

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(2), 165-171(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.2.165

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

정지궤도 복합위성 플룸 외란 계산 기법 연구

강우용*, 채종원, 박영웅

A Study on Plume Disturbance Calculation Method of
GEO-KOMPSAT-2 Satellite

Wooyong Kang*, Jongwon Chae and Youngwoong Park

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

The attitude control, station keeping and wheel off-loading at GEO-KOMPSAT-2 are realized by thrusters firings. Thrusters 1, 2 and 3 are mounted on the same axis as the solar array, which generates the plume disturbance largely. Therefore the effect of plume disturbance should be analyzed from satellite design phase. In this paper, we described the calculation method of plume disturbance and analyzed the plume disturbance of thruster 1,2 and 3 using GEO-KOMPSAT-2 initial configuration.

초 록

정지궤도복합위성은 추력기 분사를 이용하여 자세제어, 궤도 유지, 휠 오프로딩 등을 수행한다. 장착된 추력기 중 1, 2, 3번 추력기는 태양전지판과 같은 축에 장착된다. 이로 인하여 추력기 1, 2, 3번은 플룸 외란의 영향이 크게 발생한다. 그러므로 위성 설계 단계에서 부터 플룸 외란의 영향을 분석해야 한다. 본 논문에서는 정지궤도복합위성의 초기 형상을 이용하여 추력기에서 발생하는 플룸 외란을 계산하는 과정을 기술하고 추력기 조정각에 따른 플룸 외란의 영향을 분석하였다.

Key Words : GEO-KOMPSAT2(정지궤도복합위성), Plume(플룸), Disturbance(외란), Thruster(추력기), Station keeping(궤도 유지), Attitude control(자세제어)

1. 서 론

정지궤도복합위성(GK2 : GEO-KOMPSAT2)은 각 축에 장착되어 있는 추력기(Thruster)를 이용하여 자세제어 뿐 아니라 궤도 유지(Station Keeping), 휠 오프로딩(Wheel Off-loading)과 같은 임무를 수행한다. 우주공간에서 추력기를 사

용하기 위해서는 장착 오차(Misalignment), 추진제의 슬로싱(Sloshing) 효과, 플룸(Plume) 외란에 의한 영향 등을 고려해야 한다. 특히, 정지궤도복합위성의 경우 Fig. 1과 같이 추력기 1, 2, 3번은 태양전지판(SA: Solar Array)과 같은 면에 장착되어 있으므로 추력기 분사 시 플룸 외란의 영향이 크게 나타난다[1,2]. 그러므로 위성개발초기

† Received : August 24, 2015 Revised : January 22, 2016 Accepted : January 28, 2016

* Corresponding author, E-mail : kang79@kari.re.kr

단계부터 플룸 외란 해석을 통하여 외란의 영향을 최소화할 수 있는 추력기 설계를 해야 한다. 본 논문에서는 정지궤도복합위성의 초기 형상을 이용하여 플룸 외란을 계산하는 과정을 기술하고 추력기 조정각(Tilt Angle, β)각에 따른 플룸 외란의 영향을 분석하였다.

II. 플룸 외란 계산 절차

2.1 추력기 플룸 외란 계산(배치각 0°)

플룸 외란의 크기는 추력기의 장착 위치 및 분사 특성, 태양전지판의 형상, 태양전지판의 구동축(SADM : Solar Array Drive Mechanism)의 위치 등의 요인에 따라 결정된다[3,4]. 그러므로 플룸 외란에 영향을 주는 다양한 요인들은 Astrium SAS의 SYSTEMA/PLUME 소프트웨어를 사용하여 단순화된 계수를 만들어 사용한다[5]. 본 논문에서는 이를 플룸 외란 계수로 정의하며 식 (1)과 같이 추력기의 위치와 SADM 사이의 거리, 추력기 조정각에 따른 3차 다항식으로 추력기에서의 플룸 외란 값을 계산 할 수 있도록 한다. 이러한 과정을 통하여 계산한 플룸 외란은 Fig. 2와 같이 모든 추력기의 배치각(위성의 XZ 평면에서 추력기가 이루는 각)을 0°만든 상태에서 추력기와 SADM 사이의 거리, 추력기 조정각(위성의 YZ평면에서 추력기가 이루는 각)에 따라 달라진다.

