지역난방용 지중매설 배관망 네트워크 열-유체 동적 거동 모델링

이정빈 · 이준영 · 김래현* · 신치범†

아주대학교 에너지시스템 학부, 서울과학기술대학교 에너지환경대학원*
(2012년 5월 4일 접수, 2012년 6월 11일 수정, 2012년 6월 1일 채택)

Dynamic modeling of the hydraulic-thermal behavior of the buried pipe network for district heating

Jeongbin Lee · Jun Young Yi · Lae-Hyun Kim* · Chee Burm Shin†

Dept. of Chemical Engineering and Division of Energy Systems Research, Ajou University

*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science & Technology

(Received 4 May 2012, Revised 22 June 2012, Accepted 11 June 2012)

요 약

지역난방시스템이란 열에너지를 생산하고 만들어진 열에너지를 넓은 지역에 공급하는 시스템이다. 지역난방시스템은 국부 난방보다 더 효율적이고 친환경적이라고 할 수 있다. 생산된 열은 단열 배관 네트워크를 통해 사용자에게 공급된다. 지역난방시스템의 효율적인 운영을 위해서는 여러 가지 운전 조건에서 배관망 네트워크의 유량, 압력 및 온도 분포를 예측하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 지역난방용 지중매설 배관망 네트워크에서의 열-유체 동적거동을 수학적 모델을 사용하여 예측하였다. 수학적 모델은 물질, 운동량 및 에너지 수지식을 사용하였다. 모델링의 결과를 검증하기 위하여 강남지역 지역난방 시스템에서 측정된 결과와 모델링의 결과를 비교하였다.

주요어 : 지역난방, 열-유체 동적 거동, 모델링, 지중매설 배관망

Abstract- A district heating system produces thermal energy and supplies it to a large region. District heating systems can provide higher efficiencies and better pollution control than localized boilers. The heat generated by a district heating system is distributed to the customer via a network of insulated pipes. For the optimal operation of a district heating system, it is important to predict the distributions of pressure, flow rate and temperature of heating fluid within the network of pipes at various operating conditions. In this work, a mathematical modeling was performed to predict the dynamic hydraulic-thermal behaviors of heating fluid in the network of pipes for a district heating system. The mathematical model accounts for the conservations of mass, momentum and energy. In order to verify the validity of modeling, the modeling results were compared with the monitoring data of Gang-nam Branch of District Heating.

Key words : District heating, hydraulic-thermal behavior, dynamic modeling, buried pipe network

1. 서 론

지역난방시스템은 주거 지역이나 건물들이 많은 대단위 지역에 열을 효율적으로 공급해주는 방법이다. 일반적으로 지역난방시스템은 중앙 플랜트에서 열을 생산하고 그 열에 의한 온수로 배관망 네트워크

를 통하여 지역난방 사용자에게 공급해주는 것이다. 이러한 중앙 열 생산 방식이 갖는 장점으로 높은 에너지 효율 및 전기와 열을 동시에 생산할 수 있는 열병합 발전의 시설을 사용할 수 있다는 점이다.[1] 그런데 소비자들에 열을 수송해주는 과정에는 시간에 따라 온수의 유량과 온도가 변하게 되고 배관망 네트워크로부터 열 손실도 발생하게 된다. 이러한 열 손실을 최소한으로 줄이기 위해서는 플랜트에서 공급되는 온수의 온도를 가능하면 낮게 해야 된다. 그러나 너무 낮은 공급온도로 인해 사용자들이 요구

†To whom corresponding should be addressed.

Dept. of Chemical Engineering and Division of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon 443-749, Republic of Korea
Tel : 031-219-2388; E-mail : cbshin@ajou.ac.kr

