자기공명검층 해설: 자료 해석

장재화¹⁾ · 남명진^{1)*}

A Review on Nuclear Magnetic Resonance Logging: Data Interpretation

Jae Hwa Jang and Myung Jin Nam*

Abstract : Nuclear magnetic resonance (NMR) logging has become one of the effective logging methods to evaluate formation since the generations of NMR logging tools and interpretation techniques have improved. NMR measurements detect decay signal also called T_2 relaxation corresponding between proton nuclei in the fluids inside the pore space and radio frequency pulse at the proton resonance frequency. The measured amplitude of the spin echo train, called decay curve, displays on a log as a function of depth and contains important information, such as density of hydrogen in the fluid and fluid type, yet exhibits multi-exponential decay due to variety of pore sizes. For ease of interpretation, the detected decay curve convert to T_2 spectrum by using proper T_2 inversion methods. The T_2 spectrum not only could provide porosity, fluid type but also allow the identification and quantification of fluids in a reservoir. On the basis of these, the more petrophysical information such as permeability and wettability can be estimated. This paper briefly explains the basic theory of NMR first and describes NMR data interpretation including T_2 inversion and T_2 spectrum analysis.

Key words : Magnetic resonance logging, Transverse relaxation, T_2 inversion, T_2 spectrum, NMR interpretation

요 약 : 자기공명검층은 장비의 발달과 더불어 해석기술이 발달함에 따라 지층을 평가하는 가장 효율적인 검층으로 평가되기 시작하였다. 자기공명검층은 수소와 자기장의 상호작용에 따른 감쇠 시그널 즉, 종축이완과 횡축이완을 측정하며, 이때 측정된 자료는 저류층 내 유체에 존재하는 수소 원자에 대한 정보와 감쇠 속도에 대한 정보를 내포하고 있다. 측정된 자료는 보다 용이한 해석을 위해 T_2 스펙트럼 그래프로 변환되는데 이를 T_2 역산이라 하고, 역산방법과 자료의 보정의 정도에 따라 스펙트럼의 모양과 해상도가 달라지기 때문에 자기공명의 정확한 해석을 위해서는 먼저 정확한 자료처리가 필요하다. 역산을 통해 변환된 T_2 스펙트럼 그래프는 저류층의 공극률, 공극의 크기 분포, 유체의 종류 및 유착과 같은 중요한 정보를 포함하고 있으며, 이는 다른 검층 자료보다 비교적 정확하기 때문에 이를 기초로 유체 투과도, 습윤성과 같은 정보를 예측 할 수 있다. 이 논문에서는 먼저 자기공명의 이론을 간략하게 설명한 다음, 자기공명검층으로부터 측정된 자료 처리 이론 및 역산 방법과 자기공명검층을 통해 측정된 자료의 해석 및 연구 동향 순서로 살펴보고자 하겠다.

주요어 : 자기공명검층, 횡축이완, T_2 역산, T_2 스펙트럼, NMR 해석

서 론

자기공명검층은 지층 암상의 영향을 최소화 하면서 지층의 공극률, 공극 유체의 특성 등을 평가할 수 있는, 수소의 자기공명현상에 기초한 검층법이다. 이러한 자기공

명검층에 대한 첫 연구는 1952년 Chevron에서 시작되었으나 검층장비의 제약으로 대부분의 연구가 실험실에서만 이루어졌다는 한계가 있었다. 이후, 1980년대 후반 석유 산업에 적용 가능한 자기공명검층 장비가 개발되었음에도 불구하고, 장비의 기술적 한계로 인해 한정된 지역에서만 적용성이 있었을 뿐만 아니라, 자료의 해석 기술도 부족했었기 때문에, 실제 현장에서 자기공명검층은 많이 사용되지 않았다. 그러나, 1970년 석유 생산이 급격히 감소하기 시작함에 따라 새로운 유전을 개발하기 위한 새로운 기술의 도입이 절실하였으며, 이를 위해 연구소(Los Alamos national laboratory)설립과 더불어 큰 석유회사들이 자기공명검층 장비와 해석기술에 많은 투

2012년 9월 17일 접수, 2013년 1월 8일 심사완료

2013년 2월 14일 게재확정

1) 세종대학교 에너지자원공학과

*Corresponding Author(남명진)

E-mail: nmj1203@gmail.com

Address: Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

자를 함에 따라, 자기공명검층은 비약적으로 발달하기 시작하였다.

자기공명검층은 외부 자기장에 의해 공극 유체 내의 수소원자가 자기공명을 일으켜 형성한 자기장 반응을 측정한다. 공극 내 수소를 포함하고 있는 유체의 유착 특성에 따라 이완속도가 다르기 때문에 암석의 종류에 관계없이 비교적 정확한 공극률(porosity)과 공극 내 유체의 종류 및 공극의 분포에 대한 정보 등을 파악할 수 있고, 이를 바탕으로 유체투과도(permeability; Seevers, 1966; Timur, 1968, 1969a,b; Kenyon *et al.*, 1988; Hidajat, 2002; Xie *et al.*, 2006), 습윤성(wettability; Kubica, 1995; Kenyon, 1997; Freedman *et al.*, 2003; Flaum *et al.*, 2005)등도 예측할 수 있다.

자기공명검층은 또한 대부분의 저류층에 적용 가능할 뿐만 아니라 다른 검층으로 해석이 불가능한 저류층에서도 적용이 가능하다. 실제 자기공명검층장비(magnetic resonance imaging logging)를 통해 측정된 자료의 3차원/4차원 해석을 통해 이수의 침투에 의한 손상을 보정한 해석이 가능하며, 셰일층 내에 메탄 가스의 존재 유무 및 매장량에 대한 해석(Sigal and Odusina, 2010; Clennell *et al.*, 2010)과 NMR과 CT를 통한 탄층 메탄(coalbed methan; CBM)에서 공극의 구조와 파쇄 여부(Yao *et al.*, 2010a, b)를 구분할 수 있다.

자기공명검층의 정확한 해석을 위해서는 해석 기술뿐만 아니라 자기공명반응의 자료처리 방법도 매우 중요하다. 측정된 수소원자의 반응 즉, 자화는 시간에 대해 로그함수로 감소하며, 이러한 곡선을 T_2 스펙트럼 그래프로 변환하는 것을 T_2 역산이라고 한다. 역산 방법과 자료의 보정 정도에 따라 스펙트럼의 모양과 해상도가 달라지기 때문에 자기공명의 정확한 해석을 위해서는 먼저 정확한 역산을 수행해야 한다.

