

## ARC7 조건용 해양구조물 계류성능 기술 개발

이승재, 강현화, 임지수 (한국해양대학교),  
박승현 (중소조선연구원)

### 1. 서론

조선해양플랜트협회에 따르면 2012년 전 세계 극지 및 극한 기후 환경에서 운용 가능한 해양구조물의 시장규모는 약 15조원으로, 2030년경에는 약 100조원 이상의 시장(전 세계 해양구조물 시장의 1/5규모)이 형성 될 것으로 전망한다.

따라서 극지 및 극한기후 환경에서, 운용 가능한 해양구조물의 운동특성을 정확하게 파악하고 예측하는 기술자립화를 통해, 해양구조물 설계최적화 및 시장 경쟁력 강화에 필요한 핵심 기술 육성의 필요성이 대두되어 질 것이다.

일반적으로 해양구조물은 파도, 바람, 조류와 같은 환경외력이 작용하는 해상 환경에서 작업이 요구되며, 안정적으로 해양자원을 생산하는 것을 최종 목적으로 하고 있다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서는 위치유지 시스템인 계류시스템(Mooring system) 또는 동적 위치 제어 시스템(Dynamic Positioning System)의 역할이 중요시 되며, 각 시스템은 해양구조물이 설치되는 해역의 정보가 고려되어 최적화 되어야 한다.

극지방 해양구조물은 파도, 바람, 조류와 같은 환경외력의 3요소가 극한조건을 가지며, 추가적으로 비선형성이 강한 빙하중이 고려되어야 한다. 빙하중은 빙과 선체간의 상호작용 과정에서 빙의 크기 및 분포에 따라 하중 값이 비선형성을 갖는다. 따라서 빙하중이 고려된 위치유지시스템의 최적화를 위해 계류 및 위치제어시스템의 설계 및 평가 기술이 선행으로 개발되어야 한다.

본 기고는 ARC7조건으로 선정된 해역(Chuk-chi, Barents)의 생존 및 운용조건에서 극지방 계류시스템 설계와 통계적 기법을 통한 계류시스템 성능평가 기술과 빙하중이 고려된 극지방 해양구조물의 Global performance 해석 기법에 대해서 소개하고자 한다.

## 2. 환경조건 및 계류시스템 구성

### 2.1 설치해역의 환경 조건

대상 해양구조물의 설치해역은 그림 1과 같이 ARC7조건에

해당되는 수심이 서로 다른 척치해역(Chuk-chi sea)과 바렌츠해역(Barents sea)으로 선정하였다. 각 해역의 Met-Ocean 데이터 분석을 통해 주어진 설치해역의 생존조건에 대한 환경 정보는 표 1에 나타냈으며, 파도는 JONSWAP Spectrum, 바람은 NPD와 API Spectrum을 적용하였다. 환경외력의 방향은 분석된 데이터의 불확실성을 최소화 하고 보수적으로 평가하기 위해 DNVGL-OS-E301에 제시된 조합을 사용하였다. 본 기고에서는 DNVGL-OS-E301에 제시된 환경외력 방향이 적용된 결과만을 내포하고 있으나, 추가적으로 환경외력 방향변화에 대한 민감도 해석을 반드시 수행해야한다.

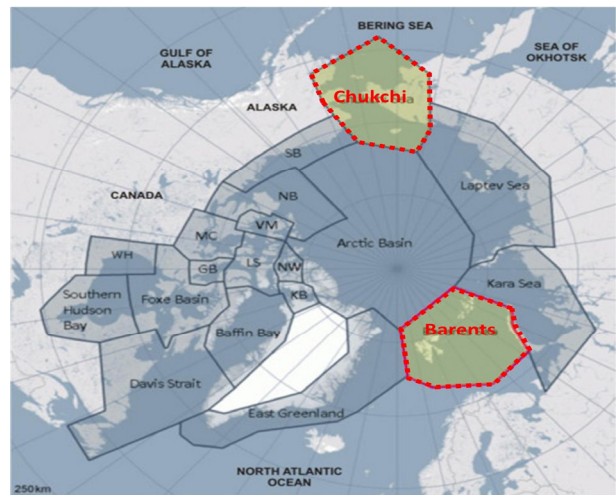


그림 1 ARC7조건 선정 해역

표 1 ARC7 조건 선정해역의 생존조건 환경외력

Description		Chuk-chi	Barents	Direction
Wave	$H_s$	10.6m	14.5m	180°
	$T_p$	16.0s	16.1s	
Wind	$V_w$	0.3m/s	0.9m/s	150°
Current	$V_c$	22.5m/s	31.9m	135°

