

## FPSO 측면 계류된 Vessel의 계류계 해석 적용 사례

김덕수\*, 허주호  
대우조선해양(주)

### An Application of Mooring System Analysis of FPSO with Vessel Moored Along the Side

*Deok-Su Kim, Joo-Ho Heo*  
*Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.*

Key Words ; multi-body mooring system analysis, relative motion, connection line tension, hydrodynamic interaction

#### 요 약

본 논문에서는 FPSO 측면에 나란히 연결된 작업선에 대한 계류계 해석이 수행되었다. FPSO 측면에 연결된 작업선의 횡동요에 의한 충돌 가능성, 작업선의 연결선 및 펜더의 파손 가능성 등에 대한 검토가 이루어졌다. 다물체 계류계 해석을 위하여 MOSES 프로그램을 사용하였고, FPSO와 작업선과의 유체역학적 상호작용은 무시하였다.

#### 1. 서 론

원유에 대한 탐사와 채취 작업이 점점 육지에서 멀어지고 심해로 옮겨감에 따라 원유에 대한 채취, 저장 및 하역 기능이 갖춰진 FPSO에 대한 필요성이 점차 증가되고 있다. 생산한 원유를 육지로 수송하기 위해서는 서틀 탱커가 필요하게 되고, 이들은 FPSO의 측면(alongside) 또는 후미(tandem)에서 원유를 하역하게 된다. 마찬가지로 FPSO 초기 설치시나 유지보수를 위하여 작업선 등이 FPSO의 측면에 연결되어 위치하게 된다.

본 논문에서는 FPSO 설치 해역에서 작업자들의 편의를 위하여 제공된 작업선이 FPSO 측면에 나란하게 계류(alongside mooring) 되었을 때, 주어진 환경 조건에 대한 FPSO 및 작업선의 안전성 여부를 검토하였다.

FPSO 측면에 계류된 작업선의 횡동요(roll motion)에 의한 충돌 가능성, FPSO와 작업선을 연결하는 연결선(connection line) 및 펜더(air fender)의 파손 등에 대한 검토가 요구되었다.

FPSO 측면 계류된 작업선의 연결선에 작용하는 최대 장력은 API(American Petroleum Institute) 규칙에 따라서 계산되었다. 주어진 환경 조건에 대하여 FPSO와 작업선의 연결선 위치에 대한 최대 운동(wave frequency motion + low frequency motion)을 구하여 연결선의 특성 곡선으로부터 연결선에 작용하는 최대 장력을 구하였다[1]. 또한 연결선을 와이어로프(wire rope) 단독, 와이어로프와 폴리프로필렌로프(polypropylene rope)를 혼합해서 사용했을 때에 대한 결과 비교되었다.

FPSO-작업선 계류계 해석을 위하여 상용프로그램인 MOSES 프로그램을 이용하였다. FPSO의 계류선 및 작업선의 연결선은 케이블 방정식(catenary cable equation)에 따라 표현되고, 작업선이 FPSO 측면에 연결되는 해상 상태는 온순(mild sea)하므로 FPSO-작업선 사이의 유체동역학적 상호 작용(hydrodynamic interaction)은 무시되었다[2][3].

## 2. 좌표계

MOSES 프로그램에 사용되는 좌표계는 국부 좌표계와 전체좌표계이고, 이들은 모두 우수좌표계를 따른다. FPSO나 작업선은 국부좌표계를 따르고, 환경 조건 방향이나 계류계 등은 전체좌표계를 따른다.

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 좌표계와 FPSO-작업선의 계류계 배치를 보여준다. 국부좌표계는 FPSO의 선미(afterward)와 작업선의 선수(forward)에 놓인 각각의 X축과 Y축의 방향이 전체좌표계와 일치하고 있고, Z축 방향의 국부좌표계는 FPSO와 작업선의 각 선저에 위치하고 있는데 반해서 전체좌표계는 수선면에 놓여있다.

## 3. 환경 조건

FPSO와 작업선 각각에 대한 부가질량, 포텐셜 감쇠 및 유체력 등의 계산을 위한 모델링은 스트립 방법을 따랐고, 점성 감쇠는 Tanaka 식으로 구하였다. 계류계 해석을 위한 각각의 하중 조건은 Table 1과 같다.

