

선박의 횡동요 저감장치를 위한 제어로직 설계

Control Logic Design for Mass Driving Anti-Rolling System of Ships

문 석 준*

Seok-Jun Moon

Key Words: Ship(선박), Anti-rolling system (횡동요 저감장치), Control logic (제어로직)

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. We adopt anti-windup technique to improve the control performance and demonstrate its efficiency by simulation.

기호 설명

ϕ : rolling angle of the ship [rad]
 z : relative displacement of moving mass to the ship [m]
 θ : rotating angle of the motor [rad]
 u : input voltage to the motor [V]
 τ_m : motor torque [Nm]
 f : control force acting to the moving mass [N]
 w : exciting moment by wave [Nm]
 I : rotary inertia moment at ship mass center [Nm]
 R : damping coefficient of the ship [Ns]
 W : ship mass [kg]

GM : metacenter height [m]
 m_d : moving mass [kg]
 l : distance between ship mass center and moving mass [m]
 r_p : pulley ratio [m]
 c_d : viscous damping ratio of moving mass [Ns/m]
 J : inertia moment of the motor [kgm²]
 k_t : torque coefficient [Nm/A]
 \bar{k}_e : thrust coefficient [Vs/rad]
 R_w : electrical resistance of the circuit [Ω]
 g : gravitational acceleration [m/s²]

1. 서론

민간 선박과 군용 함정의 고성능화가 진행되면서 운동감소 및 자세제어의 필요성이 점차 크게 대두되고 있다. 파랑중 운동의 영향을 인간공학적인 측면에서 보면 운동에 오랜 시간 피폭되어 승

* 정회원, 한국기계연구원 구조연구부
E-mail: sjmoon@kimm.re.kr
Tel.: 042-868-7428, Fax.: 042-868-7418

객에게 불쾌감을 줄 수 있고, 승무원들의 피로가 누적되어 임무수행에 문제가 발생하거나 위험상황에서의 판단 오류 등을 일으켜 안전운항에 장애가 된다. 선박의 안전성과 관련하여서는 탑재장비의 고장 등이 발생할 수 있고, 자세제어가 수행되지 않으면 운항이 불가능한 고성능 수상선 등이 있다. 또한 임무수행면에서 보면 악천후에서도 운항을 하여야만 하는 수상선의 경우 운동감소 및 자세제어가 되지 않으면 임무수행이 어렵게 된다. 현재 대형여객선, 고급요트, 해군 함정, 해경 함정, 해양조사선 등에는 Fin Stabilizer가 필수적으로 장착되고 있으며, Anti-Rolling Tank는 특수목적선에 부분적으로 장착되고 있다. 초고속선의 경우 수중 Fin을 장착하여 자세제어를 수행하는 수상선이 점차 늘고 있는 추세이다[1].

선박의 자세제어 장치는 대부분 해외도입을 하고 있어서(일반적인 장비의 일부는 라이선스 생산을 하고 있음) 해외기술 의존도가 높고 외화가 유출되고 있다. 향후 선박 및 함정의 고성능화가 진행되면서 고성능 고속선에 대한 요구가 많아지고 있고, 고부가가치 수상선에 필수적으로 적용이 될 것이다. 또한 초고속선에서는 본 기술이 필수적이어서 설계개념에 포함되고 있으며, 초고속선의 성능을 좌우하는 중요한 장비이다. 따라서 본 기술이 파급되면 국내 조선 및 제어장비분야에 경쟁력을 높이고 경제적으로 상당한 효과를 거둘 것이다.

군용 수상선의 경우 운용상의 특수성 때문에 거친 해상상태에서도 함정을 운용하여야 하는 경우가 많다. 또한 탑재무장의 경우 함정의 운동이 커지면 성능이 떨어지는 무장이 있다. 예를 들어 레이다는 함정의 운동이 커지면 표적을 탐지하기가 힘들어지는 경우가 발생하고, 함포의 경우 운동이 커지면 함포의 탄착점이 불규칙하고 명중도가 떨어진다. 또한 정교한 유도무기의 경우 초기 발사각과 코스에 의해서 표적으로의 유도성능이 결정되기 때문에 함자세가 안정되지 않으면 유도성능이 떨어지게 된다. 따라서 자세제어장비에 의하여 함정의 운동과 자세가 안정되면 탑재장비의 성능 향상 및 작전성, 기동성, 안전성을 향상시키는 등 함자세의 임무수행능력이 향상된다.

