

수동형 감요수조 설계를 위한 벤치테스터 개발

류재문^{1,†} · 김효철²
충남대학교 선박해양공학과¹
서울대학교 조선해양공학과²

Development of Bench Tester for Designing the Passive Anti-Rolling Tanks

Jae-Moon Lew^{1,†} · Hyochul Kim²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

It is important to use bench test results in the design process of anti-rolling tanks. Traditional bench tester is usually designed to perform only roll motions about a fixed axis and relatively small so that the viscous effects may not be neglected. Novel bench tester which could adjust the motion center to realize the coupled motion of sway and roll has been devised and manufactured therefore, large scaled bench tester could be utilized for designing the passive anti-rolling tanks. The time history of the reference signal from the rotation sensor of the bench tester have been recorded and processed to determine the phase angle to derive the Response Amplitude Operator(RAO) of the stabilized ship. The breadth of ART tank model should be large up to 2 m to diminish viscous scale effect and the vertical position of the tank can be varied with the ship's center of motion. The periods and the amplitude of roll motion can be varied from 1.5 sec to 5 sec and up to $\pm 20^\circ$, respectively. The components of the tester was expressed in three dimensional digital mockup (DMU) and assembled together in the CAD space. The final configuration of the bench tester has been determined by confirming the smooth operation of the moving parts without interference through the animation in CAD space. New analytic logic are introduced for the determination of hydrodynamic moment and phase difference due to fluid motion in ART and verified through the test. The developed bench tester is believed to be effective and accurate for the verification of stabilization effect of ART taking into the consideration of the sway effect in the design stage.

Keywords : Bench tester(벤치테스터), Coupled sway and roll motion(좌우-횡동요 연성), Passive anti-rolling tanks(수동형 감요수조), Three dimensional digital mockup(3차원 디지털 목업), Animation(애니메이션)

1. 서론

중소형 선박에서는 횡동요를 감소시키기 위하여 횡동요 감쇠 장치가 설치되며 그중 대표적인 것이 Anti-Rolling Tank(이후 ART로 표기함)이다. 수동형으로 설계된 ART는 화물 적재량과 적재상태 등이 변화하면 선박의 동요주기가 탱크의 설계 주기와 달라져서 효과가 크게 감소하거나 오히려 역효과를 주게 되는 단점을 가지고 있다 (Watanabe, 1969). 이를 보완하기 위해 탱크 내에 주기조절판 등을 설치하고 있다 (Lee & Vassalos, 1996; Lew, et al., 2003). ART의 횡동요 감쇠효과는 탱크 내부의 감쇠

력에 따라 지배되며, 그 크기는 Fig. 1에 보인 바와 같은 벤치테스터를 사용하여 실험적으로 구하고 있다 (Baek, et al, 1997). 실험에서는 ART 모델을 벤치테스터에 설치하고 강제동요 시켜가면서 동요각 별로 탱크 내 물의 이동에 의한 감쇠모멘트와 횡동요 운동과의 위상차를 계측한 후, 실험 결과를 사용하여 선박의 운동 응답(RAO; Response Amplitude Operator)을 계산하게 된다. 벤치테스터에 사용되는 탱크 모델은 점성의 영향을 무시할 수 있어야 하고, ART의 설치 위치에 따라 횡동요 뿐 아니라 좌우 동요가 연성되는 운동을 하지만, 기존의 벤치테스터는 순수 횡동요 운동만을 구현하도록 설계되어 있어서 실제 선박의 운항 상태를 나타내지 못하게 된다.

본 논문에서는 탱크의 설치 위치를 상하방향으로 조절하여 좌우동요가 연성된 상태로 모형 탱크를 강제동요 시킬 수 있으며, 점성의 효과를 무시할 수 있을 정도의 대형 탱크를 실험할 수 있는 벤치테스터를 설계 (Kim, et al., 2010), 제작 하였다. ART의 설계도면은 2차원 도면을 작성한 후, 상용 CAD 프로그램을 사용하여 가상의 3차원 벤치테스터를 조립하고 애니메이션 기법을 사용하여 부재 간 간섭을 피하고 오작을 예방하였다.

반복 실험을 통해 새롭게 제작된 벤치테스터의 재현성이 우수함을 확인하였다. 앞으로 ART 효율개선을 위한 배플 보드 설계와 좌우동요의 영향 규명에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

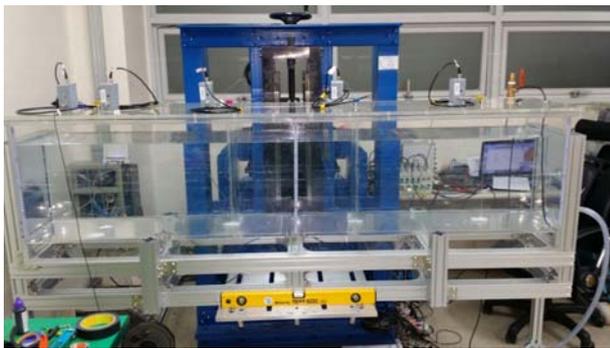


Fig. 1 Newly designed bench tester

2. 벤치테스터 설계

효과적인 실험결과를 얻을 수 있는 ART의 치수를 폭 2.0 m x 길이 1 m 라 할 때 $\pm 11.5^\circ$ 의 동요에서 0.382 m의 수위 차가 나타난다. 경사된 수면으로부터 탱크 바닥 또는 탱크 천장까지의 최소 거리를 0.15 m로 잡으면 탱크의 깊이는 약 0.7 m 정도가 되어야 한다. ART의 형식을 50% 액체가 채워지는 자유수면형 탱크라 생각하고 실험 상태의 중량을 추정하면, ART에 탑재되는 물은 0.700 m³ 가 된다. ART 모델을 두께 0.01 m인 아크릴 판으로 제작하면, 소재중량은 내부의 유동감쇠용 부재들을 포함하여 약 200 kg로 추정 할 수 있다. 따라서 ART 모델의 실험중량은 900 kg로 추정된다.

