

이산화탄소 포집 시스템 개념설계 개발을 위한 시스템 엔지니어링 기반 접근방법

이창환¹⁾ 홍대근¹⁾ 윤수철²⁾ 서석환¹⁾ 서활원¹⁾

1) 포항공과대학교 엔지니어링대학원, 2) 포항공과대학교 산업경영공학과

Systems Engineering-based Approach In Developing Concept Design Of Carbon Capture System

Chang Hwan Lee¹⁾ Dae Geun Hong¹⁾ Su Chul Yoon²⁾ Suk-Hwna Suh¹⁾ Hwal Won Sur¹⁾

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

2) Industrial Management and Engineering(IME)

Abstract : Plant industry is one of technology-intensive and most prosperous industries in Korea because of its recent prosperity and promising outlook in export. However, no Korean EPC company has yet been well prepared in lifting their capacity sufficient enough to get the upstream conceptual or basic design and engineering orders for sizable plant projects which are known as the more value-added. If systems engineering, a methodology which developed complex systems such as airplanes and has been justified its effectiveness in Defense and NASA projects, can be integrated with plant engineering which should be developed and applied based on the requirements of so many stakeholders, conditions, lifecycle concepts, and constraints of the projects, huge synergic effect is expected particularly in developing a specific upstream design, which is a conceptual or basic design. The notion of integration with each other between systems engineering and plant engineering can be really the crux of EPC' s success in any plant projects. This paper suggests an approach showing a methodology how to dig out, analyze, evaluate, verify and implement the stakeholders' requirements into a plant design in conceptual phase using the theory and skills of systems engineering. ISO/IEC 15288 well known systems engineering standards is used. Carbon capture system is used for a case study, for it is an emerging technology in reducing emissions of carbon dioxide causing global warming from flue gas after combustion. Here systems engineering was proven to play a substantial role in enhancing the capability of designers in developing a conceptual design of whole plant or certain part of crucial plant systems.

Key Words : plant engineering, carbon capture system, conceptual design, systems engineering, technical process, P-P-A(Phase-Process-Activity)

* Corresponding authour : 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. 서론

국내 산업에서 플랜트 산업은 큰 비중을 차지하고 있다. 국내의 플랜트 업계는 2012년 세계경기 침체 및 지역의 불안한 정세에도 불구하고 역대 최고를 기록한 '11년의 실적인 650억불에 육박한 648억불의 해외 수주를 기록하였다고 지식경제부는 발표하였다.¹ 한국플랜트산업협회의 분석에 따르면 세계플랜트 시장규모는 '09년의 9480억불에서 '15년에는 1조 1830억불에 달하며 지속적인 성장을 할 것으로 예측된다. 이와 같이 플랜트 산업은 자동차, 반도체, 전자기기 제조업과 더불어 향후 대한민국의 미래를 이끌 산업으로 각광받고 있다.

플랜트 산업이란 기계, 장비 등의 하드웨어와 이를 적절히 설치하기 위한 설계 및 엔지니어링 등의 소프트웨어 관련 기술, 그리고 건설시공, 유지보수 기술이 필요한 종합산업이다. 고도의 제작기술 뿐만 아니라 엔지니어링, 컨설팅, Financing 등의 지식서비스가 결합한 기술집약적인 산업으로서, 수출시 높은 부가가치를 창출하며 기자재와 인력 등도 수출이 가능한 차세대 수출 주력사업이다.² 따라서 2010년 4월 지식경제부(현재 산업통상자원부)는 '엔지니어링산업 발전방안' 을 수립하며 연구개발에 5년간 1조원을 투자하기로 하고, 핵심사업으로 포항공대 내에 엔지니어링전문대학원을 개설하는 등 '고급두뇌 역량 강화를 통한 산업고도화 전략' 으로 엔지니어링 전문인력 양성계획을 발표하였다.

하지만 대한민국의 플랜트 산업의 미래는 마냥 밝지 않다. 국내 업체의 해외플랜트 수주구조를 살펴보면, 부가가치가 낮은 상세설계 및 시공분야를 대부분 차지하고 있으며 부가가치가 높은 기획 및 개발, 기본설계 등 핵심 설계 영역의 수주는 미국과 유럽의 선진업체에 빼앗기고 있는 실정이다.² 또한 후발주자인 중국과 인도가 플랜트 산업에 진출함에 따라 가격 경쟁력에서 밀리면서 현재의 위치를 위협받고 있는 실정이다.

이렇듯 국내 플랜트 산업이 부가가치가 높은 핵심 설계 영역에서 약세를 보이는 이유는 핵심기술

이 부족하고 핵심 설계 영역을 선진국에 선점 당했기 때문이다. 따라서 정부에서는 앞에서 언급한 바와 같이 핵심기술 개발과 전문인력을 양성하기 위해 큰 지원을 하고 있다. 핵심 설계 영역에 진입하고자 하는 한국의 플랜트 업계가 항공 및 국방 영역의 핵심 설계부터 상세 설계까지 큰 역할을 하고 있는 설계 방법론인 시스템 엔지니어링이 접목된다면 선진국이 선점한 고부가가치 영역에 진입하는데 큰 힘이 될 것이다.

플랜트의 초기 설계에는 플랜트와 상호작용하는 외부 환경이 고려되어야 한다. 플랜트 구성요소 측면에서 보았을 때, 기계, 장비 등 하드웨어 뿐만 아니라 소프트웨어 측면이 모두 고려되어 개발되어야 하며, 경제적, 경영적 측면 또한 고려되어 설계되어야 한다. 이와 같이 플랜트는 다양한 이해관계자들이 얽혀 있으며, 다양한 기능적 요구사항 및 제약사항이 산재해 있고, 또한 다양한 계층으로 구성된 물리적 구조와 기능적 구조를 가지고 있다. 이러한 복잡한 시스템은 이해관계자의 요구사항의 상충분석 등을 거쳐 체계적으로 시스템의 규격에 반영하고 설계 전 과정에 걸쳐 형상관리를 하는 시스템 엔지니어링을 통해 개발될 때, 초기 요구사항을 만족시키며 보다 적은 비용과 단축된 일정으로 결함이 없는 성공적인 설계가 이루어 질 수 있다.

본 논문에서는 플랜트 산업에서 시스템 엔지니어링의 접목 가능성을 알아보는 것을 목표로 한다. 이를 위해 플랜트 산업의 개념설계에 적합한 프로세스를 선정하였다. 그리고 현재 온실가스 감축의 수단으로 각광받고 있는 이산화탄소 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 시스템 중 이산화탄소를 포집하는 탄소포집시스템의 개념 설계를 선정된 시스템엔지니어링 프로세스를 이용하여 진행한 결과를 바탕으로 플랜트 산업에의 시스템엔지니어링의 접목가능성을 확인해보겠다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 서론에 이은 2장 문헌연구에서는 탄소포집 및 저장기술과 시스템엔지니어링에 대한 이론적 배경 및 기존 연구의 특성

에 관해 논의하고, 3장에서는 시스템엔지니어링 기술프로세스를 기반으로 한 연구프레임워크를 제안한다. 4장에서는 제안된 연구프레임워크를 탄소포집시스템에 적용하였다. 대상시스템에 시스템엔지니어링 기술프로세스를 적용하기 위해서 Vitech Core 8.0과 Microsoft Excel 2013 소프트웨어를 사용하였다.

2. 문헌연구

2.1 플랜트 산업의 소개 및 중요성

플랜트산업은 설계, 구매, 건설 및 엔지니어링, 컨설팅, 파이낸싱 등 지식서비스는 물론 고도의 공학 기술 및 관리기술을 필요로 하는 기술집약적 산업으로 분류된다.³ 또한 플랜트 산업은 건설하고자 하는 대상 플랜트의 종류 및 특징과 프로젝트를 추진하는 장소적 요건과(나라마다 다른 건설관련 법적 요건 등), 플랜트 건설위치의 자연적 환경 및 이를 추진하는 기업에 따라 항상 새로운 환경이 조성되고, 이를 추진하는 과정에서 발생하는 문제의 지속적인 해결과정이 플랜트 건설 주요업무이다.

