

시간경과 탄성과 저류층 모니터링 개론

남명진^{1,2} · 김원식^{3*}

¹세종대학교 에너지자원공학과

²세종대학교 그린에너지연구소

³한국지질자원연구원 석유해저연구본부

An Introduction to Time-lapse Seismic Reservoir Monitoring

Myung Jin Nam^{1,2} and Wonsik Kim^{3*}

¹Sejong University, Department of Energy and Mineral Resources Engineering

²Sejong University, Green Energy Research Institute (GERI)

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Petroleum and Marine Research Division

요 약: 시간경과(time-lapse) 탄성과 저류층 모니터링은 생산 저류층에서 유체 흐름의 변화를 영상화 하기 위해, 동일한 탐사 지역에서 시간 차를 두고 탄성과 탐사를 여러 번 수행하여 자료를 획득, 처리, 분석하는 과정으로 요약할 수 있다. 생산 중인 광구에서는 가스 및 오일을 생산하면서 저류층 내 유체의 변화를 모니터링하여, 가채 자원량 및 생산에 필요한 변수 값의 변화를 확인하는 필수도구로 사용된다. 또한 특정 생산정의 최적 회수율 평가, 회수율을 증대시키기 위한 생산기법, 그리고 이를 위한 변수 선정에도 적용될 수 있다. 최근에는 이산화탄소(CO₂) 지중저장에도 모니터링 기법을 적용하여 저장된 이산화탄소의 변화 양상을 분석하는 사례가 보고되고 있다. 국내 업체들이 최근 외국 사이트에서의 석유 광구 지분 참여 등 투자를 늘리고 있는 상황에서 정확한 투자 가능성 진단과 기술 자체의 고부가가치를 생각할 때, 시간 경과 탄성과 저류층 모니터링은 향후 그 중요성이 더욱 증대될 연구 분야이다. 이 논문에서는 시간경과 탄성과 저류층 모니터링에 대한 이해를 돕기 위해 시간경과 탄성과 탐사의 개념, 설계, 방법, 자료처리 해석 등에 대하여 간략히 소개한다.

주요어: 감지가능성, 모니터링, 시간경과, 탄성파, 저류층

Abstract: Time-lapse seismic surveys make repeated seismic surveys at different stages of oil production of a hydrocarbon reservoir to monitor changes in reservoir like fluid saturation. Since the repeatable surface seismic measurements can identify fluid types and map fluid saturations, oil and gas companies can make much more informed decision during not only production but also drilling and development. If time-lapse seismic surveys compare 3D seismic surveys, the time-lapse surveys are widely called as 4D seismic. A meaningful time-lapse interpretation is based on the repeatability of seismic surveys, which mainly depends on improved positioning and reduced noise (if surveys were designed properly through a feasibility study). The time-lapse interpretation can help oil and gas companies to maximize oil and gas recovery. This paper discusses about time-lapse seismic surveys mainly focused on feasibility, repeatability, data processing and interpretation.

Keywords: feasibility, monitoring, reservoir, seismic, time-lapse

서 론

시간경과 탄성과 분석은, 석유 저류층에서의 탄성과 탐사 반응(seismic response)의 변화가 오일과 가스 생산에 의해서만 기인한다면, 탄성과 탐사 반응의 변화를 분석하여 저류층 내

유체의 흐름(fluid movement)의 변화를 감지할 수 있다는 원리에 기초하고 있으며, 이를 통해 생산 최적화를 위한 전략에 필요한 정보를 제공하는데 그 목적이 있다. 그러므로 탄성과 저류층 모니터링은 저류층에서 원유 또는 천연가스 생산 시 변화하는 유체의 흐름 또는 유체의 부존 양상의 영상화에 일차적인 목표가 있다.

시간경과 탄성과 탐사(시간경과 3차원 탄성과 탐사를 흔히 4차원 탄성과 탐사(4D seismic survey)라 한다)에서는 일반적으로 저류층의 지질구조는 불변이라고 가정하여, 생산에 따른 변화는 저류층 유체의 포화도, 압력 및 온도 등 저류층 변수들만 변화 한다고 가정한다. 탄성과 탐사에서 탄성과 신호(반

2011년 6월 14일 접수; 2011년 7월 5일 수정; 2011년 8월 17일 채택
*Corresponding author

E-mail: hyojin@kigam.re.kr

Address: Petroleum and Marine Research Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

사 신호 등)는 탄성과 샘(source)의 파형(wavelet)과 반사 경계면의 반사계수와의 곱말기(convolution)되어 기록된다고 할 수 있다. 반사계수 즉 반사면의 특성은 암석과 공극 내 유체 특성이 결합(coupling)되어 결정되므로 암석과 유체 특성 각각이 탄성과 반사특성에 미치는 영향을 한 번의 탐사로 분석하는 것은 어렵다. 그러므로 시간경과 탄성과 탐사에서는 두 개 이상의 탄성과 탐사에서 획득한 자료를 비교하여 시간에 따라 변하지 않는 지질적 구조에 의한 반사특성을 제거한 후, 시간에 따라 변하는 유체의 부존양상에 대한 특성을 도출하여 영상화 한다. 즉, 생산 등의 과정에서 저류층 유체의 포화도나 압력 등이 변화하면 저류층의 탄성 계수가 변화하게 되어 탄성과 반사 특성의 변화를 초래하기 때문에, 탄성과 탐사 반응이 바뀌게 되고 이 변화를 분석함으로써 저류층의 변화를 분석할 수 있다.

시간경과 탐사는 함축적으로 탄성과자료 취득 및 처리가 최소한 관심 영역 내에서는 “반복 가능(repeatable)하다”는 가정에서 출발하며, 실제로 오직 이 경우에만 탄성과 반응의 변화가 의미를 지닌다(Vesnaver et al., 2003). 즉, 여기서 “반복 가능하다”라는 의미는 시간차이를 두고 실시한 탄성과탐사를 통하여 생산 및 주입에 의한 저류층의 물성변화를 감지할 수 있어야 한다는 것(감지가능성; feasibility), 탐사자료 취득을 최대한 동일한 배열 및 변수에 의해서 할 수 있어야 한다는 것, 그리고 같은 자료처리 알고리즘 및 변수에 의해 처리할 수 있어야 한다는 것을 의미한다.

반복 가능한 탐사를 수행했을 때만 시간경과 탐사라고 할 수 있겠으나, 실제로 반복 가능한 탐사의 수행은 다음과 같은 이유로 무척 어렵다(Vesnaver et al., 2003).

1) 해상 탄성과 탐사의 경우 이전의 탐사 배열 정보(survey geometry)를 똑같이 반복하여 탐사를 하는 것은 매우 어려우므로, 파동방정식을 완전히 충족시킬 수 있는 정밀한 보간(interpolation) 알고리즘이 필요하다. 2) 정밀한 보간 알고리즘이 있다고 하더라도 적절한 입력자료를 얻기 위해서 아주 정밀한 항측 자료 또는 지형 탐사(topographic survey)가 필요하며, 샘과 수신기의 결합(coupling)과 배열 방향(directionality)에 의해 발생 가능한 변화들을 보정해줘야 한다. 4차원 탐사에 대한 고려 없이 수행한 기존의 자료를 이용할 경우(이를 이전 탐사자료(legacy data)라고 함), 현재의(시간경과 탐사를 고려하여) 신 기술로 얻은 자료 간에 샘과 수신기의 결합(coupling)과 배열 방향(directionality)이 변한다. 특히 동일한 지점에서 자료를 얻기 위해 영구적인 장비를 설치하는 방법을 고려할 수 있는데, 이 경우는 어렵행위 또는 호기심을 가진 사람들에 의한 장비의 훼손, 영구 수신기의 기능 저하, 해저면 또는 지표와의 접촉 문제와 장비의 효율성이 장시간이 흐른 후에는 나빠질 수 있다는 어려움이 있다. 3) 특히 생산정(well)에서 가스가 덮은 층(overburden)으로 침투(leakage)하는 현상이나 침하(subsidence) 작용 등으로 시간영역에서 탄성과 반응이 변할

수도 있다. 4) 어떤 경우는 시간경과에 따른 신호의 변화가 잡음수준보다 낮을 경우도 있다.

시간경과 탐사 수행의 어려움에 대해서 자료처리에 있어서도 다음과 같은 어려움이 있다. 다른 연도에 취득된 자료에 대하여 같은 자료처리 기법들을 적용하여야 한다; 자료처리 알고리즘들은 시간이 흐르면서 개선(evolve)될 수 있기 때문에, 즉, 같은 곱풀기(deconvolution) 변수를 사용하더라도 알고리즘의 단순화나 코드의 속도 향상 등을 위한 개선이나 오류(bug) 수정 등이 추가 될 수 있기 때문에, 최신 알고리즘에서는 이전 버전과는 약간 다른 결과를 제공할 수도 있다. 그러므로 가능한 모든 연도의 자료까지 동일한 방법으로 다시 자료처리하는 것이 가장 좋은 방법이라고 할 수 있다.

