

냉각수 열 교환기 망을 흐르는 냉각수 유량의 조절

김진경 · 이경범* · 이범석†

경희대학교 화학공학과

449-701 용인시 기흥읍 서천리 1번지

*부경대학교 화학공학과

608-739 부산시 남구 용당동 산 100

(2002년 9월 5일 접수, 2003년 2월 15일 채택)

Manipulation of Cooling Water Flow Rates in a Cooling Water Heat Exchangers Network

Jin-Kyeong Kim, Gyeongbeom Yi* and Bomsok Lee†

Department of Chemical Engineering, Kyunghee University, Seochonli 1, Giheung-eup, Yongin 449-701, Korea

*Department of Chemical Engineering, Pukyung University, San 100, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

(Received 5 September 2002; accepted 15 February 2003)

요 약

실제 화학공장 및 정유 공장에서 사용되는 냉각수 열 교환기들은 하나의 거대한 열 교환기 망에 연결되어 있으며 열 교환기에 공급되는 냉각수의 유량은 각각의 열 교환기 후미에 있는 밸브의 단형 정도에 의해서 조절된다. 모든 열 교환기는 하나의 망에 연결되어 냉각수를 공급받기 때문에, 하나의 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 조절하기 위하여 밸브를 조절할 경우, 열 교환기 망에 연결된 다른 모든 열 교환기로 흐르는 냉각수의 유량이 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 열 교환기 망 내의 모든 열 교환기에 흐르는 냉각수 유량을 동시에 고려하여 각 열 교환기에서의 냉각수 유량을 분석하고 원하는 유량으로 조절하는 최적화 방법을 개발하였다. 각 열 교환기에 요구되는 냉각수 요구 유량을 만족시키는 최적의 밸브 단형 정도를 결정하기 위하여 비선형 최적화 모델을 만들었으며, 모델의 최적화 해를 구하기 위하여 최적화 상용 프로그램인 GAMS/MINOS를 사용하였다.

Abstract – In a large, complex cooling water heat exchangers network, cooling water flow rates are manipulated by adjusting the valves located at the rear of each heat exchanger. Since the heat exchangers are connected to a network, the manipulation of the cooling water flow rate in a heat exchanger by adjusting the valve results in the changes of the cooling water flow rates in the other heat exchangers. Therefore, the manipulation techniques of cooling water flow rates in a cooling water heat exchangers network are required in order to operate the cooling water networks efficiently. This paper presents the analysis and the manipulation method of the cooling water flow rates in all heat exchangers in a network simultaneously. A nonlinear programming(NLP) formulation is proposed to determine the optimal adjustment of the valves for the required flow rates of the cooling water in the heat exchangers. Solution of this formulation is obtained with a commercial NLP solver (GAMS/MINOS).

Key words: GAMS/MINOS, Optimization, Heat Exchanger Network, Cooling Water Flow Rates

1. 서 론

일반적으로 화학공장이나 정유공장 등에서 냉각수를 필요로 하는 열 교환기들은 하나의 냉각수 공급 파이프에 연결되어져 냉각수를 공급받게 되며 이렇게 연결된 열 교환기들은 거대한 냉각수 열 교환기 망(cooling water network)을 이루게 된다. 냉각수를 필요로 하는 열 교환기들은 냉각수 요구 유량(혹은 냉각에 필요한 냉각수 유량)에 따라 냉각수가 공급되어야 한다. 그러나 실제 공정에서 공정이 수정되거나 새로운 공정이 추가되는 경우에 수정된 열 교환기 망을 통하여 공급되

는 냉각수는 각각의 열 교환기에서 요구 유량과 맞지 않는 유량으로 흐르게 된다. 이러한 경우 하나의 열 교환기를 흐르는 냉각수 유량을 조절하는 것은 모든 열 교환기가 하나의 망으로 연결되어 냉각수를 공급받기 때문에 다른 모든 열 교환기를 흐르는 냉각수 유량의 변화를 가져오게 된다. 따라서 각 열 교환기에 대하여 필요한 유량만큼 냉각수 유량을 조절하는 것은 매우 어려운 일이다. 경제적, 혹은 기술적인 이유로 모든 열 교환기에 유량계를 설치하여 각 열 교환기에서의 냉각수 유량을 측정하는 것은 불가능하기 때문에[11], 냉각수 열 교환기 망을 흐르는 정상상태에서의 냉각수 유량과 압력을 분석하는 것이 냉각수 유량 조절의 첫 번째 조건이 된다. 이를 위해서 냉각수 열 교환기 망을 흐르는 냉각수의 수두 손실을 수리학적으로 계산하여야 한다. 물의 분산 네

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: bslee@khu.ac.kr

트위크에서의 유량 분석에 가장 많이 사용되는 실험식으로는 Hazen-Williams 식을 들 수 있는데 이 식을 사용하여 압력 차이에 의해서 흐르는 파이프에서의 냉각수 흐름을 쉽게 표현할 수 있다[3].

본 연구에서는 냉각수 열 교환기 망에서 두 개 이상의 파이프가 연결되는 지점을 node로 정의하였다. 두 node 간을 흐르는 냉각수의 유량은 두 nodes 간의 압력 차이와 파이프의 직경과 길이에 의해서 구할 수 있는데, 이 때 사용되는 실험식이 Hazen-Williams 식이다. 또한 냉각수 공급 펌프로부터 냉각수를 공급 받거나 냉각탑으로 냉각수가 빠져나가는 node에서의 냉각수 유출입에 대해서도 냉각수 물질 수지식을 고려하여야 한다. 냉각수 열 교환기 망 내의 각 열 교환기를 흐르는 냉각수 유량을 조절하기 위해서는 각 열 교환기 후미에 장착되어져 있는 밸브를 조작하여야 한다. 이때 모든 열 교환기가 하나의 망으로 연결되어 냉각수를 공급받기 때문에 하나의 열 교환기에 대한 냉각수 유량을 조절하기 위하여 그 열 교환기 후미에 있는 밸브를 조작할 경우 다른 모든 열 교환기로 흐르는 냉각수의 유량에 영향을 주게 된다. 그러므로 모든 열 교환기로 흐르는 냉각수의 유량을 각 열 교환기에 대하여 필요한 냉각수 유량에 맞추도록 조절하기 위해서는 모든 열 교환기에 대한 냉각수의 흐름을 동시에 고려하여야 한다.