하는 온도보다 낮은 온도를 공급할 수 있다. 대한민국에 적용된 지역난방시스템에서는 이러한 문제점을 방지하고 넓은 지역에 분포되어 있는 전체 수용가의 열 공급을 충족시키기 위해서 고지대나 가장 원거리의 수용가 지점을 critical point로 지정하여 열 공급량을 측정한다. 즉, 원거리의 critical point에서 사용자가 원하는 시간에 알맞은 열량을 공급하는 것이 지역난방의 효율적인 운전 조건이라고 할 수 있다.[2] 지역난방의 효율적인 운전 조건을 결정하기 위한 한 가지 방법은 다양한 운전 전략을 모사해볼 수 있는 지역난방시스템의 수학적인 모델을 개발하는 것이다. 이전의 지역난방시스템 관련 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Helge 등[3]은 여러 갈래로 나누어져 있는 전체 지역난방 배관망을 단순화하여 모사 결과의 정확도는 같지만 모사시간을 단축시키는 방법으로 지역난방 배관망의 동적 거동을 모사하였다. Vasek과 Dolinay[4]은 물질과 에너지 수지식을 매개변수에 의존하는 간단한 식으로 변환하고 계산을 통해 나온 유속과 온도가 정확도를 가질 때까지 반복 계산하도록 하는 알고리즘을 만들었다. Gabrielaitiene 등[5]은 배관망 네트워크 내 온도 변화를 유한요소법을 사용하여 계산하였다. Vladimir 등[6]은 배관망 네트워크를 루프 모델로 변환하여 연립 선형 방정식을 만들었다. 그리고 이 연립 선형 방정식들을 제곱근 방법(the method of square root)으로 정상상태일 때 배관망 네트워크에서의 유속을 계산하였다. 하지만 배관망을 흐르는 유체의 유속만 계산하였을 뿐 열전달에 대해서는 풀지 않았다.

본 연구에서는 유체의 물질 수지식이나 운동량 수지식은 네트워크 루프 모델로 비선형 방정식들을 풀어서 배관망 내의 유량과 압력을 계산하였다. 그리고 계산하여 얻은 유량과 압력을 바탕으로 배관망 내의 열전달을 비정상상태 에너지 수지식들로 나타내어 계산하였다. 모사 결과의 타당성을 검증하기 위해 다양한 운전 조건에서 측정한 critical point 압력과 온도를 배관망 모사 결과와 비교하였다.

2. 수학적 모델

2-1. 지배방정식

지역난방용 지중매설 배관망의 동적 거동을 예측하기 위하여, 본 연구에서 사용한 모델에는 질량 보존

법칙, 운동량 보존 법칙과 에너지 보존 법칙이 고려되었다. 지배방정식을 복잡하게 가져가면 계산 시간이 많이 걸리기 때문에 지배방정식을 간단히 하기 위해 적용되는 기본적인 가정은 다음과 같다.

- (i) 배관망을 흐르는 유체는 비압축성, Newtonian 유체이다.
- (ii) 배관망을 흐르는 유체의 밀도와 점도는 온도에 따라 변하지 않고 일정하다.
- (iii) 배관망을 흐르는 유체는 Reynolds 수가 아주 큰 난류상태이어서 배관망 내의 온도분포가 일정하다.
- (iv) 유체의 질량 유속과 압력은 정상상태로 하였고 온도는 비정상상태로 가정하였다.

배관망을 흐르는 유체의 질량유속을 계산하기 위해 들어오는 배관이 하나이고 나가는 배관이 두 개 이상인 지점을 node로 지정하였다. Node로 들어오는 유량과 갈라져 나가는 유량의 합은 0이라는 질량 보존 법칙을 사용했으며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum \dot{Q} = 0 \quad (1)$$

여기서, $\dot{Q}$ 는 배관망에서 흐르는 질량유속이다.

배관망을 흐르는 유체의 압력 변화량을 계산하기 위해 열 생산 시설의 펌프에서 공급해 주는 에너지에 의한 압력 상승량, 배관망에서의 압력 강하량, 그리고 열 사용처에서의 압력 강하량의 합은 0이라는 운동량 보존 법칙을 사용했으며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum \Delta P = 0 \quad (2)$$

여기서, ΔP 는 배관망을 흐르는 유체의 압력 변화량이며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P = \hat{f} \cdot \frac{L}{d} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3)$$

여기서, L 은 배관망의 길이, d 는 배관망의 내경, ρ 는 유체의 밀도이고, $\hat{f}$ 는 마찰 계수로서 식으로

Fig. 1. Schematic diagram of a pipe

나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{f} = a \cdot RR^b \cdot Re^c \quad (4)$$

여기서, a, b, c 는 최소자승법에 의해 결정되는 계수이고, RR 은 파이프의 relative roughness이고 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$RR = \epsilon/d \quad (5)$$

여기서, ϵ 은 파이프의 absolute roughness이며 Re 는 레이놀즈수이다.

배관망 내부를 흐르는 유체에 관한 에너지 수지식은 다음과 같다.

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{m} (T|x - T|x + \Delta x) - \frac{\dot{q}}{m \cdot C_p} \quad (5)$$

$$T_{avg}(t) = \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} T(x, t) dx \quad (6)$$

일정 길이의 배관망을 흐르는 유체의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 식 (5)는 일정한 길이의 배관을 지나는 유체에 대한 에너지 미분 수지식이며 식 (6)은 식 (5)를 적분하여 시간에 따른 일정한 길이의 배관을 지나는 유체의 온도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 T_{avg} 는 배관 내부에 흐르는 평균온도, $\dot{Q}$ 은 질량유속, m 은 배관 내부에 흐르는 유체의 질량, T_x 은 배관 유입온도, $T_{x+\Delta x}$ 은 배관 출구온도, C_p 는 유체의 비열이며 $\dot{q}$ 는 열 손실량이다.

