

# 열병합설비의 스팀 활용에 관한 경제성 평가

김호연/이상문/한창훈/이재현/백영순  
한국가스공사

## 1. 서론

LNG인수기지내 상용 운전중인 열병합 설비 그림 1은 가스터빈과 폐열회수보일러로 전기와 스팀을 생산하도록 구성되어 있다. 여기서, 발전설비인 가스 터빈은 독일의 MAN-GHH사의 THM 1304-D이고 발전기는 영국의 Brush사의 Frame BRS 103.168/4로 Brushless Excitor형이다. 그리고 가스 터빈의 연료는 천연가스로 그 연소에너지를로부터

터빈의 회전력을 얻어 발전기를 구동함으로 전기에너지를 얻게 된다. 또한, 스팀생산설비인 폐열회수보일러(HRSG)는 가스터빈에서 배출되는 고온의 연소가스로부터 열을 흡수하여 스팀을 생산하도록 설치되었으며, 생산된 스팀은 인수기지내 공정용 및 건물 난방용으로 사용되고 있다.

열병합 설비의 운전은 열부하 추종 운전과 일정 전기부하 추종 운전 두가지 운전모드로 운전이 가능하며, 일정 전기부하 추종 운전시 가스터빈 발전기

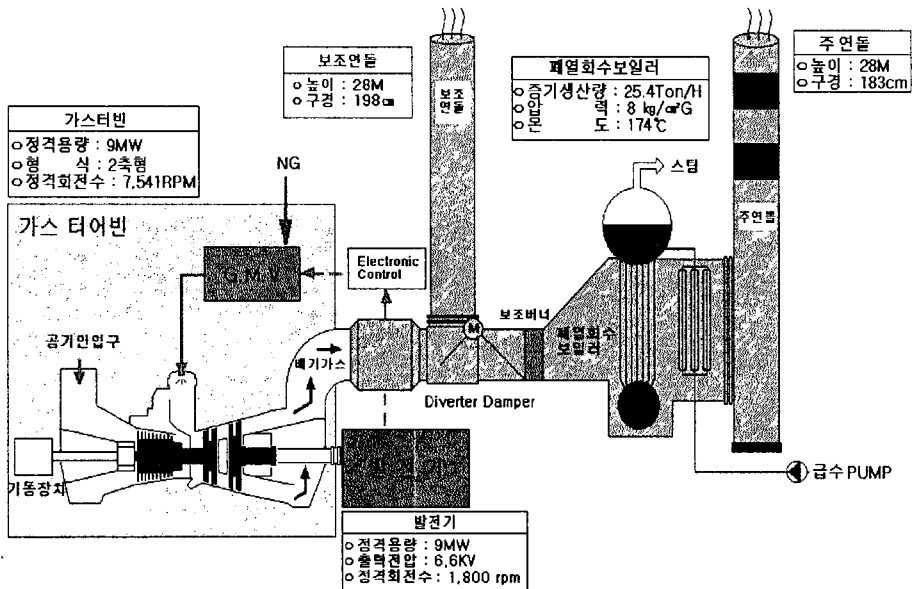


그림 1. 열병합 설비(가스터빈, 폐열회수보일러)의 구성도

는 일별 및 월 최대 예상부하로 계속 운전되며 잉여 전력은 역송전 되도록 설계되었다. 그리고 열부하 추종 운전은 기지내 스팀사용량에 따라 운전되는 방식으로 폐열회수보일러에 스팀을 생산하는 데 필요한 연소가스를 충분히 공급할 수 있도록 운전되며, Diverter Damper에 의해서 불필요한 일부 연소가스량을 바이패스 시킬 수 있게 되어 있다. 또한, 일시적 스팀부하 증가시나 가스터빈 정지시를 대비하여 보조버너인 덕트버너가 설치되어 있다. 특히, 스팀부하는 계절별, 일별, 그리고 시간대별 차이가 크게 발생되므로 가능한 최대부하로 운전을 하게 되며, 그로 인한 스팀생산량은 기지내 스팀사용량보다 항상 많은 양의 스팀을 생산하게 된다. 이것은 결과적으로 잉여스팀을 발생시켜 열병합 발전단가에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 고는 인수기지 열병합 설비의 운영 예를 토대로 스팀활용의 경제성을 LNG 기화설비의 하나인 연소식 기화기(SMV) 적용시에 대하여 천연가스가용측면과 스팀이용측면에서 평가하고자 한다.

