

## MARKAL 모형을 이용한 석유화학기술 평가 모듈 개발에 관한 연구

김종욱 · 홍종철 · 진경태 · 신희성 · 최기련\*

한국에너지기술연구소, \*아주대학교 에너지학과

### A Study on the Development of MARKAL Model Module for Technology Assessment of the Korean Petrochemical Industry

Jongwook Kim, Jongchul Hong, Gyeongtae Jin, Heesung Shin and Giryun Choi\*

Korea Institute of Energy Research, \*Department of Energy, A-ju University

#### 요 약

석유화학기술의 비용 및 환경 영향 분석을 위한 기술평가모듈을 MARKAL(MARKet Allocation)모형을 이용하여 개발하였다. 모듈은 재료흐름분석 방법을 이용한 1995년 현재의 석유화학 산업 분석과 주요 재료, 에너지원, 기술에 대한 정의를 바탕으로 개발되었다. 개발된 모듈을 우리나라 MARKAL 모형에 추가하여 석유화학 기술 및 기술의 환경영향 평가에 적용하였다. 1995년~2030년을 대상 기간으로 기준, 기술대안, 탄소세 3가지 시나리오를 이용한 기술평가를 수행하였다. 평가결과로써 2000~2030년 사이의 각 시나리오별 이산화탄소배출, 기술의 경쟁력, 에너지수요 등을 분석 하였다. 동 모듈은 향후 석유화학부문의 기술 평가와 이산화탄소 배출에 대응하기 위한 중장기 기술대안 수립에 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstracts**—The petrochemical technology assessment module for analysis of cost and environmental effects has been developed using MARKAL model as a tool. The module has been developed based on results of analysis of the current structure of the petrochemical industry using material flow analysis (MFA). The module has been applied for assessment of technology competition and environmental effects of the technology for the period 1995 - 2030 as a part of Korea MARKAL model. Three scenarios, reference case, technology options, and carbon tax were used for the module application. As a result of application, we obtained analyzed data of carbon dioxide emission, technology competition, and energy demand in the future by each scenario. It is hoped that the module can be used for technology assessment and the discussion on mid and long-term technology options for reducing carbon dioxide emission in petrochemical sector.

#### 1. 서 론

기술, 특히 신기술의 가치를 어떻게 평가할 것인가에 대한 많은 연구가 지속되어 왔다. 전통적으로 비용-이익 분석기법에 의한 평가가 단일 기술의 가치 평가에 널리 사용되어 왔다. 그렇지만 단순한 비용-이익 분석 기법으로 특정 기술이 채택되었을 때 이 기술이 에너지시스템의 다른 분야에 미치는 영향을 종합적으로 분석하는 것은 근본적인 한계를 갖고 있다.

같은 연료에 대해 몇 가지 기술들이 자주 경쟁 관계

에 놓이는 것을 볼 수 있으며, 어떤 새로운 기술의 개발 결과의 예로써 이 기술이 연간 X톤의 석탄을 필요로 한다는 자료는 있으나, 이 기술이 채택 되었을 경우 전체적으로 어떠한 절약 효과가 있는지에 대한 자료를 대하는 경우는 극히 드물다. 이는 대체된 기존 기술이 Y톤의 석유를 사용한다고 가정하고 X톤의 석탄을 사용하는 신기술이 이를 대체 할 경우 이의 단순한 기술 대 기술의 절약 효과를 계산하는 것은 쉬우나, 시스템적인 효과를 고려하여 전체적인 절약량을 산출하는 것은 상대적으로 어렵고 복잡하다는 것을 의미한다. 신기술의 전

체적인 가치는 또한 대체로 인해 남은 Y톤의 석유의 이용과 관련하여 에너지시스템의 나머지 영역에서의 어떻게 연료 사용 패턴의 변화를 가져갈 것 인가와도 관련된다.

전통적인 비용-이익 분석기법으로 이를 논리적이고 일관성 있게 설명하는 것에는 한계가 있으며, 이러한 측면에서 시스템 분석 방법은 충분한 가치를 가지고 있다. 세계적으로 시스템적인 기술평가를 위한 도구로써 기술평가모형의 개발에 많은 노력이 지속되어 왔으며, 그 대표적인 성과중의 하나로 현재 국내에도 널리 알려진 국제에너지기구(IEA)에서 개발한 MARKAL(MARKet ALlocation)<sup>1)3)</sup>모형을 들 수 있다.

본 논문은 우리나라 석유화학부문 기술평가 모듈 개발에 대한 것이며, MARKAL 모형이 개발 도구로 이용되었다. 개발된 모듈은 에너지시스템 전체를 대상으로 하는 우리나라 MARKAL 모형의 일부분으로 통합되어 모듈 자체 내에서의 전통적인 기술의 비용-이익 분석은 물론 석유화학부문의 기술 변화가 기타 나머지 에너지 시스템에 미치는 영향 분석이 가능하도록 설계하였다. 또한 석유화학분야에서의 기후변화협약에 따른 이산화탄소 감축 기술 대안 분석에 활용될 수 있도록 기술구성의 변화가 이산화탄소 배출에 미치는 효과 분석이 가능하도록 하였다. 한편 개발된 평가모듈은 에너지뿐만 아니라 재료의 흐름까지 같이 분석할 수 있는 통합 에너지 및 재료 모델링 기법을 채택하고 있다.

