

석탄발전소의 비교 연구



장길홍 (한국중공업 기술연구소 에너지환경연구팀장)

- '71-'78 동아대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '82-'87 독일 에센 대학교 기계공학과(석사)
열공학 및 발전소 공학 전공
- '87-'91 독일 베를린 공과대학 기계공학과(박사)
열공학 및 에너지 공학 박사
- '78-'80 현대중공업 발전 사업부 근무
- '88-'90 베를린 공과대학 에너지 연구소 연구원
- '91-'92 독일 슈나이더 보일러 열설계실 근무
- '92-현재 한국중공업 기술연구소 에너지 환경 연구팀장

1. 서 론

현재 국내 에너지수요는 경제성장에 따라 크게 증가하는 동시에 에너지의 고급화 현상이 두드러지고 있다. 지금까지 국내 에너지 시스템의 특성은 전력수요에 대한 안정된 공급, 경제성 그리고 공급량 위주였으나 미래의 에너지시스템은 유연성(flexibility), 분산형(decentralization), 저공해형(cleanliness), 입지절약형(siteefficiency) 그리고 기술집약형(technology intensiveness)이 될 것이다.

특히 오늘날 환경보전을 위한 막대한 경비는 전세계의 발전소 제조사, 전기공급원 그리고 학계에 미래의 환경보존 요구조건에 만족할 수 있는 즉, 기술적으로 탁월하고 간단하여 가격이 저렴한 대체나 방법의 개발을 필요로 하고 있다. 이 목표에 근접하는 근본적인 방법은 공해생성물질을 제거하는 것으로 이러한 해결책은 대부분 개발 도상에 있다. 이에 본 연구는 미래 발전소시장¹⁾에 나타날 발전형태의 적합성을 조사하고자 한다. 여러가지 발전소 형은 아래에 제시한 사항에 의해 평가된다.

- 효율(efficiency)
- 투자비(investment cost)
- 전기생산비(electricity prime cost)
- 가능한 낮은 공해물질 배출
- 현 개발수준
- 지속적인 개발 가능성

이 평가기준은 액체연료(석유류)는 더 이상 오래 사용하지 않으며, 천연가스는 석탄가스를 쓰게 될 때까지 중간 해결책으로 사용한다는 가정하에 작성되었다.

2. 평가방법

표 1에 기술한 경제조건들이 평가 기초자료가 되는데 재래식 석탄 분무식 발전소는 타 발전형태와 비교하기 위한 기준(참조: reference)형으로 선정했다.

표 1. 일반적인 평가기준

출력	ca. 370 MW
연료	석탄
위치	들(초원)
완전부하운전	최대7000 h/a
최대공해물질배출량	200 mg/m ³ (ca. 600 mg/kwh) NO _x 200 mg/m ³ (ca. 600 mg/kwh) SO _x 50 mg/m ³ (ca. 150 mg/kwh) 분진
증기압력(터빈입구)	185 bar
증기온도(터빈입구)	535 °C
재열증기온도	535 °C
복수압력	0.03 bar
가스터빈	GT13E(ABB 터빈의 최대형)
석탄가스화	BGC-Lurgi 시스템(고정층 가스화)
연료단가	1560 ₩/GJ(1DM=520₩으로 환산)
수명	30년
금리	10%

석탄가스화의 기본 시스템은 고정층방식을 채택하는데 기술적으로 다른 형태의 석탄가스화 방식이 있으므로 효과있는 조사결과를 위해 다른 석탄가스화 시스템을 평가시에 고려했다. 평가를 위해 여러 발전소형을 등급지을 수 있는 시스템을 만들었는데 이 시스템은 전체출력에 대한 가스터빈의 출력비율의 영향 즉 효율 및 투자비와 같은 특성치로 이루었다.

2.1 효율비교^{2, 3)}

그림 1에서는 상대 순효율을 나타내었다. 각 점(13개점)들은 발전소 개념을 의미하는데 물/증기 사이클들은 그림 1의 왼쪽편에 나타내었고 가스터빈 사이클은 오른쪽편에 나타내었다. 왼쪽 점은

석탄 연소장치를 의미하고 사각형은 천연가스 연소장치를 나타낸다.

그림 1의 점 1은 기준기술로 타장치와 비교하는 표준이므로 이 장치의 상대 순효율은 100%이다(그림 2참조). 그림 2는 장치의 주요특징과 열계통도를 나타낸다. 이 기준형은 재래식 석탄분무 연소식 증기발전기(steam generator)에 탈황산 및 탈질산시설을 갖추었다.

천연가스 연소 재래식 증기발전소는 배기가스 처리를 위한 탈황산시설이 필요치 않아 보조에너지가 적게 소모된다. 그림 1에 나타낸 점 2의 효율은 104%인데 이는 저온의 배기가스로 인하여 천연가스 연소 발전소의 순효율이 증가 되었다.