Fig. 2. Sectional view of supply and return pipes

Fig. 2는 공급회수관의 단면을 나타낸다. 본 연구에서는 공급관과 회수관이 동일하게 일정한 간격으로 지중 매설되어 있는 배관망의 열 손실을 계산하기 위해서 Kvisgaard and Hadvig의 열 손실 모델[7,8]을 사용하였다. C 는 공급관의 중심과 회수관 중심 사이의 거리이고 h 는 공급회수관과 지표면 사이의 거리이다. D_{es} 와 D_{ms} 는 각각 공급관의 내경과 외경이고, D_{er} 과 D_{mr} 은 각각 회수관의 내경과 외경이다. 공급회수관의 열 손실은 다음과 같다.

$$\dot{q}_s = K_s(T_s - T_g) - K_r(T_r - T_g) \quad (7)$$

$$\dot{q}_r = K_s(T_r - T_g) - K_r(T_s - T_g) \quad (8)$$

$$K_s = [R_{Gs} + R_{Is} - R_{Hs} \times R_{Hr} / (R_{Gs} + R_{Is})]^{-1} \quad (9)$$

$$K_r = [(R_{Gs} + R_{Is})(R_{Gs} + R_{Is}) / R_{Hr} - R_{Hs}]^{-1} \quad (10)$$

$$R_{Gs} = 1/(2\pi\lambda_g) \ln \left\{ 2h/D_{ms} + \left[(2h/D_{ms})^2 - 1 \right] \right\}^{-0.5} \quad (11)$$

$$H = h + 0.0685\lambda_g \quad (12)$$

$$R_{Is} = 1/(2\pi\lambda_g) \ln(D_{ms}/D_{es}) \quad (13)$$

$$R_{Hs} = 1/(4\pi\lambda_g) \ln \left[1 + (2h/C)^2 \right] \quad (14)$$

여기서 $\dot{q}_{1s}$ 는 공급관의 열손실량이고 $\dot{q}_{1r}$ 은 회수관의 열손실량을 나타낸다. T_s , T_r , 그리고 T_g 는 각각 공급관의 온도, 회수관의 온도 그리고 지표면의 온도를 나타낸다. K_{1s} 와 K_{2s} 는 각각 공급관과 회수관의 총괄 열전달 계수이며 R_{Gs} , R_{Is} , R_{Hs} 는 각각 관과 토지경계면 열 저항, 관 내부 유체와 관 벽 사이의 열 저항, 그리고 토지 열 저항을 나타낸다. 공급관의 열손실량과 회수관의 열손실량은 서로에게 영향을 받으며 공급관과 회수관을 흐르는 유체의 온도가 시간에 따라 변하면서 공급관과 회수관의 열손실량 또한 시간에 따라 변한다.

2-2. 계산 방법

전체 배관망에 대해 정상상태에서의 유량과 압력의 연립 비선형 방정식을 계산하기 위해 nonlinear least square 방법을 사용하였다. 그리고 비정상상태에서의 온도를 계산하기 위해 forward euler method를 사용하였다. 약 2300개의 노드에 대하여 물질 및 에너지와 운동량 수지식을 통해 각 노드별 유량, 압력, 온도를 구하였다. 계산에 필요한 상수들은 강남지역 지역난방시스템의 열배관 직무기초를 참고하여 사용하였다. 온도 분포의 초기 값은 각 critical point의 온도 data를 사용하여 계산하였다.

3. 지역난방시스템 운전 조건

본 연구에서는 강남에 위치한 지역난방시스템의 배관망 네트워크에 대하여 모사를 실시하였다. Fig. 3은 강남 지역난방시스템의 배관망 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 3을 보면 배관망 상단 오른쪽에 열을 공급해주는 중앙 플랜트가 있다. 또한, 배관망 끝 부

분에는 앞의 1절에서 설명한 critical point 3개가 존재한다.

