.

$$M_{xy}(t) = M_{xy(t=0)} e^{-t/T_2} \quad (4)$$

여기서, T_2 는 자기공명에 의한 최대 횡축자화값($M_{xy(t=0)}$)의 37%까지 감소하는데 걸리는 시간으로 횡축이완시간이라 한다 (Fig. 2).

대기시간

CPMG 펄스로 더 이상 스핀에코를 발생시킬 수 없을 때 즉 수소의 재배열이 더 이상 일어나지 않게 되면, 모든 수소원자가 B_0 방향으로 자화를 회복할 수 있도록 휴식시간을 주어야 한다. 이 시간을 대기시간이라 하며, 대기시간은 정자기장에 의한 종축분극 상태로 회복하는 종축이완시간과 같으며, 종축 자화가 95% 이상 회복할 수 있는 시간인 $3T_1(TW \geq 3T_1)$ 이상의 시간이어야 한다.

이완 메커니즘

이완 즉, 종축이완과 횡축이완을 일으키는 이완메커니즘에는 벌크이완(T_b 이완, bulk relaxation), 표면이완(T_s 이완, surface relaxation), 확산이완(T_d 이완, diffusion relaxation) 있다(Korringa *et al.*, 1962; Kleinberg *et al.*, 1994; Watson and Chang, 1997). 벌크이완은 공극 내 유체중 암석 표면과 닿지 않는 유체 내부에서의 이완이고, 표면이완은 공극 내 유체와 암석 표면이 닿는 부분에서의 이완이며, 확산이완은 공간에 따른 정자기장의 크기가 변화 즉 정자기장의 크기 구배 때문에 발생하는 이완이다. 자기공명반응의 이해 뿐만 아니라 자기공명반응의 수치 시뮬레이션을 하기 위해서는 이완메커니즘에 대한 이해가 매우 중요기 때문에, 이 장에서는 각 이완 메커니즘에서 수소 원자 거동 양상 및 수소의 회전(스핀)의 이동과 스핀에 영향을 미치는 요소를 자세히 살펴보고자 하겠다.

벌크이완(T_b 이완, bulk relaxation)

벌크이완은 암석 표면에 닿지 않는 공극 내 유체에서 발생하는 이완으로, 수소 스핀-스핀 사이의 상호작용으로 스핀이 이동하면서 인접해 있는 스핀에 야기하는 자기장의 변화에 의해 발생하는 이완이다. 벌크이완은 유체의 특성 즉 유체점성도(η) 및 화학 조성 등에 따라 달라지며, 벌크이완시간(T_b)은 다음과 같다.

$$T_b \cong \alpha \left(\frac{T_k}{298\eta} \right) \quad (5)$$

여기서 α 는 유체 타입에 따른 값($\alpha_{\text{water}} = 3$, $\alpha_{\text{oil}} = 1.2$), T_k 는 절대온도(K) 이다(Vinegar, 1995; Zhang *et al.*, 1998). 벌크이완이 종축이완과 횡축이완에 미치는 영향은 거의 동일하다.

표면이완(T_s 이완, surface relaxation)

표면이완은 브라운운동에 의해 자유 확산하는 유체분자와 암석 표면 사이에서 발생하는 이완으로, 표면이완의 속도는 유체 내 원자가 얼마나 많이 암석 표면과 상호작용을 하느냐에 따라 다르다.

만약 B_0 크기의 공간적 구배가 일정하다고 가정했을 때, 공극이 물로만 채워진 경우($S_w = 1.0$) 표면이완시간(T_s)은 암석 공극표면에서 수소가 이완하는 정도를 측정할 값인 표면이완도(surface relaxivity; ρ)와 공극의 면적대 부피비($(S/V)_{\text{pore}}$)에 기초하여 다음과 같이 계산할 수 있다(Kenyon, 1992; Brownstein and Tarr, 1979; Kleinberg *et al.*, 1994).

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{1s}} &= \rho_1 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} \\ \frac{1}{T_{2s}} &= \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} \end{aligned} \quad (6)$$

표면이완도는 종축이완과 횡축이완에서 각각 ρ_1 과 ρ_2 로 그 값이 다르다(Huang, 1997).

Kleinberg *et al.* (1993)은 실험실에서 105개의 샘플의 종축 표면이완도(ρ_1)와 횡축표면이완도(ρ_2)를 측정하여 이 둘의 표면이완도비($\rho_1/\rho_2 = T_1/T_2 = 1.59$)가 1이 아님을 확인하였다. 표면이완도는 암상과 유체의 종류에 따라 값이 다르며, 일반적으로 사암의 평균 표면이완도는 약 $15 \mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 탄산염을 포함한 암석의 평균 표면이완도(약 $5 \mu\text{m}/\text{sec}$) 보다 훨씬 크다고 알려져 있다(Chang *et al.*, 1997).

자기장의 구배가 일정하지 않거나 공극이 여러 유체로 채워진 경우 표면이완 계산은 복잡해지기 때문에 일반적으로 표면이완의 수치 시뮬레이션에서는 확률론에 근거한 랜덤워크 방법을 이용하게 된다.