천연가스 연소장치의 공기송풍기가 가스터빈으로 대체되어 가스터빈 배기가스에 잔류해 있는 산소가 연소되는 경우에는 기준형에 비해 출력비가 23% 증가하므로 효율은 113%로 상승한다(그림 1의 점 3).

천연가스를 연소하는 가스터빈 발전소(그림 1의 점 4)는 높은 배기가스 온도로 인하여 효율이 기준형의 82% 정도에 달한다.

폐열보일러를 천연가스연소 가스터빈 발전소에 연결하면 기준발전소에 비하여 출력비가 64% 상승하고 효율은 124%로 증가한다(그림 1의 점 5).

점 2와 점 3 그리고 점 4와 점 5를 연결한 직선은 동일한 증기상태로서 석탄발전소를 비교할 경우 이론적인 효율의 한계를 표시한다.

기준형 석탄발전소의 증기상태(증기압력 185 bar, 증기온도 535 °C/535 °C)보다 증기 상태를 250 bar, 600 °C/600 °C로 상승하는 경우에 효율은 105%로 증가한다(그림 1의 점 6: 그림 3 참조). 그림 3은 발전소의 주요한 특징과 열계통도를 나타내는데 이 형태는 소용량으로는 양호한 성능으로 이미 판정되었다.

그림 1의 점 7은 석탄연소 발전소인데 점 3의 천연가스 발전소와 동일하다. 이 발전소의 증기는 분무식 연소 보일러로 생산한다. 가스터빈 연료는 석탄가스화 장치기에서 얻은 석탄가스이다. 천연가스 발전소에 비하여 이 발전소형은 추가로 탈황산시설이 필요하며 고온의 배기가스를 배출한다. 석탄가스화 발전소의 효율은 105%이며

- 천연가스 연소장치
- 석탄/석탄가스 연소장치(비교용)
- 석탄/석탄가스 연소장치(본연구에서 조사한 것)
- 1 재래식 석탄분무형 발전소(기준형)
- 2 재래식 천연가스연소 발전소
- 3 가스터빈 + 천연가스연소 증기발전소
- 4 천연가스연소 가스터빈 발전소
- 5 천연가스연소 복합화력발전소(콤비발전소)
- 6 초기 증기상태를 개선한 재래식발전소
- 7 석탄가스연소 가스터빈 + 석탄분무형 발전소
- 8 가스터빈 + Na 사이클형 공기예열
- 9 상압 유동층연소 발전소 + 석탄가스연소 가스터빈 + 공기예열(가스터빈)
- 10 가압 유동층연소 발전소
- 11 석탄가스연소 가스터빈 발전소
- 12 석탄가스연소 복합화력발전소(IGCC)
- 13 고집적 석탄가스화 복합화력발전소(highly IGCC)

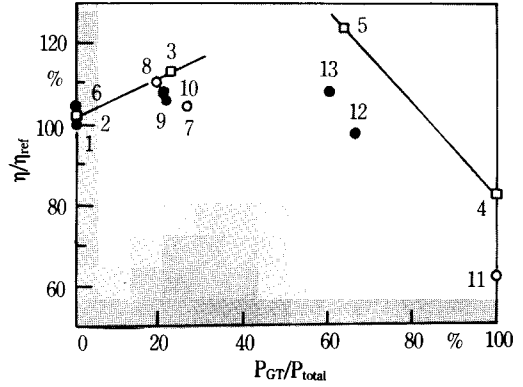
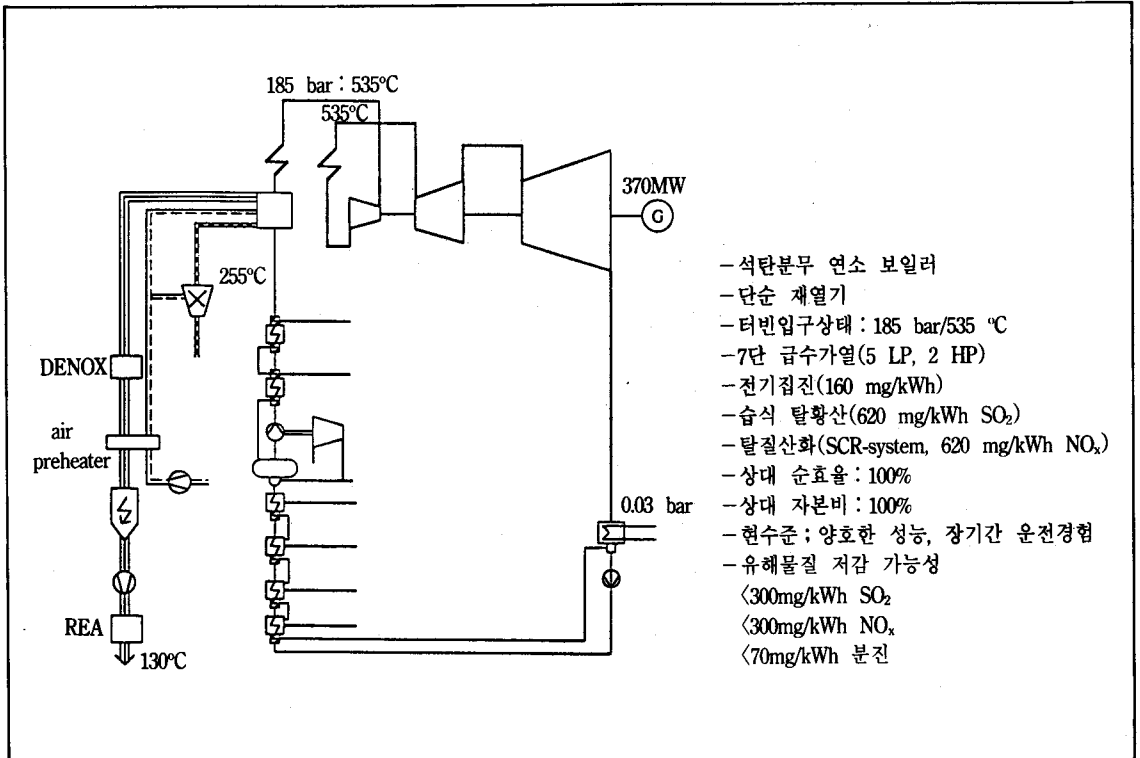


