

논문 2019-14-38

측정 데이터 기반 전기-유압 서보 실린더의 미지 변수 추정 (Unknown-Parameter Estimation of Electric-Hydraulic Servo Cylinder Based on Measurements)

승지훈, 유성구, 설남오, 노재규*

(Ji Hoon Seung, Sung Goo Yoo, Nam O Seoul, Jackyou Noh)

Abstract : Electric-hydraulic sever cylinders are used in many offshore applications such as wind energy farms, solar farms and plants. Jack-up barges are often used for these offshore system operations. Jack-up barge control is up/down by hydraulic cylinder position control. Working in harsh environments can lead to changes in internal parameters. This nonlinearity makes precise control difficult. In order to overcome the problems, we proposed a method of unknown-parameter estimation algorithm based on measurements obtained by system. In this paper, we employe Unscented Kalman filter (UKF) to estimate states and unknown-parameter from augmented nonlinear equation. Performance of estimation results is verified in simulation on an environments of Matlab. The estimation results of the state and unknown-parameter show that the estimation error of unknown-parameter is reduced according to decreasing the state estimation error.

Keywords : Hydraulic cylinder, Parameter identification, Unscented kalman filter, Nonlinear equation

1. 서론

해상 풍력, 해상 태양광, 해상 플랜트와 같은 해상 자원을 활용하는 구조물 설치가 늘어나고 있다. 해상에서 구조물을 설치하거나 유지·보수하기 위해 일반적으로 잭업바지선 (Jack-up barge)이 활용된다. 잭업바지선은 보통 4개의 레그 축으로 구성되며, 레그 축의 최하단을 바지선에 결합한 후 작업장소로 이동한 후 각 레그 축을 해저면으로 낙하시킨다. 그리고 4개의 레그가 해저면에 고정된 후 유압시스템을 이용하여 바지선을 리프팅한다. 리프팅 과정은 각

레그에 장착된 유압-결합시스템을 동시에 일정한 속도로 상승 또는 하강시켜 바지선을 이동시킨다 [1].

유압실린더의 정확한 위치제어가 되지 않으면 바지선이 기울어 위험한 상황이 발생한다. 특히 대형 잭업바지선의 경우 하나의 레그 축을 제어하기 위해 4~8개까지 유압실린더를 활용하며 다수의 유압실린더를 정확하게 제어해야 한다. 이러한 전통적인 해상설치용 유압시스템의 제어는 PLC 또는 MCU를 선박에 임베디드 형태로 장착하여 운영한다. 기존 유압시스템은 유압 자체의 비선형성과 내부 요소들의 형태, 특징에 따른 비선형성, 그리고 유압 제어 밸브의 시간 지연, 시스템의 노후화와 부하 축의 변수와 같은 외부 환경에 의한 영향으로 인해 정밀한 제어에 어려움이 있다 [2]. 이러한 기존 문제점을 극복하기 위해 사이버 물리 시스템 (Cyber-Physical Systems, CPS)개념을 적용하여 유압 시스템의 자율성을 보장하는 방안이 필요하다. 이는 정해진 시스템의 내부 파라미터의 변화에 따라 자율적으로 파라미터를 추정할 수 있는 알고리즘의 적용이 필요하다.

대부분의 유압제어밸브를 포함하는 유압시스템의 경우 초기 공장상태의 밸브 성능을 변수로 하여

*Corresponding Author (snucurl@kunsan.ac.kr)
Received: Sep. 8, 2019, Revised: Sep. 17, 2019,
Accepted: Sep. 24, 2019.

J.H. Seung : Chonbuk National University.
S.G. Yoo, N.O. Seoul, J.K. Noh : Kunsan National University.

※ 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “조선산업 부품기자재 업체 위기극복 지원사업”(과제번호 P037700004) 으로 수행된 연구결과입니다.

