

터렛 계류된 부유체의 과대 선수동요에 관한 실험 연구

조석규^{1,†} · 성홍근¹ · 홍장표¹ · 최향순²
한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소¹
전 서울대학교 조선해양공학과²

Experimental Study of Excessive Yaw Motion of Turret Moored Floating Body

Seok-Kyu Cho^{1,†} · Hong-Gun Sung¹ · Jang-Pyo Hong¹ · Hang-Shoon Choi²
MOERI/KIOST¹
Prof. Emer., 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.

Excessive yaw motion of a turret moored vessel was examined in this paper. The vessel was moored by an internal turret and catenary mooring lines. The experiments were conducted in regular waves. Turret moored vessel can oscillate from side to side or move to one particular direction, and eventually exhibit large yaw motion. The results showed that the excessive yaw occurred for specific condition, ratio of wave lengths and vessel length. It was found that turret moored floating vessel was unstable for regular wave period from 14 to 18 sec and excessive yaw occurred to maximum 50 deg. The time series, trajectory, phase plot and qualitative analysis are performed. The analysis showed that the results of experiments agreed with the that of analytic method and the excessive yaw could be predicted by the stability analysis.

Keywords : Yaw(선수 동요), Fishtail(어미 현상), Turret(터렛), Single Point Mooring(SPM, 일점 계류)

1. 서론

FPSO, FSRU, LNG-RV 등 해양구조물은 설치 해역에서 작업을 수행하기 위해 위치유지를 해야 한다. 위치를 유지하기 위해 다양한 계류시스템(일점 계류, 다점 계류, 터렛 등)을 사용할 수 있으며, 계류시스템은 설치 해역의 환경, 구조물의 종류, 비용 등 여러 가지 조건을 고려해 결정된다. 일점 계류 방식은 환경 외력에 따라 선수각이 자유롭게 회전하여(Weathervaning) 부유체에 작용하는 하중을 감소시킬 수 있기 때문에 가혹한 환경 조건에서 주로 사용되고 있으며, 터렛 계류는 대표적인 일점 계류 방식이고, 최근 STL(Submerged Turret Loading) 시스템 연구가 주목받고 있다(Kaalstad & Hovde, 2004). 터렛 계류된 부유체의 중요한 현상 중 하나는 터렛을 중심으로 회전하는 선수동요이다. 터렛 계류된 부유체는 특정 파도 주기에서 과대한 선수각을 가지거나 주기적인 선수동요(Fishtailing)를 나타낼 수 있다. 과대한 선수동요는 구조물의 운동 성능을 저해하여 작업을 방해하고, 터렛에 작용하는 하중을 증가시킬 수 있다. 특히 직렬배치 또는 병렬배치 상태에서 부유체 간(Ship To Ship) 작업이 수행되는 경우,

과대한 선수동요를 제어해야한다. 과대 선수동요는 예인, 다점 계류, 조종 등 다양한 상황에서 발생할 수 있어 많은 연구가 이루어졌지만, 그 발생 원인이 명확하게 제시되지 않고 있다. 장주기의 표류력 또는 조류에서 발생할 수 있는 선수동요와 안정성에 대한 연구(Bernitsas & Papoulias, 1986)와 직렬배치에서 선수동요 안정성 해석 연구(Lee & Choi, 2005)가 대표적이다. Chillamcharla, et al. (2009)는 과대 선수동요에 대한 모형시험과 수치해석을 수행하였고, Yadav, et al. (2007)는 터렛 위치와 파도 주기에 따른 과대 선수동요 수치해석을 수행하여 과대 선수동요 발생 주기를 확인하였고, Munipalli and Thiagarajan (2007)은 파경사에 따른 선수동요 해석을 통해 전후동요와 좌우동요의 연성 영향을 보여주었다. Cho (2012)는 터렛 계류된 부유체의 선수동요를 해석적 방법으로 분석하여 불안정성 발생 조건을 연구하였다.

