지구물리와 물리탐사 Geophysics and Geophysical Exploration
Vol. 18, No. 3, 2015, p. 143~153 http://dx.doi.org/10.7582/GGE.2015.18.3.143

ISSN 1229-1064 (Print)
ISSN 2384-051X (Online)

물리탐사 기법들의 화학공법 모니터링 적용성 분석

천세욱[1] · 박찬호[1,2] · 구본진[1] · 남명진[1*] · 손정술[2]

[1]세종대학교 에너지자원공학과
[2]한국지질자원연구원

An Analysis on Applicability of Geophysical Exploration Methods to Monitoring Polymer-flooding

Seiwook Cheon[1], Chanho Park[1,2], Bonjin Ku[1], Myung Jin Nam[1*], and Jeong-Sul Son[2]

[1]Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University
[2]Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 탄화수소 생산에서 화학공법은 폴리머 용액을 저류층에 주입함으로써 탄화수소의 생산량을 증대시키는 방법이다. 화학공법의 유용성을 파악하기 위해서는 저류층 내 폴리머 용액의 거동 양상을 모니터링하는 것이 매우 중요하다. 저류층 내 폴리머 용액과 유체 변화에 대한 모니터링의 가능성을 확인하기 위해, 저류층을 구성하고 있는 암석 및 유체의 종류, 포화도 등의 매개변수에 따른 탄성파 및 전기비저항 암석물리모델을 구성하고, 폴리머 주입에 따른 탄성파 및 EM 토모그래피의 반응을 계산하였다. 특히 전기비저항 암석물리모델 구성에서는 순수사암, 셰일질 사암, 사암셰일박리층 3가지의 서로 다른 저류층 암석을 고려하였다. 폴리머 용액의 농도는 가장 일반적으로 이용되는 2 wt%로 하고 담수를 이용한 경우와 염수를 이용한 경우로 나누어 분석하였다. 더 나아가, 화학공법에 대한 중성자검층 민감도 분석을 수행하였다. 이 논문에서 다루는 기법들은 탄화수소 저류층뿐만 아니라 지열 저류층 등의 모니터링에 있어서도 중요하게 적용될 것이다.

주요어: 모니터링, 지열 저류층, 탄화수소 저류층, 화학공법

Abstract: Polymer flooding for enhancing hydrocarbon production injects into a reservoir polymer solution that is viscous. It is very important to monitor the behavior pattern of the polymer solution in order to evaluate the effectiveness of polymer flooding. To monitor the distribution of polymer solution and thus fluid substitution within the reservoir, we first construct seismic and resistivity rock physics models (RPMs), which are functions of reservoir parameters such as rocks and type of fluid, fluid saturation. For the seismic and resistivity RPMs, responses of seismic and electromagnetic (EM) tomography are numerically simulated as polymer injection, using two dimensional (2D) staggered-grid finite difference elastic modeling and 2.5D finite element EM modeling algorithms, respectively. In constructing RPM for EM tomography, three different reservoir rocks are considered: clean-sand, dispersed shale-sand, and sand-shale lamination rocks. The polymer solution is assumed to have 2 wt% of polymer as normally generated, while water is freshwater or saltwater. Further, neutron logging is also considered to check its sensitivity to polymer flooding. The techniques discussed in the paper are important in monitoring not only hydrocarbon but also geothermal reservoirs.

Keywords: monitoring, geothermal reservoir, hydrocarbon reservoir, polymer flooding

Received: 10 August 2015; Final version Received: 21 August 2015;
Accepted: 26 August 2015
*Corresponding author
E-mail: nmj1203@gmail.com/nmj1203@sejong.ac.kr
Address: 209, Neungdong- ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea
ⓒ2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

일반적으로 알려져 있는 오일 회수 방법은 1차에서 3차까지 구분되며, 그 중 3차 회수증진(enhanced oil recovery; EOR)에서 액체 화학물질인 폴리머를 주입하여 잔류 오일의 회수를 증진시키는 방법인 화학공법은 수 공법(water flooding)에 사용되는 물의 점성을 높이는 수용성 폴리머를 첨가하는 방법이다. 이러한 폴리머 용액(polymer solution)을 저류층에 주입함으로써 다공성 저류층 오일 생산을 향상시키는 역할을 한다. 그렇기 때문에, 효과적인 EOR을 수행하기 위해서는 폴리머 용액의 거동 양상을 물리탐사를 통해 모니터링하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

생산 저류층 모니터링에 있어서, Carlos *et al.* (2008)은 생산 저류층 모델링을 진행함으로써 유체 주입 전과 주입 후의 투수율에 대한 탄성파 반응을 비교 분석하였다. Sharma *et al.* (2011)은 생산 저류층에 주입되는 폴리머의 물성과 오일이 생산되는 효율간의 상호 연관성을 분석하였고, 이에 따른 생산 저류층의 생산량을 높이기 위한 최적의 매개변수 등을 제시하였다.

Wang *et al.* (2013)은 생산 저류층의 유체거동에 따른 경제적인 영향을 고려하여 화학공법의 효율성을 평가하였다. 수 공법으로 오일을 회수하였을 때 물 생산비가 증가하고 이에 따른 오일의 생산량이 감소하게 되어 오일 회수 운영비 면에서 효과적이지 못한 반면, 화학공법을 적용하였을 때는 유동도 제어로 인한 거시적 체적접촉효율(macroscopic volumetric sweep efficiency)이 개선되어 오일 생산량이 증가하기 때문에 효율성이 높아진다는 것을 논의하였다.

앞서 언급한 연구들에서는 생산 저류층에 대한 암석물리모델을 고려하지 않아 특정 저류층에만 국한되어 적용된다는 한계점이 있었다. 그리하여, 본 연구에서는 화학공법 과정을 시뮬레이션에 저류층 암석물리모델을 적용하여 저류층 유체 변화에 따른 탐사방법 별 민감도를 파악할 수 있도록 하였다.

이 연구에서의 암석물리모델 구성에 있어 저류층은 순수 사암(clean sand)일 경우, 사암 내 셰일이 분산(dispersed shale)되어 분포할 경우, 사암-셰일 박리층(sand-shale lamination rocks)인 경우로 총 3가지 모두를 고려하였고, 각 저류층에서의 저류층 변수들은 석유공학 분야에서 혹은 일반적인 저류층에서 흔히 볼 수 있는 값의 범위를 고려하여 결정하였다. 폴리머 용액(polymer solution)에서 폴리머가 차지하는 질량은 일반적으로 폴리머 용액을 구성할 때 적용하는 것처럼 전체의 2%로 구성하였다. 총 질량 중 98%를 차지하는 물은 염수(salt water) 및 담수(fresh water) 두 가지를 모두 고려하였는데, 일반적으로 담수보다는 바닷물의 가격이 저렴하기 때문에 바닷물(염수)을 이용하는 경우가 많았으나, 염도에 의해 폴리머가 그 특성을 많이 잃게 되어 최근에는 담수를 이용하여 폴리머 용액을 구성하는 움직임도 커지고 있다. 또한, 폴리머 용액 주입에 의한 저류층의 유체 변화는 가장 이상적 상황인, 폴리머 용액의 프런트가 유지되면서 저류층 내에 부존하는 오일과 지층수를 밀어주어 오일 생산량이 증가하는 단순한 상황을 먼저 상정한 후, 전기비저항(Park *et al.*, 2014) 및 탄성파 암석물리모델(Park and Nam, 2014)을 구성하여 반응을 분석하였다. 단, 폴리머는 일반적으로 화학적 반응에 기초하는 것이 아니라, 물리적으로 물과 섞여 물의 점성을 높이기 때문에, 폴리머 용액의 부피 탄성률은 물과 동일한 값으로 하였다(폴리머 용액의 탄성률에 대한 정보에 대한 실험결과는 저자들의 알고 있는 범위에서는 없으며, 폴리머의 기작 특성을 고려했을 때 부피 탄성률에 큰 변화는 없을 것이란 것이 현재의 중론이지만 추후 이 값들에 개한 실험 분석도 필요하다고 판단됨). 또한, 실험변수를 단순화 한다는 견지에서 또 흔히 가정하는 것처럼 폴리머 용액을 구성하는 염수의 전기비저항은 지층수와 동일 값으로 결정하였다.

