

석사학위논문

돛이 소형선박의
횡동요에 미치는 영향



제주대학교 산업대학원

어업학과

김상범

2008年 7月

돛이 소형선박의 횡동요에 미치는 영향

지도교수 안 장 영

김 상 범

이 논문을 수산학 석사학위 논문으로 제출함

2008년 7월

김상범의 수산학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____인

위 원 _____인

위 원 _____인

제주대학교 산업대학원

2008년 7월

The Influence of Sail on the Rolling motion of Small ship

Sang-Beum Kim

(Supervised by Jang-Young Ahn)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER
OF FISHERIES SCIENCE

DEPARTMENT OF FISHERIES SCIENCE
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2008. 7

목 차

| | |
|------------------------------|----|
| List of Figures | ii |
| List of Tables | iv |
| Summary | v |
| I. 서 론 | 1 |
| II. 뜻을 이용한 횡요감요의 이론 | 4 |
| III. 장치 및 방법 | 11 |
| 3.1 시험선 선정 | 11 |
| 3.2 뜻의 제원 및 설치 | 13 |
| 3.3 시험선의 횡동요 경사각 측정 장치 | 15 |
| 3.4 측정방법 및 분석방법 | 19 |
| IV. 결과 및 고찰 | 21 |
| 4.1 시험선의 횡동요 경사각 변화 | 21 |
| 4.2 Rayleigh 확률밀도함수 분석 | 29 |
| 4.3 상대누적분포에 의한 감쇠효율 분석 | 33 |
| 4.4 선속의 평균값 비교 | 39 |
| VI. 요약 | 42 |
| 참고문헌 | 44 |
| 감사의 글 | 46 |

List of Figures

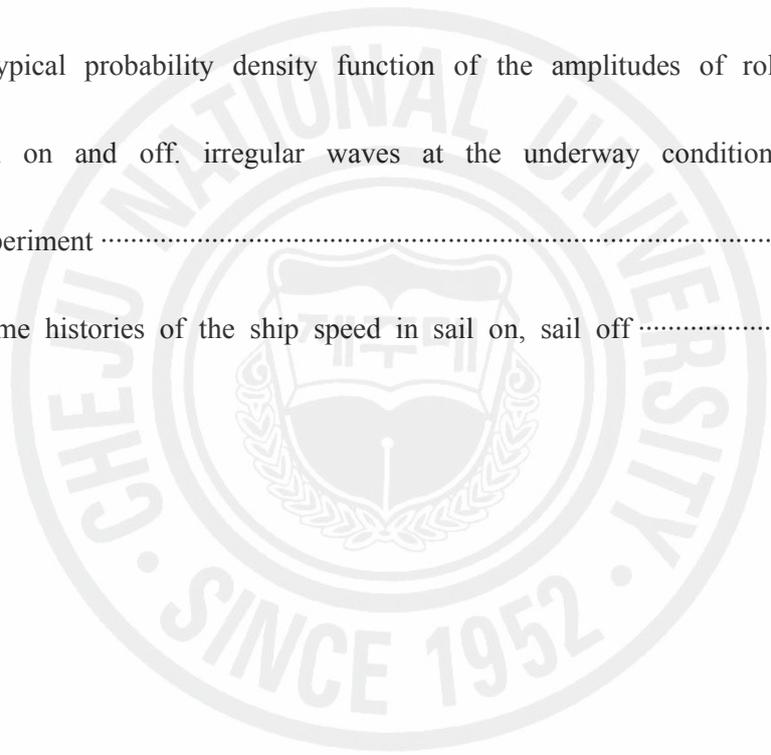
| | |
|--|----|
| Fig. 1. Basic concept of the sail system for small ship | 5 |
| Fig. 2. Co-ordinate of sail on board | 8 |
| Fig. 3. General arrangement of a experimental ship(skiff boat) | 12 |
| Fig. 4. Configurations of sailing canvas of the experimental boat | 14 |
| Fig. 5. Block diagram for measuring of angle of rolling and pitching, heading | 18 |
| Fig. 6. Sight of the sail equipped experimental boat | 20 |
| Fig. 7. Time histories of the amplitude of rolling angle in sail on and sail off. in irregular waves at the stop engine condition from first experiment | 22 |
| Fig. 8. Time histories of the amplitude of rolling angle in sail on and sail off. in irregular waves at the stop engine condition from second experiment | 24 |
| Fig. 9. Time histories of the amplitude of rolling angle in sail on and sail off. in irregular waves at the underway condition from first experiment | 26 |
| Fig. 10. Time histories of the amplitude of rolling angle in sail on and sail off. in irregular waves at the underway condition from second experiment | 28 |
| Fig. 11. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. irregular waves at the stop engine condition from first experiment | 30 |

Fig. 12. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. irregular waves at the stop engine condition from second experiment 31

Fig. 13. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. irregular waves at the underway condition from first experiment 32

Fig. 14. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. irregular waves at the underway condition from second experiment 33

Fig. 15. Time histories of the ship speed in sail on, sail off 40



List of Tables

| | |
|--|----|
| Table 1. Principal dimensions of the experimental boat | 13 |
| Table 2. Specification of sail | 14 |
| Table 3. Specification of magnetic compass | 16 |
| Table 4. Specification of GPS receiver and antenna | 17 |
| Table 5. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the stop engine condition from the first experiment | 34 |
| Table 6. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the stop engine condition from the second experiment | 35 |
| Table 7. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the underway condition from the first experiment | 37 |
| Table 8. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the underway condition from the second experiment | 38 |
| Table 9. Analysis Results | 41 |

Summary

In this paper, to examine the efficiency of the diminution of rolling of a vessel, we installed the proposed sail on a skiff boat, which is a support vessel to 'ARA', Cheju National University's training ship. Eventually we summarize the analyzed results obtained from the vessel while stationary and while in sailing for two cases, the vessel with a sail and the vessel without a sail. The sea trial test was done in cheju outer harbor.

1. The average angle of rolling is 1.74° and 1.84° each case in first test. Second case 1.09° and 1.15° respectively. The significant angle of rolling ($\Phi_{1/3}$) is 3.25° and 3.42° each trial case in first test. Second case 2.04° and 2.18° respectively. From above the result, in each case rolling angle and significant rolling angle is larger when the ship has not the sail.
2. When the ship is cruising, the average angle of rolling is 1.99° (case 1) and 2.17° (case 2) in the first field test. In the second field test, the average angle of rolling is 1.06° and 1.17° for each case respectively. The significant angle of rolling is 3.78° (case 1) and 4.11° (case 2) in each case of the first field test. In the second field test, the significant angle of rolling is 1.99° (case 1) and 2.20° (case 2) for each case. This case shows the same tendency exhibited by a stationary ship.
3. The area of Rayleigh's probability density function is larger than 0.011 and 0.019 in the first test and larger than 0.012 and 0.034 in the second case

without sail while cruising and while stationary. So, if the wave is high the area will increase.

4. In this case we consider a stationary skiff boat with sail; the efficiency of diminution is 4.57% and 4.07% in the stationary ship in each sea trial test. When the ship is cruising, the efficiency of diminution is 6.97% and 8.12% in each case. Consequently, the efficiency of diminution is higher when the ship is cruising.
5. While cruising, a ship with sail averages a speed of 5.46 knots and a ship without sail average a speed of 5.38knots. In this case, the ship with sail is faster by 0.08knots than without sail.

From above the result, the designed sail can act on diminution of rolling of ship on the irregular wave. If the sail is made of a controllable shape, the sail can control drag and lift. So this sail can use green-energy.

Based on this research, we can design a small ship with an inexpensive anti-rolling system and bring about a reduction in oil consumption. This designed sail combined with the sea anchor used on hand-line fishing boat can be useful while maintaining course.

I. 서 론

최근 유가가 200달러 시대로 들어설 것이란 말이 현실로 되어가고 있다. 유류 가격이 상승하면 경제 전반에 걸쳐 많은 영향을 주겠지만 그 중에서도 운송업이나 해상업에 종사하는 이들에게는 적지 않은 영향을 줄 것으로 본다. 이 문제에 대한 해결책은 소비에너지를 줄이는 노력과 함께 풍력, 태양에너지, 파력, 조력, 해류 등의 대체에너지를 개발하여 사용함으로써 석유에너지에 대한 의존도를 줄여 가는 것이 최선이라 생각된다.

19세기 이전 선박의 추진력은 주로 인력과 풍력에 의존하였기 때문에 깨끗한 에너지를 사용하였으나, 산업혁명 이후 현재에 이르기까지는 증기기관, 내연기관(디젤기관) 등이 발명되어 석유에너지가 그 동력원이 되어 왔다.

선박의 동력 에너지로서의 Green-Energy 사용은, 1980년대 오일쇼크의 영향 때문에 일시적으로 풍력을 보조 발전력으로 하는 범장선, 범장상선, 범장어선이 개발되기도 하였고 이에 관한 연구(Yoshimura et al., 2003)도 진행된 바 있다. 그러나 이들 장치는 초기투자 비용이 너무 높을 뿐 아니라 유지관리비도 대단히 비싸서 원유를 사용하는 것보다 결과적으로 비용절감의 효과를 얻을 수 없었기 때문에 범용화 되지 못하였고 연구·개발에도 소외되었다고 볼 수 있다. 그러나 현재와 같은 고유가 시대에는 경제적인 면에서도 범장선의 이용이 보다 효율적이고 경쟁력도 있다고 판단됨으로써 이에 대한 연구의 필요성이 다시 부각되고 있다.

선박은 파랑이 항상 존재하는 해상에서 운항됨으로써, 파랑 중의 선박의 운동도 파도의 불규칙성으로 인하여 불규칙적인 운동을 하게 된다. 이러한 선박의 운동은 승객, 승무원, 화물 및 선박 자체의 안전에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 해상에서의 각종 조업활동의 정확도와도 긴밀한 관계를 가지고 있다. 그러므로 선박에 있어서 동요의 제어는 승무원의 거주성 개선, 탑재화물의 안전 확보, 해상작업의 수월성 등의 면에서 매우 중요하다. 선박의 횡동요 감소장치는 일반적으로 선체가 동요함에 따라 발생하는 모우멘트를 이용해서 동요를 감소시키는 것으로 제어방법에 따라 수동(Passive)형과 능동(Active)형으로 나누어진다.

현재까지 개발되어 있는 횡동요 저감장치로는 Anti-rolling tank, Fin stabilizer, 타 감쇠 장치 등이 있다(Yamaguchi et al., 1993 ; Kim, 2002). 이러한 장치들은 선박의 복원력으로 반대 측으로 되돌아가는 동안 탱크내의 물을 강제 이동시켜 선체의 반전 복원을 방지하는 것이어서 독립된 탱크가 필요하다. 그러나 소형어선에서는 공간이 협소하여 횡동요 저감장치용으로 별도의 탱크를 설치할 수 없으며, 또한 Fin stabilizer나 타 감쇠 장치처럼 정선 시나 저속항해 시에는 유효하게 작동되지 않는 것은 소형어선에 적용하기 어려워 소형선박용의 횡동요 저감시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다.

선체의 동요를 감소시킬 수 있는 방법으로는 여러 가지가 검토될 수 있으나, 기능적인 면과 공간적인 면은 물론이고 고가의 설치비용도 고려되어야 하기 때문에 소형어선에서는 적용하기가 대단히 어렵다. 더구나 대부분의 소형어선은 FRP(Fiber reinforced plastics)선이어서 강재선이나 목재선보다 선체중량이 상대적으로 가볍기 때문에 흘수가 작아짐으로써 횡동요가 심하게 되어 선박의 안정성에 많은 문제가 발생한다(Park, 2000). 따라서 승무원들에게는 이에 대한 개선이 절실히 요구된다고 하겠다.

또한, 근래에 들어 지구환경을 보존하면서 연료 소모량도 줄일 목적으로 대체 에너지인 풍력에너지를 이용하여 추진력을 향상시키는데 뜻을 많이 이용하고 있다. 그런데 돛의 장착은 선박의 추진력 향상만이 아닌 선박의 동요에도 영향을 미치는 등 부가적 기능도 있어서 이에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다. 돛의 장착에 따른 선박의 횡동요 감쇠효과에 대하여, 모형실험을 통한 연구보고로는 Masuyama et al.,(1992,1993)등이 있으나, 해상에서 실제의 선박을 이용하여 실험하고 분석한 연구는 보기 어렵고, 다만 경험적으로 감쇠효과가 있을 것이라는 추측만 있을 뿐이다.

이 연구는 제주도 주변해역에서 성행하고 있는 낚시어선에 승선하는 승객 및 승무원에게 승선감을 향상시키고, 또한 채낚기어선의 조업시 선수를 풍상측으로 고정시키면서 침로를 안정시키기 위한 시스템 연구의 기초 자료를 제공할 목적으로, 선박에 돛을 장착함에 따른 횡동요 감쇠효과를 이론적으로 검토하고, 이를 바탕으로 제주대학교 실습선인 아라호 선망작업 시 보조선으로 이용되는 스키프(Skiff)보트를 시험선으로 선정하여 기상상태가 양호한 날을 택해 해상실험을 행

하였다. 해상실험은 적절한 크기의 돛을 제작하여 실험선의 선미중앙부에 장착하였을 때와 장착하지 않았을 때, 그리고 실험선이 항주중일 때와 정지중일 때에 횡동요 변화를 측정하여 비교분석하였다(A. R. J. M. LLOYD, 1989).



