



잠수함 시뮬레이터 운동재현기법

글 : 선박해양플랜트연구소 윤근항, 여동진 책임연구원, 김동진 선임기술원, 김연규 책임연구원, 이경중 명예연구위원 / khyun@kriso.re.kr, Lonepier@kriso.re.kr, dikim@kriso.re.kr, yqkim@kriso.re.kr, gilee@kriso.re.kr

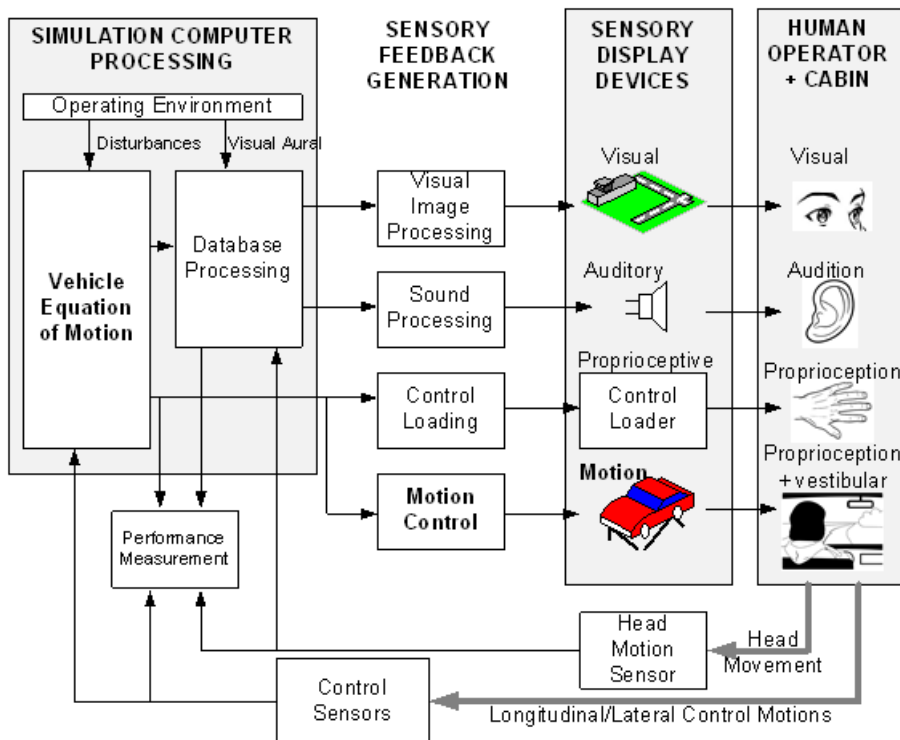
1. 서론

예로부터 인간은 내재된 호기심으로 인하여 여러 가지 운동을 느껴보려는 욕구가 있었다. 인간의 오감(시각, 청각, 미각, 후각, 촉각)과 몸의 위치에 대한 감각인 전정감각(vestibular sense, 전정기관에서 느낌)과 신체운동감각(kinesthetic sense, 근육과 관절에서 느낌)을 이용하여 실제와 비슷한 상황을 만들어 그 느낌을 공유하려고 하였다. 그리하여 그림이 그려졌고, 소리를 만들어 내기도 하고, 운동을 느끼게끔 회전목마도 만들었을 것이다.

시뮬레이터 설계자는 전정감각과 운동감각을 자극하는 운동재현기(Motion System), 시각을 자극하는 영상재현기(Display System), 청각을 자극하는 음향재현기(Sound System), 촉각을 자극하는 조종간의 작동력재현기(Forcing System)를 이용하여 사용자 혹은 훈련자에게 실제와 같은 상황을 만들어 주려고 노력한다. 놀이기구에서는 아주 예전부터 이런 것들을 이용하여 사용자에게 쾌감을 주었다. 현재도 각종 게임에서 널리 이용되고 있기도 하다.

20세기 들어와서는 기계나 기구들이 복잡해져서 이의 훈련을 위하여 시뮬레이터를 만들 필요성이 발생하였다. 현재 시뮬레이터는 비행(flight) 시뮬레이터와 운전(driving) 시뮬레이터로 대별되고 있고, 각자 목적하는 바에 따라 개발되고 있으며, 각 분야별 학술대회(conference)를 개최하고 있는 상황이다. 이에 덧붙여서 게임용 시뮬레이터 분야에서도 활발히 학술대회를 개최하고 있다.

현대의 범용적인 시뮬레이터는 다음과 같은 구성을 하고 있다.



