

# CO<sub>2</sub>배출량 저감을 고려한 국내 에너지공급시스템 분석 : 시장분배모형(MARKAL)의 응용

신희성\* · 홍종철\* · 강희정\*\*

## Energy Supply Systems for CO<sub>2</sub> Emission Control in Korea : An Application of MARKAL Model

Hee Sung Shin\*, Jong Chul Hong\* and Hee Jung Kang\*\*

### Abstract

MARKAL(MARKet ALlocation) Model, one of the most sophisticated energy technology assessment model is applied to finding the optimum mix of energy sources and evaluating energy technology competitiveness in Korea. The model is capable of handling Multiple Objective Linear Programming to test the related cost minimization and environmental control function. In this paper three environmental regulation scenarios are observed including 10% and 20% reduction of carbon dioxide emission level. For the purpose of establishing the basic data base, Korea Reference Energy System is also developed on the base of the year 1989 with technology utilization and energy flow analysis.

## 1. 서론

에너지의 안정적인 공급 대책 수립 및 효율

적인 사용을 위해서는 보다 정확한 에너지수요의 예측과 이를 만족시키기 위한 최적에너지공급방안 수립이 필요하다. 특히 우리나라와 같이 부존자원이 거의 전무한 경우 이의 필요

\* 한국에너지기술연구소 산업에너지연구부

\*\*건국대학교 산업공학과

성은 더욱 질실하다고 하겠다. 한편 산업화과정에서의 화석에너지의 사용 증가는 대기, 수질, 토양등에 대한 환경오염을 초래하였고, 특히 지구온난화문제는 인간 생활에 직접적으로 영향을 미치는 심각한 인류공동의 현안 문제가 되고 있다. 이러한 에너지와 환경문제의 해결을 위해 에너지시스템을 보다 정확히 표현, 분석하고 정책적 대안들을 공통적인 근거위에서 평가·비교할 수 있는 도구로서 에너지모델의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 전통적인 에너지모델의 적용은 앞서의 문제점을 적절히 수용하는 데에는 한계성이 있어 이의 확장 내지는 새로운 모델의 개발이 요구되고 있다.

이에 본 논문에서는 최소한의 비용으로 주어진 수요를 만족시킬 수 있는 우리나라 에너지공급시스템 설계와 최근 주요 환경문제로 부각되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출량 규제를 고려한 에너지시스템을 분석하기 위하여 최근 에너지기술평가모델의 하나로서 개발된 시장분배모형(MARKet ALlocation : MARKAL)을 이용하여 그 적용 결과를 제시하고 향후 우리나라의 환경문제를 고려한 에너지시스템 구축 계획 수립을 위한 모델의 구체적 가능성을 검토해 보고자 한다.

## 2. MARKAL모델의 개요

MARKAL은 국제에너지기구(International Energy Agency : IEA)사업으로 미국의 BNL(Brookhaven National Laboratory)과 독일의 KFA(Kernforschungsanlage)에서 1976년 부터 1983년까지 공동 개발한 모형으로서([20] [21])국가 및 지역에너지 정책 분석에 광범위

하게 적용되고 있으며 ([16] [18]) 국내에서는 1987년부터 에너지시스템 형식화와 기술 데이터베이스의 구축을 중심으로 응용되기 시작하였다([10] [11] [12] [13]).

### 2.1 모델의 특성

모델은 에너지공급에 대한 분석을 통하여 에너지시스템을 선형관계로 형식화하고 주어진 목적함수에 대한 해를 찾아나가는 선형계획법 모델이며, 최고 16개의 시간주기 (Time Period)로 나누어 다주기 분석(Multi-Period Analysis)을 행할 수 있도록 되어있다. 특히 목적함수가 단일이 아닌 에너지비용, 환경, 안정도함수의 다목적함수로 구성되어 있다.

모델에서 사용되고 있는 에너지수요는 최종 에너지사용기술(기기)의 효율을 고려한 유효에너지(Useful Energy)를 말한다. 이는 외생적인 예측치에 의해서 주어지며 이를 만족시키기 위한 에너지 시스템내에서의 최적에너지공급 및 최종사용기술의 구성이 결정되며, 이 결정은 사용자가 정의하는 각 기술에 대한 기술적 및 경제적 또는 정책적 데이터에 의해 좌우된다. 따라서 MARKAL모델은 에너지 공급모형(Energy Supply Model)으로 특정지워지며 타 에너지기술평가모델에 비하여 에너지공급, 전환, 수요기술의 분류가 상당히 세분화되어 있다. 따라서 데이터베이스의 구축에 따른 노력과 시간이 많이 소요되고 입력데이터베이스가 모델에서 차지하는 비중 역시 매우 크다.

모델에서 사용하는 에너지기술은 크게 채광, 수입, 수출 등 에너지원(생산)기술, 하나의 에너지매체(Energy Carrier)를 다른 에너지매체로 변환하는 가공(Process)기술, 전기나 열을

생산하는 전환기술, 최종 사용기술(기기)로 분류하였고, 에너지시스템내에서의 에너지흐름은 |Fig.1|과 같이 표시되는데 이를 기준에너지시스템(Reference Energy System:RES)이라 한다. 즉, RES는 실제 에너지시스템의 논리적구조(Logical Schema)이며 MARKAL모델의 시작단계로 볼 수 있으나, 많은 데이터베이스의 분석 결과 이기도 하다.