이러한 플랜트산업은 여타 산업과 달리 일관적 프로젝트 형태를 가지며 지식서비스 중심의 복합적인 산업으로 세부적인 특징은 다음과 같다.^{4,5} 첫째, 기술적 관점에서 플랜트산업은 기술집약적 종합건설 능력이 요구되는 고도의 지식 산업으로서 다양한 도메인의 복합 기술이 필요하다. 둘째, 시간적 관점에서 플랜트산업은 규모가 크기 때문에 건설기간이 장기간 소요 (보통 2~3년 이상)되고, 대규모 장치 산업으로 장기간의 수명주기(Life Cycle)를 가진다. 셋째, 경제적 관점에서 플랜트산업은 건설 규모가 크고 기간이 길기 때문에 대규모 투자비용 필요하다. 하지만 이러한 대규모 투자비용으로 인해서 고용확대, 기술발전, 관련 산업발전, 지역 경제개발 등 경제 파급효과가 매우 크다. 넷째, 복잡한 이해관계자 관점에서 플랜트 산업은 단일 플랜트 건설에 다수의 기업, 다수의 인력, 지리적/문화적/언어적으로 분산된 조직이 공동으로 참여 및 수행한다.

미국, 프랑스, 스페인 등을 포함하는 플랜트산업 세계시장의 상위 10개국에 전 세계 플랜트 시장의 90%를 차지하고 있을 정도로 소수 선진국의 시장 지배력이 강한 실정이다.⁶ 우리나라는 내수 시장 규모가 큰 중국, 인도와 함께 최근 수년간 선진 경쟁국을 꾸준히 추격하여 세계 플랜트 시장점유율을 2005년 2.5%에서 2011년 7.8%로 확대하였다.⁷ 특히, 국내기업의 해외 플랜트 수주는 2003년 64억 달러에서 2011년 650억 달러를 기록하였다.⁷ 국내 플랜트 산업은 세계 경기 변동에 따른 영향을 많이 받지만 정유플랜트, 석유화학플랜트, 담수플랜트에서 높은 세계시장 경쟁력을 가지고 있다.⁸

2.2 플랜트에서 탄소포집 및 저장기술

오늘날 기업활동의 환경적 책임에 관한 이슈가 전 세계적으로 확산되고 있다. 환경에 대한 경각심은 이 상기후가 가속화됨에 따라 더욱 커지고 있으며, 환경 오염 유발 요인 중 특히 온실효과를 유발하는 온실가스에 대한 국제적 규율이 점점 많아지고 있다. 국제기후 변화 협약 가입에 따른 온실가스 저감 목표 할당제 및 벌금제가 도입되고 있으며, 연구기관 및 기업에서는 온실가스 감축을 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.⁹ 온실가스 감축을 위한 연구 중에서 산업공정으로 인해 다량으로 배출되는 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 감축 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 그러나 이산화탄소의 감축, 저감 기술을 실질적으로 산업에 적용하기 위해서는 오랜 시간에 걸친 신기술 및 새로운 시스템의 개발이 필요하다. 이에 따라 현 단계에서는 산업공정에서 발생하는 이산화탄소를 안전하게 수집하고 저장하기 위한 기술인 Carbon Capture and Storage(CCS)가 현실적인 대안으로서 주목을 받고 있다.¹⁰

탄소포집기술과 관련된 연구로는 주로 탄소포집에 사용되는 핵심물질 개발에 관한 연구가 수행되고 있다. 가톨릭대학교 환경공학과에서는 이산화탄소 포집 및 저장 기술을 분류 및 단기, 중기, 장기적 측면에서 평가하였다. 해당 연구에서는 CCS 기술을 크게 연소 후 기술, 연소 전 기술 및 순산소 기술

로 나뉘었으며, 이 중 연소 후 기술은 다시 아민계 흡수제를 이용한 화학흡수법, 물리흡수법, 건식 흡수법, 흡착법, 막분리법, 심냉법으로 분류하였다. 또한 단기적인 방법으로 아민을 이용한 화학흡수법, 장기적인 방법으로 자열개질반응(ATR, Autothermal Reforming) 혹은 MSR-H₂(Methane steam reformer with hydrogen separation membrane reactor)가 장착된 연소 전 기술 및 SOFT+GT(Solid oxide fuel cell-Gas turbine) 순산소 기술을 적용할 것을 제안하였다.¹¹ 이 많은 탄소 포집 방법 중 경제성과 상용화를 고려할 때 가장 널리 사용되는 것은 아민계 흡수제를 이용한 연소 후 방식이다.

아민계 흡수제를 이용한 이산화탄소 포집 공정은 기술적으로 상용화 단계에 들어서 있으나, 에너지 소모가 많다는 개선의 여지를 남기고 있다. 이를 극복하기 위해 서울대학교 화학생물공학부에서는 배가스 일부를 분할 유입하여 흡수탑의 효율을 높이는 개선 공정을 개발하였으며,¹² 공주대학교 화학공학부에서는 상전이 실험을 통해 이산화탄소 포집공정의 재생에너지 절감 방안을 제기하였다.¹³

한편 포집된 산소를 저장하는 기술에 대한 다양한 이슈가 제기되고 있는데, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서는 국내 CCS 기술의 역량을 강화하기 위해서는 정부 차원의 CCS 연구개발 지원 및 법·제도적 규제 프레임워크를 개발할 것과 안전성과 환경영향 최소화를 확보하기 위한 체계적 관리 체계를 구축할 것을 제안하였다. 또한, 국내 실용화 촉진, 보급 및 확산을 위한 재정적 지원 방안 마련의 필요성을 제기하였다.¹⁴

2.3 시스템엔지니어링

시스템엔지니어링(Systems Engineering, SE)은 복잡한 시스템을 개발함에 있어 고객의 요구를 만족시키는 시스템의 솔루션을 도출하고 검증하기 위한 다분야 학문의 엔지니어링 접근방법이다. 시스템엔지니어링은 1950년대부터 우주, 국방, 항공 산업 등 복잡하고 새로운 시스템을 다루는 분야에서 주로 적용되어 왔다. 최근에는 시스템엔지니어링의 효과가 인

식됨에 따라, 철도, 자동차, 전자, 건설 산업 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. International Council on Systems Engineering (INCOSE)은 시스템엔지니어링을 다음과 같이 정의하고 있다. “시스템엔지니어링란 학제간 접근법이며, 성공적인 시스템의 실현을 가능하도록 한다. 시스템엔지니어링은 개발 주기 초기에 고객의 필요와 요구되는 기능성들을 정의하는 것에 초점을 맞춘다. 이를 위해 운용, 가격, 일정, 성능, 교육과 지원, 시험, 처리, 제조 등과 같은 전체를 포괄하는 문제를 고려하며 요구사항 문서화, 설계 조합 진행, 시스템 검증 등의 활동들을 진행한다.”¹⁵ 시스템엔지니어링은 부품 추적성, 재료 및 공정제어, 변경통제, 제품책임성, 공식적인 인터페이스 통제 등을 가능하게 함으로써 보다 높은 시스템 신뢰성을 확보할 수 있게 하였다.¹⁶

시스템엔지니어링은 1950년대부터 공학이라는 학문으로 발전하며 국방 분야에서 먼저 사용되었다. 1950년대 이후 공학보잉, 록히드, 록웰과 같은 미국의 방위산업체들은 유용한 시스템엔지니어링 도구와 기법들을 개발하고 적용하며 과거에 비해 보다 성공적으로 프로젝트를 완료하였다.¹⁶ 이로 인해 미 국방성은 2003년부터 모든 획득 프로그램에 대해 시스템엔지니어링의 의무적으로 적용하도록 규정했다.¹⁷ 이와 같이 국방영역에서는 시스템 엔지니어링이 활발하게 적용되고 있다.

