



도시가스 공급라인의 압력 및 유량변화 예측을 위한 배관망 해석 연구

조찬영 · 장성필 · †남진현 · 임시형 · 신동훈 · 정태용

국민대학교 기계자동차공학부

(2008년 5월 28일 접수, 2008년 6월 13일 수정, 2008년 6월 13일 채택)

A Study on Pipeline Network Analysis for Predicting Pressure and Flow rate Transients in City-gas Supply Lines

Chan Young Cho · Sung Pill Jang · †Jin Hyun Nam · Si-Hyung Lim · Donghoon Shin · Tae-Yong Chung

School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin University
(Received May 28, 2008, Revised June 13, 2008, Accepted June 13 2008)

요 약

배관망 내에서 측정된 압력값이 정상 또는 기준 압력으로부터 벗어나는 정도는 배관망의 운전 상황을 평가하는데 매우 유용한 정보이다. 공급 및 수요 측에서 측정된 조건에 기초하여 배관망 내의 압력변화를 정확히 예측할 수 있다면, 비용면에서 효율적인 배관망 모니터링 및 누출감지가 가능하다. 본 연구에서는 배관에서의 압축성 유체의 일차원 유동방정식에 기초하여 배관망 해석 프로그램을 개발하였다. 직선 배관에서의 유동해석 결과를 이전 연구자의 결과와 비교하여 본 해석의 신뢰성을 검증하였다. 또한 단순한 형상의 도시가스 배관망에 대하여 압력과 유량 변화를 해석하여 본 프로그램의 활용가능성을 보였다.

Abstract – The deviation of measured pressures in pipeline networks from normal or reference pressures is useful information for judging the operation of the pipeline networks. A cost-effective monitoring of pipeline networks including a leak detection capability can be realized when transient pressure variation is accurately predicted using measured conditions at supply- and demand-sides of the networks. In this study, a pipeline network analysis program was developed based on one-dimensional flow equations for compressible fluids. The validity of the present analysis was demonstrated by simulating the flow in a straight pipeline and comparing the results with the previously reported ones. Pressure and flow rate transients in several simple city-gas pipeline networks were also analyzed to show the usefulness of the developed program.

Key words : pipeline network, numerical analysis, compressible flow, leak detection

I. 서 론

안정적이며 효율적인 가스의 공급 및 누출 감지, 사고 예방을 위하여, 가스 배관망 운영에 관련된 안전 기술의 개발은 필수적이다[1]. 현재 선진국을 중심으로 원격감시를 이용한 실시간 모니터링 기술 개발을 통해 가스 안전 관리 시스템을 향상시키려는 연구가 활발히 진행 중이다[2,3].

이러한 흐름에 맞추어 국내 도시가스 공급업체들에서도 국가 GIS(Geographic Information System) 시스템의 지형, 지반 정보를 기초로 배관망 내 가스압력, 유

량 및 공급능력을 해석하고, 이를 신규 배관망의 구축 및 기존 배관망의 유지, 보수에 활용하고 있다[4]. 또한 공급 라인에 대한 배관망 모니터링 시스템을 운영하여 원격에서 정압기 압력 등 배관망의 기초적인 운전상황을 실시간으로 감시하고 있다.

도시가스 배관망의 운전 상태 모니터링 기술로는 유동 소음을 측정하는 방법, 관내의 압력 변화를 측정하는 방법 등이 있다. 이러한 방법 중 배관 내의 압력 변화를 통하여 배관망의 운전 상태를 모니터링 하는 기술[1,5,6]은 기본적으로 측정되는 정압기, 밸브실 등의 압력을 활용할 수 있다는 점에서 지능형 배관망 구축에 적절할 것으로 판단된다. 즉 실제 측정된 압력 데이터와 해석을 통하여 얻어진 압력값을 실시간으로 비교

†주저자:akko2@kookmin.ac.kr

하여 운전상태 모니터링 및 누출감지를 수행한다.

