한국해양공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집 PP.208~213

병렬계류 선박의 동유체력 상호간섭에 관한 실험연구

김진하*, 홍사영*, 조석규*, 최윤락*, 송명재**, 김덕수**
* 한국해양연구원 해양개발시스템연구본부, ** 대우조선해양(주)

Experimental Study on Interaction of Side-by-Side Moored Vessels

JIN-HA KIM*, SA-YOUNG HONG*, SEOK-GYO* CHO, YOON-RAK CHOI* AND MYONG-JAE SONG**, DUK-SU KIM**
*Ocean Development System Department, KRISO/KORDI, Daejon, Korea
** Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., LTD, Koje, Korea

KEY WORDS: side-by-side mooring 병렬계류, hydrodynamic interaction 동유체력 상호간섭, model test 모형시험, coupled condition 연성조건, Uncoupled condition 비연성조건, probability of exceedance cumulative distribution 초과누적확률분포

ABSTRACT: *Recently, Side-by-side mooring system of LNG FPSO and shuttle tanker is one of hot issues in offshore floating body dynamics, which requires accurate analysis of hydrodynamic interactions between side by side moored LNG FPSO and shuttle tanker than tandem moored vessels. This paper aims to investigate basic interaction characteristics of side-by-side moored multiple vessels both numerically and experimentally. A higher-order boundary element method combined with generalized mode approach will be applied to analysis of motion and drift force of side by side moored multiple-body. Model tests were carried out for the same multiple floating bodies in regular and irregular waves. Motion responses and drift forces of vessels for two mooring situation(coupled & uncoupled) were compared with those of calculations. Discussions will be highlighted on applicability of numerical method to prediction of sophisticated multi-body interaction problem of which motion behavior is very important to analysis of mooring dynamics of deep sea floating bodies.*

1. 서 론

최근 수요가 증가하고 있는 LNG FPSO는 지금까지의 FPSO-shuttle 시스템의 하역(Off-loading)작업이 주로 탄뎀 방식의 계류배치 상태에서 이루어진 것과는 달리 하역 장비의 운용관점에서 셔틀탱커가 FPSO의 측면에 근접하여 계류되는 소위 병렬계류(side-by-side mooring)배치를 해야 함에 따라 FPSO와 셔틀탱커등의 다수 부체간의 유체역학적 상호간섭 해석이 설계 및 운용 관점에서 중요하게 되었다.

따라서 이에 대한 이론해석 및 실험적 연구의 필요성이 높아지게 되었다.

최근 근접한 부체의 상호작용 해석에 대한 연구로는 Inoue and Islam(2001)의 수치해석 및 모형시험을 통한 횡동요의 영향 고찰, Huijsmans, Pinkster and Wilde(2001)의 근접한 부체 사이의 수치해석상의 문제를 검토하였으며, Buchner, Dijk and Wilde(2001)의 시뮬레이션으로 부터 부체간 연성효과에 기인한 동유체력의 영향에 대한 연구를 들 수 있다.

최윤락 등(2001)은 고차경계요소법을 사용하여 다수부체의 상호간섭을 해석하였으며, 김진하 등(2001)과 홍사영 등(2002), 최용호 등(2002)은 다수부체의 운동모형시험 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 병렬 계류된 다수 부체에 대해 규칙파 및 불규칙 선수파 및 횡파 조건에서 선박의 운동응답과 파랑표류력 계측 모형시험을 수행하였다. 계류배치는 비연성 및 연성병렬계류에 대하여 상호간의 유체역학적 간섭효과를 살펴보았다. 실험 계측 결과는 대체로 고차경계요소법을 이용한 계산치와 비교하여 좋은 상관관계를 나타내었다.

2. 모형시험

2.1 모형선

대우조선에서 설계한 LNG FPSO 와 LNG Carrier 선(이하 LNGC로 명기함.)과 추가적으로 Shuttle Tanker 선(이하 shuttle로 명기함.) 등의 3척을 모형시험의 대상선박으로 선정하였다.

모형선의 축척비는 파랑조건 재현에 대한 조파장치의 가용량을 고려하여 1/80 로 선정하였으며, 하역작업상황을 고려하여 LNG FPSO는 만재흘수, LNG Carrier와 Shuttle tanker는 발라스팅 흘수로 하였다.