열 교환기 후미에 있는 밸브의 닫힘 정도에 의해서 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 조절할 수 있다. 밸브의 닫힘 정도는 그에 해당되는 파이프의 등가 길이로 나타낼 수 있다[8]. 또한 Hazen-Williams 식에서 파이프의 등가 길이는 하나의 변수로 사용되어지며, 그때 사용되는 열 교환기 후미의 파이프 길이는 실제 파이프의 길이와 밸브 등가 길이의 합으로 나타내어 사용하게 된다.

냉각수 열 교환기 망을 흐르는 냉각수 유량을 조절하기 위하여 본 연구에서 개발한 최적화 모델의 조절 변수는 각 열 교환기 후미 파이프의 길이가 되며 이는 후미에 장착되어진 밸브의 닫힘 정도를 나타내는 변수를 의미한다. 목적함수는 각 열 교환기에서의 냉각수 요구 유량과 계산된 유량과의 차이들을 최소화하는 것이다. 제약조건은 각 node에서의 물질 수지식들과 각 node 사이를 흐르는 냉각수 유량을 표현하는 Hazen-Williams 식이며, 이들 제약 조건식들은 비선형이므로, 최적화 모델의 해를 구하기 위하여 최적화 상용 프로그램인 GAMS/MINOS[1]를 사용하였다.

냉각수 열 교환기 망 모델의 최적화 해로부터 각 열 교환기에 필요한 냉각수 유량을 모두 만족하는 열 교환기 후미의 파이프 등가 길이를 구할 수 있다. 여기서 결정되어진 파이프의 등가 길이는 곧 각 열 교환기 후미에 장착된 밸브의 닫힘 정도를 의미하므로, 결국 각 열 교환기에 필요한 냉각수 유량을 조절할 수 있는 열 교환기 후미의 밸브의 닫힘 정도를 결정할 수 있다.

2. 냉각수 열 교환기 망의 최적화 모델

2-1. 제약조건

파이프를 흐르는 유체의 유량과 압력과의 관계를 나타내는 많은 실험식 중에서 특히 유량을 압력과 파이프의 길이와 직경으로 표시한 Hazen-Williams 식은 정확성과 간편함으로 인해 매우 유용하게 사용된다[4, 7, 9]. 열 교환기 망을 구성하고 있는 파이프의 직경과 길이들은 쉽게 알 수 있으므로, 본 연구에서는 냉각수의 흐름을 표현하기 위하여 아래 식 (1)로 표현되어지는 Hazen-Williams 식을 이용하였다.

$$Q = C_H D^{2.63} \left(\frac{\Delta H}{6.819L} \right)^{0.54} \quad (1)$$

여기서 ΔH 는 유체가 흐르는 두 지점간의 수두 차이(혹은 압력차이)[m]를 나타내며 D 와 L 은 각각 파이프의 직경과 길이[m]를 나타낸다. 계산되어진 유량 Q 는 $[m^3/s]$ 의 단위를 갖는다. Hazen-Williams 식에서

Table 1. Values of roughness coefficient for Hazen-Williams equation[10]

Pipe material	C_H
Asbestos cement	140
Ductile iron	
Cement lined	130 to 150
New, unlined	130
5-year-old, unlined	120
20-year-old, unlined	100
Concrete	130
Copper	130 to 140
Plastic	140 to 150
New welded steel	120
New riveted steel	110

거칠기 계수인 C_H 는 관의 재질, 사용 연한에 따라 각각 다른 값을 갖는다. Table 1에서는 Hazen-Williams 식에서 사용되는 거칠기 계수인 C_H 의 몇 가지 값들을 나타내었다.

열 교환기 망의 모든 node에 대하여 냉각수 유입 유량과 유출 유량은 평형을 이루어야 한다. 이는 물질 수지식에 의해 표현될 수 있는데, n 개의 node로 이루어진 망에 대하여 node j 에서 node i 로 흐르는 냉각수의 흐름에 대하여 node i 에서 물질 수지식은 아래의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^n Q_{ji} + Q_{ext,i} = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

여기서 Q_{ji} 는 node j 에서 node i 로 흐르는 냉각수의 유량을 나타내며 (+) 부호는 node j 에서 node i 로 유입됨을 뜻하고, (-) 부호는 node i 에서 node j 로 유출됨을 뜻한다. $Q_{ext,i}$ 는 node i 에서 외부로부터 유입 또는 유출되는 유량(예: 냉각수 공급 펌프로부터의 유입, 냉각탑으로의 유출 또는 열 교환기의 정기적인 blow down)을 의미한다. 또한 $Q_{ext,i}$ 는 유입의 경우 (+) 값을, 유출인 경우 (-) 값으로 표현된다. 그리고 node i 에 연결되지 않은 node j 에 대해서 Q_{ji} 는 0이 된다.

앞에서 설명한 Hazen-Williams 식은 각 node 간을 흐르는 냉각수 유량을 예측하는 데에 사용된다. n 개의 node로 이루어진 열 교환기 망의 node i 에서의 물질 수지식은 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음 식 (3)으로 나타내어 진다.

$$\sum_{j=1}^n C_H D_{ji}^{2.63} \left(\frac{H_j - H_i}{6.819L_{ji}} \right)^{0.54} + Q_{ext,i} = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

여기서 H_j 와 H_i 는 node j 와 i 에서 수두(혹은 압력)[m]를 나타내며 그 값은 node의 높이를 포함한다. D_{ji} 와 L_{ji} 는 각각 node j 와 i 를 연결하는 파이프의 직경과 길이[m]를 나타낸다.

n 개의 node에 대한 이들 비선형 연립 방정식은 최적화 모델의 제약 조건식이 된다.

