

신규 화력발전소의 성능 시험을 통한 터빈 효율의 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Turbine Efficiency through the Performance Test of New Power Plant

권영수 · 정희택 · 정양범

Y. S. Kweon, H. T. Chung and Y. B. Jung

Key Words : Steam Turbine(증기터빈), Heat Consumption Rate(열소비율), Sub-critical Pressure Type(아임계 압력형), Super-critical Pressure Type(초임계 압력형), Performance Test(성능 시험)

Abstract : Super-critical type steam power plant, which operates with steam pressure above the super-critical point, has a good reputation recently and is adopted as a new standard of the Korean Electric Power Corporation. The reason for the good reputation lies in its superior power efficiency. However, the field data of the new power plant for the verification of its performance are still insufficient, and more empirical data are needed to acquire technologies on the effective operation of it. In this study, the authors analyzed the field test data on power efficiencies got in a super-critical type steam power plant, and evaluated the excellency of the new plant by comparing the efficiency data with the one got in a conventional sub-critical type steam power plant.

1. 서론

에너지의 대부분을 수입하는 우리나라는 원자력 발전 다음으로 석탄 화력발전이 전 발전량의 28% 정도를 차지하고 있다. 석탄 화력발전소는 삼천포 화력발전소를 비롯하여 18기가 운영되고 있으며, 12여기가 건설중에 있다¹⁾.

발전소는 사용되는 에너지에 따라 건설비, 운영비, 효율 및 발전용량 등이 다르기 때문에 발전소의 이용율을 높이고 발전원가를 낮추기 위하여 이들을 종합적으로 검토할 필요가 있다. 석탄화력발전은 중간부하를 담당하면서 주파수 변동에도 신속히 대응할 수 있는 특징을 가지기 때문에 이용 가치가 높다고 볼 수 있다. 국내의 화력발전소는 아임계압형과 초임계압형으로 구분할수 있으며, 초임계압 발전소는 기본적으로 주증기 압력이 임계압(225.65kg/cm²)을 초과하는 발전소로서 일반적으로 터빈의 효율은 아임계압 발전소보다 높다.

그러나 초임계압 발전소는 국내에 건설되지 오래되지 않아 이의 효율적 운용을 위한 자료를 확

보하기 위하여 많은 연구가 필요하다고 본다^{2,3)}.

본 연구에서는 아임계압 발전소인 삼천포 화력 발전소 제4호기와 초임계압 발전소인 삼천포화력 발전소 제5호기를 대상으로 터빈 효율을 비교 분석하여 에너지 효율을 평가하고자 한다. 즉 초임계압 석탄화력 터빈(삼천포 화력발전소 제5호기)의 성능을 시험한 후 그 결과를 설계치와 비교 분석하고, 아울러 기존의 아임계압형 석탄화력 터빈(삼천포 화력발전소 제4호기)의 제반 효율과 비교 검토 함으로써 초임계압 터빈의 특성을 파악하고자 한다. 또한 본 연구를 통하여 초임계압 발전소 터빈의 효율적 운용을 위한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 주증기 압력의 영향

발전소의 열효율은 터빈에 유입되는 증기압력과 온도를 높임으로서 향상 시킬수 있다. 그러나 유입 증기온도는 사용재료에 따라 제한되며, 현재 약 538℃~566℃가 일반적인 상한치로 되어있다. 따라서 효율을 상승시키기 위하여 터빈에 유입되는 증기의 압력을 높이는 방법을 일반적으로 사용하고 있다. 유입 증기의 압력증가에 따른 발전소 효율증

접수일 : 2000년 7월 1일

권영수 : 한국전력 삼천포화력본부

정희택, 정양범 : 경상대학교 수송기계공학부

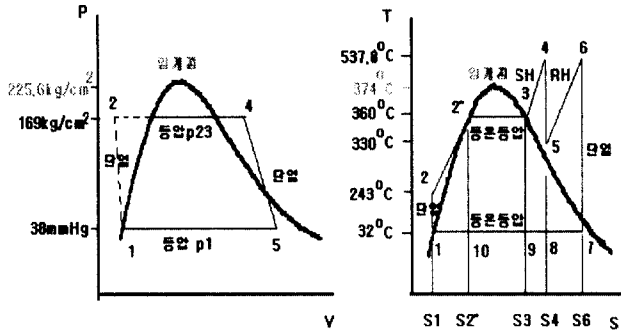


Fig. 1 Thermo-dynamic diagram for sub-critical steam turbine

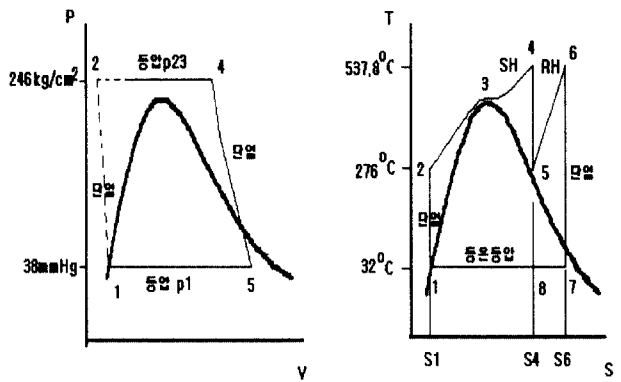


Fig. 2 Thermo-dynamic diagram for super-critical steam turbine

가는 발전소 용량에 따라 다르며, 압력을 과대하게 높일 경우 보일러 급수펌프의 동력 소모를 상승시켜 발전소 효율을 오히려 감소시키는 결과를 가져올 수도 있다.