본 논문에서는 압력 측정에 기반한 지능형 도시가스 배관망 모니터링 시스템 개발을 위한 기초 자료 제시를 목표로, 이에 반드시 필요한 효율적이고 정확한 배관망 해석 방법에 대한 연구를 수행하였다. 관로에서의 압축성 유체의 일차원 유동방정식과 유한체적법에 기초하여 배관망 해석 프로그램을 개발하였으며, 이전 연구자의 결과와 비교하여 본 프로그램의 신뢰성을 검증하였다. 또한 단순한 형상을 가진 배관망의 운전 예측에 본 프로그램을 적용하여 그 유용성을 평가하였다.

II. 해 석

2.1. 지배 방정식

배관 내를 흐르는 압축성 유체의 질량 보존 및 운동량 보존의 지배방정식은 다음과 같은 두 식으로 표현된다[7,8].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f}{2D}\rho v^2 + \rho g \sin\theta = 0 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 배관 내 유체의 밀도, v 는 유동 속도, f 는 Darcy 마찰계수, D 는 배관의 직경, g 는 중력 가속도를 나타낸다. 또한 θ 는 배관이 수평면과 이루는 각도를 의미한다. 참고로 Fanning 마찰계수 ψ_f 는 Darcy 마찰계수 f 와 $\psi_f = f/4$ 의 관계를 갖는다[9].

배관을 흐르는 가스를 이상기체($p = \rho RT$)라 가정하면 식 (1)의 연속방정식은 다음과 같이 시간에 따른 압력 p 의 변화에 대한 방정식으로 정리가 가능하다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

여기서 a 는 음속을 의미하며, 이상기체 등은 과정의 경우 $a^2 = p/\rho$ 이다. 또한 식 (2)의 운동량방정식에 배관의 단면적 A 를 곱하고, 유량의 관계식 $q = Av$ 를 이용하여 정리하면 다음과 같이 변환된다.

$$\rho \frac{\partial q}{\partial t} + \rho v \frac{\partial q}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f}{2D}\rho q v + \rho A g \sin\theta = 0 \quad (4)$$

일반적인 배관망 유동에서 대류 가속도 항, 즉 식 (3)과 (4)의 $v(\partial p/\partial x)$ 와 $\rho v(\partial q/\partial x)$ 항은 다른 항들에 비하여 매우 작으므로 무시할 수 있다[10]. 또한 배관 경사에 의한 중력의 효과 $\rho g \sin\theta$ 항도 작으므로 무시하면 식

(3)과 (4)는 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{A}{\rho a^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{\rho}{A} \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{f \rho q |q|}{2DA^2} \quad (6)$$

위의 식 (5)와 (6)에서 유량 q 는 동일한 질량 유량 \dot{m} 이 흐르는 경우에도 배관 내의 압력에 따라 다른 값이 얻어진다. 따라서 다음과 같은 질량 유량의 관계식을 이용하면 해석을 간단히 할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho q = \rho_n q_n \quad (7)$$

여기서 하첨자 n 은 압력 p_n 이 1 bar, 온도 T_n 이 288 K인 표준(normal) 상태를 지칭한다.

$$\frac{\partial q_n}{\partial x} = - \frac{A}{\rho_n a^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{\rho_n}{A} \frac{\partial q_n}{\partial t} - \frac{f \rho_n q_n |q_n|}{2DA^2} \quad (9)$$

본 논문의 모든 해석은 식 (8)과 (9)를 기본으로 하여 수행되었다. 식 (9)에서 필요한 마찰계수는 다양한 상관식을 통해 얻을 수 있다. 참고로 계기압 0.75 bar에서 7.0 bar까지의 중압 범위에서는 다음과 같은 Polyflo 방정식이 자주 사용된다[10].

$$\sqrt{\frac{1}{\psi_f}} = 5.338 R e^{0.076} \eta \quad (10)$$

여기서 η 는 점성력 외의 추가적인 마찰 또는 항력을 고려하는 효율계수이다.

