

On-Off 제어를 이용한 가변추력 고체추진 기관의 압력제어

권순규* · 김영석* · 고상호*[†] · 서석훈**

Pressure Control of a Variable Thrust Solid Propulsion System Using On-Off Controllers

Soonkyu Kwon* · Youngseok Kim* · Sangho Ko*[†] · Seokhoon Suh**

ABSTRACT

Solid propulsion systems have simple structures compared to other propulsion systems and are suitable for long-term storage. However the systems generally have limits on control of thrust levels. In this paper we introduce controllers for combustion chamber pressure using on-off control techniques which have been known for relatively easy implementation and energy efficiency. For this, we use a simple pressure change model by considering only mass conservation within the combustion chamber and we design a classical controllers and on-off controllers with are Pulse Width Modulation(PWM) and Pulse Width Pulse Frequency Modulation (PWPFM). Then we compare the performance results of the controllers through numerical simulations.

초 록

고체추진기관은 구조가 비교적 간단하고 장기적 저장성이 우수한 반면에 일반적으로 추력의 조절 등에 한계성을 가지고 있다. 본 논문에서는 구현의 용이함과 에너지 효율성이 좋은 on-off 제어기법을 이용한 가변추력 고체추진 기관의 압력 제어를 위한 제어기를 소개한다. 연소기 내 압력제어를 위해 질량보존만을 고려한 추진기관의 연소기 내 압력변화 모델에 대하여 고전적인 비례-적분 제어기와 같은 연속적 제어 기법과 PWM, PWPFM과 같은 on-off 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 결과를 비교한다.

Key Words: Variable Thrust Solid Propulsion(가변추력고체추진), Pressure Control(압력제어), On-Off Control(단속제어), Pulse Width Modulation(PWM:펄스폭변조), Pulse Width Pulse Frequency Modulation(PWPFM:펄스폭 펄스주파수 변조)

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** (주)한화 구미사업장 개발2부

† 교신저자, E-mail: sanghoko@kau.ac.kr

2. 고체추진 기관의 모델링

Nomenclature

P	(kPa)
T_g	(K)
A_b	(mm ²)
A_t	(mm ²)
A_c	(mm ²)
V_c	(mm/s)
R	(kJ/kg·K)
V	(mm ³)
C^*	(mm/s)
ρ	(kg/mm ³)
\dot{m}	(kg/s)
P_e	(N/mm ²)
P_a	(N/mm ²)
a	()
K	()
n	() ($0 < n < 1$)

고체추진기관은 다른 추진기관보다 안전성이 뛰어나고, 설계 및 제작이 용이하며, 구조적으로 간단하다는 장점이 있으나 고정된 추진제 그래인의 형상과 노즐목의 크기에 대해 추력의 크기를 조절할 수 없는 단점이 있다[1]. 최근 고체추진기관의 단점을 보완할 수 있는 비추력이 높고 추력조절이 가능한 추진기관에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그중 가장 고전적이며 널리 이용되어온 on-off 제어 기법은 구현의 용이함과 구동기의 작동에 요구되는 에너지 소모의 효율성 때문에 넓게 사용되고 있다. 그러나 on-off제어의 특성상 비선형 특성이 강하게 나타나며 내부 설계 파라미터들의 최적화에 어려움이 있다.

본 연구에서는 연소면적이 일정한 고체추진기관의 노즐목 크기변화에 따른 연소기 내 압력 변화 방정식을 이용하여 3장에서는 PI제어기 기반의 연속적 제어 기법과 PWM, PWPFM을 이용한 on-off제어기법을 활용한 연소기내 압력 제어 기법을 기술한다. 4장에서 시뮬레이션을 통한 연속적 제어기와, on-off 제어기를 적용한 시스템의 성능을 비교한 후 5장에서 결론과 추후 연구 방향에 대해 논의한다.