본 논문에서는 이러한 석유화학기술 평가 모듈의 개발과 실제 우리나라 석유화학 분야 기술평가에의 적용을 다루고 있다. 석유화학 기술간의 에너지 및 재료 흐름을 중점으로 한 기술 분석과 이를 이용한 기준 석유화학기술시스템의 정의 및 평가모듈의 개발, 그리고 이의 우리나라 석유화학기술 평가에 대한 적용을 수행하였다. 비용최소화 측면의 기술의 경쟁력 평가가 이루어졌으며, 이때의 에너지 및 이산화탄소 배출을 분석하였다. 또한 중 장기적으로 새로운 기술 대안들이 에너지 및 이산화탄소 배출에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대한 시스템적인 분석을 수행하였다.

## 2. 석유화학기술 평가 모듈

### 2-1. 평가모듈의 개요

전통적인 에너지시스템모형은 에너지시스템의 구성요소로 기술과 에너지를 포함하였으나, 최근에는 에너지와 기술은 물론 재료까지 포함하는 방법론이 대두되고 있다. 이는 재료의 전체 생명주기(life cycle)를 반영하기 위한 것이며, 에너지와 기술은 제품(재료)을 생산하기 위한 중간 투입 요소로 고려되는 개념이다. 이

방법은 산업의 부가가치, 경제성장 등의 변수를 고려하여 전망된 특정 부문의 에너지수요를 바탕으로 기술의 경쟁력과 연료의 구성 등을 평가하는 전통적인 시스템 평가 방법이 갖고 있는 불확실성을 줄이기 위한 것이다. 에너지-재료 통합 분석 방법은 최종 제품(재료)의 수요를 바탕으로 이를 생산하는데 필요한 에너지 및 재료의 투입량을 보다 정확히 산출하는데 아주 유용하며, 재료의 대체, 재료의 재활용 또는 바이오매스 사용 선택 등의 결정들을 위한 연구에 아주 중요하다.

에너지-재료 통합 분석 방법은 특히 대규모 재료의 흐름을 포함하고 있는 석유화학, 철강산업의 에너지 및 재료 분석에 적절하다. 따라서 본 평가 모듈의 개발은 기본적으로 재료흐름분석(Material Flow Analysis, MFA)에 기초를 둔 석유화학산업의 구조 분석을 통하여 이루어졌다. MFA를 통하여 석유화학 제품의 종류, 각 제품의 생산기술, 사용에너지에 대한 상세한 분석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 평가모듈을 설계 개발하였다.

석유화학 분야의 기술 및 기술의 환경영향 평가를 위한 평가모듈의 개발 도구로는 최근 에너지-재료 통합 분석 능력을 확장한 MARKAL 모형이 이용되었다. MARKAL의 여타 일반적인 모형과의 가장 두드러진 차이점은 일정하게 설계된 구조와 단순한 데이터입력 형식을 제공하고 있지 않다는 점이다. 평가하고자 하는 모든 시스템은 사용자에 의해 설계되어야 하며, 입력자료 역시 사용자가 수집, 가공하여 데이터베이스로 구축해야 되는 등 사용자에 많은 전문성과 노력을 요구한다. 따라서 MARKAL은 모형자체보다는 "모형구축을 위한 도구"의 성격을 강하게 갖고 있다. MARKAL의 이러한 특성은 사용자에 대해 모형 수립 단계에서 매우 폭넓은 적응성을 부여하고 있으며, 모형의 신뢰성, 다양한 결과 분석 능력에 의해 현재 전세계적으로 35개국 이상에서 활용되고 있다.

### 2-2. 평가모듈의 구조

우리나라는 1997년 3월 현재 4.34 MMtpy(Million Metric Tons Per year)의 에틸렌 생산능력을 가진 세계 제5위의 석유화학제품 생산국이며<sup>4)</sup>, 납사가 전체 원료의 98% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다<sup>5)</sup>.

납사는 에틸렌, 프로필렌, 그리고 아로매틱과 같은 유도품(intermediate product)으로 분해되며(cracked), 유도품들은 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC), 폴리스티렌(PS)와 polyethyleneterephthalate (PET) 등과 같은 제품으로 다시 처리되고, 이들 제품은 프라스틱 용기, 구조재료, 섬유등에 사용된다.

통계자료<sup>6)</sup>를 이용하여 석유화학 제품의 종류 및 생산량에 대한 분석을 수행 하였으며, 이를 통해 우리나라가

상당히 많은 양의 PET, PE, PP, PS, PVC 생산하고있고, 이외에 양은 적지만 아주 다양한 종류의 기타 석유화학 제품들이 생산되고 있음을 알 수 있었다. 또한 문헌<sup>7,10)</sup> 조사를 통하여 석유화학기술의 종류와 기술의 특성(사용 재료 종류와 양, 사용에너지원 및 양, 생산 제품(재료))에 대한 분석을 수행하였다. 한편 기술분석의 대상에는 기존기술 중 현재 우리나라에서 사용되고 있지않는 기술과 신기술도 같이 포함되었다. 기술은 크게 원료로부터 기초화학제품 생산기술(production of intermediates from feedstocks), 유도품 생산(Intermediate conversion), 폴리머/고무 생산기술(production of polymers/rubbers from intermediates), 그리고 기타 chlorine과 MTBE 생산기술로 구분하였다.

분석의 결과를 토대로 기준 석유화학시스템(Fig. 1)을 설계하였다. 이는 석유화학 제품의 종류와 기술을 중심으로 한 제품의 흐름을 선형으로 표현한 것으로 기술평가모듈의 기본 구조인 시스템 영역 및 구성요소를 표현하고 있다.

