

에너지技術評價模型에 관한 考察

김호탁* · 최기련** · 강희정*** · 차재호***

An Overview of Models for Energy Technology Assessment

Kim, Hotak, Choi, Kiryun, Kang, Heejung and Cha, Jaeho

Abstract

Energy system models have been broadly used for the solution of the assessment of technical and economical characteristics in the national energy systems. The purpose of this study is to overview the structures, potentials and usefulness of system models for energy technology assessment. The conventional models developed so far are not adequate to analyze the energy and environmental problems simultaneously. Energy system models integrated by multiobjective programming are also reviewed and discussed in this paper to judge their usefulness and applicability in simultaneously analyzing the energy and environmental problems.

I. 序 論

에너지新技術의 유용성을 評價한다는 것은 매우 복잡하고 어려운 일이다. 原論的으로 에너지新技術에 대한 評價는 經濟規模의 擴充에 따른 技術의 有用성과 技術開發費의 比較를 통한 純經濟的의 便益(Net economic benefit)에 의해 결정된다. 즉, 개발하고자 하는 新技術이 동일한 형태의 燃料을 생산하는 다른 技術과 어떻게 競爭할 것인가? 新技術에 의해 생산된 燃料이 에너지 市場에서 다른 형태의 他燃料들과 어떻게 競爭할 것인가? 新技術에 의해 생산된 燃料價格이 消費者들에게 동일한 效用(Utility)를 제공하는 代替燃料의 價格과 需要量에 어떤 영향을 미칠 것인가? 에너지價格이 상승할 경우 經

濟成長率이 둔화될 것인가 지속될 것인가? 이에 따른 에너지 需要의 增加率의 變化方向은 어떻게 될 것인가? 등에 대한 綜合的 評價를 통해 이루어진다. 그 외에도 意思決定者들은 新技術이 環境에 어떤 영향을 미칠 것인가? 얼마나 安全한가? 어떤 天然資源을 사용하는가? 등 新技術의 非經濟的 影響도 評價要因으로 고려하기를 요구한다. 이와 아울러 에너지新技術의 役割을 定立하기 위해서는 에너지 시스템¹⁾ 내에서 각 要因들의 독립적 영향 뿐만 아니라 요인들간 복합적 相互作用도 고려되어야만 한다. 이와 같은 技術評價의 複雜性은 에너지 연구개발(R&D)과 관련된 意思決定을 더욱 어렵게 만들고 있어서 模型開發者들에게 技術評價의 分析틀(analytical framework) 내에 상기 要因들을 반영한 模型의

*Department of Agricultural Economics, Seoul National University, Suwon, Korea.

**New Energy Development Center, The Korea Energy Management Corporation, Seoul, Korea.

***Department of Industrial Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea.

****Energy Systems Research Center, Ajou University, Suwon, Korea.

1) 에너지시스템이란 “天然狀態로 부존되어 있는 에너지원을 다양한 형태의 에너지所要(energy requirements)를 충족시키기때문 技術的, 社會·經濟的으로 變換시키는 過程”을 통틀어 일컫는 概念으로 이를 분석하기 위한 目的으로 에너지시스템을 物理-經濟的 시스템(physio-economic system), 技術-經濟的 시스템(techno-economic system) 및 價格시스템(price system) 등의 下位體系(sub-system)로 분류하기도 한다(崔基鍊, 1987).

開發을 요구하게 된다.

70년대 두 차례의 유류파동은 에너지자원의 중요성에 대한 기존의 인식을 급속도로 변화시켰으며, 이와 아울러 新·代替에너지를 중심으로 한 신기술의 개발여부와 관련하여 에너지技術評價模型의 開發需要를 급증시켰다. 이러한 背景下에서 에너지技術評價模型이 胎動하였으며, 지난 십여년간 歐美諸國을 중심으로 다양한 에너지新技術을 평가하기 위해 다양한 分析技法들이 開發되어 왔다. 이러한 評價技法들을 총괄적으로 지칭하는 ‘에너지技術評價模型(Energy Technology Assessment Models)’은 에너지新技術의 經濟的, 技術的 特性和 에너지시스템내에서 新技術의 潛在的 役割을 事前評價하면서 국가적 차원에서 에너지研究開發政策을 樹立하는데 널리 활용되어 왔다.²⁾

本稿는 국내 에너지 연구개발 관련자들의 이해 부족과 데이터베이스의 미비 등 여러가지 制約要因들로 에너지技術評價模型이 널리 실용화되지 못하고 있는 현실을 감안하여 에너지技術評價模型의 전반적 考察과 아울러 최근의 國際的 開發趨勢를 반영하는 에너지技術評價模型들의 解剖에 主要 目的을 두고자 한다. 특히 本稿는 최근 지구규모화되는 環境問題와 시스템費用이외의 主要 要因들을 모형내에서 동시에 체계적으로 고려하기 위해 工學的 過程分析에 기초를 둔 에너지시스템模型과 多目的計劃法³⁾을 연계시켜 개발된 模型-內場配分模型(Market allocation model : MARKAL), MARKAL-MACRO 模型-에 主眼點을 두어 언급하고자함을 밝혀 둔다. 이를 위해 本稿의 第II章에서는 에너지技術評價模型의 進化過程과 관련된 主要 考慮事項에 대해 언급하고, 第III章과 IV章에서는 에너지技術評價模型의 比較基準의 제시와 아울러 에너지技術評價模型을 에너지시스템모형, 부문모형, 에너지-경제모형 등으로 구분하여 그 特性和 適用範圍를 간략히 살펴보고, 第V章에서는 최근 개발된 多目的計劃法과의 連繫模型에 관한 構造와 活用方法에 대해 구체적으로 서술하고,

지생산자와 非에너지생산자에게 勞動이나 資本財와 같은 生産要素(Factor inputs)들의 價格策定(賃金, 利子 등)에 관한 情報를 제공하고 이들로부터 用役에 대한 需要量의 情報를 입수한다. 非에너지生産者의 경우에도 에너지생산자와 마찬가지로 方法으로 情報의 交換過程을 거친다. 이와 같은 情報交換過程을 통해 모든 財貨와 用役의 需要와 供給이 調和를 이루었을 때 經濟는 均衡狀態에 도달하였다고 말한다.

에너지技術評價模型은 이러한 經濟主體間 財貨와 用役의 交換過程에 대한 分析에 추가하여 에너지資源의 燃料間 代替性, 에너지 價格變化에 따른 需要의 敏感度, 외부여건의 不確實性 및 에너지部門과 巨視經濟部門과의 統合 등 의사결정에 중대한 影響을 미치는 要因들을 模型內에 흡수시키면서 進化되어 왔다. 물론 하나의 模型이 상술한 요인들을 모두 고려하여 技術評價의 전사적인 能力을 갖춘다는 것은 거의 불가능하며, 이러한 能力을 갖추는 것이 마지막 章의 結論에서는 향후 에너지技術評價模型의 開發方向에 대해 기술하는 형식으로 構成하였다.

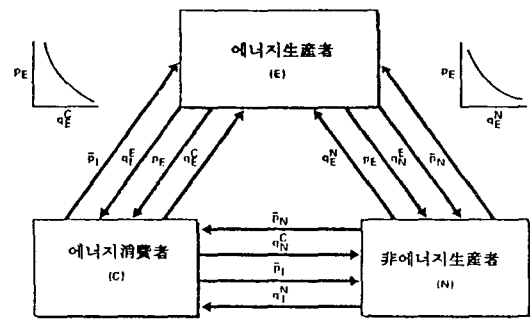


그림 1. 經濟主體間 交換過程(價格變化에 민감하게 反應하는 에너지 需要模型).

資料 : Richels, R.G., and Weyant, J.P., "Models for Energy Technology Assessment."

Academic Press Inc., 1979.

P_i : i 財貨 또는 用役의 價格

I : 生産要素 投入量(factor inputs)

q_j : j 財貨 또는 用役에 대한 I 部門의 購入量

p, q : 外生變數

2) Hoffman and Wood (1976) 참조.

3) 多數의 상반되는 目的(Objective)이나 基準(Criteria)을 동시에 綜合적으로 고려하여 解의 集合-구체적으로는 非劣等解의 集合(Non-inferior set)-을 도출해 주는 最適化技法으로 多目的計劃法(Multiojective Programming) 또는 多目的意思決定(Multiojective Decision Making)이라고 불리우는 數理計劃法의 一種이다. 따라서 線形計劃法(LP)과는 달리 目的函數가 2개이상으로 구성된다. 보다 자세한 내용은 Cohon(1978), Zeleny(1982), Goicoechea et al.(1982) 및 이상문·이병찬(1986) 등을 참조할 것.

II. 에너지技術評價模型의 進化過程과 主要 考慮事項

에너지研究開發과 관련된 意思決定에서 가장 중요하게 취급되는 情報은 그림 1에 나타난 바와 같이 경제내 개별 經濟主體間 財貨와 用役의 흐름으로부터 얻어지는데 에너지시스템분석에서의 經濟主體는 에너지生産者, 非에너지生産者 및 消費者 등 3가지 類型으로 구분된다.

財貨와 用役은 經濟主體들간의 情報交換을 통해 연속적이고 반복적으로 交換되며, 交換過程에서 價格 P와 需要量 q에 관한 情報은 서로 반대방향으로 작용한다. 즉 에너지生産者가 非에너지생산자와 소비자에게 에너지價格에 대한 情報을 보내면 非에너지생산자와 소비자는 에너지생산자에게 에너지需要量에 관한 情報을 제공한다. 동시에 消費者는 에너지 불필요할 경우도 있다. 어쨌든시간에 綜合的 觀點에서 에너지技術評價模型이 현실활용성이 높도록 實用化되기 위해서는 이들 요인에 대한 고려는 거의 필수적이다. 이하에서는 이들 要因들이 에너지기술 평가모형 내에 統合되는 背景說明과 아울러 에너지技術評價模型의 進化過程에 대해 살펴보기로 한다.

1. 에너지資源의 燃料間 代替性

1) 固定需要/單一에너지 模型(Fixed Demand/Single Fuel Models)

初期段階의 에너지技術評價模型들은 대부분 주어진 에너지需要를 單一 燃料로 만족시키는데 소요되는 費用을 最少化시키는 觀點에서의 연구가 主目的이었다. 代表的인 例로써 1970년대초 미국 원자력 위원회⁴⁾의 電力部門模型(A model of electric generation sector)을 들 수 있는 바 이 模型은 주어진 電力需要를 만족시키기 위한 供給費用의 最少化를 目的으로 電力部門의 供給技術을 評價하고 있다.⁵⁾

2) 代替可能한 多에너지模型(Interfuel Substitution Models)

第2世代 에너지模型은 에너지자원의 燃料間 代

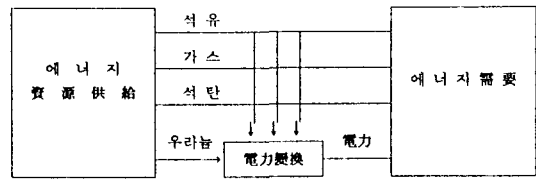


그림 2. 固定需要/燃料間 代替可能한 多에너지模型의 흐름도.

替性を 고려하여 국가전체의 총에너지수요를 만족시키는데 사용되는 에너지源間 또는 燃料間 代替가 가능하도록 設計되었다. 代表的인 模型으로는 BE-SOM 模型⁶⁾과 SRI 模型⁷⁾을 들 수 있다. 이들 모형은 모두 주어진 에너지最終需要를 만족시키는데 필요한 에너지공급량의 最適수준을 구하는 模型들로 에너지供給量은 燃料間 競爭을 통해 이루어지도록 설계되었다.

그림 2는 固定需要/燃料間 代替가 가능한 多에너지模型을 간략하게 도식화한 것이다. 또한 이러한 모형들의 情報의 循環過程은 그림 1에 나타난 循環過程과는 약간의 차를 보이는 바 그림 1에서 q_E 는 q_E^* 로, q_E^* 는 q_E 로 수정되어야 한다. 그 이유는 이들 모형이 모두 非에너지생산자와 소비자의 에너지需要량이 에너지 價格變化에 관계없이 一定하다고 假定하기 때문이다. 아울러 이 모형은 에너지생산자나 非에너지생산자가 필요로 하는 生産要素의 價格(\bar{P}_1)과 非에너지생산자의 生産物價格(\bar{P}_N) 또한 일정한 것으로 가정한다. 이러한 假定下 에너지生産者가 供給하는 에너지價格(P_E)과 에너지생산에 투입되는 生産要素量(Q)이 모형으로부터 推定된다.