2-2. 목적함수

열 교환기 망에서 실제 각 열 교환기로 흐르는 냉각수의 유량은 각 열 교환기에서 요구하는 냉각수 유량에 최대한 근사하도록 조절되어야 한다. 그러므로 최적화 모델의 목적함수는 각 열 교환기에서 필요한 냉각수 유량과 수학적 모델에 의해 계산된 유량과의 오차를 최소화하는 것이 된다. 식 (4)는 본 연구에서 개발된 최적화 모델의 목적함수를 나타낸다.

$$\text{Minimize} \sum_{(j,i) \in S} \frac{|Q_{ji}^d - Q_{ji}^c|}{Q_{ji}^d} \quad (4)$$

여기서 집합 S 는 node j 와 node i 가 각각 열 교환기의 입구와 출구를 나타내는 경우를 의미한다. 이때 node j 와 node i 를 잇는 파이프는 열 교환기를 의미하며 그 등가 길이는 열 교환기 설계 시에 결정된 냉각수 요구 유량 Q_{ji}^d , $(j, i) \in S$ 과 압력강하 설계값 그리고 열 교환기 내부에서 냉각수가 통과하는 튜브의 직경을 Hazen-Williams 식에 역으로 대입하여 구한 파이프의 길이 값을 사용한다. 이에 대한 계산 예를 예제 1에서 설명하였다. 또한, Q_{ji}^c , $(j, i) \in S$ 는 수학적 모델의 해석을 통하여 계산된 각 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 의미한다.

2.3. 조절변수

본 연구의 최적화 모델에서 조절변수로 사용되는 것은 각 열 교환기에 흐르는 냉각수의 유량을 조절할 수 있는 열 교환기 후미에 장착된 밸브의 닫힘 정도이다. 밸브의 닫힘 정도는 밸브의 종류에 따라 다양한 파이프 등가 길이로 나타낼 수 있다[5, 8]. 본 연구의 예제로 사용된 열 교환기 후미에 장착된 밸브를 게이트 밸브라고 할 때 밸브가 장착된 파이프의 직경과 밸브 닫힘 정도에 따른 등가 길이를 Table 2에 나타내었다. 제약 조건을 모두 만족하면서 목적함수의 값을 최소화하는 최적화 해에서 조절변수의 값들은 밸브의 닫힘 정도를 나타내는 등가 길이로 구해지게 된다. 최적화 해에서 구한 열 교환기 후미의 파이프 길이와 Table 2를 이용한 밸브의 닫힘 정도를 구함으로써 각 열 교환기에 흐르는 냉각수 요구 유량에 맞는 열 교환기 후미에 장착된 밸브의 닫힘 정도를 결정할 수 있게 된다.

2.4. NLP 최적화 모델

앞서 설명한 제약 조건식과 목적함수를 조합한 최적화 모델은 다음과

같이 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } \sum_{(j,i) \in S} \frac{|Q_{ji}^d - Q_{ji}^c|}{Q_{ji}^d} \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^n C_H D_{ji}^{2.63} \left(\frac{H_j - H_i}{6.819 L_{ji}} \right)^{0.54} + Q_{ext,i} = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

$$Q_{ji}^c = C_H D_{ji}^{2.63} \left(\frac{H_j - H_i}{6.819 L_{ji}} \right)^{0.54} \quad (j, i) \in S \quad (7)$$

여기서 집합 $(j, i) \in S$ 는 node j 와 node i 가 열 교환기의 입구와 출구를 나타내는 경우를 의미한다. 위 최적화 모델에서 상수로 주어지는 값들은 목적함수에서 쓰인 각 열 교환기의 냉각수 요구 유량 Q_{ji}^d , $(j, i) \in S$ 과 열 교환기 망을 구성하는 파이프의 직경 D_{ji} 와 밸브가 장착된 열 교환기 후미 파이프를 제외한 모든 파이프의 길이 L_{ji} 이며, 이 때 계산된 냉각수 유량을 냉각수가 흐르는 열교환기 내에 있는 파이프의 단면적으로 나누면 냉각수의 선속도가 구해지게 된다. 실제 조업현장에서 열교환기 내의 파이프를 흐르는 유체의 선속도는 열교환 효율을 위하여 일반적인 운전조건(예: 1-3 m/s)을 지켜야 하므로 이에 대한 제약조건을 최적화 모델에 추가한다면 다음과 같은 조건식을 추가할 수 있다. 그 외에 상수로 주어지는 값들은 냉각탑을 나타내는 node의 수두(Fig. 1에서 H_{40}) 그리고 냉각수 공급 펌프로부터 공급되는 총 냉각수 유량(Fig. 1에서 $Q_{ext,1}$)이다.

$$v_{min} \leq \frac{Q_{ji}^c}{\pi D_{ji}^2} \leq v_{max} \quad (j, i) \in S \quad (8)$$

Table 2. Equivalent lengths of gate valve for degrees of valve closing[8]

Diameter D [m]	Equivalent length of gate valve, L_v [m]			
	Degree of valve closing	75% closed	50% closed	25% closed
0.0254	75% closed	21.34	5.18	1.07
0.0318	50% closed	27.43	6.71	1.37
0.0889	25% closed	76.20	18.29	3.66
0.1524	0% closed	128.02	30.48	6.10

위 비선형 최적화 모델의 최적화 해는 상업용 최적화 프로그램인 GAMS/MINOS 5.3[1]를 이용하여 구할 수 있다. 최적화 해를 구함으로써 값이 결정되어지는 변수들은 각 열 교환기를 통과하는 계산된 냉각수 유량 Q_{ji}^d , $(j, i) \in S$ 과 냉각탑을 제외한 각 node들의 수두 H_i ($i=1, \dots, n-1$)와 냉각탑에서 유출되는 냉각수 유량(Fig. 1에서 $Q_{ext,40}$) 그리고 열 교환기 후미 파이프의 길이이다. 최적화 해에서 구한 열 교환기 후미 파이프의 길이는 파이프의 실제 길이와 열 교환기 후미에 장착된 밸브의 등가 길이를 합한 길이이므로 최적화 해에서 구한 길이에서 열 교환기 후미 파이프의 실제 길이를 뺀 값이 밸브의 등가 길이이다. 이렇게 구