다점지지된 FPSO의 계류삭 및 FPSO와 작업선을 연결하는 연결선은 케이블 방정식에 의해서 표현되었고, 이들에 대한 특성치는 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

FPSO 측면에 연결된 작업선에 대한 안전성 검토를 위하여 적용된 환경 조건은 Table 4에 나타내었다. 풍력, 조류력과 평균 파표류력은 FPSO-작업선 시스템을 정적 평형 위치로 이동시키고, 저주파수를 포함하는 파랑에 의한 운동으로 FPSO와 작업선의 연결선 위치에서의 최대 상대 운동 응답을 구할 수 있다. 연결선에 작용하는 장력은 케이블 방정식에 의해서 표현되는 케이블 특성 곡선에 의해서 구해진다.

## 4. 운동 응답

FPSO와 작업선의 연결선 위치에서의 상대 운동 응답은 스펙트럼 방법으로 주파수 영역에서 구했다. 스트립 방법으로 모델링된 FPSO와 작업선에 작용하는 유체력 등을 구하였고, 단위 파진폭에 대한 각각의 단위 운동 응답 전달 함수를 구하였다. 주어진 파에 의해 표현되는 ISSC 파스펙트럼과 단위 운동 응답 전달 함수와의 선형 조합으로 최대 운동 응답을 구하였다.

Table 5와 Table 6은 FPSO와 작업선을 왕래하기 위해서 설치된 사다리 위치에서의 상대 운동 응답을 보여준다. Table 5는 FPSO와 작업선의 연결선으로 와이어로프만을 사용했을 경우를 보여주고 있고, Table 6은 와이어로프와 폴리프로필렌로프를 혼용해서 사용했을 때에 대한 결과이다. 종방향 운동에 있어서 연결선을 강성이 큰 와이어로프 만을 사용했을 때가 폴리프로필렌로프를 혼용해서 사용했을 때보다 더 큰 운동 응답 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 연결선의 강성이 FPSO와 작업선의 상대 운동에도 영향을 주고 있음을 의미한다.

작업선은 FPSO와 직경 4.5 m의 펜더에 의해서 서로 떨어져 있는데, 측면파(90)가 작용하는 경우 최대 상대 운동 크기는 2.5 m이었고, 이는 작업선과 FPSO의 라이저 가이드가 서로 충돌할 수 있어서 이에 대한 방지가 요구되었다. Photo 1은 보강된 펜더에 대하여 보여준다.

## 5. 최대 장력

FPSO의 계류삭에는 초기 장력 250 tons이 작용하였다. 0(head sea)부터 180(following sea)까지 45 간격으로 주어진 환경 외력에 의해서 FPSO와 작업선의 최대 상대 운동 응답이 구해졌고, FPSO와 작업선의 연결선 특성 및 펜더의 특성 곡선에 의해서 이들에 작용하는 최대 장력을 Table 7과 Table 8에 나타내었다. 그리고 작업선이 실제 해역에 설치된 뒤 해상 상태에 대한 작업선 연결선에 작용하는 장력에 대한 실측 결과(2001.8.7부터 2001.8.13까지)가 Table 9와 Table 10에서 보여진다.

FPSO와 작업선의 연결선으로 와이어로프만을 사용했을 경우, 와이어로프의 큰 강성(작은 변형률)과 큰 상대 운동 응답(Table 5)에 의해서 연결선의 최대 장력도 Table 7과 같이 허용 장력 60 tons을 훨씬 초과하는 값을 주었다. 따라서 실제 설치 해역에서 FPSO와 작업선의 연결선은 와이어로프와 폴리프로필렌로프를 혼용하였다.

FPSO 설치 해역에 작업선이 임대된 뒤에 실제 해상 상태에 대한 작업선 연결선의 장력을 계측할 수 있는 기회가 있었고, 이에 대한 결과는 Table 10에 나타내었다. Table 8의 계산 결과와 Table 10의 실제 계측한 결과를 비교하면 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 다음은 실제 계측될 당

시에 대한 특징들이다.

1. 실측 당시 해상 상태는 비교적 거칠었고, 목측된 파고도 최고 4~5 m 정도였다.
2. FPSO와 작업선 사이의 펜더의 변형이 상당히 심했고, 펜더를 연결하는 새클 부분이 파손된 경우가 있었다.
3. FPSO와 작업선의 연결선 와이어로프-폴리프로필렌로프는 안전하였다.