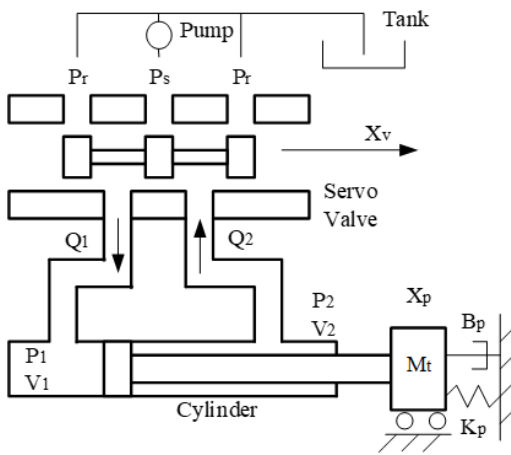


그림 1. 단로드 유압 서보 시스템

Fig. 1 Single-rod hydraulic servo system

동역학 방정식을 유도하고 제어 알고리즘을 개발하는 연구가 수행되고 있다 [3-6].

하지만 앞서 언급한 것과 같이 책임바지선의 경우 해상 플랜트, 등의 외부 환경이 적박한 환경 속에서 시스템의 빠른 노후화가 진행된다. 또한, 노후화로 인한 부하측의 내부 변수의 변화는 제어기의 성능이 감소하거나 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 시스템의 안정성을 확보하기 위해 시스템의 정확한 변수 추정이 필요하다.

본 논문에서는 단일 유압실린더의 미지 변수를 유압실린더의 변위량으로부터 추정함으로써 외부 환경의 변화나 충격으로 인한 시스템의 오작동 및 제어의 정밀도를 향상시켜 시스템 자율성을 확보할 수 있는 CPS 기반 미지 변수 추정 알고리즘을 제안한다.

유압실린더의 비선형 동역학 방정식은 유압 실린더와 유압을 조절하는 스펴, 스펴로 입력되는 유량을 공급하는 펌프로 구성된다 [7-8]. 동역학 방정식의 미지 변수를 추정하기 위해 시스템의 상태 추정에 적용되는 언센티드 칼만 필터를 도입한다.

언센티드 칼만 필터는 언센티드 변환을 통해 비선형 방정식의 상태를 선형화 과정 없이 전개할 수 있는 장점이 있다 [9-10].

전기-유압 서보 실린더의 동역학 방정식에 새로운 미지 변수를 확장하여 결합된 동역학 방정식을 언센티드 칼만 필터에 적용함으로써 기존의 상태 추정 뿐만 아니라 미지 변수를 동시에 추정할 수 있는 연구를 수행하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 전기-유압 서보 실린더의 동역학 방정식을 유도하며, 3장에서는 언센티드

드 칼만 필터의 미지 변수 추정에 적용, 4장에서 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 이상의 결과에 대한 결론과 향후 과제 등을 제5장에 정리한다.

II. 전기-유압 서보 실린더

유압실린더의 위치제어에 사용되는 전기-유압 서보 실린더는 공급유량에 의해 움직이는 유압실린더와 서보증폭기, 밸브로 구성된다. 유압실린더의 구동은 유압실린더의 변위를 측정하고, 센서에 의해 유압은 전기적인 신호로 검출된다. 유압 센서로부터 검출된 신호는 기준입력 신호와 비교를 통해 오차 신호를 발생시킨다. 서보 밸브는 서보증폭기로 증폭된 오차 신호를 통해 밸브를 제어함과 동시에 밸브의 변위로 유량이 공급되어 유압실린더로 유입된다.

유압실린더를 구동하기 위한 에너지는 유압펌프에 의해 작동 유압의 압력 에너지로 이 유체의 흐름을 제어하는 것이 전기-유압 서보 밸브이다 [1].

1. 수학적 모델링

밸브-실린더-부하단의 수학적 모델링을 위해 다음과 같은 가정을 가진다.

