

시스템 엔지니어링 접근 방법에 의한 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스 개발

김선영^{1)*}, 차재민²⁾, 김준필²⁾, 서석환¹⁾, 서활원¹⁾

1) 포항공과대학교 엔지니어링 대학원 (GEM), 2) 포항공과대학교 산업경영공학과

A Systems Engineering Approach to FEED Work Process Development for Refinery Plant

Sun Young Kim¹⁾, Jae-Min Cha²⁾, Junpil Kim²⁾, Suk-Hwan Suh¹⁾, Hwal Won Sur¹⁾

1) Graduate School of Engineering Mastership (GEM), POSTECH,

2) Dept. of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Abstract : Refinery plant producing petroleum products from crude oil has significantly contributed to the creation of the national interests as a leading engineering industries. However, domestic Engineering · Procurement · Construction (EPC) companies are facing heavy competition for orders. Domestic EPC companies as EPC contractors are faced with some problems such as undertaking responsibility for FEED packages produced by other FEED companies. But domestic EPC contractors are unfamiliar to development and validation of FEED packages. It causes poor profitability and lower competitiveness of domestic companies. It is necessary for domestic companies to have capability to perform FEED activities in order to overcome these limitations instead of focusing on EPC phase after FEED phase. The systematic procedure is needed to perform the FEED activities, however, there are present difficulties on it due to the lack of experience in FEED packages development which require various engineering knowledge of chemical process, mechanics, electrics, instrumentation, civil engineering. This study has applied systems engineering method which is

* 교신저자 : shs@postech.ac.kr

* corresponding author : Choi, Sun Woo, KINGS, swchoigo@gmail.com

* This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

multi-disciplinary approach to derive and verify the solution to meet the customer's needs when the complex system is developed to task execution process development of FEED activities for refinery plant. The problems that may occur in the future were identified in advance by taking into account the various stakeholders and system context through the application of systems engineering. It helps to develop the task execution process systematically. The developed task execution process of FEED activities is planned to make effectiveness verified by engineering professionals experienced in FEED and continually enhance this process by field application.

Key Words : Refinery Plant, Front End Engineering Design (FEED), Work Process, Systems Engineering

1. 서론

정유 플랜트는 원유를 정제하여 석유 제품을 생산하는 플랜트이며(유홍석, 2006), 우리나라의 주력 엔지니어링 사업으로 국의 창출에 많은 기여를 하여왔다. 하지만, 최근 국내의 Engineering · Procurement · Construction(EPC) 기업들은 과도한 사업 수주 경쟁에 직면하고 있으며, EPC 사업으로써 Front End Engineering Design(FEED) 설계 결과의 책임을 부담하는 등 여러 문제점이 대두되고 있다.

구체적으로, 현행 엔지니어링 계약 형태에서는 일반적으로 국내의 EPC 업체가 상세설계를 수행함에 있어, 선진 엔지니어링 업체가 수행한 FEED 설계 결과에 대해 계약서에 명시된 일정 기간 동안 설계 오류를 찾아내어 수정을 요청해야 하며, 본 기간 이후에는 FEED 설계 결과에 관한 책임을 EPC 업체가 지게 된다. 이러한 계약형태의 문제는 EPC 업체에게 향후 설계 오류 발생 시 설계 변경에 대한 비용의 증가를 유발하고, 계약서에 명시된 최종 산출물에 대한 품질의 보증을 위한 추가 비용을 유발한다. 또한, 해외의 정유 플랜트의 EPC 사업 수주에 있어 국내 EPC 업체 뿐 아니라, 개발도상국의 엔지니어링 사업 후발 주자 기업들 역시 빠르게 진출하고 있어 점점 경쟁이 심화될 것으로 예상되고 있다. 이러한 문제점들은 국내 EPC 기업들의 수익성 저하와 전반적인 사업경쟁력 하락으로 이루어지고 있다.

국내 EPC 기업들이 자체적으로 FEED 단계를 수행할 수 있는 역량을 보유하기 위해서는, 우선적으로 FEED 단계를 수행하기 위한 구체적인 프로세스와 각 프로세스의 주요 활동에 입/출력되는 정보와 문서의 흐름을 정립할 필요가 있다. 하지만, 국내 EPC 기업들은 정유 플랜트의 FEED 수행경험이 부족하기 때문에, FEED 수행을 위한 프로세스와 입/출력물이 체계적으로 정립되어 있지 않은 상황이다. 뿐만 아니라, FEED 단계는 공정, 기계, 전기, 계장, 토목, 건설 등 다양한 공학 분야를 동시에 고려하여야 하기 때문에 복잡성이 매우 높다. 따라서 이와 같은 기존의 한계점들을 극복하고, 복잡한 FEED 수행 업무 프로세스를 성공적으로 개발하기 위한 체계적인 방법이 요구된다.

시스템 엔지니어링은 이러한 한계를 극복하기 위한 하나의 좋은 대안적인 접근방법이 될 수 있다. 시스템 엔지니어링은 비행기, 자동차, 기차 등 복잡한 시스템을 개발함에 있어 고객의 요구를 만족시키는 시스템의 솔루션을 도출하고 검증하기 위한 체계적이고 종합적인 엔지니어링 접근 방법이다(INCOSE, 2004). 특히, 시스템 엔지니어링은 새로운 시스템 혹은 이전 개발 경험이 부족한 시스템이나, 다분야 기술 지식이 필요한 시스템의 개발에도 적합하다고 알려져 있으며, 이러한 특성은 정유 플랜트의 복잡한 FEED 수행 업무 프로세스의 개발의 특성과 매우 적합하다.

본 연구에서는 정유 플랜트의 FEED 수행역량을 강화하기 위한 방안으로, 시스템 엔지니어링 접근

방법에 기반하여 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스를 개발하였다. 구체적으로, 2장에서는 우선 기존의 FEED 수행 업무 프로세스 개발에 관한 문헌 연구 결과를 설명하고, 한계점을 분석한다. 3장에서는 본 연구를 위해 적용된 시스템 엔지니어링 프로세스와 이를 통해 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스 개발에 적용하는 과정을 보이고, 4장에서는 개발된 FEED 수행 업무 프로세스에 대하여 설명한다. 마지막으로, 5장에서는 연구를 통해 얻은 교훈과 한계점에 대하여 논하고, 추후 연구 계획으로 마무리한다.

2. 문헌 연구

포괄적인 문헌 연구를 수행한 결과, 오일, 가스,

LNG 플랜트 등의 업무 프로세스를 정립하거나 표준화를 하기 위하여 다양한 연구들이 수행되었다(표 1). 하지만, 대부분의 연구들이 FEED 단계의 프로세스는 다루지 않고 있거나, 개념적인 수준에서 다루고 있었으며, 구체적인 프로세스와 입/출력물을 충분히 다루지 않고 있었다.

이들 연구의 세부 내용을 보면 PISTEP Consortium (1994)은 프로세스 플랜트 사업의 생명주기 상에 참여하고 있는 다양한 이해관계자들 간 공통된 이해를 위해 설계부터 폐기까지의 프로세스를 제시하였다. 본 프로세스는 FEED 설계 단계를 포함한 구체적인 활동을 제시하였고, 프로세스의 입출력물을 제시하고 있으나, 입출력물과 세부 활동 간의 연결성이 부족하고, 세부 활동과 입출력물의 관계를 알기 어려운 한계점을 지니고 있다.

