

부유식 수중가옥의 계류안정성 설계에 관한 연구

박상욱* · † 이한석

*한국해양대학교 해양건축공학과 박사과정, † 한국해양대학교 해양공간건축학부 교수

요 약 : 수중에 부유식으로 계류하는 규모와 생활지원 하중요건을 임의 가정한 수중가옥(합체)의 정수압적(hydrostatic) 계류안정성과 시공성 고찰을 목적으로 한다.

핵심용어 : 수중가옥, 부유계류 안정성, 무게중심, 부력중심, 경심, 복원력

부유식 수중주거시설 개념 연구

수중주거란 행복주거를 본질로 하는 인류의 생활영위가 상시체류를 가능케 하는 수중가옥과 그 주변(지원)시설간의 연계를 통해 수중공간으로 확장되는 삶이다.

주거가 생활의 기능적 필요에 따라 구성을 달리하는 단위공간(거실, 방, 부엌, 화장실, 계단 등)의 합리적 조합인 가옥, 그 조합인 도시 공동체를 매개로 이뤄지는 것 같이, (수중)주거의 실현은 (수중)환경요건과 부합된 (수중)주거 단위공간들을 합리적 조합을 가능케하는 수중가옥의 설계개발을 통해 실현된다.

본 연구는 수중에 부유식으로 계류하는 규모와 생활지원 하중요건을 임의 가정한 수중가옥(합체)의 정수압적(hydrostatic) 계류안정성과 시공성 고찰을 목적으로 한다.

수중가옥의 임의 상용하중(operational load) 변위를 가정한 수중가옥(모듈)합체(submerged hull)의 안정적 수중부유계류에 요구되는 무게중심 변위와 부력변위를 합체의 시공/철거 및 계류시 요구되는 계류인장력 및 합체의 기술어짐 특성, 그에 따른 복원력을 정수압적 작용력에 한정하여 계산한다. 이를 통해 합체의 부유 및 계류 안정성과 시공성 측면에서 유효한 수중가옥의 배수량, 상용하중, 부력변위를 포함한 설계기본값을 제시하고 이를 검증한다.

본 연구는 향후 실증가능한 수중가옥 모듈의 설계와 동적거동에 대한 안정성 연구의 기초를 제공한다.

Page 1

부유식 수중가옥(1)

형식

- 부유(floating)식
- 가변압(pressure adjustable)식
- 가설(installation)식
- 모듈(module)식
- 해저파일 계류(mooring)식
- 다중(multiple) 계류식
- 발라스팅(Ballasting)식
- 단상(시공/철거)식
- 독립(semi-autonomous)식
- 설치 전용선 방식

계류파일(해저면)
Mooring line and mooring line with float

Page 3

친수 주거형태와 부유식 수중주거

수변(육지) 주거

- 호반주거
- 강변주거
- 해안주거

수변주거의 불완전성

수상 주거

- (호반/강변/연안) 수상주거(floating)
- LIVEBOARD
- 고정식 수상주거 (fixed)
- 부유식 수상주거 (floating)

수중 주거

- 부유식(해양, pelagic)주거
- 중력식 해저면주거(fixed)
- 해저면하 열거 (육지)

수상주거(floating)의 확장성

Page 2

부유식 수중가옥 (2)

규모(가정)

- 250 m³, 3인용
- 500 m³, 6인용
- 1000 m³, 20인용

단위공간

- 출입공간(airlock, moonpool)
- 휴식/수면공간
- 취사공간
- 위생공간
- (교육/업무공간)

수중환경/생명관리 가능

- 환경(공기조성/온도/압력속도)관리
- 안정성(부력/계류)관리
- 생명지원(물, 식량, 에너지)관리
- 오염/폐수/쓰레기관리
- 통신관리

다중 계류된 수중가옥의 출입

Page 4

† 교신저자 : 종신회원, hansk@kmou.ac.kr
* sangpak@kmou.ac.kr

수중가옥 설치 전용선

형식

- Swift Barge식
- 수중가옥과 일체형 Sea fastening식
- Ballast식
- 가설원지/가설로프식
- 단선(가설/절거)식
- 예선 견인식
- 해저계류 일체식

디자인 요건

- 수중가옥(부유 중략물)의 선적
- 수중가옥(활경하중하)의 이동
- 수중가옥의 분리와 인장가설
- 수중가옥의 고박과 가설인장력 분리
- 수중가옥의 고박후 절거준비

전용시공선 별면 개념도

전용시공선 측면도와 Swift 돛개

Page 5

부유식(floating) 계류 환경

부유식 구조물(수중가옥)의 환경하중에 대한 설치상/사용상 안정성 확보는 주요한 설계 고려점이다.

