

산업단지 열병합 발전 방식의 터빈 형식에 따른 기초경제성 평가

서영호*, 이준희*, 조충식*, 전용한**, 염원식***
 *(주)성현아이앤디 기술연구소, **상지영서대학, ***인하대학교
 e-mail : yhseo@shind.kr

Basic Economic Evaluation of Industrial Complex CHP based on the type of Turbine

Young-Ho Seo*, Joon Hee Lee*, Chung Sik Cho*, Yong Han Jeon**, Won Sik Yeom***
 *Research Center, Sung Hyun IND
 **Department of Fires Fighting and Safety, Sang Gi Young Seo College
 ***Dept of Mechanical Engineering, Inha University

요 약

본 논문에서는 산업단지에 공정증기를 공급하는 열병합 발전소 건설에 대한 타당성 분석시 적용되는 경제성 분석에 대한 것으로, 동일한 보일러 및 주증기 그리고 공정증기 조건하에서 배압터빈 및 복수터빈 적용시 수반되는 경제성 분석을 통해 타당성 있는 시스템을 선정하는데 그 목적이 있다. 복수터빈 방식이 배압터빈 방식에 비해 전력생산량은 약 3배정도 많으나 초기 시설투자비의 증대 및 상대적인 에너지 활용측면에서 낮은 결과를 나타냈다.

1. 서론

화석연료의 고갈 및 지구 온난화 등의 환경문제가 전 세계적으로 대두 되면서 온실가스 생산의 주요인 중 하나인 발전플랜트에 대한 관심과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 관점에서 기존 화력발전으로 전력을 생산하는 시스템에서 열원 및 전기를 동시에 공급할 수 있는 열병합 발전 시스템(CHP : Combined Heat & Power System)에 대한 연구 및 설치사례가 증가하고 있다. 본 논문은 국내 A시 산업단지에 공정증기를 공급하는 열병합 발전소에 대한 설계 사례로 석탄과 고형연료를 혼소하는 보일러를 적용하여 전력생산을 하는 증기터빈 방식을 배압 및 복수터빈 적용시 공정증기와 전력생산량을 통해 발전소 운전 방식에 따른 경제성 평가를 통하여 최적화하는 시스템 설계에 그 중요성이 있다. 열병합 발전 시스템을 구성하기 위한 열평형도(Heat balance diagram)를 작성하기 위해 Thermoflex program을 사용하였으며, Steam Table의 물성치는 IAPWS-IF97을 적용하였다.

시 되는 조건은 산업단지 열수요처의 열공급 부하량 산정에 있다. 열수요처의 열부하의 조건은 [표 1]에서 보는 것과 같이 3가지 압력 영역대로 구성되어 있으며, 발전소에서 열수요처로 공정증기 공급시 열손실에 의한 열배관망에서의 응축수 발생을 방지하기 위해 과열증기로 공급한다.

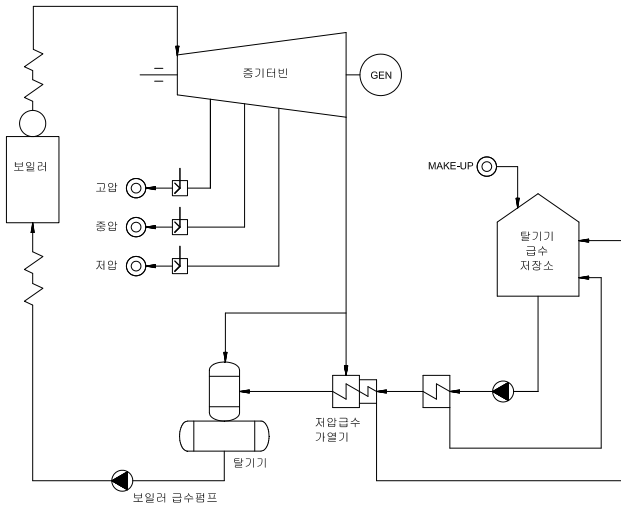
[표 1] 시스템 설계 조건

1) 보일러 주증기 조건			
① 압력 [kg/cm ² .a]			: 128.0
② 온도 [°C]			: 538.0
2) 증기터빈 유입 증기 조건			
① 압력 [kg/cm ² .a]			: 125.0
② 온도 [°C]			: 535.0
3) 복수기 설계 조건			
① 압력 [kg/cm ² .a]			: 0.088
② 건도 [%]			: 89.2
4) 공정증기 조건	증기량 [t/h]	압력 [kg/cm ² .a]	온도 [°C]
① 고압	100.0	46.0	287.0
② 중압	186.0	26.0	255.0
③ 저압	70.0	11.0	213.0
합 계	356.0		

