

배연탈황공정

이 형근

한국에너지기술연구원(hklee@kier.re.kr)

2007년 11월 19일자 조선일보에 흥미 있는 기사가 실렸다. “2030년까지 세계에서 수요가 가장 많이 늘어날 에너지원은?” 답은 석유가 아니라 석탄이다. 국제에너지기구(IEA)의 최근 보고서에 따르면, 석탄 수요는 매년 2.2%씩 증가해 2030년에는 2005년에 비해 73% 늘어날 전망이다. 석유(37%)나 천연가스 수요 증가율을 앞지르는 증가율이다. 미국은 최근 석탄 화력발전소 착공 건수가 지난 7년 이래 최고를 기록했으며, 중국은 전력 생산의 대부분을 석탄화력 발전에 의존하고 있는데, 매주 한 기씩 석탄화력발전소가 늘어나고 있다.

이와 같이 석탄을 이용하여 전기를 생산할 때 석탄 속에 포함된 황성분은 연소 중에 황산화물(SOx)로 전환되며, 이것이 공기중으로 배출되면 산성비를 만들고 사람의 건강을 해치게 된다. 이러한 황산물을 제거하는 시스템을 배연탈황(Flue Gas Desulfurization : FGD) 공정이라고 한다.

배연탈황공정은 황산화물을 비롯한 황화합물을 반응제 및 촉매를 이용하여 흡수, 산화, 환원, 흡착 등의 방법을 통해 제거하는 기술로 1970년대 이후 전 세계적으로 급격한 산업발전과 생활수준 향상으로 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 각 산업공정에서 부수적인 시설이 아니라 필수설비로 인식되고 있다.

이에 따라 미국, 일본, 독일 등 기술 선진국이 중심이 되어 배연탈황공정에 대한 연구, 개발이 활발히 이루어져 화력발전소를 비롯한 다양한 규모의 산업용 배출시설에 대해 다양한 공정이 설치되어 운전되

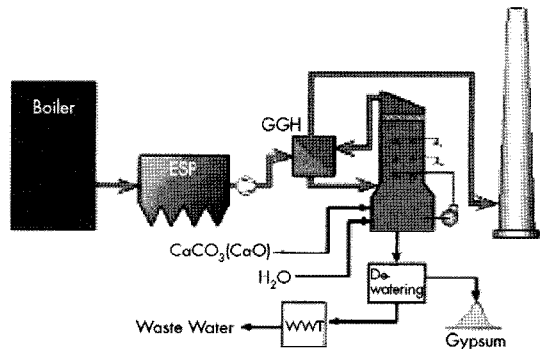
고 있다.

각 기술별 특성

배연탈황공정은 사용하는 반응제 및 반응온도에 따라 습식(wet), 반건식(semi-dry), 건식(dry) 공정으로 분류된다.

습식 탈황공정

습식 탈황공정은 물, 알칼리용액 등으로 배가스를 세정하여 흡수하는 방법으로서 1차 생성물이 용액 또는 슬러리 형태로 되고, 황산화물을 포함한 기체와 액체(반응제)의 반응이기 때문에 황산화물 제거율이 높고 운전이 쉽고 재활용 가능한 석고를 부산



[그림 1] 전형적인 습식 배연탈황공정



물로 얻을 수 있다는 장점이 있으나 초기 설치비가 많이 들고 황산화물이 제거된 후 굴뚝으로 배출되는 가스의 온도가 낮아 재가열이 필요하고 일부 공정에서는 폐수 등의 이차오염물을 생성한다는 단점이 있다.

그림 1은 습식 배연탈황공정의 구성도를 나타낸 것으로 본 공정의 기본원리는 연소과정에서 발생된 배가스를 집진기에서 분진을 제거시킨 후, 배가스가 흡수탑 내에서 알칼리 슬러리와 접촉하고 여기서 황산화물과 알칼리 반응제가 반응하여 황산칼슘(CaSO₄)과 같은 고형침전물을 포함하는 슬러지가 생기며, 이 생성된 슬러지는 탈수공정, 화학적 안정화공정을 거쳐 처리된다.

