

특집

Flow Assurance 기반 해저 모니터링 시스템 및 검증용 HILS 개발

박건일, 채희문(삼성중공업),
장재형, 장연욱(대우조선해양), 김응곤(지노스)

1. 해양생산설비와 Flow Assurance

국내 조선소에서 제작되고 있는 해양생산설비(FPSO, FLNG 등)의 주된 목적은 해양에서 생산되는 Oil/Gas 내 불순물을 처리하고 Sale Spec.에 맞춰 저장/이송하는 데 있다. 본 설비는 해저 시스템(Tree, Manifold, Flowline, Riser, Umbilical 등)과 연결되어 있으며 이에 대한 제어 및 모니터링 기능도 담당한다.

아래 그림 1과 같이 저류층(Reservoir)에서 생산된 Oil/Gas는 Well Tubing, Tree, Jumper, Manifold, Flowline, Riser를 거쳐 해양생산설비로 흐르게 된다. Reservoir 안에서 안정적으로 존재한 유체는 해양생산설비까지 흐르면서 발생하는 압력 강하와 주변 해수와의 열교환으로 발생하는 온도 강하로 인해 불안정해지며, 이러한 조건들로 인해 파이프라인 내 Gas Hydrate, Wax, Asphaltene 등이 발생한다.

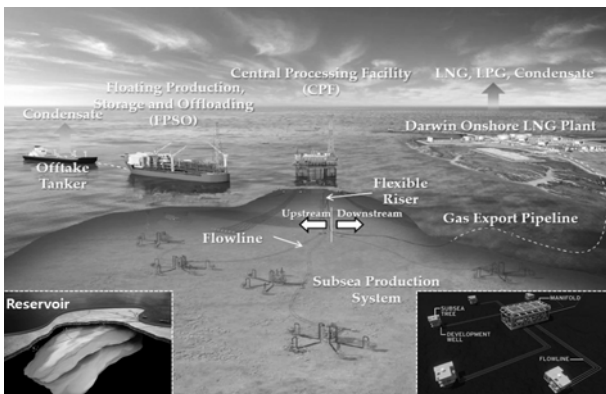


그림 1 해양 프로젝트 개략도, Image Courtesy of INPEX

Flow Assurance는 일반적으로 정유산업에서 사용되는 용어이며, 본 엔지니어링은 Reservoir부터 최종 지점(Sale Point)까지 Oil/Gas가 안정적으로 흐를 수 있도록 시스템을 설계하고 평가하는 업무를 담당한다. Reservoir부터 해양생산설비까지의 수직 거리는 짧게는 수 백 미터부터 길게는 수 천 미터에 이른다. 또한 Reservoir 압력은 고정된 값이 아니라 Oil/Gas를 생산함에 따라 Reservoir 압력이 점차 감소하게 된다. 해저 시스템에 별도의 부스팅 장비(Pump, Compressor)

가 없고 Reservoir 압력이 낮다면, 더 이상 Oil/Gas를 생산할 수 없게 된다. 따라서 Reservoir로부터 많은 양의 Oil/Gas를 생산하기 위해 Reservoir의 압력을 높이는 Water Injection, Gas Injection을 병행하면서 Oil/Gas를 생산한다.

앞서 설명한 것처럼 해양에서 Oil/Gas를 생산하는 데 있어 가장 핵심적인 것은 온도와 압력을 관리하고 모니터링 하는 것이다. 2012년부터 5개 기관(삼성중공업, 대우조선해양, 칸, HSS, 지노스)에서는 공동으로 미래산업선도기술개발사업 국책과제를 통해 해저 모니터링 시스템과 이를 검증하기 위한 HILS(Hardware in the Loop Simulation) 시스템을 개발하고 있다. 아래 그림 2는 전체 시스템에 대한 구성 및 각 참여기관 간의 업무 역할을 나타내고 있다.

