

입력 불일치 해소에 의한 개선형 무충돌전환

An Improved Bumpless Transfer by Solving the Input Discrepancy Problem

김 태 신, 양 지 혁, 권 태 완, 권 오 규*
(Tae Shin Kim, Ji-Hyuk Yang, Tae-Wan Kwon, and Oh-Kyu Kwon)

Abstract: On the controller switching time, even though on-line/off-line controller outputs are the same, a problem which deteriorates the performance of bumpless transfer can happen in case that any discrepancy between the two controller inputs is transferred directly to the controller output. In this paper, we analyze the cause of that phenomenon in existing research results and propose a new method which improves that problem. In order to solve this problem, the off-line controller is augmented to an anti-windup structure and an improved bumpless transfer method is derived by using the changed input of the off-line controller instead of the plant input. We exemplify the performance of the proposed method by comparing with the performance of the existing method via numerical examples.

Keywords: input discrepancy problem, anti-windup, bumpless transfer, controller switching, linear quadratic optimization

I. 서론

제어기법의 실제 적용 시에 단일제어기로 플랜트의 모든 동작영역을 관장할 수 없기 때문에 제어기 교체 문제가 많이 발생한다. 선형제어기법을 비선형플랜트 제어에 적용할 경우에 동작점 변화에 따라 제어기를 교체하는 것이 대표적인 사례이다[3,8-9]. 또한 보일러/터빈과 같은 산업용 대형 플랜트에서 일반적으로 사용중인 PID 기반의 제어기법에 대해서 LQ 제어기와 같은 현대 제어기법으로 교체할 때의 성능을 평가하기 위한 온라인 시뮬레이션에서 제어기 교체 문제가 발생한다. 그 밖에도, 수동제어에서 자동제어로 제어방식을 변환하는 경우, 제어성능의 달성을 위해 서로 보완적으로 설계된 제어기를 교체하는 경우, 예를 들어, 명령추종에 최적화된 제어기와 외란제거에 최적화된 제어기 사이의 교체 등의 사례가 있다[7].

제어기 교체 시 제어기 출력의 불일치 현상인 충돌(bump)이 발생할 수 있다. 이 현상을 구동기의 입력 측면에서 살펴보면 갑작스런 임펄스가 발생하는 것과 같은 상황인데, 이러한 충돌이 발생하면 시스템의 성능이 악화되고 심하면 시스템이 불안정해질 수도 있다. 이러한 충돌 문제를 해결하기 위해 과거에는 고이득 되먹임과 해너스(Hanus) 구조를 사용하는 방식 등의 누적방지 기법들을 교체대상 제어기에 확장 적용하여 충돌의 영향을 줄이는 방법을 채택해 왔다[1-3]. 그러나 이 구조는 충돌을 직접적으로 제거하는 것이 아니라 누적방지 기법의 부가적인 기능에 의해 완화하는 구조라는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 제어기 교체 시 발생하는 충돌문제를 직접적으로 해결하려는 방법이 제시되었다[4-10]. 이 방법은 오프라인 제어기의 상태공간 모델과 최적화 기법을 사용하여 오프라인 제어기의 출력이 온라인 제어기의 출력과 같게 만들어 주는 오프라인 제어기의

입력을 구하는 기법에 의해 충돌문제를 해결하는 것이다.

이상적인 무충돌전환을 위해서는 제어기 교체 순간에 온라인제어기와 교체할 오프라인 제어기 사이의 출력이 같아야 하고 이와 동시에 제어기 입력의 차이도 없어야 한다. 그런데 기존의 무충돌전환 방법들은 다음과 같은 경우에 실제 적용 시 어려움이 발생된다. 즉, 제어기 교체 직전에 온라인 제어기의 출력과 교체할 오프라인 제어기의 출력이 거의 같더라도 제어기 교체 순간에 제어기 입력의 차이가 자주 발생할 수 있는데, 이 입력의 차이가 직접적으로 제어기 출력의 차이로 전달되는 경우에 무충돌전환이 제대로 이루어지지 않는 것이다. 이런 문제를 해결하기 위해서 저역필터를 오프라인 제어기에 결합하여 무충돌전환을 유도한 방법이 제안되기도 하였다[5]. 그러나 이 방법은 오프라인 제어기 입력을 천천히 변화시켜 급격한 변화만을 줄이는 역할을 하기 때문에 제어기 입력의 차이가 곧 바로 제어기 출력의 차로 연결되는 현상에 대한 근본적인 해결책은 되지 못하고 오히려 수렴속도를 저하시키는 부작용을 초래하는 문제점이 있다.

