



# 잠수함시뮬레이터의 운동재현필터: 제2보. BB2 잠수함에의 적용

이경중<sup>1</sup>·김동진<sup>2</sup>·권창섭<sup>2</sup>·여동진<sup>2</sup>·김연규<sup>2</sup>·윤근항<sup>2,†</sup>  
선박해양공학기술협동조합<sup>1</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>2</sup>

## Motion Filter of the Submarine Simulator: Part 2, Application to a BB2 Submarine

Gyeong Joong Lee<sup>1</sup>·Dong Jin Kim<sup>2</sup>·Chang Seop Kwon<sup>2</sup>·Dong Jin Yeo<sup>2</sup>·Yeon Gyu Kim<sup>2</sup>·Kunhang Yun<sup>2,†</sup>  
Ship and Marine Technology Cooperative (SMTech)<sup>1</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO)<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Most of the vehicle simulators, such as airplane, car, ship, have motion bases that provide the motion feelings of vehicles to the trainee or user. However, the motion base has a limit on its movement due to its constrained mechanism, so the motion generated by the motion base is somewhat different from the real vehicle motion. Instead of 'classical washout filter', the part 1 of this paper proposed a new motion filter: it uses the motion states as inputs, provides the method of determining parameters, homing action, and measurement method of motion fullness. Using this motion filter, this paper deals with applications to a submarine. Since a submarine simulator does not have the graphics which show the environment change, so without a motion base, the trainee in it can not feel the situation even though some instruments indicate the submarine movements. Therefore, for the purpose of the simulator training, the motion base of a submarine simulator is highly required. Part 1 of this paper has dealt with the basic theory and general applications, and this part 2 deals with the applications to a BB2 submarine.

**Keywords** : Submarine(잠수함), Simulator(시뮬레이터), Washout Filter(위시아웃필터), Motion Base(운동재현기), Motion Feeling(운동체감)

### 1. 서론

본 논문은 잠수함 시뮬레이터의 운동재현필터의 제2보로 제1보 (Lee et al., 2024)에서는 운동재현필터의 기본이론과 일반적 용을 다루었고, 제2보인 본 논문에서는 제안된 운동재현필터를 공개선형 잠수함인 BB2 잠수함에 적용하고 그 결과를 고찰한다.

잠수함의 경우, 외부 환경이 안에서 보이지 않기 때문에 Fig. 1과 같이 주로 계기에 의존한 시뮬레이터를 제작할 수밖에 없다. 그러나 이런 경우 계기만으로 훈련을 하게 되면, 잠수함의 움직임 전혀 느끼지 않게 되고, 계기가 보여주는 운동과 탑승자가 느끼는 운동이 전혀 다르기 때문에 훈련효과가 떨어진다. 따라서 잠수함 시뮬레이터는 운동을 재현하는 것이 훈련의 효과를 높일 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 잠수함 시뮬레이터의 운동재현 기법에 대하여 알아보고, 모형시험과 동역학 시뮬레이션을 통하여 얻어진 잠수함의 운동을 제안하는 운동재현기법을 통하여 얻어진 운동과 비

교를 하여 운동재현효과가 어느 정도인지를 알아보고자 한다. 또한 운동재현기의 운동자유도에 따른 효과를 분석하여 적합한 자유도를 선택하는데 도움을 주고자 한다.

본 논문은 두 파트로 분리하여 작성하였다. 첫 번째 논문은 washout filter의 일반특성과 본 연구에서 제안하는 운동재현필터 (motion filter)의 상세한 사항과 항공기, 자동차, 선박 등 일반적인 사례 적용에 대하여 다루었다.



Fig. 1 Submarine training simulator of Korean navy(from Ministry of National Defence, 2022 and Kookbangilbo, 2019)

본 논문인, 두 번째 논문에서는 선박해양플랜트연구소에서 수행중인 잠수함 자유항주모형시험의 대상인 BB2 잠수함에 대하여 획득된 운동 특성을 바탕으로 이를 적용한 운동재현기법에 대하여 결과들을 수록하였다.

## 2. 운동재현필터(Motion filter)

시뮬레이터의 운동재현기는 운동한계를 가지므로 실제운동을 똑같이 재현하지는 못한다. 이에 따라 변위가 큰 저주파 운동을 제거하는 필터를 사용하여 운동을 재현할 수밖에 없다. 항공기 분야에서는, 훈련용 시뮬레이터를 위하여 Schmidt and Conrad (1970)가 'Washout filter'의 개념을 사용한 이후, 많은 적용과 발전이 이루어졌다 Reid and Nahon, 1985). 이 방법은 'Classical washout filter'라고 불린다. 이 필터는 입력으로 탑승자가 받는 힘을 기본으로 하는데, 필터의 많은 파라미터를 결정하기가 쉽지 않은 문제점을 가지고 있다. 본 논문의 제1보에서는 새로운 운동재현필터로서 입력으로 운동변수를 사용하고, 파라미터를 동역학적 지식으로 설정하는 쉬운 방법을 제안하였다. 여기에 이를 간략하게 소개한다. 제안한 운동재현필터의 흐름도는 Fig. 2와 같고, 필터식은 식 (1), (2)와 같다.

$$\tau \dot{\xi} + \xi = x \quad y = x - \xi \quad (1)$$

$$\dot{z} + b(z - z_H) = y \quad (2)$$

여기에서  $x$ 는 입력이고,  $\xi$ 는 중간변수,  $y$ 는 필터출력이다. 필터 입력으로는 속도를 선택하였다. 시뮬레이터 변위  $z$ 는 필터출력을 적분하여 얻고,  $z_H$ 는 호밍위치이다. 정리하면, 1차 고주파통과필터(high-pass filter)와 호밍위치를 가지는 적분을 결합한 방법이라고 할 수 있다.

호밍위치(homing position)은 다음과 같이 설정한다.

- 전후동요(surge) : 전진방향 최대속도일 때 시뮬레이터 전진 방향 최대 변위의 1/2
- 좌우동요(sway) : 옆방향 속도에 따라 결정, 전후동요(surge)의 배율과 같게 줌
- 상하동요(heave) : 0
- 횡동요(roll) : 가상횡경사각(virtual roll angle)

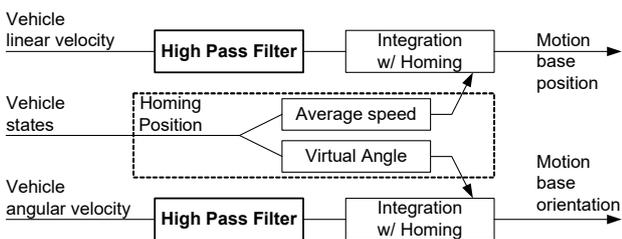


Fig. 2 Proposed motion filter structure

- 종동요(pitch) : 가상종경사각(virtual pitch angle)
- 선수동요(yaw) : 최대 회전각속도일 때 시뮬레이터 선수동요(yaw) 최대각의 1/2

가상각(virtual angle)은 탑승자가 느끼는 각도로, 가상종경사각  $\theta_v$ , 가상횡경사각  $\phi_v$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_v = \sin^{-1}\left(\frac{f_x}{f}\right) \quad f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$$

$$\phi_v = \tan^{-1}\left(\frac{-f_y}{-f_z}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{a_y - g_y}{a_z - g_z}\right) \quad (3)$$

$$f_x = -a_x + g_x \quad (4)$$

$$f_y = -a_y + g_y$$

$$f_z = -a_z + g_z$$

여기서  $a_x, a_y, a_z$ 는 각각 x,y,z방향 가속도이고,  $g_x, g_y, g_z$ 는 중력의 각 방향 성분들이다.

