

선박안정성 향상을 위한 횡동요 방지 장치 개발에 관한 연구

김영복* · 이권순** · 김준효*** · 채규훈****

* 부경대학교 기계공학부 교수, **, 동아대학교 전기공학과 교수
*** 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수, **** 군산대학교 동력기계시스템전공 교수

A Study on Development of an Anti-Rolling System for the Ship Stability Improvement

YOUNG-BOK KIM* · KWON-SOON LEE** · JUN-HYO KIM*** · AND GYU-HOON CHAE****

* Faculty of Mechanical Eng., Pukyong National University, ** Dept. of Electrical Eng., Dong-A University
*** Division of Marine Eng., Mokpo National Maritime University
**** Division of Power Mechanical System Eng., Kunsan National University

요 약 : 선박 횡동요는 물적 손실을 초래할 뿐만 아니라, 승선자의 거주성, 안전성 및 작업능률을 저하시키는 가장 큰 요인이 된다. 횡동요 억제에 관한 많은 연구는 다양한 형태의 장치개발이라는 결과를 가져왔으며 상당한 효과를 얻고 있다. 지금까지 개발된 대부분의 장치는 그 성능을 고려하지 않더라도 특수한 목적의 선박을 대상으로 설치·운영되고 있으며, 고가이고 복잡하여 설치 상에도 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 선박의 선미측에 설치한 플랩을 이용하여 운항중인 선박의 횡동요 억제에 대해 고찰하고 있다. 본 장치는 중·소형의 선박에도 쉽게 설치하여 운용이 용이할 뿐만 아니라, 적절한 제어시스템 구축으로 피칭운동도 제어할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 이러한 장치를 설치한 선박에 대해 실험적 기법을 이용하여 모델링을 행하고 시뮬레이션을 통해 장치의 횡동요 억제효과를 검증하고 있다.

핵심용어 : 횡동요, 플랩, 횡동요 방지 장치, 외란, 스펙트럴 분석

ABSTRACT : We have investigated the usefulness of active stabilizing system to reduce ship rolling under disturbances, using varying reaction of the flaps. In the proposed anti-rolling system for a ship, the flaps as the actuator are installed on the stern to reject rolling motion induced by disturbances like wave. The action induced by flaps which depends on power of disturbances can take the ship balance. Especially, in this study we identify the controlled system under the undefined system structure using spectral analysis and experimental studies. Based on these informations, we design the controller to evaluate the usefulness of the proposed system.

KEY WORDS : Rolling, Flap, Anti-Rolling System, Disturbance, Spectral Analysis

1. 서 론

제어기술의 발달과 함께 진동이나 운동분야에서도 능동제어(active control)에 관한 활발한 연구개발이 진행되고 있다. 특히 선박 진동문제 중 하나인 횡동요는 심각한 물적, 인적 손실을 초래할 뿐만 아니라, 승선자의 거주성, 안정성 및 작업능률을 악화시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 횡동요 방지 시스템 설계를 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구 결과는, 가동 질량체(moving mass), 핀(fin), 탱크, 러더(rudder)를 이용하여 횡동요를 억제하기 위한 시스템으로 개발되어 상용화되고 있다(Tanida, 1988; Mibasi, 1989; Yamaguchi and Shinkai, 1991; Otaka, 1993; Koike, 1994; Koike, 1995; 김 등,

2000; 채와 김, 2003). 그러나 이러한 시스템에는 횡동요 억제능력을 갖고 있는 반면 많은 문제점도 내재되어 있다. 예를 들면 항행 시 주행저항이 증가하거나, 선박의 제어 성능 악화 및 시스템이 복잡해지는 등의 단점이 있다.

