

# 안티롤링 진자를 장치한 선박의 점성감쇠계 해석에 대한 연구

박석주\* · 장광호\*\* · † 이금주

\*한국해양대학교, \*\*한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 대학원

## A Study on Viscous Damping System of a Ship with Anti-Rolling Pendulum

Sok-Chu Park\* · Kwang-Ho Jang\*\* · † Geum-Joo Yi

\*Division of Naval Architecture and Ocean Engineering System, National Korea Maritime University, Busan 49112, Korea

\*\* † Graduate School, National Korea Maritime University, Busan 49112, Korea

**요 약** : 부유체의 횡동요는 승조원의 피로를 누적시키고, 심지어 구조물 전체를 전복시키기까지 하고, 또 선체에 반복적인 외력을 가하는 등 부유체의 안정성과 구조물의 안전에 심대한 영향을 끼친다. 그래서 거의 모든 선박의 경우에는 빌지킬을 설치하여 횡동요를 감소시키고 있고, 특수한 경우에는 안티롤링 탱크나 핀 스테빌라이저나 자이로스코프 등을 설치하여 횡동요를 줄이고 있다. 그러나 안티롤링 탱크는 설치하는데 용적을 많이 차지하고, 핀 스테빌라이저나 자이로스코프는 설치비와 유지 관리비가 많이 든다. 저자들은 안티롤링진자를 이용한 부유체의 롤링 저감에 대한 연구를 하여 실험과 Runge-Kutta 해석에 의하여 그 유효성을 보인 바 있다. 여기에서는 선박에 안티 롤링 진자를 설치한 모델을 2자유도 점성감쇠계로 선형화하여 시스템을 해석하고 실험과 비교하여 수학 모델의 정당성을 보이고, 수학 모델의 정당성을 바탕으로 최적의 안티 롤링 진자를 제안한다. 7.7kg의 모형선의 경우 모형선 질량의 0.26%인 20g의 안티롤링 진자가 가장 효율이 좋음을 보였다. 또 안티 롤링 진자의 질량이 다른 몇 가지 경우에 대하여 자유 롤링 실험을 하여 안티 롤링 진자의 유효성을 보인다.

**핵심용어** : 안티롤링, 안티롤링 탱크, 안티롤링 진자, 단진자, 선형운동방정식, 점성감쇠계

**Abstract** : The rolling motion of a floating body makes crews and passengers exhausted and/or applies forces to the structure to cause damage; it might even upset the body. Therefore, almost all ships are equipped with bilge keels for anti-rolling; in special cases, an anti-rolling tank(ART) or fin stabilizer or gyroscope could be installed. But an ART requires a large capacity to install it, and a fin stabilizer and gyroscope need great costs to install and also many expenses to operate. The authors suggest the use of an anti-rolling pendulum(ARP), and they showed that the ARP is effective to reduce rolling by experiments and via a Runge-Kutta analysis. This paper introduces the linearized 2 degrees of freedom with a viscous damping system for a ship equipped with ARP; it also shows the validation of the linearized analysis for the ship's roll motion. The paper proposes an optimum ARP on the basis of the justified model. The case of the 7.7kg model with ship 20g ARP of a mass ratio of 0.26%, is the most effective for reducing roll motion. The paper shows the ARPs with various mass ratios are effective for reducing the roll motion of a ship by free decaying roll experiments.

**Key words** : Anti-Rolling, Anti-Rolling Tank(ART), Anti-Rolling Pendulum(ARP), Simple Pendulum, Linear Equation of Motion, Viscous Damping System

### 1. 서 론

선박이나 해양구조물은 물위에 떠있기 때문에 끊임없이 크고 작은 파도에 노출될 수밖에 없고, 따라서 구조물이 계속 해서 동요를 한다. 그래서 선박에는 이 동요를 줄이기 위하여 예로부터 빌지 킬(bilge keel), 안티롤링 탱크(anti-rolling tank; ART)(Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989), 핀 스테빌라이저(Popular Mechanics, 1932), 자이로스코프(Popular Mechanics, 1933) 등 다양한 방법으로

이를 줄이려는 노력을 해왔다. 모든 배에 설치되어 있는 빌지 킬은 비교적 값싸게 설치하여 횡동요를 줄이는 역할을 한다.

