

Steam Networking Matrices (SNMs)를 이용한 산업단지의 스팀 네트워크 최적화 방법론 개발

Development of An Industrial Complex Steam Network Optimization Method Using Steam Networking Matrices (SNMs)

김 상 훈, 채 송 화, 윤 성 근, 박 선 원*
(Sang Hun Kim, Song Hwa Chae, Sung-Geun Yoon, and Sunwon Park)

Abstract : Most chemical companies try to maximize their energy efficiencies due to high oil price and reinforcement of environmental regulation. An individual factory continuously has tried to reduce energy consumption or carbon dioxide discharge for high profit. Nevertheless, it is found that waste heat is disposed with forms of low or medium pressure steams. It can be improved by the aspect of entire industrial complex. Therefore, we have developed a steam network optimization method using Steam Networking Matrices (SNMs) in this research. Results from an illustrative example show that energy consumption can be reduced by optimizing steam exchange networks.

Keywords : SNMs (Steam Networking Matrices) steam network optimization, industrial complex, EIP (Eco Industrial Park)

I. 서론

최근 지속적으로 증가하는 환경오염과 유가상승 등의 이유로 에너지 사용을 줄이려는 움직임이 활발하다. 특히 에너지 사용량이 많은 화학산업단지의 경우 Eco Industrial Park의 조성 등을 통해 이 같은 움직임에 발맞추려 하고 있다.

화학산업단지에서 주로 사용하는 에너지인 스팀의 경우 온도와 압력에 따라 크게 초고압, 고압, 중압, 저압 스팀의 4 단계로 구분할 수 있다. 일반적으로 고압의 스팀은 그 자체를 사용하거나 이를 let down해 저압의 스팀으로 바꿔 사용한다. 일부 공장의 경우 사용 후 배출되는 중압 혹은 저압의 스팀을 재가열해 고압의 스팀으로 다시 사용하기도 한다. 하지만, 낮은 스팀 재활용 효율성이나 추가 설비의 필요 때문에 대부분의 경우 저압의 스팀을 그냥 대기 중에 배출한다. 따라서 이와 같이 대기로 방출되는 스팀을 최소화하거나 다른 공장에 공급한다면 에너지 사용량을 크게 줄일 수 있을 것이다.

또한 모든 공장에서 스팀을 생산하지 않고, 효율이 좋은 몇 개의 source companies에서만 필요한 스팀을 생산한 후 인근의 sink companies에 스팀을 공급한다면 산업단지 전체의 스팀생산 효율은 훨씬 더 높아질 것이다.

이에 본 연구에서는 산업단지 전체의 스팀 네트워크 최적화를 위한 Steam Networking Matrices (SNMs)를 제안하고, 가상의 화학산업단지에 적용, steam network를 최적화 해보았다.

II. Steam Networking Matrices (SNMs)

본 연구의 목적은 Steam Networking Matrices (SNMs)를 이용해 산업단지 전체의 steam network를 최적화하는 것이다. Steam network 최적화에 앞서 먼저 SNMs에 대해 설명하겠다.

표 1. 회사별 스팀 생산/사용/공급/수요량 (단위: 톤/시간).

Table 1. Steam production/consumption/supply/demand (ton/hour).

구분		스팀 생산량	스팀 사용량	스팀 공급량	스팀 수요량
Source Company 1	초고압	500	100	0	0
	고압	0	200	100	0
	중압	0	50	50	0
	저압	0	0	0	0
Sink Company 2	초고압	0	0	0	0
	고압	0	100	0	100
	중압	0	50	0	50
	저압	0	0	0	0

1. What are SNMs?

SNMs는 steam network를 구성하는데 필요한 source companies와 sink companies의 steam networking 정보를 담고 있는 행렬이다. 다음의 예를 통해 SNMs에 대해 살펴보도록 하겠다.

스팀을 공급하는 source company 1과 스팀을 공급받는 sink company 2가 있다. Source company 1의 스팀 생산량과 사용량 및 공급하는 양, sink company 2의 스팀 사용량 및 공급받는 양은 표 1과 같다.

이 때, source company 1의 스팀 생산량과 사용량, sink company 2의 스팀 사용량은 steam production vector, steam consumption vector와 steam supply vector를 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \text{Steam Production Vector} \\ \text{of Source Company 1} \end{pmatrix} = 1P_{\text{Production}} = \begin{pmatrix} 500 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 8. 30., 채택확정 : 2006. 10. 10.