따라서 이 논문에서는 제어기 입력의 불일치로 발생할 수 있는 기존 무충돌전환 기법의 성능악화 문제를 해결하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 이 방안의 요체는 오프라인 제어기를 누적방지 구조로 확장하고, 온라인 제어기의 출력과 같게 만들어 주기 위한 오프라인 제어기의 입력항의 변경을 통해 제어기 입력의 차이가 제어기 출력의 차이로 직접 전달되는 것을 차단함으로써 무충돌전환을 달성하는 것이다.

II. 기존 무충돌전환 기법의 문제점

이 장에서는 기존의 무충돌전환 연구결과 중에서 대표적인 Tumer와 Walker[4]의 기법을 중심으로 분석하여 문제점을 제시하고자 한다. [4]에서 제시된 무충돌전환 기법의 구조는 그림 1과 같다. 여기서, r 은 기준입력, u 는 오프라인 제어기의 출력, \tilde{u} 는 온라인 제어기의 출력, x 는 오프라인 제어기의 상태, α 는 오프라인 제어기의 출력을 온라인 제어기의 출력과 같게 만드는 r 을 대체하는 오프라인 제어기의 입력을 의미하며, F 는 되먹임 이득행렬이다. 오프라인 제어기는 유한

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 7. 29., 수정: 2009. 8. 31., 채택확정: 2009. 9. 2.

김태신, 양지혁, 권태완, 권오규: 인하대학교 전기공학과

(wtigerw@daum.net/zero1zuck@daum.net/guvil12345@naver.com/okkwon@inha.ac.kr)

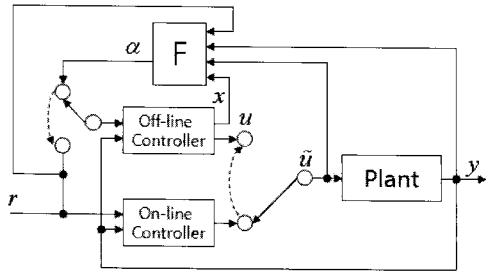


그림 1. 기존 무충돌전환 기법의 기본구조.

Fig. 1. A basic structure of an existing bumpless transfer method.

차원 시불변이고, 제어가능하고 관측가능하며 플랜트를 동작 구간에서 안정화한다는 가정하에서 다음과 같은 상태공간 모델로 나타낸다.

$$\dot{x}_c = Ax_c + B_1\alpha + B_2y \quad (1)$$

$$u = Cx_c + D_1\alpha + D_2y \quad (2)$$

여기서 벡터 α 는 다음에 따라 계산되며

$$\alpha = F[x \ y \ \tilde{u} \ r]^T \quad (3)$$

이 식에서 F 는 다음과 같이 주어진다.

$$F = \Delta \begin{bmatrix} (D_1^T W_u C + B_1^T \Pi)^T \\ (D_1^T W_u D_2 - B_1^T M \hat{Y})^T \\ (-D_1^T W_u + B_1^T M \hat{U})^T \\ (-W_c + B_1^T M \hat{R})^T \end{bmatrix}^T$$

F 를 구성하는 각 변수의 의미는 [4]를 참조하고 여기서는 생략한다.

이와 같이 제시된 기존기법의 문제점은 제어기 교체 시에 오프라인제어기의 α 가 r 로 바뀌게 되는데, 이 때 α 와 r 이 차이가 있다면 교체 직전에 u 와 \tilde{u} 가 같더라도 교체 직후에 충돌현상이 발생할 수 있다는 것이다. 식 (2)를 관찰해보면 D_1 이 0이 아닌 경우, 제어기 교체 순간에 α 와 r 의 차이가 직접적으로 제어기 출력에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 교체 직전에 제어기 출력 u 와 \tilde{u} 가 같더라도 제어기 입력 불일치에 의해 충돌현상이 발생할 수 있다. 이에 대한 구체적인 예는 IV 장에서 예제를 통해 보일 것이다. 그런데 기존의 연구결과들에서는 이 논문에서 제기된 문제가 해결되지 않고 있다[4-10]. 그러므로 제어기 입력의 불일치로 인해 발생하는 충돌현상을 방지하는 새로운 기법이 제안될 필요성이 있다.