2. 에너지 價格變化에 따른 需要變動의 敏感性

經濟異論에 따르면 所得과 다른 財貨의 價格이 일정할 경우 價格彈力性이 높은 에너지製品의 價格이 상승하면 需要量은 감소한다. 이러한 經濟原理를 반영한다면 에너지수요가 가격변화에 민감하게 반응하도록 모형이 설계되어야만 한다. 固定 需要/單一에너지 模型이나 代替可能한 多에너지模型은

4) 英文名은 Atomic Energy Commission(AEC)로 1975년 에너지研究開發部(Energy Research & Development Administration: ERDA)로 개칭함.

5) 보다 자세한 내용은 Atomic Energy commission(1974)를 참조할 것.

6) 보다 자세한 내용은 Cherniavsky(1974)를 참조할 것.

7) 보다 자세한 내용은 Cazalet(1977)을 참조할 것.

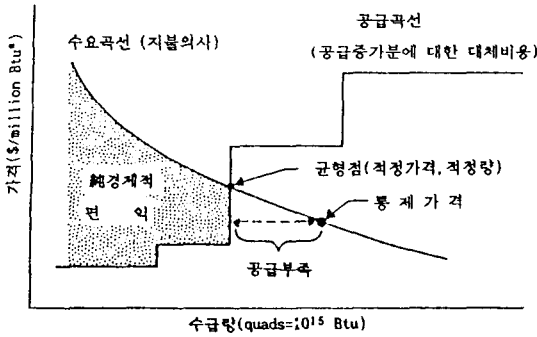


그림 3. 市場機構와 經濟的 便益의 極大化.
 資料 : Richels and Weyant(1979), ibid, p189.

이와 같은 상황을 적절하게 반영시키지 못하므로써 분석결과로 도출된 에너지 供給量은 可變인 需要에 대응하는 調整能力을 상실하게 된다. 따라서 에너지공급부문의 限界費用(Marginal cost : MC)⁸⁾을 실제보다 過大評價하므로써 에너지 供給시스템에 무리한 制約을 가하도록 하는 推定值가 나오는 경향이 짝다.

이와 같은 限界性을 극복하기 위한 차원에서 개발된 모형이 에너지 價格變化에 敏感하게 반응하는 需要模型(Model with Price-Sensitive Demand)이다. 그림 3은 價格과 需給量과의 相互作用을 통해 市場均衡(經濟的 便益의 極大化)이 달성되는 메카니즘을 예시한 것이다. 그림에서 소비자의 支拂意思(Willingness to pay)를 나타내는 需要曲線은 우하향하는 기울기를 가지며, 生産者의 추가공급에 대한 代替費用(Replacement cost)을 나타내는 供給曲線은 연료간 대체관계를 고려하여 段階函數로 표시되어 있다.

주어진 供給상황에서 純經濟的 便益(net economic benefit)을 極大化하는 均衡狀態는 수요곡선과 供給곡선이 교차하는 점에서 달성된다. 이 때의 가격과 供給량을 均衡價格(Equilibrium price), 均衡

(需給)量(Equilibrium quantity)이라고 부르며, 그림에서 빗금친 부분이 純經濟的 便益이 된다.⁹⁾ 均衡點의 달성은 ‘보이지 않는 손(invisible hand)’이 작용하는 市場機構를 통해 자발적으로 이루어진다. 한편 이 모형에서 多期間을 고려하면 時間에 따라 변화되는 수요곡선과 供給곡선의 이동(Shift)에 따른 動的 狀況을 분석하는 것으로 에너지需給과 經濟의 相互作用에 따른 部分均衡의 移動狀況을 파악하는 것이다.

앞서 예시한 그림 1은 에너지 價格變化에 따른 需要量이 敏感하게 반응하는 模型에서 情報의 循環過程을 나타낸 것이다. 앞의 多에너지模型과 比較할 때 두드러진 差異點은 에너지消費者들은 一般 소비자와 非에너지생산자-앞의 多에너지모형과 마찬가지로 에너지생산자로부터 價格情報를 제공받지만, 에너지需要量(q_e, q_n)은 에너지 價格변동에 따라 調整되도록 되어 있다.

이러한 모형의 代表的인 例로는 ETA 모형,¹⁰⁾ Nordhaus 모형¹¹⁾ 그리고 FOSSIL I 모형¹²⁾ 등을 들 수 있다. 특히 Nordhaus 模型에서는 에너지源別 最終需要의 彈力性값을 사용하였을 뿐 아니라 BESOM 모형이나 SRI 모형에서 사용하는 總에너지 需要의 彈力性값도 고려하고 있다. 한편 EAT 모형은 都賣價指數로 계산된 에너지源別 交叉彈力性(Cross price elasticity)값¹³⁾을 사용하였으며, FOSSIL I 모형에서는 소비지에 운송된 到着에너지(Delivered energy) 價格의 彈力性값을 사용하였다. 또한 FOSSIL I 모형은 부분적으로 에너지源別 相對價格을 도입하여 代替에너지의 市場占有率을 결정하여 모형에 포함시키고 있다.

3. 不確實性的 統合

計量計劃模型(Quantitative planning models)에서 不確實性은 모든 入力變數들의 값과 관련된다. 이는

8) 生産物을 한 단위 추가적으로 생산함에 따라 追加되는 生産費用으로 정의되며, 數式으로 표현하면

$$\frac{\text{총비용의 증가분}}{\text{생산량의 증가분}} = \frac{\Delta TC}{\Delta X}$$

이 된다(朴弘立, 1987)

9) 이 때의 市場均衡狀態는 에너지市場만을 고려했으므로 一般均衡(general equilibrium) 상태가 아닌 部分均衡(general equilibrium) 상태임.

10) 보다 자세한 내용은 Manne(1976, 1978)을 참조할 것.

11) 보다 자세한 내용은 Nordhaus(1978)을 참조할 것.

12) 보다 자세한 내용은 Belden(1977)을 참조할 것.

模型에서 고려하는 입력변수들의 값이 모형의 分析結果에 直接的으로 影響을 미치기 때문에 분석결과를 그대로 적용하는데에는 여러가지 制約이 따른다. 豫測과 관련된 의사결정문제에서 불확실성의 처리는 더욱 중요한 문제가 된다. 따라서 入力變數값들의 미래 不確實性을 고려한 代案的 시나리오(alternative sinarios)를 비교, 分析하는 方法으로 결과를 제시하여 意思決定者로 하여금 不確實한 未來 與件의 變化에 對處할 수 있도록 有用한 情報를 제공 해주어야 한다.¹⁴⁾

주요 不確實性에 대한 主觀的 確率分佈를 이용하여 單一解를 도출해 내는 意思決定分析(Decision Analysis)¹⁵⁾은 1968년 Raiffa에 의해 개척되었으며, 에너지부문에서는 최초로 1977년 스탠포드연구소(Stanford Research Institute : SRI)에서 에너지기술평가를 위해 도입, 적용한 이후 신형 원자료와 합성연료의 공업화분석에서 널리 이용되고 있다.

스탠포드연구소의 合成燃料의 商業化分析을 위한 SRI 模型에서 意思決定模型은 불확실성이 높은 해외 輸入原油價格 展望值의 代안적 시나리오에 대해 미국의 에너지시스템의 변화과정을 시뮬레이션하는데 이용하였다. 이로부터 도출된 시나리오별 價格과 物量은 合成燃料의 需要曲線을 도출하는데 사용되었으며, 기대값들은 각 代案別로 成果度 測定(消費者剩餘, 生産者剩餘, 豫想되는 禁輸措置로 인한 損失, 社會經濟的 厚生의 損失 등)을 위해 모형의 외부에서

계산한 후, 구해진 成果度를 대안별로 비교하여 에너지技術을 종합적으로 評價한다.¹⁶⁾

4. 巨視經濟部門과의 統合

經濟內 여러 產業部門중에서 에너지部分만을 분리시켜 고려하는 部分均衡模型(Partial equilibrium models)에서는 일반적으로 高에너지價格이 경제전반에 미치는 影響을 무시하는 경향이 짙다. 그 이유는 經濟成長率 資料가 外生的으로 入力되기 때문에 에너지가격이 상승(하락)할 경우 경제전반에 미치는 影響을 모형내에서 計測할 수 없기 때문이다. 이는 產業間 相互作用(Interindustry interaction)을 간과하는 部分均衡模型의 限界點으로 1차 석유파동 이후 석유가격의 상승이 경제전반에 미치는 影響¹⁷⁾이 既存 模型의 分析결과보다 훨씬 높게 나타남에 따라 이를 교정하기 위한 새로운 方法으로 一般均衡的 次元에서 에너지部門과 巨視經濟部門을 統合하려는 연구가 進行되기 시작하였다.

이러한 模型들 중 일부가 에너지技術評價를 위해 고안된 代表性的인 模型으로는 ETA-MACRO 模型,¹⁸⁾ H-J/BESOM(또는 LITM/BESOM) 統合模型,¹⁹⁾ 厚生經濟模型(WEM),²⁰⁾ 그리고 PILOT 模型²¹⁾ 등이 있다.

III. 에너지技術評價模型의 比較基準

에너지技術評價模型의 比較를 위한 틀(Frame-

- 13) 彈力性(elasticity)이란 $y=f(x)$ 라는 函數關係가 주어졌을 때, 변수 x 의 變化率에 대한 변수 y 의 變化率로 정의되며, 多變數函數의 경우 彈力性은 偏彈力性(partial elasticity)으로 불리운다. i 財貨의 需要 D_i 는 그 자체의 價格 P_i 뿐만 아니라 다른 財貨의 價格 $P_j(j \neq i)$ 의 函數이기도 하므로 需要函數는 $D_i=D_i(P_1, P_2, \dots, P_n)$ 이 될 것이다. 이때, 需要의 彈力性은

$$\eta_{ii} = -\frac{\partial D_i/D_i}{\partial P_i/P_i}, \quad \eta_{ij} = -\frac{\partial D_i/D_i}{\partial P_j/P_j}$$

이 된다. 여기서 η_{ii} 는 i 財貨의 價格에 관한 i 財 需要의 偏彈力性이며, η_{ij} 는 j 財貨의 價格에 관한 i 財 需要의 彈力性을 나타내고 있는데, 특히 後者를 수요의 交叉彈力性(cross elasticity)라고 부른다.

- 14) Richels(1976)과 Alexander & Rice(1975)가 미국 원자력위원회(LMFBR)의 技術評價에 관한 費用/便益 分析方法을 비평하면서 이러한 不確實性의 統合問題를 지적하였음.
 15) 보다 자세한 내용은 Raiffa(1968)을 참조할 것.
 16) 보다 자세한 내용은 Stanford Research Institute(1975b)를 참조할 것.
 17) 1975년까지 미국의 모델링研究會(Modeling Resource Group : MRG)는 그 效果가 매우 작을 것이라고 가정하였지만 이러한 見解는 석유파동 이후 意思決定者들에게 인정받지 못하므로써 에너지-經濟 統合模型의 개발이 進行되기 시작하였음.
 18) 보다 자세한 내용은 Manne(1978)을 참조할 것.
 19) 보다 자세한 내용은 Hoffman and Jorgenson(1977)을 참조할 것.
 20) 보다 자세한 내용은 Parikh(1976), []과 Dantzig *et al.*(1978)을 참조할 것.
 21) 보다 자세한 내용은 Parikh(1978)을 참조할 것.

work)은 일반적으로 잘 알려진 生産物과 資源의 循環過程에 대한 經濟的 側面의 통찰로부터 유도한다. Hogan과 Parikh은 이들을 비교하는데 그림 1에서와 같이 經濟主體를 生産者(에너지, 非에너지)와 消費者로 나누어 분석하였다.²²⁾

생산물과 자원의 순환과정에서 消費者는 생산자에게 經濟的 資源(勞動)을 제공하고, 주어진 所得으로 效用을 極大化하는 購買行爲를 하며, 生産者는 資源(資本, 勞動, 原料品 및 에너지 등)의 최적결합을 통해 費用을 極小化하고, 利潤을 極大化하는 방향으로 제품을 생산한다. 이러한 과정에서 生産者와 消費者 사이의 相互作用을 통해 궁극적으로 供給과 需要가 均衡을 이루게 된다. 균형에 도달하는 방법과 관련하여 각 모형들은 서로 다른 均衡메카니즘을 사용하므로써 模型間 근본적인 差異가 발생된다. 이상의 論據는 生産者와 消費者의 經濟行爲의 결과로 달성되는 均衡狀態에서의 經濟的 便益(Economic benefit)을 일차적인 價値尺度의 基準으로 사용될 수 있다는 점을 시사해준다. 따라서 에너지新技術의 유용성을 측정하는 尺度로써 經濟的 便益을 사용할 수 있을 것이다.²³⁾

지금까지의 설명으로 에너지技術評價模型들을 比較하는 基準으로 에너지生産者, 非에너지生産者, 消費者, 그리고 均衡메카니즘 등을 상정하고, 이러한 틀내에서 模型의 상이한 接近方法들을 기술하는 것이 模型比較를 위해 가장 적절한 方法이라고 思料된다.

