

# 통계적 접근방법을 이용한 배관망 누출 감지기법에 관한 연구

김은호<sup>1)</sup> · 장승룡<sup>2)</sup> · 김인원<sup>1)</sup>

## 1. 서 론

배관망은 화학공정산업뿐만 아니라 석유정제를 위한 천연가스와 원유의 수송 등, 많은 분야에 폭넓게 이용되고 있으며 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 실제 현장운영시 이러한 배관망내의 누출은 큰 사고를 유발시킬 수 있으므로 누출에 대한 신속한 감지와 제거가 요구된다.

본 연구에서는 배관망의 누출 감지에 있어서 Narasimhan과 Mah[1]에 의해 제안된 Generalized Likelihood Ratio(GLR)기법에 정규화를 적용하여 개선하고 개선된 방법을 배관망에 적용하여 누출 위치 및 크기를 예측해 보았으며 그 결과들의 신뢰도와 성능을 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 GLR 기법에 의한 누출감지

GLR 기법은 측정치와 데이터 보정 과정에서 계산된 잔차율 이용하여 통계학적인 검증을 통해 gross error를 찾아내는 방법[1]이다. GLR 기법은 측정치가 가지고 있는 편향만을 측정할 수 있는 Global Test, Nodal Test, Measurement Test등과 달리 측정치의 편향과 누출을 동시에 감지할 수 있으며 배관망의 누출 위치도 함께 찾을 수 있는 장점을 가진 가장 강력한 검증통계[2] 방법이다. 잔차의 계산과 검증통계[1, 3, 4]는 다음과 같고 개선된 알고리즘은 그림1에 나타내었다.

$$r = A(\hat{z} - z_m), \text{Cov}[r] = V = AQA' \quad \text{선형제약조건} \quad (1)$$

$$r = \int_m (\hat{z}_m^{k+1} - z_m) - f(\hat{z}_m^{k+1}), V = \int_m \theta_m \int_m^T \quad \text{비선형제약조건} \quad (2)$$

$$T = \sup r' V^{-1} r - (r + b\Pi)' V^{-1} (r + b\Pi) \quad \text{검증통계} \quad (3)$$

$$\hat{\delta} = (\Pi' V^{-1} \Pi)^{-1} (\Pi' V^{-1} r) \quad \text{누출의크기} \quad (4)$$

주요어 : GLR, 누출, 배관망, gross error, random error, 통계기법

1) 건국대학교 화학공학과 공정시스템 연구실

2) 한국가스공사 연구개발원 유체유동 연구팀

$$\Pi_i = \left\{ \begin{array}{l} Ae_i \text{ } i \text{ 번째 측정치 편향에 대하여} \\ m_j \text{ } j \text{ 번째 공정이나 배관에서의 누출시} \end{array} \right\} \text{오차의 벡터} \quad (5)$$

위의 방법을 다음과 같은 3가지 배관망에 대하여 적용하여 성능평가를 수행하였다.

- 1) 저압 가스배관망 (Simple Network, 그림 2), 2) 비압축성 유체가 흐르는 Gay-Middleton의 배관망(Complex Network, 그림 3)[7], 3) 고압 천연 가스 배관망(Field Network, 그림 4)

## 2.2 배관망 모사

누출의 위치를 구하기 위하여 압력손실방정식이 사용되며 저압 가스 배관에서는 압력손실방정식으로서 Lacey's 식[5]을 사용하였으며 고압 가스 배관에서는 Panhandle 식을 사용하였다. 비압축성유체에 대하여는 Darcy-Weisbach 식[5]을 사용하였다. 모사를 위하여 사용된 가정은 다음과 같다.

- 1) 누출발생이전의 흐름은 정상상태이며 누출 발생 후 빠른 시간에 새로운 정상상태에 도달한다. 2) 누출이 발생하면 가장 가까운 노드의 부하가 우선 영향을 받는다. 3) 누출로 인한 역류가 발생하지 않는다. 4) 입출력 값인 Load와 기준 압력의 측정치가 가진 random error를 무시한다.

각 노드의 제약조건으로서 물질수지식과 압력손실방정식이 함께 사용되며 압력손실방정식은 다음과 같이 누출이 없을 때(식(6))와 있을 때(식(7))의 2가지로 나타낼 수 있다.

$$P_h - P_t = \Delta P = KQ^\epsilon \quad (6)$$

$$P_h - P_t = K' l_{ib} Q_{ib}^\epsilon + ab + \beta x^* \quad (7)$$

여기서,  $P$ 는 압력,  $Q$ 는 유량,  $K' = f\left(\frac{1}{D^5}\right)$

$$\alpha = -\epsilon K' l_{ib} Q_{ib}^{\epsilon-1}, \quad \beta = \epsilon K' Q_{ib}^{\epsilon-1}, \quad x^* = xb$$

## 2.3 성능 평가 방법[2]

제시된 방법은 배관망에 적용시 그 성능을 평가하기 위해 overall power, selectivity, AVTI(Average number of type I error)와 AEE (Average error of estimation)의 값이 사용되었다.