III. 개선형 무충돌전환 기법

이 장에서는 앞에서 제기된 기존 연구결과의 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같은 개선형 무충돌전환 구조를 제안한다. 여기서, N 은 구동기의 비선형성, y_c 는 오프라인 누적방지 제어기의 출력, \tilde{y}_c 는 온라인 제어기의 출력, x_c 는 오프라인 누적방지 제어기의 상태, α 는 y_c 와 \tilde{y}_c 를 같게 만들어주는 u 를 대체하는 오프라인 누적방지 제어기의 입력을 의미한다. 점선 화살표는 오프라인 누적방지 제어기가 온

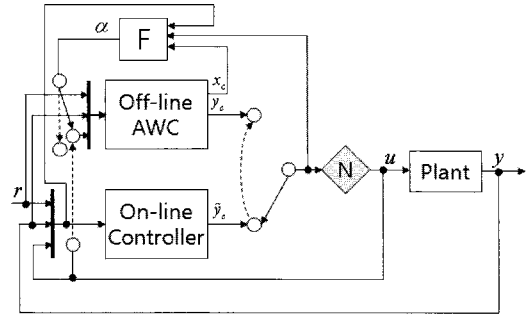


그림 2. 제안된 무충돌전환 기법의 구조.

Fig. 2. A structure of a proposed bumpless transfer method.

라인 제어기로 바뀌었을 때의 천이상태를 의미한다. 이 구조의 핵심적인 특징은 오프라인 제어기를 누적방지 제어기(AWC: Anti-Windup Controller) 구조로 확장하고, α 는 플랜트 입력을 대체하는 오프라인 제어기의 입력으로 정하므로 오프라인 제어기의 출력단에 직접적으로 α 가 연결되지 못하게 한 것이며, 이에 따라 제어기 입력의 불일치가 직접적으로 출력으로 전달되는 것을 차단하는 구조를 갖게 된다.

기본적인 유도과정은 LQ 최소화기법으로 이루어지는데, [10]에서는 이미 설계된 누적방지 제어기 사이의 무충돌전환 기법을 연구한 반면 본 논문에서는 II 장에서 제기된 문제점을 해결하기 위해 이미 설계된 제어기를 누적방지 제어기 구조로 확장하여 이용하게 된다. 만약 이미 설계된 제어기가 누적방지 제어기라면 이를 그대로 이용할 수 있으므로 본 논문에서 제안되는 방법은 [10]에서 제시된 기법의 다른 한 방법이 된다. 그러나 [10]과는 다르게 II 장에서 제기된 문제점을 해결할 수 있는 개선형 무충돌전환 구조를 갖게 된다.

1. 문제 설정

제안하는 무충돌전환 기법은 오프라인 누적방지 제어기의 상태를 알 수 있다는 가정하에 유도되며, 무충돌전환을 위해 y_c 와 \tilde{y}_c 가 같도록 하는 α 를 구하기 위한 정적 되먹임 이득행렬 F 를 유도하는 문제로 귀착된다. 여기서 제어기 적용 시 $N=1$ 로 한다면 $\tilde{y}_c = u$ 가 되어 누적방지 제어기 구조로 확장된 제어기는 전에 설계된 제어기와 동일한 동작을 하게 되므로 누적방지를 위해 추가적으로 확장된 부분은 y_c 와 \tilde{y}_c 를 같게 만들어주는 역할만을 담당하게 된다. 즉, 이 경우 기존에 설계된 제어기와는 독립적으로 무충돌전환을 위해서만 누적방지 구조를 활용할 수 있다. 만약 그대로 구동기의 비선형성을 반영하여 누적방지 제어기로 동작하게 된다면 [10]에서 제시된 통합된 누적방지 무충돌전환 기법의 한 방법이 된다.

