

② 연소 후 CO₂ 포집

‘습식아민기술’ 대체할 기술 찾는다

글 | 이종범_한국전력공사 전력연구원 선임연구원 jblee7@kepri.re.kr

오늘날 우리 인류는 역사상 가장 눈부신 과학문명의 혜택을 누리고 있는 반면 화석연료의 사용 증가에 따른 지구온난화라는 거대하고도 국가를 초월해서 해결해야 하는 지구 공통의 문제에 직면하고 있다. 2007년 12월 15일 인도네시아 발리에서 열린 제13차 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 채택된 발리 로드맵은 기존 교토의정서 체제에서 선진국 중 39개국에만 부여되었던 온실가스 감축의무를 모든 선진국과 개발도상국으로 확대하여 온실가스 감축에 동참해야 하는 이른바 ‘POST 2012’ 체제로의 전환을 시사하고 있다.

기술적으로 가장 빨리 대규모 실증 가능

이에 따라 세계 각국은 온실가스 감축과 관련된 측정, 보고 및 검증 방법을 포함한 자국의 실정에 적합한 온실가스 감축조치를 취해야 할 것으로 예상된다. 현재까지 우리 나라는 의무부담국에 포함되지 않았으나 세계 에너지 소비량 10위, 이산화탄소 배출량 세계 9위, 이산화탄소 배출 증가율 세계 1위, 그리고 세계 경제규모 12위인 경제협력개발기구(OECD) 회원국으로 2008년 하반기부터 논의되는 ‘POST 2012’ 체제에서의 이산화탄소 의무 부담국으로 선정될 가능성은 매우 높다고 할 수 있다.

한국에너지경제연구원에서 발표한 자료에 따르면 2013년 이후

우리 나라가 이산화탄소 의무 부담이 현실화될 경우 2010년까지 1990년 대비 10% 감축시키는데 약 5조 원이라는 막대한 비용이 발생할 것으로 예측하고 있다. 따라서 지구온난화 대응 및 국가 지속 발전을 위해 전 세계적으로 제시되고 있는 에너지 절약, 저탄소 에너지 사용, 이산화탄소 포집·저장 등 다양한 수단들을 국내 실정에 맞게 적용하는 전략이 필요할 것이다.

CO₂의 포집기술은 연료의 종류는 물론 발전소의 형태나 크기 등에 따라 달라지며 연소시스템을 기준으로 연소 후, 연소 전, 연소 중 포집기술로 분류할 수 있다. 지구상에 존재하는 지구온난화 가스인 이산화탄소를 가장 직접적인 방법으로 포집하는 방법 중에서 현실적으로 가장 시급하며 기술적인 측면에서 빠른 시일 내에 대규모 실증이 가능한 기술로 평가되고 있는 연소 후 이산화탄소 포집기술에 대하여 기술 개요, 기술개발 동향, 향후 기술개발 방향 순으로 살펴본다.

화력발전소·대형산업용 보일러가 적용 대상

연소시스템을 기준으로 분류된 연소 후 포집기술은 화석연료와 공기가 연소하여 생산된 스팀이 터빈을 구동하여 전기를 생산하거나 산업공정에 필요한 증기를 공급하는 과정에서 발생한 CO₂를 분리하는 기술을 총칭한다. 연소 후 CO₂ 포집기술에는 흡수제를



연소 후 CO2 포집

인도네시아 발리에서 열리고 있는 유엔기후변화협약(UNFCCC) 회의장 밖에서 나무 그림으로 바디페인팅을 한 환경운동가가 온난화가 되고 있는 지구를 나타낸 모형 옆에서 포즈를 취하고 있다.

이용한 화학 흡수법, 흡착법, 막분리법, 저온냉각법으로 구분할 수 있다.