1) 밸브는 대칭적이고 임계센터이며, 2) 공급압력은 일정하고 탱크로의 귀환압력은 0이다. 3) 공동 현상은 일어나지 않는다. 4) 밸브의 2개 오리피스를 통한 압력강하는 서로 같으며 5) 판로의 마찰손실은 없고, 기름의 온도와 밀도는 일정하다. 6) 밸브 내에서 기름의 압축성이나 누설은 무시한다.

그림 1 은 모델링하기 위한 단로드 유압 서보 시스템을 나타낸다.

서보 밸브의 양단의 오리피스를 통한 흐름 Q_1 , Q_2 는 다음과 같다.

$$Q_1 = C_d w X_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)}, \quad (1)$$

$$Q_2 = C_d w X_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2)} \quad (2)$$

여기에서 C_d 는 수풀의 오리피스 유량계수, P_s 는 공급압력, P_1, P_2 는 유압실린더 좌우의 압력, w 는 포트 단면적의 구배, X_v 는 중립위치로부터 스펴의 변위를 나타낸다. ρ 는 유체 밀도이다.

연속 방정식을 실린더 좌우에 각각 적용하면 다음과 같다.

$$Q_1 - C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_1 = \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1 dP_1}{\beta_e dt}, \quad (3)$$

$$V_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_2 - Q_2 = \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2 dP_2}{\beta_e dt} \quad (4)$$

여기에서 C_{ip} 는 내부 누설계수, C_{ep} 는 외부 누설 계수, β_e 는 작동유의 체적탄성계수, V_1, V_2 는 공급측과 귀환측의 체적이다.

실린더 좌우 양실의 부하압력은 다음과 같다.

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (5)$$

부하유량은 다음과 같이 정의된다.

$$Q_L = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (6)$$

편로드 실린더의 서보 밸브 부하 유량식은 다음과 같다.

$$Q_L = \varepsilon C_d w X_v \sqrt{\frac{1}{\rho}(P_s - \text{sgn}(X_v)P_L)} \quad (7)$$

여기에서 실린더 좌우 양실의 유량비를 η 라고 정의하면 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{1 + \eta}{\sqrt{2(1 + \eta^2)}} \leq 1 \quad (8)$$

편로드 유압실린더의 부하 유량식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_L = A_{mc} \dot{x}_p + C_{ip} P_L + \frac{V_e}{4\beta_e} \dot{P}_L \quad (9)$$

여기에서 $C_{ip} = C_{ip} + \frac{C_{ep}}{2}$ 는 피스톤 전체 누유 계수이다.

전자비례제어밸브에 관한 식은 주파수 응답 곡선 비교법에 의하여 입력 u 와 스톱의 변위 X_v 에 관한 전달함수는 다음과 같이 1차 시스템으로 근사될 수 있다.

$$\dot{X}_v = \frac{1}{T_t} X_v + \frac{K_t}{T_t} u \quad (10)$$

그리고 식 (7)에 나타난 서보 밸브의 부하 유량식과 편로드 유압실린더의 부하 유량식을 조합하여

정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_L &= \frac{4\beta_e}{V_e} (-A_{mc} \dot{X}_p - C_{ip} P_L \\ &\quad + \varepsilon C_d w X_v \sqrt{\frac{1}{\rho}(P_s - \text{sgn}(X_v)P_L)}) \\ &= -\theta_1 \dot{X}_p - \theta_2 P_L + \theta_3 X_v \sqrt{P_s - \text{sgn}(X_v)P_L} \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 $\theta_1 = \frac{4A_{mc}\beta_e}{V_e}$, $\theta_2 = \frac{4C_{ip}\beta_e}{P_L}$,

$\theta_3 = \frac{4\varepsilon C_d w \beta_e}{V_e} \sqrt{\frac{1}{\rho}}$ 이다.

