부유구조물 파랑응답 해석

홍사영, 홍 섭, 김병현〈한국기계연구원〉

1. 서 언

심해 석유자원의 탐사 및 시추를 위해 개발되어온 부유식 구조물은, 육상공간 개발이 포화상태에 다다른 현시점에서 플랜트, 비행장, 저장창고, 군사적 목적의 이동식 해양기지로서의 이용 등 국토개발의 효율성 제고 및 해양공간의 효과적 이용을 위한 하나의 현실적 대안으로 떠오르고 있다. 이웃 나라 일본에서는 이에 대한 국가적 차원의 대형 연구과제가 진행 중에 있으며 현재 關西 신 공항의 제2터미널로 부유식 해상공항을 신중히 검토하고 있는 것으로 알려져 있다. 이는 수심, 지반 및 자연환경에의 영향 등을 고려해 볼 때 매립식보다 부유식이 유리한 것으로 판단되고 있기 때문이다. 또한 부유식 구조물은 최근 NIMBY(Not In My Back Yard)현상으로 문제가 제기되고 있는 소음 및 환경오염에 영향을 주지 않는 장점으로 다각적 이용이 검토되고 있다.

부유식 해양구조물은 거친 해상환경에서 정해진 위치를 고수하며 요구되는 작업을 장기간 수행하여야 하므로 파랑, 조류, 바람 등에 의해 유기 되는 환경하중과 이로 인해 발생하는 구조물의 거동을 정확히 예측하고 해석하는 것이 설계 및 운용의 관점에서 매우 중요하다. 아울러 위치유지를 위해 설치되는 계류시스템의 설계 및 해석 또한 시스템의 작업 및 안전성 확보 관점에서 매우 중요한 분야이다. 따라서, 파랑하중과 이에 의한 구조물의 운동해석은 구조물의 강도결정 및 작업기준의 확립을 위해 오랫동안 해양공학 분야에서 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 부유구조물의 활동영역이 심해로 확장됨에 따라 비선형 파랑하중에 의해 유기 되는 계류된 해양구조물의 수평면상의 대변위 장주기 운동은 구조물의 작업위치 확보와 안전한 계류시스템의 설계와 관련되어 많은 연구가 진행되어 왔으며, 비선형 파랑하중, 장주기 운동의 시뮬레이션 모델링, 장주기 운동의 크기를 지배하는 점성항력, 파랑표류감쇠력, 계류시스템 감쇠력 등의 분야에는 아직도 규명되어야 할 많은 문제들이 남아있다.

해양공간 활용을 위해 예상되는 부유식 해양구조물은 단위구조들이 결합된 형태의 초대형 구조물로서 단위구조물간의 탄성변형 문제가 매우 중요시되고 있으며 이에 따라 단위구조물간의 상호작용이 고려된 유체력 산출과 탄성응답이 고려된 해석법의 개발이 전세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 독립부유구조물 자체의 크기가 대형화될 때 발생하는 탄성 변형 또한 구조 해석 및 진동관점에서 중요한 고려사항이며 이는 조선공학분야에서 유탄성 해석기법에 바탕을 두고 연구가 활발히 진행중이다.

본 고에서는 부유구조물의 설계에 있어 핵심 기술 중 하나인 파랑응답 해석기술의 현황에 대해 살펴보고 현재 한국기계연구원에서 수행중인 국책연구개발사업 "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발"의 세부과제인 "부유구조물 파랑응답 해석기법 개발"의 추진 내용에 대해 환경 하중/응답 해석기술, 계류시스템 설계/해석기술, 유탄성응답 해석기술로 나누어 소개하고자 한다.

