발전소 효율 향상 이론개발을 위한 조사 연구 (3)

김종보 · 김 진 · 김종현
한국중공업주식회사

2. 본 론

다. 효율 향상을 위한 개선요인 분석

전 세계적으로 석탄 화력발전소의 효율 향상과 강화된 환경규제 조건을 만족하도록 하는 연구가 진행중에 있다. 특히 보일러 부분에서 많은 연구가 진행중에 있으며, 이러한 연구들의 주요 경향은 다음과 같다.

- 열효율 (Thermal Efficiency)의 증가
- 환경 성능의 개선
- 유용성의 증가
- 초기 주요 비용의 조절
- 소내 전체 전기 비용의 감소

특히, 열효율의 증가에 대한 연구는 주요 비용의 감소에 가장 큰 영향을 미친다. 화력발전소의 운전 비용중 70% 이상이 연료비용으로 나타나기 때문에 열효율이 증가하면 발전소 전체 효율 및 환경 개선에 많은 영향을 줄 수 있다. 실제로 1960년대에 비해 현재 기술의 화력 발전효율이 약 10% 상승하였으며 이로 인하여 대기로 방출되는 이산화탄소의 양을 약 25% 줄이는 효과가 있다. 이러한 열효율 개선에 대한 많은 연구 개발이 일본과 서부 유럽 특히 독일에서 진행되고 있으며 진보된 시스템을 위한 발전소의 성능 목표는 다음과 같으며, 대표적인 발전소들은 표 3에 나타내었다.

- 발전소 정미(실질) 효율의 45%(Net Efficiency) 이상 증가
- 보일러 방출 조건 (Emissions Levels) [$lb/10^6$ Btu (mg/Nm^3)]
  - SO_2 < 0.1~0.2(120~150)
  - NOx < 0.1(120)
  - Particulate < 0.015~0.030(20~40)
  - Water Discharge ≈ 0
  - Soild Waste 최소화
  - Air Toxics 정의중
- Daily cycling down to as low as 15% maximum continuous rating
- 전력 비용의 감소
- 유용성, 신뢰성 및 연료 호환성 증대
- 고온, 고압의 신소재 개발
- 열순환의 보다 효율적인 이용

〈표 3〉 개발중인 고효율 발전소

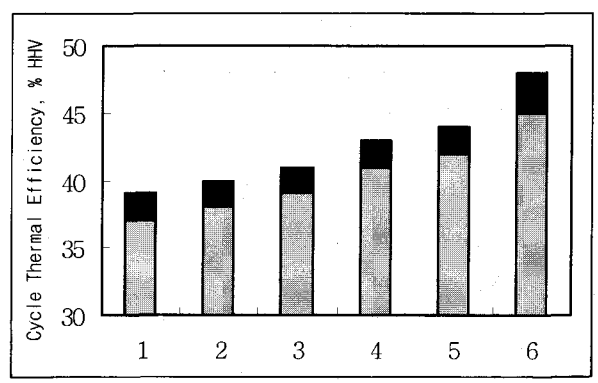
Plant	Country	Fuel	MWe	Pressure	Temp	Start-Up
Kawagoe	Japan	LNG	700	310 bar	566℃	1990
Hekinan 3	Japan	Coal	700	255 bar	543℃	1992
Matsuura 2	Japan	Coal	1000	255 bar	598℃	1997
Hessler	Germany	Coal	700	275 bar	580℃	–
Lubeck	Germany	Coal	425	300 bar	590℃	–
Franken	Germany	Coal	600	270 bar	570℃	–
Bexbach	Germany	Coal	750	250 bar	575℃	–
Avedore	Germany	Coal	400	300 bar	580℃	–
CONVOY	Denmark	Coal	400	310 bar	587℃	1998
Schkopau	Germany	Lignite	450	285 bar	550℃	–
Boxberg	Germany	Lignite	818	285 bar	552℃	2000
Sch. Pump	Germany	Lignite	800	285 bar	552℃	1997
Lippendorf	Germany	Lignite	925	285 bar	559℃	2000
Frimensdorf	Germany	Lignite	900	285 bar	559℃	–

(1) 순환 효율 (Cycle Efficiency)

일반적으로, 하나의 재열기를 가진 증기조건 253kg/cm^2/541℃/541℃의 국내 화력발전소의 정미효율(Net Efficiency)은 40~41% HHV(Higher Heating Values)이다. 이 효율을 45% 이상으로 증가시키기 위하여 다음과 같은 부분들이 개량되어야 한다.