$$(d, \beta) = a + a_2 \times d + a_3 \times d^2 + a_4 \times d^3 \quad (1)$$

$$+ a_5 \times \beta + a_6 \times d \times \beta + a_7 \times d^2 \times \beta$$

$$+ a_8 \times \beta^2 + a_9 \times d \times \beta^2 + a_{10} \times \beta^3$$

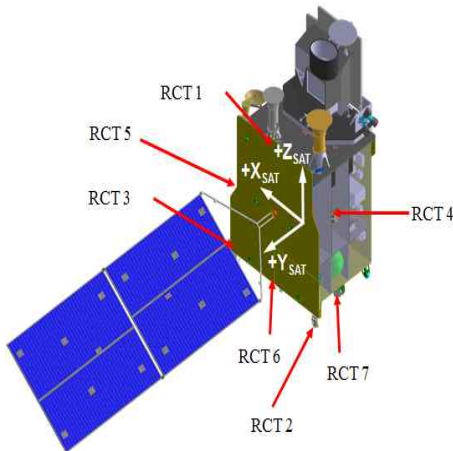


Fig. 1. The configuration of GK2

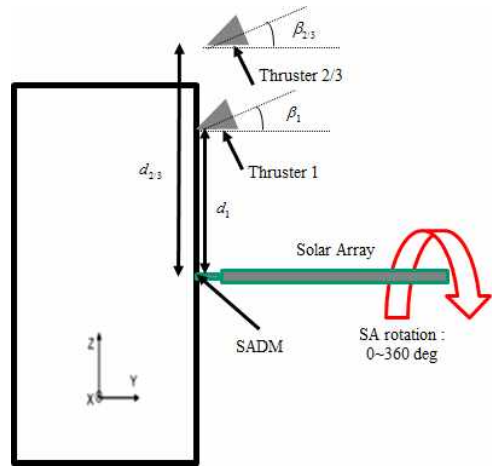


Fig. 2. Thruster position for generating plume disturbance coefficients

	F_x/F_0	F_y/F_0	F_z/F_0	$T_x/F_0(m)$	$T_y/F_0(m)$	T_z/F_0		
Set 1 Coefficients	c_{11}^1	c_{21}^1	c_{31}^1	c_{41}^1	c_{51}^1	c_{61}^1		
		
	c_{11}^{10}	c_{21}^{10}	c_{31}^{10}	c_{41}^{10}	c_{51}^{10}	c_{61}^{10}		
		
	Set n Coefficients	c_{1n}^1	c_{2n}^1	c_{3n}^1	c_{4n}^1	c_{5n}^1	c_{6n}^1	
		
		c_{1n}^{10}	c_{2n}^{10}	c_{3n}^{10}	c_{4n}^{10}	c_{5n}^{10}	c_{6n}^{10}	
		
		set 64 Coefficients	c_{164}^1	c_{264}^1	c_{364}^1	c_{464}^1	c_{564}^1	c_{664}^1
		
c_{164}^{10}			c_{264}^{10}	c_{364}^{10}	c_{464}^{10}	c_{564}^{10}	c_{664}^{10}	
...			

Fig. 3. Plume disturbance coefficients

여기서, $a_1 \sim a_{10}$ 는 플룸외란계수, d 는 추력기와 SADM 사이의 거리, β 는 추력기 조정각을 의미한다.

