

시스템 상태 및 입력 외란을 고려한 하이브리드 방식의 적응형 피드포워드 제어시스템

Hybrid Adaptive Feedforward Control System Against State and Input Disturbances

김준수, 조현철*, 김관형, 하홍곤, 이형기
(Jun Su Kim¹, Hyun Cheol Cho², Gwan Hyung Kim³, Hong Gon Ha⁴, and Hyung Ki Lee⁵)

¹Korea Polytechnic Colleges

²Ulsan College

³Tongmyong University

⁴Dong-Eui University

⁵Pukyong National University

Abstract: AFC (Adaptive Feedforward Control) is significantly employed for improving control performance of dynamic systems particularly involving periodic disturbance signals in engineering fields. This paper presents a novel hybrid AFC approach for discrete-time systems with multiple disturbances in terms of control input and state variables. The proposed AFC mechanism is hierarchically composed of a conventional feedforward control framework and PID auxiliary control configuration in parallel. The former is generic to decrease periodic disturbance excited to control actuators and the latter is additionally constructed to overcome control deterioration due to time-varying uncertainty under given systems. We carry out numerical simulation to test reliability of our proposed hybrid AFC system and compare its control performance to a well-known conventional AFC method with respect to time and frequency domains for proving of its superiority.

Keywords: digital AFC, hybrid control, periodic disturbance, gradient descent optimization

I. 서론

적응형 피드포워드 제어(AFC)는 주기적 외란에 대하여 강인한 시스템 응답을 개선시키는 제어시스템의 일종으로서, 컴퓨터의 하드디스크와 같은 데이터 저장 장치나 회전 절삭기 등과 같은 산업기기의 고급 제어기술에 널리 적용되고 있다. 이러한 제어시스템은 주기적 외란신호에 대하여 그 진폭은 같고 위상이 다른 능동 신호를 생성 및 인가하여 외란을 상쇄하는 제어전략을 갖는다. 최근에는 다양한 외란 신호 특성에 적합한 여러 가지 AFC 알고리즘이 발표되고 있다.

Guo와 Bodson은 외란의 주파수가 급격히 변화하는 외란 특성에 대하여 증분(augmented) 오차 기법을 개발하여 정현파 외란에 대한 강인 제어 알고리즘을 발표하였다[1]. 또한 외란을 선형 시변 시스템 방정식으로 모델링하였으며 Lyapunov 이론을 적용하여 시스템 전체의 안정성 검증을 실시하였다. Zhang 등은 컴퓨터 하드 디스크의 시변 외란 특성에 대한 AFC 알고리즘을 발표하였으며, 기존의 피드포

워드 신호에 위치 오차 신호를 조합하여 시스템의 과도 응답 특성을 개선하였다[2]. Lu와 Lin은 미지의 외란신호를 추정하기 위한 외란 관측기를 개발하여 고조파 성분을 포함하고 있는 드라이브 액츄에이터의 AFC 알고리즘을 제안하였으며[3], Duan 등은 컴퓨터 하드 디스크의 구동기에 multi-rate 이산화 기법을 이용하여 시변 주기 외란에 대한 AFC 방법을 적용하여 해석하였다[4]. 보다 최근에는 AFC 시스템의 강인성을 개선하기 위하여 외란의 고조파 대역폭을 추정하여 외란특성을 제어 알고리즘에 직접적으로 적용한 사례도 발표되었다[5].

최근에 발표된 AFC 시스템은 시변특성의 외란 신호를 대부분 다루고 있으며 제어대상의 특성에 적합한 제어이론을 적용하여 바람직한 제어성능을 도출하고 있다. 하지만 이제까지의 AFC 시스템은 제어신호에 인가되는 외란만을 언급하였으며 제어대상의 상태 및 출력에 적용되는 외란을 다룬 연구는 미비한 실정이다. 일반적으로 시스템 상태 및 출력변수에 외란신호가 인가될 수 있으므로 기존의 AFC 시스템에서 제어입력 변수에 적용되는 외란 외에도 이와 같은 시스템 상태 및 출력변수의 외란 신호도 함께 다루어야 보다 실용적인 AFC 시스템을 구성할 수 있다.

본 논문은 시스템 상태 및 제어입력 외란을 고려한 하이브리드 구조를 갖는 적응형 AFC 알고리즘을 제안한다. 구성한 제어시스템은 기존의 AFC 시스템에 PID 형태의 보조

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 12., 수정: 2011. 11. 29., 채택확정: 2012. 1. 18.

