

# 청정석탄기술(Clean Coal Technology)의 변천과 미래

윤용승 (고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부장)

## 1. 석탄의 활용 추이 및 CO<sub>2</sub> 이슈

석탄이 향후 2030년 이후까지 전 세계 1차에너지의 상당 부분을 담당할 것이라는 점은 국제에너지기구나 미국 에너지성, BP에너지전망 자료 등에서 일관되게 확인된다. OECD 국가들에서 전체 석탄사용량은 정체되고 중국과 인도에서 석탄사용량이 크게 증가되었지만, 최근에는 베트남이나 터키 등 자국 내 에너지자원을 최대한 활용하고자 석탄화력 발전소 건설을 확대하는 국가들도 늘고 있다.

한국과 같이 에너지 부존자원이 거의 없고 해외에 의존해야 하는 입장에서 에너지원 다변화는 정부와 민간에서 일관되게 추진되어 온 정책이다. 원자력이 확대되기 어렵고 재생가능에너지원에서 혁신적 결과가 나오지 않는 상황에서는 부득이 석탄이 역할을 할 수밖에 없다. 석유나 천연가스 대비 가격과 수급이 그래도 저가이면서 안정적이고, 최근 추세인 고효율과 CO<sub>2</sub> 저감까지 가능해지면 아마도 향후 100년 이상은 전기 생산 등에 유용하게 사용될 것이다. 석탄 활용에 걸림돌이었던 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, 분진, CO<sub>2</sub> 발생과 회재 중금속 용출, 미량이지만 수은 등에 대응이 이미 가능하기 때문에 이제는 석탄이 천연가스 수준 이상으로 청정하게 사용되는 시점에 도달하고 있다.

석탄자원을 이용하는데 향후 가장 문제가 될 부분은 바로 CO<sub>2</sub>를 저감시켜야 하는 점이다. 20세기 산업혁명 이후 지구 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도는 급격히 증가하는 추세로서 최근에는 375 ppm 이상을 기록하고 있다. 이러한 추세는 분명히 지구상의 기후변화를 초래할 것이므로 전 세계적인 저감 노력과 압력이 뒤따르고 있다. 석탄은 기존의 방법으로 사용이 계속되는 한, CO<sub>2</sub> 발생의 주범으로 각인되어 사용에 따른 각종 불이익이 뒤따를 것으로 보이며 CO<sub>2</sub> 저감이 당연시되는 활용방법이 요구되고 있다.

전 세계 CO<sub>2</sub> 발생량의 30% 정도가 화석연료 발전에서 발생되고 있고 한국은 약 24%가 화석연료 발전에서 발생한다. 미국과 유럽연합을 중심으로 신규 석탄화력 발전소 건설은 반드시 CO<sub>2</sub> 포집 저감에 대한 대안을 제시해야만 하는 쪽으로 이미 진행되고 있다. 이제 석탄화력에서 CO<sub>2</sub> 문제는 그 시점의 차이는 있지만, 이미 추는 저감을 필히 해야만 하는 쪽으로 기울었다.

2009년부터 석탄화력발전소에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 포집하여 제거하는 노력이 본격적으로 가시화되고 있다. 미국 캘리포니아주는 CO<sub>2</sub> 배출기준을 제시하고 신규 석탄화력 발전설비는 이를 맞추도록 하고 있다. 이 기준은 1,100 lb(499 kg)-CO<sub>2</sub>/MWh로서 발생하는 CO<sub>2</sub>의 50%를 포집 제거하면 만족이 된다. 천연가스 사용 복합발전에서는 770 lb(350 kg)-CO<sub>2</sub>/MWh가 발생되고 있으므로 석탄화력발전에서 발생하는 CO<sub>2</sub>의 70%를 제거하면 천연가스 복합발전에 준하는 CO<sub>2</sub> 발생량이 된다. 90% 이상 CO<sub>2</sub> 포집비율이 석탄화력에서 달성되면 천연가스 복합발전보다 CO<sub>2</sub> 측면에서 오히려 환경 친화적이 된다. 문제는 아직 CO<sub>2</sub> 포집 비용이 사회적으로 감당할 수준보다 크게 높다는 점이다.

