

☒ 응용논문

다목적 산업연관분석을 이용한 에너지·환경계획
- Multiple Objective Input-Output Analysis in
Energy and Environmental Planning -

강희정*
Kang, Hee Jung
차재호**
Cha, Jae Ho
유왕진*
Yoo, Wang Jin

Abstract

Multiple Objective Programming(MOP) has been suggested for the solution of completed decision problems. Decision analysis in numerous areas, including energy and environmental planning, necessarily requires consideration of multiple conflicting objectives, MOP has been successfully applied to a number of these problems. The objective of this paper is to present a MOP process which are integrated model with the Input-Output(I-O) analysis for energy and environment planning in industrial sectors. In the model, three objectives are observed such as (1) value added (2) total energy consumption and (3) environmental impacts. Special emphasis is placed on the police implications of industrial structures.

1. 서론

슈페터의 동태론(Schumpeter Dynamics)은 산업사회를 움직이는 원천은 기술혁신(신기술 및 상품의 개발, 신생산 방식의 도입, 신시장의 개척, 신자원의 활용 및 신조직의 운영등을 포괄하는 개념임)과 성장의 동태적 상호작용으로 정의하면서 경제사회의 발전은 경제, 정치 및 기술의 체화적공생(Symbiosis) 관계에 의해 진행된다고 주장한 바 있다. 이러한 과정에서 산업혁명 이후 경제발전의 패러다임의 진행과정에 의한 현대의 특성은 "지속가능한 개발(Sustainable development)의 단계로 진행되고 있다. 즉 에너지와 자원사용의 증가로 환경파괴의 실상이 보고되면서 지구적 규모의 환경운동이 활발해지고 있다. 1992년 리우에서 개최된 환경개발회의에서 이러한 지속 가능한 개발(Environment Sound and Sustainable development: ESSD)의 개념이 채택되었다. 뿐만 아니라 1997년 12월에는 일본 교토에서 COP3 회의를 통하여 지구온난화가스에 대한 선진국별 감축 목표를 정한바 있다. 이와 같이 에너지와 환경문제를

* 건국대학교 공과대학 산업공학과

** 에너지관리공단 정책개발처

둘러싼 여건의 변화는 경제성장에 필수적인 재화로써의 에너지자원 사용을 제약하기 때문에 국민소득 증대를 추구하는 경제 성장목표와 삶의 질 개선을 위한 환경보전이라는 상호 상충되는 국가목표를 동시에 고려하는 정책의 수립이 요구된다.

본 연구에서는 일반 균형적 거시경제 분석에서 산업간 연관관계 분석에 활용도가 높고 통계적 유의성이 높은 산업연관분석(Input-Output analysis) 모형과 다목적 계획법(Multiple objective programming)을 이용하여 경제(Economy)/에너지(Energy)/환경(Environment)의 통합정책 대안을 분석하고 상충되는 목적들 사이의 득실교환(Trade-off) 관계를 분석하여 국가적 차원에서 선택 가능한 환경친화적 산업구조의 전환을 위한 방향을 모색하고자 한다.

2. 다목적 계획과 산업연관분석

2.1 다목적 문제의 정형화

p개의 목적, n개의 의사결정 변수 및 m개의 제약조건을 가지는 다목적 문제를 정의하면 아래와 같다.

$$\text{Max-dominate } Z(X) = [Z_1(X), Z_2(X), \dots, Z_p(X)] \quad (\text{식 1})$$

subject to

$$X \in F$$

여기에서 Z(X): 목적함수 $Z_k(X)$: k번째 개별 목적함수, $k = 1, 2, \dots, p$

X: 의사결정변수 벡터 F: 실행가능영역

(식 1)에서 의사결정변수 벡터 X 와 실행가능영역(Feasible region) F는 다음 (식 2)와 (식 3)과 같이 정의된다.

$$X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \in R, \quad R: \text{실수의 집합} \quad (\text{식 2})$$

$$F = \{ X: X \in R, g_i(X) \leq 0, X_j \geq 0 \text{ for all } i \text{ and } j \} \quad (\text{식 3})$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$g_i(X)$: 제약조건(식)

이와 같은 다목적문제에서 만일 다수의 목적들 사이에 상충관계가 전혀 존재하지 않는다면 다목적 문제의 해는 단일목적 문제의 해와 동일하게 되어 최적해(Optimal solution)의 개념을 적용할 수 있다. 그러나 일부 목적들 사이에 상충관계가 존재한다면 모든 목적함수들을 동시에 최적화시키는 해는 존재하지 않으므로 단일 목적문제에서 취급되는 최적해는 더 이상 의미가 없으며, 최적해를 대신하여 비열등해의 개념이 사용된다. 이런 맥락에서 다목적 문제에 대한 해법절차의 첫 번째 단계는 다수의 비열등해들로 구성된 비열등해 집합을 도출하는 과정이 된다.