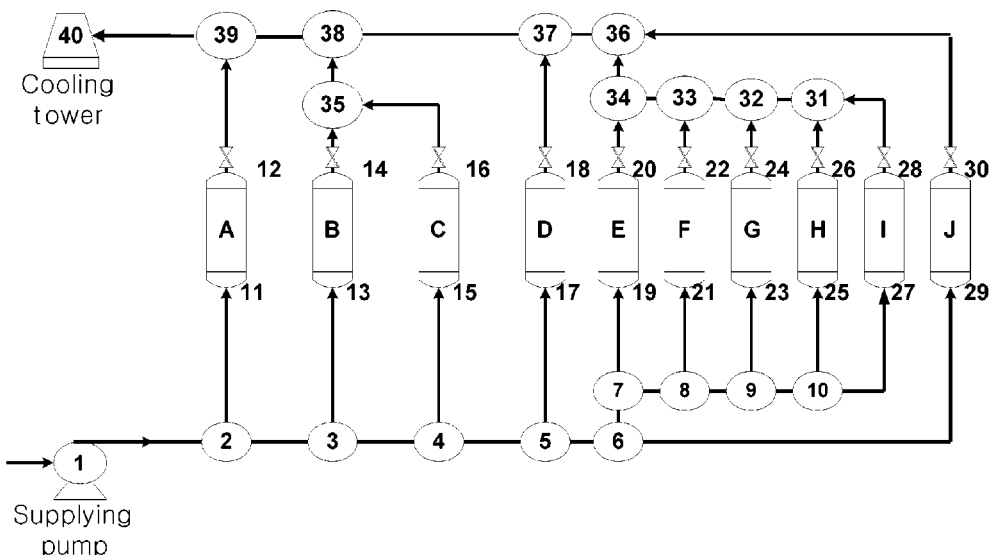


Fig. 1. The heat exchangers network for example 1.

한 밸브의 등가 길이와 Table 2를 이용하여 밸브의 닫힘 정도를 구함으로써 각 열 교환기에 요구되는 냉각수 유량을 맞출 수 있는 각 밸브의 닫힘 정도를 결정할 수 있게 된다. 열 교환기 망에서의 냉각수 유량 조절에 대한 실제 사용 예제를 다음 장에서 설명하였다.

4. 적용 예제와 고찰

4-1. 예제 1

Fig. 1과 같이 10개의 열 교환기가 하나의 망으로 연결되어 냉각수를 공급받는 냉각수 열 교환기 망이 있다. 이 망을 구성하는 관은 5년 동안 사용된 주철관이다. Table 1에 의해 Hazen-Williams 식의 거칠기 계수는 120을 사용하기로 한다. 냉각수 공급펌프(node 1)를 통하여 냉각수 열 교환기 망에 유입되는 냉각수의 유량은 $Q_{ext,1}=0.0891 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정하며, 냉각수가 유출되는 냉각탑을 나타내는 node 40에서의 수두는 항상 $H_{40}=103 \text{ m}$ 가 유지된다. 각 열 교환기의 후미에는 게이트 밸브가 부착되어 있다. 초기 상태에서 밸브 닫힘 정도는 25% closed 라고 가정하였다. 최적화 모델에서 조절 변수로 사용되는 밸브 닫힘 범위는 실제 현장에서 사용되는 25-75% closed로 한정하였다. 앞서 설명한 바와 같이 각 열 교환기에 요구되는 냉각수 요구 유량($Q_j^d, (j, i) \in S$)과 열 교환기를 통과하는 냉각수의 압력강하 설계값($\Delta H_{ji}, (j, i) \in S$), 그리고 냉각수가 통과하는 열 교환기 튜브의 직경($D_{ji}, (j, i) \in S$)을 Hazen-Williams 식에 역으로 대입하여 각 열 교환기에 해당되는 파이프 등가 길이 ($L_{ji}, (j, i) \in S$)를 구하여 Table 3에 나타내었다.

Table 4에서는 각 열 교환기 후미의 밸브를 모두 25% 닫은 초기 상태의 경우에 대하여 앞서 설명한 최적화 모델의 제한 조건식 (6)과 (7)을 사용하여 각 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 계산하여 나타내었다. 초기 상태에서 계산된 냉각수 유량은 각 열교환기에서 요구하는

냉각수 요구 유량과 상당한 오차를 보임을 Table 4에서 볼 수 있다. 각 열 교환기를 흐르는 냉각수 유량에 대한 오차를 최소화하기 위하여 본 연구에서 개발한 최적화 모델을 최적화 상업용 프로그램인 GAMS/MINOS으로 풀어 최적화 해를 구하였다.