## 2. 열병합 설비의 운영 현황

열병합설비는 인수기지내 전력소비 및 스팀소비 총량과 한전 수전이 불가능한 경우를 대비하여 자체 발전용으로 설치된 것으로 표 1과 같이 발전용 가스터빈은 3기, 스팀용 폐열회수보일러(HRSG)는 2기가 설치되어 있다. 현재, 각 2기는 기지내 스팀사용 범위 내에서 최소 발전운전과 유지보수시를 대비하여 교대로 선택적 운전을 하고 있다. 그리고 가스터빈 1기는 시간당 3,000Nm<sup>3</sup>의 천연가스로 9MW의 전기를 발생시키고 폐열회수보일러 1기는 시간당 8기압, 174℃의 스팀 25.4톤을 생산할 수 있다. 또한 보조버너인 덕트버너는 천연가스 시간당 2,172Nm<sup>3</sup>로 동일한 양을 생산할 수 있다. 그리고 잉여스팀 활용을 위한 대상설비인 SMV는 시간당 천연가스 1,423Nm<sup>3</sup>로 90톤의 천연가스를 생산할 수 있을 뿐만 아니라 설비를 일부 개조 및 추가하면 잉여스팀

을 활용할 수 있는 설비이나 여기에는 연구개발비가 수반된다. 특히, 잉여스팀은 SMV운전시기인 동절기에만 적용이 가능하며 예상 운전일수는 50일로 전망하고 있다.

표 1. 열병합 설비의 현황

구 분	가스터빈	폐열회수보일러
보유대수	3기	2기
정격능력	9MW 발전	25.4T/H 스팀
정격조건	NG 3,000Nm <sup>3</sup> /h	8기압, 174℃
운전방식	열부하 및 전기부하 추종	연소가스 유량 조절

따라서, 열병합 2기 운전시 생산할 수 있는 전력은 18MW, 스팀은 50.8톤이 된다. 그리고 인수기지 스팀사용처의 설비 준공완료 및 정상운전 시점인 2003년 동절기 3개월을 기준으로 볼 때, 스팀사용량은 시간당 16.2톤이며, 열병합 자체사용량을 제외할 시 열병합 1기 운전시에는 잉여스팀은 6.14톤, 2기 운전시에는 28.5톤이 발생된다.

그러므로 열병합 2기 동시운전은 잉여스팀을 다량 생산함으로 잉여스팀 활용에 대한 경제적 효과의 입증과 동시에 열병합 2기 동시운전에 대한 경제적 타당성이 제시되어야만 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 스팀이용측면의 경제성

스팀이용측면은 일정 전기부하 추종운전에 의해서 발생된 스팀의 순수가치만을 고려하는 것으로 열병합의 효율은 고려하지 않는다. 또한, 발생된 스팀의 순수가치는 덕트버너가 스팀을 생산하는 데 필요한 연료비용만을 기준으로 할 때, 스팀 시간톤당 25,094원의 가치를 가지고 있다.

따라서, 열병합 1기와 2기 운전시 스팀생산량중 사용되지 않는 잉여스팀량을 동절기 50일 활용했을 때 예상되는 절감액은 표 2와 같다.