무충돌전환 문제에 LQ 최소화기법을 적용하기 위해 다음과 같은 가격함수를 정한다.

$$J(y_c(t), \alpha(t), t_f) = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} z_{y_c}(t)^T W_{y_c} z_{y_c}(t) + z_u(t)^T W_u z_u(t) dt \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{2} z_{y_c}(t_f)^T P z_{y_c}(t_f) \quad (5)$$

$$z_{y_c}(t) = y_c(t) - \tilde{y}_c(t) \quad (5)$$

$$z_u(t) = \alpha(t) - u(t) \quad (6)$$

여기서 W_{y_c} 와 W_u 는 상수 양한정 가중행렬, t_f 는 종단시간, P 는 양반한정 가중행렬이다. 식 (4)를 최소화 하는 것은 무충돌전환을 이루게 해주는 u 와 가까운 α 를 구하겠다는 의미이다. 그림 2에서 무충돌전환을 이루기 위한 되먹임이득행렬 F 를 구하기 위해 식 (4)를 α 에 대해서 최소화하는 문제를 풀어야 한다.

2. 개선형 무충돌전환 기법

목적달성을 위해 식 (1)과 식 (2)와 같은 2자유도 제어기를 상태공간 상에서 누적방지 제어기로 확장하면 식 (7)과 식 (8)과 같은 상태공간 모델로 나타낼 수 있다. 이것은 [1]에서 소개된 일반 누적방지 보상기(generalized anti-windup compensator)와 동일한 구조를 갖는다.

$$\dot{x}_c = Ax_c + B_1r + B_2y + G(u - y_c) \tag{7}$$

$$y_c = Cx_c + D_1r + D_2y \tag{8}$$

식 (8)을 식 (7)에 넣어서 정리하면 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{x}_c = A_a x_c + B_{a1}r + B_{a2}y + Gu \tag{9}$$

여기서 $A_a = A - GC$, $B_{a1} = B_1 - GD_1$, $B_{a2} = B_2 - GD_2$ 이다.

오프라인 누적방지 제어기가 식 (8)과 식 (9)와 같은 구조를 갖고, 온라인 제어기의 출력과 같게 만들기 위한 오프라인 제어기 입력으로 u 대신 α 를 선택한다면 오프라인 누적방지 제어기의 상태공간 모델을 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\dot{x}_c = A_a x_c + B_{a1}r + B_{a2}y + G\alpha \tag{10}$$

$$y_c = Cx_c + D_1r + D_2y \tag{11}$$

여기서 식 (11)에 α 가 연결되어 있지 않으므로 제어기 교체 순간의 제어기 입력의 차이가 곧바로 제어기 출력의 차이로 전달되는 것을 차단한다는 것을 알 수 있다.

식 (10)은 가격함수 식 (4)를 최소화 하는데 있어서 제약조건이 된다. 그러므로 동적 라그랑지 곱셈자(dynamic Lagrange multiplier) $\lambda(t)$ 의 도입을 통해 식 (4)와 식 (10)은 다음과 같이 결합될 수 있다.

$$\tilde{J} = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [H(t) - \lambda(t)^T \dot{x}_c] dt + \phi(t_f) \tag{12}$$

여기서 $\phi(t_f) = \frac{1}{2} z_{y_c}(t_f)^T P z_{y_c}(t_f)$ 이고, 식 (12)를 최소화 하기 위한 해밀토니안(Hamiltonian), $H(t)$ 는 다음과 같이 주어진다:

$$H = \frac{1}{2} [(y_c - \tilde{y}_c)^T W_{y_c} (y_c - \tilde{y}_c) + (\alpha - u)^T W_u (\alpha - u)] + \lambda^T (A_a x_c + B_{a1}r + B_{a2}y + G\alpha) \tag{13}$$

정리 1: 제안하는 무충돌전환을 이루게 하는 오프라인 누적방지 제어기의 입력, α 가 식 (14)을 통해 구해진다고 하면

$$\alpha = F[x_c \quad r \quad y \quad \tilde{y}_c \quad u]^T \tag{14}$$

$t_f \rightarrow \infty$ 때 식 (14)의 되먹임이득행렬 F 는 다음과 같이 구해진다:

$$F = -W_u^{-1} \begin{bmatrix} (G^T \Pi)^T \\ (-G^T M \Pi \hat{F})^T \\ (-G^T M \hat{H})^T \\ (G^T M C^T W_{y_c})^T \\ (-W_u - G^T M \Pi G)^T \end{bmatrix}^T$$