최적화 해에서 구한 열 교환기 후미 파이프의 길이는 파이프의 실제 길이와 열 교환기 후미에 장착된 밸브의 등가 길이를 합한 길이이므로 최적화 해에서 구한 길이에서 열 교환기 후미 파이프의 실제 길이를 빼 값이 밸브의 등가 길이이다. 이렇게 구한 밸브의 등가 길이와 Table 2를 이용하여 구한 밸브의 닫힘 정도가 25-75% 사이에 들지 않는 경우에는 해당되는 열 교환기 후미 파이프의 직경을 교체하여 최적화 해를 다시 구하는 방법을 사용하였다. 열 교환기 후미의 파이프를 교체하여 밸브의 닫힘 정도가 실제 운전 범위인 25-75% 사이에 모두 들 때까지 반복적으로 최적화 해를 구함으로써 각 열 교환기에 요구되는 냉각수 유량을 조절할 수 있는 각 밸브의 닫힘 정도를 결정할 수 있게 되었다. 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 6에서는 교체된 열 교환기 후미 파이프의 직경과 결정된 밸브의 닫힘 정도에 따른 각 열 교환기를 통과하는 계산된 냉각수 유량과 각 열 교환기가 필요로 하는 냉각수 요구 유량과의 차이를 나타내었다. 최적화 모델로 구한 계산된 냉각수의 유량은 각 열 교환기에서 필요로 하는 냉각수 요구 유량과의 차이가 눈에 띄게 감소한 것을 알 수 있다. 즉 Table 5에 나타나 있는 열 교환기 후미 파이프 직경의 교체와 밸브의 닫힘 정도로 운전할 경우 열 교환기 망에 연결된 10개의 열 교환기에 대하여 각 열 교환기로 흐르는 냉각수의 유량을 냉각수 요구 유량에 매우 근접시킬 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Equivalent length and desired flow rate for each heat exchanger of example 1

Heat exchanger	Desired flow rate $Q_{ji}^d [\text{m}^3/\text{s}]$	Pressure drop $H_{ji} [\text{m}]$	Tube size $D_{ji} [\text{m}]$	Equivalent length $L_{ji} [\text{m}]$
A(node 11-12)	0.0019	3.20	0.0508	81.0
B(node 13-14)	0.023	13.86	0.1524	734.0
C(node 15-16)	0.0205	2.67	0.1524	175.0
D(node 17-18)	0.0205	6.39	0.1524	419.0
E(node 19-20)	0.0014	6.06	0.0508	270.0
F(node 21-22)	0.001	3.25	0.0508	270.0
G(node 23-24)	0.0008	6.66	0.0381	206.0
H(node 25-26)	0.0078	7.10	0.1016	386.0
I(node 27-28)	0.01	9.53	0.1016	327.0
J(node 29-30)	0.0022	1.89	0.0381	9.0

Table 4. Initial state(each valve 25% closed) of example 1

Heat exchanger	Valve state	Desired flow rate $Q^d [\text{m}^3/\text{s}]$	Calculated flow rate $Q^c [\text{m}^3/\text{s}]$	Error [%]
A	25% closed	0.0019	0.00137	27.9
B	25% closed	0.023	0.0198	13.9
C	25% closed	0.0205	0.03036	48.1
D	25% closed	0.0205	0.01896	7.5
E	25% closed	0.0014	0.00115	17.9
F	25% closed	0.001	0.00075	25.0
G	25% closed	0.0008	0.00071	11.3
H	25% closed	0.0078	0.00583	25.3
I	25% closed	0.01	0.00699	30.1
J	25% closed	0.0022	0.00319	45.0

Table 5. The degrees of valve closing after adjustment for example 1

Node		Pipe diameter* D [m]	$L_e [\text{m}]$	$L_v [\text{m}]$	Valve adjustment
from	to				
12	39	0.0254	22.70	1.07	29% closed
14	35	0.0889	64.20	39.27	64% closed
16	35	0.0889*	113.72	45.79	66% closed
18	37	0.0889	116.73	58.80	70% closed
20	34	0.0318	34.70	25.07	73% closed
22	33	0.3048	267.69	256.06	74% closed
24	32	0.0254*	21.41	4.70	49% closed
26	31	0.0762	33.69	18.39	56% closed
28	31	0.3810	359.28	337.98	75% closed
30	36	0.0381*	126.08	30.83	73% closed

*Changed diameter: new pipe diameter when the model was not optimized with the old pipe diameter

Table 6. The optimized results for example 1

Heat exchanger	Desired flow rate $Q^d [\text{m}^3/\text{s}]$	Calculated flow rate after adjustment $Q^c [\text{m}^3/\text{s}]$	Error [%]
A	0.0019	0.0019	0
B	0.023	0.023	0
C	0.0205	0.0205	0
D	0.0205	0.0205	0
E	0.0014	0.0014	0
F	0.001	0.00105	5.0
G	0.0008	0.0008	0
H	0.0078	0.0078	0
I	0.01	0.00995	0.5
J	0.0022	0.0022	0

