

産業用 熱併合發電의 經濟性 研究

吳 博 均*

1. 序 論	2. 熱併合發電시스템의 技術 概要와 經濟性 考察	3. 結 論
--------	----------------------------	--------

1. 序 論

근래 原油價의 上昇과 선진국의 保護貿易 분위기로 인해, 輸出을 伸長시켜야 하는 우리의 立場은, 製品原單位에 대한 에너지요소를 낮추기 위한 노력을 강화해야 할 형편이다. 이의 일환으로, 産業系에서는, 熱併合發電에 의한 에너지節減의 加能性을 검토할 필요성이 증대되고 있다.

본 報告內容은 이러한 現實性을 감안, 地域暖房이 아닌, 發電設備을 계획하고 있는 産業系에 着점을 두고 준비하려고 애썼다.

熱併合發電裝置는 燃料의 熱量(電力 또는 電力과 蒸氣)을 變換시켜 公장에서 사용할 수 있도록 한 것으로 韓國電力公社의 전력가보다 싸게 電力을 生産하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서, 熱併合發電시스템은, 各企業에 따라 負荷特性이 다르고, 施設投資가 莫大하므로 各種의 發電方式을 알고, 設備計劃을 有效하게 세울 필요성이 높다. 예를들면, 原糖工場이나 製紙工場의 境遇, 보일러燃料로서 바가스(Bagasse)나 木材를 使用하며, 背壓터어빈方式을 채용하는 것이 보다 經濟的인 것으로 평가되고 있다. 一般的으로 다음 事項들이 熱併合發電導入의 前提條件이 되고 있다.

- (1) 工場內에서 多量의 蒸氣를 필요로 하는 경우
- (2) 工場廢熱 및 잉여열량을 利用할 수 있는 경우
- (3) 工場의 廢物을 燃料로서 利用할 수 있는 경우

2. 熱併合發電시스템의 技術 概要와 經濟性 考察

1) 發電시스템 技術의 概要

産業用 自家發電시스템의 種類는 다음과 같이 세가지로 나누며, 각 방식의 특징은 표 1과 같다.

- 증기터어빈방식
 - 디젤엔진방식
 - 가스터어빈방식
 - 가스터어빈과 증기터어빈의 복합방식
- 가. 스팀터어빈방식에 의한 열병합발전

스팀터어빈발전장치는 重油·石炭 등의 燃料를 燃燒시켜 얻은 에너지를 使用, 보일러에서 물을 수증기로 바꾸고 그 수증기로 터어빈을 運轉해서, 機械的인 에너지를 發電機에서 電氣에너지로 變換하는 방식이다. 보일러 設備은 물 및 蒸氣系通, 燃料系通, 空氣系通의 세가지로 分類된다. 各系通의 主된 補助機器로는 원수펌프, 보일러 급수펌프, 탈기기 급수펌프, 수처리관계 펌프(순수장치), 연료펌프, 압입통풍 펌, 유입통풍 펌, 히터 등을 필요로 한다. 스팀터어빈장치의 기본 구성을 정리하면 그림 1과 같다. 증기터어빈의 작증 방식과 이의 특징은 표 2와 같다.

産業體의 工場에 있어서 보다 有利한 스팀터어빈發電方式을 選定하기 위해서는, 公장의 電力量 및 使用蒸氣量 등을 상세하게 調査하여 把握해야 하나, 工場의 種類에 따른 전력량(MW)과 증기사용량(ton/hr)의 比率를 검토하여 工場種類에 가장 적합한 방식을 선정할