김상훈, 채송화, 윤성근, 박선원 : 한국과학기술원 생명화학공학과
(shkim@pse.kaist.ac.kr/shchae@pse.kaist.ac.kr/sgyoon@pse.kaist.ac.kr/sunwon@kaist.ac.kr)

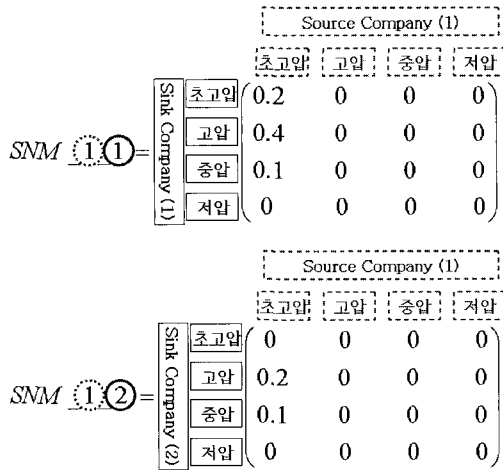


그림 1. SNMs의 구조.
Fig. 1. Structure of SNMs.

$$\begin{pmatrix} \text{Steam Consumption Vector} \\ \text{of Source Company 1} \end{pmatrix} = {}^1\text{Consumption} = \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \\ 50 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \text{Steam Consumption Vector} \\ \text{of Sink Company 2} \end{pmatrix} = {}^2\text{Consumption} = \begin{pmatrix} 0 \\ 100 \\ 50 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

위의 정보들을 종합해 그림 1과 같이 2개의 SNMs를 만들 수 있다.

각 부분이 의미하는 것을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 “SNM_1_2”에서 1은 두 회사 중 source company를, 2는 sink company를 의미한다.

모든 SNMs의 사이즈는 스팀의 grade 수와 동일한 4x4의 정사각행렬이며, SNM_1_2의 각 columns은 source company 1에서 생산된 초고압, 고압, 중압, 저압 스팀 중 sink company로 공급하는 스팀의 분율을 의미한다. 유사하게 행렬의 각 rows는 source company 1로부터 공급받은 sink company 2의 초고압, 고압, 중압, 저압 스팀을 의미한다. 모든 원소는 source company 1에서 생산된 각 grade 별 스팀 중 sink company 2로 공급되는 스팀의 분율을 나타낸다. 높은 grade의 스팀은 낮은 grade의 스팀으로 압력 변화가 가능하므로 생산된 각 스팀은 동급이나 그 이하의 스팀 grade로 변환하여 공급할 수 있다. 위 예에서 source company 1은 초고압 스팀 500톤/시간 중 20%에 해당하는 100톤/시간을 sink company 2의 고압 스팀으로 공급하고, source company 1의 초고압 스팀 10%에 해당하는 50톤/시간을 let down 시켜 sink company 2의 중압 스팀으로 공급한다. 이 정보들을 종합해 물질수지 식을 구성하면 다음과 같다.

$${}^1\text{Consumption} = \text{SNM_1_1} \times {}^1\text{Production}$$

$$\begin{pmatrix} 100 \\ 200 \\ 50 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 500 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$${}^2\text{Consumption} = \text{SNM_1_2} \times {}^1\text{Production}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 100 \\ 50 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 500 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

2. Characteristics of SNMs

지금부터 위 예제를 바탕으로 SNMs의 특징을 살펴해보도록 하겠다. SNMs의 특징을 잘 이해한다면 회사간의 복잡한 스팀 네트워크도 SNMs를 이용해 쉽고 간결하게 표현할 수 있을 것이다.