석탄화력발전소에 대한 CO<sub>2</sub> 배출허용 기준은 미국과 유럽연합의 예를 보면, 500 또는 550 kg-CO<sub>2</sub>/MWh (g-CO<sub>2</sub>/kWh)로 의견이 모아지고 있다. 이 시기는 2020-2030년 사이로 예상되며, 이 시기까지 CO<sub>2</sub> 저감기술과 관련된 플랜트 공정 기술을 확보한 몇 개 회사는 엄청난 사업기회와 이윤을 얻을 수 있다는 의미가 되기도 한다. CCS(Carbon Capture & Storage) 분야에 세계 메이저 정유, 중공업, 엔지니어링 회사들이 참여하는 배경이기도 하다.

### 2. 청정석탄기술(CCT: Clean Coal Technology)의 종류

Clean Coal Technology(CCT)는 크게 보아 아래 4가지 범위로 정의될 수 있다. 단어 자체가 의미하는 청정(clean)의 측면에서 전통적 공해발생 물질인 SOx, NOx, 분진을 제거하는 기술과 석탄자체에서 불순물(회분, 유황 등)을 제거하여 탄소 위주의 청정한 연료로 제조해서 활용하는 기술, 고효율 석탄발전을 추구함으로써 같은 전기를 생산하는데 적은 석탄을 사용하는 기술, 최근에 부각된 CO<sub>2</sub>를 분리 포집해서 지하에 저장하는 기술이 대표적이다.

#### (1) 석탄 이용에 따른 공해물질 저감: SOx, NOx, 분진 등 제거를 통해 석탄이용에 따른 공해방지

: 탈황 - 배연탈황 (FGD, Flue Gas Desulfurization)

: 탈질 - SNCR (Selective Non-catalytic Reduction),

SCR (Selective Catalytic Reduction)

: 분진 제거 - 사이클론, 스크러버, 전기집진기, 백필터

#### (2) 석탄 내부 회분제거 초청정석탄 (미래 기술)

: 무회분 석탄

#### (3) 효율 증가: 같은 전기나 에너지 생산에 소요되는 석탄의 양을 효율 증가를 통해서 줄여 공해물질 발생량을 줄이고 지구자원 소모를 최소화

: 초초임계압(USC: Ultra Supercritical) 발전

: 가스화복합(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) 발전

: 유동층연소(FBC: Fluidized Bed Combustion) 발전

#### (4) CO<sub>2</sub> 포집 제거/저장: 지구온난화의 주요 인자로 부각된 CO<sub>2</sub>를 석탄이용시 포집하고 저장 또는 다른 형태로 변환시켜 제거 또는 저장

: CCS (Carbon Capture & Storage)

### 3. 청정석탄기술(CCT)의 변천

청정석탄기술은 석탄을 에너지로 사용하면서 환경에 주는 부하를 줄여줄 수 있는 모든 기술을 포함한다. 석탄 채굴할 때 회분 정제부터 연소, 가스화, CO<sub>2</sub> 포집저장까지에 해당한다. CCT의 출발은 1970년대 미국에서 5대호 근처의 산성비에 의한 산림 피해가 부각되면서 이를 해결하고자 1980년대부터 본격 시작되었다. 이전에는 석탄으로부터

회분이나 유황 성분을 제거하는 전처리 기술이 많이 적용되었지만, 지금은 같은 양의 석탄을 사용해서 많은 전기 등 에너지를 회수함으로써 환경부하를 줄이는 고효율 석탄이용 기술과 지구온난화가 2000년대 들어 본격 부각되면서 CO<sub>2</sub> 저감기술이 CCT 기술의 근간을 이루고 있다.