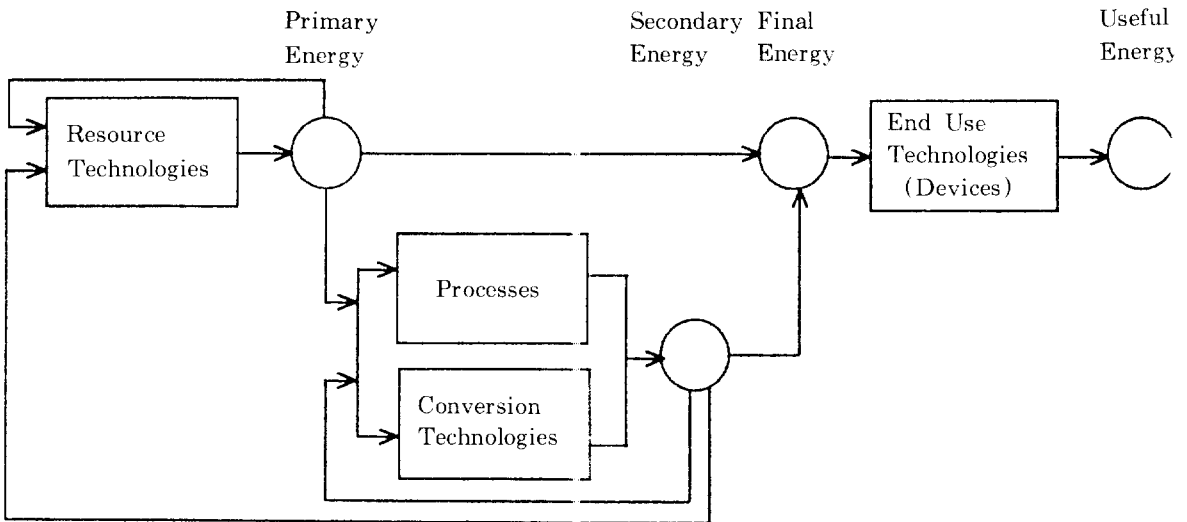
## 2.2 모델의 구조

MARKAL은 선형의 다목적함수(Multiple Linear Objectives Function)와 제약식을 갖는 형태로 나타낸다. 하나의 목적함수와 이에 대한 제약조건식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_{i=1}^n c_i x_i \\ \text{Subject to } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i & i=1, \dots, m \\ \bar{u}_j &\geq x_j \geq \underline{l}_j & j=1, \dots, n. \end{aligned}$$

여기서  $c_i$ ,  $a_{ij}$ 는 각각 목적함수와 제약조건에서의 계수들이고,  $b_i$ (RHS)는 각각의 제약식에서의 계수 및 상수의 값으로서 입력자료로 주어지는 것들이며, 해로서 구하고자 하는 것은  $x_i$ 들의 값이다.

MARKAL의 가장 큰 특징과 장점은 총 할인비용 함수(Total Discounted Cost Function), 안정도 함수(Security Function), 비용-안정도결함함수(Combination of Discounted Cost Function and Security Fuction), 환경함수(Environmental Function)등 다목적 함수(Multi-Objective Functions)를 이용 할 수 있다는 점이다. 따라서 목적함수들의 상충작용(Trade-off)분석이 가능하다([18]). 제약조건식은 열 및 전력에너지의 전체 균형 방정식을 비롯한 에너지원에 대한 균형, 수급 균형, 에너지 사용 설비의 부하특성, 기술이용등이 포함된다. 특히 열병합발전(Cogeneration)에 대한 상세한 모델링이 가능하다(부록 참조).

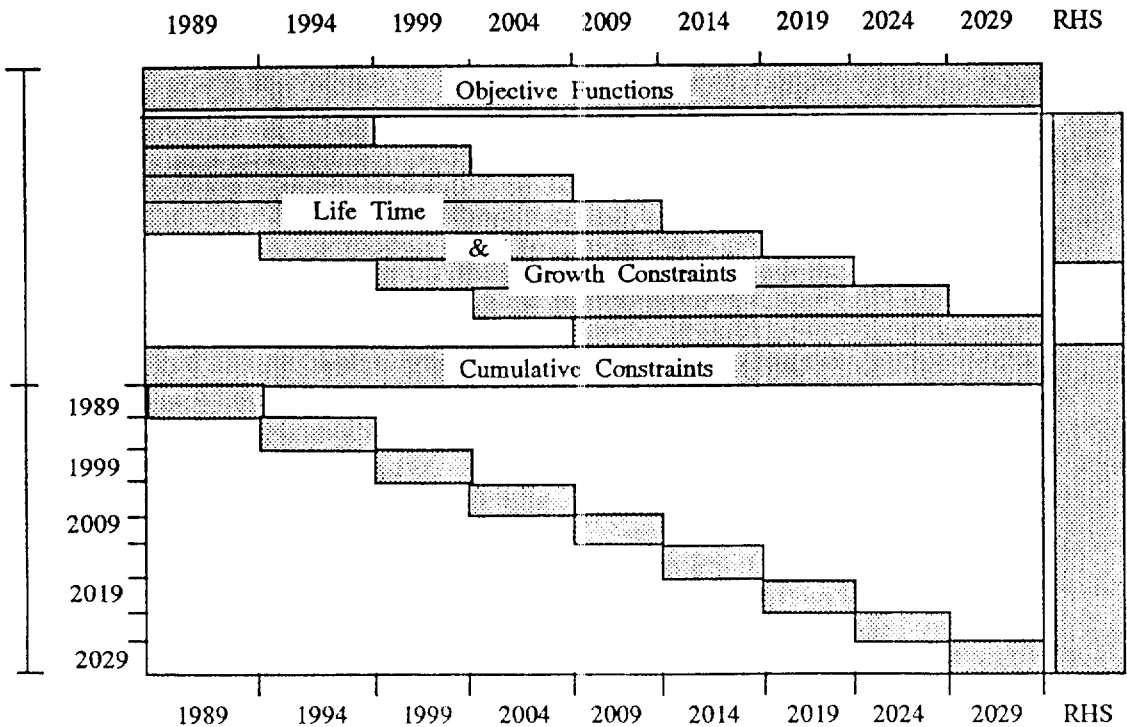


[Fig.1] Energy Flows and Technology Categories in MARKAL

### 2.3 선형계획법 매트릭스 구조

[Fig.2]는 MARKAL의 입력데이터 매트릭스를 간략화 한 것이다. 매트릭스에서의 총 기간(분석 기간)은 45년이고, 각각 5년씩 9개의 시간주기로 나누어져 있으며, 표시된 각 년도는 해당 시간주기의 중간년도를 의미한다(최고 16주기까지 가능함). 빗금친 부분은 매트릭스계수, 목적함수와 같이 모든 시간주기와 연관이

있는 제약조건, 또는 기준년도 뒤의 몇 주기가 지 영향을 미치는가를 나타내는 기술의 주기 및 증가율 제약조건, 특정 주기에만 한정되는 수요균형, 에너지매체 균형, 기술이용 관련 제약조건들을 나타낸다. 매트릭스의 생성 및 결과표 작성을 위해서는 OMNI(Hevery Systems)를 이용하였고 모델의 최적화과정에는 IBM LP Optimizer인 MPSX/370을 사용하였다.



[Fig.2] Linear Programming Matrix of MARKAL

### 3. 국내의 기준에너지시스템 (Reference Energy System)

1989년도 기준 우리나라의 에너지시스템을 모형화하기 위한 MARKAL 기준에너지시스템

을 Fig.3에 나타내었다. 에너지시스템에서의 에너지흐름 및 각 기술의 기술특성 데이터들은 관련 자료를 이용([1][2][3][4][5][6][7][8][9][14][15]), 모델 데이터베이스를 통하여 분석된 것이다.

