

# 발전용 밸브 유체누설 측정 데이터의 통계적 평가 및 누설량 예측 연구 Study on Statistical Analysis of Measured Fluid Leakage Data and Estimation of the Leakage Rate for Power Plant Valve

이상국 · 김대웅 · 김양석 · 박종혁 · 정 훈

S. G. Lee, D. W. Kim, Y. S. Kim, J. H. Park and H. Jeong

(접수일 : 2009년 7월 22일, 수정일 : 2009년 8월 20일, 채택확정 : 2009년 8월 24일)

**Key Words** : Power Plant Valve(발전용 밸브), Fluid Leakage(유체누설), Statistical Analysis(통계적 평가), Leakage Rate(누설량), Leakage Estimation(누설량 예측)

**Abstract** : High temperature and pressure valves in power plant have been used for fluid flowing and leakage occurred owing to valve internal damage such as disc wear, crack and inserting of foreign objects etc. in these valves. Recently, multi-measuring technique applied both ultrasonic and acoustic method have been used for evaluation of valve internal leakage in order to raise measurement reliability. Therefore, we have performed various leakage tests using ultrasonic and acoustic measuring system and acquired leakage data for the various leakage conditions. In this study, we developed the estimation method of regression model through leakage data, and expectation method for valve opening ratio, which is directly proportion to leakage rate, using the established estimation model from the measured data, valve size and fluid pressure so as to enhance data reliability. As a result of this study, it was founded that expectation method of leakage rate by statistical analysis method is appropriate to valve leakage evaluation.

## 1. 서 론

발전소에서는 고온/고압 및 고차압의 유체를 흘려보내기 위해 파이프와 밸브가 사용되며, 특히 밸브의 마모는 유체 누설을 발생시킨다. 밸브 내부의 유체누설은 안전사고 및 수많은 에너지 손실을 일으키게 한다.<sup>1~3)</sup> 따라서 안전한 발전소 운전 및 대폭적인 에너지 절감을 위해서 유체 누설이 발생하고 있는 밸브를 신속하게 탐지해 내는 것이 중요하다. 최근 단일 탐지기술을 보완하기 위해 다중계측에 의한 측정 데이터의 신뢰도 제고를 위해 초음파 탐지기와 음향 탐지기를 동시에 이용하는 기술을 개발하여 발전소에 적용하고 있다.<sup>4,5)</sup> 그러나, 발전소에는 수많은 종류의 밸브들이 운전되고 있으며, 이들 모든 밸브에 대하여 데이터 확보를 통한 누설량 평가는 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서

는 이러한 다양한 밸브누설 상태를 예측 및 평가를 위해, 발생 가능한 여러 가지의 밸브 개도율, 밸브 크기 및 유체압력을 변수를 모의한 완전요인 실험 계획을 적용함으로써 계측 데이터와 누설량에 해당하는 매스실린더의 유량 데이터를 이용하여 각 계측기별 계측 성능에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 또한 밸브크기와 유체압력이 계측 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 해당 변수의 수준별 회귀모형을 개발하였다.

이와 함께 다양한 현장조건하에서 계측된 유량으로부터 개도율을 예측하기 위해서는 제어가능한 조건변수(밸브크기, 유체압력, 테스트 밸브 개도율)의 다양한 조합 조건에서의 유량 데이터를 통한 회귀모형의 추정이 필요하므로, 실험을 통해 수집된 데이터로부터 실제 유량의 참값을 의미하는 매스실린더의 유량값을 종속변수로 하고, 테스트 밸브 개도율, 밸브크기, 그리고 유체압력을 독립변수로 하여 최소제곱법에 의해 회귀모형을 추정하였다. 실제 발전소 현장에서는 매스실린더의 유량 대신 계측기를 통해 유량을 추정해야 하므로 계측기값을 이용하여

이상국(책임저자) : 한전 전력연구원 원자력발전연구소  
E-mail : sglee@kcpri.re.kr, Tel : 042-865-5507  
김대웅, 김양석, 박종혁 : 한전 전력연구원 원자력발전연구소  
정 훈 : 한전 전력연구원 녹색성장연구소

추정된 유량과 밸브크기, 유체압력으로부터 개도율을 예측하고 개도율의 예측구간을 추정할 수 있었다. 본 연구의 결과는 발전용 밸브 누설검사시 누설상태 검증을 위한 기준 설정과 각종 분야 실험데이터 신뢰도 검증 및 예측을 위한 기초자료로 제시하고자 하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 다양한 테스트 밸브의 개도율 및 크기, 그리고 유체압력에 대한 완전요인실험계획을 적용하여 얻은 계측 데이터와 매스실린더의 유량 데이터를 통해 계측기간의 예측 정확도에 대한 통계적 분석 및 회귀모형을 수립하고 유량, 밸브 개도율, 그리고 밸브크기 대 유체압력간의 회귀모형을 개발하여 밸브 개도율을 예측하기 위한 방법론을 분석하였다.

