KSLV-I 실물형 킥모터조합체 TVC 구동특성시험 및 분석

선병찬*, 박용규**

TVC Actuation Tests and Analyses for Real-Sized Kick Motor Assembly of KSLV-I

Byung-Chan Sun*, Yong-Kyu Park**

Abstract

In this paper, the TVC actuation test and analysis results for a flexible seal kick motor nozzle are presented. A real-sized test model of KSLV-I kick motor system is applied to water pressurizing TVC tests which investigate the property changes in TVC nozzle expansion and TVC actuation performance against chamber pressure changes. The equipments which are required for TVC actuation tests are briefly explained. The TVC actuation tests are firstly accomplished in static mode, which reveals TVC error characteristics including thrust misalignment, control accuracy, and TVC stroke increase, etc. The properties in frequency domain is given via dynamic tests. These results may play an important role in enhancing the TVC control performance of KSLV-I.

초 록

본 논문에서는 KSLV-I 상단부 시험을 목적으로 실물형으로 제작된 킥모터 조합체에 대한 TVC 구동특성시험과 분석 결과에 대해 정리하고자 한다. 실물형 킥모터 조합체는 추진제 대신 물을 채울 수 있는 구조로 되어서 수압으로 연소압 상황을 모사하면서 챔버압에 따른 플렉스씰 TVC 노즐의 특성을 파악할 수가 있으며, 챔버압에 따른 TVC 정적 및 동적 특성 변화 또한 분석할 수가 있다. 실물형 킥모터 조합체에 대한 TVC 구동 시험을 수행하는 데 필요한 설비 구축 과정에 대해서 개략적으로 설명하고, TVC 정적 시험을 통한 제어 특성 분석 결과 및 TVC 동적 시험을 통한 동특성 분석 결과를 정리한다. 이러한 결과들은 KSLV-I 의 TVC 자세제어 정밀도를 높이는 데 있어서 중요한 역할을 담당하고 있다.

키워드 : 킥모터(kick motor), 플렉스씰(flexseal), 정적시험(static test), 동적시험(dynamic test), 추력비정렬오차(thrust misalignment), 추력벡터제어(thrust vector control)

1. 서 론

국가우주개발중장기계획의 일환으로 소형위성

* 임무설계팀/bcsun@kari.re.kr ** 임무설계팀/kyu2002@kari.re.kr

발사체 개발이 이루어지고 있다. 2단으로 구성된 소형위성발사체의 경우 2단 엔진으로서 고체연료 킥모터가 사용되고 있으며 자세제어를 위해 추력벡터제어(TVC, Thrust Vector Control) 방식을 채용하고 있다. 킥모터 노즐의 추력벡터제어를 위해 노즐 목부분이 플렉스씰(Flexible Seal) 구조로 되어 있어서 연소압이 형성되는 과정에서 노즐부분이 후방으로 팽창되는 등 여러 가지 비선형적인 특성이 존재하게 된다. 발사체의 자세제어를 정확하게 수행하기 위해서는 이러한 자세제어 특성들을 명확하게 파악할 필요가 있음은 자명하다.

이에, 본 논문에서는 실물 크기로 국내에서 처음 제작된 킥모터 조합체를 이용해서 수행한 TVC 정적 및 동적 구동 특성 시험에 대해 정리하였다. 실물형 킥모터 조합체의 경우 연료가 충진되지 않은 상태의 제품으로서 수압으로 연소압 상황을 모사할 수 있는 구조로 되어 있어서 챔버압에 따른 자세제어 특성을 파악할 수 있는 바, 챔버압에 따른 정적 및 동적 특성 변화 분석에 중요한 역할을 담당하게 된다. 실물형 킥모터 조합체에 대한 TVC 구동 시험을 수행하는 데 필요한 설비 구축 과정에 대해 개략적으로 설명하고, TVC 정적 시험을 통한 제어 특성 분석 결과 및 TVC 동적 시험을 통한 동특성 분석 결과를 정리하였다.

2. 플렉스씰 TVC 노즐

플렉스씰 킥모터 TVC 노즐의 형상을 그림으로 나타내면 다음과 같다. 여러 겹의 금속판과 고무층의 결합을 통해 노즐의 목 부위를 플렉스씰로 구성함으로써 노즐이 회전할 수 있도록 되어 있다. 플렉스씰의 특성에 의해 추력벡터제어용 킥모터 노즐은 일반적인 액체엔진 노즐과는 구별되는 여러 가지 비선형적인 요소들을 지니게 된다. 플렉스씰의 탄성에 의해 킥모터의 챔버압이 증가하게 되면 노즐이 후방으로 밀리는 현상이 발생하게 되는데, 이로 인해 노즐의 회전중심이 이동하는 특성을 가지게 된다. 노즐이 후방으로 밀릴 때 플렉스씰의 변형이 불균일하게 발생하게 되면 이로 인해 추력비정렬오차가 발생하기도 한다. 킥모터의 연소 초기에 노즐의 추력비정렬오차가 크면 클수록 추력벡터제어로 보상해야 하는 값이 커지게 되고 이는 노즐각이 증가하는 것을 의미하게 된다. 노즐각이 커질수록 옆방향 추력이 커짐으로써 자세오차 뿐만 아니라 궤도오차 또한 증가하게 된다. 따라서 추력비정렬오차의 크기가 작을수록 실제 비행에서는 바람직하다고 하겠다.

