

熱 併 合 發 電(II)

盧 承 卓

<서울대 工大 副教授·工博>

4. 熱 併 合 發 電의 現 況

熱併合發電에 의하여 生産된 發電量은 1975年에 全世界에서 430,000 GWh로서 全體發電量의 7% 이상인 되며 이의 용도는 産業體에 67%, 地域煖房에 33%를 사용한 것으로 알려져 있다.

Table 1은 外國의 1975年の 熱併合發電現況을 나타낸 것으로 소련의 경우 總發電에 對한 구성비가 30.3%가 되고 있다. 日本은 표에서 볼 수 있듯이 産業體發電이 950萬 kW로서 日本내의 9個 電力會社 6,600萬 kW의 약 14%를 차지하고 있다. 日本의 10,000 kW 이상의 自家發電設備를 가지고 있는 産業體를 業種別로 區分하여 표시한 것이 Table 2이다.

Table 1. 外國의 熱併合發電 現況

國 名	出力(MW)	總發電에 對한 比率(%)
소 련	520,000	30.3
서 독	197,000	3.3
일 본	9,500	14.0
덴 마 크	2,001	40.5
스 웨 덴	1,818	8.8
형 거 리	752	44.1
핀 랜 드	1,059	30.0
루 마 니 아	3,300	40.0

우리나라의 熱併合發電 現況은 1978年 11月現在 10여개 業體에서 163,000 kW로 全體發電出力의 數 퍼센트에 不過하며 業種에 있어서도 化學, 섬유 등에 局限되어 있다. 다만 근래에 들

Table 2. 日本의 業種別 熱併合發電 現況

業 種	會社數	出力(MW)
化 學	34	3,424
펄 프·製 紙	21	1,575
鐵 鋼	6	1,415
織 維	10	668
石 油	7	387
시 멘 트	5	347
非 鐵·기 타	13	1,258
共 同	4	422
計	100	9,496

어 數個業體에서 熱併合發電設備를 新設하고 있다. Table 3에 1978年 11月 기준으로 우리나라의 熱併合發電 現況이 나타나 있다.

5. 熱 併 合 發 電시스템의 特性

熱併合發電方式에는 水蒸氣를 媒體로 使用하는 蒸氣터어빈의 各種方式 이외에도 가스터어빈, 가스터어빈-蒸氣터어빈의 複合, 디젤엔진, 水蒸氣와 有機流體의 混合方式 등이 있으며 各各이 性能, 費用面에서의 特徵이 있다. 이들을 약술하면 다음과 같다.

5-1. 蒸氣터어빈 方式

蒸氣터어빈을 포함한 熱併合發電의 개략도가 Fig. 7에 表示되어 있으며 熱併合發電方式에서 動力單位量을 生産하는데 추가로 必要한 燃料에너지를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서는 產

Table 3. 우리나라의 熱併合發電 現況

會社名	位置	業種	보 일 러				터 어 빈			
			壓 力 (kg f/cm ²)	溫 度 (°C)	容 量 (T/h)	數	型 式	出 力 (kW)	數	容 量 (kW)
한국종합화학	충주	화 공	42.3	370	102	2	抽氣複水	7,500	3	22,500
			42.3	370	68	1				
한국종합화학	나주	화 공	60	500	90	2	抽氣複水	10,000	2	20,000
			94	510	50	2				
신 경 합 섬	수원	섬 유	94	510	50	2	抽氣背壓	5,500	1	23,500
			94	510	75	1	抽氣複水	6,000	1	
							"	12,000	1	
신 경 합 섬	울산	섬 유	114	510	85	2	抽氣背壓	11,000	1	11,000
원진레이온	양주	섬 유	42	475	45	2	"	4,200	2	8,400
대한석유공사	울산	화 공	91.4	485	150	3	背 壓	7,500	2	18,750
			42.3	376	68	1	"	3,750		
한 일 합 섬	마산	섬 유	45	425	60	2	抽氣背壓	11,200	1	11,200
석유화학공단	울산	—	60	485	91	4	抽氣複水	17,500	2	35,000
쌍용양회	문경	시멘트	23	425	15	3	"	4,000	2	8,000
동양화학	인천	화 공	42	445	60	1	"	5,000	1	5,000
			42	445	30	2				
삼양사	전주	섬 유	66	457	84	1	抽氣背壓	8,100	1	8,100

業工程用蒸氣를 生産하고 함께 電力을 生産할 때 電力生産에 대한 추가燃料의 소모가 工程用蒸氣의 壓力에 따라 달라지므로 이를 壓力의 函數로 표시한 것이다. 뒤에 설명될 디젤엔진과 가스터 어빈에 대한 資料가 함께 표시되어 있다. 蒸氣 터어빈熱併合方式의 경우 工程用壓力에 거의 無 關하게 추가에너지소모가 一定함을 알 수 있다.