**표 2. 잉여스팀양 및 절감액**

구 분	1기 운전시	2기 운전시
잉여스팀량	6.1T/H	28.5T/H
예상절감액	211백만원	337백만원

잉여스팀의 활용은 열병합의 운전비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났고 이 때의 열병합 발전단가는 스팀이용측면에서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{발전단가(원/kWh)} = \frac{\dot{C}_{\text{fuel}} - \dot{C}_{\text{steam}}}{\text{발전량}} \quad (1)$$

식(1)에서  $\dot{C}_{\text{fuel}}$ 는 열병합의 천연가스 연료비용이고  $\dot{C}_{\text{steam}}$ 는 스팀의 환산비용으로 덕트버너의 스팀생산시 연료비용이다. 상기의 계산방법에 의해서 열병합 1기 운전시 및 2기 운전시의 발전단가 및 운전비용을 잉여스팀 미활용시와 활용시로 구분하여 비교해 보면 표 3에서 보는 것과 같이 열병합 발전단가는 잉여스팀 미활용시가 상당히 높고, 특히 1기 운전시보다는 2기 운전시가 kWh당 23원 정도 높게

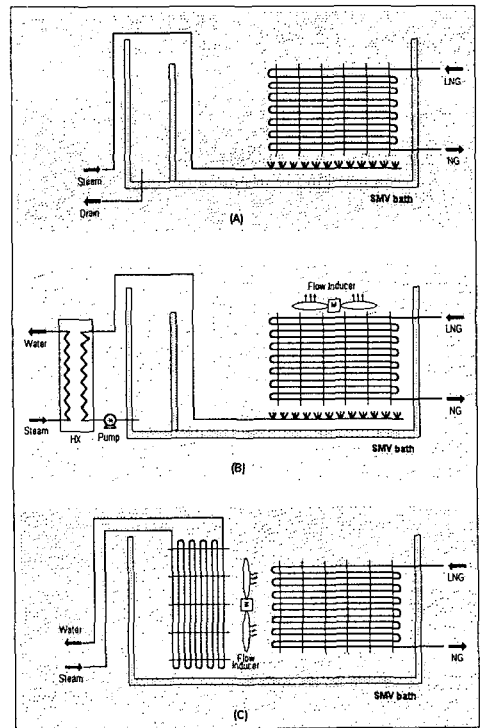
**표 3. 스팀활용에 대한 운전비 비교**

구 분		1기운전	2기운전	
잉여 스팀 미활용	전력분담 (MW)	자체	9	18
		한전	19	10
	전력단가 (원/kWh)		52.8	75.3
	운전비용 (백만원)		1,594	2,166
잉여 스팀 활용	전력분담 (MW)	자체	9	18
		한전	19	10
	전력단가 (원/kWh)		33.2	33.2
	운전비용 (백만원)		1,384	1,257

※'03전망치 및 동절기 50일 기준

나타나고 있다. 또한, 잉여스팀 활용시의 열병합 발전단가는 1기 운전시나 2기 운전시 kWh당 동일한 33.2원이다. 더욱이 잉여스팀을 미활용할 경우 운전비용은 열병합 1기 때, 210백만원 높고, 열병합 2기 때, 909백만원으로 상당한 차이를 나타낸다. 그러나, 잉여스팀을 활용할 경우에는 열병합 1기나 2기 운전시의 운전비용차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

앞서 설명한 바와 같이, 잉여스팀 활용시 운전비용 절감은 발생될 수 있으나 잉여스팀을 직접적으로 활용할 수 있는 적절한 설비가 없으므로 잉여스팀 활용시 운전비용 절감은 설비투자비에 대한 비용을 고려해서 경제성을 평가해야만 한다. 따라서, 인수기 지 기존 설비중 가장 효과적일 것으로 예상되는 연소식 기화기(SMV)에 대한 설비변경은 그림 2와 같이 3가지 경우에 대해서 생각해 볼 수 있다. 설비