본 연구에서는 터렛 계류된 부유체의 파랑 중 운동 실험을 통해 선수동요 특성을 분석하고 과대 선수동요가 발생하는 원인을 추정하였다. 두 가지 파경사(30, 50) 조건에서 실험을 수행하여, 선수동요의 시계열, 궤적, 위상, 정성적 분석을 통해 과대 선수동

요의 발생 현상을 분석하였다. 결과 분석을 통해 과대 선수동요가 발생하는 조건에 대한 정성적 분석을 수행하였다.

2. 모형실험

2.1 모형

모형시험에 사용된 구조물은 FSRU이다. FSRU의 주요 제원은 Table 1과 같다. FSRU의 위치를 유지하기 위한 계류시스템으로 내부 터렛(Internal turret)과 현수선 계류 시스템(Catenary mooring system)을 사용하였다. 터렛은 일점 계류 방식으로 환경 외력의 작용 방향으로 선수가 향하도록 선회하여 부유체에 작용하는 하중을 감소시키는 역할을 한다. FSRU 모형과 터렛을 Fig. 1, 2에 나타내었다. 사용한 모형 축척비는 600이다. 계류선 모형은 Fig. 3과 같이 체인을 이용하여 구성하였고 체인의 무게와 강성을 상사하였으며, 주요 제원은 Table 2와 같다. 계류선은 총 9개이고, 3 그룹으로 구성하여 선수를 기준으로 120 deg 간격으로 배치하였고(Fig. 4), 그룹 내에서 계류선의 간격은 2 deg이다. 터렛 계류된 모형의 복원력은 Static pull-out test을 통해 구하였고 Fig. 5와 같다. 이 때 정지된 상태에서 계류선의 초기 장력은 1,670 kN이다. 정수 중 전후동요 자유 감쇠 시험을 통해 구한 고유 주기는 216.7 sec이다.

2.2 환경 조건 및 계측

환경 조건은 규칙파로 구성되었다. 파도는 모형이 정지된 상태에서 선수파(180 deg) 방향으로 입사되었다. 규칙파의 조건은 파경사 30, 50, 주기 6~22 sec(λ/L_{BP} 0.18~2.40)이다. 규칙파의 자세한 조건은 Table 3에 나와 있다.

FSRU의 파랑 중 터렛과 무게 중심의 6자유도 운동을 계측하였다. 운동 계측은 비접촉 광학식 운동 계측 장비 RODYM6D를 사용하였다.



Fig. 1 FSRU model

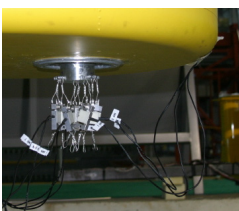


Fig. 2 Turret model



Fig. 3 Chain for mooring lines

Table 1 Particulars of FSRU

Item		
Length	L_{BP}	315 m
Breadth	B	53 m
Draft	T	12 m
Displacement	∇	200,331 ton
Turret Position	a	$0.45L_{BP}$ from CoG

Table 2 Properties of chain

Item		
Weight	W_{chain}	4,002.7 N/m in water
Stiffness	k_{chain}	2,351,880 kgf/m
Length (from turret to anchor)	1~3	1,080 m
	4~9	720 m

Table 3 Regular wave condition

ID	T_w [sec]	λ [m]	λ/L_{BP}
RW01	6	56.18	0.18
RW02	8	99.88	0.32
RW03	10	156.07	0.50
RW04	12	222.27	0.71
RW05	13	257.86	0.84
RW06	14	294.11	0.97
RW07	15	330.52	1.11
RW08	16	366.76	1.27
RW09	17	402.67	1.43
RW10	18	438.19	1.61
RW11	19	473.28	1.79
RW12	20	507.97	1.98
RW13	22	576.24	2.40