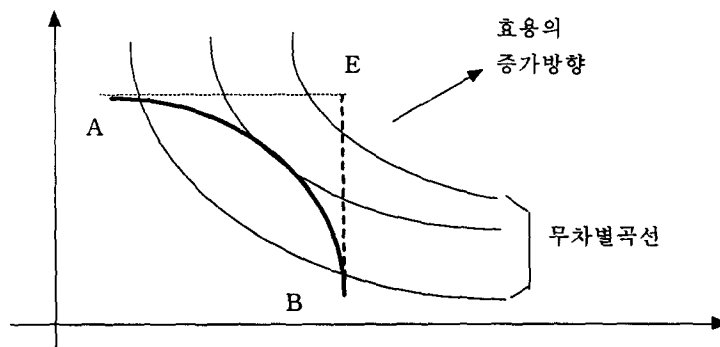
2.2. 다목적문제의 해

다목적문제에서 사용되는 비열등해를 정의하면 “비열등해(Noninferior solution)란 어떤 하나의 목적함수값을 개선(증가)시키기 위해서는 다른 여러개의 목적함수중 최소한 하나이상의 목적함수값에 대한 희생(감소)없이는 도달할 수 없는 상태에 있는 실행가능해”를 의미하며, 다목적 분석에서 실행가능영역 F가 주어졌을 때 비열등해 집합(Nondominated set:S)은 다음과 같이 정의된다. [4]

$$S = \{X: X \in F, q \in I [1, p] \text{ 에 대해 } k \neq j \text{ 일 때 } Z_p(X') > Z_q(X) \text{ 와}$$

$$Z_k(X') \geq Z_k(X) \text{의 관계를 동시에 만족시키는 어떤 } X' \in F \text{ 도 존재하지 않음} \quad (\text{식 4})$$

이와 같이 정의된 비열등해 집합(S)은 실행가능해의 부분집합이 되며, 중요한 특징은 실행가능영역(F)의 외곽부분에만 형성된다는 점이다. [그림 1]의 2차원 목적함수 벡터공간상에서 비열등해 집합은 굵은 선으로 표시된 AB선상의 모든 점이 된다.



[그림 1] 다목적 문제에서의 비열등해 및 최적절충해

이와 같은 비열등해의 도출방법에는 곡선도출법(Curve-generation method), 가중치법(Weighting method), ϵ - 제약조건법(ϵ -constraint method) 및 다목적 심플렉스법(Multicriteria simplex method) 등이 있으며, 비열등해의 도출에는 일반적으로 비열등해의 필요조건인 쿤-터커조건(Kuhn-Tucker conditions)이 이용된다.[6] 한편 의사결정자는 최종적으로 다수의 비열등해중 그의 선호구조와 부합되는 가장 선호되는 해를 선택하게 되는데 이를 '최적절충해(Best compromise solution)'라고 하며 [그림 1]에서는 E점으로 표시되어 있다. 최적절충해는 다수의 비열등해를 순서화(Ordering)할 수 있는 기준을 통해서만 도출할 수 있다.

본 연구에서는 산업연관분석 모형을 다목적계획하에서의 구조로 운영함에 따라 ϵ -제약조건법을 상용화된 선형계획 소프트웨어인 LINDO와 SAS를 이용하여 비열등해의 집합을 얻고자 한다. ϵ -제약조건법은 의사결정자가 선택가능한 영역내에 있는 비열등해를 분석자가 연속적으로 도출한 후, 각각의 목적이나 기준들에 관한 한계(bounds)를 명시하여 의사결정자가 최적절충해를 찾는 대안을 제시하는 방법이다. ϵ -제약조건법을 다음과 같이 운영된다.[3]

먼저 다목적계획법의 일반형태인 (식 1)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} & \text{Max } Z_1(X) \\ & \text{subject to} \\ & \quad X \in F \\ & \quad Z_k(X) \geq \epsilon_k \end{aligned}$$

여기서 $k = 1, 2, \dots, p$ ϵ_k : k번째 목적의 매개변수적 변량이다.

$Z_1(X)$ 는 p 개의 목적함수중 임의로 선택된 목적함수이며, 위와같은 모형에서 목적함수와 제

약조건이 모두 선형인 전통적 선형계획법에 의해 해를 도출 할 수 있다. 한편 목적함수에 포함 되지 않은 (P-1)개의 목적함수는 모두 제약조건화되며, 이때 적절한 매개변수적 변량(ϵ_k)을 사용해야만 효율적인 비열등해 집합의 도출이 가능하다. 또한 매개변수적 변량은 목적함수들 사이의 득실교환(Trade-off)를 평가하는데 유용한 정보를 제공하므로 그 크기의 결정에 신중을 기해야 한다. 그러나 매개변수적 변량의 한계를 어떻게 설정해야 할 것인지에 대한 해답은 매우 불분명하다. 이는 각 목적함수들의 타당한 값의 범위가 알려지지 않았을 경우 의미있는 ϵ_k 값의 선택과 범위의 선택이 상황에 따라 달라지기 때문이다. [5]

ϵ - 제약조건법의 기본 알고리즘은 다음과 같다.[3]

Step 1. 실행가능해의 정의역(domain), $F \subset R_n$ 설정.

