



공학석사 학위논문

MX 지역에 2-way coupling 시뮬레이션을 적용한 생산성 및 안정성 분석

Productivity and stability analyses by adapting 2-way coupling simulation in MX field

2023년 8월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

전호장

MX 지역에 2-way coupling 시뮬레이션을 적용한 생산성 및 안정성 분석

Productivity and stability analyses by adapting

2-way coupling simulation in MX field

지도 교수 최종근

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함 2023년 8월

> 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 전 호 장

전호장의 공학석사 학위논문을 인준함 2023 년 7월



유가스전 개발계획에서 저류층 시뮬레이션을 통한 생산성 예측이 필수적이나, 기존 방법은 저류층 고갈에 따른 생산성 변화를 정확히 예측하지 못하고, 가스전 시설과 지층의 안정성을 보장하기 어렵다. 지오메카닉스 시뮬레이션은 이를 개선하여 저류층 시뮬레이션과 연계되어 실제 지하 환경에서의 역학적 특성을 모사하고 유가스 생산에 따른 지층의 반응을 예측한다. 이를 통해 가스전의 개발타당성을 명확히 하고, 발생가능한 위험을 예측하여 사고를 예방하는 중요한 역할을 한다.

본 연구 대상은 심해의 Dry Gas 개발 예정지인 MX 지역으로, 탐사결과 해당 필드의 저류층 물성과 DST 중의 Sand Production은 해당 필드가 미고결층임을 지시했다. 따라서 해당 저류층 고갈에 따른 생산성 변화를 명확하게 파악하고 생산 과정의 안정성을 검증해야한다. 이를 위해 본 연구에서는 저류층 시뮬레이션과 지오메카닉스 시뮬레이션을 연계한 2way coupling 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서는 먼저 탐사자료, 검층자료, 시추리포트를 수집하고 이를 바탕으로 암석 물성간의 관계식을 세워 1D MEM을 생성하였다. 이후 지오메카닉스 그리드를 추가하고, 각 그리드에 적절히 물성을 선언해주어 3D MEM을 생성하였다. 마지막으로 MX 지역에서 가능한 개발옵션 케이스들을 정의하고 2-way coupling 시뮬레이션을 수행하여 각 케이스간의 생산성과 안정성 차이를 분석하였다.

분석 결과, MX 지역의 저류층은 미고결층임에도 불구하고 고갈에 따른 물성 변화가 크지 않아 생산성 저하가 거의 없었다. 개발옵션 케이스 분석에서 생산정의 개수 증가는 안정성을 향상시키지만 궁극가채량 증가가 없어 경제적 타당성이 떨어진다. 필드 가스 생산량 조절은 암석파괴속도 완화에 도움이 되지 않았다. 하지만 적절한 가스 생산량 선정에는 Erosional Velocity 등의 추가 요인 고려가 필요하다. 생산정의 수평구간 연장은 주변 지층의 압력저하를 완화하여 암석파괴량을 낮추는데 효과적이었다. 따라서 연장할수록 증가하는 시추비용을 고려한 적절한 길이선정이 필요하다.

주요어 : MX 지역, 지오메카닉스, 2-way coupling 시뮬레이션, 생산성 및 안정성, Case study

학 번:2021-27330

제1장서	론	1
제 2 장 연 제 1 절 제 2 절 제 3 절 제 4 절 제 5 절	구 배 경 지질학적 환경 지질학적 환경 가스정 설계 계획 지오메카닉스 연구배경 지오메카닉스 배경지식 지오메카닉스 시뮬레이션	2 .2 .5 .7 .8
제 3 장 연 제 1 절 제 2 절 제 3 절 제 4 절 제 5 절	7 방법	.7 17 19 25 28 30
제 4 장 연 제 1 절 제 2 절 제 3 절 제 4 절 제 5 절	구 결 과	33 35 44 49 54
제 5 장 결	론5	6
참고문헌	5	;9

;1
;

[Table 3.4] Cases for analysis of the effect of a field production rate.....31 [Table 3.5] Cases for analysis of the effect of horizontal section length.32 [Table 4.1] EUR and field life of each case on number of well study.......38 [Table 4.3] Risk evaluation of near wellbore geomechanics(SPE184603)43 [Table 4.4] Risk evaluation of near wellbore geomechanics(study 2)......43 [Table 4.5] EUR and field life of each case on field prod rate study.......44 [Table 4.8] Risk evaluation of near wellbore geomechanics(study 3)......48 [Table 4.10] EUR of each case on horizontal section length study.........50 [Table 4.11] Rock failure near wellbore(study 4)......51 [Table 4.12] Risk evaluation of near wellbore geomechanics(study 4)....53 [Table 4.14] Risk evaluation of near wellbore geomechanics(study 5)....55

그림 목차

[Figure 2.1] MX field's Sedimentary Environment	2
[Figure 2.2] Well Logs at MX-1 and MX-2	3
[Figure 2.3] Geological Model of GX formation	4
[Figure 2.4] Conceptual Well Trajectory and Casing Design	5
[Figure 2.5] Well designs of base case and contingency	6
[Figure 2.6] Shear Stress and Normal Stress	8
[Figure 2.8] Stress axis rotation and Principal stress	9
[Figure 2.9] Relation of Pressure and Stress	9
[Figure 2.10] Normal Strain and Shear Strain	10
[Figure 2.11] Typical results of Compression test	12
[Figure 2.12] Typical Mohr Circle diagram	12
[Figure 2.13] Mohr Circles and Failure envelope	13
[Figure 2.14] Coulomb Failure in Normal Fault Stress Regime	15
[Figure 3.1] Geomechanics study workflow	17
[Figure 3.2] Workflow of 1D MEM Construction	20
[Figure 3.3] World Stress Map	22
[Figure 3.4] Illustration of typical LOT test results	23
[Figure 3.5] Elastic moduli and Rock strength of MX-1 and MX-2	24
[Figure 3.6] Principal stress profile after calibration with LOT	24
[Figure 3.7] Workflow of 3D MEM Construction	25
[Figure 3.8] Geomechanics embedded grid	26
[Figure 3.9] MX field reservoir model with defined rock strength(UCS).	27
[Figure 3.10] Schematic of 1-way coupling simulation	29
[Figure 3.11] Schematic of 2-way coupling simulation	29
[Figure 4.1] EUR from reservoir simulation stand alone case	and
geomechanics 2-way coupling case	33
[Figure 4.2] Decreasing permeability during a depletion	34
[Figure 4.3] Permeability map of MX field at initial state and end of life.	34
[Figure 4.4] Placement of MXD wells on GX reservoir	35
[Figure 4.5] Placement of MXD wells on GX reservoir	36
[Figure 4.6] EUR difference by different number of wells	37
[Figure 4.7] Gas production rate of each well on case2 study	37
[Figure 4.8] Open hole and casing range of MAD-1 and MAD-2	38
[Figure 4.9] Near Wellbore Model of MAD-2	39
[Figure 4.10] Composition of Near Wellbore Model	39
[Figure 4.11] Rock failure near wellbore of MXD-2 in 2027 and 2049	40
[Figure 4.12] Rock failure near wellbore of MAD-2 (x-section)	40
[Figure 4.13] Increase of rock failure near well of each cases	41
[Figure 4.14] Monr Circle diagram on rock failure	44
[Figure 4.15] Kock famure and maximum effective stress near MAD-2	weii 49
[Figure 4.16] Field and production rate and sumulative	42 15
[Figure 4.10] Field gas production rate and cumulative	40
[Figure 4.18] Rock failure on field during production(in 2020)	40 17
[1]gure 4.10] NOCK failure on herd during production(in 2059)	41

[Figure 4.19] Increase of rock failure on field	47
[Figure 4.20] Increase of rock failure near well MXD-1 and MXD-2	48
[Figure 4.21] Gas production cumulative of each case (study4)	51
[Figure 4.22] Increase of rock failure near well (study 4)	52
[Figure 4.23] Reservoir pressure near MXD-2 at different hz length	52
[Figure 4.24] Generated near wellbore model for contingency plan	54
[Figure 4.25] Increase of rock failure near well (study 4)	55

제1장서 론

유가스전개발계획에 있어서 저류층 시뮬레이션을 통한 생산성 예측은 필수적이다. 그러나 기존 저류층 시뮬레이션에서는 생산에 따른 저류층 고갈로 인한 물성 및 생산성 변화를 반영하지 못하며 가스전 시설 및 대상 지층의 안정성을 보장하지 못한다. 지오메카닉스 시뮬레이션은 저류층 시뮬레이션과 연계되어, 실제 지하 환경에서의 역학적 특성을 모사하여 유가스 생산에 따른 지질층의 반응을 예측한다. 이를 통해 가스전의 개발 타당성을 명확히 하고, 발생할 수 있는 위험을 예측하여 사고를 예방하도록 한다.

MX필드는 육지로부터 약 100km거리에 있는 심해의 dry gas 개발 예정지이다. P사는 인근필드에서 탐사와 개발에 성공하여 현재 가스를 생산중이며 향후 MX필드를 개발하고 기개발된 가스전과 연계하여 감소될 가스생산량을 충당할 계획이다. 따라서 P사는 MX 지역을 탐사하였으며 2020년 2월에 탐사정을, 그리고 2022년도 3월에 평가정을 시추하였다. 필드의 가스매장량은 598Bcf로 추정되며 2027년에 개발이 마무리되어 그때부터 가스가 생산될 예정이다.

해당 저류층은 2,000~2,500mTVDSS, WD>1,000m이상의 심해 지역에 위치한다. 탐사정과 평가정에서 얻은 검층자료에서는 해당 저류층의 공극률(~34%)과 투수율(~400mD)은 매우 높게 나타났으며 검층자료로 추정한 UCS(Unconfined Compressive Strength)는 300~900psi로 낮은 편이었다. 또한 탐사정의 DST(Drill Stem Test)기간 중에 Sand Production Issue가 발생해 해당 저류층은 연약층으로 판단되었다.

연약층의 경우 일반적인 층보다 저류층 다짐(Compaction), 암석파괴(Rock Failure), 지반침하(Subsidence)의 가능성이 더 크다. 또한 MX 지역은 심해에 위치한 가스전으로 개발 이후 추가설비변경이 어렵고 이는 높은 비용을 요구한다. 사례조사에서 높은 공극률과 투수율, 낮은 암석강도(UCS)의 가스필드에서 지오메카닉스 분석을 통해 시추계획에 반영한 개발사례가 다수 확인되었다.