<그림 1 Functional elements of driving simulation (reproduced from Allen(2011) 그림 2.1)>

현재 시뮬레이터에서 가장 많이 사용되는 기법은 영상이다. 인간의 정보 습득은 대부분이 시각을 통하여 이루어지므로 그 중요성은 상당히 크고, 효과도 또한 크다. 그러나 몰입감을 위해서는 운동도 재현하는 것이 바람직하다. 대상체의 특성에 따라 운동의 재현이 필수적인 시뮬레이터도 있다. 비행훈련용 시뮬레이터도 이에 속한다. 어떤 기기를 동작하면 대상체가 어떻게 움직이고 탑승자는 어떻게 느

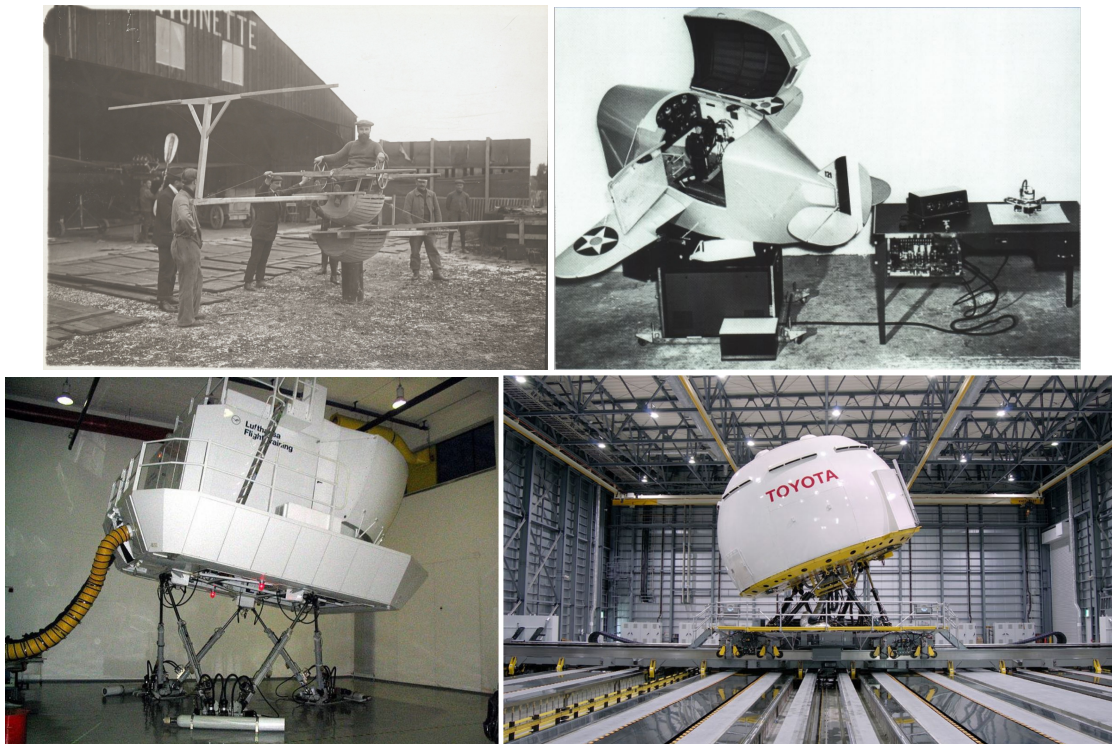
끼는지를 알려주어 기기 작동 훈련을 할 필요가 있기 때문이다. 잠수함의 경우에는 외부환경이 보이지 않으므로 장비의 작동상태만을 계기로 보여주게 되는데, 이것만으로는 실제 잠수함에 타고 있는지를 느끼게 해줄 수 없으므로, 운동재현을 해서 잠수함을 동작시키는 훈련을 하는 것이 바람직하다.



<그림 2 Submarine Training Simulator of Korean Navy, a) Motion Platform, b, c) Inside Instruments (출처 : 국방부 블로그, 국방일보)>

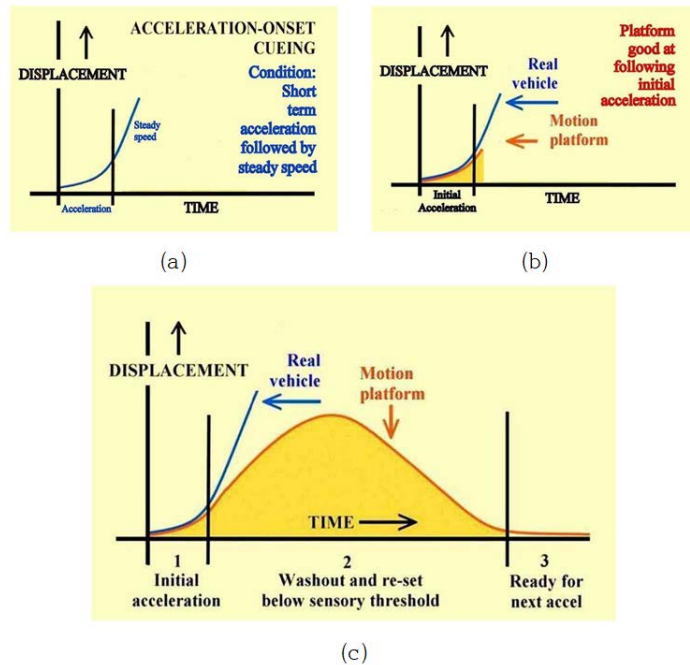
2. 운동재현기법

항공기나 자동차 등의 훈련에서 훈련자에게 운동을 재현하여 주는 것이 훈련의 효과를 향상시킬 수 있다. 1910년 처음으로 비행학교에 훈련기기가 등장한 이래, 각종 운동재현기가 장착된 시뮬레이터가 개발되었다.



