

## 감요수조의 주기조절 장치 효과에 관한 연구

유재문 †\*, 김효철\*\*, 이현엽\*

충남대학교 선박해양공학과\*, 서울대학교 조선해양공학과\*\*

### A Study on the Effects of the Period Control Device of Anti-Rolling Tanks

Jae-Moon Lew\*, Hyochul Kim\*\* and Hyun-Yup Lee\*

Chungnam National University\*, Seoul National University\*\*

#### Abstract

The effect of the passive anti-rolling tanks(ART) decreases when the roll period of the vessel does not match the designed oscillating period of the fluid in the tank. In order to improve the effect of the passive ART, the damping plates are installed in the lower duct of the ART to adjust the oscillating period of the fluid. The effects of the damping plates on the oscillating period of the fluid and the changes of the stabilizing moments are examined through the series of bench tests. Acryl model tank larger than 1m breadth is made to minimize the viscous effect of the tank and the stabilizing moments of the tank are measured for various roll angles. Using the obtained tank damping coefficient, RAO(Response Amplitude Operator) value in the resonance range is computed and the stabilizing effect of a ART has been estimated.

※Keywords: Passive Anti-Rolling Tanks(수동형 감요수조), damper plates(주기조절판), bench tester(동요시험장치), tank damping coefficient(탱크 감쇠계수)

#### 1. 서언

선박의 횡동요(roll)를 제어하기 위한 장치로 ART가 중소형 선박에 선별적으로 설치되고 있다. 일반적으로 ART는 탱크 내 물을 이동시키는데 동력을 사용하지 않는 수동형과 동력을 사용하는 능동형으로 구분된다. 수동형 ART는 1911년 Frahm

에 의하여 U-tube형 ART가 개발되고 Stigter(1966)에 의해 이론적 체계가 정립된 이후 많은 선박에 적용되어져 왔다. 수동형 ART는 탱크의 설계 점에 가까운 주파수 영역에서는 횡동요 감소효과가 뛰어나게 나타나지만 설계 영역을 벗어난 낮은 주파수 영역과 높은 주파수 영역에서는 오히려 횡동요를 증폭시키는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 일본의 Stabilo사에서는 탱크의 폭을 두 개로 나누어 선별적으로 작동하게 하는 방법을 사용하고 있고, 독일의 Interling사에서는 공기밸브를 개폐시켜가며 주기변화의 영향을

접수일: 2002년 8월 13일, 승인일: 2003년 1월 3일

† 주저자, E-mail : [jmlew@cnu.ac.kr](mailto:jmlew@cnu.ac.kr),

Tel : 042-821-6628

줄여주는 시스템을 개발하고 이를 Controlled-passive ART라 부르고 있다. 이 시스템은 설계 및 제작에 전혀 어려움이 없으나 국내에서는 모두 수입해 설치하고 있다.

연구 수행에서는 수동형 ART 설계에서 필수적으로 알아야 하는 탱크의 감쇠계수를 정확히 추정하기 위하여 동요시험장치(백창성 등, 1997)를 이용하여 탱크의 감쇠계수를 구하는 실험법을 정립하였다. 탱크 내 액체의 유동 주기조절 장치를 조절함에 따라 변동되는 ART의 모멘트와 위상차로부터 주기조절장치의 효과를 확인하고 구해진 ART의 감쇠계수를 이용해 ART가 설치된 선박이 공진할 때, RAO (Response Amplitude Operator)를 계산해 ART의 효율을 추정하였다.

## 2. 동요시험(Bench Test) 수행방법

ART의 성능을 결정짓는 주요인자들 중에는 이론적 계산으로는 추정하기 어려운 인자들이 존재한다. 예를 들어, ART의 감쇠계수, 탱크 내 물의 이동주기 등과 같은 인자들은 점성효과를 무시할 만한 크기의 모형탱크를 bench tester에 장착하고 여러 가지의 진폭과 진동수에서 반복적인 실험을 수행해야만 정확한 값을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 자체 설계·제작한 동요시험장치로 선박의 횡동요를 일으키고 여러 가지 횡동요 각도에서 탱크 내 액체가 일으키는 모멘트와 위상차를 계측하였다. 동요시험을 수행할 때 횡동요 각도는 포텐쇼미터를 사용하여 계측하였다. 동요시험 수행 시 어려운 문제중의 하나는 탱크 내 물의 이동으로 얻어지는 모멘트와 횡동요 운동과의 위상차의 계측이다. 본 연구에서는 동요시험장치의 구동 축에 1분력 검력계를 설계·제작하여 모멘트를 실시간 계측하였고, 횡동요 각도와 검력계에서의 신호를 AD 변환장치를 통해 컴퓨터에 저장한 후, 이 신호를 분석하여 횡동요 운동과 탱크내 물의 유동과의 위상차를 찾았다.