여기서 Π 는 다음과 같은 대수 리카티 방정식의 해이다.

$$0 = \Pi A_a + A_a^T \Pi + \Pi \tilde{B} \Pi + \tilde{C} \tag{15}$$

$$\tilde{B} = -G W_u^{-1} G^T,$$

$$\tilde{C} = C^T W_{y_c} C,$$

$$M = (\Pi \tilde{B} + A_a^T)^{-1},$$

$$\hat{F} = \Pi B_{a1} + C^T W_{y_c} D_1,$$

$$\hat{H} = \Pi B_{a2} + C^T W_{y_c} D_2.$$

정리 1에 대한 증명은 관련식의 해당변수에 유의하면 [10]에서의 유도방법과 유사하므로 생략한다. 정리 1을 통해 F 가 구해지면 가격함수 식 (4)을 최소화하는 α 를 구할 수 있다. 이 α 에 의해 y_c 와 \tilde{y}_c 가 같게 될 뿐만 아니라 식 (10)과 식(11)의 오프라인 누적방지 제어기의 구조가 갖는 장점에 따라 제어기 교체 시 제어기 입력의 불일치 현상이 곧바로 제어기 출력의 불일치, 즉 충돌현상으로 이어지는 것을 차단하게 된다. 또한 F 는 사전에 계산되는 상수행렬이므로 제안된 기법은 복잡성의 큰 증가 없이 적용될 수 있다.

IV. 수치 예제

이 논문에서 제안된 기법의 타당성과 성능을 알아보기 위해 다음과 같은 동특성을 갖는 플랜트에 적용해 보기로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p u \\ y_p &= C_p x_p \end{aligned} \tag{16}$$

식 (16)의 u 는 그림 2에서 표시된 u 와 같다.

$$\text{여기서 } A_p = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_p = [0 \quad 0 \quad 1] \text{ 이고,}$$

구동기의 제약조건은 $0 \leq u \leq 2$ 로 했다.

온라인 제어기는 다음과 같은 LQ 제어기를 사용한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_{lq} x_c + B_{lq1} r + B_{lq2} y \\ y_c &= C_{lq} x_c + D_{lq1} r + D_{lq2} y \end{aligned} \tag{17}$$

여기서 y 는 식 (16)의 x_p 가 되고, $A_{lq} = 0$, $B_{lq1} = 1$, $B_{lq2} = [0 \quad 0 \quad -1]$, $C_{lq} = 14.1421$, $D_{lq1} = 0$, $D_{lq2} = [-2.5758 \quad -11.0450 \quad -18.9562]$ 이다.

오프라인 제어기는 PID 제어기를 사용하며, 이를 상태공간 모델로 나타내면 다음과 같다[10].

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_{pi} x_c + B_{pi1} \alpha + B_{pi2} y \\ y_c &= C_{pi} x_c + D_{pi1} \alpha + D_{pi2} y \end{aligned} \tag{18}$$

여기서 y 는 식 (16)의 y_p 가 되고,

$$A_{pi} = \begin{bmatrix} -30.7692 & 0 \\ 0.2218 & 0 \end{bmatrix}, B_{pi1} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.9227 \end{bmatrix}, B_{pi2} = \begin{bmatrix} 128 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_{pi} = [72.0685 \quad -6.5026], D_{pi1} = 15, D_{pi2} = -315$$

이다.

1. 기존 무충돌전환 기법 적용

그림 1과 같은 기존의 무충돌전환 기법을 적용해서 식 (17)을 온라인 제어기로 사용하다가 8초 후에 오프라인 제어기로 동작하던 식 (18)로 제어기를 교체하는 모의실험을 수행한다. 즉, 8초 후에는 온라인 제어기가 식 (18)로 바뀐다. 식 (3)에서 $W_u = 100$ 이고 $W_e = 1$ 일 때 F 는 다음과 같다.

$$F = [-4.8044 \quad 0.4335 \quad 20.9991 \quad 0.0000] \quad (19)$$

그림 3만을 보면 온라인/오프라인 제어기의 사이의 출력차이가 거의 없으므로 무충돌전환이 이루어질 것으로 기대할 수 있다. 그러나 그림 4를 살펴보면 8초에서 갑작스러운 제어기 출력의 변화가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 살펴 본 바와 같이 오프라인 제어기로 동작하던 식 (18)의 $D_{pi1} = 15$ 로 인해 제어기 교체 순간에 α 에서 r 로의 제어기

입력의 변화가 곧바로 제어기 출력의 차이로 전달되기 때문이다. 또한 구동기의 제약조건으로 인해 누적현상이 상당히 발생된 것을 확인 할 수 있다.

