

초임계 이산화탄소 발전시스템 설계를 위한 FEED(Front End Engineering Design) 프레임워크 개발

김준영* 차재민 박성호 염충섭
고등기술연구원 플랜트SE팀

FEED Framework Development for Designing Supercritical Carbon Dioxide Power Generation System

Joon-Young Kim*, Jae-Min Cha, Sungho Park, Choongsub Yeom
Plant Systems Engineering Team, Institute for Advanced Engineering (IAE)

Abstract : Supercritical carbon dioxide power system is the next generation electricity technology expected to be highly developed. The power system can improve net efficiency, simplify cycle configuration, and downsize equipment compared to conventional steam power system. In order to dominate the new market in advance, it is required to found Front End Engineering Design (FEED) Framework of the system. Therefore, this study developed the FEED framework including design processes for the supercritical carbon dioxide power system, information elements for each process, and relationships for each element. The developed FEED framework is expected to be able to secure systematic technological capabilities by establishing a common understanding and perspective among multi-field engineers participating in the design.

Key Words : Front End Engineering Design, FEED, Framework, Conceptual Design, Basic Design, Supercritical Carbon Dioxide, SCO₂, Systems Engineering

Received: November 15, 2017 / **Revised:** December 11, 2017 / **Accepted:** June December 18, 2017

* 교신저자 : Joon-Young Kim, joonykim@outlook.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.

1. 서론

초임계 이산화탄소 발전시스템은 저온과 저압에서 초임계 상태에 도달하는 이산화탄소를 작동유체로 사용하는 발전시스템이다. 이 발전시스템은 증기 발전시스템 대비 높은 효율 향상과 기기 소형화 등의 기대 효과로 인해 발전시장의 패러다임을 바꿀 차세대 발전기술로 주목받고 있다. 이에 따라 향후 형성될 초임계 이산화탄소 발전시장 선점을 위해 미국, 일본, 프랑스, 한국 등에서 상용 발전시스템 개발 연구를 수행하고 있으나, 그럼에도 불구하고 발전시스템 설계의 토대가 되는 FEED(Front End Engineering Design) 관련 연구가 부족한 실정이다. 특히, 충분한 FEED 경험이 없는 초임계 이산화탄소 발전시스템의 경우, FEED 설계 프로세스와 각 프로세스 별 산출물 등에 관해 엔지니어마다 상이한 이해와 시각을 가지고 있어 이를 통합할 수 있는 FEED 프레임워크가 절대적으로 필요한 실정이다.

본 연구의 목표는 전술한 문제에 대응하기 위해서 초임계 이산화탄소 발전시스템의 FEED 설계를 수행하는 데 필요한 모든 정보 요소를 정의한 프레임워크 개발을 수행하고자 한다. 또한, 본 연구는 FEED 프레임워크 개발에서 한 단계 더 나아가 엔지니어들이 이를 적극 활용할 수 있도록 FEED 프레임워크의 세부 내용을 직관화한 가시화 지원도구까지 개발하고자 한다.

이어지는 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 초임계 이산화탄소 발전시스템과 FEED에 관한 기본 개념을 설명한다. 3장에서는 FEED 프레임워크의 개발 범위와 개발 개념을 제시하고, 관련 레퍼런스 패키지 등을 분석해 세부 정보요소와 설계 프로세스를 정의한다. 또한 정의한 세부 정보요소와 설계 프로세스를 통합하여 FEED 프레임워크를 개발한다. 4장에서는 FEED 프레임워크 가시화에 대한 사용자 요구사항을 정의하고, 이를 만족하는 지원도구를 개발한다. 5장에서는 전문가 집단을 대상으로 개발한 FEED 프레임워크와 가시화 지원도구에 대한 평가를 의뢰하여 내용의 적합도를 검증한

다. 마지막으로 6장에서는 본 연구 내용을 요약하고 이에 대한 의의와 추후 연구 계획으로 마무리한다.

2. 이론적 개념

2.1 초임계 이산화탄소 발전시스템

이산화탄소는 73.8bar, 30.98°C에서 초임계 상태가 되는데, 이를 발전시스템에 적용할 경우 작은 압축일과 유동저항 특성으로 인해 발전 효율 향상 및 설비 소형화가 가능한 장점이 있다.

본래 초임계 이산화탄소 발전시스템은 원자력 분야에서 Sulzer Bros(1948)¹⁾가 안정성이 높은 새로운 발전시스템으로 초임계 이산화탄소 사이클의 우수성을 처음으로 제안하면서 연구가 시작되었다. 이후 Fehr(1967)가 초임계 이산화탄소 재압축 발전사이클과 150kWe급 발전시스템의 개념설계를 수행하였으며²⁾, Gokhstein³⁾과 Verhivker⁴⁾, Angelino^{5,6)}에 의해 초임계 이산화탄소 발전시스템의 높은 효율성을 열역학적으로 검증하였다. 그러나 이와 같은 선행 연구에도 불구하고, 당시의 기술력으로 핵심 기기 개발이 어려워 실증 연구가 이루어지지 않은 채 더 이상의 진보된 연구가 진행되지 않았다.

그러다 2000년도에 접어들면서, 핵심 기기 중 고온/고압/고집적도의 열교환기, 소형/초정밀 터보기기 등의 제작이 가능해짐에 따라 V.Dostal(2004)⁷⁾에 의해 차세대 원자로의 2차 계통에 초임계 이산화탄소 발전시스템 적용을 제안하면서 관련 산업에서 재주목 받기 시작하였다. 이후 미국 샌디아 국가연구소⁸⁾, DOE 국가신재생에너지 연구소⁹⁾, 프랑스 전력청¹⁰⁾, 한국 고등기술연구원¹¹⁾ 등에서 초임계 이산화탄소 발전시스템을 원자력, 태양열, 폐열회수, 화력 등의 열원에 접목시킨 연구가 이루어지고 있다.

