

외란 관측기 및 칼만 필터를 이용한 차량용 에어포일 받음각 제어기 성능 향상

최세준*, 한순민*, 김성관*†

*공주대학교 기계자동차공학부

e-mail: *chltpwns7@naver.com, *softtofuhan@naver.com, *†kimsg@kongju.ac.kr

Enhancing the Performance of a Vehicle Airfoil Angle-of-Attack Controller via Disturbance Observer and Kalman Filter

*Se-Joon Choi, **Soon-Min Han, *†Sung-Gaun Kim

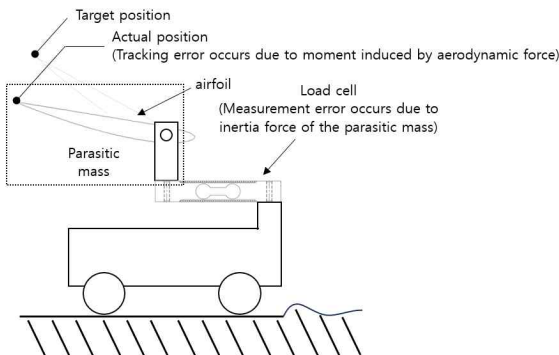
*Dept. of Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약

차량이 점차 고성능화됨에 따라 주행 안정성 확보를 위해 에어포일이 차량에 사용되고 있다. 이때 에어포일의 받음각을 적절히 조절하기 위해서, 제어와 관련된 동적 시스템의 상태와 에어포일을 통해 발생하는 하중의 크기를 알아낼 필요가 있다. 하지만, 주행 중에는 노면의 요철로 인한 차체 진동과 더불어 공기역학적 힘이 외란으로 작용하여 받음각 제어 성능을 떨어뜨린다. 본 연구에서는 이러한 외란의 영향 아래에서 안정적으로 받음각 제어가 동작하도록 외란 관측기와 칼만 필터를 이용해 제어기의 추종 성능을 확보하는 방법을 제시한다.

1. 서론

차량에 에어포일이 사용될 경우 주행 안정성을 얻기 위해 적절한 공력이 형성되는지 확인이 필요하다. 또한, 목표한 공력을 생성하도록 에어포일의 받음각을 일정하게 유지하는 제어가 필요하다. 하지만, 차량이 주행 중일 때 다양한 외란이 시스템에 가해지며 이러한 동작에 어려움이 발생한다. 대표적으로 노면의 요철로 인한 차체 상하 가속과 에어포일에 작용하는 공기역학적 힘이 외란으로 작용한다. 이러한 외란의 영향은 [그림 1]의 시스템에서 확인할 수 있다.



[그림 1] Vehicle Airfoil Angle-of-Attack Controller

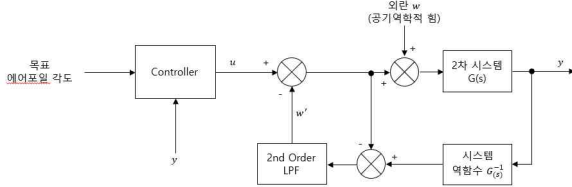
[그림 1]에서 볼 수 있듯 공력을 측정하기 측정 시스템(로드셀)과 에어포일의 각도를 제어하기 위한 제어 시스템이 존재한다.

이때 노면의 요철은 에어포일이 가지고 있는 기생 질량이 상하로 가속하도록 하여 로드셀에 측정 잡음을 발생시키며 공기역학적 인 힘은 제어시스템에 외란 모멘트를 가해 Tracking error를 발생시킨다. 이렇듯 외란이 제어시스템의 성능과 직결되는 문제인 만큼 그 영향을 제거하기 위해 많은 선행 연구가 존재하였다. 대표적으로 Backstepping 제어기인 슬라이딩 모드 컨트롤러와 외란 관측기를 사용하여 에어포일의 받음각을 제어하는 연구(Liu S.Q. et al, 2024), 칼만 필터와 PID 제어기를 이용해 외란의 영향을 최소화하도록 UAV의 받음각과 피치를 제어하는 연구(Nilar Lwin, Hla Myo Tun, 2014)가 존재하였다. 본 논문에서는 앞서 서술한 선행 연구와 더불어 슬라이딩모드 제어기와 관련된 논문인 [김봉근, 정완균, 오상록, 2002], [Guldner, J., Utkin, V. I., 1995]를 참고하여 연구를 진행하였다. 추가로 상기 논문의 내용 중 다루어지지 않은 측정 시스템(로드셀)의 잡음을 제거하기 위해 외란 관측기의 외란 추정값과 로드셀 측정값, 칼만 필터를 이용하는 방법을 연구하였으며 효과성을 입증하기 위해 매트랩 Simulink 상에서 로드셀 측정 잡음의 저감 여부와 제어기의 추종성능을 확인하였다.