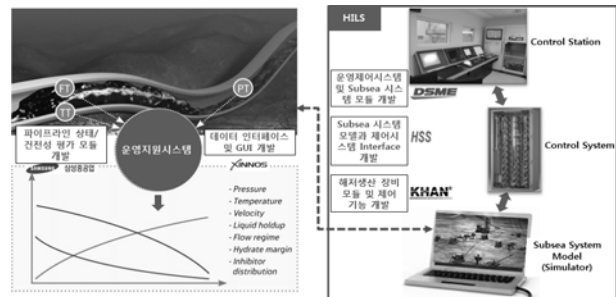


그림 2 시스템 개발을 위한 참여기관 역할

2. 해저 모니터링 시스템

본 해저 모니터링 시스템은 해저로부터 계측된 정보(온도/압력/유량)를 기반으로 해저 시스템 내 유체의 상태를 실시간으로 평가/모니터링할 수 있는 시스템이다. 파이프라인 내부를 흐르는 유체의 성분은 H₂O, N₂, CO₂, CH₄(Methane), C₂H₆(Ethane) 등 다양한 물질로 구성되어 있다. 이렇게 다양하게 구성된 유체의 온도/압력 등을 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 다행히 실험 및 실 프로젝트에서 확보된 데이터를 기반으로 개발된 다상유동 해석 프로그램이 있다. 그 중 본 과제에서는 Schlumberger社의 OLGA 제품을 기반으로 해저 모니터링 시스템을 구축하고자 한다. 본 프로그램을 사용하여 개발된 해저 모니터링 시스템이 설치된 대표 사례는 아래 표 1과 같다.

표 1 OLGA 기반 해저 모니터링 시스템 실적 리스트

No.	Field	Location	Client
1	Gjøa	Norway	GDF SUEZ
2	Marlim Deepwater	Brazil	Petrobras
3	Blind Faith	US	Chevron
4	Tahiti	US	Chevron
5	Na kika	US	BP
6	Dolphin PMS	Qatar	Dolphin Energy
7	Ormen Lange	Norway	Norsk Hydro/Shell
8	Mikkel Midgard	Norway	Statoil
9	Lobito Tomboco	Angola	Chevron
10	South Sequioa and Rosetta	Egypt	Burullus

우선 해저 모니터링 시스템을 개발하기 위해서 실제 해저 시스템과 동일하게 OLGA를 이용한 시스템 모델링이 필요하다. 이후 본 시스템의 사양(Flowline/Riser Size, Insulation Level, Valve Size 등)이 적절한지 여부를 확인하기 위한 Flow Assurance 해석을 실시한다. 본 해석결과를 바탕으로 해저 시스템 운전 절차를 수립하게 된다. Oil 생산량과 Water 생산량에 따른 유동 안정성이 아래 그림에 제시되어 있다. 따라서 운전자는 본 가이드라인에 맞춰 운전 계획을 수립할 수 있다.

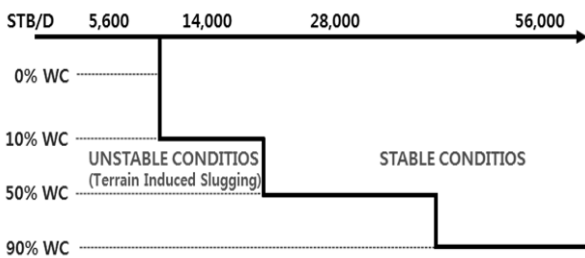


그림 3 유동 안정성에 대한 운전 가이드라인

OLGA 프로그램은 OPC(OLE for Process Control) Server를 포함하고 있으며, 별도의 OPC Client 프로그램이 개발 및 구성된다면 OLGA 프로그램에서 해석된 결과를 외부로 가져오는 것과 외부의 데이터를 OLGA 프로그램에 전달하는 것이 가능하다. 따라서 본 과제에서는 아래 그림 4와 같이 OPC Client를 개발하였고, OLGA 프로그램을 제어하고 데이터를

주고받을 수 있도록 시스템을 구성하였다. 다양한 운전 조건 상황에서 실시간으로 데이터를 주고받는 것과, 실제 해저 시스템에서 밸브의 오픈(Opening) 정보가 변경될 때 OLGA 모델에서도 즉각적으로 변경됨을 확인하였다.