ART의 형식을 U자관 형으로 제작하면 탑재 중량은 40% 정도 감소하고 탱크 부재의 중량은 20%가 증가한다고 하면 ART 모델의 실험중량은 660 kg로 추정할 수 있다.

ART는 일반적으로 Fig. 2에 보인 바와 같이 이중저와 선축 구조를 이용하여 되도록 낮게 설치하며 드물게는 갑판 상에 높게 설치하기도 한다.

Fig. 2와 같이 ART를 이중저 이용 방식으로 설계하였을 때 횡동요 중심은 선저로부터 0.7D 위치에 놓이며, 갑판 상에 설치하도록 설계하면 횡동요 중심은 선저로부터 0.85D 위치로 상승한다고 가정하자. 위의 가정을 사용하면 ART 모형의 최대높이가 0.7 m 정도이므로 선박의 선저로부터의 횡동요 중심까지 높이는 모형을 기준으로 할 때 약 0.5 m 에서 최대 0.6 m 정도인 것으로 판단 할 수 있다.

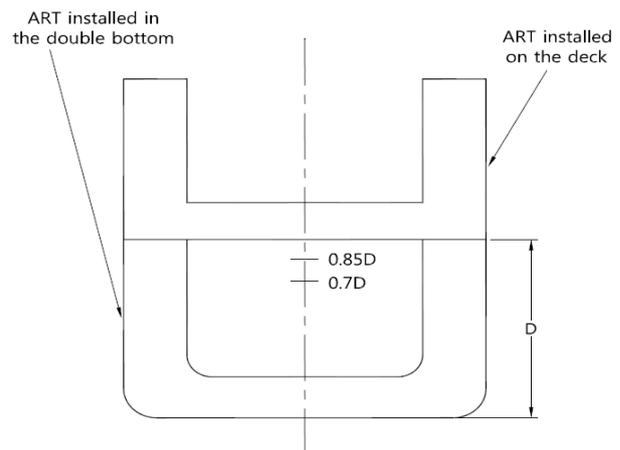


Fig. 2 U shaped ART

Fig. 3은 선박이 8° 까지 횡경사가 진행된 것을 모사한 것이다. A는 ART가 설치된 선박이 횡동요 중심을 중심으로 하나의 강체와 같이 단진자 운동을 일으킨 것에 해당한다. 이는 일반적인 벤치테스터에서 횡동요 중심에 대한 단진자 운동을 강제로 발생시키며 실험하는 상태에 해당한다. B는 선박의 횡동요 중심이 ART를 설계할 때 선정하였던 위치 보다 위에 있거나 벤치테스터의 동요 중심점이 선박의 횡동요 중심보다 위쪽에 놓인 상태에서 강제로 단순 단진자 운동이 발생된 상태가 된다. B의 상태는 A 상태에 비하여 횡동요 중심이 상승하는데 따라 진폭의 증가만 나타나고 선체와 ART의 동요 진폭 차이의 영향은 벤치테스터에서 실험으로 확인할 수 없다. C로 표현된 운동 상태는 선체의 횡동요 특성과 다른 특성을 가지는 ART가 선체에 탑재 되어 ART에서는 미소 좌우동요가 발생하며 그 크기는 선체의 동요 중심과 ART의 동요 중심 사이의 거리에 $\sin(\text{경사각})$ 을 곱하여 얻어지는 값이 된다. D는 선체의 운동 중심보다 아래쪽에 놓이는 상태를 모사한 것이다. D는 ART가 상부에 설치되어 있어서 가상의 운동 중심이 횡동요 중심보다 위쪽에 놓인 상태에서 경사 진행 상황을 모사한 것이다. Fig. 3과 같이 ART가 선체에 탑재된 상태에서 운동중심과 ART 모형을 탑재한 시험기의 기구적인 운동중심의 차이가 나타나면 좌우동요와 횡동요가 연성된 운동이 일어나므로 실험에서 실선상태를 재현하여 연성운동의 영향을 확인하는 것이 필요하게 된다.

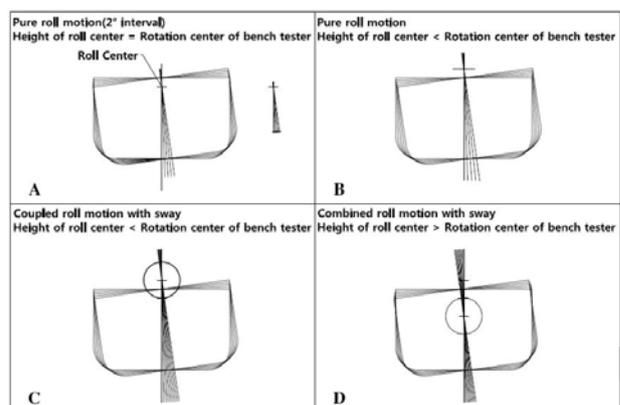


Fig. 3 Motion trajectory of ART

Fig. 4와 같이 원운동을 하는 반경 r 인 크랭크 암 끝에 가이드 롤러 C가 붙어 있고 가이드 롤러 C는 수평봉의 좌측 단에 붙여진 두 개의 수직 봉 사이로 움직이는 기구에서 C점이 T점으로 부터 출발하여 일정 각속도 ω 로 시계방향으로 회전 운동을 하면 수평방향 변위, 속도 그리고 가속도는 다음 관계가 주어진다.

