

온실가스감축정책 평가를 위한 LP기반 상향식 모형의 수리 구조 및 정식화에 대한 연구

김후곤

경성대학교 경영정보학과

(2014년 9월 17일 접수, 2014년 12월 2일 수정, 2014년 12월 4일 채택)

A Mathematical Structure and Formulation of Bottom-up Model based on Linear Programming

Hu Gon Kim

Kyungsoong University

(Received 17 September 2014, Revised 2 December 2014, Accepted 4 December 2014)

요 약

2020년을 목표로 한 국내 중기 온실가스 감축목표가 2009년에 발표된 이후 다양한 온실가스 방안들이 제시되고 있다. 장기적인 온실가스 감축 정책들을 체계적으로 평가하기 위해 대부분의 국가에서는 상향식 모형 또는 하향식 모형이 이용이 되고 있다. 본 연구에서는 상향식 모형의 일반적인 현황 및 적용방안에 대해서 알아보고, 또한 가장 많이 사용되는 LP를 이용한 상향식 모형에 대한 이론적 고찰을 수행하였다. 특히 새롭게 제시된 단순화된 LP 정식화를 제시하기 위해, 의사결정변수 분석, 목적함수에 대한 분석, 기본적인 제약식인 흐름보존제약 및 용량제약에 대한 보다 간결한 정식화를 제시하고 있으며, 다양한 시나리오나 정책의 효과를 LP에 포함시킬 수 있도록 선형제약식을 만드는 방법도 제시하고 있다.

주요어 : 온실가스감축 정책, 상향식 모형, 선형계획법

Abstract - Since the release of mid-term domestic GHG goals until 2020, in 2009, some various GHG reduction policies have been proposed. There are two types of modeling approaches for identifying options required to meet greenhouse gas (GHG) abatement targets and assessing their economic impacts: top-down and bottom-up models. Examples of the bottom-up optimization models include MARKAL, MESSAGE, LEAP, and AIM, all of which are developed based on linear programming (LP) with a few differences in user interface and database utilization. In this paper, we suggest a simplified LP formulation and how can build it through step-by-step procedures.

Key words : GHG abatement policy, bottom-up modeling, linear programming

1. 서 론

온실가스 감축과 관련된 다양한 정책들을 평가하

고 장기전망을 하는 것은 매우 중요할 뿐만 아니라 다양한 방법론들이 존재한다. 비록 우리나라는 지구 온난화 문제 해결을 위한 온실가스 규제 및 방지를 위해 1997년에 발의된 교토의정서에 의한 41개 의무 감축국(Annex-1)은 아니지만, 우리나라도 2009년에 발표한 “국가 온실가스 중기(2020년) 감축목표 설정

[†]To whom corresponding should be addressed.
Kyungsoong University 314-79, daeyon-dong, nam-gu,
busan 608-736 republic of korea
Tel : 051-663-4453 E-mail : hkim@ks.ac.kr

추진계획”에 의해 2020년까지 BAU(Business As Usual) 대비 21%, 27%, 30% 감축의 세 가지 방안을 제시하였고, 이러한 목표치 달성을 위한 다양한 정책들을 시행하고 있다. 세계적 차원, 국가차원, 국가 단위부문이나 지자체 등의 온실가스 감축을 위한 정책 및 장기전망을 위한 모형은 크게 상향식 방법(bottom-up approach)과 하향식(top-down approach)으로 나누어진다.

하향식의 경우 거시계량경제 모형과 CGE(computable general equilibrium) 모형 등이 있는데, 거의 대부분 국가에서는 CGE 모형을 이용하고 있다. CGE 모형은 일반 균형하에서 다양한 부문 및 경제 주체로 구성된 시장에서의 수요, 공급, 가격 등의 균형을 분석하는 모형으로, 배출권 거래제 도입, 탄소세 도입 등 다양한 시나리오 하에서 온실가스 감축 효과에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 보여 주게 된다. 해외의 경우 CGE 모형은 퍼듀대학의 GTAP(Global Trade Analysis Project) 데이터베이스를 이용하는 모형, GEMPACK(General Equilibrium Model PACKage)을 이용한 모형, MPSGE(Mathematical Programming System for General Equilibrium)를 이용하는 모형, GAMS(General Algebraic Modeling System)를 이용하는 모형 등이 있다.

반면 상향식 모형은 다양한 부문(sector), 하위부문(sub sector) 들의 주어진 수요를 만족시키기 위한 다양한 기술(에너지 공급원, 에너지 전환기술, 수요를 만드는 수요기술 등)들을 정의하고, 이 기술들의 에너지 흐름을 구하게 되는데, 주로 다기간 LP 모형(multit-period linear programming model)을 이용하게 된다. 상향식 모형을 구현하는 방법은 LP를 이용하는 최적화 모형(optimization model)과 시뮬레이션 모형(simulation model)으로 크게 나누어지는데, 대부분의 경우 LP를 이용하는 모형이 많이 사용되고 시뮬레이션 모형은 LEAP을 주로 이용하게 된다. 최근 LEAP(The Long-range Energy Alternatives Planning system) 모형의 경우 OSeMoSys(the Open Source Energy Modelling System)를 이용하여 제한적으로 LP를 이용한 최적화를 제공하고 있다. 최적화 모형의 대표적인 형태로는 IEA 산하기관인 ETSAP의 MARKAL(MARKet ALlocation), IAEA의 MESSAGE(Model for Energy Supply's Strategy Alternatives and General Environmental effect), 일

본 NIES의 AIM(Asia-Pacific Integrated Model) 등이 대표적이다. 이들 최적화 모형은 UI(User Interface), 구현 방식, LP solver 등에서 일부 차이를 보여주고 있지만 근본적으로는 동일한 형태의 LP 모형에 근간을 두고 있다.

