

100MWe급 순산소-미분탄 연소 발전시스템 기술개발



김 태 형
한전 전력연구원 그린에너지연구소 선임연구원

1. 개 황

화석에너지 사용은 인류에게 커다란 혜택을 제공함과 동시에 온실효과를 유발하는 물질로 알려진 이산화탄소를

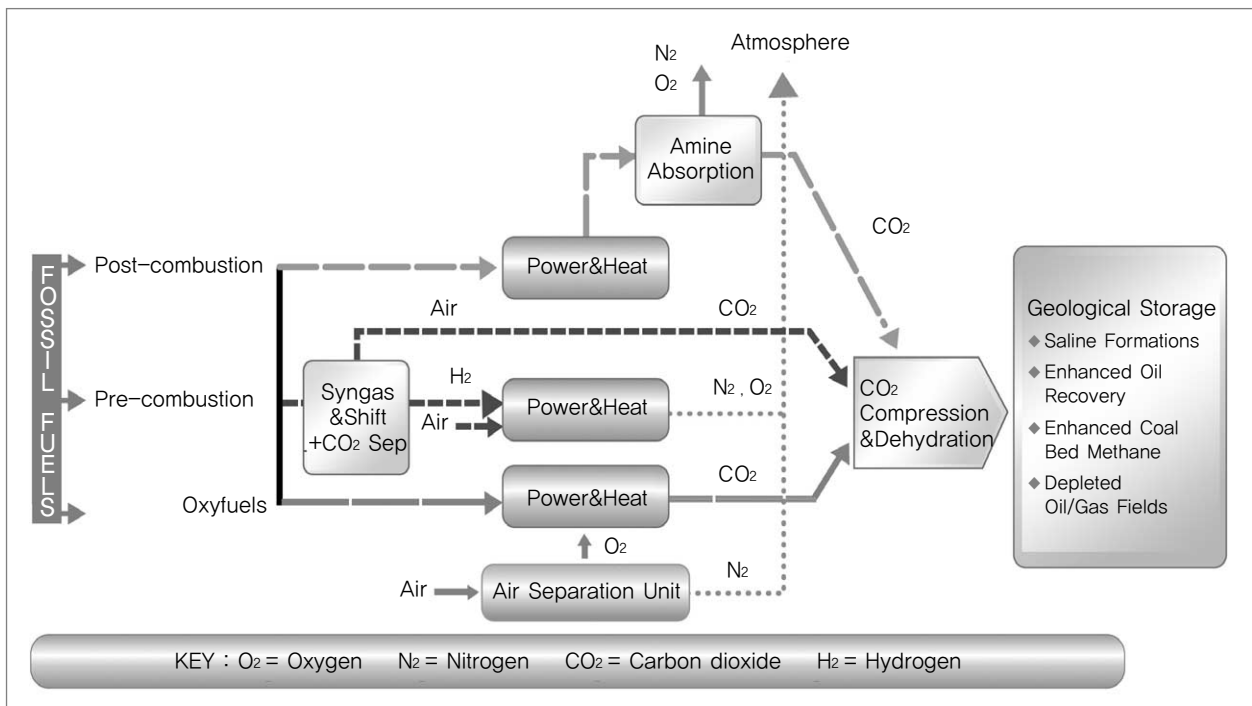
다량 배출시키고 있어 문제점으로 지적되고 있다. 그러므로 우리나라를 포함하여 EU, 미국, 호주, 일본 등 세계 여러 나라에서는 이산화탄소 배출량 저감에 획기적으로 기여할 수 있는 실질적인 기술을 확보하고자 이산화탄소

회수저장(CCS; Carbon Dioxide Capture & Storage) 기술 개발을 활발하게 진행하고 있다.

