

시스템 다이내믹스 기반 해양구조물 분리시스템의 설계검증 방법에 관한 연구

황준규* · 고재용*** · 이동건** · 박본영***

*, *** 목포해양대학교 대학원 박사과정, ** 목포해양대학교 조선해양공학과 교수

Design Verification Method of Offshore Separation Systems Based on System Dynamics

John-Kyu Hwang* · Jae-Yong Ko*** · Dong-Kun Lee** · Bon-Yeong Park***

*, *** Ph.D. Candidate, Department of Ocean System Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 본 연구는 시스템 다이내믹스를 기반으로 해양구조물 분리시스템(Separation system)의 설계검증 방법을 제안하였다. 해양구조물 분리시스템은 부가가치 측면에서 EPC 프로젝트의 성공 여부를 결정할 수 있는 상부구조(Topsides)의 가장 중요한 시스템 중 하나이다. 그럼에도 불구하고, 설계검증에 대한 지금까지의 실태는 설계 작업의 프로세스 진행이나 도면작성 및 제공에 국한되어 있어 기본설계 단계에서 설계검증의 미흡으로 인하여 계약 후 잦은 설계변경에 의한 기업손실이 발생되어 왔다. 이러한 맥락에서 본 연구의 목적은 해양구조물의 전체 프로젝트 수행 기간에 성공적인 사업수행을 도모하고자 설계검증 모델을 구축하여 적용하도록 하였다. 제안된 설계검증 방법은 상세설계의 효과적인 실행뿐만 아니라 초기설계 단계에서 기술적 오류나 불일치 사항을 미리 찾아냄으로써 해양구조물의 엔지니어링, 조달 및 건조에 대한 경쟁력을 향상시키는데 기여 할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 먼저 건조한 실적선 자료를 바탕으로 설계검증을 수행하여 FPSO 분리시스템에 적용하고 ISO 15288 국제 표준을 준수하였다. 결과적으로, 제안된 설계검증 방법이 해양구조물의 FEED 검증 프로세스에 적용될 수 있으며, 향후 해양 프로젝트의 성공적인 수행에 의한 이익창출을 도모할 수 있을 것이다. 또한, 해양구조물 건조 시 설계변경에 의한 막대한 손실을 최소화 할 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 시스템 다이내믹스, 해양구조물, 설계검증, 분리시스템, 설계변경

Abstract : This paper proposes a design verification method based on system dynamics for offshore separation systems. Oil and gas separation systems are key components of offshore oil platforms; these systems determine the competitiveness of engineering, procurement, and construction (EPC) projects, especially in terms of added value. However, previous research on design verification has been limited to the process and deliverables of design. To address this, the study aims to develop a comprehensive design verification method and the associated functions from the perspective of project management, for the entire project life-cycle of offshore structures. The proposed methodology for design verification is expected to contribute toward effective and detailed designs as well as improve the competitiveness of EPC companies in constructing offshore structures during the early design stages. We first analyzed the separation system of the FPSO using the design verification method adopted by advanced countries and compared it with the system dynamics process formalized as ISO 15288. Subsequently, a tailored process for the design verification of the offshore structure was derived. It is shown that the proposed design verification method can be applied to the front-end engineering design process of offshore structures. Moreover, it can contribute toward the successful performance of offshore projects in the future and also minimize design changes and critical risks during the construction of these offshore structures.

Key Words : System dynamics, Offshore structure, Design verification, Separation system, Design change

* First Author : imjkhwang@mmu.ac.kr, 061-240-7476

† Corresponding Author : kojy@mmu.ac.kr, 061-240-7129

1. 서론

본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 기반으로 해양구조물 분리시스템의 설계검증 방법과 인과요인 분석에 의한 설계검증 모델을 구축하였다. 최근 들어 국내 대형 조선해양 3사는 지속적인 적자를 기록하고 있으며 대부분의 손실은 해양 프로젝트에서 발생하였다. 또한, 손실 발생의 내적 원인으로는 FEED(Front-End Engineering Design) 단계의 설계검증 능력 부족 및 설계변경 리스크 관리능력 부족 그리고 EPC(Engineering, Procurement and Construction) 실행 능력 부족을 들 수 있다. 따라서 해양 프로젝트에서 대규모 손실을 줄이기 위하여 FEED 후 입찰공고 단계에서 설계검증을 충실히 수행하여 설계변경에 의한 추가 작업을 최소화 하여야 한다. 왜냐하면 계약 후 발견되는 모든 기술적인 불일치 사항과 추가적인 공사 리스크는 EPC 계약자가 전적으로 책임을 지게 되기 때문이다.