2.2 FEED (Front End Engineering Design)

발전시스템의 전체 생명주기는 계획(사업기획, 타당성 조사), 설계(개념 설계, 기본 설계, 상세 설계), 조달(구매, 운반), 건설(시공, 시운전), 유지보

수(운영, 유지보수), 폐기(폐기, 부지정리) 단계로 이루어져있다¹²⁾.

이 같은 생명주기 중 FEED 단계로 정의되는 유형은 Figure 1과 같이 5가지로 구분할 수 있다. FEED 유형 1은 타당성 조사, 개념 설계, 기본 설계, 상세 설계를 수행하고 있으며, 대표적으로 미국 KBR¹³⁾, 독일 Siemens¹⁴⁾가 이를 따르고 있다. FEED 유형 2는 개념 설계와 기본 설계를 수행하며, 이 유형은 미국 Bechtel¹⁵⁾과 Jacobs¹⁶⁾가 대표적으로 따르고 있다. FEED 유형 3은 개념 설계만을 수행하며, 이에 대한 예는 미국 Emerson¹⁷⁾이 있다. 반면 FEED 유형 4는 기본 설계만을 수행하는데, 일본 CHIYODA¹⁸⁾가 이를 따르고 있다. 마지막으로 FEED 유형 5는 기본 설계와 상세 설계를 이어주는 연결 설계를 수행하는 것으로, 삼성엔지니어링¹⁹⁾, 현대건설²⁰⁾ 등의 국내 엔지니어링사들이 주로 여기에 해당한다.

FEED 설계 프로세스와 주요 산출물은 각 FEED 유형에 따라 상이하지만, 대부분의 경우 전체 공정과 주요 설계 인자와 같은 산출물을 도출하는 핵심 설계 과정을 포함하고 있다. 이에 따라 본 연구는 선진 엔지니어링사와 선형 연구들에서 공통적으로 포함하고 있는 개념 설계와 기본 설계를 FEED 단계로 정의하였다. 따라서 본 연구에서는 해당 단계의 주요 설계 산출물과 업무 절차를 기반으로 FEED 프레임워크를 개발하고자 한다.

3. 초임계 이산화탄소 발전시스템 FEED 프레임워크 개발

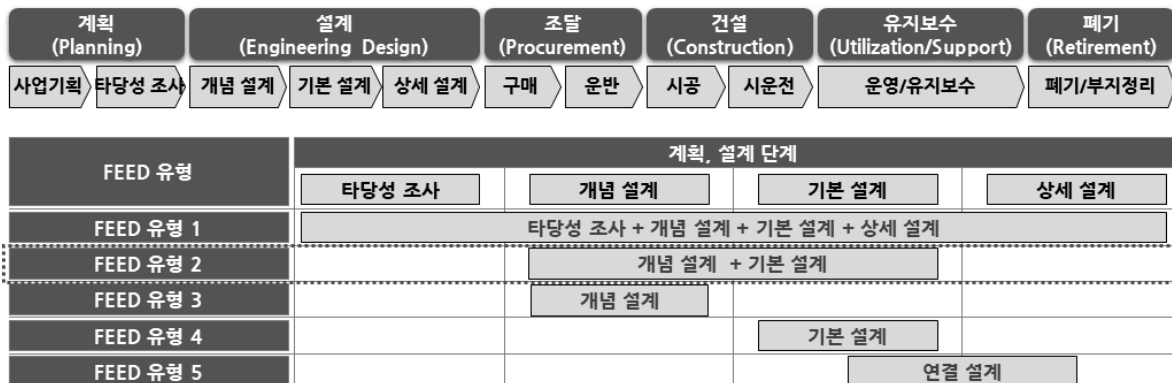
3.1 초임계 이산화탄소 발전시스템 FEED 프레임워크 개발 범위 및 목표

본 연구에서는 FEED 수행 주체 간에 공통된 이해와 시각을 갖도록 도와주고, 이들이 관련 업무를 수행하는 데 활용할 수 있는 FEED 프레임워크 개발을 목표로 한다.

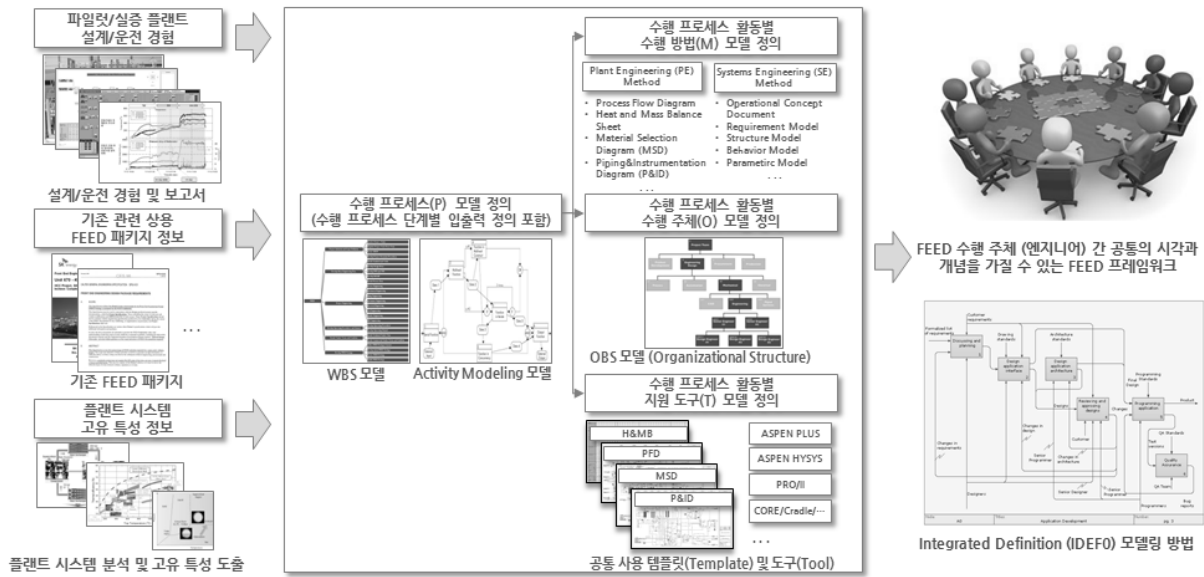
FEED 프레임워크 개발 범위는 전술한 목표에 맞게 설계 프로세스와 각 설계 프로세스별 세부 정보 요소(입력물, 산출물, 수행 주체, 수행 도구 및 방법), 세부 정보요소들 간의 관계를 포함하고자 한다. 뿐만 아니라 FEED 프레임워크에 대한 적합도는 FEED 프레임워크 개발과 관련된 내·외부 이해관계자들과 논의한 결과를 토대로 100점 만점 기준 환산 시 85점 이상의 적합도 달성을 목표로 한다.

