

炭素에 너지資源의 未來와 木材高分子利用^{*1}

林 奇 杓^{*2}

Prospects of Carbon^a-Energy Resources and wood Polymer Utilization^{*1}

Kie-Pyo Lim^{*2}

1. 緒 言

人間的 物質生活은 사람을 중심으로 하여 천체 탄상의 物體가 時間과 空間的으로 去來되고, 그의 형태와 기능에 따라 價格이 천차만별하지만 化學的으로는 100여개의 化學元素에 不過하며 物質自體는 100여개의 元素組合으로만 人間生活에 필요한 效用性에 따라 價値가 創造되고, 천차만별의 價格을 이룬다. 그러나 人間의 物質生活에 필요한 物質을 元素別로 보면 100여개가 모두 多量필요한 것이 아니라 극소수에 불과하다. 즉 自然界에 存在하는 元素를 存在量別로 보면 酸素, 硅素, 알루미늄 등의 순서로 배열시킬 수 있지만 科學文明史의 근간을 이루워온 元素는 主로 衣食住熱의 炭素와 石器時代의 工作을 위한 岩石, 유리등의 冶業재료, 청동기시대의 구리, 철기시대의 鐵金屬材料등 몇가지 元素에 불과하다.

따라서 현재 세계적인 경제불황까지 물고온 자원난에 당하여 앞을 다투어 자원확보에 각국이 열을 올리고 있지만 문명사를 실질적으로 이끌어 온 몇가지 원소를 중심으로 문헌을 통하여 자원 파동, 특히 석유파동의 원인과 통제점을 분석하고 앞으로 政策立案에 주요한 制限因子로서 作用하는 不足한 資源의 確保對策 모색도 重要하다고 생각된다.

2. 化學元素別 存在量

자연계에 존재하는 원소는 92개에 불과하나 그들 상

호작용과 증복에 의하여 수많은 물체가 형성된다.

이들 물체의 형성은 에너지보존 법칙에 따라 에너지 변환이 일어나고 안정화되는 경향으로 진행된다. 즉 우리가 관찰할 수 있는 물체는 지구표면의 안정조건에 맞추어진 것으로서 원소의 종류와 구성에 따라 형태, 외관, 색깔, 강도, 밀도, 등등 人間의 要求와는 달리 각종 성질이 다르다. 즉 화학반응에 의하여 새로운 형태와 성질을 갖는 물체가 형성되지만 원소자체의 변화는 없으므로 이를 질량보존의 법칙이라고 한다.

따라서 인간이 조사할 수 있는 지하 16km로부터 지상 60km까지의 지각, 바다 및 대기권에 존재하는 중요원소의 존재량을 순서별로 표시하면 표 1과 같다. 즉 W.Nodack(1637)⁽¹⁾의 계산에 의하면 지구반경을 6,400km, 지각부분의 밀도를 2.8g/cm³로 보고, 전체 무게를 계산하면 총량이 2.28×10¹⁸ton에 이르며 생물계에 중요한 원소는 C, H, O, N, P, Ca, Mg, S등으로 人間을 포함한 생물계 Life cycle중에서 식물에 비료로 공급되어야 한다.

3. 主要公업원료의 원소별 존재량과 수명

인간의 문명사가 石器時代, 青銅器時代, 鐵器時代 및 原子力時代의 순으로 區分되는 것과 마찬가지로 主要材料를 구성하는 원소도 科學技術의 發達에 따라 탄소(C), 규소(Si), 칼슘(Ca), 구리(Cu), 철(Fe), 및 우라늄(U), 등으로 확대되었다.

이들을 중심으로 원소별 존재량과 이용량 및 공업원료로서의 이용수명을 예측해보면 표 2와 같다. 즉 석기

*1 W.Nodack, 1937, Der Kohlenstoff in Haushalt der Natur, Angew. Chem. 50(28) : 505-510

*2 全南大學校 農科大學 林學科 Dept. of Forestry, College of Agriculture, Chonnam National University

표 1. 지각중의 원소별 존재율

원 소 명	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	Mg	K	Ti	P
존 재 율(ppm)	46.4%	28.2%	8.2%	5.6%	4.2%	2.4%	2.3%	2.1%	0.6%	1,050
원 소 명	Mn	F	Ba	Sr	S	C	Zr	V	Cl	Cr
존 재 율(ppm)	950	625	425	375	260	200	165	135	130	100
원 소 명	Rb	Ni	Zn	Ce	Cu	Y	N	W	I	U
존 재 율(ppm)	90	75	70	60	55	33	20	1.5	0.5	2.7

Source: 日本化學會編, 化學원별, 基礎編, 丸善(株), 東京, 1975; pp.138-139.

표 2. 주요산업원료의 원소성 매장량과 가채연수(1970/1972)

원 소	존 재 량	매 장 량	연간생장량	연간채취량	가채연수	용 도(기 능)
Fe	128×10 ¹⁶ ton	175.4×10 ¹⁰ ton	0	0.75×10 ¹⁰ ton	233년	住: 기계장치, 건축
Ca	96×10 ¹⁶ ton		0			住: 건축
Cu	1.25×10 ¹⁵ ton	158×10 ⁹ ton	0	6.85×10 ⁹ ton	23년	住: 전기송배전
U	61.6×10 ¹² ton	833×10 ³ ton	0	18.5×10 ³ ton	45년	熱: 원자력열에너지
C	2.9×10 ¹⁶ ton	?	1.56×10 ⁹ tonCE	8.0×10 ⁹ tonCE	?	熱: 에너지
석 탄	4.09×10 ¹² ton		0	2.3×10 ⁹ ton	1,725	熱: 에너지, 고분자용(住, 衣)
석 유	89×10 ⁹ tonCE		0	2.4×10 ⁹ tonCE	37년	" "
천연가스	71×10 ⁹ tonCE		0	1.7×10 ⁹ tonCE	41년	" "
목 재	1.55×10 ¹¹ m ³		2.8×10 ⁹ m ³	2.5×10 ⁹ m ³	매년반복	" 고분자(住, 衣)
양 곡	—		1.74×10 ⁹ ton	1.74×10 ⁹ ton	매년반복	" (食), 의약품
가 축	?		81×10 ⁶ ton	151×10 ⁶ ton	매년반복	양분(食), 의약품
물 고 기	?		70×10 ⁶ ton		매년반복	" "

※ 계산: 양곡 = 3.7×10⁹인 × 0.3t/yr = 1.1×10⁹ton.