국방과 우주 영역에서 주로 사용되던 시스템 엔지니어링은 점차 민간영역으로도 서서히 접목되고 있다. K-100으로 명명된 민간항공기의 개발에도 시스템엔지니어링이 접목되었고,¹⁸ 경량전철의 개발에도 시스템엔지니어링 프로세스를 이용해서 개발이 이루어졌다.¹⁹ 이외에도 소프트웨어 개발, 원자력 발전 영역에서 시스템엔지니어링은 점차 중요한 역할을 차지하고 있다.

시스템엔지니어링을 다루고 있는 국제표준과 관련된 자료는 많이 존재하지만, 그 중 가장 범용적으로 사용 가능하도록 제정된 것은 ISO/IEC 15288 국제표준이다. ISO/IEC 15288 국제표준은 협약 프로세스, 프로젝트 지원조직 프로세스, 프로젝트 프

로세스, 기술 프로세스 총 4개의 핵심 프로세스들로 구성된다. 본 연구에서는 이 중 이해관계자의 요구사항을 만족하기 위한 시스템 개발을 하는데 있어 기술적인 측면에서 수행하는 기술 프로세스를 중심으로 활용하고자 한다.

3. 개념설계를 위한 시스템엔지니어링 기술프로세스 프레임워크

3.1 생명주기 단계별 시스템엔지니어링 프로세스

시스템의 생명주기란 ‘요람에서 무덤’ 까지 시스템의 전체 수명을 시간에 따라 나누어 놓은 것을 의미한다. 생명주기를 고려하여 분야에 따라 다양하게 적용할 필요가 있다. 이러한 생명주기마다 기술 프로세스가 순환적으로 적용되어야 한다. 순환 반복될 때 중심적인 역할을 하는 프로세스는 매 단계마다

다 다르다. 이에 대한 내용은 아래의 그림 1에 상세하게 설명되어 있다.

3.2 개념설계를 위한 시스템엔지니어링 기술프로세스 범위 설정

시스템 규격서를 정의하는 개념 설계의 경우, 시스템엔지니어링의 생명주기 중 개념단계와 초기의 개발단계에서 수행되어야 한다. 이 단계에서는 시스템과 관련된 적절한 이해관계자의 요구사항을 추출해야 하고, 이 요구사항들이 경제성, 운용성, 그리고 기술적 구현가능성을 고려하여 시스템의 규격에 반영되도록 해야 한다. 따라서 개념 설계에서 필요한 기술 프로세스는 이해관계자 요구사항 정의 프로세스, 요구사항 분석 프로세스, 아키텍처 설계 프로세스이다. 따라서 본 연구에서는 이 세 가지 프로세스를 기술설계 프레임워크로 선정하였다.

Lifecycle Stages	Concept	Development	Production	Utilization	Retirement
				Support	
목적	이해관계자 요구사항을 바탕으로 시스템 개념 제안 → System Concept	시스템 요구사항을 정의하고 각 시스템 계층 별 규격 개발 → All Specifications	생산 과정에서 추가 식별되는 각 시스템 계층 별 규격에 대한 수정/보완 → Updated Specifications	운용 및 지원 과정에서 추가 식별되는 각 시스템 계층 별 규격에 대한 수정/보완 → Updated Specifications	이해관계자 요구사항 (환경, 안전 등)에 따라 시스템 해체 및 폐기를 제거, 향후 시스템 개발을 위한 규격 수정/보완 → Updated Specifications
프로세스	협약 프로세스	협약프로세스	협약 프로세스	협약 프로세스	협약프로세스
	조직의 프로젝트 지원 프로세스	조직의 프로젝트 지원 프로세스	조직의 프로젝트 지원 프로세스	조직의 프로젝트 지원 프로세스	조직의 프로젝트 지원 프로세스
	프로젝트 프로세스	프로젝트 프로세스	프로젝트 프로세스	프로젝트 프로세스	프로젝트 프로세스
	기술 프로세스 • 이해관계자 요구사항 정의 프로세스 • 요구사항 분석 프로세스 • 아키텍처 설계 프로세스	기술 프로세스 • 이해관계자 요구사항 정의 프로세스 • 요구사항 분석 프로세스 • 아키텍처 설계 프로세스 • 구현 프로세스 • 통합 프로세스 • 검증 프로세스 • 확인 프로세스	기술 프로세스 • 이해관계자 요구사항 정의 프로세스 • 요구사항 분석 프로세스 • 아키텍처 설계 프로세스 • 구현 프로세스 • 통합 프로세스 • 검증 프로세스 • 확인 프로세스	기술 프로세스 • 이해관계자 요구사항 정의 프로세스 • 요구사항 분석 프로세스 • 아키텍처 설계 프로세스 • 구현 프로세스 • 통합 프로세스 • 검증 프로세스 • 확인 프로세스 • 배치 프로세스 • 운용 프로세스 • 유지보수 프로세스	기술 프로세스 • 이해관계자 요구사항 정의 프로세스 • 요구사항 분석 프로세스 • 아키텍처 설계 프로세스 • 폐기 프로세스

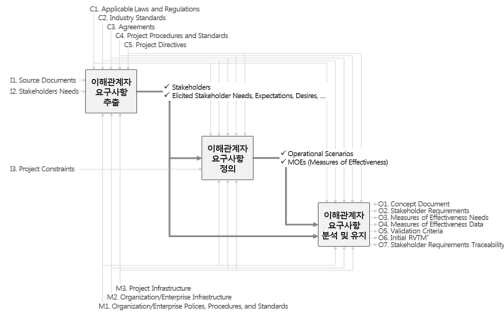
[Fig. 1] Phase-Process-Activity processes based on System Lifecycle.

3.3 개념설계를 위한 시스템엔지니어링 기술설계 프레임워크

3.3.1 이해관계자 요구사항 정의 프로세스

본 프로세스는 이해관계자 요구사항을 정의하는 것을 목적으로 한다. 이해관계자 요구사항을 정의하기 위해 시스템과 그 시스템의 생명주기에 관계하는

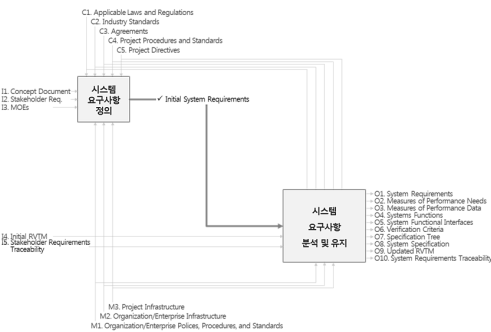
이해관계자들을 식별해야 하고 이들로부터 필요사항들을 추출한다. 추출된 이해관계자 요구사항들은 적정성을 분석하고, 외부환경과의 관계가 적절하도록 변환된다. 본 프로세스를 구성하는 활동들을 표현한 ICOM은 Fig 2]와 같으며, 이해관계자 요구사항 추출, 이해관계자 요구사항 정의 그리고 이해관계자 요구사항 분석 및 유지 세 가지 활동으로 구성된다.



[Fig. 2] Stakeholder Requirement Definition Process expressed with ICOM model

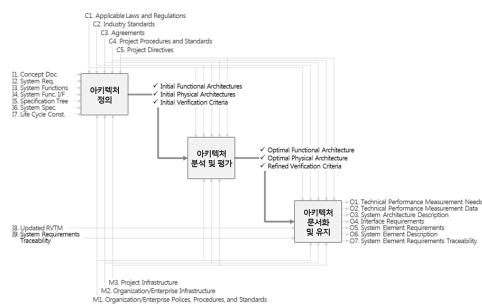
3.3.2. 요구사항 분석 프로세스

요구사항 분석 프로세스를 통해 운전자 관점에서 쓰인 이해관계자 요구사항을 시스템의 관점에서 재 정의하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 이해관계자 요구사항은 시스템 요구사항으로 변환된다. 이때 시스템 요구사항의 모음은 이해관계자 요구사항을 모두 만족시켜야 한다. 본 프로세스를 구성하는 활동들을 표현한 ICOM은 Fig. 3과 같으며, 시스템 요구사항 정의 그리고 시스템 요구사항 분석 및 유지 두 가지 활동으로 구성된다.



