

Fault Detection and Isolation System for Centrifugal-Pump Systems:
Parity Relation Approach

朴 泰 建* 李 起 常**
(Tae-Geon Park · Kee-Sang Lee)

Abstract - This paper deals with a fault detection and isolation scheme for a DC motor driven centrifugal pump system. The emphasis is placed on the design and implementation of the residual generator, based on parity relation, that provides decision logic unit with residuals that will be further processed to detect and isolate three important faults in the system: brush fault, impeller fault, and the speed sensor fault. Two process faults are modelled as multiplicative type faults, while the sensor fault as an additive one. With multiplicative fault, the implementation of the residual generator needs the time varying transformation matrix that must be computed on-line. Typical implementation methods lack in generality because only a numerical approximation around the assumed fault levels is employed. In this paper, a new implementation method using well trained neural network is proposed to improve the generality of the residual generator. Application results show that the fault detection and isolation scheme with the proposed residual generator effectively isolates three major faults in the centrifugal pump system even with a wide range of fault magnitude.

Key Words : Residual generation, Centrifugal pump system, Parity relation, Additive fault, Multiplicative fault

1. 서 론

고장검출 및 진단에 대한 연구는 지난 20여 년 간 우주 항공, 원자력 발전 등 고도의 신뢰성이 요구되는 분야를 중심으로 발전되어왔으며, 최근에는 고도로 발달된 컴퓨터 기술을 배경으로 한 고신뢰성 제어계의 필수적 구성요소로 인식되고 있다. 고장검출진단 기법 중 계통의 수학적(정량적) 모델에 근거한 해석적 기법은 동적시스템의 초기고장검출에 유용하다. 이 기법은 고장검출과 식별을 위한 잔차발생 방법에 따라 상태 또는 출력 관측기의 추정 편차를 이용한 기법 [1-5], 계통 파라미터 추정에 근거한 기법 [6-8], 그리고 등가관계 접근법(Parity relation approach)[9-13] 등으로 분류될 수 있다. 상술한 기법 중 등가관계 접근법은 입출력 형태의 등가방정식(Parity equation)으로부터 고장검출을 위한 잔차를 발생하는 방법으로 Chow와 Willsky, Patton, Gertler 등에 의해 발전되어 왔다. 최근 이 분야의 중요 연구주제의 하나는 곱하기형 고장(Multiplicative faults, Parametric faults)의 검출 및 식별이다 [14]. 일반적으로 구동기 고장, 입력센서 고장, 외란, 출력센서 고장 등은 더하기형 고장(Additive faults)으로 취급할 수 있는 반면 계통의 파라미터 변동과 관련된 고장은 곱하기형 고장으로 모델화하여 처리할 수 있다. 등가방정식을 이용하여 위의 두가지 형태의 고장을 검출 및 식별함에 있어

서 근본적인 차이점은 잔차발생에 요구되는 변환행렬에 있다. 즉, 더하기형 고장의 검출을 위한 잔차발생을 위해서는 시불변 변환행렬이 요구되는 반면 곱하기형 고장을 검출하기 위한 잔차발생에서는 시변 변환행렬이 요구된다 [13].

전동기-펌프 계통은 일상생활 및 매우 다양한 산업 현장에서 관을 통한 액체의 수송에 매우 많이 사용되고 있지만 아직 이 계통에 대한 해석적 고장검출 및 진단에 관한 연구는 미흡하다 [15-16]. 이 계통을 위한 고장검출 및 진단시스템 설계의 대표적 결과는 파라미터 추정기법에 근거하여 공정요소 고장을 검출, 진단한 Isermann의 연구 [6][17-18], 파라미터 추정기법 및 패턴분류 알고리즘에 근거하여 팬 고장(Fan break-down) 및 원심펌프의 공동화(Cavitation)의 이상을 검출하기 위한 Geiger의 연구 [19] 등이다. 국내에서는 상태 관측기에 근거한 공정요소 고장의 검출, 진단 [16], 배관망에서의 유출 진단에 대한 연구 결과 [20]가 제시된 정도이다. 본 논문에서는 속도제어 타여자 직류전동기로 구동되는 원심펌프 계통에서 발생할 수 있는 프로세스 고장 중 계통성능에 큰 영향을 주는 전동기의 브러쉬 고장, 펌프의 임펠러 고장과 제어 및 감시정보를 제공하는 속도측정장치 고장을 조기에 검출 및 진단하기 위한 고장검출식별시스템을 설계하고 실질적 적용 가능성을 검토함에 그 목적을 두었다. 연구의 초점은 고장검출식별시스템의 핵심요소인 잔차발생기법의 제안이다. 제안된 잔차발생 기법은 해석적 기법 중 등가관계 접근법에 근거한 것이며, 브러쉬 고장, 임펠러 고장은 곱하기형 고장으로, 속도측정장치 고장은 더하기형 고장으로 모델링하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 진단 대상계통인 전동펌프 계통의 수학적 모델 및 이 계통에서 발생하는

* 正 會 員 : 檀 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程 修 了
 ** 正 會 員 : 檀 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 1998年 9月 11日
 最 終 完 了 : 1998年 11月 19日

주요 고장에 대해 기술하였으며, 3장에서는 이 계통의 제어 및 감시를 위해 도입된 센서의 이상 및 프로세스 고장을 검출 및 진단하기 위한 잔차발생 기법을 제안한다. 4장에서는 제안된 잔차발생 방법의 성능을 입증하기 위하여 각 고장에 대한 시뮬레이션을 수행하고 5장에는 결론을 수록하였다.

