

Alstom Power의 가압유동층 복합발전 시스템 특성

이윤경* · 주용진 · 김종진

한국전력 전력연구원

The Figures for the Alstom Power Pressurized Fluidized Bed Combustion Combined Cycle System

Yun Kyoung Lee*, Yong Jin Joo and Jong Jin Kim

Korea Electric Power Research Institutes

요 약

가압유동층 연소 유닛은 1~1.5 MPa, 연소 온도 850~870°C 조건으로 운전된다. 가압 석탄 연소 시스템은 전열관을 통한 열전달로 증기를 생산하며 가스터빈으로 공급될 고온 가스를 생산한다. 가스 중의 고체 잔류물에 의한 가스터빈의 성능 저하 때문에 가스 정제가 매우 중요하며 석탄과 흡수제 및 연소 공기를 가압하여야 하고 배가스와 회 제거 시스템에서는 감압을 해야 하기 때문에 운전이 다소 복잡하다. 증기터빈 대 가스터빈에서 생산되는 전력의 비율은 약 80:20이고 모든 부하 범위에서 연소기와 가스터빈이 서로 적절히 조화를 이루어야 하기 때문에 PFBC와 복합 사이클 발전 루트는 독특한 제어 방식을 갖는다. 유동층에 적용할 수 있는 가스의 최대 온도는 회 용점에 의해 제한을 받기 때문에 가스터빈은 일반 가스터빈에 비해 좀 특별하다고 할 수 있다. 회의 용융이 일어나지 않도록 하기 위한 최대 허용 가스 온도는 약 900°C이다. 가스터빈의 높은 압력비 때문에 압축시 인터쿨링을 사용하며 이는 상대적으로 낮은 터빈 입구의 온도를 상쇄하기 위한 것이다.

Abstract — Pressurized fluidized bed combustion unit is operated at pressures of 1~1.5 MPa with combustion temperatures of 850~870°C. The pressurized coal combustion system heats steam, in conventional heat transfer tubing, and produces a hot gas supplied to a gas turbine. Gas cleaning is a vital aspect of the system, as is the ability of the turbine to cope with some residual solids. The need to pressurize the feed coal, limestone and combustion air, and to depressurize the flue gases and the ash removal system introduces some significant operating complications. The proportion of power coming from the steam:gas turbines is approximately 80:20%. Pressurized fluidized bed combustion and generation by the combined cycle route involves unique control considerations, as the combustor and gas turbine have to be properly matched through the whole operating range. The gas turbines are rather special, in that the maximum gas temperature available from the FBC is limited by ash fusion characteristics. As no ash softening should take place, the maximum gas temperature is around 900°C. As a result a high pressure ratio gas turbine with compression intercooling is used. This is to offset the effects of the relatively low temperature at the turbine inlet.

1. 서 론

석탄은 취급성이 좋지 않고 공해물질의 배출량이 높기 때문에 세계적으로 강화되는 환경 규제치를 만족하기 위해서는 현재 개발·보급되고 있는 청정석탄기술의 적용이 불가피하다. 청정석탄기술에는 연소 전 공해물질을 제거하는 연소 전 처리방법, 연소 중 조업 조건의 변

경이나 흡수제를 주입하여 발생하는 질소 및 황산화물을 제거하는 연소 중 방법, 연소 후에 배가스를 처리하는 연소 후 처리방법 및 석탄 가스화나 액화를 통하여 청정한 연료로 전환하는 방법이 있다. 조업 조건이나 연소방법 변형에는 버너의 개량, 연소방법의 전환 등을 들 수 있으며 순환유동층 및 가압유동층 기술이 기존의 미분탄 보일러를 대체하는 효율 높고 공해 물질 배출이 적

은 청정석탄기술로 부각되고 있다. 특히 현재 개발·가동 중인 실증용, 상업용 가압유동층 복합발전 시스템(이하 PFBC-CC)의 발전 효율은 조건에 따라 다소 다르지만 38~42%를 나타내고 있으며 증기터빈의 조업 조건 개선, 차세대 가압유동층 복합발전 기술의 개발이 완료되면 그 이상도 가능하리라고 전망되고 있다.

에너지 해외의존도가 큰 우리나라로서는 에너지의 안정적 공급을 위해 앞으로 석탄 이용량의 증가는 필수적이며 따라서 석탄 에너지의 효율적인 이용과 점차 가시화되어 가고 있는 Green Round(GR) 타결에 대비하는 측면에서도 청정석탄발전의 주요 기술인 PFBC-CC의 개발은 중요한 의미를 가지며 그에 따른 경제적·기술적인 파급 효과도 상당할 것으로 기대되며 이를 위해 PFBC-CC 기술 검토의 일환으로 이에 대한 기술적 원리 이해가 우선되어야 할 것이다.

2. 본 론

2-1. 가압유동층 복합발전의 원리

PFBC-CC는 가압 보일러 내에서 연료를 탈황제(석회석, 백운석)와 함께 유동화 상태에서 연소시켜 보일러에서의 연소열을 회수하여 증기터빈을 구동하기 위한 증기를 생산하고, 보일러에서 배출되는 고압의 연소 가스는 함유된 분진을 제거한 후 가스터빈 구동에 사용, 전력을 생산하는 고효율 복합발전 방식이다. 일반적으로

PFBC-CC에서의 전력 생산 부담율은 증기터빈 80%, 가스터빈 20%이다.

PFBC-CC 유동층 보일러는 약 1.1~1.5 MPa의 압력 조건에서 석탄을 연소하며 연소온도는 약 850~870°C이다. 석탄 내의 황은 연소 중 석회석과 반응하여 제거되며 보일러의 낮은 연소 온도로 인해 본질적으로 NOx 배출량은 적다. 연소 공기와 배가스 부피는 가압 조건에서 감소되며 따라서 보일러와 분진 제거 장치의 크기가 축소된다. 노 내 직접 탈황 방식을 적용함으로써 별도의 탈황 공정 설치가 필요치 않다. 따라서 PFBC-CC 설치에 필요한 공간은 동일한 용량의 일반적인 미분탄 발전소에 필요한 공간의 70% 정도면 된다. 이처럼 석탄을 깨끗하게 연소하고 효율적으로 발전하므로 PFBC-CC 기술은 화석연료 발전 방식과 관련된 가장 중요한 문제인 온실 가스 저감을 효과적으로 달성할 수 있다.