계측기(초음파 탐지기, 음향 탐지기)를 이용하여 유체 누설량 및 밸브의 개도율을 예측하기 위해 먼저 다양한 현장의 조건을 반영한 데이터의 수집이 선행되어야 한다. 이를 위해 Fig.1과 같은 시스템하에서 실험을 수행하였으며, 이 때 밸브형식은 글로브(globe), 유체는 물(water)을 대상으로 하였다.

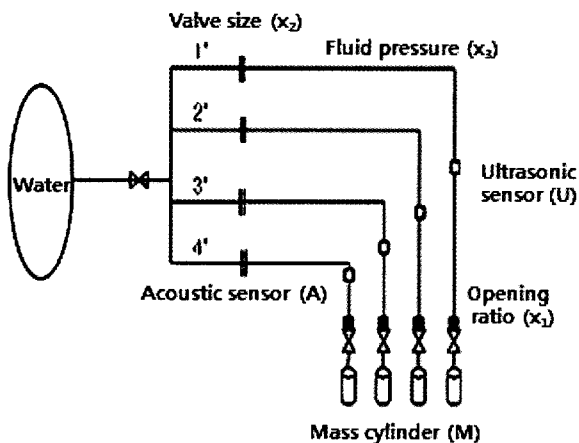


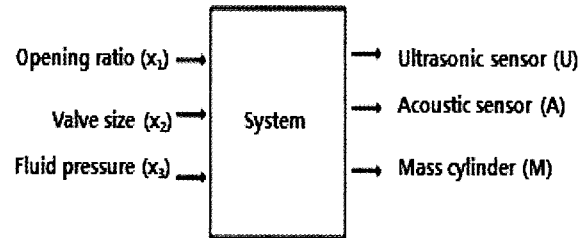
Fig. 1 Block diagram of valve leakage test system

테스트 밸브 개도율 ( $x_1$ ), 밸브크기 ( $x_2$ ), 그리고 유체압력( $x_3$ )의 다양한 조건을 반영하기 위해 각 변수들의 실험수준을 Table 1과 같이 설정하였다.

실험은 변수들의 모든 조합 조건을 고려한 완전요인 실험계획을 통해 수행하였으며 Fig. 2와 같이 각 실험조건별로 계측기의 측정값과 매스실린더의 유량을 5회씩 총  $5 \times 4 \times 4 \times 5 = 400$ 개의 데이터를 수집하였다.

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Unit	Condition
Opening ratio of test valve( $x_1$ )	%	1, 2, 3, 4, 5
Valve size ( $x_2$ )	inch	1, 2, 3, 4
Fluid pressure ( $x_3$ )	bar	10, 20, 30, 40



$x_1$ (%)	$x_2$ (")	$x_3$ (bar)	U (l/s)	A (l/s)	M (l/s)
1	1	10			
1	1	20			
1	1	30			
1	1	40			
1	2	10			
1	2	20			
⋮	⋮	⋮			
5	4	30			
5	4	40			

Fig. 2 System and test planning for data acquisition

### 2.1 매스실린더 유량의 예측

본 연구에서는 매스실린더의 유량이 유체의 누설량을 대변한다고 가정한다. 그러나 실제 현장에서는 매스실린더의 유량 대신 계측기만을 이용할 수 있다. 이 경우, 계측기의 성능은 매스실린더의 유량과 계측값간의 차이인 예측오차를 이용하여 평가할 수 있으며 예측오차가 작을수록 바람직한 계측기라고 할 수 있다. 그러므로 다양한 실험 환경의 조건하에서 계측기의 성능을 평가하고 계측성능을 향상하기 위한 교정(calibration) 모형을 제안하였다. 제안한 교정 모형과 계측기값을 이용하여 유체 누설량을 대변하는 매스실린더의 유량을 정밀하게 예측할 수 있다.

### 2.2 밸브의 개도율 예측

실제 현장에서는 유체 누설량에 대한 예측과 함께 밸브의 마모율에 대한 예측을 필요로 한다. 이를 위해 먼저 매스실린더의 유량을 종속변수로, 밸브 개도율, 밸브크기, 유체압력을 독립변수로 하여 회귀모형을 추정하였다. 추정된 회귀모형을 이용하여

메스실린더의 유량과 벨브크기, 유체압력이 주어졌을 때 벨브의 마모율을 나타내는 개도율에 대한 예측치와 예측구간을 개발하였다. 이때 개도율을 예측하기 위해 필요한 메스실린더의 유량은 계측기를 이용하여 추정하였다.