2. 고장진단 대상계통

2.1 전동펌프 계통의 수학적 모델

전동펌프 계통은 타여자 직류전동기, 원심펌프, 파이프라인의 세 요소로 구성되어 있으며 전체적인 구성도는 그림 1과 같은 시스템의 수학적 모델 [17]은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_a(t)}{dt} &= -\frac{R_a}{L_a} \Delta i_a(t) - \frac{K_b}{L_a} \Delta w(t) + \frac{1}{L_a} \Delta u_a(t), \\ \frac{dw(t)}{dt} &= \frac{K_t}{J} \Delta i_a(t) - \frac{g_w + C_f}{J} \Delta w(t) - \frac{g_M}{J} \Delta \dot{M}(t), \\ \frac{d\dot{M}(t)}{dt} &= \frac{h_w}{a_{ac}} \Delta w(t) + \frac{h_M - a_R}{a_{ac}} \Delta \dot{M}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 i_a 는 전기자 전류 [A], w 는 속도 [rad/sec], \dot{M} 는 질량유속 [kg/sec], u_a 는 전기자 전압 [V], $J = J_m + J_p$ 이다. T_p 를 펌프의 회전우력, Y 를 비에너지 (specific energy) [17] 라할 때 g_w , g_M , h_w , h_M 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_w &= \frac{\partial T_p}{\partial w} \text{ [Nmsec/rad]}, \quad g_M = \frac{\partial T_p}{\partial \dot{M}} \text{ [Nmsec/kg]}, \\ h_w &= \frac{\partial Y}{\partial w} \text{ [m}^2\text{/radsec]}, \quad h_M = \frac{\partial Y}{\partial \dot{M}} \text{ [m}^2\text{/kgsec]}. \end{aligned}$$

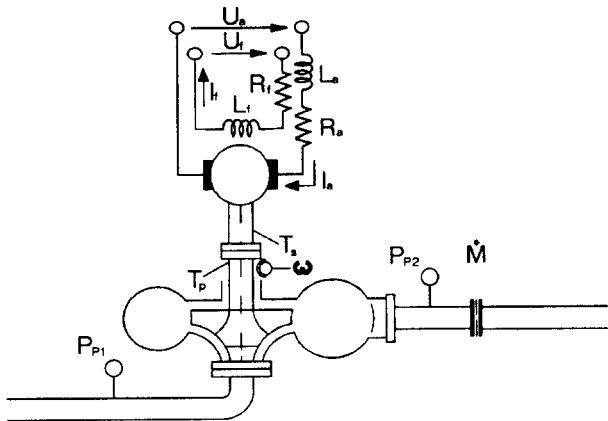


그림 1 직류전동기 구동 원심펌프 및 파이프-라인 시스템
Fig. 1 A DC motor driven centrifugal pump and pipeline systems

각 요소별 수학적 모델을 포함한 상태공간 표현은

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (2)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{g_w + C_f}{J} & -\frac{g_M}{J} \\ 0 & \frac{h_w}{a_{ac}} & \frac{h_M - a_R}{a_{ac}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} \Delta i_a(t) \\ \Delta w(t) \\ \Delta \dot{M}(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \Delta u_a(t). \end{aligned}$$

2.2 진단 대상계통의 고장

본 절에서는 전동펌프 계통의 각 구성요소에서 발생할 수 있는 고장과 그 원인 [16] 및 검출, 진단하고자 하는 고장에 대하여 기술한다. 먼저 직류전동기에서 발생할 수 있는 고장은 정류자와 브러쉬간의 마찰에 의해 발생하는 브러쉬 결함, 전기자 코일의 절연, 자기회로의 균열에 의한 전기자 코어의 결함 그리고 부하의 급변 등이 있다. 원심펌프에서 발생하는 여러 고장 중 기체 주머니(Gas pocket), 공동화, 공동화 상태에서 펌프의 장시간 동작으로 인해 발생하는 임펠러 고장, 베어링과 같은 부품의 손상 등을 대표적인 고장으로 간주할 수 있다 [21]. 또한 파이프라인에서 발생할 수 있는 고장요소와 그 원인은 파이프라인의 침전물 등으로 인해 관이 막히는 현상과 관의 특정 부분에서 유체가 유출되는 현상 등이 있다 [20]. 본 연구에서는 공정요소 고장 중 대표적인 두 고장, 즉 직류 타여자 전동기의 브러쉬 결함, 원심펌프의 임펠러 고장 및 속도측정장치의 고장을 검출, 진단 대상고장으로 선정하였다. 검출진단 대상고장 중 두 공정요소 고장이 계통 파라미터에 미치는 영향을 표 1에 나타내었다 [16]. 표 1에서 "+"는 해당 파라미터 값의 증가, "-"는 감소를 의미한다.

3. 고장식별을 위한 잔차발생 기법

앞장에서 기술된 전동펌프시스템은 구동장치인 전동기의 고장, 원심펌프의 임펠러 손상 등의 고장이 발생한 경우 그 기능이 마비되거나 성능이 크게 저하되어 관련 계통 전체의 안전성

표 1 공정요소 고장과 계통 파라미터간의 관계
Table 1 The relationship between process faults and system parameters

파라미터	R_a	g_w	h_w	a_R
고장				
브러쉬 고장	+			
임펠러 고장		-	-	+

과 경제성에 악영향을 끼친다. 한편 측정장치의 고장은 제한 경로를 통해 전파되어 전체 계통의 제어성능을 저하시키는 물론, 잘못된 감시정보를 제공함으로써 계통의 긴급 운전정지 등을 초래할 수 있다. 본 장에서는 타여자 직류전동기로 구동되는 원심펌프를 포함한 액체 수송관 계통에서 발생할 수 있는 프로세스 고장 및 센서 고장을 신속히 검출, 진단하기 위한 잔차발생기를 설계한다.

3.1 고장을 포함한 계통 표현

검출 대상고장은 잔차방정식 중 개념식(Internal form)에 표현된 형태에 따라 곱하기형 고장과 더하기형 고장으로 분류될 수 있다 (식(8) 참조). 더하기형 고장은 측정 불가능한 변수로서 구동기 및 센서 고장 등을 포함하고 곱하기형 고장은 계통의 공칭 파라미터와 실제 파라미터간의 불일치를 의미한다. 따라서 더하기형 표현은 절대적인 고장의 크기를, 곱하기형 표현은 상대적인 고장의 크기를 나타내는데 적합하다. 본 절에서는 계통의 파라미터 변동과 관련된 두 공정요소 고장은 곱하기형으로, 센서 고장은 더하기형으로 모델링한다. 곱하기형 고장과 관련된 계통 파라미터의 최대 변화 범위를 $\pm 100\%$ 로 가정하면, 즉

$$0 \leq \Delta R_a \leq R_a, -g_w \leq \Delta g_w \leq 0, \\ -h_w \leq \Delta h_w \leq 0, 0 \leq \Delta a_R \leq a_R$$

표 1에 근거하여 브러쉬 고장은 식(3a), 임펠러 고장은 식(3b)로 표현될 수 있다.