이상에서 설명한 Hogan과 Parikh의 分類基準에 따라 에너지技術評價模型을 3가지로 구분하면 아래와 같으며, 이들 모형들은 모두 工學的 過程模型(Engineering process models)과 計量經濟模型(Econometric models)를 포함하고 있다는 점에 주지해야 한다.

(1) 에너지-經濟模型(Energy-economy models) : 産業間 投入/產出構造에 따라 産業部門을 에너지와 非에너지 部門으로 나누어 분석하는 模型

(2) 에너지시스템模型(Energy system models) : 주어진 經濟活動水準과 産業의 生産水準하에서 에

너지需要를 價格에 대해 不變이거나 價格의 函數로 표시하여 에너지시스템을 분석하는 模型

(3) 部門模型(Sector models) : 經濟시스템내에서 에너지部門만을 분리하여 해당 部門의 에너지시스템을 상세하게 분석하는 模型

한편 Eden은 에너지技術評價模型을 에너지-經濟模型(Energy-economy models), 最適化模型(Optimizing models), 産業模型(Industry models), 需要處別 模型(Sectroial demand models), 그리고 에너지시스템模型(Energy system models) 등 5가지 下位模型으로 구분하고 있다.²⁴⁾

1. 非에너지生産者(Nonenergy producers)

에너지需要의 대부분은 製造部門에서 製品을 생산하는 中間材(投入財)로 투입된다. 그러나 에너지技術評價模型들은 이들 中間財의 需要, 특히 에너지需要를 처리하는 方法이 매우 상이하다. 이러한 差異點의 대부분은 集計의 水準, 代替性, 動態性 및 趨勢 등의 처리과정에서 발생된다.

1) 集計(Aggregation)

모든 模型들은 産業部門의 에너지需要를 고려한다. 에너지-經濟 模型의 경우 産業部門의 生産物을 에너지와 非에너지部門으로 나누어 집계하기도 하고, 통합해서 집계하기도 하며, 경우에 따라서는 산업부문을 20개 이상으로 나누어 집계하기도 한다. 물론 각 모형들이 각기 다른 目的으로 設計되었기 때문에 差異는 있으나 集計水準을 比較함으로써 에너지價格變化에 대한 産業部門의 影響을 測定할 수 있다. 에너지시스템模型에서는 電力 또는 가스와 같은 에너지源別로 산업부문의 에너지수요를 집계하는 반면에 部門模型에서는 電力과 같은 하나의 에너지를 대상으로 需要部門에 초점을 맞추어 집계한다.

2) 代替關係(Substitution)

製品의 生産過程에 투입되는 에너지의 代替關係는 燃料間 代替(Interfuel substitution)와 生産要素間 代替(Factor substitution)의 두가지 형태로 구분할 수 있으며, 集計水準에서의 代替性은 完全代替性

22) Hogan and Parikh(1977) 참조.

23) Weyant(1976), Parikh and Gordon(1978), 그리고 특히 Hogan과 Parikh(1977)에 제시된 에너지技術評價模型의 分類基準에 대해 언급한 내용을 인용한 것임.

24) Eden et al.(1981) 참조.

(Perfect substitutability) 또는 完全補完性(Perfect complementarity)으로 나누어진다. 에너지技術評價模型에서 代替性を 표시하는 주요 接近方法을 소개하면 다음과 같다.

(1) 固定係數를 사용하는 方法(完全補完性)

(2) 經驗的 資料의 計量經濟的 分析 結果에 근거를 둔 行態關係式을 사용하는 方法(計量經濟的 表現方法)

(3) 代替가능한 에너지技術의 工學的 概念을 사용하는 方法(工學的 表現方法)

固定係數를 사용하는 方法에서 國民生產(GNP)의 百分을 감소는 에너지사용량의 百分을 감소로 바로 연결되지만 나머지 두 方法의 경우에는 燃料間 代替나 生産要素間 代替를 고려하므로써 GNP의 영향을 덜 받게 된다. 에너지시스템模型이나 部門模型은 모두 에너지부문이 他산업부문에 미치는 經濟的인 影響을 무시함으로써 에너지需要를 過大評價하는 弱點이 있으므로 에너지-經濟模型에서는 이를 보완하기 위해 모형내에 燃料間 代替 뿐만 아니라 生産要素間 代替關係를 포함시키고 있다.

3) 動態性(Dynamics)

대부분의 에너지技術評價模型들이 動的 分析를내에서 經濟變數를 다루지만 각 模型의 豫測力은 서로 다르다. 模型의 動態性은 計劃期間의 設定과 관련시켜 설명할 수 있다. 첫째, 短期豫測模型(Miopic models)에서의 動態性은 현재 시점에 기초한 經濟變數들만을 고려하므로 의사결정의 적용범위가 短期的이다. 둘째, 長期 豫測模型(Clairvoyant models)에서의 動態性은 현재 시점과 미래 시점을 모두 고려한 經濟變數들을 사용하므로 의사결정의 적용범위가 長期的이 된다. 長期 豫測模型에서 資本스톡과 같은 주요 變數는 어느 한 시점에 集中的으로 配分되는 것을 피하기 위하여 對象期間 中 漸進的 調整이 가능하도록 설계되어 있다.

4) 趨勢(Trends)

대부분의 模型들이 단순한 趨勢值를 적용하여 중요한 外的 要因들의 영향을 처리한다. 예를 들어 에너지-經濟模型에서는 長期 産業成長을 결정하는 ① 인구, ② 노동력, ③ 노동생산성 등의 基準變數(Standard variables)들을 정의하고, 그들의 시간에 따른 추세를 사용한다. 에너지시스템模型과 部門模型에서도 실적치를 근거로 추정된 추세를 연장

적용하여 사용한다.

한편 價格에 민감하게 반응하는 模型에서 에너지시스템이 70년대초와 비슷한 均衡狀態에 있고, 에너지均衡價格이 이런 낮은 상태로 지속된다면 에너지需要의 豫測值는 GNP와 비례관계에 있는 것으로 분석된다. 그러나 價格의 敏感度를 고려하지 않는 典型的 模型에서는 에너지需要가 價格效果, 輸入效果, 變動效果 등과 관련되어 있으나 명시적으로 고려하지는 않는다.

2. 에너지生産者(Energy producers)

에너지시스템을 설명하는데 모든 模型들은 工學的 表現을 사용한다. 그러나 工學的 表現方法들도 集合의 水準, 代替程度, 動態性 및 趨勢의 適用方法에 따라 다르게 나타난다.

1) 集計

대부분의 模型들이 에너지를 電力과 非電力에너지로 나누어 集計하나 어떤 모형에서는 구분없이 集計하는 경우도 있다. 에너지部門에서 생산되는 에너지製品은 5-20개 정도 구분하여 집계되며, 에너지-經濟模型의 경우에는 지역별로 구분하여 집계되지는 않으나 일부 에너지시스템模型의 경우에는 에너지資源 供給地域과 需要地域을 분류하고, 地域別로 集計하기도 한다.

2) 代替關係

모든 模型들이 석유, 가스, 석탄 등의 에너지源을 電力에너지로 변환가능하도록 에너지源間 代替性を 고려하고 있으며, 또한 대부분의 모형들이 석유와 가스 및 石炭의 合成燃料間 代替性を 고려하고 있다.

3) 動態性

근본적으로 非에너지生産者의 動態性에 관한 내용과 일치한다.

4) 趨勢

대부분의 模型들이 단순한 趨勢值를 적용하여 중요한 에너지관련 파라미터들을 처리한다. 예를 들어 靜態模型(Static models)에서는 에너지기술의 적용범위와 공급능력에 대한 制約條件, 이용 가능한 자원의 스톡량 및 에너지資源의 價格 등에 관한 趨勢值를 명시적으로 표현하는 반면에 動態模型(Dynamic models)에서는 資源價格의 趨勢值가 累積採掘函數로 표시되며, 期別로 資源採掘費用과 같다는 가정하에서 계산되며, 한편으로 모형의 내부에서

新技術의 供給能力擴大를 制約하기 위해 最大成長率을 부여하기도 한다.

3. 消費者(Consumers)

1) 集計

일반 모형들에서 最終需要部門의 集計量은 生産部門의 集計量과 일치한다. 에너지-經濟模型에서 最終需要는 消費, 投資, 政府支出 및 純輸出 등으로 구분하여 집계된다. 最終需要는 경우에 따라 直接推定하기도 하지만 최종사용자(end-users)의 行態와 관련된 資料를 이용하여 間接推定하는 경우도 있다.

2) 代替關係

代替關係는 앞서 언급한 바와 같이 燃料間代替와 要素間代替로 구분되며, 이는 模型內에서 암묵적이든 명시적이든 完全補完性, 計量經濟的代替, 工學的代替 등으로 定型化된다. 에너지-經濟模型에서는 非에너지제품과 에너지제품간 相對價格을 통해 에너지가격에 대한 代替效果를 계산한다. 한편 에너지시스템模型에서는 非에너지제품의 價格이 에너지제품의 價格變化에 영향을 받지 않는 것으로 假定하기 때문에 需要函數는 단지 固定價格體系하에서 社會全體의 支拂意思만을 표시할 뿐이다.

3) 動態性

근본적으로 非에너지生産者의 動態性에 관한 내용과 일치한다.

4) 趨勢

근본적으로 非에너지生産者의 趨勢에 관한 내용과 일치한다.

4. 均衡메카니즘(Balancing Mechanism)

均衡메카니즘은 에너지기술평가모형들을 구분하는 중요한 源泉(Source)이다. 모든 모형들은 자원과 생산물에 관한 實物市場의 均衡메카니즘을 가지고 있으며, 화폐의 흐름을 명시적으로 고려할 경우 貨幣市場의 均衡메카니즘을 포함하게 된다. 均衡을 표현하고 있는 行態方程式들은 모형마다 차이가 있어서 均衡메카니즘과 관련되 각 模型의 目的과 動態性을 고찰해보면 模型間比較가 가능해진다.

1) 目的(Objectives)

모든 模型은 수용공급 구조에 따라 實證模型(positive models)과 規範模型(nomative models)로

구분된다. 實證模型은 효율을 극대화하려는 消費者의 行態와 이윤을 극대화하려는 生産者의 行態를 假定하고, 競爭市場을 통해 相對價格이 다른 여러 에너지源과 製品에 대한 均衡價格 均衡需給量을 도출하기 위해 市場均衡點을 찾는다.

規範模型은 생산과 소비의 가능한 過程을 기술한 후 生産과 消費部門이 특정한 目標函數를 최대화하도록 행동한다고 假定한다. 이 모형에서의 均衡은 모든 實物的 흐름과 生産과 消費活動이 목적함수를 최대화시키는 수준에 있을 때 이루어진다.

2) 動態性

均衡메카니즘의 動態性은 특정한 모형내에서 고려하는 生産과 消費의 動態性에 의존한다. 만일 생산과 소비의 동태성에 대한 처리가 近視眼的(短期的)이라면 市場均衡의 決定力도 近視眼的일 수 밖에 없다. 마찬가지로 長期的 眼目을 가지고 생산과 소비의 동태성을 처리한다면 長期的인 市場均衡을 다룰 수 있다.

IV. 에너지技術評價模型의 分類

앞서 언급된 분석틀을 적용해서 다양한 에너지技術評價模型들의 주요한 特徵들을 단순화시키며 模型間比較가 가능해진다. 표 1은 이하에서 언급될 에너지技術評價模型들의 比較基準에 따라 分流, 整理한 것이다.

표 1. 에너지技術評價模型의 分流.

區分	模 型
에너지시스템模型 (Energy system models)	Brookhaven模型(BESOM, DESOM, TESOM, RESOM) SRI模型(SRI, Gulf, LLL, DFI변형) Haefele-Manne模型, ETA模型 Nordhaus模型 FOSSIL I模型
部門模型 (Sector models)	ALPS模型 Manne 電力模型
에너지-經濟模型 (Energy-economy models)	ETA-MARCO模型 H-J/Brookhaven模型 PILOT模型 WEM模型

표 2a. 에너지시스템모델의 비교(에너지생산자).

