플랜트 FEED 설계를 위한 시스템엔지니어링 기술프로세스 적용방안 연구 - 환경플랜트 사례를 중심으로

기완욱¹⁾, 김준필¹⁾, 홍대근²⁾, 서석환²⁾

1) 포항공과대학교 산업경영공학과, 2) 포항공과대학교 엔지니어링대학원

A Study on Application of Systems Engineering Technical Process to FEED in Plant construction Industry - focused on a case of Environmental Plant

Wan Wook Ki,¹⁾ Jun Pil Kim¹⁾, Dae Geun Hong²⁾ Suk-Hwan Suh²⁾

1) Industrial and Management Engineering, POSTECH,

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

Abstract : With rapid growth of the world plant market, an increasing attention is paid on the plant engineering. Up to present time, Korean plant engineering technology has been concerned with the down stream part of the plant engineering, so called EPC, considered as a lower value chain compared with the up stream, composed of FEED(Front End Engineering Design) and PMC(Project Management Consultancy). In other words, a key issue for Korean plant industry is how to catch up the FEED technology, currently occupied by the advanced countries. In this paper, we propose an SE(Systems Engineering) approach, conventionally applied for aerospace and defense industry, to the FEED for plant engineering. Specifically, we proposed a new SE process composed of: 1) SPA matrix for reverse systems engineering, and 2) PPA matrix for forward systems engineering. To illustrate the proposed method, a case study for an environmental plant is performed.

Key Words : 시스템엔지니어링, SPA, PPA, 플랜트 엔지니어링, FEED, 환경플랜트

* Corresponding author : Suk-Hwan Shu, POSTECH, shs@postech.ac.kr

* 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.

1. 서 론

플랜트는 발전소나 정유공장과 같이 기계와 장치를 기술적으로 설치하여 생산자가 목적으로 하는 원료 또는 중간재, 최종 제품을 제조할 수 있는 생산설비를 일컫는다(유홍식과 이재현, 2009). 이러한 플랜트를 건설하는 것은 대규모이고 복잡하여 다양한 응용기술과 구성기계/자재 등을 통합하고, 체계화하여 플랜트 설계로부터 기자재 조달, 제작 및 건설을 조직적이고 체계적으로 수행하는 업무이다(Noble, 2009). 따라서 플랜트산업은 국내 기술산업의 고도화와 함께 해외 플랜트 건설시장에서 높은 부가가치 창출을 이루는 동시에 플랜트 건설에 소요되는 설비 및 기자재는 물론 이를 관리 및 시공하는 기술 인력수출이 가능한 우리경제의 새로운 성장 동력이라고 할 수 있다.

하지만 우리나라 해외건설·플랜트 수주는 외형상 양호한 모습을 보여 왔으나 향후 전망은 밝지 못하다(R&D정보센터, 2013). 저임금노동력을 위주로 한 단순공사의 해외건설수출은 한계성을 보이고 있고, 상품수출도 구각간의 무역장벽 또는 무역균형의 문제로 항상 무역 분쟁이 야기되며, 개발도상국과 저개발국가의 도전에 직면하고 있다. 이러한 상황에서 플랜트 엔지니어링은 고도의 종합 기술력을 바탕으로 하는 플랜트의 설계, 기자재공급 및 공사를 경제적이고 효율적으로 건설하는데 없어서는 안 될 중요한 부분이다.

플랜트 엔지니어링 산업에서 가장 중요한 기술분야는 설계분야이며, 이 부분은 선진국이 장악하고 있다(심현선 외, 2011). 설계분야는 고도의 기술력을 필요로 하는 부분으로 투입 자원 대비 프로젝트 예산 확보율이 높은 분야이다. 해외 선진국이 독점하고 있는 플랜트 FEED 기술에 대한 국내의 기술개발 수준은 아직 초기 단계이며, 이러한 현실을 감안할 때 향후 플랜트 건설 사업에서 경쟁력 강화를 위해서는 FEED 기술 업무 정의, 프로세스 규명 그리고 가이드라인 등이 체계적으로 정립되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 플랜트 건설 사업에서의 FEED 설계를 위한 시스템엔지니어링 적용 방안을 도출하고 이를 적용한 사례를 개발하고자 한다. 본 연구에서는 시스템엔지니어링 역공학 프로세스를 위한 SPA 매트릭스와 순공학 프로세스를 위한 PPA 매트릭스를 제안하였다. 그리고 제안된 방법을 통해서 환경플랜트를 대상으로 사례연구를 수행하였다. 사례연구를 통해서 환경플랜트 건설 사업에서 FEED 설계를 위한 시스템엔지니어링 기술적 접근 방안을 제안하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 서론에 이은 2장에서는 플랜트산업, 엔지니어링 프로세스 그리고 FEED에 대한 문헌연구를 수행한다. 3장에서는 플랜트 FEED 설계를 위한 시스템엔지니어링 기반의 연구방법을 제안한다. 4장에서는 제안된 연구방법을 환경플랜트에 적용하여 시스템엔지니어링 적용 방안을 도출한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 추후 연구에 대해서 서술한다.

2. 문헌연구

2.1 플랜트산업에서 엔지니어링의 중요성

프로세스 플랜트 건설 프로젝트의 특징은 한 마디로 인간이 필요로 하는 재화를 제작하는 공장을 만드는 것이다(유홍식과 이재현, 2009). 예를 들면 라면이나, 자동차를 생산하는 공장을 건설하는 것이다. 이러한 플랜트 건설은 항상 새로운 것을 창조하는 과정이며, 설계, 구매, 시공의 단계로 이어지는 일련의 과정이 유사한 플랜트라고 하여도 항상 새로운 문제와 상황이 발생하며, 이러한 문제에 대한 해결과 산출물을 만들어 내는 과정이 플랜트 건설 프로젝트의 본질이다.

세계적으로 플랜트 건설 산업은 설계, 구매, 건설 및 엔지니어링, 컨설팅, Financing 등 지식서비스는 물론 고도의 공학기술 및 관리기술을 필요로 하는 기술집약적 산업으로 분류된다(Noble, 2009). 이러한 플랜트산업은 국내 기술산업의 고도화와 함께 해외 플랜트 건설시장에서 높은 부가가치 창출

을 이루는 동시에 플랜트 건설에 소요되는 설비 및 기자재는 물론 이를 관리 및 시공하는 기술 인력수출이 가능한 새로운 수출주력 산업이라고 할 수 있다. 따라서 플랜트 건설산업은 우리 경제 발전에 핵심적인 성장엔진으로 축적한 제조 기술력과 교육열에 기반한 수준 높은 기술 인력에 따른 지식산업기반을 토대로 강력한 경쟁력을 발휘할 수 있기 때문에 제조업과 서비스 분야가 융합된 고부가가치 산업이라 할 수 있다.

현실적으로 한국의 해외 건설의 핵심은 시공능력에 있지 엔지니어링이 아니기 때문이다(KOTRA, 2010). 솔직히 말해 한국은 아직 건설 엔지니어링에 있어 선진국에 비해서 많이 뒤떨어진다. 한국은 선진국의 자금 및 엔지니어링 기술 경쟁력과 추격 국가의 코스트 경쟁력에 끼어 있는 상태이다. 이 상태를 극복하는 유일한 해결책은 전문 건설 즉, 엔지니어링분야로 진출하는 것이다. 플랜트 건설사업에서 엔지니어링은 고도의 기술력을 필요로 하는 부분으로 투입 자원 대비 프로젝트 예산 확보율이 높은 분야이다.