시뮬레이터가 움직이면서 탑승자에게 얼마만큼 유사하게 운동을 느끼게 해주었느냐에 대한 지수인 운동재현충실도(ratio of fullness)는 다음의 식으로 계산한다.

$$R_F = 2 \frac{f_V f_S}{f_V^2 + f_S^2} \quad (5)$$

$$R_F = 1 - \frac{|f_S|}{f_{VMax}} \quad \text{for } |f_V| < \varepsilon \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 선형운동에서는 단위질량당 힘으로, 회전운동에서는 각속도로 하며, 밀침자  $S$ 는 시뮬레이터,  $V$ 는 대상운동체를 뜻한다.  $f_S$ 와  $f_V$ 가 같을 때 1이 되고, 움직이지 않을 때 0이 되며, 음수도 나올 수 있다. 반대로 움직이는 경우 음수가 된다. 둘 다 값이 0일 때는 1로 정의한다. 이 값을 적분하여 평균을 내면 전체 충실도가 나오고, 현재평균(running average)을 구하면 현재의 평균 충실도가 나온다. 식 (6)은 대상운동체의  $f_V$ 가 설정된 최대값의 1% 이내인 경우에 사용한다.

운동재현필터 식 (1), (2)에는  $\tau, b$ 의 계수가 있는데, 모든 운동모드에 대하여 이것을 설정하여야 한다. 본 논문의 제1보에서 동역학적 자료로 계수를 설정하는 무차원수를 두 개를 제안하였는데, 하나는 'amplitude ratio coefficient'  $k_a$  이고, 다른 하나는 'restoring ratio coefficient' 로 다음과 같다.

$$k_a = \frac{a_M \tau}{z_M b} \quad (7)$$

$$k_r = b \tau \quad (8)$$

여기서  $a_M$ 은 운동체의 지속가능 최대 가속도,  $z_M^S$ 는 시뮬레이터의 최대 운동변위이다. 더 자세한 설명이 필요하다면 제1보(Lee et al., 2024)를 참조하기 바란다.

### 3. BB2 잠수함 시뮬레이터에의 적용

#### 3.1 BB2 잠수함 제원

BB2 잠수함은 MARIN에서 개발한, 실제 건조는 되지 않고, 국제 공동연구를 위해 개발된, 공개된 잠수함 선형이다. 배수량은 약 4,000톤 급으로 선미에 X타를 장착하였다. BB2 잠수함의 제원은 Table 1과 같다.

선박해양플랜트연구소에서 제작한 1/15 축소모형의 형상은 Fig. 3과 같다.

#### 3.2 BB2 잠수함의 운동자료

선박해양플랜트연구소에서는 유체동역학 계수들을 구하는 구속모형시험을 수행하였고, 이것을 이용하여 수중, 수상 거동에 대한 동역학 시뮬레이션을 수행하고 있다. 또한 자유항주모형을 제작하여 수상, 수중 모형시험을 수행하고 있으며, 그 외에도 전산유체역학을 이용하여 수중에서의 거동을 해석하고 있다.

본 논문에서 참고한 자료는 다음과 같다.

- 수상 선회 및 지그재그시험 자료 (자유항주 모형시험)
  - 수평면 35° 선회
  - 수평면 10° 선회
  - 수평면 20°/20° 지그재그
  - 수평면 10°/10° 지그재그

Table 1 Particulars of a BB2 submarine (Overpelt et al., 2015)

$L_{pp}$	70.2	m
B	9.6	m
Height hull	10.6	m
Displacement	4,365	ton
Fullness parameter ( $C_Q$ )	0.85	-

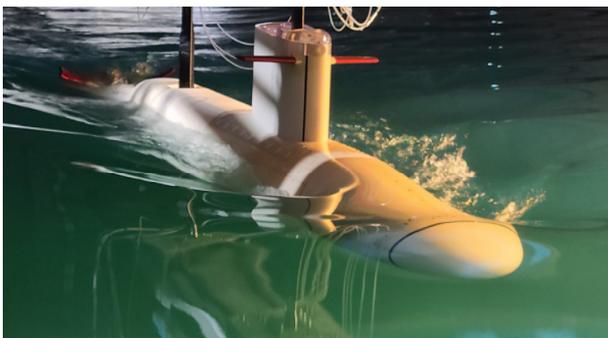


Fig. 3 Model of a BB2 submarine

- 수중 선회 및 지그재그시험 자료 (전산유체역학)
  - 수평면 30° 선회
  - 수평면 10°/10° 지그재그
  - 수평면 20°/20° 지그재그
  - 수평면 30° 선회 (20knots)
- 심도 변화 동적 거동 (동역학 시뮬레이션)
  - Submerged to Surface
  - Surface to Snorkel to Surface
  - Surface to Submerged
- 긴급 잠항, 부상 (동역학 시뮬레이션)
  - 수직면 20° 잠항
  - 수직면 20° 부상
  - 수평면 30° 수중선회(심도제어on)후 수직면 20° 부상
  - 수평면 30° 수중선회(심도제어off)후 수직면 20° 부상

여러 가지 자료 중 대표적인 것으로 '수상 35° 선회'와 '수평면 30° 수중선회(심도제어on)후 수직면 20° 부상'에 대한 자료를 선정하여 다음 절의 운동재현필터 적용 예로서 사용하였다.

운동재현필터를 위한 파라미터는 Table 2와 같이 선정하였다.

전진방향 속도는 약 20노트로 설정하였고, 옆방향 속도는 이것의 1/5로 택하였다. 전진방향 가속도는 일반선박의 경우  $0.5 \text{ m/s}^2$  수준이지만(제1보 참조), 모형시험과 시뮬레이션 결과 최대 가속도가 이것보다 작게 나와서  $0.1 \text{ m/s}^2$  으로 택하였다.(3.5절 참조) 나머지는 제1보에 제시한 값들을 사용하였다. 여기에서 최대값들은 상당시간 지속가능한 최대속도, 최대가속도로 적절한 값을 택하여야 시뮬레이터 운동재현기의 운동범위를 충분히 사용할 수 있다. 다만 안전을 위하여 크게 택할 필요는 없다. 조금 작게 택하여도 하여도 제1보에서 설명하였듯이 시그모이드함수에 의하여 안전한게 내에서 부드럽게 운동이 제한된다.

본 연구에서 사용되는 좌표계는 전진방향을 X로, 윗방향을 Z로 하는 오른손좌표계이다. 또한 모형스케일의 시험, 시뮬레이션 자료를 실선스케일로 변환하여 사용하였다. 또한 물체 고정좌표계  $x, y, z$  방향 속도는  $u, v, w$ 로 표시하였고,  $XYZ$ 는 공간고정좌표계이다. 초기에 X방향과 x방향은 일치하도록 하였다.