태양전지판의 회전을 반영해주기 위해서 플룸 외란 계수는 태양 전지판의 5.625° 회전 간격에 대해서 Fig. 3과 같은 형태로 64 세트의 외란 계수가 생성된다[5]. 그러므로 식 (1)의 플룸 외란 계수를 Fig. 3의 첫 번째 열인 X축 플룸 외력의 64개의 외란계수($c_{11}^1 \sim c_{164}^1$)로 바꾸어서 계산하게 되면 식 (2)와 같이 태양전지판의 회전을 반영한 플룸 외란을 생성할 수 있다.

$$p \quad n\omega_0) \quad (2)$$

$$= c_{1n}^1 + c_{1n}^2 \times d + c_{1n}^3 \times d^2 + c_{1n}^4 \times d^3$$

$$+ c_{1n}^5 \times \beta + c_{1n}^6 \times d \times \beta + c_{1n}^7 \times d^2 \times \beta$$

$$+ c_{1n}^8 \times \beta^2 + c_{1n}^9 \times d \times \beta^2 + c_{1n}^{10} \times d^2 \times \beta$$

여기서, n 는 플룸 외란 해석을 위해 사용한 태양전지판의 회전 각도(5.625°)이며 n 은 1~64까지로 플룸 외란 계수의 세트 번호를 의미한다.

하나의 외란 계수 세트에는 X, Y, Z축 플룸 외력(Plume Disturbance Force) 및 외란토크(Plume Disturbance Torque)를 계산할 수 있도록 각 열별로 10개씩의 계수로 이루어진다. 그러므로 식 (2)의 과정을 각 추력기에 대해서 열별로 수행하게 되면 식 (3)과 같이 추력기에 의한 X, Y, Z축 플룸 외력($F_k^{64 \times 3}$) 및 외란토크($PT_k^{64 \times 3}$)를 계산할 수 있다.

$$P_k^{64 \times 6} = PF_k^{64 \times 3} PT_k^{64 \times 3} \quad (3)$$

$$PF_k^{64 \times 3} = [p^{F_x}(n\omega_0) p^{F_y}(n\omega_0) p^{F_z}(n\omega_0)]$$

$$PT_k^{64 \times 3} = [p^{T_x}(n\omega_0) p^{T_y}(n\omega_0) p^{T_z}(n\omega_0)]$$

여기서, k 는 추력기 번호를 의미한다.

2.2 추력기 배치각에 따른 플룸 외란

플룸 외란 계수를 이용하여 식 (3)에서 계산한 플룸 외란은 추력기 배치각(Alpha Angle, α)을 0°로 가정하고 계산한 값이다. 그러나 실제 추력기의 배치는 Fig. 4와 같이 XZ 평면에서의 배치각을 가지고 있다. 실제 발생하게 되는 플룸 외란은 식 (4)에서와 같이 추력기 배치각과 태양전지판이 이루는 각(ω_k)에 의해서 영향을 받는다. 그러므로 이를 고려하여 각 추력기별 플룸 외란을 계산하는 과정이 필요하다.

$$\omega_k = \omega_0 \cdot n - \alpha_k \quad (4)$$

여기서, α_k 는 XZ 평면에서의 각 추력기와

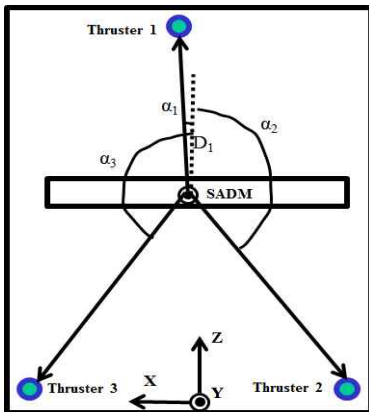


Fig. 4. Thruster placement allow for alpha angle

SADM이 이루는 배치각을 의미한다.

식 (3)의 계산 과정에서 사용한 플룸 외란 계수는 추력기 배치각을 0°가정한 값이므로 배치각의 영향을 고려하지 않았다. 그러므로 이를 반영해주기 위해서 식 (3)에서 구한 추력기 플룸 외란을 식 (5)에서와 같이 6차 푸리에 급수로 모델링한 후 모델링된 식을 바탕으로 식 (6)와 같이 최소자승법을 이용하여 푸리에 계수를 추정한다. 그리고 추정된 푸리에 계수를 이용하여 추력기 배치각에 따른 플룸 외란($TP_k^{64 \times 6}$)을 식 (7)과 같이 계산한다.