* 韓國科學技術院 機器工學研究部 先任研究員

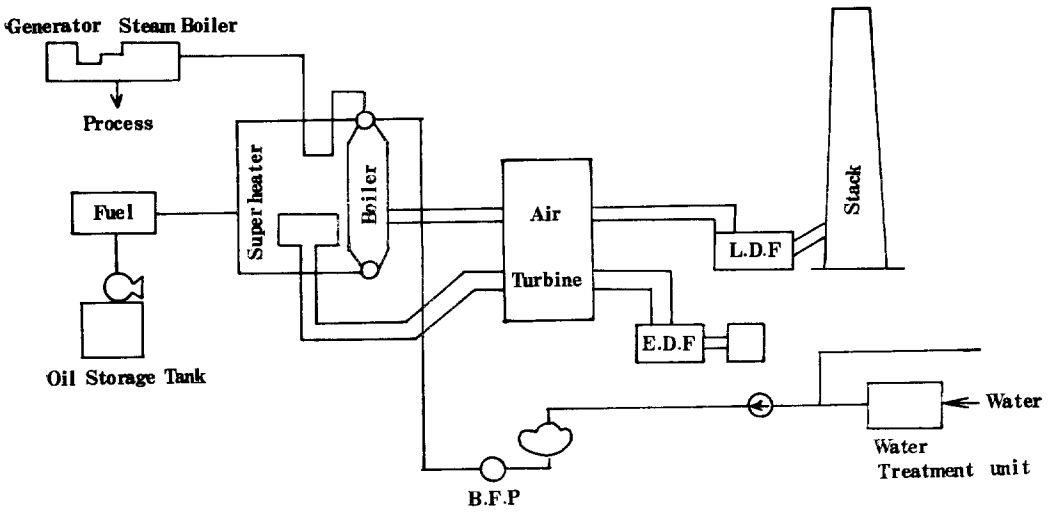


그림 1. 스팀터빈 발전장치

표 1. 産業用 熱併合發電裝置의 種類와 特徵

발전장치	스팀터빈	디젤	가스터빈
용도	공장용 상용 발전장치	공장, 빌딩, 공공시설용, 비상용 발전장치, peak-out용, 공장용 상용	공장, 빌딩, 공공시설 비상용, peak-out cycle용 발전장치
설비용량	대·중 용량	중·소용량 부하에 따라 최적용량 기종의 선택용이	중·소용량 디젤에 비해 기종이 작다
사용연료	제한이 적다. 특히, 공장 부산물, 폐기물이 싼 연료로서 사용 가능하다	중유, 경유에 한정	경유, 등유 및 가스연료가 사용가능
열효율	복수 cycle의 경우 : diesel보다 낮다, 주기 및 배압 cycle의 경우 : 높다	열효율이 높고, 연료소비량이 작다	열효율이 낮고, 연료소비량이 많다
냉각수	다량필요	다량필요(라디에타 식은 소량)	불필요
소음	소음발생원 그 자체가 커서 전체를 건물로 싸는 일은 어려우므로 국부처 대책가능. 80~90phon (Fan-Motor에 방음대책할 경우)에 이 상, 소용량은 70~80phon	흡·배기음 외에 연소소음, 기계소음 등 저주파 소음 때문에 저감콘란 소음기부착시 100phon	대부분이 흡기소음이고, 고주파음이 주이기 때문에 비교적 음의 흡수가 음이 70~80phon
진동	회전운동이기 때문에 대부분 생기지 않음	왕복기계이기 때문에 진동이 크다	회전운동이기 때문에 대부분 발생치 않음
환경	출력에 대해 영향은 없다	좌 등	출력은 주위(흡기)온도의 상승에 따라 감소한다
배기가스	粗惡油(b.c중유)를 사용할 경우 SO ₂ , NO _x 발생에 대한 대책이 곤란	좌 등	양질의 원료를 사용했기 때문에 SO ₂ 는 문제없고, NO _x 의 발생도 작아서 대책이 용이하다
보수유지	일상점검, 보일러 및 터빈, 발전기의 정기점검에 많은시간 필요 보일러의 유지자자 필요	maintainence의 回數는 많으나, 고도의 기술이 필요치 않고, 시간도 짧게 걸린다.	왕복운동과 같은 구동부가 없기 때문에 간단하다