안티롤링 탱크(anti-rolling tank: ART)의 경우는 선체에 횡 방향으로 U자형의 탱크를 설치하여 횡동요와 더불어 탱크내 의 물이 좌우로 이동하게 하는 장치로 이 때 선체의 운동과 물의 이동 사이에 위상차가 생기는 것을 이용하여 배의 횡동 요를 줄이는 장치이다. 효과는 상당히 좋으나 큰 공간을 차지 하는 단점이 있다. 물론 벨러스트 탱크나 청수 탱크를 이용하 면 공간의 문제는 해결되지만 선박의 롤링 주파수와 ART의

† Corresponding author, pj0903@hanmail.net 051) 410-4305

\* 종신회원, poseidon@kmou.ac.kr 051) 410-4305

\*\* wkdrhkdgh@hanmail.net 051) 410-4305

주) 이 논문은 “점성감쇠 안티롤링진자를 이용한 선박의 롤링 저감에 대한 연구”라는 제목으로 “2017년 한국항해항만학회 추계학술 대회 한국항해항만학회논문집(부산관광공사, 2017.11.2-4, pp.130-131)”에 발표되었음.



선박의 횡동요 진동수  $w_n$ 를 알 수 있으면 다음과 같이 추산할 수 있다.

$$J_0 = \frac{\Delta g \overline{GM}}{w_n^2} \quad (1)$$

이 모델을 더 단순화하면 Fig. 2와 같은 등가 시스템으로 표현할 수 있다.

Fig. 2에서 안티롤링 진자의 회전반경은  $R$ 이고, 안티롤링 진자와 선박의 회전 중심 사이의 거리는  $l$ 이고, 선박의 중심과 안티롤링 진자의 회전 중심 사이의 거리는  $s$ 이다.

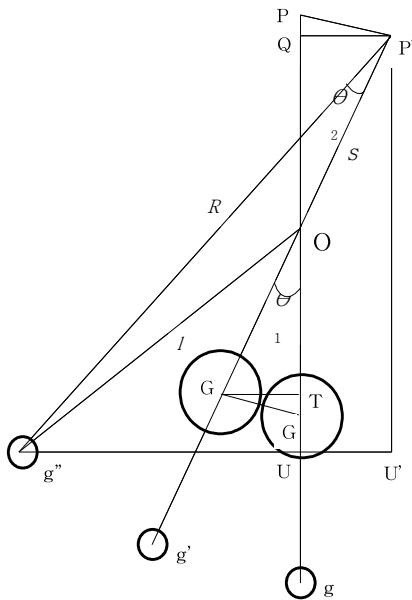


Fig. 2 Simplified ship model with anti roll pendulum

저자들(2016)은 이 시스템의 선형화한 운동방정식이 다음과 같이 나타남을 보인 바 있다.

$$\begin{bmatrix} J_0 + ml^2 & mlR \\ mlR & mR^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta g \overline{GM} + mgl & mgR \\ mgR & mgR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} M_s(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기에서  $M_s(t)$ 는 선체에 가해지는 외력 모멘트이고, ARP에 가해지는 모멘트는 없으므로 0이다.

### 2.1 점성감쇠 운동방정식

실제로는 선박의 운동은 감쇠에 의하여 시간이 경과하면서 운동이 점점 작아진다. 선박의 운동을 점성감쇠계로 가정하면 다음과 같이 운동방정식을 쓸 수 있다.

