

기후변화와 대기환경의 통합적 관리에 대한 고찰

A Review of the Integrated Strategy for Climate Change and Air Pollution Management

송 창 근* · 이 석 조 · 윤 종 수¹⁾

국립환경과학원 기후대기연구부, ¹⁾환경부 차관

(2011년 10월 18일 접수, 2011년 11월 25일 수정, 2011년 11월 25일 채택)

Chang-Keun Song*, Sukjo Lee and Jong-soo Yoon¹⁾

Department of Climate Change and Air Quality,

National Institute of Environmental Research

¹⁾*Vice-Minister, Ministry of Environment*

(Received 18 October 2011, revised 25 November 2011, accepted 25 November 2011)

Abstract

The unequivocal risk of climate change, the weakness of energy security, and the problem of air quality will be possibly accelerated by the same reason, the enhanced fossil fuel dependency in the future. It is obvious that greenhouse gases and air pollutants are mainly emitted from same sources. Moreover, greenhouse gases and air pollutants have their adverse impacts on same socio-economical, and environmental sectors. With these regards, several but limited studies have emphasized on the importance of the integrated management of climate change and air quality problem. In this study, we address the current trend of energy consumption and the change of air quality condition. Also the related policies are checked out in order to reduce emissions of greenhouse gases and air pollutants in Korea. By surveying previous studies, it is shown that the cost of climate change actions can be reduced by air quality co-benefits and *vis-a-versa*. Also the integrated strategy for climate change and air quality is introduced in term of cost-effectiveness and co-benefit.

Key words : Air quality, Climate change, Co-benefit, Energy security, Integrated strategy

1. 서 론

화석연료는 인류의 문명과 경제의 발달의 중요한 에너지원이었다. 그러나 현대 인류는 화석연료의 고

갈에 대한 위기, 화석연료의 연소로 인한 온실가스 및 대기오염물질의 방출 등으로 에너지안보, 지구온난화, 대기환경 문제에 직면해 있다. 과학자들은 이러한 위기를 잘 대처하지 못할 경우 지구 생명체의 멸종 등을 경고하고 있는 실정이다(IPCC, 2007a). 대표적인 경제성장과 환경의 갈등을 다룬 비관론으로는 1972년 로마클럽 보고서의 '성장의 한계'를 들 수 있다(Meadows *et al.*, 1974). 이 보고서에서는 경제학

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7303, E-mail : cksong@korea.kr

적인 효율 개념으로 최소의 자원으로 최대 효과 달성을 강조하고 있다. 또한, 2차 세계 대전 이후 세계 여러 나라의 환경오염과 자원 고갈에 대한 우려가 높아지는 것을 감안할 때 경제성장률을 극적으로 낮추지 않는 한 자원의 고갈과 환경오염으로 인류의 종말을 피할 수 없다고 경고하고 있다. 그러나 이러한 비판론은 1992년 UN 환경 개발 회의(UNCED)에서 채택된 ‘환경과 개발에 관한 리우 선언’(UNCED, 1992)을 통하여 ‘지속가능 발전’의 개념이 발전되면서 새로운 돌파구를 찾게 된다. 즉 지속가능 발전의 원칙을 환경 정책의 기본 틀로 삼고 환경 친화적인 경제성장, 즉 환경과 경제의 상생의 가능성과 구체적인 방법론에 대한 논의가 시작된 것이다.

그러나 21세기는 IPCC 보고서에서 경고한 지구온난화, 에너지 안보의 취약성, 전통 산업을 통한 발전의 한계에 직면하고 있다. 따라서 지속가능 발전이라는 다소 소극적인 의제보다는 당면 문제를 해결할 수 있는 좀 더 새로운 패러다임을 요구하는 시점이 되었다. 온실가스는 줄이면서 새로운 경제 성장 동력 확보를 동시에 이룰 수 있는 정책이 절실한 것이다. 이러한 문제의식에서 우리나라에서 국가 비전으로

제시하고 제안한 ‘저탄소 녹색성장’은 획기적인 해결책으로 국제적으로 인정받고 있다. 개념적으로는 경제성장과 환경보호를 상호 보완적인 관계로 발전하도록 화석연료 의존형 경제·사회 구조에서 저탄소형 경제·사회 구조로 전환을 추구하는 데 있다. 또한, 자원순환 체제, 친환경 생산체제로의 전환 전략을 추진하며, 신재생 에너지, 탄소 시장의 새로운 기회 활용을 극대화하기 위한 녹색 기술 개발과 인프라 확보, 시민·기업의 생활, 문화, 경영에서의 녹색혁명을 이루고자 하는 것이다. 더불어 국제사회의 기대에 걸맞게 기후변화 대응 의무에 최선을 다하며 저개발 국가의 녹색성장을 위한 지원 확대가 포함된다(녹색성장위원회, 2009a).

한편 미래 기후변화 가속화, 에너지 안보 취약성, 대기환경 악화로 인한 환경보건 문제 심화 등의 원인의 기저에는 화석연료 사용 증가라는 명백한 사실이 자리 잡고 있다. 특히, 온실가스와 대기오염물질은 발생원 측면에서 화석연료 사용 등의 인간 경제 활동의 부산물로 발생한다는 점, 이에 따른 부정적인 영향이 인간 건강, 생태 등 환경의 전 분야에 미치는 점, 각각의 저감대책이 에너지 사용 및 산업 활동과

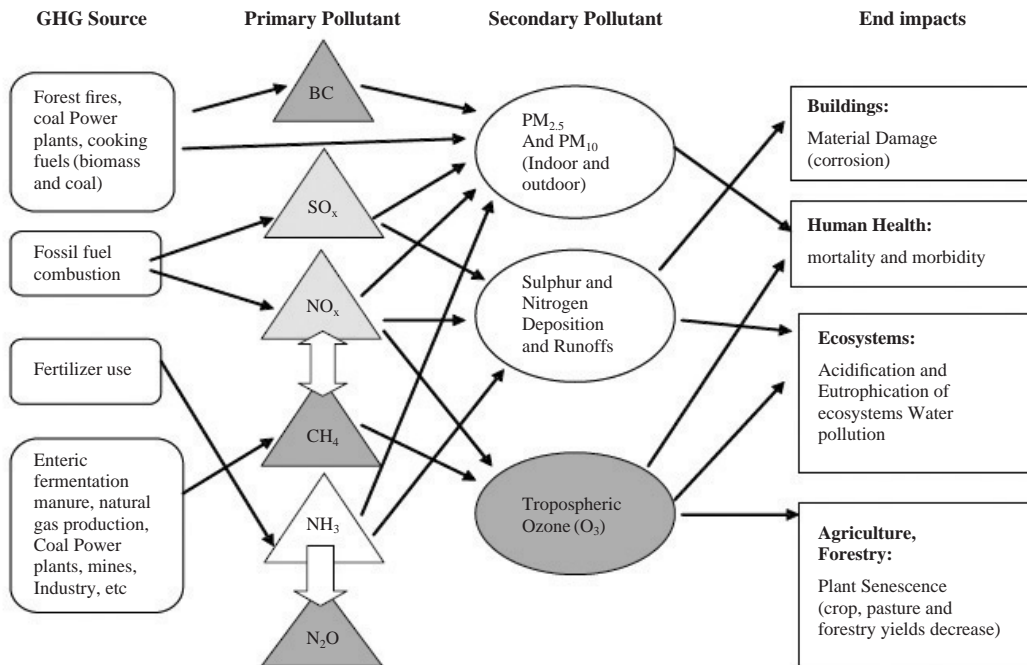


Fig. 1. GHG sources, related pollutants and their end impacts (Bollen et al., 2009).

