

가변 연소면적 DACS의 압력 제어 기법

기태석* · 박익수*[†] · 허준영* · 진정근*

Control Method for DACS with Variable Burning Area

Taeseok Ki* · Iksoo Park*[†] · Jun-Young Heo* · Jungkun Jin*

ABSTRACT

Control method for DACS with variable burning area is designed and the performance of the control method is analyzed by doing simulation at various conditions.

DACS, which got solid propellant on board, is designed as end-burning type typically. End-burning type DACS has the merit of controlling pressure and thrust, but it discharges the combustion gas which does not using for getting thrust. Therefore, optimal design of propellant grain and burning area changes over time as a result. Variable burning area can be assumed as a disturbance and adaptive control method is useful for pressure control of DACS effected by disturbance.

초 록

본 논문에서는 연소 면적이 시간에 따라 변하는 DACS의 압력 제어 기법을 설계하고 시뮬레이션을 통해 설계된 제어 기법의 성능을 확인하였다.

일반적으로 고체 추진제를 탑재한 DACS는 연소 면적이 일정하도록 설계된다. 이러한 경우 압력 및 추력 제어가 용이하다는 장점은 있으나, 추진제 연소에 의해 생성된 연소 가스가 추력 발생에 사용되지 않고 그대로 배출되는 경우가 발생한다. 따라서 그레인 형상의 최적화 설계가 필요하며, 이러한 경우 연소 면적이 시간에 따라 변하게 된다. 가변하는 연소 면적을 외란으로 가정할 수 있으며 이러한 시스템에 대하여 적응 제어 기법을 적용할 경우 효과적으로 연소관 내부 압력을 제어할 수 있다.

Key Words: Adaptive Control Method(적응 제어 기법), Burning Area(연소 면적), DACS(궤도천이 및 자세제어 시스템), Disturbance(외란)

1. 서 론

최근 유도무기용 고체 추진기관은 다양한 무기 체계에 적용되고 있는데, 그 중 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나는 직격 요격체이다.

직격 요격체는 탄두를 장착하고 폭발을 통해 목표물을 격추시키거나 피해를 입히는 기존의 방식과는 달리, 탄두를 장착하지 않고 목표물과 직접 조우하여 요격하는 무기체계다. 탄두를 장착하지 않으므로 시스템이 단순해지며, 직격 요격

체 개발에서 가장 중요한 변수 중 하나인 전체 시스템의 질량도 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 탄두가 없으므로 요격에 의한 폭발이 발생하지 않아 적군의 미사일에 대한 요격체계 및 방어 시스템으로써 활용이 되며, 무엇보다 요격체와 표적이 정확히 충돌해야 하므로 정확한 목표물 탐지 및 고기동성과 정밀한 추력 제어 성능이 필수적이다.

본 논문에서는 직격 요격체 시스템 중, 다축의 핀틀-노즐을 장착하여 연소실 내부의 압력 및 추력 제어를 통해 요격체의 궤도 및 자세를 제어하는 시스템(DACS)를 연구 대상으로 선정하였다.

기존에 연구되었던 DACS의 경우 압력 및 추력 제어의 용이함을 위하여 추진제의 연소 면적을 시간에 따라 일정하도록 설계하였으며, 이러한 DACS에 대한 제어기법 연구가 많이 진행되었다[1]. 연소 면적이 일정할 경우 내탄도 동역학이 단순해지므로 연소실 내부 압력 제어가 용이하며, 결과적으로 추력 제어의 정확도가 증가한다는 장점이 있다. 하지만 DACS의 경우 다축의 노즐을 장착하게 되면서, 추진제 연소에 의해 생성된 연소 가스가 추력 발생에 사용되지 않고 그대로 배출되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 손실을 줄이고 연소되는 추진제가 모두 요구 추력 발생을 만족시키기 위하여 사용된다면, 적은 양의 추진제를 탑재하고도 동일한 추력 요구를 만족시킬 수 있게 될 것이다. 즉 연소면적의 최적화를 통해서 탑재되는 추진제의 질량을 감소시키고, 이는 결과적으로 전체 시스템의 질량 감소로 이어지게 된다.

다만 앞서서도 언급하였듯이 고체 추진기관에서 연소면적이 변하는 시스템의 경우 내탄도 동역학적 특성이 복잡해져서 시스템 제어에 어려움을 야기시키게 된다. 이렇게 시간에 대해 변하는 시스템의 경우 적응 제어기법을 적용하여 변수를 제어한다면 효과적으로 대응할 수 있다.