2. 개선형 무충돌전환 기법 적용

여기서도 앞의 예제와 동일하게 8초 후에 제어기를 교체하기로 한다. 이 논문에서 제안된 무충돌전환 기법을 적용하기 위해 식 (18)의 오프라인 제어기를 식 (10)과 식 (11)과 같은 누적방지 제어기로 다음과 같이 확장하자.

$$\dot{x}_c = A_\alpha x_c + B_{a1} r + B_{a2} y + G \alpha$$

$$y_c = C_{pi} x_c + D_{pi1} r + D_{pi2} y \quad (20)$$

여기서

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ -50 \end{bmatrix}, A_\alpha = \begin{bmatrix} -30.7692 & 0 \\ 3603.6473 & -325.1308 \end{bmatrix},$$

$$B_{a1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 749.0773 \end{bmatrix}, B_{a2} = \begin{bmatrix} 128 \\ -15750 \end{bmatrix}$$

이다.

식 (14)에서 $W_{y_c} = 10$ 이고 $W_u = 0.01$ 일 때 F 는 다음과 같다.

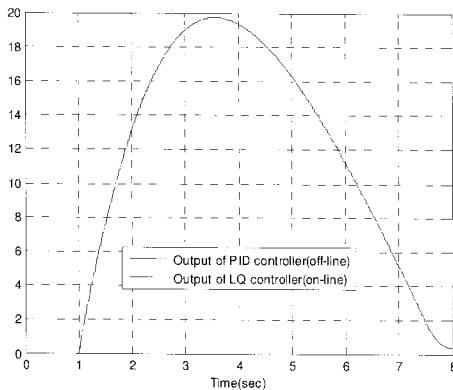


그림 3. 그림 1의 무충돌전환 기법 적용 시 제어기 교체 직전까지의 온라인/오프라인 제어기의 출력.

Fig. 3. On-line/off-line controller outputs until just before controller switching using bumpless transfer method of Fig. 1.

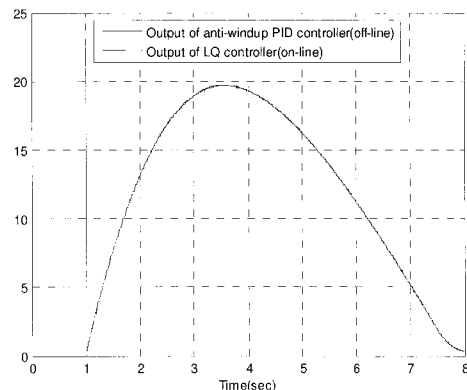


그림 5. 그림 2의 무충돌전환 기법 적용 시 제어기 교체 직전까지의 온라인/오프라인 제어기의 출력.

Fig. 5. On-line/off-line controller outputs until just before controller switching using bumpless transfer method of Fig. 2.

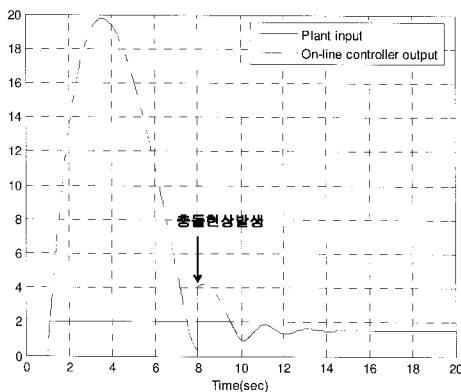


그림 4. 그림 1의 무충돌전환 기법 적용 시 온라인 제어기 출력과 플랜트 입력.

Fig. 4. An on-line controller output and a plant input using bumpless transfer method of Fig. 1.