2.2. 차분화

배관망의 지배방정식인 식 (8)과 (9)를 수치적으로 해석하기 위해서는 배관을 압력과 유량의 절점으로 차분화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 유한체적법(FVM)을 기초로 공간차분을 수행하여 대수방정식을 얻는다.

Fig. 1은 배관망 해석에서 주로 나타나는 선형 배관에 대한 차분화 방법을 보여주고 있다. 우선 배관의 길이 L 을 동일한 길이의 N 개의 영역으로 나누고, 각각의 영역 간의 경계에 압력 p_i 가 계산되는 압력 절점을 배치한다. 따라서 p_1 에서 p_{N+1} 까지 $N+1$ 개의 압력 절점이 생성되며, 각 압력 절점간의 거리 또는 영역의 길이 ΔL 은 L/N 로 모두 동일하다.

유량이 계산되는 절점은 전산유체역학(CFD)에서의

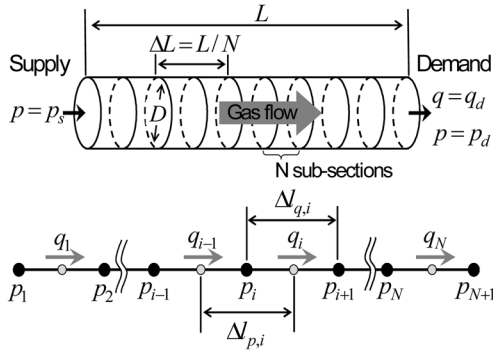


Fig. 1. Spatial discretization procedure for straight pipelines.

엇갈림 격자계(staggered grid)와 같이 인접한 두 개의 압력 절점 사이에서 배치된다. 예를 들어 p_i 와 p_j 의 압력 절점 사이에서는 유량 $q_{i \rightarrow j}$ 가 계산된다. 따라서 $N+1$ 개의 압력 절점에 대하여 유량 절점의 개수는 N 개가 된다. Fig. 1에서는 편의를 위해 p_i 에서 p_{i+1} 의 압력 절점으로 흐르는 유량을 q_i 로 지칭하며, 유동은 주로 좌측의 상류에서 우측의 하류로 일어나므로 q_i 는 양수의 값을 가진다.

식 (8)을, 압력 p_i 가 정의된 크기가 $\Delta L_{p,i}$ 인 영역에 대하여 적분하면 다음과 같은 식 (11)을 얻는다. 내부 압력 절점의 경우 $\Delta L_{p,i} = \Delta L$, 경계 절점의 경우 $\Delta L_{p,i} = \Delta L/2$ 이다.

$$\frac{q_i - q_{i-1}}{\Delta L_{p,i}} = - \frac{A}{\rho_n a^2} \frac{p_i - p_i^0}{\Delta t} \quad (11)$$

위에서 Δt 는 시간 간격을 의미하며, 시간에 대한 차분화에는 암시적 방법이 사용되었다. 다음으로 식 (9)를, 유량 q_i 가 정의된 크기 $\Delta L_{q,i} (= \Delta L)$ 인 영역에 대하여 적분한다.

$$\frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta L_{q,i}} = - \frac{\rho_n q_i - q_i^0}{A \Delta t} - \frac{f \rho_n}{2DA^2} q_i \left| \frac{p_n}{\bar{p}_i} \right| \quad (12)$$

위에서 \bar{p}_i 는 q_i 의 유량 절점에서의 평균 압력을 의미하며, $\bar{p}_i = (p_i + p_{i+1})/2$ 로 계산된다.

