

초대형 부유식 해상구조물의 기술 현황



홍 사 연

1960년 3월 12일생
1994년 서울대학교 공학박사
현 재 : 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 책임연구원
관심분야 : 해양구조물 위치유지시스템, 유탄성 응답, 내항성능해석
연 락 처 : 042-868-7521
E-mail : sayong@kiiso.re.kr



정 태 연

1952년 9월 15일생
1987년 MIT
현 재 : 한국기계연구원 책임연구원
관심분야 : 해양구조물 동역학 및 해양공간이용 기술
연 락 처 : 042-868-7420
E-mail : tychung@kimm.re.kr



신 현 경

1955년 11월 18일생
1987년 미국 MIT
현 재 : 울산대학교 수송시스템공학부 교수
관심분야 : 해양구조물 동역학
연 락 처 : 052-259-2157, 2696
E-mail : hkshin@mail.ulsan.ac.kr

1. 개 요

20세기 산업화와 도시화가 심화되면서 나타난 도시 인구의 밀집현상은 산업 용지와 주거 공간, 사회 기간시설 확보를 위한 공간자원의 고갈로 이어져 왔다. 공간자원 고갈의 주된 원인은 인간이 도시를 이루고 살 수 있는 조건을 충족시키는 공간이 제한적인 데서 연유한다. 인간이 모여 사는 공간은 해안에 밀집해 있으며 해안을 중심으로 이용 가능한 공간은 이미 포화상태이고 보다 많은 공간 창출을 위해 그 동안 행해진 해안의 매립은 환경과 생태계 파괴라는 새로운 문제점을 야기시켰다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안의 하나가 지금까지 해양공간 조성에 주된 방법이었던 매립이나 고정식 구조물에 대해 다음과 같은 특징을 갖고 있는 부유식 해상구조물을 이용한 해양공간의 효과적인

개발이다.

이미 해상 레스토랑, 부유식 석유저장기지, 부잔교, 부유식 방파제 등 부유식 구조물을 이용한 해양 개발을 활발히 벌여온 일본에서는 해양 지향적 문화 바탕과 세계적 경쟁력을 갖춘 철강, 조선산업을 기반으로 연 근해에서 초대형 해상구조물을 이용한 해상비행장을 구상하고 이를 실현하기 위한 연구를 소위 메가플로트 프로젝트라 명명하여 초대형 부유식 해상구조물 기술 개념을 제시함과 아울러 2000억원(189억엔)이 넘는 연구비를 투자하여 1995년부터 2000년까지 길이 300미터와 1000미터 규모의 2개 실증구조물을 설계, 건조, 운용함으로써 폰툰형 초대형 해상구조물의 설계·건조·운용기술을 확보하였다. 일본과 거의 같은 시기에 미국에서는 이동식 해상기지(MOB: Mobile Offshore Base) 프로젝트를 수행하여 항해 개

Table 1. 해상 부유식 구조물의 장·단점

장 점	단 점
· 이동 가능하며 증설, 확장, 철거가 용이	· 계류장치 필요
· 여러 곳에서 동시 건조가능	· 바람, 파도에 의한 다소의 동요
· 수심 및 지반 특성에 무관	· 조수 간만에 의한 육지와의 높이 차이
· 지진에 대해 안전	· 급히변형 및 진동에 대한 대책 필요
· 건설 공해 및 해역 환경영향 적음	· 내구성의 한계, 자산 가치 문제
· 지반침하/부등침하 고려 불필요	· 보수/유지에 상대적 고비용

념의 심해용 초대형 해상구조물 개념을 제시하였다.

본 고에서는 20세기 말 기존의 조선·해양공학 엔지니어링 기술을 한 차원 높이고 21세기 조선·해양 기술의 지향점을 제공한 초대형 해상구조물 기술의 현황을 살펴보고자 한다.

2. 외국의 기술개발 동향

현재까지 초대형 해상구조물 기술개발 사례로는 일본의 메가플로트 연구조합의 초대형 해상 비행장 사업과 미국 ONR(Office of Naval Research)의 MOB(Mobile Offshore Base) 프로젝트를 들 수 있다. 이 두 사업의 목적은 해상 비행장이라는 공통점을 갖고 있는 동시에 메가플로트는 연 근해 정온 해역에 설치되는 민간중심의 공공 시설로서의 성격을 갖고 있는 반면 MOB는 대양을 항해하는 군사 작전 및 보급시설의 성격을 띠고 있다. 따라서 설계 개념, 프로젝트의 추진방향, 사업의 주체 등에서 차이가 나오나 두 사업 모두 기술개발을 위한 투자에 적극적이라는 데는 뜻을 같이 하고 있다. 본 장에서는 일본 메가 플로트 사업과 미국 MOB 프로젝트에서 수행된 연구내용을 간략히 요약하고 이들의 기술 개발 성과를 살펴보기로 한다.

2.1 일본의 메가플로트 프로젝트

일본에서는 '90년부터 마린플로트추진기구에서 부체식 해양구조물

의 경제성 및 안전성 확보 기술에 대한 연구를 수행하였고 '95년부터는 메가플로트 연구조합이 결성되어 부체식 공항 건설을 위한 기술 개발 사업을 수행하였다. 이를 통해 길이, 폭, 깊이 300m×60m×2m 규모의 1단계(1995-1997) Mega-Float 실험역 실증구조물을 3년간 운용하여 설계자료를 축적하였고(길이, 폭, 깊이)1,000m×121m×3m의 2단계(1998-2000) Mega-Float 실험역 실증구조물(Fig. 1)을 1999년 완공하여 본격적인 해상공항으로서의 초대형 해상구조물 기능을 시험하였다(Fig. 2).

