

자기 공명 영상법에서 Agarose 표준 물질을 사용한 유체 포화도의 계산

김 경 회[†]

대구대학교 공과대학 화학공학과
(1998년 9월 21일 접수, 1999년 1월 5일 채택)

Estimation of Fluid Saturations Using Agarose Standard in NMR Imaging

Kyung-Hoe Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Taegu University, Kyongsan 712-714, Korea
(Received September 21, 1998; accepted January 5, 1999)

요 약: Gel 표준 물질의 핵자기 공명적 완화 성질들이 다공성 매체내 유체의 핵자기 공명적 완화 성질들과 잘 부합될 수 있기 때문에, agarose gel은 다공성 매체내 유체의 성질을 측정하기 위한 표준 물질로 사용될 수 있다. 다공성 매체의 세공도(porosity)와 포화도(saturation)를 결정하기 위한 표준 물질의 사용을 논의하였고, gel의 핵자기 공명적 성질에 대한 필요조건들도 제시하였다. 2.0 Tesla에서 측정된 agarose gel의 완화시간은 agarose 농도와 상자성 불순물의 (CuSO_4) 농도 함수로 표시하였고, agarose gel 조성과 완화시간 사이의 실험적 결과를 나타내었다. 세공도 분포에 대한 평균값은 17.7%이고, 이 값은 중량 분석법에 의해 계산된 값과 잘 일치한다. 끝으로, agarose gel을 표준 물질로 사용한 비혼화성 2상 유체실험을 수행하였다. 포화 profile들은 균일한 다공성 매체내에서 일차원 치환실험을 했을 때 계산된 결과와 잘 일치하고 있다.

Abstract: Agarose gels can be used as reference standards for the measurement of fluid properties in porous media because the relaxation properties of the gel reference standard and those of the fluid in porous media can be closely matched. The use of reference standard to determine porosity and saturation is discussed and the requirements for gel NMR properties given. The relaxation times of agarose gels measured at 2.0 Tesla are illustrated as a function of agarose and paramagnetic impurity (CuSO_4) concentrations. This work shows an empirical result between agarose gel composition and gel relaxation times. The average value for the porosity distribution is 17.7%, which compares well with the value calculated with the gravimetric analysis. Finally, two phase immiscible displacement using agarose gels as a reference standard was performed. The saturation profiles appear to be consistent with what one might calculate for a one-dimensional displacement in a uniform porous media

Key words: Agarose Standard, Porous Media, Porosity, Saturation, NMR Imaging

1. 서 론

다공성 매체에서 유체 흐름 성질들을 조사하기 위해 핵자기 공명 영상 기법(Magnetic Resonance Imaging)을 사용하는 중요한 이유중의 하나는 국소적(local) 세공도와 유체 포화도에 대한 정량적 수치를 얻을 수 있다는 점이다. 따라서, 유체들로부터 얻은 신호 강도(signal intensity)를 보정하는 것이 중요하다. 만일 보정상수가 알려지지 않으면, 계산된 유체 포화도와 세공도는 배수(multiplicative constant) 형태로 결정될 수 밖에 없다. 이와 같은 흐름 성질들(flow properties)에 대해 계산된 값들은 상대적 비로(ratio) 표현되는 반면, 원하는 양의 절대적인 값은 결정되지 않은 상태로 있다.

보정상수(calibration constant), k 는 ^1H 핵의 총수 대(對) 적분된 NMR 선강도(line intensity)의 비이다. k 를 결정하기 위한 방법은 알고 있는 수의 ^1H 핵을 갖는 표준 물질을 송신/수신(transmit/receive) 코일 내에 넣고 그 신호 강도를 측정하는 것이다. 알고 있는 거시적 NMR 성질들과 함께, 이 신호 강도는 미지의 보정상수를 결정하기 위해 사용 될 수 있다. k 를 결정할 수 있는 두 가지 방법이 있는데, 그 첫째 방법은, 표준 물질을 코일 안에 두고

신호 강도를 측정하여 유체 실험이 수행되기 전에 k 를 결정하는 것이고, 그 두 번째 방법은, 코일 내에 표준 물질과 sample을 같이 넣어 유체 실험을 수행하면서 동시에 k 를 결정하는 것이다. 첫 번째 방법은 정확도가 좋지 않은데, 그 이유는 sample이 코일내에 삽입될 때 미지의 요인에 의해 코일의 성질 인자(quality factor)가 변할 수 있기 때문이다. 두 번째 방법에서, k 값은 얻어진 각 영상에 대해 결정되며, 이 방법은 k 가 정확하게 결정될 수 있다. k 가 실험하는 동안 변하더라도, 유체 포화도와 세공도에 대한 정량적 수치 계산에 있어 정확도가 부여된다.

