

안티롤링 진자를 이용한 부유체의 횡동요 저감

박석주* · 이금주** · † 박경일

*한국해양대학교, **한국해양대학교 대학원, † (주)칸,

Reducing Ship Rolling with a Anti-Rolling Pendulum

Sok-Chu Park* · Geum-Joo Yi** · † Kyung-Il Park

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

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

† Khan co., Ltd., Geo-Je city, Gyeong-Nam, 53301, Korea

요 약 : 부유체의 횡동요는 승조원의 피로를 누적시키고, 심지어 구조물 전체를 전복시키기 까지 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. 본 연구에서는 안티롤링 진자를 이용하여 부유체의 횡동요를 줄이고자 한다. 보통 단진자라고 하면 질량체를 끈으로 어디엔가 고정시켜 놓고 자유롭게 흔들리는 구조를 말한다. 여기에서는 통상의 진자 대신에 진자를 원궤도에 올려놓아서 단진동 운동을 하도록 하는 원리를 이용한다. 제안한 장치를 실험선에 적용하여 그 효능을 입증하였다. 안티롤링 탱크의 약 1/8의 중량과 약 1/6의 용적을 가진 안티롤링 진자를 이용하여 이것보다 더 좋은 효과를 낼 수 있음을 확인하였다. 여기에 더하여 선체에 안티롤링 진자를 부가한 모델의 선형운동방정식과 비선형 운동방정식을 제시하였다.

핵심용어 : 안티롤링, 안티롤링 탱크, 안티롤링 진자, 단진자, 선형운동방정식, 비선형운동방정식

Abstract : A ship's rolling motion can make crew and passengers sick and/or apply forces to the structure that cause damage.. Therefore bilge keels are equipped in most ships for anti-rolling. In special cases, anti-rolling tanks (ARTs), fin stabilizers, or gyroscopes can be installed. However, ARTs require a large area to install, and fin stabilizers and gyroscopes are costly to install and expensive to operate. This paper suggests a Anti-rolling pendulum (ARP) to reduce roll motion. ARPs acts like ARTs. However, the ARP has a circular shape guidance arc instead of the string or wire of a simple pendulum. The device suggested has about 1/8 the weight and 1/6 the volume of an ART and is more effective. This study derives the nonlinear and linear differential equations of system motion.

Key words : Anti-Rolling, Anti-Rolling Tank(ART), Anti-Rolling Pendulum(ARP), Simple Pendulum, Linear Equation of Motion, Nonlinear Equation of Motion

1. 서 론

선박이나 해양구조물은 물위에 떠있기 때문에 끊임없이 크고 작은 파도에 노출될 수밖에 없고, 따라서 구조물이 계속해서 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 탱크내의 물이 좌우로 이동하게 하는 장치로 이 때 선체의 운동과 물의 이동 사이에 위상차가 생기는 것을 이용하여 배의 횡동요를 줄이는 장치이다. 효과는 상당히 좋으나 큰 공간을 차지하는 단점이 있다. 물론 벨러스트 탱크나 청수 탱크를 이용하면 공간의 문제는 해결되지만 선박의 롤링 주파수와 ART의 이동수 고유주파수를 일치시켜야 롤링 저감의 효과가 가장 크다는 점을 고려하면 전용의 ART를 설치하는 것이 최선임을

* 중신회원 : poseidon@kmou.ac.kr, 051) 410-4305

** 연회원, pj0903@hanmail.net 051) 410-4305

† Corresponding author : 연회원, oonchai@naver.com, 055) 687-7796

(주) 이 논문은 “안티롤링 추를 이용한 부유체의 롤링 저감”이란 제목으로 “2016년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 (부산 BEXCO, 2016.5.19, pp.106-107)”에 발표되었음

알 수 있다. 핀 스테빌라이저의 경우는 구조가 복잡하여 설치 비도 많이 들고 유지 보수비도 많이 들고, 저속에서는 기능을 발휘할 수 없는 단점이 있다. 자이로스코프의 경우에는 질량이 크면 클수록, 회전수가 빠르면 빠를수록 효과가 좋지만 그에 따른 큰 동력을 소모하게 된다.