암석물리모델을 구성한 후 화학공법에 대한 민감도 파악을 위한 물리탐사 기법으로는 심부 유체 반응에 대해 민감도가 높을 것으로 예상되는 탄성파 토모그래피와 EM 토모그래피를 주로 고려하였다. 높은 진동수의 송신원을 이용하여 탐사 해상도가 상대적으로 높은 토모그래피에 비해서, 지표탐사의 경우 심부 저류층 내 폴리머 유체에 대한 민감도가 크지 않을 것으로 판단되어 논의에서 제외하고자 한다. 이는 폴리머 용액이 담수 혹은 염수의 점성만을 주로 높이기 때문에, 심부 저류층 내의 폴리머 용액 분포 변화에 따른 지표 탄성파 반응은 폴리머 용액과 지층수를 구분하기 힘들 것으로 판단되기 때문이다. 만약 탄성파 모델 구성에서 폴리머 용액의 점성까지 정확히 고려하고 탄성파 모델링에서 점성에 따른 탄성파의 진동수에 따른 감쇄 특성까지 고려할 수 있다면 지표 탐사에 대한 수치 분석도 의미 있는 결과를 도출할 수 있을지도 모르지만, 아직까지 공극 유체의 점성을 정확히 고려할 수 있는 시뮬레이션 기법은 개발되어 있지 않으므로 이 연구에서의 순수 탄성체에 대한 모델링에 국한하여 탄성파 토모그래피를 수행하고 지표 탄성파탐사에 대한 고려는 제외하였다.

한편, 이 연구에서 물리검층의 적용성 분석에 있어서는, 유체 내의 수소 분포를 파악할 수 있는 중성자검층 시뮬레이션(Ku and Nam, 2012)을 고려하였다. 음파검층과 전기비저항검층 및 전자유도(induction)검층의 경우 탄성파/EM 토모그래피와 동일한 탄성파 및 전기비저항 암석물리모델에 기초하므로 토모그래피 결과로부터 그 반응을 유추할 수 있기 때문에, 밀도검층(Ku *et al.*, 2012)의 경우 폴리머 용액의 농도가 무게백분율로 2%이므로 화학공법에 따른 밀도 변화에 대한 민감도는 최소일 것이므로, 음파검층, 전기지저항/전자유도검층 검층 및 밀도검층에 대한 시뮬레이션 분석은 제외하였다. 공극 유체 특성 변화에 가장 민감한 자기공명검층의 경우 수소를 포함하는 분자 종류에 따라 다른 반응을 나타내기 때문에 폴리머 분자 수소에 대한 파악이 가능하리라고 예상되지만 자기

공명검층 시뮬레이션(Jang and Nam, 2013)에서 폴리머 용액을 고려하는 것은 어려움이 있기 때문에논의에서 제외하였다.

이 논문에서는 일반적으로 관찰되는 저류층 변수 값들을 가지는 단순한 저류층 모델에 기초하여 저류층 암석물리모델을 구성하였다. 이 모델에 대한 탄성파 속도 및 전기비저항 변화와 토모그래피 반응뿐만 아니라 중성자검층에 대한 반응을 분석한다. 일반적으로 관찰되는 값에 기초한 저류층이 아닌 보다 현실적인 저류층에 대한 결과를 분석하기 위해서, 화학공법 저류층 시뮬레이션을 수행한 결과(Lee, 2010)를 이용하여 저류층 암석물리모델을 구성하고 이 모델에 대해 물리탐사 기법에 기초한 모니터링을 적용하여 민감도를 분석하였다.

화학공법에 따른 탐사 반응 분석

화학공법에서는 폴리머 용액의 농도를 질량 비율로 약 2 wt% 정도의 폴리머 용액을 주로 이용한다. 즉 주입수(injection water)의 질량은 98% 폴리머의 질량은 2%이며 이 연구에서도 동일한 값을 이용한다. 화학공법 적용 대상 저류층의 지층수(formation water)의 오일 포화도는 0.5인 경우를 상정하였고, 폴리머 용액은 담수와 염수에 기초할 때로 구분하였다. 염수일 때는 지층수의 전기비저항과 동일 하므로 염도를 모두 40000 ppm으로 하였다. 폴리머 용액의 주입으로 지층수와 오일의 포화도는 감소하게 되며, 이에 따른 반응 변화의 분석을 진행하였다. 이 때 공극 내 암석 표면에 유착되어 잔류하는 잔류수(residual water)의 포화도는 0.2로 하고 수포화도는 0.2 이하로 떨어지지 않도록 하였다. 또한, 저류층 모세관압으로 인한 오일의 잔류 포화도는 0.1라고 가정하였다(Table 1).

폴리머 용액 주입에 의한 결과 중 가장 이상적인 결과인, 폴리머 용액이 저류층 내에 부존하는 오일과 지층수를 밀어 주어 오일 생산량을 증가하는 상황(Fig. 1)에 대해서 석유 회수 증진을 위한 화학공법 시 폴리머 용액의 거동 변화에 따른 탄성파 및 EM 토모그래피의 민감성을 분석하였다.

시추공 간 토모그래피 모델 구성에 있어 송신공과 수신공은 Fig. 2와 같이 x축 방향으로 각각 0 m, 400 m 지점에 위치하며, z축(심도축) 방향으로 송신원은 50 m, 수신기는 1 ~ 3번까지 각각 25 m, 50 m, 75 m에 위치시켰다. 폴리머는 0 m부터 일정 비율로 100 m, 200 m, 300 m, 400 m로 확산하여 거동하는 경우에 대해서 분석하였다. 매질은 순수 사암 내 균질하게 셰일이 분포된 셰일질 사암(Shaly sand)으로써 단위 부피당 셰일이 차지하고 있는 부피비는 흔히 관찰되는 값인 0.12로 하였다.

Table 1. Changes of water saturation and oil saturation about variation of polymer solution saturation.

S_{ps}	0	0.4	0.5	0.6	0.7
S_w	0.5	0.3	0.25	0.2	0.2
S_o	0.5	0.3	0.25	0.2	0.1

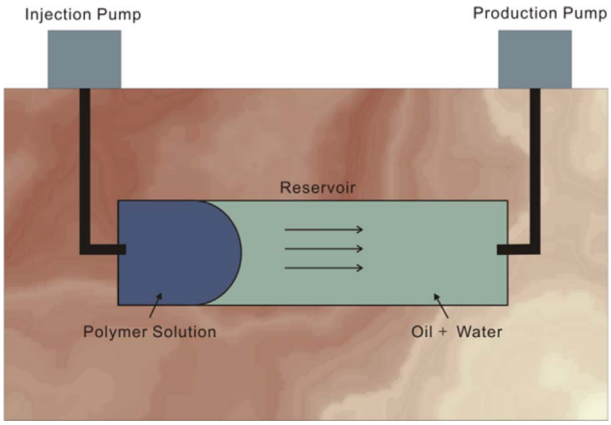


Fig. 1. Schematic diagram of polymer flooding.

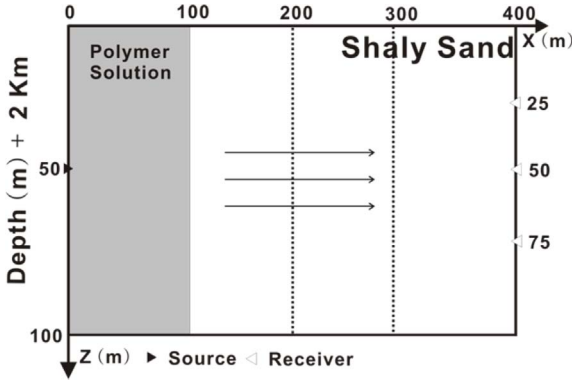


Fig. 2. A simplified model of a polymer flooding reservoir.

전기비저항 암석물리모델 변화 및 EM 토모그래피 반응 분석

1) 화학공법에 따른 전기비저항 변화

암석물리학적으로 저류층은 순수 사암(clean sand)으로 구성되어 있는 경우, 셰일질 사암에서는 분산 셰일질 사암(dispersed shale)과, 사암-셰일 박리층(laminated sand-shale)으로 구성되어 있는 경우로 구분하여 그 변화를 분석하였다. 순수 사암인 경우에는 전기비저항 암석물리모델 구성을 위해 Archie 식(Archie, 1942)을 이용하였으며, 셰일질 사암의 분산 셰일질 사암에서는 비교적 셰일질 사암의 전기비저항을 잘 반영한다는 Simandoux 모델(Simandoux, 1963)을 이용하였고, 사암-셰일 박리층에서는 Klein 모델(Klein *et al.*, 1997)을 이용하였다.

