

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.5.061>

DACS 추진기관의 핀틀 구동장치 고장을 허용하는 추력 분배기법 연구

기태석^{a,*}

Research for Thrust Distribution Method of DACS for Response to Pintle Actuating Failure

Taeseok Ki^{a,*}

^aThe 4th R&D Institute - 5th Directorate, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: kits@add.re.kr

ABSTRACT

Robust thrust distribution method of solid DACS is researched. For the case of the system which has higher number of actuation nozzles than the degree of freedom of thrust to be controlled, the robust thrust allocation law which accommodate the abnormal operation is suggested. Assuming the situation that some nozzles are uncontrollable, the error between nozzle throat area command and response can be calculated. The error is used for realtime reshaping of weighting matrix. From the weighting effect, the nozzle which operated abnormally has low responsibility for the command then, the thrust error is reduced. The suggested algorithm is verified by the simulation of abnormal operation condition of DCS and ACS nozzle respectively.

초 록

고체 추진제를 연료로 사용하는 DACS의 강인한 추력 분배기법에 대한 연구를 수행하였다. 추진기관이 제어해야 하는 추력의 자유도보다 많은 구동 노즐을 보유한 시스템에 대하여, 비정상적인 상황을 허용할 수 있는 강인한 추력제어 기법을 제안하였다. 추력 분배기법에 의해 각 노즐로 인가된 명령 대비 응답 노즐 목 면적 크기의 차이를 이용하여 추력 분배기법에 적용된 가중행렬을 실시간으로 변환시키는 기법을 적용하였다. 이를 통하여 오차가 발생한 노즐의 추력 분배 비율을 감소시키고, 결론적으로 시스템에서 발생하는 추력 오차를 감소시키도록 하였다. 제안된 기법에 대하여 DCS와 ACS 각각의 구동장치가 제어명령을 추종하지 못하는 임의의 고장조건을 모의하였고, 시뮬레이션을 통해 기법의 성능을 검증하였다.

Key Words: Divert Attitude Control System(궤도 및 자세 제어 시스템), Thrust Distribution(추력 분배), Weighting Matrix(가중행렬)

Received 27 December 2016 / Revised 28 June 2017 / Accepted 3 July 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회(2016. 12. 21-23, 강원랜드 컨벤션호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

최근 유도무기용 고체 추진기관은 다양한 제

계에 적용되고 있는데, 이 중 직격 요격체는 탄두를 장착하여 폭발 범위로 근접하게 비행하게 하는 기존의 요격 체계와는 달리 요격체와 표적이 정확히 충돌해야 한다. 따라서 정확한 목표물 탐지 및 고기동성과 정밀한 추력 제어 성능이 필수적이다. 이를 위해서는 연소실 내부의 압력 제어와 함께 요구되는 추력을 효율적으로 발생시킬 수 있는 기법에 대한 연구가 이루어져야 한다.

고체 추진기관에서 정밀한 추력 제어를 수행하기 위해서는 핀틀 구동을 이용한 추력 제어 기법이 효과적이다. 핀틀 구조체를 사용한 추력 및 압력 제어의 선행 연구로 John과 Roberto[1]는 대칭성을 가지는 한 축의 핀틀 노즐 구조체를 대상으로 시스템을 모델링하고 연소관 내부 압력에 대한 제어를 이론적으로 설계하여 실제 실험을 통해 검증하였으며, Christina와 Amy[2]는 이와 유사하지만 상온 시험을 통한 검증 과정을 추가하여 제어기 성능 검증의 절차를 더욱 체계적으로 구축하였다. 또한 Niu와 Bao[3] 등은 압력 제어 모드를 설정하여 다양한 기법의 압력 제어를 수행하였다. 하지만 해당 선행 연구들은 핀틀을 이용하여 추진기관 내부의 압력 제어만을 위한 이론적 또는 실험적 접근에 머물렀다. 또 다른 연구에서는 Morris와 Carson[4]이나 Joner와 Qinquis[5]의 연구와 같이 연소실 내부 압력 제어와 함께 추력을 동시에 제어하기 위하여 연속형 루프 닫힘 구조를 제시하여 보다 발전적인 제어 구조를 보였으며, Lee와 Eun 등[6]은 시스템의 시변 특성을 보상할 수 있는 적응 제어 기법을 이용하여 시스템의 제어 성능 및 강인성을 확보하는 연구를 수행하여 복잡한 압력 제어 기법과 함께 직관적이고 단순한 추력 분배에 대한 연구도 수행하였다. 아울러 최근의 Park과 Hong 등[7]의 연구에서는 압력 유도 기법 및 가중 의사 역행렬에 의한 추력 분배기법을 구속조건과 최적화 기법을 통하여 강인하고 효율적인 제어 기법 설계를 위한 이론적 기반을 제시하였다.