II. 돛을 이용한 횡동요 감쇠 이론

돛의 공력(空力)특성은 공기의 흐름에 직각방향으로 움직이는 힘인 양력(Coefficient of Lift force : C_L)과 평행하게 작용하는 힘인 항력(Coefficient of Drag force)로 나누어지는데, Fig. 1은 기범선이 양각(Angle of attack) ϕ_α 로 항진중일 때 선체의 전후방향 C_X , 횡 방향 C_Y 의 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 정리할 수 있으며, 그리고 C_X Maximum point는 양력이 최대인 점에서 양각을 나타낸다 (Morwood, 1953).

$$C_X = C_L \sin \phi_\alpha - C_D \cos \phi_\alpha$$

$$C_Y = C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha$$

(1)

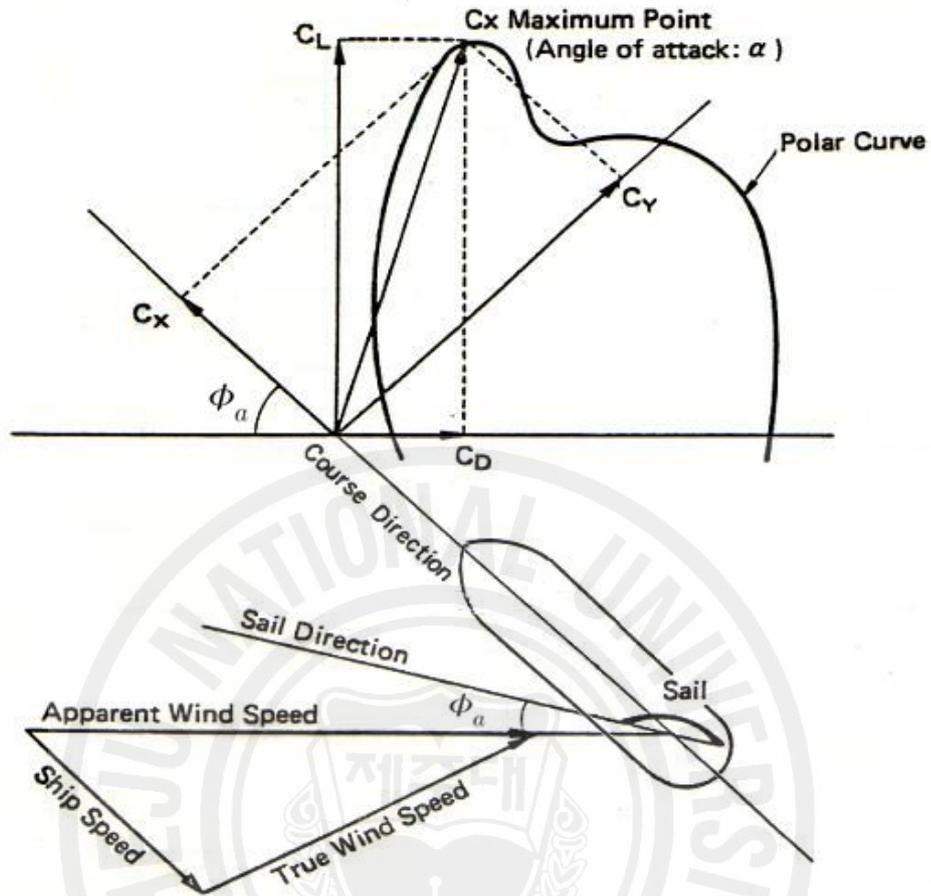


Fig. 1. Basic concept of the sail system for small ship

그리고 횡방향성분을 유 차원(有次元)으로 표현하면 식(2)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_S &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S \cdot C_Y \cdot U_\alpha^2 \\
 &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S \cdot U_\alpha^2 (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

A_S : 돛의 면적

U_α : 상대풍속

ρ_α : 공기 중의 밀도

선체가 횡동요할 경우 횡 경사각의 각속도를 $\dot{\phi}$, 돛의 힘이 작용하는 위치를 중심(重心) Z_s 에 있다고 가정하고 이때의 진 풍속을 U_{α_0} , 그 위치에서의 상대풍속 U_α 는 식(3)처럼 쓸 수 있다.

$$U_\alpha = U_{\alpha_0} - Z_s \dot{\phi} \quad (3)$$

이 때 돛으로 인해 발생하는 횡경사 모우멘트 K_s 는 식(4)처럼 나타낼 수 있으며, 여기서 절대값을 취하는 것은 물리적으로 고려해서 부(負) 감쇠력이라고 하는 운동이 일어난다고 생각했기 때문이다.

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S \cdot U_\alpha^2 (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) \cdot Z_s \\ &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S \cdot (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) \cdot Z_s \cdot (U_{\alpha_0} - Z_s \dot{\phi}) \cdot |U_{\alpha_0} - Z_s \dot{\phi}| \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $U_{\alpha_0} > Z_s \dot{\phi}$ 이므로 식(4)은 식(5)처럼 다시 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S \cdot U_\alpha (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) \cdot Z_s \\ &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S \cdot (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) \cdot Z_s \cdot (U_{\alpha_0} - Z_s \dot{\phi}) \cdot (U_{\alpha_0} - Z_s \dot{\phi}) \\ &= \frac{\rho_\alpha}{2} A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) \cdot Z_s \cdot (U_{\alpha_0}^2 - 2U_{\alpha_0} Z_s \dot{\phi} + Z_s^2 \dot{\phi}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

평수(平水) 중 동일한 모양의 파랑에서 직진상태로 기범선(機帆船)이 항진중일 때의 선체운동은 전후동요(surge : x축), 좌우동요(sway : y축), 선수동요(yawing : z축), 선회로 인한 횡경사 K_s 에 대해서 논의할 필요가 있으며, 또한 Fig. 2처럼

선박이 경사했을 때는 복원 모우멘트 = $W \cdot \overline{GZ} = m \cdot g \cdot \overline{GM} \sin\phi$ 이다.

선박의 횡동요를 수학적으로 간결하게 모델링하기 위해 몇 가지 가정을 하여 보면, 첫째 횡동요는 선박중심(重心)에 대해 발생하고 다른 자유도와의 연성(連成)효과는 무시하며, 둘째 횡동요 경사각은 미소하다는 것이다. 그리고 셋째는 선박에 작용하는 감쇠는 등가 점성 감쇠로 가정한다. 이러한 가정으로부터 선박의 횡동요를 1자유도계로 표현하면 식(6)처럼 정리할 수 있다(Yoshimura et al., 2003).

$$I_{xx}\ddot{\phi} = -J_{xxx}\dot{\phi} - k_1\dot{\phi} - k_2|\dot{\phi}|\dot{\phi} - m \cdot g \cdot \overline{GM}\phi + K_s \quad (6)$$

I_{xx} : 횡 경사축의 2차 관성모멘트

J_{xxx} : 횡 경사축의 2차부가 관성모멘트

k_1 : 선형 항 감쇠계수

k_2 : 비선형 항 감쇠계수

m : 질량

g : 중력가속도

ϕ : 횡 경사각

\overline{GM} : 횡 메타센터

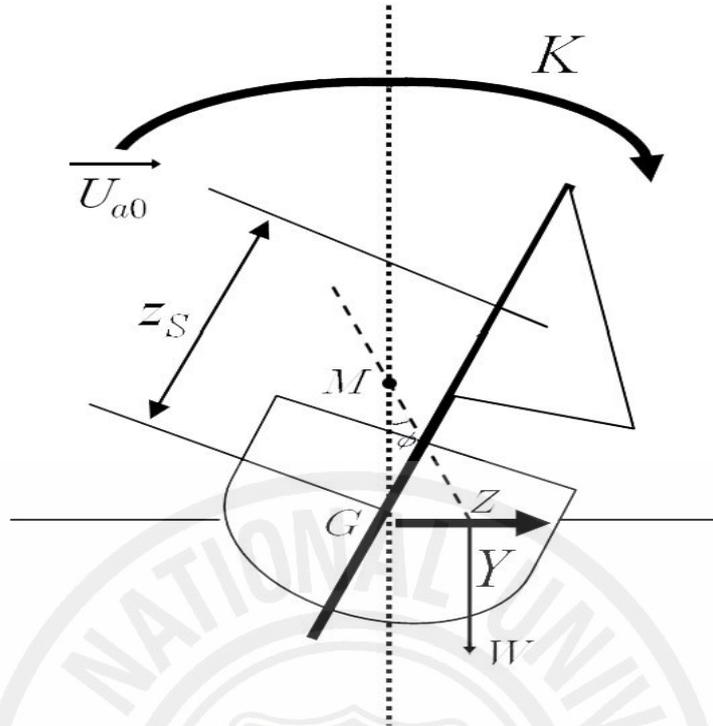


Fig. 2. Co-ordinate of sail on board.

여기서 식(5)식을 식(6) 대입하여 정리하면 식(7)처럼 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (I_{xx} + J_{xx})\ddot{\phi} + k_1\dot{\phi} + k_2\phi^2 + m \cdot g \cdot GM\phi \\
 = \frac{\rho_\alpha}{2} A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) \cdot Z_S \cdot (U_{a0}^2 - 2U_{a0}Z_S\dot{\phi} + Z_S^2\dot{\phi}^2)
 \end{aligned} \quad (7)$$

위 식의 k_1 는 순수한 횡동요 선형감쇠계수이며, k_2 는 2차 감쇠계수로 좌우동요 속도에 기인되는 계수로 나타내고 있다. 그리고 $\Delta k_1, \Delta k_2$ 만큼 증가하다면 식(7)을 식(8)처럼 표현할 수가 있다.

$$(I_{xx} + J_{xx})\ddot{\phi} + k_1\dot{\phi} + \Delta k_1\dot{\phi} + k_2|\dot{\phi}|\dot{\phi} + \Delta k_2\dot{\phi}^2 + \overline{GM}\Delta\phi = K_{s0} \quad (8)$$

여기에서 $\Delta k_1 = \rho A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) U_{a0} \cdot Z_s^2$

$$\Delta k_2 = -\frac{\rho}{2} A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) Z_s^3$$

$$K_{s0} = \frac{\rho}{2} A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) Z_s \cdot U_{a0}^2 \text{ 이다.}$$

그런데 k_1, k_2 감쇠계수와 *Froude*의 감요계수와의 관계는 식(9)과 같다.

$$a = \frac{1}{4} k_1 \frac{T_n}{I_{xx} + J_{xx}}$$

$$b = \frac{4}{3} k_2 \frac{1}{I_{xx} + J_{xx}} \quad (9)$$

a, b : 감요 계수

T_n : 선체 고유주기

따라서 뚝에 의한 감요계수의 증분 Δa 는 식(10)처럼 나타낼 수 있다.

$$\Delta a = \frac{1}{4} \Delta k_1 \frac{T_n}{I_{xx} + J_{xx}}$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{T_n}{I_{xx} + J_{xx}} \cdot \rho A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) U_{a0} \cdot Z_s^2 \quad (10)$$

즉 Δk_2 는 $U_{a0} > Z_s \dot{\phi}$ 의 영역에서는 $|\dot{\phi}|\dot{\phi}$ 이 없기 때문에 감쇠효과는 없게 되지만

$U_{a0} \simeq 0$ 의 영역에서는 $K_S = -\frac{\rho}{2} A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) Z_s^3 \cdot \dot{\phi} \dot{\phi}$ 이 되므로 Δb 는 식(11)처럼 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta b &= \frac{4}{3} \Delta k_2 \frac{1}{I_{xx} + J_{xx}} \\ &= \frac{2}{3} \frac{1}{I_{xx} + J_{xx}} \cdot \rho A_S (C_L \cos \phi_\alpha + C_D \sin \phi_\alpha) Z_s^3 \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 식(1)에서 식(11)를 통해 선박에 돛을 설치하므로 풍속 U_{a0} 가 크고 각속도 $\dot{\phi}$ 가 상대적으로 적은 범위에서는 a 계수가 증가되어 그 증분 Δa 는 범 면적과 풍속에 비례하여 크게 되며, Δa 는 선박의 고유주기에 비례하고 주기가 길수록 감요계수는 컸다. 그리고 $U_{a0} \simeq 0$ 의 범위 내에서는 감쇠효과는 횡동요 속도로 인해 돛 중심에 작용하는 힘이 증가하므로 b 계수가 크므로 수식을 통해서 감요효과가 있는 것을 규명할 수 있었다.

Ⅲ. 장치 및 방법

3.1 시험선 선정

시험선은 제주대학교 실습선인 아라호의 부속선으로, 선망작업 시 본선의 보조선으로 이용되는 스킵(Skiff)보트로 선정하였다. 이 시험선은 일반 소형어선과는 달리, 보통 선망조업이 시작되면 투망하는 그물의 한쪽 끝을 잡아 망어구가 수중에서 올바르게 둘러쳐지도록 도와주고, 양망시에는 둘러 쳐진 어망 밖으로 어군이 도망가는 것을 차단하는 역할을 하는 선박으로서, 일반배치도는 Fig. 3에 나타내었으며, 그 제원은 Table 1과 같다.