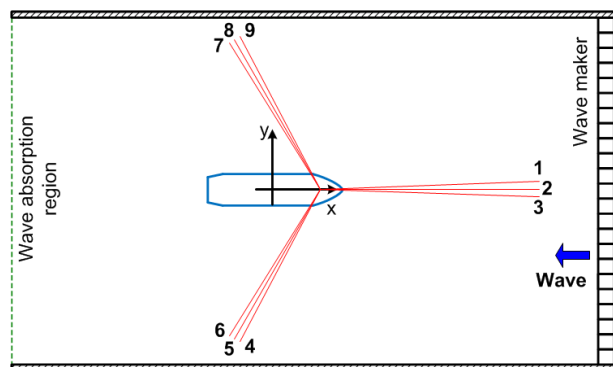


Fig. 4 Mooring configuration

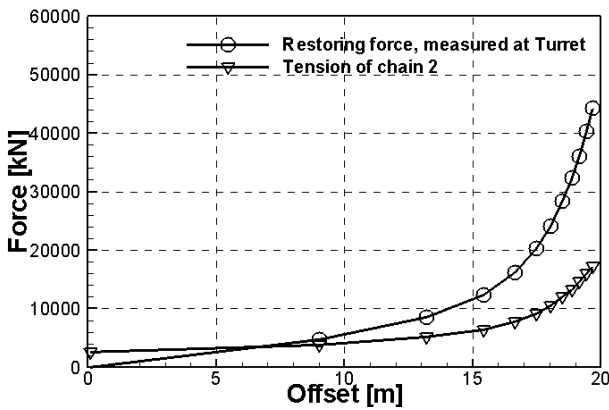


Fig. 5 Static pull-out test

3. 결과

3.1 과대 선수동요 시계열 분석

터렛 계류된 부유체의 규칙파 중 모형실험은 선수각 회전 때문에 정상 상태(Steady state) 결과를 얻기가 어렵다. 규칙파 중 모형실험은 반사파가 도달하기 전 5~20개 정도의 신호를 해석하도록 ITTC (2002)에서 권장하고 있다. 그러나 과도 과정(Transient process), 장주기, 비선형 효과가 중요한 경우 반사파를 포함하더라도 긴 구간의 해석이 필요하다. 모형실험에서 정상 상태 결과를 얻기 위해 실선 기준으로 2,300 sec(39 min) 동안 계측을 하였다. 파경사 50에서 구조물 무게 중심 운동 시계열 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 주기가 12 sec인 경우 선수각이 최대 10 deg 회전하고, 주기가 16 sec인 경우 선수각이 -50 deg까지 회전하며, 주기가 22 sec인 경우 선수각은 시간에 따라 천천히 -20 deg까지 증가한다. 각 주기 및 파경사에 따라 최대 선수각은 Fig. 7과 같다. 30 deg 이상의 과대 선수동요가 발생하는 구간은 주기 15~20 sec이다. 이 구간의 λ/L_{BP} 는 1.11에서 1.98이다. 이 구간에서 무게 중심은 앞 쪽으로 이동하는 반면 다른 구간에서는 무게 중심이 뒤 쪽으로 이동한다.

Yadav, et al. (2007)는 과대 선수동요가 발생하는 구간을 λ/L_{BP} 0.6~1.7이고 터렛 위치에 따라 변하는 것을 수치해석으로 보여주었다. 회전 중심이 무게 중심 쪽으로 이동하면 불안정성은 감소하여 선수동요가 감소하고, 과대 선수동요 발생이 전후동요와 좌우동요 가속도(관성)의 연성, 위상에 의한 것이라고 해석하였다. Yadav and Thiagarajan의 결과는 λ/L_{BP} 1 이하에서도 과대 선수동요가 발생하여 본 모형시험의 결과와 일치하지 않는다. 수치해석 시 사용된 조건(해석 시 선수각 간격, 파랑하중, 전후동요 응답 등)이 없어 정확한 분석 및 비교를 하기는 어렵다.

