

김도균, 임용식(DSR(주)),
김재한, 김철현, 이영범(대우조선해양)

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목표

연안 해안의 자원이 고갈됨에 따라 2,000년 이후 7,000 ft 이상의 자원 개발에 많은 관심을 두고 개발 중에 있으며, 최근에는 수심 3,000m에 대한 시추탐사가 이루어짐에 따라 향후 이에 대한 시장 수요가 증가할 것으로 예측된다. 수심이 증가함에 따라 기존 steel wire 대신 섬유로프로의 전환이 검토되고 있으며 이와 함께 이를 실현하기 위한 기술력이 요구되고 있다.

또한 기존 조선분야의 로프보다 규모면에서 매우 크고 사업성이 우수하나 유럽 선진사에 의한 시장진입장벽이 높아 현재까지 우리나라에서는 해당 기술 개발이 전무한 상태이다. 본 연구에서는 상용화 및 시장진입을 위해 심해 계류용 섬유로프 기술개발과 수치해석 및 모형시험을 통한 대수심 계류계 적용가능성을 검토하였다.

2. 본론

해양 플랜트의 설치위치가 점차 심해로 이동함에 따라 기존 Steel wire 로프의 자중으로 인한 여러 가지 문제점으로 점차 섬유로프 계류형태가 대안으로 부각되고 있다. Minimum Breaking Load 10,000kN기준 동일 강도에서 Steel wire 로프 대비 섬유로프 중량은 1/2 ~ 1/7정도를 나타내며, 수중에서의 중량은 이보다 훨씬 큰 차이를 나타내며 피로수명에서도 섬유로프가 Steel wire 로프보다 우수한 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 해상 계류에서 중량, 변위, 피로수명, 설치 용이성 관점에서 합성섬유가 유리하기 때문에 최근 들어 합성섬유 로프가 적용 중이거나, 계획 중인 공사가 증가하고 있는 추세이다.

특히 Petrobras사는 브라질 해역에서 약 10여척의 해양구조물에 합성섬유를 적용하고 있다.

이와 같이 근해에서 점차 심해로 시추지점의 변화가 발생되고 있고 향후 미래에는 시추 및 생산방법의 개발로 개발수심이 점점 더 심해로 이동하는 것이 예상된다. 이에 따라 Steel

Wire 로프는 중량에 의한 문제점을 더 많이 수반하게 될 것이므로 심해에서의 경량성 및 기타 장점들로 인해 섬유로프에 의한 계류형태가 많은 부분을 차지할 것으로 예상된다.

표 1 Steel Wire Rope 및 Fiber Rope 중량 비교

구 분	Steel Wire rope	Fiber Rope			
		PET	Aramid	HMPE	
DIA. [mm]	108	175	120	108	
중량 kg/m	in air	57	23	12	8.4
	in water	48	5.9	3.3	0

2.1 재질특성

Steel wire로프와 섬유로프의 가장 큰 차이점은 크게 3가지로 나누어지며 이러한 차이로 인하여 계류계 디자인 및 운용에서 많은 차이를 수반하게 된다. 물성의 차이는 원소재에 기인한 것으로 섬유로프의 소재는 Visco-elastic 특성을 나타내며 이러한 특성의 소재는 점성의 특성과 탄성의 특성을 모두 가지고 있다. 반면 steel은 탄성의 특성을 가지고 있어 상대적으로 계류시스템을 설계하는 설계자의 입장에서 물성에 대한 예측이 용이하고 사용의 역사가 매우 길어 많은 데이터 축적에 따른 안정성에서 장점이 있다. 그러나 전에 언급된바와 같이 수심에 따른 자중의 문제로 계류시스템 디자이너들은 이를 대체할 섬유로프를 고려하고 있다. 두 소재 간 차이점은 다음 그림 1과 같다.