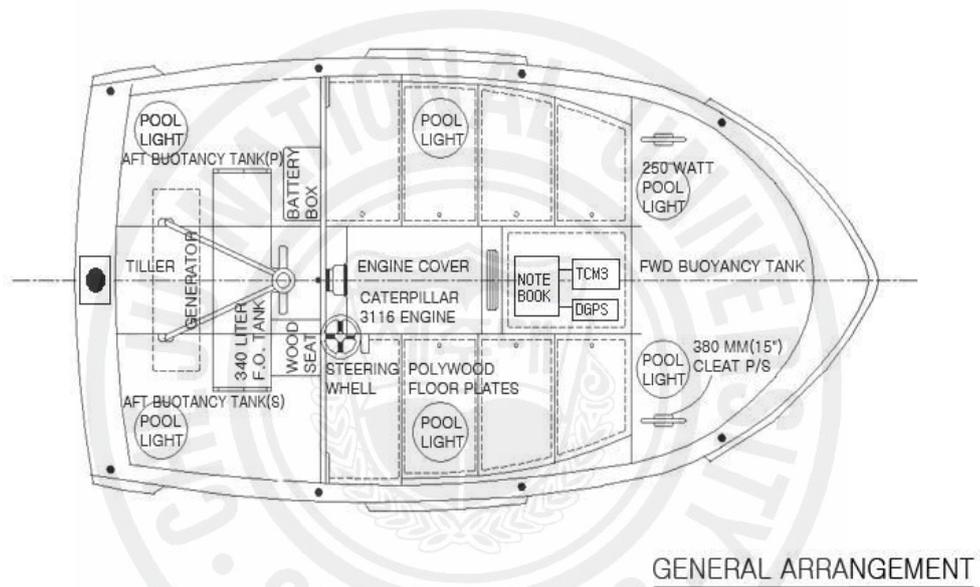
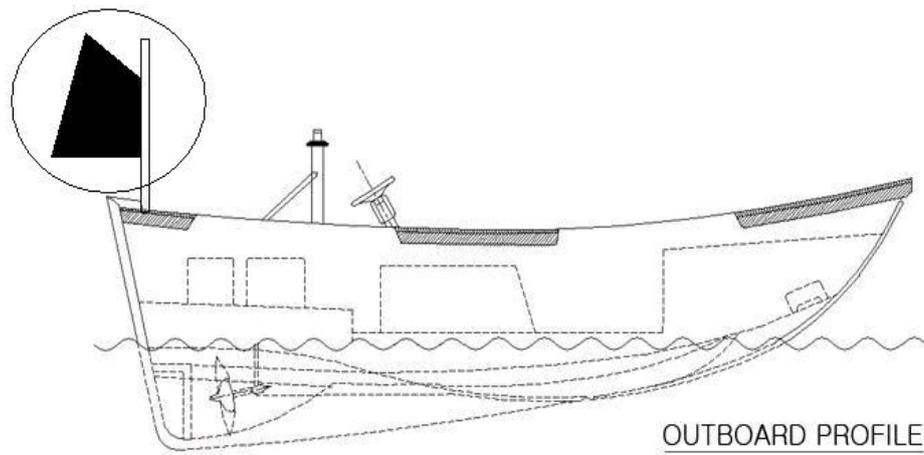


Fig. 3. General arrangement of a experimental ship(skiff boat).

Table 1. Principal dimensions of the experimental boat

| Item | Specification |
|---------------------------------|---|
| <p>Design conditions</p> | <p>Length over all (MLD) : 7.190m Beam (MLD) : 3.051m Depth (MLD) : 1.400m Freeboard : 0.914m Buoyancy : 4,770kg</p> |
| <p>Main engine</p> | <p>Two-cycle Power : 205HP Propeller : 3-bladed stainless steel Generator : 12.5Kw</p> |

3.2 돛의 제원 및 설치

실험에 사용한 돛은 추진 보조 장치의 역할과 더불어 횡동요 감쇠 역할도 동시에 하는 것으로 그 형태는 Fig. 4와 같다. 직삼각형의 정점을 잘라버린 변형 4각형으로 새가 날개를 펼치는 모양으로 두 장의 캔버스를 서로 봉합한 구조이며 일명 종범(縱帆) 또는 Spinnaker라고 한다. Fig. 4에서 주요부분은 돛의 정점을 나타내는 것을 Head, 풍 하측 전연(前緣)을 Luff라 하며, 그리고 후연(後緣)을 Leech, 폭 방향의 길이를 Foot(Chord)이라 각각 불리고 있다.

시험선에 사용한 돛의 재질은 주로 제주도 연안에서 채낚기 어선에 많이 사용하고 있는 물돛과 같은 Poly oxford재료이며, Spinnaker의 원래 목적은 이웃 일본에서는 어로작업 시 선수방향을 풍상 측으로 유지하기 위한 것이다. 그러나 이 연구에서는 돛의 원래기능보다 부가적인 횡동요 저감 효과 목적으로 이용하였다.

돛의 주요부분의 크기는 일본 북해도 하코다테(函館)항 주변해역에서 조업하는 20톤 미만의 어선 약 40척을 조사한 결과를 근거로 하여 배의 선체의 길이와 면적에 따른 비를 이용하여 설계하였으며 그 제원은 Table 2와 같다.

돛의 설치장소는 시험선의 선수·미 선상의 좌우중앙지점 Bulwark top plate에 설치하였으며 마스트와 붐은 직경이 각각 5.0cm, 3.5cm 원주강관을 사용했다. 본체는 실제적으로 어선에서 사용되고 있는 범장 장치의 구조와 동일하게 하였고 붐과 붐 사이의 간격은 약 85cm이었으며 펼쳐진 각은 약 18°를 유지하기 위하여 양쪽 끝은 줄로 고정하였다. 마스트와 붐에 대한 자세한 규격은 Table 2와 같다.

Table 2에서 종횡비(Aspect ratio)는 1.24이며 면적은 5.57m²이고 스킵보트와 돛의 일반배치도는 각각 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

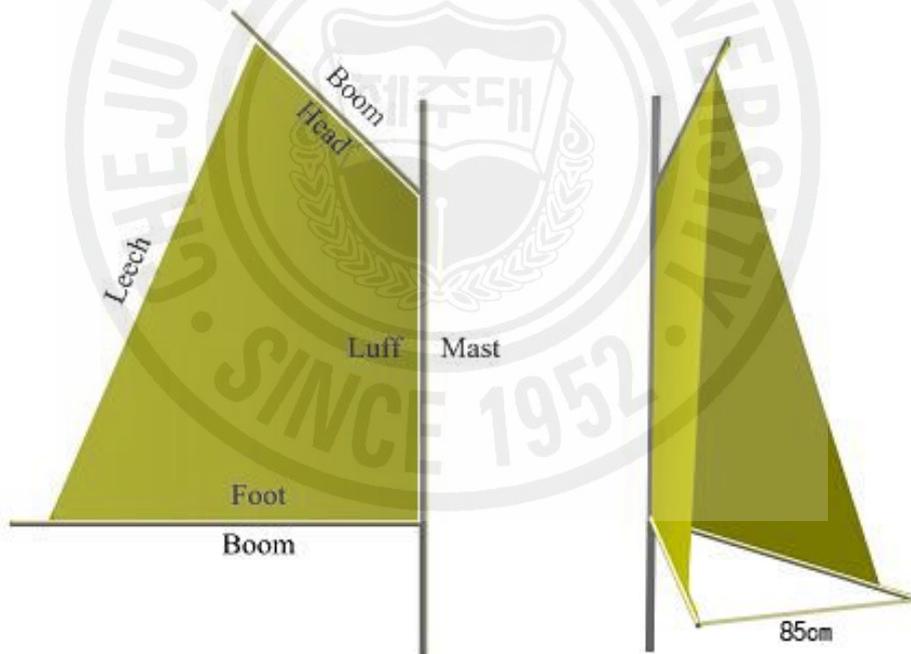


Fig. 4. Configurations of sailing canvas of the experimental boat

Table 2. Specification of sail

| Item | Specification |
|------|--|
| Sail | Leech length : 3.06m |
| | Head length : 1.03m |
| | Luff length : 1.97m |
| | Foot length : 2.18m |
| | Mast length and size : 3.34m, ϕ 5.0cm |
| | Boom of upper length and diameter :1.35m, ϕ 3.5cm |
| | Boom of lower length and diameter :2.55m, ϕ 3.5cm |
| | Aspect ratio : 1.24 |
| | Area : $5.57 m^2$ |

3.3 시험선의 횡동요 경사각 측정장치

선박의 횡동요 경사각 측정은 미국의 PNI사에서 제작된 Magnetic compass TCM3를 사용하였으며, 선수 방향각과 횡·종동요 경사각을 동시에 측정할 수 있는 3축의 경사계이다. 이 경사계의 정확도는 선수방위각은 70° 이내에서 약 0.5° 이고 종동요 경사각 측정시에는 $\pm 0.2^\circ$ RMS, 횡동요 경사각 측정시에는 65° 이하에서는 0.2° RMS이다.

선박의 운동에 따른 그 경사각의 측정은 9 pins으로 이루어진 경사계의 출력 단자를 통하여 RS232시리얼 통신 케이블을 거쳐 노트북 컴퓨터에 연결하였고, 제작회사인 PNI사에서 제공하는 소프트웨어를 이용하여 선박의 운동 상태를 관찰하면서 필요시 데이터를 디스켓에 저장하였다. TCM3 경사계의 자세한 규격은 Table 3과 같다.

Table 3. Specification of magnetic compass

| Specification of magnetic compass | | |
|-----------------------------------|---------------|--|
| Dimensions(L×W×L) | | 3.5×4.3×1.3cm |
| Weight | | 12g |
| Supply voltage | | 3.6 to 5 V |
| Heading | Accuracy | <70° of tilt 0.5° >70° of tilt 0.8° |
| | Resolution | 0.1° |
| | Max Dip angle | 85° |
| Pitch accuracy | | ±0.2°RMS |
| Roll accuracy | | 0.2° for pitch<65° 0.5° for pitch<80° |
| Connector for RS-232 interface | | 9-pin |

횡동요 경사각 측정시 보트의 선수방위는 전자자기컴퍼스와 GPS의 부가적 정보를 이용하여 동시에 측정하였다. 항주중에 보트의 속도측정은 시험선에 선속계를 장착할 수가 없어서 GPS수신기에서 NMEA0183 포맷으로 출력되는 데이터를 수신하여 이용하였다. GPS수신기와 GPS안테나에 대한 상세한 규격과 제원은 Table 4와 같다.

Table 4. Specification of GPS receiver and antenna

| GPS receiver | |
|----------------------------|--|
| Model | Canadian marconi company, ALLSTAR |
| Frequency | 1575MHz \pm 2 MHz |
| Channel | 12 channel correlator for all-in view satellite tracking |
| Data Port | Two serial input/output data port |
| Antenna | |
| Model | AT575 |
| Gain and size | +12 dB and 0.053m diameter |
| Max. length Min. length | 20 meter (12dB)/0 feet |
| Polarization | Right hand circular |

또한 스킵보트의 선속측정을 위한 GPS수신기의 안테나 설치는 선수미 중앙에 설치하였고, 이들 수신기와 경사계로부터 자료를 수집하기 위한 연결 계통도는 Fig. 5와 같다.

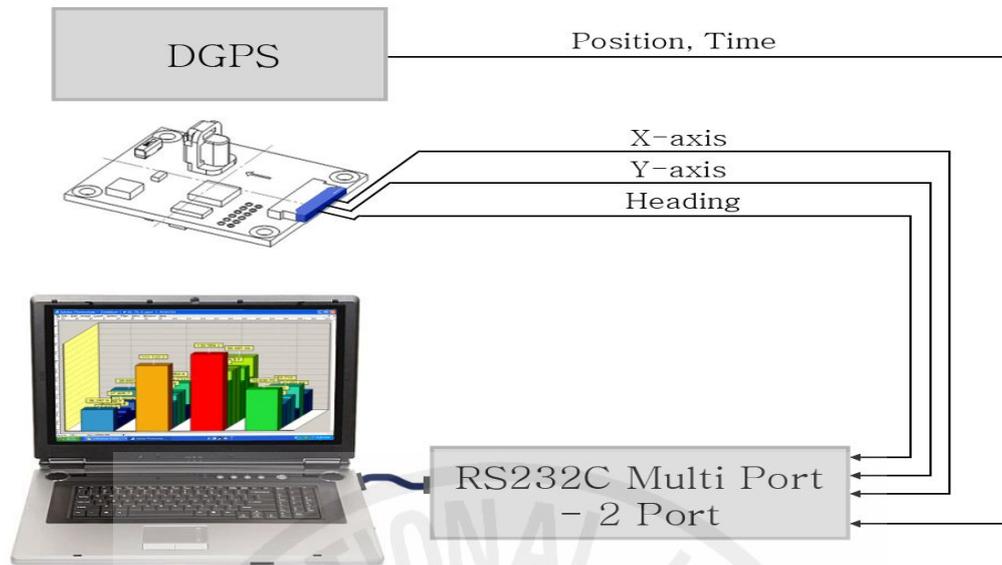


Fig. 5. Block diagram for measuring of angles of rolling and pitching, heading.

3.4 측정방법 및 분석방법

돛의 설치는 시험선의 크기에 알맞은 돛을 설계 제작한 후 시험선의 선수미선 상중 선미로부터 약 75cm 떨어진 곳에 장착하였으며, 횡동요 경사각 측정장치는 선수미선방향과 정횡방향의 중심에 설치하였다.

