

재순환 자원 교환망 설계를 위한 의사결정 지원시스템

이태용

한국과학기술원 생명화학공학과

1. 서 론

생태산업단지의 재순환 자원 교환 (Recyclable Resource Exchange, RRX)망이란 기업의 차원에서 다를 때 (-)의 가치를 갖는 자원을 기업의 집합체인 산업단지의 차원에서 다루어 (+)의 가치를 갖도록 규모의 경제를 구현하는 산업생태학적 방법론이다[1]. RRX망을 통한 순환형 경제 구조의 효과로 참여기업의 경쟁력 향상과 아울러 자원 절약과 오염물질 배출저감이라는 환경적 효과를 볼 수 있다. RRX망은 이를 통하여 교환되는 자원에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 에너지나 용수와 같이 제조업의 대부분이 사용하는 유틸리티의 교환 (Utility Exchange Network, UX)망이다. 둘째는, 예를 들어, 염소와 염산과 같은 부산물로써 이를 사용하는 기업이 소수로 한정되는 부산물의 교환 (By-Product Exchange, BPX)망이다. 여기에서는 부산물의 물리화학적 특성에 따라 망 구성이 결정되는 소규모의 BPX망보다 다양한 특성의 산업단지에 보편적으로 적용될 수 있는 UX망의 설계 문제에 대하여 살펴보자 한다.

UX망의 기술적 요소의 상당 부분은 개별 기업 차원에서 개발된 기술의 응용이 가능하다. 예를 들어 산업단지의 에너지 교환망은 개별 기업 내의 에너지 핀치 기술을, 그리고 용수 교환망 역시 개별 기업의 용수 핀치 기술이 상당 부분 응용될 수 있다. 그러나 개별기업 냉의 유틸리티 공급자와 수요자는 하나의 경제단위로 통합될 수 있는데 반하여 산업단지의 경우에는 공급자와 수요자가 별도의 경제단위이다. 이에 따라 공급망의 구성요소 각각에 대한 경제적 고려가 필요하다. 교환망 구성 요소 각자가 타 구성 요소에 대한 정보가 부족하며, 구성 요소의 관리 주체 역시 관리하는 구성 요소에 대하여 충분한 정보를 바탕으로 관리한다고 볼 수 없다. 따라서 교환망의 설계와 운전 시 이를 감안하여 교환망을 다룰 수 있는 강건한 방법론이 필요하다. 특히 구성요소 각자에 대한 경제적 고려는 후보기업을 교환망에 참여토록 설득하기 위한 필수적인 장치로서 여기에서는 NICE지 2006년 8월호 365쪽에 실린 “생태산업단지 설계를 위한 의사결정 시스템”을 소

개하고자 한다[2].

2. 생태산업단지 구축사업

우리나라에 생태산업단지 구축을 위한 정부 주도의 시범사업 기본 계획은 3단계로 구분된다. 현재 진행 중인 첫 단계는 기존의 산업단지를 생태산업단지로 전환하는 것이고, 다음 단계에서는 생태산업단지로 전환된 산업단지 사이에 상태산업망을 구축하는 것이고, 마지막 단계에서는 신설 산업단지를 생태산업단지로 조성하는 것이다. 생태산업단지 개발의 전문가인 Indigo Dev.의 Ernest Lowe는 생태산업단지를 다음과 같이 정의하였다[4].

생태산업단지는 공동의 토지에 위치한 제조 및 서비스 기업의 공동체를 뜻한다. 기업들은 환경 및 자원 관련 문제들에 있어서 협력함으로써 환경, 경제, 사회적 성과의 향상을 도모한다. 협력을 통해 이 기업 공동체는 개별 기업의 최적화를 통해 실현되는 개별적 이익의 총합을 넘어서는 집단적 혜택을 도모한다.

이 정의에는 EIP 구성요소의 지리적 근접성을 전제 조건으로 환경적, 경제적, 사회적인 관점에서 산업단지의 ‘집단적 최적화’를 생태산업단지의 근간으로 이해하였다. 본고에서는 이와 같은 관점에서 현 단계 시업사업의 EIP 설계를 위한 의사결정 지원시스템에 대하여 논의하고자 한다[3].

