

ADAMS를 이용한 가동 노즐 성능 평가 기법

김중근* · 장홍빈*

Movable Nozzle Performance Analysis by Using ADAMS

Joungkeun Kim* · Hongbeen Jang*

ABSTRACT

Effective-pivot effects on the thrust vector control performance of the flexible seal nozzle to be used to control the flight direction of missile were investigated by computer simulation. 2³-Design of experiment technique was applied and ADAMS was used for the surrogate technique. As a result, radial pivot position had more influence upon the nozzle actuating performance than axial pivot position. Connecting method of actuator was also important factor in determining effective-pivot effects on the thrust vector control performance of the flexible seal nozzle.

초 록

추진기관의 추력 방향을 조절하기 위해 널리 적용되고 있는 flexible seal 노즐에서, 노즐의 회전 중심인 유효 피봇의 위치 변화가 노즐의 구동성능에 미치는 영향을 컴퓨터를 이용한 수치실험으로 분석하였다. 실험 조건은 two-level factorial design (2³-Design)의 실험계획으로 결정하고, 실험은 범용 동력학 해석 프로그램인 ADAMS를 적용하였다. 해석결과, 유효 피봇의 반경 방향 위치 변화가 축 방향 위치 변화보다 구동성능에 미치는 영향이 컸으며, 유효 피봇의 위치 변화가 구동 성능에 미치는 영향은 구동방식에 크게 영향을 받음을 확인하였다.

Key Words : ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), 가동노즐(Flexible Seal Nozzle), 유효피봇(Effective Pivot), 수치실험(Surrogate Method)

1. 서 론

현대 전장은 점점 정밀화를 요구하는 추세로 이에 부합하기 위해 방향 조절이 가능한 추진체

(Propulsion System)개발이 필수적이다. 추진체의 추력 방향 조절을 위한 다양한 방법들이 제안되어져 왔으며 추진체의 기능과 구동력, 무게, 크기와 같은 구속 조건에 따라 적절한 방법을 선택하지만 Flexible Seal Type Nozzle (이후로 FS 노즐이라 한다)이 여러 추진체에 적용되고 있다[1].

* 2009년 6월 24일 접수 ~ 2009년 8월 17일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1기술본부 6부

연락처, E-mail: korea_kimjk@yahoo.co.kr

FS 노즐 형상은 Fig. 1과 같다. 주요 구성품은 노즐 구동을 가능케 하는 고무(Rubber), 노즐을 움직이기 위한 구동기(Actuator), 그리고 고무 사이를 연결시켜 주는 구조물(Supporter)로 이루어져 있다. 요구 명령에 따라 구동기가 움직이면 FS 노즐은 3차원 공간상의 임의의 위치를 중심으로 회전하고(이를 유효피봇(Effective Pivot)이라 한다) 노즐의 회전 정도에 따라 추력 방향 조절에 필요한 힘(F_x, F_y, F_z)을 생성되게 된다[2].

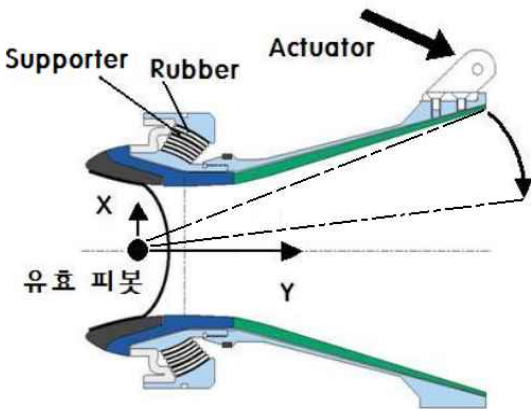


Fig. 1 Schematic of flexible seal nozzle

FS 노즐의 주요 성능 설계인자는 다음과 같으며 유효 피봇 위치에 영향을 받는다.

