

BoD 기반의 Steel Lazy Wave Riser(SLWR)와 계류된 FPSO와의 연성해석에 관한 수치해석 연구

권용주* · 남보우** · 박병원*** · 오승훈**** · 정재환***** · † 정동호

*선박해양플랜트연구소 기술원, **서울대학교 조선해양공학과 조교수, ***,*****선박해양플랜트연구소 선임연구원,
****선박해양플랜트연구소 연구원, † 선박해양플랜트연구소 책임연구원

Numerical Study on the Coupled Responses of the Steel Lazy Wave Riser (SLWR) Based on the Basis of Design and Moored FPSO

Yong-Ju Kwon* · Bo Woo Nam** · Byeong-Won Park*** · Seung-Hoon Oh**** · Jae-Hwan Jung*****
· † Dongho Jung

*Junior Engineer, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

**Assistant Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

,**Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

****Junior Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

† Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

요 약 : 초심해역 자원개발용 라이저와 계류된 부유체와의 연성해석을 수행한다. 일반적으로 라이저의 안전성은 부유체와의 연성해석 없이 최대 offset을 고려한 해석을 통해 보수적으로 평가되는데, 본 연구에서는 계류된 부유체의 연성 운동해석을 고려하여 라이저의 안전성을 분석한다. 라이저는 초심해역에 적용되는 SLWR이 고려되며, 부유체는 FPSO가 적용된다. 연성을 고려하는 방법과 고려하지 않는 방법론에 대하여 제시한다. 계류선이 모두 안전한 정상상태(Intact) 조건과 사고(damaged) 조건을 고려하여, 각 조건에서 파랑 입사각도에 따라 연성해석 효과를 분석한다. 하중 조건에 따라 계류선의 장력, 부유체의 운동 및 라이저의 거동 등을 분석한다.

핵심용어 : 연성해석, SLWR 라이저, 계류 장력, FPSO 운동, 운동해석

Abstract : A coupled analysis was performed between the riser to develop oil and gas in ultra-deepwater and the moored floating body. In general, the safety of the riser is conservatively evaluated by considering the maximum offset excluding the coupled analysis with the floating body. In this study, the safety of the riser was analyzed by considering the coupled motion analysis of the moored floating body. The riser is considered steel lazy wave riser (SLWR) applied in the deep sea, and the floating body is determined to FPSO. The methodology was presented on coupled and uncoupled analysis. The coupled effects were analyzed according to the incident wave headings in intact and damaged conditions of mooring lines. The tension of mooring lines, the motion of the floating body, and riser responses were analyzed according to the loading conditions.

Key words : Coupled Analysis, SLWR(Steel Lazy Wave Riser), Mooring Tension, FPSO, Motion Analysis

1. 서 론

해양라이저는 오일과 가스(Oil & Gas)를 해저로부터 부유체까지 전달해주는 파이프이다. 개발 수심이 비교적 깊은 해역에서는 SCR(Steel Catenary Riser)이 적용되어 왔으나, 최근에는 수심 1,500m 이상의 대수심 해역으로 개발영역이 옮겨져가고 있는 추세이다. SCR은 강관을 사용하기 때문에 경

제적으로 유리하나, 수심이 깊어지면 부유체와 연결되는 부위에서 라이저의 장력이 증가하게 되어 안전성 문제가 있다. 또한, 해저면과 맞닿는 TDZ(Touch Down Zone) 부분에서는 피로파괴 문제가 증가하여 초심해역에서 적용하기에는 한계가 있다(Yoo and Joo, 2017). SCR의 이러한 문제를 해결하기 위하여, 최근에는 SLWR(Steel Lazy Wave Riser)의 적용이 증가되고 있는 추세이다. Fig. 1은 SLWR의 일반적인 형상을 보

† Corresponding author : 정희원, dhjung@kriso.re.kr 042)866-3962

* 정희원, kwonyj@kriso.re.kr 042)866-3958

** 정희원, bwnam@snu.ac.kr 02)880-7324

*** 정희원, bwpark@kriso.re.kr 051)604-7829

**** 정희원, carot541@kriso.re.kr 051)604-7825

***** 정희원, jaehwan@kriso.re.kr 051)604-7828

여준다(Park et al., 2019). SLWR에는 lazy wave 형상을 위한 부력체가 설치되며, 부력체로 인하여 라이저의 상부장력은 감소하나 새그밴드(Sag Bend)와 호그밴드(Hog Bend)에서 굽힘 모멘트가 증가한다. 부력체의 배치와 전체 부력의 결정은 SLWR 설계에서 중요한 인자 중 하나이다.

부유체의 계류선 형태에 따라 SLWR의 페어리더(Fairlead) 위치가 결정되는데, turret 계류에서는 선수부 중심의 turret에 SLWR의 페어리더가 위치하며, spread 계류에서는 선박의 측면에 페어리더가 위치한다. Szczepanski et al.(2018)은 FPSO에서 turret와 spread 계류된 SLWR에 대한 응답을 평가하였다. Spread 계류된 SLWR은 횡좌조건에서 상대적으로 큰 응력이 발생하며, 파향에 따라 응답의 변화가 크다. 반면, turret 계류된 라이저는 입사각 제어(Angle of attack control)되는 부유체에 의하여 선수파랑에 의해 응력이 크게 발생한다.

Turret과 spread 계류된 SCR과 SLWR의 응답 비교에서 SCR은 TDZ에서 국부적인 좌굴 응답이 발생하는 반면, SLWR은 sag와 hog에서 상대적으로 큰 응답이 발생하였다. 주로 하중조건은 부유체가 최대 offset이 발생된 조건을 고려하였다. Park et al.(2015)는 J-lay 방식으로 설치되는 SCR 라이저의 수치해석을 수행하였으며, 다양한 하중조합에서 SCR의 강도해석 및 간섭해석 절차를 소개하고 설치해석을 수행하였다.

