

## 두개의 루프를 갖는 일반화된 모델 기반의 외란 제거 제어기 설계

### Design of Generalized Model-based Disturbance Rejection Controller with Two Loops

최 현 택, 김 봉 근, 엄 광 식\*

(Hyun Taek Choi, Bong Keun Kim, and Kwang Sik Eom)

**Abstract** : This paper proposes the generalized structure of a model-based disturbance rejection controller called a Robust Internal-loop Compensator (RIC). The framework consists of the RIC in the internal-loop to eliminate disturbances and a feedback controller in the external-loop to achieve nominal control performance. As the main contribution of this paper, we redefine the design problem of the RIC as a regulation control problem, then show that this new definition with the RIC structure provides more design flexibility and less implementation constraints. This is verified through a comparative structural analysis with Disturbance Observer (DOB) and Adaptive Robust Control (ARC). Two design examples of the RIC are given, along with practical issues that should be considered in the design procedure. The proposed framework is demonstrated by simulations of a rotary-type motor and experiments with a linear-type motor system.

**Keywords** : robust internal-loop compensator, model-based control, disturbance rejection controller, disturbance observer, adaptive robust control

#### 1. 서론

최근 반도체 제조 및 검사 장비나, 대용량 데이터 저장 장치를 위한 고성능 서보 시스템의 요구가 증가함에 따라 외란을 적극적으로 다룰 수 있는 외란 제거 제어 기술이 크게 주목을 받아왔다. 일반적인 외란 제거 제어 방법은 제어 명령에 대한 응답 특성과는 별도로 외란을 제거하는 별도의 보상기 구조를 갖는 점에서 2 자유도(2 Degree-Of-Freedom, DOF) 제어 구조라고 생각되어 질 수 있다. 그러나, 2 자유도 구조가 외란 제거 및 명령 추종의 두 가지 목적을 동시에 구현하기에 적절한 구조로 알려져 있음에도 불구하고, 최적화를 이용한 설계 방법에 의존하는 이론적인 2 자유도 제어기는 체계적 설계 방법의 부재로 인하여 널리 사용되지 못하고 있다[1].

이에 반하여 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB) [2-16], 적응 강인 제어기(Adaptive Robust Control, ARC) [17-19], 확장된 내부 모델 제어기(Extended Internal Model Controller)[20], 강인 내부 보상기(Robust Internal-loop Compensator, RIC)[21], 그리고 모델 기반 외란 감쇠(Model-based Disturbance Attenuation, MBDA)[22] 등은 두 개의 루프를 갖는 구조를 이용하여 다른 형태의 2 자유도 제어기 설계 방법을 제시하였다. 즉, 1 단계로 내부 루프에서 외란의 관측 및 보상을 위해 공칭 모델과 보상기를 설계하고, 2 단계로 외부 루프는 외란이 제거되었다는 가정 아래 일반적

인 되먹임 제어를 설계하는 것이다. 또한 내부 루프에서 모델링 불확실성, 모델링 매개 변수의 변화, 외부 외란 등을 소위 등가 외란으로 다루고 있다. 이러한 간단한 구조와 설계 방법으로 인해 많은 제어 시스템에 적용되어 효과적인 결과를 보여 주고 있다. 그러나, 내부 보상기의 설계가 일반적이고 체계적이지 못한 문제점을 가지고 있다. 가장 널리 이용되는 DOB의 경우, 성능에 있어서 중요한 영향을 미치는 Q-필터를 설계하기 위한 다양한 방법들이 연구되었으나 외란이 어떤 특성을 갖는 경우, 예를 들면 HDD나 DVD 제어 등에서 관찰되는 주기적인 외란의 경우, 알려진 외란에 대한 정보를 설계에 반영 및 구현 수 있는 일반화된 구조와 설계 방법을 가지고 있지 않았다. ARC의 경우, 지금까지 다양한 접근이 시도되었으나 2차 시스템에 대하여서만 유사 슬라이딩 함수가 제시되어 있어 설계의 다양성을 제한하고 있다. 이는 특정 구조에서 이에 따른 제한된 설계 방법에만 의존하는 문제점으로 이를 해결하기 위해서는 일반화된 보상기의 구조와 새로운 설계 문제 정의가 필요하다. 한편, IMC의 경우는 제어 대상 시스템의 모델을 사용하고, 실제 출력과 모델의 출력과의 차이를 되먹임 한다는 점에서는 유사한점이 있는 것처럼 생각할 수 있다. 그러나 IMC는 되먹임이 모델의 앞으로 인가되고, 외부 루프가 없다는 점에서 논리적으로 수학적으로 많은 차이를 가지고 있다. 이러한 이유로 IMC는 모델의 불확실성에 대해 불가피한 성능의 저하를 보이며, 이는 [20]의 주요 동기가 되었다.

본 논문에서는 두개의 루프를 갖는 모델 기반 외란 제거 제어기의 일반화된 구조와 이의 일반적인 설계 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해, 먼저 두개의 루프를 갖는 외란 제거 방법의 일반적인 개념을 제시하고, 외란 제거를 위한 보

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 5. 25., 채택확정 : 2003. 10. 20.

최현택 : 해양연구원 해양시스템안전연구소(htchoi@kriso.re.kr)

김봉근 : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Intelligent Systems Institute(bk.kim@aist.go.jp)

엄광식 : 한라대학교 전기전자제어공학부(kseom@hit.halla.ac.kr)

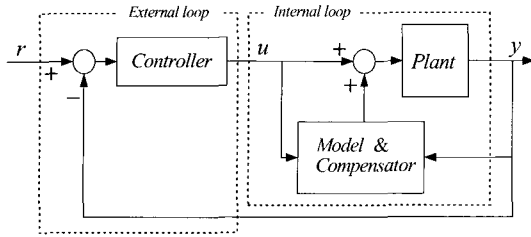


그림 1. 두개의 루프를 갖는 제어 시스템의 구조.  
Fig. 1. Structure of a control system with two loops.

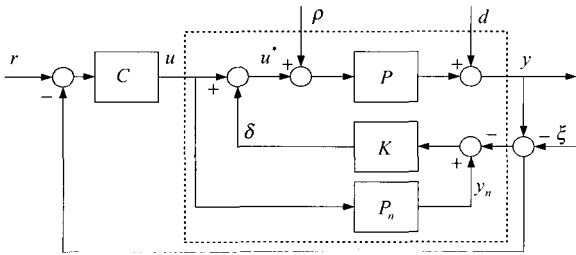


그림 2. 강인 내부 보상기.  
Fig. 2. Robust Internal-loop Compensator (RIC).

상기 설계 문제를 일반적인 안정(regulation) 제어 문제로 다시 정의한다. 여기서, 새로운 문제 정의는 이미 알려져 있는 다양한 제어기의 설계 방법을 이용하여 주어진 시스템과 외란에 대한 정보를 적극적으로 설계에 반영할 수 있도록 하는 일반화된 보상기 설계 방법의 근간이 된다. 그리고, 고전적 설계 방법과 고급 설계 방법을 사용한 설계 예를 통하여 그 타당성을 검증한다. 또한, 앞에서 언급한 유사한 구조를 갖는 방법들이 수학적으로는 등가이지만, 구조적인 특징으로 인해 발생하는 구현 방법 제약이 결국 설계 자유도를 제한하게 됨을 DOB와 ARC에 대한 구조적인 측면의 비교 분석을 통하여 설명한다. 마지막으로 회전형 서보 모터를 이용한 모의실험 결과와 선형 서보 모터를 이용한 실험 결과와 분석 결과를 통하여 제안된 제어기 설계 방법의 타당성을 보인다.

