

생태산업단지에서 용수재이용 네트워크의 에이전트 기반 모델링 및 설계

김현주 · 유창규*^{†1} · 류준형 · 이인범^{‡2}

포항공과대학교 화학공학과
794-784 경북 포항시 남구 효자동 산31
*경희대학교 환경응용화학대학/그린에너지센터
446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동1
(2007년 10월 9일 접수, 2007년 12월 13일 채택)

Agent-Based Modeling and Design of Water Reuse Network in Eco-Industrial Park (EIP)

HyunJoo Kim, ChangKyoo Yoo*^{†1}, Jun-Hyung Ryu and In-Beum Lee^{‡2}

Department of Chemical Engineering, POSTECH, San 31, Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang Kyungbuk 790-784, Korea

*College of Environmental and Applied Chemistry / Green Energy Center, Kyunghee University,

1 Seocheon-dong, Kiheung-gu, Yongin, Gyeonggi 446-701, Korea

(Received 9 October 2007; accepted 13 December 2007)

요 약

생태산업단지의 주요 목표인 무배출(zero-emission)을 달성하기 위해서는, 기업간의 효과적인 용수 재이용망의 구축이 요구된다. 다양한 서브시스템과 의사결정과정을 포함한 복잡한 망 구조를 이루기 때문에 생기는 모델링 부분에서의 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 새로운 모델링 기법인 에이전트기반 모델링(agent based modeling, ABM)을 도입하였다. 에이전트기반 모델링 기법을 이용해 물질교환망 내의 기업을 에이전트화 하고 이를 토대로 전체 시스템을 모사하는 방법론을 제시하였으며, 이를 이용해 실제 산업단지 내 기업에 대한 간단한 용수교환망 설계 모델을 구축하였다. 에이전트기반 모델에 기초한 용수재이용망은 용수공급에서 35% 감소를 보이며 폐수 배출량은 약 50%가 감소하였다. 실제 산업단지 모델링 결과 에이전트기반 모델은 시스템 변동시에도 전체 시스템을 수정할 필요가 없으며, 시스템이 확장하는 경우에도 그 적용이 용이하기 때문에 생태산업단지와 같은 복잡한 시스템의 모델링과 설계시 유용한 기술로 사용될 수 있음을 보였다.

Abstract – To achieve zero-emission, one of the main goals of an eco-industrial park (EIP), it is needed to develop an effective water exchange network. The network includes various subsystems and decision making processes, which make the modeling process extremely complicated. Agent-based modeling was used to simulate water exchange network in an EIP. Firm agents were created based on the behavior pattern of firms, and an agent-based model (ABM) was made with the agents, showing the growth of the exchange network. An existing steel and iron making industrial park was chosen as a case study, and the ABM model shows eco-efficient behavior with a decreased environmental cost. Water reuse network based on the ABM model results in 35% decrease of the fresh water supply and 50% reduction of the wastewater generation in EIP. A case study shows that agent-based model can be a powerful tool in modeling and designing complex eco-industrial parks, especially when a part of the system needs to be changed.

Key words: Agent-Based Modeling (ABM), Byproduct Exchange, Clean Technology, Eco-industrial Park (Eip), Robust Design, Water Reuse Network

1. 서 론

환경문제가 사회적 이슈로 대두되면서 부산물 처리 문제는 기업에게 있어 민감한 사안이 되었다. 정부차원의 환경규제가 강화되고

소비자의 환경적 인식 또한 증대하였으며, 이들의 영향은 기업 이미지 등의 부수적인 차원에서 벗어나 기업의 이익에 직접적으로 영향을 미치는 단계에 접어들었다. 이에 따라 산업 현장에서도 기존의 경제적 이익을 추구하는 태도에서 벗어나 친환경적인 공정을 설계하고 운용할 필요성이 제기되었으며, 생산활동의 환경적 영향을 줄이기 위한 다양한 방안들이 시도되고 있다[1-4].

생태산업단지(Eco-industrial park, EIP)는 Fig. 1에서 보듯 개별

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ^{†1}ckyooy@khu.ac.kr

^{‡2}iblee@postech.ac.kr

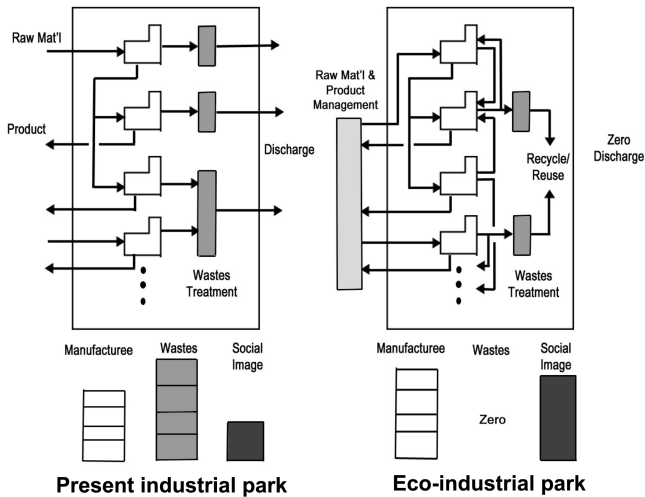


Fig. 1. The basic concept of eco-industrial park [1].