- (1) 노즐 구동각(Vector Angle)
 - 주어진 명령에 대한 실제 노즐 경사각
- (2) 상호 간섭각(Couple Angle)
 - 노즐 구동각과 직각방향의 노즐 경사각
- (2) 노즐 구동력(Actuating Torque)
 - 노즐을 구동하는데 필요한 회전력으로 구동기 힘과 구동기 축과 유효 피봇의 최단거리 곱
- (4) 비례계수 (Scale Factor)
 - 구동기 단위 길이당 노즐 경사각

일반적으로 유효 피봇 위치는 FS 노즐에 작용하는 하중 조건(연소관 압력과 구동력), 노즐 경사각 그리고 구동기 설치 조건에 따라 변한다. 따라서 유효 피봇 위치가 상기의 노즐 성능에 미치는 영향을 정확히 평가하는 것이 필수적이다.

다. 이를 실험적으로 평가한다는 것은 많은 시간과 비용이 소요됨은 물론 정확한 유효피봇 위치를 선정하여 실험하는데 어려움이 있다[3].

본 논문에서는 실험의 한계를 극복하고 FS 노즐의 설계 정보를 획득하기 위해서 ADAMS 프로그램을 이용한 Surrogate Method를 제시하였다. 이로부터 유효 피봇 위치가 FS 노즐의 성능 설계 인자에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 문헌 조사

FS 노즐의 실험 결과를 유효 피봇 위치 이동량을 중심으로 정리하여 Table 1에 제시하였다 [1]. Table 1의 3 가지 모델은 FS 노즐 크기, 구동 방식, 고무 특성이 다르지만 구조하중의 유무, 노즐 구동각에 따라 구동력 및 유효 피봇에 대한 일반적인 경향성을 보여준다.

Table 1. Pivot movement to actuation condition

< Model 1>

구동각(2°)	구동력(klb)		피봇이동(in)	
구조하중이 없을 때	Fx	53	축방향	0
			반경방향	6
구조하중이 있을 때	Fx	49	축방향	5.5
			반경방향	1.5

< Model 2>

구동각(5°)	구동력(klb)		피봇이동(in)	
구조하중이 없을 때	Fx	1.7	축방향	1
			반경방향	0.5
구조하중이 있을 때	Fx	1.0	축방향	2.25
			반경방향	0.02

< Model 3 >

구동각(5°)	구동력(klb)		피봇이동(in)	
구조하중이 없을 때	Fx	1.1	축방향	0
			반경방향	0.14
구조하중이 있을 때	Fx	0.8	축방향	2.0
			반경방향	0.02

(1) 유효 피봇은 구조하중(압력)이 작용하지 않으면 축 방향으로 거의 변하지 않지만 반경 방향으로 큰 변화를 보였다. 반면에 구조하중이 작용하면 축 방향 변화는 증가하고 반경방향의 변화는 감소한다.

(2) 구조하중이 작용하면 구조하중이 작용하지 않을 때 보다 구동력이 감소한다.

2.2 전산 모델링

유효 피봇이 FS 노즐의 구동 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 ADAMS를 이용한 컴퓨터 모사(simulation)방법을 채택하였다.

FS 노즐의 전체 형상은 간단한 빔(Beam)으로 모델링하고 고무 역할은 ADAMS에서 제공하는 Field Library의 강성행렬(Stiffness matrix)과 감쇠계수(Damping coefficient)를 가상의 유효 피봇에 적용하는 방법을 사용하였다. 실제 FS 노즐을 움직이는데 사용되는 구동기는 ADAMS의 Transitional joint로 모델링하고 구동 명령 동안에 일정한 길이를 유지하여야 하는 구동기는 길이 변화가 전혀 없는 강체(Rigid Body)로 모델링하였다.

또한 FS 노즐 구동에 따른 노즐 성능을 분석하기 위해서 변위 센서를 3 곳에 모델링하고 노즐의 기울어짐은 ADAMS의 측정(Measure) Library를 이용하였다[4].