3.2 과대 선수동요 위상 분석

파경사 50, 주기 12, 16, 22 sec일 때 구조물 무게 중심 운동 궤적, 위상을 그림으로 나타내면 Fig. 8, 9와 같다. 운동, 속도,

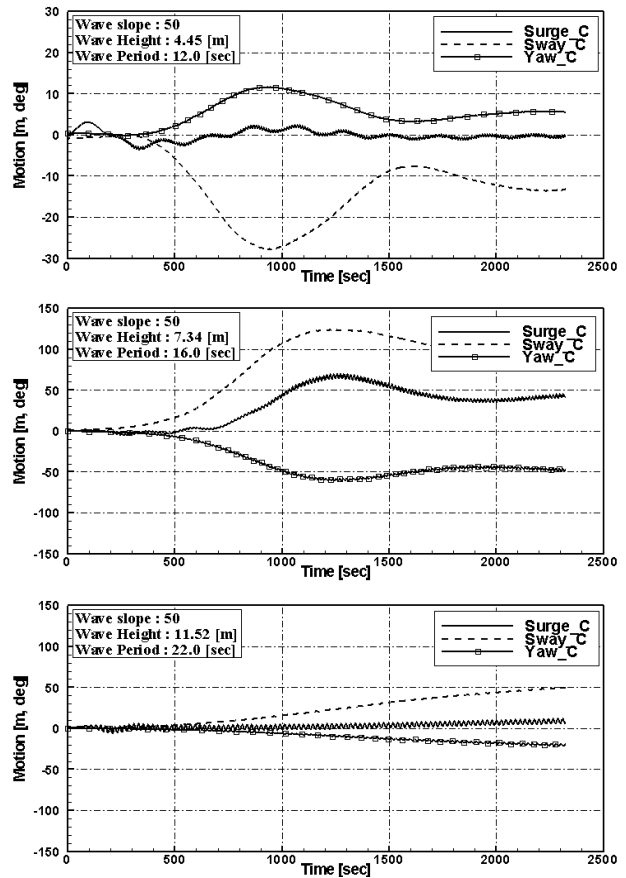


Fig. 6 Time series for regular waves (wave slope 50, top: T=12sec, middle: 16sec, bottom: 22sec)

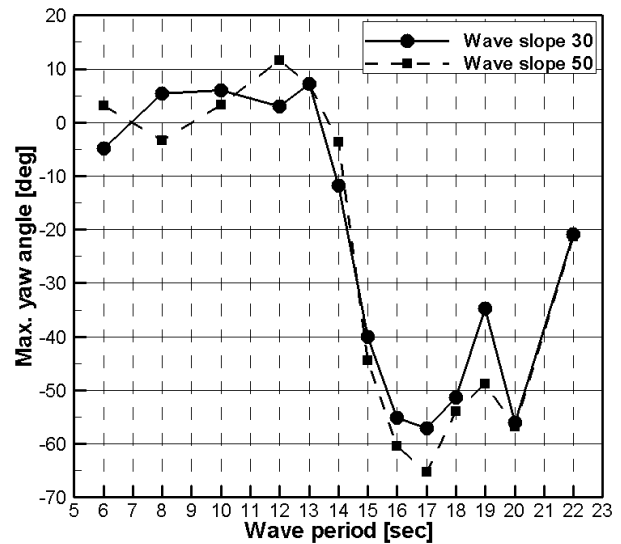


Fig. 7 Maximum yaw angle for regular waves

가속도의 궤적과 위상은 각 주기에 따라 차이를 나타낸다. 주기 12 sec의 경우, 패턴없이 불규칙한 궤적을 나타내고 전후동요의 속도와 가속도의 위상은 유계(bounded)되어 있고 변위는 0에서 2의 범위를 가진다. 이 때 좌우동요는 불규칙적이다. 주기 16 sec의 경우, 궤적은 +45 deg의 방향성을 나타내고 전후동요의

속도와 가속도 위상은 유계되어 있다. 주기 22 sec의 경우, 궤적은 타원형이고 전후동요의 속도와 가속도 위상은 유계되어 있다. 과대 선수동요가 발생하는 16 sec에서 차이점은 가속도의 궤적이 45 deg 방향성을 나타내는 것이다. 위상의 패턴으로 과대 선수동요를 구별하기는 어렵지만, 궤적은 방향성을 나타내어 과대 선수동요의 특성을 보여준다.