또한 單位動力生産에 必要的한 추가연료량이 蒸氣 터어빈 方式에서 가장 낮음을 알 수 있으며 回 收不可能한 損失이나 펌프動力의 증가를 고려하 더라도 1,180 kcal/kWh가 되어 動力發生에 대 한 效率를 약 72%로 볼 수 있어 보통의 複水 方式에 의한 發電效率 40% 內外에 比하여 훨씬 높 음을 알 수 있다. 이 경우 效率이 높은 것은 터 어빈에서 배출되는 熱이 工程用蒸氣로 使用되기 때문이다. 여기서 나타나는 損失은 단지 보일러 의 燃燒가스損失, 보일러放熱損失, 터어빈損失의 一部分 뿐이다. 이 方式에 있어서는 경우에 따 라 터어빈出口의 蒸氣狀態가 過熱蒸氣로 되는 경 우가 있으나 물을 분사하여 飽和狀態에 근접시

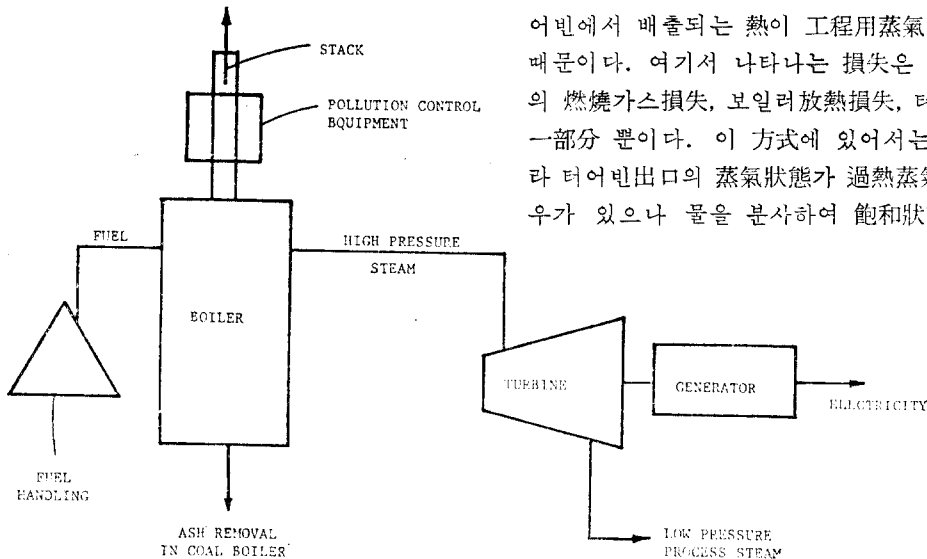


Fig. 7. Schematic diagram of steam turbine cogeneration of electricity and process steam

□ 資料

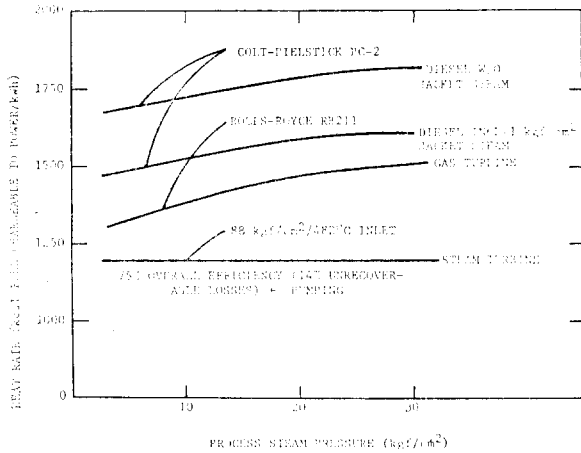


Fig. 8. Heat rates versus steam pressure

켜 사용할 수 있으나 가급적 터빈入口의 蒸氣 狀態를 조절하여 피하는 것이 좋다.

蒸氣터빈 熱併合方式에서 熱消費率은 대단히 낮아 性能評價가 양호한 반면 工程用蒸機量에 對한 電力生産量은 비교적 낮다. 예를 들어 14 kgf/cm²(g)의 工程用蒸氣가 必要할 때 壓力 88 kg f/cm²(g), 溫度 480°C의 供給蒸氣로서 10⁶kcal의 蒸氣에 對하여 163 kWh의 電力이 生産된다. 따라서 熱併合發電에서 電力生産量을 크게 할 必要가 있을 때에는 다른 方式의 채택이

必要하다. 工程用蒸氣로서 10⁶kcal를 必要로 할 때 그 壓力에 따른 電力生産量의 變化를 Fig. 9에 표시하였다. 蒸氣터빈 方式에 있어서 電力生産量은 壓力이 높아짐에 따라 감소하게 됨을 알 수 있다.