일반적으로 동요시험에 사용되는 모형은 점성의 효과를 무시할 수 있도록 하기 위해 폭을 60cm(2 ft) 이상으로 할 것을 추천하고 있으므로 (Stigter,

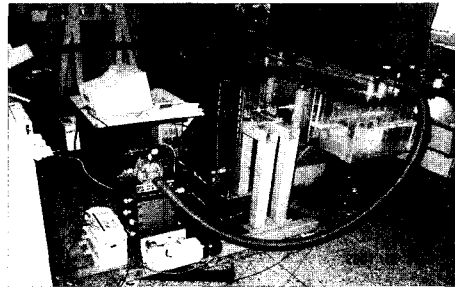


Fig. 1 Bench tester with anti-rolling tanks

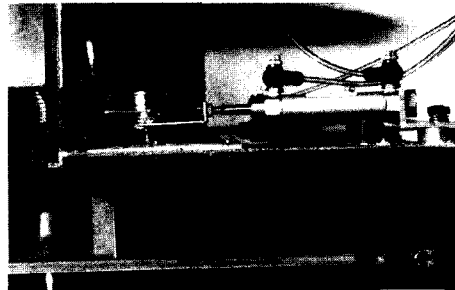


Fig. 2 Damping plates in the ART

1966), 본 연구에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 충분한 폭이 되도록 폭 1.05m의 모형 ART를 아크릴로 제작 설치하였다.

실험은 먼저 ART에 설치된 공기 밸브를 닫아 탱크 내 물이 결빙되어 유동이 일어나지 않는 탱크(frozen tank)와 같은 상태가 되도록 하고 일정한 주파수로 동요시켰을 때의 모멘트를 계측한다. 이 모멘트는 탱크와 물의 자중에 의해 발생되며, 횡동요 운동과 위상차가 없는 상태가 되므로 이를 frozen moment( $M_f$ )라 부른다. 동일한 주파수에 대해 ART의 공기 밸브를 열고 모형시험을 수행하면 탱크 내 물에 이동이 허용됨으로 인하여 탱크의 운동과 일정한 위상차를 가지는 모멘트를 계측할 수 있게 된다. 이때 계측되는 모멘트는 frozen moment와 탱크 내 물의 이동에 의한 모멘트가 합쳐진 결과가 되므로, 계측된 두 가지 모멘트를 이용하면 탱크 내 물의 이동에 의한 모멘트 및 위상차를 얻을 수 있게 된다.

밸브를 열었을 때 계측된 모멘트 진폭과 위상차

를 각각  $M'_A$ 와  $\epsilon'$ 이라 하면 탱크 내 물의 이동에 의한 모멘트( $M_A$ )와 위상차( $\epsilon$ )는 frozen 모멘트( $M_F$ )와의 차이를 이용하면 다음 식으로 계산된다.

$$M_A = \sqrt{(M'_A \cos \epsilon' - M_F)^2 + (M'_A \sin \epsilon')^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \tan^{-1} \frac{M'_A \sin \epsilon'}{M'_A \cos \epsilon' - M_F} \quad (2)$$

동요시험에서 측정된 모멘트와 위상차를 이용하면 ART의 감쇠계수를 추정할 수 있고, 또한 파랑 중에서의 선박의 횡동요 운동응답을 구할 수 있게 된다.