기술평가모듈은 기준석유화학시스템을 바탕으로 45개의 주요 석유화학 제품(재료) [부록 I]과 [부록 II]와 같은 36개의 주요 기술을 갖는 시스템으로 설계 되었다. 평가모듈은 부타디엔고무(BR), ABS, 스티렌-부타디엔고무(SBR), Butanol, 2-EH/Butanol, 산화프로필렌(PO), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), 카프로락탐(CPLM), 아세톤(Acetone), 페놀(Phenol), 폴리염화비닐(PVC), 폴리에틸렌(PE), 무수프탈산(PA), PET, MTBE 를 최종 수요로 하고, 이를 생산하기 위한 공정기술의 흐름을 포함하는 구조를 갖고 있다. 또한 에틸렌(Ethylene), 톨루엔(Tolulene), 프로필렌(Propylene)은 본 모듈에서 포함하고 있는 최종수요제품 생산 이외의 용도를 위해 통계에 따라 약간을 최종 수요에 반영하였다. 최종 수요를 만족시키기 위해 모듈에 투입되는 재료와 에너지의 종류 및 양은 기술의 구성과 연계하여 산출되도록 하였다. 각 제품은 서로 다른 기술의 경로를 통해 생산이 가능하며, 각 기술 경로들은 주어진 목적에 따라 경쟁 관계에 놓이게 된다.

이러한 본 평가모듈의 구조를 통해 비용 또는 환경측면에서 기술평가를 통해 이를 만족시키기 위한 최적의 기술 조합을 도출과 석유화학부문의 비용과 환경오염 저감을 위한 기술대안의 효과 분석이 가능하다.

**2-3. 평가모듈의 정식화**

본 석유화학기술 평가모듈은 MARKAL 모형을 도구로 개발되었기 때문에 동 모형의 목적함수와 제약식을 이용하므로 특별히 부가적인 정식화를 필요로 하지는 않는다. 다만 본 모듈에서 새로 정의된 재료의 균형 제

약조건에 대한 정의는 필요하다.

**2-3-1. 목적함수**

MARKAL의 다목적함수(Multiple Linear Objective Functions)와 제약식이 이용되며, 하나의 목적함수와 이에 대한 제약식은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_{j=1}^n c_j X_j \\ \text{Subject } \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j &= b_i \quad i = 1, \dots, m \\ u_j \geq x_j &\geq l_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $c_j$ ,  $a_{ij}$ : 목적함수와 제약조건에서의 계수

$b_i$  : RHS(Right-Hand Side)로 각각의 제약식에서의 계수 및 상수의 값으로써 사용자에게 의해 입력으로 정의

$x_j$  : 해로서 구하고자 하는 값

**2-3-2. 재료에 대한 균형 제약식**

본 평가 모듈에서는 석유화학 제품 생산을 위해 기술에 투입되는 재료의 공급은 주어진 수요를 만족시키기 위해 요구되는 재료의 소비와 같도록 정의 하였으며, 이는 주어진 재료  $m$ 과 기간  $t$ 에 대해 다음 식 (2)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &R(t, m, s = \text{mining}) c(m) \\ &+ R(t, m, s = \text{import}) c(m) \\ &- R(t, m, s = \text{export}) c(m) \\ &+ R(t, m, s = \text{stockfile}) \\ &- \sum_k i(t, m_k, m, m_s, s) R(t, m_s, s) \\ &+ \sum_{\delta} [-O_{\delta m}(t, d, \delta) i(t, m, \delta) / c(t, \delta)] S(t, \delta) \\ &+ [O_{\delta m}(t, d, \delta) O(t, m, \delta)] S(t, \delta) \\ &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

- 여기서,  $R(t, m, s)$  : 기간  $t$ 에 재료  $m$ 이 공급원  $s$ 로부터 공급되는 양
- $c(m)$  : 재료  $m$ 의 수송 효율
- $i(t, m_k, m_s, s)$ : 공급원  $s$ 로부터 재료  $m_s$ 를 한 단위 얻기 위해 필요한 재료  $m$ 의 양
- $O_{\delta m}(t, d, \delta)$  : 부문  $d$ 에 사용되는 기술  $\delta$ 의 산출량 비율
- $i(t, m, \delta)$  : 기술  $\delta$ 에 대한 재료  $m$ 의 투입계수
- $c(t, \delta)$  : 기술  $\delta$ 의 효율
- $s(t, \delta)$  : 기간  $t$ 에 사용가능한 기술  $\delta$ 의 용량
- $o(t, m, \delta)$  : 기술  $\delta$ 로부터의 재료  $m$ 의 산출 계수