**그림 2. SMV 설비변경방안에 대한 3예**

(A) 직접분사식, (B) 간접분사식, (C) 열교환식

변경 (A)의 경우, 성능효율면이나 설비 구성에서 유리할 것으로 판단되나 분사노즐에 대한 제작상의 어려움과 응축수의 회수가 불가능할 것으로 예상된다. 이것은 SMV 수조내의 물은 연소가스에 의해 산성화 되어 있으므로 순환시 관련설비들에 대한 치명적 결함을 야기시킬 수 있다. 설비변경 (B)의 경우, 응축수의 회수가 유리할 것으로 생각되나 설비 규모가 크고 복잡하여 초기비용이 높고 유지보수시 어려움 등으로 인해 적용이 거의 불가능한 것으로 나타났다. 마지막으로 설비변경 (C)의 경우, 성능효율이 비교적 낮을 것으로 예상되고 전열튜브의 증가로 설비 규모상 SMV 수조내 설치가 불가능한 것으로 나타났다. 위의 3가지 예에 대한 특징들은 표 4와 같다.

표 4의 결과로 직접분사식이 SMV에 대하여 적용 가능성이 높은 것으로 판별되었으나 열병합 2기 운전시 스팀의 체적유량이 커서 다단방식으로 분사노즐을 제작해야 하는 어려움이 수반된다. 그리고 직

접분사식의 예상 투자비는 열병합 1기 운전시 595백만원, 2기 운전시 685백만원이다.

상기 투자비에 대한 스팀이용측면의 경제성 평가는 열병합의 잉여스팀 활용시의 절감액을 가지고 평가하기로 하며 유지보수비용 및 제경비는 고려하지 않기로 한다. 또한, 투자비에 대한 경제성 분석기법은 회수기간법, 할인 회수기간법, 회계적 이익률법, 순현재가치법, 내부수익률법, 수익성지수법, 그리고 비용-편익분석법이 있으나 여기서는 순현재가치법과 내부수익률법을 기준으로 한다. 참고로 순현재가치법(NPV법)은 투자로 인해 발생하는 현금유입의 현재가치 합계에서 현금유출의 현재가치 합계를 차감한 순현재가치를 계산해서 투자안의 경제성을 평가하는 방법으로 순현재가치(Net Present Value)는 다음과 같이 표현한다.

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CI_i}{(1+k)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{CO_i}{(1+k)^i} \quad (2)$$

여기서, CI는 현금유입, CO는 현금유출, 그리고 k는 할인율을 나타내고, 또, 내부수익률법은 투자로부터 기인되는 현금유입의 현재가치 총액과 현금유출의 현재가치 총액을 동일하게 만드는 할인율을 계산하여 이를 기초로 경제성을 평가하는 방법으로 내부수익률(Internal Rate of Return)은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{CI_i}{(1+r)^i} = \sum_{i=1}^n \frac{CO_i}{(1+r)^i} \quad (3)$$

여기서, r은 할인율로서의 내부수익률이다. 상기의 방법에 위한 직접분사방식의 투자비 분석결과는 표 5와 같다.

열병합 1기의 경우, 순현재가치법에 의한 투자비 회수기간은 투자 시작후 9년이 소요되고 내부수익률법에 의한 수익 발생은 8년부터이다. 그리고 열병합 2기의 경우도 8년과 7년으로 열병합 1기의 경우

표 4. 잉여스팀 예상 활용설비의 비교

구 분	직접분사식	간접분사식	열교환식	
장 점	설비최소 성능최대	노즐간단	스팀회수 용이	
단 점	스팀회수 불가 노즐복잡	설비복잡 효율저하	효율극감	
적 용 성	가 능	불 가	불 가	
설비 규모	열병합 1기	Ø2", 1단분사	Tube 120본 (1"×4.5m)	Tube 150본 (1"×4.5m)
	열병합 2기	Ø4", 다단분사	Tube 260본 (1"×4.5m)	Tube 320본 (1"×4.5m)
투자비 (백만원)	열병합 1기	595	700	675
	열병합 2기	685	835	775

\* 설비규모는 설비업체의 일반전적자료 기준  
\* 투자비는 현재물가기준

**표 5. 직접분사방식의 투자비 분석결과**

(단위 : 백만원)