자세제어장비를 해외 도입하는 경우 설계 및 장착을 위한 상세설계시 함정의 자료를 요구하는데, 이때 함정의 설계도가 해외에 유출되어 군사비밀들에 대한 보안에 문제가 되고 있다. 그러나 국내 기술을 개발하여 국내개발장비를 사용하는 경우

한국해군 함정의 설계 및 성능에 관련된 비밀의 보안을 유지할 수 있다.

현재 일본을 중심으로 가동질량의 위치를 조정함으로써 선박의 자세를 제어하는 장비인 Mass Driving Anti-Rolling System(MDARS)에 대한 연구가 진행 중에 있다[2~5]. 주로 능동형 및 혼합형 자세제어 장치가 개발되고 있다. 이를 자세제어에 이용하려면 원하는 시간 및 위치에 중량을 정확히 이동시키는 기술과 MDARS가 항상 안정한 상태에서 작동할 수 있도록 하는 제어기 설계 기술이 필요하며, 체계적이고 실험적인 연구가 필요한 상태이다. 본 연구는 민간겸용기술과제의 일환으로 수행되고 있으며, 2002년부터 4년간 수행될 예정으로 있다. 그 중 제어로직 설계에 대한 연구내용을 발표하고자 한다.

2. 수학적 모델링

본 연구에서는 전기모터 구동방식의 MD-ARS를 대상으로 하였으며, MD-ARS의 운동방정식은 아래의 식들로 표현될 수 있다.

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

$$J\ddot{\theta} = \tau_m - r_p f \quad (2)$$

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

$$z = r_p \theta \quad (4)$$

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,

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

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

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

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

Table 1 Physical Parameters

Item	Value
Rotary Inertia Moment of Ship [I]	1.805 [Nm]
Damping Ratio of Ship [R]	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]

$$B = k_l / (R_w r_p), \quad P_1 = JD / (M r_p^2) - k_t k_e / (R_w r_p^2),$$

$$P_2 = k_l / (r_p R_w) - JB / (M r_p^2), \quad P_3 = -J / (M r_p^2)$$

선박의 수학적 모델링에 대해서 몇가지 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,

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

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

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

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

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

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

$$P_4 = m_dg + m_d l Wg\overline{GM}/I, \quad P_5 = m_d l R/I$$

본 연구에서는 제어기를 설계를 위해 일본에서 수행된 연구[6]에 사용된 수조시험용 모델선을 대상으로 고려하였다. 본 모델선은 실제 크기의 약 1/16으로 축소된 것이며, 물리적 수치는 Table 1에 정리하였다.

3. 제어기 설계

3.1 위치 제어기 설계 (inner-loop)

대상 선박 및 MD-ARS가 포함된 전체 시스템의

제어기를 설계하기에 앞서 모터를 이용한 가동질량의 위치제어용 전용제어기를 설계하였다. 위치제어기는 범용 PID 제어기법을 사용하였다. 식 (5) 및 (6)에서 입력전압 u 로부터 출력변위(위치) z 로의 전달함수를 추출하고, 이를 대상으로 제어기 설계를 하였다. PID제어기의 필요한 계인은 z 의 추정 오차를 최소화 하고, z 의 오버슈트(overshoot)가 발생하지 않도록 least square method 및 root locus method를 사용하여 선정하였다. 이때 되먹임 상태 변수는 변위(위치) z 로서 계측되는 상태량으로 가정하였다. 본 연구에서는 제어기 설계 및 수치실험을 위해 MATLAB[®]과 SIMULINK[®]를 사용하였으며, Fig. 1은 위치 제어기 설계시 사용된 SIMULINK 모델을 보여주고 있다. 설계된 PID 제어기의 계인은 다음과 같다.