**II. 두개 루프를 갖는 모델 기반 외란 제거 제어기**

제어 시스템의 설계 목적은 전체 시스템의 안정도를 유지함과 동시에 주어진 성능 목표를 달성하는 것이다. 이 두 가지 목적을 달성하기 위한 두개의 루프를 갖는 모델 기반의 외란 제거 제어기는 그림 1에서 보이는 바와 같이 공칭 모델과 보상기를 포함하는 내부 루프와 일반적인 되먹임 제어기의 구조를 갖는 외부 루프의 구조를 가지며, 각각의 루프는 독립적인 설계 목적 및 규격에 따라 단계적으로 설계된다.

먼저, 내부 루프의 설계 목적은 내부 루프의 입출력 특성을 사용된 공칭 모델의 입출력 특성과 가능한 근사하게 유지할 수 있는 내부 보상기를 설계하는 것에 있다. 일반적인 관측기(observer) 또는 추정기(estimator)의 경우 공칭 모델이 실제 시스템을 추종하도록 한다. 그러나 그림 2과 같은 구

조에서는 실제 시스템과 공칭 모델의 차이를 등가 외란으로 정의하고, 관측하여 이를 보상할 수 있는 제어 입력을 만들어서 실제 시스템 쪽에 인가한다. 따라서 실제 시스템이 공칭 모델을 추종하도록 하는 것이다. 이론적인 관점에서 볼 때 관측된 등가 외란이 완벽하게 보상된 내부 루프는 공칭 모델이라고 생각할 수 있으며, 현실에서는 관심 주파수 대역, 또는 시스템 대역폭 이하의 주파수 대역에서 공칭 모델과 같다고 생각할 수 있다.

외부 루프는 주어진 제어 성능 규격을 만족하도록 하는 일반적인 되먹임 제어기가 공칭 모델에 근거하여 설계된다. 이는 관측된 등가 외란이 완벽하게 제거되면 내부 루프 전체가 공칭 모델로 동작한다는 특성에 근거하기 때문에 외부 루프의 공칭 성능을 유지하기 위해서는 내부 루프의 성능이 매우 중요한 역할을 하게된다.

**III. 문제 정의 및 설계 예**

일반화된 모델 기반 외란 제거 제어기 구조를 그림 2에 나타내었다. 여기서, 내부 루프, 즉 강인 내부 보상기(RIC)의 입출력 관계는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$y = (1 + KP)^{-1} [P(1 + KP_n)u + d + P\rho + KP\xi] \quad (1)$$

여기서 P는 제어 대상 시스템이며, P<sub>n</sub>는 이의 공칭 모델이다. K는 내부 보상기, u는 제어 입력, u\*는 보상된 제어 입력, ρ는 토크 외란, d는 출력 외란, y는 출력, 그리고 ξ는 측정 잡음이다. 여기서 보상되어야 할 오차를 e ≡ y<sub>n</sub> - y로 정의 할 때 이는 다음과 같이 다시 쓰여 질 수 있다.

$$e = S_c(P_n - P)u - S_c d - S_c P\rho - T_c \xi \quad (2)$$

여기서 S<sub>c</sub> = (1 + KP)<sup>-1</sup>, T<sub>c</sub> = KP(1 + KP)<sup>-1</sup>이다.

따라서, 궁극적인 보상기의 설계 문제는 공칭 모델의 출력과 시스템의 출력의 오차 e를 0으로 만들고자 하는 안정(regulation) 제어 문제이며 다음과 같이 정의 한다.

**문제 정의 :** 안정한 최소 위상 시스템을 위한 내부 루프 보상기의 설계 문제는 적절한 가중 함수 W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>를 포함한 W<sub>1</sub>S<sub>c</sub> + W<sub>2</sub>T<sub>c</sub> < 1 을 만족하는 적절한 K를 설계하는 문제로 정의한다.

따라서, 내부 루프의 안정도와 주어진 외란 제거 성능 규격을 만족하는 보상기 K의 설계 문제는 안정 제어 문제와 동일하게 다루어 질 수 있다. 여기서, 문제 정의에 나타난 조건과 실제 시스템과 공칭 모델의 차이에 불안정한 극점이 존재하지 않는다면, 제한된 u, ρ, ξ, δ에 대하여 e는 제한됨을 알 수 있으며, 이는 내부 루프에 BIBO 안정도를 확보했음을 의미한다. 또한, e를 최소화하기 위한 설계에서도 최종값 정리(final-value theorem)를 그대로 적용 할 수 있다. 예를 들면, 다른 입력이 0이라는 가정 아래, 단위 계단 입력 형태의 외란(step disturbance), d를 완전히 제거하기 위해서는 S<sub>c</sub>가 최소한 1개 이상의 적분기를 갖도록 K를 설계하여야 하며, 램프 외란, ρ를 완전히 제거하기 위해서는 S<sub>c</sub>P가 최소한 2개 이상의 적분기를 갖도록 설계하여야 함을 의미한다. 이는 일정하지 않은 고차 외란의 경우, 이를

완벽하게 제거 할 수는 없으며,  $e$ 를 최소로 만드는  $K$ 를 설계하여야 함을 의미한다. 한편, 공칭 모델과 실제 시스템의 차이에 의한 영향을 최소화하기 위하여  $S_c(P_n, P)$ 를 최소로 하는  $K$ 를 설계하여야 하며,  $P_n=P$ 일 때에는  $u$ 에 의한 제어 입력의 발생은 없다고 생각할 수 있다.

이와 같이 안정 제어 문제로서의 내부 루프의 보상기  $K$ 의 일반적인 설계에 방법에 대한 실제적이고 구체적인 예를 보이기 위하여 다음에서 고전적인 제어 방법과 고급 제어 방법에 의한 예를 각각 보이고자 한다.

1. 위상 앞섬 보상기 설계

간단한 RIC의 형태로써 (3)과 같은 위상 앞섬 보상기 또는 근사 미분기를 갖는 비례 미분 제어기를 설계 할 수 있다. 이는 문제 정의에서 나타난 가중 함수를  $W_1 = 1, W_2 = 0$ 으로 설정한 것으로 구체적인 외란에 대한 정보가 없고 잡음에 고려가 필요하지 않은 제어 대상에 대하여 저 주파수 대역의 외란을 제거하기 위해 적절한 방법이다. 또한 복잡한 고급 제어 방법의 이해가 필요 없다는 면에서 장점이 있다.

$$K(s) = \frac{Ts+1}{aTs+1} \text{ 또는 } K(s) = \frac{(k_p + k_d N)s + k_p N}{s + N} \quad (3)$$

이의 구체적인 설계 방법은 일반적인 되먹임 제어 시스템에서의 위상 앞섬 보상기 또는 비례 미분 제어기와 완전히 동일하며, 주파수 영역 또는 시간 영역에서 설계되어 질 수 있다.

