

항공기 시뮬레이터 조종력 제어시스템의 견실 μ -제어기 설계

방 경 호

대우중공업 항공지상 연구소

Robust μ -Controller Design for Control Loading System of Flight Simulator

Kyeong Ho Bang

Aerospace & Defense R & D Center, Daewoo Heavy Industries LTD.

Tel: 0551-280-6725 Fax: 0551-280-6630 E-mail: khbang@solar.dhilt.co.kr

Abstract: Generally, the principle function of simulator control loading system is to provide the pilot or student with the "feel" of the actual aircraft flight control systems during flight, taxing, and in malfunction. Flight control "feel" is the resistance felt by the pilot when moving a control stick or pedal, coupled with the amount of control surface deflection, and hence aircraft response, resulting from the input. Therefore, the control loading servo must be capable of performing to some general list of requirements derived from real aircraft control forces. In this paper, we deal with a μ -controller design for a control loading system of the flight simulator. For this, we derive a frequency response of the hydraulic system from the identification data and then design a controller using a μ -synthesis method. Under the same condition of simulation, μ -controller provides the superior performance than PID controller.

I. 서 론

항공기에서 비행 조종계통은 주 조종 계통과 부 조종 계통으로 나눌 수 있으며 주 조종 계통은 엘리베이터, 에일러론과 러더 등을 구동하는 조종간과 페달을 말하며 부 조종 계통은 추력레버, 앞바퀴의 조향장치, 플랩레버, 속도 브레이크 등을 포함한다. 일반적인 항공기의 비행제어는 엘리베이터와 에일러론 및 러더가 담당하고 있으며 조종사는 실제 비행시에 조종간과 페달을 통해서 비행상황에 따른 조종감을 제공받는다. 조종력 제어장치(CLS: Control Loading System)는 항공기 시뮬레이터에서 조종사가 훈련 중 실비행기 조종시 조종사가 느끼는 것과 동일하도록 전기, 전자, 유압 등이 이용된 인위적인 장치를 통하여 항공기 제어느

낌이 역으로 제공되도록 해주는 장치이다. 실제적으로 조종력 제어장치는 실제 항공기의 비행역학과 밀접한 관계가 있으며 인위적인 조종력을 구현해 주기 위하여 많은 비행 관련 자료가 요구된다. 시뮬레이터 조종력 제어장치에서는 조종사의 스틱이나 러더페달 움직임에 따라서 FCS(Flight Control System)모델에서 계산되어진 스틱이나 페달의 변위와 힘이 시뮬레이터의 Host Computer로 전달되어 FD(Flight Dynamics)로부터 계산되어진 조종면에 느껴지는 힘의 반력이 스틱이나 러더 페달부에 충실히 구현되어야만 한다.

본 논문에서는 조종력 제어장치의 서보 유압 실린더 위치제어를 위한 μ -제어기 설계방법을 제안한다. μ -synthesis는 견실제어기 설계 방법인 H^∞ 최적화 이론에서 시스템의 불확실성을 구조적 불확실성으로 다루어 제어기를 설계하는 방법이다. 일반적으로 구조적 불확실성은 비구조적 불확실성에 비해서 비제한적인(non-conservative)인 해를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 불확실성을 구조화시킴으로써 견실안정화 문제와 동시에 성능문제도 고려한 견실성능문제까지 해결할 수 있다. 이를 위해 먼저 서보 유압실린더 시스템을 주파수 영역에서 ID(Identification)하여 주파수 응답 특성을 유도한 후 유도된 주파수 응답 데이터로부터 적절한 전달함수를 선택한다. 이로부터 μ -제어기를 설계하여 FCS의 모델과 결합한 후 시뮬레이션을 통하여 PID 제어기와와의 성능을 비교한다.

II. 본 론

2.1 유압시스템의 주파수 영역 ID

조종력 제어장치를 구성하고 있는 하드웨어 시스템은 크게 몇 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 실제 항공기와 동일한 스틱과 러더페달이 있으며 조종사의 조종력 재현을 위해 스틱과 러더 페달부에 연속적으로 힘과 위치 변위를 인가 시켜 주는 데 사용하는 서보 유

압실린더가 있다. 이러한 서보 유압실린더를 제어하기 위하여 유압제어부가 있으며 계산된 결과를 서보제어에 적합하도록 전류 값으로 변환시켜 출력해 주는 V/I 변환부가 있다. 또한 스틱과 러더 페달부에 실제로 인가되는 하중을 측정해 주는 센서로 Load Cell이 있으며 스틱과 러더 페달부의 현재 변위를 측정해주는 LVDT 센서가 있다. 그림 1은 조종력제어 장치를 구성하는 구성도이다.