자기공명검층은 가장 효율적인 검층방법 중 하나로 평가 받고 있고 해외석유개발 현장에서 많이 사용되고 있지만, 국내에서는 자기공명검층의 중요성에 대한 인식이 부족할 뿐만 아니라, 자기공명검층의 이론이나 자료 처리 및 해석방법에 대한 이해 또한 부족한 실정이다. 이 논문에서는 자기공명검층 이론을 간단히 소개한 다음 자기공명검층으로 측정된 자료의 처리 방법과 처리된 자료를 해석하는 방법을 설명하고 그에 관련된 현재까지 발표된 논문과 문헌 등을 정리하고자 한다.

자기공명검층

암석 내 공극을 채우고 있는 물과 탄화수소에 주로 포함되어 있는 수소 원자들은, 원자핵의 회전으로 자기모멘트를 형성하기 때문에(Fig. 1(a)) 수소원자는 외부자기장에 의해 강한 자기공명반응을 나타내는 특징이 있다. 즉, 외부 정자기장(B_0)에 의해 수소원자는 B_0 방향(순방향; z 방향) 혹은 반대방향(역방향)을 중심으로, 외부자기장 크기와 수소의 자기회전비(γ)의 곱에 비례하는 세차주파수(라머주파수)로 세차운동을 하게 된다(종축분극; polarization; Fig. 1(b)). 이때, B_0 에 수직인 방향(x 방향)으로 라머주파수의 진동자기장($90^\circ RF B_1$)을 가하면 수소원자들이 에너지를 흡수하여 ($B_0 \times B_1$ 방향(y 방향)으로 동위상(inphase) 세차운동하게 되는데 이를 자기공명이라 하며(횡축분극), 이때의 수소자기모멘트에 의한 자화의 크기($M_{xy}(t=0)$)는 최대가 된다(Fig. 1(c)).

$90^\circ RF B_1$ 을 차단하면 수소원자들은 에너지를 방출하며 이전의 평형 상태로 돌아가게 되는데, 이를 이완(relaxation)이라 한다. 이완은 종축방향의 종축이완(T_1 이완, longitudinal relaxation)과 종축에 수직인 면(xy 평면) 상에서 일어나는 횡축이완(T_2 이완, transverse relax-

Fig. 1. Hydrogen which is consisted of one electron and proton respectively and has magnetic moment. Applying static magnetic field (B_0) becomes a precessional axis and (b)hydrogen protons aligned with parallel and anti-parallel to B_0 called polarization. (c)By applying the RF oscillating magnetic field B_1 along to x direction, protons aligned to anti-parallel absorb energy and become in phase, called nuclear magnetic resonance and rotate its direction to y . (d) Turning off the B_1 , protons return to its original state, which is called relaxation.

ation)으로 세분된다(Fig. 1(d)). 종축이완은 B_0 방향으로 종축분극을 회복하게 되면서 종축자화가 감소되는 것이고, 횡축이완은 xy 평면상에서 동위상을 잃는 현상인 탈위상화(depahsing)에 의해 횡축자화가 감소하는 것이다. 탈위상화는 수소원자 사이의 에너지 전달로 인해 서로 다른 자기모멘트를 가지게 되는 과정과 B_0 크기의 공간적 구배(gradient)에 의한 확산의 차이로 발생하며 탈위상화에 의한 횡축자화 감쇠를 자유유도감쇠(free induction decay, FID)라 한다(Fig. 2).

자유유도감쇠는 감쇠가 매우 빠르게 일어나기 때문에 측정이 어려워 자기공명검층에서는 연속의 스핀에코(spin echo), 즉 에코트레인(echo train)을 측정 분석한다. 스핀에코란, $90^\circ RF\ B_1$ 의 제거로 인해 탈위상화가 특정 시간(τ)만큼 진행된 후, xy 평면 상에서 $90^\circ RF\ B_1$ 과 반대 방향(180° 방향(-x 방향))으로 동일한 주파수의 자기장($180^\circ RF\ B_1$)을 걸어주었다가 제거하면, τ 시간 후에 수소 원자가 180° 방향(-y 방향)으로 다시 동위상 세차운동을 하면서 형성되는 자화를 의미한다. 에코 트레인을 생성하기 위한 일련의 자기장은 발견자 이름을 따라 CPMG 시퀀스(Carr, Purcell, Meiboom, and Gill; Carr and Purcell, 1954; Meiboom and Gill, 1958)라 한다. 스핀에코에서, 탈위상화에 의한 감쇠는 회복되지 않기 때문에 에코트레인 상의 스핀에코 자화의 크기는 점점 감소된다. 이때 각 스핀 에코들의 최대 자화값 값들을 연결한 감쇠 곡선을 횡축이완 또는 이완감쇠곡선(Fig. 2)이라 한다. 자기공명검층에서 이러한 이완감쇠곡선을 주로 측정한다.

CPMG 펄스로 더 이상 스핀에코를 발생시킬 수 없을 때 즉 수소의 재배열이 일어나지 않게 되면 모든 수소원자가 정자기장 방향으로 자화를 회복할 수 있도록 휴식 시간을 주어야 한다. 이 휴식시간을 대기시간(wait time; TW)이라 하며, 대기시간은 정자기장에 의한 종축분극 상태로 회복하는 종축이완시간과 같고, 대기시간은 최소한 종축자화가 95% 이상 회복할 수 있어야 한다.

이완을 발생하는 메커니즘에는 벌크이완(bulk relaxation; T_b), 표면이완(surface relaxation; T_s), 확산이완(diffusion relaxation; T_d)이 있다. 벌크이완은 공극 내 유체 중 암석 표면과 닿지 않는 유체 내부에서의 이완메커니즘이고, 표면이완은 공극 내 유체와 암석 표면이 닿는 부분에서의 이완메커니즘인 반면, 확산이완은 공간에 따라 정자기장 크기가 다르기 때문에 발생하는 이완메커니즘이다. 종축이완은 벌크이완과 표면이완에 영향을 받으며, 횡축이완은 벌크이완과 표면이완과 확산이완에 영향을 받는다. 자기공명 이론에 대한 보다 자세한 내용은 Jang과 Nam(2012)을 참고하길 바란다.

자기공명검층 자료처리

자기공명검층에서 주로 측정하는 감쇠이완곡선(Fig. 2)은 시간에 따라 자화($M(t)$)의 크기가 로그함수적으로 감소하는데, 이를 분석하면 측정 영역 내 공극 유체에 포함된 수소의 특성 및 양을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 이를 기초로 공극률뿐만 아니라 공극 유체의 특성 및 유

Fig. 2. Since turning off B_1 , protons in xy plane become losing its coherence, free induction decay (FID) signal can be detected. However, applying 180 resonance frequency at time (τ), reverses the phase angles and thus initiates rephasing called spin echo. Series of spin echoes called an echo train are created by CPMG pulses. NMR logging tool measures the amplitude of the spin echoes to monitor the transverse magnetization decay.