안티롤링 진자(anti-rolling pendulum; ARP)를 장치한 선박에 대하여 점성감쇠계 운동방정식을 쓰면 다음과 같이 된

$$\begin{bmatrix} J_0 + ml^2 & mlR \\ mlR & mR^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta g \overline{GM} + mgl & mgR \\ mgR & mgR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} M_s(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{M}$$

이 식에서 복원력 계수의 항을 보면  $c_{12}, c_{21}, c_{22}$ 는 단지 ARP의 감쇠 특성에 의하여 결정됨을 알 수 있다.  $c_{11}$ 은 선체와 ARP의 감쇠계수에 의하여 결정되는데 선체의 감쇠계수에 비하여 ARP의 감쇠계수는 무시할 수 있으므로  $c_{11}$ 은 선체의 감쇠계수를 그대로 쓰기로 한다.

회전운동의 1자유도 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_0 \ddot{\theta} + c_t \dot{\theta} + k_t \theta = 0 \quad (4)$$

이 운동방정식의 해는 다음과 같다.

$$\theta(t) = e^{-\zeta w_n t} (A \cos w_n t + B \sin w_n t) = C e^{-\zeta w_n t} \cos(w_n t - \phi) \quad (5)$$

여기에서  $w_n = \sqrt{k_t/J_0}$ 로 고유진동수이고,  $\zeta = c_t/2\sqrt{J_0 k_t}$ 로 정의되는 감쇠비이다.

선체 본체에 대하여서  $J_0$ 는 식 (1)에 의하여 구하고,  $k_t = \Delta g \overline{GM}$ 이고, 점성감쇠계수  $c_t$ 는 자유 감쇠 동요 실험에 의하여 구할 수 있다. 또 ARP에 대하여서는 식 (2)로부터  $J_0 = mR^2$ 이고,  $k_t = mgR$ 이고, ARP의 감쇠계수  $c_t$ 는 자유진동 실험으로부터 구할 수 있다.

### 2.2 ARP의 설계

안티롤링 시스템은 기계장치의 동흡진기와 아주 흡사하다. 동흡진기 이론의 기본은 외력의 주파수와 같은 고유진동수를 가지는 부진동체를 설치하면 본체의 진동을 0으로 할 수 있다는 것이다. 이 이론은 비감쇠계에 대한 것이고, 감쇠계의 경우는 본체의 진동을 0으로 할 수는 없지만, 상당히 낮출 수 있다는 것이다(Rao, 2005). 부진동체를 장치하면 2자유도계가 되므로 당연히 고유진동수가 2개가 되어 원래의 고유진동수에서는 진동을 줄일 수 있지만 새로 생긴 2개의 고유진동수에서는 당연히 진동이 커진다. 본체의 질량과 부진동체의 질량이 같으면 새로운 2개의 고유진동수는 원래 고유진동수를 중심으로 가장 멀리 떨어져 나타내게 되고 질량비가 작아지면 작아질수록 원래의 고유진동수 부근으로 모이게 된다.

선박의 경우는 부진동체의 질량관성모멘트가 선체의 질

량관성모멘트의 수 % 또는 수백분의 1에 해당하기 때문에 새로운 2개의 고유진동수가 아주 가깝게 나타나면서 전체적으로 주파수응답함수가 낮게 된다.

본 연구에서는 선박의 횡동요 고유진동수와 일치하는 고유진동수를 가지는 ARP를 선박에 설치함으로써 선박의 횡동요를 줄이고자 한다.

### 3. 모형선예의 적용

연구에 사용된 모형선의 제원을 Table 1에 보인다.

Table 1 Specification of the model ship

Item	quantity	Unit
Length	1.160	m
Breadth	0.210	m
Depth	0.105	m
Draft	0.043	m
Mass	7.7	kg
GM	0.075	m
Rolling period	0.68	sec

#### 3.1 모형선의 수학적 모델화

선박의 운동방정식은 식 (4)로 쓸 수 있고,  $J_0$ 와  $k_t$ 는 2.1절에서 언급한 대로 구하여 얻을 수 있고, 감쇠계수  $c_t$ 는 자유롤링 실험으로부터 얻은 결과를 식 (5)와 곡선맞춤법(curve fitting method)을 이용하여 구할 수 있다. Table 2에 곡선맞춤법으로 구한 계수를 보인다.