확산이완(T_d 이완, diffusion relaxation)

수소를 포함한 매질에 가해진 정자기장의 공간적 구배로 인해, 유체 분자 확산이 일어나게 되는데, 자기장구배가 크면 클수록 확산은 더 빠르게 일어난다(Bendel, 1990). 이러한 확산은 자기회전비(γ), 자기장 구배의 크기(G (gauss/cm)), 에코간격(TE)을 이용해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{T_{2d}} = \frac{D(\gamma \cdot G \cdot TE)^2}{12} \quad (7)$$

여기서 D 는 분자확산계수(molecular diffusion coefficient)이다.

실제로 공극 내에서는, 확산하는 유체 분자가 공극의 기하학적 구조에 의해 그 이동이 제한되는 확산(restricted diffusion)이 일어나게 된다. 이때, 제한된 확산에서 분자확산계수는 유체의 자유확산계수(D_B)보다 더 크며(Latour *et al.*, 1993) 다음과 같이 계산된다.

$$D(t) = D_B \left(1 - \frac{4}{9\sqrt{\pi}} \frac{S}{V} \sqrt{D_B t} \right) \quad (8)$$

즉, 제한된 확산에서의 분자확산계수는 공극의 면적 부피비(S/V)와 자유확산계수(D_B)에 영향을 받으며, 유체의 자유확산계수(D_B)는 유체의 타입($\alpha_{water} = 1.2, \alpha_{oil} = 1.3$), 절대온도(T_K) 및 점성도(η)에 따라 다르며 다음과 같이 계산할 수 있다(Appel *et al.*, 1999; Mardon *et al.*, 1996).

$$D_B \cong \alpha \left(\frac{T_K}{298\eta} \right) \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (9)$$

한편 에코간격이 너무 짧으면 확산이완은 거의 발생하지 않는다.

각 이완메커니즘 시간에 기초한 종축이완 및 횡축이완 시간의 계산

앞서 논의한 세 가지 이완 메커니즘의 상대적인 중요성은 유체의 조성 및 측정 매개변수에 따라 변한다. 이러한 이완 메커니즘들과 종축, 횡축이완 사이의 관계를 요약하면 다음과 같다(Kenyon, 1992).

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_{1s}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_{2s}} + \frac{1}{T_{2d}} \quad (11)$$

즉, 종축이완은 벌크와 표면이완에 의해서만 결정되는 반면, 횡축이완은 벌크, 표면, 확산이완에 의해 결정된다. 벌크이완과 표면이완은 공극 내 유체와 암석의 본질적인 특성(표면이완도)과 열역학 상태(온도, 압력)에 의해 결정되며, 이 둘은 에너지를 잃음에 따라 자화의 감쇠가 발생한다. 그러나 확산이완은 유체의 확산계수뿐만 아니라 실험 변수인 자기장구배의 크기(G)와 에코간격(TE)에 의해서도 영향을 받는다. 한편, 자기장의 구배가 일정한 경우, (10)식과 (11)식은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{1}{T_1} = \frac{298\eta}{\alpha T} + \rho_1 \left(\frac{S}{V} \right)_{pore} \quad (12)$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{298\eta}{\alpha T} + \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{pore} + \frac{D(\gamma \cdot G \cdot TE)^2}{12} \quad (13)$$

자기공명검층 자료 및 측정

이 장에서는 자기공명검층 반응에 영향을 주는 공극 내 유체의 특성에 대해 간략히 검토한 뒤 자기공명검층 자료의 측정 및 측정 변수 등에 대해 논하고자 한다. 이와 더불어 자기공명자료의 분석을 위한 자기공명검층 시뮬레이션에 대해 간략히 소개하고자 한다.

공극 유체 특성에 따른 이완 특성

공극유체는 공극 내 유체 특성에 따라 점토유착공극유체 (clay bound fluid)와 모세관유착유체(capillary bound fluid, BVI) 그리고 자유유동유체(free fluid, FFI) 세 가지로 구분되며, 생산공학적 측면에서 점토유착 및 모세관유착유체는 생산불가유체, 자유유동유체는 생산가능유체로 나뉜다. 생산불가유체와 생산가능유체를 구분하는 경계는 유체 구분값(T_2 cut off value)에 의해 결정되는데, 일반적으로 사암에서의 유체 구분값은 33 ms, 탄산염 암에서는 90 ms로 암상에 따라 달라진다(Cotes *et al.*, 1999). 더불어 자유유동유체는 일반적으로 한 가지 이상으로 구성되어 있고, 유체의 종류(물, 오일, 가스)에 따라 이완시간(종축이완, 횡축이완) 및 확산계수(D_B)가 다르다(Fig. 3). 따라서 이러한 특징에 기초하여 자유유동유체를 구성하는 유체의 종류 및 양을 파악할 수 있다. 또한 공극이 작으면 이완이 빠르게 일어나고, 공극이 크면 이완이 느리게 일어난다. 즉 이완시간은 공극의 크기에 비례하기 때문에 공극의 크기를 유추할 수 있다.