MX 지역 또한 저류층의 고갈에 따른 생산성 영향을 규명하는 것과 개발 및 생산 과정 중의 안정성을 정확히 검증하는 것이 중요하다. 따라서 저류층 시뮬레이션과 지오메카닉스 시뮬레이션을 연계한 2-way coupling 시뮬레이션과 그 결과에 대한 논의가 요구되었다.

1

제 2 장 연구 배경

제 1 절 지질학적 환경

MX 지역은 2020년 3D 탄성파 탐사로 발견되었으며 이미 개발된 인근 필드 플랫폼으로부터 남쪽 37km 떨어진 위치에 있다. 이 필드는 심해 subsea well로 개발 예정이다. MX 지역은 RX분지에서 마이오세 시기에 퇴적된 저탁암을 저류층(GX층)으로 한다. 퇴적환경은 북쪽의 Feeder channel로부터 기원한 Multi-stacked sedimentary succession(Figure 2.1)이었으며, 괴상의 사암이 퇴적되며 저류층을 형성했고 상부에는 셰일이 덮개암으로 퇴적되었다. 해당 저류층은 지구조적 압축력으로 생성된 N-S방향 배사구조의 Crest에 위치하였으며 층서-구조트랩으로 플라이오세 시기에 이동(migration)된 생물기원의 탄화수소를 집적하고있다. 또한 필드 내에 2개의 역단층을 포함하고 있으며 해저면으로부터 910~1650m 하부에 위치하며 비교적 적은 양의 퇴적을 겪었다. GX층에서는 점토질 사암과 이질 실트암이 교호하여 나타난다. 특히, 하부 GX층은 괴상과 엽리가 혼합된 사암층이 나타난다. 상부 GX층은 더 얇은 엽층리 사암으로 이루어진다. 또한 MX-2 평가정에서 GX층의 상부 지층에서도 가스를 집적한 엽리사암이 발견되었고, 이는 levee기원의 퇴적층이었다.



Figure 2.1 MX field's Sedimentary Environment

MX 지역에서는 2020년 2월에는 탐사정, 2023년 3월에는 평가정을 시추하였고, 당시 수행한 검층결과는 Figure 2.2와 같다.



<Well Logs at MX -1>





Figure 2.2 Well Logs at MX-1 and MX-2

탐사정과 평가정의 XPT(Express Pressure Tool)와 MDT(Modular formation Dynamics tester)에서 측정된 압력값들은 한 개의 gas gradient를 나타냈다. C1 > 99%의 가스성분이 확인되었고 이는 이전 인근 필드에서 취득된 가스성분과 동일하다. MX-2에서는 RCA % SCAL을 이용해 Core 71.5m 구간을 분석하였다.

2022년 2월 MX-1 탐사정에서 DST(Drill Stem Test)를 실시하였다. 2,318mTVDSS를 Datum으로 초기압력은 3823psi, 투수율은 405md, 온도는 39.5°C로 추정되었다. AOFP(Absolute Open Flow Potential)는 1020MMscfd였으며 생산성은 100psi drawdown에서 70MMscfd으로 인근의 생산정보다 높은 생산성을 보였다. 이는 퇴적 깊이가 1300m로 얕은 under-compaction 환경에서 open pore throat system이 형성되어 우수한 저류층 특성을 가진 것으로 판단된다.

DST중 screen이 없는 완결상태에서 38MMscfd로 생산하였을 때 시간당 8.3kg의 대량의 sand production이 발생했다. 이러한 Sand production은 생산 설비에 치명적이므로, 이에 대한 해결책으로 당사는 수평정 시추(Horizontal well Drilling)를 추진하게 된다.

저류층에 대한 지질모델은 Figure 2.3과 같고 해당 모델에서 공극률은 평균 33.6%, 투수율은 평균 442.3MD이며 필드의 HCIP(Hydrocarbon In Place)는 773bcf이다.



Figure 2.3 - Geological Model of GX formation (Yellow : sandstone, Orange : Shale)

제 2 절 가스정 설계 계획

현재 설계 계획은 다른 필드에서 감퇴하는 가스생산량을 보충하기위해 MX 지역에서 2027년에 두개의 생산정을 시추하고 각 생산정에서 100mmscfd로 총 200mmscfd로 생산하는 것이다.

MX 지역 생산정 기본설계 계획은 수평정 개발이다. 그 목적은 저류층의 낮은 암석강도에 대응하여 위에서 언급된 Sand Production 문제에 대응하고자 저류층 Drawdown을 최소화하고 생산율을 최대화하기 위함이다. 수평구간은 reservoir payzone의 약 300m를 관통하는 것을 목표로 하고 있다.

생산정 설계는 30" 커넥터 설치를 시작으로, 상부에서부터 20", 13-3/8", 9-5/8" 케이싱으로 연결 후 저류층 구간을 8-1/2" 나공으로 개발할 계획이다. Figure 2.4는 생산정의 시추계획을 나타낸 그림이다.



Figure 2.4 Conceptual Well Trajectory and Casing Design

저류층 생산영역의 완결은 Sand Production을 고려하여 설계되었다. 유정시험자료와 코어실험(RCA, SCAL)자료와 암석강도분석(UCS, unconfined compressive range 200psi 미만)결과와 Sand Prediction study와 peer review를 통해 well의 특정지점에서 rock failure가 발생할 것이 예상되었고 그러므로 sand control이 요구되었다. Workover 가능성을 최소화하기 위해 초기단계에서 sand control을 해야 했다. 따라서 완결방법은 스킨을 최소화하고 Sand Control을 위한 OHGP(Open Hole Gravel Pack)로 예정되어있다.

OHGP은 이질성과 이방성과 Fine Sand 함량이 높은 것에 대응하기 적절하다. 스크린으로는 shunt tube screen이 사용되고 viscous carrier fluid가 이용되어 gravel packing을 할 것이다. PSD(Particle Size Distribution) 분석결과에 따르면 Screen과 Gravel의 크기는 각각 120micron screen과 40/80 gravel이 적절하다고 판단되었다.

P사는 위 계획 실행 중 시추문제가 발생하여 저류층에 도달하지 못하는 경우를 대비해 7인치 라이너를 9-5/8인치 케이싱의 하부에서부터 저류층상부까지 설치하는 방안을 계획하였다. 저류층 구간에는 6인치 시추공을 OHGP로 완결할 계획이다. MX 생산정의 기본 계획과 대안책(Contingency)의 Well design은 Figure 2.5에서 확인할 수 있다.



Figure 2.5 Well designs of base case and contingency

제 3 절 지오메카닉스 연구배경

MX 지역 탐사기간 중, 해당 저류층에서 높은 공극률과 (~34%), 높은 투수율 (~400mD), 낮은 강도(300psi~900psi UCS)를 가진 사암층에서 가스 부존이 확인되었다.

문헌조사에서 위와 유사한 물성의 저류층 개발 사례를 다수 확인하였다. 대부분 저류층 깊이 2,000~2,500mTVDSS, WD >1,000m 심해 필드이며 낮은 압축과정을 겪어 공극률과 투수율이 높아 생산성이 높은 것이 특징이었다.

Zawtika 필드는 생산초기 Sand 생산 위험성이 낮으나 생산 후기 위험성이 증가했다. 따라서 완결 단계에서 CHGP(Closed Hole Gravel Packing)완결과 acid treatment를 적용한 Sand Control을 하였고 성공적으로 생산중이다(Wuthicharn 등, 2018).

Fortuna 필드는 Dry gas subsea field로 1단계 개발 후 고갈된 저류층을 2단계 추가개발 하였다. 이때 지오메카닉스 분석으로 지층의 불안정성을 확인하였고 OHGP(Open Hole Gravel Packing) 완결을 통한 생산 최적화 및 Sand Control을 하였으며 시추경로계획과 가스정설계를 수행하였다. (French, S 등, 2017)

SX 필드는 탐사정에서 산출시험중 Sand 생산이 확인되었으며 Sand Screen 설치이후에도 해결되지 않았다. 따라서 생산정에서는 300m의 수평구간에 OHGP 통한 생산성 최적화 및 sand production 최소화를 계획하였다.

MX 지역 인근 기개발된 가스정에서는 이미 Sand Production issue가 몇차례 발생하였다. 본 연구지역인 MX 지역도 낮은 암석강도로 인해 생산 전 기간에 걸쳐 sand production이 예상된다. MX-1 탐사정 산출시험에서는 51psi drawdown에서 다량의 sand 생산이 확인되었다. 따라서 저류층 물성 및 생산량을 고려했을 때 OHGP 수평정 개발이 적절하다고 판단되며 이를 평가하고 상세한 Sand Control 계획을 위한 지오메카닉스 연구가 요구되었다.

7

제 4 절 지오메카닉스 배경지식

지오메카닉스는 지하환경에 고체역학과 수학 및 역학을 적용하여 지층의 시추, 유체유동, 응력 변화, 압력 변화 및 온도 변화에 대한 압력의 반응을 정량적으로 모사하는데 특화된 학문이다.

응력(Stress)은 작용 힘을 작용면적으로 나눈 값이며, 이는 텐서(tensor)구성요소로 표현된다. 힘의 작용방향이 면에 수직인 응력은 수직 응력(Normal Stress)이고, 힘의 작용방향이 작용면과 평행한 응력은 전단 응력(Shear stress)이다(Figure 2.6).



Figure 2.6 Shear Stress and Normal Stress

3차원 상에서 한 물체에 작용하는 stress는 6가지의 독립된 숫자로 표현할 수 있다. 이것은 비대각 행렬(off diagonal matrix)로 나타나며 σ_{11} 은 X_1 면에서 X_1 에 수직 방향으로 작용하는 수직응력을 σ_{12} 는 X_1 면에서 X_2 방향으로 작용하는 전단응력을 나타낸다(Figure 2.7). 역학적 평형상태에서 σ_{12} 와 σ_{21} 의 값은 동일하다. 따라서 아래 행렬은 6가지의 값으로만 표현된다.



Figure 2.7 Stress component matrix

응력을 표현하는 좌표축을 적절히 회전하면 Figure 2.8과 같이 3개의 수직응력성분만으로 표현할 수 있으며 이 성분들을 주응력(Principal stress)이라고 한다. 이때 최대 주응력(Maximum Compressive Principal stress)을 σ_1 , 중간 주응력(intermediate compressive principal stress)을 σ_2 , 최소 주응력(minimum compressive principal stress)을 σ_3 로 표현한다.



