

다중척도 의사결정 전략을 이용한 여수 석유화학단지의 폐수 중화망 설계

이태용*

홍익대학교 화학공학과
121-791 서울시 마포구 상수동 72-1

(2011년 6월 3일 접수; 2011년 6월 15일 수정본 접수; 2011년 6월 21일 채택)

Design for Wastewater Neutralization Network in Yeosu Petrochemical Complex by Multi-Criteria Decision Making Strategy

Tai-yong Lee*

Department of Chemical Engineering, Hongik University, Mapo-gu Sangsu-dong 72-1, Seoul, 121-791, Korea

(Received for review June 3, 2011; Revision received June 15, 2011; Accepted June 21, 2011)

요약

생태산업단지의 산업 공생망 구성을 위한 다중척도 의사결정 전략을 개발하고 이를 여수산업단지의 산/염기성 폐수 중화망 설계에 적용하였다. 산(또는 염기)성 폐수는 화학산업에서 공통적으로 나오며, 다른 곳에서 나온 염기(또는 산)성 폐수를 자체적으로 중화할 수 있는 원료가 될 수 있다. 따라서 산/염기성 폐수가 대량으로 발생하는 석유화학 산업단지에서 대규모의 산업 공생망을 구축할 수 있는 가능성을 지니고 있다. 본 연구에서는 산/염기성 폐수의 상호 중화를 위한 물질 흐름 모델을 구성하고, 여기에 다중 척도 의사 결정 전략을 적용하여 최적이며 대등한 다수의 산업 공생망 후보를 설계하고 이들의 성능을 비교 분석하였다.

주제어 : 산업 공생망, 산/염기성 폐수 중화, 물질 흐름 분석, 다중 척도 의사 결정

Abstract : A novel multi-criteria decision making strategy is developed for the construction of industrial symbiosis network in eco-industrial park and the strategy is applied to the construction of acid/alkali wastewater neutralization network in Yeosu industrial complex. Acid (or alkali) wastewater is commonly generated in chemical industries, and it can be used as neutralizing agent for alkali (or acid) wastewater generated from another source. As a consequence, a large-scale industrial symbiosis network for wastewater neutralization can be constructed in petrochemical complexes where a large amount of acid/alkali wastewater is generated. In this study, substance flow model is constructed which describes the wastewater neutralization network and multi-criteria decision making strategy is applied to find a few candidate for industrial symbiosis network.

Keywords : Industrial symbiosis network, Acid/alkali wastewater neutralization network, Substance flow analysis, Multi-criteria decision making

1. 서론

청정 생산 기반 조성을 위한 생태산업단지(Eco-industrial park, EIP) 구축 사업은 2005년부터 2010년의 5년간 1단계 시범 사업을 5개 EIP에서 완료하였다. 1단계 사업기간 동안 176개의 과제를 발굴하여 부산물 56건, 에너지 19건, 슬러지 13건, 용폐수 13건, 대기 5건 등 모두 116개 과제를 수행하여 2개에서 5개 기업으로 구성되는 산업 공생망(industrial symbiosis network)을 다수 구성하였다[5]. 여수 EIP에서는 산업 용수의 공동 처리와 독성 폐수의 공동 처리 등 용/폐수 공생망,

저온도 에너지 공생망, 여수산단의 부생수소 공생망과 광양산단의 부생기체 공생망, 다수의 고체 부산물 공생망 등 다양한 산업 공생망을 구축하였다[12]. Jeong et al.[9]는 여수 국가 산업단지 내 5개 기업을 연결하는 수소 재활용 망을 설계하였다. 이들은 수소 핀치의 개념을 도입하여 수소 재활용망의 수학적 모델을 세우고 이를 이용하여 최적의 산업 공생망을 설계하였다.

산업 공생망의 구축은 망 내부의 물질 흐름 분석과 이에 근거한 망 설계의 두 단계로 나눌 수 있으며 분석 단계에서 설계 단계로 이행하는 과정에 대한 연구 결과는 Binder et al.[2]가 포괄적으로 다루었다. Cazcarro et al.[4]은 용수의 효율적 관리를 위하여 사회계정행렬 (social accounting matrix)를

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: etaiyong@hongik.ac.kr

도입하였으며, Rechberger and Brunner[15]와 Brunner[3]는 자원의 효율적 관리를 위한 의사결정 지원도구로서 물질 흐름 분석을 사용하였다. 이 사례들은 물질 흐름 분석 단계에서만 정량적인 방법을 사용하였으며, 설계 단계에서는 정량적인 방법을 개발할 필요가 있음을 보여준다.

