

대형 LNG 선박의 롤 선체운동 추정에 관한 연구

송재영* · 이춘기** · † 임정빈

*한국해양대학교 대학원 항해학과 석사 후 연구과정, **,† 한국해양대학교 항해학부 교수

A Study on the Estimation of Roll Motion in Large Scale LNG Ships

Jaeyoung Song* · Chun-Ki Lee** · † Jeong-Bin Yim

*Research Student, Graduate School, Korea Maritime & Ocean University, Korea

** , † Professor, Division of Navigation Science, Korea Maritime & Ocean University, Korea

요 약 : 대형 LNG 선박의 선체 운동은 선박의 안전에 영향을 미친다. 본 연구의 목적은 153,000 m³ 급 대형 LNG 선박의 선체 운동 중에서 롤 운동에 대한 전달함수를 추정하기 위한 것이다. 단일-입력과 단일-출력 그리고 시스템 전달함수를 갖는 선형 시 불변(Linear Time-Invariant) 시스템을 이용하여 선체 운동 전달함수를 모델링 하였다. 모델의 입력으로 단일 해양파를 이용하고, 모델의 출력으로는 ANSYS를 통해서 획득한 LNG 선박의 롤 운동을 이용하여 시스템 식별법을 기반으로 선체 운동의 전달함수를 추정하였다. 실험 결과의 유용성은 전달함수 차원이 서로 다른 경우에 대한 모델의 안정도와 추정률을 이용하여 평가하였다. 실험 결과 안정도는 99%와 98%로 나타나고, 추정률은 78%와 50%로 나타났다. 이러한 결과로부터, 본 연구에서 제안한 선체 운동 전달함수 추정 방법이 타당함을 알았다. 향후, 실제 해상에서 운항 중인 선박의 선체 운동 데이터를 획득하여 다중-입력 그리고 다중-출력을 갖는 모델 구축에 적용하여 실용화를 추진할 예정이다.

핵심용어 : 선박안전, 선체운동, 전달함수, 시스템 식별, 추정모델

Abstract : The ship motion of large LNG ships affects ships' safety. The purpose of this study was to estimate the transfer function of roll motion among the hull motion of 153,000 m³ class LNG vessels. The ship motion transfer function was modeled using a Linear Time-Invariant system with single input, single output, and transfer function. The transfer function of the ship motion was estimated by the system identification method using single ocean wave as input of the model, and using the roll motion of the LNG ship obtained through ANSYS as the output of the model. The usefulness of the experimental results was evaluated using the precision and estimation rate of the model for cases wherein the different transfer function dimensions. Results of the experiment showed a precision at 99% and 98%, with estimation rate at 78% and 50%. From these results, we found the proposed method of estimating the transfer function of ship motion in this study reasonable. In the future, data of ship motion in actual sea conditions will be acquired and it will be applied to make the construction of models with multiple inputs and multiple outputs for practical use.

Key words : Ship's Safety, Ship Motion, Transfer Function, System Identification, Estimation Model

1. 서 론

대양에서 발생하는 대형 LNG선박의 운동은 선박의 안전에 중요한 영향을 미친다. 그 이유는, 선박의 운동은 자유표면효과를 발생시켜 선체의 복원성을 저감시키고, 승무원의 피로감을 극대화하기 때문이다. 이는 파랑에 의한 선체운동의 추정을 통하여 피해를 저감시킬 수 있다(Lee et al. 2015). 특히 어떠한 파랑의 상황에서도 선체의 운동을 추정할 수 있는 것은 항해사에게 중요한 항해정보를 제공할 수 있다.

본 연구의 목적은 파랑에 의해 발생한 선체의 운동을 시스템 이론을 이용해 추정하기 위한 것이다. 이러한 연구 목적 달

성을 위해서는, 파랑에 의해 발생한 선체의 운동 데이터 획득이 필요하고, 데이터 획득 결과를 이용한 선체 운동 추정 모델의 구현이 필요하다.