그림 1. Net efficiency of power stations



- 석탄분무 연소 보일러
- 단순 재열기
- 터빈입구상태 : 185 bar/535 °C
- 7단 급수가열(5 LP, 2 HP)
- 전기집진(160 mg/kWh)
- 습식 탈황산(620 mg/kWh SO₂)
- 탈질산화(SCR-system, 620 mg/kWh NO_x)
- 상대 순효율 : 100%
- 상대 자본비 : 100%
- 현수준 ; 양호한 성능, 장기간 운전경험
- 유해물질 저감 가능성
- < 300mg/kWh SO₂
- < 300mg/kWh NO_x
- < 70mg/kWh 분진

그림 2. 재래식 석탄분무 발전소(기준형)

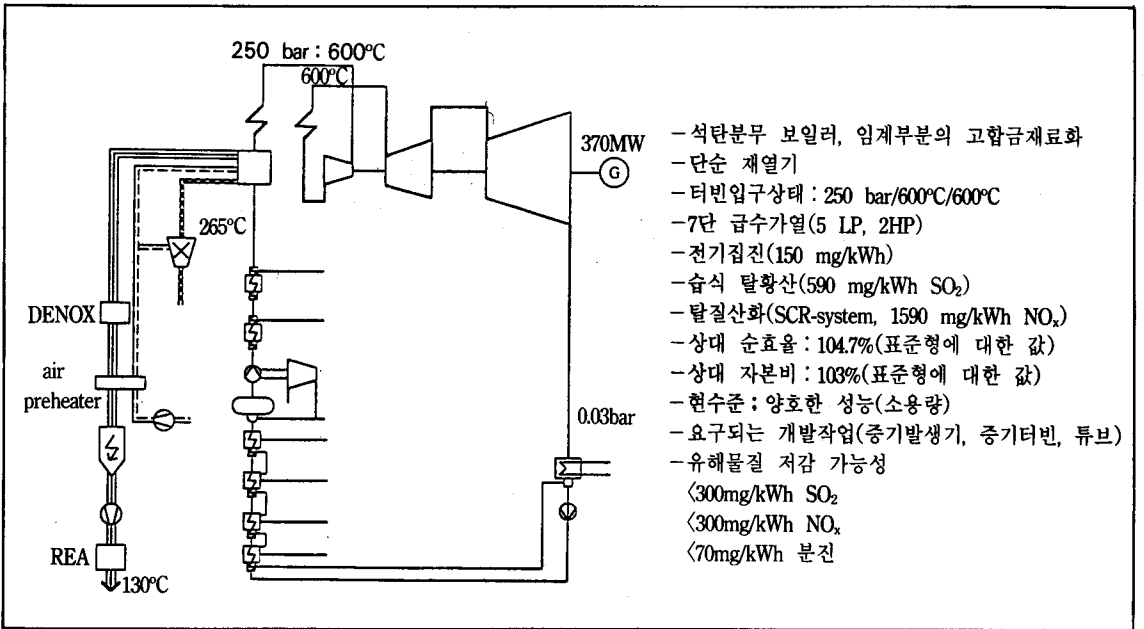


그림 3. 초기 증기상태를 개선한 재래식발전소

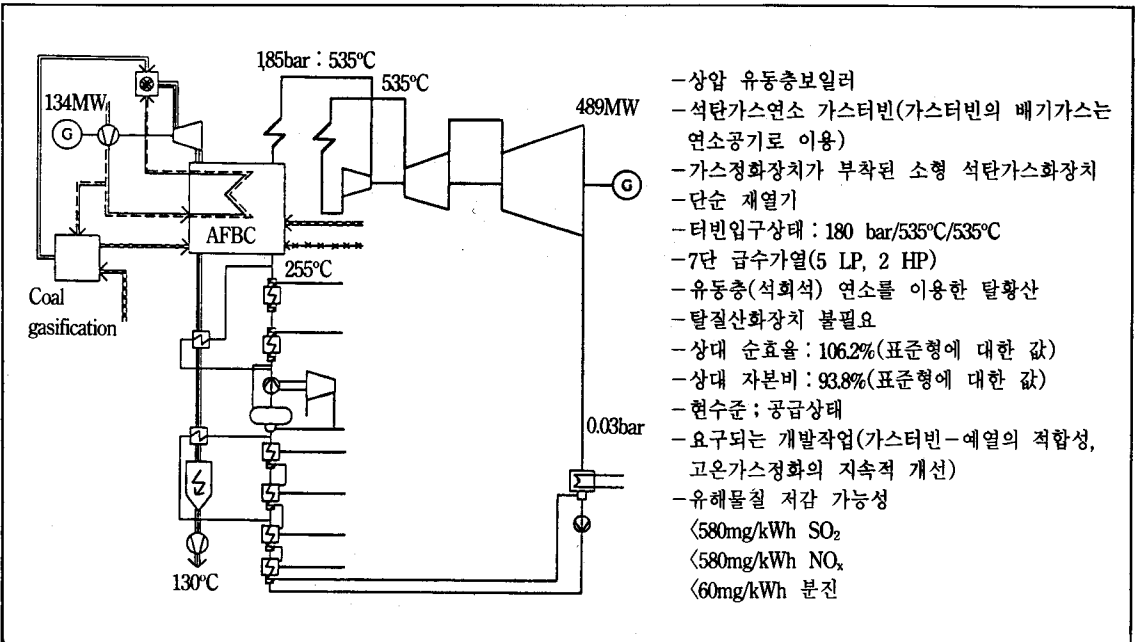


그림 4. 상압유동층연소 발전소와 가스터빈-예열

기준형에 비해 가스터빈에 대한 출력비는 27% 증가한다. 석탄가스화로 인하여 효율이 감소하나 석탄가스량의 감소로 전체 효율을 개선할 수 있다. 그림 1에서 점 9의 발전소 개념은 그림 4에

상세히 나타내었다. 압축된 연소공기는 유동층 보일러(CFBC)에서 예열되어 가스터빈의 연소실 (combustion chamber)로 들어간다. 압축공기 일부는 석탄가스화 시스템에 들어가 석탄을 부분