Step 2. 각각의 개별 목적함수들에 대한 최대화 수행

다음식에 의해 개별 목적함수들의 최대값에 대한 해 $Z_k(X^k)$ 를 도출함.

$$Z_k(X^k) = \text{Max } Z_k(X)$$

$$X \in F$$

이때 다음과 같은 E를 정의하고, 개별 목적함수들의 최소값을 구한다.

$$E = \{X^k: k \in I [1, p]\}$$

$$Z_k(X)_{\min} = \text{Min}Z_k(X)$$

$$X \in E$$

Step 3. 매개변수적 변량(ϵ_k)의 범위설정

$$Z_k(X^k) \leq \epsilon_k \leq Z_k(X)_{\min}$$

Step 4. 비열등해를 도출하기 위해 사용될 매개변수 ϵ_k 값의 수 선택

ϵ_k 의 수를 r이라고 표현.

Step 5. 각각의 목적함수들에 대해 다음 식을 이용한 ϵ_k 값의 계산

$$\epsilon_k = Z_k(X)_{\min} + [t/(r-1)] (Z_k(X^k) - Z_k(X)_{\min})$$

$$t = 0, 1, 2, \dots, r-1$$

Step 6. Step 5를 통해 산출된 ϵ_k 값들에 대한 최적해의 도출

각각의 목적함수들에 대해 계산된 $\epsilon_k(k = 1, 2, 3, \dots, p)$ 값들의 모든 가능한 조합에 대해 ϵ - 제약조건법의 운용형태를 적용하여 해를 도출함.

Step 7. Step 6에서 도출된 해에 대한 타당성 검토

만일 타당하면서 모든 목적 제약조건들이 Binding된다면, 그 해는 비열등해로 분류된다.

2.3 산업연관분석

2.3.1 산업연관분석의 의의

한 나라의 국민경제에서는 재화와 서비스가 생산되고 그 생산과정에서 각 산업은 원재료의 거래관계를 토대로 직접 · 간접으로 연관을 맺게되는데, 이와같이 생산활동을 통하여 이루어지는 산업간의 상호 연관관계를 수량적으로 파악하는 분석방법이 산업연관분석(Interindustry analysis) 또는 투입산출분석(Input-output analysis)이다. 거시경제적 국민소득분석이 국민경제 전체의 활동수준을 표시할 수는 있어도 경제구조적 측면에서의 연관관계를 분석하는 데에는 미흡한 점이 있는 반면에 산업연관분석은 국민경제 전체를 포괄하면서 전체와 부분을 유기적으로 결합하고 있어 거시적분석이 미치지 못하는 산업과 산업간의 연관관계까지도 분석이 가

능하기 때문에 구체적인 경제구조를 분석하는데 유리하다. 또한 산업별 생산활동 최종수요의 상품구성은 물론 각 산업의 생산기술구조와 그에 따른 각 산업간의 직·간접적인 상호연관관계에 미치는 각종 파급효과를 산업부문별로 나누어서 분석할 수 있다. 또한 이를 이용하여 경제계획의 수립과 예측, 그리고 산업구조정책의 방향설정이나 조정 등에도 유용한 분석도구로 활용될 수 있다. 특히 우리나라와 같이 생산기술이나 산업구조면에서 급격한 변화를 경험하고 있는 경제에서는 거시경제모형에 의한 총량분석과 산업연관분석이 상호보완적으로 이루어질 때 더욱 효율적인 경제분석이 가능하게 된다.

2.3.2. 산업연관표의 기본구조

산업연관표에서는 재화와 서비스의 거래를 산업상호간의 중간재거래부분, 각 산업부문에서의 노동, 자본 등 본원적인 생산요소의 구입부분, 그리고 각 산업부문 생산물의 최종소비자에게로의 판매부분 등 세가지로 구분하여 기록한다.

산업연관표는 두가지 방향으로 읽을 수 있는데 표의 세로(열)방향은 각 산업부문이 재화 및 용역을 생산하기 위하여 지출한 생산비용의 구성 즉 투입구조를 나타낸다. 이는 원재료 투입을 나타내는 중간투입(Intermediate inputs)부분과 임금, 이윤, 이자, 간접세 등 본원적 생산요소의 구입비용을 나타내는 부가가치(Value added)부분으로 구분되며 그 합계를 총 투입액이라 한다. 또한 이 표의 가로(행)방향은 각 산업부문의 생산물의 판로구성 즉 배분구조를 나타내는 것으로 중간재로 판매되는 중간수요(Intermediate demands)부분과 소비재, 자본재, 수출상품 등 최종재로 판매되는 최종수요(Final demands)부분의 두 부분으로 나뉘어진다. 그리고 중간수요와 최종수요를 합한 것을 총수용액이라고 하고 여기서 수입을 공제한 것을 총산출액이라 하는데 각 산업부문의 총산출액과 이에 대응되는 총투입액은 항상 일치한다. 한편 재화와 서비스의 산업부문 상호간의 거래인 중간수요와 중간투입을 기록하는 부분을 내생부분이라고 하고 최종수요와 부가가치를 기록하는 부분을 외생부분이라 한다. 따라서 산업연관표는 내생부분과 외생부분으로 구성된다고 볼 수 있는데 내생부분이란 외생부분의 수치가 모형밖에서 주어지면 이에 따라 수동적으로 모형내에서 그 값이 결정되는 부분이란 의미로 산업연관표 작성과정에서 가장 어려운 부분이며 작성된 표의 분석이나 내용에 있어서도 가장 중요한 부분이다. 외생부분이란 내생부분과는 관계없이 모형밖에서 값이 결정되는 부분이란 의미로 이 부분의 값의 변동이 국민경제에 어떠한 파급효과를 미치는가를 알아보려는 것이 산업연관표 작성의 목적인다고 할 수 있다.