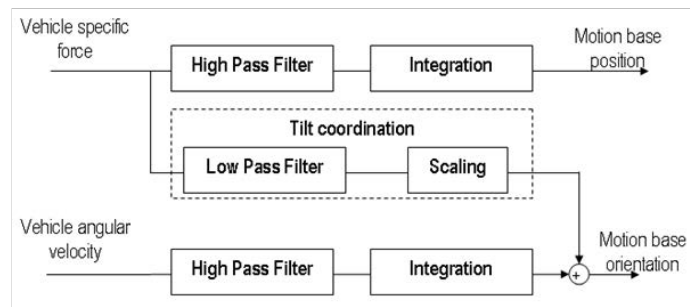
<그림 3 Various Motion Platform, a) Trainer of Antoinette flight school(1910), b) Link Flight Trainer(1930), c) Flight Simulator equipped with hexapod, d) Driving Simulator equipped with hexapod, xy-table, yaw-turntable(2007) (from Slob 2008, Roberson Memorial 2000, Page 2000)>

시뮬레이터는 그것이 가지는 운동한계 때문에 실제 대상체의 운동을 그대로 재현할 수가 없다. 따라서 1970년대부터 사용하여 온 기법은 탑승자에게 발생하는 힘을 유사하게 느끼게 하는 방법으로 시뮬레이터의 운동을 재현하는 방법이다. 인간이 운동을 느끼는 방법은 주로 전정기관(vestibular system)을 통하여 운동을 느낀다고 가정하여, 이석기관(otolith)에서 느끼는 힘과, 세반고리관(semicircular canals)에서 느끼는 회전각속도를 유사하게 만들어 내는 것을 기본으로 한다. 선형가속도에 의한 힘은 시뮬레이터의 운동한계 때문에 크게 부족할 수밖에 없으므로, 이것을 보상하는 방법으로 시뮬레이터를 기울여서 중력가속도에 의한 힘으로 선형가속도에 의한 힘을 유사하게 만들어 낸다. 이것에 대한 정리는 Reid & Nahon 1985에 잘 정리되어 있다. 전정기관과 인간의 운동감지에 대한 연구들이 여러 연구자들에 의하여 이루어졌다 (Reid & Nahon 1985의 참고문헌 Gum 1973, Zacharias 1978, Peters 1969, Meiry 1966, Hosman & van der Vaart 1978). 비행훈련용 시뮬레이터의 운동재현 신호에 대하여서는 Schmidt & Conrad 1970, Reid & Nahon 1985 등에 의하여 소개되어 있다. 이 기법을 ‘classical algorithm’이라고 부른다. 고주파필터(high-pass filter)를 사용하였으며, 이것을 저주파성분은 제거한다는 의미인 ‘Washout Filter’라고도 부른다. 이 기법을 좀 더 개량하기 위하여, ‘adaptive’, ‘optimal’, ‘predictive’ 기법들이 연구되어 왔다 (Stroosma 2013, Fang 2014, Affan 2019, Natal 2019).



<그림 4 The concept of Washout Filter (from Davison(2018))>

위의 그림은 Washout Filter의 개념을 잘 설명하고 있다. 초기 가속은 실제 운동과 비슷하게 하여 탑승자에게 운동을 느끼게 하고, 이후에는 서서히 운동을 줄이고, 또한 다음 운동을 위하여 중립위치로 서서히 가게 만들어 준다. 고전적인 Washout Filter는 다음과 같은 블록디아그램으로 설명이 가능하다.



<그림 5 Classical Motion Cueing Algorithm Filter Structure (from Colombet et al DSC 2008)>

여기에서 사용되는 필터의 전달함수는 다음과 같다,

Classical Washout Filter (from Reid & Nahon 1985)

$$H_{HP}(s) = \frac{k s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{s}{s + \omega_b} \quad \text{for translation}$$

$$H_{HP}(s) = \frac{k s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{for rotation}$$

where ω_n second-order system undamped natural frequency
 ω_b first-order low-pass filter break frequency
 ζ second-order system damping ratio

선형운동(linear motion)에 대하여서는 훈련자에게 작용하는 힘 즉 가속도를 입력으로 주고, 회전운동에 대하여서는 회전속도를 입력으로 주는 방법을 사용하는데, 그 이유는 전정기관이 감지하는 운동의 특성에 기인한다.

3. KRISO의 운동재현기법

KRISO에서는 잠수함의 운동재현기법을 개발하기 위하여, 기존에 있었던 운동재현기법에 대한 조사, 분석을 하였다. 이 중 필터에 대하여서는, Washout Filter의 차수를 1차, 2차로 하였을 경우에 대하여, 또 필터 입력을 변위, 속도, 가속도로 하였을 경우에 대하여 필터를 구현하여 분석을 해본 결과, 결과는 거의 같다는 것을 알아보았다. 따라서 꼭 가속도 입력을 하지 않아도 된다는 것을 알 수 있었다. 운동방정식의 기본 변수를 사용하는 것이 더 효과적이라는 결론을 내렸다.