### 2.2 극지방 계류시스템의 구성

계류시스템은 구조물의 종류와 설치해역의 수심 및 환경조

건에 따라 SPM, TAM, SALM, CALM 등 다양하게 구성된다. 본 기고에서 선정된 계류시스템은 극지방의 극심한 환경하중과 유빙 회피 등을 고려하여 Turret이 포함된 TAM(Thrust assisted mooring)으로 선정하였다.

계류시스템 설계는 계류선의 구성 및 기계적 물성치, 해저 지반(Seabed)의 프로파일 및 마찰력과 같이 고려해야 하는 요소가 상당하다. 각각의 구성요소 변화에 따른 민감도 테스트를 통해 도출된 계류선은 4(bundles)×4(lines)으로 구성되었으며, Barents 해역에서 계류선은 chain-wire-chain 구성으로 표 2와 같다.

표 2 Barents 해역의 계류라인 구성

표 2 Barents 해역의 계류라인 구성		
Top chain	Length	60m
	Type / Quality	R4S Studless
	Diameter	171mm
	MBL	26952kN
	Weight in water	4.96kg/m
	Elastic Modulus	2.49e+06N/m <sup>2</sup>
Wire	Length	200m
	Type / Quality	Spiral strand
	Diameter	153
	MBL	21068
	Weight in water	1.01kg/m
	Elastic Modulus	2.11e+06N/m <sup>2</sup>
Bottom chain	Length	780m
	Type / Quality	R4S Studless
	Diameter	171mm
	MBL	26952kN
	Weight in water	4.96kg/m
	Elastic Modulus	2.49e+06N/m <sup>2</sup>

### 3. 계류시스템 해석 절차

#### 3.1 주파수 영역 해석

해양구조물의 운동성능 평가를 위해서는 대상 구조물의 운동특성 계산이 선행되어야 한다. 운동특성을 계산하기 위한 수치해석 기법(FVM, BEM 등)이 다양하지만, BEM기반의 포텐셜 이론을 채택하여 주파수 영역 해석을 수행하였다.

주파수 영역 해석은 구조물에 입사되는 파의 입사각과 주파수에 따른 radiation 및 diffraction 포텐셜을 계산하여 구조물의 유체정역학 및 유체동역학적 계수들(Wave exciting force, added mass, radiation force, stiffness)을 계산한다. 각 항들을 운동방정식에 대입하면 구조물의 주파수 영역에서의 선형운동특성인 Motion RAOs를 얻을 수 있다. 그림 2는

주파수영역해석 절차에 대해 간략히 나타내고 그림 3은 대상 구조물의 주파수 영역 해석결과를 나타낸다.