김준수: 한국폴리텍대학 창원캠퍼스 전자과(kjs250@hanmail.net)

조현철: 울산과학기술대학교 전기전자학부(hcjo@uc.ac.kr)

김관형: 동명대학교 컴퓨터공학과(taichiboy1@gmail.com)

하홍곤: 동의대학교 전자공학과(hgha@deu.ac.kr)

이형기: 부경대학교 제어계측공학과(lhk@pknu.ac.kr)

제어규칙을 조합한 메커니즘을 갖는다. 이러한 보조제어기법은 시스템 상태외란에 대하여 적응형 방식의 제어시스템 구현을 목적으로 한다. 하이브리드 AFC 파라미터는 최급강하 기반 최적화 기법을 적용하여 수정규칙을 산출한다. 본 논문에서 제안한 제어알고리즘의 타당성 검증을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며 기존 AFC 시스템에 대한 개선정도를 시간 및 주파수 영역에서 각각 비교 분석하였다.

II. 고조파 외란 시스템

제어계에 인가되는 외란을 제어하기 위한 시스템의 개념도는 그림 1과 같다. 여기서 제어대상인 플랜트는 이산시간 k 에 대한 선형 이산시스템으로 간주하며 다음과 같은 상태 및 출력 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\delta(k) + Fw(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x(k) \in R^N$ 은 상태벡터, $\delta(k) \in R$ 은 플랜트 입력변수, $w(k) \in R$ 은 상태 외란변수, $y(k) \in R$ 은 출력변수를 각각 나타내며, 각 변수에 대응되는 행렬 $A \in R^{N \times N}$, $B \in R^{N \times 1}$, $F \in R^{N \times 1}$, $C \in R^{1 \times N}$ 은 상태, 제어, 외란 그리고 출력행렬을 각각 나타낸다. 본 논문에서 고려하는 외란은 그림 1에 나타난 바와 같이 플랜트의 상태에 적용되는 외란신호와 제어입력변수에 적용되는 주기적 외란신호가 있다. 상태외란의 경우 실시간 시스템 구현에서 관측되는 일반적인 노이즈 신호로 간주되며, 제어외란은 일반 AFC 시스템에서 다루는 주기적 외란신호로서 다음과 같이 표현된다.

$$d(k) = \sum_{i=1}^n \{a_i(k)\cos(\omega_i k) + b_i(k)\sin(\omega_i k)\} \quad (2)$$

여기서 $a_i(k)$ 와 $b_i(k)$ 는 외란신호의 시변 파라미터를 나타내며 $\omega_i \in [\omega_1, \omega_n]$ 는 각 고조파 성분의 주파수 대역폭을 나타낸다. 한편 제어대상에 적용되는 입력신호 $\delta(k)$ 는 제어입력변수 $u(k)$ 와 외란 $d(k)$ 와의 편차로 주어진다. 따라서 상태외란 및 제어외란의 이 두 외란에 대하여 강인 적응형 AFC 시스템을 위한 적절한 제어규칙을 도출하여야 한다.

III. 하이브리드 AFC 시스템

기존의 AFC 시스템은 그림 1에서 제어입력 측의 외란 $d(k)$ 를 상쇄하는 제어입력신호 $u(k)$ 를 생성하여 출력 $y(k)$ 가 0으로 수렴하도록 한다. 이러한 제어목적은 달성하

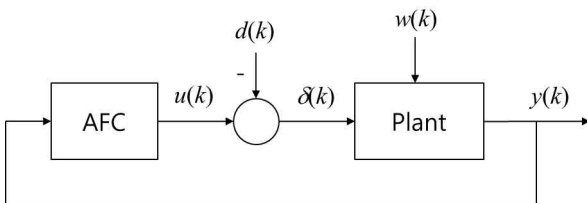


그림 1. AFC 시스템 블록선도.

Fig. 1. A block diagram of the AFC system.