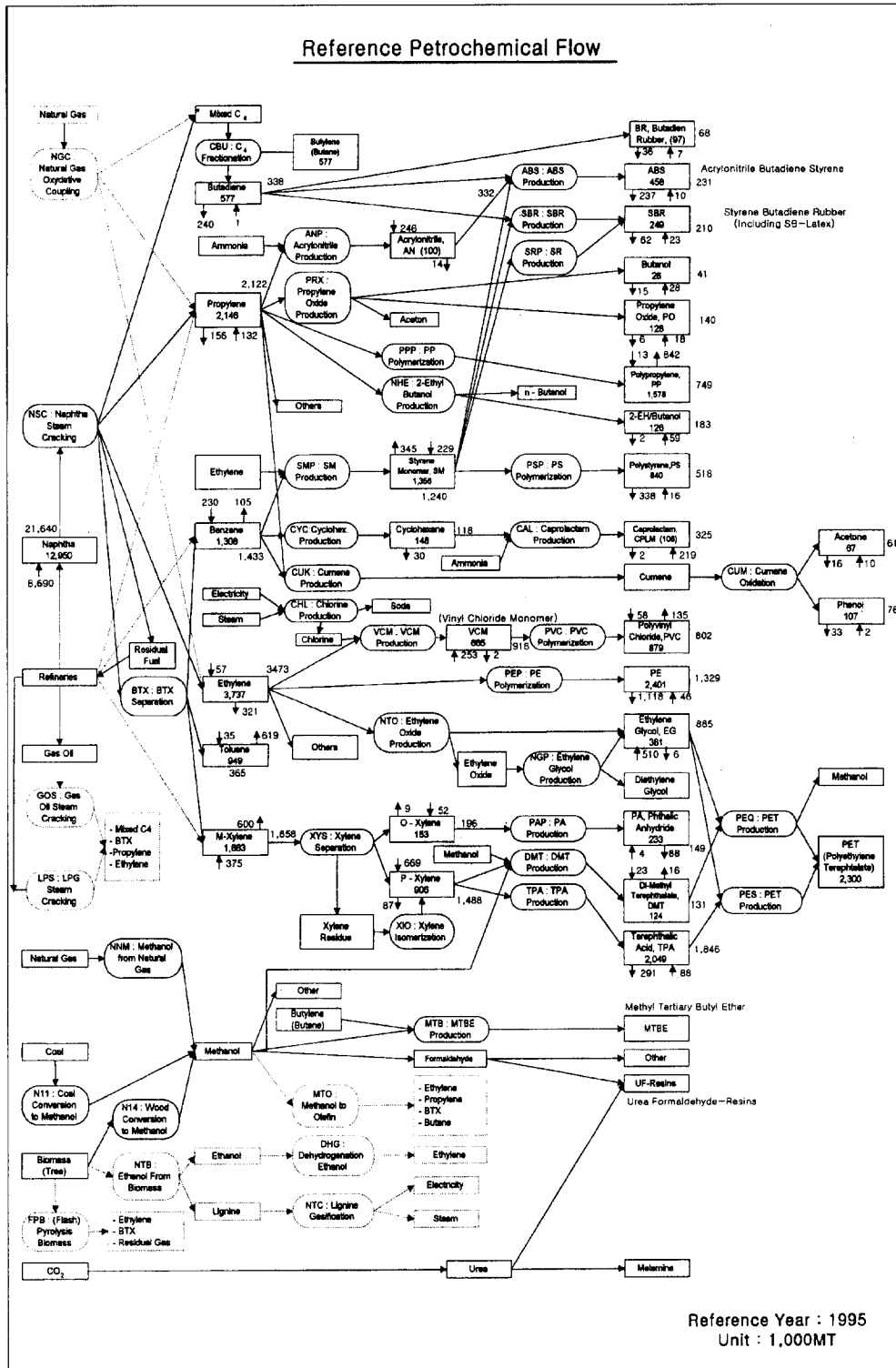


Fig. 1. Reference Petrochemical System Flow.

### 3. 석유화학기술 평가모듈의 적용

#### 3-1. 적용 방법

개발된 석유화학기술 평가 모듈을 우리나라 MARKAL 모형에 추가하여 석유화학기술 및 환경영향 평가에 적용하였다. 기술평가 적용사례로는 에틸렌 생산기술을 중점으로 분석 하였으며, 환경영향으로는 석유화학부문의 이산화탄소 배출 분석을 대상으로 하였다.

적용은 시나리오에 의한 평가 방법을 사용하였으며, 기준과 기술투입 두 가지 시나리오를 설정하였다. 할인율, 에너지 및 재료의 가격, 제품의 수요 등은 물론 기술 평가에 큰 영향을 미칠 수 있으나, 본 논문은 기술평가 모듈의 개발과 이의 적용가능성 분석에 중점을 두었기 때문에 이들 요인들에 대한 다양한 시나리오 설정 및 민감도 분석은 고려하지 않았다.

#### 3-2. 적용 시나리오

##### 3-2-1. 기준 시나리오

기술 구성과 가격, 수요 등이 특별한 변화 없이 현재의 추세대로 지속된다는 가정하에 비용의 최소화를 목적으로 기술을 평가하고 이때의 환경영향을 분석하기 위한 목적을 가진 시나리오이다.

##### 3-2-2. 기술 투입 시나리오

기술투입시나리오는 원료의 대체 및 재활용을 고려한 몇 가지 기술대안의 경쟁력 및 환경효과를 분석하기 위한 것이다.

우리나라의 석유화학산업은 대부분의 설비가 15년 이내에 건설된 설비를 보유하고 있는 것으로 조사 되었으며, 따라서 가장 최근의 효율기준이 적용되고 있는 것으로 볼 수 있다. 때문에 단기적으로 효율개선에 의한 많은 에너지절약 잠재력은 가질 수 없는 것으로 판단된다. 게다가 석유화학 산업에 사용되는 에너지의 2/3이상이 비에너지 용도로 사용되며, 이러한 에너지소비는 줄일 수 없다. 결과적으로 이산화탄소 배출 감소를 위한 에너지효율전락은 적은 잠재력으로 인해 극히 제한적으로 판단되며, 대신에 납사를 대신 할 수 있는 대체 원료의 개발이 중요하다고 분석되었다.