[Fig. 3] Requirement Analysis Process expressed with ICOM model

3.3.3. 아키텍처 설계 프로세스

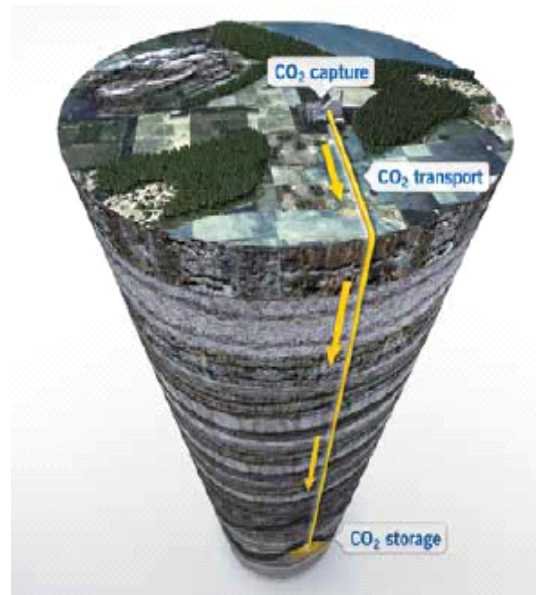


[Fig. 4] Architecture Design Process expressed with ICOM model

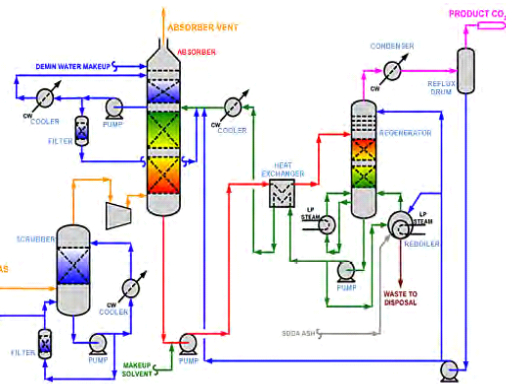
아키텍처 설계 프로세스의 목적은 위의 프로세스들로부터 정의된 시스템 요구사항들을 만족시키는 해답을 구체화하여 정의하는 것이다.

이해관계자들의 요구사항은 시스템 요구사항으로 변환되고, 이는 아키텍처의 형태로 구현된다. 아키텍처를 선정하기 위해서는 하나 또는 여러 대안의 식별과 분석이 수반되어야 한다. 본 프로세스를 구성하는 활동들을 표현한 ICOM은 Fig. 4와 같으며, 아키텍처 정의, 아키텍처 분석 및 평가, 그리고 아키텍처 문서화 및 유지 세 가지 활동으로 구성된다.

4. 사례 연구 : 탄소포집시스템의 개념설계



[Fig. 4] Carbon Capture & Storage Systems



[Fig. 5] Carbon Capture process

4.1 탄소포집시스템

이산화탄소 포집 및 저장 프로세스란 Figure. 4에서처럼 이산화탄소를 플랜트와 같은 발생원으로부터 포집한 후 처리하여 육상 또는 해양에 저장하는 과정을 말한다. 그 중 탄소포집시스템은 배가스로부터 이산화탄소를 포집하여 순수한 이산화탄소를 배출하는 역할을 하는 시스템이다. 이산화탄소 포집 방식으로는 연소 후의 배가스에서 아민을 이용하여 이산화탄소를 포집하는 방식이 주로 사용되고 포화아민에서 순수한 이산화탄소를 탈거하는 방식은 플랜트에서의 폐열을 이용한 가열방식이 사용된다. 본 논문에서는 이와 같은 아민을 사용하는 연소 후 포집 방식의 탄소포집시스템을 개발 대상으로 하였다.

4.2 이해관계자 요구사항 정의 프로세스

4.2.1 이해관계자 요구사항 추출 프로세스

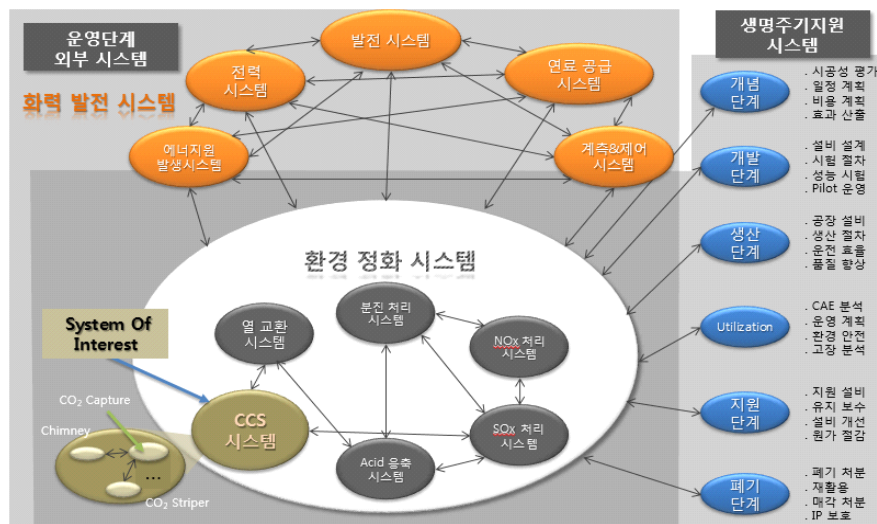
이해관계자 요구사항을 추출하기 위해서는 탄소포집시스템의 컨텍스트 다이어그램(Context Diagram) 제작이 선행되어야 한다. 컨텍스트 다이어그램(Fig. 7)을 제작하기 위해 미국 Fluor 사의 탄소포집시스템 설계 사양서를 분석하고 초본을 제작했다. 이렇

게 제작된 초본을 바탕으로 화공기업에서 20년 이상 재직하신 전문가와의 인터뷰를 진행한 후 수정하여 최종 컨텍스트 다이어그램을 제작했다. 이렇게 제작된 컨텍스트 다이어그램을 통해 CC system과 관련된 외부 시스템과 생명주기 지원시스템을 파악할 수 있었다. 이렇게 파악된 관련 시스템이 결정되면 이 시스템들의 관계자를 설정함으로써 이해관계자를 추출하기 위해 화공플랜트 산업에 종사하는 실무자들을 대상으로 인터뷰를 진행하였다. 또한 기존에 존재하는 탄소포집시스템의 설계사양서를 분석하였다. 이렇게 추출된 요구사항은 전문가와의 감수를 통해 최종 정의했다.