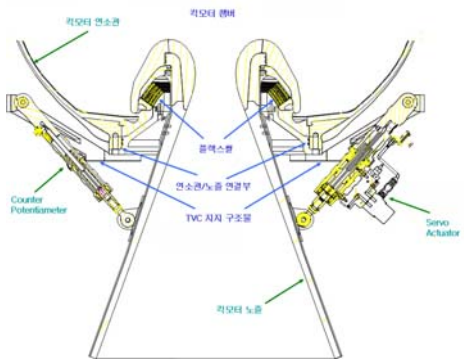

그림 1. 플렉스씰 TVC 노즐

플렉스씰 노즐의 회전운동 및 TVC 선형운동 분석을 위해 다음과 같이 운동변수를 정의한다. 일반적으로, TVC 구동기의 스트로크(L)가 증가할 때의 노즐각을 양수로 정의하게 되며, TVC 구동 명령 대비 노즐운동의 선형성을 보장하기 위해 TVC 체결각(ξ 및 ξ_c)은 가능한 한 90도에 가까운 값을 가지도록 구성한다.

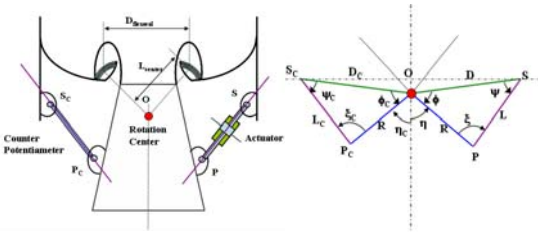

그림 2. 플렉스씰 TVC 노즐 운동 변수 정의

노즐이 팽창되면서 TVC 구동기의 중립위치가

달라지게 되며 이를 보상하기 위해 카운터 포텐셔미터(CP)가 구동기의 반대편에 장착된다. 평균적인 스트로크 변위를 보상해 줌으로써 연소압에 의한 노즐의 팽창에도 불구하고 중립지점을 찾을 수 있도록 구성된다. 따라서, 고정된 엔진 노즐에 비해 플렉스씰 노즐에서는 TVC 구동기의 선형적인 운동이 노즐의 회전운동으로 바뀌면서 나타나는 오차 요인 외에, 노즐의 회전중심 변화에 따른 오차 요인, 플렉스씰의 비대칭 변위에 의한 오차 요인, 보상 알고리듬 적용에 따른 오차 요인 등 여러 가지 복잡한 오차 요소들이 존재하게 된다.

3. 플렉스씰 TVC 노즐 시험설비

3.1 시험 설비 구성

실물형 킥모터 조합체 TVC 구동 특성 시험을 위한 시험 설비 구성을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

그림 3. 실물형 킥모터 조합체 TVC 특성 시험 구성도

연소압 모사를 위한 수압설비가 필요하고, 노즐목 부분을 밀폐시킨 상태에서 연소관에 물을 주입하고 압축시킬 수 있는 구조의 모사 노즐 제작이 별도로 이루어져야만 한다. 모사노즐은 실물 노즐과 동일한 체결구조 및 관성모멘트를 가지도록 설계되어진다.

상세 설비 구성을 보면, 크게 연소관부, 노즐부, TVC부, 센서 및 치구류, 컴퓨터시스템, 수압설비 등으로 이루어져 있다. 연소관부는 실물형 연소관, 물 공급용 플랜지, 모사노즐 연결용 마개로 되어 있고, 노즐부는 모사노즐과 TVC 구동기 체결을 위한 브라켓으로 되어 있으며, TVC부는 피치, 요 두 조의 구동기와 카운터 포텐셔미터 및 TVC 제어기, 유압 및 전원 공급장치로 되어 있다. 치구류에는 바닥 고정용 치구, 연소관 장착용 치구, 센서 장착용 치구, 연소관 파열 위험에 대비하기 위한 보호 치구 등이 있다.

TVC 구동특성시험에 사용되는 센서로는 경사도계, 각속도계, 변위계 등이 있는데, 노즐 회전각 측정에 0.001도 정밀도의 경사도계가 사용되고 동특성 시험에는 대역폭 50 Hz 이상의 각속도계가 사용되며 변위계는 각 부위의 변형 측정을 목적으로 ± 20 mm 범위에서 적용되고 있다. 그외 연소관 압력 측정을 위한 압력센서가 사용되기도 하고 수압 상황에서의 연소관 상태 파악을 목적으로 시험용 카메라가 설치되기도 한다.

수압설비에는 물탱크, 수압 제어기, 및 각종 펌프와 배관류가 포함되며, TVC 시험용 실시간 컴퓨터는 TVC 명령 생성, 아날로그 입출력, 센서 데이터의 실시간 저장 등을 수행할 수 있도록 구성되어진다.

3.2 시험 설비 설계 및 제작

실물형 킥모터 조합체 TVC 시험에 요구되는 치구 설계 및 제작과 관련해서 중요 부분들을 그림으로 정리하면 다음과 같다. 바닥고정부의 경우 다음 그림과 같이 트렌치 위에 설치할 수 있도록 설계 및 제작이 이루어진다.

