



'깨끗한 석탄'은 더러운 거짓말

호주 뉴사우스웨일스의 헌터 밸리에 있는 석탄화력발전소. 제공: Greenpeace/Sewell

석탄은 깨끗하지 않다는 이미지를 필사적으로 벗으려고 하고 있다. 석탄 산업계는 '고효율, 저탄소' 석탄화력발전소를 촉진하며 돈을 쏟아부어 청정에너지 대열에 합류하려 한다. 석탄 산업은 고효율 석탄화력발전소를 청정개발체제(CDM)와 같은 기후금융의 지원 대상에 포함시키고 싶어한다.

이런 속임수는 당장 그만둬야 한다.

석탄화력발전소는 지구상에서 가장 더러운 방식으로 전력을 생산한다. 공기와 물을 오염시키고 탄소 배출량이 모든 에너지원을 통틀어 가장 높기 때문이다. 오염물질 저감 장치를 이용해 독성 대기오염물질을 줄일 수 있다고 하지만, 오염물질 자체를 제거하지는 못한다. 오히려 석탄화력발전소는 대기 오염물질의 상당량을 액체와 고체 형태의 폐기물로 변형시키게 된다.

기업은 물론 여러 정부가 공중보건보다 이윤을 우선하며 적용 가능한 모든 종류의 오염물질 저감 장치를 설치하지 않는 경우가 흔하다. 이 경우, 유해한 오염물질이 대기로 배출돼 조기 사망과 질병 발병률을 높이는 원인이 된다.

석탄화력발전소는 발전 부문의 온실가스 배출량의 72%를 차지한다. 가장 효율적으로 설계됐다는 석탄화력발전소도 가스화력발전소보다 2배, 재생에너지 보다 20~80배 더 많은 이산화탄소를 배출한다.^{1,2} 이산화탄소 포집 저장하는 기술은 매우 값비싸고 대단히 비현실적이다.

게다가 석탄의 채굴과 전처리부터 수송과 석탄화력발전으로 이르는 과정에서 발생하는 사회적 환경적 비용을 반영한다면, 석탄화력발전은 결코 "깨끗한" 에너지원으로 말할 수 없을 것이다.

이번 자료는 석탄화력발전소의 오염저감과 효율 향상 관련 기술에 대해 짚어본다.

대기오염 저감장치가 있는 일반적인 550MW 석탄화력발전소의 가동 기간 중 배출물질

- 150백만톤의 이산화탄소 CO₂
- 70,000톤의 메탄
- 7800kg의 납
- 760kg의 수은
- 54,000톤의 질소산화물
- 64,000톤의 황산화물
- 12,000톤의 미세먼지
- 4,000톤의 일산화탄소
- 15,000kg의 아산화질소
- 440,000kg의 암모니아
- 24,000 kg의 육불화황
- 420백만 입방미터의 담수 추출
- 220백만 입방미터의 물 소비
- 206백만 입방미터의 물을 바다로 방류

출처: "Life Cycle Analysis: Supercritical Pulverized Coal (SCPC) Power Plant." US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, US DOE/NETL-403-110609, September 30, 2010. 설비용량 70%의 효율과 50년의 가동 기간으로 가정했음.



'청정 석탄' 기술의 허구성

수십 년 동안 석탄 산업은 첨단 기술을 홍보한다며 '청정 석탄'이란 표현을 즐겨 사용해왔다. 오늘날 '청정 석탄'이란 1) 높은 효율로 석탄을 연소시키는 발전소 2) 미세먼지, 이산화황, 질소 산화물을 비롯한 오염물질 저감 기술의 적용 3) 이산화탄소 포집 저장(Carbon capture and storage) 기술의 도입 등을 말한다.

1) 고효율 기술

석탄 산업계가 '고효율' 발전소에 대해 같은 양의 전기를 생산하는 데 더 적은 석탄을 소비한다고 홍보한다. 현재 가동 중인 석탄화력발전소의 75%는 **아임계(subcritical) 발전소**로 33~37%의 효율성을 가진다(이는 석탄 에너지의 33~37%가 전기 에너지로 전환된다는 의미다).