자기공명검층 자료의 측정

자기공명검층 장비는 일반적으로 정자기장 B_0 를 생성할 수 있는 자석(약 176 gauss)과 진동자기장(B_1)을 발생시키며 동시에 반응을 측정할 수 있는 안테나로 구성되어 있다. 시추공에 자기공명검층 장비를 위치시키면, 공극 내 유체의 수소원자들

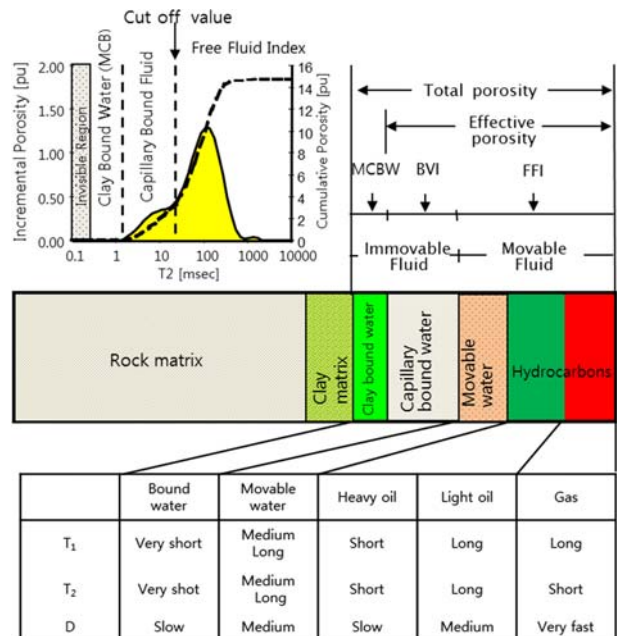


Fig. 3. A porosity model of virgin zone. Pore fluids divide into 2 categories by T_2 cut off value, one is movable fluid consisting of hydrocarbons and movable water and the other is immovable fluid including clay bound water and capillary bound water. Movable fluid also could be classified by the different properties (T_1 , T_2 and D) of fluid types (Coates *et al.*, 1999).

은 자석의 정자기장에 의해 몇 초 안에 분극된다. 분극이 완료되면 일련의 CPMG 펄스를 가하면서 매질 내 수소의 이완반응을 측정하게 된다. CPMG 펄스로 더 이상 스핀에코를 발생시킬수 없게 되면 앞서 논의한 바와 같이 정자기장방향으로 수소들이 다시 분극할 수 있게 충분히 대기시간(=중축이완)이 필요하며($TW \geq 3T_1$), CPMG 펄스에 의한 횡축이완곡선(에코트레인)과 대기시간을 통틀어 연속시간(cycle time)이라 한다.

대기시간(TW)과 에코간격(TE)은 자기공명검층 변수로 측정하고자 하는 매질 내 유체에 따라 그 값을 조정하게 되지만, 일반적으로 CPMG펄스의 에코간격(TE)은 약 0.5초, 대기시간(TW)은 10초 이상으로 설정한다(Coates *et al.*, 1999). 자기공명검층 시 자료에 가장 크게 영향을 미치는 검층 변수는 다음과 같다: 1. 정자기장의 크기, 2. 대기시간(TW), 3. 에코간격(TE).

자기공명검층의 탐사심도(depth of investigation; DOI)는 정자기장(B_0)의 크기에 따라 달라지며, 정자기장은 공간적으로 값이 변하기 때문에 검층기에서의 상대적 위치에 따라 수소원자들은 다른 라머주파수로 세차운동하게 된다. 즉, 자기공명검층기로부터 멀어지면 정자기장의 크기가 감소하기 때문에 라머 주파수도 감소한다. 이러한 특징을 이용하여, 다양한 주파수의 진동 자기장을 사용하여 다양한 탐사심도에서 자료를 취득할 수 있다(Fig. 4(a)).

한편 자기공명검층은 시추공을 따라 이동하면서 측정하기 때문에 수직해상도(vertical resolution; VR)에 대한 고찰도 필요하다. 만약 고정된 위치에서 자기공명검층을 측정하면, 수직해상도는 안테나 길이와 같다. 그러나 자기공명검층은 시추공을 따라 이동하면서 측정하기 때문에 검층기가 이동방향에서는 정자기장에 의해 분극되기 전에 검층기가 지나가게 되고, 반대방향에서는 분극되었지만 감쇠 신호를 측정하지 못한 채 지나가게 된다. 즉 앞뒤로 자료를 측정하지 못하는 부분이 생기면서 수직해상도는 감소하게 되며(Fig. 4(b)), 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$VR = L + V(TC \times SNR - TW) \tag{14}$$

여기서 L 은 안테나의 길이, V 는 검층속도, TC 는 연속시간, SNR 은 신호대 잡음비이다. 검층속도가 빠르거나 대기시간 또는 연속시간이 길어지면 수직해상도는 감소하므로 자기공명검층 시에 수직해상도를 고려하여 사전에 검층속도를 결정해야 한다(Coates *et al.*, 1999)

자기공명검층의 시뮬레이션

수소의 이완 및 확산은 블로치토리 방정식으로 계산할 수 있다. 블로치토리 방정식은 공극의 크기와 유체의 종류에 관계없이 적용 가능하며, 더불어 수소의 특징(에너지 갈라짐, 이완, 확산)과 자기장구배를 고려할 수 있다. 블로치토리 방정은 유한차분법(finite-difference method; Mohanty *et al.*, 1982) 또는 랜덤워크법(random walk method; Ramakrishnan *et al.*, 1999;

Torquato and Kim, 1989)으로 계산 할 수 있는데, 유한차분법은 일련의 선형 방정식을 풀어야 하기 때문에 시간이 오래 걸리지만(Mohanty *et al.*, 1982), 랜덤워크법은 확률론에 기초하여 수소의 이동을 랜덤 결정하기 때문에 빠른 계산이 가능하다(Hidajat *et al.*, 2003; Talabi, 2008). 한편, 현재 CT촬영 등을 통한 시추 코어의 고해상도 이미지로부터 저류층 매질 구조에 대한 정보를 얻고(Hidajat *et al.*, 2002; Arns *et al.*, 2005, 2006, 2007; Idowu, 2009), 이를 바탕으로, 공극 내 존재하는 유체의 특성(유체 분포, 유체 종류)을 구현(Valvatne, 2004; Arns *et al.*, 2007)하여 수치 시뮬레이션을 위한 모델을 구성한다. 이러한 방법은 유체를 포함한 매질에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있어 자기공명 수치 시뮬레이션의 정확도를 증가시킬 수 있게 된다.