2. 혼합  $H_\infty$  민감도 루프 형상 보상기 설계

외란 또는 시스템에 대한 정보, 예를 들면 외란의 주된 주파수나 제어 대상 시스템의 공진 주파수와 같은 주어진 정보를 반영한 설계를 위하여 적절한 가중 함수의 설정이 가능하다. 또한 설계 방법의 변형도 가능하다. 여기서는 최적화된 RIC를 설계하기 위한 변형 방법으로  $H_\infty$  혼합 민감도 함수 방법을 이용하고자 한다.

그림 2로부터 민감도 함수  $S_n$ 와 역민감도 함수  $T_n$ 는 다음과 같이 주어 질 수 있다.

$$S_n(s) = \frac{1}{1 + KP_n}, \quad T_n(s) = \frac{KP_n}{1 + KP_n} \quad (4)$$

$H_\infty$  혼합 민감도 문제에서는 공칭 외란 제거 규격  $W_1 S_n < 1$ 과 안정도 여유 규격  $W_2 T_n < 1$ 을 하나의 무한대 놈의 규격으로 합하여 다음과 같이 이를 함께 만족하는 보상기를 구한다.  $H_\infty$  혼합 민감도 함수 방법의 구체적인 설계 방법은 [24]에서 찾을 수 있다.

$$\min_K \begin{matrix} W_1 S_n(s) \\ W_2 T_n(s) \end{matrix} < 1 \quad (5)$$

3. 공칭 모델의 선정

본 논문의 서론에서 언급된 외란 제거 제어기들은 공통적으로 공칭 모델이 제어기의 일부분으로 포함되기 때문에 공칭 모델의 선정이 곧 제어기의 설계의 과정이 된다. 일반적으로 공칭 모델은 실제 시스템과 유사하게 선정되어야하

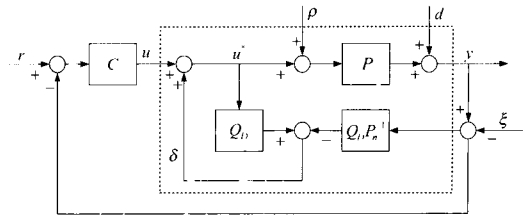


그림 3. 외란 관측기의 구조. Fig. 3. Structure of Disturbance Observer (DOB).

고, 이는 전체 시스템의 안정도에 영향을 준다고 알려져 있다. 이러한 안정도의 문제는 실질적인 관점에서 볼 때, 제어 입력의 포화에서 기인한다. 이는 공칭 모델과 실제 시스템의 차를 제거하기 위해 제어 명령과 관계없이 언제나 제어 입력을 발생하는 구조를 가지고 있기 때문에 공칭 모델과 실제 시스템의 차이가 크면 클수록 이러한 제어 입력은 커지고, 제어 명령에 따라 쉽게 제어 입력이 포화되는 상황이 발생한다. 이는 제어기 내부 안정도를 보장하지 못하는 원인이 된다[16]. 따라서 공칭 모델은 실제 시스템과 유사하게 선정하되, 특히 저 주파수 대역의 모델은 정확성을 요구한다. 그러나 함께 설계되는 보상기의 구조에 따라, 예를 들면 저역 통과 필터의 형태의 보상기를 설계한다면, 고 주파수 지역의 모델링 오차는 많이 허용된다.

공칭 모델은 이론적인 모델링과 실험적인 모델링에 의하여 얻어질 수 있다. 그러나 여기서는 제어 대상만의 모델링 자체에 목적이 있지 않기 때문에, 실험적인 방법에 의한 모델링이 정확하고 전체 제어 시스템의 설계에 효과적이다. 이는 제어 대상 시스템이 동작구간에서 선형이라는 가정 아래 동적 신호 분석기(Dynamic Signal Analyzer)를 이용한 보데 선도를 구함으로써 선형 모델의 실험적 측정이 가능하다.

IV. 유사한 외란 제거 제어기의 구조 비교 분석

유사한 제어 방법으로 언급되어진 DOB와 ARC, MBDA와 RIC는 각각 다른 관점에서 연구되어 왔으나, 이는 수학적으로 동가이다[23]. 이는 설계된 내부 보상기가 다른 형태의 보상기로 상호 수학적인 변환이 가능하다는 것을 의미한다. 그러나, 이는 수학적인 변환일 뿐, 각각의 구조적인 특징에 의하여 구현 방법이 제한을 받고 있고, 결과적으로 설계 자유도를 제한하게 된다. 이 절에서 DOB와 ARC에 대한 구조의 비교 분석과 설계 제약에 대하여 분석하고자 한다. 단, 비교 분석에서 ARC는 공칭 모델에 사용된 적응 규칙은 제외한다.

1. 외란 관측기 (Disturbance Observer, DOB)

그림 3에서 보는 바와 같이 DOB는 역 모델을 사용하여 얻어진 출력  $\delta$ 가 외란과 동일한 물리적인 의미를 갖는 점에서 관측된 외란이라고 불릴 수 있는 특징이 있다. 그러나, 역 모델을 구현 가능하도록 하는  $Q$ -필터라고 불리는 저역 통과 필터가 반드시 사용되어야 하며, 이  $Q$ -필터의 차수와 절점 주파수가 설계 변수로 전체 시스템의 안정성과 성능을 좌우한다. 따라서  $Q$ -필터를 구조적으로 설계하기 위한

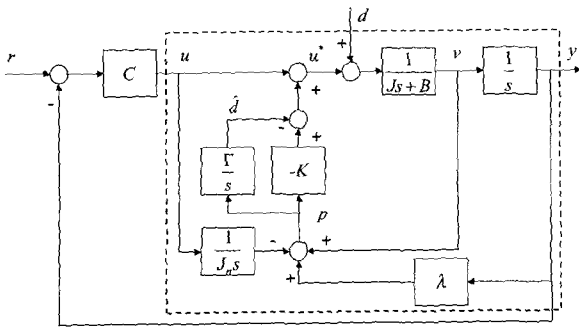


그림 4. 적응 강인 제어기.

Fig. 4. Adaptive Robust Control (ARC).

많은 연구가 수행되어왔다[3-8,10-14]. 그러나 이러한 설계 방법들은 주로 민감도 함수와 역 민감도 함수에 의존한 방법으로 구조적이지 못하며, 주어진 물리적인 환경에 대한 정보를 설계에 반영할 방법을 제공하지 않았다. 최근 [23]에서 일반적인 2DOF에서 설계한 후 DOB의 구조로 구현하는 방법을 제안하였다. 그러나, 구현할 때 제약 조건으로 인하여 구현이 불가능 한 경우가 있음을 지적하지 못하였다. 이는 다음의 설명으로 정리될 수 있다.

그림 3의 입출력 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \frac{CPP_n}{X_D} \cdot r + \frac{PP_n(1-Q_D)}{X_D} \cdot p + \frac{P_n(1-Q_D)}{X_D} \cdot d + \frac{P(CP_n+Q_D)}{X_D} \cdot \xi \quad (6)$$

여기서  $X_D = P_n(1+CP) + (P-P_n)Q_D$ . (1)과 (6)의 관계로부터,  $Q_D(s)$ 와  $K(s)$ 의 사이에 수학적인 관계를 표현할 수 있다.

$$K(s) = \frac{Q_D}{P_n(1-Q_D)} \quad \text{또는} \quad Q_D(s) = \frac{KP_n}{1+KP_n} \quad (7)$$

즉, 위의 관계식에 의하여 보상기는 수학적으로 변환이 가능하다. 그러나 DOB의 경우 다음과 같은 관계식을 만족하여 하는 구조적인 제약을 가지고 있다.

$$Q_D(0) = 1, \quad Q_D P_n^{-1} \in RH_\infty, \quad 1/(1-Q_D) \in RH_\infty. \quad (8)$$

여기서,  $RH_\infty$ 는 실유리(real-rational)함수의 집합이다. 따라서 위의 식을 만족하는  $Q_D(s)$ 는 관계식에 의하여 언제나 RIC의  $K(s)$ 로 변환 및 구현 가능하나, 그 역은 언제나 성립하지 않는다. 이것이 역 모델을 사용함으로 인하여 발생한 DOB의 구조적인 제약이다.