<Table 1> Researches on work process development for chemical process plant

연구자 (년)	연구내용	연구의 한계점
PISTEP Consortium (1994)	프로세스 플랜트 사업의 설계부터 폐기까지 전생명주기 단계 프로세스의 표준화	설계 단계의 프로세스 및 세부 활동을 제시하였고, 프로세스의 입출력물을 제시하였으나, 입/출력물과 세부 활동의 연결성이 부족함
Kang (2008)	해외 가스·오일 플랜트 사업의 구매조달 프로세스 개선 방안 제시	구매조달 단계 중심의 업무 프로세스만 제시
Won et al. (2008)	해외 가스·오일 플랜트 사업의 구매조달 업무 프로세스 도출	구매조달 단계 중심의 업무 프로세스만 제시
Yoon et al. (2009)	해외 LNG 플랜트 사업의 시공 전 단계 (기획·설계·구매조달)의 표준 업무프로세스 도출	기획, 설계, 구매조달 단계의 상위 업무 프로세스를 제시하였으나, FEED 단계의 세부 업무 프로세스 및 입/출력물은 미제시
Won et al. (2009)	해외 LNG 플랜트 사업의 초기 프로세스 분석 및 지식관리시스템 구축	기획, 설계, 구매조달 단계의 상위 업무 프로세스를 제시하였으나, FEED 단계의 세부 업무 프로세스의 입/출력물은 미제시
Yoon (2010)	해외 LNG 플랜트 사업의 기획 단계의 표준 업무 프로세스 도출 및 통합지식관리 Framework 구축	기획 단계의 중심의 업무 프로세스만 제시
Tak et al. (2010)	해외 LNG 플랜트 사업의 시공 전 단계 (계약·설계)의 표준 업무프로세스 도출	설계 단계의 프로세스 및 활동을 제시하였으나, FEED단계의 세부 업무 프로세스의 입/출력물은 미제시
Tak (2011)	해외 LNG 플랜트 사업의 시공 전 단계 (기획·설계·구매조달)의 표준 업무프로세스 도출	기획, 구매조달 단계 중심의 업무 프로세스만 제시
Han (2012)	해외 LNG 플랜트 사업의 구매조달 단계의 프로세스 분석을 통한 구매조달 지식관리 시스템 구축	구매조달 단계 중심의 업무 프로세스만 제시

ISO/IEC 15288 표준의 시스템 엔지니어링 프로세스/활동

프로세스	활동
이해관계자 요구사항 정의 [P1]	이해관계자 요구사항 도출 [P1A1]
	이해관계자 요구사항 정의 [P1A2]
	이해관계자 요구사항 분석 및 유지 [P1A3]
요구사항 분석 [P2]	시스템 요구사항 정의 [P2A1]
	시스템 요구사항 분석 및 유지 [P2A2]
아키텍처 설계 [P3]	아키텍처 정의 [P3A1]
	아키텍처 분석 및 평가 [P3A2]
	아키텍처 문서화 및 유지 [P3A3]



적용 된 시스템 엔지니어링 프로세스/활동

프로세스	활동
이해관계자 요구사항 정의 [P1]	시스템 수명주기 도출 [P1A1]
	이해관계자 식별 [P1A2]
	이해관계자 요구사항 추출 [P1A3]
	시나리오 작성 [P1A4]
	이해관계자 요구사항 분석 [P1A5]
	이해관계자 요구사항 수정 [P1A6]
	이해관계자 요구사항 기록 [P1A7]
시스템 요구사항 정의 [P2]	RVTM 수립 및 유지 [P1A8]
	외부 시스템 인터페이스 [P2A1]
	시스템 기능 정의 [P2A2]
	시스템 설계 제약사항 정의 [P2A3]
	시스템 요구사항 분석 [P2A4]
	시스템 요구사항 수정 [P2A5]
	시스템 요구사항 기록 [P2A6]
아키텍처 설계 [P3]	RVTM 수립 및 유지 [P2A7]
	논리적 아키텍처 정의 [P3A1]
	물리적 아키텍처 정의 [P3A2]

<Figure 1> Tailored SE process for Refinery Plant based on ISO/IEC 15288

한편, 강민우 (2008), 원서경 외 (2008)은 해외 가스·오일 플랜트 사업의 구매조달 단계 중심의 업무 프로세스를 제시하였다. 윤나리 외 (2009), 원서경 외 (2009), 여나리 (2010), 탁현우 외 (2010), 탁현우 (2011), 한동환 (2012)은 해외 LNG 플랜트 사업의 시공 전 단계의 업무 프로세스를 도출하였지만, 주로 기획 및 구매조달 단계를 중심으로 표준 프로세스를 제시하거나, 설계 단계를 제시한 경우에는 상위 수준의 업무 프로세스만을 제시하였으며 프로세스와 관련된 입력물과 출력물은 제시하지 않아 한계를 지니고 있다.

이러한 기존 연구의 한계를 극복하기 위해서 본 연구에서는 FEED 단계의 구체적인 업무 프로세스를 제시할 필요가 있으며, 이어지는 장에서는 FEED 단계를 체계적으로 개발하기 위한 접근방법과 이를 통해 개발된 FEED 단계의 프로세스를 제시한다.

3. 시스템 엔지니어링 기반 FEED 수행 업무 프로세스 개발

3.1 적용 된 시스템 엔지니어링 방법론

시스템 엔지니어링에 대한 연구는 기존에 많은 학계 및 산업계 전문가들을 통해서 수행되어 왔으며, ISO/IEC 15288 (2008), MIL-STD 499B

(1994), ANSI/EIA-632 (1999), ISO/IEC 26702 (2007) 등 다양한 표준과, INCOSE SE Handbook (INCOSE, 2011), SE Guidebook (Martin, 1997) 등이 개발되어 왔다.

본 연구에서는 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스 개발을 위하여 다양한 SE 표준 중 국제적으로 가장 범용적으로 사용되고 있는 ISO/IEC 15288 표준과 INCOSE SE Handbook을 기반으로 하였으며, 이 중 구체적으로, 이해관계자의 요구사항으로부터 시스템의 설계까지 수행하는데 있어 가장 핵심적인 1) 이해관계자 요구사항 정의, 2) 시스템 요구사항 정의, 3) 아키텍처 설계 프로세스를 적용하였다. 더하여, 이해관계자 요구사항 정의와 시스템 요구사항 정의 프로세스 중 요구사항 분석을 수행하는데 있어서, 조금 더 구체화 된 기준을 제시하는 ANSI/EIA-632의 프로세스를 일부 적용함으로써, 보다 체계적인 분석을 수행 하였다. 그림 1은 본 연구를 통해 정유 플랜트를 대상으로 tailoring 시킨 시스템 엔지니어링 프로세스 및 활동을 요약한 것이다.

3.2 시스템 엔지니어링 기반 정유 플랜트 FEED 수행 업무 프로세스 개발

본 절에서는 그림1의 시스템 엔지니어링 프로세스 및 세부 활동을 구체적으로 기술한다.