### 3. 계측기와 메스실린더 유량간의 회귀모형

#### 3.1 계측기 성능 비교

실제 현장에서는 누출 유설량을 대변하는 메스실린더의 유량을 측정할 수 없으므로 초음파 탐지기와 음향 탐지기를 이용하여 메스실린더의 유량을 추정한다. 계측에는 여러 원인들이 있어 오차가 발생하게 되며 이를 고려한 모형은 식 (1)과 같다.

$$M = \hat{M} + \epsilon \quad (1)$$

이 때,  $\epsilon$ 은 계측오차로서 참값과 계측값간의 차이이며,  $\hat{M}$ 은 메스실린더 유량에 대한 계측기의 계측값이다. 예를 들어, 초음파 탐지기를 이용하여 교정 없이 메스실린더의 유량을 추정하는 경우,  $\hat{M}$ 은 초음파 탐지기의 값 U이다.

계측기의 성능은 계측오차를 통해 평가될 수 있다. 본 논문에서는 계측오차에 대한 통계적인 분석을 통해 계측기의 성능을 평가하였다. 실험을 통해 수집한 400개의 데이터로부터 계측기의 정확도와 관련된 계측 오차의 평균과 계측기의 정밀도를 나타내는 표준편차를 구하였으며 Table 2와 같다.

Table 2 The mean value and standard deviation for ultrasonic and acoustic measuring data

Method	Mean value	Standard deviation
Ultrasonic measuring data	-0.00312	0.2981
Acoustic measuring data	0.0219	0.3778

Table 2에서 보는 바와 같이 초음파 탐지기가 음향 탐지기에 비해 정확도와 정밀도 측면에서 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 전체 계측 오차의 99.73%를 포함하는 영역을 나타내는 평균  $\pm 3 \cdot$  표준편차 범위는 초음파 탐지기의 경우는 (-0.89, 0.89)이며, 음향 탐지기의 경우는 (-1.11, 1.15)이다. 현 실험 조건에서 메스실린더의 유량이 (0.04, 15.75)에서 변동하는 것을 고려하면 계측기는 비교적 정확하고 정밀하게 계측됨을 알 수 있다.

테스트 벨브 개도율 ( $x_1$ ), 벨브크기 ( $x_2$ ), 유체압력( $x_3$ )이 계측기의 계측 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해  $x_1, x_2, x_3$ 에 대해 계측오차를 타점한 결과는 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

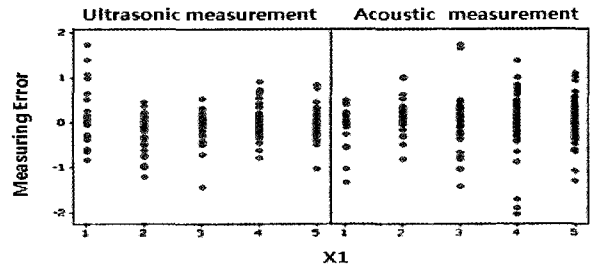


Fig. 3 Dots of measuring error for  $x_1$

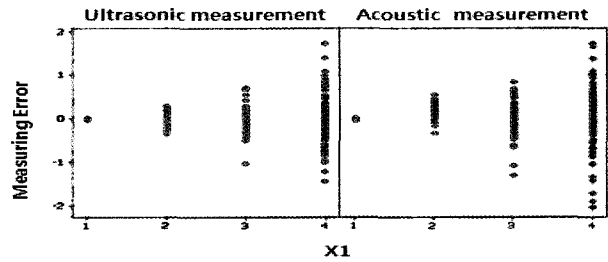


Fig. 4 Dots of measuring error for  $x_2$ ,

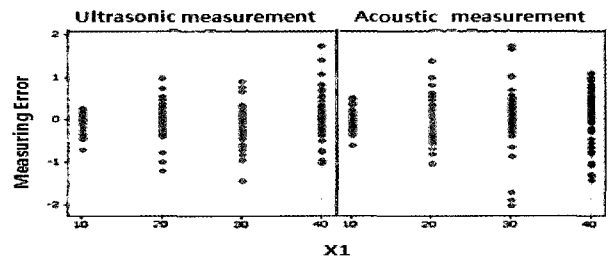


Fig. 5 Dots of measuring error for  $x_3$

초음파 탐지기와 음향 탐지기의 계측오차 타점으로 부터, 초음파 탐지기와 음향 탐지기 모두 벨브크기( $x_2$ )와 유체 압력( $x_3$ )가 커질수록 계측오차의 산포가 커지는 경향을 보이고 있다. 초음파 탐지기와 음향 탐지기의 계측오차들의 평균값은 벨브크기 및 유체압력에 관계없이 0에 가까운 값이지만 그 산포는 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2 각 계측기에 대한 회귀모형 평가