본 논문에서는 DACS 추진기관의 압력 제어 보다는 추력 분배에 대한 연구 결과를 제시하였

다. 또한 추력을 발생시키는 다수의 노즐이 하나의 연소관을 공유하는 DACS 추진기관의 특징을 고려하여, 고장 및 구동 장치 포화와 같은 비정상적인 환경에서 이에 대응할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해서 노즐 목 면적 제어의 오차를 이용하여 가중행렬을 능동적으로 변환시키는 추력 분배 기법을 제안하고 해당 기법에 대한 검증을 수행하였다.

2. 시스템 모델 및 압력 제어

2.1 시스템 구성

연구의 대상이 되는 추진기관의 구조도는 Fig. 1과 같다. 그림과 같이 연소 면적이 일정한 End burning 타입의 추진기관이며, 하나의 연소실에 대하여 DCS 4개, ACS 6개로 총 10개의 핀틀-노즐 구조체가 장착되어 있다[7].

시스템의 위치를 제어하기 위한 DCS 노즐에서는 ACS 노즐에 비해 상대적으로 큰 추력이 발생하며, 자세를 제어하기 위한 ACS 노즐은 모든 축 방향의 요구 모멘트를 만족시키기 위하여

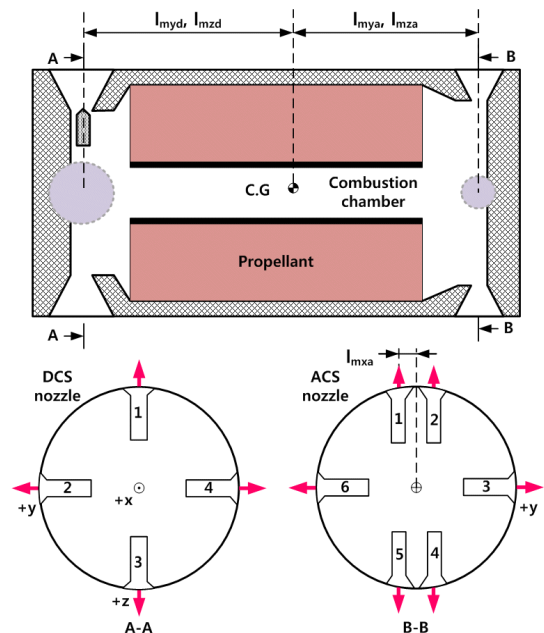


Fig. 1 Configuration of propulsion system[7].

DCS 노즐보다 2개 더 많은 6개의 노즐로 구성된다.

Fig. 1과 같이 좌표축이 정의된 시스템에서 x 축 방향으로의 힘을 제외한 각 축 방향으로의 힘(F_y, F_z) 및 모멘트(M_x, M_y, M_z)를 정리하면 Eq. 1~5와 같다.

$$F_y = T_{d4} - T_{d2} + T_{a6} - T_{a3} \quad (1)$$

$$F_z = T_{d1} - T_{d3} + T_{a1} + T_{a2} - T_{a4} - T_{a5} \quad (2)$$

$$M_x = (T_{a2} + T_{a5} - T_{a1} - T_{a4}) \times l_{mxa} \quad (3)$$

$$M_y = (T_{d1} - T_{d3}) \times l_{myd} + (T_{a1} + T_{a2} - T_{a4} - T_{a5}) \times l_{mya} \quad (4)$$

$$M_z = (T_{d4} - T_{d2}) \times l_{mzd} + (T_{a3} - T_{a6}) \times l_{mza} \quad (5)$$

이 때 DCS 및 ACS 각각의 i 번째 노즐에서 발생하는 추력을 각각 T_{di}, T_{ai} 라고 하였으며, k 축 방향의 모멘트에 대한 모멘트 암의 길이를 각각 l_{mkd}, l_{mka} 라고 표현하였다.

위 식에서 좌변에 해당하는 시스템 전체의 힘과 모멘트 벡터를 T_b , 각 노즐에서 발생하는 추력을 T_n 이라고 하면 Eq. 1~5를 다음과 같이 Eq. 6으로 정리할 수 있다.

$$T_b = T_{n2b} T_n \quad (6)$$

이 때 T_{n2b} 는 각 노즐에서 발생한 추력 벡터를 시스템의 추력 및 모멘트로 변환하는 행렬이다.