본 연구는 다공성 매체내 유체들의 NMR 영상측정법을 위한 표준 물질로서 agarose gel의 사용을 논의할 것이다. Agarose gel은 의학적 응용으로[1-4] 조직(tissue)에 상응한 phantom으로 사용되어 왔다. Mitchell은[1] 0.5에서 4.0%의 (weight/volume) 농도를 가진 agarose gel을 연구하였으나, 다공성 매체를 연구하는 경우 다공성 암석내 유체들의 가로방향 완화 시간(transverse relaxation time)은 대개 생물학적 물질의 가로방향 완화 시간보다 작기 때문에, 2.0 Tesla의 자기장에서는 4% 이상, 전형적으로 10~15%의 농도가 필요하다. Agarose gel을 표준 물질로 사용하기 위해 논의될 기법은, 모든 실험 조건하에서 k 를 얻기 위해 gel과 sample을 동시에 NMR 장치 코일 안에 넣어 수행하면, 본질적으로 더 정확한 자료를 제시해 준다. 따라서, 본 논문은 gel의 제조 방법과 그 NMR

[†] 주 저자 (e-mail: khk9509@biho.taegu.ac.kr)

적 성질을 논의하고, 제조된 agarose 표준 물질을 이용하여 비혼화성 2상 유체실험을 수행하여 그 결과를 검토할 것이다.

2. 이론적 고찰

주어진 장치를 사용하여 여기 펄스(excitation pulse) a 가 적용된 후 펄스화 실험(pulsed experiment)에서 얻은 시간영역(time domain) NMR 신호는 아래 표현식과[3] 같이 주어진다.

$$I_0(t) = AK(Q \eta \mu_0 V_s \omega_0)^{1/2} M_{s_0}(t) \tag{1}$$

보정상수 k 는 아래 식과 같이 주어진다.

$$I_0(t) = AK(Q \eta \mu_0 V_s \omega_0)^{1/2} \frac{\gamma^2 (2\pi h)^2 (I+1) H_0}{3kT} \sin(\omega t) \tag{2}$$

총괄 증폭기 이득(amplifier gain) A 는 증폭기의 예열 및 냉각 상태에 따라 변한다. 그러나, 가장 중요한 변화는 수신 코일내의 성질인자 Q 의 변화이다. 유체 포화도의 변화에 따라 유전 손실(dielectric loss)의 변화가 야기되고, 이에 따라 성질인자 Q 값이 크게 변한다. 만일 한 유체상이 전도성이 있다면 (예, 염 용액) 자기 손실(magnetic loss) 또한 변할 것이다. NMR 실험을 하는 동안 표준 물질이 필요한 것은 Q 의 변화 때문이다. NMR 신호에 대한 강도는 하드웨어 배열, 하드웨어와 sample 사이의 상호 작용 및 sample의 NMR 성질에 의존한다. 어떤 주어진 sample과 NMR 실험에서

$$I(t) = I_0(t) g(T_1, T_2, TE, TR) \tag{3}$$

여기서 TE 는 반향시간(echo time)이며, TR 은 펄스 순서(pulse sequence) 반복 시간이다. 함수 g 는 T_1, T_2, TE 와 TR 에 대한 복합 함수로, $TE \ll TR$ 인 간단한 스핀 반향 순서(spin echo sequence)에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(T_1, T_2, TE, TR) = \exp\left(-\frac{TE}{T_2}\right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{TR}{T_1}\right) \right\} \tag{4}$$

시간 영역에서 신호 강도는 실험 변수가 변함에 따라 바뀔 것이다. 식 (3)의 함축적 가정은 sample이 자성화(magnetization)된 후 그 완화(relaxation)가 T_1 와 T_2 의 단일 지수함수(single exponential function)로 묘사될 수 있다는 것이다. Sample 자성화에 대한 비지수적(nonexponential) 또는 다중 지수적(multi-exponential) 거동은 $TE=0$ 과 $TR=\infty$ 까지 NMR 신호의 외삽을 요한다. NMR 실험에서, 표준 물질과 sample을 송신/수신 코일 안에 동시에 삽입한다. 이때 sample과 표준 물질은 공간적으로 떨어져 있으므로, 자기 기울기(magnetic gradient) 방향으로 두 신호는 구별되어 나타날 것이다. 일차원 영상에서 시간 영역의 신호는 다음과 같다.

$$I_0(t) = k \int dV \{ n_H^s(x, y, z) + n_H^r(x, y, z) \} e^{i\gamma Gz} \tag{5}$$

이때 sample의 선폭(line width)은 T_2 영향이 무시될 수 있을 만큼 충분히 폭이 좁다고 가정할 수 있다. 식 (5)은 sample내의 어떤 단일 유체 상으로부터의 신호만 감지될 수 있다는 사실을 가정하고 있다. 따라서, 아래에 논의될 식들은 2상 유체 실험에 적용되며, 여기서 두 유체의 포화도는 단일 상의 유체 포화도가 측정됨으로써

터 결정될 수 있다. 실험적으로, $H_2O/MnCl_2$ 용액이 수용액 대신에 사용될 수 있으나, H_2O 대신에 실제로 D_2O 를 사용하였는데, 그 이유는 $H_2O/MnCl_2$ 용액과 암석사이에 생길지도 모르는 화학적 상호 작용 때문이다. t 에 대하여 Fourier 변환을 하면,

$$I_0(\omega) = \frac{k}{\gamma G} \int dx dy \left[n_H^r(x, y, \frac{\omega}{\gamma G}) + n_H^s(x, y, \frac{\omega}{\gamma G}) \right] \tag{6}$$

