

Active Stick 제어기 개발에 관한 연구

A study of an Active Stick Controlling System with Friction Observer

김 명 열* 남 윤 수**
Kim, Myung-Yul Nam, Yoon-su

Abstract

An active stick which supplies force feedback to the operator is developed in this study. A mathematical model of the active stick is derived, and compared with the experimental result. It turns out that the frictional torque due to the mechanical contacts of several parts of the stick is one of the major barriers to achieve high precision operation of the stick. The frictional effect of the stick is cancelled out by using a friction observer. The efficacy of the friction observer is verified through the numerical simulation. Because of the observer dynamics, there are some limitations in exact recovering the static friction and Stribeck effect. However, the friction observer follows the real friction on the average. It's anticipated that the application of the friction observer to the closed loop control of the active stick improves the performance of the displacement versus force characteristics, which will be proved experimentally in the further study.

Keywords : *Active Stick, Friction Observer, Hysteresys, 2 Axis Force Sensor, Variable Force-feel Characteristics*

1. 서론

항공기 증진투기는 여러 가지의 다양한 상황과 임무에 직면하게 된다.

대표적인 예를 들자면, 전투모드와 공중급유모드를 들 수 있겠다. 전자의 경우, 파일럿의 생명과 연관되어 민첩한 기동을 필요로 하지만, 후자의 경우는 민첩성보다는 섬세하고 정확한 기동이 요구된다.

다시 말해, 수행하는 임무의 특성에 따라서 Stick

의 성격이 달라야 한다는 것이다.

하지만, 지금까지 사용되어온 Stick은 이러한 요구가 전혀 고려되지 않았으며, 현재 Simulation장치에 사용되고 있는 장치 또한 마찬가지이다.

따라서, 실제상황 재현과 많은 차이점을 보여왔으며 더욱이, 외국의 조종사와 우리나라의 조종사 간의 체격과 체력의 차이가 고려되지 않았으므로, 우리나라의 실정에 맞는 맞춤형 Stick의 개발이 절실하다 하겠다. 따라서, 이번 연구를 통해 개발하고자 하는 Active Stick은 시뮬레이션장치에서의 실제상황 구현에 없어서는 안될 중요한 장치이다.

이 연구를 통해 얻게 되는 기술은 앞으로 독자적으로 Stick을 만드는데 필요한 연구라 하겠다.

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 부교수, 공학박사

2. Active Stick 설계

2.1 Active Stick의 기계적 구조

가능한 한 소형구조를 갖도록 기구 메커니즘이 설계되었다. Fig. 1은 MDT로 모델링된 기구 메커니즘을 보여주고 있다. 이 그림의 좌 상단부는 피치축에서 바라본 스틱의 구조, 우 상단부는 반대편 피치축에서 바라본 스틱의 구조, 그리고 하단부는 Active Stick의 전체적인 구조를 각각 나타낸다. 좌 상단부 그림에서 볼 수 있는 롤축 구동모터는 감속기와 체결된 후, 스틱 어셈블리 외부 프레임에 고정되어 있는 브라켓에 고정되어 있다. 또한, 이 브라켓에는 피치축 전체가 결합되어 있다. 즉, 피치축 감속기가 브라켓에 직결된 구조를 갖게 된다. 따라서, 롤 모터가 회전하게 되면, 피치축 구동모터를 포함한 피치축 전체가 함께 회전 운동을 하게 된다. 한편, 스틱 뭉치는 피치축 감속기에 부착된 브라켓 위에 고정된다. 따라서, 스틱이 피치축으로 회전하게 되면, Fig. 1의 우 상단부에 보이는 피치모터 외부 프레임이 같은 방향으로 회전하게 된다.

각 회전축에 대하여 설치된 스프링과 LVDT는 Fig. 1의 하단부에서 볼 수 있다. 스프링과 LVDT를 잡고 있는 홀더는 스틱 어셈블리 외부에 고정된다. 따라서, 각 축에 대한 회전은 스프링 반력을 받게 되고, 이 때 이동된 스프링의 상대거리는 LVDT에 의하여 계측된다.

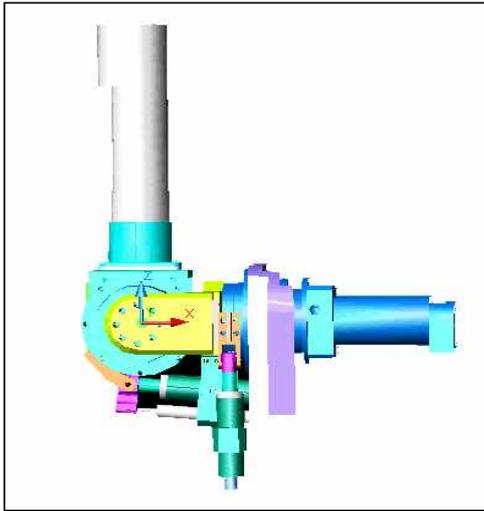


Fig. 1 Active Stick의 CAD 모델

2.2 2-축 힘 센서의 설계

Fig. 8 와 같은 구조를 갖는 2-축 힘 센서를 개발 적용하였다.

