



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

통합생산모델 구축을 통한 해상유전
생산최적화 적용 가능성 연구

A Study on Applicability of Production
Optimization on Offshore Oil Field using
Integrated Production Modeling



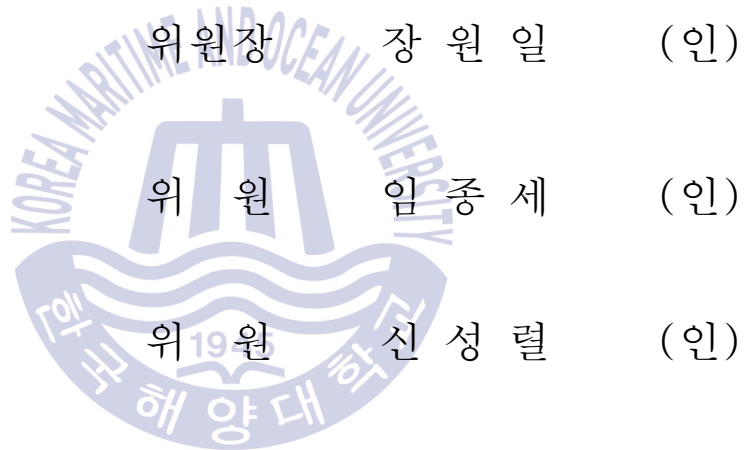
2015년 8월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

김도균

본 논문을 김도균의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2015년 7월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Figures	i
Abstract	iii
제 1 장 서론	1
제 2 장 통합생산모델 관련 연구동향	3
2.1 개요	3
2.2 저류층 시뮬레이션을 이용한 통합생산모델	4
2.3 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델	16
제 3 장 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델 구축	23
3.1 개요	23
3.2 적용대상	23
3.3 물질평형 모델 구축	27
3.4 물질평형 모델 적용	32
3.5 유정 모델 및 지표설비 모델 구축	41
3.6 통합 모델 구축 및 예측거동 분석	46
제 4 장 통합생산모델을 통한 생산최적화 적용 가능성	50
4.1 통합생산모델을 통한 생산최적화 개요	50
4.2 통합생산모델을 통한 캡틴 유전 생산최적화 적용 가능성	53
제 5 장 결론	55
참고문헌	57
참고서적	60

List of Figures

Fig. 2.1	Schematic of components for single well production system	4
Fig. 2.2	Iteration diagram	8
Fig. 2.3	Sub-global iteration diagram	9
Fig. 2.4	Example of well flow rate error in explicit coupling method	10
Fig. 2.5	Iteration diagram for Implicit Coupling	12
Fig. 2.6	Example of well sub-domain	13
Fig. 2.7	Iteration diagram of domain decomposition	14
Fig. 2.8	Material Balance Equation and its solution	18
Fig. 2.9	Workflow for reservoir pressure estimation using Material Balance Equation	18
Fig. 2.10	Reservoir condition at initial stage and after production	19
Fig. 2.11	Workflow of IPM using Material Balance model	22
Fig. 3.1	Location map of Captain field	24
Fig. 3.2	Development scheme of Captain Field.	25
Fig. 3.3	Reservoir component of Captain Field	26
Fig. 3.4	Cartoon cross section of Captain field	26
Fig. 3.5	Schematic of sand to sand cross flow	28
Fig. 3.6	Schematic of well cross flow	28
Fig. 3.7	History matching result for Reservoir A	33
Fig. 3.8	History matching result for Reservoir B	34
Fig. 3.9	History matching result for Reservoir C	35
Fig. 3.10	History matching result for Reservoir D	36
Fig. 3.11	History matching result for Reservoir E	37
Fig. 3.12	Schematic of typical well location	39

Fig. 3.13 Measured vs predicted water cut	40
Fig. 3.14 Pressure gradient inside of ESP & HSP well	43
Fig. 3.15 Differential WHP for producers	44
Fig. 3.16 Differential WHP for injectors	45
Fig. 3.17 Offset depth between datum and wellbore depth	46
Fig. 3.18 Measured vs prediction for production rate	47
Fig. 3.19 Measured vs prediction for injection rate	49
Fig. 4.1 Schematic of assumed production system	50
Fig. 4.2 Schematic of constraint production system	51
Fig. 4.3 Cases of production complying with given constraint	52
Fig. 4.4 Selection of best production strategy	52
Fig. 4.5 Schematic of Optimized production system	53



A Study on Applicability of Production Optimization on Offshore Oil Field using Integrated Production Modeling

Kim, Dokyun

Department of Energy and Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Oil industry has been extremely matured during last decades. It becomes very hard to discover new giant fields even with deep sea drilling and exploration works. Therefore, it is essential to manage discovered field efficiently.

With making integrated decision-making system of field management, well and reservoir surveillance data are utilized to explain performances of sub-surface and surface facility systems. Especially, Integrated Production Modeling(IPM) is commonly used to describe pressure interaction between reservoir and surface facilities, and its efficiency has been proved through several field cases.

In this study, IPM is suggested for Captain filed, located in the United Kingdom sector of North Sea, with various operating conditions

of injection water, power water, produced water handling volumes, FPSO's off loading capacity, etc. It comprises with coupling of 5 material balance models, 25 production well models, 10 water injection well models, and one surface facility model. By comparison with the measured data, the model forecasts show reliable results with 7% and 5% discrepancy in production well and injection well performances, respectively.

KEY WORDS: Integrated Production Modeling 통합생산모델 구축; Material balance model 물질평형 모델; Field management 유전 관리; Reservoir surveillance 저류층 모니터링.



제 1 장 서 론

최근 Improved Oil Recovery(IOR), Enhanced Oil Recovery(EOR) 등의 기술들이 발전됨에 따라, 이미 생산중인 유전들의 효율적 관리의 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해서는, 저류층, 생산정/주입정, 처리시설 등에 대한 독립적인 이해와 더불어, 통합적인 고찰이 필요하다. Orioha, et al.(2012)은 유전 설비들을 하나의 유기체로 표현하는 연구가 효율적이라고 제안하였다.

지표생산 설비는 용량, 설비 고장 혹은 유지보수 등이 생산량을 제약하는 요소가 될 수 있고, 이들은 급격한 운영 조건 변화를 야기할 수 있다. 그러나 이를 각각의 독립된 저류층 및 유정 모델에 실시간으로 반영하여 생산 동향을 예측하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로, 이들 각각을 통합적으로 해석하는 기술이 필요하다.

통합생산모델(Integrated Production Model)은 1960대 Amoco사에 의해 처음 도입된 이후, 다양한 형태로 변형 및 발전되었다. 초기 북해 가스전 관리를 목적으로 실시한 2차원 저류층 모델과 지표 네트워크 모델을 결합하는 모델로부터 Dempsey, et al.(1971)는 가스/물의 2상 유체 저류층 모델을 네트워크 모델과 결합시킨 모델로 발전시켰다. 이후, Startzman(1977 cited in Coats, et al., 2004)의 연구에 의해 최초로 3차원 저류층 시뮬레이션 모델이 통합생산모델에 사용되었고, 이는 다양한 형태로의 발전의 효시가 되었다.

Startzman(1977 cited in Coats, et al., 2004)의 연구 이후, 저류층 모델과 지표 설비 모델의 직접적인 결합을 위한 커플링에 대한 연구들이 이루어져 왔으며, Barroux, et al.(2000)와 Coats, et al.(2004) 등은 이 통합 모델의 결합과정에서의 전산 효율성 한계를 지적하였다. 최근 전산장비들의 급격한 발전이 있었지만 이 문제는 여전히 남아 있으며, 대안으로 저류층 모델 대신 물질평형 모

델을 결합하는 방법이 제안되었다. 물질평형 모델을 사용한 통합생산모델은 다양한 유 가스전 적용되어 왔으며 (Liao and Stein, 2002; Esor, et al., 2004; Bui, et al., 2006; Mazloom, et al., 2007; Madray, et al., 2008), 이러한 사례연구들을 통해 그 효용성이 입증되어 오고 있다.

이에 본 연구에서는 영국 북해에 위치한 Captain 해상유전을 대상으로 물질평형 모델을 이용하여, 수주입을 통해 생산이 이루어지고 있는 중질유 유전에서 통합생산모델을 구축하고, 이를 생산최적화에 활용 할 수 있는 방안에 대해 연구하고자 한다. 또한 물질평형 모델을 이용하여 구축된 통합생산모델은 그 신뢰도를 확인하기 위하여 모델의 최적화된 예측 생산량과 실제 유전에서의 생산량을 비교분석 하고자 한다.



제 2 장 통합생산모델 관련 연구동향

2.1 개요

최소의 비용으로 최대의 이윤을 창출하는 것은 경제활동에 있어서 최대의 관심사이자 목표라 할 수 있다. 생산유전의 경제성을 극대화하기 위해서는 주어진 설비용량 범위 내에서 생산최적화를 통해 생산량을 최대로 유지하는 것이 필수적이다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서 많은 석유업계 혹은 연구기관을 통해 저류층, 유정 그리고 지표 생산 설비 각각의 모델을 하나로 통합한 통합생산모델에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔으며, 이러한 연구를 바탕으로 구축된 통합생산모델은 수많은 현장에 적용되어 생산최적화 혹은 개발계획 수립 등에 활용 되고 있다. 현재 육상에서의 석유개발 사업은 극도로 성숙 되어있어 신규 탐사로 원유 혹은 천연가스를 발견하기 위해서 많은 석유개발기업들은 해양 석유 탐사 및 개발사업에 집중 하고 있는 실정이다. 이와 같은 해상유전은 육상유전에 비해 지표 생산설비 비용이 많이 소요되어 한정된 생산설비를 이용하여 생산을 하는 경우가 대부분이며, 이에 따라 향후 통합생산모델의 필요성은 더욱 높아질 것으로 판단된다.

이 장에서는 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델이 생산최적화에 미치는 효과에 대해 연구하기에 앞서, 현재까지 연구가 되어온 다양한 통합생산모델 구축 방법에 대하여 정리하고자 한다. 이를 위하여 저류층 해석을 위해 가장 널리 사용되는 저류층 시뮬레이션 모델을 이용하여 통합생산모델을 구축하는 다양한 방법에 대해서 간략히 정리하고, 본 연구에 활용될 물질평형 모델에 대한 기술적 특성에 대해 요약하여 물질평형 모델을 사용한 통합생산모델의 연산 원리에 대해 정리하고자 한다.

2.2 저류층 시뮬레이션을 이용한 통합생산모델

2.2.1 통합생산모델 개요

석유가 저류층에서 생산되어 지표 유체 분리기(separator)까지 도달하기 위해서는 Fig. 2.1에 묘사되어 있는 것처럼 석유 생산 시스템상의 다양한 노드(node)를 거치게 되며, 이 과정에서 순차적인 압력 강하가 일어나게 된다.

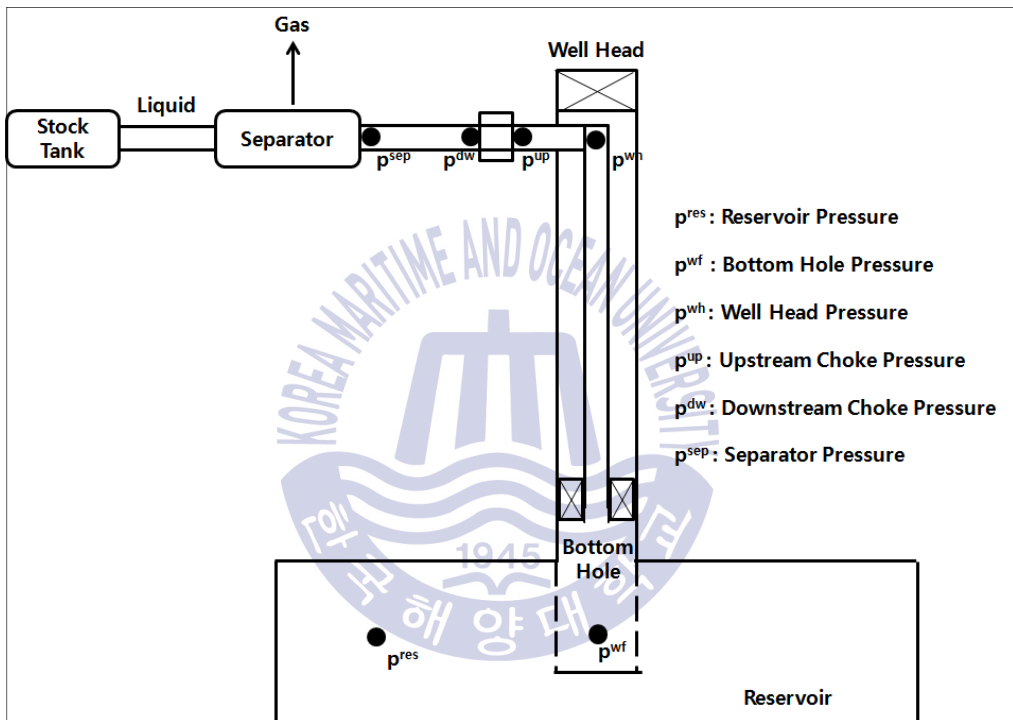


Fig. 2.1 Schematic of components for single well production system (Schiozer and Aziz, 1994).

통합생산모델은 지표설비와 유정 모델을 이용하여 노달분석(Nodal analysis)을 실시하여 운영 가능한 유정별 생산량을 산정하고, 이렇게 산정된 유정별 생산량을 저류층 모델에 반영하여 저류층 압력 분포, 유체포화도 및 저류층내 유체의 상 구성 등을 재계산하는 일련의 작업을 연결하여 수행한다. 이 작업을

수행하기 위한 통합생산모델의 연산은 크게 지표설비, 유정 그리고 저류층 3가지로 나뉘게 되며, 각 단계에서의 기본적인 연산방법은 다음과 같다.

2.2.1.1 저류층 유체거동

생산 유체가 원유일 경우 일반화된 Black-Oil 공식에 따른 3차원 저류층 시뮬레이션 모델을 통한 각각의 유정별 생산량은 식 (2-1)에 의해 산정이 된다 (Smith, et al., 1992).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{rk_{r_o}}{\mu_o B_o} k_r \left[\frac{\delta p_o}{\delta r} - r_o \frac{\delta D}{\delta r} \right] \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta}{\delta \theta} \left\{ \frac{k_{r_o}}{\mu_o B_o} k_\theta \left[\frac{\delta p_o}{\delta \theta} - r_o \frac{\delta D}{\delta \theta} \right] \right\} \\ & + \frac{\delta}{\delta z} \left\{ \frac{k_{r_o}}{\mu_o B_o} k_z \left[\frac{\delta p_o}{\delta z} - r_o \frac{\delta D}{\delta z} \right] \right\} = \frac{\delta}{\delta t} \left[\frac{\phi S_o}{B_o} \right] + q_o \end{aligned} \quad (2-1)$$

r : coordinate of r-axis

θ : coordinate of θ -axis

z : coordinate of z-axis

D : elevation of the center of the flow element

k_{r_o} : relative permeability of oil

k_r : absolute permeability of r-axis

k_θ : absolute permeability of θ -axis

k_z : absolute permeability of z-axis

μ_o : oil viscosity

B_o : oil formation volume factor

p_o : pressure in the oil phase

q_o : flow rate of oil, stb/day

ϕ : porosity of the formation

S_o : saturation of oil

2.2.1.2 지표 파이프라인 및 유정을 통한 압력 강하

지표설비 모델은 지표설비 각각의 노드에서의 압력과 생산량을 계산하게 되며, 지표설비 각 노드에서의 압력분포 및 생산량이 계산이 되면 지표설비 모델의 결과 값으로 얻어진 각각의 유정의 정두압 및 생산량으로 부터 유정의 공저 압력을 계산하게 된다.

파이프라인에서의 압력 변화는 아래의 식 (2-2)을 통해 계산된다.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{g}{g_c} \rho \sin \theta + \frac{f_M \rho v^2}{2g_c D} + \frac{\rho v dv}{g_c dL} \quad (2-2)$$

$\frac{g}{g_c} \rho \sin \theta$: pressure loss due to gravity

$\frac{f_M \rho v^2}{2g_c D}$: pressure loss due to friction

$\frac{\rho v dv}{g_c dL}$: pressure loss due to acceleration

P : pressure, lbf/ft²

L : pipeline length, ft

g : gravitational acceleration, ft/sec²

g_c : unit conversion factor, 32.17 ft-lbm/lbf-sec²

ρ : mixture fluid density, lbf/ft³

θ : dip angle from horizontal direction, deg

v : fluid viscosity, ft/sec

f_M : Darcy-Wiesbach (Moody) friction factor

D : tubing inner diameter, ft

2.2.2 통합생산모델 구축 방법

통합생산모델 구축방법은 지표설비, 유정 그리고 저류층 모델의 연산이 동시에 수행이 되는지 아니면 순차적으로 수행이 되는지에 따라 구분된다. 3개의 모델이 동시에 연산이 이루어지며 각각의 모델의 연산결과가 서로 다른 모델의 연산에 영향을 미칠 경우 이러한 모델구축 방법은 Implicit Coupling으로 분류가 되며, 지표설비와 유정 모델의 연산이 우선적으로 이루어지고 연산의 결과 값을 이용하여 저류층 모델에서의 연산이 나중에 이어지면 이러한 모델 구축방법은 Explicit Coupling으로 분류된다.

2.2.2.1 Explicit Coupling 방법

Explicit Coupling 방법은 Dempsey, et al.(1971)의 연구에 의해 최초로 제안되었다. 이 연구에 따르면 통합생산모델의 연산 작업은 하위 반복연산(Sub-global iteration) 및 전체 반복연산(Global iteration)의 두 단계로 나뉜다. Fig 2.2에서 묘사된 바와 같이 지표설비 모델과 유정 모델의 연산이 이루어지는 단계를 하위 반복연산 작업이라 구분이 되며, 하위 반복연산 완료 후 결과 값을 저류층의 경계조건으로 이용하여 저류층 모델에서 압력분포, 유체포화도 그리고 저류유체 상 분포 등의 새로운 저류층 조건을 계산되는 단계는 전체 반복연산으로 구분지어 진다.