Fig. 1, 2는 증기동력사이클의 p-v, T-s 선도를

나타낸다. Fig. 1은 기존의 아임계형의 발전소 조건을 나타내며, 터빈 입구에서 169.8 kg/cm^2 , 537.8°C 의 증기가 유입되고, 보일러는 드럼형이다.(삼천포 화력발전소 3, 4호기) 최근에 건설되는 국내의 화력발전소는 Fig. 2와 같이 입구압력이 246 kg/cm^2 의 초임계 조건에서 운전되는 터빈을 채택하여 발전 효율을 높이고 있다.(삼천포 화력발전소 5, 6호기) 초임계압 발전소용 보일러는 관류형으로 신속한 기동·정지, 안정된 저부하 운전, 기동손실의 최소화, 높은 열효율, 수명유지를 위한 열응력 감소 및 고도의 제어기술 등의 특성이 요구된다. 따라서 초임계압 발전소에서는 주로 고압 터빈의 by-pass 계통 및 부분 부하시 변압운전 방식을 채택하여 중간부하 운전시 효율을 높이고 우수한 동특성 및 신속한 부하 추종성을 가지도록 하고 있다.

2.2 터빈성능 분석기법

보일러 및 터빈의 열정산시 열의 출입 및 유동 상태를 명확히 하기 위해서는 열정산(heat balance)의 범위를 어디까지 포함할 것인가 하는 한계를 설정하는 것이 중요한 것 중의 하나가 된다. 열정산을 위하여 설정하는 보일러 또는 터빈과 그 부속설비의 한계선을 envelope boundary 라고 한다. 이 envelope boundary를 출입하는 열은 열정산의 기준이 되는 입열과 출열이 된다. Fig. 3은 터빈의 envelope boundary를 나타낸 그림이다.

터빈의 성능을 표현하는 데는 열소비율(heat rate, ϵ_{HR})이 기준이 되며, 이를 이용하여 터빈의 총 효율(total efficiency)을 산출하고, 발전소의 시스템

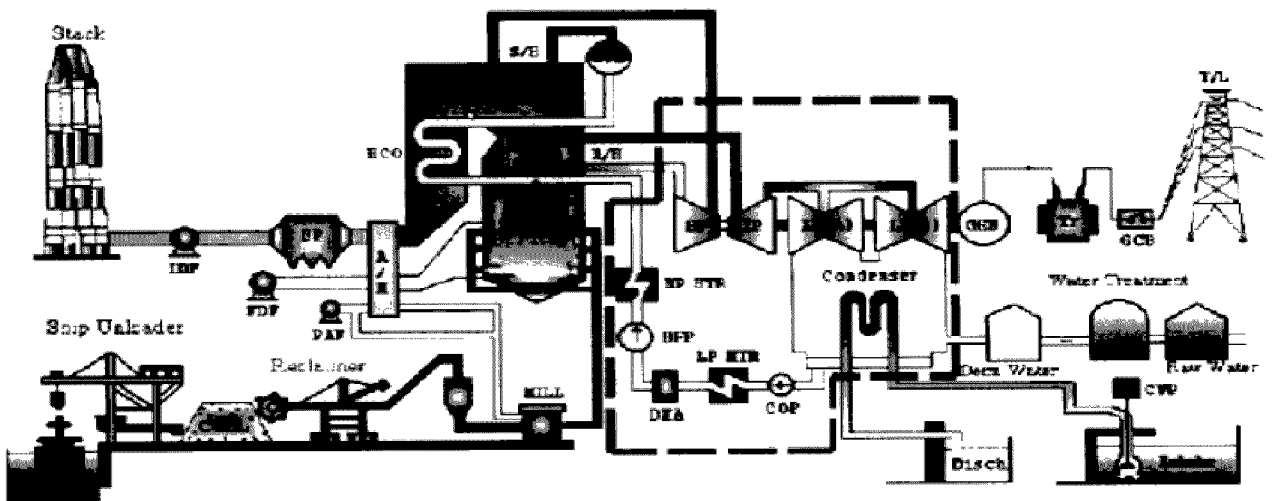


Fig. 3 Turbine envelope boundary for a fossil power plant ([] turbine boundary)

효율(plant efficiency)을 예측할 수 있다. 이외에 터빈의 각 구성품 별로 내부효율(internal efficiency)을 산출한다.

열소비율은 1kW의 전력을 생산하는데 소비되는 단위시간당의 열량을 나타낸 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{HR} = (Q_S - Q_R) / W_G \quad (1)$$

여기서, 공급열 (Q_S)은 외부로부터 터빈계통에 공급된 열량을 말하며, 주증기와 재열증기가 터빈에 가지고 들어오는 열량이 가장 주된 공급열이다. 그외 외부로부터 터빈계통에 유입되는 각종 Drain의 보유열량, 보충수가 가지고 들어오는 열량, 보일러로부터 공급되는 공기추출기 구동증기 등이 공급열이다. 반환열 (Q_R)은 터빈계통으로부터 외부의 다른 설비에 유출되는 열량을 말하며, 최종 급수 가열기 출구 급수의 보유열량, 재열기 입구 증기의 보유열량, 과열기 및 재열기의 Spray Water 보유열량 등이 주된 반환열이다. 그외 터빈으로부터 공급되는 보조증기의 보유열량이 반환열에 해당된다. 그러나 플랜트에 유용하게 이용되지 못하고 무효하게 버려지는 터빈 사이클 열량(탈기기 Vent, Sampling 등)은 반환열로 취급하지 않는다. 열소비율은 성능시험을 통하여 다음과 같이 계산된다⁴⁾.

$$\epsilon_{HR} = [\dot{m}_{MS} \times (h_{MS} - h_{FW}) + \dot{m}_{RH} \times (h_{RH,H} - h_{RH,C})] / W_G \quad (2)$$

여기서 \dot{m}_{MS} 은 주증기의 유량이며, h_{MS} , h_{FW} 는 각각 주증기 및 보일러 입구 급수의 단위질량당 엔탈피이다. \dot{m}_{RH} 는 재열기의 유량이며, $h_{RH,H}$, $h_{RH,C}$ 는 각각 재열기 출구 및 재열기 입구 증기의 단위질량당 엔탈피이다. W_G 는 발전기의 출력을 나타낸다.