일본은 최종 생성물을 매립하는 대신 흡수탑 하부에 산화용 공기를 주입하는 강제산화기술을 개발하여 탈황 석고(Gypsum, CaSO₄ · 2H₂O)를 생성시키는 습식 석회석-석고 공정을 개발하였다. 이 공정에서 최종 생성물로 발생된 석고는 석고보다나 시멘트 원료로서 판매가 가능하므로 운전비의 절감과 자원 활용이라고 하는 장점을 갖게 되었으며, 현재는 전

세계적으로 대부분의 탈황공정에 이 기술이 적용되고 있다.

이러한 습식 석회석-석고 공정은 대형 발전소나 산업체에서 활용되고 있는 반면에 중소형 보일러에는 수산화마그네슘(Mg(OH)₂)을 반응제로 이용하는 공정이 적용되고 있다. 이 공정은 반응제의 공급 및 취급이 용이하고, 탈황효율이 95% 이상으로 매우 높고 다양한 배가스 처리가 가능하다. 또한 강이나 바다로 방류가 가능한 액상 폐기물을 배출하므로 이차오염을 억제할 수 있다(그림 2).

건식/반건식 배연탈황공정

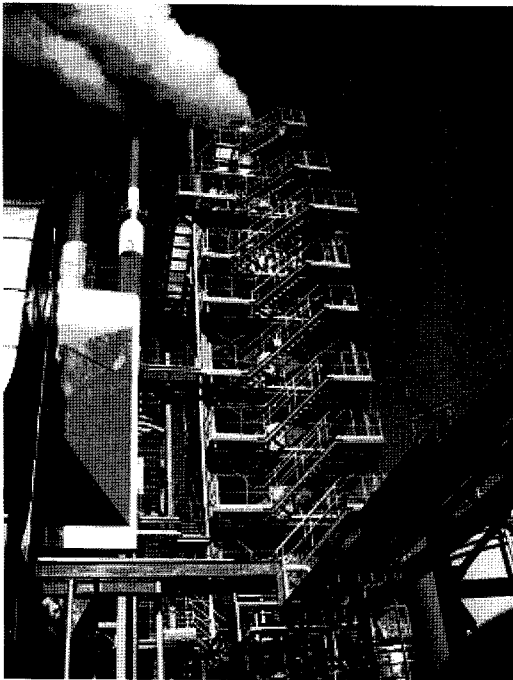
건식 공정은 높은 반응온도 조건에서 반응제로 석회석, 소석회, 알칼리 금속화합물 등과 같은 물질을 고체 상태로 사용하며 생성물이 고체로 발생된다. 따라서 습식 공정의 단점으로 지적되고 있는 폐수발생 및 배가스 재가열이 필요 없다. 또한 흡수탑과 같은 부피 큰 반응기 대신 기존의 덕트(duct)를 이용할 수 있기 때문에 초기 설치비의 절감을 기대할 수 있다.

그러나 대부분의 건식공정이 습식에 비해 반응시간이 짧아 황산화물 제거효율이 낮고, 다량의 미반응물이 발생한다는 단점으로 인해 습식에 비해 활용도는 그다지 높지 못하다. 이 공정에서 반응제는 연소로 내에 주입하거나 절탄기(economizer), 덕트 등 여러 곳에 주입할 수 있다.

그림 3은 미국의 청정석탄기술(CCT) 프로그램에 의해 개발된 건식 배연공정의 하나인 LIFAC(Limestone Injection into the Furnace and Activation of Calcium Oxide) 공정의 구성도를 나타낸 것으로 석회석 분말을 연소로 내 상부에 분사하여 고온에서 소성되어 생석회가 되도록 한 후, 반응기 내에서 조습(humidification)을 하면서 탈황반응이 일어나게 된다. 반응 후 생성된 고체 분말 중 일부는 이용율을 높이기 위하여 재순환하여 사용하고 나머지는 집진장치에서 제거된다.

반건식 공정은 슬러리 또는 용액상태의 반응제를 반건식 분무장치(spray dryer)에 분사하여 배가스 중의 황산화물을 처리하고 배가스가 포함하고 있는 열에 의해 반응생성물은 건조되어 고형물의 형태로 집진장치에 의해 제거되는 공정이다. 이 경우에 반응온도는 120 ~ 200℃ 정도이다.