그림 4. 바닥고정 치구

바닥고정 치구 위에 연소관 거치대, 센서 거치대, 및 작업 치구가 위치하도록 설계된다. 연소관이 수직인 상태로 거꾸로 놓이게 되므로 노즐부 센서 작업을 위해서는 작업 치구의 높이가 어느 정도 확보되어야만 한다.

그림 5. 연소관 장착용 작업치구 설계와 제작

연소관 거치대 및 작업치구 내에 연소관이 장착된 형상은 다음과 같다.

그림 6. 킥모터 연소관 장착 형상

연소관에 수압을 가할 수 있는 형태로 전방부 플랜지 제작이 이루어지며 다음 그림과 같이 배관 작업이 수행된다.

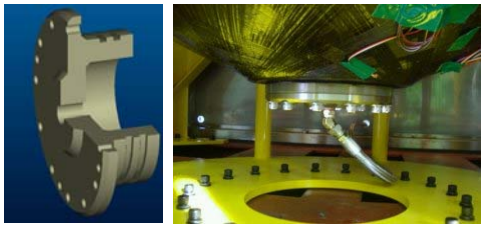

그림 7. 연소관 플랜지 설계 및 수압배관 연결

연소관의 후방부는 플렉스씰을 장착한 마개부에 의해 밀폐가 이루어지게 되며 마개부에 장착 가능한 형태의 모사노즐이 제작된다.

그림 8. 노즐연결용 마개 및 모사노즐

3.3 TVC 및 센서류 장착

모사노즐과 지지빔 끝단 사이에 TVC 구동기와 카운터 포텐셔미터가 장착되고 경사도계와 각속도계는 노즐 브라켓에 장착되어진다.

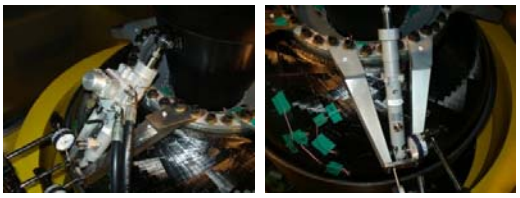

그림 9. TVC 구동기 및 카운터포텐셔미터 장착

모사노즐과 TVC 시스템이 체결된 상태의 실물형 킥모터 조합체 형상은 다음 그림과 같다.

그림 10. 실물형 킥모터 조합체 최종 형상

4. 플렉스씰 TVC 노즐 비선형 거동 특성 분석 기법

플렉스씰 노즐의 비선형 특성은 대부분 노즐 및 회전중심의 위치 변동에 의해 발생한다. 노즐의 경우에는 변위계를 통해 변위 측정이 가능하지만, 플렉스씰 회전중심의 경우에는 그 특성상 직접 측정할 방법이 없다. 회전중심이 이동하게 되면 노즐의 회전반경이 바뀌게 되고 이로 인해 TVC 노즐각 제어오차가 발생할 수가 있다. 따라서 간접적인 방법을 통해서라도 회전중심 이동 및 제어특성 변화를 살필 수 있어야만 한다.

노즐의 회전각과 TVC 구동기 및 카운터 포텐셔미터(CP)의 스트로크 변위를 측정해서 노즐 및 회전중심의 위치를 간접적으로 추정할 수가 있는데, 이러한 기법에 대해 개략적으로 설명하면 다음과 같다.

다음 그림에서와 같이 양쪽의 TVC 브라켓을 연결하는 선의 중심점 O로부터 노즐 회전중심 O_R 의 위치가 (d_x, d_y) 떨어져 있다고 가정한다. 구동기 지지빔의 축방향 위치와 CP 지지빔 축방향 위치 간에는 Δx만큼 차이가 있는 것으로 가정한다. 노즐의 TVC 체결 브라켓 간의 거리는 d_p이다.

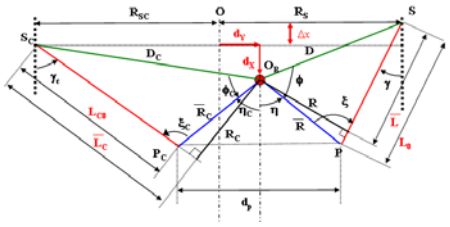

그림 11. 플렉스씰 TVC 노즐 비선형 거동 특성 분석 기법

이때 노즐각이 0도 일때의 구동기 스트로크 L_0 및 CP 스트로크 L_{c0}와 각각의 회전반경 R 및 R_c를 이용해서 다음의 관계식을 세울 수가 있다.

$$L_0 sin(\gamma) + L_{c0} sin(\gamma_c) + d_p = R_s + R_{sc} \quad (1)$$

$$L_0 cos(\gamma) = L_{c0} cos(\gamma_c) + \Delta x \quad (2)$$

$$\bar{L} sin(\gamma) + \bar{L}_c sin(\gamma_c) + R cos(\gamma) + R_c cos(\gamma_c) = R_s + R_{sc} \quad (3)$$

$$d_x = \bar{L} cos(\gamma) - R sin(\gamma) - \Delta x = \bar{L}_c cos(\gamma_c) - R_c sin(\gamma_c) \quad (4)$$