3. 의사결정 지원시스템

EIP 설계는 기술적 핵심 요소는 물질/에너지 자원의 재순환의 목적으로 교환망을 구축하는 것이다. 이와 같은 교환망의 구축은 서로 다른 기업이 경제성과 환경성을 동시에 고려하여야 하며, 일반적으로 부가가치가 낮은 물질/에너지의 교환이고, 다수의 기업이 연계되어 복잡한 시스템을 구성하므로 의사 결정에 신중을 기할 필요가 있다. 이상의 요소를 고려하

여 적정한 EIP 설계안을 제시할 수 있는 의사 결정 시스템 (decision support system, DSS)의 역할은 기존 산단을 EIP로 전환하는 경우에나 신규 산단을 EIP로 조성하는 경우 모두에서 EIP 구축사업의 핵심적인 역할을 한다.

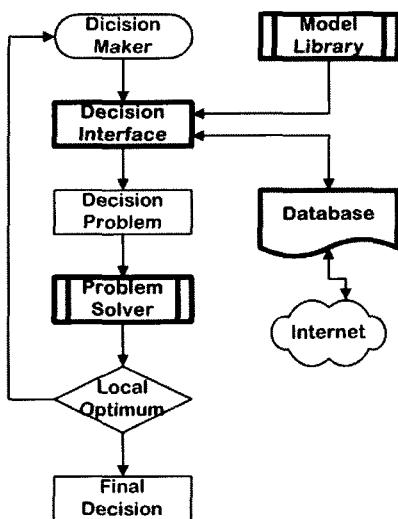


그림 1. EIP 설계 의사결정 지원시스템

그림 1에서는 EIP 설계를 위한 의사결정 지원시스템의 개요를 보여주고 있다. 이 시스템의 주요 요소는 굵은 선으로 표시한 4가지이다.

- 공개적 Database
- 확장 가능한 Model Library
- 사용자 편의를 고려한 Decision Interface
- 강건한 의사결정 Problem Solver

데이터베이스는 인터넷에 연결되어 해당 EIP의 이해 당사자가 적정한 조건 하에서 자유로이 열람이 가능하다. 인터넷을 통한 접근 가능성은 EIP 구축을 위한 정보의 수집과 배포를 위하여 필수적인 요소이다. 데이터베이스의 내용은 제품과 자원의 가격, 새로 개발된 청정기술과 장비의 정보, 환경 규제에 대한 최신의 정보, 교환 대상 부산물과 폐기물의 정보 등이다. 자료의 보안 또한 고려해야 할 중요한 문제 중의 하나이다.

모델 라이브러리는 EIP 구성원에 대한 일반적 모델과 사용자 정의 모델을 모두 포함하여야한다. 일반적 모델이란 전형적 구성원에 대한 모델로서 특정 구성원에 대한 정보가 결여된 상태에서 EIP 의사결정 모델을 구성하기 위하여 사용된다. 대부분의 경우 의사결정자(decision maker)는 실제 공정의 운전 자료와 설계 사양에 근거하여 EIP 구성원내의 전문가가

개발한 사용자 정의 모델을 선호한다. 모든 구성원의 모델은 표준화된 입/출력 인터페이스를 사용하여 한다.

의사결정자는 의사결정 인터페이스를 통하여 의사결정 지원시스템에 접근한다. 사용자 편의를 고려하여 잘 설계된 의사결정 지원시스템은 수학적 모델을 구축하기 위하여 지루하게 반복되는 모델링 작업과 복잡한 해 찾기 과정에 유용하다. EIP 의사결정 모델을 구축하기 위하여 의사결정자가 산업 생태계의 구성 요소를 GUI를 사용하여 기하학적으로 작성하고 이를 간의 연결 관계를 효율적으로 정의할 수 있어야 한다. 연결선의 유량이나 비용과 같은 중요한 자료는 데이터베이스에서 가져오거나 의사결정자가 직접 입력할 수 있다. 이와 같은 방법으로 평가를 위한 다양한 EIP 구축안을 쉽게 정의할 수 있다.

