



부이형 수중감시 시스템에서 계류라인의 구조 설계

변양현*, 최범규**, 오택원***

A Design of Mooring Line for the Buoy-Enabled Underwater Surveillance System

Yang-Hun Byun*, Bum-Kyu Choi**, and Tae-Won Oh***

이 논문은 국방과학연구소 계약번호(UC150004DD)에 의거 수행한 응용연구결과 중 일부임

요 약

부이형 수중감시 시스템은 필요시 특정해역에 설치되어 일정기간 운용하고 회수이후, 다른 해역으로 이동하여 수중감시를 수행하는 장비이다. 본 논문에서는 부이형 수중감시 시스템에 적용되는 계류라인에 대하여 설치성을 유지하고 안정적인 운용이 가능하도록 계류방법을 선정하고 계류라인의 구조를 설계하였다. 부이형 수중감시 시스템의 구성요소인 배열센서조립체의 신호전송 케이블의 간섭을 고려하여 2점 계류방법을 선정하였고, 계류라인은 해역 이동에 따른 설치/회수성을 고려하여 부이체인, 나일론 로프, 그리고 앵커체인의 3단 복합구조를 기본 구성으로 설계하였다. 설계 유효성을 검증하기 위하여 수치실험과 조파수조 시험을 수행하여 유사성을 확인하였으며, 최종적으로 해상시험 위치의 환경을 대상으로 계류라인의 설계를 수행하였다. 최종 설계에 의해 제작된 계류라인은 해상시험을 통하여 설계 시 고려한 유의파고 이상에서도 안정적인 계류를 수행함을 확인하였다.

Abstract

The buoy-enabled underwater surveillance system is a device that is installed in a particular sea area and operated for a certain period of time and moved to another sea area after recovery. In this paper, a mooring method which is applied for a buoy-enabled underwater surveillance system was selected to maintain installation and ensure stable operation. Also, the structure of the mooring line was designed. Two-point mooring method was selected considering interference with the communication cable of array-assembly. The composite structure of buoy chain, nylon rope, and anchor chain is designed as the basic component of mooring line. For the verification of design, a numerical simulation and wave tank experiment were performed. Their results were confirmed similarity in test condition. Finally, the mooring lines were designed for the environment of the sea trial location. The mooring line produced by the final design confirmed the stability above the significant wave height considered in the design on the sea trial.

Keywords

mooring line design, mooring method, buoy-enabled underwater surveillance system, composite structure mooring line

* 한화시스템 해양연구소(교신저자)
 - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9120-7282>
 ** 신동디지털
 - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2323-9287>
 *** 오션스페이스
 - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9068-2169>

• Received: Nov. 29, 2018, Revised: Dec. 12, 2018, Accepted: Dec. 15, 2018
 • Corresponding Author: Yanghun Byun
 Senior Engineer/Underwater System Team NAVAL R&D Center
 Hanwha Systems, Gumi, Gyeongbuk, Korea,
 Tel.: +82-54-460-8703, Email: dofwave@gmail.com

1. 서 론

일반적으로 해상에서의 안전을 위해서 주로 이용되는 부이는 해양관측 및 탐사부분으로 그 영역을 확장하고 있다. 기상청에서는 기상관측자료의 모니터링을 위하여 해상에서 부이를 운용중이며, 또한 최근에는 적조를 예측하고 감시를 위하여 부이를 이용하기도 한다[1]. 또한 부이를 사용하여 수중감시를 수행하는 개념도 나타나게 되었다. 한번 설치되면 설치지역에 국한되어 운용되는 고정형 수중감시체계와는 달리 필요시 특정 해역에 설치되어 일정기간 운용이후, 회수하여 다른 해역으로 이동하고 재설치하여 수중감시를 수행하는 부이형 수중감시 시스템은 해양환경에 대한 설치/회수성 및 안정성을 유지하는 설계가 필수적이다. 부이형 수중감시 시스템은 크게 부이조립체, 계류라인, 그리고 배열센서조립체로 구성된다. 일반적인 기상관측부이와는 다르게 변화하는 해상상황에 대하여 배열센서조립체의 설치상태 유지가 필수적으로 요구되며 태풍과 같은 악천후 시 긴급 회수 또는 시스템의 생존성이 설계와 제작에 반영되어야 한다. 본 논문에서는 부이형 수중감시 시스템의 구성요소 중 계류라인에 대한 설계와 제작을 수행하였다. 설계와 검증을 위하여 수치실험과 조파수조 시험을 수행하여 수치실험 프로그램의 설계 유효성을 검증하고 해상시험 해역을 대상으로 최종 설계를 수행하였다. 최종 설계된 계류라인은 실제 제작하여 해상시험을 통하여 설계 사양 이상의 안전성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 부이형 수중감시 시스템의 계류방법과 계류라인 구조에 대하여 기술한다. 3장에서는 설계 및 해석의 유효성을 검증하기 위하여 수치실험과 조파수조시험 결과에 대하여 기술한다. 4장에서는 해상시험해역을 대상으로 최종 설계한 계류라인 구조와 실제 제작하여 운용한 해상시험 결과에 대하여 기술한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 향후연구에 대하여 기술한다.