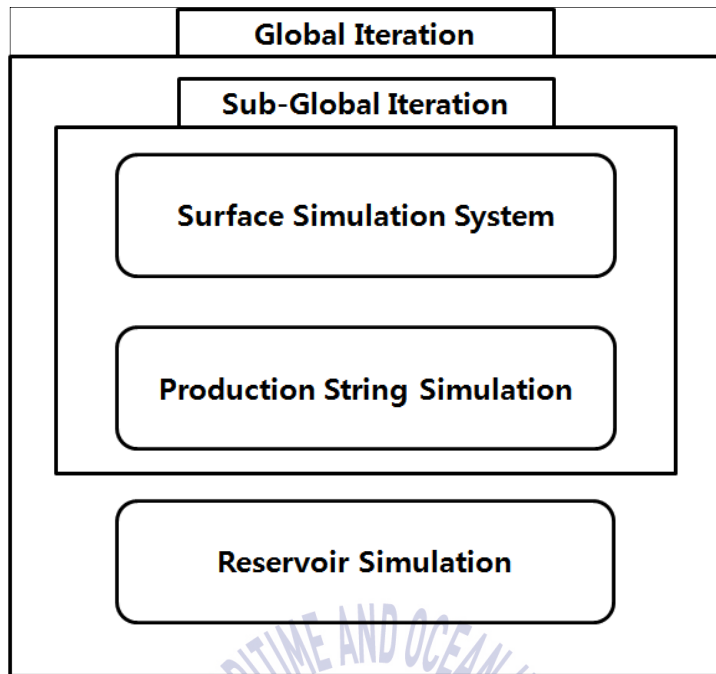


Fig. 2.2 Iteration diagram (Dempsey, et al., 1971).

하위 반복연산 단계에서는 우선 이전 연산시간대의 결과 값으로 얻어진 저류층 조건을 기반으로 하여 유정별 생산 예측치를 산정하여, 모든 유정의 생산예측치의 합을 입력 값으로 지표설비 모델로부터 생산 예측치가 파이프라인을 통해 생산될 때의 지표설비의 각 노드가 받게 되는 압력을 식 (2-2)를 통해 하류에서 상류 정두까지 순차적으로 계산한다.

이에 따라 계산된 정두압을 이용하여 각각의 유정 모델을 통해 공저압을 계산하고, 계산된 공저압을 이용하여 저류층 모델을 통해 유정별 생산량을 산정한다. 이때 저류층 모델은 주어진 공저압을 입력 변수로 하여 생산량을 산정할뿐 각각의 유정별 생산량 변동에 따른 저류층 내의 변수를 재계산 하지 않는다.

이렇게 계산된 유정별 생산량을 지표설비의 압력 분포를 계산하기 위해 사용한 예측치와 비교하여 각각의 유정별 유량이 일치 하지 않으면 유정별 유량을

수정하여 예측치와 산정된 생산량이 적정 오차 범위 내에서 일치할 때까지 다시 상기의 연산을 반복 수행한다.

하위 반복연산이 완료되면 다음 단계로 연산의 결과 값으로 얻어진 유정별 생산량과 공저압을 저류층 시뮬레이션 모델의 경계조건으로 인식시켜 저류층의 전반적인 압력 분포, 유체포화도 및 저류층내 탄화수소 상의 구성을 다시 계산하는 연산 작업을 수행하며, 이렇게 변경된 저류층 상태는 다음 연산 시간 단계의 저류층 초기조건으로 사용된다. 하위 연산의 흐름은 아래의 Fig. 2.3에 자세히 묘사되어 있다.

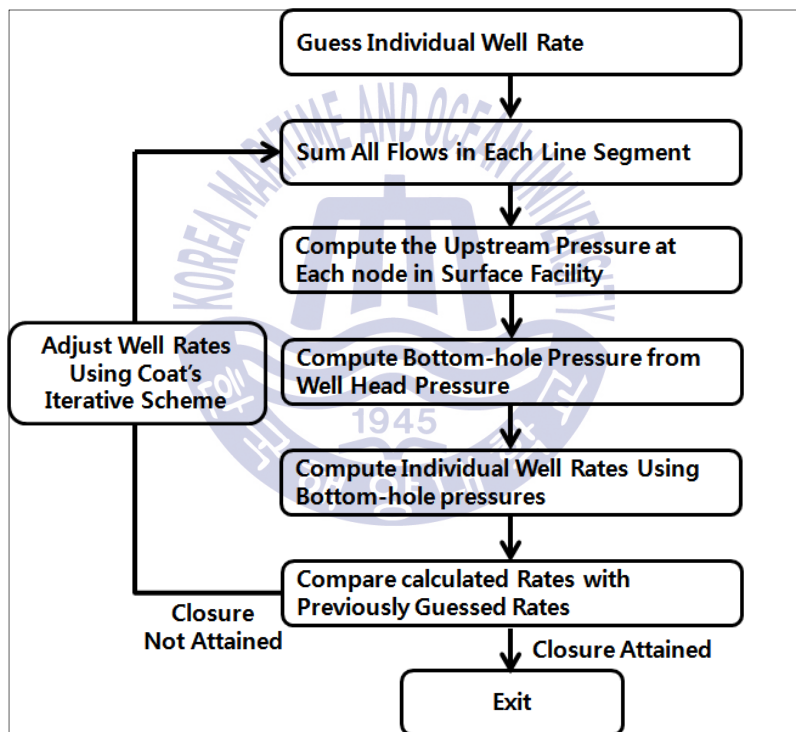


Fig. 2.3 Sub-global iteration diagram (Dempsey, et al., 1971).

상기에 서술한 연산의 흐름을 통해 인지할 수 있는 것은 Explicit Coupling 방법에서는 동일한 연산 시간 단계에서는 하위 반복연산이 수행될 때 저류층 변화가 반영되지 못한다는 문제가 있다.

유체가 생산됨에 따라서 유정별 생산량에 따라 저류층 내에서는 압력 변화에 따라 유체포화도 및 유체의 상변화에 따른 생산되는 물이나 가스의 양이 변화하여 생산관내 유체의 밀도 변화를 야기하고 이러한 변화는 유정의 정두 및 생산 설비의 각 노드에서의 압력 및 유량의 변화를 야기한다. 하지만 Explicit Coupling 방법에서는 이러한 변화가 지표설비 및 유정 모델에는 반영되지 않아 급격한 운영상의 변화가 발생할 시 생산량 계산에 큰 오차가 발생하며, 이러한 문제점에 대한 예시는 Fig. 2.4를 통해 확인 할 수 있다.

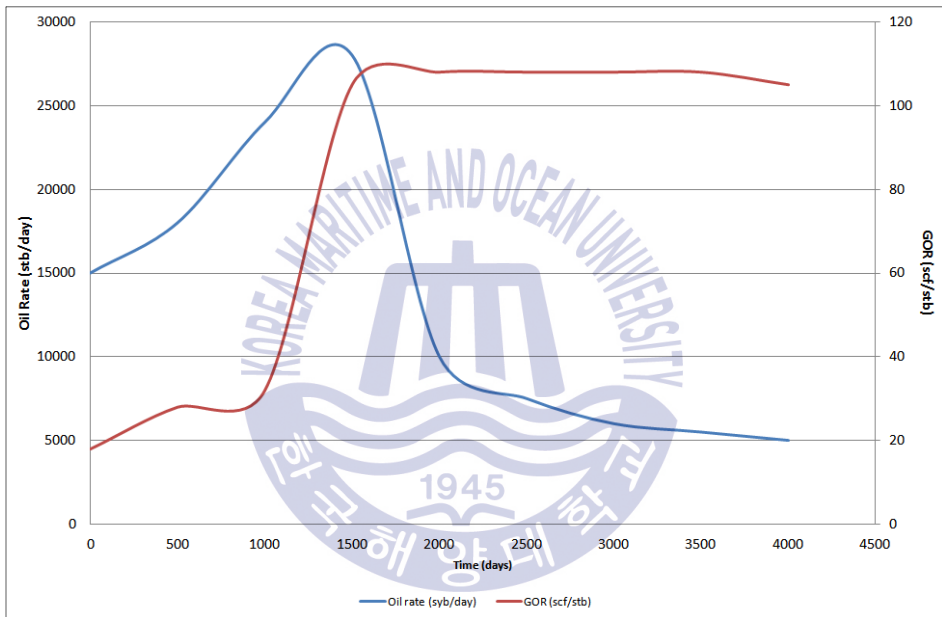


Fig. 2.4 Example of well flow rate error in Explicit Coupling method (Schiozer and Aziz, 1994).

이러한 문제점을 해결하기 위해서 연산 시간 단계의 간격을 줄이는 방법이 사용되고 있으나, 연산 시간 단계의 간격이 줄어드는 만큼 통합생산모델 연산에 필요한 시간이 늘어나게 되는 단점이 존재한다.

2.2.2.2 Implicit Coupling 방법

Explicit Coupling 방법이 가지는 예측 오차를 줄이기 위해 지표설비, 유정 그리고 저류층에서의 반복연산을 동시에 수행케 하는 Implicit Coupling 방법이 고안되었다. Implicit Coupling 방법이 앞서 설명한 Explicit Coupling 방법과 크게 다른 점은 동일 연산 시간 단계에서 저류층 모델이 반복연산에 참여한다는 점이다.

유정 모델을 통해 계산된 공저압력을 이용하여 생산량을 계산할 시 저류층 모델이 반복연산에 참여하게 되어 주어진 정두압과 이에 따라 계산된 생산량의 변화에 의하여 저류층의 조건이 변경되고, 이렇게 변경된 저류층의 조건은 유정 및 지표설비 모델의 연산에 반영된다. 이와 같은 Implicit Coupling 방법의 연산 흐름은 Fig. 2.5를 통해 확인할 수 있다.

따라서 유체의 생산으로 인한 저류층내 대수층의 유입에 의한 유체포화도 변화 혹은 압력 강하로 인한 저류유체의 상변화를 저류층 모델을 통해 계산하고, 이에 따른 생산 유체의 원유, 가스, 물의 상 비율 그리고 이에 따른 밀도 변화를 유정 및 지표설비 모델 상에 반영케 하여, 좀 더 정확한 생산량 예측을 가능하게 한다.

이러한 Implicit Coupling 방법은 Explicit Coupling 방법에 비하여 생산 예측치의 정확도 측면에서는 큰 장점을 보유하고 있으나, 저류층 시뮬레이션 모델이 반복연산에 참여하게 됨에 따라 그 연산 시간이 길어져 효과적인 통합생산 모델 구축방법은 아니라는 의견이 지배적이다. 이에 따라 최근에는 생산 예측의 오차범위가 허용 범위 내에 있다면 통합생산모델 구축을 위해서는 대부분의 경우 Explicit Coupling 방법을 사용하고 있는 실정이다.

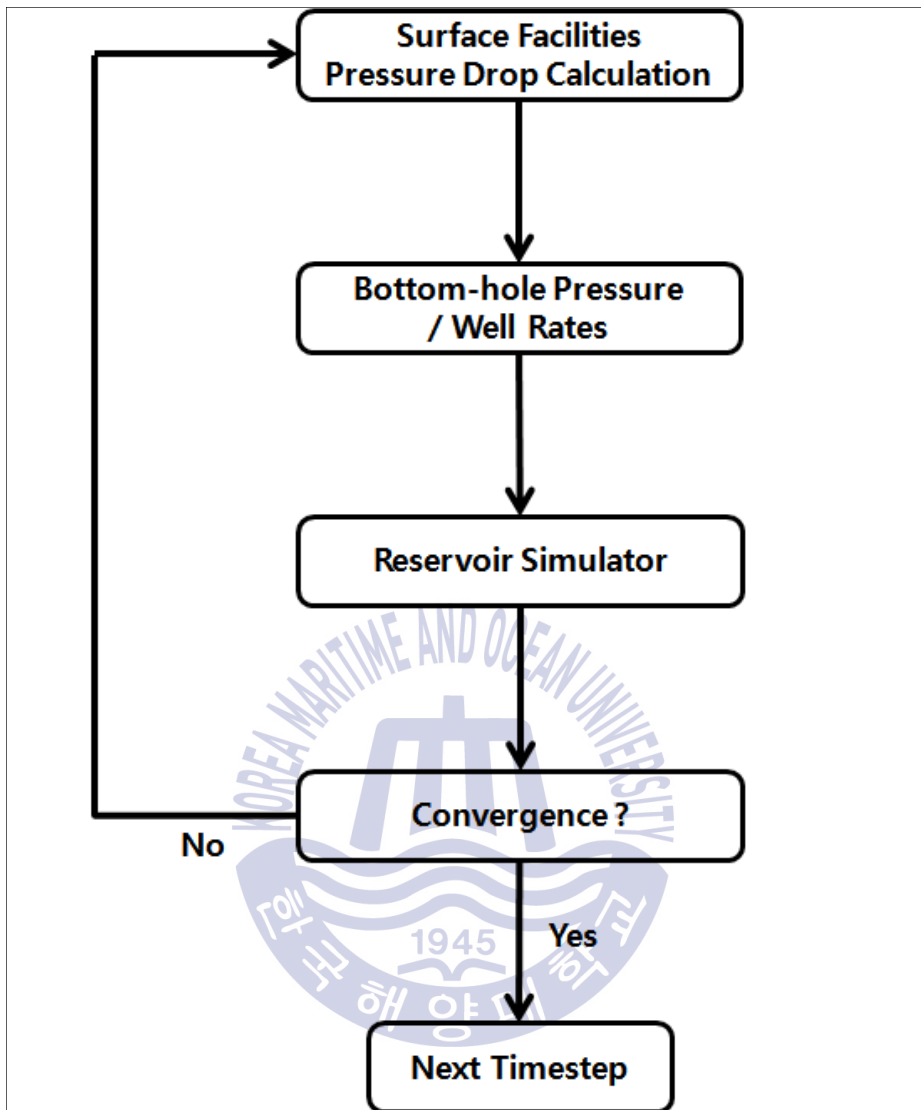


Fig. 2.5 Iteration diagram for Implicit Coupling (Schiozer and Aziz, 1994).

2.2.2.3 영역 분할 (Domain Decomposition) 방법

Explicit Coupling 방법이 가지는 불확실성 그리고 Implicit Coupling 방법이 가지는 긴 연산시간의 단점을 극복하기 위해서 저류층 모델 중 일부분만이 반복연산에 참여하는 영역 분할(Domain Decomposition) 방법이 Schiozer and Aziz(1994)의 연구를 통해 제시되었다.

이 연구에 따르면 저류층 모델 중 유정 근처의 지역만이 유정의 보조 영역(sub-domain)으로 반복연산에 참여하고(Fig. 2.6), 유정의 보조 영역 외의 저류층 모델은 Explicit Coupling 방법에서와 동일하게 지표설비, 유정 그리고 보조 영역에서의 반복연산이 수행된 후, 반복연산의 결과 값을 경계조건으로 이용하여 계산되게 된다(Fig. 2.7).

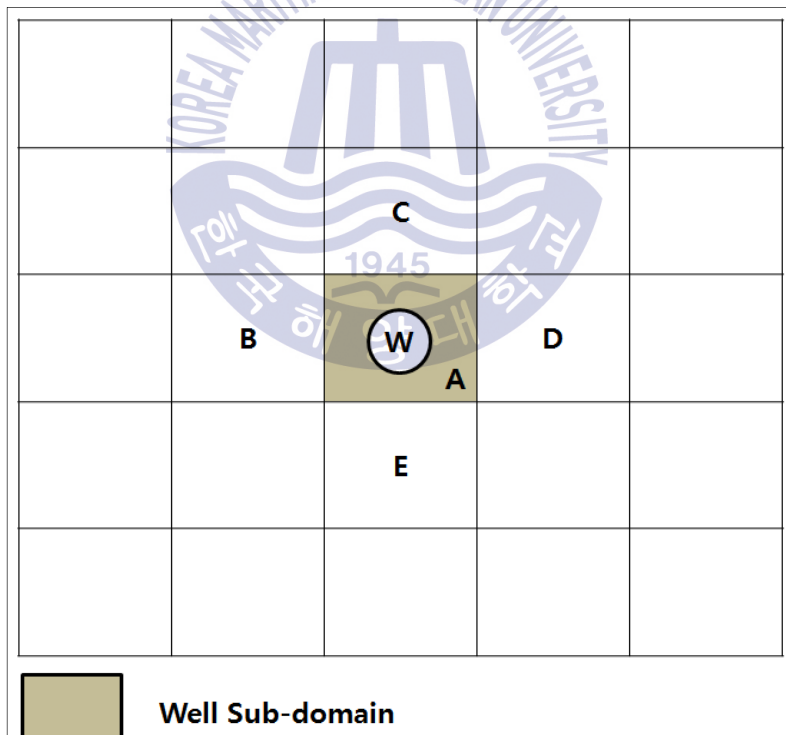


Fig. 2.6 Example of well sub-domain (Schiozer and Aziz, 1994).