$$\text{수평변위} : d_h = r \sin \omega t \quad (1)$$

$$\text{수평속도} : v_h = r \omega \cos \omega t \quad (2)$$

$$\text{수평가속도} : a_h = v_h = -r \omega^2 \sin \omega t \quad (3)$$

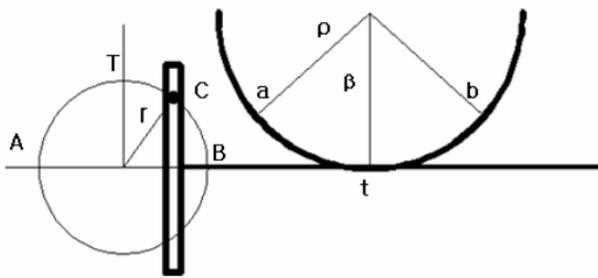


Fig. 4 Generation of harmonic angular reciprocating motion

수평봉이 반원형 부재에 미끄러짐 없이 운동을 전달하면 봉의 수평운동은 반원형 부재의 각 변위를 일으키게 된다. 회전운동 반경을 r 이라고 하고 반원 부재의 반경을 ρ 라고 하면 $\rho \times (-\beta) = r \sin \omega t$ 의 관계가 있으므로 반원 부재에 나타나는 각 변위 β 는 다음과 같다.

$$\beta = -\frac{r}{\rho} \sin \omega t \quad (4)$$

ART의 설계조건으로 최대 횡동요 경사각이 20° 정도인 순수조 화운동이 얻어지도록 하자. 그런데 선체에 설치된 ART는 좌우동요와 횡동요가 연성된 운동을 하므로 이를 재현시키는 기구가 필요하다.

ART 모형을 강제로 동요시키는 Fig. 5와 같은 기구에서 각 β 가 좌우동요로 인한 각을 나타내고 이와 연동되어 각 α 의 횡동요가 구현되는 좌우동요와 횡동요의 연동기구로 생각하였다. 봉 AC가 A점을 중심으로 회전하여 AC' 위치로 이동하였을 때 봉 Bc는 AC상의 고정된 점 B를 중심으로 회전을 하여 Bc'에 이르게 되고, c점이 봉 AC를 따라서 움직이도록 하면 C점이 C'으로 이동하였을 때 c점은 AC'상의 점 c'로 이동한다. 이때 각 CAC'는 좌우동요에 의한 각 β 가 되고 각 cBc'는 횡동요에 의한 각 α 가 된다. AB와 BC의 길이에 따라서 각 α 와 β 는 연동을 일으켜 Table 1 과 같은 관계를 가진다. 길이 AC는 일정하다고 할 때 B점이 A점과 같은 위치에 놓이면 단진자운동이 일어나며 B점이 A점보다 하방에 있을 때에는 진폭비가 늘어나고 상방에 놓이면

진폭비가 줄어드는 복진자 운동이 된다. 봉 AC는 A점을 중심으로 회전하는 강체 동요 중심축이라 하고 봉 BC는 B점을 중심으로 연동되어 동요를 일으키며 선체와 ART의 중심축과 일치한다고 하자. Table 1에 따르면 B점이 ART의 동요 각은 줄어들며 B점이 A점보다 아래쪽에 있을 때에는 선체의 동요 각이 증폭된다. ART를 설계할 때 최대 횡동요 각도를 $\pm 20^\circ$ 라고 하면 AB/BC가 3일 때에는 봉 AC를 A점을 중심으로 $\pm 5^\circ$ 강제동요 시키면 된다. 운동기구 설계에서는 AB/BC를 -1/3로부터 3 사이에 존재하는 것으로 계획하였다. 위의 조건에 따르면 좌우동요에 의해 발생하는 각은 6.67° 로부터 20° 사이의 값이 된다.

이 조건을 기어와 랙 기어를 사용하여 구동 오차가 최소화 되도록 하였다. 실험 장치에서 AC의 길이를 250 mm라 하고, 운동 주기를 0.4 Hz라 하면 각속도 ω 는 0.8π 가 된다. 실험 상태에서의 시험대의 각 변위 $\pm 20^\circ$ 까지 실험하는 구동조건에서는 식 (4)의 관계로부터 t 가 2.5일 때 $250 \text{ mm} \times 0.349 = r$ 이 된다. 따라서 조화 왕복운동을 일으키는 크랭크 암은 반경 87.25 mm ≈ 90 mm의 원운동을 하여야 하며 반경에 약간의 여유를 두어 반경 100mm를 설계의 표준으로 설정하였다.

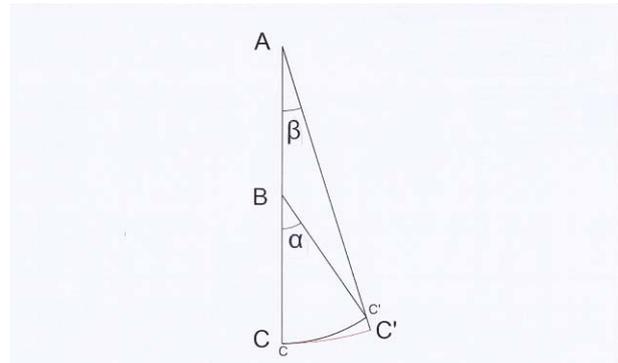


Fig. 5 Link mechanism coupled with sway and roll motion

Table 1 Motion characteristics of coupled motion

AB	BC	AC	AB/BC	α/β
-10	20	10	-1/2	0.5
-5	15	10	-1/3	0.666
-2.5	12.5	10	-1/5	0.8
0	10	10	0	1
2.5	7.5	10	1/3	1.33
3.333	6.666	10	1/2	1.5
5	5	10	1	2
6.666	3.333	10	2	3
7.5	2.5	10	3	4

크랭크 암의 길이를 100 mm 로 결정하였고, 랙 기어의 가속도는 식 (3)으로 표시되므로 $100 \text{ mm} \times 0.82 \times 3.141592 =$

631.65 mm/sec² 이 된다. 그런데 랙 기어로 구동되는 직경 500 mm의 원 기어에서 400 mm를 암으로 사용하면 가속도는 1010.64 mm/sec²로 증폭되므로 실험상태의 중량 약 660 kg을 1.01 m/sec²의 가속도로 구동시켜야 하므로 667 N의 힘이 요구된다. 따라서 크랭크 암은 66.7 N-m의 토크를 전달하여야 한다. 실험 장치를 1/29 정밀 감속기로 구동하고 실험을 간헐적으로 한다면 출력이 0.6 kw이고 정격회전수 1000 rpm인 모터를 1740 rpm 까지 증속하여 간헐 운전할 때 토크는 132 N-m 까지 허용되므로 실험장치의 구동모터로 충분한 동력 여유를 가진다.