소요 면적	많은 부지가 필요	steam turbine에 비해 작다	가장 작다
설비비	주요기기는 보일러, 터어빈, 발전기이다. 기초도 크고, 고온 고압 기기가므로 취급상 난점 때문에 고가이다.	스팀터어빈에 비해 설비비도 싸도 수요증가에 따른 증설도 용이하다	디젤에 비해 고가이다

표 2. 터어빈형태 비교표

	가	나	다	라	마
터어빈형태	배압 터어빈	추기 배압 터어빈	추기 복수 터어빈 (재열기 부)	추기 복수 터어빈 (재열기 유)	배압+복수터어빈
Steam조건	125ATA/538°C	125ATA/538°C	125ATA/538°C	163ATA/538°C/538°C	
개략도					
특성	-발생하는 증기량과 전력의 비례를 조정하기가 불가능하다 -공정열이 일정한 경우 산업용 일부 합발전설비로서 가장 경제적인 타입이다	-전력과 열의 제어 용이하다 -경제성이 양호하다 -부하율이 높은 산업체의 공정열을 공급하는 경우 경제적인 시스템이다	-전력과 열의 제어가 극히 용이하다 -부하변동에 대해 순응성이 양호하다	-다량과 동일하다 -다보다 효율이 양호하다 -다보다 투자비가 증가한다	-배압식과 복수식을 조합한 방식이다 -대용량 플랜트에서 배압식과 복수식의 특징을 동시에 갖는다
출력 DIAGRAM					
□ 발전기출력 → 공정용열 ⇨ 급수가열 M=열의 흐름					

표 3. 증기전력비와 型式의 관계

분류	증기전력비 (t/h/kw)	형식	산업명	비고
Group I	0~4	추기복수터어빈 시스템, 배압터어빈 시스템	cement, 소다, aluminum, 철강, 플라스틱, 비닐루, polyethylene	전력사용량이 증기사용량에 비해 많다
Group II	4~9	배압 또는 추기배압, 추기복수터어빈 시스템	석유화학 전체, polyester, 화학비료, styrene, acryle, 석유정제	전력사용량과 증기사용량이 비교적 균형이 있다
Group III	9~	배압 또는 추기배압 터어빈 시스템	紙 pulp, dye, rubber, combinat., 식용유, 제당	전력사용량이 증기사용량에 비해 적다

주) 증기전력비=증기사용량/전력량

표 4. 연료적용표

종 류	연 료	공 장 명
폐물이용	나무껍대기	합판공장
	바카스	원당공장
	청소먼지	먼지소각공장
	정유소	정유소
	pulp의 흑액	pulp공장
폐열이용	고도가스	제련소
	가열로페가스	정유소
	암모니아합성 플랜트 process가스	암모니아 합성 플랜트

수 있을 것이다. 産業體의 種類別 特徵에 알맞는 스팀 터빈을 分類해 보면 표 3과 같다.

보일러의 燃料는, 디젤엔진 또는 가스터어빈에 비해, 자유롭게 선택 가능하며, 극단적으로 말하면, 燃燒加能한 것은 무엇이든지 加能하다. 一般燃料로는 重油, 石炭, 輕油 등이 있으며, 工場의 廢物, 廢熱을 利用한 特殊燃料로는 표 4에 든 것과 같은 것들이 있다.

나. 가스터어빈발전장치에 의한 열병합발전

가스터어빈을 熱併合發電方式으로 채택하면 증기터어빈 방식에 비해 熱消費率은 높으나 電力生産量이 크게 增加된다. 여기서, 熱消費率이 높은 것은, 廢熱回收보일러에서의 燃燒가스엔탈피 손실이 크기 때문이다. 動力과 蒸氣의 비가 蒸氣터어빈방식의 5배까지 되는 가스터어빈방식의 長點이 될 수도 있으나, 이러한 事實은

가스터어빈熱併合方式이 動力發生에 있어서 우수한 장치라고 하기 보다는 蒸氣發生에 있어 適合하지 못하다는 것으로 解析하여야 한다. 그러나 증기터어빈方式에 비하여 20% 이상으로 熱消費率이 높기는 하나, 電氣와 熱을 따로 生産하는 방식에 비해서는 역시 熱效率이 優秀한편이다.

