

제어 입력포화를 고려한 횡동요 저감장치용 제어알고리즘 설계

문석준^{†*}, 임채욱^{*}, 이해종^{**}

한국기계연구원 e-엔지니어링연구센터^{*}
(주)스페코 특수사업부^{**}

Design of Control Algorithm for Mass Driving Anti-Rolling System Considering Control Input Constraint

Seok-Jun Moon^{†*}, Chae-Wook Lim^{*} and Hae-Jong Lee^{**}

Korea Institute of Machinery and Materials^{*}
SPECO Ltd.^{**}

Abstract

Reduction of a ship's rolling is the most important performance requirement for improving the safety of the crew on board and preventing damage to cargos as well as improving the comfort of the ride. A mass driving anti-rolling system (MD-ARS) might be one candidate of several systems against the ship's rolling.

As the movable range of the mass on the ship is finite, the control system must include restriction on the mass position to protect the device and the ship. This restriction usually causes windup phenomenon and control performance is deteriorated seriously. Two control algorithms, anti-windup control and saturated sliding mode control, are studied in this paper. Control performance and robustness problem are checked out by numerical simulations.

※Keywords: Attitude control(자세 제어), Mass driving anti-rolling system(가동질량을 이용한 횡동요 감쇠장치), Control input constraint(제어입력 제한), Anti-windup control(안티와이드업 제어), Sliding mode control(슬라이딩 모드 제어), Robustness(강인성)

1. 서론

파랑 중에 있는 선박의 운동에 대한 영향을 인

간공학적인 측면에서 보면, 승객에게 불쾌감을 유발하고, 승무원들의 피로가 누적되어 임무수행에 문제가 발생하거나 위험상황에서의 판단 오류 등을 일으켜 안전운항에 장애가 될 수 있다. 선박의 대형화, 고속화 및 고급화 추세와 함께 선박의 운동을 줄이기 위하여 자세제어방법에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 대표적인 자세제어장비

접수일: 2005년 6월 27일, 승인일: 2005년 9월 27일

† 주저자, E-mail: sjmoon@kimm.re.kr

Tel: 042-868-7428

로서는 anti-rolling tank(ART), fin stabilizer, hydrofoil control system 등이 있다(유재문 등 2003, 김진환 등 1998, 강창구 등 1996). 현재 대형여객선, 고급요트, 해군 함정, 해경 함정, 해양조사선 등에는 fin stabilizer가 필수적으로 장착되고 있으며, ART는 특수 목적선에 부분적으로 장착되고 있다(이경중 등 2004).

특수선, 레저 보트, 낚시선 등 중소형 선박의 경우 정선 중 횡동요에 의한 운동이 승무원에게 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이를 방지하기 위한 장비로서는 ART외에 가동질량을 이용한 횡동요 저감장치(mass driving anti-rolling system, MD-ARS) 등이 있다. 유체를 사용하는 ART에 비해 MD-ARS는 비중이 큰 고체의 질량을 사용하므로 설치 공간의 제약이 적으면서도 효과는 더 좋은 것으로 알려져 있다. MD-ARS에 대한 국외에서의 연구는 일본 조선소를 중심으로 체계적으로 수행되고 있다(Koike et al. 1999). 중형급 이상의 선박을 대상으로 연구를 수행 중에 있으며, 전기모터에 의해 가동되는 능동형 시제품을 개발한 후, 해양 조사선에 탑재하여 성능을 검증하고 있다. 또한 소형 선박용 MD-ARS에 대한 연구도 진행되어 실용화를 추진하고 있는 것으로 알려져 있다(Taji 1996). 국내의 연구로서는 채규훈과 김영복(2003)이 모형선을 대상으로 능동형 장비를 수조에서 실험한 내용이 발표되었다.

본 연구에서는 중소형 선박에 적용할 수 있는 능동형 MD-ARS의 운용에 필수적인 요소인 제어 알고리즘을 설계하고자 한다. 일반적으로 MD-ARS의 부가(가동)질량은 선박 배수량의 최대 2%에 불과하므로 선박의 무게에 비하여 상대적으로 매우 작다. MD-ARS가 큰 관성력을 발휘하여 선박의 횡동요를 줄이기 위해서는 가동질량이 작을수록 가동질량의 가동변위가 커야 한다. 그러나 실제 시스템에서 가동질량의 가동변위는 제한성을 가지고 있으므로 제한 조건을 고려하지 않고 설계된 제어기는 제한 조건 범위 내에서만 사용해야 하므로 제어 성능이 양호하지 않게 설계될 수 있다. 이런 경우, 실제로 가동질량이 제한 조건을 넘으면 제어기의 안정성이 보장되지 않을 수 있으므로 불안정성을 방지하기 위하여 제어기를 끄는