蒸氣터빈方式의 長點 中の 하나는 石炭을 직접 燃料로 使用함으로써 個別 工場에서의 不便을 줄일 수 있다는 데에 있다.

어떠한 에너지轉換方式에서나 重要한 因子가 效率이다. 蒸氣터빈方式에서 터빈效率이 낮으면 電力生産量은 줄어들게 되나 熱併合發電에서는 터빈의 非可逆損失이 배출증기에 엔탈피 形態로 나타나므로 그 損失이 다시 熱로 回收되므로 터빈效率을 향상시키더라도 熱消費率에 큰 影響은 없게 된다. 이것이 보통 發電所規模에 비하여 小型인 터빈을 使用하는 熱併合發電에 있어 有利한 點이 된다.

5-2. 가스터빈 方式

앞에서의 Fig. 8과 9에서 볼 수 있듯이 壓力 14 kg f/cm²(g)의 工程用蒸氣를 使用할 때 가스터빈을 熱併合發電方式에 채택하면 發電에 추가되는 燃料은 1,420 kcal/kWh가 되고 10⁶kcal의 工程用熱에 대한 電力生産은 821 kWh가 되어 蒸氣터빈方式에 比하여 熱消費率은 높으나 電力生産量이 크게 증가된다. 여기서 熱消費率이 높은 것은 주로 가스터빈方式에서 廢熱回收보일러에서의 燃燒가스엔탈피損失이 큰 때문이다. 動力과 蒸氣의 比가 蒸氣터빈에 比하여 5배까지 됨은 가스터빈의 長점이 될 수도 있다. 그러나 이러한 사실은 가스터빈熱併合方式이 動力發生에 있어서 우수한 장치라고 하기보다는 蒸氣發生에 있어서 적합하지 못한 것으로 해석하여야 한다. 蒸氣터빈方式에 比하여는 20% 이상의 熱消費率이 높기는 하나 電力과 蒸氣의 別도 生産方式에 비하면 역시 우수한 편이다. 예를 들어 14 kg f/cm²(g)의 蒸氣를 使用할 때 發電效率이 약 61%로 된다. 가스터빈에서의 熱消費率은 壓力比를 조절하여 變化시킬 수 있고 이로써 動力-蒸氣熱의 比를 조절할 수 있으므로 적합한 條件이 선택되어 使用될 여지가 많다.

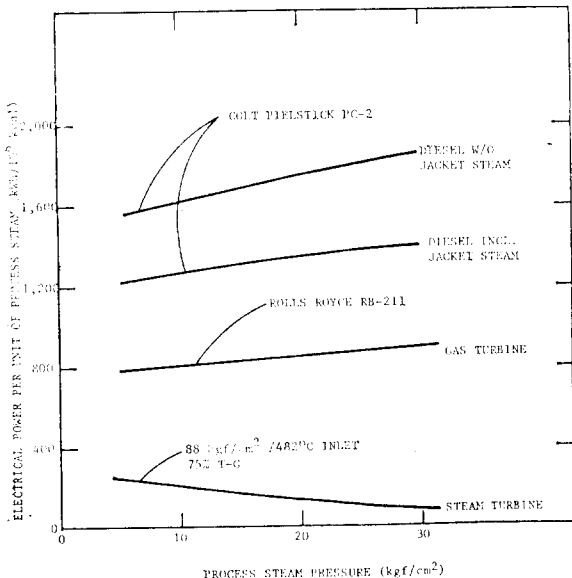


Fig. 9. Electric power generation capabilities per unit of process steam

가스터빈 방식의 큰 短點은 燃料이 現在로서는 石油나 가스라는데 있으나 가까운 장래에 石炭이 燃料로 實用化될 수 있을 것으로 예측되므로 가스터빈 방식의 重要性은 점차 높아지고 있다.

5-3. 가스터빈과 蒸氣터빈의 複合方式

가스터빈과 蒸氣터빈을 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 蒸氣所要量에 對應하는 發電을 行하고, 나머지의 電力을 보통의 發電方式으로 補充하여야 되는 경우 有利한 方式이다. 이 방식의 개략도가 Fig. 10에 나타나 있다. 이 방식은 蒸氣터빈을 背壓 또는 抽氣터빈으로 하여 工程用蒸氣를 使用하는 것을 제외하고는 가스터빈-蒸氣터빈의 複合發電方式과 同一하다.