이 그림의 중앙에 개발된 2-축 힘 센서의 구조가 개략적으로 도시되어 있다. 이 그림의 좌단부에 그려진 4개의 날개부를 갖는 부분이 스틱에 가해진 힘을 측정하게 된다. 즉, 이와 같은 구조에 대하여 피치또는 롤 방향으로 스틱에 힘이 가해지면, 대각선으로 위치된 양 날개의 한면에는 압축력, 그리고 반대쪽 면에는 인장력이 발생된다.

날개 부 하단에 접시 모양을 갖는 부분에 4개의 스트레인 게이지를 접착하고, 일반적인 스트레인 게이지 증폭회로를 사용하면, 가해진 힘에 비례하는 전기신호를 얻을 수 있다. 또한, 이 그림의 우단부는 결정된 힘 센서 구조에 대한 FEM 해석 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 좌측으로 1 N의 집중하중이 작용되면, 스트레인 게이지 장착부에는 1.43×10^{-4} 의 스트레인이 발생된다.

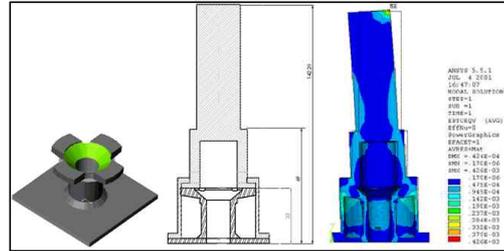


Fig. 2 2-축 힘센서의 구조

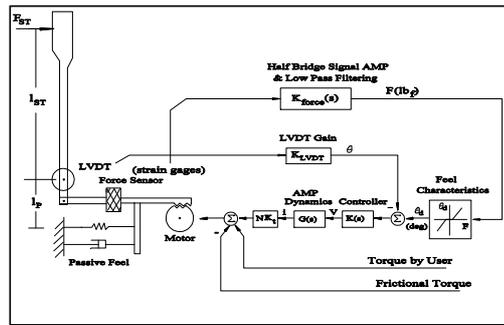


Fig. 3 Active Stick의 페루프 구조

3. Active Stick의 Dynamic Model.

3.1 Active Stick의 다이내믹스

Fig.3 은 힘과 변위 센서에서 측정된 정보를 이용하는 Active Stick의 페루프 구조를 나타낸다. Fig.3의 force-feel characteristics은 각각의 축에

Table 1 Description of parameters

Symbol	Description	Values		Unit
		Pitch-axis	Roll-axis	
J_{EQ}	Moment of inertia	206.85	262.16	$kgcm^2$
C	Damping coefficient	8.58	8.58	$kgfcm/(r/s)$
K	Spring constant	12.3	12.3	kgf/cm
IP	Distance of spring location from rotational center	4.95	4.91	Cm
IST	Distance of acting force location from rotational center	2.0	2.0	Cm
N	Gear reduction ratio	91	91	-
Kt	Torque constant of BLDC motor	0.7665	0.7665	$kgfcm/A$
$KLVDT$	LVDT signal gain	1.9549	1.9738	deg/V
$Kforce$	Force sensor gain	4.7103	5.0736	lbf/V

pre-programmed 되어 rotational command를 생성시키며, 간단한 변경에 의해 다른 성질을 가지도록 수정되어 질 수 있다.

다음의 식(1)로 나타나는 Active Stick의 개루프 다이내믹스는 (2)의 식으로 유도 할 수 있다.

$$J_{BQ}\ddot{\Theta} + C\dot{\Theta} + K\Theta = NK_t i - T_f + F_{ST}I_{ST}$$

$$i = G(s)V \quad (1)$$

Θ : 회전각 (rad)

F_{ST} : 파일럿에 의해 스틱에 가해진 힘 (lbf)

T_f : 마찰력 ($kgf\ cm$)

식 (1)에 쓰인 나머지 변수들은 Table 1.에 정리되었으며, 식(1)의 두 번째 식은 아래의 character를 갖는 BLDC 모터의 앰프다이내믹스를 나타낸다.

$$G(s) = \frac{2.9376}{(s/(120 \times 2\pi))^2 + 2 \times 0.9(s/120 \times 2\pi) + 1} \quad (A/V) \quad (2)$$

식(1)에 나타난 개루프 다이내믹스를 증명하기 위해 주파수응답 실험을 실시하였고, 그 결과가 Fig. 4 에 나타나 있다.

Fig. 4에 그려져 있는 점선은 피치축의 이론적인 응답선도이며, 나머지 실선들은 실제 실험을 통해 얻어낸 BLDC 모터 가진신호의 응답선도이다.