2-2. PFBC-CC의 단위 기술¹⁾

2-2-1. 보일러

PFBC-CC 보일러에서의 열 흡수는 총 내에 배치된 튜브 번들을 통해 이루어진다. 기존 보일러와 비교하면 가압 유동층에서의 연소 과정 중 열전달이 매우 높고 균일하지만 기존 보일러에서의 열전달 분포는 노 내 복사열이 매우 크고 배가스 통로에서의 대류 열전달이 낮기 때문에 균일하지 않다. PFBC-CC의 경우 가스터빈으로 공급되는 배가스 온도를 높고 일정하게 유지하는 것이

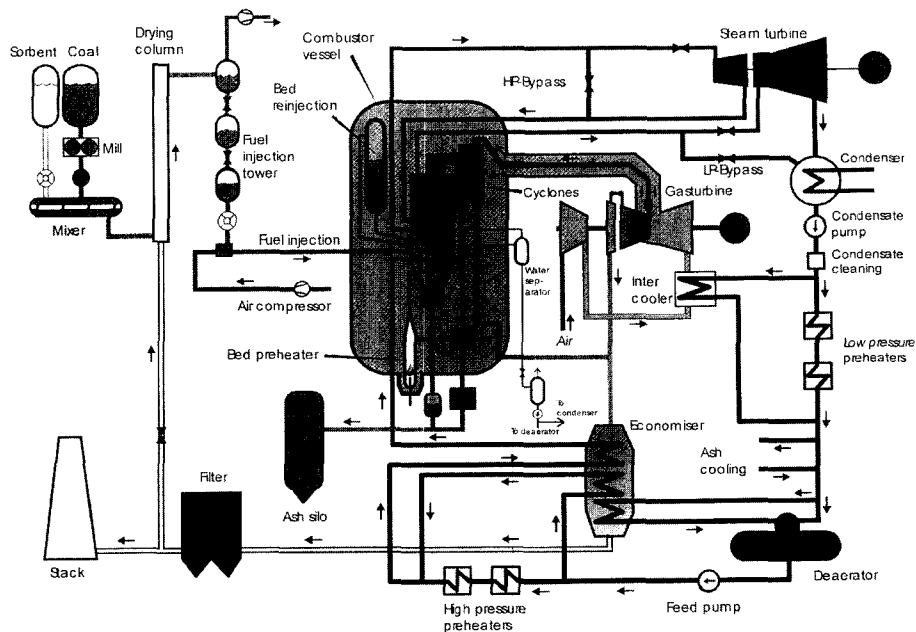


Fig. 1. PFBC-CC system schematics.

매우 중요한데 이는 플랜트 효율과 연관되어 있다. 부분 부하 운전에서 층 상단으로 노출된 튜브 번들이 가스를 냉각 시킬 때는 프리 보드 연소(freeboard firing) 시스템을 이용하여 프리 보드의 온도를 올릴 수 있다. 보일러 팬이 없는 대신 연소용 공기는 가스터빈 압축기에서 공급한다.

2-2-2. 연료공급 시스템

연료 공급 시스템은 보일러에서 정확한 층 온도를 유지하는데 필요한 연료를 대기압에서 공정 압력으로 올려 수송한다. 따라서 연료는 연소 영역의 감소나 과잉 온도 상승을 피하기 위해 적절한 크기 입자 형태로 혹은 응집된 형태로 유동 층 내에 고루 분포되어야 한다.

PFBC의 연료공급은 두 가지 개념이 있는데 석탄을 물과 혼합하여 펌프를 이용해 유동층에 공급하는 페이스트(paste : 물, 석탄의 혼합물로 슬러리보다 수분 함유량이 적고 점도가 높음) 공급 방식과 공기압과 록 호퍼를 이용해 건식으로 공급하는 방법이 있다.

건식 연료 공급은 석탄 선택 범위가 넓어 갈탄에서 역청탄까지 사용할 수 있으며 오일 셸과 같은 특정 연료도 사용 가능하다. 반면 페이스트 공급은 일반적으로 역청탄에 적절하다.

건식 연료 공급 방식은 연료에 포함된 수분이 적어 페이스트 방식에 비해 효율을 약간 더 상승 시킬 수 있으며 페이스트 공급 방식은 층에서 방울을 형성하여 건식에 비해 좀 더 천천히 연소하고 넓은 범위에서 연소되는 특징을 가지고 있다.

2-2-3. 층 물질 재주입 시스템

층 물질 재주입 시스템은 빠른 속도로 부하 변동을 하기 위해 고안되었으며 고온의 층 물질을 가압된 상태에서 가압용기 내에 저장할 수 있게 한다. 또한 기동 시에 층 물질을 공급하고 기동 준비 시에 고온의 층 물질을 저장하는데 사용된다. 이 시스템의 목적은 층 물질을 층 용기의 안과 밖으로 유연하게 그리고 변화시킬 층

높이와 일치하는 양을 공급함으로써 증기터빈 출력을 제어할 수 있도록 하는 것이다. 또한 가압 조건에서 일정량의 층 물질을 저장하고 이를 고온으로 유지할 수 있어야 한다.

2-2-4. 층 회 제거 시스템

연소하는 동안 층에서는 회가 특정한 비율로 생성되며 생성 속도는 공정 인자, 부하, 연료 및 흡수제 종류에 의존한다.

회는 흡수제와 연료가 상호 반응하여 생성된 연소 잔류물이다. 회 입자는 유동층에서 분리되어 밀도가 높은 입자는 아래로 떨어지며(층 회, bed ash) 작은 입자는 사이클론으로 날아간다(사이클론 회). 층 회는 층 하부에 잔류하다가 중력에 의해 연소기에서 빠져 나온다. 층 회 수송 방식은 다음과 같이 두 가지로 나눌 수 있다.

① 공기압 수송 방식

압축 공기로 분말과 그레놀 물질을 수송하는 방법은 여러 방면에서 사용된다. 공기압 수송 방식을 선택하는 가장 일반적인 이유는 배치의 유연성과 환경 측면 때문이다. 또한 이 시스템은 설치 시간과 시운전 기간이 짧다. 냉각 매체의 온도 제어 문제 등으로 인해 회 냉각 시스템이 적절히 작동하지 못할 경우를 대비하여 공기압 수송 시스템은 기계적인 표준 시스템보다 훨씬 높은 온도의 회를 다룰 수 있도록 설계되어 있다.

한편 회 입자와 수송 라인의 곡선부에서는 상호작용에 의한 입자의 파손이 있을 수 있고 이는 유속에 달려 있기 때문에 낮은 유속의 시스템을 선정하여야 하며 특히 층 회가 초기 층으로 재사용되고 회 생산량이 적을 때는 층 높이에 영향을 주기 때문에 입자 파손을 주의 깊게 관찰하여 적절한 시기에 층물질 교체 혹은 충전 등의 조치를 취해야 한다.

