한국의 화력발전 기술

육 동 춘 / 한국전력기술(주)
dongchun@kopec.co.kr

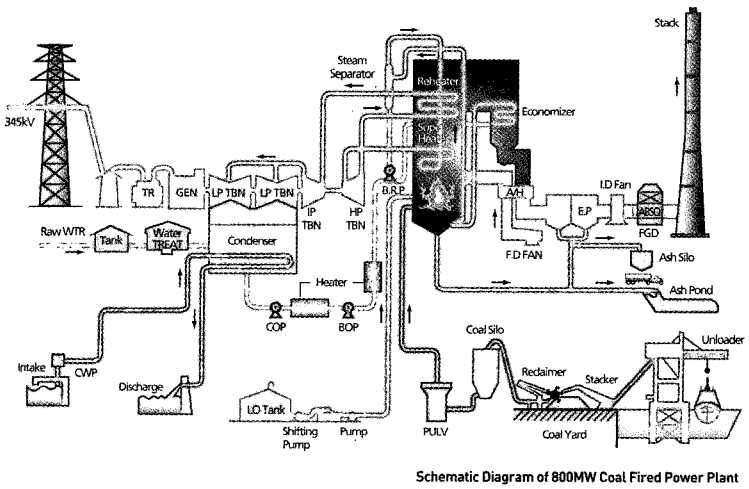
1. 개요

한 나라의 발전 기술은 국가의 장기 에너지 전략과 결부된 안보 측면과 기간산업의 측면이 있다. 또한 전력 산업은 전후 연관 산업에 대한 기술파급효과가 매우 크고 고용안정, 수입대체 및 수출에도 기여하게 된다. 부존자원이 절대 부족한 우리나라의 경우 기저부하용 원자력 발전소와 함께, 지난 20여년간 22기의 500MW 초임계압 표준석탄화력 발전소를 건설하였으며 이러한 기술을 토대로 하여 21세기 국내 주력기종을 담당할 고효율/대용량/환경친화형 차세대 석탄화력 발전 기술개발을 수행중에 있다.

현재 우리나라의 초임계압 화력발전 기술수준은 설계 및 제작분야에서 선진국과 거의 동등한 수준이고, 초초임계(USC) 화력발전 기술수준은 발전소 종합설계기술(AE)은 거의 국산화가 되었다고 할 수 있다. 그러나 제작분야는 선진국 대비 90%, 기자재 제작 설계분야는 80% 수준이고, 발전 효율 향상과 밀접하게 관계있는 주증기 및 재열증기 조건(압력 및 온도)은 일본, 유럽의 발전소에 비해 약 10여년 이상 뒤떨어져 있다. 본 고에서는 화력 발전소 기본원리와 향후 상용화가 예상되는 초초임계압 화력 발전소에 대하여 검토하고자 한다.

2. 발전소 기본 싸이클

화력 발전소의 주요 구성기기는 보일러, 터빈, 복수기, 복수펌프, 급수펌프, 급수 가열기, 순환수 설비, 석탄취급설비, 회처리설비 및 탈황설비 등으로 **그림 1**과 같이 구성되며 각 설비의 역할은 다음과 같다.



[그림 1] 화력 발전소 계통도

① 보일러

증기를 연속적으로 발생시켜 터빈과 보조설비에 필요한 증기를 공급하는 역할을 하며 여기서는 드럼(Drum)보일러와 순환 유동층 보일러를 기준으로 한다. 대부분의 화력 발전소에서는 관류 보일러를 사용하지만 경우에 따라서는 아임계압을 사용하는 드럼 보일러를 사용하기도 한다.

② 터빈

터빈은 보일러에서 공급되는 증기의 열에너지를 운동에너지로 변환시켜 발전기를 가동시킨다. 열에너지의 일부는 터빈 싸이클상의 여러 곳에서 추기되어 급수의 가열에 사용되며, 나머지 폐열은 복수기를 통하여 순환수 계통으로 방출된다. 또한 정상운전중에 중압터빈 배기관에서 추출된 증기는 급수펌프 구동터빈으로 공급된다.