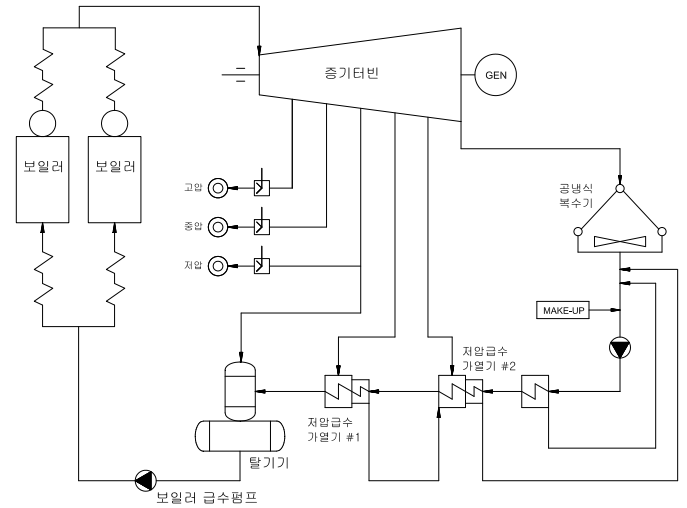
2. 시스템 구성 및 개요

2.1. 시스템 설계 조건 및 구성

본 본문에 적용된 열병합 발전시스템의 가장 우선



Case 1 : 배압터빈 방식



Case 2 : 복수터빈 방식

[그림 1] 터빈형식별 열병합 발전 시스템 개략도

보일러에서 생산되는 증기가 터빈으로 유입시 발생하는 증기의 압력 및 온도 강하는 3 kg/cm²와 3°C로 산정하였으며, 복수터빈 방식에 적용되는 복수기로 유입되는 증기의 건도는 약 89%, 진공압력은 0.088 kg/cm².a를 기준으로 하였다.

[표 2] Case별 시스템 구성 조건

항 목	Case 1	Case 2
1) 보일러		
① 형식	CFBC	CFBC
② 용량 [t/h]	400.0	400.0
③ 대수 [대]	1	2
2) 증기터빈	배압	복수
3) 복수기	-	공랭식 복수기
4) 탈기	○	○
5) 급수가열기	1단	2단

본 논문에 적용된 열병합 발전시스템은 [그림 1]과 같이 터빈형식에 따라 배압터빈과 복수터빈 방식으로 구성하였다. 공통설비로는 석탄 및 고형연료의 혼소운전이 가능한 순환유동층 보일러, 탈기, 급수가열기 등이며 각 Case별 시스템 구성은 [표 2]와 같다.

Case 1은 배압터빈을 적용한 열병합 발전시스템으로 순환유동층보일러에서 생산된 고온·고압의 증기는 배압터빈의 추기 및 배기를 통해 열수요처에 필요한 공정증기와 탈기와 급수가열기의 열원으로 사용된다. 배압터빈 방식은 복수터빈 방식에 비해 터빈 배기단에서의 열낙차가 작기 때문에 전력생산

량은 작으나 에너지 활용측면에서는 우수하다. Case 2는 복수터빈을 적용한 방식으로 2대의 순환유동층 보일러와 공랭식 복수기로 구성되어 있다. 본 시스템이 적용될 지역은 내륙지역으로 냉각수원 확보가 용이하지 않기 때문에 공랭식 복수기를 적용하였다. 복수터빈은 배압터빈에 비해 복수기로 배출되는 열손실로 인해 에너지 활용측면에서는 불리하지만 전력생산량 증대를 기대할 수 있고 열수요처의 공정증기량 변동에 대한 대응성이 우수하다. 복수터빈의 안정적인 운전을 위해 터빈으로 유입되는 증기와 복수기로 배출되는 증기의 유량비를 최소 30%이상 유지하는 조건으로 선정하였다.

2.2. 경제성 분석 조건

시스템의 경제성 분석을 위한 전제조건은 [표 3]과 같다.

[표 3] 경제성 분석 전제조건

구 분	기 준
1) 공사기간	28개월
2) 경제수명	20년
3) 감가상각율	정액법
4) 차입금 이자율	7.0%
5) 할인율	8.0%
6) 법인세	22%
7) 보험료율	0.2%
8) 세금과 공과	0.10%
9) 열판매단가	5만원~7만원/ton
10) 경상비	인건비의 80%
11) 연료비	120,000원/ton
12) SMP	116.97원/kWh

전력 생산에 따른 매진수익 산출의 기준이 되는

계통한계가격(SMP : System Marginal Price)의 기준은 최근 1년간의 SMP 원가 평균을 기준으로 하여 116.97 원/kWh로 한다.