2.2 시스템 모델링

추진기관의 내탄도 시스템을 모델링하기 위하여 먼저 Robert의 연소식을 이용하면 Eq. 7과 같이 연소 속도, r_b 를 표현할 수 있다.

$$r_b = \eta_{rb} A_b a P_c^n \quad (7)$$

위 식에서 η_{rb} 는 보정계수, A_b 는 연소면적이며, a 와 n 은 추진제의 특성에 따라 결정되는 연소속

도 상수 및 지수이다. 이렇게 결정된 r_b 와 질유량 보전법칙을 이용하여 내탄도 시스템을 Eq. 8, 9와 같이 모델링 할 수 있다.

$$\frac{dV_c}{dt} = r_b \quad (8)$$

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{RT_c}{V_c} \left(RT_c \rho_p r_b - \frac{r_b P_c}{RT_c} - \eta_d RT_c C_d P_c A_{t,tot} \right) \quad (9)$$

위 식에서 P_c, V_c 는 각각 연소실 내부 압력 및 부피이며, $A_{t,tot}$ 는 개별 노즐 목 면적의 총합, ρ_p 는 추진제 밀도, T_c 는 화염 온도, η_d 는 초경 보정계수, C_d 는 유량계수를 각각 의미한다.

2.3 제어 구조

DACS 추진기관의 역할은 시스템에서 요구되는 추력 및 모멘트를 만족시키는 것이며, 이를 위해서는 적당한 수준의 압력 제어 및 각 노즐의 추력 분배가 이루어져야 한다. 추력 분배에 앞서 각 노즐에서 발생하는 추력, F 는 Eq. 10과 같이 정의할 수 있다.

$$F = \eta_f (\lambda \times \dot{m} v_e + P_e A_e) - P_a A_e = C_f P_c A_t \quad (10)$$

이 때 η_f 는 추력 보정계수, A_e 는 노즐의 출구 면적을 의미하며, P_e 및 P_a 는 각각 노즐 출구면에서의 압력 및 대기압을 의미한다. Eq. 10과 같이 정의된 식에서 추력 계수, C_f 는 다음의 Eq. 11과 같이 정의된다.

$$C_f = \left(\eta_f \frac{P_e}{P_c} - \frac{P_a}{P_c} \right) \epsilon + \eta_f \lambda \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (11)$$

이 때 ϵ 은 노즐의 출구 면적과 노즐 목 면적의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{A_e}{A_t} \quad (12)$$

일반적으로 연소관 내부 압력인 P_c 는 P_e 및 P_a 보다 매우 크므로($P_c \gg P_e, P_a$), Eq. 11은 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$C_f \approx \eta_f \lambda \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (13)$$

즉 일반적인 경우 C_f 는 Eq. 13과 같이 상수로 가정할 수 있으며, 본 논문에서도 이러한 가정을 적용하였다.

다음으로 Eq. 6에 표현된 T_n 은 Eq. 14와 같이 정의할 수 있다.

$$T_n = C_f P_c A_{ti} \quad (14)$$

이 때 A_{ti} 는 각 노즐의 목 면적 벡터이다.

위 식에서 알 수 있듯이, 각 노즐에서 발생하는 추력은 노즐 목 면적뿐만 아니라 연소실 압력에 의해서 결정된다. 즉 단순히 추력 요구를 만족시키기 위해서 노즐 목 면적을 변화시킬 경우, 연소실 압력의 변화가 발생하므로 정확한 추력을 발생시킬 수 없게 된다. 따라서 추력 분배 기법의 단순화를 위해서는 추력 발생에 의해 연소실 압력의 변화가 없어야 하며, 이는 추력 분배 기법에 의해 발생하는 노즐 목 면적 변화의 합이 0이 되어야 함을 의미한다.

이를 식으로 표현하면 다음과 같다. 먼저 각 노즐에 요구되는 노즐 목 면적 명령, $A_{ti,cmd}$ 는 Eq. 15와 같이 연소실 압력 명령을 만족시키기 위한 $A_{ti,prs}$ 와 추력 명령을 만족시키기 위한 $\Delta A_{ti,thr}$ 의 합으로 표현할 수 있다.

$$A_{ti,cmd} = A_{ti,prs} + \Delta A_{ti,thr} \quad (15)$$

위 식에서 $\Delta A_{ti,thr}$ 는 Eq. 16과 같은 요구 조건을 만족시켜야 한다[7].

$$\sum_{i=1}^{10} \Delta A_{ti,thr} = 0 \quad (16)$$

24 압력 제어

연소실 압력 제어기는 단순한 제어기를 설계하여 적용하였으며, 제어해야 하는 총 노즐 목 면적 명령은 Eq. 17과 같다.

$$A_{tot,prs} = K_p e_{prs} + A_{t0} \quad (17)$$

이 때 e_{prs} 는 연소실 압력의 제어 오차, A_{t0} 는 초기 노즐 목 면적의 합을 의미하며, e_{prs} 는 다음과 같이 정의된다.

$$e_{prs} = P_{cmd} - P_c \quad (18)$$

압력 제어기에 의해서 결정된 총 노즐 목 면적 명령($A_{tot,prs}$)을 개별 노즐 목 면적 명령($A_{ti,prs}$)으로 분배하기 위해서 Eq. 19와 같이 압력 가중벡터, W_p 를 이용하여 계산하였다[7].

$$A_{ti,prs} = W_p^* A_{tot,prs} \quad (19)$$

$$W_p^* = \frac{W_p^T (W_p W_p^T)^{-1}}{|W_p^T (W_p W_p^T)^{-1}|} \quad (20)$$

위 식에서 W_p^* 는 가중벡터 W_p 의 의사 역행렬을 L^1 norm으로 정규화 한 값이다.