CCS 기술은 이산화탄소를 포집하는 위치나 분리대상 가스 혼합물의 종류에 따라 연소 전 포집기술, 연소 후 포집기술 및 연소 중 포집기술인 순산소 연소 기술로 분류할 수 있다. 연소 전 포집기술은 화석연료로부터 합성 가스를 생산하는 공정에서 만들어진 이산화탄소를 물리적 또는 화학적 방법에 의해 분리하여 포집하는 기술이며, 연소 후 포집기술은 공기를 사용하여 화석연료를 연소 시킨 후에 생성된 연소가스로부터 흡수, 흡착 및 막분리법을 사용하여 이산화탄소를 분리하여 회수하는 기술이다. 순산소 연소 기술은 공기로부터 질소를 제거한 고순도의 산소를 이용하여 화석연료를 연소시킴으로써 연소가스에 포함된 이산화탄소의 농도를 높여 포집 및 회수를 용이하게 하는 기술이다. 미국의 가스화 개념을 사용한 첨단 실증발전시스템 개발사업인 FutureGen 프로그램이

최근에 FutureGen2.0으로 넘어가면서 순산소 연소 개념을 사용하는 것으로 변경됨으로써 순산소-미분탄 연소 발전시스템에 대한 관심이 그만큼 높아졌음을 보여주고 있다.

국내에서는 최대 고정배출원인 석탄화력 발전시스템에서 배출되는 이산화탄소를 감축하여 국제적 요구에 대응하고자 지식경제부의 에너지지원 기술개발 사업으로 순산소-미분탄 연소 발전시스템 기술을 개발하고 있다. 오는 2015년까지 100MWe급 실증플랜트 건설을 목표로 한전 전력연구원, 한국남동발전, 두산중공업, 한국기계연구원 등의 기관을 중심으로 추진하고 있다. 이는 정부의 2020년 이산화탄소 배출 감축목표인 2005년 대비 30% 감축계획에 따른 능동적인 대응전략과 국내 이산화탄소 총 발생량의 약 26%를 차지하는 화력발전 분야에서 이산화탄소 저감을 위한 글로벌 상용화 기술의 선점을 통해 새로운 비즈니스 모델을 창출하기 위한 것이다.



[그림 1] CCS 기술의 분류

2. 국내 기술개발 현황

국내의 순산소-미분탄 연소 발전시스템 기술 개발은 100MWe급에 적용하여 실증할 목적으로 2007년 10월에 시작하였다. 1단계는 2010년 9월에 종료되었고, 보일러 기술, 환경제어 기술, 발전시스템 기술 및 이산화탄소 저장 기술 분야로 구분하여 개념설계를 완성하였다.

현재는 이산화탄소 저장 기술 분야를 제외하고 1단계에 이어서 2단계 연구가 진행되고 있으며, 영동화력 1호기를 실증대상 발전소로 정하고 공기-미분탄 연소 운전과 순산소-미분탄 연소 운전이 모두 가능하도록 올 9월에 기본설계를 완료할 예정이다.

가. 보일러 기술

보일러 기술 분야의 범위는 기존 보일러를 대상으로 연소시스템을 포함하여 미분기 입구에서부터 공기에열기 출구까지 개조를 위한 기본설계를 진행하는 것이다.

보일러 기본설계 초기 단계에서는 개조 범위를 설정하기 위해 현장설비에 대한 조사를 실시하여 기본설계의 기준을 설정하고 개조에 필요한 타당성 검토 연구를

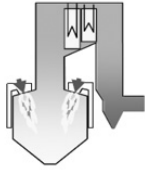
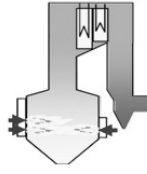
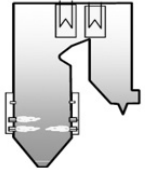
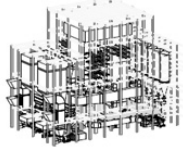
수행하였다. 타당성 검토는 국내 무연탄을 사용하기 위해 하향 연소방식으로 건설된 현재의 상태 즉, 보일러와 연소설비를 현재와 동일하도록 계속 유지하는 방안과 보일러는 현재와 같이 기존의 상태로 유지하고 연소설비만 변경하여 대항류 연소방식으로 변경하는 방안 및 보일러 전체의 설비를 새롭게 건설하는 방안에 대하여 수행하였다. 그 결과 경제성과 실증 신뢰성을 모두 만족시킬 수 있는 연소설비만을 변경하여 보일러를 개조하는 방안을 채택, 순산소-미분탄 연소 보일러의 기본설계 모델로 확정하였다.