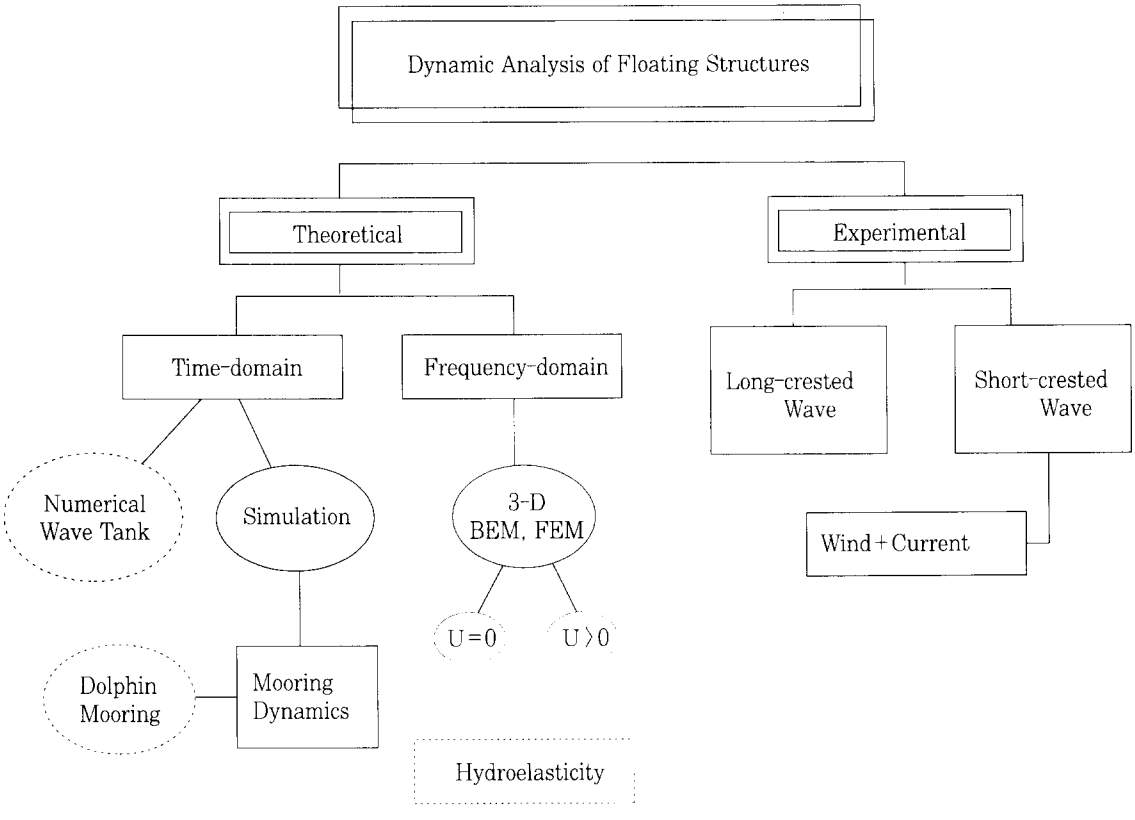
2. 파랑응답 해석기술 현황

해상에는 항시 파랑, 바람, 조류 등이 존재하며 이러한 환경인자가 부유구조물에 작용하여 동적 거동을 일으키게 된다. 따라서 구조물의 파랑응답해석을 위해서는 환경하중의 정확한 추정과 구조물의 동적 거동에 대한 물리적 모델링이 필수적이며 이를 위한 접근 방법으로 이론적 방법과 실험적 방법을 들 수 있겠다. 이 두 가지 접근방법은 각각의 장점과 한계가 있으나 서로의 장단점이 상호 보완적 성격이 강하므로 실제 해석 방법의 개발 및 검증에 있어 두 방법이 병행되고 있으며 이는 보다 물리적으로 타당하고 공학적으로 신뢰도가 높은 해석방법의 개발을 위해서 바람직한 방향으로 판단된다. 현재까지 이론 및 실험적 연구의 뒷받침에 힘입어 개발되었거나 개발중인 파랑응답 해석법은 다음과 같이 도식화할 수 있다. 그림에서 실 선으로 표시된 기술은 현재 설계에 직접 이용되고 있는 방법이며 점선으로 표시된 부분은 현재 개발중이거나 아직 실용화되지 않은 기술로 본 연구에서 개발을 목표로 하는 분야이다.