3.2 초임계 이산화탄소 발전시스템 FEED 프레임워크 개발 개념

FEED 프레임워크를 단순 개발하는 것에 그치지 않고, 이를 상업적으로 활용하기 위해선 상용 발전시스템의 FEED 관련 자료를 중심으로 초임계 이산화탄소 발전시스템의 특성을 반영하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 상용 발전시스템 FEED 패키지와 초임계 이산화탄소 발전시스템 고유 특성 정보 및 설계, 운전 핵심 자료 등을 전문



[Figure 1] FEED Types of Power Generation System Based on Life Cycle



[Figure 2] Development Concept of FEED Framework

가들과 함께 역분석함으로써 FEED 프레임워크를 정의하는 개발 개념을 Figure 2와 같이 확정하였다.

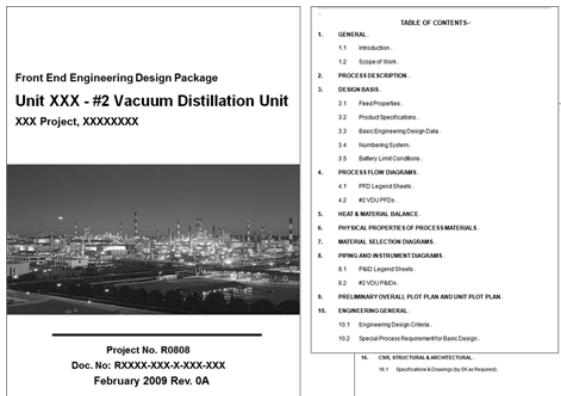
3.3 FEED 세부 정보요소 정의

FEED 프레임워크 개발을 위한 첫 번째 단계로 상용 발전시스템 FEED 패키지 자료와 내부적으로 보유하고 있는 초임계 이산화탄소 발전시스템의 설계 절차, 설계 파라미터, 주요 기기 리스트, 운전 특성, 국내·외 공급망 등을 Figure 3과 같이 수집하였다.

이후 수집한 자료들로부터 FEED 프레임워크 개발에 필요한 다양한 정보요소를 추출하였고, 이들 간 비교를 통해 공통적으로 포함된 세부 정보요소를 Figure 4와 같이 정의하였다.

정의한 세부 정보요소의 주요 항목은 다음과 같다.

- 입력물 : 발주자 요구사항 정의 문서, 열원 정보, 사이클 설계 조건, 사이클 설계 파라미터, 민감도 분석 결과, 사이클 샤프트 구성, 사이클 제어 로직, ...
- 산출물 : 설계 기준, 공정흐름도(PFD), 열물질 수지(H&MB), 재료선정도(MSD), 배치도(Plot Plan), 설비리스트, 공정배관계장도(P&ID), ...