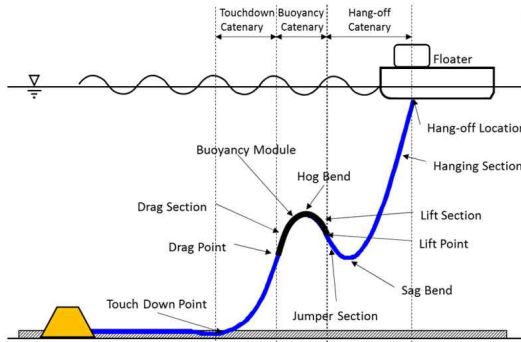


Fig. 1 Typical configuration and segments of SLWR (Ref. Park et al., 2019)

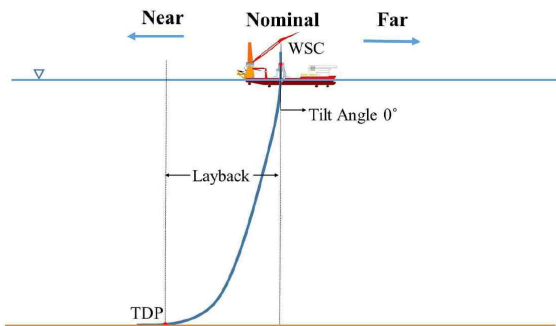


Fig. 2 Configuration of a J-lay installation (Ref. Kwon et al., 2017)

계류된 부유체가 저주파수 운동에 의해 offset이 발생하기

때문에, 라이저 초기설계에서 부유체의 최대 offset을 고려한 비연성 해석이 수행된다. 최대 offset을 고려하기 때문에, 일반적인 라이저의 비연성 해석은 보수적인 결과를 제공한다. Part et al.,(2018)은 부유체의 offset을 고려한 SCR과 SLWR의 응답 특성을 비교하였다. SCR은 부유체의 offset에 따라 상부장력을 비롯한 위치별 장력이 크게 변화하였으나, SLWR은 상부장력의 변화에 비해 sag와 hog 위치에서 굽힘 모멘트가 크게 변화하였다. Yoo and Joo(2017)는 spread 계류된 SCR에 대해 평가하였으며, FPSO의 위치변화를 near, far, translate 조건으로 고려하였다. 그리고 설치단계(Installation), hydrotest, 작동(Operation), 극한(Extreme), 생존(Survival)단계에 대해 모두 위치변화를 고려하여 평가하였다. Kwon et al.(2017)은 선박의 offset을 고려한 URF(Umbilical Riser Flowline)의 J-lay 설치에 관한 모형시험 연구를 수행하였으며, offset에 의한 파이프 및 J-lay 타워 내부 roller box의 응답특성을 검토하였다. Fig. 2는 URF 설치 연구에서의 전체형상을 보여준다. Heurtier et al.(2001)은 라이저를 포함한 계류된 FPSO의 연성해석을 수행하였다. 여기서 라이저는 유연라이저(flexible riser)를 사용하였으며, 2개의 생산라이저와 가스 및 오일 이송라이저 각각 1세트를 고려하였다. 연성 해석과 비연성 해석 결과는 주로 선박 운동 및 계류선의 장력에 대해 제시되었다. 선박의 수직방향 운동은 큰 차이를 보이지 않으나, 수평방향 운동과 상부장력은 동적해석을 통해 검토되어야 함을 확인하였다. 특히, 구조물이 작은 경우 연성해석은 반드시 필요함을 언급하였다. Cozijn and Bunnik(2004)은 대수심의 CALM(Catenary Anchor Leg Mooring) 부이에 대한 연성해석을 수행하고, 모형시험 결과와 비교하였다. 연성해석 결과는 준정적 해석보다 모형시험 결과와 유사한 결과를 보임을 확인하였으며, 계류된 CALM 부이의 거동은 연성 계류 해석을 통해 검토되어야 함을 확인하였다. Eom et al.(2014)는 FPSO에 설치되는 SCR의 국부 좌굴 현상에 관한 시간영역 해석을 수행하고, 선박-계류선-라이저의 동적 연성해석을 수행하였다. 해저 지반과 SCR의 상호작용 효과를 고려한 해석을 수행하였으며, 선박의 상하운동과 국부 좌굴 현상에 대한 관계를 규명하였다. SLWR은 기하학적으로 비선형성을 보이기 때문에, 수치해석에서 수렴상의 어려움이 발생한다. Oh et al.(2018)은 동적이완법(dynamic relaxation method)를 적용하여 SLWR의 정적형상을 추정할 수 있는 수치해석 기법을 개발하였으며, 결과를 이용하여 강한 비선형 문제를 풀수 있었다. SLWR은 일반적인 라이저보다 굽은 곡률이 크기 때문에, 이로 인한 와류유기진동(VIV) 현상이 복잡하게 발생한다. Jung; et al.(2019)은 굽은 라이저의 와류유기진동 특성 연구를 수치해석을 통하여 수행하였다. Jo et al.(2014)은 천해역의 유연라이저에 대한 연성해석과 비연성해석을 비교하는 연구를 수행하였다. 계류선은 SPM(Single Point Mooring)을 사용하였으며, 라이저는 유연 라이저를 사용하였다. 선박의 offset의 범위 안에서 제한조건을 만족하기 위해 안전성의 확보가 요구

되었다. 기존의 연구에서는 부유체와 계류선의 연성해석에 관하여 집중적으로 연구되었으나, SLWR 등과 같은 라이저를 고려한 부유체/계류선/라이저의 연성 해석에 관한 연구를 수행한 사례는 거의 없다.

본 연구에서는 SLWR과 계류된 부유체의 연성해석 연구를 수행하였다. 연성 해석결과는 비연성 해석결과와 비교되었으며, 부유체의 운동과 계류 성능 뿐만 아니라 SLWR의 응답 특성을 검토하였다. 연성 해석에서는 SLWR 포함유무에 따른 효과를 검토하였으며, 비연성 해석에서는 부유체의 최대 offset를 포함한 해석을 수행하였다. 다양한 파향조건에서 수치해석을 수행하였으며, 정상상태(Intact)와 손상상태(Damaged)에서 응답 특성을 검토하였다. 본 연구에서 파향, offset, 하중 케이스, 해석방법에 따른 영향을 검토하였다.