2단계(1998-2000) 연구를 통해서 개발한 기술 내용은 다음과 같다(Sueoka and Sato, 2000)[1].

- 5000m 해상공항 초기설계, 구조설계 및 배치설계 완료
 - 비행기 이착륙이 방해하지 않는 높이가 낮은 계류시스템
 - 유도등과 부유 구조물의 연결 구조
 - 통제탑의 강체 구조
- 구조물 유탄성응답 해석
 - 파랑-바람중 간략 해석모델에 의한 구조물-돌핀 계류 시스템 거동해석
 - 파랑-바람중 상세 해석모델에 의한 구조물-돌핀 계류 시스템 거동해석
- 해석적 방법에 의한 구조강도 해석

- 단순한 격자모델(Simple grillage modelling)
- 상세 유한요소 모델(Fine FEM modelling)
 - 해상건조 계획 수립
 - 부체 모듈 제작 계획 수립
 - 부체 예인 계획 수립
 - 환경 영향 평가 수행 및 해상설치 안전성 및 신뢰성 검증

2.2 미국의 MOB(Mobile Offshore Base) 프로젝트

미국 ONR(Office of Naval Research)에서는 1997년부터 미국 해군의 이동형 해군기지(MOB)의 설계개발을 위한 기술검토 사업에 본격적으로 착수하였다. 우선적으로

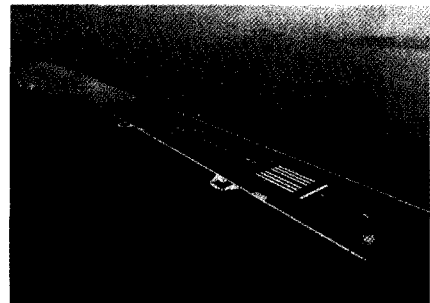


Fig. 1 Mega-Float phase II structure off Yokosuka

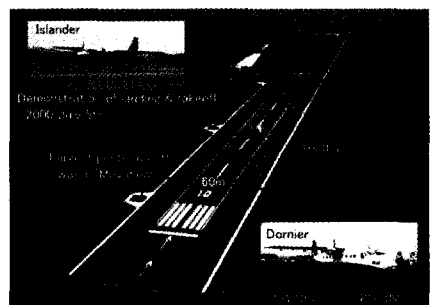
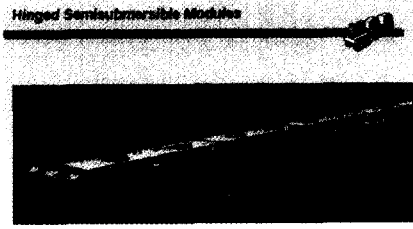


Fig. 2 Test of landing and take-off on Mega-Float phase II model



McDermott (Babcock & Wilcox)

Fig. 3 MOB model proposed by McDermott (hinged connection)

기술적 타당성 검토와 함께 건조비의 추정을 목표로 하고 있다. MOB는 최대 길이 2km 규모의 이동형 부유식 구조물로 여러 개의 모듈을 유사시 작전 해역에서 접합하는 개념으로 되어있다. 일본의 메가플로트와는 달리 대양에서의 작전을 목표로 하고 있으므로 거친 해상에서의 내과성이 우수한 반잠수식 구조물의 형태를 기본으로 하고 있다 (Remmers, et al., 1999)[2].

연구의 방향은 다양한 형태의 후보 구조물에 대한 시설계를 수행함으로써 기존 해양구조물 설계기술, 규정, 설계 요구조건 등을 검증 보완하는 동시에 각 구조물의 장단점을 성능과 건조비 면에서 비교 검토하는 방식을 취하고 있다. 현재까지 추진된 연구내용은 다음과 같다.

다양한 형태의 구조물의 성능과 건조비의 정량적 추정을 위한 설계 tool의 제공

- 일관적 기술개발을 통한 설계, 해석, 건조 역량의 향상
- MOB 설계를 위한 피로해석, 작

업 및 생존 해상 조건의 정량화

- 시설계를 통한 현 기술의 발전단계의 검증

시설계는 Bechtel, Aker, McDermott, Kvamer Maritime 사 등 국제적인 해양구조물 엔지니어링 회사와 학계에서 공동으로 수행되었다. 이 연구를 통하여 반잠수식 구조물

결합방식에 따라 MOB의 여러 가지 안이 제시되었다.

- Hinged semi-submersible module
- Semi-submersible module with flexible bridge
- Independent semi-submersible modules
- Concrete semi-submersible modules

MOB 프로젝트를 통해 지금까지 개발 또는 개선된 기술내용으로부터 도출된 결론은 다음과 같다(Zueck, Taylor and Palo, 2000)[3].

- MOB와 같은 대규모 해상구조물의 설계 가이드는 목표 신뢰성과 설계기준 만족을 위해서는 시설계를 통한 검증이 필요하다.
- MOB의 장대함으로 인한 해상공간 변화에 따른 환경변화가 고려되어야 한다.
- 공간적으로 변화하는 장과정파는 비정상적인 MOB의 전체거동과 연결부에 걸리는 힘을 유발할 수 있다. 전체거동과 연결부 힘의 상호 간섭 정도를 평가중이며 결과는 희망적이다. 이를 보다 잘 이

해하기 위해 기존의 유탄성 모델 tool이 수정되었으나 수정된 tool은 최근에 수집된 MOB 유탄성 시험 데이터에 대해 검증되지 않았다.