단백질자원(가축, 물고기) = 3.7×10⁹인 × 0.0146t/yr ÷ 18% 단백질 = 300×10⁶ton.

Sources: (1) 韓國科學技術研究所, 1974, 資源總覽, 科學技術處, 서울.

(2) M. Mesarovic & E. Pestel, 1974, Menschheit am Wendepunkt, 2. Bericht an den club of Rome zur Weltlage, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.

(3) FAO, 1960, World Forest Inventory, FAO, Rome.

(4) FAO, 1979, 1977 Yearbook of Forest Products, FAO, Rome.

(5) FAO; 1971, Production Yearbook, FAO, Rome.

(6) FAO, 1979, CERES, FAO, Rome, No. 70.

시대때부터 주요 공작재료였던 암석은 지구상에 많은 산소와 규소가 주요성분이므로 자원면에서의 고갈문제가 생기지 않을 것이며 현재 주요 건설 및 기계장치 재료인 철분도 지구중심으로 들어갈수록 많기 때문에 자원면에서의 고갈은 없을 것이다. 더욱이 이들 재료는 폐기유리나 고철을 회수하여 재생 가능하므로 자원난 극복면에서는 큰 문제로 등장하지 않을 것이다. 그러나 우리는 전기에너지수요증가와 전자공업발전으로 절대량이 부족하여 주요한 자원확보의 대상이 되며, 동재원에 필요한 고순도 등광석은 칠레, 미국에 편중분

포되어 있다. 또한 주요건축재료가 되는 칼슘은 지각중에 탄산염으로 존재하고 각종 요업 및 세멘트 원료일 뿐만 아니라 공기중의 탄소함량조절에 한 몫을 하므로 주요 탄소자원이기도 하다. 더구나 탄소로 구성된 자원은 대기중의 CO₂, 바다속의 CO₂염, 지각중의 탄산염(주로 석회석)로서 생물중의 탄소화합물과 밀접한 관계를 가지며 탄소싸이클을 이룬다.

한편 모든 생명체의 생존과 Life cycle에 주요 역할을 하는 탄소의 주요자원은 그의 존재형태에 따라 천연가스, 석유, 석탄등과 같은 화석탄소자원, 생명현상

표 3. 지구상의 탄소총량

자 원	지 각	혈 압 유	바 다	대 기	생 물 체	계
탄소원 (ton)	1.4×10^{16}	8.0×10^{15}	2.7×10^{13}	6.0×10^{11}	2.7×10^{11}	2.9×10^{16}

Source; W. Noddack, 1937, Der Kohlenstoff im Haushalt der Natur, Angew. Chem., 50(28) : 505—510.

으로 생성되는 임산물, 농산물, 축산물, 수산물등의 생물자원, 대기중의 CO₂와 바다물속의 탄산염 및 지하수에 존재하는 탄산염등의 무기탄소자원으로 구분할 수 있으며 지구상의 탄소총량은 표 3과 같다.

탄소원소는 그림 1의 다이프사이클과 같이 생명현상과 매우 중요한 관계를 맺고 있으며 탄소싸이클을 이룬다. 즉 식물의 탄소동화작용에 의하여 태양광에너지와 공기중의 CO₂를 흡수하고, 자체내에서 탄수화물, 지방 및 단백질등 생명체의 주요영양분으로 합성고정하며, 동물과 미생물은 식물이 합성한 탄소에너지를 영양분으로 이용하고 생체대사활동으로 생기는 CO₂는 호흡에 의한 분해산물로서 공기중에 방출 환원한다. 특히 공기중의 CO₂는 식물의 광합성에 이용될 뿐만 아니라 地中の 칼슘등의 알카리이온에도 흡수되므로써 공기중의 탄산가스는 안정된 평형사이클을 이루고 있다.

그러나 M. Mesarovic(1974)⁽²⁾에 의하면 표 2에서 본바와같이 공업적으로 중요한 화석탄소자원은 석

유와 천연가스가 40년, 석탄이 1700년후면 소멸되고, 인구증가와 과학기술발전에 따른 탄소자원 수요량을 계산하면 200년 이후에는 화석탄소자원이 완전고갈될 것이다 한다. 따라서 대체에너지자원 개발과 인구조절이 중요하며 인간의 인습때문에 발생하는 식량자원 부족도 시급히 극복해야 한다고 한다.

4. 炭素資源別 需給均衡과 利用展望

4.1. 탄소자원별 용도와 문명약사

표 3에서 보는 바와같이 지구상에는 약 2.910¹⁶ton의 탄소원소가 존재하나 인간이 이용하는 양은 소량이자원의 종류에 따라 이용량이 다르다. 즉 건설한바와같이 效用價値에 따라 다르므로 현대와같은 産業社會에서는 産業的原料價値가 있어야 이용된다. 이러한 경향은 표 4에서와 같이 문명사라고도 할 수 있는 인간역사와 밀접한 관계를 가지고 있다.

아마도 사람은 최초로 나무로 움막을 짓고, 열매를 먹고 살았을 것이며, 나무를 툰데 마찰시킴으로써 불을 만들었을 것이다. 즉 인간의 물질생활인 衣食住熱의 원료는 사용이 편리한 목재였을 것이며 나무를 이용한 모닥불에 음식을 익히고 고기를 구웠을 것이다. 환원하면 최초에는 문명생활이 모두 나무를 이용하고 가공및 공작물을 만들었을 것이다. 그후에야 돌을 이용하고, 청동을 이용하고, 철기를 이용하였을 것이다.