초음파 탐지기, 음향 탐지기, 다중 계측 시스템에 대한 1단계, 다단계 회귀모형의  $R^2$ 값은 Table 3과 같다. Table 3의 결과로부터, 초음파 탐지거나 음향 탐지기를 교정하지 않고 사용한 경우에 비해 회귀모형의 추정을 통해 교정한 경우  $R^2$ 값이 향상된다

는 것을 확인할 수 있다. 또한 초음파 탐지기가 음향 탐지기에 비해 계측 성능이 높으며 다중 계측 단계 회귀모형의 설명력이 가장 우수함을 확인할 수 있다. 따라서 계측기로부터 유량을 예측하고자 하는 경우 다중 계측 단단계 회귀모형을 이용하는 것이 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of regression model performance

Measuring method	Stage	R <sup>2</sup> (%)
Ultrasonic measurement system	No calibration	99.27
	1st stage regression	99.32
	Multi-stage regression	99.28
Acoustic measurement system	No calibration	98.83
	1st stage regression	98.84
	Multi-stage regression	98.84
Multi-measuring system	1st stage regression	99.41
	Multi-stage regression	99.42

#### 4. 개도를 및 현장조건변수와 유량간의 회귀모형 개발

밸브 크기가  $x_2=k$ 로 주어져 있을 때 현장조건 변수(개도율, 밸브크기, 유체압력)들과 유량간에 다음과 같은 2차 회귀 모형을 상정한다.

$$M = \beta_{0,k} + \beta_{1,k}x_1 + \beta_{3,k}x_3 + \beta_{13,k}x_1x_3 + \beta_{11,k}x_1^2 + \beta_{33,k}x_3^2 + \epsilon, x_2 = k \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 정규분포를 따른다고 가정한다.

밸브 크기  $x_2=k$ 에 대해 관측치  $M_i, x_{1i}, x_{3i}$  ( $i=1,2,\dots,n$ )를 얻었을 때 식 (2)로부터 회귀 계수의 추정치  $b_{0,k}, b_{1,k}, b_{3,k}, b_{13,k}, b_{11,k}, b_{33,k}$ 를 구할 수 있으며 추정된 회귀 모형은 식 (3)과 같다.

$$M = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{31} & x_{11}x_{31} & x_{11}^2 & x_{31}^2 \\ 1 & x_{12} & x_{32} & x_{12}x_{32} & x_{12}^2 & x_{32}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{3n} & x_{1n}x_{3n} & x_{1n}^2 & x_{3n}^2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} b_{0,k} \\ b_{1,k} \\ b_{3,k} \\ b_{13,k} \\ b_{11,k} \\ b_{33,k} \end{pmatrix} = (X'X)^{-1}X'M, x_2 = k \quad (3)$$

$$\widehat{M} = b_{0,k} + b_{1,k}x_1 + b_{3,k}x_3 + b_{13,k}x_1x_3 + b_{11,k}x_1^2 + b_{33,k}x_3^2, x_2 = k \quad (4)$$

각 밸브크기별로 추정된 회귀 모형 및 분석결과는 다음과 같다.

(a)  $x_2=1$

$$\widehat{M} = -0.106 + 0.107x_1 + 0.00297x_3 + 0.000927x_1x_3 - 0.000685x_1^2 - 0.000002x_3^2$$

$s = 0.0145424, R^2 = 99.0\%$

(b)  $x_2=2$

$$\widehat{M} = -0.380 + 0.0116x_1 + 0.0701x_3 + 0.0203x_1x_3 + 0.0410x_1^2 - 0.00163x_3^2$$

$s = 0.242420, R^2 = 96.7\%$

(c)  $x_2=3$

$$\widehat{M} = -0.765 + 0.883x_1 + 0.0711x_3 + 0.0530x_1x_3 - 0.0491x_1^2 + 0.000697x_3^2$$

$s = 0.585419, R^2 = 96.9\%$

(d)  $x_2=4$

$$\widehat{M} = -0.443 + 0.273x_1 + 0.0442x_3 + 0.0594x_1x_3 + 0.0569x_1^2 - 0.000145x_3^2$$

$s = 0.713895, R^2 = 97.0\%$

여기서,  $s$ 는 잔차( $M_i - \widehat{M}_i$ )의 표준편차이며 식 (5)와 같다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \widehat{M}_i)^2}{n-6}} \quad (5)$$

위의 결과에서 보듯이  $R^2$ 는 전체적으로 양호한 결과를 보여주므로 모형의 적합성이 보장된다고 볼 수 있지만 밸브크기가 증가함에 따라 잔차의 표준편차( $s$ )은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

#### 5. 현장 조건변수와 계측기를 통한 개도율 예측

##### 5.1 개도율의 예측

식 (4)로부터 개도율의 예측값을 구하기 위해서는

매스실린더의 유량값이 주어져야 한다. 그러나 실제 현장에서는  $\hat{M}$ 은 계측기로부터 예측된 값이므로  $\hat{M}$  대신 계측기로부터 예측된  $M_0$ 를 사용한다.

