HWAHAK KONGHAK Vol. 30, No. 5, October, 1992, pp. 526-536
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

모델링과 검증에 의한 파이프 라인 시스템의 유출 탐지

이주형 · 여영구* · 송형근* · 이광순

서강대학교 화학공학과
*한국과학기술연구원 공정제어연구실
(1991년 9월 19일 접수, 1992년 8월 1일 채택)

Leakage Detection of Pipeline System Based on Modeling and Identification

Joo-Hyeong Lee, Yeong-Koo Yeo*, Hyung-Keun Song* and Kwang-Soon Lee

Department of Chemical Engineering, Sogang University
**Process Control Laboratory, Korea Institute of Science and Technology*
(Received 19 September 1991; accepted 1 August 1992)

요 약

파이프 라인에서의 유출을 진단하기 위하여 모델에 기초한 방법을 개발하였다. 파이프 라인에서 액체가 이송되는 경우에 대한 일반적인 모델에 기초하여 유출이 발생하는 경우 이를 판단하고, 그 위치를 찾아내는 방법을 구성하였다. 길이 97.6 m, 내경 3/8"의 파이프 라인에서 물을 이송하여 실험을 수행한 결과, 약 3% 이상의 유출이 발생할 경우 유출 여부를 감지할 수 있었으며 유출량에 따라 최대 3% 이내의 정밀도로 유출 위치를 진단해 낼 수 있었다.

Abstract—A leakage detection method based on a physical model of a pipeline system is proposed. Based on fundamental balance equations for liquid transporation in a pipeline, the method was constructed to diagnose the leak point as well as to detect the leakage. The proposed method was evaluated in a water transporting pipeline system of which the length is 97.6 m and inner diameter is 3/8", respectively. As a result, the method could discriminate the leakage whenever the leaking rate is more than 3% of the total flowrate and localize the leaking point within 3% of accuracy depend on the leaking rate.

1. 서 론

액체나 기체를 전송하는 파이프 라인에서의 원하지 않는 유출은 경제적 측면에서의 손실은 물론이고 안전, 환경오염 등의 문제를 야기시킨다. 현재 국내에는 상수도관이 매우 광범위하고 복잡하게 구성되어 있으며 지역에 따라서는 도시 가스관, 유류 수송관 등도 설치되어 있다. 따라서 이러한 파이프 라인에서의 유출에 대한 조기진단은 앞으로 더욱 중요한 문제로 인식되어질 것이다.

파이프 라인에서의 이상진단은 다음과 같은 특성을 고려하여야 한다. 즉 파이프 라인은 분산 매개변수 시스템(distributed parameter system)이지만 일반적으로 감지기를 조밀하게 설치할 수 없다. 입구와 출구 등의 한정된 부분만의 감지기를 사용하여 시스템으로부터 필요한 정보를 도출할 수 있어야만 한다. 또한 일반적인 다른 공정들에 비하여 넓은 공간에 걸쳐 있으므로 외부와 내부로부터 미지의 잡음에 의한 영향으로 시스템

으로부터의 신호가 왜곡되어 측정될 수 있다. 특히 미세한 이상이 발생한 경우는 이상에 의한 신호가 잡음에 의한 신호와 뒤섞여 구분하기가 쉽지 않다.

이러한 이유로 파이프 라인에서의 이상은 입구와 출구만의 감지기로부터의 신호에 의하여 감지된다. 그리고 검출된 신호가 이상을 보이는 경우 이것이 시스템 자체의 이상(유출 등)에 의한 것인지 단순히 잡음에 의한 것인지를 판별하는 방법이 필요하다. 신호에 이상이 생길 때마다 경보를 울린다면 그 이상이 잡음에 의한 경우이면 불필요한 혼란만이 야기될 것이다. 이상의 존재가 판명된 경우 이상 발생의 장소 및 규모, 그리고 발생 시간 등의 신속한 진단은 그 이상에 의한 손실을 규명하고 더 이상의 손실을 방지하기 위하여 필수적이다.

파이프 라인에서의 이상진단은 원하지 않는 유출의 진단, 내경 감소의 진단, 그리고 유출 발생의 경우 유출 확산 지역의 예측 등에 대한 연구 결과들이 발표되고 있다. 유출 진단은 수지식, 충격파, 이상모델 필터, 이상감지 필터 등을 이용하는 방법과 매개변수의 변화를 추적하여 이상의 존재 여부를 판단하고 이상이 발생한 경우에 이상 발생 위치를 진단하는 방법 등이 있다[1, 5]. 냉각, 비틀림, 파라핀 침전 등에 의한 내경 감소의 진단은 'Fault Zone'이라는 새로운 개념을 도입하여 파이프 라인의 내경이 감소하는 경우에 이것을 판단하고 크기, 위치 등을 진단하였다[2]. 유출 확산 지역의 예측은 기체 파이프 라인에서 유출이 발생한 경우에 발생 지역과 규모 등을 통계적인 개념과 경험식에 바탕을 두고 예측을 수행하는 것이다[7]. 그밖에 파이프 라인을 구성하는 펌프, 감지기 등에서의 이상진단도 연구 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 파이프 라인에서의 이상 중 하나인 유출을 진단하기 위하여 물리적 모델을 이용하는 방법을 제안하였다. 파이프 라인으로부터의 잡음이 포함된 신호에서 참 신호를 구분하기 위하여 적절한 필터링을 구사하였으며, 유출 발생의 정확한 판단을 위한 방법을 시도하였다. 또한 유출 발생 지점을 모델링하여 2차적으로 발생하는 유출에 대비하였고, 2차적으로 유출이 발생할 경우 이를 판단하고 유출 발생 위치를 진단하였다. 액체 파이프 라인을 대상으로 이와 같은 방법들을 적용한 실험으로 유출 발생의 판단과 유출 발생 위치의 진단이 가능함을 검증하였다.

2. 파이프 라인 시스템의 유출 진단 방법의 유형

파이프 라인에서의 유출을 진단하는 방법은 파이프 라인을 흐르는 유체의 종류에 따라서 적절하게 선택되어야 한다. 유체가 비압축성이 강한 액체인 경우는 파이프 라인을 정적인 상태로 가정하고 정적 모델을 사용하는 것이 비교적 타당하며, 압축성이 강한 기체인 경우는 파이프 라인을 동적인 상태로 가정하고 동적 모델을 이용하는 것이 타당하다. 어느 경우의 유출 진단이든지 신속하고 정확하게 유출 발생을 판단하고 유출 발생 지점을 진단할 수 있어야 한다.