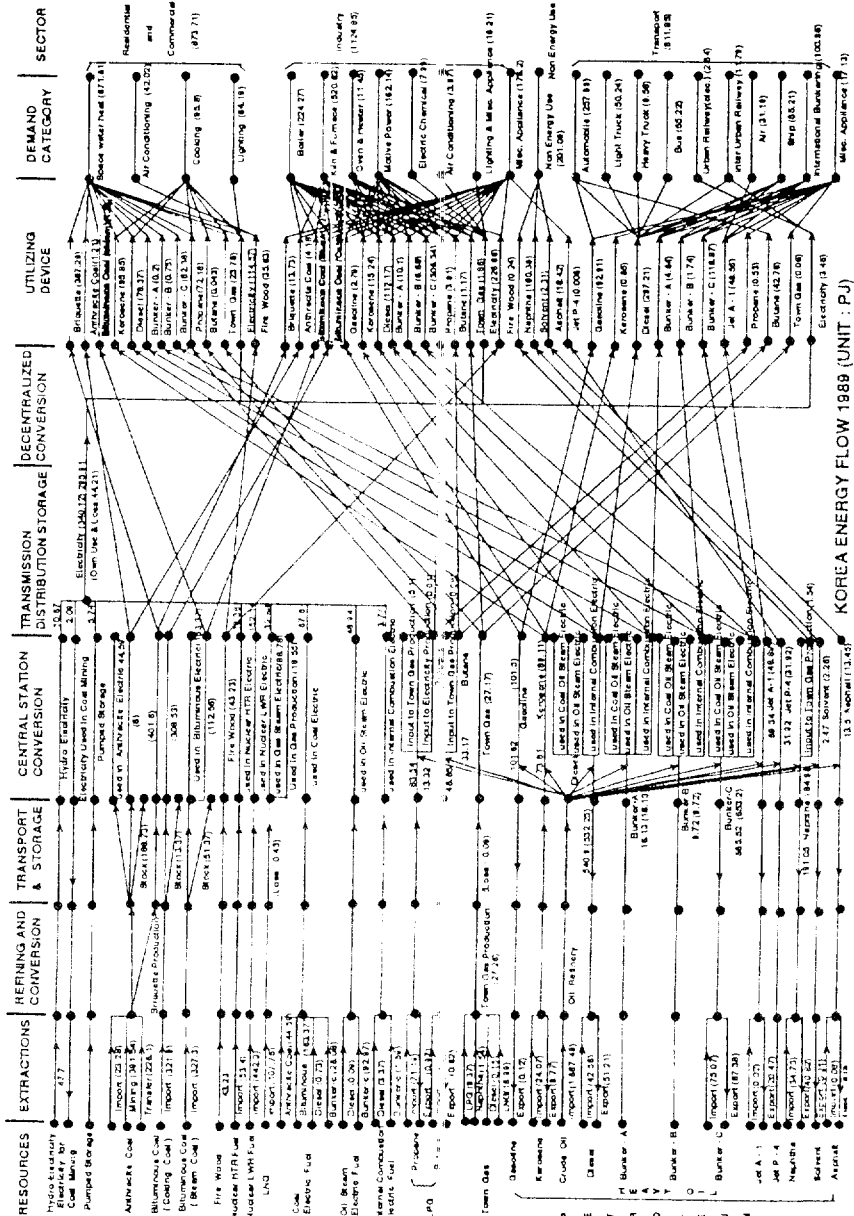


Fig.3 | Reference Energy System (RES) of MARKAL

## 4. 모델의 적용

### 4.1 시나리오의 설정

본 연구에서는 1989년도를 기준으로 2029년까지 45년간을 5년씩 9주기로 나누어 각 주기별로 국내 에너지공급시스템의 최적화를 시도하였다. 또한 CO<sub>2</sub> 배출량 규제를 고려한 에너지시스템 설계를 위하여, 각 에너지자원(생산) 기술별로 단위당 CO<sub>2</sub> 배출설계를 정의하고 최적화 결과 기술별 공급량에 의해 각 주기별로 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량 총량에 대해 일정비율의 제약을 가하는 방법을 사용하였다. 이는 지금까지 구체적인 규제치의 내용이 국내에서 수립되지 않았기 때문이다. 즉, CO<sub>2</sub> 배출량 제약없이 비용최소화를 목적함수로 하여 기준에너지시스템에 대한 최적화를 수행 하였으며, 동 결과 발생된 각 주기별 CO<sub>2</sub> 배출량을 근거로 하여 배출 총량에 대한 제약을 가하였고, 이 경우 환경영향 및 시스템비용의 최소화를 위한 에너지시스템을 분석하였다.

이를 위하여 다음과 같은 3가지의 모델운영 시나리오를 분석하였다.

시나리오 1(KORE1) : CO<sub>2</sub> 배출량을 제약하지 않고 시스템비용의 최소화만 목적으로 한 경우

시나리오 2(KORE10) : CO<sub>2</sub> 배출량을 10% 감소 제약하고 동시에 비용의 최소화를 목적으로 한 경우

시나리오 3(KORE20) : CO<sub>2</sub> 배출량을 20% 감소 제약하고 동시에 비용의 최소화를 목적으로 한 경우

### 4.2 입력 데이터

모델의 입력데이터는 크게 CLASS와 DATA 부분으로 나누어 모델데이터베이스로 구축된다. CLASS부분에는 에너지원의 종류, 전환 및 가공기술, 수요 부문 및 기술의 분류 등 모든 에너지시스템의 구성요소들 및 그 연관관계가 정의된다. DATA부분은 TABLE들로 구성되며, TABLE에는 위의 구성요소들에 대한 수치 데이터들 즉, 각 에너지원에 대한 이용가능 시간주기, 비용, 환경영향, 안정도, 그리고 가공 및 전환기술, 수요기술(기기)에 대한 기술의 수명년도, 최근 이용가능한 시간주기, 이용율, 잔여용량, 에너지전환 효율, 투자 및 고장·변동 유지보수비, 환경영향등에 대한 수치데이터가 포함된다. 또한 기술적, 경제적 요인을 고려하여 에너지원의 이용가능량에 대한 제약 및 가공기술, 전환기술, 수요기술의 용량이나 이용율에 대한 상 하한 제약을 위한 수치데이터가 정의될 수 있다. 수요부문중 산업부문에 대하여 정의된 데이터들에 대해 설명하면 그 용도에 따라 냉방, 보일러, 전기화학, 오븐 및 히터, 요·로, 조명 및 기타 전기이용기술, 동력, 기타기술로 분류되며, 냉방기술에는 전기에어콘, 보일러기술에는 석탄, 석유, 가스 보일러, 전기화학 기술에는 전기구동, 오븐 및 히터기술에는 석유, 전기, 가스 오븐 및 히터, 요·로기술에는 석탄, 석유, 전기, 가스 요·로, 조명 및 기타 전기이용기술에는 전기, 동력기술에는 전기모터 기술들이 포함된다. 각 입력 데이터는 이용 가능한 국내, 외 관련자료 ([17][19][22][23][24][25][26][27])를 사용하였다.