$$p^i(n\omega_0) = a_0 + a_1 \cos(n\omega_0) + b_1 \sin(n\omega_0) + \dots + a_6 \cos(6n\omega_0) + b_6 \sin(6n\omega_0) \quad (5)$$

여기서, $a_0, a_1 \sim a_6, b_1 \sim b_6$ 은 푸리에 계수(Fourier Coefficients)를 의미한다.

$$FC_k^{13 \times 6} = (M_0^T M_0)^{-1} M_0^T P_k^{64 \times 6} \quad (6)$$

여기서, M_0 은 푸리에 급수 모델로서 이에 대한 정의는 다음과 같다.

$$M^{64 \times 13}(\omega_0) = \begin{bmatrix} 1\cos(\omega_0) \cdots \cos(6\omega_0) & \sin(\omega_0) \cdots \sin(6\omega_0) \\ \vdots & \vdots \\ 1\cos(n\omega_0) \cdots \cos(6n\omega_0) & \sin(n\omega_0) \cdots \sin(6n\omega_0) \\ \vdots & \vdots \\ 1\cos(64\omega_0) \cdots \cos(6 \cdot 64\omega_0) & \sin(64\omega_0) \cdots \sin(6 \cdot 64\omega_0) \end{bmatrix}$$

$$P^{64 \times 6} = [TPF_k^{64 \times 3} TPT_k^{64 \times 3}] = M_k \cdot FC_k^{13 \times 6} \quad (7)$$

여기서, M_k 는 추력기 배치각을 고려한 푸리에 급수 모델로서 이에 대한 정의는 다음과 같다.

$$M_k = M^{64 \times 13}(\omega_k) = \begin{bmatrix} 1\cos(\omega_k) \cdots \cos(6\omega_k) & \sin(\omega_k) \cdots \sin(6\omega_k) \\ \vdots & \vdots \\ 1\cos(n\omega_k) \cdots \cos(6n\omega_k) & \sin(n\omega_k) \cdots \sin(6n\omega_k) \\ \vdots & \vdots \\ 1\cos(64\omega_k) \cdots \cos(6 \cdot 64\omega_k) & \sin(64\omega_k) \cdots \sin(6 \cdot 64\omega_k) \end{bmatrix}$$

2.3 위성에 영향을 미치는 플룸 외란 계산

위성에 영향을 미치는 플룸 외란은 추력기 배치각을 고려한 플룸 외란에서 플룸 외력과 플룸 외란 토크로 나누어서 계산한다. 추력기에서 발생한 플룸 외력이 위성으로 영향을 줄 때 COG와 SADM 사이의 변이에 의하여 추가적인 외란 토크를 발생시키기 때문이다. 그러므로 위성에 영향을 미치는 플룸 외력은 식 (8)과 같이 추력기에 의해 발생한 플룸 외력을 추력기와 SADM

이 이루는 각으로 변환시켜 준다.

그리고 위성에 영향을 미치는 플룸 외란 토크는 추력기와 SADM과의 이루는 각을 통한 변환과 함께 COG와 SADM 사이의 변이에 의한 영향을 추가적으로 고려하여 식 (9)와 같이 계산한다.

$$PF_k^{64 \times 3} \quad A(TPF_k^{64 \times 3}) \}^T \quad (8)$$

$$SPT_k^{64 \times 3} = \left\{ A(TPT_k^{64 \times 3})^T \right\}^T + \left\{ B(TPF_k^{64 \times 3})^T \right\}^T \quad (9)$$

여기서, A는 추력기와 SADM 사이의 배치각에 따른 회전 변환 행렬, B는 COG와 SADM 사이의 거리 차이를 고려하여 만든 Skew-Matrix를 의미한다.