$$\Delta A_{c1} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{La}(1-\gamma_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, 0 \leq \gamma_1 \leq 1 \quad (3a)$$

$$\Delta A_{c2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{g_w(\gamma_{21}-1)}{J} & 0 \\ 0 & \frac{h_w(\gamma_{22}-1)}{a_{ac}} & -\frac{a_R(1-\gamma_{23})}{a_{ac}} \end{bmatrix}, \quad (3b)$$

$$0 \leq \gamma_{21} \leq 1, 0 \leq \gamma_{22} \leq 1, 0 \leq \gamma_{23} \leq 1.$$

식(3)에서 $\gamma_1 \neq 1$ 은 브러쉬 고장이, $\gamma_{21} \neq 1, \gamma_{22} \neq 1, \gamma_{23} \neq 1$ 은 임펠러 고장이 발생했음을 의미한다. 곱하기형 공정요소 고장 및 더하기형 센서 고장을 포함한 계통 표현은 식(4)와 같다.

$$\dot{x}(t) = [A_c + \Delta A_c]x(t) + B_c u(t), \quad (4) \\ y(t) = Cx(t) + Ff(t),$$

여기서 $f(t)$ 는 센서 고장으로 본 논문에서는 속도센서의 고장을 가정하였으며 $\Delta A_c = \Delta A_{c1} + \Delta A_{c2}$ 이다.

3.2 잔차발생방정식

실제 계통은 연속적(Continuous)이지만 잔차발생에 요구되

는 계산은 샘플링된 데이터에 의해 수행된다. 본 논문에서는 이산화된 전동펌프계 모델에 근거하여 잔차발생 방법을 제안하고자 한다. 식(4)의 계통에 대한 이산치 상태공간 표현은

$$x(k+1) = [A_d + \Delta A_d]x(k) + B_d u(k), \quad (5) \\ y(k) = Cx(k) + Ff(k),$$

이며, 식(6)과 같은 MA(Moving average) 형태의 입출력 표현을 얻을 수 있다.

$$H(z)y(k) + \Delta H(z)y(k) = G(z)u(k) + \Delta G(z)u(k) + R(z)f(k) \quad (6)$$

여기서 $\Delta H(z), \Delta G(z)$ 는 곱하기형 고장의 전달함수 표현이며, $R(z)$ 는 더하기형 고장의 전달함수이다. 식(6)에서 $H(z), G(z), R(z)$ 는 다음과 같다.

$$H(z) = [\det(I - z^{-1}A_d)]I, \quad (7a)$$

$$G(z) = C \text{adj}(I - z^{-1}A_d)z^{-1}B_d, \quad (7b)$$

$$R(z) = H(z)F. \quad (7c)$$

식(6)으로부터 다음의 기본잔차 발생식(Primary Residual Equation)을 얻는다.

$$o(k) = H(z)y(k) - G(z)u(k) \\ = -\Delta H(z)y(k) + \Delta G(z)u(k) + R(z)f(k) \quad (8)$$

검출식별 대상인 두개의 고장을 표현하기 위하여 $\Delta H(z), \Delta G(z)$ 를 각각 식(9)와 같이 분리하자.

$$\Delta H(z) = \Delta H_1(z) + \Delta H_2(z) \quad (9a)$$

$$\Delta G(z) = \Delta G_1(z) + \Delta G_2(z) \quad (9b)$$

여기서 $\Delta H_1(z), \Delta G_1(z)$ 은 브러쉬 고장을 나타내는 전달함수이며, $\Delta H_2(z), \Delta G_2(z)$ 는 임펠러 고장을 나타낸다. 식(9)를 식(8)에 대입하면

$$o(k) = -\Delta H_1(z)y(k) + \Delta G_1(z)u(k) \\ -\Delta H_2(z)y(k) + \Delta G_2(z)u(k) + R(z)f(k). \quad (10)$$

이며 식(9)내의 모든 전달함수들은 발생 고장의 크기를 나타내는 파라미터 $\gamma_1, \gamma_2 = \{\gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{23}\}$ 에 의존하며 미지이다. 즉,

$$\Delta H_j(z) = \Delta H_j(z, \gamma_j), \quad j = 1, 2, \quad (11a)$$

$$\Delta G_j(z) = \Delta G_j(z, \gamma_j). \quad (11b)$$

식(11)에서 $\Delta H_j(z)$ 및 $\Delta G_j(z)$ 에 Taylor 급수 전개를

도입하고 1차항까지 고려하여 근사화하면

$$\Delta H_j(z) = \Delta H_j(z, \gamma_j) \approx P_j(z) \Delta \gamma_j, \quad j = 1, 2, \quad (12a)$$

$$\Delta G_j(z) = \Delta G_j(z, \gamma_j) \approx Q_j(z) \Delta \gamma_j, \quad (12b)$$

여기서 $\Delta \gamma_j = 1 - \gamma_j$ 이고 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 는 γ_j 에 대한 Jacobian 행렬로서 다음과 같다.

$$P_j(z) = \frac{\partial H_j(z, \gamma_j)}{\partial \gamma_j}, \quad j = 1, 2, \quad (13a)$$

$$Q_j(z) = \frac{\partial G_j(z, \gamma_j)}{\partial \gamma_j}. \quad (13b)$$

식(14)를 정의하면

$$e_j(k) = Q_j(z)u(k) - P_j(z)y(k), \quad j = 1, 2, \quad (14)$$

식(10)은 다음처럼 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} o(k) &= H(z)y(k) - G(z)u(k) \\ &= \sum_{j=1}^2 e_j(k) \Delta \gamma_j + R(z)f(k). \end{aligned} \quad (15)$$

식(15)의 기본잔차는 모델출력과 측정출력의 편차로서 모든 고장의 영향을 받으므로 고장 식별력이 크지 않다. 고장 식별력을 향상시키는 효과적인 방법은 잔차벡터에 방향성을 부여하는 것이며, 이 과정은 식(16)과 같이 적절한 변환행렬 $W(k) (\in \mathbb{R}^{q \times p})$, q : 검출식별 대상 고장의 수(=3), p : 측정 출력의 수(=3)를 곱함으로써 수행된다.

