

시스템엔지니어링 기반 산업 폐열 발전시스템 경제성 분석 모듈 설계

김준영* 차재민 박성호 신중욱 이태경
고등기술연구원 플랜트SE팀

Design of Economic Analysis Module for Waste Heat Recovery based on Systems Engineering Approach

Joon Young Kim*, Jae Min Cha, Sung Ho Park, Jung Uk Shin, Tae Kyong Lee
Plant Systems Engineering Team, Institute for Advanced Engineering (IAE)

Abstract : In the energy-guzzling industries such as steel making and cement, power plants utilizing waste heat have been attracting attention to increase energy efficiency. However, the existing economic analysis system doesn't consider the special working fluids and the cost models of the main equipment used in the waste heat recovery power plant. So it is difficult to estimate the plant economics accurately. Therefore, It is required to develop a economic analysis module that can more accurately evaluate for the power plant. In this study, the systems engineering approach was used to design and develop the module that systematically reflects the characteristics of the power plant and various requirements. Specifically, first, the special working fluids and main equipment applied to the power plant were investigated. Next, the cost models for each equipment were developed. Finally, the economic analysis module based on this was developed.

Key Words : Waste Heat Recovery, Economic Analysis, Systems Engineering

Received: November 15, 2017 / **Revised:** December 8, 2017 / **Accepted:** December 26, 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

화석 에너지원이 절대적으로 부족하며, 신재생 에너지원이 이를 완전히 대체하기 어려운 현실을 고려할 때, 효율적인 에너지의 사용은 국내 산업의 경쟁력과 밀접한 관련이 있다. 이를 위해, 제철, 시멘트, 석유화학 등 에너지 다소비 산업에서는 오래 전부터 에너지 효율을 높이기 위한 방안으로 폐열을 활용한 발전시스템을 구축하고 있다. 실제로, 산업계에서 소비하는 에너지 중 약 12%는 폐열로 버려지고 있는데, 버려지는 폐열을 회수하여 전력 생산에 사용한다면 상당한 비용 절감이 가능한 것으로 알려져 있다(이영수 외, 2016), 또한, 이러한 비용 절감 효과는 폐열 발전시스템 시장을 빠르게 성장시키는데 있어 중요 요인으로 작용하고 있다.

하지만, 해당 시장의 빠른 성장에도 불구하고 폐열 발전시스템에 특화된 경제성 분석 솔루션의 부재로 발전시스템의 사업 경제성을 정확하게 평가하기 어려운 실정이다. 이는 기존 경제성 분석 솔루션에는 폐열 발전시스템에 사용되는 특수 작동 유체와 주요 설비의 비용 모델이 고려되어있지 않아 경제성 분석에 상당한 오차가 발생하기 때문인 것으로 간주된다. 이러한 한계를 극복하기 위해서, 폐열 발전시스템의 특성을 고려하여 사업의 경제성을 보다 정확하게 평가할 수 있는 솔루션의 개발이 폐열 발전시스템 산업으로부터 요구되고 있다.

본 연구의 목표는 전문적인 문제에 대응하기 위해서 폐열 발전시스템에 최적화된 경제성 분석 모델을 개발하는 것이다. 이를 위해, 폐열 발전시스템의 특수 작동 유체를 조사 및 선정하고, 해당 유체에서 작동되는 주요 설비들을 도출하며, 도출된 설비별 비용 모델을 개발한 후, 이에 기반한 경제성 분석 모델을 개발하였다. 한편, 산업에서 실질적으로 활용할 수 있는 경제성 분석 모델을 개발하기 위해서는 산업계의 다양한 요구사항을 반영해야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 이해당사자의 요구사항으로부터 이를 반영한 최종 시스템을 체계적으로 개발하기 위한 방법론인 시스템 엔지니어링 접근방법을

활용하였다.

이어지는 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 산업 폐열 이용 발전시스템의 개요와 경제성 분석의 기본 개념을 포함한 이론적 배경을 설명한다. 3장에서는 시스템 엔지니어링 접근방법에 따라 경제성 분석 모듈 개발 시에 고려해야 할 이해관계자를 식별해 이들로부터 요구사항을 도출한다, 또한 도출된 요구사항에 부합한 아키텍처와 비용 모델을 개발하여 경제성 분석 모듈을 설계한다. 4장에서는 설계된 모듈을 실제로 구현 및 적용함으로써, 목표 정확도와 실제 정확도간의 비교를 통해 본 경제성 분석 모듈의 성능을 검증한다. 마지막으로, 5장에서는 결론과 추후연구로 논문을 마무리한다.

2. 이론적 배경

2.1 산업 폐열 이용 발전시스템의 개요

산업 폐열은 공정 가동을 위해 투입되는 에너지 중 일부가 사용되지 못하고 외부로 배출되는데, 이러한 폐에너지를 가리켜 폐열이라고 정의한다(양남식, 2001). 폐열의 형태는 매우 다양한데, 대표적으로 엔진에서 연료를 연소시켜 동력을 얻은 후 외부로 배출되는 배가스, 고온의 기기를 냉각시킨 후 외부로 방출되는 폐온수 등을 꼽을 수 있다.

폐열로 배출되는 에너지의 양은 산업 기기별로 차이는 있으나, 보일러의 경우 8~20%, 건조 설비의 경우 10~50%, 공조 시설의 경우 30~50%에 해당하는 에너지가 폐열로 배출되고 있다(한국에너지기술연구원 기술확산연구부, 2003). 이처럼 많은 양의 폐열을 활용하기 위해 다양한 기업들이 폐열 발전시스템 도입하면서, 관련 산업 규모가 지속적으로 성장하고 있다. 실제로 폐열 발전시스템 관련 시장 규모는 국내 1조 4,735억 원, 전 세계 41,291억 달러 수준에 육박하는 것으로 추정되고 있으며, 매년 6.5% 정도에 이르는 성장이 이루어질 것으로 예측되고 있다(Yang 외, 2015).