본 연구에서는 2장에서는 대표적인 LP 기반의 대표적인 모형인 MESSAGE, MARKAL, AIM, LEAP 등에 대해서 알아보고, 3장에서는 가장 상향식 모형의 수리적 특성 분석 및 LP 정식화를 제시하고, 마지막 4장에서는 향후의 연구방향을 제시하도록 한다.

2. 상향식 모형의 개요

선형계획법(Linear Programming, LP)은 최적화 이론의 한 분야로서 매우 광범위한 분야에 성공적으로 적용되어 왔다. 특히 대규모 의사결정변수와 제약식을 가지는 문제에 대한 최적해를 쉽게 구할 수 있는 효율적인 해법과 이 해법을 실행하는 매우 안정적인 소프트웨어들이 존재한다. 즉 모형의 단순성(비현실적이지만 선형이라는 매우 단순한 수학적 구조), 효율적인 해법의 존재(simplex 해법 및 interior 해법 등), 실행 소프트웨어의 안정성(cplex, glpk 등)으로 인해 많은 응용분야를 가지고 있다.

에너지 분야의 경우 1970년 초 오일쇼크에 따른 대체에너지의 경제성 분석을 위해 개발되기 시작하였는데, LP를 이용한 최적화 모형은 크게 미 국방부 산하의 Brookhaven 연구소와 IEA의 ETSAP를 중심으로 개발된 MARKAL과 EU의 지원을 받아 IIASA를 중심으로 개발된 MESSAGE가 대표적이다. 또한 일본의 NIES (the National Institute for Environmental Studies)에서 개발한 AIM (The Asian Pacific Integrated Model)의 경우에도 LP를 이용하고 있다.

LP를 이용하지 않은 경우에는 시뮬레이션이나 회계 모형을 이용하게 되는데, 이러한 경우의 대표적인 모형으로는 SEI(Stockholm Environment Institute)에서 개발한 LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning System)이 있다. LEAP의 경우 2011년부터 공개 소프트웨어인 OSeMOSYS(Open Source Energy Modeling System)를 통해 LP를 통해 제한적인 최적화 모듈을 제공하고 있다.

MARKAL, MESSAGE, AIM 등 LP에 기반을 두고 만들어진 상향식 모형 구축 툴들은 UI (User Interface) 등 일부에서 차이를 보이고 있지만, 모두

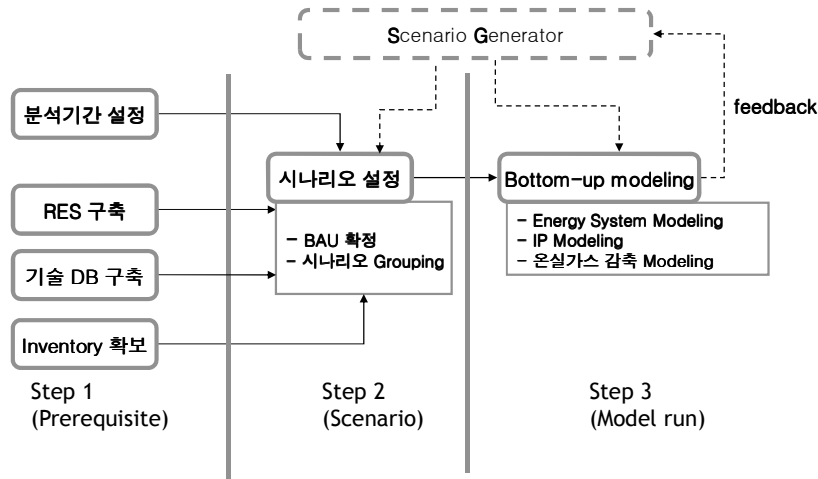


Fig. 1. 상향식 모델링의 일반적인 절차

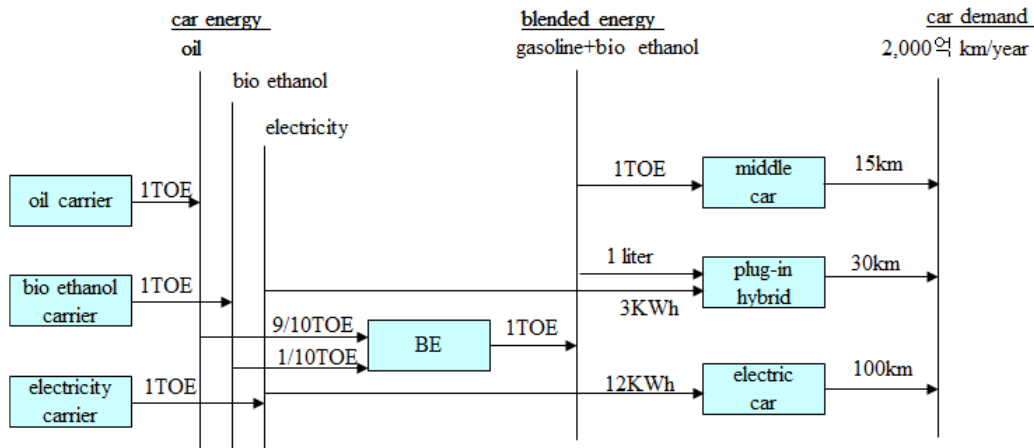


Fig. 2. 수송부문 RES의 예

동일하게 RES(Reference Energy System)를 통한 에너지 흐름을 선형계획법으로 표현하고 있다. 물론 비용의 처리에 있어서 일부 차이를 보이고 있지만, 입력 데이터가 동일하면 결과물은 동일하다고 볼 수 있다. 이들은 다음과 같은 절차를 거쳐서 선형계획법을 구현하고 있다.