이처럼 해양구조물의 공사 리스크를 최소화하고 전체 프로젝트 수행을 성공적으로 수행하기 위해서 설계검증 모델을 구축하여 적용하도록 하였다. 이와 관련된 선행 연구 현황을 살펴보면, 국내 연구로는 해양구조물 상세설계와 건조에 관한 연구(Hwang et al., 2010), 통합 프로세스 엔지니어링을 위한 해양 프로세스 기본설계 방법론 연구(Roh et al., 2010), 해양구조물 FPSO(Floating, Production, Storage and Off-loading Unit)에 대한 화재위험 기반 시나리오 연구(Jin, 2013), FPSO 상부 모듈 구조적 거동에 관한 연구(Jang and Ko, 2018), 그리고 FEED 성숙도 평가방법(Ko, 2016) 연구에서 설계검증이 비용과 품질 나아가 공사 일정을 결정짓는 중요한 인자임을 강조하였다. 국외 연구로는 해양구조물 선체와 상부구조 개념설계(Gourdet, 2008), 해양구조물 상부구조 모듈 설치기술(Roy et al., 2010), 해양구조물 상부구조 검사기술 연구(Trouchton et al., 2007) 그리고 FPSO 상부구조 모듈 서포트 구조설계(Henriksen et al., 2008) 등이 대표적인 연구이다.

또한, 해외 엔지니어링사의 경우 Doris Engineering사와 Technip Engineering사 그리고 Mustang Engineering사는 국내에서 건조한 PETROBRAS, DALIA, USAN, 그리고 AKPO 프로젝트를 통해서 국내 3사(H, D, S사)와 부분적인 컨소시엄에 참여하였으나 FPSO 상부구조 분리시스템 기술은 현재 해외 업체들만의 전유물로 여겨지고 있는 실태이다. 따라서 본 연구에서는 해양구조물 상부구조에서 가장 중요하고 첫 번째 공정인 분리시스템에 대한 설계검증 방법으로 OC-Model(Operating Condition - Model) 적용을 제안하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 해양구조물 상부구조 분리시스템

본 연구에서는 시스템 다이내믹스의 인과요인 분석을 통

하여 해양구조물 설계검증 방법을 구현하고자 FPSO 상부구조의 분리시스템을 연구대상으로 하였다. FPSO는 Fig. 1과 같이 부유식 원유 생산/저장/하역하는 설비로써 시추선에 의해 개발이 완료된 유정(Oil well)과 연결하여 원유를 뽑아 올려 1차 분리 과정을 거친 후 FPSO의 내부 Cargo hold에 저장했다가 유조선에 옮겨주는 역할을 하는 해양구조물이다. 이는 크게 하부구조(Hullside)와 상부구조로 나눌 수 있고 상부구조에 연구대상인 분리시스템이 위치하고 있다(Jang and Ko, 2018; Hwang et al., 2010).

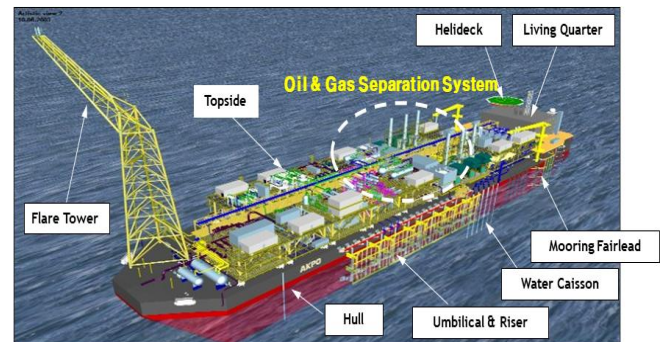


Fig. 1. Configuration diagram of FPSO separation system.

분리시스템은 유정에서 채굴한 유체의 비중 차를 이용하여 원유(Oil), 물(Water), 가스(Gas)로 분리하는 시스템이다. 이 시스템은 Table 1에 나타나 있듯이, 압력에 따라 LP(Low Pressure) Separator, HP(High Pressure) Separator 그리고 IP(Intermediate Pressure) Separator로 구분하며, Fig. 2에 보인 바와 같이 유체가 모멘텀 흡수기(Momentum Absorber)를 통과하게 되면 비중에 의해 가스가 1차 분리되고, 원유와 물은 다시 분리막대(Separating Bar)에 의해 2차 분리된다. 즉, 분리기(Separator) 내부에 설치된 분리막대를 기준으로 물보다 상대적으로 비중이 가벼운 원유가 반대편으로 넘어가면서 원유와 물이 분리된다. 이때, 물과 원유 사이 경계층의 높이를 조절하는 수위 조절기(Level Controller)를 설치하여 물이 반대편으로 넘어가는 것을 방지한다.

다음으로 분리시스템을 통과한 원유가 요구하는 품질을 갖도록 원유 내의 물과 가스 및 불순물을 제거하는 시스템인 생산시스템(Production System)으로 이동한다. 이에 해당하는 장비로는 수분 제거기(Dehydrator), 염분 제거기(Desalter) 등이 있다. 분리시스템과 생산시스템을 통과하면서 분리된 물은 아직 내부에 오일 성분을 포함하고 있다. 따라서 이 성분은 생산 수 시스템(Produced Water System)을 통과하면서 최종적으로 물로부터 걸러지게 된다. 한편, 분리된 가스의 경우, LP Compressor, IP Compressor, HP Compressor와 같은 압축시스템(Compression System)에서 저압, 중압, 그리고 고압 상태의 가스로 변환되고 2차 가스 분리기로 이송된다.