II. 계류방법 및 계류라인 구조

부이형 수중감시 시스템은 고정형 수중감시체계와는 다르게 해역에 설치되어 수중감시를 수행하고

회수 이후, 해역을 이동하여 설치하고 운용할 수 이 동형 수중감시 시스템이다. 부이형 수중감시 시스템에서 계류라인은 설치해역에서 부이조립체와 배열센서조립체의 설치성을 유지하고 운용설계 사양인 최대 유의파고 4.0m에 대하여 안정성이 유지되도록 설계 되어야 한다. 계류라인 설계 이전, 수중에서 수신되는 신호를 부이조립체로 전달되는 신호전송 케이블과 간섭이 없는 계류방법 선정이 선행되어야 한다. 계류방법 및 계류라인 설계를 위하여 영국 Orcina 사에서 Flexible riser와 계류 시스템의 설계와 해석을 위해 개발하여 환경변화가 심한 해양시스템의 정적/동적 해석을 위한 모델링에서 광범위하게 사용되는 Orcaflex를 이용하였다[2]. 부이형 수중감시 시스템에 적합한 계류방법을 선정을 위하여 1점 계류, 2점 계류, 그리고 3점 계류 방법[3]을 고려하여 그림 1에서 나타난 신호전송 케이블과 간섭이 발생하지 않는 2점 계류 방법이 선정되었다.

부이형 수중감시 시스템의 계류방식을 선정하기 위하여 미국의 National Data Buoy Center의 해양기상관측용 부이에 적용되는 All-chain, Semi-taut, 그리고 Inverse-Catenary 3종류의 계류방식을 고려하였다 [4]. All-chain 방식은 체인으로만 구성되기 때문에 큰 수직하중이 가지므로 낮은 수심에서만 사용된다. Inverse-Catenary 방식은 심해계류를 목적으로 사용되며 나일론, 와이어로프, 금속체인으로 구성되며 정적하중을 제어하는데 효율적이지만 많은 진동을 발생하여 피로파괴의 위험이 높다. 부이형 수중감시 시스템에서는 이동성과 설치/회수성 등을 고려하여 중간 수심 환경에 사용되는 Semi-taut 방식을 적용하였다.

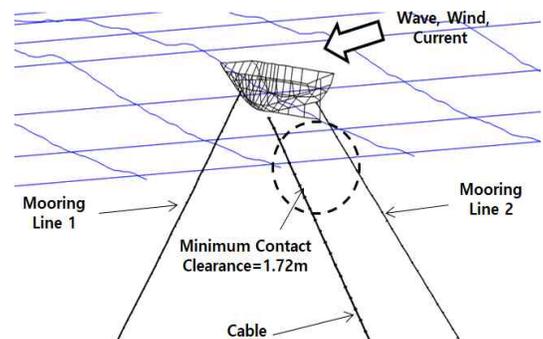


그림 1. 2점 계류방법

Fig. 1. 2-point mooring method

Semi-taut 방식 계류라인의 기본구조는 부이조립체와 연결되는 부이체인(Buoy chain), 시스템을 지지하는 무게추와 연결되는 앵커체인(Anchor chain), 그리고 부이체인과 앵커체인 사이로 나일론 로프(Nylon rope) 또는 와이어(Wire)로 구성되는 3단 복합구조로 설계되었다.