국내 CCT의 변화 경과를 요약해보면 다음과 같다. 1980-1990년대에는 화석연료 내에 포함된 유황과 질소 성분이 산소와 반응하여 생성되는 SOx, NOx를 제거하는 설비 구축에 중점을 두었다. 초기에는 해외기술을 도입하여 설치한 이후에 1990년대 들어 대부분 기술과 제작 모두가 국산화되었다. 이후 2000년대 들어 고효율 석탄화력발전기술인 IGCC(석탄 가스화복합발전, Integrated Gasification Combined Cycle)와 USC(초초임계압, Ultra Supercritical)발전에 대한 국내 논의가 시작되어 2000년대 중반부터 USC 국내 건설이 시작되었고 IGCC도 2012년에 착공하여 2015년 태안화력에 완공을 예정하고 있다. 이 경우도 해외기술이 도입되어 건설(USC는 일본 히다치기술, IGCC는 네덜란드 Shell사 기술) 되면서 국내 기술 개발이 병행되고 있고 차기 호기에는 국내기술이 주로 적용되도록 하는 전략이 추진되고 있다. 이는 원자력발전 국내기술 자립화 과정에서 얻은 교훈을 차세대 석탄화력발전기술에 적용하는 경우에 해당한다.

2010년 이후에는 지구온난화 대응차원에서 석탄화력 발생 CO<sub>2</sub>에 대응하는 전략이 필요하게 되었고 CCS 기술이 부각되는 단계에 있다.

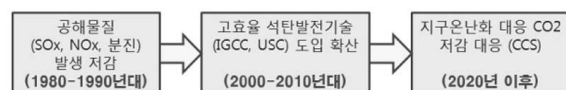


그림 1. 청정석탄기술(CCT)의 핵심대상 기술 변천

궁극적인 CCT의 목표는 대기 중으로 SOx NOx, 분진, 수은 등 공해물질과 지구온난화 가스인 CO<sub>2</sub>의 배출이 전혀 없는 zero-emission 석탄화력발전이다. 이러한 개념을 구현할 각 세부기술은 대부분 상용 또는 실증단계에 있어서 기술적으로는 2020년 이후 구현이 가능하나 아직 경제성은 매우 부족하다. 그 주된 이유는 탄소세 적용이 현실화되지 않고 있기 때문이다.

## 4. 청정석탄기술(CCT)의 주요 기술

### 가. 석탄이용에 따른 공해물질 저감기술

석탄에 포함된 유황과 질소 성분은 연소될 때 SOx와 NOx가 발생되는데 이들은 산성비와 스모그 등을 유발하게 된다. 한국을 포함한 OECD 국가들에서는 SOx와 NOx를 제거하는 탈황과 탈질설비는 대기오염물 규제를 통하여 필수적으로 설치되고 있다. 이들 기술은 한국도 자체기술을 보유하고 국내 기업이 생산하는 단계에 와있다. 중국도 환경설비 설치를 상당히 의무화하여 설치하여 대응하고 있다. 그러나, 베트남이나 기타 개발도상국에서는 아직 환경설비를 갖출 경제력이 뒷받침되지를 못하여 상당한 오염물질이 배출되고 있는 것도 현실이다.

미국 등 추세로 보아 수은 허용기준 등에서 강화된 규제가 예상되므로 이에 대한 대비가 필요하기도 하다. 석탄화력발전소에서 발생하는 수은의 총량은 미국 등 국가별로는 큰 숫자이지만 개별 발전소에서 발생하는 배기가스에 포함된 수은의 농도는 ppb 단위로 존재하기 때문에 저감기술이 황성탄소 등 흡착능력이 우수한 입자에 흡착을 시켜 제거하는 방법이 현재로서는 가장 현실적이다.

### 나. 석탄 내부 회분제거 초청정석탄기술 (미래 기술)

모든 유기물질의 구성원인 C, H, O, N, S에서 N과 S성분이 공해물질 발생의 원인이 되므로 이 성분을 제거하기도 하지만 FeS 형태의 일부 유황성분을 제외하고는 제거하는데 비용이 많이 소요된다. 석탄에서 미량 불순물을 제거하는 방식 대신에 석탄에서 필요로 하는 석탄성분만을 추출해내는 방식을 개발하게 되었다.