Table 1. Pressure of FPSO separation system

HP Separator	IP Separator	LP Separator
Pressure : 30~50 bar Temperature : 100~150°C Water content : within 5%	Pressure : 10 bar Temperature : ~100°C Water content : within 2%	Pressure : 0~3.5 bar Temperature : 60~80°C Water content : within 1%

이와 같은 과정을 통해 최종적으로 분리된 물과 가스는 Re-injection system에 해당하는 Injection pump를 통해 다시 유정으로 주입됨으로써 시간이 지남에 따라 낮아진 유정 내부의 압력을 일정하게 유지하게 된다(Hwang et al., 2010).

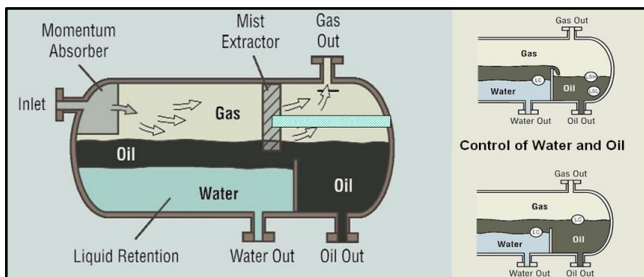


Fig. 2. Principle of oil and gas separation.

이러한 분리시스템과 생산시스템 외에도 프로세스 시스템의 작동을 보조하기 위한 유틸리티 시스템이 설치된다. 이상적으로는 해양구조물 프로세스 시스템에 대한 각종 사양이 완전히 확정된 후 이에 맞추어 유틸리티 시스템에 대한 사양이 정해지는 것이 올바른 순서이다. 하지만 시간적인 제약 조건으로 인해 거의 동시에 두 시스템에 대한 사양이 결정된다. 유틸리티 시스템은 Instrument Air & Nitrogen System, Cooling & Heating Medium System, Diesel Fuel System, Potable Water, Utility Wash Water System, Fuel Gas System과 같은 보조 시스템과 Fire Fighting System, CO₂ System, Fire & Gas System과 같은 안전 시스템(Safety System)이 있다.

2.2 분리시스템의 설계검증 방법

분리시스템의 설계검증 방법으로는 설계단계에서 문제의 정의와 설계검증의 변수 선정, 인과지도 작성 및 적용 그리고 타당성 검증 순으로 프로세스를 진행하였다. 인과지도 작성은 논리 분석 능력이 우수한 Vensim PLE를 이용하여 수행하였고 모델 구축에 필요한 정보는 FEED 데이터에서 운전조건(Operating Condition)을 얻었으며 HYSYS 시뮬레이션 데이터에서 유체 물성(Fluid Composition) 자료를 얻었고 벤더 데이터에서 설계 요구사항(Design Requirement)을 얻어 적용하였다.

2.3 해양구조물의 설계단계와 프로세스 설계

해양구조물의 설계단계는 크게 개념설계와 기본설계 그리고 상세설계와 생산설계로 나눌 수 있다. 개념설계는 프로젝트를 수행할 때 기술적으로 가능한지, 채산성이 있는지를 조사하는 단계이다.

기본설계는 개념설계에서 채택된 최적의 안으로 사양서를 확정하고 전체 프로젝트 공기와 가격 그리고 품질요구사항을 확정하는 단계로 Pre-FEED 라고도 하며 FEED의 개념을 포함하는 설계단계이다.

FEED는 상세설계 전단부(Front)와 기본설계 후단부(End)에 위치하며 다수의 입찰자들이 동일한 기준을 가지고 입찰가를 산출하여 응찰할 수 있도록 입찰서를 만들어주는 설계단계이다.

상세설계는 기자재를 조달하고, 시공에 임할 수 있게 하는 단계로써 FEED에서의 오류와 상부구조 공정분야에서의 부정확한 사항 그리고 불일치 사항을 찾아 수정 반영하는 단계이다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 상세설계는 그 담당 부분에 따라 프로세스 설계, 기장 설계, 전장 설계, 배관 설계, 선실 설계로 나뉜다. 이 중에서 프로세스 설계가 해양구조물 상부구조 설계의 핵심 부분이라 할 수 있다(Hwang et al., 2010).

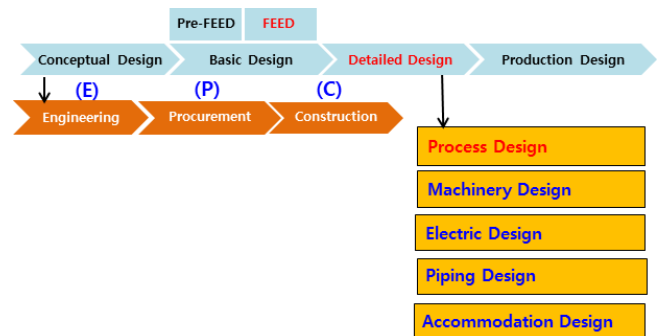


Fig. 3. Design phases of the offshore structure.

이처럼 해양구조물 상부구조의 핵심설계인 프로세스 설계에서는 발주자의 요구 사항(원유 및 가스의 하루 생산량)에 따라 상부구조에 설치되는 프로세스 시스템과 유틸리티 시스템의 공정과 사양을 결정한다. 이를 프로세스 FEED라고 하며 결과에 따라 상세설계 기간이 달라질 수 있고, 심지어는 진행되고 있는 해양구조물 프로젝트 자체가 취소될 수도 있다.