Stakeholder	No.	Stakeholders' Needs
발주자	NO.1	향후 CCS 설비를 해외에 납품할 수 있도록 준비해 주세요.
발주자	NO.2	시설 투자비를 최소화 하는 설비를 만들어 주세요.
발주자	NO.3	유지 보수에 들어가는 자원을 최소화하여 계획에 반영해 주세요.
발주자	NO.4	규제당국에서 제시하는 최소한의 조건을 만족할 수 있도록 해 주세요.
발주자	NO.5	안전에 각별히 유의해서 설비를 개발해 주세요.
발주자	NO.6	현재 발전소의 전력 생산에 차질이 없도록 작업에 임해 주세요.
발주자	NO.7	공사 일정에 맞추어 작업을 진행해 주시되 품질에 안전을 기해 주세요.
발주자	NO.8	설치 부지는 현재 발전소 내에서 레이아웃을 검토해 주세요.
발주자	NO.9	기술을 내재화할 수 있도록 Fundamental Technology에 신경 써 주세요.
발주자	NO.10	원하는 공용 소외 내지는 비밀유지를 관리할 수 있도록 계약합니다.
발주자	NO.11	회사 내부의 비밀유지를 각별히 신경 써 주세요.
발주자	NO.12	회사 엔지니어들과 긴밀히 협의해서 개발해 주세요.
발주자	NO.13	향후 추가 개발 아이템도 진행을 같이 해 주세요.
발주자	NO.14	내구연한이 충분히 길어야 한다.
발주자	NO.15	배출되는 CO2를 판매할 수 있어야 한다.
규제기관	NG.1	탄소세의 시장용 가산에서 국가 부담 적가위로 상당 시할 수 있도록 기술 개발에 안전을 기해 주세요.
규제기관	NG.2	설비 설치 전에 환경영향평가를 필수로 받을 수 있도록 준비해 주세요.
규제기관	NG.3	국제 규격에 맞는 설비를 제작해 주세요.
규제기관	NG.4	소음, 배기가스 배출 규제 조건을 준수하여 주세요.
규제기관	NG.5	환경/안전/건강에 관한 법규를 준수해 주세요.
규제기관	NG.6	국가 사용 예산에 대한 주기적인 보고를 시행해 주세요.
규제기관	NG.7	기술 개발 진행 사항은 주기적인 보고를 시행해 주세요.
계약자	NS.1	이번 프로젝트를 목표로 지속적으로 계약하기를 원합니다.
계약자	NS.2	설계 규격은 Standard로 통일해서 할 수 있도록 해 주세요.
계약자	NS.3	설비 요구사항을 충분히 알려 주세요.
임업자	NW.1	작업 프로세스가 단순하고 자동화 가능한 설비를 만들어 주세요.
임업자	NW.2	유지 보수를 단순하고 안전하게 조치할 수 있는 설비를 만들어 주세요.
임업자	NW.3	설비 작동 상황을 파악할 수 있도록 해 주세요.
임업자	NW.4	위험 사항을 사전에 고지하고, 정비용, 작동후후 세우고, 역러를 수 있도록 해 주세요.

[Fig. 6] Stakeholders' Needs

4.2.2 이해관계자 요구사항 정의 프로세스



[Fig. 7] Context Diagram for Carbon Capture Systems

이 과정을 통해 추출된 이해관계자의 필요들이 정제되어 이해관계자 요구사항으로 정의되었다. 추출된 필요들이 요구사항으로 정의되기 위해 전문가와의 인터뷰와 기존 설계사항서의 분석 등을 통해 프로젝트, 외부 환경, 규제로부터의 제약사항이 반영되었고, 시스템의 기술적 구현가능성, 경제성 등이 분석되었다. 또한 실제 종사자들과 함께 운영개념서를 제작하며 실사용자의 관점에서 운영 요구사항 등을 반영시켰다. 이러한 과정을 통해 정의된 이해관계자 요구사항의 일부가 Fig. 8에 표현되었다.

Stakeholder	No.	Stakeholders' Needs
발주자	NO.1	항후 CCS 설비를 해일에 노출할 수 있도록 준비해 주세요.
발주자	NO.2	시설 투자비를 최소화 하는 설비를 만들어 주세요.
발주자	NO.3	유지 보수에 들어가는 자원을 최소화하여 계획에 반영해 주세요.
발주자	NO.4	규제당국에서 제시하는 최소한의 조건을 만족할 수 있도록 해 주세요.
발주자	NO.5	안전에 건별의 유의해서 설비를 개발해 주세요.

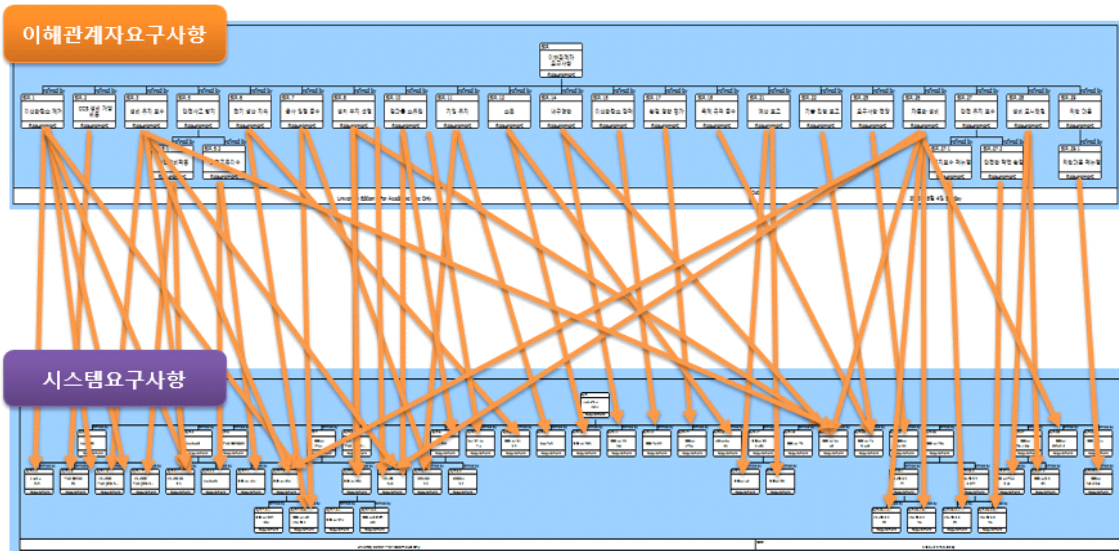
ID	Req. Name	Description
SR1	이산화탄소 제거	CCS 설비는 1200MW 복합발전소에서 배출되는 이산화탄소의 제거 효율이 90% 이상이어야 한다.
SR2	CCS 설비 개발 비용	프로젝트 비용이 기존 CCS 설비 [미 Tenesko 설비 기준]보다 저렴해야 한다.
SR3	설비 유지 보수	발주자는 4년 동안 유지보수 비용이 미화 7천만 달러를 넘지 않는 것을 희망한다.
SR4	규제 요건 만족	발주자는 정부의 규제 요건에 맞도록 CCS 설비를 제작하기를 희망한다.
SR5	안전 제일	직업자들이 건설 시공 중에 안전사고에 노출되지 않아야 한다.

[Fig. 8] Defined Stakeholder Requirement transformed from Stakeholders' Needs

4.2.3 이해관계자 요구사항 분석 및 유지 프로세스
 위의 과정을 통해 정의된 이해관계자 요구사항은 이 과정을 통해 분석되었다. 요구사항을 분석하기 위해 문장 분석모델이 사용되었다. 문장 분석모델의 문장 분해를 위해 8하2동사 원칙이 사용되었다. 각 요구사항의 평가를 위해 경쟁성, 명확성, 정확성, 설계독립성, 구현충분성, 모호성제거, 유일성, 중복제거, 상충제거를 평가 기준으로 선정하였으며, 문제가 존재할 경우는 '1', 문제가 존재하지 않을 경우는 '0' 으로 평가하였다. 문장분석모델을 통해 분석된 결과를 바탕으로 문제가 있다고 판단되는 요구사항들은 수정되며 요구사항분석기록서로 관리되었다. 이러한 과정을 거치는 동안 이해관계자 요구사항은 Fig. 9와 같이 RTM(Requirement Traceability Matrix)을 통해 계속적으로 기록되어 유지되었다. RTM에 요구사항이 추가되거나, RTM에 기록된 요구사항이 수정되기 위해서는 전문가의 승인이 필요하도록 하여 형상관리가 이루어지도록 하였다.