폐열 발전시스템의 사이클 구성은 사용되는 작동 유체에 따라 다양하게 결정할 수 있는데, 산업계에

서는 증기를 사용하는 증기 랭킨 사이클(Steam Rankine Cycle)을 주로 채택하고 있다. 증기 랭킨 사이클은 발전시스템을 안정적으로 운영할 수 있고, 20~30% 이상의 에너지 효율 향상이 검증됨에 따라 제철소, 발전소, 선박 등의 산업에서 광범위하게 적용되고 있다(Incropera 외, 2010). 또한 최근에는 에너지 효율을 더욱 향상시키기 위해 작동 유체를 유기 냉매 또는 초임계 상태의 이산화탄소로 사용하는 유기 랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)과 초임계 이산화탄소 브레이튼 사이클(Super-critical CO₂ Brayton Cycle, SCO₂ BC) 등이 개발되면서 보다 다양한 폐열 발전시스템이 추가되고 있다(백영진, 2011).

2.2 경제성 분석의 기본 개념

장기간에 걸쳐 대규모 투자가 필요한 폐열 발전 시스템은 예산 낭비를 방지하고, 투자의 효율적 집행을 위해 사업 기획에서부터 건설에 이르기까지 다차원적으로 경제성 분석을 수행해야한다.

경제성 분석에 활용하는 대표적인 지표로 총 사업비가 있으며, 이는 폐열 발전시스템의 건립 및 운영에 소요되는 투자비를 산정하는데 도움이 된다(Waler Short 외, 1995).

$$TCI = FCI + OO = DC + IC + OO \quad (\text{Eqn. 1})$$

- *TCI* Total Capital Investment
- *FCI* Fixed Capital Investment
- *OO* Other Outlays
- *DC* Direct Costs
- *IC* Indirect Costs

총 사업비(TCI)는 고정자본투자비(FCI)와 부대비용(OO)으로 합이며, 이 중에서 고정자본투자비는 직접비(DC)와 간접비(IC)로 구성된다(Bejan, A., 외, 1996). 직접비는 발전시스템에 투입되는 설비 비용과 해당 설비를 설치하기 위한 설치 비용,

용수나 유틸리티를 공급하기 위한 배관 비용, 발전 시스템 건립에 필요한 부지 비용 등을 포함하며, 간접비는 설계 및 관리감독비용, 건설비용, 예비비를 포함한다. 부대비용에는 시운전 비용, 운전자본, 라이선스 및 연구개발 비용, 건설배당충당금이 포함된다. 각 주요 항목 중에서 설비 비용은 총 사업비에 가장 큰 부분에 해당하며, 따라서 설비 비용의 정확한 산정이 전체 경제성 분석 신뢰도 향상에 중요한 영향을 끼치게 된다.

업체 견적에 따른 산출법은 설비 제조업체로부터 견적서를 입수하여, 설비 비용을 직접적으로 예측하는 방식이다. 이는 다양한 사양과 재질 등을 반영해 정확한 가격 예측이 가능한 장점이 있지만, 사양 변경 시 제조업체로부터 다시 견적을 받지 않는 한 비용 변동을 예측하기 어려운 단점이 있다. 반면, 비용 모델에 따른 산출법은 기존에 보유하고 있는 유사 사양의 견적과 선행 연구를 바탕으로 설비 비용과 설비 사양 및 사이즈 간의 상관관계가 포함된 비용 모델을 개발하고, 이로부터 설비 비용을 간접적으로 예측하는 방식이다(김정권 외, 2014). 이와 같은 방법을 수행하기 위해서는 플랜트 건립에 실제 사용한 설비의 사양/사이즈와 설비 비용간의 데이터를 최대한 확보하는 것이 정확도를 결정한다. 그러므로 정확한 비용 모델을 사용할 경우, 설비 사양 변경 시 즉각적인 비용 예측이 가능한 장점이 있

<Table 1> Comparison of Equipment Cost Estimation Methods

	업체 견적에 따른 산출법	비용 모델에 따른 산출법
산출 근거	제조업체가 직접 제공하는 견적	설비 사양/사이즈-비용간 상관관계 정의
장점	높은 정확도	사양 변경에 따른 가격 변동 예측 가능
	다양한 사양/재질에 대한 예측 가능	선행 연구/견적으로 비용 모델 개발 가능
단점	견적서 입수 어려움	제조업체의 견적과 상이할 수 있음
	사양 변경에 따른 가격 변동 예측 어려움	다양한 사양/재질에 대한 예측 어려움

<Table 2> Mission of Economic Analysis Module

단계 구분	프로젝트 진행 정도	추정 목적	추정 정확도	준비 정도 (기준 : 최소 노력 = 1)	
Class 5	0% to 2%	프로젝트(컨셉) 기획 및 선별	L : -20% to -50% H : +30% to +100%	1	
Class 4	1% to 15%	프로젝트 타당성 평가	L : -15% to -30% H : +20% to +50%	2 to 4	경제성 분석 모듈 목표 성능
Class 3	10% to 40%	프로젝트 예산 산출 및 인허가 평가	L : -10% to -20% H : +10% to +30%	3 to 10	
Class 2	30% to 70%	프로젝트 공사 입찰	L : -5% to -15% H : +5% to +20%	4 to 20	
Class 1	50% to 100%	프로젝트 실제 공사 및 설비 구매 비용 추정	L : -3% to -10% H : +3% to +15%	5 to 100	

지만, 부정확한 비용 모델을 사용할 경우, 예측된 비용이 실제 제조업체에서 제공하는 비용과 차이가 발생할 수 있는 단점이 있다. Table 1은 전술한 두 가지 설비 비용 산출법을 비교한 결과를 보인다.