2-1. 수지식에 의한 방법

대상 파이프 라인에 대한 수지식을 이용하면 직접적으로 유출 발생 여부와 유출량을 판단할 수 있다. 기본적으로 식 (1)과 같은 입구와 출구에서의 유량 차이가 유출에 대한 정보를 제공하여 준다[1].

$$q_L(k) = q_0(k) - q_N(k) \tag{1}$$

그러나 이러한 방법은 파이프 라인이 외부로부터의 잡음이나 고유의 동특성에 의하여 쉽게 영향을 받게 되므로 유출량이 많을 때에는 효과적이지만, 유출량이 적을 때에는 유량 차이가 잡음 등의 신호에 흡수되어 효과적이지 못하다. 또한 이 방법으로는 유출 발생 위치의 진단이 불가능하다.

2-2. 충격파에 의한 방법

파이프 라인에서의 갑작스러운 다량의 유출은 충격파를 발생시켜 파이프 라인을 통하여 입·출구에서의 신호에 영향을 미치게 된다. 이에 따라 유발되는 입·출구에서의 압력변화로 유출의 존재를 판단하고 충격파의 전개속도에 의하여 유출 발생의 위치를 진단할 수 있다[5].

2-3. 이상 모델 필터에 의한 방법

파이프 라인 자체의 모델과 유출 발생 모델이 구성된 경우 상태변수의 재배치 혹은 이산 시간대의 상태변수 필터에 의하여 유출 발생 모델 내에서의 유출의 영향을 나타내는 벡터를 추정할 수 있다. 잡음이 포함된 상태에서 이러한 정보를 추정하기 위하여 서로 다른 유출 발생 위치에 대한 'Bank of filters'가 사용될 수 있다[5]. 이 방법은 기체와 같이 압축성이 강한 유체에 대하여 적당하다. 단점은 계산량이 많아 유출에 대한 빠른 진단이 어렵다는 것이다.

2-4. 이상 감지 필터에 의한 방법

이상 모델 필터와는 달리 이상 감지 필터는 신호의 측정값과 추정값과의 차이를 추적한다. 유출이 발생할 경우 이 차이는 미리 결정되어진 방향으로 변하게 된다.

그러나 상태변수 필터가 유출의 영향을 어느 정도 상쇄시키기 때문에 유출 발생 경보가 지연된다[5].

3. 신호 분석에 의한 유출여부의 판단

유출 발생 위치의 진단에 앞서 필수적으로 선행되어야 하는 것이 유출 존재의 판단이다. 유출 존재의 판단은 유출이 없는 상태와 유출이 발생한 상태를 뚜렷하게 구분하는 과정이다. 유출이 존재하지 않은 상태에서 유출 발생에 대한 오경보는 혼란과 그릇된 진단 결과를 야기시키고, 유출이 존재하는 상태에서 그 존재를 판단하지 못하면 이후의 유출에 대한 대비를 할 수 없다.

3-1. 1차 저역필터에 의한 방법

기본적으로 파이프 라인에서의 유출 발생은 식 (2)와 같이 입구에서의 유량과 출구에서의 유량과의 차이를 이용하여 판단할 수 있다. 즉, 유량차 $\Delta q_L(k)$에 식 (3)과 같이 일정한 경보 발단치 Δq_{LA}를 두어 유출의 존재를 판단하는 것이다.

$$\Delta q_L(k) = q_0(k) - q_N(k) \tag{2}$$

$$\Delta q_L(k) > \Delta q_{LA} \tag{3}$$

그러나 이 방법은 측정 신호에 남아 있는 고주파수 성분이 서로 간섭하여 충분하게 여유있는 경보 발단치를 설정하는 것이 어렵다. 특히 소량의 유출이 발생한 경우는 유출이 없는 상태와 유출이 존재하는 상태를 확실히 구분짓지 못할 수도 있다.

좀더 안정적인 경보 발단점을 위하여 위의 유량차 $\Delta q_L(k)$에 식 (4)와 같이 저역필터를 적용하는 방법을 생각할 수 있다.

$$\Delta q_L^*(k) = \lambda_L \Delta q_L^*(k-1) + (1-\lambda_L)\Delta q_L(k) \tag{4}$$

이렇게 필터된 $\Delta q_L^*(k)$에 특정 한계치를 두어 유출의 존재를 판단할 수 있는데, 변수의 절대적인 값보다는 입구 유량에 대한 비를 이용하는 것이 일반적이며 식 (5)가 만족되면 유출의 존재를 판단한다.

$$\frac{\Delta q_L^*(k)}{q_0(k)} > \Delta q_{LA}^* \tag{5}$$

3-2. Cross-correlation 함수를 이용한 방법[1]

파이프 라인이 정적으로 운전되어 유량이 유출 발생에 의하여만 변화하는 경우는 상대적으로 큰 경보 발단치를 설정하기 위하여 cross-correlation과 같은 특별한 방법이 도입될 수 있다. 이 방법은 유출이 발생하지 않은 상태의 유량을 기준으로 유출 발생 후의 입·출구의 유량 변화를 서로 cross-correlation시킨 것으로, 이 cross-correlate된 값으로 유출의 발생 여부를 판단하는 것이다. Cross-correlate는 식 (6)과 같이 시키며 순차적인 계산은 식 (7)과 같이 수행한다. 식 (7)에서 λ의 값이 클수록 $\Phi_{qq}(\tau, k)$의 값이 보다 더 안정적으로 계산되지만 유출을 뒤늦게 판단한다.

$$\Phi_{qq}(\tau) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} \Delta q_0(k-\tau)\ \Delta q_N(k) \tag{6}$$

$$\Phi_{qq}(\tau, k) = \lambda\Phi_{qq}(\tau, k-1) + (1-\lambda)\ [\Delta q_0(k-\tau)\Delta q_N(k)] \tag{7}$$

여기서 $\Delta q_0(k)$는 유출 발생 후의 입구 유량에서 유출이 없을 때의 입구 유량을 뺀 값으로 유량을 임의로 변화시키지 않은 정상상태의 운전의 경우에 양의 값을 갖는다. $\Delta q_N(k)$는 유출 발생 후의 출구 유량에서 유출이 없을 때의 출구 유량을 뺀 값으로 정상상태의 운전의 경우에 음의 값을 갖는다. 그러므로 이들 두 값을 cross-correlate시킨 Φ_{qq}의 값은 유출이 발생한 경우 음으로 증가하는 값으로 계산된다. 잡음 등의 효과를 더 줄이기 위해서 다음의 식 (8)과 같이 cross-correlate된 값을 평균으로 계산할 수 있다.

$$\Phi_{avg} = \frac{1}{2n+1}\sum_{\tau=-n}^{n} \Phi_{qq}(\tau) \tag{8}$$

유출이 발생하지 않은 경우 Φ_{avg}의 값이 0에 가까우므로 다음 식 (9)와 같은 경보 발단치의 설정이 비교적 안정적이고 유출의 존재를 명확하게 구분할 수 있다.