기업의 차원에서 벗어나 기업간의 협동을 추구하여 환경영향을 감소시키고자 하는 새로운 개념이다[1]. 기존의 공업단지과 마찬가지로, 생태산업단지 또한 지리적으로 근접한 기업들의 공동체이며, 물질, 에너지 및 정보 등 다양한 자원을 공유하여 생산활동을 개선하는 것에는 차이가 없다. 그러나 기존 공업단지가 오로지 경제적인 이득만을 추구하는 데 반하여, 생태산업단지는 경제적 이익뿐만 아니라 환경적인 개선효과 또한 도모한다. 산업생태학에서 파생된 무배출(zero-emission) 개념을 도입하여 주변 환경으로의 환경영향을 최소화하는 것이 생태산업단지의 환경적 목표이며, 이를 달성하기 위해 청정공정 도입, 기업간 부산물 교환, 재활용 기업 유치 등을 시행한다[1-3].

자연친화적인 공정을 구성하기 위해서는 유틸리티중 환경과 가장 밀접한 영향을 지닌 용수 관리가 절실하다. 용수는 생활활동상에서 원료와 부산물의 역할을 동시에 수행하기 때문에, 친환경적인 용수 이용을 위해서는 용수 요구량과 폐수 배출량을 동시에 감소시키는 방안이 고려되어야 한다. 이를 달성하기 위해서 공정 내에서 용수를 자체적으로 재사용 및 재활용하는 용수 재이용망을 구성하는 것이 방법이 될 수 있다. 이러한 용수 재이용망의 개념이 생태산업단지에 도입되는 경우, 이는 기업들이 서로의 용수를 재이용하는 기업간 용수 재이용망을 의미한다.

용수 재이용망이 확립되기 전에 공단 내의 기업들은, 원수를 공급받아 이용한 뒤 폐수를 배출했으며 이들은 공단 공용의 폐수 처리시설에 모여서 처리되었다('end-of-pipe' 접근방식). 처리되기 이전의 폐수 또는 자체 처리시설의 처리과정을 거친 재생수는 다른 공정에 활용될 수 있는데, 이러한 재이용망을 구축하기 위해서는 우선 각 공정의 한계수질 및 한계용량을 분석하고 이를 토대로 하여 재이용망을 설계하는 과정이 필요하다('in process' 접근방식). 이러한 용수 재이용망 설계에 있어서는 워터핀치(water pinch), 물질흐름분석(material flow analysis, MFA) 등의 다양한 방법론이 제시되어 있다[4].

생태산업단지에 참가하는 기업이 증가함에 따라, 이를 모사하는 시스템의 규모가 커지고 구조 또한 복잡해진다. 시스템의 상태를 표현하는 변수와 이들 사이의 관계를 표현하는 식을 통해 시스템을 모사하는 기존의 모델링 기법은, 표현해야 할 시스템의 규모가 증

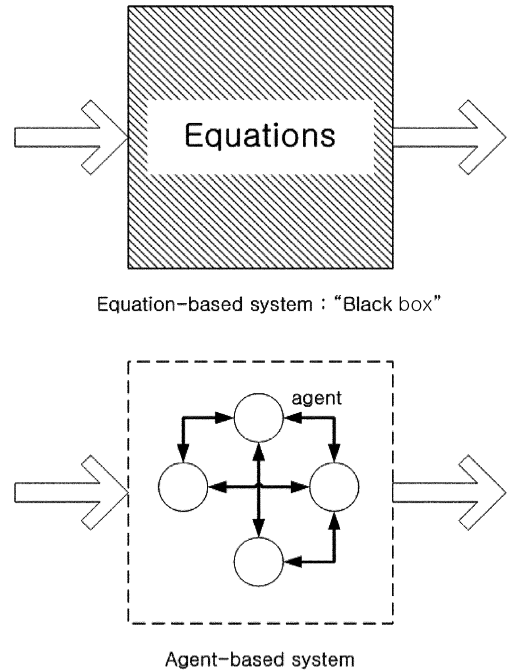


Fig. 2. Equation-based modeling vs. agent-based modeling [6].

가하게 되면 모델이 극도로 복잡해진다. 결과적으로 많은 수의 가정을 도입해야만 했으며 이는 실제 상황과 상이한 결과를 가져올 가능성이 높아 모델의 신뢰성을 감소시키는 요인이 되었다. 이러한 상황을 개선하기 위해 에이전트기반 모델링이라는 새로운 기법이 개발되었다[5-9].

