

90년대 한국의 이산화탄소 배출 추이 및 시사점

이 경 원 | 씨피에스 테크놀로지 부장

E-Mail : kwlee@cps.co.kr

천 승 규 | 환경부 행정관리담당관실 환경사무관

E-Mail : csk1017@me.go.kr

장 정 익 | 환경부 행정관리담당관실 환경주사

E-Mail : jeongik@me.go.kr

1. 머리말

산업화에 따른 화석연료사용의 증가는 대기중의 이산화탄소 농도의 평형에 영향을 미치고 있으며 이로 인한 지구온난화 문제가 21세기의 가장 중요한 환경문제의 하나로 인식되고 있다.

이미 1988년 11월 WMO, UNEP 주관 하에 “기후변화에 관한 정부간 위원회(IPCC)”가 설립되어 기후변화의 원인, 영향 및 대응에 관한 종합적 연구를 진행하고 있으며, 1992년 6월 리우 UN 환경개발회의에서는 이산화탄소 등 온실가스 증가에 따른 지구온난화에 대처하기 위해 “기후변화협약”을 채택하였다.

동 협약에서는 지구온난화에 역사적 책임이 있는 선진국들에 대해 온실가스 배출량을 2000년까지 1990년 수준으로 감축할 것을 권고하고 있는데(부속서 I), 1997년 7월 현재 세계 174개국이 가입하였으며, 우리나라는 1993년 12월에 가입하였다.

이러한 온실가스 배출규제에 관한 국제적인 움직임은 결국 한 국가의 이산화탄소 수지가 어떠한가에 따라 국제무역과 산업부문에서 유발되는 국가경제에의 영향은 막대할 수밖에 없음을 의미한다.

따라서, 우리나라도 이에 대한 산업계 에너지사

용 효율화와 이산화탄소 제거기술의 개발 등 이산화탄소 문제해결을 위한 연구와 투자가 필요하며 이를 위해서는 무엇보다도 현재 우리나라의 이산화탄소 수지에 대한 보다 체계적이고 근거 있는 연구가 있어야 한다. 이러한 연구결과가 뒷받침되어야 산업계의 이산화탄소 배출문제에 대한 보다 현실적인 접근이 가능해지며 또한 국제무대에서의 각국의 이산화탄소 저감량의 할당문제에 보다 능동적으로 대처할 수 있을 것이다.

이러한 취지에서 1990년대 이후 우리나라의 이산화탄소 수지를 그간 산림녹화에 의한 이산화탄소 고정량을 고려하여 시계열적으로 분석했으며 아울러, 인구 및 GDP와의 관계를 연계하여 평가해 봄으로써 산업발전단계상의 추이분석 및 향후 연구진행 방향을 제시해 보고자 한다. 특히, 우리나라는 97년말부터 시작된 IMF체제와 이로 인한 비정상적인 산업활동 등으로 인해 장시간에 걸친 산업발전에 따른 이산화탄소 수지의 시계열적 분석은 90년부터 97년까지를 대상기간으로 삼았다.

2. 지구온난화 관련 국내외 현황

2.1 지구온난화의 정의 및 예상피해

지구온난화(Global warming)란 이산화탄소

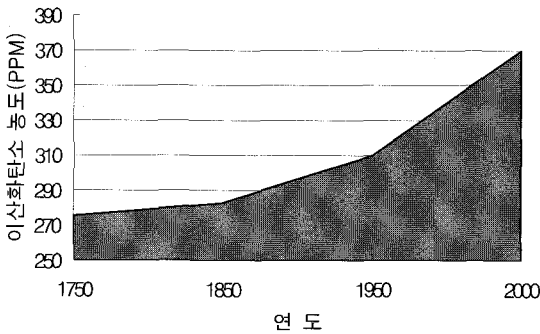


그림 1. 대기중 이산화탄소 농도의 증가 추이

(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), CFC 대체물질(HFC, PFC, SF₆) 등의 물질온실가스가 대기 중으로 방출되는 복사에너지를 흡수하여 지표면으로 다시 배출함으로써 대기온도를 상승시키는 현상을 말한다. 이산화탄소(CO₂)와 같은 이른바 온실가스의 증가는 인류의 산업화 과정에서 급격히 증가된 석유나 석탄 등 화석에너지의 소비에 주로 기인한다. 특히 온실가스 중 지구온난화에 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소(CO₂)의 농도는 그림 1과 같이 산업혁명(280ppm) 이후 꾸준히 증가하여 현재

370ppm 정도에 이르고 있다.

지구온난화로 인한 환경영향으로는 보통 해수면 상승으로 인한 해변의 침식과 홍수피해, 사막화, 생태계의 파괴와 생물종의 변화, 수자원의 변화로 인한 농업관개 및 생활용수의 악영향 등이 예측되고 있다. 지난 100년 동안 지구표면 대기 평균온도는 그림 2에서 보듯 0.3~0.6℃ 상승하였으며, 해수면 높이는 10~25cm 상승하였다. 또한 1995년 “기후 변화에 관한 IPCC 제2차 종합보고서”는 온실가스가 현재 추세대로 증가할 경우 2100년의 지구 평균 기온이 0.8~3.5℃ 상승하고 해수면도 15~95cm 상승할 것으로 예상하고 있다.

과거 75년간 한반도 연평균 기온의 증가는 1.1℃가 증가되었다고 하며 이중 도시화에 따른 열섬효과를 제하고 순수한 지구온난화 효과는 0.7℃로 추정하고 있다. 이와 같이 이산화탄소(CO₂)가 계속 증가할 경우 한반도의 기후는 크게 변화되어 극심한 가뭄과 홍수가 빈번하게 발생할 가능성이 높다.

또한 지구온난화의 결과 우리나라의 기후는 남부 지방은 겨울이 거의 없는 아열대성 기후권에 속하게 되며 중부지방은 현재의 남해안 도서지역과 유

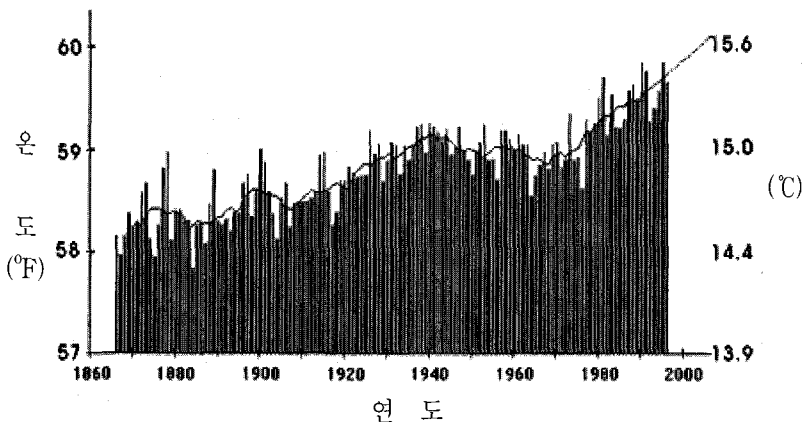


그림 2. 지구의 연평균 온도변화

사한 기후가 될 것으로 예상되어 이로 인한 농업환경의 변화와 함께 자연생태계에도 커다란 교란이 일어날 것으로 우려되고 있다.