이에 대해 본 연구에서는 선미측에 설치한 플랩(flap)을 이용하여 선체의 흔들림을 억제하는 방법에 대해 고찰한다(Kang et. al., 2003). 이 장치에 있어서의 횡동요 억제 원리는 플랩을 적절하게 제어함으로써 발생하는 양력에 의해 선체의 횡동요를 억제하는 것이다. 근본적인 제어원리는 기존의 Fin-Stabilizer와 같다. Fin-Stabilizer는 선박 측면에 Fin을 부착하여 횡동요를 억제하는 것이므로 선저면의 장애에 의한 손상 위험이 높고, 선측으로 돌출된 Fin 때문에 어선의 경우 어로작업이 곤란하거나 그 이상의 불안정한 작업환경을 유도할 가능성이 대단히 높다. 그리고 장치설치 면에서도 많은 어려움이 존재한다. 이러한 문제점을 고려하여 본 연구에서는 (i) 설치, (ii)관리유지가 용이하고, (iii)선박 본래의 궁극적 목적

* 대표저자 : 정희원, kpjiwoo@pknu.ac.kr, 051)620-1584
** kslee@dau.ac.kr, 051)200-7739
*** 종신회원, kjh571@mmu.ac.kr, 061)240-7091
**** ghchae@kunsan.ac.kr, 063)469-1847

(상선: 안전한 화물이송, 어선: 안전하고 효율적인 어로작업 등)을 효과적으로 수행하기 위한 장치개발에 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 효과적인 횡동요 억제시스템 구축을 위해 시뮬레이션 및 실험을 통해 선박운동특성을 나타내는 미지 파라미터를 추정하였다. 추정된 파라미터를 이용하여 제어대상 선박에 대한 모델링을 수행하고 제어를 설계하였다. 그리고 횡동요 억제효과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 시스템 모델링

우선 Fig. 1의 선박횡동요에 대한 역학모델을 이용하여 횡동요 억제원리에 대해 설명한다.

먼저 파랑, 바람 등의 외적 요인에 의해 선박 횡동요가 발생하게 되면 선미측에 설치된 플랩운동에 의해 횡동요가 제어되는 원리이다.

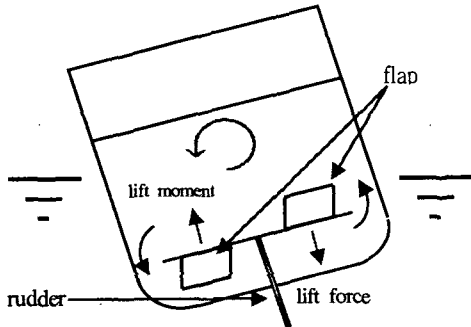
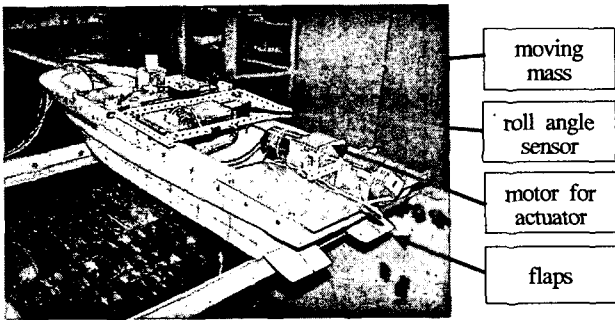
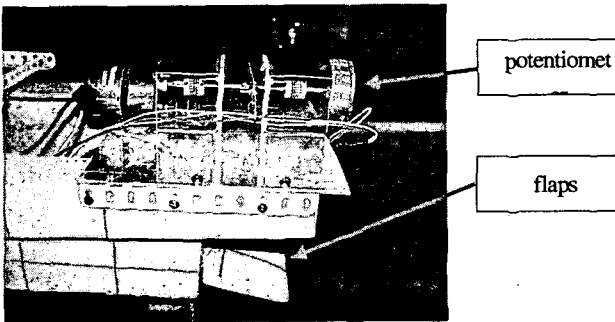