대상선의 주요제원은 Table 1에 나타내었다.

모형선의 동역학적 물성치는 경사시험과 관성시험을 통한 GM과 관성반경시험을 통해 대상선과 3% 이내로 상사하였다.

Table 1 Main dimensions of LNG FPSO, LNGC and shuttle

Item	unit	LNG FPSO (Full)	LNG Carrier (Ballast)	Shuttle (Ballast)
Length, Lpp	m	448.23	266.0	297.4
Breadth, B	m	70.0	43.4	56.0
draft(FP)	m	14.255	9.4	8.90
draft(Mid)	m	14.255	9.4	10.2
draft(AP)	m	14.255	9.4	11.74
displacement	m3	411,861	78,591	127,386
LCG	m	+8.345	+2.633	+10.872
GM	m	9.685	8.35	17.184
KG	m	22.436	12.084	12.768
Kyy=Kzz	m	0.25Lpp	0.25Lpp	0.25Lpp
Kxx	m	0.37B	0.35B	0.35B

2.2 모형선 계류배치

모형선의 병렬계류시스템은 선박간의 계류형태를 연성 및 비연성조건으로 나누어 구성하였다.

연성조건(coupled condition)은 펜더와 접안계류선을 설치하여 계류선박간의 동유체역학 및 기구적인 상호간섭을 고려한 계류형태인 반면 비연성조건(uncoupled condition)은 동유체역학적인 상호간섭만을 고려한 계류형태이다. Fig.1 은 병렬계류시스템의 계류조건에 대한 개략도를 보여주고 있다.

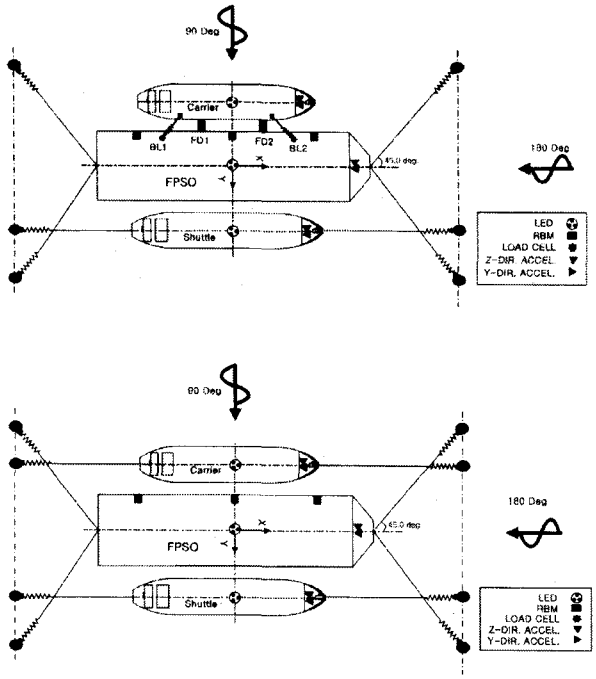


Fig. 1 Test set-up and layout of the mooring system in the tests(coupled set-up above and uncoupled set-up below)

모형선의 계류시스템은 대상선의 계류강성을 상사한 선형스프링과 와이어를 이용하여 구성하였다.

LNG FPSO의 전후방향 고유주기를 약 80초로 가정하여 전후방향 스프링 강성은 2588kN/m, 초기장력은 10,055kN 로 산정하였다. 또한, 4점 및 2점 계류선 배치에 대해 등가의 스프링 강성을 가지도록 하기 위해 4점 계류선인 경우에 배치각도를 45도로 하였다. 연성 병렬계류의 경우는 각 2개의 펜더와 접안계류선으로 구성하였다.

실선크기 4.5 m에 해당하는 펜더의 강성을 1839kN/m 하였으며, 초기압축을 0.5m 로 가정하여 초기 압축력을 919kN 으로 산정하였다.

또한, 접안계류선(Breast line)은 전후 및 좌우방향의 계류강성을 벡터합하여 실선의 계류강성 466kN/m, 초기장력 1358kN 의 선형스프링을 전후방향과 49도 각도로 배치하였다. 계류시스템의 물성치는 Table 2.2.2 와 같다.