이 때 노즐이 총 10개 이므로 W_p 는 $W_p \in R^{10 \times 1}$ 을 만족하는 가중벡터이다. 또한 Eq. 19와 같이 압력 제어를 위한 노즐 목 면적을 분배할 때 이로 인한 추력 및 모멘트를 발생시키지 않아야 하므로, W_p 의 가중치 중 DCS 및 ACS에 해당하는 가중치는 서로 동일한 값을 가져야 한다[7].

3. 추력 분배기법

3.1 추력 분배기법

압력 제어기법에 의해서 압력이 일정한 수준으로 유지되고 있다면, Eq. 16과 같은 요구 조건

을 만족시키는 $\Delta A_{ti,thr}$ 만큼 각 노즐에 변화를 주어, 압력을 일정하게 유지하면서 요구되는 추력 명령(T_{br})을 만족시킬 수 있다. 이 때 위 압력 제어기법에 의해 결정된 DCS 및 ACS 노즐의 $A_{ti,prs}$ 값이 서로 같으므로 T_{br} 은 Eq. 21과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{br} = C_f P_c T_{n2b} W_t \Delta A_{ti,thr} \quad (21)$$

이 때 W_t 는 $W_t \in R^{10 \times 10}$ 을 만족하는 대각행렬이며, 추력 요구를 만족시키기 위해 각 노즐로 분배되는 노즐 목 면적에 변화를 주는 가중행렬이다.

따라서 Eq. 16과 Eq. 21을 만족하면서, 벡터 $\Delta A_{ti,thr}$ 의 크기가 최소가 되도록 최적화 수식을 정리하면 Eq. 22와 같고, 그 해는 Eq. 23과 같다. 기존의 연구와는 달리 압력 제어를 위해 노즐 목 면적 분배 기법에 사용한 가중벡터 W_p 와 같이, 추력 분배기법에도 가중행렬 W_t 를 사용하여 사용자의 의도 및 시스템의 특성에 따라 노즐별 분배되는 목 면적을 변화시킬 수 있도록 하였다.

$$\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \| \Delta A_{ti,thr}^T \Delta A_{ti,thr} \|^2 + \\ \lambda^T (F_{br,A} - C_f P_c T_{n2bA} W_t \Delta A_{ti,thr}) \end{array} \right\} \quad (22)$$

w.r.t $\Delta A_{ti,thr}$

$$\Delta A_{ti,thr} = \frac{1}{C_f P_c} (W_t^T)^{-1} T_{n2bA}^T (T_{n2bA} (W_t^T)^{-1} T_{n2bA}^T)^{-1} F_{br,A} \quad (23)$$

위 식에서 $F_{br,A}$, T_{n2bA} 는 각각 Eq. 16을 만족시키기 위해 증대된 벡터 및 행렬이며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_{n2bA} = \begin{bmatrix} T_{n2b} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$F_{br,A} = \begin{bmatrix} F_{br} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

3.2 능동적 가중행렬 변환

추력 요구를 만족시키기 위해 Eq. 23에 의해서 분배된 노즐 목 면적 $\Delta A_{ti,thr}$ 는 가중행렬 W_t 의 대각 변수들을 변화시킴으로써, 해당 변수와 대응되는 노즐에 분배되는 노즐 목 면적을 증가 또는 감소시킬 수 있다. 따라서 이를 이용하면, 실시간으로 노즐 목 면적의 응답을 알 수 있고, 이로 인하여 노즐 목 면적 제어의 오차가 계산된다면 이를 가중행렬에 적용하여 노즐 목 면적 오차가 증가할수록 분배되는 면적을 감소시킴으로써, 요구되는 추력 및 모멘트를 더욱 효율적으로 만족시킬 수 있을 것이다.

먼저 노즐 목 면적의 오차, e_{nzi} 을 Eq. 26과 같이 정의하였다.

$$e_{nzi} = |A_{ti,cmd} - A_{ti,rsp}| \quad (26)$$

이러한 오차를 정규화하기 위하여 각 노즐의 오차와 노즐 목 면적 오차의 최대값의 비율 (Ratio)로 구성된 벡터 e_{nziR} 을 Eq. 27과 같이 정의하였다.

$$e_{nziR} = \begin{bmatrix} e_{nzi1}/e_{d,max} \\ \vdots \\ e_{nzi4}/e_{d,max} \\ e_{nzi5}/e_{a,max} \\ \vdots \\ e_{nzi10}/e_{a,max} \end{bmatrix} \quad (27)$$