개도율은 식 (4)으로부터  $x_2, x_3, \hat{M}=M_0$  값이 주어져 있을 때  $x_1$ 에 관한 2차 방정식을 풀어 구할 수 있다. 물리적으로 개도율과 유량은 단조 증가 관계에 있으므로  $b_{11} > 0$ 인 경우  $x_1 > \frac{-(b_1 + b_{13}x_3)}{2b_{11}}$

이고  $b_{11} < 0$ 인 경우  $x_1 < \frac{-(b_1 + b_{13}x_3)}{2b_{11}}$ 의 관계를 만족해야 한다. 이를 고려하여 해를 구하면 식 (6)과 같다.

$$\hat{x}_1 = \frac{-(b_1 + b_{13}x_3)}{2b_{11}} + \frac{\sqrt{(b_1 + b_{13}x_3)^2 - 4b_{11}(b_0 + b_3x_3 + b_{33}x_3^2 - M_0)}}{2b_{11}} \quad (6)$$

개도율 예측의 정도를 검증하기 위해 실험범위 내에서 밸브크기별 개도율의 참값( $x_1$ )대 개도율의 예측값( $\hat{x}_1$ )을 타점하면 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9와 같다.

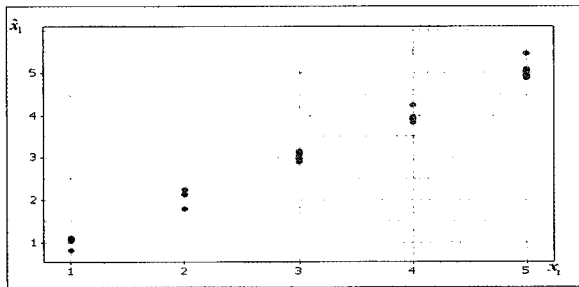


Fig. 6 Dotting results of  $\hat{x}_1$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 1$

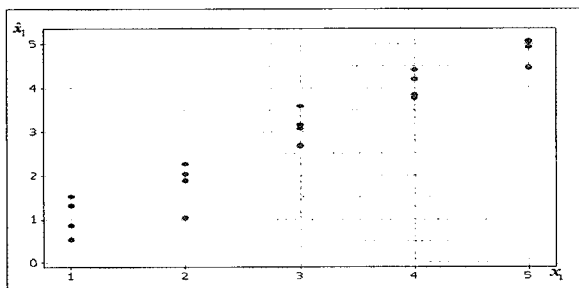


Fig. 7 Dotting results of  $\hat{x}_1$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 2$

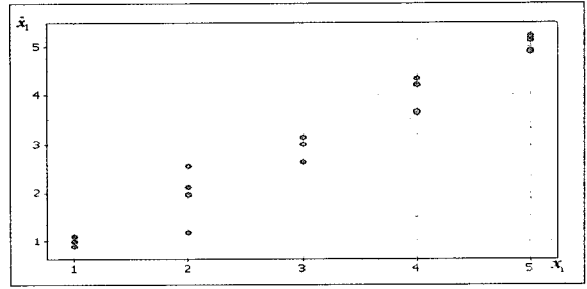


Fig. 8 Dotting results of  $\hat{x}_1$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 3$

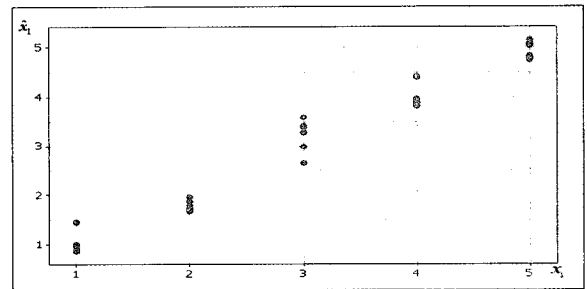


Fig. 9 Dotting results of  $\hat{x}_1$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 4$