수송용 공기 압축에는 벨트 컨베이어를 사용할 때보다 많은 전력이 소모된다. 그러므로 공기압 수송방식은 층 발전량이 최고일 때 고려되어야 한다. 공기압 수송 시스템은 공급 시스템과 수송 라인으로 구성되어 있으며 수송 라인은 고도의 유연성을 가지고 설치되지만 비선형 부분에서의 마모를 반드시 고려하여야 한다.

② 기계적 수송 방식

벨트 컨베이어는 복잡하지 않은 수송 기술이고 투자비는 공기 수송 시스템과 같은 수준이다. 기계적인 수송 시스템은 전력 소비가 적고 물질을 조심스럽게 다루지만 공기압 수송 시스템에 비해 많은 공간을 필요로 하고, 특히 연소기 하부에 필요한 공간이 늘어난다.

2-2-5. 가스 정제 시스템

가스 정제 시스템은 보일러에서 발생하는 배가스의 회 입자를 정제하고 정제된 고온 가스를 가스터빈으로 수송한다. 가스 정제는 고효율 사이클론을 이용하며 가스

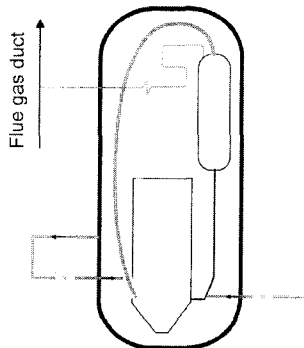


Fig. 2. Bed reinjection system.

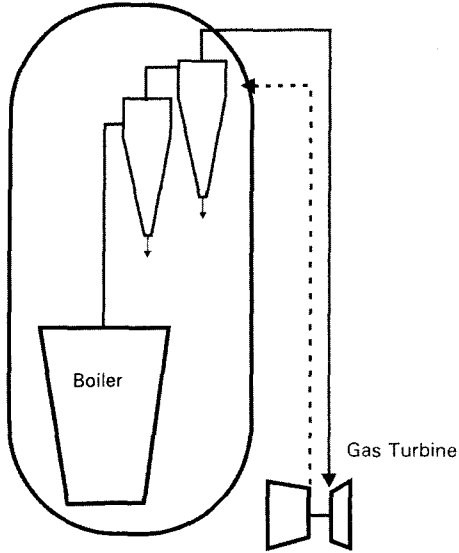


Fig. 3. PFBC-CC gas cleaning system.

터빈의 마모 문제를 막기 위해 효율적인 정제가 필수적이다. 가스 정제 설비는 연소기 내 보일러 상부에 설치되어 있고 Fig. 3에서와 같이 보일러에서 가스터빈까지 가스 출구 덕트, 사이클론, 이중관(coaxial pipe) 등으로 구성되어 있다.

사이클론 레그는 사이클론 회 제거 시스템과 연결되어 있고 분리된 분진과 함께 수송된 약간의 가스는 사이클론 레그의 회 제거 시스템을 통해 추출된다.

2-2-6. 사이클론 회 제거 시스템

PFBC-CC 회 처리 시스템은 층 회 제거 시스템, 사이클론 회 제거 시스템, 그리고 외부 회 제거 시스템으로 구성된다.

사이클론 회 제거 시스템에는 가스 정제 시스템에서 배출되는 회, 1차 및 2차 사이클론과 저장 사이로 및 가스 덕트가 포함된다. 1차 사이클론 회는 사이클론 레그로부터 외부 사이클론(external cyclone)까지 공기압에 의

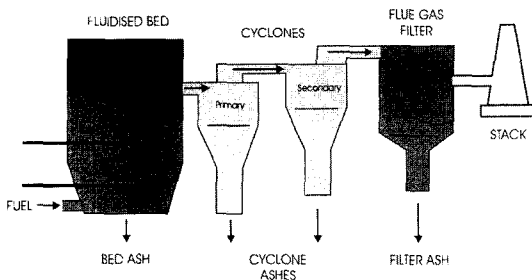


Fig. 4. Ashes from PFBC-CC.

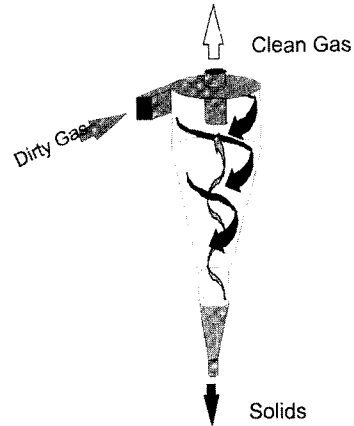


Fig. 5. External cyclone.

해 수송되며 여기서 회는 사이클론 회 사이클로로 보내지고 수송 가스는 회 사이클로의 필터를 통과한다.

회가스 온도는 연소용 공기를 매체로 하는 사이클론 레그 냉각기에 의해 압력 용기 내에서 감소되며 압력 용기 외부에서는 수 냉각기(water cooler)에 의해 특정 온도까지 감소된다.

2차 사이클론 회는 2차 사이클론 레그에서부터 외부 절단기까지 공기압에 의해 이송된다. 회가스의 온도는 압력 용기 안팎에서 복사(radiation)에 의해 감소된다.

2-2-7. 가스터빈

가스터빈은 Fig. 6과 같이 구성되어 있으며 최대 부하에서 저압 축은 최대 속력으로 운전하고 저압 압축기는 운전 속력과 대기조건에 해당하는 공기유량을 인터쿨러를 거쳐 고압 압축기로 전달한다. 고압 압축기는 항상 일정한 속력으로 운전되므로 정해진 체적용량을 갖는다. 고압 압축기는 전달된 질량 유량의 밀도가 체적용량과 일치할 때까지 인입 압력을 증가시킨다. 고압터빈 인입 압력은 기본적으로 입구 가이드 베인(IGV)의 체적용량에 의해 정해지고 인입 압력이 연소가스 유량과

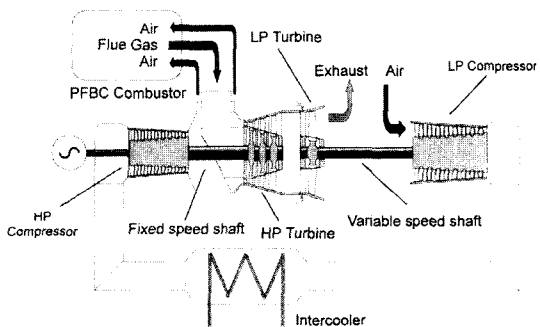


Fig. 6. Conceptual image of PFBC-CC machine.