자기공명검층 장비

현재 많은 종류의 자기공명검층장비가 사용되고 있으나, 그

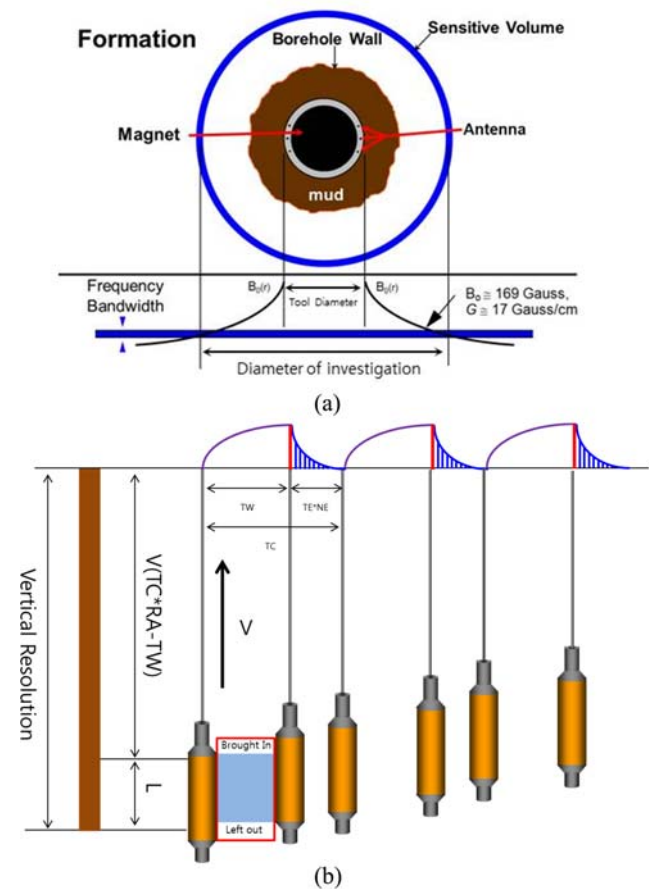


Fig. 4. Depth of investigation and vertical resolution in NMR logging tool. (a) A cross-sectional view depicts the decrease in B_0 strength with distance from the tool. (b) A vertical resolution of the NMR logging tool is decreased by the logging speed, cycle time, duration of wait time, and average signal to noise ratio (Cotes *et al.*, 1999).

중 Halliburton(이전 Numar)의 MRIL (magnetic resonance imaging logging)과 Schlumberger의 CMR (Combinable Magnetic Resonance) 또는 MR scanner가 대표적이다. 이 두 장비는 비록 제작 회사는 다르지만 수소 양성자를 분극시키기 위해 자석을 사용하고 있다는 점과 스핀에코를 생성하기 위해 연속의 자기장을 사용한다는 공통점을 가지고 있다. Halliburton에서는 MRIL를 이용하여 총 공극률, 유효공극률, 낮은 저항 지역 내 생산불가 유체의 양 등을 해석이 가능할 뿐만 아니라 투수성, 유체 종류 및 탄화수소지역, 유체 접촉면과 오일의 점성도 변화에 대한 정보를 얻을 수 있다고 주장하고 있다. 한편 Schlumberger사의 CMR과 MR Scanner는 횡축이 완시간의 분포, 총 공극률, 생산 가능 유체 및 생산 불가 유체의 구분, 투수성, 모세관 유착 공극률과 작은 공극의 공극률 정보를 얻을 수 있다고 한다(Table 1).

이 장에서는 먼저 검층장비 발전 과정에 대해 간략히 살펴본 뒤, Halliburton의 MRIL과 Schlumberger의 CMR과 MR scanner 장비에 대해서 자세히 알아보려고 한다.

자기공명검층 장비의 발전

1952년 Chevron은 자기공명검층 장비에 대한 연구를 처음 시작하였으며, 1960년 초기 Dresser Atlas에 의해 최초의 상업적인 서비스가 시작되었다. 그러나 초기 자기공명검층 장비는 많은 제약이 있었기 때문에 본격적으로 석유 업계에서 자기공명검층이 이용된 것은 1980년대 후반부터이다.

초기 자기공명검층 장비는 지구자기장(B_0)과 코일을 이용하였는데, 코일에 전류를 흐르게 하여 조사범위 내에 수소를 횡축분극 시킨 다음, 이를 제거하면 스핀이 지구자기장방향으로 돌아가는 이완반응을 측정하였다. 한편, 초기 모델은 시추공 내에서 분극이 발생되기 때문에 시추공 내에 이수가 전체 시그널에 영향을 미쳤으며 코일에서 생성한 진동자기장이 지구의 자기장에 정확히 수직이 아닐 경우 측정이 불가능하였다. 또한 시추공의 크기와 온도에 의해 자기공명 반응이 크게 왜곡되었다(Kleinberg, 2001).