비례제어 게인은 피치축에 대하여 0.5, 그리고 롤축에 대하여 0.6의 값이 적용되었다. 개루프실험에서와 같이, 가진신호의 크기를 0.6, 1.2, 2.4, 4.8 Vpp 의 값으로 변화시켜 가면서 얻어진 피치축의 페루프 주파수 응답이 Fig. 4 에 그려져 있다.

DC 주파수 영역에서 큰 DC 게인 값을 갖는 순서대로 가진신호의 크기 변화에 따른 주파수 응답선도가 대응된다.

즉, 가진신호의 크기가 증대되면, Fig. 4의 상위 선도에서 알 수 있듯이, 개루프 DC 게인 값이 크게 되고, 이는 페루프 주파수 응답에서의 DC 게인이 점점0 dB에 접근되게 된다. 또한, 페루프 주파수 응답에서 비교적 큰 가진신호에 대하여 (2.4 Vpp 이상인 경우) 공진 값이 발생하는 것은 Fig. 4의 두 번째 선도에서 나타나 있듯이, 가진 신호의 크기를 크게 하면 위상 지연 효과가 낮은 크기로 가진시키는 경우보다 더 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

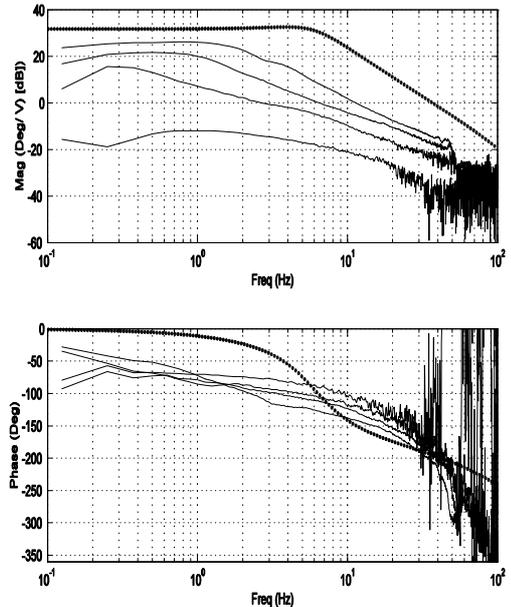


Fig. 4 Active Stick의 개루프 주파수 응답선도

3.2 페루프 설계와 실험

비례 제어기를 적용시킨 SIMULINK 모델이 Fig. 5에 도시되어 있다.

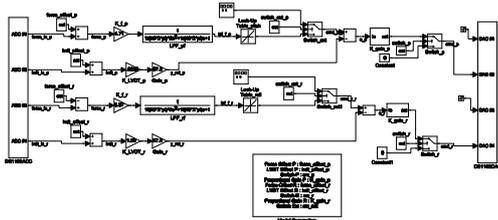


Fig. 5 Active Stick의 SIMULINK 모델

dSPACE사 DS1102 보드의 A/D 변환 채널 #1과 #2에는 피치축 힘 및 변위센서, 그리고 #3와 #4에는 롤축 힘 및 변위센서가 각각 연결되어 있다. 각 센서 출력의 영점을 맞추기 위하여, 각 센서 입력단에는 offset을 조절하는 기능이 추가되었다.

Offset 조절된 신호 (force_p)들은 적절한 게인 (K_{f_p} & K_{LVDT_p})을 곱하여 물리적 단위인 lbf와 Deg로 변환되었다. 힘 센서 출력신호에 포함된 노이즈를 제거하기 위하여 10 Hz의 차단주파수를 갖는 2차 저역통과필터가 적용되었다. 이 신호는 피치 또는 롤축 Lookup Table에 의하여 각축으로의 변위명령신호 (c_{rot_p})를 생성시킨다. 이 신호와 피치축 LVDT 센서로부터 생성된 y_{rot_p} 신호를 이용하여, 피치축 변위 오차 신호가 생성되며, 이 오차신호는 가변제어게인 블록 (K_{gain_p})에 의하여 증폭되어, D/A 변환 CH2로 출력되어 피치 모터를 구동시키게 된다. 여기서, 각 축마다 2개의 스위치가 사용되었는데 Switch_p는 피치축 제어계를 on/off 하는 기능을 갖으며, Switch_ext는 외부 신호 (Auto-pilot/ Stick shaking 기능)를 연결하기 위하여 사용되었다.