이렇게 될 경우 현재의 작물로는 농업생산력이 감소하게 될 것이나 변화된 기후조건에 적합한 작물종(種)이 도입될 경우 연중 작물의 수확은 여름기간의 증가로 높아질 수도 있다.

2.2 국제동향

지구온난화 문제는 그 영향력의 크기와 예측불가능성으로 인해 지구환경논의의 중심주제가 되어 왔다. “기후변화에 관한 정부간 위원회(IPCC)”가 1988년 11월 WMO, UNEP 주관하에 설립되어 기후변화의 원인, 영향 및 대응에 관한 종합적 연구를 진행해오고 있으며, 1992년 리우회담에서 유엔기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)이 체결되었다. 동 협약 부속서 I에서는 지구온난화에 역사적 책임이 있는 선진국들에 대해 온실가스 배출량을 2000년까지 1990년 수준으로 감축할 것을 권고하고 있는데, 1998년 7월 현재 세계 174개국이 가입하였으며, 우리나라는 1993년 12월에 가입하였다.

특히 1995년 3월 베를린에서 개최된 제1차 당사국총회에서 선진국의 의무강화를 위해 부속서 I 상의 2000년 이후 감축목표를 보다 구속력 있는 내용으로 하기 위한 의정서를 제3차 당사국총회에서 채택키로 하여 이에 따라 1997년 12월 교토에서 열린 기후변화협약 제3차 당사국총회(COP : Conference of Parties)에서는 협약을 구현하기 위한 방법을 명시한 기후변화협약 부속의정서, 이른바 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택된 바 있다.

동 의정서에서는 선진국들에게 법적 구속력이 있는 온실가스 배출감축목표를 부여하기로 합의하여

주요 선진국 그룹의 온실가스배출량을 2008~2012년에 1990년 대비 연평균 5.2% 감축하되 개별 국가별로는 -8%에서 +10%까지 차별화 하였다. 개도국의 자발적 참여조항은 77그룹, 중국 등 개도국의 반대로 삭제되어 우리나라도 의정서상의 감축의무를 당장은 부담하지 않게 되었다. 그러나 향후 이러한 개도국에 대한 의무부여에 대한 논의는 언제든지 다시 제기될 가능성이 있으며, 우리나라와 같은 선발개도국의 경우에는 시간이 지날수록 그 압력이 다른 개도국에 비해 커질 수밖에 없을 것이다.

2.3 우리나라의 이산화탄소 배출 현황

우리나라가 이산화탄소 다량 배출국이 된 것은 1960년대 이후 경제개발의 본격화에 따른 것으로 1970년대와 1980년대를 거치면서 경제규모가 커짐에 따라 그 배출절대량도 지속적으로 증가되고 있다. 특히, 그간 중화학공업 위주의 산업정책을 지속해온 결과 에너지 다소비형 산업국가가 될 수 밖에 없었고 GDP당 배출량도 일반적으로 큰 편에 속한다.

그러나 이와 같이 산업화에 따른 이산화탄소 발생량 증가에 반해 역시 70년대이후 경제개발의 본격적인 시작과 함께 산림녹화사업을 지속적으로 추진해 온 것도 사실이다. 일제와 한국동란 등 정치사회적 혼란과 경제적 어려움은 산림의 무분별한 훼손을 가져왔고 이로 인해 임목축적량은 크게 감소되어 1960년에는 ha당 축적이 $10m^3$ 에 불과하였다. 이에 따라 산림청은 1973년부터 1987년까지 제 1, 2차 치산녹화사업을 추진하여 대규모의 조림사업을 실시하여 세계사에 유래없는 단기간에 대면적의 황폐임지의 녹화를 성공시켰다.

또한 정부주도하의 지속적인 조림사업과 함께 무연탄 및 석유를 서민들의 대체에너지로 사용하기 시작하면서부터 우리나라의 임목축적량은 크게 증

가하기 시작했다. 이러한 임목축적의 증가는 에너지사용 등으로 인한 이산화탄소의 발생량을 다소나마 저감시키고 있는 것으로 평가되고 있다.

3. 이산화탄소 수지계산 방법론

3.1 수지계산을 위한 기준

물질수지계산을 위해서는 대상범위와 인자에 대한 정의를 내려야 한다. 이때 범위와 인자를 어떻게 정하는가는 결국 물질수지의 기준을 어떻게 정하는가에 따라 달라지게 될 것이다.

이산화탄소의 발생 및 흡수에 대한 총 수지를 고려할 것인지 아니면 순수지를 고려할 것인지가 먼저 결정이 되어야 한다. 이때 총수지의 경우 역시 동적인 경우와 정적인 경우로 나누어 생각할 수 있다. 동적인 경우는 연간을 기준으로 하였을 때 동일한 인자에 의한 배출과 흡수를 설명 순수지에 있어서는 0이 될지라도 고려하는 것으로 엄밀히 말하면 계산이라기 보다는 생태학적 모델링에 가까운 내용이다.

예를 들어 수목이나 초분류에 의한 이산화탄소동

화와 호흡에 의한 배출, 해양에서의 이산화탄소 입출관련 사항, 농업부문에서 이산화탄소의 작물에 의한 고정과 인간에 의한 소비 등을 모두 고려하여 기초 데이터와 계수를 활용하여 동적인 모형을 만드는 작업이라 할 수 있다.

그러나 이와 같은 동적 총수지 모형은 순수한 과학적 연구의 대상은 될 수 있어도 이산화탄소 관련 국제협약에 있어서의 문제해결에는 직접관련이 없다고 할 수 있으며 또한 지나치게 복잡하고 계산과정에서 많은 가정과 전제조건이 들어감으로 인해 오히려 가장 중요한 결과값의 산출에 별 도움이 되지 않는다.

총수지 분석방법의 또 다른 방법은 연간 탄소의 평균적 순 증감량이 있는 부분만 고려하는 것으로서 순 탄소량 증감이 0인 부분은 제외하면 될 것이다. 따라서 농업에 의한 생산 및 소비는 제외하되 바다에 의한 CO₂ 흡수와 극상상태의 숲, 초지에 의한 CO₂ 고정량은 고려해야 한다.