Stakeholder Requirement													Validation Requirements				
Ver. 1			Ver.2			Ver.3											
Stakeholder	ID	Req. Description	Req.	Description	ID	Req. Name	Description	Type	ID	Req. Name	Description	Metho	Level	Status			
발주자	SR.1	항후 CCS 설비를 해일에 노출할 수 있도록 준비해 주세요.	SR.1	이산화탄소 제거	SR.1	이산화탄소 제거	CCS 설비는 1200MW 복합발전소에서 배출되는 이산화탄소의 제거 효율이 90% 이상이어야 한다.	Constraint	SR1.1	이산화탄소 제거 효율 목표	이산화탄소 제거 효율이 90% 이상이어야 한다.	Inspection	System	기타			
발주자	SR.2	시설 투자비를 최소화 하는 설비를 만들어 주세요.	SR.2	CCS 설비 개발 비용	SR.2	CCS 설비 개발 비용	프로젝트 비용이 기존 CCS 설비 [미 Tenesko 설비 기준]보다 저렴해야 한다.	Constraint	SR2.1	CCS 설비 개발 비용 목표	프로젝트 비용이 기존 CCS 설비 [미 Tenesko 설비 기준]보다 저렴해야 한다.	Analysis	System	기타			
발주자	SR.3	유지 보수에 들어가는 자원을 최소화하여 계획에 반영해 주세요.	SR.3	설비 유지 보수	SR.3	설비 유지 보수	발주자는 4년 동안 유지보수 비용이 미화 7천만 달러를 넘지 않는 것을 희망한다.	Constraint	SR3.1	설비 유지 보수 비용 목표	발주자는 4년 동안 유지보수 비용이 미화 7천만 달러를 넘지 않는 것을 희망한다.	Analysis	System	기타			
발주자	SR.4	규제당국에서 제시하는 최소한의 조건을 만족할 수 있도록 해 주세요.	SR.4	규제 요건 만족	SR.4	규제 요건 만족	발주자는 정부의 규제 요건에 맞도록 CCS 설비를 제작하기를 희망한다.	Constraint	SR4.1	규제 요건 만족	발주자는 정부의 규제 요건에 맞도록 CCS 설비를 제작하기를 희망한다.	Inspection	System	기타			
발주자	SR.5	안전에 건별의 유의해서 설비를 개발해 주세요.	SR.5	안전 제일	SR.5	안전 제일	직업자들이 건설 시공 중에 안전사고에 노출되지 않아야 한다.	Constraint	SR5.1	안전 제일	직업자들이 건설 시공 중에 안전사고에 노출되지 않아야 한다.	Inspection	System	기타			

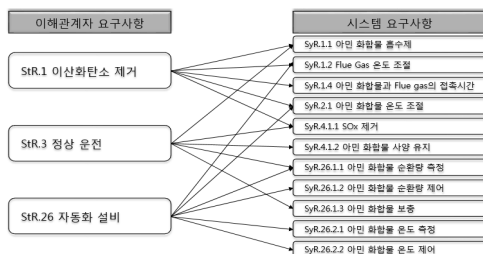
[Fig. 9] RVM



[Fig. 10] Transformed Systems Requirements ensuring Traceability to Stakeholder Requirements.

4.3.1 시스템 요구사항 정의

이 과정을 통해 최종적으로 정의된 이해관계자 요구사항은 화공 분야 전문가와의 인터뷰를 통해 시스템 요구사항으로 변환되었다. 이 때 요구사항을 바라보는 관점이 이해관계자의 관점에서 시스템의 관점으로 바뀌는 것은 매우 중요한 부분이다. 이 과정을 통해 변환된 시스템 요구사항은 구현 충분성을 확보하기 위해 보다 하위 레벨의 요구사항으로 상세히 분할되었다. 이 단계에서는 시스템 요구사항으로 변환되는 과정은 Fig. 10과 같이 이해관계자 요구사항과의 추적성을 확보하며 진행되었다. 이러한 추적성 확보는 Vitech사의 CORE9을 이용해 보다 손쉽게 구현할 수 있었다. 이해관계자 요구사항이 시스템 요구사항으로 변환된 예는 Fig. 11에 제공된다.



[Fig. 11] An example of Transformation from Stakeholder Requirements to Systems Requirements

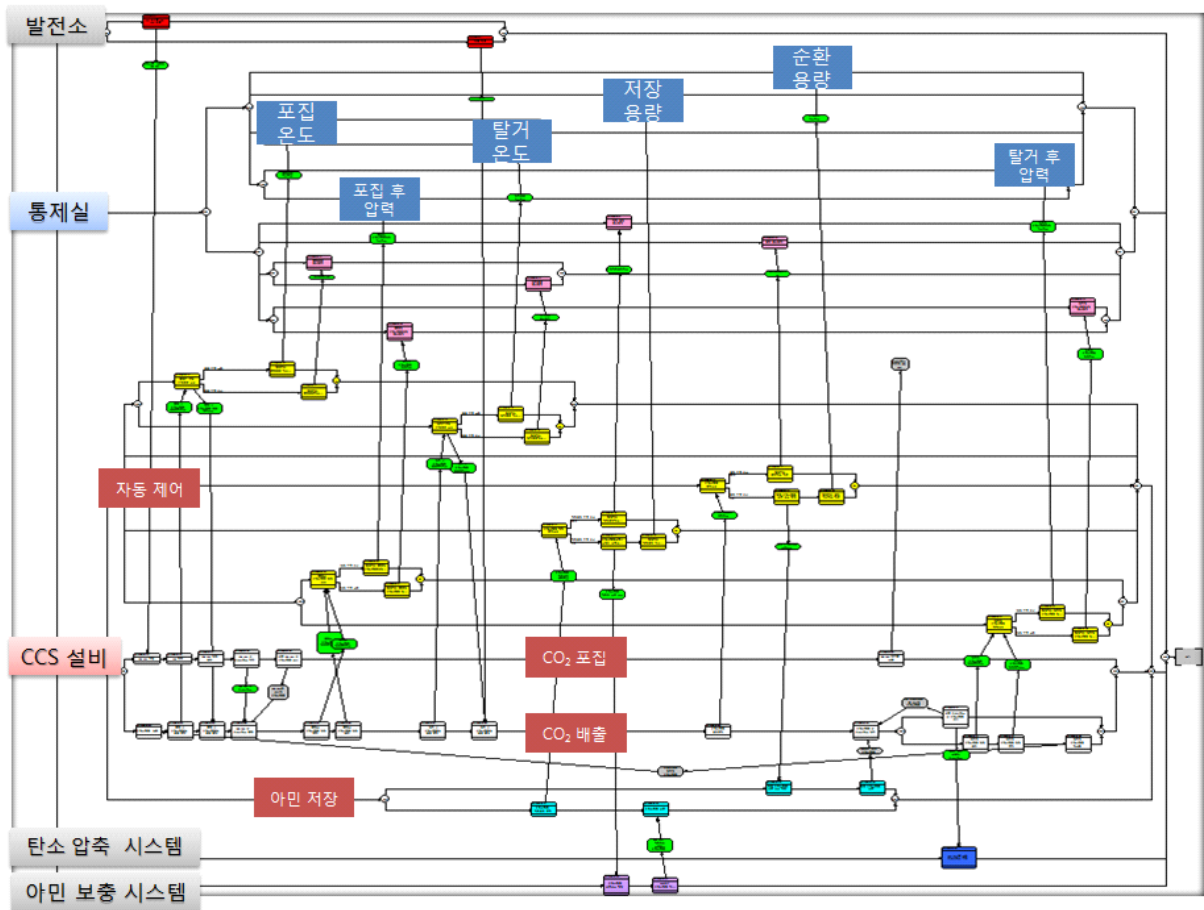
4.4 아키텍처 설계 프로세스

4.4.1 아키텍처 정의 프로세스

이 단계에서는 시스템 요구사항을 바탕으로 기능 아키텍처, 물리아키텍처를 창조하여, 최종적으로는 상위 단계의 요구사항을 하위 단계로 분할한다. 우선, 기능아키텍처를 제작하기 위해서 요구사항 중 기능요구사항만을 추출하여 기능아키텍처에 사용될 기능을 추출하였다. 보다 복잡성을 줄이기 위해 배가스와 아민화합물 이 두 작동 유체 별로 나누어 간단한 아키텍처를 만들어 본 후 이를 합성하여 통합 기능 아키텍처를 제작했다. 아래의 Fig. 13은 eFFBD (enhanced Function Flow Block Diagram)의 양식으로 작성된 기능아키텍처이다. 이는 흐름도란 형식을 취하며 플랜트 산업의 개념설계의 산출물 Process Flow Diagram(Fig. 14)과 비슷한 기능들로 구성된다. 기능아키텍처를 완성 한 후 기능의 모듈성과 물리적 구현 가능성을 고려하여 Fig. 16과 같이 기능 아키텍처를 네 개의 하위 단위로 분할하였다. 분할된 기능 아키텍처를 기술적 구현가능성을 고려하여 Fig. 15와 같이 네 개의 하위 시스템이 수행하도록 할당함으로써 네 개의 하위 시스템을 정의하였다.