모델명	개발자	개발년도	접근방법	에너지생산자			
				集計	代替關係	動態性	
(Brookhaven 모델)							
BESOM 모델	Cherniavsky	1974년	過程分析,	9개 센서스地域에서	상세한 工學的	靜態的	資源價格에 대한
TESOM 모델	Kyndes and Cherniavsky	1977년	線形計劃法(LP)	5-10개 에너지資源 集計	過程 表現	動態的, 短期的	趨越值을 外生的으로 반영
DESOM 모델	Cherniavsky	1977년				動態的, 長期的	-
RESOM 모델 (SRI 시스템 모델)	Goettle	1977년				動態的	BESOM 모델과 同一
SRI 모델	Cazalet	1973년	過程分析,	에너지資源: 5-10개	市場占有率 方程式	動態的, 계획기간	에너지 變換工程
Gulf 모델	SRI	1977년	一般均衡分析,	地域: 10-15개	에 의한 燃料配分,	중 資源이 偏重	에서 技術進歩率
LLL 모델	Rousseau 등	1978년	意思決定分析.	可變的	상세한 工學的	配分되지 않도록	의 趨越值을 外生
DFT 변형	DFT社	1978년		可變的	過程 表現.	調整可能	的으로 반영
Haefele-Manne 모델	Haefele and Manne	1975년	計量經濟規模, 過程分析,	美國 全域의 석유, 가스, 석탄, 우라늄 등의 에너지資源 集計	상세한 工學的	動態的, 長期的	-
ETA 모델	Manne	1976년	線形計劃法(LP)	上同	過程 表現	發電所 壽命은 30년으로 계산	-
Nordhaus 모델	Nordhaus	1978년	計量經濟模型, 過程分析, 非線形計劃法	上同	上同	上同	-
FOSSIL I 모델	DSD 그룹	1977년	시뮬레이션, 部分均衡分析	美國 全域의 석유, 가스, 석탄, 핵연료 등	4가지 에너지源이 電力으로 變換可能	動態的, 長期的	-
					4가지 에너지源과 電力이 집계된 生産 函數를 사용.	發電所 建設準備 期間 고려	

資料: Richels and Weyant(1979), ibid, p.p 202-3.

표 2b. 에너지시스템 모델의 비교(에너지需要者, 均衡에카니즘)

모델명	에너지需要者(에너지生産者와 消費者)			均衡에카니즘		
	集計	代替關係	動態性	趣越	目的	
(Brookhaven 모델) BESOM 모델 TESOM 모델	9개 센서스 地域에서 15-20개 에너지 最終 需要處 集計	固定需要 假定下 燃料間 代替 고려, (工學的 過程) 表現方法	靜態的, 動態的, 短期的 動態的, 長期的 情態的	最終生産物 需 要의 趣越值을 外生的으로 반영.	最終生産物 需要를 만족 시키는데 소요되는 供給 費用的 最少化	에너지生産者에 의해 決定됨.
DESOM 모델 RESOM 모델 (SRI 시스템 모델)	最終需要處: 15-20개 地域: 8개 可變的 可變的	固定需要 假定下 燃料間 代替 고려, (工學的 過程 表現) 價格彈力的 需要	動態的, 계획기간중 資本스투이 偏重配分 되지 않도록 調整可. 行動遲延을 假定한 消費者	에너지需要의 趣越值을 外生 的으로 반영. 上同	市場의 不完全성과 人間 行動의 不完全性을 반영 하는 市場均衡	에너지生産者와 에너지需要者의 相互作用에 의해 決定됨.
Haefele- Manne 모델	電力과 非電力에너지 로 구분하여 集計	電力과 非電力에너지 之間 代替不可能, 價格彈力的 需要.	明示的으로 고려하지 않음 上同	에너지需要의 趣越值을 外生 的으로 반영. 上同	生産者剩餘와 消費者剩餘 의 合으로 最大化 上同	에너지生産者에 의해 決定됨. 上同
ETA 모델	上同	電力과 非電力사이의 交叉彈力性을 고려, 價格彈力的 需要.	上同	上同	上同	上同
Nordhaus 모델	家庭用, 商業用, 産業 用, 輸送用 및 電力用 으로 세분화하여 集計	部門別 에너지 最終 需要에 대한 자체 價格彈力性 고려, 價格彈力的 總需要, 市場占有率 方程式 에 의한 燃料 配分.	基準時點의 彈力值가 計劃時間 中 線形으로 증가. 動態的, 長期的, 計劃 期間中 資本스투이 偏 重되지 않도록 調整可	部門別 에너지 需要를 外生的 으로 반영. 上同	上同	需要와 供給의 相互作用에 의해 決定됨. 上同
FOSSIL I 모델	電力, 석유, 가스, 석탄으로 나누어 集計	市場占有率 方程式 에 의한 燃料 配分.	上同	上同	計劃基幹중 每 時點마다 시물레이션을 통한 需要 와 供給의 均衡	上同

1. 에너지시스템模型(Energy system models)

典型的인 에너지시스템模型들은 非에너지生産者와 消費者를 구분하지 않고 需要者라는 범주로 통일하여 표현하며, 모든 에너지시스템模型들은 에너지需要를 固定需要로 가정하거나 價格에 민감하게 반응하는 變動需要로 가정한다. 그러나 價格이 상승함에 따라 수요가 감소한다고 가정하는 모형에서조차도 非에너지製品的 價格은 에너지價格에 影響을 받지 않는 것으로 假定하고 있다. 따라서 이들은 모두 部分均衡模型에 속하며, 에너지-經濟模型과는 달리 모든 에너지製品的 價格을 내생적으로 계산한다. 표 2는 에너지시스템模型들을 比較한 것이다.

1) Brookhaven 模型(BESOM, DESOM, TESOM 및 RESOM 模型)

미국의 Brookhaven 국립연구소(BNL)은 基準에너지시스템의 概念體系내에서 4가지 에너지技術 評價模型을 개발하였다. 基準에너지시스템은 에너지자원의 抽出로부터 加工, 變換過程을 거쳐 分配, 貯藏 및 最終消費에 이르기까지 一連의 에너지 흐름을 추적하는 會計的 構造를 가지며, 過程分析을 사용하여 에너지시스템을 기술하고 있다. Brookhaven 국립연구소에서 개발된 최초의 에너지시스템모형은 1974년 개발된 BESOM(Brookhaven Energy System Optimization Model) 模型으로 靜態的 最適化模型(static model)에 속하며, 국내 中에너지시스템을 분석한다. 한편 1977년 개발된 DESOM(Dynamic System Optimization Model) 模型²⁵⁾은 動態的 最適化模型(Dynamic model)으로 장기 에너지시스템 분석을 대상으로 삼고 있다. 시간에 따라 에너지시스템을 단계별로 최적화하는 TESOM(Time stepped System Optimization Model) 模型²⁶⁾은 動態적이지만 단기예측모형이다. 또한 RESOM(Regional Energy System Optimization Model) 模型²⁷⁾은 靜態적이지만 지역에너지시스템의 최적화를 위한 모형이다.

이상의 4가지 Brookhaven 模型들은 모두 最適化

模型으로 一連의 선형제약조건하에서 目的函數를 最適化시키는 線形計劃法(LP)을 이용하고 있다. 定型化에 있어서 變數들은 여러 에너지 變換活動의 水準을 나타낸다. 한편 制約條件들은 최종수요를 만족시키는 數量均衡方程式으로 표현되며, 變換活動들은 미리 규정(BESOM과 RESOM 모형)되거나 주어진 최종수요를 상회하는 수준으로 설비수준을 확장하는 것은 불가능(TESOM과 DESOM 모형)하도록 모형이 설계되어 있다.

均衡메카니즘을 살펴보면 Brookhaven 模型들의 目的函數는 特정의 最終에너지 需要를 충족시키는데 필요한 費用을 最小化하도록 설정되어 있다. 따라서 이러한 제약조건하에서 도출된 目的函數의 解는 非에너지製品的 價格이 不變이라는 제한적 가정과 最終에너지 製品에 대한 需要가 固定되어 있다는 제한적 가정하에서만 競爭的 均衡解로 해석이 가능하다.

2) SRI 模型(SRI, Gulf, LLL, DFI 變形)

스탠포드연구소의 SRI 模型은 처음에 걸프석유회사의 合成燃料 技術에 대한 投資決定을 돕기 위해 1977년 고안되었으며, 그 후에 SRI와 걸프석유회사 간 연구협의를 통해 몇 차례의 수정을 거쳐 개발되었다. LLL(Lawrence Livermore Laboratory) 模型²⁸⁾은 SRI 模型을 더욱 융통성있게 변화시켰고, DFI(Decision Focus, Inc.)社는 이 模型의 이용을 위해 一連의 소프트웨어를 개발하였다. LLL 모형이나 DFI 모형(Variants)²⁹⁾은 價格에 민감하게 반응하는 에너지需要를 고려한 모형들이다.

SRI 模型들은 Brookhaven 模型들과 마찬가지로 모형내에 많은 數量均衡方程式들이 포함하고 있다. 그러나 이러한 수량균형방정식들은 Brookhaven 모형과는 달리 非線形으로 체계화되어 있어서 近似值를 구하는데 反復節次法(Iterative procedure)을 사용한다. 그러나 SRI 模型들은 市場均衡解를 구하는데 最適化方法을 사용하지는 않는다.

일반화된 네트워크 흐름문제에 정형화된 SRI 模型들의 均衡메카니즘을 보면 反復節次를 통해 구하

25) 보다 자세한 내용은 Cherniavsky(1977)을 참조할 것.

26) 보다 자세한 내용은 Kydes and Cherniavsky(1977)을 참조할 것.

27) 보다 자세한 내용은 Goettle(1977)을 참조할 것.

28) 보다 자세한 내용은 Rousseau et al.(1978)을 참조할 것.

29) 보다 자세한 내용은 Decision Focus Inc.(1978)을 참조할 것.

고자하는 解는 각각의 에너지 변환과정에 투입되는 生産要素들과 產出物의 市場價格을 구하는 것이다. 均衡解는 한편으로 市場의 不完全성과 人間行爲를 반영하고 있으며 다른 한편으로 價格統制와 다른 制約條件의 도입에 의해 유발되는 不足分들을 설명해 주도록 節次化되어 있다. 따라서 이 모형들은 이상적인 完全競爭市場模型으로는 현실의 經濟行爲를 설명할 수 없다는 점을 강조하여 모두 不完全競爭市場模型을 도입, 적용하고 있다.

3) Haefele-Manne 模型

Haefele-Manne 模型(H-M 模型)³⁰⁾은 국제응용시스템分析研究所(International Institute of Application System Analysis : IIASA)의 후원으로 1975년 Haefele과 Manne에 의해 개발되었다.

Haefele-Manne 模型은 Brookhaven 模型이나 SRI 模型보다도 더 포괄적이고 종합적이다. 石油과 가스, 石炭, 우라늄 등 3가지 에너지源만이 고려되었으며, 각각의 에너지源은 電氣에너지와 非電氣에너지로 변환이 가능하도록 모형이 고안되었다. 한편 에너지需要는 電力에너지와 非電力에너지로 나누어 고려하였으나 電力에너지와 非電力에너지의 代替關係는 고려하지 않았다. 市場均衡解는 生産者와 消費者剩餘의 合을 極大化함으로써 달성되며, 이는 에너지 供給費用과 保存費用의 合을 最少化시키는 결과로 해석할 수도 있다.

4) Manne의 ETA 模型

Manne의 ETA 模型은 非扇形計劃法(NLP)의 도입으로 Haefele-Manne 模型을 더욱 발전시킨 모형이다. Haefele-Manne 模型과 비교시 에너지生産者에 대한 고려사항은 일치하나 에너지消費 側面에서는 Haefele-Manne 模型이 고려하는 전력과 非전력 에너지의 需要의 彈力性 이외에 두 에너지間 交叉彈力性을 고려하여 에너지와 비에너지 生産에서 燃料間 代替性을 추가적으로 고려한다.

均衡메카니즘은 Haefele-Manne 模型에서와 같으며, 市場均衡解는 消費者와 生産者剩餘의 合을 極大化함으로써 달성되나 ETA 模型의 목적함수에 대한 雙對問題의 解는 에너지 供給費用, 燃料交替費用 및 保存費用의 合을 最少化시키는 것으로 해

석한다.

5) Nordhaus 模型

Nordhaus 模型³¹⁾은 1978년 예일대학의 Nordhaus에 의해 개발된 모형으로 供給側面에서는 Manne의 ETA 模型과 유사하지만 需要측면에서는 매우 다르다. 均衡메카니즘은 Haefele-Manne 模型이나 ETA 模型과 같으며, 市場均衡解는 生産者와 消費者剩餘의 合의 極大化로 표시되고, 目的含蓋의 雙對解를 에너지 供給과 保存費用의 最少化로 대안적 해석을 내릴 수 있다.

6) FOSSIL I 模型

FOSSIL I 模型은 Dartmouth System Dynamics Group에 의해 1977년 개발된 에너지시스템의 동적 시뮬레이션模型이다. 에너지生産者는 가스, 石油, 石炭, 電力 등의 부문에서 44개로 나누어 集計되며, 에너지需要는 所得水準과 價格에 의존하도록 되어 있으며, 가스, 石油, 石炭, 電力 등의 市場占有率은 相對價格, 便利性, 가격과 수량의 변동효과에 의해 결정된다.