산업 공생망은 일반적으로 부산물을 다루기 때문에 참여 기업의 주력 제품의 생산 상황에 따라 수요 공급이 변동하게 되므로 안정적으로 운영되기가 어려우며 이 여파는 해당 산업 공생망 전체에 영향을 주게 된다[8]. 따라서 공생망을 안정성은 공생망의 성능 평가를 위한 중요한 요소가 된다. Williams et al.[16]은 전과정 평가가 청정기술 관련 의사결정의 기본자료로 사용되는 사례가 증가하고 있음을 지적하고 이와 같은 상황에서 전과정 목록에 내재하는 불확실성을 관리하기 위한 복합적 방법론을 제시하였다.

상당수의 부산물은 이를 생산하거나 소비하는 기업의 숫자가 제한되기 때문에 해당 공생망에 참여하는 기업의 숫자가 그리 많지 않다. 이런 관점에서 수소 재활용망에 5개 기업이 참여한 것[9]은 매우 귀한 사례라 할 수 있다. 그러나 에너지나 용/폐수와 같은 자원은 화학산업에서 일반적으로 사용되기 때문에 이들의 공생망에 참여하는 기업의 숫자는 부산물 공생망 참여기업의 수에 비하여 일반적으로 크다. 이와 같이 참여기업 수의 관점에서 대규모의 산업 공생망은 이에 따른 장단점을 함께 갖는다. 장점으로는 참여 기업이 많은 대규모의 산업 공생망은 일부 기업의 수요 공급에 변동이 있어도 망이 이 충격을 흡수할 수 있다는 즉 망이 강건(robust)할 수 있다는 점이다. 그러나 망의 규모가 크기 때문에 이 장점을 살리는 것과 아울러 기본적으로 망의 성능을 최적화하는 것은 직관적인 방법으로는 불가능하며 이를 위한 체계적인 방법론이 필요하다[3,8,16].

Kim and Lee[11]는 산/염기성 폐수를 자체 중화하는 산업 공생망에서 이를 통한 혜택을 참여 기업이 공유하는 문제를 Pareto 최적화 문제로 다루었으며 이는 Posch[14]에 의하여 일반화되어 산업 공생망이 더 넓은 범위의 지속가능성을 위한 협력의 출발점이 될 수 있음을 역설하였다. 산업 공생망은 이에서 비롯되는 혜택을 참여 기업이 적절히 공유하여야 함과 아울러 수요 공급의 변동에 대하여 망이 안정적으로 운영될 수 있는 대책이 필요하다[6]. 여수산단과 같이 폐수 발생원이 밀집하여 있는 경우 중화제의 운반 비용보다는 중화제 자체의 가격이 상당히 크기 때문에 폐수 중화 비용은 외부 중화제 사용의 환경적 측면과 폐수 처리에 따른 경제적 측면을 함께 반영할 수 있다. 따라서 산업 공생망의 성능을 망 전체의 폐수 처리 비용과 같은 단일 척도의 성능지수로 나타내거나 각 개별 기업의 처리 비용 같은 다중 척도의 성능 지수로 나타낼 수 있다. 이를 단일 척도로 나타낼 경우 외부의 중화제 사용을 최대한 줄이면서 폐수를 중화할 수 있는 망의 구성이 다수 존재하며, 이 중 어떤 망 구성을 선택하느냐에 따라 개별 기업의 처리 비용은 많은 차이를 보일 수 있다[11,13]. 그러나 모든 참여 기업의 폐수 처리 비용을 동시에 개별적으로 고려하는 것은 현실적으로 불가능하며 이에 대한 대안으로 망 구

성에 의한 혜택을 못 받거나 상대적으로 작게 받는 소수의 기업의 폐수 처리 비용을 중점적으로 고려함으로써 판단 척도의 수를 줄이는 방법이 사용된다[7]. 물질 흐름 분석에 근거한 산업 공생망 설계 문제는 수학적으로 다중 척도 선형 계획법 문제로 구성되며, 강건 최적화 기법을 사용하여 풀 수 있다[1,10].