A. Rows: 위 예제에서 source company 1와 sink company 2의 저압스팀 사용량이 모두 0이므로 SNM_1_1, SNM_1_2의 4행은 모두 0이다.

$$\text{SNM_1_1} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ \boxed{0 & 0 & 0 & 0} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{SNM_1_2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ \boxed{0 & 0 & 0 & 0} \end{pmatrix}$$

B. Columns: 위 예제의 경우 source company 1에서 생산되는 스팀이 모두 초고압 스팀이므로 SNM_1_1, SNM_1_2의 2, 3, 4열의 원소가 모두 0이다. 하지만, 열회수에 의한 스팀 생산의 경우 고압이나 중압스팀의 생산도 가능하므로 이 경우에는 2, 3, 4열의 원소도 0이 아닌 다른 값을 가질 것이다.

$$\text{SNM_1_1} = \begin{pmatrix} 0.2 & \boxed{0 & 0 & 0} \\ 0.4 & \boxed{0 & 0 & 0} \\ 0.1 & \boxed{0 & 0 & 0} \\ 0 & \boxed{0 & 0 & 0} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{SNM_1_2} = \begin{pmatrix} 0 & \boxed{0 & 0 & 0} \\ 0.2 & \boxed{0 & 0 & 0} \\ 0.1 & \boxed{0 & 0 & 0} \\ 0 & \boxed{0 & 0 & 0} \end{pmatrix}$$

C. Elements range: 앞서 SNMs의 각 원소의 값이 source company에서 sink company로 공급하는 스팀의 분율을 의미한다고 설명했다. 따라서 SNMs의 모든 원소의 값은 0 이상 1이하의 실수이다.

$$0 \leq \text{SNM}(i, j) \leq 1 \quad (i \text{ and } j = 1, \dots, 4) \quad (7)$$

D. Upper triangular matrix: 일반적으로 스팀의 공급은 고압에서 저압으로 이뤄진다. 즉 사용하고 남은 초고압의 스팀으로 고압의 스팀을 만들고, 이 고압의 스팀으로 중압의 스팀을 생산한다. 특히 파이프라인을 통해 회사간의 스팀 교환이 이뤄질 경우 거리에 따른 압력손실도 있으므로 이와 같은 Top-Down 방식이 대부분일 것이다. 물론 쓰고

남은 저압의 스팀을 재가열해 고압의 스팀을 생산하는 경우에는 Bottom-Up 방식이 적용될 수도 있으나 이는 회사간의 네트워크에서는 적합하지 않다. Top-Down 방식이 적용될 경우 SNMs의 upper triangular matrix의 모든 원소는 반드시 0이 되어야 한다. 예를 들어 SNM_{1_1}, SNM_{1_2}의 (1, 2)원소(○ 표시)의 경우 source company의 고압(2열) 스팀이 sink company의 초고압 스팀(1행)으로 공급되는 것을 의미한다. 이는 앞서 설명한 Top-Down 방식에 위배되므로 불가능하다. 따라서 (8)과 같이 upper triangular matrix의 모든 원소는 반드시 0이 되어야 한다.

$$\begin{matrix}
 SNM_{1_1} = \begin{pmatrix} 0.2 & \textcircled{0} & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 SNM_{1_2} = \begin{pmatrix} 0 & \textcircled{0} & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{matrix} \quad (8)$$

E. Summation of all elements in each column: Source company가 동일한 SNMs의 경우 각 열의 합은 1이 되어야 한다. 위 예제에서는 source company가 1번 회사 하나이므로 SNM_{1_1}, SNM_{1_2}의 1열의 합이 1이다. 다만 2, 3, 4열의 경우 해당하는 스팀 생산량이 없으므로 해당 열의 모든 원소가 0이 되어야 한다.

$$\begin{matrix}
 SNM_{1_1} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 SNM_{1_2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{matrix} \quad (9)$$

III. Industrial complex steam network optimization

지금까지 설명한 SNMs를 이용해 실제 화학산업단지 전체의 Steam Network를 다음과 같이 최적화할 수 있다.

1. Objective function

본 최적화의 objective function은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \min Total Cost \\
 = Raw Cost + Operating Cost + Investment Cost
 \end{aligned} \quad (10)$$

A. Raw cost는 공장의 보일러를 이용해 스팀을 생산하는데 필요한 연료의 구입 비용(원/년)이다. 본 연구에서는 화학공장의 보일러에서 일반적으로 많이 사용하는 벙커 C유(bunker C oil), 석탄(coal), 가스(LPG) 3종류의 연료를 선택했으며 동일한 연료의 가격은 회사에 관계없이 모두 동일하다고 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 Raw Cost \\
 = Gas Cost + Bunker C Oil Cost + Coal Cost
 \end{aligned} \quad (11)$$

연료 구입가격은 다음의 자료를 참조하였다(참고 자료: 에너지기술정보서비스, <http://www.etis.net/etisweb>).

