

# 섬유로프 계류시스템의 크리프 효과가 부유체의 운동응답 및 계류선의 장력 변화에 미치는 영향에 관한 연구

박성민·이승재<sup>†</sup>·강수원  
한국해양대학교 조선해양시스템공학부

## A Study on Creep Effect of Synthetic Fiber Rope Mooring System on Motion Response of Vessel and Tension of Mooring Line

Sung Min Park·Seung Jae Lee<sup>†</sup>·Soo Won Kang

Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

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.

Growing demand and rapid development of the synthetic fiber rope in mooring system have taken place since it has been used in deep water platform lately. Unlike a chain mooring, synthetic fiber rope composed of lightweight materials such as Polyester(polyethylene terephthalate), HMPE(high modulus polyethylene) and Aramid(aromatic polyamide). Non-linear stiffness and another failure mode are distinct characteristics of synthetic fiber rope when compared to mooring chain. When these ropes are exposed to environmental load for a long time, the length of rope will be increased permanently. This is called 'the creep phenomenon'. Due to the phenomenon, The initial characteristics of mooring systems would be changed because the length and stiffness of the rope have been changed as time goes on. The changed characteristics of fiber rope cause different mooring tension and vessel offset compared to the initial design condition. Commercial mooring analysis software that widely used in industries is unable to take into account this phenomenon automatically. Even though the American Petroleum Institute (API) or other classification rules present some standard or criteria with respect to length and stiffness of a mooring line, simulation guide considers the mechanical properties that is not mentioned in such rules. In this paper, the effect of creep phenomenon in the fiber rope mooring system under specific environment condition is investigated. Desiged mooring system for a Mobile Offshore Drilling Unit(MODU) with HMPE rope which has the highest creep is analyzed in a time domain in order to investigate the effects creep phenomenon to vessel offset and mooring tension. We have developed a new procedure to an analysis of mooring system reflecting the creep phenomenon and it is validated through a time domain simulation using non-linear mooring analysis software, OrcaFlex. The result shows that the creep phenomenon should be considered in analysis procedure because it affects the length and stiffness of synthetic fiber rope in case of high water temperature and permanent mooring system.

**Keywords** : Creep phenomenon(크리프 현상), Polyester(폴리에스테르 섬유), HMPE(고 경도 폴리에틸렌 섬유), Wave scatter diagram (파랑 분포 표), Static-dynamic stiffness model(정적-동적 강성 모델), Curve fitting(곡선 맞춤)

## 1. 서론

육상자원 및 연안 지역 석유와 가스자원의 고갈로 인해 최근 해양플랜트산업은 심해유전 개발에 박차를 가하고 있다. 해양플랜트는 라이저에 가해지는 충격을 최소화하기 위해 정확한 위치

유지가 필요하며 이와 관련된 연구가 많이 진행되었다. 현재 위치유지를 위한 장비들은 크게 계류선과 동적 위치유지 시스템(dynamic positioning system) 두 가지 방법이 사용된다. 천해에서는 계류선이 체인으로만 되어있어도 문제가 없었지만, 심해로 갈수록 계류선의 길이의 증가로 인해 자중이 커지고 이는 해양구

조물과 계류선의 정적 평형상태를 산정하는데 있어 과도한 초기 장력이 가해지는 문제를 야기한다. 이러한 이유로 심해에서 계류선의 구성은 체인과 섬유로프를 함께 사용하고 있다.

섬유로프를 계류선으로 사용할 경우, 체인에서는 볼 수 없었던 또 다른 파단원인과 섬유로프의 비선형 강성에 의한 문제가 발생한다. 먼저, 섬유로프의 파단현상은 섬유로프의 수명을 결정하는 요인으로써 많은 연구가 진행 중이다. 섬유로프 파단의 가장 큰 원인은 피로 손상이며, 이는 섬유로프의 재질에 따라 각각 다른 형태로 나타나게 된다. Polyester 로프는 인장 피로손상, HMPE 로프는 크리프 현상 그리고 Aramid 로프는 압축 피로손상이 주된 파단의 원인이며 이에 따라 계류선의 설계 수명이 결정된다. 그중에서 크리프 현상은 온도, 시간, 하중에 의해 섬유로프의 길이가 영구적으로 증가하는 현상으로 모든 섬유로프에서 발생할 수 있지만 섬유로프의 종류에 따라 발생 양상과 그 정도가 달라진다. Polyester 로프와 aramid 로프는 크리프 현상이 발생하더라도 파단을 일으킬 만큼 치명적이지는 않다 (Banfield, 2006). 하지만 HMPE 로프는 크리프 현상이 가장 많이 발생하는 재료이며 파단현상까지 야기할 수 있다. 최근에는 이 문제를 개선한 로프가 개발되었으며 크리프 실험을 통해 성능을 검증하고 있다 (Masblom & Bosman, 2006).

섬유로프의 또 다른 특징은 비선형 강성이며, 이를 표현하기 위해 많은 연구가 이루어졌으며, 대표적인 섬유로프 강성모델은 Static-dynamic 강성 모델 (Francois & Davies, 2000)과 upper-lower bound 강성 모델 (NDE & TTI, 1999)이다. 위 두 가지 모델을 이용하여 실제 프로젝트에 적용한 사례들은 American Bureau of Shipping(ABS) 보고서에 명시되어 있다 (ABS, 2010).

본 논문은 섬유로프의 크리프 현상을 고려한 설계방안을 제시하기 위하여 두 가지 방법으로 연구를 수행하였다. 첫 번째는, HMPE 로프를 사용할 때 실제 크리프 현상을 시간영역 시뮬레이션에 반영하는 과정 및 방법을 제시하였다. 해양 석유가스 개발용 플랫폼의 경우 한 사이트에서 오랜 기간 작업을 해야 하는 특성 때문에 계류시스템의 설계에 있어 해당 사이트의 파랑 분포표(wave scatter diagram)를 반영해야한다. 따라서 파랑 분포표와 더불어 시뮬레이션에 실시간으로 변형된 길이와 강성을 반영하는 과정과 방법에 대하여 논의하였다. 두 번째로 크리프 현상이 부유체의 모션 응답에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 크리프 현상은 섬유로프의 길이와 강성의 변화를 야기하게 되는데, 이것은 초기 계류 시스템의 특성을 변화시키고 시간이 지나면서 거동 응답에 영향을 미치게 된다. 따라서 크리프 현상이 발생하였을 경우와 발생하지 않았을 경우의 운동응답과 계류선에 작용하는 장력을 비교하여 크리프 현상의 영향을 정량적으로 조사하였고 크리프에 가장 치명적인 영향을 미치는 변수가 무엇인지 알아보았다.