것이 일반적인 대책이다. 반면 제한 조건을 고려하여 설계된 제어기는 MD-ARS의 제한 조건 범위를 넘는 경우, 즉 MD-ARS에 포화가 일어나는 경우에도 항상 안정성이 보장되므로 제어기를 안정되게 사용할 수 있고, 제한 조건을 고려하지 않은 제어기 보다 제어 성능을 좋게 할 수 있는 장점을 가진다. 또한 제어 대상 선박을 수학적으로 모델링할 경우 선박의 파라미터의 값을 정확하게 추정하기는 쉽지 않으므로 선박의 운동에는 불확실성에 의한 모델링 오차가 존재한다. 따라서 MD-ARS의 변위(또는 제어력) 제한 조건과 불확실성을 동시에 고려하는 제어기의 설계가 필요하다.

2. 수학적 모델링

본 연구에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 선박의 갑판위에 MD-ARS가 설치된 경우를 고려하였다. 전기모터 구동방식의 MD-ARS를 대상으로 하였으며, MD-ARS의 운동방정식은 아래의 식들로 표현될 수 있다.

$$m_d(\ddot{z} + l\ddot{\phi}) = m_d g \phi + f - c_d \dot{z} \tag{1}$$

$$J\ddot{\theta} = \tau_m - r_p f \tag{2}$$

$$\tau_m = k_t(u - k_e \dot{\theta}) / R_w \tag{3}$$

$$z = r_p \theta \tag{4}$$

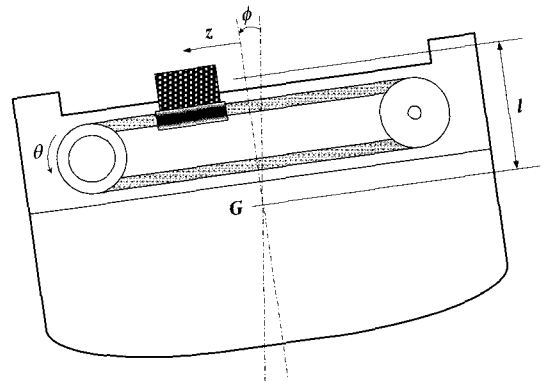


Fig. 1 Dynamic model

위 식을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_{ars} = A_{ars}x_{ars} + B_{ars}u_{ars} \quad (5)$$

$$y_{ars} = C_{ars}x_{ars} + D_{ars}u_{ars} \quad (6)$$

여기서,

$$x_{ars} = [z \dot{z}]^T, u_{ars} = [f_s u]^T, y_{ars} = [z \dot{z} f]^T,$$

$$A_{ars} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -D/M \end{bmatrix}, B_{ars} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/M & B/M \end{bmatrix},$$

$$C_{ars} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & P_1 \end{bmatrix}, D_{ars} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ P_3 & P_2 \end{bmatrix},$$

$$M = m_d + J/r_p^2, D = c_d + k_t k_e / (R_w r_p^2),$$

$$B = k_t / (R_w r_p), P_1 = JD / (Mr_p^2) - k_t k_e / (R_w r_p^2),$$

$$P_2 = k_t / (r_p R_w) - JB / (Mr_p^2), P_3 = -J / (Mr_p^2)$$

선박의 수학적 모델링에 대해서 몇 가지 가정을 하였다. 1) 횡동요는 선박중심에 대해 발생하며, 다른 자유도와의 연성효과는 무시한다. 2) 횡동요 각은 미소하다. 3) 선박에 작용하는 감쇠는 등가 점성감쇠로 가정한다. 4) MD-ARS에서 작용하는 마찰은 등가 점성감쇠로 가정한다. 이러한 가정으로부터 선박에 대한 횡동요를 모델링하면 다음과 같다.

$$I\ddot{\phi} + R\dot{\phi} + Wg\overline{GM}\phi = w + m_dgz - (f - c_d\dot{z})l \quad (7)$$