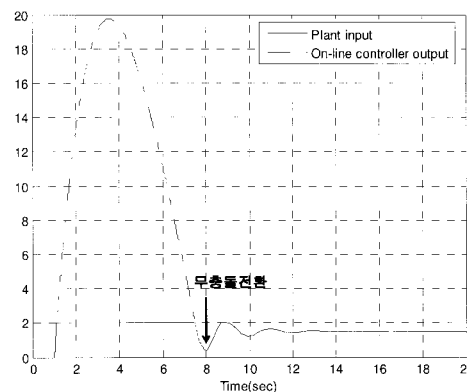


그림 6. 그림 2의 무충돌전환 기법 적용 시 온라인 제어기 출력과 플랜트 입력.

Fig. 6. An on-line controller output and a plant input using bumpless transfer method of Fig. 2.

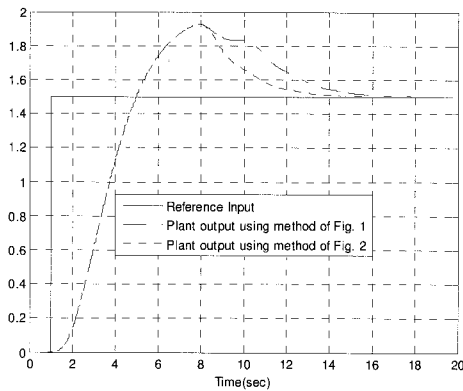


그림 7. 그림 1과 그림 2의 무충돌전환 기법 적용 시 플랜트 출력비교.

Fig. 7. Plant outputs comparison between using method of Fig. 1 and Fig. 2.

$$F = \begin{bmatrix} -2201.4878 & 199.2310 & -459.5966 \\ 9623.7603 & 31.6070 & 0.0316 \end{bmatrix} \quad (21)$$

이 논문에서 제안된 무충돌전환 기법을 사용해서 8초까지의 온라인/오프라인 제어기의 출력은 그림 5와 같다. 여기서 초기에는 오프라인 제어기의 출력이 온라인 제어기의 출력과 많이 다르나 빠른 속도로 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 6을 살펴보면 8초에서 제어기 교체가 일어난 후에도 제어기 출력의 불일치가 발생하지 않아서 무충돌전환이 이루어짐을 확인 할 수 있다. 또한 8초 이후의 플랜트 입력과 온라인 제어기 출력을 비교해 보면 거의 같은 것을 확인 할 수 있다. 이는 누적방지 제어기의 효과로써 구동기의 제약조건 범위 안에서 식 (20)의 제어기가 누적현상을 적절히 차단하였음을 알 수 있다.

마지막으로 제안된 기법의 무충돌전환과 누적방지의 효과로 인한 제어 성능개선 효과를 그림 7을 통해 확인 할 수 있다. 이러한 결과가 발생한 원인을 살펴보기 위해 그림 4를 살펴보면 그림 1과 같은 기존 기법 적용 시 교체 직후 충돌 현상 발생으로 온라인 제어기의 출력 값이 구동기의 제약조건보다 큰 약 4.3으로 갑자기 변하게 되는 것을 볼 수 있는데 이는 곧 누적현상으로 이어지고, 이 누적현상이 제어성능을 악화시킨다. 반면에 그림 6을 살펴보면 그림 2와 같은 개선형 기법 적용 시 교체 직후 충돌현상이 발생하지 않았기 때문에 온라인 제어기의 출력 값이 2보다 작은 값을 가지며 누적현상이 곧바로 발생하지 않는다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 누적방지 제어기가 누적현상을 효과적으로 차단하였기 때문에 기존의 방법보다 더 좋은 제어성능을 갖게 된다.

V. 결론

최근 제어기 교체기법의 새로운 방법으로 교체 전에 충돌 현상을 직접적으로 제거하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다[4-10]. 그러나 기존 연구결과에서는 제어기 구조에 따라 제어기 입력 불일치 문제가 충돌현상을 직접적으로 일으킬 수 있다는 사실이 간과되었다. 그러므로 이 논문에서는 제어기의 입력 불일치 문제 해소에 의해 개선된 무충돌전환 기법을 제안하였다. 이 기법은 식 (2)처럼 오프라인 제어기 출력단에 α 가 직접적으로 연결된 경우에 제어기 교체 직전 온