이 때 $e_{d,max}$, $e_{a,max}$ 는 각각 DCS와 ACS 노즐 목 면적 오차의 최대값으로, 다음과 같이 각각 DCS 또는 ACS 노즐 목 면적의 최대값과 최소값의 차이로 정의할 수 있다.

$$e_{d,max} = A_{td,max} - A_{td,min} \quad (28)$$

$$e_{a,max} = A_{ta,max} - A_{ta,min} \quad (29)$$

Eq. 23을 살펴보면 $\Delta A_{ti,thr}$ 를 계산하기 위한 가중행렬 W_t 는 역행렬로 곱해져 있는 것을 알 수 있다. 즉 가중행렬을 구성하는 가중치의 값이

증가할수록, 해당 가중치에 대응되는 노즐에 분배되는 면적 $\Delta A_{ti,thr}$ 은 반대로 감소하게 될 것이다. 이러한 특성을 이용하면 Eq. 27에 의해 계산된 오차 비율의 크기가 클수록 이에 대응되는 노즐의 가중치를 마찬가지로 증가시킴으로써, 오차가 크게 발생한 노즐에 분배되는 면적을 줄이는 개선된(Modified) 가중행렬 W_{tM} 을 정의하여야 할 것이다. W_{tM} 은 Eq. 30과 같이 정의하였다.

$$W_{tM} = E + K_{wt} e_{nz} R \quad (30)$$

위 식에서 K_{wt} 는 상수이며 가중행렬 변환 이득을 의미한다.

이를 이용하여 최종적으로 Eq. 31의 식을 이용하여 추력 및 모멘트 요구를 만족시키기 위한 노즐 목 면적 분배량을 계산할 수 있다.

$$\Delta A_{ti,thr} = \frac{1}{C_f P_c} (W_{tM}^* T)^{-1} T_{n2bA}^T \quad (31)$$

$$(T_{n2bA} (W_{tM}^* T)^{-1} T_{n2bA}^T)^{-1} F_{brA}$$

이 때 W_{tM}^* 은 가중행렬 W_{tM} 을 L2 norm으로 정규화 한 값으로 Eq. 32와 같이 계산된다.

$$W_{tM}^* = \frac{W_{tM}}{|W_{tM}|} \quad (32)$$

4. 시뮬레이션

4.1 DCS 노즐 고장조건

개선된 가중행렬의 영향을 살펴보기 위하여 임의로 노즐이 고장난 비정상적인 상황을 모의하였다. 특정 노즐(DCS 2번)이 고장, 즉 노즐 목 면적 명령이 인가되어도 전혀 움직이지 않는 상황을 설정하고 시뮬레이션을 수행하였으며, 노즐 목 면적 오차는 계산할 수 있다고 가정하였다.

먼저 시뮬레이션 시간 5초에 DCS 2번 노즐에 고장이 발생하여 노즐이 움직이지 않고, 10초에 추력 명령이 변하였다고 모의하였다. 이 때 가중

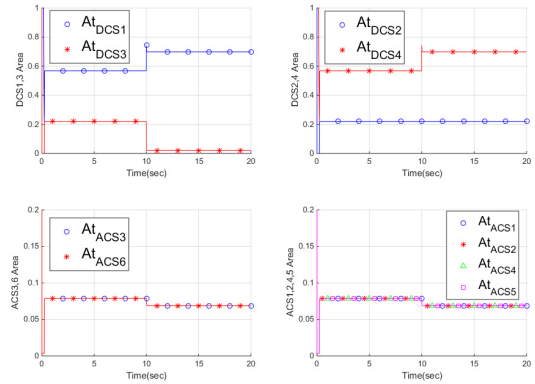


Fig. 2 Nozzle area for DCS2 failure ($W_f=E$).

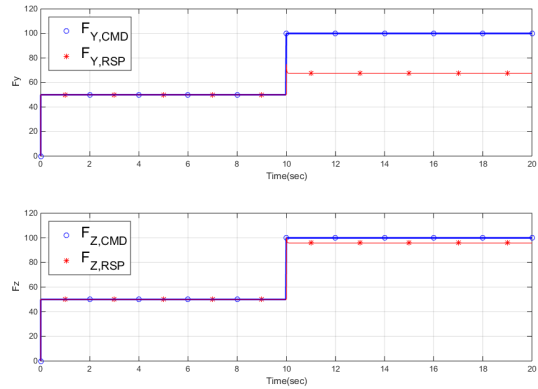


Fig. 3 Thrust for DCS2 failure ($W_f=E$).