선정된 모델에 대한 성능 및 연소시스템 설계는 보일러 설계기준과 현재 설비의 성능시험 결과를 토대로 하였다. 설계 탄종으로 선정된 아역청탄 특성을 고려하여 미분기 전체를 새롭게 교체하고, 직접식 미분탄 공급설비에 적합한 1차 공기에열기를 추가적으로 설치하는 조건이 반영되었다. 설계탄은 회용점이 낮게 설정되었기 때문에 보일러를 운전하는 도중에 발생할 수 있는 슬래깅과 파울링 현상이 감소되도록 설계에 반영하였다. 초기 설계 결과는 재평가 과정을 통해 검증을 실시하였고, 그 과정에서 도출된 문제점에 대해서는 해결방안을 모색하여



[그림 2] 기술 개발 로드맵

[표 1] 순산소-미분탄 보일러 개조 방안별 특징

Feasibility Cases				
	Case1	Case2	Case3-1	Case3-2
	Retrofit	Retrofit	Retrofit	Brownfield
Boiler	Existing Downshot	Existing Downshot	New Boiler	
Firing System	Downshot-Fired Circular Burners	Wall-Fired Circular Burners & New Windbox		
Mill & PF Ducting	Vertical Mill & New PF Piping, New PAF			
Boiler Plant Layout	Maximum use of boiler / boiler island components & layout New PAH & refurbished SAH			New
Boilerhouse Primary Steelwork	Existing			New

반영함으로써 보일러에 대한 성능 설계 및 연소시스템 개념설계를 완성하였다. 연구개발 목표로 제시된 이산화탄소 회수율 90%를 만족하기 위해서는 연소가스의 이산화탄소 농도를 95% 이상으로 유지해야 하기 때문에 보일러 본체에서 외부 공기의 누입률이 2.5%를 넘지 않도록 설계에 반영하였다. 개조되는 보일러에 대한 성능 설계는 공기-미분탄 연소와 순산소-미분탄 연소 조건에 대하여 동시에 만족시킬 수 있는 상태가 되도록 완성하였고, 부하별 평균 보일러 효율은 현재 운영되고 있는 기존의 보일러에 비해 두 조건 모두 크게 개선되는 것으로 나타났다. 공기-미분탄 연소 조건에 비해 순산소-미분탄 연소 조건의 보일러 효율이 더 높은 결과를 나타냈다.

나. 환경제어 기술

환경제어 기술은 순산소-미분탄 연소 조건에서 연소 가스재순환(FGR)의 영향으로 황산화물과 같은 특정 유해물질의 농축현상이 발생하기 때문에 관련된 설비들이 부식으로 인해 손상되어 수명이 단축되는 것을 억제

시키고, 유해물질로 인한 이산화탄소 회수설비에서의 회수율 저하를 방지하기 위한 것에 초점이 맞추어져 있다. 그러므로 실증 대상인 순산소-미분탄 연소 발전시스템의 이산화탄소 회수설비 입구에서의 가스농도를 SO₂ 10ppm 이하, SO₃ 1ppm이하 및 분진농도 1mg/Nm₃이하를 목표로 설정하여 연구를 진행하고 있다.

개발중인 주요 핵심기술에는 기존의 배연탈황설비 (FGD)를 사용하지 않는 대신에 연소실에 탈황제를 분무하여 황산화물을 흡착시켜 제거하는 기술로써 공기 연소 방식에서는 효율이 낮지만 이산화탄소 분위기에서는 탈황률이 높은 노내탈황(in-furnace deSO_x) 기술이 있다. 이 기술은 건식 및 습식 전기집진기(ESP)를 사용하여 미세분진까지 제거가 가능하다. 그리고 SO₃ 제거의 부가적 효과가 있는 복합집진 기술, 연소가스 중에 포함된 수분을 응축하면서 동시에 황산화물과 미세분진을 동시에 제거하는 효과가 있는 다기능 연소가스 응축시스템 (FGC) 기술을 포함하고 있다.

