

# 구조 변경 제어 방식을 이용한 고장 허용 제어 시스템 설계에 관한 연구

論 文

48A - 10 - 12

## A Research on Developing the Fault Tolerant Control System using Restructurable Control Method

洪 昊 澤\* · 金 容 旻\*\* · 朴 宰 弘\*\*\*  
(Hotaek Hong · Yongmin Kim · Jaehong Park)

**Abstract** - In this paper, a method to guarantee system continuity is developed, which can be applied to discontinuity problem in the time domain of restructurable control system. This method can be summarized as input alternation using weight change considering convergence speed of system mode. Input is changed from 'system continuity guarantee input,' which is defined as a input that minimizes the change of state variables, to 'alternative controller input,' which is selected by Neil's PI/EAM[3]. AIDC aircraft model is used for simulation. By showing the waveform of system input and state variable, we can sure that this method is effective for depression of system shock like jerk.

**Key Words** : Fault Tolerant Control, Restructurable Control, Fault Detection, State Feedback, Weight Change

### 1. 서론

고장 허용 제어 시스템은 이상 발생시에도 시스템의 안정적인 동작과 성능을 보장할 수 있는 시스템을 의미한다. 이러한 시스템을 구성하는 방식 중 구조 변경 방식은 특히 이상 발생시 이상 관련 정보를 검출하여 적절히 대처할 수 있는 새로운 제어기를 구성하여 적용하여 시스템 성능을 유지하도록 한다. 따라서 이 시스템에는 이상 발생 위치나 이상의 종류, 크기에 관한 정보를 알려주는 이상 진단 시스템과 이상 발생으로 인한 시스템의 변형에 적절히 대처할 수 있는 제어기 구성 방식이 적용되어야 한다.

제어기 구성 방식에 관한 연구는 주로 어떻게 하면 이상 발생 이전의 시스템 성능을 얼마나 잘 유지할 수 있는 제어기를 구성할 수 있는가에 중점을 두고 연구가 되어왔다. Looze[1]는 LQR(Linear Quadratic Regulation)을 이용하여 입력과 상태 변수에 대한 비용 함수 성능을 유지하는 방식을 제안하였으나, 시스템의 구조 유지에 관한 개념을 간과하였다. Gao[2]는 시스템 행렬 요소를 최대한 유지하는 PIM(Pseudo-Inverse Method)을 제안하여 시스템 구조의 연속성을 보장하려 하였으나 시스템의 안정성이 문제가 되었으며, Neil[3]은 PIM을 보완하여 시스템의 고유구조를 최대한 유지할 수 있도록 고유구조 지정을 이용한 PI/EAM(Pseudo-Inverse Eigenstructure Assignment Method)을 제안하였다.

본 논문에서는 검출 필터를 이용한 이상 진단 시스템과

PI/EAM을 사용한 제어기 구성 방식을 적용하여 고장 허용 제어 시스템을 구성하였다. 특히, 이 때 발생할 수 있는 제어기 교체시의 시스템 상태의 불연속성이나 채터링 문제 등 제어기 교체와 이상 정보 해석에 관한 문제를 고려하여 이를 해결할 수 있는 제어기 교체 방안을 제시하였다.

특히 시스템 상태의 불연속성 문제에 중점을 두어 시스템 상태 변수의 변화율을 최소화하는 입력인 시스템 연속성 보장 입력에 관한 개념을 제시하고 이를 새로운 제어기 입력에 앞서 적용하여 시스템 상태의 변화를 최소화하였다. 연속성 보장 입력과 새로운 제어기 입력의 부드러운 제어 입력 교체가 이루어질 수 있도록 가중치 변화를 이용한 방법을 제시하고, 제어도(controllability measure)를 이용하여 각 입력 요소가 시스템 모드에 미치는 영향을 수치적으로 나타냄으로써 각 입력 요소의 입력 교체 시간을 결정하였다. 잡음의 영향으로 인해서 이상 진단 시스템 출력에 나타날 수 있는 채터링 현상을 방지하기 위해서는 히스테리시스를 이용하였다.