[Figure 3] Example of FEED Package References

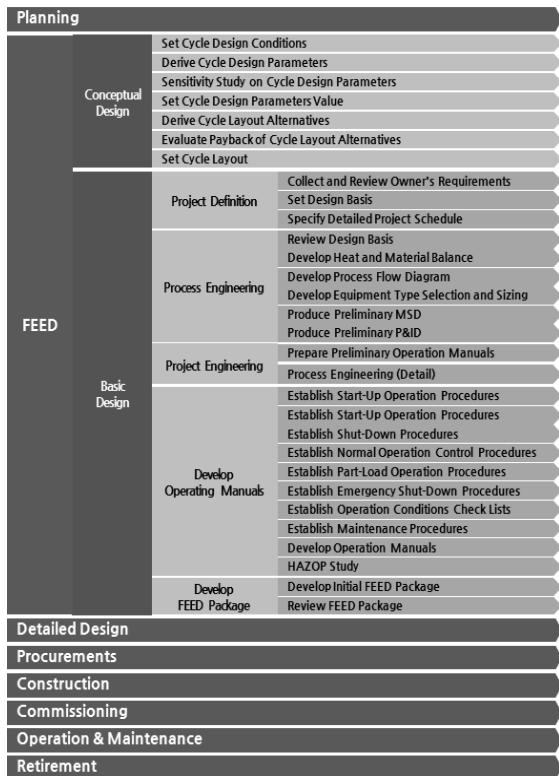
F사 VDU FEED 패키지		P사 Chemical Plant FEED 패키지	
ID	Name	ID	Name
V_D1	General	S_D1	Design Basis
V_D2	Process Description	S_D2	Process Description
V_D3	Design Basis	S_D3	Material Selection Diagram (MSD)
V_D4	Process Flow Diagrams	S_D4	Process Flow Diagram (PFD)
V_D5	Heat and Mass Balance	S_D5	Heat and Mass Balance (H&MB)
V_D6	Physical Properties of Process Materials	S_D6	Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)
V_D7	Material Selection Diagrams	S_D7	Process Control Description
V_D8	Piping and Instrument Diagrams	S_D8	Preliminary Procedures and Precommissioning
V_D9	Preliminary Overall Plant and Unit Plot Plan	S_D9	Normal Operation
V_D10	Engineering Design Criteria	S_D10	Emergency Shutdown Procedure
V_D11	Special Process Requirements for Basic Design	S_D11	Shutdown and Restart Procedure
V_D11.1	Chemical Requirements	S_D12	Equipment List
V_D11.2	Utility Summary	S_D13	Cause & Effect (Emergency Logic) Diagram
V_D11.3	Catalyst Requirement	S_D14	Pipe Line List
V_D11.4	Waste Effluents Data	S_D15	Chemical and Catalyst Specification and Summary
V_D12	Equipment List	S_D16	Raw Material Consumption
V_D12.1	Equipment Datasheets	S_D17	Utility Consumption
V_D12.2	Instrument List	S_D18	Effluent List Summary
V_D12.3	Special Control Valve Datasheets	S_D19	Material Safety Data Sheet (MSDS)
V_D12.4	ESD Cause & Effect Diagrams	S_D20	Piping Plan
V_D13	Control & Instrumentation Philosophy	S_D21	Instrument List
V_D13.1	Control Philosophy	S_D22	General Specification for Instrumentation
V_D13.2	Instrumentation Philosophy	S_D23	Instrument Process Data Sheet
V_D13.3	Electrical	S_D24	Instrument Schedule
V_D13.4	Line List	S_D25	Hazardous Area Classification Drawing
V_D14	Piping Material Specification	S_D26	General Specification for Hazardous Area Classification
V_D15	Line Class Specification (Component description)	S_D27	Electrical Load List
V_D16	Civil Structural & Architectural	S_D28	Single Line Schematic Diagram (SLD)
V_D17	Calculations	S_D29	Proposed Vendor List
V_D18	Operating and Control Philosophy		
V_D19	Operation Manual		

[Figure 4] Typical Information Items of FEED

- 수행 주체 : 발주자, EPC 계약자, 프로세스 엔지니어링 부서, 프로젝트 관리 부서, 커미셔닝 부서, 기계 엔지니어링 부서, 계장 엔지니어링 부서, 전기 엔지니어링 부서, 배관 엔지니어링 부서, 토목건축 엔지니어링 부서, 원자재 공급사, 설비제조사, ...
- 수행 도구 및 방법 : 내부 설계 코드, 요구사항 관리 소프트웨어, 비용 추정 소프트웨어, 프로젝트 관리 소프트웨어, 공정 해석 소프트웨어, ...

3.4 FEED 설계 프로세스 정의

두 번째 단계로 앞서 정의한 세부 정보요소를 산출할 수 있는 설계 프로세스를 Figure 5와 같이 최소 3단계에서부터 최대 4단계에 걸쳐 정의하였다. 해당 내용을 보다 구체적으로 설명하자면, 최상위 설계 프로세스(Level 1)인 '1. FEED'는 개념 설계를 수행하는 '1.1. Conceptual Design'과 기본 설계를 수행하는 '1.2. Basic Design' 2개의 상위 설계 프로세스(Level 2)로 구성된다. 이 중에서 '1.1.

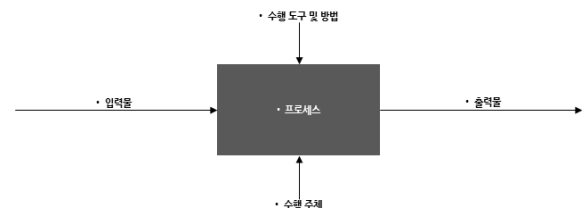


[Figure 5] Overall FEED Processes

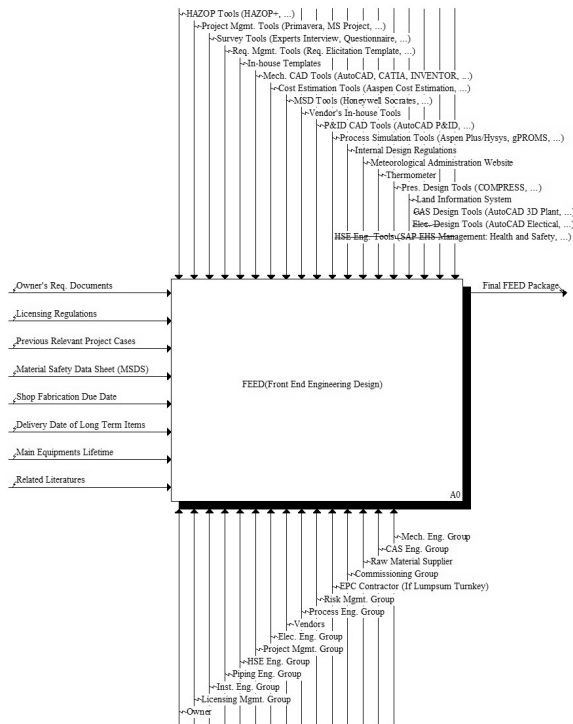
Conceptual Design'는 설계 조건을 설정하는 '1.1.1 Set Cycle Design Conditions', 사이클 설계 파라미터를 정의하는 '1.1.2. Derive Cycle Design Parameters', 정의된 사이클 설계 파라미터 기반 민감도 분석을 수행하는 '1.1.3. Sensitivity Study on Cycle Design Parameters' 등을 비롯해 총 7개의 중위 프로세스(Level 3)로 구성된다. 반면, '1.2. Basic Design'는 프로젝트 전체 기준을 확정하는 '1.2.1. Project Definition', 발전시스템의 전체 공정 설계를 수행하는 '1.2.2. Process Engineering', 공정 상세설계를 수행하는 '1.2.3. Project Engineering', 발전시스템의 운영 매뉴얼을 수립하는 '1.2.4. Develop Operating Manuals', 설계 값과 운영 매뉴얼을 정리해 FEED 패키지를 수립하는 '1.2.5. Develop FEED Package' 5개의 중위 프로세스(Level 3)로 이루어져있다. 그리고 각 중위 프로세스는 발주자의 요구사항을 수집하고 검토하는 '1.2.1.1. Collect and Review Owner's Requirements', 설계 기준을 설정하는 '1.2.1.2. Set Design Basis', 프로젝트 일정을 구체화하는 '1.2.1.3. Specify Detailed Project Schedule' 등을 비롯해 총 23개의 하위 프로세스(Level 4)로 구성되어 있음을 확인할 수 있다.

