

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(8), 722-730(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.8.722

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다축 핀틀 추력기에 적용을 위한 구동장치 연동 메커니즘 방안연구

이재청*, 허환일**, 이호성***

Study on Coupling Drive Mechanism
for Multi-Axis Pintle Thrusters

Jaechong Lee*, Hwanil Huh** and Hosung Lee***

Dept. of Aerospace Engineering, Graduate School, Chungnam National University*

Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National University**

Agency of Defence Development***

ABSTRACT

Drive mechanism of multi-axis pintle thrusters for DCS(Divert Control System) was designed to meet the needs of minimizing the number of driving motors. In this study, preliminary model was designed in order to implement appropriate pressure control and thrust distribution. Based on the preliminary model study, the drive mechanism for DCS multi-axis pintle thrusters using piston was designed and evaluated by using AMESim software. Results show that three driving motors are enough to actuate four pintle thrusters.

초 록

궤도천이용 추력기 시스템에 활용되는 다축 핀틀 추력기 시스템의 구동장치 개수 감소에 대한 필요성으로부터 구동장치 연동 메커니즘을 고안하였다. 본 연구에서는 궤도천이용 추력기 시스템의 주요 임무인 압력제어와 추력분배가 가능한 시스템 설계를 위해 구동장치 개수 감소 가능성 확인 모델을 설계하였다. 가능성 확인 모델을 근거로 피스톤을 적용한 연동 메커니즘을 고안하였고, 수치적 근거와 더불어 AMESim을 활용한 시뮬레이션을 통해 3개의 구동장치로 4개의 핀틀 추력기가 구동 가능하다는 결과를 얻었다.

Key Words : Multi-axis Pintle Thrusters(다축 핀틀 추력기), Drive Mechanism(구동 메커니즘), Divert Control System(궤도천이용 추력기 시스템), AMESim(아메심)

1. 서 론

요격용 직격 비행체의 종말단계에 활용되는 궤도천이 및 자세제어 추력기 시스템(DACS)은 목표물을 정확하게 타격하기 위한 정밀 기동을

필요로 한다. DACS에 활용되는 다축 핀틀 추력기 시스템은 다수의 핀틀 추력기가 장착되어 비행체의 역할 수행을 가능하게 한다. 미국에서는 미사일 방어체계 구축을 위해 미사일에 적용해 실험에 성공한 사례가 있으며, 지속적으로 정확

† Received : April 14, 2015 Revised : June 23, 2015 Accepted : July 21, 2015

** Corresponding author, E-mail : hwanil@cnu.ac.kr

성과 성능을 향상하기 위해 연구 및 개발 중에 있다[1,2].

고체추진기관을 기반으로 하는 핀틀 추력기는 고체로켓의 단점인 추력 제어의 어려움을 극복할 수 있는 기술로, 노즐목 면적을 조절하는 핀틀 구조물이 내부에서 전진 혹은 후진 구동을 수행한다. 핀틀의 이동에 따라 달라지는 노즐목 면적의 변화로 추력과 압력의 성능이 달라지기 때문에 복잡한 장치가 필요하지 않으며, 즉각적으로 추력을 조절할 수 있는 장점을 갖고 있다.

핀틀 추력기는 핀틀 구조물의 형상과 노즐의 형상 조합에 따라 다른 성능을 나타내기 때문에 기술을 적용하기에는 많은 기초 연구가 필요하다. 국내에서는 핀틀을 적용한 가변추진 시스템의 성능을 예측하기 위한 선형 근사화 연구를 기반으로 핀틀의 형상, 핀틀의 위치 및 노즐의 형상에 대한 연구가 진행됐다[3~5]. 핀틀이 노즐목을 기준으로 위치해 있는 지점에 따라 달라지는 유동의 특성은 추력기의 압력과 추력에 영향을 미치기에 유동의 특성을 자세하게 파악하기 위한 전산수치해석과 실험을 수행했다[6~8]. 이후에는 고정된 핀틀의 위치가 아닌 비정상상태의 특성연구 및 핀틀을 구동하는 구동력을 줄이기 위한 연구 등이 활발하게 진행되고 있다[9~13].

위에서 언급한 국내 연구의 대부분은 연소실 혹은 챔버에 단일 핀틀 노즐을 장착한 시스템 연구이다. 하지만, 비행체의 특정 역할을 수행하기 위한 핀틀 추력기는 연소실에 장착된 핀틀 노즐의 개수에 따라 달라진다. 연소실에 공유하는 핀틀 노즐의 수가 1개 일 경우, 핀틀의 구동은 단일 챔버에 영향을 주어 추력과 압력에 영향을 준다. 단일 핀틀 노즐과는 다르게 다수의 핀틀 노즐이 동일한 평면상에 장착되면, 각각 핀틀의 위치가 각각 추력기의 추력에 영향을 주고, 모든 핀틀 추력기의 노즐목 면적의 합으로 연소실의 압력이 결정된다. 미국의 Aerojet社의 사례로, 연소실에 단일 핀틀 노즐을 장착한 EI HAWK 미사일은 운용고도와 사거리에 우위를 가졌고, 다수의 핀틀 노즐을 장착한 다축 핀틀 추력기 시스템은 SM-3의 DACS에 활용되어 고고도 요격을 위한 비행체의 궤도천이와 자세제어에 활용 됐다[1].