$$r(k) = W(k)o(k) \quad (16a)$$

$$= W(k) \left[\sum_{j=1}^2 e_j(k) \Delta \gamma_j + R(z)f(k) \right] \quad (16b)$$

$$= W(k)[H(z)y(k) - G(z)u(k)]. \quad (16c)$$

여기서 식(16b)를 개념식, 식(16c)를 실현식(Computational form)이라 한다. 변환행렬 $W(k)$ 는 곱하기형 고장과 관련된 시변 함수 $e_j(k)$ 및 더하기형 고장과 관련된 시불변 전달함수 $R(z)$ 를 포함한 식(16b)에 근거해서 구해지는데 특정 고장으로 인한 잔차의 방향 및 고장으로 인한 잔차의 상대적 크기를 결정한다. 즉, 설계자의 요구에 따라 적절한 변환행렬 $W(k)$ 를 적용함으로써 특정 고장들에는 민감하고 특정 고장에는 둔감한 잔차의 발생이 가능하다. 순수한 더하기형 고장만을 취급하는 경우와는 달리 곱하기형 고장이 포함되어 있는 경우에는 식(15)의 기본잔차 발생식 $o(k)$ 에 시변인 $e_j(k)$ 가 포함된다. 이러한 경우에도 잔차 $r(k)$ 가 요구되는 방향성을 유지하기 위해서는 시변 변환행렬이 요구된다 [13].

곱하기형 고장을 포함한 경우 변환행렬 $W(k)$ 를 구하기 위해서는 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 에 근거해서 $e_j(k)$ 를 구해야 한다. 요

구되는 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 해석적으로 구하기 위해서는 먼저 j 번째 곱하기형 고장에 대한 전달함수 $H_j(z, \gamma_j)$, $G_j(z, \gamma_j)$ 을 구해야 하며 이를 위해서는 연속시간 상태공간 모델로부터 이산시간 상태공간 모델로 변환한 후 이산시간 입출력 MA 모델로 변환하는 것이 필요하다. 저차 계통의 경우와는 달리 고차 계통의 경우 해석적으로 $H_j(z, \gamma_j)$, $G_j(z, \gamma_j)$ 를 구하고 이를 γ_j 에 관해 미분하여 식(14)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 얻는 것은 매우 어렵다. 따라서 다음 절에서 기술되는 근사화 방법이 일반적으로 이용된다.

3.2.1 파라미터 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 의 근사화 방법

식(13)의 근사적 표현을 얻기 위하여 고장의 크기를 나타내는 γ_j 를 γ_j^0 로 가정하면 $\Delta \gamma_j^0$ 및 그 근방에서 식(17)이 얻어진다.

$$P_j(z) \approx \frac{\Delta H_j(z, \gamma_j^0)}{\Delta \gamma_j^0}, \quad j = 1, 2, \quad (17a)$$

$$Q_j(z) \approx \frac{\Delta G_j(z, \gamma_j^0)}{\Delta \gamma_j^0}, \quad (17b)$$

여기서

$$\Delta H_j(z, \gamma_j^0) = H(z, \gamma_j^0) - H(z), \quad (18a)$$

$$\Delta G_j(z, \gamma_j^0) = G(z, \gamma_j^0) - G(z) \quad (18b)$$

이고, $\Delta \gamma_j^0 = 1 - \gamma_j^0$ 이다.

3.2.2 신경망에 의한 근사화 방법

3.2.1절의 근사화 방법은 관심있는 고장검출 구간내의 한 고장의 크기, γ_j^0 및 그 근방에서 국부적으로 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 구하는 방법이므로 모든 범위($0 \leq \gamma_j \leq 1$)의 고장을 표현하는 것은 불가능하다. 따라서 실제 계통의 고장의 크기가 γ_j^0 와 다를 경우 고장검출진단시스템이 오정보를 발할 가능성이 커진다. 사실상 식(17)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 에 근거해서 고장검출 및 식별을 수행하는 것은 불가능하다. 본 절에서는 이러한 문제점의 한 해결방안으로 신경망에 의해 고장의 크기 γ_j 를 추정하여 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 구하는 방법을 제안하였다. 신경망의 학습시 입력은 각 고장발생시 정상상태에서의 측정치, 즉 계통의 출력 및 입력으로 하고 출력은 곱하기형 고장의 크기 γ_j 로 하였다. 즉, 신경망의 입출력 데이터 쌍은 다음과 같다.

$$[(y(k), u(k)), \gamma_j], \quad 0 \leq \gamma_j \leq 1. \quad (19)$$

학습된 신경망의 실시간 출력을 γ_j^* 로 정의하면 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 는 γ_j^* 를 γ_j^0 대신 식(17)에 대입하여 얻을 수 있다.

각 고장이 식별가능하도록 잔차를 발생시키기 위한 식(16)

의 변환행렬 $W(k)$ 를 구하는 방법은 다음과 같다.

3.3 변환행렬

검출식별하고자 하는 세 개의 고장, 즉 두 개의 공정요소 고장 및 한 개의 센서 고장에 대한 잔차벡터는 식(20)처럼 표현된다 [10][13].

$$r^*(k) = \begin{bmatrix} r_1^*(k) \\ r_2^*(k) \\ r_3^*(k) \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^2 r^*(k|\Delta\gamma_j) + r^*(k|f), \quad (20a)$$

$$r^*(k|\Delta\gamma_j) = d_j\mu_j(k)\Delta\gamma_j(k), \quad j=1,2, \quad (20b)$$

$$r^*(k|f) = c\delta(k)f(k), \quad (20c)$$

여기서 *는 잔차벡터 r 이 방향성을 가짐을 나타내고 $r_i^*(k), i=1,2,3$ 는 고장 발생시의 잔차, $r^*(k|\Delta\gamma_j)$ 는 공정요소 고장, $\Delta\gamma_j$ 발생시 잔차 벡터, $r^*(k|f)$ 는 센서 고장, f 에 의한 잔차 벡터이다. d_j 와 c 는 각각 고장 $\Delta\gamma_j$ 및 f 에 대해 등가 공간내에서 미리 선정된 잔차의 방향을 나타내는 열 벡터이며, μ_j 와 δ 는 각각 고장 $\Delta\gamma_j$ 및 f 에 대한 잔차의 동특성을 규정하는 전달함수로서 설계자에 의해 선정된다. 예를 들면 식별하고자 하는 세 개의 고장에 대해 d_j 와 c, μ_j 와 δ 를 다음처럼 선정하면

$$d_1 = [1 \ 0 \ 0]^T, \quad d_2 = [0 \ 1 \ 0]^T, \quad c = [0 \ 0 \ 1]^T, \\ \mu_1 = \mu_2 = \delta = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (21)$$