Table 2 Mooring characteristics of multi-body model tests

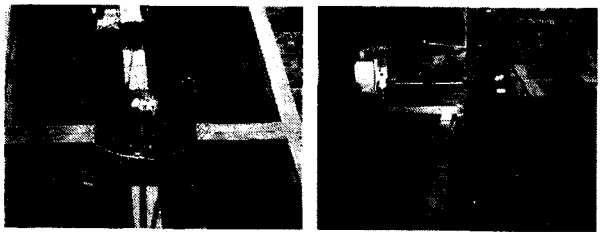
Designation	Type	Line Angle	Pretension [kN]	mooring stiffness [kN/m]
BL1 & BL2	Breast line	49deg	1,358	466
FD1 & FD2	Fender	90deg	1,839	1,839

2.3 계측항목

파랑표류력은 각 모형선을 와이어와 선형스프링으로 지지대 기둥에 연결하여 지지대에 고정된 장력계를 통해 계측하였으며, 선박의 6자유도 운동은 각 선박에 LED를 부착하고, 3대의 CCD 카메라를 이용하여 변위를 계측하는 고정도 비접촉 운동계측장치(RODYM6)를 사용하여 계측하였다(Fig. 2a). 또한, 선수부의 가속도와 병렬계류시 근접배치로 인해 예상되는 상대파고는 각각 가속도계와 저항식 및 용량식 파고계등을 사용하였다. 연성 병렬계류에서의 펜더반력과 접안계류선 장력은 인장 장력계를 설치하여 계측하였다. 펜더모형은 외팔보 구조물의 회전부분의 끝단에 선형스프링을 설치하여 펜더 강성을 모사하고, 선박의 측면과의 접촉부는 마찰을 최소화하기 위해 로울러를 제작하여 FPSO 모형선에 설치하였다(Fig. 2b). Table 3 은 계측항목 및 위치를 나타내고 있다.

Table 3 Measuring items & sensors for model test

Measuring Items	Sensors	Measuring Position
6 D.O.F Motion.	RODYM6	C.O.G
Acceleration (Vertical & Lateral)	Accelerometer (5G)	F.P
Relative Body Motion	Resitance & capacitance wave probe	F.P&A.P&midship at LNGC
Fender Tension	Loadcell	Station 12 & 8 at FPSO
Breast line tension	miniature Loadcell	station 14 & 6 at FPSO



(a)LED for RODYM6 (b) Model fender

Fig. 2 Measuring sensors for multi-body model test

2.4 파랑조건

규칙파는 선수파와 횡파조건에 대해 실선기준 원주파수를 0.2rad/s부터 1.2rad/s 까지 0.1rad/s 간격으로 재현하였다. 특히, FPSO 와 shuttle 의 횡동요 고유주파수 부근에는 0.05rad/s 간격으로 세분하여 규칙파를 생성하였다. 불규칙파는 선수파의 경우는 유의파고 3.25m, 모달주기 9.0초의 2-parameter ITTC 파도 스펙트럼을 사용하여 생성하였으며, 횡파조건에서 유의파고를 1/2로 줄여서 동일주기에 대해 생성하였다. 선수파의 파도스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다.

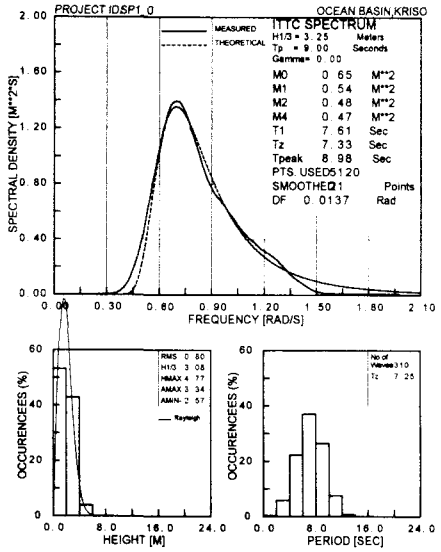


Fig. 3 Measured Irregular wave spectrum in head sea ($H_{1/3}$ = 3.25m, Tp=9.0s)

3. 모형시험 결과 및 고찰

파랑중 다수 선박간의 유체역학적 상호간섭영향을 고려하기 위한 모형시험을 한국해양연구원 해양공학수조(길이56m, 폭30m, 수심3.4m)에서 수행하였다.