이처럼 공정의 흐름이 중요하기 때문에 프로세스 FEED는 해양구조물의 생산 능력과 건조 여부까지도 결정하는 매우 중요한 설계단계라 할 수 있다. 이와 같이 프로세스 FEED는 해양구조물 설계에서 중요한 위치를 차지하고 있지만, 그 절차와 방법은 지금까지 해외 엔지니어링사에 의존하고 있어 국내업체가 독자적으로 수행하기는 어려운 실정이다. 다

만, 그간 국내 조선소들이 해양구조물의 건조를 위해 해외 설계 용역 업체들과 기술적 업무 협의를 하는 과정에서 프로세스 FEED가 조금씩 밝혀지고 있다.

2.4 해양구조물의 프로세스 FEED

해양구조물 프로세스 FEED의 업무를 상세하게 나타내면 Fig. 4와 같다. 먼저, 발주자의 설계기준(Design Criteria)을 명확히 도출하여 설계 범위 및 대상(상부구조의 각종 장비, 계기 등)을 정한다(Fig. 4의 ①).

그 다음, 설계 대상을 기반으로 전체 프로세스 흐름(원유 및 가스의 생산을 위한 작업 라인)을 정의하고, 각 흐름별 물질/열역학적 특성(“Heat & Material Balance / Utility Balance”)을 HYSYS 공정 시뮬레이션 과정을 거쳐 결정한다(Fig. 4의 ②, “Process Simulation / Utility Consideration”). 그 후, 앞의 결과를 이용하여, 상부구조를 구성하는 각종 장비(equipment), 계기(instrument), 파이프(pipe) 등의 사양을 결정한다(Fig. 4의 ③, “Process Calculation / Utility Calculation”).

그리고 앞의 공정 시뮬레이션의 결과를 종합하여 전체 프로세스 라인의 운전 조건(온도, 압력, 유량, 기타 데이터)을 그림으로 묘사한 PFD(Process Flow Diagram)와 UFD(Utility Flow Diagram)를 작성한다(Fig. 4의 ④). 그 다음, 결정된 각 장비, 계기 등의 구매 및 운용에 필요한 정보를 포함하는 PED(Process Equipment Datasheet), PID(Process Instrument Datasheet), UED (Utility Equipment Datasheet), UID(Utility Instrument Datasheet)를 작성한다(Fig. 4의 ⑤).

끝으로, 앞서 작성한 PFD, UFD에 구매 정보를 담아 보다 구체화 된 P&ID(Piping & Instrumentation Diagram)를 작성하여 프로세스 설계로 전달하게 된다(Fig. 4의 ⑥).

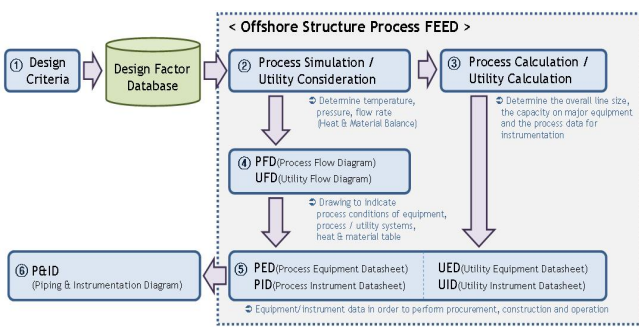


Fig. 4. Process FEED of the offshore structure.

3. 설계검증의 필요성 및 검증 모델

해양구조물의 설계검증에 대한 필요성은 아래 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 FEED의 성숙도(FEED maturity)에 의하여 좌우되며 FEED의 성숙도가 높으면 설계변경이 적게 발생하

고 FEED의 성숙도가 낮으면 설계변경이 많이 발생하여 손실에 의한 사업이 실패할 확률이 높다.

따라서 계약 전에 설계검증을 충실히 수행하여 위험성을 최소로 하여야 한다, 왜냐하면 계약 후에 발생하는 모든 리스크는 계약자의 책임이기 때문이다. 이는 보통 3개월에 걸쳐 수행하며 국내의 기술과 경험으로는 기간 내에 수행하는 것이 어려워서 사업 리스크 관리 핵심 활동 임에도 불구하고 해외 엔지니어링사에 의존해 오고 있다.

이러한 어려움을 개선하기 위하여 본 연구에서는 설계검증을 통해서 설계변경을 최소화하고 추가공사에 의한 비용 발생 그리고 납기 일정에 손해가 없도록 설계검증 모델을 제안하였다.

Fig. 6은 우리나라 기술이 아직 수행하지 못하고 있는 FEED의 설계검증 프로세스 모델이다. 즉 FEED 데이터로부터 받은 검토용 P&ID를 가지고 기술적인 오류와 도면에 누락된 내용 그리고 불일치 사항과 장비 성능상 불충분한 내용을 계약 전에 검증하여 상세설계가 원활하게 수행될 수 있도록 하였다.