제 2절에서는 폐수 중화 산업 공생망 설계 문제를 공생망 전체의 처리 비용과 개별 기업의 처리 비용 중 가장 큰 것의 두 가지 척도를 사용하는 다중척도 의사결정 문제로 구성하였다. 제 3절에서는 여수 EIP 내 18개 폐수 발생원에 대하여 최적화 문제를 적용하여 다수의 대등한 공생망 후보를 도출하였고 제 4절에서는 본 연구에 대한 결론을 맺었다.

2. 폐수 중화 산업 공생망의 설계

폐수 중화를 위한 산업 공생망 모델은 Figure 1에 나타냈다. 여기에서 Q_i 는 폐수 발생원 i 의 폐수 발생량이고, q_{ij} 는 폐수 발생원 i 에서 중화를 위하여 폐수 발생원 j 로 보내는 폐수의 유량이다. r_i 는 폐수 발생원 i 의 중화를 위하여 외부에서 추가적으로 구입하는 중화제의 유량이다. 폐수 발생원 i 의 물질 수지는 다음과 같다.

$$\sum_{j \in N} q_{ij} = Q_i \quad i \in N \quad (1)$$

N 은 폐수 발생원을 나타내는 집합이다. 폐수 발생원 i 의 산/염기 농도를 c_{qi} 라 하되, 폐수가 산성이며 $c_{qi} > 0$ 이고 염기성이면 $c_{qi} < 0$ 이다. 또, 폐수 발생원 i 를 중화하기 위하여 구입하는 중화제의 농도는 c_{ri} 라 하면 산업 공생망을 통하여 흐르는 폐수와 구입하는 중화제는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$C_b \left(r_j + \sum_{i \in N} q_{ij} \right) \leq c_{rj} r_j + \sum_{i \in N} c_{qi} q_{ij} \leq C_a \left(r_j + \sum_{i \in N} q_{ij} \right) \quad j \in N \quad (2)$$

여기에서 C_a 와 C_b 는 각각 방류수의 산/염기성 물질 농도의 허용치이며 $C_b < 0 < C_a$ 이다. 유량 q_{ij} 와 r_i 에는 다음의 제한 조건이 적용된다.

$$0 \leq q_{ij} \leq Q_i b_{ij} \quad i, j \in N \quad (3)$$

$$r_i \geq 0 \quad i \in N \quad (4)$$

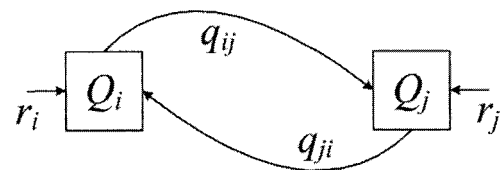


Figure 1. Industrial symbiosis network for acid/base wastewater neutralization.

여기에서 b_{ij} 는 이진 변수로서 0은 폐수 발생원 i 와 j 를 연결하지 않는 경우를 나타내며, 1은 연결하는 경우를 나타낸다.

폐수 중화를 위한 산업 공생망 전체의 폐수 처리 비용은 다음과 같이 표시된다.

$$Z = \sum_{j \in N} \left[w_j r_j + \sum_{i \in N} (u_{ij} b_{ij} + v_{ij} d_{ij} q_{ij}) \right] \quad (5)$$

여기에서 w_j 는 폐수 발생원 j 에서 사용하는 중화제의 단위 가격, u_{ij} 는 폐수 발생원 i 와 j 를 연결할 경우의 고정 비용, v_{ij} 는 폐수 발생원 i 의 폐수를 폐수 발생원 j 로 보내기 위한 단위 비용, d_{ij} 는 폐수 발생원 i 와 j 사이의 이동 거리이다. 폐수 처리를 위한 산업 공생망은 폐수 발생원의 변동 요인이 크기 때문에 폐수 교환 시설이 고정적인 것 보다는 변동 상황에 적응하기 쉬운 차량 운반을 가정 하였다.