$$\Phi_{avg} < \Phi_{avgA} \tag{9}$$

3-3. 유출의 누적, 평균에 의한 방법

유출이 발생할 경우 이상적으로는 계속해서 입구 유량에 대한 일정한 비율로 유출이 진행될 것이다. 그러나 실제로 측정된 신호로부터 계산된 유출량의 비는 잡음 등의 영향으로 일정한 값에 머무르지 않는다. 이러한 유출량에 대하여 앞절과 같이 계산된 유출량에서 고주파수 성분을 제거하는 방법 외에, 발생된 유출량의 비가 일정하다는 가정으로 특정 시간 구간 동안 유출량의 비값을 누적시킨 후 평균을 구하는 식 (10)과 같은 방법을 생각할 수 있다. 식 (10)에서 Δq는 입구와 출구의 유량차이다. 이렇게 함으로써 어떤 한 순간에 발생할 수 있는 감지기에서의 오차와 잡음 등으로 인한 유량차이를 유출 발생으로 판단하는 오류를 피할 수 있다.

$$\frac{\Delta q^*(k)}{q_0(k)} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} \frac{\Delta q(k-n)}{q_0(k-n)} \tag{10}$$

위의 식에서 N의 값이 클수록 더욱 안정적인 경보 발단점을 취할 수 있지만 유출의 판단을 뒤늦게 하게 된다. 식 (11)과 같이 경보 발단점을 설정하여 유출을 판단할 수 있다.

$$\frac{\Delta q^*(k)}{q_0(k)} > \Delta q^*_{LA} \tag{11}$$

4. 파이프 라인의 수학적 모델링

유출 발생 지점을 진단하기 위하여는 파이프 라인의 특성을 수학적으로 표현하여야 한다. 파이프 라인의 수학적 표현은 일반적으로 물질 수지식, 모멘텀 수지식 그리고 에너지 수지식으로 가능하다. 그런데 유출 발생 지점의 진단에서는 파이프 라인의 전 구간에서 열의 출입을 무시하고, 위의 수지식 중에서 물질 수지식과 모멘텀 수지식만의 도입으로 충분하다. 수지식을 수립하기 위하여 파이프 라인의 미소길이 dz를 대상 부피로 취하고 파이프 라인은 전 구간에서 곧은 모양이라는 가정을 도입하였다.

파이프 라인의 내부에서 유체의 흐름은 난류(조작범위 : Reynolds Number>3000)이고 파이프 라인의 직경이 일정하다는 가정을 도입하고, 대상부피에 대하여 물질 수지식을 구성하면 다음의 식 (12)와 같다.

$$A\frac{\partial \rho}{\partial t} + A\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \tag{12}$$

모멘텀 수지식은 파이프 라인의 입구와 출구 사이의 높이차까지 고려하고 식을 구성하면 다음의 식 (13)과 같다.

$$A\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + A\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{A}{2}\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} = -\rho A g \sin\theta - A\frac{2f}{D}\rho v^2 \tag{13}$$

위의 두 수지식에서 유속에 대한 항을 유량에 대한 항으로 치환하고 정리하면 다음의 식 (14)와 (15) 같은 물질 수지식과 모멘텀 수지식이 각각 얻어진다.

$$A\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \tag{14}$$

$$\frac{1}{A}\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{2A^2\rho}\frac{\partial q^2}{\partial z} = -\rho g \sin\theta - \frac{2fq^2}{D\rho A^2} \tag{15}$$

식 (15)에서 마찰인자는 적절한 유량의 함수로 나타내어 계산할 수가 있다. 마찰인자는 일반적으로 Reynolds수의 함수로 나타내며 난류인 경우 식 (16)과 같은 von Kármán식의 적용이 가능하다[8].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.07\ \log(N_{Re}\sqrt{f}) - 0.60 \tag{16}$$

파이프 라인에서 측정 데이터는 일반적으로 입·출구의 유량과 압력이므로 식 (14)와 (15)에서 밀도를 다른 변수로 치환시켜야 한다. 파이프 라인의 내부를 흐르는 유체가 비압축성이 강한 액체인 경우 밀도를 일정한 상수로 취급할 수 있지만, 압축성이 강한 기체인 경우는 압력과 같은 변수로 치환이 가능하다. 기체인 경우 압력과 밀도와의 관계는 상태 방정식으로 표현할 수 있다. 파이프 라인의 운전 압력이 비교적 낮고 상온의 등온임을 가정하여 이상기체 상태 방정식을 적용하여 밀도를 압력으로 치환하면 다음의 식 (17), (18)과 같은 두 개의 수지식이 각각 얻어진다.

$$e_1\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \tag{17}$$

$$e_2\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + e_3\frac{q}{P}\frac{\partial q}{\partial z} = e_4 P + e_5\frac{fq^2}{P} \tag{18}$$

여기서 $e_1 = \frac{AM}{RT}$, $e_2 = \frac{1}{A}$, $e_3 = \frac{RT}{MA^2}$,

$$e_4 = -\frac{g\sin\theta M}{RT}, \quad e_5 = -\frac{2RT}{MDA^2}$$

5. 액체(물) 파이프 라인에 대한 적용

압축성이 강한 기체는 신호의 전달 속도가 현저하게 느리다. 예로써 기체가 수송되는 파이프 라인의 경우 입구에서의 어떠한 변화는 그 즉시 출구에 전달되지 않는다. 일단 파이프 라인의 내부에서 기체의 밀도가 변하고, 이 밀도의 변화가 출구까지 점차적으로 진행되어 비로소 출구에서 그 변화가 감지된다. 또한 시간에 따른 압력분포의 변화 뿐만 아니라 밀도분포의 변화가 크게 존재하게 된다. 이 때문에 기체 파이프 라인에서의 유출 발생 위치의 진단은 상태 공간 방정식과 같은 동적 모델을 이용하는 것이 적당하다.

반면에 비압축성이 강한 액체인 경우에는 시간에 따른 변화 속도가 매우 빠르다. 즉 파이프 라인에서의 변화는 짧은 시간 내에 입구와 출구에서의 변화를 초래한다. 마찬가지로 특정 부위에 유출이 발생한 경우 그 영향은 즉시 입구와 출구에 전달된다. 이는 액체의 밀도의 변화가 매우 작기 때문이다. 또한 특정 시간에

파이프 라인의 내부에서의 밀도 분포의 변화가 거의 존재하지 않으며 압력 분포의 변화만이 존재하게 되므로 액체 파이프 라인에서는 정적 모델을 이용함으로써 효과적으로 유출 발생 위치를 진단할 수 있다.