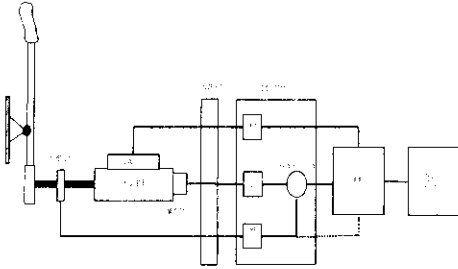


그림 1. 조종력 제어 시스템의 구성도

유압시스템을 주파수 영역에서 ID하기 위하여 서보 실린더에 입력신호를 인가하여 LVDT로부터 측정되어 지는 값을 출력하였다. 얻은 데이터로부터 Linear Least Square 방법을 이용하여 구한 서보 유압실린더의 주파수 응답 특성은 그림 2이며 이로부터 유도한 전달함수의 주파수 응답 특성은 그림 3과 같다.

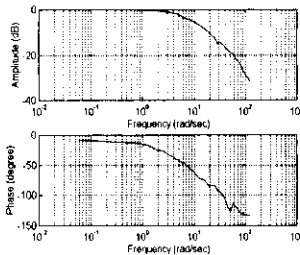


그림 2. ID data로부터 얻은 시스템의 주파수 응답 특성

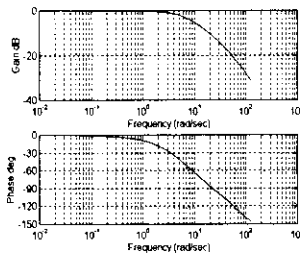


그림 3. 유도된 전달함수의 주파수 응답 특성

2.2 μ -제어기 설계

일반적으로 구조적 불확실성 $\Delta \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 인 Δ 는

$$\Delta = \{ \text{diag} [\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_s I_{r_s}, \Delta_1, \dots, \Delta_F], \quad (1)$$

$$\delta_i \in \mathbb{C}, \Delta_j \in \mathbb{C}^{m_j \times m_j} \}$$

와 같이 정의되고, 여기서 $\sum_{i=1}^s r_i + \sum_{j=1}^F m_j = n$ 이며 첨자 S 와 F 는 음이 아닌 정수로서 각각 반복스칼라 블록(repeated scalar block)과 완전블록(full block)의 수를 나타낸다. 이때 $M \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 에 대해 M 의 구조적 특이치 $\mu_\Delta(M)$ 은

$$\mu_\Delta(M) := \frac{1}{\min_{\Delta \in \mathcal{A}} \{ \sigma(\Delta) : \det(I + M\Delta) = 0 \}} \quad (2)$$

로 정의된다.

그림 4는 견실제환 설계문제에 대해서 일반적으로 가장 많이 사용되는 구조로서 입력력단, 플랜트 P 와 제어기 K 및 섭동 Δ 로 구성되어 있다.

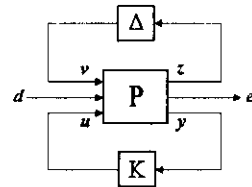


그림 4. 일반적인 견실제환 설계문제에 대한 구조

μ -제어기 설계의 목적은 구조적 불확실성 Δ 에 대해서 제환시스템의 안정화와 성능을 만족하는 것이다. 즉, 성능에 관계되는 외부입력 d 로부터 오차신호 e 까지의 폐루프 전달함수의 ∞ -노름을 가장 작게 만드는 제어기 K 를 설계하는 것이며 이러한 문제를 견실성능 최적화 문제라고 한다. 설계된 제어기는 Lower Linear Fractional Transformation에 의해서 플랜트와 결합되어 그림 5의 폐루프 M 을 형성시키며 그때의 Upper Linear Fractional Transformation은

$$e = F_U(M, \Delta)d = [M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12}]d \quad (3)$$

이다.