Table 2 Mass, damping and stiffness coefficients of the model ship earned by the curve fitting method.

Item	quantity	Unit
$J_0$ : mass moment of inertia	0.074	kgm <sup>2</sup>
$c_t$ : damping coefficient	0.047	Nm/s
$k_t$ : coefficient of restitution	5.660	Nm/rad

Fig. 3에 모형선의 자유 롤링 실험 결과와 곡선맞춤법을 이용하여 구한 감쇠계수를 식 (4)에 대입하여 초기값을 부여하여 계산한 결과의 그래프를 보인다. Table 3에 곡선맞춤법으로 구한 횡동요 특성 계수들을 보인다. 모형선의 자유 동요 실험 결과가 별표로 표시되어 있고, 곡선맞춤법으로 구한 계수를 이용하여 해석한 결과가 실선으로 표시되어 있다.

#### 3.2 ARP의 설계

선박의 횡동요를 줄이기 위하여 ARP를 설치한다. 가장 좋은 안티 롤링 장치는 모든 주파수의 외력에 대하여 횡동요를 최소로 하는 시스템이지만 이를 실현하는 것은 매우 힘이 든다. 여기에서는 선박의 고유진동수에 일치하는 외력이 가해

졌을 경우에 대응하는 시스템을 구현하는 것으로 한다.

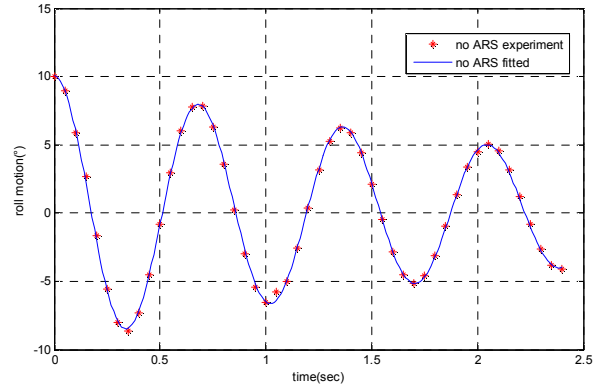


Fig. 3 Free decay roll curve and fitted curve of the model ship.

Table 3 Characteristic coefficients of the model ship

Item	quantity	Unit
$w_n$ : natural frequency	9.21	rad/s
T: roll period	0.68	sec
A: cosine coefficient	9.82	degree(°)
B: sine coefficient	0.23	degree(°)
$C(= \sqrt{A^2+B^2})$ : roll amplitude	9.82	degree(°)
$\zeta$ : damping ratio	0.038	-

단진자의 주기는 다음과 같다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (6)$$

모형선의 횡동요 주기는 0.68초이므로 단진자의 반경은 약 11.5cm가 되어야 한다. Fig. 4에 ARP를 장착한 모형선을 보인다.

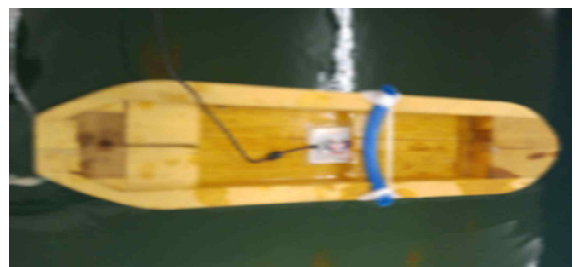


Fig. 4 The model ship equipped with ARP

#### 3.3 실험 및 고찰

실험은 ARS를 장착하지 않은 경우, 32g의 ARP를 장착한 경우, 40g의 ARP를 장착한 경우, 50g의 ARP를 장착한 경우와 웨도에 물 50cc를 채운 경우에 대하여 실시하였다. Table 4에 실험 데이터를 보인다.