라인/오프라인 제어기의 출력이 같더라도 제어기 입력의 불일치가 있는 경우 충돌현상이 발생하는 기존 무충돌전환 기법의 문제점을 방지하는 장점을 갖는다. 제안된 기법은 오프라인 제어기를 누적방지 제어기의 구조로 확장하고 플랜트 입력을 대체하는 오프라인 제어기의 입력으로 α 를 선택하여 문제를 설정한 후, LQ 최적화 기법을 적용하여 유도되었다. 유도된 형태에서 구동기의 제약조건을 두지 않을 때는 확장되기 전의 오프라인 제어기와 동일하게 동작하게 되므로 누적방지 제어기의 G 는 제안되는 무충돌전환 기법의 설계변수로 사용되어 무충돌전환 성능의 개선을 기대할 수 있고, 구동기의 제약조건이 있을 경우에는 누적방지 제어기로 동작하게 되므로 추가적인 제어성능의 개선도 기대할 수 있다.

기존의 그림 1과 같은 무충돌전환 기법에서 제어기 교체시의 입력 불일치에 의한 충돌현상을 수치 예제의 경우를 통해서 그림 3과 4에서 확인하였다. 본 논문에서 제안된 기법의 무충돌전환 성능 개선 효과를 앞에서 충돌현상이 발생한 경우에 적용 시 무충돌전환을 이룰 수 있음을 보임으로써 검증하였으며, 이것은 그림 5-7을 통해 확인할 수 있다.

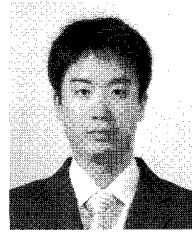
앞으로 실제 임베디드 시스템에 적용 시 수치오차에 의한 문제라든지, 시스템 불확실성에 의해 발생할 수 있는 오프라인 제어기 출력의 온라인 제어기 출력으로의 수렴성 부족등을 개선하기 위한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] C. Edwards and I. Postlethwaite, "Anti-windup and bumpless transfer schemes," *UKACC International Conference on Control '96*, 2-5 September 1996, pp. 394-399, 1996.
- [2] M. V. Kothare, P. J. Campo, M. Morari, and C. N. Nett, "A unified framework for the study of anti-windup designs," *Automatica*, vol. 30, no. 12, pp. 1869-1883, 1994.
- [3] 이영삼, 이명희, 권오규, "누적방지 무충돌 전환 제어기의 설계와 비선형 보일러 시스템 적용," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제6권 제4호, pp. 247-253, 2000.
- [4] M. C. Turner and D. J. Walker, "Linear quadratic bumpless transfer," *Automatica*, vol. 36, pp. 1089-1101, 2000.
- [5] M. C. Turner and D. J. Walker, "Modified linear quadratic bumpless transfer," *Proceeding of the American Control Conference San Diego California June*, pp. 2285-2289, 1999.
- [6] L. Zaccarian and A. R. Teel, "A common framework for anti-windup, bumpless transfer and reliable designs," *Automatica*, vol. 38, pp. 1735-1744, 2002.
- [7] K. Zheng, A. H. Lee, J. Bentsman, and C. W. Taft, "Steady-state bumpless transfer under controller uncertainty using the state/output feedback topology," *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 3-17, 2006.
- [8] 김태신, 박종후, 권오규, 박춘배, "LQ비행제어를 위한 무충돌 전환 구현 알고리즘," 한국항공우주학회, 제34권 제11호, pp. 35-41, 2006.
- [9] 김태신, 권오규, "무충돌 전환 구현 알고리즘을 이용한 전비행영역 제어기 교체법," 한국항공우주학회, 제36권 제6호, pp. 574-580, 2008.
- [10] 김태신, 권오규, "누적방지 무충돌전환을 위한 새로운 통합형 기법," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제15권 제7호, pp. 655-660, 2009.

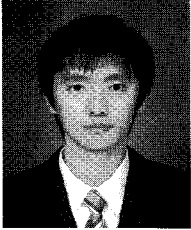
김 태 신

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제7호 참조.



양 지 혁

2006년 인하대학교 전자공학과 졸업.
2008년 인하대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사). 2008년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 이동로봇, RCP.



권 태 완

2007년 인하대학교 전자공학과 졸업.
2008년~현재 인하대학교 전기공학과 대학원 석사과정. 관심분야는 이상검출 및 진단, 다 변수 시스템 제어.

권 오 규

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제7호 참조.