3. 경제성 분석 모듈 설계

3.1 경제성 분석 모듈의 목표

현 관련 산업에서는 폐열 발전시스템에 최적화된 경제성 분석 모듈의 부재로 인해 사업 타당성 평가가 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서 사업 타당성 평가 단계에서 활용할 수 있는 경제성 분석 모듈 개발을 목표로 한다. 여기서 산정 정확도는 플랜트 경제성 평가 분야의 세계적인 공인 기관인 AACE (American Association of Cost Estimators)에서 제안하고 있는 Table 2의 경제성 추정 정확도 지표를 참고하여, Class 4 단계의 정확도를 목표 수준으로 한다(AACE International, 2011).

3.2 경제성 분석 모듈의 요구사항 정의

경제성 분석 모듈의 요구사항을 정의하기 위해서 본 연구에서는 1) 이해관계자 식별, 2) 이해관계자 요구사항 정의, 3) 시스템 요구사항 정의 절차를 준수하였다(김준영 외, 2015). 구체적으로, 우선, 개발 초기 단계에서부터 대상 시스템과 직·간접적으로 관련 있는 모든 이해관계자를 식별하였고, 이들의 니즈를 반영한 이해관계자 요구사항을 정의하였다. 다음으로 비전문적 내용으로 표현된 이해관계자 요

구사항을 개발·구현의 관점에서 보다 명확한 기술적 내용으로 변환시켜 시스템 요구사항을 정의하였다.

3.2.1 이해관계자 식별

경제성 분석 모듈 설계를 위한 첫 번째 단계로써 모듈 개발 단계 시 고려해야 할 이해관계자를 식별할 필요가 있다. 이를 위해 목표 시장인 폐열 발전 산업의 전 가치사슬에 걸쳐 연관성이 있는 대상자를 이해관계자로 선정하였으며, Table 3은 식별된 이해관계자와 그 예시를 보여주고 있다. 이해관계자는 크게 경제성 분석 모듈을 개발하는 개발자, 개발된 경제성 분석 모듈을 사용하는 사용자, 개발된 경제성 분석 모듈을 운영하고, 관련 기능과 성능을 보완하는 유지보수자로 구분할 수 있다. 이 중에서 사

<Table 3> Identification of Stakeholders

이해관계자	이해관계자 명	이해관계자 예시
개발자	경제성 분석 모듈 개발사	알고리즘개발사, UX/UI개발사, ...
사용자	폐열 발전 시스템 운영사	국영발전사, 민영발전사, ...
	에너지 수요사	제철/제련소, 시멘트, 유리, ...
	폐열 발전 시스템 설비 제조사	터빈/압축기, 열교환기, ...
	폐열 발전 시스템 엔지니어링사	기본설계사, 상세설계사, ...
	폐열 발전 시스템 건설사	토목/구조, 시공사, ...
유지보수자	경제성 분석 모듈 유지보수사	운영대행사, 유지보수대행사, ...

<Table 4> Stakeholder's Requirements

번호	명칭	내용
StR#1	작동 유체 모델 수용	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템의 작동 유체 모델을 수용할 수 있어야 한다.
StR#2	설비 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템의 설비 비용을 산출할 수 있어야 한다.
StR#3	총 직접비 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템의 총 직접비를 산출할 수 있어야 한다.
StR#4	총 간접비 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템의 총 간접비를 산출할 수 있어야 한다.

용자는 폐열 발전시스템의 생명주기에 따라 1) 폐열 발전시스템을 운영해 발전사업을 영위하는 폐열 발전시스템 운영사, 2) 에너지 수요가 많아 산업 폐열을 자체적으로 활용하기 위한 에너지 수요사, 3) 폐열 발전시스템의 주요 설비를 제작하는 제조사, 4) 폐열 발전시스템의 개념/기본/상세설계를 담당하는 엔지니어링사, 5) 상세설계 결과를 바탕으로 폐열 발전시스템의 토목/구조/시공을 수행하는 건설사로 세분화할 수 있었다.

3.2.2 이해관계자 요구사항 정의

두 번째 단계로 식별된 이해관계자로부터 경제성 분석 모듈의 요구사항을 추출하는 작업을 수행하였다. 이를 위해 각 이해관계자 그룹에서 사업 타당성 분석과 경제성 분석에 경험이 있는 실무자들을 대상으로 인터뷰, 설문지, 기능분석을 진행하여 경제성 분석 모듈의 목적과 용도에 관한 요구사항 예시를 Table 4와 같이 정의하였다.

3.2.3 시스템 요구사항 정의

세 번째 단계로 고객의 관점에서 정의된 이해관계자 요구사항을 개발자의 관점으로 정의된 시스템 요구사항으로 변환하는 작업을 수행하였다. 이를 위해 설계하고자 하는 경제성 분석 모듈의 문제 영역과 기술 영역을 우선적으로 선정하였다. 이후 도메인 전문가의 판단결과 QFD(Quality Function Deploy-