위 식을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_{ship} = A_{ship}x_{ship} + B_{ship}u_{ship} \quad (8)$$

$$y_{ship} = C_{ship}x_{ship} + D_{ship}u_{ship} \quad (9)$$

여기서,

$$x_{ship} = [\phi \dot{\phi}]^T, u_{ship} = [w \dot{z} f]^T,$$

$$y_{ship} = [\phi \dot{\phi} f_s]^T, f_s = m_dgz - m_d\dot{\phi}$$

$$A_{ship} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -Wg\overline{GM}/I & -R/I \end{bmatrix},$$

$$B_{ship} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_d l / I & -l / I & 1 / I & m_d g / I \end{bmatrix},$$

$$C_{ship} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ P_4 & P_5 \end{bmatrix},$$

$$D_{ship} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m_d l / I & -m_d^2 g l / I & -m_d c_d l^2 / I & m_d l^2 / I \end{bmatrix},$$

$$P_4 = m_d g + m_d l W g \overline{GM} / I, P_5 = m_d l R / I$$

제어기의 설계를 위해 일본의 Sasaki and Watanabe (2000)이 사용한 수조시험용 모형선을 대상선박으로 고려하였다. 본 모형선은 실제 크기의 약 1/16로 축소된 것이며, 물리적 수치는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Physical parameters of the ship model

Item	Value
Rotary Inertia Moment of Ship [I]	1.805 [Nm]
Damping Ratio of Ship [A]	0.031 [Ns]
Ship Weight [W]	68 [kg]
Height of MetaCenter [GM]	0.037 [m]
Moving Mass [m _d]	0.9 [kg]
Distance [l]	0.044 [m]
Radius of Pulley [r _p]	0.01 [m]
Viscous Frictional Coeff. [c _d]	0.3 [Ns/m]
Rotary Inertia Moment of Motor [J]	1.0e-7 [kgm ²]
Torque Coeff. [k _t]	1.43e-2 [Nm/A]
Exciting Current Coeff. [k _e]	1.43e-2 [Vs/rad]
Electrical Resistance of Circuit [R _w]	0.964 [Ω]
Gravitation [g]	9.8 [kgm/s ²]

3. 구동기 포화를 고려한 제어알고리즘 설계

대상 선박 및 MD-ARS가 포함된 전체 시스템의 포화를 고려한 비선형 제어기를 설계하기에 앞서 모터를 사용한 가동(부가)질량의 위치제어용 전용제어기를 설계하였다. 위치 제어기는 범용 PID 제어기법을 사용하여 설계하였다. 식 (5) 및 (6)에서 입력전압 u 로부터 출력변위(위치) z 로의 전달함수를 추출하고, 이를 대상으로 제어기 설계를 하였다. PID제어기의 필요한 게인은 z 의 추정 오차를 최소화 하고, z 의 오버슈트(overshoot)가 발생하지 않도록 최소 자승법(least square

method) 및 근 궤적법(root locus method)을 사용하여 결정하였다. 이때 되먹임 상태변수는 변위(위치) z 로서 계측되는 상태량으로 가정하였다. 설계된 PID 제어기의 식 및 게인은 다음과 같다.

$$u = K_p(z_{ref} - z) + K_i \int (z_{ref} - z)dt + K_d(\dot{z}_{ref} - \dot{z}) \quad (10)$$

여기서, $K_p = 949$, $K_i = 1.3$, $K_d = 39$

설계한 위치 제어기의 성능을 살펴보기 위해 step 신호와 정현파 신호를 입력하여 가동 질량의 위치추적성을 조사하였다. Fig. 2에는 입력한 신호들과 가동질량의 위치추적상태를 보여주고 있으며, step 신호에 대해서는 overshoot 없이 약 0.15초안에 위치를 추적하는 것을 알 수 있다. 정현파 신호인 경우, 위치추적 결과는 매우 우수함을 알 수 있다.

위에서 설계한 PID 위치제어기, MD-ARS 모델(식 (5) 및 (6) 참조) 및 대상 선박 모델(식 (8) 및 (9) 참조)을 연결하면, 통합된 모델을 상태방정식으로 표현하면 간략히 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_{aug} = A_{aug}x_{aug} + B_{aug}u_{aug} \quad (11)$$

$$y_{aug} = C_{aug}x_{aug} + D_{aug}u_{aug} \quad (12)$$

여기서, $u_{aug} = [w z_{ref}]^T$, $y_{aug} = [z \dot{z} \phi \dot{\phi}]^T$

가동 질량의 과도한 응답을 줄이고 장비를 보호

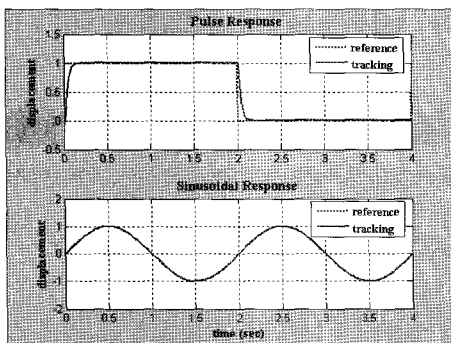


Fig. 2 Tracking characteristics

하기 위해 횡동요 제어기의 출력(zref)에 비선형 제한조건(nonlinear constraint)을 적용하였다. 제시된 제한조건은 다음과 같다.

