

FPSO의 횡요 감쇠 장치에 대한 고찰

박인규 · 양진호 · 신현수
현대중공업(주) 선박해양연구소 해양산업연구실

A Study on Roll Reduction Devices for FPSOs

IN-KYU PARK, JIN-HO YANG AND HYUN-SOO SHIN

Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

KEY WORDS: Roll Reduction Devices 횡요 감쇠 장치, FPSO, U-tube Type ART U-tube형 ART, Forced Oscillation Test 강제 동요 시험, Wave Test 파랑 중 시험, Natural Period 고유 주기

ABSTRACT: Several roll motion reduction devices are reviewed and suggested for the application in FPSO. The firstly suggested solution is the shape of the bilge. The next is a bilge keel. The last suggestion is the ART (anti-rolling tank). Typical U-tube type ART is designed for a FPSO and examined extensively by model experiment. The model section was made of transparent acryl. Free decay test, forced oscillation test and wave test were carried out at a two-dimensional wave flume. U-tube type ART is effective only when the natural periods of ART and ship are same. Therefore, the divided U-tube type ART with split plate is suggested for the reduction of the roll motion of a FPSO over the wide range of the roll period.

1. 서 론

FPSO의 횡요 운동은 여러 가지 작업 (프로세스, 하역, 헬기 이착륙, 보급선 접안 등)을 안전하게 수행하기 위하여 충분히 작은 범위내에서 제한되어야 한다. 그러나, 실제로는 해상의 파도로 인하여 터릿 계류 시스템이 적용된 FPSO일지라도 횡요 운동을 피할 수 없게 된다. 또한, 비선형 점성 감쇠로 인해서 횡요 운동을 정확히 추정하는 것이 그리 간단하지 않다. 따라서, 횡요 운동에 대한 많은 연구와 실험이 수행되어져 왔고 (Vuguts (1970), Ikeda et al. (1977), Ikeda et al. (1978), Schmitke (1978), Park et al. (1999) and Park et al. (2000)), 횡요 운동을 감소시키기 위한 장치도 발전되어 왔다 (Stiger (1966), Bell (1966), Ikeda et al. (1976), Ikeda et al. (1993), Lew et al. (2000), Na et al. (2002) and Park et al (2004)).

본 논문에서는 FPSO에 적용할 수 있는 몇 가지 횡요 운동 감쇠 장치 (빌지 모양, 빌지 킴 및 ART)에 대하여 소개하고자 한다. ART가 작동 주기에서만 유효하다는 단점 (ART는 ART 고유 주기 또는 근처에서만 효과적이다)에도 불구하고 횡요 운동을 감소시키는 성능이 우수하였다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 넓은 횡요 주기 범위에서 작동할 수 있는 ART가 요구된다.

본 연구에서는 몇 가지 빌지 킴을 소개하고, ART가 좀 더 넓은 횡요 주기 범위에서 횡요 운동을 감소시킬 수 있는 분할판을 가지는 U-tube형 ART와 질량-스프링 시스템을 가지는 ART를 제안하였다.

2. 모형 시험

설계된 ART의 성능을 검증하고 개선하기 위해서 모형 시험을 현대중공업(주) 선박해양연구소 2차원 조파 수조 (길이×폭×깊이 [m] = 25.0×0.8×1.0)에서 수행하였다. 일반적으로 ART의 모형 시험에는 공기 중 강제 동요 벤치 시험, 물 속에서의 강제 동요 시험 및 파랑 중 시험이 있다. 본 연구에서는 물 속에서의 강제 동요 시험 및 파랑 중 시험을 수행하였다.

2.1 강제 동요 시험

강제 동요 장치는 전기 모터, 감속 기어 및 크랭크 샤프트로 구성되어 있다. 전기 모터의 회전 운동은 감속 기어 및 크랭크 샤프트에 의해서 선형 운동으로 바뀌고 이 선형 운동은 유니버설 조인트와 하중계 (load cell)를 통해서 모형에 수직으로 작용한다. 강제 동요 장치를 Fig. 1에 나타내었다.

