

## 액체 수송계에 대한 고장 검출 진단시스템의 설계

김태한<sup>†</sup> · 함영민\* · 이기상\*\*

(주)태평양 시스템 엔지니어링부  
\*단국대학교 공과대학 화학공학과, \*\*전기공학과  
(1995년 2월 8일 접수, 1995년 7월 4일 채택)

## Design of a Fault Detection and Isolation System for a Liquid Transportation System

Tae-Han Kim<sup>†</sup>, Yeong-min Hahm\* and Kee-Sang Lee\*\*

*Dept. of System Eng., Pacific Corporation, Seoul 156-010, Korea*

*\*Dept. of Chem. Eng., \*\*Dept. of Electric. Eng., College of Eng., Dankook Univ., Seoul 140-714, Korea*

(Received 8 February 1995; accepted 4 July 1995)

### 요 약

본 연구에서는 타여자 직류 전동기로 구동되는 원심펌프에 의한 액체 수송관 시스템에 대한 고장 검출 진단 시스템을 제안 설계하고 모의실험을 통해 그 성능을 검토하였다. 제안된 고장 검출 진단시스템(FDIS)은 고장 검출 진단에 사용될 정보 추출을 위한 잔차 발생 기구와 잔차에 근거하여 고장 발생 여부를 판정하는 검출 논리 및 고장 원인/요소의 식별을 위한 진단 논리로 구성된다. 이 고장 검출 진단시스템(FDIS)은 각 센서당 한 개씩의 상태 관측자를 이용한 전용 관측자 구조(DOS)로 분류되며 대상 시스템의 중요 변수 측정을 위한 센서의 고장 검출, 분류 기능을 가짐은 물론, 주 공정요소인 직류 전동기, 원심펌프 그리고 파이프 라인에서 발생할 수 있는 요소 고장을 조기에 검출, 진단한다. 따라서 액체 수송계에 요구되는 안전성과 기능적 신뢰성을 확보, 향상시키기 위한 수단으로서 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract**—In this study, a fault detection and isolation system(FDIS) is constructed for the supervision of the liquid transportation system that is composed of DC-motor, centrifugal pump and pipe-lines. The FDIS consists of the residual generator, detection logic and fault isolation logic and it can be classified as the dedicated observer scheme(DOS). The system can detect the occurrence of sensor faults and identify the failed sensor. And the process faults that may occur in the components such as DC-motor, centrifugal pump and pipe-lines can be promptly detected and diagnosed with the FDIS. It may provide an effective way that will enhance the safety and the functional reliability of the fluid transportation systems.

### 1. 서 론

최근의 화학산업 공장을 비롯한 각종 플랜트의 가장 큰 특징은 대형화와 자동화라 할 수 있다. 이러한 특징은 플랜트 또는 공정의 고성능화와 동시에 대량생산을 가

능하게 한다는 입장에서 매우 바람직하지만 고도의 안전성과 기능적 신뢰도를 달성할 수 있는 설계 및 운용 기술을 요구한다.

계통의 안전성과 신뢰도 향상은 일반적으로 미리 계획된 정기점검, 예방 정비에 의해 어느 정도 달성할 수

있지만 대단위 화학공장 등에서는 운전 중 요소고장으로 인한 긴급정지시 그 비용이 막대할 뿐 아니라 인명에 치명적인 피해를 줄 수 있다. 따라서 최근에는 고도로 발달된 컴퓨터 기술을 배경으로 프로세스 운전 중 발생 가능한 요소의 이상 또는 고장을 조기에 검출 진단하여 프로세스 운전자에게 통보함으로써 신속한 후속조치를 가능하게 할 수 있는 실시간 고장 검출 진단시스템 (real-time FDIS)의 개발 도입이 적극적으로 추진되고 있다[1].

FDIS에 요구되는 일반적인 특성은 이상 및 고장에 대한 빠른 응답특성, 작은 FAR(False Alarm Rate)의 유지, 고장요소의 정확한 식별 그리고 소프트웨어적 개념 및 하드웨어적 개념이 간단하여 실시간 운용이 가능할 것 등이다.

80년대까지 연구 개발된 고장 검출 진단기법의 대부분은 Himmelblau[2]에 기술되어 있고, 최근의 연구결과들은 Frank 등[3]에 상세히 기술되어 있으며, 국내에서도 전동기, 반응기 등에 대한 이상 검출 진단기법을 제시한 연구 결과가 보고된 바 있다[4, 5].

본 연구에서는 타여자 직류 전동기로 구동되는 원심 펌프에 의한 액체 수송관 시스템에 대하여 센서 및 공정요소 고장을 조기에 검출 및 진단할 수 있는 「고장 검출 진단시스템」을 제안 설계하고 시뮬레이션을 통하여 실질적 적용 가능성을 검토함에 그 목적을 두었다.

액체 수송 계통의 핵심요소인 전동기-펌프 시스템에 대한 FDIS설계의 중요성은 이 시스템이 관을 통한 액체의 수송에 매우 많이 사용되고 있음에도 불구하고, 배관계를 구성하는 펌프계통에 대한 통합된 이상 검출 및 진단에 관한 연구가 미흡하다는 사실로부터 충분히 인식될 수 있다.

이 계통을 위한 FDIS설계의 대표적 결과는 연속 시간 파라미터 추정기법에 근거하여 공정요소 고장을 검출 진단한 Isermann의 연구이며[6], 국내에서는 배관망에서의 유출 진단에 대한 연구 결과가 제시되었을 뿐이다 [7].

본 연구에서 제안하는 FDIS는 프로세스 모델의 입출력 관계에 근거하여 고장 검출을 수행하는 ARM(Analytical Redundancy Method) 중, 잔차 발생기구로서 각 센서 당 한 개의 상태 관측자를 이용한 DOS(Dedicated Observer Scheme) 기법에 속하며[8, 9], 공정에 대한 수학적 모델을 구할 수 있고, 특정 동작점에 대한 선형화가 가능한 경우이면 이론적 수정없이 응용될 수 있다. 또한, DOS구조를 채택한 이유는, 이 기법이 batch processing을 전제한 Isermann의 연구 결과와는 달리 실시간 적용이 가능하고, 설계가 간단하며 실제적 적용이 용이하여 이미 여러 가지 공정의 고장 진단에 도

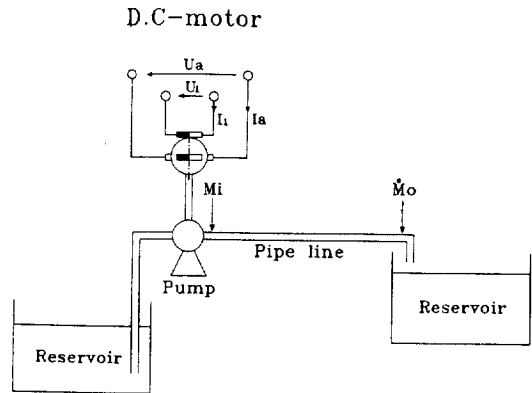


Fig. 1. Scheme of a centrifugal pump driven from DC-motor and pipe line.