3. 파랑응답 해석기술의 주요 내용

3.1 파랑 하중/응답 해석기법

파랑 하중 및 이에 대한 구조물의 응답특성 해석에 대한 연구는 종래의 환경인자에 대한 독립적 해석으로부터 점차 환경인자 간의 상호작용이 고려되고 비선형효과를 포함하는 방향으로 확장되고 있으며 수치계산의 효율성과 결과의 정확도 향상을 위해 고차경계요소법을 이용하는 경향이 두드러지고 있다. 본 절에서는 최근 해양공학 연구분야에서 관심의 대상이 되고 있으며 본 과제에서 수행하고자 하는 연구내용인 파랑-조류간의 상호작용 해석과 수치파수조개발에 대해 소개하기로 한다.



파랑-조류 상호작용 해석
(analysis of wave-current interaction) :

파랑-조류 상호작용 해석은 계류 부유구조물의 장주기 대변위 운동의 예측에 있어서 파랑표류감쇠력(wave drift damping)의 역할이 밝혀지면서 그 중요성이 인식되었다. 파랑표류감쇠력은 파고의 제곱에 비례하고 선속에 비례하는 힘으로 장주기운동의 중요한 감쇠력으로 미소 조류속도에서 파랑표류력의 조류속도에 대한 미분치로 구해진다. 한편 파랑-조류 상호작용의 효과는 구조물의 형상과 조류속도, 파주기에 따라 파랑표류력의 증가가 2배에 달하며, 선형 파랑기진력에도 상당한 차이를 나타내는 경우가 있는 것으로 밝혀지고 있다. 이제까지의 파랑-조류 상호작용 해석은 평면파넬법을 근간으로 하고 있으나 본 연구에서는 고차경계요소법을 도입하여 수치해석의 효율성과 신뢰성 향상을 도모하고자 한다.

수치 파수조(Numerical Wave Tank)

선형 포텐셜이론에 근거한 기존의 해석방법은 이제까지의 해양구조물의 설계파랑하중 및 운동응답, 파랑표류력 등의 추정에 있어 공학적으로 유용하게 사용되어왔다. 그러나 중력식 플랫폼이나 TLP(Tension Leg Platform)과 같은 해양구조물이 출현하면서 wave run-up이나 비대칭 파에 의한 충격력에 의한 ringing현상 등의 해석 등이 중요한 설계관점이 되고 있다. 이러한 필요에 의해 대두된 해석방법의 하나가 수치 파수조로 먼저 거친 해상을 표현할 수 있는 비대칭 파의 생성과 이러한 파에 의한 비선형 파랑하중의 추정을 목적으로 하고 있다. 시도되고 있는 수치해법으로는 경계요소법이 현재 주류를 이루고 있으나 유한차분법이나 유한요소법을 이용한 연구도 진행 중에 있다. 수치 파수조의 개발은 시간영역에서 계산영역 전체를 포함하는 비선형 경계치 문제를 직접 다루는 것으로 섭동법이 선형 경계치문제로부터 출발하여 차수를 높여가면서 저차항의 해를 이용하여 비선형문제를 풀어 가는 방식과는 차이를 보인다. 따라서 수치 파수조의 개발에는 매 계산시간 마다 변화되는 경계면에 대한 경계치문제의 해를 구하여야 하므로 빠르고 효율적인 계산 알고리듬의 개발은 물론 오랜 시간동안 계산이 가능하도록 수조 경계벽에서의 반사파를 제거하는 수치적 기법의 개발이 필요하다. 이러한 수치 파수조의 개발은 비선형 파랑하중의 해석은 물론 실험실에서 비대칭 파를 구현하기 위한 조파시스템의 개발에도 필수적인 연구로 계산기의 발달과 더불어 비약적인 발전이 기대되는 분야이다.