## 3. 결과 및 고찰

모사는 Monte-Carlo 반복법을 사용하였으며 random error는 정규분포를 따르도록 하였다. 각각의 예측값이 음수값을 가지는 경우에는 누출로 인한 gross error가 아니므로 AVTI의 계산에서 누출을 감지하지 못한 것

으로 계산하였다. 그림 5, 6은 단순한 저압 가스배관망에 대해 정규화된 GLR기법을 적용하였을 때 성능의 변화를, 그림 7, 8은 random error가 0.0%에서 2.5%까지 변화할 때 성능에 대한 random error의 영향을 보여주고 있다. 그림 5의 overall power는 5번 배관의 경우 최대 36%까지 상승하였으며, 그림 6의 AEE의 경우 5번 배관에서 23.5%의 감소를 보였다. 그림 7, 8은 random error가 증가할수록 overall power가 감소하고 AEE가 증가함으로써 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 표1은 정규화된 GLR 기법과 적절한 random error를 적용하여 단순 배관망에서 한 개의 누출 발생시 누출 크기와 위치를 예측한 결과이며 유량이 큰 배관에서의 감지 성능이 상대적으로 작은 5번 배관 보다 더 좋은 것을 볼 수 있다. 이것은 GLR 기법이 공정 모델의 잔차를 이용하여 누출을 감지하므로 압력손실과 유량이 적은 누출이 발생한 배관을 감지하지 못하고 잔차가 수치적으로 큰 가치를 누출로서 감지하기 때문이다. 위의 결과를 바탕으로 보다 복잡한 배관망인 Gay-Middleton 배관망과 현장의 천연가스 배관망에 적용하여 표2, 3의 결과를 얻었다. 그 결과 앞서 언급한 단순 배관망의 경우와 마찬가지로 GLR 기법은 누출 크기와 위치 감지에 있어서 좋은 감지 효율을 나타내었다. 그러나 Gay-Middleton 배관망의 31번 배관의 경우에는 가장 큰 유량의 흐름과 460배 정도의 차이를 가지고 있기 때문에 overall power가 '0'를 나타내며 이를 통한 예측치는 무의미하다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여, GLR 기법을 사용하여 배관망에서의 누출을 감지함에 있어서 각 배관간의 유량의 차이가 클 때, 적은 유량에 대한 감지 성능이 저하됨을 알 수 있었다. 또한 압력 측정치에 포함되어 있는 random error는 실제 감지성능에 많은 영향을 미치지 못하므로 무시할 수 있고 유량 측정치가 가지고 있는 random error의 크기가 감지효율을 결정하는 결정 요소임을 알 수 있었다. 정규화를 통한 GLR 적용에 있어서 비정규화시보다 5~35%의 전체적인 감지성능의 향상을 보였으며 random error의 영향이 크게 나타나는 유량측정치를 정규화하여 GLR을 적용하여 성능을 향상시킬 수 있었다. 결론적으로 간단한 배관망 뿐만 아니라 보다 복잡한 배관망에서도 GLR 기법은 잘 적용되며, 각 배관간의 유량차가 큰 배관망 보다는 최대 유량의 50% 이내 수준의 유량차를 가지는 배관망에서 정규화된 GLR 기법을 적용한다면 보다 좋은 감지 효율을 보일 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. Narasimhan, S., and R. S. H. Mah, 1987, "Generalized Likelihood

Ratio for Gross Error Identification, " *AIChE J.*, Vol. 33, 1514.

2. Narasimhan, S., 1990, "Maximum Power Tests for Gross Error Detection Using Likelihood Ratios, " *AIChE J.*, Vol. 36, 1589.

3. Joydeb, M., and S. Narasimhan, 1996, "Leak Detection in Network of Pipelines by the Generalized Likelihood Ratio Method," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 35, 1886.

4. Serth, R. W., and W. A. Heenan, 1986, "Gross Error Detection and Data Reconciliation in Steam-Metering Systems," *AIChE J.*, Vol. 32, 733(1986).

5. Osiadacz, A. J., 1987, "Simulation and Analysis of Gas Networks," E. & F.N. SPON, London.

Table 1. Results of the simple gas pipeline network system by normalization for single leak case (Random error 1%, Leak : 10% )

| No. of branch | Actual values |                     | Predicted values |                     | Performance |       |
|---------------|---------------|---------------------|------------------|---------------------|-------------|-------|
|               | location      | magnitude           | location         | magnitude           | AEE         | AEE   |
|               | (m)           | (m <sup>3</sup> /h) | (m)              | (m <sup>3</sup> /h) | for b       | for x |
| 1             | 340           | 21.769              | 315.968          | 22.914              | 0.084       | 0.119 |
| 2             | 250           | 8.552               | 256.555          | 9.656               | 0.142       | 0.136 |
| 3             | 210           | 22.730              | 179.596          | 23.339              | 0.076       | 0.230 |
| 4             | 300           | 3.232               | 310.456          | 3.721               | 0.170       | 0.441 |
| 5             | 170           | 4.733               | 236.335          | 5.804               | 0.234       | 0.579 |