입된 바 있을 뿐 아니라[10], 공정요소에서 발생할 수 있는 중요 고장은 물론, 이 공정의 제어와 감시를 위한 정보제공 수단인 각 센서의 이상/고장까지 신속히 검출 처리하는 기능을 갖도록 설계 가능하기 때문이다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 제 2장에서는 진단 대상 계통인 액체 수송시스템의 구성, 수학적 모델 및 이 계통에서 발생하는 주요 고장에 대해 기술하였으며, 제 3장에서는 이 계통의 제어 및 감시를 위해 도입된 중요 센서의 이상 및 프로세스 고장을 검출 진단하기 위한 FDIS의 제반 요소를 설계하였다. 또한 제 4장에서는 설계된 FDIS의 검출 성능을 입증하기 위하여 각 고장에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석검토하였으며, 제 5장에 결론을 수록하였다.

## 2. 진단 대상 시스템

### 2-1. 액체 수송계의 구성

액체 수송계는 각종 산업용 플랜트에서 매우 큰 비중을 차지하고 있으며 구동장치와 펌프 및 배관시스템으로 구성되어 있다. 이 액체 수송시스템은 구동장치인 전동기의 고장, 원심펌프의 임펠러 손상, 파이프라인에서의 액체 유출 등의 이상이 발생한 경우, 그 기능이 마비되거나 또는 성능이 크게 저하될 수 있으며 이는 곧 요소 고장이 관련 프로세스 전체의 안전성과 경제성에 중대한 악영향을 끼치게 됨을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 타여자 직류 전동기로 구동되는 원심펌프를 포함한 파이프 라인 액체 수송관 시스템에서 발생할 수 있는 중요 고장을 신속히 검출 진단할 수 있는 FDIS의 설계문제를 다룬다.

액체 수송계의 전체적인 구성도는 Fig. 1과 같다. Fig.

Table 1. List of the DC motor(DM30)' data

Definition	Data	Definition	Data
Maximum power	3.52[kW]	Rated power	3.0[kW]
Maximum speed	1250[rpm]	Rated speed	1000[rpm]
Rated armature voltage	160[V]	Rated frequency	60[Hz]
Rated current	22[A]	Resistance	0.45[Ω]

Table 2. Data of parameters in steady-state

Symbol	Definition	Parameter data
$R_a$	armature resistance	0.45[Ω]
$L_a$	armature inductance	0.0054[H]
$K_b$	back electromotive force constant	1.433[V·sec/rad]
$J$	moment of inertia : 0.398[kg·m <sup>2</sup> ]	$J_m = 0.199$ $J_p = 0.199$
$C_f$	adhesive friction coefficient : 0.02[N·m·sec/rad]	$C_{fm} = 0.005$ $C_{fp} = 0.015$
$K_m$	torque coefficient generated by the motor	0.1459[N·m/A]
$K_p$	torque coefficient generated by the pump	0.2736[N·m·sec/rad]
$H_m$	characteristic coefficient of the motor	0.015[m <sup>2</sup> /kg·sec]
$H_p$	characteristic coefficient of the pump	0.564[m <sup>2</sup> /rad·sec]
$A_{ac}$	acceleration coefficient of the fluid	17.13[m <sup>2</sup> /kg]
$A_r$	resistances coefficient of the fluid	13.704[m <sup>2</sup> /kg·sec]

1의 구성요소 중 직류 전동기는 일진전기공업(주)의 모델번호[DM30]인 직류 전동기를 대상 모델로 삼았고, 주요 사양은 Table 1에 나타내었다[11]. 원심펌프는 동해펌프공업(주)의 Stainless-Steel Volute-Centrifugal Pumps(DH-I-50)를 대상 모델로 삼았다[12-14]. 이 원심펌프의 특성은 양정이 크고 양수량이 많아 효율적이며, 구조가 간단하고 배관설치 및 보수가 용이하다. 또한 부식에 견딜 수 있도록 엄선된 재질을 사용하고 있으며, 다음과 같은 매우 다양한 분야에서 쓰이고 있다.

- (1) 알칼리 및 약, 강산의 이송용
- (2) 약품 및 식품 이송용
- (3) 정수 및 폐수 처리용
- (4) 솔벤트, 신나, 벤졸 등 용제 이송용
- (5) 반도체, 초음파 세척기용
- (6) 섬유 및 제지공장용

원심펌프의 소요동력( $I_a$ )은 3.32[kW]이고, 흡입구경과 토출구경이 50[mm], 정격 회전수 1000[rpm]으로 전양정이 37[m]이며, 효율은 토출량이 0.2[m<sup>3</sup>/min]일 때 48%( $\eta=0.48$ )이다.

파이프 라인 액체 수송계는 원심펌프를 사용하여 상온에서 비중 0.998인 물이 정상유속 2[m/sec]로 규격 40강관[0.05 m]을 통하여 저장탱크로부터 퍼내는 것을 대상 모델로 삼았으며, 다음과 같은 가정을 하여 모델식을 취하였다[15].

[가정] (1) 전 구간에서 걸쳐 끝은 모양이다.

(2) 유체의 흐름은 난류이다.

[가정] (1) 전 구간에서 걸쳐 끝은 모양이다.

(2) 유체의 흐름은 난류이다.

(3) 직경이 일정하다.

(4) 열의 출입은 무시한다.

전단 대상 시스템인 타여자 직류 전동기, 원심펌프 그리고 파이프 라인에서 정상상태일 때의 파라미터 값들은 Table 2에 나타내었다.

## 2-2. 액체 수송계의 수학적 모델

타여자 직류 전동기로 구동되는 원심펌프에 의한 파이프 라인 액체 수송관 시스템에서 각 요소는 식 (1)-(3)과 같은 수학적 모델로 표현될 수 있다.

(1) 전기자 회로

$$\frac{dI_a(t)}{dt} = -\frac{R_a}{L_a}\Delta I_a(t) - \frac{K_b}{L_a}\Delta\omega(t) + \frac{1}{L_a}\Delta U_a(t) \quad (1)$$

(2) 전동기와 펌프의 역학

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K_b}{J}\Delta I_a(t) - \frac{C_f + K_p}{J}\Delta\omega(t) - \frac{K_m}{J}\Delta\dot{M}(t) \quad (2)$$

(3) 파이프 라인 시스템

$$\frac{d\dot{M}(t)}{dt} = -\frac{A_r}{A_{ac}}\Delta\dot{M}(t) + \frac{1}{A_{ac}}\Delta Y(t)$$

Table 3. Fault of the system and parameter variation

System	Process component fault	Parameter variation
DC motor	① Fault1; defect of carbon-brushes. ② Fault2; a short circuit of armature coil.	① armature resistance(Ra) increase. ② armature resistance(Ra) decrease, armature inductance(La) decrease.
Centrifugal pump	① Fault3; excess of lubrication oil on ball-bearing. ② Fault4; exist of dirt on ball-bearing. ③ Fault5; cavitation happening(temperature increase, gas bubble formation). ④ Fault6; impeller defecting.	① adhesive friction coefficient(Cf) decrease, pump torque coefficient(Kp) decrease. ② adhesive friction coefficient(Cf) increase, pump torque coefficient(Kp) decrease. ③ fluid resistances coefficient(Ar) increase, pump characteristic coefficient(Hp) decrease. ④ fluid resistances coefficient(Ar) increase, pump characteristic coefficient(Hp) decrease, pump torque coefficient(Kp) decrease.
Pipe line	① Fault7; leakage in pipe line	① outlet mass flowrate(Mo) decrease.