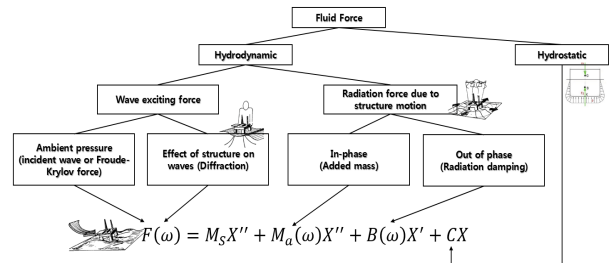


그림 2 주파수영역 해석 절차

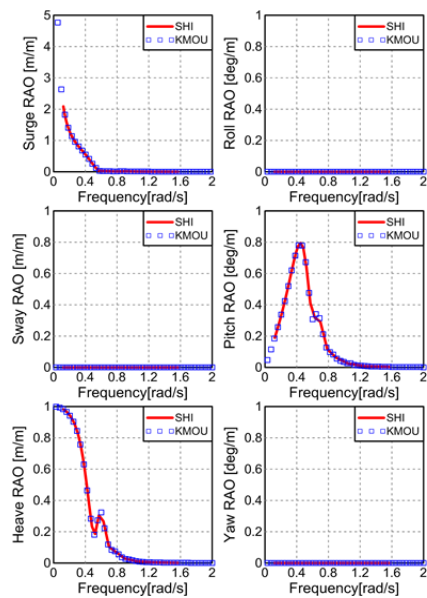


그림 3 주파수영역 해석결과 (Motion RAOs)

#### 3.2 시간 영역 해석

주파수영역 해석은 선형시스템으로 계류 및 위치제어시스템이나 빙하중과 같은 비선형요소를 고려하기 어렵다. 이와 같은 비선형요소를 고려하기 위해서는 시간영역 해석이 수행되어야 한다.

이러한 시간영역 해석 절차는 구조물의 주파수영역 해석 결과를 사용하여 시간영역에서의 운동방정식을 구성하고, 추가적인 계류라인의 장력, 빙하중, 위치제어시스템, 비선형 환경요력 등과 같은 비선형 요소들을 모델링하여 고려한다. 또한 비선형 요소를 고려하기에 앞서, 주파수 영역 해석결과를 기반으로 시간영역에서 규칙파 테스트를 통한 검증절차가 이루어져야 한다. 그림 4는 시간영역 해석을 위한 전반적인 흐름을 나타내며 규칙파 테스트의 일부 결과를 나타낸다.

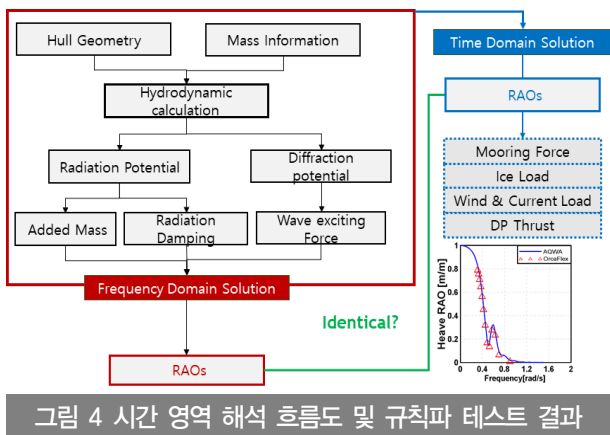


그림 4 시간 영역 해석 흐름도 및 규칙파 테스트 결과

### 3.3 통계적 해석 절차

계류시스템의 성능 평가는 구조물의 offset, 계류선의 fairlead와 anchor 지점에서의 장력을 통해 이루어진다. 3시간의 시간영역 해석 결과에서, 계류선의 최대 장력과 구조물의 offset이 불규칙파의 seeds 변화에 따른 편차가 크다. 어떤 seeds를 사용하여 분석하였는지에 따라 안전계수가 고려된 설계기준을 만족 또는 불만족하는 경우가 빈번히 발생한다.

이와 관련하여 세계 각국의 선급 및 기관에서는 통계해석을 수행할 것을 요구하고 있다. API-RP-2SK는 10개의 seeds 변화를 통한 통계처리를 요구하고 있으며, BV-NR493은 계류 해석기법과 시뮬레이션 횟수에 따라 주어진 factor를 곱하여 평가할 것을 요구하고 있다. DNVGL-OS-E301은 20개의 seeds 변화를 통해, 3-parameter Weibull, Gumbel 분포를 통한 통계값(Most Probable Maximum value, MPM)을 사용할 것을 권고하고 있다.

본 기고에서는 DNVGL-OS-E301에 제시된 통계기법을 따라 계류시스템의 성능평가를 수행하였다. DNVGL-OS-E301에 제시된 통계처리 절차를 그림 5에 나타내었으며 간략하게 요약된 절차는 5단계로 다음과 같다.