여기서, $\omega = \gamma Gz$ 이며, k 에 대한 표현식은 아래와 같다.

$$k = \frac{\int_{ref} I_0(\omega) d\omega}{N_H^r} \tag{7}$$

여기서, N_H^r 는 표준 물질의 1H 총수이다. Sample 위치에 해당하는 주파수에서 신호강도의 기여를 살펴보면,

$$I_0(\omega) = I_0^s(\omega) = \frac{k}{\gamma G} \int dx dy n_H^s(x, y, \frac{\omega}{\gamma G}) = \tag{8}$$

$$(\gamma G N_H^r)^{-1} \left\{ \int_{ref} I_0(\omega') d\omega' \right\} \int dx dy \Phi(x, y, \frac{\omega}{\gamma G}) S(x, y, \frac{\omega}{\gamma G}) N_H^s$$

여기서, N_H^s 는 sample내 유체의 수 밀도로 다음과 같다.

$$N_H^s = \frac{N_A}{M} \rho \tag{9}$$

n_H^s 와 N_H^s 사이에는 중요한 차이점이 있다. n_H^s 는 암석내 유체의 수소핵 밀도이며, N_H^s 는 bulk 유체의 수소핵 밀도이다. 두 량 사이의 관계는,

$$n_H^s = \Phi S N_H^s \tag{10}$$

식 (8)을 간단히 하고, $\Phi(z)S(z)$ 에 대해 풀면 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{\Phi(z)S(z)} = \frac{\gamma G N_H^r}{N_H^s} \frac{I_0(\omega)}{\int_{ref} I_0(\omega') d\omega'} \tag{11}$$

ΦS 위의 줄(bar)은 xy 평면에 대한 이 값들의 적분을 나타낸다. 주파수 ω 에서 신호강도는 암석 sample의 해당 단면적에 대해 적분된 세공도와 포화도의 곱에 비례한다. $\Phi(z)$ 와 $S(z)$ 는 다른 공간적 의존성을 가지므로, 실험에 의해 이 의존성을 분리해야만 한다. 함수 g 는 Φ 와 S 의 곱을 얻기 위해 공식에 다시 넣을 수 있고, 식 (11)은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\overline{\Phi(z)S(z)} = \frac{\gamma G N_H^r}{N_H^s} \frac{g(T_1^r, T_2^r, TE, TR)}{g(T_1^s, T_2^s, TE, TR)} \frac{I(\omega)}{\int_{ref} I(\omega') d\omega'} \tag{12}$$

다른 완화시간(relaxation time)을 갖는 sample과 표준 물질에 대하여, 이 식은 $\overline{\Phi S}$ 를 계산하기 위해 사용되어야 한다. 이는 신호강도를 $TE=0$ 와 $TR=\infty$ 까지 외삽하는 것과 같다. 만일 $T_1^r = T_1^s$ 이고 $T_2^r = T_2^s$ 이면, 함수 g 는 식 (12)에서 없어지고, 식(11)이 $\overline{\Phi S}$ 를 계산하기 위해 사용될 수 있다. 만일 표준 물질의 NMR적 성질들이 sample의 NMR적 성질들과 정확히 맞을 때, 실험적 변수들은 더 이상 $\overline{\Phi S}$ 계산에 영향을 주지 않을 것이고 실험자는

자유롭게 실험변수를 바꿀 수 있거나 영상기법(imaging technique) 자체도 바꿀 수 있다. $\Phi(z)$ 와 $S(z)$ 를 분리하기 위해, 포화도를 1로 설정하여 실험을 한다. 이때 식 (11)이나 (12)을 사용하면, $\Phi(z)$ 는 결정된다. $\Phi(z)$ 는 실험하는 동안 보통 변하지 않기 때문에 처음에 계산된 $\Phi(z)$ 는 나중에 $S(z)$ 를 결정하는데 쓰일 수 있다. 표준 물질과 sample의 완화 시간들을 일치시키기는 불가능하기 때문에, sample의 완화시간을 면밀히 측정하는 것이 $\overline{\Phi S}$ 의 정확한 계산을 위해 필요하다. 식 (11)의 필요조건은 $TE \ll TR$ 인 간략한 스핀 반향(spin echo) 실험에 대해, 아래와 같이 요약될 수 있다.

$$\exp\left\{-TE\left(\frac{1}{T_2^r} - \frac{1}{T_2^s}\right)\right\} \frac{1 - \exp\left\{-\frac{TR}{T_1^r}\right\}}{1 - \exp\left\{-\frac{TR}{T_1^s}\right\}} \approx 1 \quad (13)$$

