

## 에너지기술의 환경영향 평가를 위한 에너지시스템 분석기법에 관한 고찰

- 에너지기술의 온실가스 배출 저감 잠재력 평가기법을 중심으로 -

김중욱, 황윤애, 김경희, 홍종철, 신희성

한국에너지기술연구원

### A study on the Energy System Analysis Methods for Environmental Effects Assessment of Energy Technologies

Kim Jong-Wook, Hwang Yun-Ae, Kim Kyung-Hee, Hong Jong-Chul, Shin Hee-Sung  
Korea Institute of Energy Research

#### 1. 서론

산업혁명이 시작된 이래로 인류는 많은 양의 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, PFCs, HFCs, SF<sub>6</sub> 등의 온실가스를 대기 중에 배출해 왔고, 이러한 가스들의 대기 중 농도는 지난 100년 동안 크게 증가하였다. 예를 들어, 대기중의 CO<sub>2</sub>의 농도는 산업혁명 이전보다 30%나 증가하였으며 이러한 온실가스의 증가에 따른 기후 변화가 환경과 인간에게 해로운 영향을 끼칠 것으로 예상되고 있다.

이러한 온실가스는 대부분 화석연료와 석회석과 같은 일부 무기화합물의 사용으로부터 배출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 현재 세계적으로 온실가스 배출 저감을 위해 에너지를 효율적으로 사용하는 것은 이미 중요한 문제가 되어있으며, 이는 해결 대안은 적절한 에너지기술의 채택과 사용에 직결된다. 따라서 경제활동과 연관된 에너지수요를 어떤 기술을 채택하여 만족시킬 때 효과적인 온실가스 배출 저감 효과를 가져올 것인가에 대한 평가 즉, 기술평가방법에 대한 연구의 필요성이 제기된다.

코우트스(Coates, 1973)는 기술평가를 '기술이나 기술발전이 사회, 경제, 정치제도 과정 등에 끼치는 잠재적 영향을 체계적으로 파악하여 분석 평가하는 것'이라고 정의하였다. 그러나 에너지분야에서의 기술평가는 이것이 에너지시스템을 개선하고자 하는 노력의 일환으로 이해되어야 하며, 이러한 관점에서 일반적인 기술평가와는 상당한 차이가 있다. 그리고 에너지기술은 기술 자체의 절대적인 우위를 판가름하기 어렵고, 그 기술이 개발되었을 때 그로 인해 나타나는 비용의 절감 정도와 효율의 개선의 여부가 중요하다. 또한, 효율이 개선되었다 하더라도 그 기술을 상용화하는데 드는 비용이 기술의 효율에 의한 비용 절감보다 크다면 그 기술이 상용화되어 널리 이용되기는 어려우므로 이것 또한 고려되어야 한다. 즉, 에너지기술은 평가함에 있어서 다양한 에너지시스템과의 인과성을 고려하여야 한다.

본 논문에서는 온실가스의 배출 저감 효과를 가져올 수 있는 기술의 채택과 관련하여 어떤 에너지기술이 주어진 조건하에서 어느 정도의 저감 잠재력을 가질 수 있는지에 대한 기술평가에 필수적인 에너지시스템 분석기법에 대한 고찰을 수행하고자 한다. 또한 에너지시스템 분석 기법에 대한 종합적인 분석을 통하여 에너지기술의 환경영향, 특히 온실가스 저감 잠재력 평가에 적절한 기법을 제안하고자 하며, 이를 통해 향후 관련 연구에 기여하고자 하는 것이다.

#### 2. 고찰의 방법 및 범위

본 논문에서는 세계적으로 활용되고 있는 대표적인 에너지시스템 분석 기법에 대한 고찰

을 수행한 후, 그 중에서 에너지기술의 환경영향, 특히 온실가스 배출 저감 잠재력을 평가하는데 적합하다고 판단되는 기법을 제안하는 방법을 채택하였다.

범위는 현재 에너지기술평가에 널리 활용되고 있는 분석기법 및 에너지시스템모형을 포함하였으며, 이 중 특히 다양한 영역과 대안에서 GHG 배출감소 기술을 평가할 수 있는 것에 중점을 두었다.