그러나 이러한 방식도 현재 국제적으로 진행되고 있는 논의와는 다소 차이가 있다고 본다. 왜냐하면 각 국가의 자연적인 조건에 따라 불공정한 이산화

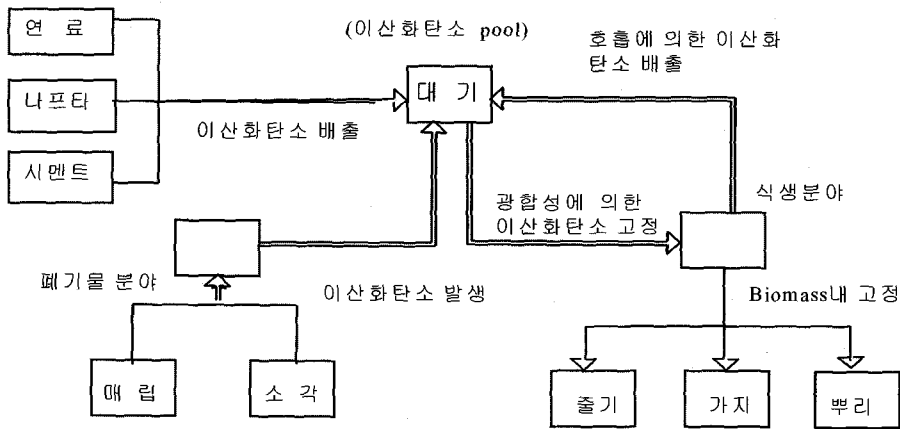


그림 3. 이산화탄소 배출/흡수 기작

탄소 할당량이 주어질 수 있기 때문이다. 즉, 사막 국가와 자연적인 산림부국, 해양국가와 내륙국가의 경우에서와 같이 자연적인 여건에 따라 극단적인 불평등이 있을 수 있으며 열대우림과 같이 그 국가의 소유 이전에 해당국가의 자연이 갖는 범지구적인 역할을 도외시하게될 우려가 있다.

따라서, 본 고에서는 수지계산을 위해 순수하게 인간에 의해 발생되거나 흡수되는 이산화탄소량을 그 기준으로 삼는 산업환경적 측면에서의 수지를 분석하고자 한다.

즉, 안정화된 자연상태에서 발생하는 이산화탄소 순증감분은 제외하고 인간의 직·간접적인 영향에 의한 순 증감부분만을 고려하는 것으로 그림 3처럼 극상상태의 숲, 초지, 바다에 의한 CO₂ 고정은 제외하고 에너지소비와 소각 및 매립에 의한 CO₂ 발생, 임목증가에 의한 CO₂고정만을 고려하였다.

3.2 부문별 이산화탄소 발생 및 흡수량 계산방법

3.2.1. 에너지 소비에 따른 이산화탄소 발생

기존의 연구에 의하면 이산화탄소 수지에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 역시 화석연료의 사용에 의한 이산화탄소 배출이다. 에너지원별 이산화탄소 발생량은 식 (3.1)과 같으며 총 이산화탄소 발생량은 식 (3.1)에 관련계수를 포함하여 식 (3.2)와 같이 구체화될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{에너지원별 CO}_2 \text{ 발생량} \\ &= \text{에너지원별 소비량} \\ & \times \text{에너지원별 CO}_2 \text{ 발생율} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} & \text{에너지소비에 따른 총 CO}_2 \text{ 배출량} \\ &= \sum(\text{연료별 소비량} \times \text{연료별 배출계수} \\ & \times \text{연소율} \times (44/12)) \end{aligned} \quad (3.2)$$

에너지원별로 연소효율, CO₂ 배출율이 서로 다르기 때문에 여기에 대한 정확한 자료조사와 산출이 가장 중요하다. IPCC에서는 각국의 CO₂ 수치

계산에 있어 자의적인 해석과 비교의 곤란성을 배제하기 위해 표 1과 같은 연료별 탄소배출계수를 권장하고 있으며 각 계수값은 연료의 1TOE당 연소시 배출되는 탄소의 양을 나타낸 것이다.

표 1. 연료별 탄소배출계수

(단위 : TC/TOE)

연료구분		배출계수	
액체화석 연료	1차 연료	원유	0.829
		NGL	0.630
	2차 연료	휘발유	0.783
		항공휘발유	0.783
		등유	0.812
		항공유	0.808
		경유	0.837
		중유	0.875
		LPG	0.713
		납사	0.829
		아스팔트	0.912
		윤활유	0.829
		Petroleum Coke	1.140
		Refinery Feedstock	0.829
고체화석 연료	1차 연료	무연탄	1.100
		유연탄	1.059
		연료탄	1.059
		갈탄	1.132
		토탄	1.186
	2차 연료	BKB & Patent Fuel	1.059
Coke	1.210		
기체화석 연료	1차 연료	LNG	0.637
바이오매스	고체바이오매스	1.252	
	액체바이오매스	0.837	
	기체바이오매스	1.281	

자료 : 에너지경제연구원, IPCC의 온실가스 추계 방법론과 한국의 에너지 및 산업공정과정에서의 온실가스 배출 추계, 1998.

주) TOE : Ton of Oil Equivalent의 약자인 에너지 단위로서, 원유 1톤이 가지고 있는 열량으로 10⁷Kcal 혹은 전기 4천kW에 해당

TC : Ton of Carbon

표 2. 석유 제품별 몰입율

제 품	몰입율(%)	제 품	몰입율(%)
아스팔트	100	L P G*	80
윤 활 유	50	천연가스*	33
원 료 탄*	6	경 유*	50
납 사*	75		

자료 : 에너지경제연구원, 1998.

화석연료별로 이산화탄소를 추정하기 위해서는 제품별 탄소 배출량을 우선 구분해야 한다. 따라서 IPCC는 제품별로 이산화탄소 배출계수를 크게 기체성, 액체성 및 고체성으로 구분하고 1차 및 2차 에너지원의 제품별로 배출계수를 제시하고 있다.

연료가 아닌 제품의 중간재 내지는 최종제품으로 사용되는 화석연료에 내포된 탄소는 연소과정을 거치지 않기 때문에 이산화탄소가 되지 않고 최종 재화내에 탄소형태로 남게 된다. 이와 같은 탄소를 몰입탄소(carbon stored)라 한다. IPCC에서 제시하는 제품몰입 가능 화석연료로는 원료탄에서 추출되는 Oil/Tar를 비롯해, 천연가스, LPG, 납사 등이 있다.

다행히 산업자원부의 “에너지통계연보”에는 연료별 1차에너지 소비량 통계가 나와있으므로 이를

표 3. 연료별 평균 연소율

연 료	연 소 율
석탄류	0.98
원유 및 석유제품류	0.99
가스류	0.995
발전용 토탄	0.99

자료 : 에너지경제연구원, 1998.

활용할 경우 제품별 몰입율에 따른 복잡한 고려를 피할 수 있다.

아울러 연료에 함유되어 있는 탄소중에서 불완전 연소 부분은 이산화탄소로 배출되지 않는다. 연료의 연소율은 연료 종류, 연료사용기기의 기술별로 상이하므로 사전에 정할 수 없으나 IPCC에서 제시하는 방법론에서는 표 3과 같이 연료별로 평균 연소율을 제시하고 있다.

IPCC에서 제공하는 배출계수는 탄소를 기준으로 한 것으로 실제 이산화탄소로 전환하기 위해서는 그 값에 이산화탄소 전환계수 즉, CO₂ 대 C의 분자량비인 44/12를 곱해야 한다.