Oikawa(1993)와 Koike(1994, 1999)는 선박의 갑판 위의 원호상의 레일 위에 움직이는 질량체를 올려놓고 제어를 통하여 능동제어함으로써 선박의 횡동요를 감소시키는 장치를 제안한 바 있다.

이 질량이동식 안티롤링 장치는 동력을 사용하여 질량체를 이동시키기 때문에 아주 큰 동력이 필요하게 되고 질량이 크고, 또 구조도 복잡하기 때문에 제어도 쉽지 않아서 실제로 선박에 장착하기에는 큰 비용이 든다. Moon(2005)은 질량체를 선박의 위에서 모터를 이용하여 이동시키는 방법으로 선박의 횡동요를 감소시키는 연구를 수행하였으나 이 방법도 대단히 큰 동력이 요구되기 때문에 효율적이지 못하다. Yoon(2004)은 수동형 이동질량 안정기를 이용하여 횡동요를 감소시키는 방안을 제시하여 시뮬레이션을 통한 효율성을 보인 바 있다.

여기에서는 안티롤링 진자를 구조물의 본체에 부가하여 제어기 없이 안티롤링 진자의 운동만으로 선박의 횡동요를 감소시키는 장치에 대하여 시스템의 운동방정식을 유도하고 실험 결과와 비교 검토한다.

2. 이 론

선박의 안티롤링에 대한 연구와 장치는 아주 오래 전부터 연구되어 왔고, 설치되고 있다. 밑지 길은 선체에 고정된 장치이므로 선박의 운동을 줄이는 감쇠 장치로 고려하면 되고, 자이로스코프는 외력으로 고려하면 되고, 안티롤링 탱크는 자유도를 증가시켜서 해석하여야 한다. 제안하는 안티롤링 진자의 경우도 개념은 안티롤링 탱크와 완벽하게 같다. 안티롤링 탱크의 질량체인 물은 물 자체로의 감쇠 성질을 가지고 있고, 더하여 물이 흐르는 통로의 크기에 따라서 감쇠의 정도가 달라지기 때문에 감쇠를 반드시 고려하여야 한다. 안티롤링 진자의 경우는 단순한 궤도 위를 움직이도록 하면 거의 감쇠가 없다. 감쇠를 추가하려면 궤도에 액체를 채워서 진자의 운동을 방해하거나 액체의 통로를 반대 쪽 궤도까지 폐회로를 만들어 흐름을 제어하여 감쇠의 정도를 조절할 수 있다.

횡동요만을 고려하여 선체 운동의 운동방정식을 만들면 1자유도 모델이 되고, 부가하여 안티롤링 진자를 얹으면 자유도가 추가되어 2자유도 운동방정식이 된다. 이것은 기계장치에서 사용하는 동흡진기의 원리와 같다. 이론적으로는 동흡진기의 고유진동수를 기계장치의 운동 진동수와 일치시키면 기계장치의 운동이 완전히 0이 된다(Rao, 2005). 그러나 이 경우에는 부가된 동흡진기의 진동이 거의 무한대로 커지기 때문에 감쇠 장치를 부가하거나 진동수를 완전히 일치시키지 않고 동흡

진기의 고유진동수를 기계장치의 진동수보다 약간 낮추면 동흡진기의 진동을 줄일 수 있고, 동흡진기의 운동을 기계장치의 운동보다 위상차가 90°도보다 약간 크게 하면 기계장치의 운동을 최대 억제할 수 있다.