이상의 관점에서, 고찰 대상 에너지시스템분석기법을 다음 5가지 범주로 구분하였으며, 이를 바탕으로 각각의 기법에 대한 분석 및 기법들간의 비교를 수행하고자 한다.

- 에너지분석, LCA(life Cycle Analysis), 각 원료 및 제품의 원료흐름분석(Material Flow Analysis, MFA)
- 에너지 및 원료시스템 통합 분석
- I/O분석(Economic Input/Output System Analysis)
- 동적 에너지시스템분석(Dynamic Energy Systems Analysis)
- 동적 에너지 및 원료시스템 모형(Dynamic energy and material systems model)

이상에서 첫 번째의 에너지분석, LCA, 그리고 MFA를 하나의 범주에 넣은 것은 이들 모두가 정적인 물리적 흐름(static physical flow)에 바탕을 두고 있기 때문이다.

### 3. 에너지시스템분석 기법에 대한 분석

#### 3.1. 에너지분석, LCA, MFA

에너지 분석은 1970년대와 1980년대 초반에 주로 에너지와 원료 생산을 위한 에너지 사용에 대한 분석을 목적으로 시작되었다. 에너지 분석은 연계 공정 분석을 위한 정적인 방법(static method)으로 누적 에너지 요구량은 에너지 사용과 관련된 환경 영향을 의미한다. 에너지 분석은 생산품, 서비스 그리고 국가 경제의 에너지 밀도의 정량화, 산업에서의 에너지 절약을 위한 대안 분석, 그리고 제품 설계와 엔지니어링을 위한 기본 원료의 에너지 입력 계수를 제공하는데 사용될 수 있다.

특정 원료, 생산품 또는 서비스를 생산하기 위한 시스템을 분석하며, 공정의 특성은 에너지와 원료의 물리적 입·출력에 따라 결정된다. 연계 공정의 총 에너지 사용량이 첨가되지만, 시간적·공간적인 측면은 고려되지 않는다.

에너지 분석을 기반으로 개발된 LCA(Environmental Life Cycle Analysis)는 연계 공정을 분석하는 정적인 방법으로 하나의 제품이나 설비의 '요람에서 무덤까지'의 분석에 초점을 맞춘 것이다. 제품 수명이 분석의 기간이지만 배출에 대한 시간적·공간적인 측면은 고려되지 않았다. LCA는 온실가스 배출을 포함한 수많은 환경영향에 대해서 설명이 가능하며 자료의 이용가능성에 따라 환경영향에 대한 정량적이고 정성적인 분석을 제공한다. 전통적인 LCA는 ISO 가이드라인에 따라서 목적과 범위 정의, 목록 분석, 영향 평가, 결과의 해석이라는 네가지 단계로 나뉘어질 수 있다.

LCA는 지난 십년동안 강력하고 유용한 분석 도구로 이용되고왔으나 네가지 단계에 대한 비판이 계속되어왔다. 그리고, 시간과 공간의 범위에 관한 방법론적 문제 및 시스템의 확장에 영향을 미칠 수 있는 시스템의 경계와 분석 범위에 관련된 다른 문제점들을 갖고 있다. 또한 최대의 이익을 얻기 위한 정책에 적합한 평가를 위한 비용 항목이 LCA에 포함되어 있지 않기 때문에 또 다른 문제가 발생할 수 있다.

최근에 주목받기 시작한 MFA(Materials Flow Analysis)는 중금속이나 비료 같은 환경에 해로운 물질이나 경제를 통한 물질(물, 음식, 에너지 또는 재료)의 흐름 같은 주제에 따른 두 가지의 구분이 가능하다. 전자는 경제를 통한 물질의 흐름과 궁극적으로 환경에 배출되는 물질 사이의 관계에 초점을 맞춘 것이며, 이것은 과거의 물리적 흐름 자료를 분석한다. 다른 하나는 선택된 영역의 지속가능성의 여부에 의문을 갖고 시작되었으며, 흐름 자체는