식 (1),(3)은 Y-축 방향으로의 길이 제한 조건식이고 식 (2),(4)는 X-축 방향으로의 노즐 브라켓 끝단 위치 및 회전중심 위치 일치 조건에 해당한다. 여기서 $\bar{L}$ 및 $\bar{L}_c$는 회전반경에 수직한 스트로크 성분을 의미하고, γ 및 γ_c는 구동기 및 카운터 포텐셔미터가 X-축과 이루는 체결각을 의미한다. 식 (1),(2)로부터 γ 및 γ_c를 구한 후에 식 (3),(4)를 적용하면 $\bar{L}$ 와 $\bar{L}_c$를 구할 수가 있다.

$$\gamma = sin^{-1}\left(\frac{C}{A}\right) - B \quad (5)$$

$$\gamma_c = cos^{-1}\left(\frac{R_s + R_{sc} - d_p - L_0 sin(\gamma)}{L_0 cos(\gamma) - \Delta x}\right) \quad (6)$$

$$\bar{L} = \frac{R_s + R_{sc} - R cos(\gamma) - R_c cos(\gamma_c) - (R_c sin(\gamma_c) - R sin(\gamma) - \Delta x) tan(\gamma_c)}{sin(\gamma) + cos(\gamma) tan(\gamma_c)} \quad (7)$$

$$\bar{L}_c = \frac{\bar{L} cos(\gamma) + R_c sin(\gamma_c) - R sin(\gamma) - \Delta x}{cos(\gamma_c)} \quad (8)$$

with $A = \sqrt{(R_s + R_{sc} - d_p)^2 + \Delta x^2}$

$$B = tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{R_s + R_{sc} - d_p}\right)$$

$$C = \frac{L_0^2 - L_{c0}^2 + (R_s + R_{sc} - d_p)^2 + \Delta x^2}{2L_0}$$

이때, 회전중심의 위치는

$$d_x = \bar{L} cos(\gamma) - R sin(\gamma) - \Delta x = \bar{L}_c cos(\gamma_c) - R_c sin(\gamma_c) \quad (9)$$

$$d_y = R_s - (\bar{L} sin(\gamma) + R cos(\gamma)) = \bar{L}_c sin(\gamma_c) + R_c cos(\gamma_c) - R_{sc} \quad (10)$$

와 같이 구할 수가 있으며, 회전중심에서 노즐 브라켓까지의 거리 $\bar{R}$과 $\bar{R}_c$, TVC 작용점에서의 사이각 ξ와 ξ_c, 노즐 중심선 기준 $\bar{R}$과 $\bar{R}_c$의 각도 η와 η_c 등도 순차적으로 계산 가능하게 된다.

$$\bar{R} = \sqrt{R^2 + (L_0 - \bar{L})^2} \qquad \bar{R}_c = \sqrt{R_c^2 + (L_{c0} - \bar{L}_c)^2}$$

$$\xi = tan^{-1}\left(\frac{R}{L_0 - \bar{L}}\right) \qquad \xi_c = tan^{-1}\left(\frac{R_c}{L_{c0} - \bar{L}_c}\right)$$

$$\eta = \xi - \gamma \qquad \eta_c = \xi_c - \gamma_c$$

$$D = \sqrt{R^2 + \overline{L}^2} \qquad D_c = \sqrt{R_c^2 + \overline{L}_c^2}$$

$$\phi = sin^{-1}\left(\frac{L_0}{D} sin(\xi)\right) \qquad \phi_c = sin^{-1}\left(\frac{L_{c0}}{D_c} sin(\xi_c)\right)$$

한편, 노즐 자체의 움직임에 대해서는 노즐 브라켓의 위치를 계산함으로써 분석할 수가 있는 바, 노즐의 변위 계산식은 다음과 같다.

$$D_x = L_0 cos(\gamma) - \Delta x = L_{c0} cos(\gamma_c) \tag{11}$$

$$D_y = R_s - (L_0 sin(\gamma) + \frac{1}{2} d_p) = L_{c0} sin(\gamma_c) + \frac{1}{2} d_p - R_{sc} \tag{12}$$

구동기 및 카운터 포텐셔미터의 회전반경 R, R_c는 직접 측정할 수 없는 데이타임에 유의할 필요가 있는데, 여기서는 노즐 회전각과 피스톤 스트로크 측정치 간에 다음의 관계가 존재한다고 가정하고 있다.

$$L = R\delta + L_0 \tag{13}$$

$$L_c = R_c\delta + L_{c0} \tag{14}$$

여기서 δ는 노즐의 회전각이고, L은 구동기 피스톤의 스트로크, L_c는 카운터 포텐셔미터의 스트로크를 의미한다. 노즐각을 변화시키면서 노즐각과 구동기 및 카운터 포텐셔미터의 스트로크를 측정한 후 최소자승법 등을 적용하면 회전반경 R, R_c와 함께 노즐각이 0도일 때의 중립길이 L_0, L_{c0}를 구할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 ξ와 ξ_c가 90도 근처의 값을 가지는 경우, 노즐각과 스트로크 측정치 간에는 식(13), (14)와 같은 선형적인 관계가 성립하게 된다.