납사 열분해 기술을 대체할 수 있는 Gasoil, LPG, 천연가스 이용기술 등 몇 가지 대안을 설정하였다(Table 1). 바이오매스와 페플라스틱 재활용기술은 이산화탄소 배출 저감의 효과 분석을 목적으로 한 대안이며, 목재(wood biomass)로부터 에탄올(ethanol) 추출과 이에 이은 에탄올의 dehydrogenation이 에틸렌 생산에 이용될 수 있도록 하였다. 대체 천연자원과는 별도로 프라스틱은 back-to-feedstock(BTF), back-to-monomer(BTM), 또는 back-to-polymer(BTP)라고 불리는 기술들을 통하여

**Table 1. List of improvement options that have been added to the model.**

<b>Production of intermediates from feedstocks</b>
Dehydrogenation of ethanol to ethylene
Ethanol production from lignocellulosic biomass
Flash pyrolysis of biomass to ethylene and aromatics
Methanol-to-olefins (MTO) process
Oxydative coupling of natural gas
Steam cracking of LPG
Steam cracking of gasoil
<b>Waste recycling options</b>
Waste PE/PP/PS/PVC pyrolysis
Waste PE/PET/PP/PS/PVC re-extrusion
Waste PE/PP/PS/PVC hydrogenation
Waste PET methanolysis
<b>Other processes</b>
Lignine gasification

재활용 될 수 있도록 하였으며, 페플라스틱가스화, 열분해(pyrolysis)와 재추출(re-extrusion)과 같은 기술들이 포함되었다.

##### 3-2-3. 탄소세 시나리오

2000년부터 \$150/TC의 탄소세(Carbon Tax)를 부과하고 이의 이산화탄소 배출, 에너지수요, 기술의 경쟁력에 미치는 영향 평가를 위한 시나리오

#### 3-3. 주요 전제사항 및 입력자료

##### 3-3-1. 평가기간 및 할인율

평가기간은 1995년을 기준으로 2030년까지로 하였으며, 전체 평가기간을 5년 단위의 8개 시간주기(Time Period)로 구분하였다. 할인율은 10%를 적용하였다.

##### 3-3-2. 에너지 및 재료 가격

1995년도 에너지 및 재료의 실제 가격 실적자료를 적용하였다.

##### 3-3-3. 이산화탄소 배출계수

석유화학부문에 사용되는 에너지는 원료와 연료용으로 구분된다. 납사, 경유, LPG, 천연가스, 중유, 석탄 등이 사용되며, 이중 납사와 경유 전량, 그리고 LPG의 일부는 원료로 사용된다. 이산화탄소 배출계수는 IPCC 배출계수를 적용하였으며, 이산화탄소의 제품물입은 IPCC 연료별 제품물입을 계수<sup>1)</sup>를 적용하여 정의하였다(Table 2).

##### 3-3-4. 석유화학 제품 수요 정의

모듈에서 현재 포함하고 있는 석유화학제품에 대한 1995년도 우리나라 수급 실적자료를 분석하여 각 제품의 기준년도 수요를 정의 하였다(Table 3). 이는 1995년 우리나라 각 제품별 생산량, 수입량에서 수출량을 제외한 것이다. 수요와는 별도로 평가모듈에는 각 제품별 수

**Table 2. CO<sub>2</sub> emission coefficient by each emission source.** (unit: thousand ton C/PJ)

Emission Source	Use as Energy	Use as
Naphtha	20.00	5.00
Diesel	20.20	10.10
LPG	17.20	3.44
LNG	15.30	10.25
Coal	25.80	-

출입이 가능한 공급 구조를 아울러 포함하고 있다.

2000년부터 2030년까지 미래 석유화학제품 수요는 에틸렌 생산을 기준으로 조절되도록 하였으며, 에틸렌 생산량은 관련 협회의 전망치를 참고하여 2000년에

**Table 3. Petrochemical Products Demand in Base Year (1995).** (unit: million tons)

Products	Demand	Products	Demand
BR	0.068	SBR	0.210
ABS	0.231	PO	0.140
PP	0.749	2-EH/Butanol	0.183
Propylene	0.127	PS	0.518
Caprolactam	0.325	Acetone	0.061
Phenol	0.076	PVC	0.802
PE	1.329	Ethylene	0.440
Toluene	0.365	PA	0.149
PET	2.300	MTBE	0.295
Butanol	0.041	Total	8.409

**Table 4. Technology Data on Naphtha Steam Cracking.**

	Unit	
INPUT:		
Naphtha	GJ	152.8
Electricity	GJ	0.29
OUTPUT:		
Ethylene	Ton	1.00
Propylene	Ton	0.53
C4	Ton	0.33
BTX	Ton	0.77
Fuel Oil	GJ	15.00
COST:		
Investments	\$/Ton of Ethylene Capacity	691.
Fixed O&M	\$/Ton of Ethylene Capacity/Year	23.
Variable O&M	\$/Ton of Ethylene	3.
Miscellaneous:		
Lifetime	Year	25
Availability factor	%	90
Residual Capacity	Million Ton of Ethylene/year	4.34

4.67백만톤, 2005년에 4.92백만톤으로 증가한 이후 2030년까지 동 생산량 수준을 유지하는 것으로 정의하였다.

3-3-5. 기술자료 입력

기술자료는 평가모듈의 구조 설계를 위한 기술분석 과정에서 수집 분석하였으며, 평가 목적에 맞게 각 기술 별로 생산되는 제품 단위 당 에너지 및 재료 투입 형태를 갖는 자료로 가공되었다.