선체의 운동 데이터는 ANSYS CFX 17.2를 이용한 전산유체역학 시뮬레이션을 통해 획득하였고, 선체 운동 추정 모델은 전자공학에서 증명된 시스템 식별(System Identification) 모델을 이용하였다(Viberg, M, 1995; Kim, B. H. & Park, T. 2007). 특히 시스템은 선형-시불변(Linear-Time Invariant) 성을 가진다고 정의하였다. 아울러 시스템 식별 모델을 이용한 선체 운동 추정 모델을 구축한 후 추정오차 최소화 기법을 이용해 파라미터를 추정하였다. 추정한 파라미터를 이용하여 추

† Corresponding author : 종신회원, jbyim@kmou.ac.kr 051)410-4246

* 정회원, jysong@kmou.ac.kr 051)410-4270

** 종신회원, leeck@kmou.ac.kr 051)410-4270

(주) 이 논문은 “시스템 식별법을 이용한 선체운동 해석에 관한 연구”란 제목으로 “2019 추계학술대회 한국항해항만학회논문집(부산 BPEX, 2019.11.20-21, p.271)”에 발표되었음.

정 모델을 구축하고, 구축된 추정 모델을 통해 본 연구의 목적인 선체 운동을 추정하였다.

한편, 선체는 6자유도운동을 하는 특징이 있다. 하지만 본 연구에서는 6자유도 운동 중 비선형성이 강한 롤 운동만을 선정하여 LTI 시스템의 특성을 이용한 선체 운동 추정의 실현 가능성을 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구절차

연구는 다음과 같은 4단계 절차를 통하여 진행하였다.

- Step 1: 먼저, 파(wave)와 선체(hull) 그리고 운동(motion) 사이의 관계 해석을 위한 선체 운동 추정 모델을 제안하였다.
- Step 2: 선체 운동 추정 모델을 구축하기 위한 전달함수 추정 방법을 정하였다.
- Step 3: 전달함수 추정에 적용할 실험 데이터를 구축하였다.
- Step 4: 실험을 통하여 전달함수를 획득하고, 획득한 전달함수의 안전성을 평가하였다.

2.2 선체운동 추정 모델

제어공학 측면에서, 파(wave)에 의한 선체(hull)의 운동(motion)은 해석 가능한 시스템으로 묘사할 수 있다.

본 연구에서는 제어공학에서 정의된 단일-입력, 단일-출력(single-input single-output, SISO)의 선형-시불변(Linear-Time Invariant, LTI) 시스템을 이용하여 선체 운동 추정 모델을 구성하였다.

Fig. 1은 z -영역(domain)에서 해석된 LTI 시스템의 입출력 관계를 나타낸 것으로, $X_{wave}(z)$ 는 파랑 신호를 나타내고, $H_{hull}(z)$ 는 시스템(즉, 선체)의 전달함수, $Y_{motion}(z)$ 은 선체 운동을 나타낸다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 선체 운동 $Y_{motion}(z)$ 은 LTI 시스템의 가역적 특성을 이용하여 파랑 신호 $X_{wave}(z)$ 와 전달함수 $H_{hull}(z)$ 의 곱하기 연산에 의해서 계산할 수 있다. 따라서 선체 운동 추정 모델의 관건은 높은 정밀도의 전달함수 $H_{hull}(z)$ 을 구하는 것이다.

LTI 시스템은 주어진 전달함수에 대해서 입력과 출력 사이의 관계가 시간에 따라서 변하지 않는 특징(즉, 시-불변)을 갖기 때문에 입력과 출력 및 전달함수 사이에 가역적 관계가 확정되어 있다. 이러한 가역적 관계는 다음 식(1)로 설명할 수 있고, $H_{hull}(z) = Y_{motion}(z)X_{wave}(z)^{-1}$ 의 관계를 이용하여 전달함수를 계산할 수 있다.

$$Y_{motion}(z) = X_{wave}(z)H_{hull}(z) \quad (1)$$

여기서, $Y_{motion}(z)$, $X_{wave}(z)$, $H_{hull}(z)$ 는 z -영역에서 나타낸 출력신호, 입력신호 그리고 전달함수를 각각 나타낸다.