5-4. 디젤엔진方式

디젤엔진의 冷却水를 使用하는 熱併合發電方式으로 오래전부터 주로 빌딩의 暖房用으로 蒸氣 또는 溫水를 供給하는데 使用한 方式이다. 디젤엔진 방식은 1,000 kW (相當蒸氣量 1,400kg/h)의 小型으로부터 30,000 kW 정도까지의 용량에도 적용될 수 있으며 실린더주위의 熱損失을 利

用하여 壓力 1 kg f/cm²(g) 程度의 低壓蒸氣生産이 可能하다. 電力生産에 대한 추가 熱消費率은 1,500~1,750 kcal/kWh로서 그 效率이 57~49%가 되어 蒸氣터빈이나 가스터빈 방식에 비하면 그 性能이 떨어지나 在來의 熱消費率보다는 훨씬 낮다(Fig. 8 참조). 또한 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 單位蒸氣熱量에 對한 發電量은 앞에서의 蒸氣터빈이나 가스터빈에 比하여 훨씬 높음을 알 수 있다.

使用燃料에 있어서 가스터빈과 마찬가지로 石油類에 국한되어 있으나 그行程 大型船用機關의 경우에는 가스터빈에서는 使用할 수 없는 液體燃料를 使用할 수 있는 利點이 있다.

6. 設備投資費用

熱併合發電方式의 채택여부는 에너지의 節約을 비롯한 各種 利點뿐 아니라 投資費를 고려한 經濟性에 의하여 決定될 것이므로 各 方式別로 規模 및 條件에 따라 設備에 所要되는 費用을 그래프로 표시하였다. 여기에 使用된 金額도 美國의 경우 1975年을 基準으로 作成한 것이다.

6-1. 蒸氣터빈 方式

蒸氣터빈 방식에서의 主要構成品은 보일러, 蒸氣터빈, 排岫가스處理裝置와 燃料處理裝置

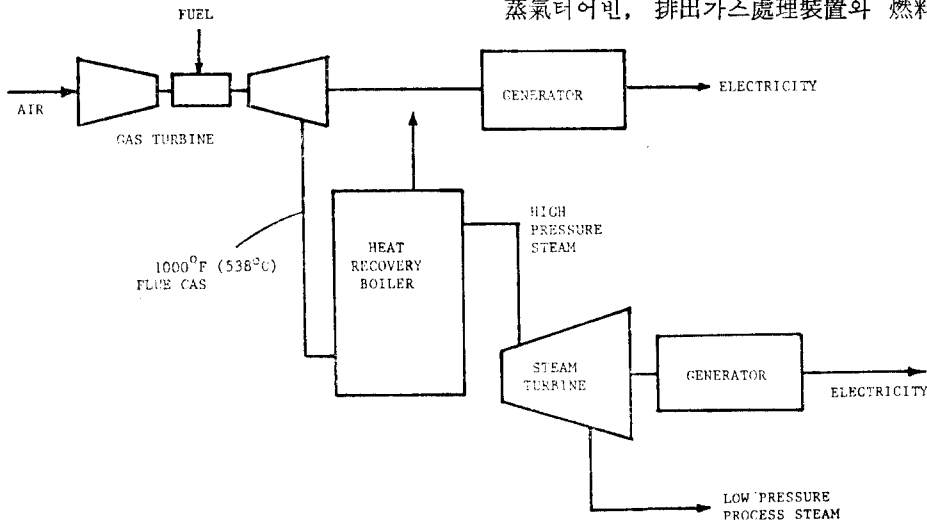


Fig. 10. Schematic diagram of gas turbine-steam turbine combined cycle for cogeneration of electricity and process steam

□ 資料

이다. 이들 품목에 대한 設置費가 Fig. 11~13에 나타나 있다. 보일러 設備費는 보일러 價格, 設置費, 기초, 빌딩, 配管, 計器, 補助裝備, 연돌, 電氣設備, 給水채취 및 處理裝置, 燃料 및 재처리

장치, 기타의 間接費用 등으로 構成되어 있다. 보일러 設備費는 Fig. 11에 표시한 바와 같이 容量規模, 使用壓力, 溫度와 使用燃料에 따라 크게 달라진다. Fig. 11에서는 石炭과 油類를 燃料로