1984년 Jackson (Los Alamos national laboratories)은 지구 자기장 대신 2개의 자석을 시추공 내에 넣어 직접 자기장을 생성시키는 Inside-out 방법을 제안하였다. 이는 현재 자기공명검층 장비의 초창기 모델로, 머드 도핑(mud doping: 머드에 불순물을 첨가하여 전기적 특성을 얻음)을 하지 않고도 측정을 할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 기존의 분극시간을 약 20 μ s에서 0.5 μ s로 감소시켰다. 그러나 자석의 신호 크기가 비교적 작아 신호 크기의 평균값을 구하기 위해 꽤 오랜 시간 동안 자료를 누적해야 하였으며, 탐사 심도가 비교적 얕다는 단점이 있다.

Halliburton (Numar)사의 MRIL

Halliburton은 Inside-out NMR에 추가의 자석을 장착하여 공명검층장비를 축으로 거리에 따라 자기장의 크기가 감소하는 새로운 디자인의 장비를 개발하였다. 이는 공간에 따라 자기장의 크기가 다르기 때문에 검층기의 상대적 위치에 따른 공명주파수를 이용하여 특정 심도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 기존 Inside-out NMR의 시추공 내 이수에 의한 영향을 배제한 측정이 가능해졌다.

1991년 Halliburton은 MRIL이라는 검층 장비로 상업적인 검층 서비스를 시작하였으며, 현재는 9개의 주파수를 측정할 수 있는 MRIL prime을 사용하고 있다. MRIL prime의 첫 번째 주파수는 점토유착공극수를 측정하며, 나머지 8개는 각각 2개씩 짝을 이뤄 에코간격이 다른 4개의 주파수를 측정함에 따라 공극 내 유체를 구분할 수 있다. 한편 MRIL은 시추공 내에 중앙에 위치하여 탐사를 하기 때문에 시추공벽의 거칠기에 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 한번에 여러 개의 주파수 대역에 대한 자료를 측정할 수 있다(Fig. 5(a); Xiao *et al.*, 2009).

Schlumberger사의 CMR

Schlumberger는 Inside-out NMR을 기초로 하지만, 신호대 잡음비를 감소시키기 위해 시추공 부착형(skid-type)의 검층장비 CMR을 개발하였다. CMR은 2개의 자석과 안테나로 구성

Table 1. A comparison of MR scanner and MRIL (from the websites of Schlumberger and Halliburton).

Tool Name	MR-scanner (Schlumberger)	MRIL (Halliburton)
Logging type	Skid type	A centralized in the bore hole
DOI	1.25 ~ 4.0 in	14 ~ 16 in
Vertical resolution	7.5 ~ 18 in	5 ft
Logging speeds	600 ft/min (3,600 ft/hr, Max.)	24 ft/min (Max.)
Measurements	So & Sw for identification and quantification of pay zones Total and effective porosities Bulk volume irreducible water Oil viscosity Pore size analysis Permeabilities (Timur Coates)	Measures total fluid-filled porosity Determine permeability, fluid types and net hydrocarbon feet, fluid contacts and changes in oil viscosity
Remark	Avoiding the interference of conductive muds on the operation of the antenna	Unaffected by hole rugosity

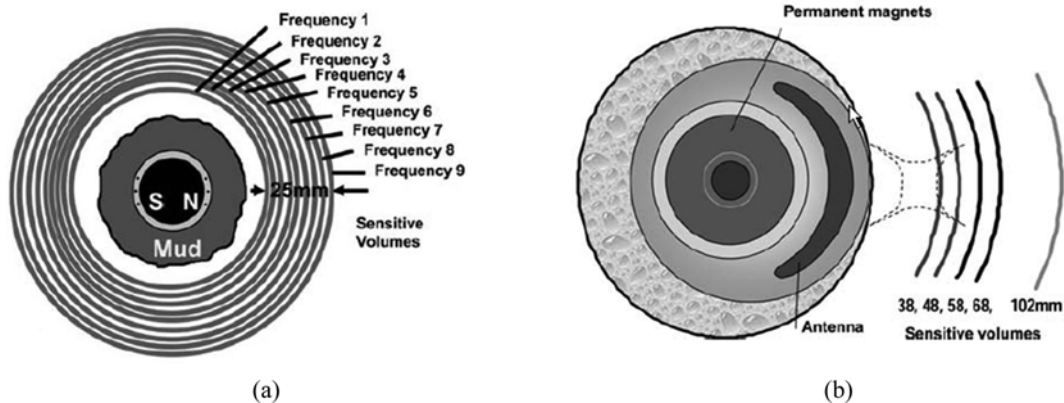


Fig. 5. Sensitive volume scheme of NMR logging tools (a) Halliburton's MRIL Prime with nine sensitive volume cylinders (b) Schlumberger's MR Scanner with five sensitive volume cylinders (Xiao *et al.*, 2009).

되어 있으며, 자석은 지구자기장의 1000배에 크기(약 2 MHz)의 자기장을 생성할 수 있다. 한편, CMR은 시추공 한쪽 벽에 부착하기 때문에 시추공 내 이수의 영향을 적게 받지만 시추공벽의 거칠기에 영향을 받는다.