산업 공생망 설계를 아래와 같이 공생망 전체의 폐수 처리 비용을 단일한 성능 지수로 다루는 최적화 문제의 경우,

Problem 1: $\min Z$ subject to (1) - (5)

그 결과로 구성되는 공생망의 혜택이 일부 기업에 편중될 수 있으며 이 경우 혜택이 없거나 다른 기업에 비하여 미약한 기업은 산업 공생망에 참여할 의미를 찾기 어렵게 되어 산업 공생망을 구성할 수 없거나 있더라도 그 규모가 축소될 수 있다[11]. 이와 같은 문제점을 방지하기 위하여 산업 공생망에 참여하는 폐수 발생원 각각의 처리 비용을 고려할 필요가 있다[6].

공생망 내 폐수 발생원 i 에서 j 로 폐수를 보내는 비용은 $(u_{ij} b_{ij} + v_{ij} q_{ij})$ 이다. 이에 대하여 폐수 발생원 i 가 부담하는 비율을 α 라 하면 j 가 부담하는 비율은 $(1 - \alpha)$ 이고 폐수 발생원 i 가 부담하는 전체 비용은 아래와 같다.

$$z_i = w_i r_i + \alpha \sum_{j \in N} (u_{ij} b_{ij} + v_{ij} q_{ij}) + (1 - \alpha) \sum_{j \in N} (u_{ji} b_{ji} + v_{ji} q_{ji}) \quad i \in N \quad (6)$$

이와 같이 각 발생원의 처리 비용을 동시에 고려하는 공생망 설계를 다중목적 함수 (multi-objective) 최적화 문제로 다룰 경우,

Problem 2: $\min (z_1, z_2, \dots, z_n)$ subject to (1) - (4)

각 발생원의 처리 비용 즉 각각의 성능 지수를 동시에 최소화하는 것이 목적이지만 이는 현실적으로 불가능하며 다중적도 의사결정(multi-criteria decision making, MCDM) 전략을 사용하여 최적의 공생망을 설계하게 된다. Problem 2에서 의사 결정할 때 중요하게 다루어야 할 성능 지수는 공생망 전체 처리 비용과

$$Z = \sum_{i \in N} z_i \quad (7)$$

공생망 구성 후에도 처리 비용이 많이 드는 폐수 발생원의 비용이며 특히 처리 비용이 가장 많이 드는 최악의 경우 (worst case, WC)의 처리 비용 Z_{WC} 을 척도로 삼는 것이 적당하다[10].

$$Z_{WC} \geq z_i \quad i \in N \quad (8)$$

따라서 다수의 폐수 발생원을 연결하여 폐수를 중화하는 산업 공생망 설계 문제는 최종적으로 아래와 같이 두 개의 목적 함수를 갖는 최적화 문제로 구성된다.

Problem 3: $\min (Z, Z_{WC})$ subject to (1) - (4) and (6) - (8)

Problem 3은 혼합 정수 선형 계획법 문제로 분류되며 GAMS를 반복적으로 이용하여 풀 수 있다. Problem 3을 푸는 과정은 다음과 같다.

Problem 3.1: Problem 1과 같으며 최적해를 얻은 후 개별 발생원의 폐수 처리비용 중 최대치를 구하여 이를 $Z_{WC,max}$ 이라 한다.

Problem 3.2: 최적화 문제 $\min Z_{WC}$ subject to (1) - (4) and (6)을 풀어 최적값을 $Z_{WC,min}$ 라 한다.

Problem 3.3: $Z_{WC,min} \leq Z_{WC} \leq Z_{WC,max}$ 를 만족하는 Z_{WC} 를 선택하여 최적화 문제 $\min Z$ subject to (1) - (4) and (6) - (8)을 풀어 (Z, Z_{WC}) 를 구한다. Z_{WC} 를 바꾸어가며 최적화를 반복하여 Problem 3의 파레토 곡선을 구한다.

3. 결과 및 고찰

여수 EIP 시범사업의 참여기업을 대상으로 산/염기성 폐수 배출 자료를 수집하였다. 조사 대상 기업의 위치는 Figure 2에 표시하였는데, 방향은 임의의 각도만큼 회전하였다. 각 기업의 폐수 발생량과 pH 값은 Table 1에 정리하였으며, (2)식과 (5)식에 나타나는 각종 상수 값은 사용 부호와 함께 정리하였다.