③ 순환수 계통

순환수 계통은 취수설비 및 순환수 펌프등으로 구성되며 터빈의 배출증기를 응축시켜 급수로 재사용할 수 있도록 복수기(Condenser)에 냉각수를 공급하고, 또한 발전소의 각종 기기로부터 열부하를 제거하기 위한 기기냉각수 열교환기, 복수기, 진공펌프(Vacuum Pump), 밀봉수 열교환기 및 스크린 세척펌프(Screen Wash Pump)에 냉각수를 공급한다.

④ 복수기

복수기는 고압의 스팀(Steam)이 터빈을 회전시키고 난 증기를 응축시켜 핫트웰(Hot-well)에 모아서 복수펌프와 그랜드 스팀 콘덴서(Grand Steam Condenser), 저압급수가열기(Low Pressure Heat Exchanger)를 거쳐 탈기기(Deaerator) 및 급수저장탱크로 보낸다.

⑤ 복수 펌프

복수기, 핫트웰에서 취수한 복수를 저압급수가열기(Low Pressure Heater)을 거쳐 탈기기로 공급한다.

⑥ 탈기기

고압 급수 가열기와 저압 급수 가열기 중간에 설치하는 가스 용존 제거 장치이다.

⑦ 급수펌프

급수펌프(Boiler Feed Water Pump)는 탈기기에서 탈기된 급수를 가압하여 고압 급수 가열기와 절탄기를 거쳐 보일러에 급수를 공급하는 펌프로서 보일러가 운전중일 때는 언제나 급수를 공급하여야 한다.

⑧ 고압 급수 가열기

고압급수 가열기에서는 저압급수가열기에서 1차 가열된 급수를 고온의 급수로 가열하는 역할을 한다.

⑨ 석탄 취급설비

석탄 취급 계통은 운탄선으로부터 석탄을 하역하여 옥외 저탄장 또는 소내 저탄조에 공급한다. 이 설비는 적정 시간내에 석탄을 하역시키고, 소내 저탄조의 저탄고를 유지시키는데 필요항 양을 공급해야 한다. 이 설비는 혼탄, 시료채취, 비산탄 억제, 철편제거 등의 기능을 가지며 소화설비를 갖추고 있다.

⑩ 회처리 설비

회처리계통은 보일러에서 석탄이 연소한 후 생성되는 회를 처리하는 계통으로서 보일러 저회와 미분기 이물질은 드레그 체인 컨베이어와 저회 컨베이어를 통하여 회사장으로 보낸 후 재활용하고, 전기집진기회, 절탄기회, 탈질설비(SCR)회 및 공기예열기회는 원회저장조에 저장한 후 정제과정을 거쳐 재활용하거나 폐회는 슬러리펌프를 이용하여 고밀도로 회사장으로 보낸다.