- 최적화된 급수 가열 (가열기의 추가 또는 재열 온도의 증가)
- 터빈 추기 압력 감소에 따른 냉각수 온도의 감소와 다단 압력 복수기의 사용
- 응축기(Condenser) 진공 압력 감소
- 증기 터빈의 효율 증가
- 고온, 고압의 신소재 개발 및 적용
- 동적 분리기를 가진 분쇄기의 설치
- 보조 전력량 및 특정 환경 설비의 전력량 감소
- 연소의 최적화
- 이중 재열기의 설치

더 나아가 효율을 현저히 증가시키기 위해서는 증기의 압력과 온도가 현저히 증가된 극초임계압(Ultra Supercritical Pressure)의 증기 조건을 가진 보일러 시스템을 구현하여야 한다. 그림 7은 각 보일러들의 성능 비교 결과를 보여주고 있다. 증기조건 168kg/cm^2/538℃/538℃의 서브임계압(Subcritical Pressure)의 드럼형 보일러와 243kg/cm^2/538℃/538℃의 초임계압(Supercritical Pressure)의 관류형 보일러가 현재 광범위하게 사용되고 있다. 증기조건 313kg/cm^2/538℃/538℃의 이중 재열기를 가진 보일러가 그 경제성만 증명된다면 가장 적용 가능성이 있으며, 참고로 이 이중 재열기를 가진 보일러의 성능은 1960년대 초에 증명되었다. 나머지 다른 증기조건들의 보일러들은 현재 연구 개발중이거나 시험중에 있다. 증기 압력 279kg/cm^{2}를 초과하고 증기온도 552℃를 초과하는 증기 사이클은 일반적으로 극초임계압으로 분류된다. 극초임계압 보일러는 기본적으로 전부하에서는 관류형 동작을 하여야 하고 이중 재열기가 설치되어 있어야 하며, 또한 저부하시 열효율 최적화를 위한 변압운전의 기능을 가지고 있어야 한다. 현재 고려되고 있는 가장 높은 효율의 증기조건은 증기 압력418kg/cm^{2}와 증기 온도 649℃이다. 이러한 극초임계압의 보일러를 개발하기 위



	1	2	3	4	5	6
Pressure kg/cm^2	168	243	243	313	313	418
SH Temp. ℃	538	538	538	566	593	649
RH Temp. ℃	538	538	552	566	593	649
2HR Temp. ℃	-	-	566	566	593	649

〈그림 7〉 석탄 화력발전소의 정미효율

해서는 앞서 설명한 기계 부문 뿐만 아니라 소재 부문의 기술 개발, 그리고 제어시스템 개발 등이 함께 발전하여야 한다.

(가) 급수 가열기의 추가

1950년에서 1965년 사이에 발전소의 조건이 현저하게 진보하였다. 증기의 압력과 온도가 60kg/cm^2/450℃에서 162kg/cm^2/566℃로 증가하였다. 그리고 발전소의 크기도 30MW에서 660MW로 증가하였다. 이러한 현저한 증가에 급수가열기의 기술이 많은 영향을 미쳤다. 개별적인 급수가열기 기술의 증가뿐만 아니라 발전소에서 사용되는 급수가열기의 수도 현저하게 증가하였다. 급수가열기의 수가 많으면 많을수록 열 성능 이득은 증가한다. 그러나 급수 가열기가 무한히 증가한다고 해서 이득이 무한히 증가하는 것은 아니다. 실제로 가장 경제적인 급수 가열기의 수는 10단이지만 기술적인 문제가 있고, 현재 국내 초임계압 석탄화력 발전소에서는 8단의 급수가열기를 채택하고 있다. 발전출력 500MW에서 마지막 급수가열기를 통과한 급수의 온도와 압력은 278℃/284kg/cm^{2}이며, 이때 엔탈피는1213kJ/kg이다. 그러나 독일의 경우 9단의 급수가열기를 설치한 발전소가 있으며, 이때 급수의 온도와 압력은 약 300℃/313kg/cm^2, 엔탈피는 1,328kJ/kg로 상승하였다. 그 결과 약 0.6% 이상의 효율 상승효과가 있음을 보고하고 있다. 그밖에 발전소 열평형의 한계를 극복하기 위해 연소가스를 급수가열에 이용하여 효율을 증가시키는 방법이 연구되고 있다. 그러나 이러한 급수 가열기의 추가 문제는 전체 열평형(Heat Blance)과 터빈 추기단 선정 등의 새로운 설계 기술을 필요로 한다. 표 4에 현재 운전중인 발전소의 급수가열기의 수와 증기조건 출력 등을 나타내었다.