3.2.2 폐기물로부터의 이산화탄소 발생

에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출외에 인위적인 발생원으로서 폐기물부문을 들 수 있다. 폐기물 부문에서는 소각에 의한 이산화탄소 발생과 매립에 의한 이산화탄소 및 메탄가스가 주요 온난화 가스이다. 이중 본 연구가 이산화탄소를 대상으로 하고 있어 폐기물부문에서는 폐기물 처리방법에 있어 소각의 비중이 갈수록 커짐에 따라 소각에 의한 영향이 가장 크고 일부 매립에 의한 영향도 있을 것으로 판단된다.

소각시 발생하는 이산화탄소는 실제 소각로에서 배출되는 이산화탄소를 측정하는 것이 가장 바람직하나 이것이 여의치 않을 경우 폐기물 종류별 소각율을 소각로의 연소효율과 함께 고려하는 것이 가능할 것이다. 그러나 이런 이론적 방식 역시 폐기물의 종류가 다양하고 동일종의 폐기물 역시 그 구성성분이 매우 복잡하기 때문에 산출이 쉽지 않은 것이 사실이다.

특히, 매립에 의한 이산화탄소 발생총량을 연도별로 확인하기가 곤란하므로 국내 관련 문헌을 조사하여 기 연구된 조사자료를 인용하여 사용할 것

이다. 즉, 식 (3.3) 과 같이 폐기물의 소각 및 매립에서 발생하는 온실가스의 총량에 대한 기존의 연구결과치에 이산화탄소의 일반적인 비율을 감안하여 산정하게 된다.

폐기물부문 이산화탄소량
 = 폐기물부문 온실가스총량
 × 이산화탄소비율(0.8)
 × 이산화탄소/탄소분자량비(44/12) (3.3)

3.2.3 산림에 의한 이산화탄소 저감

대기중의 이산화탄소 농도의 증가가 지구 온난화를 일으키는 주요한 원인중의 하나인 것으로 밝혀지면서 이산화탄소를 흡수 저장할 수 있는 능력을 가진 산림내 임목과 토양내 총 탄소량의 정확한 구명은 매우 중요한 의미를 갖는다. 더욱이 한국의 산림면적은 6.46백만 ha로서 전국토의 65%를 차지하고 있어 산림지율이 높은 국가에 속한다.

한국의 산림은 온대림이며 대부분 2차림으로 소나무를 중심으로 하는 침엽수 천연림과 참나무를

중심으로 하는 활엽수 천연림 및 잣나무와 낙엽송을 중심으로 하는 인공림 등으로 구성되어 있다.

현재 우리나라의 임상에 관한 통계는 크게 침엽수, 활엽수 및 혼효림으로 조사되고 있다. 1997년 기준 침엽수는 2,787,750ha, 활엽수림은 1,685,730ha, 혼효림은 1,778,649ha에 달한다. 그러나 산림의 이산화탄소 흡수능력은 산림의 면적보다는 임목축적량에 기반한 연 임목축적증가량이 중요하다. 또한 임목도 종류별로 그 밀도와 건량 등이 다르기 때문에 이를 고려해야 할 것이다.

임목축적량을 계산하기 위해서는 나무줄기의 부피를 알아야 하는데 참고로 외국에서 사용하는 임목부피의 계산방식은 표 4와 같다. 어느 것이나 산림의 임목축적량은 단위 면적당 나무본수 밀도와 개별 임목의 줄기부분의 부피를 기본으로 하고 있다.

우리나라의 경우 수종조성이 매우 복잡하여 전체 산림을 어느 한 수종으로 대표할 수는 없으며 따라서 임업통계연보에서는 침엽수가 75%이상이면 침엽수림, 활엽수가 75%이상이면 활엽수림, 그리고

표 4. 외국의 임목량 측정법

방법 및 사용지역	내 용	
Brereton Scale (필리핀, 미국지역)	$\frac{\pi}{4} \cdot \left[\frac{do + dn}{2} \right]^2 \cdot L$	do : 하단직경 dn : 상단직경 L : 길이
Hoppus Measure (영국지역)	$\frac{\frac{1}{4} G \times \frac{1}{4} \times G \times L}{144}$	G : 원주(중간부분의) L : 길이
Custon String Measure (영국지역)	$\frac{\frac{1}{4} G \times \frac{1}{4} \times G \times L}{113}$	G : 원주(중간부분의) L : 길이

자료 : 임업통계연보, 산림청, 1999

침엽수와 활엽수가 섞여져 있는 혼효림(침엽수 25%-75%)으로 3구분하고 있다. 이 경우 혼효림은 침엽수와 활엽수가 각각 50%를 구성하고 있는 것으로 가정하였다.

한편 IPCC의 방법론에 따르면 뿌리 등 지하부는 계산에서 제외되며 단지 지상부 바이오매스 변화에 의한 탄소 배출/흡수량만을 대상으로 하며 또한 추정대상은 경영림(managed forest)이다. 이는 우리나라의 경우 시업지에 해당된다고 볼 수 있는데 이는 대상산림을 너무 한정하고 있고 또한 뿌리부를 제외하는 것도 정확한 방법이라고 볼 수 없으므로 본 연구에서는 뿌리부분을 포함한 경영림 및 비 경영림 즉, 전체산림을 대상으로 하였다.

우선 산림통계연보에서 임목증가량을 구한다. 이때 임목량은 줄기부분을 의미하므로 여기에 가지부분과 뿌리부분을 감안한 확장계수를 각각 곱한다. 이렇게 해서 얻어진 실질적인 삼림증식분에 침엽수와 활엽수의 건조비중인자를 곱한 후 다시 탄소전환비를 곱하며 끝으로 이산화탄소/탄소 전환계수를 곱하므로써 연간 임목증가량을 이산화탄소의 양으로 역환산하는 방식을 사용하였다.

침엽수는 우리나라 대표수종인 소나무를 기준으로 하였으며 활엽수 역시 대표적 활엽수종인 참나무를 기준으로 하였다. 소나무를 비롯한 침엽수의 경우 건전비중이 0.44정도로 활엽수의 0.75에 비해 작은 편이며 가지부분이 전체에서 차지하는 비율인 수간(줄기) 대 가지부분의 비율은 침엽수 0.74, 활엽수 0.33의 비율을 더하여 전체 지상부의 생체량으로 하였다.

지하부 즉, 뿌리부분에 대해서는 관련자료를 찾기가 매우 어려운 관계로 관련문헌의 연구결과를 사용하였다. 연구에 따르면 침엽수인 잣나무 18-55년생의 단위 산림면적당 평균 근건중인 23.96t/ha, 활엽수는 신갈나무와 굴참나무 20년생의 단위산림

당 평균 근건분이 23.85t/ha으로 이를 기초로한 지상부(줄기)에 대한 지하부의 평균 무게비율이 0.78이므로 이 수치를 침엽수와 활엽수에 대해 적용키로 하였다. 아울러 탄소전환비는 IPCC에서 0.45로 보고 있어 이를 적용하였다.