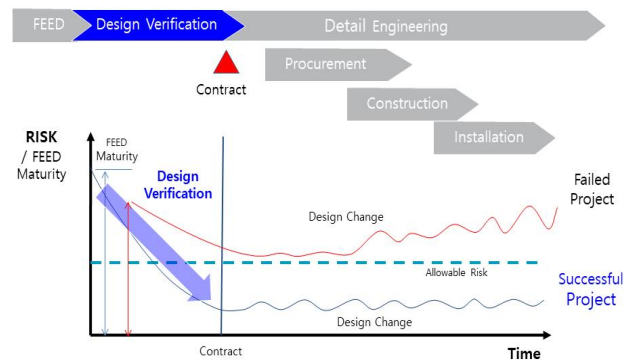


Fig. 5. Necessity of the design verification.

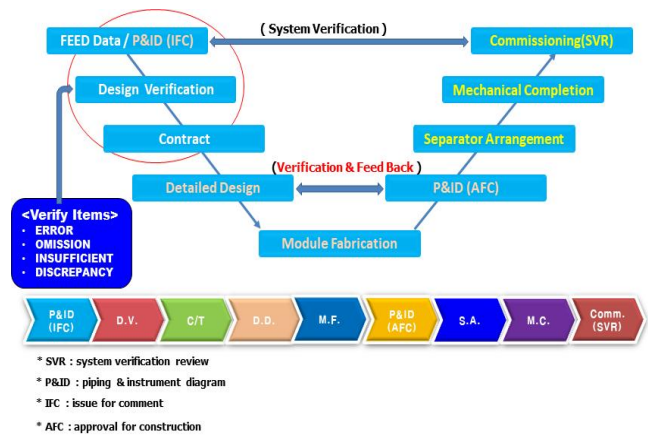


Fig. 6. Design verification process model.

4. 시스템 다이내믹스 기반의 모델개발

4.1 시스템 다이내믹스 개념 정의와 연구의 틀

시스템 다이내믹스란 시스템과 다이내믹스의 결합어로서 시스템은 관찰하고자 하는 어떤 대상이나 공간상의 영역, 혹은 어떤 물질의 양이며, 경계(Boundary)에 의하여 다른 사물과 구분되는 것이고, 다이내믹스는 시간의 변화에 따라서 대상이 변화하는 것을 의미한다. 시스템은 관련된 구성요소들의 결합으로 여겨지므로 시스템 다이내믹스는 연결된 구성요소들이 시간의 흐름에 따라서 변화하는 형태를 다루는 것이다(Kim et al., 2007).

시스템 다이내믹스 기법은 주어진 문제 또는 예상되는 문제에 대하여 직접 또는 간접적으로 관련된 변수들로 구성된 시스템을 정의하고 변수들 사이의 관계를 정량적으로 연구하여 모델화한 후, 일련의 시뮬레이션을 통하여 시스템의 동적인 특성을 밝혀내어 문제해결을 돕는 기법이다.

시스템 다이내믹스를 이용한 연구의 틀(Research Framework)은 아래와 같이 5단계로 이루어진다

첫째, 우선 분석의 목적에 합당한 모델 작성을 위해 그 목적에 맞게 문제를 인식하여 변수를 정의한다(Determine the Variables).

둘째, 단계에서는 문제를 피드백 시각(Feedback Perspective)에서 개념화(Conceptualization) 시킨다. 이 단계에서는 특정 문제를 야기시키는 여러 원인들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 피드백 시각에서 나타내는 인과지도(Causal Loop Diagram, CLD) 작성이 중요한 과제가 된다.

셋째, 이상의 개념화를 바탕으로 실제로 정책분석에 이용될 모델을 구축(Create Model) 한다,

넷째, 시뮬레이션 분석(Simulation analysis)을 수행한다.

다섯째, 작성된 모델에서 보이는 주요 변수들의 행태를 중심으로 모델의 타당성을 평가(Model Validation & Evaluation)한다.

본 연구에서는 다섯 단계의 틀 중에서 첫째 단계인 변수의 정의와 둘째 단계인 인과지도 작성을 통하여 설계검증 모델을 제시하였다. 연구의 범위는 아래의 Fig. 7과 같다.

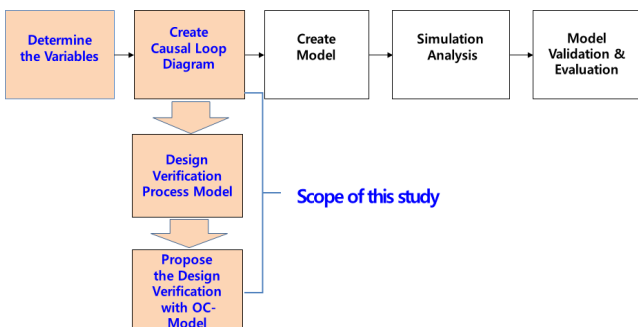


Fig. 7. System dynamics research framework.