- MOB의 비정상적인 운동을 제어하기 위한 다물체 동적 위치유지 시스템이 개발되었다. 새로운 비선형 제어이론을 검증하기 위한 모형시험이 진행중이다.
- 콘크리트나 강철에 의한 MOB의 건조 가능성이 확립되어야 한다.
- 생존성과 폭발 안전성문제는 전통적인 군의 병참 선택조건과 동일하거나 간혹 온건하다.

3. 국내 현황

일본의 예를 보면 초대형 해상구조물의 실현 가능성 타진 단계에서만 최소 2,000억원 이상의 막대한 연구비가 투입되었고 앞으로의 현실화 단계에서는 천문학적 금액의 소요가 예상되고 있다.

국내에서는 앞서 예를 든 일본이나 미국과 같이 초대형 해상구조물 실현을 위한 대규모 연구를 수행하지는 못했지만 선박해양공학연구센터에서는 과학기술부의 기관과유사업으로 “대형 해양구조물 거동해석 기법(홍사영 외, 1994-1996)[4]” 연구를 통해 푸팅형 초대형 해상구조물의 탄성응답 연구를 수행한 바 있으며, 한국기계연구원에서 ‘96-99 4년 동안 “해양공간이용 대형 복합 플랜트 개발(정태영 외, 1996-1999)[5]”를 연구 수행하여 대형 해

양구조물의 해양환경외력 해석기법의 확보와 중소규모 부유식 해양플랜트 구조물 및 계류시스템의 종합 설계기법 개발하였다. 최종 년도 연구에서는 초대형 부유식 해상구조물에 대한 유탄성응답 해석프로그램 개발과 유탄성 파랑응답 모형시험을 수행하였다. 울산대학교에서는 일본 운수성 선박연구소(SRI: Ship Research Institute)와 공동으로 '93-'96 3년동안 "부유식 해양구조물에 대한 연구(신현경 외, 1993-1996)[6]" 수행으로 초대형 구조물의 기초 설계 성능 평가 기법의 개발연구를 수행한 바 있으며 '98-'99에는 초대형 해상구조물 파랑중 모형시험을 수행하였으며 현대중공업과 공동으로 초대형 해상구조물 설계 기반기술에 대한 연구를 수행중에 있다. 서울대학교에서는 유탄성응답 해석 기초연구를 통하여 폰텐형 초대형 구조물의 유탄성 응답 해석 프로그램을 개발하였다. 해양수산부에서는 국내에서의 해양공간 개발을 위한 초대형 부유식 해상구조물의 가능성에 눈을 돌려 "부유식 초대형 해상구조물 기획연구"[7]를 지원하였으며 해양개발 기본법 및 Ocean Korea 21 계획에 초대형 해상구조물을 이용한 해양공간 개발 분야를 포함함으로써 국내에서도 초대형 해상구조물 기술 개발연구가 본격적인 발을 내딛게 되었다. 1999년부터 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서는 "초대형 부유식 해상구조물 기술 개발"[8]과제를 수행하고

있으며 2001년 2월 VLFS 연구회가 발족하는 등 국내의 초대형 해상구조물 기술 개발 여건이 성숙단계로 진입한 것으로 평가된다.

2001년 7월에는 부산시 주최로 "2001 부산해역의 미래개발을 위한 심포지엄"[9]을 개최하여 초대형 부유식 해상구조물(VLFS)의 기술동향과 활용방안에 대해 심도있는 논의를 함으로써 국내에서도 초대형 해상구조물 실현을 위한 본격적인 논의가 제기되었다. 한편 2010년 해양 엑스포 유치가 가시화 되면 해양 엑스포 전시공간의 일부를 부유식 구조물로 조성하는 시도가 가능할 것이며 이를 통해, 그 동안 개발된 초대형 해상구조물 설계·해석 기술의 적용과 검증이 이루어지면 국내 초대형 해상구조물 실현 가능성을 한층 높일 수 있을 것으로 전망된다.

4. 핵심 기술

초대형 해상구조물의 기술은 일본에서 길이 1km의 해상비행장 실증구조물을 건조한 것 이외에는 아직까지 널리 쓰여진 경험을 가지고 있지 못하기 때문에 일반적인 해양구조물과 같이 건조 구조물의 경험이 축적되어 성숙된 기술이라 할 수는 없다. 그러나 일본의 메가플로트 연구와 미국의 이동 해상기지 연구를 통해 수행된 초대형 해상구조물의 핵심기술을 설계해석기술과 건조기술로 나누어 간략히 살펴보기로 한다.

4.1 설계 해석기술

초대형 부유식 해상구조물의 설계 해석에 있어 지금까지의 해양구조물과의 가장 큰 차이점은 규모의 장대함을 꼽을 수가 있는데 그 특징은 초대형 해상구조물의 길이와 폭은 엄청나게 커지는데 반해 깊이는 기존의 구조물과 큰 차이가 없다는 것이다. 구조물의 장대화 영향은 결국 구조물의 강성을 크게 떨어뜨려 기존의 해양구조물의 운동 응답과 구조해석을 위한 유체력 해석에 있어 통용되어온 강체운동 가정이 더 이상 유효하지 않아 구조물의 변형을 고려한 소위 유탄성 응답해석이 필요하게 되었다. 또한 구조물의 장대화에 따라 고려해야 할 사항으로는 기존의 방법을 이용한 수치해석을 시도할 경우 현재의 컴퓨터 용량으로도 감당하기 힘든 방대한 량의 계산규모와 시간이 소요되는 점을 들 수 있다. 이에 따라 지난 5년간 초대형 해상구조물 유탄성 해석을 위한 많은 효율적 방법이 제안되고 개발되었다. 이 밖에도 구조물이 장대화 됨에 따라 기존의 기술검토에서는 고려되지 않았던 기술을 항목별로 살펴보기로 한다[10,11,12].