터빈의 열소비율은 보일러 증기의 증기조건, 복수기의 진공도, 급수온도나 급수가열기 단수 등 열사이클의 조건과 터빈의 성능에 의해 좌우된다. 이중 증기조건은 운전에 좌우되므로 특히, 설계치 유지에 힘쓰야 한다.

터빈부분의 총효율, η_i 는 다음과 같다.

$$\eta_i = 860 / \epsilon_{HR} \quad (3)$$

플랜트의 시스템 효율인 발전단 효율과 송전단

효율은 터빈효율과 밀접한 관계가 있으며, 발전단 효율(gross efficiency), η_g 는 다음과 같다.

$$\eta_g = (\eta_b \times \eta_i) - \omega_{PL} \quad (4)$$

여기서, η_b 는 보일러 효율, ω_{PL} 은 플랜트 손실이다.

송전단 효율(net efficiency), η_n 은 발전소내 소비율(ω_H)를 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_n = \eta_g \times (1 - \omega_H) \quad (5)$$

터빈계는 일반적으로 고압, 중압, 저압 및 재열 부분으로 구성된다. 내부효율, η_C 는 터빈의 사용 열낙차와 단열열낙차의 비로, 다음과 같이 정의된다.⁵⁾

$$\eta_C = (h_1 - h_o) / (h_1 - h_s) \quad (6)$$

여기서, h_1 은 입구증기 엔탈피, h_o 는 출구증기 엔탈피, h_s 는 입구증기가 출구압력까지 단열팽창 하였을 때의 엔탈피이다.

터빈 팽창선도는 터빈 실린더에서의 증기의 팽창상태를 나타내는 것으로서, 설계기준 및 시험결과와 팽창선도들은 터빈 자체의 성능평가 수단으로 사용되기 때문에 주요한 자료가 된다. 팽창선도는 급수가열기 추기의 조건을 터빈 플랜지에서 측정하고, 각 실린더 출구의 온도를 측정하여 Mollier 선도를 이용하여 그릴수 있다. 이때 저압 터빈 출구의 증기 조건은 습증기이므로 터빈.발전기 사이클의 열평형 계산에 의해 간접적으로 산출

Table 1 Test conditions for a sub-critical type

Load	main steam			reheat steam		
	pre	temp.	flow rate	pre	temp	flow rate
unit	kg/cm ²	°C	ton/hr	kg/cm ²	°C	ton/hr
VWO	168.2	536.5	1,781	37.3	534.	1,613
100%	170.4	534.4	1,634	34.0	533	1,461
75%	170.5	537.5	1,206	25.4	533	1,093
50%	168.6	540.7	838	17.1	493	7,642
30%	-	-	-	-	-	-

해내는 방법이나, 설계치 엔탈피를 이용하여 진공도 변화에 대해 수정하는 방법을 사용하여 추정하고 있다. 터빈의 성능은 노즐이나 블레이드 등에 Scale이 부착한다든지 외부로부터의 이물질 유입에 의한 손상 등에 의해서 영향을 받게 된다. 따라서 성능시험을 통한 터빈 내부효율의 산출은 터빈의 성능을 판정하는 중요한 자료가 된다.

화력발전의 경우, 터빈의 내부손실은 다음과 같이 구성된다.⁶⁾

- ① 단락손실: 노즐 및 동익의 손실, 습증기에 의한 손실, 회전 손실, 내부 누설손실, 각단락의 유출속도 손실 등
- ② 배기손실 : 최종단의 유출속도 손실, 배기실 손실
- ③ 단락외 압력손실: 교축손실(Control Valve 압력손실), 배관손실
- ④ 기계손실: 베어링 마찰손실, 오일 펌프 및 조속기 구동손실, Gland 흡수동력 손실
- ⑤ 외부 누설손실

3. 성능시험

3.1 시험조건

본 연구 대상은 아임계형인 삼천포 4호기와 초임계형인 삼천포 5호기이다. 정상운전 조건(100%)에서 4호기의 발전량은 560 MW이고, 5호기의 경우 500 MW이다. 최대 발전 부하(Valves wide open; VWO)에서 최소 부하(5호기의 경우 약 30%)까지의 부하별 성능시험 결과를 설계치와 비교할 것이다. Table 1은 아임계압형(4호기)의 성능시험 조건을 발생증기 기준으로 정리한 것이며, Table 2는 초임계압형(5호기)의 성능시험 조건을 나타낸다.

Table 2 Test conditions for a super-critical type

Load	main steam			reheat steam		
	pre	temp	flow rate	pre	temp	flow rate
unit	kg/cm ²	℃	ton/hr	kg/cm ²	℃	ton/hr
VWO	247.1	537.8	1,705	40.9	537.8	1,360.3
100%	247.1	537.8	1513	36.7	537.8	1220.3
75%	201.1	537.8	1088	27.2	537.8	900.2
50%	134.6	537.8	710	18.2	537.8	602.3
30%	81	537.8	445	11.5	537.8	385.4

3.2 성능시험 장치 및 절차

발전플랜트의 정확한 성능과약을 위해서는 공급된 열이 어디로 어떻게 분배되는가 하는 열의 흐름을 명확히 하는 것이 중요하다. 발전 플랜트에 공급된 열의 이용 정도를 알기 위하여 열의 출입을 각 항목별로, 즉 연료의 연소에서부터 발전까지 열의 발생, 흡수, 손실등의 과정을 분석하여 열의 분포를 상세히 계산하는 것을 열정산이라 하며, 열정산은 에너지 보존 법칙을 기초로 수행된다. 열정산의 결과를 그림으로 나타낸 것을 열정산도 (Heat balance diagram)이라 한다.