KRISO의 운동재현기법은 운동기반필터(Motion-oriented Filter)이다. 이름을 운동기반이라고 붙인 것은, 결과는 classical algorithm과 같게 나오더라도, 운동재현에 중점을 두어 필터알고리즘을 설계하고, 문제가 있을 경우 운동재현이 잘되는 방향으로 해결을 하는 방법이란 뜻이다.

3.1 KRISO Washout Filter

운동체의 경우 전진방향이란 항상 변하는 것이므로 변위를 입력으로 하는 것은 적절치 않고, 또한 운동방정식은 대부분의 경우 물체고

정좌표계에서 기본 변수로 속도를 사용하고 있다. 따라서 속도 입력으로 선정하기로 한다. 제안하는 필터는 다음과 같다.

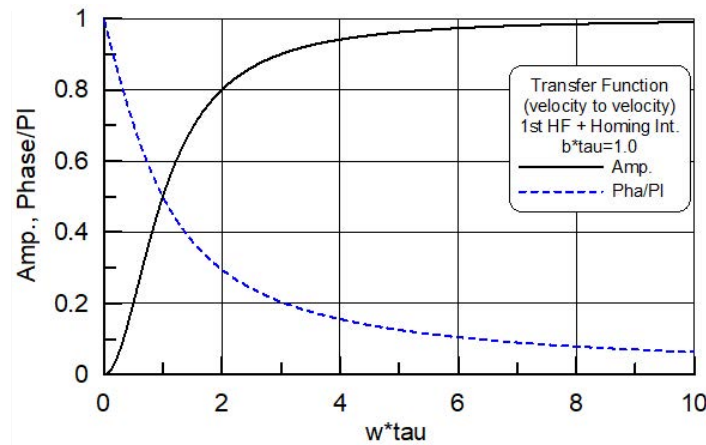
$$\begin{aligned} \tau \dot{\xi} + \xi &= x & y &= x - \xi \\ \dot{z} + b(z - z_H) &= y \end{aligned}$$

여기에서 x 는 입력이고, ξ 는 중간변수, y 는 필터출력이다. 필터입력으로 속도를 선택한다. 위의 필터출력 y 를 적분하여 시뮬레이터 변위 z 를 얻는다. 여기서 z_H 는 Homing position이다. 이 방법을 말로 표현하면 1st order high-pass filter와 integration with homing position을 결합한 방법이라고 말할 수 있다. 이 필터의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$z/x = \frac{1}{s+b} \frac{\tau s}{\tau s + 1} = \frac{\tau s}{\tau s^2 + (1+b\tau)s + b}$$

이것은 속도입력 변위출력에 대한 전달함수이므로 속도입력 속도출력에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{z}/x = \frac{s}{s+b} \frac{\tau s}{\tau s + 1} = \frac{(\tau s)^2}{(\tau s)^2 + (1+b\tau)\tau s + b\tau}$$



<그림 6 Transfer Function of KRISO Washout Filter>

이 필터는 입력을 속도로 하고, 출력을 시뮬레이터 변위로 하였을 경우, 2차 필터의 특성을 가진다. 입력이 일정가속도 일 때 즉 속도의 ramp input이 있을 때의 해를 구하여 최댓값을 구하면 다음과 같다. ($z_H=0$ 일 때)

$$z_{\max} = a\tau/b$$

일정 가속도 운동을 하는 경우, 위 식으로 계산된 위치로 시뮬레이터가 움직인다는 의미이다. 일정 속도 v 입력(step input)에 대한 해를 구하여 최댓값을 구해보자.

$$z_M = v\tau(b\tau)^{-1/(1-1/b\tau)}$$

$b\tau = 1$ 일 때 값은 $1/e = 0.36787944\dots$ 로 수렴한다. $b\tau$ 값을 0.5 - 1 사이의 값을 사용한다면, 최댓값을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$z_M \simeq \frac{1}{2} v\tau$$

이때는 일정 가속도 입력 때와는 다르게 변위가 최댓값에 도달한 후 서서히 0으로 수렴하게 된다.

3.2 파라미터의 결정

파라미터들은 운동특성에 따라 결정되어야 하는데, 하나의 운동방향에 대하여 기본적으로 τ 와 b 를 결정하여야 한다. 그런데 이 값에 따라 시뮬레이터 운동이 작아질 수도 커질 수도 있으므로 시뮬레이터 운동제한 조건에 맞는 파라미터가 결정되어야 한다. 또한 운동체의 운동특성이 속도, 가속도가 큰 운동체라면 시뮬레이터의 운동범위가 커지므로 이것도 고려해 놓아야 한다. 물론 대상체의 특성을 반영하고 적합화를 거쳐서 세밀하게 결정이 되겠지만, 최초 값들을 결정하는 방법이 있으면 좋다.