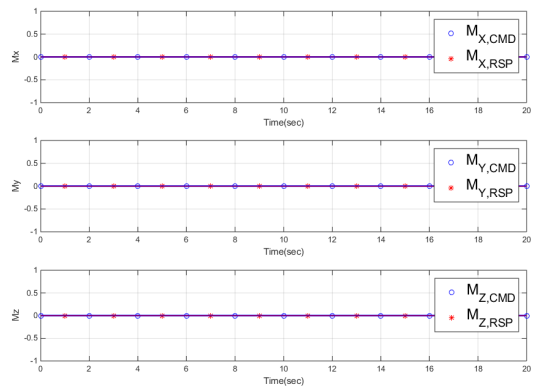


Fig. 4 Moment for DCS2 failure ($W_f=E$).

행렬 W_{tM} 을 적용하지 않고 단위행렬을 적용하면, Fig. 2와 같이 고장으로 인하여 명령을 추종하지 못한 2번 노즐 목 면적($A_{t,DCS2}$)은 정지해

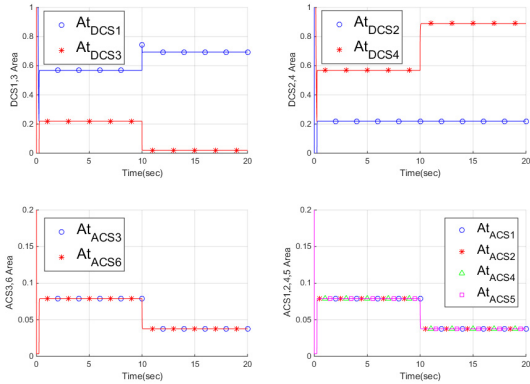


Fig. 5 Nozzle area for DCS2 failure ($W_t=W_{tM}$).

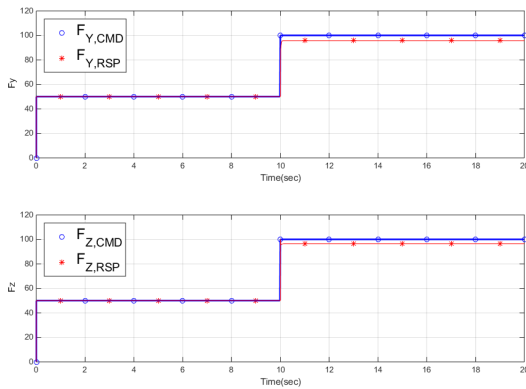


Fig. 6 Thrust for DCS2 failure ($W_t=W_{tM}$).

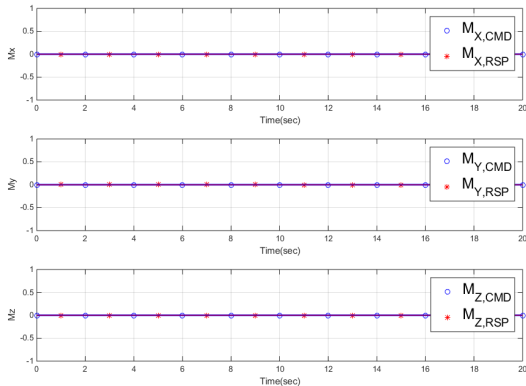


Fig. 7 Moment for DCS2 failure ($W_t=W_{tM}$).

있게 된다. 이에 반하여 다른 노즐 목 면적은 변경된 추력 명령을 추종하기 위하여 고장이 발생하지 않았을 경우 계획된 명령 분배 위치로 이

Table 1. Y-axis Thrust Error Comparison.

	Weighted Matrix	Thrust CMD	Thrust RSP	Error (%)
F_y	E	100	68.6	31.4
	W_{tM}		96.0	4.0

동하였다. 노즐 목 면적의 값은 특정 값으로 정규화하여 표기하였다. 이러한 노즐 고장으로 인한 추력 및 모멘트의 추종 결과는 Fig. 3, 4와 같다. 10초 이후에 변경된 추력 명령에 대하여 고장이 발생하지 않은 z축 방향의 추력(F_z)과 모멘트(M_z)는 명령을 추종하지만, y축 방향의 추력은 노즐 목 면적이 명령을 추종하지 못한 만큼 오차가 발생하게 된다. 추력 및 모멘트의 값 역시 특정 값으로 정규화하여 표기하였다.

동일한 고장모의 조건에서 가중행렬 W_{tM} 을 적용하면 다음과 같다. 먼저 Fig. 5의 노즐 목 면적을 살펴보면 고정된 DCS 2번 노즐에서 감소해야 할 추력을 보상하기 위하여 이와 대응되는 DCS 4번 노즐의 면적이 Fig. 2와 비교하여 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다.

또한 DCS 4번 노즐의 변화량이 증가하였으므로, 압력을 동일한 수준으로 유지하기 위하여 ACS 노즐의 변화 역시 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6, 7과 같이 나타난 추력 및 모멘트 결과 역시 명령을 잘 추종함을 알 수 있다. 모멘트의 오차는 수치 계산으로 인한 결과이며, 특히 F_y 의 경우 DCS 2번 노즐이 고정되면 개선된 가중행렬 W_{tM} 을 사용하여 DCS 2번 노즐에 분배된 면적을 최소화하고, 그 결과 오차가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 정량적인 비교는 Table 1에서 확인할 수 있으며, 오차가 급격하게 감소하였음을 알 수 있다.