기 위한 가장 간단한 제어전략은 식 (1)의 시스템 동특성이 안정할 경우, 즉 상태 x 의 초기상태가 $|x(0)| < \infty$ 일 때 $x(\infty) = 0$ 으로 되며, 또한 상태 외란 $w(k) = 0$ 이라는 가정 하에, 외란신호 $d(k)$ 와 동일한 주파수 대역폭과 진폭을 갖는 제어입력신호 $u(k)$ 를 산출하는 것으로 수학적으로 표현으로 $\lim_{k \rightarrow \infty} u(k) = d(k)$ 와 같다. 이러한 제어전략을 매

우 용이하게 실행하기 위해서는 실시간 실험을 통해 외란신호를 관측하여 그 정보를 정확히 파악하여야 한다. 하지만 외란신호에 대한 정보를 정확하게 분석하기 어렵거나 실시간 구현에서 외란이 시변특성이나 불확실성 동특성을 내포하고 있는 경우 다소 복잡한 AFC 시스템이 요구된다. 본 논문은 이러한 외란특성에도 강인 적응한 제어특성을 위하여 기존의 AFC와 외란의 시변 불확실성에 대응하기 위한 보조제어기가 추가로 정의되는 하이브리드 방식의 AFC 시스템을 제안하며 제호는 다음과 같이 주어진다.

$$u(k) = \sum_{i=1}^m \{\alpha_i(k)\cos(\omega_i k) + \beta_i(k)\sin(\omega_i k) + \gamma_i(k)\} \quad (3)$$

여기서 파라미터 $\alpha_i(k)$ 와 $\beta_i(k)$ 그리고 코사인과 사인함수의 항은 기존 AFC 시스템에 대한 수학적 표현을 나타내며, $\gamma_i(k)$ 는 보조 제어입력신호를 나타낸다. 식 (3)에서 $\alpha_i(k)$ 와 $\beta_i(k)$ 는 최적화 기법을 통해 파라미터의 추정식을 유도하기 위해 최급강하기법을 이용한다[6]. 우선 시스템 출력신호에 대한 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J = \min \left(\frac{1}{2} y^2(k) \right) \quad (4)$$

이 목적함수에 대한 최적화 기법은 플랜트의 출력값을 최소화하는 최적의 파라미터 α_i 와 β_i 를 산출하는 것으로 다음과 같은 수정규칙을 각각 갖는다.

$$\alpha_i(k+1) = \alpha_i(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \alpha_i}, \quad i = 1, \dots, m \quad (5-1)$$

$$\beta_i(k+1) = \beta_i(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \beta_i}, \quad i = 1, \dots, m \quad (5-2)$$

여기서 $\eta \in (0, 1)$ 은 수정 파라미터로서 주어지며 오른쪽 항의 편미분식은 미분의 연쇄법칙을 적용하여 전개할 수 있으며 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial J}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} \frac{\partial u(k-1)}{\partial \alpha_i}, \quad i = 1, \dots, m \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \beta_i} = \frac{\partial J}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} \frac{\partial u(k-1)}{\partial \beta_i}, \quad i = 1, \dots, m \quad (6-2)$$

여기서 또한 각각의 편미분 항은

$$\frac{\partial J}{\partial y(k)} = y(k) \quad (7-1)$$

$$\frac{\partial u(k-1)}{\partial \alpha_i} = \cos(\omega_i(k-1)) \quad (7-2)$$

$$\frac{\partial u(k-1)}{\partial \beta_i} = \sin(\omega_i(k-1)) \quad (7-3)$$

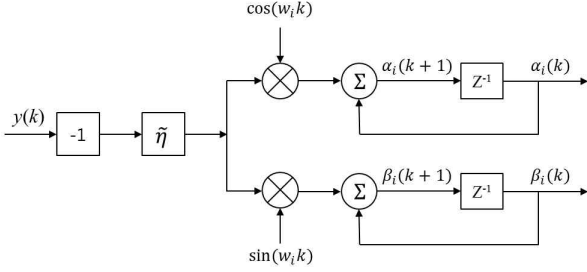


그림 2. AFC 파라미터 수정규칙 개념도.
Fig. 2. A schematic diagram of the AFC parameter adjustment rules.

와 같이 연산되며 $\partial y(k)/\partial u(k-1)$ 는 제어대상의 자코비안 (Jacobian)으로 주어진다. 이러한 자코비안 식을 전개하기 위하여 앞서 우선 이산 시스템 이론에 의하여 식 (1)에서 출력 $y(k)$ 에 대한 해를 구하면

$$y(k) = CA^k x(0) + C \sum_{i=0}^{k-1} A^{k-i-1} B(u(i) - d(i)) \quad (8)$$

와 같으며 이 결과식으로부터 $u(k-1)$ 에 대하여 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} = CI_N B \quad (9)$$