횡요 중심에서의 횡요 운동 방정식으로부터 횡요 감쇠 계수는 식 (1)과 같다.

제1저자 박인규 연락처: 울산광역시 동구 전하동 1번지
052-230-2108 irpark@hhi.co.kr

$$b_{11} = \frac{K_{osc} \sin \epsilon_k}{w \theta_A} \quad (1)$$

여기서 K_{osc} 는 강제 횡요 모멘트의 진폭, ϵ_k 는 횡요각과 횡요 모멘트의 위상차, θ_A 는 횡요각, w 는 강제 동요 주파수를 나타낸다.

공진 주파수에서 강제 동요시키면 관성력과 복원력이 상쇠되어 감쇠력만 남게 되고, 이 때는 강제 동요 모멘트와 횡요각의 위상차는 90도이다.

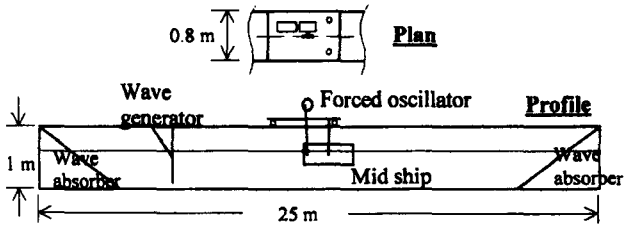


Fig. 1 Forced oscillation test facility

2.2 파랑 중 시험

공진 주파수 근처에서 강제 동요 시험으로부터 측정된 횡요 감쇠 모멘트는 거의 영 (zero)에 가까워 시험의 정도를 유지하는 것이 힘들다. 따라서, 규칙파 중 횡요 운동 시험이 효과적이다. 이 시험으로 ART가 있는 경우와 없는 경우에 대한 횡요 운동을 측정하여 횡요 운동의 감소를 관찰할 수 있다 (Fig. 8 참조).

3. 빌지 및 빌지 킬

등근 빌지와 사각 빌지에 대한 모형 시험을 수행하였다. 사각 빌지에 Fig.2에 나타낸 여러 가지 모양의 빌지 킬을 부착하여 시험하였다. 시험으로부터 횡요 운동 감소 측면에서 다음의 두 가지를 확인하였다 (Na et al., 2002).

- 1) 사각 빌지가 등근 빌지에 비해 우수하다.
- 2) T-형 단면을 가진 빌지 킬 (bilge model 2-c)이 가장 효과적이다.

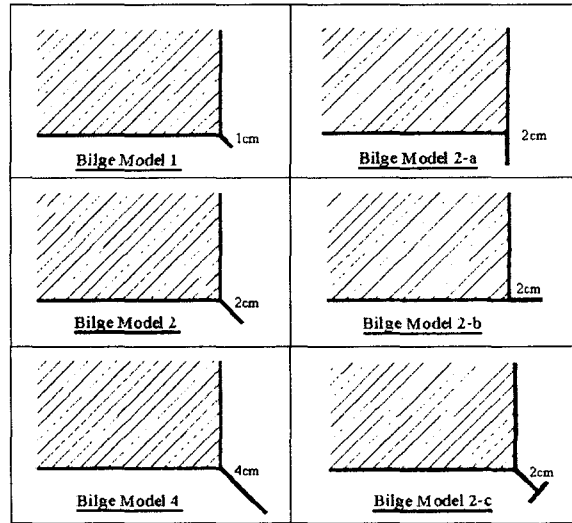


Fig. 2 Proposed configurations of bilge keel

4. ART 모형

4.1 수동형 U-tube형 ART

수동형 U-tube형 ART의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 이 ART의 고유 주기는 식 (2)에 의해 추정될 수 있다 (Lloyd, 1989).

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W_r W + 2 h_r h_d}{2gh_d}} \quad (2)$$

여기서, T_i 는 ART의 고유 주기, g 는 중력 가속도이다. 다른 변수는 Fig. 3에서 정의된다.