결국 임목의 순 이산화탄소 고정량은 아래의 식(3.4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{임목에 의한 CO}_2 \text{ 고정량(톤/년)} \\ &= \sum[(\text{수종별 년간 임목순증가량} \times \\ & \quad \text{임목별 건전비중}) \times (1 + \text{임목별 지상부} \\ & \quad \text{비율} + \text{임목별 지하부비율}) \times \\ & \quad \text{탄소전환비} \times \text{이산화탄소} \cdot \\ & \quad \text{탄소분자량비}(44/12)] \quad (3.4) \end{aligned}$$

4. 이산화탄소 수지 분석결과

4.1. 에너지 소비에 따른 이산화탄소 발생량

각 에너지 종류별로 이산화탄소 발생률이 다르며 또한 연소율도 다소 차이가 난다. 따라서 제3장에서 언급한 대로 IPCC에서 권장하는 연료별 탄소전환계수 및 연소율을 곱하여 발생탄소를 계산하고 여기에 다시 이산화탄소/탄소의 비인 44/12를 다시 곱함으로써 연료별 이산화탄소 발생량을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{에너지소비에 따른 총 탄소전환량} \\ &= \sum(\text{연료별 소비량} \times \text{탄소배출계수} \\ & \quad \times \text{연료별 평균 연소율}) \quad (4.1) \end{aligned}$$

위의 값은 탄소량으로 이를 다시 이산화탄소로 환산하기 위해서는 탄소와 이산화탄소의 분자량비인 44/12를 곱하게 된다. 즉, 이에 따라 환산된 연료별 이산화탄소 환산량은 표 5와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{연료별 이산화탄소탄소 발생량} \\ &= \text{연료별 탄소전환량} \times (44/12) \quad (4.2) \end{aligned}$$

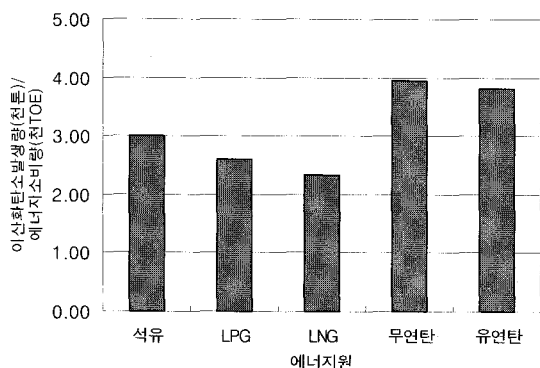


그림 4. 에너지원별 열량대비 이산화탄소 발생률

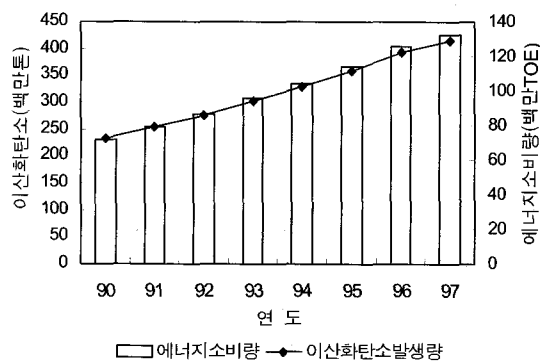


그림 5. 에너지사용에 따른 이산화탄소 배출추이

그림 5에서처럼 에너지 사용량과 이산화탄소 배

출량은 거의 비례하는 것으로 나타났다. 연료별로 동일한 열량에 대해 발생시키는 이산화탄소의 양은 차이가 있고, 또한 연도별로 주요 의존 에너지의 종류가 달라지고 있기는 하나 이는 전체적인 에너지사용에 따른 이산화탄소의 배출량 추이에 별다른 영향을 주지는 못하고 있다.

즉, 에너지 소비비중이 큰 석유, 유연탄, LPG는 연도별로 커다란 변동이 없고 LNG가 늘고 있으나 아직은 전체 에너지 소비량에서 차지하는 비중이 크지 않다. 또한 유연탄과 함께 이산화탄소 다량발생 연료인 무연탄의 소비량이 급감하고 있지만 전체에서 가지는 의미는 크지 않다.

단순한 계산에 의한다면 동일열량에 대해 비교적 이산화탄소의 발생률이 적은 LPG, LNG, 석유의 사용이 무연탄이나 유연탄과 같은 석탄계열의 사용에 비해 바람직한 것은 사실이나 에너지원의 선정은 경제성, 자원안보, 사용의 편의성 등 여타 문제가 관련이 되어 있는 것으로 화석연료의 종류선택은 이산화탄소 배출량 조절에 있어 현실적으로 여의치 않은 것이 사실이다.

연료별로 이산화탄소 발생량에 미치는 기여도를 분석한 결과는 그림 6과 같았다. 대부분 석유와 유연탄에 의한 것인데 특히 석유는 그 사용량 자체가

표 5. 연료별 연간 이산화탄소 발생량

(단위 : 천톤)

구분	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990
석유	223,074	220,471	207,486	188,621	171,947	157,418	137,743	119,327
LPG	18,732	17,881	17,363	16,643	15,582	14,153	11,287	9,367
LNG	34,379	28,322	21,411	17,704	13,300	10,646	8,141	7,025
무연탄	7,862	10,119	11,672	13,862	19,993	24,961	32,191	39,317
유연탄	124,853	112,790	95,662	88,181	79,242	65,844	62,373	54,941
신탄/기타	5,493	4,745	4,296	3,703	3,033	2,955	2,522	3,258
계	414,393	394,328	357,890	328,714	303,097	275,977	254,257	233,235