3.2.1 이해관계자 요구사항 정의

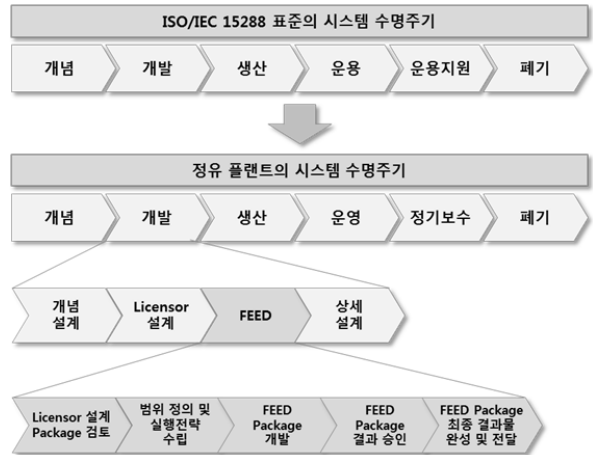
본 프로세스는 정의된 환경 조건에서 사용자 및 기타 이해관계자가 필요로 하는 서비스를 제공할 수 있는 시스템의 요구사항을 정의한다. 우선, 시스템의 생명주기를 통하여, 시스템과 연관을 갖는 이해관계자를 식별하고, 그들의 필요, 기대, 요구를 식별하며, 이를 분석하여 이해관계자 요구사항으로 변환한다. 다음으로, 요구사항 분석 활동을 통해 이해관계자의 요구사항이 요구사항기준에 부합하는지 파악하고, 이를 수정한 후 기록한다.

FEED 프로세스 정의 [P1A1]

모든 시스템은 시스템의 목적과 특성에 따라 고유의 생명주기를 가지며, 생명주기에 따라 도출해야 할 이해관계자 및 요구사항이 달라진다. 본 활동에서는 각 시스템이 갖고 있는 생명주기 각 단계를 정의하고, 단계별로 진행되는 구체적인 활동들을 도출한다.

본 연구의 대상 시스템인 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스는 정유 플랜트와 같은 물리적 시스템이 아니라, 정유 플랜트를 개발하기 위한 개발 단계 중 하나이다. 하지만, FEED 수행 업무 프로세스는 정유 플랜트의 전체 생명주기와 밀접한 연관을 갖고 있기 때문에 우선 정유 플랜트의 시스템 생명주기를 정의 하였다.

정유 플랜트는 일반적인 물리적 시스템과는 달리 수십 년 이상 지속적으로 사용되며, 사용 기간 동안 수명이 다한 구성품을 지속적으로 교체하여 활용하는 것이 일반적이다. 이러한 정유 플랜트의 특성을 고려하여, ISO/IEC 15288 표준에서 제시하고 있는 생명주기 모델의 지원 (Support) 단계 대신 정기보수 (Turnaround) 단계로 변형하였으며, 활용 (Utilization) 단계는 플랜트에서 주로 사용되는 운영 (Operation) 단계로 수정하였다. 또한, 개발 단계는 개념 설계, 기본 설계, FEED, 상세 설계 단계로 구분할 수 있으며, FEED 단계는 라이선서 (licensor)의 설계를 바탕으로 상세 설계를 할 수 있도록 하는 연결 설계의 개념으로 현업에서는 인식되고 있다. 더하여, FEED 단계는 licensor 설계



<Figure 2> System life cycle for Refinery Plant based on ISO/IEC 15288

Package 검토, 범위 정의 및 실행전략 수립, FEED Package 개발, FEED Package 결과 승인, FEED Package 최종 결과물 완성 및 전달의 단계로 구분될 수 있다. 그림 2는 정유 플랜트의 시스템 생명주기를 보여준다.

이해관계자 식별 [P1A2]

본 활동에서는 도출된 대상 시스템의 개발에 영향을 주거나 이해관계가 있는 생명주기 상의 이해관계자를 식별한다.

P1A1 단계에서 정의한 시스템 생명주기에 걸쳐 시스템 개발에 중요한 영향을 주고받는 이해관계자로, 정부, licensor, 고용주와 FEED를 수행하는 FEED 조직이 식별되었다. 식별된 주요 이해관계자의 역할은 다음과 같다.

- **정부**: 정유 플랜트가 건설되는 지역의 정부기관으로 각종 규제사항 및 제약사항 제공
- **Licensor**: FEED를 수행하기 위한 기본 엔지니어링 데이터 (Basic Engineering Data)를 제공하고 FEED 과정에서 Basic Engineering Data의 수정을 원할 경우 Licensor와의 상호 검토를 통해 변경사항이 반영
- **고용주**: 해당 정유 플랜트의 발주자로 설계 요구사항과 성능조건을 제공하며 최종적인 FEED Package에 대한 승인권한 가짐
- **FEED 조직**: FEED를 수행하는 기업 내 조직

이해관계자 요구사항 분석 [P1A5]

본 활동에서는 이해관계자 요구사항이 제대로 작성되었는지 분석한다. 이를 위해서 이해관계자 요구사항은 기능, 성능, 인터페이스, 제약사항 등의 10가지 카테고리로 분류하고 ANSI/EIA-632 표준에서 제시하고 있는 요구사항을 위한 요구사항 평가기준을 참고하여 일부를 적용하였다. 적용된 평가 기준은 다음과 같으며, 작성된 이해관계자 요구사항을 문장별로 분석을 수행한다. 그림 5는 요구사항 분석 매트릭스를 보여준다.

- **필요성:** 해당 요구사항은 필요한 요구사항인가?
- **실행독립성:** 요구사항은 해결방법(How)에 대해 독립적인가?
- **명확성:** 요구사항/요구사항 집합은 추가적인 설명이 필요없이 이해하기 쉬운가?
- **완전성:** 요구사항/요구사항 Set은 지금 단계에 필요한 정보를 모두 가지고 있는가?
- **추적가능성:** 요구사항은 상위 단계의 요구사항을 추적할 수 있는가?
- **검증가능성:** 요구사항은 지금 단계에서 검사, 승인, 시험 중 하나 이상의 방법으로 검증할 수 있는가?
- **의미유일성:** 요구사항은 하나의 의미만을 포함하고 있는가?
- **상충제거:** 요구사항은 다른 요구사항과 상반되는 의미를 포함하는가?

요구사항		평가기준 (기준 만족: 0, 미만족: 1)								
번호	요구사항 문장	필요성	실행독립성	명확성	완전성	추적가능성	검증가능성	의미유일성	상충제거	합계
	Req1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Req2	0	1	0	1	0	0	0	0	2
	Req3	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	Req4	0	0	0	0	1	0	0	0	1
...

<Figure 5> An example of requirement analysis matrix

이해관계자 요구사항 수정 [P1A6]

본 활동에서는 P1A5에서 분석된 이해관계자 요구사항의 분석 결과를 바탕으로 기준에 적합하지 않은 경우 관련 이해관계자와의 합의를 통해 적합

한 형태의 요구사항으로 수정한다.

이해관계자 요구사항 기록 [P1A7]

본 활동에서는 수정이 완료된 이해관계자 요구사항은 데이터베이스, Excel 등의 별도 저장소에 기록 및 보관하며, 요구사항의 추가, 변경, 삭제 등이 필요할 경우 반영하여 갱신 한다. 기록된 이해관계자 요구사항 중 개발 성공의 척도가 되는 주요 이해관계자 요구사항은 효과성척도(Measure of Effectiveness)로 설정하고 개발과정에서 해당 요구사항의 수행가능 여부를 지속적으로 관리한다.