시험해역은 제주항 북동쪽 약 1마일 떨어진 외항에서 정지 상태, 약 5Knot 속력으로 항주할 때를 구분하여 실험하였으며, 각각 돛을 장착하였을 때(Sail on)와 돛을 장착하지 않았을 때(Sail off)로 나누어 횡동요 경사각(Rolling angle)은 0.07sec 간격으로 GPS에 의한 선수방위와 선속은 1sec. 간격으로 각각 자동 수신하였고 선속은 GPS에 수신된 선속을 보면서 일정한 속도로 항주하려고 노력하였다.

해황은 제1차 시험 때 풍향은 NW, 풍속은 2.0m/sec이었고 항주중에는 침로가 073°방향이었다. 제2차 시험때에는 풍향이 NNE, 풍속은 1.0m/sec이었으며, 항주중

의 침로는 100°방향이었다. 항주중에는 선수방향에 정확한 물표를 선정한 다음 그 물표방향으로 선수를 유지하며 항주하였다. 이와 같은 조건하에서 돛을 장착하거나 장착하지 않으면서 데이터를 각각 측정하였다. 시험선의 출발점은 GPS에 수신된 위도와 경도를 확인해 같은 지점에서 시험을 행하였고, 불규칙한 해상 상태에서는 기상이 수시로 변하는 것을 감안하여 가능한 동일한 해상조건을 반영하기 위하여 측정시간을 10 - 20분 동안으로 하여 각각 계측하였다. 수신·계측된 데이터는 평균, 유의값, Rayleigh 확률밀도함수, 상대누적분포도 등의 통계적 처리를 통해 돛의 횡동요 감소효과에 대하여 상호 비교 분석하였다.

시험선이 항주중일 때 돛의 유무가 선속에 어느 정도 영향을 미치는지는 알기 위하여 동일 해상상태에서 동일 코스를 동일 엔진 RPM으로 10분간씩 항해를 한 다음, 항주중에 GPS수신기로부터 수신된 자료로써 선속의 변화를 비교 검토하였다. Fig. 6은 상기와 같은 조건으로 실제 해상에서 실험하는 장면이다.

횡동요 경사각 변화의 전반적인 경향을 검토하기 위해서 돛이 설치 유무에 따라 측정된 경사각 자료를 식(12)의 Rayleigh 확률밀도함수에 의해 분석하였다. 식(12)에서 ζ_a 는 횡동요 경사각의 진폭, m_o 분산 값을 나타내고 있다(A. R. J. M. LLOYD, 1989).

$$f = \frac{\zeta_a}{m_o} \exp\left(\frac{-\zeta_a^2}{2m_o}\right) \quad (12)$$

일반적으로 수동형 및 능동형 저감장치(Stabilizer)효능을 분석하기 위해서는 장치를 작동했을 때(Stabilizer on)와 작동하지 않았을 때(Stabilizer off)의 횡동요 유의 경사각 비교에서 식(13) 과 상대누적분포에 의한 식(14)을 이용하여 감요 효율을 도출 한다.

$$R(\%) = 100 \left(1 - \frac{\text{Mean of one - third highest motion in the stabilized case}}{\text{Mean of one - third highest motion in the unstabilized case}} \right) \quad (13)$$

$$R(\%) = \frac{\Sigma u - \Sigma s}{\Sigma u} \times 100 \quad (14)$$

여기에서 R 는 저감효율(%), Σu 저감장치를 작동 하지 않았을 때 횡동요 경사각의 상대누적빈도 합, Σs 저감장치를 작동 했을 때 횡동요 경사각의 상대누적빈도 합을 각각 나타내고 있다.



Fig. 6. Sight of the sail equipped experimental boat.

IV. 결과 및 고찰

4.1 시험선의 횡동요 경사각 변화

Fig. 7은 제1차로 실시한 실험으로, 시험선이 정지한 상태에서 돛을 장착하거나 장착하지 않았을 때의 횡동요 경사각을 각각 10분간씩 측정하여 시계열로 나타낸 것으로, (-)값은 좌현경사, (+)값은 우현경사를 나타내고 있다. 돛을 장착했을 때와 장착하지 않았을 때에 측정된 횡동요 경사각을 상호 비교해 보면, 좌우현횡동요 경사각 회수는 각각 총 8518회와 8493회이었고, 좌현최대각은 각각 7.46° 및 7.92°, 우현최대각은 각각 7.44° 및 7.28°이었으며, 그 평균값은 좌현경사각이 각각 1.753° 및 1.86°, 우현경사각이 각각 1.736° 및 1.822° 이었다.

시험선이 정지중 상태에서 돛을 장착함으로써 인해 일어나는 선박의 횡동요 경사각은, 좌우현 최대값에서 약간의 변화가 있는 듯 하나 최대변화폭은 거의 같았다. 그러나 좌우현 평균값의 합으로 평균진폭값을 구해보면, 돛을 장착했을 때가 3.489°, 돛을 장착하지 않았을 때가 3.681°로 돛을 장착함으로써 약 0.2° 줄어든 결과를 얻었다. 그리고 불규칙파 중에서 통계적인 처리를 통해 파의 진폭을 표현하기 위한 횡동요 유의각(Significant amplitude of Rolling angle $\phi_{\frac{1}{3}}$)에서도 각각 3.250° 및 3.416°로 돛을 부착하였을 때가 0.166° 정도 줄어든 결과를 얻었다.

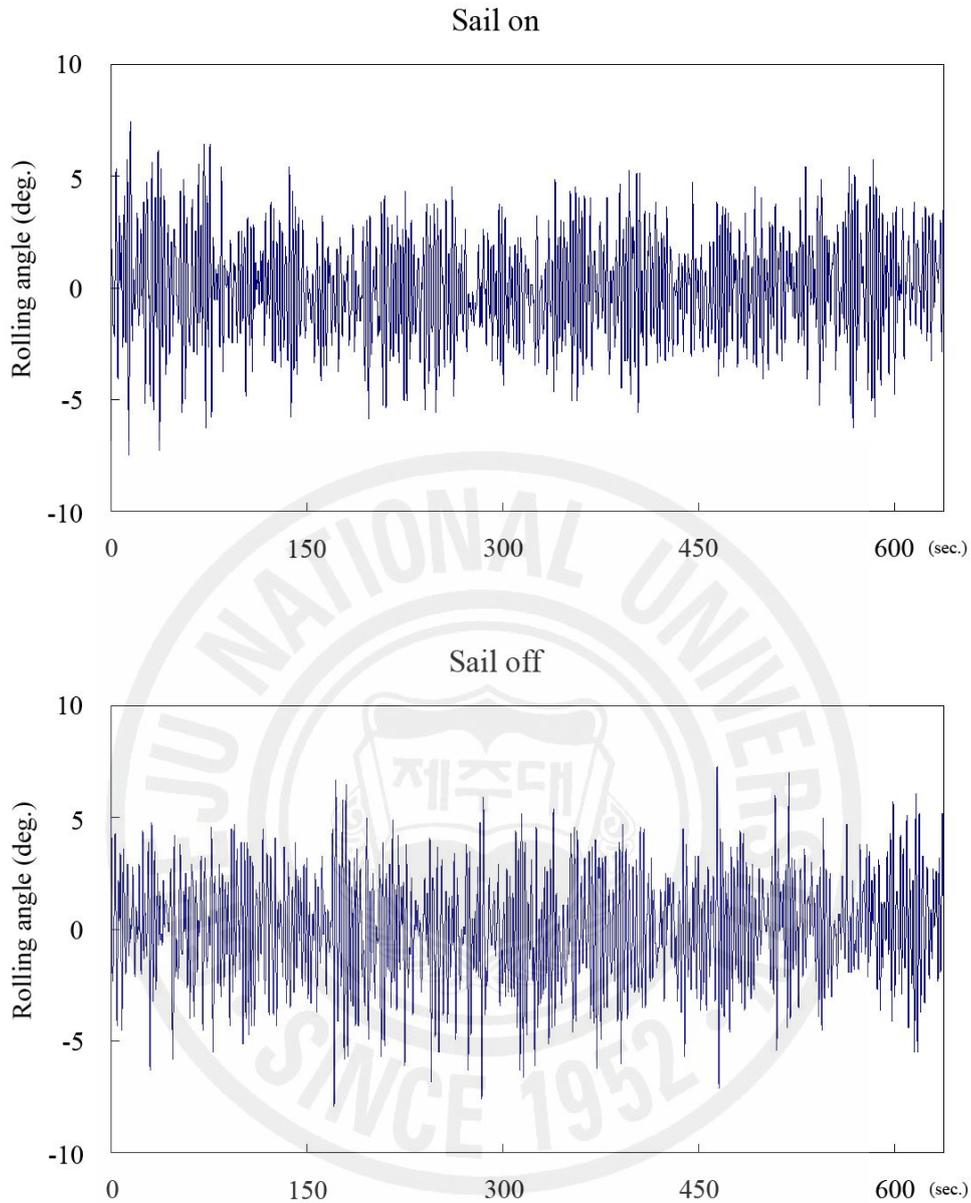


Fig. 7. Time histories of the amplitude of rolling angles in sail on and sail off. in irregular waves at the stop engine condition from the first experiment.

Fig. 8은 제1차 실험방법과 동일한 방법으로 제2차 실시한 실험으로, 시험선이 정지중 상태에서 돛을 장착했을 때와 장착하지 않았을 때에 측정된 횡동요 경사각을 상호 비교해 보면, 좌우현횡동요 경사각 회수는 각각 총 8631회와 8513회

이었고, 좌현최대각은 각각 4.91° 및 5.05° , 우현최대각은 각각 4.49° 및 5.05° 이었으며, 그 평균값은 좌현경사각이 각각 1.069° 및 1.140° , 우현경사각이 각각 1.116° 및 1.160° 이었다.

거의 동일한 해상상태에서 돛을 장착함으로 인해 일어나는 선박의 횡동요 경사각은, 좌우현 최대변화값이 9.40° 로 돛을 장착하지 않았을 때의 10.10° 보다 약간 줄어들었다. 그리고 좌우현 평균값의 합으로 구한 평균진폭값은 돛을 장착했을 때가 2.185° , 돛을 장착하지 않았을 때가 2.300° 로 돛을 장착함으로써 약 0.115° 줄어든 결과를 얻었다. 그리고 불규칙파 중에서 통계적인 처리를 통해 파의 진폭을 표현하기 위한 횡동요 유의경사각에서도 각각 3.250° 및 3.416° 로 돛을 부착하였을 때가 0.166° 정도 줄어든 결과를 얻었다.



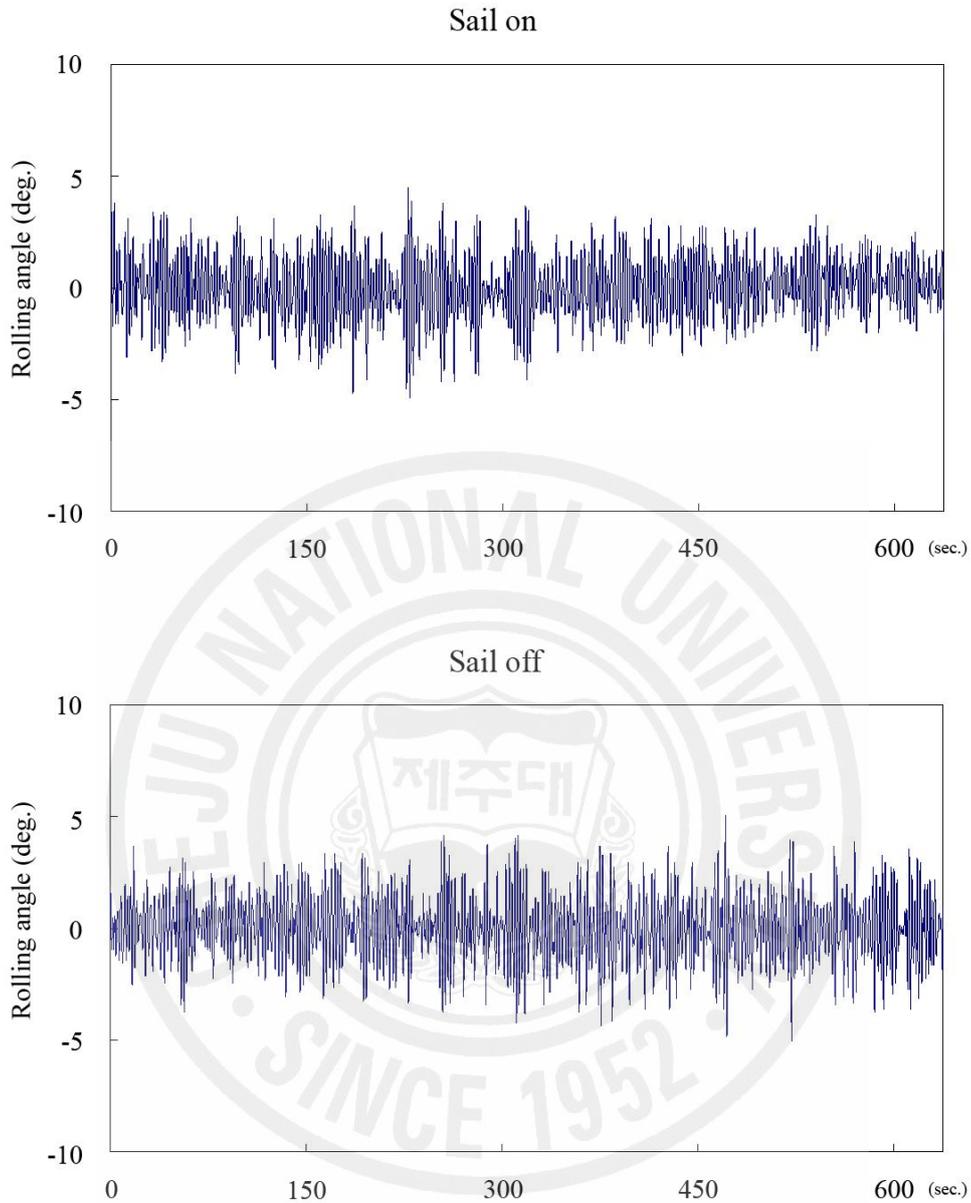


Fig. 8. Time histories of the amplitude of rolling angles in sail on and sail off. in irregular waves at the stop engine condition from the second experiment.