국내에서는 다축 핀틀추력기 시스템의 특성을 파악하기 위해 국방과학연구소에서 지상 연소시험을 수행했다. 내탄도 성능 해석과 비교하여 연소 시간에 따른 압력의 변화가 다름을 제작 금속의 열팽창으로 판단했으며, 발생하는 압력을 제어하지 않고 원하는 압력이 발생하는 핀틀의 위치를 예측하고 해당 위치로 핀틀이 움직이는 피

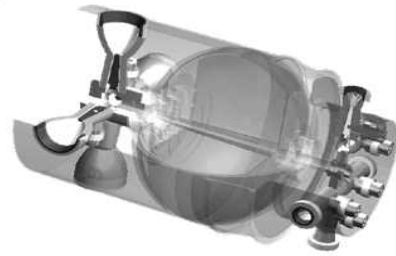


Fig. 1. Configuration of DACS

드백 제어를 수행한 연소 실험에서는 고체추진기관 내부 압력의 비정상 특성을 분석했다[14,15].

DACS는 DCS(Divert Control System)와 ACS(Attitude Control System)가 결합된 시스템을 의미하는 것으로 추진체의 종류, 연소관의 공유 여부, 핀틀을 구동하는 방식 등에 의해 여러형태로 나뉘게 된다[16]. 본 연구에서는 고체 추진체를 사용하고 연소관 외부에 핀틀형 추력기 DCS 4개와 ACS 6개가 장착된 일체형 구조의 DACS 모델을 기준으로 선정했으며, 일반적인 DACS의 형태 및 구조는 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

본 논문에서는 연소관을 공유하는 4개의 핀틀 노즐이 장착된 궤도천이용 추력기 시스템(이하, DCS)에 대한 연구를 진행한다. 기존의 DCS는 4개의 핀틀 추력기를 제어하기 위해 4개의 구동장치가 마련돼 있다. 본 연구에서는 4개의 구동장치를 3개로 줄이며, 기존의 장치와 동일한 성능을 갖는 연동 메커니즘을 고안하는 목표를 갖고 있다. DCS의 구동 방식과 정보는 미사일 등 국가 안보에 직접적으로 관련된 기술이기 때문에 정보의 습득이 매우 제한적이다. 이에 충남대학교에서는 특허 분석을 통한 구동 메커니즘을 분석하고, 구동장치의 수를 줄이기 위해 극복해야 하는 문제점을 제시했다[17]. 제시된 문제점을 극복하기 위한 구동장치 최소화 방안 연구를 통해 시스템의 변수를 결정했다. 시스템의 특성을 고려한 예시 모델을 설계했으며 그 모델의 구현가능성을 파악했다. 최종 모델의 선정 과정을 거쳐 수치적 결과와 더불어 시뮬레이션을 통해 설계한 연동 메커니즘의 구현가능성을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 구동장치 최소화 방안 연구

2.1.1 구동장치 최소화 조건

본 연구의 목적은 DCS 구동장치 수의 최소화이다. 이는 기존 DCS에서 각각의 구동기가 하나

의 핀틀 추력기를 구동하던 방식에서 벗어나 구동장치의 수를 줄이면서도 기존 방식의 추력 성능을 구현할 수 있는 구동 메커니즘에 대한 아이디어를 찾아내는 것이다. 이에 고체추진제를 사용하고 다수의 핀틀 추력기가 하나의 시스템으로 결합되어 복잡한 추력 성능 관계를 가지는 DACS에 대해 선형화 및 일부 변수에 대한 가정을 함으로써 시스템을 단순화할 필요성이 있다.

DCS의 추력 성능은 Fig. 2에서 실선으로 표시된 마름모 면적에 해당한다. 압력 유지를 위한 총 노즐목 면적이 계산되면 DCS의 성능에서 가능한 최대 추력을 계산해 낼 수 있다. 최대 추력은 마름모 도형의 꼭지점에 해당하는 지점으로 3개의 핀틀 추력기를 닫아 추력을 발생시키지 않고 1개의 추력기로 모든 유량을 집중시키는 상황에 해당한다. 또한 DCS는 총 노즐목 면적을 나누어 가지는 개념으로 제어가 되기 때문에 노즐목 면적과 추력의 관계가 비례함으로부터 DCS 총 추력의 합은 4개 추력기로부터 발생하는 추력의 합과 같다고 할 수 있다. 때문에 DCS의 최대 추력이 계산되면 임의 추력 벡터에 대한 4개의 추력기의 추력 값을 역으로 계산해 낼 수 있다.

2.1.2 가정사항 및 수치 모델의 정의

DCS 구동장치 최소화 연구에 앞서 몇 가지의 가정을 통하여 모델을 단순화하고 기본 수치 모델에 대하여 정의하였다.

모델의 단순화를 위한 가정은 다음과 같다.

- DCS에서 추력기를 통한 질량유량과 추력은 노즐목 면적의 함수이다.
- ACS는 on/off 방식인 펄스 모드로 작동하고 압력제어는 DCS를 통해서만 수행한다.
- DCS의 총 노즐목 면적이 변하지 않는다면 연소실 압력은 일정하게 유지된다.
- 핀틀 구동에 의한 내부 유동장의 비정상 상태 특성은 무시한다.
- 연소에 의한 연소관 내부의 자유체적(Free volume)의 증가는 무시한다.
- 핀틀 스트로크(구동 거리)는 형상적으로 노즐목 면적에 영향을 주는 구간으로 정의한다.
- 핀틀 추력기의 성능은 노즐목 면적의 함수이다. 실제 고려되는 압력 추력 손실, 박리, 충격과 등에 의한 추력 성능 변화는 고려하지 않는다.