셰일질 사암에서는 일반적으로 볼 수 있는 저류층의 특징에 기초하여, 셰일의 부피비(V_{sh})가 0.12인 분산-셰일질 사암, 사암-셰일 박리층으로부터 암석물리학 모델을 적용하여 각각의 전기비저항 값을 계산하였다. 폴리머 용액의 포화도(S_{ps})는 0.4에서 0.7로 0.1씩 포화도가 증가하며, Archie식의 매개변수를 정함에 있어서도 일반적으로 가장 널리 이용되는 것처럼, 비틀

림 계수(a)는 1, 교결 지수(m)는 2, 포화 지수(n)는 2로 하였다. 셰일질 사암에서는 셰일의 함량이 증가함에 따라 비틀림 계수는 증가하고 교결 지수는 감소하겠지만, 그 차이가 작기 때문에 Archie식의 매개변수들은 순수 사암과 같게 하였다 (Park *et al*., 2014). 유효 공극률은 임계 공극률(약 36 ~ 40%)을 초과하지 않으면서 저류층에서 흔히 관찰되는 값인 25%로 하였다(Dvorkin and Nur, 2000). 지층수 전기비저항(R_w)은 생산 저류층에서 주로 측정되는 0.2 ohm-m, 셰일의 전기비저항(R_{sh})은 5 ohm-m로 하였다.

– 염수 이용 폴리머 용액

폴리머 용액이 지층수와 동일한 전기비저항을 갖는 경우, 지층수와 차이가 없기 때문에 총 수포화도는 폴리머 용액의 포화도와 지층수 포화도를 더하여 계산을 진행해도 무방하다. 폴리머 용액의 포화도 변화에 따라 저류층 전기비저항(R_t)의 변화를 순수 사암일 경우, 분산 셰일질 사암일 경우, 셰일-사암 박리층일 경우로 나누어 그래프에 도시하였다(Fig. 3).

폴리머 용액의 포화도는 0을 기준으로 0.4에서 0.1씩 0.7까지 증가함에 따라, 순수 사암 저류층인 경우 각각의 이전 포화도에 비해 48.98%, 55.55%, 60.94%, 69.14%로 변화하였으며, 분산 셰일질 사암의 저류층인 경우 각각 42.29%, 28.83%, 54.44% 63.13%로 변화하였고, 사암-셰일 박리층인 경우 각각 44.12%, 50.49%, 55.79%, 64.10%로 변화하였다. 이 경우에 대한 전기비저항 암석물리모델은 대체적으로 약 3 ~ 13 ohm-m 의 낮은 전기비저항을 가지는데, 이는 지층수의 전기비저항과 동일한 전기비저항을 가지는 염수 이용 폴리머 용액의 증가로 Archie 식에서 상대적으로 지층수의 포화도가 증가한 형태가 되기 때문이다.

– 담수 이용 폴리머 용액

폴리머 용액의 전기비저항이 지층수에 비해 매우 큰 경우, 수포화도 계산 시 폴리머 용액의 포화도를 뺀 지층수 포화도만을 이용하여 계산하여야 한다. 이에 따라 폴리머 용액의 포

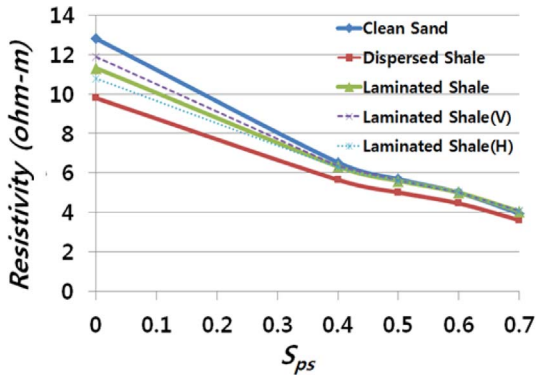


Fig. 3. Resistivities with respect to the saturation of polymer solution with salt water.

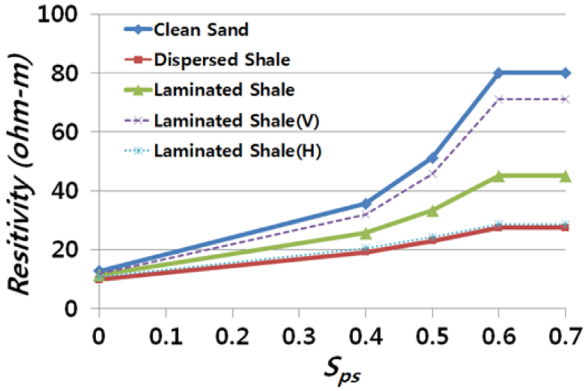


Fig. 4. Resistivities with respect to the saturation of polymer solution with fresh water.

화도 변화에 따른 저류층 전기비저항(R_t)의 변화를 순수 사암일 경우, 분산-셰일질 사암일 경우, 셰일-사암 박리층일 경우로 나누어 그래프로 도시하였다(Fig. 4). 폴리머 용액의 포화도는 0.4에서 0.1씩 0.7까지 증가함에 따라, 순수 사암 저류층인 전기비저항의 경우 각각의 이전 포화도에 비해 177.81%, 300%, 525%, 525%로 변화하였으며, 분산 셰일질 사암 저류층인 전기비저항의 경우 각각 95.91%, 134.63%, 179.88%, 179.88%로 변화하였고, 사암-셰일 박리층인 전기비저항의 경우 각각 126.17%, 194.34%, 298.23%, 298.23%로 변화하였다. 전기비저항이 큰 담수 폴리머 용액의 영향으로 전기비저항 암석물리모델들의 전기비저항 값은 최대 80 ohm-m 정도로 매우 높아졌으며, 이미 담수 이용 폴리머 용액의 증가는 Archie 식에서 지층수 포화도의 감소 형태로 나타나기 때문이다. 한편 셰일질 사암의 경우, 폴리머 용액과 무관한 셰일의 양과 전기비저항은 변화하기 않기 때문에 상대적으로 순수 사암층보다 전기비저항이 낮게 산출되었다. 또한, 폴리머 용액 포화도 0.6 ~ 0.7 영역에서는 지층수는 잔류수만이 남아있고 오일의 포화도만 변화하였기 때문에 전기비저항이 변하지 않았다.

2) 화학공법 전기비저항 암석물리모델에 대한 EM 토모그래피 반응 분석

EM 토모그래피 탐사에서는 Simandoux 모델(Simandoux, 1963)을 이용하여 셰일질 사암에서의 유체 변화에 따른 전기비저항을 계산하였고, 이를 기반으로 유한요소법에 기반한 2.5차원 모델링을 진행하였다. 송신 주파수는 1 kHz를 이용하였고, 단순 모델에서는 폴리머 용액이 100 m씩 이동하여 400 m까지 이동한 각 경우에 대한 반응을 분석하였다. 송신원의 위치는 x = 0 m, z = 50 m이고, 수신기는 3개로, 각각 x = 400 m, z = 25 m, 50 m, 75 m로 설정하였다. 폴리머 용액이 100 m 에서 400 m 까지 거동(migration)하였을 때, 폴리머 용액을 구성하는 물이 담수일 경우(Fig. 5(a))와 염수(Fig. 5(b))일 경우로 나누었고, 이에 대한 민감도를 이차 자기장의 허수 값으로 표현하였다. 폴리머 용액이 거동함에 따라 이차 자기장 값

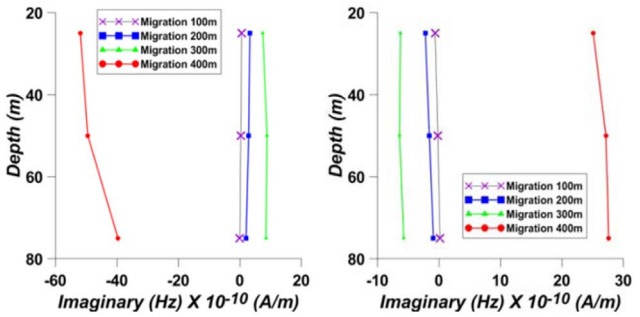


Fig. 5. Imaginary components of secondary magnetic field (imaginary, H_z) for (a) freshwater and (b) saltwater in a simplified model of clean sandstone reservoir (Fig. 2) for different migration distances.