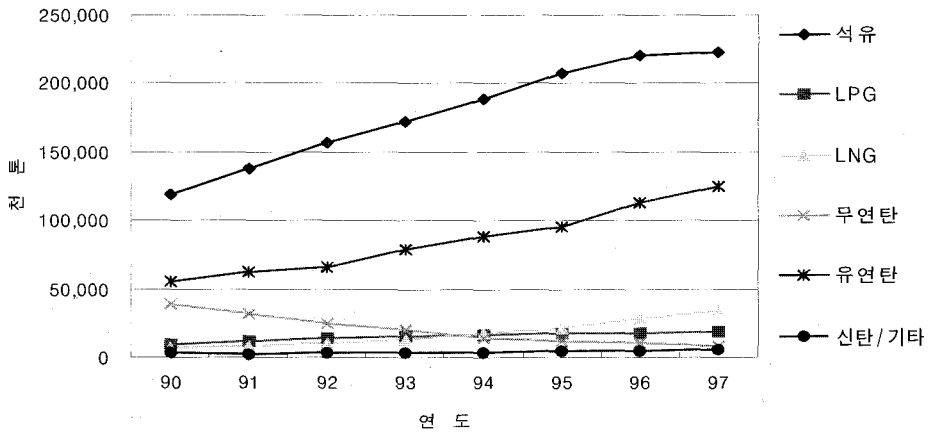


그림 6. 연료별 이산화탄소 배출추이

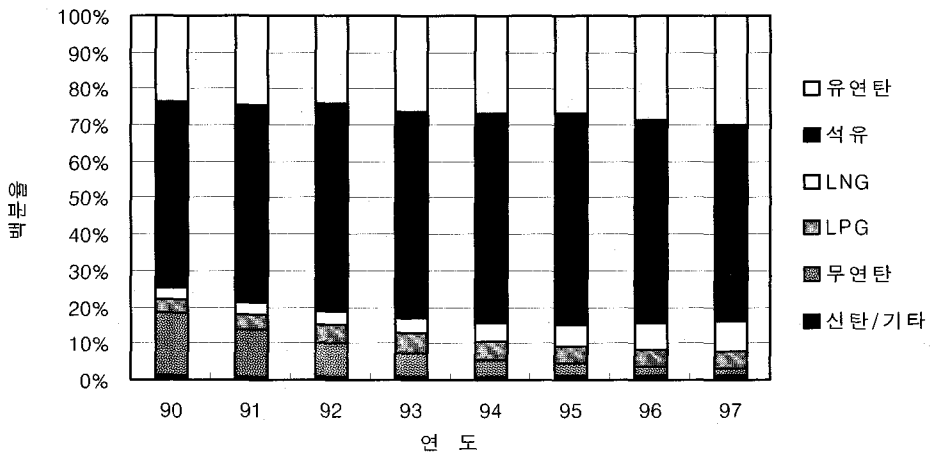


그림 7. 연료별 이산화탄소 발생량 백분율

많기 때문에 이산화탄소 기여도가 가장 크게 나타났으며 유연탄 역시 최근 들어 크게 사용량이 늘고 있어 이로 인한 이산화탄소 기여도가 상당히 큰 편이다.

그림 7은 각 연료별로 연도에 따라 전체 이산화탄소 배출량에의 기여도를 백분율로 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 LNG가 비록 저 이산화탄소 배출 에너지원이나 그 사용량이 증가함에 따

라 기여도도 상승하고 있으며 반면 고 이산화탄소 배출 에너지원인 무연탄은 그 영향이 급감하고 있다. 한편 석유의 기여정도는 별다른 변화가 없는 반면 유연탄에 의한 이산화탄소 발생이 점차 늘고 있음을 알 수 있었다.

4.2 폐기물 부문에서의 이산화탄소 발생량

폐기물 처리방법중 이산화탄소 배출과 관련된 처

표 6. 폐기물 부문의 연도별 이산화탄소 배출량

구 분	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990
온실가스 ^{ZZ)} (천TC)	13,380	12,928	12,210	11,797	11,384	10,970	10,557	10,144
이산화탄소 (천TC)	10,704	10,342	9,768	9,438	9,107	8,776	8,446	8,115
이산화탄소 (천톤)	39,248	37,922	35,816	34,605	33,393	32,179	30,967	29,756

리방식은 소각과 매립으로 소각의 경우 직접적인 이산화탄소 배출과 연관되거나 매립의 경우는 토양에서의 미생물에 의한 분해작용에 의해 서서히 발생하게 된다. 특히 매립기간중 산소의 유무에 따라 호기성에서 혐기성으로 진전되며 호기성 상태에서는 이산화탄소가 주로 배출되며 혐기성상태에서는 발생가스중 메탄이 60%이상을 차지하게 되며 나머지는 대부분 이산화탄소 및 황화수소이다. 매립에 의해 이산화탄소가 얼마나 발생하는가는 매립방식과 시간에 따라 복잡하게 변화되어 가므로 추정하기가 쉽지 않다.

소각의 경우 국내 발생 폐기물중 소각에 의해 처리되는 양은 환경부 및 지자체에서 발표하고 있으나 폐기물의 조성이 매우 불균일하고 복잡하므로 폐기물의 성상별 소각량과 이에 따른 실 이산화탄소 배출량을 구한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

따라서, 국무조정실의 조사자료를 바탕으로 하되 이 통계는 메탄가스 등 온난화유발가스를 모두 포함한 것이므로 보고서에서 밝힌 대로 전체 양중 80%이상이 이산화탄소인 점을 감안, 0.8을 곱하여 이산화탄소로 추정하였고 여기에 다시 이산화탄소/탄소 전환계수를 곱하여 연도별 이산화탄소 발생량을 계산하였다.

폐기물부문 이산화탄소량

= 폐기물부문 온실가스총량

× 이산화탄소비율(0.8) ×

이산화탄소/탄소분자량비(44/12) (4.3)

4.3 산림에 의한 이산화탄소 고정량

현재 우리나라에서 국제적으로 공표하여 사용하고 있는 임업통계자료는 정부승인통계간행물인 임업통계연보이며 일관성을 위하여 이에 수록된 자료를 본 추정의 기초자료로 삼았다.

산림청의 임업연구원보의 임목축적량을 기반으로 1990년부터 1997년사이의 연도별 순 임목증가량 및 이에 해당하는 임목의 이산화탄소 순 고정량은 3장에서 언급한 대로 식 (4.4)를 이용한다.

임목에 의한 CO₂ 고정량(톤/년)

$$= \sum[(\text{수종별 연간 임목순증가량} \times \text{임목별건전비중}) \times (1 + \text{임목별 지상부비율} + \text{임목별 지하부비율}) \times \text{탄소전환비} \times \text{이산화탄소/탄소분자량비}(44/12)] \quad (4.4)$$

임상별 임목축적량 변화추이는 침엽수와 활엽수의 경우는 큰 변화가 없으며 다만 혼효림의 경우는 점차 축적량이 늘고 있어 우리나라의 산림조성에서

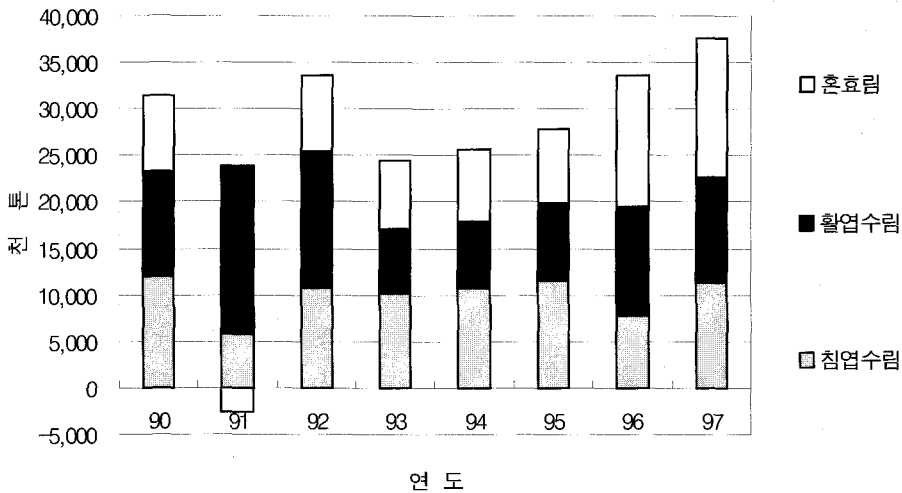


그림 8. 임상별 이산화탄소 고정량 추이

표 7. 연도별 이산화탄소 순수지

(단위 : 천톤)

구 분	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990
에너지부문	414,393	394,329	357,891	328,714	303,096	275,978	254,257	233,235
폐기물부문	39,248	37,922	35,816	34,605	33,393	32,179	30,967	29,756
산림흡수	37,526	33,690	27,857	25,572	24,440	33,640	21,117	31,427
순수지	416,115	398,561	365,850	337,747	312,049	274,516	264,107	231,564

혼효림 비중이 다소 커지고 있음을 추측하게 한다.