III. 수치실험과 조파수조시험

3단 복합구조로 설계한 계류라인의 유효성을 검증하기 위하여 특정 환경을 대상으로 수치실험과 조파수조시험을 통하여 결과를 비교하였다[5]. 검증 환경은 수심 30m, 유의파고는 5.0m이고 표 1에서 기술한 LC1에서 LC4까지 4가지 경우에 대하여 수행하였다. 파도(Wave)와 조류(Current)는 동일한 방향에서 동시에 작용하는 것으로 가정하였다.

표 1. 시험조건

Table 1. Test condition

Case	Wave			Current	
	height [m]	period [sec]	direction [deg]	velocity [m/s]	direction [deg]
LC1	5.0	11.0	0	-	-
LC2	5.0	11.0	180	-	-
LC3	5.0	11.0	0	1.0	0
LC4	5.0	11.0	180	1.0	180

3.1 수치실험

검증 환경을 대상으로 설계한 3단 복합구조의 계류라인의 사양은 표 2에서 나타내었고 해상에서의 배치형상은 그림 2와 같다. 계류라인을 제외한 다른 구성요소는 고정된 값으로 적용하고 영향을 배제하였다.

표 2. 검증 환경에 대한 계류라인 설계사양

Table 2. Specification of the mooring line in test environment

Item	Specification
Buoy Chain	ϕ 32 mm, Length=2.0 m Weight=22 kg/m, MBL=582.4 kN
Nylon Rope	ϕ 40 mm, Length=35.0 m Weight=1.0 kg/m, MBL=262.3 kN
Anchor Chain	ϕ 60 mm, Length=70.0 m Weight=79.0 kg/m, MBL=1933.3 kN

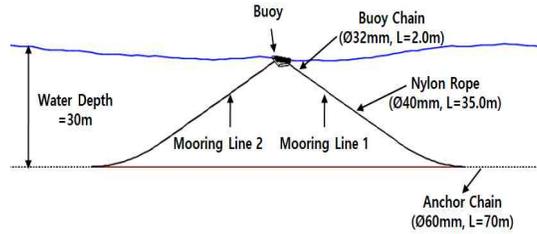


그림 2. 검증 환경에서 계류라인 배치형상

Fig. 2. Sketch of the mooring line in test environment

그림 2와 같은 배치형상을 적용하여 수치실험을 수행한 결과, 계산된 최대 계류라인의 장력은 계류라인 1의 경우 LC3조건에서 57.0kN, 계류라인 2의 경우 LC4조건에서 59.0kN으로 계산되었다. 표 3은 모든 시험조건에서 계산된 계류라인의 장력값을 나타낸 것이다.

표 3. 계류라인 장력 수치실험 결과

Table 3. Simulation result of the mooring line tension

Case	Mooring line 1 [kN]	Mooring line 2 [kN]
LC1	54.3	52.5
LC2	52.2	56.2
LC3	57.0	49.9
LC4	49.5	59.0

3.2 조파수조시험

수치실험 결과와의 비교를 위하여 수행된 조파수조시험은 한국해양대학교에서 보유중인 2차원 조파수조를 이용하여 진행되었다. 조파수조시험은 기하학적 유사법칙에 따라서 부이조립체 기준, 길이로 1/43으로 축척하였다. 표 2에서 기술된 검증 환경에 대한 계류라인 설계사양은 축척비를 적용하여 표 4와 같이 조파수조 실험에 적용되는 사양으로 전환되었다.

표 4. 계류라인의 축소모형 사양

Table 4. Scaled model specification of the mooring line

Item	Specification
Buoy Chain	ϕ 1.0 mm, Length=4.7 cm
Nylon Rope	ϕ 1.0 mm, Length=81.0 cm
Anchor Chain	ϕ 1.0 mm, Length=163.0 cm

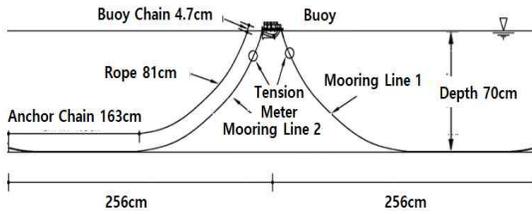


그림 3. 조파수조시험을 위한 배치도
Fig. 3. Sketch of the mooring line experiment

그림 3은 조파수조시험을 위한 배치도를 나타낸 것이고 실제 조파수조에서의 설치형상은 그림 4에서 나타내었다.