이 변화하는 것을 볼 수 있다. 담수인 경우 100 m 거동한 이차 자기장 값부터 각각의 이전 이차자기장 값들에 대해 각각 평균 1661%, 223%, 677%, 염수일 경우 각각 평균 591%, 335%, 533% 변화하였다. 이에 따라 생산 저류층의 EM 토모그래피 모니터링의 가능성을 확인할 수 있었다.

화학공법에 따른 탄성파 암석물리모델 변화 및 탄성파반응 분석

1) 화학공법에 따른 탄성파 속도 변화

탄성파 분석 시, 저류층의 온도와 압력 그리고 오일의 비중 등은 속도에 큰 영향을 미치게 된다. 이 연구에서는 일반적인 석유 저류층에서 관찰되는 것처럼 온도를 섭씨 127도, 압력은 30 MPa 그리고 염수의 염도는 40,000 ppm로, 오일의 비중은 현장에서 주로 측정되는 API 지수가 20인 원유(Crude oil)로 하였다. 부피탄성률의 경우 염수와 폴리머 용액이 동일한 값이고 폴리머 용액의 폴리머 농도는 2 wt%이기 때문에 밀도는 1.02% 증가한다. 단, 탄성파 분석에서는 폴리머 용액이 담수와 염수인 경우 유체포화매질에서의 탄성파 속도가 약 2 m/s 차이로 미소하게 나타나기 때문에 굳이 구분하여 진행하지 않았으며 이에 따라 염수인 경우에 대한 결과만을 제시한다.

저류층은 순수 사암일 때와 셰일질 사암일 때 2가지 경우로 구분하여 탄성파 속도를 계산하였으며, Table 2에 이 연구에서 이용한 알갱이(grain)에 대한 탄성계수 및 밀도 정보를 나타내었다. 순수 사암일 때는 오직 사암을 오직 석영으로만 구성되고, 셰일질 사암일 때는 셰일(이 논문에서는 점토의 알갱이의 탄성계수를 이용하여 진행하였다)의 부피비를 0.12로 하여 연구를 진행하였다(Mavko *et al.*, 2009). 탄성파 모델 구성도는 알갱이의 탄성 매개변수들로부터 건조암석의 탄성 매개변수들을 산출한 뒤, Gassmann 방정식(Gassmann, 1951)을 이용하여 유체 변화에 따른 탄성파 속도를 계산하였다.

건조암석(dry rock)은 알갱이의 탄성계수(부피탄성률, 전단계수)로부터 Nur 식 (Nur *et al.*, 1998)을 이용함으로써 건조암석의 탄성계수를 산출하였다. 임계 공극률 모델이라 일컫는

Table 2. Elastic parameters of grain.

	Sandstone (quartz)	Shale (clay)
Bulk modulus	38	21
Shear modulus	44	7
Density	2.65	2.58

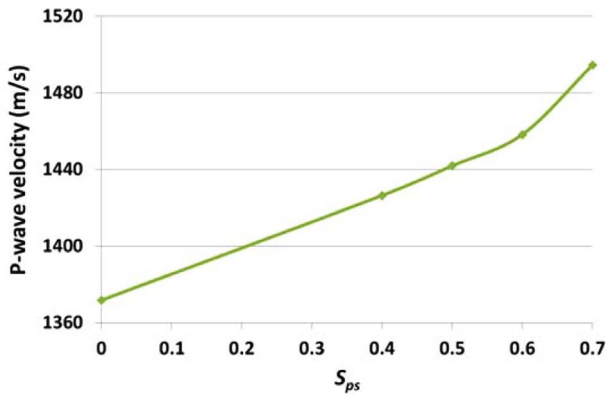


Fig. 6. P-wave velocities of fluid reservoir with respect to the polymer solution saturations.

Nur 식은 사암에서 상당히 잘 적용되고 수학적으로 간편한 방법으로써 공극률이 $0 < f < f_c$ 범위에 있을 시 적용 가능한 방법이다. 이 연구에서 공극률은 0.25로 설정하고, 임계 공극률의 정보는 Russell and Smith (2007) 문헌을 참고하여 압력 30 MPa일 때, f_c = 0.338의 값을 참고하였다. 이때, 건조암석의 전단계수는 유체에서 값이 0이므로 유체포화매질의 전단계수와 값이 동일하다. 유체의 부피탄성률은 Wood의 방정식을 이용하였으며, 유체와 알갱이 그리고 건조암석의 부피탄성률 값을 이용하여 Gassmann 방정식을 통해 유체포화매질의 부피탄성률을 계산하였다. 유체포화매질의 밀도 계산은 매질 및 유체의 포화도를 감안한 가중평균으로 계산하였다(Park and Nam (2014) 참조).

폴리머 용액의 포화도 변화에 따라 유체의 P파 속도 변화를 살펴본 결과, 오일이 생산(오일 포화도 줄어듦)되고 폴리머 용액의 포화도 0.4에서 0.1씩 0.7까지 증가함에 따라(포화도 0 기준으로) 유체의 P파 속도는 각각 3.98%, 5.11%, 6.30%, 8.95%로 증가하였다(Fig. 6). 유체의 P파 속도와 동일하게 순수 사암으로 구성된 유체포화매질의 P파 속도 변화를 살펴본 결과, 폴리머 용액의 포화도 0.4에서 0.1씩 0.7까지 증가함에 따라(포화도 0 기준으로) 유체포화매질의 P파 속도는 각각 0.47%, 0.61%, 0.76%, 1.09%가 증가하였다(Fig. 7(a)). 반면, S파 속도는 유체 포화도가 변하여도 전단계수는 일정하지만 밀도가 증가함에 따라 속도가 감소한다. S파 속도는 폴리머 용액의 포화도 0에 비해 0.7에서 0.31% 감소하였다(Fig. 7(b)).

셰일질 사암으로 구성된 유체포화매질의 P파 속도 변화를 살펴본 결과, 폴리머 용액의 포화도 0.4에서 0.1씩 0.7까지 증

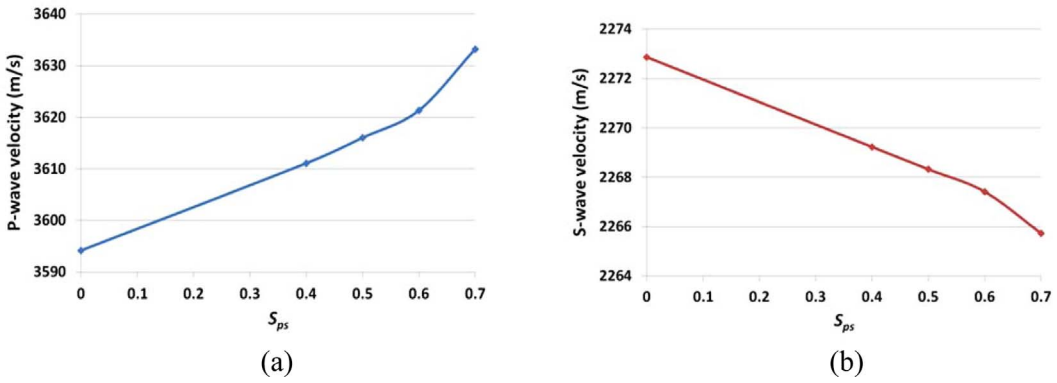


Fig. 7. (a) P- and (b) S-wave velocities of sand-stone reservoir with respect to the polymer solution saturations.

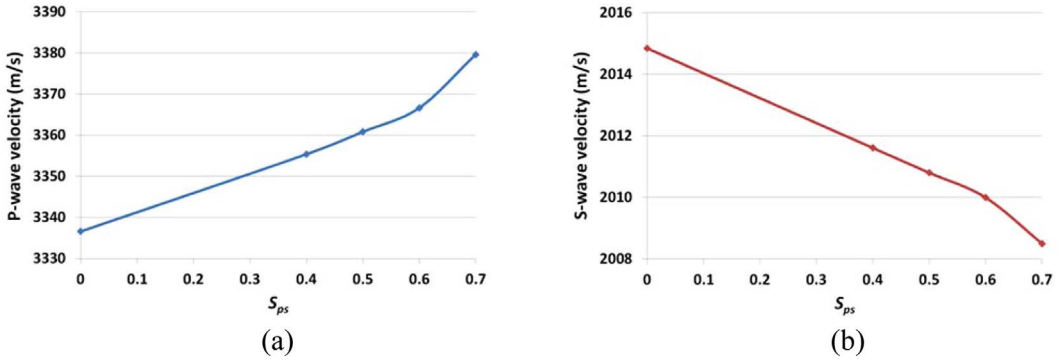


Fig. 8. (a) P- and (b) S-wave velocities of distributed-shaly-sand-stone reservoir with respect to the polymer solution saturations.