이는 다음 실험적 변수에 대한 제한조건을 주고 있다. TE 에 대한 제한조건은,

$$TE \ll \frac{T_2^2}{\Delta_2} \quad (14)$$

$$\text{여기서 } 2\Delta_2 = |T_2^r - T_2^s| \quad (15)$$

$$2\overline{T_2} = T_2^r + T_2^s \quad (16)$$

신호(signal)/잡신호(noise) 비때문에 TE 는 보통 $2T_2$ 보다 적지만, TR 에 대한 필요조건은 다소 다르다. 아래 표현식은 TR 이 단조로운(monotonous) 함수이며, $TR \gg T_1^r, T_1^s$ 일 때 1에 접근한다.

$$\frac{1 - \exp\left\{-\frac{TR}{T_1^r}\right\}}{1 - \exp\left\{-\frac{TR}{T_1^s}\right\}} \quad (17)$$

가장 나쁜 경우는 TR 이 0으로 접근하는 제한조건이다.

$$\lim_{TR \rightarrow 0} \frac{1 - \exp\left\{-\frac{TR}{T_1^r}\right\}}{1 - \exp\left\{-\frac{TR}{T_1^s}\right\}} = \frac{T_1^r}{T_1^s} \cong 1 \pm \frac{2\Delta_1}{T_1} \quad (18)$$

여기서 $\overline{T_1}$ 은 평균 완화 시간이며 $2\Delta_1 = |T_1^r - T_1^s|$ 이다. 식 (17)에 대한 근사해는 오차를 작게 하기 위해서 다음 조건을 필요로 한다.

$$TR \gg \frac{2}{5} \Delta_1 \quad (19)$$

전형적인 sample의 경우 $T_2 \cong 10$ msec이고 $T_1 \cong 600$ msec이다. Sample과 표준 물질 사이의 완화 시간 10% 변화에 대하여, TE 와 TR 은 $TE \ll 200$ msec와 $TR \gg 12$ msec로 제한된다. $TE = 6$ msec와 $TR = 400$ msec의 전형적인 선택은 제한조건을 만족한다. Figure 1과 2는 식 (13)의 변화를 $TE/\overline{T_2}$ 또는 $TR/\overline{T_1}$ 의 함수로써 보여준다.

3. 실험

3.1. Agarose Gel 제조

아래에 제시한 agarose gel 제조 방법은 많은 실험에 의해 결정

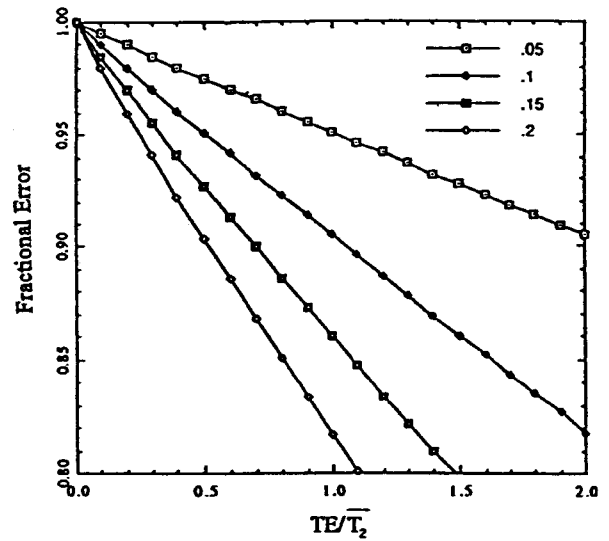


Figure 1. Error due to mismatch in transverse relaxation times. Line types represent percent difference in sample and reference relaxation times.

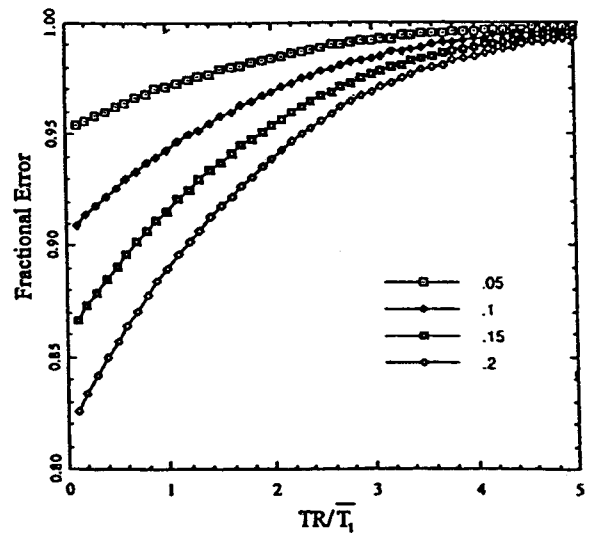


Figure 2. Error due to mismatch in spin-lattice relaxation times. Line types represent percent difference in sample and reference relaxation times.

