

## 외란 억제 및 고장 분리를 위한 고유구조 지정기법

### Eigenstructure Assignment Method for Disturbance Suppression and Fault Isolation

서 영 봉, 최 재 원  
(Young Bong Seo, Jae Weon Choi)

**Abstract :** The underlying principle of fault detection via unknown input observer is to make the state estimation error independent of disturbances(or unknown inputs). In this paper, we present a systematic method that can exactly assign the eigenstructure with disturbance suppression and fault isolation capability. A desired eigenstructure for both fault isolation and disturbance suppression is obtained by an optimization method. For the dual purposes, terms for fault isolation and for disturbance suppression are included in the employed objective function for the optimization. The proposed scheme is applied to a simple example to confirm the usefulness of the method.

**Keywords :** eigenstructure assignment, disturbance suppression, fault isolation

#### I. 서론

항공기, 자동차, 잠수정, 유연구조물 등과 같은 다양한 동적시스템에서 발생하는 고장 현상은 막대한 경제적 피해와 치명적인 인명 피해를 발생시킬 수 있기 때문에 최근에 이르러 고장허용 제어전략 및 제어시스템 개발에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 이는 시스템의 구동기나 센서 등의 고장 종류를 미리 파악하여 적절하게 제어를 수행함으로써 부분적 이상이 발생하더라도 전체 시스템의 운항이나 운전 중단을 막고 계속적으로 규정된 최소한의 기능을 수행할 수 있도록 하는 시스템의 개발이 필요하기 때문이다. 이는 가용성, 다중성 및 안전 운전 등의 시스템의 신뢰도를 높이는 방법을 통하여 달성될 수 있다. 고장 검출, 식별 및 분리를 위해서 동일한 기능을 갖는 기기를 두 개 이상 사용하여 고장에 대비하면 쉽게 구현할 수 있다는 장점은 있으나 비용과 설치 장소 등의 문제가 발생할 수 있는 단점이 생기게 된다. 이런 단점을 극복하기 위해서 서로 다른 역할을 맡고 있는 기기라 하더라도 시스템의 내부 동특성에 대한 정보를 이용하면 하드웨어 여분(hardware redundancy)을 이용한 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 해석적 여분(analytic redundancy)을 이용하여 고장 검출 및 분리를 수행할 수 있다.

시스템에서 발생할 수 있는 다양한 고장들을 서로 분리하고, 외란, 잡음, 비선형 효과, 그리고 고장이 아닌 정상적인 매개변수 변화와 같은 비고장요소들과 고장을 정확히 구별해 내기 위해서는 효과적이며 강인한 고장 검출 및 분리 기법에 대한 연구가 이루어져야 한다[1]-[4]. 현재 많이 사용되는 모델 기반 고장 검출 및 분리 기법은 잔차(residual)를 생성하는 방법에 따라 관측기(observer) 방식, 고유구조 지정기법을 이용한 검출 필터(detection filter) 방식, 확률 추정 필터 방식, 패리티 공간(parity space) 방식, 매개변수 추정 방식

으로 구분할 수 있다. 관측기 방식[5]은 일반적인 관측기를 여러 개 동시에 사용함으로써 고장 분리를 구현하는 반면에, 고유구조 지정기법을 이용한 검출 필터 방식[1][2]은 고장에 대한 반응에 특정한 방향 조건을 추가한 하나의 관측기만을 사용하여 고장 분리를 구현한다. 확률 추정 필터 방식[6]은 동적시스템의 확률적인 데이터 고장의 감지 및 분리에 Kalman 필터를 이용하는 방법이다. 패리티 공간 방식[7]은 위 세 방식과는 달리 시스템의 상태변수를 추정하는 과정을 사용하지 않고 입력력 정보만을 이용하여 시스템의 항상성(consistency)을 확인할 수 있다는 특징이 있으며, 고장이 발생하지 않았을 때의 시스템의 상태를 확인하기 위해 입력과 출력 사이의 패리티 관계를 정의하고 이 관계의 성립 여부에 따라 고장을 검출한다. 마지막으로 매개변수 추정 방식[8]에서는 고장이 시스템에 포함된 매개변수에 반영된다는 사실을 이용하여 시스템의 입력과 출력을 이용하여 대상 시스템의 매개변수를 추정하여 정상적인 값과 비교한 후 고장 여부를 확인하는 방식으로 시스템 모델을 가변적으로 설정하고 그 모델을 이루고 있는 매개변수를 추정하여 고장을 판정한다.