그림 4는 일반적인 반건식 공정의 구성도를 보인

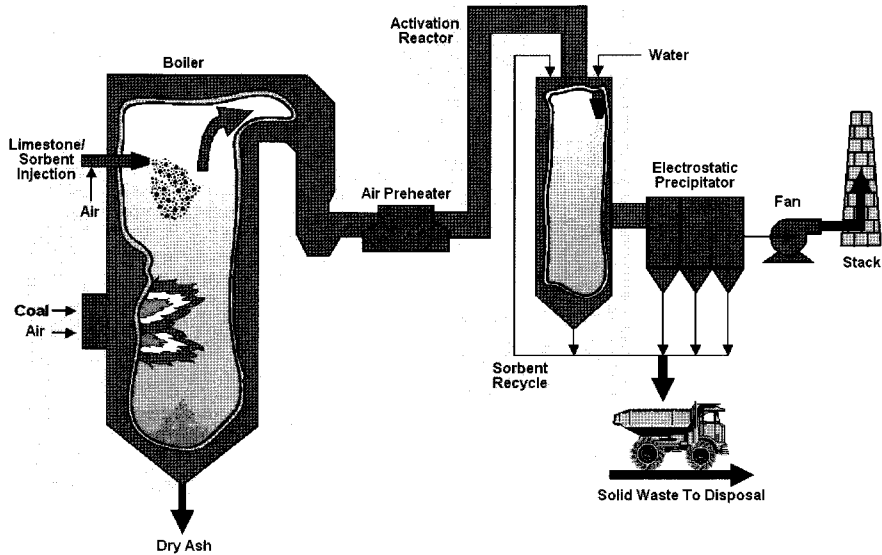


[그림 2] KIER에서 개발한 Mg(OH)₂ 배연탈황공정

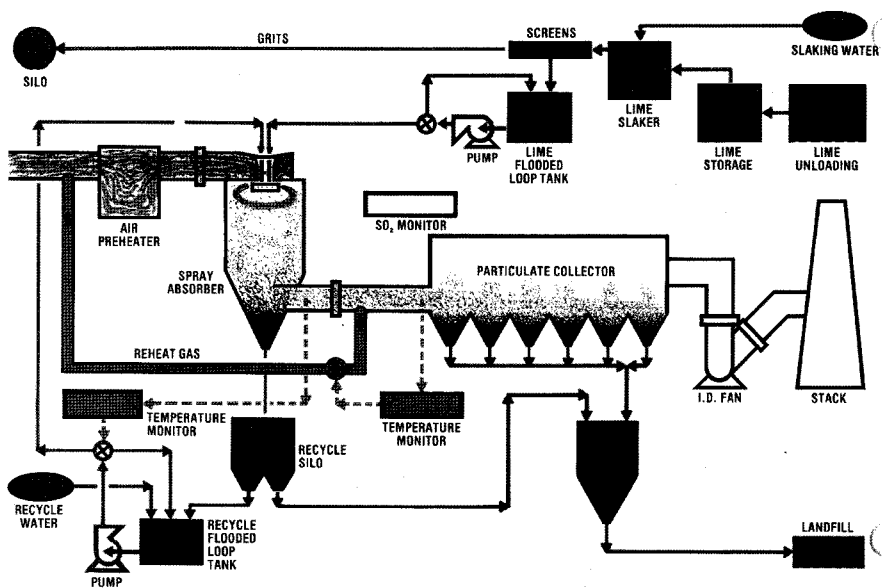
것이다. 연소설비에서 배출된 고온의 연소가스는 가스분배구를 통해 흡수조로 들어오면 분무기를 통해 유입된 미세 입자 상태의 소석회 슬러리(평균 직경 50 μm)와 반응하게 되며 액적의 체류시간은 10 ~ 15

초 정도가 된다. 반응생성물인 황산칼슘은 반응기 내부에서 건조되어 일부는 반응기 하부에서, 나머지는 집진기에서 포집된다.

이 공정은 여러 공장에서 배출되는 다양한 종류의



[그림 3] LIFAC 공정의 구성도



[그림 4] 반건식 분무흡수 공정의 구성도



연소가스를 처리할 수 있으며, 폐수나 슬러지를 배출하지 않는 장점이 있다. 또한 기존의 습식공정에 비해 공정에 비해 간단하고 소형이므로 시설투자비와 운전비가 높지 않으며, 반응기를 거쳐 집진장치를 통해 나가는 최종 배출가스의 출구온도가 포화온도 이상이므로 백연이 발생하지 않는 장점이 있다. 이 공정은 반응제 이용율과 황산화물 제거율이 낮고, 폐기물의 처리 비용이 부담이 되는 단점을 보이고 있다.