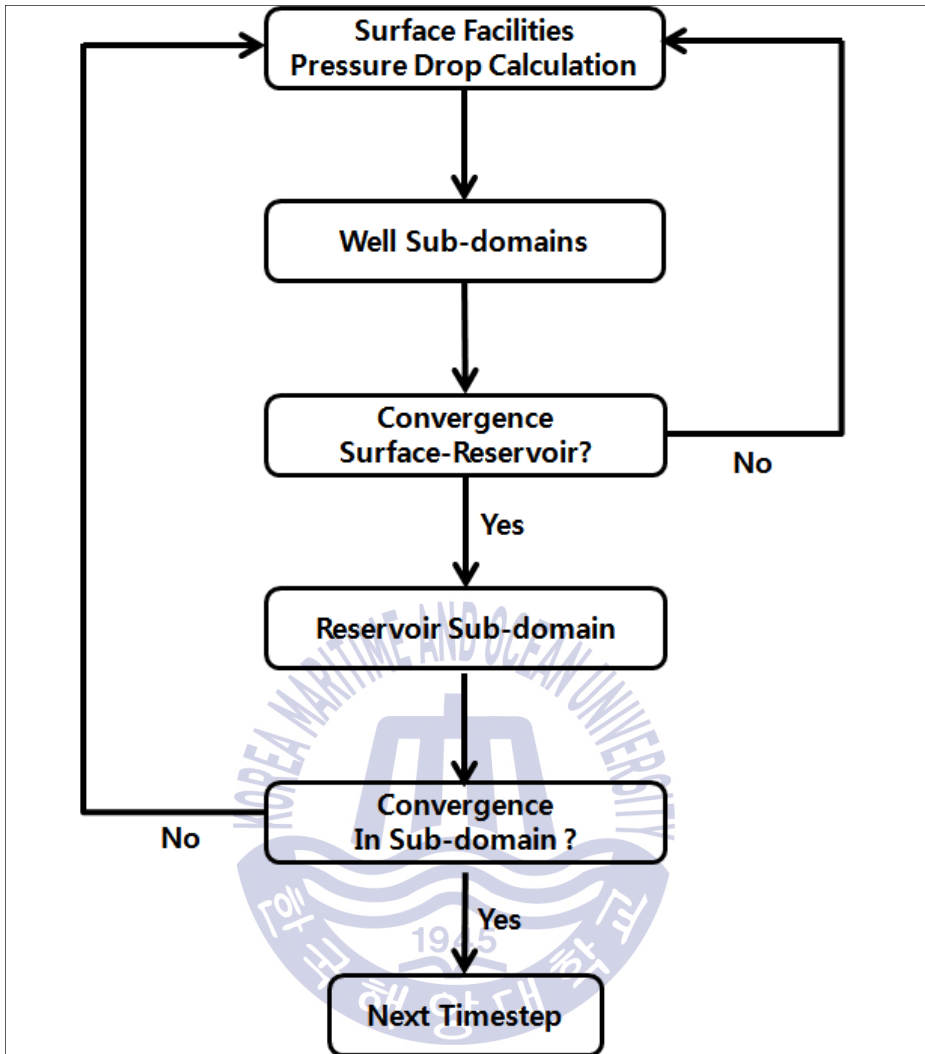


Fig. 2.7 Iteration diagram for domain decomposition (Schiozer and Aziz, 1994).

영역 분할 방법은 유정 보조 영역의 연산 참여에 의해서 유량의 변화에 따른 유정 인근 저류층의 조건 변화를 지표설비 및 유정 모델 연산시 반영할 수 있어 Explicit Coupling 방법 보다 좀 더 정확한 유량 예측이 가능하며 저류층 모델 전체가 아닌 일부만이 연산에 참여하므로 Implicit Coupling 방법에 비해서 통합생산모델 연산시간을 많이 단축시킬 수 있다는 장점이 있다.

하지만 영역 분할 방법에서 주된 문제점은 Explicit Coupling 방법보다 좀 더 정확한 생산량 예측이 가능하나, 유정 보조영역 외부 경계에서의 급격한 저류층내 변화를 Implicit Coupling 방법만큼 충분히 반영하지 못할 수 있다는 점이다. Fig. 2.6에서 유정의 보조 영역인 A의 경계에 있는 B, C, D 그리고 E 사이에서 빠른 대수층의 유입이나, 저류층 압력강하가 일어날 경우, B, C, D 그리고 E에서는 이전 연산 시간 단계의 저류층 조건을 사용하고 있기 때문에 동일한 연산 시간 단계에서는 이러한 변화를 반영하지 못한다.

이런 문제점을 완화시키기 위해서는 유정의 보조 영역의 크기를 크게 만들 필요가 있으나, 보조 영역의 크기가 커질수록 통합생산모델 연산에 필요한 시간은 늘어나게 된다.



2.3 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델

앞절에서 살펴본 바와 같이 저류층 시뮬레이션을 이용한 통합생산모델에서 가장 큰 문제점은 전체 모델 중 저류층내에서 연산이 이루어질 때 많은 연산시간이 필요하다는 점이다. 실제 유·가스전을 운영함에 있어 발생하는 급작스러운 각종 운영환경의 변화를 반영하여 최적화된 생산량을 도출하기 위해서는 즉각적인 결과치 도출이 필요하나, 저류층 시뮬레이션 모델을 활용한 통합생산모델의 긴 연산시간은 이러한 요구를 만족시키기에는 비효율적이다.

이와 같은 문제점을 해소하기 위해서 최근에는 물질평형방정식(Material Balance Equation)을 이용하여 저류층을 하나의 단순화된 탱크(tank) 모델로 구축, 저류층 내에서의 연산에 필요한 시간을 줄여 전체 통합생산모델의 효율성을 높이고자 하는 연구가 수행이 되어 왔으며, 이와 같은 방법은 많은 적용사례(Liao and Stein, 2002; Esor, et al., 2004; Bui, et al., 2006; Mazloom, et al., 2007; Madray, et al., 2008)를 통해 그 효용성이 확인되어 왔다.

2.3.1 물질평형방정식 개요

물질평형방정식은 질량보존의 법칙을 이용하여 유가스전의 매장량을 예측하는 방법 중의 하나로, 일반적으로 유·가스전의 개발 혹은 생산 초기에 사용되어 저류층내 유·가스의 원시부존량 산정, 대수층의 크기 예측 그리고 저류층 드라이브 메커니즘 규명에 사용이 되고 있다.

물질평형방정식의 기본적인 이론은 저류층 내부에서는 지표로 생산된 부피만큼 지하에 있는 유체가 팽창하거나 새로 유입 된다는 것으로 식 (2-3)에 나타나 있다(Havlena and Odeh, 1963, 1964).

$$F = N(E_o + mE_g + E_{f,w}) + W_e B_w \quad (2-3)$$

$$F = N_p [B_o + (R_p - R_s) B_g] + W_p B_w \quad (rb)$$

$$E_o = (B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s)B_g \quad (rb/stb)$$

$$E_g = B_{oi} \left(\frac{B_g}{B_{gi}} - 1 \right) \quad (rb/stb)$$

$$E_{fw} = (1 + m)B_{oi} \frac{(c_w S_{wc} + c_f) \Delta p}{1 - S_{wc}} \quad (rb/stb)$$

F : underground withdrawal, rb

N : original oil in place, stb

N_p : cumulative oil production, stb

W_p : cumulative water production, stb

W_e : water influx, stb

B_o : current oil formation volume factor, rb/stb

B_{oi} : initial oil formation volume factor, rb/stb

B_w : current water formation volume factor, rb/stb

B_g : current gas formation volume factor, rb/scf

B_{gi} : initial gas formation volume factor, rb/scf

R_p : cumulative gas oil ratio, scf/stb

R_s : current solution gas oil ratio, scf/stb

R_{si} : initial solution gas oil ratio, scf/stb

m : initial gas oil ratio, rb/rb

C_w : water compressibility coefficient, psi^{-1}

C_f : pore compressibility coefficient, psi^{-1}

S_{wc} : connate water saturation, fraction

상기 식은 일반화된 물질평형방정식을 나타내며, 저류층 유체의 PVT 분석 자료 및 생산이력 자료를 이용하여 식을 풀어냄으로 저류층 원시부존량 및 대수층으로부터의 지층수 유입 강도를 산정할 수 있다(Fig. 2.8).

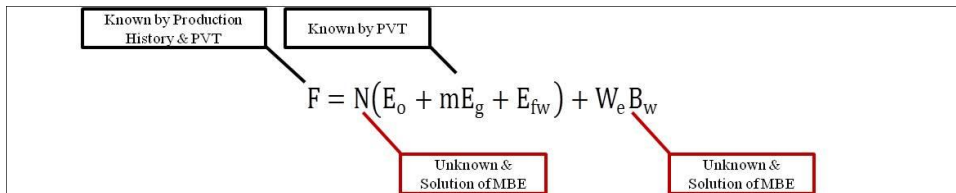


Fig. 2.8 Material Balance Equation and its solution
(Havlena and Odeh, 1963, 1964).

이렇게 산정된 원시부존량 및 대수층 강도를 입력변수로 한다면, 향후 생산에 따르는 저류층 압력의 변화를 물질평형방정식 좌변과 우변이 일치하는 압력을 도출할 때까지 반복연산을 통해 구해낼 수 있다(Fig. 2.9).

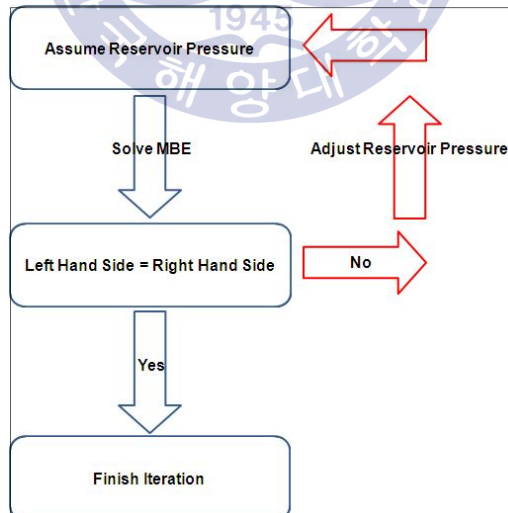


Fig. 2.9 Workflow for reservoir pressure estimation using Material Balance Equation.

식 (2-4)에 따라, 저류층을 빠져나온 유체의 부피만큼 저류층내 유체가 각각의 팽창계수에 따라 팽창하거나 대수층에서 유입된 물이 저류층내 생산유체가 빠져나간 빈 공간을 채우게 된다. 이에 생산이 진행됨에 따라 저류층내 유체의 포화율이 변화한다(Fig. 2.10).

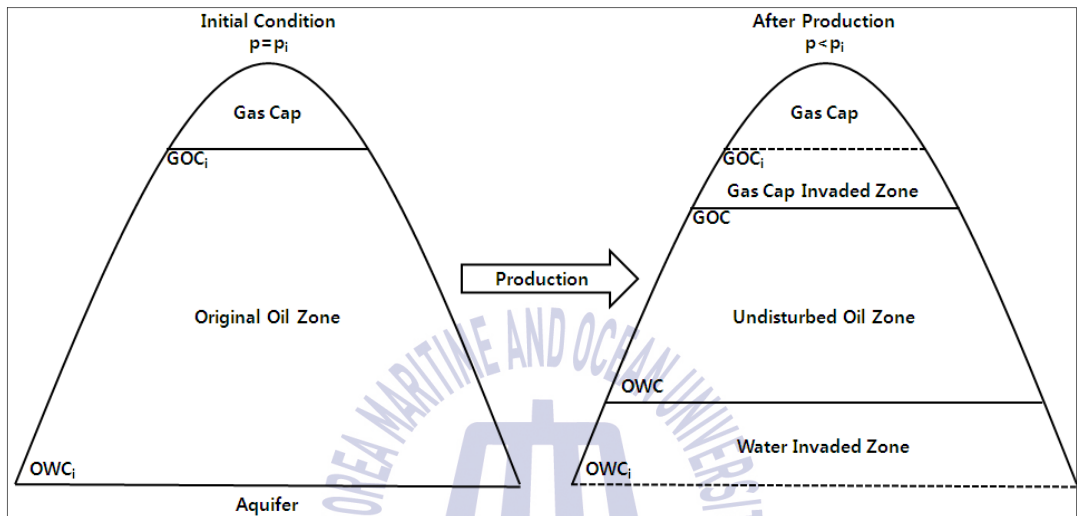


Fig. 2.10 Reservoir condition at initial stage and after production.

물질평형방정식을 이용, 향후 저류층 내 유체의 포화율의 변화를 식 (2-4), (2-5), (2-6)을 통해 예측이 가능하다(Smith, et al., 1992).

$$GCE = \frac{G(B_g - B_{gi}) - G_{pc}B_g + Q_{gin}B_g}{S_{gavg}} \quad (2-4)$$

GCE : the pore volume within the gas cap invaded zone, rb

Q_{gin} : cumulative gas injection into the gas cap, scf

G : the original free gas in place in the gas cap, scf

G_{pc} : cumulative gas production from the gas cap, scf

S_{gavg} : average gas saturation within the gas cap invaded zone, fraction

$$WCM = \frac{W_e - W_p B_w + W_{in}}{S_{wavg} - S_{wc}} \quad (2-5)$$

WCM : the pore volume within the water invaded zone, rb

W_{in} : cumulative water injection, rb

S_{wavg} : average water saturation within the water invaded zone, fraction

$$S_o = \frac{(N - N_p)B_o - (GCE)(S_{org}) - (WCM)(S_{orw})}{\frac{NB_{oi}}{1 - S_{wc}} - (GCE + WCM)} \quad (2-6)$$

S_o : oil saturation, fraction

S_{org} : remaining oil saturation in gas cap invaded zone, fraction

S_{orw} : remaining oil saturation in water invaded zone, fraction

2.3.2 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델 연산 과정

물질평형 모델을 이용한 통합생산모델의 기본적인 연산 흐름은 2.2에서 설명한 저류층 시뮬레이션 모델을 이용한 통합생산모델과 동일하며, 그 흐름은 Fig. 2.11에 묘사되어 있다.

개략적으로 가정된 유정별 생산량을 이용하여 지표설비 각각의 노드의 압력을 식 (2-2)를 통해 유체분리기에서 정두로의 순서로 계산한다. 계산된 정두압을 이용 식 (2-2)을 통해 유정별 Vertical Lift Performance(VLP) 커브를 도출하고, 물질평형 모델을 통해 얻어진 저류층 압력을 입력변수로 아래의 식 (2-7)를 이용 Inflow Performance Relationship(IPR) 커브를 도출한다(Boyun, et al., 2007).

$$q = J(p_e - p_{wf}) \quad (2-7)$$

q : flow rate, stb/day

J : productivity index, stb/day/psi

p_e : average reservoir pressure, psi

p_{wf} : flowing bottom hole pressure, psi

상기 도출된 VLP/IPR 커브의 교차점에서의 유량이 정두압을 계산하기 위해 사용된 개략적으로 예측된 생산량과 일정 허용범위 내에서 수렴하면 모든 유정의 유량을 합산하여 물질평형 모델의 입력변수로 사용, 식 (2-3)를 통해 저류층 모델의 압력을 재계산하게 된다. 만약 이 값이 개략적 예측 생산량과 다르다면, 상기 언급된 연산과정을 두 값이 수렴할 때 까지 반복 수행한다.

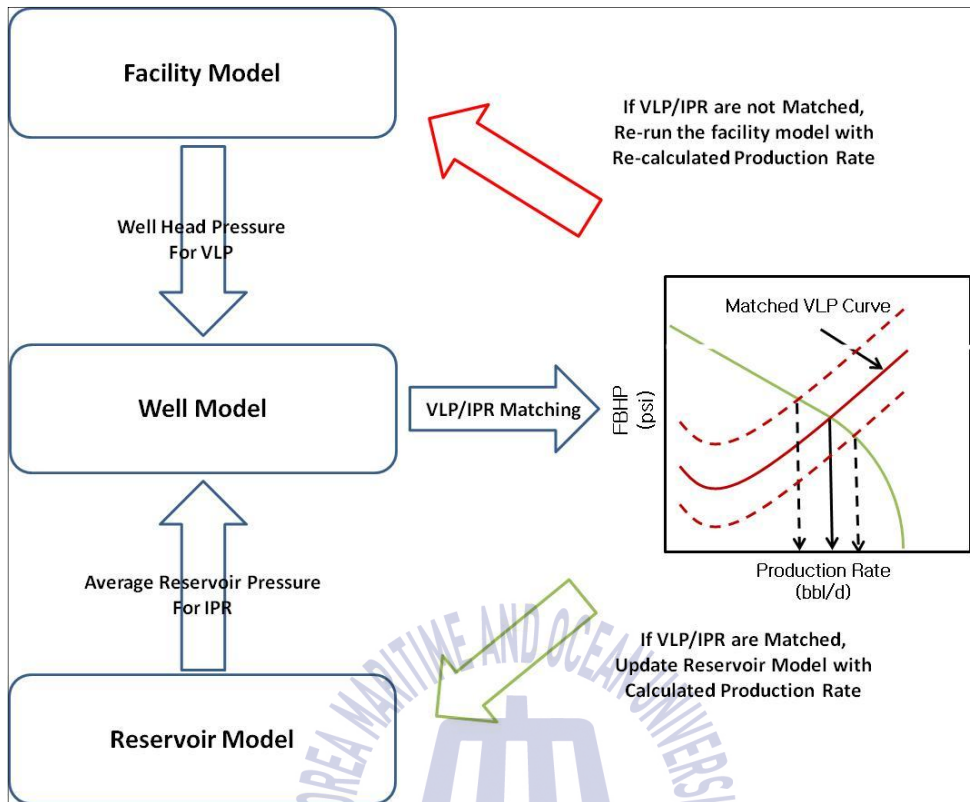


Fig. 2.11 Workflow of IPM using Material Balance model.

이와 같은 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델의 연산은 반복연산 시 저류층 모델이 연산에 참여하지 않는다는 점에서 Explicit Coupling 방법과 동일하여 급격한 저류층의 상태 변화를 반영하지 못하는 단점이 존재할 수 있으며, 저류층을 하나의 단순화된 탱크 모델로 구축함에 따라 지하구조의 불균질성 및 이방성 등을 고려하지 못하므로 유정별 생산량 예측에 있어 저류층 시뮬레이션 모델에 비해 신뢰성이 떨어질 수 있다.

제 3 장 물질평형 모델을 이용한 통합생산모델 구축

3.1 개요

이 장에서는 수주입을 통해 원유를 생산중인 영국 북해 캡틴(Captain) 유전을 대상으로 통합생산모델을 구축하고, 통합생산모델 적용을 통한 생산최적화 가능성을 검토하고자 한다. 캡틴 유전은 수주입량, HSP(Hydraulic Submersible Pump) 동력수, 생산수 처리량 그리고 FPSO(Floating Production Storage and Offloading) 하적 용량 등의 다양한 지표설비 한계가 존재하며, 이에 각각의 설비 한계에 따른 최적화된 운영가능 생산량 예측이 필수적이다.