Figure 2.8 Stress axis rotation and Principal stress

다공질 매질에는 공극압(Pore Pressure)과 유효응력(Effective stress)이 존재한다. 공극압은 공극 내 유체의 압력을, 유효응력은 매질의 입자들에 적용되는 응력을 의미한다(Figure 2.9).



Figure 2.9 Relation of Pressure and Stress

Biot는 다공질 매질에서 압력과 응력이 주고받은 영향을 분석하고 Poro elastic model을 제창하였다(1935, 1941). Poro-Elastic model에서 전체응력, 유효응력, 공극압은 식 2.1와 같은 관계식을 갖는다. σ'_{ij} 는 ij방향의 유효응력을, σ_{ij} 는 전체응력을, α 는 Biot coefficient를 의미하며, δ_{ij} 는 크로네커 델타이다.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha P_p \delta_{ij} \tag{2.1}$$

Biot coefficient α는 공극압이 유효응력에 영향을 주는 척도로 0에서 1사이의 값을 갖으며 Geertsma(1957), Skempton(1961)에 따르면 식 2.2을 통해 실험적으로 계산할 수 있다. *K* 는 공극을 포함한 암석의 체적탄성률(Bulk Modulus)을, *K_s* 순수기질의 체적탄성률을 의미한다.

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \tag{2.2}$$

지층의 상부무게가 일정하면 전체응력은 일정하다. 따라서 저류층에서 가스 생산에 따라 유체가 회수되고 공극압이 감소하면 2.1식에 따라 유효 응력이 증가하고 Rock Failure의 위험성이 커지게 된다.

변형(Strain)은 물체에 가해진 응력에 대한 형상의 변화이다(Figure 2.10). 수직변형(Normal Strain)은 작용면과 응력방향이 일치할 때 해당방향으로 수축 또는 연장된 길이와 초기길이의 비율이며 식 2.3와 같이 표현된다. 전단변형(Shear Strain)은 작용면과 응력방향이 수직일 때의 변형각도를 나타낸 값으로 식 2.4와 같이 표현된다.



Figure 2.10 Normal Strain and Shear Strain

Normal Strain
$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$
 (2.3)

탄성(Elasticity)은 물체에 응력이 가해졌을 때 영구적인 변형없이 가역적으로 되돌아가는 변형을 하는 성질을 말한다. 등방성 물질(Isotropic material)의 탄성률(Elastic Modulus)는 두 개의 물성, 영률(Young's modulus)과 포아송비 (Poisson's ratio)로 나타낼 수 있다.

영률은 응력과 같은방향의 변형의 비율을 나타내며 식 2.5로 표현된다.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$
(2.5)

포아송비는 수직응력이 가해졌을 때 수직변형과 수평방향의 팽창 또는 수축의 비율을 나타내며 식 2.6로 표현된다. ε_a는 수직방향의 변형을 ε_r은 수평방향으로의 변형을 의미한다. 일반적으로 암석은 0.2~0.4의 포아송비 값을 갖는다.

$$v = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$$
(2.6)

탄성률은 일축압축시험(Uniaxial Compression Test) 또는 삼축압축시험(Triaxial Compression Test)을 통해 측정된다. 일축압축시험은 축방향으로만 응력을 가했을 때의 변형을 측정하는 시험이다. 삼축압축시험은 축방향으로의 하중과 측면의 압력을 동시에 가했을 때의 변형을 측정하는 시험이다.

소성(Plasticity)은 변형 이후 응력이 제거되어도 변형이 남아있는 성질을 말한다. 압축시험의 전형적인 결과는 Figure 2.11과 같은데, 응력을 증가시킬수록 변형(strain)이 늘어난다. 탄성한계(Elastic limit)까지는 응력이 사라지면 다시 되돌아가는 가역적이며 선형적인 변화를 보이는데, 그 이상에서는 비선형적이며 비가역적인 소성성질을 보인다. 계속 응력과 변형이 증가하면 취성파괴(Brittle Failure)가 발생한다.

11



Figure 2.11 Typical results of Compression test

탄성률(Elastic moduli)는 일축 및 삼축압축시험과 같은 정적측정(static measurement)뿐 아니라 속도검층(well bore sonic)과 같은 acoustic method로도 측정되며 이를 동적측정(dynamic measurement)이라 한다. 탄성률의 동적측정값은 식 2.7과 식 2.8로 구해진다. *G*는 Shear Modulus를 의미한다.

Young's Modulus
$$E_{dyn} = G(3v_p^2 - 4v_s^2)/(v_p^2 - v_s^2)$$
 (2.7)

Poisson Ratio
$$v_{dyn} = (v_p^2 - 2v_s^2)/2(v_p^2 - v_s^2)$$
 (2.8)

일반적으로 정적측정값은 동적측정값보다 작게 나타나며 실제 물성을 더 정확히 모사한다. 따라서 둘을 측정한 후 관계식(correlation)을 구하여 동적측정된 Wellbore구간에서의 정적측정값을 구해야한다. 그 관계에 대한 많은 연구가 진행되어왔고 여러 관계식이 존재한다. MX필드는 영률에 대해서는 식 2.9와 같은 Linear correlation을 사용하였고 Poisson's Ratio는 명확한 상관관계가 없어 둘이 같다고 가정했다(식 2.10).

$$E_{sta} = 0.4346 * E_{dyn}$$
 (2.9)

$$\nu_{sta} = \nu_{dyn} \tag{2.10}$$

UCS(Unconfined Compressive Strength)는 가장 흔한 암석의 강도단위이다. UCS는 대기압에서 일축압축시험 수행 중 암석이 파괴될 때까지 가장 높은 응력값으로써 측정된다. 주변의 암석이 존재하지 않을 때의 파괴 기준(failure criteria)값은 UCS이다. Mohr circle은 특정 면에 작용하는 응력의 상태와 강도를 나타내는 기하학적 형태로 나타낸 것이다. Mohr Circle은 최대 및 최소 두개의 주응력 성분으로 구성된다. Mohr circle을 그리는 x축은 수직 응력의 강도이며 y축은 전단 응력의 강도이다. σ₁ 과 σ₃ '을 x축 위에 도시하고 그 둘을 잇는 원을 그린다(Figure 2.12).



Figure 2.12 Typical Mohr Circle diagram

이때 σ₁ 로부터 2α떨어진 각도에 있는 점의 수직응력과 전단응력값을 알 수 있는데, 이 지점은 σ₁'로부터 α 각도로 배열된 면의 수직응력과 전단응력을 나타낸다. 이처럼 Mohr Circle은 수직응력과 전단응력이 면의 배열에 따라 어떻게 바뀌는지 나타낸다.

Mohr Circle을 통해서 파괴조건(Failure Criteria) 여부도 확인할 수 있다. 삼축압축시험에서는 수평응력(σ_3)을 증가시키며 그때 코어가 버티는 최대응력(σ_1)을 시험한다. 몇 차례 시험으로 구한 원들에 접하는 접선인 파괴포락선(Failure Envelope)을 구할 수 있으며, Mohr Circle이 파괴포락선 아래 있는 암석은 안정함을 의미하고, Mohr Circle이 접하거나 넘는 암석들은 불안정함을 의미한다(Figure 2.13). 파괴포락선의 선형식은 식 2.11로 표현된다.



Figure 1.13 Mohr Circles and Failure envelope

$$\tau = c + tan\phi * \sigma_n$$
 (2.11)

c 는 수직응력이 0일때의 전단응력값인 응집도(cohesion)를, φ 는 마찰각(friction angle)이다. 일반적인 사암의 경우 30~40의 마찰각을 갖는다.

또한 파괴조건에서 σ_1 과 σ_3 는 선형적인 관계를 가지며 그 관계는 식 2.12와 같다.

$$\sigma_1 - N * \sigma_3 = UCS \tag{2.12}$$

$$N = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$$
 (2.13)

저류층에서 유체를 주입하는 상황에서는, 총 응력은 일정한데 공극압이 증가하여 유효 응력은 감소할 것이다. 그러면 Mohr circle이 왼쪽으로 이동하여 파괴조건에 도달하면 암석 파괴가 발생할 수 있다.

반대로 저류층에서 유체를 생산하는 상황에서도 암석 파괴가 발생할 수 있다. Normal Fault Stress Regime은 지표로부터의 응력(S_v)이 최대 주 응력방향(σ₁)인 필드이며 MX필드도 여기에 해당한다. 저류층의 유체가 제거되며 공극압이 감소하며 유효 응력이 증가하는데 σ₁ (σ_v)의 증가분은 식 2.15와 같고 σ₃ (σ_k, 수평응력)의 증가분은 식 2.16과 같다. 이때 Δσ₁ 값이 Δσ₃ 값보다 더 크므로 Mohr Circle이 오른쪽으로 이동함과 동시에 원의 크기가 커지게 되고 파괴포락선에 도달할 경우 암석파괴가 발생한다(C. Haug et al. 2018)(Figure 2.14).

$$\Delta \sigma_{v} = -\alpha \Delta P_{p} \tag{2.15}$$

$$\Delta \sigma_{k} = \left[\frac{1-2\nu}{1-\nu}\right] \alpha \Delta P_{p} \tag{2.16}$$

 α 는 Biot Coefficient, P_p 는 공극압을 의미한다.



Figure 2.14 Coulomb Failure in Normal Fault Stress Regime

제 5 절 지오메카닉스 시뮬레이션

지오메카닉스 시뮬레이션은 컴퓨터를 이용해 지하물질들의 역학적 반응을 분석하는 수치해석방법이다(Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. 2005)

지하물성을 모사하는 3D 또는 4D의 mechanical Earth model를 개발한 후에 다양한 하중 및 응력환경에 따른 지층의 반응을 보여준다. 지오메카닉스는 토목공학, 석유공학, 광상학, 등 분야에서 중요한 역할을 한다. 이는 암반의 안정성을 이해하고, 지하구조의 안정성을 설계하며 저류층에서 유체 생산이후의 반응을 예측하는 역할을 수행한다. (Zoback, M.D. 2010)

지오메카닉스 시뮬레이션으로 흔히 사용되는 수치해석법은 유한요소법 (Finite Element Method)이다. 유한요소법은 수치해석적 방법중 하나로 domain을 작은 finite-sized element로 분할하여 문제를 푼다. 지오메카닉스에서 이 element들은 시뮬레이션되는 지질물질을 최소 단위로 모사한다.