## 2. 섬유로프의 특징

### 2.1 크리프 현상

크리프 현상은 로프가 장시간 인장 하중을 받을 때, 섬유로프

의 길이가 영구적으로 증가하는 현상을 말한다. 이 현상은 온도가 높을수록, 인장 응력이 강할수록 그리고 시간이 길수록 두드러지게 나타난다. HMPE 로프는 Polyester 로프와 비교하여 동일한 파단 강도를 갖는 경우 작은 직경과 무게를 갖는다는 장점이 있지만, 강성이 매우 크고 크리프의 발생이 크다는 단점을 가지고 있다. 본 연구는 크리프 현상의 영향을 관찰하기 위해 HMPE 로프를 대상으로 크리프 현상의 영향을 연구하였다. Fig. 1은 같은 파단 강도를 가질 때 파단 응력의 30% 하중 하에서 각 섬유로프의 종류별 크리프 발생량을 보여주고 있다.

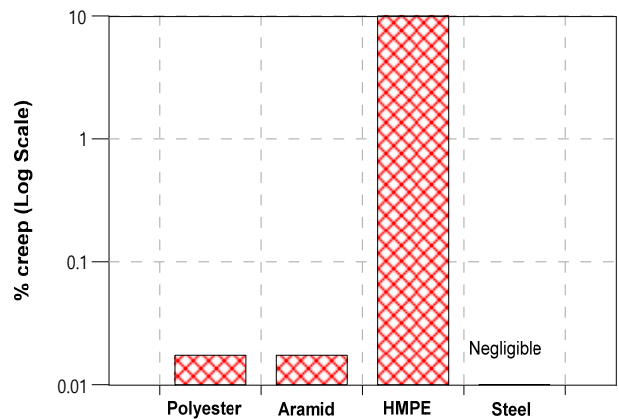


Fig. 1 Typical estimate of creep (NDE & TTI, 1999)

크리프 현상은 Fig. 2에 나타난 비와 같이 모두 세 단계를 거쳐 파단에 이르게 된다. 이 그래프는 전형적인 HMPE의 크리프 현상을 설명하고 있는데, 1번 구간에서는 원래의 길이로 돌아갈 수 있는 가역반응이 일어나고 2번 구간에서는 원래의 길이로 돌아가지 않고 늘어난 상태로 남아있는 비가역반응이 발생한다. 마지막 3번 구간에서는 HMPE의 네킹(necking) 현상과 함께 파단이 발생하게 된다. 이와 같은 현상들의 발생시기와 양상은 HMPE의 종류, 하중, 온도에 따라 상이하게 발생하므로 엄밀한 실험을 통해 크리프의 양을 판별해야 한다 (Masblom & Bosman, 2006).

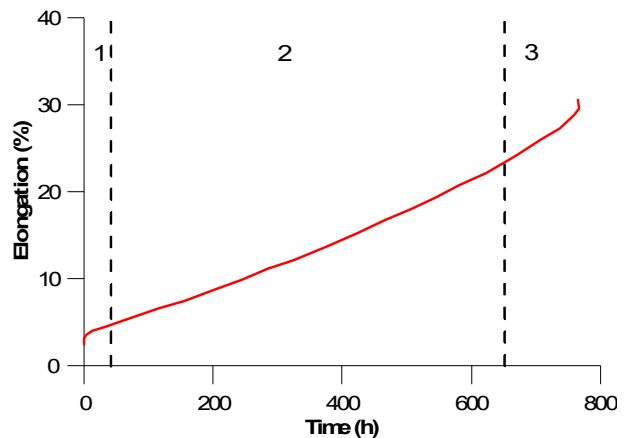


Fig. 2 HMPE rope SK78 creep curve at 30°C and 45% MBS load of rope (Masblom & Bosman, 2006)

본 연구에서 사용한 HMPE 로프는 유럽의 섬유로프 제작회사인 Dyneema의 제품을 사용하였다. Dyneema는 해양플랜트의 계류시스템에 사용하기 위한 목적으로 HMPE 로프의 크리프 발생량을 개선한 Mobile Offshore Drilling Unit(MODU)용 HMPE 로프인 SK78 제품과 영구 계류용 HMPE 로프인 DM20 제품을 차례로 개발하였다. 본 연구에서는 일시적인 계류시스템과 영구적인 계류시스템이 모두 사용되기 때문에 SK78과 DM20 제품을 사용하였으며, 실험에 따른 HMPE 로프의 크리프 특성은 Table. 1에 나타내었다.

Table 1 Creep model expectations for HMPE fiber types (Vlasblom, et al., 2012)

	SK78		DM20	
	Estimated creep	Creep failure	Estimated creep	Creep failure
MODU condition (5 years)	1.7%	can be met	0%	can be met
Permanent condition (25 years)	Failure		<0.3%	can be met

크리프 현상의 안전계수는 각 기관별 가이드라인에 따라 차이가 있지만, 크리프 현상이 발생하지 않는 경우 대비 ABS (2011)와 API (2007)는 안전계수 10을 제시하고 있다. 즉, 만약 설계수명이 30년이라면 크리프 파단 수명은 300년 이상을 가져야 한다.

섬유로프를 사용한 계류선에서의 크리프에 의한 영향을 알아보기 위해서는 하중의 크기에 따른 크리프 양을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 하지만 크리프 현상은 비선형적으로 발생하기 때문에 예측하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 SK78 로프의 각 온도에 따른 하중 별 크리프 속도 실험 자료를 바탕으로 곡선맞춤(curve fitting)하여 사용하였다. 이와 같은 방식은 ABS (2011)에서 제시한 방법이며, 크리프 실험 결과와 함께 곡선맞춤을 통하여 계산한 크리프 속도에 대한 그래프는 Fig. 3과 같다. 여기서 가로축은 하중을 뜻하고 세로축은 그 하중이 작용하였을 때 시간에 따른 크리프 속도를 의미한다.