다. 가스터어빈과 증기터어빈의 複合方式에 의한 熱併合發電

가스터어빈과 증기터어빈을 複合使用하는 熱併合發電方式은 工程用蒸氣수요가 비교적 넓은 범위에서 變化하여 蒸氣消費量에 對應하는 發電을 행하고, 나머지의 電力을 보통의 發電方式으로 補完하여야 되는 경우 有利한 방식이다. (그림 2)

이 방식은 증기터어빈을 背壓 또는 抽氣터어빈으로 하여 工程用蒸氣로 使用하는 것 이외에는, 가스터어빈—증기터어빈의 複合發電方式과 同一하다.

라. 디젤엔진 방식

디젤엔진의 冷却水를 使用하는 熱併合發電方式으로서, 오래전부터 주로 빌딩의 暖房用으로 蒸氣 또는 溫水를 供給하는데 使用돼 온 방식이다. 디젤엔진方式은 1,000kW(相當蒸氣量 1,400kg/h)의 小型으로부터 3,000kW 정도까지의 容量에도 適用될 수 있으며, 실린더 주위의 熱損失을 利用하여 壓力 1kgf/cm²(G) 정도의 低壓蒸氣生産이 加能하다. 電力生産에 대한 추가 熱消費率은 1,500~1,750kcal/kwh로서, 그 效率이 57~49%가 되어 증기터어빈이나 가스터어빈方式에 비하