지오메카닉스 시뮬레이션이 석유공학 분야에 적용될 때는 저류층 시뮬레이터와 Coupling되어 생산에 따라 저류층 시뮬레이터가 계산한 저류층의 응력, 온도, 그리고 압력을 전달받아 이에 따른 지오메카닉스 반응을 각 시간대별로 계산한다. 초기상태를 모사하고 생산 또는 주입 이후 저류층과 주변지층의 변화를 시뮬레이션하기 위해 수행된다.

지오메카닉스 시뮬레이션 결과는 지오메카닉스 물성변화로 인한 저류층 생산성 변화 뿐만 아니라 지반침하, 케이싱 붕괴, 시추 문제, 고갈로 인한 단층 재활성화, 등과 같은 안정성 분석에도 적용된다(Fjaer E et al. 2008).

제 3 장 연구 방법

제 1 절 지오메카닉스 study workflow

본 연구에서는 저류층 시뮬레이터로는 SLB社의 ECLIPSE를, 지오메카닉스 시뮬레이터는 동사의 VISAGE를, 그리고 모델링, Coupling 및 결과 도시에는 Petrel을 사용하였다. 연구순서는 Figure 3.1과 같다.



Figure 3.1 Geomechanics study workflow

- 1. MX필드에서 저류층 시뮬레이션 단독으로 수행한 모델로부터 시작한다.
- 저류층 외에 Overburden, Underburden, Sideburden Grid를 추가하여 지오메카닉 그리드를 생성한다.

- 모델에 사용되는 구역(Regions)별로 사용할 물질들과 물질들의 탄성률(Elasticity), 항복조건(Yield criterion), 등을 선언해준다. 또한 시뮬레이션 진행에 따른 물성과 투수율을 업데이트하는 함수들을 정의해준다.
- 4. 3에서 선언해준 물질들을 모델의 각 지역별로 적절하게 할당한다.
- 지오메카닉 그리드내에 단층의 위치를 입력하고 물성을 적용하여 시뮬레이션에서 단층을 고려하도록 한다.
- 6. 초기의 온도, 압력, 포화도 조건을 입력해주고 coupling의 주기를 정해준다.
- 7. 지오메카닉스 시뮬레이션에서 사용할 경계조건을 정의해준다.
- 8. Simulation case를 만들고 launch한다. 본 연구에서는 ECLIPSE와 VISAGE simulation을 2-way coupling으로 수행한다.
- 9. 결과를 가져오고 분석한다(Petrel).

제 2 절 1D MEM(Mechanical Earth Model)

Mechanical Earth Model(MEM)은 지하의 역학적 물성과 반응을 수치해석적으로 모사하는 모델을 말한다. 지오메카닉스와 저류공학에서 힘과 압력변동으로 인한 응력변화에 따른 지구물질의 반응을 예측하고자 사용된다.

MEM의 생성에는 지질 및 지구물리 자료와 암석역학적 이론이 이용되며 생성된 물성은 암상, 공극률, 투수율, 유체물성, 응력 분포, 암석 강도 등을 포함한다.

1D MEM은 well을 따라서 얻은 검층자료와 시추보고서로부터 계산한 암석물성값들을 코어실험결과와 calibration하여 생성한다. 여기에는 암석강도, 변형도, 초기 응력, 압력 등이 포함된다. 1D MEM은 추후 3D MEM설계 및 Wellbore Stability 분석에 이용된다. 1D MEM의 생성과정은 Figure 3.2와 같다.

1. 데이터 수집(Data Audit)

1D MEM생성에 필요한 두 개의 시추공에서 얻은 검층 자료와 속도 검층 자료, 시추 보고서, MX-2 평가정에서 얻은 코어실험자료가 이용되었다.

2. 시추 이벤트 분석(Drilling Event Analysis) LOT(Leak Off Test)결과와 시추과정중의 Break Out 발생여부를 확인한다.

3. 탄성률(Elastic Moduli)

음파검층 결과와 동적탄성률과의 이론적 관계식((Fjær et al., 2008)을 이용해서 동적탄성률을 계산한다. 여기에 사용된 식은 아래와 같다.

$$G_{dyn} = 13474.45 * \frac{RHOB}{DTSM^2}$$
 (3.1)

$$K_{dyn} = 13474.45 * \frac{\rho_b}{DTCO^2} - \frac{4}{3}G_{dyn}$$
(3.2)

$$E_{dyn} = \frac{9G_{dyn} * K_{dyn}}{G_{dyn} + 3K_{dyn}}$$
(3.3)

$$v_{dyn} = \frac{3K_{dyn} - 2G_{dyn}}{6K_{dyn} + 2G_{dyn}}$$
(3.4)

G_{dvn}은 전단탄성률을 의미하고 단위는 Mpsi이다. K_{dvn}은 체적탄성률을

의미하고 단위는 Mpsi이다. ρ_b는 밀도 값이며 g/cc단위이다. DTSM과 DTCO는 음파검층에서 얻어진 Shear slowness와 Compressional slowness를 의미하며 단위는 μs/ft이다.

MX필드에서 정적 탄성률을 구할 때에는 코어실험자료와의 선형상관식을 이용했고 그 결과는 식 3.5와 같다. 포아송비의 경우 명확한 상관관계가 나타나지 않아 동적 포아송비와 동일하게 두었다(식 3.6)

$$E_{sta} = 0.4346 * E_{dyn}$$
 (3.5)

$$v_{sta} = v_{dyn} \tag{3.6}$$



Figure 3.2 Workflow of 1D MEM Construction

4. 연직응력(Overburden Stress)

연직응력은 해수면으로부터 대상 깊이까지 해수면의 밀도와 밀도검층으로부터 얻은 지층밀도를 이용해 구한다(식 3.7). 저류층에서 연직응력의 등가밀도(equivalent density)는 약 1.61g/cm3이었다.

$$\sigma_V(z) = g \int_0^z \rho(z) dz$$
(3.7)

5. 공극압(Pore Pressure)

공극압은 가용한 XPT(Express Pressure Tool)와 MDT(Modular formation Dynamics tester) 측정값을 선형보간하여 구하였다(식 3.8).

$$P_p = (TVDSS + 10145)/3.2661 \tag{3.8}$$

6. 암석강도(Rock Strength)

대표적인 암석강도인 UCS와 마찰각(Frictional Angle)을 다른 탄성률과 공극률, 등의 물성으로부터 상관관계식을 통해 구하는 연구가 이어져왔고 많은 경험식이 존재한다. MX필드의 코어실험자료에서는 E_{sta}과 암석강도의 선형관계를 찾아 선형보간식 3.9와 식 3.10을 세웠다.

$$UCS = 1.0944 * E_{sta}$$
 (3.9)
 $FANG = 4.0107 * E_{sta}$ (3.10)

7. 응력방향(Stress Direction)

일반적으로 최대 및 최소 수평응력방향은 주로 Image Log와 Caliper Log에서 확인한 Breakout의 방향으로 판단한다. 하지만 MX필드에서는 시추 중 Breakout이 거의 나타나지 않았다. 따라서 인근 유정의 FMI(Fullbore Formation Micro imager)와 World Stress Map(Figure 3.3)을 참고하여 Maximum Horizontal Stress방향으로 NE70을 사용했다.



Figure 3.3 World Stress Map

8. & 9. 최소 및 최대 수평 응력(Minimum Horizontal Stress & Maximum Horizontal Stress)

지구조적 변동효과(Tectonic Effect)를 배제했을 때 모델은 최소 수평응력과 최대 수평응력이 동일하며 연직응력과 식 3.11와 같은 관계식을 갖는다.

$$\sigma_{h} = \sigma_{H} = k\sigma_{V} \tag{3.11}$$

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu} \tag{3.12}$$

σ_k, σ_H, σ_V 는 유효 최소수평응력, 최대수평응력, 연직응력이다. k는 유효수직응력에 대한 유효수평응력의 비율, ν 는 포아송비이다.

실제 지층은 시간에 따른 지구조적 변동을 받으며 응력과 변형을 받아 최소 및 최대 수평응력의 크기차이 및 방향이 발생한다. 이 때 Poro-Elastic Equation(Warpinski, 1989)를 적용해 다음과 같은 관계식을 세울 수 있다.

$$\sigma_{\dot{a}} = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2}\varepsilon_y \qquad (3.13)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{\nu E}{1-\nu^2}\varepsilon_x + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_y \qquad (3.14)$$

*σ*_H=12.8~13.5ppg로 나타났다.

 ε_x 와 ε_y 는 각각 최소 수평응력방향과 최대 수평응력방향으로의 변형(strain)을 의미하며 이 둘은 수평응력을 현장의 관측값과 교정 (Calibration)하는 과정에서 구해진다. MX필드는 Normal Fault Stress Regime지역으로, $\sigma_i = \sigma_3$ 가 성립한다. 또한 LOT(Leak-off Test)의 Closure Pressure(Figure 3.4)는 fracture가 열리고 닫히는 압력으로 σ_3 과 동일하므로 MX필드에서는 이를 교정에 사용했다.



Figure 3.4 Illustration of typical LOT test results MX필드에서 strain값은 $\varepsilon_x = 0.0002$ and $\varepsilon_y = 0.0006$ 으로 정해졌다. 1D MEM에서 생성한 탄성률 및 암석 강도 등은 Figure 3.5로 나타났고, 각 응력성분은 Figure 3.6으로 나타났다.



Figure 3.5 Elastic moduli and Rock strength of MX-1 and MX-2



Figure 3.6 Principal stress profile after calibration with LOT

제 3 절 3D MEM(Mechanical Earth Model)

3D MEM은 지오메카닉스 시뮬레이션에 필요한 3D 모델을 만들어 이후 해저면 침하(subsidence), 다짐작용(Compaction), 암석 파괴, 등의 안정성 분석을 가능하게 해준다. 3D MEM의 생성과정은 Figure 3.7과 같다.