Fig.4 와 Fig. 5는 각각 규칙파중의 모형시험시 계측신호와 모형시험 수행사진을 보여주고 있다.

규칙파중 실험은 정수상태에서 신호를 받기 시작한 후 조파기를 작동하여 실선시간 기준 약 900초동안 계측하였다. 규칙파중 파랑표류력 계측결과 해석은 입사파가 모형선에 도달한 후 조파기와 소파기로 부터의 반사파가 도달할 때까지의 신호중에서 정상상태에 도달한 것을 취하였으며, 최소 수평면 운동의 고유주기의 배수를 기준하였다.

또한, 불규칙파는 실선기준 2300초 동안 계측하였다. 얻어진 계측신호의 시계열 자료는 zero-upcrossing 법의 통계처리 방법에 의해 RMS(Root Mean Square), 평균치(파고, ±진폭), 유의값(파고, ±진폭), 최소, 최대치등을 구하였다. 모형시험에서는 20Hz의 샘플링주파수로 자료를 취득하였다.

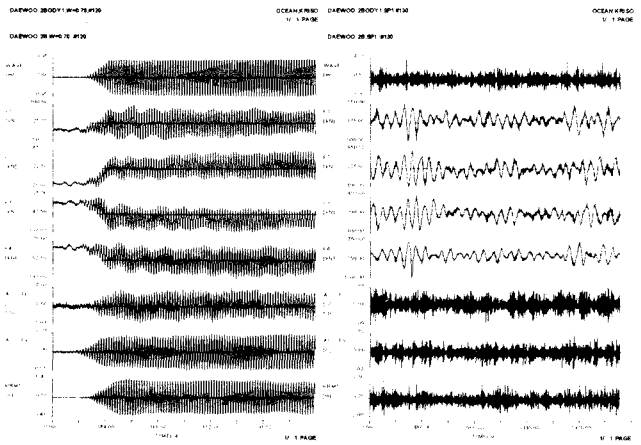


Fig. 4 Example of measured signal for model test in regular and irregular wave

Fig. 5 Snapshot of model test in waves

Fig. 6은 파향 180도의 비연성 병렬계류된 두척 및 세척의 선박의 운동응답을 나타내었다.

여기서, 각 운동응답은 병진운동의 경우는 파 진폭(A), 회전운동은 파수(k)와 진폭을 곱하여 무차원화 하였다. 실선과 파선은 각각 이론 계산결과이며, 원점과 삼각점은 실험결과를 보여주고 있다. 운동응답의 실험치와 계산치는 다수 선박의 경우에도 매우 좋은 상관관계를 보이고 있는 것으로 판단된다. 특히, 상하운동의 계산치는 0.55rad/s에서 peak값을 보이며, 이는 LNGC 횡동요의 공진주파수에 기인한 연성효과로 사료된다.

횡동요에서는 실험치 결과가 계산치의 예측결과의 공진거동을 잘 반영하고 있다. FPSO를 기준으로 양쪽에 대칭으로 LNGC 와 Shuttle이 배치되어 상호 운동응답특성이 유사하게 나타났다.