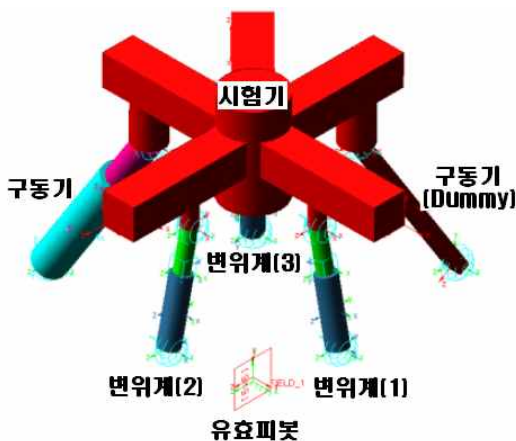


Fig. 2 ADAMS model of flexible seal nozzle

2.3 실험 설계

Figure 1의 모델을 기준으로 유효 피봇 이동 범위는 노즐 경사각을 ±10°하였을 때, 노즐과 주변 구조물이 간섭을 일으키지 않는 조건으로 결정하였다(Eq. 1-3).

$$-100\text{cm} \leq Y(\text{추력})\text{방향 피봇} \leq 200\text{cm} \quad (1)$$

$$-20\text{cm} \leq X\text{방향 피봇 이동} \leq 20\text{cm} \quad (2)$$

$$-20\text{cm} \leq Z\text{방향 피봇 이동} \leq 20\text{cm} \quad (3)$$

위의 구간에서 유효 피봇 위치가 FS 노즐 성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험 계획은 two-level factorial design (2³-Design)으로 진행하였으며 개념도를 Fig. 3에 제시하였다[5].

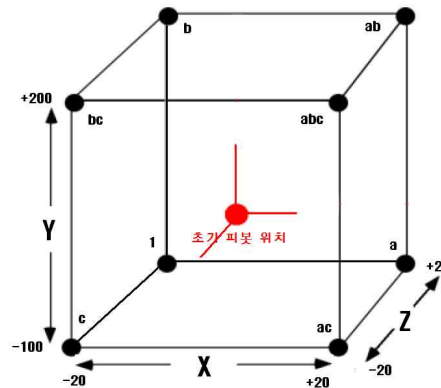


Fig. 3 2³- Design Experiment

Figure 3에서 X, Y, Z 방향은 Fig. 1에서 정의된 좌표계 방향과 동일하며 ●는 ADAMS로 수행되는 해석점(Run)을 나타낸다. 총 8회의 해석을 통하여 유효 피봇 위치가 FS 노즐 성능에 미치는 평균적인 효과는 다음의 관계로 구할 수 있다(Eq. 4-6).

$$X_{effect} = \frac{1}{4}[a + ab + ac + abc - 1 - b - c - bc] \quad (4)$$

$$Y_{effect} = \frac{1}{4}[b + ab + bc + abc - 1 - a - c - ac] \quad (5)$$

$$Z_{effect} = \frac{1}{4}[c + ac + bc + abc - 1 - a - b - ab] \quad (6)$$

2.4 구동 방식

FS 노즐 구동방식은 다양하게 적용할 수 있으며 본 논문에서는 3가지 방식을 고려하였다.

1) Case 1 - 경사형 단독구동

하나의 구동기로 노즐을 움직이되 구동기를 X-Y 평면에 경사지게 설치

2) Case 2 - 평행형 단독구동

하나의 구동기로 노즐을 움직이되 구동기를 Y방향과 평행하도록 설치

3) Case 3 - 평행형 복동구동

2개의 구동기로 노즐을 움직이되 구동기를 X-Z평면에서 ±45°에 Y축과 평행이 되도록 설치

2.5 결과 분석

유효 피봇이 Fig. 3과 같은 범위에서 변할 때, 노즐 구동에 따른 성능을 노즐 구동각, 노즐 간섭각, 노즐 구동력 그리고 비례계수를 중심으로 분석하였다.