III. 플룸 외란 계산 결과

3.1 정지궤도 복합위성 형상

플룸 외란을 계산하기 위한 정지궤도 복합위성 형상은 Table 1과 같이 설정하였다. 표에서 각 추력기와 SADM의 위치는 위성에 장착되는 구조물의 중간 값이다. 추력기에서 발생하는 추력은 10N이며 COG는 위성 임무 기간의 중간(Middle of Life)에 해당하는 값을 사용하였다. 그리고 태양전지판의 Fig. 5와 같은 형상으로 모델링 하였으며 Yoke의 크기(Width/Length)는 2219×966(mm), Panel의 크기는 2216×2730이다. 그리고 추력기 1, 2, 3번의 배치각은 α_1 은 1.93°, α_2 는 -139.52°, α_3 는 139.08°으로 설정하였다.

추력기 조정각은 추력기와 태양전지판의 배치를 기준으로 10~20°로 설정하여 추력기 조정각에 따라 플룸 외란의 영향을 분석할 수 있도록 하였다. 추력기 조정각을 10° 이하로 할 경우 태양전지판의 크기를 고려해 볼때 플룸에 의해서 오염

Table 1. Position of Thruster, COG , SADM

	X(m)	Y(m)	Z(m)
Thruster 1	0.000	1.000	3.280
Thruster 2	-1.282	1.000	0.120
Thruster 3	1.282	1.000	0.120
COG	-0.010	0.010	1.655
SADM	0.000	1.000	1.720

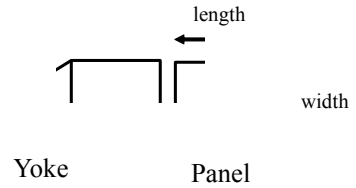


Fig. 5. The configuration of solar array

이 많이 발생하게 되며 반대로 추력기 조정각을 20° 이상으로 크게 할수록 추력의 방향이 분산되어 추력기 효율이 저하되므로 위의 범위 이내에서 추력기의 조정각이 결정된다.

또한, 플룸 외란 결과는 추력기 1, 2, 3번 각각에서 발생하는 플룸 외란을 먼저 분석한 후 추력기가 동시에 작동하는 남북 위치 유지 기동에 대해서 분석하였다.

3.2 추력기 조정각에 따른 플룸 외란 결과

추력기 조정각에 따른 추력기 1, 2, 3번 각각의 플룸 외력 결과는 Fig 6~8과 같다. 그림에서 X축은 0~360°까지 태양전지판의 회전 각도로서 하루 주기로 360° 회전한다. Y축은 위성에 영향을 미치는 플룸 외력값을 나타낸다. 추력기 모두에서 추력기 조정각을 크게 할수록 플룸 외력이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 각 추력기의 배치각이 다르므로 태양전지판의 회전 각도에 대해서 플룸 외력 값의 형상이 다르게 나타나고 있다.

그리고 위성의 X, Z 축에 비해서 Y축 방향으로 플룸 외력이 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 추력기가 Y축 방향으로 주 추력을 발생시키는 배치를 가지기 때문이다. 추력기 1, 2, 3번의 경우 위성의 +Y축에 장착되어 -Y축 방향으로 추력을 발생시키는 역할을 한다. 플룸 외력은 원하는 추력기 모두에서 원하는 추력의 반대 방향으로 플룸 외력이 발생함을 확인 할 수 있으며 그 크기는 10N 추력 기준에서 1~5% 임을 확인 할 수 있다.

남북방향 궤도 유지시에는 추력기 1, 2, 3번이 동시에 작동하게 되며 3개의 추력기에서 발행하는 플룸 외력이 합해져서 위성에 영향을 주게 되며 그 결과는 Fig. 9와 같다. 각 추력기별 결과와 마찬가지로 위성의 Y축 방향으로 플룸 외력이 크게 나타나며 그 크기는 추력기 조정각 10°인 경우 1N이다. 이 값은 위성의 남북 위치 유지 시 -Y축 방향으로 30N의 추력을 발생시키게 되

는데 추력 발생의 반대 방향으로 3%정도의 플룸 외력이 발생하게 되며 이로 인해서 효율이 저하된다.