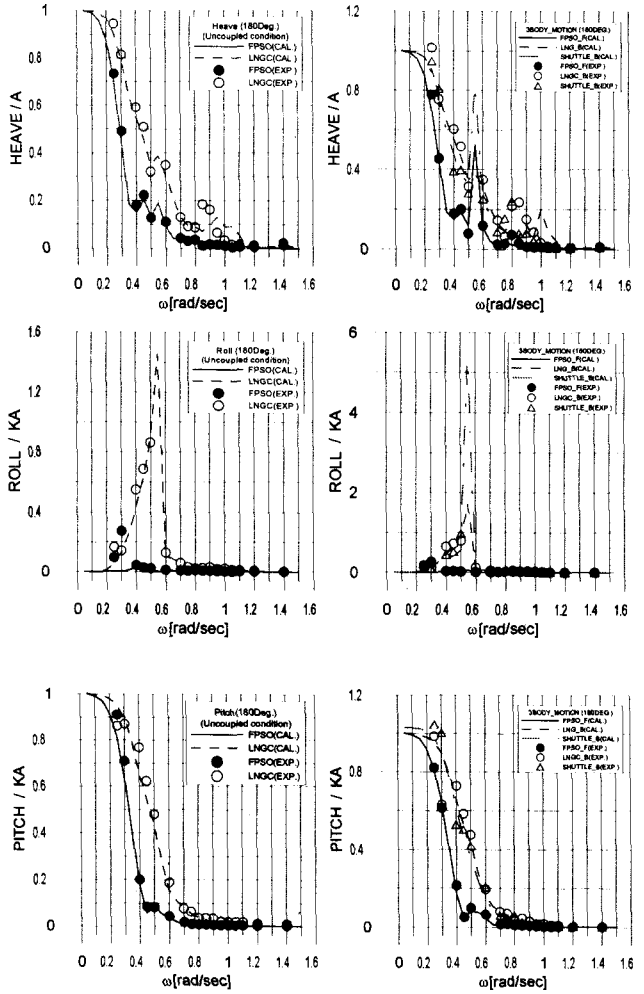


Fig. 6 Motion response of side-by-side moored vessels in head sea(2-body: left, 3-body: right)

Fig. 7은 파향 90도의 연성 및 비연성 병렬계류된 두척의 선박의 상하동요와 횡동요를 나타내었다. 여기서, 실선과 파선은 각각 이론 계산결과이며, 원점은 실험결과를 나타내고 있다.

횡파 조건에서는 입사파 방향으로 놓인 LNGC의 영향으로 뒤에 위치한 FPSO의 상하동요 수준이 크게 감소하는 것을 볼 수 있으며 이러한 경향은 계산치와 실험치에 모두 잘 나타나 있다. 연성과 비연성 병렬계류에서의 거동특성은 유사한 경향을 나타내고 있다. 실험치와 계산치는 매우 좋은 상관관계를 보이고 있는 것으로 판단된다.

FPSO와 LNGC의 횡동요 공진 주기가 차이가 나는 것은 두 선박의 동유체역학적 상호작용에 의인한 것이 아니고 홀수와 GM의 차이에 기인한 것이다. FPSO와 LNGC의 공진주파수는 각각 0.3rad/s, 0.55rad/s 부근에서 나타나며, 두 선박에 대해 실험치가 계산치에서 예측한 공진거동을 잘 반영하는 것으로 보인다.

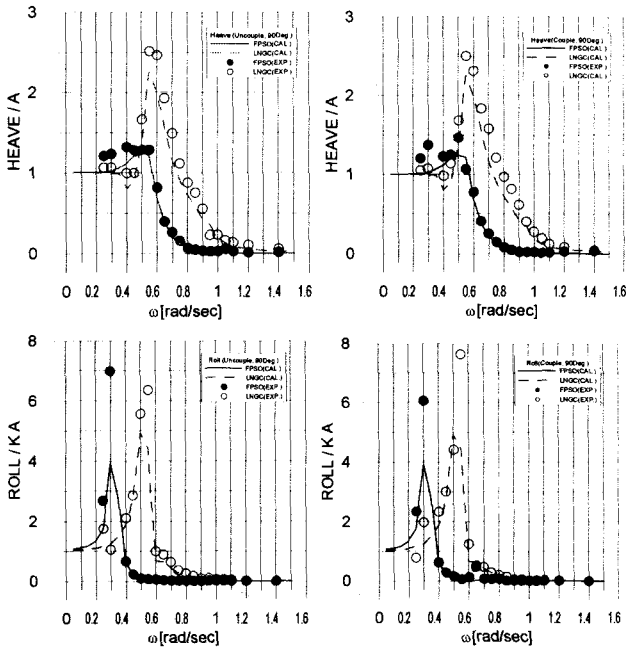


Fig. 7 Heave & Roll response of side-by-side 2 moored vessels in beam sea(Uncoupled condition: left, coupled condition: right)

Fig. 8은 병렬계류된 두 선박의 파향 180도의 경우에 종방향 및 횡방향 파랑표류력을 나타내었다. 종방향 파랑표류력의 경우에는 특히, LNGC의 경우에 주파수 구간 0.8-1.0rad/s에서 계산치는 파랑표류력이 급격한 감소, 증가, 감소를 반복하는 경향을 보이는 반면 실험치는 감소하는 경향만을 나타내고 있다. 고주파수 영역에서는 일정한 값으로 단조 수렴하는 양상을 띠고 있다. 전반적인 파랑표류력의 증가는 두 배가 파입사방향으로 평행하게 놓임으로 해서 상대적으로 blockage 효과가 커져서 생긴 현상으로 사료된다.