선형 배관에 대한 방정식인 식 (11)과 (12)의 해석을 위해서는 양 끝단에서 각각 하나씩 총 2개의 경계 조건이 필요하다. 일반적으로는 상류 측에서는 공급 압력 p_s 가 시간의 함수로 주어진다. 하류 측에서는 수요 유량 q_d 또는 수요 압력 p_d 가 시간의 함수로 주어지는 것이 보통이다.

$$p_1 = p_s(t) \quad (13)$$

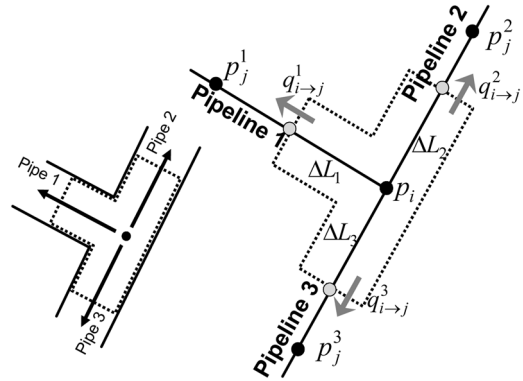


Fig. 2. Spatial discretization procedure for pipeline networks branches.

$$q_{N+1} = q_d(t) \text{ or } p_{N+1} = p_d(t) \quad (14)$$

실제 도시가스 배관망은 여러 개의 선형 배관의 지류(branch)가 서로 연결되어 복잡한 네트워크를 형성한다. 따라서 Fig. 2와 같이 3개 이상의 선형 배관이 연결되는 절점에 대한 특별한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 압력 절점을 지류의 양 끝단에 우선적으로 배치하므로, 유량 절점은 항상 동일한 지류 상의 압력에만 영향을 받는다. 따라서 위의 식 (12)가 동일하게 사용된다. 그러나 Fig. 2에서 p_i 로 표시된 압력 절점에서 대해서는 식 (11) 대신에 다음과 같은 차분식이 사용되어야 한다.

$$q_{i \rightarrow j}^1 + q_{i \rightarrow j}^2 + q_{i \rightarrow j}^3 = - \frac{A}{\rho_n a^2} \frac{p_i - p_i^0}{\Delta t} \Delta L_{p,i} \quad (15)$$

여기서 $q_{i \rightarrow j}^k$ 는 지류 k 를 통해 p_i 절점에서 p_j^k 절점으로 빠져나가는 유량을 의미한다. 또한 $\Delta L_{p,i}$ 는 세 지류 모두에 걸친 p_i 압력 절점의 영역 크기로 $\Delta L_{p,i} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3$ 이다.

본 해석 프로그램이 채택하고 있는 유한체적법(FVM)은 배관망 해석에 일반적으로 사용되는 유한차분법(FDM)에 비하여 동일한 절점 개수에서 향상된 정확도를 나타낸다. 더욱 중요하게 식 (15)와 같은 유한체적에 기초한 차분화는 복잡한 배관망의 해석에 더 적절한 것으로 판단된다.

2.3. 해석 모델

2.3.1. 선형 배관

본 연구에서는 Fig. 1의 간단한 선형 배관에 대한 해석을 우선 수행하였으며, 본 배관망 해석 프로그램의

Table 1. Parameters for pipeline network analysis of straight pipeline.

| Parameter | Explanation | Value |
|--------------|---------------------------|--------------------------------|
| L | Pipeline length | 90 km |
| N | Number of sub-sections | 40 |
| A | Pipe cross-sectional area | 1 m ² |
| ρ_n | Density | ρ_n/a^2 kg/m ³ |
| a | Wave speed | 300 m/s |
| f | Pipe friction factor | 0.003 |
| p_s | Supply pressure | 1.5 bar |
| p_d | Demand pressure | 1.0 bar |
| Δp_s | Step increase of p_s | 2.0 bar |

결과를 기존의 결과[1]와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 해석에 사용된 배관의 제원, 유체의 물성 및 경계조건이 Table 1에 제시되어 있다. 선형 배관은 초기에 상류의 공급 압력 p_s 및 하류의 수요 압력 p_d 로 정상상태에 있다가 공급 압력 p_s 가 갑자기 $p_s + \Delta p_s$ 로 증가된 상황을 고려한다. 실제 배관망 해석에서는 공급 압력 p_s 가 1.5 bar 및 수요 압력 p_d 가 1.0 bar인 정상 상태를 초기 조건으로 하여 해석하였다.