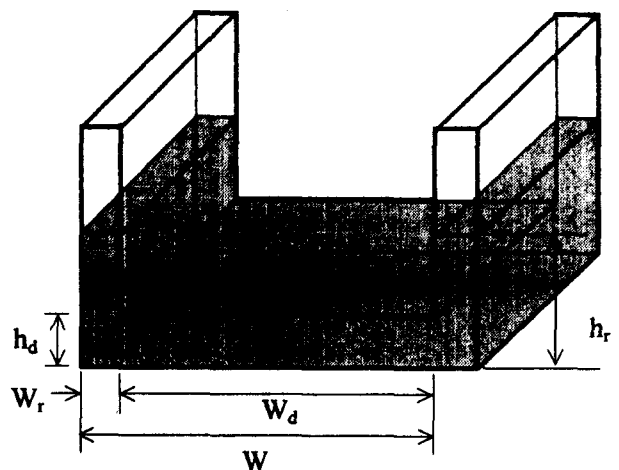


Fig. 3 Sketch of passive U-tube type ART

4.2 분할판을 가지는 U-tube형 ART

분할판을 가지는 U-tube형 ART의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 이 ART는 윙 탱크(wing tank)를 적당한 비로 나누는 하나 이상의 분할판을 가지며, 나뉜 윙 탱크의 최상부에는 공기 밸브가 있다. 분할판의 위치 및 수를 바꾸면, ART의 고유 주기를 선박의 고유 주기와 같게 할 수 있다.

Fig. 4에 나타낸 이 ART ($W_{r1} : W_{r2} = 2 : 1$)는 공기 밸브의 작동에 따라 서로 다른 세 개의 고유 주기를 가질 수 있고, 식 (2)에 의해 추정될 수 있다. 여기서 $W_r = W_{r1} + W_{r2}$ 이다.

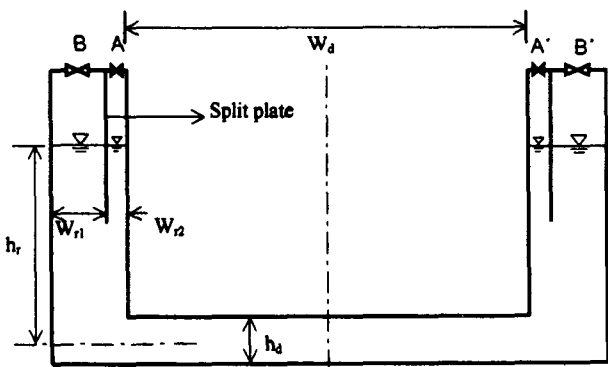


Fig. 4 Sketch of U-tube type ART with split plate

4.3 스프링-질량 시스템을 가지는 U-tube형 ART

Fig. 5에 나타낸 ART는 복잡한 제어 시스템이 아닌 간단한 질량-스프링 시스템에 의한 ART의 고유 주기 변화를 통해서 횡요 운동을 감소시키는 장치이다. 이 ART에 대해서 모형 시험은 수행하지 않고, 개념만 설명한다.

초기에 ART의 양쪽 윙 탱크에 있는 공기압은 일정하지만, 선박의 횡요 운동 후에는 선박의 횡요 운동과 ART 유동 사이에 위상차가 생긴다. 그러면, 질량-스프링 시스템에 의해서 한 쪽 탱크의 압력이 더 높아져서, ART의 복원력이 커지고 ART의 고유 주기가 바뀐다. 질량 크기와 스프링의 탄성을 변화시키면, 하중 조건에 따라 ART의 고유 주기를 바꿀 수 있어 횡요 운동이 감소될 것이다.