2. 비선형 동역학 방정식

피스톤 운동방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$A_e P_L = M_t \ddot{X}_p + B_p \dot{X}_p + L X_p + F_L, \quad (12)$$

$$\ddot{X}_p = \frac{1}{M_t} (-L X_p - B_p \dot{X}_p + A_e P_L - F_L) \quad (13)$$

앞서 구한 밸브, 실린더, 부하에 관한 상태방정식을 정리하면 다음과 같은 비선형 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= \frac{1}{M_t} (-L z_1 - B_p z_2 + A_e z_3 - F_L), \\ \dot{z}_3 &= -\theta_1 z_2 - \theta_2 z_3 + (\theta_3 \sqrt{P_s - \text{sgn}(z_4)z_3}) z_4, \\ \dot{z}_4 &= -\frac{1}{T_t} z_4 + \frac{K_t}{T_t} u, \\ X_p &= z_1 \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서 z_1 은 피스톤 로드의 변위, z_2 는 피스톤 로드의 위치 변화율, z_3 는 실린더 좌우 양실의 압력차, z_4 는 전자비례밸브의 스톱 변위를 나타낸다.

III. 미지 변수 추정 알고리즘

유압시스템은 유압실린더, 밸브, 펌프 등에 대한 정확한 사양과 성능을 기준으로 모델링을 해야 한다. 하지만 유압실린더나 펌프 등은 초기 성능 사양을 가지고 모델링에 적용하기 때문에 시스템의 장기간 사용에 따른 노후화가 발생하거나, 시스템의 외적 요인으로 초기 사양과 다른 성능을 보였을 때 적절한 유량 제어에 불안정성을 보일 수 있다. 본

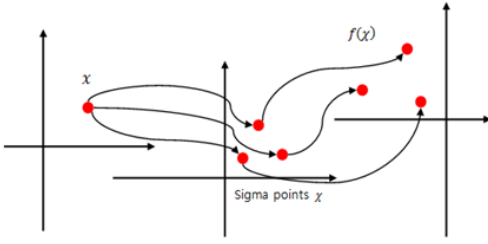


그림 2. 언센티드 변환

Fig. 2 Unscented Transform

장에서는 구성품의 미지 변수를 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘에 대해 다루고자 한다.

1. 언센티드 칼만 필터

언센티드 칼만 필터는 언센티드 변환(Unscented Transform)을 이용하여 랜덤 변수의 통계적 특성을 계산하는 방법으로 언센티드 칼만 필터 알고리즘의 기초가 된다. 확률 분포를 근사화하는 방법은 랜덤 변수 x 가 n 차원인 경우 $2n+1$ 시그마 포인트 χ_i 를 선택하여 다음 상태 변수 x 의 평균과 공분산을 추정한다.

언센티드 변환은 그림 2와 같이 시간 k 에서 추정 값 $\hat{x}_{k|k}$ 와 공분산 $P_{k|k}$ 를 이용하여 시그마 포인트 $\chi_{k|k}$ $2n+1$ 개를 계산한다. 계산된 $2n+1$ 개의 시그마 포인트 $\chi_{k|k}$ 를 각각 함수 $f(\chi_{k|k})$ 에 대입한 비선형 변환으로 설명할 수 있다. 이 변환을 통해 얻어진 시그마 포인트로부터 평균과 공분산을 계산 할 수 있다

언센티드 칼만 필터의 과정은 다음과 같다.

먼저 상태 변수와 오차 공분산 행렬을 초기화한다.

$$\hat{x}_0 = E[x_0], \quad (15)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \quad (16)$$

상태 추정 변수를 이용하여 다음과 같이 시그마 포인트를 계산한다.

$$\chi_{k-i}^j = [\hat{x}_{k-1}, \hat{x}_{k-1} \pm \sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}] \quad (17)$$

t_k 일 때 만들어진 시그마 포인트를 이용하여 상태 추정 변수와 오차 공분산 행렬을 이용하여 t_{k+1} 의 상태 추정 변수와 오차 공분산을 계산한다.

$$\chi_{k|k-1}^j = F(\chi_{k-1}^j) \quad (18)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \chi_{k|k-1}^i, \quad (19)$$

$$P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1})(\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1})^T \quad (20)$$

t_{k+1} 의 상태 추정 변수와 오차 공분산을 계산한 후 이를 이용하여 추정 시그마 포인트를 생성하고 시그마 포인트의 평균을 구한다.

