

모델링과 검증에 의한 파이프 라인 시스템의 유출 탐지

Leakage Detection of Pipeline System Based on Modeling and Identification

◦ 이주형* · 이광순* · 여영구** · 송형근**

(J. H. Lee, K. S. Lee, Y. K. Yeo, H. K. Song)

* 서강대학교 화학공학과(Sogang Univ., Dept. of Chem. Eng.)

** 한국과학기술연구원 공정제어연구실(KIST, Process Control Lab.)

Abstract - This paper presets a leakage detection method based on modeling the leakage in pipeline systems. For gas pipeline systems, a method based on the state space model is suggested. For liquid pipeline systems, an experiment based on the static model equation was performed. In the experiment, it was possible to detect the leak and to diagnosis the leak situation within the error of $\pm 3\%$.

1. 서론

액체나 기체를 전송하는 파이프 라인에서의 원하지 않는 유출은 경제적인 측면에서의 손실은 물론이고 안전성, 환경오염 등의 문제를 야기시킨다. 따라서 유출여부의 판단과 유출위치를 신속하게 진단하는 것은 매우 중요하다.

파이프 라인 시스템으로부터 검출되는 신호가 이상을 보이는 경우 이것이 시스템 자체의 이상(유출)에 의한 것인지 단순히 잡음에 의한 것인지 판별하기가 상당히 어렵다. 이런 상황에서 작은 양의 유출까지도 검출하기 위해서는 시스템의 작은 신호의 변화도 잡음과 구별하여 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

유출의 존재가 판명된 경우 유출되는 장소 및 규모, 그리고 발생 시간 등의 신속한 진단은 그 유출에 의한 손실을 규명하고 더 이상의 유출을 방지 하기 위하여 필수적이다.

본 연구에서는 파이프 라인의 모델을 근거로 하여 유출 상태를 진단하는 방법을 제안하였으며 액체 파이프 라인을 대상으로 한 실험에 있어서는 유출의 판명과 분석을 위하여 파이프 라인의 임의의 부분에 밸브를 설치하여 유

출을 고의로 발생시키는 방법을 이용하였다. 실험 장치는 작은 직경의 동파이프와 물 저장 탱크, 절대 압력 변환기, 상대 압력 변환기 그리고 80286 PC로 구성되어 있다. 실험에서 특히 어려운 점은 시스템을 판단하기 위한 감지기를 시스템 전체에 고르게 분포시킬 수 없다는 것이다. 한정된 부분(파이프의 입구와 출구)에 감지기를 설치하고 여기로부터의 신호에 의하여 시스템 전체를 판단할 수 있어야만 하였다.

파이프 라인에서의 유출을 진단하는 방법에는 여러가지가 있는데(Billmann and Isermann, 1984) 어느 경우건 유출발생의 정확한 감지와 유출 지점의 신속하고 정확한 진단을 수행할 수 있어야 한다. 유출 발생의 정확한 감지를 위해서는 측정된 신호의 적절한 분석이 매우 중요하며 유출지점의 진단은 파이프라인에 대한 수학적 모델이 융합으로써 가능하다.

2. 신호 분석에 의한 유출여부의 판단

기본적으로 유출은 파이프라인의 입구와 출구의 유량 차이로 부터 판명이 가능하다. 그러나 어떤 한 순간에서의 유량차이는 감지기에서의 오차와 잡음 등으로 유출 발생 여부와 관계없이 발생할 수 있다. 감지기에서의 오차는 신호를 분석, 처리함과 동시에 검량을 계속적으로 반복함으로써 줄일 수 있다. 잡음으로 인한 유량 차이와 유출에 의한 유량 차이는 다음과 같은 방법으로 구분이 가능하다.