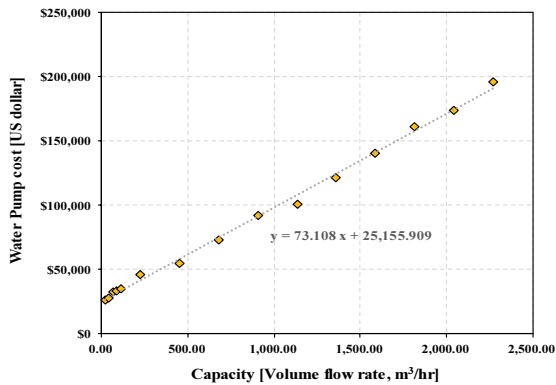
<Table 5> System Requirements

번호	명칭	내용
SyR#1	증기 모델 수용	경제성 분석 모듈은 작동 유체인 증기 모델을 수용할 수 있어야 한다. (관련 이해관계자 요구사항: StR #1)
SyR#2	유기 냉매 모델 수용	경제성 분석 모듈은 작동 유체인 유기 냉매 모델을 수용할 수 있어야 한다. (StR #1)
SyR#3	펌프 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템에 사용하는 펌프의 비용을 산출할 수 있어야 한다. (StR #2)
SyR#4	압축기 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템에 사용하는 압축기의 비용을 산출할 수 있어야 한다. (StR #2)
SyR#5	열교환기 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템에 사용하는 열교환기의 비용을 산출할 수 있어야 한다. (StR #2)
SyR#6	터빈 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템에 사용하는 열교환기의 비용을 산출할 수 있어야 한다. (StR #2)
SyR#7	총 현장 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템의 구축 현장에 소요되는 비용을 산출할 수 있어야 한다. (StR #3)
SyR#8	설계·감리 비용 산정	경제성 분석 모듈은 폐열 발전시스템의 설계·감리 비용을 산출할 수 있어야 한다. (StR #4)

ment) 기법을 동시에 활용하여 시스템 수준에서 수행해야 할 항목을 기술적 사항으로 Table 5의 예시와 같이 정의하였다.

3.3 설비 비용 모델의 개발

경제성 분석 모듈의 아키텍처에서 정의한 바대로 총 사업비를 산정하기 위해서는 폐열 발전시스템에서 사용하는 주요 설비의 비용 산정이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구는 설비 사양 변경이 빈번



[Figure 1] Cost Model of Pump

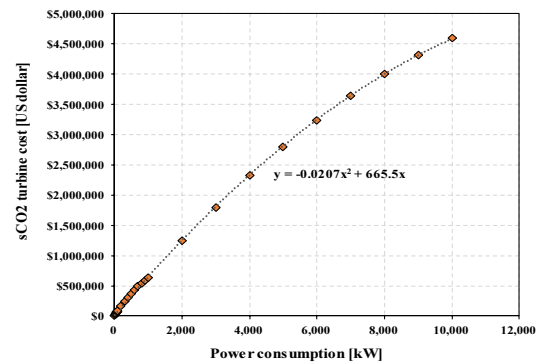
히 발생하는 사업 타당성 단계에 활용할 수 있도록 각 설비 별 비용 모델을 개발하고자 한다. 이를 위해 주요 설비인 펌프, 압축기, 열교환기, 터빈을 대상으로 설계 인자 및 제작 방법과 설비 비용간의 상관관계를 찾아 비용 모델을 개발하였다.

3.3.1 펌프 비용 모델

펌프는 증기 랭킨 사이클, 유기 랭킨 사이클, 초임계 이산화탄소 랭킨 사이클에서 액상의 유체를 고압으로 압축시키는데 사용되는 기기이다. 이와 같은 펌프의 구성요소는 유체를 압축시키는 임펠러 부분과 임펠러를 구동시키기 위한 모터 부분으로 분류할 수 있는데, 이 중에서 모터 부분이 펌프 전체 비용의 약 60~80%를 차지하고 있다. 이는 즉, 펌프 비용 모델이 유체 유량 또는 모터 용량과 상관관계가 있음을 의미한다. 본 연구에서는 이러한 사실을 바탕으로 펌프의 비용 모델을 개발하고자, 폐열 발전 시스템에서 가장 많이 사용되는 원심형 펌프의 유체 유량 별 가격을 조사하였다. 이후 해당 데이터를 회귀분석한 결과, 결정계수(R^2)가 0.997인 1차 함수의 물 펌프 비용 모델을 Figure 1과 같이 도출하였다.

3.3.2 압축기 비용 모델

압축기는 초임계 이산화탄소 브레이튼 사이클에서 펌프를 대신해 이산화탄소를 가압하는데 사용되는 기기이다. 압축기의 기능은 기본적으로 펌프와 동일하기 때문에, 압축기의 비용 모델도 유체 유량



[Figure 2] Cost Model of Compressor

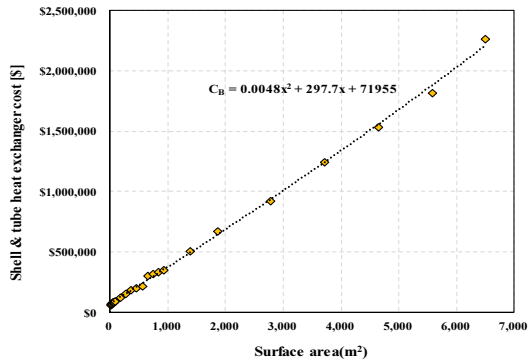
에 의해 결정된다. 이에 따라 본 연구에서는 초임계 이산화탄소 압축기 제작사인 S**社, J**社의 판매 실적에 기반하여, 2차 함수 형태의 초임계 이산화탄소 압축기 용량별 비용 모델을 개발하였다. 비용 모델을 구체적으로 살펴보면, 저용량에서는 펌프와 유사하게 유량 증가에 따라 비용이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나, 고용량으로 갈수록 유량 증가에 따른 가격 차이가 줄어드는 것을 Figure 2를 통해 확인할 수 있었다.