3.3 과대 선수동요 환경 하중 분석

모형시험 결과를 정성적으로 분석하기 위해서는 환경하중에 의한 FSRU의 과대 선수동요 거동을 분석할 필요가 있다. 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다. FSRU는 터렛으로 계류되어있고, 터렛을 중심으로 운동한다. FSRU의 평균 전진속도는 0이고 터렛을 중심으로 매우 느리게 (Very slowly) 운동한다. 터렛을 중심으로 선수동요하기 때문에 터렛 중심에 좌표계의 원점을 정의하고 동유체력 (회전 모멘트, 횡방향 힘, 회전관성 (선수동요 회전관성))을 계산하였다. 문제를 단순화하기 위하여 조류와 바람이 없는 상태에서 파도만을 고려하였다. 따라서 상대운동에 따른 영향은 고려하지 않았다. 조류와 바람은 정적성분이 지배적이고, 이러한 힘으로 정적 평형점을 찾았다고 가정하였다.

○ 정적 평형점

계류 FSRU 시스템은 일반적으로 비선형 시스템이나 정적 평형점에 대하여 시스템을 선형화하고 이를 통해 동적 안정성을 정성적으로 해석하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 바람과 조류에 의하여 평형된 다음 터렛 계류된 FSRU의 정적 평형점은 시간 평균 표류력과 계류 복원력의 평형으로 이루어진다고 가정한다. 즉, FSRU에 작용하는 힘은 시간 평균 좌우동요 표류력 (Y)과 시간 평균 좌우동요 표류모멘트 (N)이다. 이를 터렛에 대하여 모멘트 평형으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$aY(\psi) = N(\psi) \tag{1}$$

여기서 a 는 FSRU 무게중심에서 터렛까지의 거리, ψ 는 FSRU의 선수각을 나타낸다. 식 (1)를 만족하는 선수각이 정적 평형점이 된다.

○ 정적 및 동적 안정성

정적 평형점에서의 안정성은 환경하중에 의한 복원력 계수가 양의 값을 가져야 한다는 조건에서 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$a \frac{dY}{d\psi} - \frac{dN}{d\psi} > 0 \tag{2}$$

위의 정적 평형점, 안정성 해석을 사용하여 터렛 계류된 FSRU의 규칙파 중 안정성을 해석하였다. 이때 FSRU의 무게중심에서 터렛까지의 거리 a 는 $0.45L_{BP}$ 이고, 여기서 L_{BP} 은 FSRU의 수선간 길이이다. 안정성 해석에 필요한 시간 평균 표류력은 고차경계요