그림 8은 각 임상별 이산화탄소의 흡수량을 연도별로 분석한 것으로 그림에서 볼 수 있듯이 1991년도에 혼효림의 임목축적량이 (-)로 나온 관계로 이산화탄소 흡수량도 (-)로 나온 것이 특이한 점이며 연도별 추이를 보면 1993년도에 급감하였던 임목에 의한 이산화탄소 흡수량이 점차 임목축적의 증가에 따라 점증하고 있음을 알 수 있다.

4.4 이산화탄소 수치분석

이산화탄소 순수지 값은 에너지 부문과 폐기물부문의 이산화탄소 발생량에서 산림에서의 흡수량을 제한 값으로 1990년에서 1997년사이에 점진적인 증가 추이를 보이고 있다.

표 7에서 알 수 있듯이 이산화탄소 배출에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것은 역시 화석연료의 사용이며 폐기물부문에 의한 추가발생과 산림에 의한

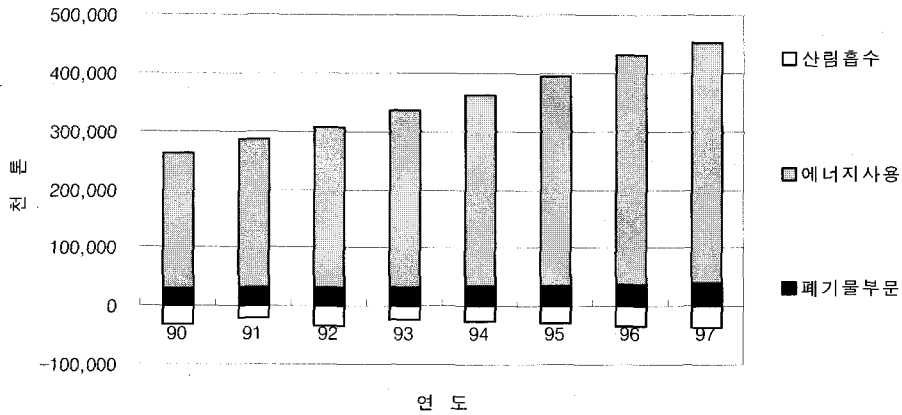


그림 9. 각 부문별 이산화탄소 배출 및 흡수추이

흡수효과는 서로 비슷한 정도를 보이고 있다. 그러나 전반적인 에너지사용의 증가와 이로 인한 이산화탄소의 발생은 산림에 의한 흡수량 증가분을 훨씬 넘고 있었다.

따라서 향후 에너지 사용의 절약과 에너지절약적 산업구조로의 개편이 없는 한 산림증식에 의한 이산화탄소 흡수로는 우리나라의 총 이산화탄소 수치를 개선하기 어려울 것으로 보인다.

이러한 이산화탄소 발생 순수지 값은 우리나라 전체에 해당하는 값으로 한 국가의 사회경제적인 측면에서의 이산화탄소 발생밀도를 의미하는 것은 아니다. 즉, 특정국가가 산업활동과정에서 또한 소비 등 생활패턴에 있어 얼마나 이산화탄소를 많이 배출하고 있는가를 알기 위해서는 인구를 비롯한 사회통계와 GDP와 같은 경제통계를 그 산정의 기본단위로 해야 할 것이다.

우리나라의 인구는 1990년부터 1997년까지 7년간 약 340만명이 증가되었는데 동 기간중 이산화탄소의 총수지값을 인구로 나눈 일인당 이산화탄소 순수지 변화추이는 그림 10과 같았다. 즉, 1990년에 5.34(톤-이산화탄소/인)이던 것이 1997년에는

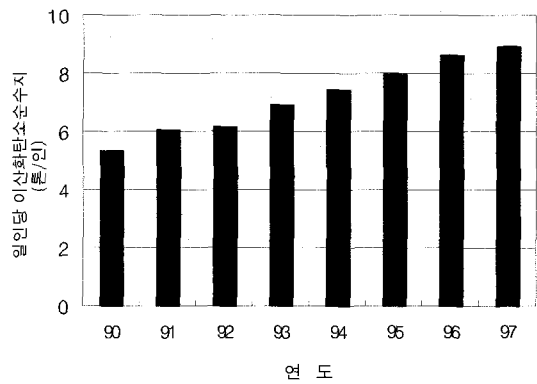


그림 10. 일인당 이산화탄소 순수지 추이

8.89(톤-이산화탄소/인)으로 66%나 증가하였다. 또한 동 기간중 일인당 이산화탄소 순수지 값이 년평균 8.7%씩 증가하고 있다.

경제지표에는 여러 가지가 있을 수 있으나 한 국가의 경제적 성장을 나타내는 척도로 크게 GNP와 GDP를 사용하는데 이중 우리나라의 영역내에서 일어나는 경제활동으로 인한 생산성 증가로는 GDP가 합당하므로 본 연구에서도 GDP를 기준으로 하였다.

표 8. 국민총생산

(단위: 10억원)

구 분	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990
국내총생산 (GDP)	290,888	275,691	257,501	236,375	217,698	205,860	194,226	179,539

자료: 한국은행, 「경제통계연보」, 1998.

주) 1990년불변가격 기준

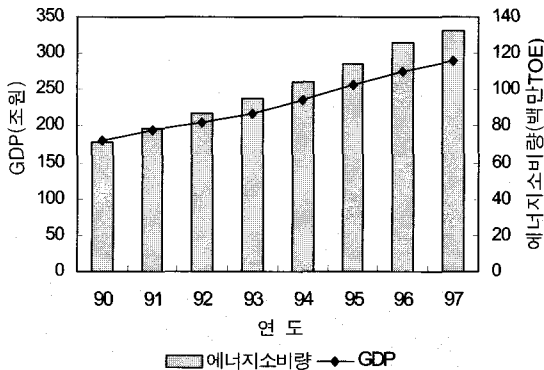


그림 11. GDP증가 대 에너지소비량 추이

앞에서 분석한 바와 같이 에너지 소비에 따른 연료별 이산화탄소 연간 배출량과 배기물부문에서의 발생량 그리고 산림에 의한 흡수효과는 우리나라 이산화탄소 수지에 있어 가장 중요한 인자이다.