5-1. 파이프 라인의 정적 모델

비압축성이 강한 액체를 수송하는 파이프 라인에서의 유출 발생 위치를 진단하기 위하여 정적 물질 수지식을 세워보면 식 (14)에서 시간에 대한 미분항이 무시되므로 식 (19)와 같은 관계가 얻어진다.

$$\frac{\partial q}{\partial z}=0 \tag{19}$$

이 관계를 식 (15)의 모멘텀 수지식에 대입하고 시간에 대한 미분항을 모두 무시하여 정적 모멘텀 수지식을 수립하면 식 (20)과 같은 관계가 얻어진다.

$$\frac{\partial P}{\partial z}=-\frac{2fq^2}{D\rho A^2}-\rho g\ \sin\theta \tag{20}$$

식 (20)은 일반적인 파이프 라인에 대한 식이다. 이 식에서 파이프 라인의 직경과 기하학적인 모형, 중력 가속도, 유체의 밀도 그리고 마찰계수의 계산시 점도 등은 실험조건과 시스템에 따라서 오차를 포함할 수 있으므로 특정한 파이프 라인에 대하여는 약간의 보정이 필요하다. 따라서 식 (20)을 보정시킨 다음의 식 (21)이 보다 유용하게 사용된다.

$$\frac{\partial P}{\partial z}=-\frac{2\alpha fq^2}{D\rho A^2}-\rho g\ \sin\theta \tag{21}$$

5-2. 정적 모델을 이용한 유출 발생 지점의 진단

5-2-1. 한 지점에서 발생한 유출에 대한 진단

파이프 라인의 정적 모델식 중 식 (21)의 모멘텀 수지식이 파이프 라인의 길이에 대한 압력의 변화 형태로 이루어졌으므로, 모델식을 적분하여 압력의 변화 형태를 판단하면 유출 발생 지점의 진단이 가능하다. 유출이 없는 경우에 파이프 라인은 입구에서 출구까지 한 개의 시스템으로 생각할 수 있다. 그러나 유출이 발생한 경우는 파이프 라인을 입구에서 유출 발생 지점까지와 유출 발생 지점에서 출구까지의 두 개의 시스템으로 분리하여 생각하는 것이 편리하다.

유출이 없는 경우에 정적 물질 수지식을 파이프 라인의 입구에서 임의의 지점 z까지 적분하면 식 (22)가 얻어진다. 식 (22)를 이용하여 모멘텀 수지식인 식 (21)을 같은 구간에서 적분하면 식 (23)이 얻어진다. 즉 식 (22)와 (23)은 유출이 없는 경우의 파이프 라인에 따른 유량과 압력 분포를 각각 나타낸다.

$$q=q_0=\text{constant} \tag{22}$$

$$P=P_0-\left[\frac{2\alpha f_0 q_0^{\,2}}{D\rho A^2}+\rho g\ \sin\theta\right]z \tag{23}$$

유출이 발생한 경우 입구에서 유출 발생 지점까지의 유량과 압력 분포는 앞의 식 (22), (23)과 같은 형태로 표현된다. 그러나 유출 발생 지점부터 출구까지는 식 (19), (21)의 이 구간에서의 적분으로 다음의 식 (24), (25)와 같은 형태로 유량과 압력 분포가 각각 표현된다.

$$q=q_N=\text{constant} \tag{24}$$

$$P=P_N+\left[\frac{2\alpha f_N q_N^{\,2}}{D\rho A^2}+\rho g\ \sin\theta\right](z_N-z) \tag{25}$$

유출 발생 지점 z_L은 식 (23)과 (25)의 압력 분포가 만나는 지점으로 두 식을 연립하면 다음의 식 (26)과 같이 계산된다.

$$z_L=\frac{D\rho A^2(P_N-P_0)+2\alpha f_N q_N^{\,2}z_N+D\rho^2A^2g\sin\theta z_N}{2\alpha(f_N q_N^{\,2}-f_0 q_0^{\,2})} \tag{26}$$

여기서 보정한 α는 유출이 없는 경우에 계산된다. 유출이 없는 경우의 압력 분포식 (23)에서 $z=z_N$일 때 $P=P_N$이므로 α는 다음의 식 (27)과 같이 계산된다.

$$\alpha=\frac{D\rho A^2}{2f_0 q_0^{\,2}}\left[\frac{P_0-P_N}{Z_N}-\rho g\ \sin\theta\right] \tag{27}$$

5-2-2. 순차적으로 두 지점에서 발생한 유출에 대한 진단

파이프 라인이 유출없이 운전되다가 한 지점에서 유출이 발생하면 입·출구에서 유량과 압력은 변화하고, 유출 발생 지점에서의 유출량과 파이프 라인 내부의 압력은 한 지점에서 유출이 계속되는 동안 일정하다. 그러나 또 다른 지점에서 2차적인 유출이 발생하면 파이프 라인의 입·출구에서 유량과 압력 뿐 아니라 1차적인 유출 발생 지점에서의 유출량과 파이프 라인 내부의 압력도 변화한다. 한 지점에서 발생한 유출 위치의 진단은 앞 단락에서와 같은 방법으로 가능하다. 즉 파이프 라인의 입·출구 양단의 유량과 압력으로부터 식 (26)을 이용하여 진단을 수행할 수 있다. 이러한 사실을 일반화시키면 특정한 두 지점 사이에서 발생한 유출은 그 두 지점의 유량과 압력으로부터 진단이 가능함을 알 수 있다.

2차적인 유출은 파이프 라인의 입구와 1차 유출 발생 지점 사이나 1차 유출 발생 지점과 파이프 라인의 출구 사이에서 발생한다(이 두 경우에 대한 판단은 뒤에서

언급함). 그러므로 2차 유출 발생 지점을 진단하기 위하여는 2차 유출 발생 후 변화된 1차 유출 발생 지점에서 파이프 라인 내부의 압력은 2차 유출 발생 지점이 파이프 라인의 입구와 1차 유출 발생 지점 사이인 경우 식 (23)에서 z에 1차 유출 발생 지점 z_{L1}을 대입하여 구할 수 있다. 마찬가지로 2차 유출 발생 지점이 1차 유출 발생 지점과 파이프 라인의 출구 사이인 경우는 식 (25)를 이용하여 구할 수 있다. 2차 유출 발생 후의 1차 유출 발생 지점에서의 유출량은 다음의 식 (28)과 같이 유출 발생 지점을 모델링함으로써 가능하다.

$$q_L=\beta\sqrt{\Delta P_L} \tag{28}$$

여기서 ΔP_L은 유출 발생 지점의 파이프 라인 내부의 압력과 대기압과의 차이를 나타낸다. β는 1차의 유출만이 발생한 경우에 계산된다. 즉 식 (28)을 이용하여 1차 유출이 발생하였을 때의 β와 2차 유출 발생 후 1차 유출 발생 지점의 파이프 라인 내부 압력으로부터 2차 유출 발생 후의 1차 유출 발생 지점에서의 유출량을 계산할 수 있다.