Table 4 Specification of the various ARSs

Item	50cc	32g	40g	50g
T: Period of ARP(sec)	0.69	0.68	0.69	0.68
R: radius of ARP(m)	0.115			
l: distance from pendulum to F(m)	0.010			
mass ratio (ARS/ship in percent)	0.65	0.42	0.52	0.65

Fig. 5에 실험 결과를 보인다. 검은색 그래프가 ARS가 없는 경우이고, 분홍색 그래프가 32g의 ARP를 장착한 경우이고, 녹색 그래프가 40g의 ARP를 장착한 경우이고, 빨간색 그래프가 50g의 ARP를 장착한 경우이고, 파란색 그래프가 궤도에 50cc의 물을 채운 경우에 대한 자유 횡동요 실험 결과를 보인다. 어떤 경우든 초기에 10도 경사시킨 후 조용히 모형선을 놓아서 자유 횡동요를 관찰하였다. 계측은 MPU6050 6축 자이로 센서를 Arduino nano에 연결하고, Arduino nano를 USB로 노트북에 연결하였고, 노트북에서는 PLX-DAQ라는 오픈 Excel 응용 프로그램을 이용하여 데이터를 눈으로 직접 확인하면서 실시하였다.

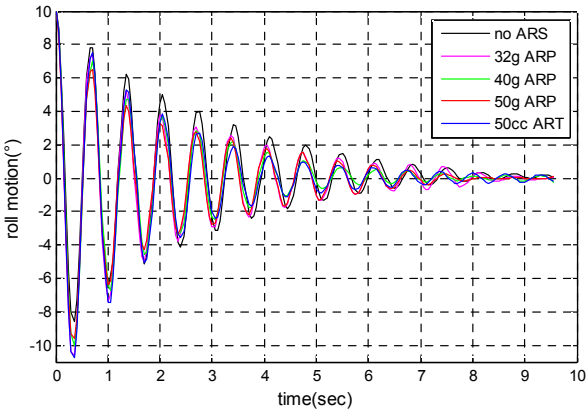


Fig. 5 Roll motion comparison graph between ships without ARS and with various ARPs and ART.

Table 5에 곡선맞춤법으로 구한 각 경우의 계수를 보인다. 표에서 root mean square error는 최소자승오차로 작게는 1.5에서 크게는 6.07로 나타났다. 첫 4.5주기의 49개의 데이터를 사용하였고, 최대값이 대략 10 정도임을 감안하면 맞춤 결과는 좋은 것으로 판단된다. 고유진동수의 변화는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 가장 중요한 것은 감쇠 효과이다. ARS가 없는 상태를 기준으로 하여 감쇠비를 비교하면 32g의 경우 45%, 40g의 경우 47%, 50g의 경우 61%, 50cc ART의 경우에는 42%의 감쇠비 증가를 보였다. 그림에서는 잘 나타나지 않지만 곡선맞춤한 결과를 보면 ARP의 질량이 커질수록 그 효과가 커짐을 알 수 있다. 또 같은 질량 50g인 ART와 ARP를 비교해보면 ARP의 경우가 약 20% 정도 성능이 좋음을 알 수 있다. 특히 주목할 부분은 선체 질량의 약 0.4%인 32g의 ARP

로도 45%의 감쇠비 증가를 보이는 것이다. 더 가벼운 ARP로도 상당한 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 또 32g의 ARP 효과가 50cc ART의 효과 동등 이상인 것으로 나타났다.

Table 5 Characteristic coefficients of the model ship in case of without ARS and with various ARSs

kind of ARS	no ARS	32g ARP	40g ARP	50g ARP	50cc ART
mass ratio(%)	0	0.42	0.52	0.65	0.65
$w_n$ (rad/s)	9.21	9.25	9.16	9.26	9.1
T(sec)	0.68	0.68	0.69	0.68	0.69
$\zeta$	0.038	0.055	0.056	0.061	0.054
$\zeta/\zeta_0$	1	1.45	1.47	1.61	1.42
root mean square error	1.5	5.21	5.85	6.07	5.35

### 3.4 실험과 이론 해석의 비교

여기에서는 실험 결과와 이론 해석 결과를 비교하여 정립한 이론식의 실용성을 보이고자 한다.