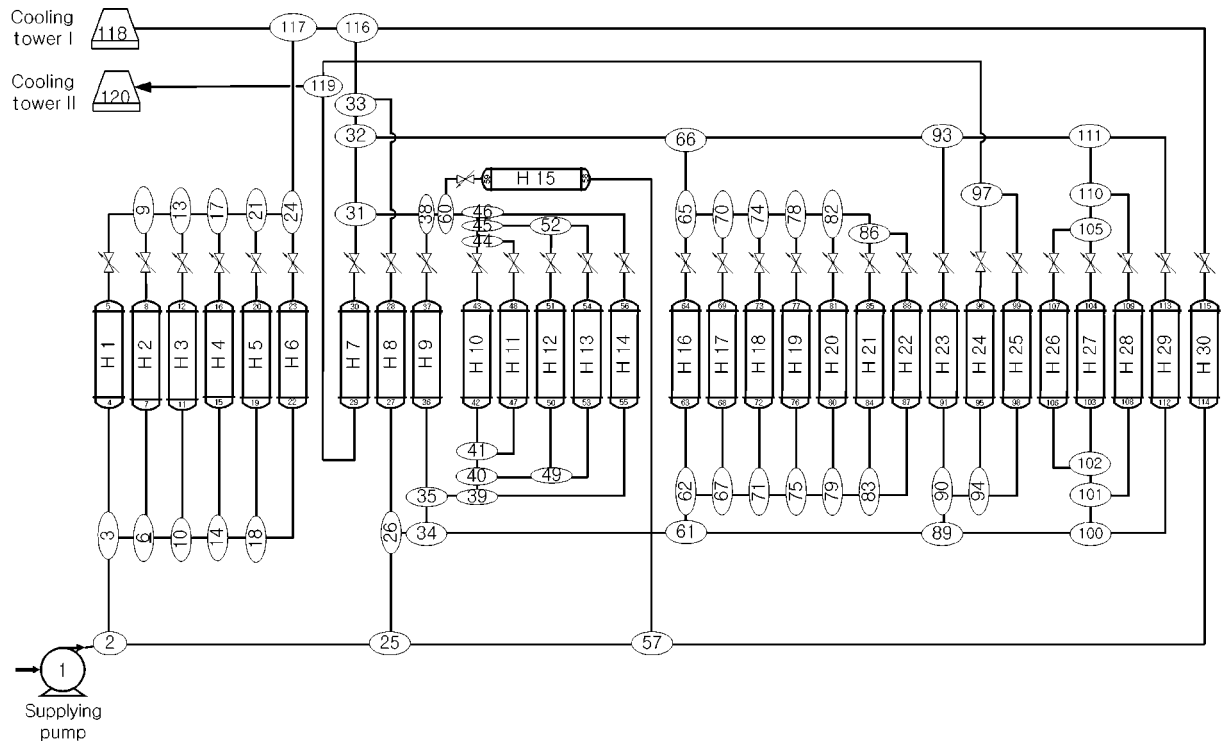


Fig. 2. The heat exchangers network for example 2.

Table 7. Equivalent length and desired flow rate for each heat exchanger of example 2

Heat exchanger	Equivalent length L_{ji} [m]	Tube size D_{ji} [m]	Desired flow rate Q_{ji}^d [m ³ /s]
H1	206	0.0387	20.0
H2	206	0.0387	13.0
H3	206	0.0387	16.0
H4	206	0.0387	18.0
H5	206	0.0387	10.0
H6	206	0.0387	16.0
H7	320	0.1524	85.0
H8	235	0.4318	1975.0
H9	73	0.1524	166.0
H10	206	0.0387	10.0
H11	206	0.0387	8.0
H12	206	0.0387	15.0
H13	206	0.0387	15.0
H14	235	0.4318	1975.0
H15	52	0.0762	24.0
H16	54	0.0387	20.0
H17	54	0.0387	13.0
H18	54	0.0387	16.0
H19	54	0.0387	18.0
H20	54	0.0387	10.0
H21	54	0.0387	16.0
H22	270	0.0504	85.0
H23	75	0.2032	1975.0
H24	749	1.2954	166.0
H25	749	1.6510	10.0
H26	182	0.1524	8.0
H27	184	0.1524	15.0
H28	289	0.3048	15.0
H29	189	0.3048	1975.0
H30	838	1.0161	24.0

4-2. 예제 2

예제 2에서는 Fig. 2에 보여진 바와 같이 30개의 열 교환기와 120개의 node가 복잡하게 연결된 열 교환기 망에 대하여 살펴보기로 한다. 열 교환기 망을 연결하는 파이프의 재질은 새 주철관으로, Table 1에서의 Hazen-Williams 거칠기 계수는 130을 사용하기로 한다. 열 교환기 후미에서 냉각수 유량을 조절하는데 사용되는 밸브는 게이트 밸브이고, 초기 상태에서 밸브 닫힘 정도는 25% closed이며 조작 범위는 25-60% closed로 한다. 최적화 해에 의해 결정되는 밸브 닫힘 정도가 만약 조작 범위인 25-60% closed 사이를 벗어나는 경우에는 열 교환기 후미 파이프를 교체시켜 조작 범위 내의 값으로 결정되도록 최적화 문제의 해를 되풀이하여 구한다. 전체 유입 냉각수 유량은 $Q_{ext,1}=11,852.0$ m³/s로 일정하며, 두 개의 냉각탑을 통하여 냉각수가 유출된다. 이때 node 118의 냉각탑 I은 수두가 $H_{118}=103$ m로 일정하며 node 120의 냉각탑 II의 수두는 $H_{120}=94$ m로 일정하다. 각 열 교환기가 필요로 하는 냉각수 요구 유량, 압력 강하 설계값, 냉각수가 통과하는 열교환기 튜브의 직경, 그리고 이들 값을 식 (1)에 역으로 대입하여 구한 각 열교환기의 등가 길이를 Table 7에 나타내었다.

먼저 초기 상태에서 계산된 냉각수의 유량과 요구 유량과의 차이가 어느 정도인지 파악해 보도록 한다. Table 8은 예제 2의 열 교환기 망에 있는 모든 밸브들을 25% closed 상태에서 제약 조건식 (6)과 (7)을 사용하여 구한 각 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 나타내었다. Table 8에 나타난 바와 같이 계산된 냉각수 유량과 요구 유량과의 오차가 10%를 넘는 열 교환기가 다수 존재한다. 본 연구에서 개발한 최적화 모델의 최적화 해를 구함으로써 열 교환기 후미 파이프의 등가 길이를 구하였고 이 값에서 파이프의 실제 길이를 빼면 밸브의 닫힘 정도를 결정짓는 등가 길이를 구할 수 있다. 이로써 구한 밸브의 등가 길이와 Table 2를 이용하면 밸브의 닫힘 정도를 구할 수 있는데 이를 Table 9에 나타내었다. 또한 Table 9에서 보여지는 값으로 열 교환기 후미 파이프의 직경을 교체하고 밸브 닫힘 정도로 운전하였을 때, 각 열 교환기로 흐르는 냉각수의 유량을 Table 10에 나타내었다. Table 10의 결과를 살펴보면 각 열 교환기를 흐르는 계산된 냉각수 유량과 요구 유량