3.5 세부 정보요소-설계 프로세스 통합 FEED 프레임워크 개발

마지막 단계로 세부 정보요소와 설계 프로세스를 통합한 FEED 프레임워크를 최종적으로 도출해야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 Integration Definition for Function Modeling (IDEFO) 기법을 활용하여, FEED 세부 정보 요소를 포괄할 수 있는 Figure 6의 테일러링된 IDEFO(Tailored IDEFO)를 정의하



[Figure 6] Tailored IDEFO for FEED Framework

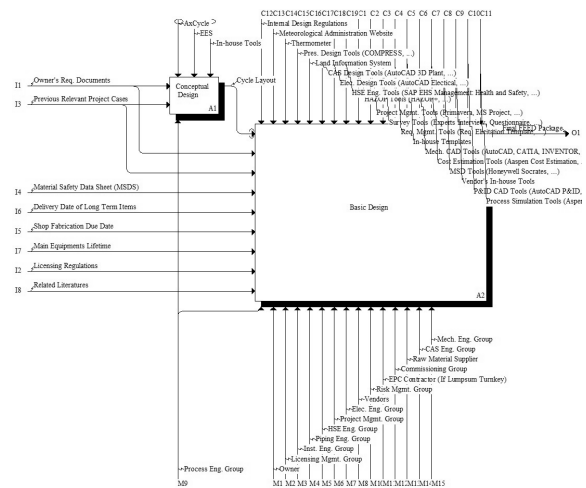


[Figure 7] FEED Framework – Level 1 Model

였다. 테일러링된 IDEF0는 FEED 수행과정에서 도출되는 고유 정보요소를 모두 담아내기 어려운 기존 IDEF0의 문제점을 해결하고자, 세부 정보요소와 설계 프로세스를 포함하는 FEED 프레임워크 모델링 방법이다. 구체적으로, 입력물로부터 출력물을 만드는 데 필요한 제약조건 및 제어항목은 각 프로세스별 수행 도구 및 방법(필수적으로 사용해야 하는 도구, 표준 등을 포함)으로 정의되며, FEED 수행에 필요한 주요 자원은 발전시스템 설계를 수행하는 인적 자원인 수행 주체로 정의한다.

이처럼 테일러링된 IDEF0를 이용하여, 앞서 정의한 세부 정보요소와 설계 프로세스를 반영한 통합 FEED 프레임워크는 다음과 같다.

FEED 프레임워크의 상위 레벨(Level 1)인 '1. FEED'는 Figure 7과 같이, 프로세스 엔지니어링 부서(Process Eng. Group), 프로젝트 관리 부서(Project Mgmt. Group) 등이 내부 설계 코드(Vendor's In-house Tools), 요구사항 관리 소프트웨어(Req. Mgmt. Tools) 등의 수행 도구를 활용

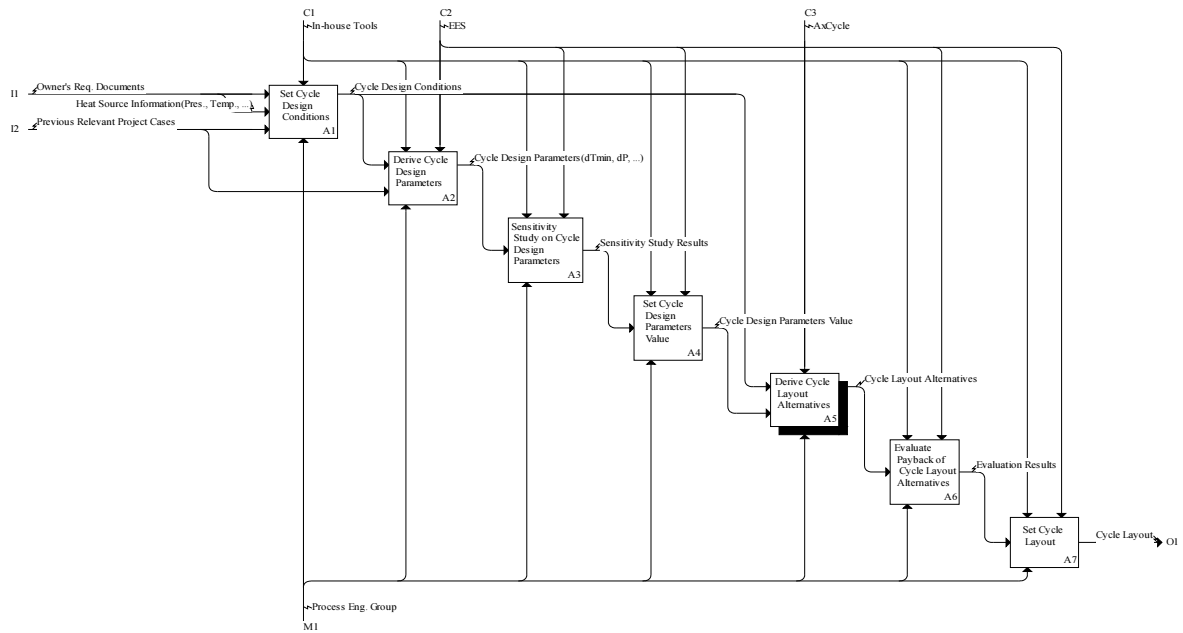


[Figure 8] FEED Framework – Level 2 Model

하여, 초임계 이산화탄소 발전시스템의 운영 주체인 발주자의 요구사항서(Owner's Req. Documents)와 과거 유사한 프로젝트 실적 자료(Previous Relevant Project Cases) 등을 입력물로 받아, 발전시스템의 상세 스펙과 데이터가 패키지화된 FEED 패키지(Final FEED Package)를 산출하는 모델임을 제시하고 있다.