한편 각 주기별 유효 에너지수요는 기준년도의 에너지수요 및 수요기술(기기)의 효율과 에너지수요 전망자료([1][14])를 이용 <Table 1>

과 같이 정의 하였다.

CO<sub>2</sub>는 배출량 산출을 위한 에너지원별 CO<sub>2</sub> 배출계수는 <Table 2>와 같이 정의 하였다.

### 4.3 주요 결과 및 고찰

모델에서 얻을 수 있는 주요 결과로는

- 주기별 각 에너지원의 1차 및 최종 에너지 소비량
- 주기별 각 기술의 설치용량 및 용량의 증감
- 주기별 각 기술의 이용현황
- 각 기술에 대한 투자 및 유지보수비용
- 에너지수입 비용
- 주기별 신기술의 이용에 따른 에너지절약량
- 에너지 및 기술들의 사용에 의한 환경영향

등이 있다. 그러나 여기에서는 시나리오 1에 의한 에너지공급시스템 최적화 결과와 시나리

오 2와 3을 이용한 CO<sub>2</sub> 배출량 규제가 에너지 시스템에 미치는 영향을 각 에너지원별 1차공급량 즉, 에너지원(생산)기술과 수요부문 중 산업부문 수요기술의 구성변화를 중심으로 비교 분석하였다. 모델에서 에너지시스템의 최적화는 기본적으로 에너지시스템내의 동일 용도 기술들 사이의 경쟁을 통하여 이루어지며, 각 기술의 경쟁력은 각 기술에 의한 최종에너지 또는 유효에너지 산출량에 의해 평가된다. 따라서 기술의 유효에너지산출량이 많고 적음은 그 기술의 경쟁력의 높고 낮음으로 평가 될 수 있다.

한편 시나리오 1의 최적화 결과 배출된 각 주기별 CO<sub>2</sub>의 배출 총량은 <Table 3>과 같았으며, <Table 4>는 <Table 3>을 근거로 산출한 시나리오 2와 시나리오 3에 적용된 총 CO<sub>2</sub> 배출량 규제치이다.

<Table 1> Useful Energy Demanc for Each Time Period

(Unit : PJ/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
수요량	1914.1	2423.7	3104.4	3393.8	3711.0	4059.6	4442.4	4863.1	5325.5

<Table 2> Emission Factors of Resource Activities

(Unit : KTon/PJ)

에너지원	Coal	Oil	Natural Gas
배출계수	23.92	19.72	13.81

<Table 3> CO<sub>2</sub> Emissions for Scenario 1

(Unit : KTon/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
배출량	68780	82546	104560	110366	117405	125106	136236	147629	157335

〈Table 4〉 Upper Bound of CO<sub>2</sub> Emissions for Scenario 2 and 3

(Unit : KTon/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
KORE10	68780	74291	94104	99329	105664	112594	122613	132866	141602
KORE20	68780	66037	83648	88292	93924	100084	108989	118103	125868

〈Table 5〉 Primary Energy Supply in Each Scenario

(Unit : PJ/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
KORE1	3430.6	4281.2	5519.8	5977.3	6458.8	6996.2	7607.5	8274.3	9006.2
KORE10	3430.6	4278.8	5391.0	5831.5	6322.5	6880.2	7483.8	8127.3	8855.9
KORE20	3430.6	4472.7	5525.5	5898.9	6411.2	6949.6	7539.9	8233.6	8849.1

〈Table 6〉 Final Energy Supply in Each Scenario

(Unit : PJ/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
KORE1	2776.1	3560.1	4606.7	4997.6	5423.6	5900.2	6419.7	6986.4	7607.8
KORE10	2776.1	3456.1	4580.8	4978.8	5415.6	5889.9	6408.9	6976.2	7585.2
KORE20	2776.1	3194.5	4378.5	4784.1	5239.9	5667.2	6218.7	6788.7	7272.0

#### 4.3.1 에너지원(생산 기술)

모델 적용결과 에너지시스템으로의 총 1차 에너지(Primary Energy) 및 최종에너지(Final Energy) 공급량은 CO<sub>2</sub> 배출량을 제약할 경우에 (KORE 10, KORE 20) KORE 1보다 전반적으로 감소하는 것으로 나타났으나, KORE20의 경우는 KORE 10보다 약간 증가 하였다. 이는 목적함수로 환경함수를 배제하고 비용함수만을

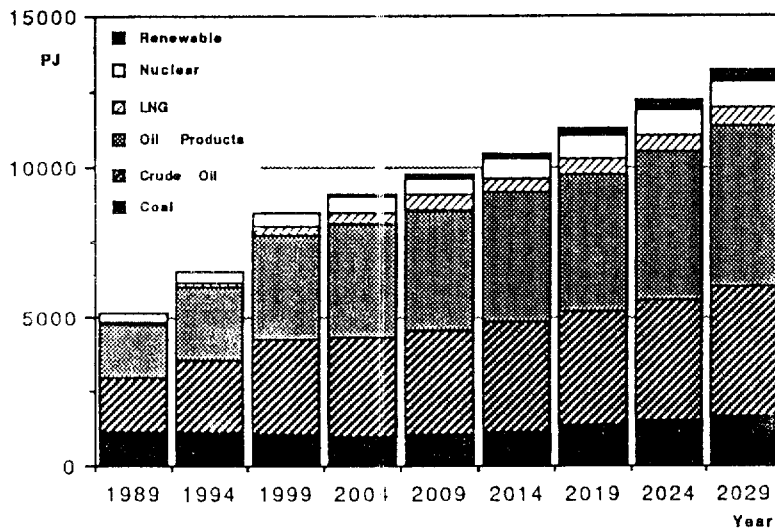
이용했을 경우에는 전체 시스템비용을 최소화 하기 위해 상대적으로 비용이 적게 소요되는 기술 위주로 시스템이 최적화 되었다. 그러나 비용함수 이외에 환경함수(CO<sub>2</sub> 배출량 규제)를 동시에 고려하였을 경우에는 시스템비용은 상대적으로 증가 하지만 CO<sub>2</sub> 배출량이 적은 기술 위주로 에너지시스템이 구성되었고, 이때에는 시스템을 구성하는 기술들의 효율이 CO<sub>2</sub>