2차 유출 발생 지점이 파이프 라인의 입구와 1차 유출 발생 지점 사이에 존재하는지 아니면 1차 유출 발생 지점과 파이프 라인의 출구 사이에 존재하는지의 판단은 가상적인 2차 유출 발생 지점을 이용하여 가능하다. 즉 실제적으로는 두 지점에서 유출이 발생한 것을 한 지점에서만 유출이 발생한 것처럼 가정하여 가상적인 유출 발생 지점을 계산하고, 이 값과 1차 유출 발생 지점과의 크기 비교로써 2차 유출 발생 지점의 존재 구역을 판별할 수 있다. 가상적인 유출 발생 지점이 1차 유출 발생 지점보다 작은 값이면 2차 유출 발생 지점은 파이프 라인의 입구와 1차 유출 발생 지점 사이에 존재하고, 큰 값이면 1차 유출 발생 지점과 파이프 라인의 출구 사이에 존재한다.

2차 유출 발생 지점이 파이프 라인의 입구와 1차 유출 발생 지점사이인 경우, 2차 유출 발생 지점은 식 (26)에서 다음의 식 (29)와 같이 변수를 치환함으로써 계산된다.

$$\begin{aligned} &P_N \rightarrow P_{L1} \\ &q_N \rightarrow q_N + q_{L1} \\ &z_N \rightarrow z_{L1} \end{aligned} \tag{29}$$

그리고 2차 유출 발생 지점이 1차 유출 발생 지점과 파이프 라인 출구 사이인 경우, 2차 유출 발생 지점은 식 (26)에서 다음의 식 (30)과 같이 변수를 치환함으로써 계산된다.

$$P_0 \rightarrow P_{L1}$$

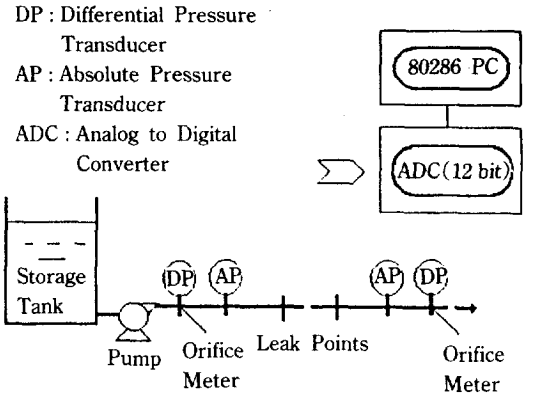

Fig. 1. Experimental pipeline leaking system.

$$\begin{aligned} &q_0 \rightarrow q_0 - q_{L1} \\ &z_N \rightarrow z_N - z_{L1} \end{aligned} \tag{30}$$

6. 실 험

6-1. 실험장치 및 방법

유출 진단을 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 내경 3/8 inch, 길이 97.6 m인 동관과 물 저장 탱크, 원심 펌프, 절대압력 변환기, 차압 변환기, 12bit AD 변환기, 12 V 전압기, 24 V 전압기 그리고 80286 PC 등으로 구성되어 있다. 파이프 라인을 흐르는 유체로는 물을 사용하였다. 파이프 라인의 입·출구에서의 압력은 절대 압력 변환기를 사용하여 측정하였고, 유량은 오리피스를 장착시킨 차압 변환기를 사용하여 측정하였다. 절대 압력 변환기는 파이프 라인의 모델식인 식 (21)에서 압력에 관한 항이 선형적으로 포함되어 있으므로 계기를 별도로 검량(calibration) 하지 않고 사용하였다. 여기서 발생하는 오차는 선형적으로 구성한 보정항 α에 의하여 보정되므로 문제가 되지 않는다. 차압 변환기는 유량이 모델식에서 비선형적으로 포함되어 있으므로 정확한 검량이 필요하였다. 유출은 파이프 라인의 입구 압력계로부터 45.0 m 지점과 69.3 m 지점에서 발생하도록 하였다.

실험은 유출없이 펌프로 물을 파이프 라인으로 흘려보내다가 어느 순간 유출을 발생시키면서 유량과 압력을 측정하는 식으로 수행하였다. 입·출구 양단의 유량과 압력의 측정은 유출의 존재 여부와 관계없이 계속하여 측정하였다. 유출 위치의 진단을 위하여는 유출이 없는 상태의 데이터(보정항 α를 계산하기 위함)와 유출이 존재하는 상태의 데이터가 모두 필요하기 때문이다. 실험의 종류는 임의로 유량을 변화시키지 않는 경우와 유량을 임의로 변화시키는 경우에 대하여 수행하였고,

Table 1. Experimental canditions and results

Experimental no.	1	2	3	4	5	6	7
Leakage point [m]	45.0	69.3	45.0, 69.3	69.3, 45.0	45.0	69.3	69.3, 45.0
Inlet flowrate [kg/min]	5.53	5.56	5.90	5.66			
Outlet flowrate [kg/min]	5.34	5.14	4.34	4.88			
Inlet pressure [bar]	2.29	2.26	2.12	2.21			
Outlet pressure [bar]	1.41	1.39	1.27	1.35			
Sampling time [sec]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Threshold [%]	1	1	1	1	3	3	3
Flowrate change	무	무	무	무	유	유	유
Diagnosed point [m]	47.8	69.8	47.2, 65.4	70.7, 46.2	48.5	74.1	69.0, 49.9
Leakage amount [kg/min]	0.19	0.42	1.56	0.78			
Leakage amount [%]	3.47	7.49	26.54	13.82	14.5	9.62	24.25
α [$\times 10^{-4}$]	2.41	2.42	2.41	2.41	2.43	2.43	2.44
β [$\times 10^{-4}$]			38.23	14.96			23.93
Diagnosis error [m]	2.8	0.5	2.2, −3.9	1.4, 1.2	3.5	4.8	−0.3, 4.9