4.2 시스템 다이내믹스 핵심요인분석에 의한 인과지도 작성

해양구조물의 FEED 성숙도에 따라 설계변경이 일어나고 설계변경에 따라 추가공사가 발생하여 이의 손실에 의한 영업수익이 감소하는 악순환의 연결고리를 가지고 있다. 따라서 이러한 인과 관계를 분석하고자 Vensim PLE 프로그램을 이용하여 인과지도를 작성할 수 있도록 주요 핵심요인(Cause and Key Factors) 8가지 항목을 Fig. 8과 같이 선정하였다. 핵심요인 8가지를 구성변수로 선정할 이유는 개념설계 단계에서부터 상세설계 단계에 이르는 경계조건 내에서 구성변수들이 순환적 체계(Loop) 내에 존재해야 하므로 직접 영향이 있고 연결고리가 존재하는 항목만을 선정하였다. 즉, 변수가 너무 많으면 인과지도가 복잡하게 되고 변수가 적으면 문제의 원인을 파악할 수 없게 되기 때문이다.



Fig. 8. Cause and key factors.

또한, 시스템 다이내믹스는 구성변수가 시간의 흐름에 따라 변하므로 장기적이며 전체적인 변화패턴에 초점을 맞추고 인과지도를 작성, 이를 바탕으로 FEED 성숙도에 따른 설계변경과 추가공사에 의한 손실 발생의 동태적 인과지도를 아래 Fig. 9와 같이 나타내었다.

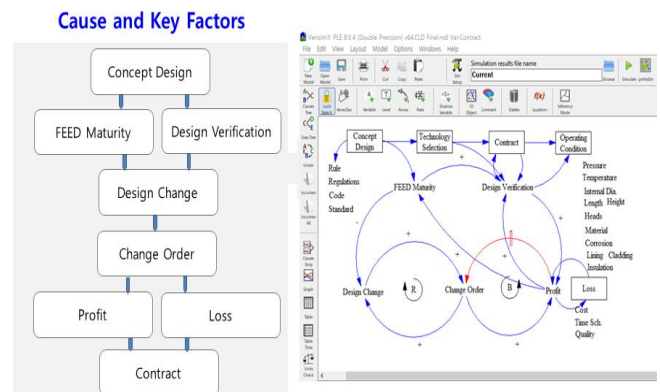


Fig. 9. Causal loop diagram (CLD).

4.3 시스템 다이내믹스 기반 모델 적용

설계검증의 모델 적용 방법은 아래의 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 FEED 데이터와 시뮬레이션 데이터 그리고 벤더 데이터를 받아 적용하였다. 즉, FEED 데이터에서 운전 조건과 시뮬레이션 데이터에서 유체의 물성 그리고 벤더 데이터에서 설계 요구사항을 선별하여 적용하였다.

FEED 데이터의 운전조건에서 Pressure와 Temperature를 적용하였고 시뮬레이션 데이터의 유체의 물성에서 Heads의 형상을 적용하였다. 그 이유는 유정에서 올라오는 오일과 가스의 Mol%에 따라 2차, 3차 분리시스템의 오일 분리기와 가스 분리가 다르게 선정될 수 있기 때문이다. 그리고 벤더 데이터의 설계요구사항에서 Internal Diameter, Height or Length, Material, Corrosion Allowance, Lining/Cladding Type, Insulation Type을 적용하였다.

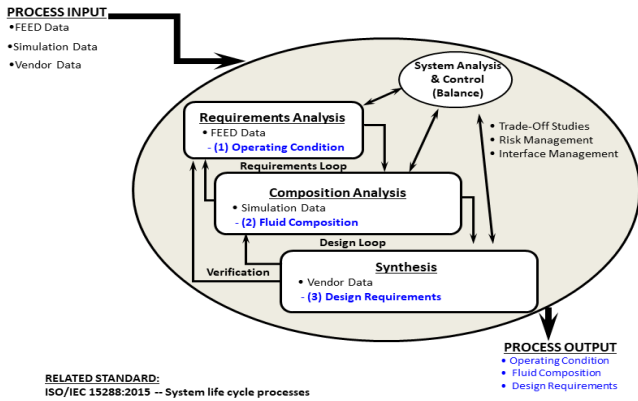


Fig. 10. Process application method.

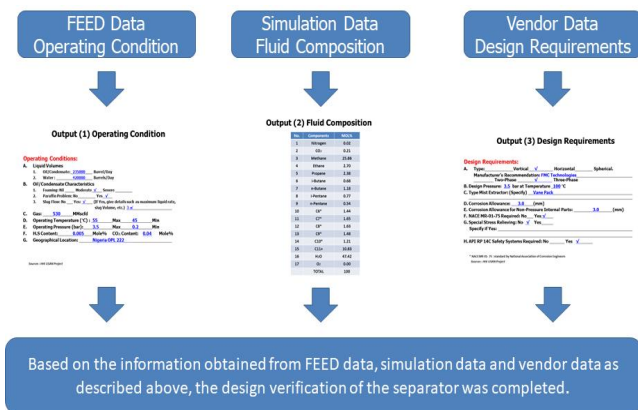


Fig. 11. Summarized of the design verification.

