

부유식 해상공항의 구조설계에 관한 연구

박성환*, 정태영**

A study for the structural design of floating airports on sea

Seong-Whan Park* and Tae Young Chung**

요 약

부유식 초대형 해상구조물(VLFS : Very Large Floating Structures)의 구조설계는 대상 구조물의 종류와 그 구조형식 등에 따라 구체적인 설계조건 혹은 설계의 기본 계획이 달리 나타날 수 있다. 본 연구에서는 설계조건 설정, 구조형식 및 재료의 선택, 설계하중의 추정, 부재 배치 및 치수결정 등의 과정으로 나타나는 초대형 해상구조물의 구조설계 기법에 관하여 기술하고, 구체적인 적용례로서 부산 해상공항 및 컨테이너 물류기지 개발안에 대한 초기 구조설계 과정과 그 결과를 소개한다.

Abstract

Structural design requirements for very large floating structures (VLFS) are different corresponding to this purpose and structural type. In this study, the structural design procedure of VLFS is described, composing of the following processes : construction of design conditions, choice of structural types and main materials, estimation of structural design loads, determination of structural arrangements, and scantling of structural members. As an example of practical application, the initial structural design of floating airport and container terminal for Pusan is demonstrated.

접수일자: 2000년 5월 2일, 승인일자: 2001년 4월 28일

* 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부 (E-mail: swpark@kimm.re.kr)

** 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부 (E-mail: tychung@kimm.re.kr)

1. 서언

해상공항, 해상도시, 해상이동기지 등 다양한 용도로 초대형 해상구조물들이 제안되고 있는데, 이중에서도 부유식 해상공항안은 그 제안사태가 가장 많을 뿐만 아니라 관련 설계 기술의 개발이 가장 구체적으로 진행되고 있는 분야이다 (박성환 등 1999). 특히 일본에서는 1977년 일본조선공업회가 제안한 칸사이 국제공항 제1기 개발안 (宝田直之助 1982)을 시작으로, 마린플로트 추진기구의 해상복합 물류터미널 구상안, 칸사이 국제공항 제2기 개발안 (마린플로트 추진기구편 1997) 등, 그 추진사태가 가장 많다. 특히, 1995년부터 시작된 메가플로트 프로젝트 (<http://www.dianet.or.jp/mega-float/1999>), (메가플로트 기술연구조합 1996, 1997, 1998)로 인하여 초대형 해상구조물을 이용한 해상공항의 실현이 가시화되었다고 볼 수 있다.

국내에서도 이와 관련하여 초대형 해상구조물 기술개발에 대한 관심이 날로 증가하여 왔으며, 관련한 연구개발 활동도 활발하다 (다카라다 나오노스케 1995), (정태영 등 1999), (홍익대학교 해양시스템연구소 1999).

특히, 1999년까지 한국기계연구원에서 수행한 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발 사업 (정태영 등 1999)에서는 부산 해상공항 및 컨테이너 물류기지 기본계획을 초대형 부유식 해상구조물로 접근한 바가 있다. 이 구상사례와 관련하여 저자들은 초대형 부유식 해상구조물의 구조설계에 관한 정보를 수집하여, 주어진 설계조건하에서 해상공항의 부유체구조에 관한 초기 구조설계를 수행한 바 있는데 (정태영/박성환 1999), 본 논문에서 이와 관련된 설계기법, 설계과정 및 결과를 소개함으로써 국내의 초대형 해상구조물의 설계기술 개발에 일조하고자 한다.

부유체구조의 초기구조설계는 초기설계단계에서 강재중량의 크기 및 분포에 관한 정보, 구조강성값의 추정 등 추후 구조물의 성능평가에 필수적인 기본정보를 제공할 뿐만 아니라, 소요강재량, 제작비, 건설비, 건설기간의 추정에 필요한 자료도

제공한다. 그리고, 초대형 해상구조물의 어마어마한 규모를 고려할 때 보다 합리적인 접근법에 의한 구조안전성의 확보와 경량화 설계의 중요성은 새삼 강조되어도 지나침이 없을 것이다.