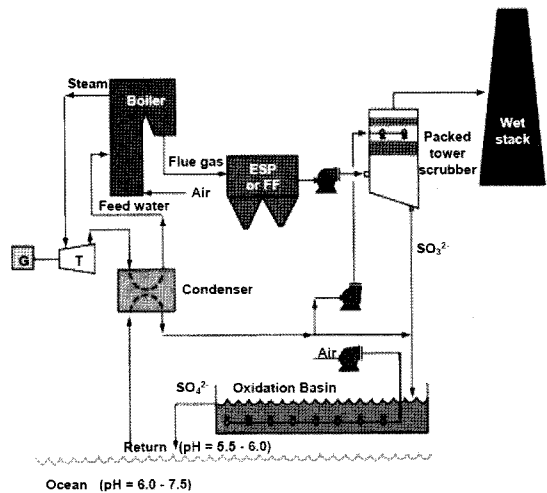
제 공급이나 반응 생성물의 처리에 대한 부담 없이 높은 탈황효율을 얻을 수 있는 공정으로 평가받고 있다. 이러한 조건은 바다를 운항하게 되는 선박에 최적의 탈황공정으로 평가되고 있다. 이에 따라 Marine Energy 사에서는 Eco-Silencer라는 불리는 공정을 개발하여 선박에 설치하여 운전 중이며, 탈황효율은 95%, 분진 제거율 80%, NOx도 15% 정도 제거되고 있다. 그림 6은 이 공정의 개념도를 나타낸 것으로 하부의 해수에 잠겨있는 관로를 통해 가

기타 공정

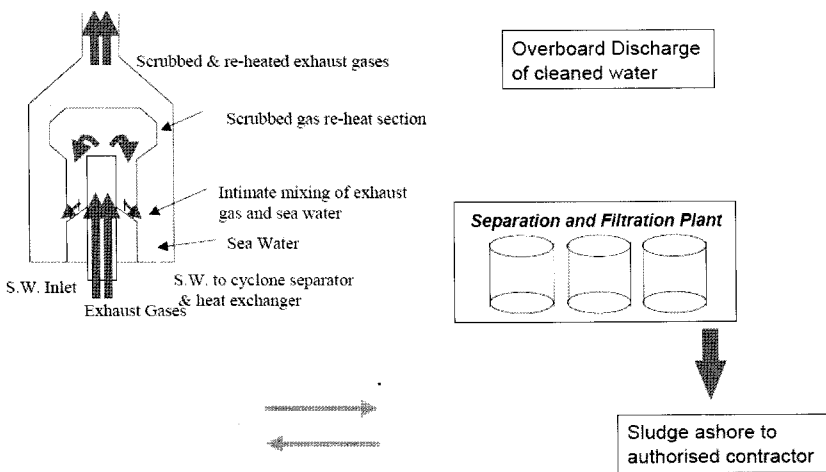
• 해수를 이용한 탈황

해수 탈황(sea water scrubbing)은 바닷물 중 함유되어 있는 알칼리 성분(주로 아황산이온)을 이용하여 황산화물을 중화처리하고 반응생성물로 바닷물의 주요 성분중 하나인 황산염을 생성하여 배출시키므로 바닷물의 생태 조건에는 영향을 미치지 않는 공정이다. 따라서 알칼리 반응제 구입의 필요성이 없고, 고체 반응물의 생성이 없으므로 운전비 절감 및 운전이 용이하다는 장점을 갖고 있다. Alstom 사는 말레이시아 Manjung에 700 MW 규모 3기의 해수탈황공정을 2003년에 설치하여 운전중에 있으며 황산화물 제거 효율도 95% 이상을 유지하고 있다(그림 5).

이 공정은 바다 인근에 위치한 설비나 해수를 충분히 공급할 만한 조건을 갖춘 곳에서는 특별한 반응



[그림 5] Alstom사의 해수탈황공정 개념도



[그림 6] Eco-Silencer 해수탈황공정 개념도

스 중 오염물질이 해수에 흡수된 후 상부의 배출구를 통해 나가게 된다. 온도가 저하된 배가스는 가스 재가열 장치에서 재가열 되어 굴뚝을 통해 방출된다. 오염물질을 흡수한 해수는 여과장치를 거쳐 바다로 최종 배출되고 여과장치에서 걸러진 슬러지는 보관되어 기항지에서 처리된다.