해롭지는 않지만 그것들을 생산, 사용, 폐기 처리하는 것은 부정적 영향을 끼칠 수 있다. MFA에 대한 연구는 다양하고 빠르게 발전하고 있다. MFA의 일반적인 특징은 영역이나 부문 또는 산업의 물질수지를 분석하고, 환경, 경제 그리고/또는 시스템의 상당량의 물질수지를 계산한다는 것이다. 그리고 원료 생산을 위한 상위의 원료 흐름과 배출 그리고 초기 시스템 경계 밖의 폐기물에 대한 하위 원료 흐름과 배출을 포함할 수 있다. 사용범위는 어떤 영역에서의 원료 흐름 분석, 경제의 원료 밀도 분석, 경제 성장의 원료 밀도 추세 분석, 다른 영역내의 원료 생산 또는 소비 비교 등이다.

### 3.2. 에너지 및 원료시스템 통합 분석

통합 에너지 및 원료 시스템 분석을 위한 정적인 도구로 널리 활용되고 있는 것 중의 하나는 MIMES model(Model for Integrating Material flow with the Energy System)이다. 이것은 정적 최적화 방법이며, 시스템에서 생산되는 원료를 위한 요구량과 원료의 총량에 의해 좌우된다. 정적인 모형이기 때문에, 제품내에서의 원료 저장과 폐기물의 배출은 자세하게 연구될 수 없다. 이 모형은 개개의 플랜트나 도시 또는 작은 지역수준에서 사용 가능하다. 최근에는 간단한 폐기물 관리 계획을 위해 사용되기도 한다. 또한 MIMES는 불확실성을 감소시키거나, 복잡한 것을 다룰 때, 공동 상승 작용을 확인하거나 어떤 통합된 계획 작성을 위해서 사용되어진다.

### 3.3. I/O분석

통합 에너지 및 원료 시뮬레이션 모형의 기초는 경제적 산업연관 분석인데, 이 접근법은 경제를 향한 시스템 분석 접근법이라고 특징 지을 수 있다. 그리고 각 부문의 특징은 금전적인 입·출력 사이의 관계에 따라서 결정된다. 부문은 에너지 분석이나 LCA의 공정과 매우 유사하지만 물리적 단위 대신에 화폐단위를 쓴다는 점이 다르다. 경제적 I/O 행렬은 경제내의 부문들간의 재정적 거래를 나타낸다. 행과 열의 수가 같으면(Leontief 행렬) 역행렬이 가능하므로 만약 부문의 에너지 사용 또는 배출량이 알려져 있다면 상위의 영향을 포함한 부문별 output의 총 에너지 사용 또는 배출량을 계산할 수 있고 부문들 사이의 내부작용도 포함된다. 다양한 output을 갖는 부문으로의 부문별 배출량의 할당은 부문별 output의 경제적인 값에 기초하여 이루어진다. 그리고 이 방법은 직접적인 에너지 요구량 또는 상품이나 서비스의 환경적 영향에 대한 의견을 제공할 수 있다.

I/O 분석은 종종 CO<sub>2</sub> 배출의 소비 패턴 영향 연구에 사용된다. 대부분의 나라가 이미 적용(국가 통계청)하고 있다는 것이 주요한 장점이며 부문별 접근법은 경제에서의 모든 배출에 대한 설명이 가능하다. I/O 접근법은 전체 경제를 포함하므로 시스템에서의 개선에 대한 잠재력 연구와 개선 옵션 사이의 상호작용 연구가 가능하다.

### 3.4. 동적 에너지시스템분석

동적 에너지 시스템 분석 방법은 현재 20년 이상 사용되고 있다. 이 방법을 이용한 몇몇의 모형들이 있는데 그 중에서 MARKAL(MARKet ALlocation) 모형은 IEA/ETSAP 프로그램을 통해서 35개국 이상에서 적용되었고, MARNES 모형은 유사한 동적 최적화 모형이다. EFOM(Energy Flow Optimisation Model)은 MARKAL과 유사한 특성을 가진 모델로 유럽 공동 연합에서 개발한 것이다. 독일의 IKARUS(Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien) 모형 역시 몇몇 유사한 에너지 시스템 모형을 포함한다. 공정과 흐름은 물리적 단위(Mt 또는 PJ)나 화폐 단위를 사용한다. 계획 기간은 수십년 정도이다. 그리고 복잡성을 해결하기 위해서 최적화 접근법이 적용되었다.