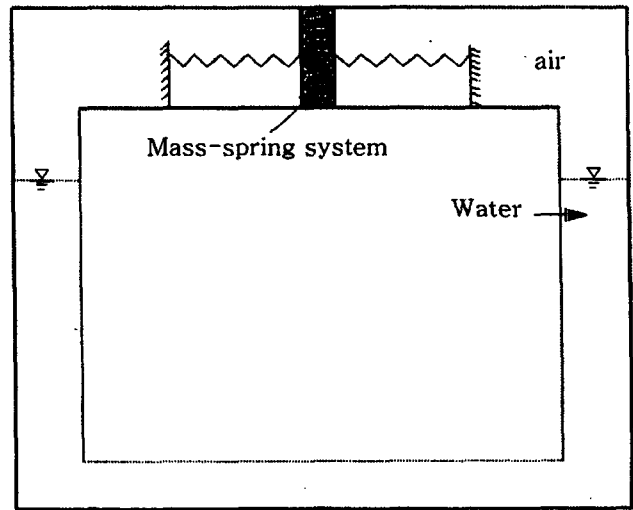


Fig. 5 Sketch of U-tube type ART with mass-spring system

5. 결과

5.1 강제 동요 시험

강제 동요 시험 이전에 U-tube형 ART의 고유 주기를 추정하기 위해 자유 감쇠 시험을 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 분할판을 가지는 ART의 고유 주기를 Table 1에 나타내었다. All-ART는 밸브 A, A' and B, B'가 열린 경우, small-ART는 밸브 A, A'는 열려 있고 B, B'는 닫힌 경우는, big-ART는 밸브 B, B'는 열려 있고 A, A'는 닫힌 경우를 나타낸다.

All-ART에 대해서 식 (2)에 의해 계산된 고유 주기는 실험치와 잘 일치하고 있다. 하지만, big-ART 및 small-ART는 그렇지 않다. 그러므로, 이러한 분할판을 가지는 ART의 고유 주기를 추정하기 위해서는 기본적으로 자유 감쇠 시험이 필요하다.

Table 1 The natural periods of U-tube type ART with split plate

Case	Free-decay test [s]	Calculation [s]
All-ART	1.98	1.94
Big-ART	1.61	1.78
Small-ART	1.21	1.49

Table 1에서 볼 수 있듯이, 분할판을 가지는 ART의 고유 주기는 넓은 범위 (1.21 ~ 1.98 초)에서 변화될 수 있다. 실제 배에 대해서는 8.5 ~ 14 초이다. 이 ART는 제안된 FPSO의 대부분의 흘수에 걸쳐 횡요 운동 감소에 효과적일 것이다.

강제 동요 시험의 예로써 횡요 모멘트를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 가로축은 무차원 주파수, w/w_n , (파 주파수/ 고유 주파수), 세로축은 횡요 모멘트를 최대 횡요 모멘트로 나눈 무차원화된

횡요 모멘트를 나타낸다. 공진 주파수에서 최소 횡요 모멘트가 발생함을 알 수 있다.

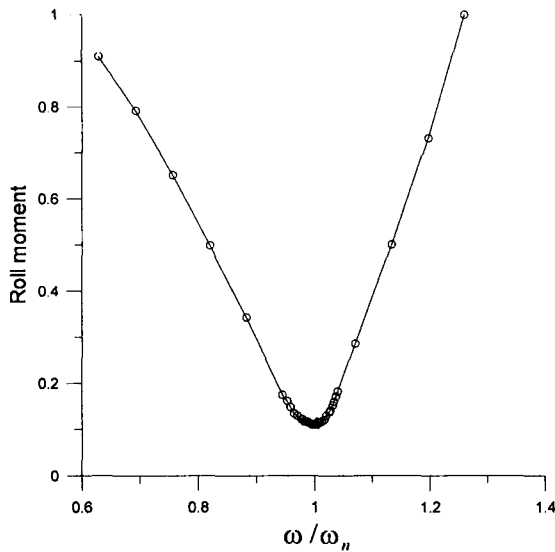


Fig. 6 Roll moment in forced oscillation test

5.2 수동형 U-tube형 ART에 대한 파랑 증 시험

무차원 주파수, w/w_n , 에 대한 무차원화된 횡요 운동, ζ_1 을 Fig. 7 ~ 8에 나타내었다.

$$\zeta_1 = \frac{\theta}{k\xi}$$

여기서 θ 는 횡요각, ξ 는 파 진폭, k 는 파수 (wave number)이다.