3.2 돌핀계류시스템의 종합설계기법

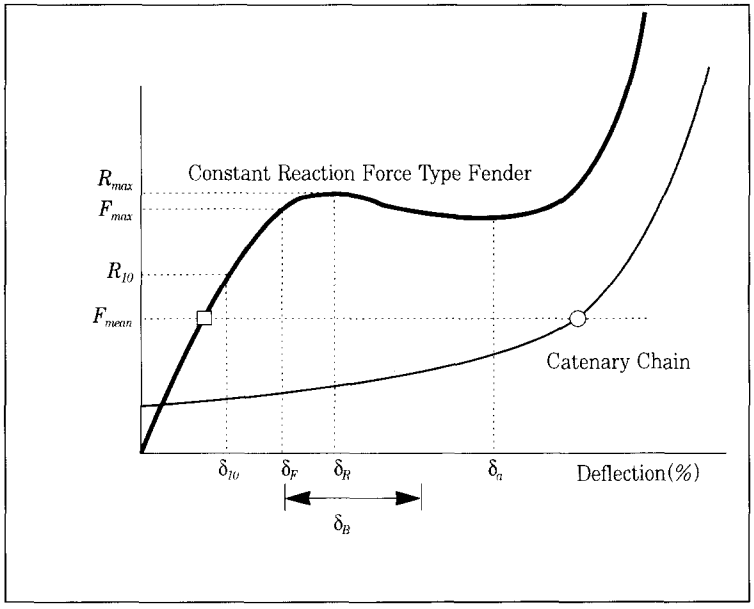
부유구조물의 계류는 부유체와 연결되는 계류장비의 변형에 따른 발생 반력을 이용하여 부유구조물의 운동변위를 원하는 범위 이내로 구속하는 데에 그 목적을 갖는다. 부유체가 부두에 접안되어 있는 선박과 같은 경우를 제외한다면 조류력, 파력 등을 받아 움직이는 부유체 운동의 상당부분은 계류장비의 변형을 거쳐서 결국 해저지반으로 전달 흡수되게 된다. 그러므로, 일반적으로 계류설계에 있어서 해저의 앵커 선정이 한 중요한 설계인자로 다루어진다.

이러한 계류장비 및 계류앵커의 선정은 계류 대상 구조물의 제원 및 해저지반 조건을 포함해서 풍속, 조류, 유의파고 등의 환경조건에 의해 지배되는데, 이는 계류 대상 부유체에 작용하는 환경하중과 부유체의 운동에너지를 구속해낼 수 있는 범위의 정의 및 그 방식 즉, 계류장비와 계류앵커의 선택을 뜻한다. 어떠한 우수한 계류장비라도 이를 해저 지반에 안전하게 지지해주는 앵커를 필요로 하게된다.

선박 및 해양구조물의 해상 계류에 일반적으로 사용되는 체인(또는 체인과 와이어 로우프와의 조합)에 의한 계류는 수심이 낮아지면 적용의 한계에 봉착된다. 천해역 계류방식으로는 돌핀계류의 타당성이 높게 평가되고 있으며, 일본의 경우 많은 적용례를 찾아볼 수 있다. 이때, "돌핀"이란 계선주(繫船柱)로 사용되는 해저고정식 직립 구조물을 지칭하며, 전체적 또는 부분적으로 계류복원력에 기여한다. 따라서 "돌핀계류"란 경우에 따라서는 돌핀과 부유체를 연결하는 계류장비에 대한 구체적 언급이 생략된 용어이다.

펜더(fender)는 일반적으로 부두의 선박 접안시

설에 완충재로서 많이 사용되어 왔다. 에너지 흡수매체에 따라서 공기식(pneumatic), 좌굴식(buckling) 등으로 분류되고 그에 따라 변형과 반력 즉, 에너지 흡수에 있어서 차이를 나타낸다. 일본의 경우 長崎縣 上五島의 부유식 석유비축탱크(Kami-Goto Project)의 계류장비로서 펜더를 이용한 돌핀/펜더 계류시스템이 처음 적용된 이후, 대형 부유구조물의 계류에는 돌핀/펜더 계류시스템의 사용이 보편화되고 있다.