2. 대상모델 및 해석조건

2.1 해석방법론

본 절에서는 연성해석을 수행하는 해석방법론에 대하여 기술하며, Fig. 3은 연성 해석과 비연성 해석의 방법론적인 차이를 보여준다. 연성 해석은 부유체와 라이저, 그리고 계류선이 서로 하중을 주고받으며, 부유체의 하중으로 파랑기진력, 파랑표류력, 부가질량 및 감쇠 계수를 고려한다. 비연성 해석에서 부유체 운동은 라이저와 계류선에 하중으로 작용하나, 라이저와 계류선의 응답은 부유체 운동에 영향을 미치지 않는다. 부유체의 운동은 주파수 성분에 따라 크게 파주파수와 저주파수 응답으로 구분된다. 비연성 해석에서 파주파수 응답은 운동 RAO(Response Amplitude Operator)인 변위형태로 직접 입력하고, 이 때 저주파수 운동은 제외한다. 일반적으로 초기설계에서 저주파수 응답에 의해 발생하는 부유체의 offset을 설계 기준의 최대 offset으로 고려하여 라이저의 안전성을 보수적으로 평가한다. 연성해석과 비연성해석에서 공통적으로 조류 하중과 부유체의 횡동요 감쇠를 포함하였다.

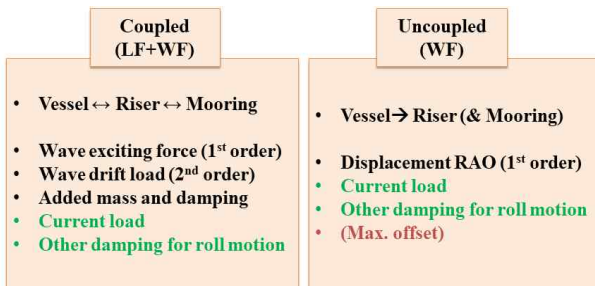


Fig. 3 Comparison of input data on coupled and uncoupled analysis

2.2 대상모델

본 연구에서 검토하는 SLWR은 수심 1,600m에 설치되며,

대상 수심을 기준으로 선정되었다. SLWR은 API 2RD(API, 1998)와 API RP 1111 기준으로 설계되었으며, 외경과 내경은 273.05 mm와 228.60mm이다. 부력재의 외경은 776mm이며, 물속에서 단위 길이당 0.14 톤의 부력을 갖는다. 대상 부유체와 SLWR 연결 부위에서 응력을 저감하기 위해 flexjoint를 고려하였다. Table 1은 SLWR의 제원을 보여준다(Park et al., 2019). 대상 부유체는 FPSO이며, spread 계류 시스템이 사용된다. FPSO의 설계 흘수는 약 17.5m이며, 설계 흘수에서 배수량은 대략 340,000톤 이다. Table 2는 FPSO의 제원을 보여준다. SLWR은 FPSO의 좌현에 위치하는 것으로 가정하였으며, 본 연구에서 1세트의 SLWR을 고려한 연성해석을 수행하였다. 계류선은 16개의 계류선이 spread 방식으로 계류되며, 체인-폴리에스테르로프-체인으로 연결된다. Table 3은 계류선의 제원을 보여준다.

Table 1 Pipe specification for SLWR (Ref. Park et al., 2019)

Object	Item	Unit	Value
Design Condition	Water Depth	m	1,600
	Design Pressure	MPa	45
Riser Pipe	Pipe Grade		API-5L X65, Seamless
	Material yield stress	MPa	448
	Inner Diameter	mm	228.60
	Wall Thickness	mm	22.225
	Outer Diameter	mm	273.05
Buoyancy	Wall Thickness	mm	274
	Outer Diameter	mm	776
	Buoyancy	ton/m	0.47
	Weight	ton/m	0.33
	Submerged Weight	ton/m	-0.14

Table 2 Specification of FPSO

Item	Unit	Value
LBP	m	322.2
Depth	m	30.0
Draft	m	abt. 17.5
Displacement	MT	abt. 340,000
GM	m	6.463

Table 3 Specification of Mooring lines

Item	Unit	Bottom chain	Polyester Rope	Top Chain
Grade	-	R4s		R4s
Length	m	190	1950	200
Nominal Dia.	mm	168	296	168
MBL	kN	24,281	24,525	24,281
Weight in air	kN/m	5.538	0.556	5.538
Weight in water	kN/m	4.818	0.139	4.818
Axial Stiffness (EA)	kN	2.26E+06	3.68E+05	2.26E+06

2.3 환경조건 및 설계기준

대상 해역은 서아프리카 해역이며, 대상해역의 파랑조건을 고려하여 main swell, secondary swell, wind sea를 고려하였다. 조류는 100년 재현주기 기준으로 수면에서 2.1 m/s이고, 해저면 부근에서 0.1m/s인 프로파일을 고려하였다. Table 4는 100년 재현주기의 파랑조건을 보여준다. 다양한 파향에서 조류는 파도와 같은 방향으로 입사하는 것으로 가정하였으며, 파도 및 조류는 BoD(Basis of Design)을 기준으로 결정하였다.

Table 4 The environmental condition of a wave under 100 year return period

Parameter	Hs (m)	Tp (s)
Main Swell	4.32	15.3
Secondary Swell	2.66	19.9
Wind Sea	2.23	8.3

연성해석에서 부유체, 계류선, 라이저에 대해 각각 설계기준을 만족하는지 검토한다. 부유체의 설계기준은 저주파수 운동에 의해 발생하는 offset이며, 계류선 기준은 안전율을 고려한 계류 장력이다. 또한, 라이저는 길이를 따라 발생하는 응력 기준의 만족여부를 확인한다. 부유체의 offset 기준은 극한상태(Extreme)와 생존상태(Survival)에 대해 수심의 8%와 10%를 고려한다. 계류선의 MBL(Minimum Breaking Load)은 정상상태(Intact)와 손상상태(Damaged)에 대해 각각 1.67과 1.25의 안전율을 적용하며, 여기서 정상상태와 손상상태는 극한상태와 생존상태를 각각 의미한다. 라이저의 응력은 등가응력(von Mises Stress, VMS)을 기준으로 극한상태와 생존상태에 대해 1.2와 1.5의 안전율을 적용한다. 더불어 그 외에 라이저의 장력, 굽힘 모멘트 등을 함께 검토한다.

