

발전소 효율 향상 이론개발을 위한 조사 연구 (1)

김종보 · 김 진 · 김종현
한국중공업주식회사

1. 서 론

미국의 스티븐 월콕스가 1856년 증기 보일러의 특허를 취득한 이래로 141년이 경과했으며, 그후 1880년대에 최초의 석탄 화력발전소로서 열효율 5%, 출력 0.3MW의 필라델피아 브러쉬 발전소에서 전력 공급을 시작했다. 이후로 화석연료(Fossil Fuel) 연소에 의한 증기 보일러를 에너지 변환장치로 선택한 발전설비, 즉 화력발전소(Fossil Steam Power Plant)는 지속적인 연구개발과 해를 거듭할수록 쌓여가는 경험을 바탕으로 꾸준히 개량되어 왔다. 그 결과로 1967년에는 출력 950MW에 열효율 39%의 TVA(Tennessee Valley Authorities)의 Bull Run #1에 이르기까지 화력발전은 많은 시행착오를 겪으면서 꾸준히 개량되어 오늘에 이르렀다. 주증기의 압력과 온도만 하더라도 $9\text{kg/cm}^2\text{g}/344^\circ\text{C}$ 의 단순한 포화증기(Saturated Steam)로부터 일약 $250\text{kg/cm}^2\text{g}/541^\circ\text{C}$ 의 과열증기(Superheated Steam)에 도달함으로써, 화력발전의 용수(Working Fluid)인 물의 임계점(Critical Point) $226\text{kg/cm}^2\text{g}/371^\circ\text{C}$ 를 증가하게 되었다. 표 1은 간략한 화력발전소의 개발 역사를 나타내고 있다.

ABB-CE의 Joe Singer는 화력발전 개발사에서 가장

중요한 3대 발명품으로는 증기 터빈(Steam Turbine), 절탄기(Economizer), 그리고 미분기(Pulverizer)를 꼽고 있다. 그 이유는 표1로부터 찾아 볼 수 있다. 따라서 1940년을 기점으로 볼 때, 화력발전의 효율을 높이기 위한 개발은 그 이전에 완성되었고, 그 이후부터는 이것을 좀더 개량하기 위해서 새로운 금속재료 개발에 전념하여 왔다고 할 수 있다. 그 결과 1960년대까지 열 효율은 계속 증가하였고, 발전설비의 대형화 추세로 상대적으로 발전단가(Cost/kWh)는 하락하게 되었다. 실제로 인플레이션을 감안하더라도 1970년 발전단가는 1930년의 20% 정도에 지나지 않았다. FGD(Flue Gas Desulfurization)와 같은 오염규제장치(Pollution Control Equipment)가 없을 경우, 표1에서 보여주는 바와 같이 열효율 1%를 올리기 위해서는 평균적으로 증기의 온도를 20°F 정도 증가시켜야 함을 알 수 있다. 따라서 화력 발전을 비롯한 증기를 이용하는 모든 에너지 시스템의 개발역사는 바로 증기온도의 역사라고 볼 수 있다. 한편 효율의 증대와 함께 화력발전당 평균출력(Plant Net Output)도 계속 증가추세를 보여, 1970년에 이르러서는 단위 출력 500MW급 화력발전소가 선호를 받게 되었다. 이와 같은 추세는 환경오염이라는 바람직하지 못한 부작용을 일으켜서 급기야는 행정당국의

〈표 1〉 화력발전소의 주요 개발연혁(열효율은 HHV 기준임)

기간 (연도)	주 증기		출력 (MW)	열효율 (%)	주요 개발
	압력kg/cm ²	온도℃			
1880~1890	125	344	0.3	5	B&W Boiler(Hand Firing), 벨트형 1단 팽창 피스톤 엔진
1890~1900	130	344	0.7	7	다단 팽창 피스톤 엔진
1900~1910	145	358	1.0	10	Steam Turbine(1904), Superheated Steam
1910~1920	275	560	10	15	Steam Turbine의 효율 증대
1920~1930	550	725	25	25	미분기, 수벽(Water Wall), 공기 예열기, 급수 가열기
1930~1940	900	900	50	32	Arc 용접, 고온고압용 신 합금
1940~1950	1200	1000	150	36	2차 세계대전 중 신소재 개발 박차
1950~1960	2400	1050	300	38	관류형(Once Through), 초임계압(Supercritical) 발전
1960~1970	3500	1050	500	39	발전소의 대형화
1970~1980	3500	1005	1000	36	DeNOx/DeSOx, OFA, Cooling Tower
1980~1990	3500	1005	600	40	열병합, Cogeneration, Gas Turbine, DSS(Daily Start-up Shut-down)
1990~2000	4200	1100	600	40+	USC/PC, PFBC, IGCC, 표준화

법적규제를 받게 되었다.