6자유도 운동 중 횡동요 운동만이 이루어진다고 가정하였을 때 파랑 중에서의 횡동요 운동응답은 다음식으로 계산된다(Zdybek, 1979).

$$\frac{\phi_a}{aa_w} = \frac{\omega_\phi^2}{\sqrt{(\omega_I^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma_I^2 \omega_\phi^2 \omega^2}} \quad (3)$$

단,  $\gamma_I = \gamma_\phi + \gamma_t$  (4)

$$\gamma_t = \frac{\omega_\phi M_A \sin \epsilon}{2\omega \Delta GM \phi_a} \quad (5)$$

$$\omega_I^2 = \omega_\phi^2 \left(1 - \frac{M_A \cos \epsilon}{\Delta GM \phi_a}\right) \quad (6)$$

여기서,

- $\phi_a$  : 선박의 횡동요 각
- $aa_w$  : 유효 파 경사각
- $\omega_\phi$  : ART의 자유표면 효과를 고려하지 않은 고유주파수
- $\Delta$  : ART 무게를 포함한 선박의 배수량
- GM : ART의 자유표면 효과를 고려하지 않은 메타센터 높이
- $\gamma_\phi$  : 무차원화된 선박의 감쇠계수
- $\gamma_t$  : 무차원화된 탱크 감쇠계수

동요시험장치에서 탱크 내 물의 이동에 의한 모멘트와 위상차를 측정한 결과를 이용하여 식(5)를 계산하면 ART의 감쇠계수를 구할 수 있다.

ART를 설계 할 때에는 먼저 모형 탱크에 각종 부재들을 배치한 후 부재를 제거하며 반복실험을

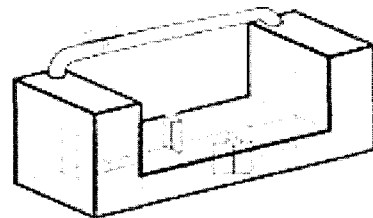
수행하여 최적의 감쇠계수를 얻도록 하여야 한다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

ART 탱크 내 물의 이동주기조절을 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 대칭형 단판 구조로 설계된 2벌의 주기조절판을 모형 ART에 설치하였다. 주기조절판은 U 탱크 아래쪽 덕트의 길이를 늑골간격에 따라서 8개의 구획으로 등분한 후 하나의 조절판이 2개의 구획을 막을 수 있도록 하여 2조의 장치를 모두 닫으면 길이방향으로 1/2구획을 막아서 유동을 차단 할 수 있도록 계획하였다. Fig. 2에 2~3번째 및 6~7번째 구획에 45° 만큼 열려진 주기조절판을 보였다. 이 장치는 Fig. 3에 보인 바와 같이 일본 NKK사에서 채택하고 있는 것으로 홈페이지에 공개된 자료를 참조하여 설계제작한 것이며, 백창섭 등(1997)의 밸브와는 다소 다르게 설계하였다.

Fig. 2에 보인 ART 모형은 점성의 영향이 작아 지도록 하기 위해 탱크의 폭을 105cm로 하였고, 길이는 48cm로 하였다. 원 탱크의 폭이 16cm, 덕트의 높이 9cm로 하고 물높이는 ART 바닥에서 16cm가 되도록 하여, 마찰 없는 탱크로 가정했을 때 위의 제원을 이용하여 계산하면 물의 유동 주기가 약 1.9초 정도가 된다.

Fig. 4 ~ Fig. 5는 횡동요각 9.84°일 때 동요 주기 1.7초 및 2.9초에 대한 bench test에서 측정한 결과를 보여주고 있다. 동요주기 1.7초는 위상차가 90°보다 작은 경우로 밸브를 열었을 때 측정된 모멘트가 닫았을 때에 비해 크게 나타나고



**Semi-active type**

Fig. 3 Schematic view of ART with damper plates(NKK)

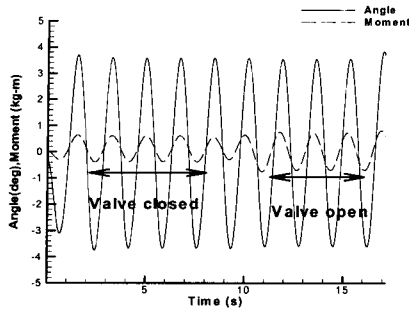


Fig. 4 Measured roll angle and moment at  $T_{Roll} = 1.70\text{sec}$ .