2.4 초기계류해석을 통한 연성해석 케이스 선별

연성해석 조건을 선별하기 위해 계류해석을 우선적으로 수행하였다. 계류해석은 정상상태와 손상상태에 대해 각각 수행되었으며, 계류장력 및 offset 기준의 만족여부를 확인하였다. 파향은 22.5도 간격으로 고려하였으며, 가장 큰 응답은 횡과 조건인 90도 파향 조건과 더불어 67.5도와 112.5도에서 발생하였다. Fig. 4는 FPSO와 계류선 그리고 SLWR를 포함한 OrcaFlex 모델링의 평면도를 보여준다. 연성해석은 정상상태와 손상상태에 대해 각각 수행하며, 손상상태의 경우 가장 큰 장력이 발생한 조건에 대해 수행하였다. 초기 계류해석 결과 횡과 조건인 90도 파향에서 7번 계류선이 손상된 조건에서 가장 큰 장력이 발생하였으며, 선미파인 0도 파향조건에서는 11번 계류선이 손상된 조건의 장력이 가장 크다. 라이저가 좌현에 위치하므로 비대칭성을 고려하여 전 방향에 대해 22.5도 간격으로 16개의 각도에 대한 해석을 수행하였다.

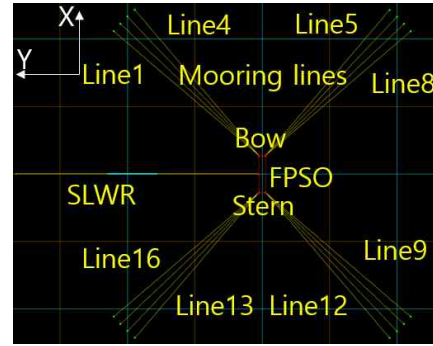


Fig. 4 Planview of OrcaFlex modeling including FPSO, mooring lines, and SLWR

3. 연성해석

연성해석을 통해 FPSO의 파주파수 및 저주파수 운동 응답과 더불어 라이저의 유무에 따른 계류장력 응답 그리고 다양한 파향조건에서 SLWR의 응답에 대해 자세히 검토하였다. 특히, SLWR의 응답은 통상적인 설계방법과의 결과 비교하여 추가로 검토하였다.

3.1 FPSO 운동

계류선과 SLWR은 부유체 운동에 크게 영향을 받으며, 부유체의 운동에 대해 연성 해석과 비연성 해석 결과를 비교하였다. Fig. 5는 선수파조건에서 연성 해석과 비연성 해석에 관한 운동 RAO 비교 그래프이다. 주파수영역 해석은 HOBEM 기반의 AdFlow와 상용프로그램인 WADAM으로 계산하였으며, 주파수해석 결과를 시간영역 프로그램인 OrcaFlex에 입력하였다. 연성해석에서는 앞서 언급한 바와 같이 파랑기진력, 파랑표류력, 부가질량 및 감쇠 계수를 입력하였으며, 비연성 해석에서는 변위형태의 RAO를 직접 입력하였다. 초록색 실선은 AdFlow 주파수 영역 해석 결과이며, 빨간색 네모 표식은 WADAM을 이용한 주파수 영역 해석 결과이다. 파란색 원형 표식과 초록색 세모 표식은 연성 해석과 비연성 해석에 관한 OrcaFlex 해석 결과이다. 파주파수 성분에 해당하는 운동 RAO는 모든 결과에서 유사한 응답을 보인다. 다음으로 저주파수 성분에 대해 검토하였다. 비연성 해석에서는 저주파수 운동이 고려되지 않으므로 연성해석과 결과 차이가 발생한다. Fig. 6은 횡과조건에서 연성 해석과 비연성 해석에 관한 저주파수 운동의 비교 그래프이다. Fig. 6(a)는 정상상태에서 90도 파향조건 3시간 시뮬레이션에 대한 연성 해석과 비연성 해석의 시계열이며, 연성 해석과 비연성 해석 결과는 각각 빨간색 실선과 초록색 점선으로 나타내었다. 연성 해석에서는 파랑표류력을 포함하며, 계류된 부유체는 저주파수 운동이 발생한다. 그러나 비연성 해석에서는 파주파수 성분만 포함하므로 저주파수 응답이 발생하지 않는다. 이를 자세히 검토하기 위해 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)에 PSD(Power Spectrum Density)와

표준편차 응답을 나타내었다. 그림과 같이 비연성 해석에서는 연성해석에 비해 수평면 방향 운동이 매우 낮게 평가된다. 통상적인 초기설계에서는 이를 보상하기 위해 최대 offset을 적용한다. SLWR 포함유무에 따른 부유체의 운동 응답을 비교하였다. Fig. 6(c)에서 나타난 바와 같이 SLWR을 포함한 검정색 바 그래프와 SLWR을 제외한 빨간색 바 그래프 응답은 정상상태에서 유사한 응답을 보였다. 즉, 부유체에 비해 상대적으로 질량이 작은 SLWR 응답이 부유체의 운동에 큰 영향을 미치지 않는다.

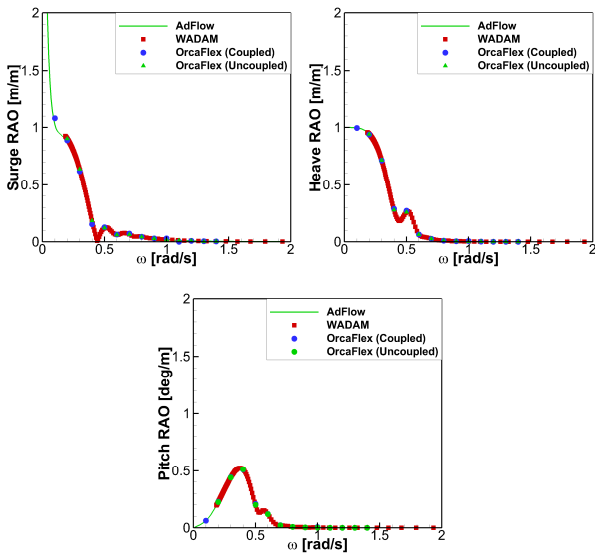
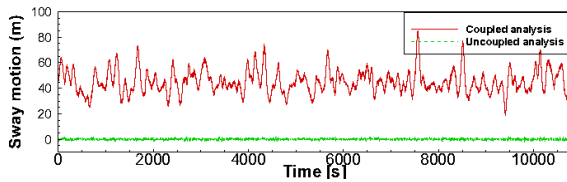
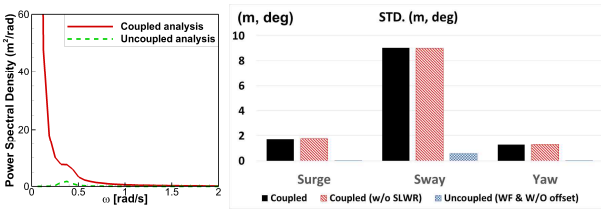