이 그래프에서 점으로 표시한 데이터는 크리프 실험에 의한 자료이며 선으로 표시한 부분은 본 연구에서 구한 곡선맞춤 식을 통해 계산한 데이터이다. 크리프 실험과 곡선맞춤 식이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 이 그래프는 높은 온도일수록 더 큰 크리프 속도를 보인다. ABS (2011)에서 제시한 크리프의 양을 산정하는 식 (1)은 Fig. 3의 30°C조건에서 곡선 맞춤 하여 나타낸 것이다. 하지만 본 연구에서는 더 정확한 계산을 위해 섬유로프가 설치되는 수심에서의 수온 변화에 대응할 수 있도록 10, 20°C의 곡선을 곡선 맞춤 하여 크리프의 양을 산정하였고 그 결과는 식 (2), (3)과 같다.

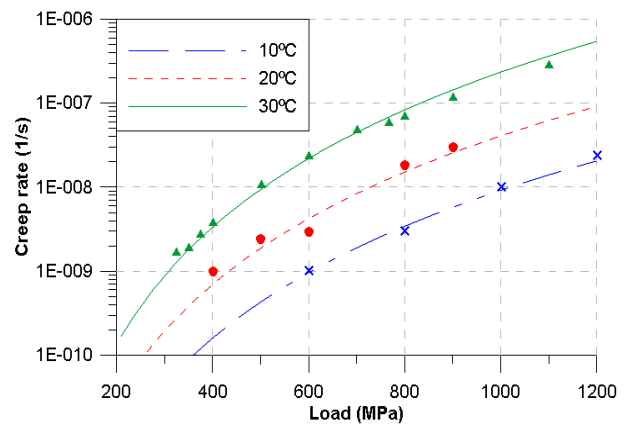


Fig. 3 Creep rate model test (ABS, 2011)

$$R_C = 4 * 10^{-11} * T_m^{4.45} \quad (at \ 30^\circ C) \quad (1)$$

$$R_C = 2 * 10^{-12} * T_m^{4.421} \quad (at \ 10^\circ C) \quad (2)$$

$$R_C = 10^{-11} * T_m^{4.4365} \quad (at \ 20^\circ C) \quad (3)$$

이 때  $R_C$ 는 크리프 속도(1/day),  $T_m$ 은 섬유로프에 작용하는 평균 장력(% of Minimum Breaking Strength, MBS)을 의미한다. 각 환경 하중 하에서 섬유로프에 작용하는 장력을 계산하고, 이 장력이 작용하는 시간을 알면, 위 식을 사용하여 크리프의 양을 계산할 수 있다.

## 2.2 섬유로프의 Static-dynamic 강성 모델

섬유로프는 힘이 가해졌을 때 액체와 고체의 성질이 동시에 나타나는 점탄성 물질의 특성을 갖고 있다. 이 특성으로 인해 섬유로프는 선형적인 강성을 띄지 않고 비선형 강성으로 표현된다. 이러한 비선형 강성을 표현하기 위해 여러 가지 섬유로프용 강성 모델이 개발되어 있다. 그 중 Static-dynamic 강성 모델 (Francois & Davies, 2000)은 섬유로프의 연신율에 따른 거동을 설명하기 위해 개발되었으며, 섬유로프의 강성을 크게 정적 강성 (static stiffness)과 동적 강성(dynamic stiffness)으로 나누고 있다. 정적 강성은 주기성 없이 일정하게 가해지는 하중에 대한 부유체의 평균 오프셋(offset)과 섬유로프에 걸리는 평균 장력을 구하기 위한 강성이며, 동적 강성은 주기성을 가진 하중에 대한 부유체의 동적 오프셋과 장력의 변화를 나타내기 위한 강성이다. 동적 강성은 반복하중 하에서 평균 하중, 하중의 진폭 그리고 가해지는 하중의 주기로 표현되며 (Del Vecchio, 1992) 이는 식 (4)와 같다.

$$K_{r,d} = \alpha + \beta L_m + \gamma T + \delta \log(P) \quad (4)$$

이 때  $K_{r,d}$ 는 MBS로 무차원화 한 동적 강성,  $L_m$ 은 평균 하중(%)

of MBS),  $T$ 는 하중의 진폭(% of MBS),  $P$ 는 하중의 주기(second)이다. 하지만 식 (4)를 실제 해상환경을 적용할 경우에서 사용 할 경우 세 가지 변수의 조합에 의해 무수히 많은 동적 강성이 존재하게 되고 그에 따라 시뮬레이션의 수도 증가하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 ABS (2011)는 해상상태의 거칠기에 따른 세 가지 경우와 더불어 태풍이 발생하였을 때의 동적 강성을 제시하였고, 이 때 가장 큰 동적 강성값을 사용하는 것이 보수적인 접근법이라 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 섬유로프의 동적 강성이 가장 큰 경우에서 해석을 진행하였다.

### 2.3 섬유로프의 준 정적 강성

준 정적 강성(quasi-static stiffness)은 환경 하중이 발생하였을 때 로프에 발생하는 영구적인 길이의 증가로 인해 감소한 정적 강성을 의미한다 (ABS, 2011). 이는 Fig. 4에 도식화 하였다.

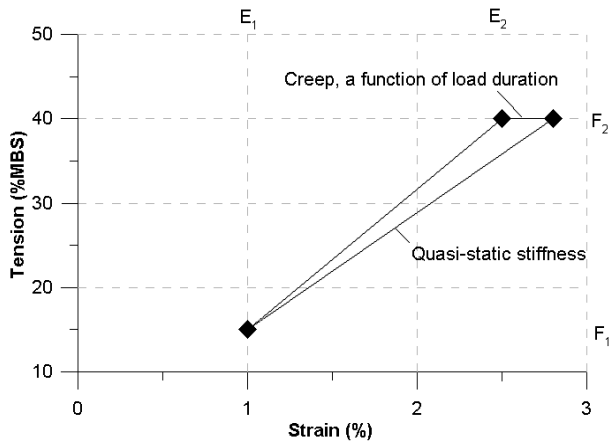


Fig. 4 Illustration of quasi-static stiffness (ABS, 2011)

만약 섬유로프가 오랜 시간 동안 장력  $F_2$ 를 받으면 영구적인 연신율의 증가인 크리프가 발생하게 되고 그에 따라 새로운 기울기가 발생하게 된다. 식 (5)과 같이 표현되는 이 기울기는 새로운 정적 강성으로 작용하게 되고 다음 해석에 영향을 미치게 된다.

$$K_{rs} = (F_2 - F_1) / (E_2 - E_1 + Ct) \quad (5)$$

여기서  $K_{rs}$ 는 MBS로 무차원화한 정적 강성,  $F_1$ 은 계류선에 작용하는 초기 장력(% of MBS),  $F_2$ 는 환경 하중에 의한 장력(% of MBS),  $E_1$ 은 초기 장력에 의한 연신율(%),  $E_2$ 는 환경 하중에 의한 연신율(%),  $C$ 는 크리프의 양을 나타내는 계수이며,  $t$ 는 환경 하중이 걸리는 시간(day)을 의미한다.