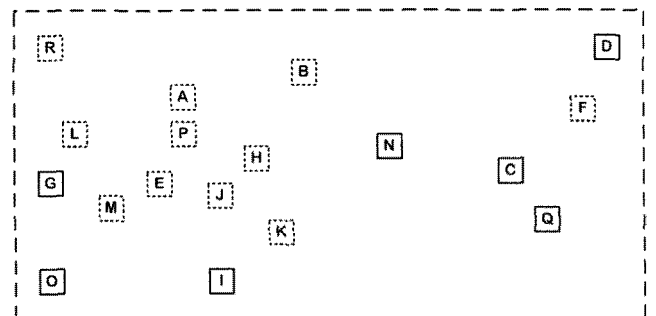


Figure 2. Acid (dotted box) and alkali (solid box) wastewater sources located Yeosu EIP. Large dashed box shows 10 km by 5 km area.

Table 1. Wastewater generation and pH data

Source	$Q_i, m^3/d$	pH
A	41	2.2
B	12	0.1
C	3427	9.5
D	23	13.8
E	546	3.5
F	9	0.6
G	121	13.8
H	3481	5.0
I	162	11.9
J	879	3.9
K	5289	5.9
L	123	1.1
M	835	2.0
N	2461	11.4
O	22	12.3
P	272	2.6
Q	5195	8.1
R	27	1.0

본 연구에서는 11개의 산성 폐수 발생원과 7개의 염기성 폐수 발생원을 포함하여 모두 18개의 폐수 발생원의 자료를 수집하였으며 이들 18개 폐수 발생원에서 현재 사용하는 중화제는 $812 m^3/d$ 로 그 비용은 $\$81200/d$ 이다. 18개 발생원을 폐수 자체 중화를 위한 산업 공생망을 구성하기 위하여 Problem 3으로부터 Pareto 최적해를 구하였다.

Problem 3.1: $Z = \$18,592/d$ 이고, $Z_{WC,max} = z_D = \$8,085/d$ 이다. 이 점은 Figure 3의 Pareto 곡선에서 심플렉스(simplex) a이다.

Problem 3.2: $Z_{WC,min} = z_O = \$2,843/d$ 이고, $Z = \$19,020/d$ 이다. 이 점은 Figure 3의 Pareto 곡선에서 심플렉스 d이다.

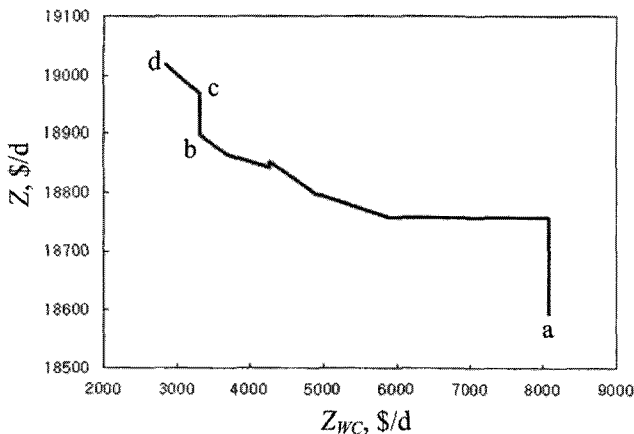


Figure 3. Pareto optimal curve of Problem 3.

Problem 3.3: $Z_{WC,min} \leq Z_{WC} \leq Z_{WC,max}$ 를 만족하는 범위에서 최적화 문제를 반복하여 풀어서 Pareto 곡선을 구하였다. 이 곡선은 Figure 3에서 심플렉스 a와 d를 연결하는 선이다.

최적화 결과로 얻은 파레토 곡선은 7개의 심플렉스와 이를 연결하는 선으로 구성된다. 특히 Figure 3의 심플렉스 a와 심플렉스 b/c에서는 산업 공생망 전체의 폐수 처리 비용 Z가 불연속적으로 변화였다.

Figure 4에서는 전체 처리 비용 Z와 아울러 개별 기업의 처리 비용 z_i 를 $i = B, C, D, F, G, I, N, O$ 의 8개 발생원에 대하여 누적 그래프 형태로 나타내었다. 나머지 10개 발생원의 처리 비용은 매우 작으며 Figure 4의 그래프에서 아래쪽에 함께 나타내었다. Z_{WC} 가 줄어들에 따라 처리 비용이 소수의 기업에 편중되는 망 구성에서 다수의 기업으로 나뉘는 망 구성을 변함을 알 수 있다.