이러한 모형들은 국가적인 수준에서 사용되고 변화하는 에너지 시스템내에서의 기술에 초점을 맞춘 것으로, 이러한 분석들의 결과는 특별히 장기간의 R&D 계획과 기술향상에 대한

잠재력 평가에 적합하다. 모든 모형들이 기본적으로 유사한 접근법을 갖지만 시간의 세부적인 배분이나 부문별 세부 배분, 비용 정의 등에서 차이가 발생한다.

선형 동적 최적화 모형인 MARKAL은 장기간의 에너지 전략개발을 위해서 사용될 수 있고, 온실가스 같은 환경 제한인자들을 설명할 수 있으며 에너지 서비스에 대한 요구량을 외생적으로 결정한다. 모형은 몇 백개의 에너지 공급, 변환, 그리고 요구 기술들에 대한 데이터베이스를 포함한다. 공정은 LCA에서와 같이 물리적 input 및 output과 환경 영향 사이의 선형 관계를 갖는 black box로 특징지어진다. 공정은 물리적 흐름과 비용, 기술수명주기, 그리고 용량등의 제한 인자에 의해서 특징을 나타내게 된다. 총 생산, 변환 그리고 생산품의 최종사용과 서비스 역시 고려되어진다.

모형 사용자가 생산품과 서비스의 최종 요구량을 결정하며 MARKAL은 이를 만족시키는 가장 낮은 비용의 시스템 배열을 계산하게 된다. 최적의 해는 소위 "perfect foresight" 접근법이라 불리는 방법에 의해 계산되어진다. 모든 배출에 고정된 부과금을 부여하거나, 전체 시스템의 최대 배출에 제한을 두는 것으로 GHG 배출 감소에 대한 모델링이 가능한데 이는 모두 모형 사용자에게 의해서 정의된다.

### 3.5 동적 에너지 및 원료시스템 모형

앞서 언급된 분석기법과 모형들은 에너지와 원료에 의한 환경영향(예, 온실가스 배출)을 적절히 분석하는데 한계를 가지고 있다. 따라서, 이를 위해 동적 에너지 및 원료시스템 모형이 대두되었으며, 가장 성공적인 예로는 MARKAL 모형을 원료의 흐름을 처리할 수 있도록 확장한 것을 들 수 있다.

원료시스템 모형으로 MARKAL을 이용하기 위해서는 모형 메카니즘이 실제 원료 흐름을 적절히 반영할 수 있어야 한다. 이러한 변환가능성은 에너지 시스템과 원료시스템간의 큰 차이점이 있기 때문에 중요하다.

- 화학에너지는 원자재로부터의 생산이 이루어질 동안에 그 원료에 저장된다. 그리고, 그것들이 재활용된다면 그 만큼의 에너지 절감을 할 수 있다. 종종 폐기물을 이용하여 원료를 생산할 때 필요한 에너지의 양이 원자재를 이용할 때의 양보다 적다. 결과적으로 원료를 재활용하는 것이 에너지를 재활용하는 것보다 더 쉽고, 상대적으로 더 많은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 저감효과를 나타낼 수 있다.
- 폐기 에너지와는 반대로, 폐기물은 일반적으로 환경에 확산 되지는 않는다.
- 원료는 생산품에 내재되어 있다가 생산주기를 다하면 폐기된다. 내재와 폐기사이의 기간은 달이나 년의 단위로 나타내고, 에너지 서비스에 대한 내재는 일반적으로 분이나 날의 단위로 나타낸다.
- 에너지 흐름은 일반적으로 GJ(GigaJoule)로 나타내는데 반하여, 원료흐름은 톤(Ton)으로 나타낸다.