## 2. 적응 강인 제어 (Adaptive Robust Control, ARC)

과도 응답 특성을 개선하고 불연속적인 외란을 다루고자 Yao에 의하여 제안된 ARC는 슬라이딩 모드 제어 방법에 기초한 강인 제어 방법과 적응제어의 구조적인 결합으로 구성되어 있다. 이론적으로 ARC는 일반적인 시스템에 대하여 개발되어 다양한 응용을 시도하였다. 그러나, 사용되는 유사 슬라이딩 함수는 2차 함수에 대하여만 제안되어 있어 시스템 차수에 따라 새로운 유사 슬라이딩 함수가 정의되어야

한다. 또한 모든 상태 되먹임이 가능하지 않음으로 발생하는 문제를 해결하여야 한다. 그림 4로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$y = G^*(s)s^{-1}(u^* + d) \quad (9)$$

여기서  $G^*(s) = 1/(Js+B)$  이고,  $J$ 와  $B$ 는 각각 관성과 감쇠 상수이다. 그리고,  $u, u^*, y, d$ 는 각각 제어 입력, 보상된 제어 입력, 출력, 외란이며  $G(s) = G^*(s)s^{-1}$ 이다. 이때 공칭 모델,  $G_n^*(s) = 1/(J_n s + B_n)$ 을 정의하면, 유사 스위칭 함수  $p$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$p = (s + \lambda)y - (J_n s)^{-1}u, \quad \lambda = B_n/J_n \quad (10)$$

여기서  $J_n$ 와  $B_n$ 는 각각  $J$ 와  $B$ 의 공칭 값이다. 이때 ARC의 제어 입력은 다음과 같이 구성된다.

$$u^* = u - K_A p + \dot{d} \quad (11)$$

여기서  $K_A > 0$  그리고 관측된 외란  $\hat{d}$ 이 주어진 범위 ( $\hat{d}_m, \hat{d}_M$ )에서 존재한다면 다음으로 표현된다.  $l'$ 는 상수이다.

$$\dot{\hat{d}} = \Gamma p / s \quad (12)$$

따라서 (1)과 (9)-(11)로부터 ARC와 RIC의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

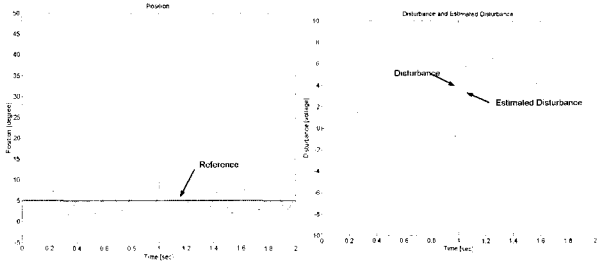
$$K(s) = \frac{(K_A s + \Gamma)(s + \lambda)}{s} \quad \text{또는} \quad K_A + \frac{\Gamma}{s} = \frac{K(s)}{(s + \lambda)} \quad (13)$$

두개의 상수  $K_A$ 와  $\Gamma$ 를 갖는 ARC의 보상기는 언제나 RIC의  $K(s)$ 의 형태로 변환되어 질 수 있다. 그러나 그 역은 언제나 성립하지 않는다. 또한  $K_A$ 와  $\Gamma$ 의 구조적인 설계 방법도 존재하지 않는다. 그리고, 2차 시스템의 예에서는 속도 정보를 얻기 위하여 속도 센서를 사용하지 않고 위치 정보를 근사 미분하여 사용하는 경우, 이론적인 ARC의 구조를 유지 할 수 없다. 한편, ARC에서 외란의 과도한 누적을 방지하기 위해 사용된 (12)와 조건들이 내부 안정도를 보장한다고 할 수는 없다. DOB의 경우 큰 외란에 의해 발생하는 제어 입력의 포화로부터 전체 시스템 내부 안정도를 보장하는 방법이 알려져 있다[16]. RIC에서는 이와 같은 방법을 이용하여 내부 안정도를 유지 할 수 있도록 구현이 가능하다. 따라서 기존의 방법을 RIC의 구조에서 표현할 수 있는 점과 설계되어진 보상기를 구현함에 있어 제약이 없다는 면에서 일반적인 구조를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

## V. 모의 실험 및 실험

### 1. 회전형 AC 모터에 대한 모의 실험

본 논문에서 제안된 RIC 설계 방법의 효용성을 보이기 위하여, 앞에서 다루어진 두 가지 설계 예를 제어 시스템에서의 널리 사용되는 회전형 브러시리스 직류 모터(BLDC)에 적용한 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험은 Matlab 환경에서 제어 주기 [msec]으로 설정하여 수행되었으며, 이때 사



(a) 위치 응답 (b) 외란 및 관측된 외란

그림 5.  $d_1$ 에 대한 DOB의 모의실험.  
Fig. 5. Simulation of DOB with  $d_1$ .

용된 모터의 모델은 (14)와 같이 표현되는 2차 시스템으로 50와트급 모터의 실험적 모델링에 의해 파라미터를 설정하였고, 모터 위치 측정을 위한 센서로 모터 1회전당 2000 펄스의 해상도를 갖는 엔코더 모델을 사용하였다.

$$P_n = \frac{w_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)} \quad (14)$$

여기서  $\omega_n$ 은 260.77 rad/s이며,  $\zeta$ 는 0.0012이다.

보상기 설계 예 1

먼저, III.1의 설계 예에서 제시한 PD 형태의 보상기를 설계하였다. 보상기의 구조는 (3)과 같이 표현되며,  $k_p, k_d, N$ 는 각각 0.15, 0.0005, 1000이다.

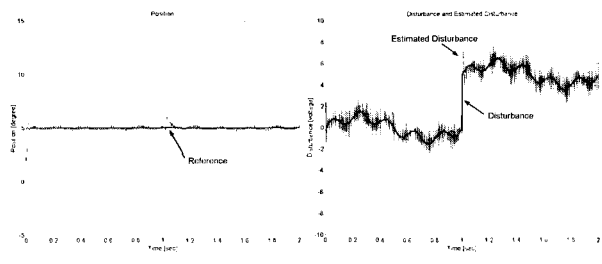
비교 실험을 위한 DOB의 설계에서 공칭 모델의 상대 차수가 2인 것을 고려하여, 다음과 같이 Q-필터의 차수를 선택하였으며, [3]에서 제안한 것과 같이 민감도 함수와 역민감도 함수의 최적화를 통해 설계하였다. 여기서  $\tau$ 는 1/30으로 설계되었다.

$$Q = \frac{3\tau s + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (15)$$

외부 루프의 제어기는 공칭 모델에 근거하여 설계된 PD 형태의 제어기를 사용하였다. 이때의 비례 이득과 미분 이득은 각각 0.2, 0.004이다. 제어 명령으로 5도를 유지하는 안정 문제이며, 각 경우에 대하여 외란은 제어 입력에 인위적으로 인가되었다.