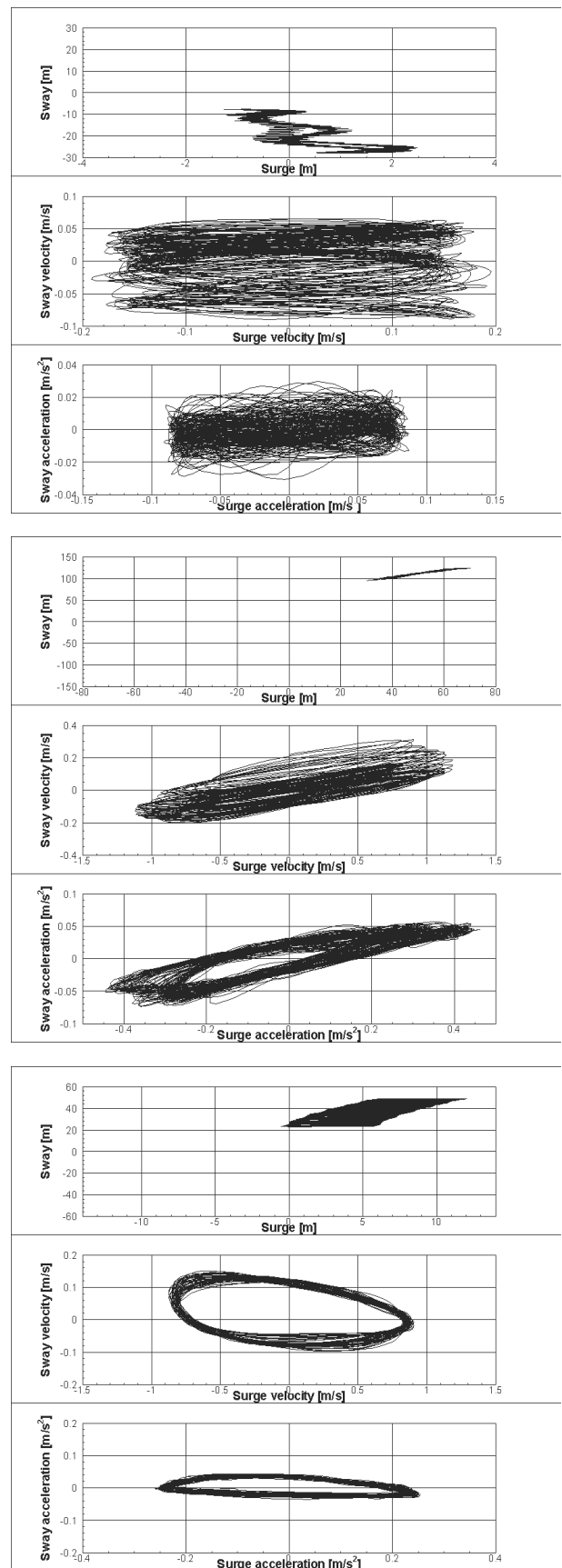


Fig. 8 Trajectory plot for regular waves (wave slope 50, top: T=12sec, middle: 16sec, bottom: 22sec)