DCS의 추력은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각 추력기의 추력 합으로 추력 벡터가 형성된다. 그러나 DCS 추력이 항상 (+)축 방향으로만 생성되는 것이 아니고 4개의 추력기에서 각각의 추력이

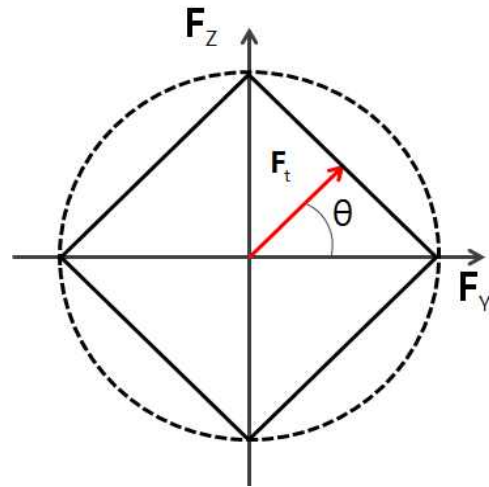


Fig. 2. Required thrust of DCS

발생되기도 한다. 특히 4개의 추력기에서 모두 추력을 발생시켜야 하는 상황에서 지정된 방향으로의 추력 벡터를 효과적으로 발생시키기 위한 면적 분배 기법도 중요한 요소이다. 기본적으로 추력 벡터의 명령이 변화되었을 때 기존에 위치해 있던 핀틀의 위치로부터 최소한의 스트로크와 추력 벡터를 형성하는 것이 가장 효과적이라 할 수 있다.

기본 수치 모델을 정의하면 다음과 같은 조건을 제시할 수 있다.

$$A_t = f(\text{stroke}), F_i = f(A_t) \quad (1)$$

$$CMDA_t = \sum A_{ti}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$F_y = F_t \cos\theta = F_{(y^+)} - F_{(y^-)} \quad (3)$$

$$F_z = F_t \sin\theta = F_{(z^+)} - F_{(z^-)} \quad (4)$$

$$F_t = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \quad (5)$$

식 (1)과 같이 목면적(A_t)은 핀틀 스트로크(stroke)의 함수이며, 추력(F_i)은 목면적(A_t)의 함수로 나타낼 수 있다. 핀틀 구동에 따라 핀틀의 위치가 달라지며, 핀틀 추력기의 노즐목 면적이 달라지는 과정을 의미한다. 총 4개로 구성된 각 추력기의 노즐목 면적의 합은 식 (2)로 표현되며, 항상 명령된 목면적($CMDA_t$)과 같아야 한다. 각각의 목면적을 나타내는 숫자는 좌표계를 적용할 때 아래첨자 1은 y+, 2는 y-, 3은 z+, 4는 z-를 의미한다. 추력의 축 성분은 식 (3), (4)와 같이 (+), (-) 방향의 성분의 차로 결정되며, 4개 추력기에서 발생하는 추력의 크기를 식 (5)로 표현할 수 있다.

추력은 목면적에 직접적으로 관련되어 있으며, 노즐목 면적은 핀틀 스트로크의 함수라는 것을 식 (1)에서 확인할 수 있다. 함수의 형태는 핀틀의 형상과 핀틀 팁(Tip)에 따라 다양한 그래프로 나타난다[6]. 이에 본 연구에서는 성능변수의 확인보다 구동 메커니즘의 구현가능성 확인이라는 목적을 달성하기 위해 선형 가정을 활용한다. 선형 가정은 다음의 내용을 포함한다.

- 핀틀 스트로크와 목면적의 함수는 선형이다.
- 노즐목 면적과 추력의 관계는 선형이다.

위의 선형 조건을 가정으로 설정하여 각각 추력기의 스트로크를 계산함으로써 추력 분포 및 전체 노즐목 면적을 수식적으로 표현할 수 있다.

$$A_{t1} = A(S_n) = C_1(S_n) + C_2 \quad (6)$$

$$A_{t2} = A(S_n) = C_1(S_n) + C_2 \quad (7)$$

$$A_{t3} = A(S_n) = C_1(S_n) + C_2 \quad (8)$$

$$A_{t4} = A(S_n) = C_1(S_n) + C_2 \quad (9)$$

$$A_{t1} = C_1(S_n) + C_2 = F_1 / (C_F P_c) \quad (10)$$

식 (6)~(9)는 각 노즐목 면적을 선형함수로 표현한 것이며, 노즐목 면적으로 추력기의 추력을 식 (10)을 통해 계산할 수 있다. S_n 은 임의의 틀 스트로크 값이고, C_1 과 C_2 는 노즐목 면적을 나타내는 상수이다. 추력식은 추력 F_1 , 추력계수 C_F , 연소실의 압력 P_c 로 구성된다.

2.2 구동장치 감소 가능성 확인 모델

구동 메커니즘 아이디어를 구상하는 과정에서 시행착오를 통해 4개의 아이디어를 구상해 보았다. 각각의 아이디어가 완벽한 구동 메커니즘을 이루고 있지 않으며, 사실상 불가능한 내용을 포함하고 있다. 하지만 실제 구현할 수 없다 하더라도 구동 메커니즘에 적용되는 원리와 문제점의 보완책으로 최종 구동 메커니즘 아이디어 선정에 활용될 기반이 된다. 각각의 구동 메커니즘 아이디어는 서로 다른 핵심 구조물과 원리를 갖고 있으며, 주요 구조물로는 유압장치가 포함된 제어 구조물, 회전 원판, 캠 구조물, 스프링과 링크 등이 있다. 주요 구조물은 추력분배를 위해 2개의 구동장치가 필요하며 1개의 구동장치로 압력제어를 수행한다.