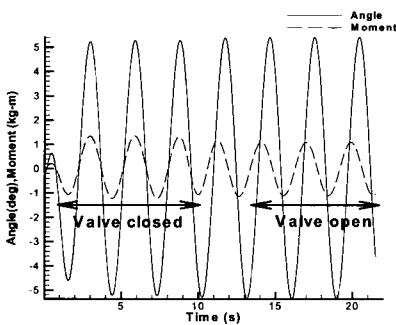


Fig. 5 Measured roll angle and moment at  $T_{Roll} = 2.9\text{sec}$ .

있으나 2.9초는 위상차가  $90^\circ$ 보다 큰 경우로 밸브를 열었을 때의 모멘트가 다소 작게 측정되는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 탱크 내 물의 이동에 의한 위상차로 인한 결과이다. 측정결과를 살펴보면 제작된 동요시험장치에서 얻어지는 횡동요 각도의 기록에는 약간의 비 대칭성이 나타나 있는데 이는 제작된 동요시험장치의 원점조정이 수동 조작으로 이루어지게 계획되어 있어서 실험자의 기구조정 숙련도에 따라서 다소의 차이가 나타나기 때문이며 실험장치의 횡동요 각도의 조정도 계획 값에 맞추기보다는 실측된 동요각을 채택하도록 기구가 설계되었기 때문에 횡동요 각이 계획하였던  $9.84^\circ$ 와 다소 차이를 주게 된 것으로 확인되었다. 이러한 오차는 실험 결과에 큰 영향을 주지 못할 것으로 판단하고 실험을 수행하였다.

Fig. 6~Fig. 9는 횡동요 각의 변화에 대한 모

멘트와 위상차의 변화를 보여주고 있다. 시험 조건은 L00, M44, N99 등으로 구분하였는데 영문자 L, M, N은 각각 횡동요  $9.84^\circ$ ,  $6^\circ$  및  $4^\circ$ 를 나타내며, 영문자 위의 두가지 숫자는 주기조절판의 개폐를 나타내는 것으로 0은 완전 개방, 4는  $45^\circ$  개방, 9는 완전히 막은 것을 나타낸다. 따라서, L49는 횡동요각  $9.84^\circ$ , 하나의 주기조절판은  $45^\circ$ , 다른 하나의 주기조절판은  $90^\circ$ 에 대한 실험결과를 나타낸다. 그림들로부터 위상각은 각도가 클 때 기울기가 완만하게 변하나 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 7로부터 횡동요각이 변화하여도 위상차가  $90^\circ$  되는 주파수가 거의 동일한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이로부터 탱크의 고유주파수가 약  $3\text{rad/sec}$ 가 되어 탱크 내 물의 동요주기는 약 2.1초가 되는 것을 확인하였다. 이 결과를 초기 ART를 설계하였을 때 점성의 영향을 무시하고 1.9초의 동요주기를 예상했던 것과 비교해 보면 탱크 내 각종 부재의 설치 및 점성의 영향으로 인해 물의 동요주기가 길어진 것으로 생각할 수 있을 것이다. Fig. 8~Fig. 9는 측정된 모멘트에 위상차의 cosine과 sine 성분을 곱한 결과를 보여주고 있다. 이 성분은 식(5)와 식(6)의 탱크 감쇠계수 및 주파수를 계산한 결과로부터 RAO를 계산하는데 중요한 기여를 하는 것을 알 수 있다. 즉, 식(5)로부터  $M_A \sin \epsilon$  항은 ART의 감쇠계수를 계산하는데 사용되며, 식(6)으로부터  $M_A \cos \epsilon$ 은 주파수 변화에 기여하여 주파수의 크기를 감소시키는 항임을 알 수 있게 된다.

특히, Fig. 9에 보인  $M_A \sin \epsilon$ 은 특정 주파수 값에서 최대가 되는 것을 알 수 있으며, 이 결과로부터 이 주파수에 해당하는 주기가 점성감쇠를 포함한 탱크의 감쇠주기(damped period)에 해당된다고 판단할 수 있을 것이다. 동요각이 커짐에 따라 모멘트가 최대인 주파수가 작아지는 사실로부터 감쇠주기는 동요각이 커짐에 따라 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 횡동요 운동의 비선형성에 기인한다고 판단된다.