착 형태 등에 대해 해석할 수 있다. 실제 지층 내 다양한 형태 및 크기가 다른 공극이 존재하고 또 공극 내에는 한 가지 이상의 유체를 포함하고 있는 경우가 많기 때문에, 감쇠이완곡선은 유착 상태의 영향이 합쳐진 복합 감쇠곡선(multi exponential decay)으로 볼 수 있다. 각 유체는 서로 다른 T_2 시간을 가지고 있기 때문에, 복합 감쇠곡선을 T_2 시간에 따른 공극률 그래프 즉 T_2 스펙트럼 그래프로 변환하는 T_2 역산과정을 수행하는 것이 자기공명검층 자료처리의 시작이다.

공극 유체에 따른 자기공명검층 반응

공극유체는 유착 특징에 따라 점토유착공극수(clay bound water; MCBW)와 모세관유착수(capillary bound water; BVI) 그리고 자유유동유체(free fluid; FFI)등 세 가지로 나눌 수 있으며, 점토유착공극수와 모세관유착수는 생산공학적 견지에서는 생산불가유체(immovable fluid)이며 자유유동유체는 생산가능유체(movable fluid)로 구분된다. 생산불가유체와 생산가능유체를 구분하는 경계는 유체 구분값(T_2 cut off)에 의해 결정되는데, 일반적으로 사암에서의 유체 구분값은 33 ms, 탄산염 암에서는 90 ms로 암석에 따라 달라진다(Coates *et al.*, 1999; Fig. 3).

Fig. 3. A sample of sandstone formation with water saturated. According to the type of fluid (MCBW, BVI and FFI), the corresponding decay times at T_2 spectrum are different, thus, FFI in pore have typical qualitative values of T_1 , T_2 and D respectively (Coates *et al.*, 1999).

T_2 역산

측정된 자기공명 이완감쇠곡선으로부터 T_2 스펙트럼 그래프로 변환하는 과정을 T_2 역산(T_2 inversion or T_2 mapping)이라 한다. T_2 역산은 어떠한 수학적 방법을 적용하였는지와 자료의 보정 정도에 따라 스펙트럼 결과가 달라진다. 한편, 스펙트럼 그래프는 공극률뿐만 아니라 유체투과도, 습윤성 등을 계산할 때에도 사용되기 때문에, 자기공명 자료의 정확한 해석을 위해서는 보다 정확한 T_2 역산을 수행하는 것이 중요하다.

특정 시간(t)이 지난 뒤에 측정된 자화값($M(t)$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(t) = \sum M_i(0) \exp\left(-\frac{t}{T_{2i}}\right) \quad (1)$$

여기서 $M_i(0)$ 는 i 번째 공극의 초기 자화값이고, T_{2i} 는 i 번째 공극의 횡축이완이다(Kenyon, 1997). 식 (1)은 Fredholm 적분방정식의 첫 번째 형($\int_a^b f(x, y)h(y)dy = M(x)$)의 이산화된 형태로서, 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$b_i = \sum_{j=1}^m f_j \left[\exp\left(-\frac{t_i}{T_{2j}}\right) \right] + \varepsilon_i \quad (2)$$

여기서 i 는 에코의 개수, b_i 는 시간(t_i)에서의 자화값이며, m 은 이완시간의 개수, f_j 는 횡축이완시간(T_{2j})에서의 공극률비, ε 는 가우스 잡음(Gaussian noise)이다. 식 (2)을 CPMG 펄스 시퀀스에 따라 각각의 연립방정식으로 풀어 쓰면,

$$\begin{cases} f_1 \cdot e^{-t_1/T_{21}} + f_2 \cdot e^{-t_1/T_{22}} + \dots + f_n \cdot e^{-t_1/T_{2n}} = b_1 = g_1 + \varepsilon_1 \\ f_1 \cdot e^{-t_2/T_{21}} + f_2 \cdot e^{-t_2/T_{22}} + \dots + f_n \cdot e^{-t_2/T_{2n}} = b_2 = g_2 + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ f_1 \cdot e^{-t_m/T_{21}} + f_2 \cdot e^{-t_m/T_{22}} + \dots + f_n \cdot e^{-t_m/T_{2n}} = b_m = g_m + \varepsilon_m \end{cases} \quad (3)$$

여기서 n 은 발생한 스핀에코 수이고, $\exp(-t/T_{2j})$ 를 K_{ij} 로 치환($K_{ij} = \exp(-t/T_{2j})$)하여, 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Kf = g + \varepsilon \quad (4)$$

이 식은 III-condition으로, III-condition에서 역산은 측정 자료에 포함된 잡음에 의해 스펙트럼의 모양과 T_2 스펙트럼의 해상도가 달라진다(Song *et al.*, 2008). 따라서 역산을 위해서는 먼저 잡음의 영향을 줄이기 위한 자료

의 정규화가 필요하며, 정규화를 포함한 수학적으로 증명된 여러 가지 방법들, 특이치 분해(singular value decomposition; Dunn *et al.*, 1994), Butler-Reeds-Dawson (Butler *et al.*, 1981), 동시반복 영상구현기법(simultaneous iterative reconstruction technique, Wang *et al.*, 2003), Curvature smoothing regularization method (Chen *et al.*, 1999; Toumelin, 2002; Talabi, 2008), Truncated singular value decomposition (Sternin, 2008; 이하 TSVD), 라플라스역산(Laplace inversion; Song *et al.*, 2002; Hürlimann *et al.*, 2002; Sun and Dunn, 2005; Song, 2007)을 통해 풀 수 있다.

한편 검층장비의 발달과 더불어 한번에 여러 에코간격(TE)과 분극시간(TW)에 대한 복합 자료를 취득할 수 있게 되었기 때문에 복합 자료 처리(역산) 및 해석을 위한 방법론에 대한 연구 또한 급격히 발전하였다. 대표적인 2차원 역산방법으로는 대기시간에 따른 2차원 역산(T_2 - T_1)과 에코간격에 따른 2차원 역산(T_2 - D)이 있다(Xie *et al.*, 2009).

에코간격(TE)이 다른 k 개의 에코트레인의 자료처리는 식 (2)에 확산이완에 의한 영향을 추가한다.

