

대기오염 저감과 청정 에너지 기술 개발

김영성, 박원훈
한국과학기술 연구원 환경연구센터

1. 대기오염과 청정연료

표 1은 '91-'93 기간 서울시 20개 측정소 측정치의 단기 환경기준 초과 회수이다. 대기질의 변화를 볼 수 있도록 개정기준까지를 포함하여 가장 엄격한 기준에 대한 초과 회수를 조사하였다.

아황산가스뿐 아니라 먼지, 일산화탄소의 기준 초과 회수도 3년간 현저히 감소하고 있다.

그러나 이산화질소와 오존의 초과 회수는 감소하지 않고 있다. '91년에는 아황산가스의 기준 초과가 오존보다 월등 많았으나 '93년에는 상황이 역전되었다.

아황산가스 등은 오염원으로부터 직접 배출된다

는 점에서 1차 오염물질이라 칭한다.

오존은 1차 오염물질인 질소산화물과 반응성 탄화수소를 반응물로, 자외선에 의하여 촉발되는 광화학 반응에 의하여 생성되기 때문에 2차 오염물질이라 칭한다.

이산화질소는 대부분 광화학 반응에 의하여 생성되나 오염원으로부터 직접 배출되기도 한다.

질소산화물과 탄화수소는 주로 차량으로부터 배출되는데, LNG 보급과 차량 증가로 서울의 대기오염은 1차 오염물질로부터 2차 오염물질로 변하고 있다.

정부는 대기중 아황산가스 농도를 저감시키기 위하여 '81년 서울을 필두로 B-C유는 4.0%에서

표 1. '91-'93 기간 서울 20개 측정소 측정치의 기준 혹은 개정 단기 환경기준 초과 회수.

오염물질	환경기준	1991	1992	1993
SO ₂	1 시간 평균 250 ppb ¹⁾	936	178	0
TSP	24 시간 평균 300 g/m ³	124	62	38
CO	8 시간 평균 9 ppm ²⁾	87	30	1
NO ₂	24 시간 평균 150 ppb ¹⁾	43	15	40
O ₃	1 시간 평균 150 ppb ¹⁾	157	222	63

1) '93. 12. 31부터 시행.

2) '95. 1. 1부터 시행.

LNG를 사용하기 시작한 '88년 이후 서울의 아황산가스 농도는 꾸준히 감소하고 있으며, '93년부터는 개정 기준인 0.03 ppm 이하로 떨어지고 있다.

1.6%, 경유는 1.0%에서 0.4%로 황함유량을 낮춘 연료유를 공급하기 시작하였고, '85년부터 서울 등 주요 시 군의 고체연료 사용을 규제하고 있으며, '88년부터는 서울을 중심으로 청정연료인 LNG 사용을 적극 추진하고 있다.

보일러 종류

(열공급, 10⁶ Btu/hr)

연료	먼지 ²⁾	SO ² x	NOx	CO	CH ₄	NMTOC ³⁾
발전용/대형 보일러 (>100)						
유연탄 ⁴⁾	7.58A	28.8S	10.9	0.38	0.030	0.061
벙커 C유 ⁵⁾	1.13S+0.37	19.9S	8.1	0.61	0.034	0.092
LNG	0.02~0.09	0.01	10.1	0.74	0.006	0.026
소형 산업용 보일러 (10~100)						
유연탄 ⁶⁾	9.09	28.8S	10.4	3.79	0.045	0.038
벙커 C유	1.13S+0.37	19.4S	0.6	0.61	0.12	0.034
경유	0.26	18.7S	2.6	0.65	0.007	0.026
LNG	0.11	0.01	2.6	0.64	0.055	0.051
상업용 보일러 (0.3~10)						
벙커 C유	1.13S+0.37	19.4S	0.6	0.61	0.058	0.137
경유	0.26	18.7S	2.6	0.65	0.028	0.045
LNG	0.08	0.01	1.8	0.38	0.036	0.070
가정용 연소로 (<0.3)						
무연탄	11.1	43.3S	3.3	ND ⁷⁾	8.89	ND ⁷⁾
등유	0.34	19.8S	2.5	0.69	0.246	0.098
LNG	0.003	0.01	1.7	0.74	0.070	0.137

그림 1은 서울, 대전, 울산의 연평균 아황산가스 농도 변화이다. 서울의 평균 농도가 연료 정책과 함께 변하고 있음을 볼 수 있다.