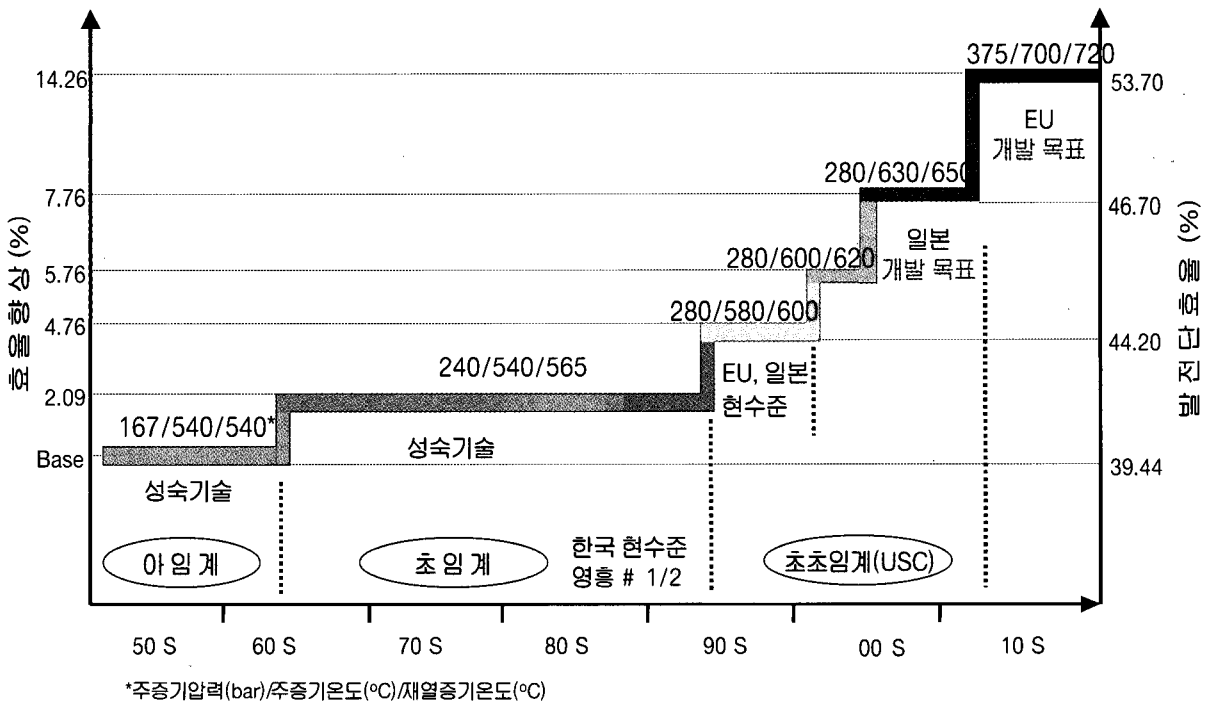
⑪ 탈황 설비

탈황설비 계통은 보일러로부터의 배기가스를 흡수탑으로 유입시켜 배기가스 중의 황산화물을 흡수 · 제거하는 흡수탑계통, 처리된 가스를 유입가스의 열원을 이용하여 재열 · 배출하는 배기가스 계통, 탈황 흡수제로 이용되는 석회석을 슬러리화하여 흡수탑에 공급하는 석회석슬러리제조계통, 흡수탑에서 취출되는 석고슬러리를 탈수하는 석고탈수계통, 탈황설비에서 발생하는 폐수를 처리하는 탈황폐수처리계통, 탈황설비에 필요한 용수를 공급하는 탈황용수공급계통 등으로 구성된다.

3. 화력 발전소의 발전과정

공학기술은 사회적/공학적/정치적 요구에 따라 초기의 형태로부터 진화(evolution)과정을 거쳐 발전하게 되며 그 시대적 요구 조건을 충족하지 못하거나, 대체 기술이 개발되면 퇴출이라는 운명을 맞게 된다. 따라서 인류가 전기로 이룬 문화와 문명을 포기하거나 전기를 대체할 할 다른 형태의 기술이 개발되지 않는 한 발전산업은 인류의 요구에 따라 꾸준히 발전하고 존속하게 될 것이다.

화력 발전소 증기조건 발전 연대기를 살펴보면 **그림 2**에서와 같이 증기온도와 압력은 1900년대 초부터 2000년 현재까지 꾸준히 증가하여 발전효율이 39%에서 44.2%까지 상승하였다. 60년대에서 90년대까지의 약 30년 동안의 초임계압 발전시기를 거쳐, 90년대부터 초초임계압(USC) 발전기술이 상용화 단계에 접어들었으며, 2020년까지 초초임계압 발전이 화력발전의 주력 기종으로 대두될 것으로 예상된다. 경제성과 직결되는 발전단위기 용량은 꾸준히 증가하여 2002년 현재 1050MW 급의 석탄화력 발전소가 상용 운전되고 있다.



[그림 2] 화력발전소 증기조건 및 발전효율 변화

4. 초초임계압 화력발전

초초임계압 화력 발전소는 'Ultra-supercritical Power Plant'를 번역한 것으로서 초기에 미국 및 유럽에서는 'Advanced Steam Condition'으로 일본에서는 'Ultra-supercritical Power Plant'로서 불리어졌으나, 최근에는 미국 및 유럽에서도 'Ultra-supercritical Power Plant' 용어를 사용하고 있고 'Ultra-supercritical Power Plant'라는 표현이 일반화되고 있다. 엔지니어에 따라서는 온도만 상승된 조건에서 초초임계압으로 표현하는데 대하여 이의를 제기하는 경우도 종종 있으나, 'Supercritical Power Plant'를 초임계압 화력 발전소로 표현하였으므로 'Ultra-supercritical Power Plant'를 초초임계압 화력 발전소로 표현하여도 무방하리라 판단된다.