추력기 조정각에 따른 추력기별 플룸 외란 토크 결과는 Fig. 10~12와 같다. 각 추력기 모두 위성 조정각이 작을수록 외란 토크가 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 또한 Y축 플룸 외란토크에

비해서 X, Z축 플룸 외란토크가 크게 나타난다. 이는 추력기 1, 2, 3번이 롤(X축), 요(Y축) 자세제어에 사용되므로 이 방향으로 토크가 크게 나타날 수 있는 배치를 가지기 때문이다. 자세제어용으로 추력기가 사용될 경우 추력기의 위치와 COG 외적인 방향으로 토크가 추력기 1번의 경

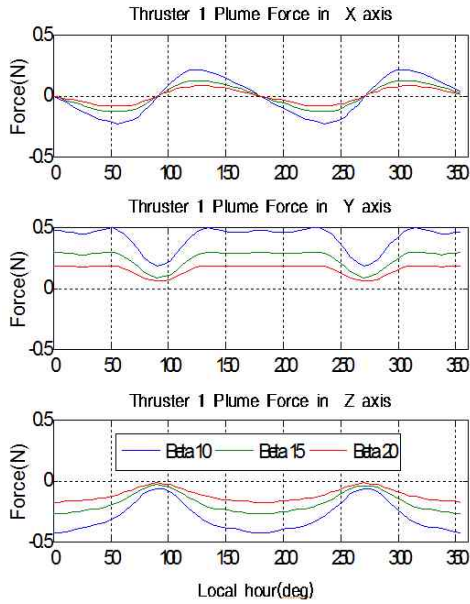


Fig. 6. Thruster 1 plume force

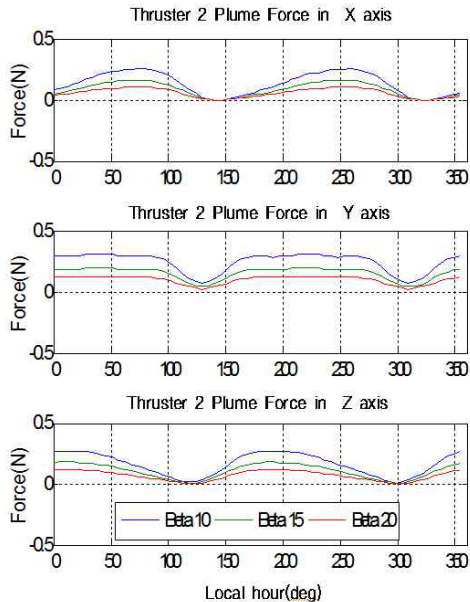


Fig. 7. Thruster 2 plume force

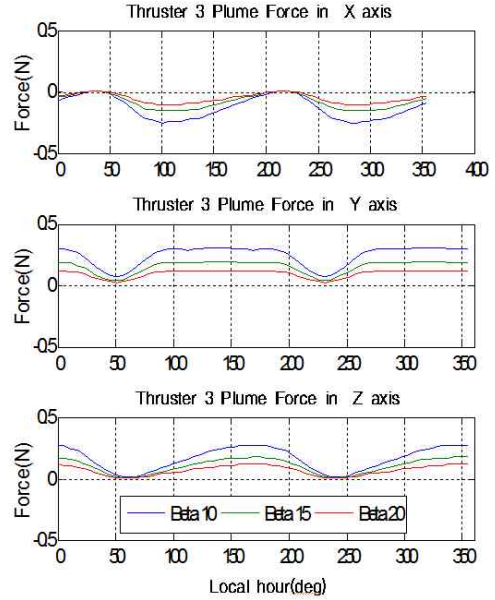


Fig. 8. Thruster 3 plume force

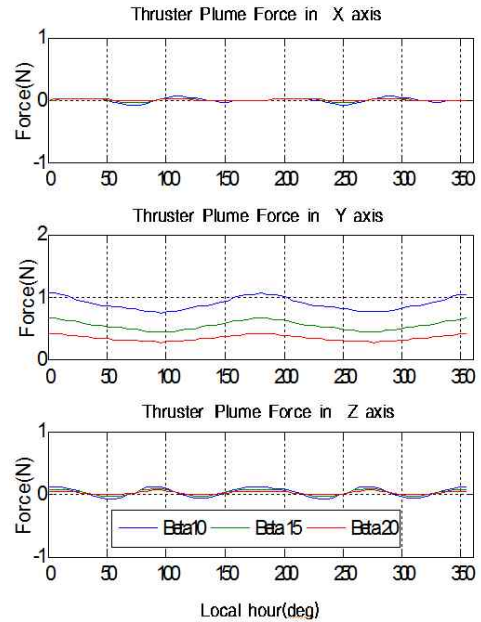


Fig. 9. NS station keeping plume disturbance force

우 롤 토크가 14Nm, 추력기 2번의 경우 롤 토크가 -12Nm, 요 토크가 10.2Nm, 추력기 3번의 경우 롤 토크가 -12Nm, 요 토크가 -10.2Nm 발생한다. 추력기 조정각이 작은 경우 플룸 외란 토크는 각 추력기가 발생 할 수 있는 토크에 대해서 반대 방향으로 10%발생하며 이런 외란토크가 발생할 경우 제어기에 외란으로 작용하므로

제어 성능 저하를 가져 올 수 있다.

추력기 모두가 동작하는 남북 위치 유지 기동시에 발생하는 플룸 외란토크는 Fig. 13과 같다. 이상적인 궤도 유지시에는 궤도 유지를 위한 추력만 발생하고 토크는 발생하지 않아야 한다. 그러나 추력기 작동에 의한 플룸 외란에 의해서 플