시간경과 탄성과 탐사 시에는, 저류층 생산에 따라 변화하는 저류층 물성 값을 정량적으로 도출해야 하기 때문에 앞서 언급한 어려운 점들을 극복하기 위해 많은 경비와 높은 기술력이 필요하다. 그러므로 기본 계획부터 자료처리에 필요한 세부 사항까지 세밀한 계획이 필요하며, 취득, 처리, 해석이 순차적으로 이루어지는 것이 아니라 필요한 경우 언제든지 서로 상호 보완적으로 이루어져야 한다.

시간경과 탐사의 단계를 크게 구분하면 첫째 감지가능성 분석, 탐사설계 및 자료획득, 자료처리, 해석 및 분석으로 분류할 수 있다(Fig. 1). 이 논문에서는 시간경과 3차원 탐사의 큰 단계별로 개략적 개념 및 요구되는 사항을 정리하고자 한다. 특히, 이 논문에서는 해상 탄성과 탐사에 초점을 두어 설명하고자 하며, 시간 경과 3차원 뿐만 아니라 시간경과 2차원 탐사 수행 시에도 적용되는 경우가 많기 때문에, 4차원 탐사라는 용어보다는 시간경과 탄성과 탐사라는 용어를 선호하여 이용하였다.

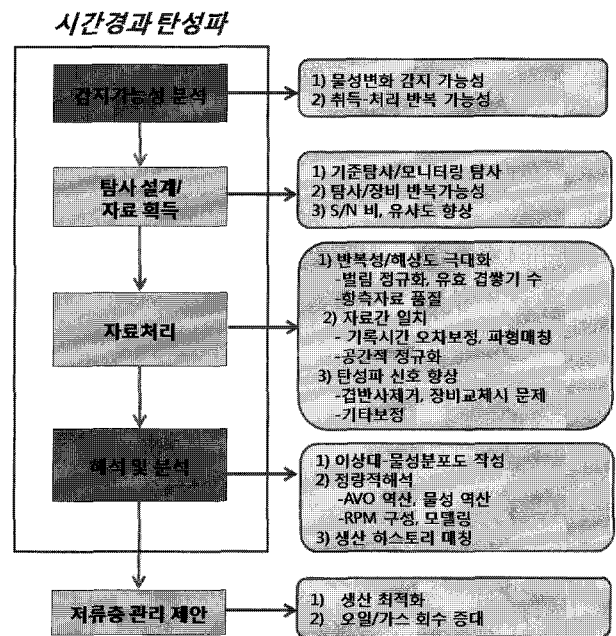


Fig. 1. A flow chart of time-lapse seismic.

이 논문에 나열할 각 단계의 필수항목 및 기법들은 지금까지 발표된 연구 및 사례들 중에서 대표적인 것을 요약 정리한 것이다. 이 논문에서 다루지 않더라도 기타 기본적인 취득/처리/해석 기법들은 대상 저류층 및 자료의 특성에 맞게 추가되어야 할 것이다. 특히 4차원 자료 처리 이전에 전통적으로 해 오던 기초적이고 기본적인 자료처리 과정을 고려할 필요가 있다. 또한, 시간경과 탄성과 탐사에 대해 앞서 언급한 4 단계는 순차적으로만 적용되는 것이 아니라, 서로 상호 연관되어 각 단계의 연구결과가 다른 단계에서의 변수 설정에 이용되게 된다. 이 논문에서는 가급적 한국지구물리·물리탐사 학회에서 용어 통일을 위해 수정하고 있는 물리탐사용어사전 최신판의 한글 용어를 이용하였다.

감지가능성(feasibility) 분석

성공적인 시간경과 3차원 탄성과 탐사(4차원 탄성과 탐사)의 목적은 생산 저류층의 특성(reservoir characteristics) 정보를 보다 정확히 얻음으로써, 추가 생산정과 주입정에 가장 효율적으로 설계하여 생산량은 늘리고 비용은 절감하는 데 있다고 할 수 있다. 감지가능성(feasibility) 연구란 생산 저류층 내 유체 변화로 야기되는 탄성 계수의 변화를 정해진 탄성과 탐사 설계 변수로 탐사했을 때 시간경과 탄성과 신호의 형태로 탐지할 수 있는지 즉, 서로 다른 3차원 탄성과 신호 차이의 강도가 잡음 수준 이상인지 확인하고, 더 나아가 가장 이상적인 시간 경과 탄성과 반응을 예측하여 이러한 반응을 얻을 수 있도록 탐사 변수를 설계하는 것이다.

시간경과 탄성과 반응 분석은 기준 탐사(baseline survey)와 모니터 탐사(monitor survey) 자료 사이의 차이를 분석한다는 것을 의미한다; 시간경과 탄성과 탐사를 계획하고 수행하는 첫 탐사가 기준 탐사(baseline survey)이며 일정 시간 생산 후 즉 시간경과 후 수행하는 탐사가 모니터 탐사(monitor survey)이다. 만약 시간경과 탐사를 계획하기 전에 수행한 탐사 자료가 시간경과 탐사 자료 해석에 포함될 경우 이 초기의 탐사를 이전 탐사(legacy survey)라 한다.

물-오일 저류층에서 유체 유동을 모니터링하기 위한 시간경과 탄성과 탐사의 경우는 가스-물 저류층에 비하여 상대적으로 작은 임피던스 차이를 보이므로 시간경과 변화량 차이를 분석하기가 용이하지 않다. 이 경우 성공적인 시간경과 탄성과 탐사를 위해서는 4차원 탐사 시, 사전에 감지가능성에 대한 고찰 및 모델링 연구, 상황에 맞는 특정한 자료획득 기술의 적용 및 시간경과 자료처리 알고리즘 및 해석 전략 작성 등을 사전에 수행하는 것이 필수적이다. 특히, 성공확률이 매우 낮은 프로젝트의 경우에는 4차원 탄성과 자료를 획득하기 전에 감지가능성 분석을 면밀하게 하여야 한다.

감지가능성 연구 과정에 대해 간략히 요약하면 먼저 기존의 탄성과 자료, 검층 자료, 탄성과 속성(attribute) 분석 자료 등 접근 가능한 모든 자료를 이용하여 저류층에 대한 암석 물리

모델(rock physics model; RPM)을 구성한 뒤, 기준 탐사 설계 변수를 고려하여 이 RPM에 대해 탄성과 반응을 모델링함으로써 기준 탐사 자료를 만드는 것이다. 다음으로 모니터 탐사를 위한 모델을 구성하게 되는데, 이 과정은 기준 탐사에 대한 RPM에서 저류층의 변수가 생산에 따라 변하는 것을 반영하여 새로운 RPM으로 업데이트하는 것이다. 이와 같이 RPM을 구성하고 나면 이 RPM에 대해 탄성과 반응을 계산함으로써 모니터 탐사 자료를 획득한다. 기준 탐사와 모니터 탐사 자료에서 시간경과 탄성과 반응을 추출하여 분석하면 설정된 모델의 불확실성(uncertainty)를 파악할 수 있으며, 더 나아가 탐사 설계 변수 변화에 따른 기준 탐사 및 모니터 탐사 자료를 분석함으로써 가장 이상적인 시간경과 탄성과 탐사 설계 변수도 도출할 수 있다.

모니터 탐사를 위한 유체치환 RPM 구성 시, 여러 생산 시간에 대한 RPM을 구성하여 모니터 탐사 모델링을 수행한 뒤 기준 탐사 자료와 비교한다면, 모니터 탐사 수행을 위한 최적 시기의 결정에도 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 그러므로 보다 면밀한 감지가능성 연구를 위해서는 저류층에서의 생산에 따른 유체의 변화를 모사하기 위한 생산 저류층 시뮬레이션 등을 통해 저류층 변수 값을 도출하여 보다 정확한 유체치환 RPM을 구성할 수 있어야 한다. RPM 구성을 위해서는 여러 방법들이 발표 되었으나 그 중에 Gassmann's equation (Gassmann, 1951)을 이용하는 것이 가장 보편적이다(Nguyen and Nam, 2011). RPM 구성을 위한 저류층 시뮬레이션을 위해서는 시뮬레이션 입력 변수의 정확한 도출이 또한 중요하다.