기존 연구에서도 DACS 시스템에 적응 제어기

법을 적용하여 시스템의 시변 특성을 보상하여 제어 성능 및 강인성을 확보하는 연구[2]가 수행되었으며, 이러한 적응 제어기법을 기반으로 핀틀의 열 팽창이나 연소속도의 변형과 같이 실제로 발생할 수 있는 시스템 시변 특성 사례에 대한 적응 제어기법의 특성 및 성능에 대한 연구[3]도 수행되었다.

본 연구에서는 연소 면적이 변하는 시스템에 적응 제어기법을 적용시켜서 연소관 내부 압력 제어의 성능을 확인하였다. 연소 면적이 단순하게 변화하는 시스템뿐만 아니라 복잡하게 변하는 시스템에 대해서도 분석을 수행하여, 다양한 경우에 대한 적응 제어기법의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 시스템 모델 및 압력 제어 기법

2.1 시스템 모델링

DACS 추진기관의 경우 일반적으로 전체 시스템의 궤도 천이 및 자세 제어를 위해서는 Fig. 1[4]과 같이 다축의 핀틀-노즐을 장착하여 추력을 발생시키게 된다.

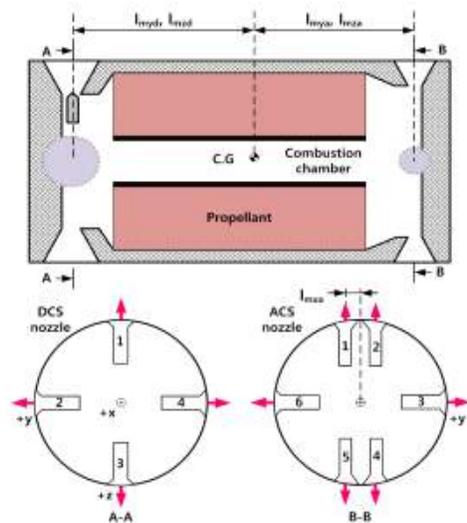


Fig. 1 Configuration of DACS[4]

* 국방과학연구소 4기술연구본부

† 교신저자, E-mail: ispak@add.re.kr

시스템 전체에 작용하는 추력을 제어하기 위해서는 각 노즐의 노즐목 면적을 조절하여 노즐에서 발생하는 추력을 개별적으로 제어해야 하나, 연소실 압력을 제어하기 위해서는 노즐의 개수와는 관계없이 총 노즐목 면적(각 노즐목 면적의 합)이 입력 변수가 된다. 즉 다축의 노즐이 있는 DACS지만, 연소관 내부 압력 제어를 위해 시스템을 모델링하기 위해서는 하나의 노즐을 장착한 시스템이라고 가정할 수 있다.

고체 추진기관의 내탄도 시스템을 모델링하기 위하여 먼저 Robert의 연소실을 이용하면 Eq. (1)과 같이 연소속도, r_b 를 연소관 내부 압력, P_c 의 함수로 표현할 수 있다.

$$r_b = aP_c^n \quad (1)$$

이 때 a 와 n 은 각각 추진제의 특성에 따라 결정되는 연소속도 상수 및 지수이다. 또한 Eq. (1)과 같이 표현된 연소속도는 연소관 내부 부피, V_c 의 시간에 따른 변화량으로도 표현이 된다. 이렇게 결정된 r_b 와 질유량 보전법칙을 이용하면, 내탄도 시스템을 Eq. (2)와 같이 모델링 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dV_c}{dt} &= r_b \\ \frac{dP_c}{dt} &= \frac{RT_c}{V_c} \left(\rho_p A_b r_b - C_D P_c A_t - \frac{A_b r_b P_c}{RT_c} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

이 때 ρ_p , C_D 는 각각 추진제 밀도 및 노즐의 유량 계수를 의미하며, A_b , A_t 는 각각 연소 면적 및 총 노즐목 면적을 의미한다. DACS에서 연소관 내부 압력 제어를 위한 변수는 총 노즐목 면적인 A_t 가 된다.