Table 8. Initial state(each valve 25% closed) of example 2

Heat exchanger	Valve state	Desired flow rate Q^d [m ³ /s]	Calculated flow rate Q^c [m ³ /s]	Error [%]
H1	25% closed	20.0	20.3	1.5
H2	25% closed	13.0	14.9	14.6
H3	25% closed	16.0	14.9	6.9
H4	25% closed	18.0	18.2	1.1
H5	25% closed	10.0	10.0	0
H6	25% closed	16.0	14.9	6.9
H7	25% closed	85.0	50.9	40.1
H8	25% closed	1975.0	1963.3	0.6
H9	25% closed	166.0	173.5	4.5
H10	25% closed	10.0	10.3	3.0
H11	25% closed	8.0	7.7	3.8
H12	25% closed	15.0	12.8	14.7
H13	25% closed	15.0	12.5	16.7
H14	25% closed	1975.0	2281.8	15.5
H15	25% closed	24.0	16.2	32.5
H16	25% closed	13.0	11.2	13.8
H17	25% closed	13.0	11.1	14.6
H18	25% closed	15.0	20.0	33.3
H19	25% closed	13.0	11.1	14.6
H20	25% closed	12.0	11.0	8.3
H21	25% closed	13.0	14.5	11.5
H22	25% closed	15.0	16.5	10.0
H23	25% closed	310.0	290.2	6.4
H24	25% closed	2100.0	2005.8	4.5
H25	25% closed	2450.0	2300.2	6.1
H26	25% closed	170.0	198.2	16.6
H27	25% closed	240.0	237.4	1.1
H28	25% closed	651.0	797.9	22.6
H29	25% closed	915.0	816.1	10.8
H30	25% closed	556.0	539.6	2.9

과의 오차는 모두 10% 이하로 줄어들었음을 알 수 있다.

4.3. 고찰

지금까지 여러 개의 열 교환기로 이루어진 열 교환기 망을 흐르는 냉각수 유량을 조절하기 위한 최적화 방법을 두 개의 예제를 들어 설명하였다. 두 예제에서 예로 사용한 열 교환기 망은 실제 화학공장에서 사용되는 열 교환기 망의 일부분을 발췌한 것으로서 파이프의 직경, 길이 그리고 각 열 교환기에서 필요로 하는 냉각수 요구 유량 및 연결 형태들은 동일한 값을 사용하였다. 그러나 실제 화학 공장에서 사용되는 냉각수 열 교환기 망은 100개에 가까운 열 교환기로 이루어진 거대한 망으로서 본 논문에서 예로 든 열 교환기 망에 비해서 엄청나게 크다. 예제 1에서는 10개의 열 교환기로 이루어진 다소 간단한 열 교환기 망으로서 최적화 해를 구함으로써 얻어진 각 열 교환기 냉각수 유량은 각 열교환기에서 필요로 하는 냉각수 요구 유량과 거의 일치하는 값(Table 6)을 얻을 수 있었다. 다만 Table 5에 있는 밸브 닫힘값을 보면 70% 이상 밸브를 닫은 상태로 운전하는 열 교환기가 10개 중 5개를 차지하는데 실제 현장에서 밸브를 이와 같이 과도하게 닫은 상태에서 운전하는 것은 용인되기는 하지만 바람직하다고 볼 수는 없을 것이다. 이를 시정하기 위해서는 과도하게 많이 닫힌 밸브가 장착된 열 교환기 후미 파이프의 직경을 교체하는 방안이 제시될 수 있다. 이렇게 하려면 교체된 파이프 직경 값을 최적화 모델에 대입하여 최적화 모델을 다시 풀어야 하는 번거로움을 겪어야 한다.

20개의 열교환기로 이루어진 다소 복잡한 구조의 열교환기 망을 나타

Table 9. The degrees of valve closing after adjustment for example 2

Node		Changed diameter D [m]	L_e [m]	L_v [m]	Valve adjustment
from	to				
5	9	0.0229	24.68	6.68	58% closed
8	9	0.0178	18.82	5.82	60% closed
12	13	0.0178	13.63	0.63	25% closed
16	17	0.0203	16.63	3.63	52% closed
20	21	0.0152	15.37	2.37	50% closed
23	24	0.0178	13.63	0.63	25% closed
30	31	0.1270	108.59	65.59	60% closed
28	33	0.1651	60.10	25.10	49% closed
37	38	0.0762	118.56	24.56	60% closed
43	44	0.0203	11.84	4.84	56% closed
48	44	0.0178	12.66	2.66	49% closed
51	52	0.0635	16.24	2.24	25% closed
54	52	0.1524	83.11	49.11	60% closed
56	46	0.1651*	106.78	5.78	25% closed
59	60	0.0635	35.68	20.68	60% closed
64	65	0.0152	10.53	0.53	25% closed
69	70	0.0152	10.53	0.53	25% closed
73	74	0.0178*	15.67	5.67	60% closed
77	78	0.0152	10.53	0.53	25% closed
81	82	0.0152	10.53	0.53	25% closed
85	86	0.0152	8.27	3.27	54% closed
88	86	0.0203	26.46	6.46	60% closed
92	93	0.0762	76.66	2.66	25% closed
96	97	1.1430	99.05	46.05	28% closed
99	97	0.8890	91.12	31.12	25% closed
107	105	0.0635	50.68	20.68	60% closed
104	105	0.0635	29.41	9.41	49% closed
109	110	0.1016	75.96	32.96	60% closed
113	111	0.1397	144.90	4.90	25% closed
115	116	0.5461*	558.06	148.06	56% closed

*Diameter changed for the optimization

내는 예제 2에서는 밸브의 닫힘 정도를 현장에서의 운전 범위에 보다 가깝게 60%로 한정지는 범위 내에서 최적화 해를 구하였고 각 열교환기에서 필요로 하는 냉각수 요구 유량과 조절된 냉각수 유량과의 오차를 모두 10% 이내에 들도록 다음과 같은 조건식을 추가하였다.

$$\frac{|Q_{ji}^d - Q_{ji}^c|}{Q_{ji}^d} < 0.1 \quad (j) \in S \quad (9)$$

Table 10의 결과를 보면 각 열 교환기에 흐르는 조절된 냉각수의 유량이 요구 유량값과 모두 10% 오차 범위 내에 드는 만족한 값으로 조절된 것을 알 수 있다. 오차 범위를 10%보다 더 작은 최적화 해를 구하기 위해서는 식 (9)로 나타내어지는 각 열교환기 냉각수 유량의 오차 허용범위를 더욱 작게 하면 가능해진다. 다만 최적화 문제의 해를 구하기 위해서는 계산 시간이 많이 증가하게 된다. 실제 현장에서 사용되는 거대한 열 교환기 망의 경우(열교환기 개수=100개) 냉각수 유량의 조절값을 요구 유량과 불과 10% 오차 범위 내에 맞추기 위해서도 최적화 해를 구하기 위한 컴퓨터 계산 시간은 엄청나게 소요된다.