검증 환경인 수심 30m를 기준으로 축척비를 적용하여 조파수조의 수심은 70cm로 설정하였다. 또한 유의파고 5.0m, 파주기 11sec, 그리고 조류 1.0m/s는 상사법칙에 따라 조파수조에서 각각 0.12m, 1.68sec, 0.15m/s 값으로 적용하였다. 시험에 의해 측정된 계류라인의 장력값은 축척비를 이용하여 다시 실제 해상에서의 값으로 변환하였다.

표 5와 그림 5는 수치실험에서 계산된 장력값과 조파수조에서 측정된 장력값을 비교하여 나타낸 것이다. 수치실험서 계산된 값은 파란색 실선으로 표시되어 있고 조파수조에서 측정된 값은 빨간색 점선으로 표시되어 있다. 계류라인 1과 계류라인 2의 구분은 각각 작은 원과 사각형으로 표기하였다. 표 5에 나타난 조파수조에서 측정된 값은 축척비를 이용하여 해상에서의 값으로 변환된 값이다.

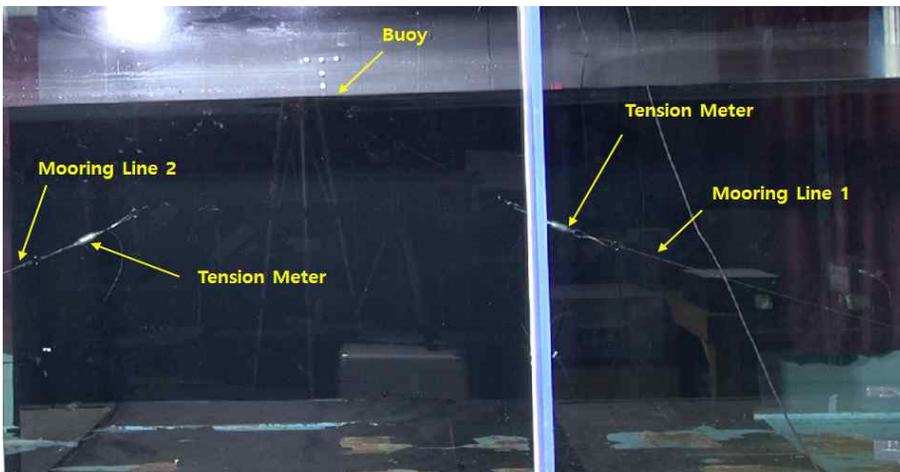


그림 4. 조파수조에서의 설치형상
Fig. 4. Installation shape in a wave tank

LC1에서 LC4까지 4가지 모든 검증 환경에 대하여 유사한 경향을 확인할 수 있다. 결과적으로 수치 해석과 조파수조 시험을 통하여 계류라인 설계와 설계 프로그램의 유효성을 검증하였다.

표 5. 수치실험과 조파수조실험 결과 비교
Table 5. Comparison of the result of simulation and water tank

Case	Mooring line 1 [kN]		Mooring line 2 [kN]	
	Simulation	Tank	Simulation	Tank
LC1	54.3	56.7	52.5	47.2
LC2	52.2	47.0	56.2	55.5
LC3	57.0	60.4	49.9	52.5
LC4	49.5	53.9	59.0	63.2