모형의 수식은 이러한 차이를 적합하게 설명할 수 있어야 하는데 알고리즘은 기본적으로 같지만 기간 t에서의 상품 A의 소비와 기간 t+L(L은 생산주기를 나타낸다)에서의 폐기상품 A의 배출사이에 새로운 형태의 관계를 갖는다는 점이 틀리다. 또 다른 차이는 에너지부분에서는 부등식이 사용되지만, 원료부분의 모든 수식은 등식이라는 것이다. 부등식은 가능해를 계산할 수 있다. 자재의 흐름에서 폐기물처리는 비용효과적인 활동이 아니다. 따라서 폐기물처리를 '소홀'히 하는 것이 비용효과적인 것이다. 과정에서 그러한 해는 민감한 현실을 반영할 수 없다. 모형화 문제는 등식을 사용함으로써 해결되고, 결과적으로 원료의 투입과 산출량이 같아질 수 있다.

에너지 시스템은 자연에너지자원의 재활용에서 마지막 에너지 사용까지 네트워크로 모형화될 수 있으며, 원료 시스템은 원료와 제품이 재활용 될 수 있기 때문에 더 복잡하다. 이러한 이유로 두 시스템의 모형구조가 크게 달라지게 된다.

#### 4. 에너지시스템 분석기법에 대한 종합 고찰

에너지 분석과 LCA 그리고 MFA는 모두 시스템 접근법을 기반으로 한 환경분석 도구이지만, 각기 다른 시스템에 초점을 맞추고 있다. MFA의 경우에는, 특정지역에서 모든 제품에 대한 자재흐름이 특정시간단위에 대하여 분석된다. 따라서, 그들의 전체 생산주기에 대한 제품의 환경영향은 MFA로 분석될 수 없다. 즉, MFA는 폐기물발생에 대하여 장기간의 영향을 연구하기에는 적합하지 않다. 반면 LCA는 모든 에너지와 자재흐름이 '요람에서 무덤까지'의 개념으로 한 생산품에 대하여 표시한다. 즉 시간적 차원은 소홀하다. LCA 결과는 한 부분의 시스템 수준에서 원료의 개선이 환경에 미치는 영향에 대한 결과는 도출하지 않는다.

그리고, 세 방법은 모두 통계시스템분석 도구이며, 기술의 개선은 비록 장기간의 생산품이라 할지라도 고려되지 않는다. 따라서 이러한 방법들은 기존 에너지 시스템이 바뀌는 상황에서의 장기간의 분석에는 적합하지 않다.

또한 비용을 고려하지 않으므로 비용효과적인 관점에서 배출감소 대안을 선택할 수 없고, 통합된 에너지 원료 시스템의 통계적 성질과 지역적 범위 때문에 GHG 배출감소 정책의 분석은 제한을 받게 된다.

I/O 분석의 경우, 시스템에서의 개선에 대한 잠재력 연구와 개선 대안 사이의 상호작용 연구가 가능하기는 하지만 원료시스템에서의 장기간의 개선대안을 나타내는 것과, 개선대안의 효과를 연구하기에는 적합하지 않다. 이 접근법에서 부문들은 하나로 묶이게 된다. 예를 들어 어떤 국가의 경우에 단일 부문으로 구분가능한 산업이 기초 화학산업이라고 하자. 기초화학산업의 영향과 화폐가치를 기본으로 한 수백개의 화학제품이 상위에 미치는 영향에 대한 할당은 물리적 현실을 적절히 표현할 수 없다. 할당문제와는 별도로 개선옵션은 일반적으로 더 상세한 공정수준으로 개발되지만, 각 부문별 공정개선의 영향은 명확하지 않다. 그리고 원칙적으로는 더 상세하게 I/O 모형 접근이 가능하나 그러한 접근에 필요한 자료의 통계는 존재하지 않는다.