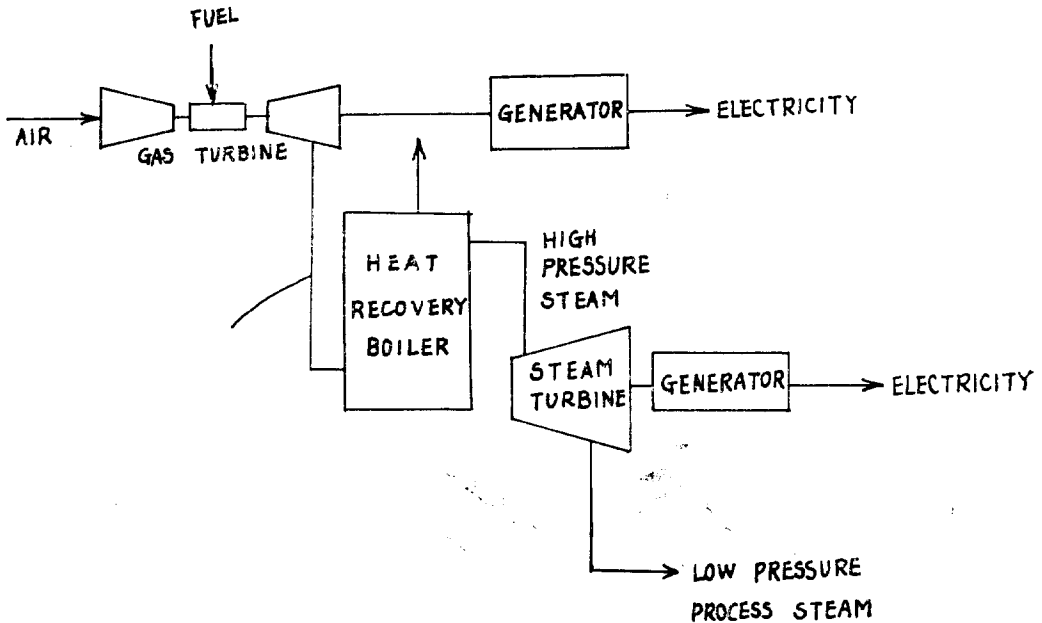


그림 2. 가스터어빈과 증기터어빈의 複合방식에 의한 열병합 발전

면 그 성능이 떨어지나, 在來의 熱消費率보다는 훨씬 낮다. 또한 單位蒸氣熱量에 대한 發電量은 증기터빈이나 가스터빈에 비해 훨씬 높다. 使用燃料에 있어서, 가스터빈과 마찬가지로 石油類에 국한되어 있으나, 2行程大型船用機關의 경우에는, 가스터빈에서는 使用할 수 없는 液體燃料을 使用할 수 있는 利點이 있다.

2) 電氣 및 熱單價 算定方法

熱併合發電과 같이 같은 施設에서 동시에 2개의 生産品이 나올때의 단가계산은 어려움이 많다.

電力生産에만 소요되는 費用(증기터빈, 發電氣, 變電 및 送電施設)은 電氣料金에 熱施設에만 소요되는 비용(熱煤用 파이프라인)은 蒸氣料金에 配當할 수 있으나, 두 生産品을 위한 共同費用(보일러와 열교환기 등의 시설비용과 연료비, 급수처리비 등 재료비, 인건비 등)을 어떻게 배분한 것인가를 결정해야 한다. 이 방법으로는 대략 다음과 같은 것들이 있다.

가. 증기의 에너지적 이용

- 1) 蒸氣生産을 爲主로 하는 施設(蒸氣가 첫째 目的)
- 2) 電力生産을 爲主로 하는 施設(電氣가 첫째 목적)
- 3) 平均值 또는 比例 計算方法

나. 別도생산에서의 비용

다. 經濟費用의 觀點

가) 蒸氣의 에너지적 利用에 따른 費用配分

- 1) 蒸氣生産 爲主에서의 費用計算

上記 "가"의 1), 2)에 의한 계산방법을 따르면 熱併合發電에서는 電力이나 蒸氣 어느 한쪽이 一方으로 有利한 計算이 된다. 첫 방법("가"의 1))은 生蒸氣生産을 위한 總費用을 熱의 落差에 비례하여 分배하므로

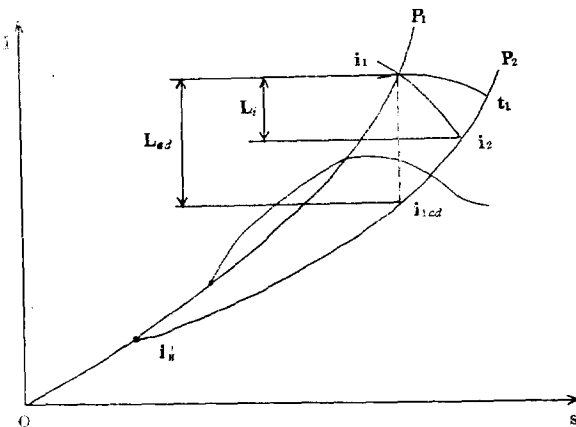


그림 3. 열병합의 i=s선도

표 5. 연료비용 비례치

공정 증기의 연료비 = 생증기 연료비 $\times \frac{i_2 - i'_H}{i_1 - i'_H}$
노동 증기의 연료비 = 생증기 연료비 $\times \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_H}$

서 이루어진다.

어떤 背壓플랜트를 생각하면, 電力生産을 위하여 使用된 열에너지 낙차는 그림 3에서 $AL_1 = i_1 - i_2$ 이고, $q_H = i_2 - i'_H$ 이다. 여기서 증기의 複水(condensate)가 포화 온도 이하로 냉각되지 않는다고 가정한다. 보일러에 주어진 總熱量은 $i_1 - i'_H$, 비용분배를 위한 燃料費用比例치는 표 5와 같이 된다.

