

## 순산소 발전시스템에서 설비구성에 따른 공정해석

김성철, 김수현, 김태형\*, 서상일  
한전 전력연구원  
(thkim@kepri.re.kr\*)

### Process Analysis of Oxy- Combustion Plant

Kim Sung Chul, Kim Soo Hyun, Kim Tae Hyung\*, Seo Sang Il  
Korea Electric Power Research Institute  
(thkim@kepri.re.kr\*)

## 서론

이산화탄소를 포집하기 위한 CCS(Carbon Capture & Storage)기술 중에서 연소 중 포집 기술인 순산소 연소조건에서 125MW급 기존 석탄화력발전소에 공정 해석용 툴인 VMGSim을 활용하여 설비 구성에 따른 Case 연구를 통해 공정해석을 수행하여, 최적의 공정을 선정하였다. 설비구성은 배가스 재순환 위치, 산화제 예열과 석탄 건조 유,무등에 대해 공정해석을 수행하였다.

## 본론

### 1. 순산소 발전시스템

일반적인 공기연소에서는 석탄 연소 후 발생하는 연소가스의 대부분은 질소이며, 만약 공기를 분리하여 산소만 보일러에 공급하여 연소하게 되면, 질소성분이 제거된 상태로 산소만이 기존의 보일러에서 사용된다면, 먼저 보일러 내에서 높은 화염온도, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O의 주요 조성가스의 높은 방사율로 인해 복사 전열량이 크게 증가하게 된다. 이로 인해 심한 Slagging과 NO<sub>x</sub> 발생이 예상되며, 배기가스 량 감소로 인해 보일러 후부 대류 전열부측에서 감소된 가스 유속으로 인해 열전도계수와 열 흡수를 낮추는 결과를 초래하게 된다. 그러므로 전열면적에 대한 수정이 없으면 보일러 설비 전체에 전반적인 열흡수 균형이 달라질 수 있으나, 이런 문제점은 보일러 출구에서 연소가스 중 일부를 재순환시켜, 허용 가능한 범위 이내로 재순환 가스유량을 유지함으로써 해결 될 수 있다. 따라서 개념적인 공정 프로세스를 작성하는 것이 가능하다. 그림 1은 이러한 공정을 개략적으로 나타낸 순산소 발전 연소시스템 공정도이며, 순산소 미분탄 보일러 공정은 기존의 미분탄 연소 보일러와 비교하여 구별되는 세 가지 특징이 있다. 즉 연소용 공기는 보일러 전에서 공기 분리설비에서 심냉법에 의해 분리되어 산소만 (95mol% 산소, 2mol% 질소, 3mol% Argon) 연소공정에 공급되고, 질소와 Argon은 대기로 배출된다. 또한 보일러에서 배출되는 연소가스 중 약 2/3 이상이 재순환되어 버너로 순산소와 혼합되어 공급됨으로써 급격한 화염온도 상승을 방지하고 각 전열면에서 열흡수 균형을 맞추는 게 된다는 특징과 보일러에서 배출되어 다시 재순환된 약 2/3의 전체 배가스를 제외하고, 나머지 연소가스는 냉각되어 함유된 수분을 제거하고 비활성 가스 분리 설비와 CO<sub>2</sub> 압축기를 거쳐 110 bar까지 압축되어 회수 저장하게 된다.

그림1의 순산소 공정시스템은 산소생산설비(ASU)에서 대기 중에 함유된 산소와 질소의 비등점 차이를 이용, 분리하여 95%이상의 산소를 생산한다. 생산된 산소는 보일러 출구

에서 재순환 된 연소가스와 혼합되어 미분탄과 같이 보일러 내로 투입되어 연소하게 된다. 연소된 가스는 각종 전열면에서 열 흡수된 후, 온도가 저하되어 보일러 출구로 배출된다. 이때 배출된 가스온도는 약 350°C 내외로 가스-가스 예열기와 전기 집진기를 거치면서 약 275°C로 저하 된다. 전기 집진기를 통과한 배가스 중 일부는 주 연소용 산소와 혼합되기 위해서 재순환 되며, 이때 재순환 되는 가스를 2차 재순환 가스라 한다. 2차 재순환 가스는 수분 함량이 25%로 높으며, 2차 재순환 가스를 제외한 나머지 가스는 탈황설비와 냉각장치를 거치면서 황산화물과 수분이 제거되며 이때 가스온도는 약 40°C 내외로 저하하게 된다. 이중 일부 가스는 석탄 건조와 이송을 위해 재순환 되며, 이 때 재순환 되는 가스를 1차 재순환 가스라 한다. 저온의 1차 재순환 가스는 가스-가스 재열기를 거치면서 약 270°C 내외로 온도를 상승시켜 미분기에 보내지게 된다. 여기서 1차 재순환 가스의 산소 혼합은 미분기 내에서 자연발화 등을 방지하기 위해서 5% 이내로 제한하고 있으며, 가스-가스 재열기에서 가열되기 전에는 가스온도가 낮아 저온부식 발생 우려가 높으며, 사용탄의 유황 함량에 따라 탈황설비와 냉각장치 설비에 대한 저온부식 방지 대책 마련이 필요하다. 본 논문에서는 순산소 연소 발전시스템의 기본 구성도와 실증 발전소 설계기준을 바탕으로 설비구성 측면에서 여러 Case로 공정 해석전용 툴인 VMGSim을 사용하여 공정해석을 수행하였다.