횡방향 파랑표류력의 경우에는 선수파 조건에서도 상당한 크기의 횡방향 표류력이 발생함을 알 수 있다. 각 선박에 작용하는 표류력은 주된 파주파수 범위에서는 서로 멀어지는 경향을 보이고 있다. 또한, 계측치의 peak 값이 계산치보다 약간 작은 0.8-0.9rad/s의 주파수에 나타나며, 이는 Fig. 9 의 다수부체의 경우에 FPSO에서의 상대운동응답의 계측치에서도 peak 값이 0.8rad/s 부근에서 동일하게 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 계산치가 다소 과장된 값을 주는 것으로 보이며 이는 포텐셜이론이 공진응답시 실재하는 점성의 효과를 반영하지 못하기 때문으로 사료된다.

선수파의 경우에 병렬계류로 인해 발생하는 횡방향 표류력은 좌우 비대칭 유동으로 기인한 것이며 이의 주된 원인은 실험과 계산치가 보여주듯이 공진유동이 발생하는 주파수 범위에서만 표류력이 발생하는 것을 볼 수 있다.

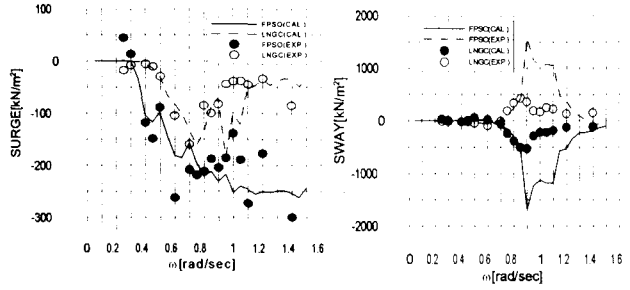


Fig. 8 Wave drift force of side-by-side moored vessels in head sea

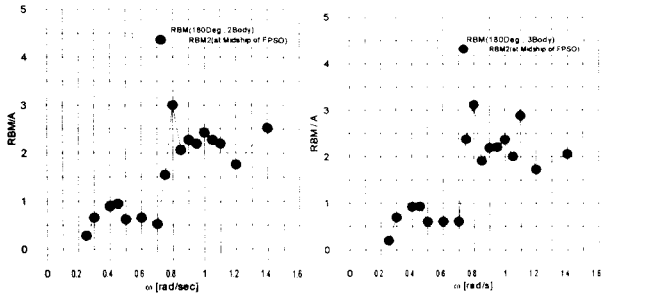


Fig. 9 Relative body motion of side-by-side moored vessels in head sea(2-body: left, 3-body:right)

Fig. 10은 파향이 90도인 경우에 연성 및 비연성 병렬계류의 횡방향 파랑표류력을 파도진폭의 제곱으로 나타내었다. 비연성 계류의 경우는 계산치는 앞에 위치한 LNGC와 뒤에 위치한 FPSO 모두 파주파수 1.0 rad/s 부근에서 파랑표류력의 peak 값을 나타내고 있는 반면 실험치는 0.9 rad/s 부근에서 peak값을 보이고 있다. 이에 대해서는 보다 정밀한 실험과 계산에 대한 분석이 필요한 것으로 사료된다.

횡파의 병렬계류의 경우에 두 선박의 표류력의 변화는 두 선박 사이에 같힌 물의 공진효과가 커지기 때문인 것으로 사료된다. 이는 거리가 4m인 경우에 2차원 유동을 가정한 경우 같힌 물의 상하방향 Helmholtz 공진주파수가 약 1.0rad/s 으로 실험에서 계측된 주파수와 근사치를 제공하는 것으로 볼 수 있으며, 근접한 물체의 가장 강한 상호작용이 발생하는 주파수는 Helmholtz 공진주파수 부근임을 알 수 있다.

연성 병렬계류의 경우는 계산치는 FPSO 와 LNGC의 파랑표류력의 합으로 표현되며, 실험치와 좋은 일치를 보이고 있다.