공정 증기 연료비(K·H)와 노동 증기 연료비(K·A)로서 연료비 비율을 나타내고 있으며 電力需要者와 暖房蒸氣消費者들에게, 이 比率로 연료비를 부담시킨다.

이 計算方法은 一次的으로 공정용 증기 생산을 目的으로 하는 회사에서 사용하고 있으며, 熱量으로 계산되므로 칼드리方法이라고도 한다. 대개 背壓플랜트에 使用된다.

2) 電力生産 爲主의 費用計算

전력 생산을 위주하는 施設에서는 복수운전이라고 보고, 얻어진 電力單價를 基準으로 하여, 이를 背壓 또는 抽氣運轉 計算에 使用한다. 즉, 電力消費者들에게 부담되는 증기값은, 上記 發電單價에 의한 利得과 實際 使用된 單位蒸氣 消費量을 고려하여 定해진다.

이 方法은 蒸氣를 그의 노동능력에 따라 價値판단하므로 熱力學的 또는 노동가치적 計算방법이라고 한다.

熱併合發電에서는 이로서 증기쪽이 이득을 보게되며 대개 抽氣플랜트에 使用되는 方法이다.

3) 平均值 또는 比例 計算方法

앞의 두가지 方法 모두가, 그 計算에 公正하지 못한 要素가 있어, 이를 무마하기 위하여 두 方法에서 얻은 값을 平均하는 方法.

나) 別途生産에 대응하는 配分方法

熱 및 電氣를 別途로 生産한다고 했을 때의 費用과 熱併合時 費用의 差額(merit)를 양쪽에 分하여 減하여서 價格을 決定하는 方法으로 표 6의 E. Shulz方式과 E. Shuly方式이 있다.

3. 열병합발전시스템의 표준설계 및 경제성검토(例)

標準設計로서 送熱負荷 25Gcal/h, 50Gcal/h에 따른 背壓式시스템의 設計 및 經濟性 檢討 例를 소개하면 다음과 같다.

가. 設計 基本資料

1) 蒸氣條件

표 6. 메리트 배분방법

	E. Shulz 방식	E. Shuly 방식
메 리 트 배 분 도 매		
해	<p>□ 우선 단순한 방법으로 메리트를 양분하는 방식으로 한다.</p> <p>(1) 메리트 $M = (a+b) - c$</p> <p>(2) 전력측 경비 $A = a - M/2$</p> <p>열측 경비 $B = b - M/2$</p>	<p>□ 효율변화에 대한 상위수정을 위해, 입력측 환산 배분의 방법을 취한다.</p> <p>(∴ 열병합시 효율 ≠ 전용시 효율)</p> <p>$Q_B =$ 전력측 출열량(kcal/hr)</p> <p>$\eta_B =$ 발전전용시 플랜트효율(20~40%)</p> <p>$Q_H =$ 열측출열량(kcal/hr)</p> <p>$\eta_H =$ 열전용시 플랜트효율(70~90%)</p> <p>(1) 메리트 $M = (a+b) - c$</p> <p>(2) 배분비율</p> <p>전력측</p> $E = \frac{Q_B/\eta_B}{Q_B/\eta_B + Q_H/\eta_H} \text{ (입력비)}$ <p>열측 $H = 1 - E$</p> <p>(3) 전력측 경비 $A = a - (MXE)$</p> <p>열측 경비 $B = b - (MXH)$</p>
설		

터어빈입구압력, 온도는 103ata/538°C로 하고 背壓點은 공급온수온도에서 터어빈 단락압 3.5ata로 한다.

2) 流入蒸氣量

송열용 배기증기량을 기초로 계산해 낸다.

3) 누설증기량

보일러 blow-out, 케이싱 누설증기량은 계산계락을 위해 제외한다.

4) 급수가열사이클

고온차(TD)=0, 저온차(DC)=80°C이내로 한다.