Table 1에 나타난 산/염기성 폐수를 중화하기 위한 중화제 구입 비용은 $\$81,200/d$ 이다. 그러나 Problem 3의 최적해에 의하여 폐수 중화망을 구성하였을 때 산업 공생망 참여 기업 전체의 폐수 처리비용은 Problem 3.1의 $\$18,582/d$ 기준으로 23% 수준으로 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 Problem 3의 Pareto 곡선으로부터 산업 공생망 전체의 폐수 처리 비용이 $\$18,592/d$ 에서 $\$19,020/d$ 로 2% 증가하는 대신에 개별 발생원의 폐수 처리비용 최대치가 $\$8,085/d$ 에서 $\$2,843/d$ 로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 Figure 3과 4의 심플렉스 a에서는 폐수 발생원 G가 단독으로 전체 처리 비용의 43%를 부담하여야 하는데 심플렉스 d에서는 폐수 발생원 O가 15%를 부담하는 것을 비롯하여 G, D, I, N 등이 비슷한 정도로 부담함으로써 산업 공생망 본래의 목적이 잘 구현된다.

Figure 3과 4에 표시한 3개의 심플렉스 a, b, c에서 산업 공생망을 Figure 5에 보였으며 그 특징을 Table 2에 정리하였다. Z_{WC} 가 줄어들에 따라 망 내부의 연결은 줄어들지만, 외부 중화제를 구입해야 하는 기업이 증가하여 전체 연결 수는 증가한다. 특히 외부 중화제 구입량은 Pareto 곡선의 심플렉스 b/c

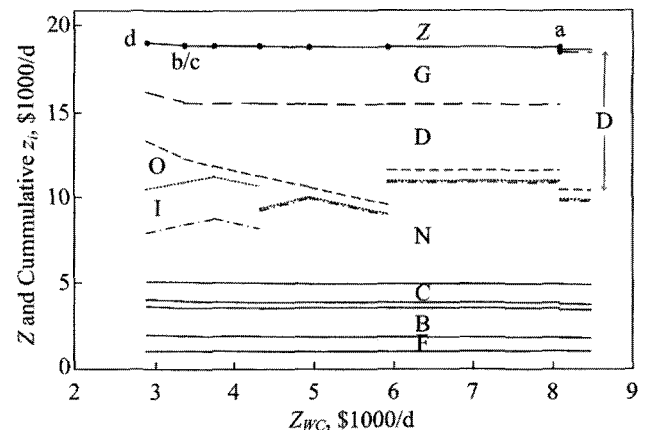


Figure 4. Neutralization cost of each company participating in the industrial symbiosis network.

Table 2. Analysis of selected networking shown at simplexes a, b, and c

Simplex	Number of linkage			external agent, m ³ /d
	internal	external	total	
a	14	5	19	729
b	12	10	22	729
c	8	17	25	812