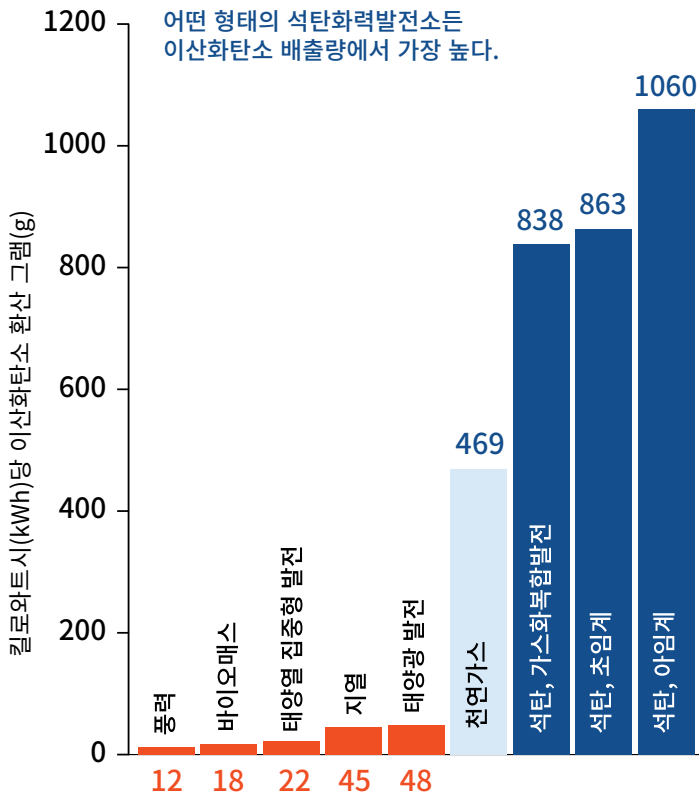
- **초임계 발전소(Supercritical plants)**는 물의 임계 압력 이상에서 증기를 생산하는 기술로 42~43%의 효율성을 가진다. 이 '신기술'은 1970년대에 처음 상용화됐다. 인도와 중국은 연료비를 낮추기 위해서 새로운 석탄화력발전소에 대해 초임계 기술을 도입하도록 국가 행정명령을 발표했다.
- **초초임계(Ultra-supercritical plants, USC) 발전소**는 더 높은 온도와 압력을 통해 효율성을 45%

까지 높이도록 설계됐다.

- **석탄가스화복합(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) 발전소**는 최대 50%의 효율성을 낼 수 있다고 추정된다. 이 발전소는 열 손실을 줄이기 위해 석탄 가스를 복합사이클 가스 터빈에 사용한다. 높은 설치비와 운영비용 그리고 훨씬 더 복잡한 설계가 요구되기 때문에 석탄가스화 발전소가 건설되는 예는 거의 없다.³
- **순환유동층연소(Circulating fluidised Bed Combustion, CFBC) 발전소**는 석회의 순환층 내에서 공기와 함께 석탄을 연소시킨다. 이 발전소는 이산화황 배출량을 줄이지만 다른 오염물질 배출량에 대해선 그렇지 않다. 다양한 종류의 연료를 태울 수 있다는 장점에도 다른 석탄화력발전소 기술보다는 효율성이 낮다.

초임계 석탄화력발전소가 아임계에 비해서 줄이는 이산화탄소 배출량은 15~20% 수준에 불과하다. 결국 석탄화력발전소는 다른 발전원보다 훨씬 더 많은 이산화탄소와 유해 오염물질을 배출하고 있다. 게다가 비싼 건설비용으로 많은 저개발국이 초임계 석탄화력발전의 도입을 주저하고 있다. 2011년 추가 건설된 석탄화력발전소의 절반이 아임계 기술에 해당했다.

발전원별 이산화탄소 배출량



출처: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Annex II: Methodology, 2011; Whitaker, M. et al (2012). "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation." Journal of Industrial Ecology, 16: S53-S72.

2) 대기오염 저감 장치

대기오염 저감 장치는 다양한 유해 오염물질의 대기 배출량을 낮출 수 있다. 그러나 이런 오염물질이 제거된 후에는 방수 처리도 되지 않은 석탄재 처리장에 저장되는 게 일반적이다. 오염물질이 토양과 지하수에 침출되어 사람과 생태계에 핵심적인 수자원을 오염시킨다. 게다가 다이옥신과 퓨란 과 같은 맹독성 오염물질을 제거할 수 있는 저감 기술이 현재까지 개발되지 않았다.