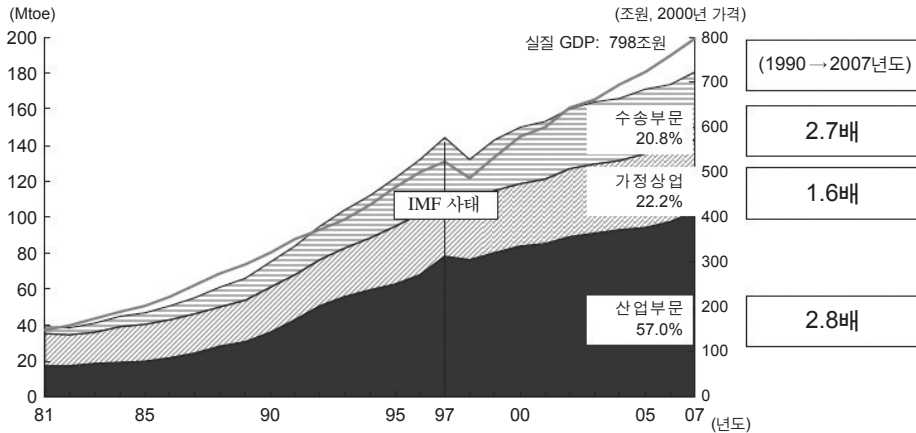


Fig. 2. National trend of sectoral energy consumption and socio-economic development (지식경제부, 2010).

관련되어 많은 부분에서 서로 동일한 점에서 매우 유사한 특징을 가지고 있다(그림 1). 더욱이, 기후 시스템과 대기 환경은 상호 밀접하게 연결되어 생성 및 소멸 기작의 상승작용을 유발하는 것으로 알려져 있다. 오존, 에어로졸 등의 대기오염물질은 기후변화에 의해 생성, 소멸 등의 기작이 변화하며, 변화한 대기오염물질의 농도는 다시 기후변화 강제력에 영향을 주는 등 상호 되먹임(feedback) 작용을 유발하는 것이다(Bollen et al., 2009).

따라서 국제 사회에서는 경제성장을 위한 개발, 대기환경 보전 및 기후변화 대응이라는 세 가지 당면 과제에 대한 최적의 균형 해법을 찾기 위해 대기환경정책 및 기후변화정책의 통합관리 논의가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 통합관리를 추진할 경우, 윈-윈-윈(win-win-win)의 해법이 도출될 것으로 기대하고 있다(World Bank, 2010). 일례로 자동차 연료 효율 개선을 통한 검댕(black carbon) 배출량 감축 정책의 경우, 대기오염과 이에 따른 인간 건강의 부정적 영향을 감소시킬 수 있으며, 극지방의 눈의 반사도에 영향을 주는 대륙 간 수송 및 침적량을 줄일 수 있어 지구온난화 대응을 동시에 할 수 있는 통합관리의 대표적인 정책이다.

본 논고에서는 그간 경제·사회적 여건변화에 따른 환경변화의 추이, 해당 정책 변화 분석과 새로운 기후변화 시대에서의 통합관리 전략 등에 대한 문헌 분석을 통하여 통합적인 대기환경-기후변화 정책 및 관리 방향을 제시하고자 한다.

2. 사회·경제적 여건 변화에 따른 환경변화 추이

2.1 경제성장과 에너지 소비 변화 추이

우리나라는 1960년대 말 이후 경제성장 정책과 에너지 소비에 의존한 생산 집중형 경제 구조, 1980년대 이후에는 고도 산업화 사회로의 산업구조의 변화를 경험했다. 더불어 실질 국내총생산(GDP)의 경우 1990년대 초의 400조원에서 2007년 800조원에 이르러 2배 이상 증가하였으며, 이에 따라 에너지 소비도 거의 같은 규모로 증가하였다. 또한 같은 기간 부문별로 에너지 사용량을 살펴보면 전체 에너지 사용량의 50% 이상을 차지하는 산업부문의 경우에는 2.8배 증가하였으며, 가정·상업부문은 1.6배, 그리고 수송부문은 2.7배의 증가율을 나타내고 있다. 즉, 우리나라는 에너지에 기반한 경제성장 구조를 유지해 왔음을 알 수 있다(그림 2). 특히 산업부문의 에너지소비는 1990~2000년 기간 중 연평균 8.8%의 높은 증가율을 보였고 수송부문의 경우 같은 기간(1990~2000년) 중 연평균 8.1%의 높은 증가율을 보였으나 2000년 이후의 지속된 고유가 상황 등으로 2007년 소비 증가율은 전년대비 2.9%를 기록했다. 또한, 통계자료(국토해양부, 2011)에 의하면 자동차 등록대수는 1990년 300만대에서 2007년에는 1,600만대로 무려 5배가 증가하였음에도, 자동차 등록대수 증가와 에너지 소비 증가율에서 2배의 차이를 보이는 것은 그간 자동차 연비 개선 등의 노력에 기인한 것으로

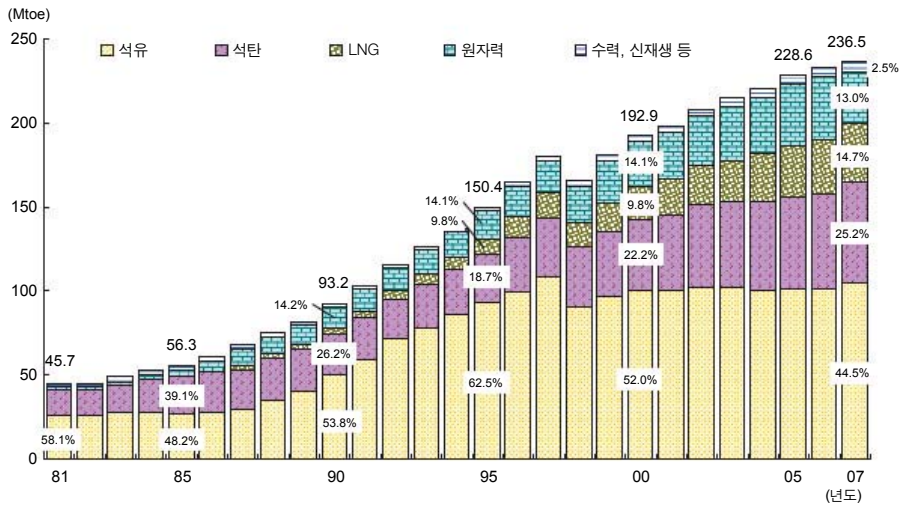


Fig. 3. Trends of energy consumption with each resources (지식경제부, 2010).

판단된다.

에너지원별로는 소득증가, 주거형태 변화 등에 따라 1990년 이전에는 무연탄이 주 에너지원이었으나 1990년 이후에는 석유가 주 에너지원으로 부상했으며 1990년 후반이후 전력, 도시가스, 열에너지 등 고급에너지로 다변화되었다(그림 3). 주목할 점은 1990년대 후반에 들어서면서 사용이 편리하고 깨끗한 LNG 및 전기의 소비가 증가하면서 석유의 소비 비중이 축소되기 시작하였다. 특히, 2007년에는 석유의 비중이 44.6%로 축소된 반면, LNG는 1990년대 연평균 20.1%의 급성장을 하면서 2007년에는 소비비중이 14.7%로 확대되었다. 이와 같이 LNG 소비점유율 증가 등 석유소비의 연료대체 현상은 지속되고 있어 석유의존도는 점차 낮아지고 있는 추세이다. 또한 경제규모 성장에 따른 전력수요 증가로 발전 용유연탄(2007년 22.6%) 및 LNG 등 전력 에너지원의 소비도 점진적으로 증가하고 있다.

2.2 대기환경 변화 추이

1990년대 이후 대기 배출량 변화 추이(그림 4)를 살펴보면 황산화물(SO_x)의 배출량 감소가 두드러지는 것으로 나타났다. 특히 저황유 사용 제도(1981년 처음 도입)와 이 제도의 규제 기준이 대폭 강화된 1997년 이후 SO_x의 배출량은 급격히 감소하였으며, 일산화탄소(CO)의 경우도 수송부문에서 급격히 감

소하였다. 그러나 질소산화물(NO_x)의 경우는 에너지 산업 연소, 제조업 특히 수송부문에서의 배출량 증가로 인하여 전체 배출량은 점차 증가하는 추세이다. 1990년대 초에 비해 2005년 그 배출량이 2배로 증가하였으며 이에 기인한 2차 오염물질(photochemical oxidants)의 농도 증가에 주목할 필요가 있다. 미세먼지(TSP, PM10)의 배출량은 1997년까지 계속 증가하다가 그 이후 증가세가 주춤한 상태이며, 휘발성 유기화합물(VOCs)는 서서히 증가하는 추세를 보이고 있다(국립환경과학원, 2010a).