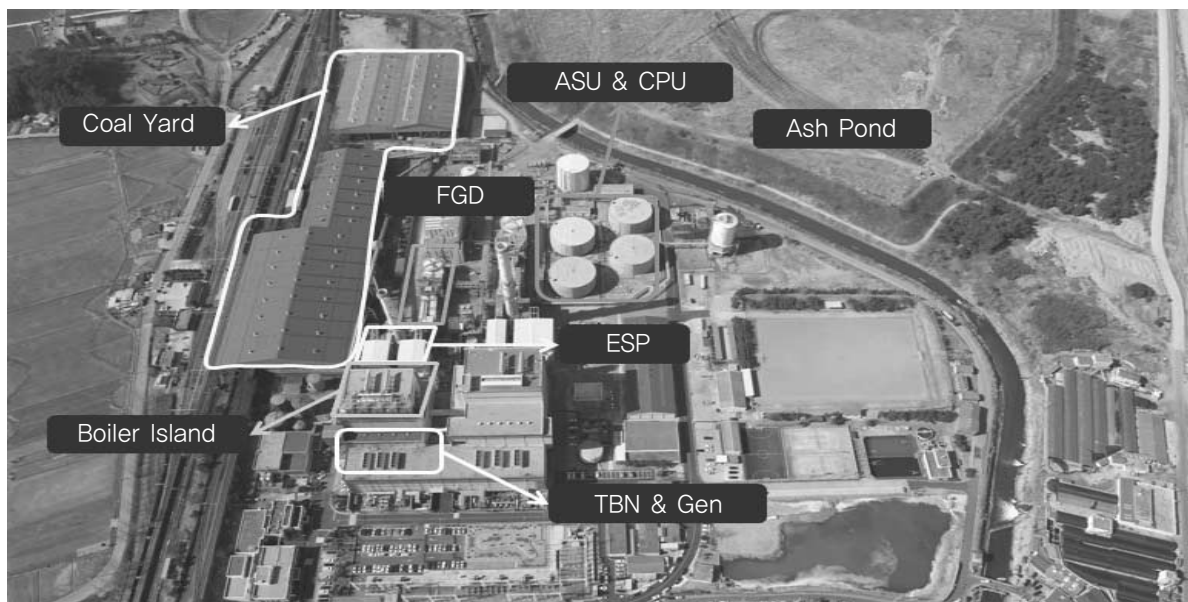
최근 실험실 규모의 실험을 통해 핵심 원천기술에 대한 개발이 완료되었고, 파일럿 실험을 통해 건식 및 습식 노내탈황 기술을 확립하고 고효율의 황산화물 제거 성능을 확인하였다. 실증을 위한 위치별 주요 수치 및 설비별 탈황 특성, 집진기 효율향상을 위한 내부 응축 방지 기술 등을 확보하여 환경제어 기술 분야의 기본 설계에 반영하고 있다.

다. 발전시스템 기술

발전시스템 기술 분야에서는 단위기술을 통합하고 최적화하여 상세설계와 실증설비 건설에 사용될 수 있도록 기본설계가 진행되고 있다. 공기연소 발전시스템으로 운영 중인 영동화력 1호기에 대하여 산소생산설비(ASU)와 이산화탄소 회수설비(CPU)를 포함한 최적의 순산소-미분탄 발전시스템으로 개조할 수 있도록 하는 것이다. 실증 발전설비에 적용할 산소 생산설비는 발전시스템이 공기 또는 순산소 모드로 운전되는 특징을 모두 고려하여 100MWe 전력생산에 필요한 전체 산소 공급량의 약 1/3 규모(약 20,000Nm³/h)로 건설하고

운전모드에 따라 탄력적으로 운영하는 것이 합리적인 대안이기 때문에 이를 토대로 산소생산설비에 대한 기본 설계가 진행되고 있다. 이산화탄소 회수설비는 열교환기를 사용하여 유입되는 연소가스 자체가 냉매로 사용되도록 냉동 사이클을 구성하여 연소가스 중에 이산화탄소를 90% 이상 회수할 수 있는 공정으로 개발하였다.

또한, 이산화탄소를 기체 상태로 회수하여 임계압력 이상으로 압축한 다음 압축된 상태로 수송하는 공정과 가스 상태로 회수된 이산화탄소를 고순도로 정제된 후에 액화에 필요한 압력으로 압축하여 액체상태의 이산화탄소로 회수하는 공정을 함께 개발, 이산화탄소 처리 시나리오에 따라 유연하게 대응할 있도록 하였다. 100MWe급 용량의 이산화탄소 회수설비는 아직까지 회수된 이산화탄소를 전량 처리할 수 있는 저장소가 확정되지 않았고 액화상태로 저장하기 위한 용량에도 한계가 있다. 이에따라 실증 이산화탄소 회수설비는 처리해야 하는 전체 연소가스의 약 10% 용량으로 회수된 이산화탄소가 액체 상태로 저장될 수 있도록 기본설계가 마무리 단계에 있다.