국내외 기술 개발 동향

국내

한국전력연구원에서는 1992년부터 환경부의 G-7 과제로 발전용 배연탈황 기술개발 실용화 연구에 착수하였으며 10 MW급 파이롯 플랜트의 운전경험을 토대로 독자적인 한국형 배연탈황공정(KEPAR)의 개발에 성공하였다. 이 공정은 200 MW급 영동화력 2호기에 실증 적용되었으며 이후 영동화력 1호기와 서천화력 1, 2호기에 후속 적용되었다.

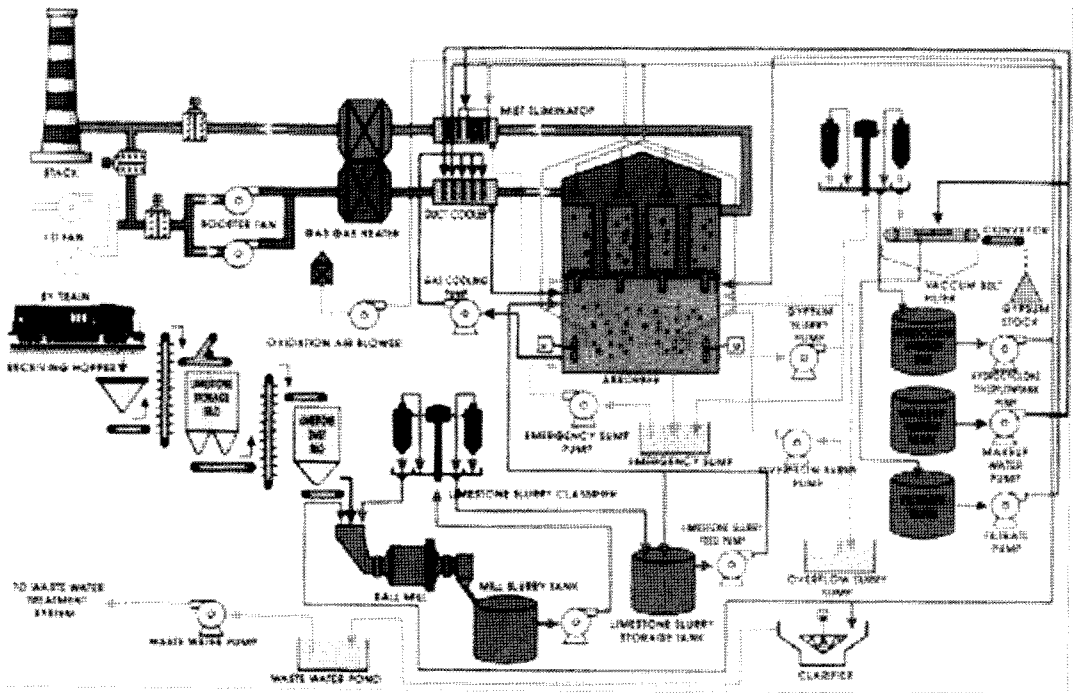
한국전력기술주식회사(KOPEC)에서는 이 기술을 평택화력발전소의 1기의 350 MW급 중유발전소에

적용하였으며, 2008년 까지 중부발전의 보령화력발전소 500 MW 규모의 2기를 설치 중에 있다.

한국에너지기술연구원(KIER)은 산업용 보일러의 배가스 처리에 적합한 $Mg(OH)_2$ 를 반응제로 사용하는 습식 탈황공정의 개발을 위한 연구를 수행하여 경기화학의 온산공장에 3 MW 규모의 탈황공정을 설치하였으며, 2003년에 목포 대불공단내 보위터한라제지의 100 ton/hr급 보일러의 배연탈황공정 상용화에 성공한데 이어 2004년에는 온산의 LG-Nikko사의 동계련로 폐가스 처리를 위한 배연탈황공정을 설치하여 97% 이상의 탈황효율로 운전되고 있다.