### 2.4 크리프 현상을 고려한 섬유로프 계류시스템의 해석 절차

본 연구에서는 섬유로프의 강성을 표현하기 위해

Static-dynamic 강성 모델을 도입하였고, 이와 함께 크리프 현상도 고려해야 하므로 새로운 해석 절차가 필요하다. 이 강성모델의 경우 정적 강성과 동적 강성으로 두 번의 해석 절차가 필요하므로, 해석 결과를 조합 할 방법이 필요하다. 조합 방법은 다음과 같다. 동일한 해상 상태에서 정적 강성과 동적 강성을 적용하여 두 번의 해석을 계류해석을 수행한다. 먼저 정적 강성을 사용하여 평균 응답을 구하고 동적 강성을 사용하여 시간에 따른 동적 응답을 구한다. 그러나 동적 응답을 구할 때, 정적 응답의 해석과는 다른 초기 장력을 가지기 때문에 동일한 초기 장력을 갖는 설계 조건을 만족하기 위해서는 계류선의 길이조절을 통해 동일한 초기 장력을 갖도록 한다. 마지막으로 두 결과를 결합하여 최대 응답을 구하는 것이 일반적인 방법이다 (Yongjun, et al., 2013). 하지만 이 방법은 섬유로프의 크리프에 의한 길이 변화와 강성의 변화를 고려하지 않은 과정이다. 따라서 길이와 강성의 변화를 고려하기 위해서는 섬유로프 계류시스템의 해석 결과를 토대로 섬유로프의 늘어난 길이와, 변화한 강성을 구하는 과정을 반복해야 한다. 이 과정을 도식화 하면 Fig. 5와 같다.

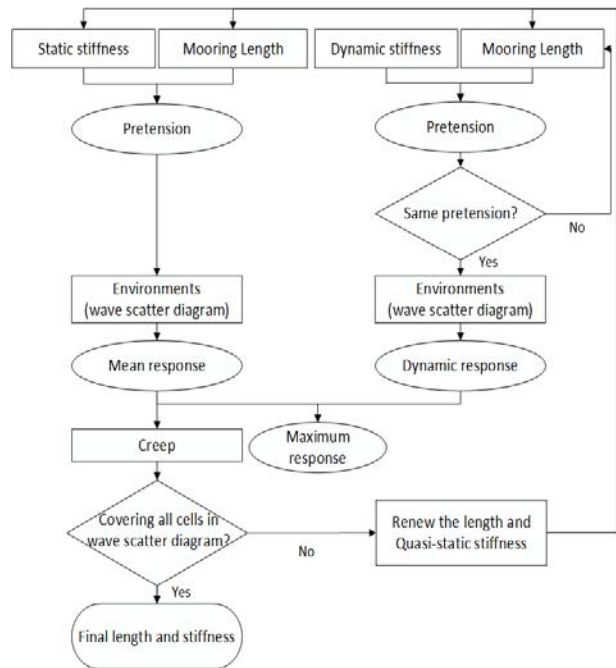


Fig. 5 Synthetic fiber rope mooring analysis procedure including creep phenomenon

Fig. 5의 절차에 따라 해당 사이트의 설계 수명에 대응하는 파랑 분포 표에 대한 해석이 끝나게 되면 설계 수명에 따른 변화된 길이와 강성이 계산된다. 누적되는 크리프의 양은 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.

$$G_t = \sum_{i=1}^n h_i H_i \quad (6)$$

여기서  $G_t$ 는 총 크리프의 양,  $h_i$ 는 환경하중이 작용하는 시간

(day),  $H_c$ 는 크리프 속도(1/day),  $n$ 은 파랑 분포 표의 셀 개수를 나타낸다.

### 3. 부유체의 운동

#### 3.1 운동해석의 개요

자유수면에 떠 있는 부유체의 운동을 해석하는 방법으로 경계 요소법(boundary element method)을 사용하였으며, 이 방법은 문제의 해석해와 함께 많은 선행 연구 결과가 있어 가장 널리 쓰이고 있는 방법이다. 본 연구에서는 부유체의 경계치 문제를 푸는 프로그램인 Ansys AQWA를 이용하여 거동을 해석하였다.

본 연구에서는 Maritime Research Institute of Netherlands (MARIN)에서 실험을 수행한 Floating Production Storage Offloading(FPSO)을 대상 부유체로 적용하였고, 부유체의 형상과 주요 제원은 Fig. 6, Table 2와 같다.

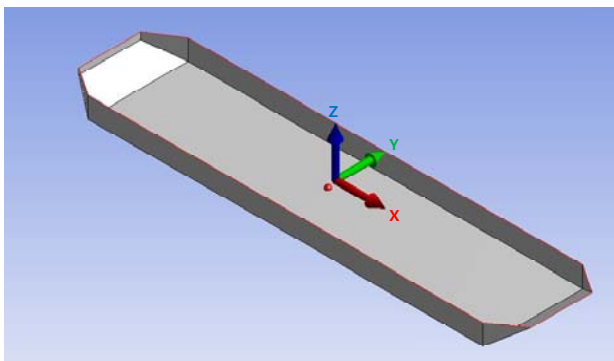


Fig. 6 Geometry of FPSO model

Table 2 Main particulars of MARIN-FPSO

Description	Magnitude
Length between perpendicular	285m
Breadth	61m
Draft	13m
Mass	225518ton
Longitudinal center of gravity	142.26m
Vertical center of gravity	16.71m
Mass radius of gyration in X-axis(Kxx)	19.49m
Mass radius of gyration in Y-axis(Kyy)	78.42m
Mass radius of gyration in Z-axis(Kzz)	71.25m

#### 3.2 운동해석 결과

해당 지역에는 150deg 방향의 파가 지배적으로 분포하고 있으며, 150deg 방향의 운동해석 결과를 Fig.7 에 나타내었다. 계류체가 장착되지 않았기 때문에 매우 낮은 주파수에서의 Surge

운동응답이 가장 크게 나타나며, Pitch의 경우 약 0.42rad/s에서 가장 큰 응답을 나타내고 있다.