Fig. 9에서  $M_A \sin \epsilon$ 의 최대값과 식(5)를 이용하면 ART의 감쇠계수를 추정할 수 있으며, 이 결과를 식(3)에 적용하면 공진점에서 ART가 작동될 때의 RAO를 예측할 수 있다. 예컨대, 배수량

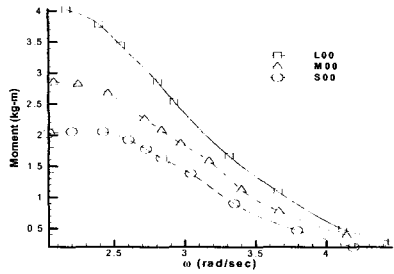


Fig. 6 Effect of roll angles on the tank stabilizing moments

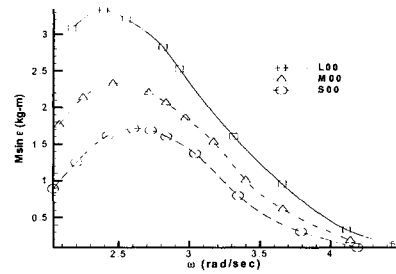


Fig. 9 Effect of roll angles on the sine components of tank stabilizing moment

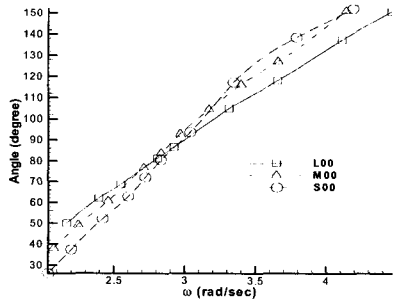


Fig. 7 Effect of roll angles on the variations of phase angles

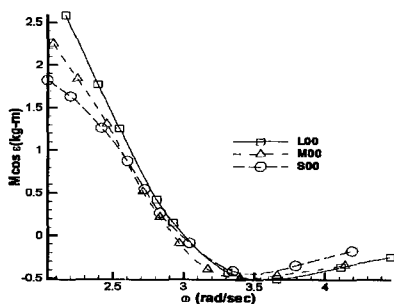


Fig. 8 Effect of roll angles on the cosine components of tank stabilizing moment

400kg, GM =0.15m인 모형선박에 ART가 설치되었다면 Fig. 8로부터 동요각 9.84°일 때의  $M_A \sin \epsilon$  값이 3.5Kg-m 정도가 되므로 ART의 감쇠계수,  $\gamma_b$ , 는 대략 0.1698이 된다. 일반적인 선박의 공진시 RAO의 값이 6이라 가정하면 선박의 감쇠계수는 0.0833에 해당하고, 식(3)을 이용해 ART가 작동될 때 공진시의 RAO를 계산하면 약 1.98이 되어 ART의 효과를 모형시험 없이 예측할 수 있게 된다.

Fig. 10 ~ Fig. 11에는 대각도 횡동요시 두 개의 주기조절판을 같은 각도만큼 회전시켰을 때의 모멘트와 위상차 변화를 도시하였다. 주기 조절판의 위치 변화에 따라 ART의 모멘트 값이 최대가 되는 위치가 변화하고 있으며, 특히 위상차가 90°가 되는 주파수가 변화하고 있는데, 이 경우에 탱크 내 액체의 동요주파수를 생각하면 약 2.8 rad/sec에서 3 rad/sec로 바꾸고 이를 주기로 환산하면 약 0.15초 정도의 주기 변화가 나타난 셈이다. 이를 폭 8m급의 실선으로 환산하면 실선에서 주기 변화의 효과가 약 0.4초 정도가 된다. 이 값은 주기 조절판이 덕트 하부 단면적의 1/2을 막도록 계획하여 이로 인한 주기 변화가 모형에서 못 미치고 있다. 이는 길이방향으로 swash bulkhead를 두어 효과적으로 유동을 막지 못하였기 때문이라 여겨진다. 따라서, 실선에 설치할 주기조절장치는 다소 면적을 크게 할 필요가 있다고 생각된다.