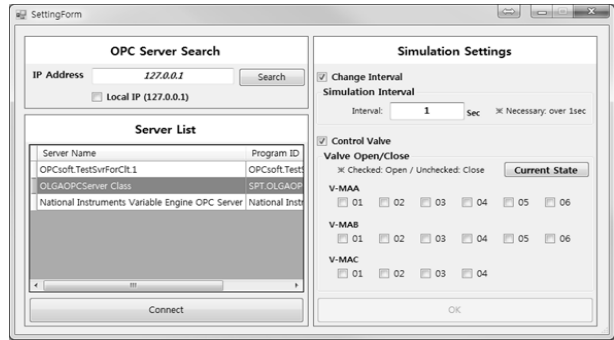


그림 4 해저 모니터링 시스템을 위한 OPC Client

OPC Client 프로그램은 OPC 통신을 이용하여 Reservoir에서의 온도/압력 정보, 해저 시스템에 설치된 Valve Opening 정보 등을 해저 시스템으로부터 받고, 이를 OLGA 프로그램의 경계조건(Boundary Condition)으로 설정하게 된다. 실제 해저 시스템의 상태 값이 변경되면 OLGA 프로그램에도 즉각적으로 반영될 수 있도록 한다. OLGA 프로그램 해석 값들은 운전자가 해저 시스템 상황을 빠르게 이해/판단 할 수 있도록 제공되어야 한다.

본 과제에서는 해저 모니터링 시스템을 아래 그림 5와 같이 구성하였다. 시스템 전체를 볼 수 있는 Overview, Bottomhole부터 Tree까지 볼 수 있는 Well View, Manifold view, Manifold부터 Separator까지 볼 수 있는 Flowline/Riser View로 구성하였다.

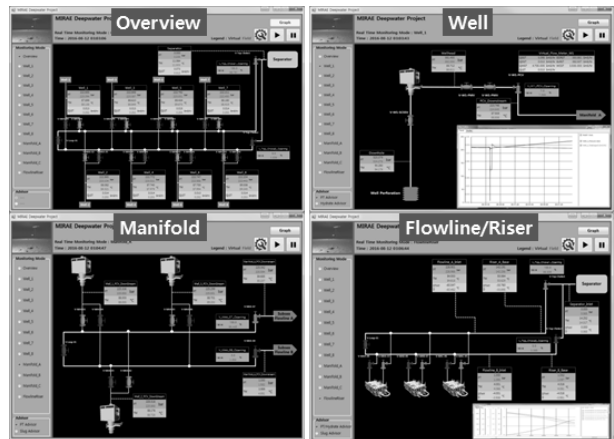


그림 5 해저 모니터링 시스템

각 View에서는 시스템 전체에 대한 온도/압력/유량(Oil/Gas/Water) 정보가 확인 가능하다. 그리고 이를 활용한 Hydrate 생성 유무(Hydrate Margin Temperature), 파이프라인 내 Corrosion 발생량, 해양생산설비에 설치된 Separator로 유입되는 유량 정보 등도 추가로 확인 가능하다. 아래 그림 6은 Well View의 PT(Pressure and Temperature) Advisor 화면이며, Downhole에서의 온도/압력, Tree에 설치된 Valve 전·후단에서의 온도 압력, Valve의 오픈링 정보가 제공된다. 이와 더불어 Well Tubing 전체에 대한 온도/압력 정보가 프로파일 형태로 운전자에게 제공된다. 추가적으로 본 정보를 활용하여 해저 시스템에 설치된 계측장비의 이상 유무 검증이 가능하다.