되었으며, agarose gel의 농도가 클수록 그 제조방법에 더 주의를 기울여야 한다. Gel 제조시 마이크로파 oven을 사용하였으나, 높은 agarose 농도의 gel 제조시 기포가 생기는 것을 방지하기 위해 autoclave를 사용하는 것이 좋다. 한편, Mitchell은[1] gel을 제조하기 위해 자석식 교반기가 달린 열판(hot plate)을 사용했다. 본 실험에 의한 gel의 제조 절차는 다음과 같다. (1) 0.001 M에서 0.005 M사이의 $CuSO_4$ 농도를 선택한 후, gel 표준물질로 사용하기에 충분한 agarose 분말을 준비한다. (2) 1~15 wt %의 agarose 농도를 얻기 위해 용액에 적합한 양의 agarose 분말을 더한다. sample vial을 단단히 밀폐시키고 잘 섞는다. oven이나 autoclave 안에서 단단히 밀폐된 sample vial은 끓어 넘침, 기포 발생 및 다량의 수분 증발을 방지할 것이다. (3) 1200 watt 마이크로파 oven을 사용

할 때 30% 동력을 사용하여 agarose gel을 만들며, 아래에 제시된 조리시간은 물 10 gram을 기준으로 한 것이다. 조리시간과 동력은 다른 장치를 사용하거나 gel의 량에 따라 조정될 수 있다.

Agarose concentration (wt %)	Cooking procedure
1-5	cook 2.25 min and mix well
6-10	cook 2.0 min and mix well
11-12	cook 1.5 min and mix well
	cook 0.3 min and mix well
13-15	cook 0.3 min and mix well
	cook 0.3 min and mix well
	cook 0.25 min and mix well
	cook 0.25 min and mix well

(4) 기포를 제거하기 위하여 천천히 식힌다.

3.2. Agarose 표준 물질의 사용

Agarose 표준 물질은 비혼화성 2상 유체실험에서 각상의 포화도를 계산하기 위해 사용되었다[7-11]. 사용된 암석 sample은 길이 3 in 직경 1 in인 원통형 고체 석회석(limestone)이다. 원통형 암석 sample에 진공을 적용하여 암석 새공내의 공기를 완전히 제거한 뒤 비 젖음상(nonwetting phase)인 n-octadecene을 포화시켰다. 암석 sample은 epoxy (Stycast 2651, Emerson & Cumming Co.)를 사용하여 원통형 Plexiglass에 고정하였다. Epoxy의 T_2 는 실험에 사용된 유체의 T_2 에 비해 매우 짧기 때문에 신호강도에 거의 영향을 주지 않는다. 한편, sample holder 입출구에서 유체가 새는 것을 방지하기 위하여 고무 gasket을 사용하였다. 유체실험 동안 영상화(imaging)는 31 cm 직경의 수평구(bore)와 0.2 Tesla/m 차폐 기울기 코일(shielded gradient coil)이 구비된 2 Tesla GE NMR imager/spectrometer를 사용하였다. Sample holder내의 암석sample과 그 위에 tape로 고정된 agarose 표준 물질을 NMR 영상기(imager) 수평구의 4 1/4 in 수신 코일(receiving coil) 내에 잘 위치시킨다. 일단 sample holder가 NMR장치 내에 고정되면, 암석 sample과 표준 물질은 전 실험과정 동안 움직이지 않으며, 이때 사용된 표준 물질은 무게비로 agarose 분말 16%와 탈이온수 84%로 구성되었다.

유체의 흐름은 NMR 자석(magnet)의 정적 자기장(static magnetic field) 방향인 암석 sample의 길이 방향이다. 먼저, 석회석 sample을 비 젖음성 유체로 포화시켰으며, 젖음성 유체로는 Deuterium oxide (D_2O)를 사용하였다. 초기 실험동안 유체의 흐름 속도는 0.56×10^{-4} pore volume/sec로 하였다. 암석 sample의 출구로부터 D_2O 가 나오기 시작한 후, 유체 실험을 빠르게 진행하기 위하여 유체속도를 17×10^{-4} pore volume/sec로 증가시켰다. 표준 물질의 NMR 신호대(對) 암석 sample의 NMR 신호비가 일정한 값에 도달하면 유체실험이 정상상태에 달한 것을 의미한다. 영상화 순서(imaging sequence)는 비선택적 단순 스핀 반향 순서(non-selective spin echo sequence)를 사용하였다. Hahn 스핀 반향 질차에서 90° 와 180° 펄스(pulse)는 반향을 획득(acquisition)하는 동안에 암석 sample의 축(axial) 방향으로 적용된 일정한 자기장 기울기(gradient)를 가지며 비선택적이다. 얻어진 결과는 암석 sample 단면에 대해 평균화된 유체 포화도와 세공도의 1차원 profile이다. 반향시간(echo time)은 9 msec로 고정되고, 펄스 반복 시간(pulse repetition time)은 $5T_1$ 보다 크게 정했다. 실험하는 동안 펄스 순서 변수들(pulse sequence parameters) 중 어느 것도 바꾸지 않았다.