2.1 고체추진기관 기본 사양

노즐목 넓이에 따른 연소기 내의 압력 제어 모델을 고려한다. 고체 추진기관에서 연소관 압력은 노즐목의 크기에 지대한 영향을 받기 때문에 노즐목 면적을 조절하여 연소관내 압력을 인위적으로 제어할 수 있다.

2.2 고체추진기관 모델링

Figure 1는 연소면적이 일정한 일반적인 고체추진기관의 개략도이다.

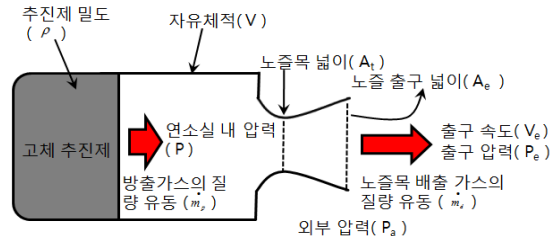


Fig. 1 고체추진 연소 기관

노즐목에서 초킹(Chocking)이 일어난다고 가정하면, 고체추진제의 연소로 생성되는 가스의 질량 유량은 $\dot{m}_p = A_t \rho a P^n$ 이고, 노즐목에서 배출되는 질량 유량은 $\dot{m}_d = P A_t / C^*$ 으로 표현된다. 연소기 압력의 시간변화율은 시스템의 연속방정식에 기초하여 다음과 같이 표현된다[2].

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT_g}{V} (\dot{m}_p - \dot{m}_d) \quad (1)$$

Equation 1에서 자유체적 V 는 일정하다고 가정하는데, 이는 자유체적의 변화율이 작기 때문이며, 제어기의 설계를 용이하게 해준다. 참고문헌[3]에서는 자유체적의 변화를 고려한 적응제어 기법이 소개되어있다. \dot{m}_p 와 \dot{m}_d 를 Eq. 1에 대입하면, 연소기 내의 압력 응답에 대한 비선형 방정식이 얻어진다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT_g}{V} \left(A_t \rho a P^n - \frac{PA_t}{C^*} \right) \quad (2)$$

Equation 2는 상태변수인 압력 P 와 입력변수인 노즐목 면적 A_t 의 관계를 나타내는 상태방정식이며 상수값들을 대입하면 Eq. 3을 얻을 수 있다.

$$\frac{dP}{dt} = 0.1(0.9P^{0.4} - 2PA_t) \quad (3)$$

3. 고체추진 기관의 압력 제어

3.1 PI 제어기를 이용한 연속적 압력제어

비례-적분(PI) 제어기를 사용하기 위해 Eq. 2를 각 운용점에서 선형화한다. 운용점 압력을 P_0 로 표시하고 Eq. 2를 선형화하면 다음과 같은 관계를 얻는다[4].

$$\frac{dP}{dt} = \frac{-RT_g}{V} (1-n) A_t \rho a P_0^{n-1} P - \frac{RT_g}{V} \frac{P_0}{C^*} A_t \quad (4)$$

$$\dot{P} = -\alpha P - \beta A_t \quad (5)$$

여기에서 $\alpha = (1-n)RT_g A_t \rho a P_0^{n-1} / V$ 이고, $\beta = RT_g P_0 / VC^*$ 이다. 고체추진기관의 노즐목 넓이를 조절하는 구동기는 해석의 단순화를 위해 2차 전달 함수를 가지는 모델로 가정하였다. 운용점에서 선형화한 압력식 Eq. 5에 압력을 피드백하여 비례-적분 제어기를 설계한다(Fig. 3).