결과적으로 I/O 분석에 대한 공정자료는 전 부문을 통합하는 수준으로 변형되어야 하는데 이 과정은 상대적으로 어려운 과정이다. 더 나아가 한 구간의 수준에서 그 공정수준의 여러 가지의 다른 개선옵션들을 한 옵션으로 조합하는 것은 그 공정수준의 옵션에 대한 분석을 모호하게 한다. 이 방법은 최적화가 아닌 시뮬레이션이기 때문에 전 시스템을 위한 비용 효율을 기본으로한 개선 대안들 사이의 선택에는 적합하지 않다. 또 다른 문제는 시스템의 유동성(system dynamics)이 연구되어질 수 없다는 것인데, 예를 들어 제품과 폐기물에 내재되어 있는 자재에 대한 에너지와 원료시스템의 상호 연관성은 생산주기를 넘어서도 계속 있게 된다. 기술을 변환시키는 것은 행렬의 모수를 변화시킴으로써 I/O 모형에 반영시킬 수 있다. 그러나 이것은 이 연구의 관점에서 동적인 것은 아니다. 예를 들어, 제품의 원료와 계속되는 원료의 재활용, 또는 제품의 재활용은 I/O 모형에서 적절하게 반영시킬 수 없다.

MARKAL의 최적해는 비용최소화 관점에서(이익최대화 관점이 아님) 이상적인 시장에서의 합리적인 의사결정을 나타낸다. 즉, MARKAL은 한 구간이나 공정수준에서의 의사결정을 나타내는 최적시스템을 구하는 것이다. 또한 같은 결과치를 갖는 대안공정을 비용최소화를 기준으로 구할 수 있다. 이러한 비용은 자본비, 고정비, 변동비의 합에 부산물에 따른 이익을 감하고, 내생적인 환경영향 비용을 더한 것이다.

GHG 배출을 감소시킬 수 있는 많은 제품과 공정들은 배출이 상대적으로 많은 기존의 제품과 공정들보다 더 많은 비용이 든다. 이것은 환경비용이 그러한 시나리오에서는 내재되어 있지 않기 때문이다. 결과적으로 이러한 공정들은 선택되지 않을 것이다. 그러나 그것들은 기본 예에서 선택된 공정의 배출량보다 적기 때문에 배출감소를 나타낼 수 있는 시나리오에서는 비용효과적일 수 있다. 또한 배출량은 한계비용을 통하여 모형에 반영될 수 있다.

아래의 표는 지금까지 살펴본 LCA, MFA, Mimes, I/O model, MARKAL을 비교, 분석한 것이다.

표 1. 에너지 시스템 분석 기법의 비교

구분		LCA	MFA	Mimes
Approach		Simulation	Simulation	Optimisation (non-linear)
Goal		Selection best product: identification of key impacts: evaluation improvement option	Dematerialisation analysis: identification of key materials	Regional/plant strategy development
Scope	Topic	1 Product(service)	Whole economy	Waste handling
	Spatial system boundary	Cradle-to-grave	Region	(set of)region(s). plant
	Temporal system boundary	Product life span	1 year	1 year
	Technological improvement options	Can be added	Not considered	Management focus
	Greenhouse gas emissions	Accounted	Only material flows : can however be added	Can be added
Dynamics	Capital equipment dynamics	Not relevant	Not relevant	Not relevant
	Materials storage in products	Not Considered	Considered	Not considered
	Time preferences included in valuation of impacts	Not relevant	Not relevant	Not relevant
	Energy & materials system interactions	Can-to a limited extent-be simulated	Not considered	Can-to a limited extent-be simulated
Option evaluation	Changing environmental policy goals	Not considered	Not relevant	Not considered
	Life cycle costs	Not considered	Not relevant	Considered
	Selection of cost-effective improvement options	External selection process	Not relevant	Internalised

표 1. 에너지 시스템 분석 기법의 비교(계속)

구분		I/O models	Common MARKAL
Approach		Simulation	Optimisation
Goal		Selection of best product: identification of key impact: evaluation improvement option	National strategy development
Scope	Topic	Sectoral output	Total end-use
	Spatial system boundary	Cradle-to-grave	Country/region
	Temporal system boundary	None	45-80 years
	Technological improvement options	Can principally be added	Research focus
	Greenhouse gas emissions	Can be added	Accounted
Dynamics	Capital equipment dynamics	Not relevant	Considered
	Materials storage in products	Not considered	Not considered
	Time preferences included in valuation of impacts	Not relevant	Considered
	Energy & materials system interactions	Can to a limited extent be simulated	Not considered
Option evaluation	Changing environmental policy goals	Not considered	Considered
	Life cycle costs	Not considered	Considered
	Selection of cost-effective improvement options	External selection process	Internalised