2.5.1 노즐 구동각

Figure 4는 유효 피봇이 노즐 구동각에 미치는 영향을 구동방식별로 비교한 것이다. Case 1에서 구동기가 X-Y 평면에 있는 경우, Z 방향의 유효 피봇 변화는= 노즐 구동각에 미치는 영향이 X, Y방향의 유효 피봇 변화에 비해서 훨씬 적었다. 그리고 Case 1의 구동 방식은 유효 피봇

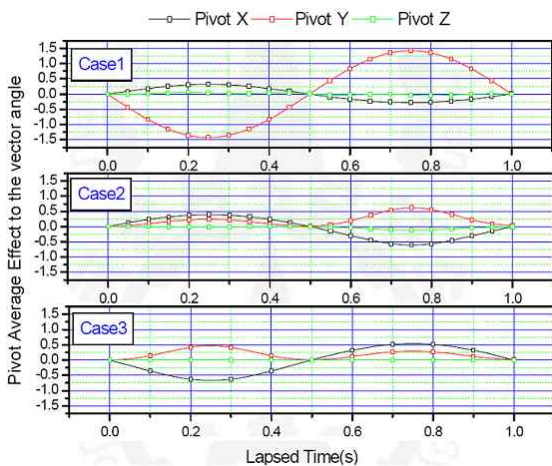


Fig. 4 Effect pivot movement on vector angle

의 Y 위치 변화가 노즐 구동각에 가장 큰 영향을 미치고 있으나 Case 2, Case 3의 구동 방식에서는 X 위치 변화가 Y 보다는 더욱 큰 영향을 미치고 있다.

이로부터 유효 피봇의 위치 변화가 노즐 구동각에 미치는 영향은 노즐 구동방식에 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

2.5.2 노즐 간섭각

노즐 간섭각이 적을수록 가동노즐의 X-Y 평면 운동과 Y-Z 평면운동이 서로 연과성이 없어 (Decouple) 가동 노즐의 구동을 제어하기 위한 알고리즘을 간단하게 구성할 수 있을 뿐만 아니라 안정적인 비행궤적을 얻을 수 있다. Fig. 5는 유효 피봇의 변화가 노즐 간섭각에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

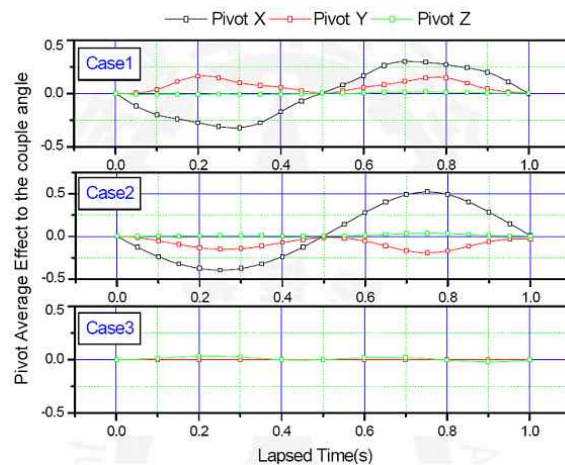


Fig. 5 Effect pivot movement on couple angle

노즐을 X-Y 평면에 내에서 구동하는 경우, 유효 피봇의 Z 좌표는 구동방법에 상관없이 노즐 간섭각에 미치는 영향이 X, Y 피봇 위치에 비해서 훨씬 적었다.