Fig. 9는 제1차 시험시 시험선이 항주중일 때 횡동요 경사각을 측정된 결과로, 돛을 장착했을 때와 장착하지 않았을 때에 측정된 각각의 좌우현횡동요 경사각 회수, 8493회와 8492회를 상호 비교해 보면, 좌현최대각은 각각 9.12° 및 11.22° ,

우현최대각은 각각 7.68° 및 9.98° 이었으며, 그 평균값은 좌현경사각이 각각 2.010° 및 2.188° , 우현경사각이 각각 1.980° 및 2.152° 이었다.

시험선이 정지중에 있을 때와 같은 방법으로 항주중일 때도 측정한 결과, 돛을 장착함으로 인해 일어나는 선박의 횡동요 경사각은 좌우현 최대변화값이 16.80° 이었으나 돛을 장착하지 않았을 때는 21.20° 로 장착했을 때보다 4.4° 높게 나타났다. 즉 돛을 장착함으로 인해 시험선의 횡동요가 약 20% 감소되었음을 알 수 있었다. 그리고 좌우현 평균값의 합으로 구한 평균진폭값은 돛을 장착했을 때가 3.990° , 돛을 장착하지 않았을 때가 4.340° 로 돛을 장착함으로서 약 0.35° 줄어든 결과를 얻었다. 그리고 불규칙파 중에서 통계적인 처리를 통해 파의 진폭을 표현하기 위한 횡동요 유의각에서도 각각 3.783° 및 4.110° 로 돛을 부착하였을 때가 0.327° 정도 줄어든 결과를 얻었다.



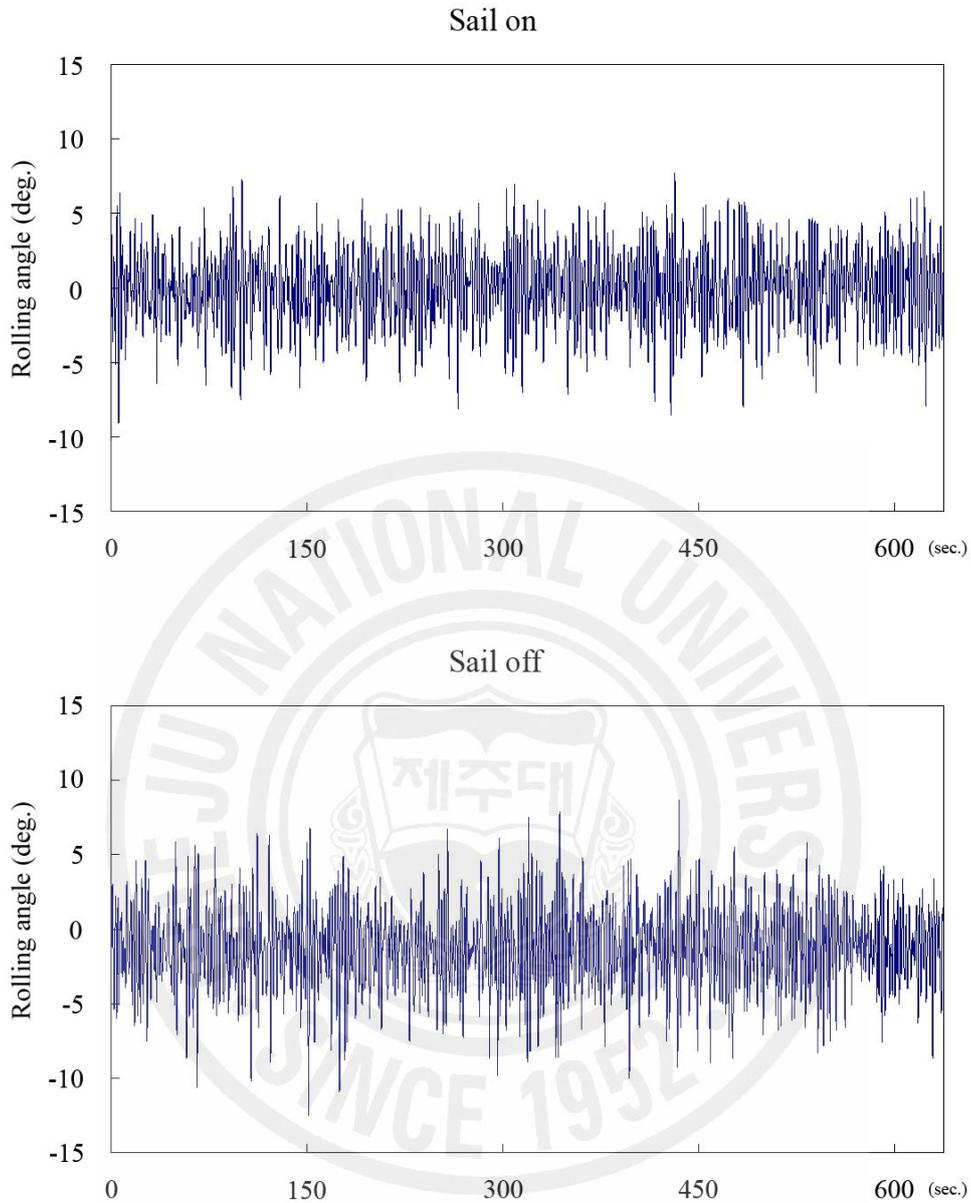
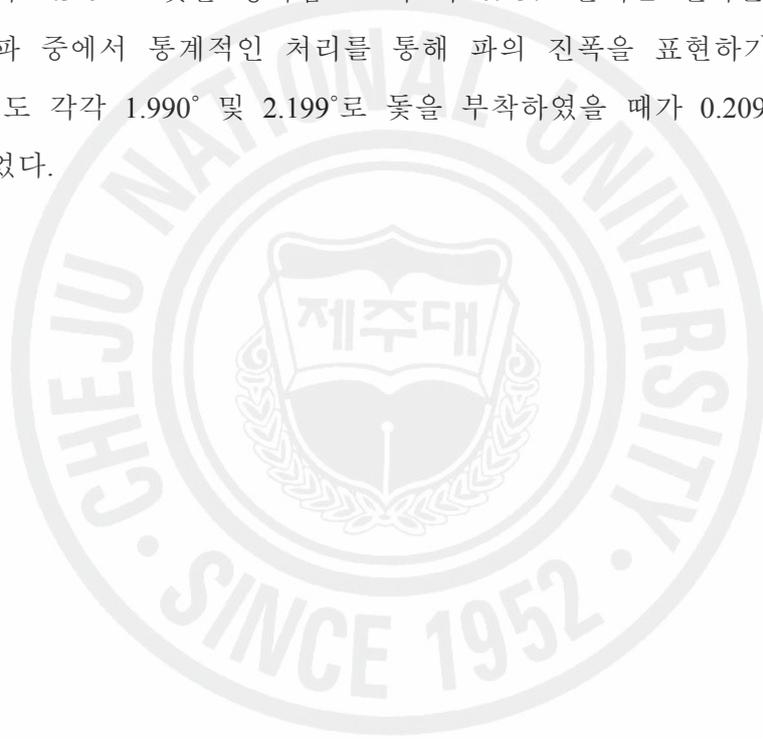


Fig. 9. Time histories of amplitude of rolling angles in sail on, sail off. in irregular waves at the underway condition from the first experiment.

Fig. 10은 Fig. 9에서처럼 시험선이 항주중일 때의 횡동요 경사각을 측정한 제2차 실험의 결과를 시계열로 나타낸 것이다. 돛을 장착했을 때와 장착하지 않았을 때에 측정된 각각의 좌우현횡동요 경사각수 7507회와 7609회를 상호 비교해 보

면, 좌현최대각은 각각 4.42° 및 4.61° , 우현최대각은 각각 4.88° 및 5.19° 이었으며, 평균값은 좌현경사각이 각각 1.041° 및 1.151° , 우현경사각이 각각 1.071° 및 1.198° 이었다.

시험선이 항주중일 때 측정한 횡동요경사각의 결과에서, 돛을 장착함으로 인해 일어나는 선박의 횡동요 경사각은 좌우현 최대변화값이 9.30° 이었으나 돛을 장착하지 않았을 때는 9.80° 로 장착시보다 0.5° 높게 나타났다. 즉 돛을 장착함으로 인해 시험선의 횡동요가 미미하나마 감소되었음을 알 수 있었다. 그리고 좌우현 평균값의 합으로 구한 평균진폭값은 돛을 장착했을 때가 2.112° , 돛을 장착하지 않았을 때가 2.349° 로 돛을 장착함으로서 약 0.237° 줄어든 결과를 얻었다. 그리고 불규칙파 중에서 통계적인 처리를 통해 파의 진폭을 표현하기 위한 횡동요 유의각에서도 각각 1.990° 및 2.199° 로 돛을 부착하였을 때가 0.209° 정도 줄어든 결과를 얻었다.



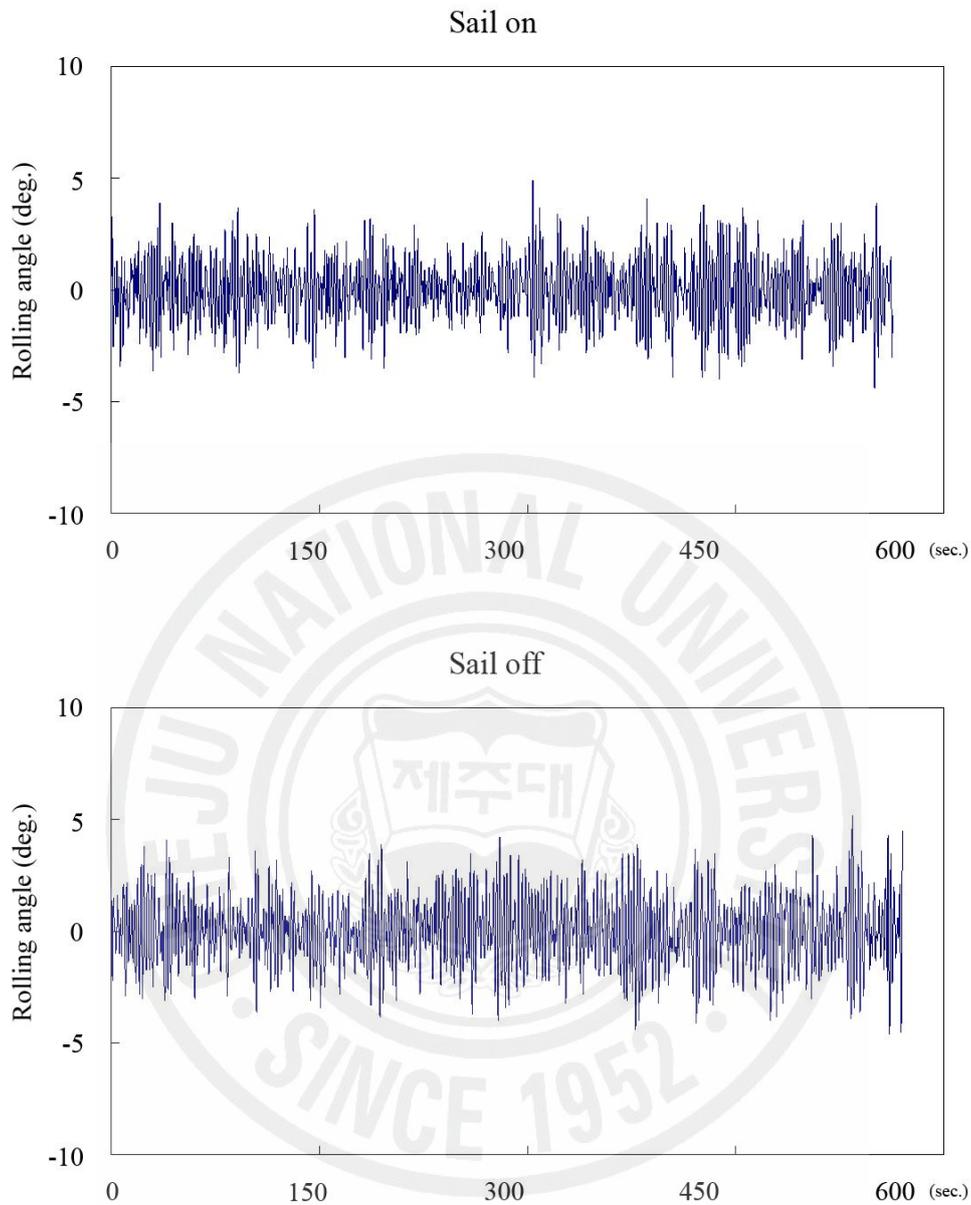


Fig. 10. Time histories of amplitude of rolling angles in sail on, sail off. in irregular waves at the underway condition from the second experiment.