Table 2 Proposed parameters of motion filter for a BB2 submarine

Mode	X (m, m/s, m/s <sup>2</sup> )	Y (m, m/s, m/s <sup>2</sup> )	Z (m, m/s, m/s <sup>2</sup> )	Roll (°, /s)	Pitch (°, /s)	Yaw (°, /s)
Motion limit	1	1	1	30	30	30
Rate max.	10	2	2	20	20	3
Acc. max.	0.1	0.1	0.1	-	-	-
$k_a$	1	1	1	1	1	1
$k_r$	1	1	1	2	2	1

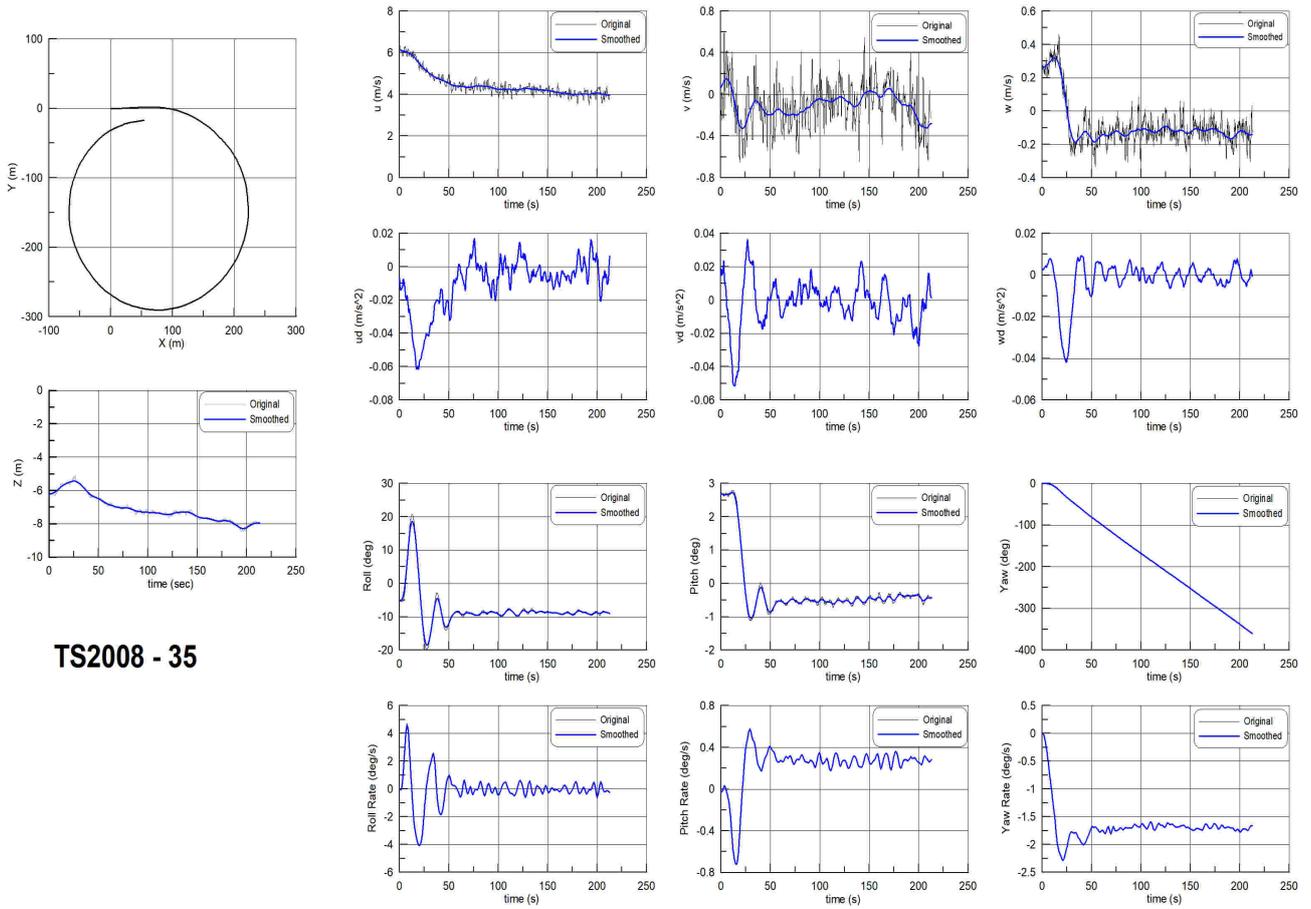


Fig. 4 Free-run model test data of a BB2 submarine (on surface, 35° turn)

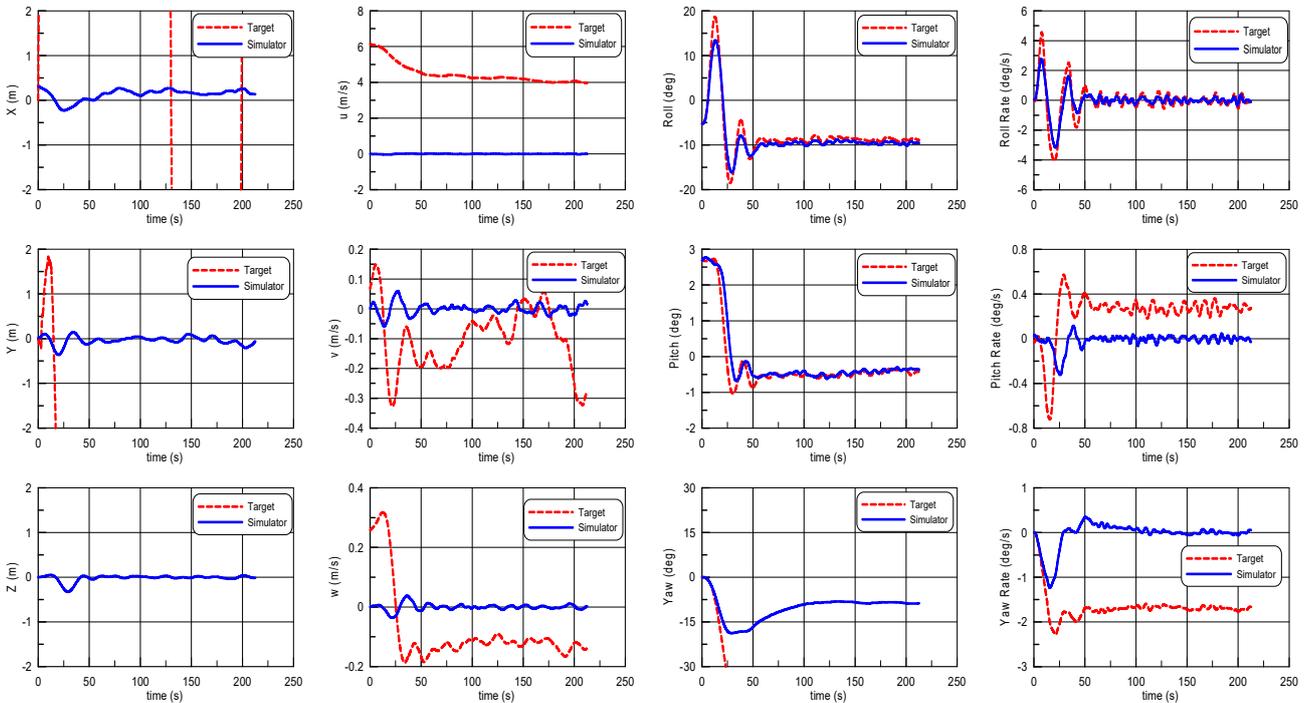


Fig. 5 Comparisons of motion variables during 35° turn on surface: target(BB2 free-run) motions and the ones from the motion filter