CMR은 끊임없는 연구를 거쳐 현재는 3개의 안테나(1개의 메인 안테나와 2개의 고해상도 안테나)를 장착한 MR Scanner로 발전하였으며, 이는 깊이에 따른 5개의 주파수 대역을 측정할 수 있고, 검층 속도가 빠르다(Fig. 5(b); Xiao *et al.*, 2009).

이 두 장비는 자석과 안테나를 포함한 원통형으로 구성되어 있으며, 한번에 여러 주파수 대역의 이완자료를 측정할 수 있다는 공통점을 가지고 있지만, 탐사심도, 시추공의 영향(이수, 시추공벽의 거칠기)은 장비에 따라 다르다(Table 1).

결 론

자기공명검층은 암상의 영향 없이 매질의 구조와 공극 내 유체를 평가할 수 있는 가장 강력한 방법이다. 암석 내 물과 탄화수소에 주로 포함되어있는 수소는 자기 모멘트를 가지고 있으며, 외부 자기장의 여부에 따라 분극과 이완을 한다. 자기공명검층은 공명현상에 의해 외부에너지를 흡수한 수소원자가 흡수한 에너지를 방출하면서 원래 상태로 돌아가려는 이완시간을 측정한다. 이완은 벌크이완과 표면이완 메커니즘에 의해 발생하는 종축이완과 벌크이완, 표면이완, 확산이완 메커니즘에 의해 발생하는 횡축이완이 있다. 벌크이완과 표면이완은 유체와 암석의 특성에 영향을 받고, 확산이완은 유체의 확산계수와 정자기장의 구배 및 에코간격 등의 검층 변수에 영향을 받는다. 측정된 에코트레인 감쇠 곡선은 공극 내 존재하는 유체의 수소의 밀도정보와 이완속도에 대한 정보를 포함하고 있으며, 에코트레인 감쇠 곡선 해석법을 이용하면 총공극률뿐 아니라 공극 내 유체의 유착타입에 대한 정보도 얻을 수 있다. 또한 검층 변수가 다른 자기공명 자료를 서로 비교하면, 유체의

종류뿐만 아니라 유체를 포함하고 있는 공극의 크기에 대한 정보도 획득할 수 있다. 이러한 정보들을 바탕으로 유체투과도와 습윤성에 대한 정보를 추정/계산하려는 많은 연구가 수행되고 있다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2012T100201588). 남명진은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0014684)을 일부 받아 연구를 수행하였습니다. 저류층 유체특성에 대해 자문을 아끼지 않으신 강원대학교 박창협 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- Adler, P. M., Jacquin, C. G., and Quiblier, J. A., 1990, Flow in simulated porous media, *Int. J. Multiphase Flow*, **16**, 691-712.
- Akkurt, R., Bachman, H. N., Minh, C. C., Flaum C., Lavigne, J., Leveridge, R., Carmona, R., Crary, S., Decoster, E., Heaton, N., Hürlimann, M. D., Looyestijn, W. J., Mardon, D., and White, J., 2009, Nuclear magnetic resonance comes out of its shell, *Schlumberger Oilfield Review*, **20**(4).
- Appel, M., Freeman, J. J., Perkins, R. B., and Hofman, J. P., 1999, Restricted diffusion and internal field gradients, *Trans. SPWLA 40th Annual Logging Symposium*, paper FF.
- Appel, M., Gardner, J. S., Hirasaki, G. J., Shafer, J. L., and Zhang, G. Q., 2001, Interpretation of restricted diffusion in sandstones with internal field gradients, *Magnetic Resonance Imaging*, **19**, 535-537.
- Arns, C., Knackstedt, M., Pinczewski, W. V., and Martys, N., 2004, Virtual permeametry on micro tomographic images, *J. Petrol. Magnetic Resonance Imaging*, **45**, 41-46.