두 소재간 물성의 차이점은 첫 번째 SS curve에서 Steel은 Yield strength까지 선형 특성을 나타내나 섬유로프의 경우 비선형특성을 나타낸다. 두 번째 하중의 반복에 따라 섬유는 Hysteresis loop를 나타내지만 Steel의 경우 Hysteresis가 거의 나타나지 않는다. 마지막으로 섬유는 하중이 일정수준으로 유지되면 섬유가 영구적으로 신장되는 Creep현상이 나타나지만 Steel의 경우 Yield strength이하에서는 Creep현상이 나타나지 않는다.

이러한 물성의 차이로 인하여 섬유로프의 경우 설계시 고려사항이 Steel wire 로프 보다 더 많아지고 이에 따라 요구 시험 항목도 더 많아지게 된다.

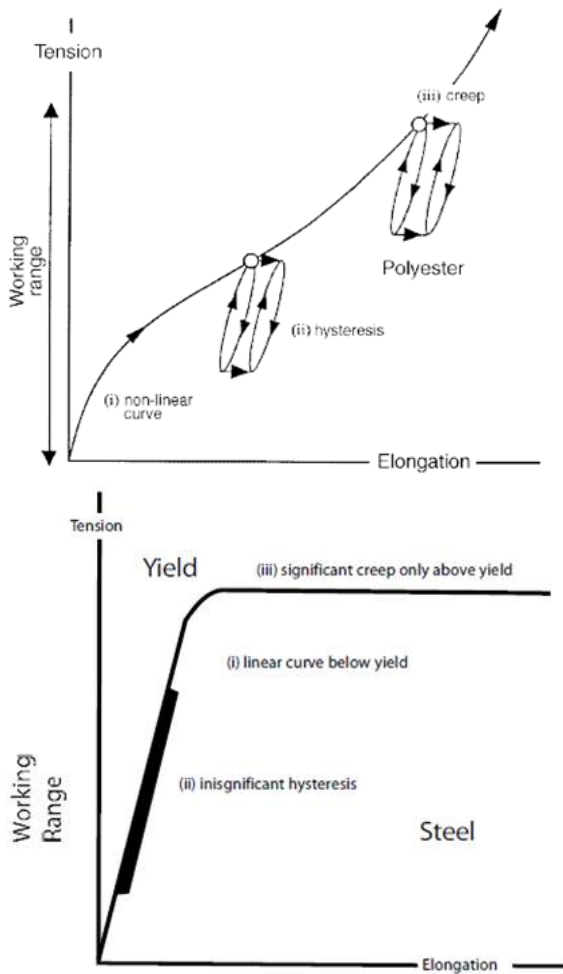


그림 1 Steel 및 Fiber 소재 물성 차이

2.2 섬유로프의 구조

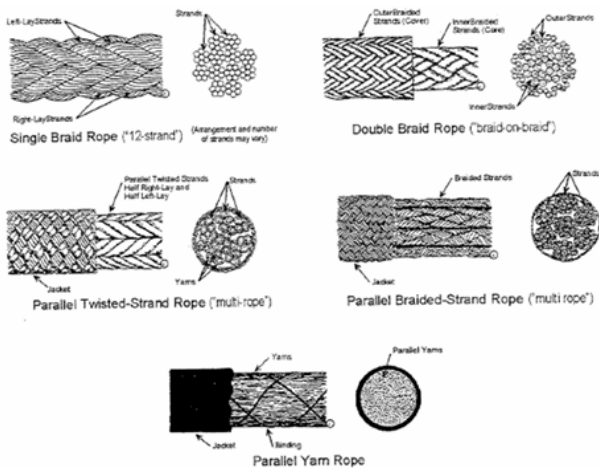


그림 2 섬유로프 구조 사례

심해 계류용 섬유 로프구조는 높은 강도 효율을 요구하며 이에 따른 대표적인 구조 사례들을 위의 그림 2와 같이 나타내었다. 섬유로프는 로프의 경(Diameter) 증가에 따라 효율이 감소하며 이러한 효율 감소를 최소화 시켜야 한다. 이를 위해 경이 낮은 규격의 효율을 높은 경에서 구현하기 위해 낮은 규격의 로프를 평행형태로 배열하고 그 외측에 커버를 씌우는 구조가 일반적이다. 그러나 경우에 따라서는 Steel wire 로프와 연결하여 사용하여야 하는 등 로프의 구조는 제조사 또는 적용환경에 따라 다양하게 나타난다.