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9로부터 밸브크기가 1인치인 경우 개도율의 예측치는 2~4인치와 비교하여 상대적으로 정확도와 정밀도가 높게 나타나는 경향을 보여준다. 예측 개도율과 참 개도율간의 적합성 정도 파악하기 위해 인치별로 식(7)과 같은  $R^2$ 를 고려하면 결과값은 Table 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_{1i} - \bar{x}_1)^2}{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2} \quad (7)$$

Table 4  $R^2$  versus valve size

Valve size (inch)	$R^2$
1	0.9867
2	0.9323
3	0.9569
4	0.9681

모든 밸브크기에 대해  $R^2$ 값이 대체적으로 높은 값이 나왔으나 2인치의 경우  $R^2$ 값이 93.23%로서 1, 3, 4인치의 밸브크기에 비해 상대적으로 적합성 정도가 낮은 경향을 보여주고 있다. 그러므로, 밸브크기가 2인치인 경우 예측 정밀도를 높이기 위해 반

복측정을 통해 얻은 데이터로부터 예측한 개도율의 평균을 사용할 수 있다. 유체압력별로 데이터와 표본평균의 차이, 즉,  $X_i - \bar{X}$ 로 정의되는 잔차(residual)  $(x_1 - \hat{x}_1)$ 를 타점하면 Fig. 10과 같다.

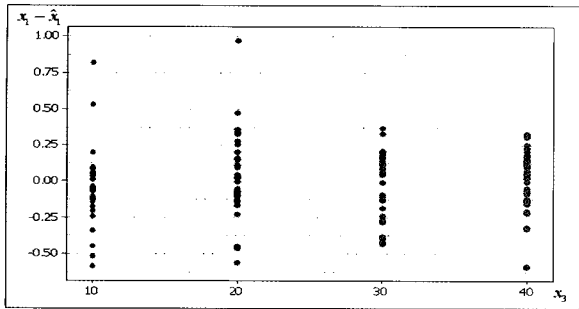


Fig. 10 Dotting results of  $x_1 - \hat{x}_1$  versus  $x_3$

Fig. 10으로부터  $x_1$ 을 추정하는 경우 유체압력이 낮을수록 잔차의 변동이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러므로 유체압력이 낮은 경우 개도율의 예측 정밀도를 높이기 위해서는 반복 측정한 값을 통해 추정된  $\hat{x}_1$ 의 평균을 사용할 것을 권장할 수 있다.

### 5.2 개도율의 예측구간

제4항에서 전술한 바와 같이 다양한 현장조건하에서 측정한 매스실린더의 유량데이터를 활용하여 회귀모형을 추정하는 절차를 검토하였다. 이때 측정한 매스실린더 유량데이터의 확률적 변동으로 인하여 추정된 회귀모형 및 개도율의 예측치 역시 확률적으로 변하게 된다. 제4항에서 제시한 개도율에 대한 예측방법은 점 추정 방법으로서 확률적 변동 및 산포를 반영하지 못하는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 개선하여 추정치의 확률적 변동을 반영한 추정방법으로서 예측구간 추정방법이 있다. 개도율  $x_1$ 에 대한  $100(1-\alpha)\%$ 예측구간은 식 (8)과 같이 확률 부등식을 만족하는 예측상한 ( $x_U$ )와 예측하한 ( $x_L$ )로 구성된 구간으로 정의된다.

$$P(x_L \leq x_1 \leq x_U) = 1 - \alpha \quad (8)$$

밸브크기  $x_2$ 와 유체압력  $x_3$ 에서 계측기를 통해 유량  $M_0$ 를 측정하였을 때  $x_1$ 에 대한 예측구간은 식(9)를 통해 유도할 수 있다.

$$P(-t_{1-\alpha/2, n-p} \leq \frac{M_0^* - \hat{M}}{S\sqrt{1+v_0}} \leq t_{1-\alpha/2, n-p}) = 1 - \alpha \quad (9)$$

$$\text{여기서, } S = \sum_{i=1}^n \frac{(M_i - \hat{M}_i)^2}{n-p}, \quad v_0 = x_0'(X'X)^{-1}x_0$$

이며  $M_i$ 와  $\hat{M}_i$ 은  $i$ 번째 실험조건에서  $M$ 의 관측치와  $M$ 에 대한 회귀식의 추정치를  $n$ 은 시료수,  $p$ 는  $\hat{M}$ 의 회귀모형 추정에 포함된 회귀계수의 갯수를 나타낸다. 그리고  $x_0$ 와  $X$ 는 상정한 회귀 모형에 의해 결정되는 벡터와 설계행렬을 나타내며 1차항과 교호작용항만을 포함한 회귀모형을 상정한 경우 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$x_0' = (1, x_1, x_3, x_1x_3)'$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{31} & x_{11}x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{32} & x_{12}x_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{3n} & x_{1n}x_{3n} \end{pmatrix} \quad (10)$$

