



# THEME 01

# 석탄가스화 복합발전에서의 고온·고압 입자제어 기술

정창호 | 두산중공업(주) 기술연구원 대리 | e-mail : changho1.jung@doosan.com  
백민수 | 두산중공업(주) 기술연구원 수석 | e-mail : minsu.paek@doosan.com

고효율 청정 발전기술인 석탄가스화 복합발전(IGCC)에서 고온·고압의 연소성 합성가스에 함유된 비회(fly ash) 입자를 제어하는 집진 공정으로 사이클론, 필터 및 습식 스크러버 등이 사용된다. 이 글에서는 분류층 건식가스화 공정이 적용된 IGCC 플랜트의 입자제어를 위한 집진 기술에 대하여 소개하고자 한다.

## 석탄가스화 복합발전의 특성 및 구성

석탄가스화 복합발전(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)은 가스화설비와 복합발전설비가 결합된 형태의 발전으로 기존 화력발전에 비해 발전효율이 높고, 환경 친화적인 차세대 화력발전 기술이다. 또한, 석탄가스화 기술은 전기뿐만 아니라, 석탄으로부터 합성가스, 수소, 액화석유 및 다양한 화공 제품을 생산할 수 있으며, 수소산업화, 연료전지 등 미래 에너지 기술들과 연계할 수 있는 기반기술이다.

IGCC 플랜트는 그림 1과 같이 크게 공기분리 설비

(air separation unit), 가스화 설비(gasification unit), 복합발전 설비(combined cycle unit)로 구성된다. 공기분리 설비에서는 대기에서 질소와 산소를 분리하여 가스화 설비와 복합발전 설비에 공급하는 역할을 한다. 가스화 설비에서는 가스화기에서 석탄, 산소 및 증기를 이용하여 가스화 반응을 일으켜 고온·고압의 가연성 연료인 합성가스를 만들어, 집진설비와 탈황 설비를 거쳐 비회(fly ash) 입자와 황 성분을 제거시킨다. 정제된 합성가스는 복합발전 설비인 가스터빈과 증기터빈을 구동시켜 전기를 생산한다.

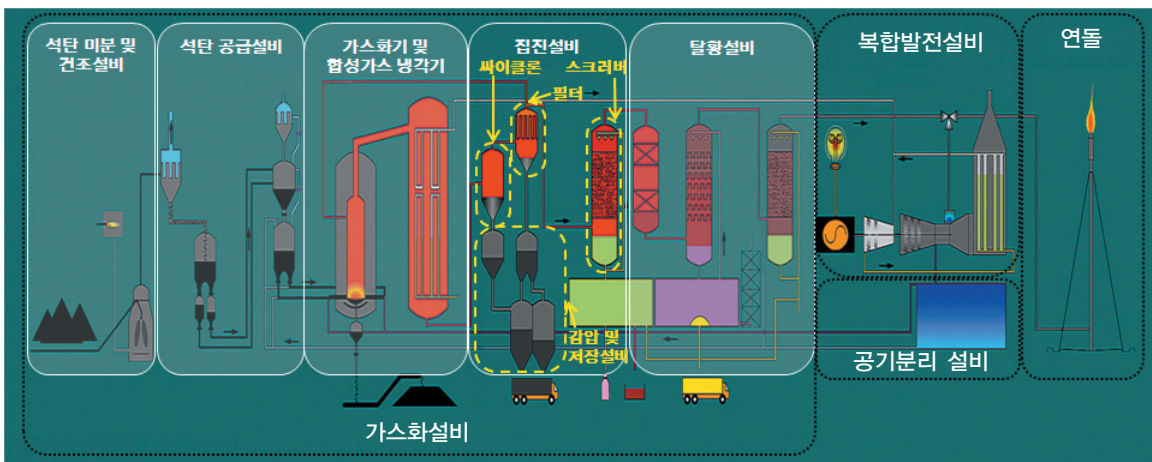


그림 1 석탄가스화 복합발전 공정 및 집진설비 구성도(출처 : Shell 공정)