2.2.1 비압축성유체를 적용한 구동 메커니즘

비압축성유체를 활용한 구동 메커니즘 아이디어는 피스톤 방식의 유압장치에 4개의 핀틀 구조

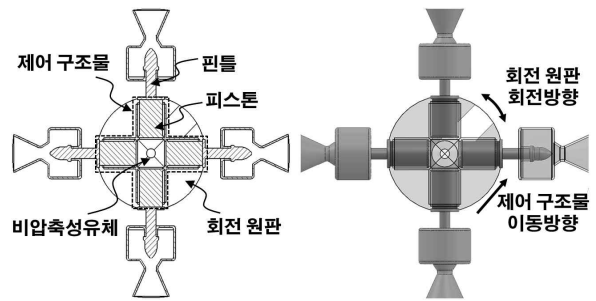


Fig. 3. Drive mechanism using incompressible fluid[18]

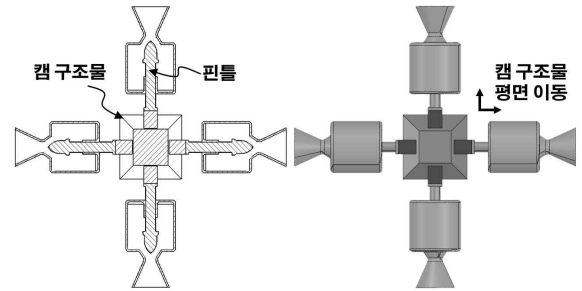


Fig. 4. Drive mechanism using cam structure[18]

물이 접해있으므로 유압이 공급되면 각 핀틀 방향의 피스톤이 밀려나 전체 노즐목 면적을 제어하는 원리를 갖고 있다. Fig. 3의 중앙에 존재하는 회전 원판은 추력분배를 위한 구조물로서 제어 구조물이 이차원 평면 구동을 가능하도록 한다. 이론적으로 추력분배와 압력제어 조건을 만족하지만 피스톤 및 유압시스템을 실제 제어하는 과정에서 생기는 어려움을 고려해 볼 때, 구동장치 감소의 결과를 만족할 수 없을 것으로 판단하였다.

2.2.2 캠을 적용한 구동 메커니즘

비압축성유체를 활용한 구동 메커니즘의 난점인 유압시스템 제어를 보완하여 캠 구조물을 적용한 구동 메커니즘을 고려하였다. 구조적으로 일정한 크기를 갖는 Fig. 4의 캠 구조물은 구동장치에 의해 상승 혹은 하강 구동으로 전체 노즐목 면적을 제어할 수 있다. 하지만, 추력분배의 관점에서는 이차원 평면을 이동하는데 구조적, 기하학적 한계가 있기 때문에, 성능저하가 있음을 파악하였다.

2.2.3 기어 및 기계 구조물을 적용한 구동 메커니즘

제어 구조물이라는 이차원 평면상을 움직이는데 한계점을 갖고 있는 구동 메커니즘 아이디어로부터 Fig. 5와 같은 기어 및 기계 구조물을 이용한 추력분배 방법을 고안하였다. 기어와 기계

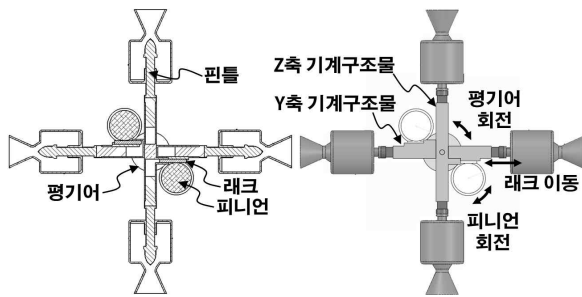


Fig. 5. Drive mechanism using gear

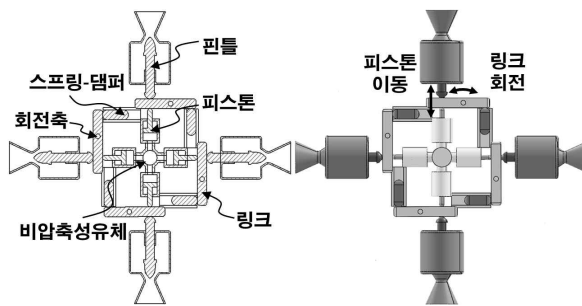


Fig. 6. Drive mechanism using spring-damper

구조물은 동력전달의 용이성을 갖고 있으며, 시스템 부피의 최소화에 기여할 수 있다[19]. 하지만, 구동장치의 개수는 3개이고, 구동 대상체가 4개인 시스템을 고려해 볼 때, 구조적으로 체결되어 기어의 기어비로는 구현할 수 없는 영역이 발생한다. 구동영역의 제한이라는 단점은 DCS의 필요 추력분배를 위한 요구조건을 만족하지 못한다.

2.2.4 스프링 댐퍼를 적용한 구동 메커니즘

구조물 간의 체결 혹은 맞물릴 수밖에 없는 기계적 연동 메커니즘의 아이디어로부터 국한된 구동 영역을 넓히기 위한 방법으로 특정 방향 이외의 핀틀 구조물의 이동을 제한해야 한다는 결론을 얻었다. 이로부터 Fig. 6과 같은 스프링 댐퍼 시스템을 적용하여 특정 방향으로 일정한 위치를 갖게하고 구동장치 구동으로 스프링의 힘을 이기는 구동 메커니즘 아이디어를 고안하였다. 이 구동 메커니즘의 현실 가능성을 고려하기 위해 자문을 얻은 결과, 스프링의 진동문제와 더불어 유압 시스템과의 허용 하중한계 차이가 시스템을 불안정하게 한다는 결론을 얻었다.

구동장치 개수 감소에 따른 구동 장치 배치 및 구성 가능성을 기계, 유압, 구조적 링크를 활용하여 설계하였다. 예시 모델의 설계로부터 구조적 제약조건으로 구동할 수 있는 핀틀 구조물의 구동영역이 제한됨을 파악하였고, 이를 해결

하기 위해 구동장치에 핀틀 구조물을 직접 연결하는 형태가 아닌 구동장치와 핀틀 구조물 중간에 피스톤과 같은 매개 구조물을 구동하여 제한된 구동 범위를 넓혀야 한다는 결론을 내렸다.

