



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 섬유로프 계류시스템의 크리프 효과에 관한 연구

The effects of creep phenomenon in the mooring system with  
synthetic fiber rope



지도교수 이 승 재

2017년 02월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

박 성 민

본 논문을 박성민의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 조 효 제 (인)

위 원 공학박사 이 승 재 (인)

위 원 공학박사 이 성 욱 (인)

2017년 02월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vi

## 1. 서 론

1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구동향 .....	2
1.3 연구내용 .....	3

## 2. 섬유로프의 특징

2.1 The creep phenomenon .....	4
2.2 Static-dynamic stiffness model .....	8
2.3 Upper-lower stiffness model .....	9
2.4 Quasi-static stiffness .....	11
2.5 Analysis procedure .....	12

## 3. Environments condition

3.1 Environments load .....	15
3.2 Design condition .....	18

## 4. Mooring analysis

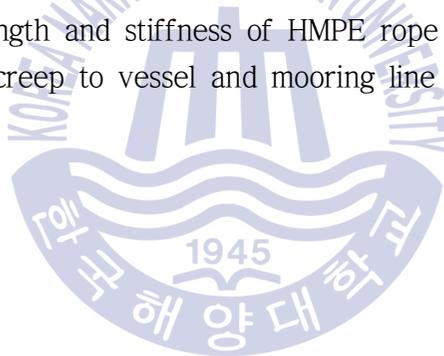
4.1 Mooring layout .....	19
4.2 Mooring stiffness .....	22
4.3 Simulation case .....	24

<b>5. Analysis results</b>	
5.1 Case 1 and Case 2 .....	26
5.2 Case 3 .....	30
5.3 Case 4 .....	33
5.4 Case 5 .....	36
5.5 Case 6 .....	39
5.6 Case 7 .....	42
<b>6. 결론</b> .....	<b>47</b>
<b>Reference</b> .....	<b>49</b>



## List of Tables

Table 2.1	Creep model expectations for HMPE fiber types .....	6
Table 3.1	Wave scatter diagram .....	17
Table 3.2	Environments data .....	17
Table 3.3	Design conditions .....	18
Table 4.1	Polyester and HMPE section lengths .....	19
Table 4.2	Stiffness of synthetic fiber ropes for static-dynamic stiffness ·	22
Table 4.3	Stiffness of synthetic fiber ropes for upper-lower stiffness .....	22
Table 4.4	Main properties of mooring system .....	23
Table 4.5	Simulation cases .....	24
Table 5.1	Changed length and stiffness of HMPE rope .....	45
Table 5.2	Effects of creep to vessel and mooring line .....	45



## List of Figures

Fig. 1.1 Mooring configuration and line type .....	2
Fig. 2.1 Typical estimate of creep .....	4
Fig. 2.2 HMPE rope creep curve .....	5
Fig. 2.3 Creep rate model test .....	7
Fig. 2.4 Upper-lower stiffness model .....	9
Fig. 2.5 Illustration of quasi-static stiffness .....	11
Fig. 2.6 Synthetic fiber rope mooring analysis procedure including creep phenomenon in the static-dynamic stiffness model .....	13
Fig. 2.7 Synthetic fiber rope mooring analysis procedure including creep phenomenon in the upper-lower stiffness model .....	14
Fig. 3.1 Campos Basin in the Brazil .....	15
Fig. 3.2 Water temperature in the Campos Basin .....	16
Fig. 4.1 Configuration of mooring line .....	20
Fig. 4.2 Mooring line numbering and Environments direction .....	21
Fig. 5.1 Change of HMPE rope length (Case 1 and Case 2) .....	26
Fig. 5.2 Change of HMPE rope stiffness (Case 1 and Case 2) .....	26
Fig. 5.3 Change of Mooring line pretension (Case 1 and Case 2) .....	27
Fig. 5.4 Change of HMPE rope length according to the diagram cell sequence .....	27
Fig. 5.5 Change of HMPE rope stiffness according to the diagram cell sequence .....	28
Fig. 5.6 Maximum vessel offset in the design condition (Case 1 and Case 2)	28
Fig. 5.7 Maximum tension in the design condition (Case 1 and Case 2) ..	29
Fig. 5.8 Change of HMPE rope length (Case 3) .....	30
Fig. 5.9 Change of HMPE rope stiffness (Case 3) .....	30
Fig. 5.10 Change of Mooring line pretension (Case 3) .....	31
Fig. 5.11 Maximum vessel offset in the design condition (Case 3) .....	31
Fig. 5.12 Maximum tension in the design condition (Case 3) .....	31
Fig. 5.13 Change of HMPE rope length (Case 4) .....	33

Fig. 5.14	Change of HMPE rope stiffness (Case 4) .....	33
Fig. 5.15	Change of Mooring line pretension (Case 4) .....	34
Fig. 5.16	Maximum vessel offset in the design condition (Case 4) .....	34
Fig. 5.17	Maximum tension in the design condition (Case 4) .....	34
Fig. 5.18	Change of HMPE rope length (Case 5) .....	36
Fig. 5.19	Change of HMPE rope stiffness (Case 5) .....	36
Fig. 5.20	Change of Mooring line pretension (Case 5) .....	37
Fig. 5.21	Maximum vessel offset in the design condition (Case 5) .....	37
Fig. 5.22	Maximum tension in the design condition (Case 5) .....	37
Fig. 5.23	Change of HMPE rope length (Case 6) .....	39
Fig. 5.24	Change of HMPE rope stiffness (Case 6) .....	39
Fig. 5.25	Change of Mooring line pretension (Case 6) .....	40
Fig. 5.26	Maximum vessel offset in the design condition (Case 6) .....	40
Fig. 5.27	Maximum tension in the design condition (Case 6) .....	40
Fig. 5.28	Change of HMPE rope length (Case 7) .....	42
Fig. 5.29	Change of HMPE rope stiffness (Case 7) .....	42
Fig. 5.30	Change of Mooring line pretension (Case 7) .....	43
Fig. 5.31	Maximum vessel offset in the design condition (Case 7) .....	43
Fig. 5.32	Maximum tension in the design condition (Case 7) .....	43
Fig. 5.33	Comparison of results in the different stiffness model (No creep)	

# The effects of creep phenomenon in the mooring system with synthetic fiber rope

Park, Sung Min

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

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. Designed 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.

**KEY WORDS:** 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; Upper-lower stiffness model 상-하 경계 강성 모델; Curve fitting 곡선 맞춤.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

육상자원 및 연안 지역 석유와 가스자원의 고갈로 인해 최근 해양플랜트산업은 심해유전 개발에 박차를 가하고 있다. 해양플랜트는 라이저에 가해지는 충격을 최소화하기 위해 정확한 위치유지가 필요하며 이와 관련된 연구가 많이 진행되었다. 현재 위치유지를 위한 장비로는 크게 계류선과 동적 위치유지 시스템(Dynamic Positioning System) 두 가지 방법이 사용된다. 수심이 낮은 천해에서는 계류선이 체인으로만 되어있어도 문제가 없었다. 하지만 심해로 가면 계류선의 길이가 증가하게 되고, 체인의 자중이 커짐으로 인해 해양구조물의 부력과 계류선의 장력이 정적 평형상태를 유지할 수 없는 문제가 발생한다. 이러한 이유로 심해에서 계류선의 구성은 체인과 섬유로프를 함께 사용하고 있다.

Fig. 1.1은 수심에 따라 현재 해양플랜트에서 사용하는 계류의 형태와 재질을 보여주고 있다. Fig. 1.1에서 나타내는 Catenary 계류는 현수선 형상을 갖는 계류선을 의미하며, 주로 체인과 와이어로 구성되어 있다. 그리고 Taut-leg 계류는 해양 구조물과 해저 사이의 계류선이 팽팽하게 긴장되어있는 상태를 말하며, 각 해역의 특징에 따라 섬유로프는 체인, 와이어와 함께 혼용하여 사용되고 있다.

섬유로프를 계류선으로 사용할 경우, 체인에서는 볼 수 없었던 또 다른 파단 원인과 섬유로프의 비선형 강성에 의한 문제가 발생한다. 이러한 섬유로프의 특징은 향후 섬유로프를 계류시스템으로 사용하는 해양플랜트에 어떤 영향을 미치는지 알아보고자 본 연구를 진행하였다.

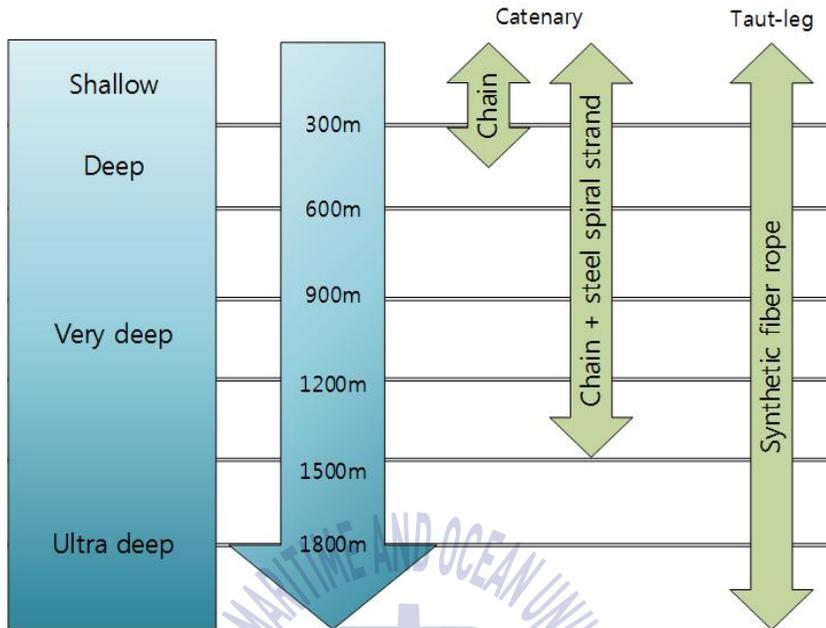


Fig. 1.1 Mooring configuration and line type (출처: BRIDON)

## 1.2 연구 동향

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 설계수명이 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 발생 하더라도 파단을 일으킬 만큼 치명적이지는 않다(Banfield, S. J., 2006). 하지만 HMPE 로프는 크리프 현상이 가장 많이 발생하는 재료이며 파단현상까지 야기할 수 있다. 이 문제를 해결하여 장기간 해양플랜트의 계류시스템으로 사용하고자 최근에는 크리프 문제를 개선한 HMPE 로프가 개발되었으며 크리프 실험을 통해 성능을 검증하고 있다(Vlasblom, M.P. & Bosman, R.L.M., 2006).

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

### 1.3 연구내용

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 wave scatter diagram을 반영해야한다. 따라서 wave scatter diagram과 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 계류시스템의 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.

## 제 2 장 섬유로프의 특징

### 2.1 The creep phenomenon

크리프 현상은 로프가 장시간 인장 하중을 받을 때, 섬유로프의 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. 2.1은 같은 파단 강도를 가질 때 파단 응력의 30% 하중 하에서 각 섬유로프의 종류별 크리프 발생량을 보여주고 있다.

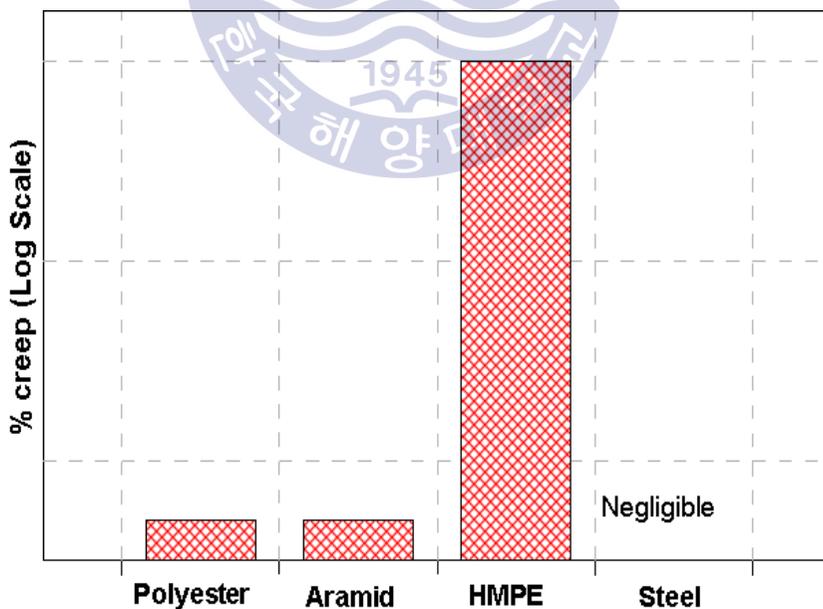


Fig. 2.1 Typical estimate of creep (출처: NDE & TTI, 1999)

크리프 현상은 Fig. 2.2에 나타난 바와 같이 모두 세 단계를 거쳐 과단에 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 늘어진 상태로 남아있는 비가역반응이 발생한다. 마지막 3번 구간에서는 HMPE의 네킹(necking) 현상과 함께 과단이 발생하게 된다. 이와 같은 현상들의 발생시기와 양상은 HMPE의 종류, 하중, 온도에 따라 상이하게 발생하므로 엄밀한 실험을 통해 크리프의 양을 판별해야 한다 (Vlasblom, M.P. & Bosman, R.L.M., 2006).