- RES를 통한 에너지 흐름의 표현
- multi-eriod dynamic LP
- 비용은 변동비, 고정비, 투자비의 세가지로 구성
- 수요는 주어짐
- 의사결정 변수는 activity variable과 capacity variable로 구성됨

상향식 모델링은 <그림 1>과 같이 사전준비(Prerequisite), 시나리오 작성(Scenario), 모델 실행(Model Run) 등의 세가지 단계로 구성된다. 이러한

전반적인 절차를 걸쳐서 만들어지는 상향식 모형에서 가장 핵심이 되는 부분은 RES라 할 수 있다. RES는 주어진 수요를 만족시키는 에너지흐름을 표현하기 위한 것으로, RES는 에너지 품(energy form), 기술(technology), 수요(demand), 자원(resource), 저장(storage)등으로 구성된다. RES를 표현하기 위해서는 최소한 한 개 이상의 에너지 품(energy form), 기술(technology), 수요(demand)가 필수적으로 존재하여야 한다.

본 연구에서는 다음 <그림 2>의 수송부문의 예를 중심으로 RES를 설명하기로 한다.

<그림 2>의 RES에서 수직선은 수요 및 에너지 품의 에너지 레벨(energy level)을 나타낸다. 수요는 RES에서 맨 오른쪽 수직선으로 표현되며, 여러개의 수요가 있을 수 있다. 수요를 제외한 나머지는 특정 에너지 품에 속한 에너지 레벨들을 나타낸다.

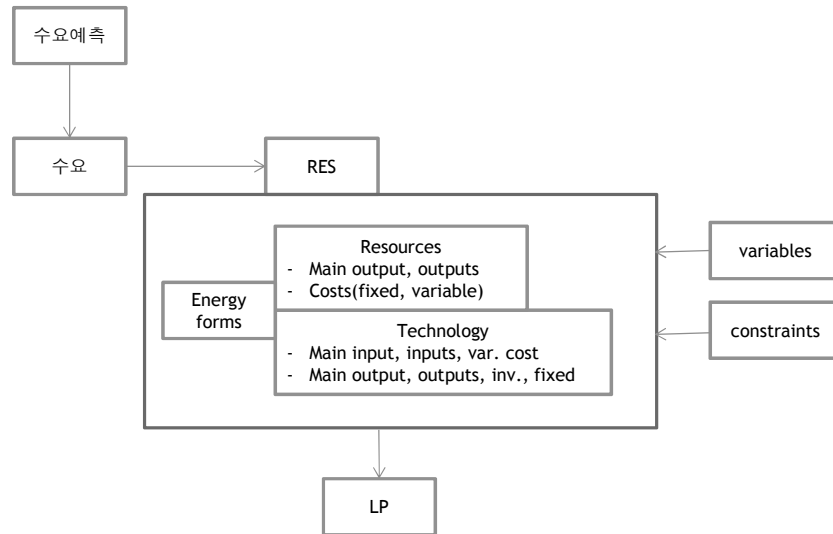


Fig. 3. 수송부문 RES의 예

그리고 RES에서 사각형으로 표현된 것은 기술(technology)이라고 하는데, 기술은 한 개 또는 여러 개의 에너지 레벨을 입력으로 받아서, 한 개 또는 여러 개의 에너지 레벨을 출력하는 것이다. 기술들은 단순히 에너지이거나 아니면 제품, 공장 등이 모두 해당될 수 있다. 즉 MESSAGE에서는 입력을 받아서 산출을 하는 모든 것들을 기술이라고 표현하고 있다.

<그림 2>에서 맨 오른쪽의 기술("oil carrier", "bio ethanol carrier", "electricity carrier")들은 입력이 없는데, 이런 기술들은 수입(import)이나 자원(resource)과 같은 경우 또는 주에너지(primary energy)를 나타내기 위한 것이다. 주에너지는 어떤 기술에 의한 전환없이 주어지는 에너지를 말한다. 수송의 경우 oil이 주에너지이지만, 만약 정유공정을 포함하는 RES에서는 oil은 정유공정의 에너지 폼으로부터 입력되어야 한다. 또한 그림의 맨 오른쪽에 존재하는 기술들("middle car", "plug-in hybrid", "electric car")은 에너지 폼의 입력을 받아서 수요를 만드는데, 이러한 기술들은 특별히 수요 기술(demand technology)이라 부른다.

RES가 작성되고 나면, RES와 관련된 각종 통계 데이터(inventory)를 이용하여 LP 모형 구축을 위한 데이터들을 입력하고, 이를 LP로 구현하게 되는데 다음의 <그림 3>은 상향식 모형에서의 LP의 구성 과정을 보여주고 있다.

<그림 3>에서 보듯이 주어진 수요를 만족시키기 위한 RES가 작성되면 RES와 관련된 의사결정변수들이 결정되고, 이 외에 제약식들을 표현하기 위한

가상 변수(dummy variables)들 및 제약식들을 추가한 후에 최종적으로 LP를 만들게 된다.