均衡메카니즘은 供給과 需要가 매 시점마다 均衡을 이루도록 고안되었다. 에너지 生産部門에 존재하는 資本스톡을 生産要素로 투입했을 경우의 調整이 均衡을 달성하기 위한 최초의 메카니즘이다. 그러나 사용된 資本比率이 최대값을 보이면 에너지投入과 에너지代替는 解의 形態에만 의존하도록 되어 있다.

2. 部門模型(Sector Models)

部門模型(Sector models)은 에너지시스템을 구성하고 있는 여러 下位部門(Subsector)들을 보다 상세하게 분석하기 위한 目的으로 개발된 모형이다. 部門模型에서 에너지需要는 固定되었거나 價格에 민감하게 반응하는 變動的인 것으로 처리되고 있다. 본 절에서는 電力部門의 분석에 이용된 AEC의 ALPS 模型과 Manne의 電力模型을 소개하기로 한다. 部門模型에 대한 綜合比較는 표 3에 제시된 바와 같다.

1) ALPS 模型

原子力위원회(AEC)의 ALPS 模型³²⁾은 1972년 액

30) 보다 자세한 내용은 Haefele and Manne(1975)을 참조할 것.

31) 보다 자세한 내용은 Nordhaus(1978)을 참조할 것.

32) 보다 자세한 내용은 AEC(1972)를 참조할 것.

표 3a. 部門模型의 比較(에너지生產者).

模型名	開發者	開發時期	接近方法	에너지生產者		
				集計	代替關係	動態性
ALPS模型	미국 원자력 위원회(AEC)	1972년	費用/便益 分析 線形計劃法(LP)	석유, 가스, 석탄, 우라늄 등의 資源을 全國的으로 集計.	기저부하용 發電量에 對해서만 競爭을 弄 항 燃料間 代替 고려.	化石燃料 價格의 趨越值을 外生的으로 반영.
Manne模型	Manne	1974년	動的 計劃法(DP) 확률적 시뮬레이션	ALPS模型과 같음.	ALPS模型과 같음.	ALPS模型과 같음.

資料 : Richels and Weyant (1979), ibid, p. 213.

표 3b. 部門模型의 比較(에너지需要者, 均衡메카니즘).

模型名	集計	代替關係	動態性	趨越	均衡메카니즘	
					目的	動態性
ALPS模型	기저부하용 電力需要에 對해서만 全國的으로 集計.	電力需要는 固定需를 加정하므로써 燃料 間 代替 不고려	動的的, 長期的.	電力需要의 趨越值을 外生的으로 반영	주어진 固定 電力需要를 만족시키는데 소요되는 電力費用의 最少化.	需要와 供給의 相互 作用에 의해 決定됨.
Manne模型	기저부하, 중간부하, 첨두부하용 電力需要에 對해 全國的으로 集計	電力需要는 價格彈 力的인 變動需要를 加정하여 燃料間 代替 고려.	動的的, 長期的	電力需要의 趨越值 (基準案)을 外生的으로 반영.	市場均衡은 生産者와 消費 者剩餘의 極大化로 이를 目的으로 연속적으로 시뮬레이션.	需要와 供給의 相互 作用에 의해 決定됨.

체-금속 고속증식로(LMFBR) 計劃의 環境影響評價에서 費用/便益分析을 위해 개발된 모형이다. 이 모형은 電力生産에 대한 資料를 전국적으로 集計하여 基底負荷用 發電設備로부터 尖頭負荷用 發電設備에 이르기까지 燃料間 代替를 고려하고 있다. 모형은 多期間을 고려하는 動態模型이며, 電力需要와 에너지價格에 대한 入力資料 및 化石燃料의 價格에 대한 入力資料는 外生적으로 계산된 자료를 사용한다.

基底負荷用 電力에 대한 需要는 燃料間 代替를 고려하고 있으나 非에너지生産物의 生産에 투입되는 生産요소중 資本과 에너지間 代替는 고려하지 않는다. 모형이 동태적이기는 하지만 電力需要를 固定的이라고 假定하였기 때문에 에너지 가격변화에 따른 需要變動效果를 탄력적으로 반영하지 못하는 限界가 있다. 均衡메카니즘을 보면 이 모형의 目的函數는 外生적으로 주어진 電力需要를 만족하는데 필요한 電力供給費用을 最小化하도록 構成되어 있다.

2) Manne의 電力模型

1974년 Manne에 의해 개발된 電力模型³³⁾은 AEC의 LAPS 模型과 전반적으로 비슷하나 集計次元에서 電力需要가 價格에 대해 민감하게 반응한다는 내용을 포함하고 있다는 점이 다르다. 이 모형은 國際原子力機構(IAEA)에 의해 全世界的으로 보급된 WASP 模型(Wien Automatic System Planning model)³⁴⁾의 전신이기도 하다.

에너지 生産者에 대한 集計는 ALPS 模型과 같으나 에너지需要(비에너지 生産者와 消費者) 側面에서 電力需要는 전국적으로 집계되나 需要形態는 기저부하, 중간부하, 첨두부하 등으로 구별된다. 전력 生産에 투입되는 非에너지와 다른 燃料의 代替關係는 電力需要曲線에 의해 표시되는데 이 수요곡선은 본질적으로 Haefele-Manne 模型의 電力需要曲線과 같다. 이 모형에서 사용하는 電力需要 展望値는 에너지수요 중 電力部門이 차지하는 比重과 電力需要 成長率을 고려하여 산출된 값을 사용한다. 模型의 目的函數는 生産者剩餘와 消費者剩餘를 합한 값을 最大化하도록 설정되어 있다.

3. 에너지-經濟模型(Energy-economy Models)

에너지-經濟模型은 모든 生産物의 價格과 數量을 내생적으로 동시에 해결하도록 構成되어 있다. 에너지-經濟模型에 대한 綜合比較는 표 4에 제시된 바와 같다.

1) ETA-MARCO 模型

ETA-MARCO 模型은 ETA 模型의 증보판으로 ETA 模型에서 工學的 概念으로 표현된 에너지시스템과 자본, 노동 및 에너지 투입량 등 生産요소 的 대체關係를 가정하는 巨視經濟 成長模型을 統合한 模型이다. 따라서 에너지部門에 적용된 概念은 ETA 模型에 적용된 개념과 동일한 構造를 갖는다.

非에너지生産者의 에너지투입과 消費者의 에너지 最終需要는 ETA 模型에서와 마찬가지로 電力과 非電力에너지로 나누어 집계되나, 生産要素間 代替關係는 巨視經濟 成長模型에서 사용되는 Cobb-Douglas 生産函數³⁵⁾를 도입하여 電力과 非電力에너지 투입간 대체를 고려한다. 한편 需要側面에서 消費와 貯蓄(投資)에 대한 消費者의 意思決定基準은 消費者가 現在 消費로부터 얻는 화폐의 단위당 便益과 현재 소비를 유보(貯蓄, 投資)함으로써 얻는 未來 消費에 대한 便益이 같아지도록 配分하는 것이다.

市場均衡解를 구하는데에는 동태적인 非線形 最適化技法을 이용하여 시뮬레이션하며, 계획기간중 연속적으로 投資와 消費의 均衡을 最適化하기 위하여 Maximand는 '할인된 消費者 效用'을 사용하며, 소비에 대한 效用函數는 代數函數로 표시된다.

2) H-J/BESOM 統合模型

Hoffman과 Jorgenson에 의해 개발된 H-J/BESOM 統合模型(또는 LITMJ/BESOM 統合模型이라고도 함)은 1974년 Hudson과 Jorgenson에 의해 개발된 H-J 模型과 Brookhaven 국립연구소의 BESOM 模型의 통합에 의해 이루어졌다. 따라서 H-J 模型의 非에너지生産者와 消費者의 行動에 관한 計量經濟의 概念이 BESOM 模型의 에너지部門에 대한 상세한 工學的 概念과 결합되어 있다.

産業聯關表(Input-Output Table)를 사용한 計量經濟模型인 H-J 模型에서 內生部門은 9개의 産業部

33) 보다 자세한 내용은 Manne(1974)를 참조할 것.

34) 보다 자세한 내용은 IAEA(1984)를 참조할 것.

표 4a. 에너지-經濟模型의 比較(에너지生産者, 非에너지生産者).

模型名	開發者	開發時期	接近方法	에너지生産者			非에너지生産者				
				集計	代替	動態性	趨越	集計	代替關係	動態性	趨越
ETA-MARCO 模型	Manne	1978年	過程分析, 非線形(NLP) 生産函數.	ETA 模型과 같음.	ETA 模型과 같음.	ETA 模型과 같음.	ETA 模型과 같음.	資本, 勞動, 에너지를 生産要素로 하나의 集計的 生産函數 假定.	에너지와 投入要素 間 代替는 CES生産 函數 이용, 진력과 비진력에너지의 燃料間 代替는 Cobb Douglas 生産函數 이용	動態的, 長期的. 資本스톡은 계획 기간중 固定比率로 감소하는 것으로 假定.	인구, 노동, 노동생 산성 등 標準變數의 趨越值를 外生 的으로 반영.
H-J/BESOM 統合模型	Hoffman and Jorgenson	1977年	過程分析, 産業聯關分析 (可變係數).	BESOM 模型과 같음.	BESOM 模型과 같음.	BESOM 模型과 같음.	BESOM 模型과 같음.	4개 部門으로 분류, 각 部門은 資本, 勞動, 에너지를 生産 要素로하는 KLEM 生産函數 假定.	5개 에너지部門과 4개 비에너지 投入 要素間 代替는 CRS 生産函數를 이용.	動態的, 長期的, 계획기간중 資本이 偏重配分 되지만 調整 可能.	上同
PILOT模型	Dantzig and Parikh	1976年	産業聯關分析 (固定係數), 變形計劃法 (LP)	석유, 가스, 석탄, 우라늄	상세한 工學的 過程 표현	PILOT 模型과 같음.	PILOT 模型과 같음.	18개 非에너지 産業 部門으로 분류하여 集計	固定 投入產出係數 적용, 要素間 代替를 고려하지 못함.	動態的, 長期的, 異質的 資本스톡 異時點間 配分되도록 고려.	上同
WEM模型	Parikh	1978年	産業聯關分析 (固定係數), 시뮬레이션, 規範的 方法	PILOT 模型과 같음.	PILOT 模型과 같음.	PILOT 模型과 같음.	PILOT 模型과 같음.	PILOT모형의 18개 部門을 7개 부분으로 통합하여 集計	部門別 生産函數를 이용하여 에너지와 生産要素間 代替 고려.	PILOT模型과 같음.	上同

資料 : Richels and Weyant(1979), ibid, p.p 216-7.

표 4b. 에너지-경제模型的의 比較(에너지消費者, 均衡메카니즘).

模型名	에너지消費者				均衡메카니즘	
	集計	代替關係	動態性	趨越	目的	動態性
ETA-MARCO 模型	非에너지 生産者와 同一함.	非에너지 生産者와 同一함.	非에너지 生産者와 同一함.	非에너지 生産者와 同一함.	市場均衡은 동태적인 非線形(NLP)函數를 통해 할인된 消費者 效用이 極 大化되도록 시뮬레이션됨.	需要와 供給의 相互 作用에 의해 決定됨.
H-J/BESOM 統合模型	9개 産業部門의 最終 需要가 消費, 投資, 政府支出 및 輸出/ 輸入으로 나누어 集計.	消費者에 대한 投資- 消費, 勞動-餘暇, 價格 價格彈力性 및 燃料間 代替 고려.	動態的, 長期的. 全期間에 걸쳐 投資額 이 累積值로 표시됨.	政府支出과 輸出 의 趨越值가 外生 的으로 명시됨.	生産要素市場과 商品市場 에서의 均衡.	均衡은 同質의 이용 가능한 資本財과 연계되어 全期間에 걸쳐 연속적으로 決定됨.
PILOT模型	9개 에너지部門과 18개 非에너지 部門으로 구분하여 에너지 消費 量이 集計.	주어진 所得水準下에서 固定比率로 分배되므로 代替關係 고려불가능. 電力과 非電力사이의 效用函數를 통해 勞動- 餘暇, 에너지-非에너지 사이의 代替關係 고려.	消費은 時間經過에 따 라 감소할 수 없는 것 으로 假定.	政府支出과 人口 水準의 趨越值는 外生的으로 반영.	經濟의 物理的 生産能力的 한도내에서 累積消費의 極大化	需要와 供給의 相互 作用에 의해 決定됨.
WEM模型	5개 에너지部門과 7개 非에너지 部門으로 구분하여 에너지 消費 量이 集計.		動態的, 長期的. 割引率은 외생적으로 계산됨.	生産水準은 인구 와 소득에 대한 線形函數로 표시 됨.	市場均衡은 線形(LP)函數 로 표시된 할인된 消費者 효용이 極大化되도록 시뮬레이션됨.	需要와 供給의 相互 作用에 의해 決定됨.