Fig. 5 Comparison of motion RAO between coupled and uncoupled analysis under head sea condition



(a) time series



(b) PSD

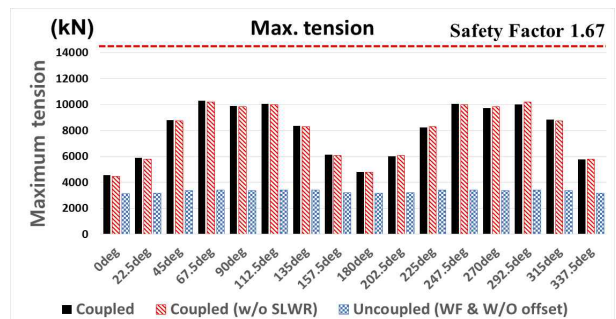
(c) Standard deviation

Fig. 6 Comparison of low frequency motion between coupled and uncoupled analysis under beam sea condition

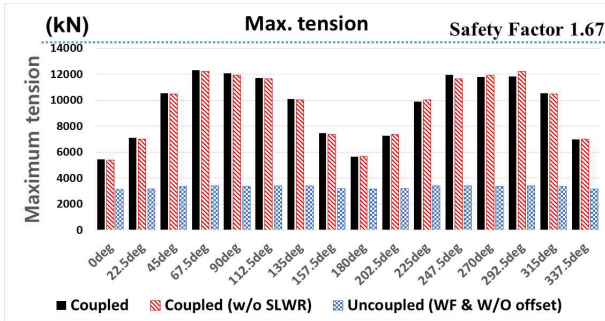
3.2 계류 성능

앞서 부유체 운동에서 검토한 바와 같이 부유체의 파주파

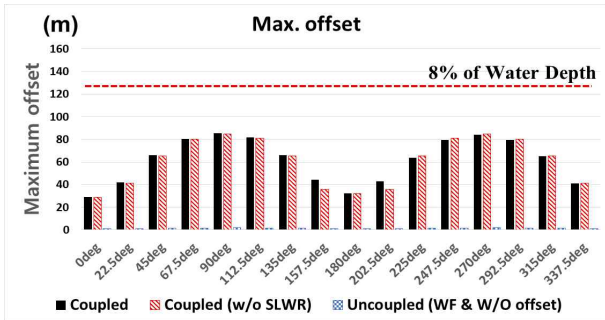
수 응답은 연성 해석과 비연성 해석에서 유사하나, 저주파수 응답은 큰 차이를 보였다. 그리고 부유체의 저주파수 응답은 계류 성능과 직결된다. Fig. 7은 다양한 파향조건에서 정상상태와 손상상태에 대한 계류선의 최대장력과 부유체의 최대 offset 결과를 보여준다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 정상상태와 손상상태에 대한 최대장력 응답이다. 검정색 바 그래프는 계류선과 SLWR을 포함한 연성 해석결과이며, 빨간색 그래프는 SLWR을 제외한 연성 해석결과이다. 그리고 파란색 그래프는 offset을 포함하지 않은 비연성 해석결과이며, 비연성 해석에서는 초기장력과 파주파수 성분에 의한 응답만 포함된다. 비연성 해석결과는 연성 해석결과와 큰 차이를 보이며, 이는 계류 성능이 저주파수 성분에 거의 지배되기 때문이다. 연성해석에서는 저주파수 성분이 포함되며, 횡파조건인 90도와 270도 주변 파향조건에서 다소 큰 응답이 발생하였다. SLWR 포함유무에 따라 정상상태에서 응답의 차이는 다소 작으나, 손상상태에서 일부 파향에서 다소 큰 차이를 보였다. 본 연구에서 라이저의 초기 장력은 계류선 1개의 초기 장력의 약 63.6%이며, 라이저로 인해 발생된 비대칭성으로 인해 응답의 차이를 보이는 것으로 판단된다. Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)는 정상상태와 손상상태에서의 최대 offset 결과이며, 계류선의 장력과 동일하게 횡파조건인 90도와 270도 주변 파향조건에서 다소 큰 응답을 보인다. 최대 offset은 역시 연성해석에서 크게 평가되며, 이는 비연성해석에서 저주파수 응답이 포함되지 않아 부유체의 offset이 거의 발생하지 않기 때문이다. 그리고 매달린 라이저로 인한 비대칭성의 증가로 인해 offset의 변화가 발생하며, 특히 계류선 하나가 파손된 손상상태에서 좌현에 위치한 라이저로 인한 offset의 변화가 크게 보여진다. 상대적으로 상부장력이 작은 SLWR은 부유체의 운동에 영향을 미치지 못하지만 계류 성능에는 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 정상상태와 손상상태의 경우 계류선 장력의 안전율은 MBL의 1.67과 1.25가 적용되었다. 손상상태에서 정상상태에 비해 최대장력이 증가하였으나, 정상상태와 손상상태에서 장력 기준을 모두 만족하는 것을 확인할 수 있다. 최대 offset은 손상상태에서 정상상태에 비해 크게 평가되었으며, 정상상태와 손상상태에 대해 수심의 8%와 10%의 설계기준을 모두 만족하였다.



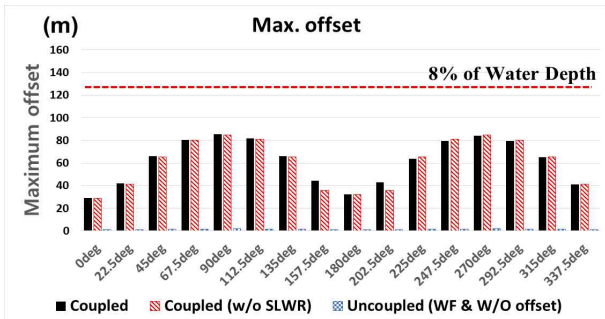
(a) Intact - Maximum tension



(b) Damaged - Maximum tension



(c) Intact - Maximum offset



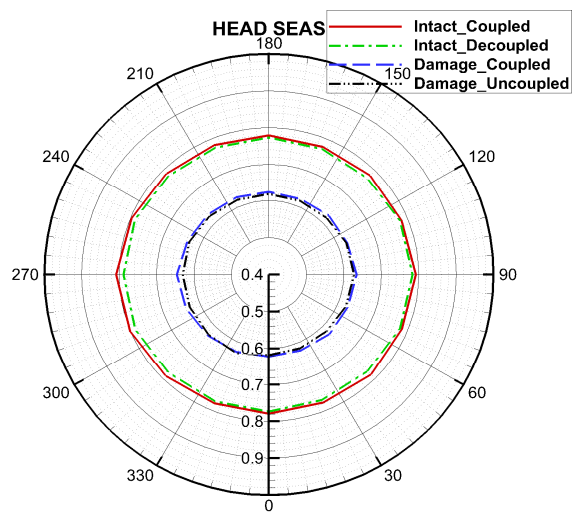
(d) Damaged - Maximum offset

Fig. 7 Maximum tension and offset under intact and damaged conditions under various wave headings