2.1 지배방정식

안티롤링 진자를 장치한 선박은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

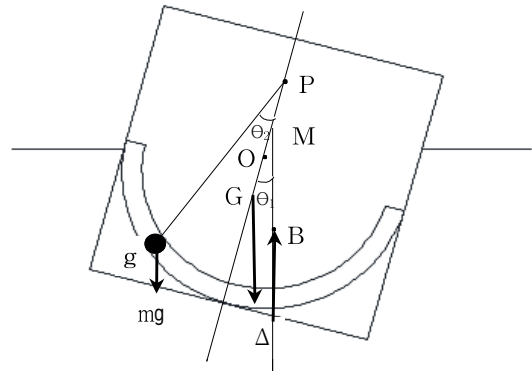


Fig. 1 A ship model with anti-rolling pendulum

선체의 질량은 Δ 라 하고, 선체의 중심은 G , 선박의 부심은 B , 선박의 메타센터는 M 이라고 한다. 안티롤링 진자의 질량은 m , 안티롤링 진자의 중심은 g 라 하기로 한다. 선박의 횡동요는 수직축에 대하여 θ_1 회전하고, 안티롤링 진자는 점 P 를 중심으로 선체에 대하여 θ_2 회전하는 모델을 상정하기로 한다.

선체의 회전중심은 정확히 알 수 없으나 수선면의 중앙인 O 에 있는 것으로 가정하기로 한다. 또 선체의 복원력은 $M = \Delta g \overline{GM} \sin \theta_1 \cong \Delta g \overline{GM} \theta_1$ 이므로 이 모델을 단순화하면 O 점에 질량 Δ 인 추가 길이 \overline{GM} 인 곳에 매달려서 진동하는 단진자로 상정할 수 있고, 이때의 질량관성모멘트는 J_0 는 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.

이 시스템의 운동에너지와 위치에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

운동에너지는 선체의 운동에너지와 롤링진자의 운동에너지

Table 2 Specification of the anti-rolling pendulum

Item	quantity	Unit
diameter	0.025	m
mass of ARP	0.064	kg
R	0.118	m
l	0.03	m
mass ratio(ARP/ship)	0.5	%

Fig. 4(a)는 안티롤링 탱크를 장착한 모델의 사진이고, Fig. 4(b)는 안티롤링 진자를 장착한 모델의 사진이다.

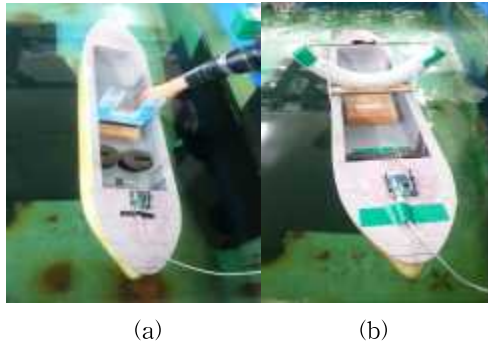


Fig. 4 The model ship with anti-rolling tank and anti-rolling pendulum

안티롤링 탱크의 크기는 선박의 배수량의 약 4%인 500g의 이동수가 되도록 하였고, 안티롤링 진자는 배수량의 약 0.5%인 64g인 직경 25mm의 쇠구슬을 이용하였다.

모든 시스템의 진동(동요 포함)은 시스템의 고유진동수 근방의 주파수를 가지는 외력이 작용할 때 가장 심하게 일어나기 때문에 이 고유진동수 근방에서 진동을 최소화 하는 제진 시스템을 개발하여야 한다. 일반적으로 시스템의 고유진동수와 일치하는 부진동체를 장착함으로써 진동을 최소화할 수 있다.