이것을 위하여 일정 가속운동의 입력이 주어졌을 때, 즉 속도 입력이 ramp function으로 주어졌을 때의 시뮬레이터 운동변위는

$$z = \frac{a\tau}{b} \left(\frac{1}{b\tau+1} (1 - e^{-bt}) + \frac{b\tau}{b\tau+1} (1 - e^{-t/\tau}) \right)$$

이 된다. 여기서 a 는 가속도이다. 위 값은 0에서 시작하여 시간이 지날수록 $a\tau/b$ 값에 근접하는 성질을 가진다. 최대 운동변위는 $a\tau/b$ 라고 할 수 있다. 이 최대 운동변위를 시뮬레이터의 최대 운동변위로 나눈 무차원수를 선정한다. 이것을 'amplitude ratio coefficient'라고 하자.

$$k_a = \frac{a_M \tau}{z_M^S b}$$

여기서 a_M 은 운동체의 최대 가속도, z_M^S 는 시뮬레이터의 최대 운동변위이다. 이 값이 1보다 작으면 필터를 거친 시뮬레이터의 운동변위가 시뮬레이터 최대변위보다 작게 된다.

또 하나의 무차원수를 생각해보자. 필터를 거친 운동변위는 τ 로 표시되는 1st order filter로 주어지는 값과 b 과 관계되는 homing action에 따른 값으로 구성되어 있다. 이 값을 곱하여 무차원수 'restoring ratio coefficient'를 선정한다.

$$k_r = b\tau$$

이 값이 커지면 homing position에 더 잘 추종한다는 의미를 가지고 있다. 이 값이 1보다 크면 homing position에 빨리 추종하여 나중에 남는 운동은 high-pass 필터에 의한 값이 많이 남아 있다는 뜻이고, 1보다 작으면, high-pass 필터에 의한 값이 빨리 줄어들어 나중에 남는 운동은 integration with homing position에 의한 운동이라는 뜻이다. 둘의 영향을 비슷하게 하려면 이 값을 1로 하면 된다. Homing position으로의 복귀는 약간 천천히 한다면 이 값을 0.5 정도로 하는 것이 도움이 될 것이다.

b : 작으면 좋다. 작으면 homing position에 천천히 수렴한다. 그러나 외부에서 homing position을 지정한 것이라면 빨리 추종할 필요가 있다.

τ : 크면 좋다. 크면 입력에 빨리 추종한다. $1/\tau$ 가 cut-off frequency이기 때문에, 크면 조금 더 낮은 주파수까지 통과시킨다. 입력에 보다 잘 추종한다.

시뮬레이터의 운동범위 전체를 이용하려면 k_a 를 1에 가깝게 사용하면 된다. Homing position에 부드럽게 가게 하려면 k_r 을 1/2 정도로 사용하면 될 것이다. 이렇게 k_a, k_r 을 정하면 이것으로 τ, b 를 결정할 수 있다.

$$\tau = \sqrt{k_a k_r \times \frac{z_M^S}{a_M}} \quad b = \sqrt{\frac{k_r}{k_a} \times \frac{a_M}{z_M^S}}$$

이 값을 적합화의 시작점으로 사용하는 것이 바람직하다. τ 또는 b 를 결정하고 다른 것들을 결정할 수도 있겠지만, 그것보다는 시뮬레이터 운동특성과 변위, 원하는 restoring action의 비율을 정하고 위와 같이 정하는 방법도 상당히 유용할 것이다.

3.3 겹보기 각도(Virtual Angle)

운동을 하고 있는 운동체에 탑승한 탑승자가 느끼는 각도와 외부에서 본 각도에는 차이가 있다. 탑승자가 느끼는 각도는 힘의 방향에 대한 각도이고, 외부에서 본 각도는 이것과 상관없이 절대적인 각도이다. 시뮬레이터에서는 탑승자가 느끼는 각도가 중요하므로 힘의 방향에 대한 각도를 기본으로 하여 시뮬레이터를 동작시켜주어야 한다.

운동체의 단위질량당 관성력은 다음과 같이 표현된다. (선형운동의 경우, 물체고정좌표계에서 기술됨)

$$\begin{aligned} a_x &= \dot{u} + qw - rv + \dot{q}z - \dot{r}y - x(q^2 + r^2) + yqp + zrp \\ a_y &= \dot{v} + ru - pw + \dot{r}x - \dot{p}z - y(r^2 + p^2) + zrq + xpq \\ a_z &= \dot{w} + pv - qu + \dot{p}y - \dot{q}x - z(p^2 + q^2) + xpr + yqr \end{aligned}$$

여기서 u, v, w 는 linear velocity이고, p, q, r 은 각각 roll, pitch, yaw 각속도이다. x, y, z 는 물체고정좌표계에서의 위치이다. 인간은 운동체의 가속방향의 반대방향의 힘을 받는다. 인간이 받은 힘은 이것 이외에 중력이 있다. Euler angle로 각도가 있는 물체고정좌표계에서의 중력의 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_x &= g \sin\theta \\ g_y &= -g \sin\phi \cos\theta \\ g_z &= -g \cos\phi \cos\theta \end{aligned}$$

여기서 g 는 중력가속도이다. 전체적으로 인간이 받는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f_x &= -a_x + g_x \\ f_y &= -a_y + g_y \\ f_z &= -a_z + g_z \end{aligned}$$