플랜트 건설업무 초기단계에서 설계를 변경하는 비용은 한창 건설이 진행 중일 때 변경하는 것 보다 상대적으로 적은 비용으로 다양한 설계 대안을 검토하고 분석하여 최적의 경제성과 효율성을 갖춘 설계를 확정할 수 있다(Helmus, 2008). 엔지니어링은 대규모의 비용이 소요되고, 수명기간이 장기간인 산업분야에서 초기에 최적의 개념을 수립하여 최적의 비용과 장기간에 걸친 플랜트 수명주기에 대한 안정적인 플랜트 운영을 위한 강력하고 확고한 대안을 제시할 수 있다. 따라서 플랜트 건설사업에서 엔지니어링 역량을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다.

2.2 엔지니어링 역량과 FEED의 관계성

엔지니어링, 엔지니어링산업, 엔지니어링서비스산업 등의 용어가 유사한 의미로 혼용되어 사용되고 있다. 엔지니어링 활동 및 업무 등의 엔지니어링 분야 전체 맥락을 포괄하기 위해 본 연구에서는 엔

지니어링 산업 관점에서 엔지니어링 용어를 정의하고자 한다. 엔지니어링은 과학기술의 지식을 응용하여 시설물을 설치할 때 이에 대한 계획수립과정에서부터 설계, 개발, 운영 및 유지 보수 등의 전 주기 과정에 걸쳐서 관련된 기술업무를 수행하는 것이다(산업정책연구원, 2008). 기본적으로 엔지니어링 프로세스 타당성조사, 개념설계, 기본설계, 상세설계, 구매, 시공을 통합하는 EPC 단계, 시운전 및 운영단계(O&M)와 플랜트 수명 이 다했을 때 플랜트를 철거하는 폐기단계로 구분할 수 있다.

엔지니어링 프로세스에서 FEED는 플랜트 엔지니어링 수명주기 동안에서 가장 전반부에 수행되어 계획 및 설계를 수행하는 업무이다(최항석 외, 2010). FEED는 일반적으로 화공 플랜트 또는 정유 플랜트 등의 플랜트 건설사업의 프로세스 개념을 개발하는 작업을 의미한다. 이러한 관점에서 FEED는 프로세스 플랜트 건설사업 초기에 플랜트 건설을 위한 기본적인 기획 및 설계 개념을 정립하여 실제 프로젝트 수행단계에서 발생하는 설계 변경을 최소화하여 건설비용을 최적화하고자 한다(최광호, 2009). 즉, FEED는 설계변경에 대한 비용이 상대적으로 낮은 시점인 사업초기단계에 확고한 프로젝트 기획과 설계를 포함하는 업무이다.

특히, 플랜트에 대한 FEED 설계기술은 대부분 미국, 유럽의 주요 글로벌 엔지니어링 기업들이 독점하고 있는 실정이다(R&D정보센터, 2013). 미국 및 유럽 국가들은 FEED 설계를 차세대 플랜트 산업을 선도할 핵심 기술 중의 하나로 선정하고, 기술 개발과 인력양성에 집중적인 투자를 하고 있다. 일례를 들면, 미국은 에너지성(DOE)이 주관하는 차세대 원자력 프로그램(Next Generation Nuclear Plant; NGNP) FEED 설계에 시스템엔지니어링의 요구사항 분석 및 추적 기법을 기반으로 NGNP 요구사항 매트릭스를 제안하여 활용하고 있다(Gorski et al., 2004). 또한, 영국은 무역 산업성(DTI)을 중심으로 Virtual Plant Demonstration Model(VPDM)을 개발하여 차세대 발전소 FEED 설계에 적용하고 있다(Chiocchio & Kuehn,

2008).

해외시장 주요 플랜트, SOC 등 턴키방식으로 발주되는 대형 프로젝트는 FEED 등 고부가가치 영역이 수주 경쟁력의 관건이나(최홍식, 2007), 원천기술은 해외 선진기업이 독점중이며 국내 기업은 상세설계 및 시공분야에 집중하고 있다. 특히, 국내 엔지니어링 제조공정기술에 대한 선호도가 낮은 상태이며, 기초설계 능력에 대한 현실이 선진국의 70% 수준으로 고부가가치 엔지니어링분야 진출이 어려운 실정이다(고은옥, 2011). 따라서 국내기업이 해외 건설·플랜트 분야에 있어 새로운 사업을 창출하기 위해서는 현재까지 국내기업이 상세설계 및 시공으로 얻은 설계기술과 경험을 기반으로 고부가가치 영역인 FEED 역량 확보가 시급히 요구된다.

2.3 플랜트 FEED 역량 강화에 SE 적용 가능성

시스템엔지니어링에 대한 정의를 살펴보면 다음과 같다. MIL-STD-499A(1994)에서는 시스템 엔지니어링을 운용요구사항을 시스템 성능사항과 원하는 시스템 성능으로 변환시키기 위한 각종 활동과 의견을 수립하는 하나의 논리적 프로세스라고 정의하였다. ANSI/EIA-632(1999)에서는 시스템 엔지니어링을 고객요구를 만족하는 사람, 제품 및 프로세스 해결책의 통합된 수명주기 균형시스템 개발과 검증을 위하여 필요한 모든 기술적 활동을 포함하는 다분야 학문과 관련 접근법으로 정의하고 있다. IEEE P1220(2005)에서는 시스템엔지니어링을 고객의 기대와 공공의 수용성을 만족시키는 수명주기 균형시스템 해결책을 도출하여 발전시키고 검증하는 다분야 학문과 관련된 공동연구 접근법으로 정의하고 있다. 따라서 본 연구에서는 시스템 엔지니어링은 복잡한 시스템을 개발함에 있어 고객의 요구를 만족시키는 시스템의 해결책을 제시하고 검증하기 위한 다분야 학문의 엔지니어링 접근법으로 규정한다(INCOSE, 2011).

시스템엔지니어링을 수행한다는 것은, 대상 시스템을 대상으로 불명확하고 복잡한 이해관계자 요구사항을 분석하여 개념단계부터 합리적인 방법을 통

해서 시스템 규격으로 개발하고 관리하기 위한 절차, 방법, 도구, 환경을 구체적 제시하고 이를 수행하는 것이다(INCOSE, 2011). 시스템엔지니어링을 적용할 경우, 개발 초기에 개부분의 설계변경이 이루어지므로 개발 후반부로 갈수록 변경이 줄어들게 되므로 프로젝트 비용, 일정이 크게 감소하는 효과를 얻을 수 있다. 특히, 미국 보잉의 767 대비 777 개발사례에서는 재작업률 50% 감소, 시험기간 60% 감소, 정비작업 비용 35% 절감, 운용비용 10% 절감이라는 시스템엔지니어링 적용효과를 분석하였다(방위사업청, 2007).

미국을 중심으로 선진국들은 우주/항공/방위/철도/자동차 분야의 시스템엔지니어링 적용수준은 매우 성숙되었으며, 점차 플랜트로의 적용도를 높여가고 있다. 2012년, 2013년 INCOSE 발표논문들을 분석해보면 플랜트 산업분야의 적용 사례는 찾기 어려우며, 'SE Infrastructure Working Group'을 중심으로 초기 단계의 논의 중이다. 아직까지 국방/항공/철도 등 국가사업 분야가 시스템엔지니어링 연구의 주된 토픽으로 다루어지고 있으며, 상업적인 분야로의 진출은 미흡한 실정이다. 하지만 선진국에서는 플랜트산업에서의 시스템엔지니어링의 적용가능성을 탐색하기 위해서 1990년대 후반부터 원자력 발전플랜트를 중심으로 적용을 시도하고 있다(Gorski et al., 2004; Chiochio & Kuehn, 2008).