Lumley *et al.* (1997)은 4차원 탄성과 탐사의 위험성을 평가하기 위해서 빠르게 수행할 수 있는 스프레드시트 분석 기법을 개발하였다. Moore (1997)는 북해(north sea) 저류층에서 1차원 벌립 대비 진폭변화(amplitude variation with offset; AVO) 자료를 시추공 물리검층을 통해서 획득하면서 여러 강도의 수공법을 모델링하였다. Wang (1997)와 Hirsche *et al.* (1997) 등은 탄성과의 속도와 밀도의 변화를 예측하기 위해 코어 샘플에 대한 암석의 물리적 측정을 통해서 저류층의 수포화도(water saturation), 압력, 온도 등의 상태 등을 파악하였다. Lumley *et al.* (1994)은 저류층 유동 시뮬레이션에 기초하여 2차원 탄성과 모델을 구성하여 North Sea Troll 저류층의 얇은 석유 층에서의 수평 시추공 석유 생산을 모니터링하는 것에 대한 감지가능성을 평가하였다. Lumley and Behrens (1998)는 히스토리 매칭(history matching) 유동 시뮬레이션과 암석 코어에 대한 물리적 물성 측정 자료에 기초하여 3차원 모델을 구성하여 탄성과 모델링을 수행하였다. 여기서 히스토리 매칭이란 각각의 유정에서 예상되는 생산량을 실제 생산량과 맞출 수 있도록 저류층 모델을 구현하는 것이다.

탐사 설계 및 자료 획득

시간경과 탄성과 신호의 취득은 동일한 지역에서 다른 시간

에 두 번 이상의 자료를 취득하는 것이므로 탐사의 반복성(repeatability)이 가장 중요하다. 반복성 문제는 설계 및 자료 취득뿐 아니라 추후 자료처리 시에도 반드시 고려하여야 하는 사항이다. 반복성을 확보하기 위해서는 2번 이상의 시간경과 탐사자료 취득 시 샘과 수신기의 위치가 이론적으로는 같아야 하고, 신호 기록 시 기본 필터링 등의 변수 등이 동일해야 한다. 날씨 및 조류로 인한 스트리머(streamer)의 방위각 오차 등이 발생할 수 있으므로 이를 최소화 할 수 있어야 한다(Fig. 2). 특히 최초의 탐사 이후에 생산 플랫폼 등의 구조물이 구축될 경우 근본적으로 반복성을 획득할 수 없게 되는 경우도 발생할 수 있으므로, 최초의 탐사 수행 시에 구조물이 없더라도 저류층 상부 해수면에서 수행하지 않고, 두 척의 배를 이용하여 공통 중간 점을 플랫폼에 위치시키거나, 해저면에 수신기 케이블을 설치하고 탐사선에서 탄성과 샘을 발생시키는 방법 등을 선택하여야 한다. 즉 시간경과 탄성과 탐사 설계 시에는, 추후 생산 계획 등 제반 사항을 고려해서 최초 탐사 즉 기준 탐사를 수행하여야 한다.

반복성을 확보하기 위한 최상의 요소 중 하나는 동일한 시스템을 이용하고 동일한 탐사 설계 변수를 이용하여 자료를 획득하는 것이다. 시간경과 탐사를 수행하는 기간 내에 계속해서 동일한 장비를 이용할 수 있도록 최대한 최신의 장비를 이용하고 동일한 자료취득기법을 이용할 수 있는 자료취득 시스템을 이용할 수 있어야 한다.

기준 탐사와 모니터 탐사 자료 사이의 반복성은 시간경과 탄성과 자료처리에서 참 4차원 탄성과 신호(true 4D signal)를 획득하는데 있어서 중요한 요소가 되므로 모니터 탐사 설계는 기준 탐사 설계를 따라야 한다. 만약 기준 탐사가 아닌 이전 탐사 자료를 이용하여 모니터 탐사 자료를 해석해야 할 경우에 모니터 탐사는 이전 탐사 시의 설계를 따라야 한다. 그러나 이전 탐사의 경우 시간경과가 탐사가 아닌 일반적 탐사에서 이용하는 고르기(sampling), 송수신 별림(offset distribution), 겹

쌓기 수(fold of coverage) 등에 맞추어 설계되었기 때문에 4차원 자료 해석에 어려움이 있을 수도 있다. 이러한 경우에는 더욱 정밀한 분석 기법 혹은 상황에 적합한 기법을 찾아서 분석하여야 할 것이다.

탐사 변수를 동일하게 하였다고 하더라도, 인위적으로 제어하기 힘든 지형, 지표 근처의 물성, 조류, 파고, 날씨, 탐사 장해물, 지하수면, 주변 잡음 상태 등에서의 아주 작은 변화도 4차원 탄성과 탐사의 자료 획득 반복성에 악영향을 미칠 수 있다(Moldoveanu *et al.*, 1996; Beasley *et al.*, 1997; Ebrom *et al.*, 1997; Rennie *et al.*, 1997; El-Emam *et al.*, 1998; Porter-Hirsche and Hirsche, 1998). 반복성 확보에 있어서 탐사의 방위(orientation)도 중요한 요인이 된다. 즉, 모니터 탐사는 기준 탐사의 방위를 따라야 하는데, 탐사 시 장애물, 날씨 상황, 경비 문제, 해상 교통문제(maritime traffic) 등으로 탐사의 방위가 어긋날 수가 있다. 탐사 설계 및 탐사 자체의 반복성 외에, 송수신기의 교정(calibration) 등 시스템 자체의 반복성도 매우 중요하다.

반복성을 향상하기 위해서 4차원 탄성과 자료의 신호 대 잡음 비를 향상시키기 위한 노력도 필요하다. 최대한 같은 종류의 탄성과 샘과 수신기를 사용하고, 자료 취득 시 탐사 방향 및 측선 간격 등을 일치시키고 스트리머의 이탈각을 최소화하여야 한다. 더 나아가 해저면과 육상에서의 위치 확인 기법의 향상, 수신기들의 영구 설치 등을 통해서 탄성과 측정에서 반복성을 향상시킬 수 있다. 뿐만 아니라 계절적인 변화 즉, 해빙기 주기 및 강수량 등도 고려해서 탄성과 탐사시기를 결정해야 한다(Vesnaver *et al.*, 2003). 지하수면의 변화와 같은 영향들은 탐사 자료 획득 설계의 향상을 통해서 최소화하거나 혹은 시간경과 탄성과 탐사 자료의 처리 단계에서 고려한다. 실제 시간경과 탐사 수행 시에는 장비가 다르거나 취득 시기가 달라 주변 환경의 차이가 클 수 있기 때문에, 각 탐사에서 획득한 자료를 동일한 조건으로 일치시키기 위한 탐사장비 및 변수 선정 그리고 해석을 위한 전산처리 방법이나 이론이 필요하다.

단일 3차원 탐사에서 겹쌓기 수가 과도하게 많은 경우에는 전통적으로 특정 영역에서 어느 기준을 정하여 잘 기록된 자료만을 선택함으로써 겹쌓기 수를 줄이고 자료의 질을 높인다. 즉, 중간점(mid-point)이 빈 센터에 얼마나 가까운지 혹은 취득 시의 현장 방위각이 설계 시의 방위각과 얼마나 유사한지 등을 고려하여 기준 이상의 유사도가 있는 채널기록(trace)들만을 선택하여 겹쌓기 등의 자료처리에 이용하는 것이 좋다. 4차원 비닝은 이러한 개념을 확장시킨 것인데, 시간경과 탐사 자료 사이의 자료 질을 판단할 수 있는 기준을 두고 탐사자료를 비교 및 선택하는 것이다. 즉 유사도 기준(user-selected similarity criteria)에 따라 최대의 반복성을 보이는 탐사자료 간의 채널기록 쌍(trace pair)을 선택한다. 유사도 기준으로는, 최대 유사 중간점 위치, 방위각, 샘/수신기 혹은 샘 사이의 거

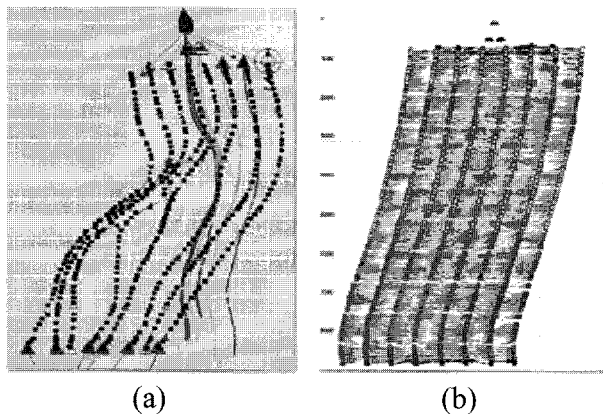


Fig. 2. A comparison between (a) conventional- and (b) 4D-streamer steering devices. The 4D device is a Q-Fin streamer steering device from WesternGeco designed for reliable and repeatable cable positioning (Aronsen *et al.*, 2004).