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p f_{jl} \left[\exp\left(-\frac{t_i}{T_{2j}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma^2 G^2 (TE_k)^2 D_l t_i}{12}\right) \right] + \varepsilon_{ik} \quad (5)$$

여기서 b_{ik} 는 k 번째 이완시간(TE)에서 i 번째 에코의 자화값이며, f_{jl} 는 횡축이완시간(T_{2j})과 확산계수(D_l)에서의 수소의 개수, m 은 이완시간(T_{2j})의 개수, q 는 확산이완(D_l) 개수, D_l 는 횡축이완(T_{2j})에서 확산계수, γ 는 수소의 자기회전비, G 는 자기장구배, ε_{ik} 는 k 번째 이완시간(TE)에서 i 번째 에코의 잡음이다. 식 (5)에서 $E_{ikjl} = \exp(-t_i/T_{2j}) \exp(-\gamma^2 G^2 (TE_k)^2 D_l)$ 라고 하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m E_{ikjl} f_{jl} + \varepsilon_{ik} \quad (6)$$

분극시간(TW)이 다른 k 개의 에코트레인의 자료를 처리하기 위해서, 식 (2)에서 분극시간(TW)에 대한 영향을 고려함으로써 아래와 같이 변환할 수 있다.

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p f_{jr} \left[\exp\left(-\frac{t_i}{T_{2j}}\right) \left(1 - \alpha \frac{T_{wk}}{T_{1r}}\right) \right] + \varepsilon_{ik} \quad (7)$$

여기서 i 는 에코의 개수, b_{ik} 는 k 번째 분극시간(TW)에서

i 번째 에코의 자화값이며, f_{jr} 은 종축이완시간(T_{1r})과 횡축이완시간(T_{2j})에서 수소의 개수, m 은 횡축이완시간(T_{2j})의 개수, p 는 종축이완시간(T_{1r})의 개수, α 는 상수(inversion recovery, $\alpha = 2$; saturation recovery, $\alpha = 1$), ε_{ik} 는 k 번째 분극시간(TW)에서 i 번째 에코의 잡음이다. 식 (7)에서 $E_{ikjr} = \exp(-t_i/T_{2j}) \exp(1 - \alpha T_{wk}/T_{1r})$ 라고 하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m E_{ikjr} f_{jr} + \varepsilon_{ik} \quad (8)$$

식 (6), (8)식을 행렬로 정리하면 식 (4)과 같이 앞서 언급한 여러 가지 수학적 역산방법을 통해 풀 수 있다.

자기공명검층 자료 해석

횡축이완곡선은 총 공극률과 공극 크기 분포에 대한 정보를 주며, T_2 역산을 통해 공극 내 유체의 유착 타입과 유효 공극률, 공극 유체 종류에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이 장에서는 T_2 역산으로 얻은 T_2 스펙트럼 그래프가 정확하다는 가정 하에, T_2 스펙트럼 그래프로부터 공극률 및 유체 특성, 습윤성, 유체 투과도 등을 해석하는 방법에 대해 고찰해 본다.

공극률과 유체의 유착 타입의 해석

횡축이완에 초기 자화값은 측정 영역 내 공극 유체에 포함된 수소의 밀도이기 때문에, 횡축이완곡선의 T_2 역산을 수행하여 T_2 시간에 따른 공극률 값인 T_2 스펙트럼을 획득하였을 때, T_2 스펙트럼 곡선의 면적이 측정 대상 지층의 총공극률이 된다. 한편, 유체 구분값을 계산하면 생산불가유체와 생산가능유체를 구분할 수 있는데, 유체구분값을 계산하는 방법으로는 고정 유체구분법(cut-off BVI; CBVI)과 스펙트럼 유착 유체구분법(spectral BVI; SBVI)법이 있다. 고정 유체 구분법은 물로 포화된 코어($S_w=1.0$)의 누적 공극률(cumulate porosity)과 모세관유착유체($BVI = S_{wi}$)의 누적공극률 그래프를 그려 모세관유착유체 누적공극률의 최고 값에서 연장선을 그어 물로 포화된 누적공극률과 만나는 점을 유체 구분값으로 하는 방법이다(Fig. 4). 스펙트럼 유착 유체 구분법은 공극률 대비 공극 내 유착유체의 비율(W)로 계산하기 때문에 고정 유체 구분법보다 정확하다.

$$SBVI = \sum_{i=1}^n W_i \phi_i \quad (9)$$

유착유체의 양은 코어로부터 측정한 값을 사용하기도 하

Fig. 4. CBVI cut off model. NMR measurements at 100% water saturated (S_w) and irreducible water (S_{wi}). Draw a line parallel to the upper value of S_{wi} . The point where the parallel line and the cumulative porosity of S_w meet is the T_2 cut off value (Coates *et al.*, 1999).

지만 코어 측정이 불가능할 경우, 횡축이완($0 \leq T_{2,i} \leq 1$)과 암석의 상수(m , b)를 이용하여 아래와 같이 계산할 수도 있다(Kleinberg and Boyd, 1997; Chen *et al.*, 1998).

$$\frac{1}{W_i} = mT_{2,i} + b \quad (10)$$

습윤성 예측

고체 표면에 유체가 부착 또는 흡착되어 있는 특성을 습윤성(Craig, 1971)이라 한다. 습윤성은 잔류 오일 포화도, 상대적 투과성과 모세관압등과 같은 저류암의 중요한 특징들에 영향을 미친다. 따라서 습윤성을 이해하는 것은 오일을 회수하는 가장 효과적인 방법을 결정하는데 매우 중요하다.

자기장구배가 일정하고 공극이 물로만 채워진 경우($S_w = 1.0$), 표면이완은 표면이완도와 공극의 면적대 부피비로 계산할 수 있다(Kenyon, 1992; Brownstein and Tarr, 1979; Kleinberg *et al.*, 1994).

$$\frac{1}{T_s} = \rho \left(\frac{S}{V} \right)_{pore} \quad (11)$$

한편 물로 포화된 저류층에서 표면이완은 물이 상자성 물질을 포함한 공극벽과 닿으면 이완속도는 더 빨라지지만, 오일과 닿으면 표면이완이 일어나지 않는다. 즉, 표면이완은 표면적(S)과 표면이완도(ρ) 보다는 공극내 친수성 유체의 부피(V_{eff})에 영향을 받는다(Alvarado *et al.*, 2003).