5. 플렉스씰 TVC 노즐 정적거동 특성시험 및 분석

5.1 TVC 노즐 정적 거동 특성 시험

TVC 노즐의 정적 거동 특성 시험은, TVC 명령을 -10 ~ +10V 범위에서 1V 간격으로 변화시켜 가며 해당 노즐각과 구동기 및 카운터 포텐셔미터의 스트로크를 측정하는 방식으로 진행된다. 노즐각 0도 부근에서의 히스테레시스 특성을 살피기 위해 명령이 증가하는 경우와 감소하는 경우를 동시에 고려한다. 한편, 연소압 상황에서의 TVC 거동 특성을 살피기 위해서는 여러 단계의 수압 상태에서 위의 시험을 반복적으로 수행해서 비교하는 과정을 거치게 된다. 정적 거동 특성 시험을 통해 측정된 데이터는 다음 그림과 같은 형태를 가지게 된다.

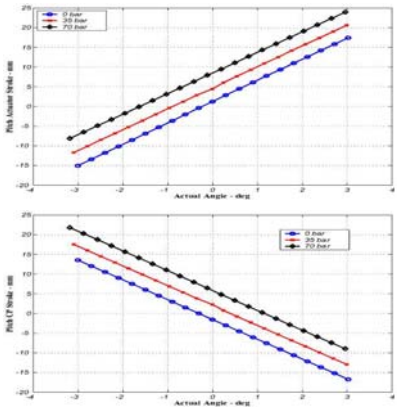

그림 12. TVC 노즐 정적 거동 특성 시험 결과

5.2 TVC 스트로크 변화 특성

위 시험 결과에 의하면, 노즐각이 증가함에 따라 구동기 및 CP 의 스트로크가 선형적으로 증가 또는 감소하는 현상을 확인할 수가 있으며, 챔버압이 증가함에 따라 노즐이 후방으로 밀리면서 구동기 및 CP의 스트로크가 전반적으로 증가한 형태가 되지만 이때에도 선형성은 유지되고 있음을 알 수가 있다.

구동기와 CP의 스트로크 특성을 비교하면, 구동기 스트로크 증감이 CP 스트로크 증감보다 다소 크게 발생한 것을 볼 수가 있는데, 이는 능동소자인 구동기의 힘에 의해 구동기 지지빔 끝단에서 추가적인 변위가 발생하기 때문이다.

TVC 스트로크와 노즐각 사이의 선형적인 특성을 토대로 식(13)과 같은 선형 관계식의 계수를 구할 수가 있다. 분석 결과에 의하면, 챔버압

이 증가함에 따라 노즐각 0도일 때의 구동기 스트로크가 최대 7.26 mm, CP 스크로크는 최대 7.36 mm까지 증가하고 노즐각이 1도 회전함에 따라 구동기 스트로크는 5.23~5.40 mm, CP 스트로크는 5.013~5.025 mm 씩 증가하는 특성이 있음을 알 수가 있다.

표 2. TVC 회전이득 및 중립스트로크 추정 결과

수압	구동기		카운터 포텐셔미터	
	R	L_o (mm)	R_c	L_{co} (mm)
0 bar	309.24 mm/rad 5.3973 mm/deg	371.24 Δ=0.00	287.87 mm/rad 5.0243 mm/deg	368.46 Δ=0.00
35 bar	304.64 mm/rad 5.3170 mm/deg	374.74 Δ=3.50	287.24 mm/rad 5.0133 mm/deg	372.02 Δ=3.56
70 bar	299.38 mm/rad 5.2252 mm/deg	378.50 Δ=7.26	287.88 mm/rad 5.0245 mm/deg	375.82 Δ=7.36

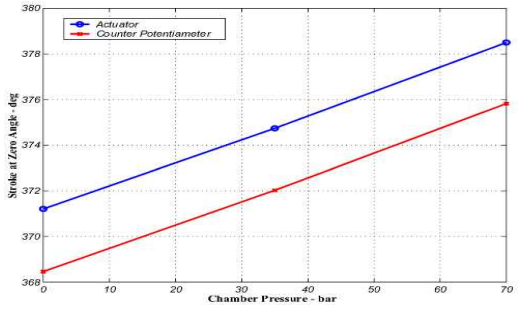

그림 13. 챔버압 증가시 TVC 구동기 및 카운터 포텐셔미터 중립 길이 변동 특성

5.3 TVC 노즐 회전중심 위치 특성

비선형 특성 분석 기법을 이용해서 TVC 노즐의 회전중심 위치 및 노즐 자체의 움직임에 대해서 추정하면 그 결과는 다음과 같다.

챔버압이 70 bar까지 증가할 때 플렉스씰 노즐의 회전중심은 노즐 출구쪽으로 3.5 mm 정도 이동한 반면, 노즐 자체적으로는 4.3 mm 정도 이동하였음을 알 수가 있다. Y축 방향으로의 이동거리에 있어서는 회전중심이 0.18 mm, 노즐이 0.13 mm 정도 변한 것으로 분석되는데 이러한 횡방향 수치는 기축 방향에 비해 미세한 움직임에 해당하며 측정오차 수준 내에 있으므로 거의 변화가 없다고 보아도 무방할 것이다.