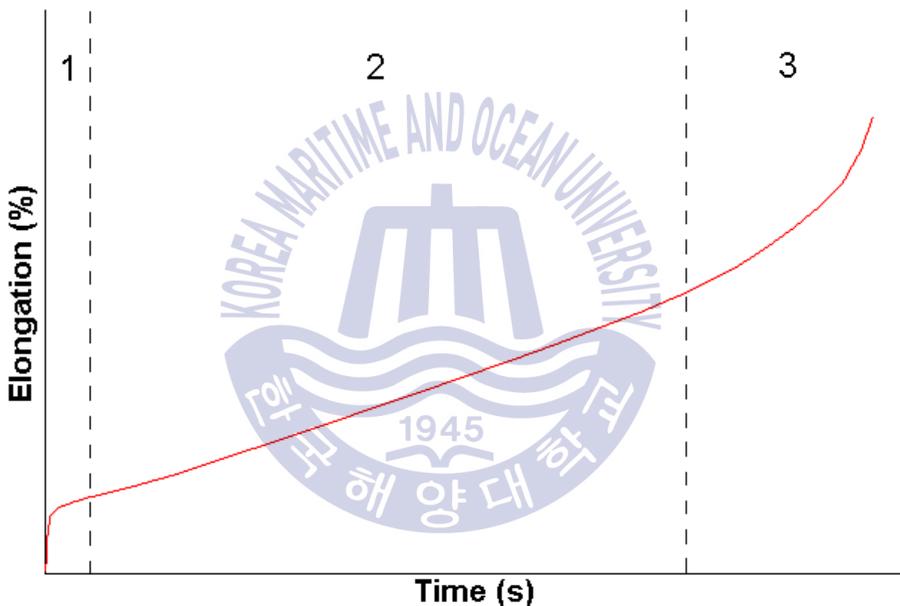


Fig. 2.2 HMPE rope creep curve (출처: Vlasblom, M.P. & Bosman, R.L.M., 2006)

DSM dyneema는 해양플랜트 계류에 사용하기 위해 HMPE 로프의 크리프 발생량을 개선한 Mobile Offshore Drilling Unit(MODU)용 SK78과 영구 계류용 DM20을 차례로 개발하였다. 본 연구에서는 DSM dyneema에서 개발한 SK78과 DM20이 사용되었으며, 실험에 따른 HMPE 로프의 크리프 특성은 Table 2.1에 나타내었다.

**Table 2.1** Creep model expectations for HMPE fiber types (출처: Vlasblom, M.P. Boesten, J. Leite, S. & Davies, P., 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

Table 2.1은 DSM Dyneema가 개발한 SK78과 DM20 로프가 각각 MODU플랫폼과 생산플랫폼의 설계수명에 해당하는 5년과 25년의 수명동안 파단 강도 (breaking strength)의 20%에 해당하는 장력을 받을 때 예상하는 크리프의 양을 나타내고 있다. Failure는 크리프 파단이 발생하였음을 의미하며 SK78 로프가 25년 이상 장력을 받을 경우에 나타나고 있다.

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 크리프는 비선형적으로 발생하기 때문에 예측하기가 매우 어려우므로 본 연구에서는 SK78과 DM20 로프의 각 온도에 따른 하중 별 크리프 속도 실험 자료를 바탕으로 곡선 맞춤(curve fitting)하여 사용하였다. 크리프 실험 결과에 대한 그래프는 Fig. 2.3과 같으며 여기서 가로축은 하중을 뜻하고 세로축은 그 하중이 작

용하였을 때 시간에 따른 크리프 속도를 의미한다.

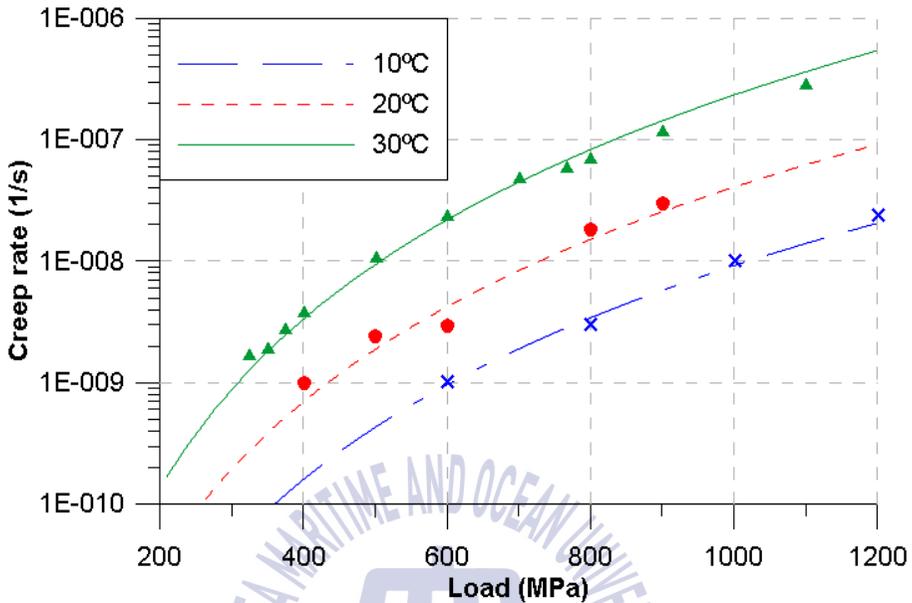


Fig. 2.3 Creep rate model test (출처: ABS, 2011)

이 그래프는 높은 온도일수록 더 큰 크리프 속도를 보인다. ABS (2011)에서 제시한 크리프의 양을 산정하는 식 (1)은 Fig. 2.3의 30°C 곡선을 curve fitting 하여 나타낸 것이다. 하지만 본 연구에서는 더 정확한 계산을 위해 섬유로프가 설치되는 수심에서의 수온 변화에 대응할 수 있도록 10, 20°C의 곡선을 curve fitting 하여 크리프의 양을 산정하였고 그 결과는 식(2), (3)과 같다.

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

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

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

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 Static-dynamic stiffness model

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. 섬유로프의 비선형 강성 모델 중 Static-dynamic stiffness model(Francois, M. & Davies, P., 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 섬유로프에 걸리는 평균 장력을 구하기 위한 강성이며, 동적 강성은 주기성을 가진 장력의 변화를 나타내기 위한 강성이다. 동적 강성은 반복하중 하에서 평균 하중, 하중의 진폭 그리고 하중의 주기들로 표현되며(Del Vecchio, C. J. M., 1992) 이는 식 (4)와 같다.

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

이 때  $K_{rd}$ 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 사용할 경우 세 가지 변수의 조합에 의해 무수히 많은 동적강성이 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.

여기서, 정적 강성은 주기성 없이 일정하게 가해지는 하중에 대한 부유체의 평균 오프셋과 계류선의 평균 장력을 계산하기 위한 강성이고, 동적 강성은 주기적인 하중에 대한 동적인 부유체의 오프셋과 계류선의 장력을 계산하기 위한 강성이다.

### 2.3 Upper-lower stiffness model

섬유로프의 강성 특징을 표현하는 다른 모델로는 upper-lower stiffness model(NDE & TTI, 1999)이 사용된다. Static-dynamic stiffness model은 프랑스의 BV(Bureau Veritas) 선급이 선호하는 모델이지만 upper-lower stiffness model은 API(American Petroleum Institute)에서 선호하는 모델이다.

이 모델은 섬유로프의 두 가지 강성으로 섬유로프 계류시스템의 global performance를 해석하는 방법인데, upper stiffness와 lower stiffness가 두 가지 강성에 해당한다. Upper stiffness는 dynamic stiffness의 한 종류로서 design storm condition 하에서 예상되는 섬유로프의 최대 동정강성을 의미하며, storm stiffness와 동일한 의미를 가진다. Lower stiffness는 static stiffness의 한 종류로서 해상에서 계류시스템이 설치된 직후에 예상되는 섬유로프의 최소 정적 강성을 의미하며, post-installation stiffness와 동일한 의미를 가진다. Fig. 2.4는 Upper-lower stiffness model을 나타내고 있다.

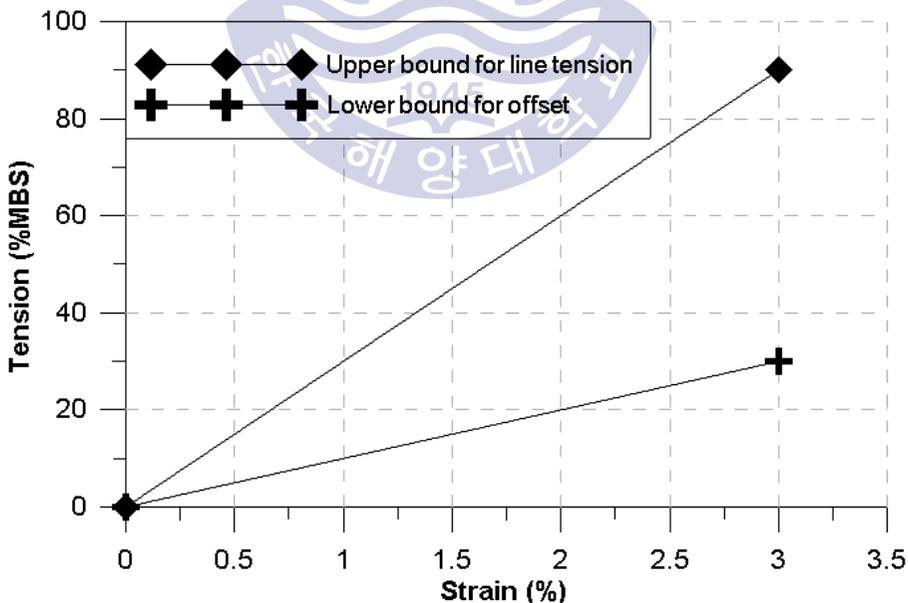


Fig. 2.4 Upper-lower stiffness model

Fig. 2.4에는 두 기울기가 존재하는데, 이 기울기는 섬유로프의 강성을 의미한

다. 두 기울기는 섬유로프가 가지는 모든 강성의 범위 중에서 최대 기울기와 최소 기울기를 나타내고 있다. 여기서 최대 기울기를 나타내는 upper stiffness는 계류선에 작용하는 최대 장력을 구하기 위해 사용하고, 최소 기울기를 나타내는 lower stiffness는 동일한 환경조건 하에서 부유체의 최대 오프셋을 구하기 위해 사용한다. 이 모델은 현재 해양플랜트 산업에서 가장 널리 쓰이는 모델이며 상용 소프트웨어(commercial software)로 해석하기 편리하다는 장점이 있다. 하지만 이 모델을 사용한 시뮬레이션의 결과는 최대, 최소 강성을 사용하여 도출된 최대 장력과 최대 오프셋이므로 매우 보수적인(conservative) 결과를 초래할 수 있으므로 주의해야 한다.



## 2.4 Quasi-static stiffness

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. 2.5에 도식화 하였다.

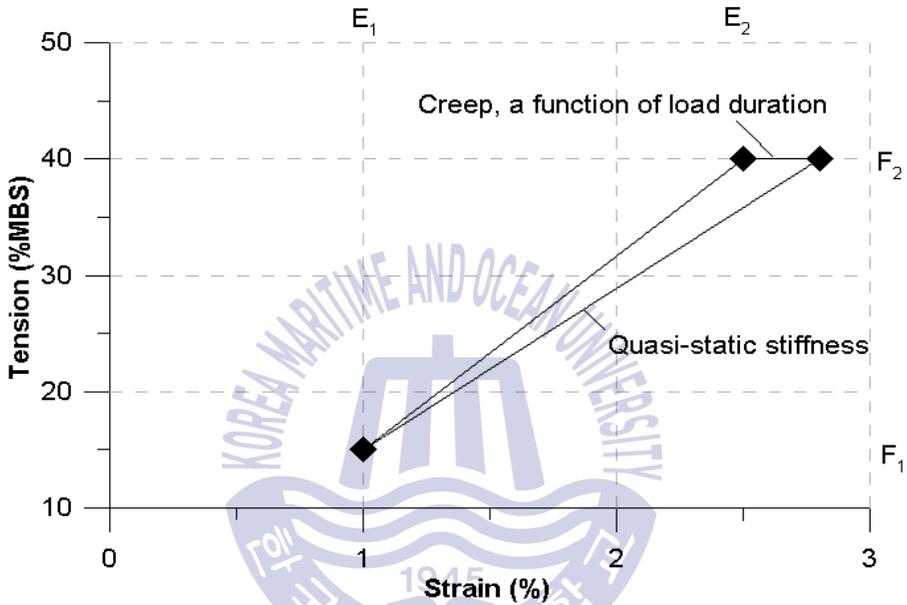


Fig. 2.5 Illustration of quasi-static stiffness (ABS, 2011)

만약 섬유로프가 오랜 시간 동안 장력  $F_2$ 를 받으면 영구적인 연신율의 증가인 크리프가 발생하게 되고 그에 따라 새로운 기울기가 발생하게 된다. 식 (5)와 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(%), C는 크리프의 양을 나타내는 계수이며, t는 환경 하중이 걸리는 시간(day)을 의미한다.

## 2.5 Analysis procedure

본 연구에서는 섬유로프의 강성을 표현하기 위해 Static-dynamic stiffness model과 upper-lower stiffness model을 도입하였고, 이와 함께 크리프 현상도 함께 고려해야 하므로 새로운 해석 절차가 필요하였다. Static-dynamic stiffness model은 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 설계조건을 만족하기 위해서는 계류선의 길이조절을 통해 동일한 초기 장력을 갖도록 한다. 마지막으로 두 결과를 결합하여 최대 응답을 구하는 것이 일반적인 방법이다 (Yongjun, C. Yan, Q. & Tianyu, Z., 2013).

Upper-lower stiffness model도 마찬가지로 upper stiffness와 lower stiffness로 두 번의 해석 과정이 필요하다. 해석과정은 동일한 해상 상태에서 upper stiffness 적용하여 각 계류선에 작용하는 최대 장력을 구고 lower stiffness를 적용하여 부유체의 최대 오프셋을 구한다. static-dynamic stiffness model과 마찬가지로 두 강성의 차이로 인해 다른 초기장력을 갖게 되므로 동일한 초기 장력은 갖는 설계조건을 만족하기 위해서는 계류선의 길이조절을 통해 동일한 초기 장력을 갖도록 한다.

이 과정은 섬유로프 계류시스템의 일반적인 해석 방법이지만 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.

크리프 효과를 고려한 static-dynamic stiffness model의 해석 과정은 Fig. 2.6에 도식화 하였고, upper-lower stiffness model의 해석과정은 Fig. 2.7에 도식화 하였다.