반면에 국내의 경우에는 1990년대 T-50 고등훈련기 개발을 시작으로 시스템엔지니어링을 도입하였으며, 이후 한국형 우주발사체 개발, 한국형 고속열차 개발, 무인운전경량전철 개발과 같은 항공/우주/철도 분야로 점차 확대 적용되어가고 있다(방위사업청, 2007). 하지만 시스템엔지니어링 전 분야에서 선진국 대비 성숙도가 매우 낮은 수준이다. 더불어 화공, 발전, 해양 그리고 철강을 포함하는 산업플랜트 분야에서 아직까지 시스템엔지니어링에 관한 연구를 찾아보기 힘든 상황이다. 따라서 국내에서도 시스템엔지니어링과 플랜트산업, 시스템엔지니어링과 FEED에 대한 다양한 사례연구가 필요하다.

3. 연구체계

[그림 1] 플랜트 산업에서의 FEED에 대한 시스템엔지니어링 기술 프로세스 적용을 위한 연구 체계

본 단원에서는 플랜트 FEED 설계를 위한 시스템 엔지니어링 기술 프로세스 적용방안을 위한 연구 추진체계에 대해서 설명한다. 본 연구에서 제안하는 연구체계는 SE 접근방식 유형 분류, RSE (Reverse Systems Engineering) 프로세스, FSE

(Forward Systems Engineering) 프로세스 크게 세 가지로 구성되었다.

3.1 SE 접근방식 유형 분류

본 절에서는 문헌연구 및 시스템엔지니어링 프로젝트 유경험자와의 인터뷰를 바탕으로 시스템엔지니어링 접근방식 유형 분류를 수행하고자 한다. 첫째, 기존의 시스템엔지니어링을 통한 시스템 개발형태를 파악하기 위해서 시스템엔지니어링분야에서 대표적으로 사용되고 있는 ISO/IEC 15288, INCOSE Handbook v.3.2.2를 참고한다. 두 가지의 참고 문헌에서 제시하고 있는 시스템엔지니어링 시스템 개발 형태를 찾아본 뒤 이를 분석한다.

둘째, 참고 시스템 존재 여부를 파악하기 위해서 앞서 진행했던 문헌연구와 더불어 시스템엔지니어링 프로젝트 유경험자와의 인터뷰를 통해서 시스템 엔지니어링 참고 시스템 존재여부를 파악한다. 이러한 분석을 통해서 ‘시스템 개발 형태’와 ‘참고 시스템 존재 여부’를 두 축으로 하는 시스템엔지니어링 접근방식 유형 분류 매트릭스를 도출한다.

[그림 2] 시스템엔지니어링 접근방식 유형 분류 매트릭스

[그림 3] SPA 매트릭스

3.2 RSE 프로세스

본 절에서는 시스템엔지니어링 기술프로세스 중 기존의 설계 결과를 바탕으로 초기의 사용자 요구사항을 추측하는 RSE 프로세스 방법론을 개발하고자 한다. 첫째 RSE 프로세스의 흐름, 활동들과 입/출력물을 분석하여 매트릭스로 나타낸다. 앞선 진행된 문헌연구를 바탕으로 각 프로세스 별 활동들과 출력물을 분석 및 정리하여 SPA (Scenario-Process-Activity) 매트릭스를 개발한다. 둘째, SPA 매트릭스를 구성하는 시스템엔지니어링 기술 프로세스 주요활동을 산출한다. 앞서 진행된 문헌연구와 더불어 RSE, Re-Engineering 관련 문헌연구를 통하여 RSE 프로세스와 관계가 깊은 활동들을 도출하고 각 프로세스 별 주요 활동으로 분류한다.

3.3 FSE 프로세스

본 절에서는 시스템엔지니어링 기술프로세스 중 초기 이해관계자 요구사항을 바탕으로 타당성 분석,

개념 설계 그리고 기본 설계의 산출물을 도출하는 FSE 프로세스 방법론을 개발하고자 한다. 첫째, FSE 프로세스의 단계, 프로세스 그리고 활동들을 분석하여 매트릭스로 나타낸다. 본 연구에서는 기존의 문헌연구를 통해 도출된 일반적인 시스템엔지니어링 기술 프로세스의 전체 생명 주기와 각 단계별로 명시된 기술 활동들을 프로세스 별로 통합하여, 중복되는 부분을 삭제하여, 정제된 PPA (Phase-Process-Activity) 매트릭스를 개발한다. 둘째, PPA 매트릭스를 구성하는 시스템엔지니어링 기술 프로세스 주요활동을 산출한다. 앞서 진행된 문헌연구와 더불어 FSE 방법론 관련 문헌연구를 통하여 FSE 프로세스와 관계가 깊은 활동들을 도출하고 각 단계별, 프로세스 별 주요 활동으로 분류한다.

4. 사례연구

본 단원에서는 실제 현업 설계 사례를 바탕으로

Phase (P_i) Process (P_j)	타당성 분석 (Feasibility Study)	개념 설계 (Conceptual Design)	기본 설계 (Basic Design)	상세 설계 (Detailed Design)
	P_1	P_2	P_3	P_4
이해관계자 요구사항 정의 (StReq. Definition)	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 이해관계자 식별 A_2: 이해관계자 요구사항 추출 A_3: 제약사항 정의 A_4: 시나리오 작성 A_5: 효과성 척도 (MOEs) 수립 A_6: 이해관계자 요구사항 분석 A_7: 이해관계자 요구사항 수정 A_8: 이해관계자 요구사항 기록 A_9: Traceability Matrix 수립 및 유지 			
요구사항 분석 (Req. Analysis)	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 시스템 기능적 경계 정의 	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 시스템 요구사항 정의 A_2: 성능 척도 (MOPs) 수립 A_3: 시스템 요구사항 분석 A_4: 시스템 요구사항 수정 A_5: 시스템 요구사항 기록 A_6: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 하부시스템 요구사항 정의 A_2: 성능 척도 (MOPs) 수립 A_3: 하부시스템 요구사항 분석 A_4: 하부시스템 요구사항 수정 A_5: 하부시스템 요구사항 기록 A_6: 하부시스템 요구사항 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 컴포넌트 요구사항 정의 A_2: 성능 척도 (MOPs) 수립 A_3: 컴포넌트 요구사항 분석 A_4: 컴포넌트 요구사항 수정 A_5: 컴포넌트 요구사항 기록 A_6: Traceability Matrix 수립 및 유지
아키텍처 설계 (Arch. Design)	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 논리적 아키텍처 정의 A_2: 이해관계자 요구사항 분할 A_3: 인터페이스 및 상호작용 식별 	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 논리적 아키텍처 정의 A_2: 시스템 요구사항 분할 A_3: 인터페이스 및 상호작용 식별 A_4: 상용제품 (COTS) 요소 평가 A_5: 설계 대안 평가 A_6: 아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화 A_7: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 논리적 아키텍처 정의 A_2: 하부시스템 요구사항 분할 A_3: 인터페이스 및 상호작용 식별 A_4: 상용제품 (COTS) 요소 평가 A_5: 설계 대안 평가 A_6: 아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화 A_7: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A_1: 논리적 아키텍처 정의 A_2: 컴포넌트 요구사항 분할 A_3: 인터페이스 및 상호작용 식별 A_4: 상용제품 (COTS) 요소 평가 A_5: 설계 대안 평가 A_6: 아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화 A_7: Traceability Matrix 수립 및 유지

[그림 4] PPA 매트릭스

이전 단원에서 설명한 연구체계 방법론에 맞추어 사례연구를 수행한다. 본 단원에서는 참고 시스템인 ‘철강회사의 배수 중말 처리 설비’를 대상으로 RSE를 수행하고 그 결과를 활용하여 기존의 엔지니어링 설계 문제점을 개선하기 위해 FSE를 수행하는 과정을 설명한다.