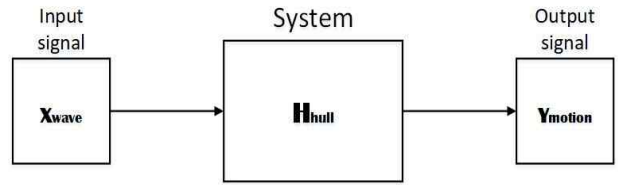


Fig. 1 Conceptual block diagram of linear-time invariant(LTI) system for the ship-motion estimation

2.3 전달함수 추정 방법

위의 식(1)에서, 전달함수 $H_{hull}(z)$ 는 입력 $X_{wave}(z)$ 와 출력 $Y_{motion}(z)$ 가 주어지면 구할 수 있는데, 조건은 z -영역으로 나타낸 LTI 시스템에서 $H_{hull}(z) = Y_{motion}(z)X_{wave}(z)^{-1}$ 의 해가 존재해야 된다. 이러한 조건을 만족하기 위해서는 $H_{hull}(z)$ 을 구하기 위한 상태 공간(state-space) 방정식의 도입이 필요하다.

이산 신호처리에서 SISO의 LTI 시스템에 대한 상태 공간 방정식은 다음 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x[n+1] &= Ax[n] + Bu[n] \\ y[n] &= Cx[n] + Du[n] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 u 는 입력이고, x 는 상태 벡터이며, y 는 출력이고, n 은 수열의 번호로서 $n=1,2,3,\dots,N$ (N 은 샘플 수)이며, A, B, C, D 는 계수 행렬이다(Ljung, L, 1999).

여기서, 상태 방정식을 이용하여 시스템을 해석하는 경우에는 위의 식(2)의 계수행렬 A, B, C, D 를 구하면 되지만, z -영역에서 해석하기 위해서는 계수행렬을 대신할 수 있는 이산 전달함수 $H(z)$ 의 획득이 필요하다.

위의 식(2)에 대한 이산 전달함수는 다음 식(3)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$H(z) = \prod_{k=1}^L H_k(z) = \prod_{k=1}^L \frac{b_{0k} + b_{1k}z^{-1} + b_{2k}z^{-2}}{1 + a_{1k}z^{-1} + a_{2k}z^{-2}} \quad (3)$$

여기서 L 은 시스템을 묘사하기 위한 섹션(section)의 수를 나타내고, 벡터 a 와 b 는 다음 식(4)로 정의할 수 있는 전달함수의 분모 계수들과 분자 계수들로 구성된 것이다. 그리고 z 는 복소수를 의미하는 것으로, 일반적으로 $z = e^{j\omega}$ 의 형태를 갖는다.

$$H(z) = \frac{b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_{n+1}z^{-n}}{a_1 + a_2z^{-1} + \dots + a_{m+1}z^{-m}} \quad (4)$$

여기서, n 은 계수 b 의 차수를 나타내고, m 은 계수 a 의 차수를 나타낸다. 위의 식(4)에서 문제는 어떻게 최적의 차수 n 과 m 에 대한 계수 a 와 b 의 값을 구할 것인가이다. 이러한 문제는 식(2)부터 식(4)까지의 과정을 반복하여 구할 수 있는데, 대단히 복잡한 과정이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 MATLAB에서 제공하는 시스템 식별 도구 박스(System Identification Toolbox)의 'mpctool'을 이용하여 선체 운동 추정 모델의 전달함수 계수를 구하였다(Mathworks, 2015). 그리고 획득한 전달함수는 선체 운동의 추정결과 극-영점(pole-zero) 해석을 이용하여 모델의 안정성을 평가하였다. 여기서 추정결과는 손실함수의 개념으로 평균제곱오차 식(5)에 의하여 도구박스를 이용해 추정하였다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (y_k - t_k)^2 \quad (5)$$

여기서 E 는 손실율, y_k 는 원래의 신호, t_k 는 추정된 신호이다.

2.4 실험 데이터

선체 운동 추정 모델의 구현을 위해서는 명확하게 정의된 시간 영역에서의 입출력 신호가 필요하다. 본 연구에서는 ANSYS 상용 프로그램을 이용한 전산유체역학 시뮬레이션을 이용하여 실험 데이터를 획득하였다.