그러나 기존의 관측기, 검출 필터, 확률 추정 필터, 패리티 공간, 매개변수 추정 등과 같은 방법으로는 구조의 제약으로 인하여 고장 분리와 외란 억제를 동시에 만족시키는 것은 불가능하다. 예를 들어 좌 고유구조 지정기법의 경우, 시스템의 좌 고유구조(고유치와 좌 고유벡터)의 적절한 지정을 통하여 제어력의 효과적인 전달 능력과 외란의 억제 능력을 동시에 가진 제어기의 설계가 가능하지만[9]-[12], 좌 고유벡터는 외란 입력행렬에 수직, 고장 입력행렬에 평행해야하므로 이를 동시에 만족시키는 것은 불가능하다.

한편, 관측기 설계 문제에 제어기의 쌍대(dual) 문제로서 고유구조 지정기법이 사용되어 왔다[2]-[4]. 즉, 제어기에서의 우(좌) 고유구조는 관측기에서는 좌(우) 고유구조에 대응되므로 이러한 관계에 기초하여 관측기 설계문제에서는 주로 좌 고유구조의 지정에 관한 연구가 수행되었다.

최근에 Liu와 Si[1]는 새로운 고장 검출 필터 설계 방법을 제안하였는데, 제안된 필터는 그 목적을 동시 다발적인 고장을 하나의 전상태 관측기를 통하여 근사적으로 분리하는데 두고 있다. Choi와 Lee[2]는 좌 고유구조 지정 개념을 관측기에 도입한 새로운 고장 분리 필터 설계법을 제안하여 Liu와 Si의 결과보다 나은 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

그러나 이들의 기법에 사용된 설계 구조는 외란에 대한 어떠한 고려도 할 수 없거나 고려를 할 수 있더라도 두 설계 조건(고장 분리와 고장 억제)을 동시에 만족할 수 없게 되어 있고, 관측기의 안정성 문제와 분리 가능한 고장의 갯수에 한계가 있었다. 따라서, 본 논문에서는 고유구조 지정기법을 이용하여 외란과 독립된 잔차를 만들기 위한 새로운 알고리즘을 통하여 외란 억제와 고장 분리가 동시에 가능하도록 하였다. 요구되는 고유구조와 외란의 상태추정오차를 동시에 새로운 성능지수로 정의하여 최적화하는 기법을 제안하고, 간단한 예제 시스템에 적용하여 그 타당성과 유용성을 검증하였다.

II. 문제 설정

잔차 생성과 응답에 대해 고찰하기 위해 다음과 같이 미지(unknown) 입력 항이 첨가된 연속 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + L\xi(t) + Rf(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{2}$$

여기서,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 은 상태 벡터,  $y(t) \in \mathbb{R}^r$ 은 출력 벡터,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 은 기지(known) 입력 벡터, 그리고  $\xi(t) \in \mathbb{R}^q$ 는 미지 입력(또는 외란) 벡터로 가정하고,  $f(t) \in \mathbb{R}^q$ 는 미지 시간 함수로 고려된 고장 벡터를 나타낸다.  $A, B, C$  및  $L$ 은 각각 적합한 차원을 가진 알려진 행렬들이다. 행렬  $R$ 은 시스템 고장이 감지되고 분리되는 곳을 설계자가 알아내었다고 가정했을 때의 고장 분포행렬이다.

전차수(full dimensional) 관측기에 기초한 상태추정벡터 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + H(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ &= (A - HC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Hy(t) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \tag{4}$$

$$r(t) = Q(y(t) - \hat{y}(t)) \tag{5}$$

여기서,  $r(t) \in \mathbb{R}^p$ 는 잔차 벡터,  $\hat{x}(t)$ 와  $\hat{y}(t)$ 는 각각 상태와 출력 추정치이다. 행렬  $Q \in \mathbb{R}^{p \times m}$ 는 잔차에 대한 가중 인자이며, 행렬  $H$ 는 관측기 게인이다. 잔차는 출력 추정치 오차의 선형 변환이므로, 잔차 차원  $p$ 는 출력 차원  $m$ 보다 작거나 같다.