## IGCC 플랜트의 집진설비

석탄 화력발전은 상압에서 석탄을 완전연소시켜 불활성화 된 배기가스 내 비회를 제거하기 위해 전기 집진기(ESP: Electrostatic Precipitator)나 여과포 집진기(bag house)를 사용하지만, IGCC 플랜트에서는 고온·고압의 가연성 연료인 합성가스 내 비회를 제거하기 때문에 그림 1에서와 같이 사이클론(cyclone), 필터(filter), 습식 스크러머(wet scrubber), 감압 및 저장설비 등을 사용한다. 전기 집진기와 여과포 집진기는 IGCC 플랜트에서 요구하는 배출 기준을 만족하지 못하며, 대용량의 고압 용기를 만들기 어렵고, 화재 및 폭발위험이 있어 사용할 수가 없다. 또한 석탄 화력발전은 발전소 환경기준치 수준에서 만족하면 되지만, IGCC 플랜트에서는 후단의 탈황 설비 및 가스터빈이 안정적으로 운전되기 위해 비회 미세입자를 99.9% 이상 제거하여 청정화된 상태(ash-free)의 합성가스가 공급되어야 한다.

IGCC 플랜트에 적용되는 집진 설비인 사이클론, 필터, 습식 스크러머 등에 대한 보다 상세한 설명은 다음과 같다.



그림 2 세라믹 캔들 필터(출처 : 폴(PALL) 사)

## 사이클론 공정

사이클론은 원심력을 이용하여 비회를 포집하는 집진설비로, 합성가스 냉각기 후단에 설치되며, 10 $\mu$ m 이상 비회의 90% 정도를 포집할 수 있어 효과적이다. 사이클론의 원리는 비회를 함유한 합성가스가 상단부에서 접선 방향으로 유입되어 원심방향으로 회전하면서 비교적 입자가 큰 비회는 원심력에 의하여 가장자리로 밀려나고, 밀려난 비회는 중력에 의하여 하부로 떨어진다. 사이클론은 비교적 간단한 구조 때문에 제작과 유지보수 비용이 저렴하고 고온에서 운전이 가능하나, 10 $\mu$ m 이하 비회에서 포집효율이 낮고 비교적 큰 압력손실(50kPa 이상)이 발생한다.

사이클론이 설치되면 후단의 필터설비로 유입되는 비회량을 줄여 필터의 역세정 주기를 늘려 필터수명을 향상시킬 수 있으나, 사이클론 하단에 고압의 비회를 감압하는 설비가 추가로 설치해야 하는 단점이 생겨, 회성분이 많지 않은 석탄을 사용할 경우 설치하지 않는 것이 바람직하다.

## 필터 공정

IGCC 플랜트에서 필터 공정은 고온·고압의 운전 조건을 만족하고, 99.9% 이상의 높은 집진 효율로 탈황 설비 및 가스터빈을 보호한다. 필터는 운전 조건 및 경제성에 따라 재질, 형상, 배치 및 세정방법 등이 결정된다. 필터의 재질은 세라믹 계열과 금속 계열이 사용되며, 세라믹 필터는 고온과 부식에 잘 견디고 경제성이 좋은 반면 내구성이 약한 문제점이 있고 금속 필터는 내구성이 강한 반면 고가인 문제점이 있다. 분류층 건식 가스화 공정에 대표적인 공정사인 셸(SHELL) 사는 내식성과 경제성 향상을 위해 유럽, 중국 등의 다수의 석탄가스화 플랜트에 세라믹 필터를 설치하였다. 대량의 합성가스 내 비회를 포집하기 위



해서는 집진장치 내에 여과면적이 넓고, 필터에 남아 있는 비회를 효과적으로 제거할 수 있는 튜브(tube) 형상의 캔들(candle) 필터가 주로 사용된다. 현재 주로 사용되는 고온용 집진 세라믹 필터는 필터의 표면에 형성된 비회의 덩어리를 제거하는 탈진성능과 필터의 내구력 때문에 직경과 최대 길이가 한정되어 있으며, 전체적인 형상은 그림 2와 같다.

필터의 성능은 비회의 여과와 여과된 비회로 인한 필터 전·후단의 차압에 의해 결정된다. 필터의 총 차압은 필터 자체 차압, 입자 잔여층에 의한 차압, 임시 분진층에 의한 차압으로 구성되며, 필터의 기공률, 가스 조성, 미세입자의 특성 및 운전시간 등에 의해 결정된다. 필터의 여과과정은 필터 코팅층에서 비회가 표면에 부착되고 합성가스는 필터를 통과하는 표면 여과작용과 역세정을 통해 비회를 제거하는 과정으로 이루어진다. 필터가 최초로 사용되면 코팅층 표면에 기공보다 작은 비회가 점착되어 잔여층을 형성하여 필터의 기공을 막아 잔여층에 의한 차압이 높아지게 된다. 필터의 기공보다 큰 비회는 지속적으로 유입되면서 잔여층 위에서 성장하면서 차압이 발생하게 된다.