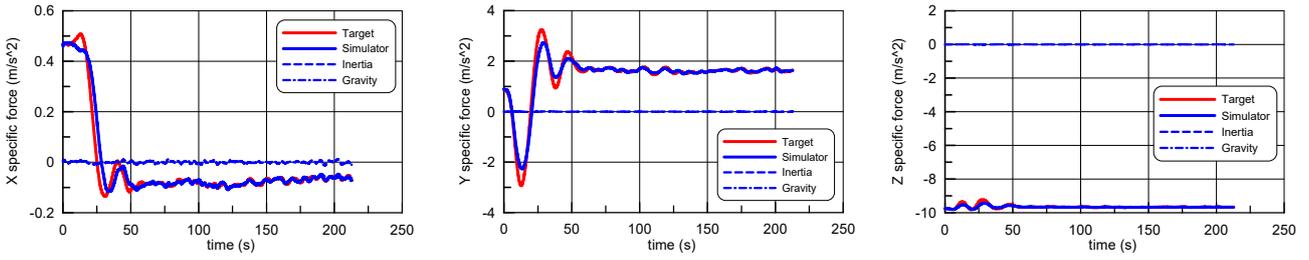


Fig. 6 Comparisons of specific forces during 35° turn on surface: target(BB2 free-run) forces and the ones from the motion filter

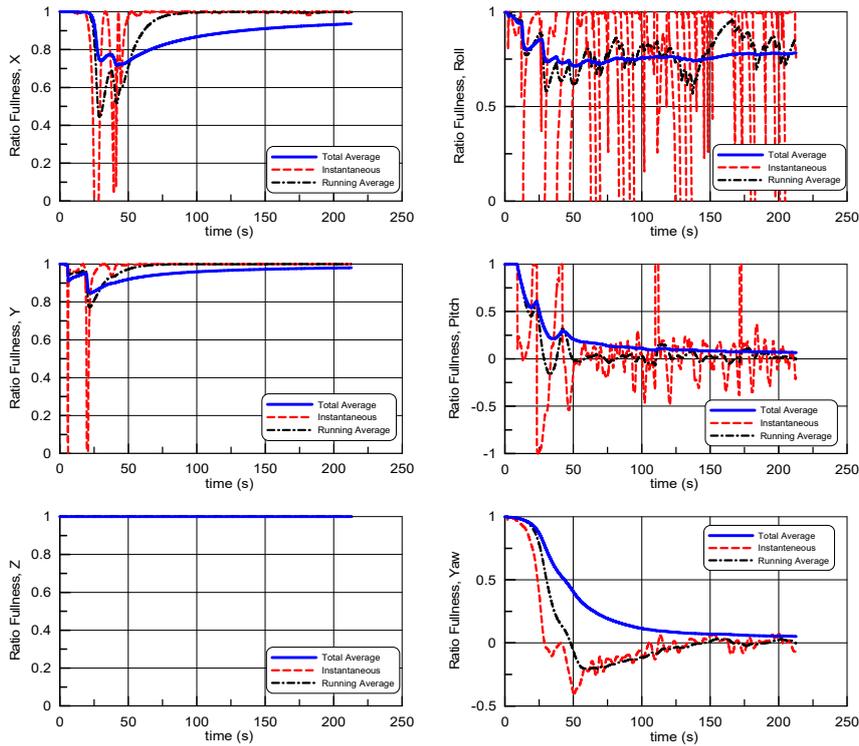


Fig. 7 The ratio of fullness during 35° turn on surface

### 3.3 수상 35° 선회

Fig. 4는 자유항주모형을 이용한, 수상항주 중 타를 35° 작동 시켜서 선회를 수행한 자료이다. 센서노이즈를 많이 포함하고 있어서, 평활화(smoothing)하여 운동제한필터의 입력으로 사용하였다.

평활화는 삼각형 평활기법을 사용하였는데, 특히 속도  $u, v, w$  는 강도 높은 평활화를 하였다. 모형시험자료와 이것의 평활화 결과는 Fig. 4에 수록하였다. 특이한 점은 선회중 외방경사가 약 10도 정도로 유지되었고, 이에 따라 선회(turn)각속도가 선수동요(yaw)각속도와 종동요(pitch)각속도로 분리가 되어 종동요 각속도가 0.3 /s 정도를 유지하고 있다는 점이다. 또한 종경사가 초기 항주에서는 선수가 밑으로 향하는 상태이었는데, 선회를 하면서 선수가 위로 들리는 거동을 보여준다.

이 운동을 운동제한필터(motion filter)를 통하여 시뮬레이터 운동으로 재구성한 결과는 Fig. 5에 수록하였다. 이것을 보면, 횡동

요의 크기가 약간 작아졌는데, 이것은 옆방향 가속 때문에 계산되는 가상횡경사각의 영향 때문으로 판단된다. 또한 종동요각을 약간 늦게 추종하는데, 이것은 상하방향 가속도 때문으로 판단된다.