Sox, Nox, CO₂ 등에 의한 대기오염을 줄이기 위하여 FGD와 같은 연소가스처리장치, OFA(Over Fire Air)와 같은 연소방법의 개선 등이 개발되었고, 수질오염을 줄이기 위하여 냉각탑이 필요하게 되었다. 이와 동시에 화석연료의 매장량은 점차 감소하여, 1994년 현재의 소비추세를 계속 유지한다면 Oil과 NG (Natural Gas)는 각각 50년 후, 석탄은 250년 후에 완전히 고갈될 것으로 전망된다. 석탄의 경우 저질탄(High-sulfur, High-ash and High Moisture Coal)이 주종을 이루고 있으며, 이 탄은 재래식 연소로로 효과적으로 연소하면서 동시에 각종 오염 표준치와 높은 열효율을 만족시키기에는 한계가 있다. 이 한계점을 탈피하기 위해서 직접연소(Direct Combustion)법인 유동층 연소로(Fluidized Bed Combustor)와 간접연소(Indirect Combustion)법인 석탄가스화기(Coal Gasfier)가 다시 각광을 받게 되었고, 이들을 주축으로 하는 차세대 발전설비인 가압유동층보일러(PFB: Pressurized Fluidized Bed)와 석탄가스복합화력(IGCC :Integrated Gasification Combined Cycle) 등이 이제 막(1989년 이후) 상용화 단계에 돌입하였다. 그러나 PFBC나 IGCC는 출

력면에서 Utility Class에 해당하는 300MW급에는 미치지 못하고 있으며, 미국과 스웨덴을 주축으로 많은 연구 개발이 진행중에 있다. PFBC나 IGCC는 열병합형으로 가스터빈과 증기터빈으로부터 출력을 얻게 되므로 자연히 열효율이 높아서 현재 약 40%를 상회하고 있고, 가스터빈의 소재개발 여하에 따라 2010년까지는 50%(HHV 기준)까지 기대하고 있다. 한편 재래식 발전설비를 개량하는 방법으로 USC/PC(Ultra Supercritical Pulverized Coal)과 Combustion 2000을 들 수 있다. USC/PC의 경우 주증기 조건이 295kg/cm²g/593℃를 상회하며 여기에 Double Reheat을 이용함으로써 열효율 45% 이상을 얻을 수 있다. Combustion 2000은 재래식 발전소에 가스 터빈을 부착한 열병합형으로 높은 열효율(50%+)을 기대할 수 있다.

현재 우리나라에서는 500MW급 화력발전소 12기가 상업운전중이며, 6기는 시운전, 8기는 건설중에 있다. 이중 초임계압 관류 보일러형 석탄화력 발전소는 20기에 해당하며 앞으로도 800MW급을 비롯해 신규 건설이 추진될 전망이다. 세계적인 추세로 볼 때 석탄화력 발전효율은 현재 약 45%까지 상승하였으며 이는 1960년대에 비해 10% 이상 상승한 것으로 다양한 신소재 개발,

기계 기술의 발달, 선진 제어이론의 적용 등을 통해 이루어졌다. 그러나 현재 국내 초임계압 석탄화력 발전효율은 약 41%로 아직도 세계수준과는 거리가 있으며 상당한 개선의 여지가 있음을 알 수 있다. 이에 본 조사연구에서는 발전소 효율과 관련하여 국내·외의 선진 기술을 조사하여 국내 500MW급 초임계압 석탄화력 발전소에 적용 가능성을 검토하여 어떠한 효율개선 요인이 아직도 잠재해 있는지를 알아보고자 한다.

그동안 석탄 화력발전소의 효율 향상을 주도해온 것은 주로 신소재의 개발로, 이를 통하여 고온, 고압의 증기 이용이 가능하게 되었고 또한 기계적 개선으로는 미분기의 개발, 다양한 열교환기의 개발 등을 들 수 있다. 그러나 이러한 기계적인 개선은 현재 많은 연구개발이 진행되고 있음에도 불구하고 거의 정점에 도달했으며 개선의 실용화에는 많은 투자 비용과 노력이 요구된다. 이에 반해 제어 및 프로세스 개선안은 개선효과 증명에 어려움이 있지만 실용화가 용이하며 신규 발전소 뿐 아니라 기존의 발전소에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 기계적 개선처럼 큰 향상을 기대할 수 없다는 단점이 있다. 제어 및 프로세스 개선으로는 날로 발달해가는 컴퓨터 기술 및 선진제어 이론을 발전소 제어에 이용하는 방법과 기존 프로세스의 보다 효율적인 이용을 통한 효율 개선을 시도하는 방법 등으로 이루어지며, 대부분의 에너지를 수입하는 국내 현실을 미루어 볼 때 이러한 개선을 위한 보다 현실적인 연구와 노력이 학계와 산업계에 광범위하게 요구된다고 할 수 있다.