요구사항 검증 추적 매트릭스 수립 및 유지 [P1A8]

본 활동에서는 정형화 되지 않은 이해관계자의 초기 기대에서부터 최종적으로 수정된 이해관계자 요구사항과 이를 검증 및 확인하기 위한 검증 요구사항까지 추적할 수 있는 요구사항 검증 추적 매트릭스(Requirements Verification Traceability Matrix; RVTM)를 수립하고, 이를 지속적으로 유지한다. 이러한 RVTM 수립 및 유지를 통해, 향후 요구사항의 수정이 필요할 때, 영향을 주고받는 다른 요소들을 쉽게 파악할 수 있다.

3.2.2 시스템 요구사항 정의

시스템 요구사항 정의 프로세스는 희망하는 서비스에 대한 요구사항 중심의 이해관계자의 표현을, 서비스를 제공할 제품에 대한 기술적 표현으로 변환하는 것이다. 우선, 대상 시스템에 영향을 줄 수 있는 외부 시스템을 식별하여 시스템 경계를 정의하고, 대상 시스템이 가져야 할 기능을 정의한다. 다음으로, 시스템을 설계하는데 있어 지켜야 하는 제약사항을 정의하고, 작성된 시스템 요구사항들이 제대로 작성되었는지 분석한 후 수정 및 기록한다.

외부 시스템 인터페이스 [P2A1]

본 활동에서는 시스템 요구사항을 정의하기 위하여 대상 시스템에 영향을 줄 수 있는 외부 시스템을

식별하고, 대상 시스템과 외부 시스템 간의 인터페이스를 정의한다. 또한, 인터페이스 간에 서로 주고받는 입력물과 산출물을 정의한다. 이러한 과정을 통해 대상 시스템이 외부 시스템과의 관계를 명확히 할 수 있으며, 시스템 개발에 있어 고려해야 할 인터페이스 요구사항을 도출한다.

시스템 기능 정의 [P2A2]

본 활동에서는 이해관계자 요구사항을 수행하기 위해 시스템 관점에서 시스템이 수행하여야 하는 기능 및 시스템 요구사항을 정의한다.

시스템 설계 제약사항 정의 [P2A3]

본 활동에서는 시스템을 설계하는데 있어 지켜야 하는 기능적, 물리적, 환경적 제약사항 등을 정의한다. 대상 시스템과 상호 작용하는 외부 시스템으로 인한 제약사항 뿐 아니라, 생명주기를 고려한 제약사항들도 포함된다.

요구사항 분석 [P2A4]

본 활동에서는 시스템 요구사항이 제대로 작성되었는지 분석한다. 이를 위해 P1A5에서 설명한 요구사항 분석 기준과 매트릭스를 활용하며, 작성된 시스템 요구사항 문장별로 분석을 수행한다.

시스템 요구사항 수정 [P2A5]

본 활동에서는 P2A4에서 분석된 시스템 요구사항의 분석 결과를 바탕으로 기준에 적합하지 않은 경우 관련 이해관계자와의 합의를 통해 적합한 형태의 요구사항으로 수정한다.

시스템 요구사항 기록 [P2A6]

본 활동에서는 수정이 완료된 시스템 요구사항은 데이터베이스, Excel 등의 별도 저장소에 기록 및 보관하며, 요구사항의 추가, 변경, 삭제 등이 필요할 경우 반영하여 갱신 한다.

요구사항 검증 추적 매트릭스 수립 및 유지 [P2A7]

본 활동에서는 P1A8에서 수립한 RVTM을 바탕

으로, 초기 이해관계자 요구사항부터 최종적으로 수정된 시스템 요구사항과 이를 검증 및 확인하기 위한 검증 요구사항까지 추적할 수 있는 RVTM로 갱신하고, 이를 지속적으로 유지한다.

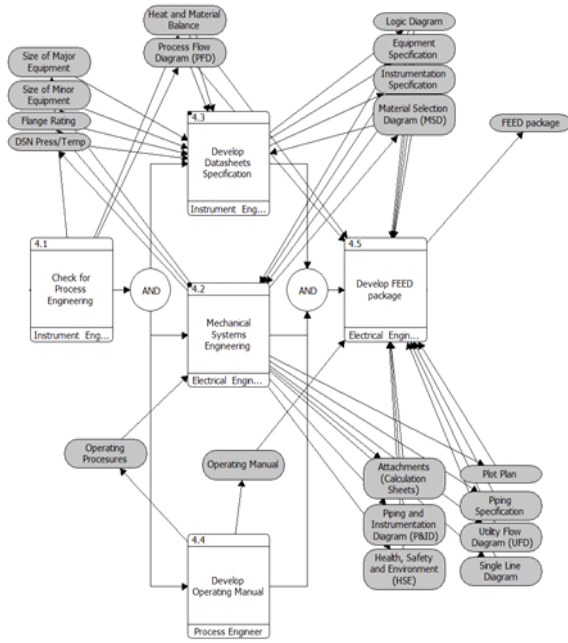
3.2.3 아키텍처 설계

아키텍처 설계 프로세스는 시스템 요구사항을 만족시키는 솔루션을 조합하는 단계로 여기서 아키텍처란 시스템을 포함하는 환경 내에서 시스템의 각 요소들이 설계되고 진화되기 위한 기본적인 구조라고 할 수 있다. 우선, 시스템의 기능을 중심으로 논리적 아키텍처를 정의하고, 논리적 아키텍처를 바탕으로 시스템의 물리적 요소를 할당함으로써 물리적 아키텍처를 정의한다.

논리적 아키텍처 정의 [P3A1]

본 활동에서는 정의된 시스템 요구사항을 바탕으로, 시스템의 기능을 정의한다. 우선, 시스템의 최상위 수준의 기능을 정의하고, 이를 시스템 요구사항을 만족시킬 수 있는 수준의 세부 기능으로 분할한다. 분할된 기능들을 중심으로 각 기능의 입력과 출력을 정의함으로써, 기능들의 논리적 상호작용 및 흐름을 정의한다. 이러한 기능 분할 및 할당의 과정을 거치면서, 시스템 요구사항에 누락되었던 요구사항을 갱신하며, 시스템 요구사항과 정의된 기능간의 추적성 매트릭스를 수립함으로써 추적성을 확보해야 한다.