2. 초대형부유식 해상구조물 구조설계법

초대형 부유식 해상 구조물 설계에 있어서는 먼저, 수요조사 분석, 구조물의 목적 설정, 구조물의 기본 구조형식, 방파제 설치 유무, 계류시스템 형태, 육지와와의 연결 문제 등에 관한 개념설계가 선행되어야 한다. 이러한 개념설계가 이루어지면 전체 배치의 구체적인 결정, 구조물의 설계환경 및 설계하중의 결정, 설계기준의 설정, 사용재료의 결정, 구조물의 안전성/안정성의 검토 등이 수행되는 기본설계단계로 이어지고, 각종 하중조건 및 사용조건에 관한 성능평가가 수행되면서 구체적인 설계가 이루어지게 된다.

전술한 구조물의 기본설계단계는 Fig.1에서 보이는 바와 같이 설계조건 설정, 구조 기본계획 수립, 구조설계 수행, 전체구조 강도해석, 국부강도 구조해석 등의 과정으로 세분할 수 있다 (마린플로트 추진기구편 1997). 이들 각 과정은 그림에서 보인 바와 같이 모두 그 결과가 구조 기본계획과정에 feedback 됨으로서 최적구조 설계를 도출하게 된다.

먼저, 설계조건 설정에는 바람, 파도, 조류 등에 의한 자연 환경 외력조건, 해상구조물의 기능 (물류터미널, 해상공항, 복합기지, 인공섬 등)에 따르는 기본하중 및 설계조건, 구조안전 기준 설정 등의 과정이 포함된다. 또한, 구조 기본계획이라 함은 기본 구조형식의 선정과 함께, 주요 제원 및 형상의 결정, 주요 부재 배치의 결정, 계류방식의 구체적 결정, 건조방법의 설정 등의 과정을 일컫는다.

구조설계 수행과정은 설계조건에서 주어진 자연 환경조건과 기능조건으로부터 구체적인 설계하중의 산정, 주요구조 배치의 적절성/안전성 검토, 주요구조부재의 치수산정 과정 등이 포함된다. 한편, 전체구조해석은 구조물 전체를 해석 대상으

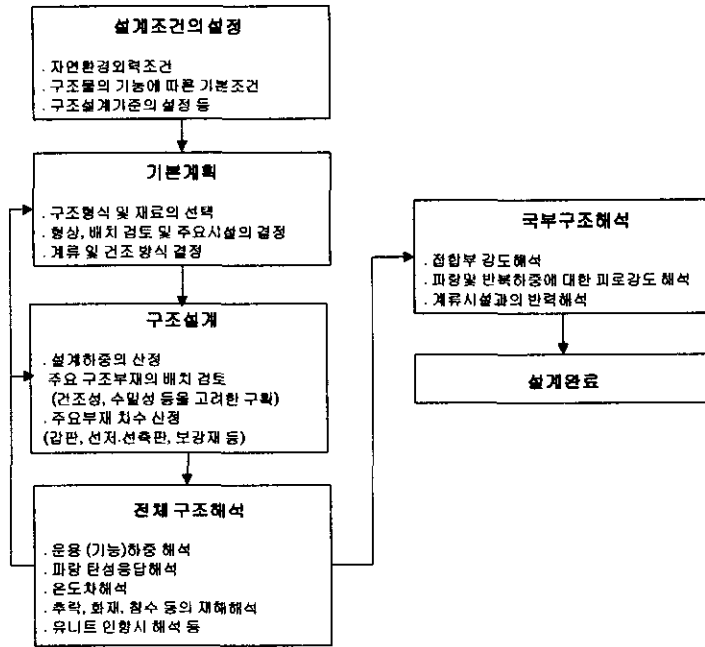


Fig. 1 Flow chart of basic structural design for very large floating structures

로 운용상태중 하중해석, 파랑 탄성응답해석, 온도차 해석, 추락, 화재, 침수 등의 재해 해석, 유닛 인항해석, 계류시스템 해석 등이 여기에 포함된다. 국부구조 해석과정에는 접합부의 강도해석, 국부 피로강도해석, 계류시스템과의 접합부 상세해석 등 국부적으로 구조안전성의 검토가 필요한 모든 부위의 해석을 의미하며 이는 상세 구조설계와도 연계된다.