이상의 신뢰성 검증을 위한 해석 연구가 끝난 후, 본 해석 프로그램의 유용성을 평가하기 위한 연구가 위와 동일한 제원의 선형 배관에 대하여 수행되었다. 이 경우에는 상류의 공급 압력 p_s 를 일정하게 유지하고, 하류의 수요 유량 q_d 를 시간에 따라 sine 함수의 형태로 변화시키면서 배관망 해석을 수행하였다.

2.3.2. 단순 배관망

Fig. 3은 1개의 공급부(p_{s1})와 2개의 수요부(q_{d2} 와 q_{d3})를 연결하는 3개의 선형 배관들로 구성된 단순 배관망

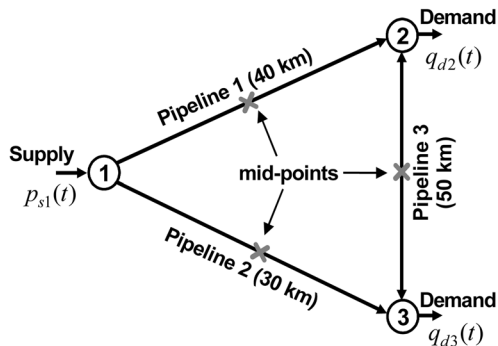


Fig. 3. A simple pipeline network composed of three pipeline branches.

Table 2. Supply and demand condition for pipeline network analysis of simple network.

| Period t (h) | Supply (1) p_{s1} (bar) | Demand (2) q_{d2} (Nm ³ /h) | Demand (3) q_{d3} (Nm ³ /h) |
|----------------|---------------------------|--|--|
| 0~1 | 2.5 bar | 30 → 80 | 30 → 16.7 |
| 1~1.5 | | 80 | 16.7 → 10 |
| 1.5~2 | | 80 | 10 |
| 2~8 | | 80 → 60 | 10 |

을 보여주고 있다. 이러한 배관망의 해석에는 Fig. 2에서 유도한 선형 배관의 연결 절점에 대한 식 (15)의 고려가 필수적이다. 본 연구에서는 Table 1에 제시된 것과 동일한 파이프 제원에 대하여 해석을 수행하였다. 단순 배관망 해석에 사용된 경계 조건은 Table 2에 스케줄의 형식으로 정리되어 있다.

III. 결 과

3.1. 선형 배관(검증 모델)

Fig. 4와 Fig. 5는 공급 압력이 급격히 증가하는 경우, 선형 배관의 압력 및 유량 변화에 대한 배관망 해석의 결과를 보여주고 있다. Fig. 4와 Fig. 5에서 실선으로 표시된 결과는 본 프로그램의 해석 결과이며, 비교를 위해 동일한 문제에 대한 Emara-Shabaik *et al.*[1]의 해석 결과를 기호로 표시하였다. 두 해석 결과는 압력과 유량 모두에서 최대 1% 미만의 오차를 나타내는 것으로 확인되었으며, 본 해석 프로그램의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

Fig. 4에서 x/L 이 0.25, 0.5, 0.75인 세 지점에서의 압력은, 초기에 p_s 가 1.5 bar인 정상 상태에서 약 2500 s의

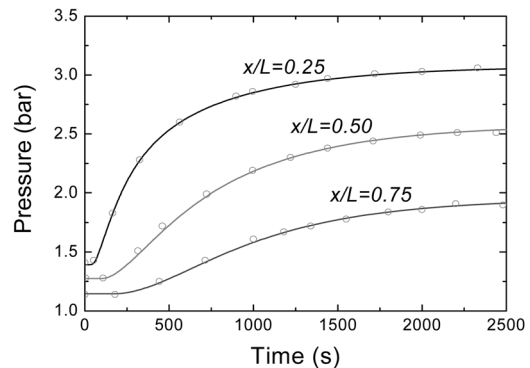


Fig. 4. Pressure histories in straight pipeline with constant demand flow rate (base case).