에이전트 기반 모델링(agent-based modeling)은, 시스템을 구성하는 각 부분의 행동양식을 표현하는 에이전트를 통해 모델을 구축하는 방식이다[5]. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 전통적인 모델링 기법이 시스템 외부에서 보이는 변수와 식을 통해 모사하는 외부적인 접근 방식인 데 비해, 에이전트 기반 모델링은 시스템 내에서 일어나는 현상을 모사하고 이들을 취합하여 전체 시스템을 표현하는 모델을 만드는 내부적인 접근방식이라고 할 수 있다. 이 기법에서는, 실제로 모사해야 할 부분은 시스템의 일부분이기 때문에 가정을 도입할 필요성이 감소하며, 이는 공업단지의 설계 및 운영과정에 있어서 보다 신뢰성 있는 모델의 구축을 위해서 에이전트 지향 접근방식은 유용한 도구가 될 수 있다[6].

본 연구는 에이전트 기반 모델링을 이용해 기업간 용수 재이용망을 표현하기 위해 요구되는 에이전트 설계 방법론을 제안하고자 한다. 생태산업단지를 구성하는 요소 중 가장 중요한 구성원이라고 할 수 있는 기업을 나타내는 에이전트를 설계하였으며, 이를 이용하여 실제 철강산업단지의 기업간 용수교환망 모델 및 설계를 구현하였다.

2. 에이전트 기반의 용수 재이용 네트워크 설계

2-1. 에이전트 기반 모델의 설계과정

에이전트 기반 모델링을 구축하는 과정에서 최초로 수행되어야 하는 것은 시스템을 분석하는 것이다. 표현하고자 하는 전체 문제 영역을 시스템의 동적인 측면과 정적인 측면을 고려하여 분석하고,

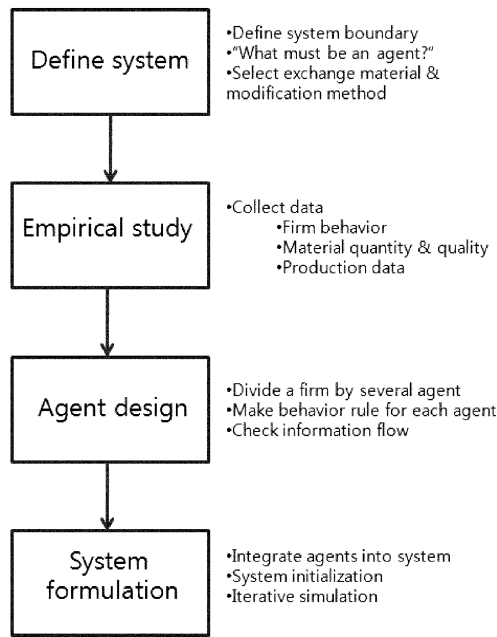


Fig. 3. The step of agent-based modeling [8].

이 중에서 에이전트로 표현되어야 하는 것을 추려낸다. 개별 에이전트로 설계할 영역을 지정한 이후에는, 사례연구 등을 통해 에이전트의 행동규칙을 도출한다[7]. 에이전트는 시스템을 모사하기 위해 필요한 핵심 내부요소가 되는데, 이는 객체지향적 설계에서의 객체와 비슷한 개념으로 볼 수 있다. 그러나 에이전트는 기존의 객체와는 차별되는 다음과 같은 특징을 가지고 있으며, 시스템 설계자는 에이전트를 설계하는 과정에서 이를 염두에 두어야 한다[8].

- (1) 에이전트는 환경에 대응해서 독립적으로 자신의 행동을 결정한다.
- (2) 에이전트는 변화하는 환경에 반응하여 자신의 행동을 변화시킬 수 있다.
- (3) 에이전트는 목적지향적인 행동을 한다. 에이전트 자신의 목표가 정해져 있다.
- (4) 에이전트는 목표 달성을 위해 다른 에이전트와도 상호작용한다. 따라서, 에이전트 내부에는 외부 변화에 대한 반응 규약과 자발적인 행동 규약이 포함되어 있어야 한다. 이러한 에이전트 행동 규약을 결정할 때에는 에이전트의 목적이 명확하게 정의되어야 한다. 그러나 에이전트는 시스템 내부에 포함된 요소이기 때문에 시스템 전체의 상태를 고려하여 행동을 결정한 필요는 없다[9]. 에이전트 자체에 대한 설계가 종료된 이후에는, 에이전트간의 정보 교환방식을 결정하고 이를 시스템에 이식하여 전체 모델을 구축하게 된다. 이상의 과정을 정리하면 Fig. 3과 같다[8].

2-2. 에이전트 기반 모델링을 바탕으로 한 기업에이전트 설계

기업간 용수재이용 시스템에서 핵심적인 에이전트는 생산활동을 수행하는 기업이다. 기업을 에이전트로 표현하기 위해서는 우선 용수 사용에 대한 기업 행동 모델이 구축되어야만 한다. 기업의 용수 이용을 정의하는 기본 정보는 기업의 용수 이용량 및 폐수 배출량이지만, 기업의 성격에 따라 기업의 행동 패턴 또한 변화하므로 이 또한 기업 에이전트 구축 시 반영해야만 한다.