- 1) 생존 및 운용조건에서 불규칙파의 seeds 변화에 따른 20 cases 해석을 수행한다.
- 2) 각각의 해석 결과에서 Global maxima data(Mean-up crossing peak value)를 샘플링 한다.
- 3) 샘플링 된 데이터를 3-parameter Weibull 모델을 활용하여 확률밀도함수로 나타낸다.
- 4) 샘플링 된 데이터는 통계적으로 독립임으로 CDF의 n승으로 가정하여 극한분포로 나타낼 수 있다. 극한분포는 Gumbel 분포의 모델이 권고된다.
- 5) Gumbel 극한분포의 확률밀도함수의 기울기가 0이 되는 지점을 MPM으로 정의하고 20개의 MPM을 평균처리 하여 룰

에서 제시된 기준(MBL의 60%)과 비교한다.

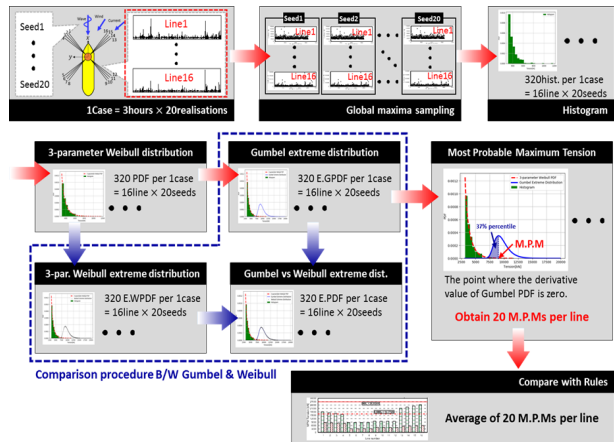


그림 5 계류시스템 성능평가를 위한 통계처리 절차

### 3.4 빙하중 고려 기법 및 방안

앞서 언급된 바와 같이, 극지방 해양구조물의 운동성능 해석은 파도, 바람, 조류 이외에 빙하중이 추가적으로 고려되어야 한다. 현재, 국내의 빙하중 추정기법은 활발히 연구가 수행되어 왔으나 추정된 빙하중을 시간영역에 적용하는 기법은 아직 일반화되지 못한 실정이다.

본 기고에서는, 현 단계에서는, 가상의 빙하중을 가정하여 시간영역 해석의 빙하중 적용 가능성을 확인한 결과와 향후 빙하중 적용 방안에 대해 기술한다.

그림 6은 빙하중을 임펄스 형태와 파 에너지 스펙트럼을 역 푸리에변환을 통한 불규칙 시계열로 가정하고 시간영역 해석에 고려하였을 때의 결과를 나타낸다.

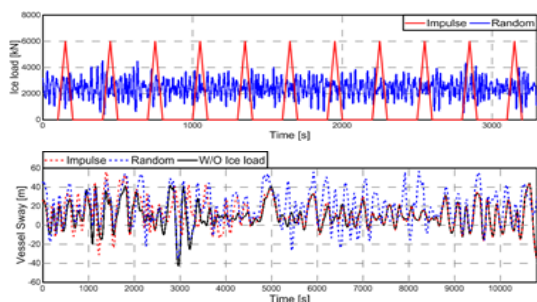


그림 6 시간영역의 가상 빙하중 적용 결과

그림 6의 결과와 같이 빙하중에 대한 시계열 데이터가 존재한다면, 시간영역 해석에서 빙하중을 고려 가능할 것으로 판단된다. 따라서 향후, 빙하중에 대한 연구가 활발히 이루어져 빙하중 시계열 또는 빙하중 스펙트럼을 도출할 수 있다면,

빙하중이 고려된 극지방 해양구조물의 위치유지 성능평가가 가능할 것으로 예측된다.