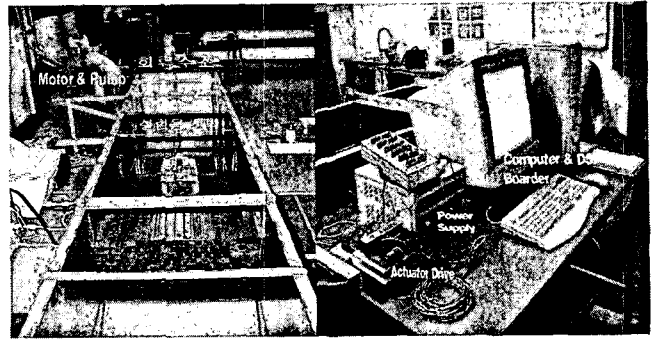
Fig. 1 Flap dynamic responses to the ship roll motion



(a) measurement and control equipments

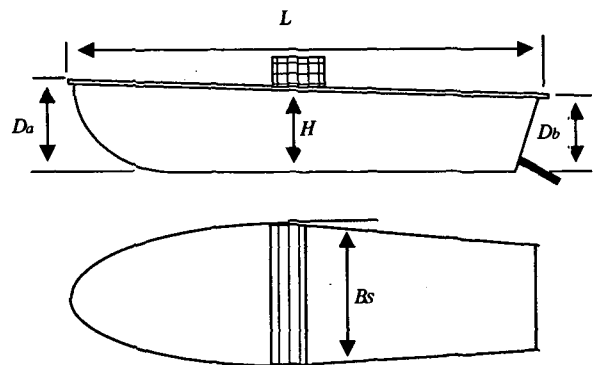


(b) actuator part



(c) overall system configuration

Fig. 2 Control system and experimental apparatus



- B_s [m] : 0.235
- D_a [m] : 0.125
- D_b [m] : 0.140
- H [m] : 0.095
- m_d [kg] : 0.0136
- L [m] : 0.815
- W [kgf] : 2.600

Fig. 3 The controlled ship

즉, Fig. 1에서 선박이 좌현방향으로 흔들릴 경우, 선미의 좌측 플랩을 아랫방향으로 내리게 되면 선박주행에 따라 플랩에 의해 저항이 증가하고 이러한 저항 증가는 선박 횡동요를 억제시킬 수 있는 회전력으로 작용하게 된다.

이와 같은 원리에 따라 Fig. 2와 같은 실험선을 제작하였다 (Kang et al., 2003). 본 연구에서는, Fig. 2와 같이 제작한 실험용 소형선박(축척비 1:15, 길이 0.75m, 폭 0.30m)을 제어 대상으로 하고 플랩을 이용한 능동제어방식으로 선체 흔들림을 억제하기 위한 제어계를 설계한다. 단, 본 논문에서는 실험에 의한 모델링과 시뮬레이션 결과에 대해서만 정리한다. Fig. 2(a)는 실험선의 전반적인 부분을 나타내고 있다. 그림에서 선미에 한 쌍의 플랩이 설치되어 있으며 이것은 모터에 의해 그 각도가 제어된다. 그리고 실험선에는 횡동요 각도를 계속하기 위한 각도센서(roll angle sensor)가 선상에 설치되어 있다. 또한 선상에 설치되어 있는 가동질량체(moving-mass)는 선박에 횡동요를 발생시키기 위한 것이다. 이것은 회류수조 내에서 실험을 수행해야 하는 제약 때문에 설치한 것으로 컴퓨터에

의해 그 이동범위와 속도가 제어되고 다양한 주파수 특성을 갖는 외란을 인가할 수 있다. 플랩운동을 제어하여 선박 횡동요를 억제하기 위한 액츄에이터부는 Fig. 2(b)에 상세하게 나타내었고, Fig. 2(c)는 회류수조 및 제어시스템을 나타낸 것이다.

그리고 실험용 선박의 제원은 Fig. 3에 나타내었다.

이와 같은 선박시스템에 대한 모델링은 복잡한 시스템 특성 및 비선형적 요소 때문에 선형모델을 구한다는 것은 상당히 어렵고 힘든 작업이다. 또한 어렵게 구한 모델은 제어계 설계에 상당한 부담이 되고 제어계를 설계하였다 하더라도 실험이 불가능하게 되는 경우가 빈번하다. 본 연구에서는 이러한 경험을 바탕으로 역학적 모델에 기초한 제어계 설계보다는 시스템의 구조가 불확실하다는 전제하에 시스템에 대한 입력과 출력신호특성을 분석하여 제어대상을 모델링하는 방법을 이용한다.