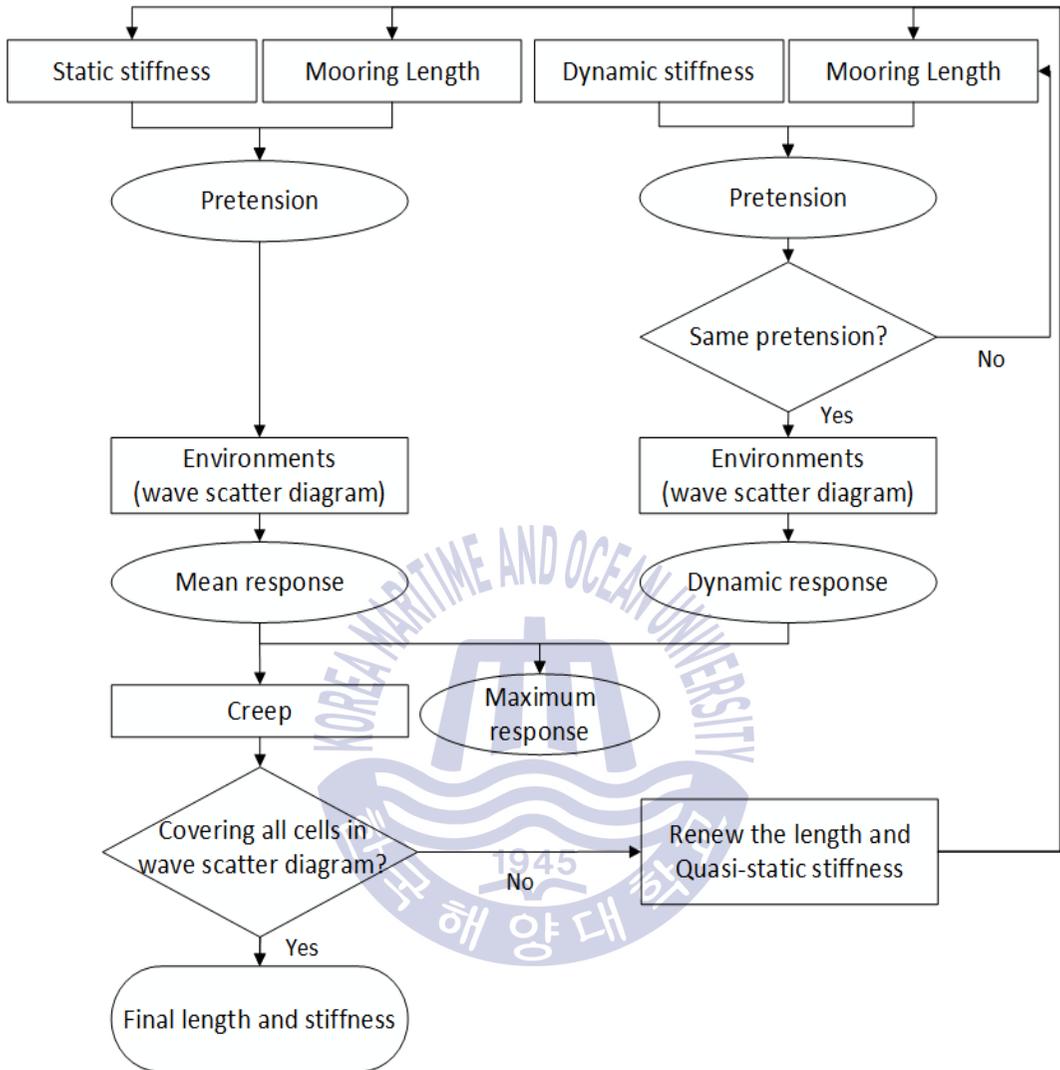


Fig. 2.6 Synthetic fiber rope mooring analysis procedure including creep phenomenon in the static-dynamic stiffness model

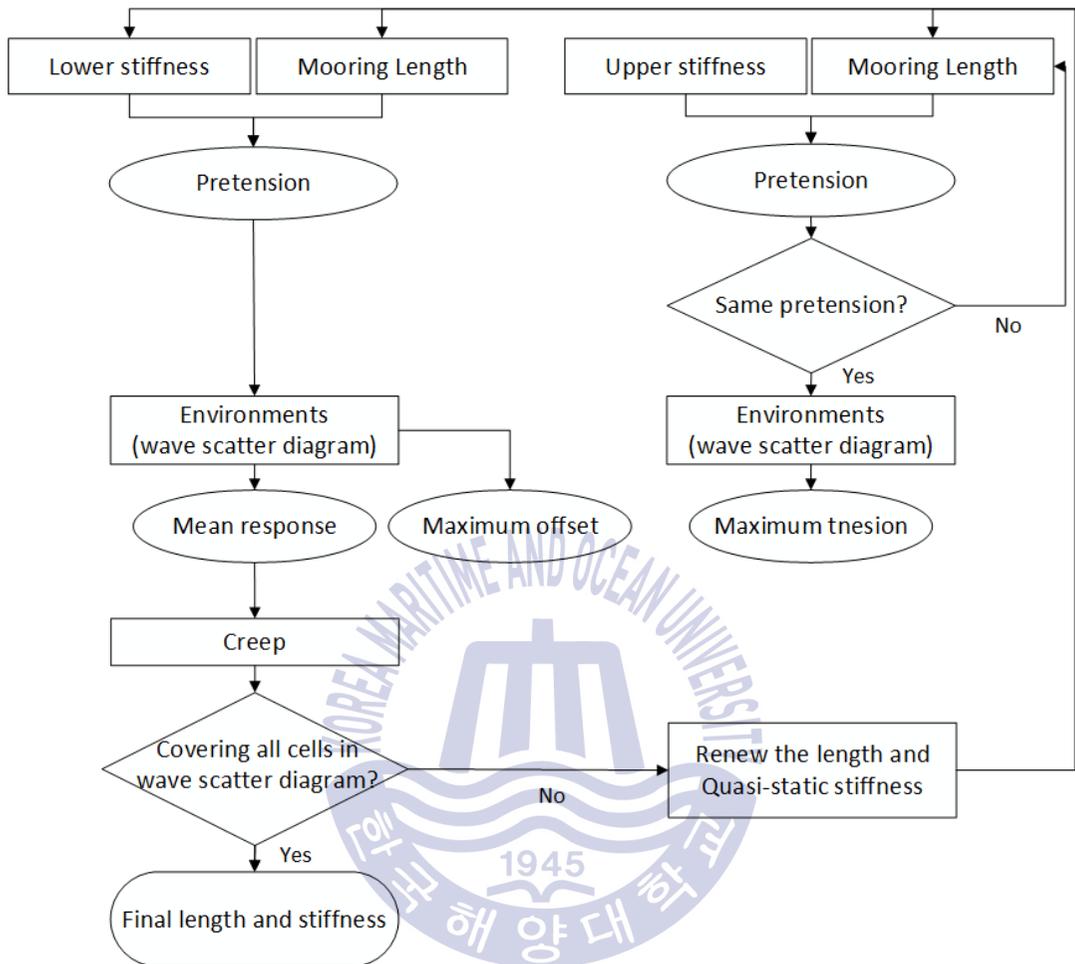


Fig. 2.7 Synthetic fiber rope mooring analysis procedure including creep phenomenon in the upper-lower stiffness model

Fig. 2.6과 2.7의 절차에 따라 해당 사이트의 설계수명에 대응하는 wave scatter diagram에 대한 해석이 끝나게 되면 설계수명에 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),  $H_i$ 는 크리프 속도(1/day),  $n$ 은 wave scatter diagram의 셀 개수를 나타낸다.

## 제 3 장 Environments condition

### 3.1 Environments load

본 연구에서는 브라질의 Campos 해역의 환경조건을 대상으로 개발된 해석과정을 검증하였다(Zhang, W. Jeong, C. & Spreeken, A. V., 2013). Fig. 3.1은 Campos Basin의 위치를 나타내고 있으며 이 해역의 수심은 100~2,000m로 다양하게 분포한다.



Fig. 3.1 Campos Basin in the Brazil

Fig. 3.2는 Campos 해역의 수심에 따른 연 평균 수온의 분포를 나타내고 있다. 특히 본 연구에서는 HMPE 로프가 설치되는 수심이 350m 부근인데, 이 수심에서의 연 평균 수온은 급격하게 변화하고 있다. 따라서 온도에 따른 크립의 차이를 관찰할 수 있다고 판단하여 이 해역을 대상으로 하였다.

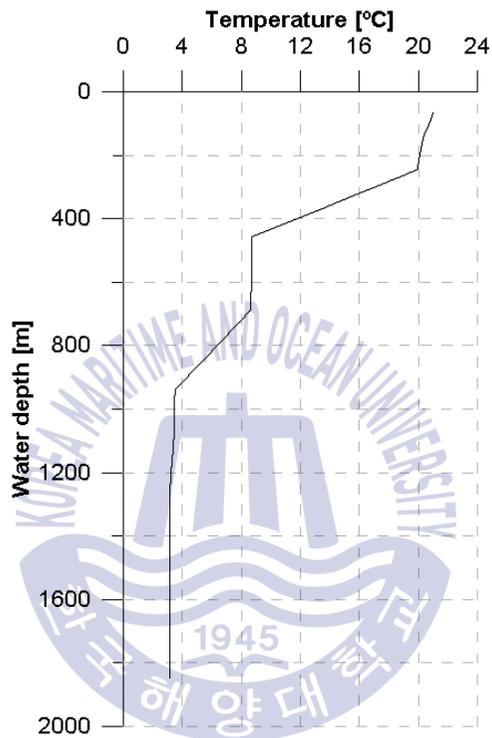


Fig. 3.2 Water temperature in the Campos Basin

이 해역은 유의파고 1~3m, 주기는 6~12초 그리고 150deg 방향의 wave가 지배적으로 분포하고 있다. Table 3.1은 10년간 측정된 데이터를 wave scatter diagram으로 나타내었으며 셀의 색이 녹색에서 붉은색으로 갈수록 발생 빈도가 높음을 나타낸다.

Wind는 API spectrum을 사용하였고 current는 이 해역의 수심 별 평균 속도와 방향을 적용하였다. 이와 같은 환경조건들은 Table 3.2에 정리되어 있다.

**Table 3.1** Wave scatter diagram

Hs [m]	Tp [s]								Sum
	4	6	8	10	12	14	16	18	
	~ 6	~ 8	~ 10	~ 12	~ 14	~ 16	~ 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 3.2** Environments data

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

### 3.2 Design condition

대상 해역의 wave scatter diagram에 대한 계류해석을 모두 수행하고 난 후 해당 사이트에서 설계수명에 대한 실제 변화된 길이와 강성을 계산할 수 있다. 설계조건(design condition)에서 크리프와 강성 변화를 고려하지 않았을 때와 고려하였을 때의 계류선에 작용하는 최대 장력과 부유체의 최대 오프셋의 비교를 통해 본 연구에서 크리프의 영향력을 알아보하고자 한다.

크리프 효과가 계류해석에 미치는 영향을 알아보기 위해 브라질의 campos 해역의 100년 재현 주기 설계조건을 바탕으로 시뮬레이션을 수행 하였고, 이는 Table 3.3에 나타나 있다.

Table 3.3 Design conditions

	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°

## 제 4 장 Mooring Layout

### 4.1 Mooring layout

계류시스템의 설계는 선행 연구 자료를 바탕으로 설계하였다(Leite, S. & Boesten, J., 2011). 이는 브라질에서 MODU를 대상으로 HMPE 로프의 사용이 적합함을 연구하였으므로, 본 연구에서도 동일한 계류 형태를 취하였다. 특히 HMPE 로프는 다른 섬유로프에 비해 강성이 매우 크다는 특징이 있다. 따라서 수심이 깊은 경우에서 HMPE 로프만 사용 할 경우 계류선에 작용하는 장력이 로프의 MBS(Minimum Breaking Strength)을 넘어 파단이 발생하게 된다. Leite, S. & Boesten, J.(2011)는 이 문제를 해결하기 위해 계류선의 일부분에서 polyester 로프를 사용하는 ‘하이브리드 계류시스템’을 적용하였다. 하이브리드 계류시스템은 Polyester 로프와 HMPE 로프를 사용하므로, 수심에 따라 섬유 로프 길이 비율을 다르게 해야 한다. 상기 연구에서 제시하는 각 로프들의 비율은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 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%

HMPE 로프는 온도에 민감하여 수온이 높을수록 크리프 속도가 증가하므로 상대적으로 수온이 낮은 seabed 부근에 설치해야 하며, polyester 로프는 크리프의 발생이 매우 미미하고, 온도에 민감하지 않기 때문에 수온이 높은 수면 부근에 설치하였다.

계류선은 spiral stand wire - Polyester rope - HMPE rope - Chain으로 구성되어 있다. 계류선의 길이는 총 1268m이고, Foot print radius는 일반적인 Taut-leg 계류시스템이 사용하는 수심의 1.5배를 취하였다. 해저지형구조는 평평한 해저면으로 가정한다. Fig. 4.1은 이와 같은 계류선들의 형상을 설명하고 있다.

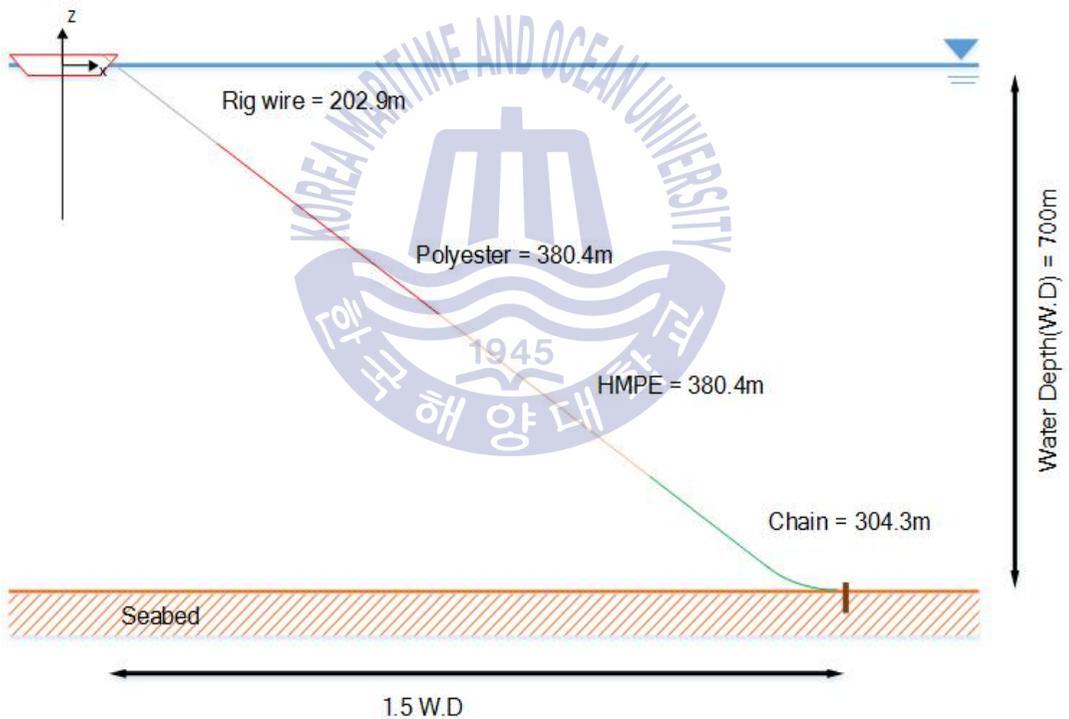


Fig. 4.1 Configuration of mooring line

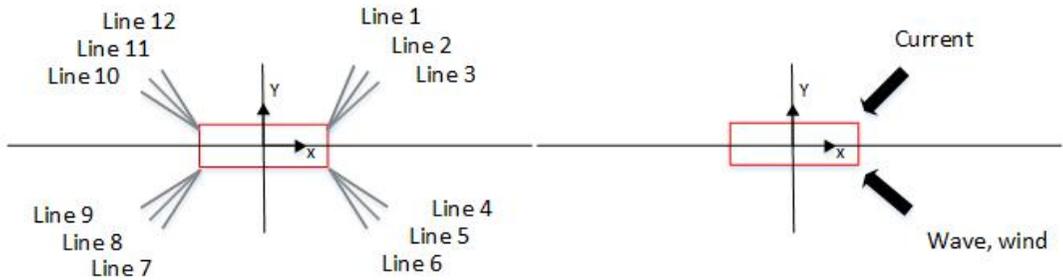


Fig. 4.2 Mooring line numbering and Environments direction

계류선은 총 네 개의 계류선묶음이 있으며 각 묶음 당 세 개의 계류선이 설치되어있다. 계류선의 라벨은 line 1번을 중심으로 시계방향으로 취하였다. 부유체와 계류선이 이루는 각도( $\alpha$ , Out Bundle Angle)와 계류선 사이의 각도( $\beta$ , Inner Bundle Angle)는 계류선에 걸리는 장력의 관점에서 최적의 각도를 연구한 바 있으며 본 연구에서는 각각  $2^\circ$  와  $60^\circ$  를 사용하였다(박성부, 2015).