구 분		'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10
열병합1기	투 자 비	64	199	93	595	-	-	-	-	-	-
	용수비용	-	-	-	4	4	4	4	4	4	4
	절 감 액	-	-	-	211	211	211	211	211	211	211
	현금수지	-64	-199	-93	-388	207	207	207	207	207	207
	순 현 가	-64	-244	-321	-613	-471	-343	-226	-120	-23	65
	내부수익률	-	-	-	-	-	-	-	3.2%	8.9%	12.6%
열병합2기	투 자 비	64	199	93	700	-	-	-	-	-	-
	용수비용	-	-	-	19	19	19	19	19	19	19
	절 감 액	-	-	-	337	337	337	337	337	337	337
	현금수지	-64	-199	-93	-367	318	318	318	318	318	318
	순 현 가	-64	-244	-321	-597	-380	-182	-3	161	309	444
	내부수익률	-	-	-	-	-	-	0.9%	17.9%	22.7%	25.7%

보다 투자비 회수가 조금 빠르고 수익면에서는 약 2 배 정도로 크나 전체적으로 볼 때, 투자회수기간이 길고 수익률이 낮다. 단지 운전비만을 고려한 비용으로서 열병합 설비의 유지보수비를 고려하면 경제성이 더욱 떨어질 것으로 예상된다.

#### 4. 천연가스이용측면의 경제성

천연가스이용측면은 천연가스를 사용하고 있는 열병합 설비 및 SMV의 성능효율을 고려하여 열병합 운전의 실질적인 경제성을 평가하는 데 있다. 이것은 열병합설비의 운영방안을 객관적으로 제시해 줄 수 있다.

일차적으로 SMV적용시 기존 방식대로 천연가스를 직접 연소시키는 방법과 스팀을 이용하는 방법을 동일 운전비용을 기준으로 하여 운전모드별로 LNG환산생산량을 계산한 결과는 표 6에서 보여 주고 있다. 여기서, LNG환산생산량은 LNG 시간당 1톤을 NG 바꾸는 데 필요한 열량으로 시간당 170Mcal이다.

**표 6. 운전모드별 LNG환산생산량**

운전모드	운전비용 (백만원)	LNG 환산 생산량(T/H)
열병합(18MW)	2,653	141.4+104.7 $\eta$
한전(10MW)		
한전(28MW)	2,653	247.6
SMV		
열병합(6.52MW)	2,653	272.3
한전(21.48MW)		
SMV		

※  $\eta$ 는 열병합 효율로, 0< $\eta$ <1

표 6의 결과로 스팀사용범위인 열병합이 6.52MW의 발전과 21.48MW의 한전수전, 그리고 나머지를 SMV에 직접연소 시키는 것이 LNG환산생산량이 가장 큰 것으로 나타났으며, 열병합 2기

(18MW) 운전시가 LNG환산생산량 245.8T/H이므로 가장 적게 생산된다. 특히, 열병합 2기 운전시는 스팀 생산시의 열병합 효율이 가장 큰 변수로 작용하고 있음을 보여 주고 있다.

따라서, 열병합 효율과 발전단가와의 관계를 수전 단가와 비교해 볼 필요성이 있다. 여기서 효율을 고려한 발전단가는 다음과 같이 계산한다.

$$\text{발전단가(원/kWh)} = \frac{1 - [\eta_{\text{tur}} + \eta_c(1 - \eta_{\text{tur}})]\eta_b}{\text{발전량}} \cdot \dot{C}_{\text{fuel}} \quad (4)$$

여기서,

- $\eta_{\text{tur}}$  : 가스터빈에 의한 발전효율
- $\eta_b$  : 폐열회수보일러 효율
- $\eta_c$  : 스팀이용설비의 총효율

식(4)의 계산기준에 의한 열병합 효율과 발전단가와의 관계는 그림 3에서 보여 주고 있다. 열병합 운전데이터에 의한 성능효율은 약 71.6%로 발전단가는 kWh당 55.13원이다. 그리고 한전의 산업용 제조업 평균 전력단가 44.94원보다 높다.