리나 수신기 사이의 거리 최소화 또는 평균 등을 이용할 수 있다.

적합한 유사도 기준에 근거하여 채널기록을 선택하게 되면 4차원 탄성과 자료 사이의 반복성을 크게 향상시킬 수 있다. 최근 여러 개의 품질관리 속성(QC attribute)들을 도시하는 상업적인 프로그램들이 개발되고 있는데, 이를 통해서 서로 다른 유사도 기준들에 대한 유사도를 쉽게 평가하는 것이 가능하고, 탐사가 반복성 있게 수행되었는지 객관적으로 판단할 수 있다.

자료처리

모니터 탐사의 자료처리 기법은 기준 탐사 자료와 동일하게 해야 하며, 만약 자료처리 시스템이 향상되거나 바뀌었을 경우는 변화된 방법을 이용하여 반복 탐사뿐 아니라 기준 탐사 자료의 자료처리까지 모두 수행함으로써 동일한 자료처리 기법을 적용하여야 한다. 이는 반복성 문제와 결합되어 시간경과 탄성과 자료처리의 성패를 좌우하는 기본 요소가 된다. 특히, 민감하게 처리하여야 하는 각종 속성(attribute) 분석의 경우에는 자료처리 기법의 반복성에 대한 중요성이 극대화된다.

명확한 시간경과 자료처리는 기준 탐사와 모니터 탐사 혹은 두 모니터 탐사 사이의 자료의 차이가 측정 가능할 때, 즉 측정 가능한 시간경과 반응이 있을 때 적절하게 수행할 수 있다. 시간경과 탄성과 자료처리의 성공 열쇠는 자료의 반복성과 시간경과 자료의 해상도에 있기 때문에, 만약 반복성이 없거나 해상도가 낮다면 자료들은 시간경과 자료의 잡음으로 오인되어 제거되거나 잡음에 묻힐 수도 있다. 그러나 자료 획득 시의 탐사 환경의 차이가 시간경과 자료 잡음의 주요 요인으로 작용하고 또한 현실적으로 시간경과 탄성과 탐사들에서 탄성과 자료들 사이의 완벽한 반복성을 유지하는 것은 불가능하다. 심지어 탐사 변수들마저도 상당히 다를 수 있기 때문이다. 그러므로 반복성이 조금 부족한 자료도 해석할 수 있는 고도의 자료처리 기술 및 전략이 필요하다.

시간경과 탄성과 자료처리에서 가장 중요한 첫 단계는 자료의 반복성을 극대화 하면서, 지중 변화(subsurface variation)를 감지할 수 있는 충분한 시간적 공간적 해상도를 유지하는 것이다. 이때 지중 변화는 일반적으로 음향 임피던스(ρ -임피던스)의 변화를 의미하지만 경우에 따라 AVO 영향, 전파시간 치우침(travel time shift) 혹은 탄성과 자료의 특성에서의 변화일 수도 있다. 또한 반응들이 서로 상호결합(coupling)되는 경우도 발생할 수 있으므로 어떤 시간경과 자료가 기대되는지에 대한 예측 하에 자료처리 전략을 선택하여야 하며, 생산에 의한 영향이 나타날 수 있는 지역에 대해서는 신중한 모니터링을 통해 탄성과 반응의 변화를 얻어낼 수 있어야 한다.

성공적인 4차원 탐사 자료의 자료처리를 위해서는 각 탐사 현장의 탄성과 자료의 특징에 맞게 탄성과 자료처리를 수행하

여야 한다. 또한 각 저류층의 특성 및 분석하고자 하는 세부 사항에 맞게 각 자료처리 시퀀스를 설정하여야 하며 이때 고려되어야 할 사항들은 시간경과 탄성과 자료의 반복성에 영향을 주는 요인들이라 할 수 있다. 자료처리 시, 시간경과 탄성과 자료의 반복성 향상을 위해 고려해 주어야 하는 중요한 사항들은 다음과 같다.

1) 벌림 정규화(Offset regularization)

탄성과 탐사 시, 벌림(offset)에 따라 반사면에서 반사파의 진폭 양상은 변화하며 자료의 대역폭도 벌림에 따른 수직 시간차 왜곡이나 다른 요인들로 인해 변화한다. 겹쌓기 단면에서 이러한 반사 경계면의 특성은 겹쌓기에 이용한 최대·최소 벌림, 즉 벌림의 범위 따라 변할 수 있으므로, 4차원 자료의 분석에서는 시간경과 자료 각각의 겹쌓기 자료 구성 시 벌림의 범위를 동일하게 유지해야 한다. 즉, 일단 모든 탐사 자료에서 적절한 최대·최소 벌림이 결정되면 이 범위 외의 자료들은 이용하지 않아야 한다. 이렇게 적절한 벌림 범위가 정해지면 일반적으로 자료처리 시 벌림 빈(offset bin)으로 나누어 처리하게 되는데 일반적으로 각각의 빈 사이에는 벌림이 일정하다. 때때로 주 축선과 추가 축선이 겹치는 지역 또는 장애물로 인해 자료 취득 시 겹쳐지는 지역이나, 중첩된 해상 스트리머 취득 등으로 인해 과도한 겹쌓기 수를 가진 빈이 생길 수가 있다. 이 경우 앞에서 언급한 4차원 비닝 기술을 각각의 벌림 빈에 적용하여 두 개의 탐사자료 간 유사한 채널기록 수를 고를 수 있다.

2) 유효 겹쌓기 수

주어진 벌림 빈의 유효 겹쌓기 수(fold of coverage)는 한 셀에서 다음 셀로도 자료취득 시의 변화(variability)에 따라 변하게 된다. 과도한 겹쌓기 수는 자료처리 모듈이나 4차원 비닝 기법을 응용하거나 유사도 기준에 따른 선택을 통해서 처리할 수 있으며, 3D 자료처리에 흔히 적용할 수 있는 여러 경우를 포괄적으로 고려할 수 있는 비닝(flexible binning)을 통하여 처리할 수도 있다. 그러나 플랫폼 등과 같은 장애물들 때문에 겹쌓기 수를 잃어버리기도 하고, 특정 지역에서는 벌림 빈의 겹쌓기 수가 현저히 떨어져 영(zero)이 되기도 한다. 종종 신설 설비 등의 구축 등으로 인한 장애물 때문에 새로운 모니터 탐사가 이전 모니터 탐사 혹은 기준 탐사 보다 낮은 커버리지를 보이는 경우도 있는데, 이 때는 이전 탐사자료를 정규화한 자료를 이용하여 새로운 모니터 탐사 자료에서 부족한 부분을 채울 수도 있다. 이 경우 새로운 모니터 탐사를 이전 탐사와 동일한 장비로 동일한 취득변수를 이용하여 수행했을 때 해석의 오류를 최소화 할 수 있다.

3) 향측 자료 품질 확인

시간경과 자료의 자료처리 및 해석에 있어 향측 자료의 품

질은 매우 중요하다. 특히 새로운 모니터 탐사 시, 이전 탐사의 샘 및 수신기 위치에 대한 전체 치우침(bulk shift)이 매우 자주 발생하기 때문에 탐사 초기에 이를 간파할 수 있어야만 샘과 수신기의 좌표를 업데이트 하여 위치를 교정함으로써 문제를 해결할 수 있다. 또한 항측 자료의 자료처리 시 사소한 에러들은 쉽게 발견하여 교정할 수 있지만, 탐사 시 스트리머가 구부러져 발생하는 형태 변화에 의한 오차처럼 복잡한 문제들은 해결하기 매우 어렵다. 겹쌓기 후의 위치 조정(repositioning) 등으로 항측 자료의 오차를 개선할 수는 있지만 근본적으로 해결할 수는 없기 때문이다.

4) 기록시간 오차 보정

두 개 혹은 그 이상의 탐사자료 사이에서, 해저면 및 저류층 경계면의 반사 신호 도달 전파시간 차이가 나는 등 탐사자료 볼륨 간의 도달 전파시간 차이가 날 수도 있다. 특히 시간경과 탐사 사이의 방위각이 다를 때, 측선 사이의 교차점에서 이러한 문제들이 두드러질 수 있다. 이러한 경우에는, 탐사 시에 오류가 없었는지를 확인하여야 한다. 즉, 기계적인 문제, 해수의 온도, 조류 등으로 인한 샘-수신기간의 오차 등 여러 가능한 오류에 대해 확인하여야 한다.