2.2 적응 제어기 설계

적응 제어기는 기존의 연구에서 사용되었던 적응 제어 기법 및 슬라이딩 모드 제어 기법[2]

을 동일하게 사용하였다. 이에 대해 간략하게 표현하면 다음과 같다. 먼저 Eq. (2)와 같이 표현된 내탄도 모델에서 제어하고자 하는 상태 변수를 x , 입력 변수를 u 라고 하면 외란이 존재할 경우 Eq. (2)를 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\alpha_k + \alpha) + (\beta_k + \beta)u \\ y &= x \end{aligned} \quad (3)$$

이 때 α_k , β_k 는 Eq. (2)와 같이 기존에 알고 있는 시스템의 동역학적 특성을 의미하며, α , β 는 외란과 같이 예상하지 못한 시스템의 특성을 의미한다. 이 때 연소 면적이 시간에 따라 변하는 시스템의 경우 이를 외란으로 정의할 수 있으며, β_k 는 A_b 의 변화에 영향을 받지 않으므로 Eq. (3)에서 β 에 해당하는 외란은 입력되지 않는다고 가정할 수 있다. 이러한 시스템에 대한 제어 입력은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_t &= u_c + u_s \\ u_c &= \frac{- (\alpha_k + \hat{\alpha}) + y_m \dot{k}_c e}{\beta_k} \\ u_s &= - \frac{W}{\beta_0} \text{sgn}(e) \end{aligned} \quad (4)$$

이 때 u_c , u_s 는 각각 적응 제어 기법 및 슬라이딩 모드 제어 기법에 의해 설계된 입력 변수이다. y_m 은 상태 변수를 수렴시키고자 하는 레퍼런스 모델을 의미하여, 이는 명령값의 1차 지연으로 모델링하여 사용하였다. 또한 e 는 수렴하고자 하는 레퍼런스 모델과 출력 변수의 차이를 의미하고 Eq. (5)와 같이 표현되며, 외란인 α 를 추정하는 법칙은 Eq. (6)과 같이 표현된다.

$$e = y_m - y \quad (5)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{e}{\zeta} \quad (6)$$

2.3 구동기 모델

위의 제어 기법에 의해서 입력 변수인 A_t 의 목표값이 결정되면, 해당 명령이 노즐목 면적을 결정하는 핀틀 구동기로 전달된다. 실제 시스템에 적용되는 구동기의 경우 구동기에 적용된 핀틀의 위치 제어기 성능 및 구동기 자체의 특성에 의해 목표로 하는 A_t 값을 추종하고자 할 것이며, 본 논문에서는 이를 간단한 1차 지연 모델로 Eq. (7)과 같이 표현하였다.

$$A_{t,rsp}(s) = \frac{1}{\tau_a s + 1} A_{t,cmd}(s) \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 및 결과

3.1 시뮬레이션 조건

연소 면적 A_b 가 가변하는 DACS에 대하여 이를 외란으로 가정하고 적응 제어기를 설계하였으므로, A_b 가 시간에 따라 변하는 다양한 조건에 대하여 설계된 제어기의 연소관 내부 압력 제어 성능을 확인하고자 하였다.

Table 1. Simulation condition

공통 조건	
명령 압력(P_{cmd})	1000 psi
기준 연소 면적($A_{b,ref}$)	0.0488 m ²
개별 연소 면적 변화(dA_b , 10초 이후)	
조건 1	Step
조건 2	Ramp
조건 3	Profile

먼저 시뮬레이션 시간 기준으로 10초 이전까지는 연소 면적의 변화가 없이 동일한 조건에서 압력 제어를 수행하며, 10초 이후로는 연소 면적을 변화시키되 그 변화가 일정한 경우, 시간에

따라 비례하게 증가하는 경우 마지막으로 특정 프로파일로 변하는 경우로 나누어 각각 시뮬레이션을 수행하여 제어기의 성능을 확인하였다. 이러한 시뮬레이션 조건을 Table 1과 같이 정리하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

적응 제어기의 압력 제어 성능을 확인하기 위하여 기본적인 개루프 제어기 결과와 비교를 하였다. 일반적으로 Eq. (2)와 같이 표현된 내탄도 모델에서 연소관 내부 압력이 특정 값에 수렴하였을 때의 값은 노즐목 면적의 값에 의해서 결정되므로, 반대로 연소관 내부 압력이 특정 값($P_{c,ss}$)에 수렴하였을 때의 노즐목 면적의 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{t,ss} = \frac{\rho_p A_b a P_c^{n-1} - \frac{A_b a}{RT_c} P_c^n}{C_D} \quad (8)$$

즉 특정 압력에 도달하기 위한 총 노즐목 면적은 Eq. (8)를 통해 계산이 가능하며, 이러한 방식을 통해서 압력 제어를 수행한 것을 개루프 제어라고 하였다. 이러한 제어 기법은 실제 연소관 내부 압력의 특성이 Eq. (2)와 정확하게 일치한다면 정확한 값으로 제어를 하지만, 본 연구의 대상이 된 연소 면적이 가변하는 시스템과 같이 외란이 입력되는 경우에 대해서는 외란에 의한 영향만큼 오차가 발생하게 된다.