이렇게 제안한 방안들을 실제의 항공기 모델에 적용함으로써 동작 성능을 확인하였다. 모의 실험을 위한 시스템 구현 시 검출 필터를 이용한 이상 진단 시스템과 이상에 따른 새로운 제어기 구성 부분, 연속성 보장 입력 생성 부분과 입력 교체 부분을 통합하여 이상에 따른 시스템의 동작이 올바르게 이루어짐을 확인하였고, 제시한 방안의 응용 가능성을 검증하였다.

본론에서는 이러한 내용을 바탕으로 세부적인 연구 내용을 제시한다. 2.1절에서는 PI/EAM에 대한 내용과 time domain에서 발생할 수 있는 불연속성 문제, 2.2절에서는 불안정성에 대처하기 위해 제안한 시스템 연속성 보장 방안, 2.3절에서는 이론을 검증하기 위한 대상 시스템으로 항공기 모델을 보이고, MATLAB의 Simulink를 이용한 모의 실험 결과를 제시한다.

\* 正 會 員 : LG電子(株)

\*\* 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 1月 22日

最終完了 : 1999年 9月 22日

2. 본론

2.1 PVEAM

Neil[3]이 제안한 PI/EAM은 유사 역행렬과 고유구조 지정을 이용한 제어기 구성 방식이다. 이는 시스템의 고유구조가 비슷하게 유지되면 시스템의 전체적인 반응 역시 비슷한 양상을 보인다는 점에 착안한 것으로, 이상 발생 이후의 시스템이 이상 발생 이전과 동일한 고유치와 비슷한 고유 벡터를 가지도록 유사 역행렬을 이용하여 상태 궤환 방식의 제어기를 구성한다.

대상 시스템은 이상 발생에 따라 변형되는 선형 시불변 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ \Rightarrow \dot{x}_f(t) &= A_f x_f(t) + B_f u_f(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $x(t)$ ,  $x_f(t)$ 는  $n$ 차,  $u(t)$ ,  $u_f(t)$ 는  $p$ 차이다. 본 논문에서 사용한 이상 진단 시스템인 검출 필터에서는 structured fault에 대한 정보를 제공하며, 이 정보를 바탕으로 변화된 시스템 행렬  $A_f$ ,  $B_f$ 를 구성할 수 있다. 단, 이 때 시스템제어기 적용을 위해서는 가제어성이 만족되어야 하며, 이상 발생에 대한 대처 시간이 시스템의 변화 속도보다 충분히 빠르므로 상태 변수가 동일하게 유지될 수 있어야 한다.

시스템의 변화에 대한 제어기 교체는 다음과 같이 이루어진다.

$$u(t) = Kx(t) \Rightarrow u_f(t) = K_f x_f(t) \quad (2)$$

PI/EAM에서의 제어기 교체는 이상 발생 전후의 고유구조를 최대한 유지할 수 있는  $K_f$ 를 선정하여 이루어진다. 변형된 페루프 시스템의 고유치는 이상 발생 이전과 동일하게 지정할 수 있지만, 고유벡터의 존재 영역이 이전과 달라지게 된다. Kautsky[6]에 따르면 고유벡터의 존재 영역은

$$B_f = [U_{Bf0} \ U_{BA}] \begin{bmatrix} \Sigma_{B_f} \\ 0 \end{bmatrix} V_{B_f}^T \quad (3)$$

와 같은  $B_f$ 의 특이치 분해에 따라

$$N_{\bar{f}} = \text{Null} [U_{BA}^T (\lambda_i I - A)] \quad (4)$$

행렬의 열벡터 평면으로 결정된다. 고유치가 복수로 존재하는 일반화된 고유벡터의 경우도 Klein[7]에 따라 적용이 가능하다.

따라서, 고유치  $\lambda_i$ 에 대한 고유벡터가  $v_i$ 에서  $v_{\bar{f}}$ 로 변화한다고 할 때, 고유벡터 지정 영역  $N_{\bar{f}}$ 상에서  $v_i$ 와 가장 가까운  $v_{\bar{f}}$ 는 유사 역행렬을 이용하면,

$$v_{\bar{f}} = N_{\bar{f}} N_{\bar{f}}^* v_i \quad (5)$$

이다. 여기서  $N_{\bar{f}}^* = (N_{\bar{f}}^T N_{\bar{f}})^{-1} N_{\bar{f}}^T$ 이다.