일본 제철사들이 주로 인도네시아 등 동남아 산지에서 저급탄을 일본으로 운송 활용하는 방안으로 초청정석탄 제조기술을 개발하기 시작하여, 현재는 파일럿급 단계에 이르러 있다. 하지만 근본적으로 용매를 사용하는 방식이기 때문에

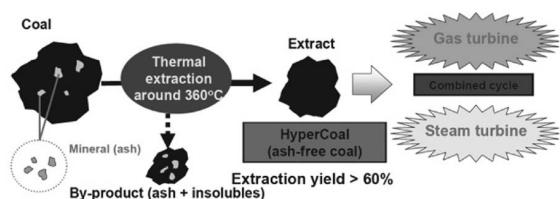


그림 2. 석탄에서 유용물질인 탄소만 선택 추출하여 활용하는 초청정 석탄기술 개요

단가를 낮추는 추가기술이 개발되어야 하거나 석탄을 고급 원료로 활용할 기반이 갖추어져야 상용화가 가능하다.

석탄에 포함된 회분이 제거되고 탄소 위주의 물질(hypercoal, ash-free coal)은 가스터빈 연소기에 곧바로 적용이 가능하므로, 해외 석탄산지에서 석탄에서 유용한 물질만을 추출 이송 활용한다는 측면에서 매력적인 기술이다. 하지만 국내도입을 하기에는 기술이 파일럿-demo급 규모에 머물고 있고 아직 경제성이 확보되지를 못하여, 2020년 이후 에너지 가격이 원유 기준으로 배럴당 150불 이상이 되면 고려대상이 될 수 있겠다.

### 다. 효율 증가 기술

기존 석탄화력발전기술을 대체할 차세대 신석탄기술에는 초초임계압(USC: Ultra Supercritical)발전기술, 석탄가스화 복합발전(IGCC), 가압유동층연소기술(PFBC: Pressurized Fluidized Bed Combustion)이 있다.

PBFC와 USC기술은 CO<sub>2</sub>가 최종 결과물인 연소방식에 의해 반응이 진행되고 질소가 79% 함유된 공기를 사용하게 되므로 농축된 CO<sub>2</sub>가 요구되는 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 측면에서는 IGCC보다 다소 불리한 측면이 있다. 기술 방향 측면에서 요약하면, 차세대 석탄화력발전소 기술은 IGCC와 USC가 대세이고 CO<sub>2</sub> 규제가 본격화되기 이전에는 USC가 설비 규모와 건설단가 측면에서 IGCC 대비 유리하다. 현재 국제적으로 상용규모의 신석탄발전은 USC와 IGCC 기술이 두 축인 점은 확실하다.

석탄발전소를 국내에 추가 건설이 적어도 2030년대까지는 필수적인 상황에서 어떤 CCT 발전소를 어떤 비율로 건설 운영할 것인가는 단지 전기 생산 측면만이 아닌 관련 플랜트 사업의 국제 경쟁력 차원에서도 심도 있게 고민되어야 할 사항이다.

전기 생산을 효율적으로 생산만 하는 관점에서는 USC가 2020년 이후 2030년까지 계속 커나갈 시장이다. 2020년 이후 적어도 OECD 국가들에서는 인허가 의무사항으로 강제화될 가능성이 매우 높은 CO<sub>2</sub> 저감(천연가스 사용 발전하는 수준의 CO<sub>2</sub> 발생량까지 저감)측면에서도 기술을 본다면 IGCC도 일정부분 대비를 할 필요가 있겠다. 따라서 USC와 IGCC 발전소 신규 건설을 2020-2030년대까지를 내다보고 9:1이나 8:2 등의 비율로 추진해나가는 것이 국가적으로 바람직한 CCT 대응전략으로 보인다. 기술의 국산화와 자국 생산을 통한 건설비와 유지보수비 절감 및 관련 산업의 파급효과도 고려할 필요가 있다.