(3)~(5)의 잔차 생성기가 (1)~(2)의 시스템에 인가되면, 상태추정오차와 잔차는 각각 다음 식에 의해 지배를 받게

된다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A - HC)\tilde{x}(t) + L\xi(t) + Rf(t) \tag{6}$$

$$r(t) = QC\tilde{x}(t) \tag{7}$$

여기서,  $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 이다. 잔차와 외란에 Laplace 변환을 적용하면 잔차 응답은 다음과 같다.

$$r(s) = \frac{QC(sI - A + HC)^{-1}Rf(s)}{+ QC(sI - A + HC)^{-1}L\xi(s)} \tag{8}$$

잔차  $r(t)$ 와 상태추정오차는 시스템에 고장오차가 없을 때라도 0은 아니다. 잔차  $r(t)$ 를 외란에 독립적으로 만들기 위해서는 잔차와 외란 사이의 전달함수의 각 요소를 0으로 만들 필요가 있다. 즉,

$$G_{rd}(s) = QC(sI - A + HC)^{-1}L\xi(s) = 0 \tag{9}$$

여기서,  $L$ 을 알고 있다면 남은 문제는 (9)를 만족하는 행렬  $H$ 와  $Q$ 를 찾는 문제로 되고[1][2], 이것은 FDI(Fault Detection and Isolation) 성능을 최적화하는 적합한 고유치를 선택하는 문제가 되기도 한다. 그러나 잔차와 외란 사이의 전달함수의 각 요소를 0으로 만드는  $Q$ 를 구했다고 가정하더라도 (8)의 첫 번째 항만으로 구성된 잔차 방정식에서 고장이 분리되지 않고 섞여질 가능성이 크다. 반대로, 고장 분리를 위하여  $Q$ 를 결정하게 되면 외란의 영향은 무시할 수 없게 된다. 고유구조 지정기법을 이용한 직접적 접근법은 특정 시스템에 대해서 관측기의 몇몇 좌 고유벡터를 외란의 분포 방향에 수직이 되도록 지정한다. 이렇게 하면 잔차는 외란에 대하여 독립적이 되도록 만들어질 수 있지만[4], 일반적인 경우가 아니라 주어진 조건을 만족하도록 만들어진 시스템에서만 가능하다. 시스템의 좌 고유벡터는 외란 분포행렬에 수직하게 하고 동시에 고장 입력행렬에 평행하게 만드는 것은 일반적으로 불가능하므로 고유벡터의 방향만으로 외란과 고장을 동시에 고려할 수 없다.

III. 다중 성능지수를 통한 고유구조 지정기법

본 장에서는 고장 분리와 외란 억제의 두 가지 목적을 동시에 만족하도록 요구되는 고유구조를 지정하기 위하여 다중 성능지수를 정의하고 최적화하는 기법을 제안한다. 본 기법은 결국 고장 분리 및 외란 억제를 동시에 만족하는 고유구조 지정에 필요한 선형결합계수벡터를 구하는 과정으로 귀착된다. 이에 대한 유도과정을 자세히 기술한다.

1. 쌍대 개념을 이용한 고유구조 지정기법

(6)의 상태추정오차식의 상이한 공액복소수로 이루어진 집합  $\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ 을  $\Lambda$ 라 하자. 그러면, 상태추정오차식에 대한 우 및 좌 고유치 문제는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$(A - HC - \lambda_i I_n) \phi_i = 0 \tag{10}$$

$$(A - HC - \lambda_i I_n)^T \phi_i = 0 \quad (11)$$

여기서,  $I_n$ 은  $n \times n$ 차원의 단위행렬이고,  $\phi_i$ ,  $\psi_i$ 는 각각 우 및 좌 고유벡터를 나타낸다. 시스템이 중복 고유치를 갖는 경우에 대해서도 위의 고유치 문제는 쉽게 일반화될 수 있다[13]. 따라서 식의 전개를 단순화시키기 위하여 본 논문에서는 상이한 고유치들만을 가진 시스템에 한정하여 문제를 기술하기로 한다. 위의 고유치 문제들로부터 우 고유구조(고유치 및 우 고유벡터) 및 좌 고유구조(고유치 및 좌 고유벡터) 지정 문제는 결국 요구되는 우 및 좌 고유구조를 만족시킬 수 있게 하는 되먹임 이득행렬  $H$ 를 구하는 문제가 된다.