(1) 환경외력 추정 기술

초대형 해상구조물은 구조물의 규모가 장대하며 설치가 육상 가까이 설치되므로 주변의 지형에 따라 구조물에 작용하는 조류나 바람이 시간과 공간적으로 균일하지 못하고 변동하는 성격을 갖게 되므로 구

조물에 작용하는 조류와 바람의 힘을 추정할 때 이러한 불균일성이 고려되어야 한다. 조류와 바람의 하중은 점성에 기인한 것으로 실험적인 방법을 통해서만 그 예측이 가능한데 바람과 조류의 불균일성을 고려한 실험을 통한 환경하중의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 아울러 실험데이터를 바탕으로 설계 환경조건에서의 바람, 조류의 분포를 예측할 수 있는 기법의 정립이 필요하다.

폰튼형 초대형 구조물의 경우 일반적인 해양구조물에서 바람의 하중 중 항력이 지배적인 것과는 달리 마찰력이 계류시스템의 설계에 주된 하중으로 밝혀졌는데 이러한 마찰력은 표면의 조도에 따라 그 값이 매우 크게 변하므로 모형 실험을 통해서만 정확한 결과를 추정할 수 있다. 실제 구조물의 설계에서는 환경 하중의 엄밀한 추정이 요구되므로 이를 뒷받침할 수 있는 신뢰성 있는 실험데이터의 축적이 요구된다. 아울러 공간적으로 불균일한 파도의 분포와 친수성에 따른 조류력의 변화도 고려되어야 할 요소이다.

우리나라의 경우에는 크게 고려되고 있지는 않으나 일본에서는 해일과 해진에 의한 효과도 설계시키고 고려되고 있다.

(2) 파랑중 유탄성응답 해석기술

유탄성 응답 해석은 파랑중 구조물의 응답 해석에서 구조물의 탄성 거동의 효과를 고려하는 것으로 원

리적으로 강제운동 해석에 적용되어온 모드 중첩법을 일반화함으로써 가능하다. 강제운동해석에서는 물체의 6자유도 운동에 대한 방사문제와 산란문제를 풀어 동유체력과 파강제력을 구하고 이로부터 운동방정식을 풀어 운동응답을 구함으로써 구조물의 거동을 6자유도 운동의 선형함으로 나타내는 방법을 사용하는데 여기서 일반화된 모드 중첩법이라 함은 6자유도 운동을 N 자유도의 운동으로 일반화하고 각 자유도에 대한 동유체력 계수와 파강제력을 구하여 N 자유도의 운동방정식을 풀어 각 모드 응답을 중첩함으로써 구조물의 탄성응답을 나타내는 것을 말한다. 이러한 개념은 유체분체와 구조문제를 분리한 모드 중첩법뿐만 아니라 기본적으로 유한요소법과 경계요소법을 결합한 이산화법으로도 확대 적용이 가능하며 초대형 구조물 주변의 파파제나 주변시설에 의한 상호 간섭효과까지도 해석이 가능하다. 현재 해양구조물의 운동응답 해석에 있어 널리 쓰이는 3차원 경계요소법을 일반화 하여 적용하는 것은 앞서 언급된 바와 같이 계산의 방대함으로 인해 사용이 제한되는 문제가 남아있다. 폰튼형 구조물의 경우는 구조물의 기하학적 특성을 이용하여 일반적인 3차원 경계요소법 대신 흡수를 영으로 근사시키는 영흡수 근사법(zero-draft approximation)을 사용하는 경우가 많으며 이 경우에 물체의 동유체력 해석은 통상 압력분포법을 따른다.

고유함수전개법은 폰튼형 구조물과 같이 형상이 간단한 경우 3차원 경계요소법에 비해 계산량과 계산 시간을 대폭 단축시키고 정합방법을 통해 방파제의 효과도 고려할 수 있으나 구조물의 형상이 단순하지 않은 경우에는 적용에 한계가 있다. 동일한 형태의 반잠수식 부체 모듈을 결합한 형태의 초대형 구조물의 경우에는 상호간섭이론을 적용하여 하나의 부체모듈에 대한 유체력만을 계산하여 전체 구조물의 유탄성 응답 거동을 계산함으로써 계산량을 줄일 수 있다.

해상 공항에서 비행기의 이착륙이나 항만에서 화물의 이동과 같이 충격하중이나 이동하중에 대한 유탄성 응답 해석을 위해서는 시간영역에서 해석이 불가피하다. 시간영역 해석은 선박이나 해양구조물의 천이 응답해석에서와 같이 주파수 영역에서 구한 동유체력을 후리에 역변환을 통해 시간영역으로 변환함으로써 운동방정식에서 기억효과를 고려하는 방법이 유효하다. 유탄성 응답 해석을 위해서는 각 모드별 동유체력 계수를 변환하여 선형중첩 시키는 것이 차이이며 고차모드의 효과를 엄밀히 고려하기 위해서는 시간적분 시 충분히 짧은 시간증분 값이 필요하고 주파수 영역 동유체력 계수값의 정확도가 요구된다. 동등한 방법으로 시간영역 그린함수를 사용하는 방법도 있으나 전자의 방법에 비해 실용성이 떨어진다.