Fig. 5. Decay rate of 100% water saturated pores. (a) The decay rate of single pore is different from its pore sizes and displays single-exponential decay (b) A medium containing various pore sizes exhibits multiple T_2 values due to its pore sizes and multi-exponential decay (Coates *et al.*, 1999).

$$\frac{1}{T_{2,surface}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V_{eff}} \right) \quad (12)$$

여기서 만약 공극이 각각 물로만 채워지거나($S_w = 1.0$) 오일로만 채워졌을 때($S_o = 1.0$), 횡축이완은 각각 다음과 같이 달라진다.

$$\begin{aligned} \text{물(water)} \quad \frac{1}{T_{2,w}} &= \frac{1}{T_{2b,w}} + \left[\frac{D_w(G\gamma TE)^2}{12} \right] + \frac{1}{T_{2s,w}} \\ \text{오일(oil)} \quad \frac{1}{T_{2,o}} &= \frac{1}{T_{2b,o}} + \left[\frac{D_o(G\gamma TE)^2}{12} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

공극 크기 분포

자기장구배가 일정하고 공극이 친수성 유체로만 포화된 경우, 횡축이완을 발생시키는 메커니즘 중 저류층 내 벌크이완과 확산이완의 영향은 무시할 정도로 작아지기 때문에 횡축이완은 표면이완 메커니즘에 영향만을 받는다.

$$\begin{aligned} M(t) &= \sum M_i(0) \exp \left(-\frac{t}{T_{2b}} - \frac{t}{T_{2s}} - \frac{t}{T_{2d}} \right) \\ &\approx \sum M_i(0) \exp \left(-\frac{t}{T_{2s}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에 표면이완(식 (11))을 대입하면, 다음과 같다.

$$M(t) = M_0 \exp\left(-\rho_2 \left(\frac{S}{V}\right) t\right) \quad (15)$$

실제 저류층은 크기가 다른 공극으로 구성되어 있으며, 공극의 크기가 작은 경우 횡축이완은 빠르게 일어나고 공극의 크기가 큰 경우 횡축이완은 상대적으로 느리게 일어난다(Fig. 5(a)). 이때 저류층의 총자화는 다양한 크기의 공극 내에서 일어나는 횡축이완의 합으로 다음과 같이 계산할 수 있다(Fig. 5(b)).

$$M(t) = \sum M_0 \exp\left(-\rho_2 \left(\frac{S}{V}\right) t\right) \quad (16)$$

유체 종류 판별(Fluid typing)

생산가능유체가 한가지 이상으로 구성된 혼합유체인 경우, 어떠한 유체가 얼마만큼 포함되어 있는지 구분하는 것도 중요하다. 유체는 서로 다른 T_1 , T_2 , D 값을 가지기 때문에 각각의 유체의 특성을 알면 이들을 구분하는 것은 어렵지 않다(Fig. 3).

1차원 유체 종류 판별

1차원 유체 종류 판별(1D fluid typing)에는 스펙트럼 차이법(differential spectrum method; DSM)과 확산 차이법(enhanced diffusion method; EDM) 등 2가지 방법이 있다(Akkurt *et al.*, 1995; Prammer *et al.*, 1995). 스펙트럼 차이법은 유체의 종축이완 즉, 분극시간(TW)의 차이를 이용하여 공극 내 유체를 구분하는 방법으로 물은 다른 유체보다 빠르게 분극(종축이완시간=약 0.3~3S)하는 특성에 기초한다. 물이 완전히 분극하는 시간을 TW_S (TW short)라 하고 공극 내 나머지 유체가 충분히 분극하는 시간을 TW_L (TW long)이라 하면,

$$\begin{aligned} \phi_{TW_L} &= \phi_{water} + \phi_{gas} (1 - e^{TW_L/T_{1,gas}}) \\ &\quad + \phi_{oil} (1 - e^{TW_L/T_{1,oil}}) \\ \phi_{TW_S} &= \phi_{water} + \phi_{gas} (1 - e^{TW_S/T_{1,gas}}) \\ &\quad + \phi_{oil} (1 - e^{TW_S/T_{1,oil}}) \end{aligned} \quad (17)$$

이 둘의 차이($TW_L - TW_S$)로 공극 내 물의 신호를 제거한 가스와 오일의 신호를 얻을 수 있다(Dunn *et al.*, 2002; Fig. 6(a)).

$$\begin{aligned} \phi_{TW_L} - \phi_{TW_S} &= \phi_{gas} (e^{-TW_S/T_{1,gas}} - e^{-TW_L/T_{1,gas}}) \\ &\quad + \phi_{oil} (e^{-TW_S/T_{1,oil}} - e^{-TW_L/T_{1,oil}}) \\ \phi_{TW_L} - \phi_{TW_S} &= \phi_{gas} (e^{-TW_S/T_{1,gas}}) + \phi_{oil} (e^{-TW_S/T_{1,oil}}) \end{aligned} \quad (18)$$

확산 차이법은 유체의 확산계수 차이에 기초한 유체 구분방법으로, 유체의 확산계수는 에코간격(TE)에 영향을 받는다. 에코간격은 스핀에코간격으로, 에코간격이 짧을 경우(TE_S ; TE short) 확산이완은 거의 발생하지 않지만, 에코간격이 넓을 경우(TE_L ; TE long) 확산이완이 발생한다. 한편, 물의 확산계수는 오일의 확산계수보다 크기 때문에, 에코 간격이 넓을 경우, 물이 더 빠르게 확산이완하기 때문에, 확산계수 차이($TE_L - TE_S$)에 기초하여 오일과 지층수의 신호를 각각 구분할 수 있다(Fig. 6(b)).

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{2,L}} - \frac{1}{T_{2,S}} &= \left\{ \frac{1}{T_{2,int}} + \left[\frac{CD_a(G\gamma TE_L)^2}{12} \right] \right\} \\ &\quad - \left\{ \frac{1}{T_{2,int}} + \left[\frac{CD_a(G\gamma TE_S)^2}{12} \right] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

Fig. 6. Two kinds of 1D fluid typing method (a) DSW uses different T_2 distributions due to different TW values. The difference of polarization time (TW) is used to differentiate hydrocarbons from water. (b) DEM uses different T_2 distributions owing to different TE values. The Fluids in pore have different diffusion coefficients so that diffusion relaxation rates are different due to the fluid type (Coates *et al.*, 1999).

(a)

(b)

(c)

Fig. 7. Numerical simulated distribution for a mixture of gas, movable water and irreducible water in 1D and 2D (T_2 - D and T_2 - T_1) maps. (a) 1D T_2 distribution for a mixture of gas, movable water and irreducible water is difficult to distinguish due to overlapping signals. It can be converted to 2D by changing the porosity domain to T_1 or D (b) $\ln T_2$ - T_1 map, maximum T_1 is gas, the lower left peak is irreducible water, and the right middle peak is movable water. (c) $\ln T_2$ - D map, the upper peak corresponding to the maximum D is gas, which is the most diffusive fluid in the pore, the lower left peak corresponds to irreducible water, and the lower right peak corresponds to movable water(Xie *et al.*, 2009).

여기서 G 은 자기장구배, γ 는 수소의 자기회전비, T_{2im} 은 벌크이완과 표면이완의 합, C 는 자기장에서 확산과 서로 다른 에너지 상태의 자기모멘트의 혼합 효과를 나타내는 상수로 이는 회사별 장비에 따라 다르다(MRIL; $C=1.08$).