3. 해석 및 결과

3.1. 열병합 발전설비의 효율

본 열병합발전 시스템에서 열수요처로 공급해주는 공정증기의 공정열량과 전력생산량을 의미하는 발전열량의 비를 의미하는 열전비를 산출하였다. 그리고 순환유동층 보일러에 유입되는 연료의 사용량 기준으로 발전소 종합효율을 산출한 결과는 [표 4]와 같다.

[표 4] Case별 열전비 및 효율 비교

항 목	Case 1 (배압터빈)	Case 2 (복수터빈)
1) 공정증기 열량 [Gcal/h]	233.2	233.2
2) 발전열량 [Gcal/h]	36.4	109.7
	(48.1 MW)	(145 MW)
3) 열전비	6.41	2.49
4) 종합효율 [%]	90.7	70.1

$$\text{열전비} = \text{공정열량} \div \text{발전열량} \quad (1)$$

$$(2)$$

본 시스템과 같은 산업단지 열병합 발전(집단에너지) 시설은 열수요처로 안정적인 열공급을 위해 열전비를 1이상 되도록 설계해야 하는데 [표 4]의 결과와 같이 두 Case 모두 열전비 및 종합효율 측면에서는 만족되었다. Case 2는 Case 1보다 순환유동층보일러가 1대 더 많기 때문에 이로 인한 전력생산량이 Case 1보다 3배 이상 증가하였으나 복수기 등으로 손실되는 열량으로 인해 열전비 및 종합효율은 상대적으로 낮게 나타났다.

3.2. Case 별 경제성 분석

사업타당성 분석이 가장 우선시 되는 것은 경제성 분석으로 본 사업의 타당성 유무를 가르는 경제성 분석 기준으로는 내부수익률(IRR), 편익비용비율법(Benefit Cost Ratio), 순현재가치(NPV) 그리고 투자회수 기간법이 있다.

3.2.1 내부수익률(Internal Rate of Return : IRR)

내부수익률이란 당초 투자에 소요되는 지출액의 투자로부터 기대되는 현금유입액의 현재 가치를 동일하게 만드는 수익률이다.

내부 수익률은 식(3)에서 수치해석방식에 의해 산출하게 되며, 기본안의 내부 수익률이 기업의 기준 할인율보다 높은 경우 투자는 경제성이 있고, 적으면 경제성이 없는 것으로 평가한다.

$$\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

여기서,

I_t : t 년도에 투자로부터 기대되는 현금 유입액

Q_t : t 년도에 소요되는 투자 지출액

n : 기간

r : 내부 수익률(경제적 혹은 재무적 수익률)

3.2.2 편익비용비율법(Benefit Cost Ratio)

편익비용비율법은 투자기간과 회수기간을 포함하는 총사업기간중에 투입되는 총비용의 현재와 같은 기간동안의 현재비용을 산출하여 경제성을 평가하는 방법으로 그 비율이 1 이상이면 경제성이 있다고 판단한다.

$$\frac{\text{편익}}{\text{비용}} = \frac{\text{총 사업기간 중 총 수입의 현재}}{\text{총 사업기간 중 총 비용의 현재}} \quad (4)$$

3.2.3 순현재가치(Net Present Value : NPV)

순현재가치는 필요 수익률로 할인된 순현재금의 합을 의미하는 것으로 NPV가 0보다 크면 경제성이 있다고 판단되며, 실제 사업수행시 순현재가치 만큼의 기업가치가 증대한다고 판단할 수 있다.

$$NPV = \sum_{n=0}^T \frac{X_n}{(1+K)^n} \quad (5)$$

여기서,

NPV : 순현재가치

X_n : n 년도의 순현재금 출납

T : 사업의 내용년수

K : 기준할인율

3.2.4 투자기간 회수법(Payback Period Method)

투자회수 기간법(Payback Period Method)은 해당 사업을 위해 투입된 초기 비용을 그 투자에서 나오는 순 현금흐름으로 회수하는데 필요한 기간으로 정의된다. 여기서 산출된 회수기간이 단일 투자사업일

경우에는 내정된 최대 기간보다 짧으면 투자 가치가 있다고 판단하며, 다수의 투자 대상 중에서 투자 우선 순위를 정할 경우에는 회수기간이 짧을수록 투자 가치가 있다고 판단한다. 투자회수기간을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{t=0}^n F_t > 0 \quad (6)$$