각각의 탐사 자체에 문제가 없다고 판단될 경우, 그 탐사 측선에 상응하는 위치에 시추 및 검층 자료가 있다면, 이러한 자료들을 이용하여 타이밍을 보정할 수 있으며, 만약 자료가 없을 경우는 다음과 같은 방법을 적용할 수 있다. 먼저, 시간경과 탐사자료 중 하나의 자료에 대하여 수직시간차(normal move out; NMO) 속도를 분석한 뒤 이를 겹쌓음으로써 기준 자료를 작성한다. 이 기준 자료를 이용하여 첫 번째 탐사 자료에 대한 도달 전파시간 보정(trim statics)을 적용하여 기준자료 볼륨을 만든 뒤, 두 번째 자료에 대한 도달 전파시간 보정을 수행하여 자료 사이의 시간 차이를 제거한다. 만약 두 탐사 자료의 방위각이 정확히 일치하지 않을 경우에는 기준 자료를 보정 대상 탐사 자료의 격자(grid)에 맞게 회전시킨 뒤 도달 전파시간 보정 작업을 수행한다. 이와 같은 시간경과 자료 사이의 기록시간 오차 보정을 통해, 시간경과 자료군의 겹쌓기 전의 타이밍을 정규화하여 자료 볼륨의 반복성을 향상시킬 수 있다. 이때, 겹쌓기 전 자료는 도달 전파시간 발취(trim statics picking process)를 수행할 수 있을 정도의 품질이어야 한다.

기록시간 오차 보정을 수행하는 또 다른 방법으로는, 첫 번째 자료에 대한 수직 시간차 속도를 분석하고 이것을 두 번째 탐사자료의 수직 시간차 속도를 분석하기 위한 초석으로 이용하는 것이다. 사람의 해석보다는 신뢰할만한 자동 속도 분석 기법을 이용하는 것이 더욱 일관성 있는 결과를 얻을 수 있다. 수직 시간차 보정 후, 동일한 기준 볼륨을 이용하여 두 탐사 자료에 대해 도달 전파시간 보정 기법을 적용하면 일치 정도를 더욱 향상시킬 수 있다.

5) 파형 매칭(Wavelet matching)

시간경과 탄성과 탐사 시 동일한 송신 파형을 이용하여 시간경과 자료를 획득해야 하는 것은 필수 조건이지만, 장비의 노후 및 현장 상황 등에 송신 파형이 달라질 수 있다. 탄성과 샘이 탐사 중 에어건의 압력에 따라 파형의 진폭이 달라지거나 거품(bubble) 형태가 변할 수도 있으며, 또는 여러 개의 탄성과 샘들(source cluster) 중에서 일부의 에어건이 고장이 날 수도 있다. 또한, 저류층 내 유체의 양이나 유체 흐름의 변화에 따라 저류층의 반사 파형 등이 차이를 보일 수도 있다. 이러한 경우 시간경과 자료 사이의 파형이 달라질 수 있다. 뿐만 아니라, 저류층의 물성변화에 기인한 진폭의 변화 등으로 인하여 각각의 탄성과 자료 볼륨 내에서도 파형은 변할 수 있다. 이러한 파형의 변화를 해결하기 위해서 시간경과 탐사자료의 자료처리 초기에 자료를 영위상(zero phase) 자료로 변환한 후 자료처리를 진행하는 것이 적절하다. 최소위상(minimum phase) 파형의 경우 형태(shape)와 타이밍은 진폭 스펙트럼에 영향을 받을 가능성이 크지만 영위상 파형에 경우는 이러한 영향을 받을 가능성이 낮기 때문이다. 이렇게 함으로써 반복성 분석을 단순하게 할 수 있고, 이후 일련의 자료처리 알고리즘들을 여러 자료군에 일관적으로 적용할 수 있게 된다.

6) 공간적 정규화(Spatial regularization)

시간경과 탄성과 볼륨들은 공간적으로 같은 위치에 있어야 한다. 이것은 최종 처리된 자료군이 같은 빈 내에 있어야 한다는 것을 의미한다. 만약 불규칙한 위치에서 획득한 자료들이 있다면, 이에 대해서는 겹쌓기 전에 이들 자료를 빈의 중앙으로 보간(interpolate)하는 공간적 정규화를 수행한 뒤에 겹쌓기하여야 한다.

7) 겹반사 제거(Multiple attenuation)

조류나 물의 속도 변화에 의해서 발생할 수 있는 해저면 도달 왕복 전파시간의 작은 변화는 수층 내에서의 되울림(reverberation)에 의해서 증폭될 수 있기 때문에, 해저면 겹반사(multiple)는 반복성이 결여되는 경향이 강하다. 이러한 되울림 파동열(train)은 시간경과 탐사 자료에서 반복적으로 나타나지는 않는다. 또한 되울림 파가 공간적으로 변한다면 하나의 공통 깊이점(common depth point; CDP)에서 나타나던 되울림 파가 다음 공통 깊이점에서는 나타나지 않을 수 있다. 해수층에서 겹반사가 강하게 일어나는 지역에서는, 시간경과 자료처리 이전에 각각의 탐사 자료에 대한 해저면 겹반사 에너지를 최대한 제거하는 것이 중요하다. 라돈 필터(Radon filter)를 이용한 겹반사 제거 기법은 비교적 안정적으로 적용될 수 있어서 파동방정식을 이용한 겹반사 제거 기법보다 나올 수 있으나, 충분히 겹반사를 제거할 수 있도록 여러 제거 기법들을 묶어서 주의 깊은 테스트를 하는 것이 중요하다. 특히 여러 겹반사 제거 기법들을 적용하는 과정에서 주 반사파가 변할 수도

있으므로 이에 대한 각별한 주의가 필요하다.

8) 장비교체

탐사 중에 탐사 장비의 노후화 및 어망 등으로 인해서 에어 건 또는 스트리머 케이블에서 특정 섹션을 교체해야 하는 경우도 발생할 수 있다. 이런 경우 탄성과 섹의 파형이 변할 수도 있으며, 채널의 민감도(sensitivity)가 변하여서 기록파형 및 진폭에 영향을 줄 수도 있다. 주로 오래된 장비를 이용한 탐사에서 흔히 발생하며 정확하게 보정하기는 어렵지만 지형을 고려한 진폭 보정 기법(Surface-consistent amplitude compensation) 등과 같은 기법을 이용하여 보정하여야 한다.

9) 기타보정

조석 변화는 시간경과 탐사 자료 사이의 도달 전과시간 치우침(travel time shift)를 야기시킬 수 있다. 이러한 영향은 일반적으로 매우 작아서 겹쌓기 자료의 품질에 영향을 크게 주지는 않지만 시간경과 탐사자료 사이의 불륨의 품질 저하를 야기할 수는 있다. 조석 테이블을 이용하거나 측정된 조석 값을 이용하여 조류 변화에 의한 영향을 보정할 수 있다. 큰 파도가 칠 경우에는 근본적으로 잡음 수준이 커지는 문제가 있다. 잡음이 일반적으로 큰 문제가 되지 않을 수도 있으나, 겹쌓기 전 깊이 참반사 보정(prestake depth migration; 중합전 심도 구조보정) 등의 저류층 내부 영상에 영향을 줄 수도 있으므로 이러한 잡음들을 초기에 제거하여야 한다. 수층에서의 음향 속도의 변화는 탐사 사이 혹은 하나의 탐사에서 기록시간 치우침을 야기시킬 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 무작위 잡음의 경우 전형적인 자료처리 흐름은 다양한 다중 채널 처리를 하므로 실제로는 큰 문제가 되지 않지만 잡음이 무작위로 특정 방향에 나타날 수 있으므로 이에 대해서는 주의 기울여야 한다.

해석 및 분석

시간경과 자료처리를 통해 4차원 탄성과 신호에서 이상대를 찾게 되면 시간경과 해석 및 분석을 시작할 수 있다. 이를 위해서 먼저 물리검층 자료, 코어 측정, 압력 및 온도 자료, 생산 이력 등의 시간에 따른 변화와 탄성과 자료에서의 시간경과에 따른 변화를 연결하기 위해 보정 작업을 한다(Ecker *et al.*, 1999). 물리검층 자료로부터 해석한 탄성 계수를 이용하여 구성한 RPM에 대한 탄성과 자료를 모델링하는 것에 기초하는 이러한 보정을 통해서 4차원 탄성과 자료 해석 상의 이상대가 자료 획득 및 자료처리 방법론의 비반복성에 의한 오차가 아니라 실제 저류층의 변화로 인한 것이라는 판단을 할 수 있다. 즉, 보정이 제대로 수행된 후에야 4차원 탄성과 탐사 자료의 해석을 통해서 시간경과에 따른 탄성과 자료의 이상들이 의미하는 바를 신뢰성있게 설명할 수 있게 된다. 시간경과 탄성과 자료의 해석에서 시간경과 이상대가 주로 오일, 물 혹은

가스의 포화도의 변화에서 기인한 것이라고 추정한다는 점을 감안하면 4차원 탄성과 탐사 자료의 해석은 1990년대 말까지는 정성적인 단계에 있었지만(Anderson *et al.*, 1997; Sonneland *et al.*, 1997; He *et al.*, 1998), 최근에는 정량적인 기법들이 개발되고 있다. 그러나 시간경과 탄성과 자료의 해석은 가스의 포화도, 압력, 온도 등의 변화하는 저류층 물성(Lumley, 1995a, 1995b; Jenkins *et al.*, 1997), 그리고 다짐(compaction)이나 파쇄대의 형성 등에 의해 뜻하지 않게 변화하는 암석의 압축성 및 공극률 등의 지질학적인 특성을 고려한다면 해석은 더욱 복잡해진다(Walls *et al.*, 1998; Johnston *et al.*, 1998).