기업은 기본적으로 이익을 목적으로 생산활동을 하기 때문에 경

제적 이익에 따라 움직인다. 용수재이용 시스템에 참여하는 기업은 용수구입비용 및 폐수처리비용의 절감을 통해 경제적 이익을 확보할 수 있다. 그러나, 재이용 시스템에 참가하는 경우 기업은 시설비를 부담하여야 하며, 전체 재이용망의 구축이 단기간에 이루어지지 않으므로 시스템이 안정화될 때까지의 추가부담 또한 고려해야 한다. 즉, 기업에이전트의 최종 목적은 경제적 이익을 최대화하는 것이다. 그러나 생태산업단지에 참가하는 기업의 경우 경제적 이익 외에도 환경적인 개선 또한 희망하는 것으로 볼 수 있다. 이 또한 기업의 목적에 포함되어야 하는데, 본 연구에서는 이를 원수 및 재생수 단위비용에 반영하여 기업의 선택에 반영하였다. 이상의 목적을 가진 기업이 공단 내에서 수행하는 작업은 다음과 같이 나누어 볼 수 있다.

(1) 기업은 일반적인 생산활동을 수행한다. 용수 재이용망 구축 과정에서 이 생산활동은, 용수를 받아들여 폐수를 배출하는 과정으로 요약할 수 있다.

(2) 기업은 용수 재사용 및 재이용 활동을 수행한다.

용수 재사용 및 재이용 활동이 일반 생산활동에 영향을 미치지 않는다고 가정할 경우, 에이전트가 결정해야 할 행동 패턴은 용수 재사용 및 재이용 활동에 한정된다. 여기에는 재사용을 위한 용수망 구성, 개별 재생시설 설치 및 이용여부 등의 선택지가 포함된다. 행동 결정을 위한 의사결정과정을 설계할 때에는 기업의 원 목표인 경제적 향상과 더불어 환경영향 감소 또한 고려하여 설계를 진행하여야 한다.

본 연구에서 설계된 기업 에이전트에는 세 종류의 의사결정과정 이 존재한다. 친환경공정 도입을 발안하는 경우, 친환경공정 제안을 받아들이는 경우 및 기존에 운용되고 있던 공정을 중단하는 경우가 이에 포함된다. 각 경우에 있어서 기존에 용수구입 및 처리에 사용되던 비용과 예상비용을 비교하여 결정을 내리는데, 비용에는 용수 구입비용, 폐수처리비용, 설비도입시의 고정비용 및 변동비용이 포함된다. 각 기업은 동일한 의사결정과정을 거쳐서 재이용망을 구축하지만 기업이 수용할 수 있는 비용범위 및 시설종류는 기업의 성격에 의해 차이가 생기며, 이는 에이전트에 기업성격을 반영하는 변수를 부여하여 모델을 구현한다.

기업 에이전트가 명확하게 각 기업을 표현하게 하기 위해서 가장 좋은 방법은 단지 내의 각 기업을 대상으로 직접조사를 수행하여 그 결과를 반영하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 이 방법을 적용하는 데 어려움이 있었으므로, 기존 연구결과를 이용하여 에이전트를 구성하였다. ISO 14,000 시리즈와 EMS 등에 대한 기업의 반응 연구를 분석한 결과, 환경보전에 대한 기업행동여부에는 기업의 규모가 가장 큰 영향을 미치며, 생산물 종류 및 기업의 재정상태 등에 의해서도 영향을 받음을 알 수 있었다. Table 1은 기업행동에 영향을 미치는 요소들을 나열한 것이다[10, 11].

환경보전에 대한 행동 여부를 나타내는 기업의 성격변수, 용수량 및 수질, 폐수량 및 수질을 바탕으로 하여 기업의 환경영향 정도를 판단하며 다음의 식으로 표현된다[12].

$$E = \frac{\sum_{flow-out} f_i m_i}{\sum_{flow-in} f_i m_i} + \alpha \cdot S \tag{1}$$

f_i 와 m_i 는 기업으로 출입하는 용수흐름의 수질과 수량이 되며, 이때 수질은 시스템 내에서 미리 정의한 핵심오염물질을 기준으로 계산한다. S는 위에서 정의한 기업의 성격변수이다. 위의 식은 기업의

Table 1. Firm properties which influence on environmental decisions [10-11]

| Firm property | Influence |
|----------------------|--|
| Firm size | · Large firm discharges more pollution. · Large firm tends to have a positive policy in adopting environmental technologies and equipments. |
| Accounting condition | · If the debt ratio of firm is high, a firm shows a negative attitude about introducing environmental equipments. |
| Investment tendency | · If the investment ration of firm is high, a firm introduces environmental technologies and equipments actively. |
| Product type | · When the pollution levels of byproducts are high, a firm has a positive attitude to environmental technologies and equipments. · A firm whose products are close to consumer goods shows active behavior in adopting environmental technologies and equipments. |

배출 폐수의 수질이 나쁠수록, 또 기업의 규모가 크거나 환경친화적일수록 기업이 채감하는 환경영향은 커지고, 그에 따라 재이용 공정을 받아들이는 것이 용이해짐을 나타낸다.