이를 [그림 2]에서 보면 먼저 가로방향으로 I부분의 국내생산 X_i 와 수입 M_i 를 합한 총공급 $X_i + M_i$ 중 $ID_i (= \sum_j X_{ij})$ 는 자부문 및 타부문에 중간재로, $Y_i (= C_i + I_i + E_i)$ 는 소비, 투자, 수출 등 최종수요로 판매되는 것을 나타내며 세로방향으로 j부분은 X_i 의 생산을 위해 자부문 및 타부문으로부터 $II_j (= \sum_i X_{ij})$ 를 원재료로 구입하고 V_j 의 본원적 생산요소를 구입한 것을 나타낸다.

<표 1>은 우리나라의 1990년 생산자가격을 기준으로 한 산업연관표이다.[2]

2.4. 산업연관분석에서의 투입계수와 생산유발계수

2.4.1. 투입계수

투입계수는 또는 기술계수(Input coefficient or Technical coefficient : a_{ij})는 각 산업부문이 재화나 서비스의 생산에 사용하기 위하여 다른 산업으로부터 구입한 각종 원재료연료 등 중간재의 투입액과 부가가치 투입액을 그 산업의 총투입액(또는 총산출액)으로 나눈 것으로 각 부

문 생산을 1단위 생산에 필요한 각종 중간재 및 부가가치의 단위를 나타낸다.

구' 분	내 생 부문		외 생 부문		수 입 (공제)	총산 출액	
	1 ··· j ··· n	중 간 수요계	소비투자수출	최 중 수요계			
내 생 부 문	1	$Z_{11} \cdots Z_{1j} \cdots Z_{1n}$	ID_1	$C_1 \quad I_1 \quad E_1$	Y_1	M_1	X_1
	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·
	i	$Z_{i1} \cdots Z_{ij} \cdots Z_{in}$	ID_j	$C_i \quad I_i \quad E_i$	Y_j	M_j	X_j
	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·
n	$Z_{n1} \cdots Z_{ni} \cdots Z_{nm}$	ID_n	$C_n \quad I_n \quad E_n$	Y_n	M_n	X_n	
중간투입계		$\Pi_1 \cdots \Pi_j \cdots \Pi_n$					
외 생 부 문	부가가치계	$V_1 \cdots V_j \cdots V_n$					
총투입액		$X_1 \cdots X_j \cdots X_n$					

[그림 2] 산업연관표의 기본구조

$$a_{ij} = \frac{Z_{ij}}{X_j} \tag{식 5}$$

$$Z_{ij} = a_{ij} \cdot X_j \tag{식 6}$$

따라서 투입계수는 각 산업부문의 생산활동에 있어서의 산업기술구조, 즉 투입과 산출의 함수관계를 나타낸다고 할 수 있다. 이와같이 투입계수는 투입과 산출의 기술적인 수량관계를 나타내므로 물량단위의 거래표로부터 산출되는 것이 이상적이라 할 수 있으나 현실적으로 불가능하기 때문에 금액단위의 거래표로부터 산출 이용하게 된다. 투입계수도 중간투입액을 총투입액으로 나눈 중간투입계수와 부가가치의 각 항목을 총투입액으로 나눈 부가가치계수(또는 부가가치율)로 구분할 수 있는데 산업간의 상호의존관계를 분석하는 산업연관표의 특성상 통상 투입계수라고 하면 중간투입계수를 의미하게 되며 이는 산업간 또는 산업과 최종수요간의 파급효과분석의 기초가 된다.

2.4.2. 생산유발계수

위에서 본 바와 같이 투입계수는 재화나 서비스에 대한 최종수요가 발생하였을 때 이에 따라 각 산업부문으로 파급되는 생산유발효과의 크기를 예측하는데 이용되는 매개변수와 같다. 그러나 산업부문수가 많은 경우에는 위의 예에서와 같이 투입계수를 매개로하여 무한히 계속되는 생산파급효과를 일일이 계산한다는 것은 현실적으로 불가능한 것이다. 이러한 문제를 해

<표 1> 1990년 산업연관표

(단위: 억원)

구 분	중 간 수 요						최 종 수 요				총 수 요 계	수 입 (공계)	총 산 출액	
	농림 어업	광공업	도소매	운수	기타 산업	중 간 수요계	소 비	투 자	수 출	최 종 수요계				
중 간 투 입	농림어업	1,964	15,193	5	-	605	17,767	6,612	-57	841	7,396	25,163	3,305	21,858
	광고업	3,996	109,386	1,453	3,641	32,471	150,947	41,340	24,789	42,318	108,447	259,394	50,499	208,895
	도소매	441	7,419	937	311	2,833	11,941	10,295	2,279	3,433	15,007	27,948	252	27,696
	운 수	211	2,719	640	1,517	1,801	6,888	5,820	236	4,134	10,190	17,078	1,275	15,803
	기타사업	820	16,462	5,711	2,130	25,982	51,105	50,742	41,035	2,429	94,206	145,311	2,599	142,712
중간투입계	7,432	151,179	8,746	7,599	63,692	238,648	114,809	68,282	53,155	236,246	474,894	57,930	416,964	
부 가 가 치	임 금	2,237	25,864	4,545	4,506	42,537	79,689							
	기 타	12,189	31,852	14,405	3,698	36,483	98,627							
	부가가치계	14,426	57,716	18,950	8,204	79,020	178,316							
총투입계	21,858	208,895	27,696	15,803	142,712	416,964								