B. Operating cost는 다음의 두 가지 항목으로 구성된다.

$$\begin{aligned}
 Operating Cost \\
 = Repair Cost + Pressure Drop Cost
 \end{aligned} \quad (12)$$

1) Repair cost: 스팀 네트워크를 형성하는 두 회사간의 파이프라인을 유지 보수하는데 필요한 비용(원/년)으로 거리의 함수이며 (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Repair Cost \\
 = Repair Parameter \times Pipeline Length
 \end{aligned} \quad (13)$$

2) Pressure drop cost: 일반적으로 스팀 네트워크를 형성하는 두 회사간의 파이프라인이 길어질수록 스팀의 압력이 떨어진다. 이 경우 source company에서 고품질의 스팀을 공급하더라도 sink company에서는 원래의 스팀보다 낮은 품질의 스팀을 제공받을 수 밖에 없는데 pressure drop cost은 이때의 손실 비용(원/년)을 의미하며 역시 거리의 함수이다.

$$\begin{aligned}
 Pressure Drop Cost \\
 = Pressure Drop Parameter \times Pipeline Length
 \end{aligned} \quad (14)$$

Repair cost와 pressure drop cost는 다음의 자료를 참조하였다(참고 자료: 여수산업단지 H사).

C. Investment cost는 새롭게 스팀 네트워크를 형성하는 두 회사간의 파이프라인 설치와 관련된 비용(원/년)이다. 본 연구에서는 파이프라인 설치비용에 할증제도를 도입해 두 회사간의 파이프라인 거리가 minimum 거리보다 짧을 경우 기본비용을 적용하고, minimum 거리보다 긴 경우에는 기본비용에 m당 일정한 비용을 추가하는 방식으로 계산했다. 따라서 investment cost도 거리의 함수이다.

$$\begin{aligned}
 Investment Cost \\
 \begin{cases}
 (If Pipeline Length \leq Min Length) \\
 = Pipeline Number \times Pipe Parameter1 \\
 (Else) \\
 = Pipeline Number \times (Pipe Parameter1 + \\
 Pipe Parameter2 \times Excess Pipeline Length)
 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (15)$$

파이프라인 설치비용은 다음의 자료를 참조하였다(참고 자료: 여수산업단지 H사).

Objective function에서 raw cost는 보일러 가동에 필요한 연료 구입 비용이므로 거리에 관계없는 상수이다. 나머지 두 비용은 모두 거리의 함수이므로 산업단지의 스팀 네트워크 최적화에 가장 중요한 것은 파이프라인 거리의 최소화라 할 수 있겠다.

2. Parameters

본 최적화의 파라미터는 다음과 같다.

- n : number of Steam Grades
- N : number of Source Companies
- M : number of Sink Companies

- i : i th row of SNM
- j : j th column of SNM
- SNM(i, j) : (i, j)th element of SNM (16)
- Repair Parameter } Operating Cost Parameters
- Pressure Drop Parameter }
- Pipe Parameter1 } Investment Cost Parameters
- Pipe Parameter2 }

3. Variables

본 최적화의 변수는 SNMs의 element 값이다. SNMs의 최대 개수가 (source companies의 수)×(sink companies의 수)이므로 변수의 총 개수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Number of SNMs} &= N \times M \\ \text{Number of Variables} &= N \times M \times n^2 \end{aligned} \quad (17)$$

4. Constraints

본 최적화의 제한조건은 characteristics of SNMs에서 설명한 기본적인 SNMs의 조건 (7), (8), (9)와 source companies의 스팀 공급량이 sink companies의 스팀요구량을 만족해야 한다는 4가지이다.

$$\left[\begin{array}{l} 1. 0 \leq SNMs(i, j) \leq 1, (i \text{ and } j = 1, \dots, n) \\ 2. SNMs(i, j) = 0, (i < j, i \text{ and } j = 1, \dots, n) \\ 3. \sum_{i=1}^n SNMs(i, j) = 1, (j = 1, \dots, n) \\ 4. \text{sum(Steam supplies of Source Companies)} \\ = \text{Steam demands of Sink Company} \end{array} \right] \quad (18)$$

5. Optimization tool

본 최적화를 위해 Matlab TM 6.5 (release 13)을 사용하였다.