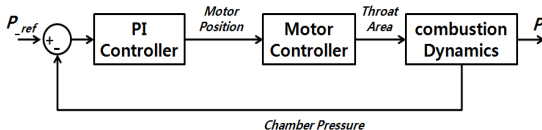


Fig. 2 비례-적분(PI) 제어 시스템

3.2 Pulse-Width Modulation (PWM)

펄스폭 변조기법(PWM)은 전자회로에 사용되는 신호 변조 기법으로, 일반적으로 PWM 회로는 on-off 형태의 신호를 반복적으로 생성하여 연속적인 아날로그 입력 신호를 펄스 형태의 신호로 변조한다. 이때 내부 캐리어 신호(carrier signal)의 신호 수준에 비례하여 펄스 폭을 변화시켜 입력 아날로그 신호에 근사한 응답을 얻게 된다. PWM은 연속 신호에 의한 평균 거동을 불연속 펄스에 의해 근사화 하기 때문에 구동기의 작동에 요구되는 에너지를 감소시킬 수 있기 때문에 on-off 제어에 자주 사용된다[5].

일반적으로 전자회로에서 구현되는 PWM은 컴퓨터에서 캐리어 신호와 제어입력신호를 비교하여 제어입력 신호의 수위 변화에 따라서 펄스 폭의 다른 출력이 나타난다. 캐리어 신호는 일반적으로 제어입력신호보다 큰 톱니파 혹은 삼각파가 고정된 주파수로 반복적으로 생성되기 때문에 결론적으로 펄스 출력 신호 또한 고정된 주파수를 갖는다. 본 연구에서는 캐리어 신호 생성기(carrier wave generator), 뱅-뱅 트리거(bang-bang trigger), 이득(gain)과 포화도(saturation)를 이용하여 PWM을 구현하였다[6].

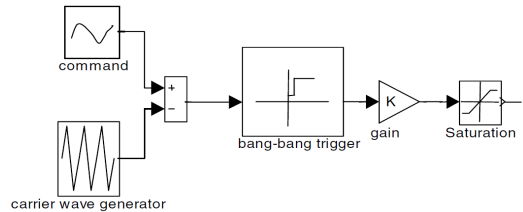


Fig. 3 PWM의 개략도 [6]

3.3 Pulse-Width Pulse-Frequency Modulation(PWPFM)

펄스폭 펄스 주파수 변조기(PWPFM)는 PWM과 유사하지만, 내부 캐리어 신호 대신에 피드백된 1차 필터 신호를 사용하기 때문에 출력 신호의 주파수가 가변적이다. PWPFM은 선형에 가까운 유사-선형(Pseudo-linear) 거동을 하며[9] 설계 파라미터의 설정에 따라 여러 요구 조건에 대해 광범위하게 시스템 요구조건을 만족시킬 수 있다. 또한 PWM에 비해 에너지 소모 측면에서 효율적이며 특히 시스템에 진동이 존재할 때

정밀한 지향이 가능하지만 상대적으로 설계 파라미터가 많아 최적화에 어려움이 존재한다[7, 10].

본 연구에서는 1차 필터, 슈미트 트리거 (Schmitt trigger), 피드백 루프를 이용하여 PWPFM을 구현하였다[7, 8].

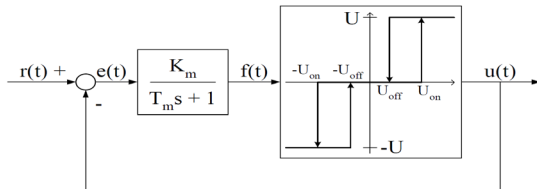


Fig. 4 PWPFM의 개략도 [8]

4. 제어기설계 및 시뮬레이션

4.1 PI 제어기를 이용한 압력제어

선행연구로 얻어진 PI 제어모델은 연소기 초기압력을 운용점인 1.65 KPa로 설정하였으며, 1 KPa를 상승시키는 입력이 주어졌다. PI 제어모델은 연속적 제어신호를 생성하며, 이후 논의될 PWM과 PWPFM을 적용한 on-off제어기의 입력신호가 된다[2].