[그림 3] 실증 대상 발전설비 전경

순산소-미분탄 연소 발전시스템 개발의 핵심은 발전 효율 Penalty와 투자비 최소화를 통해서 경제적 이득을 실현하고, 실증과 상용화용 발전시스템이 안전하고 신뢰성 있는 운영이 가능하도록 최적의 공정이 개발되어야 한다. 이를 실현하기 위해서 순산소-미분탄 발전시스템 전체를 정확하게 모사하고 해석하기 위한 공정 해석용 툴을 자체적으로 개발하여 사용하고 있다. 영동화력 1호기에 최적화된 순산소-미분탄 발전시스템을 실현하기 위하여 전체 발전시스템에 대한 공정을 완성시키고, 다양한 시나리오를 작성하여 열·물질 수지 밸런스 해석 수행 결과를 종합적으로 고려, 최적의 설계 변수를 확정하고 독자적인 발전시스템을 완성하였다.

실증 발전시스템과 상용화에 필요한 기술 개발을 위해서는 실험을 통해 미지의 변수를 도출하고 검증하여 설계에 반영하여야 한다. 특히, 핵심적인 신기술을 개발하기 위해서는 필수적으로 요구되는 절차로 다양한 변수를 활용하여 최대한 가능한 수준까지 실제 발전설비에 대한 모사실험을 수행하여야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 전력연구원은 순산소-미분탄 실험용 통합 파일럿 실험설비가 구축되어 활용되고 있다.

용량은 0.7MW급으로 독일에 이어 전 세계에서 두 번째로 국내기술에 의해 개발되었으며, 연소설비, 제어설비, 보일러 및 환경설비, 산소생산설비, 이산화탄소 회수 및 저장설비 등으로 구성되어 있다. 실험은 현재 잘 알려진 공기연소와 순산소연소 조건을 비교하여 연소로 내부에서의 온도 및 열유속 분포, 환경오염물질 거동특성, 부식물질의 영향성, 연소가스 특성에 따른 이산화탄소 회수성능, 시스템 운전제어 특성 등을 비롯하여 실증 발전시스템 설계에서 요구되는 다양한 실험을 수행하였다.

최초로 실증하게 되는 순산소-미분탄 연소 발전시스템에서 개발하여야 하는 핵심기술 가운데 하나는 안전한

설비운전을 위한 신뢰성 있는 자동제어기술 확보이다. 산소생산과 이산화탄소 회수를 위해 새로운 설비가 추가되고 환경제어 설비와 운전이 있어서도 상당한 변화가 있고, 공기와 순산소 운전모드의 변경 등에 잘 대응하기 위한 제어시스템이 개발되어야 한다.

이를 위해 제어시스템이 실증 설비에서 타당하게 적용될 수 있을지 확인하고 검증하기 위해 실증 운전 전에 제어시스템 및 제어로직을 구현할 수 있는 다이내믹 엔지니어링 시뮬레이터가 개발되어 활용되고 있다.

이 시뮬레이터는 첨단 제어기술의 검증뿐만 아니라 다양한 가상 운전조건에 대한 영향성 평가에도 활용되고 있다.

3. 향후 계획

현재 영동화력 1호기를 대상으로 실증할 수 있는 100MWe급 순산소-미분탄 연소 발전시스템에 대한 기본 설계가 마무리 단계에 있기 때문에 올 9월 완성될 것이다. 이를 토대로 3단계에서는 실증에 필요한 순산소-미분탄 연소 발전시스템의 상세설계와 건설을 진행시켰고, 완성된 실증 발전시스템을 활용하여 상용화에 필요한 기술과 함께 운영에 필요한 독자적인 기술을 확보할 계획이다.

2020년이 도래하기 전까지는 500MWe급에 대한 상용화 기술을 완성하여 기후변화협약에 대응할 수 있는 국가적 이산화탄소 회수저장에 대한 대응방안을 확보할 예정이다. 이러한 목표는 국가의 지속적인 관심과 협조를 기반으로 연구 개발에 참여하는 기관들의 부단한 노력이 더해져야 가시적인 성과를 거둘 수 있을 것이다. KEA