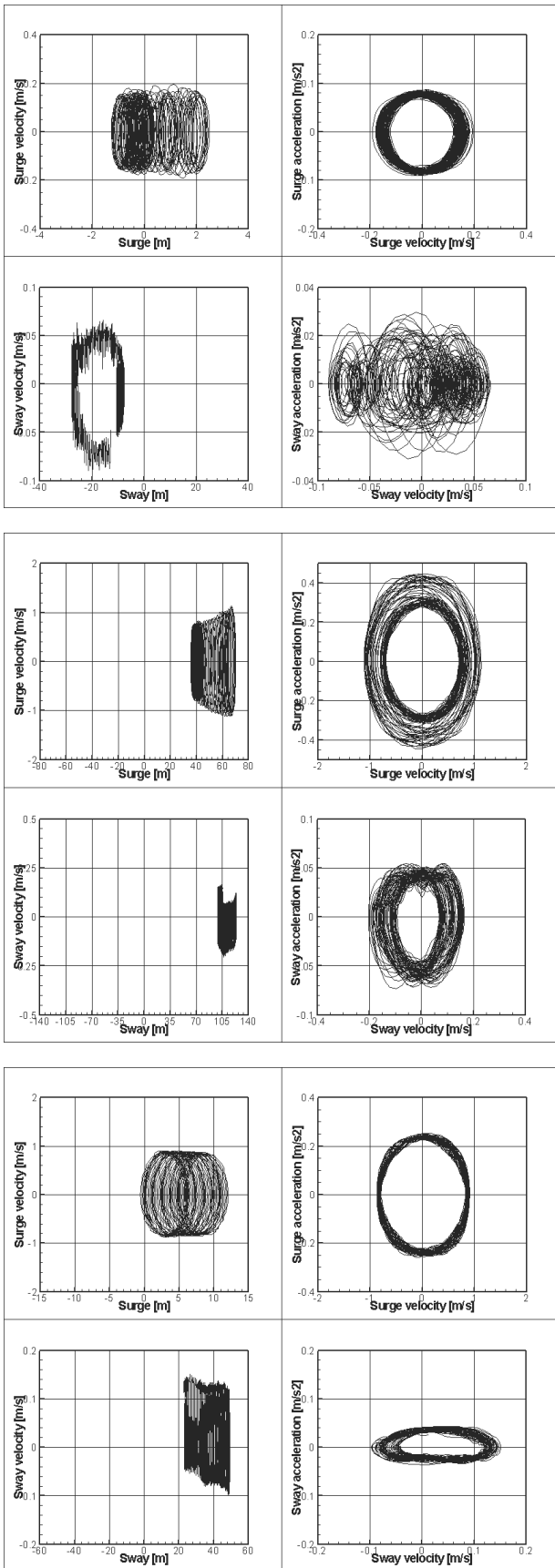


Fig. 9 Phase plot for regular waves (wave slope 50, top: T=12sec, middle: 16sec, bottom: 22sec)

소법을 사용하여 계산하였다. 파주파수 0.2~1.2 rad/s, 선수각 110~250 deg에서 계산하였다.

규칙파 주기에 따른 정적 평형점은 모멘트 평형이 되는 $M_{net} = aY - N = 0$ 이 될 때이다. 파주파수 0.2~1.2 rad/s까지, 선수각 110~250 deg에서의 M_{net} 은 Fig. 10과 같다. 그림에서 음의 값을 갖는 영역을 회색 등치선으로, M_{net} 이 0이 되는 구간은 검은색 점선으로 표시하였다. 선수각 180 deg에서 M_{net} 이 0이 되고, 파주파수 0.35~0.47 rad/s (14~18 sec)에서 M_{net} 의 부호가 180 deg를 기준으로 좌우 바뀌는 영역이 발생한다. 터렛 계류된 FSRU의 정적 평형점은 선수각 180 deg임을 알 수 있다.

$dM_{net}/d\psi$ 은 Fig. 11과 같다. 그림에서 음의 값을 갖는 영역을 회색 등치선으로 표시하였다. 즉 하얀색으로 표시된 영역은 동적으로 안정한 영역이고, 회색 음영으로 표시된 영역은 불안정하다. 선수각 140~220 deg에서 불안정한 구간은 파주파수 0.35~0.47 rad/s로, 정적 평형을 이루는 모멘트 합이 부호가 바뀌는 영역과 동일하다. 터렛 계류된 FSRU의 불안정한 구간은 파주파수 0.35~0.47 rad/s, 선수각 140~220 deg이다. 이 구간에서 정적 평형점은 180 deg이지만 불안정하기 때문에 과대 선수동요가 발생할 수 있다. 실험 결과도 동일한 주파수 구간에서 과대 선수동요가 발생함을 보여준다. 실험에서 최대 선수각은 30~50 deg 정도이고, 동적 해석 결과에서 130~230 deg가 불안정성이 발생하는 영역이라고 생각하면 과대 선수각의 값 또한 실험과 정성적으로 일치한다.