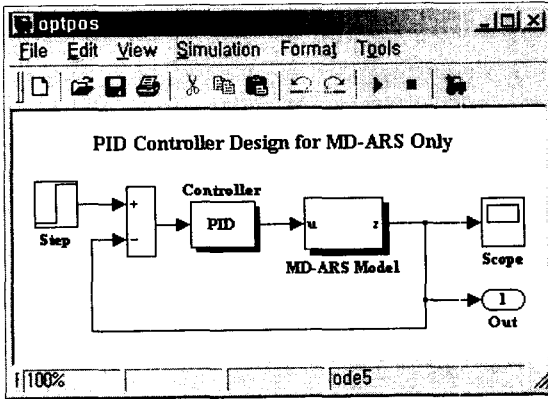


Fig. 1 A Model for PID Controller Design

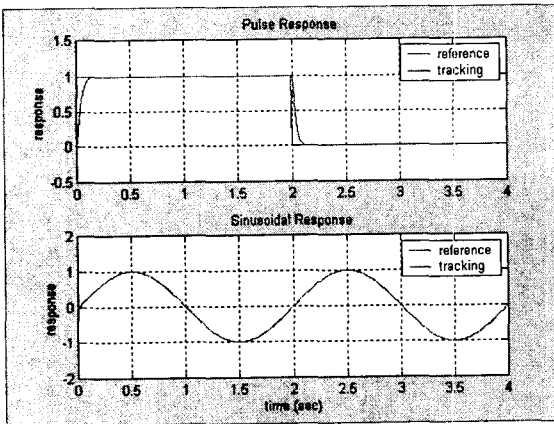


Fig. 2 Tracking Characteristics of Moving Mass

$$K_p = 949, K_i = 1.3, K_d = 39 \quad (10)$$

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

3.2 횡동요 제어기 설계 (outer-loop)

위에서 설계한 PID 위치제어기, MD-ARS 모델 (식 (5) 및 (6) 참조) 및 대상 선박 모델(식 (8) 및 (9) 참조)을 연결하면, Fig.3과 같이 도시할 수 있다. 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 $u_{aug} = [w \ z_{ref}]^T$, $y_{aug} = [z \ \dot{\phi} \ \phi]^T$

식 (11) 및 (12)를 대상으로 최적제어 이론을 바탕으로 최적 제어기를 설계하였다. 되먹임 상태 변수로서는 가동질량의 변위 z 와 선박의 횡동요 각 ϕ 로 가정하였다. MATLAB[®]에서 제공하고 있는 'kalman' 함수를 이용하여 estimator를 설계하고, 'lqr' 함수를 이용하여 linear quadratic regulator

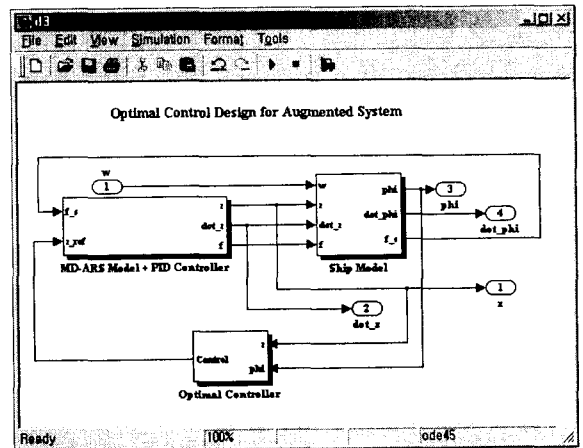


Fig. 3 Block Diagram for Control Design of the Augmented System

를 설계하였다. 또한 'lqgreg' 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/s 에서 감쇠비가 약 75배 정도 증가했음을 확인할 수 있다.

3.3 수치실험(I)

설계한 횡동요 제어기의 성능을 검증하기 위해 외력으로서 해양파에 의한 강제 모멘트 w 를 생성하였다. 일반적으로 해양파의 스펙트럼은 $0.05 \sim 0.2\text{Hz}$ 의 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 $0.2 \sim 0.8\text{Hz}$ 에 있는 것으로 가정하였다. Fig.4에 보인바와 같이

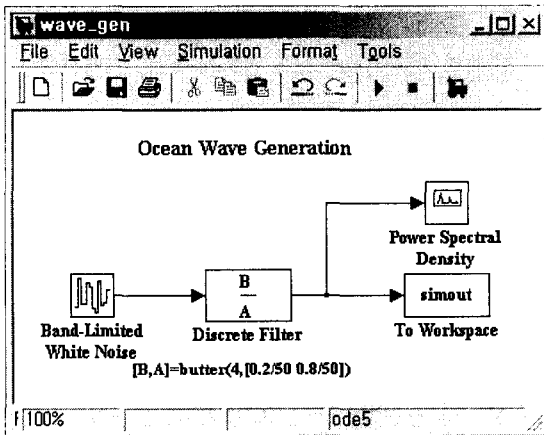


Fig. 4 SIMULINK Model for Wave Generation

SIMULINK®에서 제공하고 있는 'White Noise' 함수와 'Discrete Filter' 함수를 사용하여 필요한 해양파에 의한 강제 모멘트를 구현하였다. 이로부터 생성된 강제모멘트는 Fig.5에 보이고 있다.