기업이 발생시키는 환경영향이 허용레벨을 초과하고 그 처리비용이 기업 내 비용기준을 초과하는 경우 기업은 자신에게 적합한 친환경공정을 선택하고, 필요할 경우 그 파트너를 탐색한다. 이 탐색 과정은 기업에이전트 내에 포함된 탐색 에이전트가 담당한다.

공정의 종류와 규모는, 기업용수의 상태와 구축비용에 의해 결정된다.

$$BCR = \frac{CST_b - CST_0}{CST_c} \quad (2)$$

(2)의 식은 BCR(benefit-cost ratio) 방식을 이용한 공정의 경제성을 평가를 보여 준다[13]. CST_b와 CST₀는 각각 공정을 설치함으로써 발생하는 연간 추가이익과 운영비용을 나타낸 것이며, CST_c는 공정 설치를 위한 고정비용을 나타낸다.

각 기업은 자신의 상태를 파악하고, 공정의 제안과 수용을 반복하면서 최종적으로 안정화된 용수 재이용망에 도달하게 된다.

2-3. 사례연구: 기존 산업단지 내의 용수 재이용망 구축

에이전트 설계 방법론을 바탕으로, 철강산업단지의 용수 재이용망을 구성하는 에이전트 기반 모델을 구축하였다. 기존 공단에서 용수교환망을 구성하기에 적절한 기업을 선정하여 이들을 에이전트로 표현하였고 두 종류의 사업을 제안하여 이들을 이용한 재이용망 구

축 과정을 확인하였다.

실험은 크게 두 단계로 구성되었다. 우선, 용수 재이용 과정에서 주어지는 다양한 기술적 제약 및 경제적 제약을 부여하지 않은 상태에서 재이용망을 구축하였고, 이후 에이전트를 수정하여 제약조건을 부여한 상태에서 다시 재이용망을 구축하였다. 개별 기업에 대한 제약조건을 추가하기 위해서 본 모델에서는 해당 기업의 에이전트만을 수정하면 되기 때문에, 훨씬 직관적이고 정확한 모델의 수정이 가능하다.

Table 2와 Table 3은 실험에서 공통적으로 사용한 용수 비용 및 기업정보를 나타내고 있다[14]. 용수 재이용망을 구축하는 과정에서 용수 운용 비용을 감축시키는 목표가 존재하며 에이전트의 의사결정과정에서도 비용은 중요한 역할을 차지하기 때문에, 용수비용, 배관비용, 처리비용 등의 비용 데이터가 필요하다. 용수의 오염도를 나타내는 핵심 오염물질은 화학적산소요구량(COD)과 이온전도도(conductivity)를 선택하였다. 본 실험에서 기업이 적용할 수 있는 재이용공정은 다음과 같다.

(1) 기업은 자체정화모듈을 설치하여 자신의 폐수를 처리할 수 있다. 또한, 용량이 남을 경우에는 다른 기업의 폐수 또한 처리할 수 있으며 이 재생수를 타 기업에 판매하여 추가적인 이익을 얻을 수 있다. 정화시설은 고정비용이 큰 편이며 규모가 커질수록 단위비용이 감소하기 때문에 주로 폐수배출량이 많거나 기업규모가 큰 기업이 채택하는 경향이 있다.

(2) 기업은 타 기업의 자체정화모듈, 또는 종말처리장으로부터 재생수를 구입하여 용수 대신 사용할 수 있다. 이 경우 새로운 배관비용과 용수구입비용을 부담하여야 한다. 그러나 재생수 구입비용은

Table 2. Water purchasing, abating and treatment cost

| Water source water cost (cu/t) | Abatement cost (cu/t) | Treatment center | | Regenerated water | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------|-------------|---------------------------|-------------------|
| | | Capacity | Cost (cu/h) | Piping cost (cu/distance) | Water cost (cu/t) |
| 0.6 | 0.35 | 1.67 | 1.67 | 0.01 | 0.3 |
| | | 16.7 | 8.33 | | |
| | | 167 | 25 | | |