다음 Table 4는 기술자료 입력의 예로써 납사분해기술에 관한 것이다.

4. 기술평가 모듈 적용 결과 분석

4-1. 환경 영향(이산화탄소 배출)

적용 결과 1995년의 우리나라 이산화탄소 배출량은 105.2백만톤으로 산출되었으며, 시나리오별 전체 이산화탄소 배출은 Fig. 2와 같이 나타났다. 기준시나리오에 의한 평가 결과, 현재의 추세대로 배출량이 증가한다면 2000년에 123.0백만톤, 2010년에 170.2백만톤, 2020년에 203.9백만톤에 이를 것으로 추정되었으며, 기술투입 시나리오를 적용할 경우 기준시나리오 대비 2000년에 0.5%, 2010년에 2.7%, 2020년에 약 4.9%의 배출 감소 효과가 있었다. 기술투입의 효과가 상대적으로 미미하게 나타난 주 요인은 현재 기술투입시나리오에 포함된 신기술들이 기존기술과의 비용 경쟁에서 뚜렷한 경쟁력을 갖지 못했고 이산화탄소 배출 감소에 기여도가 낮은 점 이외에, 고효율 모터, 고효율 조명기기, 지역난방 등 감소 잠재력이 크지만 현재 시장 점유율이 낮은 기술들

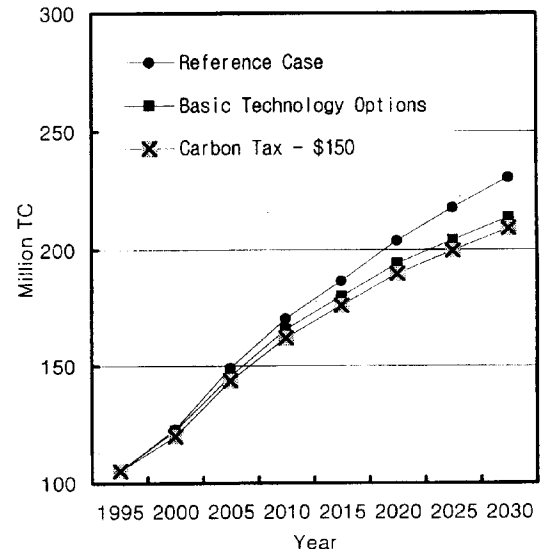


Fig. 2. CO<sub>2</sub> Emission by Scenarios.

의 완전한 투입 효과가 이미 기준시나리오에 반영된 데 있는 것으로 분석되었다.

또한 2000년부터 \$150/TC의 탄소세를 부과할 경우 기준시나리오 대비 2000년에 2.5%, 2010년에 4.8%, 2020년에 약 7%의 배출 감소 효과가 있는 것으로 나타났다.

석유화학 부문의 이산화탄소 배출은 기준시나리오 적용 결과 1995년 3.97백만톤에서 2030년에 5.71백만톤까지 증가할 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 1995년의 경우 우리나라 전체 배출량의 약 3.8%정도로 단일 산업부문으로는 철강에 이어 큰 비중을 차지하는 것이며, 2030년에는 2005년 이후 생산 용량 증설을 하지 않는 전제에 따라 전체의 2.5%정도로 비중이 감소할 것으로 평가 되었다.

기술투입 시나리오의 경우에는 2005년부터 오히려 이산화탄소 배출이 증가하는 추세를 보였으며, 이는 채택된 신기술들이 비용최소화에는 기여하지만 이산화탄소 배출 감소 효과는 없음을 의미한다. 한편 \$150/TC 수준의 탄소세 적용을 통해 석유화학부문에서 2000년 0.3%에서 2030년에 2.82%정도의 배출 잠재력을 가질 수 있는 것으로 분석 되었다. 납사를 대체하기 위한 Gasoil과 LPG, 천연가스 등 기술대안은 이산화탄소 저감에 기여하지 못하는 적용 결과를 보였으나, 목재바이오매스와 폐플라스틱 재활용기술은 이산화탄소 배출 저감에 효과가 있는 기술 대안으로 판단되었다. 그러나 이들 기술은 자원의 이용량에 크게 제약을 받는 한계를 갖고 있다.

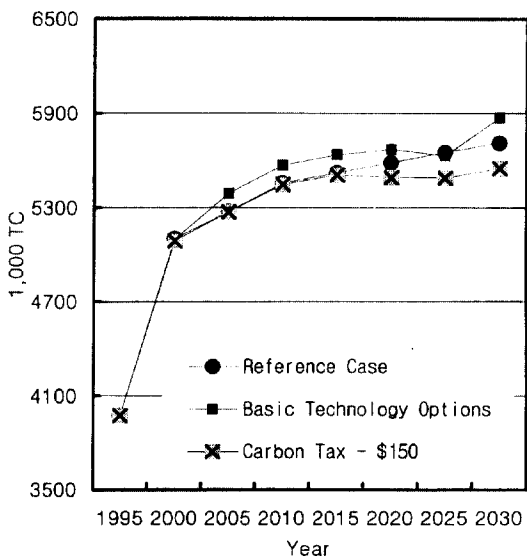


Fig. 3. CO<sub>2</sub> Emission in Petrochemicals.

#### 4.2. 석유화학기술의 경쟁력 평가

개발된 모듈에 의한 기술의 경쟁력 평가는 주어진 제품 수요를 만족시키는데 어떤 기술이 많은 기여를 하고 있는가를 분석함으로써 이루어지며, 주어진 조건하에서 경쟁력이 우수한 기술이 특정 제품의 생산을 위해 채택 됨을 의미한다. 본 분석에서는 석유화학기술의 경쟁력 평가의 예로써 대표적인 기초유분인 에틸렌 생산 기술의 각 시나리오별 평가 결과를 제시하고자 한다.