대기오염 저감 장치는 높은 비용으로 석탄화력발전소 한 기당 수천억 원의 비용이 추가로 발생한다. 오염 저감 장치로 인해 발전원가가 1킬로와트시(kWh)당 9원 가량 더 오를 수 있다. 오염 저감 장치는 석탄화력발전소 효율성을 떨어뜨려 같은 전력을 생산하기 위해 더 많은 석탄을 연소하게 된다. 발전소 운영사가 비용을 줄이기 위해 가능한 오염 저감 장치를 설치하지 않는 이유다. 오히려 운영 비용을 낮추기 위해 설치된 오염 저감 장치를 꺼두기도 한다. 공중 보건과 환경의 비용으로 기업 이익을 올리는 것이다.

석탄화력발전소에서 발생하는 일반적인 오염물질과 해당 오염물질의 저감 기술은 다음과 같다.

초미세먼지(PM2.5)

머리카락 지름보다 30배나 작은 초미세먼지는 심장마비, 심근경색, 호흡기 질환의 발병률을 높인다. 섬유질 필터나

집진장치는 미세먼지의 직접 배출량을 저감하는 일반적인 장치다. 집진장치는 총 미세먼지의 99.9%와 초미세먼지의 99.0~99.8%를 포집할 수 있다. 전형적인 600MW 석탄발전소의 경우, 이 장치의 설치비는 약 1000억 원 수준이다. 여과장치의 한 두 개가 망가질 경우, 미세먼지의 배출량은 20배 늘어날 수 있다.

전기 집진기(Electrostatic Precipitators, ESP)도 미세먼지 저감을 위한 장치다. 전기 집진기는 총 미세먼지의 99% 이상, 초미세먼지의 경우 80~95%를 포집 가능하다. 섬유질 필터와 전기 집진기 모두를 사용하면 미세먼지를 훨씬 더 많이 줄일 수 있는 가장 좋은 방식이다.

이런 장치들이 미세먼지의 직접적인 배출은 줄여주는 반면, 질소산화물과 이산화황 반응을 통해 대기에서 형성되는 미세먼지는 잡아내지 못한다. 이런 2차 미세먼지는 공중 보건 측면에서 특히 우려되는 부분이다.

이산화황

이산화황 배출은 산성비와 초미세먼지의 원인이 되고 암과 호흡기 질환을 증가시킨다. 이산화황을 저감하는 방법으로는 저유황탄으로 연료를 바꾸거나 연소 이후 배출 물질을 저감시키는 방식이다. 이산화황 배출량을 저감할 수 있는 기본적인 방식은 배연탈황화(Flue Gas Desulphurisation, FGD)다. 이 기술은 습식, 분무 건식 또는 건식 세정 방식을 이용한다.

습식 세정 방식은 배기가스에 다량의 물과 석회를 뿌린다. 국제에너지기구(IEA)에 따르면 습식 세정 방식으로 시간당 최대 50톤의 물이 소비된다고 추정된다. 이 과정에서 막대한 양의 황, 수은 그리고 기타 금속물질의 슬러리가 발생해 폐기물 처리장으로 보내져야 한다. 만약 폐기물 저수지를 가두던 보가 망가지면 수백만 리터의 폐기물이 강으로 흘러 들어가 물고기를 폐사시키고 중금속과 기타 유해물질로 식수와 농업용수를 오염시킨다. 첨단 설비는 보통 이산화황의 95% 이상을 제거하고, 집진 확률이 98~99%에 이를 수 있다.