온도를 조정한다. 저압터빈은 한 개의 변동 가이드 베인을 갖는 1단으로 설계되어 있다. 저압터빈 인입 압력은 변동 가이드 베인의 체적용량에 의해 정의되며 인입 압력이 연소가스 유량과 온도를 조정한다.

저압터빈 용량은 변동 가이드 베인의 차단 각을 줄임으로서 증가되고, 이로 인해 원주 속도는 감소한다. 이로 인해 인입 압력이 감소되며 저압터빈에서의 팽창량이 감소되고 저압 압축기의 동력 소모가 감소된다.

변화된 저압터빈 출력이 해당하는 질량유량과 압력비가 맞추어 질 때까지 저압 압축기 속력은 감소한다. 감소된 질량유량이 체적용량에 부합할 때까지 고압 압축기 인입 압력이 하강한다. 유동층의 온도 감소로 인해 고압터빈 인입 압력이 낮아지고 고압 압축기 출구 압력 또한 감소된다. 이와 같은 방법으로 부분부하 운전조건이 설정된다.

2.3. PFBC-CC 기술 특성²⁾

PFBC-CC 기술은 모든 종류의 석탄, 예를 들면 회분이 많고, 유황 함량이 높고, 발열량이 낮거나 혹은 반응성이 낮은 석탄까지도 사용할 수 있으며 이를 환경 친화적인 방식으로 이용한다. 복합사이클을 이용해 발전하므로 기존의 미분탄 연소 발전 방식보다 효율이 높고 가압 유동층 공정을 사용함으로써 콤팩트하며 고도로 모듈화된 방식으로 건설할 수 있기 때문에 기존의 미분탄 발전소를 출력 및 효율을 증가시켜 PFBC-CC로 리파워링(repowering)할 수 있다.

2.3-1. 공정의 간략함

PFBC-CC 리파워링 프로젝트에서는 대부분 기존의 증기터빈을 재사용할 수 있다. 증기터빈의 수명이 남은 경우 혹은 신규 프로젝트인 경우 원하는 증기터빈을 선택할 수 있으며 PFBC-CC는 모든 증기터빈과 연계 가능하다.

또한 유동층 기술은 수년 동안 존재해왔다. PFBC-CC와 기존 유동층의 차이는 터빈의 압축 공기를 이용해 층을 가압한다는 점이다. 가압의 장점은 층이 깊어지고 연료 연소에 충분한 체류시간을 제공한다는 것이다. 또한 고압이기 때문에 동일 효율을 목표로 할 경우 상대적으로 반응 온도가 낮아지므로 기타 과정에서 문제가 되는 열(thermal) NOx의 생성을 피할 수 있다.

한편 환경규제 물질인 SOx나 NOx를 제거하기 위한 별도의 설비가 필요하지 않기 때문에 공정이 간단하다. 기존의 미분탄 화력 발전소는 배가스에서 이와 같은 성분을 제거하기 위한 정제 설비의 설치가 필요하다. PFBC-CC는 자체에서 배출물질을 제어한다. 석회석이나 백운석과 같은 흡수제는 석탄과 혼합되어 석탄의 연소과정 중 발생하는 유황을 흡수하며 약 90% 이상의 황이 제

거된다. 열 NOx는 거의 생성되지 않으며 연료 NOx는 프리보드나 혹은 가스터빈 전단에서 암모니아를 주입함으로써 연소 중 제거할 수 있다. CO2는 석탄을 연소하는 과정에서 항상 생성되지만 PFBC-CC는 기존의 미분탄 화력에 비해 생산 전력당 약 15% 정도 적은 석탄을 소모하므로 CO2의 생성량도 약 15% 정도 적다.

2.3-2. 고효율성

PFBC-CC가 효율적이라는 것은 같은 양의 전력을 생산하기 위해 기존의 미분탄 화력보다 약 15% 적은 량의 석탄만 사용한다는 것을 의미한다. 연료의 효율적인 이용(적은 연료로 많은 출력)은 배출 물질 또한 적음을 의미한다.

2.3-3. 콤팩트한 사이즈

PFBC-CC는 규모가 작고 2차적인 정제 설비가 불필요하기 때문에 넓은 발전소 부지 공간이 없는 혼잡한 곳에 잘 맞는다. 또한 PFBC-CC가 주변의 건물이나 혹은 통행로에 위험이나 방해로 주지 않고 자리 잡을 수 있다는 것을 의미하기도 한다. PFBC-CC는 커다란 발전소의 부분 리파워링에 쉽게 사용되기도 하고 혹은 도심 한가운데에 설치할 수도 있다. 스톡홀름의 Vartan 발전소가 이와 같은 경우이다.

가압용기는 기존의 석탄 연소 보일러에 비해 약 1/3 크기이다. 따라서 건설에 필요한 재료가 적게 들어 경제적으로 이득이며 다른 한편으로 무게가 가볍기 때문에 수송이 용이하다.

2.3-4. 유연성(다양성)

PFBC-CC는 모듈화 되어 있으며 모듈이 가능하면 시스템 구성을 유연하게 할 수 있다. 또한 PFBC-CC는 다

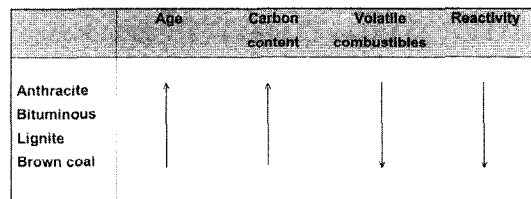


Fig. 7. Variations in coal properties.

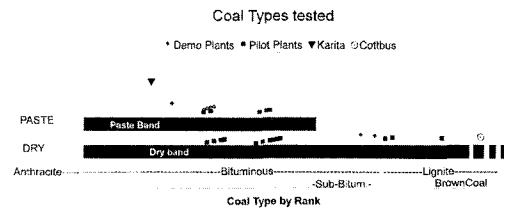


Fig. 8. PFBC-CC competitive profile, acceptable fuel range.