Output(1) Operating Condition - Fig. 11(a)

- A. Liquid Volumes
 - Oil/Condensate: 235000 Barrel/Day
 - Water : 420000 Barrels/Day
- B. Oil/Condensate Characteristics
 - Foaming: Nil Moderate Severe
 - Paraffin Problem: No Yes
 - Slug Flow: No Yes: (If Yes, give details such as maximum liquid rate, slug Volume, etc.) 3 m³
- C. Gas: 530 MMscfd
- D. Operating Temperature (°C): 55 Max 45 Min
- E. Operating Pressure (bar): 3.5 Max 0.2 Min
- F. H.S Content: 0.005 Mole% CO₂ Content: 0.21 Mole%
- G. Geographical Location: Nigeria OPL 222

Output(2) Fluid Composition - Fig. 11(b)

No.	Components	MOL%
1	Nitrogen	0.02
2	CO ₂	0.21
3	Methane	25.86
4	Ethane	2.70
5	Propane	2.38
6	i-Butane	0.68
7	n-Butane	1.18
8	i-Pentane	0.77
9	n-Pentane	0.54
10	C6*	1.44
11	C7*	1.65
12	C8*	1.63
13	C9*	1.48
14	C10*	1.21
15	C11+	10.83
16	H ₂ O	47.42
17	O ₂	0.00
	TOTAL	100

18.24

Output(3) Design Requirements - Fig. 11(c)

- A. Type: Vertical Horizontal Spherical.
 Manufacturer's Recommendation: FMC Technologies
 Two-Phase Three-Phase
- B. Design Pressure: 3.5 bar at Temperature 60 °C
- C. Type Mist Extractor: (Specify) Vane Pack
- D. Corrosion Allowance: 3.0 (mm)
- E. Corrosion Allowance for Non-Pressure Internal Parts: 3.0 (mm)
- F. NACE MR-01-75 Required: No Yes
- G. Special Stress Relieving: No Yes
 Specify if Yes: _____
- H. API RP 14C Safety Systems Required: No Yes

Fig. 11에 나타난 바와 같이 설계검증에 쓰인 자료의 요약 내용은 운전 조건에서 Fig. 11(a)의 운전압력 3.5 bar와 운전온도 55°C를 확인하였고 시뮬레이션 데이터에서 얻은 유체의 물성은 Fig. 11(b)에서 메탄 25.86 Mol%, 물 47.42 Mol%, 오일 18.24 Mol%를 확인하였다. 또한, 벤더 데이터에서 얻은 설계 요구사항은 Fig. 11(c)에서 설계압력이 3.5 bar이고 설계온도가 60°C 그리고 분리기의 형상과 부식의 허용량 등을 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 설계검증 모델은 Fig. 12에서 보이는 바와 같다. 계약 전에 설계검증이 충실히 수행되어 문제가 없도록 함이 중요하며 운전 조건을 고려한 OC-Model은 설계 요구사항을 신속히 언어 적용하는 것이 핵심사항이다.

또한, 해양구조물에서 대규모 손실 발생을 줄이기 위하여 설계검증 프로세스 구성 및 각 장비들의 효율적인 배치, 유정에서 올라오는 유체의 온도, 압력, 유량 조건 그리고 설계 요구사항(No. 1~No. 9 사항)을 만족시켜야 한다.

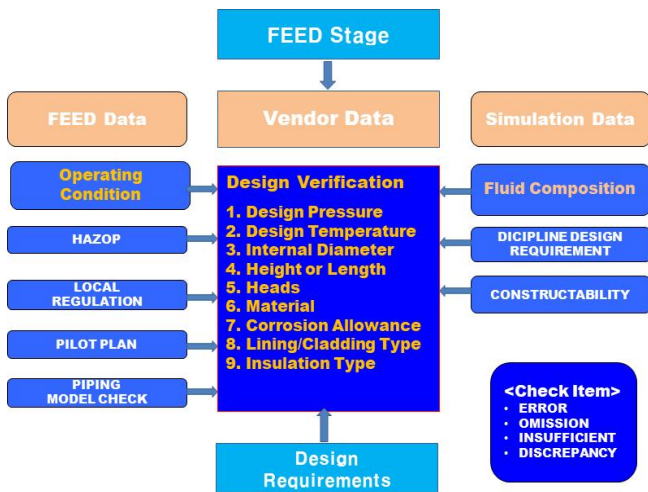


Fig. 12. Proposed design verification with OC-model.

4.4 설계검증 결과 및 고찰

설계검증 결과를 Table 2에 나타내었다. 초기 검토용 P&ID와 최종 승인된 P&ID를 비교 검토한 결과 오일과 가스 분리시스템(Separator Number TO VZ 2002)의 온도, 압력, 유량 조건 그리고 벤더 데이터에서 얻어진 설계 요구조건을 만족시켰으며 Table 2의 1. Pressure와 5. Heads 그리고 9. Insulation type이 FEED 오류로 인한 설계변경이 일어났음을 확인하였다.

초기 검토용 P&ID에서는 설계압력이 29bar였으나 최종 승인용 P&ID 도면에는 3.5bar로 표기되어 있어 오류임을 확인하였다. 또한, 분리시스템의 Heads 형상은 타원형에서 가스 유동을 더욱 원활히 하려고 반타원형으로 변경하였음을 확

인하였고 Insulation type은 일반적인 열을 고려하는 H에서 방화벽이 필요한 PFP(Passive Fire Protection)로 강화되었음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서 제안한 설계검증 OC-Model을 이용하여 적용한 결과 검증항목 9건 중 3건이 설계변경 되었음을 확인하게 되었다. 이로써 지금까지 해외 엔지니어링사에 의존해 왔던 설계검증을 앞으로는 국내 조선소 엔지니어가 직접 수행할 수 있을 것으로 판단한다.