시간경과 탄성과 탐사 자료 해석의 모호성을 줄이기 위해서, 4차원 탄성과 자료 역산을 통해서 변화하는 저류층 물성들의 변화를 보여주는 물성 분포도를 곧바로 생성하여 정량적으로 해석하는 것이 더욱 바람직하다. Lumley (1995a, b)와 Jenkins *et al.* (1997)은 Duri의 증기 주입 시험장 자료로부터 온도와 증기 포화도 분포도를 구성하였다. Lumley *et al.* (1999)은 나이지리아의 Meren 현장에서 탄성과 모델링을 통해서 오일과 물 가스 포화도 분포도를 구성하였다. Tura and Lumley (1998, 1999a, 1999b)와 Landro (1999)는 시간경과 AVO 역산을 통해서 포화도와 압력의 변화들을 동시에 예측하는 방법을 제시하였다. 변화하는 저류층 물성을 예측하기 위해 중요한 요소는 불확실성 분석이기 때문에, Ecker *et al.* (1999)는 최소 및 최대의 물성 값 분포도 만들기 위해서 불확실성 값을 명시한 증기의 분포와 온도 분포도들을 제작하였다.

해석과 분석을 마치면, 저류층 관리를 위한 제안을 할 수 있어야 한다. 과거의 어느 시기보다 탄성과 기술은 저류층 유체의 흐름을 모니터링하기 위한 4차원 탄성과 자료를 이용하여 효율적인 저류층 관리를 위한 결정에 중요한 역할을 할 수 있게 되었다. 그러므로 4차원 탄성과 탐사의 가장 중요한 마지막 단계는 탄성과 탐사자료의 분석에 기초한 제안을 하는 것이다. Duri 증기 주입 프로젝트에서, 석유 회수 증진과 주입 증기의 위치를 최적화하기 위해서 4차원 탄성과 분석은 유정의 증기 주입의 순위를 결정하고 생산과 주입정의 구성을 조절하는 등 중요한 역할을 하고 있다(Waite and Sigit, 1997). 생산정과 떨어져 있어서 생산하지 못한 석유를 생산하거나 물의 포화도가 큰 지역을 피하기 위한 수평정 설계에도 4차원 탄성과 해석 결과가 중요한 역할을 한다(예, Anderson *et al.*, 1997; Sonneland *et al.*, 1997).

20세기에는 3차원 탄성과 기법을 이용하여 개발 비용을 줄이는데 주력하였다면, 이제는 시간경과 탄성과(4차원 탄성과) 모니터링을 통해 석유회사들이 생산을 최적화하고 저류층 유체의 유동을 모니터링함으로써 회수율을 증대시키는데 초점을 두어야 한다. 탄성과 탐사를 통한 유체 유동 모니터링이 가능하게 된 원동력은 장비 및 기술의 발달로 탄성과 신호의 정확도와 반복성이 향상되었기 때문이다.

1) 시간경과 자료의 정량적 해석

저류층 관리에 4차원 탄성과 자료 해석 결과를 이용하기 위해서는 정량적인 해석이 가능해야 하며, Gullfaks 현장에서는 시간경과 탄성과 모니터링 자료의 정량적 해석에 기초하여 15 개의 추가적 생산정 시추를 성공적으로 수행함으로써 약 950 만불의 비용을 절감할 수 있었다(El Quair and Stronen, 2006). 정량적으로 해석하기 위하여 Ouair and Stronen (2006)은 탄성과 자료의 4차원 동시 역산(4D simultaneous inversion)을 수행한 뒤 이 결과에 기초하여 확률적 암석 물리 역산(Stochastic rock physics inversion)을 수행하였다.

2) 4차원 동시 역산

탄성과 반사도(reflectivity)의 차이는 탄성 계수(p -임피던스, s -임피던스, 밀도 등)의 변화와 연관시킬 수 있으며, 암석 물리적 관계에 의해 탄성 계수의 변화로부터 탄화수소 포화도와 압력에서의 변화를 추적할 수 있다. 시간경과 역산은 주로 각각의 3차원 탄성과 자료를 역산한 뒤 그 결과들의 차이를 비교하여 탄화수소 포화도나 압력 등의 변화를 유추했다. El Ouair *et al.* (2005)은 다른 시간대에 획득한 자료들을 동시에 역산함으로써 4차원 탐사 자료를 정량적으로 해석하는 기법을

제시하였다. 이 4차원 역산에서는 여러 탐사자료들로부터 구성한 모든 부분 겹쌓기를 동시에 최적화 하는 방법을 이용하였다. Figure 3은 Aarre *et al.* (2007)이 수행한 4차원 동시 역산의 결과로 공극 압력의 감소와 수포화도의 증가로 인한 p -임피던스의 증가(Fig. 3a)와 수포화도 증가로 인한 푸아송 비(Poisson's ratio)의 증가(Fig. 3b)를 확인할 수 있다.

3) 시간경과 영상화 정보의 해석

4차원 탄성과 영상화를 도시한 Fig. 4에서 관찰할 수 있는 것과 같이, 1985년의 기준 탐사에 비해 1999년도의 저류층 영상은 생산의 영향을 분명하게 보여주고 있다. 저류층 상부에서 반사강도(Seismic reflection strength)의 변화는 포화도의 변화 뿐 아니라 오일층의 높이와도 관련이 있다. 물이 오일을 대체할 때 p -임피던스가 증가하므로 저류층 상부에서 나타나던 강한 반사는 점차 약해지게 된다. 즉, 기준 탐사에서 나타나는 OWC (oil-water contact)에서의 강한 탄성과 반응은 생산으로 인해 약화되었다고 판단할 수 있다. Fig. 4에서 붉은색과 노란색은 p -임피던스가 감소하는 것을 의미하고 푸른색은 증가하는 것을 의미한다.

4) 겹쌓기 전 역산 및 암석 물리에 기초한 시간경과 탄성과 자료 분석

시간경과 탄성과 저류층 모니터링은 생산/주입이 저류층의 유체포화도, 압력, 온도 등을 크게 변화시키고, 이로 인해 저류층 암석에서의 탄성 계수가 변화하게 되며, 이 변화를 탄성과 자료로부터 감지할 수 있다는 사실에 기초하고 있다. 탄성과 자료로부터 변화양상을 분석하기 위해 시간경과 자료를 먼저 겹쌓기 전 AVO 분석 및 역산을 수행하여 p -임피던스와 s -임피던스, 밀도변화 분포를 분석하고 이를 토대로 시추공자료와 통합분석을 통하여 탄성과 임피던스 분포도를 구성할 수 있다. 이렇게 구성된 임피던스 변화를 이용하여 RPM을 구성하게 되는데, 이 RPM은 암상, 유체포화도, 저류층의 압력의 변화에 대한 저류층의 탄성적 반응을 묘사하는 모델이 된다고 할 수 있다. 구성된 모델은 이용 가능한 코어와 물리 검증 자료에 기초하여 검증 및 보정을 하게 되면, 이 모델에 기초하여 탄성과 속성의 변화에 따른 포화도와 압력의 변화를 결정할 수 있게 된다.