특정한 한 고장에만 영이 아닌 다음의 잔차 벡터를 발생시킬 수 있다.

$$r^*(k) = \begin{bmatrix} r_1^*(k) \\ r_2^*(k) \\ r_3^*(k) \end{bmatrix} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \begin{bmatrix} \Delta\gamma_1(k) \\ \Delta\gamma_2(k) \\ f(k) \end{bmatrix} \quad (22)$$

한편, 식(15)에 방향성을 부여하여 다음처럼 표현할 수 있다.

$$o^*(k) = \sum_{j=1}^2 o^*(k|\Delta\gamma_j) + o^*(k|f), \quad (23a)$$

$$o^*(k|\Delta\gamma_j) = e_j(k)\Delta\gamma_j(k), \quad j=1,2, \quad (23b)$$

$$o^*(k|f) = R(z)f(k). \quad (23c)$$

고장식별을 위한 방향성 잔차발생방정식은 식(16)에 의해 식(24a)와 같이 구해지고, 식(24a)에 식(23)을 대입하면 식(24b)가 얻어진다.

$$r^*(k) = W(k)o^*(k) \quad (24a)$$

$$= W(k) \left[\sum_{j=1}^2 e_j(k)\Delta\gamma_j + R(z)f(k) \right]. \quad (24b)$$

식(24b)를 식(20)과 비교하면 다음과 같다.

$$W(k)e_j(k) = d_j\mu_j(k), \quad j=1,2, \quad (25a)$$

$$W(k)R(z) = c\delta(k). \quad (25b)$$

여기서

$$\Xi_j(k) = d_j\mu_j(k), \quad j=1,2, \quad (26a)$$

$$\Gamma(k) = c\delta(k), \quad (26b)$$

$$\Lambda(k) = [\Xi_1(k) \ \Xi_2(k) \ \Gamma(k)], \quad (26c)$$

$$M(k) = [e_1(k) \ e_2(k) \ R(z)], \quad (26d)$$

라 하면 식(25)는 다음의 행렬 방정식으로 된다.

$$W(k)M(k) = \Lambda(k), \quad (27)$$

여기서 q 를 검출식별 대상 고장의 수(=3), p 를 측정 출력의 수(=3)라 하면 $M(k)$ 는 $p \times q$ 의 차원, $\Lambda(k)$ 는 $q \times q$ 의 차원이다. 선정된 전동펌프계의 경우, 고장의 수가 출력의 수와 같기 때문에 $M(k)$ 는 (3 x 3)차원의 정방행렬이며 변환행렬 $W(k)$ 는 식(28)로부터 구할 수 있다.

$$W(k) = \Lambda(k)M(k)^{-1} \quad (28)$$

식(28)을 식(24b)에 대입하면 고장과 방향성 잔차 벡터와의 관계인 식(29)를 얻을 수 있다.

$$r^*(k) = W(k) \left[\sum_{j=1}^2 e_j(k)\Delta\gamma_j(k) + R(z)f(k) \right] \quad (29)$$

$$= \Lambda(k) \begin{bmatrix} \Delta\gamma_1(k) \\ \Delta\gamma_2(k) \\ f(k) \end{bmatrix}$$

식(29)의 잔차벡터는 변환행렬 결정에 필요한 행렬 $\Lambda(k)$ 의 선정 기준을 제시하고 있다. 예를 들면, 행렬 $\Lambda(k)$ 를 대각행렬로 선정하면 잔차벡터 $r^*(k)$ 는 특정한 한 고장에만 영이 아닌 잔차들로 구성된다. 따라서 행렬 $\Lambda(k)$ 를 적절히 선정함으로써 고장량에 비례하며 설계자에 의해 미리 결정된 방향성을 갖는 잔차 벡터를 발생시킬 수 있다.

4. 적용사례 및 결과 검토

제안된 잔차발생 기법의 타당성을 입증하기 위하여 PI (Proportional-Integral) 속도제어 직류전동기 구동 원심펌프 계통에 대한 고장검출식별시스템을 설계하고 시뮬레이션을 수행하였다. 구성요소 중 직류전동기는 일진전기공업 [22], 원심펌프 [23]는 동해펌프공업 [24]에서 제작된 것으로 주요 사양은 각각 표 2, 표 3에 나타내었다. 또한 g_u, g_M, h_u, h_M

$$W_{i/h1} = \begin{bmatrix} -4.6358 & -5.5507 & 3.2333 & -6.7508 & -9.1901 & -2.2669 & -9.8155 \\ 5.6881 & -5.9786 & -0.4552 & -4.6395 & 3.9839 & 6.7537 & 3.6360 \\ 3.3789 & 1.5846 & -7.1582 & 3.6793 & -4.2362 & 2.8182 & -4.6631 \\ 7.3323 & 0.8560 & 4.0744 & 4.6571 & 1.1730 & -3.9643 & 0.9406 \end{bmatrix}$$

$$W_{h1/h2} = \begin{bmatrix} -1.5572 & 2.4006 & 2.8607 & 1.0607 & -3.2003 & -2.4671 & -0.7354 \\ 2.5238 & -1.4917 & -1.8419 & 4.3607 & 2.3783 & -3.3402 & -4.3723 \\ -2.7956 & -4.3524 & 0.5018 & 1.7134 & 5.0458 & -2.8772 & -3.3860 \\ -4.2837 & -4.9036 & -3.5621 & -2.7266 & -3.8782 & -2.7909 & 3.1954 \\ 1.3456 & 1.1993 & 2.8394 & 1.0270 & 0.3339 & 2.0933 & 5.2716 \\ 1.8348 & 4.4049 & 3.1811 & -0.6341 & 0.7313 & 1.4884 & -6.1327 \\ -6.8878 & -2.2713 & -3.4185 & 2.9354 & -2.9858 & 0.7584 & -4.1408 \end{bmatrix}$$

$$W_{h2/o} = \begin{bmatrix} 3.0857 & 3.0964 & 5.6218 & 8.1102 \\ 2.7126 & 2.7700 & 5.7738 & 1.8696 \\ -1.9256 & -1.6325 & -5.5431 & 2.7328 \\ 3.6603 & -8.3533 & -2.8244 & 0.0804 \\ 1.6872 & -2.3729 & 0.1996 & -3.4195 \\ 2.3696 & -1.4835 & 0.7691 & 1.5206 \\ -10.0516 & -0.2650 & 2.4100 & 4.3363 \end{bmatrix}$$