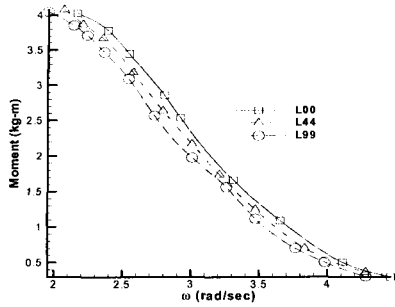


Fig. 10 Effect of damper plates on tank stabilizing moments ( $\phi = 9.84^\circ$ )

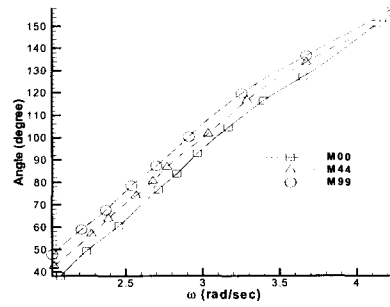


Fig. 13 Effect of damper plates on the variations of phase angles ( $\phi = 6.0^\circ$ )

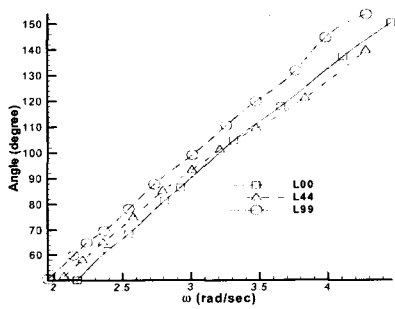


Fig. 11 Effect of damper plates on the variations of phase angles ( $\phi = 9.84^\circ$ )

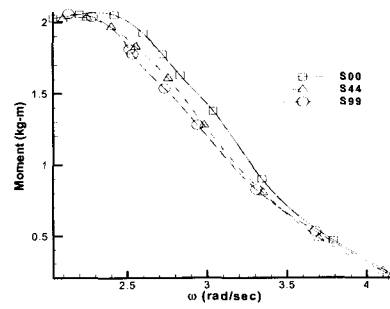


Fig. 14 Effect of damper plates on tank stabilizing moments ( $\phi = 4.0^\circ$ )

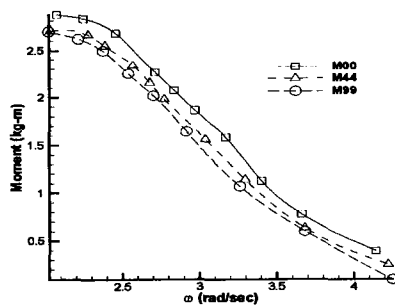


Fig. 12 Effect of damper plates on tank stabilizing moments ( $\phi = 6.0^\circ$ )

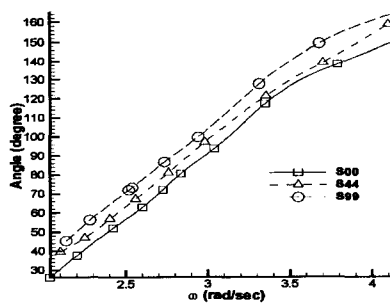


Fig. 15 Effect of damper plates on the variations of phase angles ( $\phi = 4.0^\circ$ )

Fig. 12 ~ Fig. 15에는 6° 및 4° 로 회전할 때 주기조절판 위치변화에 따른 모멘트와 위상차를 보여주고 있다. 대체로 대각도 횡경사시의 결과와 동일한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 언

본 연구에서는 ART의 하부 덕트 내에 동요주기 조절장치를 설치하고, 이들로 인한 주기지연 효과와 감요 모멘트 변화를 동요시험장치에서 모형시험을 수행하여 확인하였다. 본 연구를 통해 동요시험장치의 유용성이 확인되었고, 주기조절장치의 효과도 확인되었다. 확인된 내용들은 앞으로 ART의 국산화에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 2001년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비와 한국과학재단의 산학협력 연구과제(2000-30600-001-1) 연구비로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- 백창섭, 김효철, 유재문, 김재성, 1997, "감요수조 설계를 위한 Bench Tester의 개발", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 313-316

- 백창섭, 김효철, 유재문, "수동형 감요수조의 성능개선을 위한 실험적 연구", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, 1997. 4
- Stigter, Ir. C., 1966, "The performance of U-tank as a passive anti-rolling tank", Publication of the Netherlands Ship Research Centre TNO
- Zdybek, T., 1979, "The use of bench test results for calculating roll response of the tank stabilized ship", Italian-Polish Series on Ship Structures and Hydrodynamics
- <http://www.nssnet.co.jp>



< 유 재 문 > < 김 효 철 > < 이 현 업 >