(3) 구조설계 및 해석 기술

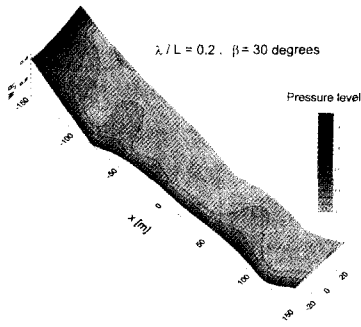


Fig. 4 Pressure distributions acting on pontoon type structure due to hydroelastic response[8]

초대형 부유식 해상구조물의 기본 설계 단계를 구체적으로 살펴보면 Fig. 5에서 보이는 바와 설계조건 설정, 구조 기본계획의 수립, 구조설계 수행, 전체 구조 강도해석, 국부강도 구조해석 등의 과정으로 세분할 수 있다[13]. 이들 각 과정은 그림에서 보인 바와 같이 모두 그 결과가 구조 기본 계획과정에 feedback 됨으로서 최적구조 설계를 도출하게 된다.

한편, Fig. 5에도 보인 바와 같이 설계조건 설정과정에는 바람, 파

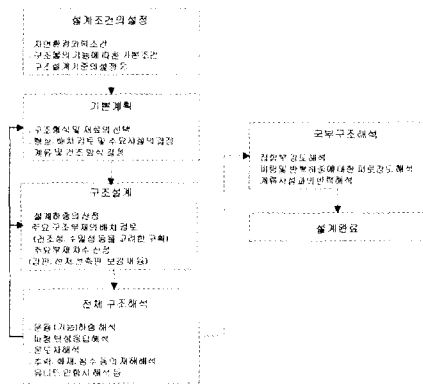


Fig. 5 Flow chart of basic structural design for very large floating structures.

도 등에 의한 자연 환경 외력조건과 해상구조물의 기능 (물류터미널, 해상공항, 복합기지, 인공섬 등)에 따르는 기본 하중 및 설계조건과 구조설계의 기준 설정과정이 포함된다.

구조설계 수행과정은 설계조건에서 주어진 자연 환경 조건과 기능 조건으로부터 구체적인 설계하중의 산정과정, 주요 구조 배치의 적절성, 안전성 검토, 주요구조 부재의 치수 산정 과정이 포함된다.

한편 전체구조해석은 구조물 전체를 해석 대상으로 한 운용(가동) 상태 하중해석, 파랑 탄성응답해석, 온도차 해석, 추락, 화재, 침수등의 재해 해석, 유니트 인항해석, 계류시스템 해석 등이 여기에 포함된다. 국부구조 해석과정에는 접합부의 강도해석, 국부 피로강도해석, 계류시스템과의 접합부 상세해석 등 국부적으로 구조안전성의 검토가 필요시 모든 부위의 해석을 의미하며 이는 상세 구조설계와도 연계된다.

주요 구조부재에 대한 구조설계가 이루어지면 유한요소법 등을 활용한 보다 엄밀한 구조 강도 해석이 수행된다. 구조강도 해석은 대상 구조물 전체를 대상으로 하는 전체구조강도 해석이 먼저 수행된 후 이 결과를 활용하여 국부 강도 구조해석 및 피로 강도 해석 등을 수

행하게 된다.

초대형 부유식 해양구조물의 구조강도 해석의 종류로는 파랑, 이동하중, 온도차 및 기타 운용하중에 따르는 탄성 구조해석, 계류시스템의 완충기구에 관한 구조해석, 지진, 화재, 충돌 등에 따르는 이상상태 해석 등이 포함된다.

구조물의 전체강도의 안전성 검토는 탄성설계의 관점에서 수행되기 때문에, 설계하중의 산정과 구조해석 모델링 기법이 그 중요한 핵심 기술이라 할 수 있다. 설계하중으로는 작용하중의 원인별 혹은 구조물의 건조, 설치, 운용 등 그 기간별로 다양한 형태가 있으며, 모델링 기법으로는 격자 구조 모델링, 판요소 모델링, 보 유추 모델링, 3차원 유한요소 모델링 등 다양한 방법이 있다.

(4) 계류시스템 설계기술

초대형 부유식 해상구조물의 경우는 보통의 해상구조물에 비해 그 크기가 매우 크고 또한, 용도가 주요산업 기반시설 혹은 대인원의 거주형태로 나타나기 때문에 안정적인 계류시스템이 필수적으로 요구된다. 이에 관한 구체적인 설계 기술은 최근 일본을 중심으로 가시화되고 있는데, 보통 돌판-펜더 방식에 의한 계류가 유일한 대안의 형태로 나타나고 있다. 따라서 본 고에서도 돌판-펜더 방식을 중심으로 그 설계기법을 검토하고자 한다.