터빈계의 열정산을 위한 계측 위치는 ASME PTC 6.0에 근거를 두고, 터빈 계통을 파악하여, 제작자와 한전이 상호합의한 위치에 선정하였다.^{6, 8)} 본 성능시험에서 데이터를 측정하기 위한 계측의 구성도는 Fig. 4와 같다.

성능시험을 위한 방법 및 절차는 참고 문헌^{7, 8)}에 잘 나와 있으며, 터빈의 성능에 영향을 미치는 주요 변수로는, 주증기의 압력 및 온도, 재열기의 온도와 압력강하, 배기 압력 등이다. 이 외에, throttle의 설계 유량, 보충수 율, 최종 급수온도 등에도 부분적으로 영향을 받는다. 성능시험시 운전 허용 편차가 규정되어 있으며, 주증기 압력의 경우 0.25 % 이내, 온도의 경우는 16 °C 이내에서 운전되어야 한다.

3.3 데이터 분석법

보일러 성능보증 시험은 ASME PTC4.1과 4.3을 기초로 제작자와 한전이 상호 합의한 시험방법에 의하여 수행되었으며, 터빈에 대한 성능시험 절차는 ASME PTC6-1996을 기초로 수립되었다. ASME PTC 6 Series에 의하면 터빈의 열소비율을 산정하는 방법에는 3종류(Full scale method, Alternative method, Simplified method)가 있는데 삼천포화력 터빈에 대한 방법은 Full scale method를 사용하였다¹²⁾.

측정된 데이터는 다음과 같이 2가지 관점에서 보정된다. 1차 보정(Group 1 correction)에서는 터빈 본체 외의 외부 운전조건으로 인하여 터빈성능에 미치는 영향을 보정한다. 이때 시험시의 운전조건 대신에 설계조건을 대입하여 전 Cycle을 재계산하거나 또는 제작자가 제시한 보정곡선을 이용한다. 2차 보정(Group 2 correction)은 터빈 본체의 운전조건으로 터빈성능에 직접 영향을 미치는 입구 및 출구 증기조건에 설계치 대비 변화율에 대한 보증으로 제작자 측의 보정곡선을 이용한다.

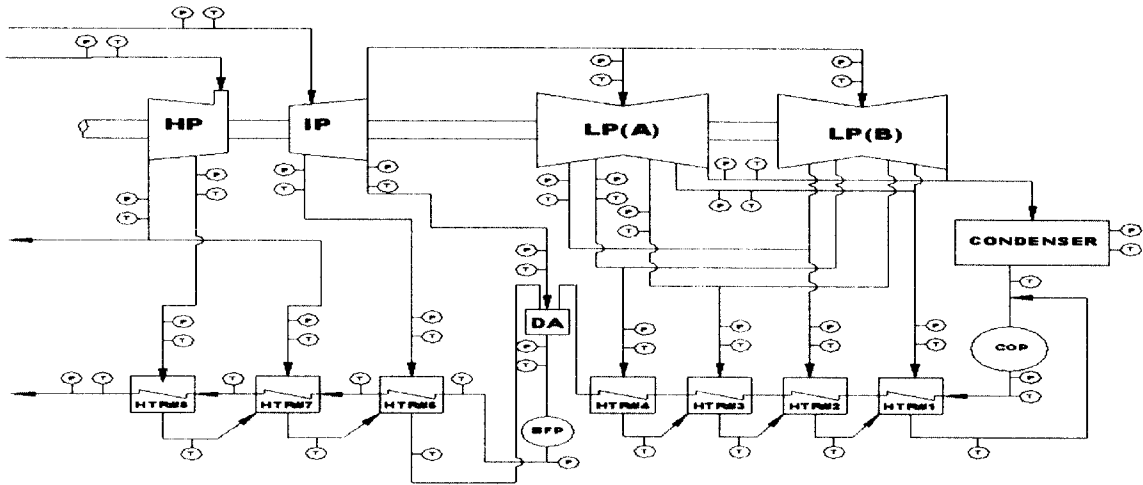


Fig. 4 Measurement diagram for turbine performance test

1차 보정결과에 의해 산정된 열소비율에 주증기의 압력과 온도, 재열기의 온도와 압력강하 및 저압터빈의 출구압력에 대해 2차 보정을 보정 곡선에 의해 시행한다. 100% 부하 조건에서의 성능시험 결과^{9,10)}에 대한 열정산도는 Fig. 5(아임계형, 삼천포 4호기), Fig. 6(초임계형, 삼천포 5호기)과 같다.

4. 결과 분석

3절의 성능시험 절차에 따라 수행된 아임계압형(4호기)과 초임계압형(5호기)의 터빈계 성능시험 결과^{10,12)}를 설계치와 각각 비교하고, 두 유형의 성능 특성을 분석하면 다음과 같다.

4.1 아임계압형 터빈의 효율 분석

Fig. 7은 아임계압형의 성능시험 결과를 분석하여 설계치와 비교하여 나타낸 그림이다. 정상운전 조건(100% load)에서 총효율의 오차는 약 0.5%로 보증사항을 준수하지만, 내부효율은 성능시험결과와 설계치가 약간의 차이를 보인다.

열소비율은 정상운전 조건에서 최소가 되며, 발전량이 577MW로 정상운전시(560 MW)보다 클 경우 열소비율은 증가하고, 효율은 감소한다.(Fig. 7(a), (b)) 부하의 변화에 따른 고압터빈의 내부효율 변화는 설계와 실험치가 비슷한 경향을 보이고, 오차도 작다.(Fig. 7(c)) 그러나 중압, 저압 및 재열터빈의 경우 설계에서는 부하변동에 의한 효율의 변화가 없다고 보증하였으나, 실제 성능시험에서는 차이를 보인다. 중압터빈의 경우(Fig.7(d)) 부하변화에 대한 효율변화의 경향은 비슷하나, 성능시험

결과가 설계치보다 크다. 압력이 낮은 저압 및 재열터빈의 경우(Fig.7(e)-(f)) 경향과 오차 모두 설계와 다르며, 특히 저부하에서 큰 차이를 나타낸다.