선형화한 2자유도 점성감쇠계의 식 (3)으로 표시되었다. 앞 절에서의 가정과 곡선맞춤법의 결과를 이용하면 식 (3)에서  $c_{12}, c_{21}, c_{22}$ 를 제외한 모든 계수들은 구할 수 있다. 또  $c_{12} = c_{21} = c_{22}$ 의 관계가 있다고 하였고, 이는 단진자의 감쇠 계수이므로 단진자의 감쇠계수만 구하면 된다.

단진자의 감쇠계수를 구하기 위하여 ARP의 15도 경사 위치에서 50g의 쇠구슬을 조용히 놓아서 감쇠 특성을 조사하였다. 십 수 차례의 실험 결과 6초 동안 약 8.5회 진동한 후 쇠구슬이 멈추는 것을 알 수 있었다. 또 마찰 때문에 구슬은 초기 소각도의 경사에서는 움직이지 않는다. 최초로 구르기 시작하는 각을 BOSH사의 GLM80으로 10회 측정한 후 평균값을 구한 결과 6.65도로 나왔다. 이 현상을 지수 감쇠로 보고 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같고, 식으로 나타내면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\theta_p(t) = 15e^{-0.136t} \cos(8.9t) \tag{7}$$

또 식 (7)과 (5)의 관계로부터 Table 6와 같은 단진자의 특성을 얻을 수 있다. 식 (3)의 모든 계수들이 구해지면 해석이 가능해진다.

Fig. 7에 50g의 ARP를 장착하여 모형선을 10도 경사시킨 후 조용히 놓아준 경우의 횡동요 그래프를 보인다. 붉은색 별표가 실험 결과이고, 실선은 Runge-Kutta 법으로 계산한 해석 결과이다. 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다.

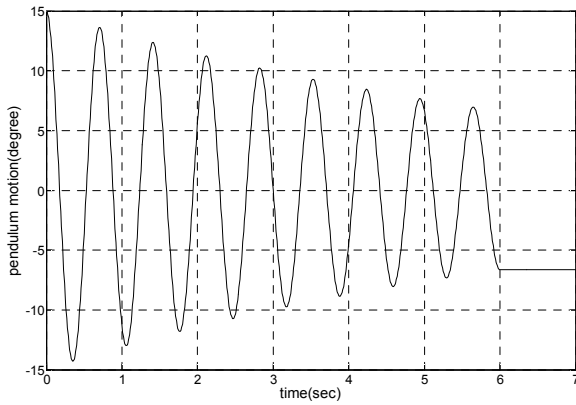


Fig. 6 Free decay characteristics of ARP

Table 6 Specification of the 50g of anti-rolling pendulum

Item	quantity	Unit
T: Period of ARP	0.68	sec
D: diameter of pendulum	0.023	m
m: mass of pendulum	0.050	kg
mass ratio(ARP/ship)	0.65	%
R: radius of pendulum	0.115	m
l: distance from pendulum to metacenter	0.01	m
$\zeta_p$ : damping ratio of pendulum	0.015	-
$J_p = ml^2$ : moment of inertia of pendulum	$0.661 \times 10^{-3}$	$\text{kgm}^2$
$k_p = mgR$ : restoring coefficient	0.0564	Nm
$c_p = 2\zeta_p \sqrt{J_p k_p}$ : damping coefficient	$0.186 \times 10^{-3}$	$\text{kgm}^2/\text{s}$

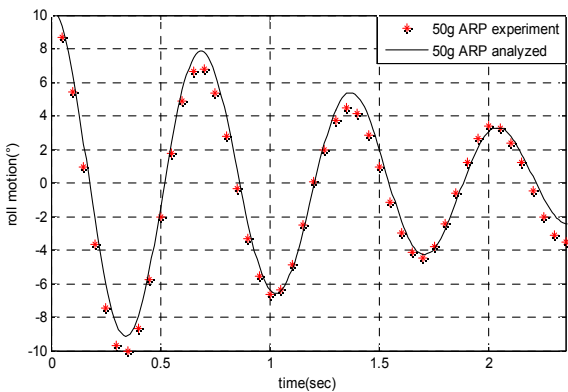


Fig. 7 Roll motion of experiment and analysis with 50g ARP

3.5 파랑강제력에 대한 응답

앞 절에서 ARP를 장치한 모델선에 대하여 식 (3)으로 자유 횡동요 해석을 하여서 계수들의 정당성을 증명하였다.