## 4.2 Mooring stiffness

본 연구에서는 하나의 계류선에 네 가지 다른 종류의 계류선이 사용되었다. Polyester와 HMPE 로프의 강성은 섬유로프 제작회사인 Lankhorst와 DSM dyneema에서 실험하여 제공한 강성을 사용하였다. Static-dynamic stiffness model 관점에서 동적 강성은 storm condition에서 가장 큰 강성 값을 가지므로, 동적 강성은 이 조건에서의 강성을 적용하였다. 이는 Table 4.2에 정리하였다.

**Table 4.2** Stiffness of synthetic fiber ropes for static-dynamic stiffness

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

또한, upper-lower stiffness model의 관점에서 upper stiffness는 storm stiffness 이므로 static stiffness에서 사용한 동적 강성과 동일한 강성을 사용하였고, lower stiffness는 NDE & TTI(1999)에서 제시하는 강성을 사용하였다. 이를 정리하면 Table 4.3과 같다.

**Table 4.3** Stiffness of synthetic fiber ropes for upper-lower stiffness

Stiffness mode	HMPE rope
Upper stiffness	105*MBS
Lower stiffness	35*MBS

본 연구에 사용된 계류시스템의 주요 제원은 Table 4.4에 나타내었다.

**Table 4.4** Main properties of mooring system

Description	Magnitude
Pretension	13% of MBS
Number of lines	4 × 3
Length of mooring line	1268 m
Segment1(top section)	Rig wire
Length	202.9 m
Nominal Diameter	0.099 m
Mass per length in air	39.1 kg/m
Axial Stiffness	395,960 kN
Minimum Breaking Strength(MBS)	6,208 kN
Segment2	Polyester
Length	380.4 m
Diameter	0.117 m
Mass per length in air	14.9 kg/m
Minimum Breaking Strength(MBS)	6,174 kN
Segment3	HMPE
Length	380.4 m
Diameter	0.08 m
Mass per length in air	5.1 kg/m
Minimum Breaking Strength(MBS)	6,174 kN
Segment4(ground section)	Chain RK4 studless
Length	304.3 m
Bar Diameter	0.078 m
Mass per length in air	119.5 kg/m
Axial Stiffness	512,930 kN
Minimum Breaking Strength(MBS)	6,221 kN

### 4.3 Simulation case

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 campos basin 해역의 수온에 따라 10°C와 20°C로 차이를 두었고, 추가로 장시간에 따른 비교를 수행하기 위해 영구적인 계류선에 사용되는 DM20의 크리프 실험자료를 기반으로(Vlasblom, M.P. Boesten, J. Leite, S. & Davies, P., 2012), 30년의 설계수명에 대한 영향을 알아보았다. 또한 wave scatter diagram을 반영하기 때문에, diagram의 셀 적용 순서도 고려해야 한다. Diagram을 어떤 순서로 적용하느냐에 따라 크리프 양이 차이가 발생하고 부유체에 미치는 영향도 차이가 발생할 것이다. 이를 알아보기 위해 diagram의 적용 순서를 임의로 하는 경우를 추가하였다. 이상과 같은 각 시뮬레이션 case들을 Table 4.5에 나타내었다.

Table 4.5 Simulation cases

	Stiffness model	Condition	Temperature	Cell sequence
Case 1	Static-dynamic stiffness model	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
Case 5	Upper-lower stiffness model	MODU (5 years)	20°C	random 1
Case 6			10°C	random 1
Case 7		Permanent (30 years)	20°C	random 1

## 제 5 장 Analysis result

본 결과는 앞서 언급한 해석과정과 해양환경 그리고 계류시스템을 기초로 해석을 수행하였다. 각 Case의 결과는 길이와 강성의 변화를 먼저 나타내었고 또한 크리프가 발생하기 전 MBS(Minimum Breaking Strength)의 13%였던 초기장력이 크리프가 발생한 후 어떤 변화가 발생하였는지 각 Case 별로 정리하였다. 그리고 계류선에 작용하는 최대 장력과 부유체의 평면운동인 surge, sway, yaw motion의 최대 오프셋을 비교하여 크리프 효과가 위치유지 능력에 미치는 영향을 알아보았다.

Static-dynamic stiffness model을 사용하였을 때는 크게 세 가지의 비교를 정리하였다. Case 1의 결과를 통해 MODU용 계류시스템을 사용 할 경우 수온 20°C에서 발생하는 크리프의 양과 그에 따른 강성의 변화를 알 수 있고, Case 1과 Case 2의 비교를 통해 wave scatter diagram 셀의 반영 순서에 따른 차이를 비교할 수 있다. Case 3의 결과를 통해 10°C에서 발생하는 크리프와 강성의 변화를 알 수 있고 Case 4의 결과는 영구계류 상태에서 크리프의 발생을 알 수 있다. 마지막으로 upper-lower stiffness model을 사용한 경우의 결과는 Case 5, 6, 7에서 각각 나타내었고, static-dynamic stiffness model을 사용하였을 때와 비교하여 크리프 효과가 더 민감하게 반응하는 강성모델을 알아보았다.

## 5.1 Case 1 and Case 2

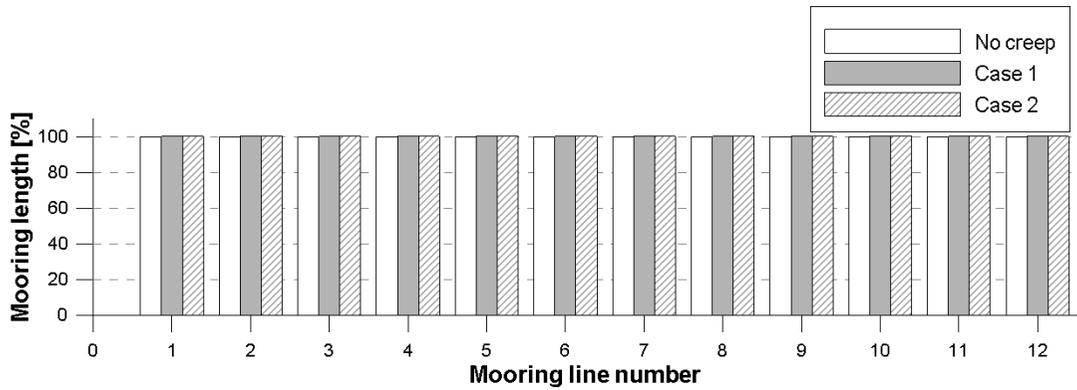


Fig. 5.1 Change of HMPE rope length (Case 1 and Case 2)

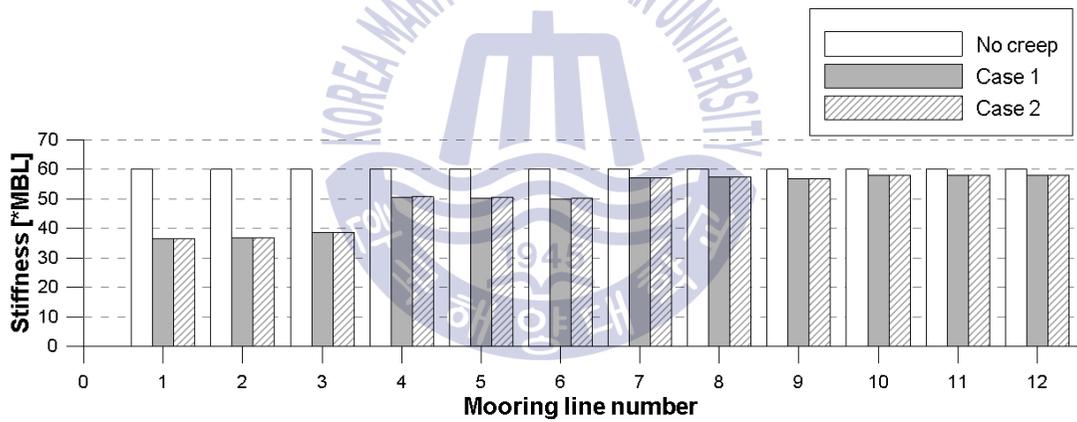


Fig. 5.2 Change of HMPE rope stiffness (Case 1 and Case 2)

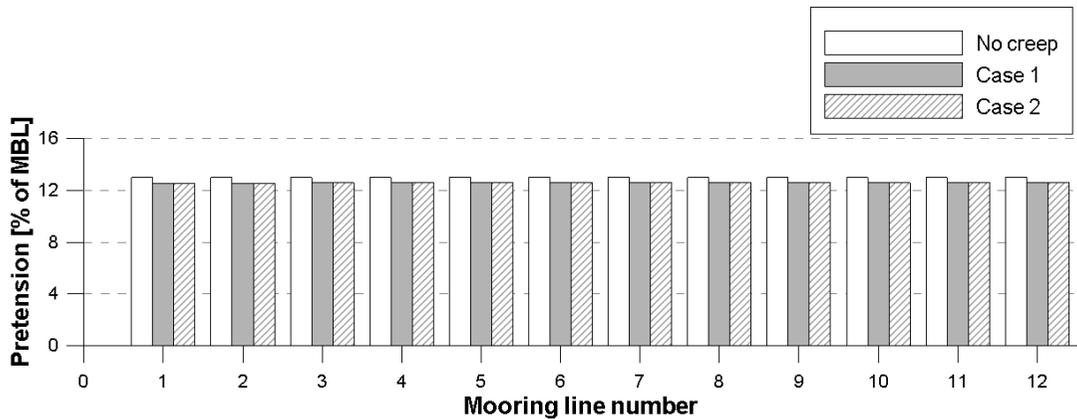


Fig. 5.3 Change of mooring line pretension (Case 1 and Case 2)

Fig. 5.1은 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. 5.2는 강성의 변화를 나타내며 두 경우 모두 동일하게 39% 감소하였다. Fig. 5.3은 크리프의 효과에 의해 각 계류선에서 변화한 초기장력을 의미하며, 마찬가지로 Case 1번과 Case 2번에서 최대 3.4% 동일하게 감소하였다. Case 1과 2는 diagram의 cell 적용 순서에 따른 차이이다. 하지만 두 Case를 비교하였을 때 큰 차이가 발생하지는 않았다. 따라서 diagram 셀의 해석이 진행되어감에 따라 변화하는 계류선의 길이와 강성을 자세히 살펴보았다.

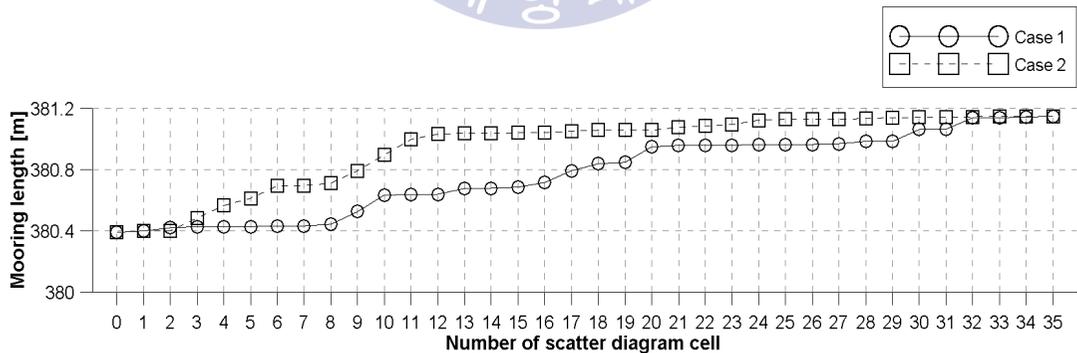


Fig. 5.4 Change of HMPE rope length according to the diagram cell sequence

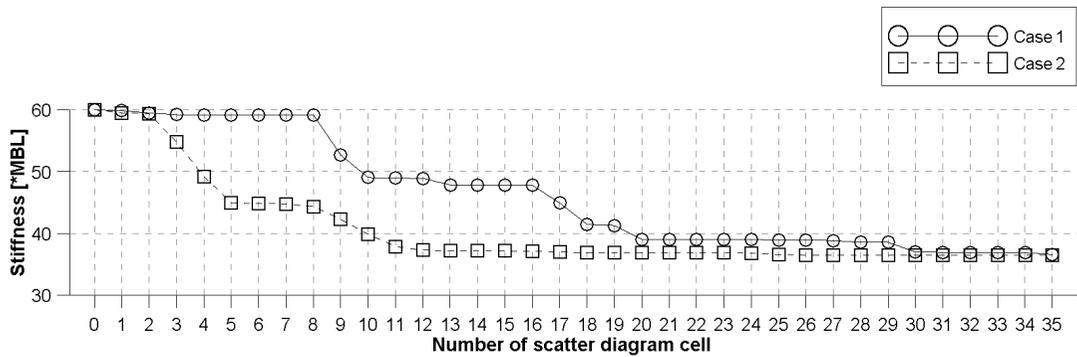


Fig. 5.5 Change of HMPE rope stiffness according to the diagram cell sequence

Fig. 5.4와 Fig. 5.5는 35개의 wave scatter diagram 셀의 해석이 진행됨에 따라 길이와 강성의 변화를 나타내고 있다. Wave scatter diagram의 해석 순서를 다르게 적용하여도 동일한 길이와 강성으로 수렴하고 있다.