2.3 섬유로프의 요구시험 항목

심해 계류용 섬유로프의 시험항목은 앞에서 언급한바와 같이 Steel대비 다양한 시험이 요구되며 그 재질 특성에 따라 별도로 요구되는 시험항목과 공통적으로 요구되는 시험항목이 있다. 예를 들어 Polyester는 하중에 대한 피로가 로프 파단의 가장 큰 요소로 작용하므로 Cyclic loading 시험이 요구되며, HMPE의 경우 하중피로는 매우 우수하나 Creep에 의한 파단이 가장 큰 문제요소이므로 Creep 시험을 별도로 요구한다.

섬유로프 시험에 대한 절차, 방법 및 내용은 재질, 국제 규격 또는 선급기관에 따라 조금씩 달라지나 일반적으로 요구되는 시험항목은 다음 표 2와 같다.

표 2 섬유로프 재질별 시험항목

시험항목	재질		
	PET	HMPE	Aramid
파단강도	○	○	○
신장률 및 강성도	○	○	○
단말가공 신뢰성	○	○	○
단위 중량	○	○	○
미세입자 방지특성	○	○	○
Creep특성		○	
압축피로 특성			○

위의 시험항목 중 기본적으로 충족되어야 하는 물성은 수명에 관계되는 강도, 미세입자 방지특성, Creep, 압축피로특성이 있으며 실제 계류 시스템에서 가장 중요한 고려대상인 신장률 및 강성도가 있다.

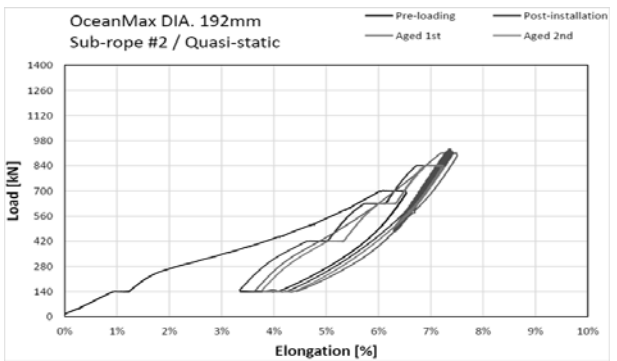
신장률 및 강성도가 중요한 이유는 첫째 초기 로프 설치과정에서 영구적인 신장률 제거 후 로프의 길이변화와 둘째 부유체의 이동범위와 계류라인의 하중을 나타내는 지표이기 때문이다. 부유체의 이동범위가 중요한 이유는 riser의 허용범위

를 넘어서면 안되기 때문이며 계류라인의 하중은 로프의 장기적인 수명 및 계류 시스템 안정성과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

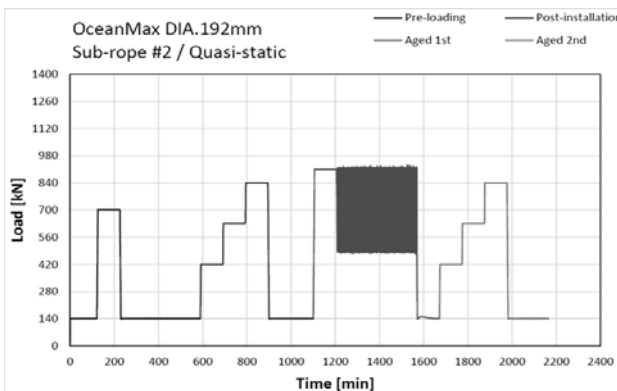
부유체의 이동 범위는 일반적으로 준정적 강성도(Quasi-static stiffness)에 지배를 받으며 계류라인의 하중은 동적인 강성도(Dynamic stiffness)에 의해 결정된다.