Figure 3.7 Workflow of 3D MEM Construction

1. 지오메카닉스 그리드 생성 (Create Geomechanical Grid)

먼저 기존의 저류층 시뮬레이션에 지오메카닉 그리드를 추가한다. 여기에는 Overburden, Sideburden, Underburden Grid들이 추가된다. 지오메카닉스 그리드가 없는 모델에서는 압력변화 환경에서 저류층에 응력 집중이 발생한다. 이를 방지하고자 Sideburden Grid가 추가된다. Overburden과 Underburden Grid는 Sideburden Grid의 추가이후 수평으로 넓어진 모델이 휘어지는 Stress Buckling Effect를 방지하기 위해서 추가된다. 또한 Overburden Grid를 추가함으로써 저류층 상부 지층의 무게와 수직 응력을 모사한다. 기존 지질 모델은 1,519,760개의 cell을 가졌으며 추가 그리드는 1,743,640개 cell로 총 3,263,400개 cell이 지오메카닉스 시뮬레이션에 사용되었다(Figure 3.8).



Figure 3.8 Geomechanics embedded grid

2. 물질과 함수 정의(Define materials and function)

밀도 검층과 음파 검층으로부터 얻은 Vp, Vs 및 Density 데이터를 사용하여 well단의 수직 베리오그램(Vertical Variogram)을 생성한다. 수평 베리오그램은 탄성파 역산(Seismic inversion)으로부터 가이드된 값에 따라 생성한다. 이렇게 생성된 수평 베리오그램을 기반으로 Gaussian random function simulation을 사용하여 Vp, Vs 및 Density 모델을 생성하고, 이를 공동크리깅(Co-kriging)의 2차 변수로 사용하여 전체 모델에 대한 Vp, Vs 및 밀도값을 정의하였다.

3. 물성 선언(Populate Properties)

앞에서 이용한 Esta, PRsta, UCS, FANG식을 동일하게 적용하여 3D Model에 탄성률과 암석강도 등을 할당한다.

4. 불연속 모델링 (Discontinuity Modeling)

불연속 모델링 단계에서는 파쇄대(Fracture), 단층(Fault)의 물성과 모델링 방법을 설정한다. MX필드에서는 단층 및 파쇄대의 영향이 크지 않아 본 5. 온도 / 압력 / 포화도 설정

이 단계에서는 각 그리드가 가지는 온도와 수포화도(Water Saturation), 압력을 선언한다. 온도와 수포화도는 MX필드 시뮬레이션에 큰 영향을 미치지 않아 생략되었다. 저류층영역에서는 2-way coupling 과정에서 저류층 시뮬레이션으로부터 전달받는 압력을 사용했고 저류층 외부의 overburden, underburden영역에서는 0.1bar/m(정수압과 동일)의 압력 구배를 적용했다.

6. 경계조건 설정(specify boundary condition)

Visage 지오메카닉스 시뮬레이터는 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하여 응력 및 변형의 3D맵을 도출한다. 시뮬레이션 격자 내의 응력을 계산하기 위해서는 그리드에 적용되는 힘을 도출할 수 있어야 하고, 이 때 힘과 하중의 경계조건으로 연직 응력, 공극압 그리고 수평 하중이 적용된다. 수평 하중은 응력이 아닌 변형률(strain)으로써 경계조건을 설정해주었다. 변형률의 값은 1-D MEM생성단계에서 계산한 ε_x = 0.0002 and ε_y = 0.0006 의 지구조 변형률(Tectonic strain)을 모델의 경계조건으로 사용하였다.



Figure 3.9 MX field reservoir model with defined rock strength(UCS)

제 4 절 Coupling Simulation

기존의 저류층 시뮬레이션은 압력에 따른 지층의 변형과 그로 인한 물성변화를 정확하게 예측하지 못한다. SLB社의 Visage는 수치해석방법인 유한요소법(Finite Element Method)으로 지층의 암석역학적 물성 변화를 예측하는 시뮬레이터이다. 입력자료로는 저류층 유체거동에 의한 압력변화를 받고, 출력자료로 유효응력변화와 그에 따른 지층의 변형(deformation)과 공극률 등의 물성변화를 예측하여 출력한다.

지오메카닉스 시뮬레이션이 저류층 시뮬레이션의 압력정보를 받는 coupling 방법에는 크게 3가지 방법이 있다. 첫번째, One-way coupling 방법에서는 먼저 저류층 시뮬레이션을 단독으로 수행한다(Figure 3.10). 그리고 그 출력 결과인 time-step별 압력 변화를 지오메카닉스 시뮬레이션의 입력자료로 사용한다. 두 시뮬레이션이 독립적으로 진행되어 계산시간이 짧다. 하지만 지오메카닉스 시뮬레이션 결과인 암석물성 변화를 저류층 시뮬레이션이 반영하지 못해 유체 거동이 암석물성 변화에 큰 영향을 주는 경우에는 시뮬레이션의 정확도가 떨어진다. 두번째, Two-way coupling방법에서는 먼저 저류층 시뮬레이션이 실행되고 결과값인 압력변화를 지오메카닉스 시뮬레이션의 입력자료로 사용한다. 그리고 지오메카닉스 시뮬레이션의 결과값인 공극률, 투수율 변화를 다시 저류층 시뮬레이션의 입력값으로 사용하고 다음 time-step을 진행한다(Figure 3.11). One way coupling방법보다 시간소요가 크지만 저류층의 암석물성 변화를 반영하므로 시뮬레이션이 실제 현장을 더 정확하게 모사한다. 마지막으로 Fully coupling 방법은 저류층과 지오메카닉스 방정식을 통합하여 1개의 솔버(Solver)로 동시에 풀어낸다. 양방향의 상호 작용을 완전히 포착하므로 가장 정확하지만, 계산이 복잡하고 시간소요가 매우 크다. MX필드의 저류층은 미고결 사암층으로 가스 생산에 따른 저류층 다짐(compaction)작용으로 인한 영향이 클 것으로 예상되었다. 따라서 본 연구에서는 2-way coupling방법을 이용했으며, 투수율의 변화는 Kozenv-Carman 함수를 반영했다(식 3.15).

$$[K] = [K_0] \frac{\phi^3 / (1 - \phi)^2}{\phi_0^3 / (1 - \phi_0)^2}$$
(3.15)

$$\phi = \phi_0 - \Delta \phi / (1 - \Delta \phi) \Delta \phi \tag{3.16}$$

$$\Delta \phi = \Delta \varepsilon_{v} \tag{3.17}$$

$$\Delta \varepsilon_{\nu} = \Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3 \tag{3.18}$$

 K_0 는 초기상태의 Permeability를 ϕ_0 는 초기상태의 공극률을 ε_v 는 체적변형(volumetric strain)을 의미한다.



Fig 3.11 Schematic of 2-way coupling simulation

제 5 절 Case Study

본 연구에서는 MX필드 개발에 있어서 정확한 의사결정을 내리기 위해 현재 개발계획인 Base Case를 기준으로 여러 변동 케이스를 만들고 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 케이스별 다짐작용(Compaction)에 의한 생산성 변화와 지반 침하(Subsidence)를 분석하였다. 또한 MX필드 개발계획의 중점사안인 Sand Production Issue의 정도를 간접적으로 추정할 수 있는 Near Wellbore Geomechanics분석을 수행하였다. 수행한 케이스들은 다음과 같다. Base case의 저류층 시뮬레이션에서 설정해준 운영조건은 Table 3.1와 같다.

Input Parameters	Value
Dimension	121 x 157 x 80
Permeability(mD)	442.3
Porosity(%)	33.6
GWC(m)	2,438
Fluid type	Dry gas
Drive mechanism	Depletion Drive
Number of wells	2
Field abandonment gas rate(MMscfd)	20
Well abandonment gas rate(MMscfd)	5
Abandonment tubing head pressure(psi)	305
Production period	2027.04 - 2050.01
Production requirements during the plateau period(MMscfd)	200

Table 3.1 Base case reservoir simulation input and assumptions

1. 2-way Coupling으로 인한 생산성 영향분석

가스생산 후 지오메카닉스가 반영한 암석물성변화로 인한 생산성을 확인하기 위해 Table 3.1와 같이 저류층 시뮬레이션을 단독으로 수행했을 때와 2-way coupling으로 수행했을 때의 케이스를 생성하고 비교하였다.

	Without Coupling	With 2-way Coupling (Base Case)
Method	ECLIPSE stand-alone	Coupling ECLIPSE and VISAGE

2. 생산정 개수에 따른 생산성 및 안정성 영향 분석

현재 MX필드는 두 개의 생산정을 시추하는 것으로 계획 되어있다. 그러나 개발이 진행됨에 따라 생산정의 개수가 변동될 수 있으므로 Table 3.2와 같이 생산정의 개수를 줄이거나 늘렸을 때의 케이스를 생성하고 생산성과 안정성을 비교하였다.

Table 3.3 Cases for analysis of the effect of a number of wells

	Case 1	Base Case	Case 2
Number of Wells	1	2	3

3. 필드 생산량 변동에 따른 생산성 및 안정성 영향 분석

MX필드는 인근 필드의 연계되어 개발되는 필드이므로, 인근필드 생산량 변동에 따라 증산 또는 감산이 가능하다. 또한 생산량은 Sand Production과 직접적인 연관이 있으므로 Table 3.3와 같이 Base Case(200MMscfd) 보다 감산/증산하는 케이스들을 생성하고 생산성과 안정성을 비교하였다.

Table 3.4 Cases for analysis of the effect of a field production rate

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3
Field Production Rate (MMscfd)	100	150	200	260

4. 수평구간 길이 변화에 따른 안정성 영향분석

당사는 MX필드 생산 중 예상되는 Sand Production Issue에 대응하여 300m의 수평정 시추(Horizontal well drilling)를 계획중이다. 수평구간 길이에 대한 효율적인 의사결정을 위해 Table 3.4와 같이 케이스들을 생성하고 생산성과 안정성을 비교하였다.

Table 3.5 Cases for analysis of the effect of a horizontal section length

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3	Case 4
Hz Length(m)	200	250	300	350	400

5. 생산정 디자인에 따른 안정성 영향 분석

현재 MX 생산정들은 저류층에 8-1/2" 직경의 나공에 그래벌 패킹(Gravel Packing)으로 완결하는 것으로 계획되어있다. 하지만 시추문제 발생시 다른 직경의 시추가능성이 존재하여 Table 3.5와 같이 케이스를 생성하고 안정성을 비교하였다.