표 1에 제시한 2007년도 국가 대기오염물질 배출량 산정결과(국립환경과학원, 2010b)에 따르면 여전히 SO_x(총 402,525톤)는 제조업연소(25.4%)와 에너지산업연소(23.4%)가 주요 배출원이며, PM10(총 98,143톤)은 제조업 연소(54.1%)와 도로이동오염원(23.1%)에서 배출 기여율이 높았다. NO_x는 총 1,187,923톤이 배출되었는데 도로이동오염원(41.7%)과 비도로이동오염원(20.0%)이 주요 배출원이었으며, 특히 수도권에서는 도로이동오염원이 49.5%의 높은 배출 기여율을 보였다. 또한 VOCs는 총 874,699톤이 배출되었으며 유기용제 사용으로 인한 배출이 60.7%로 가장 많은 양을 차지하고 있다.

2009년 대기환경연보(국립환경과학원, 2010c)에 따르면 대기 중 오염농도는 배출량 변화에 따른 패턴을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다(그림 5). SO₂

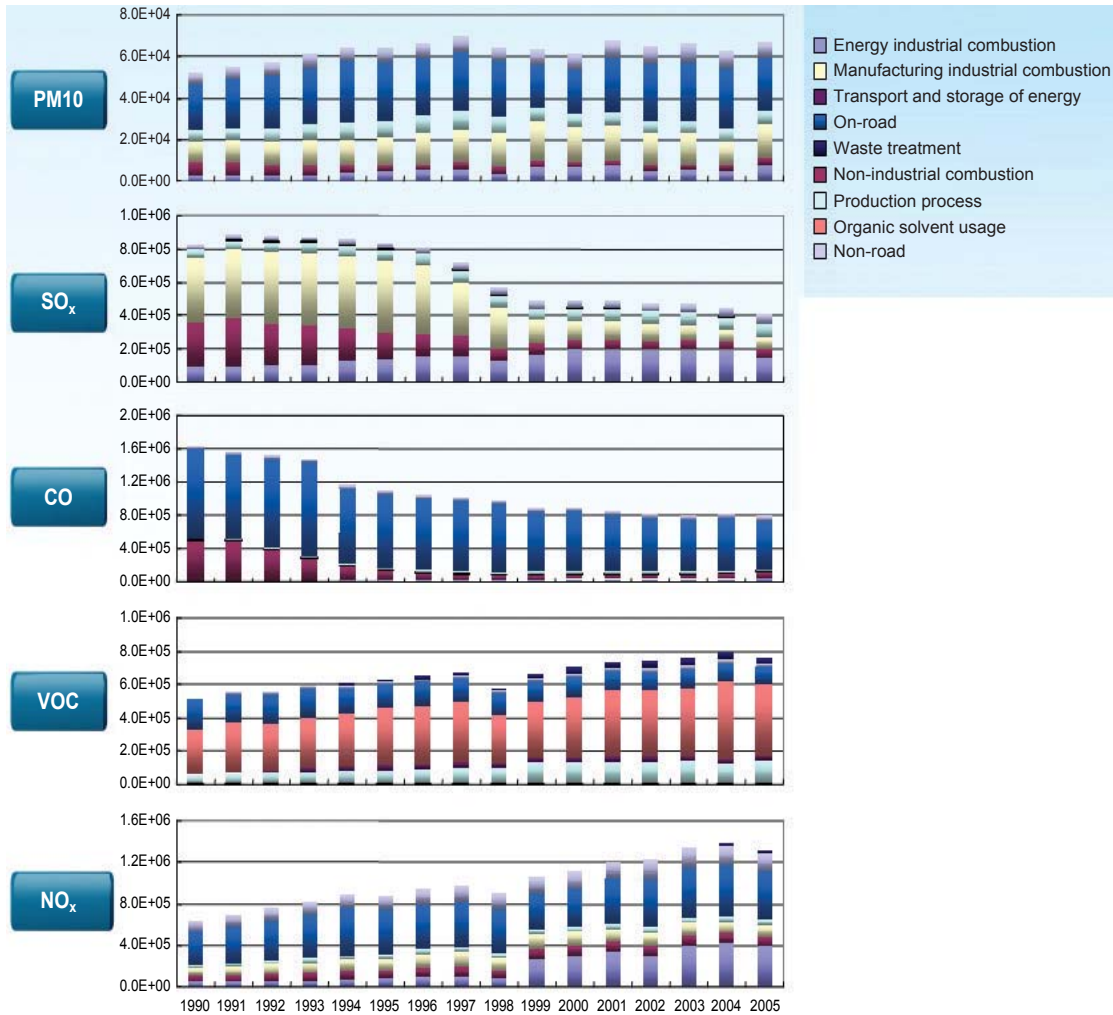


Fig. 4. Emission trends of major air pollutants.

경우 1990년대 초 국가 대기환경기준치인 50 ppb (1990년), 30 ppb (1994년)와 비슷한 대기 중 농도를 보였지만 이후 급격히 감소하여 2000년대 이후에는 대기환경기준치(20 ppb, 2000년)보다 2배 이상 낮은 10 ppb 이하를 나타내고 있다. CO의 경우는 이미 1990년 대기환경기준치(월평균 8 ppm)보다 낮은 농도를 보이고 있으며 특히 2000년대 이후에는 1 ppm 이하로 관리되고 있다. 그러나 NO₂의 경우는 대기 중 농도가 줄어들지 않고 있으며 O₃의 경우는 오히려 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 경제 성장과 인구증가로 인한 수송부문에서 질소산화물

(NO_x)의 배출량이 크게 늘었으며, 질소산화물과 같이 점점 배출량이 많아지고 있는 휘발성유기화합물(VOCs)과의 광화학 과정에 참여함으로써 2차 오염물질인 오존 생성이 크게 증가하였기 때문이다. 미세먼지(PM10)의 경우는 1990년대에는 서서히 감소하는 경향을 보였으나 2000년대 들어 감소율이 낮아지면서 농도가 거의 변하지 않고 있어, 대기환경기준치(연평균 50 µg/m³)를 상회하는 농도를 보이고 있다.

최근 4년간(2006~2009년) 대기환경기준이 설정되어 있는 6개 대기오염물질에 대한 대기환경기준의 달성률을 살펴보면, PM10와 NO₂는 저공해차 보급,

Table 1. Air pollutant emission amounts based on source classification in 2007.

(unit: ton)

Source classification	NO _x	SO _x	TSP	PM10*	CO	VOCs*
Combustion in energy industry	156,304 (13.2%)	94,317 (23.4%)	4,651 (3.2%)	2,951 (3.0%)	40,360 (5.0%)	5,870 (0.7%)
Non-industrial combustion	82,396 (6.9%)	64,083 (15.9%)	2,583 (1.8%)	2,208 (2.2%)	80,155 (9.9%)	2,910 (0.3%)
Combustion in manufacturing industry	155,053 (13.1%)	102,172 (25.4%)	90,659 (62.7%)	53,144 (54.1%)	15,424 (1.9%)	2,941 (0.3%)
Production process	48,725 (4.1%)	85,709 (21.3%)	11,324 (7.8%)	6,074 (6.2%)	21,771 (2.7%)	140,357 (16.0%)
Energy storage	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	29,752 (3.4%)
Solvent utilization	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	531,282 (60.7%)
On-road transportation	495,084 (41.7%)	856 (0.2%)	22,694 (15.7%)	22,694 (23.1%)	546,493 (67.6%)	95,404 (10.9%)
Non-road transportation	237,101 (20.0%)	52,814 (13.1%)	11,719 (8.1%)	10,477 (10.7%)	95,559 (11.8%)	25,206 (2.9%)
Waste disposal	13,097 (1.1%)	2,574 (0.6%)	417 (0.3%)	302 (0.3%)	2,231 (0.3%)	40,379 (4.6%)
Other area source	163 (0.0%)	0 (0.0%)	462 (0.3%)	294 (0.3%)	6,870 (0.8%)	597 (0.1%)
Summation	1,187,923	402,525	144,510	98,143	808,862	874,699

*: Anthropogenic VOCs only

경유차 매연여과장치(DPF) 부착 등 '수도권 대기환경 개선에 대한 특별법'에 따른 정책 추진으로 환경기준 달성률이 높아지고 있다(표 2). PM10은 2009년도의 경우 2008년에 비해 11.5% 증가한 40.2%의 대기환경기준 달성률을 보였으며, NO_x는 전국의 230개 측정소 중 163개소에서 연평균 환경기준을 달성하여 '08년에 비해 7.4% 증가한 70.9%의 달성률을 보였다. 또한, 이산화황(SO₂) 및 일산화탄소(CO)의 연평균 농도는 '05년 이래 모든 측정소에서 환경기준을 만족하고 있다. 그러나 O₃은 8시간 및 1시간 환경기준 달성률이 2008년에 비해 2009년도에 각각 2.6%, 7.8% 낮아졌으며, 2006년 이후 지속적으로 달성률이 하락하고 있다.