2.4 섬유로프 준정적 강성도 특성

현재 심해계류용 로프로 가장 많이 적용 및 고려가 되는 Polyester에 대해서 ABS선급기관 규정에 따른 시험을 진행하였으며 그 결과는 다음 그림 3과 같다.



(a) Load vs. Elongation



(b) Load vs. Time

그림 3 Quasi-Static Stiffness 시험

시험은 실제 현장에서 계류시스템을 설치하는 과정과 설치 이후 나타나는 로프의 준정적 강성도가 어떻게 나타나는지를 조사하고 장기간 준정적 현상이 발생하였을 때 부유체의 이동 범위가 어느 정도까지 움직일지에 대한 예측을 하기 위함이다. 절차는 설치초기 로프의 구조적 신장률을 제거하는 과정이 있고 이는 0~ 600 min까지의 절차로 나타나 있다. 이후

600 ~ 1100 min과정은 로프 설치 직후 파단강도의 30%, 45%, 60%에서 준정적 상태에서 로프의 영구적인 신장률 변화를 시험하는 절차이다. 1100 ~ 1580 min 범위는 폭풍에 영향을 나타내는 과정이며 이후 1580min ~ 마지막 시간범위는 로프에 초기신장률 및 구조적 신장률이 완전히 제거된 후 나타나는 준정적 상태에서의 강성도를 조사하기 위한 시험단계이다.

위의 그림 3(b)는 시험절차를 보기 쉽게 나타내기 위하여 X축을 시간으로 나타낸 그래프이며 강성도 계산을 위해서는 위의 그래프를 하중과 변위(신장률)축으로 변경하여야 하며 그 결과는 다음 그림과 같다. 그림 3(a)는 X축을 신장률로 변환한 그래프이며 위 그래프상에서 계류시스템 설치 전후의 신장률차이는 3.36%이며 설치 직후 준정적 상태에서의 creep 특성은 다음 그림4와 같다.

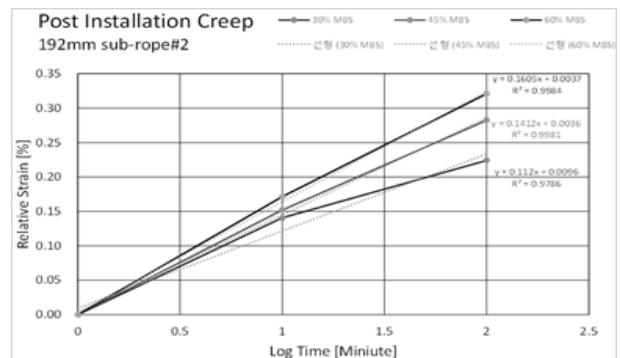


그림 4 Post installation Creep coefficient

위의 결과에 따라 Creep 상수를 구하면 30% - 0.112, 45%-0.141, 60%-0.161을 구할 수 있다. 그리고 어느 정도 시간 경과 후 로프에 구조적인 신장률이 모두 제거된 후 (Aged rope) 준정적 상태에서의 creep 특성은 다음 그림5와 같다.

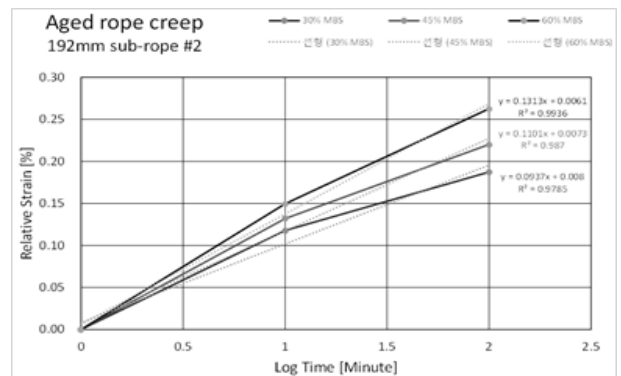


그림 5 Aged Creep coefficient

위의 결과에 따라 Aged rope의 creep 상수를 구하면 30% - 0.094, 45%-0.110, 60%-0.131을 구할 수 있다. 위 Creep 상수 값들을 ABS에서 권장하는 준정적 강성도 도출식에 따라 각 시간별로 강성도를 구하면 다음 표 3과 같다.