3. 상향식 모형의 수리적 특성 분석 및 정식화

RES는 단일 연도만을 표현하는 것이 아니고, multi-period를 표현할 수 있도록 되어 있는데, 이를 위해 RES의 기술들의 입력 및 출력 그리고 관련된 비용요소들은 모두 연도별로 다른 값을 가질 수 있다. 즉 연도별 다른 값을 가지게 되면 이를 시계열 데이터(time series data)라 부른다. LP기반의 상향식 모형은 RES 및 각종 시계열데이터로 구성된 인벤토리를 입력으로 받아서, 이로부터 LP를 만들게 되는 데 어떠한 과정을 거치게 되는지를 살펴보기로 한다.

3.1 RES를 통한 에너지 흐름의 표현

앞에서 언급하였듯이 RES는 기본적으로 에너지 흐름을 나타내는데, 이때 RES가 가지는 여러 가지 가정들이 존재한다. 가장 먼저 에너지 흐름과 관련하여서는 선형계획법의 가장 큰 가정인 비례성(proportionality)을 들 수 있는데 이는 다음과 같다.

Property 1(비례성). 특정 연도의 RES에서 기술의 입력과 출력은 비례성을 만족하여야 한다.

예를 들어 <그림 4>와 같이 기술 i가 입력이 2개, 출력이 3개라 하자.

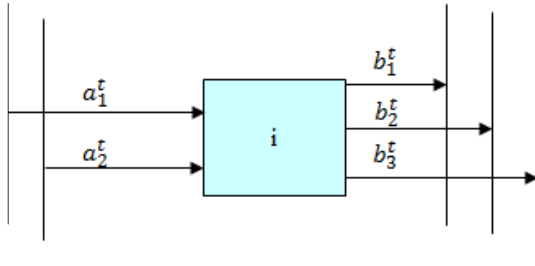


Fig. 4. 기술의 입력과 출력 예

이때 i 로 투입되는 에너지를 f_i^t 라 하면,

$$a_m^t f_i^t = b_n^t f_i^t, \text{ for } m = 1, 2, \quad n = 1, 2, 3$$

를 만족한다는 것이다.

즉 f_i^t 의 값에 관계 없이 모두 비례성을 만족하여야 한다. 최소한의 제약식을 가지고, RES의 모든 기술에 대해서 비례성을 만족시키도록 표현하는 방법은 다음의 에너지흐름보존제약(energy flow conservation equation)이 됨을 쉽게 보일 수 있다.

특정 에너지 품을 생성하는 기술들의 집합을 P_j 라 하고, 이 에너지를 소비하는 기술들의 집합을 C_j 라 하자. 그러면 Property 2는 다음과 같이 된다.

Property 2(에너지흐름보존제약). 특정 연도의 에너지 품을 생성하는 기술들의 입력의 합은 이 에너지 품을 소비되는 기술들의 출력의 합과 같다.

다음 <그림 5>와 같이 에너지 품 j 를 생성하는 기술들의 집합을 $P_j = \{1, 3\}$ 라 하고, 이 에너지를 소비하는 기술들의 집합을 $C_j = \{4, 5, 8\}$ 라 하자. 그리고 $a_{j(i)}^t$ 는 t 년도에 에너지 품 j 로부터 기술 i 로의 입력값이고, $b_{j(i)}^t$ 는 t 년도에 에너지 품 j 로 들어오는 기술 i 의 출력값이라 하자.

그러면 <그림 3>에서 j 에 대한 에너지흐름보존제약은

$$b_{j(1)}^t f_1^t + b_{j(3)}^t f_3^t = a_{j(4)}^t f_4^t + a_{j(5)}^t f_5^t + a_{j(8)}^t f_8^t$$

이 된다. 이를 일반화하면

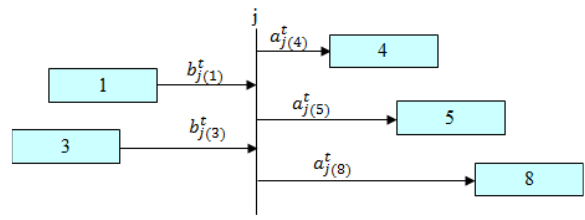


Fig. 5. 에너지 품에 대한 에너지 흐름 보존 제약

$$\sum_{i \in P_j} b_{j(i)}^t f_i^t = \sum_{i \in C_j} a_{j(i)}^t f_i^t$$

가 되고, (에너지흐름보존제약)이라 부르기로 한다. 이때 j 가 수요이면 $C_j = \emptyset$ 이 되고, t 년도의 j 의 수요를 d_j^t 라 하면

$$\sum_{i \in C_j} a_{j(i)}^t f_i^t \geq d_j^t$$

가 되는데, 이를 편의상 (수요제약)이라 부르기로 한다.

Property 3. 모든 기술의 출력이 하나만 존재하면

$$\sum_{i \in C_j} a_{j(i)}^t f_i^t = d_j^t$$

이 된다.