3.3.3 열교환기 비용 모델

열교환기는 중·저온의 폐열로부터 열을 흡수해 발전시스템으로 에너지를 공급하거나, 터빈 후단으로부터 나온 미열을 방출해 발전시스템의 작동유체를 냉각시키는데 필요한 기기이다. 일반적으로 폐열 발전시스템에 사용하는 열교환기는 다관형 열교환기(Shell and Tube Heat Exchanger)이다. 다관형 열교환기는 제철, 시멘트, 석유화학 등의 전 산업 분야에 널리 사용되는 설비인 만큼, 비용 모델에 대한 다양한 선행 연구가 수행되어왔다.

$$C_P = C_B \times F_P \times F_M \times F_L \quad (\text{Eqn. 2})$$

- C_P 다관형 열교환기 비용
- C_B 전열 면적 단가(Baseline)
- F_P 설계압력 보정계수
- F_M 재질 보정계수
- F_L Tube Length 보정계수



[Figure 3] Cost Model of Heat Exchanger

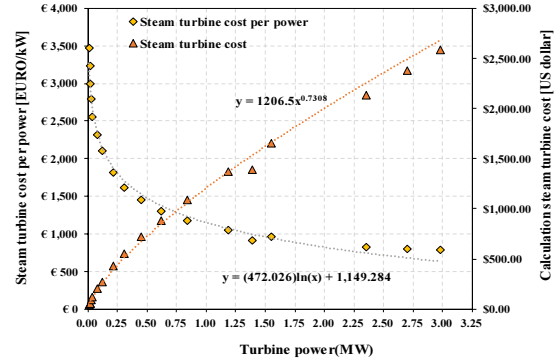
이 중에서 Couper(2003)는 Eqn. 2와 같이 전열 면적 단가에 열교환기 설계압력과 재질, Tube Length 보정계수를 반영함으로써 다관형 열교환기 비용을 산출할 수 있는 개념을 제시하였다. 해당 개념을 활용하기 위해서는 전열 면적 단가(C_B)를 도출해야 하는데, 이를 위해 본 연구는 미국 에너지부(Department of Energy; DOE)를 통해 발전시스템 내에 설치된 다관형 열교환기 관련 정보를 조사하였다. 이후, 해당 정보를 바탕으로, 다관형 열교환기 비용 모델의 Baseline이 되는 전열 면적 단가(C_B)를 Figure 3과 같이 도출하였다.

3.3.4 터빈 비용 모델

터빈은 증기·유기 냉매·초임계 이산화탄소의 팽창 일을 전달받아 전력을 생산하는데 사용되는 기기이다. 기본적으로 터빈은 발전 용량에 따라 팽창비, 단수 등의 설계 인자가 결정되며, 이러한 설계 인자가 터빈의 비용에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구는 작동 유체별로 발전 용량에 따른 터빈 비용 조사 결과를 바탕으로 Figure 4와 같이 발전 용량과 지수함수의 상관관계를 갖는 비용 모델을 개발하였다.

3.4 경제성 분석 모듈의 아키텍처 설계

앞서 정의한 다양한 시스템 요구사항에서 최종 시스템을 개발하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이는 요구사항이 많고 시스템 복잡도가 높은 경우, 요구사