이상 두 차례 실험결과에서 선박의 항주상태와 돛의 유무에 따른 횡동요 경사각의 변화에는 전반적으로 비슷한 경향을 나타내고 있지만, 항주중일 때가 정지중일 때보다 횡동요 경사각의 진폭변화 범위가 넓었다. 또한 돛을 장착하였을 때가 정

지중일 때보다 전반적으로 횡동요 경사가 적게 일어남을 알 수 있어 돛이 선박의 횡동요를 감쇠시키는 역할을 하고 있다고 판단된다. 또한 돛을 장착함으로 인한 선박의 횡동요 감쇠효과는 항주할 때가 정지해 있을 때보다 효과가 큰 것으로 나타났다.

4.2 Rayleigh 확률밀도함수 분석

Fig. 11은 제1차 시험선이 정지상태일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 Rayleigh 확률밀도함수 분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 2.2° , 2.3° 에서 가장 높은 확률밀도함수를 각각 보였으며 그리고 2.2° , 2.3° 이상에서 면적 모멘트는 0.279, 0.265로 나타나 면적이 차이가 0.014정도 있다는 것을 알 수 있었다. 그리고 횡동요 경사각 3.5° 이상에서의 면적을 비교하여 보았을 때 0.054, 0.065로서 돛을 장착하지 아니한 경우가 사전부분 만큼인 0.011였다.

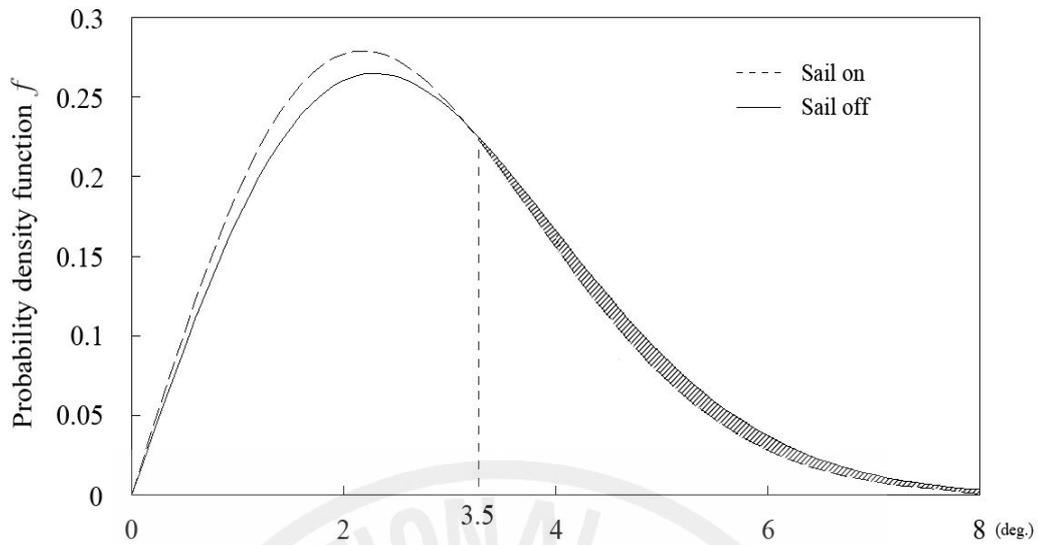


Fig. 11. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. in irregular waves at the stop engine condition from the first experiment.

Fig. 12는 제2차 시험선이 정지상태일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 Rayleigh 확률밀도함수 분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 1.5° , 1.4° 에서 가장 높은 확률밀도함수를 각각 보였으며 그리고 1.5° , 1.4° 이상에서 면적 모멘트는 0.440, 0.420로 나타나 면적이 차이가 0.020정도 있다는 것을 알 수 있었다. 그리고 횡동요 경사각 2° 이상에서의 면적을 비교하여 보았을 때 0.073, 0.092로서 돛을 장착하지 아니한 경우가 사전부분 만큼인 0.019로 제1차 실험의 결과보다는 다소 차이가 커졌다.

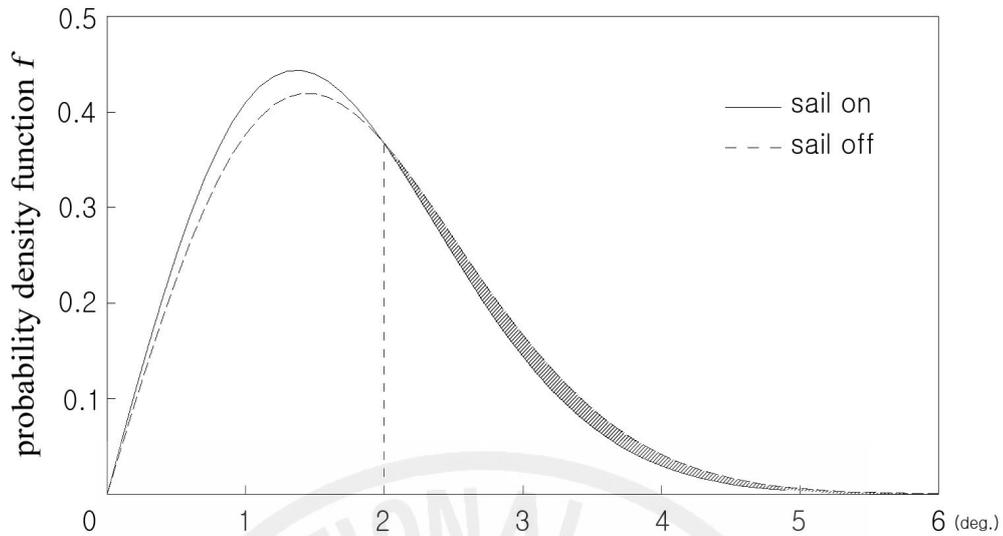


Fig. 12. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. in irregular waves at the stop engine condition from the second experiment.

Fig. 13은 제1차 시험선이 항주 중일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 Rayleigh 확률밀도함수 분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 2.5° , 2.7° 에서 가장 높은 확률밀도함수를 각각 보였으며 그리고 2.5° , 2.7° 이상에서 면적 모멘트는 0.241, 0.220로 나타나 면적이 차이가 0.021정도 있다는 것을 알 수 있었다. 그리고 횡동요 경사각 4° 이상에서의 면적을 비교하여 보았을 때 0.060, 0.071로서 돛을 장착하지 아니한 경우가 사선부분 만큼인 0.012 컸다.

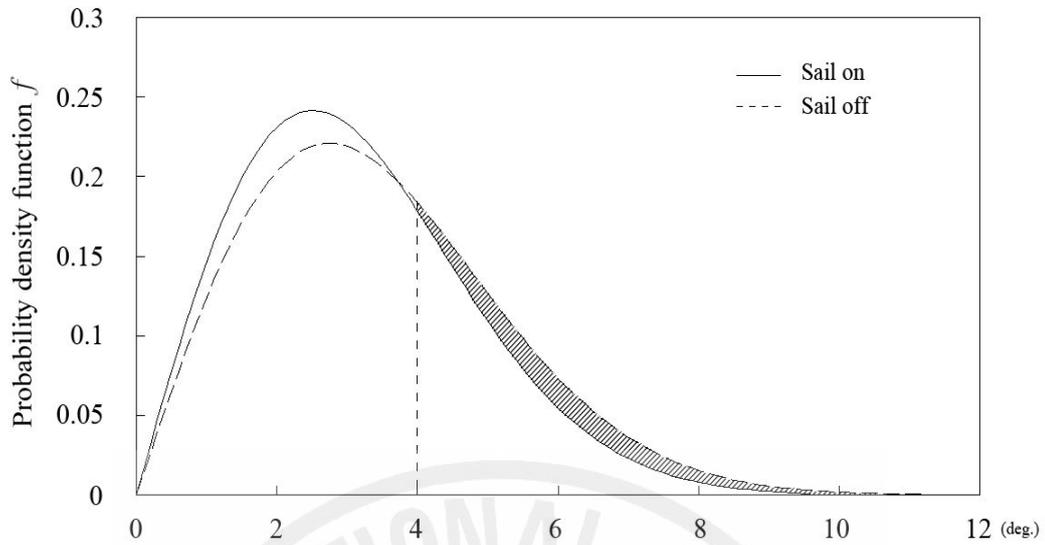


Fig. 13 Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. in irregular waves at the underway condition from the first experiment.

Fig. 14는 제2차 시험선이 항주 중일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 Rayleigh 확률밀도함수 분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 1.3° , 1.5° 에서 가장 높은 확률밀도함수를 각각 보였으며 그리고 1.3° , 1.5° 이상에서 면적 모멘트는 0.456, 0.412로 나타나 면적이 차이가 0.044정도 있다는 것을 알 수 있었다. 그리고 횡동요 경사각 2° 이상에서의 면적을 비교하여 보았을 때 0.060, 0.094로서 돛을 장착하지 아니한 경우가 사전부분 만큼인 0.034로 제1차 실험의 결과보다는 다소 차이가 커졌다.

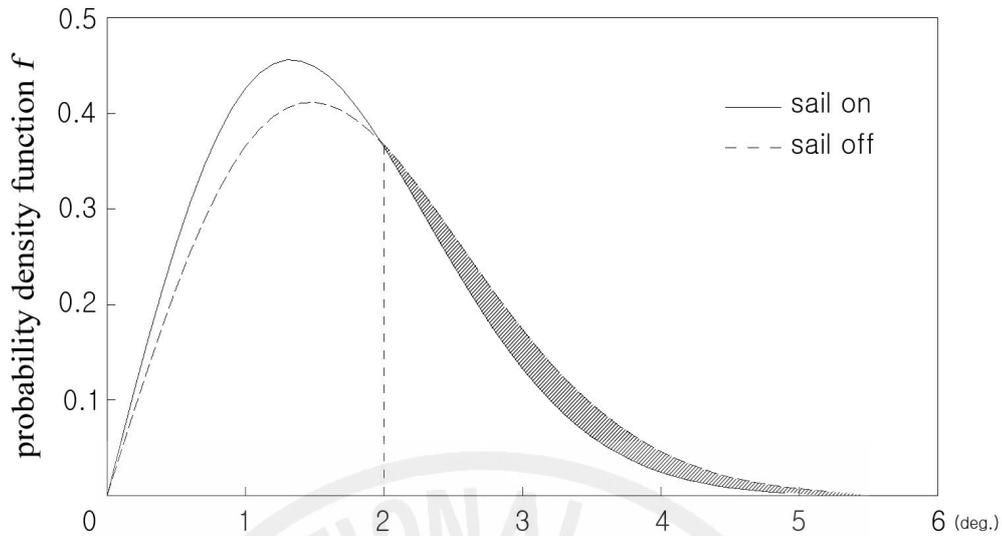


Fig. 14. Typical probability density function of the amplitudes of rolling angles in sail on and off. in irregular waves at the underway condition from the second experiment.

4.3 상대누적분포에 의한 감쇠효율 분석

정지 시 2차에 걸쳐 돛을 설치하였을 때(Sail on), 하지 않았을 때(Sail off)의 횡동요 경사각을 각각 10분간씩 측정한 시계열을 분석결과에서 횡동요 유의(有義) 경사각(Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$)은 각각 3.25° , 3.47° , 2.04° , 2.18° 였으나, 이것은 단순비교에 지나지 않는다. 그래서 식(13)을 이용한 감요 효율 결과 1차 때에는 돛을 장착하므로 4.860% 정도 효능이 있는 것으로 분석되었고, 2차는 6.473%이었다.