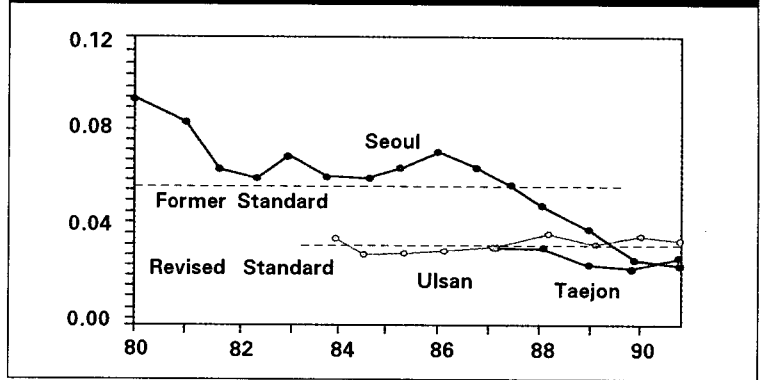
특히 LNG를 사용하기 시작한 '88년 이후 서울의 아황산가스 농도는 꾸준히 감소하고 있으며, '93년부터는 개정 기준인 0.03 ppm 이하로 떨어지고 있다.

대전도 평균이 집계된 '90년 이후 농도가 감소하기는 하나 서울만큼 뚜렷하지 않다.

표2. 원유 1톤 상당 연료를 연소시킬때 주요 고정 연소시설의 연료 종류별 오염물질 배출량 비교¹⁾ (kg/toe)

1) 방지시설 미설치 시설에 대한 미국 EPA의 배출 계수를 토대로 작성.
 2) A는 연료 중 황함유량%, S는 연료 중의 황함유량%.
 3) 비메탄계 유기화합물 (non-methane total organic compounds).
 4) 미분탄 연소, dry bottom, tangential firing.
 5) Normal firing.
 6) 멀티 사이클론이 부착된 spreader stoker.
 7) 적절한 자료가 없음 (no data).

그림1. 서울, 대전, 울산의 연평균 SO₂ 농도변화.
1993. 12. 31. SO₂의 연평균 기준이 0.05ppm에서 0.03ppm으로 강화됨.



공단이 인접한 울산의 농도는 '80년대 중반 이후 작지만 오히려 증가하였고, '91년을 정점으로 감소하는 듯 하나 소비 도시들과 달리 연료 정책의 효과가 크지 않다.

표 2는 열량 기준 원유 1톤 상당의 연료를 연소시킬 때 연료별 연소시설별 오염물질 배출을 비교한 것이다.

황산화물 배출은 연료 중 황함유량에 비례하며, 황함유량이 동일할 때 석탄으로부터 황산화물 배출은 연료유에 비하여 1.4~2.2배 많다.

그러나 실제 국내에서 소비되고 있는 유연탄의 황함유량은 벙커 C유의 절반 수준이므로 이들의 배출은 유사하며, 경유와 가정용 등유는 황함유량이 낮은 만큼 이들보다 배출이 작다.

석탄 사용에 따른 먼지 발생이 많으나 대형 보일러는 물론 산업용 보일러

연료구분	배출계수 (kg/C/GJ)		
액체 화석연료	1차 연료	원유 20.0	
		액화천연가스 (LNG) 15.2	
	가공 연료	휘발유 18.9	
		Avi-gas 18.9	
		등유 19.6	
		항공유 19.5	
		경유 20.2	
		중유 21.1	
		LPG 17.2	
	고체 화석연료	1차 연료	납사 20.0
			Bitumen 22.0
			운활유 20.0
			Petroleum coke 27.5
		Refinery feedstock 20.0	
가공 연료		원료탄 25.8	
	연료탄 25.8		
	갈탄 27.6		
	Peat 28.9		
	BKB & patent fuel 25.8		
	Coke 29.5		
	천연가스 (dry gas) 15.8		
기체 화석연료	고체 바이오매스 29.9		
	액체 바이오매스 20.0		

표3. IPCC¹⁾ 탄소배출계수.

1) 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change) 자료 : 에너지경제 연구원(1994). p329.

표4. 1993년 부문별 대체에너지 소비실적 (toe)

에너지원	가정·상업	산업	수송	공공·기타	계
태양열	3,426	264	-	-	3,690
태양광	33	-	-	526	559
바이오매스	-	14,378	-	39,366	53,744
폐기물	16,251	709,996	-	-	726,247
풍력	39	-	-	-	39
소수력	28,886	-	-	-	28,886
계	48,635	724,638	-	39,892	813,165

자료 : 김진오(1995), p137.