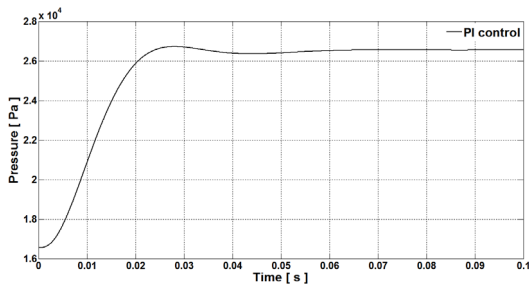


Fig. 5 PI 제어기를 이용한 압력 시뮬레이션

0.1초의 시뮬레이션 결과 1%이내의 오버슈트 (overshoot)과 함께 정상상태 오차 없이 목표 압력인 2.65 kPa에 도달하였다. 이 PI 제어모델에 기반한 압력 응답을 다음 절에서 논의될 on-off 제어기법을 이용한 시뮬레이션의 비교 대상으로 간주하였으며 PWM 및 PWPFM제어기 설계시 PI 제어모델의 응답과 유사하도록 설계 변수를 결정하였다.

4.2 PWM을 이용한 압력제어

PI 제어 신호는 시간에 대해 연속이며 PWM 변조기는 이 연속적인 PI 제어 신호를 불연속 펄스 형태로 변조한다. 따라서 on-off 제어를 위한 PWM, PWPFM변조기는 위의 4.1절에서 설계된 PI 제어기 뒤에 위치하며 PI 제어기의 출력신호가 PWM 변조기의 입력신호가 된다.

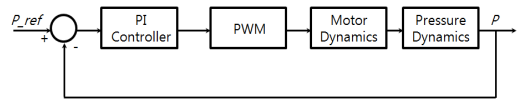


Fig. 6 PI 제어기 기반 PWM 제어모델

PWM의 설계 파라미터는 캐리어신호의 진폭 $A_{carrier}$, 캐리어 신호의 주파수 $f_{carrier}$, PWM 출력 신호의 크기 A_{PWM} 이다. 캐리어 신호의 진폭은 PWM평균 출력과 펄스 on-off 시간을 결정하는 파라미터이며 제어입력 신호의 크기보다 큰 진폭을 갖는다. 한편 캐리어 신호의 주파수는 PWM 출력의 주기와, 펄스 on-off 시간을 결정하는 파라미터이며 PWM 출력신호의 크기는 평균 출력을 결정하는 매개변수로서 시스템 특성을 고려하여 결정한다. 일반적으로 $A_{carrier}$ 가 증가함에 따라 PWM 출력 신호의 듀티 사이클 (Duty Cycle)은 감소하며, $f_{carrier}$ 가 증가함에 따라 작동횟수(Firing number)가 증가한다[6].

본 연구에서는 PI 제어기에 의한 연속적 제어와 유사한 응답을 얻기 위해 PWM의 파라미터인 캐리어 신호의 진폭, 주파수, PWM 출력 펄스 신호의 크기를 시행착오를 통하여 각각 $A_{PWM} = 35000$, $f_{carrier} = 200Hz$, $A_{carrier} = 35000$ 으로 설정하였다.

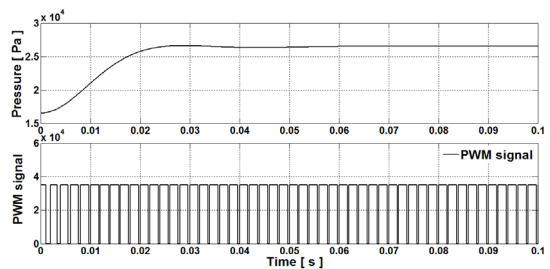


Fig. 7 PWM 제어기를 이용한 압력 시뮬레이션

4.3 PWPFM을 이용한 압력제어

PWPFM의 설계 파라미터는 1차 필터의 필터 이득 K_m , 시간상수 T_m 그리고 슈미트 트리거 (Schmitt trigger)의 on 값 U_{on} , off 값 U_{off} , 출력 값 U 이다. 일반적으로 K_m , U_{on} 값이 작아질수록 연료 효율이 증가하며 작동횟수는 감소한다. 반면에 T_m 과 $U_{on} - U_{off}$ 값은 커질수록 연료 효율이 증가하고 작동횟수는 감소한다[10].