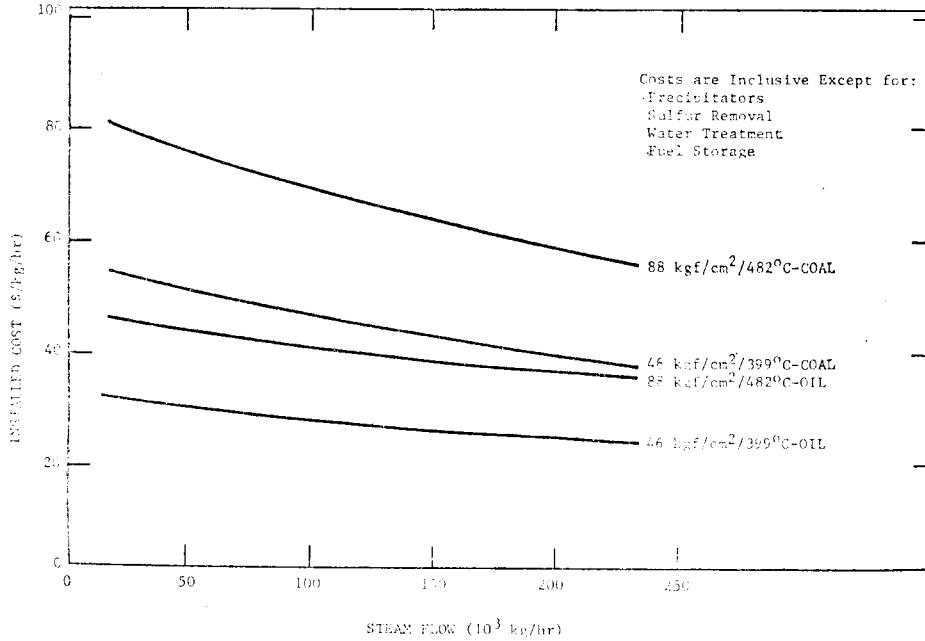


Fig. 11. Installed costs vs capacity for field erected steam boilers

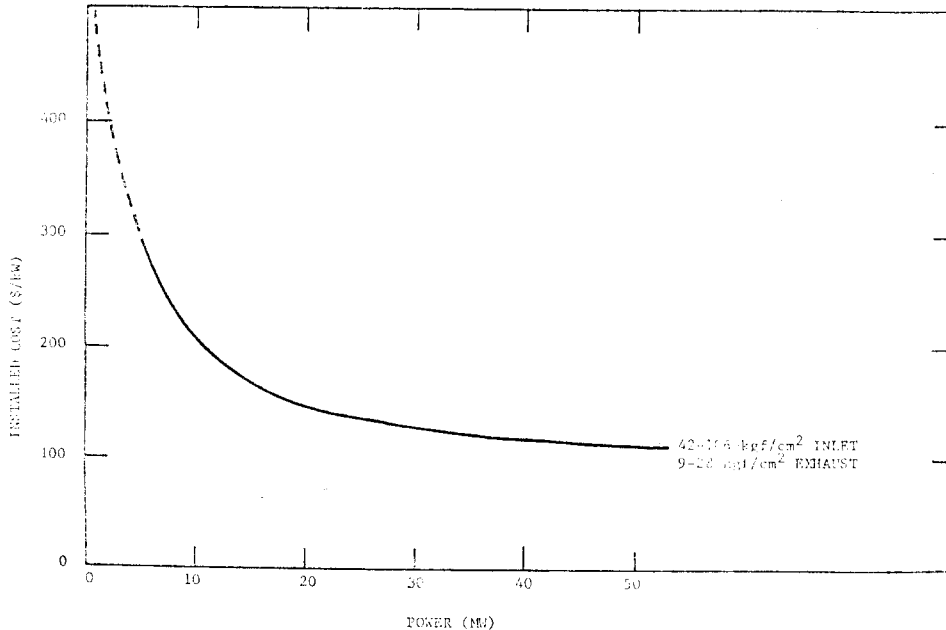


Fig. 12. Installed costs vs capacity for back pressure turbine-generators

하는 경우 46 kgf/cm²와 88 kgf/cm²의 2개의 壓力에 대하여 보일러 流量에 따른 設置單價가 표시되어 있다. 보일러 設備費의 보일러 價格에 대한 比는 石油使用보일러의 경우 2~2.5倍, 石炭使用의 경우 1.9~2.1倍로 보일러容量에 따라 다르다.

蒸氣터어빈의 設備費는 터어빈價格, 設置費, 配管費, 電氣부수설비費, 기초, 빌딩, 計裝, 保溫 및 기타 間接費를 포함한 것으로 대체로 터어빈 價格의 2.25倍로서 計算된다. 보일러의 경우와 마찬가지로 터어빈設備費도 容量에 따라 單價가 變化하여 5,000 kW의 小容量의 경우 kW 當 \$ 280로부터 30,000 kW 이상의 경우 kW 當 \$ 120 까지 감소한다. 背壓터어빈의 경우에 대한 例가 Fig. 12에 표시되어 있다.

燃料 및 재處理設備費는 400 MW 設備를 기준 으로 하여 이 때 費用의 0.6승에 比例하는 것으로 간주할 수 있으며 400 MW에서의 單價는 대체로 石炭使用의 경우 \$ 10.73/kW, 液體燃料 使用의 경우 \$ 6.22/kW이다. 이 경우 재처리장치로서 진기집진장치가 石炭, 石油用 모두에 使用되는 것으로 본 것이다(Fig. 13 참조).