3.2 적용대상

3.2.1 유전개요

캡틴유전은 영국 에버딘에서 북쪽으로 약 130km 떨어진 영국령 북해상에 위치하고 있다(Fig. 3.1). 캡틴 유전은 유전의 지분을 85% 보유한 셰브론 유럽지사(Chevron Upstream Europe)에 의해 운영되고 있으며, 남은 15%의 지분은 한국석유공사가 보유하고 있다.

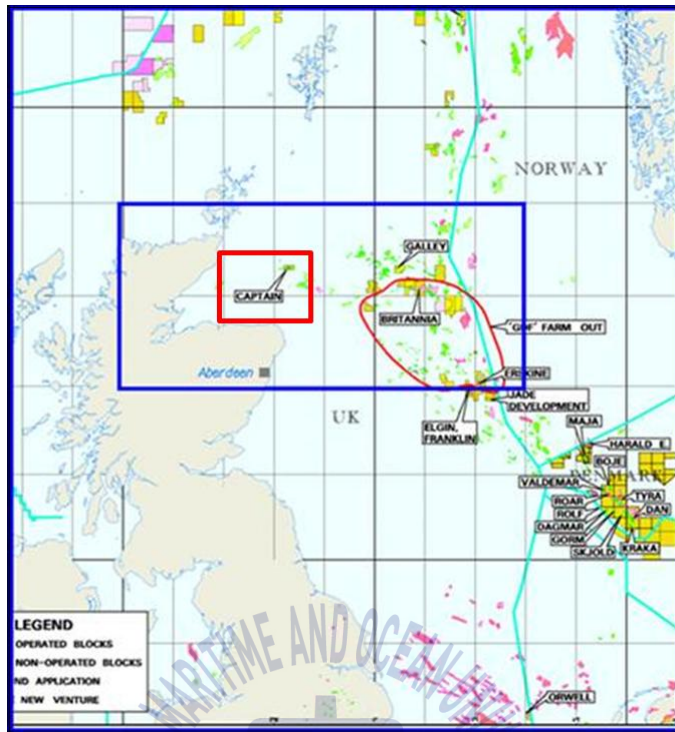


Fig. 3.1 Location map of Captain field
(Chevron Upstream Europe (CUE), 2013).

유전은 1977년 발견되어, 1997년 3월에 생산이 시작되었으며, 총 3단계로 나뉘어 개발이 진행되었다. 각각의 개발단계를 통해 A, B 그리고 C 지역이 순차적으로 개발이 진행되었다(Fig. 3.2). A지역은 WPPA(Wellhead Protection Platform)을 통해 생산이 이루어지고 있으며, 생산정의 인공채유를 위해 ESP(Electrical Submersible Pump)가 사용되고 있다. B와 C지역은 해저 UTM(Unified Template Manifold)를 통해 생산이 이루어지고 있으며, 생산정의 인공채유를 위해 HSP가 사용되고 있다.

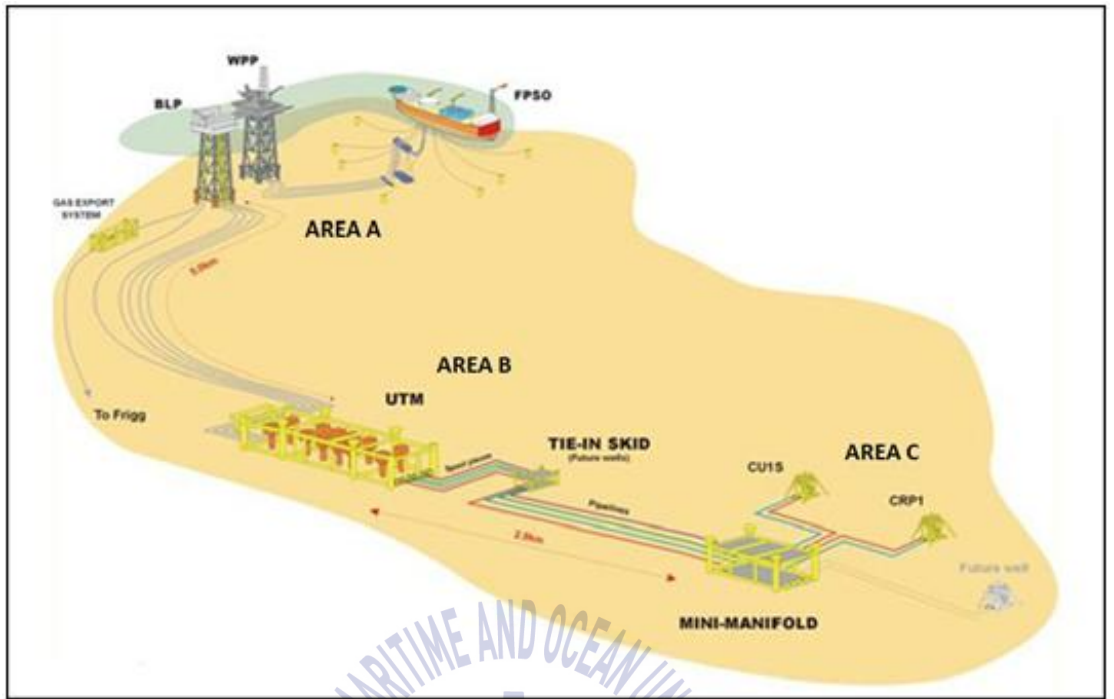


Fig. 3.2 Development scheme of Captain Field (CUE, 2013).

캡틴 유전의 저류층은 비교적 균질하고, 유체투과도가 수 Darcy에 이르는 양질의 미고결 사암으로 구성되어 있으며, 원유성상은 13~21° API의 중질유로 특징되어 있다. 유전내 저류층은 크게 5개의 저류층으로 구성되며, 모든 저류층에서 수주입이 실시되며 수평정을 통해 생산이 진행되고 있다(Fig. 3.3, Fig. 3.4).

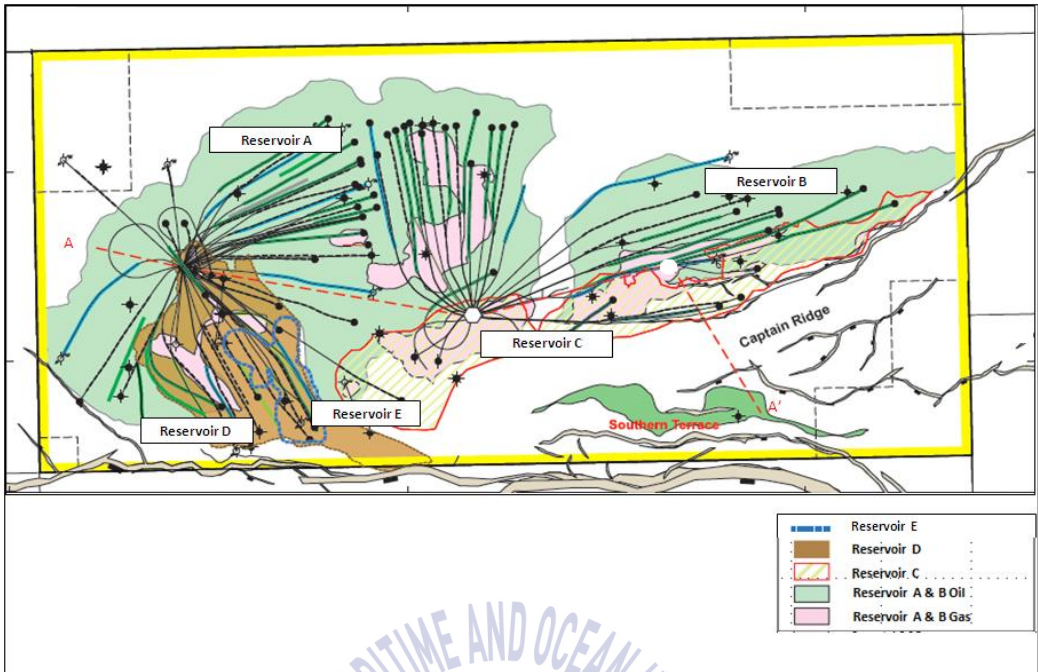


Fig. 3.3 Reservoir component of Captain Field (CUE, 2013).

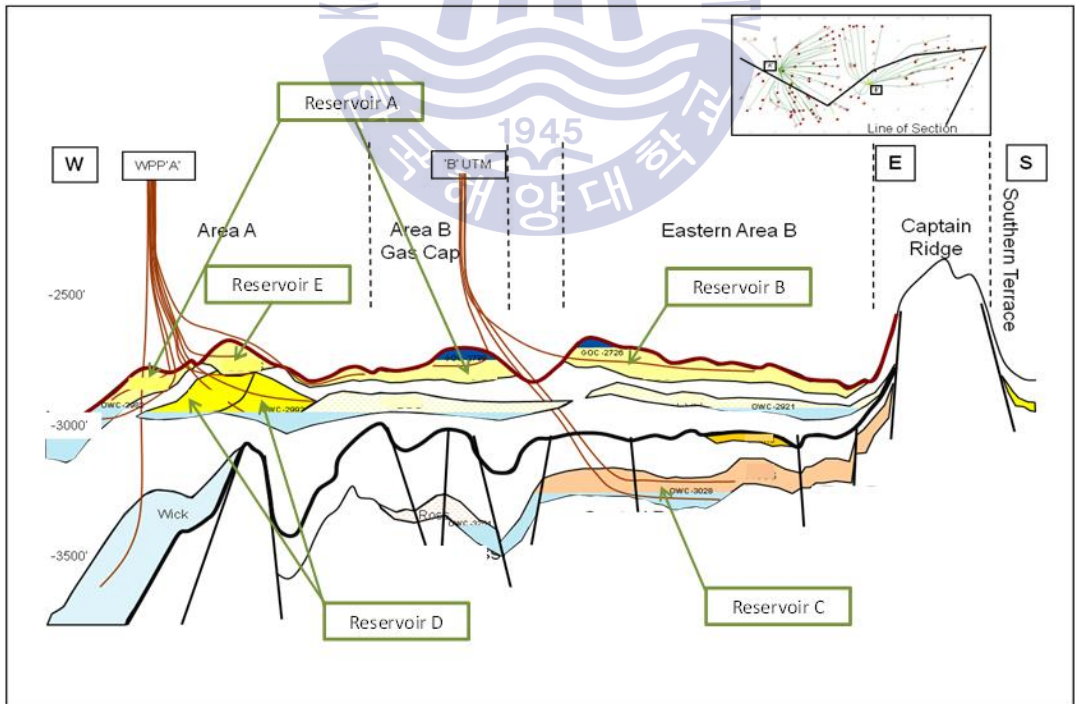


Fig. 3.4 Cartoon cross section of Captain field (CUE, 2013).

3.3 물질평형 모델 구축

3.3.1 물질평형 모델 개요

물질평형 모델을 구축하기 위해 PETEX(Petroleum Expert)사의 상용프로그램인 MBAL 모델이 사용되었으며, 각각의 저류층에 대해서 총 5개의 물질평형 모델을 구축하였다. A, B, C 저류층은 분리된 하나의 탱크 모델로 구축이 되었으며, 저류층 D와 E는 저류층 사이 층간 및 생산유정을 통한 교차유동(cross flow)이 탐지된 관계로 각각의 저류층 탱크 모델에 가상의 생산정과 주입정을 추가하고 두 저류층 모델을 전달률(transmissibility)을 통해 연결시켜 모델을 구축하였다.

저류층 E는 지질학적으로 저류층 D의 상부에 위치하고 있으며, 저류층 D와 E 사이의 덮개암(seal rock) 역할을 하는 셰일층이 일부 구간에서 존재하지 않아, 두 저류층간 압력차가 발생할 때, 식 (3-1)에 따른 층간 교차유동이 발생한다(Fig. 3.5).

$$Q_i = C \sum_i \frac{Kr_i}{\mu_i} \Delta P \quad (3-1)$$

Q_i : total downhole flow rate, rb/day

C : transmissibility constant, rb/day×cp/psi

Kr_i : relative permeability of phase i, fraction

μ_i : viscosity of phase i, cp

ΔP : pressure difference between the two reservoirs, psi

또한 저류층 D를 목표로 시추된 유정 중, 3개 유정의 생산구간이 저류층 D와 E를 동시에 관통하고 있어 저류층 D에서 생산된 일부 유체가 저류층 E로

유입이 관측되었다(Fig. 3.6). 이러한 교차유동은 2009년 10월 교차유동에 기여한 모든 유정들이 폐공이 됨에 따라 종료되었다.

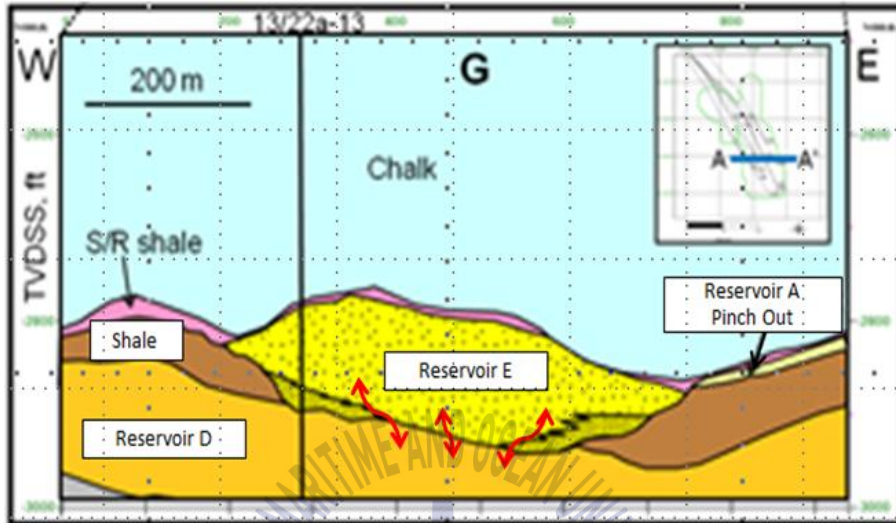


Fig. 3.5 Schematic of sand to sand cross flow (CUE, 2013).

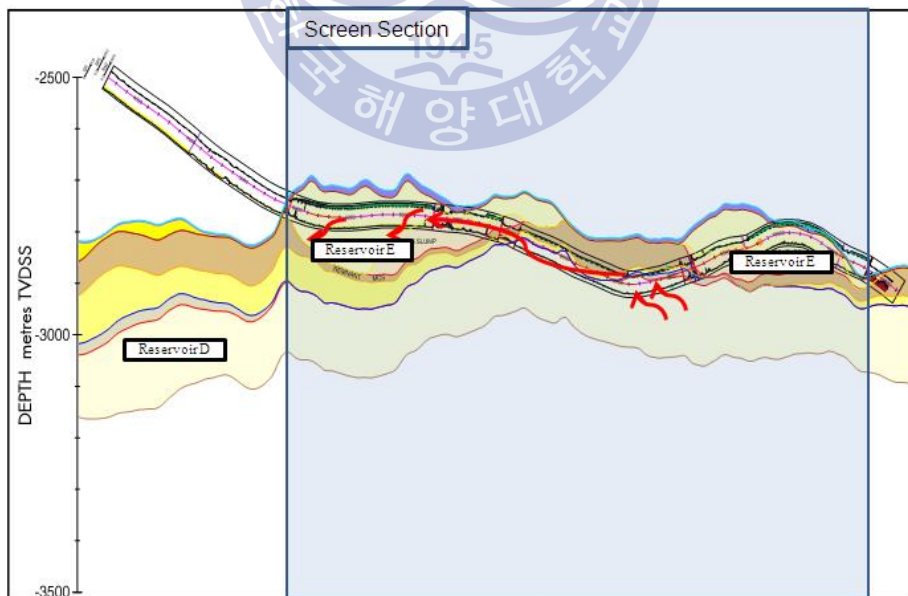


Fig. 3.6 Schematic of well cross flow (CUE, 2013).

유정을 통한 교차유동량은 과거 저류층 E에서 생산량 관측 및 2002년 실시된 생산검층(production logging)을 통해 추측이 이루어졌다. 교차유동이 일어나는 유정중 하나인 D1 유정이 생산중일 때 저류층 E내 유일한 생산정인 E1 유정의 생산량은 약 15,000 stb/day 수준이었으나 D1 유정이 폐공된 이후 공저압이 일정함에도 불구하고 E1의 생산량이 6,000 stb/day 감소하는 현상이 관측되었다. 이에 E1의 전체 생산량 중 약 9,000 stb/day 정도가 교차유동에 의해서 이루어졌다고 추정할 수 있는 근거가 되었다. 또한 2002년 또 하나의 교차유동이 일어나고 있었던 D2 유정에서 실시된 생산검층 결과 생산이 중단되었을 때 약 6,000 stb/day 그리고 생산중일 때 약 2,000 stb/day의 유량이 저류층 D에서 E로 유입되었음이 확인되었다.

상기 설명한 층간 교차유동을 모델에 반영하기 위해 히스토리 매칭을 통해 전달률을 산정하였으며, 유정을 통한 교차유동을 반영하기 위해서 하나의 가상 주입정을 저류층 E에, 다른 하나의 가상의 생산정을 저류층 D에 모델링 하였으며 가상의 수주입정을 통한 주입량과 생산정을 통한 생산량은 동일한 값을 사용하였다.

현실적으로 교차유동 발생시, 물, 원유 그리고 가스 3개의 상이 모두 교차유동을 통해 이동이 이루어졌을 것으로 판단되지만, 3상의 비율을 산정하는 것은 매우 어려운 문제로, 이 연구에서는 가상의 유정을 통해 주입, 생산되는 유체는 모두 물로 가정되었다.