열 사용량이 많을수록 공급유량과 공급 온도는 높아지게 되고 시간에 따라 유량과 온도가 급격하게 변하게 된다. 이렇게 급격히 변하는 조건에서도 모델링의 결과가 실제 현상과 큰 차이가 없어야 모델링의 신뢰성을 검증할 수 있다고 판단하였다. 그래서 강남 지역난방시스템에서 1년 중 열 사용량이 가장 많았던 기간에 측정한 critical point 자료와 모델링 결과를 비교하기로 하였다. 정해놓은 기간 동안 중앙 플랜트에서 조작된 공급 유량, 압력과 온도를 시간에 따라 Fig. 4에 도시하였다.

에너지 수지식은 비정상상태에서의 거동을 해석하기 때문에 초기 값이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 에너지 수지식의 수치 해에 관한 정확도를 높이기 위하여 초기 critical point의 온도를 입력하였고 이에 대한 자료는 Table 1에 보인 바와 같다.

4. 결과 및 고찰

강남지역 지역난방시스템의 배관망 네트워크 모델링 신뢰성을 검증하기 위하여 96시간 동안 측정한 critical point 데이터와 모델링 결과를 비교하였다.

Fig. 4는 critical point 1번에서 측정한 압력과 온도를 모델링 결과와 비교한 그림이다. Fig. 4 a)는 critical point 1번에서의 시간에 따른 압력변화를 비교한 그림으로, 측정한 데이터는 세모로, 모델링 데이터는 점선으로 표시하였다. 측정한 데이터와 모델링 데이터를 비교해 보면 거의 모든 부분에서 측정한 데이터와 모델링 데이터가 일치하였다. Critical point 1번에서의 압력 변화 차이의 평균값은 0.08 kgf/cm²이다. Fig. 4 b)는 critical point 1번에서의 시간에 따른 온도변화를 비교한 그림으로, 측정한 데이터는 원이고 모델링 데이터는 점선으로 표시하였다. 53시-54시 부분을 제외하고는 대부분의 시간대에서 모델링 결과가 측정결과와 일치하였다. Critical point 1번에서 온도 변화 차이의 평균값은 1.29℃이다. 모델링 결과와 측정결과가 차이를 보이는 데 그 이유는 열 사용처에서의 열 사용량이나 국부적인 토지온도의 차이 등으로 예측하기 힘든 외란 때문에 모델링 결과와 측정한 결과가 차이가 생기기 때문이다.

Fig. 3 Pipes distribution of Bucheon Branch of District Heating

Fig. 4 Variation of (a) supply flow rate, (b) supply pressure and (c) supply temperature

Critical point No.	Measured temperature [°C]
Critical point #1	115.3
Critical point #2	110.8
Critical point #3	102.9

Table 1. Initial temperatures of critical points

Fig. 5 Comparison between measured data and modeling data on the critical point 1. (a) pressure and (b) temperature

Fig. 6 Comparison between measured data and modeling data on the critical point 2. (a) pressure and (b) temperature

Fig. 7. Comparison between measured data and modeling data on the critical point 3. (a) pressure and (b) temperature

Fig.5는 critical point 2번에서 측정한 압력과 온도를 모델링 결과와 비교한 그림이다. Fig.5 a)는 critical point 2번에서의 시간에 따른 압력변화를 비교한 그림으로, 표기한 기호는 Fig. 4 a)와 같다. 측정된 데이터와 모델링 데이터를 비교해 보면 압력이 올라가 있는 부분에서 차이가 존재하고 나머지 부분은 전반적으로 일치하였다. Critical point 2번에서의 압력 변화 비교의 평균값은 0.11 kgf/cm²이다. Fig.5 b)는 critical point 2번에서의 시간에 따른 온도변화를 비교한 그림으로, 표기한 기호는 Fig. 4 b)와 같다. 대부분의 시간대에서 모델링 결과와 측정결과를 비교해 보면 critical point 1번보다 온도 차이가 더 크게 나는 것을 볼 수 있다. 하지만 모델링 결과와 측정 결과의 경향은 같게 나오는 것을 볼 수 있다. Critical point 2번에서의 모델링 결과와 측정된 결과가 차이가 심하게 나는 것은 critical point 1번과는 다르게 열 사용처가 배관망의 노선이 복잡하므로 유체의 흐름이 복합적으로 발생하기 때문이다. Critical point 2번에서의 온도 변화 차이의 평균값은 1.87℃이다.