2.3 온실가스 배출량 추이

우리나라의 온실가스 배출량은 1990년 이후 철강, 석유화학과 같은 에너지 다소비 업종의 급성장으로 2004년 배출량이 1990년 대비 약 2배 증가하여 세계 9위의 온실가스 배출국이 되었다(표 3). 2004년

총배출량은 591백만CO₂으로 1990년 대비 90.2% 증가하였으나, 증가율은 1999년 이후 감소 추세(증가율: '99년 9.3% → '00년 6.3% → '02년 3.8% → '04년 1.4%)를 보이고 있다. 부문별로 온실가스 배출량의 기여도를 살펴보면 에너지 부문이 83%를 차지하고 있으며, 산업공정 11.7%, 농업 2.7%, 폐기물 2.6%을 나타내고 있다(환경부, 2011). 특히, 에너지부문 온실가스 배출량 증가요인으로는 전력 발전량 중 비화석 연료 비중이 1990년 56.8%에서 2004년 44.4%로 감소한 반면, 석탄비중이 17.7%에서 36.3%로 급증한 것과, 수송부문에서 자동차 등록대수 급증으로 에너지 소비 절대량 증가, 석유화학산업 생산설비 증설로 비연료유 소비가 '90년 6.9백만TOE에서 '04년 37.3백만TOE로 5.4배 증가, 그리고 시멘트 생산 증가 등을 들 수 있다. 또한 산업공정부문에서의 온실가스 배출의 증가요인으로는 국내 반도체 산업의 고속성장과 LCD 생산량 증대, 자동차 생산 증대에 따른 불소계 온실가스(F-Gas) 소비량 증가와 시멘트 생산 증가에 따른 CO₂ 증가를 꼽을 수 있다.

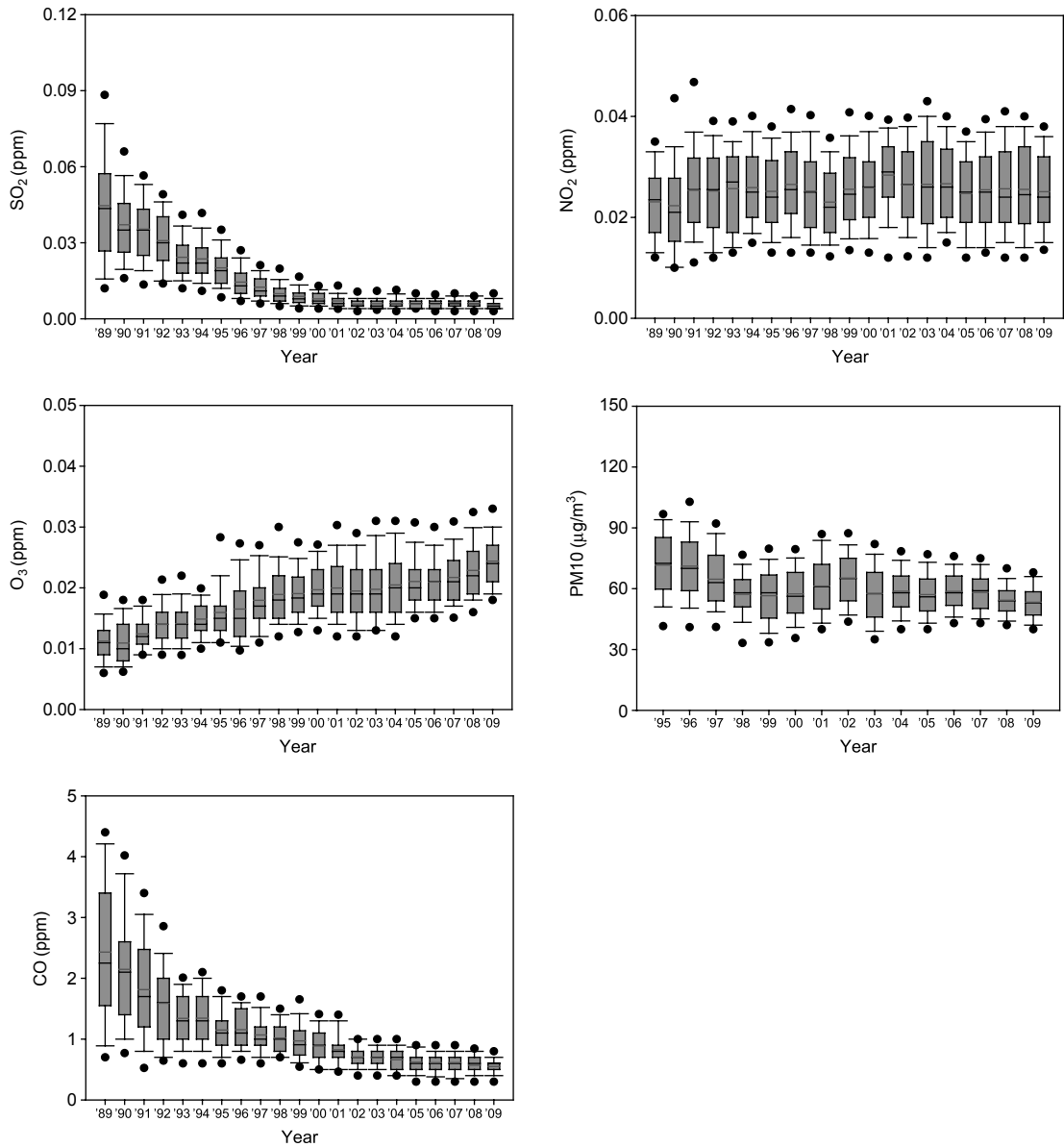


Fig. 5. Trend of annual mean concentrations of air pollutants.

3. 정책 변화 분석

3.1 에너지 정책

우리나라의 에너지정책은 주로 유가의 변화에 따라 공급 및 수요 정책을 적절히 활용하였다(지식경제부, 2010). 고유가 시대인 1970년~1985년의 1차

석유파동 시에는 에너지 소비억제를 위해 에너지다소비 사업자를 지정하여 관리하기 시작하였으며, 또한 2차 석유파동을 계기로 ‘에너지이용합리화법’을 제정(1979.12)하여 에너지원의 다변화 정책을 추진하였다.

이어 1986~2001년까지의 저유가 시대를 맞이하

여, 소비효율등급제도 도입 등 에너지절약정책을 시장기능 맡기는 것을 골자로 하는 '에너지 이용 합리화 기본계획'을 5년 단위로 수립하여 추진하였다. 그러나 국제유가 하락, 경기 회복, 물가안정정책, 에너지가격 인하 및 석유화학, 철강 등 에너지다소비 산업위주의 경제성장 등으로 에너지 소비는 지속적으로 증가하는 결과를 초래하며 정책의 성과는 제한적이었다.

2002년부터 시작된 신고유가 시대를 맞이하여 유

가 상승세를 공급여력 감소에 의한 구조적인 원인으로 진단하고 지속가능성과 기후변화협약 등을 종합적으로 고려하여 에너지 저소비형 사회를 구축하기 위해 노력하였다. 특히 석유중심의 에너지공급시스템을 다원화하기 위하여 신·재생에너지의 기술개발에 노력할 뿐만 아니라 청정개발 사업(CDM)시행 등 기후변화에 대한 체계적인 대응체제를 구축하였다.