$$z_{ref} = \begin{cases} 0.1 & \text{when } z_{ref} > 0.1 \\ z_{ref} & \text{when } -0.1 \leq z_{ref} \leq 0.1 \\ -0.1 & \text{when } z_{ref} < -0.1 \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)과 같은 구동기의 포화를 제한 조건으로 적용할 경우 제어효과는 현저하게 감소하는 것이 일반적인 현상이다. 구동기의 포화를 고려하는 제어기 설계 접근방법은 일반적으로 2가지로 대별된다. 첫째는 구동기의 포화를 고려하지 않고 제어기를 설계한 후 또 다른 제어기(compensator) 등을 추가하여 구동기의 포화로 인한 제어기 성능 저감을 방지하는 방법으로 anti-windup 제어기 등이 있다. 다른 방법은 처음부터 구동기의 포화를 고려하여 제어기를 설계하는 기법으로 포화 영역 내에서 최대 성능을 얻도록 설계를 하며, bang-bang 제어기와 같은 계열의 방법이다. 본 연구에서는 2가지 접근방법에 따라 제어기를 설계하고, 두 제어기의 성능 및 강인성을 검토해 보았다.

3.1 Anti-windup 제어기

식 (11) 및 (12)을 대상으로 최적제어 이론을 바탕으로 선형 제어기를 설계하였다. 최적제어 이론은 널리 알려진 이론이므로 본 고에서는 간략히 설계 과정만을 기술하고자 한다. 되먹임 상태변수로서는 가동질량의 변위 z 와 선박의 횡동요 각 ϕ 로 가정하였다. MATLAB®에서 제공하고 있는 'kalman' 함수를 이용하여 estimator를 설계하고, 'lqr' 함수를 이용하여 linear quadratic regulator를 설계하였다. 또한 'lqreg' 함수를 이용하여 설계한 estimator와 LQR를 연결하여 최종적으로 LQG regulator K 를 설계하였다. 횡동요 제어기를 적용 전-후의 시스템 특성을 살펴보기 위해 Table 2에 각 경우에 대한 감쇠비를 정리하였다. 대상 선박의 횡동요 고유진동수인 3.66rad/s에서 감쇠비가 약 75배정도 증가했음을 확인할 수 있다.

구동기의 포화를 고려하기 위해 다양한 anti-windup 제어방법들이 제안되고 있다. 본 연

구에서는 Watanabe et al.(1998)이 제안한 방법을 응용하여 anti-windup 제어를 설계하였다.

설계한 횡동요 제어기 K 의 minimal realization은 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$K = \begin{bmatrix} A_{con} & B_{con} \\ C_{con} & D_{con} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)를 left coprime factorization하면 다음과 같다.

$$K = (I - \bar{R})^{-1} \bar{N} \quad (15)$$

여기서, $\bar{R} = \left[\begin{array}{c|c} A_{con} - FC_{con} & F \\ \hline C_{con} & 0 \end{array} \right]$,

$$\bar{N} = \left[\begin{array}{c|c} A_{con} - FC_{con} & B_{con} - FD_{con} \\ \hline C_{con} & D_{con} \end{array} \right]$$

F : free parameter

Anti-windup 제어기는 Fig. 3과 같이 구성되며, 설계인자인 F 는 아래의 Riccati 식 (16)으로부터 positive definite 행렬인 P 를 구한 후 식 (17)로부터 산정된다.

$$A_{con}P + PA_{con}^T - \frac{1}{\gamma^2} PC_{con}^T C_{con} P + \quad (16)$$

$$B_{con}B_{con}^T + \delta I = 0, \delta > 0$$

$$F^T = \frac{1}{\gamma^2} C_{con} P \quad (17)$$

Table 2 Natural frequencies and damping ratios

Without Controller		With Controller	
Natural Freq. [rad/s]	Damping	Natural Freq. [rad/s]	Damping
1.37e-3	1.00e+0	1.37e-3	1.00e+0
3.66e+0	2.35e-3	3.77e+0	1.76e-1
-	-	3.81e+0	1.95e-1
3.96e+1	3.40e-2	3.96e+1	3.40e-2
-	-	7.20e+1	5.91e-1

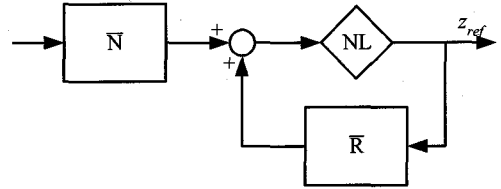


Fig. 3 Left coprime factorization

$\gamma=0.1$ 일 경우 설계 인자 $F = [0.0027, 6.5296, 22.4137, 5.0368, -30.8792]$ 이며, 이때 $(A_{con} - FC_{con})$ 의 고유치는 $[-1.38e-3, -4.83 \pm 5.40i, -42.8 \pm 57.5i]$ 이다.