각종 EIP 구축안의 경제적, 환경적 성능은 의사결정 지원 시스템의 해 찾기 (Problem Solver) 기능을 사용하여 평가하게 된다. 해 찾기 기능은 주어진 문제로부터 최적의 해를 찾는다. 의사 결정자는 해 찾기에서 제시한 성능의 최적성을 평가하고 더 좋은 모델의 존재 여부에 대한 판단을 통하여 의사 결정을 수행한다.

4. EIP 교환망의 일반적 모델

EIP 교환망의 의사결정 지원시스템에 사용될 일반적 모델에 대하여 살펴보자. EIP 교환망 모델의 기본 요소는 그림 2에 사각형 또는 원으로 나타낸 '구성원(member)'과 화살표로 나타낸 '연결(connecton)'이다. 모델 외곽의 긴 점선으로 표시한 사각형은 산업단지 즉 EIP의 경계선을 나타내고, 하첨자 0은 EIP 외부를 나타낸다. 일반적으로 각각의 구성원은 다수의 물질과 에너지 자원 교환망으로 연결되지만, 여기에서는 한 가지 자원의 교환만을 나타내었다.

EIP 참여 기업 혹은 지역 사회 등이 구성원이 될 수 있으며, 여기에서 구성원은 자원의 공급자와 수요자 역할을 하고 있다. 구성원의 가장 중요한 속성으로서 F_{0j} 는 현재 고려중인 어떤 자원의 공급 설비 j 가 배출하는 자원의 유량이고 F_{ik} 는 수요 설비 k 에 투입되는 유량이다. 구성원과 연결 중짧은 점선으로 나타낸 것은 EIP 구축에 따라 조성하게 될 교환망의 요소로서 교환망의 연결흐름과 EIP 자원의 처리 설비 m 을 나타낸다. 이 짧은 점선을 제외한 실선으로 나타낸 부분이 기존의 산업단지를 나타내며 산업단지 내 인접한 위치에 있으면서 상호작용이 없던 구성원이 점선의 EIP 교환망으로 서로 연결되는 것을 볼 수 있다. EIP 교환망의 속성은 공급 설비 j 에서 수요 설비 k 로 순환되는 자원의 흐름

f_{jk} 등 각종 자원의 유량과, 경우에 따라 필요한 처리 설비의 용량 F_{Tm} 이다. EIP 모델의 특징 중 하나는 원료, 제품, 폐기물 등에 대한 기존의 구분이 그 의미를 상당부분 잃는다는 것이다. 다만 EIP 내 구성원의 입장에서는 배출되는 자원과 투입되는 자원은 구별할 필요가 있다.