공작에 필요한 충분한 재료는 철기시대에 와서야 만들어졌으며, 지식의 축적과 필요에 따라 에너지원으로 나무이외에 석탄, 석유, 천연가스를 이용하고 20세기 후반에는 원자력도 큰 몫을 하게 되었을 것이다. 더욱이 구조재료인 건축재 및 건설용재는 목재이외에 양철강철, 세멘트, 경금속, 고분자 플라스틱등으로 개발이 용되었으며, 섬유재료는 나무잎에서부터 나무의 인피 섬유와 면화로 변천하고, 지금은 목재섬유와 합성섬유까지 이용하고 있다. 그러나 동물, 특히 인간의 영양재료인 식품과 의약품 및 사료등은 지금도 처음과 마찬가지로 농산물, 축산물, 수산물로 공급되며, 아직도 보완되는 대체자원이 개발되지 않고 있다. 이것은 바로 인간 생존조건이 매우 정밀하고 경교할 뿐만 아니

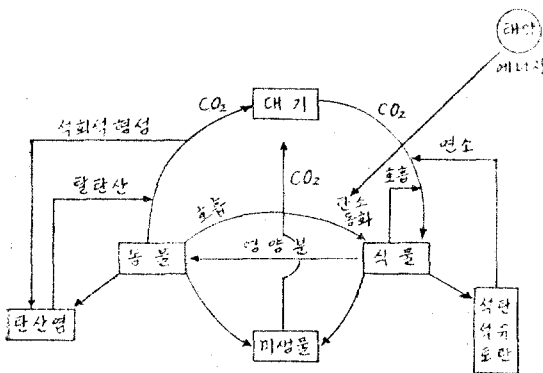


그림 1. 탄소의 순환

source: (1) M. Mesarovic & E. Pestel. 1974. Menschheit am Wendepunkt, 2. Bericht an der club of Rome zur Weltlage, Deutsch. Verlags-Anst. Stuttgart

(2) W. Sandermann. 1956. Grundlage der Chemie und Chemische Technologie des Holzes, A. KG. Leipzig, :p.79—88

표 4. 자원이용의 약사

시 대	건축재료	섬유재료	영 양 원	열에너지원	기 타(기 술)
석기시대	목재, 압석, 흙	나무 잎	열매, 동물, 불고기	목 재	불발결, 요업(도자기)
청동기시대 BC 3500 ?	"	인 피 섬유	"	"	목재회분세탁
철기시대 BC 1000 ?	철 재 료	목 화	"	"	목탄제철
600 ?	"	종 이	"	석 탄	종이발명
1700 ?	"	"	"	"	코르크제철, 소다회제조, 전기발전
1800 ?	"	목 재 펄 프	"	석 유	에너지전환법발명, 유황제조
1900 ?	셀룰로이드, 세멘트, 알루미늄, 합성수지, 플라스틱	셀룰로스섬유, 합성섬유	(목재당화)	"	셀룰로이드제조, 세멘트제조, 경금속제련, 합성수지플라스틱 제조, 합성섬유제조, 목재당화 및 발효
1950 ?	"	"	"	원자력발전	환경보존문제 대두, 자원과동 대두

Source: W. Sandermann. 1956. Grundlage der Chemie und Chemische Technologie des Holzes, AVG. Leipzig: 1-78.

표 5. 1일평균 단백질 요구량

	에너지(kcal/day)	총단백질(g/day)	동물단백질(g/day)
평 균 요 구 량	2,200~3,00	70	40
공 급 량 선 진 국 개발도상국	3,100	90~110	30~70
	2,150	35~60	5~10

Source: M. Mesarovic & E. Pestel. 1974 ibid: pp.9172

라, 일관된 질통성을 유지하는 특수조건이고, 불변인 것으로 생각된다. 특히 인간의 경우 생명의 근원이 되는 단백질원의 일부는 생존의 조건때문에 포 5와 같이 축산물이나 수산물등 동물단백질로 공급되어야 한다.

4.2. 탄소자원의 이용기술

옛날에는 나무가 영양재료를 제외한 모든 분야에 이용되었고, 인구가 적어서 현재와 같은 자원문제가 발생하지 않았다. 그러나 인구증가와저석의 축적으로 과학기술이 발달하고 각종 제품의 수요증가로 인하여 탄소자원은 석탄, 석유, 천연가스등 화석탄소자원까지 이용하여야 하였다. 특히 1840년 J.P. Joule가 전기적에너지를 기계에너지와 열에너지로 변환하는 실험으로 에너지형태의 상호변화가 가능하게 되었고, 20세기에는 화학적 중합법 개발로 저분자량의 탄소화합물을 고분자량의 화합물로 변화시킬 수 있게 됨에 따라 목재, 가축, 고무, 연화등 천연산 고분자가 담당하던 분

야 이상까지 인공합성 탄소고분자가 담당하게 되었다. 따라서 탄소원소는 현재 에너지원으로서의 기능 뿐만 아니라 분자재료로서의 기능까지 담당하게 되었으며 탄소원소는 수만개가 결합된 복잡고분자로부터, 수천개의 섬유재료, 수백개의 영양재료, 수십개의 기초유기약품, 수개의 연료토까지 각분야의 재료로 합성이용되고 있다.

(1) 에너지원으로서의 탄소이용~18세기에 B. Franklin이 전기를 발견하고 19세기에 J.P. Joule이 에너지 형태사이의 상호변환이론이 확립되므로서 20세기에는 식①과같은 에너지의 當量轉換이 실용화됨으로써 탄소자원의 열에너지이용이 급속도로 증가되었다. 즉 열역학적인 에너지보존법칙과 질량보존법칙에 따라 이동

$$1 \text{ newton-meter} = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt-sec.}$$

$$= \frac{\text{운동에너지}}{\text{열에너지}} = \frac{\text{전기에너지}}{\text{열에너지}} = 0.239 \text{ cal}$$

표 6. 세계의 에너지 소비량과 그의 구조(1950)

원 소 자 원 명	탄 소 (C)						기 타 (수력발전)	총 계
	석 탄	석 유	천연가스	목 재	농산폐기물	소 계		
소비량(10.6 ton CE)	1,640	980	260	240	?	3,120	40	3,160
구 성 비(%)	51.9	31.2	8.1	7.6	?	98.8	0.2	100

Source: H. Hartler. 1950. "The Advancement of Science", London.