상술한 설계기법은 대상구조물의 용도, 구조형식에 따라 개념설계, 기본설계, 성능평가 및 상세설계 등의 영역구분이 명확하지 않고 상호 연관성이 큰 경우도 있다. 다음절에서는 구체적인 해상공항 구조설계 예를 통하여 앞에서 설명한 각 설계단계의 내용을 구체화하기로 한다.

3. 해상공항 구조설계 일례

3.1 개요

본 절에서는 해상공항에 대한 구체적인 구조설계 예로서 부산 해상공항 및 컨테이너 물류터미널

개발안에 대한 구조설계 과정과 그 결과를 기술하기로 한다. 본 개발안은 한국기계연구원에서 수행된 바 있는 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발사업에서 제안된 초대형 부유식 해상구조물의 하나로써, 최근 그 시설용량이 수요증가에 따르지 못하는 김해국제공항에 대한 추가수요가 발생할 경우 이를 해상에서 실현하고, 또한, 가덕도 신항만 시설이 2010년 이후 처리 능력이 포화상태에 도달할 것을 예상하여 계획한 것으로, 2020년경에 건설되는 것을 가정한 것이다.

본 개발안의 기본계획 및 배치계획에 관한 상세내용은 정태영/박성환 (1999)에 의해 설명되어 있는 바, 여기서는 추후 전개를 위하여 배치계획도만을 Fig.2에 인용하기로 한다.

3.2 구조설계기준 및 하중조건

(1) 사용재료 및 구조설계 기준

본 해상공항의 구조설계에 사용된 재료 및 설계기준은 다음과 같이 결정하였다. 먼저, 사용강재는 보통의 선박에 사용되는 연강과 고장력강을 사

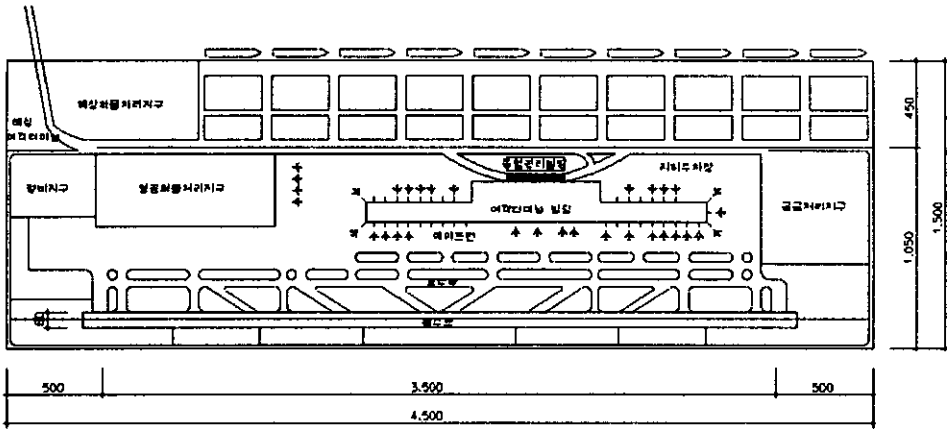


Fig.2 General Arrangement of a floating airport and cargo terminal

용한다. 이때 연강의 항복응력은 24 kgf/mm², 고장력강의 항복응력은 32 kgf/mm², 그리고 강재의 Young 율은 21,000 kgf/mm² 로 설정하였다.

그리고, 외판, BHD 두께 및 소골재, 골재 설계는 (사)한국선급의 "선급 및 강선규칙" ((사)한국선급 1999)과 "선급 및 강선규칙 적용지침" ((사)한국선급 1999)을 기준으로 설계하고, 필요의 경우 stiffener의 설계는 보이론에 기초한 탄성설계를 수행하였다. 이때의 허용응력은 Table 1을 따랐고, 강제부식대에는 50년을 수명주기로 보고 10년 단위에 1mm, 총 5mm의 부식 여유를 고려하였다.