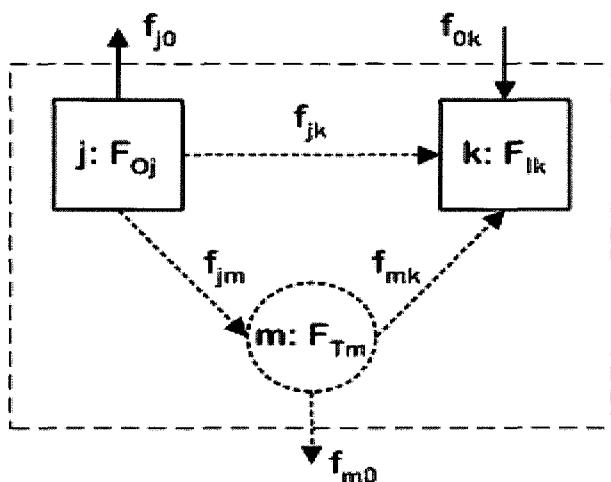


그림 2. EIP 교환망 모델

혼합정수 계획법에 의한 모델링: EIP 모델의 성능을 정량적으로 평가하여 의사 결정을 지원하기 위하여 그림 2에 보인 EIP 교환망 모델에 대하여 물질 및 에너지 수지에 근거한 수학적 모델이 필요하며, 이 모델은 혼합 정수 계획법 문제로 표현된다. EIP 구성원이 보유한 공급 설비 $j \in J$, 수요 설비 $k \in K$, 처리 설비 $m \in M$ 사이에는 $(J \cup K) \cap M = \emptyset$ 의 관계가 있다. 자원의 공급과 수요 및 처리 설비의 수지식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} f_{j0} + \sum_{k \in K} f_{jk} + \sum_{m \in M} f_{jm} &= F_{Oj} & j \in J \\ f_{0k} + \sum_{j \in J} f_{jk} + \sum_{m \in M} f_{mk} &= F_{Ik} & k \in K \\ \sum_{j \in J} f_{jm} + f_{i0} + \sum_{k \in K} f_{mk} &= F_{Tm} & m \in M \end{aligned}$$

투입하는 자원에 대하여는 자원의 특성에 대한 제한이 가해진다.

$$\begin{aligned} Q_{Lk} F_{Ik} &\leq Q_{0k} f_{0k} + \sum_{j \in J} Q_{jk} f_{jk} + \sum_{m \in M} Q_{mk} f_{mk} \\ &\leq Q_{Uk} F_{Ik} & k \in K \end{aligned}$$

외부로 배출되는 흐름 f_{j0} 와 f_{m0} 는 각각 준수해야하는 규제가 적용되며 모든 흐름의 유량은 음수 값을 가질 수 없다. EIP 교환망을 통하여 교환되는 자원은 일반적으로 부가가치가 낮으며, 이에 따라 일정 규모이상이 되지 않으면 교환망의 연결 요소로서 의미가 없다. 따라서 다음의 제한이 가해진다.

$$\begin{aligned} b_{jk} f_{jk}^L &\leq f_{jk} \leq b_{jk} f_{jk}^U & j \in J, k \in K \\ b_{mk} f_{mk}^L &\leq f_{mk} \leq b_{mk} f_{mk}^U & m \in M, k \in K \\ b_{jm} f_{jm}^L &\leq f_{jm} \leq b_{jm} f_{jm}^U & j \in J, m \in M \end{aligned}$$

여기에서 b_{jk} , b_{mk} , b_{jm} 은 0 또는 1의 값을 갖는 이진변수이다.

EIP 교환망의 성능평가: EIP 교환망의 성능은 환경적 지표와 경제적 지표로 나누어 생각할 수 있다. 환경적 지표는 다시 배출물 감소에 의한 환경오염 저감과 투입물 감소에 의한 자원 소비 절감의 두 가지 측면이 있다. 기존의 산단과 EIP의 어떤 자원에 대한 환경 영향은 다음과 같고

기존 산단의 환경영향

$$= \sum_{j \in J} W_j f_{Oj} + \sum_{k \in K} V_k f_{Ik}$$

EIP 구축 후 개선된 환경영향은 다음과 같다.

EIP의 환경영향

$$= \sum_{j \in J} W_j f_{j0} + \sum_{k \in K} V_k f_{0k} + \sum_{m \in M} W_m f_{m0}$$

여기에서 W_j 는 폐기물의 배출을 환경영향으로 환산하는 계수이고, V_k 는 자원 소비에 대한 계수이다. 다수의 물질 및 에너지 자원이 산단의 환경영향 평가에 고려되어야 하므로 위에서 계산한 자원별 환경영향 개선 효과를 모두 합하면 산단 전체의 환경 영향이 얼마나 개선되는지 알 수 있다.

표 1. EIP 연결 흐름의 비용 계수

계수	적용 흐름	값의 부호	비고
P_{0k}	f_{0k}, F_{Ik}	+	k 의 구입 비용
P_{jk}	f_{jk}	+/-	k 의 구입 비용
P_{mk}	f_{mk}	+/-	k 의 구입 비용
P_{j0}	f_{j0}, F_{Oj}	+	j 의 배출 비용
P_{jm}	f_{jm}	+/-	j 의 배출 비용
P_{m0}	f_{m0}	+/-	m 의 배출 비용