여기에서는 식 (3)을 이용하여 규칙파 강제력에 대한 응답을 구하여 본다. 파랑 강제력은 공진주파수의 단위 크기 즉

1 Nm이 가해지는 경우에 대하여 살펴본다. 이 모형선의 경우 정적인 모멘트 1Nm가 가해지면  $1(Nm) = \Delta g \overline{GM} \sin\theta$ 의 관계로부터 선체가 약  $10^\circ$  경사한다.

Fig. 8에 ARS가 없는 경우와 15g, 20g, 30g, 40g, 50g의 ARP를 장치한 경우의 전달함수를 보인다. 횡축은 강제력 주파수의 고유주파수에 대한 주파수비이고, 종축은 단위 모멘트당 횡동요 각이다. 검은색 실선이 ARS가 없는 경우이고, 사각형의 분홍색 실선이 50g의 ARP, x표의 파란색 실선이 40g의 ARP, +표의 회색 실선이 30g의 ARP, o표의 붉은색 실선이 20g의 ARP, ◇표의 녹색 실선이 15g의 ARP를 장치한 경우의 횡동요 응답이다. ARS가 없는 경우 공진 상태에서의 동요 진폭은 약  $119^\circ/\text{Nm}$ 이고, ARP를 탑재한 경우는 2자유도가 되었기 때문에 공진점이 두 군데 나타나고, 따라서 원래 1자유도의 전달함수와 새로운 2자유도 전달함수가 두 점에서 만나게 된다. 그래프를 살펴보면 ARP의 질량이 크다고 해서 횡동요를 더 많이 줄여주는 것은 아니라는 사실을 알 수 있다. 공진 즉 횡동요 고유진동수의 강제력이 작용할 때는 ARP의 질량이 커질수록 효과가 좋지만 전체적으로 보면 20g의 ARP를 장치한 경우가 가장 좋은 효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

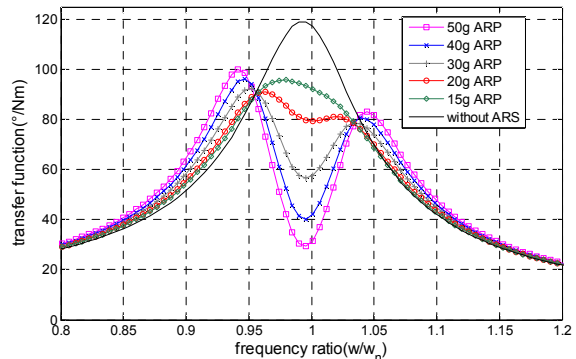


Fig. 8 Transfer function graphs of ships with various ARP

더 정확하게 안티 롤링 효과를 알기 위하여 전달함수의 최대값과 감소의 효과를 Table 7에 보인다.

Table 7은 20g의 ARP를 장치하면 규칙파에 대한 최대 횡동요를 23.5% 정도 줄일 수 있다는 것을 의미하고 있다. 모형선의 질량이 7.7kg이므로 0.26%의 중량으로 횡동요를 약 1/4 가량 줄일 수 있을 것으로 보인다.

Table 7 Roll reduction effects by various ARPs

kinds of ARP	no ARS	15g ARP	20g ARP	30g ARP	40g ARP	50g ARP
peak values ( $^\circ/\text{Nm}$ )	119.1	95.7	91.1	92.4	96.3	100.1
reduction effects(%)	0.00	20.0	23.5	22.4	19.1	16.0



Fig. 5에서는 50g의 ARP의 성능이 가장 좋은 것으로 보이는데 이 실험은 자유 횡동요 실험으로 횡동요 주기가 거의 변하지 않았기 때문이다. 이것은 Fig. 8을 보면 알 수 있는데 모형선의 고유진동수 부근에서는 ARP의 질량이 클수록 감쇠 효과가 큰 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 안티롤링 진자를 이용하여 선박의 횡동요를 저감시키는 방법을 제안하여서 다음의 결론을 얻었다.