IV. Case Study

1. A chemical company complex with six companies

다음 그림은 가상의 chemical company complex를 나타낸 지도이다. 1, 3번 원은 스팀을 생산하는 source companies이고 2, 5, 6번 원은 스팀을 소비하는 sink companies이다. 4번 원은 source company이면서 동시에 sink company이다. 화학산업단지에서 1, 3번에 해당하는 곳은 소각업체와 같이 자연발생적으로 스팀이 생산되는 회사이고, 4번과 같이 스팀을 생산도 하고 소비도 하는 곳은 보일러나 NCC(Naphtha Cracking Center)와 같이 자체 스팀생산 설비를 가지고 있는 대규모의 화학공장이다. Source company와 sink company의 스팀 생산량과 소비량은 실선의 available supply steam amounts와 점선의 necessary demand steam amounts 박스에 나타났다. 각 박스에는 SS(Super Heated Steam), HS(High pressure Steam), MS(Medium pressure Steam), LS(Low pressure Steam)이 표시되어 있다. 각 원의 아래 쪽에는 (60,5)와 같이 해당 회사의 위치가 표시되어 있다. 좌표의 값은 오른쪽 아래로 갈수록 증가하며 단위는 10m이다.

Source companies와 sink companies 간의 거리는 위의 표 2와 같다. 표를 참고할 때 source 1과 sink 6이 네트워크 형성에 가장 불리함을 알 수 있었다.

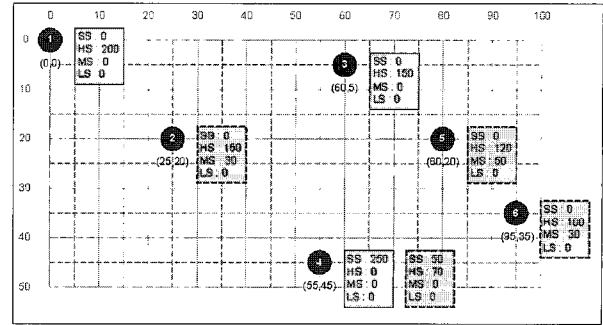


그림 2. SNMs 테스트에 사용된 가상 화학산업단지.
Fig. 2. A chemical company complex with six companies.

표 2. Source companies와 sink companies 간 거리(단위: m).
Table 2. Distances between source and sink company (meter).

	Sink 2	Sink 4	Sink 5	Sink 6
Source 1	321	711	825	1013
3	381	404	250	461
4	391	0	354	413

2. Optimization parameters and assumptions

본 case study에서 steam grade와 source, sink companies의 수는 다음과 같다.

$$n = 4, N = 3, M = 4 \quad (19)$$

Operating cost, investment cost를 계산하기 위한 parameters는 다음과 같다. (단위: 원)

$$\begin{aligned} \text{Repair Parameter} &= 50,000 \\ \text{Pressure Drop Parameter} &= 20,000 \\ \text{Pipe Parameter1} &= 20,000,000 \\ \text{Pipe Parameter2} &= 400,000 \\ \text{Raw Cost} &= 300,000,000 \end{aligned} \quad (20)$$

Pipe parameter1, 2의 경우 여수산업단지에 있는 H사의 실제 파이프라인 건설비용을 참조하였으나 repair parameter, pressure drop parameter는 실제 비용을 알기 힘들어 적정값을 가정하였다. 이 같은 가정을 할 수 있었던 이유는 repair parameter, pressure drop parameter의 값이 pipe parameter1, 2 값에 비해 매우 작기 때문이다. 즉 최적화에 중대한 영향을 미치는 parameters는 repair parameter, pressure drop parameter에 비해 order가 훨씬 더 큰 pipe parameter1, 2이다.

또한 거리의 함수가 아니라 최적화의 결과에는 관계없는 raw cost의 값은 300,000,000원으로 가정하였다.