門으로 구성되었으나 統合模型에서는 BESOM 모형에서 고려한 에너지부문을 상세하게 고려하여 51개부문으로 나누었다. 그중 11개 부문이 에너지源生産部門, 20개 부문이 에너지變換部門, 16개 부문이 에너지製品 生産部門 그리고 4개 부문만이 非에너지 生産部門으로 구성되어 있다. 이 모형에서의 生産函數는 産業聯關分析에서 전형적으로 고려하는 CRS 生産함수를 假定하고 있다.

市場에서의 均衡解는 均衡方程式을 통해 계산되며, 생산자와 소비자 또는 생산자들 사이의 相互作用을 통해 去來가 이루어지며, 거래의 결과로 均衡量과 價格이 계산된다. 均衡은 계획기간에 걸쳐 動態의 關係로 작동되는 同質의 資本財供給과 더불어 매 기간마다 연속적으로 결정되며, 이때의 均衡은 部分市場均衡이 아닌 모든 시장에서의 一般市場均衡이다.

3) PILOT 模型

PILOT 模型은 1978년 스탠포드대학의 SOL 연구소에서 政府의 政策이 국민의 生活水準에 影響을 미치는 정도를 測定하기 위한 目的으로 개발되어 에너지部門에 적용한 모형이다. 이 모형도 H-J/BESOM 統合模型과 마찬가지로 産業聯關表를 이용하고 있으나 이와는 달리 巨視經濟 成長模型에 주어

지는 명시적인 構造가 없으며, 단지 投入要素에 대한 關係(固定係數法 사용)만을 動的 線形計劃法(Dynamic LP)으로 표시하고 있다. 또한 이 모형은 다른 에너지-經濟模型과는 달리 生産要素間 代替性(完全補完性 假定)을 고려하지 않았으나 에너지部門에서의 燃料間 代替는 工學的인 關係를 수식화하여 모형내에서 고려하고 있다.

이 모형의 가장 큰 特徵은 에너지部門의 工學的變換過程을 세분화하여 다루는 非集計的 시스템模型이라는 點과 에너지部門의 典時點間 資源配分과 供給能力의 制限에 대한 시험에서 規範的 接近方法을 택하고 있다는 點이다. 한편 目的函數는 경제의 물리적인 공급능력의 한도내에서 허용되는 累積消費量을 最大化하도록 설정되어 있다. 均衡解는 또한 대상기간 중 소비수준을 최대화하는데 필요한 産業의 部門別 最適 投資水準을 동시에 산출해 준다.

4) WEM 模型

厚生均衡模型(Welfare Equilibrium Model : WEM 模型)은 1978년 Parikh에 의해 개발되었다. 이 모형에서 에너지需要者(非에너지 生産者)의 效用函數는 餘暇-勞動時間의 函數로 표시되며, 代替函數들의 階層的 構造(Hierarchy)로 정형화되어 있다. WEM 模型에서의 産業聯關分析은 그림 4에서와

35) Cobb-Douglas 生産函數는 經濟學者인 P.H. Douglas가 數學者인 C.W. Cobb의 도움을 받아 개발한 生産함수로 總生産量을 Q, 勞動投入量을 L, 資本投入量을 K, 에너지投入量을 E라 할 때 다음과 같이 정의된다.

$$Q = AL^\alpha K^\beta E^\gamma \text{ (단, } \alpha, \beta, \gamma > 0, \alpha + \beta + \gamma = 1) \quad (1)$$

여기서 A, α , β , γ 등은 그 사회에서 주어지는 파라미터들이다.

(1)식을 投入量(L), 資本量(K), 에너지投入量(E)에 관해 각각 편미분하여 정리하면 각각

$$\frac{L}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial L} = \alpha, \quad \frac{K}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial K} = \beta, \quad \frac{E}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial E} = \gamma$$

등이 되므로, α , β , γ 는 각각 生産의 勞動彈力性, 生産의 資本彈力性, 生産의 에너지彈力性인 동시에 生産要素의 分配率이 된다.

또한 Cobb-Douglas 生産函數는 CRS 生産函數(수학적인 표현으로는 '1차동차함수'임)이기 때문에 다음과 같이 표시되는 '오일러의 定理(Euler's theorem)'가 성립한다.

$$Q = \frac{\partial Q}{\partial L} \cdot L + \frac{\partial Q}{\partial K} \cdot K + \frac{\partial Q}{\partial E} \cdot E$$

Cobb-Douglas 生産函數가 1차동차함수라는 것은 經濟異論에 입각할 때 매우 중요한 의의를 갖는다. 完全競爭市場에서는 生産要素의 價格은 生産要素의 限界生産力에 의해 결정되기 때문이다. 그러므로 $\frac{\partial Q}{\partial L}$ 은 勞動의 限界生産力이고, 따라서 賃金率이 된다. 마찬가지로 $\frac{\partial Q}{\partial K}$, $\frac{\partial Q}{\partial E}$ 는 각각 利率, 에너지價格이 된다. 그러므로 $(\frac{\partial Q}{\partial L}) \cdot L$ 은 임금율에 노동량을 곱한 값이므로 生産物의 勞動分配分이 되며, 마찬가지로 $(\frac{\partial Q}{\partial K}) \cdot K$, $(\frac{\partial Q}{\partial E}) \cdot E$ 는 각각 生産物의 資本分配分, 生産物의 에너지分配分이 된다. 그런데 이들의 합이 產出量(Q)과 같으므로 產出量은 勞動, 資本 및 에너지의 分配分에 따라 과부족없이 분배된다는 것을 알 수 있다.

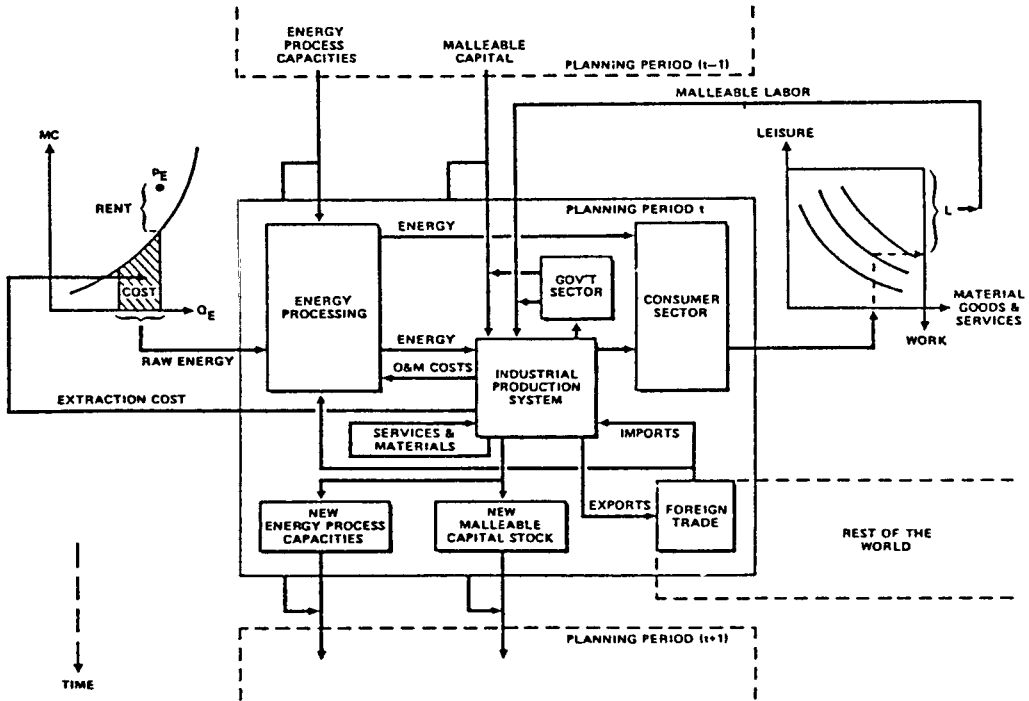


그림 4. 厚生均衡模型(WEM)에서 에너지와 經濟의 相互作用. 資料 : Parikh(1978).

같이 유연성있는 生産/消費 시스템을 갖추기 위해 일반화되어 있다.

WEM 모형은 PILOT 모델에서 기술한 에너지部門의 構造에 대한 工學的인 概念을 그대로 援用하고 있다. 非에너지 部門의 生産函數는 效用函數와 마찬가지로 산업부문별로 階層的 構造를 가지며, 産業部門의 產出量은 에너지제품, 노동, 자본 등의 함수로 표시하므로써 燃料間 代替와 生産要素間代替를 명시적으로 고려하고 있다. 均衡메카니즘을 살펴보면 WEM 모형의 目的은 ETA-MACRO 모형에서와 마찬가지로 계획기간 중 연속적으로 投資와 消費의 均衡을 最適化하는 것이나 ETA-MACRO 모형과는 달리 效用函數에서 여가시간을 포함시킴으로써 勞動-餘暇 사이의 相衡關係(trade-offs)를 명시적으로 고려하고 있다.

V. 多目的計劃法과 連繫模型

1. 多目的計劃法の 概要

國家에너지 戰略樹立을 포함하여 에너지部門에

대한 諸般 意思決定問題에는 環境에의 影響分析이라는 새로운 制限條件을 包含시켜야 한다. 이를 위하여 從來에 사용되어 왔던 傳統의인 單一目的(Single purpose or objective)의 에너지模型으로는 適切한 分析道具로서의 限界를 가져와 새로운 模型의 開發이 必要하게 되었다. 이러한 必要性에 副應하여 多目的計劃法(Multiple objective programming)이 에너지/환경부문에 導入되었다. 總 에너지費用의 最小化라는 目的과 環境에의 影響 最小化라는 二 목적에는 서로 相衡되는 部分이 存在한다. 이를테면 淸淨에너지의 사용증대는 環境에의 影響을 축소시키더라도 總에너지 費用 및 輸入依存度의 增加를 招來한다(그림 5 參照). 또한 에너지비용은 貨幣單位로서 定量的 測定이 가능하지만 環境汚染 排出에 대한 影響分析은 단순한 하나의 測定單位로서는 충분히 표현할 수가 없다. 一定期間 동안 특정에너지源으로부터의 總排出量과 같이 비록 淸량화가 가능하더라도 同一單位로써 測定될 수 없는 두 개 이상의 目的函數를 포함하고 위에서 말한 바와 같이 서로 相反되는 部分이 있을 때 意思決定에 유용한

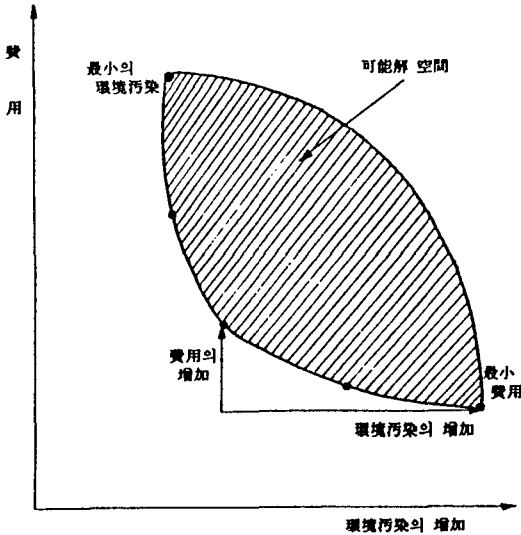


그림 5. 多目的 計劃法 目的函數間의 相衡作用.
 資料 : (KFA) Kernforschungsanlage, Intertemporal Capacity Expansion Models, Germany (1990).