그리고 Case 1과 Case 2와 같이 가동 노즐을 한 개의 구동기로 X-Y 평면에 대해 구동시킬 때에(단동구동)노즐 간섭각은 유효 피봇의 X, Y 위치에 가장 큰 영향을 받지만, Case 3과 같이 2개의 구동기로 노즐을 구동하는 경우(복동구동) 유효

효 피봇 X, Y 위치에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다 이것은 복동구동 방법의 장점으로, 가동노즐의 간섭각이 중요한 설계변수가 된다면 단동구동보다는 복동구동 방법이 효과적임을 나타낸다. 또한 단동구동 방법이라도 경사형보다는 평행형 구동방식이 유효 피봇의 위치 변화에 의한 노즐 간섭각 변화가 큰 것으로 나타났다 따라서 가동노즐 구동방식은 물론 구동장치와 가동노즐의 연결 상태에 따라서 노즐 간섭각 성능이 영향을 받음을 알 수 있다.

2.5.3 노즐 구동력

구동력이 작으면 필요한 구동장치의 구동 동력원(Power source)의 크기가 적어지므로 구동장치설치에 요구되는 필요공간을 줄일 수 있지만, 반대로 구동력이 커지게 되면 구동장치의 필요공간이 증가하게 되어 구조물 사이의 간섭을 일으킬 수 있는 원인이 되기도 한다.

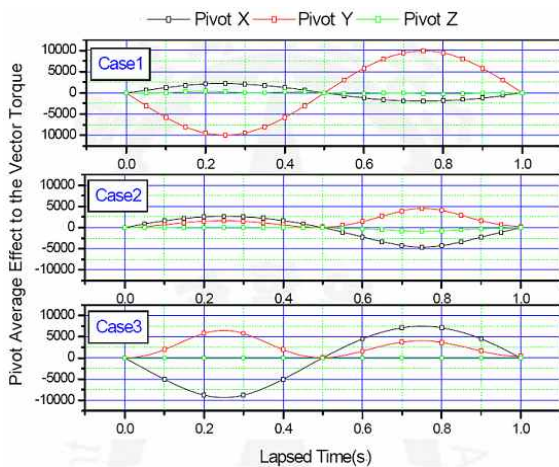


Fig. 6 Effect pivot movement on actuating torque

Figure 6은 유효 피봇의 변화가 노즐 구동력에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

가동노즐을 X-Y 평면으로 구동시킬 때에 유효 피봇의 Z 방향위치가 노즐 구동력에 미치는 영향은 구동방식과 무관하게 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 경사형 단동구동 방식은 유효 피봇의 Y 방향 위치에 크게 영향을 받는 반면에

평행형 단동구동과 복동구동 방식은 유효 피봇의 X 방향 위치에 더욱 크게 영향을 받고 있다.

그리고 값의 크기로 보아 경사형 단동구동 방식은 다른 평행형 구동방식과 비교하여 유효 피봇의 Y 위치 변화에 더욱 민감한 것으로 나타나고 있다

2.5.4 비례 계수

유효 피봇의 이동에 따라 구동기 길이에 대한 노즐 경사각 비를 나타내는 비례계수가 일정하다면(비례계수가 일정한 상수가 된다면) 유도조정에 적용되는 알고리즘이 매우 단순화 될 수 있을 뿐만 아니라 제어성능도 우수하게 된다. 반대로 외부 환경에 따른 비례계수가 심하게 변한다면 유도조정 알고리즘이 복잡화 될 뿐만 아니라 가동노즐의 성능 신뢰도도 크게 저하 된다.

이론적으로 비례계수가 일정한 상수가 되도록 하는 것은 현실적으로 어려우며 구현한다고 하더라도 다른 설계 변수들 값이 최적조건에서 상당히 벗어난다. 따라서 여러 가지 환경에 대해서 비례계수의 변화가 최소화 될 수 있는 설계가 요구된다.