제어기에서의 우(좌) 고유구조는 관측기에서는 좌(우) 고유구조에 대응되므로 이러한 관계에 기초하여 쌍대 개념을 적용하면 관측기의 좌 고유치 문제는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\{\phi_i^T(A - HC)\}^T = (A^T - C^T H^T) \psi_i = \lambda_i \psi_i \quad (12)$$

결과적으로 관측기의 좌 고유구조는 제어기 설계에 있어서 우 고유구조와 같다. 그러므로 관측기의 좌 고유구조를 원하는 값 및 방향을 갖도록 설정하기 위해서는 먼저 관측기 시스템에 쌍대 개념을 적용하여 제어기 설계문제와 같게 놓고 관측기의 우 고유구조를 지정한다. 획득가능한 좌 고유벡터  $\phi_i^c$ 는 원하는 고유벡터  $\psi_i^d$ 의  $(\lambda_i I - A^T)^{-1} C^T$ 의 열들에 의해 확장된 부분공간에 투영된 것으로 정의할 수 있다 [11][12].  $\phi_i^c$ 를 계산하기 위하여 다음 식을 정의한다.

$$N_i = (\lambda_i I - A^T)^{-1} C^T \quad (13)$$

획득가능한 고유벡터는 허용가능한 고유벡터의 부분공간에 속해야 하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_i^c = N_i b_i, \quad b_i \in \mathbb{R}^m \quad (14)$$

$\phi_i^d$ 의 획득가능한 부분공간에 투영된 것에 대응하는 선형 조합계수벡터  $b_i$ 는 다음 식을 최소화하는 것으로 선택한다.

$$J = (N_i b_i - \phi_i^d)^H (N_i b_i - \phi_i^d) \quad (15)$$

여기서  $(\cdot)^H$ 는 행렬  $(\cdot)$ 의 복소공액전치행렬을 나타낸다.

### 2. 고장 분리 필터에서의 외란 억제

(9)의 잔차와 외란 사이의 전달함수의 각 요소를 0으로 만들면 외란은 고장 분리에 어떠한 영향도 끼치지 않게 되므로 외란에 건설한 고장 분리 필터를 만들 수 있게 된다. 외란만 분리하는 경우, (1)의 외란을 확정적인 것으로 가정하면 기존의 연구[2]-[4]에서 제시된 것처럼 외란입력벡터의 방향에 수직이거나 수직에 가깝도록 우 또는 좌 고유벡터의 방향을 지정하면 된다. 그러나 고장 분리까지 동시에 수행해야 하는 경우에는 외란의 크기를 최소화시키는 성능

지수를 선정하여 최적화 기법에 따라 외란의 영향을 최소화하게 된다. 또한, (1)에서 외란이 확률적인 잡음으로 주어지는 경우에 외란 억제뿐만 아니라 고장분리까지 수행하기 위해서는 잡음의 분산을 최소화시키는 성능지수를 고려하여 최적화를 수행해야 한다. 본 장에서는 외란이 확률적으로 주어지는 경우, 즉 (1)에서 외란  $\xi(t)$ 가 강도  $\Sigma$ 인 0-평균 백색잡음인 경우에 대해서 논의한다. 즉, 본 논문에서는 고장 분리 필터에서 외란 억제 문제를 (3)의 상태추정벡터 방정식을 이용하여 최적으로 추정된 상태추정벡터  $\hat{x}(t)$ 를 찾는 문제로 상정한다.

정상상태에서 (6)의 상태추정오차의 상호분산전파식의 해 즉,  $\dot{P}=0$ 일 때의 해를 구하는 식은 다음과 같다[14].

$$(A - HC)P + P(A - HC)^T + LEL^T = 0 \quad (16)$$

위 식을 페루프 고유치 및 획득가능한 고유벡터의 항으로 표시하면 다음과 같다.

$$N_i b_i A(N_i b_i)^{-1} P + P(N_i b_i)^{-T} \Lambda(N_i b_i)^T + LEL^T = 0 \quad (17)$$

정상상태에서 (6)의 상태추정오차  $\hat{x}(t)$ 의 평균  $E\{\hat{x}(t)\}$ 는 0이지만 상호분산행렬  $P (= E\{\hat{x}(t)\hat{x}^T(t)\})$ 는 0이 아니므로, 최적의 상태추정벡터  $\hat{x}(t)$ 를 찾기 위해서는 최대한 상태추정오차  $\hat{x}(t)$ 의 상호분산행렬  $P$ 를 최소화해야 할 것이다. 이 목적을 위해서 가격함수  $J$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$J = E\{\hat{x}(t)\hat{x}^T(t)\} \quad (18)$$

이제 가격함수 (18)을 최소화하는  $\hat{x}(t)$ 를 구할 수만 있다면, 외란의 영향을 최소화하는 최적 상태추정벡터  $\hat{x}(t)$ 를 구할 수 있다. 물리적으로 가격함수  $J$ 를 최소화하는 문제는 각 상태추정오차의 분산값  $E\{\hat{x}_i^2(t)\}$ 의 합을 최소화하는 문제와 같다. 그러므로 가격함수  $J$ 를 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$J = \text{tr}\{P^2\} \quad (19)$$