이 힘들로 겉보기 각도(virtual pitch, roll angle)를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_v &= \sin^{-1}\left(\frac{f_x}{f}\right) & f &= \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} \\ \phi_v &= \tan^{-1}\left(\frac{-f_y}{-f_z}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{a_y - g_y}{a_z - g_z}\right) \end{aligned}$$

Bank turn을 하는 경우 중력에 의한 옆방향 힘과 원심력에 의한 옆방향 힘이 서로 상쇄되어, Virtual roll은 0이 될 수 있다. 모든 방향의 물체의 가속도가 없다면, 겉보기 각도는 실제의 pitch, roll 각과 같아진다. 만일 시뮬레이터의 운동 가속도가 있다면, 다음과 같이 식을 바꾸면 된다.

$$\begin{aligned} f_x &= -(a_x - a_x^S) + g_x \\ f_y &= -(a_y - a_y^S) + g_y \\ f_z &= -(a_z - a_z^S) + g_z \end{aligned}$$

여기서 a_x^S, a_y^S, a_z^S 는 시뮬레이터 운동의 x,y,z 방향 가속도이다.

3.4 Homing Position

이것으로 운동체 동작의 변화가 없으면 시뮬레이터의 변위를 0점에 가져다 놓는 것을 구현한다. 또한 전진방향 가속의 부족한 부분을 pitch 각과 중력가속도를 이용하여 보완하는 데에 필요하다. 또한 전진방향의 속도가 있으면, 향후 속도가 줄어들 가능성이 더 높기 때문에 시뮬레이터를 앞으로 조금 가져다 놓는 게 유리한 면이 있다. 따라서 다음과 같이 homing position을 준다.

- Surge : 전진방향 최대속도일 때 시뮬레이터 전진방향 최대 변위의 1/2
- Sway : 옆방향 속도에 따라 결정, Surge의 배율과 같게 줌
- Heave : homing position은 0점
- Roll : Virtual Roll Angle
- Pitch : Virtual Pitch Angle
- Yaw : 최대 회전각속도일 때 시뮬레이터 Yaw 최대각의 1/2

여기에서 surge, sway, yaw의 homing position 결정에 사용되는 속도는 대상운동체 속도의 running average를 사용한다. 이렇게 homing position을 설정하면, 시뮬레이터 외부에서 보았을 때, 대상체의 속도 등 움직임을 알 수 있는 방법이기 때문이다.

위의 homing position 중 다른 것들은 문제를 발생시키지 않을 것이다. Roll과 pitch의 경우 virtual angle이 급격하게 변화하는 경우가 발생할 수가 있다. 또한 이 값들은 dynamic system을 통하지 않고 계산에 의한 값이므로 급격한 변화를 가질 수 있다. 따라서 이것 들에는 적절한 low-pass filter를 적용하여 사용하는 것이 좋다. 따라서 roll과 pitch의 virtual angle에는 low-pass filter를 사용하여 운동재현을 한다.

$$\begin{aligned} G_{L1} &= \frac{1}{\tau s + 1} \\ G_{L2} &= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned}$$

이때 τ 는 3.1절의 high-pass 필터의 T 값과 같게 한다. 만일 1차 필터의 출력이 급격히 움직여서 원하지 않는 운동을 만들어 낸다면, 2차 필터를 사용하는 것이 좋다. 이때 ω_n 은 cut-off frequency의 개념으로 $1/\tau$ 를 쓰게 된다. 그러나 이때의 필터 출력은 변화에 둔 감하게 응답을 한다. 따라서 $\omega_n = k \times 1/\tau$ 로 하고, k 값은 1에서 2까지의 값을 사용하는 것이 좋다. 2를 주면 1차 필터와 거의 비슷한 거동을 준다.

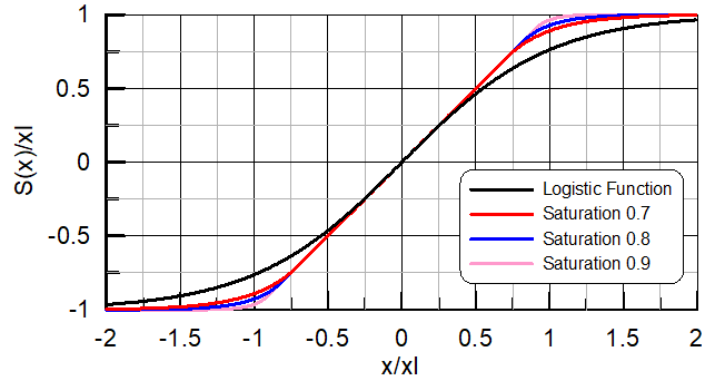
3.5 운동한계

시뮬레이터 변위를 위에서와 같은 방법으로 계산하는 경우, 시뮬레이터의 운동한계를 넘어가는 경우가 발생할 수 있다. 이때는 운동한 계 내에서 작동을 하도록 운동을 줄여줄 필요가 있다. 이때 사용하는 함수가 속칭 sigmoid function이다. Sigmoid function으로 많이 사용하는 함수는 logistic function이다 (logistic function은 1800년대에 population growth를 모델링하기 위하여 도입되었다.) 통 상적인 sigmoid function은 시뮬레이터가 운동한계의 1/2에 도달하기도 전부터 값이 줄어든다. 따라서 줄어들기 시작하는 변위를 지 정하고 이 이하에서는 운동값을 그대로 재현하고, 이 이상이 되었을 때만 줄여주는 함수가 필요하다. 이런 함수를 구하면 다음과 같다.