4.1 문제 유형의 식별

본 절에서는 사례 분석을 위한 시스템엔지니어링 접근법을 선정한다. 3.1절에서 설명했던 바와 같이 다양한 문헌과 인터뷰를 통해서 도출된 시스템엔지니어링 접근방식 유형 중 본 연구에서 다루게 되는 사례연구는 기존 경험이 있는 시스템을 개선하는 개발 형태이므로 ‘Bottom Problem’ 유형이다. 컴포넌트 분석 규격서를 바탕으로 이해관계자 요구사항을 분석하고, 이를 토대로 새로운 시스템을 컴포넌트 레벨까지 구현한 뒤 검증하는 프로세스로 구성되어 있다.

[그림 5] Bottom-Up Problem 유형

4.2 사례 개요

본 사례의 개요는 아래 표에 나타나 있다. 위 사례 개요는 실제로 환경 플랜트 설계를 담당했던 전문가와의 인터뷰를 통해 도출되었다.

4.3 Reverse Systems Engineering Process

본 절에서는 기존 광양 3배수 중말 처리 설비의 설계 결과물을 이용하여 이해관계자 요구사항을 도출하는 과정을 설명한다. 사양서, 설명서, 도면, 구입사양서 등 각종 문서를 활용하여 기존 설계에서

의 정보를 추출하였다.

<표 1> 사례 개요

사례 개요	
시스템 명칭	배수 종말 처리 설비
시스템 용도	폐용수 처리 및 재활용수 생산
총 개발 기간	약 18개월
총 개발 비용	약 700억 (원)
일일 최대 처리용량	약 34,000t (Backwash 포함)
폐수 발생지 / 발생 물질	고로 공장 : 질소 성분(생물학적 처리 필요) 연주 공장 : 냉각수 용도로 인해 오염 물질 미비 (재활 용수로 사용)
시스템 정의	3배수 종말 처리 설비란 'P'사 공장에서 발생하는 오/폐수를 정화 및 재생하여 환경 오염을 줄이고 용수 생산성을 높이기 위해 설계된 환경 플랜트

[그림 6] 배수 종말 처리 설비의 폐수 수조 레이아웃

레이아웃 정보 및 계통도와 행위 순서 정보를 추적하고, 이를 바탕으로 운영 시나리오(Operation Scenario)를 작성하여 이하 10개의 프로세스를 거쳐서 각 프로세스 별 사용자 요구사항(User Requirements) 및 새로운 운영 시나리오를 작성함으로써 프로세스가 완료된다.

첫째, 설계 문서 분석 및 전문가 인터뷰를 통해 도출된 광양 3배수 종말 처리 설비의 일반적인 프로세스 시나리오는, '오/폐수를 수집하여 화학적 반응 처리 후 불순물의 응고, 침전, 퇴적 과정을 거친 후 다시 오/폐수를 수합한다. 그 위에 다시 Sand

Filter - Carbon Filter를 통해서 여과한 후에 최종 처리소로 운반된다.' 라고 정의할 수 있다.

전체 처리설비 계통

[그림 7] 배수 종말 처리 설비의 처리 계통도

둘째, 도출된 운영 시나리오를 바탕으로 프로세스 다이어그램(Process Diagram)을 작성한다. 프로세스 다이어그램 작성을 통해 도출된 주요 프로세스는 14개이다.

[그림 8] 초기 운영 시나리오 프로세스 다이어그램

셋째, 철강회사로부터 제공받은 구입사양서(Purchase Specification) 및 설계도면 내용을 참고하여 시스템 구조(System Structure)를 도출한다. 이와 같은 시스템 구조를 시스템엔지니어링에서는 '빌딩블록(Building Block)' 이라고 부르기도 한다.

[그림 9] 시스템 구조 (빌딩 블록)

넷째, 앞서 도출된 각 프로세스에 연관된 시스템 구성요소(System Elements)를 식별하고 할당한다. 이를 통해 각 프로세스를 실제 수행하는 시스템 구성요소에 할당함으로써 초기 운영 시나리오로부터 도출 가능한 사양 (Specification)의 범위를 파악할 수 있다.

[그림 10] 프로세스 6과 관련된 시스템 구성요소 확인 및 할당

다섯째, 14개의 프로세스들을 식별 및 할당한 후에 전체 프로세스 중 어떤 시스템 구성요소에도 할당되지 않는 프로세스가 있을 경우, 시스템 계층 구조(System Hierarchy)에 누락된 시스템 구성요소를 추가함으로써 시스템 계층구조와 도출 가능한 사양의 범위가 상호 보완적으로 수정된다.

여섯째, 철강회사로부터 제공받은 구입 사양서, 설계도면, 운전매뉴얼과 앞서 수행한 프로세스-시

스템 구성요소 할당(Process-System Elements Mapping) 결과를 활용하여 각 프로세스 별 기능 아키텍처(Functional Architecture)를 도출한다.

[그림 11] 프로세스 6의 기능 아키텍처

일곱째, 앞서 도출된 기능 아키텍처에서의 메커니즘 정보와 입/출력 정보를 활용하여 각 프로세스 별 물리 아키텍처(Physical Architecture)를 도출한다.

여덟째, 본 단계에서는 시스템 구조에서 레이어(Layer) 1 하부 시스템(Subsystem), 레이어 2 엔드 프로덕트(End Product), 레이어 2 하부시스템을 대상으로 수행한 RSE 결과와 레이어 1 & 2 하부 시스템 관련 각 공급업체들로부터 제공된 구매 사양서 및 자료를 바탕으로 레이어 1 하부 시스템, 레이어 2 엔드 프로덕트, 레이어 2 하부 시스템에

대한 사양을 도출한다.

[그림 12] 프로세스 6의 물리 아키텍처

[그림 13] 프로세스 1에 대한 사양 (레이어 1 & 2 하부 시스템)

앞서 도출된 레이어 1에 대한 사양을 레이어 0의 엔드 프로덕트(배수 종말 처리 설비)를 기준으로 그룹화하여 레이어 0의 사양을 도출한다.

분류	Layer 0 Specification	Layer 1 Specification
System Functional Specification	SR XXX. 광양 4배수 종말 처리설비는 전기 공급이 가능해야 한다.	SR XXX.XXX. Control System은 모든 시스템 구성품들이 대기 상태를 유지할 수 있도록 전기를 공급할 수 있어야 한다.
	SR XXX. 광양 4배수 종말 처리 설비는 신호 조작이 가능해야 한다.	SR XXX.XXX. Process System은 신호를 인식할 수 있어야 한다.
		SR XXX.XXX. Process System은 신호를 제어할 수 있어야 한다.
System Non-Functional Specification	SR XXX. 광양 4배수 종말 처리설비는 4초 이내로 신호에 응답할 수 있어야 한다.	SR XXX.XXX. Process System은 4초 이내로 신호에 응답할 수 있어야 한다.
	SR XXX. 광양 4배수 종말 처리설비는 전력을 정해진 규격대로 사용해야 한다.	SR XXX.XXX. Control System은 전력을 정해진 규격대로 사용해야 한다.