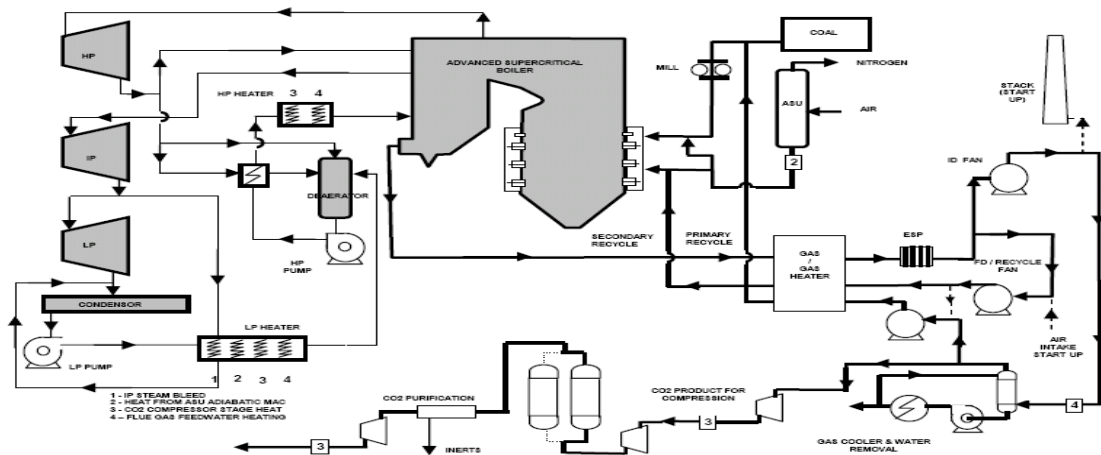


그림 1 순산소 미분탄 연소 발전시스템 공정도

공정해석에 사용된 설계탄의 공업분석 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. 순산소 연소 실증발전소 설계탄의 공업분석

분석항목 (Air Dry)	단위	석탄규격	
		설계탄	범위탄
총 수분	wt%	18	Max. 25
수분	wt%	10.3	Max. 18
휘발분	wt%	40.0	Min. 27
고정탄소	wt%	46.2	Max. 58
회분	wt%	3.5	Max. 12
열량	kcal/kg	5,800	Min. 5200
회용점(IDT)	°C	1,180	1,050
분쇄도	HGI	50	Min. 45

## 2. 공정 해석 Case

설비에 따른 공정해석 Case는 총 8개 Case로 나누어 공정해석을 수행하였고, 1~4번 Case는 재순환 가스의 Suction 위치 변화와 1, 2차 가스의 분배방법, 산화제인 산소의 예열 횟수를 구분하여 공정해석을 수행 하였으며, 5~8번 Case는 효율 상승을 주목적으로 공기 예열기 출구 가스의 현열의 회수 방법에 따라 각각의 Case로 나누어 공정해석을 수행하였고 Table 2와 같다.

Table 2. 설비구성에 따른 공정해석 Case

구분	석탄 건조 유, 무	재순환가스				산소예열 횟수				
		재순환 위치	Wet Flue gas	Dry Flue gas	1차 산소	2차 산소				
Case 1	0	ID fan 후단	2차가스로 재순환	1차가스로 재순환	1회	2회				
Case 2	X	ID fan 후단	2차가스로 재순환	1차가스로 재순환	1회	1회				
Case 3	0	ID fan 전단	Wet 가스와 Dry 가스를 혼합하여 1차 가스와 2차 가스로 다시 분류		1회	1회				
Case 4	X	ID fan 후단	Wet 가스와 Dry 가스를 혼합하여 1차 가스와 2차 가스로 다시 분류		1회	2회				
Case 구분	집진기 온도	2차 재순환가스				1차 재순환가스				
		냉각	세정	건조	재열	냉각		세정	건조	재열
Case 5	Cold	0	0	0	0	공기예열기 위치: 집진기 전단	FWH 위치 : ESP 후단	0	0	0
Case 6	Warm	0	0	X	0	공기예열기 위치: 집진기 전단	FWH 위치 : ESP 후단	0	0	0
Case 7	Hot	X	0	X	X	공기예열기 및 FWH 위치 : 집진기 후단(직렬배열)		0	0	0
Case 8	Hot	X	0	X	X	공기예열기 겸 FWH 위치 : ESP 후단		0	0	0