표5. 대체에너지 기술개발사업 분야

에너지원	생산에너지	이용분야
태양열	열(온수, 증기)	주택 및 상업용 에너지
태양광	전력	낙도·오지의 전력 공급
바이오매스	매탄/수소/알코올	산업 및 수송용 에너지
폐기물	열(온수, 증기), 가스연료	주택, 상업용, 산업용 및 발전에너지
석탄	COM, CWM, 석탄액화 오일, 석탄가스	산업용 및 발전에너지
소수력	전력	발전에너지
풍력	전력	낙도·오지의 전력 공급
수소	가스연료	전부분 에너지
연료전지	전력+열(열병합시스템)	발전에너지 및 건물의 냉·난방
해양에너지	전력	발전에너지
지열	열수(95°C 이상)	지역 난방 등

자료 : 통상산업부, 에너지자원기술개발지원센터.

표6. 청정에너지 기술개발사업 분야.

기술분야	중분류 과제	세부기술과제
석탄 저공해 고효율 연소	석탄 오염물질 전처리 기술	· 석탄의 연소전 처리 · 석탄의 개질 및 고품위화 · 석탄의 고체 성형
	석탄 저공해 연소 기술	· 순환 유동층 연소 · 미분탄 연소 · 가압 유동층 연소
	저공해 석탄 취급 기술	· Coal Cartridge/System (CCS) · 지하 가공 및 저장 · 석탄회 활용
석유 저공해 정제	저공해 중질유 분해/정제 기술	· 분해/정제 촉매, 공정 개발
CO ₂ 가스에너지 이용	정제중 SO _x , NO _x 저감 기술	· 선택적 촉매 환원법 개발
	연소가스 공해물질 저감 기술	· SO _x , NO _x 저감
	CO ₂ 가스 화학원료 전환	· CO ₂ 가스의 분리 및 회수 · CO ₂ 가스의 화학원료 전환

자료 : 통상산업부, 에너지자원기술개발지원센터.

표7. 발전방식에 따른 오염물질 배출 비교.¹⁾

발전방식 ²⁾	전환효율 (%)	배출량 (g/kwh)		
		NO _x	SO _x	CO ₂
미분탄 연소	36	1.29	17.2	884
미분탄 연소(탈황)	36	1.29	0.86	884
유동층 석탄 연소	37	0.42	0.84	861
석탄가스화 복합발전	42	0.11	0.30	758
가스터빈 복합발전	55	0.10	0.00	345

1) 개발 중인 기술 포함. 2) 석탄의 황함유량은 2.2%.

자료 : Flavin and Lenssen (1994), p 68.

천연가스는 자동차 연료로서도 주목받고 있다.
천연가스의 화학 구성이 단순한 만큼 엔진구성이 단순하여
지고 질소산화물과 탄화수소 배출을 현저하게
줄일 수 있는 촉매개발이 가능하다.

에서도 전기집진이나 여과포 집진 등 2차 집진을 고려하는 것이 보통이므로 먼지 발생은 회처리 문제로 전환된다.

LNG의 황산화물 배출은 연료유 중 가장 깨끗한 등유에 비하여도 수 %에 불과하여 황산화물에 관한 한 거의 완벽한 청정연료임을 나타내고 있다.

황산화물에 미치지 못하는 먼지 역시 LNG를 사용함으로써 현저하게 감소된다.

그러나 여타 오염물질에 대한 LNG 사용 효과는 알아보기 쉽지 않으며, 가정용 등유를 LNG로 전환할 때 반응성 탄화수소의 경우와 같이 배출이 증가하기도 한다.

2. CO₂ 저감과 천연가스

지구 온난화 문제의 대두와 더불어 지금까지 대기 오염물질이 아니던 이산화탄소가 지구 온난화의 주원인으로 취급되면서 연료 중 탄소성분 자체가 문제되고 있다.

표 3은 연료 1 GJ당 탄소함유량이다. 연료에 포함된 주 연소성분인 탄화수소의 물질에 따라 단위 열량당 탄소함유량이 차이를 보이나, 수소 성분이 점차 이탈되며 탄화되면서 가스에서 오일로, 다시 석탄으로 변화되었기 때문에 석탄의 고밀도 탄소는 본질적으로 불리하다.