分析道具를 제공할 수 있는 模型이 多目的 計劃法의 特徵이다. 現在까지 여러 분야에서 어느 特定部門의 意思決定을 위해 일부 적용되어 왔다(Psarras, 1990). BESOM 模型(Cherniavsky, 1974)이 代表的이라 할 수 있으나 에너지 技術評價模型으로서 具體的이고 細分化된 模型은 市場配分模型(MARKet ALlocation : MARKAL)이라 할 수 있다. MARKAL을 포함한 일반적인 多目的 線形計劃法(Multiple objective linear programming : MOLP)은 아래와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} \text{MAX : } Z(x) &= [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_p(x)] \\ \text{Subject to} \\ g_i(x) &\leq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

위의 MOLP는 p개의 目的函數로 構成되어 있고 $g_i(x)$ 는 意思決定變數 x 에 의하여 정의된 線形的 制約條件式이다. 多目的 線形計劃法에서는 既存의 線形計劃模型(LP)에서 目的函數의 適正性(Objective function appropriateness)의 假定條件이 배제된다. LP 問題에서의 解는 最適解(Optimal solution)인데

反하여 多目的 線形計劃 問題의 解는 劣等解(Non-dominated or efficient solution)이다. 이는 어느 目的函數의 增價가 나머지 目的函數 중에서 최소한 한 개 이상의 目的函數들에 대한 減少로서만 可能해지는 解이다. 즉 $k=1, 2, \dots, p$ 에 대해 $Z_k(x) \geq Z_k(x')$ 그리고 최소한 하나의 k 에 대하여 $Z_k(x) > Z_k(x')$ 를 滿足시키는 可能解 $x, x' \in X$ 가 存在하지 않을 때 可能해 $x', x' \in X$ 는 劣等解이다. 이상은 典型的인 劣等解의 정의이지만 최근에는 보다 더 具體的이며 制限的인 劣等解의 概念이 研究되고 있다(Lowe et al., 1984). 意思決定者는 劣等解 가운데 最終的으로 가장 選好되는 解(Preferred or best compromised solution)를 선택하게 된다. 多目的 計劃法을 適用함으로써 얻어지는 一般的인 長點은 1) 意思決定者 역할의 적정성 향상 2) 廣範圍한 意思決定 手段의 考慮, 3) 問題解決의 現實性 強化 등을 들 수 있다.³⁶⁾

MOLP의 劣等解를 구하는 方法은 주어진 問題의 性格에 따라 결정되지만 주어진 MOLP 問題에 대해 事前의 情報(Pre articulation of information)가 없는 한 ϵ -制約法(ϵ -constraints method)을 많이 使用한다.³⁷⁾ 이는 위에서 주어진 MOLP를 다음과 같이 變更한다.

$$\begin{aligned} \text{MAX : } & Z_1(x) \\ \text{Subject to} \\ & g_i(x) \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \\ & Z_k(x) \geq \epsilon_k, \quad k=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, p \end{aligned}$$

$Z_1(x)$ 는 임의로 선택된 目的函數이며 ϵ_k 는 k 번째 目的函數의 滿足水準(satisfaction level)의 最低水準이다. 그림 6에서 $Z_1(x)$ 가 目的函數로 選擇되었을 때 $Z_2(x)$ 는 제한조건식으로 되어 원래의 可能解領域(feasible set)인 S 대신에 S' 가 $Z_2(x) \geq \epsilon_2$ 에 의해 새로운 可能解領域이 된다. 따라서 S_0 가 解(compromised solution)가 된다. 만약 ϵ_k 의 값이 매우 높은 경우에는 可能解가 존재하지 않고 반대인 경우에는 수 많은 解가 導出되는 短點이었다. MARKAL 模型의 目的函數들간의 相衡作用을 알아보기 위한 方法도 위에서 說明된 方法과 같다고 볼 수 있다. 다음 節에서 說明되겠지만 특히 에너지시스템의 割引費用과

36) Cohon(1978) 참조.

37) 보다 자세한 내용은 Cohon(1978); Chankong and Haimes(1983)을 참조할 것.

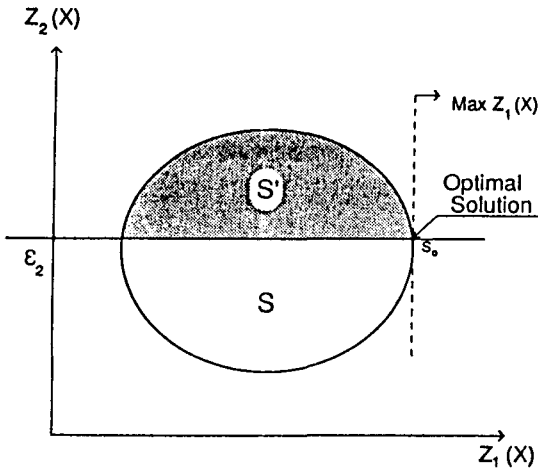


그림 6. ε-制約法에서의 解

안정도函數라는 二목적函數의 相衡作用 分析에는 安定度函數에 대한 加重値를 附與하고 있다.

2. 市場配分模型(MARKAL 模型)

MARKAL 模型은 1980年代 初 美國의 BNL (Brookhaven National Laboratory)과 獨逸의 KFA (Kernforschungsanlage) 研究所에 의하여 開發된 에너지 技術評價模型의 하나로써 多目的 變形計劃으로 구성된 動的模型으로 特徵지워진다. 그동안 이 模型은 國家 에너지/환경계획 수립 뿐만 아니라 地域 에너지政策樹立에 利用되어 왔으며 歐美 先進國 뿐만이 아닌 브라질, 中國, 인도네시아 등의 開發途上國家에도 適用되어 왔다. MARKAL 模型의 分析 目標은 첫째, 既存의 에너지技術에 대한 新技術의 代替時期의 決定 및 상대적 우월성 評價 둘째, 전체에너지 시스템 費用의 最小化, 枯渴性 資源利用의 最小化, 再生에너지 利用의 極大化와 같은 目的의 실현을 위한 미래의 代案的 에너지시스템 設計 셋째, 에너지 轉換效率와 利用效率로 인한 供給構造의 變化 등을 推定할 수 있으며, 이와 같은 市場配分模型의 시나리오별 代案은 미래의 국가적 에너지시스템의 행동측면을 이해하는데 도움을 줄 수 있다. MARKAL 模型은 BESOM 模型과 DESOM 模型의 後續模型으로 특히 DESOM 模型과 여러면에서 비

슷하다. 그러나 細部的인 에너지 變換, 使用技術의 模型化, 多目的函數, 問題定型化의 伸縮性 附與, 熱 併合發電시스템의 細分化 等的 追加보다 유용한 結果를 얻을 수 있다.³⁸⁾

1) 目的函數

MARKAL의 目的函數는 1) 에너지시스템의 割引費用(Total discounted System Cost), 2) 安定度函數(Security Cost), 3) 기울기函數(slope function), 4) 環境影響 函數(Enviromental Function)로 구성된다. 에너지시스템의 割引費用函數는 다시 年間 에너지 供給費用, 特定 技術의 運營維持費, 設備投資費用, 殘存價値 등으로 구체화한다. 安定度函數는 各 에너지源 使用量에 대해 加重値를 부여하는 函數이다. 이는 특히 石油製品輸入의 정도를 알아보기 위해 利用된다. 기울기函數는 結合函數로서 에너지 시스템의 割引費用과 安定度函數의 相衡作用(Trade-off)을 분석하기 위하여 二 目的函數의 相對的 加重 値(q)를 결정한다. 즉

$$\theta = C + q\phi$$

여기에서는 C는 에너지시스템의 割引費用 函數 이며, φ는 安定度 函數이다. 環境函數는 에너지加工, 轉換, 利用設備로부터의 環境汚染物質 排出量의 結合函數이다.

2) 入力資料

基準에너지시스템(Reference Energy System : RES)는 MARKAL 模型의 中心部分으로 1次 에너지源으로부터 다양한 需要部門에 이르기까지의 흐름 및 과정을 보여주는 에너지흐름도이다(그림 7 參照). 이러한 과정에서 에너지 變換設備나 技術에 關聯된 技術的, 經濟的 特性이 分析되며 이때 포함되는 典型的인 Paramater는 에너지效率, 環境에 대한 影響, 技術關聯 設備의 運營維持費用, 初期 投資費用 및 割引率 등이 入力된다. 이는 앞서의 ETA 模型과 크게 다를 바 없지만 MARKAL은 그 어느 模型보다 關聯 데이터베이스(Database) 구축 및 그 役割이 크고 또한 依存度가 높다. 反面 ETA 模型은 市場 浸透(Market penetration)의 動態性分析에 非線形計劃을 利用한다. 또한 MARKAL은 ETA 模型에 비

38) Fishbone et al.(1981) 참조.

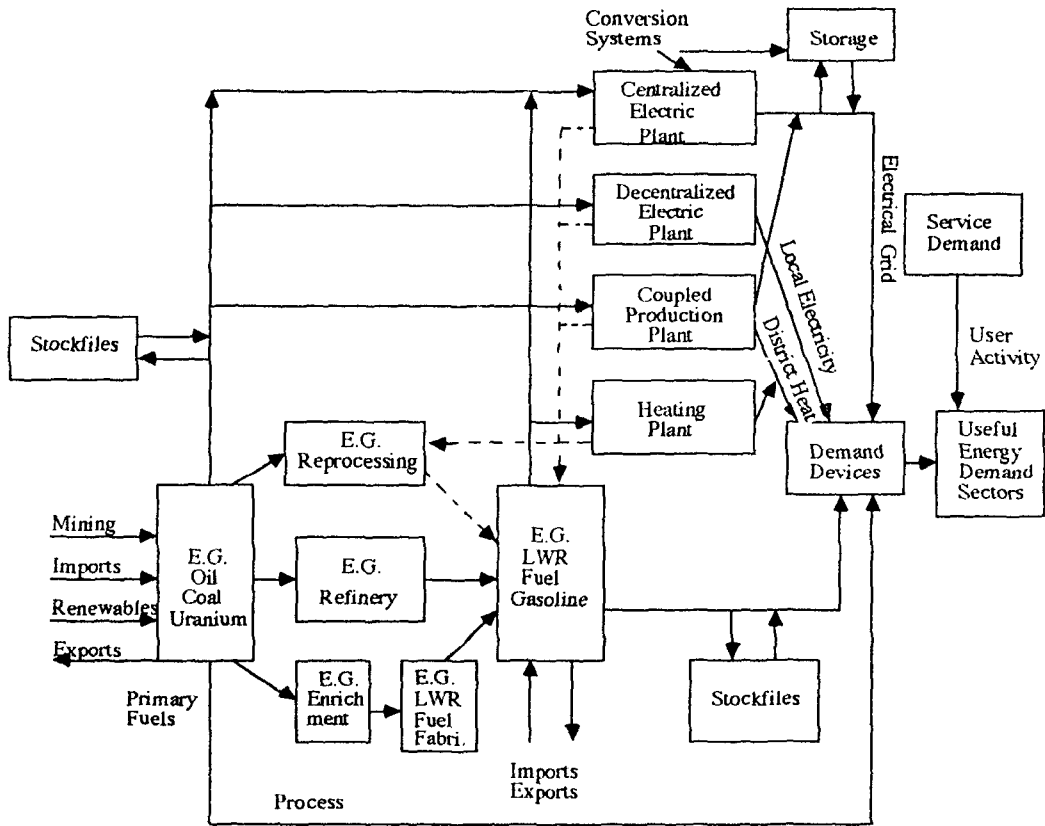


그림 7. MARKAL의 基準에너지시스템(RES).

하여 에너지變換過程을 보다 더 詳細하게 記述하고 있다. 즉 ETA 模型은 電力部門에 8個 技術, 非電力部門에 9個 技術만을 使用하지만 現在 MARKAL 模型 Full version일 경우 15個의 에너지 供給技術, 30個의 需要技術과 10個의 에너지 供給源으로 構成 된다.³⁹⁾ MARKAL에서 요구하는 入力데이터는 다음과 같이 4개로 그룹화된다.

- 1) 技術 關聯部分(Technology categorization)
- 2) 1次 에너지源(Source of primary energy)
- 3) 有用에너지 需要(Useful energy demand)
- 4) 環境 制約條件(Enviromental constraints)

MARKAL 模型 適用의 最近 動向은 크게 에너지 관련 新技術 評價와 環境部門에 대한 影響 分析이다. 環境에 대한 관심이 고조되면서 특히 地球溫 暖化 防止를 위한 이산화탄소 排出과 에너지 政策

과의 關聯性이 중요시되고 있다. 國內에서 MARKAL 模型은 RES 및 向後 에너지 技術評價를 위한 데이터베이스의 構築에 대한 研究가 進行되고 있다 (韓國動力資源 研究所, 1987 : 1988 : 1991). 日本에서의 二酸化炭素 排出 減少를 위한 MARKAL 模型 適用의 例를 그림 8에 나타내었다. 主要 手段으로서는 效率向上, 燃料代替 및 技術 代替效果 등이 포함되었는데 선택가능한 수단의 도입 여부에 따라 상당량의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 2030年 基準 20%의 配出量減少를 이룩하기 위해서는 CO₂ TON당 限界費用이 30달러로 導出되었다.⁴⁰⁾

3) MARKAL-MECRO 模型

또 하나의 MARKAL 模型과 관련된 것은 MARKAL-MACRO, MARKAL-Input/Output 分析의 統合模型構築과 運營이다. 그림 9는 1991年 美國의

39) Manne(1992) 참조.

40) Yasukawa(1992) 참조.

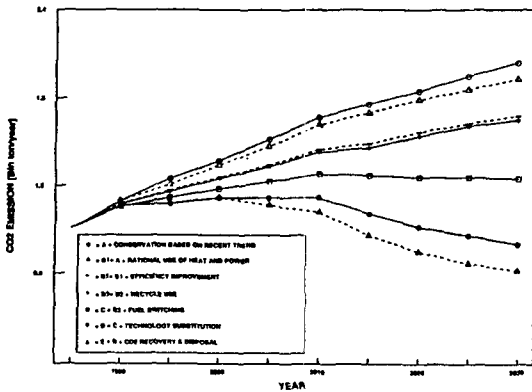


그림 8. 일본의 CO₂ 배출량 분석을 위한 MARKAL 적용예.