(2) 설계하중조건

설계하중으로는 보잉 747-400을 대상으로 한 항공기의 이착륙 하중과 공항내 차량하중, 건축물 및 컨테이너 야적하중, 파랑하중 등을 고려하였다 (宝田直之助 1982), (마린플로트 추진기구편 1997), (정태영 등 1999).

항공기 이착륙하중으로는 지상주행시 하중, 착륙시 하중, 비상착륙하중(충격계수 1.35)등을 고려하였다. 부유체구조의 상면피복으로서 활주로 부에는 30 cm의 콘크리트와 20 cm의 아스팔

Table 1 Allowable stresses[3]

응력형태	평상시하중	비상착륙하중
인장응력	0.6 σ_y	0.8 σ_y
전단응력	0.4 σ_y	0.53 σ_y
조합응력	0.7 σ_y	0.9 σ_y
압축응력	0.57 σ_{cr}	0.77 σ_{cr}

Table 2 Design load conditions

구분	조건	설계하중
항공기	지상주행(18륜)	396 ton
	착륙시(16륜)	386 ton
	비상착륙시(16륜)	533 ton
차량	총중량	80 ton
	바퀴중량(6륜) 접지압	13.3 ton 6.7 kgf/cm ²
건축물		5.8 ton/m ²
컨테이너 화물야적장		5.8 ton/m ²
수압	태풍시 부체의측부	25.1 ton/m ²
	태풍시 부체저부 (부가수두 0.5m)	30.1 ton/m ²
파랑조건 (방파제 고려)	평상시 파고 주기	$H_{1/3} = 0.5m$ $T_{1/3} = 6.5sec$
	태풍시 파고 주기	$H_{1/3} = 1.0m$ $T_{1/3} = 9.6sec$

트 피복을, 유도로부에는 20 cm의 콘크리트와 15 cm의 아스팔트 피복을, 건축물시설부에는 18 cm의 콘크리트 피복을 상정하였다. 이들은 갑판부 차륜하중의 작용면적을 분산시키는 효과(분산각도는 45도)를 지니나 구조강도에는 그 기여가 없다고 가정한다.

상기 설계하중조건과 파랑하중조건을 모두 정리하면 Table 2와 같다. 한편, 앞에서 기술한 설계하중 조건이외에도 선박의 충돌, 비행기의 추락 등에 의한 이상상태 하중조건 및 피로강도 설계조건 등이 설계하중에 포함되어 질 수 있으나, 이들에 관해서는 본 초기설계단계에서 그 적용을 배제하였다.

3.3 구조배치 및 치수결정

(1) 건조unit결정 및 주요구조부재의 배치
 부체구조의 크기는 4500m(L) × 1500m(B) × 6.0m(D) 이며 수면하에 잠겨있는 흘수(d)는 1.5 m 이다. 전체 1,500 m의 폭 방향에 대해서는 Fig.2의 전체 배치도에서 보는 바와 같이 300m 폭의 활주로부, 300m 폭의 유도로부, 450m 폭의 Apron & Building Terminal부, 그리고 450m 폭의 container 적하장부 등의 4개 부위로 구분할 수 있다.

한편, 이러한 대규모의 부유체를 한번에 건조하기는 불가능하므로, 부유체를 여러 개의 유니트로 나누어 육상의 건조도크에서 건조한 후 각 유니트를 현지로 이동한 후 해상에서 접합하여 건설하여야 한다. 이 경우 유니트의 크기 선정이 매우 중요한데, 이는 각 조선소의 설비/건조 능력, 수송 경로, 접합공정, 건설기간 등의 여러 인자를 고려하여 정밀한 분석에 의해 결정되어야 한다. 본 연구에서는 현재 국내 조선소의 도크 크기만을 감안하여 각 유니트의 크기를 150m × 50m × 6m로 하는 것이 적절한 것으로 판단하였다(총 900개). 각 유니트에는 Fig.3에서 보이는 바와 같이 44m 간격으로 2개의 측벽을 설치하고, 6m 간격으로 전체 25개의 횡격벽을 설치하며, 유니트와 유니트의 접합을 위해 측벽양쪽으로 상판 및 선저판을 3 m씩 연장을 한 구조로 결정하였다.