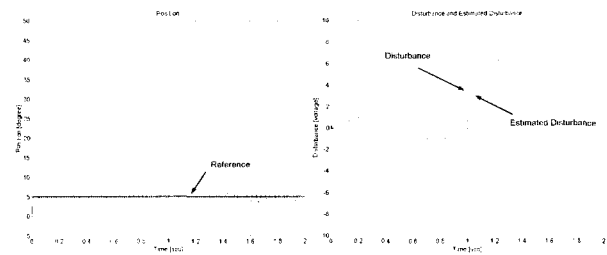
$d_1(t) = 1.0 \sin(2\pi t) + 0.5 \sin(10\pi t) + \delta$  [V]. 여기서  $\delta = 5, (t \geq 1 \text{ sec}) / 0, (t < 1 \text{ sec})$ 이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 DOB에 기초한 제어 시스템은 약 2.5도의 위치 오차와 단위 계단 입력 형태의 외란에 대하여 최대 17도에서 -8도의 오차를 나타내었다. 또한 그림 5의 (b)에서 DOB는 외란을 완전하게 관측하지 못하는 것을 볼 수 있다. 이로 인하여 외란은 완전하게 제거할 수 없게 된다. 한편 RIC의 경우, 그림 6에서 보는 바와 같이 위치오차는 약 0.36 도를 보이며, 단위 계단 입력 형태 외란의 인가 순간의 최대 오차는 +3.5에서 -0.6도를 나타내었다. 이와 같이 외란을 제거할 수 있는 근거는 그림 6의 (b)에서 보는 바와 같이 RIC가 외란을 완전하게 관측하여 보상할 수 있는 제어 입력을 만들어 내기 때문이다. 이 결과를 주파수 영역에서 분석하기 위해, 고전적인 PD제어기를 포함한 3가



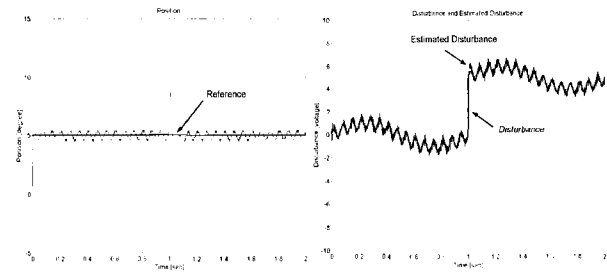
(a) 위치 응답 (b) 외란 및 관측된 외란

그림 6.  $d_1$ 에 대한 RIC의 모의 실험.  
Fig. 6. Simulation of RIC with  $d_1$ .



(a) 위치 응답 (b) 외란 및 관측된 외란

그림 7.  $d_2$ 에 대한 DOB의 모의실험.  
Fig. 7. Simulation of DOB with  $d_2$ .



(a) 위치 응답 (b) 외란 및 관측된 외란

그림 8.  $d_2$ 에 대한 PD 형태 RIC의 모의실험.  
Fig. 8. Simulation of PD type RIC with  $d_2$ .

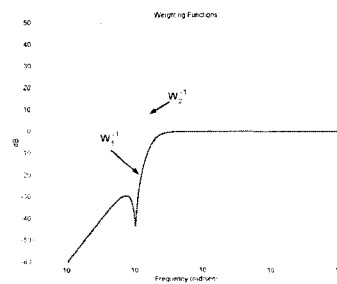
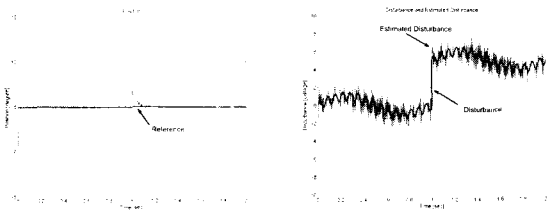


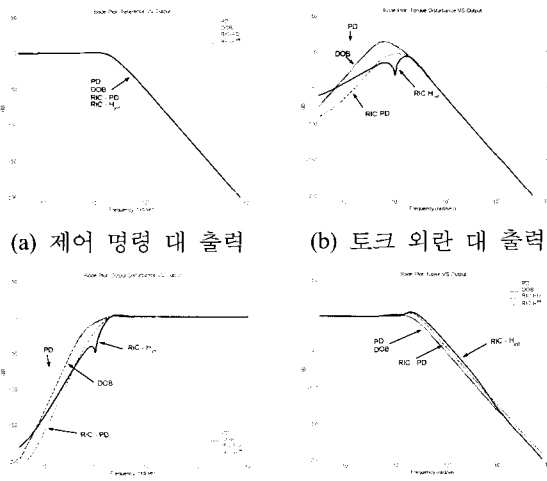
그림 9. RIC 설계에 사용된 가중 함수.  
Fig. 9. Weighting Function used in RIC Design.

지 경우에 대한 보데 선도를 그림 11에 나타내었다. (a)로부터 입력과 출력의 특성은 모든 제어기가 완전히 같음을 알 수 있다. 또한 (b)와 (c)에서 RIC에 기초한 시스템이 토크 외란이나 출력 외란에 대해 단순한 외부 제어기를 사용하거



(a) 위치 응답 (b) 외란 및 관측된 외란

그림 10.  $d_2$ 에 대한  $H_\infty$  형태의 RIC의 모의실험 결과.  
Fig. 10. Simulation Result of  $H_\infty$  type RIC with  $d_2$ .



(a) 제어 명령 대 출력 (b) 토크 외란 대 출력  
(c) 출력 외란 대 출력 (d) 잡음 대 출력

그림 11. 보데 선도에서 의한 비교.  
Fig. 11. Comparison with Bode Plots.

나, DOB를 사용하는 경우보다 저주파수 영역에서 강한 특성을 보임을 알 수 있다. 그러나, (d)에서 보는 것처럼 센서 등에서 기인하는 잡음에 대한 출력 특성은 상대적으로 민감한 특성을 나타내지만, 이러한 문제는 엔코더와 같은 디지털 센서를 이용하는 경우에 측정 잡음에서 야기될 수 있는 영향은 줄어 들 수 있다.

보상기 설계 예 2

여기서는 모터의 토크 리플 등에 의해 발생될 수 있는 특정 주파수의 외란이 존재하는 경우에 대하여 RIC의 설계 확장성을 모의 실험을 통해 보이고자 한다.

$d_2(t) = 1.0 \sin(2\pi t) + 0.5 \sin(30\pi t) + \delta$  [V]. 여기서  $\delta = 5$ , ( $t \geq 1$  sec) / 0, ( $t < 1$  sec)이다.

$d_2$ 에 포함된 15 Hz (94.25 rad/sec)의 신호는 그림 11의 보데 선도에서 보는바와 같이 DOB에서 제거하기 어려운 주파수의 외란이다. 예상과 같이 앞의 설계 예1에서 설계된 DOB는 그림 7에서 나타난 것처럼, 15 Hz 신호를 제거하지 못함을 볼 수 있으며, 그림 8에서처럼 PD형 RIC의 경우도 DOB보다 개선된 성능을 보이고 있으나, 외란을 완전히 제거하지는 못하였다.