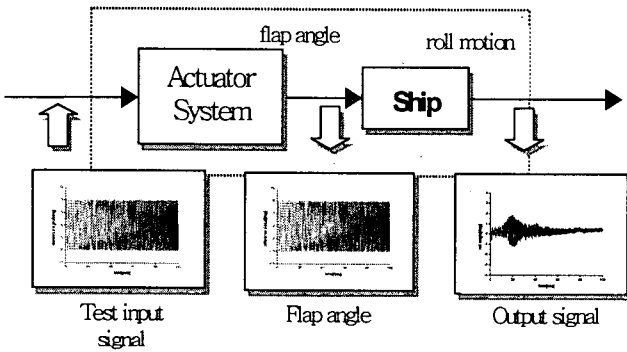


Fig. 4 System identification methodology

이를 위해 Fig. 4와 같이 액츄에이터부를 포함한 선박을 하나의 불확실한 제어대상으로 간주하고 적절한 신호를 인가하여 그 출력특성으로부터 시스템 동정(system identification) 작업을 수행하였다.

이때 시험신호는 Fig. 5와 같이 선박의 횡동요 특성을 고려하여 0.025~5[rad/sec] 범위에서 주파수를 변화시키면서 제어 대상에 인가하고 이 신호에 대한 선박의 횡동요 특성을 Fig. 6과 같이 얻었다. 이러한 실험은 선박주행속도를 변화시키면서 4회에 걸쳐 회류수조(Fig. 2(c)) 내에서 시행하였다.

이러한 실험결과를 통해 취득한 데이터를 스펙트럴 분석(spectral analysis)을 통해 주파수 응답을 각각 구하였다. 각각의 주파수 응답을 Fig. 7에서 점선 혹은 파선으로 나타내었다. 이 결과로부터 4차의 근사화 모델을 구하였고, 주파수 응답은 Fig. 7에서 실선으로 나타내었다.

액츄에이터부를 포함한 근사화 모델의 전달함수 $G(s)$ 는 다음식과 같다.

$$G(s) = \frac{145}{(s^2 + 19.55s + 145)} \cdot \frac{(0.0099s^3 + 0.1671s^2 + 0.9846s + 0.1075)}{(s^4 + 0.108s^3 + 7.668s^2 + 0.2006s + 8.5410)} \quad (1)$$

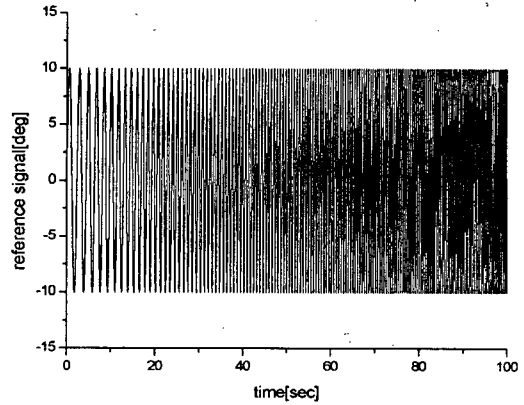


Fig. 5 Test input signal(0.025~5[rad/sec])