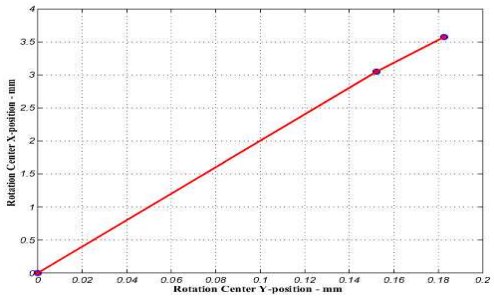

그림 14. 챔버압 증가시 TVC 노즐의 회전중심 이동 특성

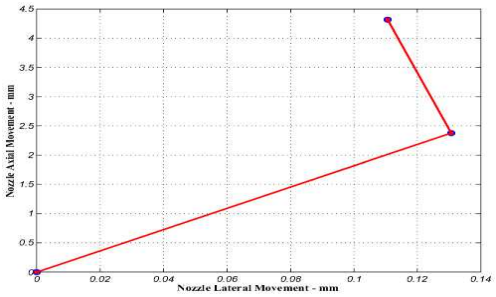

그림 15. 챔버압 증가시 TVC 노즐의 팽창 특성

5.4 TVC 노즐 추력비정렬오차

챔버압을 증가시키면서 측정한 노즐각 데이터들 중에서 TVC 명령이 0V 인 경우의 노즐각 측정치를 비교해 보면 노즐이 팽창할 때 발생하는 추력비정렬오차를 살필 수가 있다. 결과를 그림으로 정리하면 다음과 같다. 챔버압이 0 bar 일 때의 추력비정렬오차를 0 으로 가정할 때 챔버압이 70 bar 로 증가하면서 최대 0.116 도의 추력비정렬오차가 유발됨을 알 수가 있다. 이러한 오차는 구동기와 카운터 포텐셔미터 신호가 TVC 제어기 내의 보상 알고리듬으로 궤환되는 과정에서 이득 차이에 의해서 유발되기도 하고, 복합재로 제작된 연소관 자체의 변형에 의해 발생하기도 하는데 이러한 원인에 대한 상세 분석은 추후 별도로 정리되어질 예정이다. 본 결과에 의하면,

연소압이 형성되는 과정에 발생하는 추력비정렬 오차가 결코 작은 값이 아니라고 판단되며 추후 여러 차례의 수압시험과 연소시험을 통해 보다 정확히 규명할 필요가 있는 부분이라 하겠다.

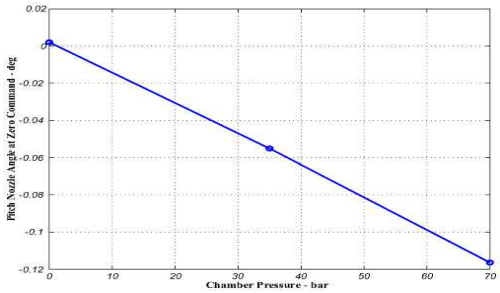

그림 16. 챔버압 증가시 플렉스씰 TVC 노즐의 추력비정렬오차 증가 특성

5.5 TVC 노즐각 제어오차 특성

챔버압이 증가함에 따라 스트로크가 길어지고 회전반경이 감소하는 등의 현상이 발생하게 되므로 일정한 TVC 전압명령 대비 실제 노즐각이 달라지고 제어 정밀도가 변하는 문제가 발생하게 된다. 이러한 특성을 파악하기 위해

$$V_{cmd} = K_V \delta + V_0$$

와 같은 형태의 추정을 수행해서 전압명령 이득값인 K_V의 변화 정도를 살펴볼 수가 있는데 그 결과는 다음과 같다.

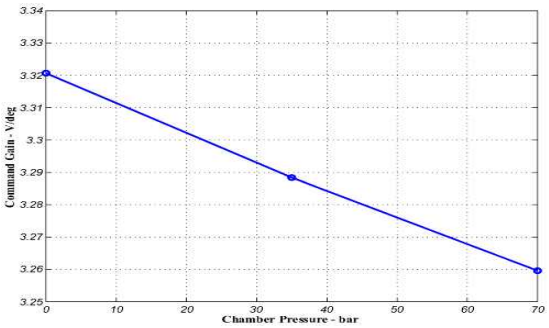

그림 17. 플렉스씰 TVC 노즐의 명령이득 변화 특성

연소 전 상태, 즉 0 bar 기준으로 전압명령이득을 셋팅했다고 가정하면, 70 bar 상태에서도 1도의 노즐 회전 명령으로서 3.3207 V가 생성될 것이다. 하지만 실제로 1도의 노즐 제어에 해당하는 전압은 3.2596 V가 되며 그 차이만큼 제어오차로 나타나게 된다. 이러한 오차 성분을 관계식으로 정리하면 다음과 같아지며,

$$\Delta\delta = \delta_{act} - \delta_{cmd} = \frac{K_{V_{set}} - K_{V_{act}}}{K_{V_{act}}}\delta_{cmd} + \frac{V_{0_{set}} - V_{0_{act}}}{K_{V_{act}}}$$

그림 17에 해당하는 최대 제어오차가 ±3도 기준으로 0.06 deg 수준이 됨을 알 수가 있다.