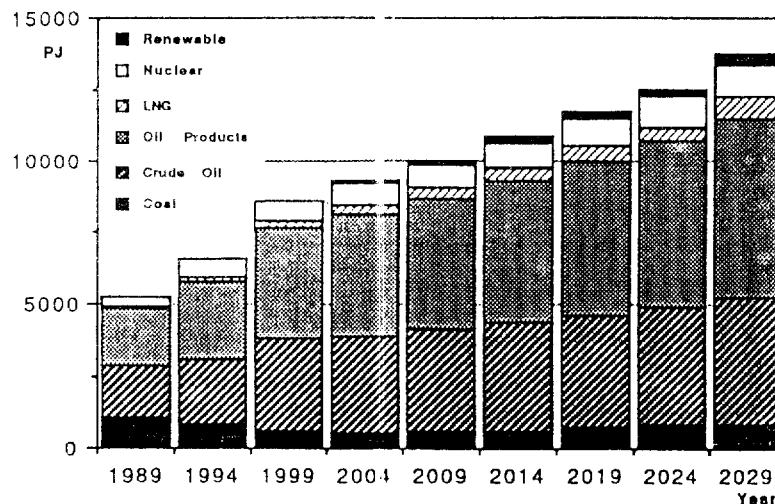
제약을 가하지 않은 경우보다 전반적으로 고효율  
임에 따른 것임을 유효에너지 산출량과 에너지공  
급량의 비율을 통해 알 수 있다(〈Table 5〉,  
〈Table 6〉참조).

한편 환경함수와 비용함수를 동시에 고려 했  
을때 이를 만족시키기 위한 1차에너지 공급을  
에너지원별로 살펴보면, [Fig.4], [Fig.5] 및  
[Fig.6]에서 보는 바와 같이 CO<sub>2</sub> 배출량이 가

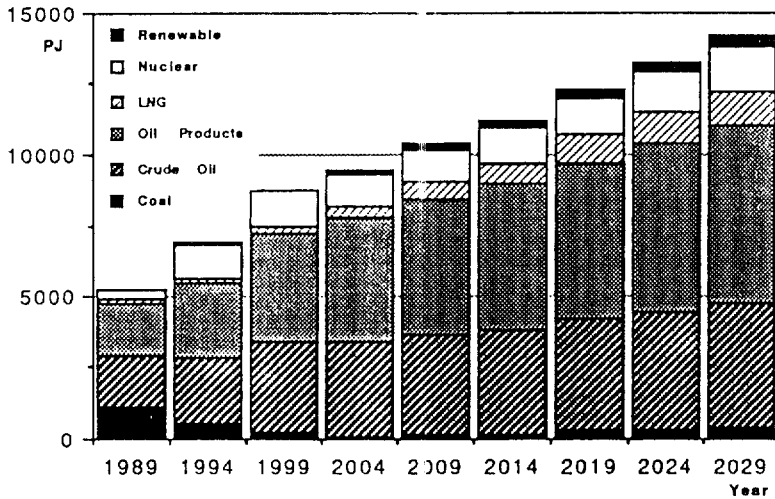
장 많은 석탄의 경우 제약이 클 수록 그 공급  
량이 급격히 감소하였으며, 반면 신재생, 원자  
력, 가스(LNG)의 공급량은 증가하였다. 석유  
제품의 공급량은 시나리오 모두에서 꾸준한 증  
가를 보이고 있었으나 제약이 클수록 그 증가  
폭은 줄어들었으며 원유 도입량에는 큰 변화  
가 없는 것으로 나타났다.



[Fig.4] Energy Supply in Each Energy Source(KORE1)



[Fig.5] Energy Supply in Each Energy Source(KORE10)



[Fig.6] Energy Supply in Each Energy Source(KORE20)

#### 4.3.2 에너지 수요기술

수요기술은 수요범위(Demand Category)별로 외생적으로 정의된 유효에너지수요(Useful Energy Demand)를 주어진 목적함수 및 제약 조건에 따라 만족시킬 수 있는 기술의 조합으로 구성되며, 동일 범주안의 수요기술들 사이의 경쟁을 통한 각 기술의 유효에너지 산출량에 의해 결정된다. 본 연구에서는 각 시나리오별 수요기술의 변화를 산업부문 보일러 기술을 통해 살펴 보고자 한다.

KORE1의 결과 보일러기술 중에서는 석유보일러로부터 유효에너지산출량이 가장 많았다. KORE10 적용의 경우는 석탄보일러나 가스보일러로부터의 유효에너지산출량은 부분적으로 약간 감소한 경우도 있으나 전반적으로는 KORE1과 큰 차이가 없었으며, 석유보일러는 유효에너지 수요 증가량 만큼 따라 증가하여 KORE1에서와 같이 KORE10에서도 가장 경쟁력이 뛰어난 것으로 나타났다. KORE20에서는 석탄보일러의 경우 시간주기 4인 2004년에

감소하기 시작하여 2009년 부터는 유효에너지 산출량이 전혀 발생되지 않았다. 가스보일러는 변화가 없었으며 석유보일러는 역시 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다. 이러한 결과에서 살펴 볼때 현재 보일러 기술중 석유보일러의 사용이 비용면에서 가장 경쟁력이 우수하고, 전체 시스템에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량 제약도 동시에 만족시킬 수 있는 기술로 분석되었다(〈Table 7〉, 〈Table 8〉, 〈Table 9〉 참조).

## 5. 결 론

중장기 에너지 공급시스템 최적화와 CO<sub>2</sub> 배출량 규제를 고려한 에너지시스템 설계를 위하여 MARKAL모형을 적용 하였다. 이 결과 주어진 목적함수와 제약조건을 만족시키는 해를 산출하였으며, 결과분석을 통하여 MARKAL모형이 국내에너지 및 환경분야에 관련

<Table 7> Useful Energy from Coal Boiler in Each Scenario

(Unit : PJ/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
KORE1	7.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
KORE10	7.0	15.0	20.0	25.0	30.0	13.6	40.0	45.0	50.0
KORE20	7.0	15.0	20.0	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

<Table 8> Useful Energy from Oil Boiler in Each Scenario

(Unit : PJ/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
KORE1	160.2	200.9	240.6	258.9	280.9	307.1	337.8	373.5	415.0
KORE10	160.2	201.2	240.6	258.9	280.9	328.4	337.8	373.5	450.3
KORE20	160.2	201.2	240.6	275.3	310.9	342.1	377.8	418.5	465.0

<Table 9> Useful Energy from Gas Boiler in Each Scenario

(Unit : PJ/Year)