Table 3.6 Cases for analysis of the effect of a well design

	Base case	Case 1
Well Design	ОЦСР	OHGP
Well Design	UIGI	(Contingency)

제 4 장 연구 결과

3장 5절에서 언급된 바와 같이 케이스 스터디를 진행했다. 케이스에 따른 생산성 분석에서는 궁극가채량(EUR)과 감퇴 및 생산종료 시점을 보았고, 안정성 분석에서는 필드의 암석파괴(Rock failure)와 지반침하 (Subsidence)를 보았으며, 추가로 Near Wellbore Geomechanics분석을 통해 각 생산정 인근지층의 암석파괴와 변형률(Compaction Strain)을 분석하였다.

제 1 절 2-way coupling의 생산성 영향

기존 저류층 시뮬레이션 단독으로 추정한 MX 지역의 궁극가채량(EUR, estimated ultimate recovery)와 지오메카닉스 시뮬레이션과 coupling하여 생산에 따른 저류층 물성변화를 반영한 궁극가채량을 비교했다.

그 결과 기존 저류층 시뮬레이션 단독수행시 EUR은 611.24bcf, coupling시에는 610.83bcf로 0.41bcf 약 0.1%차이가 나타났다(Figure 4.1).



Figure 4.1 EUR from reservoir simulation stand alone case and geomechanics 2-way coupling case

이는 생산에 따른 저류층 compaction으로 인해 투수율이 감소한 결과로

보인다. 생산 초기와 후기의 투수율은 각각 364.7mD와 353.7mD로 나타났다. Figure 4.2는 특정 그리드(53, 71, 66)에서의 투수율 변화양상을 나타낸다. Figure 4.3은 MX필드의 특정층(K= 95)에서 생산 초기(2027년)와 후기(2049년)의 저류층 투수율지도이다.



Figure 4.2 Decreasing permeability during a depletion



Figure 4.3 Permeability map of MX field at initial state and end of life

제 2 절 생산정 개수 설계

MX필드의 기본계획은 2개의 생산정을 2.5km 간격으로 배치하고 공당 100MMscfd로 총 200MMscfd생산하는 것이다. 가스 생산량에 따라 저류층 생산구간에서의 drawdown이 크게 달라지고 그로 인해 Sand Production의 정도가 결정된다.

본 절에서는 필드 생산량을 유지하는 조건에서 생산정의 개수를 달리하였을 때 생산성의 영향과 생산정인근에서의 암석역학적 위험성을 분석하였다. 필드에서의 생산정 배치는 Figure 4.4와 같다. 생산정을 1개로 하는 case 1에서는 가장 updip에 위치한 MXD-2 well만을 이용하였다. 과거 인근 필드에서는 각 생산정의 생산면적을 640acres로 설계하였다. MX필드의 면적은 약 1830acres이므로 생산정을 3개로 하는 case 3에서는 이를 고려하여 배치하였다(Figure 4.5).



Figure 4.4 Placement of MXD wells on GX reservoir



Figure 4.5 Placement of MXD wells on GX reservoir

생산정의 개수에 따른 궁극 가채량 차이는 Figure 4.6과 같이 나타났으며 생산기간과 함께 Table 4.1에 정리하였다. Case 2과 Base case를 비교하였을 때 추가생산정으로 인한 궁극 가채량 증가효과는 없는 것으로 나타났다(0.78bcf감소). Case 2에서 궁극가채량 감소의 이유는 MX필드의 투수율과 연결성이 좋으며 운영조건상 생산정이 많을수록 각 생산정의 최소유량 조건(5MMscfd)에 빨리 도달하기 때문이다(Table x.xx). 또한 Field 생산량의 감퇴시점은 생산정의 개수가 많을수록 늦게 도달한다. 이는 생산정이 많을수록 최대 유량이 낮게 설정되며, 각 생산정의 배수구역 (Drainage Area)의 압력고갈 정도가 낮기 때문이다.



Figure 4.7 Gas production rate of each well on case2 study

	Case 1	Base case	Case 2
# of well	1	2	3
Gas Rate Per 1	200	100	66.6
well(MMscfd)	200	100	00.0
Field Decline	2029.03	2030.12	2031.07
Field Cut-off	2043.07	2041.07	2040.08
EUR(bcf)	566.00	611.24	610.05

Table 4.1 EUR and field life of each case on number of well study

생산정 인근의 안정성을 보기 위해서 Near Wellbore Geomechanics 모델링과 시뮬레이션을 수행했다. Near Wellbore Geomechanics는 전체 모델의 cell들의 압력, 응력값을 입력자료 및 경계조건으로 설정하여 생산정 인근의 지오메카닉스를 상세분석하는 방법이다. base case에서 저류층 구간에 300m 길이의 수평정을 8 1/2 " openhole로, 상부 케이싱은 9 5/8"사이즈로 설계했다. 모델링은 Tangential 방향 60분할, radial 방향 24분할, Axial방향 50분할로 하여 각 well당 72,000개의 grid들이 사용되었다. 모델의 지층구간의 직경 85"로 설계했다. MXD-1과 MXD-2의 open hole구간과 casing구간은 Figure 4.8에 나타나 있다. MXD-2에서 Near Wellbore Modelling 결과는 Figure 4.9와 같다 케이싱 구간에서는 Formation과 Hole 중간에 케이싱과 시멘트도 모델링하였으며 그 구성비율은 Figure 4.10과 같다.



Figure 4.8 Open hole and casing range of MXD-1(left) and MXD-2(right)



Figure 4.9 Near Wellbore Model of MXD-2



Figure 4.10 Composition of MXD-2 Near Wellbore Model, 0 = Formation, 1 = Interface, 3&5 = Cement, 6 = Steel(Casing)

위 Near Wellbore Geomechanics 모델을 2027~2049년까지 시뮬레이션을 진행하였으며 생산진행에 따라 Wellbore 인근 지층에서 암석 파괴(Rock Failure)가 증가했다(Figure 4.11). 이러한 암석 파괴는 생산 진행에 따라 Sand Production발생을 간접적으로 지시한다. Figure 4.11은 생산초기와 후기에 MXD-2 인근에서 발생한 Rock Failure의 비율을 나타낸다. 초기 2.0%는 시추과정 중 발생한 Rock Failure이다. 후기에는 1.6%가 증가하여 총 3.6%의 지층에서 Rock Failure가 발생한다. Figure 4.12는 MXD-2의 axial 방향에서의 rock failure가 발생한 단면을 나타낸 그림이다.



Figure 4.11 Rock failure near wellbore of MXD-2 in 2027 and 2049



Figure 4.12 Rock failure near wellbore of MXD-2 (x-section along well)

시간에 따른 생산 진행에 따른 Rock Failure의 증가량은 Figure 4.13과 같이 나타났으며, 최종 Rock Failure의 비율은 Table 4.2와 같이 정리되었다. 생산정의 개수가 3개인 case2에서 Rock failure비율과 증가속도가 가장 적어 안정적이었다.



Figure 4.13 Increase of rock failure near well of each cases(2_1 = case1, 2_2 = case2)

MX필드에서의 Failure Mechanism을 확인하기 위해 Mohr-Coulomb Diagram을 도시했다. MX필드는 Normal Fault Stress Regime 지역으로 생산에 따라 유효응력이 증가한다. 이때 최대 유효응력(σ₁)이 최소 유효응력(σ₃)보다 빠르게 증가하여 Mohr Circle이 오른쪽으로 이동하며 점점 커진다. 이때 Failure Envelope에 도달하면 Rock Failure가 발생한다(Figure 4.14). Near Wellbore Model에서도 이를 확인할 수 있는데, Figure 4.15에서는 Rock Failure가 발생 분포방향과 최대 유효응력의 분포방향이 일치함을 확인할 수 있다.



Figure 4.14 Mohr Circle diagram on rock failure



Figure 4.15 Rock failure and maximum effective stress near MXD-2 well

	Case 1	Base Case	Case 2
# of well	1	2	3
MXD-1	_	0.2	0.1
MXD-2	1.9	1.6	1.2
MXD-3	-	_	0.6

Table 4.2 Rock Failure Near wellbore at last time step (%)

생산정에서의 Geomechanics Risk를 판단에는 현재까지 명확한 판단기준이 없다. 하지만 SPE 84553과 SPE 184603에서는 생산정 인근의 Formation Compaction strain과 그에 따른 발생위험을 다수의 관측값으로부터 확인하였고 Table 4.3와 같은 기준을 위험 평가기준으로 제시하였다. 본 연구에서도 해당 기준을 이용하여 MXD 생산정의 위험성을 평가하였으며 그 결과는 Table 4.4과 같이 정리하였다.

	Low Risk	Medium Risk	High Risk	Very High Risk
Average Reservoir Compaction strain	<1%	1-2%	>2%	>3%
Note		Sand Production	Excessive sand Production	Parted Casing

Table 4.3 Risk evaluation of near wellbore geomechanics(SPE 184603)

Table 4.4 Risk evaluation of near wellbore geomechanics(MX field)

	Case 1	Base Case	Case 2
Number of wells	1	2	3
Formation Compaction Strain near MXD-1 (%)	_	1.24	0.83
Formation Compaction Strain near MXD-2 (%)	1.73	1.22	1.03
Formation Compaction Strain near MXD-3 (%)	_	_	0.99

제 3 절 필드 가스 생산량 선정

MX필드는 인근 필드의 연계되어 개발되는 필드이므로, 인근필드 생산량 변동에 따라 증산 또는 감산의 가능성이 있다. 또한 생산량이 높을수록 저류층에 가해지는 Drawdown Pressure가 높아져 Sand Production에 직접적인 영향을 미치게 된다. MX필드에서 기존 200MMscfd 생산량의 절반인 100MMscfd를 생산하는 Case1부터 파이프라인 설비를 고려했을 때 최대 생산량인 260MMscfd 생산 케이스(Case 3)까지의 케이스들을 생성하고 결과를 비교하였다(Table 4.5).

필드 생산량 변동에 따른 EUR은 최대 611.88bcf부터 최소 611.11bcf으로 0.77bcf(약 0.1%) 내에서 차이가 발생하여 유의미한 정도가 아니었다(Figure 4.16).