이와 같은 경우, 주어진 외란의 정보를 반영하는 고급 기법의 RIC를 설계할 수 있다. 여기서는 III.2에서 예시한  $H_\infty$  혼합 민감도 설계 방법을 사용하여 보상기를 설계하

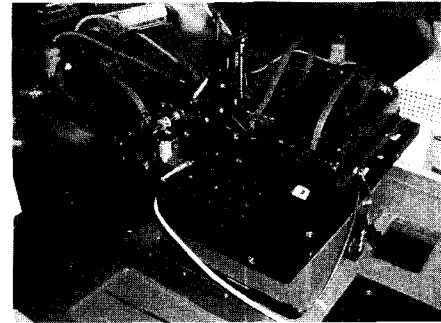


그림 12. 와이어 본더를 위한 선형 모터 시스템.  
Fig. 12. Linear Motor System for Wire Winder.

였다. 알려진 특정 주파수인 15 Hz의 외란을 효과적으로 제거하기 위하여 다음 식과 같은 가중 함수를 설정하였으며, 가중 함수의 주파수 특성을 그림 9에 나타내었다.

$$W_1^{-1}(s) = \frac{(s+0.1)(s^2+10s+1000)}{(s+100)(s^2+500s+10000)} \quad (16)$$

$$W_2^{-1}(s) = \frac{10^6}{s^2}$$

주어진 공칭 모델과 가중 함수를 반영한 보상기를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$K(s) = \frac{3587434.8s^4 + 755223236.5s^3 + 53271558837.5s^2 + 33174314355.5s + 4292413.3}{s^4 + 249596.8s^3 + 506652426.7s^2 + 7587745726.4s + 5041969708388.1s + 504121599983.1} \quad (17)$$

이렇게 설계된 RIC는 외란을 정확히 관측하여 제거하므로서 적은 위치 오차를 나타냄을 그림 10에 나타내었다. 이러한 결과는 그림 11에 나타난 보데 선도로부터 확인할 수 있다. 따라서 RIC가 알려진 외란에 대해 적극적인 제어기 설계가 가능함을 확인할 수 있다.

2. 선형 모터 실험

제안된 RIC 설계 방법을 그림 12에 나타난 반도체 칩 제조 장비인 와이어 본더에 사용되는 선형 모터 시스템을 대상으로 타당성을 검증하였다. 실험 대상 시스템은 AC 서보 증폭기(GP8600-50:Glenitek사)와 위치 검출을 위한 0.15625 [ $\mu m$ ]의 해상도를 갖는 엔코더가 장착되어 있다. 디지털 제어를 위해 32비트 부동소수점 연산이 가능한 DSP 보드를 이용한 제어기를 구성하였으며, 제어 주기는 250[ $\mu sec$ ]로 설정하였다.

RIC와 DOB 설계에 사용될 공칭 모델은 동적 신호 분석기를 이용하여 주파수 특성을 측정하여 그림 13에 나타난 결과를 얻었으며, 이 결과를 토대로 (14)에 나타난  $\omega_n$ 은 3975[rad/sec],  $\zeta$ 는 0.00073의 파라미터 값을 갖는 2차 시스템으로 근사화하여 구하였다.

선형 모터 시스템에서의 성능 비교를 위하여 고전적인 제어 방법인 PID제어기와 DOB 그리고 PD형 RIC를 설계하였다. PID 제어기는 별도의 내부 보상기 포함하지 않는 구조로 외부 루프에 비해, 적분, 미분 이득은 각각 0.00073,

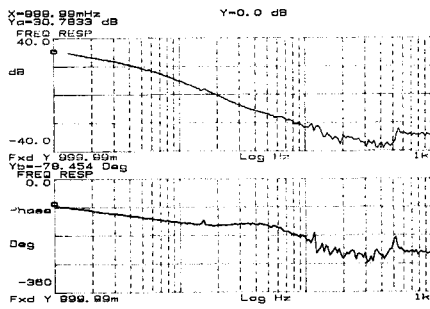


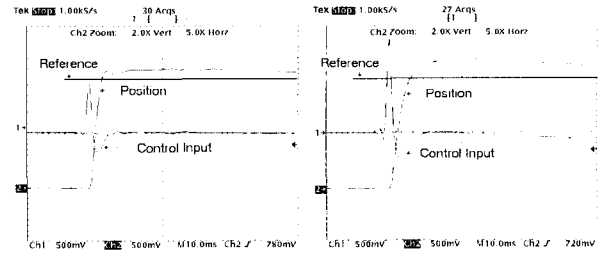
그림 13. 선형 모터의 특성.

Fig. 13. Characteristics of Linear Motor.

0.08, 0.000175이다. DOB의 설계는 공칭 모델의 상대 차수를 고려하여 (15)와 같은  $Q$ -필터의 차수를 결정하였으며 시정수값  $\tau$ 는 0.005로 주어졌다. RIC는 시스템에 특별히 알려진 외란의 정보가 없다고 가정하고 III.1에서 예시한 PD형 RIC를 설계하였으며,  $k_p$ 와  $k_d$ 는 각각 0.002, 0.00002이다. DOB와 RIC를 위한 외부 보상기는 모두 같은 위상 앞섬 제어기를 설계하여 사용하였으며,  $a$ 와  $T$ 는 각각 27.5와 0.00018이다.

3. 단위 계단 입력에 대한 응답 특성

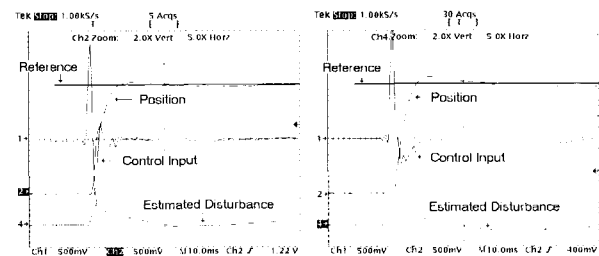
설계된 3가지 제어기에 대한 단위 계단 입력에 대한 성능을 측정하였다. 단위 계단 명령은  $200[\mu m]$ 이며, 시스템에 인가되는 외란 성분은  $2[kg]$ 의 외어 본더 헤드를 장착에 따른 부하 변화에 의한 것으로, 부하가 없는 경우와 있는 경우에 대한 실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. PID, DOB, RIC 제어기를 적용했을 경우의 위치 출력, 제어 입력, 그리고 DOB와 RIC의 경우 관측된 외란을 각각 그림 14, 15, 16에 도시하였다. 각 그림의 (a)는 본더 헤드를 장착하기 전의 상태로 무부하 상태이며, (b)는 본더 헤드 장착으로 인한 부하가 인가되는 상태의 응답이다. 그림 14의 (a)는 PID에 대한 결과로 오버슈트가 발생하며, 오차는 약  $100[\mu sec]$ 후에 정상 상태 오차가 0에 근접하게 된다. 이는 실험에 사용된 선형 모터에 존재하는 마찰력에 의한 부분이며, 안정 시간을 줄이기 위해 적분 제어기의 이득을 크게 할 경우 이는 오버슈트를 증가시키는 원인이 되며, 비선형성을 포함한 시스템에 대하여 PID 제어 변수를 결정하는 것이 매우 까다로운 것임을 알 수 있었다. 그림 14의 (b)에서와 같이 부하가 존재 할 때는 무부하 상태보다 큰 오버슈트와 긴 안정 시간이 나타남을 관찰할 수 있다. DOB를 적용한 경우 그림 15에서 보는바와 같이 PID를 적용한 경우에 비해 부하의 유무에 상관없이 적은 오버슈트와 짧은 안정 시간을 보임으로써 성능면에서 상대적으로 우수한 결과를 나타냈으며, 이는 DOB에 의해 마찰을 포함한 외란 성분을 관측하여 보상한 결과임을 알 수 있다. RIC를 적용한 경우 그림 16에서 보는 바와 같이 부하 변동에 관계없이 오버슈트가 발생하지 않으며, DOB에 비하여 짧은 안정 시간이 나타내었다. 이 경우도 외부 제어기에 적분 제어를 사용하지 않았지만, 내부 루프의 고유한 적분 제어기 성능으로 인하여 마찰을 포함한 외란에 대하여 좋은 성능을