4.2 초임계압형 터빈의 효율 분석

Fig. 8은 초임계압형에 대한 성능시험결과와 설계치를 비교하여 나타내었다. 정상운전 조건에서 총효율의 오차가 0.3%로 보증사항을 준수한다고 볼 수 있다.

부하가 증가함에 따라 열소비율은 감소하여 총효율은 증가하며, 발전량이 550MW인 VWO에서 최대효율인 46.12%를 나타내었다. 이는 설계에서 예상한 바와 비슷하다. (Fig.8(a)-(b))

부하의 변화에 대한 내부효율의 변화는 고압과 중압 터빈의 경우 성능시험결과와 설계치가 비슷한 경향을 보이지만, 고압터빈의 경우 설계치가 높고 중압터빈의 경우 성능시험결과가 설계치보다 높게 나타나고 있다.(Fig. 8(c)-(d)). 저압 터빈의 경우 저부하에서 효율이 높게 나타나는 결과를 보여준다. 이상의 결과에서, 초임계형 터빈의 총효율은 설계치와 성능시험결과가 비슷한 경향을 보여주지만, 내부효율은 설계와 상이한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

4.3 아임계압형과 초임계압형의 비교

Fig. 9, 10은 아임계압형과 초임계압형에 대한 성능시험을 통하여 나타난 터빈부의 성능 특성을 비교하여 나타낸 그림이다. 총효율은 초임계압형이 아임계압형의 것보다 약 1.5~2% 정도 높게 나타난다. 이는 온도는 비슷하지만 초임계압형의 주증