4.2 ACS 노즐 고장조건

ACS 고장모의는 DCS와 유사하게 시뮬레이션 시간 5초에 ACS 2번 노즐이 고장으로 인하여 정지되었고, 10초에 모멘트 명령이 변화되었다고 모의하였다. 먼저 가중행렬을 W_{tM} 이 아닌 단위행렬로 정의하면 그 결과는 Fig. 8~10과 같다.

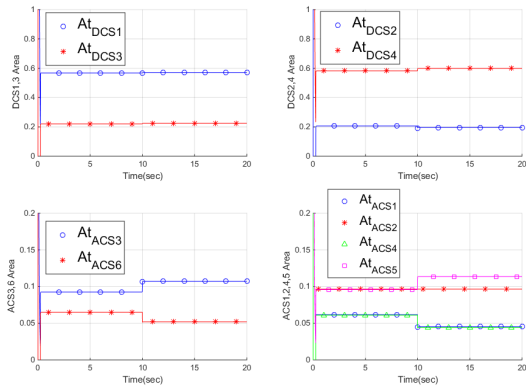


Fig. 8 Nozzle area for ACS2 failure ($W_f=E$).

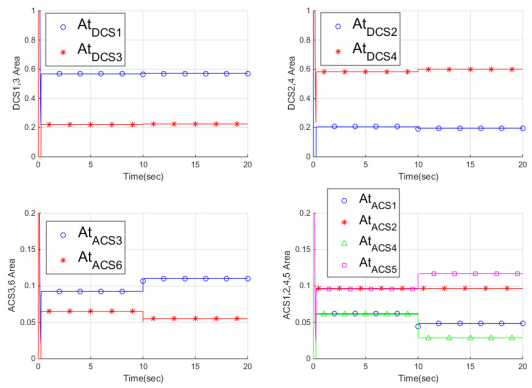


Fig. 11 Nozzle area for ACS2 failure ($W_f=W_{IM}$).

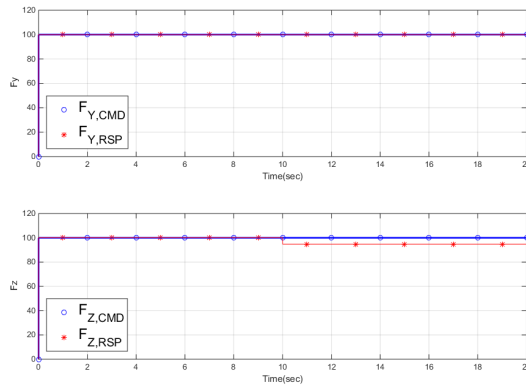


Fig. 9 Thrust for ACS2 failure ($W_f=E$).

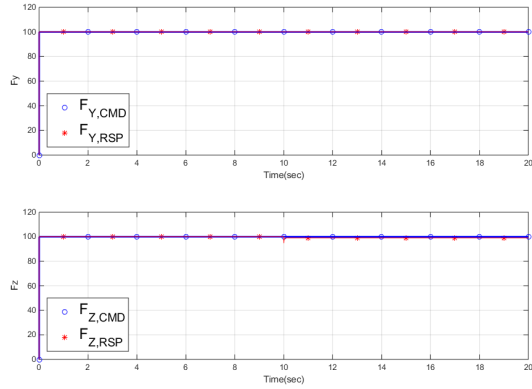


Fig. 12 Thrust for ACS2 failure ($W_f=W_{IM}$).

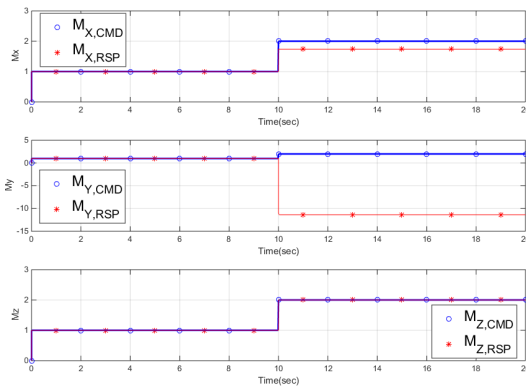


Fig. 10 Moment for ACS2 failure ($W_f=E$).

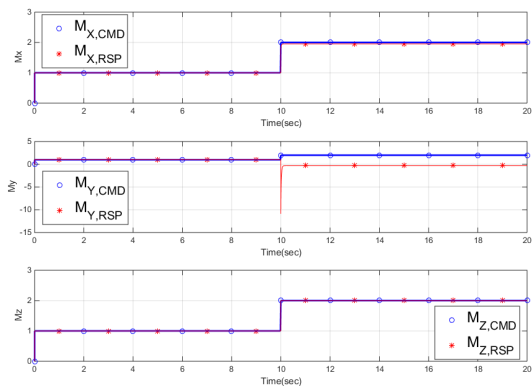


Fig. 13 Moment for DCS2 failure ($W_f=W_{IM}$).