적으로 가스화 시킨다. 여기서 발생한 가스는 가스터빈의 연료로 쓰이며 이때 가스화 되지 않은 석탄은 상압 순환유동층에 주입되는 석탄과 혼합하여 연소되며 가스터빈의 배기가스는 유동층 보일러의 연소공기용으로 이용된다. 이 발전소의 장점으로서는 다음과 같다: 1) 석탄가스화 비율에 관련한 효율의 손실은 가능한 적게 하였고, 2) 탈황산 및 탈질산시설은 유동층연소의 이용으로 필요하지 않고, 3) 전체출력에 대한 고급연료 수요비를 낮게할 수 있다. 이런 개념은 ABB사와 EVT(독일 보일러제조업체)가 공동으로 개발하였다. 이 형은 기준형보다 출력비가 21% 상승하여 효율이 6%가 증가하였다(그림 1의 점 9).

에너지 공급업체인 VEW에서 열역학적으로 상기형과 비슷한 개념의 발전소형을 제안하였다(그림 1의 점 8). 탈황산시설을 가진 석탄분무 연소 보일러는 특수한 나트륨(Na) 사이클로 석탄가스 연소 가스터빈용 압축 공기를 가열한다. 이 VEW-개념은 기류층(Entrained Flow Bed)을 이용한 가스화이다. 이 형은 출력비의 20% 증가로 기준형보다 10% 증가한 110%의 효율을 가진다.

그림 1의 점 10은 가압 유동층연소(PFBC) 보일러를 이용한 발전소이며 그림 5에서는 이 형에 대한 기술적인 중요한 사항과 열계통도를 상세히 제시한다. 저압 가스터빈은 공기를 약 4bar로 압축하는 저압 압축기를 가동시킨다. 압축공기의 열은 그림 5의 ①에서 ②로 연결되는 급수에 전달된다. 고압압축기는 유동층에서 요구하는 공급 공기압력인 15bar로 압축하는데 고압 가스터빈으로 가동된다. 물/증기-순환설계는 재래식으로 하였다. 보일러에서 나오는 배기가스는 가스터빈 필터로 보내어지며 순환하는 급수에 의해 배기가스는 160 °C로 냉각된다.