국외

외국의 경우, 습식 배연탈황공정에 관한 연구는 일찍이 1930년대에 영국에서 시작된 이래 50년 이상 계속적으로 발전되어 기술축적이 이루어졌으며 미국에서는 1950년대에 TVA(Tennessee Valley Authority)에 의해 연구가 시작되었으며, 그 후 많은 상용화 공정이 설치되어 있다.



[그림 7] 한국형 배연탈황공정 개념도



전세계에서 현재 운전 중에 있는 가장 오래된 FGD 공정은 1972년 미국기술에 의해 세워진 일본 Mitsui 알루미늄회사의 Omuta Unit 1(156 MW)이다.

최근 이 분야의 연구는 공정의 경제성 향상과 신뢰도 향상에 초점이 맞춰지고 있다. 이를 위해 보다 작은 설비로 많은 양의 배가스를 처리함으로써 설비규모를 줄일 수 있는 방안이 연구되고 있으며 요소장치 및 부품의 신뢰도를 높여 고장을 사전에 방지함으로써 여분의 흡수탑과 같은 부대설비를 줄이고 공정을 단순화하여 설치비용 및 운전비용을 절감하여 경제성을 향상시킬 수 있는 연구들이 진행되고 있다.

대표적인 연구사례로 일본의 미쯔비에서 개발한 DCFS(Double contact flow scrubber) 공정으로서 이것은 그림 8에서와 같이 슬러리 노즐이 하부에 위치하여 배가스와 같은 방향인 상부로 분무하게 되어 있어서 물의 높이로 탈황효율을 알 수 있으며, 기존공정에 비해 설치비용이 저렴하고 보수 유지가 간편하고 운전비용이 적게 든다는 장점을 갖고 있다. 이 공정은 이미 400 MW 규모의 산업체 보일러에 설치되어 운전되고 있으며, 99% 이상의 높은 탈황효율을 보이고 있다.

건식/반건식 배연탈황공정

국립환경연구원에서는 1993년부터 G7 project의 일환으로 알칼리슬러리에 의한 SO₂ 제거실험 및 중 소형 보일러를 대상으로 한 반건식공정 개발 연구를

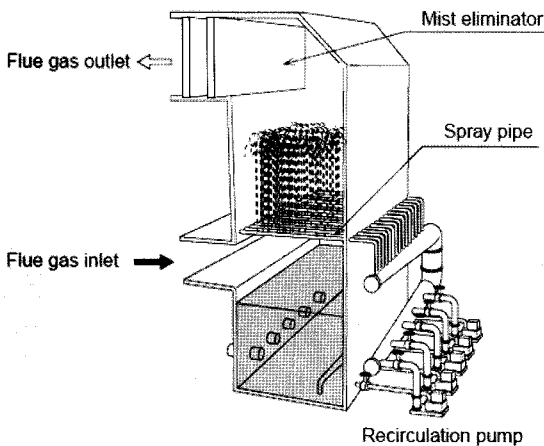
수행하였다. 한국기계연구원에서는 1990년부터 3년 동안 고분자 폐기물 소각시 생성되는 유해가스를 반건식 세정기를 설치하여 처리하는 실험이 이루어진 바 있다.

한국에너지기술연구소는 1997년부터 반건식 공정 및 건식 탈황공정에서 산성가스를 비롯한 다양한 대기오염물질을 동시에 처리할 수 있는 고효율 복합 흡수제 개발을 시도하였으며 최근에는 탈황/탈질 및 수은과 미세먼지를 단일 공정에서 제거할 수 있는 복합공정(hybrid APCD)에 관한 연구를 진행하였다.