Fig. 5의 SIMULINK 모델은 MATLAB의 RTW (Real Time Workspace) tool을 이용하여, DSP TMS320C31를 위한 기계어로 변환되어 실행된다. 이 때, 실행 I/O 신호들의 상태는 dSPACE사의 ControlDesk로 모니터링할 수 있다. Fig. 6은 ControlDesk의 실행화면을 나타낸다. 이 그림에서 좌 하단부는 그림 5의 SIMULINK 모델에서 정의된 control parameter 들을 설정할 수 있는 기능을 갖고 있다. 좌측 첫번째 열의 4 박스는 피치축 힘 센서/ 피치축 LVDT/ 롤축 힘 센서/ 롤축 LVDT 출력의 offset을 조절할 수 있으며, 두 번째 열은 피치 및 롤 축 제어계의 비례게인을 설정할 수 있다. 또한, 세번째 열의 상위 2 박스는 피치 및 롤 제어계를 switch on/off 하는 기능을 갖으며, 하위 4개 Box는 외부 가진신호인 Stick shaking을 위한 파형/ 주파수/ 크기를 설정할 수 있는 기능을 갖게 된다. 한편, 그림 6의 상위 2 행은 피치 및 롤 축의 회전각/ LVDT 센서 출력/ 힘 센서 출력을 각각 보여주고 있다. 마지막으로, 이 그림의 우 하단부에는 롤 및 피치축에 관한 힘 대 변위 신호를 함께 그린 plot을 볼 수 있다.

Fig. 7에 피치축 비례게인을 0.5, 그리고 롤 축 비례게인을 0.7으로 선정하였을 때, Active stick의 시간영역 응답특성이 도시되어 있다.

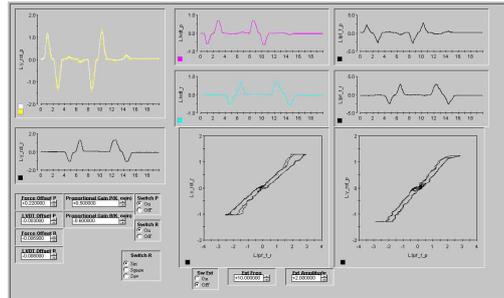


Fig. 6 ControlDesk의 실행화면

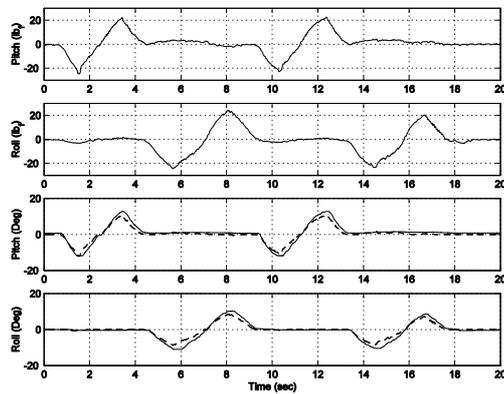


Fig. 7 Active Stick의 시간영역 응답

Fig. 7에 Active Stick의 시간영역 응답 특성이 그려져 있다. 이 그림에서 첫 번째 plot부터 마지막 plot까지는 스틱에 가해진 피치 force, 롤 force, 피치축 회전량, 롤축 회전량을 각각 보여주고 있다. 특히, 3 번째 및 4 번째 plot에서 점선으로 표시된 부분은 힘 대 변위 Lookup Table에서 산출된 피치 및 롤 방향으로의 회전 명령 신호를 각각 표시한다. 이 시간영역 응답특성은 다음과 같은 순서로 사용자의 힘을 스틱에 작용한 결과이다. 초기 4초 동안 피치축 방향으로 full forward pitch stick/ full aft pitch stick, 그리고 다음 4초부터 9.5초 구간에는 롤 방향으로 full left roll/ full right roll stick의 운동을 가했고, 다음은 이 순서를 반복한 결과이다. 이 그림의 상위 두 plot에서 볼 수 있듯이, 피치 및 롤 축간에는 서로 간섭효과가 존재한다. 한편, 이 그림의 하위 두 plot에서는 개발된 Active stick의 추종 정밀도를 알 수 있다. 두 개의 plot에서 점선으로 표시된 것은 사용자가 스틱에 가한 힘으로부터 산출된 각 축 방향으로의 회전 명령신호를 나타내고, 실선은 스틱의 실제 변위를 나타낸다. 보는 바와같이 스틱운동이 정지된 영역에서 더욱 큰 오차신호가 나타나고 있다. 이로

부터 스틱운동에 상당한 정지 마찰력이 존재 함을 알 수 있다. 또한, 스틱이 중립점에서 멀어지는 운동에 대하여는 스틱변위 명령신호에 대하여 실제 변위의 위상이 앞서게 되며, 스틱 중립점으로 이동하는 운동에 대하여는 위상 뒤짐 현상이 발생함을 볼 수 있다.

이 같은 위상변위 현상은 Fig. 6의 아래의 두 plot에서 뚜렷이 관찰될 수 있다. 이 두 plot은 피치 및 롤 각축에 대하여 스틱force 대 스틱 변위를 함께 그린 결과이다. 앞서 언급된 위상 앞섬/뒤짐 현상이 클수록, 이 Hysteresis 특성의 폭이 확대된다. 즉, 비례 제어기의 게인을 작게 할수록 Hysteresis 특성의 폭이 확대되며, 게인을 크게 하면 이 폭의 크기가 작게되지만, 낮아진 뎀핑효과로 인하여 스틱의 진동현상이 발생된다. 또한, 이 그림에서 중앙 부분이 넓게 되는 것은 인위적으로 설정한 스틱의 dead zone 효과에 의한 것이다.