Table 2에서 보듯이 모형의 축척비는 1/100이다. 설계 하중 및 발라스트 하중 조건에서의 모형의 고유 주기는 각각 1.6 초, 1.2 초이다. 따라서, ART의 고유 주기는 1.4 초로 설계하였다 (Kim and Park, 2002).

Table 2 The dimensions of models

Designation	Passive U-tube type ART	U-tube type ART with split plate
Scale	1/100	1/50
Breadth [m]	0.48	1.02
Draft [m]	0.135	0.31, 0.38
Natural period of ART [s]	1.40	1.98, 1.61

Fig. 7에서 ART가 있는 모형의 횡요 운동 (원 심볼)은 ART가 없는 경우 (사각 심볼)와 비교하여 공진 주파수에서 1/6 정도 감소함을 볼 수 있다. 그러나, 공진 주파수에서 떨어진 주파수에서는 횡요 운동은 다소 커지는 경우도 있다. 공기 밸브의 구멍 크기를 작게 하면 (controlled ART; 십자가 심볼), 횡요 운동 감소 효과는 줄어들

지만 고유 주기는 바뀌지 않는다.

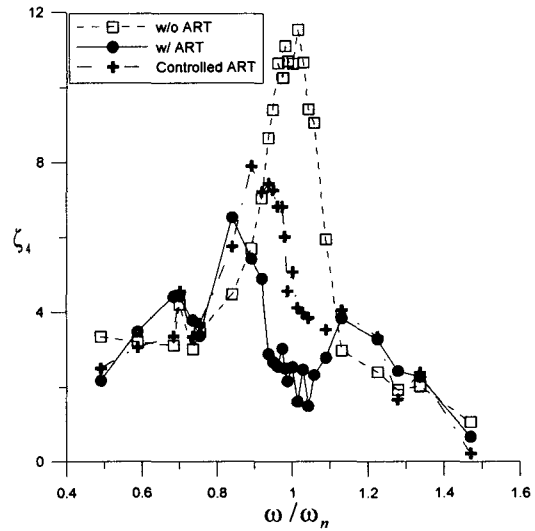


Fig. 7 Non-dimensional roll motion of passive U-tube type ART

5.3 분할판을 가지는 U-tube형 ART에 대한 파랑 증 시험

Table 2에서 보듯이 모형의 축척비는 1/50이다. Fig. 8에서 all-ART를 가지는 모형의 횡요 운동 (원 심볼)은 ART가 없는 경우 (사각 심볼)와 비교하여 공진 주파수에서 1/7 정도 감소함을 볼 수 있다. 그 외의 주파수에서는 all-ART를 가지는 모형의 횡요 운동이 ART가 없는 경우보다 조금 크다. Big-ART 및 small-ART에 대한 결과도 all-ART와 비슷한 경향을 보인다.