Ahmed(2001)는 Fig. 5에 대한 ART에 대하여 식 (9)와 같은 고유주기를 유도하였다.

$$T_t = \sqrt{\frac{2gh_d}{w_r w + 2h_r h_d}} \quad (9)$$

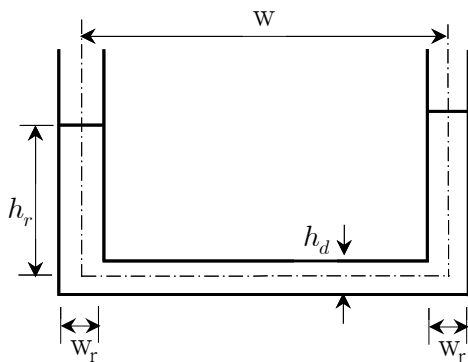


Fig. 5 ART and its geometric parameters

안티롤링 탱크의 이동하는 물의 질량을 선체질량의 약 4%로 하고, 이동수의 왕복 주기를 모형선의 횡동요 주기인 0.7초로 맞추면 Table 3과 같은 안티롤링 탱크의 제원을 얻을 수 있다.

Table 3 Specification of the ART

Item	quantity	Unit
w	14	cm
w _r	3.5	cm
h _d	3.5	cm
h _r	13	cm
T _t	0.7	sec
mass of ART water	490	g
mass ratio(ART/ship)	3.8	%

Table 3에 의하여 3.5cm의 정사각형 단면을 가진 안티롤링 탱크를 만들어서 실험에 사용하였다. 이 때 이동수의 양은 490g이었다.

또 안티롤링 진자의 경우는 단진자의 주기가 배의 동요주기와 일치하도록 설계하였다. 단진자의 주기 T는 다음과 같다.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (10)$$

3.1 안티롤링 효과

Fig. 6은 아무런 안티롤링 장치(Anti Rolling System: ARS)가 없는 모형선의 자유감쇠 운동을 나타낸 그래프이다. 실험은 수조에서 실시하였고, 초기 횡동요 각은 10°로 하여 최대한 조용한 상태에서 배를 놓아주었다.

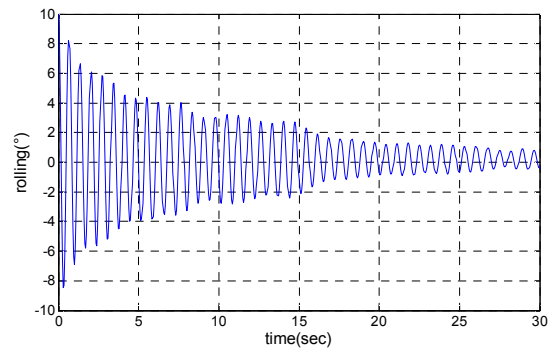


Fig. 6 Model ship's free roll decay without anti-rolling system

Fig. 6에서 5초가 경과하면 횡동요가 커졌다 작아졌다 하는 것을 알 수 있는데 수조가 작은 관계로 반사파의 영향을 받은 결과로 보인다. 따라서 해석은 처음 5초의 범위 내에서 하였다. 안티롤링의 효과는 한두 주기 안에서 이미 달성되어야 하기 때문에 약 7주기에 해당하는 처음 5초는 해석 범위로 충분하다.

먼저 안티롤링 장치를 갖추지 않은 선박의 자유진동에 대한 횡동요의 감쇠 특성을 살펴보기 위하여 곡선맞춤법을 이용하여 계수들을 구하여 보았다. 점성감쇠계의 자유진동의 일반해는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta(t) = e^{-\zeta w_d t} (A \cos w_d t + B \sin w_d t) \quad (11)$$

여기에서 w_n 은 시스템의 고유진동수이고, w_d 는 감쇠고유진동수인데 선박 횡동요의 경우는 횡동요 주파수이고, ζ 는 시스템의 감쇠 특성을 나타내는 감쇠비이다. Fig. 7이 곡선맞춤법의 결과를 보이고, Table 4가 얻어진 각 계수이다.