그림 1의 점 11은 석탄가스 연소 가스터빈 발전소이며 그림 1의 점 4의 천연가스 연소 가스터빈 발전소와 같은 종류이다. 이 발전소형의 전체효율은 표준형의 63%로 상대적으로 낮은 효율을 갖는데 가스화로 인한 효율손실이 그 원인이다.

석탄가스화 장치에서 공급된 석탄가스를 연소하는 복합화력발전소(콤비발전소, 그림 1의 점 12)는 출력비는 66%가 증가하지만 효율은 기준형에 대해 97% 정도이다. 석탄가스연소 콤비발전소는

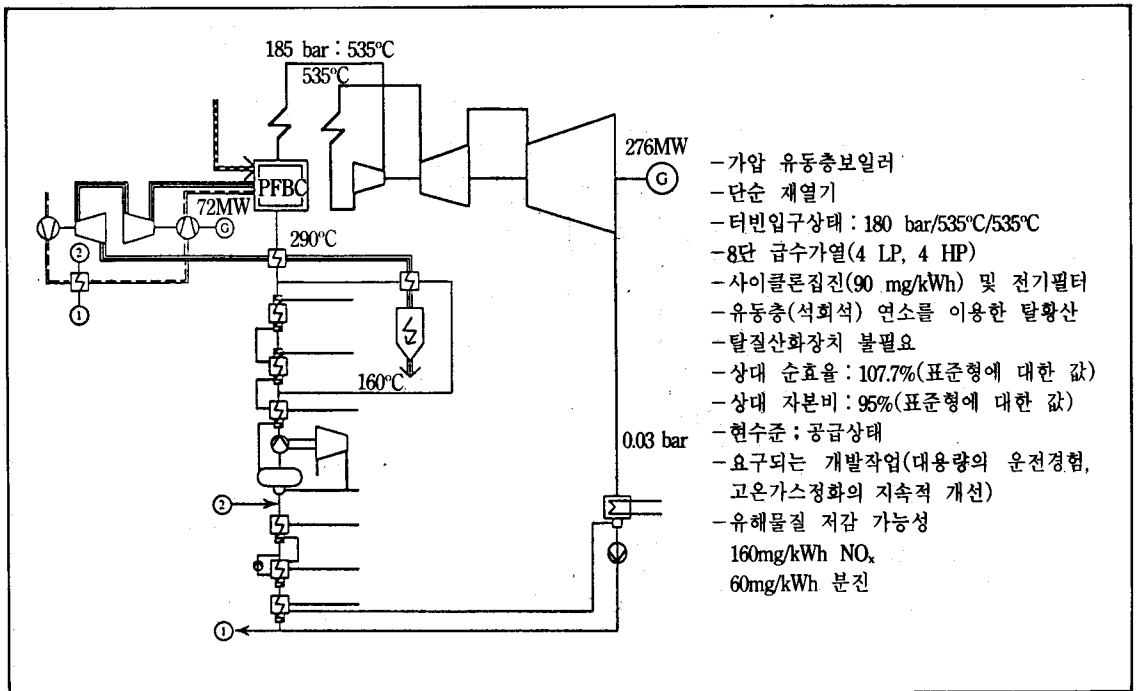


그림 5. 가압 유동층연소 발전소

그림 6에서 기술적으로 중요한 사항과 열계통도를 다시 상세히 기술했다. 이 발전소는 2개의 가스 터빈과 2단 압력(50bar/5bar)을 갖는 폐열보일러로 이루어졌다.

그림 7은 석탄가스화로 제조된 석탄가스를 연소하는 복합화력 발전소는 shell형 가스화 장치

기기로 기류층 원리를 이용한 것으로 그림 6에서 언급한 콤비발전소 보다 효율이 좋다. 이 발전소는 출력비가 61%로 기준형에 대해 효율은 107%이다(그림 1의 점 13). 고온의 석탄가스는 가스터빈에서 연소되며 연소한 배기가스는 폐열보일러에서 고온증기를 만들면서 냉각되며 폐열보일러는 다시