그러나 2008년 새 정부 들어 과거의 에너지이용 합리화 대책으로는 급변하는 에너지환경과 기후변화 및 지속적인 경제발전을 동시에 달성하기 어렵다는 판단 하에, 저탄소 녹색성장 기조아래 국가에너지기본계획(2008.8월)이 새롭게 수립되었다. 이 계획에서는 저탄소 녹색성장을 에너지부문에서 뒷받침하기 위하여, ① 에너지를 덜 쓰면서 성장을 구현하는 사회, ② 환경오염을 최소화하는 사회, ③ 그린 에너지 산업으로 일자리와 성장동력을 창출하는 사회, ④ 위기에도 흔들리지 않는 에너지 자립 및 복지사회 구현을 제시하고 있다.

3. 2 대기환경 정책

1980년대 이후 급격한 경제성장에 따른 대기오염 문제가 공론화되기 시작하면서부터 저황유 공급, 청정연료 사용의 확대, 고체연료 사용의 규제, 저공해 자동차 보급 등 에너지와 관련된 대기오염저감정책이 시행되어 아황산가스, 일산화탄소, 총먼지 등을 강

Table 2. Attainment ratio of national air quality regulation in year of 2009 and 2008.

Pollutants	National standards		Attainment ratio (%)	
			2009	2008
SO ₂	Annual	0.02 ppm	100	100
	24 hrs.	0.05 ppm	100	99.5
	1 hr.	0.15 ppm	99.6	99.5
NO ₂	Annual	0.03 ppm	70.9	63.5
	24 hrs.	0.06 ppm	63.5	63.9
	1 hr.	0.1 ppm	70.4	69.1
O ₃	8 hrs.	0.06 ppm	1.7	4.3
	1 hr.	0.1 ppm	48.7	56.5
CO	8 hrs.	9 ppm	100	100
	1 hr.	25 ppm	100	100
PM10	Annual	50 µg/m ³	40.2	28.7
	24 hrs.	100 µg/m ³	2.6	1.3

Table 3. National greenhouse gases (GHGs) emission amounts since 1990.

(단위: 백만 tCO₂)

GHGs sources	'90	'95	'00	'02	'03	'04	'90~'04 change		'03~'04 change (%)
							Total (%)	Annual (%)	
Energy	247.7 (79.8)	372.1 (82.2)	438.5 (83.0)	473.0 (83.1)	481.4 (82.7)	490.2 (83.0)	97.9	5.0	1.8
Industrial process	19.9 (6.4)	47.1 (10.4)	58.3 (11.0)	64.5 (11.3)	69.7 (12.0)	69.4 (11.7)	248.6	9.3	-0.5
Agriculture	17.5 (5.6)	17.8 (3.9)	16.2 (3.1)	15.8 (2.8)	15.5 (2.7)	15.9 (2.7)	-9.0	-0.7	2.2
Waste	25.5 (8.2)	15.7 (3.5)	15.6 (3.0)	16.0 (2.8)	15.6 (2.7)	15.1 (2.6)	-40.8	-3.7	-3.6
Gross total	310.6 (100)	452.8 (146)	528.6 (170)	569.3 (183)	582.3 (187)	590.6 (190)	90.2	4.7	1.4
LULUCF	-23.7 (-7.6)	-21.2 (-4.7)	-37.2 (-7.0)	-33.4 (-5.9)	-33.3 (-5.8)	-33.3 (-5.6)	-40.2	2.4	-1.4
Net total	286.8 (100)	431.5 (150)	491.4 (171)	535.9 (187)	548.6 (191)	557.3 (194)	94.3	4.9	1.6

력히 규제하기 시작하였다.

1980년대 서울시 이산화황의 농도는 당시 대기환경기준(0.05 ppm)의 두 배 가까이 되는 0.094 ppm로서 배출량을 원천적으로 감소시키기 위한 획기적인 대책이 필요하였다. 이에 1981년 저황유사용제도를 도입되어 중유 등을 대상으로 지역별로 단계적으로 황함유량의 최대 허용치를 설정하였다(표 4). 그 결과 연도별 황산화물(SO_x) 총배출량에서 중유에 의한 배출량이 차지하는 비율이 1999년 36.4%에서 2004년에는 27.3%로 조금씩 감소하였다. 특히, 2010년에는 황산화물 배출량이 약 624만 kg, 미세먼지 배출량은 약 13만 kg 줄어들었다. 2012년부터 2038년까지는 각각 매년 1,100만 kg, 23만 kg씩 감축하는 효과가 있을 것으로 기대되며, 그로 인한 편익은 2009년부터 30년간 2천억 원을 넘어설 것으로 예상될 것으로 분석되었다(신영철, 2007). 그러나 저황유사용제도 만으로는 도시지역의 아황산가스 및 미세먼지 오염도를 적정수준으로 개선하는 것에 한계가 있어, 환경부는 청정연료 등 사용에 관한 고시를 적용하고 있다. 1985년부터는 수도권 및 대도시를 대상으로 석탄류, 코크스류, 펄나무와 숯 등의 고체연료 사용을 규제하

는 ‘고체연료 사용금지제도’를 전면적으로 도입하게 된다.

1988년에는 서울올림픽을 계기로 ‘청정연료 사용의무제도’를 도입하게 되었다. 이는 대기질 개선을 위하여 필요한 경우에 산업용 시설을 제외한 도시지역 내 일정규모 이상의 발전시설, 업무용시설, 난방시설에 대해 오염물질의 거의 배출하지 않는 액화천연가스(LNG) 및 액화석유가스(LPG) 등 기체연료(청정연료) 외의 연료의 사용을 금할 수 있는 제도이다. 제도 시행으로 인해 청정연료사용의무화 강화시기인 1997년을 기준으로 중유 사용이 급격히 감소하여 청정연료사용의무화의 시행에 따른 효과가 매우 뚜렷이 나타났다. 또한, 1980년에 제정된 자동차 배출허용기준은 이후 5회에 걸쳐 그 기준이 강화되었다. 특히, 2009년 이후의 초저공해 제작자동차 배출허용기준을 예시하는 등 하이브리드 자동차, 초저공해 자동차 및 연료전지 자동차 등 무공해 자동차(Zero Emission Vehicle)의 개발과 보급에 힘을 쏟고 있다(표 5). 자동차의 배출가스 관리의 경우, 제작자동차의 배출허용기준, 인증, 검사 및 제작차 배출허용기준을 초과할 경우 이를 시정하는 결함확인검사제도 등을 시행하고 있다.

Table 4. Environmental regulation level of sulfur containing in heavy oil.

Corresponding contents	Implementation period	Implementation period		
		~1997.6.30	1997.7.1~2001.6.30	2001.7~2007.11
Bunker-A			below 0.3%	below 0.3%
Bunker-B	below 1.0%	below 0.5%	below 0.5%	below 0.5%
Bunker-C		below 1.0%	below 1.0%	below 1.0%

3. 3 저탄소 녹색성장

2006년 발표된 스텐보고서(Stern, 2006)에 따르면 지속적인 화석연료 의존적 경제성장 시 기후변화로 인한 경제손실이 매년 세계 GDP의 5~10%에 이를 것으로 전망하고 있다. 이에 경제, 정부는 에너지 위기와 기후변화로 대표되는 환경위기를 동시에 극복하기 위한 새로운 생존전략으로서 2008년 8월 대한

Table 5. Emission standard for gasoline vehicle since year 2000.

Model year of vehicles	Implementation period	Warranty on emission control	Emission rate (g/km)			Comparison
			CO	NO _x	HC	
after 2000.1	2000.10~2002.12	5-year / 80 K km	2.11	0.25	0.16	USA Tier I
		10-year / 160 K km	2.61	0.37	0.19	
after 2002.7	2003.1~2005.12	5-year / 80 K km	2.11	0.12	0.047	California LEV1-LEV
		10-year / 160 K km	2.61	0.19	0.056	
after 2006.1	after 2006.1	5-year / 80 K km	1.06	0.031	0.025	California LEV2-ULEV
		10-year / 160 K km	1.31	0.044	0.034	
after 2009.1	after 2009.1	10-year / 190 K km	Average control			LEV, ULEV, SULEV, ZEV

민국 건국 60년을 맞아 ‘저탄소 녹색성장’을 새로운 국가 비전으로 선언하였다. 이러한 비전에 따라 에너지 이용의 효율화, 환경오염의 최소화, 그리고 녹색산업·녹색기술의 신성장동력화에 모든 국력을 집중하고 있다.