이들 資料를 使用하여 여러가지 파라미터를 조합할 때 터어빈入口 壓力을 88 kgf/cm²(g)로 할 경우 內部收益率이 最大로 되어 經濟的이고

電力生産이 이 壓力에서 最大가 된다. 따라서 熱併合發電設備에 대한 總費用을 터어빈入口條件의 壓力을 88 kgf/cm²(g), 溫度 480°C로 하고 工程用 蒸氣의 壓力을 各各 25 kgf/cm²(g), 10 kgf/cm²(g), 5 kgf/cm²(g) 할 경우에 대하여 Fig. 14에 표시하였다. 여기에 계산된 費用에는 보일러價格, 蒸氣터어빈價格, 燃料 및 재처리장치, 排出가스처리장치 등의 費用이 모두 포함되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 蒸氣流量, 背壓 및 使用燃料의 種類에 따라 單價가 크게 달라진다. 蒸氣터어빈 熱併合發電方式을 채택하는 경우 工程用 蒸氣보일러의 費用은 必要하지 않으므로 이 費用을 제외하면 熱併合發電方式으로 인한 추가費用이 된다. 排出가스處理裝置와 燃料, 재처리 장치에 대한 費用을 포함시키지 않은 추가설치비를 터어빈入口條件을 88kgf/cm², 482°C로 할 때 蒸氣流量, 背壓 및 燃料의 種類에 따라 나타낸 것이 Fig. 15이다. 產業界에서 現在 使用하고 있는 보일러設備에 추가하여 蒸氣터어빈을 設置하는 경우 기준의 보일러가 이미 高壓으로

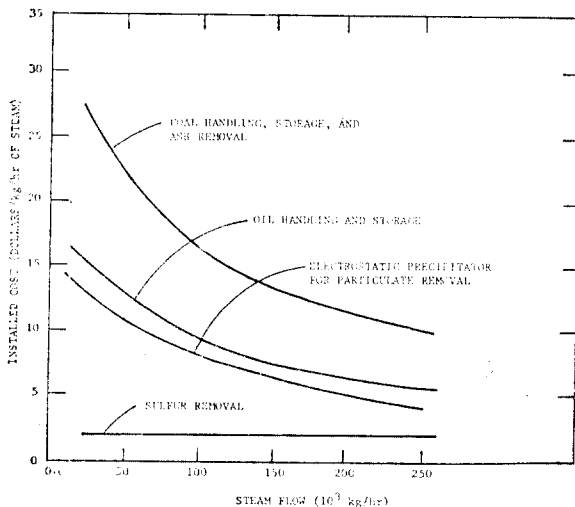


Fig. 13. Installed costs for coal and oil handling and emission control

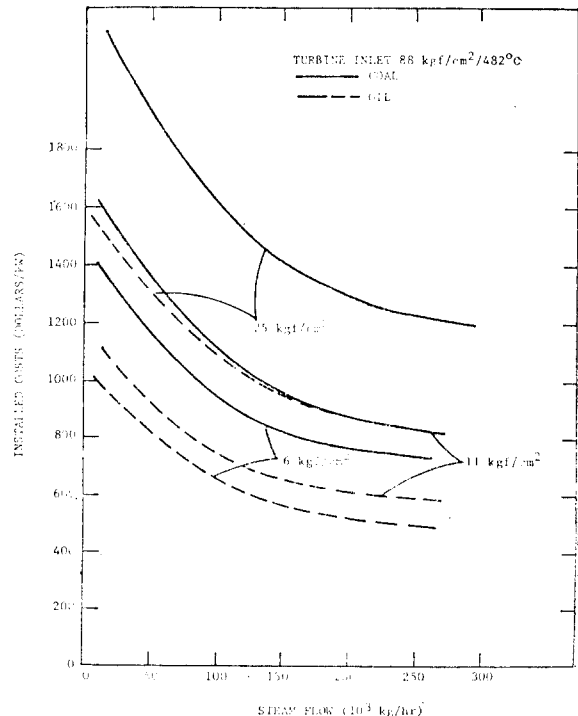


Fig. 14. Total installed costs versus steam flow for steam turbine cogeneration

□ 資料

된 예가 많다. 壓力 45 kgf/cm², 溫度 370°C의 터빈 入口條件과 工程用蒸氣壓力를 5~25kgf/cm²로 하여 背壓터빈을 추가로 設置할 때의 費用을 Fig. 16에 표시하였다.