$$S(x) = \begin{cases} x & \text{for } x < kx_l \\ x_l - x_l(1-k)e^{-\frac{x-kx_l}{x_l(1-k)}} & \text{for } x > kx_l \end{cases}$$

$$S(x) = \begin{cases} x & \text{for } x \geq -kx_l \\ -x_l + x_l(1-k)e^{\frac{x+kx_l}{x_l(1-k)}} & \text{for } x < -kx_l \end{cases}$$

여기에서 x_l 은 운동의 제한값이고, k 는 운동변위를 줄여주기 시작하는 제한값의 비율이다. 이렇게 하면 기울기와 값이 이어지면서 saturation 되는 sigmoid function이 된다. 원점에서 기울기가 1이 되고 크기가 1인 logistic function과 비교하면 다음의 그림과 같다.



<그림 7 KRISO Sigmoid Function>

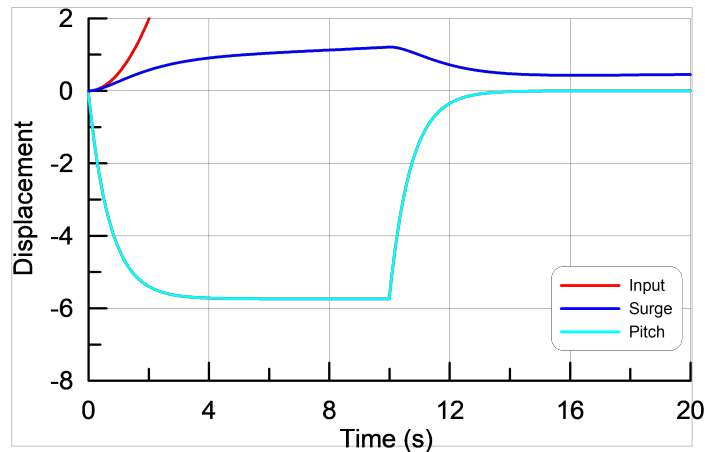
k 값을 0.7 이상을 사용하면 원하는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

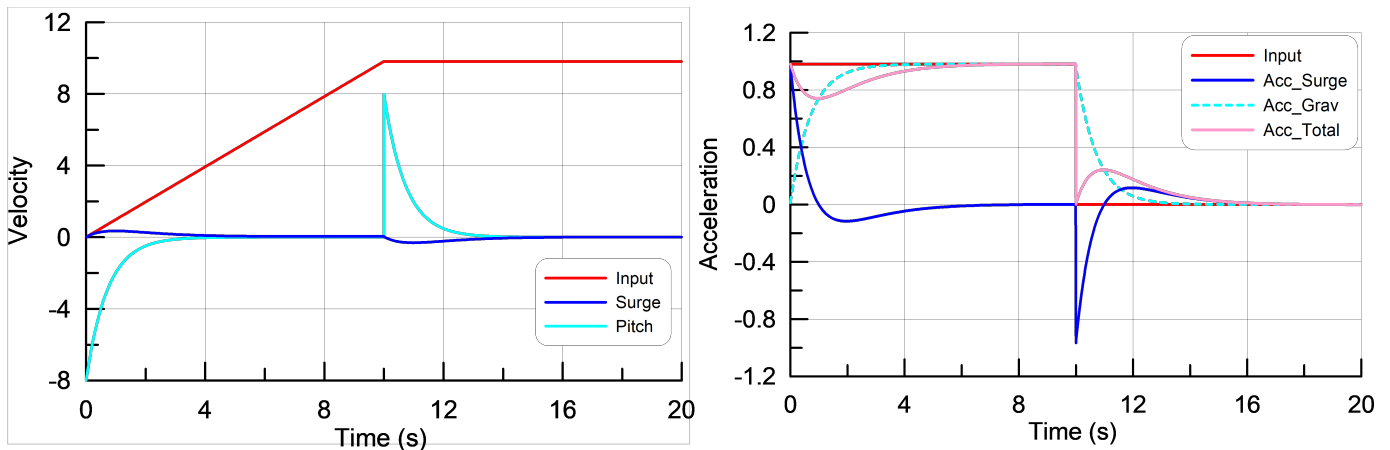
4. 적용 예

KRISO의 washout filter의 사용 예를 제시한다. 시뮬레이터의 안전 한계는 linear motion은 $\pm 1\text{m}$, angular motion은 $\pm 30\text{degree}$ 로 한다.

시뮬레이터의 파라미터는 무차원수 $k_a=1$, $k_r=1$ 로 하여 얻는다. Roll과 pitch의 경우 virtual angle을 빨리 추종하기 위하여 $k_r=2$ 로 한다. 이 값들은 기준으로 사용하는 것이고, 대상체의 특성에 따라 적절한 값을 구하여 사용한다. 옆방향과 위방향에 대한 파라미터는 전진방향에 대한 파라미터와 같은 값을 사용하기로 한다. 그 이유는 같은 선형운동이므로 자연스러운 선택이다.