3.2.1 일정 연소 면적 변화(조건 1)

시뮬레이션 시간 기준으로 10초 이후에 연소 면적이 시간에 따라 변하지 않고 일정하게 변하는 조건에 대한 압력 제어 결과는 Fig. 2와 같다.

시뮬레이션 시간 기준으로 10초 이전에는 두 제어 기법 모두 동일하게 목표 압력인 1000 psi에 수렴하나, 연소 면적이 일정하게 증가하면 외란에 대한 정보가 없는 개루프 제어의 경우 연소 면적이 증가한 만큼 압력이 증가하게 된다.

반면 연소 면적의 변화를 외란으로 인식하고 이를 추정하여 압력 제어에 반영하는 적응 제어기의 경우 외란이 인가된 10초에는 소량의 압력 변화가 있으나 금세 목표한 값으로 연소관 내부 압력이 다시 수렴하게 되는 것을 확인할 수 있다.

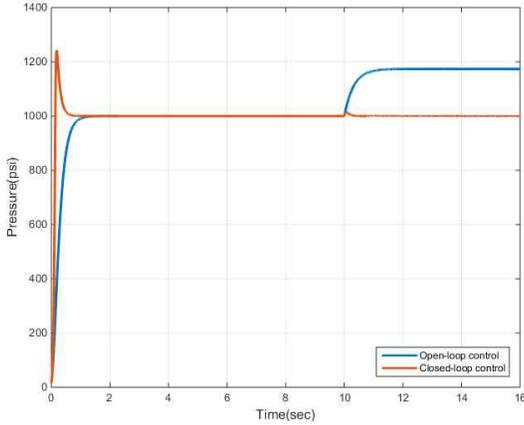


Fig. 2 Pressure control result for condition 1

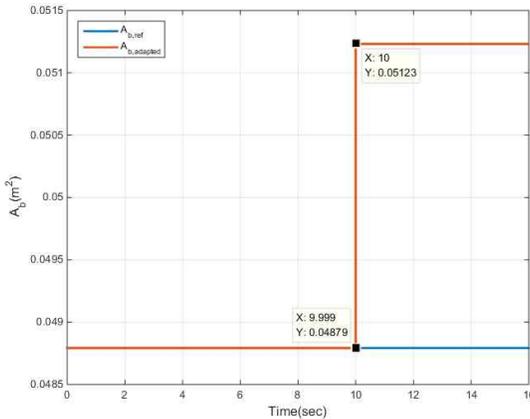


Fig. 3 Adapted burning area of condition 1

3.2.2 비례 연소 면적 변화(조건 2)

시뮬레이션 시간 기준으로 10초 이후에 연소 면적이 시간에 비례하게 증가하는 조건에 대한 압력 제어 결과는 Fig. 4와 같다.