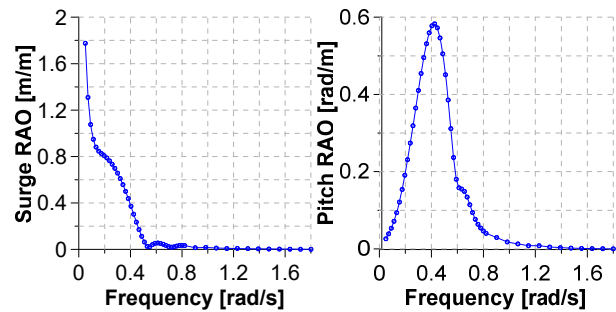


Fig. 7 Motion RAOs of MARIN FPSO

### 4. 환경 조건

#### 4.1 환경 하중

본 연구에서는 브라질의 Campos Basin 해역의 환경조건을 대상으로 개발된 해석과정을 검증하였다 (Zhang, et al., 2013). 이 지역의 수심은 100~2,000m로 다양하게 분포하며, 특히 HMPE 로프가 설치되는 수심에서의 연 평균 수온이 10 ~ 20°C로 분포하고 있기 때문에 온도에 따른 크리프의 차이를 관찰할 수 있다. 이 지역은 유의파고 1~3 m, 주기는 6~12초 그리고 150 deg 방향의 파가 지배적으로 분포하고 있다. 풍하중은 API 스펙트럼을 사용하였고 조류는 이 지역의 수심 별 평균 속도와 방향을 적용하였다. 파랑 분포 표는 2014년 FUGRO의 COPEDI seminar에서 발표한 자료를 사용하였으며, 이 자료는 브라질의 Campos Basin 해역의 환경자료를 10년간 측정된 자료이다. 이와 같은 환경조건들은 아래의 Table 3과 Table 4에 정리되어 있다.

Table 3 Wave scatter diagram of Campos Basin

Hs [m]	Tp [s]								Sum
	4 ~ 6	6 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 12	12 ~ 14	14 ~ 16	16 ~ 18	18 ~ 20	
0~1	8	164	212	78	49	3	0	0	514
1~2	333	1725	2235	2275	826	109	34	1	7538
2~3	40	1330	790	1406	1483	174	50	2	5275
3~4	0	230	105	124	471	118	22	0	1070
4~5	0	9	17	29	69	43	7	0	174
5~6	0	0	2	5	18	10	0	0	35
6~7	0	0	0	0	1	0	0	0	1
7~8	0	0	0	0	1	0	0	0	1
SUM	381	3458	3361	3917	2918	457	113	3	14608

Table 4 Environments data

Description		Condition
Wave JONSWAP spectrum	gamma	1.7
	direction	150°
Wind API spectrum	1 year mean speed at 10 m	5.5 m/s
	direction	150°
Current	current speed at surface	0.35 m/s
	direction	210°

### 4.2 설계조건에서의 환경 하중

대상 해역의 파랑 분포 표에 대한 계류해석을 모두 수행하고 난 후 해당 사이트에서 설계 수명에 대한 실제 변화된 길이와 강성을 계산할 수 있다. 이 변화를 고려하지 않았을 때와 고려하였을 때의 비교를 통해 본 연구에서 크리프의 영향력을 알아보고자 한다. 계류해석의 결과 비교를 위해 해당 사이트의 설계조건에 해당하는 100년 재현주기 해양환경자료에 대해 계류해석을 수행하였고, 이는 Table 5에 나타내었으며, 여기서 gamma는 JONSWAP spectrum peak의 강도를 나타내며, Hs는 유의파고 (significant wave height), Tp는 피크주기(peak period)를 의미한다.

Table 5 Design conditions (Park, 2015)

Description		Condition
Wave JONSWAP spectrum	Hs	7.8m
	Tp	15.4s
	gamma	1.7
	direction	202.5°
Wind API spectrum	mean speed at 10m	28.3m/s
	direction	22.5°
Current	current speed at surface	1.75m/s
	direction	225°

## 5. 계류 해석

### 5.1 계류시스템의 배치

계류 시스템은 선행 연구 자료를 바탕으로 설계하였다 (Leite,

& Boesten, 2011). 이는 브리질에서 MODU를 대상으로 HMPE 로프의 사용이 적합함을 연구하였으므로, 본 연구에서도 동일한 계류 형태를 취하였다. 특히 HMPE 로프는 강성이 매우 크기 때문에 계류선에 작용하는 장력을 줄여주기 위해 일부에서는 Polyester 로프를 사용하는 '하이브리드 계류 시스템'을 적용하였다. 하이브리드 계류 시스템은 두 종류의 섬유로프를 사용하므로, 수심에 따라 섬유로프 길이의 비율을 다르게 해야 한다. 상기 연구에서 제시하는 각 로프들의 비율은 Table 6과 같다.

Table 6 Polyester and HMPE section lengths

Water depth	HMPE rope	Polyester rope
6,000ft (1,829m)	50%	50%
7,500ft (2,286m)	60%	40%
10,000ft (3,048m)	75%	25%

계류선의 구성은 Wire-Polyester-HMPE-Chain으로 이루어져 있다. HMPE 로프는 온도에 민감하여 온도가 높을수록 크리프 속도가 증가하므로 상대적으로 수온이 낮은 해저면 부근에 설치하였으며, polyester는 온도에 민감하지 않기 때문에 수온이 높은 수면 부근에 설치하였다. 또한 계류선의 형태는 Semi-taut이므로 계류선과 해저면의 마찰을 고려 해야 하며, 마찰에 강한 체인을 계류선의 앵커 부분에 설치하였다. 계류선의 길이는 1268 m이고, 총 네 개의 계류선 묶음이 있으며 각 묶음 당 세 개의 계류선이 설치되어있다. 계류선에 작용하는 초기장력은 섬유로프를 사용한 다른 프로젝트의 초기장력을 조사하여(Mad Dog=14% of MBS, Red Hawk=11% of MBS, Octabuoy=13% of MBS, Mirage/Titan=17% of MBS) 그 범위 내에서 적절한 값을 임의로 선정하였고, 본 연구에서 초기장력은 MBS의 13%를 적용하였다. Fig. 8은 계류선의 형상을 나타내었으며, Table 7은 계류시스템의 주요 제원을 나타내었다.