일반적으로 돌판방식의 계류시스템은 수심이 얇고 정온화된 해역에

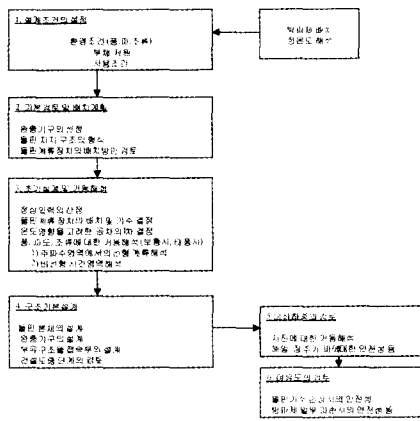


Fig. 6 Design procedure of the dolphin mooring system for very large floating structures

사용된다. 해상구조물에 작용하는 정상외력과 파주기 동요의 흡수는 1차적으로 구조물과 돌핀사이에서 방충재(防衝材) 역할을 하는 펜더가 담당하게 되고, 펜더 변형에 의해 발생하는 반력은 돌핀 구조를 통하여 지반으로 전달 흡수되어진다. 보통 돌핀지지 구조로는 중력식과 파일식으로 구분된다. 또 그 형태에 따라서 강재 또는 철근콘크리트, 강재자켓으로 제작된다. 지반이 단단하고 대형 구조물의 경우에는 때때로 케이슨(Caisson) 형태의 중력식 돌핀이 사용된다. 일반적으로는 파일방식의 돌핀이 많이 사용되고 있는데 파일식 돌핀은 경사말뚝식, 수직말뚝식, 자켓식, 강각콘크리트식 등이 활용되고 있다. 또한, 완충장치 형태로는 cable fender 형식, guide frame 방식, 유체압방식 등이 고려되어지고 있다.

이러한 돌핀-펜더 방식을 중심으로 한 초대형 해상구조물에 대한 계

류장치의 설계 흐름을 도식화 해보면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 구조물의 용도와 크기가 정해지면 이에 따른 설계 기준(변형정도, 사용연수, 설계재현주기) 등이 결정되어야 하고, 또한 설치 장소가 정해지면 이에 따른 각 설계 환경조건에 관한 조사, 결정이 이루어져야 한다. 대표적인 설계환경 조건으로는 재현주기에 따른 풍속의 결정, 설계 조류의 크기, 설계파랑의 크기, 조석차의 크기, 온도 변화량, 설치 장소의 수심, 지반조건 등이 있으며, 방파제 설치 유무에 따른 이들 각 환경 조건의 영향 등이 평가되어야 한다.

(5) 해역정온화 및 환경변화 예측 기술

해역정온화 기술은 부유구조물에 유입되어 구조물의 운동을 유발하는 파랑에 대한 제어기술과 주변해역의 해류 및 시설물의 배출수 등에 의해 유발되는 국지조류에 대한 제어기술의 두 분야로 크게 대별될 수 있다. 해역정온화를 위한 제어구조물의 설계를 위해서는 파랑 및 해수유동과 관련된 여러 핵심기술의 확보가 필수적이다. 이들 핵심기술들은 환경조건에 대한 이론적, 수치적 해석법의 개발과, 설계인자들의 변화에 따른 성능평가를 통한 제어구조물의 최적설계, 그리고 해석법 및 설계 구조물의 성능 검증을 위한 모형시험기법의 개발 등을 포함

한다. 해역정온화 기술은 대상 해역의 환경외력(바람, 파랑, 조류 등)의 정확한 추정을 기초로 하며 구조물 주위에서의 해수유동 변화와 더불어 파의 굴절, 회절, 반사 등의 해석과 천해지역의 수심변화에 따른 파랑변형의 해석이 필요하다.

파랑 제어를 위한 구조물로는 방파제의 설치가 고려될 수 있으며 부유구조물의 운동특성, 설치장소의 지형, 해양의 환경조건에 적합한 방파제의 설계가 필수적이다. 따라서 효과적인 방파제의 형식 및 형태에 따른 소파 성능, 건조, 설치, 운용 등에 대한 체계적인 검토가 필요하다. 또한 방파제로서의 역할 뿐 아니라 파랑에너지를 이용하는 복합 구조물로서의 기능에 대한 연구가 시설의 효율적 운용 관점에서 검토할 수 있다.

조류는 구조물 및 지반에 작용하는 주요 외력으로서의 역할뿐 아니라 퇴적물의 형성이나 오염물질의 확산 등에 가장 큰 영향을 주는 인자이다. 따라서 해상에 부유구조물 및 방파제 등의 대형 구조물이 설치되는 경우 이에 따른 조류의 유동변화 관측 및 예측에 관한 연구가 구조물의 안전성 및 환경보전의 관점에서 필수적이라 하겠다. 부유구조물의 설치시 야기되는 주변해역의 물리적 환경 변화가 주변시설에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 예상되는 제문제의 적극적 개선을 위한 해류제어 구조물의 설계 기술은 해수유동의 수치적 모델링과 이를 활용한 해수축진 구조물의

설계가 핵심을 이룬다.

해수유동 수치 모델은 유동해석의 목적에 따라 유동에 있어 수심 방향의 유동을 적분한 2차원 모델, 층 모델(layer model), 레벨 모델(level model)과 같은 3차원 유동 모델 여러 수준의 방법이 사용되며, 수치해법은 해석모델에 따라 유한요소법, 유한차분법 등이 쓰이게 된다.