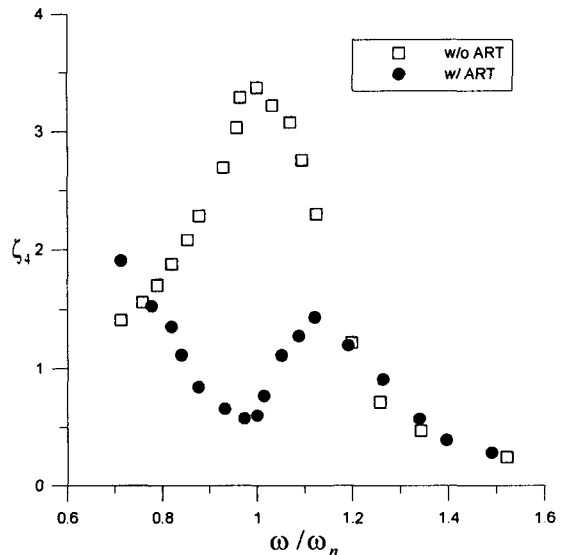


Fig. 8 Non-dimensional roll motion of U-tube type ART with split plate

5.4 GoM FPSO에서의 적용

설계된 ART는 GoM FPSO에 적용될 수 있다. Fig. 9에 일반 배치도를, 그리고 Fig. 10에 중앙 단면도를 보여주고 있다. 실선의 흘수 및 무게 분포에 따라 고유 주기가 변한다. 먼저, ART의 고유 주기는 설계 하중 흘수에서 설계된다. ART의 고유 주기는 분할판 또는 질량스프링 시스템을 적용함으로써 바뀔 수 있다.

본 연구에서는 ART의 고유 주기를 변화시키기 위해서 U-tube의 물 기둥 높이를 조절하면서 분할판을 가지는 ART를 적용하였다.

ART의 길이는 No. 3 COT와 나란한 No. 3 WBT까지 확장된다. Fig. 11에 횡요 감소 장치가 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 나타내었다. 세로축은 최대 횡요각에 대한 횡요각의 비를 나타낸다. 십자가 심볼은 빌지 킬과 ART가 없는 등근 빌지의 경우를, 다이아몬드와 별 심볼은 각각 빌지 킬이 있는/없는 직각 빌지의 경우를 나타낸다. 삼각 심볼은 ART를 가지고 있는 사각 빌지의 경우를 의미한다. Fig. 11로부터 횡요 운동 감소 효과는 ART, 빌지 킬 그리고 빌지 모양 순임을 알 수 있다.

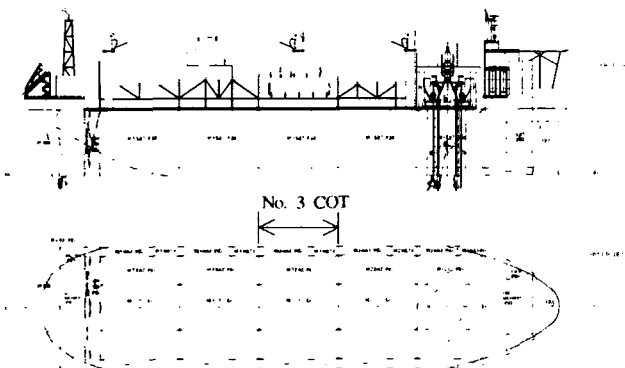


Fig. 9 Proposed General arrangement of FPSO

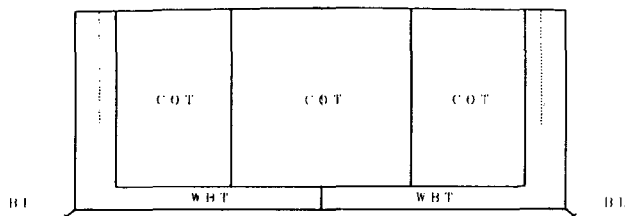


Fig. 10 ART applied to mid-ship section of GoM FPSO

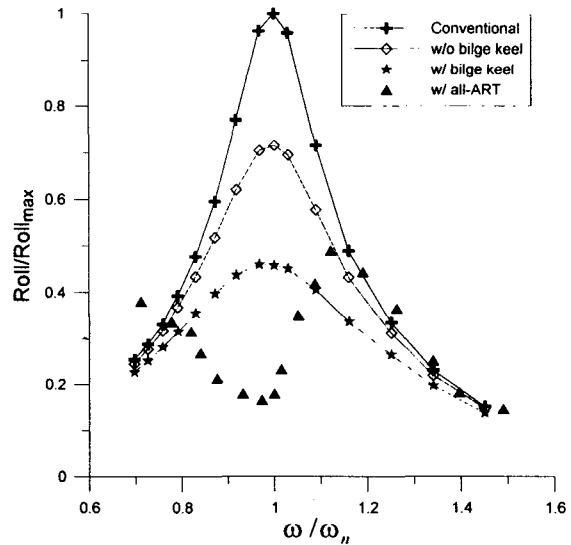


Fig. 11 Roll motion with bilge keel and ART in waves

6. 결 론

본 연구에서, ART의 FPSO 적용이 가능함을 다음의 결론으로부터 알 수 있다.