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{A_r}{A_{ac}} \Delta \dot{M}(t) + \frac{1}{A_{ac}} [H_p \Delta \omega(t) + H_m \Delta \dot{M}(t)] \\
 &= \frac{1}{A_{ac}} H_p \Delta \omega(t) + \left[ \frac{H_m}{A_{ac}} - \frac{A_r}{A_{ac}} \right] \Delta \dot{M}(t) \quad (3)
 \end{aligned}$$

위의 요소별 수학적 모델식을 다시 상태벡터 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_b}{J} & -\frac{(C_f + K_p)}{J} & -\frac{K_m}{J} \\ 0 & \frac{H_p}{A_{ac}} & -\frac{(A_r + H_m)}{A_{ac}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [u_a] \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta L_a(t) \\ \Delta \omega(t) \\ \Delta \dot{M}(t) \end{bmatrix}, \quad u = [u_a] = [\Delta u_a(t)],$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

위에서  $y_i (i=1, 2, 3)$ 은 질량유속의 제어와 공정감시를 위한 측정출력으로 본 계통의 경우에는 모든 상태변수를 측정출력으로 가정하였다. 식 (4)에 각 매개변수 값을 대입하여 구해진 대상 시스템의 특성값(eigen-values)은  $(-69.415, -14.651, -0.801)$ 이다.

### 2-3. 진단 대상 시스템의 고장

본 절에서는 액체 수송계의 각 구성요소에서 발생할 수 있는 고장과 그 원인 및 본 연구에서 진단하고자 하는 진단 대상의 고장에 대하여 기술한다.

먼저, 직류 전동기에서 발생할 수 있는 고장요소와 원인은 정류자와 브러쉬간의 마찰에 의해 발생하는 브러쉬 결함, 전기자 코일의 절연, 자기회로의 균열에 의한 전기자 코어의 결함 그리고 부하의 급변 등이 있다[4].

원심 펌프에서 발생하는 고장은 여러 원인이 복합적으로 작용한 경우가 많지만 기체 주머니(gas pocket), 공동화(cavitation), 과도한 틈새(excessive clearance), 베어링(bearing)과 같은 부품의 손상 등을 대표적인 고장(원인)으로 간주할 수 있다[16].

또한, 파이프 라인에서 발생할 수 있는 고장 요소와 그 원인은 파이프 라인에 침전물 등이 생겨관이 막히는 현상과 관의 어느 부분에 손상이 생겨 유체가 유출되는 현상 등이 있다[7].

본 연구에서는 직류 타여자 전동기에서 발생할 수 있는 브러쉬 결함과 전기자 코일의 결함 그리고 원심 펌프에서 발생 가능한 고장 중 대표적인 현상인 공동화가 일어날 때, 임펠러가 손상되었을 때, 베어링에서 윤활유의 유무에 따른 이상 및 고장을 검출 진단하고, 파이프 라인에서의 액체 유출을 검출하고자 대상 파이프 라인에 대한 수지식을 이용하여 직접적으로 유출 발생 여부와 유출량을 판단한다.

대상 시스템에서 진단하고자 하는 대표적인 고장 요소와 관련된 매개변수 영향을 Table 3에 나타내었다.

### 3. 고장 검출 진단시스템(FDIS)의 설계

본 장에서는 액체 수송계에 대한 「고장 검출 진단시

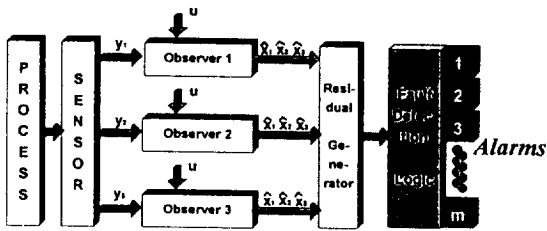


Fig. 2. The FDIS(Fault Detection Isolation System).

시스템」을 제안 설계한다. 제안된 FDIS는 고장 검출 진단에 사용될 정보 추출을 위한 잔차 발생 알고리즘과 잔차에 근거하여 고장 발생 여부를 판정하는 검출 논리 및 고장 원인/요소의 식별을 위한 진단 논리로 구성되며 그 구조는 Fig. 2와 같다[10].

이 FDIS는 대상 시스템의 중요 변수 측정을 위한 센서의 고장을 검출, 분류하는 기능을 가짐은 물론, 주 공정요소인 타여자 직류전동기, 원심펌프 그리고 파이프 라인에서 발생할 수 있는 요소 고장을 조기에 검출 진단하도록 설계된다.

Fig. 3은 이 FDIS의 운용 즉, 고장정보의 습득과 처리과정을 나타낸 것이다. 그림에서 각 센서는 고장 정보 추출을 위한 공정 변수를 측정하며, 관측자 बैं크 내의 각 상태 관측자는 서로 다른 센서의 측정치에 근거하여 중복된(3중) 상태 추정치를 제공한다. 다음으로 잔차 발생기는 상태 관측자 बैं크에 의해 제공된 상태 추정치로부터 고장의 발생여부 및 진단에 사용될 잔차를 발생한다.

또한 고장의 검출 진단은 모두 이 잔차와 검출 진단 논리에 근거하며, 그 과정은 센서 고장과 공정요소 고장을 구분하는 단계와 센서 고장의 경우 고장 센서를 식별하는 단계 및 공정요소 고장의 경우 그 고장원인을 진단하는 단계로 이루어진다.

### 3-1. 관측자 बैं크의 설계

상태관측자는 소수의 출력변수 측정치에 근거하여 모든 상태변수 정보를 재구성하는 방법이다. 이 기법은 Kalman filter와 같이 측정이 불가능한 변수를 포함하고 있는 계통에 대한 상태궤환제어를 실현하기 위한 수단으로 제안되었으며 설계방법 및 용도 면에서 매우 다양하게 발전되어왔다.