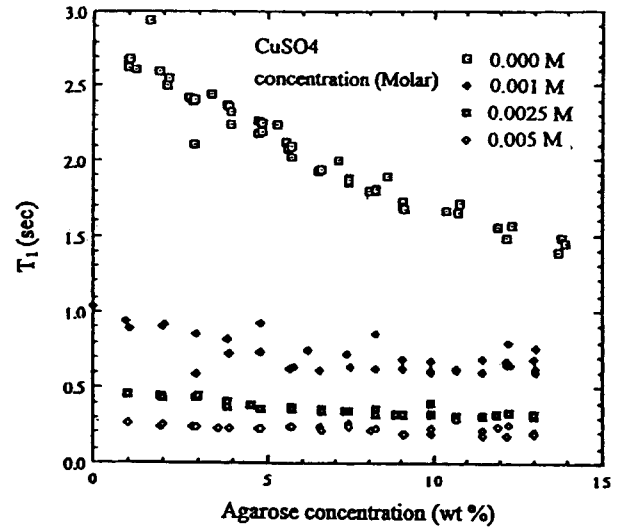


Figure 3. Longitudinal relaxation in agarose samples.

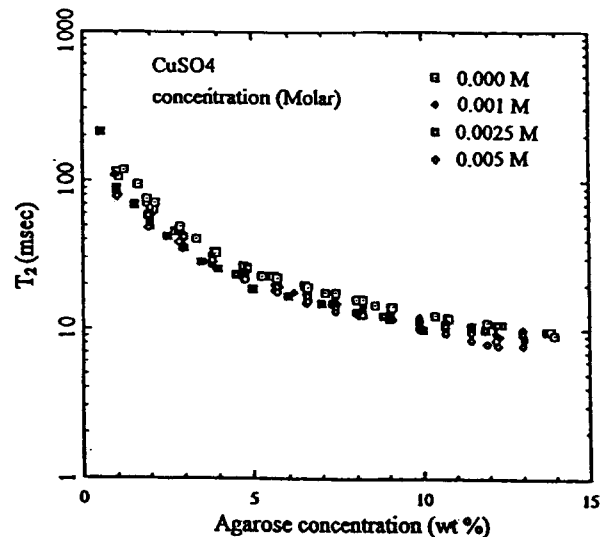


Figure 4. Transverse relaxation in agarose samples.

4. 결과 및 고찰

Agarose gel은 부드러운 고체로 90% 이상의 액체를 포함한다. Gel은 거의 균일한 다공성 매체이고, 그 gel의 조성을 알 수 있으므로 1H 핵의 총 수를 결정할 수 있다. 스핀-격자(spin-lattice) 완화시간을 일치시키기 위해, agarose gel의 T_1 는 직접 조절할 수 있다. Bulk 유체의 T_1 과 gel의 T_1 을 조절하기 위해 $H_2O/CuSO_4$ 혼합물을 사용하였고, gel의 T_2 는 agarose의 농도로 조절하였다. Figure 3과 4는 agarose 농도와 $CuSO_4$ 농도의 함수로써 agarose gel sample들의 T_1 , T_2 완화시간들을 보여준다. 이 결과로부터 유체실험에 사용될 agarose gel을 표준 물질의 적합한 $CuSO_4$ 농도와 gel 농도가 결정되고, 제조된 gel의 T_1 , T_2 완화 시간들을 측정하여 암석 sample의 T_1 , T_2 완화시간과 비교 검증한 후 실험에 사용한다. 완화시간 data가 많이 분산되어 있는데, 그 이유는 gel 준비 과정에서 야기된 것으로 생각되므로, 가장 적합한 표준 물질을 만들려면 실험 전에 몇 개의 gel을 제조해야만 한다.

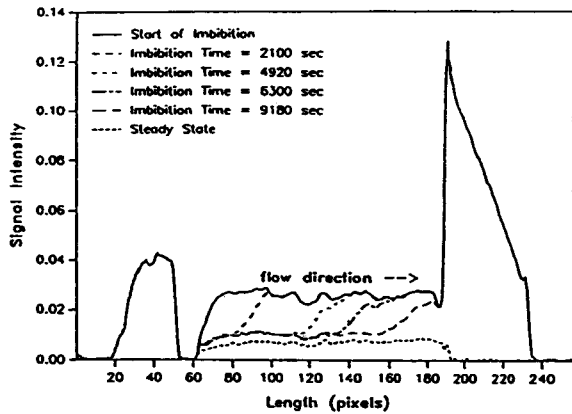


Figure 5. Profile images of primary imbibition.

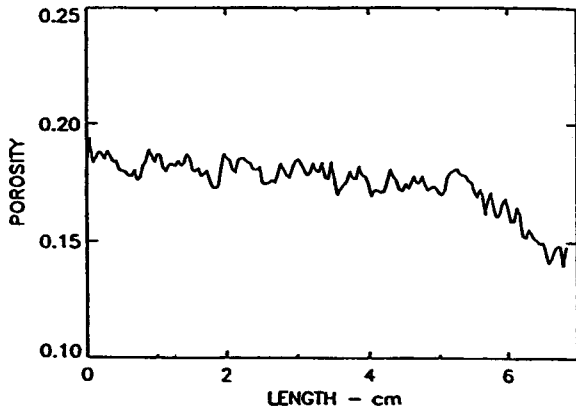


Figure 6. Porosity profile for Indiana limestone.