결하기 위해 역행렬이라는 수학적인 방법으로 생산유발계수를 도출하여 이용하게 되는데 그 도출과정을 보면 다음과 같다.

먼저 산업연관표에서 각 산업부문 생산물의 수급관계를 보면 중간수요와 최종수요의 합계에서 수입을 차감한 값과 총산출액이 일치하므로 그 수급방정식은 다음과 같은 일련의 연립방정식 체계로 표시할 수 있다. 이를 행렬기호로 간단히 표시하면

$$AX + Y - M = X \quad (\text{식 7})$$

여기에서 A : 투입계수 행렬, X_i : i 부문의 산출액, Y_i : i 부문의 최종수요 M : i 부문의 수입이다. (식 7)을 X 에 대해 풀면

$$\begin{aligned} X - AX &= Y - M \\ (I - A)X &= Y - M \\ X &= (I - A)^{-1}(Y - M) \end{aligned} \quad (\text{식 8})$$

이 되며 이때 역행렬 $(I - A)^{-1}$ 을 생산유발계수라 한다. I는 주대각요소가 모두 1이고 그 밖의 요소는 모두 0인 단위행렬을 가리킨다.

생산유발계수는 다음과 같은 무한등비급수의 합으로도 표시될 수 있다. 즉,

$$(I - A)^{-1} = \frac{1}{1 - A} = 1 + A_1 + A_2 + A_3 + \dots$$

가 된다. 이 식의 우변에서 단위행렬 I는 각 산업부문 생산물에 대한 최종수요가 1단위씩 발생하였을 때 이를 충족시키기 위한 각 산업부문의 직접생산효과가 되며 A는 각 산업부문 생산물 1단위 생산에 필요한 중간재 투입액 즉 1차 생산파급효과가 된다. A_1 는 1차 생산파급효과로 나

타난 각 산업부문 생산물 생산에 필요한 중간재 투입액 즉 2차 생산파급효과가 되며 마찬가지로 A_2, A_3, \dots 는 각각 3차, 4차, \dots 생산파급효과가 된다.

그런데 이 계수는 최종수요로부터 파생되는 파급효과를 나타내는 승수의 성질을 가지고 있으므로 케인즈의 투자승수와 구별하여 다부문승수(multi-sector multiplier) 혹은 레온티에프승수(Leontief multiplier)라고도 한다. 즉 생산유발계수의 요소를 r_{ij} 라고하면 r_{ij} 는 j 부문의 최종수요 1단위를 충족시키기 위하여 필요 i 산업부문의 재화 또는 서비스의 직 · 간접산출액을 나타내는 것이다.

3. 다목적 산업연관분석 모형

3.1. 모형의 설정

산업연관분석에서 사용되는 선형계획모형의 일반적 형태는 아래 식에서와 같이 국민소득(부가가치)을 최대화하는 문제로 접근된다.

$$\text{Max } Z(X) = C X \quad (\text{식 9})$$

subject to

$$X(I - A) \geq Y$$

$$\sum_{j=1}^n b_j X_j \leq L_0$$

여기서 $Z(X)$: 목적함수 C : 산업부문별 생산액(량) 단위당 소득(부가가치) 벡터

X : 산업부문별 생산액(량)에 대한 의사결정변수 벡터

$(I - A)$: 레온티에프 행렬 Y : 산업부문별 최종수요 벡터

b_j : j 산업부문의 생산액(량) 단위당 노동투입계수

L_0 : 경제부문의 총노동투입 가능량 이다.

이와같은 단일 목적의 선형계획모형을 경제/에너지/환경을 동시에 고려하는 다목적 산업연관 모형으로 변환하면 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Max-dominant } Z(X) = [Z_1(X), Z_2(X), Z_3(X)] \quad (\text{식 10})$$

subject to

$$X(I - A) \geq Y$$

$$g_i(X) \leq \text{or } \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$X_j \geq 0$$

여기서 $Z(X)$: 목적함수 $Z_1(X)$: 국민소득(부가가치) 관련 목적함수

$Z_2(X)$: 에너지소비량 관련 목적함수

$Z_3(X)$: 환경오염(CO_2) 관련 목적함수

$g_i(X)$: 기타 제약조건식

(식 10)의 다목적 산업연관분석의 문제를 ϵ - 제약조건법의 운영형태로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } Z_1(X) && \text{(식 11)} \\
 & \text{subject to} \\
 & X(I - A) \geq Y \\
 & g_i(X) \leq \text{or } \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \\
 & Z_2(X) \leq \varepsilon_2 \\
 & Z_3(X) \leq \varepsilon_3 \\
 & X_j \geq 0
 \end{aligned}$$

여기서 ε_k : k 번째 목적의 매개변수적 변량이다.