상태 관측자를 고장 검출 진단에 도입한 초기의 연구는 주로 IFD(Instrument Fault Detection)에 집중되어 있으나 최근에는 PFD(Process Fault Detection)에도 적극적으로 도입되고 있다. FDIS에 도입될 관측자의 종류와 설계기법은 대상계통의 여러 가지 특성과 검출

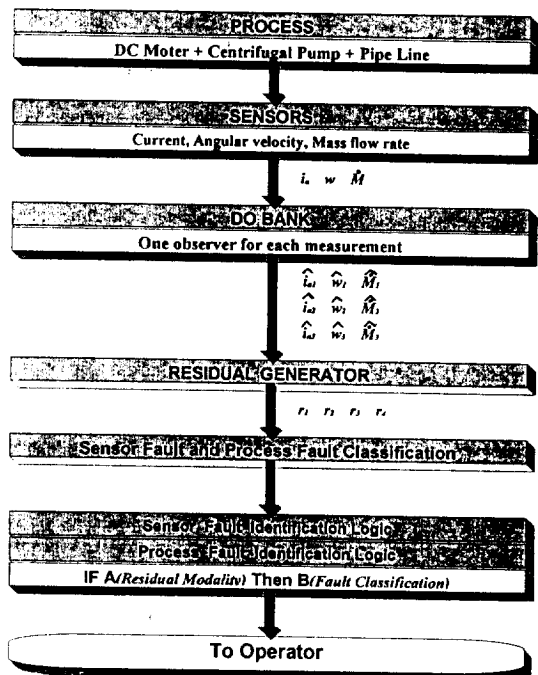


Fig. 3. Technical flowchart of the fault detection diagnosis system.

진단해야 할 고장의 종류 등을 고려하여 선택되어야 한다.

본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 전차원 관측자를 사용한다.

다음과 같은 미분 방정식으로 표현되는 선형 시불변 계를 고려한다[17].

$$\text{상태 방정식: } \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$\text{출력 방정식: } y(t) = Cx(t) \quad (6)$$

여기서  $x$ :  $n$ 차원 상태벡터,  $u$ :  $m$ 차원 입력벡터

$y$ :  $p$ 차원 출력벡터,  $A, B, C$ : 모델의 계수행렬

식 (6)에 대한 전차원 관측자의 표현식은 다음과 같다.

$$\dot{z} = (A - LC)z + Ly + Bu \quad (7)$$

위에서  $z$ 는 상태  $x$ 의 추정치이고  $L$ 은 관측자 이득이다. 관측자의 상태추정 편차를  $e(t) = z(t) - x(t)$ 로 정의하면 이 편차는 식 (6)과 (7)로부터 얻어지는 다음 방정식에 지배된다.

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (8)$$

따라서 전차원 관측자는  $(A - LC)$ 가 요구되는 고유

Table 4. Data of real constants matrix L

Real constants	Simulation value	Real constants	Simulation value	Real constants	Simulation value
$l_1$	40.133	$l_4$	-217.44	$l_7$	301500.
$l_2$	-10.233	$l_5$	30.133	$l_8$	-17200.
$l_3$	181.07	$l_6$	-582.226	$l_9$	30.

치를 갖음으로서  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 이 되도록 이득 L을 구함으로서 설계된다.

액체 수송계의 FDIS 내의 상태 관측자 뱅크는 전기 자전류, 전동기 및 펌프의 회전 속도, 질량유속의 측정치에 의해 구동되는 세 개의 관측자로 구성되며 각 관측자 방정식은 각각 다음과 같다.

이들 관측자는 각 센서 당 한 개씩 설계되므로 DO (Dedicated Observer)라 부르며 DO(i)는 i번째 센서 출력값에 의해 구동되는 관측자를 의미한다.

DO(1) (9)

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} - l_1 & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_b}{J} - l_2 & -\frac{(C_f + K_p)}{J} & -\frac{K_m}{J} \\ -l_3 & \frac{H_p}{A_{ac}} & -\frac{(A_r + H_m)}{A_{ac}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} y_1 + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_a$$

DO(2) (10)

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} - l_4 & -\frac{K_b}{L_a} - l_4 & 0 \\ \frac{K_b}{J} - l_5 & -\frac{(C_f + K_p)}{J} - l_5 & -\frac{K_m}{J} \\ 0 & \frac{H_p}{A_{ac}} - l_6 & -\frac{(A_r + H_m)}{A_{ac}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_4 \\ l_5 \\ l_6 \end{bmatrix} y_2 + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_a$$

DO(3) (11)

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_7 \\ \dot{z}_8 \\ \dot{z}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & -l_7 \\ \frac{K_b}{J} & -\frac{(C_f + K_p)}{J} & -\frac{K_m}{J} - l_8 \\ 0 & \frac{H_p}{A_{ac}} - l_6 & -\frac{(A_r + H_m)}{A_{ac}} - l_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_7 \\ z_8 \\ z_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_7 \\ l_8 \\ l_9 \end{bmatrix} y_3 + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_a$$

위에서 DO(1)은 전동기의 전기자전류( $I_a$ ) 측정치에 근거하여 상태변수( $I_a, \omega, \dot{M}$ )를 추정하도록 설계된 것이며 DO(2), DO(3)은 각각 전동기로 구동된 원심펌프의 각속도( $\omega$ ), 파이프 라인에서의 질량유속( $\dot{M}$ ), 측정치에 근거하여 상태변수( $I_a, \omega, \dot{M}$ )를 추정한다. 따라서 이들 세 관측자는 각 상태변수에 대한 3중의 정보를 제공한다.

모의실험에 사용된 진단 대상 시스템의 파라미터 값들은 Table 2에 나타내었고, Table 4에는 DO(1), (2), (3)에 적용한 비례이득의 값을 수록하였다.

각 상태 관측자의 특성값(eigenvalues)은 각각 DO1은 (-80, -38.4, -6.7), DO2와 DO3은 (-80, -25, -10)으로 선정하였으며, 이러한 극점은 관측자의 추정치가 짧은 시간 내에 실제 상태값에 수렴하도록 시스템 극점보다 더 큰 음의 실수부를 갖도록 선정된 것이다[17].

### 3-2. 센서 고장과 프로세스 고장의 검출

제안된 FDIS의 가장 큰 특징의 하나는 센서 고장과 공정요소 고장을 분리 검출할 수 있도록 설계되었다는 점이다. 거의 모든 기존의 FDIS는 센서 고장 또는 공정요소 고장 중 한가지만을 검출 대상으로 하여 설계되었으며 그 이유는 일반적인 고장 검출 진단기법을 적용할 경우, 이들 고장이 서로 다른 고장과 관련된 잔차를 증가시키는 간접 작용을 가짐으로 그 분류가 곤란하기 때문이다.

이는 FDI기법의 감도문제로 잘 알려져 있으며 지속적인 연구가 요구되는 부분이다[10].

본 절에서는 DOS의 특성을 활용하므로써 센서 고장과 공정요소 고장을 식별하기 위해 다음과 같은 간단한 구분논리를 제시한다. 고장검출 및 진단논리에 사용할 수 있는 잔차는 다음의 두 가지 형태로 정의될 수 있다.

$$\text{res1}(i, j) = |y_i - \hat{y}_{ij}|, i=1,2,\dots,m, j=1,\dots,m \quad (12)$$

$$\text{res2}(i, j, k) = |\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{ik}|, i=1,\dots,n, j, k=1,\dots,m \quad (13)$$

여기서  $y_i$ :  $i$ 번째 공정 출력변수의 측정치

$\hat{y}_{ij}$ : DO( $j$ )로 추정된  $i$ 번째 출력변수의 추정치

$\hat{x}_{ij}$ : DO( $j$ )로 추정된  $i$ 번째 공정 상태변수 추정치

$m$ : 측정 출력변수의 수

$n$ : 공정 상태변수의 개수

위에서 식 (12)는 출력변수의 측정치와 각 관측자에서 추정된 추정치의 차이이며, 식 (13)은 동일한 상태변수에 대한 서로 다른 관측자 추정치들의 차이이다.