경제적 지표는 공급과 수요 및 처리 설비를 보유한 구성원 i 의 폐기물 처리 비용과 원료 구입비용으로 나누어 표현할 수 있다. 이를 위하여 각 호름의 단위량에 대한 비용 계수를 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

이 계수를 적용한 구성원 i 가 기준에 지불한 어떤 자원의 구입비용은 $G_i = P_{0i}F_i$ 이고 EIP 구축 후 지불할 비용은 아래와 같다

$$g_i = P_{0i}f_{0i} + \sum_{j \in J} P_{ji}f_{ji} + \sum_{m \in M} P_{mi}f_{mi}$$

한편 구성원 i 가 기준에 지불한 어떤 순환자원의 처리 비용은 $H_i = P_{d0}F_{0i}$ 이고 EIP 구축 후 지불할 비용은 아래와 같다.

$$h_i = P_{i0}f_{i0} - \sum_{k \in K} P_{ik}f_{ik} + \sum_{m \in M} P_{im}f_{im}$$

따라서 구성원 i 가 어떤 자원의 교환망 구축에 따라 누리게 될 경제적 혜택은

$$f_i = (G_i - g_i) + (H_i - h_i)$$

로 표현되며 구성원 i 가 다수의 자원에 대한 교환망에 참여한다면 그 혜택 F_i 는 각각의 자원에 대한 f_i 의 합으로 표현된다. 처리 설비 i 가 어떤 자원을 처리하면서 누리게 될 경제적 혜택은

$$f_i = \sum_{j \in J} P_{ji}f_{ji} + \sum_{k \in K} P_{ik}f_{ik} - P_{i0}f_{i0} - P_{Ti}F_{Ti}$$

로 표현되는데 여기에서 P_{Ti} 는 자원 F_T 를 처리하는데 필요한 비용 계수이다. 처리 설비에서 다수의 자원을 처리한다면 그 혜택 F_i 는 각각의 자원에 대한 f_i 의 합으로 표현된다.

서두에 인용한 Lowe의 정의에 따르면 EIP 설계의 기준은 집단적 환경 영향과 집단적 혜택 $\sum F_i$ 를 최적화하는 것이다. 그러나 집단적 지수의 최적화는 부적절한 (ill-posed) 문제인 경우가 많다. 예를 들어 EIP의 구성원 1이 구성원 2와 3으로부터 부산물을 공급받아 원료로 활용하는 교환망의 경제적 지표에 대하여 고려해보자. 특히 구성원 2와 3이 공급 가능한 양의 합이 구성원 1이 필요로 하는 양에 비하여 많다고 가정하자. - EIP 구축에서 이는 매우 흔한 경우이다. -

연결호름의 비용계수 P_{21} 과 P_{31} 의 값이 약간만 차이가 나더라도 최적화 결과는 비용 계수가 약간이라도 작은 쪽을 선호하는 결과가 나올 것이다. 이는 바람직하지 못 함에도 불구하고 집단적 혜택을 최적화하는 과정에서 '大를 위하여 小를 희생'한 결과이다. 그러나 서로 다른 이해 집단이 모여서 EIP를 구성함에 있어서 이와 같은 의사결정 방법으로는 전체적인 합의를 도출 할 수 없을 것이다. 즉 EIP 구축의 경제적 혜택을 적절히 공유하는 것은 EIP 설계시 매우 중요한 의사 결정 요인임을 알 수 있다.