여기서 I_N 은 N 차원의 단위행렬을 나타낸다. 식 (7)과 식 (9)의 결과를 식 (5)에 대입한 후 정리하면 각각의 파라미터 수정규칙은 다음과 같다.

$$\alpha_i(k+1) = \alpha_i(k) - \eta y(k) (CI_N B) \cos(\omega_i k), \quad i = 1, \dots, m \quad (10-1)$$

$$\beta_i(k+1) = \beta_i(k) - \eta y(k) (CI_N B) \sin(\omega_i k), \quad i = 1, \dots, m \quad (10-2)$$

여기서 η 와 $CI_N B$ 의 결과값은 각각 상수이므로 이 두 항의 곱을 간단히

$$\tilde{\eta} := \eta CI_N B = \text{상수} \quad (11)$$

로 두고 식 (10)을 다시 정리하면 최종적으로 다음과 같다.

$$\alpha_i(k+1) = \alpha_i(k) - \tilde{\eta} y(k) \cos(\omega_i k), \quad i = 1, \dots, m \quad (12-1)$$

$$\beta_i(k+1) = \beta_i(k) - \tilde{\eta} y(k) \sin(\omega_i k), \quad i = 1, \dots, m \quad (12-2)$$

이 파라미터의 수정규칙에 대한 개념도는 그림 2와 같다.

IV. 보조 제어시스템

식 (3)에서 보조제어 시스템 $\gamma_i(k)$ 는 이산 선형 PID 제어형태로 구성하며 다음과 같이 표현된다[7].

$$\gamma_i(k) = \gamma_i(k-1) + \sum_{j=1}^3 \sigma_{i,j} y(k-j+1) \quad (13)$$

여기서 $\sigma_{i,j}$ 는 보조 제어시스템의 파라미터로 주어지며, 마찬가지로 식 (4)의 목적함수를 만족하기 위하여 최적화 기법을 통해 수정규칙을 산출하여야 한다. III 장에서 도출한

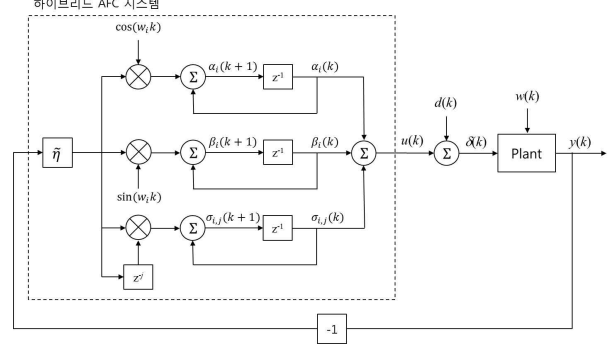


그림 3. 제안한 하이브리드 AFC 시스템의 블록선도.
Fig. 3. A block diagram of the proposed hybrid AFC system.

유사한 과정을 통해 최급 강하 기반 최적화 기법에 의한 $\sigma_{i,j}$ 의 수정규칙은 다음과 같다.

$$\sigma_{i,j}(k+1) = \sigma_{i,j}(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \sigma_{i,j}} \quad (14)$$

마찬가지로 식 (14)의 편미분 항은 미분의 연쇄법칙을 이용하여 전개하면

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_{i,j}} = \frac{\partial J}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} \frac{\partial u(k-1)}{\partial \gamma_i(k-1)} \frac{\partial \gamma_i(k-1)}{\partial \sigma_{i,j}}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

와 같다. 여기서 우변의 편미분 항에서, 식 (3)으로부터

$$\frac{\partial u(k-1)}{\partial \gamma_i(k-1)} = 1 \quad (16)$$

가 되며 차분방정식의 시간추이 법칙에 의해

$$\gamma_i(k-1) = \gamma_i(k-2) + \sum_{j=1}^3 \sigma_{i,j} y(k-j) \quad (17)$$

가 되므로 식 (15)의 우변에서

$$\frac{\partial \gamma_i(k-1)}{\partial \sigma_{i,j}} = y(k-j), \quad j = 1, 2, 3 \quad (18)$$

와 같이 연산된다. 이러한 결과 식을 바탕으로 식 (14)의 파라미터 수정규칙은 최종적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{i,j}(k+1) = \sigma_{i,j}(k) - \tilde{\eta} y(k) y(k-j), \quad j = 1, 2, 3 \quad (19)$$