본 절에서 제시하는 센서 고장과 공정요소 고장의 분류논리는 다음 사실에 근거한다.

Fact(1): 센서의 고장은 대응되는 DO의 입장에서 측정치의 변화이므로 과도기간 이후  $\text{res1}(i, i)$ 는 영에 수렴한다.

Fact(2): 고장센서의 출력  $y_i$ 와 정상센서에 대응되는 DO의 추정치  $\hat{y}_{ij}$ 의 잔차와 고장센서에 대응되는 DO의 추정치  $\hat{y}_{ij}$ 와 정상센서의 출력  $y_i$ 의 잔차 즉,  $\{\text{res1}(i, j) | i \neq j\}$ 는 반드시 영이 아닌 값을 가진다. 이 Fact(2)는  $y_i$ 센서 고장시 ( $m \times m$ )개의 잔차 중,  $2(m-1)$ 개의 잔차 즉,  $\{\text{res1}(i, j) | j=1,2,\dots,m, j \neq i\}$ 과  $\{\text{res1}(j, i) | j=1,2,\dots,m, j \neq i\}$ 만이 임계치를 초과함을 의미한다.

Fact(3): 공정요소 고장은 공정 파라미터의 급변, 측정 불가능한 미지외란의 발생 등, DO 설계시 고려하지 않은 변화를 의미하므로 일반적으로 모든  $\text{res1}(i, j)$ 를 증가시키며 최소한 한 개 이상의 대각요소  $\text{res1}(i, i)$ 를 증가시킨다.

센서 고장과 공정요소 고장의 분류는 위의 Fact에 근거한 다음 논리에 의해 수행된다.

$\text{res1}(i, j)$  중 ①  $\text{res1}(i, i)$ 가 모두 임계치보다 작고,  
②  $\text{res1}(i, j)$  중  $2(m-1)$ 개가 임계치

보다 크면

→ 센서 고장

$\text{res1}(i, j)$  중 ① 두 개 이상의  $\text{res1}(i, i)$ 가 임계치보다 크고,

②  $\text{res1}(i, j)$  중 불특정 다수가 임계치보다 크면

→ 공정요소 고장

위의 논리에서 조건 ①은 조건 ②에 비해 큰 비중을 가지는 동시에 조건 ②없이 자체적인 판단이 가능하므로 단순화된 분류논리로 사용될 수 있다.

### 3-3. 고장센서의 식별논리

3-2절의 과정에서 센서 이상이 검출된 경우에는 고장센서로부터 제공되는 허위정보를 차단 또는 정정하기 위하여 즉시 고장센서를 식별하여야 한다. 고장센서의 식별을 위한 한가지 논리는 전술한 Fact(2)에 근거하여 설정될 수 있다.

Fact(2)에 의하면  $y_i$ 의 측정을 위한  $i$ 번째 센서의 고장은 ( $m \times m$ )개의 잔차 중,  $2(m-1)$ 개의 잔차 즉,  $\{\text{res1}(i, j) | j=1,2,\dots,m, j \neq i\}$ 과  $\{\text{res1}(j, i) | j=1,2,\dots,m, j \neq i\}$ 를 증가시키므로 고장센서는 다음 논리에 의해 식별될 수 있다.

편의상, 잔차  $\text{res1}(i, j)$ 를 요소로 갖는 행렬을 RES1이라 하자.

식별논리[1]: RES1의 모든 요소에 대한 임계치 검사를 수행한 결과, [대각 요소를 제외한 모든  $i$ 행 요소 및  $i$ 열 요소가 모두 임계치를 초과하면 고장센서는  $i$ 번째 센서이다.]

식 (13)으로 정의된 잔차  $\text{res2}$ 를 이용하면 고장센서의 식별을 위한 또 다른 논리의 설정이 가능하다. 식별논리는 다음 사실에 근거한다.

Fact(4): 고장센서의 출력  $y_i$ 에 의해 구동되는 DO( $i$ )의 상태 추정치와 정상센서에 대응되는 DO( $i$ )의 상태 추정치의 잔차는 모두 임계치를 초과하며 정상센서에 대응되는 DO 추정치 간의 잔차는 매우 작은 값을 갖는다.

이 경우 정의될 수 있는 잔차벡터는 모두  $m(m-1)/2$ 개이고 따라서 모두  $nm(m-1)/2$ 개의 잔차가 정의될 수 있다. 그러나 본 연구의 진단대상계통은  $m=3$ 이므로 단지 3개의 잔차벡터만이 정의될 수 있으며 그 식별논리는 다음과 같다.

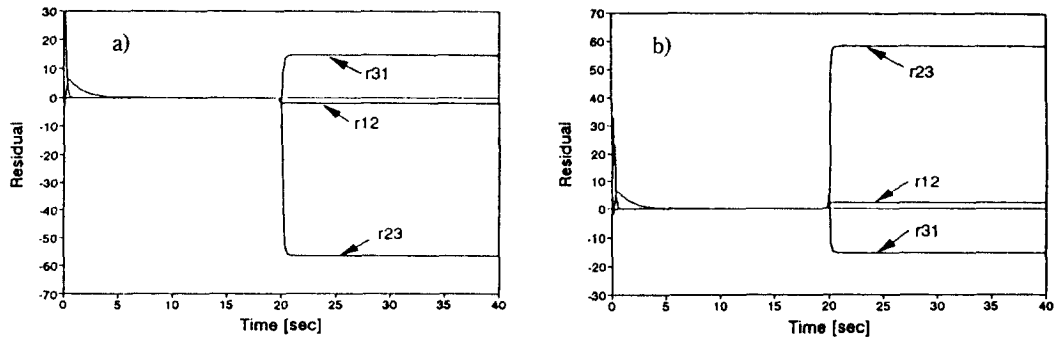


Fig. 4. Residuals when faults exist in DC-motor.