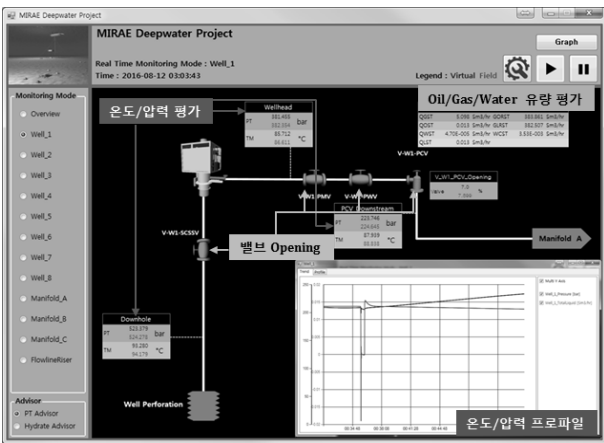


그림 6 Well View - PT Advisor

최초 본 시스템이 가동되게 되면, 해저 시스템에서 계측된 값과 해저 모니터링 시스템을 통해 나오는 결과 값을 맞추는 튜닝(Tuning) 작업이 필요하다. 이후 실시간으로 해저 시스템을 평가하고 모니터링할 수 있다. 그리고 현재의 운전조건으로 지속적으로 운전 시 향후 발생할 상황에 대한 예측할 수 있는 기능(Look-ahead)과 현재의 운전 조건을 다르게 할 경우 어떠한 상황이 발생할지에 대한 평가 기능도 가능하다. 따라서 본 시스템을 활용하여 해저 시스템 및 해양생산설비 운전 전에 있어 안정성을 확보할 수 있다.

해저 시스템의 파이프라인이 Hydrate나 Wax로 인해 막힐 경우, 이를 해결하기 위해서는 많은 시간이 소요되며, 그로인한 생산손실도 불가피하다. 해저 시스템과 해양생산설비가 만나는 부분은 Separator다. 본 장비는 Oil/Gas/Water를 분리하는 기능을 포함하기도 하지만, 불규칙적으로 들어오는 유체를 처리하는 기능을 담당하며, 만약 Separator가 처리할 수 없는 많은 양의 Surge가 발생한다면 해양생산설비의 가동이 중단될 수 있다. 이에 Hydrate와 같은 Solid 이슈와 Surge와 같은

Liquid 이슈 등이 발생하지 않도록 해저 시스템을 모니터링하고 예측할 수 있다면, 운전자에게 최적의 솔루션을 제공할 수 있는 셈이 된다.

3. HILS

HILS란 복잡한 시스템의 개발 및 시험에 사용 되는 기술로 가상의 시스템 환경을 구축하여 사전에 성능 시험을 수행하는 가상의 테스트 방법이다. HILS의 이점은 시스템 개발 기간을 단축 할 수 있고, 실제 환경에서 발생 가능한 위험 요소를 사전에 제거함으로써 시스템의 성능 향상을 기대할 수 있다는 점이다. 특히, 해양 및 상선 프로젝트에서의 HILS 수행은 시 운전 등의 공정 준수에 활용하여 생산성을 향상 시킬 수 있다. 아래 그림 7은 HILS 개략도이다.

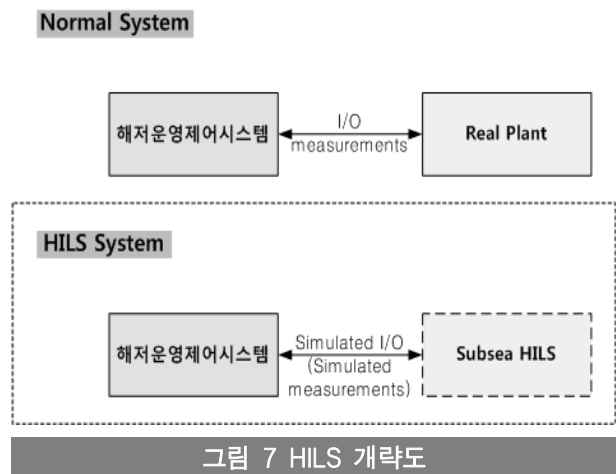


그림 7 HILS 개략도

해저운영제어시스템은 계측장비로부터 얻어진 기초 데이터를 통해 운전자가 해저 시스템의 상태와 해양생산설비로 유입되는 유체의 상태를 보다 쉽게 파악할 수 있도록 지원한다. 이러한 해저운영제어시스템은 실제 필드에 설치하기 전에 HILS를 이용한 성능 검증이 필요하다.

본 과제에서는 해저운영제어시스템 및 해저 모니터링 시스템의 검증 평가의 일환으로 Subsea HILS를 구축하여 시스템의 성능을 사전에 검증하고자 한다. Subsea HILS는 해저 시스템 모델과 이를 운영하기 제어 시스템, 사용자 인터페이스인 HMI(Human Machine Interface)로 구성되어 있다.