표 3 Quasi-static Stiffness design chart

$$K_{rz} = (F_2 - F_1) [E_2 - E_1 + C \log(t)] \dots \dots \dots (3.4)$$

where

- F_1 = starting test tension, typically pre-tension of mooring line (%MBS)
- F_2 = ending test tension, typically storm mean load (%MBS)
- E_1 = starting strain (%)
- E_2 = ending strain (%)
- C = creep coefficient
- t = duration of the environmental event

The coefficient C can be determined by regression analysis as shown in A2/2.2.

2. Quasi-Static Stiffness Design Chart
192 mm_sub-rope #2

Relative strain	Creep coefficient	Time [min] Log time [m]	1		10		100		360		1000		1440		2880		10080	
			0	1	2	2.56	3	3.16	3.46	4.00	10	11.22	11.01	10.65	10	11.22	11.01	10.65
Post installation	1.430	0.112	P-I 30%	13.99	12.97	12.10	11.66	11.33	11.22	11.01	10.65							
	2.494	0.141	P-I 45%	14.03	13.28	12.61	12.26	12.00	11.90	11.73	11.44							
	3.449	0.161	P-I 60%	14.50	13.85	13.26	12.96	12.64	12.64	12.49	12.22							
Aged	1.351	0.094	Aged 30%	14.80	13.84	13.00	12.57	12.25	12.14	11.94	11.59							
	2.306	0.110	Aged 45%	15.18	14.49	13.86	13.53	13.28	13.19	13.03	12.74							
	3.169	0.131	Aged 60%	15.78	15.15	14.57	14.27	14.03	13.95	13.80	13.53							

위 표에 나타난 값들을 강성도(Y축)와 log(time) (X축, 로그좌표)에 도식하면 다음 그림 6과 같은 디자인 curve를 얻을 수 있다.

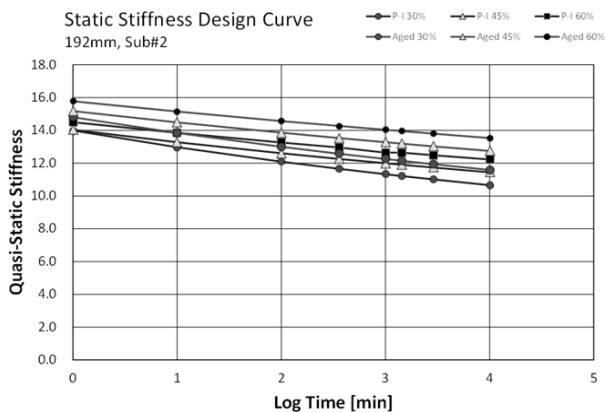


그림 6 Static stiffness design curve

위의 결과를 보면 초기 준정적 강성도는 초기 14~16 X MBS를 나타내며 시간 경과에 따라 낮아지는 경향을 나타내며, 구조적 신장률이 완전히 제거된 후의 강성도가 1정도 높게 나타난다. 위의 준정적 강성도 기준은 일반적으로 디자인 단계에서 12~15정도를 기준으로 하며 야사 샘플의 경우 약간 높은 경향을 나타내는데 이는 부유체 이동범위가 더 작다는 의미이므로 더 우수한 특성으로 분석할 수 있다.