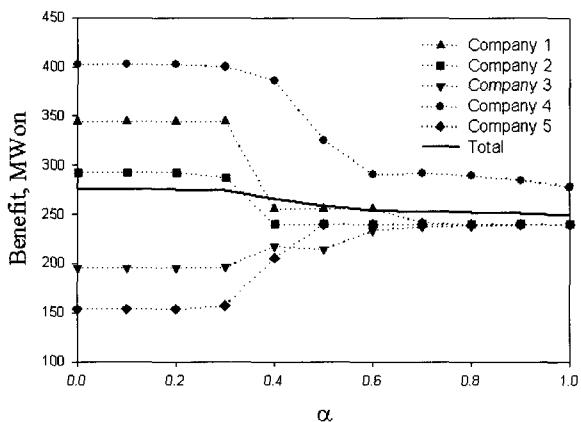


그림 3. 최저치 비중증가에 따른 EIP구축안의 변화

경제학자 Markowitz는 투자선택이론에서 투자 결과의 평균치와 아울러 최악의 상황을 동시에 고려할 필요가 있다고 주장하였다. 즉 평균치에 약간의 희생을 허용하면 최악의 상황을 현저히 개선 할 수 있음을 보였다. Fishburn은 일정한 기준치 이하의 투자 효과가 기대되는 경우(lower partial mean)를 집중적으로 개선함으로써 이를 구현하였으며, 최악의 경우를 집중적으로 개선함으로써 같은 효과를 얻을 수 있음이 입증되었다. 즉 EIP 설계의 최적화 모델은 각 구성원이 누리게 될 혜택의 평균치 F 와 최저치 F^* 의 가중 평균치를 최적화하는 파레토 최적화 문제로서

$$J = (1-\alpha)F + \alpha F^*$$

에서 가중치 α 를 0에서 1까지 변화시키면서 최적화하여 분석할 수 있다. 그림 3에서는 5개 구성원이 참여한 EIP 교환망이 누리게 될 혜택의 변화에 대한 파레토 최적해를 보였다. 평균치만 고려하였을 경우에 구성원의 누리게 될 혜택의 최대 편차는 최저치를 집중적으로 고려함에 따라 20% 수준으로 감소하였지만 이에 따라 감소한 혜택의 평균치는 최대 편

차의 7% 수준으로 나타났다.

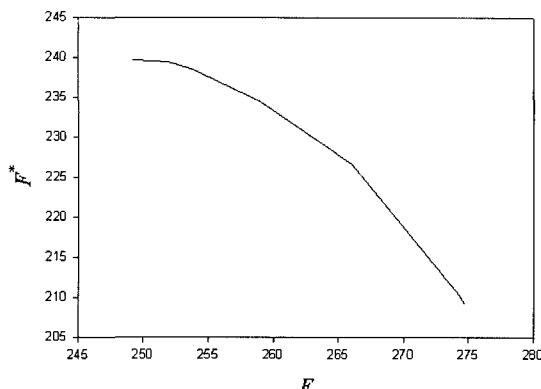


그림 4. 혜택의 평균치와 최저치의 파레토 곡선

그림 4에서는 평균치 F 와 최저치 F^* 의 파레토 곡선을 보였다. 그림 우하단의 F 가 강조되는 영역은 dF^*/dF 의 기울기가 큰 반면 좌상단의 F^* 가 강조되는 영역은 그 기울기가 작다. 이 기울기가 큰 우하단 영역에서는 평균치를 약간만 희생하여도 최저치를 현저히 향상시킬 수 있는 반면 좌상단 영역에서는 평균치의 희생이 최저치의 향상에 큰 도움이 되지 못한다. 따라서 EIP 구축의 이해 당사자는 이와 같은 설계 분석 결과를 바탕으로 구축안에 대한 합의를 도출함으로써 EIP 구축을 성공적으로 수행할 수 있다.

참고문헌

- [1] 김도원, 이태용, "영국 국가산업공생 프로그램 (NISP)" NICE, vol 24, no 5, pp. 465 – 472, 2006. 10.
- [2] 이태용, "생태산업단지 설계를 위한 의사결정 지원시스템," NICE, vol 24, no 4, pp. 365 – 369, 2006. 8.
- [3] J S Kang, H D Kim, T Lee, "Sharing benefits of eco-industrial park by multi-objective material flow optimization," Proceedings of 8th International Symposium on Process Systems Engineering, pp. 499 - 504, Kunming, China, 2004.
- [4] E. A. Lowe, Ecoindustrial Park Handbook for Asian Developing Countries, Indigo Development, 2001.

..... 저자약력



《이 태 용》

- 1980년 서울대학교 화학공학과 학사
- 1987년 미국 Caltech 화학공학 박사
- 1986 ~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 교수

• 관심분야: 공정 최적화, 공정 모사, 산업생태학