3.2 Sliding mode 제어기

또 다른 접근방법으로 구동기의 포화를 고려하기 위해 sliding mode 제어방법(SMC)을 채택하였다. SMC는 시스템(식 (11) 참조)의 상태 궤도를 슬라이딩 면(sliding surface)으로 유도하는 제어를 설계하는 방법이다. 이때에 슬라이딩 면 위에서의 거동은 안정하게 설계해야 한다. 슬라이딩 면 $S = 0$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$S = Px = 0 \quad (18)$$

식 (18)에서 P 행렬은 슬라이딩 면 위에서의 거동이 안정하도록 결정되어야 한다. P 행렬을 결정하는데 극점 배치(Pole Assignment), LQR (Linear Quadratic Regulator) 등 여러 방법들이 있을 수 있는데, 여기에서는 LQR에 의한 방법을 고려한다. LQR에 의한 방법에서는 P 행렬은 다음의 성능지수 J 를 최소화함으로 얻어진다.

$$J = \int_0^{\infty} x^T(t) Q x(t) dt \quad (19)$$

여기서 Q 는 양정 행렬(Positive Definite Matrix)이다.

제어기는 상태 궤도가 슬라이딩 면 $S = 0$ 으로 유도하도록 설계되어진다. 이 목적을 위해서 다음의 Lyapunov 함수를 고려하였다.

$$V = \frac{1}{2} S^T S = \frac{1}{2} x^T P^T P x \quad (20)$$

시간 t 가 ∞ 로 갈 때 슬라이딩 모드(Sliding Mode) $S=0$ 이 발생하기 위한 충분조건은 다음과 같다.

$$\dot{V} = S^T \dot{S} \leq 0 \quad (21)$$

식 (21)의 Lyapunov 함수의 시간 미분치와 식 (11)의 상태 방정식으로부터 다음을 얻을 수가 있다.

$$\dot{V} = \lambda(z_{ref} - G) \quad (22)$$

$$\lambda = S^T PB; \quad G = -(PB)^{-1}P(Ax + E) \quad (23)$$

따라서 $\dot{V} \leq 0$ 이기 위해서 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$z_{ref}(t) = G - \delta\lambda \quad (24)$$

여기서 $\delta > 0$ 이다. 식 (24)를 식 (22)에 대입하면 충분조건 $\dot{V} = -\lambda\delta\lambda \leq 0$ 을 만족한다.

다음으로 제어기에 포화가 발생하는 경우에 대하여 살펴보자. 제어기가 다음과 같이 상·하한을 가지는 경우를 고려해 보자.

$$|z_{ref}(t)| \leq z_{max} \quad (25)$$

이 경우에도 제어기의 안정성이 보장되면 제어기에 포화가 발생하는 경우에도 유용하게 사용할 수 있다. 특별히 개루프계(open-loop system)가 안정한 경우에 대해서는 제어기에 포화가 발생하여도 제어기의 안정성을 보장하는 제어기를 쉽게 구할 수 있다. 제어가 행해지지 않을 때 ($z_{ref}(t) = 0$), Lyapunov 함수의 시간 미분치는 다음 식과 같다.

$$\dot{V}_{ols} = -\lambda G \quad (26)$$

여기서, 개루프계가 안정하면 항상 $\dot{V}_{ols} < 0$ 이다. 따라서 모든 시간 t 에 대하여 제어기의 작동에 의해서 $\dot{V} \leq \dot{V}_{ols}$ 를 만족하거나 $\dot{V} \leq 0$ 을 항상 유지하도록 하면 된다. 이와 같은 전제에 대하여 다음의 제어기 (27)는 항상 이 전제를 만족한다.

$$z_{ref}(t) = sat(\alpha^* G - \delta\lambda) \quad (27)$$

여기서 $0 \leq \alpha^* \leq 1$ 이고 sat 는 포화함수이다.