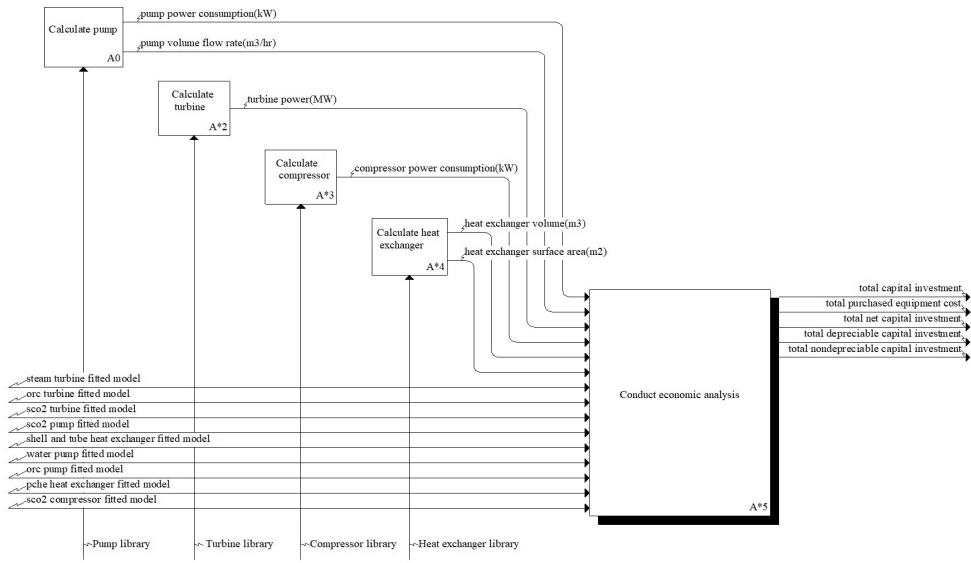


[Figure 4] Cost Model of Turbine

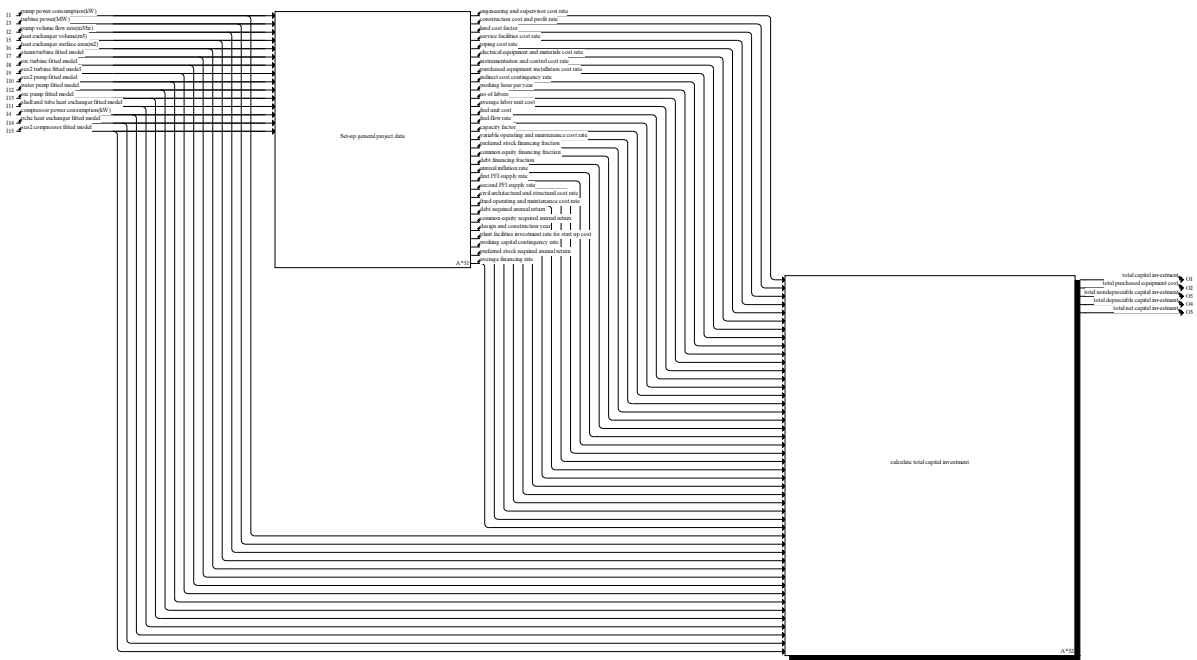
항의 반영이 누락되어 개발 완료 후에 재설계가 요구되는 경우가 자주 발생하기 때문이다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 아키텍처 설계 과정을 수행하였으며, 이로부터 최종 시스템이 요구사항을 달성하기 위한 기능들을 아키텍처로 정의하였다. 구체적으로, 대상 모듈의 기능들을 상세하게 분석 및 정의하는 기능 분석(Functional Analysis) 방법을 통해 경제성 분석 모듈이 가져야 할 최상위 수준의 기능에서부터 함수로 구현하기 위한 최하위 수준의 세부 기능들까지 정의하였다. 더하여, 해당 아키텍처는 세부 기능과 관련되어있는 컴포넌트를 연계시킴으로써 기능 요소와 물리적 요소를 포함한 통합 아키텍처를 개발하였다. 이를 체계적으로 수행하기 위한 방법으로 복잡한 시스템의 기능 분석에 널리 사용되는 모델링 기법인 Integrated Definition for Functional Modeling (IDEFO) 기법을 이용하였다. 이 같은 과정을 거쳐 설계한 경제성 분석 모듈의 아키텍처는 다음과 같다.

경제성 분석 모듈의 Level 1 아키텍처는 Figure 5에서 나타난 바와 같이, 경제성 분석 모듈이 외부 모듈과 어떠한 정보를 주고받는지 보여준다. 외부 모듈(A0~A4)은 폐열 발전시스템의 주요 설비 설계 모듈이며, 총 사업비 산정 모듈(A5)은 외부 모듈로부터 펌프, 압축기, 열교환기, 터빈의 설계 인자와 사양 정보를 입력받으며, 기 개발한 비용 모델에 입각해 내부적으로 설비 비용을 도출한 뒤 이로부터 총 사업비를 최종적으로 계산하게 된다. 경제성



[Figure 5] Architecture of Economic Analysis Module (Level 1)



[Figure 6] Architecture of Economic Analysis Module (Level 2)

분석 모듈의 Level 2 아키텍처는 Figure 6과 같이, 경제성 분석에 필요한 기본 정보를 설정하는 ‘Set-up General Project Data’기능과 해당 설정 정보를 입력받아 총 자본투자비를 산정하는 ‘Calculate Total Capital Investment’기능으로 구성된다. 이 중에서 ‘Calculate Total Capital Investment’기능

은 1) 펌프 비용 산정 기능, 2) 압축기 비용 산정 기능, 3) 열교환기 비용 산정 기능, 4) 터빈 비용 산정 기능, 5) 기능 1)~4)에서 산출된 결과값을 입력받아, 총 설비 비용을 산정하는 기능을 포함한다. 이러한 기능은 시스템 요구사항 SyR #3~6을 반영한 결과이다.

4. 경제성 분석 모듈 구현 및 사례 연구

앞서 개발된 경제성 분석 모듈의 기능 아키텍처가 제대로 설계되었는지 검증할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 기능 아키텍처를 바탕으로 프로토타입을 구현하고, 이를 이용한 사례 연구를 통해 경제성 분석 모듈의 추정 정확성을 검증한다.

4.1 경제성 분석 모듈의 프로토타입 구현

앞서 설계된 기능 아키텍처는 소프트웨어 시스템의 최하위 구성요소인 단위 함수(Unit Function) 수준까지 정의되어 있으므로, 이를 기반으로 프로그래밍 언어를 이용해 프로토타입을 구현하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 수식 계산에 최적화된 Mathworks Matlab 2017b를 이용하였으며, 별도의 Toolbox는 사용하지 않았다. Table 6은 경제성 분석을 위한 중간 과정으로써, 건설배당충당금을 계산하는 단위 함수의 소스코드와 입력변수, 출력변수, 동작원리, 알고리즘이며, 이와 같이 각 단위 함수와 이를 통합한 전체 모듈을 본 과정에서 구현하였다.

4.2 경제성 분석 모듈의 성능 검증

개발한 경제성 분석 모듈이 총 사업비를 제대로 추정할 수 있는지 검증하기 위한 가장 정확한 방법은 실제로 추진된 폐열 발전시스템의 설비 비용을 경제성 분석 모듈에 입력해 추정한 총 사업비와 실제 건립에 사용된 총 사업비를 직접 비교하는 것이다. 이때, 실제 총 사업비와 경제성 분석 모듈을 통

해 추정된 총 사업비의 차이가 -15%~+30%의 범주 안에 있다면, 본 연구의 성능 목표를 달성하는 것으로 간주할 수 있다.