시스템 고유치를 대각화하여  $\Lambda$ 로 나타내고, (5)식으로 구한 이에 해당하는 고유벡터 행렬을  $V_f$ 라 하면, 페루프 시스템은

$$(A_f + B_f K_f) = V_f \Lambda V_f^{-1} \quad (6)$$

와 같이 나타나며, 이에 따라 새로운 제어기  $K_f$ 는

$$K_f = B_f^* (V_f \Lambda V_f^{-1} - A_f) \quad (7)$$

로 구해진다. 이 때 고유치가 중복되는 경우에는 Klein[7]에 제안된 방법을 이용하여 고유벡터의 존재 영역을 결정할 수 있고 고유치가 포함된 벡터  $\Lambda$ 도 Jordan block  $J$ 로 교체할 수 있다.

이 상태 궤환 제어기는 시스템의 고유구조를 유지함으로써 시스템의 전체적인 반응 양상을 나타내는 s-domain상에서의 연속성을 최대한 유지할 수 있지만, 제어기 교체 순간의 시스템 입력은 계단입력의 형태로 급격하게 변화하게 된다. 이는 시스템 상태 변수에 있어서도 급격한 변화를 일으키게 되므로 구동기와 시스템 내부에 부정적인 효과를 일으킬 수 있으므로 바람직하지 않다. 이를 보완하기 위해서는 순간적인 반응 양상을 나타낼 수 있는 time domain에서의 연속성도 고려하여야 한다. 본 논문에서는 제어기 교체 시 상태 변수의 변화율을 최소화 하는 입력을 먼저 적용하고, 가중치 변화 방식으로 새로운 제어기 입력으로 전함으로써 time domain에서의 연속성을 보장하는 방안을 제시한다.

2.2 시스템 연속성 보장 방안

제어기 교체 시 먼저 적용되어 시스템 상태 변수의 변화율을 최소화하는 입력을 시스템 연속성 보장 입력이라 정의한다.  $t = t_f$ 에서 제어기가 교체되었을 때 다음과 같은 상태 변수 변화율의 차이를 나타내는  $P$ 를 고려한다.

$$\begin{aligned} P &= \left\| \left. \frac{dx_f(t)}{dt} \right|_{t=t_f} - \left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=t_f} \right\|_2 \\ &= \|A_f x_f(t_f) + B_f u_f(t_f) - Ax(t_f) - Bu(t_f)\|_2 \end{aligned} \quad (8)$$

이 때 시스템 연속성 보장 입력은  $P$ 를 최소화하는 입력  $u_f(t_f)$ 로 결정할 수 있으며 이는 유사 역행렬을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_f(t_f) = B_f^* ((A - A_f)x(t_f) + Bu(t_f)) \quad (9)$$

(9)식의 시스템 연속성 보장 입력으로부터 (2)식의 새로운 제어기 입력으로의 전환은 입력의 변화율이 크지 않도록 시간에 따른 가중치 변환을 이용한다. 가중치 변환 함수는 임의로 선정이 가능하나, 변화가 급격하게 일어나지 않는 함수를 사용하는 것이 좋다. 최적의 가중치 변화 함수에 대한 내용은 본 논문의 범위를 벗어나므로 다루지 않겠다.

본 논문에서는 임의적으로 가중치 변화가 비교적 천천히

일어나면서도 쉽게 구현할 수 있는 cosine 함수를 이용하였다. 시스템 연속성 보장 입력과 제어기 입력 각각에 대한 가중치 함수  $W_1(t)$ ,  $W_2(t)$ 는 각 입력 요소의 입력 전환 가중치 함수

$$\begin{aligned} w_{1i}(t) &\equiv \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi t}{t_i} \right) \\ w_{2i}(t) &\equiv \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi t}{t_i} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

의 대각화 행렬로 나타내어진다. 여기서  $t_i$ 는 각 입력 요소의 입력 교체 시간으로 cosine 함수의 주기에 해당한다. 이러한 가중치 변환 함수를 적용한 최종 입력은

$$u(t) = W_1(t)u_f(t_f) + W_2(t)u_f(t) \quad (11)$$

가 된다.