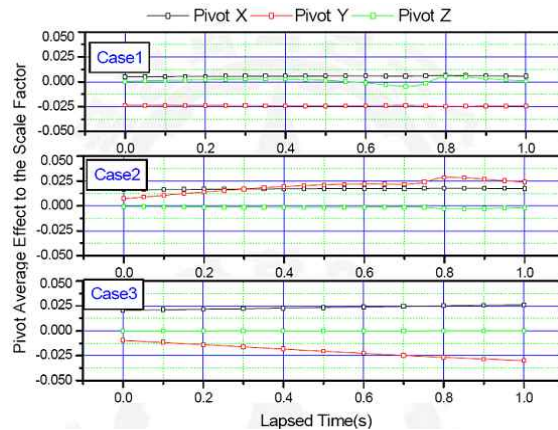


Fig. 7 Effect pivot movement on scale factor

Figure 7은 유효 피봇의 변화가 비례계수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 7에서, 가동노즐을 Y-X 평면으로 구동시킬 때에 유효 피봇 Z 위치가 비례계수에 미치는 영향은 구동방식에

관계없이 거의 없는 것으로 나타났으며 유효 피봇 Y 위치는 구동방식에 무관하게 비례계수에 비슷한 영향을 주는 것으로 나타났다.

그러나 유효 피봇 X 위치는 구동방식에 따라 비례계수에 미치는 영향이 다르게 나타났으며 경사형 단동구동 방법의 경우, X 위치에 의한 영향이 상대적으로 적었으나 평행형 단동구동과 복동구동 방법의 경우에는 유효 피봇 Y 위치변화에 의한 영향과 비슷한 결과를 나타내고 있다. 이로부터 평행형 구동방식이 유효 피봇의 위치에 의한 비례계수에 미치는 영향에 민감한 것으로 판단할 수 있다.

2.6 요약

가동노즐을 X-Y 평면으로 구동시킬 때, 가동노즐의 유효 피봇 X, Y, Z 방향의 위치 변화가 가동노즐의 성능에 미치는 영향을 요약하면 Table 2와 같다. Table 2에서 ++는 영향이 큰 것을, +는 영향이 적은 것을, 0은 영향이 거의 없음을 상대적으로 나타낸 것이다

Table 2. Effect pivot movement on flexible seal nozzle performance

성능인자	구동방식	유효 피봇 위치 변화		
		X	Y	Z
노즐 구동각	Case 1	+	++	0
	Case 2	++	+	0
	Case 3	++	+	0
노즐 간섭각	Case 1	++	+	0
	Case 2	++	+	0
	Case 3	0	0	+
노즐 구동력	Case 1	+	++	0
	Case 2	++	+	0
	Case 3	++	+	0
비례 계수	Case 1	+	++	0
	Case 2	++	++	0
	Case 3	++	++	0

3. 결 론

가동노즐의 유효 피봇은 작동조건에 따라 3차원 공간상을 자유롭게 움직이며 가동 노즐의 구동 성능에 지대한 영향을 미친다. 본 논문에서 ADAMS를 이용하여 유효 피봇 위치 변화가 가동 노즐 성능에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 가동노즐을 정해진 평면으로 구동시키는 경우 노즐의 운동 평면과 직각 방향의 유효 피봇의 위치가 가동노즐의 성능에 미치는 영향은 무시할 정도로 적다.
- 2) 유효 피봇이 구동성능에 미치는 영향은 축 방향 보다는 반경 방향의 피봇 이동이 더 크다.
- 3) 노즐 간섭각이 중요한 설계변수가 된다면 단동구동보다는 복동구동 방식이 효과적이다.
- 4) 유효 피봇의 위치가 구동 성능에 미치는 영향은 구동방식에 크게 영향을 받는다.

참 고 문 헌

1. NASA, "Solid Rocket Thrust Vector Control," NASA-SP-8114, 1974
2. James R. Donat , "Solid Rocket Motor Nozzle Flexseal Design Sensitivity," AIAA-93-1122, 1993
3. R. D. Gaffin, "Space Shuttle Solid Rocket Booster Nozzle Flexible Seal Pivot Point Dynamics ", AIAA-77-986, 1977
4. MSC, "Basic ADAMS Full Simulation Package ", 2005
5. Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, "Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiments" , John Wiley & Sons, INC., 1995