

# 광역에너지 열배관망 동적 거동 모사

류승민, 이정빈, 신치범  
아주대학교 에너지시스템학부

## Thermal-hydraulic dynamic modeling of district heating network systems

Seung-Min Ryu, Jeongbin Lee, Chee Burm Shin  
Ajou university, Division of Energy System Research

### 1. 서론

현재 전 세계적으로 에너지자원의 부족현상과 화석연료사용에 의한 환경적인 문제로 에너지 효율성 문제가 제시되어 왔다. 지역난방 시스템은 실제적인 운영으로 에너지 효율을 증대시켜 경제적, 환경적인 해결책을 제시하여 준다. 지역난방 시스템의 가장 큰 장점은 열병합 발전과 국지적인 잉여 열원에 의한 열 생산과 열배관망을 통한 효율적인 열의 공급이다. 열 공급 배관망은 폐쇄 배관망으로 구성되어 있으며, 공급에서 회수까지 소요되는 시간은 수도권 열병합의 경우 대략 8시간에서 12시간 정도 소요된다. 전체 수용가의 열 공급을 충족시키기 위해서 고지대나 가장 원거리의 수용가 지점을 critical point로 지정하여 그 지점에서의 온도와 압력을 측정한다. 즉, 지역난방 시스템의 최적화는 원거리의 critical point에 사용자가 원하는 시간에 알맞은 열량을 공급하는 것이라고 할 수 있다. 지역난방 시스템의 최적화를 위해서 물질수지식, 운동량수지식, 에너지수지식을 통해 배관망내의 유체의 거동을 예측할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하였다.

### 2. 수학적 모델

본 연구에서는 광역에너지 네트워크 열 배관망의 유동특성을 묘사하기 위하여 적용되는 기본적인 가정은 다음과 같다.

- 1) 유체는 비압축성, Newtonian 유체이다.
- 2) 유체의 밀도와 점도는 온도에 따라 변하지 않고 일정하다.
- 3) 파이프 안쪽을 흐르는 유체는 난류상태이며 온도분포가 일정하다.

## 2-1. 지배방정식

배관망 내를 흐르는 유체의 유량을 계산하기 위한 물질수지식은 다음과 같다.

$$\sum Q = 0 \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 유량이다. 한 분기점에서 들어오는 유량은 갈라져 나가는 유량의 합과 같다.

또한 압력을 계산하기 위한 운동량수지식은 다음과 같다.

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

여기서  $\Delta P$ 는 배관망 내를 흐르는 유체의 압력 변화량이다. 압력 변화량  $\Delta P$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P = \hat{f} \cdot \frac{L}{D} \frac{PV^2}{2} \quad (3)$$

여기서  $\hat{f}$ 는 마찰 계수로서 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $a, b, c$ 는 최소자승법에 의해 결정되어지는 계수 (무차원),  $RR = \epsilon/d$ 은 파이프의 relative roughness (무차원),  $\epsilon$ 은 파이프의 absolute roughness (m),  $d$ 는 파이프의 내경(m)이고  $Re$ 는 레이놀즈 수이다.

관 내부를 흐르는 유체에 관한 에너지수지식은 다음과 같다.

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{\dot{m}}{m} (T_{in} - T_{out}) - \dot{q} \quad (5)$$

여기서  $T_{avg}$ 는 파이프를 지나는 평균온도,  $\dot{m}$ 은 질량유속,  $m$ 은 파이프를 지나는 유체의 질량,  $T_{in}$ 은 파이프 유입온도,  $T_{out}$ 은 파이프 출구온도이며  $\dot{q}$ 는 열 손실량이다. 열 손실량을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{q} = UA(T_{avg} - T_s) \quad (6)$$

여기서  $U$ 는 총괄열전달계수,  $A$ 는 파이프의 면적이고,  $T_s$ 는 토사의 온도이다.