2.3 구동장치 연동 메커니즘을 적용한 최종 모델

2.3.1 구성 및 원리

구동장치 연동 메커니즘을 적용한 최종모델은 Fig. 7의 구조를 갖고 있으며, 주요 구성으로는 핀틀 추력기, 피스톤, 유압 구동장치, 추력분배를 위한 2개의 구동장치를 갖고 있다.

총 4개의 핀틀 추력기로 구성되어 있으며, 각각 핀틀 구조물을 제어하여 노즐목 면적 제어를 수행한다. 핀틀 구조물은 피스톤의 변위에 따라 종속되어 구동하는 특징을 갖고 있다. 즉, 구동장치 최소화 가능성 확인단계에서 파악한 매개 구조물을 피스톤으로 활용한다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 피스톤은 상단과 하단에 다른 유체가 존재하며, 하단에는 비압축성유체가 다른 4개의 피

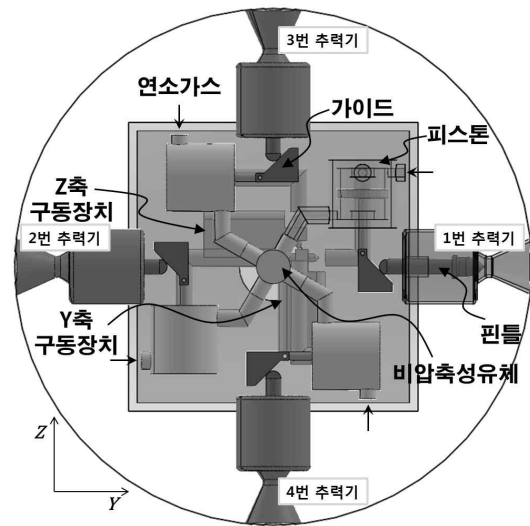


Fig. 7. Drive mechanism using piston

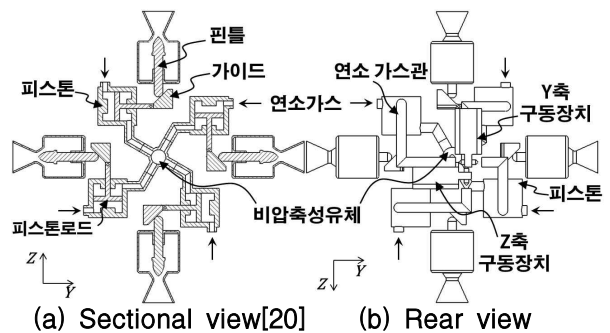


Fig. 8. Drawings of drive mechanism

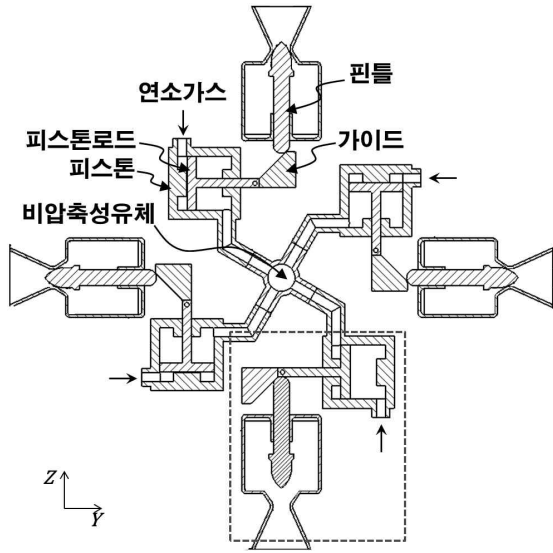


Fig. 9. Thrust distribution

스톤과 연결되어 있다. 이는 4개의 피스톤이 연동되어 있음을 의미하며, 피스톤 1개의 변위가 비압축성유체를 통해 다른 피스톤에 영향을 미칠 수 있다. 상단에는 연소가스가 흐르는데, 연소가스는 피스톤 상단을 거쳐 관을 따라 구동장치에 연결돼있다. 연소가스가 흐르는 관과 구동장치의 배치는 배면도를 통해 확인할 수 있다.

구동장치는 연소가스의 유량을 조절하는 방법으로 피스톤 상단에 작용하는 압력을 변경한다. 구동장치 구동시, 4개의 피스톤 상단 압력에 차이가 발생하고 하단에는 비압축성유체로 연결돼 있다. 상대적으로 높은 피스톤 상단 압력을 갖는 피스톤은 비압축성유체를 밀면서, 하단방향으로 움직여 연결된 핀틀이 목 면적이 커지는 방향으로 이동한다. 추력분배를 위한 2개의 구동장치는 동일 축방향간의 연동되어 각각 Y축 방향, Z축 방향에 배치된 2개의 핀틀 추력기에 영향을 미친다. 나머지 1개의 구동장치는 비압축성유체의 양을 조절하여 전체 노즐목 면적을 조절한다.

비압축성유체를 활용한 연동과 핀틀의 이동은 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다. Z축 구동장치 1개를 구동하여 전체 노즐목 면적을 유지한 상태에서 1개의 추력기를 최대로 열고 나머지 추력기는 모두 닫힌 상태를 구현했다. 우선, 압력제어를 위한 전체 노즐목 면적의 크기를 일정하게 유지하기 위해 비압축성유체의 양을 고정한다. Fig. 9를 구현하려면 전체 양의 3/4을 공급해야한다. 추력분배를 위한 구동장치를 구동하여 피스톤 상단의 압력을 상승시키고(4번 피스톤), 비압축성유체가 나머지 피스톤으로 이동한다. 이때, 비압축성유체가 나머지 피스톤 방향으로 균등하게 분배되려면, 피스

톤 상단에 동일한 압력이 유지돼야한다.