필터의 운전시간 증가에 따른 역세정 주기의 변화는 그림 3과 같으며, 최초 역세정을 시작으로 주기적으로 반복된다. 역세정 주기는 비회의 유입이 많을 경우 필터 전·후단의 차압이 설계차압까지 도달하는 시간에 의해 결정된다. 비회의 유입이 적을 경우에는 설계차압까지 도달하지 않았어도 필터에서 비회가 경화되어 역세정 효과가 떨어지는 것을 방지하기 위해 일정 시간이 지나면 연속적으로 시행된다. 필터가 장시간 운전되면 잔여층에 의한 차압이 점차 증가하고, 임시 분진층에 의한 차압이 설계차압까지 상승하는 속도가 빨라져 역세정 주기가 점차 짧아지게 되며, 역세정 주기가 짧아질수록 필터에 전해지는 충격이 잦

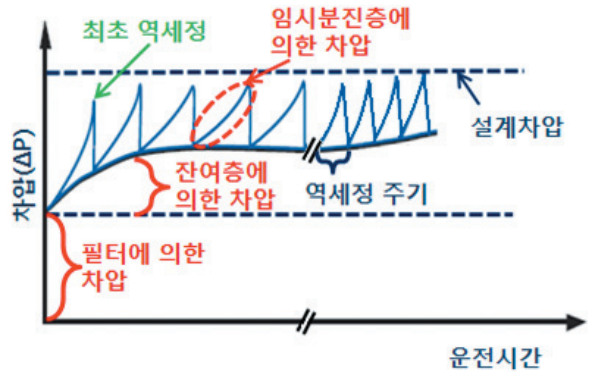


그림 3 필터 운전시간 증가에 따른 역세정 주기 변화

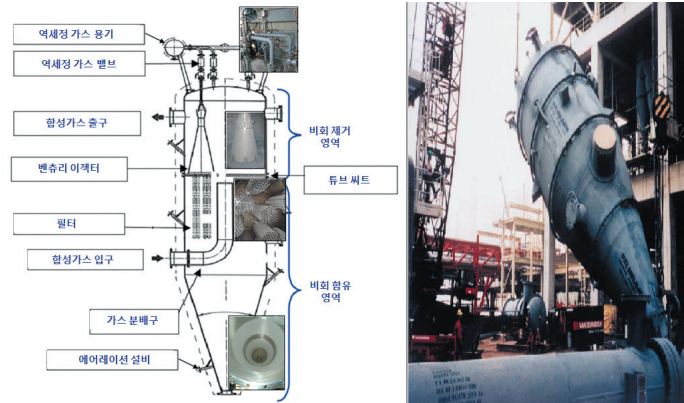


그림 4 폴(Pall) 사 세라믹 필터 설비의 내·외부 모습

아져 파손의 우려가 증가한다. 또한 미세입자의 잔여층에 의해 필터의 기공도가 70~80%까지 증가하게 되면 필터의 수명을 다한 것으로 보며, 유지·보수기간을 이용하여 특수 세정 방법을 통해 잔여층을 일부 제거하여 재활용 할 수 있다. 역세정은 유입 압력의 두 배 이상의 역세정 가스로 짧은 시간에 필터 내부에서 압력을 주어 털어내게 되는데, 태안에 설치되는 300MW IGCC 1호기 필터 설비의 경우 운전압력은 약 40bar이므로 탈진압력은 80bar 이상이 필요하다.

상용 IGCC 플랜트에서 대표적으로 사용되는 폴(Pall) 사의 고온·고압용 세라믹 필터 설비의 전체적인 형상은 그림 4와 같으며, 상단에는 역세정 설비, 중앙 부분은 필터와 필터를 지지해주는 튜브 시트(tube