- Arns, C. H., Knackstedt, M. A., and Martys, N., 2005, Cross-property correlations and permeability estimation in sandstone, *Physical Review*, **72**, 046304.
- Arns, C. H., Sheppard, A. P., Saadatfar, M., and Knackstedt, M. A., 2006, Prediction of permeability from NMR response: surface relaxivity heterogeneity, *Trans. SPWLA 47th Annual Logging Symposium*, paper GG.
- Arns, C. H., Sheppard, A. P., Sok, R. M., and Knackstedt, M. A., 2007, NMR petrophysical predictions on digitized core images, *Petrophysics*, **48**, 202-221.
- Bakke, S., and Øren, P. E., 1997, 3-D pore-scale modeling of sandstones and flow simulations in the pore networks, *SPE Journal*, **2**, 136-149.
- Bendel, P., 1990, Spin-echo attenuation by diffusion in non-uniform field gradients, *J. Magnetic Resonance*, **86**, 509.
- Bloembergen, N., Purcell, E. M., and Pound, R. V., 1948, Relaxation effects in nuclear magnetic resonance absorption, *Physical Review*, **73**, 679-712.
- Brownstein, K. R., and Tarr, C. E., 1979, Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells, *Physical Review*, **A19**, 2446-2453.
- Bryant, S. L., Mellor, D. W., and Cade, C. A., 1993, Physically representative network models of transport in porous media, *AIChE Journal*, **39**, 387-396.
- Carr, H. Y., and Purcell, E. M., 1954, Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiment, *Physical Review*, **94**, 630-638.
- Cowan, B., 1997, *Nuclear Magnetic Resonance and Relaxation*, Cambridge University Press.
- Chang, D., Vinegar, H., Moriss, C., and Straley, C., 1997, Effective porosity, producible fluid and permeability in carbonates from NMR logging, *The Log Analyst*, **38**, 60-72.
- Cho, H., Ryu, S., Ackerman, J. L., and Song, Y. Q., 2009, Visualization of inhomogeneous local magnetic field gradient due to susceptibility contrast, *J. Magnetic Resonance*, **198**, 88-93.
- Coates, G., Xiao, L., and Prammer, M., 1999, *NMR Logging Principles and Applications*, Halliburton Energy Services Publication.
- Dunn, K. J., Bergman, D. J., and LaTorraca, G. A., 2002, *Nuclear Magnetic Resonance: Petrophysical and Logging Application*, Elsevier Science.
- Clennell, M. B., Josh, M., Dewhurst, D., Esteban, L., and Raven, M., 2010, Shale petrophysics: electrical, dielectric and NMR methods to characterize mud rocks and discover relationships to mechanical properties and hydrocarbon affinity, *AAPG Hedberg Conference*, 90122.
- Flaum, M., Chen, J., and Hirasaki, G. J., 2005, NMR diffusion-editing for D-T₂ maps: application to recognition of wettability change, *Petrophysics*, **46**, 113123.
- Freed, D. E., Durcaw, L., and Song, Y. Q., 2005, Scaling laws for diffusion coefficients in mixtures of alkanes, *Physical Review Letters*, **94**, 067602.
- Freedman, R., Heaton, N., Flaum, M., Hirasaki, G. J., Flaum, C., and Hürlimann, M. D., 2003, Wettability, saturation, and viscosity from NMR measurements, *SPE Journal*, 317-327.
- Hazlett, R. D., 1995, Simulation of capillary-dominated displacements in microtomographic images of reservoir rocks, *Transport Porous Media*, **20**, 21-35.
- Hidajat, I., Singh, M., Cooper, J., and Mohanty, K. K., 2002, Permeability of porous media from simulated NMR Response, *Transport in Porous Media*, **48**, 225-247.
- Hidajat I., Singh, M., and Mohanty, K. K., 2003, NMR response of porous media by random walk algorithm: A parallel implementation, *Chemical Engineering Science*, **190**, 1661-1680.
- Hürlimann, M. D., 1998, Porous media by random walk algorithm: A parallel implementation, *J. Magnetic Resonance*, **131**, 232-240.
- Huang, C. C., 1997, *Estimation on rock properties by NMR relaxation method*, Master's thesis, Rice University
- Idowu, N. A., 2009, *Pore-scale modeling: stochastic network generation and modeling of rate effects in water flooding*, PhD thesis, Imperial College London.
- Jin, G., Patzek, T. W., and Silin, D. B., 2003, Physics-based reconstruction of sedimentary rocks, *SPE Western Regional / AAPG Pacific Section Joint Meeting*, 83587.
- Keller, P. J., 1991, *Basic Principles of MR Imaging*, Chapter 4, GE Medical Systems.
- Kenyon, W. E., Day, P. I., Straley, C., and Willemsen, J. F., 1988, A three-part study of NMR longitudinal relaxation properties of water-saturated sandstones, *SPE Formation Evaluation*, **3**, 622-636.
- Kenyon, W. E., 1992, Nuclear magnetic resonance as a petrophysical measurement, *Nuclear Geophysics*, **6**, 153-171.
- Kenyon, W. E., 1997, Petrophysical principles of applications of NMR logging, *Log Analyst*, **38**, 21-43.
- Kleinberg, R. L., Straley, C., Kenyon, W. E., Akkurt, R., and Farooqui, S. A., 1993, Nuclear magnetic resonance of rocks: T₁ vs. T₂, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 553-563.
- Kleinberg, R. L., Kenyon, W. E., and Mitra, P. P., 1994, Mechanism of NMR relaxation of fluids in rock, *J. Magnetic Resonance*, **108**, 206-214.
- Kleinberg, R. L., 2001, NMR well logging at Schlumberger, *Concepts in Magnetic Resonance*, **13**, 396-403.
- Korringa, J., SeEVERS, D. O., and Torrey, A. C., 1962, Theory of spin pumping and relaxation in systems with a low concentration of electron spin resonance centers, *Physical Review*, **127**, 1143-1150.
- Kubica, P., 1995, Statistical test of permeability estimates based on NMR measurements, *Trans. SPWLA 36th Annual Logging Symposium*, paper VVV.
- Latour, L. L., Mitra, P. P., Kleinberg, R. L., and Sotak, C. H., 1993, Time-dependent diffusion coefficient of fluids in porous media as a probe of surface-to-volume ratio, *J. Magnetic Resonance*, **101**, 342-346.
- Liang, Z. R., Fernandes, C. P., Magnani, F. S., and Philippi, P. C., 1998, A reconstruction technique for three-dimensional porous media using image analysis and Fourier transforms, *J.*