3.3.2 물질평형 모델 입력변수 처리

물질평형 모델 구축을 위해서는 공극률, 유체투과도, 그리고 수포화율 등의 저류층 특성 변수, PVT 자료, 원시부존량 그리고 대수층 입력 변수가 필요하다. 저류층 특성 변수 및 PVT 자료는 기존에 실시된 시료분석 결과 자료를 이용하였다. 원시부존량은 물질평형방정식을 통해 구해지는 출력 변수이지만, 캡틴 유전은 오랜 기간 동안 생산이 이루어진 유전으로 기존에 지속적으로 평가된 신뢰도가 높은 원시부존량 산정치가 존재하여, 이를 물질평형 모델링의 시작점으로 활용하고 물질평형 모델 히스토리 매칭을 통해 검증 및 조정하는 방향으로 히스토리 매칭을 실시하였다.

물질평형 모델 히스토리 매칭을 위해 필요한 입력변수는 누적 생산량 및 저류층 압력 자료이다.

일반적으로 압력 자료는 측정 오류 혹은 게이지의 오작동으로 인해 이상치가 존재하며 이러한 이상치는 사용 전에 제거해줄 필요성이 있다. 따라서 이 연구에서는 기포점 압력(bubble point pressure) 이하 그리고 저류층 초기 압력 이상의 압력 자료는 이상치로 추정, 제거하였다.

또한 캡틴 유전에서는 저류층 평균압력을 구하기 위한 압력 테스트가 이루어지지 않아 저류층 압력(static reservoir pressure) 자료가 존재하지 않는다. 이에 5일 이상 생산이 중단 되었을 때의 PIP(Pump Intake Pressure)에 펌프에서 저류층 기준 심도의 차이만큼의 정수압을 반영한 가상의 정압(pseudo static reservoir pressure)을 저류층 압력으로 사용했다.

누적생산량 자료는 데이터베이스상의 자료를 별도의 처리 없이 모델의 입력 변수로 사용이 가능하나, 캡틴유전의 수주입량의 경우 몇 가지 이유에 의해서 오차가 존재할 수 있다.

첫 번째 이유는 캡틴 유전에서는 2011년 이전에는 수주입정별 수주입량을 측정하기 위한 지하 유량 측정기가 존재하지 않아 2011년 이전의 수주입량은 전체 수주입량을 지표 설비 모델인 GAP 모델을 통해 각각의 수주입정 별로 분산을 시킨 예측치를 사용한 것에 기인한다.

두 번째 이유는 2011년에 수주입정별 수주입량을 측정하기 위한 장비로 ultrasonic meter가 사용이 되었으나, 동 장비가 가지고 있는 고유의 측정오차 범위가 10%라는 점이다.

이에 이 연구에서는 수주입량의 오차를 감안하기 위해 필요시 2011년 이전의 자료에는 20%의 측정오차를 적용하고 2011년부터 그 이후의 자료는 10%의 측정오차를 적용하였다.

3.3.3 물질평형 모델 히스토리 매칭 개요

이 연구를 위한 모든 저류층 모델은 생산 시작부터 2013년 8월 31일까지의 생산이력 자료를 이용하여 히스토리 매칭이 실시되었다.

물질평형 모델에서 히스토리 매칭 작업은 ‘가상압력(Simulated Pressure)’이라 불리우는 물질평형방정식인 식 (2-3)를 이용하여 계산된 압력 값을 측정압력 값과 매칭을 시키는 방법으로 수행되며 측정압력으로 사용되는 저류층 평균 압력은 아래 식 (3-2)을 통해 전체 유정 압력의 누적생산량에 가중치를 둔 가중평균치가 사용된다(Dake, 2001).

$$\bar{p} = \frac{\sum_j p_j \Delta F_j / \Delta p_j}{\sum_j \Delta F_j / \Delta p_j} \quad (3-2)$$

\bar{p} : average reservoir pressure, psi

p_j : pressure of j^{th} well, psi

Δp_j : change in pressure of j^{th} well, psi

ΔF_j : change in underground withdrawal of j^{th} well, rb

대수층의 강도와 측정 오차를 고려한 수주입량 조정을 통해 히스토리 매칭이 수행되었으며 저류층 D와 E의 경우 층간 교차유동을 반영하기 위한 유동률 그리고 유정을 통한 교차유동을 반영하기 위한 가상 수주입정과 생산정에 대한 유량 산정이 추가적으로 수행되었다.

3.4 물질평형 모델 적용

3.4.1 물질평형 모델 히스토리 매칭 결과

히스토리 매칭 결과를 확인하기 위해 물질평형방정식 선형화 방정식 (3-3)을 (Havlena and Odeh, 1963, 1964) 이용한 Graphical Method와 평균압력 값을 이용 물질평형방정식을 풀어서 계산된 생산량과 측정된 생산량을 비교 분석하여 회귀분석을 통해 저류층 입력변수를 조정할 수 있는 Analytical Method가 사용된다.

$$\frac{F}{E_t} = N + \frac{W_e}{E_t} \quad (3-3)$$

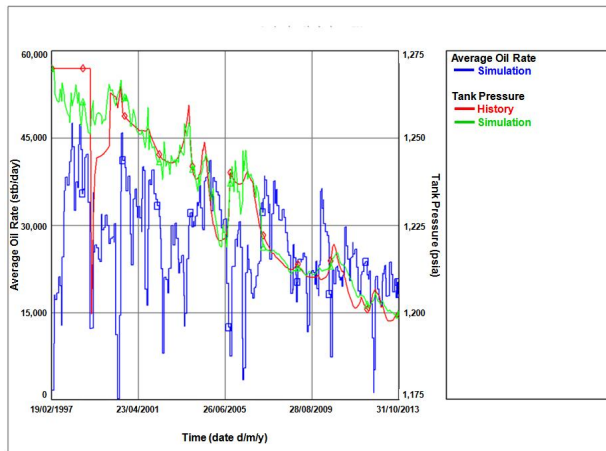
W_e : water influx, rb

$$W_e = U \sum \Delta p W_D \quad (rb)$$

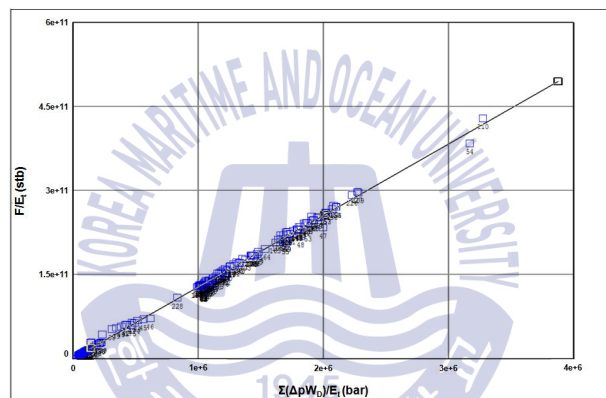
$$E_t = E_o + E_g + E_{fw} \quad (rb/stb)$$

모든 저류층에 대한 히스토리 매칭결과 모든 저류층에서 양호한 매칭 결과를 보였으며, Graphical Method상 대부분의 자료 값이 직선상에 위치하며, Y 절편이 입력된 원시부존량 값과 차이를 거의 보이지 않음을 확인하였으므로 가정된 대수층 모델이 적정한 것을 확인할 수 있었다.

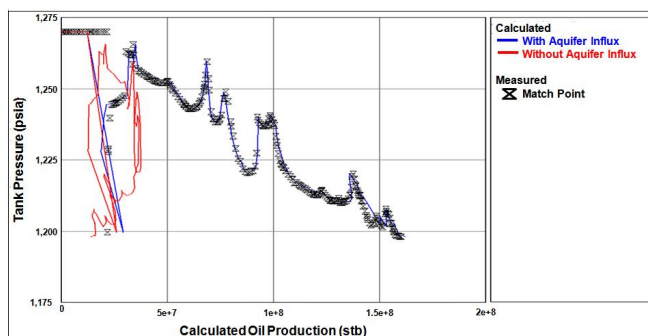
또한 Analytical Method상 계산된 생산량이 측정된 생산량과 양호한 매칭이 이루어진 것으로 미루어 기타 저류층 입력 변수도 적정하며 추가적인 조정이 필요가 없음을 확인할 수 있다(Fig. 3.7~3.11).



(a) Pressure Matching Domain.

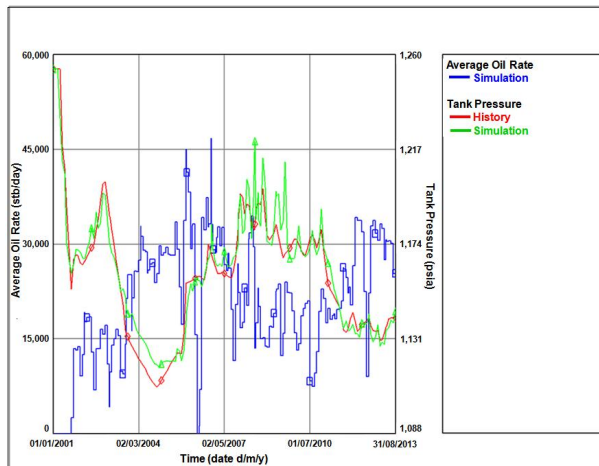


(b) Graphical Method.

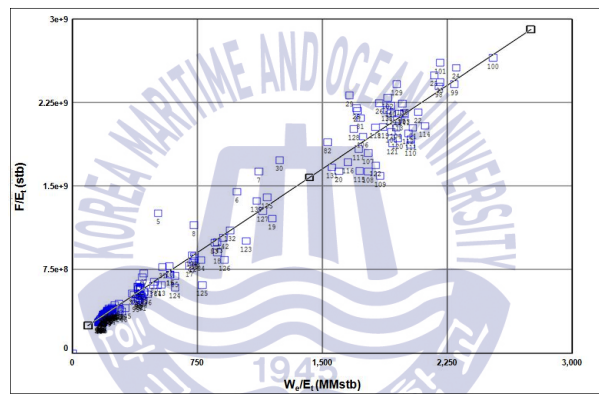


(c) Analytical Method.

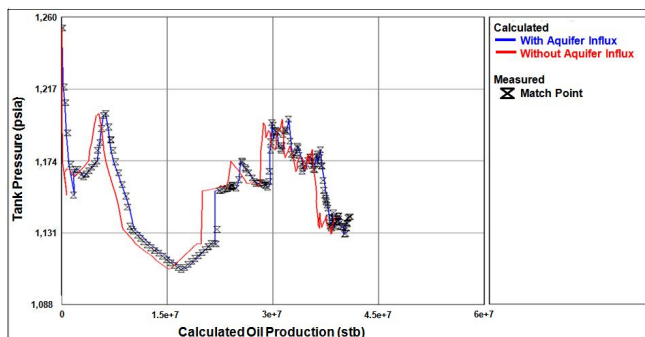
Fig. 3.7 History matching result for Reservoir A.



(a) Pressure Matching Domain.

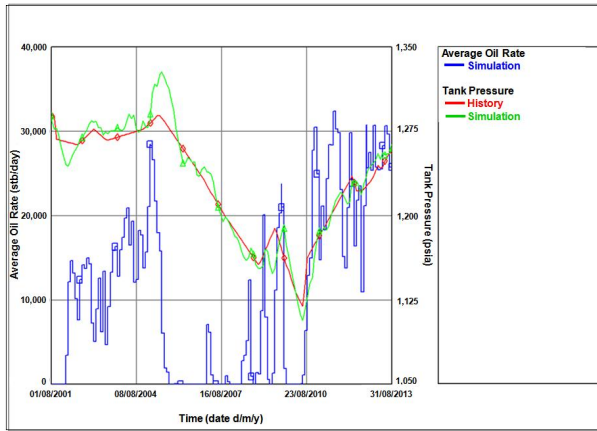


(b) Graphical Method.

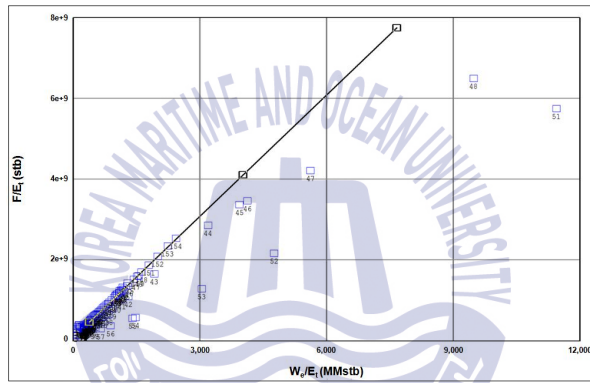


(c) Analytical Method.

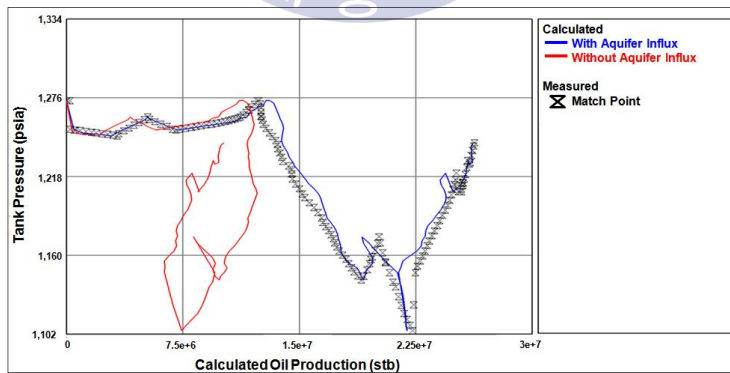
Fig. 3.8 History matching result for Reservoir B.



(a) Pressure Matching Domain.

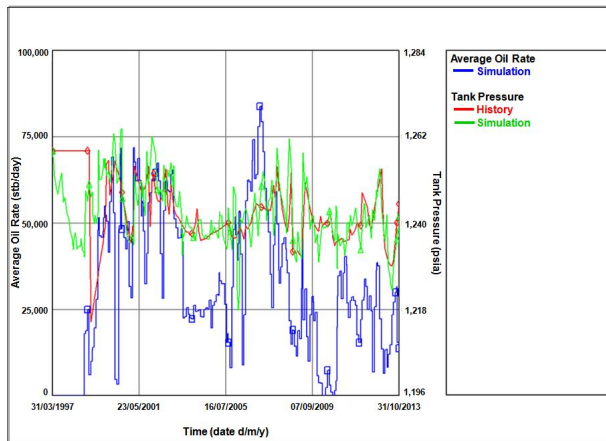


(b) Graphical Method.

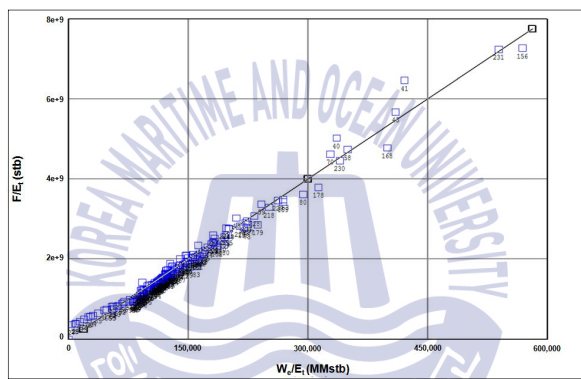


(c) Analytical Method.

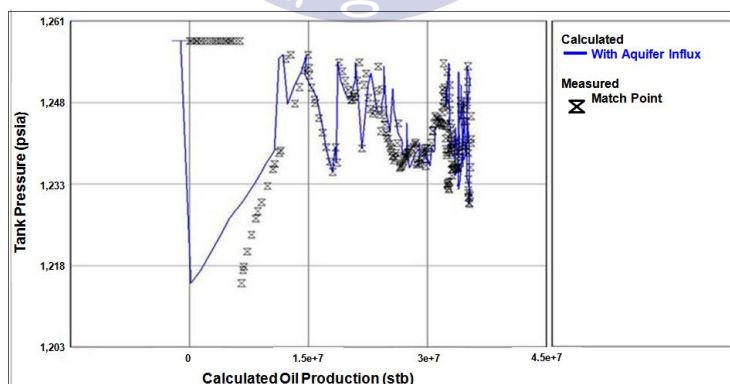
Fig. 3.9 History matching result for Reservoir C.



(a) Pressure Matching Domain.

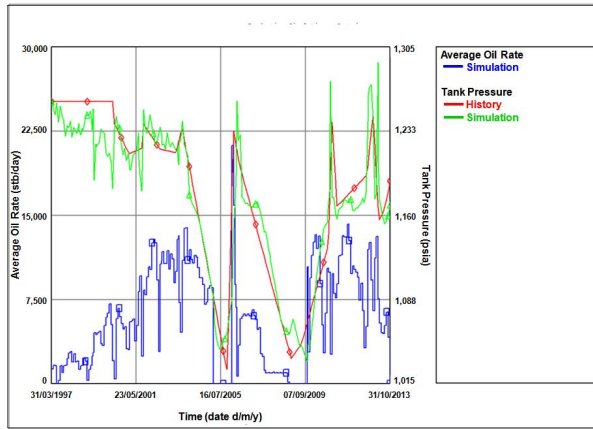


(b) Graphical Method.

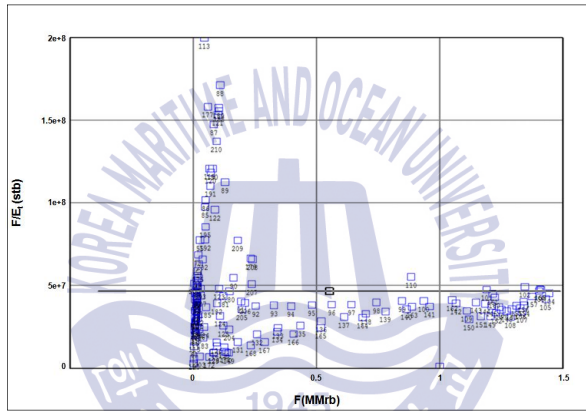


(c) Analytical Method.