2.5 섬유로프 동적 강성도 특성

동적 강성도 특성에 대해서도 가장 많이 고려되고 있는 Polyester에 대해서 ABS선급기관 규정에 따른 시험을 진행하였으며 동적 강성도 시험 매트릭스는 다음 표 4와 같다.

표 4 Dynamic Stiffness Test Matrix

Case Number	T_{min} (%MBS)	T_{avg} (%MBS)	T_{max} (%MBS)	T_{min} (%MBS)	Period (sec)
1	15	5	10	20	250
2	20	3	17	23	12 to 35
3	20	3	17	23	250
4	23	16	7	39	250
5	30	16	14	46	12 to 35
6	30	16	14	46	250
7	30	28	2	58	250
8	35	8	27	43	12 to 35
9	35	8	27	43	250
10	40	30	10	70	12 to 35
11	40	30	10	70	250
12	50	20	30	70	12 to 35
13	50	20	30	70	250
14	60	10	50	70	250

위의 시험 절차에 따라서 시험하면 다음 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다.

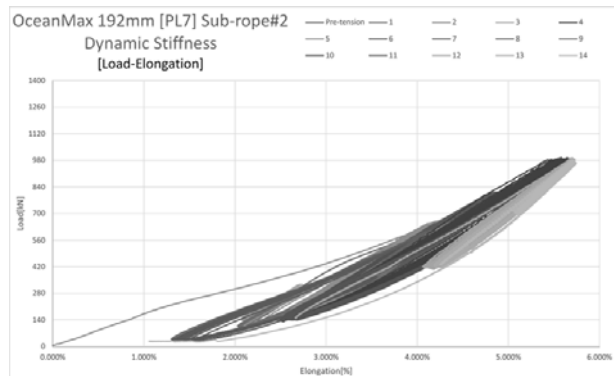
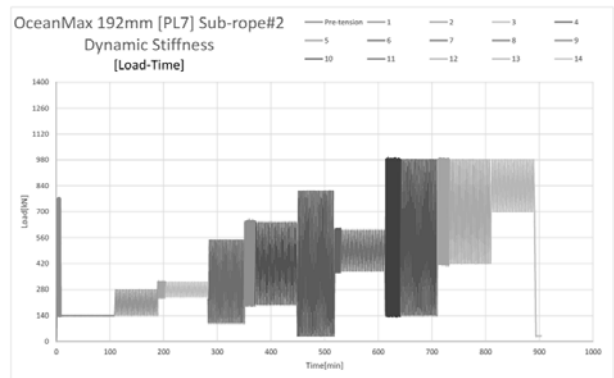


그림 7 Dynamic Stiffness Test 결과

위의 시험 결과를 ABS 규정에 따라 단계별 강성도를 구한 다음 하중범위, 반복속도, 반복하중 구간의 평균 하중의 변수

의 식으로 모델화하기 위해 강성도값을 종속변수로 두고 위의 3개 변수를 독립변수로 설정하여 선형회귀분석을 수행한다.

표 4 ABS Dynamic Stiffness Equation and Results

Equation for Dynamic Stiffness

The three-parameter equation [8] is recommended for dynamic stiffness:

$$K_{rd} = \alpha + \beta L_m + \gamma T + \delta \log(P) \dots\dots\dots (3.3)$$

where

- L_m = mean load as % of MBS (i.e., 20 is 20% of MBS)
- T = load amplitude as % of MBS
- P = loading period in seconds

There is a trend in the industry to take out the tension amplitude and loading period in the equation, claiming their impact is negligible. This leaves a simplified dynamic stiffness model depending on mean load only. Investigations reveal that this simplified model is a poor fit to the test data. To have a general model for all polyester ropes, all 3 parameters should be kept, unless data are available to justify the use of a simpler formulation.