### (1) 초초임계압(USC) 석탄화력발전 기술

수증기는 압력과 온도가 높으면 더 많은 에너지를 함유하게 된다. 이 온도를 계속 증가시켜 임계압인 225.65 kg/cm<sup>2</sup>과 374°C를 지나게 되면 초임계상태로 증기가 되어 기체와 액체 상태가 공존하는 영역에 되는데 이 초임계 상태에서는 어떤 액체도 부식성이 나타나게 된다. 초임계 액체는 기체의 확산성과 액체의 용해성을 가지는데, 초임계 상태에 있는 물은 금과 같은 귀금속도 녹이고 셀룰로오스나 다이옥신과 같은 물질들도 분해할 수 있다. 초초임계압발전(USC)는 기존 초임계압보다 더 높은 246 kg/cm<sup>2</sup> 이상 압력조건과 증기온도 593°C 이상이 적용된 발전소를 말한다.

최근의 추세는 증기조건을 300 bar 이상, 600°C로 올리는 데 까지 도달해 있다. 기존 석탄화력발전소의 HHV 기준 발전 효율이 38%대인데 반하여 USC는 41% 이상의 발전효율을 보여주고 있고, 1기 규모도 원자력발전과 비슷한 1,000 MW로 주로 건설되고 있다.

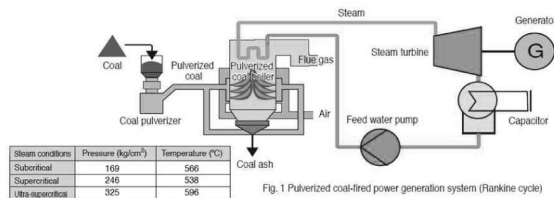


그림 3. 미분탄연소 석탄화력발전소 개념도와 아임계, 초임계, 초초임계압 스팀 조건

### (2) 석탄가스화복합발전(IGCC) 기술

석탄가스화복합발전 (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle) 기술은 석탄을 고온, 고압하에서 가스화시켜 일산화탄소(CO) 및 수소(H<sub>2</sub>)가 주성분인 가스를 제조·정제한 후 가스터빈을 구동하고 가스화기 및 가스터빈의 배가스 열로 증기터빈을 구동하는 미래 친환경 발전기술이다.

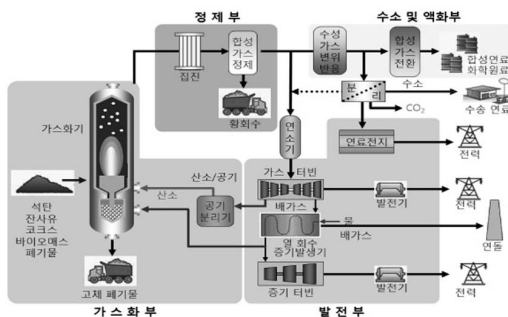


그림 4. 석탄가스화복합(IGCC)발전의 공정개요도

IGCC는 발전효율이 높고(현재 38-42%, 고성능 가스터빈 사용시 46%가 가능하며(HHV(Higher Heating Value), 송전단 기준), 환경친화적이며(탈황율 99.9%, NOx 25 ppm), 기존 화력발전 대비 15%대 CO<sub>2</sub> 저감효과(CCS 장착시 90% 이상)가 있고, 다양한 연료(석탄, 바이오매스, 폐기물)를 사용할 수 있다. 또한, IGCC의 근간을 이루는 가스화 기술은 석탄액화(CTL, Coal-To-Liquid), 수소생산, 합성천연가스(SNG, Synthetic Natural Gas) 생산, 각종 화학원료 생산 및 석탄가스화 연료전지(IGFC, Integrated Gasification Fuel Cell) 기술 등과 연계가 가능한 핵심기술이기도 하다.