생성된 강제모멘트를 선박 모델에 입력하여 설계한 제어기(위치 및 횡동요 제어기)의 성능을 조사하였다. Fig.6은 제어기가 포함된 MD-ARS가 설치될 경우와 설치되지 않은 경우의 선박의 횡동요 응답을 비교하고 있다. 수치실험은 10ms간격으로 40초간 수행되었다. Fig.6에서 보듯이 MD-ARS의 설치로 인하여 대상 선박의 횡동요 응답이 1/3수준으로 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다. 반면 MD-ARS의 가동질량의 변위를 살펴보면 최대 약 2m까지 움직이는 것을 알 수 있는데, 이는 실제 상황에서는 허용할 수 없는 현상이다. 따라서 과도한 응답을 줄이기 위한 방안을 마련해야 한다.

3.4 Anti-Windup 제어기 설계

가동 질량의 과도한 응답을 줄이고 장비를 보호하기 위해 횡동요 제어기의 출력(z_{ref})에 비선형 제

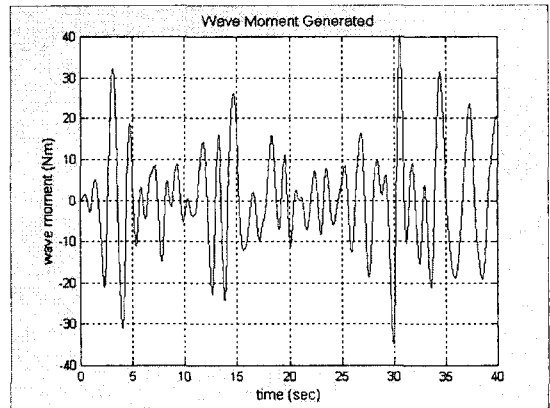


Fig. 5 Exciting Wave Moment Generated

Table 2 Natural Frequencies and Damping Ratios

Without Controller		With Controller	
Natural Frequency [rad/s]	Damping	Natural Frequency [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

한조건(nonlinear constraint)을 적용하였다. 제시된 제한조건은 다음과 같다.

$$z_{ref} = \begin{cases} 0.05 & \text{when } z_{ref} > 0.05 \\ z_{ref} & \text{when } -0.05 \leq z_{ref} \leq 0.05 \\ -0.05 & \text{when } z_{ref} < -0.05 \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)을 적용하였을 때의 응답을 조사하기 위해 수치실험을 수행하여 결과를 Fig.7에 보였다. 제한조건을 적용할 경우 제어효과는 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이런 현상을 최대한 줄이기 위해 anti-windup 제어방법들이 제안되고 있다.

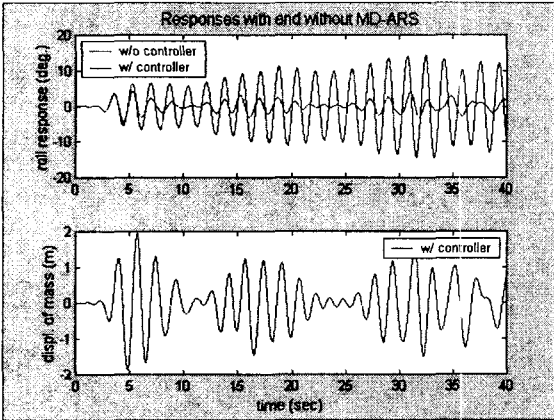


Fig. 6 Ship Responses and Mass Displacement

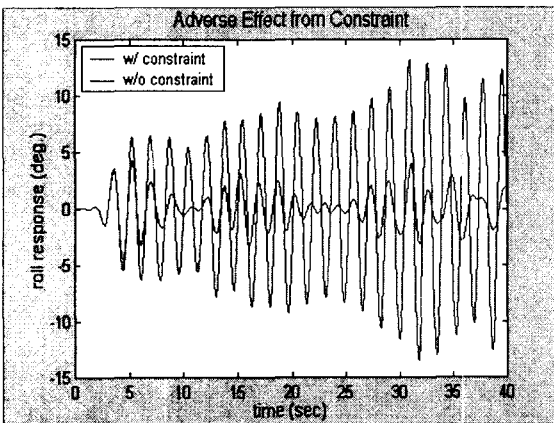


Fig.7 Adverse Effect from Nonlinear Constraint

본 연구에서는 참고문헌[7]이 제안한 방법을 사용하여 anti-windup 제어를 설계하였다.