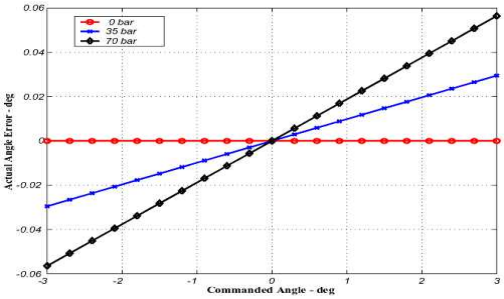

그림 18. 플렉스씰 TVC 노즐 제어오차 특성

6. 플렉스씰 TVC 노즐 동적거동 특성시험 및 분석

실물형 킥모터 조합체에 대한 TVC 동적거동 특성시험 방법과 결과에 대해 정리하면 다음과 같다.

6.1 TVC 노즐 동특성 시험 방법

플렉스씰 TVC 노즐의 동특성시험에 사용되는 신호는 일반적인 형태의 정현파 신호이다. 정현파 신호를 실시간컴퓨터에서 생성해서 TVC 명령으로 내보내게 되는데, 신호 크기에 따른 비선형성을 살펴보기 위해 0.1도, 0.25도, 0.50도, 0.75도, 1.00도 노즐각에 해당하는 5가지 전압 신호를 사용하고, 신호의 주파수는 0~100 Hz 범위를 가지도록 구성한다. 시스템의 대역폭이 존재할

것으로 예상되는 저주파수 대역에서는 신호의 주파수를 조밀하게 구성하고 상대적인 중요성이 떨어지는 고주파수 대역에서는 성기게 구성하는 방식을 적용하게 된다. 각각의 주파수역 신호에 대해 2~6초 동안의 센서 데이터를 측정해서 명령신호 대비 이득과 위상 특성을 파악함으로써 동특성을 살필 수 있게 된다. 일반적으로, 일정 주파수 정현파 신호를 동특성시험에 적용하게 되면 Chirp 신호를 적용하는 경우에 비해 특히 고주파수 대역에 대해 보다 정확한 특성 파악이 가능하다.

주파수역 특성을 파악하는 과정에서 측정 잡음의 영향을 최소화하기 위해서 보통 최소자승기법을 이용한 추정 방식을 취하게 되는데, 본 논문에서 사용한 시간 영역에서의 이득 및 위상 데이터 추정 기법에 대해 간략히 정리하면 다음과 같다. 먼저, 기준 신호를

$$u = A\sin(\omega t) \tag{15}$$

$$\dot{u} = A\omega\cos(\omega t) \tag{16}$$

라고 두고 임의의 측정신호를

$$y = B\sin(\omega t + \phi) \tag{17}$$

로 가정하면,

$$\begin{aligned} y &= B(\sin(\omega t)\cos(\phi) + \cos(\omega t)\sin(\phi)) \\ &= K_1 u + K_2 \dot{u} \end{aligned} \tag{18}$$

$$K_1 = \frac{B}{A}\cos(\phi), \quad K_2 = \frac{B}{A\omega}\sin(\phi) \tag{19}$$

와 같이 나타낼 수가 있다. 여기서 시스템의 이득은 $K = \frac{B}{A}$이고 위상은 ϕ가 된다. 따라서, K_1과 K_2를 추정하게 되면 이득과 위상은

$$K = \sqrt{K_1^2 + K_2^2\omega^2} \tag{20}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{K_2\omega}{K_1}\right) \tag{21}$$

과 같이 계산 가능하게 된다.

한편, 각속도계 신호의 경우에는 측정신호가

$$y_{rate} = C\omega\cos(\omega t + \phi)$$

와 같은 형태로 주어지므로 계산 방식이 다음과 같이 다소 달라지게 된다.

$$\begin{aligned} y_{rate} &= C\omega(\cos(\omega t)\cos(\phi) - \sin(\omega t)\sin(\phi)) \\ &= -K_3 u + K_4 \dot{u} \end{aligned}$$

(22)

$$K_3 = \frac{C\omega}{A}\sin(\phi), \quad K_4 = \frac{C}{A}\cos(\phi) \tag{23}$$

$$K = \frac{C}{A} = \sqrt{\left(\frac{K_3}{\omega}\right)^2 + K_4^2} \tag{24}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{K_3}{K_4\omega}\right) \tag{25}$$

이 경우에도 K_3와 K_4를 추정하게 되면 이득과 위상을 직접 구할 수 있다.

6.2 플렉스씰 TVC 노즐 동특성시험 결과

플렉스씰 TVC 노즐에 대한 동특성시험 결과를 그림으로 정리하면 다음과 같다. 센서 및 챔버압에 따라 다음과 같이 구분되어진다.

Case 1: 구동기 포텐셔미터 at 0 bar
Case 2: 카운터 포텐셔미터 at 0 bar
Case 3: 각속도계 at 0 bar
Case 4: 구동기 포텐셔미터 at 70 bar
Case 5: 카운터 포텐셔미터 at 70 bar
Case 6: 각속도계 at 70 bar