- (1) 횡요 운동이 수동형 U-tube형 ART, 빌지 킬 및 사각 빌지에 의해 감소됨을 확인하였다.
- (2) 분할판을 가지는 U-tube형 ART는 넓은 범위의 고유 주기를 가지고 있다. 따라서, 넓은 범위의 횡요 고유 주기에서 횡요 운동을 감소시킬 수 있다.
- (3) 공진 주파수에서 횡요 운동 감소에 대한 ART의 효과는 빌지 킬보다 우수하다.
- (4) 분할판을 가지는 ART 고유 주기를 계산하는 공식을 검토하였다. 공식보다는 실험으로부터 이 ART의 고유 주기를 결정하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

- Bell, J. (1966). "Activated and Passive Controlled FluidTank System for Ship Stabilization", SNAME Annual Meeting, New York, November.
- Ikeda, Y., Himeno, T. and Tanaka, N. (1976). "On Roll Damping Force of Ship-Effect of Friction of Hull and Normal Force of Bilge Keels", Journal of Kansai Soc. N. A., No. 161.
- Ikeda, Y., Himeno, T. and Tanaka, N. (1977). "On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull", Journal of SNAJ, Vol.142.
- Ikeda, Y., Himeno, T. and Tanaka, N. (1978). "Components of

- Roll Damping of Ship at Forward Speed", Journal of SNAJ, Vol. 143.
- Ikedo, Y., Fujiwara, T. and Katayama, T. (1993). "Roll Damping of a Sharp-Cornered Barge and Roll Control by a New-Type Stabilizer", Proceedings of ISOPE.
- Kim, J.K. and Park, I.K. (2002). "A Study of the Application of ART to a FPSO", Proceedings of the 47th Workshop on Ocean Engineering, Korea.
- Lew, J.M., Kim, H.C. and Choi, B.J. (2002). "Development of Passive and Active Anti-Rolling Tanks", Proceedings of ISOPE PACOMS-2002, Daejeon, Korea.
- Lloyd, ARJM (1989). "Seakeeping: Ship Behavior in Rough Weather", Section 18.4 Passive Tanks, Ellis Horwood Limited.
- Na, J.H., Lee, W.C., Shin, H.S. and Park, I.K. (2002). "A Design of Bilge Keels for Harsh Environment FPSOs", Proceedings of the 12th ISOPE 2002 Conference, Kyushu, Japan.
- Park, I.K., Yang, J.H. and Shin, H.S. (2004). "Roll Motion Reduction Devices for Harsh Environmental FPSOs", Proceedings of the 14th ISOPE 2004 Conference, Toulon, France.
- Park, I.K., Shin, H.S. and Cho, J.W. (1999). "An Experimental Study on Roll Damping for Tanker-based FPSO", Proceedings of ISOPE-99, Brest, France.
- Park, I.K., Shin, H.S., Kim, J.W. and Cho, J.W. (2000). "Roll Center Effect on Damping for FPSO Sections by Experiment", Proceedings of ISOPE-2000, Seattle, USA.
- Schmitke, RT (1978). "Ship Sway, Roll, and Yaw Motions in Oblique Seas", Transactions of SNAME, Vol. 86.
- Stigter, C. (1966). "The Performance of U-Tank as a Passive Anti-rolling Tank", Publication of the Netherlands Ship Research Center, TNO.
- Vugts, J.H. (1970). "The Hydrodynamic Coefficients for Swaying, Heaving and Rolling Cylinders in a Free Surfaces", Netherlands Ship Research Center TNO Report No. 112.

2004 월 일 원고 접수

s004 월 일 최종 수정본 채택