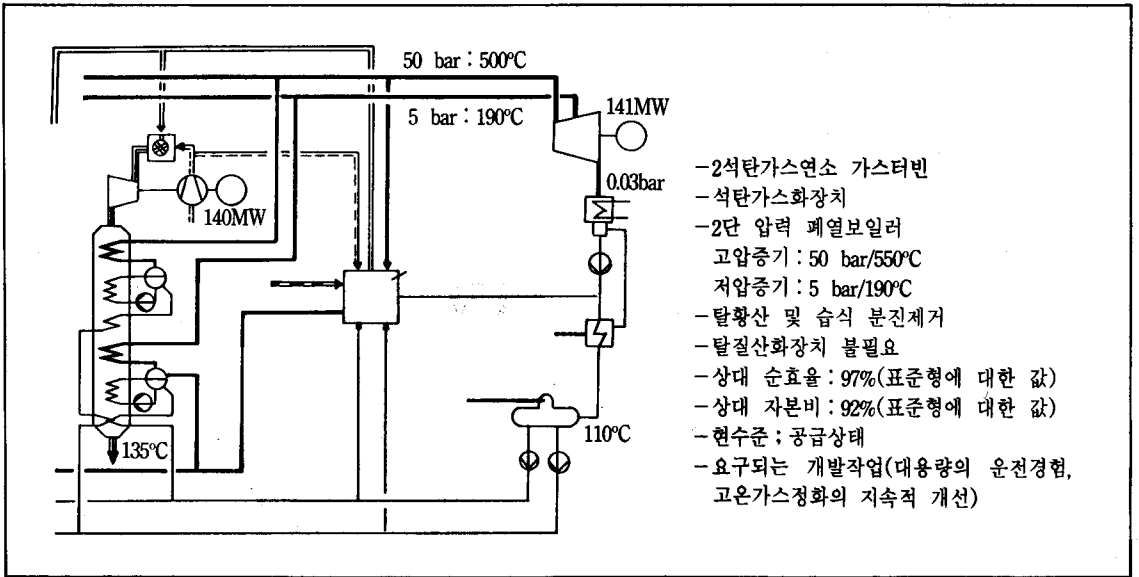


그림 6. 석탄가스연소 복합화력발전소

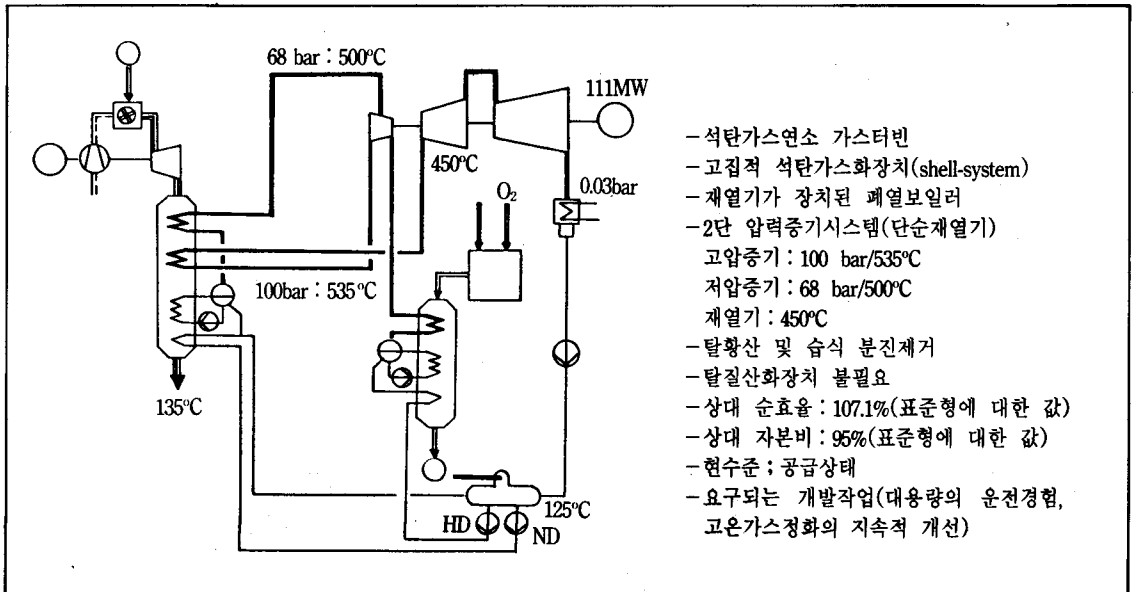


그림 7. 고집적 석탄가스화 복합화력발전소

재열기의 역할을 하며 저압증기를 생산한다. 또한 배기가스는 폐열보일러에서 급수예열에 이용된다.

석탄발전소에서 일산화탄소의 방출은 공급하는 석탄량에 비례하며 장치의 효율이 좋을 수록 공해물질의 방출이 적어진다.

2.2 투자비

투자비(investment cost)는 아래 (1) 식으로 나타낼 수 있다.

$$KI = KOT + ZR + SR \quad (1)$$

여기서 KI : 투자비
 ZR : 일반총경비
 SR : 세금

미래 발전소의 투자비는 효율과 아울러 개발성향 조사상 주요한 부분이다.