2. 외란 관측기

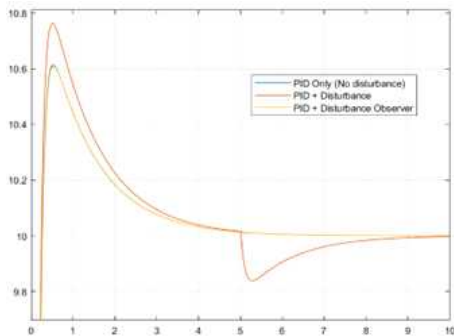
2.1 외란 관측기 개요

외란 관측기는 제어기로부터 출력된 제어 입력과 시스템의 응답을 비교하여 외란을 추정하고 보상하는 구조를 가지고 있다. 아래 [그림 2]에서 u 는 제어 입력이며 w 는 외란을 의미한다. 이때 2차 LPF(Low Pass Filter)의 경우 차단 주파수(Cutoff frequency)이하에서 이득이 1에 근접하므로 w 와 w' 은 서로 상쇄되어 외란을 제거하게 된다.



[그림 2] Disturbance Observer

에어포일의 받음각 제어 시 외란 관측기를 사용할 경우 받음각에 작용하는 외란을 효과적으로 제거 가능하다는 장점이 있다. [그림 3]에서는 PID 제어기 단독으로 사용하는 경우와 외란 관측기와 함께 사용하는 경우 2가지를 보여준다. PID 제어기 단독으로 사용하는 조건에서 시간에 따라 오차가 바뀌면 추종 성능이 저하되는 모습을 볼 수 있다. 이는 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분기로 인해 발생하는 현상이다. 특히 차량의 경우 시간에 따라 속도가 계속 변화하므로 이러한 외란 변동이 제어기의 추종 성능을 크게 저하시킬 수 있다. 이때 외란 관측기를 함께 사용하는 경우 외란을 직접적으로 상쇄하도록 동작하므로 추종 성능 저하가 발생하지 않는 모습을 볼 수 있다.

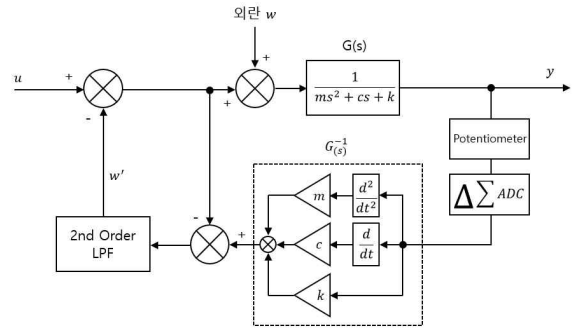


[그림 3] Response according to the use of a disturbance observer

2.2 외란 관측기 내 미분기 문제

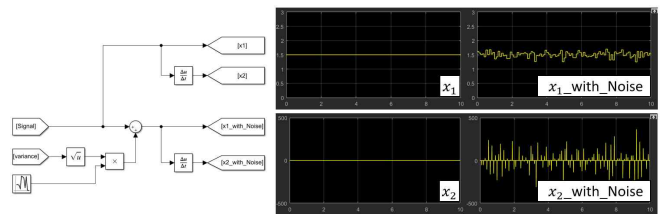
외란 관측기는 외란을 계산하기 위해 제어 대상의 응답을 전달함수의 역함수에 통과시켜 제어 입력과 외란이 섞인 신호를 얻는다. 이때 [그림 4]의 구조에서 확인할 수 있듯 역함수를 구현하기 위해 미분기가 사용되는데, 만약 센서(포텐쇼미터)의 신호에 노이즈가 섞일 경우 미분기 통과

이후 노이즈가 매우 커지게 되어 외란 관측기의 외란 추정 값이 불안정하게 된다.