Figure 5는 흡수(imbibition) 실험이 연속적으로 진행되는 동안 시간별로 얻은 oil의 신호 강도 profile을 보여준다. 그림의 횡축은 화소단위(pixel unit)로 표시되었으며, 각 화소(pixel)의 크기는 0.56 mm이다. 실험하는 동안 유체는 좌측에서 우측으로 흐르며, 화소단위로 20에서 50에 해당하는 그림 좌측의 peak는 표준 물질에 해당하며, 61에서 194까지의 중앙부는 암석 sample에 포화된 oil이 시간에 따라 D₂O에 의해 치환되는 모습을 보여준다. 한편, 195에서 235에 해당하는 우측의 peak는 암석 sample의 출구와 gasket 사이에 고여 있는 oil을 나타내고 있다. 정상상태에서 유체의 흐름 속도를 흡수실험에서 사용한 유속보다 증가시켰기 때문에, 정상상태에서 얻은 신호강도 profile의 크기가 흡수실험 동안 얻은 다른 신호강도 profile들보다 상당히 작은 것을 알 수 있다. NMR 영상기의 수신코일은 코일 전체에 걸쳐 균일한 radio frequency를 갖기 때문에, 성질인자도 균일해져서 암석 sample 옆에 표준물질을 놓아도 oil의 신호 강도를 얻는데 아무 오차도 야기하지 않았다. Figure 6은 석회석 sample의 길이에 따른 세공도 profile을 나타낸다. 흡수 실험을 시작하기 전에, 석회석을 oil로 완전히 포화시킨 상태에서 13개의 profile image를 취하고, 이로부터 신호강도를 평균하여 초기 포화 profile을 얻는다. 세공도는 $S(z) = 1$ 인 초기 포화 profile을 사용하여 식 (12)로 계산되었다. Oil이 포화된 석회석 sample의 T_1 , T_2 의 값은 각각 0.446 sec와 6.5 msec로 측정되었다. 표준 물질에 해당하는 T_1 , T_2 값은 각각 0.398 sec와 7.1 msec이다. 실험에 사용된 반향시간은 9 msec이고, 이는 T_2 값과 유사한 값을 사용해

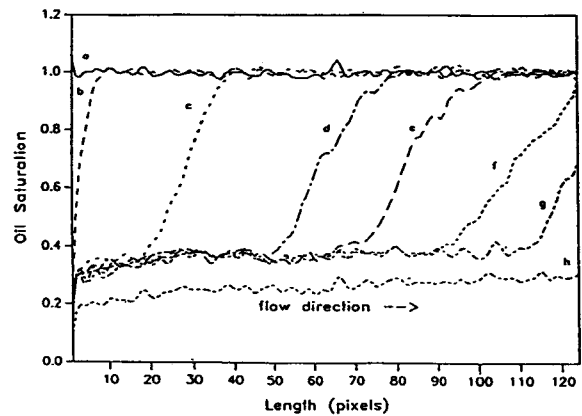


Figure 7. Oil saturation profiles for a limestone core. Profiles correspond to different times during the experiment: a) before the start of imbibition; b) start of imbibition; c) 2100 s; d) 4920 s; e) 6300 s; f) 9180 s; g) 11400 s; and h) steady state.

야 한다. 이 경우 특히 표준물질의 적절한 선택이 중요하는데, 만약 표준물질로 bulk 유체를 사용했다면 세공도 계산에 있어 25% 정도의 오차를 야기한다. 그림에서 보는 바와 같이, sample 우측부분에 세공도 분포가 다소 감소하지만, sample 전반에 걸쳐 균일함을 알 수 있다. 세공도 계산은 화소단위로 실시되었으며, 이렇게 계산된 세공도 분포는 석회석 세공도의 실제 국소적 분포를 반영하고 있다. 잡신호(noise)의 크기는 sample 신호 외부영역인 기선(baseline)을 해석하여 계산할 수 있으며, 그 잡신호(noise)와 신호(signal)의 비는 1:8이다. 따라서, 실험으로부터 얻은 신호 강도가 국소적 세공도를 충분히 반영하고 있음을 알 수 있다. 세공도 값의 정확도를 기하기 위하여 신호를 평균하여 계산하였고, 계산된 평균 세공도 값은 17.7 %이다. 이 값은 중량 분석법(gravimetric analysis)에 의해 얻어진 16.9% 값과 잘 일치한다. Figure 7은 석회석 sample의 초기 포화도, 흡수시간에 따른 포화도 profile 및 정상상태의 포화도를 보여주며, 포화도 계산은 식 (12)와 세공도 profile을 사용하였다. 각 흡수시간마다, 2.5 msec에서 50 msec 사이의 여러 반향시간을 사용하여 15개의 신호강도 profile들을 얻을 수 있고, 이 신호강도 profile들로부터 고유 자기화 강도(intrinsic intensity of magnetization)를 계산하였다. 각 신호강도 profile에 대한 영상시간은 펄스 순서 반복 시간 (TR; 연속적인 펄스 순서 사이의 시간), 반향시간들의 수와 각 반향시간에 대한 획득 수의 곱으로 주어진다. 이 실험에서, 지연시간은 2.1 sec였고, 15개의 반향시간이 사용되었으며, 각 반향시간마다 4개의 획득을 사용하였다. 따라서, 각 profile에 대한 전체 영상시간은 약 2 min이며, 이 시간동안 유체의 직선 움직임은 1 mm 이하이다. 초기 포화상태의 (a) oil이 D₂O에 의해 치환될 때 형성된 두 유체사이의 계면은 시간이 경과함에 따라 유체의 흐름 방향으로 움직이며 (b, c, d, e, f, g), 그 모습은 균일한 다공성 매체내 일차원 유체실험에서 두 유체사이의 계면이 움직이는 양상과 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