3. 3차원 디지털 목업 구현

위와 같은 개념으로 벤치테스터의 기구를 구상하고 시장에서 구입 가능한 기성 부품을 최대한 활용하여 설계 도서를 완성하였다. 작성된 2차원 도면으로 3차원 디지털 목업을 구현하고, 부재 간 간섭과 작동상황을 애니메이션으로 확인하여 제작 오류를 피할 수 있는 설계도면을 완성하였다.

3.1 2차원 설계도면

벤치테스터를 6개의 주요 구동부분으로 구성하였다. Fig. 6은 크랭크 암 조절기구로 회전원판에 설치된 LM가이드와 볼 스크루로 크랭크 암의 길이를 조절한다. 크랭크 암의 길이를 조절하면 수평부재의 단순조화 왕복운동의 진폭이 결정 된다.

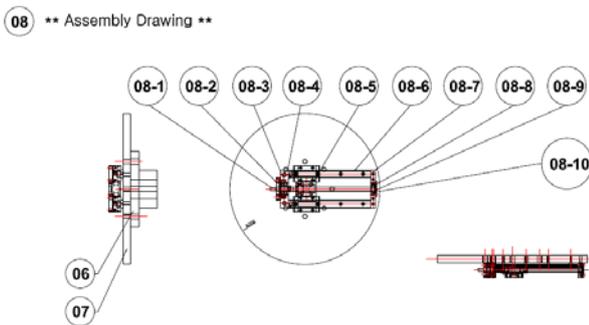


Fig. 6 Adjusting mechanism of crank arm

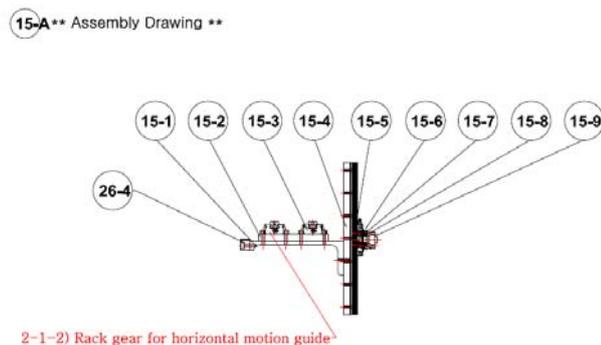


Fig. 7 Horizontal slider mechanism for harmonic horizontal translation of rack gear

Fig. 7에 보인 수평부재는 벤치테스터의 프레임에 고정된 수평 방향 LM 가이드를 따라 단순조화 왕복운동을 하며 수평부재에 붙여진 랙 기어에 맞물리는 기어는 단진자 운동을 하게 된다.

Fig. 8은 랙 기어와 맞물리는 기어로서 모듈이 2.5이고 이빨 수가 200인 규격품 기어를 사용하였다.

다음은 단진자 운동 발생기구로 상단의 A점에 해당하는 위치에 각 변위를 계측하는 변위계가 설치되며 하단의 C점에는 강제력을 계측할 센서가 부착된다.

26 ** Assembly Drawing **

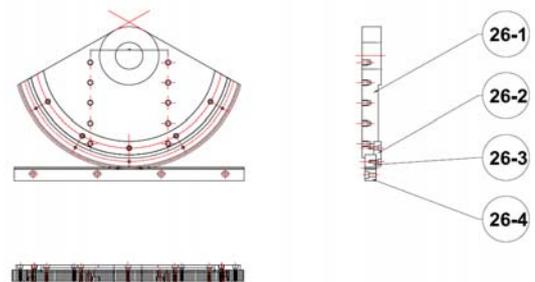


Fig. 8 Assembly of gear system for swing motion generator

Fig. 9는 단진자운동 발생기구부를 구성하는 스윙 암 즉 Fig. 5의 봉 AC를 구성하는 부재와 이동하는 봉 Bc의 c점이 조립된 상태를 보인 도면으로 c점은 AC가 A점을 중심으로 왕복 각 운동을 일으킬 때 AC를 따라서 움직인다. 봉 AC는 랙 기어로 구동되는 원 기어에 고정되어 왕복 각 변위를 일으키며 이때 c점은 봉 AC에 의하여 봉 Bc를 구동한다.

30 ** Assembly Drawing **

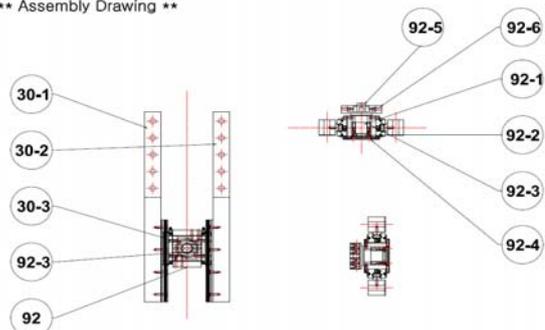


Fig. 9 Radial slider block for coupled roll and sway motion

Fig. 10은 모형을 횡동요 시키는 부분으로 Fig. 5의 봉 Bc에 해당한다. 점 B가 모형의 회전 중심이 되며 모형의 중심선은 중앙의 길이 조절 봉과 일치하도록 설치된다. B점은 중립상태에서의 단진자 운동을 유발하는 스윙 암 AC의 A점 보다 위 또는 아래쪽으로 위치를 조절할 수 있으며, 그에 따라서 Table 1과 같이 좌우동요와 횡동요의 연성 조건을 바꾸어 줄 수 있다.