$$Z_{k|k-1}^j = H(\chi_{k|k-1}^j), \quad (21)$$

$$\hat{z}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Z_{k|k-1}^i \quad (22)$$

시그마 포인트와 상태 추정 변수, 시그마 포인트와 시그마 포인트의 평균을 이용하여 칼만 이득을 계산하고, 상태 추정 변수와 오차공분산 행렬을 업데이트한다.

$$P_{k|k-1}^{zz} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (Z_{k|k-1}^i - \hat{z}_{k|k-1})(Z_{k|k-1}^i - \hat{z}_{k|k-1})^T, \quad (23)$$

$$P_{k|k-1}^{xz} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (X_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1})(Z_{k|k-1}^i - \hat{z}_{k|k-1})^T, \quad (24)$$

$$K = P_{k|k-1}^{xz} (P_{k|k-1}^{zz})^{-1}, \quad (25)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K(z_k - \hat{z}_{k|k-1}), \quad (26)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K(P_{k|k-1}^{zz})K^T \quad (27)$$

여기에서, P_k 는 상태 오차 공분산, P_k^{xz} 는 상관 오차 공분산, $W_i^{(m)}$, $W_i^{(c)}$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$W_0^{(m)} = \lambda/(n+\lambda), \quad (28)$$

$$W_0^{(c)} = \lambda/(n+\lambda) + (1-\alpha^2 + \beta), \quad (29)$$

$$W_i^{(m)(c)} = 1/2(n+\lambda) \quad (30)$$

여기에서, n 은 시스템의 차수를 나타내고, α 는 시그마 포인트의 퍼짐을 계산하는 스케일 파라미터로서, 항상 작은 양의 값($1 \leq \alpha \leq 10^{-3}$)을 갖는다. κ 는 2차 스케일 파라미터이며 대부분 0으로 설정하고, β 는 랜덤 변수의 분포에 대한 사전지식을 포함한다. 가우시안 분포를 따르면 최적값은 $\beta=2$ 이 된다. $W_i^{(m)}$, $W_i^{(c)}$ 는 가중치를 나타내며, $(\sqrt{(n+\lambda)P_{k|k}})_i$ 는 Square root 행렬 (Lower triangular Cholesky factorization)의 i -번째 열이다. λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n \quad (31)$$

표 1. 전기-유압 서보 실린더의 변수

Table 1. Parameters of the hydraulic system

Description	Para.	Val.	Unit
Cross section area of the head cylinder	A_1	50.24	cm^2
Cross section area of the load cylinder	A_2	15.9	cm^2
Mean value of A1 and A2	A_{me}	33.07	cm^2
Total mass	M_t	150	$kgf \cdot s^2/cm$
Bulk modulus	β_e	12000	kgf/cm^2
spring constant	L	55	$kgf \cdot s^2/cm$
Viscous damping coefficient	B_p	5.46	$kgf \cdot s/cm$
Total volume of the valve and cylinder chamber	V_e	410	cm^3
Supply pressure	P_s	70	kgf/cm^2
Total leakage coefficient	C_{lp}	0.00001	$cm^5/kgf \cdot s$
Flow constant of spool orifice	C_d	0.61	
Sampling time	T_t	0.01	sec
Flow gain	K_t	0.0104	cm/mA
Oil density	ρ	8.78×10^{-7}	$kgf \cdot s^2/cm^4$
Gradient of port cross section area	w	3.228	cm
Maximum load flow	Q_{max}	3500	cm^3/s

표 2. 상태 추정 오차

Table 2. Error of state estimation result

Status	RMSE
Displacement of Electric-Hydraulic Servo Cylinder	0.011 cm

2. 미지 변수 추정 방정식 유도

유압실린더의 부하변수를 추정하기 위해, 부하변수를 새로운 변수로 정의한다.