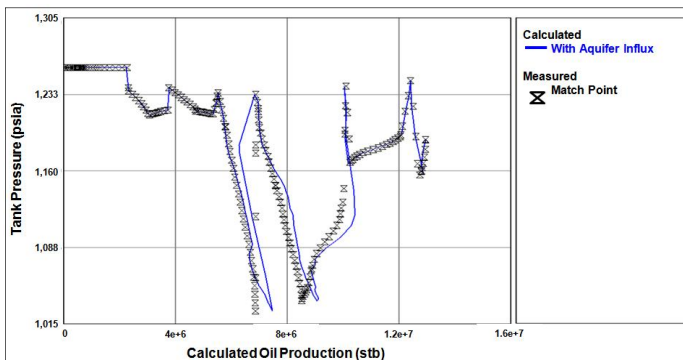
Fig. 3.10 History matching result for Reservoir D.



(a) Pressure Matching Domain.



(b) Graphical Method.



(c) Analytical Method.

Fig. 3.11 History matching result for Reservoir E.

3.4.2 물질평형 모델 예측거동 분석

캡틴 유전의 경우 수주입을 통해 생산이 이루어지고 있으며, 대수층 유입에 의한 영향을 받고 있는 관계로, 향후 신뢰할 수 있는 원유 생산량을 예측하기 위해서는 좀 더 정확한 water cut 예측이 필요하다.

따라서 생산 이력 자료를 통해 유정별 상대유체투과도 커브를 도출해 내는 것은 향후 신뢰도 높은 water cut 예측에 필수적이다.

본 연구에서는 fractional flow 매칭 작업을 통해 Corey function에 필요한 endpoint와 Corey 지수를 도출하였다.

물에 대한 fractional flow식은 아래 식 (3-4)와(Buckley and Leverett, 1942) 같다.

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{k_{ro}\mu_w}{k_{rw}\mu_o}} \quad (3-4)$$

f_w : fractional flow of water, fraction

k_{ro} : relative permeability of oil, fraction

k_{rw} : relative permeability of water, fraction

μ_o : oil viscosity, cp

μ_w : water viscosity, cp

생산이력 자료와 PVT 자료를 이용하여 $\frac{k_{ro}}{k_{rw}}$ 를 구할수 있으며, fractional flow 매칭을 통해 얻어진 endpoint 값과 Corey 지수를 이용 상대유체투과도 곡선을 식 (3-5)를 이용하여 도출할 수 있다.

$$k_{r,X} = E_X \left[\frac{S_X - S_{r,X}}{S_{\max,X} - S_{r,X}} \right]^{n_X} \quad (3-5)$$

$k_{r,X}$: relative permeability of phase X, fraction

E_X : end point of phase X, fraction

S_X : saturation of phase X, fraction

$S_{r,X}$: residual saturation of phase X, fraction

$S_{\max,X}$: maximum saturation of phase X, fraction

상대유체투과도 곡선은 저류층 단위로 도출하는 방법도 가능하나, 유정별로 대수층과의 거리 그리고 수주입정과의 거리가 서로 상이한 관계로(Fig. 3.12 참조), 이러한 유정의 위치를 고려해 주기 위하여 상대유체투과도 곡선은 각각의 생산 유정별로 도출되었다.

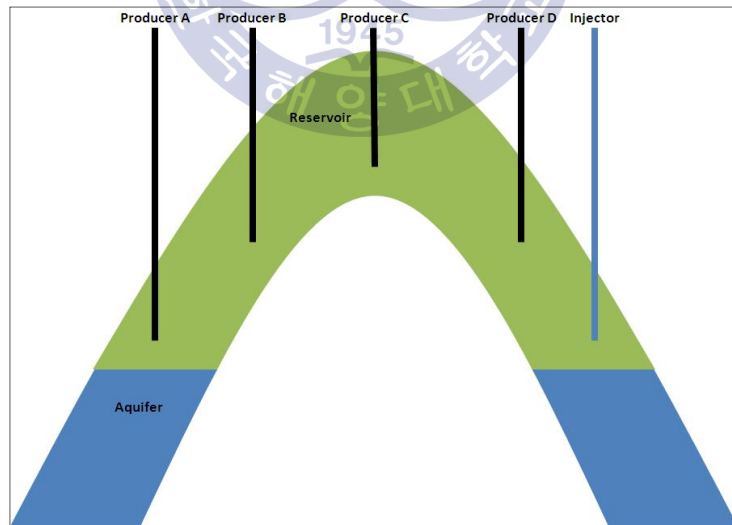


Fig. 3.12 Schematic of typical well location.

도출된 상대유체투과도 곡선의 신뢰도를 검증하기 위해 2013년 5월을 모델의 생산량 예측 시작 시점으로 하고 2013년 8월까지 예측된 water cut 값을 실측치와 비교하였다. 예측, 실측치간 차이는 $\pm 1\%$ 이내 그리고 결정계수는 0.9931로, 도출된 상대유체투과도 곡선이 높은 신뢰도를 보이고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3.13).

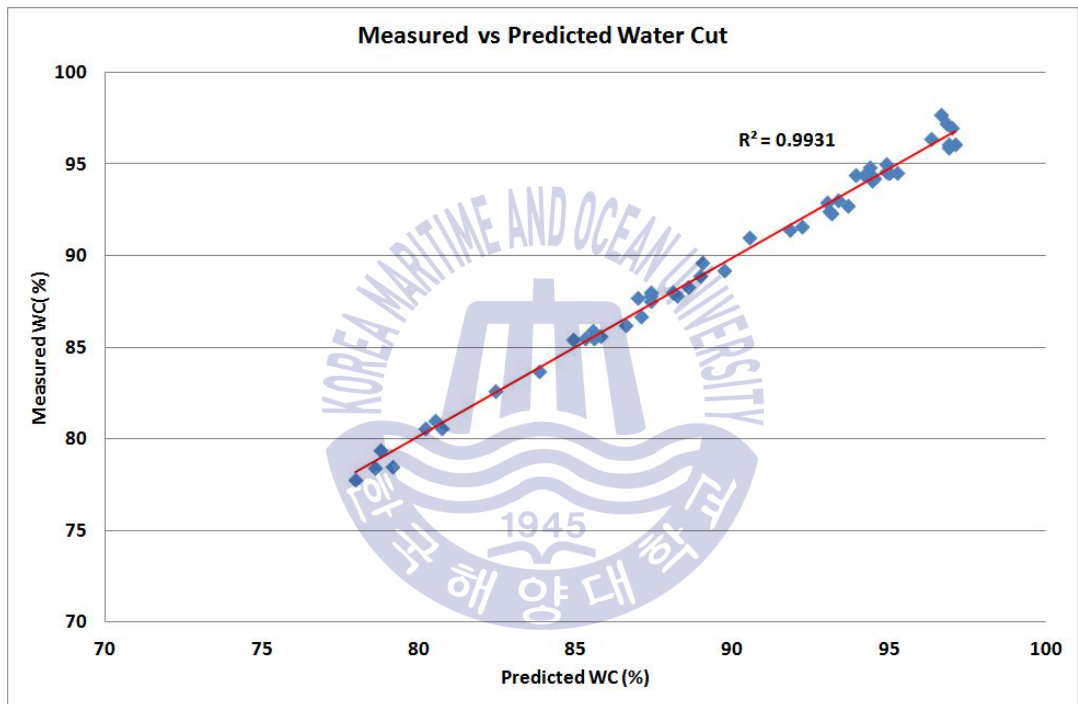


Fig. 3.13 Measured vs predicted water cut.

3.5 유정 모델 및 지표설비 모델 구축

3.5.1 유정 모델 매칭

앞선 3.3에서 설명된 바와 같이, 지표설비 모델은 각각의 유정의 정두압을 계산하고 유정 모델은 VLP커브를 도출하는데 사용되므로, 신뢰도 높은 예측작업을 수행하기 위해 모델을 통합하기 앞서 지표설비 모델 및 유정 모델이 최근 실측 압력 및 생산량 자료를 이용하여 매칭이 되었다.

앞서 3.2에서 설명한 바와 같이 캡틴 유전에서는 인공채유 기법으로 ESP 및 HSP 펌프가 사용되고 있으며, 이 두 가지 펌프는 시간이 지남에 따라 기계적인 노후로 인한 효율이 떨어지게 된다. 이에 유정 모델 매칭작업을 수행하여 현재 펌프의 노후 정도를 파악하고, 도출된 펌프 노후도를 모델에 반영하여 신뢰도 높은 VLP 커브를 도출을 통해 좀 더 정확한 생산량 예측이 가능하게 해주게 된다.

유정 내에서 압력강하는 정두에서 펌프 상부, 펌프 그리고 펌프 하부에서 공저의 크게 3가지 부분으로 나누어 볼 수 있으며, 각각의 부분에서 압력강하는 아래의 식 (3-6), (3-7), (3-8)과 같다.

펌프 상부 :

$$PDP=WHP+P_g+P_f \quad (3-6)$$

PDP : pump discharge pressure, psi

WHP : wellhead pressure, psi

P_g : pressure losses due to the gravity, psi

P_f : residual saturation of phase X, fraction

펌프 :

$$PIP = PDP - PPUMP \quad (3-7)$$

PIP : pump intake pressure, psi

$$PPUMP = \text{Head} \times \rho_{mix}$$

PPUMP : pump pressure difference, psi

Head : potential energy, ft

ρ_{mix} : density of the mixed fluid, psi/ft

펌프 하부 :

$$P_{wf} = PIP - P_g \quad (3-8)$$

$$P_{wf} = P_r - Q/PI$$

P_{wf} : flowing bottomhole pressure, psi

P_r : reservoir pressure, psi

PI : productivity index, stb/day/psi

Q : flow rate, stb/day

또한 각각의 부분에서 압력강하에 큰 영향을 미치는 변수는 아래 Fig. 3.14에 나타난 바와 같다.

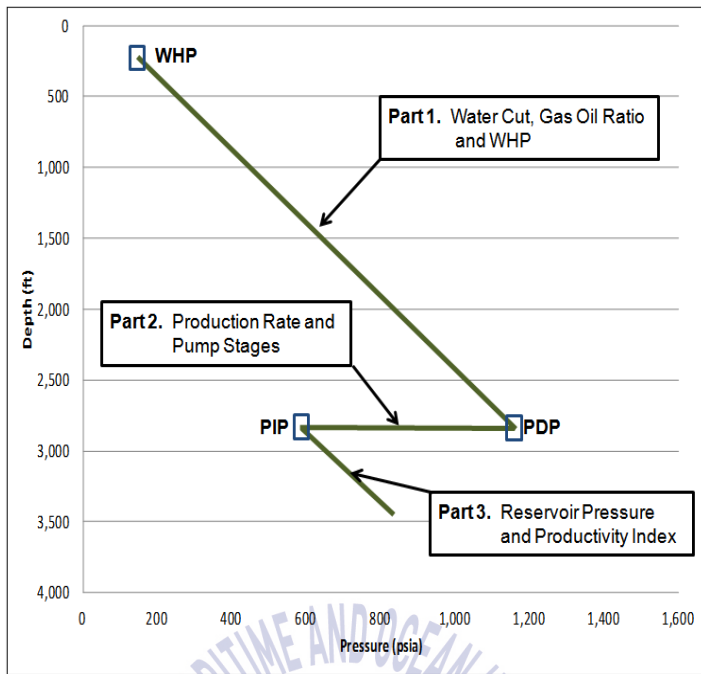


Fig. 3.14 Pressure gradient inside of ESP & HSP well.

상기 유정내에서 압력강하에 영향을 미치는 요소 중 측정이 불가능한 요소는 펌프를 통해 주어지는 펌프 헤드에 영향을 미치는 Pump Stage와 PI 두 가지로 이 두 가지의 값은 유정 모델 매칭을 통해 도출되었다.

3.5.2 지표설비 모델 매칭

지표설비 모델을 매칭하기 위해서 안정적으로 생산이 이루어진 2013년 12월 1일 실측 유체분리기 압력이 이용 되었으며 매칭결과 모든 생산정 및 수주입정에서 실측 정두압과 지표설비 모델을 이용하여 계산된 정두압이 ± 1.5 barg 이내의 범위에서 수렴되었다(Fig. 3.15, Fig. 3.16).

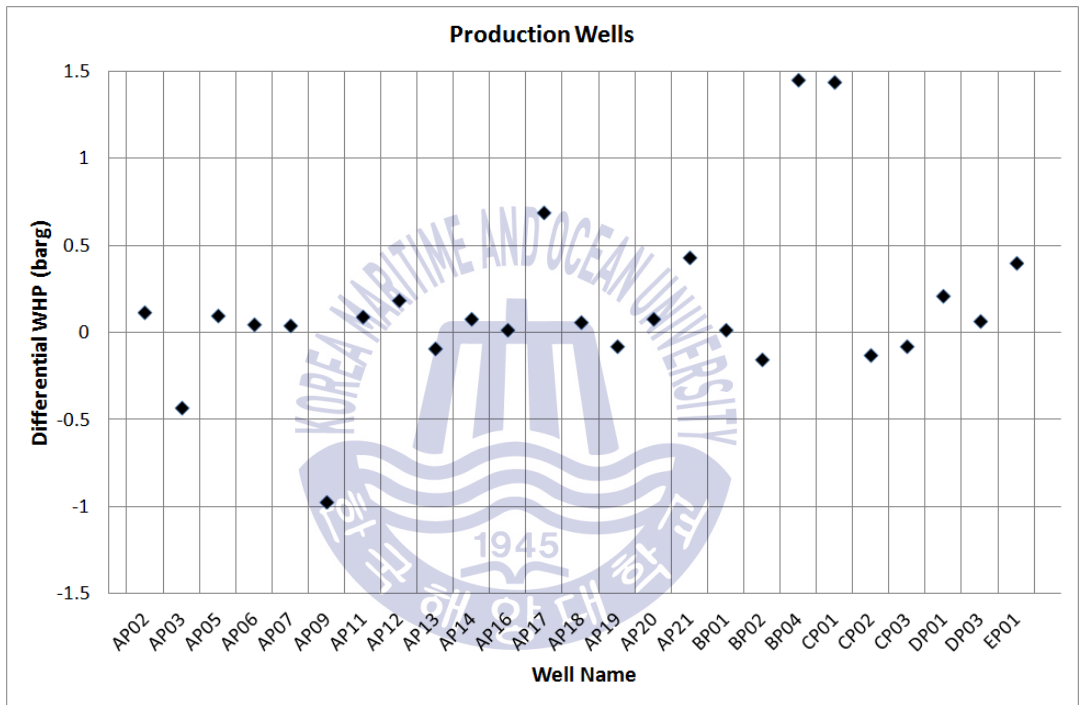


Fig. 3.15 Differential WHP for producers.

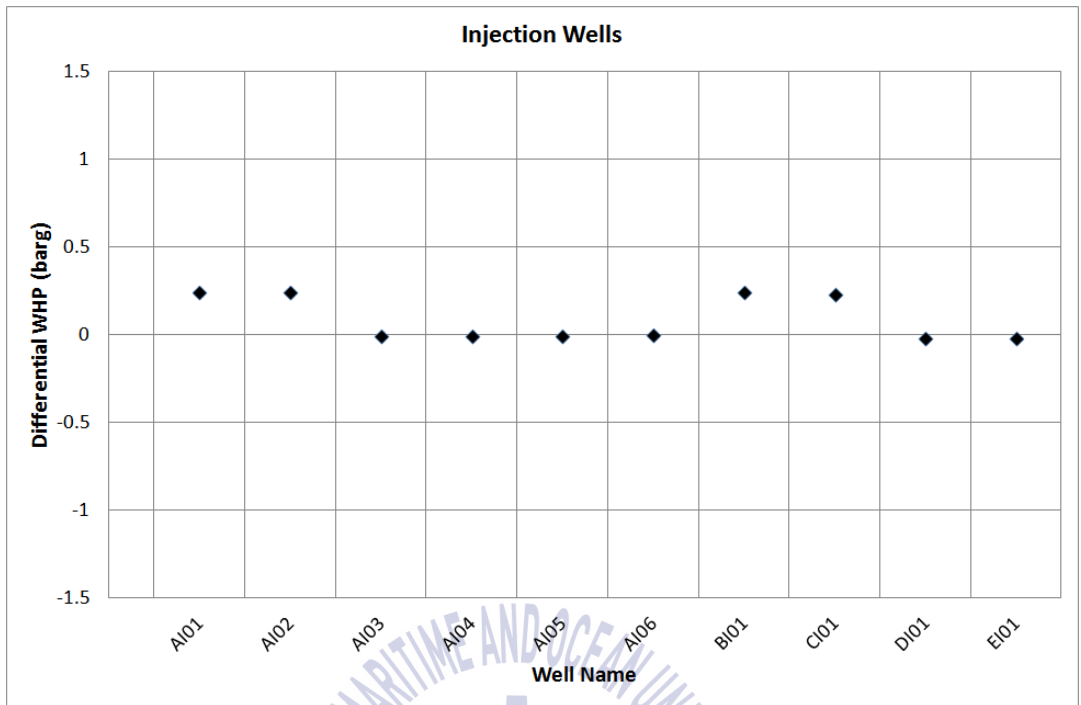
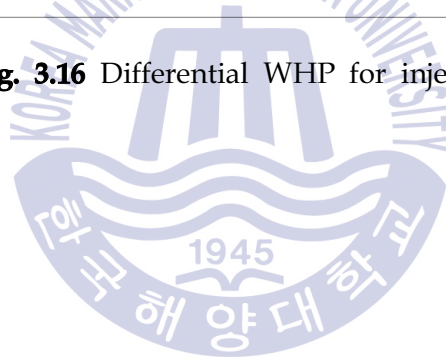


Fig. 3.16 Differential WHP for injectors.



3.6 통합 모델 구축 및 예측거동 분석

3.6.1 모델 통합

매칭이 완료된 지표설비 모델, 유정 모델 그리고 저류층 모델을 연결하여 통합생산모델이 구축이 완료 되었다.