지구 온난화에 대응할 수 있는 에너지 대책은 에너지 절약과 청정 에너지 이용으로 요약할 수 있다.

오늘날 환경 문제의 많은 부분이 과소비에서 비롯됨을 감안할 때 에너지 절약은 에너지 소비에 따

른 환경오염을 감소시킬 수 있는 첫 단계이다.

청정에너지로서는 우리나라의 예에서 보듯이 당분간 천연가스가 유망하다. 현재의 천연가스 이용에서는 질소산화물 배출과 탄화수소 배출 내지는 누출이 문제이나 이들은 기술개발로써 해결이 가능한 것으로 믿고 있다.

천연가스는 자동차 연료로서도 주목받고 있다. 천연가스의 화학 구성이 단순한 만큼 엔진구성이 단순하여지고 질소산화물과 탄화수소 배출을 현저하게 줄일 수 있는 촉매개발이 가능하다.

가스의 압축이 아직 문제이나, 버스나 트럭 등 대형 차량부터 천연가스를 이용한다면 오늘날 대기환경에 가장 큰 부담이 되고 있는 대형 차량 오염물질 배출부터 감소시킬 수 있다.

천연가스를 원유 시추의 부산물로 볼 때에는 천연가스가 석유보다도 한정된 것으로 생각하기도 하였다.

그러나 표 3에서 건식 천연가스를 별도로 분류한 것과 같이 많은 양이 세계 곳곳에서 원유와 별도로 발견되고 있다.

현재의 천연가스 자원으로 향후 수십년은 비교적 안전하게 오염물질 배출을 최소화하며 에너지를 사용할 수 있으리라 예상할 수 있다.

이렇게 유예된 기간 동안 다양하고 분산되어 있으며 비연속적인 태양에너지, 풍력, 지열, 조력 등 신재생에너지를 취급이 용이한 형태로 변환시킬 수 있어야 한다.

에너지 매체로써는 수소를 생각할 수 있다. 벽지에서 생산된 신 재생에너지로써 수소를 생산하여 수송하거나 저장할 수 있다.

기획특집

에너지 기술은 대형기술로서 개발에 장기간이
소요될 뿐 아니라 혁신적인 기술보다는 시스템적으로
조금씩 향상시키는 기술 개선이 환경보전과 에너지 절약에
실제적으로 더 큰 효과를 가져올 수 있다.

수소에는 탄소조차 포함되어 있지 않으므로 수소 연소는 깨끗하다.

천연가스로 구축된 가스이용 체계는 쉽게 수소 이용으로 이어질 수 있다. 21세기 쾌적한 환경보전과 에너지 사용을 위하여 에너지 절약, 에너지 효율 향상, 신 재생 에너지 기술개발이 시급하다.

3. 청정에너지 기술개발 현황

표 4는 '93년 우리나라 부문별 대체에너지 소비 실적이다.

1차 에너지 소비에 대한 비율은 0.64%로 '92년 일본의 1.5%나 '90년 미국의 7.7%, '93년 유럽연합의 5.4% 보다 월등 낮다.

일본은 2010년 5.8%, 미국은 2000년 8.8~9.3%, 유럽연합은 2010년 15%를 목표로 하고 있다. 미국의 대체에너지 비율이 특별히 높은 것은 수력발전, 풍력발전, 태양광 발전, 지열 발전, 연료전지 등을 포함시킨 때문이다. 우리나라의 대체에너지 소비는 총 에너지 소비에서 차지하는 비율도 낮지만 거의 90%가 소각 등 폐기물 처리의 결과이다.

폐기물 소각은 자원 절약이라는 측면에서는 긍정적이나 환경문제를 폐기물에서 대기나 수질로 이전시킬 수 있으므로 주의가 필요하다.

오염물질 배출 비중이 계속 커지고 있는 수송부문의 대체에너지 소비실적이 없는 것도 취약한 부분이다.

자동차의 합산소 연료사용 의무화 추세에 따라 연료용 알코올을 일정비율 휘발유에 혼합하여 공급하는 방안이 검토되는 등 향후 수송부문의 대체에너지 소비가 늘 것으로 예상되나, 'Eco Station 2000' 계획 아래 전기자동차, 압축천연가스

(CNG) 자동차, 메탄올 자동차 보급 확대를 시도하는 일본보다 적극적이지 못하다.

통상산업부에서는 '88년부터 대체에너지 기술개발 사업을 시작하여 '91년 1단계 사업을 마치고 '96년까지 2단계 사업이 진행 중이다.