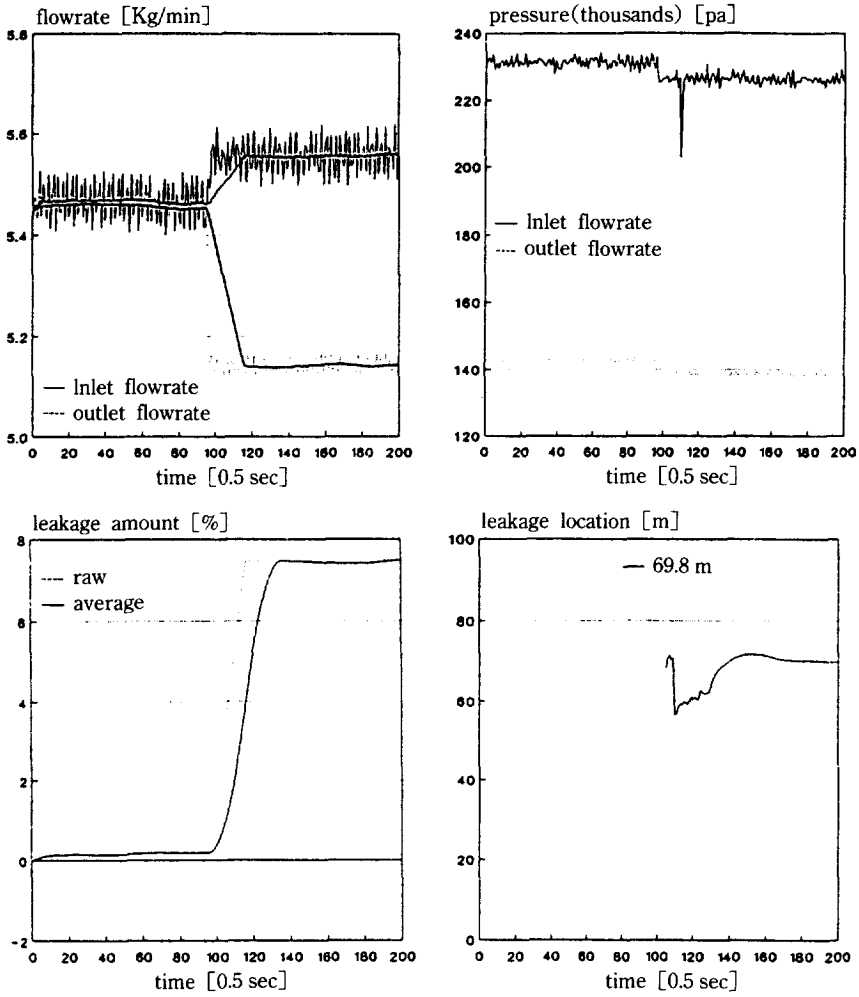

Fig. 2. Diagnosis results leakage at 69.3 m from pipeline inlet(Exp. 2, without flowrate change).

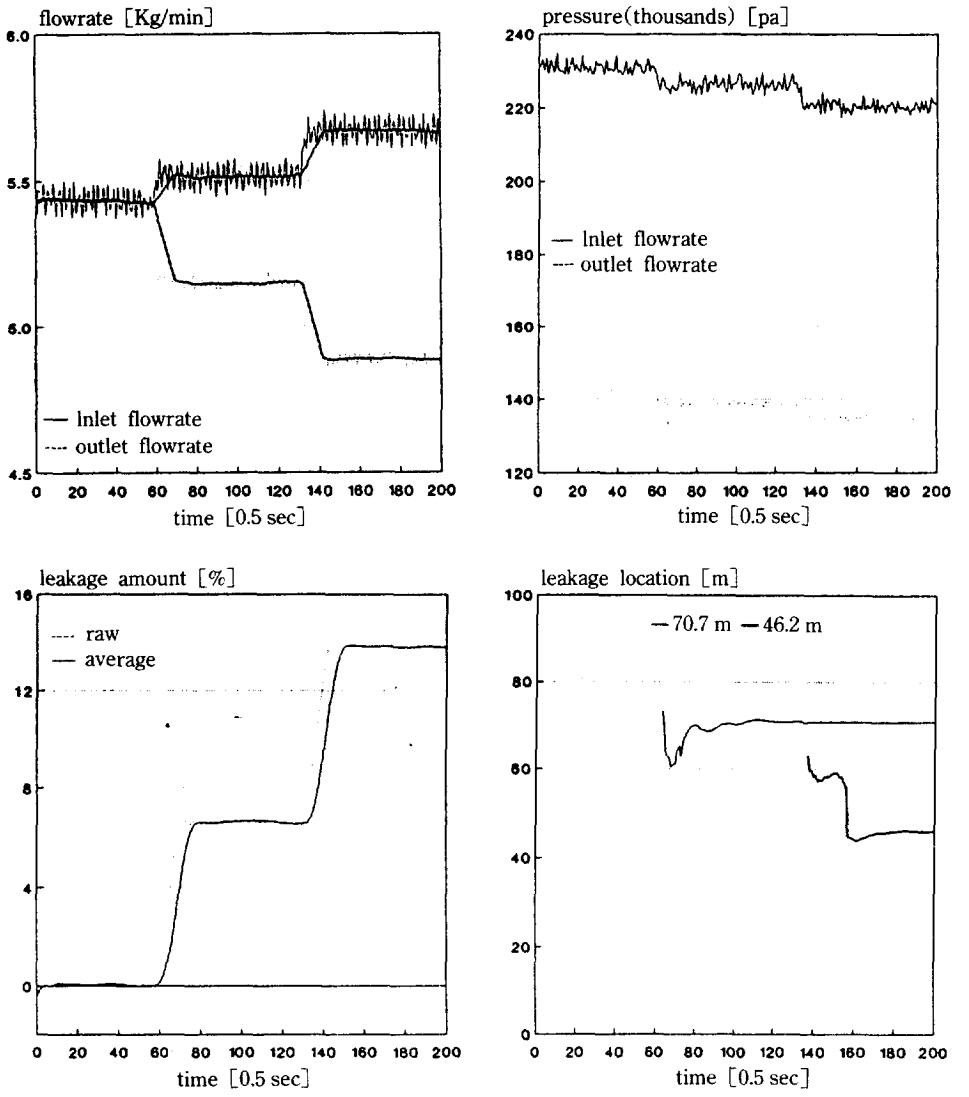

Fig. 3. Diagnosis results for leakage at 69.3 m and 45.0 m from pipeline inlet(Exp. 4, without flowrate change).

두 경우에 대하여 각각 한 지점에서 유출이 발생한 경우와 순차적으로 두 지점에서 유출이 발생한 경우를 수행하였다. 임의로 유량을 변화시키지 않는 경우는 유량의 변화가 단지 유출에 의하여만 변하는 경우이다.

6-2. 실험결과 및 토의

실험결과로는 시간에 따른 유량의 변화, 압력의 변화, 유출량의 변화 그리고 유출 발생 위치의 진단 결과 등을 각각 조사하였다. 각 종류에 대한 실험조건과 결과를 Table 1에 나타내었고, 그 중 일부를 Fig. 2-4에 나타내었다. 특히 유량의 변화를 나타낸 그림에서 굵은 실선은 입·출구의 유량에 대한 신호를 필터링한 것이다. 실험 1-4는 유량을 임의로 변화시키지 않은 경우이고, 실험 5-7은 유량을 임의로 변화시킨 경우이다. 실험 1, 2, 5, 6은 한 지점에서 유출이 발생한 경우이고, 실험 3, 4, 7은 순차적으로 두 지점에서 유출이 발생한 경우이다. Table 1에서 입·출구의 유량과 압력은 모두 유출이 발생한 후의 값이다. 실험 5, 6, 7에 대하여는 유량을 임의로 변화시켰으므로 특정한 값을 나타내지 않았다.