### 3. 고장 분리를 위한 변환

(7)의 잔차 방정식에서 고장이 분리되기 위해서  $Q$ 는 출력행렬  $C$ 의 형태에 따라 다음과 같이 결정되어야 한다.

$$QC = [I_r \mid \times_{n-r}] \quad (20)$$

여기서,  $I_r$ 은  $r \times r$ 차원의 단위행렬이고,  $\times_{n-r}$ 은 임의의  $r \times (n-r)$ 차원 행렬이다. 이렇게 하면, 상태추정오차가 그대로 잔차에 반영되어 고장을 분리할 수 있게 된다. 하지만, 상태추정오차에 이미 고장이 섞여서 들어오게 되는 경우가 대부분이기 때문에  $Q$ 를 정하기에 앞서 (6)의 상태추정오차 방정식에서 먼저 고장을 분리해 주어야 한다. 즉, 유사변환

을 이용하여  $\check{x}(t)$ 를 새로운 상태  $z(t)$ 로 변환한다.

$$\check{x}(t) = Vz(t) \tag{21}$$

(21)을 이용하여 새로운 상태  $z(t)$ 로 표시되는 새로운 상태공간 모델식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= V^{-1}(A - HC)Vz(t) + V^{-1}L\xi(t) + V^{-1}Rf(t) \\ &= \tilde{A}z(t) + \tilde{L}\xi(t) + \tilde{R}f(t) \end{aligned} \tag{22}$$

$$r(t) = QCV\check{x}(t) = QCz(t) \tag{23}$$

여기서,  $V$ 는 페루프 시스템의 획득가능한 좌 고유벡터 ( $\phi_i^q = N_i p_i$ ,  $i=1, \dots, n$ )로 구성된 행렬이다. 원하는 좌 모드행렬을 고장 입력행렬에 수직이 되도록 다음과 같이 지정한다.

$$\tilde{A} = V^{-1}(A - HC)V = \text{diag}\{\lambda_i\}, \tag{24}$$

$$\tilde{R} = V^{-1}R (= \Psi^T R) = \begin{bmatrix} I_q \\ - \\ \times_{n-q} \end{bmatrix} \tag{25}$$

여기서,  $I_q$ 는  $q \times q$ 차원의 단위행렬,  $\times_{n-q}$ 는 임의의  $(n-q) \times q$ 차원 행렬이다. 이렇게 하면 상태추정오차에 섞여서 들어오던  $q$ 개의 고장은 새로운 상태  $z(t)$ 에 각각 분리되어서 들어가게 되고, (20)의 형태로 정해지는  $Q$ 에 의해서 잔차에 그대로 분리되어서 나오게 된다.

4. 다중 성능지수의 최적화 알고리즘

(11), (15), (17), (19)를 모두 동시에 고려한 성능지수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} J &= (N_i p_i - \phi_i^q)^H (N_i p_i - \phi_i^q) \\ &+ L_1 \{ N_i p_i \Lambda (N_i p_i)^{-1} P + P (N_i p_i)^{-T} \Lambda (N_i p_i)^T + LEL^T \} \\ &+ M_i \{ (A - HC - \lambda_i I_n)^T N_i p_i \} + \text{tr}\{P^2\} \end{aligned} \tag{26}$$

여기서,  $M_i$ ,  $i=\dots, n$ 은  $(1 \times n)$  차원의 Lagrange-급수 벡터이고,  $L_1$ 은  $n \times n$  차원의 Lagrange-급수 행렬이다[15].

(26)을 각각의 파라미터  $M_i$ ,  $L_1$ ,  $P$ ,  $H$ ,  $p_i$ 에 대해서 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial J}{\partial M_i} = A^T N_i p_i - \lambda_i N_i p_i - (HC)^T N_i p_i \tag{27}$$

$$\frac{\partial J}{\partial L_1} = N_i p_i \Lambda (N_i p_i)^{-1} P + P (N_i p_i)^{-T} \Lambda (N_i p_i)^T + LEL^T \tag{28}$$

$$\frac{\partial J}{\partial P} = N_i p_i \Lambda (N_i p_i)^{-1} L_1^T + L_1^T N_i p_i \Lambda (N_i p_i)^{-1} + 2P \tag{29}$$

$$\frac{\partial J}{\partial H} = M_i^T (CN_i p_i)^T - L_1^T (CP)^T - (L_1^T P)^T C^T \tag{30}$$

$$\frac{\partial J}{\partial p_i} = 2N_i^T N_i p_i - 2N_i^T \phi_i^q + N_i^T (A - HC - \lambda_i I_n) M_i^T \tag{31}$$