본 연구에서는 투자비에 대하여 여러 발전소형을 비교하기 위하여 다음 사항들을 고려하였다:

- 천연가스를 연소하는 재래식발전소는 여기의 조사대상에서 제외하였다.
- 석탄가스를 연소하는 가스터빈발전소 이외는 실용적인 형이 아니다.
- 석탄가스 연소 가스터빈후에 석탄분무하는 보일러를 갖는 발전소는 같은 비용으로는 유사형의 발전소에 비해 효율이 낮다.
- 석탄가스로 작동하는 가스터빈과 나트륨순환식으로 터빈 공급용 공기를 예열하는 석탄분무연소 발전소는 현재까지는 공급하기에는 이르다.

그림 8은 표준형의 투자비에 대한 여러 발전소형의 투자비를 제시했는데 초기증기상태를 높인 석탄분무 연소 발전소를 제외한다면 모두 기준정보보다 투자비가 저렴하다.

2.3 전기생산비

이 장에서는 여러 발전소형태를 연중 이용시간에 대해 지출하는 것을 산출하는 현찰가법(cash value method)⁴⁾으로 비교하였다.

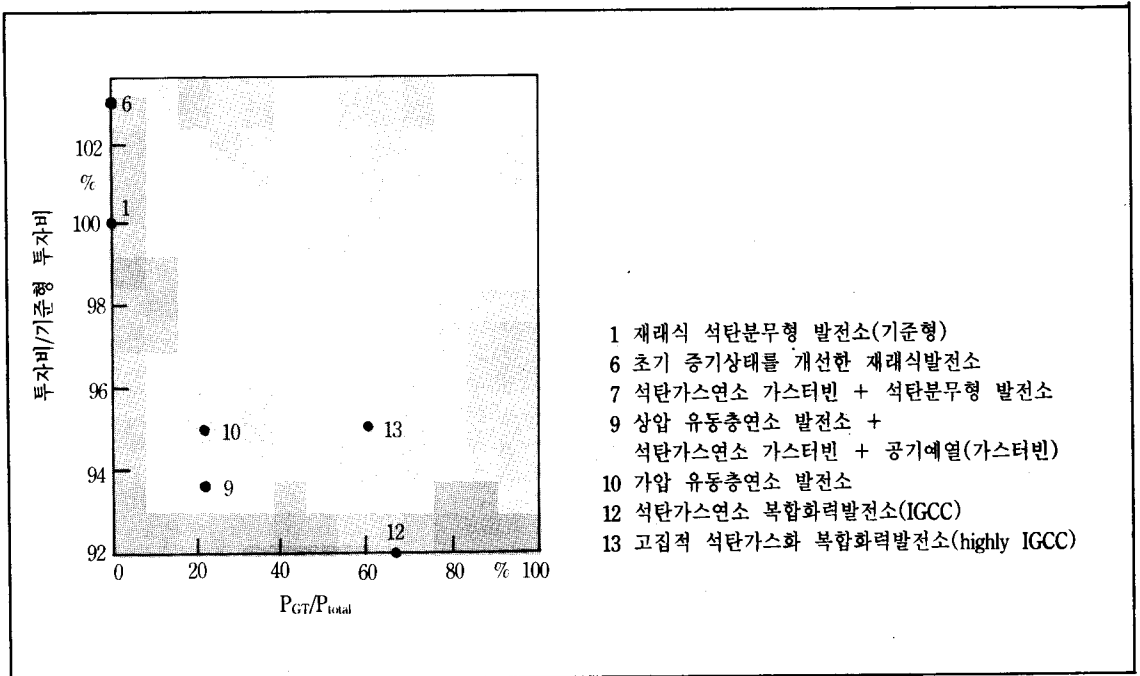


그림 8. 발전소 투자비

전기생산비(E_i)는 아래 (2)식과 같이 구한다.

$$E_i = \frac{KI(a+s+v)}{T_i} + \frac{b_i}{\eta_{net}} + f_i + b_s \quad (2)$$

여기서 E_i : 전기생산비 KI : 투자비
 a : 연부금을 s : 평균세율
 v : 보험비를 T_i : 연중이용시간
 b_i : 연료비 η_{net} : 순이용율
 f_i : 고정비 b_s : 운전비

여기 기술한 발전소 개념은 조사한 용량으로는 거의 모두가 아직 현실화 되지 못한 것이므로 단지 근사치에 지나지 않는다. 제조경험과 운전경험이 없기 때문에 제조시간과 인력수요에 대한 사항은 고려하지 못했지만 연구조사 결과는 개발성향에 대한 해석의 이용은 가능하리라 생각된다. 그림 9는 조사한 발전소개념의 현찰가(cash value)를 연이용 시간에 대한 함수로 제시 하였다. 상대투자비는 선의 절단점에서 수직선을 읽으면 된다. 상승하는 직선은 연료가 주종을 이루는 운전비(operational cost)의 크기를 의미한다. 선의 값이 낮을수록 각종 발전소의 전기생산비(electricity

prime cost)도 낮아진다.