(예시) "Process 1. 작업지시를 기다린다 (대기 상태)"에 대한 Specification (Layer 0) 도출 결과

[그림 14] 프로세스 1의 사양 (레이어 0)

아홉째, 프로세스 #1 ~ 14에 걸쳐 앞서 수행한 절차를 반복하여 각 프로세스 별 레이어 0의 사양 도출을 완료하고 이를 통합하여 사용자 요구사항을 추측한다. 아래 표에서 나타나듯이, 요구사항 8, 9는 RSE 프로세스를 통해 새롭게 도출된 요구사항이다. 본 단계까지의 산출물을 바탕으로 전문가 인터뷰를 통해 새로운 요구사항을 도출하였다. 위 표에서 나타난 '공간 활용 최적화'와 '여과재 교체 사이클 기간의 증가'가 그것이다. FSE 프로세스에

서는 위 두 가지 요구사항을 중심으로 수행될 것이다. 물론 기존 시스템의 6가지 요구사항 역시 그대로 반영되어야 한다. 본 연구의 목적은 기존 시스템의 개선에 초점이 맞춰져 있으므로, 기능 요구사항에 있어서는 큰 변화가 없다. 다만 RSE 프로세스 산출물을 도출해내고, 이를 토대로 기존 설계 전문가들과 인터뷰를 통해 초기의 요구사항을 체계적으로 도출할 수 있으며, 기존 설계에서 개선되어야 할 요구사항도 함께 도출할 수 있었다.

<표 2> 도출된 요구사항

사용자 요구사항	정의
요구사항 1	시스템은 작업자의 조작에 의해 폐수를 이송할 수 있어야 한다.
요구사항 2	시스템은 작업자의 조작에 의해 폐수를 처리할 수 있어야 한다.
요구사항 3	시스템은 작업자의 의해 제어될 수 있어야 한다.
요구사항 4	작업자는 HMI를 통해 원하는 작업명령을 입력할 수 있어야 한다.
요구사항 5	시스템은 메인 서버를 통한 피드백이 가능해야 한다.
요구사항 6	작업자는 시스템을 모니터링 할 수 있어야 한다.
도출된 요구사항	정의
요구사항 8	공간 활용 최적화
요구사항 9	여과재 교체 사이클 기간 증가

마지막으로 새로운 운영 시나리오를 작성한다. 새로운 시나리오는 '작업자는 HMI 조작을 통해 4개의 PIT 펌프를 통해 수합된 오 / 폐수를 화학적 반응, 응결, 응집, 퇴적, 여과 과정을 통해서 처리할 수 있다. 작업자는 모든 시스템 구성품들의 상호 신호 조작이 가능하며, 신호 값 / 피드백(Feedback) 등은 메인서버(Main Server)를 통해 관리 / 제어할 수 있다. 처리 전 과정의 모니터링(Monitoring)이 가능하며, 이와 연동하여 모든 시스템 구성품들의 제어가 가능하다.'로 정의할 수 있다. 초기 운

영 시나리오보다 ‘시스템 구성품들의 정의’가 정확히 드러나 있으며, ‘기능의 전개’도 시간 순서대로 나타나 있다. 시스템의 요구사항이 ‘기능과 물리적 시스템 구성품으로 추적이 가능한’ 운영 시나리오라고 볼 수 있다.

앞서 진행된 RSE 프로세스에서 도출된 산출물을 FSE 프로세스 수행 시, 입력자료 또는 참고 자료로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 기존 시스템 개선이라는 명분에 맞게, 새롭게 도출된 두 가지 요구사항을 중심으로 FSE 프로세스를 수행한다.

4.3 Forward Systems Engineering Process

본 절에서는 문헌연구를 통해 도출된 FSE 프로세스를 바탕으로, RSE 프로세스를 통해 도출된 광양 3배수 중말 처리 설비의 요구사항과 새로 도출된 요구사항으로 광양 4배수 중말 처리 설비의 시스템 요구사항, 논리 아키텍처, 물리 아키텍처 등 주요 시스템엔지니어링 산출물을 도출한다. 3장에서 설명한 PPA 매트릭스 중 타당성 분석, 개념 설계 그리고 기본 설계 단계까지 수행한다.

Phase (P)	타당성 분석 (Feasibility Study)	개념 설계 (Conceptual Design)	기본 설계 (Basic Design)	상세 설계 (Detailed Design)
Process (P)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
이해관계자 요구사항 정의 (Stakeholder Requirements Definition)	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 이해관계자 식별 A₂: 이해관계자 요구사항 추출 A₃: 제약사항 정의 A₄: 시나리오 작성 A₅: 목표성 척도 (MOEs) 수립 A₆: 이해관계자 요구사항 분석 A₇: 이해관계자 요구사항 우선 A₈: 이해관계자 요구사항 기록 A₉: Traceability Matrix 수립 및 유지 			
요구사항 분석 (Req. Analysis)	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 시스템 기능적 경계 정의 	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 시스템 요구사항 정의 A₂: 성능 척도 (MOPs) 수립 A₃: 시스템 요구사항 분석 A₄: 시스템 요구사항 우선 A₅: 시스템 요구사항 기록 A₆: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 미분시스템 요구사항 정의 A₂: 성능 척도 (MOPs) 수립 A₃: 미분시스템 요구사항 분석 A₄: 미분시스템 요구사항 우선 A₅: 미분시스템 요구사항 기록 A₆: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 컴포넌트 요구사항 정의 A₂: 성능 척도 (MOPs) 수립 A₃: 컴포넌트 요구사항 분석 A₄: 컴포넌트 요구사항 우선 A₅: 컴포넌트 요구사항 기록 A₆: Traceability Matrix 수립 및 유지
아키텍처 설계 (Arch. Design)	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 논리적 아키텍처 정의 A₂: 이해관계자 요구사항 분할 A₃: 인터페이스 및 상호작용 식별 	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 논리적 아키텍처 정의 A₂: 시스템 요구사항 분할 A₃: 인터페이스 및 상호작용 식별 A₄: 상세레벨 (CDR) 요소 분기 A₅: 상세레벨 (CDR) 요소 평가 A₆: 상세레벨 평가 A₇: 아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화 A₈: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 논리적 아키텍처 정의 A₂: 시스템 요구사항 분할 A₃: 인터페이스 및 상호작용 식별 A₄: 상세레벨 (CDR) 요소 분기 A₅: 상세레벨 (CDR) 요소 평가 A₆: 상세레벨 평가 A₇: 아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화 A₈: Traceability Matrix 수립 및 유지 	<ul style="list-style-type: none"> A₁: 논리적 아키텍처 정의 A₂: 시스템 요구사항 분할 A₃: 인터페이스 및 상호작용 식별 A₄: 상세레벨 (CDR) 요소 분기 A₅: 상세레벨 (CDR) 요소 평가 A₆: 상세레벨 평가 A₇: 아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화 A₈: Traceability Matrix 수립 및 유지

[그림 15] 파워드 시스템엔지니어링 프로세스 (PPA 매트릭스)

시스템엔지니어링의 특성 상 생명 주기 전 영역에 필요한 세부적인 모든 사항을 도출해야 한다. 하지만 본 연구에서는 FSE 프로세스의 방법론에 대해서는 빠짐없이 제시하고, 사례 분석의 과정은 주요 활동 및 산출물 위주로 요약해서 나타낸다. RSE 프로세스를 통해 새로 도출된 두 개의 요구사항을

중점으로 FSE 프로세스를 수행한다. FSE 프로세스는 타당성 분석, 개념 설계, 기본 설계의 3가지 단계로 구성되어 있으며 각 단계별로 3가지 프로세스를 가진다. 이 프로세스는 이해관계자 요구사항 정의, 요구사항 분석 그리고 아키텍처 설계로 구성되어 있다.

4.3.1. 타당성 분석

<표 3> 타당성 분석 프로세스

타당성 분석 프로세스	
No.	하부 프로세스
1	이해관계자 식별
2	이해관계자 요구사항 추출
3	제약사항 정의
4	시나리오 작성
5	효과성 척도 (MOEs) 수립
6	이해관계자 요구사항 수정
7	이해관계자 요구사항 기록
8	추적 매트릭스(Traceability Matrix) 수립 및 유지
9	시스템 기능적 경계 정의
10	논리적 아키텍처 정의
11	이해관계자 요구사항 분할
12	인터페이스 및 상호작용 식별

첫째, 타당성 분석 단계에서는 이해관계자 식별 프로세스부터 시작하여 논리 아키텍처 정의, 인터페이스 및 상호작용 식별 산출물까지 도출한다.