먼저, 입력 신호로서의 파랑 신호는 Table 1과 같이 정하였다. 파랑 신호는 파고 2.75 미터에 파장 288 미터로 정하였는데, 이 값은 후술하는 십만 톤 급 LNG 선박의 크기를 고려하여 임의로 정한 것이다. Fig. 2는 Table 1의 조건을 이용하여 생성한 360초 길이의 파랑 신호를 나타낸다.

그리고 선체 운동 추정에 적용한 선박은 Table 2와 같이 정하였다. 이 선박은 100,216 톤에 길이가 288 미터이고 폭이 44 미터인 대형 LNG 선으로 선체의 형상은 Delft-Ship을 이용해 제작하였다(Delftship, 2019). 이 선박의 제원은 Kim et al.(2009)이 사용한 K-LNG 선형의 정면도와 이 선박에 대한 제원과 수리역학 테이블(HHIC, 2009)에서 획득한 것이다.

아울러 출력신호로서의 선체 운동은 ANSYS 프로그램을 이용하여 획득하였는데, 여기에는 Fig. 3에 나타난 유체장을 이용하고 Table 3에 나타난 적하 상태를 가정하였다.

여기서, Fig. 3은 등 균질(Homogeneous)로 가정한 LNG 선박을 ANSYS 프로그램을 이용하여 가시화한 결과를 나타낸 것으로, 유체장의 바닥은 심해를 표현하기 위하여 자유 슬립(free-slip) 조건을 주고 유체장의 측면과 상부는 열린 면으로 설정하여 파랑이 흘러가도록 하였으며 대기압 중의 조건을 부여한 것이다. 단, 우측 벽면은 파장의 출구로서 깊이로 정수압을 개방된 면으로 부여하였다. 격자를 생성하는 상용 프로그램인 ICEM CFD를 이용하여 전체 유동 영역에는 Tetra Mesh를 생성하고 선체 벽면에는 Prism 격자를 생성하여 사용한 총 격자수는 약 2,429,959 만개 Nodes이다. 난류 모델은 SST모델을 사용하였으며, 자유표면의 거동을 모사하기

위해 등 균질 다상유동모델을 사용하였다.

Fig. 4는 시뮬레이션 결과 획득한 선체 운동 중에서 롤 운동 데이터를 나타낸다. 본 연구에서는 유동장 내의 선체에 선수미축의 1자유도 회전운동만 가능하도록 설계하여 선체 운동 추정에 롤 운동만을 이용하였는데, 그 이유는 LNG 선박에서는 자유표면효과가 발생하여 복원력에 영향을 주기 때문이다. 이때 자유표면효과의 영향은 롤 운동 시 이동하는 관성 모멘트 값을 기반으로 계산하는 점에서 롤 운동은 중요하다. 롤 운동을 제외한 다른 6자유도 운동에 대해서는 추후 연구를 둔다.

Table 1 Data for calculation of incident wave

Item	Value
Amplitude(m)	2.75
Wave length(m)	288.0
Wave number(rad/m)	$\pi/144$
Frequency(rad/s)	0.4626
Phase velocity(m/s)	21.2
Phase function	$(\pi/144)t - 0.4626t$
Sea level difference(m)	$2.75 \times \sin[(\pi/144 - 1)\omega t]$

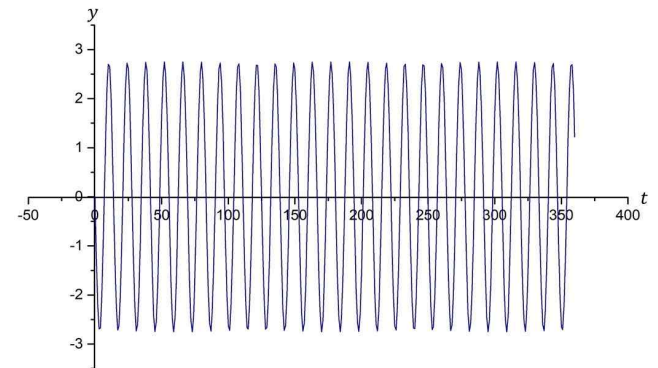


Fig. 2 Incident wave used as input signal

Table 2 Particular of Model Ship

Type of Ship	LNG Carrier
Type of Cargo Tank	Membrane Tank
Gross Tonnage(ton)	100,216
LOA(m) / LBP(m)	288.0 / 276.0
Breath(m)	44.0
Full Loaded Draft(m)	12.4
Displacement at Full Loaded	116634.3
Draft(ton)	
Light Weight(ton)	29856.3