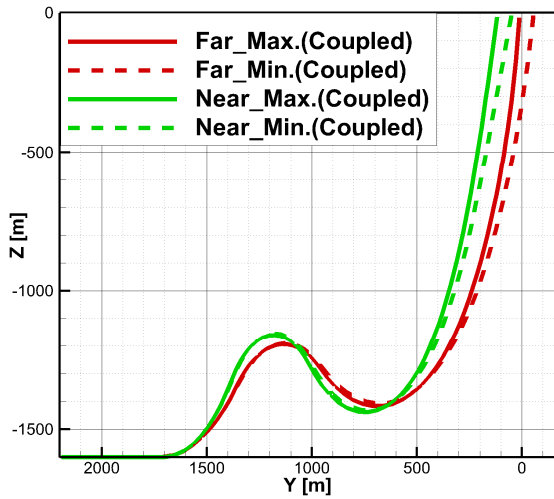
3.3 SLWR 응답

SLWR은 API RP 2RD를 참고하여 WSD (Working stress design) 방법을 기준으로 평가되었으며, 허용응력에 각 조건별로 적절한 안전율이 적용되었다. SLWR의 안전율은 정상상태에서 1.2와 손상상태에서 1.5를 적용하였으며, 항복응력을 기준으로 평가되었다. Fig. 8은 SLWR 응답에 관한 연성 해석 결과 그래프이다. Fig. 8(a)는 정상상태와 손상상태에서 허용응력 비율을 보여준다. 여기서 빨간선과 초록선은 정상상태의 연성 해석과 비연성 해석응답이며, 파란선과 검정선은 손상상태의 연성 해석과 비연성 해석응답이다. 허용응력 비율은 모든 해석조건에서 설계기준인 1.0을 넘지 않는 것으로 평가된다. Fig. 8(a)에 표시된 바와 같이 정상상태 조건에서 허용응력 비율이 상대적으로 높게 평가된다. 이는 정상상태에서 작은 안전율이 적용되었기 때문이다. 반면 손상상태에서 상대적으로 큰 안전율이 적용되어 허용응력 비율은 낮게 평가되었으며, 손상상태에서 라이저의 허용응력

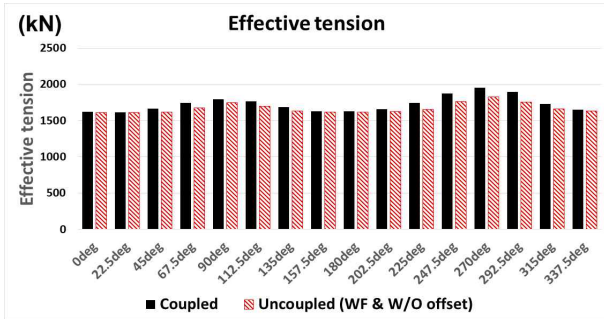
은 크게 증가하지 않았다. 즉, 계류선 하나가 파손된 손상상태에서도 라이저의 응력의 증가는 크지 않은 것으로 평가된다. 그리고 연성 해석 결과가 비연성 해석결과에 비해 약간 더 큰 응답을 보였으며, 횡파조건에서 선수 및 선미파 조건에 비해 응답이 다소 커짐을 확인하였다. 라이저의 길이에 따른 응답을 자세히 살펴보기 위해 SLWR의 전체 형상을 Fig. 8(b)에 도시하였다. 270도 파향조건에서 최대 및 최소 응답은 빨간색 실선과 점선으로 도시하였으며, 90도 파향의 결과는 초록색 실선과 점선으로 나타내었다. 여기서 270도 파향조건은 far 조건이며, far 조건은 저주파수 운동에 의해 발생된 offset으로인해 선박이 라이저가 해저바닥에 부딪히는 지점인 TDZ로부터 멀어지는 경우를 의미한다. 반면 90도 파향조건인 near 조건은 선박이 TDZ로 가까이 위치한 조건을 의미한다. SLWR의 상부 영역에서 응답의 최대/최소 차이값은 부유체 운동의 영향으로 인해 상대적으로 크게 나타나며, sag와 hog를 지나면서 TDZ에서의 응답 변화는 거의 발생하지 않는다. Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)는 파향별 정상상태의 최대 장력과 굽힘 모멘트 응답을 보여주며, 연성 해석에서는 저주파수 운동에 의한 SLWR 상부와 sag/hog 위치에서 형상의 변화로 인해 응답의 변화가 크게 발생한다. 여기서 270도 파향조건은 부유체가 TDZ로부터 멀리 떨어진 far 조건이며, far 조건에서 SLWR 상부에서의 장력이 커지고 sag/hog의 굽힘 모멘트는 작아진다. 반면, 부유체가 TDZ로부터 가까운 near 조건에서는 상부 장력이 작아지고 굽힘 모멘트가 커진다.