Fig. 11은 벤치 테스터의 모형을 탑재하는 테이블과 연결되어

야 함으로 Fig. 10의 부재 앞 뒤쪽에 쌍으로 배치되고 B점의 위치 조절을 정확하고 용이하게 수행할 수 있도록 LM가이드를 이용하였으며 높이 조절 후 위치를 고정할 수 있도록 하였다.

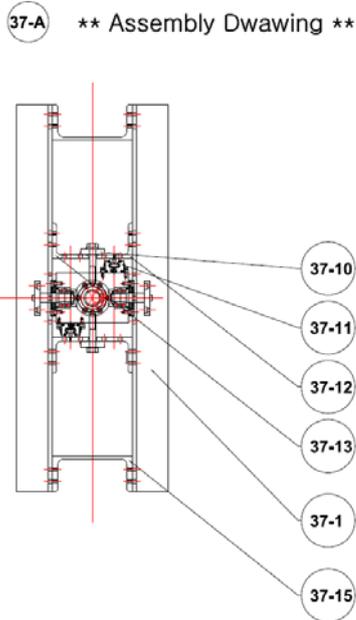


Fig. 10 Motion center of coupled sway and roll motion

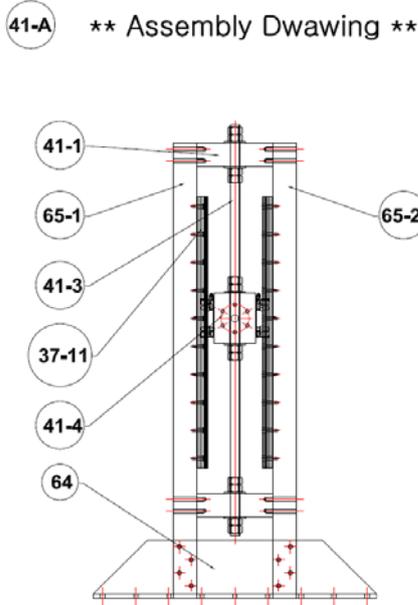


Fig. 11 Center of roll motion of bench tester

3.2 3차원 디지털 목업 구현

2차원 설계 자료를 사용하여 3차원 디지털 목업으로 조립하여 벤치테스터 제작에 앞서서 애니메이션으로 설계의 적정성을 검토하였다. 이 과정에서 벤치테스터를 구성하는 모터로부터 벤치

부분까지 동력전달 순서에 따라서 크랭크 암 조절기구, 랙 기어로 구동하는 단진자운동 발생 기구 및 좌우동요-횡동요 연성기구 및 ART 모형 탑재 테이블부분까지 형상화 하여 살펴보았다.

크랭크 암의 길이조절 기구는 Fig. 12와 같이 원판에 붙여진 LM가이드 등으로 회전 운동을 단순조화 직선왕복 운동으로 변환시키는 역할을 한다.

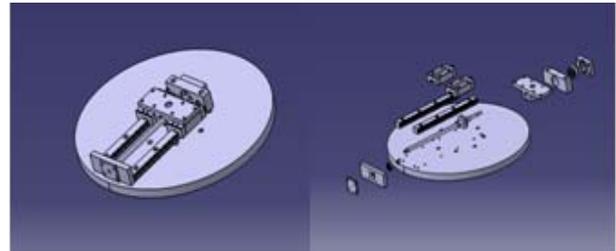


Fig. 12 Assembling of adjusting device of crank arm

Fig. 13은 모터의 동력을 전달 받아 크랭크 암의 회전 원운동을 수직 방향으로 설치된 두개의 LM 가이드를 이용하여 수평방향의 단순조화 왕복운동으로 변환하는 부분의 조립상태를 보이며 최종부분에는 모듈 2.5인 랙 기어가 붙여져 있다.

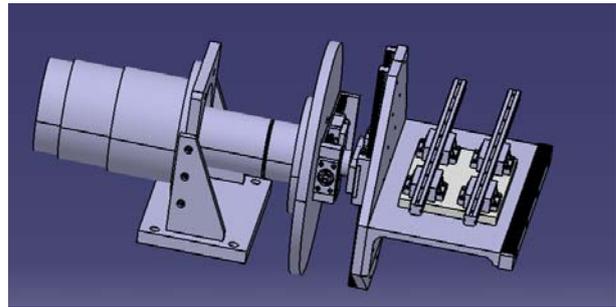


Fig. 13 Power transmission to rack gear for horizontal harmonic motion

Fig. 14는 기성부품으로 공급되고 있는 모듈 2.5 이빨 수 200인 기어를 구입하여 랙 기어의 수평왕복운동을 단진자 운동으로 변환하는 기구를 구성하였으며 부품상태와 조립상태를 나타낸다. 원 기어에는 두개의 봉이 조립되어 스윙 암을 구성하고 두개의 봉 사이에서 슬라이더 블록이 설치된다. 이 블록은 탱크를 강제동요시키는 동력을 전달하며 검력계가 설치되어 있어서 강제력을 계측할 수 있다.