Case Number	Stiffness (MBS)	Mean Tension (%MBS)	Tension Amplitude (%MBS)	Log Period (sec.)	P
1	22.51	15	5	2.38	239
2	24.29	20	3	1.32	21
3	23.86	20	3	2.37	235
4	18.59	23	16	2.30	198
5	22.60	30	16	1.48	30
6	22.20	30	16	2.37	234
7	14.90	30	28	2.31	206
8	27.49	35	8	1.23	17
9	27.80	35	8	2.39	247
10	18.83	40	30	1.62	42
11	19.25	40	30	2.31	203
12	26.78	50	20	1.50	32
13	27.02	50	20	2.37	232
14	32.07	60	10	2.38	242

$$K_{rd} = \alpha + \beta L_m + \gamma T + \delta \log(P)$$

$$K_{rd} = 20.787 + 0.308L_m + (-0.441)T + (-0.574)\log(P)$$

위의 값은 선형회귀분석을 통하여 도출된 동적 강성도 모델식이며 모델식의 내용은 평균하중이 증가하면 강성도는 증가하고 반복속도 및 반복범위는 증가할수록 강성도가 낮아진다는 의미이다. 위의 동적 도출 모델은 일정 size에만 적용 가능하며 size차이가 커지면 적용하기 어렵다. 실제 1/5 size로 동일 과정 반복하여 비교한 결과 모델식의 계수 값들이 많은 차이를 나타내어 한 규격으로 모든 Size에 적용하기는 어려울 것으로 판단된다.

3. 모형시험

개발된 섬유로프의 심해 계류계 적용 가능성을 확인하기 위해 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 Wind, wave 및 current의 복합환경 하에서 2.5 MMbbls급 FPSO의 계류성능 평가 모형시험을 수행하였다.

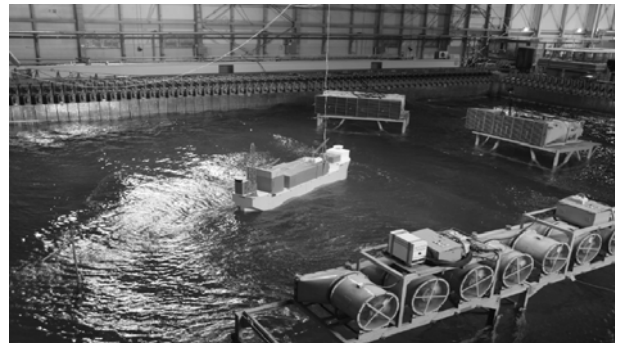
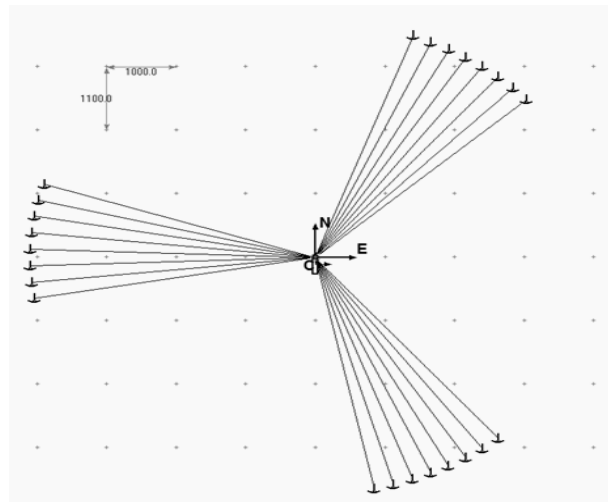


그림 8 FPSO 계류성능 평가 모형시험

모형시험을 위한 계류계의 주요 제원과 배치는 다음 그림 9와 같다.



Description	Unit	Value		
Number of Mooring Line	-	24 (3 bundles x 8 lines)		
Angle between Bundle	deg	120		
Angle between Lines within Bundle	deg	4		
Pre-Tension (ballast/Full)	kN	3116.2/3000		
Total line length	m	4970		
Segment		Bottom	Intermediate	Top
Type / Grade		R4 Studless Chain	Polyester rope	R4 Studless Chain
Length	m	200	4500	270
Diameter	mm	138	240	138

그림 9 모형시험 계류계 주요 제원 및 배치

계류성능 평가를 위한 환경조건을 선정하기 위해 Wave,

wind 및 current의 다양한 환경 조합을 고려하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 아래 표5와 같이 최대 장력과 offset이 발생하는 조건에 대해 모형시험을 수행하였다.