Table 5는 제1차 시험선이 정지상태일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정한 데이터에 의한 상대누적분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 $0.5^\circ - 1.0^\circ$, $0.0^\circ - 0.5^\circ$ 에서 절대빈도수가 가장 높았으며, 횡동요 경사각이 2.0° 이상에서는 돛을 장착하지 않았을 때가

점차적으로 빈도수가 커져가는 경향을 보이고 있다. 식(14)를 이용하여 효율을 검토하여 보면 약 4.57%정도 뚫에 의한 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 5. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the stop engine condition from the first experiment

| Rolling Angle Limit (°) | Sail on | | | Sail off | | |
|-------------------------|-----------|--------------------|-------------------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| | Reading s | Cumulative | | Reading s | Cumulative readings | |
| | | absolute frequency | relative frequency (%) | | absolute frequency | relative frequency (%) |
| 0.0-0.5 | 1385 | 8518 | 100 | 1351 | 8493 | 100 |
| 0.5-1.0 | 1445 | 7133 | 83.74031 | 1291 | 7142 | 84.09278 |
| 1.0-1.5 | 1283 | 5688 | 66.77624 | 1227 | 5851 | 68.89203 |
| 1.5-2.0 | 1154 | 4405 | 51.71402 | 1140 | 4624 | 54.44484 |
| 2.0-2.5 | 983 | 3251 | 38.16624 | 1005 | 3484 | 41.02202 |
| 2.5-3.0 | 833 | 2268 | 26.62597 | 796 | 2479 | 29.18874 |
| 3.0-3.5 | 516 | 1435 | 16.84668 | 585 | 1683 | 19.81632 |
| 3.5-4.0 | 364 | 919 | 10.78892 | 420 | 1098 | 12.92829 |
| 4.0-4.5 | 206 | 555 | 6.515614 | 279 | 678 | 7.983045 |
| 4.5-5.0 | 141 | 349 | 4.097206 | 159 | 399 | 4.697987 |
| 5.0-5.5 | 119 | 208 | 2.441888 | 93 | 240 | 2.825857 |
| 5.5-6.0 | 48 | 89 | 1.044846 | 69 | 147 | 1.730837 |
| 6.0-6.5 | 23 | 41 | 0.481334 | 42 | 78 | 0.918403 |
| 6.5-7.0 | 6 | 18 | 0.211317 | 20 | 36 | 0.423878 |
| 7.0-7.5 | 10 | 12 | 0.140878 | 10 | 16 | 0.18839 |
| 7.5-8.0 | 2 | 2 | 0.02348 | 6 | 6 | 0.070646 |
| | | | | | | |
| | | | $\Sigma_s = 409.614943$ | | | $\Sigma_u = 429.224063$ |

Table 6은 제2차때 시험선이 정지상태일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 상대누적분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 0.0° - 0.5°에서 각각 절대빈도수가 가장 높았으며, 횡동요 경사각이 2.0°이상에서는 돛을 장착하지 않았을 때가 점차적으로 빈도수가 커져가는 경향을 보이고 있다. 식(14)를 이용하여 효율을 검토하여 보면 약 4.07%정도 돛에 의한 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 6. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the stop engine condition from the second experiment

| Rolling Angle Limit (°) | Sail on | | | Sail off | | |
|-------------------------|-----------|--------------------|-------------------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| | Reading s | Cumulative | | Reading s | Cumulative readings | |
| | | absolute frequency | relative frequency (%) | | absolute frequency | relative frequency (%) |
| 0.0-0.5 | 2208 | 8631 | 100 | 2153 | 8513 | 100 |
| 0.0-1.0 | 2144 | 6423 | 74.4178 | 2041 | 6360 | 74.70927 |
| 1.0-1.5 | 1788 | 4279 | 49.57711 | 1608 | 4319 | 50.73417 |
| 1.5-2.0 | 1228 | 2491 | 28.86108 | 1142 | 2711 | 31.84541 |
| 2.0-2.5 | 651 | 1263 | 14.6333 | 782 | 1569 | 18.43064 |
| 2.5-3.0 | 334 | 612 | 7.090719 | 429 | 787 | 9.244685 |
| 3.0-3.5 | 170 | 278 | 3.220948 | 221 | 358 | 4.205333 |
| 3.5-4.0 | 72 | 108 | 1.251303 | 97 | 137 | 1.609303 |
| 4.0-4.5 | 25 | 36 | 0.417101 | 26 | 40 | 0.46987 |
| 4.5-5.0 | 11 | 11 | 0.127448 | 10 | 14 | 0.164454 |
| 5.0-5.5 | | | | 4 | 4 | 0.046987 |
| | | | | | | |
| | | | $\Sigma_s = 279.596809$ | | | $\Sigma_u = 291.460122$ |

같은 방식으로 항주 중 상대누적분포도에 의한 방법으로 분석한 결과를 보면, 항주시 2회에 걸쳐 돛을 설치하였을 때(Sail on), 하지 않았을 때(Sail off)의 횡동요 경사각을 각각 10분간씩 측정된 시계열을 분석결과에서 횡동요 유의(有義)경사각(Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$)은 1, 2차 각각 3.78°, 4.11°, 1.99°, 2.20°이었다.

식(13)을 이용한 감요 효율 결과 1차 때에는 돛을 장착하므로 7.956% 정도 효율이 있는 것으로 분석되었고, 2차때는 9.504%이었다.

Table 7은 제1차때 시험선이 항주 중일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 상대누적분포를 나타내는 것으로 돛을 장착했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 횡동요 경사각 0.5° - 1.0°에서 각각 절대빈도수가 가장 높았으며, 횡동요 경사각이 2.0°이상에서는 돛을 장착하지 않았을 때가 점차적으로 빈도수가 커져가는 경향을 보이고 있다. 식(14)를 이용하여 효율을 검토하여 보면 약 6.97%정도 돛에 의한 효과가 있는 것으로 분석되었다.

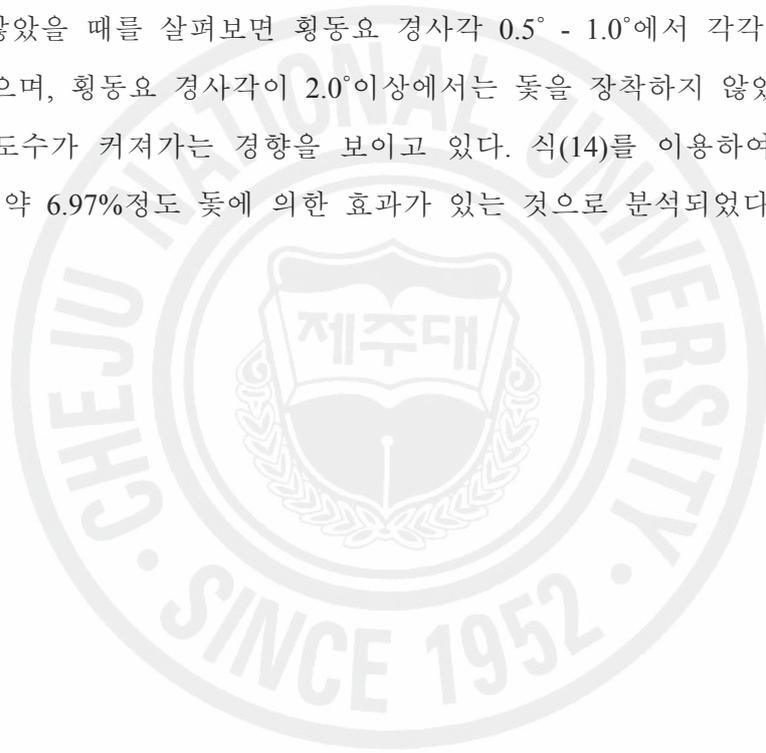


Table 7. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the underway condition from the first experiment

| Rolling Angle Limit (°) | Sail on | | | Sail off | | |
|-------------------------|----------|--------------------|-------------------------|----------|---------------------|------------------------|
| | Readings | Cumulative | | Readings | Cumulative readings | |
| | | absolute frequency | relative frequency (%) | | absolute frequency | relative frequency (%) |
| 0.0-0.5 | 1248 | 8493 | 100 | 1160 | 8492 | 100 |
| 0.0-1.0 | 1324 | 7245 | 85.30555 | 1224 | 7332 | 86.34008 |
| 1.0-1.5 | 1164 | 5921 | 69.71624 | 1080 | 6108 | 71.92652 |
| 1.5-2.0 | 1104 | 4757 | 56.01083 | 1050 | 5028 | 59.20867 |
| 2.0-2.5 | 839 | 3653 | 43.01189 | 868 | 3978 | 46.84409 |
| 2.5-3.0 | 720 | 2814 | 33.13317 | 770 | 3110 | 36.6227 |
| 3.0-3.5 | 595 | 2094 | 24.6556 | 645 | 2340 | 27.55535 |
| 3.5-4.0 | 479 | 1499 | 17.64983 | 466 | 1695 | 19.95996 |
| 4.0-4.5 | 377 | 1020 | 12.00989 | 360 | 1229 | 14.47244 |
| 4.5-5.0 | 249 | 643 | 7.570941 | 249 | 869 | 10.23316 |
| 5.0-5.5 | 146 | 394 | 4.639115 | 200 | 620 | 7.300989 |
| 5.5-6.0 | 108 | 248 | 2.920052 | 131 | 420 | 4.945831 |
| 6.0-6.5 | 56 | 140 | 1.648416 | 95 | 289 | 3.403203 |
| 6.5-7.0 | 35 | 84 | 0.98905 | 66 | 194 | 2.284503 |
| 7.0-7.5 | 22 | 49 | 0.576946 | 54 | 128 | 1.507301 |
| 7.5-8.0 | 15 | 27 | 0.317909 | 26 | 74 | 0.871408 |
| 8.0-8.5 | 6 | 12 | 0.141293 | 15 | 48 | 0.565238 |
| 8.5-9.0 | 4 | 6 | 0.070646 | 15 | 33 | 0.388601 |
| 9.0-9.5 | 2 | 2 | 0.023549 | 8 | 18 | 0.211964 |
| 9.5-10.0 | | | | 4 | 10 | 0.117758 |
| 10.0-10.5 | | | | 3 | 6 | 0.070655 |
| 10.5-11.0 | | | | 1 | 3 | 0.035327 |
| 11.0-11.5 | | | | 2 | 2 | 0.023552 |
| | | | | | | |
| | | | $\Sigma_s = 460.390917$ | | | $\Sigma_u = 494.8893$ |

Table 8은 제2차 시험선이 항주 중일 때, 돛의 장착 유무에 따른 횡동요 경사각을 측정된 데이터에 의한 상대누적분포를 나타내는 것으로 돛을 장착 했을 때, 하지 않았을 때를 살펴보면 절대빈도수가 가장 높은 경우는 경사각이 0.5° - 1.0°에서 각각 나타났고, 횡동요 경사각이 2.0°이상에서는 돛을 장착하지 않았을 때가 점차적으로 빈도수가 커져가는 경향을 보이고 있다. 식(14)를 이용하여 효율을 검토하여 보면 약 8.12%정도 돛에 의한 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 8. Statistical evaluations for amplitude of rolling angle by the relative cumulative frequency at the underway condition from second experiment

| Rolling Angle Limit (°) | Sail on | | | Sail off | | |
|-------------------------|-----------|--------------------|------------------------|-----------|---------------------|------------------------|
| | Reading s | Cumulative | | Reading s | Cumulative readings | |
| | | absolute frequency | relative frequency (%) | | absolute frequency | relative frequency (%) |
| 0.0-0.5 | 1987 | 7506 | 100 | 1839 | 7609 | 100 |
| 0.5-1.0 | 1979 | 5519 | 73.52784 | 1807 | 5770 | 75.83125 |
| 1.0-1.5 | 1536 | 3540 | 47.16227 | 1480 | 3963 | 52.08306 |
| 1.5-2.0 | 979 | 2004 | 26.69864 | 1045 | 2483 | 32.63241 |
| 2.0-2.5 | 500 | 1025 | 13.65574 | 691 | 1438 | 18.89867 |
| 2.5-3.0 | 298 | 525 | 6.994404 | 402 | 747 | 9.817322 |
| 3.0-3.5 | 145 | 227 | 3.024247 | 203 | 345 | 4.534104 |
| 3.5-4.0 | 64 | 82 | 1.092459 | 90 | 142 | 1.866211 |
| 4.0-4.5 | 13 | 18 | 0.239808 | 40 | 52 | 0.683401 |
| 4.5-5.0 | 5 | 5 | 0.066613 | 8 | 12 | 0.157708 |
| 5.0-5.5 | | | | 4 | 4 | 0.052569 |
| | | | | | | |
| | | | $\Sigma = 272.462021$ | | | $\Sigma = 296.556705$ |

경사계에 의한 횡동요 경사각을 정지, 항주 중에 돛을 장착했을 때와 하지 않았을 때를 평균값, 분산 값, 횡동요 유의경사각, Rayleigh 확률밀도함수, 상대누적분포에 의한 분석결과 전반적으로 돛이 횡동요 경사각에 미치는 영향이 있다는 것을 알 수 있으며, Woo et al(1974); Moon et al(2005)에 의한 U-Tank 및 부가질량을 이용한 수동형 및 능동형 저감효과는 50 ~ 80%, 20 ~ 50%의 결과와 비교하여 보면 다소 낮게 나타나 정지 때에는 4.07 ~ 4.57%, 항주 중에는 6.97 ~ 8.12% 효과를 각각 보였다. 그래서 현재 선박에 사용하고 있는 수동형 및 능동형에서는 많은 공간과 설치비용이 소요되기 때문에 소형선박에서는 설치가 불가능할 것으로 판단되며, 가능한 돛을 선미에 설치하므로 공간적으로 어로 작업에 전혀 지장을 주지 않을 뿐만 아니라, 아울러 저 비용으로 감요 효과를 나타낼 수 있다.

4.4 선속의 평균값 비교

Fig. 15는 2회에 걸쳐 시험선이 항주중일 때 돛의 유무가 선속에 어느 정도 영향을 미치는지를 알기 위하여 동일 해상 상태에서 고정물표를 정점으로 하여 GPS에서 수신된 선수방위를 유지하고 선속을 일정하기 위해서 엔진 Control Lever를 고정시켜서 10분간씩 항해한 다음 항주 중에 GPS수신기로부터 수신된 선속을 이동 평균한 시계열로 나타낸 것으로 돛을 장착 했을 때의 평균선속이 5.46knot , 돛을 장착하지 않았을 때가 5.38knot로 돛을 장착했을 때가 0.08knot 정도 빨랐고, 선속의 증가도 돛을 장착했을 때가 안정적인 변화를 보였다.