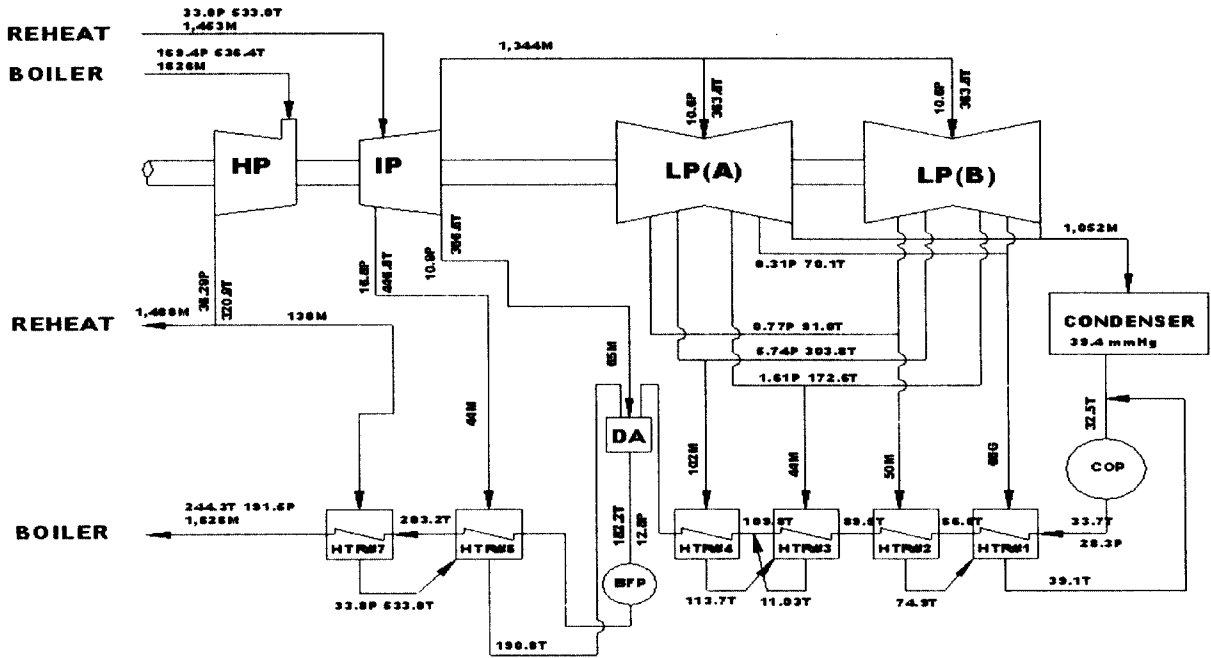


Fig. 5 Heat balance diagram on 100% load conditions for sub-critical type

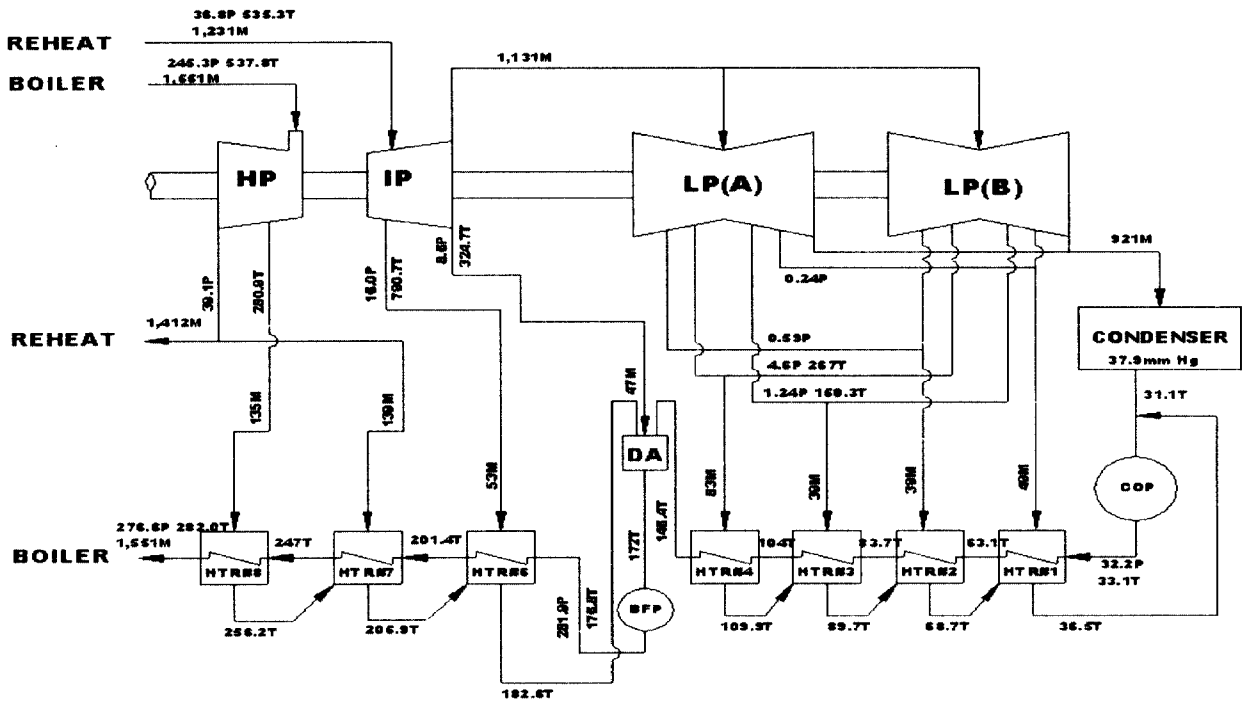
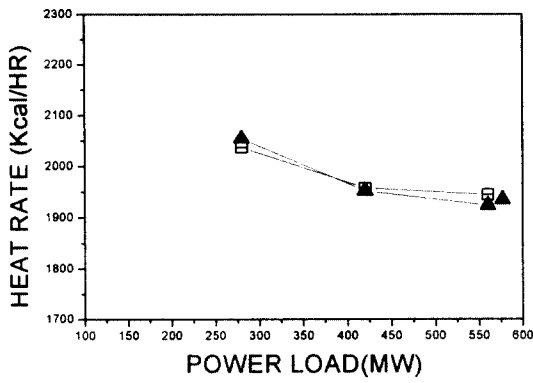
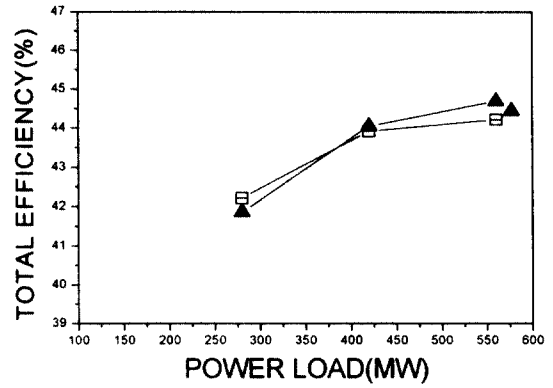


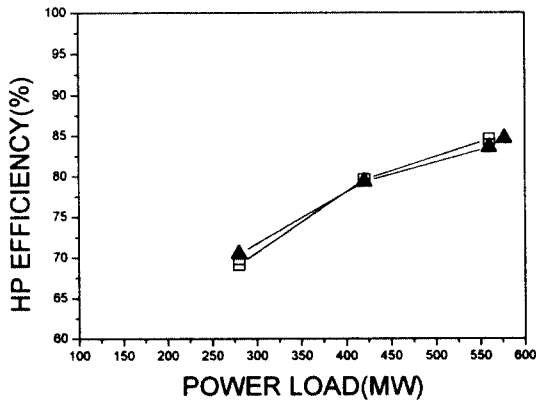
Fig. 6 Heat balance diagram on 100% load conditions for super-critical type