2.3.2 메커니즘 구동 및 수치적 모델링

구동장치를 구동하는 조합에 따라 DCS의 요구 추력분배 및 압력제어 역할을 수행할 수 있다. 압력제어를 위해 유압 구동장치를 구동하고, 추력분배를 위한 2개의 구동장치는 개별로 구동하는 경우와 동시에 구동하는 경우로 나눌 수 있다.

먼저, 구동장치 1개를 활용한 메커니즘의 수치적 모델이다. a는 구동장치의 구동으로 인해 발생하는 스트로크 변위를 의미하며, a만큼 1개의 구동장치를 구동하였을 때, 비압축성유체에 의해 나머지 3개의 피스톤에 균등 분배되는 것을 목적으로 나타내면 아래 식 (11)~(14)와 같다.

$$A_{t1} = C_1(S_n - a) + C_2 \quad (11)$$

$$A_{t2} = C_1(S_n + \frac{a}{3}) + C_2 \quad (12)$$

$$A_{t3} = C_1(S_n + \frac{a}{3}) + C_2 \quad (13)$$

$$A_{t4} = C_1(S_n + \frac{a}{3}) + C_2 \quad (14)$$

전체 노즐목 면적의 합을 통해 압력분배에 영향을 주는 변수를 확인할 수 있으며, 축방향의 노즐목 면적의 차를 통해 발생하는 추력에 영향을 주는 변수를 확인할 수 있다.

$$\Sigma A_t = A_{t1} + A_{t2} + A_{t3} + A_{t4} \quad (15)$$

$$= A(S_n - a) + A(S_n + \frac{a}{3}) + A(S_n + \frac{a}{3}) + A(S_n + \frac{a}{3}) \\ = 4\{C_1(S_n) + C_2\}$$

$$A_{t1} - A_{t2} = C_1(\frac{-4a}{3}) = F_y / (C_F P_c) \quad (16)$$

식 (15)는 Y축 방향을 담당하는 구동장치를 구동하더라도 전체 노즐 목면적은 초기 스트로크 (S_n)만의 함수이며, 식 (16)은 Y축 방향의 추력이 a만의 함수로 분배가 가능한 것을 의미한다.

이와 동일하게 추력분배를 위한 구동장치 2개를 활용한 모델은 Y축 구동장치의 변수 a와 Z축 구동장치의 변수 b의 조합으로 표현이 가능하다. 그 결과 추력분배는 식(17), (18)과 같다.

$$A_{t1} - A_{t2} = C_1\left(-a - \frac{(a+b)}{2}\right) = F_y / (C_F P_c) \quad (17)$$

$$A_{t3} - A_{t4} = C_1\left(-b - \frac{(a+b)}{2}\right) = F_z / (C_F P_c) \quad (18)$$

다축 핀틀 추력기의 연소실 압력은 전체 노즐

목 면적에 의해 결정되기 때문에 요구 추력발생을 위한 압력제어가 우선적으로 수행되어야한다. 본 메커니즘에서는 비압축성유체의 양으로 전체 노즐목 면적을 일정하게 고정할 수 있으며, 움직일 수 있는 목면적의 한계 내에서 추력분배를 수행한다. 이에 실제 핀틀 추력기에서 스트로크에 따라 확장비가 달라지더라도 압력제어와 추력분배가 독립적으로 이루어 질 수 있다.

고정된 전체 노즐목 면적은 핀틀이 움직일 수 있는 스트로크의 한계가 정해져 있음을 의미한다. a와 b는 초기 비압축성유체에 의해 결정된 S_n 에 따라 한계가 결정된다. 피스톤 상단의 압력에 의해 해당 피스톤에 존재한 비압축성유체가 다른 피스톤으로 밀려나게 되는 원리로부터 a와 b는 S_n 보다 큰 값을 가질 수 없다. 특수한 예로 전체 노즐의 목 면적을 최대로 열거나, 모두 닫은 상황을 고려해 볼 때, 이러한 상황에서는 추력분배를 고려하지 않고 모든 추력기의 목 면적을 일정하게 유지함과 더불어 초기에 결정되는 비압축성유체의 양에 의해 핀틀이 움직일 수 있는 공간이 존재하지 않는다.

수치적 모델링을 통해 추력분배를 위한 구동장치는 압력제어에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있고, 각 방향의 추력이 식 (17), (18)에서와 같이 a와 b의 함수이기에 추력분배 또한 2개의 추력분배를 위한 구동장치 조합으로 가능하다. 이로써 4개의 구동대상체인 핀틀 추력기가 3개의 구동장치로 구현될 수 있다는 결론을 얻었다.

2.3.3 연동 메커니즘 시뮬레이션

수치적 모델링과 더불어 추력분배를 위한 구동장치의 구동에 따른 피스톤 변화에 대한 시뮬레이션을 수행했다. 이는 가장 핵심적인 원리의 가능성을 판단하는 것으로 구동장치 구동에 따른 피스톤의 이동을 우선적으로 파악하기 위해 1축 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 S/W는 상용 소프트웨어인 AMESim[21]을 활용하였다.

1축 구동장치 구동에 따른 피스톤의 이동이 가능한지에 대한 결과를 Fig. 10을 통해 확인할 수 있다. 연소가스가 피스톤 상단을 거쳐 구동장치로 흐르는 과정을 모델링했다. 시스템은 공급압력과 가변 오리피스를 사용하였으며, 오리피스 전단에 피스톤 상단이 연결되어 있다. 가변 오리피스는 목 면적을 제어하여 피스톤 상단의 압력을 조절하는 구동장치의 역할을 수행한다. 피스톤 하단에 비압축성유체 역할과 동일한 일정 압력을 공급해주었다. 피스톤 상단 압력의 변화를