그림 6은 그림 4에 묘사된 정유 플랜트 CONOPs의 "Develop FEED Deliverables" 기능을 기능흐름블록선도 (enhanced Functional Flow Block Diagram; eFFBD)로 도식화 한 것이다. eFFBD는 기능의 흐름과 각 기능 간에 입력과 출력을 모델링하는 다이어그램이다 (Lightsey, 2001). Develop Deliverable 기능은 Licensor로부터 받은 공정흐름도(Process Flow Diagram; PFD), 열물질수지(Heat & Material Balance; H&M Balance)등 공정 설계와 관련된 산출물을 검토하고 확정하는 Check for Process Engineering 기능과 이러한 결과를 바탕으로 공정과 관련된 장치의 크기, 압력,



<Figure 6> eFFBD for "Develop FEED Deliverables" of CONOPs

온도, 레이아웃, 재질 등을 결정하는 Mechanical Systems Engineering 기능, 그리고, 설계와 관련된 각종 데이터 시트(Datasheet)를 계산하고 작성하는 Develop Datasheet Specification 기능, 플랜트의 초기 시운전(Start-up), 정상 시운전(Start-up), 정상 정지(Shut-down), 비상 정지(Shut-down) 등 각종 운영 상태에 따른 조치 방안과 공정의 운영에 필요한 각종 운영 파라미터 등을 작성하는 Operating Manual 기능, 마지막으로 도출된 산출물을 모두 모아 하나의 패키지로 구성하는 Develop FEED Package 기능으로 분해된다. 이러한 각 기능들은 하나의 시스템 요구사항에 할당될 수 있는 수준까지 분해된다.

물리적 아키텍처(수행조직 아키텍처) 정의 [P3A2]

본 활동에서는 앞서 정의한 논리적 아키텍처의 기능을 실제로 구현할 수 있는 물리적 시스템을 식별하고 정의한다. 우선, 논리적 아키텍처로부터 도출된 각 기능을 대상으로 기능을 구현할 수 있는 시스템 구성요소를 식별하고, 식별된 시스템 요소간의 물리적 인터페이스를 정의한다.

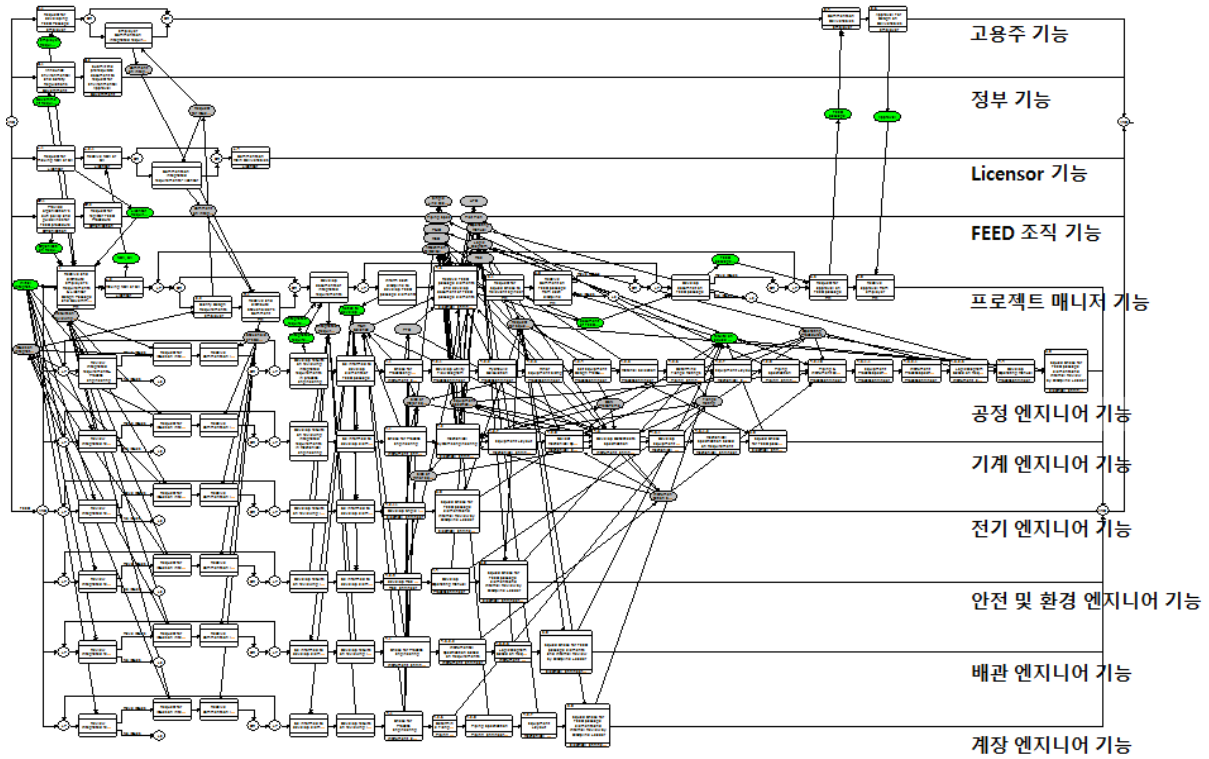
P3A1에서 정의된 논리적 아키텍처의 각 기능을 실제 수행할 수 있는 물리적 구성요소에 할당함으로써 물리적 아키텍처를 정의하였다. 대상 시스템인 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스는 물리적 시스템이 아니라, 설계 절차이기 때문에, FEED 수행 업무 프로세스를 구현하는 물리적 구성요소는 물리적 시스템이 아니라, 설계 절차를 수행하는 각 분야별 전문가 혹은 팀이 된다. 이러한 특성을 반영하여 논리적 아키텍처의 각 기능을 수행할 수 있는 물리적 구성원은 프로젝트 매니저, 공정 엔지니어, 기계 엔지니어, 전기 엔지니어, 계장 엔지니어, 배관 엔지니어, 안전 및 환경 엔지니어로 구성되었다. 다음으로, 논리적 아키텍처의 각 기능은 물리적 구성원에 할당함으로써 물리적 아키텍처를 정의하였다. 그림 7은 FEED 수행 업무 프로세스의 기능이 물리적 구성원에 할당된 아키텍처를 Enhanced FFBD (eFFBD) 형태로 보여준다.

4. 개발된 정유 플랜트 FEED 수행 업무 프로세스

앞에서 설명한 P1A1부터 P3A2까지 체계적인 절차를 통해 최종적으로 도출된 결과물은 이해관계자 리스트, 이해관계자 요구사항 집합, 시스템 요구사항 집합, RVTM, 논리적 아키텍처, 물리적 아키텍처 등이며, 이 중 논리적/물리적 아키텍처는 본 연구에서 최종적으로 개발하고자 하는 정유 플랜트의 FEED 수행 업무 프로세스와 같다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 개발된 FEED 수행 업무 프로세스는 프로젝트 매니저 기능, 공정 엔지니어 기능, 기계 엔지니어 기능, 전기 엔지니어 기능 등 8개의 분야별 엔지니어 기능으로 구성되며, 본 장에서는 이 중 정유 플랜트 설계에 가장 핵심적인 프로젝트 매니저 기능, 공정 엔지니어 기능, 기계 엔지니어 기능에 대하여 구체적으로 설명한다.