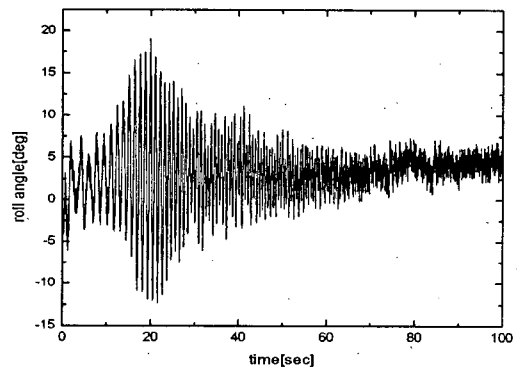


Fig. 6 A rolling motion induced by the flap

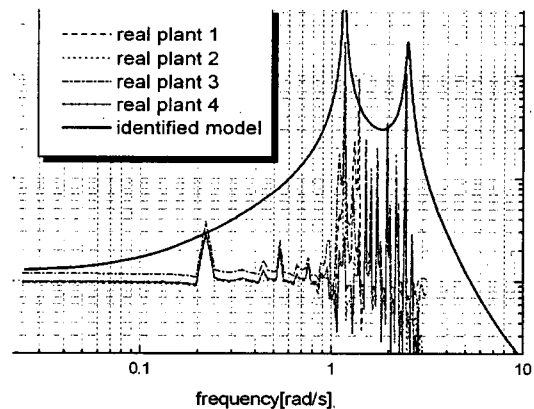


Fig. 7 Frequency responses of model and real plants

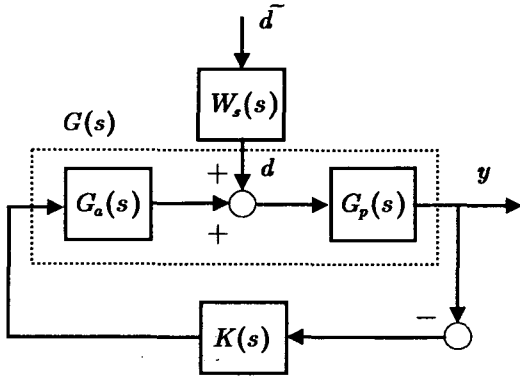


Fig. 8 Disturbance rejection problem

3. 제어기의 설계

2장에서는 제어대상인 선박시스템의 구조가 불확실하다는 가정하에 시스템 동정법을 이용하여 모델링을 행하였다. 그 결과로부터 역추에이터를 포함한 선박 전체시스템을 식(1)과 같이 표현하였다.

식(1)로 표현되는 제어대상에 대한 제어기는 강인제어(robust control)기법을 이용하여 설계한다. 즉, 파랑 등의 외란에 대한 선박의 횡동요를 최대한 억제하도록 하는 제어계를 구성한다. 이 문제는 Fig. 8과 같이 설정할 수 있으며, Fig. 8에서 $G_a(s)$ 는 역추에이터부를 나타내며, $G_p(s)$ 는 제어대상인 선박에 대한 전달함수를 나타낸다.

그리고, $W_s(s)$ 는 파랑 등의 외란특성을 고려하여 제어계를 설계하기 위해 도입된 일종의 필터이다. Fig. 7의 주파수 응답을 고찰해 보면, 1~3[rad/sec]에서 공진모드가 존재하므로 이 영역에서의 이득값을 저하시키도록 제어기를 설계하는 것이 바람직하다.

따라서 스펙트럴 밀도가 1~3[rad/sec]영역에 집중되는 외란에 대해 d 에서 y 까지의 페루프 이득(RMS 이득)이 1이하가 되도록 제어계를 설계한다.

우선 외란 d 를 식(2)와 같이 나타낸다. 특히 외란 d 는 모든 에너지가 0~5[rad/sec] 주파수 영역에 집중되어 있도록 한다.

$$d(s) = W_s(s)\tilde{d}(s) \quad (2)$$

이것으로부터 $W_s(s)$ 는

$$W_s(s) = \frac{0.0204s^2 + 5.0703s + 197.6176}{s^2 + 4.0360s + 15.3730} \quad (3)$$

와 같이 정의하였고 주파수 응답은 Fig. 9에 나타낸다.

Fig. 8에서 외란 $\tilde{d}(s)$ 에서 출력신호 y 까지의 페루프 전달함수를 SW_s 로 나타내면 S 는

$$S := G_a(I + G_p G_a K)^{-1} \quad (4)$$

와 같이 정의된다.