앞서 광양 3배수 중말 처리 설비 RSE 프로세스에서 도출된 사용자 요구사항을 바탕으로 이해관계자 요구사항을 추출한다. 여러 이해관계자들의 요구사항 중에 운전자, 관리자, 공장장, PM의 요구사항을 일부 요약하여 나타나 있다.

시스템엔지니어링의 다양한 도구 가운데 요구사항 분석과 아키텍처 작성을 도와주는 'CORE 8.0'을 사용해서 요구사항 계층 구조를 추출한다. 이해관계자 요구사항 추출 결과를 바탕으로 배수 중말 처리 설비의 ‘공간 활용 최적화’와 ‘여과재 교체 사이클 기간 증가’ 시나리오를 작성한다. 시나리오 작성

과정에서 식별된 이슈들은 이해관계자 및 전문가와 검토하여 수정 및 보완한다.

Stakeholder	No.	Name	Description
설계자			
운전자(비)	1	패수 이송	시스템은 작업자의 조작에 의해 패수를 이송할 수 있어야 한다.
	2	패수 처리	시스템은 작업자의 조작에 의해 패수를 처리할 수 있어야 한다.
	3	작업자에 의한 제어	시스템은 작업자에 의해 제어될 수 있어야 한다.
	4	HMI 명령 입력	작업자는 HMI를 통해 원하는 작업 명령을 입력할 수 있어야 한다.
	5	Main Server를 통한 Feedback	시스템은 Main Server를 통한 Feedback이 가능해야 한다.
	6	시스템 모니터링	작업자는 시스템을 모니터링 할 수 있어야 한다.
관리자	7	공간 활용 최적화	관리자는 시스템의 공간을 최적으로 활용해야 한다.
	8	여과재 교체 사이클 기간 증가	여과재 교체 사이클 기간을 최대로 증가시켜야 한다. New User Requirements
공정장	9	기술교육 제공	프로젝트 종료 후, 광양 4배수 중량처리 설비에 대한 기술교육이 제공되어야 한다.
	10	기술자료 제공	프로젝트 종료 후, 광양 4배수 중량처리 설비에 대한 기술자료가 제공되어야 한다.
PM	11	개발기간	광양 4배수 중량처리 설비 개발 프로젝트 기간은 3개월 미만이어야 한다.
	12	개발비용	광양 4배수 중량처리 설비 개발 프로젝트 비용은 1억원 미만이어야 한다.

[그림 16] 이해관계자 요구사항

[그림 17] 이해관계자 요구사항 계층 구조 (CORE 8.0)

Project Name: 공간 배수 중량 처리 설비 개발 Scenario Title: 공간 활용 최적화 시나리오 Scenario Writer: JPCORE/CH GEM PME 전문연구실				
No.	Name	Description	Issue	
1	배수 수조 연동 조사	관리자는 현재 배수 중량처리 설비의 수조 시퀀스에 대해 기명한다.		
2	남비 공간 개선	관리자는 수조배치를 변경하는 남비 공간을 개선한다.		
3	최적 대안 도출	개선 필요성을 검토하고, 개선 사항에 따라 최적 대안 도출한다.	• 어떤 원리로 남비공간에 들어드는가? • 최적대안 도출 시 어떤 원리로 들어드는가?	
4	최적 설계	관리자는 최적 대안을 바탕으로 최적 설계를 수립한다.		
5	수조 제작	관리자는 배수 중량처리 설비의 수조를 제작한다.		
6	수조 운용	관리자는 배수 중량처리 설비의 수조를 운용한다.		

[그림 18] 공간 활용 최적화 및 여과재 교체 사이클 기간 증가 시나리오

No.	Name	Type	Description
...	...	...	...
1	패수 이송	Functional	시스템은 작업자의 조작에 의해 패수를 이송할 수 있어야 한다.
2	패수 처리	Functional	시스템은 작업자의 조작에 의해 패수를 처리할 수 있어야 한다.
3	작업자에 의한 제어	Functional	시스템은 작업자에 의해 제어될 수 있어야 한다.
4	HMI 명령 입력	Functional	작업자는 HMI를 통해 원하는 작업 명령을 입력할 수 있어야 한다.
5	Main Server를 통한 Feedback	Functional	시스템은 Main Server를 통한 Feedback이 가능해야 한다.
6	시스템 모니터링	Functional	작업자는 시스템을 모니터링 할 수 있어야 한다.
7	공간 활용 최적화	Constraints	관리자는 시스템의 공간을 최적으로 활용해야 한다.
7.1	수조 설계 타인	Constraints	설계자는 수조를 직사각형 형태로 설계해야 한다.
8.1	여과재 교체 사이클 기간 증가	Constraints	여과재 교체 사이클 기간을 최대로 증가시켜야 한다.
9	기술교육 제공	Constraints	프로젝트 종료 후, 광양 4배수 중량처리 설비에 대한 기술교육이 제공되어야 한다.
10	기술자료 제공	Constraints	프로젝트 종료 후, 광양 4배수 중량처리 설비에 대한 기술자료가 제공되어야 한다.
11	개발기간	Constraints	광양 4배수 중량처리 설비 개발 프로젝트 기간은 3개월 미만이어야 한다.
12	개발비용	Constraints	광양 4배수 중량처리 설비 개발 프로젝트 비용은 1억원 미만이어야 한다.
...	...	...	...
...	...	...	...

[그림 19] 수정된 이해관계자 요구사항

위 요구사항을 분석하기 위해 ‘6W2H 요구사항 평가 방법’을 사용한다 (ANSI/EIA-632).

- 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?

No.	누가	누에게	왜	언제	어디서	무엇을	어떻게	얼마나	종사	조종사	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준
	(Who)	(What2)	(why)	(when)	(where)	(what1)	(How)	(HowMuch)	(Verb)	(Aux. V)	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준	평가기준
7	관리자는	시스템의 공간을	최적으로				최적대로	최적	최적	최적	1	0	0	0	0	0	0	0	1
7.1	설계자는	수조를	직사각형 형태로				최적	최적	최적	최적	0	1	0	0	0	0	0	0	1
8	설계자는	여과재 교체 사이클 기간을	최대로				최적	최적	최적	최적	1	0	0	0	0	0	0	0	1
8.1	설계자는	여과재 교체 사이클 기간을	최대로				최적	최적	최적	최적	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(중간 생략)											0	0	0	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0

[그림 20] 이해관계자 요구사항 분석

3가지 요구사항에서 ‘명확성’, ‘정확성’ 평가 기준에서 오류가 있다고 판단되었다. 명확성이란 주어진 문장의 의미 분석 없이 바로 이해가 되는 정도를 의미한다. 정확성이란 요구사항 문장에 오류가 존재하면 안 된다는 기준이다. 이 외에도 13개의 요구사항 평가 기준이 존재하며 이를 ‘요구사항의 요구사항(Requirement of Requirements)’이라고 부른다. 오류 부분을 수정하여 이해관계자 요구사항을 업데이트한다.

최종 수정된 이해관계자 요구사항으로부터 시스템 컨텍스트(System Context)를 파악하였다. 시

스텝 컨텍스트란 대상 시스템과 외부 시스템 간의 인터페이스 관계를 나타내는 시스템엔지니어링 산출물이다. 이 또한 이해관계자 및 전문가의 검토를 통해서 도출한다.