이를 위해 대통령 직속의 단일 조정 기구로 출범한 녹색성장위원회는 녹색성장 국가전략 및 5개년 계획(2009~2013)(녹색성장위원회, 2009b)을 수립하여 중장기 녹색성장의 추진 전략과 계획을 분명히 하였다. 녹색성장 국가전략에서는 에너지 자립도를 2020년에 50%, 2050년에 100%, 녹색기술 세계시장

점유율을 2020년 10%, 2050년 18% 달성 등을 목표로 하는 전략을 세웠다. 또한 법적인 뒷받침을 위하여 2009년 저탄소 녹색성장 기본법을 통과시켜 에너지 자립도의 획기적인 제고를 위해 신재생에너지 보급에 대한 중장기 목표를 제시하였으며, 또한 2020년의 온실가스 감축목표를 배출전망치 대비 30%로 국가 목표를 설정하였다(표 6). 저탄소 녹색성장 기본법과 시행령에는 5년 단위의 녹색성장 국가전략 수립, 온실가스 및 에너지 목표관리를 유기적으로 연계한 온실가스감축 국가목표설정, 일정기준량 이상의 온실가스 배출업체 및 에너지 소비업체의 감축목표 관리, 온실가스 정보 및 통계에 관한 검증, 녹색생활 및 지속가능발전의 실현과 관련된 사항과 중앙부처의 소관임무를 정의하고 있다.

Table 6. Mid-term national reduction target of greenhouse gases by major developed counties.

Country	Reduction target
EU	<ul style="list-style-type: none"> · 20% reduction by 2020 compared to 1990 · ‘EU Climate-Energy Legislative Package’ (2009.4) · EU-ETS (2005) and Euro-5 (2009)
U.S.A	<ul style="list-style-type: none"> · 17% reduction by 2020 compared to 2005 · ‘Waxman-Markey Bill’ (2009.6)
Japan	<ul style="list-style-type: none"> · ‘Cool Earth 50’ program (2007.5) · 15% reduction by 2020 compared to 2005 (2009.6)

4. 온실가스 및 대기오염물질의 통합 관리

4.1 온실가스와 대기오염물질

IPCC 보고서에서는 기후변화 유발 물질(Climate Change Drivers)을 정의하고 있다. 화학적으로 안정

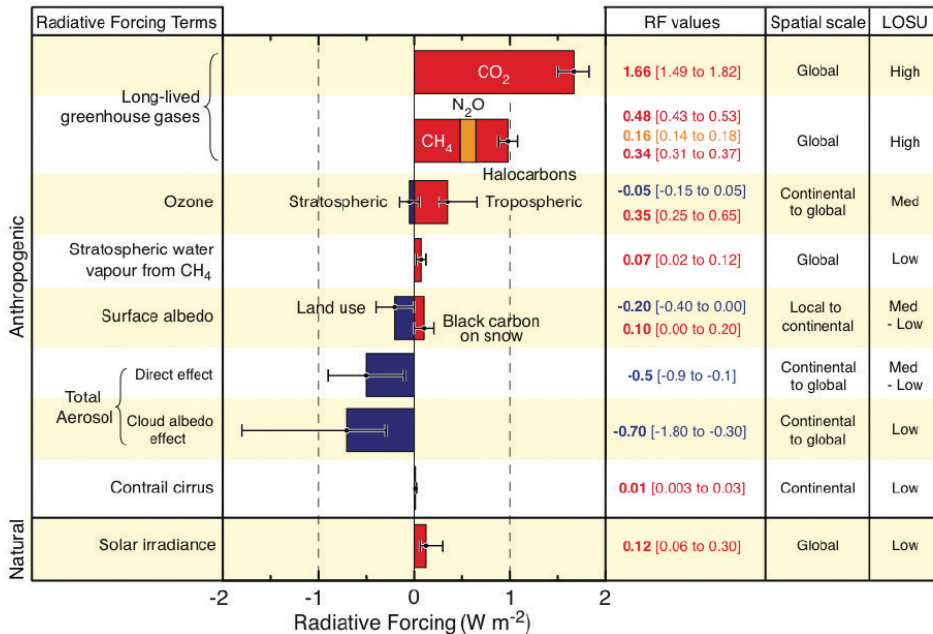


Fig. 6. Radiative forcing of climate change drivers (IPCC, 2007b).

하고 수십 년에서 수백 년까지 대기 중에 체류하여 기후변화에 영향을 주는 물질인 장기체류 온실가스(Long-Lived greenhouse gases; LLGHGs)로는 6가지의 화학종(CO₂, CH₄, N₂O, 불소계 온실가스 3종)을 지정하고 있다. 이와 더불어 대기 중 화학 반응 등으로 대기 중 지속시간이 상대적으로 짧지만 기후변화 유발효과가 큰 기체를 단기체류 온실가스(Short-Lived greenhouse gases; SLGHGs)(SO₂, CO, O₃ 등)로 정의하고 있다. 또한 대기 중 입자상 물질인 에어로졸(Aerosol)을 태양 복사에너지를 흡수(warming) 또는 반사(cooling)함으로써 기후변화를 유발하는 물질로 규정하고 있다. 최근 UNFCCC에서 논의되고 있는 전 지구적인 안정화 목표(2°C 목표)를 감안할 때, 온도상승의 기여도를 무시할 수 없는 단기체류 온실가스, 에어로졸에 대한 고려가 특히 중요시되고 있다(그림 6). 특히, 장기체류 온실가스 중 메탄(CH₄), 단기체류 온실가스인 SO₂, CO, O₃, VOCs 및 에어로졸의 경우는 동시에 대기환경에도 영향을 미치는 대기오염물질이다. 따라서 기후변화 유발물질은 기후변화 메커니즘에 있어 대기물리·화학·역학적으로 복잡하게 연결되어 있어 온실가스 및 대기오염물질의 통합 관리가 전 세계적 추세이다.

4.2 온실가스와 대기오염물질의 통합 관리

효과

기후변화 대응 및 대기오염 정책은 보건, 생태계 등 사회·경제적 환경에서 서로 상보적인 관계를 갖게 되는데 이를 편익 관점에서 부가편익(Co-benefit)이라고 한다. 예를 들면, 에너지를 얻기 위하여 화석 연료를 연소할 때에는 동·식물의 건강을 위협하는 기후변화를 가속화하는 온실가스와 대기환경을 악화시키는 대기오염물질이 발생한다. 이때 에너지를 줄이거나 대체 연료를 사용하여 에너지 생산에서 발생하는 온실가스와 대기오염물질을 동시에 줄이고자 하는 것이 통합적인 기후변화와 대기환경 관리 정책의 출발점이다(MoE Japan, 2008).

이에 따라 OECD에서는 직접적으로는 기후변화를 완화하기 위한 정책이 다양한 부가적 편익을 발생시킨다고 보고 그 범위와 정도를 파악하고, 또한 기대되는 부가적 편익이 온실가스 감축에 소극적인 국가들에 대한 유인책으로 어떻게 작용할 수 있을지에 대한 연구를 진행한 바 있다. 온실가스 감축 정책을

통한 대기질 개선, 건강 증대 효과를 살펴보면, CO₂ 1톤을 줄이면 2~196달러(평균 49달러)의 대기질 개선 Co-benefit 발생하며 이는 대기오염도가 높은 곳일수록 Co-benefit이 크게 나타나서, 개발도상국은 27~196달러(평균 81달러), 선진국은 2~128달러(평균 44달러)에 이르는 것으로 조사되었다(Bollen *et al.*, 2009). 특히 단기적으로는 선진국에서 그 효과가 클 것으로 전망하였는데, 이는 선진국의 경우 온실가스 감축을 위해 대기오염 유발효과가 큰 수송분야에 집중할 것으로 전망되지만, 개도국은 감축비용이 상대적으로 낮은 전기부문에 집중하여 온실가스 감축에는 크게 기여하지만 대기오염분야의 효과는 크게 나타나지 않기 때문이다.

그러나 장기적인 시뮬레이션의 결과를 살펴보면, 2005년 대비 2050년까지 온실가스 50% 감축 가정 시나리오의 경우, 온실가스 감축과 대기오염물질의 동시감축 효과로 인해 대기오염으로 인한 조기사망자수는 20~40% 감소하고 특히 개발도상국의 Co-benefit도 급격히 증가할 것으로 전망하였다. 이를 경제적 효과로 환산하면 EU의 GDP의 0.7% 그리고 중국은 4.5%에 달하는 것으로 조사되었다.