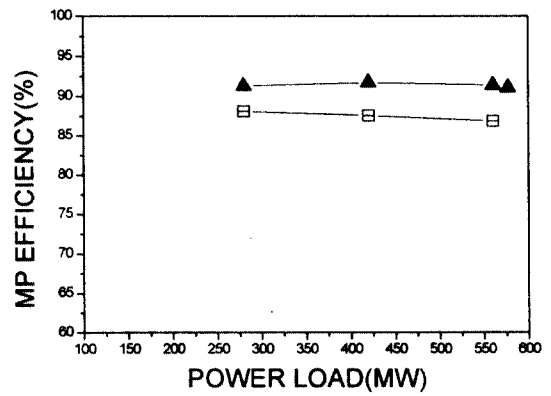
(a) Heat rate



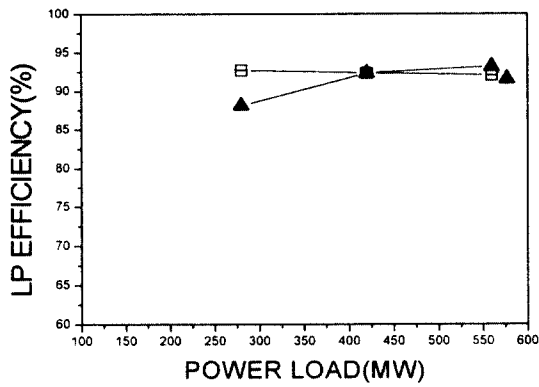
(b) Total efficiency



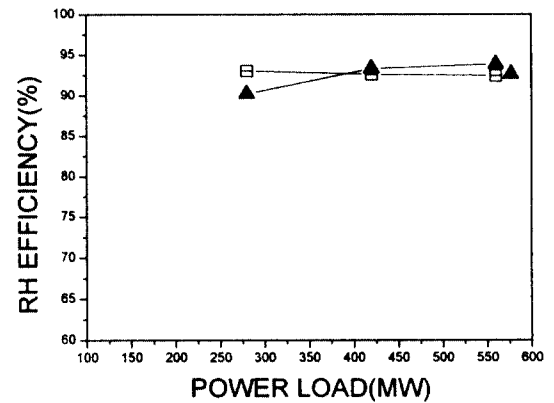
(c) HP efficiency



(d) IP efficiency



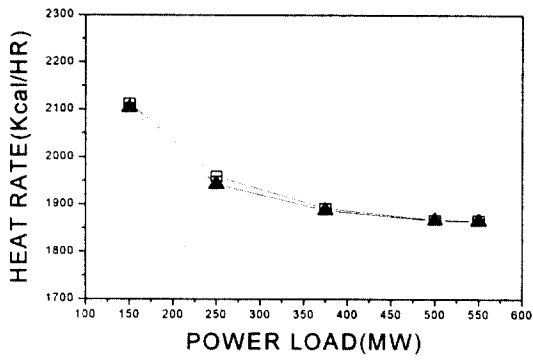
(e) LP efficiency



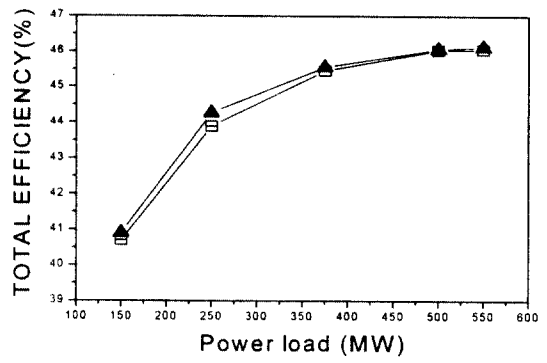
(f) Reheat efficiency

Fig. 7 Performance-load curve for sub-critical steam turbine

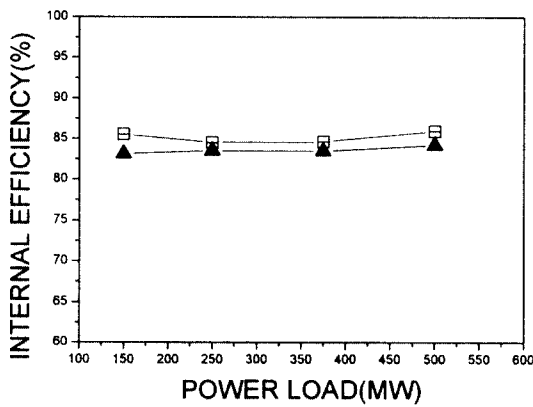
(—□— Design, —▲— Test)



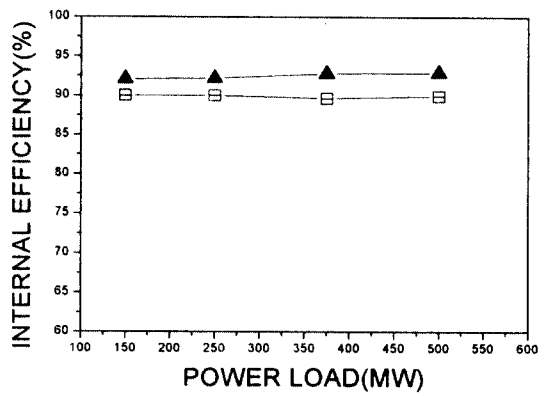
(a) Heat rate



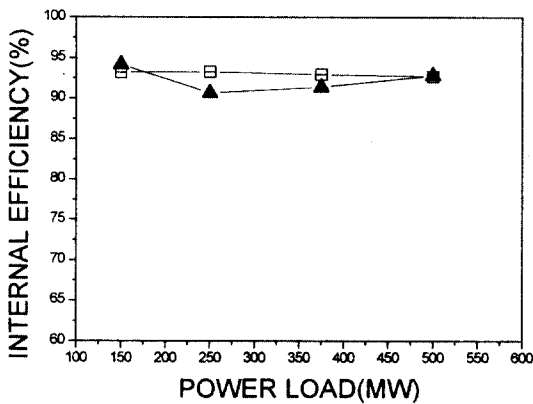
(b) Total efficiency



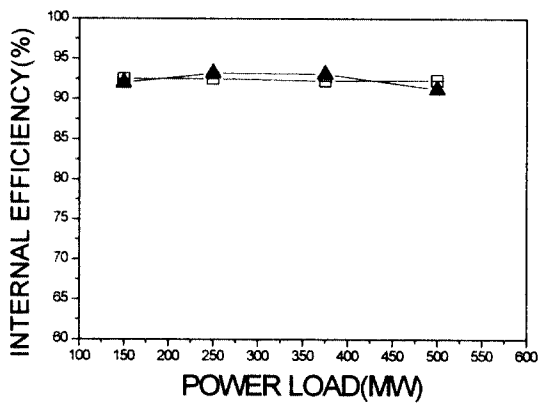
(c) HP efficiency



(d) IP efficiency



(e) LP efficiency



(f) Reheat efficiency

Fig. 8 Performance-load curve for super-critical steam turbine

(—□— Design, —▲— Test)

기 압력이 아임계압형의 주증기 압력보다 높기 때문에 효율이 증가한 것이다. 아임계압형은 정상운전 조건에서 열소비율이 최소가 되지만 초임계압형은 정상운전 조건을 넘어서 부하가 증가하여도 열소비율은 계속 감소하는 결과를 보인다. 이는 초임계압형의 최적운전 조건이 설계상의 정상운전 조건(100%)과 일치하지 않음을 의미하며, 이 결과는 초임계압형의 설계평가 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

보일러의 운전특성을 비교해보면, 아임계형은 드럼형 보일러, 초임계형은 관류형의 보일러를 사용하기 때문에 보일러의 기동과 운전에서 초임계형이 유리하였다. 즉 아임계형의 경우 드럼형이므로 냉간과 온간간의 기동 시간이 길지만, 초임계형은 열간 기동시간이 짧고, 터빈 정지시에도 단독 운전이 가능하였다.