5) 시간경과 탄성과 자료의 다양한 해석

저류층 특성인 유체 포화도와 압력의 역산 시, 먼저 관심 지역에 대하여 지질학적 모델을 구축한 뒤, 결정학적, 지구 통계적, 확률적 기법들을 동원하여 가능한 모든 자료로부터 저류층 특성(암상, 공극률, 포화도 등)을 지질 모델 부여하여 적절한 RPM을 구성한다. 이 RPM을 이용하여, 저류층 특성을 p -임피던스 및 s -임피던스를 계산하는 순 모델링(forward modeling)을 수행한다. 이 순 모델링을 통해 구한 임피던스 결과를 AVO

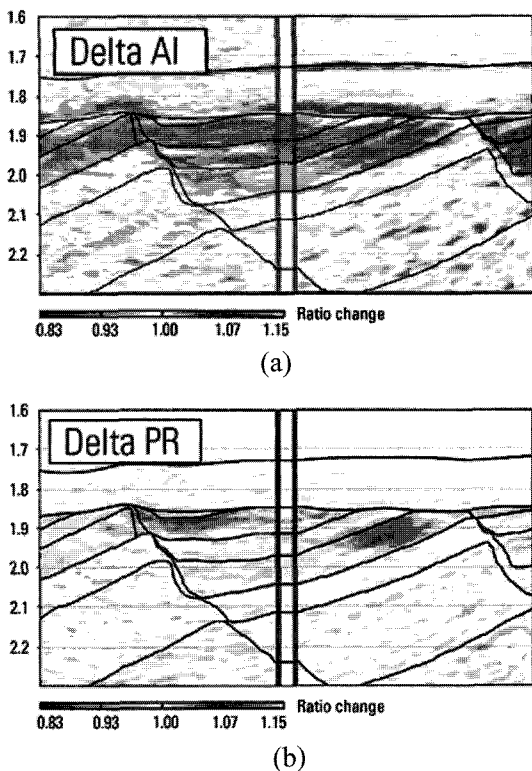


Fig. 3. 4D simultaneous inversion results by Aarre *et al.* (2007). Red and yellow colors mean an increase in acoustic impedance due to pore pressure decrease and water saturation increase (a) and an increase in Poisson's ratio due to water saturation increase (b). The increase in Poisson's ratio is confined to the initially oil-saturated zone.

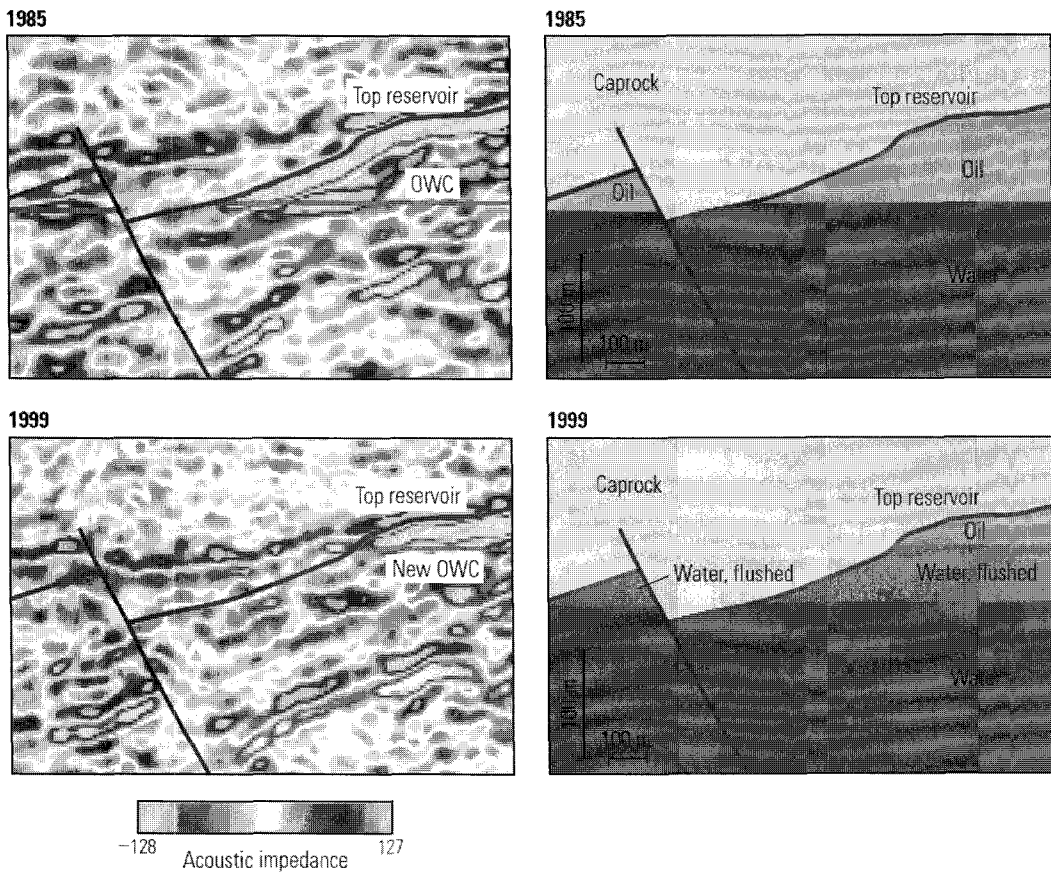


Fig. 4. Reservoir changes observed in 4D seismic images between 1985 (top) and 1999 (bottom) (Alsos *et al.*, 2002).

역산을 통해 얻은 임피던스 결과와 맞추게 되면, 고해상도의 저류층 특성들을 획득할 수 있게 되며 이때 이 특성들은 탄성 파뿐 아니라 지질학적으로도 최적의 결과라고 할 수 있다.

반복성이 뛰어난 고해상 탄성파자료와 고해상도의 역산결과 그리고 앞서 설명한 암석 물리에 기초한 정 모델링 계산결과가 잘 조합되면, 저류층을 정량적이면서도 상세하게 해석할 수 있게 된다. 결과에서 보면 유체의 포화도와 와/혹은 압력의 변화에 정확하게 관련이 있는 p -임피던스와 s -임피던스 변화가 2% 보다 낮아도 감지될 수 있다(Fig. 4; Alsos *et al.*, 2002).

앞서 언급한 해석 외에도 4차원 탄성파 자료를 이용하여 저류층의 압력, 포화도, fluid contacts 등을 해석함으로써, 시추공의 위치를 최적화하고 생산과 주입작업을 향상시킴으로써 생산성을 향상시킬 수 있었다. 이뿐 아니라, 시간경과 탄성파 자료와 이를 해석 결과들을 이용하면 생산 히스토리 매칭 (production history matching)에 추가적인 제약 조건을 줄 수 있고 더 나아가 저류층 시뮬레이션을 향상시킬 수 있다. 또한 시간경과 탄성파 자료는 저류층의 유체 유동 특성을 파악하는데 쓰일 수 있고, 유체 유동 모델(flow model)을 향상시키는 데도 쓰일 수 있다. 시간경과 탄성파 자료를 이용함으로써 저류층 내부 및 주변의 유체유동 특성을 관찰할 수 있기 때문에 시추공의 위치를 더욱 최적화 시켜 개발과 생산을 더욱 성공

적으로 수행할 수 있다.

6) 히스토리 매칭과의 복합 해석

4차원 탐사 기술은 4차원 탄성파 자료를 저류층 모델링 및 저류층 관리 시스템에 연결할 수 있다(Lumley and Behrens, 1998). 그 첫 번째 단계는 탄성파 히스토리 매칭(seismic history matching)이라고 할 수 있다. 히스토리 매칭은 저류층 모델을 저류층의 이력(past behavior)을 그대로 재생산할 수 있을 때까지 업데이트 하는 과정을 의미한다. 생산 전과 생산 후 등 많은 현장자료 및 시추공 측정자료들을 통해서 압력변화, 탄성파 자료의 변화, 유체이동 변화 등등을 이용하여 RPM을 구성하고 이 모델이 현재 또는 과거의 현장 탄성파 자료 등을 그대로 시뮬레이션 할 수 있게 되면 이 모델을 실제 저류층의 모델로 인정할 수 있게 된다. 일단 모델이 과거의 이력과 일치(history matched)되면 이 모델은 향후 생산이 계속 될 때의 상황을 신뢰성 있게 예측할 수 있게 된다. 그리고 지속적인 생산 후에 다시 얻어지는 4차원 탄성파 탐사자료 등을 이용하여 이 저류층 모델은 다시 업데이트 되는 과정까지를 포함하는 것이 히스토리 매칭이라고 할 수 있다.

히스토리 매칭의 결과는 설정한 저류층 모델의 질과 압력 및 생산에 관한 자료의 양과 질에 달려 있다. 이때 저류층의

지질학적인 제한변수(constraints)를 통해서 RPM을 구성하는 변수의 범위 등을 제한하면 더욱더 신뢰성 있는 모델을 구성할 수 있다. 또한 각 변수들의 불확정도(uncertainty)도 구성한 모델의 신뢰도에 영향을 미치게 되므로 각 변수가 가지는 특성에 대한 연구가 필요하다. 최근에 최적화 기법(optimization technique) 등 최근 다양한 히스토리 매칭 기법들이 제안되고 있다(Ralf Schulze-Riegert, Shawket Ghedan, 2007). Huang *et al.* (1998)과 Lumley and Behrens (1998)은 이미 이와 비슷한 연구를 수행한 바 있다.