식 (12)와 식 (19)의 파라미터 수정규칙을 바탕으로 본 논문에서 제안하는 하이브리드 AFC 시스템의 구성도는 그림 3과 같다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문의 컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 플랜트의 상태 및 출력 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.16 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \end{bmatrix} w(k) \quad (20)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$$

여기서 $w(k) \sim N(0,1)$ 이며 외란 신호 $d(k)$ 를 구성하기 위하여 식 (2)에서 $n=5$ 로 하였으며, 주파수 대역폭 $\omega_i = 2\pi(i-1)$, $i=1, \dots, 5$ 로 결정하였고 외란 파라미터는 각각 $a_i(k) \sim N(0.1, 0.05)$ 와 $b_i(k) \sim N(1, 0.05)$ 로 정의하

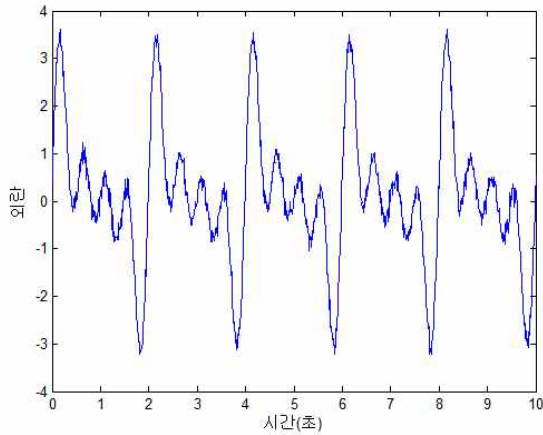


그림 4. 외란 신호 파형.
Fig. 4. Disturbance signal waveform.

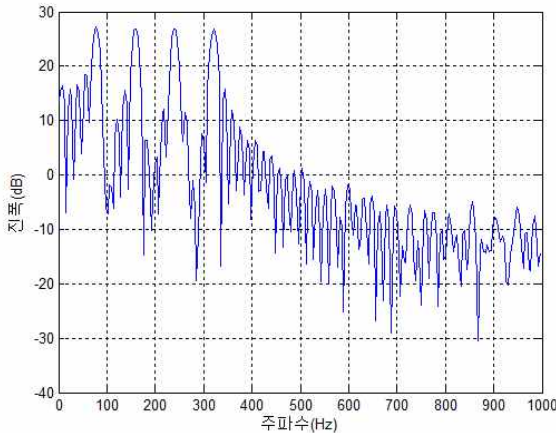


그림 5. 외란 신호의 주파수 스펙트럼.
Fig. 5. Frequency spectrum of the disturbance signal.

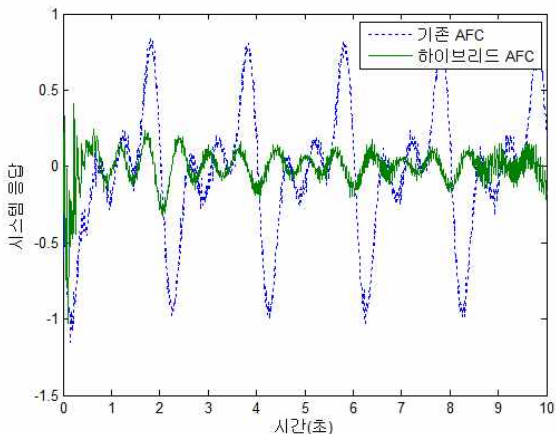


그림 6. 시스템 응답 파형.
Fig. 6. System response waveform.

였다. 그림 4는 샘플링 시간이 0.01초이며 전체 제어시간이 10초인 경우의 외란 신호 파형을 보여준다. 여기서 전체적으로 약 3.5 정도의 최대 진폭을 관측할 수 있으며 서로 대칭적 파형임을 알 수 있다. 그림 5는 그림 4의 외란신호에 FFT를 적용하여 주파수 대역폭에 대한 데시벨 크기를 보여 주고 있다. 이 FFT 파형으로부터, 80 Hz, 160 Hz, 240 Hz, 320 Hz에서 27 dB 정도의 최대 진폭이 발생하였음을 볼 수 있으며, 하지만 비교적 고주파의 경우 상대적으로 그 진폭의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다.