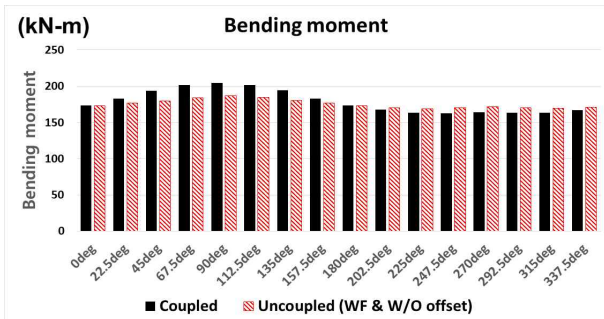
(a) Allowable von mises stress (vMS / allowable stress)



(b) SLWR configuration



(c) Intact - Effective tension



(d) Intact - Bending moment

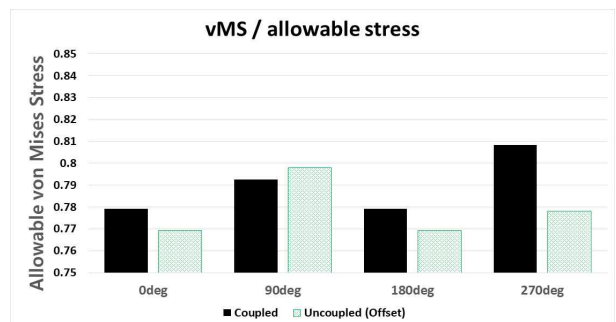
Fig. 8 SLWR coupled analysis results under various wave headings

3.4 통상적인 설계방법과의 라이저 응답 비교

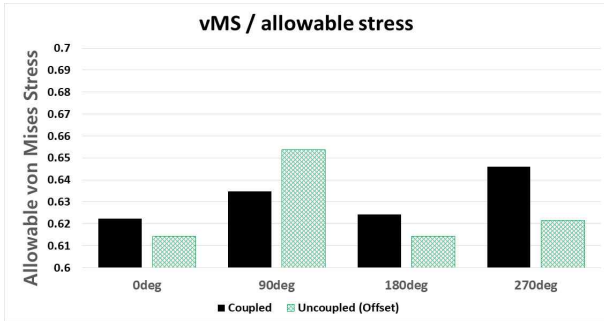
통상적인 라이저의 초기설계는 최대 offset을 적용한 비연성 해석으로 수행하며, 이 방법은 보수적인 결과를 제공한다. 반면, 본 연구에서는 통상적인 설계방법을 이용한 라이저 응답 평가에 앞서 최대 offset 설정 없이 부유체와의 연성해석을 수행하여 두 해석 결과를 비교하였다. 본 절에서는 정상상태와 손상상태에서 통상적인 설계방법으로 평가한 라이저 응답을 살펴보았다. Fig. 9는 연성 해석과 최대 offset을 고려하는 비연성 해석의 SLWR 응답에 관한 비교 결과이다. 여기서 검정색 바 그래프는 연성 해석결과이며, 초록색 그래프는 비연성 해석결과이다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 정상상태와 손상상

태에서 SLWR의 허용 증가응력 비율을 보여준다. 앞서 살핀 바와 같이 정상상태 조건에서 허용 증가 응력 비율이 높게 평가되며, 정상상태와 손상상태에서 모두 API 기준을 만족하거나 작은 안전율이 적용된 정상상태에서 손상상태에 비해 주의가 요구된다. 통상적인 설계방법이 적용된 해석결과에서도 손상상태에서 라이저 응력의 증가가 크지 않은 것으로 평가된다. 두 조건에서 모두 횡파조건인 90도와 270도 파향조건에서 응답이 크다. 연성 해석에서는 270도 파향인 far 조건에서 응답이 크고, 최대 offset을 포함한 비연성 해석에서는 90도 파향인 near 조건에서 응답이 크게 발생하였다. Fig. 9(c)와 Fig. 9(d)는 정상상태에서의 최대 장력 및 최대 굽힘 모멘트 결과이며, 최대 장력과 굽힘 모멘트의 파향별 경향은 유사하나 응답의 크기는 서로 다르다. 연성 해석에서는 270도 파향에서 장력이 크게 평가되며, 비연성 해석에서는 90도 파향에서 굽힘 모멘트가 크게 평가되었다.

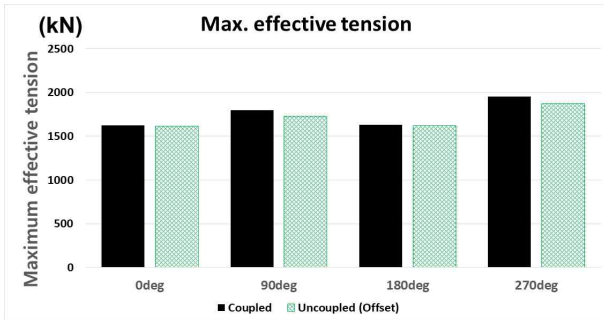
라이저 응답을 자세히 살펴보기 위해 정상상태 조건에서의 위치별 응답특성을 확인하였다. Fig. 10은 라이저 위치별 응답특성을 비교한 그래프이다. 왼쪽부터 증가응력, 장력 그리고 굽힘 모멘트 결과이다. 빨간색과 초록색 선은 연성 해석의 270도와 90도 파향조건의 결과이며, 파란색 선은 비연성 해석의 90도 파향 결과이다. 90도와 270도 조건은 각각 near와 far 조건이며, 빨간색 그림과 같이 far 조건에서 SLWR 상부에서 증가응력이 크게 발생하고 near 조건에서는 sag/hog에서 응답이 크게 발생하였다. 장력은 상부에서 가장 크고 부력제로 인해 sag/hog에서 작은 반면, 굽힘 모멘트는 상부에서 flexjoint로 인해 상대적으로 작고 sag/hog에서 형상변화로 인해 크게 나타난다. 비연성 해석의 90도 조건에서는 최대 offset을 적용함에 따라 sag/hog 지점에서의 굽힘 모멘트가 크게 증가하며, 증가한 굽힘 모멘트로 인해 증가 응력이 hog 지점에 가장 크게 나타났다. 일반적으로 SCR은 최대 offset으로 인해 TDZ과 라이저의 매달린 길이(Suspended length)의 변화로 인해 장력이 증가한다. SLWR은 SCR과 응답 특성이 서로 다르므로, 연성해석을 통해 SLWR의 위치별 응답특성의 면밀한 검토가 요구된다.