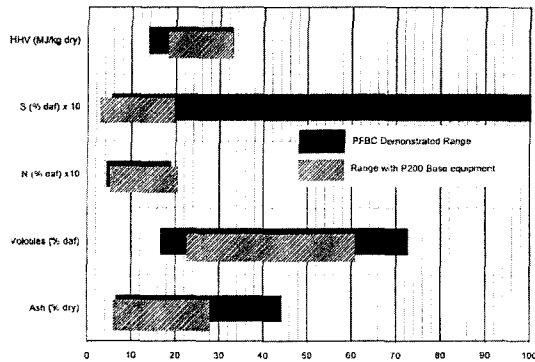


Fig. 9. PFBC-CC demonstrated ranges of different fuel properties.

양한 연료를 사용할 수 있다. 연료로서의 석탄은 다양한 급이 있고 Fig. 7에서와 같이 갈탄과 무연탄의 연료 성상에 있어 몇 가지 차이를 보인다.

PFBC-CC에 실증된 다양한 연료 종류 및 성상을 Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다

2-3-5. 회 특성

① 자체 결합성

역청탄의 회와 흡수제 혼합물은 자체 결합성이 높고 그 효과도 오래 지속되는 것으로 나타났다. 회 혼합물에 적절한 양의 물만 더해주면 굳어진다. 약 30일간 굳힌 후에는 최고 강도가 40~50 MPa에 이르며 매우 좋은 품질의 콘크리트에 견줄 수 있는 강도이고 여기에는 어떠한 접착성 첨가제도 사용할 필요가 없다.

② 비 용해성

PFBC-CC 공정의 온도가 상대적으로 낮기 때문에, PFBC-CC 회는 다른 회와는 대조적으로 비 용해성을 갖는다. 이것이 좋은 자체 결합성을 가지게 하는 원인 중 하나로 생각된다.

③ 낮은 유리 석회(CaO) 농도

PFBC-CC 공정에서 반응하지 않은 흡수제는 탄산칼슘(CaCO_3)의 형태로 존재한다. 이는 PFBC-CC 회가 매우 낮은 농도의 유리 석회를 함유하고 있다는 것을 의미하며 유리 석회는 화학적으로 매우 공격적이며 반드시 중화되어야 하기 때문에 이 같은 사실로 PFBC-CC 회의 사용을 매우 긍정적으로 생각할 수 있다.

④ 침출 거동

흡수제를 사용하기 때문에 PFBC-CC 침출수에서 Ca와 SO_4 이온의 농도는 매우 높다. 그러나 이 이온들을 제외한 다른 이온들은 일반적인 석탄 연소시의 회에서 침출되는 것보다 많지 않은 양이 발견되었다.

고체화된 상태의 PFBC-CC 회 혼합물은 물 침투성에서 매우 좋은 내성을 보였다. 여기에는 다른 이점도 있

다. 매립지에 사용할 때 이것은 다른 유해한 폐기물로부터 환경을 보호하는데 사용될 수 있다. 또한 합성 자갈을 생산하여 도로 건설에 사용하거나 혹은 슬라브나 벽돌과 같이 간단한 건축 자재를 생산할 수 있다.

⑤ 낮은 미연 탄소 농도

회 중의 미연 탄소 농도는 여러 가지 인자에 의해 영향을 받으며 이 중에는 석탄의 반응성, 연소 온도 및 과잉 공기가 가장 중요한 것이다. 일반적으로 PFBC-CC의 연소 효율은 매우 높기 때문에 회 중의 미연 탄소 함량은 매우 낮게 유지된다.

2-4. PFBC-CC 환경특성

2-4-1. NOx 배출^{[3][4][5]}

화석 연료를 사용함으로써 인한 질산화물의 배출은 산성비의 원인 중 하나가 된다. 산성비는 호수, 숲, 바다 그리고 토양에서 자연의 균형을 깬다. 발전 분야가 NOx 배출의 주요원이 아니라 할지라도 최근 발전 기술에서는 대기로 방출되는 NOx량을 최소화하고자 하는 노력이 중요시 되고 있다.

① NOx 배출 저감법

○ 온도 및 과잉 공기의 저감

유동층 연소는 900°C 미만의 저온에서 이루어진다. 이 온도에서 연소 공기 중의 N₂는 안정적이고 공기 중의 질소는 NOx를 형성하지 않는다. 배출되는 질산화물은 연료 자체에 존재하는 질소에 의한 것이며 이것이 유동층 공정에서 기본적으로 NOx 방출량이 낮은 주요 원인이다. 부하에 따라 연료 중 질소의 5~20%가 NOx로 전환된다. 그 중 90% 가량이 NO이며 나머지 10%가 NO₂이다. 과잉 공기량이 증가하면 질소 산화물의 배출량이 증가하며 NOx 생성에 사용할 수 있는 O₂의 양이 증가하게 된다. 따라서 부분부하에서는 별도의 장치가 없으면 NOx 발생량이 증가한다.

○ 압력 상승

PFBC 운전 압력에서 CO₂는 높은 분압을 가지며 이는 탈황을 위해 유동층에 공급되는 흡수제의 소성으로부터 방출되는 유리 석회(CaO)가 없음을 의미한다. 이 역시 PFBC-CC에서 본질적으로 질산화물 배출량이 낮은 다른 이유가 되는데, 유리 석회는 NOx 생성에 기여하는 것으로 알려져 있기 때문이다. PFBC에서는 질산화물 및 황산화물 배출이 모두 낮다. 층 하부에서 생성된 NOx는 층을 따라 상승하면서 H₂, CO, 코크 등의 존재 때문에 NO에서 N₂로 환원된다.

○ 암모니아를 이용한 선택적 비촉매 환원법(SNCR, selective non-catalytic reduction)

600°C 이상의 온도에서 배가스에 암모니아와 같은 첨가물을 주입하면 NOx를 줄일 수 있다고 알려져 있다.

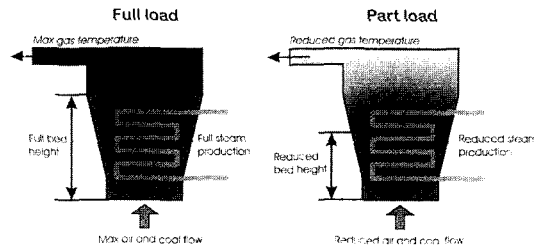
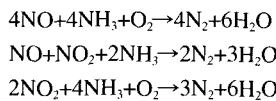
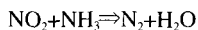


Fig. 10. Load change.

PFBC-CC에서는 100% 부하인 경우 암모니아를 주입함으로써 NOx 80% 가량을 감소시킬 수 있다. 그 효과는 가스 온도가 600°C 이하가 되는 40% 부하 정도 부근에서 효과가 없어질 때까지 점차적으로 감소한다. 사실상 첨가물 손실이 없는 화학양론은 약 2~3 정도이다. 반응은 매우 복잡하며 일반적으로 다음과 같이 간략하게 표현된다.