표 7. 국민소득과 에너지소비(1970)

1인당 국민소득 GNP (US\$)	100~200	400~700	700~1,400	1,400~1,800	2,500~3,500	300~1,000
1인당 에너지소비량 (ton CE)	0.7~1.4	1.5~2.5	2.1~2.7	2.7~3.1	2.7~3.2	3.7~4.5
지 역	열대지역국가, 아프리카	일본, 남미, 아프리카, 중동	북서구라파	호주, 뉴질랜드, 이스라엘	북아메리카	동구라파, 소련

Source: M. Mesarovic & E. Pestel. 1974. *ibid*: p.128

하는 에너지는 형태만 다를 뿐 동일한 에너지이며, 무질서한 열에너지를 방향성의 기계적 운동에너지로 전환하는 때는 장치에 따라 효율성이 다를 뿐이다.

현재 이용하는 총에너지의 자원별 구성비를 보면 표 6에서와 같이 99%가 탄소계이고, 그중 90% 이상이 채 생산되지 않는 화석탄소계이다.

따라서 표 2의 자원별 수명과 그의 대체성을 고려할 때 대체에너지개발이 시급하며, 원자력에 의한 에너지 대체는 공해방지와 폐기물처리문제 등 완전한 대체자원은 못된다고 생각된다. 따라서 원시적인 풍력발전, 수력발전과 조력발전, 지열발전, 태양열발전과 광전지에 의한 전기에너지 생산과 열에너지이용이 가장 앞선한 대체에너지가 될 것이며 수량면에서도 적지않다고 생각된다.

더욱이 경제발전에 따른 에너지수요증가는 표 7에서와 같이 일인당 국민소득이 증가될수록 에너지소비량도 증가하며, 미국, 캐나다 등 북아메리카는 2.7~3.2톤의 탄소에너지를 소비하여 약 3,000달러의 소득을 얻으나 동구라파와 소련은 3.7~4.5톤을 소비하고서도 소득은 북아메리카의 1/4 정도에 불과한 점으로 보아 에너지 이용시스템의 개발도 중요함을 보여준다. 특히 앞으로 후진국의 경제발전과 인구증가에 따른 에너지수요증가를 고려할 때 탄소자원의 고갈로 탄소에너지공급이 감소된다면 총에너지소요의 90% 이상이 화석탄소로 운전되는 현재의 산업구조는 대체에너지자원의 개발이 시급하고, 그에 따른 산업구조개편도 일어날 것이다.

(2) 합성 고분자원으로서의 탄소 이용~식물의 탄소동

화작용을 근간으로 하고, 생명체에서 얻어지는 고무, 섬유, 목재, 가죽, 양모, 실크 등 천연고분자를 대신하는 합성고분자는 1930년경부터 실용화되었으며, 주로 천연가스나 석유에서 얻어지는 저분자량의 탄소로부터 제조된다. 특히 합성고분자는 천연고분자에 걸려되어 있는 특성을 합성하기 때문에 그의 수요는 증가일로에 있다. 비교적 정확하다는 R. Houwrick의 예측치로 보면 표 8에서와 같이 1980년대를 전후하여 고분자 수요가 급속수요보다 용적면에서 많게 될 것이라고 한다. 이는 합성고분자의 수요증가 때문이며, 그에 따라 저분자 탄소화합물의 수요도 증가할 것이다.

한편 현재까지 알려진 인공합성 기술을 천연산고분자의 생합성과정과 비교하면 표 9와 같다. 즉 공기중의 탄산가스가 식물의 광합성에 의하여 영양재료인 글루코스로 합성된 다음, 섬유재료인 셀룰로스섬유로 합성되고, 셀룰로오스 섬유가 생합성된 리그닌접착제에 의하여 커다란 나무가 되는 과정에 대비하여 인공합성 기술을 저분자량부터 고분자량의 탄소화합물로 비교하면, 현재강도가 요구되지 않는 대부분의 물체가 저분자량의 천연가스나 석유로부터 목재와 유사한 고분자까지 인공 합성되는 셈이다. 다만 생명현상 특유의 합성체만이 인공합성의 미개척 분야로 남아있다.

4. 3. 식물의 탄소고정량과 탄소자원 이용

(1) 식물의 광합성에 의한 고정탄소량~지구표면적 51×10⁹ha에서 생합성되는 생물체 탄소고정량은 표 10에서 보는 바와같이 연간 686.9×10¹³kcal/yr의 광에너지가 탄소에 고정되며, 탄소로 환산하면 약 86×19