PWPFM에서 기준입력신호가 필터에 유입됨과 동시에 필터 출력이 증가하기 시작하며, 필터 출력이 U_{on} 과 같아질 때 슈미트 트리거는 on 펄스를 생성한다. 이후 피드백과 함께 오차가 발생하기 때문에 필터 출력은 감소하며 U_{off} 와 같아질 때 까지 슈미트 트리거는 펄스 신호를 유지한다. 본 연구에서는 PI 제어기에 의한 연속적 제어와 유사한 응답을 얻기 위해 위에서 언급한 다섯 개의 파라미터를 각각 $K_m = 1$, $T_m = 0.1$, $U_{on} = 200$, $U_{off} = 50$, $U = 35000$ 으로 설정하였다.

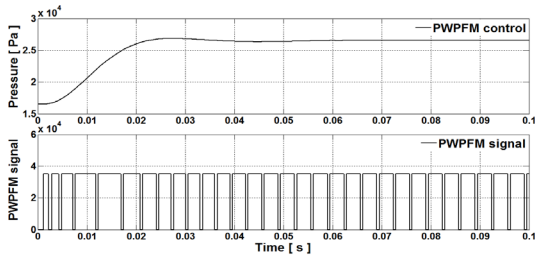


Fig. 8 PWPFM 제어기를 이용한 압력 시뮬레이션

4.4 제어기별 성능비교

PI제어, PWM 제어, PWPFM제어 시뮬레이션 결과 적절한 파라미터의 설정에 따라 유사한 응답을 얻을 수 있다(Fig. 11). 제어 측면의 효율성을 검토하기 위해 추종성능과 사용된 제어 에너지의 합으로 표현되는 성능지수(performance index) J 를 다음과 같이 정의한다[11].

$$J = \int \left\{ \alpha \left(\frac{p_{ref} - p}{\max(p_{ref} - p)} \right)^2 + \left(\frac{T_{on}}{T_{total}} \right)^2 \right\} dt \quad (6)$$

시스템의 제어입력인 A_t 는 개폐 상태만을 고

려하였기 때문에 성능지수는 추종 성능과 구동기의 작동시간인 T_{on} 의 합수로 표현할 수 있다. 추종성능과 작동 시간은 최대값으로 정규화 하였으며 추종성능의 영향을 고려하여 가중치 (weighting factor) α 를 적용하였다. 제어 형태에 따른 제어입력 T_{on} 에 대해 다음의 결과를 얻을 수 있다.

Table. 1 제어기에 따른 시스템 특성

Controller	A_t	T_{total}	T_{on}	N_{on}
PI	연속	0.1s	0.1s	-
PWM	on-off	0.1s	0.8360s	50
PWPFM	on-off	0.1s	0.8325s	30