입력 교체 시간  $t_i$ 는 각 입력 요소가 주로 영향을 미치는 시스템 모드의 수렴 속도를 기준으로 결정한다. 입력 교체 시간이 너무 길면 시스템이 불안정해질 수 있고, 너무 짧으면 시스템 연속성 보장 효과가 약해진다. 시스템 모드의 수렴 속도를 판단하기 위해서는 Choi[4]의 제어도(controllability measure)의 개념을 도입한다. 제어도는 각각의 입력 요소가 시스템 모드에 미치는 영향을 수치화한 것으로,

$$\mu_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{1i} \\ \vdots \\ \cos \theta_{pi} \end{bmatrix} |b_i| = W_f^T b_i, \quad i=1, \dots, p \quad (12)$$

로 나타내어진다. 여기서  $W_f$ 는 좌고유벡터 행렬을,  $b_i$ 는 구동기 행렬  $B_f$ 의  $i$ 번째 열벡터를 나타낸다.

이를 고유치에 대한 평균을 구할 때의 가중치로 사용하면 주로 영향을 미치는 모드에 해당하는 속도 상수  $\tau_i$ 를 구할 수 있다.

$$\tau_i = [\lambda_1, \dots, \lambda_n] \mu_i^{norm}, \quad i=1, \dots, p \quad (13)$$

여기서  $\mu_i^{norm}$ 은 정규화된 제어도 벡터를 나타낸다. 각 입력 요소의 입력 교체 시간은 이를 이용하여

$$t_i = \frac{t_{conv}}{\tau_i}, \quad i=1, \dots, p \quad (14)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서  $t_{conv}$ 는 교체 기준 시간으로, 지수함수가 초기값으로부터 수렴하는 시간을 기준으로 결정할 수 있다. 지수함수가 초기값의 0.1%로 수렴하는 경우를 기준으로 하면  $e^{-7} \approx 0.001$ 이므로  $t_{conv} = 7$ 이 된다.

지금까지 제시한 시스템 연속성 보장 입력, 가중치 변화와 시스템 모드를 고려한 입력 교체 시간 등의 개념을 적용함으로써 입력이 전환되는 부분에서 상태변수의 변화를 최소화하고, time domain에서의 시스템 연속성을 유지할 수 있다.

### 2.3 제어 시스템 구성 및 모의 실험

지금까지의 이론을 검증하기 위해 제어 시스템을 구성하고, 모의 실험을 수행하도록 한다. 본 연구에서는 Yang[5]을 참고하여 AIDC(Aeronautical Industry Development Center) 시험기의 수직 방향 모델을 제어 대상 시스템으로 한다. 대상 시스템은 입력 3차, 상태 변수 4차, 출력 2차의 선형 시불변 시스템으로, 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$A = \begin{bmatrix} -3.313 & 0.0006 & 0 & 0.9032 \\ -8.476 & -0.2596 & -34.37 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 25.78 & -0.0060 & 0 & -3.022 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -3.346 & -0.4579 & -0.1365 \\ -2.485 & -40.77 & -98.85 \\ 0 & 0 & 0 \\ -65.53 & -2.451 & -15.34 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 95.62 & -0.0103 & 0.002 & -0.4354 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 상태 변수는,

$$x(t) = [\alpha \ u \ \theta \ q]^T$$

로 나타내어지며, 각각 진입 각도와 수직 방향 속도, 피치 각도와 피치율을 나타낸다. 입력은

$$u(t) = [\delta_H \ \delta_{LEF} \ \delta_{TEF}]^T$$

로 나타내어지며, 각각 승강타와 앞날개 플랩, 뒷날개 플랩의 변화각을 나타낸다. 출력은 정상 상태 가속도와 피치율이 된다.