본 논문에서 사용된 냉각수의 유량과 압력 강하를 나타내는 실험식인 Hazen-Williams 식 자체가 갖고 있는 오차와 최적화 모델의 해로 구해진 냉각수 유량의 오차로 인해 각 열교환기에 필요로 하는 냉각수의 유량은 아주 정확하게 공급되지는 않을 것이다. 미세한 냉각수 유량의 조절이 필요한 경우에는 본 논문에서 제시하는 최적화 방법으로 허용 오차 범위내에서 냉각수 유량을 조절하고 실제 조업 현장에서 숙련된

Table 10. The optimized results for example 2

Heat exchanger	Desired flow rate Q^d [m ³ /s]	Real flow rate after adjustment Q^c [m ³ /s]	Error [%]
H1	20.0	20.0	0
H2	13.0	13.8	6.2
H3	16.0	15.8	1.3
H4	18.0	18.0	0
H5	10.0	10.0	0
H6	16.0	15.9	0.6
H7	85.0	89.8	5.6
H8	1975.0	1987.5	0.6
H9	166.0	175.7	5.8
H10	10.0	10.0	0
H11	8.0	8.0	0
H12	15.0	14.0	6.7
H13	15.0	13.7	8.4
H14	1975.0	2014.0	2
H15	24.0	24.0	0
H16	13.0	12.0	7.7
H17	13.0	12.0	7.7
H18	15.0	15.0	0
H19	13.0	12.0	7.7
H20	12.0	12.0	0
H21	13.0	13.1	0.8
H22	15.0	15.7	4.7
H23	310.0	309.8	0.1
H24	2100.0	2128.4	1.4
H25	2450.0	2450.9	0
H26	170.0	183.2	7.8
H27	240.0	240.5	0.2
H28	651.0	664.0	2
H29	915.0	876.1	4.3
H30	556.0	567.2	2

조업자가 각 열교환기에 부착된 유량계(혹은 온도계)를 보고 미세하게 냉각수 유량을 조절하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 열 교환기 망을 흐르는 냉각수 유량을 조절하기 위한 최적화 방법을 개발하였다. 이를 위해 냉각수 열 교환기 망을 구성하는 각 파이프의 연결 지점을 통과하는 냉각수 유량에 대한 물질 수지식을 세우고 파이프를 흐르는 냉각수 유량과 파이프의 직경, 길이 그리고 압력 강하에 관한 관계식으로서 Hazen-Williams 실험식을 사용하였다. 또한 열 교환기 후미에 장착되어진 밸브를 열고 닫음으로써 각 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 조절하게끔 최적화 모델을 만들었다. 냉각수 열 교환기 망을 표현하는 최적화 모델의 최적화 해를 구함으로써 결정되어진 등가 길이를 통하여 각 열 교환기 후미의 밸브 닫힘 정도를 결정할 수 있었고, 이렇게 결정되어진 밸브 닫힘 정도에 의하여 두 개의 예제에서 보여진 바와 같이 만족스러운 오차 범위 내에서 냉각수 유량이 조절되었다. 본 연구의 결과는 실제 화학공장이나 정유공장에서 사용되는 거대한 냉각수 열 교환기 망에 대해서도 적용이 가능하며 냉각수의 유량을 분석하고 각 열 교환기를 흐르는 냉각수의 유량을 조절

하는 데에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

이 논문은 한국과학재단(과제번호: 1999-1-307-002-3)의 부분적인 재정 지원에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

사용기호

C_H	: roughness coefficient in Hazen-Williams equation
D	: pipe diameter [m]
H	: heads [m]
L	: pipe length [m]
Q^d	: desired cooling water flow rates for heat exchanger [m ³ /s]
Q^c	: calculated cooling water flow rates for heat exchanger [m ³ /s]
S	: set of node connections which denotes heat exchangers

아래첨자

e	: equivalent
v	: valve
n	: number of nodes in network
i	: any node
j	: any node connected to node i
ext	: external flow rate into(or from) the node

참고문헌

1. Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A., GAMS: A User's Guide, Release 2.25, The Scientific Press, Massachusetts(1992).
2. Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkes, J. O., *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Sons, New York, NY(1969).
3. Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L. and Andersen, L. B., *Principles of Unit Operations*, John Wiley & Sons, New York, NY(1980).
4. Hammer and Mark, J., *Water and Wastewater Technology*, John Wiley & Sons, New York, NY(1986).
5. Lee, H., Lee, B. and Lee, I. B., "Analysis and Operation of Cooling Water Flows in a Heat Exchanger Network," *Korean J. Chem. Eng.*, **14**(4), 257-262(1997).
6. Lee, I. B., Lee, E. S., Chung, C., Yi, G., Lee, B. and Shin, D., *Chemical Process Optimization*, A-Jin, Seoul(1999).
7. King, H. W., Wisler, O. W. and Woodburn, G. W., *Hydraulics*, Robert E. Krieger, Florida(1980).
8. Ludwig, E. E., *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Gulf Publishing Co., Texas(1977).
9. Male, J. W. and Walski, T. M., *Water Distribution Systems: A Troubleshooting Manual*, Lewis Publishers, Chelsea, Mich.(1990).
10. Mays, L. W. and Tung, Y. K., *Hydrosystems Engineering and Management*, McGraw-Hill, New York, NY(1992).
11. Simon, A. L., *Hydraulics*, John Wiley & Sons, New York, NY(1986).