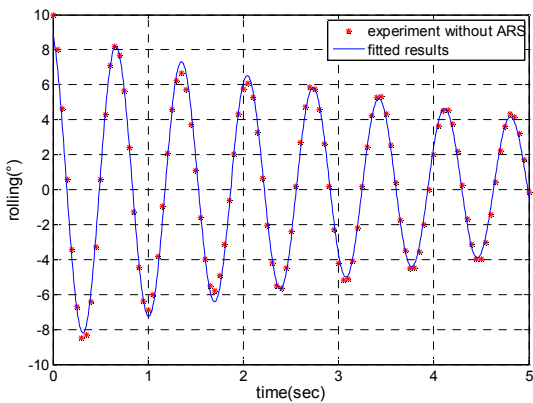


Fig. 7 Curve fitting results of roll angle without ARS

Table 4 Roll characteristics by curve fitting

Item	quantity	Unit
w_n : natural frequency	9.096	rad/s
w_d : damped natural frequency	9.094	rad/s
T: roll period	0.69	sec
A: cosine coefficient	8.6	degree(°)
B: sine coefficient	-2.34	degree(°)
$C (= \sqrt{A^2 + B^2})$: roll amplitude	8.91	degree(°)
ζ : damping ratio	0.019	-

Fig. 7에서 알 수 있듯이 실험 데이터와 곡선맞춤법으로 구한 결과가 잘 맞는 것을 알 수 있고, 따라서 이 선박의 횡동요 특성은 식 (11)로 잘 표현될 수 있음을 알 수 있다. 즉 선박의 횡동요는 점성감쇠계로 간주해도 좋다는 사실을 보여준다.

Table 4에서 횡동요 주기는 약 0.7초이며 초기 진폭은 8.91°이고, 감쇠비는 0.019임을 알 수 있다. 초기 진폭이 10이 되지 않고 8.91이 된 것은 실제의 선박은 상하동요(heave)의 영향을 받고, 또 정확히 메타센터를 중심으로 하여 회전운동을 하지는 않기 때문이다. 이러한 초기 상태의 선박의 불안정성을 감안하여 식 (11)에 상수항을 더하여 곡선맞춤법을 시행하였다.

Fig. 8은 안티롤링 장치가 없는 경우와 안티롤링 탱크(Anti

Rolling Tank: ART)를 장착한 경우와 본 연구에서 제안한 안티롤링 진자(Anti Rolling Pendulum: ARP)를 장착한 경우에 대한 횡동요의 비교 그림이다.

빨간색 쇠선이 안티롤링 장치가 없는 경우이고, 파란색 실선이 전통적인 안티롤링 탱크를 장착한 경우이고, 검은색 점선이 안티롤링 진자를 장착한 경우의 그래프이다. 안티롤링 탱크와 안티롤링 진자를 장착한 선박이 상당히 빨리 횡동요가 줄어들어 줄어든 것을 알 수 있다.

여기에서도 횡동요 특성을 더 자세하게 파악하기 위하여 식 (11)를 이용하여 곡선맞춤법을 적용하여 각 계수들을 구하였고 그 결과를 Table 5에 보인다.

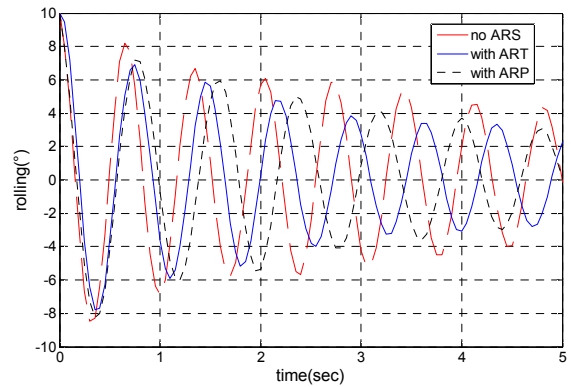


Fig. 8 Graph comparison between ships without ARS, with ART and with ARP

Table 5 Various ship's Roll characteristics

Item	no ARS	ART	ARP	Unit
w_n	9.10	8.71	7.82	rad/s
w_d	9.09	8.71	7.82	rad/s
T	0.69	0.72	0.80	sec
A	8.60	8.69	8.82	degree(°)
B	-2.34	1.49	-1.93	degree(°)
C	8.91	8.81	9.03	degree(°)
ζ	0.019	0.031	0.032	-