시스템 이상으로는 여러 가지가 있을 수 있지만, 입력에서 가장 중요한 승강타의 이상과 상태 변수에서 피치 각도에 해당하는 부분의 이상을 가정한다. 승강타에서 이상이 발생한 경우 해당 구동기의 분리를 위하여 구동기 행렬의 첫 열이 없어진 것, 피치 각도에서는 시스템 행렬에서 세 번째 열이 0으로 대치된 것으로 생각한다.

$$A_f = \begin{bmatrix} -3.313 & 0.0006 & 0 & 0.9032 \\ -8.476 & -0.2596 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 25.78 & -0.0060 & 0 & -3.022 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} -0.4579 & -0.1365 \\ -40.77 & -98.85 \\ 0 & 0 \\ -2.451 & -15.34 \end{bmatrix}$$

제어기는 (7)식의 PI/EAM을 적용하면 이상에 대해

$$K = \begin{bmatrix} 0.4153 & -0.0289 & 0.5261 & 0.3102 \\ -0.0313 & 0.1202 & -0.1271 & -0.0064 \\ -0.0593 & 0.2884 & -0.2479 & 0.0220 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow K_f = \begin{bmatrix} 52.6699 & -0.3515 & -69.2978 & -0.0587 \\ -23.5077 & 0.5095 & 30.4158 & -0.0946 \end{bmatrix}$$

와 같이 교체되며, 제어기 교체 순간의 연속성 보장 입력과

입력 교체 시간은 (9)식과 (14)식에 의해

$$u_f(t_f) = [-56.6872 \ 24.3801]^T$$

$$[t_1 \ t_2 \ t_3] = [1.3247 \ 0.2137 \ 0.2070]$$

로 주어진다.

그림 1은 MATLAB의 Simulink를 사용해 구성된 고장 허용 제어 시스템의 구성도이다. 중앙 상단의 System A, B, C 블록이 대상 시스템, 우측의 Detection Filter 블록이 이상 진단을 위한 검출 필터, 우측 하단의 Logic 블록이 잡음으로 인한 채터링 현상을 제거하기 위한 히스테리시스 로직, 좌측의 Reconfigurable Controller 블록이 이상 정보를 바탕으로 제어기를 구성, 교체하는 구조 변경 제어 시스템이다.

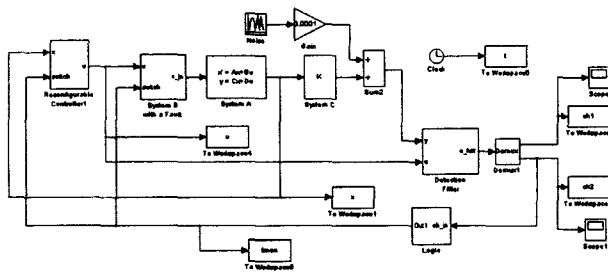


그림 1 고장 허용 제어 시스템 구성도  
Fig. 1 Configuration of the fault tolerant control system

그림 2와 3은 각각 연속성 보장 방안 적용 전후의 입력 파형이다. 3개의 그래프는 3차의 입력을 나타내며, x축은 시간, y축은 입력의 크기를 나타낸다. 두 경우 모두 이상이 발생한 입력 u1이 제어기 교체 순간 0이 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 다른 두 입력은, 그림 2에서는 step 형태로 갑작스런 변화가 일어나지만, 그림 3에서는 먼저 시스템 연속성 보장 입력이 가해지고 새로운 제어기 입력으로 cosine 형태의 전환이 부드럽게 이루어진다.