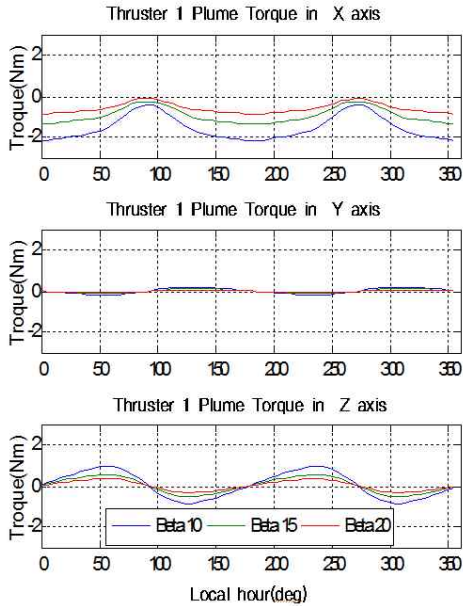


Fig. 10. Thruster 1 plume torque

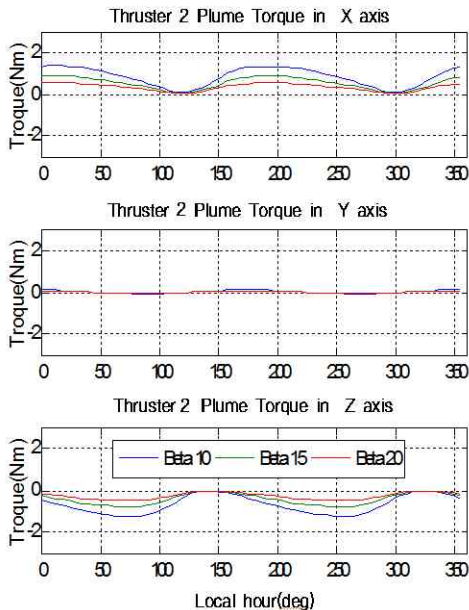


Fig. 11. Thruster 2 plume torque

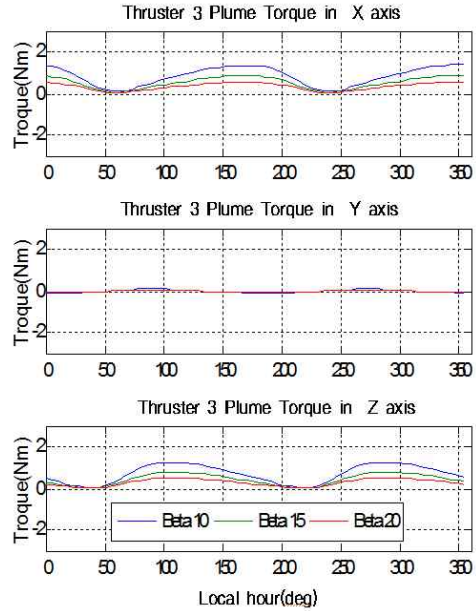


Fig. 12. Thruster 3 plume torque

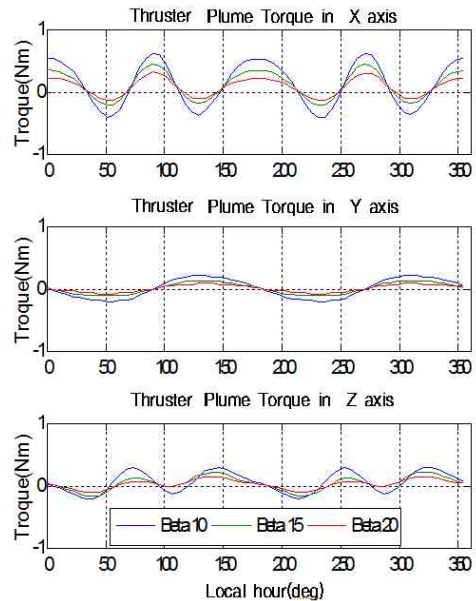


Fig. 13. NS station keeping plume disturbance torque

플룸 외란토크가 각 축에서 모두 발생하며 추력기 조정각이 작은 경우 0.5Nm의 값이다. 이러한 외란토크를 제어하기 위해서 제어기에서는 제어 토크를 생성해야 하며 이 과정에서 추가적인 연료 소모가 발생한다.

IV. 결 론

정지궤도복합위성은 추력기 분사를 이용하여 다양한 기동을 수행하므로 추력기 외란 해석이 필요하다. 특히, 플룸 외란의 경우 추력 분사 시 발생하며 이에 대한 영향을 고려하여 추력기 배치 및 제어기 설계를 해야 한다. 이를 위하여 정지궤도복합위성의 초기 형상을 이용하여 플룸 외란을 계산하였으며 추력기 조정각에 따른 플룸 외란을 분석하였다. 분석 결과 추력기 조정각을 크게 할수록 플룸 외란의 영향이 감소함을 확인 할 수 있다. 또한, 계산된 플룸 외란 값과 추력기 성능을 비교하여 플룸 외란이 추력기에 미치는 영향을 확인하였다. 향후 위의 결과를 바탕으로 추력기 효율과 자세제어 성능은 최대가 되며 플룸 외란의 영향은 최소가 되는 추력기 최적 배치에 이를 활용한다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부에서 지원하는 특정 연구개발 사업의 일환으로 수행중인 '정지궤도복합위성 개발사업'의 연구 결과입니다.

References

- 1) Choi J.D, Park J.S, Chang S.S, Park, B.K, Kim J.A, Lee S.R, "GEO-KOMPSAT2 Satellite Development Status", Autumn Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space sciences, 2012, PP.864-869.
- 2) Park Y.W, "Thruster Configuration Optimization on COMS and Preliminary Performance Analysis ", Korea Aerospace Research Institute, 2006, PP.114-118.
- 3) Kang W.Y, Chae J.W, Park Y.W, Choi H.T, " Analysis of GEO-KOMPSAT-2 Satellite Plume Disturbance", Autumn Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space sciences, 2013, PP.1448-1451.
- 4) Chae J.W, Han J.Y, Jun H.Y, " A Technology Development of Dynamic Effects Analysis on Solar Arrays Due to Attitude Control Thruster's Plume of Geostationary Satellite", Autumn Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space sciences, 2013, PP.1392-1395.
- 5) Chae J.W, Han J.Y, Jun H.Y, " Dynamic Effects Analysis on a Solar Array Due to Attitude Control Thruster Plume", J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(9), 799-804(2015).