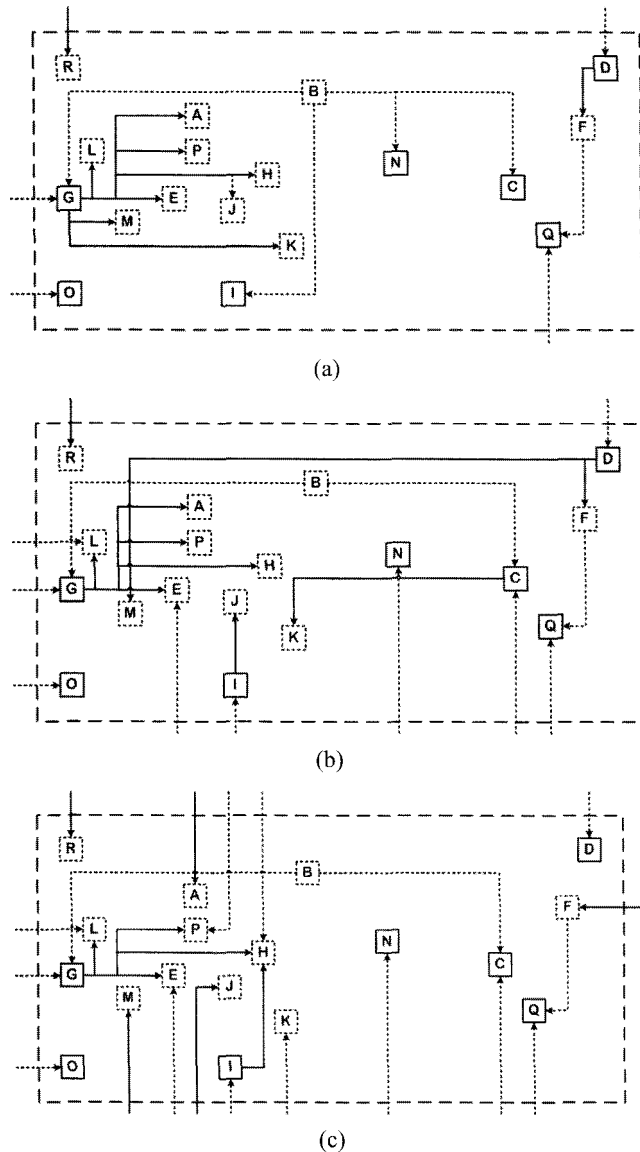


Figure 5. Industrial symbiosis network at point a, b, and c. Solid streams denote for alkali flow, dotted streams for acid flow, and streams crossing the boundary for purchase of external neutralizing agents.

에서 불연속적으로 증가하며 망 구성도 다르다. 이와 같은 관측은 망 전체의 처리 비용 증가가 2%로 수용할 수 있다고 전제하여 개별 기업의 비용 중 최대치 Z_{wc} 를 무조건 줄이는 것이 최선이 아님을 보여준다.

Table 2에 보인 것처럼 심플렉스 a에서 b 사이에는 외부

중화제 사용량은 동일하며 c는 a에 비하여 외부 중화제를 구입하는 기업의 수가 많은 반면 기업별 폐수 처리 비용은 그 차이가 줄어들었다. 이에 비하여 심플렉스 b와 c 사이에서는 외부 중화제 사용량이 11% 증가한 반면에 기업별 폐수 처리 비용은 서로 같다. 이와 같은 관점에서 최종적인 산업 공생망의 설계는 Figure 5(b)에 보인 심플렉스 b에서의 망 구성을 우선적 후보로 결정하고 해당 기업 간의 협의를 거쳐 결정하는 것이 타당하다.

4. 결론

본 연구에서는 산/염기성 폐수가 다량으로 배출되는 석유화학산업 단지에서 외부 중화제의 사용량을 줄이려는 목적으로 자체 중화를 위한 산업 공생망의 설계 방법을 개발하였다. 설계 문제를 망 전체의 폐수 처리 비용과 가장 비용이 많이 드는 개별 기업의 폐수 처리 비용을 두 가지 척도로 사용하는 다중척도 의사결정 문제로 구성하여 이를 여수 EIP에 적용한 결과 외부 중화제의 사용량을 23% 수준까지 줄일 수 있음을 보였다. 또한 이 수준을 만족하는 공생망 후보가 다수 존재하며, 이 후보군 사이의 차이는 망 구성의 혜택 배분의 차이임을 밝히고 그 혜택을 고루 나눌 수 있는 공생망 후보를 도출하였다. 본 연구에서 적용한 물질 흐름 분석과 다중척도 의사결정 전략은 산/염기 폐수 발생원에 일반적으로 적용 가능하므로 산/염기성 폐수 발생원이 밀집하여 다수 존재하는 산업 단지에 확산할 수 있으며, 특히 거점 기업의 역할을 담당할 강산성/강염기성 폐수 발생원이 있는 경우에 적용 가능성이 높다.