비면하중

- 수역의 주 풍향/풍속에 따른 계류체계 설계
- 구조물의 풍하중 저항/이동을 고려한 설계 (hull 외형, 계류의장)
- 비상 대응(돌기, 상문등의 기밀 훼손시)을 고려한 장치 및 운용설계

파도/해류하중

- 수역의 파랑 및 유속에 따른 계류체계 설계
- 구조물의 파랑/해류하중을 고려한 가설수심/위치 설계
- 비상 대응(결로이탈, 표류)을 고려한 장치 및 운용설계

입력하중(수중의 경우)

- 주거 목적에 따른 수중가옥 최대수압 설계
- 함체의 부력에 따른 계류체계 설계
- 가설수심에 따른 함체의 압력설계
- 함체의 부력중심, 무게중심 및 그 변위에 따른 복원력과 안정성 설계

시공/사용 중 환경하중은 부유구조물의 안정성에 영향을 준다.

환경하중에 대한 Catenary 수상계류 자료 Seastead.org

Page 8

수중가옥 설치

방식

- 원치와 장력식(로프)을 이용한 인력침하식
- 2별식 계류식(가설용 로프와 수중가옥 고박용 로프)
- 장력조질식 (수중가옥 인력 침하중 안정성)
- 수심/속도(하강/상승) 조절식
- 잠수사 지원식

의장 요건

- 전용선 가설용의 장
- 수중가옥 외부 (hull) 계류의장
- 고박과일 계류의장 (파일상 pulley / bollard) (가설용과 고박용 로프간 장력연이 가설용 로프의 수중보관/절거절차에 따른 요구의장 고려)

연결된 가설로프

인장된 가설로프

Page 6

수중가옥(모듈)의 부유계류 안정성 이론

수학적 연구 방법

무계산장

수역하중, 함체와 내부 의장무게의 합

$$\sum W_{\text{Hull}} + \sum W_{\text{Interior}}$$

무계산장과 의장하중의 균일분포 모델 (고정하중의 균일분포를 가정하여 설계한다.)

가정: - 의장하중이 함체 하단으로 분포 수직 1m 이내 균일분포 가정 - 의장하중이 함체 하단으로 분포 수직 2m 이내 균일분포 가정 - 의장하중이 함체 하단으로 분포 수직 3m 이내 균일분포

가변하중 - 승선인원과 선적자재 무게의 합

$$\sum M_{\text{Occupant}} + \sum M_{\text{Cargo}}$$

승선인원과 선적자재의 균일 분포 모델 (가변하중의 균일분포를 가정하여 설계한다.)

가정: - 가변하중이 함체 수평중심축으로 분포 수직 1m 이내 균일분포 가정 - 가변하중이 함체 수평중심축으로 분포 수직 2m 이내 균일분포 가정 - 가변하중이 함체 수평중심축으로 분포 수직 3m 이내 균일분포

부력산장

부력 - 함체파피와 외부 의장무게의 합에 의한 배수량

$$\sum V_{\text{Hull}} + \sum V_{\text{Interior}}$$

수중가옥 외관파피와 외부 의장무게의 합에 의한 배수량 (외관파피를 가정하여 설계한다.)

가정: - 부피 250 m³ 용량의 함체의 배수중심은 각각 4m, 4m, 3m (수직) 가정. - 부피 500 m³ 용량의 함체의 배수중심은 각각 6m, 6m, 3m (수직) 가정. - 부피 1000 m³ 용량의 함체의 배수중심은 각각 9m, 9m, 3m (수직)

그림(위): 부유제 (선박)의 안정성 관련 백터

g: 하중과 무게중심 (하중변동과 무게중심 변동)

B: 부력과 부력중심 (부력변동과 부력중심 변동)

M: 정선과 정선 무게중심, 정선 무게중심 거리 (변위)

f: 견인 (freeboard)

그림(위): 수중가옥의 부유안정성 요건

g: 티원형 함체의 하단에 보호막면 안정성이 향상된다.

h: 하중과 무게중심으로부터 상방으로 멀어질수록 복원력이 증가한다.