[그림 4] Inverse function of the transfer function in the disturbance observer

[그림 5]는 매트랩 Simulink 상에서 이러한 노이즈의 영향을 보기 위해 가우시안 노이즈를 적용, 미분기를 통과시켰을 때의 결과를 보여준다.



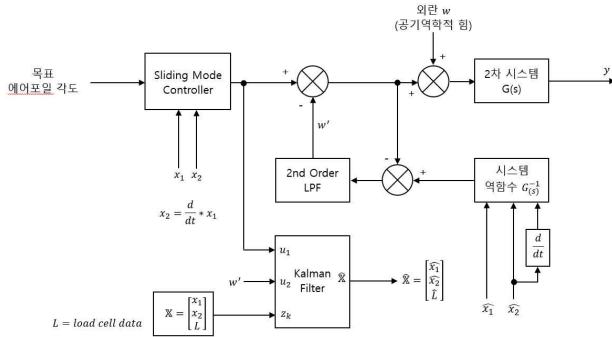
[그림 5] Results of applying Gaussian noise

이렇듯 미분기를 통과한 값의 노이즈가 매우 큰 것을 확인 가능하며 시뮬레이션의 Time-step이 작을수록 이러한 노이즈는 더 커지는 경향을 보였다. 이는 실제 제어 시스템을 MCU와 같은 프로세서를 통해 구현할 때 제어기의 성능을 높이고자 클럭을 빠르게 할 경우 오히려 노이즈가 커지며 제어시스템이 불안정해지는 결과를 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 칼만 필터를 도입하여 노이즈의 영향을 최소화하고 제어 시스템의 안정도를 높였다.

3. 칼만 필터

칼만 필터는 모델을 통해 예측한 시스템의 상태와 실제 측정값을 통계적인 방법을 이용해 적절히 조합하여 가장 적절한 실제 시스템의 상태를 추정하는 알고리즘이다. 본 시스템에서 칼만 필터는 센서에 섞이는 노이즈로 인한 미분기의 불안정성을 해결하기 위해 사용하였다. 제어 시스템과 함께 측정 시스템 또한 칼만 필터를 사용하여 측정 잡음을 제거하였으며 이는 외란 관측기로부터 얻어지는 외란 모멘트 추정값과 로드셀 측정값을 칼만 필터에 입력하여 수행하였다. 이러한 구조는 전체 시스템 선도 [그림

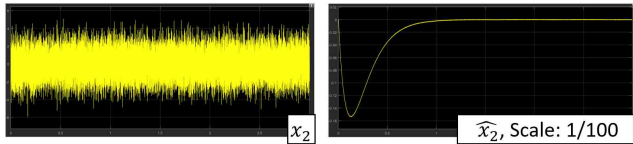
6]에서 확인할 수 있다.



[그림 6] System structure diagram

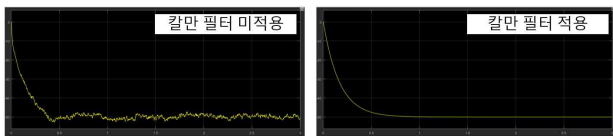
[그림 6]에서 칼만필터는 현재 시스템의 상태, 외란 측정값을 입력받아 실제 시스템의 상태를 추정하는 역할을 한다. 이렇게 추정된 실제 시스템의 상태는 외란 관측기로 입력되어 외란을 보상하는데 사용한다. 이러한 구조는 시스템의 측정값에 포함된 잡음으로 인해 발생하는 미분기의 불안정성을 최소화하여 외란 관측기가 효과적으로 동작하도록 한다.

[그림 7]에서 측정 잡음이 섞인 값(x_1)을 미분했을 때 칼만 필터 여부에 따른 차이를 확인할 수 있다.