잡음이 평균이 0인 백색잡음인 경우 한순간에서의 잡음에 의한 값은 크게 변할 수 있다. 그러나 일정 기간 동안 누적된 잡음의 평균값은 0에 가까운 값을 가지게 된다. 그러므로 잡음이 존재하더라도 입구와 출구의 유량차이를

일정기간 누적시켜 평균을 구하면 다음과 같이 잡음이 어느정도 배제된, 유출에 의한 유량의 차이만을 필터할 수 있다.

$$\hat{\Delta q}(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Delta q(k) \quad (1)$$

이렇게 구한 유량차에 특정 한계치를 두어 유출 존재를 판별할 수 있는데 이 때 변수의 절대 값보다는 입구 유량에 대한 비를 이용하는 것이 일반적이며 다음의 관계가 만족되면 경보가 울리게 된다.

$$\frac{\hat{\Delta q}(k)}{q_0(k)} > \Delta q_{PE} \quad (2)$$

3. 수학적 모델에 기초한 유출 지점의 진단

파이프라인의 특성을 수학적으로 나타내기 위해서는 모델턴 및 물질 수지식이 필요하다. 수지식을 구성하기 위하여 파이프라인의 미소 길이 dz 를 대상부피로 취하고 관의 흐름은 난류(조작범위 : Reynolds Number > 5000)이며 관의 직경은 일정하다고 가정하였다. 대상부피에서 물질 수지식과 모델턴 수지식을 구성하고 관의 내부를 흐르는 유량과 유속과의 관계를 첨가하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{2A^2 \rho} \frac{\partial q^2}{\partial z} = -\rho g \sin \theta - \frac{2fq^2}{D\rho A^2} \quad (4)$$

위의 식(4)에서 마찰인자는 난류인 경우 식(5)와 같은 von Kármán식을 사용할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.07 \log(N_{Re} \sqrt{f}) - 0.60 \quad (5)$$

파이프라인에서 측정 데이터는 일반적으로 입구와 출구의 유량과 압력이므로 식(4)에서 밀도에 관한 항을 압력에 관한 항으로 치환시킬 필요가 있다. 이는 이상기체 방정식을 사용함으로써 가능하다. 등온임을 가정하고 결과를 정리하면 다음과 같이 두개의 수지식이 얻어진다.

$$e_1 \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$e_2 \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + e_3 \frac{q}{P} \frac{\partial q}{\partial z} = e_4 P + e_5 \frac{fq^2}{P} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)을 풀기위하여 유한 차분법을 도입하였다. 이를 위하여 파이프라인 시스템을 다음의 그림1과 같이 N개의 구간으로 나누고 다음과 같은 식(8)의 근사관계를 이용하였다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{z+1,k} &= \frac{P_{z+1,k+1} - P_{z+1,k}}{\Delta t} \\ \left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z,k} &= \frac{q_{z+2,k} - q_{z,k}}{2\Delta z} \\ \left. \frac{\partial q}{\partial t} \right|_{z,k} &= \frac{q_{z,k+1} - q_{z,k}}{\Delta t} \\ \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{z+1,k} &= \frac{P_{z+3,k} - P_{z+1,k}}{2\Delta z} \end{aligned} \quad (8)$$

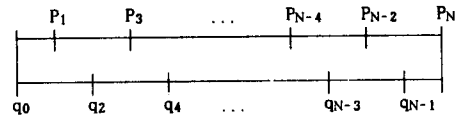


Fig.1. Discrete state representation of the pipeline.

식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면 식(9)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} P_{z+1,k+1} &= P_{z+1,k} + c_1 q_{z+2,k} + c_2 q_{z,k} \\ q_{z,k+1} &= v_1 q_{z,k} + c_3 P_{z+3,k} + c_4 P_{z+1,k} + v_2 q_{z+2,k} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 z 에 0 부터 N 까지의 값을 대입하여 정리하면 다음과 같은 비선형 상태공간 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} X^{k+1} &= A(X^k) X^k + B(X^k) U^k \\ Y^{k+1} &= C X^{k+1} \end{aligned} \quad (10)$$

파이프 라인 시스템을 N 등분하여 각 부분의 상태를 상태 변수로 취하였으므로 입력 데이터 U와 출력 데이터 Y로부터 상태변수를 관측하면 이 값이 곧 시스템 전체를 나타내 주는 양이 된다.