우선 (24), (25)를 만족하는 선형조합계수벡터  $p_i$ 를 이용하여 (27)을 만족하는 고유구조 지정계인  $H$ 를 구한다. 그리고, (28)~(30)에서 구한  $P$ ,  $L_1$ ,  $M_i$ 를 이용하여 (31)에서 새로운 선형조합계수벡터  $p_i$ 를 구한다. 이와 같이 구한 선형조합계수벡터를 갱신하여 모든 성능지수를 만족하는 고유구조 지정 계인을 얻게 된다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 제시한 제어기법의 설계과정 및 유용성과 타당성을 고찰하기 위하여 다음과 같은 간단한 3차 시스템[1]을 고려한다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.25 & -0.3 & 0 \\ -0.1 & 0.4 & -0.5 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

원하는 고유치는 임의로  $\Lambda^d = [-1 \ -2 \ -3]$ 로 선정하였고, 우 모드행렬 및 좌 모드행렬은 (24), (25)를 만족하도록 각각 다음과 같이 선정하였다.

$$\Phi^d = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Psi^d = (\Phi^d)^{-T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -0.5 & -0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

(24), (25)를 만족하는 선형조합계수벡터와 고유구조 지정을 위한 계인은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_1 &= \begin{bmatrix} -2.6398 \\ 0.9952 \end{bmatrix}, \quad p_2 = \begin{bmatrix} -1.9179 \\ 0.8870 \end{bmatrix}, \quad p_3 = \begin{bmatrix} -1.9603 \\ 0.6286 \end{bmatrix} \\ H &= \begin{bmatrix} 0.2354 & -4.9435 \\ 2.0042 & 4.2325 \\ -2.7016 & -1.4720 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(27)-(29)에서 구한 각각의 파라미터  $P$ ,  $L_1$ ,  $M_i$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \begin{bmatrix} 0.3831 & -0.2968 & 0.3184 \\ -0.2968 & 0.2406 & -0.2440 \\ 0.3184 & -0.2440 & 0.2757 \end{bmatrix} \\ L_1 &= \begin{bmatrix} 5.1600 & 7.5054 & 5.7769 \\ 7.5054 & 11.3816 & 8.3239 \\ 5.7769 & 8.3239 & 6.5816 \end{bmatrix} \\ M_1 &= [7.4199 \quad -5.4129 \quad 6.4898] \\ M_2 &= [-10.1878 \quad 7.5432 \quad -8.8441] \\ M_3 &= [-3.3144 \quad 2.4778 \quad -2.8622] \end{aligned}$$

(26)의 성능지수를 모두 만족하는 새로운 선형조합계수 벡터는 (31)을 사용해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_1 = \begin{bmatrix} -2.4610 \\ -4.2410 \end{bmatrix}, p_2 = \begin{bmatrix} 3.4809 \\ 4.0777 \end{bmatrix}, p_3 = \begin{bmatrix} -4.7252 \\ 5.1994 \end{bmatrix}$$

새로운 선형조합계수벡터를 사용한 고유구조 지정계인, 그리고 획득가능한 좌 모드 행렬은 각각 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} 7.9308 & -8.7566 \\ 2.6226 & -2.2927 \\ 3.2024 & -3.2607 \end{bmatrix},$$

$$\psi^a = \begin{bmatrix} 1.1207 & -1.3644 & -1.3942 \\ 1.7434 & 0.0984 & 0.1461 \\ -3.6724 & 2.4623 & 2.0612 \end{bmatrix}$$

이제, (21)의 변환행렬  $V = (\psi^a)^{-T}$ 을 이용하면,  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{R}$ 은 각각 다음과 같이 된다.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}, \tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.9350 & -1.4310 \\ 1.2947 & -0.2666 \\ 0.9592 & -0.7273 \end{bmatrix}$$