- Petroleum Science and Engineering*, **21**, 273-283.
- Mardon, D., Prammer, M. G., and Coates, G. R., 1996, Characterization of light hydrocarbon reservoirs by gradient-NMR well logging, *Magnetic Resonance Imaging*, **14**, 769-777.
- Meiboom, S., and Gill D., 1958, Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times, *Review of Scientific Instruments*, **29**, 688-691.
- Mohanty, K. K., Ottino, J. M., and Davis, H. T., 1982, Reaction and transport in disordered composite media: Introduction of percolation concept, *Chemical Engineering Science*, **37**, 905.
- Okabe, H., and Blunt, M. J., 2004, Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics, *Physical Review*, **70**, 066135.
- Okabe, H., and Blunt, M. J., 2005, Pore space reconstruction using multiple-point statistics, *J. Petroleum Science and Engineering*, **46**, 121-137.
- Ören, P. E., and Bakke, S., 2003, Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modeling of wettability effects, *J. Petroleum Science and Engineering*, **39**, 177-199.
- Ramakrishnan, T. S., Schwartz, L. M., Fordham, E. J., Kenyon, W. E., and Wilkinson, D. J., 1999, Forward models for nuclear magnetic resonance in carbonate rocks, *The Log Analyst*, **40**, 260-270.
- SeEVERS, D. O., 1966, A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones, *Trans. SPWLA 7th Annual Logging Symposium*, paper L.
- Sigal, S., and Odusina, E., 2010, NMR Gas relaxation signature for organic shale reservoir rocks, *AAPG Hedberg Conference*, 90122.
- Shafer, J. L., Mardon, D., and Gardner, J., 1999, Diffusion effects on NMR response of oil & water in rock: impact of internal gradients, *The Society of Core Analysts*, 9916.
- Sun, B., and Dunn, K. J., 2002, Core analysis with two dimensional NMR, *The Society of Core Analysts*, 38.
- Talabi, O., 2008, *Pore-scale simulation of NMR response in porous media*, PhD thesis, Imperial College London.
- Timur, A., 1968, An investigation of permeability, porosity and residual water saturation relationship, *Trans. SPWLA 9th Annual Logging Symposium*, paper K.
- Timur, A., 1969a, Producing porosity and permeability of sandstones investigated through nuclear magnetic resonance principles, *The Log Analyst*, **10**, 3-11.
- Timur, A., 1969b, Pulsed nuclear magnetic resonance studies of porosity, movable fluid, permeability of sandstones, *J. Petroleum Technology*, **21**, 775-786.
- Torquato, S., and Kim, I. C., 1989, Efficient simulation technique to compute effective properties of heterogeneous media, *Applied Physics Letters*, **55**, 1847-1849.
- Toumelin, E., 2002, *Monte Carlo simulations of NMR measurements in carbonate rocks under a constant magnetic field gradient*, Master's thesis, The University of Texas at Austin.
- Toumelin, E., Torres-Verdín, C., Chen, S., and Fischer, D. M., 2003, Reconciling NMR measurements and numerical simulations: assessment of temperature and diffusive coupling effects on two-phase carbonate samples, *Petrophysics*, **44**, 91-107.
- Toumelin, E., Torres-Verdín, C., Chen, S., and Fischer, D. M., 2004a, Reconciling NMR measurements and numerical simulations: assessment of temperature and diffusive coupling effects on two-phase carbonate samples, *Petrophysics*, **44**, 91-107.
- Toumelin, E., Torres-Verdín, C., Sun, B., and Dunn, K. J., 2004b, A numerical assessment of modern borehole NMR interpretation techniques, *SPE Technical Conference and Exhibition*, paper 90539.
- Toumelin, E., Torres-Verdín, C., Sun, B., and Dunn, K. J., 2006, Limits of 2D NMR interpretation techniques to quantify pore size, wettability, and fluid type: a numerical sensitivity study, *SPE Journal*, **11**, 354-363.
- Toumelin, E., Torres-Verdín, C., Sun, B., and Dunn, K. J., 2007, Random-walk technique for simulating NMR measurements and 2D NMR maps of porous media with relaxing and permeable boundaries, *J. Magnetic Resonance*, **188**, 83-96.
- Valvatne, P. H., 2004, *Predictive pore scale modeling of multiphase flow*, PhD thesis, Imperial College London.
- Vinegar, H. J., 1995, Short course notes: Relaxation mechanism short course notes, *Trans. SPWLA 36th Annual Logging Symposium*.
- Watson, A. T., and Chang, C. P., 1997, Characterizing porous media with NMR methods, *Progress in NMR Spectroscopy*, **31**, 343-386.
- Xie, R. H., Xiao, L. Z., and Dunn, K. J., 2006, NMR Logging porosity activation and data processing method, *Chinese J. of Geophysics*, **49**, 1419-1424.
- Xiao, L., Liao, G., Xie, R., and Wang, Z., 2009, Inversion of NMR Relaxation measurements in well logging, Codd, S. L., and Seymour, J. D., Ed., *Magnetic Resonance Microscopy*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Yao, Y. B., Liu, D., Cai, Y. D., and Li, J. Q., 2010a, Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography, *Science China*, **53**, 854-862.
- Yao, Y. B., Liu, D., Che, Y., Tang, D., Tang, S., and Huang, W., 2010b, Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance, *Fuel*, **89**, 1371-1371.
- Zhang, Q., Lo, S. W., Huang, C. C., Hirasaki, G. J., and Kobayashi, R., 1998, Some exceptions to default NMR rock and fluid properties, *Trans. SPWLA 39th Annual Logging Symposium*, paper FF.
- Zhang, G. Q., Hirasaki, G. J., and House, W. V., 2003, Internal field gradients in porous media, *Petrophysics*, **44**, 422-434.