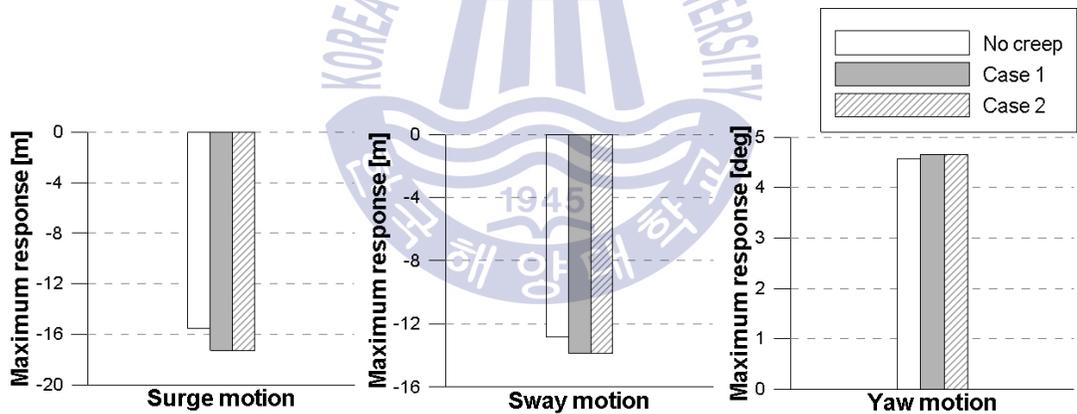


Fig. 5.6 Maximum vessel offset in the design condition (Case 1 and Case 2)

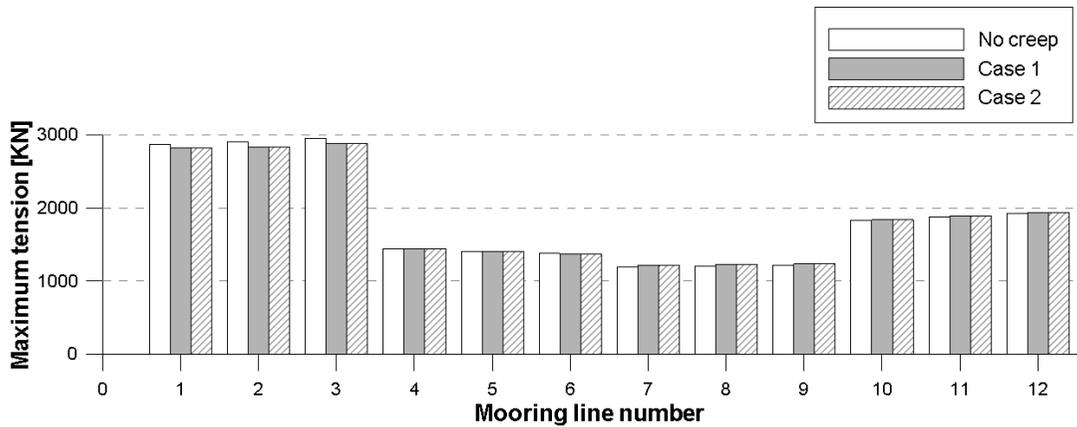


Fig. 5.7 Maximum tension in the design condition (Case 1 and Case 2)

Fig. 5.6는 디자인 컨디션에서 크리프가 발생하지 않았을 경우와 발생하였을 경우를 비교하여 부유체의 최대 오프셋의 변화를 보여주고 있으며 surge, sway, yaw motion에서 각각 11%, 7%, 2% 증가하였다. Fig. 5.7은 설계조건에서 각 계류선에 작용하는 최대 장력을 나타내며 정적 강성의 변화로 인해 최대 2.4% 감소하였다. 이 결과로 미루어 보아 20℃에서 5년 이후의 변화는 강성이 가장 크며 이로 인해 부유체의 최대 오프셋과 계류선에 작용하는 최대 장력의 변화를 야기하였음을 알 수 있다.

## 5.2 Case 3

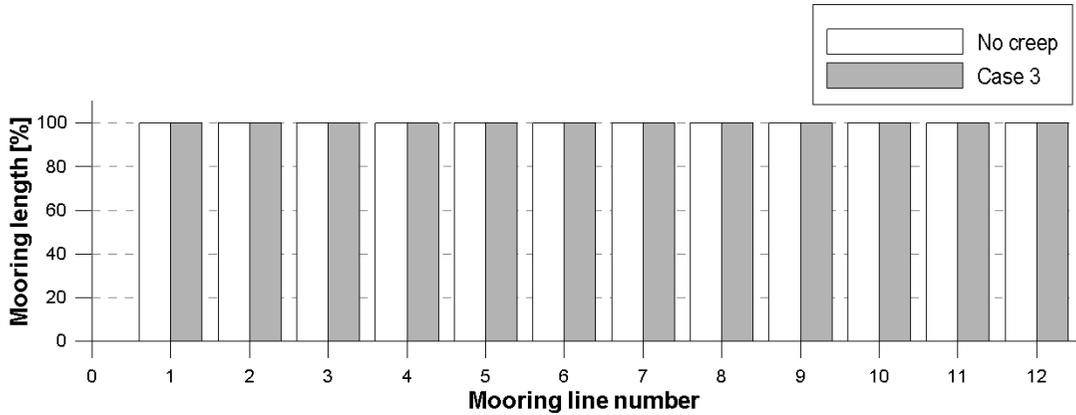


Fig. 5.8 Change of HMPE rope length (Case 3)

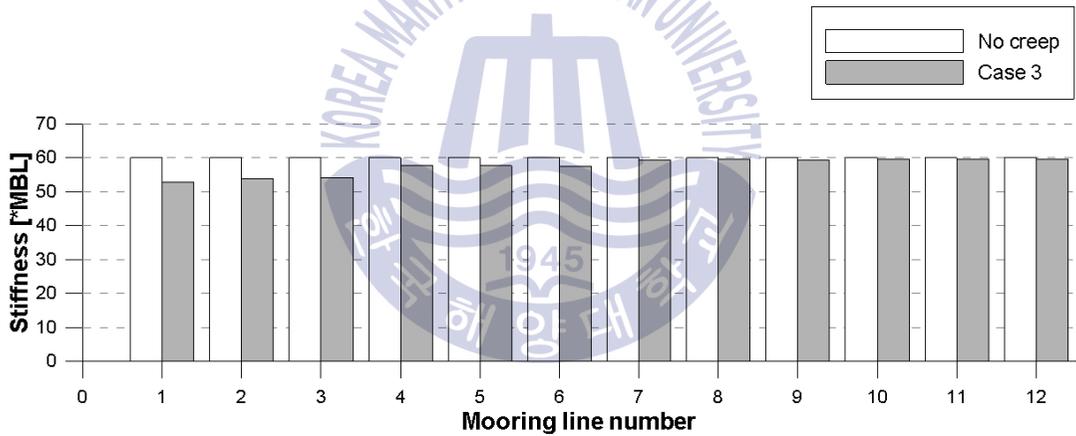


Fig. 5.9 Change of HMPE rope stiffness (Case 3)

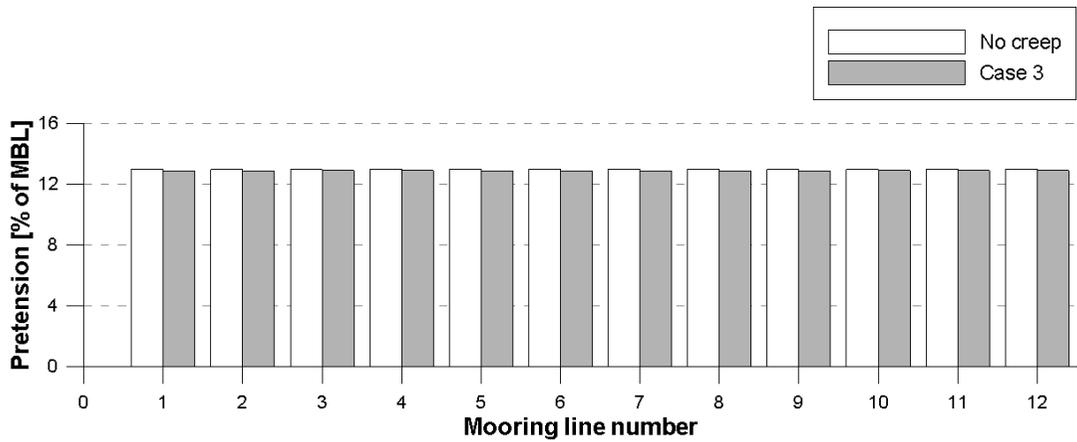


Fig. 5.10 Change of mooring line pretension (Case 3)

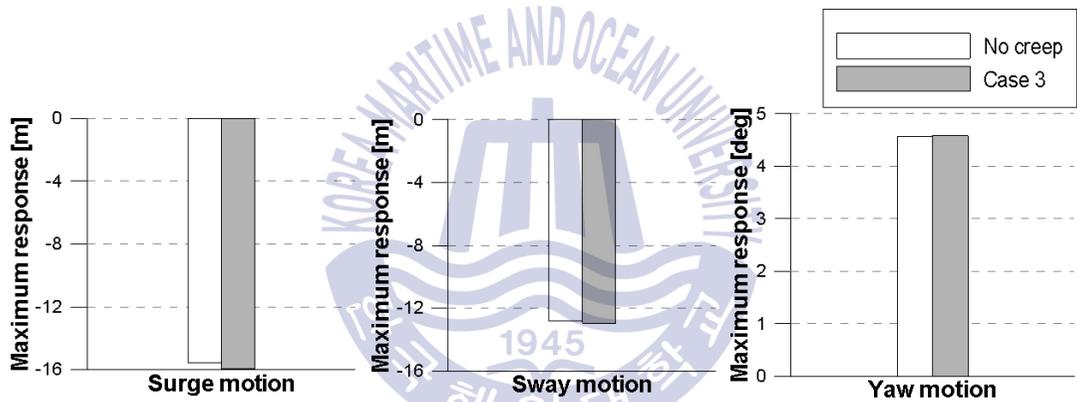


Fig. 5.11 Maximum vessel offset in the design condition (Case 3)

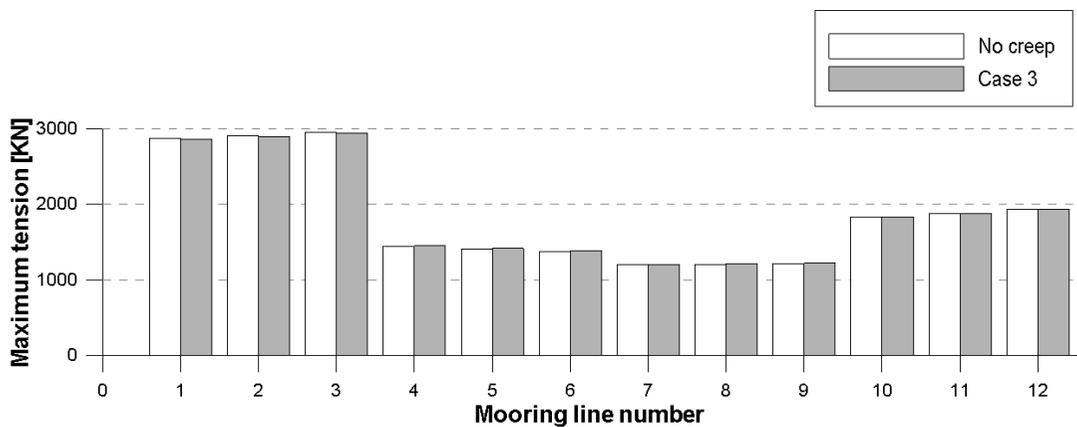


Fig. 5.12 Maximum tension in the design condition (Case 3)

Case 3번 즉, static-dynamic stiffness model을 사용할 때 10℃의 저온에서 발생하는 크리프의 결과는 다음과 같다. HMPE 로프의 길이는 Fig. 5.8에서 보여주고 있으며 최대 0.04% 증가하였다. 각 계류선에서 발생한 강성의 변화는 Fig. 5.9에서 보여주고 있으며 최대 13% 감소하였다. Fig. 5.10은 HMPE 로프의 길이와 강성의 변화로 인해 감소한 초기장력을 나타내고 있으며 초기장력은 최대 0.7% 감소하였다. 온도가 낮은 경우에는 크리프의 양이 미미하므로 디자인 조건에서도 부유체의 응답에 미치는 영향이 크지 않아 부유체의 최대 오프셋은 surge, sway, yaw motion에서 각각 2%, 1%, 0.5% 증가하였고 계류선에 걸리는 최대 장력은 약 0.4% 감소하였다. 이 결과들은 각각 Fig. 5.11과 Fig. 5.12에 나타내었다. Case 3의 해석 결과는 20℃에서의 경우와 비교하였을 때 현저히 낮은 길이와 강성의 변화를 보여주고 있다. 따라서 부유체의 거동과 계류선의 장력에 미치는 크리프의 효과는 크지 않다.