현재 전 세계적으로 설비용량 2천261GWe의 석유, 석탄 및 천연가스를 연소하는 화력 발전소가 있으며, 연소 후 포집기술의 1차적인 대상으로는 CO₂ 포집이 가장 잘 적용될 수 있는 고효율 발전소인 초임계압 미분탄 화력발전소(155GWe)와 천연가스 복합화력발전소(339GWe)가 고려되고 있다. 실질적인 이산화탄소 포집 효과를 기대하기 위해서는 일정 규모 이상에서의 이산화탄소 포집이 가능해야 할 것이다. 이러한 연소 후 CO₂ 포집기술의 적용 대상은 기존 화력발전소와 철강, 시멘트, 정유 산업과 같은 대형 산업용 보일러가 될 것이다. 연소 후 CO₂ 포집기술 중 현재까지 화학 흡수법이 가장 유망한 기술로 평가되고 있으나 현재 상용기술인 아민(MEA)을 이용한 습식 흡수법이 갖고 있는 높은 회수비용을 극복할 수 있는 저비용 저에너지 포집기술 모색을 위한 다양한 연구개발들이 수행되고 있다.

화력발전소, 또는 산업용 보일러의 연소 후 배출되는 배가스의

특징은 낮은 압력(0.7~1bar)과 다양한 범위의 CO₂ 농도(12~18vol%) 및 분진, SO_x, NO_x, Hg 등 다양한 불순물과 수분을 포함하고 있어 이들 조건에 적합한 CO₂ 회수기술 개발이 무엇보다 중요하다. 연소 후 배가스 기류에 포함된 CO₂ 농도는 미분탄 석탄 화력발전소의 경우 10~15v/v%, 천연가스 발전소의 경우 5~8v/v%를 포함하며, 시멘트 킬른, 고로 같은 경우는 14~33% 범위이다. 현재까지 화력발전소와 철강, 시멘트, 정유 산업과 같은 대형 산업용 보일러의 연소 후 배가스와 같은 상압 기류에 적용 가능한 기술로 평가되고 있는 화학 흡수법은 대규모 처리가 가능하지만 상압 등 가스 기류의 특성에 기인한 처리 설비의 규모가 커 설치비가 많이 들고 에너지 소비도 많다는 단점이 있다.

연소 후 CO₂ 포집기술이 시장에 적용되려면 어느 정도의 비용이면 가능할까? 이 문제에 대한 대답은 현재 발전 또는 생산원가의 상승을 현재 수준의 10% 정도로 낮추어야 한다는 것이다. 이 목표를 달성하기 위해서는 CO₂ 회수 비용을 궁극적으로 10~20\$/tC 수준으로 낮추어야 한다. 2010년경 CO₂ 회수 비용의 세계적 목표는

이산화탄소 포집기술 특성 비교

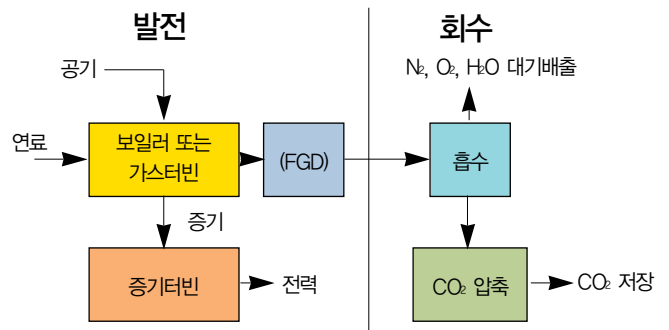
구분	흡수	흡착	막분리
장점	<ul style="list-style-type: none"> · 기술성숙도 높음 · 대용량 가스처리 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 장치가 간단 · 소규모 가스처리 유리 	<ul style="list-style-type: none"> · 장치가 간단하고 조작성이 용이 · 모듈화가 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> · 재생에너지 높음 · 흡수액열화 · 장치 부식 심함(습식) 	<ul style="list-style-type: none"> · 대용량 배가스 처리 어려움 · 탈착에너지 소모 많음 	<ul style="list-style-type: none"> · 고가의 분리막 · 분리막 안정성이 낮음 · 대용량 배가스 처리 어려움 · 기체간 분리계수가 낮음
규모	대 (발전소, 대형 산업용 보일러)	중 (산업용 보일러)	소 (소규모 적용 가능)

약 \$50/tC이다. 현재 실증 규모의 연구가 진행 중인 습식 아민 기술에 대한 CO₂ 회수비용은 대개 125~380\$/tC 범위로 제시되고 있으며 IEA는 2003년 147~220\$/tC 범위를 제시하였다. 이에 따른 발전 효율의 감소는 40%에 이르고 결과적으로 80% 이상의 발전원가 상승을 초래하게 될 것이다.