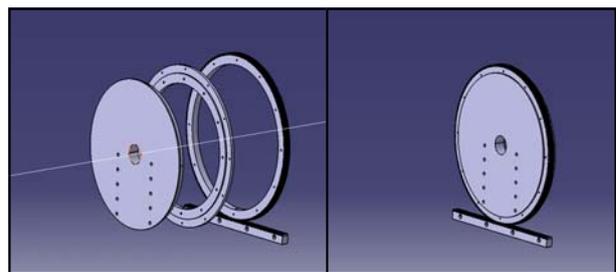


Fig. 14 Gear train for harmonic swing motion

Fig. 15에 보인 스윙 암에는 LM 가이드가 설치되어 있어서 슬라이더 블록이 원활하게 움직이도록 계획되어 있으며 슬라이더 블록에는 중심주위로 각 변화를 일으키며 강제력을 계측할 수 있는 센서 블록이 부품으로 조립된다. 슬라이더 블록은 원기어로부터 동력을 전달 받아 탱크를 강제동요 시키며 횡동요와 좌우동요를 연성시키는 핵심 동력전달부분이다. 스윙 암의 반경방향 변위와 중심축에 대한 각 변위가 허용되며 스윙 암의 원주방향으로의 강제력을 계측하는 센서가 조립된다.

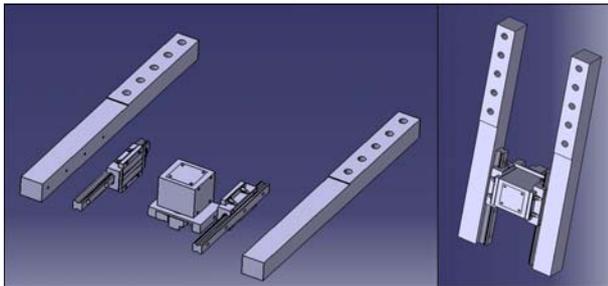


Fig. 15 Assembly of swing arm and slider block

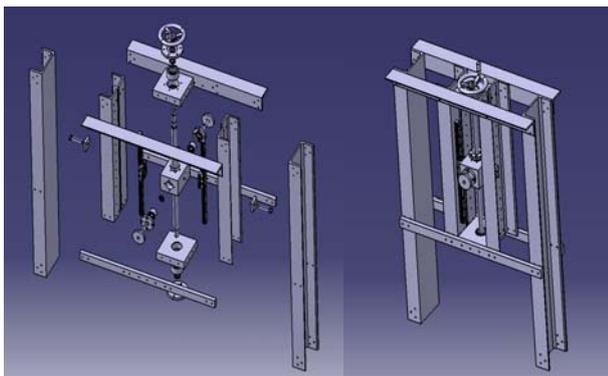


Fig. 16 Adjustment device for ratio of sway and roll coupling

Fig. 16은 Fig. 5의 B점에 해당하는 부분으로서 좌우동요와 횡동요 연성 비를 결정하며 테이블과 탱크의 실험중량을 지지한다. 따라서 중심 블록은 상하로 움직이는 동시에 테이블의 회전 중심이 된다. 중심 블록은 중앙의 볼 스크루와 LM 가이드로 상하 위치를 조절한 후에는 미끄럼방지를 위하여 전후 방향으로 설치된 조임 볼트로 구속한다. 중심블록에는 모형의 횡동요 중심 핀이 베어링으로 지지되며 핀을 중심으로 모형의 각 변위가 일어난다. 중앙의 볼 스크루로 높이를 조절하면 연성 비가 변화한다.

Fig.17은 테이블의 횡동요 시키는 스윙 암으로 중앙부의 블록은 중심 블록 B와 연결되어 있어서 블록 B의 위치에 따라서 길이를 함께 조절하고 상하 위치를 너트로 고정시킨다. 중심 블록 앞뒤로 배치되는 상기의 부재 하단에 설치하는 외팔보 형의 동요 테이블에는 모형을 고정하도록 다수의 구멍을 설치하였다. 제작에 앞서서 상용프로그램의 간섭 체크 기능을 활용하여 완성된 벤치테스터의 간섭을 체크하였으며 모니터 상에서 조립 순서의 확인 및 구동 상태 등을 파악하고 x, y, z축을 중심으로 자유로운 구동상태를 확인함으로써 제작할 때 오작발을 예방하였다. 이

와 같은 설계단계를 거쳐 벤치테스터를 제작하였으며 사진 Fig. 18와 같이 완성하였다.

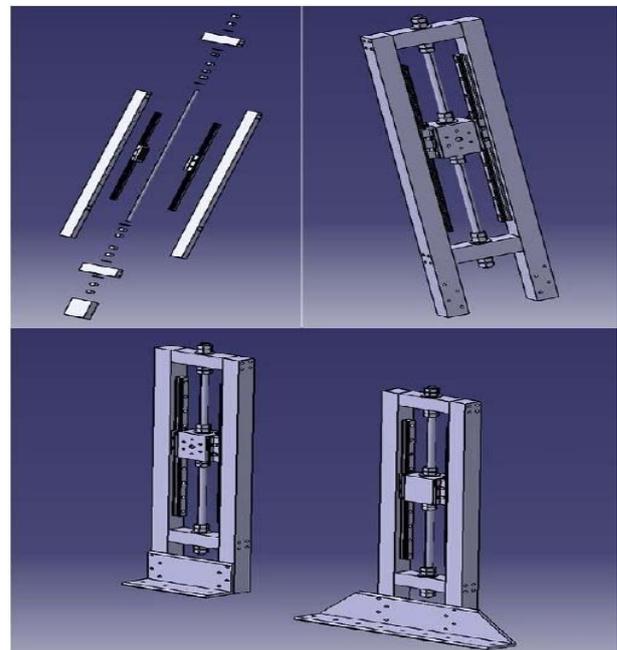


Fig. 17 Assembly of swing arm for forced oscillation table



Fig. 18 Assembled bench tester

4. 실험 방법 및 검증 시험 검토

제작된 벤치테스터의 성능을 확인하기 위해 Fig. 10에 보인 바와 같이 제작된 직육면체 탱크 모델을 설치하고 일정한 각도로 횡동요 운동을 구현하였다. 실험은 물이 이동하지 않는 상태에서 동요각과 frozen moment(M_f)를 계측하고, 탱크 내 물이 자유롭게 움직이는 상태에서 동요각과 동요모멘트를 계측하여 성능을 검토하였다. 실험결과로부터 ART 내의 유체이동으로 인한 모멘

트와 위상차를 추정하면 탱크의 감쇠계수를 추정할 수 있고 선박의 RAO를 계산할 수 있다 (Lew, et al., 2003).