2. 본 론

가. 500MW급 초임계압 관류 보일러형 석탄 화력발전소 개요

화력발전소가 현재와 같이 대형화되고 1880년대에 불과 5%였던 발전효율이 오늘날 40% 이상으로 발전하게 된 추이를 살펴보면, 1890년 다단 피스톤엔진의 개발로

7%의 효율을 달성하였으며 1900년대 출력1MW에 열효율 10%인 발전소가 건설되었고, 1920년대에는 미분기(Pluverizer), 수관(Waterwall), 공기 예열기(Air Preheater), 급수 가열기(Feedwater Heater) 등의 개발로 출력 25MW, 효율 25%의 발전소가 건설되었다. 그러나 이때까지도 주증기 압력은 불과 40kg/cm²g 미만 이었고 온도는 385℃에 지나지 않았다. 그 후 1, 2차 세계대전 중 고온 고압의 신소재가 개발되었으며 1950년대에 열효율 35% 이상, 출력300MW, 주증기 압력이 170kg/cm²g에 온도가 537℃의 중대형 발전소가 나타났으며 초임계압 관류보일러형 발전소도 이 시기에 개발되었다. 1960년대에 발전소는 점점 대형화되었으며 1970년대에 들어 세계 각국의 환경보호를 위한 규제로 탈황, 탈질, 냉각탑 등이 개발되었으며 출력 1000MW급의 대형 화력발전소도 이 시기에 출현했다.

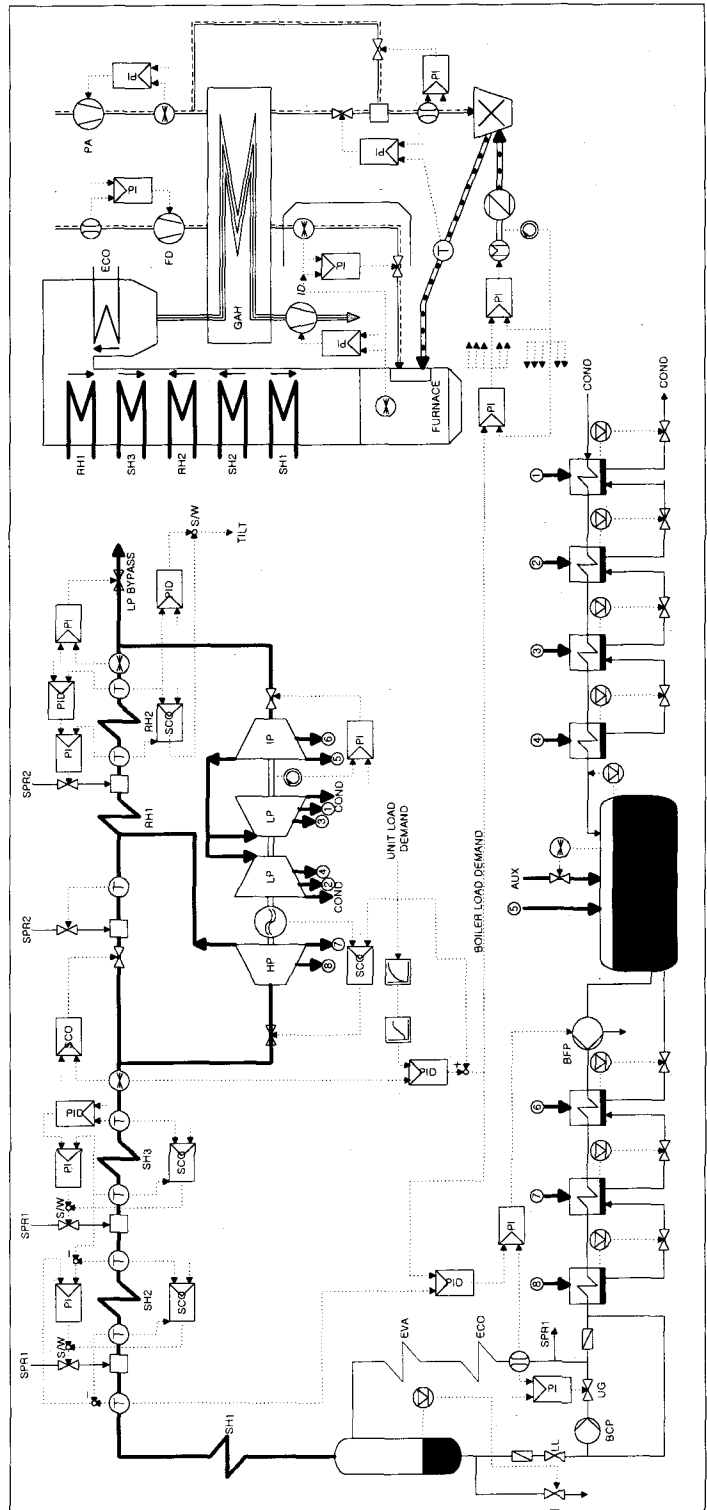
1980년대에는 가스터빈, 열병합(Co-generation)을 비롯하여 600MW급의 일일기동 및 정지 운전이 가능한 초임계압 화력발전소가 나타나기 시작했으며 1990년대에 들어 차세대 발전설비로서 석탄가스복합화력(IGCC: Intergrate Gasification Combined Cycle)과 가압 유동층 보일러형 발전소(PFB: Pressurized Fluidized-Bed)가 상용화 단계에 돌입하였으며 소재개발 여하에 따라 가까운 장래에 발전효율 50%에 접근할 것으로 기대된다. 이와 아울러 기존의 초임계압 석탄화력 발전소를 개량하려는 노력이 유럽과 미국 등지에서 활발하게 진행되고 있다. 현재 유럽에서는 효율 45% 이상의 초임계압 관류보일러형 발전소가 건설되고 있는 추세이다. 국내에 처음으로 500MW급 초임계압 관류보일러형 석탄화력 발전소가 상업운전을 시작한 것은 1990년대에 접어들면서 부터이다.