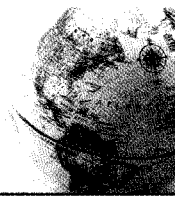
표 1은 초초임계압과 초임계압 화력 발전소의 정의이다. 각 제작사 및 관련 업체들은 편의에 따라 그 조건을 상이하게 표현하고 있다. 따라서 Ultra-supercritical(Advanced steam condition)의 정의에 대해 국내에서는 당진 5,6호기를 기점으로 하여 압력조건 246kgf/cm^2 이상인 발전소로서 주증기 온도 566℃ 이상이고 재열증기 온도가 566℃를 초과하는 발전소로 규정하는 것이 타당하리라 판단된다.

종래의 초임계압 조건보다 한층 고온고압화 하는 USC의 기술개발에는 여러가지 기술적인 문제가 발생한다. 보일러에서는 증기조건의 USC화에 따라 과열기, 고온 대구경관 및 전열관 등이 기존 초임계압의 경우보다 가혹한 조건에 노출된다. 비가열부의 대구경관에서는 관의 금속 온도가 증기 온도를 넘지 않지만 고압화에 의한 내압부의 강도가 문제이다. 내압부의 강도문제는 벽 두께를 두껍게 제작하여 대처할 수도 있지만 부하 변동(기동정지)시 발생하는 관 내외면의 온도차로 인한 열응력의 영향을 고려할 때 벽 두께를 늘리는 것 보다 고성능의 내열 고장력 재료를 사용하는 것이 좋다.

현재 설계되거나 운전되는 초초임계압 발전소의 주증기 압력은 유럽의 일부 발전소를 제외하고는 3,500 psig(246 kgf/cm^2.g) 급으로, 이는 압력을 올릴 경우 열소비율 측면에서는 유리하나 보일러 및 터빈의 주요 부위 재질 두께가 두꺼워져 초기

<표 1> 제작사별 Ultra-supercritical(Advanced Steam Condition)의 정의

제작사	내 용	조 건
EPRI	명확한 내용은 없으나 246kgf/cm^2/538/566℃까지를 초임계압으로 분류하고 있으므로 246kgf/cm^2/566/566℃이상을 USC 발전소로 분류 가능함.	주증기 및 재열증기 온도 566℃ (1,050°F) 이상
Hitachi	압력이 310kgf/cm^2 이상이거나 주증기 566℃이상 또는 재열증기 온도가 593℃이상인 발전소을 USC 발전소라 함.(Hitachi Review Vol. 42(1993), No.1)	압력 310kgf/cm^{2}g 이상이거나 주증기 566℃이상 또는 재열증기 온도 593℃이상
GE	It has become industry practice to refer to such steam conditions, and in fact any supercritical conditions where the throttle and/or reheat steam temperatures exceed 1,050°F/566℃, AS "ULTRASUPERCRITICAL" (GER-3945A)	주증기 또는 재열증기 온도 566℃ (1,050°F) 이상
GEC ALSTHOM	Advanced steam conditions, here defined at the turbine as main pressures of 240 bar and above with main and reheat temperatures of 565℃ and above.	240bar/565/565℃ 이상
두산중공업	주증기 또는 재열증기 온도가 566℃를 넘는 경우에 일반적으로 USC 발전소(초초임계압 발전소)라고 부른다(대한기계학회 2000년도 압력기기 위원회 발표p80-106)- 주증기 또는 재열증기 온도가 593℃를 이상인 경우(산자부 회의 자료).	주증기 또는 재열증기 온도 (구)566℃(1,050°F)초과 (신)593℃(1,100°F)이상



투자비가 급격히 증가하고 열응력 측면에서 불리하기 때문으로 판단된다. 또한 압력을 4,000 psig(281 kgf/cm^2.g) 이상으로 올릴 경우 터빈 팽창선이 H-S 선도의 좌측으로 이동함에 따라 터빈 최종단에서 습분 함유량이 증가하여 2단 재열을 적용하여야 할 필요성이 대두될 수 있고, 이 경우 역시초기 투자비가 증가하고 운전 제어가 복잡하여 진다.