그리고 종강도 및 국부강도를 만족하도록 보강재와 트랜스링 등을 사용하여 충분히 보강한다.

(2) 주요부재 치수 결정

앞에서 선정된 각종 설계하중 조건을 고려하여 “선급 및 강선규칙” ((사)한국선급 1999)과 “선급 및 강선규칙 적용지침” ((사)한국선급 1999)을 이용하여 계산된 각 구조부재의 치수는 Table 3

Deck Plan

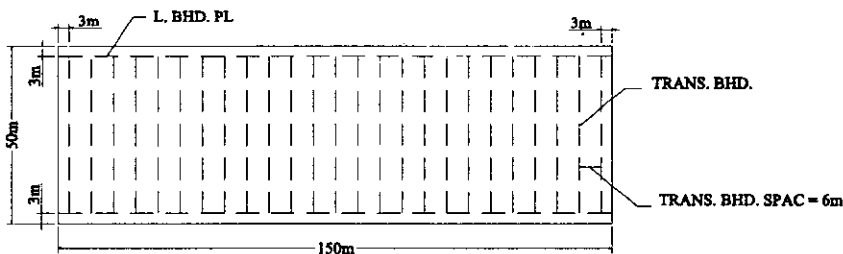


Fig.3 Structural configuration of one unit

Table 3 Scantlings of the members

부재명과 위치	적용설계식	설계하중	설계치수	
갑판 두께	활주로부	자동차운반선 차량갑판식	비상시착륙하중	21 mm
	유도로부	"	주행하중과 차량하중 중 큰 것	20 mm
	건축물 시설부	강갑판식	야적하중	16 mm
갑판 중등 보강재	활주로부	차량갑판식중 직접계산 방식	비상시 착륙하중 (허용응력 : 0.8항복응력)	20x1000 + 25x200 T형
	유도로부	"	허용응력 : 0.6항복응력	20x900 + 25x20
	건축물 시설부	갑판보식	야적하중	16x550 + 16x200
선저부	판두께	단저구조식	설계수두	15 mm
	보강재	폰툰형 화물부선식	-	15x450 + 15x150
선측외판 및 BHD	판두께	선측구조식을 수정적용	설계수두	11 mm
	보강재	선측구조식	-	11x350 + 11x120

과 같다. 횡격벽의 간격은 전술한 바와 같이 6 m로 설정하였으며 중등보강재의 간격은 1.25 m를 기준으로, 선측외판 및 중등 BHD의 보강재간격은 0.625 m를 기준으로 계산하였다. 한편, 앞에서 구한 각 주요구조부재를 설계도면으로 나타내면 Fig.4와 같다.

4. 결론

전술한 바와 같이 초대형 해상구조물인 해상공항의 초기구조설계는, 개념설계 단계에서 결정되어지는 구조형식의 선택, 방파제의 유무, 자연환경조건의 설정 등에 의해 지배적인 제약을 받는다. 그러나, 이러한 개념설계가 이루어지면 구체적인 설계과정은, 크게 사용재료의 선택, 설계기준의 구체적 적용, 설계하중의 산정 등에 의해 결정되어지며, 또한 구체적인 치수는 유니트구조의 결정, 주요 구조부재의 배치, 보강재 간격 등에 의해 직접 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 또한, 합리적인 구조설계를 위해서는 설계하중의 정확한 추정, 설계기준의 적절한 적용 등이 선행되