가함에 따라(포화도 0 기준으로) 유체포화매질의 P파 속도는 각각 0.56%, 0.73%, 0.90%, 1.29%가 증가하였다(Fig. 8(a)). S파 속도는 폴리머 용액의 포화도 0에 비해 0.7에서 0.32% 감소하였다(Fig. 8(b)). 결과적으로, 순수 사암일 때보다 셰일질 사암일 때 P파 속도는 (폴리머 용액 포화도 0.7 기준으로) 7.50%가 감소하였으며, S파 속도는 12.81%가 감소하였다.

2) 화학공법 탄성파 암석물리모델에 대한 탄성파 토모그래피 반응 분석

탄성파 토모그래피 탐사에서는 Gassmann 방정식(Gassmann, 1951)을 이용하여 유체 포화도 변화에 따른 속도 모델을 구성하고, 유한차분법에 기반한 시간-영역에서의 2차원 엇갈린 격자 유한 차분법 탄성파(2D staggered-grid finite difference elastic) 모델링(Nguyen *et al.*, 2014)을 진행함으로써 폴리머 용액의 분포에 따른 초동 주시를 중점적으로 분석하였다. 송신 주파수는 1 kHz의 고주파수를 이용하였으며, 파장 당 격자수는 최소 7개로 구성하였다.

수평 변위(horizontal displacement)를 분석해 본 결과 수신기 1 지점에서 폴리머 용액이 100 m일 때와 400 m를 거동하였을 때 초동 피킹을 한 결과 주시 차이는 약 1.15 ms로 나타

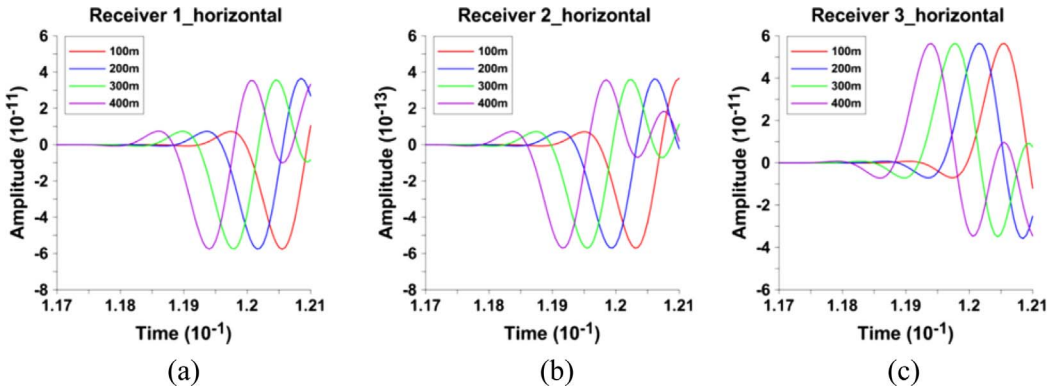


Fig. 9. Changes of the horizontal displacement in a simple model at (a) receiver 1, (b) receiver 2 and (c) receiver 3.

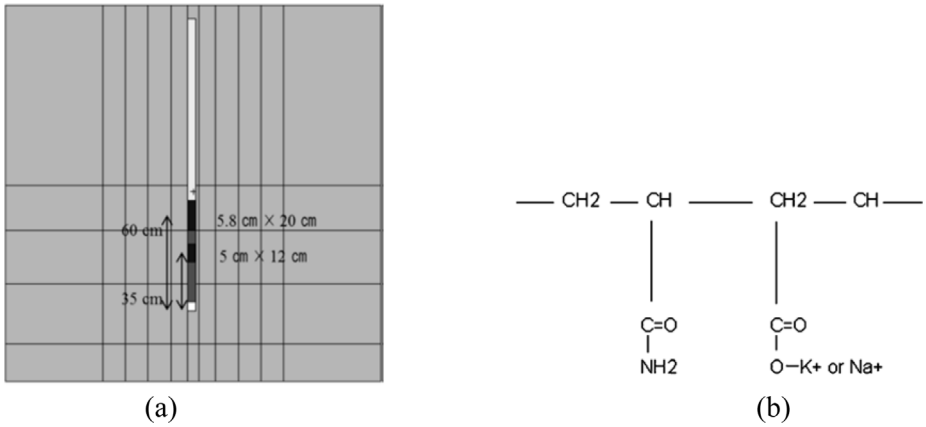


Fig. 10. (a) Model for neutron logging simulation and (b) the structure of HPAM (Sheng, 2010).

났다(Fig. 9(a)). 이 해당 주시 차이는 균질한 매질이므로, 수신기 3과 동일한 값을 보였으며(Fig. 9(c)), 수신기 2에서는 폴리머 용액이 100 m일 때와 400 m 거동하였을 때 약 1.1 ms로 나타났으며, 송수신기 사이에서의 각이 존재하지 않고 일직선상에 존재하기 때문에 초동 진폭은 수신기 위치가 다른 지점보다 상당히 낮은 것을 볼 수 있다(Fig. 9(b)).

중성자검층 암석물리모델 구성 및 반응 분석

중성자검층은 지층의 수소 원자 밀도를 통해 지층의 공극률을 측정하는 물리검층 방법이다(Ku *et al*., 2012). 중성자 검층기(Fig. 10(a)) 하부에 중성자 방사선원이 위치하고 여기서 방출된 고속 중성자는 지층을 통과해 방사선원에서 일정 거리에 위치한 검출기에 도달하게 되는데 이때, 검출기에서 지층을 통과함으로써 에너지를 잃은 열중성자 또는 감마선을 측정하게 된다. 고속 중성자의 에너지 손실은 원자의 질량에 의존하고 중성자의 질량은 수소의 질량과 가장 유사하기 때문에 중성자와 수소의 충돌 시 에너지 손실이 가장 크다. 따라서 지층 내 공극에 수소를 포함하는 물 또는 탄화수소 등이 포함되어 있으면 수소의 영향으로 검출기의 count rate는 감소하게 된다. 화학공법에서 사용되는 폴리머는 수소를 포함하는 고분자 물질이기 때문에 중성자검층에서 반응 변화를 보일 것으로 판단되어 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 알고리듬을 이용하여 중성자검층의 수치모델링을 통해 폴리머의 영향에 의한 반응변화를 알아보았다.

중성자검층의 수치모델링을 위해서는 저류층과 유체의 대한 정보들을 반영하여야 한다. 화학공법에서 사용하는 폴리머는 주로 수소와 탄소로 구성된 HPAM(Hydrolyzed Poly-Acrylamide)(Fig. 10(b))라 불리는 파우더 형태의 폴리머를 사용하며 밀도는 0.8 g/cm^{3}이고, 폴리머 용액에 폴리머는 질량비로 0.1%정도 포함되며 많을 경우 2%까지 포함된다.

폴리머를 염수와 혼합하여 폴리머 용액을 제작할 경우 밀도는 1.1 g/cm^3, 담수를 혼합하여 제작할 경우에도 기타 물질들이 포함되므로 폴리머 용액의 밀도는 1.05 ~ 1.1 g/cm^{3}가 된다. 탄화수소 저류층에서 원유는 탄소, 수소, 질소, 산소, 황, 기타 금속 물질 등을 포함하는 복잡한 화학구조를 가지고 있지만 각 화학물질들의 구성비 등은 각 저류층 마다 고유한 값을 가지므로 정확한 화학식을 구현하기에는 어려움이 존재한다.

원유에서 탄화수소는 주로 Alkanes(일반적인 화학식: C_nH_{2n+2})으로 구성되고, 경유(Light oil)는 탄소 원자를 5 ~ 10개정도 가지는 화학식을 가지고 있으며 밀도는 0.7 ~ 0.85 g/cm^{3}이다. 중성자검층 수치모델링을 위하여 octane(C_8H_{18})을 저류층 내의 탄화수소로 가정하였기 때문에 밀도는 0.708 g/cm^{3}로 하였다.