## 6. 결론

본 해석을 통하여 FPSO 측면에 계류된 작업선의 횡동요에 의한 충돌 가능성, FPSO와 작업선을 연결하는 연결선 및 펜더의 파손 등에 대한 검토를 하였고, 실제 해역에서 안전에 대한 대비를 할 수 있었다.

주어진 환경 조건에 대하여 FPSO와 작업선의 연결선 위치에 대한 최대 상대 운동을 구하여 연결선의 특성 곡선으로부터 연결선에 작용하는 최대 장력을 구하였다. 또한 연결선을 와이어로프 단독, 와이어로프와 폴리프로필렌로프를 혼용했

을 때에 대한 계산 결과가 비교되었다.

FPSO 설치 해역에 작업선이 임대된 뒤에 실제 해상 상태에 대한 작업선 연결선의 장력을 계측할 수 있었고, 계산 결과와 실제 계측한 결과를 비교하였다.

추후, FPSO와 측면에 연결된 작업선과의 유체동역학적 상호작용의 영향, wind shielding effect, 조류에 의한 jack-knifing effect 및 계류삭의 동적 효과를 고려한 fully coupled dynamic analysis 등에 대한 연구가 요구된다.

## 참고 문헌

- [1] API, "Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures-API Recommended Practice 2SK," First Edition, 1995.
- [2] Ultramarine Ltd., "MOSES Reference Manual Ver. 5.09," 1999.
- [3] Ultramarine Ltd., "MOSES Theoretical Document," 1991.