5) 壓力損失

- 過熱器損失은 drum압력의 7%로,
- 再熱器損失은 고압터어빈출구압력의 10%로,
- 제 1 抽氣損失은 재열단으로부터 추기하는 경우 5%, 기타경우 8%로 한다.

• 其他 抽氣損失은 터어빈단락압의 8%로 한다.

6) 給水펌프壓力

드럼압력의 1.25배

7) 等熵 엔탈피 上昇

壓縮水の 엔탈피로 하고, 等엔드르피 變化時的 엔탈피 上昇과 實際의 엔탈피 上昇의 比率을 0.7로 한다.

8) 機械損失

製作會社 仕様에 準하고, 비재열, 재열은 별도로 선정한다.

9) 發電機損失

發電機效率은 0.96으로 計算한다.

나. 터어빈仕様

터어빈의 사양은 표 7과 같다.

다. 열 흐름도

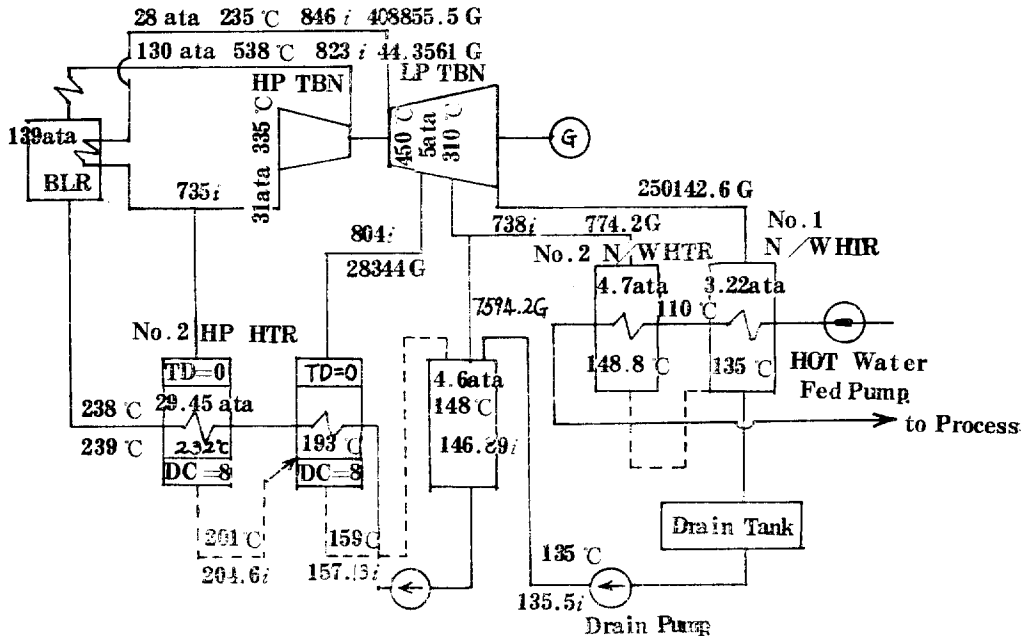


그림 4. 배압식 발전소 열흐름도(비제열성)