$$z_5 = L \tag{32}$$

식 (32)를 식 (14)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= \frac{1}{M_t}(-z_1 z_5 - B_p z_2 + A_e z_3 - F_L), \\ \dot{z}_3 &= -\theta_1 z_2 - \theta_2 z_3 + (\theta_3 \sqrt{P_s - sgn(z_4) z_3}) z_4, \\ \dot{z}_4 &= -\frac{1}{T_t} z_4 + \frac{K_t}{T_t} u, \\ \dot{z}_5 &= 0, \\ X_p &= z_1 \end{aligned} \tag{33}$$

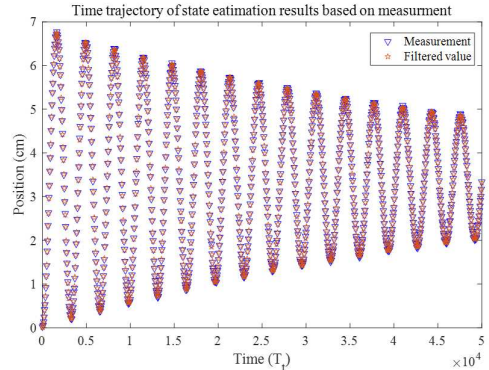


그림 3. 상태 추정 결과

Fig. 3 Result of state estimation

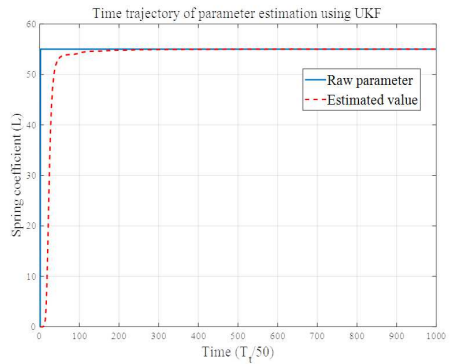


그림 4. 미지 변수 추정 결과

Fig. 4 Result of unknown-parameter estimation

IV. 시뮬레이션

전기-유압 서보 실린더의 미지 변수 추정 성능을 분석하기 위하여 Matlab 기반의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 변수 값은 표 1과 같다 [11].

미지 변수 추정을 위한 언센티드 칼만 필터 설정은 다음과 같다.

표 3. 미지 변수 추정 오차

Table 3. Error of unknown-parameter estimation result

Parameter	RMSE
Spring constant	7.7421

$$x_0 = [0 \ 0 \ 0], \quad (34)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 10 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-4} & & \\ & & \\ & & 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (36)$$

유압 실린더의 부하 변수 추정을 위해 유압 실린더에 유입되는 양은 일정하며, 측정 데이터의 센서 및 측정 오차는 가우시안 분포를 가진다고 가정한다.

측정 데이터 기반의 상태 추정 결과는 다음 그림 3과 같다. 그림 3에서 측정 오차가 포함된 측정 데이터와 언센티드 칼만 필터로 추정된 실린더의 변위 추정 값을 나타낸다. 수치 결과는 표 2에 정리했다. 상태 추정과 동시에 추정한 미지 변수 추정 결과는 그림 4와 같다. 스프링 상수의 초기 값은 표 1에 확인 할 수 있듯이 $55 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$ 이며, 그림 3에서의 추정 오차가 줄어들며 따라 미지 변수 추정 오차 또한 빠르게 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그 수치 결과는 표 3과 같다. 정상 상태 값에 도달한 시점 이후로 추정 오차의 RMSE 값을 계산한다면 그 수치는 더 작아질 것으로 판단된다.

V. 결론

다양한 해양 산업에 사용되는 잭업 바지선은 단일 전기-유압 서보 실린더의 여러 조합을 통해 제어된다. 즉, 전기-유압 서보 실린더의 정확한 제어는 잭업 바지선의 제어 성능과 밀접한 관계를 가진다.