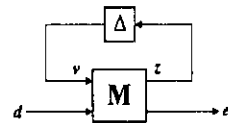


그림 5. 분석된 블록선도

일반적으로 견실성능문제를 만족하는 최적의 제어기를 설계하는 문제는

$$\inf_{K \text{ stabilizing}} \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\mathcal{D}}(M) \quad (4)$$

이지만 식 (4)의 해를 구하기가 어렵기 때문에 최종적인 제어기 설계문제는 구조적 특이치의 성질을 이용한

$$\inf_{K \text{ stabilizing}} \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\alpha}(DMD^{-1}) \quad (5)$$

의 문제로 변환된다. 여기서 D 는

$$D = \{ \text{diag} [D_1, \dots, D_S, d_1 I_{m_1}, \dots, d_F I_{m_F}] \quad (6) \\ : D_i \in \mathbb{C}^{r_i \times r_i}, D_i = D_i^* > 0, d_j \in \mathbb{R}, d_j > 0 \}$$

이고 식 (5)를 만족하는 제어기를 찾는 문제는 두개의 변수에 대해서 각각 ∞ -노름을 최소화하는 제어기를 찾는 문제이다. 즉

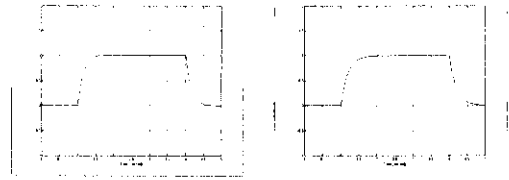
$$\|DF_L(P, K)D^{-1}\|_{\infty} \quad (7)$$

를 최소화하는 제어기를 찾는 문제로서 D 를 고정시키고 K 를 찾는 것은 H^{∞} 최적화 문제이며 K 를 고정시키고 D 를 찾는 것은 convex 최적화 문제이다. 이러한 반복적인 방법으로 최적의 제어기를 찾는 방법을 D - K 반복법이라고 하며 μ -synthesis 제어기 설계방법으로 가장 많이 사용되고 있다.

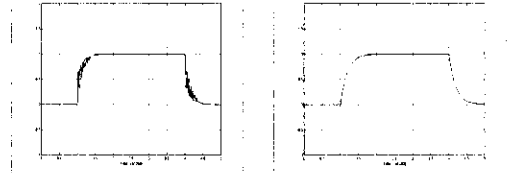
2.3 시뮬레이션 및 검토

본 절에서는 μ -synthesis 방법으로 설계한 제어기와 PID제어기와의 성능을 비교하며 2.1절에서 유도한 시스템의 전달함수로부터 μ -제어기를 설계한다. 이때 설계된 제어기는 구조적 불확실성 Δ 에 대해서 견실한 안정화와 성능을 만족하는 제어기이다.

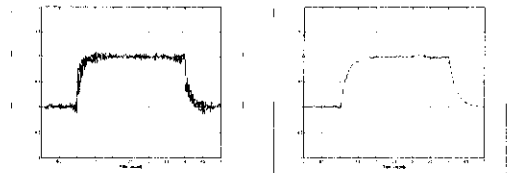
그림 6은 ID된 데이터로부터 유도한 전달함수와 제어기만으로 구성된 공칭 페루프 시스템의 시간 응답 특성으로서 PID제어기와 μ -제어기가 거의 동일한 특성을 보임을 알 수 있다. 그림 7은 실제로 FCS의 수학적 모델링과 결합하였을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 엘리베이터의 FCS 모델링은 one-mass system으로 모델링 하였으며 spring force, friction force, damping force 등에 대한 계수들은 시험을 통하여 얻어진 값들이다. 설계된 제어기의 견실 성능 특성을 살펴보기 위하여 먼저 노이즈의 크기를 달리하여 성능을 확인하고 플랜트의 파라미터 변화량과 FCS모델의 계수 변화량을 증가시키며 이에 대한 시간 응답 특성을 알아본다. 그림 8부터 14는 이에 대한 시뮬레이션 결과이며 설계한 μ -제어기가 PID제어기보다 불확실성에 대해서 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.



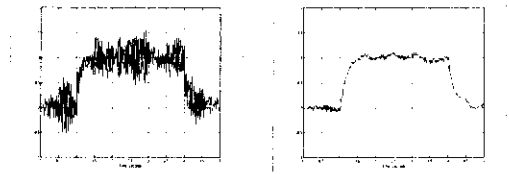
(a) PID 제어기 (b) μ 제어기 특성
그림 6. 공칭 페루프 시스템의 시간 응답 특성



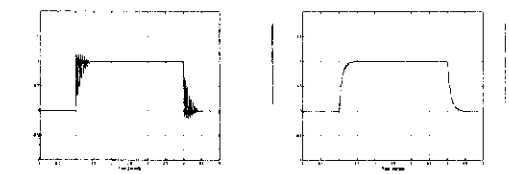
(a) PID 제어기 (b) μ 제어기 특성
그림 7. 페루프 시스템의 시간 응답 특성