### 5.3 Case 4

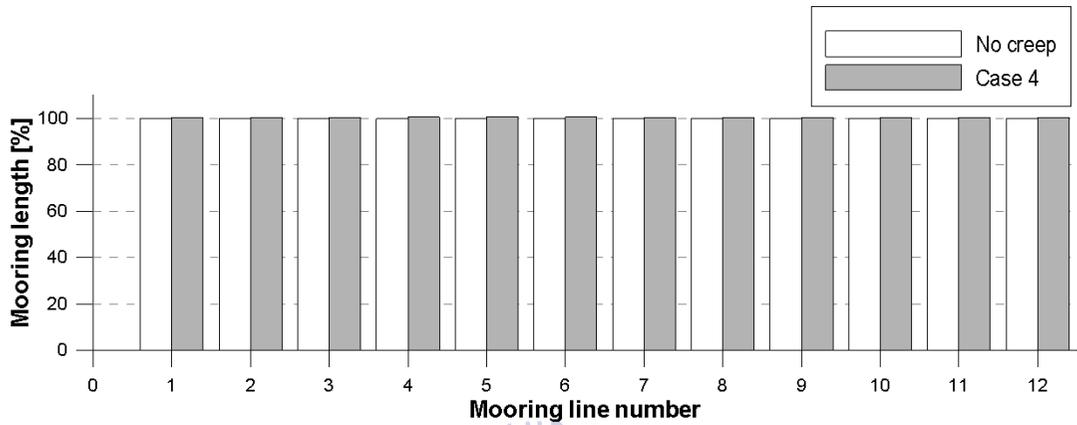


Fig. 5.13 Change of HMPE rope length (Case 4)

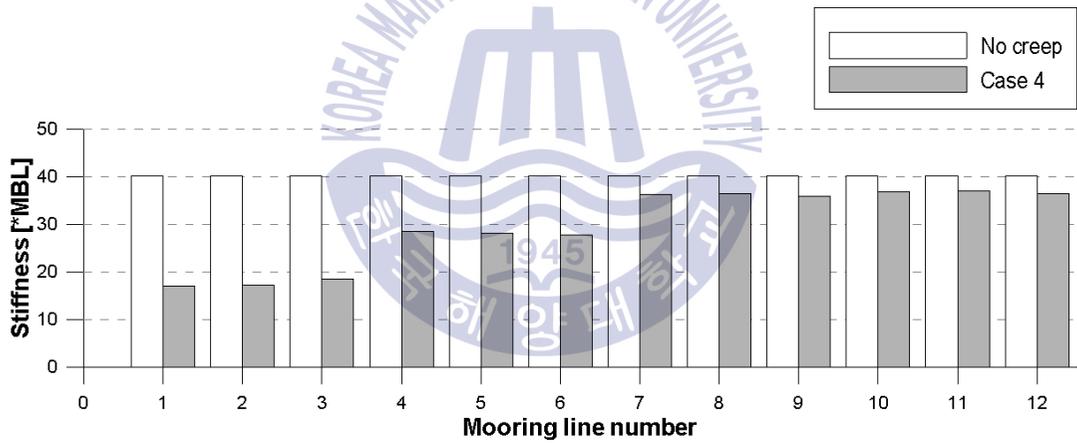


Fig. 5.14 Change of HMPE rope stiffness (Case 4)

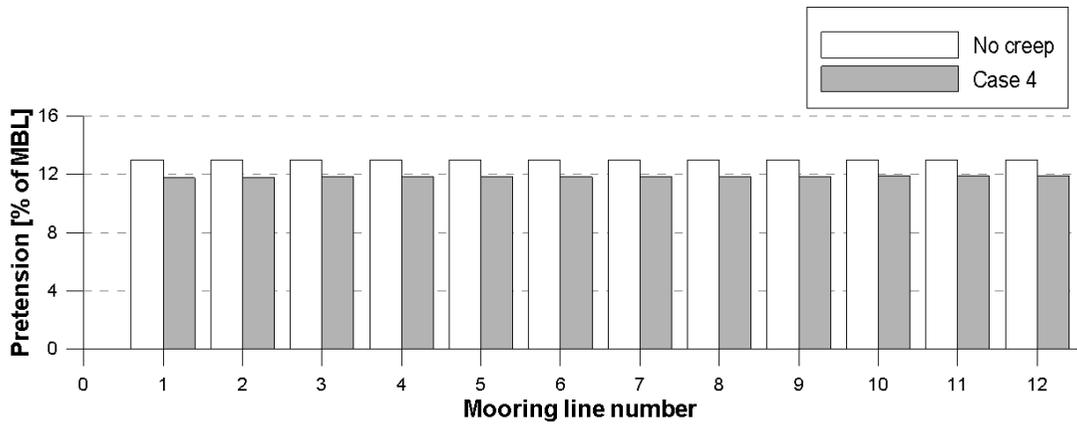


Fig. 5.15 Change of mooring line pretension (Case 4)

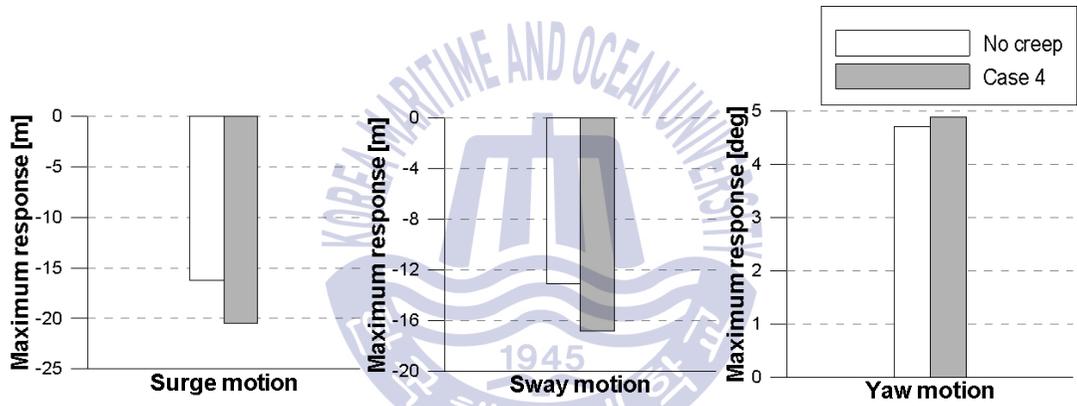


Fig. 5.16 Maximum vessel offset in the design condition (Case 4)

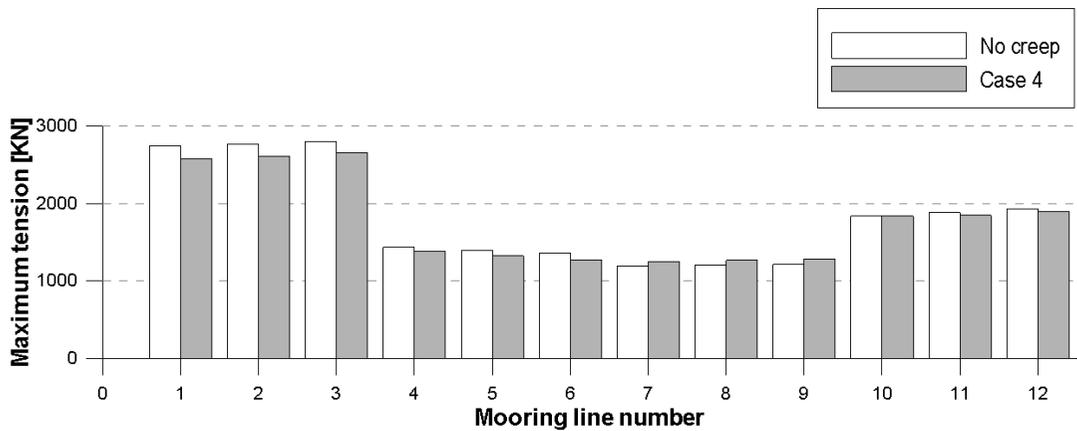


Fig. 5.17 Maximum tension in the design condition (Case 4)

Static-dynamic stiffness model을 사용하고, 수온 20℃, 설계수명 30년의 상황을 나타내는 Case 4의 결과를 Fig. 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17에 나타내었다. Fig. 5.13, 5.14에서 보이는 바와 같이 HMPE 로프의 길이는 최대 0.6% 증가하였고 강성은 최대 58% 감소하였다. Fig. 5.15는 HMPE 로프의 길이와 강성의 변화로 인해 감소한 초기장력을 나타내고 있으며 초기장력은 최대 9.6% 감소하였다. Fig. 5.16에서 보여주는 결과는 설계조건에서 부유체의 최대 오프셋과 계류선에 작용하는 최대 장력이며, surge, sway, yaw motion에서 각각 26%, 29%, 4% 증가하였고 최대 장력은 Fig. 5.17과 같이 약 6.6% 감소하였다. Case 4번의 결과는 부유체의 설계수명이 5년인 경우에 비해 부유체의 오프셋과 계류선의 장력 변화가 매우 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.



## 5.4 Case 5

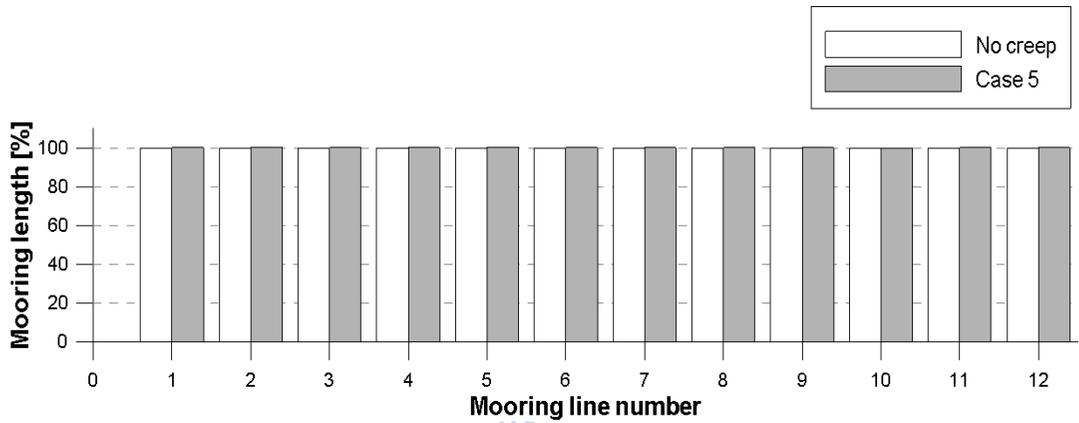


Fig. 5.18 Change of HMPE rope length (Case 5)

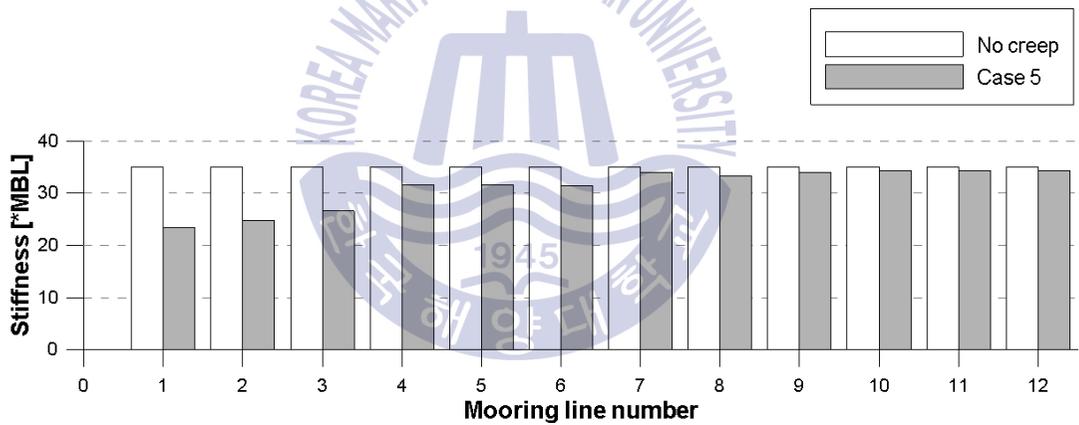


Fig. 5.19 Change of HMPE rope stiffness (Case 5)

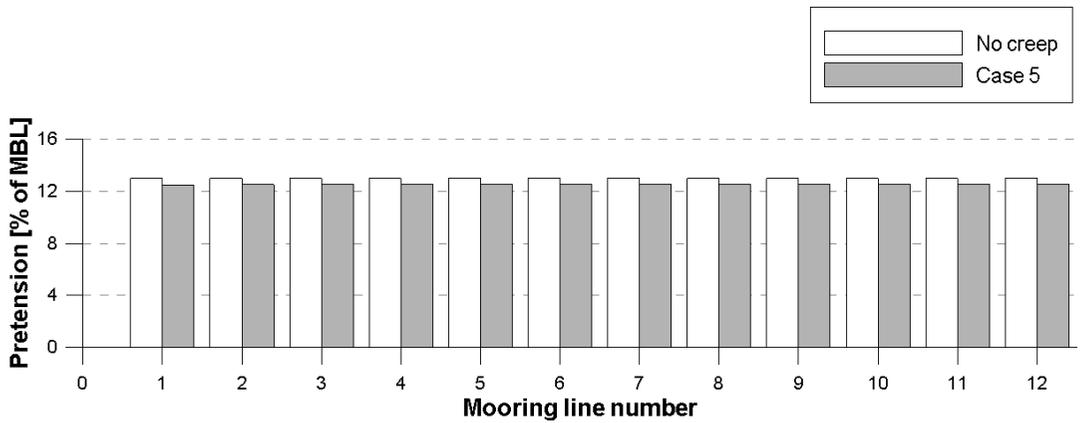


Fig. 5.20 Change of mooring line pretension (Case 5)

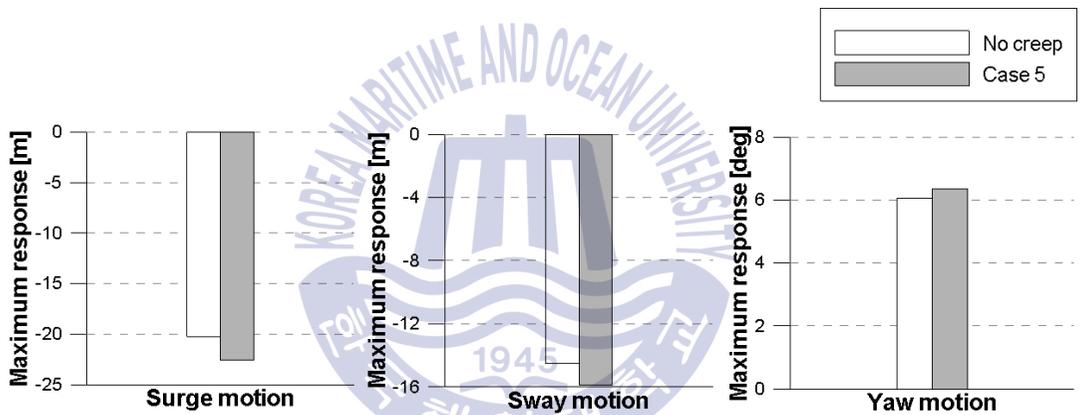


Fig. 5.21 Maximum vessel offset in the design condition (Case 5)