3.2. 문제의 정형화

다목적 산업연관분석을 위해 설정된 목적함수는 경제적 측면과 관련하여 부가가치의 최대화, 에너지 측면과 관련하여 에너지 소비량의 최소화, 환경적 측면과 관련하여 이산화탄소(CO₂) 배출의 최소화 등 3개 목적함수를 고려한다.

$$\begin{aligned}
 Z_1(X) &= \sum_{j=1}^{75} C_{1j} X_j && C_{1j} : j \text{ 산업부문의 생산액 단위당 부가가치(=부가가치율)} \\
 Z_2(X) &= \sum_{j=1}^{75} C_{2j} X_j && C_{2j} : j \text{ 산업부문의 생산액 단위당 에너지 소비량} \\
 &&& \text{(=에너지원단위 TOE/백만원)} \\
 Z_3(X) &= \sum_{j=1}^{75} C_{3j} X_j && C_{3j} : j \text{ 산업부문의 생산액 단위당 CO}_2 \text{ 배출량} \\
 &&& \text{(=환경원단위 TC/백만원)}
 \end{aligned}$$

목적함수의 계수가운데 부가가치율은 산업연관표[2]로부터 산업부문별 부가가치율을 산출하였고, 에너지원단위는 산출된 산업부문별 부가가치원단위를 적용하였으며, 환경원단위는 통계자료[1]을 참고하여 에너지원별 CO₂배출량을 산출한 후 이를 산업부문별 에너지소비량에 곱하여 환경원단위를 산출하였다. 1993년의 산업연관표를 이용, 75개 산업부문에 대한 목적함수의 계수인 부가가치율, 에너지원단위, 환경원단위 산출결과를 <표 2>에 나타내었다. 한편 다목적 산업연관분석에서 제약조건식은 크게 두가지로 나누어지는데 첫째가 산업연관표상의 부문별 구조방정식이고, 둘째가 매개변수적 변량과 관련된 ε - 제약조건식이다. 또한 환경친화적 산업구조의 전환을 위해 환경제약이나 에너지수요관리정책이 강화되어 산업부문간 구조조정이 진행될 경우 부문별 최종수요는 최대수요는 최대 30%의 범위내에서 조정이 가능하도록 최종수요량을 추가하였다.

4. 분석결과

4.1. 비열등해의 도출

매개변수적 변량의 설정은 1993년 기준값을 기준으로 산업구조조정으로 인한 부가가치, 에너지사용량, 환경배출량이 $\pm 30\%$ 이내의 값으로 제한하였다. 따라서 부가가치, 에너지사용량, 환경배출량의 최고값과 최저값, 기준값은 <표 3>과 같다. 개별 목적함수들에서 의해 계산된 변량(ε_k)값의 이내에서 5% 비율로 모든 가능한 조합에 대해 ε -제약조건법의 운영형태를 적용하여 해를 도출하였다. 도출된 해의 결과는 <표 4>에 나타나 있다.

<표 2> 75부문 목적함수 계수(부가가치율, 에너지원단위, 환경원단위)