(6) 모형시험·해석 기술

모형시험은 일반적인 선박이나 해양구조물과 같이 장기간의 공학적 경험과 실측 데이터가 확보된 경우에도 이론 해석의 보완과 최종적인 검증의 차원에서 수행되고 있는 대단히 유용한 방법이다. 초대형 해상 구조물의 경우는 전례가 없는 구조물이므로 여러 가지 측면에서 모형시험의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다고 하겠다. 모형시험의 목적은 대체로 이론 해석 결과의 검증, 이론으로 해석할 수 없는 현상의 규명, 가혹한 환경하에서의 안전성능 검증이라고 볼 수 있다. 초대형 해상구조물은 앞에서 열거한 모든 경우에 대해 모형시험의 중요성과 비중이 매우 높다고 할 수 있는데 실제 구조물의 규모가 매우 크고 구조물의 강성이 약함으로 인해 전통적인 선박의 모형시험과는 달리 부가적으로 고려해야 할 사항이 있다. 구조물의 강성이 약해 탄성거동이 중요하므로 구조 강성을 상사시킨 모형이 필요하며 수 km 급의 구조물을 현재의 수조시설에서 시험하기 위해서는 최소 1/100 - 1/500에

달하는 대축척 모형이어야 한다. 이와 같은 대축척 탄성모형은 제작 자체도 용이하지 않을 뿐 아니라 매우 정밀한 계측 시스템과 환경 재현 장치가 요구된다. 이와 같은 대축척 모형에 대한 파도, 바람, 조류의 복합 환경을 동시에 고려하는 것은 더욱 더 어려운 문제가 된다.

이상의 검토로부터 초대형 해상 구조물의 대축척 모형실험을 위해서는 초경량 탄성 모델 제작을 위한 소재의 개발, 초정밀 계측 시스템의 개발, 고성능 환경재현장치의 구축이 전제되어야 할 것이다. 지금까지 언급된 모든 요구조건을 충족시킨 모형시험은 수행된 바 없으나 여러 가지 형태의 탄성 모델을 이용한 모형시험, 돌핀 계류 시스템 모형시험과 풍동 모형시험 등이 일본에서 수행된 바 있으며 국내에서도 유탄성응답 모형시험이 수행된 바 있다.

앞으로 실험시설의 확장과 계측 장비의 정도 향상을 통한 실험법의 비약적 발전이 기대되지만 축척비가 1/100이 넘는 대축척 모형시험은 현재의 실험 수준에서 실험 오차를 고려하면 결과의 신뢰성 면에서 문제가 있으므로 부분 모형을 이용한 모형시험과 이론해석의 검증을 통해 실험 결과를 확장 해석하는 시도가 필요할 것이다. 아울러 일본에서 이미 행해진 실험자료가 부분 모형시험의 확장 해석에 중요한 데이터를 제공해 줄 것으로 기대된다.

4.2 건조기술

구조물의 장대화로 말미암아 건조상 발생하는 문제는 기존의 선박 및 해양구조물처럼 조선소의 도크에서 전체구조물을 완성할 수 없으므로 조선소에서 건조된 부분 구조물을 설치해상까지 운반하고 현장에서 조립, 완성하는 개념의 현장 건조개념이 도입되어야 한다. 아울러 선박 및 해양구조물의 수명이 30년 정도인 것에 비해 초대형 해상 구조물은 100년 이상의 사용 연한을 목표로 하고 있으므로 보다 완벽한 방식 방법의 채택과 운용 보수 계획이 필요하다.

(1) 현장 설치 공법

단위 부체를 해상에서 접합하기 위한 고려 사항으로는 단위 부체의 현장 운송방법, 해상 접합을 위해 각 부체를 근접시켰을 때 접합부에 걸리는 하중 예측, 단위 부체를 효과적으로 접합시키기 위한 공정관리 및 각 부체의 결합 시나리오, 실제 해상에서 실시 가능한 접합 공법의 확립이다.

단위 부체의 현장 운송을 위한 현실적 방법은 예인으로 모형시험을 통해 예인 시 구조물의 직진 안정성, 예인력 등을 추정할 수 있다. 근접된 부체 간의 하중 예측은 해상 용접을 위한 부체의 일시적 고정 장치의 안전성 확보를 위해 매우 중요하며 다양한 파향, 주기, 파고 조건에 대해 이론해석과 모형실험을 통한 예측과 검증을 통해 설계하중을 결정할 수 있다. 침수부 용접 방

법으로는 일본에서 메가플로트 실증구조물 건조 때 가압채취 방법을 사용함으로써 수중용접 없이 현장 접합작업을 수행한 바 있다. 폰툰형 구조물과 같이 규격화된 상자형 구조물의 경우에는 수중 로봇을 이용한 수중용접도 하나의 방법이 될 수 있을 것이다.

(2) 초장기 수명 보증 기술

초대형 해상구조물은 사용 연한 100년을 목표로 하고 있으므로 이러한 요구조건 충족을 위한 내식성 특수재료 개발, 장기 방식 방법 개발, 유지 보수 계획이 필요하다. 구조물 전체에 대해 내식성 특수 재료를 사용하는 것은 경제성 관점에서 비현실적이므로 침식 작용이 가장 심할 것으로 예상되는 비말대(飛沫帶)에 부분적인 사용과 구조물의 대부분을 차지하는 몰수부에 대해서는 장기적인 전기적 방식방법을 강구하는 한편 용접부와 방식상태에 대한 광범위한 실시간 모니터링을 위해 각종 센서를 이용한 원격 모니터링 시스템을 구축함으로써 구조물의 초장기 수명보증을 위한 통합관리 체계를 확립해야 할 것이다. 초대형 해상구조물은 선박과 같이 도크에서의 정기적인 검사가 불가능하므로 장기간 설치에 따른 수중생물 부착에 대한 방지책이 요구되며 아울러 ROV(Remotely Operated Vehicle), AUV (Autonomous Underwater Vehicle)을 이용한 시각 모니터링 시스템의 확보와 함께 유인, 무인 잠수작업에 의

한 유지보수계획도 필요할 것으로 예상된다.