3. SNMs

위 chemical company complex 에에서 가능한 SNMs은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &SNM_{1_2} \quad SNM_{1_4} \quad SNM_{1_5} \quad SNM_{1_6} \\ &SNM_{3_2} \quad SNM_{3_4} \quad SNM_{3_5} \quad SNM_{3_6} \\ &SNM_{4_2} \quad SNM_{4_4} \quad SNM_{4_5} \quad SNM_{4_6} \end{aligned} \quad (21)$$

이 SNMs을 이용해 (18) 중 4번째 제한조건을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &sum(\text{Steam supplies of Source Companies}) \\
 &= \text{Steam demands of a Sink Company} \\
 &SNM_{1_2} \times 1Production + SNM_{3_2} \times 3Production \\
 &+ SNM_{4_2} \times 4Production = 2Consumption \\
 &SNM_{1_4} \times 1Production + SNM_{3_4} \times 3Production \\
 &+ SNM_{4_4} \times 4Production = 4Consumption \quad (22) \\
 &SNM_{1_5} \times 1Production + SNM_{3_5} \times 3Production \\
 &+ SNM_{4_5} \times 4Production = 5Consumption \\
 &SNM_{1_6} \times 1Production + SNM_{3_6} \times 3Production \\
 &+ SNM_{4_6} \times 4Production = 6Consumption
 \end{aligned}$$

4. Results

이제 최적화를 수행하면 다음의 결과들을 얻을 수 있다.

A. SNMs and total cost

제한조건을 만족하는 스팀 네트워크를 구성하기 위한 SNMs는 다음과 같다. SNMs중 모든 항이 0인 것은 표현하지 않았다. 앞서 설명한 바와 같이 source company가 동일한 SNMs의 각 열의 원소의 합은 모두 1이다.

$$\begin{aligned}
 SNM_{1_2} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 SNM_{1_5} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.60 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 SNM_{3_2} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (23) \\
 SNM_{4_4} &= \begin{pmatrix} 0.20 & 0 & 0 & 0 \\ 0.28 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 SNM_{4_6} &= \begin{pmatrix} 0.40 & 0 & 0 & 0 \\ 0.12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

위와 같은 SNMs을 가질 때 total cost는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &Total Cost \\
 &= Raw Cost + Operating Cost + Investment Cost \\
 &= 300,000,000 + 222,460,000 + 1,271,200,000 \quad (24) \\
 &= 1,793,660,000(Won/Year)
 \end{aligned}$$

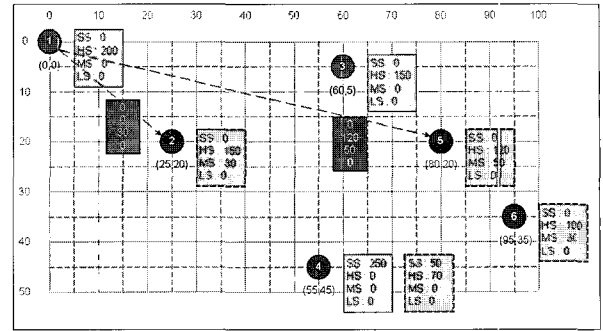


그림 3. Source company 1의 스팀 네트워크 결과.
Fig. 3. Result of steam networks based on source company 1.

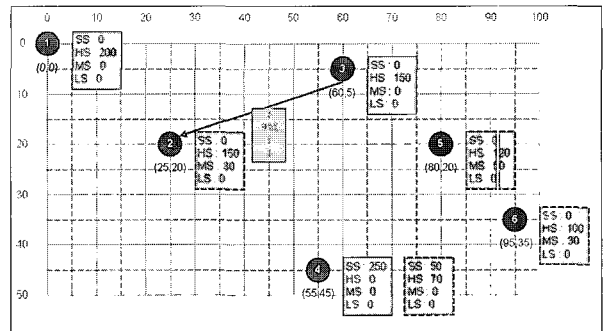


그림 4. Source company 3의 스팀 네트워크 결과.
Fig. 4. Result of steam networks based on source company 3.

B. Result of steam networks based on source company 1

본 case study에서 가장 특이한 결과는 source company 1이 제일 가까운 sink company 2에는 소량의 스팀만 공급한다는 것이다. 오히려 source company 1에서 가장 먼 곳 중 하나인 sink company 5로 대부분의 스팀이 공급된다. 이유는 그림 4를 살펴보면 잘 알 수 있다.