문헌에 나타난 주요 부문별 Co-benefit의 사례를 살펴보면, 건강 분야의 경우 Bussolo and Connor(2001)의 연구결과에서 2010년 BAU 대비 15% 온실가스 감축 시, CO₂ 백만톤 감축 당 인도의 경우 334명, 중국은 210~298명의 추가사망자가 줄어드는 것으로 보고되고 있다. 또한 West *et al.*(2006)은 2030년까지 2010년 대비 전 지구적으로 메탄(CH₄)의 배출량을 20% 감축할 경우 대류권 오존 증가로 인한 사망자 중 총 37만 명의 생명을 추가로 구할 수 있을 것으로 추정하였다. 농업 및 산림분야의 경우에는 기후변화에 의해 향후 50년 내 고농도 오존현상의 빈도가 급격한 증가와 이에 따른 농작물 및 임업 생산성으로의 부정적인 영향을 분석한 연구(Reilly *et al.*, 2007)가 있다. 연구결과를 구체적으로 살펴보면 온실가스 및 대기오염물질 감축 정책을 시행하지 않을 경우, 2000년 대비 2100년도에 작물 생산량이 40~60% 감소하며, 온실가스 감축 정책 만을 시행할 경우에는 20% 감소하는 것으로 예측하였으나, 기후-대기 통합 관리(동시 감축) 정책을 시행할 경우에는 오히려 작물 생산량이 20% 증가하는 것으로 나타났다.

기후변화와 대기환경의 통합관리 정책의 가장 큰

Co-benefit은 일반적으로 대기오염물질 감축의 회피 비용 저감으로 나타난다. 모델 시뮬레이션 결과(Alcamo *et al.*, 2002)에 의하면 잘 기획된 기후-대기 통합 관리 정책의 경우 그 비용과 대기오염물질 만을 감축하는 비용은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 또한 통합 관리 정책을 통하여 SO_x 감축 비용의 50~70%, NO_x 감축 비용의 50%를 절감할 수 있을 것으로 추정하였다. 한편, 국립환경과학원의 연구결과에 따르면 IPCC 배출량 시나리오(SRES)(IPCC, 2000)에 근거할 경우 향후 온실가스뿐만 아니라 대기오염물질의 배출도 증가함에 따라, A2 시나리오에서 남한 전체의 평균적인 대기질은 악화되는 것으로 전망되었다. 하절기(6~8월) 중 남한 지역 전체에 대하여 8시간 평균 일 최고 오존 농도는 2000년대 30 ppb에 비해 2020년대 이후 39~42 ppb 수준으로 증가하는 것으로 그리고 8시간 평균 일최고 오존농도가 60 ppb를 초과 확률은 2000년대는 2.2%에서 2020년대 8.2%, 2050년대 16.3%, 2100년대 15.1%로 증가하는 것으로 전망되었다. 또한 SO₂ 경우도 2000년대 6 ppb에서 2050년대 9 ppb, PM2.5는 2000년대 24 µg/m³에서 2100년대 67 µg/m³로 증가할 것으로 전망되었다(국립환경과학원, 2010d). 따라서 우리나라의 경우 비용·효과적인 온실가스 및 대기오염물질의 동시감축 정책이 시급함을 알 수 있다.

Chae (2010)과 Chae and Park (2011)는 2014년 수도권 대기질 개선대책의 목표와 온실가스 감축 목표를 가장 비용·효과적으로 이행하기 위한 각각의 정책과 통합 관리정책 수행 시의 비용·편익 분석을 수행하였다. 결론적으로 통합관리정책의 편익이 각각의 정책 수행 편익을 초과하는 것으로 나타나, 대기환경 정책과 연계된 온실가스 감축 정책추진 시 그 효과 및 효율이 매우 높음을 정량적으로 제시하였다.

4.3 온실가스와 대기오염물질의 동시 저감 전략

통합관리전략을 수립하고 이행하기 위해서는 먼저 온실가스 및 대기오염 저감 정책의 건강, 생태 등 각 분야별 사회·경제적 편익을 분석할 수 있는 정책 분석 모형을 활용하여 Co-benefit 효과의 정량화를 통해 정책의 객관성을 확보해야 한다. 또한 이를 통하여 가장 우선적 추진이 필요한 온실가스와 대기오염물질의 동시 감축 전략을 도출할 수 있다. 경제성

과 환경성을 극대화하기 위한 최적화 조건을 찾는 도구로서 사용되는 정책 분석 모형의 틀은 기본적으로 감축 모형과 편익산정 모형으로 구성되는게 일반적이다.

온실가스와 대기오염물질의 동시 저감 전략을 위해서는 먼저 배출원에 해당하는 에너지 공급 부문에 있어서 기존의 화석 연료 의존 방식을 대체할 수 있는 기술 개발과 정책 추진이 필요하다. 그러나 산업 및 공정분야에서는 기존의 연료규제, 대기오염물질 배출 저감 및 정화 시설 설치로는 Co-benefits의 효과가 제한적인 것으로 평가되고 있다(Netmet *et al.*, 2010). 따라서 신·재생에너지 공급, LNG 같은 청정 연료로 전환, 저NO_x 버너로의 교체 등 보다 적극적인 전략이 필요하다. 또한 투입 대비 효율을 높일 수 있는 에너지 효율화 기술에 대한 연구·개발 및 보급이 시급하다. 특히, 전체 국내 총생산의 약 30%를 제조업 중심의 수출에 의존하고 있으나 철강, 석유화학 업종을 제외하고는 여전히 에너지 원단위 측면에서는 선진국에 비해 그 효율이 떨어지는 우리나라의 경우 시사하는 바가 크다.

배출원에 대한 규제 및 연료의 전환 등의 정책에 비해 에너지 수요 부분의 전략은 시민의 자발적인 협조를 유도하기 위한 정책이 우선적으로 고려되어야 한다. 즉 공급 부문에서 동시감축 기술, 효율화 기술 등에 대한 연구·개발·보급이 정책의 우선순위에 있다면, 수요부분에서는 인센티브 및 보조금 제도를 통해 에너지 의존도를 낮추기 위한 정책이 국가 재정 투자의 우선순위가 있다. 또한 시민사회 운동을 통해서도 우리의 실생활에 기후변화 및 대기환경 대책의 통합적 접근이 가능한데, 가정·공공부문 에너지절약 실천, 냉·난방 줄이기, 대중교통 이용하기 등은 화석연료의 사용을 줄여 온실가스와 대기오염물질을 동시에 줄일 수 있다.

일반적으로 기후변화와 대기환경 정책의 통합적인 접근은 두 부류로 정리할 수 있는데 기후변화에 중점을 둔 관점과 대기질 관리에 중점을 둔 관점으로 나누어 볼 수 있다. 기후변화의 관점에서 보면 온실가스 감축으로부터 부가적으로 대기오염 감소, 환경보전적인 혜택, 에너지 비용과 의존성을 낮추는 편익이 발생한다. 즉, 온실가스 감축 시 부가적인 대기오염 대응 비용 절감 효과로 온실가스 감축 비용을 상쇄할 수 있어 국가 차원의 온실가스 감축목표 참여

에 강력한 유인을 제공할 수 있는 것이다. 반면, 지역적인 대기오염 정책을 통한 Co-benefit으로의 접근은 선진국보다는 개도국에서 선호한다. 왜냐하면, 산업 발전에 따른 당면 대기오염 문제 해결이 국가적으로는 더 중요한 문제이기 때문이며 제한된 국가 재정 투입에서 비교적 단기간에 효과를 볼 수 있고 대책 이행 비용이 온실가스 저감 대책보다는 훨씬 낮기 때문이다(Surapipith, 2009).