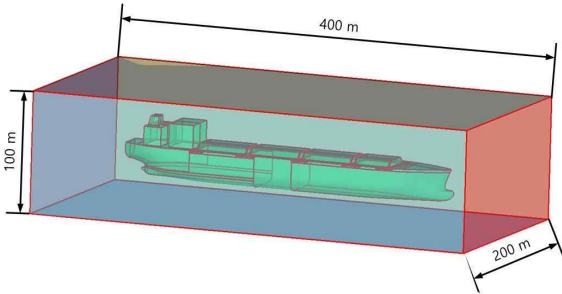


Fig. 3 Fluid domain (Isometric view)

Table 3 Loading condition of model ship

Item	Value
Draft Fore(m)	9.320
Draft Aft(m)	9.320
KG(m)	12.329
GM(m)	9.400
Displacement(ton)	84901.300

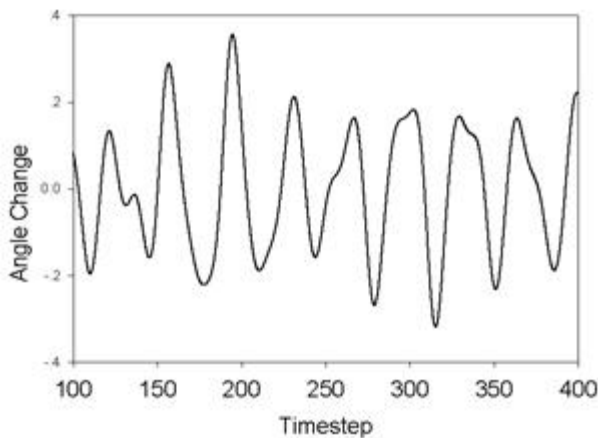


Fig. 4 Ship motion used as output signal which is calculated by ANSYS-CFX

3. 실험 및 결과

3.1 모델의 추정 결과

획득한 입출력 신호를 이용해 전달함수를 획득하였다. 한 개는 시스템 추정의 차수가 높고 다른 하나는 시스템 추정의 차수가 낮은 전달함수이다. 시스템 추정의 차수에 따른 안정도와 추정률을 비교하기 위해 2가지 경우를 임의로 선정하여 비교하였다.

먼저 10차의 계수 b 와 11차의 계수 a 를 적용한 전달함수 $H_1(z)$ 계수들의 값을 Table 4에 정리하여 나타냈다.

7차의 계수 b 와 8차의 계수 a 를 적용한 전달함수 $H_2(z)$ 의

계수들의 값을 Table 5에 정리하여 나타냈다.

추정한 전달함수를 기반으로 LTI 시스템의 특성을 이용해 선체 운동을 추정한 후, 실험 데이터로 주어진 선체 운동과 비교하였다. Fig. 5는 시간 영역에서 시스템 추정의 차수가 높은 경우의 비교 결과를 나타낸 것으로, 시뮬레이션을 이용해 획득한 데이터와 전달함수를 이용해 획득한 데이터를 (5)의 식을 이용해 비교한 결과 79.5% 일치하였다. 하지만 Fig. 6은 시스템 추정의 차수가 낮은 경우의 비교결과를 나타낸 것으로 시뮬레이션을 이용해 획득한 데이터와 전달함수를 이용해 획득한 데이터를 (5)의 식을 이용해 비교한 결과 50.0% 일치하는 결과를 도출하였다.