유출은 그림 1의 특정한 한 구간에서 발생하므로 다른 구간에서는 식(3)과 (4)가 만족되어야 하며 유출 발생 구간에서는 유출에 의한 항이 이 식들에 첨가되어야 한다. 유출에 관한 정보는 미지이므로 수지식에 특정한 형태로 첨가시키기는 불가능하다. 따라서 유출 정보를 직접 수지식에 첨가시키기 보다는 완성된 상태 공간 방정식(10)에 다음의 식(11)과 같이 미지의 벡터 D_k 을 첨가하고 이 벡터를 추적하여 유출을 진단하는데 이용하는 방법을 생각할 수 있다. 특정 구간에서의 유출은 그 구간에서의 상태변수에 직접적인 영향을 미치므로 이 방법은 타당성이 있다.

$$\begin{aligned} X^{k+1} &= A(X^k) X^k + B(X^k) U^k + D_L q_L \\ Y^{k+1} &= C X^{k+1} \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에서 벡터 D_L 의 요소들 가운데 유출 지점에 대응되는 것을 제외한 나머지 요소들은 모두 0의 값을 갖는다. 벡터 D_L 은 다음과 같이 상태변수를 치환한 상태 공간 방정식에서 상태변수를 관측함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X'^{k+1} &= A'(X'^k) X'^k + B'(X'^k) U^k \\ Y^{k+1} &= C' X'^{k+1} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{여기서 } X'^k = \begin{bmatrix} X^k \\ D_L \end{bmatrix}, \quad A'(X'^k) = \begin{bmatrix} A(X^k) & q_L \\ 0 & I \end{bmatrix},$$

$$B'(X'^k) = \begin{bmatrix} B(X^k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{그리고} \quad C' = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

위에서 0은 식의 차원을 일치시키면서 모든 요소를 0으로 갖는 행렬이다.

4. 액체(물) 파이프라인에 대한 적용

압축성이 강한 기체는 신호의 전달 속도가 현저하게 느리다. 예로써 기체가 수송되는 파이프라인의 경우 입구에서의 어떠한 변화는 그 즉시 출구에 전달되지는 않는다. 일단 관의 내부에서 기체의 밀도가 변하고 이 밀도의 변화가 출구까지 전달되어 비로소 출구에서 그 변화를 감지할 수 있게 된다. 또한 관의 내부에서는 시간에 따른 압력분포의 변화 및 밀도분포의 변화가 존재 하게 된다. 이 때문에 기체 수송관에서의 유출 진단은 공간 상태 방정식과 같은 동적 모델을 이용하여 탐지하여야 한다.

반면에 비압축성이 강한 액체인 경우에는 시간에 따른 변화 속도가 매우 빠르다. 즉 파이프라인 입구에서의 변화는 짧은 시간 내에 출구에서의 변화를 초래한다. 마찬가지로 관의 특정부위에 유출이 발생한 경우 그 영향은 즉시 입구와 출구에 전달된다. 이는 액체의 밀도의 변화가 매우 작기 때문이다. 또한 특정 시간에 관의 내부에서의 밀도분포의 변화가 거의 존재하지 않으며 압력 분포의 변화만이 존재하게 되므로 액체 수송관에서는 정적 모델을 이용함으로써 효과적으로 유출을 탐지할 수 있다.

액체를 수송하는 파이프 라인에서의 유출을 진단하기 위하여 정적 물질 수지식을 세워보면 식(3)에서 시간에 대한 미분항이 무시되므로

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0 \Rightarrow q = \text{constant} \quad (13)$$

이 관계를 다시 식(4)의 모멘텀 수지식에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \frac{2fq^2}{D\rho A^2} - \rho g \sin\theta \quad (14)$$

위의 식(14)는 일반적인 파이프라인에 대한 식이다. 이 식에서 중력 가속도, 마찰계수, 점도 그리고 밀도등은 실험 조건과 시스템에 따라서 오차를 포함할 수 있으므로 특정한 파이프라인에 대하여는 약간의 보정이 필요하다. 따라서 식(14)를 보정시킨 다음의 식이 보다 유용하게 사용될 수 있다.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \frac{2\alpha fq^2}{D\rho A^2} - \rho g \sin\theta \quad (15)$$

식(13)을 바탕으로 식(15)를 전체 파이프 라인 길이에 대하여 적분하면

$$\frac{P_N - P_0}{z_L} = - \frac{2\alpha fq^2}{D\rho A^2} - \rho g \sin\theta \quad (16)$$

의 결과를 얻는다. 식(16)에서 보정항 α 는 유출이 없는 정상 상태에서 보정하여 줄 수 있다.

위의 식들로부터 유출을 판단하는 방법은 유량을 이용하는 방법과 압력을 이용하는 방법의 두가지를 생각할 수 있다. 유량을 이용하는 방법은 앞에서 언급한 누적에 의한 방법을 도입할 수 있다. 압력을 이용하는 방법에서는 식(16)을 바탕으로 다음 식과 같은 관측함수를 이용한다.

$$P_0 = P_N + \frac{2\alpha fq^2}{D\rho A^2} z_L + \rho g \sin\theta z_L \quad (17)$$

즉 위의 관측함수의 값과 입구의 측정압력과의 차이로부터 유출의 존재를 판단하게 된다.