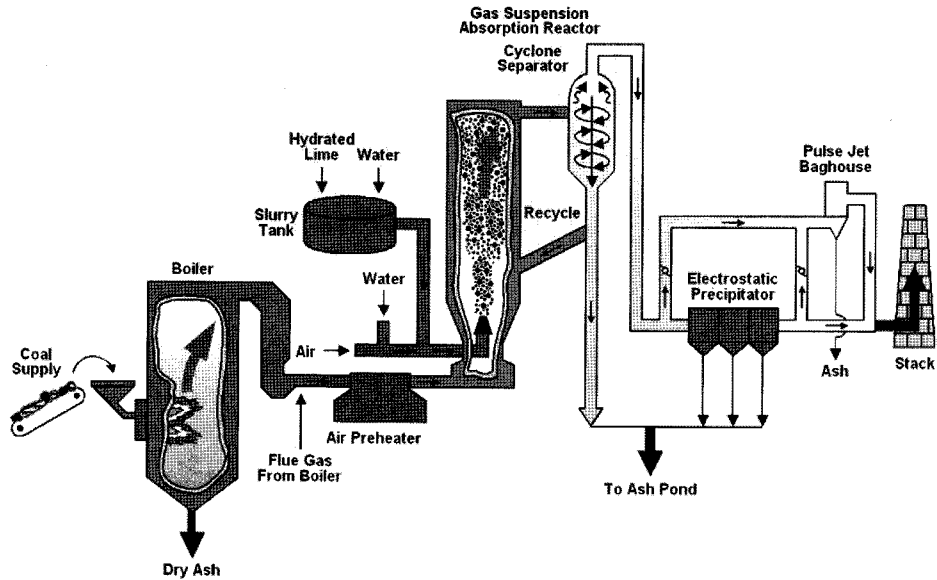
외국의 경우, 반건식공정은 석탄연소보일러의 배가스 탈황, 도시고형 폐기물 연소가스의 산성가스 제거 등에 이용되었다. 1970년대 중반에는 여러 회사들이 반건식공정을 산업용 또는 utility 보일러 등의 연소가스의 탈황을 위해 적용하고자 하는 연구를 시작하였으며, 1981년 최초의 배연탈황 반건식 세정공정의 운전이 시작된 이후 전세계적으로 활발하게 적용되고 있다. Niro Atomizer Company는 1982년 유럽에서 덴마크의 Kommunekemi 설비에 반건식 세정방법을 이용하여 유해폐기물소각 연소가스를 처리하였다.

1990년대 들어 미국의 CCT 프로그램의 일환으로 수행된 새로운 반건식 공정인 GSA(Gas Suspension Absorption) 공정의 경우 10 MWe 규모의 시범화 사업을 통해 최고 98% 정도의 탈황효율을 얻었으며, 이후 오하이오주의 Hamilton에 50 MWe 규모의 보일러 설비에 설치되어 운전되고 있다(그림 9). 최근에 미국 Marsulex사에서는 그림 10에서와 같이 로타리분무기(rotary atomizer)를 이용한 반건식 분무공정을 개발하여 보급하고 있는데, 2004년에는 캐나다 알버타의 발전소에 490 MW 규모의 공정을 설치하여 운전하고 있는데 탈황효율은 80% 정도이다. 이 공정은 습식 공정에 비해 탈황효율이 낮은 반면에 설치비용이 저렴하기 때문에 향후 중국을 비롯한 개발도상국에 많이 설치될 것으로 예상된다.

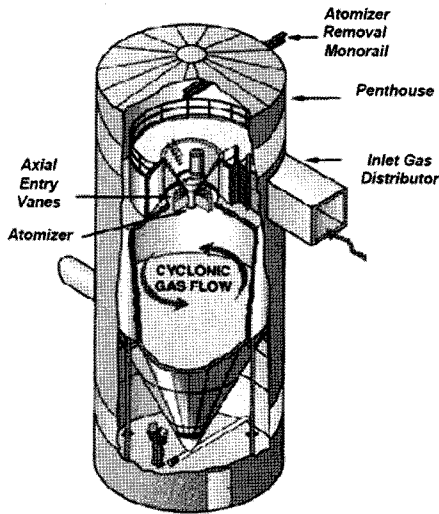
중국의 경우에는 남서전력설계원(southwest electric power design institute)에서는 Sichuan 성에 있는 베이마(Beima) 화력발전소에 70,000 Nm³/hr의 연소가스를 처리하는 반건식공정을 개발하였으며 이 공정의 황산화물 제거율은 80 ~ 90%이었다. 이 연구소는 이 연구 결과를 200 MW 석탄화력발전소에 적용할



[그림 8] 일본 미쯔비사의 DCFS공정



[그림 9] Air-Pol사의 GSA 공정의 구성도



[그림 10] MARSULEX의 반건식 분무공정 구성도

기술적 설계를 완성하였다. 특히 중국에서는 내륙지방에 물부족 현상이 심하기 때문에 물을 많이 소비하는 습식 공정보다는 건식/반건식 공정을 적극 권장하고 있으며, 이러한 기술 개발을 위해 많은 연구를 진행하고 있다.