4.1 프로젝트 매니저 기능

정유 플랜트의 FEED 설계에서 프로젝트 매니저

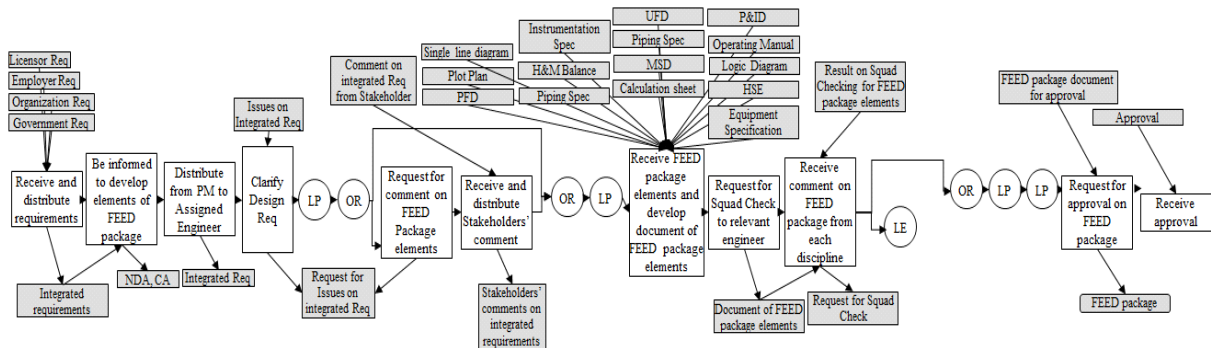


<Figure 7> Functions assigned to the physical elements

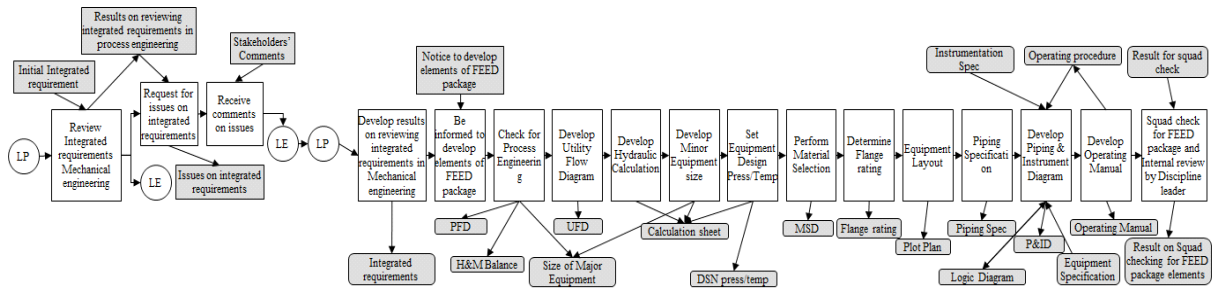
는 프로젝트의 전반적인 사항을 관리하고 최종 FEED Package의 개발 책임을 가지고 있다. 정유 플랜트의 FEED 설계가 제한된 시간과 비용 내에서 이해관계자들의 요구사항을 모두 만족하는 결과를 내기 위해 프로젝트 매니저는 체계적이고 효율적인 방법으로 프로젝트를 관리해야 한다.

프로젝트 매니저는 정유 플랜트의 FEED 업무 수행을 위해 고용주, 정부, Licensor, FEED 수행 조직으로부터 서면으로 작성된 계약서, 구두나 이메일로 주고받은 이메일 등 프로젝트와 관련된 상위 수준의 요구사항을 수집한다. 수집된 관련 요구

사항들은 프로젝트 매니저에 의해 엔지니어링 분야 별 검토를 위해 전달된다. 동시에 프로젝트 매니저는 기밀유지 협약 관련 문서를 작성하고 Licensor의 동의를 구한다. 각 엔지니어링 분야별 해당 요구사항에 대해 이해관계자로부터의 확인이 필요한 부분이 있을 경우 이슈사항을 접수 받고 내부 협의를 거쳐 이해관계자에게 해당 사항에 대한 확인 및 의견을 요청한다. 이슈사항 확인에 대한 반복적인 과정을 거친 후 최종적으로 요구사항을 확정하고 이를 각 엔지니어링 분야에 전달함과 동시에 FEED 설계 수행 공지를 배포한다.



<Figure 8> Functions of Project Manager



<Figure 9> Functions of Process Engineer

각 엔지니어링 부서에서는 확정된 요구사항을 바탕으로 FEED Package에 들어갈 구성요소들을 작성하게 되며, 엔지니어링 분야별 성과물 작성과정에서 타 분야의 설계에 대한 중요한 수정요청 사항 발생 시 프로젝트 매니저는 이에 대한 이슈사항을 접수하고, 관련 엔지니어들과 협의 후 전 엔지니어링 영역에 걸쳐 수정결과를 배포하고 이를 관리한다.

다음으로, 프로젝트 매니저는 작성된 FEED Package 구성요소를 이를 문서화하여 FEED Package 초안을 만들어 낸다. 이는 다시 각 엔지니어링 분야로 전달되어 분야별 검토(Squad Check) 과정을 거치고 오류나 수정사항 발생 시 프로젝트 매니저의 관리 하에 각 영역별 FEED Package 구성요소를 수정하는 과정을 거친다. 반복되는 수정 작업을 통해 Squad Check 결과 오류나 수정사항이 없을 경우 모든 자료를 통합하여 FEED Package를 작성한다. 최종적으로 완성된 FEED Package는 각 엔지니어링 영역별 부서장의 승인을 받고 FEED 조직의 승인을 거쳐 마지막으로 계약 사항에 따라 고용주의 최종승인을 받는다. 고용주의 최종 승인과 함께 정유 플랜트의 FEED 수행 업무는 종료된다.

프로젝트 매니저의 기능을 세부기능으로 구분하여 기능간의 역할과 입력물, 출력물을 정의하였다. 개발된 업무 절차를 통해 초기 요구사항에 대해 각 분야별 전문가들이 요구사항을 분석하고 이를 프로젝트 매니저가 관리하여 일괄 배포하는 과정을 통해 설계 시작 전 요구사항을 명확히 정의할 수 있다. 또한 분야별 설계과정에서 타 분야의 설계변경을 초래할 수 있는 사항들을 프로젝트 매니저가 수

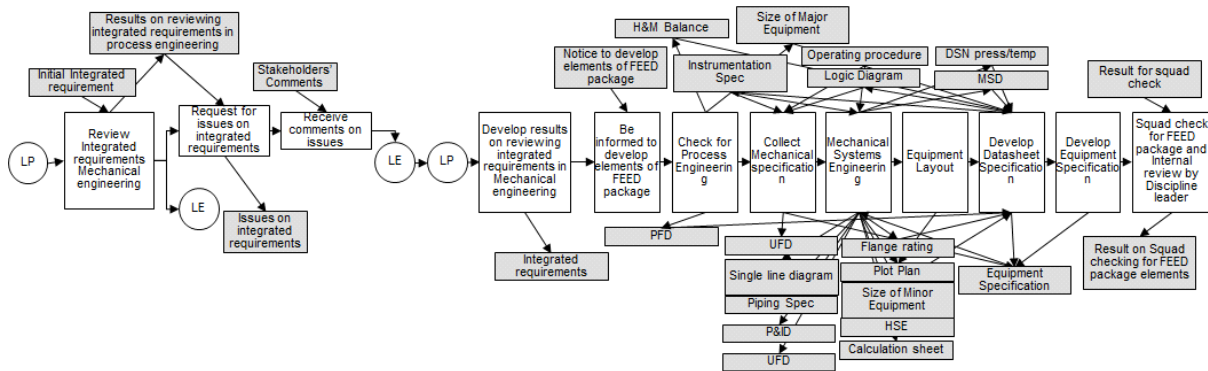
집하여 타 영역으로의 영향력을 분석하고 변경사항을 공지함으로써 여러 영역이 참여하여 복잡도가 증가할 수 있는 설계과정을 체계적으로 관리한다. 그림 8은 프로젝트 매니저 기능을 eFFBD로 표현하고 있다.