식 (27)에서 $\alpha^* = 1$ 인 경우는 식 (24)의 제어기에 포화함수를 사용한 것이 된다. 그러므로 식 (24)의 SMC의 제어 방법은 제어기에 포화가 발생하는 경우에도 개루프계가 안정한 경우 항상 안정성이 보장되는 큰 장점을 가지게 됨을 알 수 있다. LQR 등 일반적인 선형제어기는 제어기에 포화가 발생하는 경우 제어기의 안정성을 이론적으로 보장할 수 없다. 본 연구에서 고려된 PID 위치 제어기, MD-ARS 모델 및 대상 선박 모델을 연결한 통합된 모델의 상태방정식 (11)에서 A 행렬은 항상 안정, 즉 개루프계가 안정한 경우이므로 식 (27)의 제어기를 적용할 수 있다.

앞의 식 (27)에서 주어진 포화 SMC (SSMC)의 선박 및 MD-ARS에 대한 제어기의 성능을 수치 실험적으로 확인해 보았다. 실제 제어시에는 모든 상태량을 측정하는 것이 불가능하므로 선박의 횡동요(ϕ) 만을 센서로부터 측정하고 다른 상태량은 이로부터 Kalman-Bucy filter를 통해 추정하도록 관측기를 설계하였다.

제어기는 다음과 같은 파라미터들을 시행착오로 선정하여 설계하였다. 가중행렬 $Q = diag(1, 100, 1, 200, 1)$ 로 두었고, 이때 구해진 안정한 슬라이딩 면 $S = 0.0016x_1 - 0.2593x_2 - 0.0238x_3 + 0.0356x_4 - 0.0859x_5$ 이다. 또한 $\delta = 2e - 1$, $\alpha^* = 1$ 로 두었다.

4. 수치 실험

4.1 제어기의 성능(performance)

설계한 횡동요 제어기의 성능을 검증하기 위해 외력으로서 해양파에 의한 강제 모멘트 w 를 생성하였다. 일반적으로 해양파의 스펙트럼은 0.05 ~ 0.2Hz의 주파수 영역에 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 파 강제모멘트의 스펙트럼도 같은 주파수 영역에 있는 것으로 가정할 수 있다. 단, 본 연구에서의 대상선인 모형선은 모선을 1/16로 축소한 것이므로 선체의 횡동요 주기가 변하게 되며, 이를 고려하여 w 의 주파수 영역을 0.2 ~ 0.8Hz에

있는 것으로 가정하였다. 수치실험을 위해 생성된 해양파에 의한 강제 모멘트는 Fig. 4에 보였다.

생성된 강제모멘트를 선박 모델에 입력하여 설계한 제어기(위치 및 횡동요 제어기)의 성능을 조사하였다. 수치실험은 10ms간격으로 180초간 수행되었다. 먼저 제어기에 입력 제한조건이 없는 경우에 선박의 횡동요 응답을 살펴보았다. MD-ARS가 설치될 경우와 설치되지 않은 경우, 선박의 횡동요 및 가동질량의 응답을 Fig. 5에 비교하였다. MD-ARS의 설치로 인하여 대상 선박의 횡동요 응답의 최대값 및 RMS 값은 약 80% 정도 (비제어 최대값 6.64° 에서 최적제어 1.11° , sliding mode 제어 1.07°) 저감효과를 확인할 수 있었다. Fig. 5를 보면 sliding mode 제어의 성능이 최적제어보다 더 양호한 것처럼 보이나, 가동질량의 변위 응답을 고려하면 두 제어방법의 성능은 비슷한 것을 알 수 있다. 반면 MD-ARS의 가동질량의 변위를 살펴보면 최대 약 $0.7m$ 까지 움직이는 것을 알 수 있는데, 이는 실제 상황에서는 허용할 수 없는 운동거리이다. 따라서 가동질량의 과도한 응답을 줄이고 장비를 보호하기 위해 횡동요 제어기의 입력(z_{ref})에 비선형 제한조건을 적용하였다.

제시된 제한조건 식 (13)을 고려하여 설계한 anti-windup 제어기와 포화 SMC (SSMC)의 성능을 조사하기 위해 위에서 수행한 수치실험을 다시 수행하였다. Fig. 6은 제어기에 입력 제한조건이 있는 경우의 선박의 횡동요 응답과 제어기 입력의 시간이력을 보여 주고 있다. MD-ARS의 설치로 인하여 대상 선박의 횡동요 응답의 최대값 및 RMS 값은 약 60% 정도(비제어 최대값 6.64° 에서 anti-windup 제어 3.02° , 포화 sliding mode 제어 2.66°), 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다. 제어기의 입력 제한조건으로 인해서 입력제한 조건이 없는 경우에 비하여 제어성능은 감소하지만 제어 입력에 포화가 생겨도 제어기는 안정하게 작동함을 확인할 수 있었다.