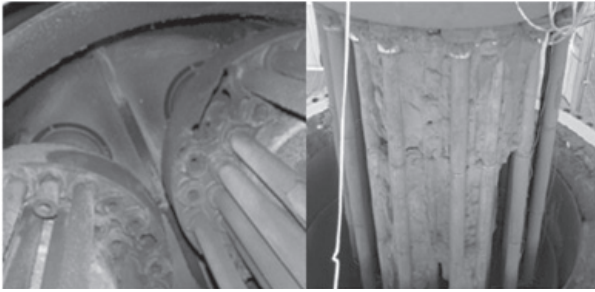


그림 5 필터의 손상(좌측 : 필터 파손, 우측 : 분진 가교층 발생)

sheet) 및 배출구, 하부는 원뿔 형태로 쌓인 비회를 원활히 배출하기 위한 에어레이션(aeration) 설비 등으로 구성되어 있다. 역세정 설비는 운전압력의 두 배 이상의 고압 역세정 가스가 용기에 저장되어 있다가, 역세정 가스 밸브가 개폐되는 짧은 시간( $10^{-1} \sim 10^{-2}s$ ) 동안 벤투리 이젝터(venturi ejector)를 통해 고압의 가스가 필터에 전달되어 그 충격에 의하여 탈진이 이루어진다. 필터는 다수의 필터가 집진설비 안에 설치되기 때문에 집진설비의 크기 최소화 및 탈진효율을 높이기 위해 수십 개씩 다발로 묶는 클러스터링(clustering) 기법을 사용하여 장착한다. 필터에서 떨어진 비회는 하부에 쌓여 있다가, 주기적으로 하단의 감압설비로 배출되어 저장 및 처리된다. 비회의 원활한 배출을 위해 필터 설비 하부는 원뿔 모양으로 제작하며, 경화되는 것을 방지하기 위해 에어레이션 설비에서 지속적으로 불활성 가스를 주입한다.

발전 시스템의 필터설비는 고온, 부식, 마모 및 기계적 응력 환경에서 1.5년 이상 안정적으로 운전될 수 있는 높은 신뢰도가 요구된다. 초기 IGCC 플랜트에서는 그림 5와 같이 필터 파손 및 성능 손상으로 인하여 플랜트 전체의 운전성이 떨어졌다. 필터는 수백 개 중 한 개만 파손 되도 차압에 의해 비회가 파손된 필터에 집중되어 유입되기 때문에 후단 탈황 설비 및 가스터빈의 손상을 가져온다. 또한 제대로 탈진이 되지 않으면 분진 가교층이 형성되어 필터가 원활한 기능을 할 수 없게 된다.

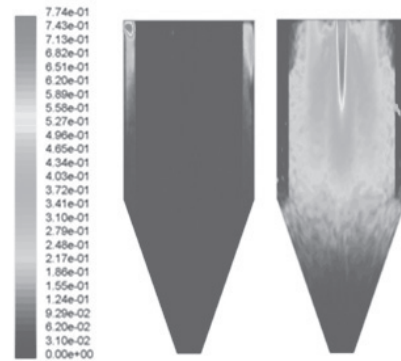


그림 6 유입위치 및 가리개 설치에 따른 미세 입자의 부하 특성 비교(좌측 : 접선방향 유입, 우측 : 하단방향 유입 / 자료출처 : Korean Chem. Eng. Vol. 65(5))

이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 방면에서 필터의 효율 및 신뢰성 확보를 위한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법으로 탈진방법 개선을 위한 벤투리 이젝터의 형상, 필터 배열, 필터의 내구성 향상, 안전 필터 설치, 이중 구조 필터 및 일체형 필터 클러스터 등이 연구되고 있다. 또한 그림 6과 같이 합성가스의 유입 방식을 개선하여 비회의 부하를 줄일 수 있는 비회의 유입위치 다변화 및 가리개 설치 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

### 습식 스크러버 공정

습식 스크러버는 물을  $150 \sim 300 \mu m$ 의 미세 물방울(mist)을 비산하여 필터에서 제거하지 못한  $1 \mu m$  이하의 비회, 중금속 및 수용성 산성가스를 제거한다. 석탄의 연소과정에서 발생하는 미량의 수용성 산성가스는 탈황 설비와 가스터빈 손상을 가져오고, 기기의 부식을 불러올 수 있기 때문에 습식 스크러버를 통해 추가적으로 제거한다. 가스터빈의 안정적인 운전을 위해서는 표 1과 같이 유해물질들을 가스터빈 운전 규제치 이하가 되도록 한다. 습식 스크러버 설비는 구조는 간단하지만 압력손실과 부식에 대한 잠재성이 크고