이러한 시스템 환경에 대하여 본 논문에서 제안한 하이브리드 AFC 시스템을 적용하여 시스템 응답을 검출하여 분석하였다. AFC 파라미터인 α , β , σ 에 대한 초기값은 0과 1사이의 항등분포를 갖는 랜덤값으로 하였으며 식 (12)와 식 (19)에서 $\tilde{\eta}_1=0.1$, $\tilde{\eta}_2=0.001$ 로 각각 선택하였다. 구성된 하이브리드 AFC의 반복 시뮬레이션을 통해 식 (3)에서 $m=9$ 일 때 최적의 제어성능을 갖는 것을 알 수 있었다. 제어 성능은 파라미터 m 의 값을 변화시켜 주어진 제어시간 동안 전체 오차값을 연산하여 서로 비교 분석하였으며 이 결과 m 의 값이 1에서 8사이일 때 오차가 점점 줄어들어 $m=9$ 일 때 가장 작은 오차 값을 가지며 이후의 값 즉 $m > 9$ 인 경우에 오차 값이 다시 점점 증가하는 것으로 분석되었다. 그림 6은 본 논문에서 제안하는 하이브리드 AFC에 대한 시스템 응답을 보여주며 또한 기존의 AFC 기법을 함께 시뮬레이션을 실시하여 그 결과파형을 비교 분석 하였다. 기존의 AFC 시스템은 참고문헌 [5]에서 제안한 알고리즘을 본 논문의 시뮬레이션 환경에 적합하도록 변경하여 적용하였으며 반복 시뮬레이션을 통해 최적의 제어성능을 갖는 제어 파라미터를 사용하였다. 또한 두 제어기의 경우 최적의 제어성능을 도출하여 그 결과를 비교 분석하였다. 그림 6의 결과파형으로부터 하이브리드 AFC의 경우 약 1초까지 과도응답 특성을 보이고 있으며 정상상태 응답에서 최대 진폭이 약 0.25임을 관측할 수 있다. 하지만 기존 AFC의 경우 최대 진폭이 약 0.8 정도로 관측되었으며 하이브리드 AFC의 경우 상대적으로 제어오차가 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 한편 두 제어방식에 대하여 전체 제어시간 동안 기준값 0에 대한 오차값을 $e_{\Sigma} = \sqrt{(e^T e)}$ 와 같이 연산하였으며 기존 AFC의 경우 $e_{\Sigma} = 13.9$, 하이브리드 AFC의 경우 $e_{\Sigma} = 3.7$ 으로 관측되었다. 따라서 하이브리드 AFC가 기존 AFC 방식에 대하여 약 73.4%의 개선정도를 보이고 있다. 그림 7은 주파수 영역에서 두 제어시스템의 결과파형을 각각 보여주고 있다. 기존 AFC의 경우 저주파 대역에서 약 18 dB 부근의 진폭을 가지지만 하이브리드 AFC의 경우 그 진폭의 크기가 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 하지만 고주파 대역에서는 진폭이 거의 동일한 것으로 분석되며 이는 저주파 외란에 대하여 하이브리드 AFC의 제어성능이 월등히 우수함을 알 수 있다. 그림 8은 하이브리드 제어시스템의 입력신호를 보여준다. 시스템 응답 파형과 유사하게 과도응답 영역에서는 신호의 파형이 일정하지 않지만 정상상태에서는 외란 파형과 유사한 패턴의 신호가 인가됨을 알 수 있다.

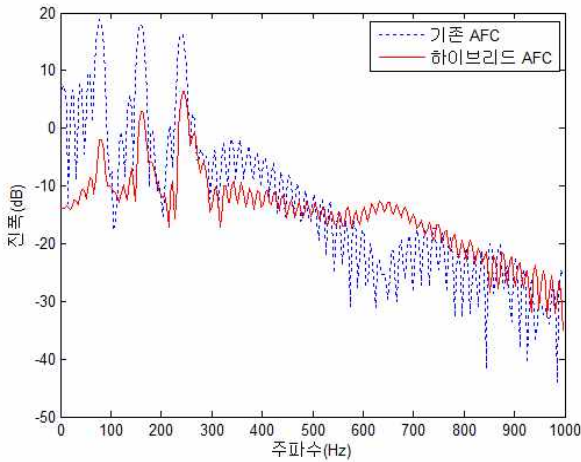


그림 7. 시스템 응답의 주파수 스펙트럼.

Fig. 7. Frequency spectrum of the system responses.