〈표 4〉 전형적인 급수가열기의 수

Output (MW)	Steam Conditions		Reheat Temp(℃)	Number of Heater	Final Feed Temp(℃)
	Press(bar)	Temp(℃)			
375	241.3	593	566	8	266
500	158.6	566	566	8	252
600	158.6	566	566	9	278
660	158.6	566	566	8	252
800	158.6	538	538	8	254
860	172.4	538	538	7	254

(나) 미분기의 성능 향상

발전소에 설치된 미분기(Pulverizer)의 역할은 석탄을 분쇄하여, 이 분쇄된 석탄을 공기와 혼합하여 점화장치(Burner)로 공급하는 것이다. 이러한 미분기의 원리를 보면 먼저 미분기의 위쪽에 위치한 석탄이송장치(Coal Feeder)를 통하여 석탄이 미분기로 들어오게 된다. 석탄이송장치에서 회전면(Rotating Bowl)으로 석탄이 떨어지며, 이 회전면의 회전에 의해 발생하는 원심력에 의하여 석탄을 바깥쪽으로 밀어내어 분쇄장치(Journal Assemblies and Grinding Ring)아래로 들어가게 한다. 석탄은 이 분쇄장치에서 분쇄된다. 이렇게 분쇄된 석탄은 미분기의 옆면에서 들어온 1차 공기(Primary Air)에 의하여 건조되면서 위쪽에 있는 분리기(Classifier)로 이동된다. 석탄과 공기의 혼합물이 미분기의 벽면(Separator Body)을 통하여 올라갈 때 무거운 입자들은 중력에 의하여 다시 바닥면으로 떨어져 다시 분쇄된다. 분리기 입구측에 설치된 전향 날개(Deflector Blades)에 의하여 분리기 내부에서 소용돌이가 형성되며, 이 소용돌이가 원심력을 발생시킨다. 이 힘에 의하여 내부에서 무거운 입자들은 다시 바닥면으로 떨어져 다시 분쇄된다. 그러나 가벼운 입자들은 공기 유량에 의하여 미분기를 빠져나가 점화장치로 들어가게 된다.

미분기의 성능은 미분도(Fineness)에 의하여 좌우된다. 또한 미분도는 보일러의 연소에 많은 영향을 미치게 되어 전체 효율에까지 영향을 주는 주요한 요인이다. 이러한 미분도를 결정하는 역할을 하는 장치가 분리기이다. 전형적인 고정형 분리기(Static Classifier)를 가진 분리기의 분리율은 약 15%이다. 이것은 분리기를 통과하여 미분기를 한번에 통과하는 입자가 15% 정도임을 의미한다. 나머지 85%는 다시 분쇄기로 떨어져서 분쇄

된다. 실제로 이러한 입자들은 미분기를 빠져나가기 전에 미분기내에서 4~5회 정도 회전한다. 이러한 미분기 내에서의 석탄의 회전은 미분기의 수명에 큰 영향을 미친다. 이때 미분도를 1% 증가시키려면 미분기의 용량이 1.5% 감소되며 또 미분도를 증가시키기 위하여 미분기의 크기를 증가시키는 데에도 한계가 있다. 그래서 미분도를 증가시키기 위한 한 방편으로 정적 분리기 대신 동적 분리기(Dynamic Classifier)가 연구되어 현재 국내에서도 시험 설치중에 있다. 이 동적 분리기는 기존의 정적분리기가 고정형인데 비하여 전동기를 이용하여 분리기를 회전하게끔 설계되었다. 이 동적분리기의 분리율은 약 55%이며, 입자들이 미분기를 빠져나가기 위한 미분기 내의 평균 회전수는 1~2회 정도가 된다. 실제로 정적 분리기를 동적 분리기로 교체하였을 경우의 미분기의 성능 보증치는 다음과 같다.