Bc: 배수량과 상중중량의 설계를 통해 적정 부유안정성을 달성한다.

f: 최소 수중가옥(모듈)은 각각 30% 범위의 부력을 갖도록 설계한다.

Page 9

수중가옥 가설원료와 시공선(fleet) 절수

완료 요건

- 수중가옥의 계류안정확인 완료
- 수중가옥의 사전절수준비 완료
- 수중가옥과의 통신확보 완료
- 수중가옥 가설 인가의 완료
- 설치전용선 절수준비/예선결속 완료

부유계류된 수중가옥

유사시설 (중력식 구조물에 대한) 예

- 침대식 콘크리트 케이스 시공 (가막해저터널)
- 함체에 대한 ballasting 적용
- 함체 내부에 승조원 탑승 적용
- 복수의 닻을 사용한 시공선/구조물 계류 적용
- 수중 거치시 잠수사 지원

Auto-ballasting 침대형 콘크리트 케이스의 수중거치 시공 (가막해저터널)

Page 7

하중요인	3인용	8인용	20인용	수중가옥(모듈)의 부유계류 환경
1. Hull 부피	250m³	500m³	1000m³	위치: 부산조위관측소 (1.034kg/l 2019년 3월 23일) 인근해역으로 가정 시점: 2019년 3월 23일 05시 가설환경: 기온: 5.1°C (부산항 조위관측소 35.1N 129E) 기압: 1019.9hPa - 풍속: 0.6 m/s - 조파: 20 cm - 염분: 34.1 PSU - 파고: 0.151 m (승정해수측량 해양연구부이 35.2N 129.2E) - 유속: 0.47 m/s (부산항 해양관측부이 35.1N 129.1E) - 수온: 13.23°C
2. 의장에 위한 내부 공간 점유율 (25%)	62.5 m³	125 m³	250 m³	
3. 내부의장 평균밀도	4kg/m³	4kg/m³	4kg/m³	
4. 환경하중	동적응답 해석시	동적응답 해석시	동적응답 해석시	
5. 승선인원하중 (70kg/인)	210 kg	560 kg	1400 kg	
5. 물: 25t/d 음식: 3kg/d 재류기간: 1일~7일	물: 75~525t/d 음식: 9~63kg/d 초기역제공간에 서 기체공간으로 정장공간 전이 (CB와 CG 변위)	물: 200~1400t/d 음식: 24~168kg/d 초기역제공간에 서 기체공간으로 정장공간 전이 (CB와 CG 변위)	물: 500~3500t/d 음식: 60~420kg/d 초기역제공간에 서 기체공간으로 정장공간 전이 (CB와 CG 변위)	
6. 배설 (Human waste) 쓰레기 (오수/세수)	기체공간에서 액체공간으로 전환 (CB와 CG 변위)	기체공간에서 액체공간으로 전환 (CB와 CG 변위)	기체공간에서 액체공간으로 전환 (CB와 CG 변위)	부력 - 배수량: 258.5MT, 517MT, 1034MT 하중 - 함체 소재밀도: 14~100 kg/m³ (1748 kg/m³) - 내부의장: 배수량에 대비 체중비율로 가정 (초기조건 30%) - 상용하중: - 승선인원: 70kg/인 가정 - 선적 재하: 30kg/인, 재류기간 14일 가정 - 선적 자재: 물, 식량자원을 재류기간 14일 가정 (표 참조: Seastead.org 연구보고서 6권) - 연결하중/부력: 수중가옥(모듈)의 다중연결 가정 (계류) 안정성 변화 = 하중변위 + 부력 변위 + 환경 변위 정적 응답 고질(변위)을 기초로 동적거동 응답으로 연구확장
7. 수중가옥 다중연결	3인용 수중가옥 연결성 연계	3인용과 8인용 수중가옥 연결성 연계	3인용과 8인용 수중가옥 연결성 연계	Page 10