본 논문에서는 전기-유압 서보 실린더의 부하 측 미지 변수를 추정하는 연구를 수행했다. 전기-유압 서보 실린더에 대한 동역학 방정식을 유도하고, 비선형 방정식에 미지 변수를 포함하여 상태와 미지 변수를 동시에 추정하는 언센티드 칼만 필터에 적용할 수 있도록 결합된 비선형 방정식을 유도했다. 시뮬레이션 결과 상태 추정 오차가 줄어들며 미지 변수 추정 오차가 감소하는 것을 확인하였다.

References

- [1] D.A. Fee, J. O’dea, Technology for Developing Marginal Offshore Oilfields, Taylor & Francis, 2006.
- [2] S. Ilango, V. Soundararajan, Introduction to Hydraulics and pneumatics, PHI Learning, 2011.
- [3] M.J. Kim, S.B. Bae, W.K. Baek, M.G. Joo, K. N. HaA, “Way-Point Tracking of Hovering AUV by PID Control,” IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol 10, No. 4, pp. 257-264, 2015 (in Korean).
- [4] J.K. Tar, I.J. Rudas, A. Szeghegyi, K. Kozłowski, “Nonconventional Processing of Noisy Signals in the Adaptive Control of Hydraulic Differential Servo Cylinders,” Journal of IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 54, No. 6, pp. 2169-2176, 2005.
- [5] D. Zuo, L. Qian, T. Yang, X. Cui, Q. Luo, “Coupling Leveling Control Based on Fuzzy PID for Synchronous Loading System of Load-Bearing Test Bed,” Journal of Electronics, Vol. 26, No. 6, pp. 1206-1212 2017.
- [6] D. Wang, D. Zhao, M. Gong, B. Yang, “Research on Robust Model Predictive Control for Electro-Hydraulic Servo Active Suspension Systems,” Journal of IEEE Access, Vol. 6, pp. 3231-3240, 2017.
- [7] J. G. Kim, “Study on the Sensor Embedded Hydraulic Cylinder for Offshore Application and Position Tuning Control of Multiple Cylinders,” Korea Maritime and Ocean University, Master. Dissertation, 2002.
- [8] D. Li Se. E. Salcudean, “Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, pp. 3360-3366, 1997.
- [9] M.J. Kim, M.G. Joo, “Implementation of a Hybrid Navigation System for a Mobile Robot by Using INS/GPS and Indirect Feedback Kalman Filter,” IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 10, No. 6, pp. 373-379, 2015 (in Korean).
- [10] S.B. Bae, M.J. Kim, D.H. Shin, S.T. Kwon,

W.K. Baek, M.G. Joo, "A Design of a Simplified Hybrid Navigation System for a Mobile Robot by Using Kalman Filter," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 9, No. 5, pp. 299-305, 2014 (in Korean).

[11] J.H. Kim, "Performance Improvement of a Fuzzy PID Controller and Its Application to the Position Control of Nonlinear Hydraulic Cylinders," Korea Maritime and Ocean University, Master. Dissertation, 2002.

Ji Hoon Seung (승지훈)



He received Ph. D in Department of Electronic Engineering, from Chonbuk National University in Korea. His research interest is Parameter Identification,

Estimation, Robust control.

Email: jeehun@nate.com

Nam O Seul (설남오)



He received Ph. D in Department of Electric Engineering from Chonbuk National University in 1997.

His research interest is remote control,

renewable energy.

Email: selnamo@kunsan.ac.kr

Sung Goo Yoo (유성구)



He received Ph. D in Department of Control and Instrumentation Engineering from Chonbuk National University in 2010.

His research interest

is A.I Control, Robot control

Email: yoosunggoo@kunsan.ac.kr

Jackyou Noh (노재규)



He received Ph. D in Department of Naval Architecture and Ocean Engineering from Seoul National University in 2009. He is currently a professor of Naval

Architecture and Ocean Engineering at Kunsan National University.

His research interest is Control System Design, Deep Reinforcement Learning.

Email: snucurl@kunsan.ac.kr