년 도	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	2024	2029
KORE1	0.6	0.3	17.9	26.6	35.3	44.0	52.6	61.3	70.0
KORE10	0.6	0.0	17.9	26.6	35.3	44.0	52.6	61.3	70.0
KORE20	0.6	0.0	17.9	26.6	35.3	44.0	52.6	61.3	70.0

된 제반 의사결정에 공헌할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 앞으로 보다 현실적인 제약조건의 추가 및 기술데이터베이스의 보완을 통하여 중 장기 에너지공급시스템 설계, 에너지기술평가, 신기술의 도입이 에너지시스템에 미치는 영향 분석, CO<sub>2</sub> 배출량 제약 등 환경문제를 고려한 에너지시스템 설계 등 각종 에너지계획 수립에 유용하게 이용 될 수 있을 것으로 사료

된다. 특히 에너지절약 및 이용합리화 부문과 특정 부문 모형의 운용에 관한 시도가 필요하다. 또한 MARKAL모델이 안고 있는 독자적인 수요예측의 어려움과 기타 경제부문과의 연결을 통한 보다 폭넓은 문제 해결을 위하여 경제모델과의 통합(MARKAL-MACRO)도 이루어져야 할 것으로 보인다.

## 〈부 록〉 MARKAL 모델의 구성

$$\Phi = n \sum ws(t,f,s) S(t,f,s)$$

ws(t,f,s) : 가중치

### 1. 목적함수

#### 1.1 총 할인비용 함수

$$\begin{aligned} &YC(t) \\ &= \sum [c_s(t,f,s) + \sum c_r(t,fd,f,s) i(t,fd,f,s)] S(t,f,s) \\ &\quad - \sum c_s(t,f,s = \text{비축}) S(t+1,f,s = \text{비축}) \\ &\quad + \sum c_k(t,\tau) K(t,\tau) \\ &\quad + \sum \{1/\mu(d) \sum [K(t,\delta)/e(t,\delta) \{ \sum c_r(t,f,\delta) o_n(t, \\ &\quad \quad d,\delta) i(t,f,\delta) \\ &\quad + \sum c_q(t,\beta) Q_a(t,\beta) \sum c_r(t,f,\beta) i(t,f,\beta) \\ &\quad + \sum E(t,j,z) [c_E(t,z) + c_{Ez}(z) + \sum c_r(t,f,z) i(t,f,z) \\ &\quad + \sum H(t,j,z) [c_H(t,z) + c_{Hz}(z) + \sum c_r(t,f,z) i(t,f,z) \\ &\quad + \sum h(t,j,z) Hc(t,j,z) [c_E(t,z) + c_{Ez}(z) + \sum c_r(t,f,z) \\ &\quad \quad i(t,f,z) ] ] ] \end{aligned}$$

$$J(t) = \sum c_A(t,\tau) A(t,\tau)$$

$$\begin{aligned} &TC(t) \\ &= \sum \sum (1+r)^{t-k} (1+r)^{-(t-k)} YC(t) \\ &\quad + \sum (1+r)^{-(t-k)} [J(t) + V(t)] \end{aligned}$$

YC(t) : 주기 t의 연간 비용

J(t) : 총 투자비용

V(t) : 기술에 대한 잔여가치(Salvage Value)

TC(t) : 주기 t의 총 할인 비용

r : 할인율

#### 1.2 안정도 함수

#### 1.3 비용-안정도 결합함수

$$\theta = TC + q\Phi$$

q : 가중치

#### 1.4 환경함수

$$\begin{aligned} &\Omega(x) \\ &= n \sum \{ \sum va(t,f,s,x) S(t,f,s) \} \\ &\quad + \sum vi(t,z,x) A(t,z) \\ &\quad + \sum \{ va(t,\beta,x) Q_a(t,\beta) + vc(t,\beta,x) K(t,\beta) \} \\ &\quad + \sum i(t,f,z) va(t,z,x) E(t,j,z) \\ &\quad + \sum vc(t,z,x) K(t,z) \\ &\quad + \sum va(t,z,x) i(t,f,z) h(t,j,z) Hc(t,j,z) \\ &\quad + \sum va(t,z,x) i(t,f,z) H(t,j,z) \\ &\quad + \sum \{1/\mu(d) \sum \{ o_n(t,d,\delta) vc(t,d,x)/e(t,\delta) \} \\ &\quad \quad K(t,\delta) \} \end{aligned}$$

### 2. 제약조건

#### 2.1 전력에너지 균형(Balance)

$$\begin{aligned} &\sum c_E(z) E(t,j,z) \\ &- w(j) \sum i(t,fd = \text{전기}, f,s) S(t,f,s) \\ &- w(j) \sum i(t,f = \text{전기}, \beta) Q_a(t,\beta) \\ &- \sum \{ w(i,d)/\mu(d) \sum \{ o_n(t,d,\delta) i(t,f = \text{전기}, \delta) \\ &\quad /e(t,\delta) \} K(t,\delta) \} \geq 0. \end{aligned}$$

### 2.2 열의 균형

$$\begin{aligned} & \sum_{z_c: \text{열병합발전}} H(t, j, z) \\ & + \sum_{z_c: \text{열발전}} eH(j, z) Hc(t, j, z) \\ & - \sum \{w(j, d) / (eH(j) \mu(d))\} \sum \{o_D(t, d, \delta) i(t, \\ & f = \text{열}, \delta) / e(t, \delta)\} K(t, \delta) \geq 0. \end{aligned}$$

### 2.3 기타 에너지원에 대한 균형

$$\begin{aligned} & S(t, f, s = \text{국내생산, 수입}) e(f) \\ & - S(t, f, s = \text{수출}) \\ & + S(t, f, s = \text{비축}) \\ & - S(t + 1, f, s = \text{비축}) \\ & - \sum i(t, fd = f, fs, s) S(t, fs, s) \\ & - \sum \{i(t, f, \beta) - e(f) o(t, f, \beta)\} Qa(t, \beta) \\ & + e(f) \sum Q(t, f, \beta) \\ & - (1/n) \sum I(f, \beta) A(t + 1, \beta) \\ & - \sum \{i(t, f, z) - e(f) o(t, f, z)\} E(t, j, z) \\ & - \sum \{i(t, f, z) - e(f) o(t, f, z)\} H(t, j, z) \\ & - \sum \{i(t, f, z) - e(f) o(t, f, z)\} h(j, z) Hc(t, j, z) \\ & - (1/n) \sum I(f, z) A(t + 1, z) \\ & - \sum \{1/\mu(d)\} \sum \{i(t, f, \delta) / e(t, \delta) - o(t, f, \delta)\} o_D \\ & (t, d, \delta) K(t, \delta) \geq 0. \end{aligned}$$