1950년대 초임계압 관류형 보일러가 개발된 후 40년 만에 국내에서도 표준화력으로서 발전을 시작하게 된 것이며 2001년 하동화력 6호기가 상업운전을 하면 초임계압 관류보일러형 석탄화력 발전소만으로 10,000 MW의 전력을 공급할 수 있게 된다. 이 발전소는 500MW 정격 운

전시 주 증기 압력이 253kg/cm²g, 온도가 541°C이며 일일기동 및 정지 운전이 가능하고 분당 25MW의 출력 변화로 계통의 요구에 신속하게 추종할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 국내의 중간부하 또는 첨두부하를 담당하게 될 것이다. 그림1은 국내 500MW급 초임계압 관류보일러형 석탄화력 발전소의 계통도를 보여준다.

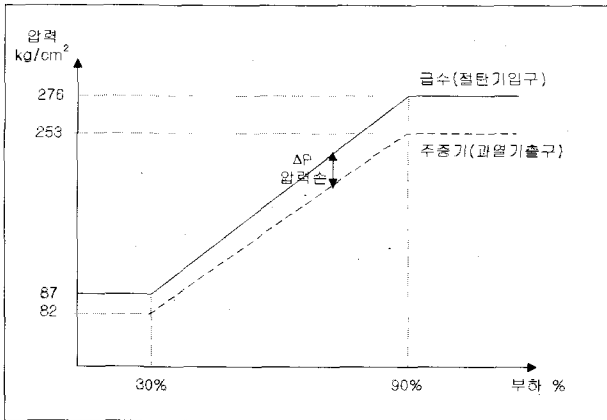
먼저, 국내의 500MW 초임계압 관류보일러형 석탄화력발전소의 운전방식을 이해하기 위해서는 변압운전의 특성을 이해하여야 한다. 변압운전은 크게 아임계압 변압운전(Subcritical-pressure Sliding-pressure Operation)과 초임계압 변압운전(Supercritical-pressure Sliding-pressure Operation) 방식으로 나뉘며, 주로 관류형 보일러에 적용된다. 드럼형 보일러의 경우에도 변압운전이 불가능한 것은 아니지만 드럼내 압력 변화의 허용한계로 인해 2%/min 이내의 출력 변화로 운전되므로 국내에 설치된 500MW드럼형 발전소(예; 삼천포 1,2호기)의 경우에는 정상 운전시에 5%/min의 출력 변화가 가능한 정압운전(Constant Pressure Operation) 방식을 채택하고 있다. 현재 국내 500MW급 관류 보일러형 발전소의 경우 초임계압 변압운전 방식을 채택하고 있다. 변압운전 설계 조건에서 가장 먼저 고려해야 할 조건은 부하에 따른 압력 변화이며 국내 500MW급 관류 보일러형 발전소의 경우에 설계조건은 그림 2와 같다.