개발된 Active Stick에 대하여, 성능에 영향을 미치는 정지 마찰력을 실험적으로 결정하여 보자. 이를 위하여 스틱이 센터점에서 정지된 조건 그리고 개루프 작동조건에 대하여, 0.2 Hz 1.4 Vpp 정현파를 입력시켜 보았다. 이에 의한 각축으로의 시간영역 응답 특성이 Fig. 36 및 Fig. 37에 도시되어 있다. 이 그림들 중에서, 가장 큰 진폭을 갖는 신호가 스틱의 각 변위, 중간 크기의 신호는 구동 전류, 그리고 최소의 진폭을 갖는 신호가 각 축으로의 구동신호를 각각 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 구동전류의 값이 어느 정도 이상이 되어야 스틱이 운동하게 됨을 알 수 있다. 또한, 스틱이 정지되어 있는 위치가 대칭이 아니므로 (특히, 피치축에 대하여) 정지 마찰력의 크기가 방향성을 갖음을 알 수 있다. 이러한 실험 데이터로부터 스틱의 각축에 걸리는 마찰력을 유추하면 다음과 같다.

1. 피치축 운동에 대한 정지 마찰 토크 추정

스틱 구동축으로
 환산된 모터의 Torque constnat = 0.7665 kgf cm/ A x 91 = 69.75 kgf cm/ A

피치 축으로 환산된 스프링 상수 = 12.3 kgf/cm x 4.95 x 4.95/57.3 = 5.2597 kgf cm/ Deg

Fig. 8을 자세히 관찰하면, 대략 4.5초후부터 스틱이 운동을 시작하게 된다. 이 때, 소요된 구동 전류를 읽으면, 대략 1 A의 값이 된다. 따라서, (-) 방향의 스틱 피치 운동에 대하여 69.75x1 = 69.75 kgfcm의 마찰 토크가 존재 함을 추정할 수 있다. 또한, 4.5초 이후부터 스틱이 (-)방향으로 회전하다

가 대략 5.2초부터 6.5초 구간까지는 다시 정지해 있음을 알 수 있다. 이처럼 스틱이 이 구간에 대하여 정지하고 있는 이유는, 스틱의 회전에 의한 스프링 토크 반력과 구동 토크가 5.2초 구간에서는 정확히 서로 상쇄되다가, 6.5초부터는 (+) 방향운동에 대하여 작용하는 정지 마찰 토크가 스프링 반력 토크보다 크기 때문이다. 따라서, (+) 방향 마찰 토크는 5.2597x4 = 21.04 kgfcm의 값을 갖는다고 볼 수 있다. (+) 방향 정지 마찰 토크가 (-) 방향 마찰 토크보다 크기 때문에, 동일한 구동 토크에 대하여 스틱은 (+) 방향으로 더욱 많이 이동되게 된 것이라 생각된다. (-) 방향으로의 정지 마찰 토크는 8초부터 9.2초 구간의 데이터를 사용하여 확인할 수 있다. 즉, 9.2초 순간에서는 (스프링 반력 토크) + (0.5 A에 의한 구동 토크) = [(-) 방향 정지 마찰 토크]의 관계식이 성립한다. 위의 관계식으로 산출된(-) 방향 정지 마찰 토크는 대략 5.2597x 6 + 69.75x 0.5 = 66.43 kgfcm의 값을 갖게 된다.

결론적으로,
 (+) 방향으로의 정지마찰 토크 = 21.04 kgfcm
 (-) 방향으로의 정지마찰 토크 = 69.75 kgfcm
 의 값을 갖게 되며, 같은 방법으로 롤축의 정지 마찰토크를 구하면 아래와 같다.

(-) 방향 정지마찰 토크 = 55.8 kgcm
 (+) 방향 정지마찰 토크 = 54.33 kg

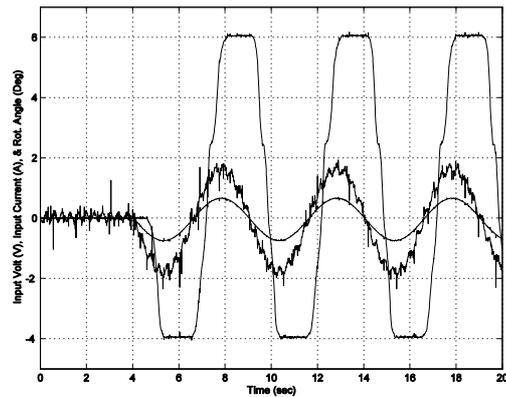


Fig. 8 피치축의 개루프 시간영역응답

4. 마찰보상기의 설계

위에서 주어진 data는 Active Stick 내부에 존재하는 마찰력을 고려해야하는 이유를 제시해 주고 있다.