또한 필드안정성 측면에서 지반 침하(subsidence)를 확인하기 위해 생산 중기(2035년)와 생산후기(2049년)의 저류층의 평균 이동(displacement) 을 비교하였다(Table 4.6). 생산 종료후에는 모든 케이스에서 0.028~0.029m의 지반침하가 발생했다. 생산 중기(2035)에는 지반침하의 정도가 달랐으며 이는 같은 시점의 누적생산량 차이로 인해 발생한 것으로 보인다. 지반 침하 외에도 필드의 암석파괴(Rock Failure) 발생 그리드들을 확인하였다. 생산 중기 동일 시점(2039년)에 암석파괴 발생정도는 일부 차이가 있었으나(Figure 4.18), time-step별로 확인했을 때 생산량에 따라 발생시점만 단순 shift되었을 뿐 최종 암석파괴 발생정도와 발생속도(기울기)는 거의 유사하였다(Figure 4.19).

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3
Field Production Rate (MMscfd)	100	150	200	260
Production Rate Per Well (MMscfd)	50	75	100	130
EUR(bcf)	611.88	611.63	611.24	611.11
Decline Start	2040.04	2034.02	2030.12	2028.11
Cut-off	2047.02	2043.02	2041.07	2040.10

Table 4.5 EUR and field life of each case on field production rate study



Figure 4.16 Field gas production(left) rate and cumulative(right)

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3
Field Production Rate (MMscfd)	100	150	200	260
Production Rate Per Well (MMscfd)	50	75	100	130
2035 Average Displacement(m)	-0.013	-0.020	-0.023	-0.024
2049 Average Displacement(m)	-0.029	-0.029	-0.028	-0.028
2039 Rock Failure (# of Grid)	1	42	42	88

Table 4.6 Reservoir displacement and rock failure of each case



Figure 4.17 Reservoir average displacement after production end





Figure 4.18 Rock failure on field during production(in 2039)



Figure 4.19 Increase of rock failure on each production rate case

Well별 생산안정성 측면을 분석하기 위해 Near Wellbore Geomechanics를 수행했다. 모델링은 앞선 2절의 내용과 동일하다. 생산 중기(2039년)과 생산후기(2049년)의 생산정 인근의 암석 파괴(Rock Failure) 비율은 Table 4.7과 같았으며 time-step별 Failure 증가경향은 Figure 4.20와 같이 나타났다. MXD-1의 경우 필드 생산량에 상관없이 낮은 암석파괴가 나타났다. MXD-2의 경우 필드 생산량에 따라 암석 파괴가 다르게 나타났으나 필드의 암석 파괴와 마찬가지로 단순히 급증시기만 늦춰지는 경향이 있었다.

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3
Field Production Rate (MMscfd)	100	150	200	260
Near MXD-1 2039 Rock Failure (%)	0	0.1	0.1	0.1
Near MXD-1 2049 Rock Failure (%)	0.2	0.2	0.2	0.2
Near MXD-2 2039 Rock Failure (%)	0.3	1.1	1.5	1.5
Near MXD-2 2049 Rock Failure (%)	1.6	1.7	1.6	1.7

Table 4.7 Rock Failure near wellbore in 2039 and 2049



Figure 4.20 Increase of rock failure near well MXD-1 and MXD-2

Rock Failure 뿐 아니라 4장 2절의 내용과 마찬가지로 Reservoir Compaction strain을 이용한 안정성 평가 기준(Table 4.2)를 이용해서 안정성을 평가했으나 모두 Medium Risk영역에 포함되었으며 케이스간 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Table 4.8).

Table 4.8 Risk evaluation of near wellbore geomechanics

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3
Field Production Rate (MMscfd)	100	150	200	260
Formation Compaction Strain Near MXD-1 (%)	1.26	1.25	1.24	1.24
Formation Compaction Strain Near MXD-2 (%)	1.21	1.22	1.22	1.21

제 4 절 생산정 수평구간 길이선정

당사는 MX필드 개발시 예상되는 Sand Production Issue에 대응하여 수평정 시추를 계획중이다. 현재 계획된 수평길이는 300m이지만 본 연구에서는 적절한 수평정 길이를 선정하고자 Table 4.9과 같이 200m, 250m, 350m, 400m의 케이스를 추가로 생성하고 그에 따른 생산성 및 안정성을 비교하였다.



Table 4.9 Generated Cases for Horizontal section length study



수평정구간의 길이에 따른 생산성 영향을 비교했다(Table 4.10). 수평정 길이가 늘어남에 따라 EUR증가가 있었으나 최대 1.57bcf 차이(0.26%)로 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Figure 4.21).

Table 4.10 EUR of each case on horizontal section length study

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3	Case 4
Horizontal Section Length (m)	100	150	200	250	300
EUR(bcf)	610.18	610.64	611.24	611.64	611.65



Figure 4.21 Gas production cumulative of each case (study4)

수평정 길이변동에 따른 안정성 분석을 위해 케이스별 Near Wellbore Geomechanics 분석을 수행했다. 생산종료(2049년) 기준 생산정 인근 지층의 암석파괴(Rock Failure)는 Table 4.11과 같이 정리되었다. MXD-2의 수평구간의 길이가 늘어날수록 암석파괴가 줄어들었다. 시간에 따른 암석파괴의 증가를 도시한 결과는 Figure 4.22와 같다. 이는 생산정의 길이가 길수록 인근 저류층의 압력저하가 낮기 때문이다. Fig 4.23는 수평정길이가 200m(case 1)일 때와 400m(case 4)일 때 주변 지층의 압력차이이다. 400m일 때 약 1bar가량 높은 압력이 나타난 것을 확인했다.)

Table 4.11 Rock failure near wellbore(study 4	4
---	---

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3	Case 4
Horizontal section length(m)	200	250	300	350	400
MXD-1 2049 Rock Failure (%)	0.4	0.2	0.2	0.2	0.4
MXD-2 2049 Rock Failure (%)	2.1	2	1.6	1.5	1.2



Figure 4.22 Increase of rock failure near well (study 4)



Figure 4.23 Reservoir pressure near MXD-2 at different hz length

2절과 3절의 결과와 마찬가지로 저류층 Compaction strain을 기준으로 안정성 분석을 수행하였다. 그 결과 위험성 단계의 차이는 나타나지 않았으나, 수평구간 길이가 늘어날수록 Formation compaction strain값이 점점 줄어들어 안정성이 상승하는 효과가 있었다(Table 4.12).

	Case 1	Case 2	Base Case	Case 3	Case 4
Horizontal Section Length (m)	200	250	300	350	400
Formation Compaction Strain Near MXD-1 (%)	1.2	1.29	1.24	1.11	1.07
Formation Compaction Strain Near MXD-2 (%)	1.4	1.3	1.22	1.23	1.05

Table 4.12 Risk evaluation of near wellbore geomechanics(study 4)

제 5 절 생산정 완결 디자인

당사의 MX필드 개발에 있어서 기본계획으로 9 5/8" 케이싱 설치 후 8 1/2" OHGP으로 완결할 계획이다. 하지만 시추문제가 발생할 경우, 저류층 구간에 7" 라이너 설치 후 6" OHGP으로 완결하는 대응책도 수립하였다. 따라서 Figure 4.24와 같이 위 Case에 대한 Near Wellbore Geomechanics Modeling후 안정성 분석을 수행했다.



Figure 4.24 Generated near wellbore model for contingency plan

Table 4.13와 같이 Contingency 케이스의 완결방법 차이에 따른 케이스를 생성하고 안정성 분석을 하였다. Time-step에 따른 생산정 인근의 암석파괴 증가는 Figure 4.25와 같다.

Table 4.13 Generated case and rock failure for contingency completion plan

	Base Case	Contingency Case
Well Completion Design	9-5/8″ casing + 8-1/2″ Open Hole	7″ Liner + 6″ Open Hole
MXD-1 2049 Rock Failure (%)	0.2	0.2
MXD-2 2049 Rock Failure (%)	1.6	1.4



Figure 4.25 Increase of rock failure near well (study 4)

2절, 3절, 4절의 결과와 마찬가지로 저류층 Compaction strain을 기준으로 안정성 분석을 수행하였다. 그 결과는 Table 4.14과 같았으며 유의미한 차이가 나타나지 않았다.

Table 4.14 Risk	evaluation of	of near	wellbore	geomechanics	study	5)
-----------------	---------------	---------	----------	--------------	-------	----

	Base Case	Contingency Case
Well Completion Design	9-5/8″ casing + 8-1/2″ Open Hole	7″ Liner + 6″ Open Hole
Formation Compaction Strain Near MXD-1 (%)	1.24	1.25
Formation Compaction Strain Near MXD-2 (%)	1.22	1.23

제 5 장 결론

본 연구에서는 미고결 사암층에 개발예정인 MX필드에서의 생산성과 안정성을 분석하기 위해 저류-지오메카닉스 2-way coupling 시뮬레이션을 수행했다. 시뮬레이션 진행을 위해 데이터 수집 - 암석물성 계산 - 1D MEM 생성 - 지오메카닉스 그리드 생성 - 암석물성 선언 - 경계조건 설정까지의 모델링 과정을 거쳐 3D MEM(Mechanical Earth Model)을 구축하였다.

그 후 MX필드에서 가능한 개발옵션들을 해당모델에 적용한 케이스들을 생성 후 2-way coupling으로 시뮬레이션을 진행했다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 분석하여 개발옵션별 저류층 생산성과 생산진행에 따른 안정성을 비교하였다. 저류층 생산성은 궁극가채량과 생산량, 필드수명을 기준으로 비교하였다. 지오메카닉스 분석에서 필드 안정성은 필드의 암석파괴(Rock Failure), 지반침하(Subsidence)를 기준으로 비교하였다. 생산정의 안정성은 NWG(Near Wellbore Geomechanics) 분석을 통해 생산정 인근 저류층의 암석 파괴 비율 및 지층의 변형률(Formation Compaction Strain)을 기준으로 비교하였다.