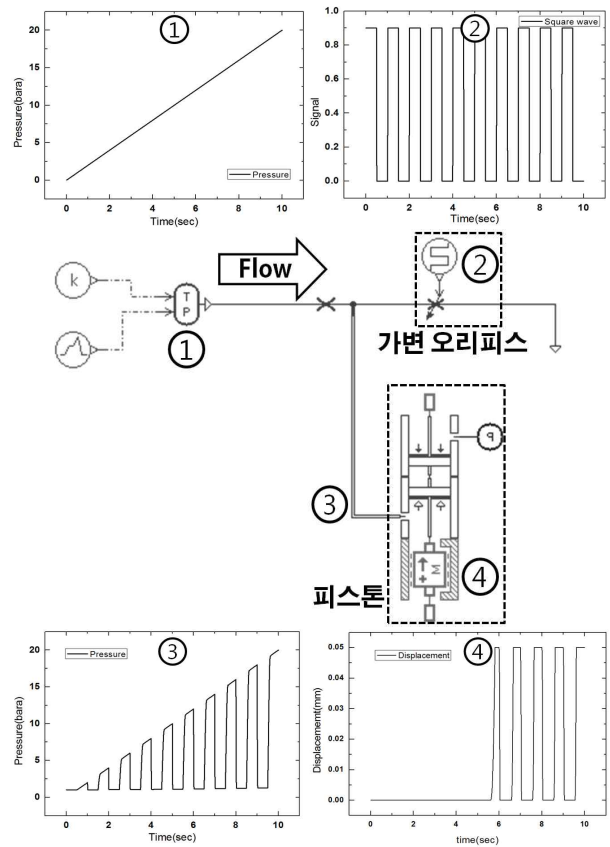


Fig. 10. One-axis system simulation

모사하기 위해 공급압력을 점진적으로 증가(①)했고, 가변 오리피스의 목 면적 변화를 지속적으로 명령(②)했다. 그 결과, 피스톤 상단의 압력이 점진적으로 증가함과 함께 목 면적 변화에 반응(③)했다. 피스톤 하단에 작용하는 비압축성유체의 초기 압력을 상단에 비해 높게 설정하여, 상단압력이 비압축성유체보다 높은 압력조건이 형성될 때 피스톤이 이동(④)하는 것을 확인했다.

1축 시스템의 구현이 가능하다는 결론으로, 본 메커니즘의 핵심인 비압축성유체를 포함한 시스템을 Fig. 11과 같이 구현하였다. 4개의 피스톤의 하단을 공유하는 비압축성유체가 중앙에 존재한다. 1축 시뮬레이션을 수행한 모델 4개를 기본 모델로 활용하여 비압축성유체를 공유하도록 모델링했다.

2.3.1절에서 설명한 비압축성유체의 이동과 피스톤의 움직임은 피스톤 상단의 압력에 의해 달라진다. 구동장치에 영향을 받지 않는 피스톤의 상단 압력은 일정하게 유지되며, 이로부터 상대적으로 높은 압력에서 낮은 압력으로 비압축성유체가 균등분배 된다.

Figure 11에서 수행한 시뮬레이션은 DCS의 필수 구동영역 중 하나인 핀틀 추력기 1개만 열고

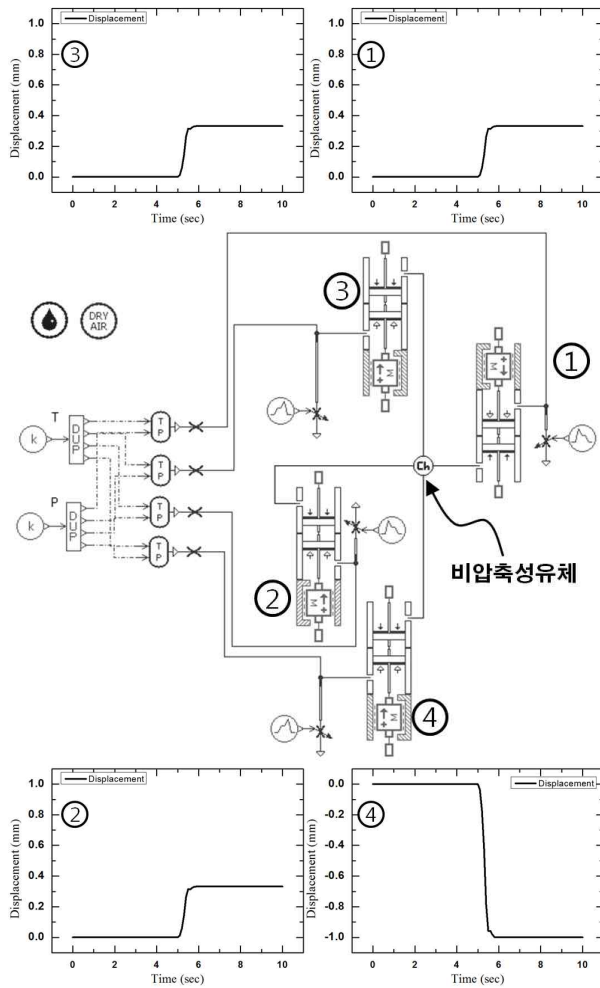


Fig. 11. Four-axis mechanism simulation

나머지 3개를 닫는 구동을 수행한 것이다. 비압축성유체 및 피스톤의 위치는 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

모두 동일한 지점(0 mm)에서 5초에 4번 피스톤 상단에 상대적으로 높은 압력이 가해지도록 명령을 주었다. 그 결과, 4번 피스톤의 변위가 변함과 동시에 비압축성유체가 나머지 3개의 피스톤으로 이동하고, 그 변위가 4번 피스톤의 1/3로 균등분배가 됐음을 그래프로 확인할 수 있다. 피스톤의 변위가 음의 값을 갖는 것은 연소가스에 의해 피스톤 상단의 압력이 높아서 피스톤을 미는 과정을 의미하고, 양의 값은 비압축성유체의 양이 많아지는 상태를 의미한다.