4.2 강인성(robustness)

선박 모델의 실제 파라미터 중 I(Rotary Inertia Moment of Ship), W(Ship Weight), GM(Height

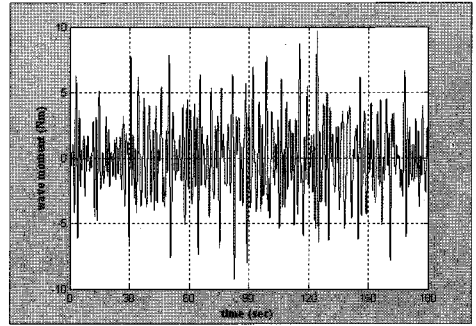


Fig. 4 Generated wave moment

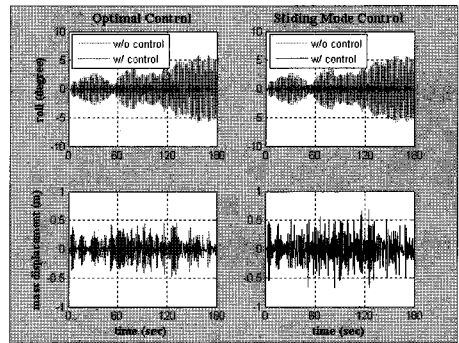


Fig. 5 Simulation results using linear controllers

of MetaCenter) 등의 값에서 불확실성이 있는 경우에 대하여 수치실험을 수행하였다. 여기서는 제어기의 입력 제한 조건($z_{max} = 0.1$)이 있는 경우, 즉 anti-windup 제어 및 포화 sliding mode 제어 방법에 대해서 살펴보았다. 먼저 선박 모델 중 파라미터 I의 불확실성이 $\pm 20\%$ 인 경우를 고려하였으며, Table 3에 선박 횡동요 응답의 최대값 및 RMS 값을 정리하였다. 두 제어기 모두 최대값 및 RMS 값이 약 55 ~ 75% 정도 줄었음을 확인할 수 있다. 다음으로 선박 모델 중 파라미터 W나 GM에 불확실성이 $\pm 20\%$ 인 경우를 살펴보았다. 식 (7)에서 보는 바와 같이 W와 GM은 같은 항에 곱으로 표현되기 때문에, 동일한 불확실성은 식 (11)의 시스템 행렬 A의 변화를 동일하게 변화시키므로 동일한 수치실험 결과를 얻게 한다. Table 4에서는 이 경우의 선박 횡동요 응답의 최대값 및 RMS 값을 보여 주고 있는데, 두 제어기 모두 최대값 및 RMS 값이 약 55 ~ 70% 정도 줄었음을

확인할 수 있다. 따라서 설계된 두 제어기는 제어기의 입력 제한 조건이 있는 경우에도 강인 안정성은 보장되며, 선박 모델에서 I, W, GM의 파라미터 ±20%의 불확실성에 대해 안정된 제어성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 단 불확실성의 변화에 대한 제어성능 변화량은 포화 sliding mode 제어방법이 더 작음을 알 수 있으며, 이를

통해 sliding mode 제어가 우수한 강인성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 선박의 횡동요 저감을 위한 장치 중 하나인 Mass Driving Anti-Rolling System (MD-ARS)에 필요한 제어로직 설계 방안을 제안하였다. 모터의 위치제어를 위해 내부 제어루프로서 PID 제어기법을 사용하였으며, 선박의 횡동요 응답을 기반으로 최적제어 방법 및 sliding mode 제어방법을 사용하여 외부 제어루프를 각각 설계하였다. 또한 가동질량의 제한조건으로 인한 windup 현상을 방지하기 위해 anti-windup 제어 및 포화 sliding mode 제어방법을 제안하였다. 설계된 제어 알고리즘을 이용하여 소형 모형선박을 대상으로 수치실험을 수행한 결과 두 제어기에 대해 양호한 제어결과를 얻을 수 있었다.