表 8. 高 分 子 及 各 種 平 業 材 料 需 要 量 の 長 期 展 望

年 度	1 9 6 6		1 9 7 0		1 9 8 0		1 9 8 5		1 9 9 0		2 0 0 0	
	1,000t kg/人	1,000mm ³ l/人	1,000t kg/人	1,000mm ³ l/人	1,000t kg/人	1,000mm ³ l/人	1,000t kg/人	1,000mm ³ l/人	1,000t kg/人	1,000mm ³ l/人	1,000t kg/人	1,000mm ³ l/人
人 口 [10 ⁵ 人]	3.4		3.7		4.6		5.0		5.6		7.9	
	金 鐵	470,000 137	60,000 17.5	560,000 150	71,600 19	900,000 196	115,000 25	1,130,000 220	145,000 28	1,400,000 248	179,000 32	2,250,000 321
	鋁	7,700 2.1	2,900 0.8	11,300 3	4,190 1.1	32,000 7	11,850 2.6	55,000 11	20,000 4	90,000 16	33,300 5.9	250,000 36
	銅	5,400 1.5	600 0.2	6,200 1.7	693 0.2	9,200 2	1,027 0.3	10,000 2	1,100 0.3	13,500 2.4	1,507 0.9	20,000 3
	亜 鉛	4,300 1.2	600 0.2	5,000 1.3	703 0.3	7,200 1.6	1,020 0.2	8,700 1.7	1,250 0.25	10,400 1.8	1,462 0.3	15,000 2.1
金 屬 小 計	487,400 145	64,100 18.8	582,500 158	77,186 21.0	948,400 206	123,897 23.0	1,203,700 241	167,350 33.5	1,513,900 270	215,220 38.5	2,535,000 362	
高 分 子 材 料	16,000 5	14,200 4.3	27,000 7	23,450 6.3	105,000 23	91,400 20	240,000 48	205,000 41	420,000 75	365,500 65	1,700,000 243	1,480,000 211
合 成 高 分 子	3,900 1.1	4,100 1.2	5,500 1.5	5,800 1.6	11,500 2.5	12,000 2.6	16,000 3.2	17,000 3.4	23,000 4.1	24,000 4.3	44,000 6.4	16,000 6.7
化 學 織 維	5,600 1.6	4,700 1.4	7,150 1.9	6,000 1.6	13,000 2.8	11,000 2.3	17,000 3.4	14,200 2.8	24,500 4.3	19,500 3.6	46,000 6.6	38,000 5.6
小 計	25,500 7.5	23,000 6.7	39,650 10.3	35,250 9.5	129,500 28	114,400 25	273,000 55	236,200 47	467,500 83	409,000 73	1,790,000 256	1,564,000 223
天 然 材 料	2,200 0.6	2,400 0.7	2,500 0.7	2,700 0.8	2,600 0.6	2,700 0.6	2,700 0.5	2,900 0.6	2,800 0.5	3,000 0.6	3,000 0.4	3,200 0.5
木 材	19,000 5.5	16,000 4.4	21,500 5.8	18,000 4.8	30,250 6.6	25,000 5.6	35,000 7.0	29,000 5.9	41,500 7.4	34,500 6.2	60,000 8.6	50,000 7.1
小 計	21,200 6.1	18,400 5.1	24,000 6.5	20,700 5.6	32,850 7.2	27,700 6.2	37,700 7.5	31,900 6.5	44,300 7.9	37,500 6.8	63,000 9.0	53,200 7.6
高 分 子 材 料 小 計	534,100 357	105,500 31	646,150 175	133,136 36	1,110,750 248	271,000 59	1,514,400 303	435,450 87	2,025,700 363	661,770 118	4,388,000 627	2,011,240 286

Source: R. Houwick, 1966, Kunststoff, 53(8) : 597-593.

표 9. 분자크기별 탄소화합물의 형태와 용도(고분자)

분자크기	식물생합성(목재)	인공합성	비고(용도)
C	광합성 (생체대사) 산화	탄소의 수소화	원소 : 유기약품, 연료
C ₆	5탄당, 6탄당 (생중합) 가수분해	단량체 (phenol, caprolactom) etc. 중합 (부가반응, 축합반응)	{생합성물 : 양분(전분, 단백질) {인공합성 : pentose 합성(1961)
(C ₆) _n	전분, 셀룰로스, 단백질, 리그닌, 지방, 수지, 테르페, 생고무, 라텍스 (생중합) 가수분해	중합체 섬유 (Nylon, polyester etc.) 플라스틱 {세놀수지, 요소수지, 기타}	전상고분자, 망상고분자
복합체	식물체(목재), 동물체	고무 {부타디엔고무, 스티렌고무, 기타}	복합고분자, 플라스틱, 고무, 섬유등

Source: (1) F.W. Billmeyer. 1962. Textbook of Polymer Chemistry, Interscience, N.Y.
(2) B.L. Browning. 1963. The Chemistry of Wood, Interscience, N.Y.

표 10. 식생별 광합성탄소고정량

식생단위	육지								바다	계	
	산림	산지	초지	농경지	툰드라	사막	하천	소계			
표면적(10 ⁹ ha)	5.0	0.7	2.4	1.4	2.6	2.4	0.4	14.9	36.1	51.0	
수광성 수합량	g/m ² /yr	1,290	600	600	650	90	—	1,250	669	155	303
	10 ⁹ ton/yr	64.5	4.2	15.0	9.1	2.4	—	5.0	100.2	55.0	155.2
환산단위(kcal/g)	4.5	4.6	4.0	4.1	4.5	4.5	4.3	—	—	—	
광에너지고정량 (10 ¹⁵ kcal/yr)	277.0	19.6	69.0	37.8	10.2	0.1	21.4	426.1	260.8	686.9	

Source: H. Lieth. 1972. Über die Primärproduktion der Pflanzendecke der Erde, Argew. Botan. 46(1) : 1-37.

표 11. 연간 탄소고정량과 이용량

연간순수탄소고정량				연간탄소이용량					용도
식생단위	면적 (10 ⁹ ha)	고정량 (10 ⁹ ha)	연량 (10 ¹⁵ kcal)	지원명	총배장량 (10 ⁹ ton)	채취량 (10 ⁹ ton)	가채연수 (yr)	연간이용량 (10 ¹² kcal)	
육지	산림	5.0	64.5	277.0	식단	4,087.0	2,300.0	1725	16.87
	산지	0.7	4.2	19.6	식유	88.9	2,428.4	37	19.42
	초지	2.4	15.0	60.2	천연가스	71.1	1,693.3	41	13.86
	농경지	1.4	9.1	37.8	목재	77.8	1,220.0	?	4.88
	툰드라	2.6	2.4	10.2	양곡	?	1,743.5	?	6.56
	사막	2.4	—	0.1	축산물	?	81.0	?	0.05
	지하천	0.4	5.0	21.4	유기질비료	?	?	?	?
소계	14.9	100.2	426.1	소계	4,324.8	9,466.2	?	61.64	
바다	36.1	55.0	260.8	수산물	?	69.7	?	0.024	
총계	51.0	155.2	686.9	총계		9,535.9	?	61.88	

Source: H. Lieth. 1972. Über die Primärproduktion der Pflanzendecke der Erde, Argew. Botan. 46(1) : 1-37.