C. Result of steam networks based on source company 3

Source company 3의 경우 sink company 2에 모든 스팀을 제공하고 있다. HS:150을 전량 공급하므로 이때 필요한 파이프라인은 HS 1개이다. 하지만, source company 3이 다른 sink company, 예를 들어 sink company 5에 HS:120, MS:30의 스팀을 공급한다고 가정할 경우 HS와 MS의 파이프라인 2개가 필요하게 된다. Sink company 4나 6에 스팀을 공급할 경우에도 마찬가지이다. 즉 source company 3이 sink company 2가 아닌 다른 곳으로 스팀을 공급할 경우 source company 3의 파이프라인은 필연적으로 2개 이상이 될 수밖에 없다. 파이프라인의 증가는 investment cost의 증가에 막대한 영향을 미치므로 이 같은 네트워크가 구성되었음을 알 수 있다. source company 3이 sink company 2에 HS를 전량 공급하기 때문에, 그림 3과 같이 source company 1은 먼 거리에도 불구하고 스팀의 대부분을 sink company 5로 공급하게 된다.

D. Result of steam networks based on source company 4

3곳의 source companies 중 스팀 생산량이 가장 많은 4번의 경우 위와 같이 자사에 필요한 스팀을 제외한 나머지를 sink company 6에 공급하게 된다.

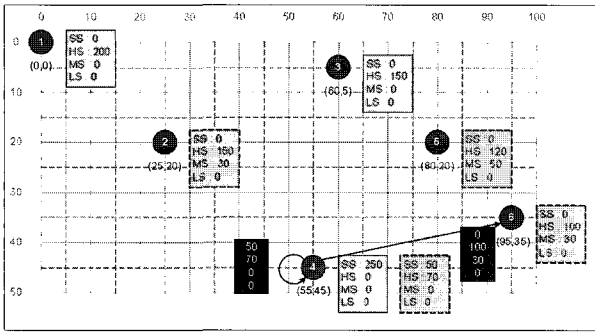


그림 5. Source company 4의 스팀 네트워크 결과.
Fig. 5. Result of steam networks based on source company 4.

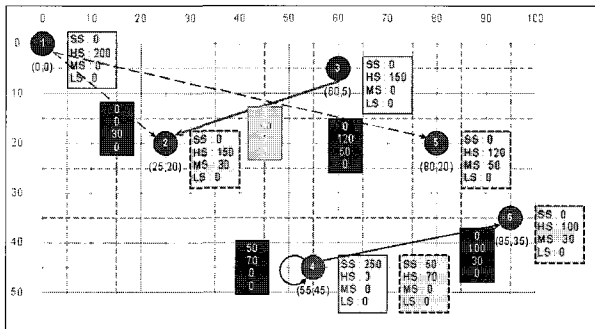


그림 6. Source company 1, 3, 4의 스팀 네트워크 결과.
Fig. 6. Result of steam networks based on source company 1,3,4.

E. Total results

최종 결과를 하나의 지도에 표현해 보았다. Source, sink companies 수가 비교적 적기 때문에 간단한 네트워크를 구성하고 있으나 source companies의 스팀 supply가 sink companies의 스팀 demand를 잘 만족함을 알 수 있다.

5. Discussion

Case study에서 다룬 예제는 source, sink companies 수가 적어 단순하지만, NCC나 보일러를 보유한 대량의 스팀 생산업체(source company 4)와 소규모의 스팀 생산 업체(source company 1, 3), 스팀을 사용하기만 하는 업체(sink company 2, 5, 6) 모두를 포함하고 있다. 기존에는 이와 같은 산업단지 전체를 대상으로 한 에너지 최적화가 수행되지 않았다. 하지만 본 연구에서 제안한 SNMs을 이용하면 스팀의 4단계 grade를 동시에 고려하여 복잡한 산업단지의 스팀 네트워크를 최적화 할 수 있을 것이다. 본 연구에서 제안하는 방법을 적용하기 위해서는 우선 각 기업의 스팀 생산/사용 현황과 각 스팀 grade별 온도, 압력 등에 대한 정확한 사전조사가 필요할 것이다. 향후 파이프라인의 유지보수 비용이나 파이프라인 거리에 따른 스팀손실 비용 등을 더 정확한 값으로 추정한다면 현실성을 좀 더 반영할 것으로 기대된다. 그리고 보일러 효율과 같은 스팀생산 효율을 고려한다면, 스팀생산 효율이 좋은 source company에서 우선적으로 스팀을 생산해 이것을 sink companies에 공급함으로써 스팀생산 단계에서부터 에너지 최적화를 할 수 있을 것이다.