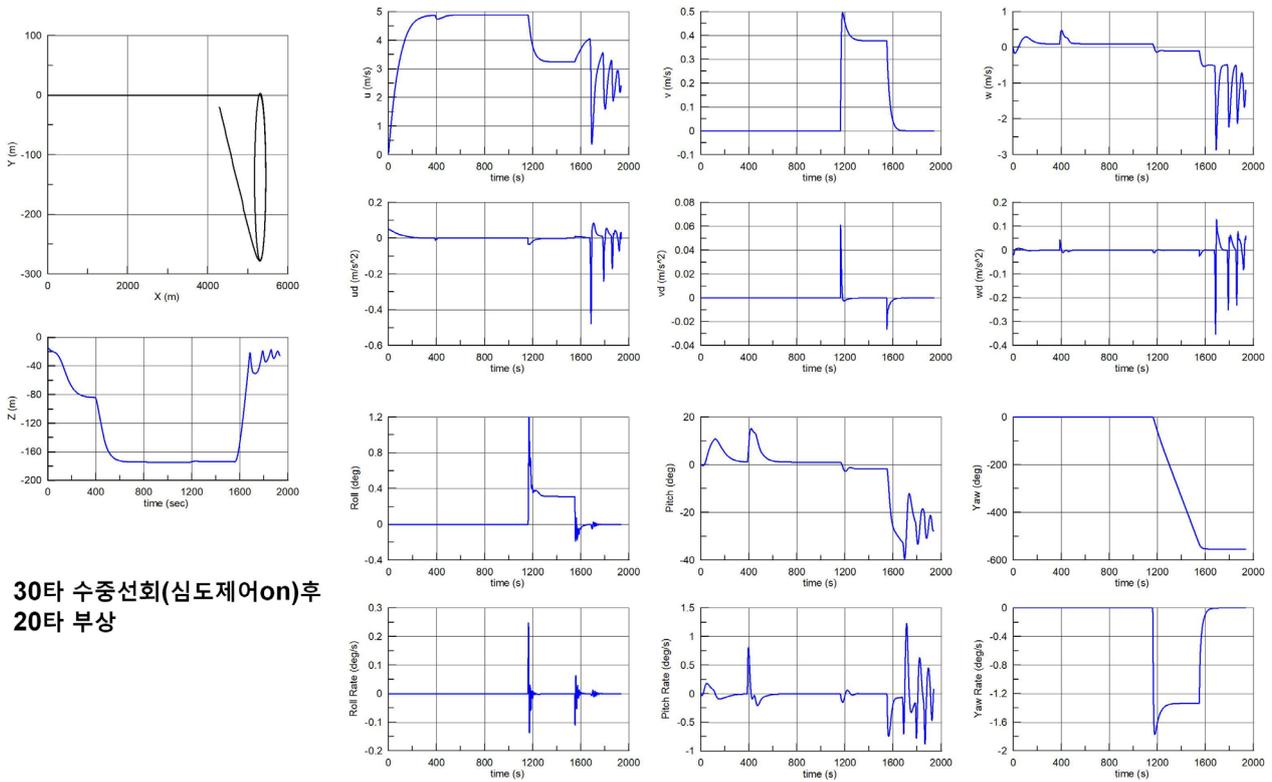
탑승자에게 가해지는 힘은 Fig. 6에 수록하였는데, 전진방향 힘이 초기에 약간 지연되고, 옆방향 힘은 조금 작아진 것을 제외하고는 아주 잘 재현하고 있다.

Fig. 7은 운동제한충실도를 보여주고 있는데, 일부 운동제한충실도가 아주 작은 값을 잠시 가지는 경우가 많이 발생하였다. 이것은 대상운동체의 해당 값이 0근처의 아주 작은 값이라서 운동제한충실도를 정의하기가 힘든 경우에 해당한다. 이런 경우를 제외하고는 선형운동의 경우에는 운동제한충실도가 높은 값을 보여주고 있다. 그러나 회전운동에서는 종동요와 횡동요의 충실도가 떨어지는 것을 보여주는데, 이것은 대상운동체의 각속도가 일정값으로 유지되는데 반하여 시뮬레이터의 각속도는 운동범위의 제한으로 인하여 계속 유지할 수 없기 때문이다.

### 3.4 수중선회 및 부상

Fig. 8은 동역학 시뮬레이션을 이용하여 [30° X타 수중 수평면 선회(심도제어on)후 20° X타 부상]에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

Fig. 8은 수상 정지상태에서 가속하면서 1차 잠항을 하고, 시간 400초에서 2차 잠항을 하여 심도를 크게 하고, 운동상태가 안정되면 수중에서 선회를 한 후, 티를 상승타로 하여 수면으로 부상하는 시간이력 자료이다. 시뮬레이션결과라서 노이즈는 없는 자료이다. 가속도 수준을 보면 긴급부상시 수면에 도달하였을



30타 수중선회(심도제어on)후  
20타 부상

Fig. 8 Simulated data of a BB2 submarine (submerged, 30° turn and surfacing)

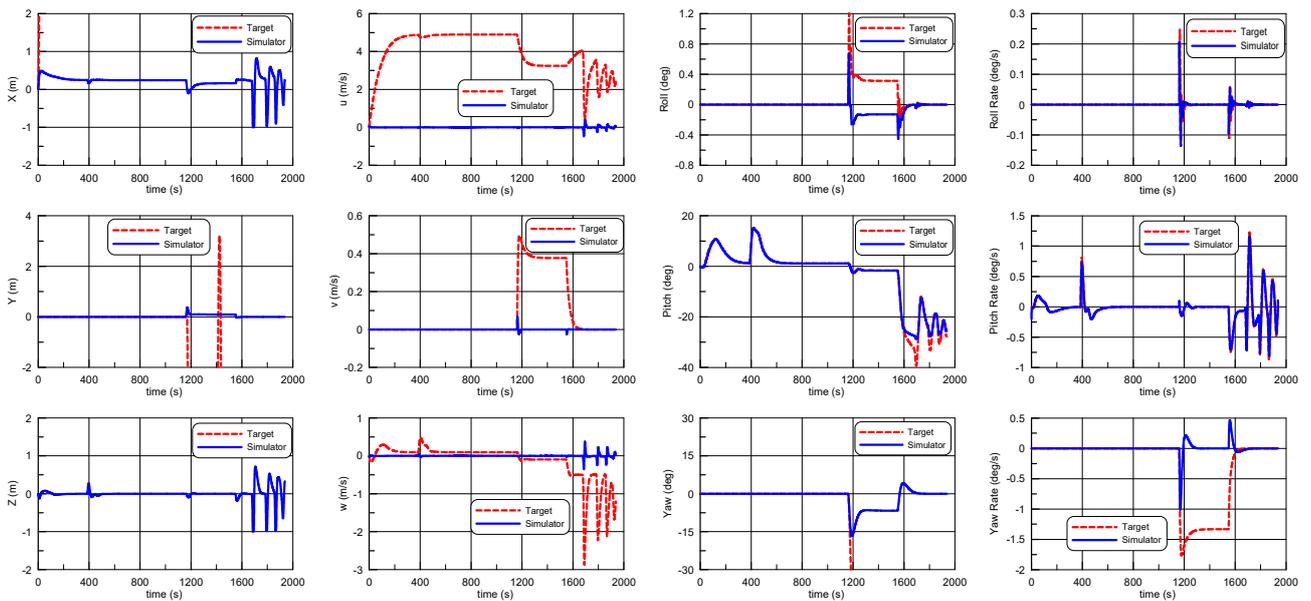


Fig. 9 Comparisons of motion variables during 30° turn and surfacing: target(BB2 simulation) motions and the ones from the motion filter

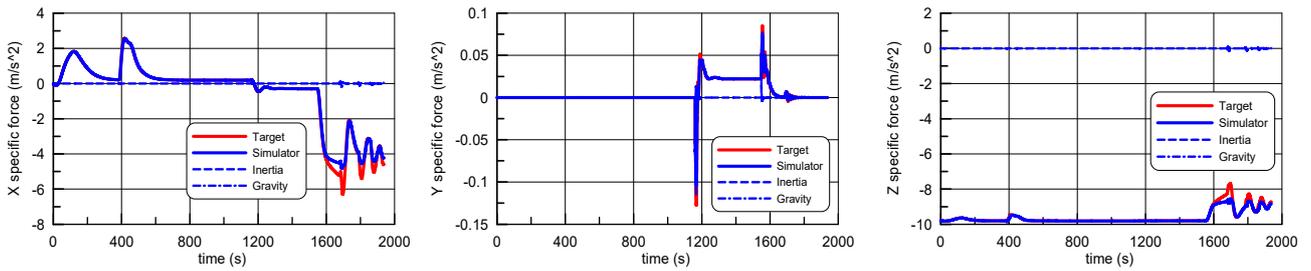


Fig. 10 Comparisons of specific forces during 30° turn and surfacing: target(BB2 simulation) forces and the ones from the motion filter