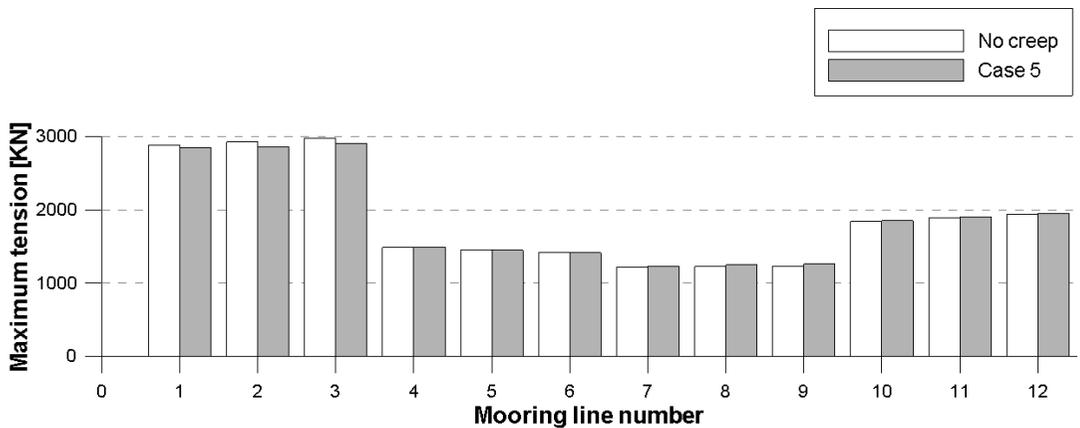


Fig. 5.22 Maximum tension in the design condition (Case 5)

Upper-lower stiffness model을 사용했을 때 수온 20℃에서 발생하는 크리프의 결과는 다음과 같다. Fig. 5.18은 Case 5번에서 발생한 HMPE 로프의 길이 변화를 나타내고 있다. 로프의 길이는 최대 0.19% 증가하였다. Fig. 5.19는 크리프의 발생에 따른 강성의 변화를 나타내고 있다. 강성의 변화는 최대 33.4% 감소하였다. 초기 장력의 경우는 최대 4% 감소하였는데, 이는 Fig. 5.20에서 보여주고 있다. 또한 Case 5번의 경우 Fig. 5.21에서 보여주는 바와 같이 Surge, sway, yaw motion의 최대 오프셋은 각각 11%, 9%, 5% 증가하였다. 계류선에 작용하는 최대 장력은 2.4% 감소하였으며 이는 Fig. 5.22에서 보여주고 있다. 이 모델은 static-dynamic model을 사용했을 경우보다 보수적인 결과를 얻게 되어 오프셋의 절대적인 수치는 더욱 증가하였다.



## 5.5 Case 6

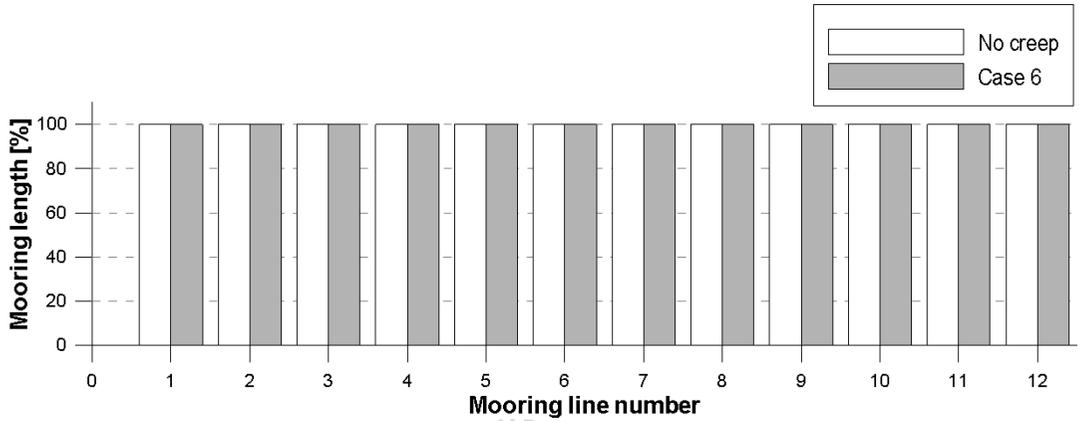


Fig. 5.23 Change of HMPE rope length (Case 6)

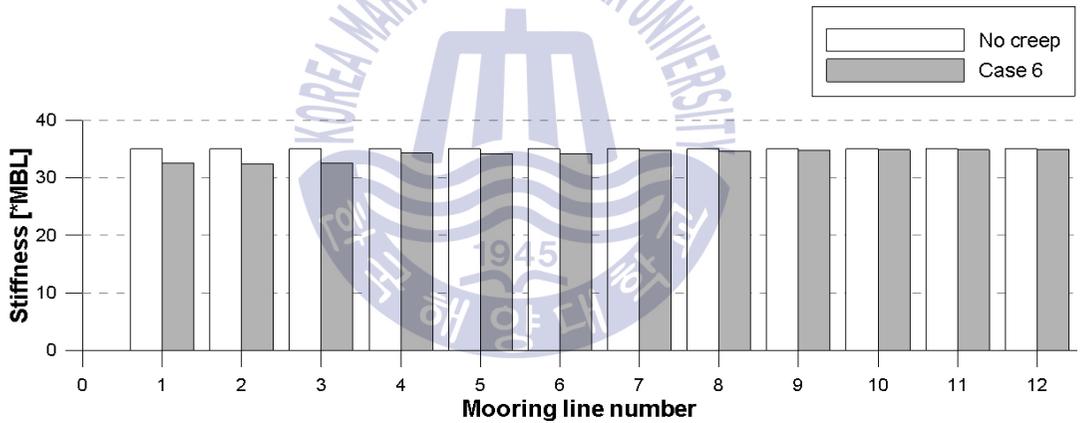


Fig. 5.24 Change of HMPE rope stiffness (Case 6)

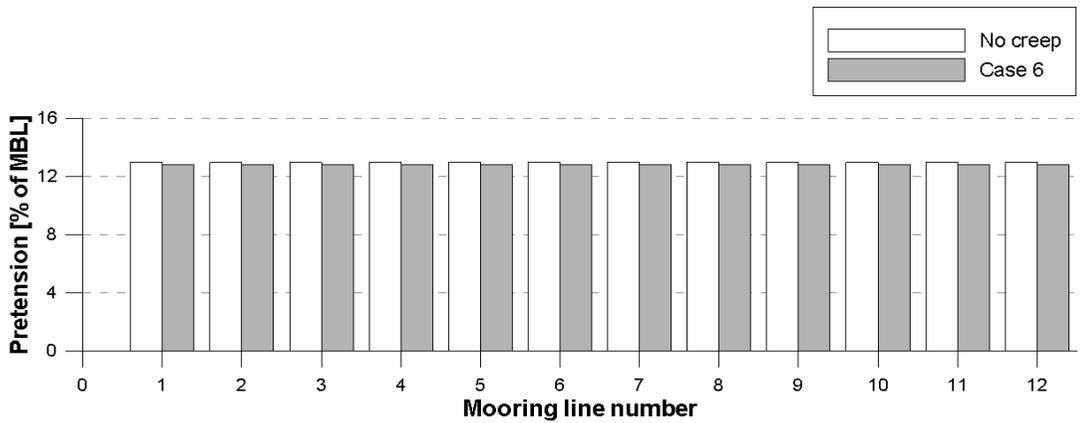


Fig. 5.25 Change of mooring line pretension (Case 6)

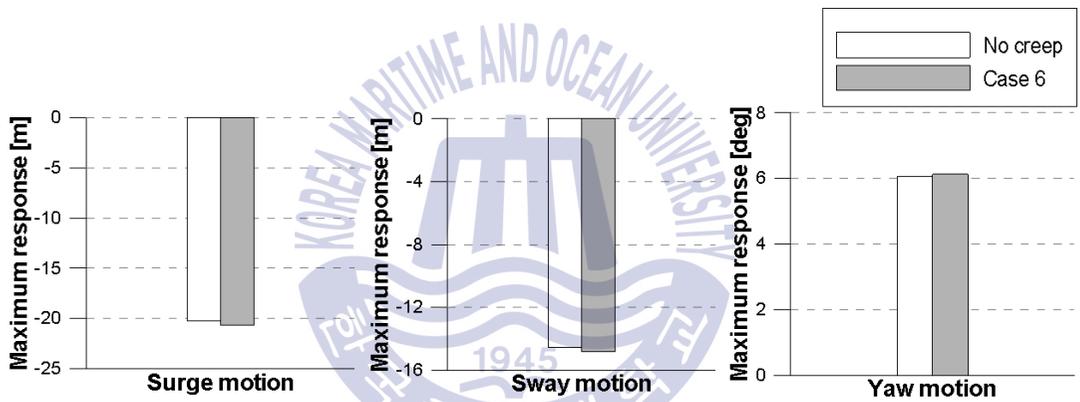


Fig. 5.26 Maximum vessel offset in the design condition (Case 6)

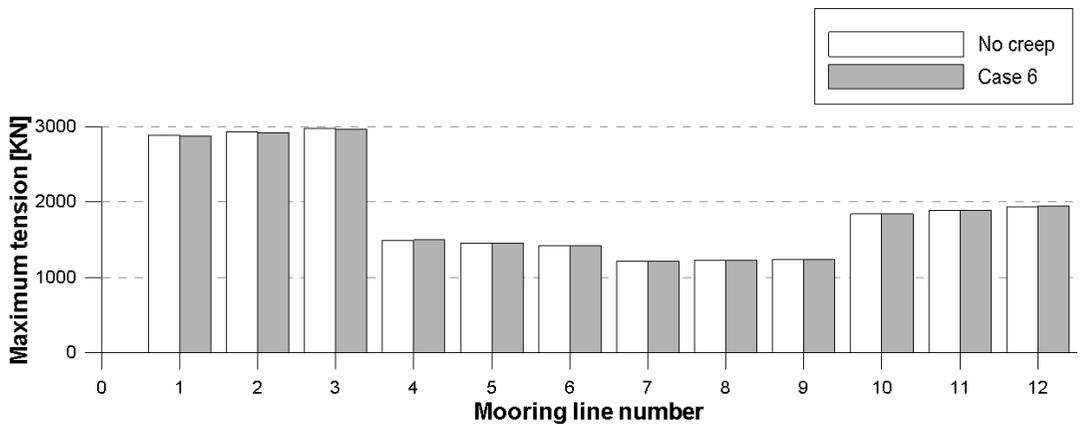


Fig. 5.27 Maximum tension in the design condition (Case 6)

Case 6번은 upper-lower stiffness model을 사용하고 10℃의 저온에서 발생하는 크리프의 결과를 보여주고 있다. HMPE 로프의 길이는 Fig. 5.23과 같이 최대 0.04% 증가하였고 그에 따른 강성의 변화도 최대 7.6% 감소하였다. 길이와 강성에 따른 초기 장력의 변화는 최대 1.2% 감소하였다. 강성의 변화와 초기 장력의 변화는 각각 Fig. 5.24와 Fig. 5.25에서 보여주고 있다. 이 결과는 Case 3번과 같이 저온에서 크리프의 발생이 미미하다는 것을 보여주고 있다. Fig. 26과 27은 설계 환경하중 하에서 각각 부유체의 최대 오프셋과 계류선에 작용하는 최대 장력을 나타내고 있다. 최대 오프셋은 surge, sway, yaw motion에서 각각 2%, 1.9%, 1.2% 증가하였다. 최대 장력 최대 0.4% 감소하였다.



## 5.6 Case 7

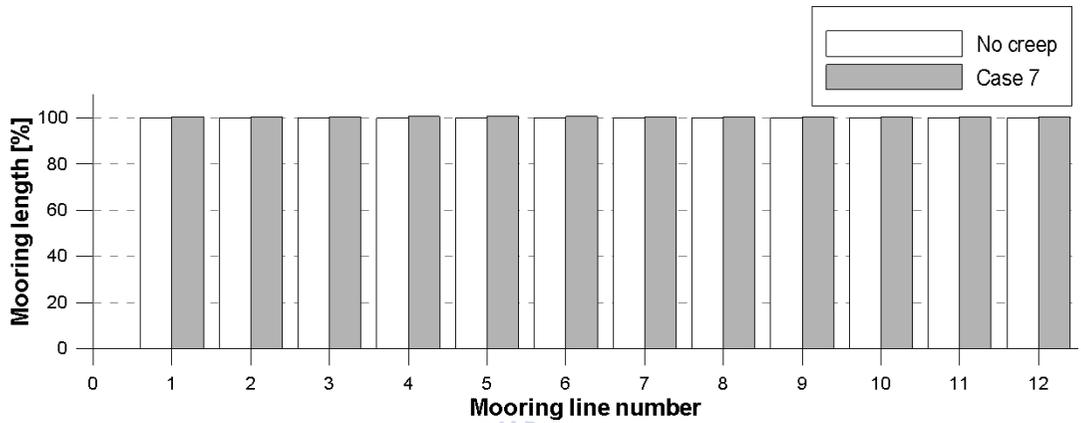


Fig. 5.28 Change of HMPE rope length (Case 7)

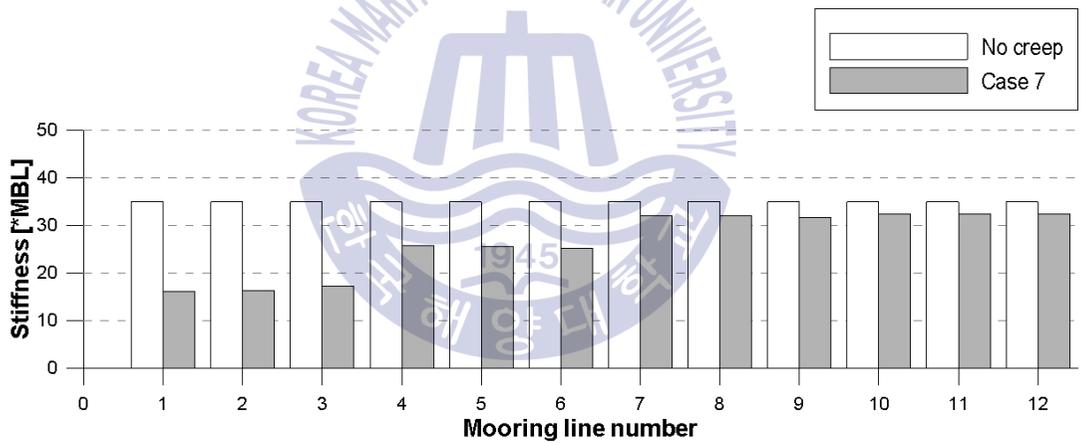


Fig. 5.29 Change of HMPE rope stiffness (Case 7)