○성능 보증치
- -미분도 : 200 Mesh 통과량 : 10% 증가
  50 Mesh 통과량 : 0.5% 감소
- -용 량 : 15 ~ 20% 증가

항 목		정적 분리기	동적 분리기
미분도	200mesh	71.5%	78.6% 이상
	50mesh	0.9%	0.4% 이하
용 량		41.7MT/HR	48.0MT/HR 이상

위와 같은 정성적 효과외에도 미분도의 향상에 따른 효과로는 먼저 연소되지 않는 석탄이 감소하게 되며, 화염의 안정도가 증가, Turn Down의 증가, 과잉산소량의 감소 그리고 NOx 감소 등의 현상이 나타나므로 보일러의 전체 효율 향상에 큰 영향을 미친다.

(다) 고효율용 소재의 개발

발전소의 고효율화 방법 중의 하나인 증기 조건의 고온 고압화를 위해서는 고온 고압 하에서 우수한 성능을 발휘할 수 있는 내열재료를 필요로 한다. 이러한 내열재료의 개발은 발전설비를 초초임계압화하기 위한 가장 필요한 기술중의 하나로 최근에 개발된 많은 재료들이 실용화되어 규격으로 채택되고 있어 발전소의 효율 향상에 많은 도움을 주고 있다.

기존의 화력발전소용 보일러와 터빈 로터에 사용되는 Conventional 12% Cr강은 1950년대에 독일에서 개발된 X20CrMoV121, 1960년대에 GE사에서 터빈 로터용으로 개발한 11CrMoVNbN, 일본에서 GE사의 재료에 Ta를 첨가하여 고온특성을 개량한 11CrMoVTaN계의 재료가 사용되고 있다. 이러한 재료들은 모두 537~566℃ 범위에서는 25년 이상 성공적으로 사용된 실적이 있지만 증기온도가 593~649℃ 범위로 상승하는 극초임계압 발전소에는 크립 파단강도가 낮아 사용이 불가능하다. 기존의 재료 중에서 오스나이트계 내열강은 고온강도가 Conventional 9~12% Cr강보다 우수하기 때문에 극초임계압 발전소의 보일러나 터빈 로터 재료로 사용될 수 있지만 열피로 강도가 특히 낮기 때문에 고효율 발전소에 필수적인 Cycling Operation을 어렵게 하는 문제가 있다. 9~12% Cr계 내열강은 지금까지 최고 566℃ 이하에서만 사용가능한 것으로 인식되어 왔지만, 새로운 합금설계 개념 등이 도입되어 650℃ 정도까지 사용가능성이 확인되었다. 오스나이트계 강에 비해 높은 열피로강도 620℃까지는 오스나이트계 강보다 우수한 크립 강도, 오스나이트계 강에 필적할 만한 내산화성 및 내부식성, 저렴한 가격 등의 여러 가지 장점 때문에 이 강종에 대한 집중적인 연구가 수행되어, 현재 극초임계압 화력발전소의 보일러 및 터빈용 재료로 사용가능한 Advanced 9~12% Cr강이 개발되어 증기조건의 고온고압화에 큰 기여를 하고 있다. 초임계압 발전소의 증기압력과 온도조건에 따른 주요 부분의 재료를 살펴보면 표 5와 같다.

화력발전소에서 증기조건의 고온, 고압화에 의한 열효율 증가의 근본적인 장애 요인으로 보일러에서는 후육부(Thick Wall Section)와 주증기관 크립특성, 과열기 고온부식특성이며, 터빈에서는 로터, 캐스팅 등의 크립특성이 주요 제한요소이다. 기존에 사용되고 있는 오스

〈표 5〉 초임계압 증기조건과 보일러 재료

증기조건	과열기관	주증기관	고온고압헤더
264kg/cm²g 538/552/566℃	CrMO	2¼CrMo	2¼CrMo
320kg/cm²g 566/566/566℃			
320kg/cm²g 595/566/566℃	오스나이트계	9Cr계	9Cr계
320kg/cm²g 595\595/595℃			
320kg/cm²g 621/595/595℃	고강도 오스나이트계	고강도 오스나이트계	고강도 오스나이트계
320kg/cm²g 650/595/595℃			