4.2 공정 엔지니어 기능

정유플랜트의 FEED Package 설계과정에서 공학 분야의 중심적인 역할을 수행하는 기능은 공정 엔지니어 기능이다. 원유를 상품화하기 위한 일련의 화학공정의 집합체인 정유 플랜트의 특성상 원유의 특성을 파악하여 최종제품의 품질기준에 맞는 화학공정을 개발하고 설계하는 공정 엔지니어링 기능이 중요하다.

공정 엔지니어는 프로젝트 매니저로부터 받은 초기 요구사항을 검토하고 이슈사항이 있을 경우 프로젝트 매니저에게 이슈사항을 알리고 해당 사항에 대한 의견을 받는다. 수립된 의견과 요구사항의 변경사항을 접수받으면 공정 엔지니어는 이에 대한 재검토를 수행하고 초기 요구사항에 반영하여 요구사항 문서를 작성 후 프로젝트 매니저에게 전달한다.

프로젝트 매니저로부터 최종 요구사항문서와 FEED 설계 수행 공지를 입력 받으면 공정 엔지니어는 FEED 설계를 시작한다. 우선, licensor로부터 제공되는 PFD를 검토하고 수정하고 초기 요구사항을 기초로 한 H&M Balance와 주기기 크기 (Size of Major Equipment)의 초안을 작성하고 한다. 이 세 가지 성과물은 기계 엔지니어, 배관 엔지니어, 계장 엔지니어에게 전달되어 각 분야별로 추가 보완 설계를 수행한다. 공정 엔지니어는 보완



<Figure 10> Functions of Mechanical Engineer

된 PFD와 H&M Balance를 토대로 유체해석 과정을 거친 Hydraulic Calculation, 장치의 Spec등을 포함하여 utility 정보들을 기반으로 한 유틸리티 흐름도(Utility Flow Diagram; UFD), 제어 밸브(control valve)가 잠길 경우 플랜트 프로젝트 경계(Battery Limit)에 부여되는 압력을 계산하기 위해 배관 크기와 길이를 고려하여 압력과 온도조건을 설계하는 DSN Press/Temp을 작성한다. DSN Press/Temp를 기반으로 압력과 온도로 인한 부식 인자들을 판별하여 재질선택도(material selection diagram; MSD)를 작성한다. 공정 엔지니어는 장치의 노즐을 연결할 때 연결 볼트(connection bolt) 역할을 하는 플랜지(flange)에 대한 설계 결과인 flange rating, plot plan, 배관 구입을 위해 piping class, line list 등을 포함한 piping specification은 기계 엔지니어가 초안을 구성하여 배관 엔지니어와 함께 설계하고, 중요 논리에 대한 정보를 포함한 논리 구조도(logic diagram)는 계장 엔지니어가 초안을 구성하여 기계 엔지니어와 함께 설계 한다. 공정 엔지니어는 설계된 결과물에 대해 공정 최적화 관점에서 검토한다. 운전 절차와 운전 상태(mode) 별 시나리오를 제공하고 설계 규격과 제품 규격이 일치하지 않는 경우 조작성이 가능한 내용을 포함하는 운전 교범(operation manual)은 안전 및 환경 엔지니어와 공정 엔지니어가 함께 설계한다. 공정배관계장도(Process and Instrumentation Diagram; P&ID)는 공정 엔지니어가 licensor가 제공하는 구조의 틀 안에서 상세부분을 채워 넣는 방법으로 작성한다. 그림 9은 공정 엔지니어링 기

능을 eFFBD로 표현하고 있다.

4.3 기계 엔지니어 기능

기계 엔지니어 기능은 공정 엔지니어 기능만큼이나 정유 플랜트에서 중요한 역할을 담당한다. 공정 엔지니어가 공정 설계를 포함하여 정유 플랜트 설계의 엔지니어링 부분에 대해 주도적으로 설계를 수행한다면 기계 엔지니어는 공정 설계가 실제 플랜트로 구현될 수 있도록 각 분야의 설계 내용에 대한 기계 설계 검토와 보안을 담당한다.

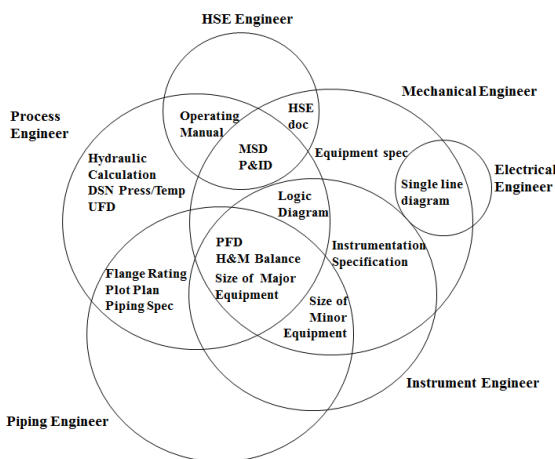
기계 엔지니어는 프로젝트 매니저로부터 받은 초기 요구사항에 대한 검토 후 이슈사항에 대해 의견을 받아 요구사항 문서를 작성한다. 프로젝트 매니저로부터 최종 요구사항 문서와 FEED 설계 수행 공지를 입력받으면 기계엔지니어의 FEED 설계를 시작한다.

기계 엔지니어는 공정 엔지니어가 수행한 PFD, H&M Balance를 토대로 size of major equipment를 결정한다. 다음으로 안전 및 환경 엔지니어와 공정 엔지니어로부터 운전 관련 자료를 입력받고 기계엔지니어와 계장 엔지니어가 수행한 계장 규격(instrumentation specification)을 입력 받아 기기 규격(equipment specification)을 작성하고 이는 설계 종료 시 까지 계속해서 보완된다. 기계 엔지니어는 equipment spec의 보완과 동시에 logic diagram와 P&ID에 대해 검토 및 보완한다. 또한 원유의 특성과 공정 엔지니어로부터 제공되는 촉매를 비롯한 화학물질에 대한 정보를 토대로 기계 엔지니어는 공정 엔지니어가 함께 MSD를 설계

한다. MSD의 설계와 함께 열교환기의 크기 등 보조기기의 크기(size of minor equipment)를 설계한다. 밸브의 크기(valve size)와 밸브 운전 시나리오(valve operation scenario)를 포함한 instrumentation specification은 계장 엔지니어가 초안을 작성하고 기계 엔지니어와 함께 설계한다. 기계 엔지니어는 안전 및 환경 엔지니어와 함께 Health, Safety, and Environment document (HSE document) 를 작성한다. HSE document에는 relief load, flare load를 결정하고 위험구역에 대한 분류와 각종 환경관련 인허가 내용이 포함된다. 그림 10은 기계 엔지니어링 기능을 eFFBD로 표현하고 있다.