비교적 단순한 저류층에서는 스펙트럼 차이법과 확산 차이법을 통한 해석이 가능하지만 대부분의 저류암은 다양한 크기의 공극으로 구성되어 있고 한가지 이상의 유체를 포함하고 있기 때문에 이 두 방법으로 해석하는 것은 쉽지 않다.

2차원 유체 종류 판별

스펙트럼 차이법은 공극이 큰 곳에서 지층수 층의 자료가 정확하지 않으며, 확산 차이법은 생산불가유체와 가스를 구분하는 것이 어려웠다. 한편, 검층장비의 발달로 인해 한번에 방대한 자료를 취득이 가능해짐에 따라 이를 처리하는 연구 또한 급격히 발달하였는데, 특히 2차원 유체 판별법(2D fluid typing; Sun and Dunn, 2002; Hürlimann *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2002; Al-Rushaid *et al.*, 2004)은 1차원 유체 판별법의 한계를 극복한 새로운 해석을 가능하게 하였다(Xie *et al.*, 2009).

2차원 유체 판별은 기존 1차원 역산식 (2); Fig 7(a)에 공극률 도메인을 횡축이완(T_1) 또는 확산계수(D) 도메인으로 변경한 T_2 - D 와 T_2 - T_1 이 가장 대표적이며 (식 (6) and (8)), 이를 통해 유체의 종류 및 유체의 점성도와 포화도에 대한 정보를 얻을 수 있다.

T_2 - T_1 은 1차원 스펙트럼 차이법에서 큰 공극에서 대수층이 오일층으로 잘못 해석되는 문제의 해결뿐만 아니라 가스층을 구분할 수 있게 하였으며(Fig. 7(b)), T_2 - D 은 확산 차이법에서 생산불가유체와 가스를 구분하지 못하는 문제점을 해결하였다(Xie and Xiao, 2011; Fig. 7(c)). 특히 T_2 - D 법은 유체 구분값 없이도 유체의 구분이 가능하며(Toumelin *et al.*, 2004) 경사자기장이 존재할 때에 증질유와 가스층에서도 적용 가능하다는 장점이 있다(Xie and Xiao, 2011).

보다 발전된 유체 종류 판별법

한편, T_2 - D 방법은 확산이 매우 잘 일어나는 유체(gas, condensate, 고온의 water)에서는 정확한 구분이 쉽지가 않다. 이러한 한계를 해결하고자 확산계수(D)와 T_1 , T_2 를 결합한 3차원 유체 판별법이 사용되기 시작하였다. 더불어 다양한 탐사심도(depth of investigation; DOIs)를 고려한 4차원 유체 판별법으로 시추 이수에 대한 손상에 의한 영향을 제외한 해석이 가능해짐에 따라 저류층 내에 존재하는 유체의 특성(유동성, 습윤효과)을 보다 정확하게 알 수 있다(Akkurt *et al.*, 2009).

유체 점성도 예측

브라운운동에 의한 유체 분자의 확산은 확산계수(D)의 영향을 받으며, 확산계수(D)는 유체의 타입($a_{water} = 1.2$, $a_{oil} = 1.3$), 온도(T_K) 및 점성도(η)로 계산한다(Appel *et al.*, 1999; Mardon *et al.*, 1996).

$$D \cong \alpha \left(\frac{T_K}{298\eta} \right) \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (20)$$

탄화수소분자의 이완속도와 확산계수는 분자량과 연관이 있다. 만약 분자량이 다른 오일이 확산할 경우, 분자량이 가벼운 분자가 더 빠르게 확산하기 때문에 오일의 점도에 따라 횡축이완시간이 다르다. 이러한 확산계수와 횡축이완의 관계를 그래프로 나타낸 것을 점도구성 모델(constituent viscosity model; 이하 CVM; Freedman *et al.*, 2001)이라 하며(Fig. 8), 이를 바탕으로 탐사 지역 내 오일의 점도를 예측할 수 있다.

유체투과도 예측

유체투과도란 암석 내에서 유체가 이동할 수 있는 능력에 대한 값으로 직접적인 측정이 불가능하지만, 자기공명검층을 통해 얻은 공극률과 공극 크기의 분포에 대한 정보를 통해 저류층의 유체 투과도를 예측할 수 있다(Kenyon, 1992). 자기공명 자료를 이용하여 유체투과도를 계산하는 대표적인 방법은 Coates-Timur모델과 SDR (Schlumberger-Doll research) 모델이 있다.

Coates-Timur 모델

Coates 등(1991)은 Timur(1968, 1969a,b)의 모델에 기

Fig. 8. Constituent viscosity model (CVM) shows that bulk viscosity and geometric mean of T_2 relaxation rates are related (Schlumberger, 2012).

초하여 Coates-Timur모델을 발표하였다.

$$k = \alpha \phi^4 \left[\frac{V_{FFI}}{V_{BVI}} \right]^2 \quad (21)$$

Coates-Timur모델에서 유체투과도(K)는 생산가능유체의 양(V_{FFI}), 유착유체양(V_{BVI}), 공극률(ϕ), 지층의 타입(a)에 의해 결정된다. 한편 Coates-Timur모델은 지층내 물 또는 탄화수소가 존재할 때 적용하지만 가스층과 중질유에서는 상수 a 의 값이 낮게 측정되기 때문에 보정이 필요하다.

SDR 모델

SDR모델은 평균 T_2 모델(mean T_2 model)이라고도 불리며 지층에 물만 존재할 때 그 값이 가장 잘 맞는다(Kenyon, 1997).

$$k = \alpha \phi^4 T_{2,L,M}^2 \quad (22)$$

SDR모델은 지층 상수($a = 4.0 \text{ mD}/(\text{ms})^2$; Morris *et al.*, 1996)와 T_2 의 평균값($T_{2,L,M}$; geometric mean T_2 value; ms)에 영향을 받는다(Straley *et al.*, 1995).

$$T_{2,L,M} = \exp \left(\frac{\sum a_i \log T_{2i}}{\sum a_i} \right) \quad (23)$$

한편 자기공명검층으로 측정한 공극률은 유체투과도와는 상관없는 정동(vugs)에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 Coates-Timur와 SDR모델로 유체투과도를 정확하게 계산하는 것은 어렵다. 그러므로 검층 시에 암석의 시료를 측정하여, 암석의 종류, 퇴적 환경 등에 대한 정보를 얻고 이를 자기공명검층 자료를 보정하는데 이용한다.