이는 또한 다음과 같은 불균형 반응으로 표현되기도 한다.



- 프리보드(freeboard) 연소 장치 -

프리보드와 가스터빈에서의 온도는 100% 부하에서는 거의 층 상부의 온도와 동일하다. 하지만 가스는 프리보드에서 약간 냉각된다. 부하를 감소시킬 때는 층의 높이도 감소된다. 이 때 층 상부의 튜브 번들은 Fig. 10에서와 같이 층 표면 위에 위치하고 따라서 튜브 번들은 가스터빈으로 향하는 가스를 냉각시키기 시작한다.

부분부하에서 NOx 배출량을 감소시키기 위해 가능한 방법은 모든 부하 범위에서 프리보드의 가스 온도를 일정하게 유지하는 것이다. Fig. 11에서와 같이 층 위의 프리보드에 2차 연소를 도입함으로써 배가스의 온도를 높

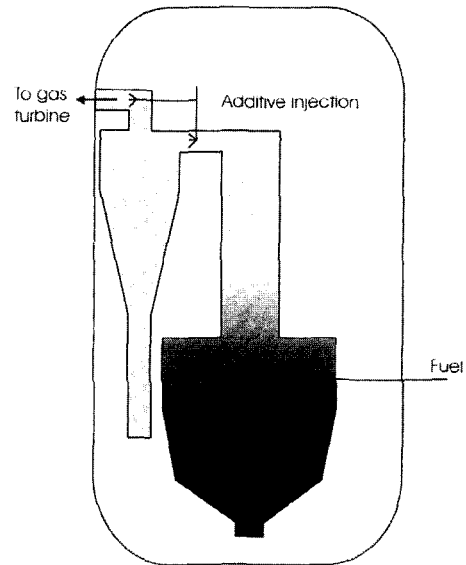


Fig. 11. Freeboard firing and additive injection.

게 유지할 수 있고 모든 부하 영역에서 NOx 농도를 낮추기 위한 암모니아 주입에도 좋은 조건을 만들어준다.

○ 선택적 촉매 환원법(SCR, selective catalytic reduction)

필요하다면 작은 선택적 촉매 반응기를 절탄기 앞의 배가스 덕트에 설치할 수 있다. SCR은 NOx 저감 효과를 높이고 암모니아 손실을 막기 위해 암모니아 주입과 함께 사용된다. 다량의 배가스에는 막대한 양의 촉매가 필요하기 때문에 이 기술은 많은 비용이 들고 SNCR 보다 많은 공간이 필요하다. 배출 제한치가 너무 낮아서 SNCR만으로는 그 기준을 달성할 수 없을 때 다음 단계로 사용하는 것이 촉매를 사용하는 방법이다. 또한 SCR은 SNCR의 미반응 암모니아를 포집하여 암모니아 손실로 인해 과량의 암모니아가 배출되는 위험을 막아 주는 것으로 입증되었다. 촉매는 몇 개의 층(0.5~1m 두께)으로 나누어지며 각각 반응기 내부의 상부에 위치한다. 촉매가 노화되면 반응성은 시간에 따라 지속적으로 감

Table 1. NOx emissions measured at PFBC-CC plants.

Plant	Requirement (mg/MJ)	Typical values (mg/MJ)	Best values (mg/MJ)	Special measures
Vartan	50 (designed for 70)	10~50	<10	ammonia injection+"minicat"
Tidd	260	75~90	70	none
Escatron	150	75~90	70	none
Wakamatsu	43	15~40	10	SCR
Karita		25		SCR
Cottbus				
- full load	43	38		ammonia injection
- part load	75	65		ammonia injection+freeboard firing

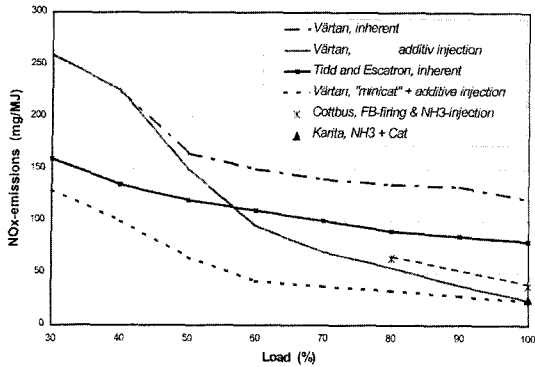


Fig. 12. PFBC-CC NOx emissions.

소하기 때문에 촉매 층은 반응기가 운전 중인 동안은 주기적으로 교체되어야 한다.

② PFBC-CC 실증 발전소에서의 NOx 배출

PFBC-CC 실증 발전소에서 측정된 배출량은 Table 1과 같다. Tidd와 Escatron에서의 배출 요구치는 쉽게 만족되었다. 그러나 Vartan 플랜트에서는 엄격한 배출 요구 조건을 만족시키기 위해 추가공정(미니캣(minicat: 작은 사이즈의 SCR 장치) 및 프리보드 연소)이 설치되었다. Wakamatsu에서는 SCR이 사용되었고 Cottbus에서는 SNCR과 오일을 이용한 프리보드 연소가 사용되었다. 부하를 함수로 할 때와 여러가지 NOx 저감 방법을 사용할 때의 NOx 배출량은 Fig. 12와 같다.

2-4-2. 일산화탄소, CO

CO는 연소 및 공정 상태에 대한 좋은 지시 화합물이다. CO 배출량이 높은 것은 연소가 잘 이루어지지 않고 있다는 것이며 이와 같은 경우 H₂, CH₄, 기타 POM (poly organic material)이라 불리는 고분자 탄화수소 등과 같은 비연소 가스가 있을 위험이 존재한다.

환경 및 인체에 대해 매우 위험한 것으로 간주되고 있는 CO의 농도는 일반적인 운전 중에는 매우 낮다. POM 농도도 매우 낮아서 환경에 미치는 영향은 무시할 수 있

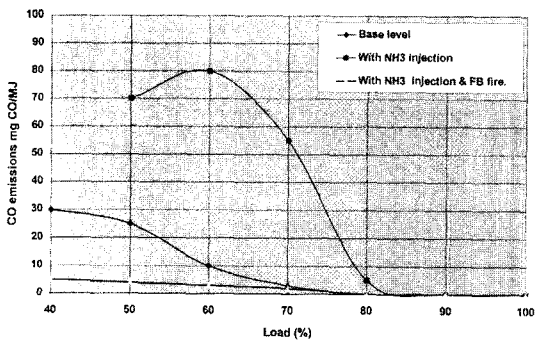


Fig. 13. CO emissions at Vartan.