a) Fault 1, b) Fault 2

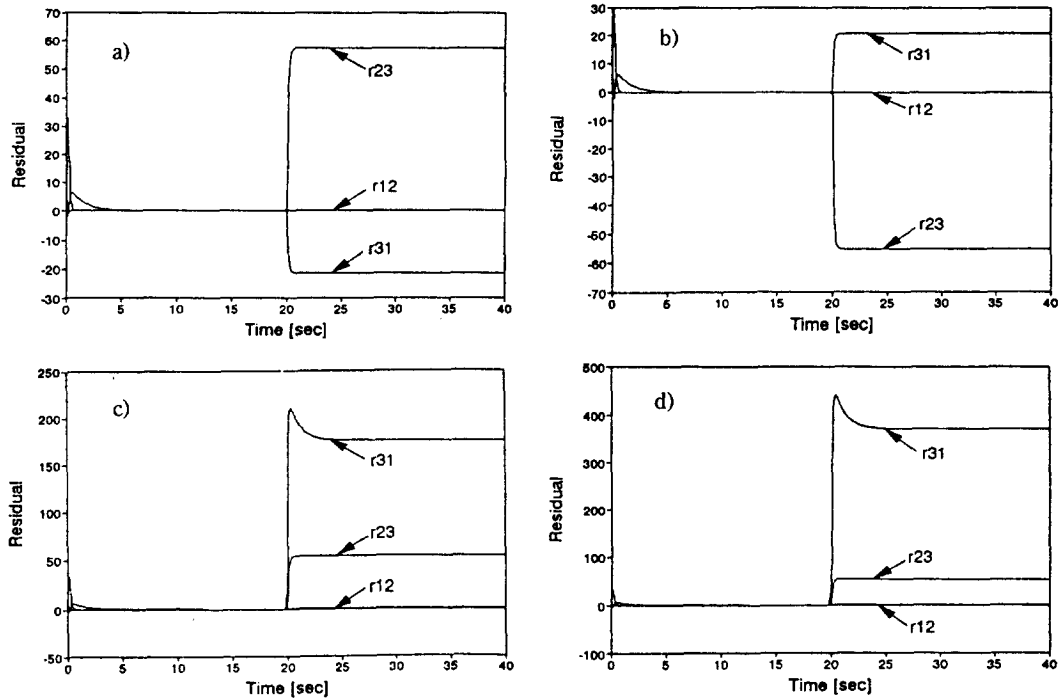


Fig. 5. Residuals when faults exist in centrifugal pump.

a) Fault 3, b) Fault 4, c) Fault 5, d) Fault 6

식별논리[2]:

Rule 1: If  $(r_{12}, r_{13}, r_{23}) = (\text{불변}, \text{불변}, \text{불변})$   
THEN; 정상(Normal state)Rule 2: If  $(r_{12}, r_{13}, r_{23}) = (\text{증가}, \text{증가}, \text{불변})$   
THEN;  $x_1$  센서 고장Rule 3: If  $(r_{12}, r_{13}, r_{23}) = (\text{증가}, \text{불변}, \text{증가})$   
THEN;  $x_2$  센서 고장Rule 4: If  $(r_{12}, r_{13}, r_{23}) = (\text{불변}, \text{증가}, \text{증가})$ THEN;  $x_3$  센서 고장 (15)위에서  $r_{ij}$ 는 벡터  $[\text{res2}(1,i,j) \text{ res2}(2,i,j) \text{ res2}(3,i,j)]^T$ 를 나타낸다.

## 3-3. 공정요소 고장 검출 진단논리

3-2절의 과정에서 공정요소의 고장이 검출되면 조업 중단 여부의 결정 및 기술적인 후속조치가 취해질 수



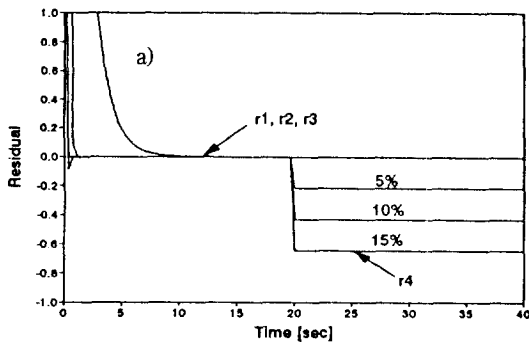


Fig. 6. Residuals when faults exist in pipe line.

a) Fault 7

있도록 고장요소와 원인을 규명하여야 한다.

공정요소 고장의 진단논리는 진단의 신속성과 동시에 정확성이 보장되도록 설계되어야 한다. 그러나 대부분의 프로세스에서 고장의 전과과정과 이에 따른 상태변수의 거동의 분석은 많은 시뮬레이션과 고도의 해석기술을 요구한다. 따라서 공정요소 진단논리의 직관적인 설계는 불가능하다.

본 연구에서는 각각의 진단대상고장에 대한 시뮬레이션을 수행하여 각 고장이 발생한 경우, 공정 출력변수의 측정치들과 세 개의 관측자에서 추정된 상태변수 추정치들 간의 잔차의 동향을 분석함으로써 효과적인 진단규칙을 세웠다.

대상 시스템에서 진단하고자 하는 대표적인 고장 요소와 관련된 매개변수 영향을 Table 3에 나타내었고, 대상 시스템에서 한번에 하나의 고장만 발생한다는 가정을 전제로 하였다.

진단 규칙의 수립에 사용될 고장데이터의 확보를 위한 공정요소 고장 모사는 각각의 고장들에 대하여 +10~30%의 파라미터 값의 변화를 +10% 간격으로 투입하였다. 각 공정요소 고장들에 대해 구해진 공정 출력변수 측정치와 관측자 추정치간의 잔차 양상들의 결과를 Fig. 4에서 6에 나타내었다.

공정요소 고장 검출 진단 모사에서 발생한 잔차들은 res1형이며 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= x_1 = I_0(t), \quad y_2 = x_2 = \omega(t), \quad y_3 = x_3 = \dot{M}(t) \\
 r_{11} &= x_1 - \hat{x}_{11}, \quad r_{12} = x_1 - \hat{x}_{12}, \quad r_{13} = x_1 - \hat{x}_{13}, \\
 r_{21} &= x_2 - \hat{x}_{21}, \quad r_{22} = x_2 - \hat{x}_{22}, \quad r_{23} = x_2 - \hat{x}_{23}, \\
 r_{31} &= x_3 - \hat{x}_{31}, \quad r_{32} = x_3 - \hat{x}_{32}, \quad r_{33} = x_3 - \hat{x}_{33}. \\
 r_4 &= \dot{M}_o(t) - \dot{M}_f(t)
 \end{aligned} \quad (16)$$

각 공정요소에 고장이 발생했을 때 공정 상태변수 측정치와 관측자 추정치간의 잔차  $r_{12}$ , 잔차  $r_{23}$ , 잔차  $r_{31}$ ,

그리고 파이프 라인의 출구부분에 하나의 센서를 더 설치하여 출구부분의 질량유속 측정치  $y_4 = x_4 = \dot{M}_o(t)$ 와 관측자 2를 이용한 파이프 라인 입구부분의 추정치인  $\hat{x}_{23}$ 간의 잔차  $r_4$ 를 활용하여 식 (17)과 같은 진단규칙을 추출하였다.