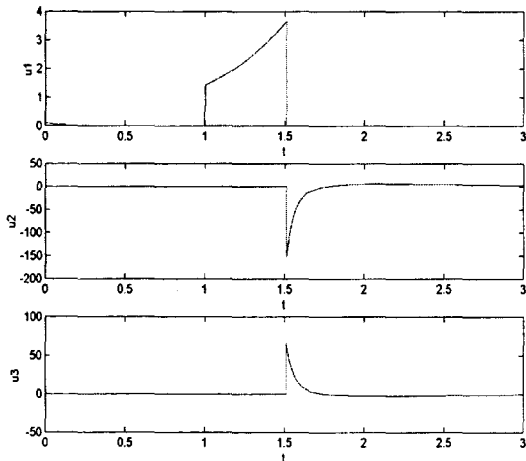


그림 2 연속성 보장 방안 적용 전의 입력  
Fig. 2 Inputs before the time-domain continuation input is applied

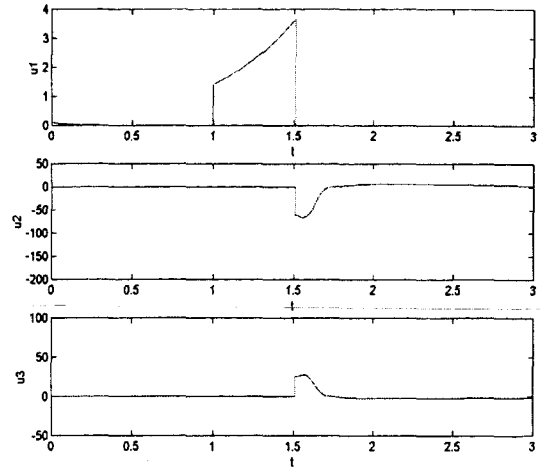


그림 3 연속성 보장 방안 적용 후의 입력  
Fig. 3 Inputs after the time-domain continuation input is applied

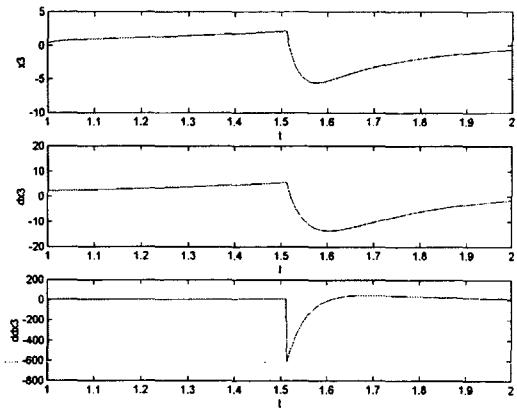


그림 4 연속성 보장 방안 적용 전의 상태 변수  
Fig. 4 States before the time-domain continuation input is applied

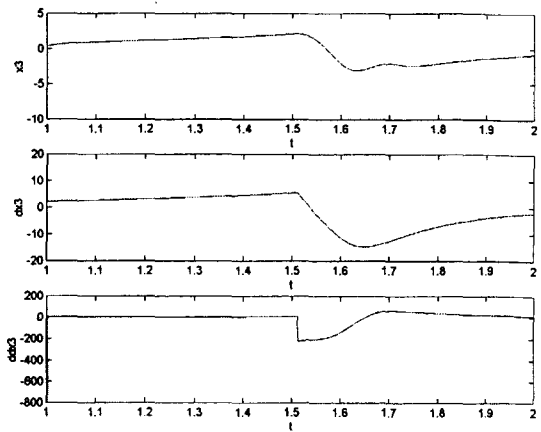


그림 5 연속성 보장 방안 적용 후의 상태 변수  
Fig. 5 States after the time-domain continuation input is applied

그림 4와 5의 3개의 그래프는 그림 2와 3의 입력에 의한 상태 변수의 변화 중 특히 이상이 발생한 피치 각도  $x_3$ 과 이를 미분한 가속도  $dx_3$ , jerk  $ddx_3$ 을 나타낸다. 그림 4에서는 변화가 급격하지만, 그림 5에서는 변화량이 훨씬 작아지며, 특히 시스템에서 갑작스런 충격으로 나타나는 jerk  $ddx_3$ 은 그림 4에서 -600이 넘는 큰 값을 가지지만, 그림 5에서는 약 200정도로 충격량이 크게 줄어든다. 이는 시스템 연속성 보장 방안이 따라 상태 변수의 변화량이 작아졌기 때문이다.