본 연구는 다공성 매체내 유체 실험을 수행할 때 NMR 신호강도의 기준으로서 agarose gel을 사용하였고, 그 표준 물질인 agarose gel의 제조 방법을 개발하였다. 1~15 wt %의 gel 농도와 0.001 M ~ 0.005 M의 CuSO₄ 농도에서 NMR 완화 시간이 측정되었으며,

이렇게 제조된 agarose gel은 영상 보정화(image calibration)를 위해 필요한 표준 물질로 사용될 수 있다. 여러 가지 유체실험을 할 때, gel 표준 물질을 사용하므로써 유체 포화도와 세공도를 결정하기 위해 필요했던 영상화 과정을 변경하지 않고, 펄스 순서의 매개 변수나 펄스 순서 자체를 바꿀 수 있도록 하였다.

감 사

본 논문은 1998년도 대구대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

사 용 기 호

- A : amplifier gain
- G : gradient strength
- g : correction factor
- h : Planck constant
- H_0 : static magnetic field strength
- I : observed signal intensity or spin quantum number
- I_0 : intrinsic signal intensity
- K : inhomogeneity factor
- k : Boltzmann constant
- k : constant of proportionality
- M : atomic mass
- M_0 : magnetization per unit volume
- M_{xy} : transverse magnetization
- N_A : Avogadro constant
- N_H^r : total number of hydrogen nuclei in reference
- N_H^s : total number of hydrogen nuclei in fluid sample
- n_H^r : number density of hydrogen nuclei in reference
- n_H^s : number density of hydrogen nuclei in fluid sample
- Q : quality factor of coil
- q : number of 1H nuclei per fluid molecule
- S : saturation
- t : time
- T : temperature
- T_1 : spin-lattice(longitudinal) relaxation time constant
- T_2 : spin-spin(transverse) relaxation time constant
- \bar{T}_1 : average T_1
- \bar{T}_2 : average T_2
- TE : echo time
- TR : pulse sequence repetition time
- V : volume
- V_s : sample volume

x,y,z : cartesian coordinates

상첨자

- r : reference phantom
- s : sample fluid

그리스 문자

- α : tip angle
- γ : proton gyromagnetic ratio
- Δ_1 : T_1 difference
- Δ_2 : T_2 difference
- η : coil filling factor
- μ_0 : permeability of free space
- ρ : mass density
- Φ : porosity
- ω, ω' : frequency
- ω_0 : Larmor frequency

참 고 문 헌

1. M. D. Mitchell, H. L. Kundel, L. Axel, and P. M. Joseph, *Magn. Reson. Imaging*, **4**, 263(1986).
2. P. R. Moran, R. Knispel, and F. N. Ranallo, "Preliminary Studies on Gel Formulations for NMR Tissue Equivalent Phantoms and Application in Medical NMR Imaging," *Univ. of Wisconsin Medical Physics Report #147* (1981).
3. K. A. Kraft, P. P. Fatourors, G. D. Clarke, and P. R. Kishore, *Magn. Reson. Med.*, **5**, 555(1987).
4. J. O. Christofferson, L. E. Olsson, and S. Sjoberg, *Acta Radiol.*, **32**, 426(1991).
5. D. I. Hoult, and R. E. Richards, *J. Magn. Res.*, **24**, 71(1976).
6. D. I. Hoult, and P. C. Lauterbur, *J. Magn. Res.*, **34**, 425 (1979).
7. S. Mandava, C. M. Edwards, and A. T. Watson, *AIChE J.*, **36**, 1680(1990).
8. P. D. Majors, J. L. Simth, F. S. Kovarik, and E. Fukushima, *J. Mag. Res.*, **89**, 470(1990).
9. J. J. Dechte, R. A. Komoroski, S. Ramaprasad, *J. Mag. Res.*, **93**, 142(1991).
10. J. M. Dereppe, C. Moreaux, and K. Shenker, *J. Mag. Res.*, **91**, 596 (1991).
11. A. K. Giagalas, A. Chidester Van Orden, F. Robertson, T. H. Mareci, and L. A. Lewis, *Nuclear Technol.*, **84**, 113(1989).