앞으로의 방향

4차원 탄성과 탐사 기술은 지수함수적으로 빠르게 발전하고 있으며 저류층 모델링뿐 아니라 저류층 관리를 위한 정보까지 제공할 수 있다. 뿐만 아니라 모니터링 센서를 시추공과 지표에 설치함으로써, 모니터링 자료를 실시간으로 획득하여 저류층 관리 팀이 결정한 저류층 관리 방법의 영향을 모니터링할 수도 있다. 탄성과 탐사 자료에 영향을 줄 정도의 저류층 변화는 그렇게 빨리 일어나는 것이 아니므로 탄성과 탐사 자료는 시추공의 압력과 온도 센서에서처럼 실시간으로 측정할 필요는 없다. 조만간 저류층 상황을 모니터링할 수 있는 낮은 가격의 다성분 p 와 s 파 센서가 제공되어서 시추공 및 지표에 설치 될 수 있을 것이다. 비록 연속적이거나 실 시간적으로 측정하지는 않을지라도, 이러한 탄성과 자료는 빠른 시간 내에 해석함으로써 저류층 관리를 위한 결정에 유용하게 이용되게 될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No. 2010T100200133)과 지식경제부 “한반도 주변해역 석유가스자원 탐사연구” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Aarre, V., Hansen, H. J., Herwanger, J., Marshall, J., Paulsen, J. O., Pickering, S., and Tang, M., 2007, Innovations in time, *First break*, **25**, 91-96.
- Alsos, T., Eide, A., Astratti, D., Pickering, S., Benabentos, M., Dutta, N., Mallick, S., Schultz, G., Ooer, L., Livingstone, M., Nickel, M., Sonneland, L., Schlaf, J., Schoepfer, P., Sigismond, M., Soldo, J. C., and Stronen, L. K., 2002, Seismic applications throughout the life of the reservoir, *Oilfield Review*, 48-65.
- Altan, S., 1997, Time-lapse seismic monitoring: Repeatability processing tests, *67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 866-867.
- Anderson, R. N., Boulanger, A., He, W., Xu, L., Flemings, P. B., Burkhart, T. D., and Hoover, A. R., 1997, 4-D time-lapse seismic monitoring in the south Timbalier 295 field, Gulf of Mexico, *67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 868-871.
- Aronsen, H. A., Osdal, B., Dahl, T., Eiken, O., Goto, R., Khazanehdari, J., Pickering, S., and Smith, P., 2004, Time will tell: New insights from time-lapse seismic data, *Oilfield Review*, 6-15.
- Beasley, C. J., Chambers, R. E., Workman, R. L., Craft, K. L., and Meister, L. J., 1997, Repeatability of 3-D ocean-bottom cable seismic surveys, *The Leading Edge*, **16**, 1281-1285.
- Ebrom, D., Krail, P., Ridyrd, D., and Scott, L., 1998, 4-C/4-D at Teal South, *The Leading Edge*, **17**, 1450-1453.
- Ebrom, D. A., Purnell, G., and Krail, P., 1997, Repeatability of marine seismic streamer data for prestack analysis at the Orca basin, *67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 59-62.
- Ecker, C., Lumley, D. E., Tura, A., Kempner, W., and Klonsky, L., 1999, Estimating separate steam thickness and temperature maps from 4-D seismic data: An example from San Joaquin Valley, California, *69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2032-2034.
- El-Emam, A. H., Hughes, J. K., and Bunaian, H. A., 1998, Repeatability of land seismic surveys: A case study from Kuwait, *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 5-8.
- El Ouair, Y., and Stronen, L., 2006, Value creation from 4D seismic at the Gullfaks Field: achievements and new challenges, 76th SEG annual meeting.
- Gassmann, F., 1951. Über die elastizität poröser medien: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, **96**, 1-23.
- Greaves, R. J., and Fulp, T. J., 1987, Three-dimensional seismic monitoring of an enhanced oil recovery process, *Geophysics*, **52**, 1175-1187.
- He, W., Guerin, G., Anderson, R. N., and Mello, U. T., 1998, Time-dependent reservoir characterization of the LF sand in the South Eugene Island 330 Field, Gulf of Mexico, *The Leading Edge*, **17**, 1434-1438.
- Hirsche, K., Batzle, M., Knight, R., Wang, Z., Mewhort, L., Davis, R., and Sedgwick, G., 1997, Seismic monitoring of gas floods in carbonate reservoirs: From rock physics to field testing, *67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 902-905.
- Huang, X., Meister, L., and Workman, R., 1998, Improving production history matching using time-lapse seismic data, *The Leading Edge*, **17**, 1430-1433.
- Jenkins, S. D., Waite, M. W., and Bee, M. F., 1997, Time-lapse monitoring of the Duri steamflood: A pilot and case study, *The Leading Edge*, **16**, 1267-1273.
- Johnston, D. H., McKenny, R. S., Verbeek, J., and Almond, J., 1998, Time-lapse seismic analysis of Fulmar Field, *The Leading Edge*, **17**, 1420, 1422-1426, 1428.
- Landro, M., 1999, Discrimination between pressure and fluid saturation changes from time lapse seismic data, *69th Ann.*

- Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1651-1654.
- Lumley, D. E., 1995a, Seismic time-lapse monitoring of subsurface fluid flow: Ph.D. thesis, Stanford Univ.
- Lumley, D. E., 1995b, 4-D seismic monitoring of an active steam flood, *65th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 203-206.
- Lumley, D. E., and Behrens, R. A., 1998, Practical issues of 4D seismic reservoir monitoring: What an engineer needs to know: SPE Reservoir Evaluation and Engineering, December, 528-538.
- Lumley, D. E., Behrens, R. A., and Wang, Z., 1997, Assessing the technical risk of a 4-D seismic project, *The Leading Edge*, **16**, 1287-1291.
- Lumley, D. E., Nunns, A. G., Delorme, G., Adeogba, A. A., and Bee, M. F., 1999, Meren Field, Nigeria: A 4-D seismic case study, *69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1628-1631.
- Lumley, D., Nur, A., Strandenes, S., Dvorkin, J., and Packwood, J., 1994, Seismic monitoring of oil production: A feasibility study, *64th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 319-322.
- Moldoveanu, N., van Baaren, P., Adessi, D., Stubbington, L., and Combee, L., 1996, Repeatability of the seismic experiments for 4-D seismic in transition zone surveys, *66th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 5-8.
- Moore, D. E., 1997, Using multiple time-lapse 3-D seismic surveys for fluid characterization in consolidated sandstone reservoirs: Offshore Technology Conference, OTC Paper 8292.
- Nguyen, P. K. T., and Nam, M. J., 2011, A review on methods for constructing rock physics models of saturated reservoir rock for time-lapse seismic, *Geosystem Engineering*, **14**, 95-107.
- Porter-Hirsche, J. L., and Hirsche, K. W., 1998, Repeatability study of land data acquisition and processing for time lapse seismic, *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 9-11.
- Ralf Schulze-Riegert and Shawket Ghedan, 2007, Modern Techniques for History Matching, 9th international forum on reservoir simulation, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Rennie, J., Alexandre, R., and Ronen, S., 1997, Sensitivity of repeat 3-D seismic surveys to geometry variations - A controlled experiment, *67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 91-95.
- Tura, A., and Lumley, D. E., 1998, Subsurface fluid flow properties from time-lapse elastic wave reflection data, *Mathematical Methods in Geophysical Imaging*, **5**, 125-138.
- Tura, A., and Lumley, D. E., 1999a, Estimating pressure and saturation changes from timelapse AVO data, *61st Conf. and Tech. Exhibit, Eu. Assn. Geosci. Eng., Extended Abstracts*, 1-38.
- Tura, A., and Lumley, D. E., 1999b, Estimating pressure and saturation changes from timelapse AVO data, *69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1655-1658.
- Vesnaver, A., Accaino, F., Bohm, G., Madrussani, G., Pajchel, J., Rossi, G., and Moro, G., 2003, Time-lapse tomography, *Geophysics*, **68**(3), 815-823.
- Waite, M. W., and Sigit, R., 1997, Seismic monitoring of the Duri steamflood: Application to reservoir management, *The Leading Edge*, **16**, 1275-1278.
- Walls, J. D., Dvorkin, J., and Smith, B. A., 1998, Modeling seismic velocity in Ekofisk Chalk, *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1016-1019.
- Wang, Z., 1997, Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring: The physical basis: *The Leading Edge*, **16**, 1327-1329.