이때 저류층에서 유정내로 유체가 유입되는 최초 노드가 되는 공저 심도가 유정별로 상이하나, 저류층 모델을 통해 계산된 저류층 압력은 하나의 기준 심도에서 계산이 되므로 두 지점간 심도를 보정해 주기 위해 원유의 압력 변화도를 이용하여 유정별로 정수압 보정치를 통합생산모델에 입력을 하였다.(Fig. 3.17).

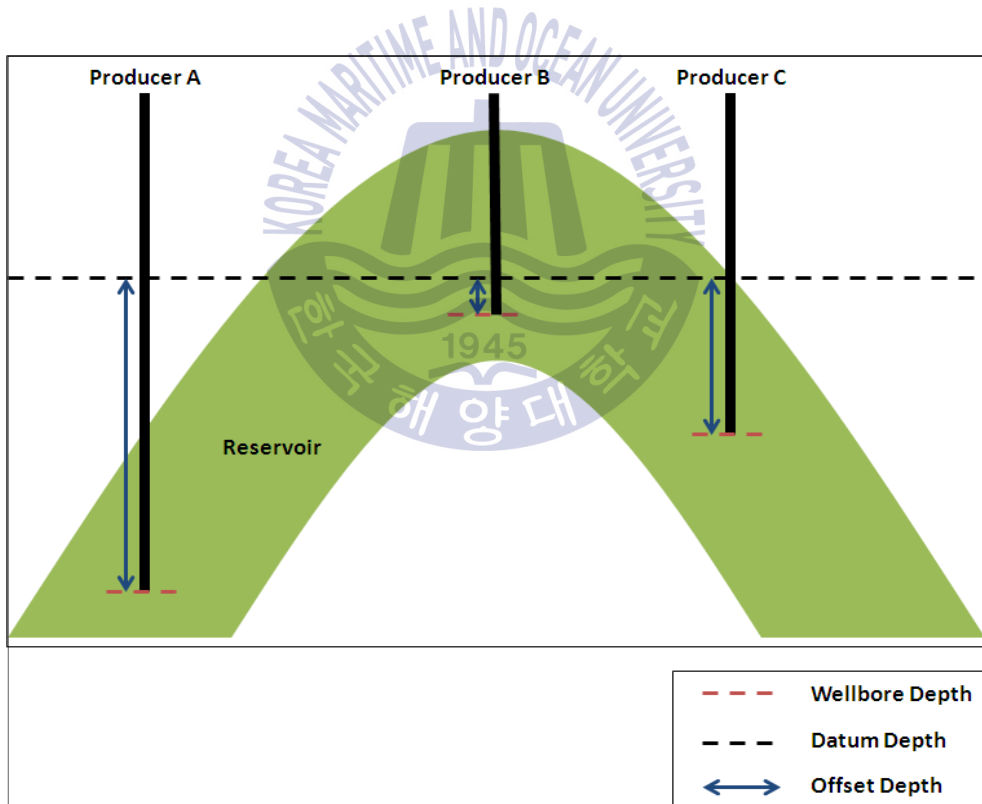


Fig. 3.17 Offset depth between datum and wellbore depth.

3.6.2 통합생산모델 생산량 예측거동

통합이 완료된 모델의 생산량 예측거동을 분석하기 위해 안정적으로 생산이 이루어진 2013년 12월 1일자의 벤츄리 미터를 통해 측정된 실측 생산량 자료와 모델을 통해 계산된 생산량 비교 분석을 실시하였다.

실측치와 예측치간 차이는 식 (3-9)를 통해 산정 하였으며, 생산정의 경우 대부분의 유정에서 차이가 $\pm 7\%$ 이내로 양호한 예측 결과 값을 보여주었으나, 일부 유정에서 $\pm 7\%$ 이상의 차이가 발생했다(Fig. 3.18).

$$Differential = \frac{Prediction - Measurement}{Measurement} \quad (3-9)$$

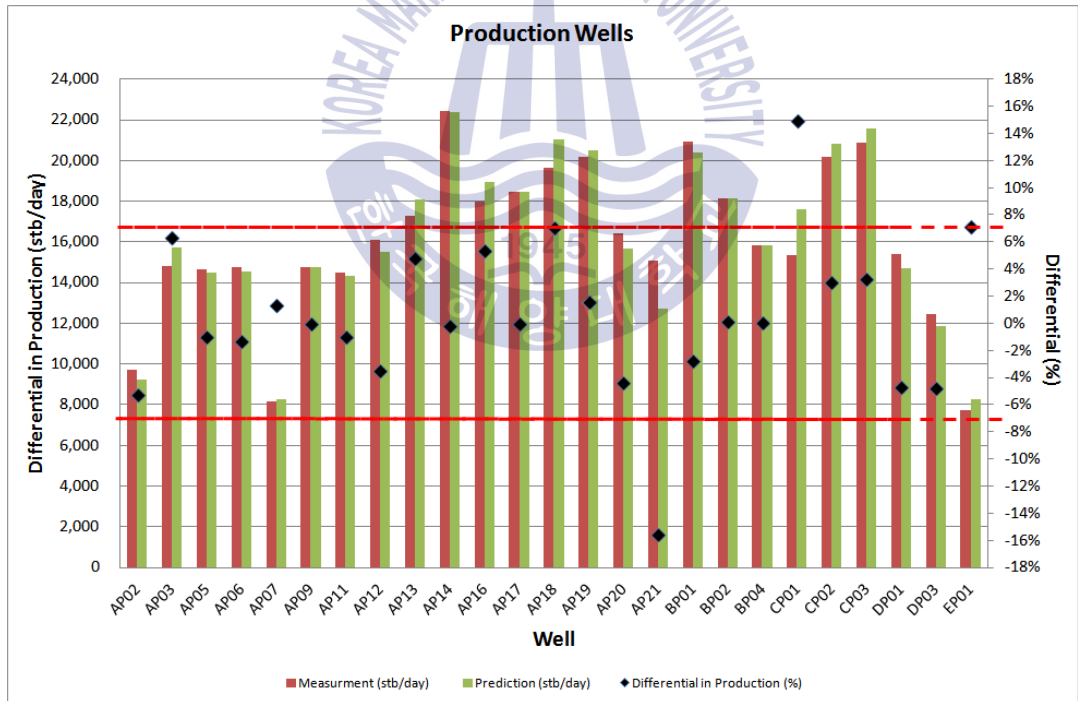


Fig. 3.18 Measured vs prediction for production rate.

저류층 C 1번 유정의 경우 예측 생산량이 실측 생산량 보다 15%정도 높게 산정이 되었다. 이에 기존 생산 이력자료를 분석해본 결과, 동 유정은 상기 측정일에 측정된 평균 펌프 속도를 가질 때, 예측 생산량과 가까운 생산능력이 있음을 확인 하였다. 또한 동 유정은 가스 생산량의 변동이 심한 유정으로, 2013년 8월 이후로 테스트를 통한 GOR 측정이 이루어지지 않았다. 이에 만약 9월에서 12월 사이 가스 생산량이 감소하였다면, 생산량이 벤츄리 미터 통해 과소측정이 되었을 것이라 판단하였다.

저류층 A 21번 유정의 경우 저류층 C 1번 유정과 반대로 실측치가 예측치에 비해 15%정도 높게 측정되어있는데, 동 유정의 경우 최근 실시된 Multiphase Meter Test 결과, Multiphase Meter Test를 통해 측정된 생산량에 비해 벤츄리 미터를 통해 측정된 생산량이 16% 정도 높게 측정이 된 것을 확인한 바 있다.

이러한 현상은 벤츄리 미터가 생산량을 측정하는 방식에 따르며, 벤츄리 미터를 통해 생산량을 측정하는 방식은 아래 식 (3-10)과 같다.

$$Q = \frac{CA_a \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}}}{\sqrt{\left(\frac{A_a}{A_b}\right)^2 - 1}} \quad (3-10)$$

Q : flow rate

C : discharge coefficient

A_a : upstream diameter

A_b : diameter of venturi neck

p_a : upstream pressure

p_b : downstream pressure

ρ : fluid density

상기 식 (3-10)에 따르면 유체의 밀도에 따라 측정되는 생산량이 변화하고 이러한 유체의 밀도는 가스 생산량 변화에 영향을 받는다. 생산 유체의 밀도는 벤츄리 미터에 입력된 고정된 GOR과 water cut에 따라 계산됨으로 만약 가스 생산량 혹은 물생산량이 변화 했음에도 불구하고, 변화한 GOR 및 water cut 수치를 벤츄리 미터의 입력 변수로 입력해 주지 않았을 경우 상기 식 (3-10)에 따라 계산된 생산량의 값에 오차가 생기게 된다.

따라서 상기 2개의 유정에 대해서는 신뢰도 있는 GOR 및 water cut 값을 얻기 위한 Multiphase Meter Test가 필요할 것으로 판단되며, 신규로 취득된 값을 이용하여 실측치와 예측치간 비교 분석을 추가로 실시할 필요가 있다.

수주입정의 경우 하나의 주입정을 제외한 나머지 수주입정에서의 실측 대비 예측치간의 오차가 $\pm 5\%$ 이내로 상당히 양호한 예측 결과 값을 보여주고 있으며, 오차가 약 8% 정도가 되는 8번 주입정의 경우에도 주입량이 미미하여 약간의 주입량의 차이도 큰 오차범위를 가지게 할 수 있는 측면이 있기에 동 수주입정의 오차는 무시 하였다(Fig. 3.19).

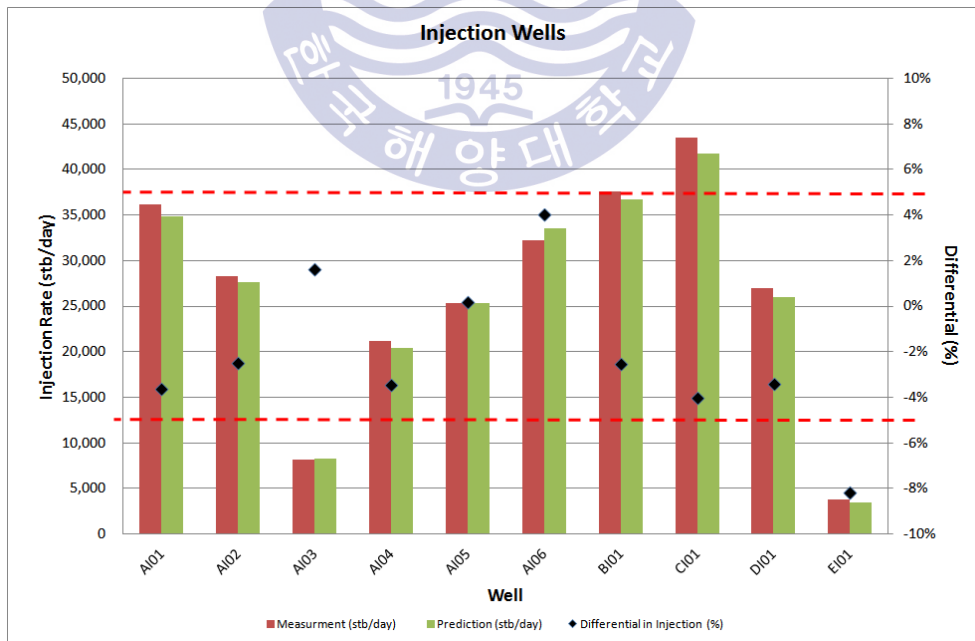


Fig. 3.19 Measured vs prediction for injection rate.

제 4 장 통합생산모델을 통한 생산최적화 적용 가능성

4.1 통합생산모델을 통한 생산최적화 개요

아래 Fig. 4.1은 15,000 stb/day의 용량을 가진 2개의 수처리 시설(Water handling vessel)을 통해 4개의 유정에서 22,000 stb/day의 원유를 생산하는 생산 유전의 생산시스템이 가정되어 있다.

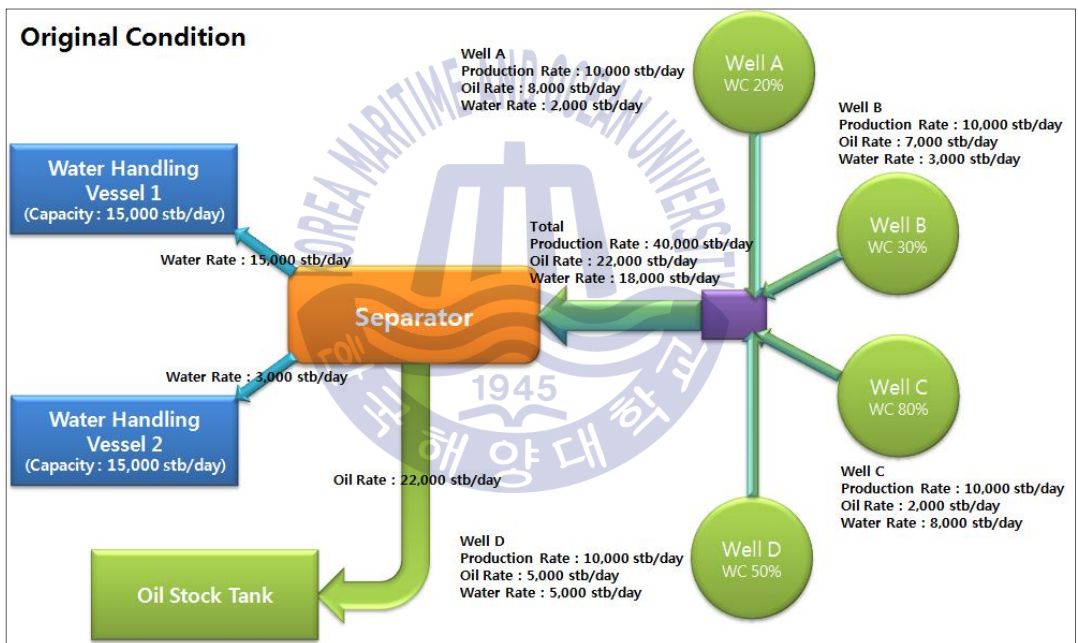


Fig. 4.1 Schematic of assumed production system.

만약 Fig. 4.1의 생산시스템에서 아래의 Fig. 4.2과 같이 수처리 용량 제약이 발생할 경우, 통합생산모델 실행을 통해 주어진 설비 용량 한계 범위 내에서 최적의 생산 전략을 도출할 필요성이 있다.

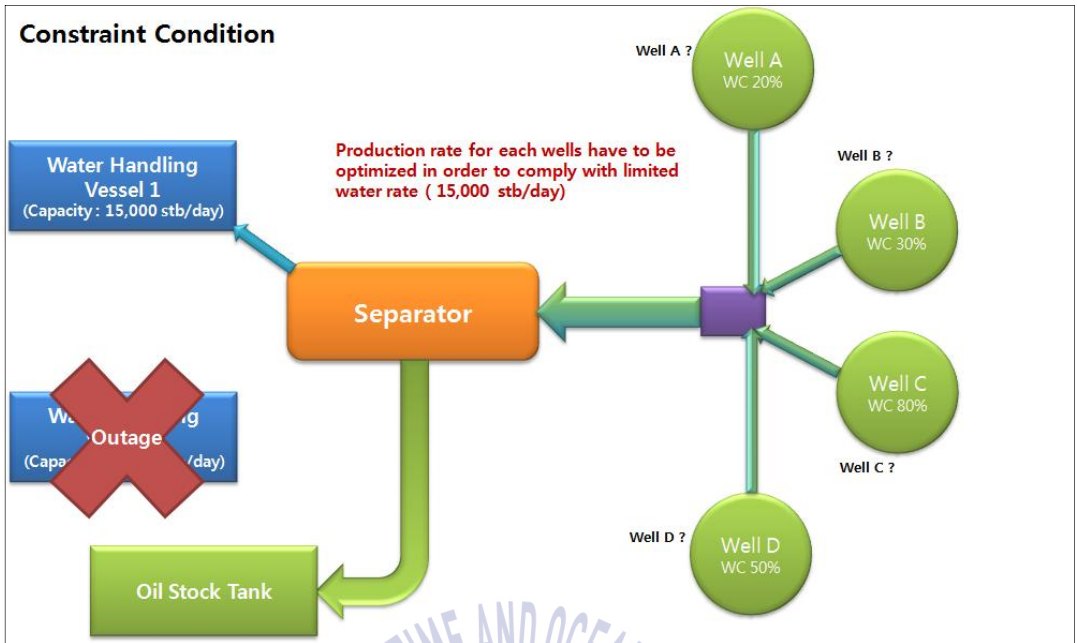


Fig. 4.2 Schematic of constraint production system.

통합생산모델은 설비 용량 한계를 만족 시키는 모든 경우(case)를 도출하고 (Fig. 4.3), 이를 비교 분석하여 최적의 생산 전략을 도출해(Fig. 4.4, Fig. 4.5) 줌에 따라 생산최적화 작업을 수행 가능하게 해준다.

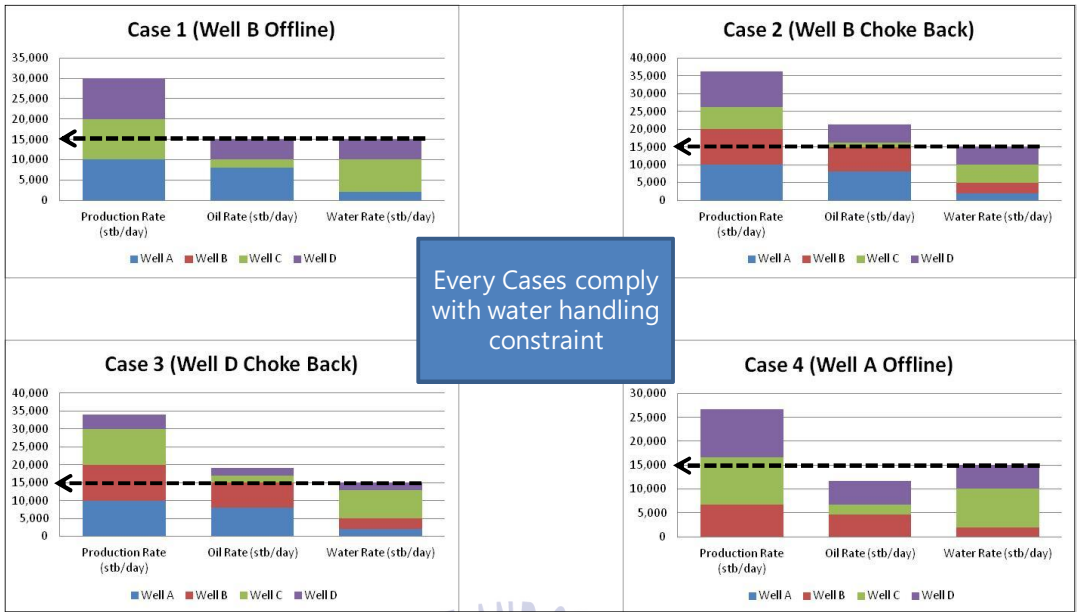


Fig. 4.3 Cases of production complying with given constraint.