여기서,

F_t : t 년도 시점에서의 순 현금흐름

n : 기간

3.2.5 경제성 분석 결과

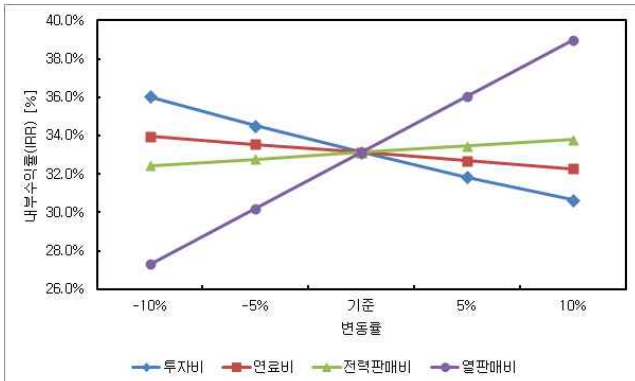
순현가를 제외한 내부수익률, 편익비용비율, 투자회수기간등이 복수터빈을 적용한 Case 2보다 배압터빈 방식인 Case 1이 경제성이 있는 것으로 나타났다. 두 Case 모두 내부수익률 및 편익비용비율을 좋게 나타냈지만 배압터빈 방식이 경제성이 더 좋은 이유는 초기투자비가 적고, 열전비 및 종합효율이 높기 때문이다.

[표 5] Case별 경제성 분석 결과

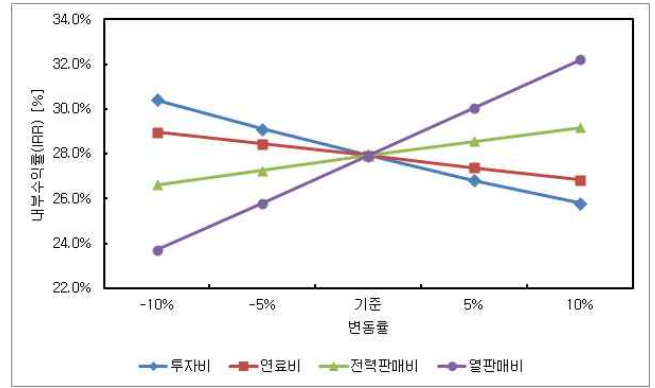
항 목	Case 1 (배압터빈)	Case 2 (복수터빈)
1) 내부수익률(IRR) [%]	33.12	27.91
2) 편익비용비율	1.745	1.571
3) 순현재가(NPV) [백만원]	703,187	956,478
4) 투자회수기간 [년]	2.4	3.0

복수터빈 방식인 Case 2의 NPV가 Case 1보다 많기는 하지만 이는 전력생산량 증가로 인한 수익률 상승이 원인이다.

[그림 2], [그림 3]은 두가지 Case에 대해 투자비, 연료비, 전력판매비, 열판매비에 대한 민감도 분석을 한 것이다.



[그림 2] Case 1(배압터빈) 민감도 분석



[그림 3] Case 2(복수터빈) 민감도 분석

두 Case 모두 열수요처에 공급해주는 공정증기의 열판매비가 가장 중요한 변수로 판단되었다. 배압터빈 방식인 Case 1이 복수터빈보다 열판매비에 대한 민감도가 큰 이유는 열전비가 높기 때문에 전력판매보다는 공정증기의 열판매에 대한 의존도가 더 높기 때문이다.

4. 결론

본 논문은 석탄과 고품연료의 연소가 가능한 순환유동층 보일러에서 생산된 증기를 열수요처로 공급시 터빈형식에 따른 경제성 분석을 하여 신규 열병합 발전 시스템 방식 결정 인자를 도출하고자 하였다.

(1) 복수터빈 방식을 적용한 Case 2는 복수기로 손실되는 열량으로 인해 Case 1인 배압터빈 방식보다 종합효율 및 열전비 등이 낮게 나타났다.

(2) 투자비, 소요부지면적, 효율 그리고 IRR 등을 고려해 볼 때 보일러 400 t/h x 2기를 적용한 복수터빈방식(Case 2) 보다는 배압터빈방식(Case 1)을 선정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

참고문헌

- [1] 최연석 외, 석탄유동층 보일러에서 폐플라스틱 고품연료의 혼소기술 개발에 관한 연구, 산업자원부, 2007.
- [2] 선도원 외, RDF 연소 순환유동층 열병합 발전시스템 개발, 산업자원부, 2007
- [3] Thermoflow, 2010, Thermoflex ver 20.
- [4] 서영호, “계절별 부하 특성을 고려한 CHP 성능 해석”, 설비공학논문집, v22 n07, 2010년, pp 454-459