FEED 프레임워크의 중위 레벨(Level 2)은 대표적으로, 1.1. Conceptual Design'에서 프로세스 엔지니어링 부서가 내부 설계 코드와 상용 공정해석 소프트웨어(Axcycle, EES 등)를 활용하여, 발주자의 요구사항서와 유사 프로젝트 실적 자료로부터 발전사이클 레이아웃(Cycle Layout)을 산출하는 모델임을 Figure 8에서 확인할 수 있다.

Figure 9는 FEED 프레임워크의 하위 레벨(Level 3) 중 하나인 '1.1.1. Set Design Conditions' 모델을 제시하고 있는데, 이는 프로세스 엔지니어링 부서가 내부 설계 코드를 활용해 발주자 요구사항서, 열원 정보(Heat Source Information), 유사 프로젝트 실적으로부터 발전사이클 레이아웃에 포함되어야 하는 사이클 설계 조건(Cycle Design Conditions)을 산출한다. 또한, '1.1.2. Derive Cycle Design Parameters'는 프로세스 엔지니어링 부서가 EES 등의 수행 도구를 활용하여, 유사 프로젝트 경험과 '1.1.1. Set Cycle Design Conditions'에서 도출된



[Figure 9] FEED Framework - Level 3 Model

최종 산출물인 사이클 설계조건을 입력물로 받아 최소 온도차(dTmin), 압력 강하(dP) 등을 포함한 사이클 설계 변수(Cycle Design Parameters)를 산출하는 것으로 해석할 수 있다.

4. FEED 프레임워크 가시화 지원도구 개발

4.1 FEED 프레임워크 가시화 지원도구 사용자 요구사항 정의

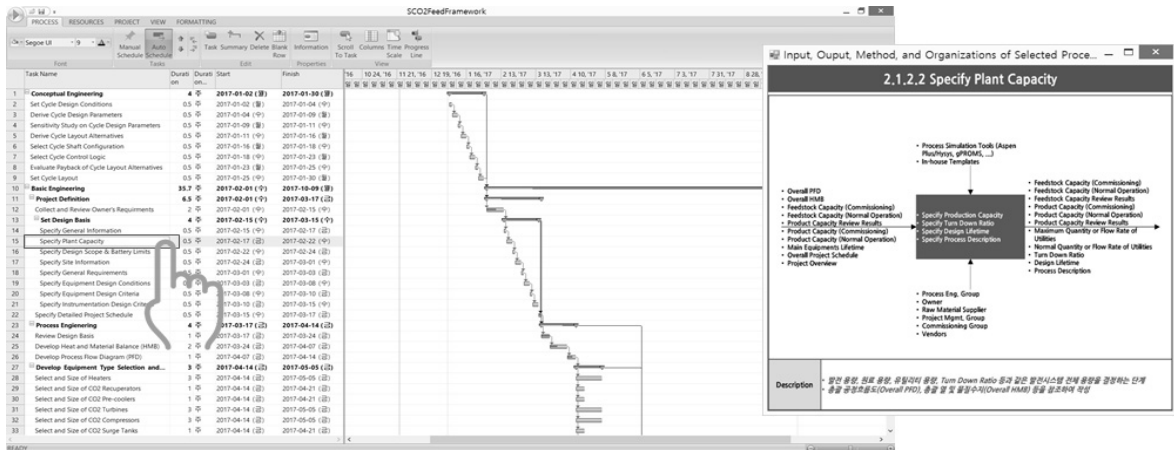
3장에서 개발한 FEED 프레임워크에는 설계 프로세스와 각 프로세스 별 세부 정보요소들이 체계적으로 정리되어있지만, 그 내용이 방대하여 엔지니어들이 직관적으로 이해하기 어려운 측면이 있다. 또한, FEED 프레임워크에는 IDEF0 모델링 특성상 각 프로세스의 수행 시간 정보가 담겨있지 않아, 프로젝트 관리 기능이 부족한 측면이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 엔지니어들로부터 Table 1과 같은 가시화 지원도구 사용자 요구사항을 정의하였으며, 이에 기반해 FEED 프레임워크 가시화 지원도구를 개발하고자 하였다.

<Table 1> Requirements for FEED Framework Visualization Support Tool

번호	요구사항 내용
R.1	가시화 지원도구는 프로젝트를 수행할 때 FEED 프레임워크를 참고할 수 있도록, 각 설계 프로세스에 소요되는 시간 정보를 제공할 수 있어야 한다.
R.2	가시화 지원도구는 사용자의 편의성을 위하여 직관적인 사용자 인터페이스 (UI)를 제공해야 한다.
R.3	가시화 지원도구는 개발의 편의성을 확보해야 한다.
R.4	가시화 지원도구는 매번 새로운 작업을 수행하지 않도록 작업 중인 파일의 저장과 불러오기 기능을 지원해야 한다.
R.5	가시화 지원도구는 윈도우 계열 OS (Windows 7, Windows 8, Windows 8.1) 상에서 동작해야 한다.