Property 3의 증명은 매우 간단하다. Property 1에 의해서 두 개 이상의 출력값을 가지는 기술 i_1 가 존재한다고 하자. 그러면 기술 및 에너지 품으로 구성되어, 마지막으로 수요 j_k 를 만드는

$$i_1 - j_1 - i_2 - j_2 - \dots - i_{k-1} - j_{k-1} - i_k - j_k$$

와 같은 기술에너지체인(technology-energy flow chain)을 정의할 수 있다. 기술 i_1 또 다른 기술에너지체인을

$$i_1 - j_1' - i_2' - j_2' - \dots - i_{k-1}' - j_{k-1}' - i_k' - j_k'$$

라 하자. 그러면 이로부터 쉽게 d_{j_k} 또는 $d_{j_k'}$ 중 어느 하나는 (수요제약)에서 “>”임을 보일 수 있다.

Property 4. 수요 j_k 를 만드는 기술에너지체인

$$i_1 - j_1 - i_2 - j_2 - \dots - i_{k-1} - j_{k-1} - i_k - j_k$$

가 하나 이상 존재한다.

Property 4는 매우 간단하지만, RES를 구성하고 난 후에 j_k 를 만족하는 (흐름보존제약)들이 존재하는지를 알아보는 방법이 된다. 즉 feasibility를 check 하는 수단이 되며, Property 4는 feasible solution이 존재하기 위한 필요조건이 되는 것이다. 이를 이용하면 필요한 에너지흐름에 대한 하한 값 및 최적해의 하한 값을 쉽게 구할 수 있을 것으로 보이는데, 이에 대한 연구는 추후의 과제로 남겨 두기로 한다.

3.2 의사결정변수

MESSAGE에서 의사결정변수는 어떤 기술에 투입되는 메인입력(main input energy)의 양과 기술에 대한 용량 신설(또는 증설)의 양(capacity installation)의 두가지로 구성된다.

Property 1에 의해 t 연도의 기술 i 에 투입되는 에너지들과 산출물들은 서로 비례성을 만족하므로, 기술마다 투입되는 에너지 중에서 하나를 메인입력으로 지정할 수 있다. 편의상 Property 1에 의해 메인입력의 양은 1로 두자. 그러면 <그림 4>는 비례성의 의해 <그림 6>과 같이 된다.

메인입력이 정해지면 나머지 입력 및 출력은 메인입력에 비례하여 정의할 수가 있으므로, 기술 i 에 투입되는 메인입력의 양(main energy input for technology i)만을 변수로 설정하면 된다. 이를 기술의 활동수준(activity)라고 하며, 이 활동수준을 나타내는 변수를 활동변수(activity variable)로 한다. 즉 활동변수는 기술에 입력되는 메인입력의 양을 나타내는 의사결정 변수이다. 활동변수는 활동 수준에 비례하여 목적함수에 비용으로 부과되는데, 비례성에 의해서 임의의 출력 중 하나를 메인출력으로 지정하고, 이 메인출력의 단위당 비용형태로 목적함수에 변동비(variable cost)를 입력할 수 있도록 되어 있다.

어떤 기술에 에너지원들의 입력이 이루어져서 이를 처리한 후 산출물(output)을 만들려면, 이 기술은 설비용량(capacity)을 가져야 한다. 기술이 공장(또는 공정이나 설비)인 경우에는 공장의 신설 및 증설이 이루어져야 하고, 이렇게 만들어진 공장의 용량에 의

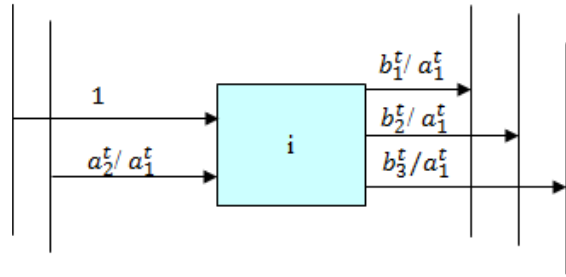


Fig. 6. 메인입력이 '1'인 경우의 기술의 입력과 출력

해 산출물은 제약을 받게 된다. 또한 기술이 자동차나 가전제품과 같은 형태의 경우에는 특정연도에 생산(또는 투입)되는 대수를 에너지 단위로 환산한 것이 된다. 설비용량 증설과 관련되어서는 투자비(investment cost)와 연간고정비(fixed operation and maintenance cost per year)가 발생하게 된다.

상향식 모형에서 base year와 terminal year사이에서 속한 기간이 모델의 분석 기간(time horizon)이 된다. 예를 들어 2007년부터 2050년까지를 분석기간으로 하려면 base year는 2006이고 terminal year는 2051년이 된다. historic capacity는 first model year 이전에 이미 만들어져 있는 설비들 중 수명이 남아 있어서 model year 동안에 이용할 수 있는 기존 설비 용량을 말한다.

편의상 base year를 0이라 하고, 분석기간(first model year부터 last model year)을 $1, 2, \dots, N$ 이라 하고, 모든 기술들의 집합을 I 로 나타내자. 그리고 h_i^{-t} 는 기준년도에서 t 년도 이전의 재고량을 나타내고, l_i 는 기술 i 의 수명이라고 하자. 즉 기준년도가 2007년이면, h_i^{-1} 는 2006년을 의미한다. 그러면 historic capacity는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} h_i^1 &= h_i^{-1} + h_i^{-2} + \dots + h_i^{-(l_i-1)} \\ h_i^2 &= h_i^{-1} + h_i^{-2} + \dots + h_i^{-(l_i-2)} \\ &\vdots \\ h_i^{l_i-1} &= h_i^{-1} \end{aligned}$$

t 년도에 기술 i 의 메인입력에 투입되는 에너지의 양(활동수준)을 f_i^t 라 하고, 설치되는 설비용량을 y_i^t 라 하자. 설치되는 설비용량은 수명을 가지게 되는데, 수명을 l_i 라 하면 t 년도에 설치된 설비는 $t, t+1, \dots, t+l_i-1$ 기간동안 이용이 가능하다. 메