제4항에서 개도율을 예측하기 위해  $x_1^2$ 과  $x_3^2$ 항까지 포함한 회귀모형을 고려하였으나 계산의 편의를 위해 회귀모형은 1차항과 교호작용항만을 포함한 모형, 즉  $\hat{M} = b_0 + b_1x_1 + b_3x_3 + b_{13}x_1x_3$ 을 가정하여  $x_1$ 에 대한 근사 예측구간을 구하였다.  $(M_0 - \hat{M})/s\sqrt{1+v_0}$ 은 자유도가  $n-4$ 인  $t$ 분포를 따르므로 식 (11)와 같은 확률 부등식을 고려할 수 있다.

$$P(-t_{1-\alpha/2, n-4} \leq \frac{M_0 - \hat{M}}{S\sqrt{1+v_0}} \leq t_{1-\alpha/2, n-4}) = 1 - \alpha \quad (11)$$

식 (11)를 정리하면 식 (12)와 같은 2차 확률 부등식의 형태로 유도할 수 있다.

$$P(ax_1^2 + bx_1 + c \leq 0) = 1 - \alpha \quad (12)$$

여기서,

$$a = b_{13}^2x_3^2 - s^2t^2c_{22} + b_1^2 - 2s^2t^2x_3c_{24} + 2b_1b_{13}x_3 - s^2t^2c_{44}x_3^2$$

$$b = 2(b_3b_{13} - s^2t^2c_{34})x_3^2 + 2(b_0b_{13} + b_1b_3 - s^2t^2c_{23} - M_0b_{13} - s^2t^2c_{14})x_3 + 2(b_1b_0 - b_1M_0 - s^2t^2c_{10})$$

$$c = (b_0^2 - s^2t^2c_{33})x_3^2 + 2(b_0b_3 - M_0b_3 - s^2t^2c_{13})x_3 + M_0^2 - 2M_0b_0 + b_0^2 - s^2t^2c_{11} - s^2t^2$$

$c_{ij}$ 는 식 (10)의  $(X'X)^{-1}$  행렬의  $i$ 행  $j$ 열의 요소를 나타낸다.

그러므로,  $x_1$ 의 예측 구간은 식 (12)를 정리하여 식 (8)과 같은 형태로 유도하여 예측상한과 예측하

한을 구할 수 있다. 밸브크기별로 참 개도율에 대한 예측치 및 예측 구간을 타점하면 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14와 같다.

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14로부터, 유체 압력이 클수록 예측구간의 폭이 비교적 작게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 압력이 클수록 예측된 개도율의 산포가 작게 나타나는 Fig. 10의 경향과 일치한다. 그러나, 유체 압력이 40 bar이고 밸브 크기가 4인치치의 데이터의 경우 정밀도가 높게 나타나지만 참 개도율로부터 편향된 개도율이 추정되는 것을 알 수 있다. 그러므로 밸브크기가 4인치인 경우 데이터 해석시 결과의 해석에 있어서 주의가 필요하다.

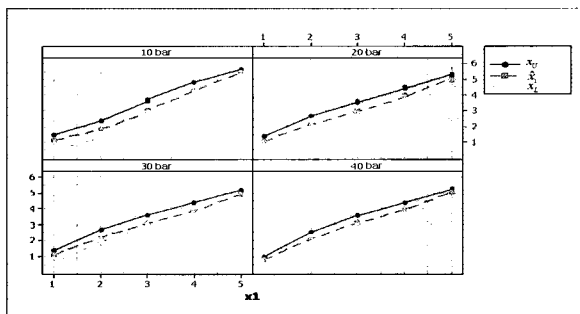


Fig. 11 Dotting results of  $\hat{x}_1, x_U, x_L$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 1$

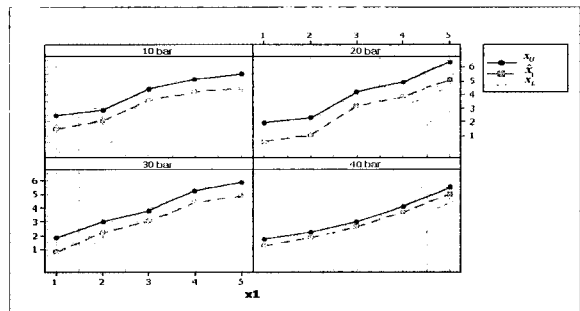


Fig. 12 Dotting results of  $\hat{x}_1, x_U, x_L$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 2$