나이트계 스테인레스강은 약 650℃까지 보일러와 터빈에 사용될 수 있을 정도의 높은 크립 파단강도를 가지지만 열전도도가 작고 열팽창계수가 크며 인장강도가 작기 때문에 발생되는 낮은 열피로 강도, 장시간 사용시 발생되는 금속의 조직적인 불안정성 및 취화현상, 응력부식 균열에 대한 감수성 등 근본적인 문제가 있다. 이 외에도 고가의 합금원소 사용에 의한 높은 가격 및 터빈 로터축과 같은 대형 단조품의 경우 제작상의 어려움이 있기 때문에 극초임계압 발전소의 보일러 후육부와 터빈에 사용되기에는 설계상의 애로 요인이 많다. 이에 대한 대안으로 오스나이트계 강의 단점을 없앨 수 있는 9~12% Cr계의 페라이트 강이 제시되었지만, 이 강종은 제일 중요한 고온 크립 강도가 낮기 때문에 크립강도를 높이기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되었다.

1970년대 후반부터 시작된 9~12% Cr강에 대한 연구결과 P91을 시작으로 극초임계압 화력발전소의 보일러와 터빈재료로 사용될 수 있는 각 용도별 Advanced 9~12% Cr 강들이 개발되어 극초임계압 화력발전소의 건설이 실현가능하게 되었다.

국내의 경우 보령 3호기로부터는 초임계압 운전조건을 위해서 12Cr강인 DIN X20CrMoV121을 도입하여 사용하고 있다. 그러나 X20CrMoV121은 탄소 함량이 높아 용접성이 불량하여 작업성이 떨어지고 550℃ 이상에서는 고온 강도가 ASME A213 T91보다 낮아 사용이 감소하는 추세이다. 현재 새롭게 개발된 보일러 신소재 중 국내 화력발전 설비에 가장 많이 도입되고 있는 재료는 고 Cr강이다. 이 고 Cr강은 함량에 따라 9% Cr강과 12% Cr강으로 구분하고 있으며, 파이프 및 튜브에는 9% Cr강과 12% Cr강 둘 다를 사용하고 터빈 로타에는 12% Cr강만 사용되고 있다. 9% Cr강 중 Tempaloy F-9, EM12, T91(P91)등은 바나듐(V)이나 니오비움(Nb)을 첨가하여 탄화물을 석출시켜 강도를 강화시킨 합금들로 개량형 9% Cr강 또는 Super 9% Cr Alloy라고도 한다. 그리고 보일러 튜브 및 파이프에 널리 사용되고 있는 12% Cr강인 HT9(DIN X20CrMoV121)은 12%의 Cr과 0.2%의 탄소를 함유하며 텅스텐과 바나듐으로 고온 강도를 증가시키고, δ-페라이트량을 줄이기 위해 0.5%의 니켈을 첨가한 재질로 지난 20여년 동안 사용되어 왔으나, 이 재질은 크립 파단시간이 증가할수록 연성이 감소하는 경향을 보이고 있고, DBTT가 초기에는 낮으나 시효(Aging)에 따라 급격히 증가하는 단점이 있다. 또한 높은 탄소함량 때문에 용접에 상당한 주의를 요한다. 용접성에 대한 심각한 우려 때문에 미국과 일본에서는 사용이 제한되고 있다.

최근에 보일러 튜브용으로 개발된 개량형 12% Cr강의 종류로는 AMAX 12Cr, HCM 12, TB 12 등이 있으며, 이들은 HT9와 비교하여 용접성 및 크립 파단 강도가 우수하다. 보령화력의 경우 증기조건이 538℃, 246kg/cm^{2}이며, 열효율이 40.9%인 반면에 영흥도 1-2호기는 증기조건 566℃, 246kg/cm^{2}에 열효율 43.5%로 온도증가는 상당한 효율향상을 기대할 수 있다. 그래서 영흥도 1~2호기에 사용될 일부 재료가 다르게 선정되었다. 나아가 극초임계압의 593℃ 적용은 고효율화를 위해 필히 달성되어야 하며, 이러한 고효율화의 달성을 위해서는 오스나이트계 스테인레스강과 고 크롬페라이트강의 적용에 크게 의존한다. ■ *(다음호에 계속)*