Rule 1: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{불변}, \text{불변}, \text{불변}, \text{불변})$   
THEN; 정 상

Rule 2: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{증가}, \text{감소}, \text{감소}, \text{불변})$   
THEN; Fault 1=(브러쉬의 고장)

Rule 3: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{감소}, \text{증가}, \text{증가}, \text{불변})$   
THEN; Fault 2=(전자기 코일의 고장)

Rule 4: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{감소}, \text{불변}, \text{증가}, \text{불변})$   
THEN; Fault 3=(볼베어링 윤활과잉의 고장)

Rule 5: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{증가}, \text{불변}, \text{감소}, \text{불변})$   
THEN; Fault 4=(볼베어링의 먼지에 의한 고장)

Rule 6: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{증가}, \text{불변}, \text{증가}, \text{불변})$   
THEN; Fault 5, 6=(공동화 혹은 임펠러의 고장)

Rule 7: If  $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (\text{불변}, \text{불변}, \text{불변}, \text{감소})$   
THEN; Fault 7=(파이프 라인에서의 유출)

(17)

## 4. 고장 검출 진단시스템의 성능 검토

### 4-1. 센서 고장에 대한 성능검토

제안 설계된 「센서 고장 검출 진단시스템」의 성능을 검토하기 위하여 출력변수 측정 센서에 +5~20%의 바이어스(bias)를 5% 간격으로 투입하고 고장 검출성능을 확인한 결과, 빠른 시간에 센서 고장이 검출되었으며 거의 동시에 고장센서가 식별되었다. 각각의 센서 고장에 대한 진단 및 성능검토 결과를 Table 5에 나타내었다. 제안된 「고장 검출 진단시스템」은 m개의 전차원 관측자를 사용한 구조이기 때문에 중첩된 상태변수 정보를 제공한다. 따라서 검출 진단 알고리즘을 단순화 하기 위해 각 관측자에 의해 추정되는 n개의 상태변수 중 하나의 상태변수 추정치에 대한 잔차를 이용하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

설계된 「고장 검출 진단시스템」의 또다른 장점은 특정 센서의 고장이 발생한 경우에도 정상인 센서에 의해 구동되는 상태 관측자로부터 즉시 측정에 실패한 변수의 추정치를 제공받을 수 있다는 점이다.

### 4-2. 공정요소 고장에 대한 성능검토

제안 설계된 「공정요소 고장 검출 진단시스템」의 성

Table 5. Simulation results of the sensor fault and efficiency test

Residuals											Eff. (%)	
		r <sub>11</sub>	r <sub>12</sub>	r <sub>13</sub>	r <sub>21</sub>	r <sub>22</sub>	r <sub>23</sub>	r <sub>31</sub>	r <sub>32</sub>	r <sub>33</sub>		
Fault rate	x <sub>1</sub>	5%	1.052	1.052	0	0.324	0.324	0	9.779	9.779	0	100
	sensor fault	10%	2.104	2.104	0	0.648	0.648	0	19.558	19.558	0	100
		15%	3.156	3.156	0	0.972	0.972	0	29.336	29.336	0	100
		20%	4.208	4.208	0	1.295	1.295	0	39.115	39.115	0	100
x <sub>2</sub>	sensor	5%	16.560	0	16.560	5.025	0	5.025	155.22	0	155.22	100
		10%	33.120	0	33.120	10.051	0	10.051	310.45	0	310.45	100
		15%	49.679	0	49.679	15.076	0	15.076	465.67	0	465.67	100
	fault	20%	66.239	0	66.239	20.102	0	20.102	620.89	0	620.89	100
x <sub>3</sub>	sensor	5%	0	41.621	41.621	0	3.029	3.029	0	0.207	0.207	100
		10%	0	83.242	83.242	0	6.057	6.057	0	0.414	0.414	100
		15%	0	124.86	124.86	0	9.086	9.086	0	0.621	0.621	100
	fault	20%	0	166.48	166.48	0	12.115	12.115	0	0.828	0.828	100

Table 6. Simulation results of the process fault and efficiency test

Faults	Fault rate	Effi. (%)	Residuals									
			$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{31}$	$r_{32}$	$r_{33}$	$r_4$
Fault1	10%	100	-0.005	-0.681	1.171	-2.162	-0.026	-19.036	4.963	-1.013	-0.001	0
	20%	100	-0.011	-1.354	2.328	-4.298	-0.052	-37.841	9.866	-2.013	-0.002	0
	30%	100	-0.016	-2.019	3.471	-6.408	-0.077	-56.418	14.709	-3.001	-0.003	0
Fault2	10%	100	0.005	0.690	-1.186	2.189	0.026	19.272	-5.025	1.025	0.001	0
	20%	100	0.011	1.388	-2.386	4.405	0.053	38.785	-10.112	2.063	0.002	0
	30%	100	0.016	2.095	-3.602	6.649	0.080	58.543	-15.263	3.114	0.003	0
Fault3	10%	100	-0.080	0.037	18.120	-0.015	0.026	18.883	-7.083	1.004	0.001	0
	20%	100	-0.161	0.075	36.461	-0.030	0.052	37.998	-14.252	2.021	0.002	0
	30%	100	-0.243	0.113	55.028	-0.045	0.079	57.347	-21.510	3.050	0.003	0
Fault4	10%	100	0.079	-0.037	-17.902	0.015	-0.026	-18.657	6.998	-0.992	-0.001	0
	20%	100	0.157	-0.073	-35.591	0.029	-0.051	-37.091	13.912	-1.973	-0.002	0
	30%	100	0.234	-0.109	-53.070	0.044	-0.076	-55.306	20.745	-2.942	-0.003	0
Fault5	10%	100	-0.076	0.035	16.823	-0.014	0.025	17.548	69.456	-4.590	-0.015	0
	20%	100	-0.153	0.071	33.850	-0.028	0.049	35.307	126.958	-8.305	-0.028	0
	30%	100	-0.230	0.107	51.028	-0.043	0.075	53.277	175.251	-11.347	-0.038	0
Fault6	10%	100	-0.077	0.036	16.767	-0.014	0.025	17.507	145.444	-10.110	-0.031	0
	20%	100	-0.155	0.072	33.751	-0.029	0.050	35.235	267.087	-18.486	-0.058	0
	30%	100	-0.234	0.109	50.949	-0.044	0.076	53.182	370.421	-25.526	-0.080	0
Fault7	5%	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5
	10%	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10
	15%	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15

능을 검토하기 위하여 Table 2의 파라미터 값을 갖는 액체 수송관 시스템에서 공정요소 각각의 고장들에 대하여 +10-30%의 매개변수 변화를 +10% 간격으로 투입한 후 진단시스템의 응답을 확인하였으며, 각각의 공정요소 고장에 대한 진단 및 성능검토 결과를 Table 6에 나타내었다.

「고장 검출 진단시스템」의 성능을 좌우하는 중요한

자의 하나인 각 잔차에 대한 임계치는 검출하고자 하는 고장의 크기, 공정잡음 및 측정잡음 등에 대한 영향 등을 고려하여 0.3으로 설정하였다. 이 임계치는 5% 이상의 파라미터 변화에 대응되는 크기의 공정요소 고장을 검출 진단할 수 있도록 선정된 것이다.