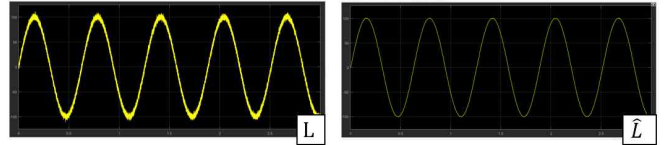
[그림 7] Comparison before and after passing through the Kalman filter

이러한 차이는 외란 관측기의 성능에 큰 영향을 미치며 제어기의 추종 성능에 직접적으로 연관된다. 이는 [그림 8]에서 확인할 수 있다.



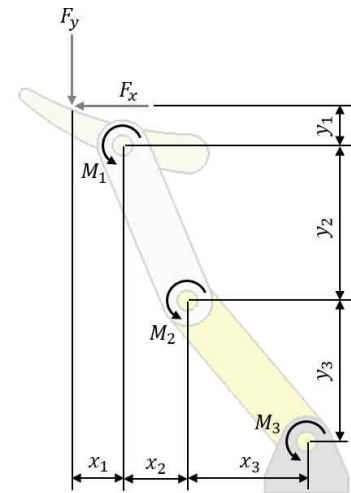
[그림 8] Differences in controller tracking performance with a Kalman filter

또한, 로드셀의 측정 잡음 또한 칼만 필터를 이용하여 최소화하였다. [그림 6]에서 로드셀의 하중 측정값과 외란 관측기로부터 얻은 하중의 예측값을 칼만 필터로 입력하여 측정 잡음을 제거하는 구조를 볼 수 있다. 칼만 필터 통과 전후의 차이는 [그림 9]에서 확인할 수 있다.



[그림 9] Differences in load cell measurements with a Kalman filter

단, 외란 관측기로부터 얻어진 외란은 모멘트에 해당하기 때문에 로드셀 측정값과 함께 칼만필터로 입력하기 위해서는 외란 모멘트를 발생시키는 힘을 구할 필요가 있다. [그림 10]에서 각 관절 부에서 측정된 외란 모멘트 (M_1 , M_2 , M_3)를 이용해 수직과 수평 방향의 힘을 구하는 방법은 다음과 같다.



[그림 10] 3-degree-of-freedom airfoil angle-of-attack control system

외란 관측기로부터 얻은 각 모멘트는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{cases} M_1 = x_1 \cdot F_y + y_1 \cdot F_x \\ M_2 = (x_1 + x_2) \cdot F_y + (y_1 + y_2) \cdot F_x \\ M_3 = (x_1 + x_2 + x_3) \cdot F_y + (y_1 + y_2 + y_3) \cdot F_x \end{cases}$$

M_1 식을 구성하는 각 항은 전부 미지수이나, M_2 및 M_3 식을 이용하여 F_x 및 F_y 를 구하는 것이 가능하다. 여기서 F_x 는 에어포일에 가해지는 항력, F_y 는 양력에 해당한다.

4. 결론

차량의 주행 안정성 확보를 위해 에어포일을 장착할 경우 적절한 공력이 형성되는지 확인이 필요하다. 이를 위한 측정 시스템에서 발생하는 측정잡음을 외란 관측기와 칼만 필터로 제거할 수 있도록 하였다. 또한, 제어 시스템의 안정적인 동작을 위해 칼만 필터를 통과한 시스템의 상태를 외란 관측기에 입력함으로써 효과적으로 제어 시스템을 안정화 할 수 있음을 확인하였다. 하지

만 이는 시뮬레이션 상에서만 이루어졌으며 시험 장치를 구성하여 실제 시험을 통해 그 효과를 검증할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Liu, S.Q. et al., "Disturbance Observer Based Backstepping Terminal Sliding Mode Aeroelastic Control of Airfoils," Preprints, 2024.
- [2] Putra, D.B.E., "Implementation of Flight Control System Based on Kalman and PID Controller for UAV," Int. J. Sci. Technol. Res., Vol. 3, No. 4, pp. 76-80, 2014.
- [3] 김봉근, 정완균, 오상록, 「Disturbance Observer Based Approach to the Design of Sliding Mode Controller for High Performance Positioning Systems」, 『Proceedings of the 15th IFAC World Congress』, Barcelona, Spain, pp.55 ~ 60, 2002.
- [4] Guldner, J., Utkin, V. I., 「The chattering problem in sliding mode systems」, 『IEEE Transactions on Control Systems Technology』, pp.1~7, 1995.