IEA에서는 현 습식기술을 50% 향상시킬 경우 회수비용을 약 140\$/tC로 추정하고 있고, 2010년에 회수비용 88\$/tC를 달성할 것으로 제시하고 있다. 일본 미쓰비시 중공업은 액체아민의 일종인 KS-1 흡수제를 개발하여 유럽연합 및 미국과의 공동연구에서 천연가스 복합발전의 CO₂ 회수에 적용한 결과 회수비용을 US \$103/tC로 기존 MEA 대비 약 54% 절감하였지만 2010년경 국내 외적 회수비용 목표(US\$ 50~60/tC)에는 아직 미흡한 실정이다. 대체 아민 개발과 공정 개선을 통한 습식아민 공정의 높은 회수비용을 낮추려는 연구가 국내에서도 진행되고 있다. 그리고 재생에너지를 현저히 낮출 수 있으며 내부식성을 50% 이상 향상시킨 코솔 계열의 흡수제 개발과 공정실증 연구가 수행 중이다.

‘건식 회수기술’ 등 대체기술 개발 활발

기존 습식 아민 흡수제의 CO₂ 흡수능 한계, 흡수제 재생을 위한 재생 에너지 소비 과다, 석탄 연소 배가스에 포함된 타 오염원에 대한 흡수제의 내구성 등이 습식 CO₂ 회수기술이 극복해야 할 과제이자 타 기술의 개발 동인이 되기도 한다. 현재 습식 아민을 대체할 수 있는 잠재성이 큰 기술로 떠오르고 있는 몇 가지 기술의 개발 동향을 살펴보면 다음과 같다.



연소 후 CO₂ 회수 시스템 개략도

‘건식 회수기술’은 유동층 또는 고속 유동층 공정에 건식 재생 고체 흡수제를 사용하여 대량의 상압 배가스에 포함된 CO₂를 연속적으로 제거 가능한 기술이다. 건식 재생 고체 흡수제는 흡수·재생 반응기를 연속적으로 순환하면서 배가스 중에 있는 이산화탄소와 물과 반응하여 CO₂를 포집 후 가열 또는 수증기에 의해 수증기와 고농도의 CO₂를 방출하고 고체 흡수제는 재생된다. 함께 배출된 수증기를 응축시켜 제거함으로써 결과적으로 순수한 고농도의 CO₂를 생산하여 저장, 전환 또는 재활용 과정을 통해 CO₂를 포집하는 기술이다.

건식 포집기술은 공정부피가 작고 온도조절이 용이하며 저가의 흡수제 원료를 사용할 수 있으며 흡수제를 다양하게 설계 가능하다는 장점이 있다. 또 반응효율이 좋고 에너지 소비가 적다는 점 등 기존 습식 아민기술의 단점을 극복할 수 있는 잠재성이 있어 연구 개발 중이다.



독일 공업도시인 쾰렌키르헨시의 유럽 최대 화력발전소에서 증기가 피어오르고 있는 모습 (AP=연합)

연광도보

다. 국내에서는 21C 프론티어사업의 지원을 받아 한국에너지기술 연구원에서 연구 중이며 원천 핵심기술에 대한 특허를 국내외에 출원 중이다.

현재까지 ‘습식아민기술’이 가장 앞서

‘수용성 암모니아 공정’은 아민수용액 공정과 유사하다. 암모니아, 물, 이산화탄소가 반응하여 중탄산 암모늄염을 형성한다. 암모니아공정은 아민공정에 비하여 반응열이 작고, 흡착능이 크다.