Fig.6은 critical point 3번에서 측정한 압력과 온도를 모델링 결과와 비교한 그림이다. Fig.6 a)는 critical point 3번에서의 시간에 따른 압력변화를 비교한 그림으로, 표기한 기호는 Fig. 4 a)와 같다. 측정된 데이터와 모델링 데이터를 비교해 보면 critical point 1번과 같이 마지막 10시부터 20시까지의 부분만 약간의 차이를 보이고 나머지 부분은 전반적으로 일치하였다. Critical point 3번에서의 압력 변화 비교의 평균값은 0.2 kgf/cm²이다. Fig.6 b)는 critical point 3번에서의 시간에 따른 온도변화를 비교한 그림으로, 표기한 기호는 Fig. 4 b)와 같다. 대부분의 시간대에서 모델링 결과와 측정결과를 비교하면 critical point 2번의 온도 비교와 같이 온도 차이가 크게 나는 것을 볼 수 있다. 하지만 critical point 2번과 모델링 결과가 측정 결과의 경향은 같게 나오는 것을 볼 수 있다. 그리고 Critical point 3번에서 측정 데이터의 온도 절정(peak)이 나타날 때 모델링 결과에서는 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 critical point 2번 결과에서 언급했듯이 열 공급처와의 거리가 멀기 때문에 발생하는 예측하지 못한 외란 때문인 것으로 보인다. 하지만 모델링 결과가 측정된 결과의 경향을 따라가는 것을 볼 수 있다. Critical point 3번에서의 온도 변화 차이의 평균값은 2.37℃이다.

5. 결 론

본 연구에서는 강남지역 지역난방시스템의 열-유체 배관망 네트워크의 유량, 압력 및 온도를 예측할 수 있는 전산모사 프로그램을 개발하였다. 유량과 압력 변화는 정상상태로 가정하여 비선형 최소자승법을 이용하여 계산하였고, 온도변화는 비정상상태로 설정하고 유한차분법을 이용하여 계산하였다. 따라서 개발한 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 critical points에서 측정한 압력 및 온도 변화와 모델링 결과를 비교하였다. 열사용량이 많았던 조업 조건에서 모델링의 압력 결과는 잘 일치하였고 온도결과는 약간의 오차가 존재하지만 전반적으로 경향은 따라간다고 볼 수 있다. 이 프로그램은 지역난방시스템의 다양한 운전 전략을 모사해볼 수 있으므로 지역난방시스템의 효율적 운전에 기여할 것으로 판단된다.

사 용 기 호

$\dot{Q}$: Mass flow [kg/hour]

P : Pressure [kgf/cm²]

$\hat{f}$: Friction factor

L, x : Length [m]

d : Inner diameter [m]

V : Velocity [m/s]

Re : Reynolds number

RR : Relative roughness

T : Temperature [℃]

m : Mass [kg]

C_p : Specific heat [J/kg·K]

$\dot{q}$: Heat loss [KJ/hour]

h : Distance between ground surface and center of a pipe [m]

t : Time [hour]

D : Diameter [m]

C : Distance between center of the supply pipe and center of the return pipe [m]

그리이스 문자

ρ : density [kg/m³]

ϵ : Absolute roughness [m]

λ : Adjust coefficient

아래첨자

avg : Average
 e : Inner diameter
 g : Ground
 m : Outer diameter
 s : Supply
 r : Return
 G_s : Between ground surface and a pipe
 I_s : Between insulation of a pipe and fluid
 H_s : Between ground and a pipe

8. Benonysson, A.; Böhm, B.; Ravn, H. F. Operational optimization in a district heating system. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36, 297-314.

후 기

“본 연구는 지식경제부와 한국에너지기술평가원의 에너지·자원기술개발사업-효율향상분야 중대형과제인 “광역에너지 네트워크 최적화 및 통합관리시스템개발” 과제 (과제번호 : 2007-E-ID25-P-02-0-000)의 지원에 의해 수행되었습니다.”

참고문헌

1. Taylor, N. R.; Stierhoff, K. L.: *District Heating Handbook*; The International District Heating Association: Washington, D.C., 1983.
2. Pinson, P.; Nielsen, T. S.; Nielsen, H. Aa.; Poulsen, N. K.; Madsen, H. Temperature prediction at critical points in district heating systems. *European Journal of Operational Research*, 2009, 194, 163-176.
3. Larsen, H. V.; Pöhlsson, H.; Böhm, B. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43, 995-1019.
4. Vasek L.; Dolinary, V. Simulation model of heat distribution and consumption in municipal heating network. *International journal of mathematical models and methods in applied science*, 2010, 4, 240-248.
5. Gabrielatene, I.; Kacianauskas, R. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. *Digital library of construction informatics and information technology in civil engineering and construction*, 2001, 9, 995-1019.
6. Stevanovic, V. D.; Prica, S.; Maslovacic, B. Efficient numerical method for district heating system hydraulics. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48, 1536-1543.
7. Lianzhong, L. Dynamic modeling and optimal operation of district heating system. Master Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2003.