4.2 FEED 프레임워크 가시화 지원도구 개발

본 연구에서는 앞서 정의한 요구사항에 부합하도록 실무에서 널리 사용되고 있는 간트 차트(Gantt Chart) 형태의 지원도구를 구현하고자 하였다. 이를 위해 Microsoft사의 .Net C#을 이용하여, 직관적인 사용자 인터페이스와 시간 정보를 포함한 가시화



[Figure 10] Developed FEED Framework Visualization Support Tool

지원도구를 Figure 10과 같이 개발하였다. 개발한 가시화 지원도구는 기본적으로 설계 프로세스와 수행 주체, 수행 도구를 사용자가 추가로 정의하거나 삭제할 수 있도록 하였다. 또한, 전체 설계 프로세스 또는 각 프로세스마다 소요되는 시간 정보를 설정할 수 있어 프로젝트 일정 관리기능을 강화하였다. 뿐만 아니라 XML(Extensive Markup Language) 표준 저장 방식을 채택하여, 상용 프로젝트 관리 소프트웨어인 MS Project에서도 저장하고 불러올 수 있도록 개발하였다.

5. 초임계 이산화탄소 발전시스템 FEED 프레임워크 적합도 평가

개발한 초임계 이산화탄소 발전시스템 FEED 프레임워크의 적합도를 객관적으로 평가하기 위해, 전문가 집단을 선별하여 설문조사를 수행하였다.

설문 항목은 FEED 프레임워크의 설계 프로세스의 적합성 정도, '세부 정보요소의 적합성 정도', '설계 프로세스와 세부 정보요소 간 논리적 연결성 정도' 등에 관한 것으로 선정하였다. 또한, 설문 대상은 FEED 관련 분야에서 10년 이상의 경력을 가진 전문가 9명을 대상으로 하였으며, 설문 점수는 7점 척도 기준으로 평가하였다. Figure 11은 설문 문항과 평가 예시를 보여주고 있다.

번호	설문 문항	채택여부	필요도		중요도		적합도	
			필요	중요	적합	불적합		
1	1.1 Set Cycle Design Conditions의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	12					✓	
2	1.2 Derive Cycle Design Parameters의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	13					✓	
3	1.3 Sensitivity Study on Cycle Design Parameters의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	14					✓	
4	1.4 Set Cycle Design Parameters Values의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	15					✓	
5	1.5.1 Select Cycle Start Configuration의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	16					✓	
6	1.5.2 Select Cycle Control Logic의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	17					✓	
7	1.6 Evaluate Payback of Cycle Layout Alternatives의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	18					✓	
8	1.7 Set Cycle Layout의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	19					✓	
9	2.1.1 Collect and Review Owner's Requirements의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	20					✓	
10	2.1.2.1 Specify General Information의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	21					✓	
11	2.1.2.2 Specify Plant Capacity의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	22					✓	
12	2.1.2.3 Specify Design Scope & Battery Limits (1)의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	23				✓		
13	2.1.2.3 Specify Design Scope & Battery Limits (2)의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	24				✓		
14	2.1.2.3 Specify Design Scope & Battery Limits (3)의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	25					✓	
15	2.1.2.4 Specify Site Information (1)의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	26					✓	
16	2.1.2.4 Specify Site Information (2)의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	27					✓	
17	2.1.2.5 Specify Codes and Standards의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	28				✓		
18	2.1.2.5 Specify Codes and Standards의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	29					✓	
19	2.1.2.5.3 Specify Measuring Units의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	30				✓		
20	2.1.2.5.4 Specify Numbering System의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	31				✓		
21	2.1.2.6.1 Specify Equipment Design Pres의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	32					✓	
22	2.1.2.6.2 Specify Equipment Design Temp의 활동 및 입력, 출력, 도구, 수행주체가 적합하다고 생각되는가?	33					✓	

[Figure 11] Evaluation Example of Developed FEED Framework

이와 같은 과정을 거쳐 이루어진 FEED 프레임워크 적합도 평가는 Table 2와 같이 평균 6.21점으로, 이를 100점 만점 기준으로 환산하였을 경우 88.68점을 획득한 것으로 확인되었다. 이 수치는 초기 설정한 FEED 프레임워크의 개발 목표치를 상회한 것으로, 실제 초임계 이산화탄소 발전시스템 FEED 단계에 충분히 적용 가능한 것으로 평가할 수 있었다.

<Table 2> Evaluation Results

응답자	소속 기관	직무	설문 점수
K**	엔지니어링사	기본 설계	5.79
K**	엔지니어링사	기본/상세 설계	6.65
M**	기자재사	기자재 설계	6.68
J**	엔지니어링사	기본 설계	6.06
K**	발전사	상세 설계	6.09
H**	엔지니어링사	기본 설계	5.61
K**	엔지니어링사	기본/상세 설계	5.85
B**	엔지니어링사	상세 설계	6.14
S**	대학 교수	기본 설계	7.00
7점 만점 기준 평균 점수			6.21
100점 만점 기준 환산 점수			88.68

6. 결론

초임계 이산화탄소 발전시스템은 높은 효율과 복잡하지 않은 사이클 구성, 핵심기기의 소형화, 다양한 열원과의 연계성 등의 장점으로 인해 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 기존 연구들은 사이클 및 핵심기기에 대한 설계와 실험에만 초점이 맞춰져 있어, 발전시스템 상용화에 기반이 되는 FEED 관련 연구가 부재한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 초임계 이산화탄소 발전시스템 개발에 참여하는 엔지니어들이 FEED 설계 절차, FEED 설계 정보요소에 대해 동일한 시각을 가질 수 있도록 초임계 이산화탄소 발전시스템을 위한 FEED 프레임워크를 개발하고자 하였다.