하지만, 마찰현상은 특유의 비 선형성으로 인해 정확한 수식으로 기술하기 어렵다. 따라서, 여기서는B.

Friedland 가 제시한 마찰 추정기에 근거하여 스틱에 작용하는 마찰 토크를 추정하려 한다. 그가 제시한 마찰 추정기는 다음 식으로 표현되는 마찰력에서 파라미터 a 의 값을 추정하는 것이다.

$$f(v, a) = a \operatorname{sgn}(v) \quad (3)$$

한편, 마찰이 존재하는 다이내믹 시스템에 대한 운동 방정식은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$m\dot{v} = -f(v, a) + w \quad (4)$$

여기서, w 는 시스템에 작용하는 마찰력을 제외한 모든 외력을 나타낸다. 이 때, 마찰 모델의 파라미터 a 는 다음의 식으로 결정된다.

$$\begin{aligned} \hat{a} &= z - k|v|^\mu \\ z &= k_\mu |v|^\mu - 1 \frac{1}{m} [w - f(v, \hat{a})] \operatorname{sgn}(v) \end{aligned} \quad (5)$$

위의 마찰상수 추정기에 있어서, 지수 μ 와 게인 k 는 양수이며, 각 조건에 따라 적절히 선정되어야 한다. 이제 식 (5)로 표현되는 마찰 계수 추정기의 안정성에 대하여 논의해 보자.

아래의 식과 같이 추정 오차, e 를 정의할 때 추정 오차의 시간 변화율에 관하여 식을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} e &= a - \hat{a} \\ \dot{e} &= -\dot{\hat{a}} = -z + k_\mu |v|^\mu - 1 \operatorname{sgn}(v) \\ &= k_\mu |v|^\mu - 1 \operatorname{sgn}(v) \frac{1}{m} [mv - w + f(v, \hat{a})] \\ &= -k_\mu |v|^\mu - 1 \operatorname{sgn}(v) \frac{1}{m} [f(v, a) - f(v, \hat{a})] \\ &= -k_\mu |v|^\mu - 1 \operatorname{sgn}(v) \frac{1}{m} [(a - \hat{a}) \operatorname{sgn}(v)] \\ &= -\frac{k_\mu |v|^\mu - 1}{m} e \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, 위 식에서, 지수 μ 와 게인 k 는 양수이므로 추정 오차에 관한 다이내믹스는 항상 안정하다. 또한, (7) 식으로부터 μ 와 k 는 마찰 계수 추정기의 빠르기를 결정함을 알 수 있다. 즉, 이 값들을 크게 설정하면, 빠르게 \hat{a} 의 값이 a 로 접근하지만 노이즈에 많은 영향을 받게 된다.

한편, μ 와 k 의 값을 작게 설정하면, 마찰 추정기의 성능이 너무 느리게 된다. 따라서, 대상 시스템의 특성에 따라 이들 값들을 적절하게 조절하여야 한다.

이제 Friedland가 제안한 마찰 계수 추정기를 사용하여 Active stick에 존재하는 마찰을 추정하

여 보자. 이를 위하여 Fig. 9로 규정된 마찰 토크가 Active stick에 작용한다고 가정하여 보자. 또한, Fig. 10은 Fig. 9의 마찰토크, 그리고 식 (9)로 표현되는 마찰계수 추정회로가 포함된 active stick의 폐루프 운동 모델을 나타낸다. 먼저, 식 (1)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$J_{BQ} \ddot{\theta} = -C\dot{\theta} - K_P^2 \theta + NK_{fi} + F_{ST} I_{ST} - T_f(\theta, a) = w - T_f(\theta, a) \quad (8)$$

따라서, active stick에 대한 마찰 추정기는 다음 식으로 결정된다.

$$\begin{aligned} \hat{a} &= z - k|v|^\mu \\ z &= k_\mu |\dot{\theta}|^\mu - 1 \frac{1}{J_{BQ}} [w - T_f(\theta, \hat{a})] \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \\ &= k_\mu |\dot{\theta}|^\mu - 1 \frac{1}{J_{BQ}} [-C\dot{\theta} - K_P^2 \theta + NK_{fi} + F_{ST} I_{ST} - T_f(\theta, \hat{a})] \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 9와 같은 마찰 특성을 갖는 피치축 제어계에 주기 2초, 그리고 30 lbf의 peak-to-peak 크기를 갖는 삼각파형 입력을 1초에서 7초 구간 동안 인가시켰다. Fig. 11은 마찰 추정기의 성능을 나타내는 그래프이다. 이 그림의 첫 번째 플롯은 가해진 입력신호에 대하여, 피치축에 존재하는 마찰 토크를 나타내며, 두 번째 플롯은 설계된 마찰 추정기에 의하여 추정된 마찰 토크를 나타낸다. 전체적으로 마찰 추정기의 값은 실제 마찰 토크의 값을 추종하는 것을 볼 수 있다. 마찰 계수 추정기의 파라미터들은 다음과 같은 값으로 설정하였다.