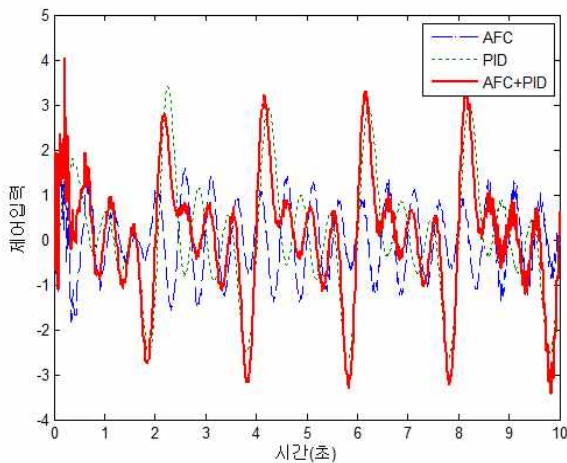


그림 8. 제어입력 신호 파형.

Fig. 8. Control input signal waveform.

VI. 결론

본 논문은 일반적인 시스템 상태 외란과 제어 액츄에이터에 인가되는 제어외란에 대한 적응형 하이브리드 AFC 시스템을 제안하였다. 제안한 AFC 시스템은 기존의 AFC 규칙과 PID 제어규칙으로 조합하여 구성하였으며 각각의 제어기 파라미터는 기존의 최급 강하 기반 최적화 알고리즘을 적용하여 수정규칙을 산출하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 AFC 시스템은 기존의 AFC에 대하여 70% 이상 제어능력이 개선되었음을 알 수 있었으며 주파수 응답에서도 10 dB 이상 진폭이 감소되었음을 관측하였다. 한편 제안한 AFC 시스템은 제어동작 구간에서 상태 및 제어 입력 외란의 인가에도 바람직한 제어성능을 가지며 정상상태에서 설정치 부근에 수렴하는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 검증할 수 있었다. 향후 연구로는 실시간 테스트베드를 구축하여 제안한 AFC 시스템의 실 적용 가능성 및 타당성을 검증하고자 하며, 또한 이산 리아푸노브 이론 및 확률 수렴성 이론을 적용하여 제어시스템의 안정성 및 제어 파라미터의 수렴특성을 분석하고자 한다.

참고문헌

- [1] X. Guo and M. Bodson, "Adaptive cancellation of a sinusoidal disturbance with rapidly varying frequency using an augmented error algorithm," *Proc. of the IEEE Conf. on Decision & Control*, Seville, Spain, pp. 4803-4808, Dec. 2005.
- [2] H. Zhang, X. Huang, and G. Peng, "A novel adaptive feedforward compensation algorithm for hard disk drive," *Proc. of the Int. Conf. on Mechanics & Automation*, Luoyang, China, pp. 1275-1279, June 2006.
- [3] Y. Lu and S. Lin, "Disturbance-observer-based adaptive feedforward cancellation of torque ripples in harmonic drive systems," *Elect. Eng.*, vol. 90, pp. 95-106, 2007.
- [4] C. Duan, G. Gu, C. Du, and T. C. Chong, "Robust compensation of periodic disturbance by multirate control," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 3, pp. 413-418, 2008.
- [5] G. Pin, "A direct approach for the frequency-adaptive feedforward cancellation of harmonic disturbances," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 58, no. 7, pp. 3523-3530, 2010.
- [6] J. M. Mendel, *Lessons in Estimation Theory for Signal Processing, Communications, and Control*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1995.
- [7] K. Ogata, *Discrete-time Control Systems*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1995.



김준수

2001년 한국교육개발원 전자공학과 졸업(공학사). 2004년 동의대학교 대학원 전기전자공학부 졸업(공학석사). 현재 부경대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정. 1996년~현재 한국폴리텍대학 전자과 부교수. 관심분야는 자동제어.



조현철

1997년 2월 부경대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 1999년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2006년 8월 미국 네바다 주립 대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 울산과학기술대학교 전기전자학부 조교수. 관심분야는 자동제어, 고장진단, 신경회로망.



김관형

2001년 2월 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(공학박사). 2000년 3월~현재 동명대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 관심분야는 최적제어, 인공지능, 임베디드 시스템, 신호처리.



하 흥 곤

1973년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1977년 동 대학원 졸업(공학석사). 1984년 중앙대학교 대학원 졸업(공학박사). 현재 동의대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 제어이론, 지능제어, 비선형제어.



이 형 기

1975년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980년 동 대학원 졸업(공학석사). 1985년 동 대학원 졸업(공학박사). 현재 부경대학교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 자전거 자세제어, 태양광 시스템, 퍼지제어.