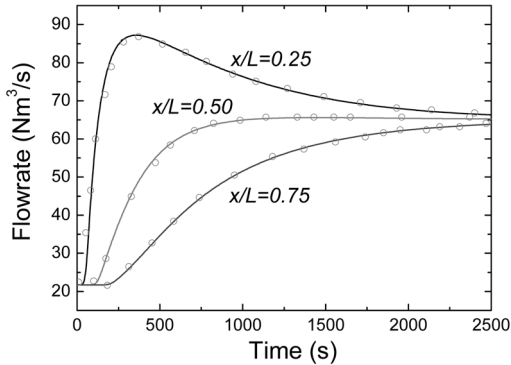


Fig. 5. Flow rate histories in straight pipeline with constant demand flow rate (base case).

과도 시간을 거쳐 3.5 bar의 p_s 에 대응되는 새로운 정상 상태에 도달하는 것을 관찰할 수 있다. 선형 배관의 길이가 90 km에 달하는 것을 고려하면, 압력파가 전파되는 데에만 300 s가 걸린다. 따라서 배관 내의 유동이 정상 상태에 도달하는 데 대략 10배 정도의 시간이 걸리는 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 유량은 시간에 따라 단조 증가하는 압력의 거동과는 다르게, x/L 이 0.25인 상류 근처에서는 증가한 후 감소하여 정상 상태에 도달하는 거동을 관찰할 수 있다. 이것은 선형 배관을 충전하기 위하여 초기에 상류 공급부 근처에서의 유량이 정상 상태보다 매우 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 선형 배관(변동 수요 유량)

Fig. 6과 Fig. 7은 선형 배관의 공급 압력이 3.5 bar로 유지되고 하류의 수요 유량 q_d 가 시간에 따라 변화하는 상황에 대한 배관망 해석의 결과를 보여주고 있다. 변

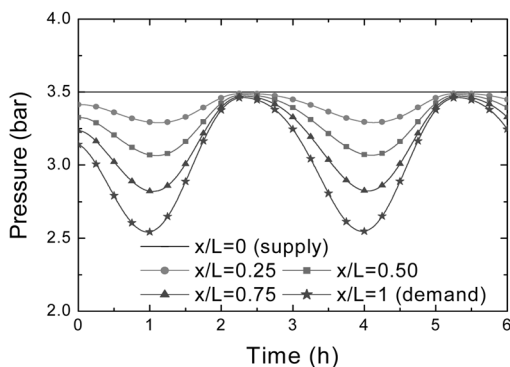


Fig. 6. Pressure histories in straight pipeline with varying demand flow rate $q_d(t)$.

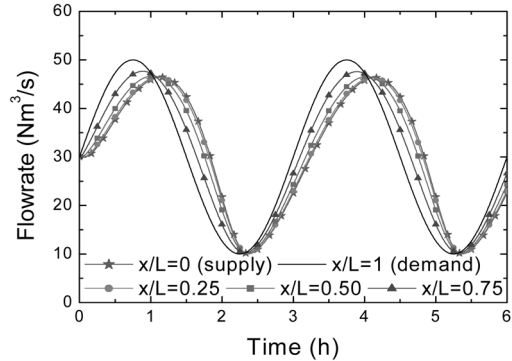


Fig. 7. Flow rate histories in straight pipeline with varying demand flow rate $q_d(t)$.

동 수요 유량은 주기가 3 h인 sine 파형으로 가정되었으며, 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$q_d(t) = 30 + 20\sin\left(\frac{2\pi t}{3}\right) \text{ Nm}^3/\text{s} \quad (16)$$

위의 수요 유량 q_d 의 형태는 Fig. 7에서 기호 없는 실선(demand)으로 표시되어 있으며, 해석 시간은 sine 파형의 2주기에 해당하는 6 h로 설정하였다.

Fig. 6은 선형 배관에서의 수요 유량 변동에 따른 선형 배관 내 다섯 지점의 압력 거동을 보여준다. 우선 공급 압력이 3.5 bar로 유지됨을 기호가 없는 실선(supply)으로 확인할 수 있다. 각 위치에서의 압력은 수요 유량 q_d 가 sine 파형을 따라 증가될 때 낮아지며, 인접한 두 지점 간의 압력차는 증가된 유량을 유동시키기 위하여 커진다. 따라서 선형 배관 내의 압력은 시간에 따라 sine 파형과 유사한 형태로 증가와 감소를 주기적으로 반복한다.