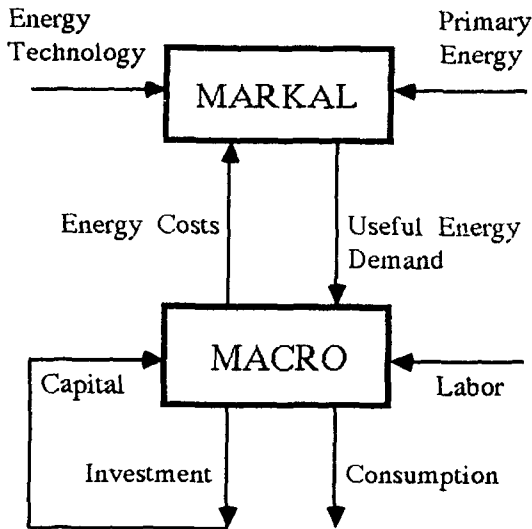


그림 9. MARKAL-MACRO 통합모델圖.

Manne과 Wene에 의해 개발된 MARKAL-MACRO 통합모델圖이다.⁴¹⁾ 이는 MARKAL과 MACRO 두 모델의 構造的變化를 最小化하기 위하여 두가지 형태만의 連結(Linkage)만을 도입하였는데, 첫째는 MARKAL로부터 MACRO에 대한 에너지의 흐름이고 둘째는 MACRO부터의 에너지 費用 支出(Energy cost payment)이다. 이 점은 ETA-MACRO 모델과 거의 같다고 볼 수 있다. 다만 에너지의 흐름이 ETA-MACRO 모델에서는 電力과 非電力 部分으로 구분

되는 대신에 有用에너지의 需要(Useful energy demand)라는 점이다. 따라서 MACRO 모델에서의 生産函數의 代替可能한 統合要素는 資本, 勞動 그리고 有用에너지이다. 따라서 MACRO 모델에서는 價格에 기인되는 에너지節約과 時間이 경과함에 따라 非價格要因으로 인한 單位生産當 에너지需要 減少의 에너지效率 向上의 可能性을 分析할 수 있다.

MARKAL 모델은 OMNI로 作成된데 비하여 MARKAL-MACRO 모델은 模型 構造變更에 용이하도록 GAMS(A Generalized Algebraic Modeling System)로 作成되어 있다. 또한 MARKAL-MACRO에서는 컴퓨터사용시간의 단축을 위하여 MARKAL에서와 같은 세부기술의 사용 대신 이를 다소 統合하여 運營한다. MARKAL과 관련된 또 하나의 통합 모델은 MARKAL-Input/Output 모델이다.⁴²⁾ 이 모델에서는 尙來 經濟 豫測 資料 및 假定되어진 에너지價格下에서 에너지 需要豫測을 行하는 方法으로서 現在 이탈리아의 國家에너지 및 環境計劃 評價를 위하여 시도되어지고 있다. 主要 內容은 에너지 消費節約 및 地球 溫暖化防止를 위한 二酸化炭素 節減에 공헌할 수 있는 經濟構造變化의 把握에 있다.

V. 結 論

모델의 適用性은 模型의 定型化와 관련된 問題를 구조적으로 수용하여 內在化시켰을 때 개선되며, 이러한 과정을 통해서만이 意思決定과 관련된 效果들을 올바르게 분석할 수 있다. 지난 기간동안 에너지技術評價模型은 燃料間 代替性, 에너지수요에 대한 價格反應度, 不確實性 및 經濟成長과 에너지價格의 相關關係를 고려해서 분석할 方向으로 개선되어 왔다. 그러나 現存하는 模型들이 에너지技術의 評價와 관련된 모든 機能을 가지고 있는 것은 아니며 다음과 같은 몇가지 限界點을 극복하지 못한 상태에 있다.

- (1) 個別 意思決定에 있어서 不確實性의 影響을 定型化할 수 있는 一般적 方法論의 缺如
- (2) 完全競爭市場을 가정한 既存 異論의 추종
- (3) 環境問題에 대한 고려의 부족

41) Manne(1991) 참조.

42) Tosato(1991)과 Tosato(1992) 참조.

(4) 적절한 데이터 使用의 問題

그렇지만 이러한 限界性的의 가장 根本的의 原因은 관련자들의 理解와 情報不足 때문이다. 그럼에도 불구하고 각 기술평가모형들은 나름대로의 위치를 구축하여 관련 意思決定者들에게 유용한 情報(실행 가능한 代案)를 제공해줌으로써 實用性을 입증받고 있다. 그러나 최근 개발중에 있는 몇몇 모형들을 제외하고는 대부분의 技術評價模型들이 上記 要因들을 적절하게 반영시키지 못하고 있어서 實用性이 저하되는 경향이 나타나기 시작하고 있다.

따라서 앞으로의 에너지技術評價模型 開發方向은 관련자들의 理解와 情報不足 問題에 대한 고려와 아울러 상기 제시된 既存模型들의 限界點을 극복하는 次元에서의 연구가 활성화되는 方向으로 進전되어야 할 것이다. 이를 위한 方法으로 다양한 사회의 욕구를 반영하면서 實行可能解들을 적절하게 제시해주는 多目的計劃法의 活用을 적극 권장하고 싶다.

參考文獻

1. 崔基鍊, 에너지經濟學, 比峰出版社(1987).
2. 朴弘立, 微視經濟學, 博英社(1987).
3. 李相文·李炳贊, 多目標意思決定論, 法文社(1986).
4. 史炳祐, “에너지政策模型에 대한 考察,” 에너지研究, 第4卷 5號, pp.34-73(1981).
5. 韓國動力資源研究所, 에너지技術 評價모델 開發(I) (1987).
6. 韓國動力資源研究所, 에너지技術 評價모델 開發(II) (1988).
7. 韓國動力資源研究所, 에너지技術 評價모델 開發(III) (1991).
8. Alexander, A. J., and Rice, D. B., Comments on LMFBR Cost-Benefit Analysis, (Report P-5498). Rand Corp, Saanta Monica, California (1975).
9. Atomic Energy Commission, Cost-Benefit Analysis of the U.S. Breeder Reactor Program, (WASH-1184). U.S. Govt. Printing office, Washington, D.C (1972).
10. Atomic energy Commission, Proposed Final Environmental Statement: Liquid Metal Fast Breeder Reactor, (WASH-1535). Washington, D.C (1974).
11. Belden, R.D., Report on the Forum Project: Fossil Analysis of Future Trends in the U.S. Coal Industry, Dartmouth College, New Hampshire (1977).
12. Cazalet, E.G., Generalized Equilibrium Modeling: The Methodology of the SRI/Gulf Energy Model, Decision Focus, Palo Alto, California (1977).
13. Chankong, V., and Haimes, Y.Y., Multiobjective Decision making: Theory and Methodology, North-Holland, New York (1983).
14. Cherniavsky, E.A., Brookhaven Energy System Optimization Model (BESOM), (BNL-19569). Brookhaven National Laboratory, Upton, NY (1974).
15. Cherniavsky, E.A., Juang, L.L., and Abilock, H., Dynamic Energy System Optimization Model, Brookhaven Natl. Lab. Upton, NY (1977).
16. Chiang, A.C., Fundamental Methods of Mathematical Economics, 3rd Ed, McGraw-Hill Book Company, NY (1984).
17. Cohon, J.L., Multiobjective Programming and Planning, Academic Press (1978).
18. Dantzig, G.B., Conolly, T.J., and Parikh, S.C., Stanford Pilot Energy/Economic Model, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (1978).
19. Eden, R., Posner, M., Bending, R., and Crouch, E., Energy Economics, Growth, Resources, and Policies, Cambridge Univ Press (1981).
20. Fishbone, L.G., Giesen, G., and Vos, H., MARKAL, A Linear-Programming Model for Energy System Analysis: Introduction to Version I, Brookhaven Natl. Lab., and Kernforschungsanlage, Jülich (1981).
21. Goettle, R.J., Cherniavsky, E.A., and Tessmer, R. G., An Integrated Multi-Regional Energy and Interindustry Model of the United States. (Report BNL-22728). Brookhaven Natl. Lab., Upton, NY (1977).
22. Haefele, W., and Manne, A.S., *Energy Policy* 3(1), pp. 3-23 (1975).
23. Hoffman, K.C., and Wood, D.O., “Energy System Modeling and Forecasting,” (J.M. Hollender, ed.), Annual Review, Vol. 1, Palo Alto, California (1976).
24. Hoffman, K.C., and Jorgenson, D.W., *Bell J. Econ.* 8 pp. 444-66 (1977).
25. Hogan, and Parikh, S.C., “Energy and the Economy,” *Energy Modeling Forum*, Vol. 2, Stanford University, California (1977).
26. (IAEA) International Atomic energy Agency, Ex-

- pansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook, Technical Report Series, No. 24, Vienna (1984).
27. (KFA) Kernforschungsanlage, Intertemporal Capacity Expansion Models, Germany (1990).
 28. Kydes, A.S., and Cherniavsky, E.A., Coal in Transition (1980-2000): Demand Considerations, Brookhaven Natl. Lab., Upton, NY (1977).
 29. Lowe, T.J., Thisse, J.F., and Wendell, R.E. "On Efficient Solutions to Multiple Objective Mathematical Programs," *Management Science*, Vol. 30, No. 11, pp. 1346-1349 (1984).
 30. Manne, A.S., *Rev. Econ. Studies Symp.*, pp.47-65 (1974).
 31. Manne, A.S., *Bell J. Econ.* 7, pp. 379-406 (1976).
 32. Manne, A.S., "ETA-MACRO: A Model of Energy-Economy Interactions," In *Advances in the Economics of Energy and Resources*. (R. Pindyck, ed), Vol. 2, JAI Press, Connecticut (1978).
 33. Manne, A.S., MAKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-economy Analysis, (Draft Report). Brookhaven Natl. Lab., Upton, NY (1991).
 34. Manne, A.S., MARKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-economy Analysis, Brookhaven Natl. Lab., Upton, NY (1992).
 35. (MRG) Modeling Resource Group, Energy Modeling for an uncertain Future, Committee on Nuclear and Alternative Energy Systems (CONAES), National Academy of Sciences, Washington D.C (1978).
 36. Nordhaus, W.D., *The Efficient Use of Energy Resources*, Yale Univ Press, Connecticut (1978).
 37. Parikh, S.C., Analyzing U.S. Energy Options Using the PILOT Energy Model, (Report SOL 76-27). Systems Optimization. Lab., Stanford University, California (1976).
 38. Parikh, S.C., The Welfare Equilibrium Model of Stanford PILOT System, Systems Optimization. Lab., Stanford University, California (1978).
 39. Parikh, S.C., and Gordon, R.L., "Coal in Transition (1980-2000)," *Energy Modeling Forum*, Vol. 2, Stanford University. California (1978).
 40. Psarras, J., Capros, P., and Samouilidis, J.E., "Multiobjective Programming," *Energy*, Vol. 15, No. 7/8, pp. 583-605 (1990).
 41. Raiffa, H., *Decision Analysis: Introductory Lectures on Choices Under Uncertainty*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1968).
 42. Richels, R.G., "R&D Under Uncertainty: A Study of the U.S. Breeder Reactor Program," ph. D. Thesis, Energy and Environmental Policy Center, Harvard University, Cambridge, Massachusetts (1976).
 43. Richels, R.G., and Weyant, J.P., *Models for Energy Technology Assessment*, Academic Press, (1979).
 44. Rousseau, W.F., Sussman, S.S., Castleton, R.N., and Rambo, J.T., *Economic Models and Algorithms Used in the Lawrence Livermore Laboratory*, (Report UCRL-52527). Livermore, California (1978).
 45. Stanford Research Institute, *decision Analysis of the Synthetic Fuels Commercialization Program*, SRI, California (1975).
 46. Tosato, G., *Energy and Environment System for Italy: Overview of the MARKAL Model and Data*, Presented at the ETSAP/IIASA Workshop, Italy (1991).
 47. Tosato, G., *Extension of the MARKAL Capabilities: Demand Driven by an Endogenous Input/Output Matrix: Present at the ETSAP/IIASA Workshop*, Austria (1991).
 48. Weyant, J.P., *Some Attributes of the Models Employed by the CONAES Modeling Resource Group*, Energy and Environmental Policy Center, Harvard University, Cambridge, Massachusetts (1976).
 49. Yasukawa, S. *et al.*, *Energy and Technology Option for CO₂ Emission Reduction in Japanese Energy System*, Presented at the ETSAP Workshop, France (1992).
 50. Zeleny, M., *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill Book Company, NY (1982).