을 정도이지만 인체에 대한 영향은 매우 중요하다. 동물 실험 결과, 연소 중에 생성될 수 있는 몇 가지 유기 화합물은 발암성 및 돌연변이를 유발하는 것으로 나타났다.

① CO 배출 원리

Fig. 13에서 나타나는 바와 같이 기본적인 CO 배출량은 부하가 감소함에 따라 증가한다. CO가 CO₂로 산화되는 현상은 온도에 매우 의존적이며, 따라서 이와 같은 효과는 부하가 감소됨에 따라 프리보드 온도가 낮아지기 때문이다.

② SNCR과 CO 배출

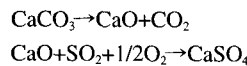
PFBC-CC에서 암모니아 주입을 하는 경우 저 부하에서 CO 배출량이 증가함이 관찰되었다. 이는 암모니아가 프리보드에서 CO의 2차 연소를 방해하기 때문이다. 반면 프리보드 연소를 적용하는 경우, 프리보드의 온도는 암모니아가 존재할지라도 모든 부하 영역에서 2차 연소가 일어나기에 적절한 정도로 높게 유지된다. 따라서 CO 배출량은 모든 부하 범위에서 매우 낮아진다.

2-4-3. 탈황

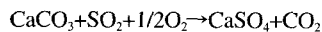
오일과 석탄을 이용함으로써 발생하는 황산화물은 산성비의 주요 원인이다.

PFBC-CC에서 흡수제(석회석 혹은 백운석)는 석탄 중의 유황을 포집하는데 사용되며 흡수제는 유동층에 석탄과 함께 혹은 분리된 주입 시스템에 의해 공급된다. PFBC-CC의 고압 조건 때문에 황 포집은 상압 유동층에서와 다른 경로를 갖는다.

○ 상압유동층에서의 탈황 반응(2단계)



○ 가압유동층에서의 탈황반응(1단계)



가압유동층에서는 흡수제가 처음 소성 상태를 거친 후 황화 반응이 일어나는 대신, 화학 반응이 CO₂를 SO₂와 산소로 대체하면서 1단계 반응이 일어난다. 이 때문에 PFBC-CC 탈황에서 발생하는 고체 잔여물인 석고와 흡수제가 유리 석회를 함유하고 있지 않아 무해하므로 건축 자재로 사용할 수 있다.

황 제거율은 석탄의 종류(등급, 화학적 조성, 휘발분과 휘 사이의 유황 분포 등), 흡수제의 종류 등과 같은 몇 가지 인자에 의해 영향을 받는다. 유동화 속도가 낮고 층이 깊기 때문에 층에서 고체와 기체의 체류 시간이 길어 황 제거율이 높아진다. 산소는 탈황 반응에 참여하므로 층에서 황 제거율을 좋게 하기 위해서는 연료 분산을 좋게 하여 환원 영역이 생성되는 것을 방지하여야 한다.

압력이나 과잉 공기 농도 등과 같은 다른 공정 파라미터 역시 황 포집 시간에 영향을 준다. 흡수제 사용량을 증가시키거나(혹은 Ca/S 비율, 즉, 석탄 중 1몰의 황(S)에 대해 더해지는 흡수제 중 Ca의 몰을 증가시키거나) 또는 흡수제의 반응성을 증가시키면 황 제거율이 향상된다.

탈황 반응이 어느 정도 진행될 것인가는 사용되는 흡수제의 반응성에 의해 좌우된다. 흡수제의 반응성에 영향을 주는 인자는 다음과 같다.

- 흡수제 종류
- 흡수제의 지질학적 구조
- 흡수제 입도 분포
- 큰 입자인 경우
 - 층에서 입자의 체류 시간
 - 층 턴 오버(turn over, 혼합) 속도
- 작은 입자인 경우
 - 기체의 체류 시간

백운석은 일반적으로 석회석보다 반응성이 작으며 같은 양을 사용했을 때 Fig. 14에서와 같이 낮은 황 제거율을 보이지만 석회석과 백운석의 종류에 따라 또한 다른 양상을 보인다. Fig. 15에서와 같이 동일한 양의 흡

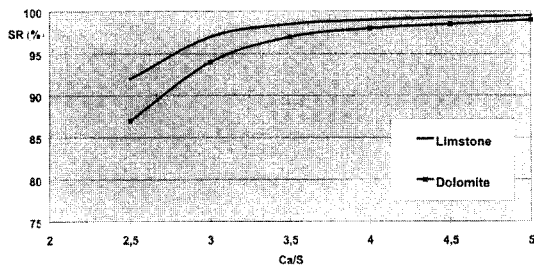


Fig. 14. Vartan PFBC-CC, sulfur retention (SR) for different sorbents as a function of sorbent dosage (Ca/S).

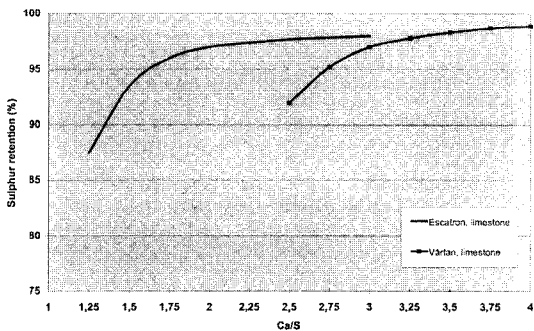


Fig. 15. Vartan & Escatron, sulfur retention with limestone as a function of sorbent dosage (Ca/S).

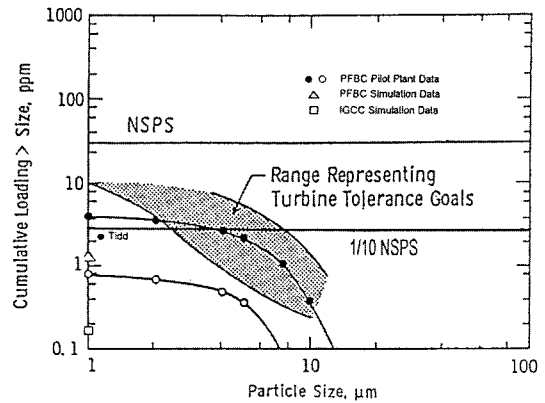


Fig. 16. Filter requirements for gas turbine.

수제를 사용하였을지라도 흡수제가 생산된 지역에 따라 다른 황 제거율을 나타낸다.