식(16)을 이용하여 특정 위치(L_L)에서 유출이 발생한 경우의 모델을 구성하여 보면 다음의 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{P_L - P_0}{L_L} &= - \frac{2\alpha f_0 q_0^2}{D\rho A^2} - \rho g \sin\theta \\ \frac{P_N - P_L}{z_L - L_L} &= - \frac{2\alpha f_N q_N^2}{D\rho A^2} - \rho g \sin\theta \end{aligned} \quad (18)$$

위의 식을 이용하면 유출 지점은 다음의 식(19)와 같이 계산된다.

$$L_L = \frac{D\rho A^2(P_N - P_0) + 2\alpha f_N q_N^2 z_L + D\rho^2 A^2 g \sin\theta z_L}{2\alpha(f_N q_N^2 - f_0 q_0^2)} \quad (19)$$

유출 지점의 관 내부의 압력 P_L 은 식(19)를 이용하여 식(18)로부터 쉽게 계산할 수 있다.

5. 실험

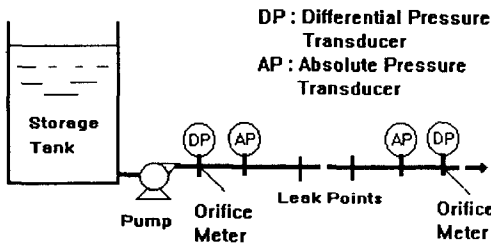


Fig. 2. Experimental pipeline system.

물이 통과하는 파이프 라인에서의 유출 실험을 위하여 길이 97.6m, 내경 3/8inch의 동파이프를 설치하고 물을 흘려 보내면서 유출 진단 실험을 행하였다. 실험장치는 그림 2에 보인 바와 같다. 저장탱크에 있는 물을 펌프를 이용하여 파이프 라인으로 흘려 보내면서 파이프 라인의 입구와 출구의 양단에 설치된 압력계와 유량계를 이용하여 각각의 위치에서 압력과 유량을 측정하였다. 유출은 입구의 압력계로부터 각각 45m 지점과 69.3m 지점에서 발생하도록 하였다.

측정 데이터는 입, 출구의 압력과 유량이다. 실험은 유출없이 정상상태에서 유량을 변화시키면서 측정하다가 어느 순간 유출을 발생시키고 데이터를 측정하는 식으로 수행하였다. 보정항 α 는 정상상태 운전시 계산된다.

측정 데이터중 압력은 파이프 라인의 모델식 (21)에서와 같이 선형적으로 변화하므로 계기를 검량(Calibration)하지 않고 눈금값을 직접 사용하였다. 여기서 발생하는 오차는 선형적으로 구성된 보정항 α 에 의해 보정되므로 문제가 되지 않는다. 유량은 모델식에서 비선형적으로 변화되므로 정확한 검량이 필요하였다.

실험에 있어서는 시간에 따른 유량의 변화 및 압력의 변화 그리고 시간에 따른 유출 발생위치의 진단등을 각각 조사하였다. 시간의 단위는 임의로 정할 수 있는데 본 실험에서는 데이터를 한번 읽어 들이는 간격으로 하였다.

6. 실험 결과

두 종류의 유출에 대한 진단 결과는 그림3에서 그림10까지를 바탕으로 도출되었으며 유출의 판단은 1%이상으로 하였다. 그 결과 45m에서 시간단위 93시각의 실제 유출에 대하여는 47.6m에서 시간단위 103시각에 6.0% 유출이 발생한 것으로 진단되었다. 또 69.3m에서 시간단위 82시각의 실제 유출에 대하여는 71.8m에서 시간단위 95시각에 3.6% 유출이 발생한 것으로 진단되었다.