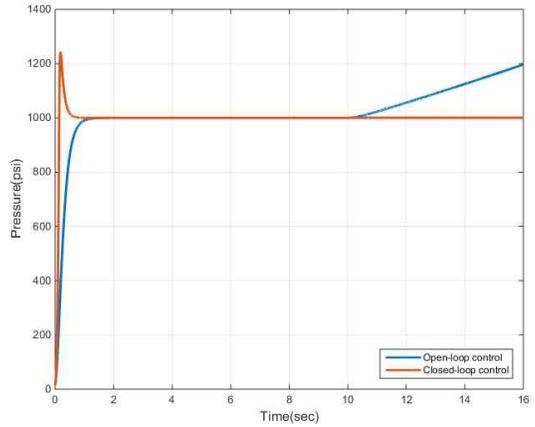


Fig. 4 Pressure control result for condition 2

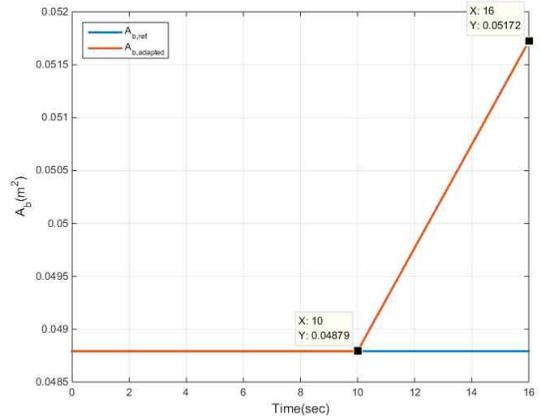


Fig. 5 Adapted burning area of condition 2

조건 2의 시뮬레이션 결과 역시 조건 1과 마찬가지로 연소 면적이 증가함에 따라서 개루프 압력 제어 결과의 경우 압력이 상승하지만, 적응 제어 기법을 적용한 결과에서는 큰 오차가 발생하지 않고 목표한 압력을 잘 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2.3 프로파일 연소 면적 변화(조건 3)

마지막으로 연소 면적이 규칙적으로 변하지 않고 특정 프로파일에 의해 급격하게 변하는 조건에 대한 압력 제어 결과는 Fig. 6과 같다.

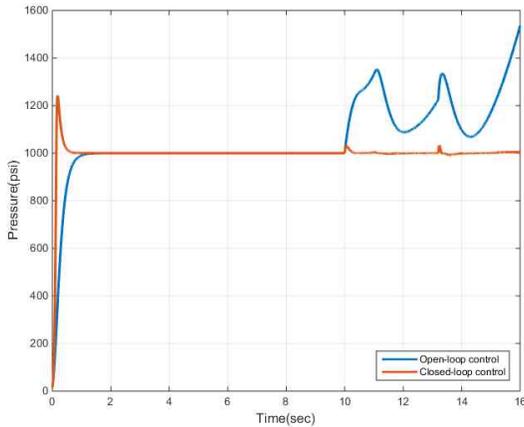


Fig. 6 Pressure control result for condition 3

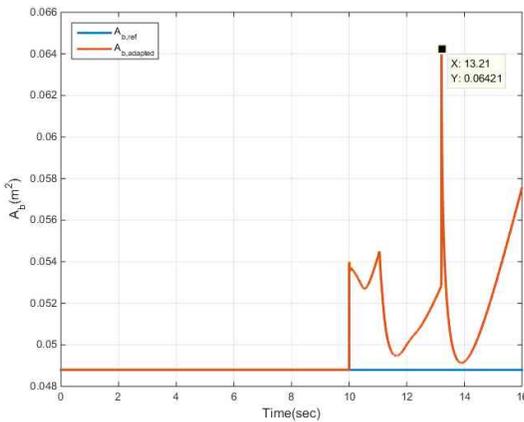


Fig. 7 Adapted burning area of condition 3

연소 면적의 변화가 급격하게 발생하는 조건 3의 압력 제어 결과 역시, 앞의 조건 1, 2와 유사하게 연소 면적이 급격하게 변화하는 곳에서는 연소관 내부 압력의 오차가 증가하지만 이내 목표한 값으로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

DACS를 적용한 무기 체계의 효과적인 개발 또는 성능 개량을 위해서는 여러 가지 방법을

통해서 시스템 전체의 질량을 감소시키고자 하는 노력이 시도될 것이며, 추진제 그레인 형상의 최적화 역시 그러한 시도 중 하나가 될 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 향후 적용 가능성이 있는 연소 면적이 가변하는 DACS에 대한 압력 제어 기법을 제안하였다. 앞에서도 언급하였듯이 가변하는 연소 면적을 외란으로 가정하고, 외란이 인가되는 시스템의 경우 적응 제어 기법을 적용시키면 효과적으로 상태 변수의 제어가 가능하다. 또한 설계된 제어 기법을 시뮬레이션을 통하여 다양한 조건에 대해 제어 성능의 안정성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Christina A. D., Amy B. G., "Variable Thrust Solid Propulsion Control Using Labview," *AIAA Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2003.
2. Wonseok L., Yeonju E., Hyochoong B., Hosung L., "Efficient Thrust Distribution with Adaptive Pressure Control for Multinozzle Solid Propulsion System," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 29, No. 6, pp. 1410-1419, 2013.
3. Taeseok K., Seokhyun H., Ik-soo P., "Robustness Analysis of Adaptive Controller for Solid Rocket Motor with Pintle Nozzles," *2014 KSPE Fall Conference*, 2014.
4. Iksoo P., Seokhyun H., Taeseok K., Sutton, G.P., "Pressure Guidance and Thrust Allocation Law of Solid DACS," *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 9-16, 2015.