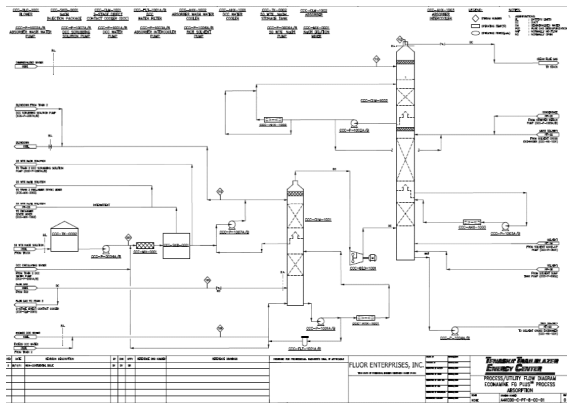
Stakeholder Requirements										System Requirements									
Ver. 1					Ver. 2					Ver. 1					Ver. 2				
ID	Req. Name	Description	Priority	Type	ID	Req. Name	Description	Priority	Type	ID	Req. Name	Description	Priority	Type	ID	Req. Name	Description	Priority	Type
SR1	SR1.1	SR1.1.1	SR1.1.2	SR1.1.3	SR1.2	SR1.2.1	SR1.2.2	SR1.2.3	SR1.2.4	SR2	SR2.1	SR2.1.1	SR2.1.2	SR2.1.3	SR2.2	SR2.2.1	SR2.2.2	SR2.2.3	SR2.2.4

[Fig. 12] Final RVTM

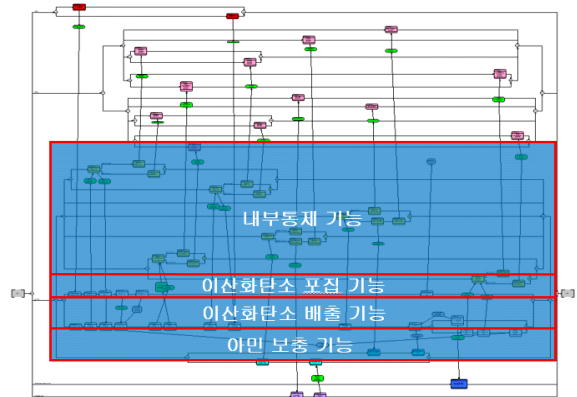


[Fig. 13] Functional Architecture of the Carbon Capture Systems

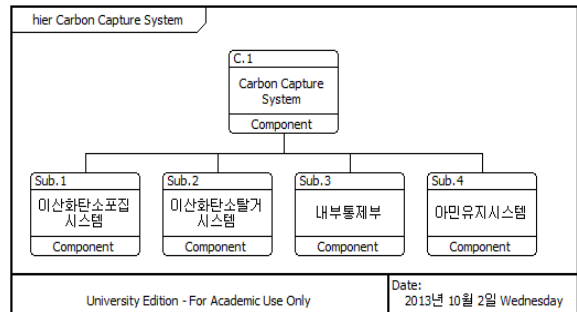
정의된 네 개의 하위 시스템은 물리적 계층구조의 형태로 Fig. 16에 나타나 있다. 하위 시스템을 정의한 다음, 기능아키텍처를 이용하여 하위 시스템들의 인터페이스를 정의하였다. 이렇게 정의된 인터페이스는 IDEFO 형식으로 Fig. 17에 나타나 있다. 이를 통해 다음에 진행될 기본설계와 상세설계 시에 시스템 요소들의 인터페이스를 고려하며 시스템을 설계할 수 있게 된다.



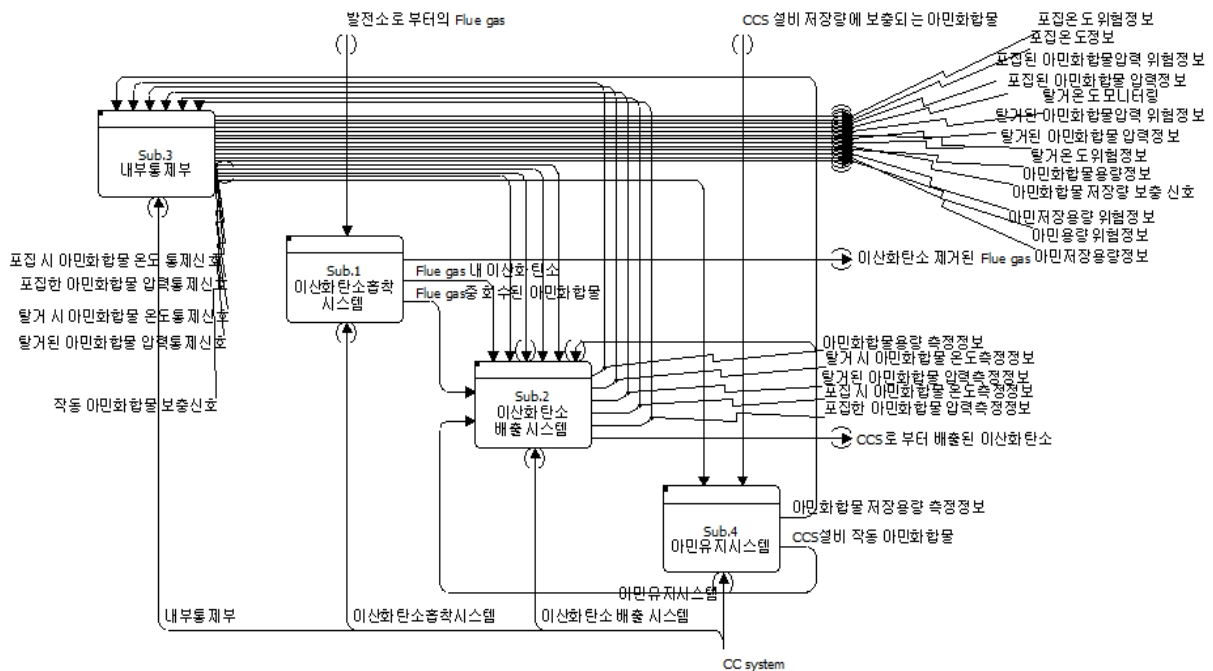
[Fig. 14] Process Flow Diagram of the Carbon Capture System



[Fig. 15] Allocation of the Functional Architecture according to Functions



[Fig. 16] Physical Architecture of the Carbon Capture System



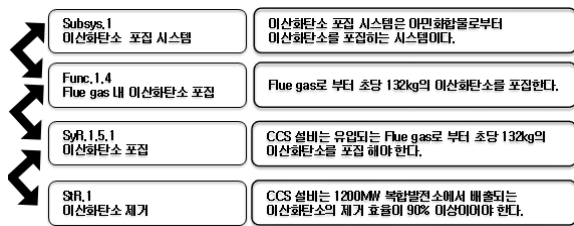
[Fig. 17] Interfaces of the Carbon Capture System expressed with IDEFO

4.4.2 아키텍처 분석 및 평가 프로세스

이 단계에서는 정의된 아키텍처를 분석 및 평가하는 단계이다. 이 단계에서는 여러 가지 분석 기법이 사용될 수 있다. 본 연구에서는 CORE 9에서 제공하는 시뮬레이터를 사용하여 Timeline Sheet를 작성함으로써 기능 아키텍처를 분석하였다. 이를 통해 어떠한 기능들이 단절 없이 구성되었는지, 기능요소들이 논리적으로 구성되었는지, 기능요소들이 논리 흐름상에 적절한 시기에 수행되는지를 판단하였다. 또한 전문가와 검토를 통해 기술적 구현 가능성, 분할 적정성 등이 최종 평가되었다.