잔차 방정식에서 고장을 분리하기 위한  $Q$ 는 출력행렬  $C$ 의 형태에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$QC = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션에 사용한 잡음  $\xi(t)$ 는 평균이 0이고 표준편차가 0.2인 Gaussian 분포를 갖는 확률 변수로 가정하였고 그림 1에 도시되어 있다. 고장 입력은 각각 10초와 15초 사이에 동시에 발생한다고 가정하였고 그림 2에 도시하였다. 그림 3의 잔차응답에 도시된 바와 같이 외란의 영향을 고려하지 않고 고장분리만 수행한 경우보다 외란의 영향을 억제하면서 고장분리를 수행한 경우 더 나은 결과를 보임을 알 수 있다. 외란이 확률적인 잡음으로 주어지고 고장이 확정적으로 발생하는 경우 일반적인 고유구조 지정기법을 사용하는 경우에는 외란의 영향을 제거하는 것이 불가능하다. 주어진 예제 시스템에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제시한 외란 억제 및

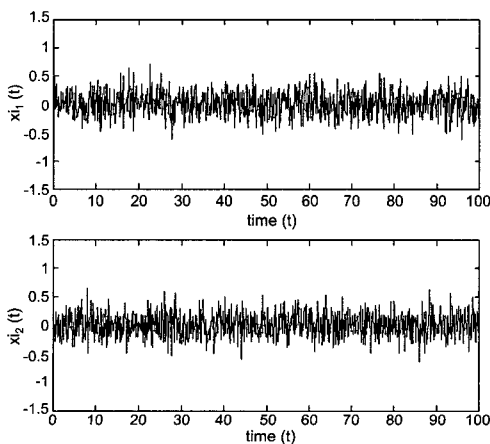


그림 1. 외란 프로파일.  
Fig 1. Disturbance profile.

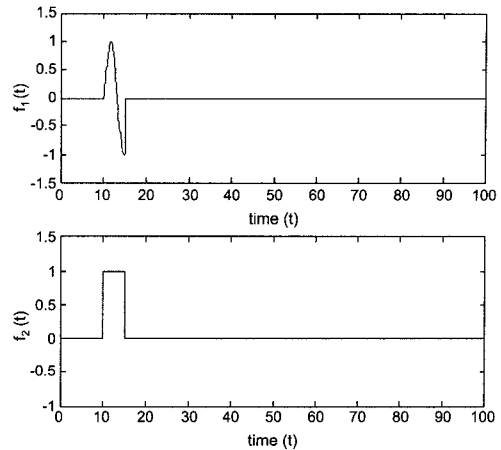


그림 2. 고장 프로파일.  
Fig 2. Fault profile.

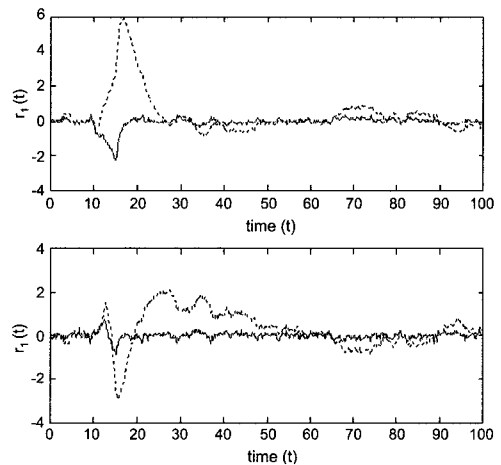


그림 3. 잔차 응답(점선 : 고장 분리만 적용, 실선 : 외란 억제와 고장 분리 동시에 적용).  
Fig 3. Residual response(dotted line : fault isolation only, solid line : combine disturbance suppression with fault isolation).

고장 분리를 위한 고유구조 지정기법은 외란의 영향을 최적화 기법을 이용해서 억제하는 것이 가능하다.

### V. 결론

본 논문에서는 고장 분리와 외란 억제 문제를 동시에 고려하기 위하여 고유구조 지정에 최적화 기법을 이용하는 접근방법을 제시하였다. 고장 분리를 위하여 요구되는 고유구조 조건과 외란을 억제하기 위한 성능지수를 통합하여 새롭게 정의하여 최적화하여 두 설계 조건을 동시에 만족하도록 하였다. 고유구조의 쌍대정리를 이용하여 관측기의 좌 고유구조를 쌍대시스템의 우 고유구조를 지정함으로써 성취하였고, 최적화 기법에 기반하여 성능지수를 동시에 만족하는 새로운 계인을 구해낼 수 있게 하였다. 마지막으로, 간단한 예제 시스템에 적용하여 고장 분리와 외란 억제를 동시에 고려하는 고유구조 지정기법의 타당성과 유용성을 검증하였다.