No.	Name	Type	Description
1	폐수 이송	Functional	시스템은 작업자의 조작에 의해 폐수를 이송할 수 있어야 한다.
2	폐수 처리	Functional	시스템은 작업자의 조작에 의해 폐수를 처리할 수 있어야 한다.
3	작업자에 의한 제어	Functional	시스템은 작업자에 의해 제어될 수 있어야 한다.
4	HMI 명령 입력	Functional	작업자는 HMI를 통해 원하는 작업 명령을 입력할 수 있어야 한다.
5	Main Server를 통한 Feedback	Functional	시스템은 Main Server를 통한 Feedback이 가능해야 한다.
6	시스템 모니터링	Functional	작업자는 시스템을 모니터링 할 수 있어야 한다.
7	공간 활용 최적화	Constraints	관계자는 시스템의 공간을 사용시간이 없는 상태로 활용해야 한다.(수정완료)
7.1	수조 설계 타입	Constraints	설계자는 수조로 가도, 세로와 폭이 11.9인 직사각형 형태로 설계해야 한다.(수정완료)
8	여과제 교체 시간 주기 증가	Constraints	여과제 교체 시간 주기 증가를 기존 설계보다 3배이상 증가시켜야 한다.(수정완료)
8.1	PCR 처리 효율	Constraints	여과제 교체 시간 주기 증가를 기존 설계보다 3배이상 증가시켜야 한다.(수정완료)
9	기술 교육 제공	Constraints	프로젝트 종료 후, 광양 4배수 중합 처리 설비에 대한 기술교육이 제공되어야 한다.
10	기술 자료 제공	Constraints	프로젝트 종료 후, 광양 4배수 중합 처리 설비에 대한 기술자료가 제공되어야 한다.
11	개발 기간	Constraints	광양 4배수 중합 처리 설비 개발 프로젝트 기간은 3개월 미만이어야 한다.
12	개발 비용	Constraints	광양 4배수 중합 처리 설비 개발 프로젝트 비용은 1억원 미만이어야 한다.
			(중간 생략)

[그림 21] 분석 후 업데이트된 이해관계자 요구사항

[그림 22] 시스템 컨텍스트 다이어그램

각 기능 요구사항에 대응되는 기능 간의 순서와 개략적인 제어 구문 및 입/출력물을 표현하여 논리 아키텍처 (기능 아키텍처)를 정의한다.

[그림 23] 논리 아키텍처 (CORE 8.0)

논리 아키텍처를 바탕으로 각 기능 간 주고 받는 아이템(데이터, 물리적 자원)과 각 기능을 수행하는

시스템 요소에 대한 실질적인 상호작용을 식별하여 물리 아키텍처를 구성한다.

위 과정을 통해 타당성 분석 단계는 완료되었다. 이 외에도 부가적인 활동이 있으나, 본 연구에서는 필수적인 주요 활동들에 대해서만 사례에 적용하여 언급한다. RSE 프로세스를 통해 새로 도출된 2가지 요구사항은 제약 요구사항을 위 논리적 아키텍처에는 직접적으로 나타나지 않았다. 하지만 개념 설계 및 기본 설계에서 하부 시스템 요구사항을 추출하는 과정에서 반영되어 새로운 요구사항 업데이트 및 아키텍처에 반영될 것이다.

[그림 24] 물리 아키텍처 (CORE 8.0)

4.3.2. 개념 설계

둘째, 개념 설계 단계에서는 시스템 요구사항 정의부터 시작하여 논리적 아키텍처 및 물리적 아키텍처까지 정의하는 과정을 따른다.

앞서 타당성 분석 단계에서 도출된 이해관계자 요구사항 중 시스템 요구사항에 해당하는 부분을 식별한다. 기능 & 퍼포먼스 (Performance) 요구사항, 외부 인터페이스(External Interface) 요구사항 등이 있다. 이 식별된 범위에 해당되는 이해관계자 요구사항을 시스템 요구사항으로 변환한다.

이해관계자 요구사항에서 시스템 요구사항으로 변환된 과정을 살펴보면, '7.공간 활용 최적화'

요구사항의 ‘최대로’ 라는 표현이 ‘사공간이 없는 형태’로 수정되었으며, ‘7.1 수조 설계 타입’ 요구사항의 ‘직사각형 형태’는 ‘가로, 세로의 비율이 1:1.5인 직사각형 형태’로 수정되었다. 변환된 시스템 요구사항을 다시 시스템 수준으로 수정 / 세분화했다.

<표 4> 개념 설계 프로세스

No.	하부 프로세스
1	시스템 요구사항 정의
2	성능 척도 (MOPs) 수립
3	시스템 요구사항 분석
4	시스템 요구사항 수정
5	시스템 요구사항 기록
6	추적 매트릭스 수립 및 유지
7	논리적 아키텍처 정의
8	시스템 요구사항 분할
9	인터페이스 및 상호작용 식별
10	상용제품 (COTS) 요소 평가
11	설계 대안 평가
12	아키텍처 설계 결과 및 의사결정 결과 문서화
13	추적 매트릭스 수립 및 유지

분석된 시스템 요구사항을 토대로 시스템 수준의 논리적 아키텍처를 구성한다. 시스템 요구사항의 최하단 결과물(Leaf-node) 가운데 기능 요구사항 (Functional Requirement)들을 사용하여 논리 아키텍처 (기능 아키텍처)를 정의한다.

물리 아키텍처의 경우 다른 업데이트 사항이 없으므로 다음 단계인 기본 설계에서 추가된 2가지 요구사항을 반영한 뒤에 수정 / 보완된다.

[그림 27] 도출된 기능 요구사항

[그림 28] EFFBD (Enhanced Function Flow Diagram, CORE 8.0)를 이용한 기능 아키텍처

위 과정을 통해 개념 설계에 필요한 주요 프로세스를 완료하였다. 이와 같은 과정을 통해서 초기 이해관계자 요구사항에서부터 수정 / 보완된 시스템 요구사항까지 추적성을 확보할 수 있게 되었다. 각 기능들 간의 전개와 입/출력물도 시스템 레벨에 맞게 정의되었으며 시스템 요구사항의 각 레이어 별 추적이 가능하며, 확인 / 검증 요구사항을 이용하여, 요구사항이 제대로 구현되고 있는지 검토할 수 있는 체계도 갖추어졌다.

4.3.3. 기본 설계

셋째, 기본 설계 단계에서는 하부 시스템 요구사

[그림 25] 시스템 요구사항

[그림 26] 세분화된 시스템 요구사항

항 정의를 시작으로 논리적 아키텍처 정의 및 추적 매트릭스까지 정의하는 단계로 구성된다. 앞서 타당성 분석에서 새로 도출된 2가지 요구사항을 중점적으로 수행한다.

[그림 29] 추적성 매트릭스

앞 단계에서 도출된 시스템 요구사항을 하부 시스템 요구사항과 하부-하부 시스템 요구사항으로 변환한다.

[그림 30] 시스템 요구사항으로부터 도출된 하부 시스템 / 하부-하부 시스템 요구사항

하부 시스템 요구사항으로 변환된 제약 요구사항인 ‘공간 활용 최적화’는 4배수 종말 처리 설비의 상세 설계에 반영될 것이다. 기존 시스템인 3배수 종말 처리 설비 시스템의 문제점이었던 원형 구조의 구조적 설계를 시스템 엔지니어링 활동을 통해서 반영한 뒤 요구사항으로 추가된 것이다.

하부 시스템 요구사항과 하부-하부 시스템 요구사항을 분할한 후 이를 기존의 시스템 기능 아키텍처에 반영한다. 그 결과 ‘폐수 처리’라는 기능이 ‘PCF Filter 여과’와 ‘Carbon Filter 여과’로 분할되었으며, 이 두 기능 또한 하부-하부 기능으

로 분할되었다. 초기 타당성 분석에서 전문가 인터뷰를 통해 도출된 2가지 요구사항이 하부-하부 시스템 기능 아키텍처까지 반영되었으며 추적성 또한 확보되었다.