유출 시각의 진단이 실제의 유출 시각에 비하여 늦은 이유는 소량의 유출을 진단하기 위하여 유출을 누적시켰기 때문이다. 오히려 계산에 의한 위의 결과보다는 입구와 출구의 유량차이와 관측합수와 입구의 측정 압력과의 차이를 추적한 그림3과 7 그리고 그림5와 9로부터 판단하는 것이 실제 유출 시각에 더 접근되리라 보여진다. 입구와 출구의

유량차이는 그림3과 그림7에서와 같이 매우 현저하게 나타남을 볼 수 있다. 유출이 발생할 경우 입구의 유량은 증가하고 출구의 유량은 감소하는 현상을 보였다. 누적을 이용한 방법으로 유출을 판단하여 도시한 그림4와 그림8에서는 소량의 유출도 쉽게 찾아낼 수 있었다.

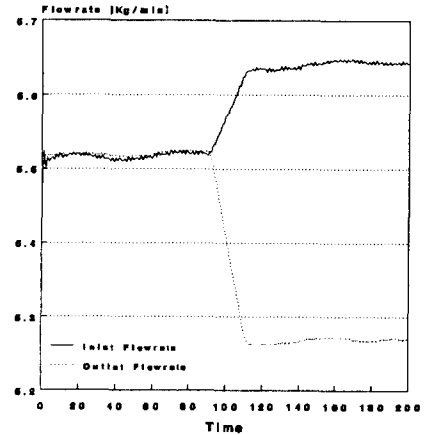


Fig. 3. Flowrate history.

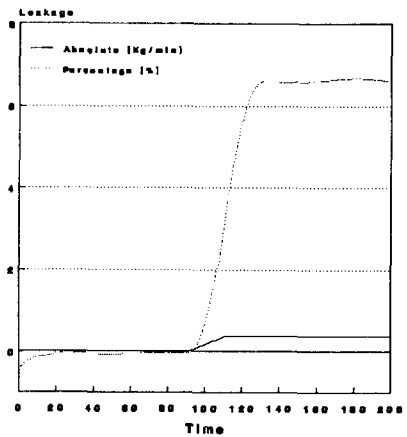


Fig. 4. Leakage amount.

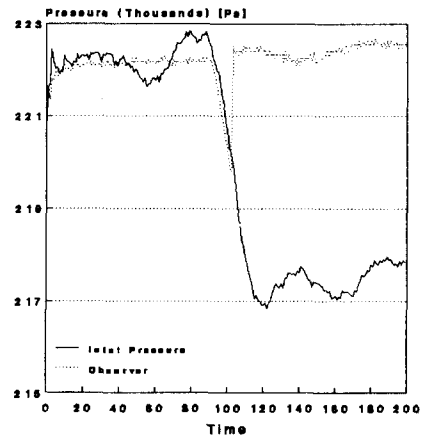


Fig. 5. Inlet pressure and observer.

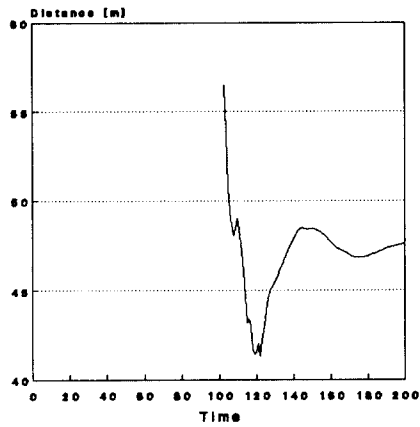


Fig. 6. Leakage location from inlet pressure gauge.

Fig. 3., Fig. 4., Fig. 5., Fig. 6. Diagnosis results for leakage at 45m.

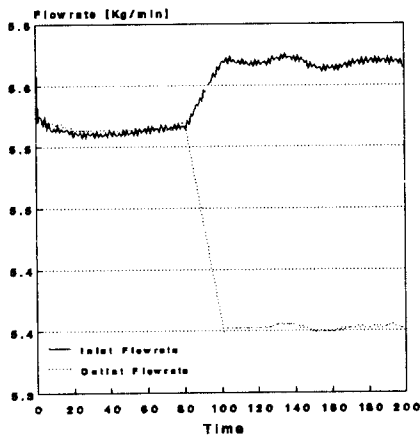


Fig. 7. Flowrate history.

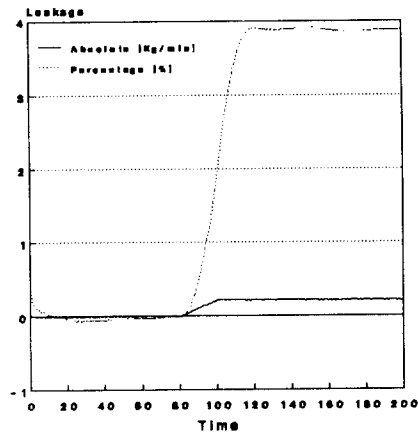


Fig. 8. Leakage amount.