*tonCE가 고정된다. 특히 森林과 河川은 초지나 농경지 및 橋未이 없는 灌木地의 광합성량보다 2배나 많다. 그러나 수산업의 본거지인 바다는 농경지의 1/4에 불과하다.

한편 태초부터 대체자원을 개발하거나 합성하지 못하고 있는 영양원을 생산하는 농경지와 단백질 자원을 생산하는 초지의 면적이 육지의 26%에 불과하고 사막과 툰드라는 30%로서 식량을 생산하는 농경지보다 넓다.

(2) 연간탄소고정량과 탄소이용균형~지구표면의 식물이 광합성에 의하여 고정한 탄소량과 인간이 이용하는 탄소량을 대비시키면 표 11과 같다. 즉 연간 이용하는 탄소량은 연간 식물이 고정하는 탄소량의 10% 정도이며 현재 이용하는 화석탄소량을 제외하면 광합성량의 2%정도 밖에 이용되지 않는 셈이다. 관연하면 현재는 98%의 고정탄소가 목질성 줄기로 비축되거나 식량과 동물사료 및 유기질비료로 소비되고 한다. 따라서 대체에너지가 시급히 개발되지 않을 경우 화석탄소 자원이 고갈되는 2,200년 이후에는 모든 탄소이용산업들은 비축된 목재나 매년 소비되는 일사구나 초류를 산업원료와 에너지원으로 사용하여야 할 것이다. 즉 앞으로는 식물광합성에 기인한 고정탄소의 이용을 높여야 할 것이며 광에너지의 비축인 목재의 과학적 이용기술이 더욱이 개발되어야 하고, 폐재나 소경목등 작은 목편을 분티 이용하는 펄프제조 방법이 주요 공정이 될 것이다.

한편 용도별 탄소자원의 소비량을 보면 현재 총인구

의 50%가 영양실조에 있는 단백질자원개발이 시급하며 수산업의 기술개발도 중요하지만 목초지확대에 의한 축산진흥도 중요하다.

그러나 인간의 영속적인 생존을 위하여 현재의 생태계를 그대로 유지한다는 환경보존의 조건하에서 탄소계자원의 용도와 식생밀 광합성 탄소고정량을 비교하면, 부족한 식량 및 단백질 자원을 시급히 해결하기 위하여 사막을 산림 또는 초지자원으로 전환시키고 동시에 미래의 탄소자원이 될 목질폐재와 농산폐기물 및 드시쓰레기의 수집과 이용기술개발도 매우 시급히 이루어져야 한다.

5. 未來의 炭素系 資源과 利用

미래의 탄소계 자원은 건술한 바와같이 식물광합성에 의한 탄소동화량이 되겠지만 식생단위별로 생산되는 주요 산물을 산업원료별로 구분 비교하면 표 12와 같다. 특히 생존을 위한 생태계와 환경보존의 조건하에서 주요산물별 광합성량을 현재 이용하는 량과 비교하면 다음과 같다.

5.1. 생물계 탄소자원의 현황

(1) 일산물(목재)~현재 연간 성장량이 $2.8 \times 10^9 m^3$ 정도이며, 연간 벌채이용량은 $2.5 \times 10^9 m^3$ 이 되므로 영속적 생태계 보존인 보축생산을 기준으로 보면 연간성장량의 90%를 이용하고 있다. 따라서 현재의 이용도 일산원료 $1.2 \times 10^9 m^3$ 과 산업용 $1.3 \times 10^9 m^3$ 이므로 앞으로

표 12. 탄소자원의 연간이용량과 소요량

구 분	매 장 량	연간이용량	가채연수 (yr)	연간소요량	비 고	
과 석 탄 소	석 탄	$4.1 \times 10^{12} \text{ton}$	$2.3 \times 10^9 \text{ton}$	1,725	$2.3 \times 10^9 \text{ton}$	재생불가능
	석 유	$89 \times 10^9 \text{tonCE}$	$2.4 \times 10^9 \text{ton}$	37	$2.4 \times 10^9 \text{tonCE}$	"
	천 연 가스	$71 \times 10^9 \text{tonCE}$	$17. \times 10^9 \text{tonCE}$	41	$1.7 \times 10^9 \text{tonCE}$	"
	소 계		$6.4 \times 10^9 \text{tonCE}$		$6.4 \times 10^9 \text{tonCE}$	
생 물 계 탄 소	일산물(목 재)	$154.6 \times 10^9 m^3$	$2.5 \times 10^9 m^3$?	$2.5 \times 10^9 m^3$	식물: 재생산, 연간 성장량의 90% 소비
	농산물(양 곡)	—	$1.7 \times 10^9 \text{ton}$?	$1.1 \times 10^9 \text{ton}$	식물: 재생산, $0.64 \times 10^9 \text{ton}$ 이 남음
	축산물(고 기)	?	$81 \times 10^6 \text{ton}$?	$300 \times 10^6 \text{ton}$	동물: 식물용 소비하여 재생산 단백질 자급율은 50%
	수산물(물고기)	?	$70 \times 10^6 \text{ton}$?		
	소 계		$1.3 \times 10^9 \text{tonCE}$		$1.4 \times 10^9 \text{tonCE}$	
총 계		$7.7 \times 10^9 \text{tonCE}$		$7.8 \times 10^9 \text{tonCE}$		

Source: 표 2와 동일

로의 인구증가와 과학기술 발달로 예기되는 임산물 수요증가는 거의 감당하기 어렵고, 화석탄소자원 고갈에 따른 대체량은 커데로 보아 인간 약 $120 \times 10^9 \text{tonCE}$ 에 불과하므로 화석탄소가 고갈되는 2,200년 이후의 탄소수요를 목재로 해결한다는 것은 생태계의 파괴와 황폐화를 초래할 것이다.