### 3.5 계류시스템 성능평가

언급한 요소기술들을 종합하여 계류시스템의 성능평가 해석결과를 간략히 서술하고자 한다. 앞서 언급된 바와 같이 계류시스템의 성능평가 항목은 fairlead 지점의 계류선 장력과 anchoring 지점의 uplift force 발생 유/무, 구조물의 offset이다. 계류선 장력의 경우, 관련규정에 언급된 기준이 있지만, offset 기준은 보통 선주의 요구에 의해 결정된다. 본 연구에서는 계류선의 장력은 규정에 언급된 설계기준(MBL의 60% 이내)과 구조물의 offset은 35m 이내의 운동성능을 목표로 성능평가를 수행하였다. 수행 결과의 일부는 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

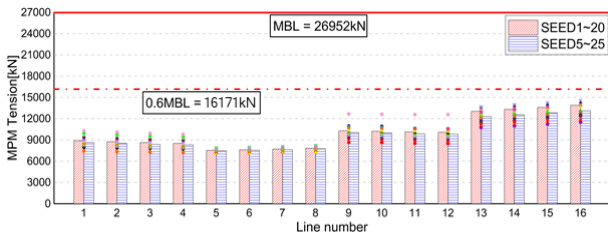


그림 7 생존조건에서의 계류라인의 통계 극한값

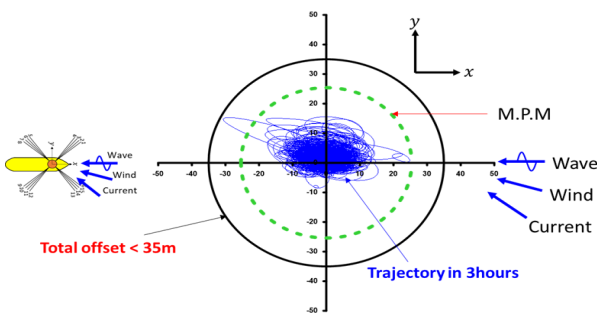


그림 8 생존조건에서의 구조물의 Offset 결과

## 4. 결론

최근 극지방 해양구조물의 시장규모 증가 추세에 따라 유빙이 고려된 계류 및 위치제어시스템 연성이 고려되는 기술은 전 세계적으로도 초기 단계이다.

본 기고에서는 ARC7조건의 극지방 계류시스템 설계기술 자립화를 위한 설계절차 및 빙하중 적용 방안에 대해 간략히

소개하였다. 추후, 위치제어 시스템과 실제 빙하중이 고려된 해양구조물의 Global performance 해석을 통해 유빙 및 위치제어시스템을 연성하는 기술을 도입하여 해당 기술을 선도하고자 한다.

## 참고 문헌

API-RP-2SK, Design and Analysis of Station keeping Systems for Floating Structures (2005)  
 DNVGL-OS-E301, Position mooring (2015)  
 BV-NR493, Classification of Mooring Systemes for Permanent and Mobile Offshore Units (2015)  
 Li Zhou & Torger Moan, J, Heading control for turret-moored vessel in level ie based on Kalman filter with thrust allocation, Mar Sci Technol (2013)

### 이승재



- 1973년생
- 2008년 Texas A&M University Ph.D. in Ocean Engineering
- 현 재 : 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 부교수
- 관심분야 : 부유식 해양구조물 동적 거동, Global performance 해석
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*\*
- E-mail : slee@kmou.ac.kr

### 강현화



- 1997년생
- 2019년 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 재학
- 현 재 : 한국해양대학교 학부생
- 관심분야 : 부유체 운동해석
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*\*
- E-mail : khh\_653@kmou.ac.kr

### 임지수



- 1995년생
- 2019년 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 재학
- 현 재 : 한국해양대학교 학부생
- 관심분야 : 부유체 전산유체해석
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*\*
- E-mail : 20140571@kmou.ac.kr

### 박승현



- 1992년생
- 2019년 한국해양대학교 조선해양시스템공학과 석사졸업
- 현 재 : 중소조선연구원 연구원
- 관심분야 : 부유체 운동해석 및 실험유체
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*\*
- E-mail : shpark@rims.re.kr