Table 3. Water usage data of industries in case studies

| Firm ID | Water input | | | Water output | | | | | |
|---------|------------------|-------------|---------------|------------------|-----------|-----------|-------------|---------------|----------|
| | Quantity (ton/h) | Cost (cu/h) | quality level | Quantity (ton/h) | COD level | ion level | Cost (cu/h) | Quality level | Priority |
| p1 | 162.5 | 97.5 | 325 | 152.08 | 6 | 4 | 38.02 | 760.4 | 2.384799 |
| p2 | 9.36 | 5.616 | 18.72 | 18.71 | 6 | 3 | 4.6775 | 84.195 | 4.626365 |
| p3 | 91.32 | 54.792 | 182.64 | 32.53 | 6 | 4 | 8.1325 | 162.65 | 2.122751 |
| p4 | 18.83 | 11.298 | 37.66 | 12.63 | 6 | 3 | 3.1575 | 56.835 | 1.572699 |
| p5 | 214.61 | 128.766 | 429.22 | 16.67 | 6 | 6 | 5.8345 | 100.02 | 0.256723 |
| p6 | 29.17 | 17.502 | 58.34 | 17.92 | 6 | 6 | 6.272 | 107.52 | 2.365529 |
| p7 | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0.036874 |
| p8 | 58.33 | 34.998 | 116.66 | 50 | 5 | 4 | 12.5 | 225 | 1.974975 |
| p9 | 12.95 | 7.77 | 25.9 | 12.96 | 5 | 2 | 2.592 | 45.36 | 1.762966 |
| p10 | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0.009056 |

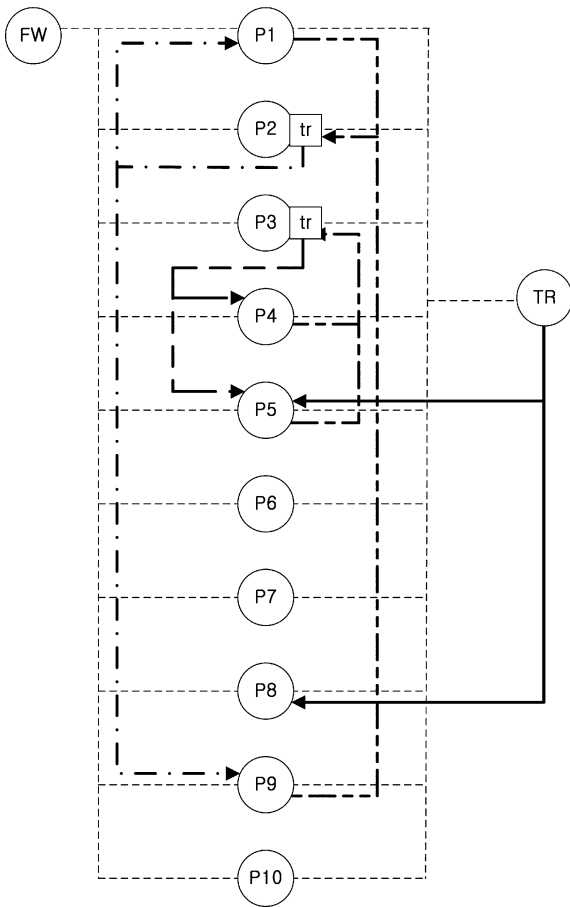


Fig. 4. Final network of case study 1.

원수 구입비용에 비해 저렴하다. 폐수에 비해 용수의 영향이 크고, 규모가 작은 기업이 채택할 수 있는 재이용 공정이다. 이상의 공정을 대상으로 하여 용수재이용망 구축을 위한 에이전트기반 모델링을 수행하였다.

2-3-1. 사례 1: 공정 도입 의사결정만을 포함한 에이전트 모델링 이 모델에서 에이전트는 용수재이용을 위한 청정공정을 도입하는 의사결정과정을 포함하고 있으며, 용수교환에 있어서 특별한 제약 조건을 부여하지 않았다. 10개의 에이전트와 1개의 종말폐수처리시설로 구성된 시스템에서, 6턴이 경과한 후 시스템은 안정화되었으며 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 자체 처리시설을 설치한 2개의 기업을 중심으로 클러스터를 이루는 양상을 보였다. 시스템 전체에 대한 공업용수의 유입이 50% 선, 폐수 배출은 20% 선으로 감소하여서, 생태산업단지에서 추구하는 무배출 요건에 근접하는 재이용망을 구성하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 이 모델은 용수 재이용 과정에서 존재하는 한계를 고려하지 않은 모델로 실제 사용가능한 용수 이용망과는 차이가 존재한다.