은 다음과 같다.

$$g_u = 0.2736 \text{ [Nmsec/rad]}, \quad g_M = 0.1459 \text{ [Nmsec/kg]},$$

$$h_u = 0.564 \text{ [m}^2\text{/radsec]}, \quad h_M = 0.015 \text{ [m}^2\text{/kgsec]}.$$

표 3의 원심펌프의 사양에서 효율 48 [%]는 토출량이 0.2 [m³/min] 일때이다. 파이프라인 액체 수송계는 원심펌프를 사용하여 저수조의 물을 규격 40강관 (0.05[m])을 통하여 퍼내는 것을 대상모델로 삼았으며, 이때 정상유속은 2 [m/sec]로 가정하였다 [16]. 또한 계통의 정상상태 파라미터 값은 표 4와 같고 이산치 계통으로의 변환시 샘플링 주기는 0.005[s]이다.

4.1 신경망에 의한 학습

3.2.2절에서 기술된 것 처럼 측정된 계통의 입출력 데이터에 근거하여 곱하기형 고장 파라미터 $\gamma_j, j=1,2$ 를 추정하기 위하여 신경망을 도입하였다. 학습에 사용된 신경망은 한 개의 입력층 및 출력층, 두 개의 은닉층으로 구성된 4층 구조로서 각 은닉층 뉴런의 수는 7개로 선정하였으며 오차역전파 학습알고리즘을 사용하였다. 신경망의 학습 데이터는 측정된 계통 출력 및 제어입력을 신경망의 입력 ($\in \mathbb{R}^4$)으로, 곱하기형 고장 파라미터 $\gamma_1, \gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{23}$ 를 신경망의 출력 ($\in \mathbb{R}^4$)으로 선정하였으며, 총 311개의 데이터가 학습에 이용되었다. 학습데이터는 두 공정요소 및 센서고장이 동시에 발생하지 않는다는 가정하에 시뮬레이션 결과로부터 취득하였으며, 샘플링 구간은 0.02[s]를 적용하였다. 학습된 신경망의 입력층과 첫 번째 은닉층간의 연결강도 $W_{i/h1}$, 첫 번째 은닉층과 두 번째 은닉층의 연결강도 $W_{h1/h2}$, 두 번째 은닉층과 출력층간의 연결강도 $W_{h2/o}$ 는 상단에 나타나 있고, 첫 번째 은닉층의 오프셋은 식(30a), 두 번째 은닉층의 오프셋은 식(30b), 출력층의 오프셋은 식(30c)이다.

$$\begin{bmatrix} -3.4642 & -2.7390 & -0.2589 & -2.5908 & 1.7068 \\ -2.8460 & 0.2305 \end{bmatrix} \quad (30a)$$

$$\begin{bmatrix} 3.8156 & 2.5468 & 2.6758 & -1.9441 & -0.1286 \\ 5.4328 & -0.3520 \end{bmatrix} \quad (30b)$$

$$\begin{bmatrix} -0.4545 & 7.8208 & 1.1773 & -6.9267 \end{bmatrix} \quad (30c)$$

표 2 직류전동기의 사양

Table 2 Specification of a DC motor

정의	사양	정의	사양
최대전력	3.52[Kw]	정격전력	3.0[kW]
최대속도	1250[rpm]	정격속도	1000[rpm]
정격전압	160[V]	정격주파수	60[Hz]
정격전류	22[A]		

표 3 원심펌프의 사양

Table 3 Specification of a centrifugal pump

정의	사양	정의	사양
소용동력	3.32[Kw]	정격속도	1000[rpm]
흡입구경	50[mm]	전양정	37[m]
토출구경	50[mm]	효율	0.48

표 4 정상상태 파라미터 데이터

Table 4 Data of parameters in steady-state

기호	정의	파라미터 데이터
R_a	전기자저항	0.45[Ω]
L_a	전기자인덕턴스	0.0054[H]
K_b	전동기의 역기전력상수	1.433[Vsec/rad]
K_t	전동기의 토크상수	1.433[Nm/A]
J_m	전동기의 관성모멘트	0.199[Nmsec ² /rad]
J_p	펌프의 관성모멘트	0.199[Nmsec ² /rad]
C_f	마찰계수	0.02[Nmsec/rad]
a_{ac}	유체의 가속화계수	17.6190[m ² /kg]
a_R	유체의 저항계수	14.0952[m ² /kgsec]

4.2 변환행렬의 선정

식(4)에서 속도센서 고장을 가정하였으므로 $F = [0 \ 1 \ 0]^T$ 이고 식(7c)에서

$$R(z) = H(z)F = [0 \ h(z) \ 0]^T \quad (31)$$

$$h(z) = 1 - 2.6321z^{-1} + 2.2864z^{-2} - 0.6542z^{-3}.$$

이다. 식(26d)의 $M(k) = [e_1(k) \ e_2(k) \ R(z)]$ 에서

$$e_j(k) = \begin{bmatrix} e_j^1(k) \\ e_j^2(k) \\ e_j^3(k) \end{bmatrix} \quad (32)$$

이며 $e_j(k) = Q_j(z)u(k) - P_j(z)y(k)$ 는 신경망의 출력 γ_j^* 에 근거하여 $Q_j(z)$, $P_j(z)$, $j=1,2$,를 구함으로써 얻어진다. 예를 들면 $\gamma_1^* = 0.5$, $\gamma_2^* (= \gamma_{21}^* = \gamma_{22}^* = \gamma_{23}^*) = 0.8$ 인 경우 $P_j(z)$, $Q_j(z)$ 는 각각 다음과 같다.