모의 실험 결과, 구조 변경 제어 방식에 의해 이상이 발생한 부분의 입력을 0으로 만들어 시스템에서 분리시키고, 나머지 구동기로 시스템 성능을 유지하는 것을 확인하였다. 특히, 연속성 보장 방안을 적용함으로써 이상 발생 시 제어기의 교체에 따른 time domain에서의 연속성을 보장함으로써 시스템의 입력과 상태 변수의 급격한 변화를 억제할 수 있음을 보였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 PI/EAM을 이용한 고장 허용 제어 시스템에서 제어기 교체 순간의 급격한 입력과 상태 변수의 변화로 인한 불연속성 문제를 해결하기 위한 방안을 제시하였다. 제어기 교체 순간 상태 변수의 변화를 최소화하는 시스템 연속성 보장 입력과 가중치 변환을 이용한 입력 전환, 시스템 모드의 속도를 고려한 입력 교체 시간 선정 등의 방법을 통해 time domain에서의 시스템 연속성을 최대한 유지하도록 하였다. 또한, 이를 AIDC 항공기 모델에 적용하여 제어 시스템을 구성하고 모의 실험을 진행함으로써 원하는 성능을 발휘하는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국전력공사의 지원으로 수행된 1997년도 전력기술기초연구 과제의 결과를 응용한 것입니다

### 참 고 문 헌

[1] Douglas P. Looze, Jerold L. Weiss, John E. Eterno and Nancy M. Barrett, "An Automatic Redesign Approach for Restructurable Control Systems," IEEE Control Systems Magazine, pp. 16-22, May 1985.  
 [2] Zhiqiang Gao and Panos J. Antsaklis, "Pseudo-inverse methods for reconfigurable control with guaranteed stability," Proceedings of IFAC 11th World Congress, Vol. 2, pp. 293-298, 1990.  
 [3] Neil F. Palumbo, Saroj K. Biswas, Brian P. Butz, "Recovery of close-to-nominal pre-fault performance using the pseudo-inverse/eigenstructure assignment method," Proceedings of ACC, pp. 2123-2124, 1992.  
 [4] Jae Weon Choi, Jang Gyu Lee and Youdan Kim, "Design of an Effective Controller via Disturbance Accommodating Left Eigenstructure Assignment,"

Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 18, No. 2, pp. 347-354, Mar. 1992.

[5] Ciann-Dong Yang, Hann-Shing Ju and Shin-Whar Lin, "Experimental Design of H-infinity Weighting Functions for Flight Control Systems," International Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 17, No. 3, pp. 544-552, May 1994.  
 [6] J. Kautsky, N. K. Nichols and P. Van Dooren, "Robust Pole Assignment in Linear State Feedback," International Journal of Control, Vol. 41, No. 5, pp. 1129-1155, 1985.  
 [7] G. Klein and B. C. Moore, "Eigenvalue-Generalized Eigenvector Assignment with State Feedback," IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 140-142, Feb 1977.  
 [8] 박재홍, '원전 적용을 위한 고장진단/고장허용 제어 시스템의 개발', 기초전력공학공동연구소 과제 최종 보고서, 과제관리번호 97-036, 1998

## 저 자 소 개



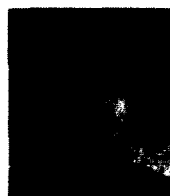
#### 홍 호 택 (洪 昊 澤)

1975년 1월 21일생. 1997년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 LG 전자(주) 근무  
 E-mail : philia@camus.snu.ac.kr



#### 김 용 민 (金 容 旻)

1970년 7월 28일생. 1994년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 서울대 공대 전기공학부 박사과정.  
 Tel : (02) 875-8374  
 E-mail : kym@camus.snu.ac.kr



#### 박 재 홍 (朴 宰 弘)

1961년 1월 11일생. 1983년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1984년 미시간 주립대 졸업(석사). 1991년 미시간대 졸업(공학박사). 1991년~1994년 미시간대 전자공학부 연구 조교수 (Vehicular Electronics Laboratory Assistant Director) 1994년~1999년 서울대 공대 전기공학부 조교수. 1999년~현재 서울대학교 공대 전기공학부 부교수.  
 E-mail : jaehong@asri.snu.ac.kr