Table 4 Coefficient of transfer function in case of High order

n or m	b_n	a_m
1	+ 1.505e07	+ 1.000
2	- 9.750e07	- 7.534
3	+ 2.849e08	+ 25.710
4	- 4.965e08	- 52.660
5	+ 5.780e08	+ 72.420
6	- 4.797e08	- 71.210
7	+ 2.946e08	+ 52.040
8	- 1.330e08	- 28.670
9	+ 3.998e07	+ 11.560
10	- 5.930e06	- 3.0530
11	-	+ 0.3908

Table 5 Coefficient of transfer function in case of Low order

n or m	b_n	a_m
1	-0.01847	1
2	0.0103	-6.287
3	0.02422	17.3
4	0.03104	-27.02
5	0.02295	25.87
6	0.009324	15.17
7	0.001633	5.05
8	-	-0.7355

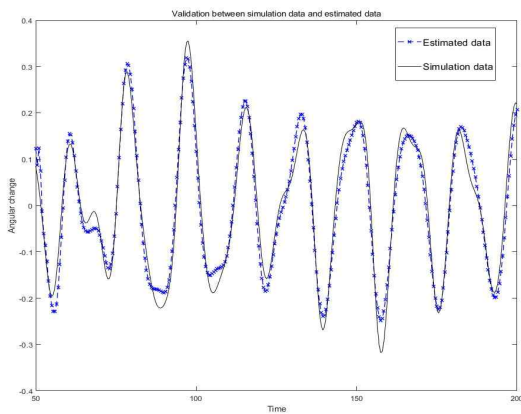


Fig. 5 Verification between measured and simulated output in case of high order

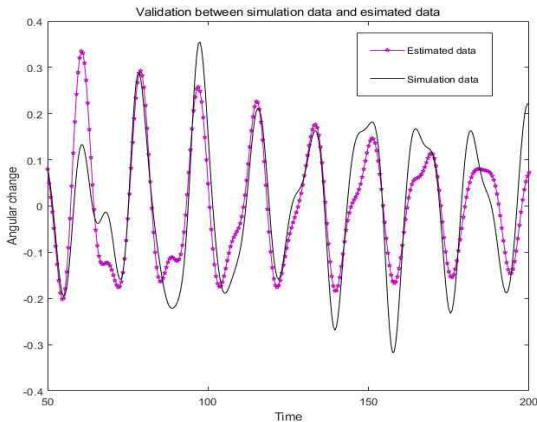


Fig. 6 Verification between measured and simulated output in case of low order

3.2 모델의 극-영점 해석 결과

획득한 전달함수 모델의 적합성을 판정하기 위하여 극-영점 해석을 실시하였다. Fig. 7은 시스템 추정의 차수가 높은 경우의 극-영점 해석 결과를 나타낸 것으로, 단위원 내에 극-영점이 분포하므로 전달함수 모델이 안정함을 알았다. 하지만 Fig. 8은 시스템 추정의 차수가 낮은 경우의 극-영점 해석 결과를 나타낸 것으로, 단위원 외부에 영점이 획득되어 해당 모델이 불안정함을 알았다. Table 6은 차수에 따른 모델의 차이를 서로 비교한 결과이다. 이러한 비교는 모델의 추정이 유용성이 있는지 즉, 시스템 추정 차수에 따른 선체 운동 추정 결과의 차이를 알기 위한 것이다.

Table 6에서, 시스템 추정 차수의 차이에 따라 각각의 모델들은 추정률과 안정도에 차이를 보였다. 예를 들면 고차원의 시스템 추정 차수를 가진 모델은 79.5%의 유사성을 가진 선체 운동을 추정할 수 있었으며 시스템의 안정도가 높았다. 이에 반하여 저차원의 시스템 추정 차수를 가진 모델은 추정률과 시스템 안정도 모두 상대적으로 낮았다. 그래서 시스템 추정 차수에 따라 추정률과 안정도가 높은 추정이 가능함을 알았다.

Table 6 Result of experimental

Item	High order	Low order
Percentage of Estimation	79.5 %	50.0%
Stability	stable	unstable