- 해저 시스템 모델 : 해저 시스템의 시뮬레이션 모델로 OLGA 프로그램으로 모델링되었으며 총 8 개의 유정(Well)으로 구성되어 있다.
- 제어 시스템 : 해저 시스템의 생산에 관련된 컨트롤 밸브들

을 조작하기 위한 운영 로직을 포함하며 MCS(Master Control System)와 SCM(Subsea Control Module)으로 구성되어 있다. MCS는 주제어 시스템으로 해저 시스템의 제어와 탑사이드 시스템의 제어를 수행한다. SCM은 해저 시스템 제어를 담당하며, MCS로부터 명령 신호를 받아 해당 제어 로직을 수행하게 된다.

- HMI : 해저 시스템 모델과 제어 시스템의 인터페이스는 OPC 통신 방식을 통해 시스템 제어와 데이터 교환이 이루어진다.

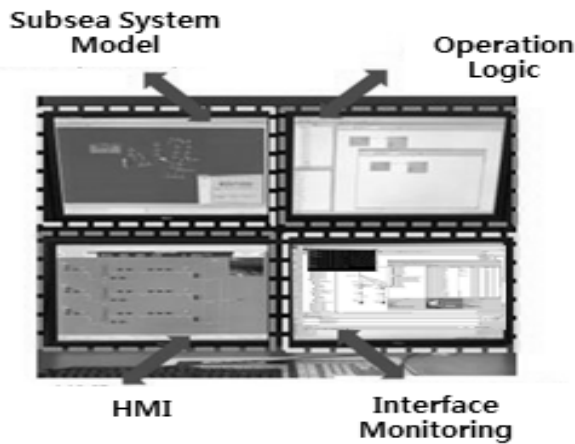


그림 8 HILS 시스템 구성

해저 시스템의 운전 시나리오는 해저 유정에서 생산된 Oil/Gas가 해양생산설비에 안정적으로 공급될 수 있도록 하고, 위기 상황 발생 시 이에 대응 할 수 있도록 한다. 이를 바탕으로 해저시스템의 운영 시나리오를 분석하여 제어 로직을 작성하였다. 운영 시나리오는 정상운전(Normal Operation)과 안전운전(Safety Operation)으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 아래 표2와 같이 운영 시나리오를 작성하여 로직을 작성하였다.

표 2 시스템 운전 시나리오

Operation Mode	Operation Scenario
Normal Operation	- Production turn down
	- Production ramp up/down
	- Well shut-in
	- Well restart
Safety Operation	- Well stop
	- Normal shutdown

해저 시스템과 관련된 밸브들은 SCSSV(Surface Controlled Sub-surface Safety Valve), PMV(Production Master Valve),

PWV(Production Wing Valve), PCV (Production Choke Valve) 등이 있다. 각 유정 별로 정의된 운영 시나리오에 따라 관련 밸브들을 제어하게 된다. 밸브 제어는 SCM에서 수행하나 경우에 따라서 MCS에서도 매뉴얼 제어가 가능하다. 작성된 운영 시나리오에서는 각 생산정마다 4개의 밸브를 제어하게 되며, 8개의 유정에 대해 총 32개의 밸브가 제어된다. 운영 시나리오는 추후 고도화 연구를 통해 업그레이드 될 예정이다.

아래 그림 9는 각 시스템 간의 네트워크 인터페이스를 보여준다. Subsea HILS 콘솔(Console)에서는 MCS의 로직 및 HMI, 해저 시스템 모델을 포함한다. ML PLC PC에서는 SCM과 관련한 제어 로직을 포함한다. SCM의 제어 로직에 의하여 해저 시스템 모델 상의 밸브가 제어되고, 이에 따라 밸브 상태 데이터와 유체의 흐름에 따른 온도, 압력 데이터가 HMI 상에 출력 된다.