Table. 2 제어기의 작동시간에 대한 성능지수

Controller	$J (\alpha = 1)$
PI	0.7764
PWM	0.7779
PWPFM	0.7770

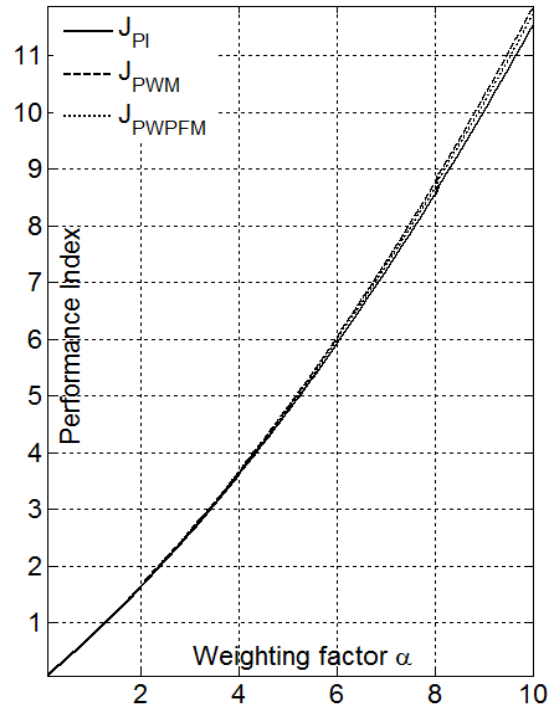


Fig. 9 작동시간에 대한 제어기별 성능지수

작동시간에 대한 성능지수는 약 1%미만의 차이밖에 나지 않기 때문에 성능지수만을 고려하여 효율성을 논의하기 힘들다. 한편 on-off제어기에서 작동횟수(N_{on})에 대한 성능지수를 (7)식으로 정의할 수 있으며 구동기 작동 횟수 N_{on} 에 대해 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$J = \int \left\{ \alpha \left(\frac{p_{ref} - p}{\max(p_{ref} - p)} \right)^2 + \left(\frac{N_{on}}{N_{max}} \right)^2 \right\} dt \quad (7)$$

Table. 3 제어기의 작동횟수에 대한 성능지수

Controller	$J (\alpha = 1)$
PWM	1.0502
PWPFM	0.6486

고전 비례-적분 제어기에 의한 연속적 제어기법이 효율은 가장 뛰어나다. 그러나 On-Off 제어기법만을 논의한다면 작동시간(T_{on})과 작동횟수(N_{on}) 및 성능지수 J 를 종합적으로 고려했을 때 PWPFM이 PWM보다 효율적임을 알 수 있다. 때문에 인공위성과 같이 에너지 소모가 수명과 직접적으로 관계된 시스템의 제어기로는 PWPFM이 적합하다. 그러나 PWPFM을 구현하기 위해서는 여러 설계 변수의 최적화가 요구되므로 단시간 제어를 위해서는 구현이 비교적 간단한 PWM이 더욱 효율적일 수도 있기 때문에 상황에 맞는 제어기설계가 필요하다.

본 논문에서는 앞서 언급한 경우를 제외한, 오직 작동시간과 작동횟수에 대한 평가 함수만을 고려하여 다음의 결과를 도출하였다.