식(4), (5)와 Fig. 9(b)의 결과에서 예측할 수 있듯이, 초임계압형은 아임계압형보다 총효율이 1.5~2.0% 높으므로, 발전시스템 효율도 비슷한 정도로 높다. 이는 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

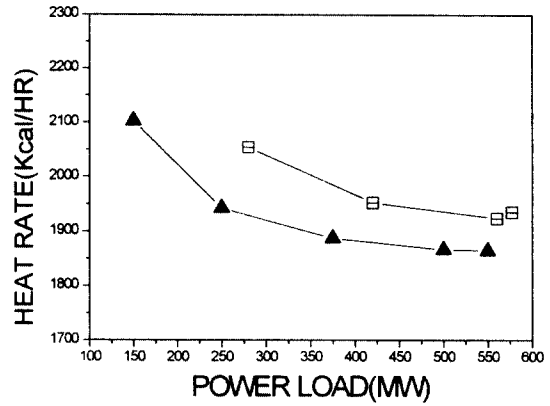
본 연구는 삼천포 화력발전소 4호기와 5호기를 대상으로 아임계압형과 초임계압형의 성능특성을 비교한 것으로 아임계압형과 초임계압형의 특성 비교에 대한 대표성은 부여할 수 없겠지만 그 경향은 비슷할 것으로 판단된다.

5. 결론

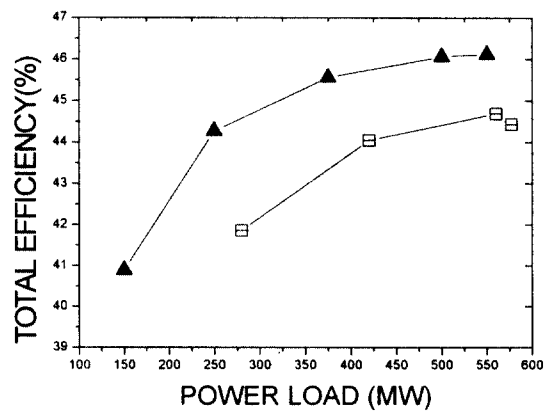
본 연구는 삼천포 화력발전소 4호기와 5호기를 대상으로 아임계압형과 초임계압형 석탄화력 발전소의 성능특성을 터빈계통의 성능시험을 통하여 비교한 것으로 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 터빈에 유입되는 주증기 압력의 상승으로 초임계압형의 터빈 총 효율은 아임계압형보다 1.5~2.0% 높일 수 있었다.
- 2) 아임계압형은 정상운전 조건에서 열소비율이 최소로 되지만, 초임계압형은 정상운전 조건을 넘어서도 부하의 증가에 대하여 열 소비율이 감소하였다.
- 3) 터빈 성능은 정상운전 조건에서 성능시험 결과와 설계치의 오차는 아주 작으며, 따라서 성능보증사항을 준수한다고 볼 수 있다.

이상의 성능시험 결과는 신규 발전소의 성능검정의 의미 뿐만 아니라, 향후 발전소 운전 방향의 설정에도 도움이 되리라 사료된다.



(a) Heat rate



(b) Total efficiency

Fig. 9 Comparison of turbine performance (□□ sub-critical, ▲▲ super-critical)

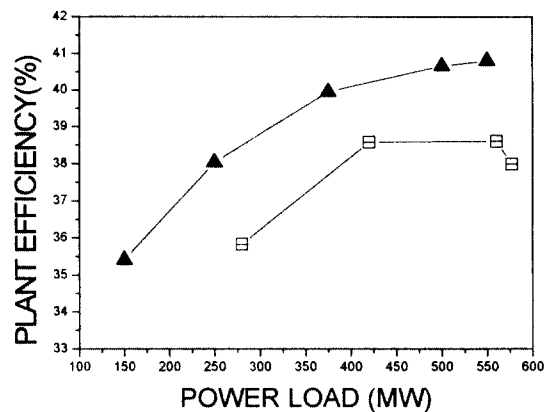


Fig. 10 Comparison of plant efficiency

(□□ sub-critical, ▲▲ super-critical)

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 한국전력, "98-경영 통계", 경영정보처, 1998
2. 한국전력, "삼천포 5, 6호기: DataBook (I)", 1998
3. 이창식, 정희택, "신규 화력발전소의 최적 운전 도출을 위한 보일러의 성능시험에 관한 연구", 생산기술연구소 논문집, 14권, pp. 307~314, 1998
4. 한국전력연구원, "화력발전소 성능시험 지침", 1997
5. 서정운, "증기공학", 청문각, 1997
6. 한국전력, "모의화력 운전실무", 삼천포연 수원 교재 A-I-1.94.8, 1994
7. 한전화력연수원, "성능시험", pp. 9~80, 1996
8. Combustion Engineering, "Combustion Fossil Power-A Reference Book on Fuel Buring and Steam Generation", Manual book, 1991
9. HANJUNG, "Turbine-GeneratorPerformance Test Report: 삼천포 제4호기", pp. 1~80, 1994
10. 한전전력연구원, "신규화력 발전설비 인수성능 시험결과보고서 삼천포화력 제5호기", pp. 1~65, 1998
11. 한전전력연구원, "인수성능시험 결과보고서", pp. 169~236, 1994
12. GE, "Performance Test Report", pp. 1~65, 1997