저류층은 사암(sand-stone)으로 30%의 공극률을 가지도록 하였고, 공극 내 유체가 100%로 포화되어 있다. 유체는 지층수, 오일(탄화수소), 폴리머 용액으로 구성하였다. 폴리머 용액을 주입하기 전의 저류층의 지층수와 오일의 포화도는 각각 0.5로 상정하였고, 폴리머 용액이 주입되면서 40 ~ 70%까지 변화하도록 하였으며 지층수와 오일의 포화도의 감소하도록 하였다.

중성자 검층기의 근거리 검출기와 원거리 검출기에서의 반응을 폴리머 용액의 포화도에 따른 열중성자속(thermal neutron flux)의 그래프로 도시하였다(Fig. 11). 염수를 넣은 폴리머 용액의 공극내 포화도가 0에서 40%까지 증가하였을 때 근거리 검출기에서 반응이 2%의 상대차이를 보였고, 같은 경우 담수를 넣었을 때는 1%의 상대차이를 보였다. 이는 검층 환경이나 자료획득 시 오차 등을 고려할 때 차이를 파악하기 힘들 것으로 판단된다. 또한 근거리 검출기보다 먼 거리를 이동하여 돌아온 반응을 측정하는 원거리 검출기에서는 반응변화를 보기 어려웠다. 폴리머 용액의 포화도의 변화에 따른 상대차이도 1% 이내로 거의 반응변화를 보기 어려웠다.

이전 수치모델링에서는 저류층 공극 내 공극수, 오일, 폴리머 용액이 모두 포함된 경우를 고려하였으나 근거리 검출기,

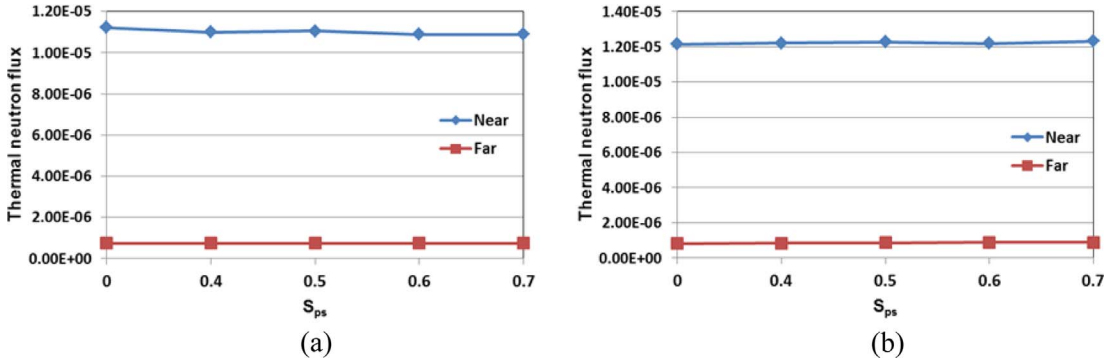


Fig. 11. Neutron logging for reservoir with respect to saturation of polymer solutions from (a) saltwater and (b) freshwater.

원거리 검출기 모두에서 반응변화를 보기 어려웠다. 이번에는 유체만 있다고 하여 유체에 따른 반응 변화를 좀 더 자세히 살펴보았다. 유체는 담수, 염수, 탄화수소(C_5H_{12}, C_8H_{18}), 염수와 혼합한 폴리머 용액(질량비; 1%, 1.5%, 2%)으로 하였다. 담수에서 염수로 유체를 변화시켰을 때 상대오차는 18%로 나타났으며, 이는 중성자 흡수체 역할을 하는 염수에 포함된 염소(Cl)의 영향으로 판단된다. 담수를 기준으로 하였을 때, 탄화수소(C_5H_{12}, C_8H_{18})와의 상대차이는 22%, 3%였고 폴리머 용액은 폴리머의 질량비(1%, 1.5%, 2%)에 상관없이 17%를 보였다. 염수를 기준으로 하였을 때, 탄화수소(C_5H_{12}, C_8H_{18})와의 상대오차는 49%, 19% 였으며, 폴리머 용액과는 1 ~ 2%의 상대차이를 보였다(Fig. 12).

담수를 기준으로 하였을 때 폴리머 용액과 17%의 반응차이를 보였으나, 염수를 기준으로 하였을 때, 1 ~ 2% 정도의 상대차이 밖에 나지 않았다. 이는 담수와 염수의 차이로 인한 영향이 더 크게 나타난 것을 알 수 있으며, 폴리머의 영향은 미미한 것으로 알 수 있다. 폴리머의 질량비는 1 ~ 2% 사이로 용액 내 함량의 워낙 적기 때문에 이렇게 반응 변화를 보기 힘든 것으로 판단된다. 또한, 담수와 염수, 탄화수소 등에 의한 반응 변화 역시 다르게 나타났으며 저류층을 고려할 때 모든 유체들의 영향이 복합적으로 발생하기 때문에, 폴리머의 영향은 중성자검층 반응에서 보기는 어려울 것으로 보여진다.

중성자검층 수치모델링을 통해 화학공법에서 폴리머의 모니터링에 대한 적용성 검토 연구를 수행하였다. 수소를 포함하는 폴리머, 탄화수소, 염수 등의 복합적인 영향으로 폴리머의 거동을 파악하기 어려웠으며, 중성자검층 시뮬레이션을 위한 모델 구성의 한계의 영향이 있을 수 있다고 판단하였다. 모델에서는 상온의 고체 폴리머의 밀도와 유체밀도를 따로 이용하여 모델의 물질을 구성을 하였으나, 용액상태와 차이가 있을 수 있으며 저류층 환경에서는 상온에서와 다르게 물질특성이 변화할 수 있는데, 이를 고려하지 못한 한계점이 있었다.

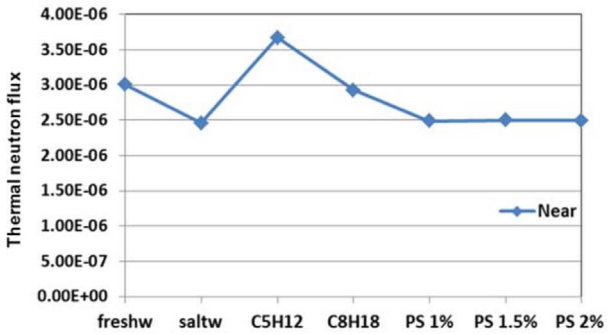


Fig. 12. Neutron logging for fluid including polymer solution.

화학공법 저류층 시뮬레이션 결과에 기초한 저류층 반응 분석

폴리머 주입에 따른 저류층의 변화를 보다 실제적인 견지에서 살펴보기 위해, 폴리머 주입에 대한 저류층 시뮬레이션 결과에 대해서 다루고 있는 Lee (2010)의 논문에 제시된 화학공법 결과(Fig. 13)에 기초하여 전기비저항 및 탄성파 암석물리 모델을 구성하고, 폴리머 주입에 따른 반응 변화 분석을 하고자 한다. 중성자검층은 폴리머 용액에 대한 반응 차이가 거의 없기 때문에 고려하지 않는다.

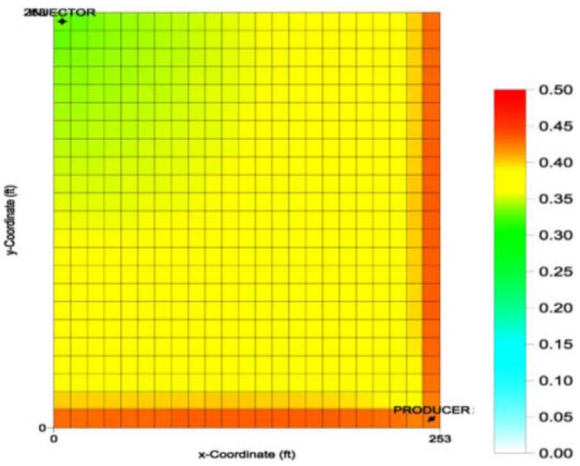


Fig. 13. Distribution of oil saturation by polymer flooding after simulation (Lee, 2010).