그 밖에 투과도 연구

보다 정확한 투과도를 계산하기 위한 연구(Chang *et al.*, 1997)은 SDR모델을 변형하여 탄화수소에서 750 mms 보다 느린 공극률을 포함하지 않는 공극률을 발표하였으며, Hidajat(2002)는 공극과 유체유동결정공극(throat) 연결도(correlation)를 고려한 투과도 예측 법에 대해 발표하였다. Chen 등(2008)은 Leverett-J함수와 SDR모델에 기초하여 탄산염암에서의 투과도와 공극과 유체유동결정공극의 비(ρ)를 Coates모델을 접목하여 유체 구분값 없이도 투과도 계산이 가능할 수 있다고 발표하였다. 또 다른 투과도에 대한 연구로는 공극률(ϕ), 비틀림 상수(η),

유효 공극의 반지름(r_{eff})의 함수인 Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1937, 1948, 1956)모델과, 프랙털 차원 (fractal dimension; D)과 비틀림 지수(tortuosity exponent; m)를 동시에 고려한 RGPZ모델(Revil, Glover, Pezard and Zamora; Glover *et al.*, 2006; Glover and Walker, 2008), 공극의 크기 분포를 바탕으로 투과도를 계산한 Multi lattice capillary model (Murtsovkin, 2009) 이 있다.

결 론

자기공명검층은 자기 공명 현상을 이용하여 지층 내에 수소원자를 선택적으로 감지하여, 시간에 따른 수소 밀도를 측정하는 검층방법이다. 자기공명검층으로 종축이완과 횡축이완을 측정할 수 있으며, 측정된 이완감쇠 그래프는 용이한 해석을 위해 T_2 역산과정을 거쳐 T_2 스펙트럼 그래프로 변환한다. T_2 역산은 여러 가지 수학 방법들이 있으며, 역산 방법, 자료의 보정 정도에 따라 스펙트럼 결과가 달라지기 때문에 정확한 해석을 위해서는 정확한 역산방법을 사용해야 한다. T_2 스펙트럼 그래프를 통해 공극 크기의 분포, 공극률, 공극 내 유체의 종류 및 유착 타입에 대한 비교적 정확한 정보를 알 수 있고, 이를 바탕으로, 저류층의 구조 및 저류층에서의 유체의 흐름을 이해하는데 중요한 정보(투과도, 습윤성)를 예측할 수 있기 때문에 자기공명검층에 대한 중요성이 점점 높아지고 있다.

사 사

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

- Akkurt, R., Bachman, H.N., Carmona, R., Crary, S., Decoster, E., Heaton, N., Hurlimann, M.D., Looyestijn, W., Mardon, D. and White, J., 2009, "Nuclear magnetic resonance comes out of its shell," *Schlumberger Oilfield Review*, [http:// www.slb.com/](http://www.slb.com/).
- Akkurt, R., Vinegar, H.J., Tutunjian, P.N. and Guillory, A.J., 1995, "NMR logging of natural gas reservoirs," *The Log Analyst*, Vol. 37, No. 6, pp. 33-42.
- AlO Rushaid, A., Sun, B., Dunn, K.-J., Bilodeau, B.J., Van Dalen, S.C., and Stonard, S.W., 2004, "Two-dimensional NMR logging and field test results," *Trans. SPWLA 45th Annual Logging Symposium*, paper.KK.
- Alvarado, B.J., Damgaard, A., Hansen, P., Raven, M., Heidler, R., Hoshun, R., Kovats, J., Morriss, C., Rose, D. and Wendt, W., 2003, "Nuclear magnetic resonance logging while drilling," *Schlumberger Oilfield Review*, 15(2), pp. 40-51.
- 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.
- Brownstein, K.R. and Tarr, C.E., 1979, "Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells," *Physical Review*, Vol. 19, pp. 2446-2453.
- Butler, J.P., Reeds, J.A. and Dawson, S.V., 1981, "Estimating solutions of first kind integral equations with nonnegative constraints and optimal smoothing," *SIAMJ numerical analysis*, Vol. 18, No. 3, pp. 381-397.
- Carman, P.C., 1937, "Fluid flow through granular beds," *Trans. Institution of Chemical Engineers*, Vol. 15, pp. 150-166.
- Carman, P.C., 1948, "Some physical aspects of water flow in porous media," *Discussions of the Faraday Society*, Vol. 3, pp. 72-77.
- Carman, P.C., 1956, *Flow of gases through porous media*, Butterworth Scientific, Publications Ltd.
- Carr, H.Y. and Purcell, E.M., 1954, "Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments," *Physical Review*, Vol. 94, No. 1, pp. 630-638.
- Chang, D., Vinegar, H., Morriss, C. and Straley, C., 1997, "Effective porosity, producible fluid and permeability in carbonates from NMR logging," *The Log Analyst*, Vol. 38, No. 2, pp. 60-72.
- Chen, S., Arro, R., Minetto, C., Georgi, D. and Liu, C., 1998, "Method for computing S_{wi} and BVI from NMR logs," *Trans. SPWLA 39th Annual Logging Symposium*, paper. HH.
- Chen, S., Georgi, D., Fang, S., Salyer, J. and Shorey, D., 1999, "Optimization of NMR logging acquisition and processing," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 56766.
- Chen, S., Jacobi, D., Chen, J., Gladkikh, M., Georgi, D. and Gillen, M., 2008, "A new approach for obtaining S_{wir} from NMR log without requiring T_2 cut off," *Trans. SPWLA 49th Annual Logging Symposium*, paper.DD.
- 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 Search and Discovery*, p.90122.
- Coates, G., Lizhi, X. and Prammer, M., 1999, *NMR logging principles and applications*, Halliburton Energy Services.
- Coates, G., Miller, M., Gillen, M. and Henderson, C., 1991, "The MRIL in Conoco 33-1 an investigation of a new magnetic resonance imaging log," *Trans. SPWLA 32nd Annual Logging Symposium*, paper DD.
- Craig, F.F., 1971, "Efficiency of oil displacement by water," Monograph, Henry L. Doherty Series, *The reservoir engineering aspects of waterflooding*, Monograph Vol. 3.
- Dunn, K.J., Bergman, D.J. and LaTorraca, G.A., 2002, *Nuclear magnetic resonance: petrophysical and logging application*, Pergamon: Elsevier Science.
- Dunn, K.J., Latorraca, G.A. and Warner, J.L., 1994, "On the calculation and interpretation of NMR relaxation time distribution," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE28367.
- Flaum, M., Chen, J. and Hirasaki, G.J., 2005, "NMR diffusion-editing for D - T_2 maps: application to recognition of wettability change," *Petrophysics*, Vol. 46, No. 2, p. 113.
- Freedman, R., Lo, S., Flaum, M., Hirasaki, G.J., Matteson, A. and Sezginer, A., 2001, "A new NMR method of fluid characterization in reservoir rocks: experimental confirmation and simulation results," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 63214.
- Freedman, R., Heaton, N., Flaum, M., Hirasaki, G.J., Flaum, C. and Hurlimann, M., 2003, "Wettability, saturation, and viscosity from NMR measurements," *SPE Journal*, pp. 317-327.
- Glover, P.W.J. and Walker, E., 2008, "A grain size to effective pore size transformation derived from electro kinetic theory," *Geophysics*, Vol. 74, pp. 17-29.
- Glover, P.W.J., Zadjli, I.I. and Frew, K.A., 2006, "Permeability prediction from MICP and NMR data using an electro kinetic approach," *Geophysics*, Vol. 71, pp. 49-60.
- Hidajat, I., 2002, *Stochastic porous media reconstruction, NMR response simulation and study of carbonate structure using NMR and CT scanner*, PhD dissertation, University of Houston.
- Hurlimann, M.D. et al., 2002, "Diffusion editing: new NMR measurement of saturation and pore geometry," *Trans. SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, paper. FFF
- Jang, J.H. and Nam, M.J., 2012, A review on nuclear magnetic resonance logging: fundamental theory and measurements, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, 15(4), 235-244.
- Kenyon, W.E. 1992, "Nuclear magnetic resonance as a petrophysical measurement," *Nuclear Geophysics*, Vol. 6, No. 2, pp. 153-171.
- Kenyon, W.E., 1997, "Petrophysical principles of applications of NMR logging," *The Log Analyst*, Vol. 38, No. 2, pp. 21-43.
- 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*, Vol. 3, No. 3, pp. 622-636.
- Kleinberg, R.L. and Boyd, A., 1997, "Tapered cutoffs for magnetic resonance bound water volume," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 38737.
- Kleinberg, R.L., Kenyon, W.E. and Mitra, P.P., 1994, "Mechanism of NMR relaxation of fluids in rock," *J. Magnetic Resonance*, Vol. 108, No. 2, pp. 206-214.
- Kozeny, J., 1927, "Über kapillare leitung des wassers in boden," *Sitzungsber Akad., Wiss, Wein, Math-Naturwiss*, Vol. 136, No.2a, pp. 271-306(In German).
- Kubica, P., 1995, "Statistical test of permeability estimates based on NMR measurements," *Trans. SPWLA 36th Annual Logging Symposium*, paper VVV.
- Mardon, D., Prammer, M.G. and Coates, G.R., 1996, "Characterization of light hydrocarbon reservoirs by gradient-NMR well logging," *Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 14(7/8), pp. 769-777.
- Meiboom, S. and Gill, D., 1958, "Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 29, pp. 688-691.
- Morris, C.E., Deutsch, P., Freedman, R., McKeon, D. and Kleinberg, R.L., 1996, "Operating guide for the combinable magnetic resonance tool," *The Log Analysis*, Vol. 37, No. 6, pp. 53-60.
- Murtsovkin, V.A., 2009, "The Use of multi lattice capillary model for calculating permeability by NMR data," *Colloid Journal*, Vol. 71, No.5, pp. 699-705.
- Prammer, M.G., Mardon, D., Coates, G.R. and Miller, M.N., 1995, "Lithology-independent gas detection by gradient-NMR logging," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 30562,.
- Schlumberger, 2012.11.19, http://www.slb.com/~media/Files/evaluation/brochures/wireline_open_hole/petrophysics/nmr/mrf_br.pdf.
- Seevers, D.O., 1966, "A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones," *Trans. SPWLA 6th Annual Logging Symposium*, paper L.
- Sigal, R. and Odusina, E., 2010, "NMR gas relaxation signature for organic shale reservoir rocks," *AAPG Hedberg Conference*, 90122.
- Song, Y.-Q., Venkataramanan, L., Hurlimann, M.D., Flaum, M., Frulla, P. and Straley, C., 2002, " T_1 - T_2 correlation