2-3-2. 사례 2: 공정 평가 의사결정을 포함한 에이전트 및 재이용 공정의 제약조건을 포함한 모델링

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 이 모델에서 에이전트에는 실험 1의 의사결정과정과 함께, 재이용 공정을 중단하는 경우에 대한 의사결정 과정이 추가되었다. 일정 기간(4턴)마다 기업의 환경 및 경제적 상

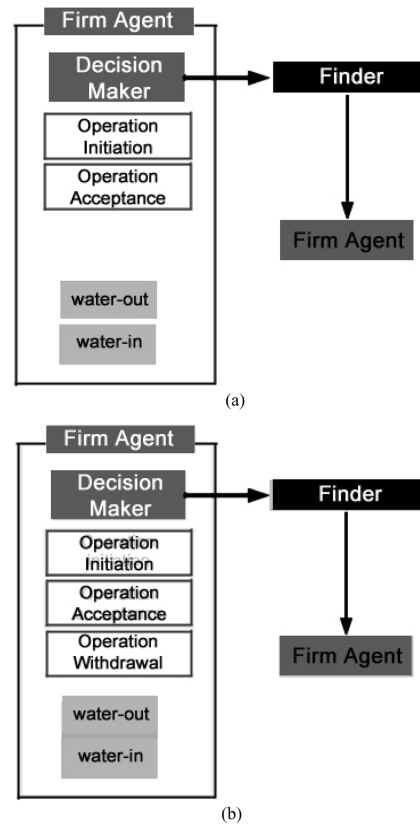


Fig. 5. Agent architecture of (a) case study 1 and (b) case study 2, which include the operation withdrawal of the decision maker.

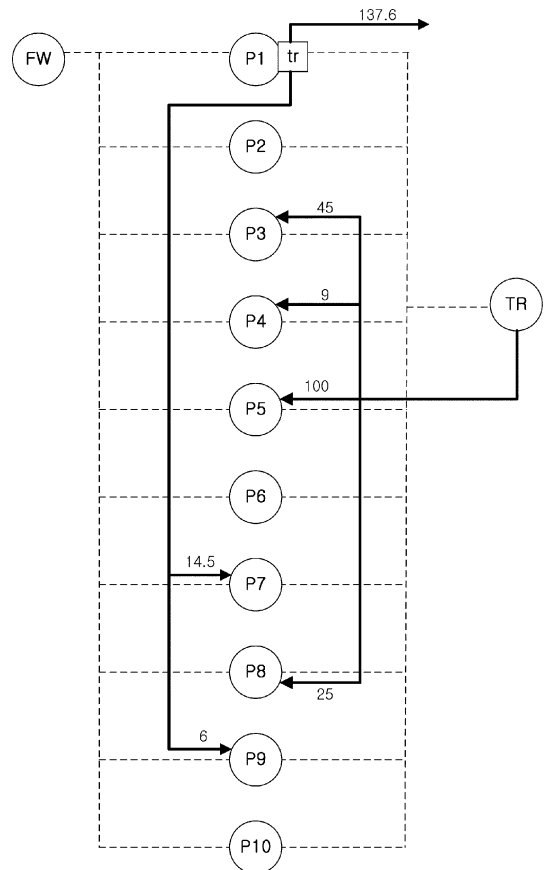


Fig. 6. Final network of case study 2.

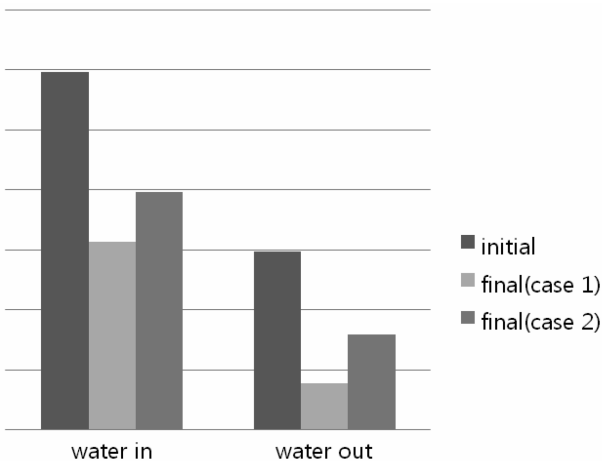


Fig. 7. Amounts of the reduced water usage in case studies.

황을 판단하여, 해당 공정의 실적이 부족할 경우 에이전트는 공정을 포기한다. 이는 기업에서 해당 공정이 차지하는 비중과 환경개선 정도를 통해 결정된다. 이러한 과정을 통해 우수한 공정이 적용되면서, 전체 공단은 보다 환경친화적인 방향으로 발전할 수 있다[15]. 또한 이 모델에서는 용수교환과정에서의 제약조건이 추가된다. 실제 공정에서는 오염물의 누적과 시설면에서 제약 등으로 인해 재이용수의 사용이 제약된다. 재이용수의 사용량, 개별 기업이 수용할 수 있는 최대 연결망 수, 오염물 총량 등을 각각 제약조건으로 지정하여, 이를 반영하는 재이용망을 구축하였다.

이상의 조건을 적용하여 설계한 용수재이용망은 용수공급면에서 35% 감소를 보이며 폐수 배출량은 약 50%가 감소하였다. 재이용망을 10년간 운영한다고 가정할 경우, 전체 비용은 약 18% 감소하였다[16]. Fig. 6는 이 모델에서의 기업간 용수 연결망을 나타내고 있다.