하지만, 기업 기밀 상 폐열 발전시스템 건립에 소요된 설비 비용과 총 사업비를 공개하지 않을 뿐만 아니라, 발전 산업 고유의 폐쇄성으로 인해 자료 확보가 어려워 이와 같은 직접 비교를 수행하기 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 경제성 분석 모듈의 성능 검증 대안으로 미국 에너지 기술 연구소(National Energy Technology Laboratory; NETL)에서 공개한 천연가스 복합발전(Natural Gas Combined Cycle; NGCC)의 경제성 분석 사례(Black, 2011)를 바탕으로, 사례에서 제시하고 있는 총 사업비와 본 연구에서 개발된 경제성 분석 모듈을 이용해 추정된 총 사업비를 비교함으로써 성능을 검증한다.

4.2.1 NETL NGCC 사례

NETL NGCC 사례를 설명하기에 앞서, NGCC 시스템에 대하여 간략히 설명한다. NGCC 시스템은 천연가스(Liquified Natural Gas; LNG)를 연소해 만든 고온의 연소가스로 가스터빈을 돌려 1차적으로 전기를 생산하고, 이 때 배출되는 고온의 배기가스로 터빈을 돌려 또 한번 더 전기를 생산하게 된다. 이와 같은 NGCC 시스템은 적은 환경오염과 높은 열효율의 장점을 가지고 있어 발전 산업에 있어 널리 사용되고 있다.

NETL의 NGCC 보고서(Black, 2011)는 미국 Montana 지역과 North Dakota 지역에 512 MW 급의 순 출력을 가지는 NGCC 시스템을 건설하는데 드는 총 사업비를 분석한 자료이다. NETL NGCC 보고서에는 두 지역에 건설하는 사례에 대하여 제시하고 있으며, 각 사례에 대하여 CO₂ 포집하는 경우와 CO₂를 포집하지 않는 경우로 나눠 총 4가지의 총 사업비 분석 사례(S31A, S31B, L31A, L31B)를 제시하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 CO₂를 포집하지 않는 S31A 사례를 선정하였다. S31A 사례에서 NGCC 시스템은 연소 터빈 및 발전기(Com-

<Table 6> Prototype of Economic Analysis Module

항목	상세설명
함수명	calculate_AFUDC_details
함수기능	산출된 플랜트 설비 투자비를 기반으로 건설배당충당금 세부 인자를 계산
동작원리	배분된 투자비 중 자기 자본 비율과 우선주 발행 비율, 차입금 비율을 산정하여 각 차년도 별 투자비를 계산함
알고리즘	$PFI1 = plant_facilities_investment * (first_PFI_supply_rate);$

<Table 7> Basis and Consumption for Economic Analysis

분석 데이터 및 가정	입력값
System Life	30 years
Economic Life	35 years
Design and Construction Year	1 years
No of Labors	5
Working Hours per Year	2,600hour
Average Labor Unit Cost	\$34.65/hour
Capacity Factor	85%
Equipment Installation	20%
Land Cost	0.03%
Civil Architectural and Structural	20%
Service Facilities	30%
Engineering and Supervisor Cost	10%
Construction Cost and Contractor's Profit	15%
Common Equity	2.25%
Debt	6%
Total Income Tax Rate	3.8%
Purchased Equipment	\$112,022,000

bustion Turbine and Generator), 배열회수보일러 (Heat Recovery Steam Generator; HRSG), 스팀 터빈 및 발전기(Steam Turbine and Generator), 응축기(Condenser), 스택(Stack) 등의 설비로 구성되어있다. 이 중 연소 터빈 후단의 폐열을 재이용하여 발전하는 공정이 본 연구의 대상인 폐열 발전 시스템의 일부로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 NGCC 공정 중 연소 터빈 및 발전기를 제외한 나머지 설비를 대상으로 하였다.

4.2.2 총 사업비 분석 및 비교

경제성 분석 모듈의 성능 검증하고자, NETL S31A 사례에서 사용된 폐열 발전시스템 설비 비용을 개발한 모듈에 입력하여, 추정된 총 사업비와 NETL S31A 사례의 총 사업비를 비교하였다.

우선, 경제성 분석에 필요한 기본 데이터와 가정은 Table 7과 같이 NETL S31A 사례와 동일하게 입력하였으며, 이는 앞서 구현한 프로토타입 각 단위 함수의 입력변수, 출력변수, 알고리즘과 연동되

<Table 8> Calculation Summary of Developed Prototype

구분	항목	결과값(\$)
총 사업비 산정 모듈	Total Purchased Equipment Cost	112,022,000
	Total Onsite Cost	134,426,400
	Total Offsite Cost	59,371,660
	Total Direct Cost	193,798,060
	Total Indirect Cost	84,786,651
	Fixed Capital Investment	278,584,711
	Start-up Cost	7,825,426
	Escalated Start-up Cost	8,301,995
	Fuel Cost	3,729,571
	Escalated Fuel Cost	10,188,835
	Working Capital	3,439,355
	Escalated Working Capital	3,648,812
	AFUDC Total Current	18,549,480
	AFUDC Total Future	18,742,668
	Total Capital Investment (TCI _M)	325,353,306
NETL S31A	Total Purchased Equipment Cost	112,022,000
	Total Plant Cost	206,921,000
	Total Owner's Costs	79,197,000
	Total Overnight Cost	286,118,000
	TCI Multiplier	1.075
Total Capital Investment (TCI _R)	307,576,850	
모듈에서 산정한 총 사업비와 NETL 총 사업비 간 차이 (D) (D = Abs(TCI _M - TCI _R))		17,776,456
경제성 분석 모듈의 오차 (E) (E = D/TCIR x 100)		5.78%

어 경제성 분석을 위한 세부 인자를 계산하게 된다.