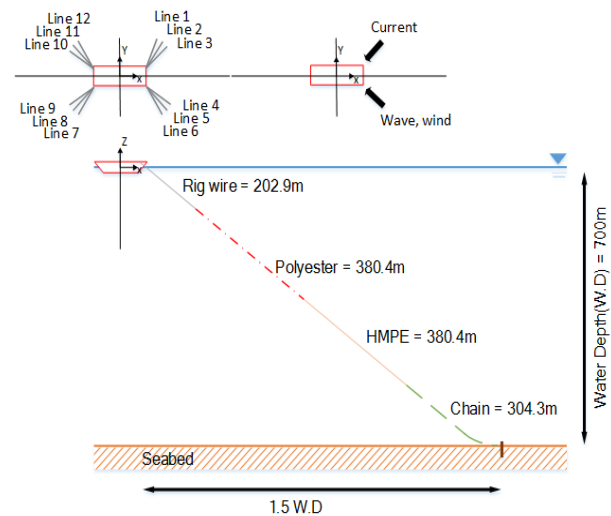


Fig. 8 Configuration of mooring line

Table 7 Main properties of mooring system

	Type	Diameters	MBL	Mass per length
Wire rope	Spiral stand	0.099m	6,208 kN	39.1 kg/m
Polyester		0.117m	6,174 kN	14.9 kg/m
HMPE	SK78, DM20	0.08m	6,174 kN	5.1 kg/m
Chain	RK4 studless	0.078m	6,221 kN	119.5 kg/m

### 5.2 섬유로프의 강성

본 연구에서는 하나의 계류선에 네 가지 다른 종류의 계류선이 사용되었다. Polyester와 HMPE 로프의 강성은 섬유로프 제작 회사인 Lankhorst와 Dyneema에서 실험하여 제공한 강성을 사용하였다. Static-dynamic 강성 모델 관점에서 동적 강성은 태풍 상황에서 가장 큰 강성 값을 가지므로, 동적 강성은 이 상황에서 의 강성을 적용하였다. 이는 Table 8에 정리하였다.

Table 8 Stiffness of synthetic fiber ropes

Stiffness mode	Polyester EA	SK78 EA	DM20 EA
Static	15*MBS	60*MBS	40.3*MBS
Dynamic	30*MBS	105*MBS	60*MBS

### 5.3 해석 케이스

크리프 현상이 부유체의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해, 크리프 현상에 가장 많은 영향을 미치는 변수인 온도, 하중, 시간 세 가지 요소 변화에 대한 영향을 조사하였다. 온도는 브라질 해역의 수온에 따라 10°C와 20°C로 차이를 두었고, 추가로 장시간에 따른 비교를 수행하기 위해 영구적인 계류선에 사용되는 DM20의 크리프 실험자료를 기반으로 (Masblom, et al., 2012), 30년의 설계수명에 대한 영향을 알아보았다. 또한 파랑 분포 표를 반영하기 때문에, 이 표의 셀 적용 순서도 고려해야 한다. 파랑 분포 표를 어떤 순서로 적용하느냐에 따라 크리프 양이 차이가 발생하고 부유체에 미치는 영향도 차이가 발생할 것이다. 이를 알아보기 위해 파랑 분포 표의 적용 순서를 임의로 하는 경우를 추가하였다. 이상 각 해석 케이스들을 Table 9에 나타내었다.

계류해석은 선박의 주요치수와 운동해석 프로그램의 결과로부터 얻어진 유체역학적 특성을 바탕으로 계류해석 프로그램인 OrcaFlex를 사용하여 시간영역에서 수행하였다. 해석 시간은 3 시간이며, 0.1초 간격으로 계산을 수행하였다.

Table 9 Simulation cases

	Condition	Temperature	Cell sequence
Case 1	MODU (5 years)	20°C	random 1
Case 2		20°C	random 2
Case 3		10°C	random 1
Case 4	Permanent (30 years)	20°C	random 1

## 6. 해석 결과

본 결과는 앞서 언급한 해석과정을 기초로 해석을 수행하였으며, 크게 세 가지의 비교를 정리하였다. Case 1과 Case 2의 비교를 통해 파랑 분포 표의 반영 순서에 따른 차이를 비교하였고, Case 3을 통해 온도에 따른 차이 그리고 Case 4를 통해 영구계류 상태에서 크리프의 영향을 살펴보았다. 설계수명이 경과한 후 HMPE 로프의 증가한 길이와 감소한 강성을 크리프가 발생하지 않았을 경우와 먼저 비교하고, 계류선에 작용하는 최대 장력과 부유체의 움직임 중 평면운동인 surge, sway, yaw의 최대 오프셋을 비교하여 위치유지 능력에 미치는 영향을 알아보았다.

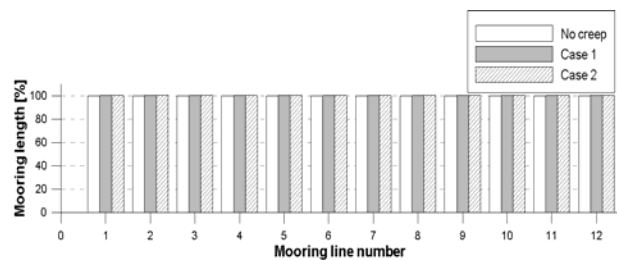


Fig. 9 Change of HMPE rope length (Case 1 and Case 2)

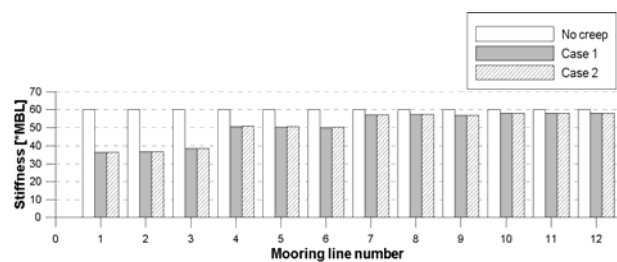


Fig. 10 Change of HMPE rope stiffness (Case 1 and Case 2)

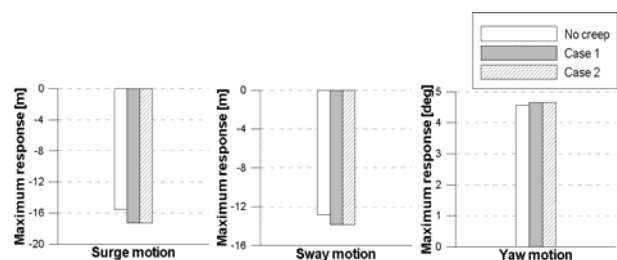


Fig. 11 Maximum vessel offset in the design condition (Case 1 and Case 2)