기준시나리오의 경우 Naphtha Steam Cracking 이외에 다른 기술 대안을 투입하지 않았기 때문에 실제적인 기술평가의 의미는 없다(Fig. 4).

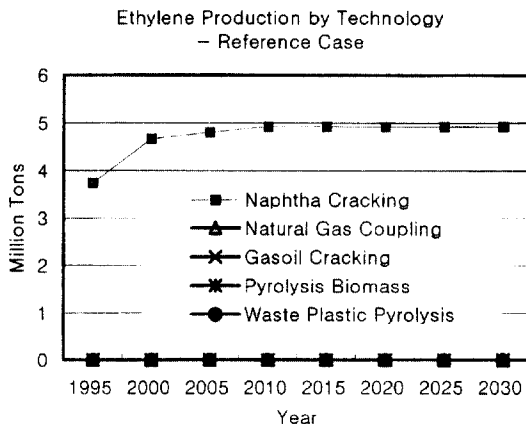


Fig. 4. Ethylene Production by Technology-Reference.

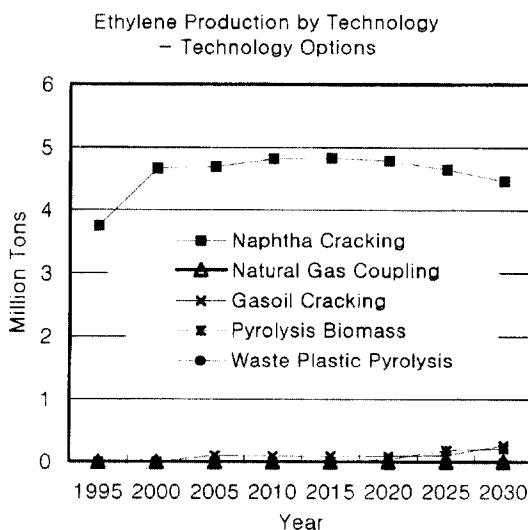


Fig. 5. Ethylene Production by each Technology-Technology Options.

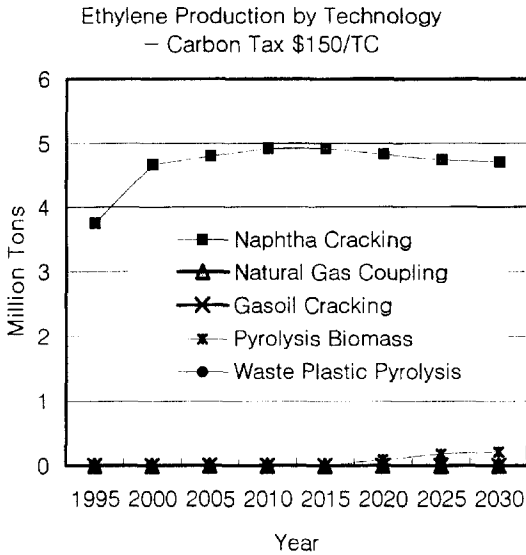


Fig. 6. Ethylene Production by each Technology-Carbon Tax \$150/TC.

기술투입시나리오 적용 결과, Gasoil Cracking과 Pyrolysis Biomass 기술이 현재의 Naphtha Steam Cracking 설비의 수명이 끝나는 시점부터 약간의 경쟁력을 가질 수 있는 것으로 평가되었다(Fig. 5).

탄소세시나리오하에서는 Pyrolysis Biomass 기술이 상대적으로 경쟁력이 우수한 것으로 평가 되었으며, 기술투입시나리오하에서 경쟁력을 가졌던 Gasoil Cracking 기술은 탄소세의 영향을 크게 받아 경쟁력을 가지지 못하는 것으로 분석 되었다(Fig. 6).

4.3. 에너지 수요

우리나라 1차에너지수요는 1995년에 150.65백만TOE였으며, 석유화학부문의 에너지소비는 17.06백만TOE로 1차에너지의 약 11% 정도의 비중을 차지하는 것으로 분석되었다.

기준시나리오 적용 결과 주어진 제품 수요를 만족시키기 위해 필요한 석유화학부문의 에너지수요는 원료용을 포함하여 1995년 17.06백만TOE에서 2030년에 24.11백만TOE가 될 것으로 평가되었다. 1995년의 경우 17.06백만TOE의 소비중 원료용이 13.69백만TOE, 에너지로 사용된 것이 3.37백만TOE로 나타났다. 기존 통계자료<sup>18)</sup>에서의 1995년 석유화학부문 에너지소비(화합물 및 제품 제조업의 간접가열, 직접가열, 동력용)는 19.68백만TOE(에너지 4.57백만TOE, 원료 15.11백만TOE)으로 본 모듈의 적용 결과와 차이를 보이고 있다. 그러나 이는 석유화학부문 이외의 에너지소비도 같이

Energy Demand in Petrochemical Sector

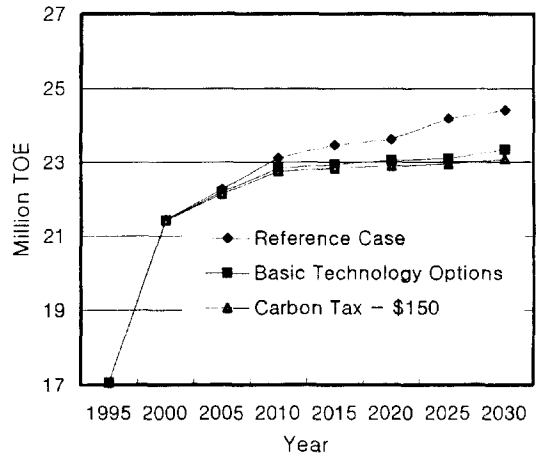


Fig. 7. Energy Demand in Petrochemical Sector.