4.1의 시뮬레이션 결과와 유사하게 10초를 기점으로 ACS 2번 노즐 목 면적($A_{t,ACS2}$)을 제외하 나머지 노즐의 목 면적이 증가 또는 감소하는

것을 확인할 수 있다.

또한 고장 발생 시점(5초)에서는 추력 및 모멘트 요구 변화가 없으므로 고장 발생 여부와 관

Table 2. Z-axis Thrust Error Comparison.

	Weighted Matrix	Thrust CMD	Thrust RSP	Error (%)
F_z	E	100	94.7	5.3
	W_{LM}		99.1	0.9

Table 3. X, Y-axis Moment Error Comparison.

	Weighted Matrix	Moment CMD	Moment RSP	Error (%)
M_x	E	2	1.74	13.3
	W_{LM}		1.96	2.3
M_y	E	2	-11.38	669
	W_{LM}		-0.28	114

계없이 목표 추력 및 모멘트를 만족시키며, 10초에 모멘트 명령이 증가하면 고장의 영향을 받지 않는 M_z 는 응답이 명령을 정확하게 추종하지만, M_x 및 M_y 는 명령 대비 오차가 발생하였다. 아울러 ACS 2번 노즐의 영향을 받는 Z축 방향 추력(F_z)에도 오차가 발생하였다.

다음으로 능동 가중행렬(W_{LM})을 적용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 11~13과 같다. 먼저 Fig. 11의 노즐 목 면적을 살펴보면 고정된 ACS 2번 노즐에서 증가해야 할 추력이 보상되어야 한다. 이를 위해서 이에 대응되는 ACS 4번 노즐의 면적이 Fig. 8과 비교하여 상대적으로 크게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 12, 13을 살펴보면 오차가 발생한 방향의 추력 및 모멘트의 오차가 감소하였음을 확인할 수 있다.

다만 M_x 와 비교하여 M_y 의 경우 동일 노즐 목 면적 오차에 대하여 모멘트 오차가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 ACS 노즐이 가지는 x 축에 대한 모멘트 암의 길이(l_{mxa})가 y 축에 대한 모멘트 암의 길이(l_{mya})보다 짧으므로 노즐에서 발생하는 추력 변화에 대한 모멘트의 변화량이 상대적으로 작기 때문이다. 추력 및 모멘트에 대한 명령 추종특성의 정량적 개선 효과는 Table 2, 3에서 확인할 수 있다.

5. 결 론

가중행렬을 이용하여 노즐 목 면적을 분배하고 추력 및 모멘트 요구를 만족시킬 경우, 발생한 추력 및 모멘트 요구의 방향 또는 크기에 관계없이 해당 요구를 만족시킬 수 있는 노즐 목 면적의 해가 계산된다는 장점이 있다. 이러한 장점을 노즐의 고장 또는 제어 오차가 크게 발생한 비정상적인 상황에 적용하여, 강인한 추력 추종 성능을 가진 추력 분배기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 확인한 결과, 오차가 크게 발생한 노즐일수록 추력 및 모멘트 요구를 만족시키기 위한 노즐 목 면적 분배를 적게 받게 되고, 이는 결과적으로 추력 및 모멘트 오차의 감소로 이어지게 되는 강인한 제어 특성을 보였다.

References

1. John, L.B. and Roberto, D.S., "Solid Rocket Motor Control: Theoretical Motivation and Experimental Demonstration," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Huntsville, A.L., U.S.A., AIAA 2003-4968, Jul. 2003.
2. Christina, A.D. and Amy, B.G., "Variable Thrust Solid Propulsion Control Using Labview," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Huntsville, A.L., U.S.A., Jul. 2003.
3. Niu, W.Y., Bao, W., Chang, J., Cui, T. and Yu, D.R., "Control System Design and Experiment of Needle-type Gas Regulating System for Ducted Rocket," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 224, No. 1, pp. 563-573, 2010.
4. Morris, J.W., Carlson R.W., Peterson, K.L. and Reich, E.M., "Multiple Pintle Nozzle Propulsion Control System," US Patent No. 5456425, Oct. 1995.
5. Joner, S. and Quinquis, I., "Control of an

- Exoatmospheric Kill Vehicle with a solid Propulsion Attitude Control System," *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Keystone, C.O., U.S.A., AIAA 2006-6572, Aug. 2006.
6. Lee, W., Eun, Y., Bang, H. and Lee, H., "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.
7. Park, I., Hong, S., Ki, T. and Park, J., "Pressure Guidance and Thrust Allocation Law of Solid DACS," *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 9-16, 2015.