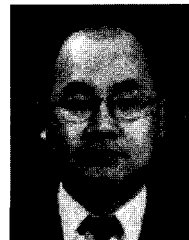
## 참고문헌

- [1] B. Liu, and J. Si, "Fault isolation filter design for linear time-invariant systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 5, pp. 704-707, 1997.
- [2] 최재원, 이대영, "좌 고유구조 지정기법을 이용한 고장 분리 필터 설계," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제6호, pp. 567-574, 1998년 12월.
- [3] K. M. Sobel and S. S. Banda, "Design of a modalized observer with eigenvalue sensitivity reduction," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 12, no. 5, pp. 762-764, 1989.
- [4] A. N. Andry, J. C. Chung, and E. Y. Shapiro, "Modalized observers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 9, no. 7, pp. 669-672, 1984.
- [5] C. Commault, J.-M. Dion, O. Sename, and R. Moteyian, "Observer-based fault diagnosis for structured systems," *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 4, pp. 4138-4143, 2000.
- [6] C. M. Hajiyev and F. Caliskan, "Fault detection in flight control systems based on the generalized variance of the kalman filter innovation sequence," *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, vol. 1, pp. 109-113, 1999.
- [7] P. Kabore, M. Staroswiecki, and H. Wang, "On parity space and observer-based approaches for FDI in state affine systems," *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, pp. 2910-2911, 1999.
- [8] Z. Xiaodong, T. Parisini, and M. Polycarpou, "Robust parametric fault detection and isolation for nonlinear systems," *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, pp. 3102-3107, 1999.
- [9] J. W. Choi, "A simultaneous assignment methodology of right/left eigenstructures," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 625-634, April 1998.
- [10] A. N. Andry, E. Y. Shapiro, and J. C. Chung, "Eigenstructure assignment for linear systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 711-729, 1983.
- [11] 최재원, 서영봉, "고유구조 지정기능을 갖는 LQR 설계 및 비행제어시스템에의 응용," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제3호, pp. 280-288, 1998년 6월.
- [12] J. W. Choi and Y. B. Seo, "LQR design with eigenstructure assignment capability," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 700-708, April 1999.
- [13] B. H. Kwon and M. J. Youn, "Eigenvalue-generalized eigenvector assignment by output feedback," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 32, no. 5, pp. 417-421, 1987.
- [14] P. Dorato, C. Abdallah, and V. Cerone, *Linear Quadratic Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 99-122, 1995.
- [15] I. K. Konstantopoulos and P. J. Antsaklis, "Optimization approach to robust eigenstructure assignment," *IEE Proc.-Control Theory and Appl.*, vol. 146, no. 6, pp. 561-565, November 1999.



서영봉

1997년 부산대 기계설계공학과 졸업. 부산대 기계공학부 대학원 석사 (1999). 1999년~현재 부산대 기계공학부 대학원 박사과정. 2001년 5월~현재 부산대 기계기술연구소 전임연구원. 1998년 5월 부산대학교 대학원 공학계열 학술상 수상. 관심분야는 고유구조 지정 및 응용, 비행체 자세 제어, 통신망 흐름 제어.



최재원

1987년 서울대학교 제어계측공학 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 제어계측공학 석사. 1995년 서울대학교 대학원 제어계측공학 박사. 1995년 2월~3월 일본 NASDA/TKSC 방문 연구원. 1995년 9월~1996년 2월

미국 USC PostDoc. 1998년 1월~2월, 1999년 12월~2000년 1월 미국 LSU 방문 교수. 1999년 8월~현재 IFAC Technical Committee on Aerospace 및 Technical Committee on Linear Systems 운영위원. 2000년 1월~현재 IEEE Control Systems Society Conference Editorial Board, Associate Editor. 2000년 1월~현재 제어·자동화·시스템공학 논문지 제어응용분야 담당 편집위원, 2000년 11월~현재 KSME International Journal, Associate Editor, 1996년~현재 부산대학교 기계공학부 전임강사, 조교수. 2000년 5월 한국과학기술단체총연합회 수여 제 10회 과학기술우수논문상 수상, 2001년 3월 부산대학교 공과대학 수여 신진교수상 수상, 2001년 10월 제어·자동화·시스템공학회 수여 학술활동상 수상. 관심분야는 네트워크 차량의 항법 및 유도제어와 ITS에의 응용, 선형시변시스템의 고유구조 지정기법, 다중표적 추적필터 설계, 고장진단기반 제어기 재구성 등.