이 실험에서 사용한 돛은 수동형태이어서 돛의 각도를 자동적으로 조절하지 못하여 아쉬움이 많았다. 실험결과를 보고 미루어 생각하면 아주 미미하겠지만 돛을 제어 가능한 형태로 조절할 수만 있다면 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

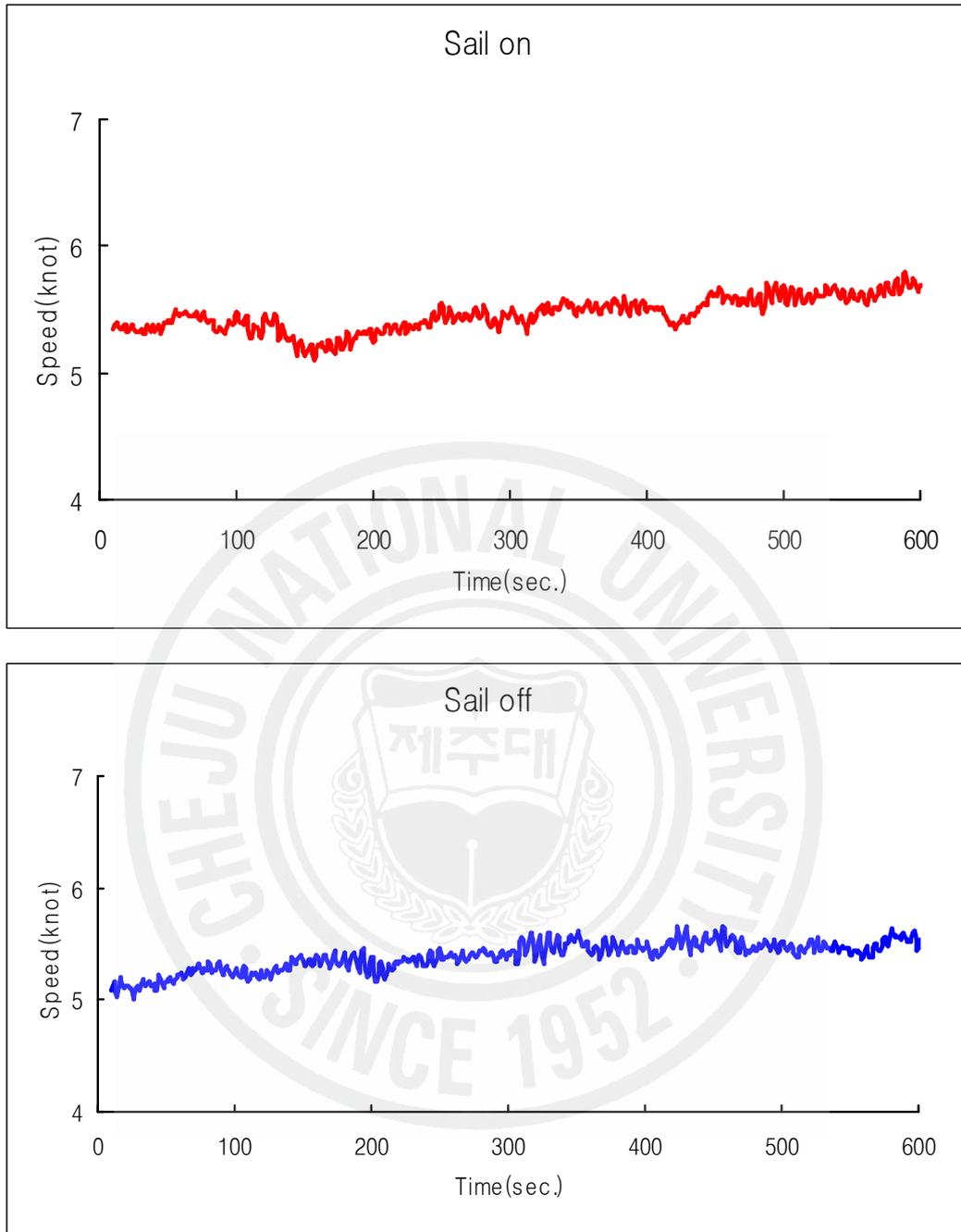


Fig. 15. Time histories of the ship speed in sail on, sailoff

Table 9는 두 차례에 걸쳐 측정된 자료를 기초로 운동응답을 통계적 처리하여 평균 및 유의값, 선속, Rayleigh 확률밀도함수, 상대누적분포도를 구한 다음, 서로 비교분석한 결과를 요약한 것이다.

Table 9. Analysis Results

| | | Dividing | | Sail on | Sail off |
|---|----------------|---|-------------|----------------|-----------------|
| No.1 | Stop engine | Total data | | 8518 | 8493 |
| | | Average amplitude | | 1.74 | 1.84 |
| | | Starboard | Maximum | 7.44 | 7.28 |
| | | | Average | 1.73 | 1.82 |
| | | Port | Maximum | 7.46 | 7.92 |
| | | | Average | 1.75 | 1.86 |
| | | Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$ | | 3.25 | 3.47 |
| | Attenuation(%) | | 4.57% | | |
| | underway | Total data | | 8493 | 8492 |
| | | Average amplitude | | 1.99 | 2.17 |
| | | Starboard | Maximum | 7.68 | 9.98 |
| | | | Average | 1.98 | 2.15 |
| | | Port | Maximum | 9.12 | 11.22 |
| | | | Average | 2.01 | 2.19 |
| Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$ | | 3.78 | 4.11 | | |
| Attenuation(%) | | 6.97% | | | |
| Average speed | | 5.461(knot) | 5.389(knot) | | |
| No.2 | Stop engine | Total data | | 8631 | 8513 |
| | | underway | | 1.09 | 1.15 |
| | | Starboard | Maximum | 4.49 | 5.05 |
| | | | Average | 1.12 | 1.16 |
| | | Port | Maximum | 4.91 | 5.05 |
| | | | Average | 1.07 | 1.14 |
| | | Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$ | | 2.04 | 2.18 |
| | Attenuation(%) | | 4.07% | | |
| | underway | Total data | | 7506 | 7609 |
| | | Average amplitude | | 1.06 | 1.17 |
| | | Starboard | Maximum | 4.88 | 5.19 |
| | | | Average | 1.07 | 1.20 |
| | | Port | Maximum | 4.42 | 4.61 |
| | | | Average | 1.04 | 1.15 |
| Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$ | | 1.99 | 2.20 | | |
| Attenuation(%) | | 8.12% | | | |
| Average speed | | 5.532(knot) | 5.509(knot) | | |

V. 요약

제주대학교 실습선 아라호에 선망 어로 작업 시 보조선으로 이용하는 스키프-보트 (Skiff boat)에 돛을 설치하여 횡 동요 감쇠 효과에 대한 효율을 검토하기 위하여 제주 외항에서 동일 위치에서 정지, 항주 시에 돛을 장착 했을 때와 돛을 장착하지 않았을 때 나누어 분석한 결과에 대해 요약하면 다음과 같다.

1. 시험선을 정지한 후 돛을 장착했을 때와 하지 않았을 때, 평균 횡동요 경사각은 1차 때 1.74° , 1.84° , 2차 때 1.09° , 1.15° 횡동요 유의(有義)경사각(Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$)은 1차 때 3.25° , 3.42° 2차 때 2.04° , 2.18° 으로 나타나 돛이 없을 때가 1,2차 모두 평균 횡동요 경사각, 횡동요 유의 경사각이 크다.
2. 시험선을 항주 하였을 때의 돛 장착 유무에 따른 평균 횡동요 경사각은 1차 때 1.99° , 2.17° , 2차 때 1.06° , 1.17° 횡동요 유의(有義)경사각(Significant angle of rolling $\phi_{\frac{1}{3}}$)은 1차 때 3.78° , 4.11° 2차 때 1.99° , 2.20° 이었다.
3. Rayleigh 확률밀도함수에 의한 면적은 정지, 항주 때 돛을 장착하지 아니한 경우가 1차 때 0.011, 0.019 2회 때 0.012, 0.034정도 크므로 파도가 높을수록 차지하는 면적은 많이 확장 될 것으로 예상된다.
4. 상대누적분포에 의한 감쇠 효율에 의한 분석 결과를 보면 돛을 장착하고 시험선이 정지 했을 때 1, 2회 각각 4.57%, 4.07% 그리고 항주 했을 때는 각각 6.97%, 8.12% 정도의 감쇠 효율을 보여서 항주 할 때가 정지시 보다 효율이 높았다.
5. 시험선을 항주 하였을 때의 돛 장착 유무에 따른 선속을 보면 돛을 장착하였을

때 평균선속이 5.46knot , 돛을 장착하지 않았을 때가 5.38knot로 돛을 장착했을 때가 0.08knot 빨랐다.

이상 분석한 결과를 살펴보면 불규칙한 파도에 의해서 선체에 작용하는 횡동요 경사각을 해상 실험을 통해서 돛이 작용하는 힘으로 감소시킬 수 있다고 생각되고, 돛을 Passive형이 아닌 제어 가능한 형태로 바꿨을 경우 양력과 항력을 조절할 수 있으므로 그린에너지도 이용 가능할 것으로 보인다. 향후 이를 토대로 소형어선을 개발한다면 연료비 절감과 적은 비용으로 감쇠효과가 기대되고 채낚기 어선에 사용하는 물돛(Sea anchor)과 병행함으로써 침로유지에 많은 도움이 될 것으로 예상되어 이와 병행하는 추가적인 연구가 필요 할 것으로 생각된다.



참고 문헌

- A. R. J. M. LLOYD, 1989. Sea-keeping : Ship Behaviour in Rough Weather. Ellis Horwood Ltd. New york, 94-120, 328-342.
- Masuyama Y., Nakamura I., Tatano H., Takagi K., and Miyakawa T., 1992. Sailing performance of ocean cruising yacht by full-scale sea test(Steady sailing performance and dynamic performance in waves), Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 172, 349 - 364.
- Masuyama Y., Nakamura I., Tatano H., Sakaguchi K., and Kanekiyo T., 1993. Sailing performance of ocean cruising yacht by full-scale sea test(Maneuverability and tacking performance), Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 174, 377-388.
- Moon, S.J J.A. Jeong, H.K. Yoon, G.J., Lee and S.P., Ann, 2005. An experimental study on mass driving anti-rolling system for ships. Journal of the Society of Naval Architects of Korea. 42(6), 666-672.
- Morwood J., 1953. Sailing Aerodynamics. F. J. Parsons Ltd, London, pp. 28- 39.
- Park, J.W., 2000. Development of the new Chine hull -form for stability of coastal small fishing-vessel. Development of practical technology. Ministry of Maritime Affairs & Fisheries Report. 35-36.
- Kim, Y.B., 2002. A study on rudder-roll stabilizer system design for ship. The society of Mechanical Engineers of Korea, 26(2), 329-339.
- Woo, B.K., C.H. In and J.D. Koo, 1974. On the Performance of the anti rolling tank(2). Socirty of Naval Architects of Korea. 11(1), 17-26
- Yamaguchi, S., A. Shinki and Y. Ogawara, 1993. On a Feedback control system of ship's rolling motion by an activated anti rolling tank. Journal of The Society of Naval Architects of Japan. 126, 203-210.

Yoshimura Y., Kuroda T., Kikumoto M., Igarashi Y., 2003. Roll-damping control by sail-angle. Journal of The Society of Naval Architects of Japan Symposium Proceeding, 2, 85-86.



감사의 글

대학원 들어 온지가 엇그제 같은데 벌써 졸업을 한다는게 실감이 나지 않지만, 나름대로 3년 동안 나에게는 많은 발전이 있었던 기간이었던 같다. 직장을 다니면서 학업을 한다는 게 쉽지 않은 길이었지만, 이제와 돌아보면 직장을 핑계 삼은 건 아닌가 돌아보게 된다.

많이 부족한 저를 항상 같은 마음으로 지도와 편달을 아낌없이 보내주신 안장영 교수님과 항상 제 옆에서 관심과 격려를 아끼지 않으시고 학위과정 내내 지도를 아끼지 않으신 최찬문 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

아울러 미흡한 논문을 세심하고 정성껏 다듬어 주신 안영화 교수님께도 감사를 드리며, 학위 과정 내내 지도를 해 주신 서두옥 교수님, 김석종 교수님, 문일주 교수님께도 심심한 감사를 드립니다.

직장에서나 학교에서나 항상 열심히 하라고 자상하게 격려를 해 주신 정용진 교수님, 강창남 교수님께도 감사를 드립니다.

언제나 많은 조언과 관심을 가져주신 이창현 선배님과 김병엽 선배님, 그리고 물심양면으로 도와준 친구 김성호에게 진심어린 감사를 드립니다.

실험 때마다 항상 고생한 후배 지금은 졸업하고 망망대해를 향해중인 강승필, 고성건 후배님과 바쁜 학업 중에도 자료 정리를 해준 실험실 후배님들에게도 고마움을 전합니다.

대학원 생활하는 동안 언제나 자기일인 마냥 도움을 줬던 고영식, 변승우, 강경범, 고혁준 후배님과 항상 논문 작성시 자기 논문이상으로 진폭적인 도움을 준 동생 은택이에게 감사를 드립니다.

실험을 할 때 마다 자기일 같이 최선을 다해 도와주시고 논문을 완성할 때 까지 시간적인 배려와 격려를 아끼지 않으신 아라호 직원 분들에게 진심어린 감사를 드립니다.

끝으로 저를 믿고 한 걸음 뒤에서 묵묵히 지켜봐 주시는 부모님과 정신적 지주인 형님, 옆에서 항상 응원해주시는 형수님과 조카들, 그리고 처남, 처제, 동서, 장모님에게도 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 직장생활, 학교생활에 스트레스 받을 때면 항상 아빠 힘들다고 등 두들겨주는 아들 대환이, 항상 나를 웃음 짓게 만드는 막내 태린이 언제나 한결같이 뒷바라지 해주고 조언해 주는 나의 사랑스런 아내에게 진심어린 고마움을 전합니다.