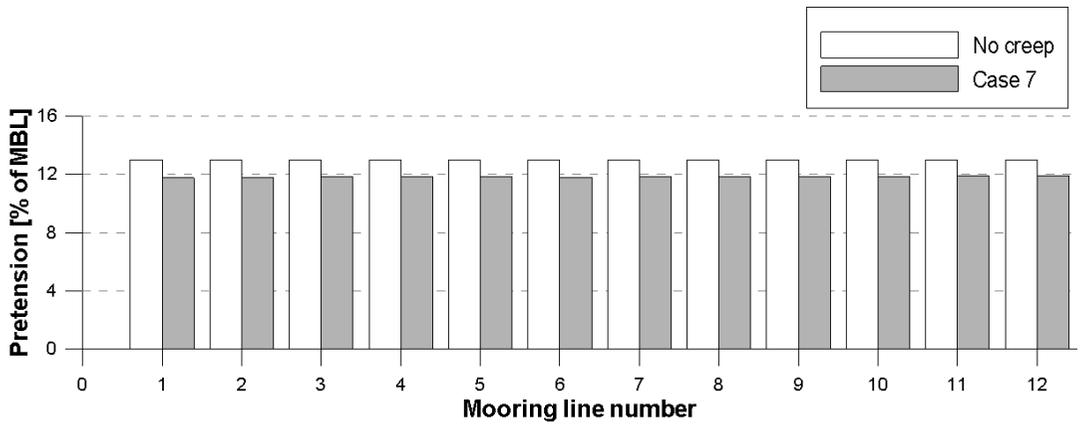


Fig. 5.30 Change of mooring line pretension (Case 7)

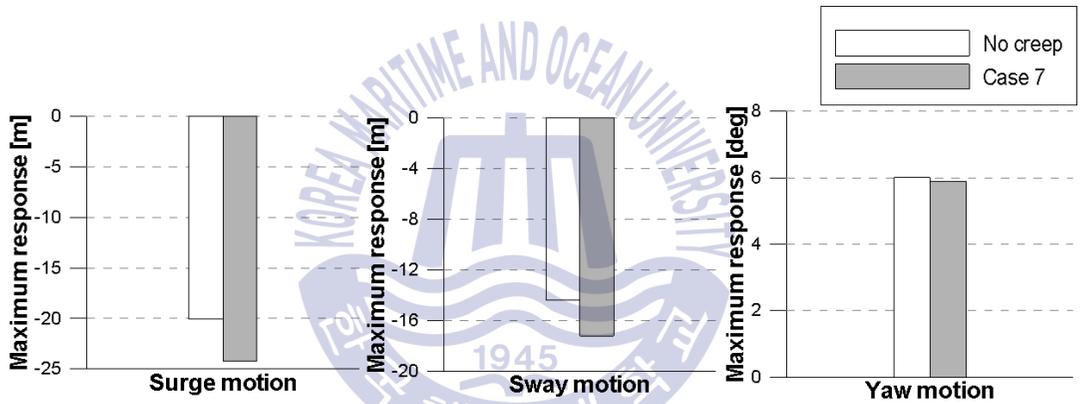


Fig. 5.31 Maximum vessel offset in the design condition (Case 7)

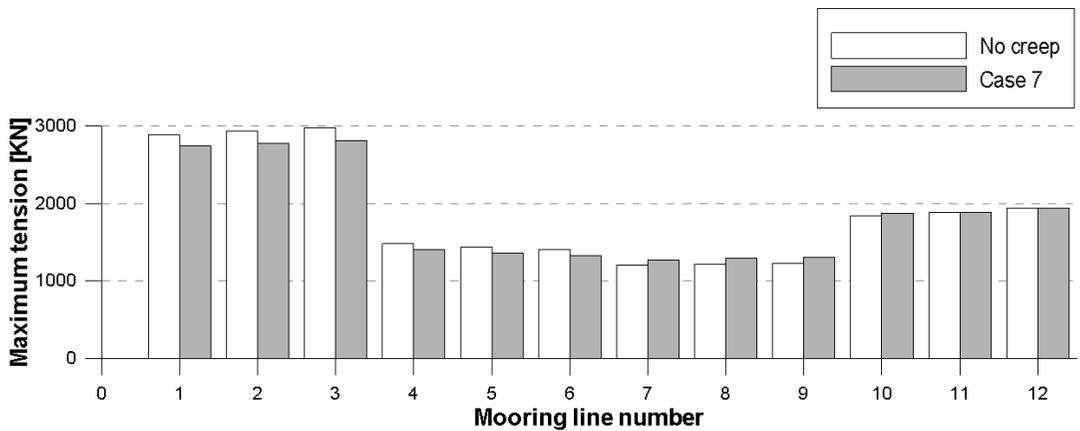


Fig. 5.32 Maximum tension in the design condition (Case 7)

마지막으로 Case 7번은 upper-lower stiffness model을 사용하고 수온 20℃인 경우에서 설계수명 30년을 갖는 영구 계류시스템을 사용 하였을 때 발생하는 크리프와 크리프의 영향을 보여준다. HMPE 로프의 길이 증가는 최대 0.6%로 Fig. 5.28에서 보여주고 있다. Fig. 5.29는 크리프 발생에 따른 강성의 변화를 나타내는데, 최대 54% 감소하였음을 확인할 수 있다. 이러한 변화는 계류선의 초기 장력에도 큰 영향을 미쳐 최대 10% 감소하였고, 이 결과는 Fig. 5.30에서 확인할 수 있다. 부유체의 최대 오프셋과 계류선 장력의 변화는 각각 Fig. 31과 32에 도식화하였다. 부유체의 surge, sway, yaw motion은 각각 최대 21%, 20%, 0.03% 증가하였고 계류선에 걸리는 장력은 최대 5.7% 감소하였다.

Upper-lower stiffness model을 사용하였을 때는 static-dynamic stiffness model과 비교하여 surge, sway, yaw motion과 계류선에 작용하는 장력에서 더 큰 최대값이 도출되었다. Case 1번과 5번에서 크리프 현상이 발생하기 전 부유체의 최대 surge, sway, yaw motion을 비교하면, case 1번을 기준으로 case 5번은 surge motion에서 30%, sway motion에서 13% 그리고 yaw motion에서 32% 각각 최대 motion이 증가하였다. 또한 최대 장력은 line 3번에서 발생하였는데, case 1번과 비교하여 case 5번의 최대 장력은 0.7% 증가하였음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 5.33에서 보여주고 있다.

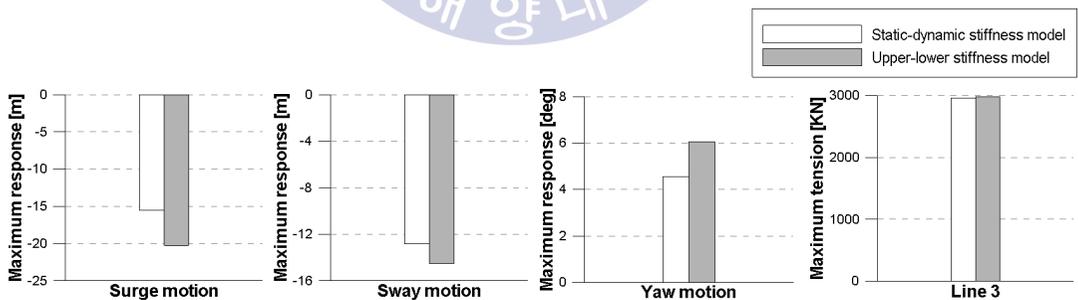


Fig. 5.33 Comparison of results in the different stiffness model (No creep)

Case 1번부터 7번까지의 크리프 발생량과 크리프 효과에 의한 부유체의 거동과 계류선 장력의 변화율을 정리하면 Table 5.1, 5.2와 같다.

**Table 5.1** Changed length and stiffness

	Stiffness model	Condition	Changed length	Changed stiffness
Case 1	Static-dynamic stiffness model	MODU (5 years)	+0.2%	-39%
Case 2			+0.2%	-39%
Case 3			+0.04%	-13%
Case 4		Permanent (30 years)	+0.6%	-58%
Case 5	Upper-lower stiffness model	MODU (5 years)	+0.19%	-33.4%
Case 6			+0.04%	-7.6%
Case 7		Permanent (30 years)	+0.6%	-54%

**Table 5.2** Effects of creep to vessel and mooring line

	Stiffness model	Condition	Surge	Sway	Yaw	Tension
Case 1	Static-dynamic stiffness model	MODU (5 years)	+11%	+7%	+2%	-2.4%
Case 2			+11%	+7%	+2%	-2.4%
Case 3			+2%	+1%	+0.5%	-0.4%
Case 4		Permanent (30 years)	+26%	+29%	+4%	-6.6%
Case 5	Upper-lower stiffness model	MODU (5 years)	+11%	+9%	+5%	-2.4%
Case 6			+2%	+1.9%	+1.2%	-0.4%
Case 7		Permanent (30 years)	+21%	+20%	+0.03%	-5.7%

Table 5.1은 각 시뮬레이션 케이스에서 발생한 HMPE 로프의 길이 증가와 강성의 감소를 보여주고 있다. Case 1번과 5번, case 3번과 6번 그리고 case 4번과 7번은 같은 조건에서 다른 강성 모델을 사용한 경우이다. 다른 강성모델에서 발생하는 크리프의 발생량을 비교할 경우 로프의 길이는 매우 유사한 비율의 증가를 보이고 있다. 하지만 강성의 변화는 다소 차이가 발생하였는데, 그 이유는 감소비율을 산정하기 위한 기준치가 다르기 때문이다. Static-dynamic stiffness model의 정적강성 변화는 60\*MBS에서부터의 감소 비율을 나타내며 upper-lower stiffness model의 lower 강성 변화는 35\*MBS에서부터의 감소 비율을 나타내기 때문에 차이를 보인다.

Table 5.2는 Table 5.1에서 발생한 길이와 강성의 변화가 부유체의 거동과 계류선의 장력에 미치는 영향을 나타내어 크리프가 발생하지 않았을 경우를 기준으로 부유체의 거동과 계류선 장력의 변화율을 의미한다. Case 1번과 5번 그리고 case 3번과 6번에서 부유체의 최대 오프셋 변화율 비교를 통해 설계 수명이 5년인 경우 두 강성 모델의 크리프에 의한 변화의 민감성을 비교할 수 있다. 이 경우 변화율에 큰 차이가 발생하지는 않았으므로, 두 모델이 크리프 현상에 동일한 민감성을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 case 4번과 7번과 같이 설계 수명이 30년인 경우에는 부유체의 오프셋 변화율에 다소 차이가 발생하였다. 이 결과는 static-dynamic stiffness model이 크리프에 의한 변화에 더 민감하게 변화하였음을 알 수 있다. 계류선에 작용하는 최대 장력의 감소 비율은 case 1번과 5번 그리고 case 3번과 case 6번이 동일한 감소 비율을 보이고 있으므로 두 모델이 동일한 민감성을 보이고 있다. 하지만 case 4번이 case 7번에 비해 변화율이 더 큰 것으로 보아 설계 수명이 30년인 경우에는 static-dynamic stiffness model이 더 민감하게 변화하였음을 알 수 있다.

## 제 6 장 결론

크리프 현상을 고려하여 설계수명이 경과한 후 부유체의 거동 응답해석과 계류선에 작용하는 최대 장력을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

먼저 static-dynamic stiffness model을 사용하는 경우, case 1과 case 2의 비교를 통해 wave scatter diagram 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 설계수명 그리고 온도의 변화가 없으므로 발생하는 크리프도 변함이 없음을 의미한다. 그러므로 크리프는 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 1, 2, 3은 MODU용 로프인 SK78 HMPE 로프를 사용한 경우이고, case 4와 같이 온도가 높고 영구계류용 로프인 DM20 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.

Static-dynamic stiffness model을 사용하는 case 1, 3, 4와 비교하여 upper-lower stiffness model을 사용하는 case 5번, case 6번 그리고 case 7번의 경우에는 부유체의 최대 오프셋과 계류선의 최대 장력이 더 큰 값이 도출되었

으나 크리프에 의한 변화율은 case에 따라 다소 차이가 발생하였음을 알 수 있다. 설계 수명이 5년인 경우 두 강성 모델이 크리프의 영향에 동일한 민감성을 갖지만, 설계수명이 30년인 경우에는 case 4번이 case 7번에 비해 더 큰 변화율을 보이므로 static-dynamic stiffness model이 크리프에 의한 영향에 더 민감하게 변화하는 것을 알 수 있었다. 최대 장력의 관점에서도 동일한 결과를 보여 영구 계류시스템에서 static-dynamic stiffness model이 크리프 영향에 더 민감하다는 결론을 도출하였다. 따라서 static-dynamic stiffness model을 사용하여 HMPE 로프 영구 계류시스템을 설계하는 경우 크리프 효과에 의해 더 민감한 부유체의 오프셋과 장력의 변화율을 갖기 때문에 설계자는 이를 반드시 고려해야 한다.



## Reference

- ABS, 2010. *POLYESTER ROPE STIFFNESS MODELING, TESTING, AND ANALYSIS*, Joint Industry Project Phase 1 Report No TR-2010-03.
- ABS, 2011. *THE APPLICATION OF FIBER ROPE FOR OFFSHORE MOORING*, American Bureau of Shipping(ABS), USA.
- 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, 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, 16-19 October 2000.
- Leite, S. & Boesten, J., 2011. *HMPE Mooring Lines for Deepwater MODUs*, Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 4-6 October 2011.
- NDE & TTI, 1999. *Engineers Design Guide for Deepwater Fibre Moorings*, Joint Industry Study Report No L17739-Rev.F/DNE/RWPS.
- Park, S.B., 2015. *Study on spread mooring layout under ocean environmental load for FPSO*, Masters thesis, Pusan university
- Vlasblom, M.P. & Bosman, R.L.M., 2006. *Predicting the Creep Lifetime of*

*HMPE Mooring Rope Applications*, OCEANS 2006, IEEE, 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.

Yongjun, C. Yan, Q. & Tianyu, Z., 2013. *Polyester mooring stiffness modeling for deepwater floating system*, Engineering Sciences, 4, 007.

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.