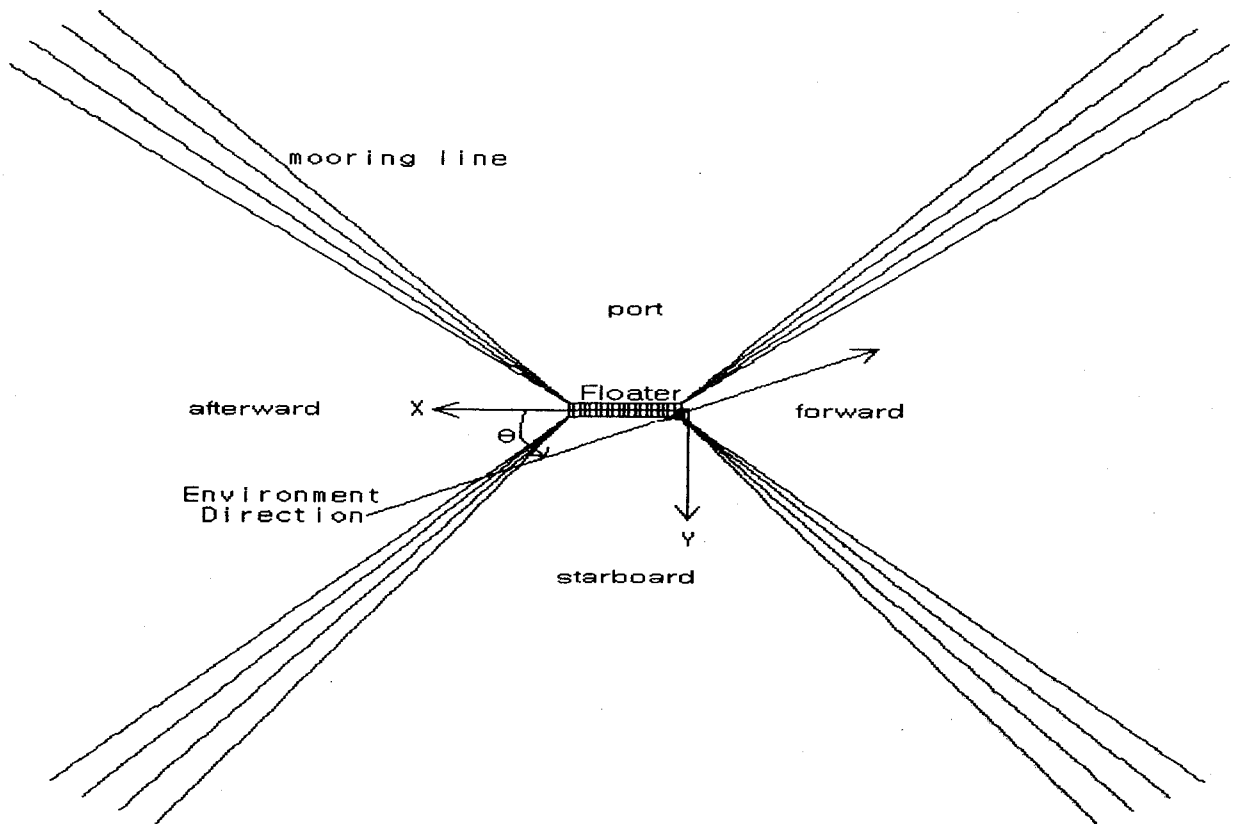


Fig. 1 Coordinate system and environment direction

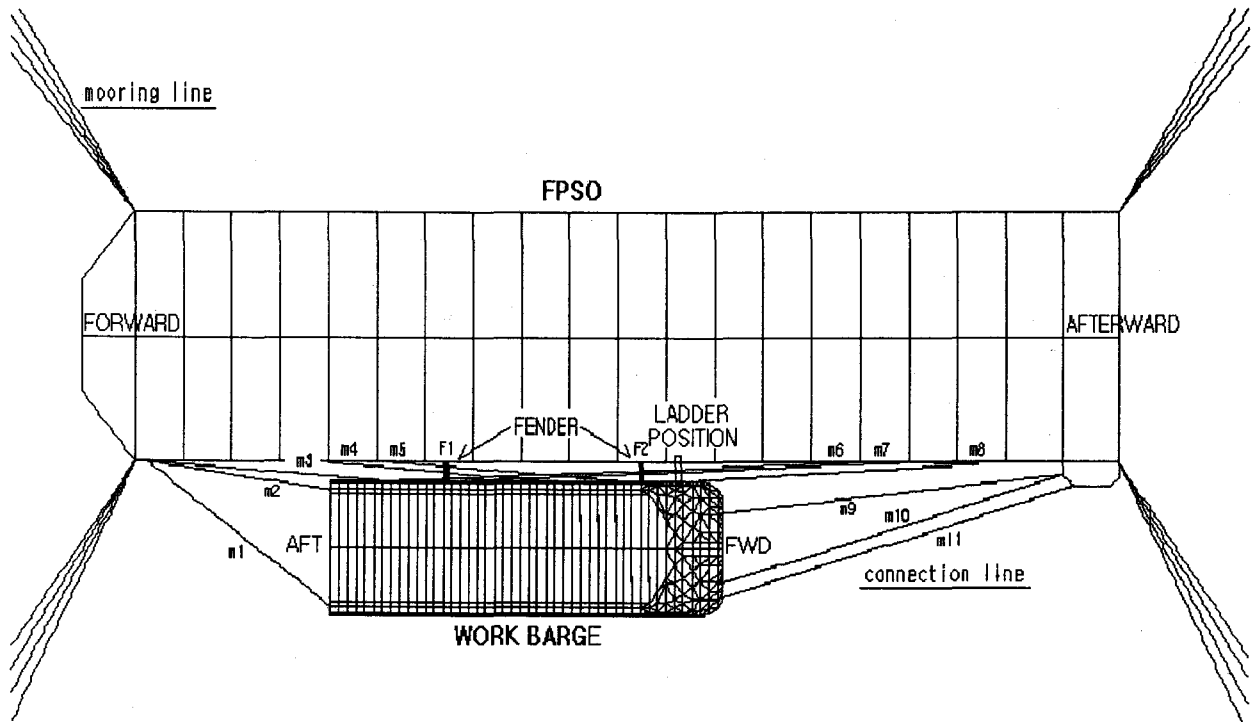


Fig. 2 Top plane view of mooring arrangement

Table 1 Principal particulars of FPSO and Work Vessel

	Dimension(m)			Draft (m)	Displ. (tons)	C O G (m)	
	LBP	Breadth	Depth			LCG	VCG
FPSO	300.00	59.60	30.50	12.0	200719	150.94	18.17
Work Vessel	113.80	32.16	7.50	4.2	13547	57.14	3.92

Table 2 Mooring line characteristics of FPSO

Mooring Line		Weight/Load	Q'ty	Remarks
Fairleader Chain	105 mm diameter / 200 m length		16	R4 studless
	Min. breaking load	1096.2 tons		
	Weight in water	194.0 kg/m		
Middle Wire Rope	102 mm diameter / 1775 m length		16	Spiral Strand
	Min. breaking load	960.0 tons		
	Weight in water	42.6 kg/m		
Ground Chain	120 mm diameter / 650 m length		16	R3 studless
	Min. breaking load	1126.1 tons		
	Weight in water	253.0 kg/m		