본 연구에서의 제어계 설계목적은 외란의 효과적 억제이며 이 문제는 다음의 조건을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 설계하는 문제와 동가이다.

$$|SW_s|_{\infty} < 1. \quad (5)$$

이러한 관계로부터 Matlab Tool을 이용하면 페루프 시스템을 안정화 시키고 외란에 대해 강인성을 갖는 제어기는 다음과 같이 구해진다.

$$K(s) = \frac{N_k}{D_k} \quad (6)$$

이때,

$$\begin{aligned} N_k &= 3.876096 \times 10^6 s^9 + 1.055919 \\ &\quad \times 10^9 s^8 + 6.151632 \times 10^{10} s^7 + 1.141441 \times 10^{12} s^6 \\ &\quad + 1.041922 \times 10^{13} s^5 \\ &\quad + 4.283076 \times 10^{13} s^4 + 1.342071 \times 10^{14} s^3 \\ &\quad + 1.678835 \times 10^{14} s^2 + 3.377894 \times 10^{14} s \\ &\quad + 1.026686 \times 10^{15} \\ D_k &= s^{10} + 5.256928 \times 10^2 s^9 + 1.156028 \times 10^5 s^8 \\ &\quad + 1.474728 \times 10^7 s^7 + 1.120096 \times 10^9 s^6 \\ &\quad + 4.076643 \times 10^{10} s^5 + 5.982370 \times 10^{11} s^4 \\ &\quad + 4.397993 \times 10^{12} s^3 + 1.532745 \times 10^{13} s^2 \\ &\quad + 3.292873 \times 10^{13} s + 3.480140 \times 10^{12} \end{aligned} \quad (7)$$

이다.

이 결과로부터 페루프계의 주파수응답특성 개선정도를 평가하도록 한다. Fig. 10에서 파선은 개루프계의 주파수 응답을 나타내고 있으며 실선은 페루프계의 주파수 응답을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 외란억제성능이 크게 개선될 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

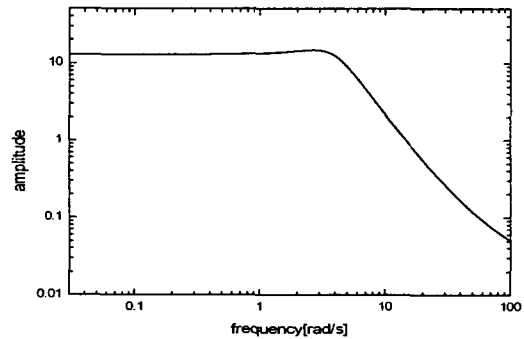


Fig. 9 Frequency response of disturbance shaping filter

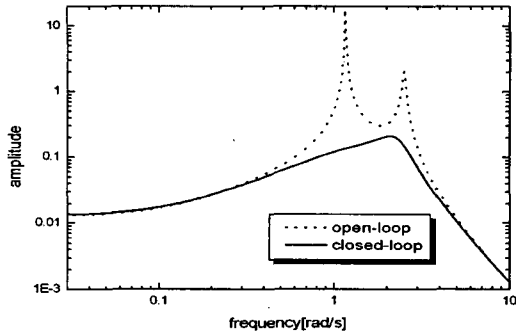


Fig. 10 Frequency responses of the open(uncontrolled case) and closed-loop(controlled case) system

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하고 실험을 통해 액츄에이터를 포함한 전체시스템의 근사화 모델을 구하였다. 이렇게 구한 모델에 대해 파랑 및 바람 등의 외란이 존재하는 경우에 있어서도 제어계의 안정성 확보 및 외란억제성능을 갖도록 하는 제어기를 설계하였다. 본 장에서는 시뮬레이션을 통해 설계된 제어계의 외란억제성능을 평가하도록 한다.

시뮬레이션은 외란이 존재할 경우에 있어서 제어를 행할 때와 그렇지 않을 때의 결과를 비교한 것이다.