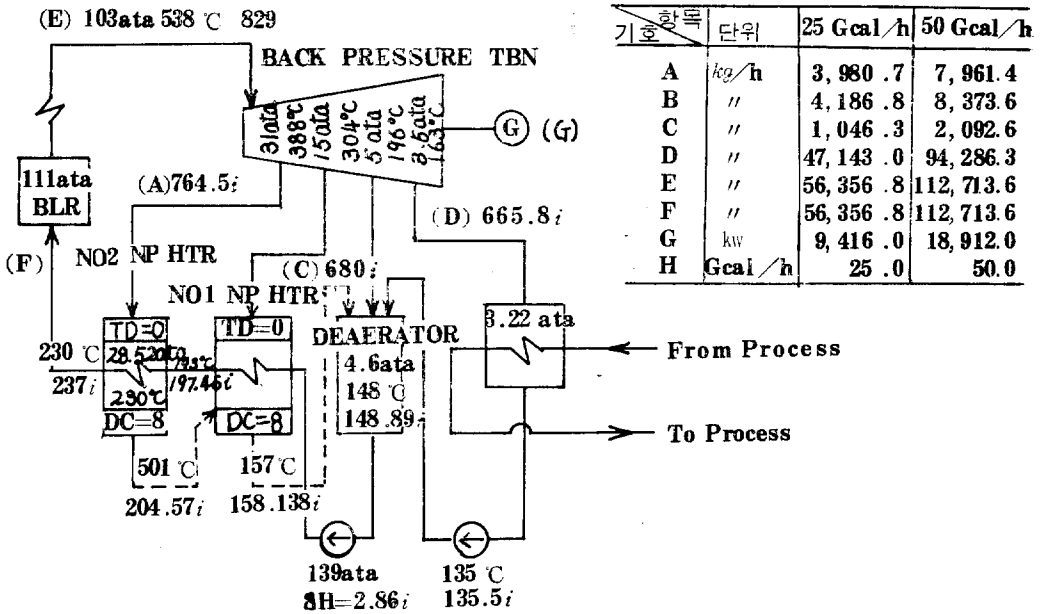


그림 5. 배압식 열병합 발전소 열흐름도(제열형)

표 7. 배압식터어빈의 사양

항목	증열량	25Gcal/μ	50Gcal/μ
	량	1기	1기
형식	재생식배압터어빈	과	동
정격출력	9,416kw	18,912kw	
중기압 입구/배압	103/35ata	과	동
터어빈입구온도	538°C	과	동
보일러급수온도	230°C	과	동
추기단수	3단	과	동
유입증기량	56,357kg/h	112,714kg/h	
내부효율	82%	과	동
총합효율	86.3%	86.4%	

비제열형 발전소의 열효율도는 그림 4와 같으며, 제열형은 그림 5와 같다.

라. 經濟性 檢討

背壓터어빈熱併合發電의 燃料經濟性은 표 8과 같다.

3. 結 論

産業用 熱併合發電은 燃料經濟性面에서는 충분히 경쟁력이 있는 것으로 인정되고 있으나, 모든 환경에서 經濟性이 보장되는 것으로 생각할 수는 없다. 따라서 다음의 여건을 충분히 감안, 전문적인 검토를 받고 實施하는 것이 바람직하다.

1. 産業用 熱併合發電方式의 추진에는 負荷特性을

표 8. 배압터어빈의 연료 경제성

구분	출력 단위	9,416kw	18,912kw	비고
		kw	kw	
발전전용시출력	kw	9,416	18,912	
열병합시출력	kw	9,416	18,912	
전송열부하	Gcal h	25	50	
발전전용시사이클	"	22.37	44.93	
입열량(Q ₀)	"	38.35	76.69	
열병합시사이클	"	38.35	76.69	
입열량(Q _H)	"	15.98	31.76	ΔQ=Q ₀ -Q _H
중분사이클입열량(ΔQ)	"	31.25	62.5	효율80%로가정
발전용시 입열량(Q _p)	"	51.14	50.82	
입열비율	%	48.86	49.18	
발전용에 대한 연료절감비	"			송열부하(kcal/h)×100%
열병합율	"	308.64	307.50	열병합전력량×860(kcal/kw)

면밀히 검토하고 韓電의 受電單價를 고려한 最適容量이 결정되어야 한다.

2. 石炭, 石油, 가스 등 燃料面에서 다양한 검토를 실시하고 자체공장의 여건에 맞는, 經濟性있는 燃料의 選擇이 重要하다.

3. 政府에서 熱併合發電을 하는 業體에 주는 稅制, 金融上의 혜택을 최대한으로 利用할 수 있도록 計劃하여야 한다.