연구에서 비교한 개발옵션 케이스들과 그로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 저류층 시뮬레이션만 단독으로 수행했을 때와 지오메카닉스 변화를 반영하는 2-way coupling 시뮬레이션의 결과를 비교했다. 동일 저류층에 대해 2-way coupling 시뮬레이션은 저류층 시뮬레이션을 단독으로 수행했을 때보다 0.41bcf(약 0.1%) 낮은 궁극가채량을 보여주었다. 이 차이는 지오메카닉스 시뮬레이션이 생산에 따른 저류층의 Compaction으로 인한 저류층 투수율 감소를 반영하였기 때문이었으며 그 영향이 크지 않음을 확인하였다.
- 2. 기본계획상 동일한 필드 생산량 조건에서 생산정 개수인 2개를 1개로 줄였을 때와 3개로 늘렸을 때를 비교하였다. 생산정의 배치는 배수면적(drainage area)을 고려하였다. 생산정이 2개일 때와 3개일 때의 궁극가채량은 611.24, 610.05bcf로 큰 차이가 없었으나 생산정이 1개일 때에는 566bcf로 약 45bcf 감소하였다. NWG결과 MXD-1 생산정은 케이스에 상관없이 생산에 따른 암석파괴가 거의 없이 안정하였다. MXD-2 생산정은 MXD-1에 비해 안정성에 취약했으며 그 정도는 케이스별로 상이하였다. 단일 생산정으로 생산하는 케이스에서는 MXD-2 인근 지층의 파괴가 최종적으로 1.9%

파괴되었고, 기본 케이스에서는 1.6%, 생산정 3개로 생산하는 케이스에서는 1.2%로 생산정이 적을수록 그 값이 크게 나타났다. SPE 184603에서 제시한 저류층 위험 평가법을 인용했을 때, 생산정이 3개인 케이스의 MXD-1, MXD-3는 위험성이 낮았고 나머지 생산정들은 중간정도의 위험성이 있었다. 특히 MXD-2를 단독생산하는 케이스에서는 변형률이 1.73으로 가장 위험성이 높았다.

- 3. MX필드의 생산량을 기본계획인 200MMscfd에서 100, 150MMscfd로 감소시킨 케이스와 260MMscfd로 증가시킨 케이스를 생성하고 비교하였다. 모든 케이스에서 최종적인 지반침하는 0.028~0.029m로 유사하였다. 생산중기의 지반침하와 저류층의 암석파괴를 비교하였을 때 생산량이 많을수록 침하 및 파괴의 정도가 더 컸다. 하지만 시간대별 암석파괴를 도시했을 때, 파괴가 급증하는 시기의 차이만 있을 뿐 파괴발생 속도는 유사함을 확인하였다(Figure 4.19). NWG 분석에서는 앞선 결과와 마찬가지로 MXD-1은 케이스에 상관없이 안정하였다. MXD-2는 MXD-1에 비교하여 불안정하였으며 암석파괴가 급증하는 시기의 차이는 있지만 그 증가도는 유사했다. SPE 184603 기준 평가법으로 생산정 인근의 변형을 비교하였을 때에도 MXD-1, MXD-2 모두 중간수준의 위험도이며 그 값도 유사하였다.
- 4. MXD 생산정의 수평구간 길이를 기본계획인 300m에서 200, 250m로 줄였을 때와 350, 400m로 늘렸을 때를 비교하였다. 생산성의 경우 400m인 경우가 궁극가채량이 611.65bcf로 최대였으며, 200m인 케이스에서는 610.18bcf로 최소였으며 둘의 차이는 1.57bcf였다. NWG분석을 수행했을 때 MXD-1에서는 모든 케이스에서 생산정 인근의 암석 파괴가 거의 일어나지 않아 안정적이었다. MXD-2의 경우 수평정 길이에 따라 암석파괴정도가 상이했다. 생산 후기에 수평정이 200m일 때는 2.1% 파괴가 발생한 반면, 수평정이 400m일 때는 1.2%로 더 큰 안정성을 나타냈다. 이는 수평정이 길수록 저류층과의 접촉면적이 넓고 저류층 압력저하정도가 감화되기 때문이다. SPE 184603 기준 평가법 적용시 모든 케이스, 모든 생산정이 중간정도의 위험도로 나타났다. 하지만 MXD-2의 수평구간이 200m로 짧은 경우 인근 지층 변형률이 1.4%인 반면 수평구간이 400m 일때는 1.05%로 수평구간이 길수록 더 높은 안정성을 보였다.

5. MX필드의 기본 개발 계획은 두 생산정 모두 9-5/8" casing설치 후 8-1/2"의 나공으로 저류층을 완결하는 것이다. 개발 진행 중 시추문제가 생기는 경우에 7" 라이너 설치 후 6" 직경으로 저류층을 완결하는 대안책이 존재한다. 따라서 기본계획과 해당 대안책의 생산정의 안정성을 비교하였다. MXD-1의 암석파괴는 두 케이스 모두 유사하게 안정적이었으며 MXD-2의 경우 0.2%내의 차이로 유사한 안정성을 보였다.

위 결과들을 요약했을 때 MX필드는 지오메카닉스 영향으로 인한 생산성 변동은 적다. 생산정의 안정성의 경우 MXD-2가 MXD-1에 비해 불안정하였다. 생산정의 개수를 3개로 늘리는 방안은 생산정 운영의 안정성을 향상시켜주지만, 궁극가채량 증가효과가 없어 시추비용 측면에서 경제성이 떨어진다. 필드 가스 생산량을 낮출수록 암석 파괴가 급증하는 시기를 늦추는 효과가 있지만 그 급증도를 완화시키진 못했다. 생산정의 수평구간을 늘릴수록 암석파괴와 지층변형률 측면에서 안정도가 증가했다. MX필드 생산정 디자인의 기본 계획과 대안책 모두 안정도가 유사하여, 대안책으로 시추시에도 추가적인 문제가 발생할 가능성은 낮다.

본 연구는 Sand Production의 양을 정확하게 계산하지는 못하지만 경향성은 반영한다. 또한 Sand Production Issue 측면에서는 본 연구에서 수행한 3-D Near Wellbore Geomechanics뿐만 아니라, Critical Gas Velocity, Erosional Velocity, 등 다양한 분석값을 종합적으로 고려하여 필드 생산량과 수평구간 길이를 선정해야 한다.

MX필드는 저류층 암석강도는 낮은 반면 지오메카닉스 시뮬레이션을 반영했을 때 생산성 영향이 크지 않았다. 지오메카닉스가 어떤 특성의 저류층의 생산성에 크게 영향을 주는지 알기 위해선 다양한 필드사례들을 수집하여 추가연구를 진행할 필요가 있다.

또한 지오메카닉스 시뮬레이션에는 매우 많은 탐사 및 시추자료 그리고 가정된 상관관계식이 사용되었으며 그에 따른 불확실성이 존재한다. 따라서 시뮬레이션의 정확도 향상을 위해 향후 개발착수시 시추자료, 검층자료, 코어실험자료, 생산 자료를 반영한 모델 업데이트가 필요하다.

58

참고 문헌

French, S., et al. 2017. 4-D Geomechanics to Predict Compaction and Subsidence for Development of Unconsolidated Sandstone Reservoir: Fortuna Project Case Study, Offshore Equatorial Guinea. Paper presented at SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition.

Hamid, O., et al. 2017. Reservoir Geomechanics in Carbonates. Paper presented at SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference.

Ahmed, B.I., and Al-Jawad, M.S. 2020. Geomechanical modelling and two-way coupling simulation for carbonate gas reservoir. In: Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.

Sun, J., et al. 2017. Regional Scale 3D Geomechanical Modeling For Evaluating Caprock Integrity And Fault Leakage Potential During Underground Gas Storage Operations In A Produced Field. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

Markou, N., and Papanastasiou, P. 2021. Geomechanics in Depleted Faulted Reservoirs. In: Energies. 14(1), 60.

Haug, C., et al. 2018. Assessment of geological factors potentially affecting production-induced seismicity in North German gas fields. In: Geomechanics for Energy and the Environment.

Fjaer, E., et al. 2008. Petroleum-Related Rock Mechanics (2nd ed.). Elsevier.

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., and Zimmerman, R.W. 2007.

Fundamentals of Rock Mechanics (4th ed.). Blackwell Publishing.

Badru, O. 2003. Well-placement optimization using the quality map approach. M.S. Thesis, Stanford University.

Batycky, R.P., Blunt, M.J., and Thiele, M.R. 1997. A 3D fieldscale streamline-based reservoir simulator. In: SPE Reservoir Engineering. 12(4), 246-254.

Prevost, J.H. 2013. One-Way versus Two-Way Coupling in Reservoir-Geomechanical Models. In: Poromechanics V, ASCE.

Li, X., et al. 2003. Compaction, Subsidence, and Associated Casing Damage and Well Failure Assessment for the Gulf of Mexico Shelf Matagorda Island 623 Field. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado.

Wuthicharn, et al. 2018. Applications Of 3D Geomechanical Model On Sand Production Prediction And Completion Design In Zawtika Gas Field. Paper presented at the AAPG Asia Pacific Region GTW

Zoback, M. D. (2010). Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press.

Abstract Productivity and Stability Analysis by adapting 2-way Coupling Simulation in MX Field

Hojang Jeon

Department of Energy Systems Engineering The Graduate School Seoul National University

Productivity prediction through reservoir simulation is essential in oil field development plans. However, existing methods do not accurately predict productivity changes due to reservoir depletion, and it is not easy to ensure the stability of gas field facilities and formation. Geomechanics simulation is linked to reservoir simulation and simulates mechanical characteristics in the underground environment and predicts the formation reaction during oil gas production. Through this, it plays an essential role in clarifying the feasibility of developing gas fields and preventing accidents by predicting possible risks.

The subject of this study is the MX field, the site of Dry Gas development in the deep sea. As a result of the exploration, the reservoir properties of the field and Sand Production during DST indicated that the field is an unconsolidated formation. Therefore, it is necessary to identify changes in productivity due to reservoir depletion and verify the stability of the production process. Therefore, this study conducted a two-way coupling simulation linking reservoir and geomechanics simulations.

This study first collected exploration data, well-logging data, and

drilling reports. Based on this, a relationship equation between rock properties was established to generate 1D MEM. After that, a geomechanical grid was added, and proper properties were populated to each grid to generate 3D MEM. Finally, we defined possible development option cases in the MX field and conducted a two-way coupling simulation to analyze the differences in productivity and stability between the cases.

As a result of the analysis, although the reservoir of the MX field is an unconsolidated sandstone, there was little change in rock properties due to depletion, so there was little decrease in productivity. In the development option case analysis, the increase in production wells improves near-well stability. However, the EUR remains the same, resulting in poor economic feasibility. Field gas production control did not help ease the rate of rock failure. However, additional factors, such as Erosional Velocity, must be considered to select appropriate gas production. Extending the horizontal section of the production well alleviates the pressure drop in the surrounding formation, thereby decreasing rock failure amount. Therefore, it is necessary to select an appropriate horizontal section length considering the drilling cost which increases as it extends.

Keywords : MX field, Geomechanics, 2-way coupling simulation, productivity and stability, case study Student Number : 2021-27330

62