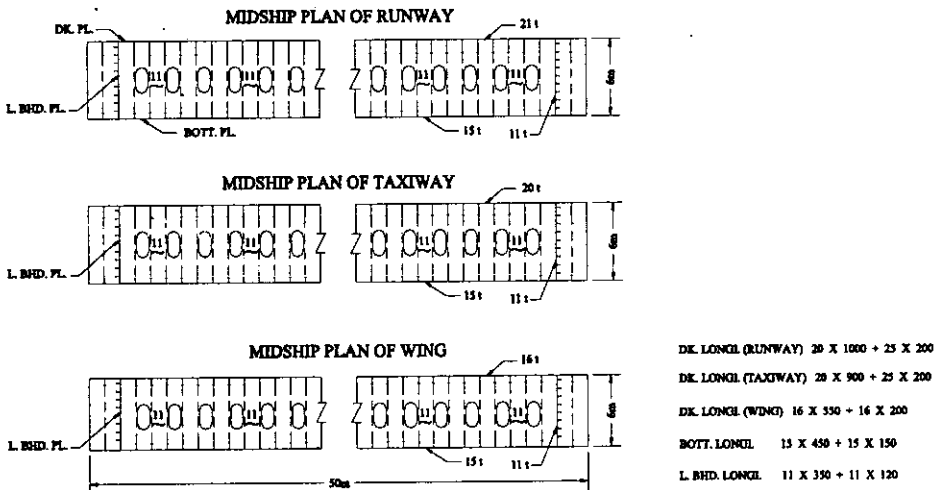


Fig.4 Midship section of the unit of sea airport and container terminal

어야 하며, 최소 중량설계를 위해서는 주요부재의 각종 배치와 간격에 관한 반복적인 계산과정이 필요한 것으로 판단되었다.

아직 초대형 해상구조물은 다른 일반 해양구조물과 달리 실제 설계되고 사용된 바가 없을 뿐만 아니라, 이에 대한 실증 시험결과도 미진하기 때문에, 선박, 항만구조물, 일반 해양구조물 등에 관한 제 설계규정 및 기준 등을 합리적으로 활용할 필요가 있고 또한, 이와 관련한 연구개발이 필수적인 것으로 판단되었다.

한편, 본 연구를 통하여 해상공항 주요부재인 갑판부, 선저, 선측부의 설계에는 항공기의 이착륙하중과 최대파랑하중이 직접적으로 영향을 미침을 확인하였다. 참고로 본 논문에서 제시한 각종 구조설계 치수는 마린플로트 추진기구편 (1997)의 결과와 거의 비슷한 값을 제시하고 있으므로 설계과정에서의 큰 오류가 없는 것으로 판단되었다.

후 기

본 논문은 해양수산부가 시행한 해양수산연구개발 사업 "초대형 부유식 해상구조물 기술개발 연구용역"의 결과중 일부임을 밝힌다.

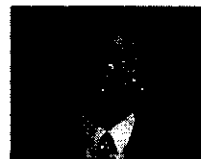
참 고 문 헌

- 다카라다 나오노스케 1995, "(초대형) 부유식 해양구조물에 대한 기술평가의 일례,".
- 마린플로트 추진기구편 1996, "부체식 해상공항 - 거대 프로젝트에의 도전", (일본어).
- 메가플로트 기술연구조합 1996, "메가플로트(초대형부체식 해양구조물) 1995년도 연구성과 보고서" (일본어).

- 메가플로트 기술연구조합 1997, "메가플로트(초대형부체식 해양구조물) 1996년도 연구성과 보고서" (일본어).
- 메가플로트 기술연구조합 1998, "메가플로트(초대형부체식 해양구조물) 1997년도 연구성과 보고서" (일본어).
- 박성환 등 1999, "초대형 부유구조물 구상사례 및 구조형식에 관한 연구", 대한조선학회 1999년도 춘계 학술대회 논문집.
- (사)한국선급 1999, "선급 및 강선규칙".
- (사)한국선급 1999, "선급및 강선규칙 적용지침".
- 宝田直之助 1982, "초대형해양구조물의 technology, assessment의 일례 (부체공법에 의한 해상공항건설에 대한 기술검토) 제1보-제10보," 일본조선학회지, 제638호 - 제652호(일본어).
- 정태영 등 1999, "해양공간이용 대형복합 플랜트 개발 : 성과확산을 위한 보완 연구", 한국기계연구원 연구보고서.
- 정태영, 박성환 1999, "하부구조물 구조설계 및 성능평가 기술 개발", 한국기계연구원 연구보고서.
- 홍익대학교 해양시스템연구센터 1999, "부유식 초대형 해상구조물 기획연구", 해양수산부 보고서.
- Mega-float Home Page: <http://www.dianet.or.jp/mega-float/>, 1999년.



< 박 성 환 >



< 정 태 영 >