Fig. 7은 수요 유량의 변동에 따른 선형 배관 내의 각 지점에서의 시간에 따른 유량의 거동을 보여준다. 각 지점에서의 유량은 일정한 위상각을 가지고 증가 또는 감소를 반복하는 것이 관찰되는데, 이것은 배관 내의 압력파 및 유량파의 전달 속도가 음속으로 유한하기 때문이다. 따라서 하류 측의 수요 유량의 증가 또는 감소가 상류 측까지 전달되는 데 일정한 시간이 걸리고 그 이후에 상류 측의 유량의 증가나 감소가 나타난다.

3.3. 단순 배관망

Fig. 8과 Fig. 9는 Fig. 3의 단순 배관망에 대한 압력 및 유량의 해석결과이다. 공급부의 압력 p_{s1} 은 2.5 bar로 유지되는 상태에서, 수요부의 수요 유량 q_{d2} 와 q_{d3} 는 Table 2의 스케줄에 따라 변화된다. 시간에 따른 수요

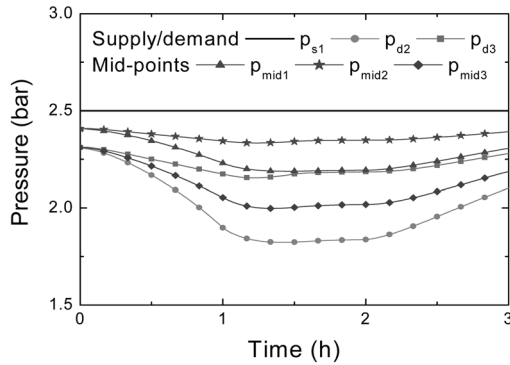


Fig. 8. Pressure histories at supply and demand locations in simple pipeline network.

유량의 변화는 Fig. 9에서도 확인할 수 있다. 수요부(2)에서는 수요 유량 q_{d2} 가 크게 증가하였다가 일정하게 유지된 후 감소하는 반면, 수요부(3)에서는 q_{d3} 가 작은 값으로 감소되어 일정하게 유지된다.

Fig. 8에서 시간에 따른 각 지점의 압력 변화를 보여주고 있다. 수요부(2)의 압력 q_{d2} 는 시간에 따라 감소하다가 일정하게 유지된 후 다시 증가하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 수요 유량이 증가하면 압력이 감소하고, 반대로 수요 유량이 감소하면 압력이 증가하는 일반적인 거동에 부합한다. 그러나 수요부(3)의 압력 p_{d3} 는 일반적인 거동과 반대로 유량이 감소함에도 압력이 함께 감소하는 결과를 나타낸다. 이는 수요부(2)와 (3)을 연결하는 선형 배관(3)이 존재하기 때문이다. q_{d2} 와 q_{d3} 를 합한 전체 수요 유량이 증가하므로 배관 (2)는 수요부(3)에서 요구하는 유량 q_{d3} 보다 많은 양을 전달한 후 나머지를 배관(3)을 통해 수요부(2)로 전달시키는 역할을 한다. Fig. 8에서는 각 선형 배관의 가운

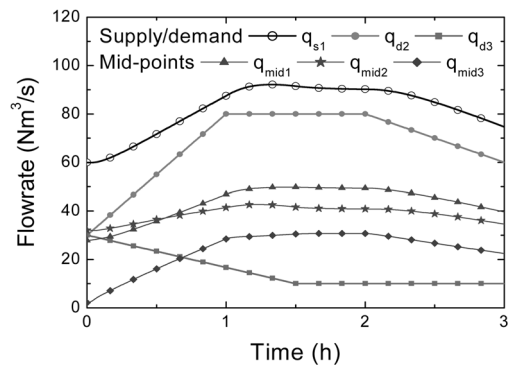


Fig. 9. Flow rate histories at mid-points of pipeline branches in simple pipeline network.