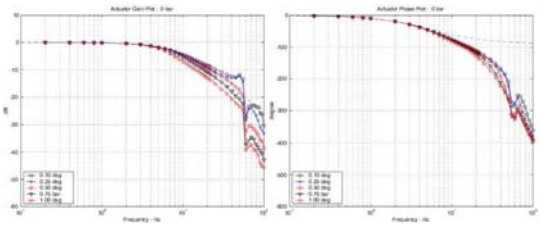

그림 19. 플렉스씰 TVC 노즐 동특성: Case 1

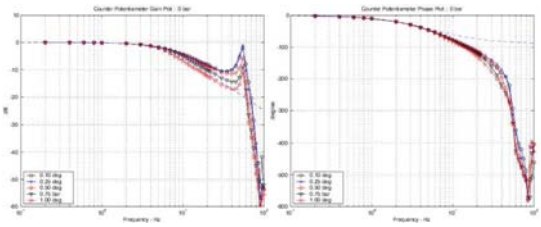

그림 20. 플렉스씰 TVC 노즐 동특성: Case 2

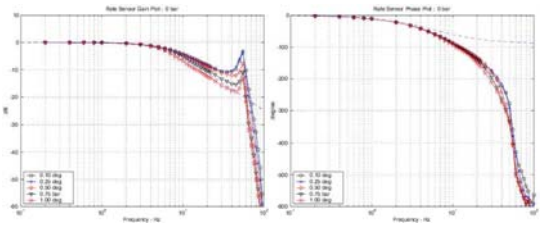

그림 21. 플렉스씰 TVC 노즐 동특성: Case 3

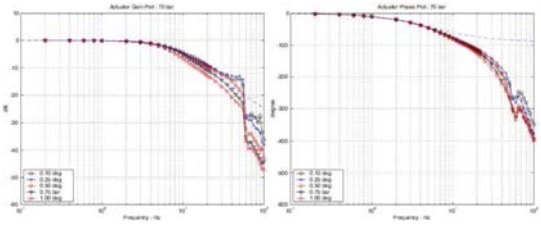

그림 22. 플렉스씰 TVC 노즐 동특성: Case 4

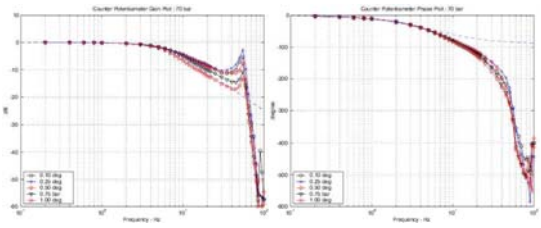

그림 23. 플렉스씰 TVC 노즐 동특성: Case 5

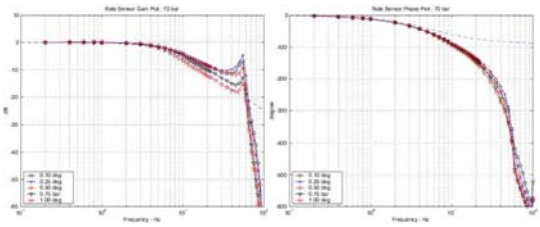

그림 24. 플렉스씰 TVC 노즐 동특성: Case 6

그림에 의하면, TVC 노즐의 공진모드가 55 Hz 대역에 존재함을 알 수가 있다. 공진이득은 -3~0 dB 수준으로서 벤딩 등 발사체의 다른 진동 모드와의 공진을 없애기 위해서는 필터 설계가 필수적이라 하겠다. 센서별 신호 특성을 비교해 보면, 각속도계 신호와 카운터 포텐셔미터 신호에서는 공진모드가 나타나지만 구동기 포텐셔미터 신호에서는 거의 나타나지 않는 것으로 분석된다. 동특성에 있어서는, 0~1도 신호 기준으로 대역폭이 5.7 Hz 이상 유지되는 것으로 분석된다. 신호 크기에 따라 공진이득의 크기가 다르고, 1도 신호에서는 5.7 Hz 정도인 대역폭이 0.1도 신호에서는 7.5 Hz 이상으로 크게 증가하는 등 비선형적인 특성이 있음에 유의할 필요가 있다. 필터 설계 시에 이러한 비선형성을 적절히 고려해야 할 것으로 여겨진다. 챔버압 크기에 따른 동특성은 거의 차이가 없는 것으로 분석된다. 실물 노즐에 대한 동특성 시험을 0 bar 상태에서 수행해서 필터의 설계 및 성능 검증을 수행하더라도 실제 연소 상황에서 별 문제가 없을 것이라 예상되는 부분이다.

7. 결 론

본 논문에서는 KSLV-I 상단부 시험을 목적으로 제작된 실물형 킥모터 조합체에 대한 TVC 구동특성시험 및 분석 결과를 정리하였다. 시험설비 구성, 시험 및 분석 방법, 및 개략적인 시험 결과들을 제시하였다. 시험 결과를 토대로, TVC 운용 알고리듬, 안정화 필터 설계 등의 작업이

이루어질 예정이며 지상연소시험을 통한 성능 검증 작업 또한 수행되어질 계획이다.

참 고 문 헌

1. 선병찬 외, “플렉시블 씰 엔진노즐의 TVC 구동오차 특성분석”, 2005 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2005. 11, pp.848~851.
2. 선병찬 외, “플렉스씰 노즐 TVC 구동특성시험 및 분석기법”, 2006 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2006. 4, pp.643~646.
3. 선병찬, 박용규, 최형돈, “KSR-III 김발엔진 구동장치 서보필터 설계”, 한국항공우주학회지, 제32권, 제10호, 2004, pp.83~92.
4. 민병주, 박문수, 이희중, 선병찬, 최형돈, “고체모터 가동노즐 구동장치시스템”, 한국항공우주학회지, 제32권, 제5호, 2004, pp.122～128.