최종의 經濟性 分析에는 投資費 뿐 아니라 運轉 및 유지비가 추가된다. 蒸氣터빈 方式에서

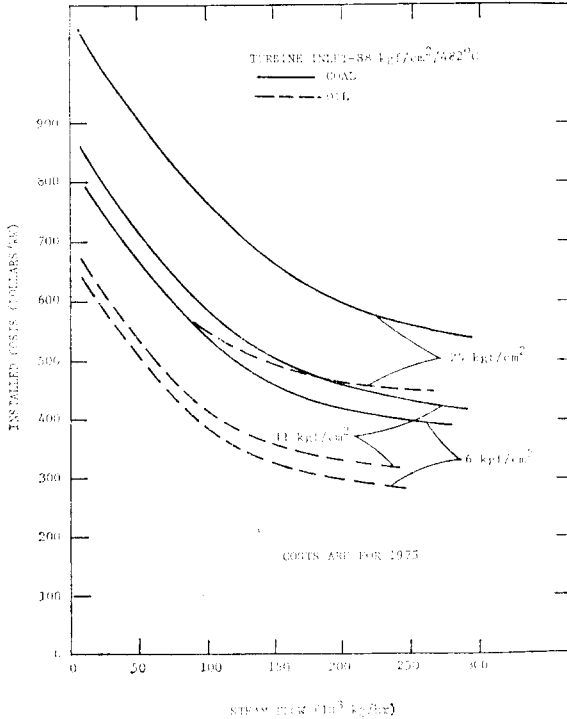


Fig. 15. Incremental installed costs versus steam flow for steam turbine cogeneration

의 運轉 및 유지비는 대체로 \$0.003/kW로 간주할 수 있다.

6-2. 가스터빈 方式

가스터빈에 의한 熱併合發電設備費用은 가스터빈, 設置作業費, 補助部品, 配管, 기초, 빌딩, 計裝, 保溫 및 기타의 間接費用으로 구성된다. 이 때의 總費用은 터빈價格의 約 1.6倍로

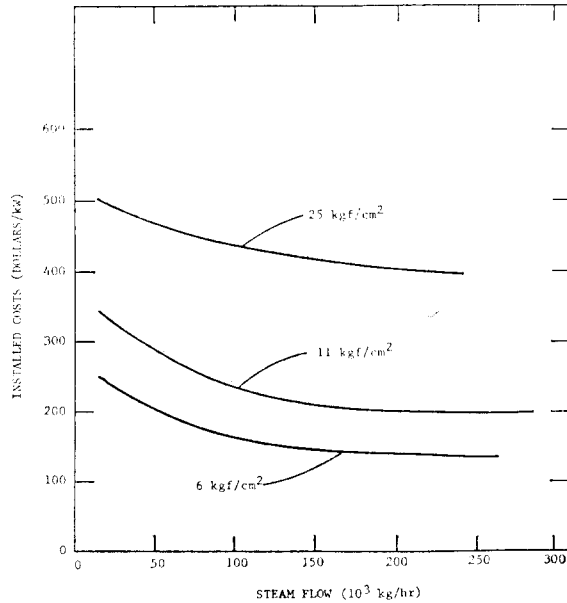


Fig. 16. Steam turbine installed costs for installation of back pressure turbine between existing boiler and process steam vs steam flow

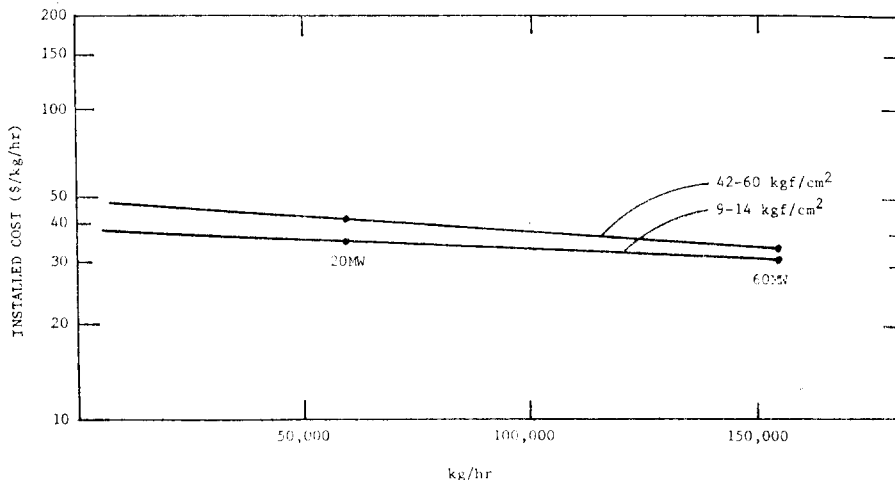


Fig. 17. Installed cost for heat recovery boilers

볼 수 있다. 이 방식에서 熱回收 보일러의 設置 費를 蒸氣流量 및 蒸氣壓力에 따라 나타낸 것이 Fig. 17이며 가스터어빈에 의한 熱併合發電設備의 費用을 표시한 것이 Fig. 18이다. 여기에는 燃料 저장設備, 廢熱回收보일러, 가스터어빈의 費用 및 이들의 總計를 蒸氣流量의 函數로 표시하였다. 보일러에 의하여 供給하는 蒸氣를 가스터