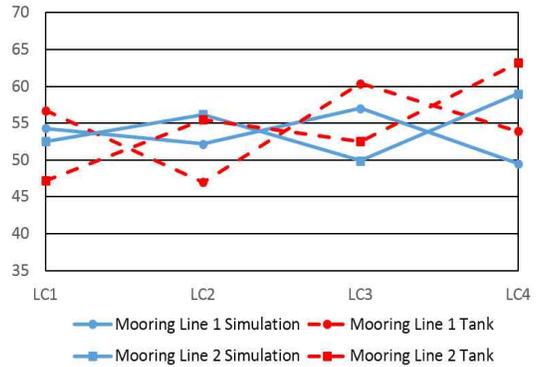


그림 5. 계류라인의 장력 시험 결과
Fig. 5. Result of the mooring line tension

IV. 계류라인 최종 설계 및 운용

4.1 계류라인 최종 설계

부이형 수중감시 시스템의 해상시험 위치인 남해를 대상으로 계류라인 최종 설계를 수행하였다. 검증된 수치해석 프로그램을 이용하여 수심 47m, 조류 0.681m/s, 유의파고 4.0m, 그리고 파주기 7.72sec를 설계 매개변수로 선정하였다.

표 6. 계류라인의 최소 안전 요소

Table 6. Minimum safety factor of the mooring line

Condition of system	Analysis Method	
	Quasi-dynamic	Dynamic
Intact	1.75	1.67
Damaged	1.25	1.25
Transient	1.25	1.20

최종 계류라인 설계시 표 6의 안전기준을 만족하도록 설계하여야 한다[6][7]. Semi-taut 방식의 3단 복합구조로 설계한 계류라인은 Catenary 계류방식을 적용하여 연결부의 장력을 최소화 하도록 하였다. 부이조립체와 연결되는 부이체인은 해수면에서의 마모 및 부식을 고려하고, 무게추와 연결되는 앵커 체인은 충분한 중량을 보유하여 안착길이를 확보하여 Catenary 계류 형태를 유지할 수 있어야 한다. 부이체인과 앵커체인을 연결하는 나일론 로프는 와이어에 비하여 가벼운 특성을 가지므로 계류라인의 전체 중량을 감소시키기 위하여 적용하였다. 나일론 로프는 최초 하중을 받으면 최초 길이 대비 약 25% 늘어나고 외력을 제거하면 길이가 줄어들지만 최종적으로는 최초 길이 대비 약 17% 늘어난 상태를 유지한다. 최종 설계에 반영된 나일론 로프 길이는 초기상태를 기준으로 설계되었다. 해상시험 위치인 남해를 기준으로 적용한 3단 복합구조의 계류라인 최종 설계 사양은 표 7과 그림 6에서 나타내었다.

계류라인의 최종 설계 구조에 대한 검증을 위하여 시험 해역의 설계 수심 47m 를 대상으로 8가지 시험환경에 대하여 수치실험을 수행하였다.

표 8은 계류라인의 최종 설계 사양 검증을 위한 8가지 시험환경을 나타낸 것이다. 파도와 바람, 그리고 조류는 같은 방향에서 동시에 작용하는 것으로 가정하였다.

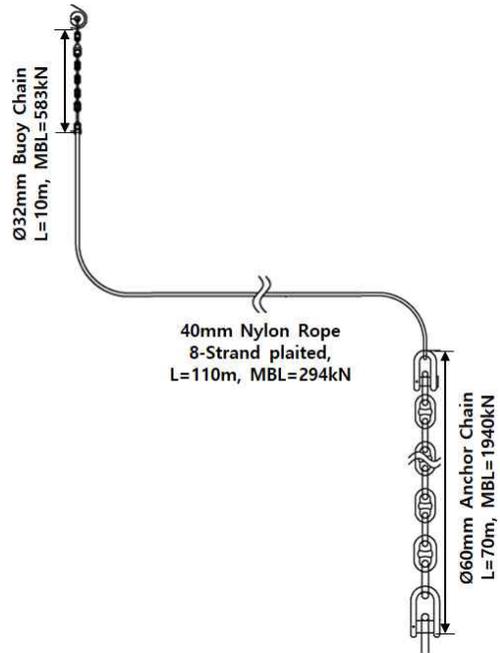


그림 6. 계류라인의 최종 설계 구조
Fig. 6. Shape of the final mooring line design

표 7. 계류라인 최종 설계 사양

Table 7. Specification of the final mooring line design

Item	Specification
Buoy Chain	φ32 mm, Length=10.0 m Weight=224 kg, MBL=583 kN
Nylon Rope	φ40 mm, Length=110.0 m Weight=110 kg, MBL=294 kN
Anchor Chain	φ60 mm, Length=70.0 m Weight=5,524 kg, MBL=1940 kN