비압축성유체의 균등분배가 가능하다는 시뮬레이션 결과는 2개의 구동장치를 구동할 때에도 동일하게 적용된다. 피스톤의 구동이 최종적으로 핀틀 스트로크에 영향을 주기 때문에, 구동장치 구동에 따른 비압축성유체의 이동결과를 시뮬레이션을 통해 확인했다.

본 연구의 결과를 바탕으로 다축 핀틀 추력기 시스템의 연동 메커니즘 특허를 출원했다[22].

III. 결 론

본 논문에서는 가변추력 고체추진기관의 DCS 구동장치 개수를 4개에서 3개로 줄이는 연구를 진행하였다. 구동장치 개수 감소 가능성을 파악하기 위해 캠, 기어 등 구동 원리가 다른 구조물을 사용하여 구동 메커니즘 아이디어 사례를 연구하였다. 그 결과 구조적 제약조건을 갖는 구동장치에 핀틀 구조물을 직접 연결하는 형태가 아닌, 구동장치와 핀틀 구조물 중간에 매개 구조물을 제어해야 한다는 결과를 얻었다. 매개 구조물로 피스톤을 고안하였으며, 피스톤 상단과 하단에 작용하는 압력을 제어하는 원리로 핀틀 스트로크를 제어한다. 실제 구현 가능성에 대한 검증 방법으로 AMESim을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 구체적 성능 및 제어에 관련된 내용은 제작단계에서 기초 실험수행으로 진행되어야 하지만 시뮬레이션을 통해 다축 핀틀 추력기에 적용을 위한 구동장치 연동 메커니즘 방안이 실제적으로 구현이 가능하다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(계약번호 UD140023GD).

Reference

- 1) Napior, J., and Victoria G., "Controllable Solid Propulsion for Launch Vehicle and Spacecraft Application," The 57th International Astronautical Congress, Spain Kovalam West, 2006.
- 2) Aerojet Rocketdyne, www.rocket.com.
- 3) Kim, J., Park, J., "Ballistic Performance Variation Prediction of Continuously Variable Thrust Solid Rocket Motor by The Linear Approximation," Journal of The KSAS, Vol. 36, No. 1, 2008, pp.79~85.
- 4) Kim, J., Park, J., "Thrust Modulation Performance Analysis of Pintle-Nozzle Motor," Journal of The KSAS, Vol. 37, No. 4, 2009, pp.392~398.

- 5) Kim, J., Lee, J., Oh, J., Jang, H., "A Study on Steady State Performance of Variable Thrust Nozzle by Cold-Flow Test," Journal of The KSPE, Vol. 12, No. 2, 2008, pp.8~14.
- 6) Kim, J., Park, J., Lee, J., Jeon, M., "A Study on The Pintle-Tip Shapes Effect of Nozzle Flow Using Cold-Flow Test," Journal of The KSAS, Vol. 38, No. 10, 2010, pp. 985~991.
- 7) Park, B., Kim, S., Yoon, W., Lee, J., "Numerical Studies on Flow Structures with Various Shapes of Needle-type Pintle in Solid Rocket Motor," The KSPE Spring Conference, 2011, pp.249~252.
- 8) Lee, S., Huh, H., "Effect of Pintle Shape on Nozzle Flow-Pattern," The KSPE Fall Conference, 2012, pp.313~316.
- 9) Kang, M., Kim, J., Park, J., "Investigation on Pintle Shape Design to Minimize Drag," The KSME Spring Conference, 2009, pp.134~135.
- 10) Lee, J., Jang, H., Go, H., "A Study of Unsteady Characteristics on The Pintle Nozzle," The KSPE Fall Conference, 2011, pp.662~665.
- 11) Choi, J., Lee, J., "CFD Analysis on Dynamic Characteristics of The Pintle Motor," The KSPE Fall Conference, 2012, pp.371~375.
- 12) Huh, J., Jeong, G., Seong, H., "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust : Part 3," The KSPE Spring Conference, 2013, pp.523~528.
- 13) Hwang, H., Huh, H., "Pintle-Driven Thrust Characteristics of a Pintle Thruster," The KSPE Fall Conference, 2014, pp.817~818.
- 14) Jin, J., Ha, D., Oh, S., "Experimental Study and Performance Analysis of the Solid Rocket Motor with Pintle Nozzle," Journal of The KSPE, Vol. 18, No. 5, 2014, pp.19~28.
- 15) Ki, T., Ha, D., Jin, J., Lee, H., Yoon, H., "Analysis of Unsteady Combustion Performance in Solid Rocket Motor with Pintle," Journal of The KSPE, Vol. 19, No. 1, 2015, pp.68~75.
- 16) Kim, S., Huh, H., "Recent Progress in R&D and Prospect of Divert and Attitude Control System(DACS)," Journal of The KSPE, Vol. 16, No. 6, 2012, pp.62~72.
- 17) Kim, S., Huh, H., Lee, H., "Patent Review on Drive Mechanism of Multi-Axis Pintle Thrusters," The KSPE Spring Conference, 2012, pp.262~267.
- 18) Lee, J., Huh, H., Lee, H., "Concept Design of Pressure Control for Multi-Axis Pintle Thrusters," The KSPE Fall Conference, 2013, pp.391~393.
- 19) Hong, S. I., *Machine Design*, Munundang, 1997.
- 20) Lee, J., Huh, H., Lee, H., "Conceptual Design of Drive Mechanism for Multi-Axis Pintle Thrusters," *The KIMST Conference*, 2014, pp.1601~1602.
- 21) LMS Imagine Division, AMESim Ver.13
- 22) Huh, H., Lee, J., Bang, H., Lee, H., Multi-Axis Pintle Thrusters System with Coupling Mechanism, 10-2015-0022223 Patent Pending.