4.1 모멘트와 위상차 계측

제작된 벤치테스터의 성능을 확인하기 위해 Fig. 1에 보인 자유수면형 탱크에 대한 모멘트와 동요각을 계측하였다. Fig. 19와 20에 주기가 2.6초 일 때와 4.2초 일 때에 frozen 상태에 대한 계측 결과를 도시하였다. 주기가 짧을 때에는 기존의 해석과 같이 위상이 0도로 나타났으나, 주기가 길 때는 위상이 180도를 나타내는 것을 확인하였다. 이는 기존의 벤치테스터에서 나타나지 않던 현상으로 이에 대해서는 다음 장에 기술하기로 한다. Fig. 21에는 주기 4.6초일 때 동요각과 감요모멘트를 보였다. 동요각과 감요모멘트 사이에 위상차기 발생 하며, 물에 의한 충격력이 계측되는 것을 알 수 있다. Fig. 22에는 주기 2.6초 일 때의 실험 장면을 보였다. 내부에 배틀이 없어 내부 물이 천장을 치는 현상이 나타나고 있는 것을 확인하였다.

이상의 계측 결과를 토대로 횡동요와 좌우동요가 연성된 대형 벤치테스터는 만족스러운 성능을 나타낸다고 판단하였다.

4.2 Frozen Moment 계측결과 검토

벤치테스터는 회전중심을 기준으로 강제 진자운동을 한다. 주파수 ω 로 강제동요를 시키기 위해서는 접선방향으로 힘을 가해 주어야 하며, 접선방향의 가속도가 주파수 제곱에 비례하므로 벤치테스터에 설치된 ART의 검력계에는 주파수 제곱에 비례하는 힘이 작용하며, 중력으로 인한 힘, $mg \sin\phi$ 는 반대방향으로 작용하여 두 힘의 차이가 센서에서 Fig. 19 ~21과 같이 계측된다.

검력계는 접선력 만을 계측하며 원심력은 계측되지 않도록 설계하였다. 이 현상은 주기가 길 때 주파수가 작아져 접선방향의 힘이 적어지는데 비해 대형 탱크를 설치하기 위한 벤치를 포함한 회전부 중량의 중력에 의한 효과는 동일하기 때문이라 판단된다. 따라서 기존의 해석 방법 (Zdybek, 1980; Lew, et al., 2003)과 달리 frozen moment의 위상차를 고려해 모멘트와 위상차를 추정하여야 한다.

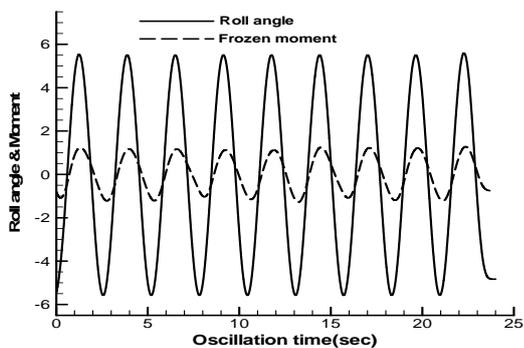


Fig. 19 Measured frozen moment with roll angle at T=2.6 sec

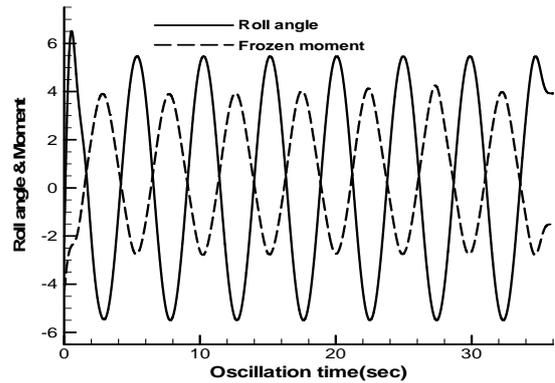


Fig. 20 Measured frozen moment with roll angle at T=4.2 sec

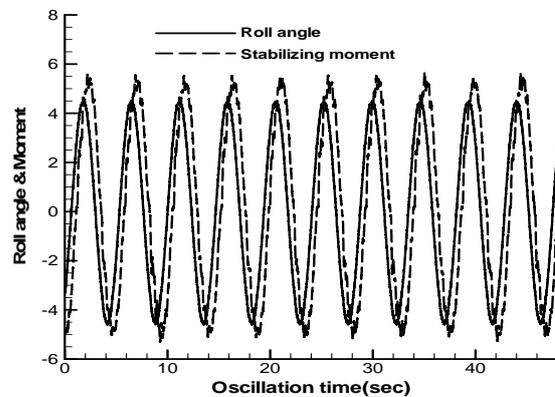


Fig. 21 Measured stabilizing moment with roll angle at T=4.6 sec

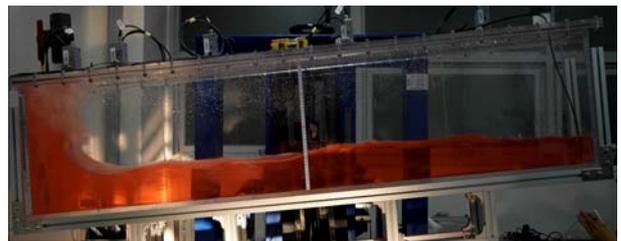


Fig. 22 Snapshot of the test

4.3 감요 모멘트 및 위상차 추정식 검토

횡동요 진폭을 ϕ_A 로 나타내면 횡동요 운동은 $\phi = \phi_A \sin \omega t$ 로 표현되고 frozen moment 는 식 (5)로 표현되고 탱크 내 액체가 움직일 때는 식 (6)으로 표현된다.