표 5의 11개 분야 중 태양광과 연료 전지는 범국가적 연구사업으로 진행하고 있으며 바이오매스와 폐기물 분야에는 민간기업의 참여도 비교적 활발하다.

'92년부터는 에너지절약 기술개발 사업의 일환으로 '96년까지를 시한으로 에너지 절약 효과가 크고 단기기간내 실용화 보급이 가능한 기술들을 발굴하여 지원하고 있으며, '94년부터는 미국의 청정석탄기술 (Clean Coal Technology) 프로그램에 상응하는 청정에너지 기술개발사업을 시작하여 표 6의 분야들을 지원하고 있다.

'92년부터 과학기술처 주도로 시작된 G7 프로젝트에는 정보/전자 에너지 첨단소재 분야의 에너지 절약형 구조용 소재개발, 차세대 자동차기술 분야의 CNG 엔진기술 등 저공해 기술과 전기자동차 기술, 신에너지기술 분야의 연료전지, 석탄가스화 복합발전, 환경공학 분야의 대기오염 방지기술과 청정기술 등 에너지 환경관련 기술들이 망라되어 있다.

4. 기술개발 방향

에너지 기술은 대형기술로서 개발에 장기간이 소요될 뿐 아니라 혁신적인 기술보다는 시스템적으로 조금씩 향상시키는 기술 개선이 환경보전과 에너지 절약에 실제적으로 더 큰 효과를 가져올 수 있다.

**'90년대 들어 에너지 환경 관련 기술개발이 활발하나
현재의 화석연료 중심으로부터 LNG 사용, 미래의 신
재생에너지/수소 이용 체계로의 진행을 효과적으로
뒷받침하는 노력이 더욱 필요하다.**

예로서 표 7은 전력생산 방식에 따른 오염물질 배출을 비교한 것이다.

첨단형 가스터빈 복합발전은 황산화물이 거의 배출되지 않음은 물론, 최신의 미분탄 발전에 비하여 질소산화물 90%, 이산화탄소 60%를 줄일 수 있다.

따라서 체계적으로 점진적인 개선을 추구하는 기술개발이 되어야 한다.

두번째로 에너지기술은 바로 환경기술이어야 한다.

오늘날 환경기술은 사후처리보다는 사전예방을 지향하고 있다. 또한 단위과정 중심보다는 생성부터 소멸까지 전과정을 분석하고자 한다.

차량 오염이 문제된다 하여 전기 자동차를 개발하지만 발전과정에서 오염물질 발생이 많다면 환경오염은 줄기보다는 이전될 뿐이다.

오염물질 발생이 많은 연료를 사용하여 발전하면서 배출물을 줄이기 보다는 애초부터 오염요인이 적은 연료를 사용할 수 있으면 최선이다.

사후처리는 대부분 상용하는 에너지를 필요로 하고 또다른 형태의 오염물질을 발생시키기 때문이다. 당분간은 LNG가 최선의 선택으로 생각되나 한시성에 유의할 필요가 있다.

'90년대 들어 에너지 환경 관련 기술개발이 활발하나 현재의 화석연료 중심으로부터 LNG 사용, 미래의 신 재생에너지/수소 이용 체계로의 진행을 효과적으로 뒷받침하는 노력이 더욱 필요하다.

이황산가스와 LNG의 예에서 보듯 효율적 에너지 관리를 통하여 환경문제의 많은 부분이 자연스럽게 해결될 수 있다.

참고문헌

김영성 "청정연료 보급과 서울의 대기오염 현황"; 화학공업과 기술, 1994, 12, 303-309.

김진오 "대체에너지 수급통계 정비방안 연구"; 상공자원부 보고서 944Z01-251FP1; 에너지경제연구원; 서울, 1995. 1.

에너지경제연구원 "기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구"; 상공자원부 제출 1차년도 최종보고서, 1994. 12.

Flavin, C. "지속가능한 에너지로의 전환"; "1992 지구 환경 보고서"; Worldwatch Institute; 도서출판 따님; 서울, 1991; 제3장.

Flavin, C.; Lenssen, N. "Reshaping the power industry"; State of the World 1994; Worldwatch

Institute; Norton; New York, 1994; Chapter 4.

U.S.Environmental Protection Agency "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources"; 4th ed.; No. AP-42; Environmental

Protection Agency; Research Triangle Park, N.C., 1985 and ff.