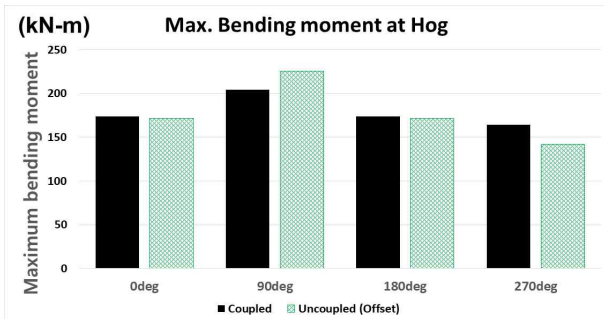
(a) Intact - VMS / allowable stress



(b) Damaged - VMS / allowable stress



(c) Intact - Max. effective tension



(d) Intact - Max. bending moment at Hog

Fig. 9 Comparison of SLWR responses under coupled and uncoupled analysis including maximum offset

리고 SLWR 응답에 대하여 연성 해석과 비연성 해석 결과를 상호비교 하였다. 본 수치해석 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 부유체 운동은 좌우좌수 성분과 저주좌수 성분으로 나눌 수 있으며, 연성 해석과 비연성 해석에서 좌우좌수 성분은 거의 유사한 결과를 보였다. 그러나 비연성 해석에서 포함되지 않은 저주좌수 성분에 의해 수평방향의 운동이 낮게 평가되며, 이를 보상하기 위해 최대 offset을 적용하는 등의 방안이 요구된다. 또한, 상대적으로 질량이 작은 SLWR 응답은 부유체 운동의 변화에 거의 영향을 미치지 않았다.

- 계류 성능은 저주좌수 응답에 지배적이므로 시간영역 연성해석을 통해 평가하는 것이 타당하다. 또한 정상상태에 비해 손상상태에서 SLWR의 유무에 따른 offset 및 장력이 변화가 두드러지게 발생한다. 이는 라이저의 상부장력이 계류선 1개 초기 장력의 약 63.6%이므로, SLWR의 위치에 따라 야기된 비대칭성이 계류 성능에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

- SLWR 응답은 허용 등가응력을 기준으로 평가되었으며, 낮은 안전율이 적용되는 정상상태에서 허용 등가응력 비율이 크게 평가된다. 이는 손상상태에서 동적 응답의 증가가 크지 않기 때문이다. far 조건과 near 조건에서 등가응력이 다소 크게 나타나며, 이는 far 조건에서는 상부장력이 증가하고 near 조건에서는 부력재가 위치한 sag/hog 위치에서 굽힘 모멘트가 크기 때문이다. 또한 연성해석에서는 상부장력의 증가가 크게 나타나는 반면, 최대 offset을 고려한 비연성 해석에서 sag/hog 위치에서 굽힘 모멘트가 크게 증가한다. 이는 일반적인 SCR의 응답 특성과는 다르므로, SLWR에서는 연성해석을 통해 위치별 응답의 면밀한 검토가 요구된다.

References

- [1] API Recommended Practice 2RD.(1998), "Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)", American Petroleum Institute, USA.
- [2] Cozijn, J. L. and Bunnik, T. H. J.(2004), "Coupled Mooring Analysis for a Deep Water Calm Buoy", Proceedings of the ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, Canada, OMAE2004-51370.
- [3] Eom, T. S., Kim, M. H. and Bae, Y. H.(2014), "Local dynamic buckling of FPSO steel catenary riser by coupled time-domain simulations", Ocean Systems Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 215-241.
- [4] Heurtier, J. M., Buhan, P. L., Fontaine, E., Cunff, C. L., Biolley, F. and Berhault, C.(2001), "Coupled Dynamic

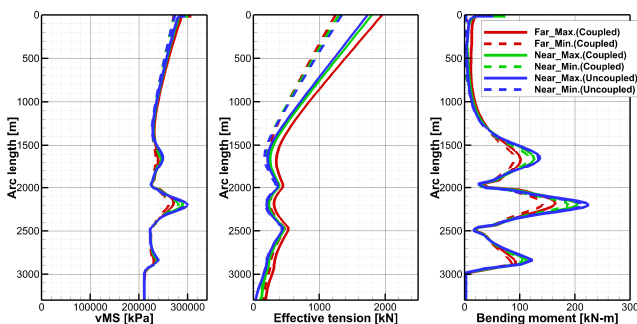


Fig. 10 Comparison of SLWR responses along the riser length (Left : VMS, Middle : Effective tension, Right : Bending moment)

4. 결 론

본 연구에서는 SLWR와 계류된 부유체의 연성 응답에 관한 수치해석 연구를 수행하였다. 부유체 운동과 계류 성능, 그

Response of Moored FPSO with Risers”, Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway.

- [5] Jo, C. H., Kim, D. Y., Hwang, S. J. and Rho, Y. H.(2014), “A Comparison of Coupled and Uncoupled Dynamic Analysis for the Flexible Riser in Shallow Water”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 2, pp. 195-201.
- [6] Jung, J. H., Oh, S. H., Nam, B. W., Park, B. W., Kwon, Y. J. and Jung, D. H.(2019), “Numerical Study on Flow Characteristics Around Curved Riser”. Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 33, No. 2, pp. 123-130.
- [7] Kwon, Y. J., Nam, B. W., Kim, N. W., Park, I. B., Won, U. W, Hong, S. Y. and Shin, C. S.(2017), “Model Tests for Normal Laying Stage of J-lay Installation”, Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineers Conference, Guje, Korea.
- [8] Oh, S. H., Jung, J. H., Park, B. W., Kwon, Y. J. and Jung, D. H.(2018), “Numerical Study on Estimation of Static Configuration of Steel Lazy Wave Riser Using Dynamic Relaxation Method”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 32, No. 6, pp. 466-473.
- [9] Park, B. W., Kwon, Y. J., Jung, J. H., Oh, S. H., and Jung, D. H.(2018), “Study on Initial Configuration of SLWR(Steel Lazy Wave Riser) considering internal flow density and seabed conditions”, Offshore Plant Design Research Group 2018 Spring Workshop, Seoul, Korea.
- [10] Park, B. W., Oh, S. H., Kwon, Y. J., Jung, J. H. and Jung, D. H.(2019), “Dynamic Analysis of SLWR Subjected to Internal Slug Flow Conditions”, Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 1861-1867.
- [11] Park, K. S., Choi, H. S., Kim, D. K., Yu, S. Y. and Kang, S. C.(2015), “Structural Analysis of Deepwater Steel Catenary Riser using OrcaFlex”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 29, No. 1, pp. 23-34.
- [12] Szczepanski, D., Balash, C. and Martens, M.(2018), “A Steel Lazy Wave Riser for Turret VS. Spread-Moored FPSO in Extreme and Wave-Induced Fatigue Conditions”, Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid, Spain, OMAE2018-78736.
- [13] Yoo, K. K. and Joo, Y. S.(2017), “Sensitivity Study on SCR Design for Spread-Moored FPSO in West Africa”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 111-120.

Received 7 October 2019

Revised 31 October 2019

Accepted 19 November 2019