포함하고 있어 명확한 적용 결과의 비교치로 사용하기에 적절하지는 않은 것으로 판단된다.

기술투입시나리오 적용의 경우에는 기준시나리오에 비해 2000년에 0.02%에서 2030년에 4.35%까지의 에너지수요 감소 효과가 있었으며, 탄소세 적용을 통해서 2000년에 0.11%에서 2030년에 5.4% 정도의 수요 감소 효과가 있는 것으로 평가되었다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

원료용 소비를 포함하여 우리나라 1차에너지수요의 약 10% 이상을 차지하는 석유화학부문의 기술평가 모듈을 개발하고, 두 가지 적용시나리오를 이용하여 석유화학기술의 비용 및 이산화탄소 배출 효과에 대한 평가를 수행하였다. 동 모듈은 관련 산업과 정책기관에서 미래 석유화학기술의 채택 결정과 이의 중요한 결정 변수가 될 이산화탄소 배출 저감 압력에 따른 기술 대안의 효과 평가에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이 모듈의 개발을 통해 우리나라 MARKAL 모형은 석유화학분야의 기술현황을 상세히 포함하게 되었으며, 유럽국가 등 타 국가의 MARKAL 모형 결과와 동 분야에서 비교가 가능하게 되었다.

그러나, 현재의 모듈은 용제(solvent)와 세제(detergent) 등 중요한 석유화학 제품 그룹을 아직 포함하고 있지 못하며, 앞으로 이들을 포함한 보다 상세한 모델링을 필요로 하고 있다. 아울러 본 연구를 통해 축적된 MFA 데이터는 앞으로도 지속적이고 더욱 정밀한 검토와 보완을 필요로 한다. 또한 원유정제모듈은 에너지 집약적인 재료



들이 동 분야에서 생산되고 있기 때문에 매우 중요한 분야이며, 이의 개발과 이를 통한 정제 배가스(refinery off-gas)로부터 ethylene과 propylene의 회수 등의 기술을 석유화학기술평가모듈에 포함하여 더욱 신뢰성 있는 모듈로 발전시켜 나갈 것이다.

### 참고문헌

1. 신희성 외: "CO<sub>2</sub> 배출량 저감을 고려한 국내 에너지 공급시스템 분석: 시장배분모형(MARKAL)의 응용", 한국경영과학회지, **18**(1), 79-95 (1993).
2. 김종욱 외: "비용최소화와 환경영향을 고려한 철강 기술 평가에 관한 연구: MARKAL 모형의 응용", 에너지공학, **18**(2), 188-197 (1997).
3. Leslie G. Fishbone, etc: "User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0): A Multi-period, Linear-programming Model for Energy System Analysis", IEA/ETSAP (1983).
4. Y.H. Kim: "Korea, Hydrocarbon Processing" (1997. 5).
5. "석유화학공업 제통도 해설", 석유화학 '96 3월호, 46 (1996).
6. "Petrochemical Industry in Korea 1997", Korea Petrochemical Industry Association (1997).
7. Price, R.O.: "Liquid Hydrogen; An Alternative Aviation Fuel?", Automotive Engineering, **99**(2), (1991).
8. Stratton, A. and Hemming D.F.: "Ethylene Production from Oil, Gas and Coal-derived Feedback", IEA Coal Research, London (1983).
9. Chauvel, Lefebvre: "Petrochemical Processes Vol. 1: Synthesis-gas derivatives and major hydrocarbons", Editions Technip, Paris (1989).
10. Chauvel, Lefebvre: "Petrochemical Processes Vol. 2: Major oxygenated and nitrated derivatives", Editions Technip, Paris (1989).
11. Geem v.: "Nieuwe routes naar etheen (in Dutch)", Petrochemical Technologies (1992. 3).
12. Steinberg: "The Flash Pyrolysis and Methanolysis of Biomass (wood) for production of Ethylene, Benzene and Methanol: Novel production methods for Ethylene, Light Hydrocarbons, and Aromatics", Marcel Dekker, New York (1992).
13. D.J. Gielen and Vos. D.: "The Petrochemical Industry and Its Energy Use", ECN (1996).
14. Lee, R. Lynd, Richard T. Elander and Charles E. Wyman: "Likely Feature and Cost of Mature Biomass Ethanol Technology", Applied Biochemistry and Biotechnology, (57/58), 741-761 (1996).
15. J.R. Ybema, P. Lako and D.J. Gielen: "Prospects for Energy Technologies in the Netherlands", ECN (1995).
16. D.J. Gielen and P.A. Okken: "Optimization of Integrated Energy and Materials Systems: Compilation of Materials Processes", ECN-C-94-011 (1994).
17. "기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구", 통상산업부, 에너지경제연구원 (1995. 12).
18. "에너지총조사보고서", 통상산업부, 에너지경제연구원 (1996).
19. "개별 산업의 대응방안: 철강, 석유화학, 시멘트 산업을 중심으로", 기후변화협약과 산업구조 전환, 산업연구원(1998. 5).