같은 기간의 GDP성장률과 에너지 소비량과의 관계를 비교해본 결과 그림 11과 같았다. 즉, GDP

성장에 따라 에너지 소비량도 증가하고 있으나 GDP성장률에 비해 에너지 소비량의 증가폭이 갈수록 커지고 있음을 알 수 있다. 최근의 지구온난화 관련 국제동향을 보더라도 각국은 저 이산화탄소 발생형 산업의 채택과 기술개발을 위해 노력을 기울이고 있다. 우리나라와 같이 고 에너지 소비형의 산업은 추후 국제무역에서의 체제 등 각종의 불이익을 맞을 수 있으며 또한 향후 협약의 내용을 준수하기 위해서는 현재와 같은 에너지 과소비형 산업 체제를 계속 유지해 나가기 어려울 것이다.

1990년기준 1997년까지 GDP가 62%나 성장하고 있는데 GDP성장에 못지 않게 에너지소비가 급증하였기 때문에 GDP당 이산화탄소 순수지는 표 9에서처럼 1990년 129(톤-이산화탄소/억원)에서 1997년에는 143(톤-이산화탄소/억원)으로 증가하였다. 다만, 1993년도를 정점으로 이러한 증가추이는 소강상태를 보이고 있는 점으로 보아 우리나라

표 9. 연도별 GDP당 이산화탄소 순수지

구 분	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990
GDP(10억원)	290,888	275,691	257,501	236,375	217,698	205,860	194,226	179,539
순수지(천톤)	416,115	398,561	365,850	337,747	312,049	274,516	264,107	231,564
GDP당순수지 (톤/억원)	143	145	142	143	143	133	136	129

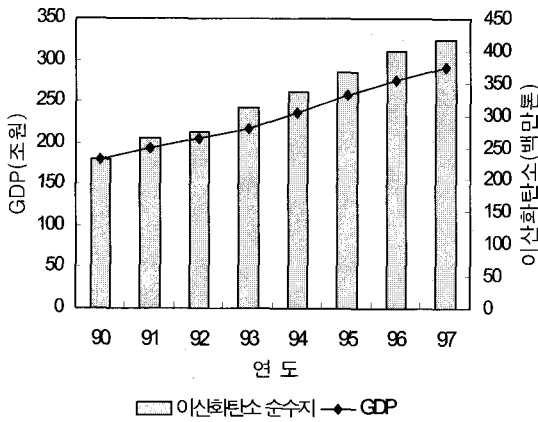


그림 12. GDP 성장과 이산화탄소 순수지 추이

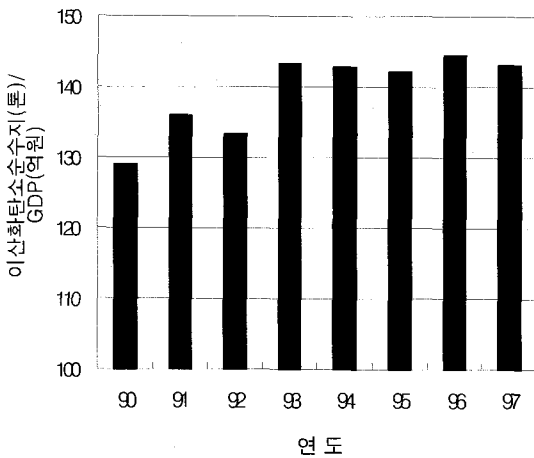


그림 13. 단위 GDP당 이산화탄소 순수지 추이

도 이때부터 조정기에 들어서고 있는 것으로 사료된다. 특히, 1997년말부터 IMF체제에 들어서고 이를 계기로 산업별 과잉 중복투자의 배제 및 정보통신분야의 육성 등 기업 및 산업구조의 구조조정 및 체질 개선작업이 이루어지고 있어 향후 GDP당 이산화탄소 순수지는 정지 또는 서서히 감소하는 추세로 돌아설 것으로 판단된다.

5. 결론

최근 온실가스에 의한 지구온난화 문제가 국제적으로 큰 이슈가 되고 있어 이에 대한 국가수준의 이산화탄소 수치관련 연구에 대한 필요성이 커지고 있다. 이에 우리나라의 이산화탄소 발생 및 흡수현황을 분석하고자 1990년부터 1997년 사이에 에너지 및 폐기물부문에서의 이산화탄소 발생량과 산림의 임목축적량을 기반으로 한 이산화탄소 흡수량을 산출하여 연도별 이산화탄소의 순수지 값을 구하였다.

분석결과 에너지부문의 소비에 따른 이산화탄소 배출문제가 가장 큰 기여도를 보이고 있고 따라서 이부문의 에너지 소비효율화와 산업구조의 저에너지 고부가가치화 아울러 배출 이산화탄소의 제거기술 등 에너지소비 부문에 대한 집중적인 관리가 이산화탄소 저감을 위해 가장 필요한 것으로 판단된다.

향후 각국의 이산화탄소 배출억제에 관한 국제적인 논의가 구체화되고 구속력을 갖게 될 경우 이로 인한 우리나라의 경제적인 부담은 대단히 커질 것으로 우려되는 바 지금부터라도 이산화탄소 억제를 위한 산업구조의 개편, 관련제도의 정비 및 기술개발 등 정부와 민간차원의 공동노력이 시급하다 하겠다.

- 참고문헌 -

1. 건설교통부, 건설교통통계연보(건설부문), 1998.
2. 과학기술처, 산림의 공익적 기능의 계량화 연구, 1991.
3. 국무조정실, 기후변화협약대응 종합대책, 1999.
4. 김갑덕 외, "국내 산림 Biomass의 생산에 관한 연구와 동향", 인삼에너지, 1988.
5. 박준영, "구조분해분석을 이용한 CO₂배출량 변

1. 화요인분석에 관한연구”, 서울대학교학위논문, 1999.
6. 산림청, 임업통계연보 각년도(1990~1998).
7. 산업자원부, 에너지통계연보, 1998.
8. 에너지경제연구원, 기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구, 1994.
9. 에너지경제연구원, 배출권 거래제를 활용한 전력산업의 온실가스 저감방안, 1999.
10. 에너지경제연구원, 에너지-경제-환경시스템의 모형화에 관한 연구, 1999.
11. 에너지경제연구원, 한국의 지구온실가스 배출과 저감정책 도입방안 연구, 1999.
12. 에너지경제연구원, IPCC의 온실가스 추계 방법론과 한국의 에너지 및 산업공정과정에서의 온실가스 배출 추계, 1998.
13. 통계청, 한국도시연감, 1998.
14. 한국은행, 경제통계연보, 1998.
15. 한국환경정책·평가연구원, 기후변화협약 대응을 위한 국내산업 체질 개선방안, 1998.
16. IPCC, IPCC 제1차 보고서, 기후변화에 관한 정부간 위원회(IPCC), 1990.
17. Houghton, R. A., "Terrestrial Metabolism and Atmospheric CO₂ Concentrations", BioScience, Vol. 37 No. 9, 1987.
18. Olson, J. F., The Earth As Transformed by Human Action, Cambridge University Press, New York, 1983.
19. Peirce, William Spangar, Economics of The Energy Industries (2nd edition), 1996.