3.5절에서 언급하였듯이, 앞서 살펴본 방법들은 다양한 온실가스 배출원, 즉, 에너지와 원료 모두로부터의 배출과 이에 따른 기술의 저감 잠재력 평가에는 한계를 갖게 된다. 그리고 동적 에너지 및 원료 시스템 모형의 계획기간은 대략 반세기 정도이다. 아주 짧은 계획기간으로는 자본이 요구되는 설비의 낮은 대체율로 인해 단지 적은 양의 배출 감소 잠재력만을 보여줄 수 있기 때문에 긴 계획기간이 필요하다.

동적 접근법은 원료 소비와 일년 동안의 생산품 요구량, 그리고 다음해의 폐기물 배출과의 관계를 분석할 수 있다. 이것이 LCA와 MFA같은 정적인 분석 접근법과 중요한 차이점이다. 오랜 계획기간은 더욱더 현실적인 환경 향상 잠재력을 증명할 수 있게 한다. 또한 이것은 현재의 원료소비와 미래의 재활용 및 에너지 회수 가능성사이의 복잡한 관계를 고려하는 새로운 분석을 제공할 수 있다.

결론적으로, 이상에서 살펴본 분석기법 중에서 에너지와 원료(예, 석회석)로부터의 온실가스 배출 모두를 고려하면서, 에너지 기술의 배출저감 잠재력을 평가할 수 있는 것은 동적 에너지 및 원료 시스템 모형이 적절한 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 향후 연구방향

에너지기술의 환경영향(특히, 온실가스 배출) 평가에 적용할 수 있는 에너지시스템분석 기법들에 대해 고찰해 보았으며, 다양한 배출원을 고려한 기술의 평가에 가장 적절히 적용할 수 있는 것으로 동적 에너지 및 원료시스템 모형을 제안하였다.

본 논문에서 제기하고자 하는 주요한 문제 중의 하나는 온실가스 배출 잠재력 평가와 관련하여 에너지사용에 의한 배출과 더불어 원료에 의한 배출 역시 중요하게 고려되어야 한다는 점이다. 현재까지 원료에 의한 배출은 잘 알려지지 않고 있으며, 산업부문의 주요한 배출에 관련하여 정확히 이해되지 못하고 있는 실정이다.

온실가스 저감을 위한 전략의 수립의 경우, 기술개발, 연료대체와 더불어 원료를 고려한다면 더욱 비용 효과적인 배출저감 효과를 가져올 것으로 사료된다.

향후 본 논문에서 포함하고 있는 여러 가지 방법론들의 국내 적용 및 검증에 관한 연구가 필요할 것이며, 이를 실제 기술정책 대안의 도출과 연계시키기 위한 많은 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 또한 다양한 방법론들이 활발히 적용되고, 적용결과가 유용하게 활용되기 위해서는 이들 방법론들이 필요로 하는 많은 다양한 자료에 대한 국가적인 인프라가 우선적으로 구축되어야 할 필요가 있다.

## 6. 참고문헌

- 1) Dolf J. Gielen, "Materialising dematerialisation; Integrated energy and materials systems engineering for greenhouse gas emission mitigation", Thesis Delft University of Technology, Delft, the netherlands, 1999.
- 2) 정환삼 외, "전원별 환경영향 평가를 위한 수명주기분석기법 도입 필요성 연구", 한국에너지공학회 추계 학술발표회 논문집, 1998.
- 3) 한국에너지기술연구소, "지구환경을 고려한 에너지자원 정책 방향", 1998.
- 4) 중소기업청, "개별기술평가 모델 개발", 1999.
- 5) 통상산업부, "에너지 분석", 1996.
- 6) Berger et al., "Mew MARKAL features related to material and energy flow", GERAD, Montreal, Canada, 1993.
- 7) Duchin, F. et al., "The future of the environment. Ecological economics and technological change", Oxford University press, New York, 1994.
- 8) Sundberg J., "Generic modelling of integrated material flows and energy systems", Thesis Chalmers University, Goteborg, Sweden, 1993.