표 8. 계류라인 최종 설계 사양 검증 환경

Table 8. Simulation environment of the final mooring line design

Case	Wave			Wind		Current	
	height [m]	period [sec]	direction [deg]	velocity [m/s]	direction [deg]	velocity [m/s]	direction [deg]
O1	4.0	7.72	0	36.0	0	0.681	0
O2	4.0	7.72	45	36.0	45	0.681	45
O3	4.0	7.72	90	36.0	90	0.681	90
O4	4.0	7.72	135	36.0	135	0.681	135
O5	4.0	7.72	180	36.0	180	0.681	180
O6	4.0	7.72	225	36.0	225	0.681	225
O7	4.0	7.72	270	36.0	270	0.681	270
O8	4.0	7.72	315	36.0	315	0.681	315

계류라인의 안정성이 유지되기 위해서는 파단이 발생하지 않아야 하고 이것은 표 6의 계류라인의 안전요소에서 Intact, Dynamic 조건에 해당하여 파단 강도가 계류 장력의 1.67배 이상 확보되어 한다. 신호전송 케이블과의 간섭을 배제하기 위한 2점 계류 방법 적용시, 부이와 앵커에서 각 계류라인에서 발생하는 장력은 8가지 시험환경에 대하여 표 9와 같이 계산된다.

부이형 수중감시 시스템을 설치 완료 이후, 표 9에서 기술된 8가지 시험환경에 대하여 계산된 계류라인에 발생하는 최대장력은 시험환경 O6, 계류라인 2에서 부이조립체 연결부 27.6kN, 앵커연결부 17.2kN으로 계산되었다. 각 계류라인의 안전성을 검증한 수치실험 결과, 표 7에서 기술된 계류라인의 최종 설계 사양은 모든 환경에 대하여 허용 수치 이상의 안정성을 확보한 것으로 확인되었다.

표 7과 표 9의 비교를 통하여 계류라인의 최종 설계 사양이 파단력을 기준으로 과도설계로 생각될 수도 있는데 이는 국내에서 최초로 시도되는 이동형 수중감시 시스템의 특성을 고려하여 안전성과 수심이 다른 해역에서의 설치도 고려한 것이다.

복합구조의 계류라인에서 체인부는 내구연한 5년 이상의 마모 및 부식(0.3mm/year)를 고려하였고[8], 나일론 로프도 마모와 내구성을 고려하여 안전성을 증가하여 설계를 완료하였다.

표 9. 시험환경에 대한 계류 장력 계산 결과
Table 9. Result of the mooring tension in simulation environment

Case	Mooring Tension [kN]			
	Buoy		Anchor	
	Mooring line 1	Mooring line 2	Mooring line 1	Mooring line 2
O1	17.5	5.6	3.2	0.1
O2	21.7	15.8	9.6	2.6
O3	20.7	22.3	8.6	10.7
O4	17.4	24.3	4.2	12.9
O5	7.9	15.9	0.2	2.2
O6	20.3	27.3	7.9	17.2
O7	24.0	25.3	13.2	15.0
O8	25.6	18.8	14.9	5.9

4.2 계류라인 운용

최종 설계에 의해 제작된 계류라인은 부이형 수중감시 시스템의 해상시험 해역인 남해에 설치되어 검증을 수행하였다. 수심은 설계값과 동일하고, 설치 해역의 평균 조류는 1.15m/s로 측정되어 최종 설계에 적용한 유속보다 빠른 환경에서 해상시험을 수행하였다.



그림 7. 부이형 수중감시 시스템의 계류라인
Fig. 7. Mooring line in buoy-enabled underwater surveillance system

그림 7은 최종 설계를 기반으로 제작된 계류라인을 나타낸 것이다. 제작된 계류라인은 부이형 수중감시 시스템에 2점으로 계류되어 2018년 3월부터 10월까지 다수의 시험을 통하여 설계 수심에서 운용 및 설치/회수성을 검증하였으며 8월에는 최종 설계시 고려한 유의파고 4.0m을 넘어서는 4.3m에서도 안정적인 계류를 유지함을 확인하였다[9].