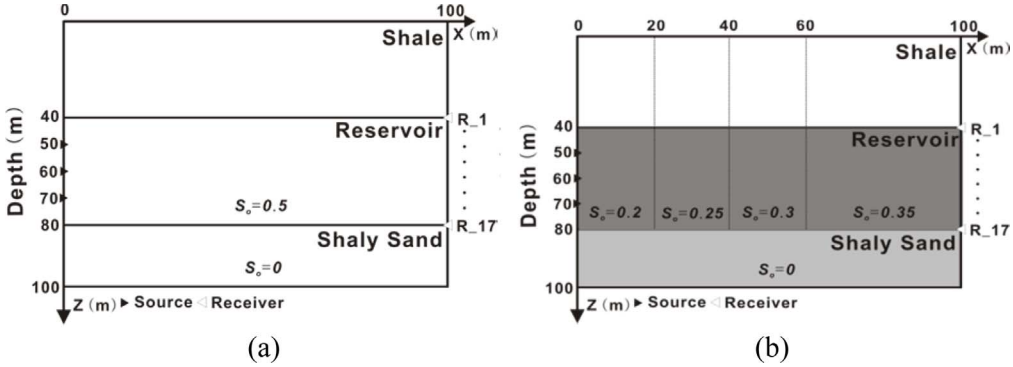


Fig. 14. A real simulation model for the behavior of the (a) before and (b) after injected polymer solution.

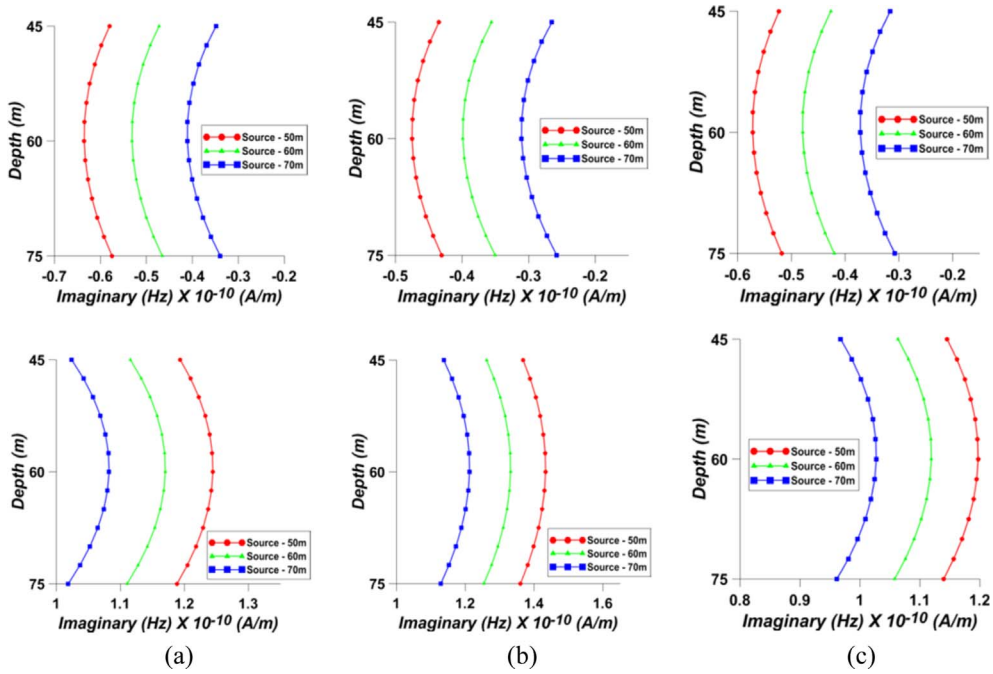
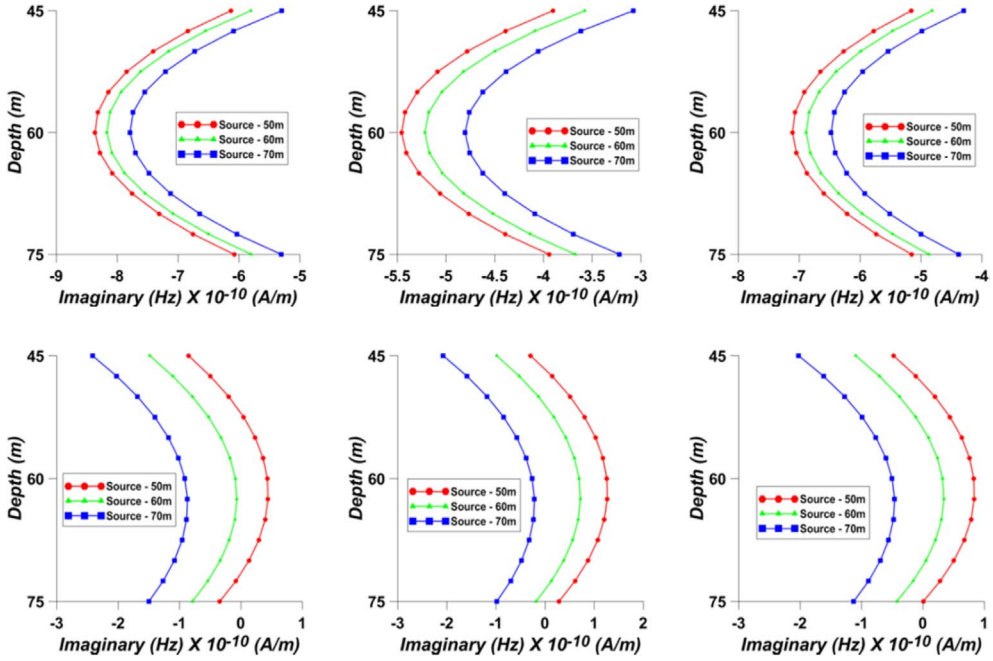


Fig. 15. Changes of the secondary magnetic field (imaginary, H_z) displacement for (a) clean sand, (b) dispersed shale, (c) laminated sand-shale in a real simulation model at 10 Hz (top panel – freshwater polymer solution, bottom panel – saltwater polymer solution).

저류층 시뮬레이션 모델에서 송신공과 수신공은 Fig. 14와 같이 x축 방향으로 각각 0 m, 100 m 지점에 위치하며, z축(심도축) 방향으로 송신원은 50 m, 60 m, 70 m 수신기는 40 m ~ 80 m 심도에 위치하고 있다고 하였다(단순모델에서와 달리 탄성파 토모그래피와 EM 토모그래피 수신기의 개수가 다름). 배경 매질은 3층 층서구조로 셰일층, 타겟 저류층, 순수 사암 내 균질하게 셰일이 분포된 셰일질 사암으로써 단위 부피 당 셰일이 차지하고 있는 부피비는 0.12로 상정하였다.

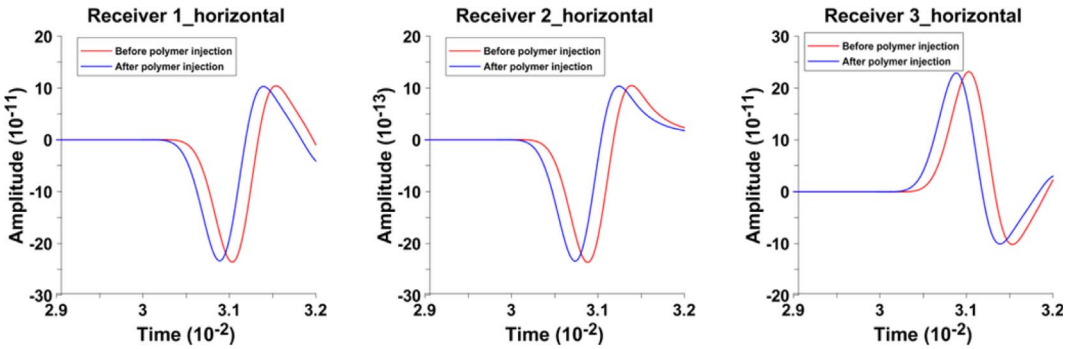
EM 토모그래피 탐사 시뮬레이션

실제 시뮬레이션 결과를 참고한 EM 토모그래피 탐사에서는 순수사암 및 분산 셰일질 사암, 사암-셰일 박리층 각각의 모델을 이용하여 유체 변화에 따른 전기비저항을 계산하였고, 이를 기반으로 유한요소법에 기반한 2.5차원 모델링을 진행하였다. 송신 주파수는 10 Hz (Fig. 15)와 1 kHz (Fig. 16)를 이용하였고, 화학공법이 끝난 후의 이차자기장의 허수 값을 측정하였다. 송신원의 3개의 위치는 각각 x = 0 m, z = 50 m, 60 m, 70 m이고, 수신기는 z방향 2.5 m 간격으로 x = 100 m, z = 40 m ~ 80 m로 설정하였다. 단순모델과 마찬가지로 폴리머 용액을 담수와 염수로 구분하였을 때 서로 반대방향의 변화를 보이는데, 이는 폴리머 용액의 전기비저항 때문에 야기된다. 또한 송신 주파수 1 kHz를 사용하였을 때, 가탐 심도(skin depth)가 가장 작기 때문에 값의 변화가 다른 송신 주파수 보다 큰 것을 볼 수 있다. 실제 저류층에서 화학공법 시, 폴리머 용액이 보고자하는 대상 저류층 방향으로만 주입되는 것이 아니라 저류층 전체에 주입되기 때문에, 그에 따른 반응을 고려하지



(a) (b) (c)

Fig. 16. Changes of the secondary magnetic field (imaginary, H_z) displacement for (a) clean sand, (b) dispersed shale, (c) laminated sand-shale in a real simulation model at 1 kHz (top panel – freshwater polymer solution, bottom panel – saltwater polymer solution).