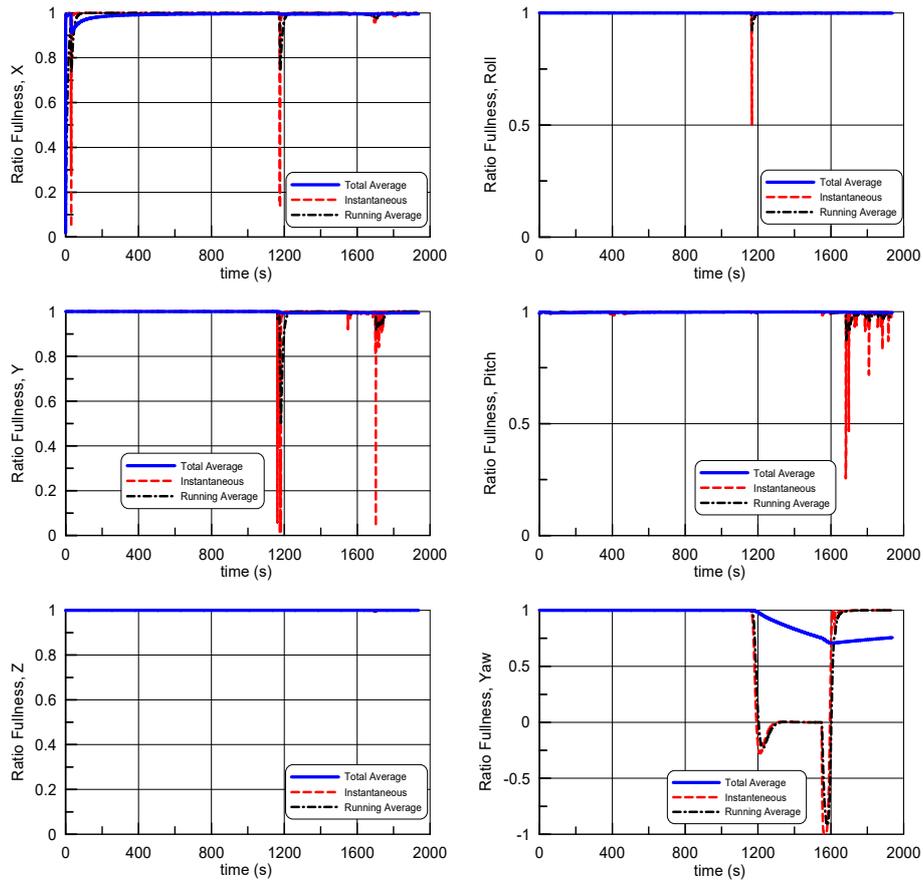


Fig. 11 The ratio of fullness during 30° turn and surfacing

때를 제외하고는 0.5–0.6 m/s<sup>2</sup> 수준이다. 수상선회와 달리 수중 선회시 횡경사각은 내방경사 0.3도 정도로 아주 작다.

운동재현필터를 통하여 시뮬레이터 운동으로 재구성한 결과는 Fig. 9에 도시하였다. 수면에 도달하였을 때를 제외하고는 무리 없이 운동재현을 하고 있으며, 선회 시작 시 선수각을 선회방향으로 움직여 선회가 시작되었다는 것을 표현하고 있다. 특이한 사항으로는 횡경사의 경우 대상운동체의 횡경사와 시뮬레이터의 횡경사가 작지만 반대의 부호를 가지고 있다는 것이다. 이것은 원심력을 재현하기 위한 가상횡경사각 때문이다. 긴급부상으로 수면에 도달했을 때는 운동한계까지 시뮬레이터가 움직인다.

탑승자에게 가해지는 힘은 Fig. 10에 도시하였다. 긴급부상으

로 수면에 도달했을 때를 제외하고는 유사하게 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 운동재현충실도를 보여주는데, 초기출발 시, 선회시작 시, 수면도달 시를 제외하고는 높은 운동재현충실도를 보여주고 있다.

3.3절의 모형시험자료에 의한 결과와 차이가 나는 점은 센서 노이즈가 없다는 것과, 운동재현충실도가 높다는 점이다. 시뮬레이터는 통상적으로 동역학 시뮬레이션의 결과를 실시간으로 운동재현기와 계기에 반영하고, 탑승자의 기기 동작에 의한 효과를 동역학 시뮬레이션에 반영하는 시스템이므로 본 절에서 사용한 자료가 실제 시뮬레이터에서 구현되는 결과와 거의 유사할 것이다.

Table 3 Maximum values of BB2 submarine motions in various maneuvering tests and simulations

	Speed (knots)	X Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Y Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Z Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Roll rate (°/s)	Pitch rate (°/s)	Yaw rate (°/s)
35° Turn (on surface)	12	0.06	0.05	0.04	5.0	0.7	2.2
10° Turn (on surface)	12	0.01	0.02	0.005	1.5	0.25	1.0
20°/20° Zig-zag (on surface)	12	0.04	0.035	0.03	3.0	0.8	1.5
10°/10° Zig-zag (on surface)	12	0.03	0.03	0.015	2.0	0.4	1.0
30° Turn (submerged)	10	0.055	0.06	0	0.6	0.3	2.6
10°/10° Zig-zag (submerged)	10	0.01	0.04	0	0.4	0.2	1.5
20°/20° Zig-zag (submerged)	10	0.04	0.06	0	0.6	0.35	2.0
30° Turn (submerged)	<b>20</b>	<b>0.24</b>	<b>0.25</b>	<b>0</b>	<b>3.4</b>	<b>6.0</b>	<b>5.5</b>
Submerged to surface	20	0.026	0	0.14	0	1.3	0
Surface to snorkel to surface	20	0.036	0	0.1	0	0.9	0
Surface to submerged	20	0.05	0	0.12	0	1.3	0
20° Diving	10	0.05	0	0.05	0	1.2	0
20° Surfacing	10	<b>0.05(0.6)</b>	0	<b>0.05(0.4)</b>	0	1.2	0
30° Turn(depth control on) and 20° surfacing	10	<b>0.05(0.5)</b>	0.06	<b>0.05(0.35)</b>	0.25	1.2	1.8
30° Turn(depth control off) and 20° surfacing	10	<b>0.05(0.5)</b>	0.06	<b>0.05(0.4)</b>	0.25	1.2	1.8

### 3.5 운동재현 분석

앞 절에서 계산된 것들을 종합하여 보면, 시뮬레이터의 선형운동변위가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 선형운동의 크기를 크게 하려면  $k_a$ 를 키우는 방법과 가속도 최대값을 작게 하는 방법이 있다. 가속도 최대값은 오래 지속되는 가속도의 최대값을 주는 것인데, 처음 생각했던 것보다 작은 값을 주어도 될 것이다. 시뮬레이터 운동한계를 전부 다 사용하는 것이 훈련 효과 면에서 좋을 것이므로 오래 지속되는 가속도 최대값을 안전을 위하여 크게 잡지 말고, 실제 값 수준에서 택하는 것이 좋다.