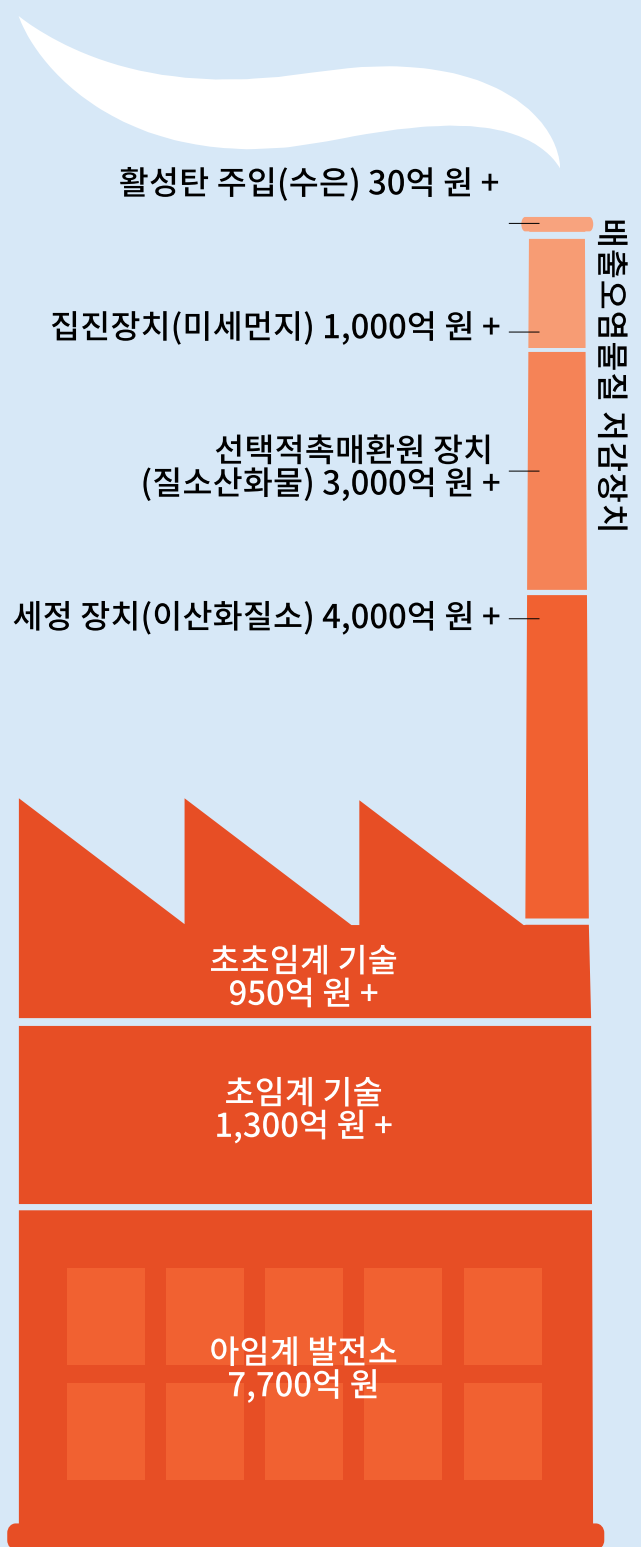
건식 세정 방식은 일부 석탄화력발전소에 도입된다. 이 과정에는 석회와 소량의 물이 투입돼 황과 기타 오염물질을 흡수하게 된다. 여기서 발생하는 폐기물은 집진장치나 전기집진기를 이용해 모아진다. 최신 기술로 90% 이상의 이산화황을 포집할 수 있다.

배연탈황화 설비는 가장 비싼 오염물질 저감 장치로, 보통 600MW 발전소에 3000~5000억 원의 비용이 든다. 이는 새로운 발전소 건설 비용의 약 25%에 달한다. 많은 신규 발전소에 이 설비를 도입하지 않는 이유는 바로 비싼 비용 때문이다.

질소산화물

질소산화물 배출은 초미세먼지와 오존 생성으로 이어질 수 있다. 이런 오염물질은 폐기종과 기관지염과 같은 호흡기 질환을 일으킬 확률을 높인다. 저녹스(질소산화물 저감) 연소 장치는 연소 온도를 낮춰 질소산화물 생성을 줄일 수 있다. 연소 이후에서 선택적 촉매환원(selective

600MW 석탄화력발전소 유형별 비용 예시



총 비용 = 1조8000억 원

참고: CO₂ 배출량은 저감되지 않음.

출처: IEA Technology Roadmap (2013년3월); NESCAUM (2011)

catalytic reduction, SCR)으로 질소산화물을 더 줄일 수 있다. 이런 질소산화물 저감 기술을 조합해 최대 90%까지 배출량을 감소시킬 수 있다. 선택적 촉매환원 장치는 발전소당 3,000억원 비용이 든다. 대안으로는 보다 저렴한 선택적 비촉매환원 기술이 있으며, 저감 효율은 60~80% 수준이다.

수은

석탄 연소는 인위적으로 발생하는 수은의 최대 오염원이다. 수은은 신경독소 물질로서 선천적 장애의 원인이며 아동의 뇌 발달에 회복 불가능한 피해를 남긴다. 2013년 140개국은 수은에 관한 유엔 미나마타 협약을 비준하고 수은의 환경 오염을 줄이는 데 합의했다.