제어기의 안정성과 성능도 중요하지만, 제어 대

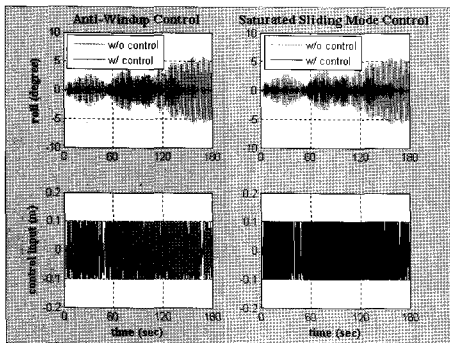


Fig. 6 Simulation results using N.L. controllers

Table 3 Roll responses of ship with uncertainty in rotary inertia moment of ship

	Anti-windup control						SSMC					
	I × 0.8		I × 1.0		I × 1.2		I × 0.8		I × 1.0		I × 1.2	
	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
No Control (degree)	7.671	1.686	6.642	2.166	5.848	1.764	7.671	1.686	6.642	2.166	5.848	1.764
Controlled (degree)	2.431	0.685	3.020	1.000	1.373	0.491	3.227	0.680	2.666	0.686	2.187	0.552
Reduction (%)	68.3	59.4	54.5	53.8	76.5	72.2	58.0	59.7	59.9	68.3	62.61	68.69

Table 4 Roll responses of ship with uncertainty in ship weight or height of metacenter

	Anti-windup control						SSMC					
	W × 0.8		W × 1.0		W × 1.2		W × 0.8		W × 1.0		W × 1.2	
	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
No Control (degree)	6.180	2.016	6.642	2.166	5.585	1.682	6.180	2.016	6.642	2.166	5.585	1.682
Controlled (degree)	1.709	0.670	3.020	1.000	1.807	0.517	2.797	0.657	2.666	0.686	2.242	0.556
Reduction (%)	72.3	66.8	54.5	53.8	67.6	69.3	54.8	67.4	59.9	68.3	59.9	66.9

상계의 파라미터의 불확실성에 대한 강인 안정성과 강인 성능 또한 매우 중요하다. 선박의 실제 파라미터 값을 정확하게 추정하기는 쉽지 않으므로 불확실성이 항상 존재하며, 따라서 모델링 오차가 항상 존재하게 된다. Sliding mode 제어 이론은 이미 강인성이 보장됨을 확인되었다. 포화 sliding mode 제어는 sliding mode 제어이론에 근거하여 제시된 것이므로 제어 입력에 포화가 생겨도 제어 대상계의 파라미터의 불확실성에 대한 강인성을 보장할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 민·군 겸용 기술개발사업 중 "중·소형 Mass Driving ARS 설계기술 개발" 사업 과제로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강창구, 홍사영, 서현, 이창민, 김연규, 공인영, 1996, "고속 카타마란선의 규칙 정면파중 운항자세 제어시험," 대한조선학회 논문집, 제 33권, 제 2호, pp. 36-43.
- 김진환, 김연규, 이경중, 이창용, 1998, "시험선 나래의 자세제어기술개발 및 실 해역 시험," 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 3호, pp. 26-37.
- 문석준, 임채욱, 이해중, 2005, "가동질량을 이용한 횡동요 저감장치의 제어입력포화를 고려한 제어알고리즘 설계," 대한조선학회 춘계학술발표회, pp. 714-722.
- 유재문, 김효철, 이현엽, 2003, "감요수조의 주기 조절 장치 효과에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 1호, pp. 1-7.
- 이경중, 윤현규, 문석준, 부성윤, 2004, 파랑중 수상선의 자세제어장비 기술개발, 한국해양연구원, 연구보고서 UCN00700-04072.
- 채규훈, 김영복, 2003, "LMI를 이용한 선박 횡동요 제어에 관한 실험적 연구," 한국해양공학회지, 제 17권, 제 2호, pp. 60-66.
- Koike, Y., Saeki, A., Mutagushi, M., Imazeki, M., Miyabe, H. and Yamashita, S., 1999, "Application of Hybrid Anti-Rolling System to Actual Ship," Transaction on SNAJ, Vol. 185, pp. 111-117.
- Sasaki, D. and Watanabe, R., 2000, "Active Rolling Control of Ships: Design of Control System in Consideration of Movable Range of Mass," Transaction on IEE in Japan, Vol. 120-D, No. 11, pp. 1382-1390.
- Watanabe, R., Matsui, A. and Uchida, K., 1998, "Design and Implementation of Anti-Windup Controller Based on Stated Feedback H_{∞} Control Theory," Electrical Engineering in Japan, Vol. 124, No. 1, pp. 33-41.
- Taji, T., 1996, "Research trend on the active control of the anti-Rolling System for Ships", Techno Marine, Vol. 800, pp. 119-124.



< 문 석 준 >



< 임 채 욱 >



< 이 해 중 >