모사 결과는 공정요소의 큰 고장뿐 아니라 작은 고장이 발생하는 경우에도 진단이 가능함을 나타내고 있

Table 7. Efficiency test when noise exist in faulty process

Faults	Standard deviation	Efficiency (%)			
	Fault rate	0.1%	0.2%	0.3%	0.7%
Fault1	10%	99.9	74.6	60.7	32.8
	20%	100	96.9	82.1	54.5
	30%	100	99.8	92.9	61.3
Fault2	10%	99.9	76.4	62.2	34.3
	20%	100	96.5	82.7	55.2
	30%	100	99.8	92.8	62.3
Fault3	10%	100	87.2	71.4	35.3
	20%	100	96.6	91.1	39.9
	30%	100	100	98.2	41.8
Fault4	10%	100	86.6	71.3	37.2
	20%	100	99.6	91.2	41.1
	30%	100	100	98.3	44.7
Fault5	10%	100	100	100	61.8
	20%	100	100	100	64.6
	30%	100	100	100	63.9
Fault6	10%	100	100	100	65.4
	20%	100	100	100	66.5
	30%	100	100	100	65.7
Fault7	5%	97.8	33.5	-	-
	10%	97.8	33.5	-	-
	15%	97.8	33.5	-	-

으며, 제안 설계된 「고장 검출 진단시스템」이 초기 고장의 신속한 감지, 분류에 사용될 수 있음을 의미한다.

Fault 5와 Fault 6은 잔차 증감이 정도의 차이는 있으나 그 양상이 동일하며, 원심펌프의 공동화가 심해지면 원심펌프의 임펠러가 손상되는 결과를 초래되는 현상과 같은 의미로 해석될 수 있다.

Fault 7은 전동기와 원심펌프가 정상적으로 동작할 때, 파이프-라인의 출구부분과 입구부분에서의 질량유속의 차를 비교하므로써 질량유속 손실을 감지할 수 있음을 보여주고 있다.

측정 센서에 잡음이 존재할 때의 영향을 고려하여, 각 측정 센서에 잡음을 투입하여 각 고장에 대한 진단 가능성을 살펴보고 Table 7에 나타내었다.

각 측정 잡음은 분산이 대응되는 변수값의 0.01, 0.05, 0.1, 0.5%(표준편차 0.1, 0.2, 0.3, 0.7%)인 네 가지 경우를 고려하였으며, 모든 경우 zero-mean인 백색잡음을 가정하였다.

측정 잡음이 존재할 때의 「공정요소 고장 검출 진단 시스템」의 성능을 검토한 결과, 고장의 크기가 작고 잡음의 분산이 대응되는 변수값의 0.1%를 초과하는 경우를 제외한 모든 경우에 거의 완벽한 진단이 가능함을 보여주고 있다.

「공정요소 고장 검출 진단시스템」의 모사결과 공정이 정상상태일 때 잔차의 발생이 없는 점으로 보아 진단 규칙에 어긋나는 잔차들의 양상은 우리가 알지 못하는 그 외의 이상이거나 중복된 고장일 것으로 볼 수 있다. 이러한 여러 가지 이상과 고장들에 관한 연구는 앞으로 계속되어야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 타여자 직류 전동기로 구동되는 원심 펌프에 의한 파이프 라인 액체 수송관 시스템에서 발생하는 고장의 조기 검출 및 진단을 위한 FDIS를 제안 설계하였고, 모의실험을 통해 그 성능을 검토하였다. 제안된 FDIS는 공정 상태변수의 측정치들과 상태 추정치들의 잔차에 근거하여 검출 진단을 수행하는 DOS 구조이며 다음과 같은 특징을 가진다.

(1) 센서 고장과 공정요소 고장의 검출 진단을 통합적으로 수행하도록 고안된 최초의 시도로 판단되며 이 구조는 현재 수학적 모델에 근거한 고장 검출기법의 커다란 문제점으로 지적되고 있는 감도문제, 즉 센서 고장과 공정요소 고장의 상호 간섭 작용으로 인한 고장 검출 진단의 어려운 문제의 한가지 해결 방안을 제공한다.

(2) 액체 수송계에 사용되는 세 가지 핵심 센서의 이상(고장)을 검출하고 고장센서를 식별할 뿐 아니라, 측정 실패된 신호를 즉시 재생시켜 불량 정보의 제한으로 인한 계통 성능의 저하 및 불량 정보에 의한 운전자의 오조작 등을 방지할 수 있다.

(3) 이 분야에서 기 제안된 FDIS는 전동기, 파이프 라인 등과 같이 분리된 요소만을 대상으로 설계된 것이 대부분이므로 통합된 액체 수송계에의 적용이 곤란하였다. 그러나 본 연구에서는 설계단계에서 각 요소간의 상관관계를 충분히 고려하여 진단시스템을 설계하였으므로 실제적 적용이 가능할 것으로 판단된다.

(4) 측정 잡음이 존재할 때의 성능검토 결과는 제안된 FDIS가 프로세스 잡음과 측정 잡음이 모두 존재하는 실질적인 상황에 적용될 수 있음을 보여준다.

## 참고문헌

1. Frank, P. M.: "Robust Model-based Fault Detection in Dynamic System", on-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, Proc. of IFAC, 1(1992).
2. Watanabe, K. and Himmelblau, D. M.: "Fault Diagnosis in Nonlinear Chemical Processes", *AIChE*

- Journal*, **29**(2), 243(1983).
3. Seliger, R. and Frank, P. M.: "Robust Nonlinear Observer-based Fault Detection for an Overhead Crane", Proc. of 12th World Congress IFAC, **7**, 449(1993).
  4. Lee, K.-S. and Bae, S.-W.: "A Fault Detection Filter Design by Fault Vector Model Approach and Application", *TKIEE.*, **36**(6), June(1987).
  5. 최용진 외 2인 : "Observer를 이용한 화학공정의 이상감지", 한국자동제어 학술회의 논문집, **589**, Oct.(1993).
  6. Isermann, R.: "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Method-A Survey", *Automatica*, **20**, 387(1984).
  7. 이주형 외 3인 : "Leakage Detection of Pipeline System Based on Modeling and Identification", *Journal of KICChE*, **30**, 526(1992).
  8. Clark, R. N.: "Instrument Fault Detection", *IEEE Trans Aerosp. Electron. Syst.*, **14**, 456(1978).
  9. Frank, P. M.: "Advanced Fault Detection and Isolation Schemes Using Nonlinear and Robust Observers", Proc. of 10th World Congress IFAC, **63** (1987).
  10. Patton, R., Frank, P. M. and Clark, R. N.: "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Theory and Application", New York, Prentice-Hall(1989).
  11. 일진전기공업(주) : "직류전동기 취급 설명서, 모델 DM30".
  12. 김영진 : "펌프와 수차", 대광서림 출판.
  13. 동해 펌프(주) : "Catalogue", 대영 펌프(주) : "Catalogue".
  14. Lobanoff, V. S. and Ross, R. R.: "Centrifugal Pumps Design and Application", (1985).
  15. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: "Transport Phenomena", John Wiley and Sons (1976).
  16. Yedich, S.: "Diagnosing Trouble of Centrifugal Pumps", *Chem. Eng.*, **24**, 124, Oct.(1977), **21**, 193, Nov.(1977), **5**, 141, Nov.(1977).
  17. Chen, C.: "Linear System Theory and Design", Holt-Sounders(1983).