4.4 부서별 업무 성과물 비교

도출된 FEED 수행 업무 프로세스의 분석 결과 정유 플랜트의 FEED 수행 업무는 공정 엔지니어, 기계 엔지니어, 계장 엔지니어, 배관 엔지니어, 안전 및 환경 엔지니어, 전기 엔지니어 기능으로 세분화할 수 있었다. 또한 그림 7을 통해 각 엔지니어링 분야로부터 도출할 수 있는 성과물들은 대부분 하나의 엔지니어링 분야로부터 도출되기 보다는 다분야의 엔지니어링 분야 간의 상호 유기적인 개발과정으로부터 도출됨을 확인할 수 있었다.(그림 11).



<Figure 11> Deliverables obtained from teamwork of various domain engineers

공정 엔지니어의 경우 Hydraulic Calculation, DSN Press/Temp, UFD는 독립적으로 개발하여 각 분야별로 다른 성과물을 작성하는 데 입력 자료로 배포하고 이를 제외한 operating manual, MSD, P&ID 등을 포함한 9개의 성과물은 각각 기계, 계장, 배관, 안전 및 환경 엔지니어와의 협업으로 성과물이 작성된다.

기계 엔지니어의 경우 equipment specification은 타 분야의 기술정보들을 취합하여 기계엔지니어가 작성하고 이를 제외한 10개의 성과물은 각각 타 분야의 공학엔지니어들과 협력하여 설계한다.

5. 결론

최근 우리나라의 주력 엔지니어링 사업 중 하나인 정유 플랜트 산업에서 국내 EPC 기업들은 과도한 사업 수주 경쟁, FEED 설계 결과 책임 부담 등 여러 한계에 직면하고 있으며, 이러한 한계를 극복하기 위해 자체적으로 FEED 단계를 수행할 수 있는 역량을 보유하기 위한 노력을 수행하고 있다.

본 연구에서는 국내 EPC 기업들의 FEED 단계 수행 역량을 보유하기 위한 하나의 방안으로, 정유 플랜트의 FEED 단계를 수행하기 위한 FEED 수행 업무 프로세스를 시스템 엔지니어링 방법론에 기반하여 체계적으로 개발하였다. 우선, 본 연구에서 제안된 시스템 엔지니어링 프로세스 절차에 따라, FEED 수행 업무 프로세스 개발과 관련된 이해관계자를 식별하고, 이해관계자 요구사항을 정의하였으며, 이를 만족할 수 있는 시스템 요구사항을 정의하였다. 다음으로, 시스템 요구사항을 만족시키는 기능을 중심으로 논리적 아키텍처를 정의하였으며, 논리적 아키텍처의 기능을 수행할 수 있는 물리적 구성원으로서의 할당을 통해 물리적 아키텍처를 정의하였다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 FEED 수행 업무 프로세스를 개발하였다.

개발된 FEED 수행 업무 프로세스의 유효성 검증을 위해 선진 FEED 엔지니어링에서 FEED 수행 경험이 있는 현장 전문가와 인터뷰를 수행하였으며, 개발된 수행 업무 프로세스가 일반적인 정유 플랜

트의 FEED 실제 수행 절차를 적절히 반영하고 있으며, 현업에서 유용하게 활용될 수 있을 잠재력을 인정받았다. 하지만, 개발된 FEED 수행 업무 프로세스가 실제 현업으로 적용되기 위해서는 현재 개발된 수행 업무 프로세스를 더욱 세분화 하여 최소 업무 단위 수준까지 개발할 필요가 있는 것으로 평가 되었다.

본 연구를 통해 개발된 FEED 수행 업무 프로세스는 현재 FEED 단계로의 진출을 계획하고 있으나, 아직까지 FEED 수행 업무 프로세스를 체계적으로 정립하지 못한 EPC 기업들에게 하나의 좋은 예시를 제시할 수 있을 것으로 기대한다. 한편, 본 연구팀은 동안 시스템 엔지니어링 기법이 다른 일반적인 물리적 시스템뿐만 아니라, 정유 플랜트 FEED 프로세스와 같은 새롭고 다분야적이며 복잡한 프로세스 시스템을 개발하는데 있어도 매우 효과적이라는 것을 파악할 수 있었다. 이러한 체계적인 적용 절차는 EPC 기업들이 자사의 FEED 수행 업무 프로세스를 개발하는데 있어 새로운 접근법으로 활용할 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 현장 전문가들과의 인터뷰를 통해 개발된 프로세스를 현업에서 적용할 수 있는 수준으로 구체화 할 계획이며, 장기적으로는 본 연구의 결과를 석유화학, 정밀화학 플랜트 등 일반적인 화학 플랜트에서 사용할 수 있도록 일반적인 프로세스를 개발할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부 주관 2014년 엔지니어링 전문인력양성사업 (과제번호 H2001-14-1001)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Han, D.-H. A Study on Knowledge Management of Procurement Phase for Oversea Plant Project through Business Analysis, KyungHee University, Master

- Thesis, 2012.
2. INCOSE. What is systems engineering, 2004, Retrieved July 31, 2013, from <http://incose.org/practice/whatisystemseng.aspx>
3. INCOSE, Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities, version 3.2.2, International Council on Systems Engineering (INCOSE), 2011.
4. ISO/IEC 15288, Systems and Software Engineering - System Life Cycle process, International Organization for Standardization, 2008.
5. ISO/IEC 26702, Systems engineering - Application and management of the systems engineering process, International Organization for Standardization (ISO), 2007.
6. Kang, M,-W., Offering Improvement Plans Through Analyzing Procurement Process of Overseas Plant Projects Process, KyungHee University, Master Thesis, 2008.
7. Lightsey, B., Systems engineering fundamentals, Defense Acquisition University Press, Fort Belvoir, VA, 2001.
8. Martin, J. N., Systems engineering guidebook: A process for developing systems and products, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.
9. MIL-STD-499B, Systems Engineering, U.S. Department of Defense, 1994.
10. PISTEP Consortium, Process Plant Engineering Activity Model (PPEAM), 1994.
11. Tak, H.-W., A Study on Process Modeling for Efficient Knowledge Management in LNG Plant Project, KyungHee University, Master Thesis, 2011.

12. Tak, H.-W., Won, S.-K., Hwang, K.-H., Han, C.-H., and Lee, J.-B., Development on Standard Process of Pre-construction phase for Overseas Plant projects, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, No.6, pp. 806~811, 2010.
13. Won, S.-K., Kang, M.-W., Lee, J.-B., Kim, S.-K., Han, C.-H., An Analysis of Procurement Processes for the Application of System Prototype of Overseas Plant Projects, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction No.2 Vol. 24, 2008.
14. Won, S.-K., Lee, J.-B., Han, C.-H., Analysis of Pre-construction Processes and Development of KMS Prototype of LNG Plant Projects, Journal of the Korea Institute of Building Construction No.6 Vol.9, 2009.
15. Yoo, H.-S., Lee, J.-H., Plant engineering and project management, Korea Institute of Plant Engineering and Construction, 2006.
16. Yoon, N.-R., A Study on Development of Framework for Knowledge Management System of Overseas LNG Plant Project, KyungHee University, Master Thesis, 2010.
17. Yoon, N.-R., Tak, H.-W., Won, S.-K., Han, C.-H., Lee, J.-B., Analysis of the Pre-construction Process for Overseas LNG Plant Projects, Korea Journal of Construction Engineering and Management, pp 666~671, 2009.