(a) (b) (c)

Fig. 17. Changes of the horizontal displacement of (a) receiver 1, (b) receiver 2 and (c) receiver 3 in a real simulation model.

못한 한계점이 있다.

탄성파 토모그래피 탐사 시뮬레이션

탄성파 토모그래피 탐사 시뮬레이션을 위한 모델은 송신원 위치(x = 0 m, z = 60 m)이며, 수신기 1부터 3까지 각각 x = 100 m, z = 50, 60, 70 m로 설정하였다. 송신 주파수는 1 kHz의 고주파수를 이용하였으며, 파장 당 격자 수는 최소 16개로 송수신간의 거리가 짧기 때문에 이전 단순 모델보다 격자를 더욱 더 조밀하게 나누어 분석해보았다. 이 모델에서는 송수신간 거리가 100 m이기 때문에 폴리머 용액의 거동에 따른 관측 시간의 차이가 줄어들었으며, 수평 변위(horizontal displacement)를 분석해 본 결과 수신기 1 지점에서 폴리머 용액이 주입 전과 주입이 끝났을 때를 비교하였을 때 초동 피킹을 한 결과 주시 차이는 약 0.11 ms로 나타났다(Fig. 17(a)). 이 해당 주시 차이는 관심 구역이 균질한 매질이므로, 초동 주시는 수신기 3과 동일한 값을 보였으며(Fig. 17(c)), 수신기 2에서는 폴리머 용액 주입 전과 주입이 끝났을 때를 비교하였을 때, 약 0.15 ms로 나타났다(Fig. 17(b)).

결 론

본 논문에서는 암석물리모델을 통한 화학공법으로 변화하는 저류층 유체에 대해 중성자검층, 탄성파 그리고 전기비저항 탐사 등에 기초하여 폴리머 용액의 거동 파악 가능성을 분석하

였다. 또한, 저류층의 탄성파 속도 변화 및 전기비저항의 변화 등에 대해 분석한 뒤, 중성자검층과 탄성파/EM 토모그래피 등의 반응을 분석하였다. 저류층 암석물리모델의 경우 총 세가지로, 순수 사암이었을 경우, 사암 내 셰일이 분포한 경우, 사암-셰일 박리층으로 나누어 연구를 진행하였는데 세 가지 암석물리모델 모두 확연히 다른 결과를 얻을 수 있었다. 단, 암석물리모델 구성에서는 상온의 고체 폴리머의 밀도와 유체밀도를 따로 이용하여 모델의 물질을 구성을 하였으나 용액상태와 차이가 있을 수 있으며, 저류층 환경에서는 상온에서와 다르게 물질특성이 변화 할 수 있는데 이를 고려하지 못한 한계점이 있었다. 연구 결과 탄성파 및 EM 토모그래피의 경우 화학공법을 통한 결과를 잘 반영하는 것을 볼 수 있었다. 저류층 내 수소(Hydrogen) 원자 수에 영향을 받는 중성자검층의 경우, 지층수와 탄화수소 그리고 폴리머 모두 수소를 비슷하게 포함하고 있기 때문에 폴리머의 거동을 파악하기 어려웠다.

한편, 음파검층과 전기비저항 혹은 유도검층의 경우, 탄성파와 전기비저항 암석물리모델의 변화를 고려할 때 탄성파 토모그래피와 EM토모그래피와 비슷한 결과를 유추할 수 있지만, 밀도검층의 경우 폴리머 용액의 농도가 무게 백분율로 2%이므로, 화학공법에 따른 밀도 변화에 대한 민감도는 최소일 것으로 판단된다. 물리검층 기법 중 최근 그 적용성이 확대되고 있는 자기공명검층의 경우, 수소의 특성을 파악할 수 있고 특히 수소를 포함하고 분자 종류에 따라 반응이 다르게 나타나므로 폴리머 분자 수소에 대한 파악이 가능하므로 폴리머의 분포 양상을 직접적으로 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20133030000220)을 받아 수행한 연구 논문입니다.

References

Archie, G. E., 1942, The Electrical Resistivity Log as and Aid in Determining some Reservoir Characteristics, *Trans. AIME*, **146**, pp. 54-62.

Carlos, C., Fredy, A., Wilson, F., and Vladimir A., 2008, Time-lapse seismic modeling assisted by numerical reservoir simulation of water and gas flooding scenarios in oil reservoirs, *Sociedade Brasileira de Geofisica*, **26**(2), 195-209.

Dvorkin, J., and Nur, A., 2000, Critical Porosity Models, *Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, CA* 94305-2215.

Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poroser medien, *Veirteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, No. 96, pp. 1-23.

Jang, J. H., and Nam, M. J., 2013, A Review on Nuclear Magnetic Resonance Logging: Simulation Schemes, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **16**(2), 97-105.

Klein, J. D., Martin, P. R., and Allen, D. F., 1997, The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs, *The Log Analyst*, May-June.

Ku, B. J., and Nam, M. J., 2012, A study on slim-hole neutron logging based on numerical simulation, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*., **15**(4), 219-226.

Ku, B. J., Nam, M. J., and Hwang, S. H., 2012, A study on slim-hole density logging based on numerical simulation, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*., **15**(4), 227-234.

Lee, K. S., 2010, Comparison of Reservoir Performances for Chemical Enhanced Oil Recovery, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **47**(3), 291-299.

Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J., 2009, *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*, 2rd ED., Cambridge University Press, USA, pp. 1-503.

Nur, A., Mavko, G., Dvorkin, J., and Gal, D., 1998, Critical porosity: A Key to Relating Physical Properties to Porosity in Rocks, *The Leading Edge*, **17**, pp. 357-362.

Phung K. T. Nguyen, Myung Jin Nam, and Seungpil Jung, 2014, A preliminary study on sensitivity of seismic responses to changes in reservoir parameters using various RPM-constructing strategies, *Geosystem Engineering,* **17**, Issue. 4, 207-218

Park, C. H., and Nam, M. J., 2014, A Review on Constructing Seismic Rock Physics Models Based on Gassmann's Equation for Reservoir Fluid Substition, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **51**(3), 448-467.

Park, C. H., Cheon, S. W., Ku, B. J., and Nam, M. J., 2014, A Review and Analysis on Constructing Electrical Resistivity Models for Hydrocarbon Reservoirs Based on the Characteristics of Shale Distribution, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **51**(1), 97-115.

Russell, B. H., and Smith, T., 2007, The relationship between dry rock bulk modulus and porosity – An empirical study, *CREWES Research Report*, **4**(4), 143-147.

Sharma, M., Taware, S., and Datta-Gupta, A., 2011, Optimizing Polymerflood via Rate Control, paper SPE 144833 presented at *the SPE Enhanced Oil Recovery Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, July 19-21.

Simandoux, P., 1963, Dielectric Measurements on Porous Media: Application to Measurement of Water Saturation: Study of the Behavior of Argillacious Formation, *SPWLA, Houston*, pp. 97-124.

Wang, Y., Pang, Y., Shao, Z., Han, P., Li, R., Cao, R., and He, X., 2013, The Polymer Flooding Technique Applied at High Water Cut Stage in Daqing Oilfield, *paper SPE 164595 presented at the North Africa Technical Conference & Exhibition*, Cairo, Egypt, April 15-17.