번호	산업부문	부가가치율	에너지원단위 (TOE/백만원)	환경원단위 (TC/백만원)
X1	작물	0.682	0.024	0.018
X2	축산 및 양잠	0.167	0.065	0.042
X3	농업서비스	0.672	0.080	0.073
X4	임산물	0.390	0.008	0.005
X5	수산물	0.547	0.492	0.338
X6	석탄	0.132	0.021	0.024
X7	원유 및 천연가스	0.000	0.000	0.000
X8	금속광석	0.017	0.008	0.007
X9	비금속광물	0.624	0.177	0.135
X10	목류 및 뇌농품	0.119	0.027	0.023
X11	수산가공품	0.187	0.065	0.057
X12	장미 및 재분	0.034	0.011	0.011
X13	제당	0.162	0.132	0.115
X14	편. 과자 및 곡수류	0.300	0.077	0.066
X15	기타 식료품	0.243	0.080	0.070
X16	음료품	0.502	0.049	0.042
X17	담배	0.737	0.009	0.008
X18	섬유사	0.155	0.081	0.083
X19	섬유제품	0.238	0.140	0.129
X20	섬유제품	0.257	0.060	0.054
X21	의복 및 장신품	0.259	0.014	0.013
X22	가옥 및 모피제품	0.242	0.025	0.021
X23	제재 및 목제품	0.163	0.059	0.055
X24	가구	0.314	0.044	0.044
X25	펄프 및 종이	0.239	0.127	0.123
X26	인쇄, 출판	0.381	0.026	0.016
X27	유기화학기초제품	0.136	1.310	0.395
X28	합성수지 및 합성고무	0.166	0.085	0.081
X29	무기화학기초제품	0.226	0.389	0.302
X30	화학섬유	0.189	0.135	0.209
X31	화학비료 및 농약	0.153	0.135	0.119
X32	의약품 및 화장품	0.381	0.030	0.030
X33	기타 화학제품	0.178	0.094	0.082
X34	석유제품	0.281	0.200	0.141
X35	석탄제품	0.190	0.070	0.107
X36	고무제품	0.303	0.087	0.074
X37	플라스틱제품	0.290	0.096	0.081
X38	유리 및 도자기	0.389	0.451	0.353
X39	시멘트 및 시멘트제품	0.338	0.544	0.574
X40	기타 도입 및 포식제품	0.387	0.394	0.361
X41	제철 및 제강	0.106	0.533	0.971
X42	제강 1차제품	0.228	0.106	0.131
X43	비철금속과 및 1차제품	0.148	0.109	0.127
X44	금속제품	0.312	0.048	0.042
X45	일반산업용 기계	0.243	0.028	0.022
X46	특수산업용 기계	0.227	0.024	0.019
X47	컴퓨터 및 사무용기계	0.145	0.008	0.008
X48	전기기계 및 장치	0.226	0.042	0.032
X49	가정용 전기전자제품	0.266	0.013	0.011
X50	통신기기	0.254	0.011	0.009
X51	전자기기 부분품	0.278	0.017	0.017
X52	정밀기기	0.142	0.013	0.012
X53	자동차	0.299	0.023	0.019
X54	기타 운송기계	0.176	0.017	0.013
X55	기타 제조업제품	0.311	0.043	0.038
X56	전력	0.521	0.089	0.116
X57	도시가스 및 열공급업	0.242	2.951	1.773
X58	수도	0.470	0.231	0.273
X59	건축 및 건축보수	0.469	0.021	0.014
X60	보험 건설	0.439	0.067	0.044
X61	도소매	0.682	0.134	0.091
X62	음식점 및 숙박	0.519	0.284	0.228
X63	운수 및 보관	0.476	0.755	0.504
X64	통신	0.806	0.035	0.030
X65	금융 및 보험	0.859	0.041	0.031
X66	부동산	0.796	0.023	0.023
X67	사업서비스	0.552	0.051	0.038
X68	공공행정 및 국방	0.581	0.091	0.061
X69	교육 및 연구	0.858	0.122	0.099
X70	의료, 보건 및 사회복지	0.354	0.106	0.080
X71	기타 사회서비스	0.474	0.101	0.070
X72	기타 서비스	0.598	0.095	0.080
X73	사무용품	0.000	0.000	0.000
X74	가계의 소비지출	0.000	0.001	0.003
X75	분류불명	-0.710	0.127	0.121

<표 3> 목적함수값의 설정범위

구분	단위	-30% (Min)	기준값	30% (Max)
부가가치	(10억원)	190,805	272,579	354,352
에너지소비량	(천TOE)	62,982	89,975	116,967
CO ₂ 배출량	(천TC)	49,489	70,699	91,908

<표 4> 비열등해 집합

CO2 에너지 소비	90%	95%	(Base)	105%	110%	115%	120%	125%	130%
90%	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible
95%	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible	infeasible
(Base)	infeasible	infeasible	272579296.0	272579488.0	361949504.0	361949504.0	361949504.0	361949504.0	361949504.0
105%	infeasible	infeasible	272579296.0	354010848.0	354010848.0	354010848.0	354010848.0	354010848.0	354010848.0
110%	infeasible	infeasible	272579296.0	361949504.0	435442400.0	435442400.0	435442400.0	435442400.0	435442400.0
115%	infeasible	infeasible	272579296.0	361949504.0	451319680.0	516874016.0	516874016.0	516874016.0	516874016.0
120%	infeasible	infeasible	272579296.0	361949504.0	451319680.0	540689984.0	598305600.0	598305600.0	598305600.0
125%	infeasible	infeasible	272579296.0	361949504.0	451319680.0	540689984.0	630060032.0	679737216.0	679737216.0
130%	infeasible	infeasible	272579296.0	361949504.0	451319680.0	540689984.0	630060032.0	716812544.0	761168768.0

기준값에서 에너지소비량과 환경배출량의 기준값 이하에 해당하는 모든 대안의 조합은 최적해가 없는 것으로 나타났다. 그러나 에너지소비량과 환경배출량의 제약을 풀어 증가시킬 경우 부가가치가 증가하는 것으로 나타났으며, 최적해가 존재하는 것으로 나타났다. 도출된 해에 대한 타당성 검토를 실시 한 바 <표 4>의 굵은 선안에 있는 해가 비열등해 임이 판별되었다. 비열등해의 추세를 표에서 볼 수 있듯이 비열등해는 에너지소비량과 환경배출량의 제약을 동시에 증가시킬 때 존재하며, 에너지소비량과 환경배출량중 어느하나의 제약이 월등히 저하되거나 아니면 상대적으로 높도록 설정되면 비열등해가 존재하지 않는 것으로 나타남을 알 수 있다. 이는 환경배출량과 에너지소비량이 상관성이 높은 제약이기 때문으로 판단된다. 따라서 환경배출량과 에너지소비량의 동시적 증가가 이루어질 때 비로소 비열등해를 도출할 수 있다. 도출된 비열등해는 주어진 조건에서 최대의 효율을 올릴 수 있는 대안으로 이들 대안에서의 정책결정이 경제학적 효율성의 극대를 추구할 수 있는 대안으로 볼 수 있다.