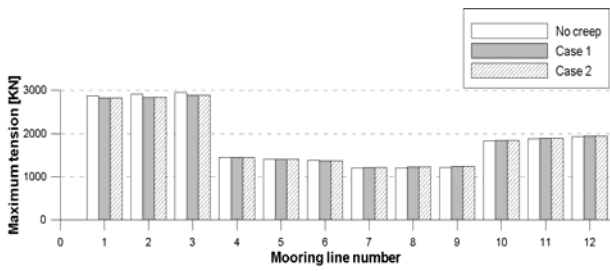


Fig. 12 Maximum tension in the design condition (Case 1 and Case 2)

Fig. 9는 설계수명인 5년이 지난 후 Case 1과 Case 2의 변화한 HMPE 로프의 길이를 나타내고 있으며 그 결과는 두 가지 경우 모두 동일하게 0.2% 증가하였다. Fig. 10은 강성의 변화를 나타내며 두 경우 모두 동일하게 39% 감소하였다. 또한 Fig. 11은 디자인 컨디션에서 크리프가 발생하지 않았을 경우와 비교하여 부유체의 최대 오프셋의 변화를 보여주고 있으며 surge, sway, yaw에서 각각 11%, 7%, 2% 증가하였다. Fig. 12는 설계 조건에서 각 계류선에 작용하는 최대 장력을 나타내며 최대 0.2% 감소하였다. 이 결과로 미루어 보아 20°C에서 5년 이후의 변화는 강성이 가장 크며 이로 인해 오프셋이 변화하였음을 알 수 있다.

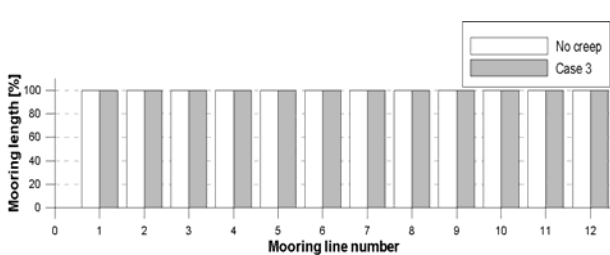


Fig. 13 Change of HMPE rope length (Case 3)

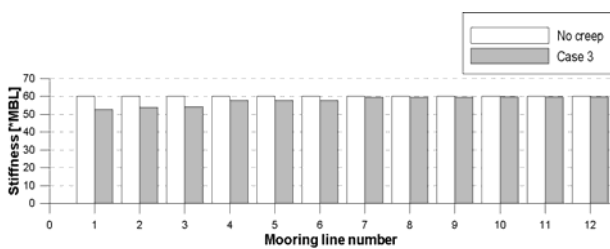


Fig. 14 Change of HMPE rope stiffness (Case 3)

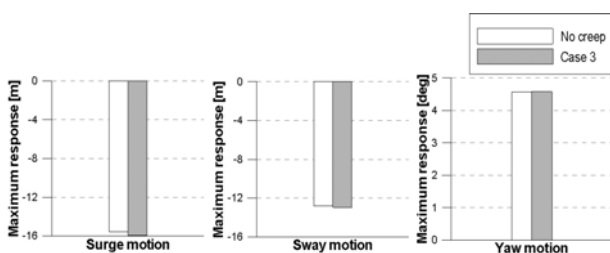


Fig. 15 Maximum vessel offset in the design condition (Case 3)

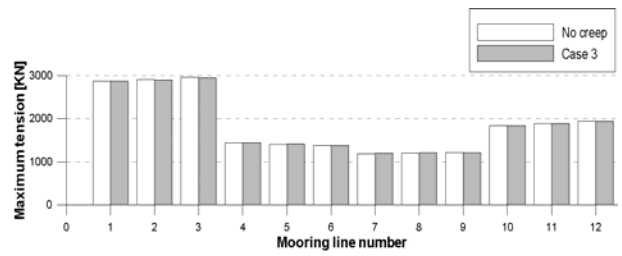


Fig. 16 Maximum tension in the design condition (Case 3)

Case 3번 즉, 온도에 따른 차이를 비교하였을 경우의 결과는 다음과 같다. 로프의 길이는 Fig. 13에서 보여주듯이 수온이 10°C인 경우에서 최대 0.04% 증가하였다. 강성은 최대 13% 감소하였고 이는 Fig. 14에서 보여주고 있다. 온도가 낮은 경우에는 크리프의 양이 미미하므로 디자인 컨디션에서도 부유체의 응답에 미치는 영향이 크지 않아 최대 오프셋은 각각 2%, 1%, 0.5% 증가하였고 최대 장력은 약 0.05% 감소하였다. 이 결과들은 각각 Figs. 15와 16에 나타내었다. 이 결과는 20°C에서의 경우와 비교하였을 때 현저히 낮은 길이와 강성의 변화를 보여주고 있다. 따라서 부유체의 거동과 계류선의 장력에 미치는 영향이 작아 그 변화량이 크지 않았다.

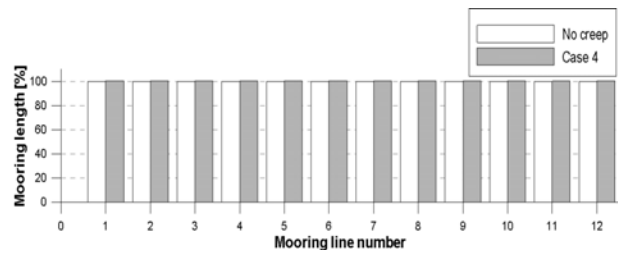


Fig. 17 Change of HMPE rope length (Case 4)

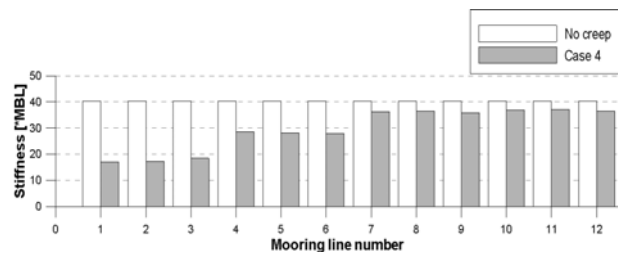


Fig. 18 Change of HMPE rope stiffness (Case 4)