인출력의 양을 b_i^t 라 하면, 설비용량은 historic capacity를 포함하여 메인출력에 대하여 다음과 같이 된다.

$$b_i^t f_i^t \leq \sum_{s=1}^t y_i^s + h_i^t, \quad \text{for } l_i \geq N, \\ t = 1, 2, \dots, N, \quad i \in I \quad (\text{capacity-0})$$

$$b_i^t f_i^t \leq \sum_{s=1}^t y_i^s + h_i^t, \quad \text{for } l_i < N, \\ t = 1, 2, \dots, l_i - 1, \quad i \in I \quad (\text{capacity-1})$$

$$b_i^t f_i^t \leq \sum_{s=t-(l_i-1)}^t y_i^s, \quad \text{for } l_i < N, \\ t = l_i, l_i + 1, \dots, N, \quad i \in I \quad (\text{capacity-2})$$

편의상 이를 (설비용량제약)이라 부르기로 한다.

어떤 기술에 대한 (설비용량제약)은 다음의 두가지 유형으로 나누어지게 된다.

(1) 용량 제약이 없는 경우

공장 증설이나 신설이 없어도 되는 경우(분석기간 동안 충분한 용량을 제공할 수 있는 경우 또는 용량 증설과 관련된 투자비와 연간고정비를 0으로 가정하는 경우)가 해당된다. 목적함수에서 설비용량증설과 관련된 모든 비용이 0이 되면, LP에서 (설비용량제약)은 redundant한 제약식이 된다. 즉 의미없는 제약식이 되므로, 생성할 필요가 없는 것이다.

(2) 용량 제약이 있는 경우

활동수준이 용량에 의해 제약을 받는 경우로서, 설비의 수명 및 historic capacity에 의해 제약식이 결정된다. 만약 설비의 수명이 주어지지 않으면 설치된 설비는 나머지 분석기간 동안 이용이 가능하다. 그리고 투자비 및 연간 고정비 중 적어도 하나의 비용이 부과되어야 한다.

3.3 목적함수식의 비용 분석

상향식 모형의 LP에서 목적함수와 관련되어 입력하는 비용은 3가지가 있다. 기술의 활동수준(t 년도에 기술 i 의 메인입력에 투입되는 에너지의 양을 나타내는 f_i^t)에 비례하여 발생하는 변동비(variable cost), 설비용량(t 년도에 기술 i 에 설치되는 설비용량을 y_i^t)에 대하여 발생하는 투자비(investment cost)와 연간 고정비(fixed operation and management cost per

year)이다. 변동비는 메인입력 단위당에 비례하도록 입력하여야 하고, 투자비의 경우 설비증설 기간 동안 필요한 전체 투자비를 설비단위당으로 환산하여 하며, 연간고정비는 설비단위당 매년 고정적으로 발생하는 비용을 입력하여 한다. 이렇게 입력된 변동비, 투자비, 연간고정비는 상향식 모형의 LP 내에서 할인율을 감안하여 연간단위로 재계산하여 목적함수에 반영되게 된다.

상향식 모형의 LP에서 할인율(discount rate)은 매우 중요한 요소인데, 목적함수에서의 비용들은 할인율을 감안하여 현재화(annualization)하게 된다. 할인율은 분석기간동안 하나로 주어지는데 편의상 이를 r 이라고 하고, 각 연도별 할인율을 d^t 라고 하면,

$$d^t = 1/(1+r)^{t-0.5}$$

가 된다. 즉 할인율을 이용해 연도별 할인율은 현재화하는데, 이 때 t 년도에 발생하는 비용들은 각 연도의 중간 기간에 대해 할인한 비용이 된다.

이러한 할인율을 반영하여 변동비, 투자비, 연간고정비를 계산하는 과정을 살펴보기 위해, 다음의 용어를 정의하도록 한다.

$t \in T$ 에 대해

v_i^t : $i \in I$ 의 메인 입력1단위를 처리하는데 발생하는 변동비

y_i^t : technology i 의 t 년도의 capacity installation

F_i^t : technology $i \in I$ 의 t 년도의 capacity installation의 단위당 고정비

Iu_i^t : technology $i \in I$ 의 t 년도의 capacity installation의 단위당 투자비

l_i^t : technology i 의 t 년도에서의 capacity installation의 수명

(1) 변동비

변동비의 입력은 메인입력에 대해서 하지만 목적함수에서는 메인출력 1단위에 대해 발생하게 된다. 따라서 메인입력 1단위에 대한 메인출력을 b_i^t 라 하면, 목적함수에서 t 년도의 기술 i 에 대한 변동비는

$$var_i^t = (v_i^t \cdot b_i^t) \cdot d^t$$

가 된다.

(2) 고정비

고정비용은 capacity installation 단위당에 대해 부과되고, 연간 고정비용(fixed operation and maintenance per year)으로 입력이 된다. 따라서 capacity installation이 일어나면, 수명 기간 동안 동일하게 부과되는 연간 고정비용을 모두 합산하여야 되므로, t년도에 설치되는 설비 i의 수명기간(l_i^t)과 관련되어서 발생하게 된다. 따라서 다음의 두가지 경우가 있게 된다.