그러나 선진국과 개도국 모두 현실에서는 온실가스 감축 정책을 기반으로 하는 동시 저감 전략이 용이하지 않다. 왜냐하면 국가적인 아젠다로서 온실가스 감축 시 비용을 최소화 정책이 선호되고, Co-benefit을 고려하기 보다는 기후적 편익에 더 가치를 두기 때문이다. 따라서 이런 상황을 고려할 때, 장기 대책으로는 기후변화에 중점을 둔 통합 전략을 고려하되 단기적으로는 기존 대기오염 관리 대책을 중심으로 Co-benefit을 고려하는 정책을 전략적으로 병행할 필요가 있다(Netmet *et al.*, 2010). 이는 온실가스 감축 정책에 우호적이지 않은 이해관계자 설득 가능하고, 대기환경정책 중심의 통합관리는 기후변화 정책 중심의 정책보다 반응이 빠르다는 장점 때문에 정책 추진에 탄력을 받을 수 있으며, 불확실성에 의한 정책 실패 시 대비책 마련이 기후변화 대응 정책에 비해 수월하기 때문이다.

5. 결 론

최근 우리나라의 경제성장 규모는 1990년대에 비해 2007년에 이르러 2배 이상으로 커졌으며, 이에 따라 에너지 소비도 거의 같은 규모로 증가하였다. 에너지 사용량은 산업부문의 경우에는 2.8배, 가정·상업부문은 1.6배, 그리고 수송부문은 2.7배 증가하였다. 또한 자동차 등록대수는 2007년에 1,600만대를 기록하여 1990년보다 5배가 증가하였다. 대기환경의 경우, 각종 규제 정책의 효과로 황산화물과 일산화탄소의 배출량은 감소하였지만 자동차 및 에너지 소비 증가로 인하여 질소산화물의 경우에는 배출량이 점차 증가하며 2차 오염물질(광화학 옥시단트)의 농도 역시 크게 증가하였다. 결국 고도 압축 경제성장과 산업화로 인한 에너지 소비의 증가로 에너지 공급 안정성과 환경 건전성이 급격히 취약해진

경제·사회 구조를 갖게 되었다.

이에 그간 정부는 유가 변동 상황에 따라 에너지 소비억제 정책, 에너지 이용 합리화 정책, 에너지원 다변화 정책, 신·재생 에너지 등 친환경 에너지 공급 정책 등을 통하여 에너지 분야의 당면 과제를 해결하기 위해 노력해 왔다. 또한 대기환경 관리를 위하여 저황유 공급, 청정연료 사용의 확대, 고체연료 사용의 규제, 저공해 자동차 보급 등 대기오염저감정책을 추진하였다. 배출된 오염물질을 정화하는 것에서부터 생산과 사용 시 덜 배출하는 기술을 개발 또는 에너지 발생 연료 자체를 청정한 것으로 교체하는 방법까지 적극적으로 대기 환경문제 해결에 나섰다. 그럼에도 불구하고 에너지와 환경문제는 여전히 진행형이다.

한편, 세계 경제 환경은 미래 지식기반 기술(IT, BT, NT, ET)과 융합 산업 기반을 통해 글로벌 무한 경쟁이 심화되고 있으며, 이와 더불어 에너지·자원 고갈로 인한 가격 불안정 확대와 기후변화의 현실화 등으로 에너지·환경 문제에 대한 해답을 요구하고 있다. 뿐만 아니라 온실가스 감축, 탄소 배출권 거래, 신·재생 에너지 등 새로운 환경 시장 급성장이라는 기회에도 직면해 있다. 이러한 환경에서 우리 경제가 지속 성장하기 위해서는 우리 경제·사회 구조의 체질을 친환경적으로 바꾸어 에너지·자원 저소비형 구조로 전환하지 않으면 국제사회에서 생존하기 어려운 상황이다. 따라서 국제 사회의 요구와 경제 환경 변화에 부응하기 위해서는 저탄소형 경제구조로의 전환과 녹색기술 육성 등을 통한 신성장동력을 극대화하는 전략이 부각되고 있다.

이와 병행하여 현재 당면한 새로운 저탄소 녹색성장 시대는 기후변화 대응 및 대기오염 정책의 통합은 보건, 생태계 등 사회·경제적 환경에서 서로 상보적인 편익, Co-benefit을 창출하기 위한 전략이 요구되는 시점이다. 즉, 온실가스와 대기오염물질을 동시에 줄이는 통합적인 에너지와 대기환경 관리 정책에 대한 관심을 가질 필요가 있다. Co-benefits 접근은 대기오염물질과 온실가스 관리에서 행정력과 국가 재정 투입의 중복을 줄이게 되어 효율성 측면의 효과가 있을 것으로 기대된다. 또한 통합적인 관리 전략을 채택할 경우, 온실가스를 감축하기 위해 개발한 기술이 오히려 대기오염물질을 발생시키는 등의 상호 부정적인 효과를 사전에 상쇄할 수 있게끔 할

수 있어 개별 정책을 따로 추진 시의 정책 실패 또는 부작용의 가능성을 줄일 수 있을 것으로도 기대된다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원 (2010a) <http://www.airemiss.nier.go.kr>.
- 국립환경과학원 (2010b) 대기오염물질 배출량 2007, 54 pp.
- 국립환경과학원 (2010c) 대기환경연보 2009, 441 pp.
- 국립환경과학원 (2010d) 기후 및 대기환경 통합시스템 구축 및 운영 (III), 33 pp.
- 국토해양부 (2011) e-나라 지표 (www.index.go.kr).
- 녹색성장위원회 (2009a) 녹색성장 국가전략, 138 pp.
- 녹색성장위원회 (2009b) 녹색성장 5개년 계획 (2009~2013), 382 pp.
- 신영철 (2007) 저황유 보급·확대에 따른 환경·경제성 분석, 환경부 용역보고서, 11 p.
- 지식경제부 (2010) 2010 신재생 에너지 백서, 590 pp.
- 환경부 (2011) e-나라 지표 (www.index.go.kr).
- Alcamo, J., P. Mayerhofer, R. Guardans, T. Harmelen, J. Minnen, J. Onigkeit, M. Posch, and B. Vries (2002) An integrated assessment of regional air pollution and climate change in Europe: findings of the AIR-CLIM Project, *Environmental Science & Policy*, 5, 257-272.
- Bollen, J., B. Guay, S. Jamet, and J. Corfee-Morlot (2009) Co-benefit of climate change mitigation policies: Literature review and new results, *ECO/WKP (2009)34*, OECD, 46 pp.
- Bussolo, M. and D. Connor (2001) Clearing the Air in India: the Economics of Climate Policy with Ancillary Benefits. Responding to Local and Global Environmental Challenges, OECD Development Centre, Paris, 61 pp.
- Chae, Y. (2010) Co-benefit analysis of an air quality management plan and greenhouse gas reduction strategies in the Seoul metropolitan area, *Environmental Science and Policy*, 13, 205-216.
- Chae, Y. and J. Park (2011) Quantifying costs and benefits of integrated environmental strategies of air quality management and greenhouse gas reduction in the Seoul Metropolitan Area, *Energy Policy*, 39, 5296-5308.
- IPCC (2000) IPCC Special Report of Emission Scenario; Summary for Policymaker, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (2007a) Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (2007b) Climate change 2007: The Physical Science basis, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Meadows, H.D., D.L. Meadows, J. Randers, and W. Behrens (1974) *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, New York Universe Books, 205 pp.
- MoE Japan (2008) The Co-benefits Approach for GHG Emission Reduction Projects, Ministry of Environment, Japan, 4 pp.
- Netmet, F., T. Holloway, and P. Meier (2010) Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking, *Environmental Research Letters*, 5; doi:10.1088/1748-9326/5/1/014007.
- Reilly, J., S. Paltsev, B. Felzer, X. Wang, D. Kicklighter, J. Melillo, R. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, and C. Wang (2007) Global economic effects of changes in crops, pasture, and forests due to changing climate, carbon dioxide, and ozone, *Energy Policy*, 35, 5370-5383.
- Stern (2006) *Stern Review on the Economics of Climate Change*, UK Treasury, 575 pp.
- Surapipith, V. (2009) Co-benefit of Air Pollutant Control Strategies and Climate Change, TF HTAP/TFMM Paris Workshop, 2009.6.
- UNCED (U.N. Conference on Environmental and Development) (1992) *The Rio Declaration on Environment and Development*, Rio de Janeiro, Brasil, June, 1992.
- West, J., A. Fiore, L. Horowitz, and D. Mauzerall (2006) Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls, *Proceedings of National Academy of Science*, 103(11), 3988-3993.
- World Bank (2010) *Assessing the Environmental Co-Benefits of Climate Change Actions*, 2010 Environment Strategy, 34 pp.