설계한 횡동요 제어기 K의 minimal realization은 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$K = \left[\begin{array}{c|c} A_{con} & B_{con} \\ \hline C_{con} & D_{con} \end{array} \right] \quad (14)$$

식 (14)를 left coprime factorization하면 다음과 같다.

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

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

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

F: free parameter

Anti-windup 제어기는 Fig.8과 같이 구성되며, 설계인자인 F는 아래의 Riccati 식 (16)으로부터 positive definite 행렬인 P를 구한 후 식 (17)로부터 산정된다.

$$A_{con}P + PA_{con}^T - \frac{1}{\gamma^2} PC_{con}^T C_{con}P + B_{con}B_{con}^T + \delta I = 0, \quad \delta > 0 \quad (16)$$

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

v=0.1일 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.

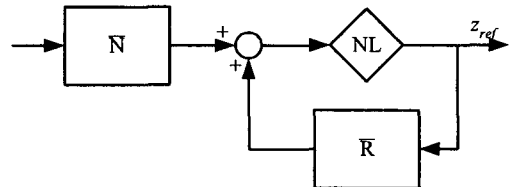


Fig. 8 Left Coprime Factorization with Nonlinear Constraint

3.5 수치 실험 (II)

설계한 anti-windup 제어기의 성능을 조사하기 위해 3.3절에서 수행한 수치실험을 다시 수행하였다. Fig.9는 선박의 횡동요 각과 가동질량의 변위를 보여주고 있다. 제한조건이 없을 경우에 비해서는 제어효과가 크지 않으나, 이로 인하여 안정된 시스템을 구현할 수 있게 되었다. 또한 anti-windup 제어기의 성능은 만족스러운 정도의 수준은 아니며, 좀더 심도있는 연구가 수행됨으로써 향상된 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 지속적인 연구를 진행할 예정으로 있음을 밝혀둔다.

4. 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 제어루프로써 PID 제어기법을 사용하였으며, 선박의 횡동요 응답을 기반으로 최적제어 방법을 사용하여 외부 제어루프를 설계하였다. 또한 MD-ARS의 wind-up 현상을 방지하기 위해 anti-windup을 위한 제어로직을 제시하였다. 설계된 제어로직을 이용하여 소형 모형선박을 대상으로 수치실험을 수행한 결과 양호한 제어결과를 얻을 수 있었다.

추후 본 연구에서 얻은 결과를 이용하여 소형 선박용 MD-ARS에 적용하고 성능시험을 수행할 예정이며, 실험이 성공적일 경우 실용화/상용화를 위한 연구를 수행할 계획으로 있다.

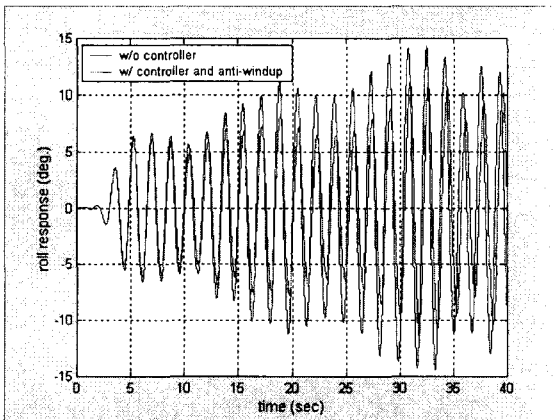


Fig. 9 Roll Response with Anti-Windup

후 기

본 연구는 과학기술부 민·군겸용 기술개발사업 중 "파랑중 수상선의 자세제어장비 기술개발 - Mass Driving ARS 설계기술 개발" 사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 이경중, 2002, "파랑중 수상선의 자세제어장비 기술개발", 민·군겸용기술개발사업 연구개발계획서, 한국해양연구원
- (2) 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 (in Japanese)
- (3) Tsukioka, S., Saeki, A., Miyabe, H., and Fujita, T., 1998, "Development and Sea Trial of a Hybrid Anti-Rolling System for R/V MIRAI", *Transaction on SNAJ*, Vol.184 (in Japanese)
- (4) Koike, Y., Yoshikai, K., Hiroshige, E., Tanida, K., and Mutagushi, M., 1994, "Study and At-Sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System (II)", *Transaction on SNAJ*, Vol.176 (in Japanese)
- (5) Oikawa, M., Koike, Y., Chatani, K., and Shigematsu, S., 1993, "Study and At-Sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System", *Transaction on SNAJ*, Vol.174 (in Japanese)
- (6) 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 (in Japanese)
- (7) 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