Case 1의 경우 가스 재순환의 흡입 위치를 ID Fan 후단에 위치하도록 하였으며, 수분에 의한 손실을 방지하기 위하여 Coal Dryer를 설치하였고, 연소 효율을 높이기 위해 저온인 산소를 가열하기 위해 별도의 가스-산소 예열기를 설치하였으며, 여기서 나온 주연소용 산소는 2차 재순환 가스와 혼합되어 재가열 되도록 하였다. 2차 재순환 가스를 제외한 나머지 가스는 열교환기를 이용하여 급수(Feed Water)에서 열을 가능한 최대 회수토록 하였으며, 여기서 온도 저하된 배기가스는 응축기에서 수분을 제거하고 1차 재순환가스와 CO<sub>2</sub> 회수 설비로 각각 보낸다. Case 2의 경우 설비의 구성을 좀 더 단순화하기 위해서 Coal Dryer와 산소 가열기 설치를 제외시켰으며, Case 3의 경우 설비구성 측면에서는 Case 1과 유사하나, 1, 2차 재순환가스를 혼합한 후 다시 재분배 되도록 설비를 구성하여, 탄의 수분 함량과 유황함량에 따라 1차 및 2차 재순환가스의 수분 함량을 조정토록 하였다. Case 4의 경우 시스템 구성은 기본 개념은 Case 3과 유사하나 설비구성을 단순화하기 위해 Case 2와 같이 Coal Dryer와 산소 가열기 설치를 제외시켰다.

Case 5~8의 경우는 설비구성을 단순화 하는 측면에서 Case 2를 기본으로 하여 최적의 배기가스 회수 방안과 저온부식 방지를 고려하여 설비를 각각 구성하였다. Case 5의 경우 모든 배기가스가 급수가열기와 수분응축기를 통과하면서 수분을 제거토록 하여 재순환 Fan의 소형화와 저온부식을 방지, 배기가스 열 회수를 목적으로 구성하였다. Case 6의 경우는 1차, 2차 재순환가스를 각각 분리하여 설비를 구성하였으며, 2차 재순환 가스는 가스-가스 열교환기를 거쳐 고온집진기를 거친 후 바로 순환되도록 하였으며, 1차 재순환 가스는 급수가열기와 수분 응축기를 통과하여 수분이 제거 된 후 재순환 되도록 하였다. Case 7, 8의 경우는 가스-가스 예열기와 2차 재순환 가스 흡입 위치를 변경하였고 Table 3과 같이 분석되었다.

Table 3. Case별 특성 분석 및 장,단점 분석

CASE	시스템 특성	장, 단점
설비 구성 방법	Case 1 - 재순환 가스 흡입 ID FAN 후	- 외부 공기 누입을 최소화 - ID FAN 대형화
	Case 2 - Coal Dryer 설치	- 수분 다량 저급탄 사용 가능 - 시스템 구성 복잡
	Case 3 - 저온 산소 Heater 설치	- 폐열 이용, 효율상승 - 산소 가열로 안정성 저하
	Case 4 - 1, 2차 재순환 가스의 혼합 방법	- 여열이용으로 효율상승 - 저온부식 발생
	Case 5 - 1, 2차 재순환가스 냉각, 수분 제거	- 저온부식 발생 저감 - 저온 EP 사용 가능 - 효율 저하
	Case 6 - 1차 재순환가스 수분 제거 - 2차 재순환가스 부분 냉각	- EP 사용온도 (230℃~270℃)
	Case 7 - 2차 가스 냉각되지 않음 - 배기가스 여열 급수에서 회수	- EP 사용온도 (300℃ 이상) - 효율상승
	Case 8 - 1차 재순환 가스 여열로 이용 증대	- EP 사용온도 (300℃ 이상) - 효율상승

## 결론

설비 구성에 따른 각 Case의 특성 및 장, 단점 분석, 그리고 공정해석 결과, 기존의 공기 연소와 순산소 연소를 동시에 만족하면서 운전이 가능한 실증발전소 시스템 구성은 Case 6 이 가장 바람직한 것으로 해석되었다.