먼저 Fig. 11과 Fig. 12는 1~2.5[rad/sec]의 주파수 특성을 갖는 외란이 인가될 때의 횡동요 응답을 나타내고 있다. Fig. 7에 나타낸 개루프 및 폐루프계의 주파수 응답에서 알 수 있듯이 실험선박의 공진영역이 1~3[rad/sec]에 있으므로 이 영역에서 에너지를 갖는 외란에 대한 제어성능을 평가하는 것은 당연하다. 외란인가는 실험상황을 고려한 것으로, 실험용 선박의 상부에 설치되어 있는 가동질량체를 운동시킴으로써 횡동요를 강제적으로 발생시킬 수 있다. 즉, 가동질량체를 선체 중심으로부터 ± 0.1 m 범위내에서 적절한 주파수(이동속도)로 운동시킬 때의 경우에 해당된다. 이때 본 실험장치의 가동질량체 질량은 0.0136kg이다. 이러한 조건에서의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있는 Fig. 11과 Fig. 12에서 파선은 외란발생장치인 가동질량체의 운동[이동거리 cm]을 나타내고 있다. 점선은 이러한 외란에 대한 횡동요를 억제하기 위한 플랩운동[deg]을 나타내며, 실선은 선체 흔들림 정도[deg]를 나타내고 있다. 제어를 행할 경우인 Fig. 12에서 알 수 있듯이 외란억제성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 그리고, 보다 일반적인 상황을 고려하여 외란이 0.01~5[rad/sec] 주파수 영역에서 에너지를 갖는 경우에 대해 고찰해 본다. 이러한 외란에 대한 응답특성을 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 위의 경우와 마찬가지로 제어를 행하지 않는 Fig. 13의 경우에는 선박이 심하게 흔들리고 있다(실선). 그러나 플랩을 적절하게 제어함으로써 외란에 적극적으로 대처하고 있는 Fig. 14의 경우에는 선체 흔들림이 현저하게 줄어들어 외란억제성능이 크게 개선되었음을 알 수 있다.

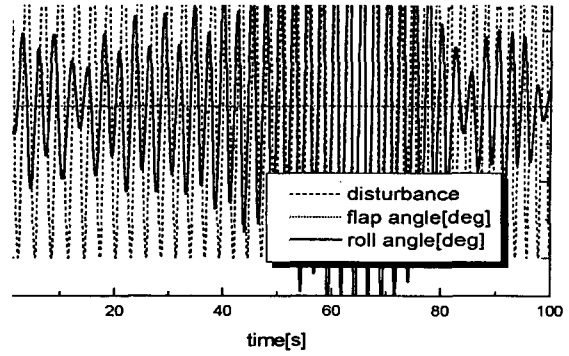


Fig. 11 Roll motion to the disturbance input(uncontrolled case, the disturbance frequency varies 1[rad/sec] to 2.5[rad/sec]

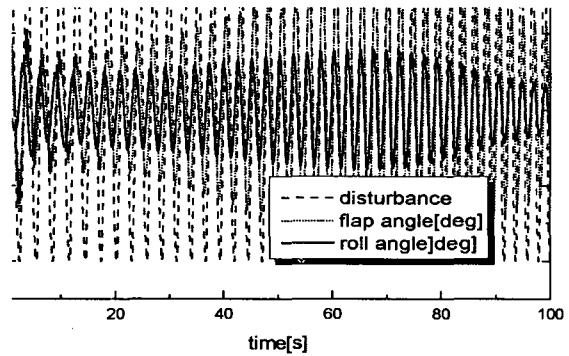


Fig. 12 Disturbance rejection property(controlled case, the disturbance frequency varies 1[rad/sec] to 2.5[rad/sec]

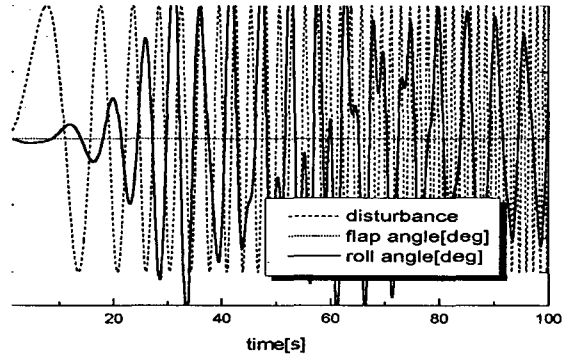


Fig. 13 Roll motion to the disturbance input(uncontrolled case, the disturbance frequency varies 0.01[rad/sec] to 5[rad/sec]