(2) 농산물(식량)~현재 연간 $1.74 \times 10^9 \text{ton}$ 의 양목이 생산되고 있는 반면, 연간 양목소비량은 $1.1 \times 10^9 \text{ton}$ 이므로 100% 자급되고 있으나 인구증가와 과학기술 발달에 따른 수요증가를 고려하면 다른 산업원료로의 전환은 곤란하다. 그러나 현재 단백질 자원의 자급율이 50%에 불과하므로 연간 약 $0.5 \times 10^9 \text{ton}$ 을 사료로 전환할 수 있으며, 선진국에서는 고기류 1kg 생산을 위하여 약 7kg의 양목을 소비한다고 한다.

(3) 축산물과 수산물(동물단백질)~현재 축산물과 수산물 생산량을 합하면 인간 약 $151 \times 10^6 \text{ton}$ 의 단백질 자원이 생산되나 137억의 인구중 50%가 단백질 부족으로 영양실조상태에 있는 셈이다. 따라서 동물단백질 자원의 확보는 생존을 위하여 시급히 필요하며, 수산물증산도 중요하다. 시급한 단백질 확보를 위하여 육분의 양목으로 가축을 기른다면 약 $70 \times 10^6 \text{ton}$ 의 단백질을 자원을 증산할 수 있을 것이므로 총 수요 $300 \times 10^6 \text{ton}$ 중에서 $221 \times 10^6 \text{ton}$ 만이 공급된 셈이며 70%까지 자급율이 확대될 것이다. 그러나 영양새로 전체로 보아 절대량이 부족하므로 육중에 의한 단위면적당 증산이 필요하며, 더 나아가 농경지와 목초지의 확대가 긴급하고 궁극적으로 사막지도 농경지화 하여야 할 것이다.

(4) 임산물 및 농산폐기물(유기질비료)~현재 임목벌채와 양곡수확후 산이나 들에 버려지는 잎사귀, 가지, 줄기 뿌리의 양은 수확된 량보다 많다. 더욱이 이들 폐기물은 목질폐기물로서 산지와 농경지의 생산력보존을 위하여 자연으로 환원되거나 농촌의 연료로 이용된다. 그러나 만약 대체 에너지개발이 늦어지면 화석탄소 자원이 고갈되는 2,200년 이후에는 이들 폐기물이 산업용 탄소자원으로 이용되어야 할 것이다. 따라서 도시쓰레기를 포함한 각종폐기물의 수집방법과 저장 및 운반방법뿐만 아니라 이들 생물계탄소자원을 원료로 한 각종 탄소화합물제조기술이 개발되어야 할 것이다. 즉 폐기물로부터 도시가스, 가스올, 알콜, 에칠렌, 벤젠, 페놀, 부타디엔, 스티렌등등 액체연료와 고분자제조용기초유기약품등이 제조되어야 한다.

5.2. 생물계 탄소자원의 분포와 이용기술

현재 생물계탄소자원은 절대량이 부족하기보다 그들의 분포가 편중되어 있고 지역에 따라 성장이 다양하다. 즉 목재의 경우 북아메리카, 소련, 스칸디나비아반도에 치엽수가 많고, 적도지방에는 활엽수가 많으며 산림자원이 많은 곳은 적도지역인 남아공도와 아마존강 유역이고 광합성량도 많아 속성수종이 많다. 그러나 같은 위도라도 아프리카대륙은 사막이 많고 산림이 적다. 한편 식량자원은 인구밀도와 농경지 및 지역별 식성과 관계되므로 현재 주로 미국, 호주가 수출하고, 그외국가들은 자급자족정도일뿐이며, 농경지가 부족하고 사막이 많은 북아프리카와 중동지역 인구가 많은 인도지역은 식량이 부족하며, 동물단백질자원도 식량과 유사한 경향을 보인다. 따라서 아직도 미개발지역 열대지방의 장클지대와 사막지대를 개발하여 용도별 토지확보가 필요하며, 특히 일조시간이 길어서 태양광합성량이 많은 적도지역은 앞으로 주요탄소자원생산국이 될 것이다.

그러나 이들 탄소자원을 가공하는 과학기술은 인간생활의 필요에서 생기므로 주로 북반구의 자원부족지역에서 발전하였으며 기술속격도 높다. 따라서 자원보유국과 기술보유국의 상호협력에 의하여서만이 현재의 불균형을 전쟁없이 극복할 것이다.

특히 자원난과 과학기술 발전은 사람에게 의하여 유발된 것이므로 인구조건과 이동이 자유롭다면 쉽게 극복되었지만, 역사적 전통과 가치관 차이때문에 용이하지 않을 것으로 생각된다.

6. 結 論

현재의 주요 탄소자원인 천연가스, 석유, 식탄등의 화석탄소는 앞으로 약 200년간 이용되고, 그후 부터는 고갈될 것이며, 현재까지의 문명사로 보아 화석탄소가 고갈되더라도 영속적인 인간역사는 이루어가는 방향에서 극복될 것이다. 특히 탄소계 자원은 인간생존을 위하여 필수적인 자원이므로 화석탄소자원이 고갈되면 광합성에 의한 생물계탄소자원이 이를 대신할 것이다.

가장 긴급한 생물자원의 확보는 인간생존의 병목이 되고 있는 식량과 동물 단백질 자원이며, 앞으로의 인구는 식량에 따라 조절될 것이다. 그의 시기가 언제이냐가 남아 있으나 이도 과학기술의 발달로 극복될 것이나, 적시에 개발되지 못하고 있다. 더 나아가 앞으로

의 자원확보와 육성연구 개발과 산업구조 개편방향도 생물계 탄소자원의 이용이 될 것이다. 따라서 다음과 같은 대책이 지금부터 수행되어야 할 것으로 생각된다

(1) 에너지소비구조에서 90% 이상을 점유하는 탄소계 에너지를 다른 에너지원으로 전환하여야 한다. 화석탄소에너지자원의 고갈이 40년 내지 200년이라고 보면 그 기간내에 대체에너지를 연구개발하여야 할 것이며 대체 에너지자원으로서는 수력발전, 풍력발전, 조력발전, 지열발전과 광전지 및 태양열 이용등이 될 것이다. 그러나 원자력에 의한 핵발전은 공해방지와 폐기물처리기술이 확립된후에야 가능할 것이다.