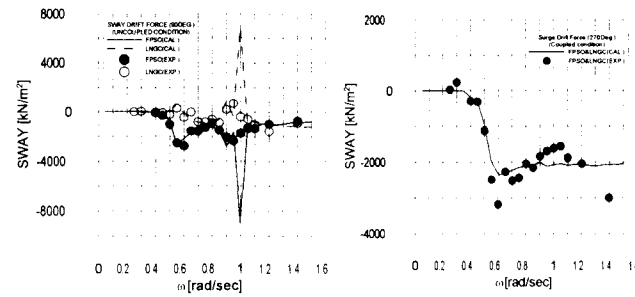


Fig. 10 Wave drift force of moored vessels in beam sea(coupled: left, uncoupled: right)

Fig. 11은 불규칙 횡파중 두 선박의 상하동요 스펙트럼을 나타내고 있다. 실선은 계산치이고, 파선과 원점은 각각 불규칙파 및 규칙파의 계측치를 통해 얻어진 스펙트럼 결과이다. 모든 경우에 좋은 상관관계를 나타내고 있다.

Fig. 12는 규칙파 및 불규칙파중 FPSO의 횡동요 및 종동요 계측치의 전달함수를 비교하여 나타내었다. 두가지 경우에 모두 좋은 일치를 나타내고 있다.

따라서, 병렬계류된 다수 선박의 동유체역학적 상호간섭영향에 대해 선형중첩원리가 적용될 수 있는 것으로 판단된다.

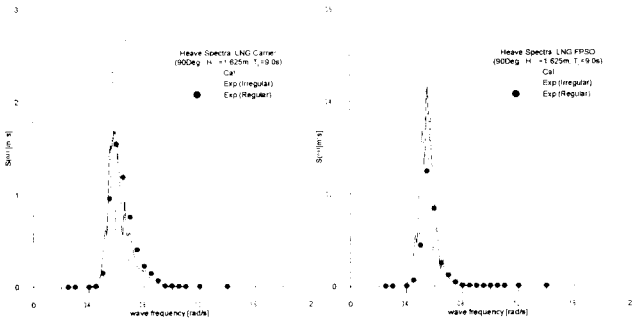


Fig. 11 Heave spectra of side by side moored vessels in beam sea($H_{1/3}$=1.625m, Tp=9.0s)

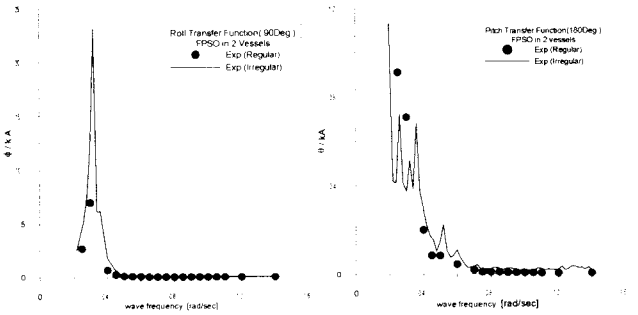


Fig. 12 Pitch & Roll motion transfer funtions of side-by-side 2 moored vessels

Fig. 13은 연성 병렬계류에서 불규칙 횡파중 펜더와 접안계류선에 작용하는 장력을 초과누적확률분포(probability of exceedance cumulative distribution)로 나타내었다. 초과누적확률은 계측된 시계열 자료중 peak 값과 횟수를 계산하여 누적하여 초과확률로써 나타내었다.

펜더와 접안계류선은 각각 선수부와 선미부에 설치되었으며, 횡파조건에 대해 위치와 상관없이 장력의 크기와 확률이 유사한 경향을 보이고 있다. 횡파조건에서 펜더장력과 접안계류선의 장력이 100톤을 초과하는 확률은 약 1% 정도임을 알 수 있다.

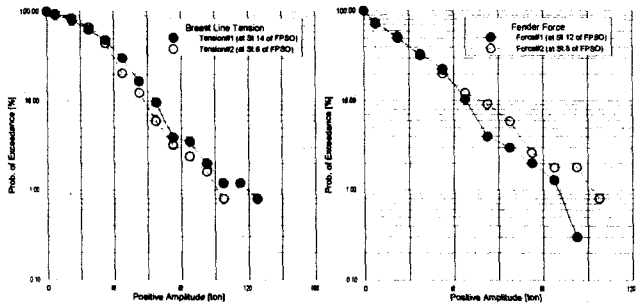


Fig. 13 Probability of exceedance cumulative distribution for fender and breast line in irregular beam sea ($H_{1/3}$ = 1.625m, Tp=9.0s)