데 지점에서의 압력을 p_{mid1} , p_{mid2} , p_{mid3} 로 보여주고 있다. 예상할 수 있듯이 이 압력은 각 배관 말단부의 두 압력의 평균과 거의 비슷한 것으로 관찰된다.

Fig. 9는 배관망의 공급부, 수요부 및 선형 배관의 중심 지점에서의 유량 변동을 보여주고 있다. 공급 유량 q_{s1} 은 총 수요 유량 $q_{d2} + q_{d3}$ 와 거의 동일하게 증가 또는 감소하지만 수요 유량의 변화에 대하여 약간의 지연 시간 또는 위상각을 가지고 변화함을 관찰할 수 있다. Fig. 9에서는 각 선형 배관의 가운데 지점에서의 유량 p_{mid1} , p_{mid2} , p_{mid3} 를 보여주는데, 이는 각 배관을 따라 흐르는 평균적인 유량으로 간주할 수 있다. 앞서 살펴본 것처럼 선형 배관(2)를 흐르는 유량 q_{mid2} 는 수요부(3)의 수요 유량 보다 크며, 그 차이인 $q_{mid2} - q_{d3}$ 는 배관(3)을 따라 수요부(2)로 흐르는 유량 q_{mid2} 와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 압축성 유체의 관내 유동에 대한 지배방정식과 유한체적법에 기초하여 배관망 해석 프로그램 개발하였다. 선형 배관 및 단순 배관망 등 다양한 모델 배관망에 대하여, 공급 압력 또는 수요 유량의 변화에 따른 배관 내의 유동의 과도 상태를 해석하고 압력과 유량 변화를 예측하였다. 이를 통하여 본 해석 프로그램의 신뢰성을 검증하였으며, 실제 도시가스 배관망에의 적용 가능성을 평가하였다. 복잡한 배관망의 기하학적 연결과 공급부 및 수요부에서 측정된 운전 데이터를 활용한다면, 본 해석 프로그램은 실제 도시가스 배관망에 대한 정상 및 비정상 유동의 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국가스안전공사 주관, 에너지·자원기술개발위탁사업(과제번호: 2007-M-CC-23-P-03-3-010-2007)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Emara-Shabaik, H.E., Y.A. Khulief and I. Hussaini, "Simulation of Transient Flow in Pipelines for Computer-based Operations Monitoring", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **44**, 257-275, (2004)
- [2] Fukushima, K., R. Maeshima, A. Kinoshita, H. Shiraishi and I. Koshijima, "Gas Pipeline Leak De-

- tection System Using the Online Simulation Method”, *Comp. & Chem. Eng.*, **24**, 453-456, (2000)
- [3] Wang, S., H. Yang and H. Liu, “Design of the Gas Pipes Monitoring System Based on CompactPCI”, *Comp. Meas. & Cont.*, **14**, 358-359, 370, (2006)
- [4] 하종만, “배관망 해석의 이해와 활용”, *유체기계저널*, **6**, 90-98, (2003)
- [5] Benkherouf, A. and A.Y. Allidina, “Leak Detection and Location in Gas Pipelines”, *IEE Proceedings D-Control Theory & Appl.*, **135**, 142-148, (1988)
- [6] 하태웅, 하종만, 김동혁, 김영남, “저압확장파 검출을 통한 배관 누출 및 누출위치 예측”, *KIGAS*, **11**, 47-53, (2007)
- [7] Osiadacz, A., *Simulation and Analysis of Gas Networks*, Gulf Publishing, Houston, (1987)
- [8] Chaudhry, M.H., *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold, New York, (1987)
- [9] Munson, B.R., D.F. Young and T.H. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Dynamics*, Wiley, New York, (2004)
- [10] Ke, S.L. and H.C. Ti, “Transient Analysis of Isothermal Gas Flow in Pipeline Network”, *Chem. Eng. J.*, **76**, 169-177, (2000)