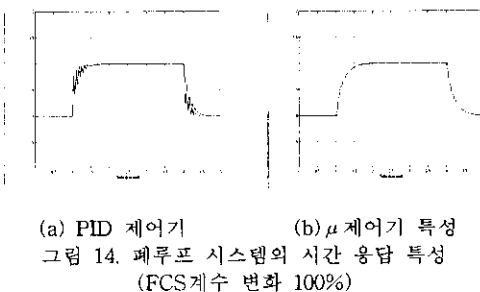
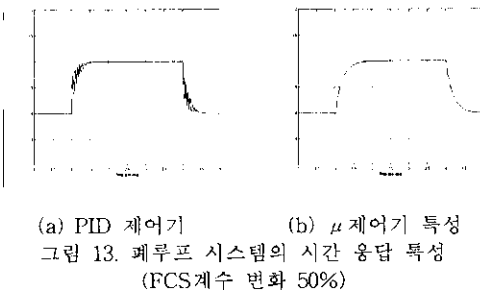
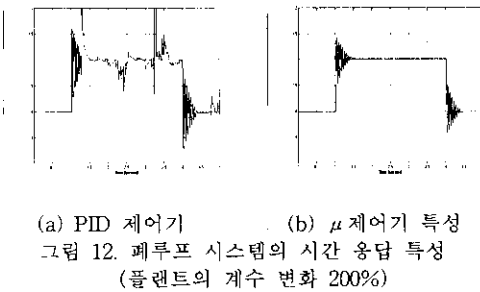
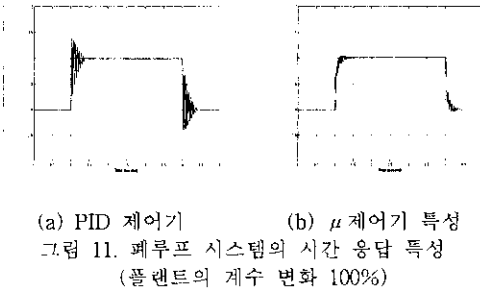
(a) PID 제어기 (b) μ 제어기 특성
그림 8. Noise가 있을 경우의 페루프 시스템의 시간 응답 특성(case I)



(c) PID 제어기 (d) μ 제어기 특성
그림 9. Noise가 있을 경우의 페루프 시스템의 시간 응답 특성(case II)



(a) PID 제어기 (b) μ 제어기 특성
그림 10. 페루프 시스템의 시간 응답 특성 (플랜트의 계수 변화 50%)



III. 결 론

본 논문에서는 항공기 시뮬레이터 조종력 제어시스템의 건설 μ -제어기 설계방법에 대해서 알아보았다. 이를 위해 조종력 제어시스템을 구성하고 있는 유압시스템을 ID하여 전달함수를 유도하였으며 이로부터 제어기를 설계하였다. 또한 설계한 μ -제어기가 외란과 파라미터 변화 등과 같은 불확실성에 대해서 PID 제어기 보다 우수한 성능을 보임을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 앞으로의 연구과제는 현재 Force Servo Loop로 구성되어 있는 조종력 제어시스템의 모델을 먼저 Position Servo Loop로 바꾸어 구성하여야 한다. 또한 좀 더 많은 데이터로부터 유압시스템의 ID를 수행하여 정확한 유압시스템의 전달함수를 유도하여야 하며 설계한 μ -제어기의 성능을 실제 항공기 시뮬레이터의 운용시험을 통하여 확인하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1984
- [2] B. Shahian and M. Hassul, *Control System Design Using Matlab*, Prentice-hall, Englewood cliffs, N. J. 1993
- [3] R. C. Nelson, *Flight Stability & Automatic Control*, McGraw-Hill Book Company, 1989
- [4] J. C. Doyle, "Synthesis of robust controllers and filters," *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, San Antonio, TX, pp. 109-114, 1983.
- [5] K. Glover and J. Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy and H^∞ norm bound and relations to risk sensitivity," *System and Control Letters*, vol. 11, pp. 167-172, 1988.
- [6] J. C. Doyle, "Analysis of feedback systems with structured uncertainties," *IEE Proceedings*, vol. 129, part D, no. 6, pp. 242-250, 1982.
- [7] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice Hall, 1989.
- [8] G. J. Balas, J. Doyle, K. Glover, A. Packard, and R. Smith, *The μ -Analysis and Synthesis Toolbox*, Math Works and MUSYN, 1991.