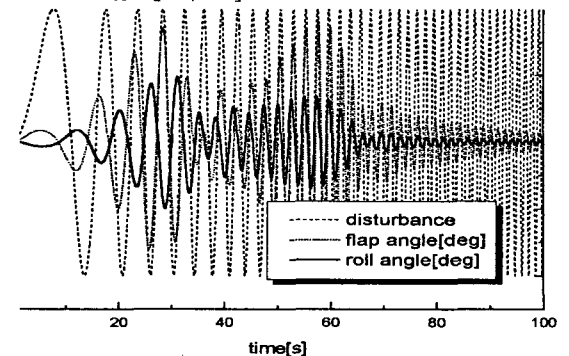


Fig. 14 Disturbance rejection property(controlled case, the disturbance frequency varies 0.01[rad/sec] to 5[rad/sec]

5. 결 론

본 연구에서는 선미측에 설치한 플랩을 능동적으로 제어함으로써 선체 흔들림을 억제하는 방법에 대해 고찰하였다. 특히 장치설치와 관리유지가 용이하고, 선박 본래의 궁극적 목적인 안전한 화물이송 및 안전하고 효율적인 어로작업 등을 효과적으로 수행하기 위한 장치개발에 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 본 장치는 Fin-Stabilizer와 같은 맥락의 장치로 생각할 수 있으나, Fin-Stabilizer가 갖는 설치상 및 운용상의 문제 등을 적극적으로 해결할 수 있다. 그리고 이 장치의 횡동요 억제 효과와 유용성을 확인하기 위해 실험을 통해 선박시스템의 모델링을 행하고 시뮬레이션으로 그 유용성을 확인하였다. 차후 실험을 통해 시뮬레이션 고찰에 대한 검증과 실현성에 대한 평가를 수행하고자 한다.

본 연구에서 고려하고 있는 장치는 횡동요 뿐 만 아니라 pitching 운동도 제어할 수 있는 제어능력을 갖고 있다. 이와 같은 유효한 특성은

- 1) 플랩의 크기 및 형상에 따른 응답특성 평가
- 2) 저항특성을 개선할 수 있는 플랩형상 결정
- 3) 선박운용 시스템특성을 고려한 액츄에이터부의 재설계 등에 의한 심도 있는 고찰을 통해 재검증 되어야 할 것으로 본다.

후 기

본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구(R01-2005-000-10418-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 김영복, 변정환, 양주호(2000), 선체 횡동요 방지 장치 개발을 위한 실험적 연구, 한국해양공학회지, 제14권 제4호, pp.43-48.
- [2] 채규훈, 김영복(2003), LMI를 이용한 선박 횡동요 제어에 관한 실험적 연구, 한국해양공학회지, 제17권 2호, pp. 60-67.
- [3] Kang G. B., G. H. Chae and Y. B. Kim(2003), A Study on System Identification and Anti-Rolling System Design for a Ship with the Flaps, Proceedings of the 42th SICE Annual Conference, pp.318-323.
- [4] Koike, Y.(1994), Study and At-sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System, Journal of the SNAJ, No 174, pp.137-143.
- [5] Koike, Y.(1995), Application of Hybrid Anti-Rolling System to Actual Ship, Technical Reviews of IHI, Vol 35, No 6, pp.395-399.
- [6] Mibasi, K.(1989), Vibration Absorber for Marine Machinery Machinery, Mitsui Zosen Giho, No 138, pp.33-40.
- [7] Otaka, K.(1993), The Research Trends of Ship Vibration, Techno Marine, No 764, pp.127-130.
- [8] Tanida, K.(1988), Active Vibration Absorber, Techno Marine, No 707, pp.283-290.
- [9] Yamaguchi, S. and Shinkai, A.(1991), On Activating and Optimizing Procedures of a Fluid Tank System for Ship Stabilization, Journal of the SNAJ, No 171, pp. 125-131.

원고접수일 : 2005년 05월 16일
 원고채택일 : 2005년 06월 24일