건식 배연탈황공정으로는 1998년에 개발 완료된 LIFAC 공정의 경우 연소로에 석회석을 직접 주입하여 1차 탈황 후 활성화 반응조(Activation reactor)에서 2차 반응을 시킴에 의해 90% 이상의 탈황효율을 얻었다. 이 공정은 1990년 상업화 공정을 보급한 이래 2005년 까지 60 ~ 300 MW에 이르는 보일러에 적용하여 미국, 캐나다, 중국, 핀란드 등지에 8기가 상업적으로 운전되고 있다.

국내외 대응 현황 및 시장동향

90년대 초반이후 국내 대기배출 허용기준은 계속적으로 강화되고 있으며 특히 SO₂의 경우 최우선적인 규제항목으로 1999년부터 선진국 수준으로 강화되었. 국내 발전소에는 표 1에서와 같이 2007년 현재 53기에 이르는 배연탈황공정이 설치되어 운전 중에 있으며, 설비의 규모도 초기에 125 MW에서 최근에는 870 MW 이르게 되었으며, 황산화물 제거효율도 초기 90%에서 현재는 93% 이상을 목표로 하고 있다.

이 외에도 국내에서는 지역난방시설 및 열병합 발전소를 비롯한 일반 산업용 보일러에도 다양한 탈황



<표 1> 국내 화력발전소 탈황설비 설치 및 건설현황

발전소명	설비용량 (MW)	사용 연료	비고
하동 #1-6	500 × 6	유연탄	남부발전
태안 #1-6	500 × 8	유연탄	서부발전 (#7,8 건설중)
보령 #3-8	500 × 6	유연탄	중부발전 (#7,8 건설중)
당진 #1-8	500 × 8	유연탄	동서발전 (#7,8 건설중)
영흥 #1-4	800 × 2(#1-2) 870 × 2(#3-4)	유연탄	남동발전 (#3,4 건설중)
영동 #1-2	125 × 1 200 × 1	국내탄	남동발전
서천 #1-2	200 × 2	국내탄	중부발전
울산화력	400 × 3	중유	동서발전
영남화력	200 × 2	중유	남부발전
여수화력	200 × 1 300 × 1	중유	남동발전
삼천포 #1-4	560 × 4	유연탄	남동발전
평택 #1-4	350 × 4	중유	서부발전
남제주 #3-4	100 × 2	중유	남부발전

* 총 53 기(2007년 현재)

* 한국전력공사의 배연탈황설비 설치조건

- 설비형식 : 습식석회석 석고법
- 부산물 : 석고(순도 95% 이상, 석고보드제조용 또는 시멘트 응결지연제로 활용)

설비가 건설되어 운전되고 있다.

중국의 경우 2005년도 중국 전체 발전량의 82%를 화력발전소가 담당하고 있으며, 중국의 총 황산화물 배출량의 52%를 화력발전소에서 발생하고 있지만 화력발전소의 탈황시설 설치율은 14%에 불과한 것으로 추정되었다. 따라서 중국 정부는 “11차 5개년 계획(11·5) 기간 중 발전소 용량의 50% 이상에 대해 탈황시설을 설치하고, 탈황시설 설치가 어려움 소형 발전소는 원칙적으로 폐쇄한다는 방침이며, 향후 5년에 걸쳐 연간 80 ~ 100억위엔의 탈황설비 시장이 형성될 것으로 전망하고 있다.

국내의 대기배출허용기준이 계속 강화되는 추세에 있고 연료사용 규제가 완화될 것이라는 점을 감안하

면 배연탈황공정만을 이용해 배출허용기준을 만족시키기 위해서는 탈황율을 95% 이상으로 향상시켜야 할 필요성이 있으며, 이를 위해서는 기존에 설치된 탈황공정의 황산화물 제거효율의 향상기술 및 이미 설치되어 운전되고 있는 공정의 경제성 향상을 위한 최적화 기술 등에 관한 연구가 지속적으로 추진되어야 할 것이다.

또한 중국 등 개발도상국에서는 환경보호 계획에 따른 탈황설비의 수요가 급증하고 있으므로 국내 탈황공정 기술을 보유하고 있는 설비업체에서는 이러한 수요를 수주하기 위해 현재의 확보된 기술의 기술력과 경제성을 더욱 향상시켜서 경쟁력 제고를 도모해야 할 것이다. 