흡수·재생 시 흡수능의 분해가 작으며, 가격이 싼 장점이 있다. 또한 배가스 중에 포함된 SO_x, NO_x와 반응하여 비료를 만들 수 있어 부가적인 효과를 얻을 수 있다. 그러나 암모니아는 휘발성이 크기 때문에 배가스를 112℃ 정도로 냉각시켜야만 이산화탄소 흡수가 크고 암모니아의 손실을 막을 수 있다. 또한 재생 시 암모니아의 휘발온도보다 높은 온도로 인하여 암모니아의 손실이 발생한다. 따라서 공정 중에 발생하는 암모니아의 손실의 억제하기 위한 많은 연구들이 진행 중이다. 또 다른 공정은 엘스툼에 의해 개발 중인 냉각 암모니아 공정이다. 이 공정은 -14~-4℃의 낮은 온도에서 조업하며 배가스는 이산화탄소 흡수 전에 상기온도로 냉각시켜야만 한다. 국내에서는 한국에너지기술연구원에서 암모니아를 이용한 이산화탄소 제거 공정을 개발하여 2008년부터 1000Nm³/h 공정 적용 시험이 계획 중이다.

앞에서 살펴본 바와 같이 습식 아민기술은 적용 규모 등을 고려할 때 현재까지 가장 앞선 CO₂ 회수 기술로 평가되고 있다. 이 기술은 향후 내부식성 향상, 내구성 향상, CO₂ 흡수력 극대화, 재생 에너지 저감 등 기술의 진보를 통해 회수비용을 혁신적으로 줄여야 하며, 또 대규모 실증을 통한 기술 적용 연구에도 힘써야 할 것이다. 또 동시에 현재의 습식 아민기술을 대체할 수 있는 잠재성으로 인해 연구개발 중인 다양한 기술 분야들은 전 세계적으로 연구개발에서 실증 단계로 진행되고 있으며, 일정 규모 이상에서의 실증을 통한 기술 신뢰성 평가 및 경제성 입증에 대한 객관적인 평가를 통하여 가능성 있는 혁신 기술에 대한 지속적인 연구개발 투자를 통한 저비용 CO₂ 회수기술 확보도 필요하다. ㉔

미국 NETL에서는 FGD 후단에서 이산화탄소를 용이하게 흡수할 수 있도록 고비표면적을 갖는 소재에 아민을 함유한 흡수제를 개발하여 시험 중이다. MEA공정보다 에너지 효율면에서 우수한 것으로 보고하고 있으나 아직까지 가격이 너무 비싼 단점이 있다. 또 미국의 RTI에서는 Na₂CO₃ 흡착제를 이용한 건식공정을 개발하고 있다. 국내의 경우 교과부 21C 사업의 일환으로 전력연구원, 한국에너지기술연구원 등이 Na, K 계열의 저가 고강도 건식 재생 흡수제 개발 및 2탑 유동층 공정 개발 및 소규모 실증(100Nm³/h)을 통해 건식 흡수제 및 공정분야의 원천 핵심기술에 대한 특허를 국내외에 출원하고 있으며, 2008년부터 2000Nm³/h급 실증 시험이 하동화력발전소에서 수행될 예정이다.

‘탄산염시스템’은 용액에 용해되어 있는 탄산염과 이산화탄소가 반응하여 중탄산염을 생성하는 기술이다. 이러한 중탄산염은 재생 시 이산화탄소를 배출하며 탄산염은 다시 사용될 수 있다. 재생 시 소요되는 재생에너지는 아민법에 비하여 매우 작은 장점이 있다. 텍사스대학의 리셀 교수는 K₂CO₃를 용액으로 하여 피페라진(PZ)을 이산화탄소 용해를 증진시키는 매개체로 사용한 K₂CO₃/PZ 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 30% MEA 수용액보다 10~30% 빠른 이산화탄소 흡수속도를 보이며 흡수능에서도 만족할만한 성과를 보였다. K₂CO₃/PZ 시스템에서는 아민흡수법보다 산화물 용해도가 낮아 용액의 활성감소가 작으나 아민수용액보다 가격이 비싼 단점이 있다. 현재의 연구결과는 30%의 아민수용액에 비하여 40% 높은 흡수능을 보이며 에너지소비는 5% 적은 것으로 나타났



글쓴이는 경희대학교에서 공학석사학위를 받았다.