5. 맺음말

초대형 부유식 해상구조물 기술은 대상 구조물 규모의 장대함으로 인해 지금까지 선박이나 해양구조물 설계·해석·건조·운용에 있어 고려하지 않았던 다양한 부분들을 고려해야 하는 실로 조선·해양공학 뿐 아니라 모든 엔지니어링 기술의 총화(總和)라고 할 수 있다. 초대형 해상구조물 기술은 20세기 말에 태동하여 21세기에 꽃을 피울 미래의 기술인 동시에 이를 통해 개발된 기술로 인해 현재의 조선·해양공학 엔지니어링 기술의 수준을 한단계 높이는 파급효과를 가져다 줄 것이다.

그러나 초대형 부유식 해상구조물의 설계·건조에 필요한 많은 부분의 기술적 문제가 검토된 현재에도 수 km 급 규모의 초대형 해상 비행장 건설에는 천문학적인 자금의 규모가 소요됨으로 인해 기술력, 경험, 자금력에서 우리나라보다 한 단계 앞선 것으로 평가되는 일본과 미국에서도 초대형 해상 비행장의 실현은 당분간 쉽지는 않을 전망이다. 일본에서는 현재에도 일본해사연구소(NMRI: National Maritime Research Institute, 舊 船舶研究所)를 중심으로 초대형 해상구조물의 기술적 적용분야 확대를 위해 다양한 형식의 초대형 구조물 연구를 계속 수행하고 있으며 제 2기 메가플로

트 실증 구조물의 부분 구조물인 길이가 약 500m 규모의 해상구조물을 도쿄만 내에 설치하여 대도시 IT 기능의 백업기능을 갖도록 하는 실증 실험을 계획하는 등 초대형 해상구조물 기술의 여러 가지 활용 방안을 꾸준히 강구하고 있다.

일본의 표현을 빌면 초대형 해상구조물을 이용한 해상공간을 “꿈의 대지”라고 부르고 있다. 이 꿈이 실현되기 위한 전제조건은 초대형 해상구조물을 이용한 해상공간 조성에 대한 사회적 공감대와 필요성의 증가, 구조물의 설계·건조·운용 기술의 확립으로 볼 수 있을 것이다. 좁은 국토와 높은 인구밀도, 시화호 및 새만금 등에 대한 무분별한 매립식 연안역의 개발이 최근 커다란 사회적 문제를 야기한 것에서 볼 수 있듯이 우리나라에서도 부유구조물을 이용한 쾌적한 해양공간 개발에 대한 필요성이 점차 높아지고 있으며 현재 세계 1위의 조선산업과 국제적 경쟁력을 갖는 철강산업 등 우리나라는 초대형 해상구조물에 대해 일본에 못잖은 사회적 필요성과 기술적 잠재력을 갖추고 있다고 판단된다.

엔지니어링 기술의 속성상 초대형 부유식 해상구조물의 실현에는 해석기술 개발과 함께 실제 설계·건조를 통한 경험의 축적과 기술을 유지 발전시킬 전문가 확보가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 정부의 연구개발 투자와 정책적 뒷받침, 정부출연연구소, 대학의 핵심 기술개발, 기업의 설계 및 건조기술 개발

이 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] Hidetoshi Uueoka, Chiaki Sato, "Phase II Research of Mega-Float", *Proc. of the Tenth ISOPE*, Vol. 1, pp10-16, 2000.

[2] Remmers, G., Taylor, R., Palo, P. and Brackett, R., "Mobile Offshore Base: A Seabasing Option", *Proc. of VLFS 99*, Vol. 1, pp7-13, 1999.

[3] Robert Zueck, Robert Taylo and Paul Palo, "Assessment of Technology for Mobile Offshore Base", *Proc. of the Tenth ISOPE*, Vol. 1, pp17-22, 2000.

[4] 홍사영 외, "대형 해양구조물 거동해석 기법 개발(I-III)", 선박해양공학연구센터, 과거처 특정 연구개발사업 보고서, 1994-1996.

[5] 정태영 외, "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발(I-III), I. 시스템 종합기술 개발", 한국기계연구원, 과거처 특정 연구개발사업 보고서, 1995-1998.

[6] 신현경 외, "부유식 해양구조물에 관한 연구 울산대학교", 과거처 특정 연구개발사업 보고서, 1994-1996.

[7] 조규남 외, "부유식 초대형 부유구조물 기획연구", 해양수산부(주관기관: 홍익대학교 해양시스템연구센터), 1999.

[8] 홍사영 외, "초대형 부유식 해상구조물 기술개발", 한국해양연구소, 해양수산부 해양수산개발사업 연구보고서, 1999-2000.

[9] "2001 부산해역의 미래개발을 위한 심포지엄"-초대형 부유식 해상구조물(VLFS)의 기술동향과 활용 방안, 2001.7.6 부산광역시.

[10] 일본조선학회 해양공학위원회성능부회편, "초대형 부유구조물(최항순, 박노식, 조철희 공역)", 도서출판 대선, 2001.3.

[11] "超大型浮式海洋構造物メガフロト)平成9年度研究成果報告書", 메가フロ트技術研究組合, 1998.3.

[12] "メガフロトの空港利用に關する實證的研究 平成11年度研究成果報告書", 메가フロ트技術研究組合, 2000.3.

[13] 마린프로트 추진기구편, "부채식 해상공항 - 거대 프로젝트에의 도전", 1997.