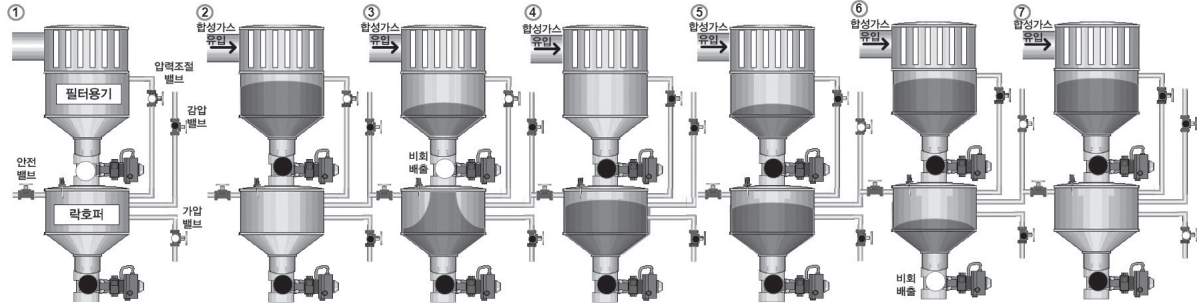


그림 7 비연속적 감압방식 운전 개념 순서도(1단계: 운전압력까지 최초 가압, 2단계: 연속적인 비회 포집, 3단계: 필터 용기의 비회를 락 호퍼로 배출, 4단계: 필터 용기와 락 호퍼 차단, 5단계: 차단된 락 호퍼 감압, 6단계: 비회 배출, 7단계: 락 호퍼를 재가압 후 2단계로 복귀)

표 1 가스터빈 운전을 위한 유해물질 규제치

유해물질	기준치
황화물(H <sub>2</sub> S, COS, CS <sub>2</sub> )	20ppmw 이하
수소 할로겐화물(HCl, HF)	1ppmw 이하
납(Pb)	1ppmw 이하
바나듐(V)	0.005ppmw 이하
나트륨(Na), 칼륨(K), 칼슘(Ca)	0.003ppmw 이하

(출처 : Ron Zevenhoven, Pie Kilpinen, "Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases")

산성 유출수를 수거하여 처리하는 공정이 추가 설치되어야 한다. IGCC 플랜트에서는 효율과 운전성 향상을 위해 습식 스크러머 공정을 대처할 수 있는 건식 공정 개발이 필요하다.

### 감압 비회 배출 공정

IGCC 플랜트는 고압으로 운전되기 때문에 고압의 비회를 처리하기 위해서는 상압까지 낮출 수 있는 감압설비가 필요하다. 감압설비에는 락 호퍼(lock hopper)를 이용한 비연속적 감압방식과 연속적 감압방식이 있다. 비연속적 감압방식은 연속적 감압방식에 비해 구조가 단순하고 운전 조건에 제약을 덜 받는 장점이 있지만, 비회를 저장할 수 있는 충분한 저장 공간이 필요해 설비가 커지는 단점이 있다. 비연속적 감압방식의 운전 개념은 그림 7과 같은 순서로 작동된다.

감압공정 후에 고온의 비회 배출과정에서 소량의 합성 가스가 동반 배출되기 때문에 불활성 가스를 비회에 불어 넣어 합성가스 냉각 및 제거공정이 필요하다.

### 맺음말

IGCC 플랜트는 고효율, 친환경적 석탄 화력발전소이며 합성천연가스, 암모니아 및 수소 생산 등의 석탄 화학 산업의 핵심인 석탄가스화 공정을 포함하고 있어, 미래에너지 사업의 핵심중의 하나가 될 것이다. 현재 국내에서는 '한국형 300MW급 IGCC 설계기술 자립 및 실증플랜트 건설' 과제를 지식경제부, 한국에너지기술평가원의 지원 하에 한국서부발전, 두산중공업, 한국에너지기술연구원 및 부산대학교 등 국내 산·학·연이 함께 참여하여 수행 중이다. 이를 통해 단기적으로는 플랜트 설계, 제작, 건설 및 운전기술을 확보하고자 한다. 또한 중장기적으로는 한국형 고유 가스화 공정 개발, 설비 국산화, 설계표준화 및 신뢰도 향상 등을 목표로 연구 개발을 진행 중이다. 입자제어를 위한 집진설비에서는 고온·고압하에서 고성능 및 고신뢰도 집진 제어 기술이 중요하며, 핵심 요소기술의 국산화 개발, 성능향상 및 운전기술 확보를 위한 연구개발이 진행 중이다.