(a) 부하가 없는 경우 (b) 부하가 있는 경우

그림 14. PID 제어기의 단위 응답.

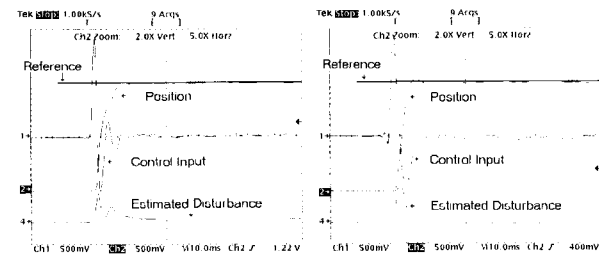
Fig. 14. Step Response of PID Controller.



(a) 부하가 없는 경우 (b) 부하가 있는 경우

그림 15. DOB에 기초한 제어기의 단위 응답.

Fig. 15. Step Response of DOB based Controller.



(a) 부하가 없는 경우 (b) 부하가 있는 경우

그림 16. RIC에 기초한 제어기의 단위 응답.

Fig. 16. Step Response of RIC based Controller.

보임을 알 수 있었다. 또한 RIC가 DOB에 비해 오버슈트와 안정 시간 그리고 부하 변동에 대해 우수한 성능을 보인 것을 확인할 수 있었으며, 이는 RIC와 DOB가 동일한 외부 제어기를 사용한 것을 감안할 때 RIC의 내부 루프가 공칭 모델에 더 가까운 특성을 보임을 반증한다고 할 수 있다.

4. 외란 제거 성능

외란 제거 성능을 비교하기 위하여 앞에서 설계한 3가지 제어기에 대해 제어 명령을 0으로 유지한 상태에서 크기가  $0.5[V]$ 이고 주파수가 5, 15, 31[Hz]인 정형파 신호를 인위적인 외란 신호로 인가하여 그 응답 특성을 비교하였다. 내부 보상기가 없는 PID 제어기를 사용한 경우 그림 17에 나타난 것과 같이 각 주파수에 대하여 위치오차가 존재함을 알 수 있다. 특히, 15[Hz](94.25 [rad/sec])의 외란에서 가장 큰 오차를 나타내었으며, 이는 그림 14의 시스템 모델에서 관찰 될 수 있는 공진 모드와 관계가 있다. 이에 반해 DOB

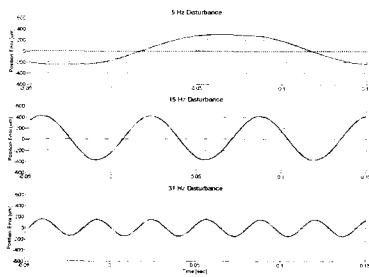


그림 17. PID의 외란 제어 성능.  
Fig. 17. Disturbance Rejection Performance of PID.

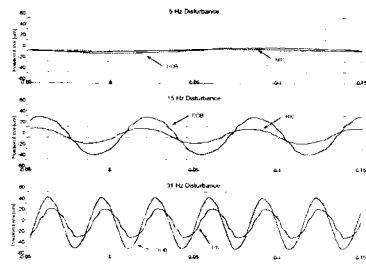


그림 18. DOB와 RIC의 외란 제어 성능.  
Fig. 18. Disturbance Rejection Performance of DOB and RIC.

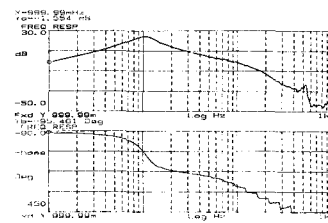
와 RIC는 PID에 비하여 월등히 뛰어난 외란 제거 성능을 보이며, RIC에 의한 외란 제거 성능이 DOB를 적용한 것보다 우수함을 그림 18을 통해 알 수 있다. 또한, PID제어기를 적용했을 때 나타났던 15[Hz] 부근에서의 공진 현상도 내부 보상기에 의해 관측되어 제거된 결과로 나타나지 않음을 알 수 있다. 이 실험의 결과로 RIC의 구조에서 간단한 PD 형태의 보상기를 설계한 것만으로도 RIC가 Q필터의 차수 등을 고려해서 설계에 반영해야 하는 DOB보다 뛰어난 외란 제거 효과가 있음을 알 수 있다. 표 1은 위의 실험을 각각 10회 수행하여 그 최대 위치 오차를 평균한 결과를 나타내며, 표 2은 평균 위치 오차를 비교한 것이다.

표 1. 제어기별 최대 위치 오차 (10회 평균).  
Table 1. Maximum Position Error for Controllers (10 times average).

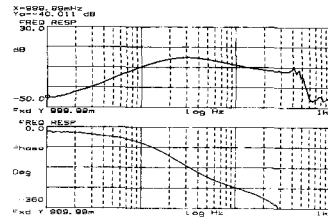
외란의 주파수	PID ( $\mu\text{m}$ )		DOB ( $\mu\text{m}$ )		RIC ( $\mu\text{m}$ )	
	무부하	부하	무부하	부하	무부하	부하
31 Hz	149.0	139.0	45.3	56.1	28.8	31.3
15 Hz	404.0	438.0	32.4	33.6	13.8	14.1
5 Hz	268.5	275.5	13.6	15.4	2.8	2.7

표 2. 최대 위치 오차 비교 (10회 평균).  
Table 2. Ratio of Maximum Position Error (10 times average).

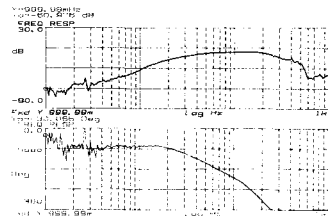
외란의 주파수	DOB/PID		RIC/PID		RIC/DOB	
	무부하	부하	무부하	부하	무부하	부하
31 Hz	30.4%	40.4%	19.3%	22.5%	63.6%	55.6%
15 Hz	8.0%	7.7%	3.4%	3.2%	42.6%	42.0%
5 Hz	5.1%	5.6%	1.0%	1.0%	20.6%	17.5%



(a) PID



(b) DOB



(c) RIC

그림 19. 제어기별 민감도 함수.  
Fig. 19. Sensitivity Functions for Controllers.