2-3-2. 맨 끝

Fig. 7에서 두 사례연구를 통해 얻은 용수재 이용망의 결과를 비교해 볼 수 있다. 두 재이용망에서 공급용수 및 폐수량이 모두 감소하는 결과를 보였다. 사례 2의 경우 용수 이용 및 폐수 배출량의 감소율이 다소 적었으며, 특히 폐수 배출 면에서는 초기 배출량 대비 20%선과 50%선으로 현격한 차이를 보였다. 이러한 결과는 실제 공정에서 보여지는 제약조건에 의해서 발생하였으며, 상기 사례에서는 특히 수용 가능한 오염물 총량제약이 큰 영향을 미쳤다.

3. 결 언

생태산업단지를 구축하는 과정에 있어서 용수의 효율적인 이용은 매우 중요하다. 산업단지내의 다수의 기업을 재이용 네트워크로 통합하는 경우의 복잡한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 에이전트 기반 모델링을 통한 접근방식을 이용하여 간단한 용수 재이용망을 설계하였다. 설계결과 기업이 환경친화적인 목표를 가지고 행동을 결정할 경우 공단 전체를 포괄하는 목표를 부여하지 않아도 공단내 기업은 용수 재이용망을 구축하는 것을 철강산업단지를 대상으로 한 실험에서 확인할 수 있었다. 즉, 친

환경 공정을 수용하는가에 대한 적절한 기준이 부여될 경우 각 에이전트가 시스템 전체의 정보를 고려하지 않더라도 설득력 있는 이용망을 구성할 수 있으며, 이는 생태산업단지 내에서 요구되는 복잡한 기업간 연결 문제에서 에이전트 기반 모델링이 응용될 수 있음을 보여주었다. 또한, 에이전트와 그 연결관계를 통해 시스템을 구성하는 에이전트 기반 모델링의 특성상 시스템의 일부가 변경되어야 할 때 기존 모델링 기법에 비해 손쉽게 에이전트를 변경할 수 있다는 점은 경영전략에 따라 쉽게 변화하는 기업의 생산활동에 대응하는 에이전트 기반의 동적 모델링에 대한 가능성을 제시하고 있다.

감 사

본 연구는 BK21 2단계 사업에 의해 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lowe, E. A., "Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries," *Asian development bank report*(1997).
2. Yoo, C. K., Heo, S. K., Yoo, D. J., Shin, J. N., Chun, H. D., Moon, J. K. and Lee, I. B., "Review: Eco-Industrial Park (EIP) Development and Key Technologies for Clean Production," *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**(4), 549-559(2005).
3. Keckler, S. E. and Allen, D. A., "Material Reuse Modeling: A Case Study of Water Reuse in an Industrial Park," *J. Ind. Ecol.*, **2**(4), 79-92(1999).
4. Lee, S., Yoo, C. K., Choi, S. K., Chun, H. D. and Lee, I. B., "Modeling of Eco-Industrial Park (EIP) through Material Flow Analysis (MFA)," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(6), 579-587(2006).
5. Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsh, F., Mooji, W. M., Railsback, S. F., Thulke, H. H., Weiner, J., Wiegand, T. and DeAngelis, D. L., "Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology," *Science*, **310**(11), 987-991(2005).
6. Parunak, H. V. D., Savit, R. and Riolo, R. L., "Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide", *MABS '98*, 10-25(1998).
7. Bonabeau, E., "Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems," *PNAS*, **99**(3), 7280-7287 (2002).
8. Kim, M. J., Lee, Y. L., Park, K. H., Park, W. Y. and Park, S. Y., "Agent Oriented Software Modeling Methodology," *J. KISS: Software and Applications*, **27**(10), 1015-1027(2000).
9. Jennings, N. R., "On Agent-Based Software Engineering," *Artif. Intell.*, **117**(2), 277-296(2000).
10. Nakamura, M., Takahashi, T. and Vertinsky, I. M., "Why Japanese firms Choose to Certify: A Study of Managerial Responses to Environmental Issues," *JEEM*, **42**(1), 23-52(2001).
11. Kim, S.-J., "Explanatory Factors for Eco-Efficient Behavior of Firms," (2003).
12. Shadbegian, R. J. and Gray, W. B., "What Determines Environmental Performance at Paper Mills? The Roles of Abatement Spending, Regulation and Efficiency," (2003).
13. Rowe, D. and Abdel-Magid, I. M., "Handbook of Wastewater

- Reclamation and Reuse," (1995).
14. Lemons, J., Westra, L. and Goodland, R., "Ecological Sustainability and Integrity: Concepts and Approaches," *Kluwer Academic Publisher*(1998).
 15. Becker, R. A. and Shadbegian, R. J., "A Change of PACE: Comparing the 1994 and 1999 Pollution Abatement Cost and Expenditures Surveys," (2004).
 16. Lim, S., Park, D., Lee, D. S. and Park, J. M., "Economic Evaluation of a Water Network System Through the Net Present Value Method Based on Cost and Benefit Estimations," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(22), 7710-7718(2006).