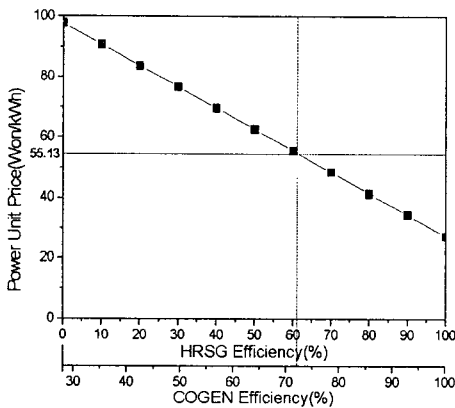


그림 3. 열병합 효율과 발전단가

따라서, 열병합 발전은 실질적으로 한전수전보다

경제성이 없다는 것을 의미한다. 또한, 열병합 발전 단가는 사용연료인 천연가스 단가에 의해서 지배적인 영향을 받게 된다. 이런 이유로 열병합 설비의 운전은 신중히 고려되어야 할 필요성이 있다. 추가적으로 잉여스팀 활용설비의 성능 또한 발전단가 상승의 한 원인으로 작용하나 성능효율에 대한 정확한 값을 예측하기 어려움으로 효율별 단가는 그림 4에서 보여 주고 있다.

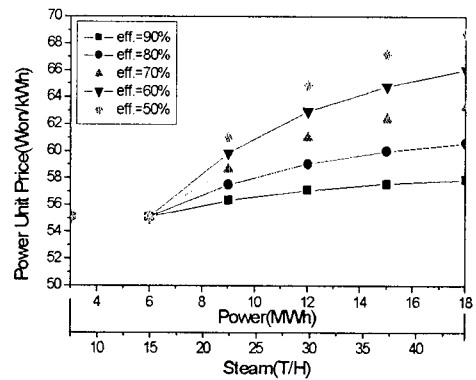


그림 4. 스팀이용설비의 효율과 발전단가

만약에 잉여스팀활용설비의 도달 가능한 효율이 70%라면 그 때의 운전모드별 운전비용과 손실비용은 표 7과 같다.

표 7. 운전모드별 비용비교 (단위: 백만원)

운전모드	운전비용	손실비용	비용차액
열병합배제	3,032	30	30
최소부하	2,904	347	119
열병합 1기	2,842	361	171
열병합 2기	2,653	776	397

※'03전망치, 동절기 50일 기준  
 ※열병합배제 모드 : 한전수전, 덕트버너, SMV

표 7의 결과 동일한 전력생산 28MW시 열병합을 사용하지 않는 것이 손실비용이 가장 적은 것으로

나타났고 열병합 2기 운전시는 상당히 큰 손실액 발생된다. 따라서, 열병합 운전은 특별한 목적이나 특수한 사항이 아니면 자제하는 것이 유리하다.

## 5. 결론

열병합 설비의 운전에 대한 경제성 평가를 스팀이용측면과 천연가스이용측면에서 각각적으로 검토한 결과 양측면 다 현시점에서 경제성이 떨어지는 것으로 나타났다.

스팀이용측면에서 열병합의 스팀활용은 투자비나 투자기간에 비해 투자회수기간이 길고 내부수익이 낮은 것으로 나타났다. 그리고 천연가스이용측면에서 열병합 운전보다 한전수전, 덕트버너에 의한 스팀생산이 손실비용을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 한전수전단가와 천연가스 연료단가가 열병합 설비 운전에 대한 경제성에 직접적이고 가장 큰 영향을 주기 때문이다.

결론적으로 열병합의 운전은 기회비용과 초기 설치목적을 고려할 때, 현행대로 최소 열부하 추종운전을 하는 것이 바람직함으로 잉여스팀을 최소화해야 한다.