4.1 열소비율 향상

제작사가 제시하는 증기조건 개선에 따른 열소비율 개선은 **표 2**에 나타내었다. 또한 500MW 석탄화력 발전소에 대하여 당사가 보유하고 있는 Pepse 프로그램을 통하여 계산한 결과는 **표 3**에서와 같이 566℃/593℃급까지는 EPRI CS4029 및 제작사 제시자료와 매우 유사하였다.

4.2 경제성 분석

경제성 분석은 분석에 사용되는 경제성 분석 지수(경제수명, 고정비율, 할인율, 이자율, 물가 상승률, 발전소 이용률, 적용환율, 연료비, 연료비 상승률 등)에 따라 순위가 바뀔 수 있으며, 여기서는 당사에서 사용하는 일반적인 경제적 분석 지수를 사용하여 500MW급 석탄화력 발전소의 경제성을 예상하여 보면 **표 4**와 같다. 단 여기에는 지구 온난화 협약에 의한 탄소세 관련내용이 고려되어 있지 않았으며, 탄소세를 고려 할 경우 증기조건의 개선은 불가피한 사항으로 판단되며 또한 소재에 대한 기술 개발이 더욱 더 진행되어 온도에 따른 기자재비 상승률이 감소 될 경우 증기조건이 개선된 발전소의 경제성은 증가 될 것이다.

5. 결론

이상 초초임계압 화력 발전소의 발전과정에 대하여 검토하여 보았다. 향후의 발전 시장은 대용량으로서, 재질 개발이 수반되는 한 효율을 상승

<표 2> 증기조건 개선에 따른 열소비율 향상 추세

제 작 사	열소비율 개선분(%)		
	G 사	S사	H사
주증기 압력 35kgf/cm^2.g (500psi) 증가	+0.5	–	+0.7
증기온도 28℃ (50°F) 증가	+0.7	+0.7	+0.5
재열단수 (1단→2단) 증가	2.9	+1.6	+1.6

<표 3> 증기조건 개선에 따른 열소비율 향상 추세 비교

주증기 압력		246 kgf/cm^2.g			
주증기 온도, ℃	재열증기 온도, ℃	계산결과(KOPEC)		제작사 제시 열소비율 변화율, %	EPRI 보고서 제시 열소비율 변화율, %
		터빈열소비율, kcal/kWh	열소비율 변화율, %		
538	538	1841.6	Base	Base	Base
566	566	1812.9	−1.56	−1.5	−1.6
566	593	1801.3	−2.19	−2.0	−2.3
593	593	1785.6	−3.04	–	−3.0
600	610	1772.7	−3.74	–	–

<표 4> 500 MW급 증기조건에 따른 경제성

단위 : 억원

항목	538/538℃	566/566℃	566/593℃	593/593℃	600/610℃
기자재비	7,010	7,140	7,220	7,350	7,390
	Base	+ 130	+ 210	+ 340	+380
에너지경비	11,400	11,220	11,150	11,050	10,970
	Base	- 180	- 250	- 350	- 430
계	18,410	18,360	18,370	18,400	18,360
	Base	- 50	-40	- 10	-50

시키기 위하여 압력 및 온도를 증가되고 환경 문제로 인하여 탈황 및 탈질 설비 등 환경설비가 대폭 추가될 것으로 판단된다. 현재 정부에서는 차세대 화력 발전소로서 1000 MW급 주증기 압력 265 kgf/cm^2.g, 주증기 온도 610℃, 재열증기 온도 620℃의 초초임계압 화력 발전소를 기술 개발 중에 있으며 2010년 이후에는 이러한 초초임계압 발전소가 상업운전되어 효율향상에 따른 연료 절감, CO_2 배출량 감소, ash 감소, 온배수 배출량 감소 등의 효과가 있을 것으로 판단된다. KIPEC