향후 예상되는 효율증가 추세를 보면, USC가 42% 수준에서 Advanced-USC로 더 개발되면 46-48% 효율이 예상된다. 천연가스 발전은 가스터빈 기술의 향상에 따라 52%대에서 56%대로 향상될 것으로 예측되고, 가스터빈 효율향상의 혜택을 받는 IGCC도 현재 가스터빈 인입연소온도가 1,300°C인 가스터빈(예: GE사 7FA 가스터빈)을 사용하고 있는 단계에서 효율이 43-44%(실제 설비결과들은 39-41%)에 이르고, 가스터빈이 GE7FB로 2012년에 처음 도입되었는데 42% 효율을 예상한다. 이후 가스터빈 인입연소온도가 1,700°C 가스터빈이 도입되면 효율은 50%에 달하게 된다. 이후 연료전지가 대규모로 상용화된다면 60%대 발전효율도 가능하다.

### (3) 가압유동층연소(PFBC) 기술

가압유동층연소(PFBC) 기술은 유럽 보일러업체들에서 처음 개발이 시작되었고, 현재는 일본에서만 정부사업으로 실증설비 규모로 운영되고 있다. 국내 석탄화력발전소 상용 규모인 300 MW 이상 설비를 보증 공급할 업체가 없는 관계로, PFBC 기술이 국내에 도입될 가능성은 현재로서는 매우 낮다.

PFBC 기술자체 개념은 엔지니어링적으로는 매우 의미가 있고 타당하지만, 대규모 설비에 적용하는데 문제가 있어서

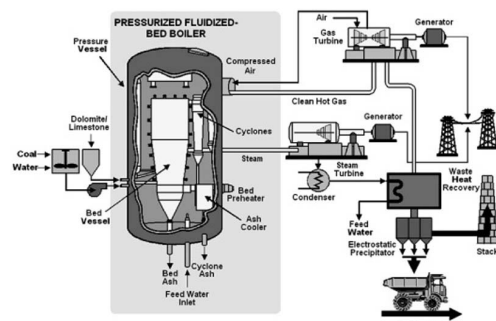


그림 5. 가압유동층연소(PFBC) 방식의 공정 개념도



중소규모 설비에 적합하다. 개념은 플랜트 전체가 가압상태로 운전되면 각각의 설비들이 가압용기로 제작되어야 하지만, 전체가 큰 가압용기 안에 장착되면 각각 설비의 내외부는 모두 가압 상태이므로 각 설비는 상압설비로 저렴하게 제작되어도 된다. 따라서 수백 MW급 설비에는 압력용기 제작 한계 때문에 제약이 따르게 된다.

일본 히다치중공업 등에서는 PFBC 기술을 더 발전시킨 개념으로 기술개발을 계속 하고 있기도 하다. 일본업체의 특징은 차별화된 기술을 장기간 지속적으로 개발해서 기술이 성숙되면 세계시장을 독과점하고 그 과정은 정부의 지원을 계속 받는다는 점이다

#### 라. 석탄이용 발생 CO<sub>2</sub>의 포집 저장(CCS) 기술

석탄화력발전소에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 양은 500MW급 1기에서 1년에 대략 300만톤의 CO<sub>2</sub>가 발생한다. CO<sub>2</sub>로부터 천연가스, 플라스틱을 만드는 기술이 개발되고 있기는 하지만 실제 사용되는 CO<sub>2</sub> 양은 많지 않다, 석탄발전에서 발생하는 양을 현재나 적어도 수십년 내 예상되는 기술로는 처리나 변환이 불가능하기 때문에 할 수 없이 지하에 저장하자는 개념이 도입되었다. 그러다가 원유나 천연가스 채굴에 스팀이 사용되는데 이를 CO<sub>2</sub>로 바꾸어 사용하니 원유나 천연가스의 채굴율이 5-15% 증가함을 발견하고는 EOR (Enhanced Oil Recovery) 사업에서 다량이 CO<sub>2</sub>가 필요하게 되어 CCS가 경제성 있는 사업으로 부각되게 되었다.