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 부이형 수중감시기술 시스템에서 사용되는 계류라인에 대하여 2점 계류방법을 선정하고 이동성과 설치/회수성 등을 고려하여 중간 수심 환경에 사용되는 Semi-taut방식을 적용하였다. 해상에서 위치하는 부이와 연결되는 부이체인, 시스템을 지지하는 무게추와 연결되는 앵커체인, 그리고 부이체인과 앵커체인 사이로 나일론 로프의 3단 복합구조를 계류라인의 기본구조로 선정하였고, 설계 프로그램의 검증을 위하여 수치실험과 조파수조시험을 수행하였다. 수치실험에서 계산된 값과 조파수조에서 계측된 값이 유사함을 확인하여 수치실험의 유효성을 검증하였다. 검증된 수치실험 프로그램을

이용하여 실제의 시험해역을 대상으로 계류라인의 최종 설계를 수행하고 안전성을 확인하였으며, 최종 설계된 계류라인은 실제 제작되어 해상시험을 통하여 설계시 고려한 유의과고 이상에서도 안정적인 계류를 수행함을 확인하였다.

실제 해상 시험시 설계상의 문제에 의한 계류라인의 파단은 발생하지 않았지만 시험기간 중 어로 활동으로 어선 및 어구에 의한 나일론 로프의 손상이 발생하였다. 향후 실제 운용 체계로 발전시 이러한 점들을 고려하여 나일론 로프의 한계점을 극복하기 위한 대체품목 선정이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

References

[1] Nam-Bong Ha and Namgi Kim, "Design of Red Tide Prediction System", Proceedings of KIIT Summer Conference, pp. 14-17, May 2014.

[2] Orcina Ltd., <http://www.orcina.com/SoftwareProducts/OcraFlex/Documentation> [accessed : May 30, 2018]

[3] Vincenzo Nava, Marin Rajic, and Carlos Guedes Soares, "Effects of the Mooring Line Configuration on the Dynamics of a Point Absorber", Proceeding of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Artic Engineering, MAE2013-11141, pp. 1-9, Jun. 2013.

[4] Dong-Min Keum, Tae-Woo Kim, Dae-Suk Han, Woo-Boo Lee, and Jae-Myung Lee, "Design of Oceanography Buoy - Part II: Mooring System", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 23, No. 1, pp. 89-95, Feb. 2009.

[5] L. Johanning, G. H. Smith, and J. Wolfram, "Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices", Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 1918-1934, Oct. 2007.

[6] American Petroleum Institute (API), "Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures", API RP 2SK 3rd Edition, American Petroleum Institute, Washington, USA. pp. 17-24,

Oct. 2008.

[7] Marine and Offshore Division, "Classification of Mooring Systems for Permanent and Mobile Offshore Units", Bureau Veritas. pp. 18-47, Dec. 2015.

[8] Editorial Department, "Port and Fishing Design Standards", Ministry of Ocean and Fisheries, pp. 367-368, Dec. 2005.

[9] Weather data release portal, <https://data.kma.go.kr/data/sea> [accessed: Oct. 30, 2018]

저자소개

변 양 헌 (Yang-Hun Byun)



1998년 2월 : 한국해양대학교
해양공학과(공학사)
2002년 2월 : 한국해양대학교
해양공학과(공학석사)
2007년 8월 : 한국해양대학교
해양공학과(박사수료)
2016년 3월 ~ 현재 : 한화시스템(주)

전문연구원

관심분야 : 수중음향, 수중통신, 해양모델, 해양플랫폼

최 범 규 (Bum-Kyu Choi)



1990년 2월 : 한국해양대학교
항해학과(공학사)
2015년 12월 ~ 현재 :
(주)신동디지털 이사
관심분야 : 항해/통신

오 태 원 (Tae-Won Oh)



2001년 1월 : 한국해양대학교
조선해양시스템공학부(공학사)
2003년 2월 : 한국해양대학교
조선해양시스템공학부(공학석사)
2003년 1월 ~ 현재 : 오션스페이스
부장

계류시스템 설계

관심분야 : 부유체 운동 및