- spectra obtained using a fast two-dimensional Laplace inversion," *J. Magnetic Resonance*, Vol. 15, No. 4, pp. 261-268.
- Song, Y.-Q., Cho, H., Hopper, T., Pomerantz, A.E. and Sun, P.Z., 2008, "Magnetic resonance in porous media: recent progress," *J. Chemical Physics*, Vol. 128, p. 052212.
- Song, Y.Q., 2007, "Resolution and uncertainty of Laplace inversion spectrum," *Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 25, No. 4, pp. 445-448.
- Sternin, E., 2008, *Use of inverse theory algorithms in the analysis of biomembrane NMR data*, H. Press, Ed., Vol. 400, Methods in Membrane Lipids, A product of Humana Press, pp. 103-125.
- Straley, C., Rossini, D., Straley, C., Tutujian, P. and Vinegar, H., 1995, "Core analysis by low-field NMR," *The Society of Core Analysts*, SCA1995-9494.
- Sun, B. and Dunn, K.J., 2002, "Core analysis with two dimensional NMR," *The Society of Core Analysts*, SCA 2002-38.
- Sun, B.Q. and Dunn, K.J., 2005, "A global inversion method for multi-dimensional NMR logging," *J. Magnetic Resonance*, Vol. 172, pp. 152-160.
- 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, "Producible porosity and permeability of sandstones investigated through nuclear magnetic resonance principles," *The Log Analyst*, Vol. 10, pp. 3-11.
- Timur, A., 1969b, "Pulsed nuclear magnetic resonance studies of porosity, movable fluid, permeability of sandstones," *J. Petroleum Science and Engineering*, Vol. 21. No. 6, pp. 775-786.
- 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., Sun, B. and Dunn, K.J., 2004, "A numerical assessment of modern borehole NMR interpretation techniques," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, paper 90539.
- Wang, Z.D., Xiao, L.Z. and Liu, T.Y., 2003, "New inversion method with multi-exponent and its application," *Science in China*, Vol. 33, p. 323332(in Chinese).
- Xie, R. and Xiao, L., 2011, "Advanced fluid-typing methods for NMR logging," *Petroleum science*, Vol. 8, pp. 163-169.
- Xie, R.H., Xiao, L.Z. and Dunn, K.J., 2006, "NMR Logging porosity activation and data processing method," *Chinese J. Geophysics*, Vol. 49, No. 5, pp. 1419-1424.
- Xie, R.H., Xiao, L.Z., Liu, J.J. and Dunn, K.J., 2009, "A method for multiple echo trains jointing inversion of NMR relaxation measurements," *Chinese J. Geophysics*, Vol. 53, No. 6, pp. 1342-1349.
- 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*, Vol. 53, pp. 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*, Vol. 89, pp. 1371-1380.

장 재 화

2006년 충북대학교 지구환경과학과 학사

현재 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정
(E-mail: gypsie8282@gmail.com)

남 명 진

현재 세종대학교 에너지자원공학과 조교수
(本學會誌 第49卷 第5号 參照)