최대가속도를 0.1g으로 하여 정지상태에서 10초간 가속을 하고, 10초 후 가속을 0으로 한 경우에 대하여 시뮬레이터 운동변위와 속도, 가속도를 구하면 다음과 같다.





<그림 8 Output of Washout Filter when forward acceleration, a) displacement, b) velocity, c) acceleration>

가속 시 중운동(pitch) 각도가 약 5.7도가 되고, 전후운동(surge)은 약 1m 정도 된다. 가속도는 전진방향 가속도가 처음에만 만들어지다가 급격히 줄어드는데 이것을 중운동(pitch)을 움직여 중력가속도로 보상을 한다. 위의 계산 예는 homing position input에 대하여 1차 필터를 사용한 것이다. 위의 그림 c)의 가속도가 탑승자가 느끼는 힘을 나타내고 있다. Input이라고 지시된 것은 실제 운동체의 가속도이고, Acc_Total이라고 지시된 것은 시뮬레이터 탑승자가 느끼는 힘이다. 가속이 변하는 초기에 실제 값에 조금 못 미치지만, 그 이외의 시간에서는 같은 값을 주고 있다. 즉 탑승자가 느끼는 힘은 실제와 비슷하다는 의미이다. 위의 계산 이외에도 선회(level turn, bank turn) 시, 정지 시에 대하여서도 분석을 하였으나, 지면 관계상 줄인다.

5. 결론

본 기술보고에서는 잠수함 시뮬레이터 운동재현기법을 다루었다. 운동재현기법의 중요한 기법인 Washout Filter는 운동변위, 속도, 가속도를 어떠한 것을 입력으로 하여도 유사한 결과를 준다는 것을 알았다. 따라서 KRISO에서는 운동변위를 기반으로 한 운동재현기법을 제시하였다. 이 방법의 특징은 기구적인 제한조건과 재현하여야 할 운동범위를 가지고, 필요한 각종 파라미터를 정하는 방법도 제시한 것이다. 또한 운동변위를 기반으로 하였기 때문에 물리적인 개념으로 파라미터를 변경하기가 쉽다는 장점이 있다. 잠수함 시뮬레이터는 현재 한국해군에서 승조원의 훈련용으로 사용하고 있는데, KRISO에서는 향후 새로이 개발되는 차세대 잠수함의 훈련용 시뮬레이터와 운동재현기법에 대하여 준비하고 있다.

감사의 글

본 기술보고는 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “수중운동체 운항성능 통합 추정기술개발”(과제번호 PES4690)에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 국방부 블로그, <https://blog.naver.com/mnd9090/222891390841>
- 국방일보, https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20190430/8/BBSMSTR_00000010024/view.do,
- Affan, M., Ahmed, S. U., Manek, A. I., Uddin, R., 2019, “Design and Implementation of the Washout Filter for the Stewart-Gough Motion Platform”, 2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE), December 2019, Dubai
- Allen, R. Wade, 2011, A Short History of Driving Simulation, Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology (edited by Donald L. Fisher et al.) CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011
- Colombet, F., Dagdelen, M., Reymond, G. Pere, C., Merienne, F., Kemeny, A., 2008, “Motion Cueing: what’s the impact on the driver’s behavior?”, DSC 2008
- Davison, Peter John, 2018, Motion in Flight Simulators - A story of Evolution, Aviation Focus, Hong Kong
- Fang, Z. and Kemeny, A., 2014, “Review and Prospects of Renault’s MPC based Motion Cueing Algorithm for Driving Simulator”, Driving Simulation Conference 2014, Paris, September 2014
- Natal, G.S., Arjoni, D.H., Oliveira, W.R., Rodamilans, G.B., da Silva, E.T., Silveira, L., Villani, E., Trabasso, L., 2019, “Implementation Analysis of a Washout Filter on a Robotic Flight Simulator - a Case Study”, Journal of Aerosp. Technol. Manag. v11, 2019
- Page, Ray L., 2000, Brief History of Flight Simulation, Proceedings of SimTecT 2000, Sydney, 28 Feb.- 2 March 2000, pp.1-11
- Reid, L.D. and Nahon, M.A., 1985, Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: Part 1 - Developing and Testing the Equations, 1985, UTIAS Report No. 296
- Roberson Memorial, 2000, The Link Flight Trainer - A Historic Mechanical Engineering Landmark, Roberson Museum and Science Center
- Schmidt, S. F. and Conrad, B. 1970, Motion Drive Signals for Piloted Flight Simulators, NASA CR-1601, 1970
- Slob, J.J., 2008, State-of-the-Art Driving Simulators - a Literature Survey, DCT report DCT 2008.107, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, August 2008
- Stroosma, O., van Paassen, M. M., Mulder, M., 2013, “Applying the Objective Motion Cueing Test to a Classical Washout Algorithm”, AIAA 2013-4834, AIAA Modeling and Simulation Technologies(MST) Conference, August 2013 Boston