$$P_j(z) = \begin{bmatrix} P_j^1(z) & 0 & 0 \\ 0 & P_j^2(z) & 0 \\ 0 & 0 & P_j^3(z) \end{bmatrix}$$

$$P_1^k = 0.2444z^{-1} - 0.4905z^{-2} + 0.2461z^{-3}, \quad k=1,2,3..$$

$$P_2^k = 10^{-3}(0.5922z^{-1} - 0.8834z^{-2} + 0.3682z^{-3}),$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} -0.1369z^{-1} + 0.2728z^{-2} - 0.1359z^{-3} \\ -0.0009z^{-1} - 0.0007z^{-2} + 0.0016z^{-3} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} -0.0027z^{-1} + 0.4199z^{-2} - 0.4188z^{-3} \\ 0.0086z^{-1} + 0.0351z^{-2} + 0.0105z^{-3} \\ -0.0004z^{-1} - 0.0015z^{-2} - 0.0003z^{-3} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

변환행렬 $W(k)$ 를 구하기 위하여 선정된 $\Lambda(k)$ 는 다음과 같다.

$$\Lambda(k) = \det(M(k)) \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

위식에 근거하여 구해진 변환행렬 $W(k)$ 는 다음과 같다.

$$W(k) = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{bmatrix} \text{adj}(M(k)) \quad (35)$$

$$= \begin{bmatrix} W_{11}(k) & 0 & W_{13}(k) \\ W_{21}(k) & 0 & W_{23}(k) \\ W_{31}(k) & W_{32}(k) & W_{33}(k) \end{bmatrix}$$

여기서 $W_{11}(k) = -\alpha_{11} e_2^3(k) h(z)$, $W_{13}(k) = \alpha_{11} e_2^1(k) h(z)$,
 $W_{21}(k) = \alpha_{22} e_1^3(k) h(z)$, $W_{23}(k) = -\alpha_{22} e_1^1(k) h(z)$,
 $W_{31}(k) = \alpha_{33}(e_1^2(k) e_2^3(k) - e_1^3(k) e_2^2(k))$,
 $W_{32}(k) = \alpha_{33}(e_1^3(k) e_2^1(k) - e_1^1(k) e_2^3(k))$,
 $W_{33}(k) = \alpha_{33}(e_1^1(k) e_2^2(k) - e_1^2(k) e_2^1(k))$.

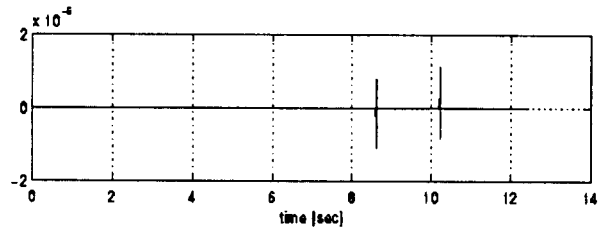
식(35)를 식(29)에 대입하면 다음과 같은 잔차방정식(개념식)을 얻을 수 있다.

$$r^*(k) = \begin{bmatrix} r_1^*(k) \\ r_2^*(k) \\ r_3^*(k) \end{bmatrix} = \Lambda(k) \begin{bmatrix} \Delta \gamma_1(k) \\ \Delta \gamma_2(k) \\ f(k) \end{bmatrix} \quad (36)$$

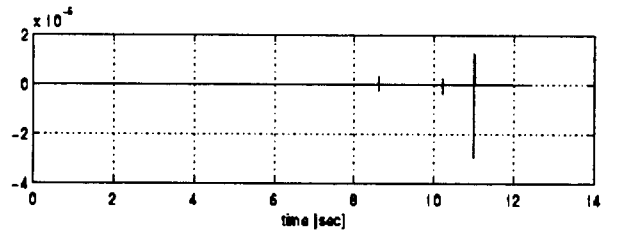
$$= \det(M(k)) \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \gamma_1(k) \\ \Delta \gamma_2(k) \\ f(k) \end{bmatrix}$$

4.3 시뮬레이션 결과

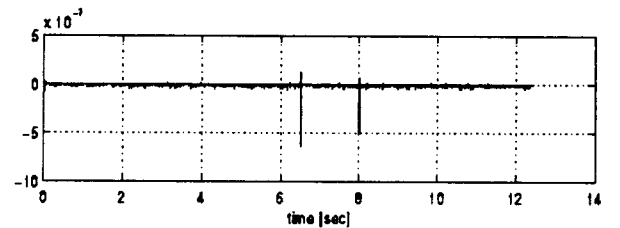
시뮬레이션에서 식(35)의 $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = 1$ 로 하고 속도 센서에 $-0.05 \sim 0.05$ 의 미지의 측정잡음이 존재하는 상황을 가정하였다. 그림 2는 속도센서 고장 ($f = 0.5[\text{rad/sec}]$, $6.5 \leq t < 8[\text{s}]$), 브러쉬 고장 ($\gamma_1 = 0.8$, $8.6 \leq t < 10.2[\text{s}]$), 임펠러 고장 ($\gamma_{21} = \gamma_{22} = \gamma_{23} = 0.8$, $t \geq 11[\text{s}]$)이 발생하였을 때 잔차를 나타낸 것이다. 고장식별을 위하여 식(36)에서 잔차 $r_1^*(k)$ 는



(a) 잔차 $r_1^*(k)$



(b) 잔차 $r_2^*(k)$



(c) 잔차 $r_3^*(k)$

그림 2 고장 발생시 잔차: 센서 고장 ($6.5 \leq t < 8[\text{s}]$), 브러쉬 고장 ($8.6 \leq t < 10.2[\text{s}]$), 임펠러 고장 ($t \geq 11[\text{s}]$).

Fig. 2 Residuals under faults: sensor fault ($6.5 \leq t < 8[\text{s}]$), brush fault ($8.6 \leq t < 10.2[\text{s}]$), and impeller fault ($t \geq 11[\text{s}]$).