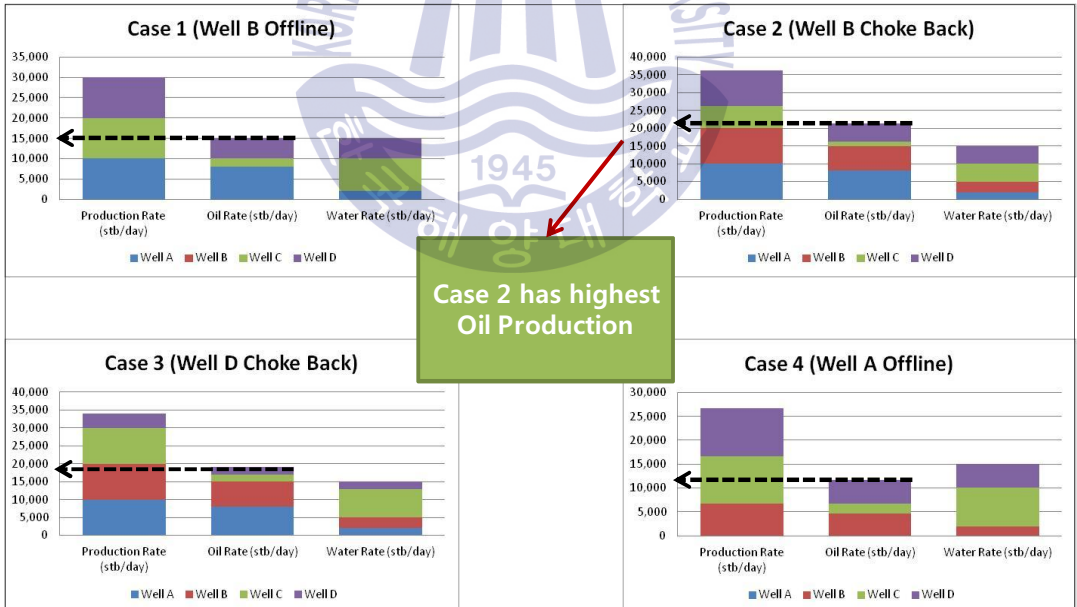


Fig. 4.4 Selection of best production strategy.

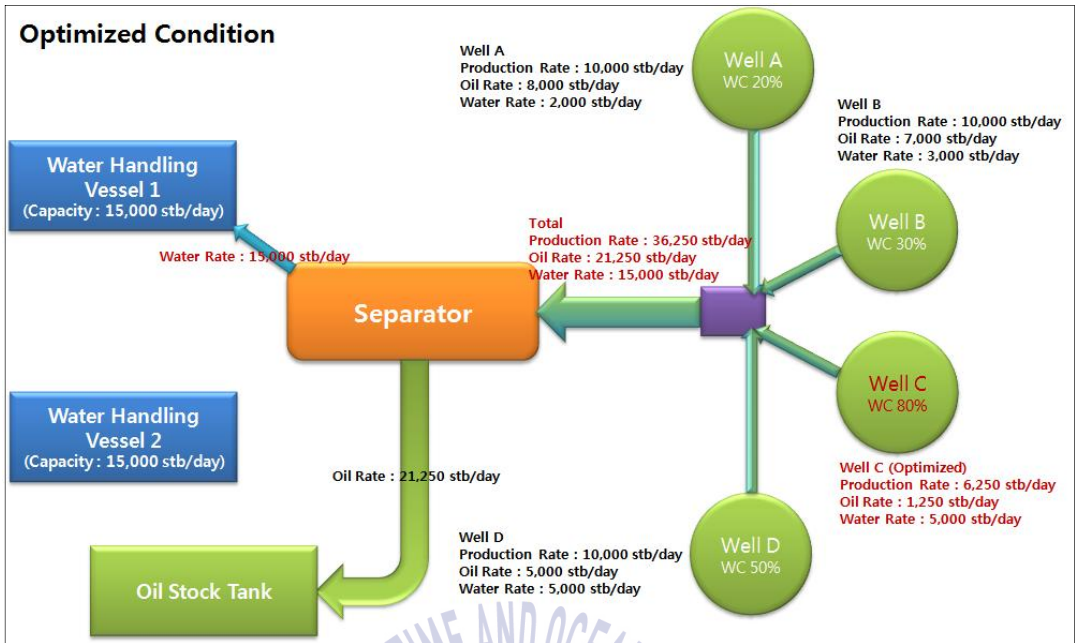


Fig. 4.5 Schematic of Optimized production system.

4.2 통합생산모델을 통한 캡틴 유전 생산최적화 적용 가능성

3.1에서 설명된 바와 같이 캡틴 유전은 수주입량, HSP 동력수, 생산수 처리량 그리고 FPSO 하적 용량 등의 다양한 지표설비 한계가 존재하므로, 지표설비 제약 상황 발생시, 생산최적화 작업을 통한 생산 전략 도출이 필수적이다.

구축된 통합생산모델은 캡틴 유전 석유시스템의 현 상태를 반영하고 있으므로, 지표설비 제약 상황 혹은 설비용량 입력 시, 각각의 설비 제약 상황별로 주어진 상황에서 원유를 최대한 생산 할 수 있는 전략을 빠른 시간 내에 도출해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.1 수주입량 및 생산수 처리 용량관련 제약 발생시

캡틴 유전의 경우 생산된 물은 생산수 처리 시설을 통해 불순물을 제거 된 후 다시 저류층 압력 보강을 위해 저류층 내로 주입된다. 따라서 수주입량 및 생산수 처리 시설에 제약 상황이 발생하면, 물 생산량을 감소시켜줄 필요성이

있다.

이를 위하여 통합생산모델은 상대유체투과도 곡선을 통해 도출된 WC이 높은 생산정을 우선적으로 선별하여 생산 중단 혹은 생산량 저감을 통한 물 생산량 억제를 위한 생산 전략을 도출해 주게 된다.

4.2.2 HSP 동력수 제약 발생시

HSP의 경우 물을 동력원으로 하는 펌프로, 동력원이 되는 물의 용량에 제약 상황이 발생할 경우, 일부 생산정에서는 펌프를 통한 인공체유가 불가하게 되어 생산이 중단되어야 한다.

이를 위하여 유정 모델 매칭을 통해 도출된 유정별 HSP 터빈 노후도를 통해 펌프 효율이 떨어지는 생산정을 선별하여 생산 중단 혹은 생산량 저감하는 생산 전략을 도출하게 된다.

4.2.3 FPSO 하적용량 제약 발생시

유정 모델 매칭을 통해 생산정 별 생산성 지수, 펌프 노후도 및 터빈 노후도가 반영이 되어 있고 상대유체투과도 곡선을 통해 생산정 별 WC이 도출되어 있으므로, 통합생산모델 실행을 통해 물 생산이 적고 펌프 운전을 위한 전력 및 동력수를 가장 적게 소모하는 생산정을 선별하여 생산에 참여하는 생산전략 도출로 생산최적화 작업을 수행하게 된다.

제 5 장 결 론

통합생산모델은 저류층, 유정 그리고 지표설비 모델을 연계하여 연산함에 따라 각각의 시스템간 상호작용을 효과적 그리고 효율적으로 이해 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징으로 인해 생산최적화를 위한 통합생산모델의 효용성에 대해서는 현재까지 다양한 연구결과를 통해 입증된 바가 있다.

최근에는 기존 저류층 시뮬레이션을 이용한 통합생산모델이 가지는 연산시간이 길다는 단점을 극복하기 위해, 저류층을 단순화된 하나의 탱크 모델로 구축하는 물질평형 모델을 사용한 통합생산모델 구축도 널리 사용되고 있다.

이에 본 연구에서도 이러한 단순화된 물질평형 모델을 이용하여 통합생산모델을 구축하였으며, 통합생산모델이 5개의 저류층 모델, 25개의 생산정 그리고 10개의 수주입정 모델로 구성이 되어 있음에도 불구하고, 그 연산 시간이 10여분 수준으로 굉장히 짧은 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다.

모델을 통해 계산된 예측 생산량 및 주입량이 비교적 작은 오차 범위(생산정 $\pm 7\%$, 수주입정 $\pm 5\%$)내에서 실측 생산량과 수렴을 하고 있어 정확도가 높은 생산량 예측이 가능했다.

이로 미루어 향후 지표설비 제약 상황 발생시, 구축된 통합생산모델을 이용하여 주어진 제약 상황에서 운영 가능한 생산전략을 즉각적으로 도출하여 신뢰도 높은 생산최적화 작업이 가능할 것이라 판단된다.

또한 구축된 통합생산모델을 통해 생산된 유체의 체적과 벤츄리 미터를 통해 측정된 수치가 상이한 생산량 분배(allocation) 오차가 발생한 경우, 통합생산모델을 통해 산정된 결과 값과 벤츄리 미터를 통해 측정된 생산량이 상이한 유정 판별이 가능할 것으로 판단된다. 또한 이러한 작업을 통해 유정들에 대한 테스트 우선순위를 결정하고, 테스트 결과 watercut 혹은 GOR 수치 변화가 확인이

되는 유정이 존재할 경우, 동 유정들에 대한 생산량 분배작업을 재실시 하여 생산 이력자료의 신뢰도를 높여 줄 수도 있을 것으로 판단된다.

하지만 통합생산모델을 통해 이러한 생산최적화 작업을 수행하기 위해서는, 모델이 구축된 현재 시점 뿐만 아니라 향후에도 지속적으로 그 정확성 및 신뢰성을 유지해야할 필요성이 있다. 이를 위해서는 장시간에 걸쳐 모델의 신뢰성에 대한 지속적인 관측이 이루어져야 하나, 이 논문에서는 연구기간에 제약으로 인해 이러한 관측을 통한 통합생산모델의 분석에는 한계가 있다.

이에 향후 모델 거동에 대한 지속적인 관측이 필요하며, 만약 예측치와 실측치간 오차 범위가 시간이 지남에 따라 커진다면, 대수층 강도 및 유체 전달률 재산정을 통한 저류층 모델 수정이 필요할 것으로 판단된다.



참고문헌

- Barroux, C.C., Duchet-Suchaux, P., Samier, P. and Nabil, R., 2000. Linking Reservoir and Surface Simulation: How to Improve the Coupled Solution. paper SPE 65159 presented at the *SPE European Petroleum Conference*, Paris, France, October 24-25.
- Boyun, G., William, C.L. and Ali, G., 2007. *Petroleum Production Engineering*. Elsevier Inc.: Oxford, UK.
- Buckley, S.E., and Leverett, M.C., 1942. Mechanism of Fluid Displacement in Sands. *Transactions of the AIME*, 146(1), pp.107-116, December.
- Bui, T., Bandai, M. and Hutamin, N., 2006. Material Balance Analysis in Complex Mature Reservoir Experience in Samarang Field. Malaysia, paper SPE 101138 presented at the *SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*, Adelaide, Australia, September 11-13.
- Chevron Upstream Europe (CUE), 2013. *Integrated Production Modelling Result for Captain Field*, Aberdeen: CUE.
- Coats, B.K., Fleming, G.C., Watts, J.W., Rame, M. and Shiralkar, G.S., 2004. A Generalized Wellbore and Surface Facility Model. Fully Coupled to a Reservoir Simulator, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, pp.132-142, April.
- Dake, L.P., 2001. *The Practice of Reservoir Engineering*. Revised ED. Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands.
- Dempsey, J.R., Patterson, J.K., Coats, K.H. and Brill, J.P., 1971. An Efficient Model for Evaluating Gas Field Gathering System Design. *JPT*,

pp.1067-1073, September.

Esor, E., Dresda, S. and Monico, C., 2004. Use of Material Balance to Enhance 3D Reservoir Simulation: A Case Study. paper SPE 90362 presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, U.S.A., September 26-29.

Havlena, D., and Odeh, A.S., 1963. The Material Balance as an Equation of a Straight Line. *JPT*, pp.896-900, August.

Havlena, D., and Odeh, A.S., 1964. The Material Balance as an Equation of a Straight Line. Part II - Field Cases. *JPT*, pp.815-822, July.

Liao, T.T., and Stein, M.H., 2002. Evaluating Operation Strategies via Integrated Asset Modeling. paper SPE 75525 presented at the *SPE Gas Technology Symposium*, Calgary, Alberta, Canada, April 30-May 2.

Madray, R., Coll, C., Veitch, G., Chiboub, C., Butter, M., Azouzi, S., Bahri, S., Yaich, B. and Saada, T., 2008. Integrated Field modeling of the Miskar Field. paper SPE 113873 presented at the *SPE Europe/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Rome, Italy, June 9-12.

Mazloom, J., Tosdevin, M., Frizzell, D., Foley, B. and Sibley, M., 2007. Capturing Complex Dynamic Behaviour in a Material Balance Model. paper IPTC 11489 presented at the *International Petroleum Technology Conference*, Dubai, U.A.E., December 4-6.

Orioha, H., Gruba, .C., Muoneke, G. and Ezuka, I., 2012. Application of IPM modelling for Production Surveillance, Allocation and Optimization. paper SPE 148334 presented at the *SPE International Production and Operation Conference and Exhibition*, Doha, Qatar, May 14-16.

Schiozer, D.J., and Aziz K., 1994. Use of Domain Decomposition for Simultaneous Simulation of Reservoir and Surface Facilities. paper SPE 27876 presented at the *Western Regional Meeting*, Long Beach, California,

U.S.A., March 23-25.

Smith, C.R., Tracy, G.W., & Farrar, R.L., 1992. *Applied Reservoir Engineering Vol. 1*. OGCI, Inc., and PetroSkills, LLC.: Oklahoma, U.S.A.

Smith, C.R., Tracy, G.W., & Farrar, R.L., 1992. *Applied Reservoir Engineering Vol. 2*. OGCI, Inc., and PetroSkills, LLC.: Oklahoma, U.S.A.



Bibliography

Dake, L.P., 1978. *Fundamentals of Reservoir Engineering*. Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands.

Litvak, M.L., and Darlow, B.L., 1995. Surface Network and Well Tubing Pressure Constraints in Compositional Simulation. paper SPE 29125 presented at the *SPE Symposium on Reservoir Simulation*, San Antonio, Texas, U.S.A., February 12-15.



감사의 글

석사과정 진학 이후, 모든 과정을 마치기 위해 8년이라는 오랜 시간이 걸렸습니다. 일과 학업을 병행하는 과정이 쉽지 않았고 나태한 마음으로 인해 중간에 학위취득을 포기하려는 생각을 하고는 했습니다. 하지만 이런 제가 대학원 석사 과정을 모두 마칠 수 있게 된 것은 무엇보다도 저에게 가르침을 주시고 작은 것에서부터 큰 것까지 너무도 많은 것을 도와준 소중한 사람들이 있었기 때문이라 생각합니다.

우선, 저의 지도교수님이신 임중세 교수님의 저를 향한 끊임없는 신뢰와 열정적인 가르침에 깊은 감사를 드립니다. 과정 수료 이후, 논문에 대한 주제를 정하지 못해서 학위취득을 포기할까 생각하던 저에게 지속적인 관심과 독려를 보내주신 교수님이 계셨기에 마침내 논문을 준비하고 완성할 수 있었습니다. 다시 한번 깊이 감사를 드립니다.

학부 때부터 깊은 애정과 많은 가르침을 주셨고, 부족함이 많은 제 논문을 검토해 주시며 귀중한 조언과 지도를 해주신 장원일 교수님, 신성렬 교수님께도 깊은 감사의 인사 올립니다. 두 교수님이 계셔서 무사히 석사과정을 수료하고 논문 작업을 수행할 수 있었습니다.

명쾌한 강의로 학부에서 석사과정까지 모든 과정을 마칠 수 있는 자양분을 주신 윤지호 교수님, 김성윤 교수님 그리고 허지희 교수님께도 감사를 전하고 싶습니다.

이 글을 읽을 수는 없지만, 이 주제로 학위 논문을 준비할 수 있게 많은 도움과 조언을 해준 Richard Reverol, Yerkebulan Soltybayev 그리고 Andreina Maria Paz를 비롯한 셰브론 캡틴 생산팀 분들에게 깊이 감사드립니다.

또한, 업무로 인해 바쁜신 와중에도 흔쾌히 저의 논문을 검토해 주시고 업무, 학업 그리고 인생 전반에 대한 소중한 조언을 아끼지 않으셨던 기세일 박사님 그리고 종용이 형에게 진심어린 감사를 전하고 싶습니다.

학위 논문을 무사히 마무리 할 수 있게 많은 도움을 준 판상이, 광원이, 기하, 동건이, 효진이 그리고 성민이를 비롯한 석유공학연구실 후배들 그리고 논

문을 마무리 지을 수 있는 환경을 제공해 주시고 격려해 주신 한국석유공사 생산기술처 선·후배, 동료 여러분께 깊은 감사를 전하고자 합니다.

마지막으로 모든 학업과정을 무사히 마칠 수 있도록 힘드신 내색을 하지 않으시고 물심양면으로 지원해주신 부모님께 깊은 감사의 인사를 드리며 글을 마칩니다.