유량을 임의로 변화시키지 않은 경우가 유량을 임의로 변화시킨 경우에 비하여 조금 더 정확한 진단 결과를 얻을 수 있었다. 진단의 오차는 대체적으로 파이프 라

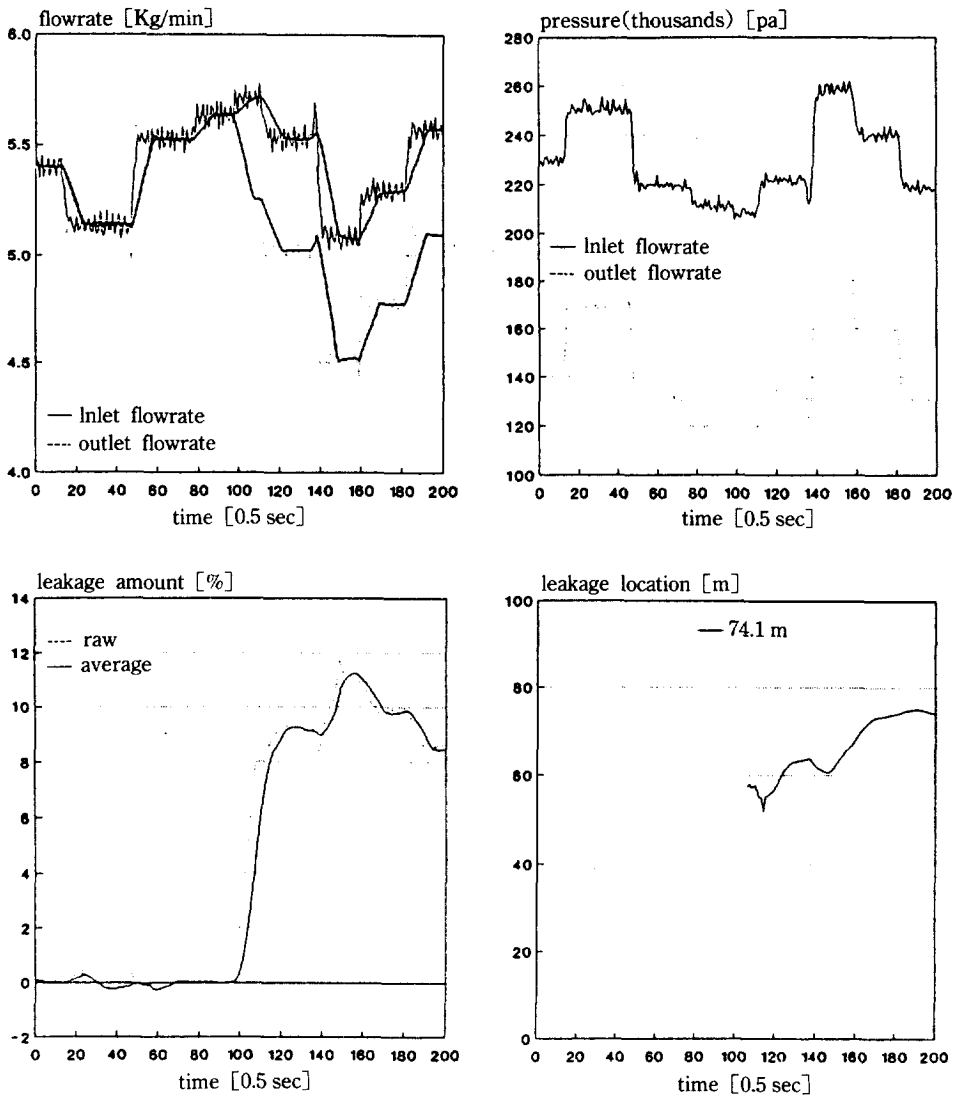

Fig. 4. Diagnosis results for leakage at 69.3 m from pipeline inlet(Exp. 6, with flowrate change).

인의 입구로부터 먼 거리에서 유출이 발생하였을 때가 가까운 거리에서 발생하였을 때보다 작았고, 순차적으로 두 지점에서 유출이 발생한 경우는 2차로 발생한 유출보다 1차로 발생한 유출에 대하여 작게 나타났다. 전자의 경우는 파이프 라인의 입구에 펌프가 설치되어 있기 때문에 입구로부터 가까울수록 펌프의 동특성에 의한 영향을 크게 받기 때문이다. 후자의 경우는 2차 유출 위치를 진단할 때 2차 유출을 진단할 때의 오차뿐 아니라 1차의 유출 위치를 진단할 때의 오차까지 포함되었기 때문이다.

유출량에 따른 진단 결과는 유출량이 많을수록 비교적 더 정확하였다. 이는 유출량이 많을수록 유출에 의한 신호의 크기가 펌프와 파이프 라인의 동특성 그리고 잡음 등에 의한 것보다 크기 때문이다. 반대로 유출량이 매우 작은 경우(약 1.5% 미만)는 유출에 의한 신호가 다른 신호들과 뒤섞여 진단을 수행할 수가 없었다. 이러한 영향은 순차적으로 두 지점에서 유출이 발생한 경우와 유량을 임의로 변화시킨 경우에 더욱 크게 나타났다. 그러므로 이들 경우에 대하여는 비교적 많은 양의 유출을 발생시키고 실험을 행하였다. 유량을 임의로 변화시킨 경우는 또한 경보 발단치도 3%로 비교적 크게 취하여야 했다.