$$k = 30, \text{ \& } \mu = 3$$

또한, 폐루프 시스템에 사용된 제어기는 비례 제어기로서, 제어기 게인 값은 아래와 같다.

$$K_{PROP} = 0.05$$

이 같이 작은 값의 비례제어 게인을 선정한 이유는 동일한 폐루프 작동조건에서 마찰 현상을 관찰하기 위함이다. 즉, 이 값을 0.5로 사용하게 되면 마찰이 존재하지 않는 조건에 대한 시뮬레이션은 수행할 수 없게 된다.

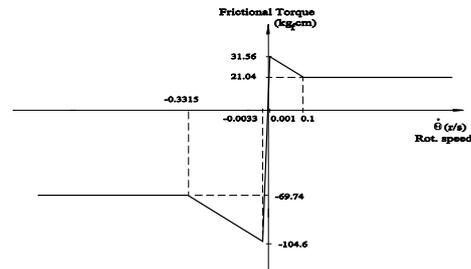


Fig. 9 마찰력의 선형화

또한, 이 그림의 세 번째 및 네 번째 플롯은 스틱의 회전 각속도에 대한 마찰력 관계를 나타낸 것으로, 세번째 플롯이 Fig. 9와 같은 실제 마찰 특성이며, 네 번째 플롯은 마찰 추정기에 의하여 재구성된 관계를 보여준다. zero velocity 근처에서 마찰 추정기의 성능이 완전하지 못하다는 점을 제외하고는 마찰 추정기의 성능이 만족스럽다고 결론할 수 있다.

지금까지의 시뮬레이션 결과를 종합하면, Friedland가 제안한 마찰 추정기가 완벽하지는 않지만 전체적으로 Active Stick에 내재하는 마찰 현상을 잘 추정하는 것으로 결론할 수 있다. 따라서, 지금부터는 위의 시뮬레이션에서 사용된 동일조건에 대하여, 마찰 추정기를 사용하여 stick의 마찰 현상을 보상하려 한다. 마찰 현상을 보상하는 방법은 Fig. 10의 SIMULINK 모델에서 나타난 바와 같이 마찰 토크 추정기의 출력을 페루프 시스템에 인가시키는 것이다. 이러한 마찰 보상 방법을 적용하게 되면, 앞서 유도된 식 (8)과 식 (9)는 각각 다음의 식으로 변경된다.

$$J_{BQ}\ddot{\theta} = -C\dot{\theta} - K_f^2\dot{\theta} + NK_{fi} + F_{ST}I_{ST} - T_f(\theta, \dot{\theta}) + T_f(\theta, \dot{\theta}) = \omega - T_f(\theta, \dot{\theta}) \quad (10)$$

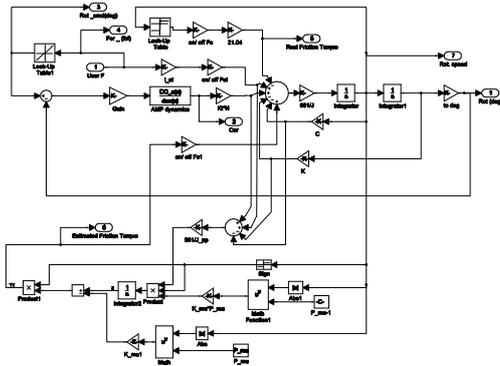


Fig. 10 마찰 보상을 포함한 페루프 SIMULINK 모델

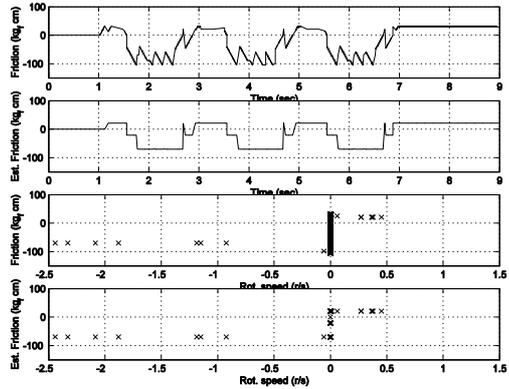


Fig. 11 마찰 추정기의 특성

여기서, 식 (8)의 w 와 식 (10)의 w 는 $T_f(\theta, \dot{\theta})$ 만큼의 차이가 있음에 주의 하자. 또한, 마찰 추정기의 성능이 완벽하다고 가정하면, $T_f(\theta, \dot{\theta}) \equiv T_f(\theta, \dot{\theta})$ 의 조건이 성립한다. 따라서, 식 (9)에서 z update에 사용되는 식은 아래와 같이 변경된다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= z - k|\dot{\theta}|^{\mu} \\ z &= k_{\mu}|\dot{\theta}|^{\mu-1} \frac{1}{J_{BQ}} [w - T_f(\theta, \dot{\theta})] \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \\ &= k_{\mu}|\dot{\theta}|^{\mu-1} \frac{1}{J_{BQ}} [-C\dot{\theta} - K_f^2\dot{\theta} + NK_{fi} + F_{ST}I_{ST} - T_f(\theta, \dot{\theta})] \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (11)$$