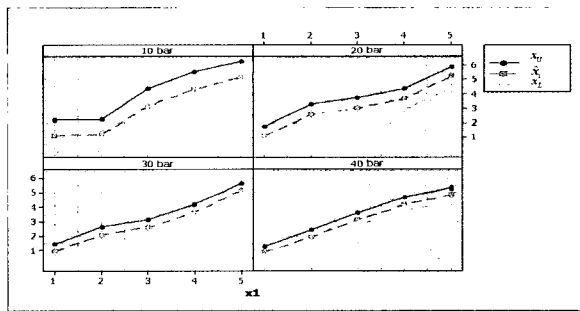


Fig. 13 Dotting results of  $\hat{x}_1, x_U, x_L$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 3$

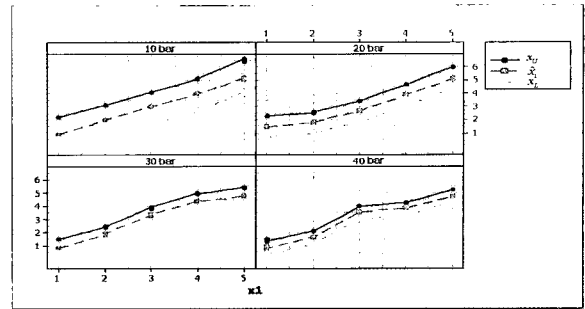


Fig. 14 Dotting results of  $\hat{x}_1, x_U, x_L$  versus  $x_1$  at  $x_2 = 4$

## 6. 결 론

발전용 밸브 유체누설의 다양한 현장조건(개도율:  $x_1$ , 밸브크기:  $x_2$ , 유체압력:  $x_3$ )하에서 매스실린더와 계측기(초음파탐지기: U, 음향탐지기: A) 데이터를 이용한 통계적 평가 및 누설량 예측 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 계측값과 현장조건변수의 값이 주어져 있을 때 아래의 절차에 의해 누설량을 추정할 수 있는 개도율의 예측방법을 개발하였다.

단계 1. U와 A로부터 M 추정

단계 2. M과  $x_1, x_2, x_3$ 간의 회귀모형 추정

단계 3. U, A,  $x_2, x_3$ 가 주어져 있을 때 단계 1과 2로부터  $x_1$  예측

2) 다중 계측 다단계 회귀모형을 이용하여 유량을 예측하는 경우, 밸브크기의 값이 커짐에 따라 잔차의 산포도 커지므로 밸브크기가 4인치 이상인 경우에는 반복관측 횟수를 증가시키고 계측기로부터 예측된 유량값들의 평균을 이용하는 것이 바람직하다.

3) 밸브크기별 예측된 회귀모형의  $R^2$ 는 95%이상으로 적합도 측면에서 양호한 결과를 보여주고 있다. 밸브크기가 1인치인 경우  $R^2$ 는 99%이며 2~4인치에 비해 적합성이 높은 회귀모형을 추정하고 있으며 밸브크기가 증가함에 따라 예측된 개도율의 산포가 증가하는 경향을 보여주므로 밸브크기가 증가하는 경우 모형추정을 위한 실험 수행시 반복관측의 횟수를 증가시키는 것이 바람직하다.

4) 추정된 회귀모형으로부터 계측기의 값과 현장조건변수(유체압력, 밸브크기)로부터 개도율을 예측하는 경우  $R^2$ 는 유체압력이 낮을수록 예측된 개도율의 산포가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 2인치의 경우 예측된 개도율의 산포는 낮지만 추정된 모형의 적합성 정도(93.23%)는 1,3,4인치

(95% 이상)에 비해 상대적으로 낮게 나오므로 유량 데이터를 반복적으로 관측하여 예측된 개도율의 평균을 이용할 것을 제안한다.

5) 본 연구의 결과는 각종 분야 실험데이터 신뢰도 검증 및 데이터 예측을 위한 분야에 기초자료 제공 및 응용이 가능할 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

1. A. A. Pollock and S. Y. S. Hsu, 1882, "Listening to Leaks", Noise & Vibration Control Worldwide, Vol. 13, No. 9, pp. 374~376.
2. H. Wichmann and D. Phillips, 1984, "Acoustic Emission Techniques for Locating Internal Leakage of Redundant Components", Journal of Spacecraft, Vol. 21, No. 1, pp. 36~40.
3. Anon, 1986, "Acoustic Emission for Detection of Leakage in Pipelines", Noise & Vibration Control Worldwide, Vol. 17, No. 2, pp. 66~67.
4. S. G. Lee, J. H. Park and G. B. Yoo, 2007, "Study on Evaluation of the Leak Rate for Steam Valve in Power Plant", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 45~50.
5. S. G. Lee et al, 2007, "Study on the Multi-measuring Method for Evaluation of Internal Leak of Power Plant Valve", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 35~40.