- 수명기간이 $l_i^t (< N)$ 로 주어지는 경우

$$fom_i^t = \begin{cases} F_i^t \cdot \left(\sum_{s=t}^{t+(l_i^t-1)} d^s \right), & t \leq N - (l_i^t - 1) \\ F_i^t \cdot \sum_{s=t}^N d^s, & t > N - (l_i^t - 1) \end{cases}$$

- 수명기간이 $l_i^t (\geq N)$ 로 주어지는 경우

$$fom_i^t = F_i^t \cdot \sum_{s=t}^N d^s, t \in T$$

(3) 투자비

투자비용은 capacity installation 단위당 부과된다. 단위당 투자비용은 총 투자비용을 기술의 할인율(hurdle rate)을 이용하여 기술의 수명기간동안 동일한 연간 비용으로 분산시킨 개념이다. 투자비용(investment cost)은 수명 기간에 걸쳐 연간환산투자비용(annualized investment cost, AIC)을 이용하여 구하는데,

$$AIC = \frac{Iu}{\sum_{i=1}^n (1+r)^{-i}}$$

가 된다. 또한 자본회수계수(Capital Recovery Factor, CRF)는 다음과 같이 정의된다.

$$CRF = r(1+r)^n / ((1+r)^n - 1) = 1 / \sum_{i=1}^n (1+r)^{-i}$$

이를 이용하면

$$AIC = Iu \cdot CRF \quad \text{가 된다.}$$

투자비용은 기술의 수명기간동안 동일한 금액(AIC)을 매년 지불하는 것으로 가정하는데, 수명기간이 분석기간을 초과하는 투자에 대해서는 잔여기간

동안의 가치(salvage value)만을 반영하게 된다. 즉 수명기간이 5년이고 AIC가 100인데, 실제 투자가 2013년에 발생하는데 분석기간이 2015년에 끝나게 되면 투자는 3년간 발생하여 300이 투자비용이 된다. 그렇지 않고 2011년 이전에 발생하는 투자는 500이 투자비용이 된다.

- 수명기간이 $l_i^t (< N)$ 로 주어지는 경우(AIC_i^t 를 기술 i의 t년도 AIC라 하자)

$$inv_i^t = \begin{cases} (AIC_i^t \cdot l_i^t) \cdot d^t, & t \leq N - (l_i^t - 1) \\ (AIC_i^t \cdot (N - (t - 1))) \cdot d^t, & t > N - (l_i^t - 1) \end{cases}$$

- 수명기간이 $l_i^t (\geq N)$ 로 주어지는 경우 :

$$inv_i^t = (AIC_i^t \cdot (N - (t - 1))) \cdot d^t$$

3.4 상향식 모형에서의 LP 정식화

이제 3절에서 논의된 내용을 바탕으로 목적함수 및 제약식을 정리하면 다음과 같은 가장 상향식 모형에서의 기본적인 LP 정식화(formulation) 모형인 (Basic LP)을 정의할 수 있다.

(Basic LP)

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^N (inv_i^t \cdot y_i^t + fom_i^t \cdot y_i^t + var_i^t \cdot f_i^t)$$

s.t

$$b_i^t f_i^t \leq \sum_{s=1}^t y_i^s + h_i^t, \text{ for } l_i \geq N, t=1,2,\dots,N, i \in I \quad \text{(capacity-0)}$$

$$b_i^t f_i^t \leq \sum_{s=1}^t y_i^s + h_i^t, \text{ for } l_i < N, t=1,2,\dots,l_i-1, i \in I \quad \text{(capacity-1)}$$

$$b_i^t f_i^t \leq \sum_{s=t-(l_i-1)}^t y_i^s, \text{ for } l_i < N, t=l_i, l_i+1, \dots, N, i \in I \quad \text{(capacity-2)}$$

$$f_i^t, y_i^t \geq 0, t=1,2,\dots,N, i \in I$$

(Basic LP)에 다양한 제약식들을 추가하게 되면, 보다 현실을 반영할 수 있는 상향식 모형을 만들 수 있게 된다. 또한 다양한 제약식들의 집합을 하나의 시나리오라 정의할 수 있는데, 이러한 시나리오를 만

들기 위해서는 현실을 반영할 수 있는 선형제약식을 만들 수 있어야 한다.

LP 기반의 상향식 모형에서 자주 사용되는 제약식에 대해 알아보자. 이러한 제약식들은 메인입력, 메인출력, 용량증설에 대한 3가지로 나누어진다. 기술 $i \in I$ 의 t 년도의 메인 입력 단위당 메인출력을 b_i^t 라고 정의하자.

(1) 그룹 제약식

모든 기술의 집합을 I 에 대한 부분집합 $G \subseteq I$ 에 대한 제약식을 말한다.

- 메인입력 제약식 : 예로는 온실가스배출제약, 연비개선제약, 활동량 제약 등이 있다.

$$\sum_{i \in G} a_i^t f_i^t \leq bound_t, \quad \text{for } t=1,2,\dots,N, \quad G \subseteq I$$

- 메인출력 제약식 : 예로는 온실가스배출제약, 연비개선제약, 활동량 제약 등이 있다.

$$\sum_{i \in G} (a_i^t \cdot b_i^t) f_i^t \leq bound_t, \quad \text{for } t=1,2,\dots,N, \quad G \subseteq I$$

- 용량증설에 관한 제약식 : 설비 및 용량 증설에 대한 제약이다.

$$\sum_{i \in G} p_i^t y_i^t \leq bound_t, \quad \text{for } t=1,2,\dots,N, \quad G \subseteq I$$

(2) 기술의 부분 집합들에 대한 전체 모델 기간에 대한 제약식

G 에 속한 기술들에 대하여 모델 기간 전체에 대한 제약식을 만들게 된다. 제약식에 이용될 기술 i 의 t 년도의 파라미터를 p_i^t 라 하자.