위의 식을 포함하는 스틱의 피치축 제어계 모델이 Fig. 10에 나타나 있다. 이 모델에 대하여 위와 동일한 시뮬레이션 조건에서 수행한 결과가 Fig. 12에 나타나 있다.

마찰 보상을 적용한 경우에도 마찰 추정기가 정상적으로 작동하고 있음을 볼수 있다.

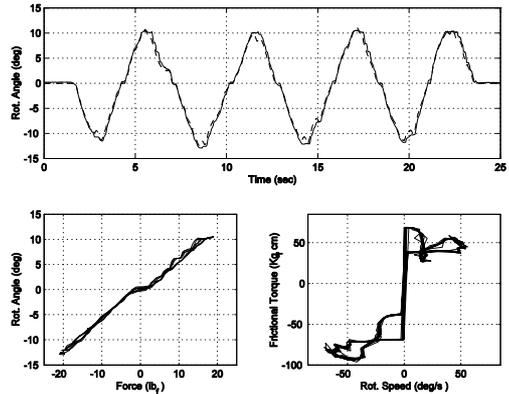


Fig. 12 마찰보상을 이용한 실험적 결과

5. 결론

이 연구를 통해 시뮬레이션 장치를 이용하는 파일럿에게 조종면 반력의 효과를 제공해주는 Active Stick이 개발되었다.

Active Stick의 설계를 위하여 수학적 모델이 제시되었으며, 제시된 모델은 실험결과를 통해 비교, 확인되었다.

Stick의 Feel Character가 간단한 프로그램 변환에 의하여 쉽게 수정되어질 수 있도록 설계되었으며, 간단한 비례제어기를 이용해 성능을 보다 향상시킬 수 있었다.

Stick의 개발 도중, Stick의 여러 부분에서 야기되는 마찰 토크가 Stick의 작동을 방해하는 가장 큰 요인인 것으로 나타났으며, 이 마찰의 효과를 줄이기 위해 마찰 추정기를 설계, 개발하였고 이를 이용해 마찰의 효과를 줄일 수 있었다.

특히, 이 마찰 추정기의 성능은 simulation을 통해 증명되었으며, 실제의 마찰력을 완벽히 구현하였다.

위의 결과를 종합해 볼 때, 개발된 Active Stick은 설계 요구조건에 만족됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Morgan, "An Initial Study into the Influence of Control Stick Characteristics on the Handling Qualities of a Fly By Wire Helicopter", *AGARD Conference Proceedings, No. 508*, pp. 18.1-18.13, 1990.
- [2] G. W. Hall, et al., "Flight Investigation of Fighter Side Stick Force Deflection Characteristics", *Technical Report AFFDL-TR-75-39*, 1975.
- [3] A. Konar, et al., "Digital Flight Control System for Tactical Fighters", *Technical Report AFFDL-TR-74-69*, 1974.
- [4] G. Belcher, et al., "Validation of Flight Control Systems", *AGARD-AR-274*, 1991.
- [5] M. Baarspul, "A Review of Flight Simulation Techniques", *Progress in Aerospace Sciences, Vol. 27*, pp. 1-120, 1990.
- [6] C. Canudas de Wit, H. Olssen, K.J. Astrom, and P. Lischinsky, "A New Model for Control of Systems with Friction", *IEEE Trans. On Automatic Control, Vol. 40, No. 3*, pp. 419-425, 1995.
- [7] M. Feemster, P. Vedagarbha, D.M. Dawson, and D Haste, "Adaptive Control Techniques for Friction Compensation", *Proceedings of the American Control Conference*, pp.

1488-1492, 1998.

- [8] F. Altpeter, M. Grunenber, P. Myszkorowsky, and R. Longchamp, "Auto-Tuning of Feedforward Friction Compensation Based on the Gradient Method", *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2600-2604, 2000.
- [9] A. Ramasubremanian and L. Ray, "Adaptive Friction Compensation using Extended Kalman-Bucy Filter Friction Estimation: A Comparative Study", *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2588-2604, 2594, 2000.
- [10] Jayesh Amin, Bernard Friedland, Avraham Jarnoy, "Implementation of a Friction Estimation and Compensation Technique", *IEEE*, 1997.