$$M_F = M_A'' \sin(\omega t + \epsilon_F) \tag{5}$$

$$M_{ART} = M_A' \sin(\omega t + \epsilon') \tag{6}$$

탱크 내 물 만에 의한 모멘트는 식 (7)로 계산되고 이로부터 모멘트와 위상차는 식 (8)로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 M_{Water} &= M_A \sin(\omega t + \epsilon) = M_{ART} - M_F & (7) \\
 &= (M_A' \cos \epsilon' \sin \omega t + M_A' \sin \epsilon' \cos \omega t) \\
 &\quad - (M_A'' \cos \epsilon_F \sin \omega t + M_A'' \sin \epsilon_F \cos \omega t) \\
 &= (M_A' \cos \epsilon' - M_A'' \cos \epsilon_F) \sin \omega t \\
 &\quad + (M_A' \sin \epsilon' - M_A'' \sin \epsilon_F) \cos \omega t
 \end{aligned}$$

$$M_A = \frac{M_{ART} - M_F}{\sqrt{(M_A' \cos \epsilon' - M_A'' \cos \epsilon_F)^2 + (M_A' \sin \epsilon' - M_A'' \sin \epsilon_F)^2}} \quad (8)$$

$$\epsilon = \arctan \frac{M_A' \sin \epsilon' - M_A'' \sin \epsilon_F}{M_A' \cos \epsilon' - M_A'' \cos \epsilon_F} \quad (9)$$

식 (8)이 탱크 내 물의 이동에 의한 ART 모멘트이고, 식 (9)가 탱크 내 물과 동요각 사이의 위상차가 된다. 여기서 ϵ_F 는 모형 ART의 크기가 커도 가속도의 영향이 크게 나타나 대부분 0도가 되나 주기가 긴 경우에는 가속도의 영향이 작아져 중력의 영향이 크게 나타나면서 위상차가 180도가 되므로 Lew, et al. (2003)의 결과와 다르게 위상차를 고려한 식 (9)를 사용하여야 한다. 이렇게 주파수 별로 탱크 내 물에 의한 모멘트와 위상차가 추정되면 Lew, et al. (2003)을 따라 ART의 감쇠계수를 추정된 후 선박의 하중 상태에 대한 RAO를 계산할 수 있게 된다.

4.4 반복 실험 결과

실험 오차를 확인하기 위해 주기 탱크의 공진 주파수 근처 동요주기로 세 번 반복 실험을 수행하여 Table 2의 결과를 얻었다.

Table 2 Repeatability test results

	First	Second	Third	Average
Stabilizing moment (kg-m)	8.148	8.382	8.382	8.304
Phase angle (deg)	81.82	81.82	79.53	81.057

계측된 모멘트의 최대 오차는 0.156 kg-m로 1회 계측값 8.148 kg-m의 2% 미만으로 나타났고, 위상차는 81.82도일 때 오차가 최대 2.29도로 역시 3% 이내의 오차로 확인되었다. 이로 부터 벤치테스터의 재현성은 만족스러운 것으로 판단하였다.

5. 결론

지금까지 사용되고 있는 벤치테스터의 동요 특성을 단순조화 왕복 각운동으로 정확하게 구현하는 동시에 좌우동요와 횡동요를 연성시켜 모형 탱크를 강제 동요시킬 수 있는 새로운 벤치테

스터를 설계하였다. 강제동요 최대 각 진폭은 $\pm 20^\circ$ 이며 좌우 동요와 횡동요를 연성시키기에 따라서 탱크의 횡동요 각은 변화시킬 수 있도록 하였다. 새로이 고안된 실험 장치를 Auto CAD로 설계하였으며, 제작과 조립에 앞서서 3차원 상용 프로그램으로 형상을 나타내고 부품 간 간섭의 확인, 조립작업, 단면형상 및 작동 상황을 애니메이션 등으로 설계의 적정성을 확인하고 제작에 참고 하였다. 제작된 시험기를 사용하여 자유수면형 대형 ART 모형을 실험하여 충분한 재현성을 가지는 실험이 이루어지는 것을 확인 하였다.

개발된 벤치테스터를 활용하여 ART의 효율 개선을 위한 최적 배플 보드 설계와 탱크 상하 위치 변화에 따른 좌우동요 연성 효과를 고려한 ART 효율변화에 대한 연구가 이루어져야 하겠다.

후 기

본 연구는 2014년도 충남대학교 학술연구비로 수행되었음.

References

Baek, C.S. Kim, H. & Lew, J.M., 1997. Development of bench tester for designing anti-rolling tanks. *Proceedings of Spring Annual Conference of SNAK, Chinhae*, pp.24-27.

Kim, H. Lew, J.M. & Ji, J.Y., 2010. *Experimental Device of Forced Oscillator for Stabilizer Model of a Ship*. Patent No. 10-093461.

Lee, B.S. & Vassalos, D., 1996. An Investigation into the Stabilization Effects of Anti-rolling Tanks with Flow Obstructions. *International Shipbuilding Progress*, 43(433), pp.70-86.

Lew, J.M. Kim, H. & Lee, H.Y., 2003. A Study on the Effects of the Period Control Device of Anti-Rolling Tanks. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(1), pp.1-7.

Watanabe, S., 1969. *Motion reduction method (2) by Anti-Rolling Tanks, Workshop report on Seakeeping committee*. Tokyo: SNAJ.

Zdybek, T., 1980. The use of bench test results for calculating roll response of the tank stabilized ship. *International Shipbuilding Progress*, 27, pp.96-105.