표에서 알 수 있듯이 감쇠비가 안티롤링 장치가 없는 경우에는 0.019에서 안티롤링 탱크를 장착한 경우에는 0.031로, 안티롤링 진자를 장착한 경우에는 0.032로 상당히 커졌음을 알 수 있다. 감쇠비가 커졌다는 것은 그만큼 횡동요가 빨리 준다는 것을 의미한다. 안티롤링 탱크와 안티롤링 진자의 경우는 거의 비슷하여 우열을 가리기 어렵다.

또 횡동요 주기는 안티롤링 장치가 없는 경우에는 0.69초에서 안티롤링 탱크를 장착한 경우에는 0.72초로, 안티롤링 진자를 장착한 경우에는 0.80초로 길어졌음을 알 수 있다.

그래프 상에서는 안티롤링 탱크와 안티롤링 진자의 효과가 거의 비슷한 것으로 나오지만 사람이 느끼는 것은 진폭의 문제가 아니라 가속도의 문제이기 때문에 주기가 더 길어진 안티롤링 진자가 여객이나 승무원에게는 효과가 더 좋다. 가속

도는 진동수의 제곱에 비례하기 때문에 인체에 미치는 효과를 가속도를 기준으로 비교하면 Table 6와 같다.

Table 6 Various ship's roll characteristics

	no ARS	ART	ARP
roll amp	$\Theta(\text{rad})$	$\Theta(\text{rad})$	$\Theta(\text{rad})$
max vel.	$9.09\Theta(\text{rad/s})$	$8.71\Theta(\text{rad/s})$	$7.82\Theta(\text{rad/s})$
max acc.	$82.70\Theta(\text{rad/s}^2)$	$75.84\Theta(\text{rad/s}^2)$	$61.10\Theta(\text{rad/s}^2)$
relative acc	1.00	0.92	0.74

안티롤링 장치가 없을 때를 1로 하여 인체나 화물에 미치는 영향을 평가하면 안티롤링 탱크의 경우는 0.92, 안티롤링 진자의 경우는 0.74 정도의 힘을 받게 된다는 의미이다. 즉 안티롤링 장치가 없는 경우에 비하여 안티롤링 탱크를 비치한 선박은 약 10% 정도, 안티롤링 진자를 장치한 경우는 약 30% 정도로 감소된 외력을 느끼게 된다는 의미이다. 물론 횡동요 주기가 길어졌다는 것은 GM의 감소를 뜻하기 때문에 이것은 유념할 필요가 있다.

Fig. 9에 선박의 가속도의 그림을 보인다. 붉은색 쇄선이 안티롤링 장치가 없는 선박의 가속도 그래프이고, 파란색 실선이 안티롤링 탱크가 장착된 선박의 가속도 그래프이고, 검은색 점선이 안티롤링 진자가 장착된 선박의 가속도 그래프이다. 안티롤링 진자가 장착된 선박의 가속도가 가장 빨리 작아짐을 알 수 있다.

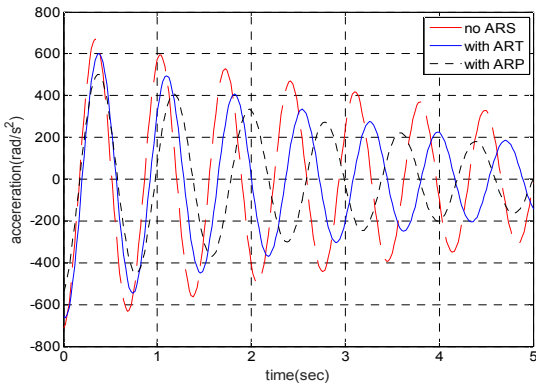


Fig. 9 Acceleration comparison graphs between ships without ARS, with ART and with ARP