Table 3는 선박해양플랜트연구소에서 모형시험, 전산유체역학, 동역학 시뮬레이션을 통하여 계산한 결과를 분석하여, 선형운동은 최대가속도 회전운동은 최대각속도를 집계한 표이다. 수중에서 수상으로 부상하는 경우 X, Z방향 가속도가 0.4-0.6 수준으로 올라간다. 이것은 선체가 수중에서 일부가 수상으로 올라가고 이에 따라 부력의 급격한 변화 때문이다. 이때는 비정상적인 상황인데, 이것을 그대로 재현해야하는 것은 아니므로 부상시 값들은 참고만 한다. 또한 20노트로 전진하다가 타를 30도 틀어서 선회하는 경우, 상당히 큰 값들이 나온다. 그러나 이 값들이 유지된다는 것은 아니고, 잠시 나오는 값들이다. 또한 이것보다 작은 값들을 사용한다고 하여 문제가 되는 것은 아니다. 운동한계에 도달할 수 있다는 것인데, 운동한계까지 기구를 사용하는 것이 탑승자에게 느끼는 운동이 더 좋을 것이다. 따라서 이 값보다는 작은 값을 택하는 것이 좋다.

파라미터들은 Table 2와 같이 하여도 될 것이라고 생각된다. 여기에서 횡동요(roll)과 종동요(pitch)는 최대각속도 값을 작게 택하면 시간상수가 커져서 횡동요와 종동요를 천천히 추종하므로 바람직하지 않다. 이 값들에는 가상각이 포함되어 있고, 실제값에 잘 추종하여야 탑승자가 느끼는 운동재현충실도가 높아진다는 것을 유의하여야 한다.

### 4. 자유도의 고려 사항

현재 일반적인 잠수함 운동재현기는 횡동요(roll)와 종동요(pitch)의 2자유도를 가지고 있다. 여기에 다른 운동의 자유도를 넣으면 얼마나 운동재현이 좋아지는지 알아보기로 한다.

우선 제1보의 예제에 대하여 검토하였다. 전진가속의 운동을 1자유도, 2자유도 운동재현기로 운동을 재현하였을 때의 앞 방향 힘과 운동재현충실도를 Fig. 12에 수록하였다. 전진가속의 경우에 시뮬레이터에서는 x 방향 변위와 가상각으로 종경사(pitch)각을 이용하여 운동을 재현하고 있다. 운동재현기는 앞 방향으로 움직이면서 종경사(pitch)으로 앞 방향을 위로 들어올린다. 운동재현기가 처음에 앞 방향으로 가속하기 때문에 탑승자는 앞으로 가고 있는 느낌을 받고, 이후 종동요(pitch)각에 의한 중력이 뒷 방향으로 향하므로, 계속 뒷 방향의 힘을 받아 앞으로 가속을 받고 있다는 느낌을 받게 된다. 여기에서 x 방향 운동을 하지 않는다면 관성력에 의한 힘이 없어지고, 중력에 의한 힘만 발생하게 된다.

2자유도로 운동을 재현하면 앞 방향 가속을 느끼고, 그 가속이 조금 줄어들었다가 주어진 가속이 된다. 1자유도로 운동을 재현하면 뒷 방향 힘을 종경사(pitch)각에 의해서만 느낄 수 있다. 힘과 운동재현충실도 값 자체도 중요하지만, 전진가속의 경우 중력에 의한 뒷 방향 힘을 느끼는 것보다는 운동재현기가 앞으로 가속을 하여 뒷 방향 힘을 초기에 느끼게 하는 것이 좋다. 이것을 지수로 표현하지는 못하지만, 효과 면에서는 다르게 나타날 것이다.

선회를 하는 경우(제1보 4장의 예제) 운동재현기는 횡동요, 종동요, 선수동요(roll, pitch, yaw) 세 가지의 회전운동으로만 이 운동을 재현한다. 수평선회(level turn)의 경우 옆방향 힘은 횡경사각을 주어 표현을 한다. 이 때 선수동요(yaw)각을 변화시켜주지 않으면 탑승자는 옆으로 기울어지는 것만을 느끼게 되어, 선회시

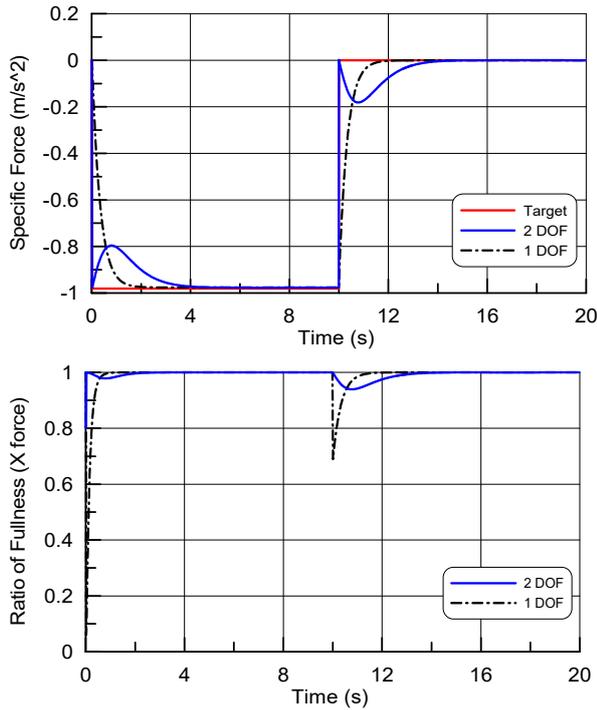


Fig. 12 Comparisons of the forces and ratio of fullness in 1 DOF(pitch) and 2 DOF(surge, pitch) simulator during forward acceleration

원심력만을 느끼지, 선회를 하는 것에 대한 느낌을 받을 수 없다. 더욱이 뱅크선회(bank turn)의 경우에는 옆방향 힘도 없어서 운동재현기가 거의 움직이지 않는다. Fig. 13은 뱅크선회 거동자료를 이용하여 운동재현필터를 거친 결과를 보여준다. 시뮬레이터 운동이 작아 선회의 느낌을 받기가 힘들다. 선수동요(yaw) 각속도를 느끼게 해주어야 선회를 하는 것으로 느낄 수 있으므로 초기에 선수동요(yaw)각이 변화도록 해주는 것이 바람직하다. 실제로는 횡경사가 있는데, 시뮬레이터에서는 횡경사가 있으면 중력에 의하여 옆 방향 힘을 받으므로 횡동요 변위는 작게 할 수 밖에 없다. 따라서 뱅크선회(bank turn)의 초기에 아주 조금 횡동요 각속도를 내고 짧은 시간 내에 이것을 줄여야만 한다. 이것을 보면 시뮬레이터로 뱅크선회의 효과를 내기는 쉽지 않다는 것을 알 수 있다.

그 외 운동자유도와 관련하여 고려하여야 할 사항들은 다음과 같다.