4.4.3 아키텍처 문서화 및 유지

제작된 아키텍처는 Excel과 CORE8을 통해 작성되었고 관리되었다. Excel을 이용한 RTM과 CORE8에서 제공되는 추적성 확보 기능을 이용하여 요구사항부터 아키텍처까지 Fig. 18와 같이 추적성을 확보할 수 있었다. 이러한 추적성 확보를 통해 형상관리 시 관련된 요소들을 파악할 수 있게 된다. 이러한 요소 간의 관계성은 형상 변경 시 설계 오류를 방지할 수 있게 한다.



[Fig. 18] Traceability from Stakeholder Requirements to Sub-system

5. 결론

본 연구에서는 효과적으로 플랜트 산업에 시스템 엔지니어링을 접목하기 위해 탄소포집시스템의 개념 설계 과정을 지원하기 위해 ISO/IEC 15288 기술 프로세스를 개발 프로세스에 적용했다. 다른 시스템과 유기적으로 결합하여 복잡한 구조를 지닌 이

산화탄소포집시스템의 개념설계를 효율적으로 수행할 수 있도록 시스템엔지니어링 기술프로세스를 활용한 ICOM 접근방법을 제안하였다. 여러 생명주기에 관계한 이해관계자를 고려하여 포괄적인 요구사항을 추출할 수 있었고, 이러한 요구사항을 분석 과정을 통해 추후 설계 수정을 줄이도록 정제할 수 있었다. 또한 요구사항이 반영된 아키텍처를 제작함으로써 요구사항이 설계에 반영될 수 있도록 하였다. 또한 기능아키텍처를 이용하여 물리적 아키텍처를 도출함으로써 하위 요소들이 모듈적 특성을 가지게 하고, 하위 요소들 간의 인터페이스를 정의함으로써 추후 기본설계와 상세설계를 용이도록 하였다.

이러한 사례연구를 통해 플랜트 산업에 시스템엔지니어링 프로세스의 효과성을 기대할 수 있었다. 플랜트는 많은 요소들이 많은 인터페이스를 갖고 있기에 큰 복잡성을 가진다. 이러한 복잡성은 개발의 성공 확률을 줄인다. 시스템엔지니어링은 기능아키텍처 제작 등의 논리적인 과정을 통해 시스템을 하위 요소로 분해하여 설계한다. 이 과정을 통해 시스템의 복잡성은 줄어들고 보다 설계되기 수월해진다. 시스템엔지니어링은 분해된 요소들의 인터페이스를 관리함으로써 인터페이스 오류를 막는다. 이러한 인터페이스 관리로 인해 시스템은 고유의 창발성(Emergent property)을 유지하며 설계될 수 있다. 또한 이러한 전 과정들은 RTM을 통해 유지되기에 추후 설계 수정 시 요소들과의 관련성을 고려하며 형상관리를 하며 수정할 수 있다.

본 연구를 통해 시스템엔지니어는 도메인 전문가와의 협업이 필수라는 것을 확인할 수 있었다. 오랜 기간 동안 축적된 전문가의 지식과 노하우는 프로세스 진행 과정에서 시스템의 경제성, 기술적 구현 가능성을 평가하거나, 성능 값을 결정할 때 큰 역할을 하였다. 따라서 시스템 엔지니어는 도메인 전문가와의 협업이 필수라는 것을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

본 연구는 시스템엔지니어링을 접목하여 탄소포집시스템의 개념설계를 진행하였다. 하지만 기본설계와 상세설계를 진행하지 않았기에 시뮬레이션 분

석, 파일럿 플랜트 제작 등의 설계 과정이 시스템엔지니어링 프로세스와 병행하여 진행되지 않았다. 추후에 플랜트의 기본설계와 상세설계에 시스템엔지니어링이 접목되어 진행된다면 시스템엔지니어링의 플랜트 산업으로의 접목가능성과 효과성을 보다 확실히 파악할 수 있을 것이다.

사 사

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

참 고 문 헌

1. Ministry of Knowledge Economy Press Release. 2012.
2. Y.J. Kim. 플랜트 산업의 특징과 발전방향, 특집원고, 한국설비기술협회지, 28(7), 34-41, 2007
3. Patick J. Noble, Process Plant Construction - A Handbook for Quality Management, Wiley&Blackwell, p1-10, 2009
4. H.S. Yoo, J.H. Lee, Plant engineering and project management, Korea Institute of Plant Engineering & Construction, p12, 2009
5. 한국플랜트학회 EPC 기술위원회, 해외플랜트 프로젝트의 수행 특성, The Plant Journal, Vol.6, No.2, pp.12-17, 2010
6. H.S. Choi, Y.J. Kim, S.J. Kim, Y.S. Choi, B.I. Choi, B.I. Choi, Foundation of Front-end Engineering & Design for Plant, Korea Society of Mechanical Engineering, p.24-25, 2010
7. e-나라지표, access time Oct. 1, 05:12PM, 2013, http://www.index.go.kr/egams/stts/jsp/potal/stts/PO_STTS_IdxMain.jsp?idx_cd=
8. R&D정보센터, 플랜트/엔지니어링산업 시장동향과 기술개발전략, Knowledge Industry Information Institute, p44-48, 2013
9. J.N. Choi, T.S. Jang, B.S. Kim, Recent Development of Carbon Dioxide Conversion Technology, Clean Technology, 18(9), 229-249, 2012
10. S.Y. Chae, S.J. Kwon, A Study on Domestic Policy Framework for Application of Carbon Dioxide Capture and Storage, Journal of the the Korean Society of Marine Environment and safety, 18(6), 617-625, 2012
11. J.H. Wee, J.I. Kim, I.S. Song, B.Y. Song, K.S. Choi, Reduction of Carbon-Dioxide Emission Applying Carbon Capture and Storage (CCS) Technology to Power Generation and Industry Sectors in Korea, Journal of the Korean Society of Environmental Engineering, 30(9), 961-972, 2008
12. J.H. Jung, Y.S. Lim, Y.S. Jeong, U. Lee, S.Y. Yang, C.H. Han, CO2CaptureProcessusingAqueousMonoethanolamine(MEA):ReductionofSolventRegenerationEnergybyFluegasSplitting, Korean Chem. Eng. Res., 49(6), 764-768, 2011
13. Y.M. Kim, D.S. Kim, J.H. Cho, A Study on the Regeneration Energy Reduction through the Process Improvement of the Carbon Dioxide Capture Process, Clean Technology, 18(2), 221-225, 2012
14. C. Huh, S.G. Kang, H.H. Joo, Consideration of Carbon dioxide Capture and Geological Storage (CCS) as Clean Development Mechanism (CDM) Project

- Activities: Key Issues Related with Geological Storage and Response Strategies, Journal of the the Korean Society of Marine Environment and safety, 14(1), 52-64
15. ISO/IEC 15288:2008. Systems and software engineering - System life cycle processes, 2008
16. The Defense Acquisition University, Systems Engineering Fundamentals, Iworkbook, 2007
17. DoD Directive. 5000.1, The Defense Acquisition System, 2003
18. N.S. Choi, M.S. Kang, K.H. Kim, D.W. Koh, A Study on the Systems Engineering Application to KC-100 Aircraft Development, Journal of Korea Council of Systems Engineering, 5(2), 49-56, 2012
19. K.H. Cha, J.J. Park, J.H. Lee, D.S. Choo, A Study on System Engineering of Light Rail Transit Private Investment Projects, Korea Society for Railway, 2011.10, 517-544, 2011