안티롤링 진자의 또 다른 장점은 안티롤링 탱크에 비하여 그 차지 용적이 약 1/3로 줄어든다는 것이다. 이는 쇄의 비중이 해수 비중의 약 7.7배에 해당하여 통로의 면적을 줄일 수 있기 때문이다. 또 안티롤링 탱크의 해수의 양이 490g인데 비하여 안티롤링 진자의 경우는 약 1/7.7인 64g짜리를 사용하여 동등 이상의 효과를 나타낼 수 있음을 보여준다.

3.2 이론 해석의 적용

여기에서는 안티롤링 진자를 장치한 선박의 횡동요 특성을

이론적인 해석으로 접근한다.

먼저 선박이 소각도로 동요한다고 가정하여 운동방정식을 선형화한 식 (8)을 적용하여 해석하고, 다음에 비선형 방정식 (7)을 이용하여 비선형 해석을 한다.

3.2.1 선형 해석

식 (8)에서 각 계수들은 실측 데이터와 이로부터 계산한 값들을 사용하였다. 중심은 배를 실로 매달아 찾았고, 메타센터는 계산에 의하여 구하였고, \overline{GM} 은 1kg의 추를 좌현에서 우현으로 우현에서 좌현으로 이동시키는 실험에 의하여 구하였다. 이로부터 복원력을 구하고, 횡동요 주파수로부터 선체의 질량관성모멘트 J_0 를 추정하였다. 따라서 이 J_0 에는 부가질량에 의한 질량관성모멘트가 포함되어 있다. 선체의 감쇠계수는 Table 5로부터 계산하여 구하였고, 안티롤링 진자의 감쇠계수는 크기가 선체의 감쇠계수에 비하여 아주 작으므로 시스템의 해석에 크게 영향을 주지 않을 것으로 사료되어 선체의 감쇠비를 그대로 이용하여 구하였다. 나머지 계수들은 물리적인 성질이나 기하학적인 성질로부터 구하였다. 이들을 행렬로 정렬하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)에 초기값을 대입하면 이 운동방정식에 대한 해를 얻을 수 있다. 해석과 실험 결과를 그림으로 표시한 것이 Fig. 10이다. 빨간색 실선이 안티롤링 장치를 장착하지 않은 것이고, 검은색 점선이 안티롤링 진자를 장착한 경우의 실험 결과이고, 파란색 쇄선이 식 (12)를 이용하여 해석한 결과이다.

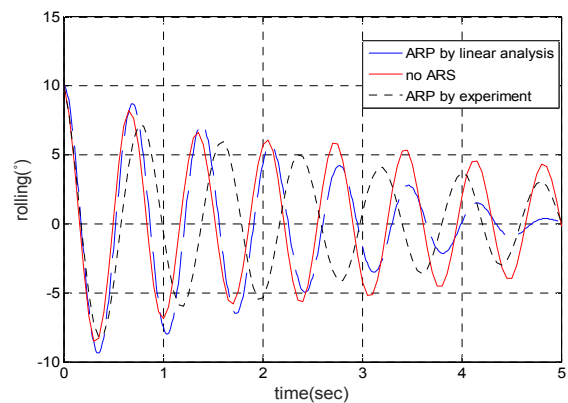


Fig. 10 Roll comparison graphs between ships, without ARS, with ARP by experiment and with ARP by linear analysis

Fig. 10을 보면 해석결과가 안티롤링 장치를 부착하지 않은 쪽과 오히려 가까운 것을 알 수 있다. 이것은 식 (10)을 잘 살펴보면 알 수 있다. 안티롤링 진자의 고유진동수를 선박의 횡

동요 주파수와 같도록 설계하였기 때문에 K_{11}/J_{11} 과 K_{22}/J_{22} 의 비는 거의 같지만 J_{11}/J_{22} 와 K_{11}/K_{22} 의 비는 약 140으로 비교하기 힘들 정도로 차이가 크다. 따라서 1/140 크기의 안티롤링 진자를 부가하여서는 선박의 횡동요 주파수를 거의 바꾸지 못한다.