감사

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구 진흥비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

사용부호

- b_{ij} : 이진변수. 폐수 발생원 i 에서 j 로 보내면 1, 아니면 0
- C_a/C_b : 폐수내 산/염기성 물질의 농도 허용치, 5×10^{-5} mol/L
- c_{qi} : 폐수 발생원 i 의 산(>0) 또는 염기성(<0) 물질 농도, mol/L
- c_{ri} : 중화제의 농도, 0.1 mol/L
- d_{ij} : 폐수 발생원 i 와 j 사이의 이동 거리, m
- i, j : 폐수 발생원: A, B, ..., R
- N : 폐수 발생원의 집합: {A, B, ..., R}
- n : 폐수 발생원의 수: 18
- Q_i : 폐수 발생원 i 의 폐수 발생량, m³/d
- q_{ij} : 폐수 발생원 i 에서 j 로 보내는 유량, m³/d
- r_i : 중화제 구입량, m³/d
- u_{ij} : 폐수 자체 중화에 필요한 고정 비용, \$18/d
- v_{ij} : 폐수 운반 비용, \$6.50/m³ · m
- w_i : 중화제 구입 비용, \$100/m³

- Z : 산업 공생망 전체의 폐수 중화 비용, \$/d
 z_i : 폐수 발생원 i 의 폐수 중화 비용, \$/d
 Z_{\max} : 개별 폐수 발생원의 폐수 중화 비용 최대치, \$/d
 α : 폐수를 주는 발생원의 처리비용 부담 비율, 0.5

참고문헌

1. Ben-Tal, A., and Nemirovski, A., "Selected Topics in Robust Convex Optimization," *Math. Programm. Series B*, **112**(1), 125-158 (2008).
2. Binder, C. R., von der Voet, E., and Rosselot, K. S., "Implementing the Result of Material Flow Analysis: Progress and Challenges," *J. Ind. Ecol.*, **13**(5), 643-649 (2009).
3. Brunner, P. H., "Substance Flow Analysis as a Decision Support Tools for Phosphorus Management," *J. Ind. Ecol.*, **14**(6), 870-873, (2010).
4. Cazcarro, I., Pac, R. D., and Sanchez-Choliz, J., "Water Consumption Based on a Disaggregated Social Accounting Matrix of Huesca (Spain)," *J. Ind. Ecol.*, **14**(3), 496-511 (2010).
5. Chae, S. H., Lee, G.-S., Lee, J.-H., and Min, B.-J., "Field Note: the First Phase Eco-Industrial Park Construction," *J. Ind. Ecol.*, **1**(1), 17-22 (2010).
6. Cziner, K., Tuomaala, M., and Hurme, M., "Multicriteria Decision Making in Process Integration," *J. Clean. Prod.*, **13**(5), 475-483 (2004).
7. Fishburn, P., "Mean-Risk Analysis with Risk Associated with Below-Target Returns," *Am. Econ. Rev.*, **67**(2), 116-126 (1977).
8. Hsu, Y. C. and Rohmer, S., "Probabilistic Assessment of Industrial Synergetic Systems," *J. Ind. Ecol.*, **14**(4), 558-575, (2010).
9. Jeong, C., Lee, C. J., Kim, D. H., and Han, C., "Optimal Hydrogen Recycling Network Design of Petrochemical Complex," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(1), 25-31 (2007).
10. Kang, J. S., Lee, T. Y., and Lee, D. Y., "Robust Optimization for Engineering Design," *Eng. Optimiz.*, in press.
11. Kim, H. D. and Lee, T. Y., "Pareto Optimality of Industrial Symbiosis Network: Benefit Sharing of Wastewater Neutralization Network in Yeosu EIP," *PSE Asia 2007*, Xian, China (2007).
12. Lee, T. Y., Yun, C. H., Yoon, H. S., Yang, S. H., "Business Characteristics of the 1st Stage EIP Project for Yeosu National Industrial Complex," *Proceedings of the GIN 2010 Conference on Climate Change & Green Growth: Innovating for Sustainability*, 148, Seoul (2010).
13. Mittinen, K., *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, the Netherlands, (1999).
14. Posch, A., "Industrial Recycling Networks as Starting Points for Broader Sustainability-Oriented Cooperation?," *J. Ind. Ecol.*, **14**(2), 242-257 (2010).
15. Rechberger H. and Brunner, P. H., "A New, Entropy-Based Method to Support Waste and Resource Management Decision," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 809-816 (2002).
16. Williams, E. D., Weber, C. L., and Hawkins, T. R., "Hybrid Framework for Managing Uncertainty in Life Cycle Inventories," *J. Ind. Ecol.*, **13**(6), 928-944 (2009).