브러쉬 고장에 민감하고 임펠러 및 센서 고장에는 둔감하도록, 잔차 $r_2^*(k)$ 는 임펠러 고장에는 민감하고 브러쉬 및 센서 고장에는 둔감하도록, $r_3^*(k)$ 는 공정요소 고장에는 둔감하고 센서 고장에만 민감하도록 설계하였다. 그림 2는 잔차방정식 설계시 의도대로 특정 고장에 대하여 민감한 잔차 벡터가 발생되었음을 의미한다. 측정 잡음 등이 존재하는 실제적 상황에서는 고장이 발생하지 않은 경우에도 영이 아닌 잔차가 발생된다. 따라서 고장검출 성능을 향상시키고 오경보를 최소화하기 위해서는 잔차에 대한 적절한 임계치를 선정하여 검출 및 식별을 수행하여야 한다. 그림 2의 잔차에 대한 임계치는 수차의 고장 시뮬레이션 결과를 분석하여 다음과 같이 선정하였다.

$$Th_{r_1} = 0.5 \cdot 10^{-6}, Th_{r_2} = 10^{-6}, Th_f = 2 \cdot 10^{-7}.$$

이 경우 고장식별 논리는 표 5와 같다. 검출식별 대상 고장이 곱하기형으로 표현되는 경우, 기존의 잔차발생 기법으로는 각 고장에 대한 계통 전달함수의 감도(식(13)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$)를 관심있는 고장검출 구간내에서 가정된 특정 크기의 고장에 대한 계통 전달함수의 감도(식(17)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$)로 근사화 할 수 있는 경우에만 제한적으로 고장검출 및 식별이 가능하다. 제안된 기법은 신경망을 도입하여 기존의 기법을 확장한 것으로 곱하기형 고장의 크기를 추정함으로써 발생 가능한 모든 고장에 대해 검출, 진단이 가능하다.

표 5 고장식별 논리

Table 5 Logic for fault isolation

고장의 종류	브러쉬 고장	임펠러 고장	속도센서 고장
$ r_1^*(k) : Th_{r_1}$	>	<	<
$ r_2^*(k) : Th_{r_2}$	<	>	<
$ r_3^*(k) : Th_f$	<	<	>

5. 결 론

본 논문에서는 PI제어기에 의해 제어되는 타여자 직류전동기 구동 원심펌프 계통에서 발생할 수 있는 프로세스 고장과 센서 고장을 조기에 검출 및 진단하기 위하여 고장검출진단 시스템의 핵심요소인 잔차발생 기법을 제안하였다. 제안된 잔차발생 기구는 모델 기반 해석적 기법 중 등가관계 접근에 근거하여 설계되었다. 검출대상 고장은 전동기 브러쉬 결합, 펌프의 임펠러 손상과 제어 및 감시정보를 제공하는 속도센서 고장이다. 제안된 기법의 중요한 특징은 각 고장에 대한 계통 전달함수의 감도를 신경망에 의해 근사화함으로써 발생 고장의 크기에 무관하게 요구되는 방향성을 갖는 잔차발생이 가능하다는 점이다. 또한 이 과정에서 고장 크기의 추정치가 제공된다는 점도 제안된 기법의 특징이라 할 수 있다. 제안된 기법의 실질적 적용 가능성을 검토하기 위하여 시뮬레이션 결과를 검토한 결과 측정 잡음이 존재하는 상황하에서도

우수한 검출, 식별 성능을 가짐을 확인하였다.

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy-A survey and some new results," *Automatica*, Vol. 26, pp. 459-474, 1990.
- [2] P. M. Frank, "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, Baden-Baden, Germany, pp. 99-111, 1991.
- [3] R. J. Patton and J. Chen, "A review of parity space approaches to fault diagnosis," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, Baden-Baden, Germany, pp. 65-81, 1991.
- [4] M. A. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-31, pp. 839-846, 1986.
- [5] J. E. White and J. L. Speyer, "Detection filter design: Spectral theory and algorithms," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-32, pp. 593-603, 1987.
- [6] R. Isermann and B. Freyermuth, "Process fault diagnosis based on process model knowledge. Parts I and II. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 113, pp. 620-626 and 627-633, 1991.
- [7] B. Ninness, G. C. Goodwin, O. K. Kwon and B. Carlsson, "Robust fault detection based on low order models," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, Baden-Baden, Germany, pp. 199-204, 1991.
- [8] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing," *Automatica*, Vol. 29, pp. 815-836, 1993.
- [9] E. Y. Chow and A.S. Willsky, "Analytical Redundancy and Design of Robust Failure Detection Systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-29, No. 7, pp. 603-614, 1984.
- [10] J. Gertler, "Residual Generation in Model Based Fault Detection," *Control Theory and Advanced Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 259-285, March, 1993.
- [11] N. Eva Wu, "Some Extension to the Generalized

Parity Space Method For FDI," *IFAC System Identification*, 1994.

- [12] M. Blanke, S. A. Bogh, R. B. Jorgensen, and R. J. Patton, "Fault Detection for a Diesel Engine Actuator a Benchmark for FDI," *Control Eng. Practice*, Vol. 3, No. 12, pp. 1731-1740, 1995.
- [13] J. Gertler, "Fault detection and isolation using parity relations," *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 5, pp. 653-661, 1997.
- [14] M. Medavilla, L. J. Miguel, and P. Vega, "Isolation of Multiplicative Faults in the Industrial Actuator Benchmark," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, pp. 855-860, 1997.
- [15] 과학기술처, "Motor Pump의 성능 평가에 관한 연구", 1986.
- [16] 김태한, 함영민, 이기상, "액체 수송계에 대한 고장검출 진단시스템의 설계," 한국화학공학회 논문지, 제33권, 제6호, 1995.
- [17] R. Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation," *Automatica*, Vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [18] Frank, P.M. and J. Wünnenberg, "Process fault diagnosis based on dynamic models and parameter estimation methods," In: *Fault Diagnosis in Dynamical Systems: Theory and Applications* (R.J. Patton, P.M. Frank and R.N. Clark, (1st Ed.)), Prentice Hall, New York, Chap. 7, pp. 253-291, 1989.
- [19] G. Geiger, "Fault identification of a motor-pump system using parameter estimation and pattern classification," *Proceedings of the 9th IFAC Congress*, Budapest, pp. 184-189, 1984.
- [20] 이주형 외 3인, "Leakage detection of pipeline system based on modeling and identification," *Journal of KICHe*, Vol. 30, pp. 526, 1992.
- [21] S. Yedich, "Diagnosing trouble of centrifugal pumps," *Chem. Eng.*, Vol. 24, pp. 124, 1977.
- [22] 일진전기공업(주), *직류전동기 매뉴얼: 모델 DM30*.
- [23] V. S. Lobanoff, and R. R. Ross, *Centrifugal Pump Design and Application*, 1985.
- [24] 동해펌프공업(주), Catalogue. 본문

저 자 소 개



박 태 건(朴 泰 建)
1967년 11월 14일생. 1992년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



이 기 상(李 起 常)
1952년 10월 24일생. 1978년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995-1996년 Univ. of Washington. Visiting Professor. 현재 단국대 전기공학과 교수.