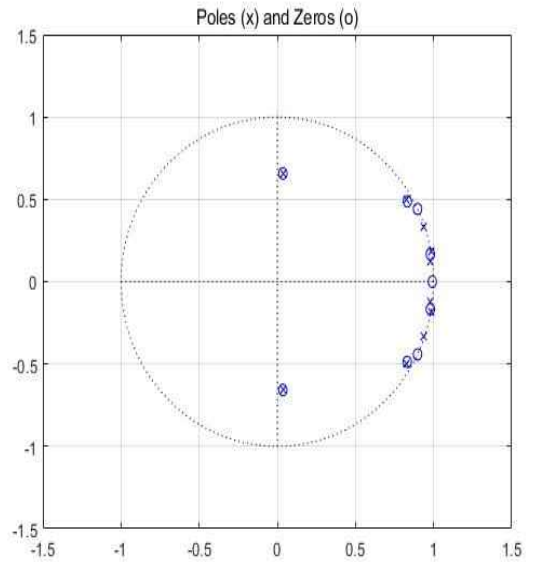


Fig. 7 Pole-zero analysis in case of high order

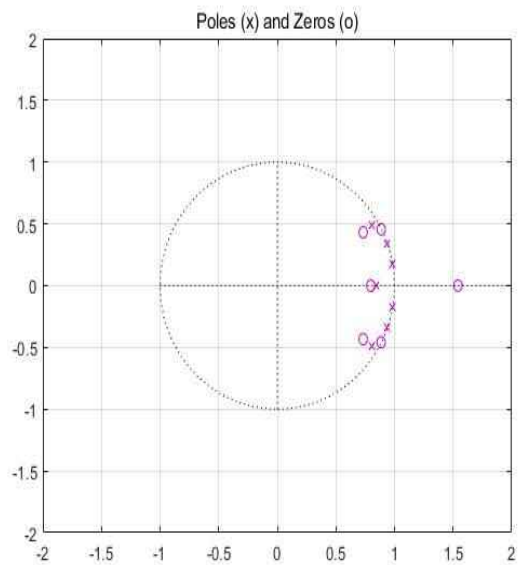


Fig. 8 Pole-zero analysis in case of low order

4. 결 론

본 연구에서는 선형-시불변(Linear Time-invariant) 시스템을 이용하여 선체 운동의 전달함수 모델을 제안하고, 이 모델을 이용하여 선체 운동 시스템의 특성을 전달함수로 추정하였다. 선체 운동 전달함수 모델을 모델링 한 결과로부터 임의의 파랑에 의해 발생한 선체의 롤 운동 추정이 가능하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 선체 운동 특성을 추정할 수 있는 전달함수 모델을 제안하였다.

둘째, 제한한 모델을 적용하여 수치적으로 해석하고 추정하여 유의성 검증을 하였다. 유의성 검증에는 극-영점 해석을 통한 시스템 안정도 검증방법을 사용하였다.

본 연구결과를 통하여, 1) 단일 해양 파 조건하에서 선체의 운동을 추정할 수 있었고, 2) 이를 통해 선체운동 추정모델이 유의성을 가진 모델임을 알았다. 하지만 시스템을 선형 시불변으로 가정하였으며 SISO라고 가정하였기에 외란 및 과적합의 한계가 있었다. 향후, 다양한 조건의 해양 파 조건하에서 6자유도 운동이 다중출력되는 조건의 6자유도 전달함수 추정 모델에 관한 연구를 진행하고자 한다.

후 기

본 논문은 해양수산부 소관(자율운항선박 기술개발, PJT201313) 연구개발사업의 연구비 지원을 받아 수행됨을 밝힌다.

References

[1] ANSYS CFX 17.2(2016), ANSYS Inc.

[2] Delftship(2019), Delftship marine software, <http://www.delftship.net>

[3] HHIC(2009), Final Trim, Stability & Longitudinal Strength Calculation, HHIC.

[4] HHIC(2009), General Arrangement, HHIC.

[5] Kim, B. H. and Park, T.(2007), "Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method" *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 304, pp. 660-676.

[6] Kim, B. N. et al.(2009), "The Comparison of Flow Simulation Results around a KLNG Model Ship", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, pp. 219 - 231.

[7] Lee, C. H. et al.(2015), "A study on evaluation of ship motion in irregular waves", *Journal of the Korean*

Society of Fisheries and Ocean Technology, Vol. 51, pp. 504-511.

[8] Ljung, L.(1999), *System identification*. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, pp. 1-19.

[9] Mathworks Inc.(2015), "System identification toolbox user guide 9.2"

[10] Viberg, M.(1995), "Subspace-based methods for the identification of linear time-invariant systems" *Automatica*, Vol. 31, pp. 1835-1851.

Received 07 January 2020

Revised 29 January 2020

Accepted 24 April 2020