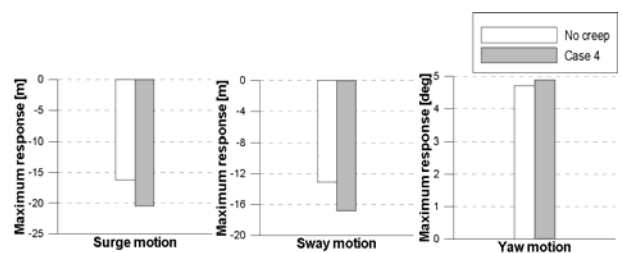


Fig. 19 Maximum vessel offset in the design condition (Case 4)



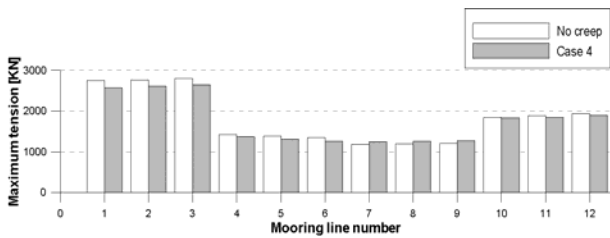


Fig. 20 Maximum tension in the design condition (Case 4)

마지막으로 수온 20°C에서 설계수명 30년에 대한 경우인 Case 4의 결과를 Figs. 17, 18, 19, 20에 나타내었다. Fig. 17, 18에서 보여주듯이 HMPE 로프의 길이는 최대 0.6% 증가하였고 강성은 최대 58% 감소하였다. Fig. 19과 같이 설계조건에서도 부유체의 최대 오프셋은 surge, sway, yaw에서 각각 26%, 28%, 4% 증가하였고 최대 장력은 Fig. 20와 같이 약 6% 감소하였다. Case 4번의 결과는 부유체의 오프셋과 계류선의 장력 변화가 매우 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

이상의 결과를 케이스 별로 정리하면 Tables 10, 11과 같다.

Table 10 Changed length and stiffness

	Condition	Changed length	Changed stiffness
Case 1	MODU (5 years)	+0.2%	-39%
Case 2		+0.2%	-39%
Case 3		+0.04%	-13%
Case 4	Permanent (30 years)	+0.6%	-58%

Table 11 Creep effects on vessel motion and tension of mooring lines

	Condition	Surge	Sway	Yaw	Tension
Case 1	MODU (5 years)	+11%	+7%	+2%	-0.2%
Case 2		+11%	+7%	+2%	-0.2%
Case 3		+2%	+1%	+0.5%	-0.05%
Case 4	Permanent (30 years)	+26%	+28%	+4%	-6%

## 7. 결론

크리프 현상을 고려하여 설계수명이 지난 후 계류선에 작용하는 최대 장력과 부유체의 거동 응답해석을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

먼저 Case 1과 Case 2의 비교를 통해 파랑 분포 표 셀의 해석 순서에 따른 차이를 비교해 본 결과, 셀의 적용순서와 관계없이 길이와 강성의 변화량이 동일하였고 이에 따라 부유체의 최대 오프셋과 계류선에 걸리는 최대 장력도 같았다. 이는 해당 해역에서 발생하는 환경 하중과 설계 수명 그리고 온도의 변화가 없으므로 발생하는 크리프도 변함이 없음을 의미한다. 그러므로 크

리프는 온도, 하중, 시간에 따라 변화하며, 작용하는 하중의 순서와는 관계가 없다는 결론을 도출하였다.

Case 3과 같이 온도가 낮은 경우에는 길이와 강성의 변화가 Case 1에 비해 상대적으로 미미하며 위치유지능력에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Case 4와 같이 온도가 높고 영구계류로서 장기간 HMPE 로프를 사용하는 경우, 길이의 증가와 강성의 감소량이 다른 경우에 비해 매우 크며 위치유지능력에 매우 큰 영향을 미쳐 부유체의 오프셋이 가장 많이 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 온도가 낮고 설계수명이 짧은 경우 크리프의 양과 위치유지 능력에 미치는 영향은 미미하지만, 온도가 높고 설계수명이 영구적인 경우는 크리프의 양과 영향은 무시할 수 없으므로, 계류 설계 시 이를 반드시 고려해야 한다. 그리고 길이의 변화율에 비해 강성의 변화율이 매우 크기 때문에 설계 시 크리프에 의한 강성의 변화는 반드시 고려되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 산업통산자원부 산업기술혁신사업 (과제번호:10063405) “위치유지와 계류 시스템을 적용하여 ARC7 조건에서 연중운용이 가능한 북극해 기반 부유식 해양구조물 형상 개발”과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

## References

- ABS, 2010. *Polyester rope stiffness modeling, testing, and analysis. Joint industry project phase 1 report no. TR-2010-03*. ABS Plaza, Houston.
- ABS, 2011. *The application of fiber rope for offshore mooring*. ABS Plaza, Houston.
- API, 2007. *Recommended practice 2SM*. American Petroleum Institute(API): USA.
- Banfield, S.J., 2006. Durability of polyester ropes used as deepwater mooring lines. *OCEANS 2006*, IEEE, Singapore, 16-19 May 2006, pp.1-5.
- Del Vecchio, C.J.M., 1992. *Light weight materials for deep water moorings*. PhD Thesis. University of Reading.
- Francois, M. & Davies, P., 2000. Fiber rope deep water mooring: a practical model for the analysis of polyester mooring system. *Rio Oil and Gas Conference, IBP24700*, Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2000, pp.1-10
- Leite, S. & Boesten, J., 2011. HMPE mooring lines for deepwater MODUs. *Offshore Technology Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 4-6 October 2011, pp.1-9.

NDE & TTI, 1999. *Engineers design guide for deepwater fibre moorings. Joint industry study report No L17739-Rev.F/DNE/RWPS*. London: Oilfield Publication.

Park, S.B., 2015. *Study on spread mooring layout under ocean environmental loads for FPSO*. Master's degree thesis, Pusan National University.

Vlasblom, M.P. & Bosman, R.L.M., 2006. Predicting the creep lifetime of HMPE mooring rope applications. *OCEANS 2006, IEEE*, Singapore, 16-19 May 2006, pp.1-10.

Vlasblom, M.P. Boesten, J. Leite, S. & Davies, P., 2012. Development of HMPE fiber for permanent deepwater offshore mooring. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, 30 April-3 May 2012, pp.1-15

Yongjun, C. Yan, Q. & Tianyu, Z., 2013. Polyester mooring stiffness modeling for deepwater floating system. *Engineering Sciences*, 4, pp.1-7.

Zhang, W. Jeong, C. & Spreeken, A. V., 2013. Float-over feasibility in brazilian sea water. *Offshore Technology Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 29-31 October 2013, pp.1-10.