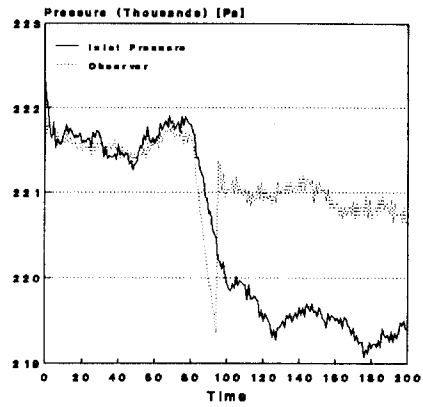


Fig. 9. Inlet pressure and observer.

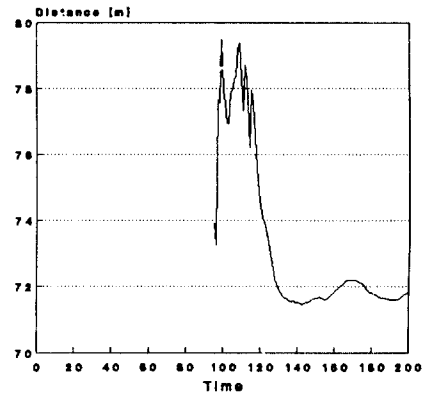


Fig.10. Leakage location from inlet pressure gauge.

Fig. 7., Fig. 8., Fig. 9., Fig.10. Diagnosis results for leakage at 69.3m.

7. 결론

파이프 라인에서의 이상중 하나인 유출에 대하여 유출을 판단할 수 있는 방법과 유출 위치를 진단할 수 있는 방법을 개발하였다. 유출의 판단은 누적에 의한 방법을 사용하였고 유출 위치의 진단은 모멘텀 수지식과 물질 수지식을 이용하였다. 또한 유출의 판단에 쓰인 누적에 의한 방법이 누적하는 데이터의 양이 많을수록 유출 존재의 정확한 판단이 가능하지만 유출 시각을 뒤늦게 판단하므로 유출 시각의 정확한 판단을 위하여 관측함수를 구성하였다. 유출 지점의 진단은 유출이 없는 정상상태의 데이터를 필요로 하였다. 정상 상태의 데이터가 정확할수록 진단 지점은 정확하였다. 실험실 규모의 액체 파이프 라인에 대하여 개발한 위의 방법들을 직접 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

8. 참고 문헌

- 1) R. Isermann, *Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Method-A Survey*, Automatica, 20, 387, 1984.
- 2) L. Tao and C. Fang, *Diagnosis of a Class of Faults in Distributed Parameter Systems*, 10th IFAC, 3, 80, 1987.
- 3) L. Zhi, *Fault Diagnosis of Dynamic System by Means of Parameter Estimation*, 11th IFAC, 1602, 1988.
- 4) E. B. Wilie, *The Microcomputer and Pipeline Transients*, J. of Hydraulic Engineering, 109, 1723, 1983.
- 5) L. Billmann and R. Isermann, *Leak Detection Method for Pipeline*, Proceedings of the 9th IFAC Congress, Budapest, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- 6) R. Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena," John Wiley & Sons, 1960.
- 7) W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriott, "Unit Operations of Chemical Engineering," McGraw-Hill, 1985.
- 8) J.S. Meditch, "Stochastic Optimal Linear Estimation and Control," McGraw-Hill, 1969.
- 9) R.W. Hornbeck, "Numerical Methods," Prentice-Hall, 1975.
- 10) G.D. Smith, "Numerical Solution of Partial Differential Equations," Oxford University, 1978.
- 11) S.J. Farlow, "Partial Differential Equation for Scientists & Engineers," John Wiley & Sons, 1982.
- 12) J.M. Smith, H.C. Van Ness, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics," McGraw-Hill, 1987.
- 13) K.J. Astrom, B. Wittenmark, "Computer Controlled System," Prentice-Hall, 1990.
- 14) K.J. Astrom, B. Wittenmark, "Adaptive Control," Addison-Wesley, 1989.