(2) 현재도 마찬가지이지만 미래에도 동물단백질자원의 확대육성이 필요하다. 즉 초지자원과 사료작물확대재배로 축산업을 육성하고, 사막과 툰드라의 초지자원과가 시도되어야 할 것이다. 또한 단위면적당 생산량을 높이기 위하여 식물육종뿐만 아니라 동물육종기술도 시급히 개발되어야 할 것이다.

(3) 생존환경의 보존과 폐기물의 자원화를 위하여 도시쓰레기를 포함한 각종 폐기물의 수집체계와 저장 및 운반방법을 개발하여 자원화하고, 광합성산물인 셀룰로오스계 물질을 저분자 탄소화합물로 전환하는 연구개발과 미생물에 의한 직접이용방법 개발로 산업구조가 개편되어야 할 것이다. 특히 그림 2의 목재이용기술체계에서 보는 바와같이 인간, 특히동물의 영양원이 되는 식량을 제외하면 모든 탄소화합물을 합성 또는 분해할 수 있으므로 폐기물의 이용기술이 공업화되어야 한다. 특히 식물이 생합성한 셀룰로오스섬유의 분해없이 성분별로 분리 이용하는 펄프화방법이 실용

를 재합성하는 시간과 에너지소비를 절약하고 식물체의 구성성분을 분리 이용할 수 있으므로 적당한 목질폐재 이용방법이 될 것이다.

우리나라의 경우는 표 13에서 보는 바와같이 탄소계 자원은 목재와 식량이 부족할뿐 단백질자원은 충족되는 셈이며, 부족한 식량은 간척사업으로 충족될 수 있다. 한편 화석탄소 자원은 무연탄대장량이 많아 현재 수입하는 모든 화석탄소를 식탄으로 공급하여도 4만여년 쓸 수 있다. 특히 석탄 고갈후에는 국내입산자원비축으로 충족될 것이다. 그러나 현재의 에너지소비구조에서 약 2%가 수력이고, 탄소계에너지가 98%인점을 고려할 때 대체에너지 개발이 시급하며, 입산연료의 비중이 탄소계에너지중 10%에 불과하므로 국토의 65%인 $6.5 \times 10^6 \text{ha}$ 의 산림이 일본수준인 입목축적 $72.4 \text{m}^3 \text{ha}$ 와 연간 성장율 3%정도만 된다면, 연간 $14.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 가 성장하므로 1980년의 국내목재총수요인 $9.22 \times 10^6 \text{m}^3$ 을 제외하여도 연간 $0.66 \times 10^6 \text{tonCE}$ 를 공급할 수 있으므로 탄소원소의 전체량에서 국내 모든 탄소수요를 충족시킬 수 있다. 따라서 현재의 우리나라는 산림축적을 $17 \text{m}^3/\text{ha}$ 에서 $70 \text{m}^3/\text{ha}$ 이상으로 향상시키는 것이 급선무이며, 50년 후에나 74.4m^3 에 달하므로 수출과 경제발전에 따른 탄소수요를 공급하기 위하여서는 국내 산림자원보존과 동시에 해외자원의 개발 수입, 생물자원을 이용한 저분자량의 탄소화합물제조기술개발 및 산업구조개편이 필요불가결하다. 즉 우리나라의 경우 탄소자원의 보유량은 식회석, 석탄이 많고 국토의 67%가산림이며, 삼면이 바다인 점에서 충분하며, 농경지확대를 위한 간척지개발도 대륙붕이 많

표 14. 우리나라의 주요원소별 자원보유량과 수입현황(1976)

원소명	칭	매장량(ton)	연간생산량(ton)	가채연수(yr)	연간수입량(ton)	총소요량(ton)	비 고
Fe	철강석(고철)	$6 \times 10^8 \text{ton}$	0.36×10^6	18	고철: 1.29×10^6	1.85×10^6	100%기준
Ca	석회석	40×10^9	19.1×10^6	1,840	0	12.4×10^6	50% Ca기준
Cu	동광석	131×10^3	900	66	?	43×10^3	100% Cu기준
U		315	?	?	?	?	100% U_3O_8 기준
C	석탄	1.47×10^{12}	16.4×10^6	95,500	2.2×10^6	18.6×10^6	공업용유연탄수입
	석유	0	0	0	$15.7 \times 10^6 \text{ton CE}$	$15.7 \times 10^6 \text{ton CE}$	100%수입
	천연가스	0	0	0	0	0	0
	목재	$108 \times 10^6 \text{m}^3$	$1.1 \times 10^6 \text{m}^3$?	6m^3	$7.8 \times 10^6 \text{m}^3$	86%수입
	식량	?	8.2×10^6	?	2.9×10^6	13.5×10^6	21%수입
축산물	?	0.6×10^6	?	0.2×10^6	3.0×10^6	5%수출	
수산물	?	2.4×10^6					

Source: 韓國科學技術研究所. 1974. 資源總覽科學技術處, 서울

고 간단한 차가 큰 서해안에 조력발전소를 건설하면 증
 축 될 것이다. 그러나 어떻게 주어진 천연자원을 합리
 적으로 운용하며, 유용한 형태의 자원으로 과학적으로
 체계화하고 건설하느냐에 달려 있다. 즉 장기생존전략

과 과학적 체계화를 바탕으로 자원 확보와 해외자원의
 개발방향 및 전략이 검토되어야 할 것이며 세계 과학
 기술에 발맞춘 장기적인 생존의 기술전략이 필요하다.