수은 배출은 석탄 세척을 통해 일부 줄일 수 있지만, 이 과정에서 수은이 함유된 폐수를 발생시켜 지표수와 지하수를 오염시킬 수 있다. 수은 배출량의 대부분은 집진장치나 선택적 촉매환원제 또는 배연탈황화와 같은 다른 오염물질의 저감 장치를 통해 포집될 수 있다. 활성탄 주입으로 불리는 방식도 수은을 제거하는 데 사용되는데, 집진장치나 전기집진기와 함께 적용하면 수은 배출을 90%까지 낮출 수 있고, 비용은 600MW 발전소당 30억원 수준이다.⁴

3) 석탄 포집 및 저장 장치(CCS)

일부 석탄 산업계는 탄소 포집 및 저장 기술(CCS)로 석탄화력발전소에서 배출되는 이산화탄소를 줄일 수 있다고 주장한다. 이 기술은 이산화탄소 배출을 포집하고 액체로 압축한 뒤에 영구적 저장을 목적으로 깊은 지하 암반에 주입시키는 방식이다.

탄소 포집저장 기술은 현재까지 매우 비싸고 입증되지 않은 기술로 상용화 단계에 이르지 못했다. 이 기술의 일차적인 장벽은 경제적 현실성이 없다는 데 있다. 이 기술을 활용하면 같은 양의 에너지를 생산하기 위해 25~40% 정도 더 많은 석탄을 소모해야 한다. 결국 더 많은 석탄이 채굴되고 운송되며 공정 과정을 거치고 태워지면서 대기오염물질과 유해한 폐기물을 증가시킨다. 탄소 포집저장 건설비와 '에너지 부과금' 비용이 석탄의 발전단가보다 두 배 이상 비싸기 때문에 경제적으로 성장하기가 어렵다. 미국에서 600MW 용량의 켐퍼(Kemper) 발전소는 화려한 홍보로 시작됐지만, 건설 지연과 비용 상승으로 난항을 겪고 있다. 건설비가 애초 2조8000억원으로 예상됐지만, 현재 6조1000억원으로

캐나다 CCS 사업에서 나타난 한계

석탄 산업계는 상업적 규모의 탄소 포집저장 기술(CCS)이 도입된 최초의 사례라며 캐나다 서스캐처원에서의 110MW 용량의 바운더리데일 발전소 사업(기존 노후 화력 발전소를 개조해 CCS가 적용된 석탄화력발전소)의 시작을 자축했다. 하지만 1조4000억원 규모의 이 사업은 약 2천억 원에 달하는 정부 보조금(이 금액은 240MW의 태양광을 설치할 수 있는 비용이다)이 없었다면 추진될 수 없었을 것이다.

발전소 운영사인 서스크파워(SaskPower)는 사업 규모를 축소하기 이전에 몇 가지 대안을 고려했다. 기존 석탄화력발전소에 새롭게 CCS 기술을 설치하면, 발전소에서 생산되는 전기의 40%가 줄어들게 됐다. 300MW 규모의 석탄화력발전소를 새롭게 건설하고 CCS를 추가하면 3조1천억 원의 비용이 들어갈 것으로 나타났다. 운영사는 사업 규모를 축소하게 된 다른 이유 중 하나로서 발전소를 운영하며 연간 포집하게 되는 이산화탄소 양이 1백만 톤을 초과하게 되면 수익성이 없다는 것을 인정했다. 일반적인 600MW급 석탄화력발전소의 연간 이산화탄소 배출량은 대략 350만 톤 수준이다.

문제적인 CCS 기술에 수천억 원의 비용을 쏟아붓는 대신, 정부는 에너지 수요를 지속가능한 방법으로 해결하기 위한 재생에너지 투자를 우선해야 한다.

크게 올랐고 완공 예정일도 3년이나 늦춰졌다.

게다가 탄소 포집 저장의 기술적 타당성을 둘러싼 중대한 의문이 남아있다. 과연 이산화탄소가 영구적으로 땅속에 격리 저장될 수 있는지 그리고 지하 저장이 지진 위험으로부터 어떤 영향을 받을지 불확실하다. 포집된 이산화탄소를 물리적으로 저장하기에 적합한 지하 처리장이 석탄화력발전소 인근에 존재하는지도 명확하지 않다.



출처

- 1 "New unabated coal is not compatible with keeping global warming below 2°C", Statement by leading climate and energy scientists, November 2013, p.3.
- 2 Benjamin K. Sovacool, "Valuing the Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power: A Critical Survey", *Energy Policy*, V. 36, p. 2940 (2008).
- 3 *Technology Roadmap: High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation*, OECD/International Energy Agency, Paris, 2012, pg. 24.
- 4 James E. Staudt, *Control Technologies to Reduce Conventional and Hazardous Air Pollutants from Coal-Fired Power Plants*, Andover Technology Partners, March 31, 2011. <http://www.nescaum.org/documents/coal-control-technology-nescaum-report-20110330.pdf>