Table 2. Results of design verification (Source: HHI USAN project)

DESCRIPTION				IFC P&ID		AFC P&ID	
* Separator Number				TO VZ 2002		TO VZ 2002	
* Stage				2nd Stage Separator		2nd Stage Separator	
* Type				2 Phase		2 Phase	
1. Pressure (bar g)	Design			FV/29		FV/3.5	
	Working			0.5		0.5	
2. Temperature (°C)	Design	Min.	Max.	-29	100	-29	100
		Working	Min.	Max.	45	55	45
					4600		4600
3. Internal Diameter (mm)				4600		4600	
4. Height or length(mm)				15400		15400	
5. Heads				Elliptical		Semielliptical	
6. Material				CS		CS	
7. Corrosion Allowance (mm)				3		3	
8. Lining / Cladding Type				Coating / Anodes		Coating / Anodes	
9. Insulation Type				H		PFP	
1. Error : Full Vacuum / 29 bar(3.5 bar) 2. Insufficient : H - Heat Conservation (PFP) 3. Type Change : Elliptical(Semielliptical) * PFP : Passive Fire Protection							

5. 결론

설계검증을 수행하는 목적은 해양 프로젝트 계약 시 소요되는 가격과 중량 그리고 각 시스템별 배치를 추정하고 해당 프로젝트에 대한 최종 의사결정(손익 예측)을 하여 입찰에 참여하는 것이다. 이들의 추정을 위해서 각 장비, 배관, 계기들의 사양을 정해야 하며 이것이 FEED의 최종 결과물이다. 이는 결과적으로 비용(Cost), 품질 (Quality) 그리고 일정(Schedule)으로 표출되며 해당 프로젝트의 성공 여부를 결정지를 가장 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 이의 효율성을 증대시키기 위해 시스템 다이내믹스를 기반으로 분리시스템의 설계검증 모델을 제안하였다.

결론적으로 FEED 데이터를 통해서 첫째, 설계 오류를 조기에 찾아낼 수 있었고 둘째, 초기 설계검증에 의한 설계변경을 최소화 할 수 있었으며 셋째, 짧은 기간 내에 설계검증을 수행하여 성공적인 계약을 성사시킬 수 있었다. 또한, 본 연구에서 제안한 방법을 적용할 경우 신속하고 체계적인 설계검증이 이루어질 수 있음을 확인하였다. 향후 이 방법을 FPSO 상부구조의 핵심장비인 압축기(Compressor)와 열교환기(Heat exchanger) 그리고 펌프(Pump)에도 확대 적용하여 그 효율성을 증가시킬 예정이다.

사 사

이 논문은 2020년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(No.20200547)이며, 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019R1G1A1006819).

Received : 2020. 07. 22.

Revised : 2020. 08. 24. (1st)

: 2020. 09. 10. (2nd)

Accepted : 2020. 10. 28.

References

- [1] Gourdet, G.(2008), Connection Hull-Topsides: Principles, Designs and Returns of Experience, Bureau Veritas.
- [2] Henriksen, L. O., B. D. Williams, X. Wang, and D. Liu(2008), Structural Design and Analysis of FPSO Topside Module Supports, ABS Technical Paper.
- [3] Hwang, J. K., M. I. Roh, and K. Y. Lee(2010), Detailed Design and Construction of the Hull of an FPSO (Floating, Production, Storage, and Off-loading unit), Ships and Offshore Structures, Vol. 5, No. 2, pp. 93-104.
- [4] Jang, B. S. and D. E. Ko(2018), A Study on the Structural Behavior of FPSO Topside Module by Support Condition, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society Vol. 19, No. 11 pp. 18-23.
- [5] Jin, Y.(2013), A Study on Probabilistic Scenario Based Fire Risk Analysis for FPSO Structure, Proceedings of the 27th Asian-Pacific Technincal Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2013.
- [6] Kim, G. C., G. Y. Jeong, and S. W. Kim(2007), System Dynamics using the Vensim®, Seoul Economy and Management, Vol. 1, pp. 1-5.
- [7] Ko, M. S.(2016), FEED Maturity Evaluation Method, The Korean Society of Ocean Engineers Conference, Busan BEXCO, Korea.
- [8] Roh, M. I., J. H. Hwang, J. H. Cha, and K. Y. Lee(2010), Offshore Process FEED Method for Integrated Process Engineering, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 47, No. 2, pp. 265-277.
- [9] Roy, Kumar D., Arun Kr Dev, and Seref Aksu(2010), Installation Engineering of Topside Modules on Ship Shaped Offshore Floating Structures, Proceedings of 4th PAAMES and AMEC2010 Dec. 6-8, 2010, Singapore.
- [10] Troughton, M., A. Rouhan, and J. Goyet(2007), Risk Based Inspection Approach for Topside Structural Components, Offshore Technology Conference.