- 메인입력 제약식

$$\sum_{s=1}^t \sum_{i \in G} p_i^s f_i^s \leq bound_t, \quad \text{for } t=1,2,\dots,N, \quad G \subseteq I$$

- 메인출력 제약식

$$\sum_{s=1}^t \sum_{i \in G} (p_i^s \cdot b_i^s) f_i^s \leq bound_t, \quad \text{for } t=1,2,\dots,N$$

- 용량증설에 관한 제약식

$$\sum_{s=1}^t \sum_{i \in G} p_i^s y_i^s \leq bound_t, \quad \text{for } t=1,2,\dots,N$$

(3) 기술의 부분 집합들에 대한 각 t 년도별 누적 제약식

G 에 속한 기술들에 대하여 모델 기간 전체에 대한 제약식을 만들게 된다. 이 역시도 메인입력, 메인출력, 용량증설에 대한 3가지로 나누어 지는데, 제약식에 이용될 기술 i 의 t 년도의 파라미터를 p_i^t 라 하자

- 메인입력 제약식

$$\sum_{t=1}^N \sum_{i \in G} p_i^t f_i^t \leq bound_t$$

- 메인출력 제약식

$$\sum_{t=1}^N \sum_{i \in G} (p_i^t \cdot b_i^t) f_i^t \leq bound_t$$

- 용량증설에 관한 제약식

$$\sum_{t=1}^N \sum_{i \in G} p_i^t y_i^t \leq bound_t$$

4. 결 론

장기적인 온실가스 감축 정책들을 체계적으로 평가하기 위해 대부분의 국가에서는 상향식 모형 또는 하향식 모형이 이용이 되고 있다. 본 연구에서는 상향식 모형의 일반적인 현황 및 적용방안에 대해서 알아보았고, 또한 가장 많이 사용되는 LP를 이용한 상향식 모형에 대한 이론적 고찰을 수행하였다. 특히 새롭게 제시된 단순화된 LP 정식화를 제시하기 위해, 의사결정변수 분석, 목적함수에 대한 분석, 기본적인 제약식인 흐름보존제약 및 용량제약에 대한 보다 간결한 정식화를 제시하고 있으며, 다양한 시나리오나 정책의 효과를 LP에 포함시킬 수 있도록 선형제약식을 만드는 방법도 제시하고 있다.

이러한 LP 기반의 상향식 모형에 대한 정식화를 바탕으로 향후 상향식 모형을 기반으로 한 온실가스 감축 시스템 개발에 대한 이론적 기반을 제공하고 있다는 점이 본 논문의 의의라 할 수 있을 것이다. 그렇지만 단순화된 LP 정식화를 기반으로 이에 대한 심도있는 수리적 특성 및 이를 실질적인 시스템으로 구

현하기 위해서는 다양한 후속 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2014학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음

References

1. 국가온실가스 종합정보센터, “2020년 중기 국가 온실가스 감축목표설정”, 2011.
2. 녹색성장위원회, “그린카 발전전략 및 과제”, 2010.
3. 에너지경제연구원, “MARKAL 모형과 국내 장기 온실가스 감축잠재량 분석 보고서”, 2009.
4. 에너지경제연구원, “저탄소 경제시스템 구축 전략 연구 - 지역별 저탄소 경제시스템 개발”, 2010.
5. 유종훈, 김후곤, “손익분기점 분석을 이용한 전기차의 보조금 정책 연구”, 에너지공학, 제20권 제1호, 2011.
6. 유종훈, 김후곤, “MESSAGE 모델링을 이용한 승용차 부문의 그린카 도입 전망 분석”, 에너지공학, 제21권 제1호, 2012.
7. 지식경제부. “전기자동차산업 활성화방안”, 2009.
8. 한국산업환경기술원, “온실가스 배출 전망 및 감축잠재량 예측 분석 평가 기술 개발”, 2011.
9. 한국원자력 연구원, “MESSAGE 모형을 이용한 가정·상업·수송 부문 온실가스 감축잠재량 분석”, 2010.
10. EEA, CO2 Emissions Performance of Car Manufacturers in 2011, European Environment Agency (2011).
11. EPA, Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards; Final Rule, Federal Register, 75(88), Environmental Protection Agency (2010).
12. Fishbone, L.G., Abilock, H., MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL

- version. Energy Res. 5(4), 353–75 (1981).
13. Fumo, B., Mago, P.J., Chamra, L.M., Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems. Appl. Energy 86 (11), 2344–350 (2009).
14. Goldberg, K.P., The effects of the corporate average fuel efficiency standards in the U.S.. J. Ind. Econ. 46 (1), 1–3 (1998).
15. Hashim, H., Douglas, P., Elkamel, A., Croiset, E., Optimization model for energy planning with CO2 emission considerations. Ind. Eng. Chem. Res. 44 (4), 879–90 (2005).
16. IPCC, IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1995).
17. IPCC, IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2001).