1. 안티롤링 진자를 장치한 선박의 횡동요에 대한 점성감쇠 수학 모델을 제시하였고, 실험을 통하여 수학 모델의 정당성을 확인하였다.

2. 수학 모델의 정당성을 확인하였으므로 수학 모델을 이용하여 파랑 강제력 해석을 수행하였고, 선체 질량의 0.26%인 20g의 ARP가 최적의 ARP임을 알 수 있었다.

3. ARP의 감쇠효과를 확인하기 위하여 ARS를 장착하지 않은 경우, 50cc의 ART, 32g의 ARP, 40g의 ARP, 50g의 ARP를 장착한 경우에 대하여 자유 횡동요 실험을 하여서 각각 감쇠비가 1.45배, 1.47배, 1.61배, 1.65배 증가함을 알 수 있었다. 또 32g의 ARP가 50cc의 ART와 동등 이상의 성능을 보여주는 것을 알 수 있었다.

논문에서 적용한 0.42~0.65%의 ARP의 중량도 큰 선박에 적용하기에는 큰 중량이기 때문에 대형선에 대하여서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 그러나 낚싯배 등 소형선박이나 소형 여객선에는 비교적 쉽게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

또 최적의 ARP 도출법에 대한 해석법과 실험에 의한 확인을 통하여 실선에 적용할 수 있는 연구와 ARP를 설치하는데 따르는 선체의 구조적인 문제에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 보인다.

## References

- [1] Koike, Y., Saeki, A., Mutaguchi, M., Imazeki, M., Miyabe, H., Yamashitar, S.(1999), "Application of Hybrid Anti-Rolling System to Actual Ship," Transaction of the society of Naval Architecture of Japan, vol. 185, pp. 111-117.
- [2] Koike, Y., Yoshikai K., Hiroshige. E., Tanida, K., Mutaguchi, M.(1994), "Study and At-sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System," Transaction of the society of Naval Architecture of Japan, vol. 176, pp. 137-143.
- [3] Moon, S. J., Jeong, J. A., Yoon, H. K., Lee, G. J., Ahn, S. P.(2005), "An Experimental Study on Mass Driving Anti-Rolling System for Ships," Transaction of the

Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, pp. 665-672.

- [4] Oikawa, M., Koike. Y., Chatani. Y(1993), "Study and At-sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System," Transaction of the society of Naval Architecture of Japan, vol. 174, pp. 217-223.
- [5] Park S. C, Yi G. J, and Park K. I, "Reduction Ship Rolling with a Anti-Rolling Pendulum," Journal of Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 40, No. 6, pp. 361-367.
- [6] Popular Mechanics(1932), "Fins Proposed For Big Liners To Prevent Rolling," Popular Mechanics, August, p. 251.
- [7] Popular Mechanics(1933), "Fins to Stop Ship's Rolling Governed by Gyro," Popular Mechanics, April, p. 509.
- [8] Rao S. S.(2005), Mechanical vibrations 4th ed., Pearson Education Korea Ltd., pp. 730-733, 736-740.
- [9] Sellars F. H. and Martin J. P.(1992), "Selection and Evaluation of Ship Roll Stabilizer Systems," Marine Technology vol. 29, No. 2, pp. 84-101.
- [10] Society of Naval Architects and Marine Engineers(1989), Principles of Naval Architecture, Vol. 3, p 127.
- [11] Yoon H. K., Lee G. J., Lee C. M.(2004), "Modeling and Simulation of a Ship with Anti-Rolling Devices in Waves," Journal of Korean Navigation and Port Research, vol. 28, No. 5, pp. 347-352.

Received 17 July 2017

Revised 12 September 2017

Accepted 12 September 2017