$$J_{PWM} > J_{PWPFM} > J_{PI}, \quad \forall \alpha \in [0, 10]$$

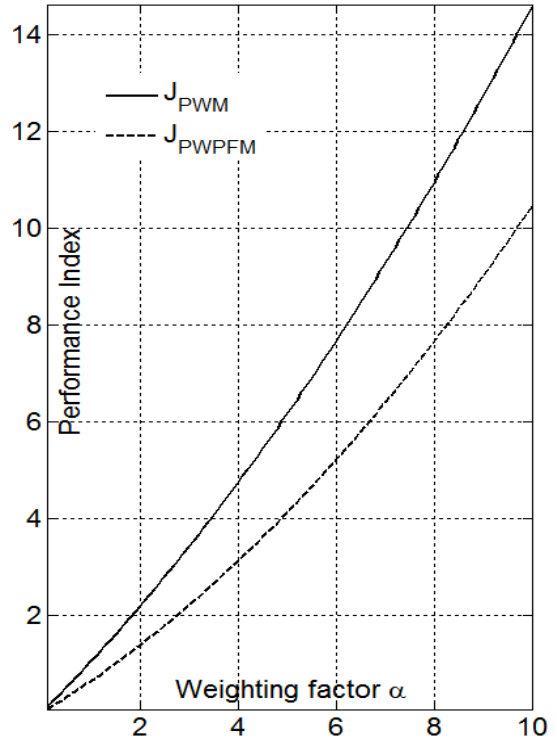


Fig. 10 작동횟수에 대한 제어기별 성능지수

5. 결 론

가변추력 고체추진기관의 연소기내 압력을 제어하기 위해 본 논문에서는 고전적인 제어기법

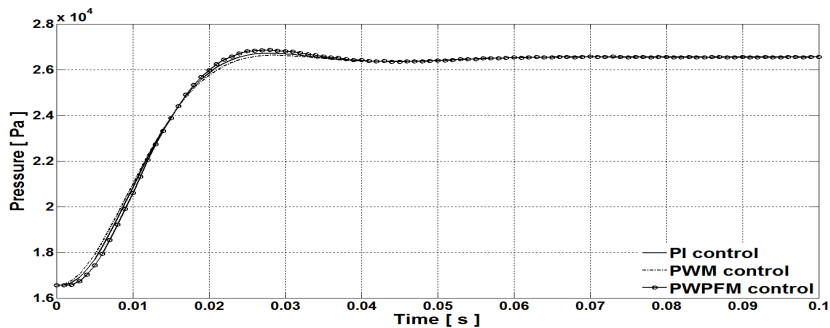


Fig. 11 연속적 비례적분 제어기법과 on-off 제어기법의 응답 비교

인 비례-적분(PI)제어기를 이용한 연속적 제어기 법과 PWM 및 PWPFM을 활용한 on-off 제어기 법을 적용하여 성능을 비교하였다.

PWM 제어기는 3개의 설계 파라미터, PWPFM은 5개의 설계 파라미터를 갖기 때문에 PWPFM 제어기가 효율성 측면에서 상대적으로 우수하다. 그러나 파라미터의 최적화에는 어려움이 존재한다. 또한 PWM와 PWPFM은 뱅-뱅 트리거, 슈미트트리거와 같은 비선형 특성이 존재하기 때문에 PI 제어 시뮬레이션에서 찾아볼 수 없는 limit cycle 현상이 발생하며 describing function을 이용한 안정도 해석이 요구된다. 추후 연구의 연속으로 과대편차 조건에서의 해석 및 제어기 설계, 설계 변수에 대한 최적화, 비선형 특성의 해석 등을 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 (주)한화에서 지원한 “추력 발생장치 유동해석 및 제어시스템 연구”를 통하여 수행된 결과임.

참 고 문 헌

1. 김중근, 박종호, “핀틀 형상이 노즐 성능에 미치는 영향에 관한 연구” 한국항공우주학회 논문집, 제36권, 제8호, 2008. pp.392-398
2. 김영석, 차지형, 고상호, 김대승, “선형화기법을 이용한 가변추력 고체추진 기관의 압력 및 추력제어”, 한국추진공학회지, 제 15권, 제4호, 2011, pp.18-25
3. 이원석, 방효충, 은연주, 이호성, 이도윤, 박종승, “적응제어 기법을 이용한 가변추력 고체추진기관 압력제어,” 한국항공우주학회 2010년도 추계학술발표회 논문집, Vol. 1, 2010, pp.686-689
4. 이호성, 이도윤, “가변추력 고체추진기관의 압력제어 기법연구,” 제15차 유도무기 학술대회, ARC025-0910-015, 2009, pp.71-74
5. Marian K. Kazimierczuk, "Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters : 1st Edition", WILEY, 2008
6. N. Ma , G. Song, "Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation", Institute of Physics Publishing, 2003
7. G. Arantes Jr., Luiz S. Martins-Filho, Adrielle C. Santana, "Optimal on-off attitude control for the Brazilian multimission platform Satellite", Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2009, p.17
8. T. Dagfinn Krovel, "Optimal tuning of PWPFM modulator for attitude control", Department of Engineering Cybernetics Norwegian University of Science and Technology, Master Thesis, 2005
9. Marcel J. Sidi, "Spacecraft dynamics and control : A practical engineering approach", Cambridge University press, 1997
10. Nicholas V. Buck, "Minimum vibration maneuvers using input shaping and Pulse-Width, Pulse-Frequency modulated thruster control", Naval Post Graduated School, 1996
11. E. Bryson Jr, "Dynamic optimization", Addison Wesley, 1999