상기 언급한 기본 데이터 및 가정과 NETL S31A 총 설비 비용을 바탕으로 경제성 분석 모듈을 통해 추정된 총 사업비는 \$325,353,306 이었으며, 추정된 총 사업비와 NETL S31A 사례의 총 사업비 간의 차이는 Table 8과 같이 \$17,776,456으로 확인

되었다. 이는 모듈의 성능 목표 대상인 NETL S31A 사례 대비 5.78% 오차가 발생한 것이며, 해당 결과는 개발 목표로 설정하였던 사업 타당성 평가 단계에서 충분히 활용할 수 있는 Class 4의 추정 정확도 (-15%~+30%)를 달성한 것으로 판단할 수 있었다.

5. 결론

버려지는 폐열을 회수해 전력을 생산하는 폐열 발전시스템은 에너지 다소비 산업에서 원가 절감 효과가 입증되면서 빠르게 성장하고 있다. 그러나 높은 성장세에도 불구하고, 폐열 발전시스템에 특화된 경제성 분석 모듈이 없어 정확한 사업 타당성 평가를 수행하기 어려운 문제가 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구는 폐열 발전시스템의 사업 타당성 분석에 활용할 수 있는 경제성 분석 모듈을 개발하고자 하였다.

이와 같은 목적에 따라 본 연구는 관련 산업의 기술 수요를 반영해 경제성 분석 모듈을 개발하였다. 여기서 경제성 분석 모듈 개발은 시스템 엔지니어링 접근방법을 이용하여 폐열 발전시스템 산업의 가치사슬과 관련된 이해관계자를 탐색하고, 이들로부터 요구사항을 도출하였다. 또한 도출된 요구사항으로부터 모듈의 기능과 세부 정보를 포함한 시스템 아키텍처를 설계함과 동시에 각 세부 기능 실행에 필요한 설비 비용 모델까지 개발하였다. 그리고 한 걸음 더 나아가 아키텍처를 바탕으로 경제성 분석 모듈의 프로토타입을 구현하고, NETL NGCC 사례와 함께 성능 검증을 수행하였다. 그 결과, 개발한 모듈의 추정 총 사업비가 실제 총 사업비의 5.78% 오차 범위를 만족함에 따라 경제성 분석 모듈이 초기 개발 목표 기준에 부합한 것을 확인하였다.

이와 같은 과정을 거쳐 진행한 본 연구는 경제성 분석에 대한 개념이 정립되지 않은 현재의 폐열 발전시스템 산업에서 사업 타당성을 정확하게 평가할 수 있는 새로운 아이디어와 이에 부합한 결과물을 제공한다는 의의를 갖고 있다. 하지만 본 연구는 개발한 경제성 분석 모듈의 성능 비교를 위해 기존 문

헌에서 발췌한 제한된 총 사업비 데이터를 기반으로 비교 분석한 한계가 있다. 경제성 분석 모듈의 정확도를 보다 정확하게 검증하기 위해서는, 폐열 발전시스템 건립에 사용된 총 사업비 관련 데이터를 충분히 확보할 필요가 있다. 따라서 추후 연구에서는 이러한 한계점을 극복한 추가 검증을 진행하여 해당 결과를 기반으로 산정 정확도를 개선할 계획이다. 또한, 정확도 개선과 더불어 폐열 발전시스템의 사업 타당성을 평가할 수 있는 순현재가치(Net Present Value; NPV)나 내부수익률(Internal Rate of Return; IRR), 균등화 발전원가(Levelized Cost Of Energy; LCOE) 등과 같이 다양한 경제성 분석 지표를 산정하기 위한 기능을 더해나갈 계획이다.

Acknowledgements

이 연구는 2016년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10063187)

References

1. AACE International, Cost Estimate Classification System - As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries, AACE International Recommended Practice No. 18R-97, 2011.
2. Baek, Y. J., Study on the power optimization of transcritical and subcritical rankine power cycles for a low-grade heat source, Doctoral Dissertation, KAIST, 2011.
3. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., Thermal Design & Optimization, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1996.
4. Couper, J. R., Process Engineering Economics, Marcel Dekker, 2003.
5. Incropera, F.P. and DeWitt, D. P. Bergman,,

- T., and Lavine, A. S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition, Wiley, 2010.
6. Korea Institute of Energy Research (KIER) Technology Transfer and Commercialization Division, Heat Recovery Technology, Energy Saving Technology Trend, 30, KIER, 2003.
 7. Kim, J. G., A Study on Analysis Methods for Feasibility Study of Demonstration Plant Establishment Projects: Final Report, Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning (KISTEP), 2014.
 8. Kim, J-Y., Hong, D. G., Suh, S.-H., and Sur, H. W., 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), 81-93, 2015.
 9. Lee, Y. S. and Lee, G. Introduction to KIER Thermal Energy Network and Research Activities, Journal of the KSME, 56(8), 32-36, 2016.
 10. Loh, H. P., Process Equipment Cost Estimation Final Report, DOE/NETL-2002/1169, U.S. DOE Department of Energy/National Energy Technology Laboratory, 2002.
 11. Short, W. Packey, D. J., and Holt, T., A Manual for The Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies, NREL/TP-162-5173, National Re-nearable Energy Laboratory (NREL) 47-50, 1995.
 12. Yang, Michael, 2015 Market Research Report on Waste Heat Recovery System Industry, 9 Dimen Research Waste Heat Recovery System Research Center, 2015.
 13. Yang, N. S., Status and Prospects of Industrial Waste Heat Usage, Energy Management, Korea Energy Agency, 50-56, 2001.
 14. Black, J. B., Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants, Volume 3c: Natural Gas Combined Cycle at Elevation, DOE/NETL-2010/1396, 2011.