2-4-4. 분진 제거

유동층에서 생산된 연료가스는 가스터빈에 주입되기 전에 가스터빈 블레이드 마모 방지를 위해 분진을 제거하여야 한다. 현재 실증 공정에 사용되고 있는 분진 제거 방법은 1차로 사이클론에서 처리하고 이후 세라믹 백필터를 사용한다. 이외 개발되고 있는 분진 제거 방법으로는 그레놀 베드 필터, 정전기식 사이클론, 로터리 플로로 사이클론(rotary flow cyclone), 사이클로 센트리퓨즈(cyclo centrifuge), 전기집진 장치, 세라믹 패널 등이 있다.

터빈에서 문제가 발생하지 않는 범위의 분진 양 및 입자크기를 Fig. 16⁶⁾에 나타내었다. 고효율 가스터빈에는 일반 연료를 사용할 때 마모, 침적 및 부식 환경을 방지하기 위한 최대 허용치가 있다. 고온 분진 제거 장치는 분진뿐만 아니라 부식을 일으킬 수 있는 화학물질, Na, K, V, Ca, Pb 등을 제거할 수 있도록 설계할 것을 요구하고 있다. 미국의 환경 규제 기준에서 요구하는 총 분진 배출 기준치는 0.03 lb/MMBtu(18 ppmw)이지만 터빈 블레이드에서는 5 μm 보다 큰 입자가 10 ppm 이상 있으면 곤란하다. 터빈의 분진 유입은 마모와 관련되고 마모는 입자의 충돌에너지와 관계되기 때문에 입자크기가 클수록 허용되는 분진의 농도는 적어야한다¹⁷⁾.

2-4-5. 알칼리 금속 제거¹⁸⁾

가스터빈에 공급되는 가스는 터빈 블레이드 부식을 최소화하기 위해 연소 및 연료가스 중에 알칼리 금속 농도를 될 수 있는 대로 줄여야 한다. 발생하는 알칼리 물질은 나트륨과 칼륨이 대부분이며, 가압유동층의 경우 67~90 ppbw가 발생된다. 이는 일반 산업용 가스터빈 허용량 24 ppbw를 넘어서는 것으로 이를 제거하기 위한 공정을 추가하거나 세라믹 필터에서 효과적으로 알칼리 물

질을 제거하기 위한 보환을 해야 한다.

3. 결 론¹⁹⁾¹⁰⁾

전 세계적으로 기존 석탄화력 발전의 효율과 환경 성능이 낮은 등의 기술적 한계를 극복하고 환경규제 강화 등 미래의 여건 변화에 효과적으로 대응하기 위해서 청정석탄 기술(Clean Coal Technology)을 응용한 신기술 발전방식으로의 기술 전환 필요성이 요구되고 있다. 우리나라에서는 청정석탄 기술에 석탄가스화 복합발전(IGCC, Integrated coal gasification combined cycle)과 PFBC-CC가 포함되며 제1차 전력수급 기본계획(2002년 8월 산업자원부 공고)에는 이 두 가지 기술 중 한 가지를 선택하여 300 MW급 규모의 신규 청정석탄 발전소를 건설하도록 규정되어 있다. IGCC의 경우 국내에서 많은 관련 연구가 이루어져 향후 도입에 대비하고 있지만 PFBC-CC 국내 연구 실적은 매우 저조하며 특히 기술 도입에 대비한 기술성 평가 능력 확보 등의 관련 연구는 전무하다. 따라서 이와 같은 능력의 확보와 더불어 핵심 기술의 적기 개발이 시급하다.

PFBC-CC는 복합발전 기술을 사용함으로써 고효율 특성을 가지며 또한 환경 성능이 좋은 등의 장점을 가지고 있다. 특히 유동층의 특성 때문에 노 내 탈황이 가능해 배연 탈황 시스템이 필요치 않으며 낮은 연소 온도로 인해 NO_x 배출물이 적고 효율이 향상되기 때문에 CO₂ 배출 역시 적다. 보일러는 가압 연소 방식을 채택함으로써 매우 콤팩트하게 만들 수 있고 따라서 발전소 설치에 필요한 공간이 기존의 미분탄 화력 방식에 비해 적다. 또한 현재까지 PFBC-CC 실증 및 상업용 발전소는 좋은 환경 성능을 입증해 왔고 투자비와 운전비는 감소시키고 광범위한 연료의 사용 등의 유연성을 증가시키면서 환경 영향을 더욱 줄이고자 하는 노력이 계속되고 있다.

하지만 전반적으로 청정석탄 발전 기술 채택은 매우 서서히 진행되고 있고 특정 지역에서는 청정석탄 발전 기술이 근본적으로 배제되어 있기도 하다. 본문에서는 특히 가압유동층 복합발전 기술에 대한 기본 원리와 특성

에 대한 이해를 제시함으로써 신기술 도입시 우려되는 위험도 최소화에 기여하고자 하였으며 국내 PFBC-CC 기술 관련 연구의 저변 확대에 기여하고자 한다.

참고문헌

1. Pressurized fluidized bed combustion process, Alstom Power, from personnel contact.
2. "Why PFBC-CC?", ABB Carbon, from web. <http://www.abb.se/carbon/>
3. Johnsson, J.E.: "Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion", *Fuel*, 73(9), 1398-1415 (1994).
4. Lin, W., *et al.*: "Interaction between emissions of sulphur dioxide and nitrogen oxides in fluidized bed combustion", *Fuel*, 73(7), 1202 (1994).
5. Amand, L.-E. *et al.*: "Influence of SO₂ on the NO/N₂O chemistry in fluidized bed combustion", *Fuel* 72(4), 557 (1993).
6. Newby *et al.*: "Cross flow filter performance with second generation PFBC carbonizer fuel gas", *Proceeding of the 12th International conference on fluidized bed combustion*, 703 (1993).
7. Ayala *et al.*: "Development of sorbents for high temperature desulfurization in moving bed systems", *Proceeding of the Coal Fired Power Systems 94 - Advances in IGCC and PFBC Review Meeting*, Morgantown, 637 (1994).
8. Lee *et al.*: "Measurement at alkali-vapor emission from pressurized fluidized bed combustion of Illinois coals", *Proceeding of the 12th International conference on fluidized bed combustion*, 1359 (1993).
9. Present situation and prospects for coal application technology, Mita Shigeo, Electric Power Development Co. Ltd. (EPDC), 석탄이용국제 회의, 동경.
10. "Fluidized bed combustion systems for power generation and other industrial applications", *Technology status reports*, Department of Trade and Industry (2000).