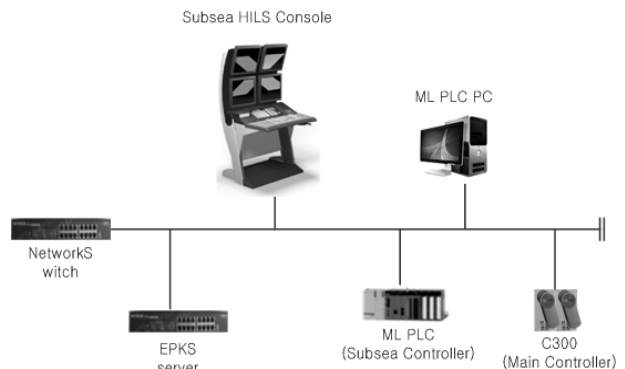


그림 9 시스템 네트워크 구성도

데이터 인터페이스는 해저 모니터링 시스템과의 연동을 위해 OPC 통신을 통해 이루어진다. 이를 위해 HILS 시스템을 위한 OPC 인터페이스를 구축하였고 이에 대한 테스트를 수행하였다. 제어 시스템(MCS, SCM)의 운전 값을 해저 시스템 모델의 밸브에 입력하여 밸브가 운전 값에 따라 정상 동작하는지 HMI를 통해 확인하였다. 아래 그림 10은 데이터 인터페이스에 대한 테스트 화면이다.

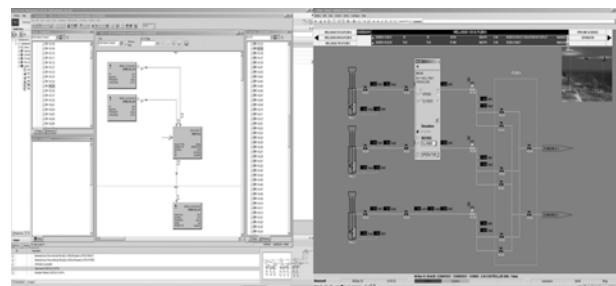


그림 10 데이터 인터페이스 테스트

향후 현재까지 개발된 기술 및 시스템을 기반으로 Subsea HILS를 통해 해저 모니터링 시스템 검증 및 보완할 예정이다.

4. 결론

해양 프로젝트에 있어 Flow Assurance 기술은 핵심이며, 해저 시스템 설계뿐만 아니라 실제로 Oil/Gas를 생산하는 과정(생산 단계)에 있어서도 본 기술이 필요하다. 본 기술을 기반으로 하는 해저 모니터링 시스템의 적용에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이는 해양프로젝트 운영에 있어 안전을 더욱 더 중요하게 생각하기 때문이다. HILS 기술은 노르웨이에서 주로 보유한 핵심기술이며, 최근 들어 Drilling 시스템, Dynamic Positioning 시스템 등에 있어 국내 기술이 적용되고 있다. 향후 본 과제를 통해 해저 시스템에 대한 HILS도 구축된다면 HILS 기술에 있어 국내 기업이 선도할 수 있는 기회가 될 수 있다.

참고 문헌

시스템산업미래성장동력사업 연차보고서 별첨연구보고서 [심해 석유 생산망 FEED 설계 및 부유체 핵심 기술 개발] (2015, 2016)



박건일

- 1970년생
- 1995년 서울대학교 조선해양공학과 졸업
- 현 재 : 삼성중공업 수석연구원
- 관심분야 : 선박 및 해양 플랜트 기자재 기술
- 연 락 처 : 031-5171-7210
- E - mail : gi.park@samsung.com



채희문

- 1979년생
- 2008년 경희대학교 기계공학과 졸업
- 현 재 : 삼성중공업 책임연구원
- 관심분야 : Subsea Flow Assurance
- 연 락 처 : 031-5171-7229
- E - mail : heemoon.chae@samsung.com



장재형

- 1975년생
- 2009년 KAIST 기계공학과 졸업
- 현 재 : 대우조선해양 중앙연구원 차장
- 관심분야 : HIL/OTS Simulation
- 연 락 처 : ***-***-****
- E - mail : jjang@dsme.co.kr



장연욱

- 1985년생
- 2010년 한국항공대 기계공학과 졸업
- 현 재 : 대우조선해양 중앙연구원 대리
- 관심분야 : 해양시스템제어
- 연 락 처 : ***-***-****
- E - mail : ukki6159@dsme.co.kr



김응곤

- 1973년생
- 2002년 조선대학교 전자계산학과 졸업
- 현 재 : (주)지노스 IAS연구소 연구소장
- 관심분야 : 모니터링 제어시스템, HILS Test
- 연 락 처 : 02-596-1488
- E - mail : ek_kim@xinnos.com

**대한조선학회논문집(한국연구재단 등재학술지)에
회원 여러분들의 많은 논문 투고를 부탁드립니다.**