변압 운전에도 부분 부하 또는 전부하 운전 방식(과도상태 제외: 부하 30% 이하)이 있으나 국내에서는 전부하 변압운전을 채택하고 있다. 전부하 변압운전의 기본이론은



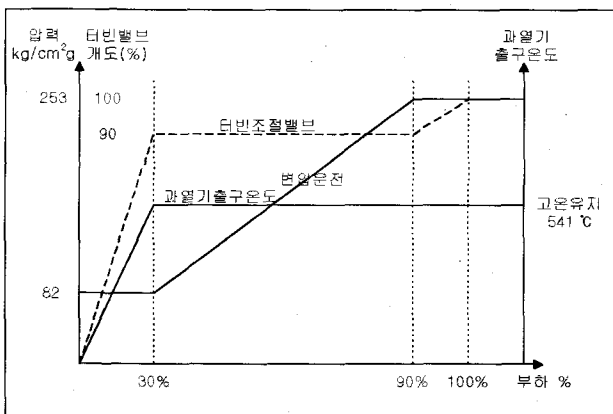
(그림 1) 500MW 초임계압 관류보일러형 석탄화력발전소 계통도

◆..발전소 효율 향상 이론개발을 위한 조사연구(1)◆



〈그림 2〉 부하에 따른 압력변화

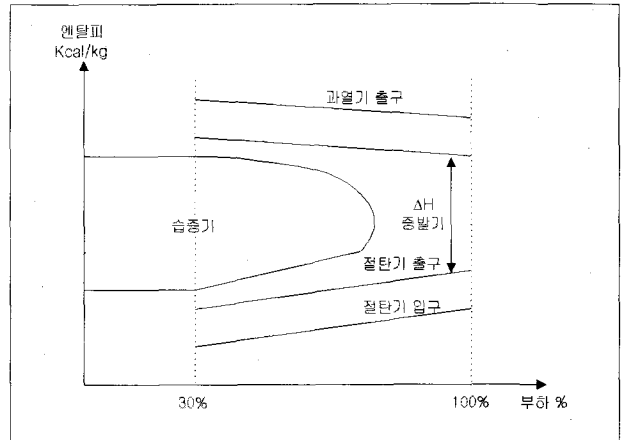
아래 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 터빈 조절 밸브(TCV)의 조절기능이 최소화되며 보일러에서 터빈의 요구 압력을 만들어주는데 있다. 30%의 보일러 부하에서 터빈 조절 밸브(TCV)는 90% 위치로 열리고 보일러 부하 90%까지 그 위치를 유지하며 90~100% 부하에서 조절기능을 한다. 보일러에서는 정상 운전의 전부하 범위인 30%~100%의 보일러 부하에서 주증기 온도가 일정하도록 조절해야 한다. 일반적으로 변압 운전방식은 보일러에서는 정압운전보다 열응력에 강하지만 터빈의 열응력이 발생에 의해서 부하 조절 속도가 제한됨이 빈



〈그림 3〉 변압운전(Variable Pressure Operation)

번히 발생하므로 규정된 부하에 따른 증감 속도 조절과 주증기의 온도 압력 조건을 터빈의 요구치에 맞추도록 조절할 수 있는 회로의 정밀도가 요구된다.

그러나, 이러한 변압운전의 기본 이론은 주증기의 Throttling 손실을 줄일 수 있는 이점에도 불구하고 터빈 보호 차원에서 국내 발전소에는 채택되지 않고 있으며 대신에 전체 발전소 부하의 주 제어 기능을 보일러 제어(UMC)에서 가지고 있다. 정상 운전시 터빈 조절 밸브의 궤도를 보일러의 부하와 맞출 수 있도록 보일러 제어시스템에서 터빈 제어시스템으로 부하량 요구 신호를



〈그림 4〉 초임계압 관류형 보일러 변압운전 특성

전송하는 이 터빈 제어시스템에서는 특별한 자체 보호회로가 동작하지 않는 한 터빈 제어시스템에서 이 신호를 기초로 하여 터빈조절밸브(TCV)를 연속적으로 동작하는 방식을 채택하고 있다. 그러나 기본적으로 이러한 문제점은 국내 발전소의 경우 보일러 제어 시스템과 터빈 제어 시스템 공급자가 다른데서 오는 문제점이므로 앞으로의 후속기 건설에 있어서는 전체 발전소의 통합된 제어시스템 공급으로 보다 효율적인 운전이 되도록 고려되어야 할 것이다. 그림4는 국내 초임계압 관류형 보일러의 변압운전 성능 특성을 보여준다. ■

(다음호에 계속)