4.2. 통합 정책대안별 분석

(1) 성장지향형 군집

성장지향형 군집에 속하는 비열등 통합정책대안은 <표 4>의 비열등해 집합에서 우측하단에 속하는 대안으로 이들 대안의 경제/에너지/환경값은 <표 5>에 정리되어 있다. 이 군집은 에너

<표 5> 성장지향형 군집의 대안별 부가가치, 에너지소비량, 환경배출량

분류	대안1	대안2	대안3	대안4	대안5
부가가치액 (10억원)	598,305	630,060	679,737	716,812	761,169
에너지소비량 (천TOE)	84,839	84,839	88,374	88,374	91,909
환경배출량 (천TC)	107,970	112,469	112,469	116,967	116,967

지소비량의 증가와 환경배출량의 증가에도 불구하고 부가가치를 올리고자 하는 특색을 가지고 있어 경제성장 지향으로 분류할 수 있다. 즉, 에너지가격의 하락이나 환경규제의 완화시 시도해 볼 수 있는 대안으로 나타난다.

(2) 환경지향형 군집

환경지향형 군집에 속하는 비열등 통합정책대안은 <표 4>의 비열등해 집합에서 좌측 상단에 속하는 대안으로 이들 대안들의 경제/에너지/환경값은 <표 6>에 정리되어있다. 이 군집은

<표 6> 환경지향형 군집의 부가가치, 에너지소비량, 환경배출량

분류	대안1	대안2	대안3	대안4
부가가치액 (10억원)	272,579	272,579	354,011	361,950
에너지소비량 (천TOE)	89,975	89,975	94,474	98,973
환경배출량 (천TC)	70,700	74,235	74,235	74,235

총 부가가치의 하락에도 불구하고 에너지 소비의 감소와 환경배출의 억제에 주요 목표를 두는 특징을 가지고 있어 환경친화적 성격을 가지고 있다. 즉, 에너지가격의 상승이나 환경규제의 강화시 시도해야 함이 바람직한 대안으로 볼 수 있다.

(3) 중립형 군집

중립형 군집에 속하는 비열등 통합정책대안은 <표 4>의 비열등해 집합에서 가운데에 속하는 대안으로 이들 대안들의 경제/에너지/환경값은 <표 7>에 정리되어 있다. 이 군집은 에너지 소비와 환경배출량의 소폭 증가로 다소 작은 부가가치 증가를 목표로 하는 특징을 가지고 있다. 이는 경제성장을 무시해서도 안되며, 에너지소비량의 작은 증가를 허락하며, 또한 환경배출의 증가를 허용할 때만 가능한 대안이라 볼 수 있다. 그러나 중립적인 대안이 가장 최적의 대안이라 볼 수도 있다. 이는 환경지향형과 성장지향형의 절충적인 산업구조의 방향을 제시하고 있다.

<표 7> 중립형 균집의 대안별 부가가치, 에너지 소비량, 환경배출량

분류	대안1	대안2	대안3	대안4
부가가치액 (10억원)	435,442	451,320	516,874	540,690
에너지소비량 (천TOE)	98,973	103,472	103,472	107,970
환경배출량 (천TC)	77,769	77,769	81,304	81,304

5. 결론

본 연구에서는 경제/에너지/환경의 목적(명제)를 동시에 고려하는 통합정책 대안의 제시를 위하여 기존의 산업연관분석을 다목적계획법과 연계하여 목적들간의 Trade-Off를 분석하고자 하였다. 다목적계획 모델로부터의 해의 집합을 산업구조적 특성에 의한 분류로써 성장지향형, 환경지향형, 중립형으로 구분하여 그 특징을 살펴보았다. 이는 경제성장의 지속화, 환경적 측면에서는 지구규모의 환경보전을 위한 이산화탄소의 최소화, 에너지측면에서는 경제성장의 지속적 추진을 위한 에너지투입의 감소에 목표를 두고 있다. 본 연구에서 특히 산업부문을 75개 부문으로 세분류하여 각 부문의 특성을 살핀 데에도 큰 의미가 있다고 하겠다. 그러나 각 목적함수에 주어진 부가가치, 에너지소비, 이산화탄소 배출량 이외의 다른 평가기준에 대해서도 검토할 필요가 있으며 모델의 동적화 작업이 앞으로 연구될 분야이다. 특히 에너지·환경부문의 기술개발에 대한 적절한 평가가 가능한 모형개발도 요구된다고 하겠다.

<참 고 문 헌>

[1] 통상산업부, 에너지분석, 1996년.
 [2] 한국은행, 산업연관표, 1990. 1993년
 [3] Cohon, J.L, Multiobjective Programming and planning, Academic Press. NY. 1978년
 [4] Goicoechea, A. et.al, Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications, John Wiley&Sons, NY. 1982년
 [5] Kang,H.J and West, T.M., Multiobjective Decision Making in Industrial and Environmental Planning, International IE Conference, San Fransisco, 1990
 [6] Zeleny,M., Multiple Criteria Decision Making, McGraw-Hill, NY, 1982년