100% 점은 기준형의 투자비(현찰가)를 의미한다(선 1). 다른 선들은 이 값에 대한 상대치이다. 초기증기의 상태를 개선한(선 6) 발전소의 값은 기준형(선 1) 보다 높는데 이는 높은 자본비(capital cost) 때문이다(그림 9). 연중이용시간이 증가함에 따라 효율이 감소한다. 현재 저렴한 연료비로 인해 초기 증기상태를 개선한 발전소형은 선 6번 아래에 있는 타 발전소에 비해 경쟁력이 없으나 고집적 석탄가스화 복합화력발전소, 가압유동층(PFBC) 보일러형 발전소 그리고 가스터빈과 연결한 순환유동층(CFBC) 보일러형 복합화력발전소는 값싼 전력 공급이 가능하다.

3. 결 론

본 연구 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 석탄을 이용한 전력생산은 앞으로도 더욱 개선력을 가질수 있다는 것을 여러차례 확증한 기술이다.
- 연구조사한 발전소 제형태와 현 연료비는 가스터빈의 경제적 장점을 제시했다.
- 아직 새기술을 이용한 대규모발전소가 없기

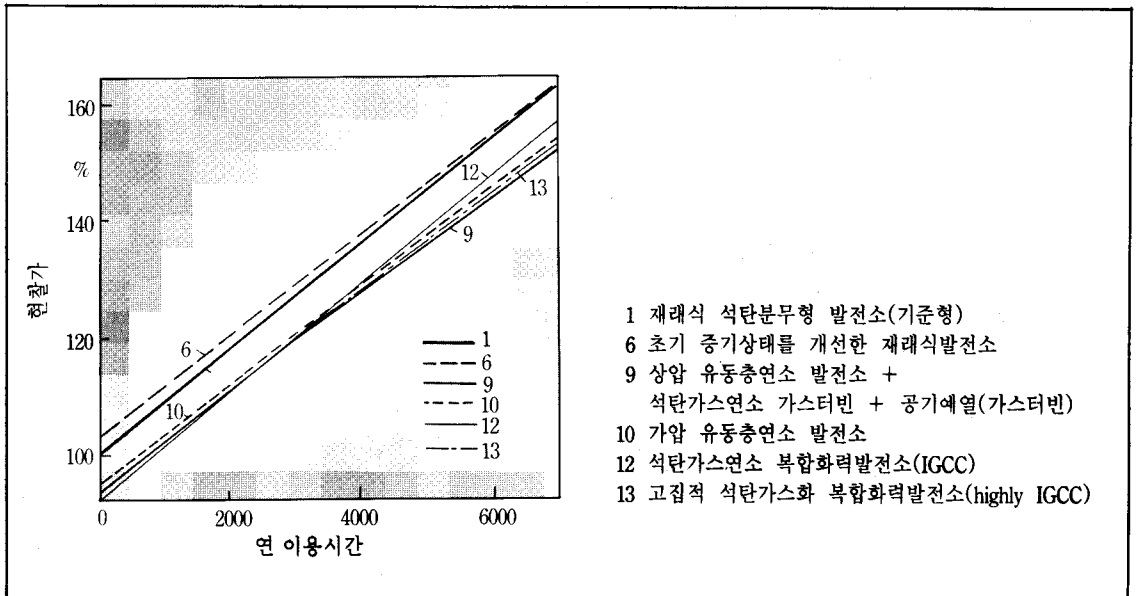


그림 9. 발전소 현찰가(cash value)

때문에

- 1) 고집적 석탄가스화 복합화력발전소
- 2) 가압유동층 보일러 발전소
- 3) 가스터빈과 연결된 순환유동층 보일러 발전소는 동일한 값으로 취급해야 한다.

참 고 문 헌

[1] N. N., "Improved Coal Fired Power Plants", EPRI 2nd. Int. Conference(1988), Palo Alto, USA
 [2] Knizia, K, "Zur Entwicklung kombinierter Gastur-

binen-Dampfturbinenprozesse fuer unterschiedliche Primaerenergien", VGB KRAFTWERKSTECHNIK 65(1985), Heft 6, pp.545-557.
 [3] Weinzierl, K, "Kohlevergasung zur Wirkungsgradverbesserung im Kraftwerk-Das VEW-Kohleumwandlungsverfahren im Vergleich zu alternativen Loesungen", VGB KRAFTWERKSTECHNIK 62 (1982), Heft 5, pp.365-379.
 [4] Bohn, T & Bitterlich, W, "Grundlagen der Energie- und Kraftwerkstechnik", Tchnischer Verlag Resch, Graefelfing 1982, pp.207-224.