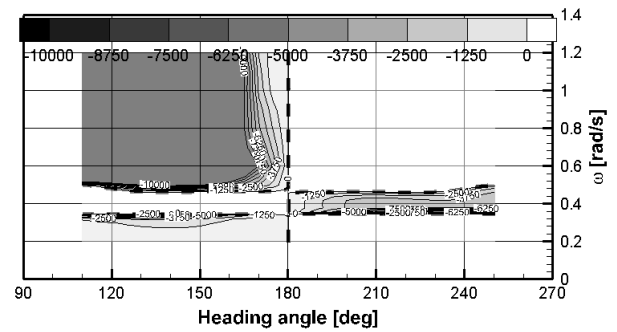


Fig. 10 Total moment contour for static equilibrium point of FSRU

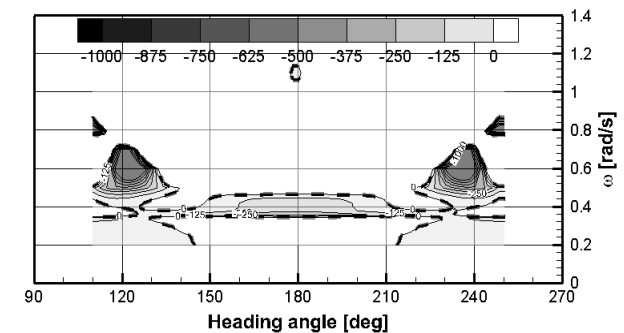


Fig. 11 Differential total moment contour for dynamic stability of FSRU

4. 결론

터렛 계류된 FSRU의 파랑 중 운동 모형실험을 수행하였다. λ/L_{BP} 1.11~1.98 구간에서 30 deg 이상의 과대 선수동요가 발생하는 것을 확인하였다. 위상의 경우 안정된 한계 순환을 보여주지만 과대 선수동요를 추정할 수 있는 원인을 나타내지 않고, 과대 선수동요가 발생하는 경우 가속도 궤적은 45 deg로 방향성을 나타낸다.

FSRU 중심에서 터렛까지의 거리가 0.45 L_{BP} 인 터렛 계류된 FSRU의 경우, 선수각 180 deg가 평형점이고, 파주파수 0.35~0.47 rad/s에서 동적으로 불안정해지는 구간이 발생하는데, 이는 규칙파 실험 결과와 잘 일치한다. 불안정한 구간에서는 30 deg 이상의 과대한 선수동요가 발생함을 확인하였다.

터렛 위치, 구조물 크기, 계류시스템 등 다양한 조건에서 과대 선수동요 현상을 이해하기 위해서는 모형실험과 더불어 수치해석을 통한 연구가 필요하다. 모형실험은 한정된 조건에서 분석이 제한되지만 수치해석은 관련된 변수와 해석에 제한이 없어 정성적, 정량적 분석이 가능하다. 모형실험 결과를 바탕으로 과대 선수동요 수치해석 연구를 진행 중이다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요연구사업 “해양구조물의 이송·설치를 위한 작업성능 평가기술 개발”과 지식경제부의 전략기술개발사업 “해상 LNG터미널(FSRU) 엔지니어링 기술개발”의 결과 중 일부를 밝힌다.

참 고 문 헌

- Bernitsas, M.M. & Papoulias, F.A., 1986. Stability of Single Point Mooring Systems. *Applied Ocean Research*, 8(1), pp.49-58.
- Chillamcharla, G.K. Thiagarajan, K.P. & Winsor, F., 2009. Mooring analysis of a weathervaning FPSO in Bi-directional sea state. *28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, USA, 31 May-5 June 2009.

- Cho, S.K., 2012. *A study on the motion behaviour of side-by-side moored two floaters including sloshing effects*. Ph.D. Seoul National University, Korea.
- ITTC-Recommended Procedures and Guidelines: 7.5-02 07-03.2. ITTC, 2002.
- Kaalstad, J.P. & Hovde, G.O., 2004. Submerged turret loading buoy based offshore gas receiving terminals for LNG and CNG. *Offshore Technology Conference*, Houston, USA, 3-6 May 2004.
- Lee, D.H. & Choi, H.S., 2005. A Stability Analysis of Tandem Offloading Systems at Sea. *Journal of Marine Science and Technology*, 10(2), pp.53-60.
- Munipalli, J. & Thiagarajan, K.P., 2007. Effect of wave steepness on yaw motions of a weathervaning floating platform. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2007, pp.1007-1011.
- Yadav, A. Varghese, S. & Thiagarajan, K.P., 2007. Parametric study of yaw instability of a weathervaning platform. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2007, pp.1012-1015.



조석규

성흥근

홍장표

최항순