표 5 계류성능 평가를 위한 환경조건

L/C	Wave			Wind		Current	
	Hs [m]	Tp [s]	Heading [deg]	Speed [m/s]	Heading [deg]	Speed [m/s]	Heading [deg]
Full load	9.1	11.9	180	44.5	135	2.02	180
	11.1	13.2	135	38.8	270	2.02	180
Ballast	9.1	11.9	180	44.5	135	2.02	180

모형시험 결과 최대 Offset과 Chleo 장력은 Ballast 조건에서 발생하였다. Chain-wire-chain을 적용하는 Catenary 계류의 경우 흘수변화에 따라 일반적으로 최대 Offset은 Full load에서, 최대 장력은 Ballast에서 발생하지만 섬유로프를 적용하는 대수심 계류계의 경우 계류선이 Taut mooring 형태가 되고 계류선의 길이가 아주 길기 때문에 흘수변화에 큰 영향이 없는 것을 볼 수 있다.

또한 실험 결과에 따르면 계류선에 작용하는 최대 장력은 MBL의 48%로 API RP 2SK에서 제안하는 Safety factor를 충분히 만족하는 것을 확인하였다.

4. 결론

심해 부유체 생산설비의 설치 수심이 점차 심해로 이동함에 따라 기존 steel wire로프의 자중 문제에 의해 대안으로 섬유로프가 검토되고 있으며 일부 지역의 경우 매우 활발하게 적용이 이루어지고 있다.

섬유로프는 Steel wire로프와 소재의 차이로 인하여 많은 부분에서 차이를 나타내며 이러한 차이로 섬유로프의 경우 많은 시험항목을 요구하고 있다. 이에 제품 개발 및 상용화를 위해 중요한 강성도 부분에 대해서 시험 및 분석을 진행하였으며 그 결과 준정적 강성도는 매우 양호한 수준을 나타내었다. 그리고 동적 강성도의 경우 size별로 다른 모델상수를 나타내었으며 이는 Size의 차이가 커질 경우 동적 강성도는 개별 Size로 시험하는 것이 타당할 것으로 예상된다. 위의 연구 결과에 따라 제품 선급인증 및 1~2년내 상용화를 추진할 계획이다.

참고 문헌

시스템산업미래성장동력사업 연차보고서 별첨연구보고서 [심해 석유 생산망 FEED 설계 및 부유체 핵심 기술 개발] (2015, 2016)



김도균

- 1965년생
- 1990년 전남대학교 섬유공학과 졸업
- 현 재 : 디에스알(주) 이사
- 관심분야 : Mooring system, 해양플랜트
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : dkkim@dsr.com



임용식

- 1976년생
- 2005년 전남대학교 화학공학과 석사졸업
- 현 재 : 디에스알(주) 기술연구소 과장
- 관심분야 : offshore mooring system
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : ysyim@dsr.com



김재한

- 1978년생
- 2013년 서울대학교 조선해양공학과 박사 졸업
- 현 재 : 대우조선해양 선박해양연구소 과장
- 관심분야 : 내항성능, 계류계
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : HANKIM@DSME.CO.KR



김철현

- 1973년생
- 2005년 부경대학교 조선해양공학과 박사졸업
- 현 재 : 대우조선해양 선박해양연구소 차장
- 관심분야 : 내항성능, 계류계
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : CHHKIM@DSME.CO.KR



이영범

- 1970년생
- 2010년 University of Southampton 박사 졸업
- 현 재 : 대우조선해양 선박해양연구소 부서장
- 관심분야 : 내항성능, 계류계
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : YBLEE@DSME.CO.KR