- 선박의 선회는 자동차의 선회와 다르다. 옆 방향 속도가 발생한다.
- 만일 파도에 의한 운동까지를 재현하는 것이라면 y 방향, z 방향 변위도 움직여 주어야만 한다.
- 잠수함의 긴급부상의 경우, z 방향 변위도 필요하다.

잠수함의 경우, 횡동요(roll)과 종동요(pitch)는 필수적인 운동 변위이고, 가감속을 충실하게 느끼게 하고 싶으면 x 방향 변위도 포함되어야 한다. 또한 방향전환, 선회를 충실하게 느끼게 하고

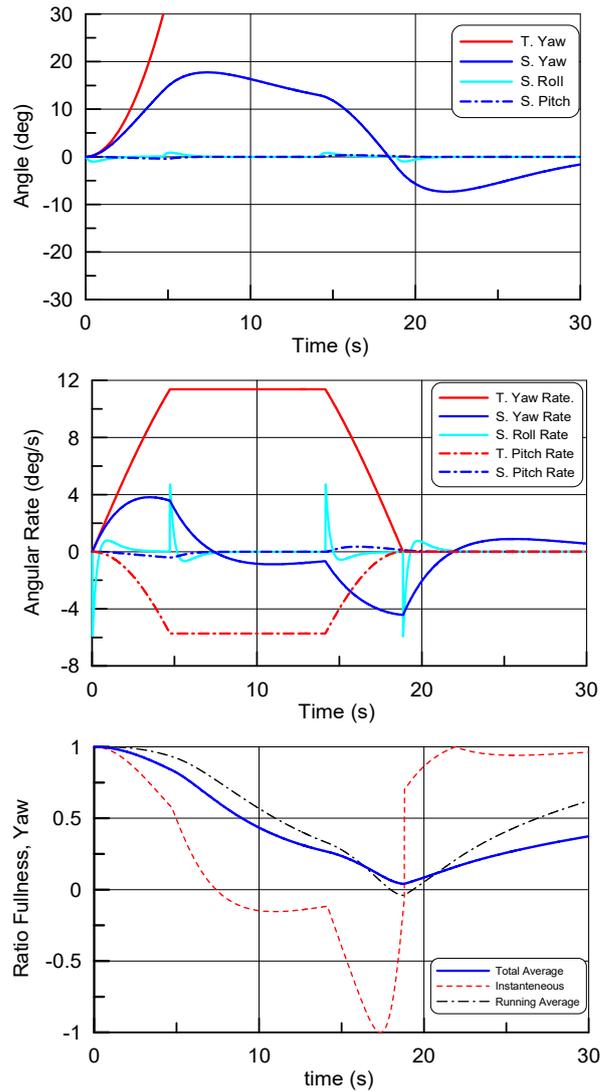


Fig. 13 The angles and rates of 3 DOF(roll, pitch, yaw) simulator during bank turn

싶으면 선수동요(yaw) 변위도 재현하여야 한다. 수면에서의 운동 특히 파도에 의한 운동을 재현하기 위해서는 y 방향, z 방향 변위도 재현하여야 한다.

자유도를 선택하는 것은 투입자원대비 효과를 생각해서 적절하게 택하여야 한다. Table 4는 운동재현기 운동모드의 우선순위를 제시한 것이다. x 방향 변위만 더할 것이라면 운동재현기 위에

Table 4 The priority of motion mode in submarine simulator

Priority	Motion mode	Possible mechanism
1	Pitch	Center bearing & actuator
2	Roll	Center bearing & actuator
3	Surge(X)	Sliding block
4	Yaw	Turn table
5	Sway(Y)	Sliding block
6	Heave(Z)	(6DOF platform)

x 방향으로 슬라이딩을 할 수 있는 기구를 만들고 그 위에 훈련시스템을 얹으면 될 것이다. 선수동요(yaw) 방향만을 더하는 것이면, 회전판(turn table)을 얹으면 될 것이다. y, z 방향 변위를 더하려면 결국 6자유도 운동재현기를 사용할 수밖에 없다. 따라서 훈련효과와 가용자원의 범위를 고려하여 적절한 수준을 택하여야 한다.

## 5. 결론

본 연구는 장차 사용하게 될 차세대 잠수함의 훈련을 위하여, 시뮬레이터 운동재현기에 사용될 운동재현기법을 다루었다. 힘이나 운동변수를 기반으로 한 운동재현필터(motion filter)를 제안하였으며, 필터에 사용되는 파라미터를 간단하게 설정하는 방법을 제시하였다. 또한 호밍위치(homing position)를 주는 방법으로 가상 각도들을 주어 중력에 의하여 힘을 보상하는 방법을 제안하였으며, 현 운동상태에 적합한 호밍위치를 주는 방법도 제시하였다. 자세한 기본이론은 제1보에 수록되어있으며, 본 논문은 공개선형인 BB2 잠수함에의 적용을 다루었다.

BB2 잠수함은 선미에 X타를 장착한 공개선형으로 전 세계 연구기관에서 공개적인 연구를 할 수 있도록 설계된 잠수함이다. 선박해양플랜트연구소에서는 BB2 잠수함에 대하여 구속모형 시험, 자유항주 모형시험, 전산유체역학, 동역학 시뮬레이션을 통하여 잠수함의 거동특성을 연구하고 있다. 이의 결과로 도출된 운동시간이력을 본 연구에 사용하였다. 제안된 운동필터를 사용하여 탑승자가 느끼는 힘에 대한 분석이 이루어졌으며, 만족할 만한 결과를 얻었다. 또한 횡동요(roll)과 종동요(pitch)의 2자유도 운동재현기에서, 다른 자유도를 첨가할 경우에 대한 고찰이 이루어졌다.

이의 결과는 향후 차세대 잠수함을 개발하고, 이를 훈련할 시뮬레이터를 개발하는데 도움이 될 것을 기대한다.

## 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 주요연구사업 “수중운동체 운항성능 통합 추정 기술개발(5/5) [PES5070]”의 연구 결과 중 일부분을 밝힌다. 모형시험과 전산유체역학에서 사용된 BB2 잠수함 선형은 MARIN에서 제공한 자료를 기초로 하였다.

## References

- Kookbangilbo, 2019. URL: [https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20190430/8/BBSMSTR\\_000000010024/view.do](https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20190430/8/BBSMSTR_000000010024/view.do) [Accessed 27 August 2024].
- Lee, G.J., Yeo, D.J., Kim, Y.G., Kim, D.J., Kwon, C.S., Yun K., 2024. Motion filter of the submarine simulator: Part 1. Basic Theory and General Applications, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(6), pp.446-459.
- Ministry of National Defence, 2022. URL: <https://blog.naver.com/mnd9090/222891390841> [Accessed 27 August 2024]
- Overpelt, B., Nienhuis, B. and Anderson, B., 2015. Free running manoeuvring model tests on a modern generic SSK class submarine(BB2), *PACIFIC 2015 (Pacific International Maritime Conference)* Sydney, 6-8 October.
- Reid, L.D. and Nahon, M.A., 1985. *Flight simulation motion-base drive algorithms: part 1 - developing and testing the equations*, UTIAS Report No. 296.
- Schmidt, S.F. and Conrad, B., 1970. *Motion drive signals for piloted flight simulators*, NASA CR-1601.