석탄화력에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 저감시키는 방향은 크게 2가지다. 우선은 가능한 한 고효율 기술을 적용함으로써 같은 전기 생산에서 발생하는 CO<sub>2</sub>의 양을 최소화하고, 나머지 발생 CO<sub>2</sub>는 CCS를 적용하여 Zero Emission을 달성한다는 개념이다([그림 6] 참조).

현재 전 세계에서 CO<sub>2</sub> 포집기술을 경쟁적으로 개발하고 있으나, 아직 탄소세가 가시화되지 않은 관계로 기술개발 단계에 머물고 있다. 현재 전 세계에서 CO<sub>2</sub> 포집저장이 상용

화되고 있는 부분은 EOR 원유회수 분야이고, 미국 노스다코다 석탄가스화 플랜트에서 CO<sub>2</sub>를 포집해서 캐나다로 이송 원유생산에 사용하는 경우가 유일하다.

## 5. 결론

석탄화력발전소는 이제 거의 zero emission 수준으로 전기 생산을 해야 하는 시기가 도래하고 있다. 기존의 전통적 공해물질인 SOx, NOx, 분진은 당연히 천연가스 발전수준 이하를 만족해야 하고, CO<sub>2</sub>도 최소 40% 이상 줄여야 신규 인허가를 받는 추세로 가고 있다. 이러한 석탄화력발전소에 대한 근본 패러다임 변혁이 2020년 이후 우선 OECD 국가들을 시작으로 강제화 되는 추세가 확실시되므로 이에 대한 대비가 필요하다.

궁극적으로 석탄화력발전은 천연가스보다 더 청정한 전기 생산방식의 기술로 개발되고 발생된 CO<sub>2</sub>는 90% 이상을 지하에 저장하여 향후 100-200년간 지하에 안정적으로 보관하는 방식으로 발전하게 된다. 석탄을 가스화 시켜서 수소와 CO<sub>2</sub>만으로 구성된 합성가스를 제조하고 수소는 에너지원이나 화학산업 원료로 사용 한 후 나머지 CO<sub>2</sub>는 지하저장 하는 개념의 플랜트가 2020-2030년 사이에는 상용 기술이 본격 보급되기 시작할 것으로 예상되기도 한다.

국내 중공업 기반이 국제경쟁력을 갖고 있고 이를 강화할 좋은 기회가 CCT 석탄발전 분야로 판단된다. USC는 기존 미분탄연소석탄발전의 연장선상에서 계속 건설될 것이고 IGCC는 새로운 패러다임의 석탄을 이용한 전기 생산방식이다. 1기당 건설비용이 4,000억원에서 1.4조원에 이르는 대형 플랜트 사업이고, 해외 기업들이 독과점하고 있는 분야이므로 더욱 경쟁력을 갖추어야만 할 분야이기도 하다.

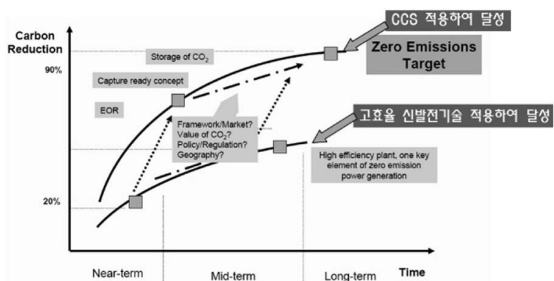


그림 6. 석탄화력에서 CO<sub>2</sub>를 제거하는 2가지 기술의 축 개요

#### •• 윤 용 승 ••



1979 연세대학교 화학공학과 학사  
1981 KAIST 화학공학과 석사  
1990 University of Utah 화학공학과 박사  
1991-1992 Brown University, Research Associate  
1993-현재 고등기술연구원 연구위원  
2009-현재 공업화학회 공업화학전망 편집위원장  
2013-현재 폐자원에너지기술협의회 회장