[그림 31] 시스템 기능 아키텍처에서 하부-하부 시스템 기능 아키텍처까지의 분할

시스템 기능 아키텍처에서 하부 시스템 기능 아키텍처로, 마지막으로 하부-하부 시스템 기능 아키텍처까지 분해되어 도출된 요구사항이 기능으로 반영되었다. 하부-하부 시스템 기능은 물리적 아키텍처로 할당된다. 이는 4배수 종말 처리 설비의 프로세스 시스템(Process System)에서 이전 3배수 시스템과 비교해서 업데이트된 사항만을 물리적 아키텍처로 반영하였다. 물리적 아키텍처 역시 시스템 물리 아키텍처에서 하부-하부 시스템 물리 아키텍처로 분해되었다.

[그림 32] 시스템 물리 아키텍처에서 하부-하부 시스템 물리 아키텍처로의 분할 프로세스

5. 결론

본 연구에서는 SPA 매트릭스를 활용한 RSE 프로세스를 적용하여 기존의 3배수 종말 처리설비의 요구사항과 운영 시나리오를 추출하였다. 이를 바탕으로 PPA 매트릭스를 활용하여 4배수 종말 처리설비를 위한 요구사항을 정제하고 이해관계자 요구사항과 시스템 요구사항, 하부 시스템 요구사항 간의 추적성을 확보하기 위한 RVTM을 도출하였다. 이를 바탕으로 시스템의 논리적 아키텍처와 물리적 아키텍처를 구현하였다.

기존의 시스템을 바탕으로 요구사항을 추출하고 이를 시작점으로 하여 이해관계자 요구사항, 시스템 요구사항 그리고 하부 시스템 요구사항으로 연결되는 추적성을 확보할 수 있었다. 이를 통해 시스템 문제 발생 시의 대응 방안을 체계적으로 접근할 수 있으며, 재설계 시 필요한 개선점을 명확히 파악할 수 있다. 실제 플랜트 업계에서 작성하는 도면, 설비 목록 그리고 공정 흐름도와 같은 FEED 결과물에 시스템엔지니어링 프로세스 활동들과 산출물들을 통합하여 요구사항에 좀 더 적합하고 신뢰성 있는 설계 결과물을 산출할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 사례 분석을 통해서 시스템엔지니어링 적용 방안을 제시하고 그 효과를 분석하는 것이다. 하지만 결과 분석에 있어서 시스템엔지니어링의 정량적인 효과에 대해서는 검증할 수가 없었다. 이는 시스템엔지니어링을 활용한 FEED 설계 방안이 마련되고, 설계 후 엔지니어링 업무까지 수행될 때 검증할 수 있을 것이다.

본 연구에서의 사례 분석을 수행하면서, 참고할 만한 플랜트 설계 가이드라인 및 운영 절차에 관한 연구가 거의 전무하다는 것을 알게 되었다. 따라서 시스템엔지니어링 프로세스를 적용하여 플랜트 사례를 작성함에 있어서, 초기 설계 기획 시에 많은 어려움이 있었다. 게다가 궁극적인 지향점인 FEED 설계를 염두에 두었을 때, 시스템엔지니어링 방법론에 맞추어서 사례 분석을 진행함과 동시에 그 산출물들을 어떤 식으로 FEED 산출물과 연결시켜서 현

업에서 반영하고 활용해야 하는 지에 대한 연구가 더 필요할 것이라고 생각하였다. 즉 플랜트 설계 시의 개념 설계와 기본 설계를 시스템엔지니어링 방법론을 통해 분석한 뒤 수행하였지만, 이를 제대로 도면화시켜서 현업에서 사용하기 위해서는 현업 전문가와의 협업과 설계 전문가들과의 업무 절차에 대한 논의가 필요할 것이라는 생각이 들었다.

마지막으로 본 연구를 종합하자면 플랜트 역량강화를 위해 타당성 분석, 개념 설계, 기본 설계 단계를 시스템엔지니어링 관점에서 수행하였다. 하지만 플랜트 산업에서 FEED 수행 시, 시스템엔지니어링의 구체적인 활용방안을 도출하기 위해서는 FEED 프로세스의 활동 및 산출물과 시스템엔지니어링 프로세스의 활동 및 사이의 연관성 규명이 필요하다. 따라서 FEED 활동 및 산출물 기반의 프로세스를 정립하여 시스템엔지니어링과의 상관관계를 구체적으로 분석하고 이를 통해 시스템엔지니어링 기반의 FEED 패키지 리포트에 들어갈 요소들을 정리하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

본 논문은 산업통상자원부가 주관하는 2013년 엔지니어링 전문인력양성사업(과제번호 : H2001-13-1001)을 지원받아 발표하는 논문입니다.

References

- [1] 고은옥, 플랜트엔지니어링분야 정부지원현황 분석 및 기술개발동향, The Plant Journal, 7권, 2호, p.3-9, 2011
- [2] 방위사업청, 시스템엔지니어링 가이드북 Version 1.0, 방위사업청, 2007
- [3] 산업정책연구원, 엔지니어링 국제경쟁력 강화방안 연구, 한국엔지니어링진흥협회, 2008
- [4] 심현선, 김영일, 정광섭, 국내 플랜트 엔지니어링 산업의 기계공학분야 기술인력 수급을 위한 대학교육 개선에 관한 연구, 설비공학

- 논문집, 제23호, 제11호, p741-746, 2011
- [5] 유홍석, 이재현, 플랜트 엔지니어링과 프로젝트 매니지먼트, 한국플랜트학회, 2009
- [6] 최광호, FEED 및 기본설계기술, 설비저널, 제38권, 제3호, p.51-58, 2009
- [7] 최항석, 김용진, 김석준, 최연석, 최병익, 최병일, 플랜트 FEED(front-End Engineering & Design) 설계 기반 구축, 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회 논문집, p.24-25, 2010
- [8] 최홍식, 세계 플랜트 EPC사업의 지속적 참여를 위한 한국의 준비, The Plant Journal, 3권, 2호, p.2-4, 2007
- [9] KOTRA(Korea Trade Investment Promotion Agency), 엔지니어링 해외진출 로드맵 수립, 한국엔지니어링협회, 2010
- [10] R&D정보센터, 플랜트/엔지니어링산업 시장동향과 기술개발전략, 지식산업정보원, p44-48, 2013
- [11] Ed Gorski, Dennis Harrel and Finis Southworth, A Project Management and Systems Engineering Structure for a Generation IV Very High Temperature Reactor, ICSE & INCOSE Joint 2004 Conference, Las Vegas, NV, U.S.A., Sep. 15-18, 2004
- [12] Electronic Industry Alliance (EIA), “ANSI/EIA 632, Process for engineering a system”, EIA, Arlington, VA, 1998
- [13] Frank P. Helmus, Process Plant Design - Project Management from Inquiry to Acceptance, Wiley-VCH, p13-48, 2008
- [14] IEEE Std 1220, Systems engineering - application and management of the systems engineering process, International Organization for Standardization, 2005
- [15] INCOSE SE Handbook Working Group, Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities v.3.2.2, INCOSE-TP-2003-002-03.2.2., 2011
- [16] MIL-STD-499B, Systems Engineering, U.S. Department of Defense, 1994.
- [17] Patick J. Noble, Process Plant Construction - A Handbook for Quality Management, Wiley&Blackwell, p1-10, 2009
- [18] S. Chiochio and I. Kuehn, Integrated Systems Engineering Approach to Manage the Installation and Start up of a fusion reactor, AIChE Annual Meeting, 2008.