### 2.4 최대부하 전력생산에 관한 제약식

$$\begin{aligned} & \{w(j) / (1 + m_E)\} \sum e_E(z) k(t, z) K(t, z) \\ & - w(j) \sum i(t, fd = \text{전력}, fs) S(t, fs) \\ & - w(j) \sum i(t, f = \text{전력}, \beta) Qa(t, \beta) \\ & - \sum w(j, d) \sum \{o_D(t, d, \delta) i(t, f = \text{전력}, \delta) / (e(t, \delta) \mu(d))\} K(t, \delta) \geq 0. \end{aligned}$$

### 2.5 열의 최대부하에 관한 제약식

$$\begin{aligned} & \{1 / (1 + m_H)\} \sum K(t, z) \\ & + \{1 / (1 + m_H)\} \sum \{\phi(z) e_H(j, z) / h(j, z)\} K(t, z) \\ & - \sum [w(j, d) / \{e_H(j) w(j)\}] \sum \{o_D(t, d, \delta) i(t, f = \\ & \text{열}, \delta) / (e(t, \delta))\} K(t, \delta) \geq 0. \end{aligned}$$

### 2.6 기초부하에 관한 제약식

$$(1 - b) \sum E(t, j, x) - b \sum E(t, j, x) \leq 0.$$

### 2.7 열병합발전 관련 제약식

$$h(j, z) \{1 - \phi(z)\} Hc(t, j, z) - \phi(z) E(t, j, z) \leq 0.$$

### 2.8 에너지가공기술의 제품산출에 대한 제약

$$\begin{aligned} & e(t, \beta) Qa(t, \beta) - \sum Q(t, f, \beta) = 0 \\ & Q(t, f, \beta) - u(t, f, \beta) Qa(t, \beta) \leq 0. \\ & u(t, f, \beta) : \text{비율의 상한} \end{aligned}$$

### 2.9 기술 이용도에 관한 제약

가공기술

$$Qa(t, \beta) - a(t, \beta) K(t, \beta) \leq 0.$$

전환기술

$$\begin{aligned} & \sum M(t, j, z) - \{1 - a(t, z)\} \{1 - f_{F0}(z)\} K(t, z) \geq 0. \\ & Ec(t, j, z) \\ & + h(j, z) H(t, j, z) \end{aligned}$$

$$-w(j) [1 - \{1 - a(t, \alpha)\} f_{r0}(x)] K(t, \alpha) + M(t, j, \alpha) \leq 0.$$

$$n \sum S(t, f, s) \leq Sc(f, s)$$

### 2.10 기간에 따른 용량변화 제약

$$K(t, \tau) - \sum A(z, \tau) \leq R(t, \tau)$$

$R(t, \tau)$  : 계획기간 초기에 있었던 기술  $\tau$ 의 잔여용량

### 2.11 에너지수요 관련 제약

$$\sum \{1/\mu(d)\} o_n(t, \delta, d) K(t, \delta) \geq D(t, d)$$

$D(t, d)$  : 수요부문  $d$ 의 에너지 수요

### 2.12 설비증가 및 에너지공급 증가율에 대한 제약

설비증가

$$K(t, \tau) - (1 + g(t-1, \tau))^n K(t-1, \tau) \leq Ko(\tau)$$

$g(t-1, \tau)$  : 증가율  
 $Ko(\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 증가 규제 상수

에너지 공급 증가

$$S(t, f, s) - [1 + g(t-1, f, s)]^n S(t-1, f, s) \leq So(f, s)$$

$g(t-1, f, s)$  : 증가율  
 $So(f, s)$  : 공급원  $s$ 로부터의 에너지원  $f$ 의 증가를 규제하는 값

### 2.13 누적 에너지공급에 대한 제약

### 첨자(Index)

- $t$  : 모델에서 고려하는 시간주기(Time period)
- $j$  : 계절
- $f$  : 에너지원
- $s$  : 에너지 공급원
- $d$  : 에너지 수요부문
- $x$  : 환경오염물질
- $\tau$  : 에너지관련기술로 다음의 3가지로 대별됨
  - $\alpha$  : 에너지전환기술(예:원자력발전기술)
  - $\beta$  : 에너지가공기술(연료로의 전환, 예:석탄액화기술)
  - $\delta$  : 에너지사용기술(예:산업용 보일러 관련기술)

### 변수

- 다음에 설명되는 변수들은 LP문제의 해(解)로서 결정되는 값이며, 각 값들은 연간치(Annual Value)를 나타낸다.
- $S(t, f, s)$  : 주기  $t$ 에 1차 에너지원  $f$ 가 공급원  $s$ 로부터 공급되는 양
- $K(t, \tau)$  : 주기  $t$ 에 이용가능한 기술  $\tau$ 의 설비용량
- $A(t, \tau)$  : 주기  $t$ 초기의 기술  $\tau$ 의 추가 투자분
- $E(t, j, \alpha)$  : 주기  $t$ , 계절  $j$ 에 전환기술  $\alpha$ 로부터 생산되는 전력량
- $Hc(t, j, \alpha)$  : 주기  $t$ , 계절  $j$ 에 열병합발전  $\alpha$ 로부터 생산되는 열(Heat)의 양
- $H(t, j, \alpha)$  : 주기  $t$ , 계절  $j$ 에 열생산설비  $\alpha$ 로부터의 열 생산량

$M(t,j,x)$  : 주기  $t$ , 계절  $j$ 동안의 전환기술  $x$ 의 유지보수로 인해 사용이 불가능한 설비용량(Scheduled Outage)  
 $Qa(t,\beta)$  : 주기  $t$ 의 가공기술  $\beta$ 의 사용 용량  
 $Q(t,f,\beta)$  : 주기  $t$ 에 가공기술  $\beta$ 로부터 산출되는 에너지원  $f$ 의 양