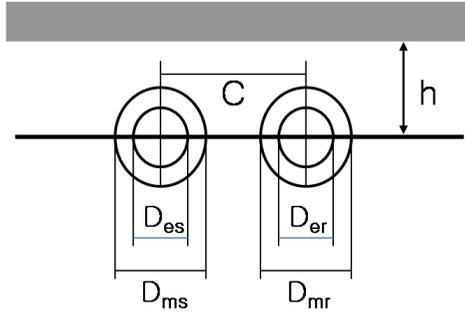


그림 1. 공급회수관의 개략도

공급회수관의 열 손실은 Kvisgaard and Hadvig의 열 손실 모델이 사용되었다. 그림 1.은 공급회수관의 단면을 나타낸다.  $C$ 는 공급관의 중심과 회수관 중심사이의 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.

## 2-2. 모델링 결과

본 연구에서는 MATLAB를 이용하여 모델링을 수행하였다. 정상상태에서의 유량과 압력을 계산하기 위하여 Nonlinear least square방법을 사용하였고 시간에 따른 온도의 변화를 계산하기 위해 수치해석 방법인 forward-Euler 방법을 사용하였다.

그림 2.는 공급유량이  $5400 \text{ m}^3/\text{hour}$ , 공급압력이  $11 \text{ kgf/cm}^2$ , 회수압력이  $5.5 \text{ kgf/cm}^2$ , 공급온도는  $120^\circ\text{C}$ 이고 회수온도가  $60^\circ\text{C}$ 일 때의 1시간 후 열배관망의 온도 분포를 나타내는 그림이다.

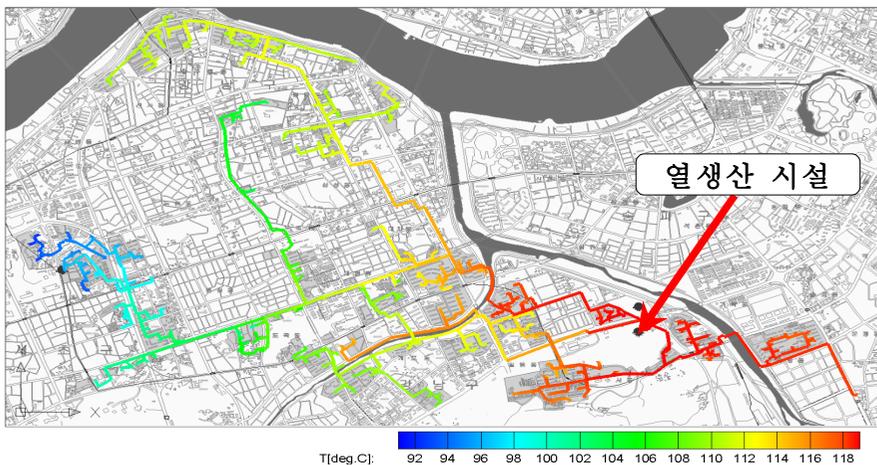


그림 2. 강남지사 배관망의 모델링 결과

### 3. 결론

본 연구에서는 강남권의 341개의 substation에 대한 유체의 동적 거동을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 배관망의 분포에 따른 유량과 압력강하를 물질 수지식과 운동량 수지식을 통해 계산할 수 있었으며 파이프의 시간에 따른 온도변화를 에너지 수지식과 forward-Euler 방법을 통해 계산할 수 있었다. 이 모델링의 결과와 한국 지역난방공사 강남지사의 실제 조업데이터를 비교함으로써 모델링의 타당성을 검증하였다. 시간에 따른 압력변화, 온도의 변화가 실제 조업 데이터와 전반적으로 일치하였다. 이 모델링은 한국 지역난방공사 강남지사의 열 공급 최적화의 기초자료로 사용됨으로써 지역난방 시스템의 효율성을 향상시킬 것으로 기대된다.

### 4. 참고문헌

1. “강남지사 열생산공급시설 운전조작 설명서”, 한국지역난방공사 강남지사, 20-46, (2008)
2. Vladimir D. Stevanovic, Branislav Zivkovic, Sanja Prica, Blazenka Maslovaric, Vladan Karamarkovic and Vojin Trkulja, "*Prediction of thermal transients in district heating systems*", Energy Conversion and Management, 50, 2167 - 2173, (2009)
3. Vladimir D. Stevanovic, Sanja Prica, Blazenka Maslovaric, Branislav Zivkovic and Srdjan Nikodijevic, "*Efficient numerical method for district heating system hydraulics*", Energy Conversion and Management, 48, 1536 - 1543, (2007)