4. 결 론

병렬계류된 다수 선박에 대한 규칙파 및 불규칙파중 운동 및 파랑표류력 계측 모형실험을 수행하고 고차경계요소법에 의한 수치계산 결과와 비교검토한 결과에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 병렬계류된 부체의 수가 두 척이상인 경우에도 운동 및 파랑표류력응답의 계측치가 계산치와 좋은 상관관계를 나타내었으며, 연성 병렬계류된 FPSO의 경우에 계측치와 계산치는 LNGC와 FPSO의 파랑표류력의 합으로써 나타낸 경우 좋은 일치를 보였다.

2. 병렬계류된 선박이 선수파에 놓인 경우 상대파고 및 파랑표류력 계측치와 계산치 결과로부터 파랑표류력의 변화가 상대적으로 큰 주파수 구간이 존재하며, 이에 대응되는 주파수 구간에서는 횡방향 표류력 발생이 뚜렷하며 FPSO와 LNGC 및 shuttle을 서로 밀어내는 방향으로 작용하였다.

3. 횡파의 경우에 입사파 방향에 위치한 경우 대부분의 파랑표류력을 앞에 위치한 LNGC가 받게 되지만 FPSO와의 거리가 근접한 경우에 FPSO에 작용하는 표류력이 급증하고 LNGC에는 파랑표류력이 거의 작용하지 않는 강한 상호간섭 효과가 나타나는 주파수 범위가 존재하며 이 주파수 범위는 낮은 홀수에 해당하는 진동수주의 Helmholtz 공진주파수로 근사할 수 있다.

4. 다수 부체에 강한 상호작용이 나타나는 경우 계산에 의한 예측은 다소 과장된 값을 주는 것으로 보이며 이는 포텐셜이론이 공진응답시 실재하는 점성의 효과를 반영하지 못하기 때문으로 사료된다.

5. 불규칙파중에서 병렬계류된 다수선박의 운동과 파랑표류력은 선형중첩의 원리를 적용하여 산정할 수 있는 것으로 사료된다.

6. 병렬계류된 다수 선박의 경우에 운동 및 파랑표류력의 실험치는 계산치와 좋은 상관관계를 나타내었으며, 계산치를 이용해 근접된 다수 부체에 대해 기본 설계 단계에서는 유용한 자료를 제공할 수 있다.

후 기

본 연구는 공공기술이사회가 지원한 "해양개발을 위한 설계엔지니어링 기술 고도화 연구"와 대우조선해양(주)가 지원한 "다물체 계류시스템 동적 거동해석연구" 결과의 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 김진하, 김현조, 최윤락, 홍사영(2001), "계류방식에 따른 FPSO-셔틀탱커의 동유체력 간섭에 대한 실험연구", 해양공학연구회 제 46차 Workshop 논문집, pp53-64
2. S.Y.Hong, J.H.Kim, H.J.Kim and Y.R.Choi(2002), " Experimental study on behavior of tandem and side-by-side moored vessles", Proc. 12th ISOPE, Vol. 3, pp841-847.
3. 최윤락, 홍사영,(2001) "고차경계요소법을 이용한 다수 부체 동유체력 해석", 대한조선학회 2001년도 추계 학술대회 논문집, pp198-203.
4. 최용호,홍삼권,김문성(2002) "LNG-FPSO와 계류된 LNG 운반선의 Two-Body 운동에 관한 실험적 연구", 해양공학연구회 제 47차 Workshop, pp19-26.
5. Huijsmans, R.H.M., Pinkster, J.A., de Wilde, J.J.,(2001)." Diffraction and radiation of waves around side-by-side moored vessels", Proc. 11th ISOPE, Vol.1, pp406-412.
6. Buchner, B., Dijk, A. and Wilde, J., (2001) "Numerical Multiple-Body Simulation of Side-by-Side Mooring to an FPSO", Proc. 11th ISOPE, Vol. 1, pp343-353.
7. Inoue, Y. and Islam, R., (2001) "Effect of Viscous Roll Damping on Drift Forces of Multi-body Floating System in Waves", Proc. 11th ISOPE, Vol. 1, pp279-285.