5. 주파수 대역 특성

앞에서 관찰된 결과를 주파수 영역에서 분석하기 위하여, 외란 대 출력의 관계, 즉 민감도 함수를 측정하여 보대 선도를 그림 19와 같이 구하였다. 그 결과는 시간 영역의 결과에서 예상된 것과 PID제어기를 적용한 경우 보다 DOB, RIC를 적용하는 경우 저주파 대역에서의 외란 제거 성능이 매우 우수한 것을 보여준다. 특히, RIC는 DOB를 적용한 경우보다 우수한 외란 제거 성능을 보이며, 저주파 대역으로 갈수록 더 큰 차이를 보여 1Hz의 경우 약 20dB의 차를 나타낸다.

VI. 결론

본 논문에서는 효과적으로 외란을 다룰 수 있는 일반화된 모델 기반의 외란 제거 제어기, 강인 내부 보상기 (RIC)를 제안하였다. 또한 제안된 구조에서 체계적인 RIC 설계를 위하여, 외란 제거 제어 문제를 안정 제어 문제로 재정의하였다. 이러한 일반적인 구조에서 더 적은 구현 제약과 많은 설계 자유도를 얻을 수 있음을 외란 관측기(DOB)와 적응 강인 제어기(ARC)에 대한 구조의 비교와 분석을 통하여 보였다. 아울러 새로운 문제 정의로부터 다양한 설계 방법이 적용될 수 있고, 특히 주어진 시스템과 외란의 정보를 적극적으로 설계에 반영할 수 있다는 장점을 보이기 위해서 두 가지의 설계 예를 제시하였고, 이를 회전형 모터에 대한 모의 실험과 선형 모터에 대한 실험으로 검증하였다.



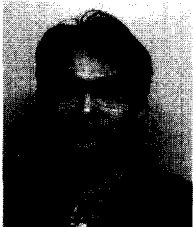
## 참고 문헌

- [1] R. Vilanova, I. Serra, "Realization of two-degrees-of-freedom compensators," *IEE Proceedings-Control Theory Application*, vol. 144, no. 6, pp. 589-595, 1997.
- [2] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. Japanese Society of Electrical Engineering*, vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [3] H. S. Lee, "Robust digital tracking controllers for high-speed/high-accuracy positioning system," *Ph. D. Dissertation*, U. C Berkeley, 1994.
- [4] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high accuracy positioning systems," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 43, pp. 48-55, Feb. 1997.
- [5] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust tracking controller design for high-speed machining," *Proc. of the 1995 American Control Conference*, pp. 215-219, 1995.
- [6] A. Tesfaye, H. S. Lee and M. Tomizuka, "A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 5 no. 1, pp. 32-38, Mar. 2000.
- [7] A. Tesfaye, H. S. Lee, and M. Tomizuka, "Robust digital control design for high performance motion control systems," *Proc. 1994 ASME Winter Annual Meeting*, pp. 903 - 908, 1994.
- [8] S. Komada, N. Machii, and T. Hori, "Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 47, no. 2, pp. 413 - 420, April 2000.
- [9] K. S. Eom, I. H. Suh, and W. K. Chung, "Disturbance observer based path tracking control of robot manipulator considering torque saturation," *Proc. of 8th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 651-657, July 1997.
- [10] T. Umeno, Y. Hori, "Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 363-368, Oct. 1991.
- [11] T. Umeno, T. Kaneko, and Y. Hori, "Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 5, pp. 473-485, Oct. 1993.
- [12] K. Yamada, S. Komada, M. Ishida, and T. Hori, "Analysis and classical control design of servo system using high order disturbance observer," *Proc. of the 23th IEEE IECON*, pp. 4-9, 1996.
- [13] Y. Choi, W. K. Chung, and Y. Youm, "Disturbance observer in  $H_\infty$  frameworks," *Proc. of the 23th IEEE IECON*, pp. 1394-1400, 1996.
- [14] T. Mita, M. Hirate, K. Murata, and H. Zhang, " $H_\infty$  control versus disturbance-observer-based control," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 45, pp. 488-495, Oct. 1998.
- [15] C. J. Kempf, S. Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 513-526, Sep. 1999.
- [16] H. T. Choi, B. K. Kim, I. H. Suh and W. K. Chung, "Design of robust high-speed motion controller for plant with actuator saturation," *ASME J. of Dynamic, System, Measurement, and Control*, vol. 122, pp. 535-541, Sep. 2000.
- [17] B. Yao, M. Tomizuka, "Smooth robust adaptive sliding mode control of manipulators with guaranteed transient performance," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 118, pp. 764-775, Dec. 1996.
- [18] B. Yao, M. Al-Majed, and M. Tomizuka, "High-performance robust motion control of machine tools: an adaptive robust control approach and comparative experiments," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 2, no. 2, pp. 63-76, June 1997.
- [19] B. Yao, "High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes," *Proc. of the 36th Conf. on Decision and Control*, pp. 2489-2494, Dec. 1997.
- [20] A. Zhu, G. S. Hong, C. L. Teo, and A. N. Poo, "Internal model control with enhanced robustness," *Int. J. of Systems Science*, vol. 26, no. 2, pp. 277-293, 1995.
- [21] B. K. Kim, H. T. Choi, W. K. Chung, and I. H. Suh, "Robust internal loop compensator design for motion control of precision linear motor," *Proc. 1999 IEEE ISIE*, pp. 1045-1050, 1999.
- [22] B. -K. Choi, C.-H. Choi, and H. Lim, "Model-based disturbance attenuation for CNC machining centers in cutting process," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 4, no. 2, pp. 157-168, June 1999.
- [23] B. K. Kim, H. T. Choi, W. K. Chung and I. H. Suh, "Analysis and design of robust motion controllers in the unified framework," *ASME J. of Dynamic, System, Measurement, and Control*, vol. 124, pp. 313-321, June, 2002.
- [24] J. C. Dyle, B. A. Francis, A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Company, 1992.



#### 최 현 택

1968년 2월 27일생. 1991년 한양대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 전자공학 석사(1993), 전자공학 박사(2000), 1993년~1995년, 한국통신 연구개발원 전임 연구원, 2000년~2003년 하와이 주립 대학교 기계공학과 ASL 연구실 후기 박사, 현재 한국 해양 연구원 해양 시스템 안전 연구소 선임연구원. 관심분야는 강인제어, 최적제어, 초정밀 제어, 임베디드 시스템 개발, 무인 잠수정의 제어 및 개발 등.



#### 엄 광 식

1970년 2월 5일생. 1993년 한양대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 기전공학 석사(1995), 전자공학 박사(2000), 2001년~2002년 하이제인안테나 연구원. 현재 한라대학교 전기전자제어공학부 전임강사. 관심분야는 강인제어, 로봇 제어, 제어 시스템 설계, 위성 능동 안테나 등.



#### 김 봉 근

1971년 10월 8일생. 1994년 부산대학교 생산기계공학과 졸업. 포항공과대학교 기계공학 석사(1996), 포항공과대학교 기계공학 박사(2001). 2001년~2002년 포항공과대학교 공정산업의 지능 자동화 연구센터 연구원. 2002년~2003년 University of California at Berkeley 기계공학과 연구원. 2003년~현재 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Intelligent Systems Institute 연구원. 관심분야는 고속/고정밀 제어, 로봇의 동작 및 힘 제어, 원격제어, 지식 분산형 로봇 제어 등.