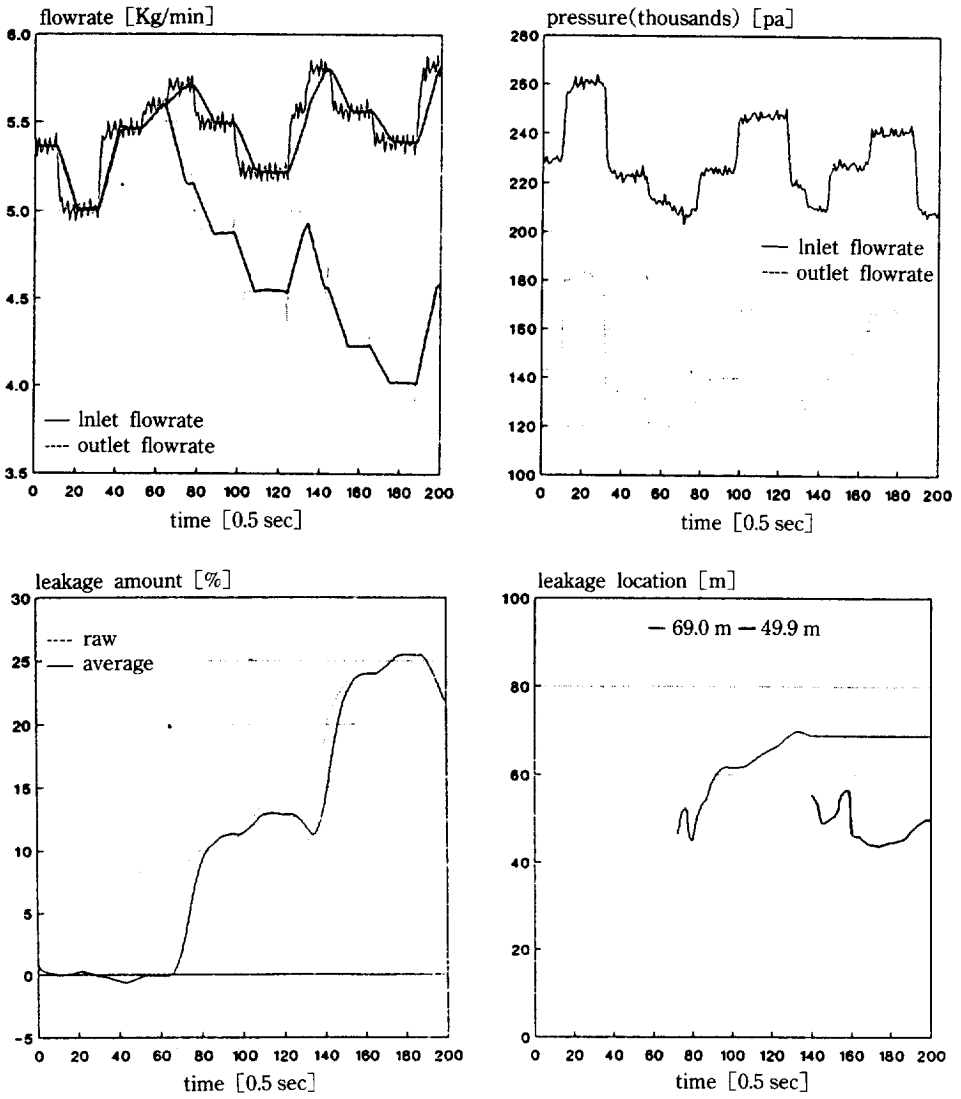

Fig. 5. Diagnosis results for leakage at 69.3 m and 45.0 m from pipeline inlet(Exp. 7, with flowrate change).

7. 결 론

파이프 라인에서의 이상 중 하나인 유출에 대하여 유출을 판단할 수 있는 방법과 유출 위치를 진단할 수 있는 방법을 개발하였다. 유출의 판단은 누적, 평균에 의한 방법을 사용하였고 유출 위치의 진단은 모멘텀 수지식과 물질 수지식을 이용하였다. 진단에 이용된 데이터는 유출이 없는 정상 상태의 데이터와 유출 발생 후의 데이터를 모두 필요로 하였으므로 유출의 발생 여부에 관계없이 모든 데이터를 수집하였다. 데이터의 양은 많고 정확할수록 진단 지점은 정확하였다. 실험실 규모의 액체 파이프 라인에 대하여 개발한 위의 방법들을 직접 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

사용기호

A : cross-sectional area of the pipe [m^2]
D : pipe diameter [m]
e_i : coefficients (17, 18)
f : friction factor [dimensionless]
f_0 : friction factor in inlet
f_N : friction factor in outlet

g : gravitational acceleration [m/sec^2]
k : discrete time index
M : fluid molecular weight [Kg/mol] (17, 18)
N_{Re} : Reynolds number [dimensionless]
P : pressure [Pa]
P_0 : inlet pressure [Pa]
P_N : outlet pressure [Pa]
P_L : leakage point pressure [Pa]
P_{L1} : first leakage point pressure [Pa] (29)
ΔP_{L1} : difference between P_L and atmospheric pressure [Pa] (28)
q : flowrate [Kg/sec]
q_0 : inlet flowrate [Kg/min]
q_N : outlet flowrate [Kg/min]
q_L : leakage flowrate [Kg/min]
q_{L1} : leakage flowrate in first leakage point [Kg/min] (29)
Δq^* : integrated mean value of flowrate difference [Kg/min] (10)
Δq_L : flowrate difference between q_0 and q_N [Kg/min] (2)
Δq_L^* : filtered flowrate difference [Kg/min] (4)
Δq_{LA} : alarm threshold (3)
Δq_{LA}^* : alarm threshold (5, 11)
Δq_0 : inlet flowrate change [Kg/min] (6)
Δq_N : outlet flowrate change [Kg/min] (6)
R : gas constant [J/mol-K] (17, 18)
t : continuous time index
T : temperature [K] (17, 18)
v : fluid velocity [m/sec]
z : distance index
z_L : leakage point from inlet [m] (26)
z_{L1} : first leakage point from inlet [m] (29)
z_{L2} : second leakage point from inlet [m]
$\bar{z}_{L2}$: imaginary second leakage point from inlet [m]
z_N : pipe length [m]

그리이스 문자

α : correction factor (21)
β : leakage point model parameter (28)
θ : inclination [radian]
λ : recursive calculation parameter (7)
λ_L : filter parameter (4)
ρ : fluid density [Kg/m^3]
τ : time index
Φ_{qq} : cross-correlation function (6)
Φ_{avg} : mean value of cross-correlation function (8)
Φ_{avgA} : alarm threshold (9)

참고문헌

1. Isermann, R.: *Automatica,* **20**, 387(1984).
2. Tao, L. and Fang, C.: 10th IFAC, 3, 80(1987).
3. Zhi, L.: 11th IFAC, 1602(1988).
4. Wilie, E. B.: *J. of Hydraulic Engineering,* **109**, 1723 (1983).
5. Billmann, L. and Isermann, R.: Proceedings of the 9th IFAC Congress, Budapest (1984).
6. Lee, K. S. and Chang, K. S.: *INT. J. Control,* **48**, 929(1988).
7. Spiekout, J. :*Oil and Gas Journal,* **May 20**, 40 (1991).
8. McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P.: Unit Operations of Chemical Engineering, 4th ed, McGraw-Hill, New York(1985).
9. Bird, R., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: Transport Phenomena, John Wiley & Sons, New York (1960).
10. Meditch, J. S.: Stochastic Optimal Linear Estimation and Control, McGraw-Hill, New York(1969).
11. Hornbeck, R. W.: Numerical Methods, Quantum Publishers, New York(1975).
12. Smith, G. D.: Numerical Solution of Partial Differential Equations, 2nd ed, Oxford University, Oxford(1978).
13. Farlow, S. J.: Partial Differential Equation for Scientists & Engineering, John Wiley & Sons, USA (1982).
14. Smith, J. M. and Van Ness, H. C.: Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 4th ed, McGraw-Hill, New York(1987).
15. Åström, K. J. and Wittenmark, B.: Computer Controlled System, 2nd ed, Prentice-Hall, New Jersey (1990).
16. Åström, K. J. and Wittenmark, B.: Adaptive Control, Addition-Wesley, New York(1989).
17. Shinskey, F. G.: Process Control Systems, 3rd ed, McGraw-Hill, New York(1988).
18. Shumway, R. H.: Applied Statistical Time Series Analysis, Prentice-Hall, New Jersey(1988).
19. Stearns, S. D. and Hush, D. R.: Digital Signal Analysis, 2nd ed, Prentice-Hall, New Jersey(1990).
20. Embree, P. M. and Kimble, B.: C Language Algorithms for Digital Signal Processing, Prentice-Hall, New Jersey(1991).