Table 2. Results of estimation of the Gay-Middleton pipeline network system by normalization for single leak case (Random error 1.5% )

| No. of branch | Actual values |                      | Predicted values |                      | Performance |        |
|---------------|---------------|----------------------|------------------|----------------------|-------------|--------|
|               | location      | magnitude            | location         | magnitude            | AEE         | AEE    |
|               | (ft)          | (ft <sup>3</sup> /s) | (ft)             | (ft <sup>3</sup> /s) | for b       | for x  |
| 1             | 50            | 0.0731               | 41.3330          | 0.0736               | 0.0309      | 0.3546 |
| 7             | 50            | 0.1395               | 41.2184          | 0.1409               | 0.0236      | 0.1762 |
| 9             | 50            | 0.0307               | 47.0249          | 0.0296               | 0.0821      | 0.2514 |
| 22            | 50            | 0.1480               | 39.6804          | 0.1502               | 0.0150      | 0.2551 |
| 31            | 50            | 0.0003               | -                | -                    | 2.8002      | 2.3379 |

Table 3. Results of estimation of natural gas pipeline network system for single leak case

| No. of branch | Actual values        |          | Predicted values     |          | Performance |       |
|---------------|----------------------|----------|----------------------|----------|-------------|-------|
|               | magnitude            | location | magnitude            | location | AEE         | AEE   |
|               | (m <sup>3</sup> /hr) | (m)      | (m <sup>3</sup> /hr) | (m)      | of b        | of x  |
| 1             | 58000                | 2000.0   | 57821.3              | 1823.1   | 0.082       | 0.220 |
| 3             | 58000                | 7656.5   | 58841.1              | 7882.1   | 0.102       | 0.275 |
| 6             | 31788                | 6651.5   | 28511.6              | 7012.3   | 0.125       | 0.301 |
| 8             | 14051                | 2948.0   | 12052.8              | 2778.1   | 0.174       | 0.333 |
| 11            | 20561                | 2969.0   | 22541.9              | 3045.8   | 0.201       | 0.354 |
| 13            | 20561                | 4500.0   | 23544.1              | 4106.9   | 0.224       | 0.371 |
| 17            | 5133                 | 6128.5   | 4811.1               | 5574.2   | 0.351       | 0.404 |
| 18            | 4162                 | 2451.5   | 4321.5               | 1989.5   | 0.344       | 0.447 |
| 19            | 3459                 | 6904.0   | 3109.3               | 6412.8   | 0.365       | 0.451 |

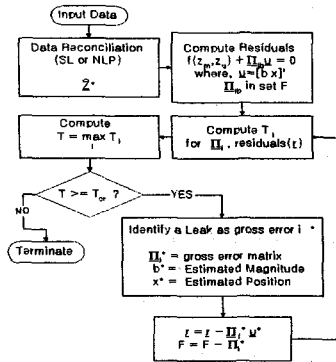


Fig. 1 Algorithm of leak detection using modified Generalized Likelihood Ratio method

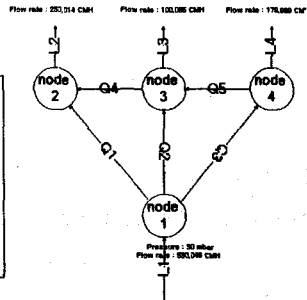


Fig. 2 Simple pipeline network system

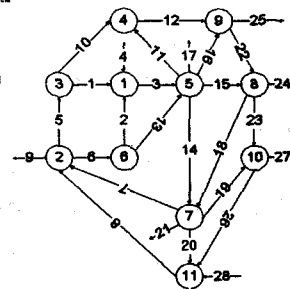


Fig. 3 Steam-metering network system for a methanol synthesis unit process

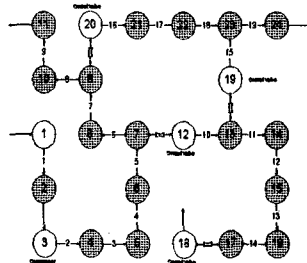


Fig. 4 Diagram of natural gas pipeline network system

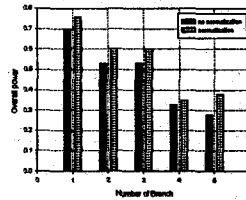


Fig. 5 Overall power changes by normalization in the simple gas pipeline network system

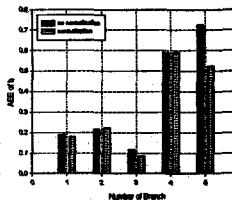


Fig. 6 AEE changes of b by normalization in the simple pipeline network system

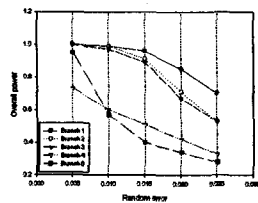


Fig. 7 Overall power changes by random error increase in the simple gas pipeline network system.

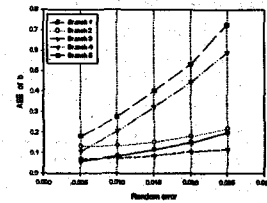


Fig. 8 AEE changes by random error increase in the simple gas pipeline network system