### 계수 및 상수

$n$  : 시간주기의 기간  
 $w(j)$  : 년중 계절  $j$ 가 차지하는 기간의 비율  
 $w(j,d)$  : 계절  $j$ 에 사용되는 수요부문  $d$ 의 에너지 비율  
 $\mu(d)$  : 수요부문  $d$ 의 설비용량 결정 배수 (=Max[ $w(j,d)/w(j)$ ])  
 $m_E$  : 평균전력 수요 총당에 필요한 설비용량에 대한 최대 부하시의 예비용량의 비율  
 $b$  : 기저부하로 발전할 수 있는 최대 비율  
 $e_H(j)$  : 계절  $j$ 의 열의 유통 효율  
 $m_H$  : 평균열 수요총당에 필요한 설비용량에 대한 최대부하시의 열의 예비용량 비율  
 $i(t,fd,f,s)$  : 공급원  $s$ 로부터 에너지원  $f$ 를 한 단위 얻기위해 필요한 에너지  $fd$ 의 양  
 $e(f)$  : 에너지원  $f$ 의 수송효율  
 $i(f,\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 용량을 한단위 늘릴때 필요한 에너지원  $f$ 의 재고량  
 $i(t,f,\tau)$  : 기술  $\tau$ 에 대한 에너지원  $f$ 의 투입계수  
 $o(t,f,\tau)$  : 기술  $\tau$ 로부터의 에너지원  $f$ 의 산출계수  
 $e(t,\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 효율  
 $a(t,\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 가동율  
 $\phi(x)$  : 열병합발전  $x$ 에 의한 전력 손실율  
 $h(j,x)$  : 열병합발전  $x$ 의 전력 대 열의 생산 비율  
 $e_F(x)$  : 전환기술  $x$ 로부터의 송전효율  
 $c_H(j,x)$  : 전환기술  $x$ 로부터의 열 수송 효율

$k(t,x)$  : 최대부하 발전에 기여하는 전환기술  $x$ 의 비율  
 $f_{fo}(x)$  : 전환기술  $x$ 의 설비고장에 의한 발전중단 비율(Forced Outage)  
 $o_D(t,d,\delta)$  : 수요부문  $d$ 에 사용되는 기술  $\delta$ 의 산출량 비율  
 $L(\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 수명  
 $c_s(t,f,s)$  : 공급원  $s$ 로부터의 에너지원  $f$ 의 단위 비용  
 $c_T(t,fd,f,s)$  : 공급원  $s$ 로부터의 에너지원  $f$ 의 공급에 관련된 에너지  $fd$ 의 단위 수송비용  
 $c_k(t,\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 용량과 관련된 고정 유지보수비  
 $c_T(t,d,\tau)$  : 기술  $\tau$ 에 투입되는 에너지원  $f$ 의 단위 수송 비용  
 $c_A(t,\tau)$  : 기술  $\tau$ 의 단위 투자비용  
 $c_F(t,x)$  : 전환기술  $x$ 로부터의 전력생산과 관련된 변동 유지보수비  
 $c_H(t,x)$  : 열전환기술  $x$ 로부터의 전력생산과 관련된 변동 유지보수비  
 $c_{TF}(x)$  : 전환기술  $x$ 와 관련된 송배전 비용  
 $c_{TH}(x)$  : 전환기술  $x$ 로부터의 열수송 비용  
 $c_Q(t,\beta)$  : 가공기술  $\beta$ 의 사용과 관련된 변동 유지 보수비  
 $\Phi(t,f,s)$  : 공급원  $s$ 로부터의 에너지원(전력 및 열 제외) $f$ 에 대한 안정도  
 $va(t,f,s,x)$  : 공급원  $s$ 로부터의 에너지원  $f$ 의 단위당 환경오염물질  $x$ 의 방출량  
 $vi(t,\tau,x)$  : 기술  $\tau$ 의 단위 투자당 발생하는 환경오염물질  $x$ 의 양  
 $va(t,\tau,x)$  : 기술  $\tau$ 의 단위 사용당 발생하는 환경오염물질  $x$ 의 양  
 $ve(t,\tau,x)$  : 기술  $\tau$ 의 단위 용량당 발생하는 환경오염물질  $x$ 의 양

## 참 고 문 헌

- [1] 류지철, 21세기를 향한 에너지전략 수립의 과제, 21세기 에너지정책개발 워크샵 논문집, 에너지경제연구원, 1990.
- [2] 석탄합리화사업단, 석탄 통계년보, 1990.
- [3] 한국에너지기술연구소, 신재생에너지실천 계획에 관한 연구, 1991.
- [4] 한국에너지기술연구소, 에너지부문 환경공해 저감대책 수립(II), 1991.
- [5] 동력자원부, 에너지총조사 보고서, 1990.
- [6] 에너지경제연구원, 에너지 통계년보, 1991.
- [7] 한국전력공사, 장기전력수급계획(시안), 1990.
- [8] 한국가스공사, 천연가스 수요패턴분석 자료집, 1991.
- [9] 전국경제인연합회, 한국경제연감, 1991.
- [10] 한국동력자원연구소, 에너지기술평가모델 개발(I), 1988.
- [11] 한국동력자원연구소, 에너지기술평가모델 개발(II), 1989.
- [12] 한국동력자원연구소, 에너지기술평가모델 개발(III), 1991.
- [13] 한국에너지기술연구소, 에너지기술평가모델 개발(IV), 1992.
- [14] 에너지경제연구원, 한국의 에너지미래(장기전망과 전략: 1987-2010), 1987.
- [15] 한국전력공사, 한전경영통계, 1992.
- [16] Benjamin Lev, *Energy Models and Studies*, North-Holland Publishing Company, N.Y. 1983.
- [17] OECD/NEA, "Energy Sources and Technology for Electricity Generation," Senior Expert Symposium of Electricity and Environment (Helsinki, Finland), Key Issue Paper No.2, 1991.
- [18] Kernforschungsanlage Julich (KFA), *The Energy Supply Model, MARKAL and Its Application Possibilities*. 1983.
- [19] IAEA, *Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook*. 1984.
- [20] Fishbone, G. Giesen and H. Vos, *MARKAL. A Linear Programming Model for Energy System Analysis*, BNL & KFA, 1981.
- [21] Leslie G., Fishbone, G. Glesen and G. Goldstein, *User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Ver.2.0)*, BNL/KFA, 1983.
- [22] New York State Energy Research and Development Authority, *The Potential for Electricity Conservation in New York State*. 1989.
- [23] Richels, Richard G. and John P. Weyant, "Models for Energy Technology Assessment," *Advances in Energy System and Technology*, Vol.2 (1979), pp.179-260.
- [24] S.C. Morris, J. Lee, G. Goldstein and D.Hill, *Evaluation of Carbon Dioxide Emission Control Strategies in New York State*, BNL, 1992.
- [25] World Bank, *Summary 1988 Power Data Sheet for 100 Developing Countries*. 1991.
- [26] Electric Power Research Institute (EPRI), *TAG<sup>TM</sup> Technical Assessment*



*Guide*. Vol.1, Electricity Supply—1986, 1987.

- [27] Electric Power Research Institute (EPRI), *TAG<sup>TM</sup> Technical Assessment Guide*. Vol.2. *Electricity End use, Part3: Industrial Electricity Use*—1987, 1988.