이는 식 (7)의 선형방정식으로 근사하는 과정에서 많은 가정이 들어갔기 때문이다. 결국 비선형 방정식을 풀어야 더욱 정확한 결과를 기대할 수 있는 것이다.

3.2.2 비선형 해석

더 정확한 해를 구하기 위하여서는 식 (6)의 비선형 방정식을 풀어야 한다. 여기에서는 Runge-Kutta 법을 적용하였다.

Fig. 11에 비선형 해석 결과를 보인다. 검은색 점선이 안티롤링 탱크를 장착한 선박의 실험 데이터이고, 파란색 실선이 해석 결과이다. Fig. 10과 비교하여 보면 확연히 개선된 결과가 나타난 것을 알 수 있고, 또 해석과 실험의 횡동요 주기가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

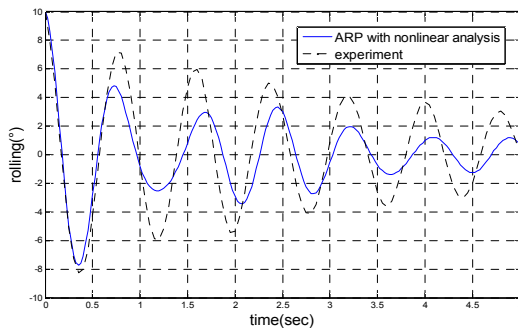


Fig. 11 Roll comparison graphs between analysis and experiment of ship with ARP

4. 결 론

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

1. 약 0.5%의 부가 중량인 안티롤링 진자를 이용하여 이보다 약 8배 무거운 안티롤링 탱크를 이용한 경우보다 동등 이상의 안티롤링 성능을 낼 수 있음을 확인하였다. 안티롤링 탱크를 밸리스트 탱크 등 다른 탱크를 이용할 경우에는 추가의 부피를 차지하지는 않지만 이동수의 고유진동수를 횡동요 고유진동수와 일치시키기에는 한계가 있다.

2. 인체나 화물에 직접적으로 영향을 주는 가속도의 관점에서 보면 안티롤링 진자를 이용할 경우가 안티롤링 탱크를 이용할 경우보다 월등히 좋은 효과를 볼 수 있음을 보였다.

3. 안티롤링 진자를 장치한 선박의 횡동요에 대하여 수학 모델을 제시하여서 선형화한 모델과 비선형 모델에 대한 해석적 방법을 제시하였다.

4. 선형화한 모델 해석으로는 횡동요 주기를 맞추는데 한계가 있었으나, 비선형미분방정식을 적용한 결과 개선된 결과를

얻을 있었다.

제안한 장치는 큰 선박에 적용하기에는 0.5%의 중량도 큰 중량이 되기 때문에 많은 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 그러나 낚싯배 등 소형선박이나 소형 여객선에는 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

또 안티롤링 진자를 코퍼댐이나 기관실 앞쪽 벽 근처에 설치하면 추가적인 공간을 줄일 수 있을 것이다.

References

- [1] Ahmed F. Abdel Gawad, Saad A. Ragab, Ali H. Nayfeh, Dean T. M(2001), Roll stabilization by anti-roll passive tanks, *Ocean Engineering*, 28, pp. 457-469.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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.
- [9] Society of Naval Architects and Marine Engineers(1989), *Principles of Naval Architecture*, Vol. 3, p. 127.
- [10] Yoon H. K., Lee G. J., Lee C. M.(2004), "Modeling and Simulation of a Ship with Anti-Rolling Devices in Waves," *Joural of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 347-352.

Received 25 July 2016

Revised 17 October 2016

Accepted 1 November 2016