이와 같은 목적에 따라 본 연구는 상용 발전시스템 FEED 패키지화 초임계 이산화탄소 발전시스템 설계 및 운전 핵심 자료 등을 역분석함으로써, 세부 정보요소(입력물, 산출물, 수행 주체, 수행 도구 및 방법)와 설계 프로세스를 정의하였다. 이후 IDEFO 모델링 방법을 적용하여 정의한 세부 정보요소-설계 프로세스를 통합한 FEED 프레임워크를 개발하였다. 또한, 엔지니어들이 FEED 프레임워크를 보다 쉽게 이해하고, 실무에 활용할 수 있도록 간트 차트 방식의 가시화 지원도구까지 개발하였다. 그리고 한 걸음 더 나아가 FEED 전문가를 대상으로 본 연구에서 개발한 FEED 프레임워크의 논리적 연결

성 및 적합도 평가를 수행하였으며, 이 결과, 실제 초임계 이산화탄소 발전시스템 프로젝트에 충분히 적용가능한 수준임을 정량적으로 검증하였다.

이와 같은 과정을 거쳐 진행한 본 연구는 전 세계적으로 체계화되지 않은 초임계 이산화탄소 발전시스템의 FEED 프레임워크를 처음으로 정립하였을 뿐만 아니라, 엔지니어가 실무에 활용할 수 있도록 직관성과 편의성, 프로젝트 관리성을 향상시킨 지원 도구까지 제시하였다는 의의가 있다. 이러한 의의와 더불어, 추후 연구에서는 수십 MWe급 초임계 이산화탄소 발전시스템 실제 프로젝트에 FEED 프레임워크를 적용함으로써 지금보다 고도화된 FEED 프레임워크로 개선해나갈 계획이다.

Acknowledgements

이 연구는 2016년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('10072058').

References

1. Sulzer, G., Verfahren zur Erzeugung von Arbeit aus Wärme, Swiss Patent CH 269599, 1950.
2. Feher, E. G., The supercritical thermodynamic power cycle, Energy conversion, 8(2), p85-90, 1968.
3. Gokhshtein, D. P., KOZOREZ, A., DEKHTYAREV, V., FUTURE DESIGNS OF THERMAL POWER-STATIONS OPERATING ON CARBON-DIOXIDE, Thermal Engineering, 18(4), 1971.
4. Gokhshtein, D. P., Verkhivker, G. P., Use of carbon dioxide as a heat carrier and working substance in atomic power stations, Atomic Energy, 26(4), p430-432, 1969.
5. Angelino, G., Carbon dioxide condensation cycles for power production, ASME, 1968.
6. Angelino, G., Real gas effects in carbon

- dioxide cycles, In ASME 1969 gas turbine conference and products show (pp. V001 T01A071-V001T01A071), American Society of Mechanical Engineers, 1969.
7. Dostal, V., Driscoll, M. J., Hejzlar, P., A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering), 2004.
 8. Floyd, J., Alpy, N., Moisseytsev, A., Haubensack, D., Rodriguez, G., Sienicki, J., Avakian, G., A numerical investigation of the sCO₂ recompression cycle off-design behaviour, coupled to a sodium cooled fast reactor, for seasonal variation in the heat sink temperature, Nuclear Engineering and Design, 260, p78-92, 2013.
 9. Wright, S. A., Radel, R. F., Vernon, M. E., Rochau, G. E., Pickard, P. S., Operation and analysis of a supercritical CO₂ Brayton cycle. Sandia Report, No. SAND2010-0171, 2010.
 10. Le Moullec, Y., Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle. Energy, 49, p32-46, 2013.
 11. Sungho, P., Dong-Ryul, R., Choongsub, Y., Jea-Min, C., Junguk, S., Chunsik, L., Thermo-economic evaluation of 500MW class coal fired power plant combined with supercritical carbon dioxide Brayton cycle, Journal of Energy Climate Change, 11(1), p1-12, 2016.
 12. Joon-Young, K., Deaguen, H., Suk-Hwan, S., Hwal-Won, S., A Systems Engineering Approach to the Design of Steam Reforming H₂ Generation System based on Natural Gas: Case of Iron and Steel making Plant, Journal of the Korean Society of Systems Engineering, 11(1), p81-93, 2015.
 13. KBR. (2016). [online] Available at: <https://www.kbr.com/services/engineering-procurement-and-construction/engineering> [Accessed 13 Apr. 2016].
 14. Siemens. (2015). FEED - Engineering & Consulting - Siemens. [online] Available at: http://w3.siemens.com/mcms/engineering-consulting/en/services_/engineering/feed/pages/feed.aspx [Accessed 22 Dec. 2015].
 15. Bechtel. (2015). Engineering. [online] Bechtel Corporate. Available at: <http://www.bechtel.com/services/engineering/> [Accessed 23 Dec. 2015].
 16. Jacobs. (2016). Services Jacobs. [online] Available at: <http://www.jacobs.com/services#engineering> [Accessed 25 April. 2016].
 17. EMERSON. (2015). [online] Available at: <https://www.emerson.com/en-us/automation/services-consulting/project-services/systems-project-services/pre-feed> [Accessed 23 Dec. 2015].
 18. CHIYODA CORPORATION. (2015). FEED (Front End Engineering Design) | CHIYODA CORPORATION. [online] Available at: <https://www.chiyodacorp.com/en/service/ple/feed/> [Accessed 22 Dec. 2015].
 19. Samsung Engineering. (2016). Samsung Engineering. [online] Available at: <http://www.samsungengineering.co.kr/business/unit/common/buView> [Accessed 12 May 2016].
 20. HYUNDAI E&C. (2016). HYUNDAI E&C We build tomorrow. [online] Available at: <http://en.hdec.kr/EN/Business/EnergyWork.aspx#.Wi9o2mxrz-g> [Accessed 12 May 2016].