Table 3 Mooring outfitting of Work Vessel

Mooring Outfitting		Weight/Load	Q'ty	Remarks
Winch	Winch(double drum)	30.0 tons	4	Break capa.:80 tons In-service set:60 tons
	Windlass	14.1 tons	2	Break capa.:105 tons
Fender	LengthxDiameter	6.5x4.5 m	2	
	Min. breaking load	475.0 tons		
Wire Rope	46 mm diameter / 1300 m length		10	6xWS36 IWRC type
	Sectional area	1048.0 mm <sup>2</sup>		
	Min. breaking load	151.0 tons		
	Young's modulus	1.420e4 Mpa		
Poly-propylene	100 mm diameter / 200 m length		7	Required to connect FPSO and Work Vessel
	Sectional area	7854.0 mm <sup>2</sup>		
	Min. breaking load	144.0 tons		
	Young's modulus	0.769e2 Mpa		

Table 4 Environmental condition for mooring analysis

Wave		Wind Velocity 10m(knots)	Current	
Sig. Height (m)	Mean Period (sec)		Surface (m/sec)	11m Depth (m/sec)
2.25	13.0	15.0	1.21	0.71

Table 5 Relative single amplitude motions, wire rope connection line only

Angle of Attack (deg)	Relative Single Amplitude Motion Responses					
	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Yaw (deg)
90	2.11	2.49	3.02	6.16	0.38	0.77
135	2.40	1.39	1.51	2.28	1.20	0.99
180	1.87	1.42	2.29	0.39	1.95	1.33

Table 6 Relative single amplitude motions, wire rope-polypropylene connection line

Angle of Attack (deg)	Relative Single Amplitude Motion Responses					
	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Yaw (deg)
90	0.06	2.20	3.16	5.98	0.17	0.18
135	0.92	0.83	1.19	2.31	1.06	0.60
180	0.91	0.03	1.99	0.02	1.66	0.01

Table 7 Maximum tensions of connection lines and reactions of air fenders, wire rope connection line only

Connection Lines											Air Fenders	
M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	F1	F2
475	372	908	30	33	17	16	405	365	281	369	162	134

Table 8 Maximum tensions of connection lines and reactions of air fenders, wire rope - polypropylene connection line

Connection Lines											Air Fenders	
M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	F1	F2
13.0	0.0	14.7	12.9	11.9	6.7	6.6	11.3	11.2	11.6	10.7	163.9	130.0

Table 9 Estimated environmental data at FPSO installation site (2001.8.7~2001.8.13, www.meteomer.fr offered)

Wave		Wind	
Sig. Height (m)	Mean Period (sec)	Mean Velocity (knots)	Gust Velocity (knots)
1.8~2.2	?	15~17	20~23

Table 10 Measured maximum tensions of connection lines(2001.8.7~2001.8.13)

Connection Lines											Air Fenders	
M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	F1	F2
11.4	9.8	13.1	-	-	-	-	15.8	12.0	5.0	5.8	-	-

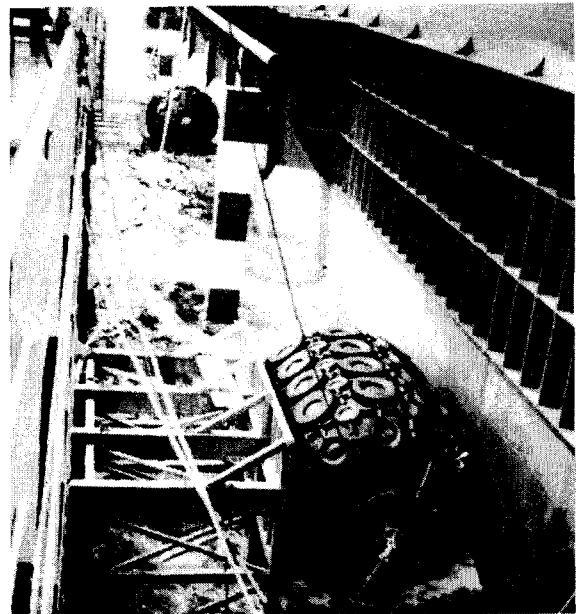


Photo 1 Reinforced fender system