일반적으로 화학산업단지에는 공급할 곳을 찾지 못해 버리는 중/저압스팀이 어느 정도 존재한다. 이는 산업단지의 에너지 사용 효율성을 떨어뜨리고, 국가적인 에너지 낭비를 초래한다. 이 같은 에너지 낭비를 줄이기 위해 본 연구에서 제안하는 SNMs을 이용한다면, 에너지 사용에 대한 효율성 제고와 함께 연간 수십 억원에 이르는 경제적 효과 또한 기대할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 스팀 배출량을 줄임으로써 CO₂ 배출량 또한 상당부분 절감할 수 있어 환경적으로도 매우 유용할 것이다.

결국 SNMs을 이용해 산업단지 스팀 네트워크를 최적화한다면 에너지 사용 절감으로 인한 경제적인 이익뿐만 아니라 CO₂ 배출량 절감으로 인한 환경적 이익까지 함께 기대할 수 있을 것이다. 세계 각국의 환경규제가 점점 더 강화되는 것을 감안할 때 스팀 네트워크 최적화를 통한 “에너지 사용량 최소화”는 국내의 화학산업단지에 필수적으로 적용되어야 할 것이다.

V. Conclusion

최근 국제 유가의 상승 및 연료사용에 따른 환경오염의 증가 등으로 에너지 사용을 줄이자는 의견이 제기되고 있다. 특히 에너지 사용량이 많은 화학산업단지의 경우 각종 환경규제의 강화로 인해 CO₂ 배출량이나 에너지 사용량을 줄이기 위해 더욱 노력하고 있다. 대부분의 화학공장의 경우 개별 공장의 최적화는 꾸준히 이뤄져 더 이상의 효율개선은 불가능한 것으로 보인다. 그룹 차원에서 에너지 교환을 하는 공장들이 일부 있지만 아직 많이 부족한 현실이다. 이에 본 연구에서는 산업단지 내에서 스팀의 재활용은 높이고 에너지 사용량은 줄이기 위해 Steam Networking Matrices (SNMs)를 제안하고, 이를 이용해 가상의 화학산업 단지의 steam network를 최적화 해보았다.

참고문헌

- [1] E. A. Lowe, *Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries*, Asian Development Bank, October 2001.
- [2] E. A. Lowe and L. K. Evans, “Industrial ecology and industrial ecosystems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 3, no.1-2, pp. 47-53, 1995.
- [3] R. A. Frosch and N. E. Gallopoulos, *Scientific American*, 261(3), 144-152, 1989.
- [4] E. A. Lowe, S. Moran, and D. Holmes, “Fieldbook for the development of eco-industrial parks.” *Oakland, CA: Indigo Development*, 1996.
- [5] A. Amundsen, “Networking among companies represents a potential for CO₂ reduction,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, pp. 495-501, 2000.
- [6] W. Fichtner, M. Frank, and O. Rentz, “Inter-firm energy supply concepts: an option for cleaner energy production,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, pp. 891-899, 2004.
- [7] N. Puspita, T. Fuchino, and M. Muraki, “Synthesis of Heat Exchanger Networks Considering Location of Process Stream Sources,” *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 31, no. 3, pp. 330-339, August 1998.



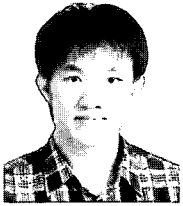
김 상 훈

2004년 경북대학교 화학공학과 졸업. 2004년~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Eco Industrial Park(EIP), 에너지 최적화(Energy Optimization).



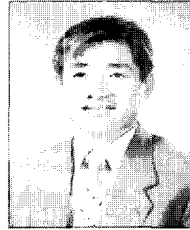
채 승 화

2004년 한국과학기술원 생명화학공학과 졸업. 2004년~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Eco Industrial Park(EIP), 에너지 최적화(Energy Optimization).



윤 성 근

2002년 한국과학기술원 생명화학공학과 졸업. 2002년~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 산업분석 및 구조 최적화, Eco Industrial Park(EIP), 에너지 최적화(Energy Optimization).



박 선 원

1970년 서울대학교 화학공학과(공학사). 1974년 Oklahoma State University 화학공학과(공학석사). 1979년 University of Texas at Austin 화학공학과(공학박사). 1987년 University of Houston-Clear Lake 경영학(MBA). 1988년~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 교수. 관심분야는 공정최적화, EIP, SCM, 산업분석, Systems Biology.