어빈에 의한 熱併合發電方式으로 轉換할 때 추가하여 필요로 되는 費用을 Fig. 19에 표시하였다. 여기서 使用蒸氣壓力이 7~28 kgf/cm²에서는 費用의 差異가 거의 무시될 수 있어 區分이 되어 있지 않으며 石炭燃燒 보일러의 경우 가스터어빈에 의한 추가비용은 石油의 경우보다 훨씬 낮음을 알 수 있다.

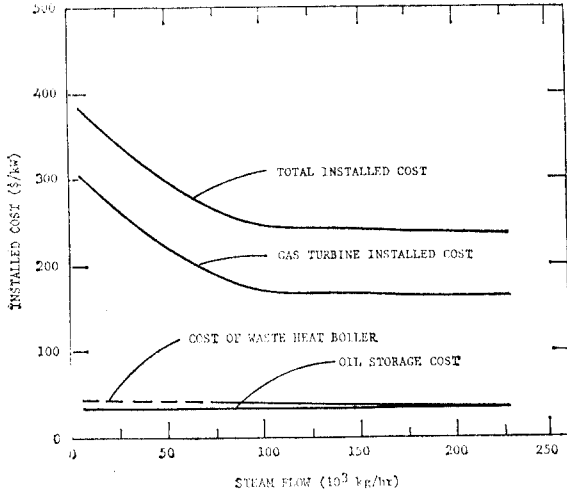


Fig. 18. Gas turbine installed cost versus steam flow

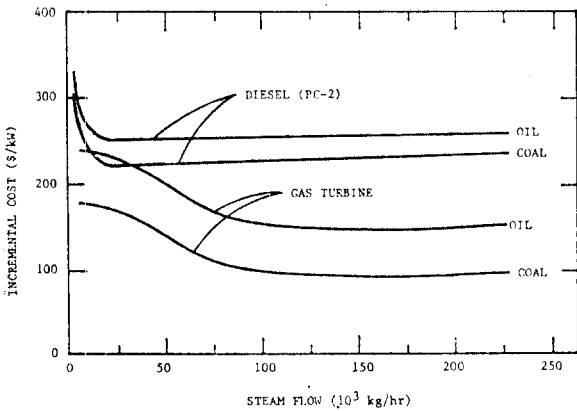


Fig. 19. Incremental cost versus steam flow

6-3. 디젤엔진 方式

디젤엔진에 의한 熱併合方式은 가스터어빈에 의한 方式과 유사하므로 앞에서와 같은 方法으로 Fig. 19와 Fig. 20에 추가비용과 總設備費를 나타내었다.

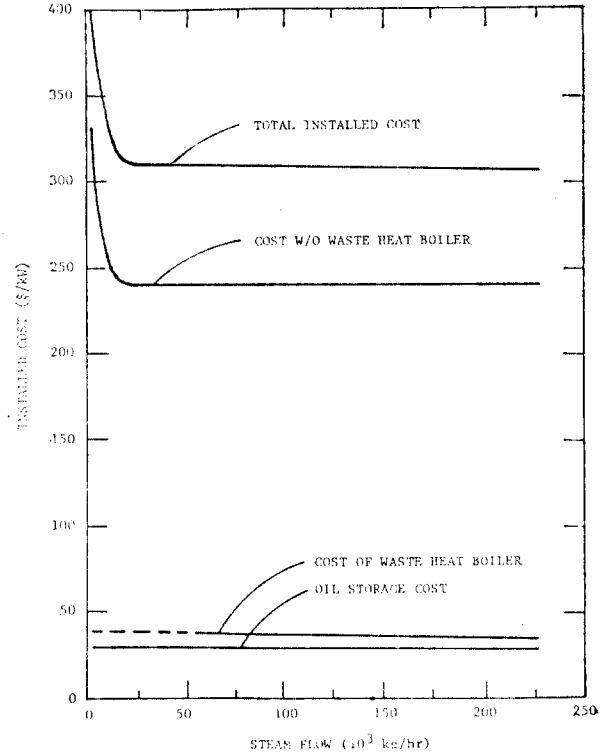


Fig. 20. Diesel engine total installed cost versus steam flow