본 연구에서의 계류 대상 또한 연안의 천해에 투입되는 대형 부유식 구조물임을 감안하여 본 절에서는 돌핀/펜더 계류시스템의 설계기법에 관하여 간단히 다루고자 한다.

펜더(Fender) 선정기법

흔히 사용되어지는 펜더의 종류는 공기식인 비례반력형(比例反力型) 펜더와 좌굴식인 정반력형(定反力型)으로 구분된다. 고무가 재료인 좌굴식 정반력형의 경우를 보면, 펜더의 변형에 따른 반력 발생은 초기의 작은 변형시 선형적 특성을 보이다가 변형이 선형 구간을 초과하면서 발생 반력은 최대치(R_{max})에 도달한 후 이어지는 변형의 진전에 따라 오히려 반력이 약간 감소하는 정반력의 구간을 갖는다. 그후 더 계속되는 변형에 대하여는 반력이 급격히 증가한다. 이러한 특성은 일반적인 체인 계류삭의 경우와 비교하면 작용외력(F_{mean})에 대한 계류장비의 변형에 있어서 펜더는 체인에 비하여 월등히 작은 변형을 가지고 외력에 대응하는 반력을 발생시킨다. 최대반력 발생 이후의 상당한 변형에 대하여 반력이 거의 일정히 유지되는 정반력형 펜더의 특성은 풍력, 조류력 등의 정상외력에 의한 펜더 변형에 파도와 바람에 의한 동적 거동이 중첩되더라도 과도한 반력의 유발 없이 계류력이 돌핀으로 전달될 수 있다는 큰 이점이 된다. 즉, 동적 거동을 고려한 부유체의 최대 운동변위가 펜더의 허용변형율(δ_α) 이하로 유지될 수 있다면 특히 대형 부유구조물의 천해 계류에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

선박 접안시설의 경우에 적용되는 정반력형 펜더의 선정기법은 다음과 같다. 즉,

a) 방충재인 펜더의 배치를 가정한다.

b) 설계 평균풍속으로부터 선박에 작용하는 풍하중을 산출한다. 이때, 풍향은 30° ~ 150°로 변화시키면서 Sway 방향의 하중과 Yawing 모우멘트를 계산한다.

c) 펜더의 변위-복원력 특성을 선형적이라고 가정하여, b)에서 구해진 풍하중에 대한 펜더에 작용하는 하중(F_{mean})을 계산한다.

d) 이 하중(F_{mean})이 선정하고자하는 펜더의 10% 변형에 대한 반력(R_{10})을 넘지 않도록 한다.

e) 거스트(gust)율을 1.3으로하는 최대 순간풍속에 대한 펜더하중(F_{max})을 구하여 이 값이 선정하고자하는 펜더의 최대반력(R_{max})을 초과하지 않도록 한다.

f) 계류되지 않은 선박의 운동을 계산하여 Sway, Yaw, Roll 운동에 의한 펜더위치에서의 선박의 운동변위(δ_β)를 구한다. 최대 순간풍속에서의 펜더하중(F_{max})에 대한 펜더 변형률(δ_F)에 이 운동변위(δ_β)

를 더한 값이 펜더의 허용변위(δ_α) 이하에 머물도록 적당한 펜더를 선정한다.

상기한 부두 접안시설용 펜더 선정방법은 조류력과 평균파랑표류력 등의 영향이 포함된다면 f)를 제외하고는 큰 수정 없이 연안 천해역의 대형 부유구조물 계류용 펜더 설계에 적용 가능하리라 판단된다. 부유체의 동적 운동변위 산정에 있어서 상기한 f) 처럼 펜더의 영향을 무시하는 것은 매우 보수적인 방법이며 펜더의 가격이 매우 비싼 점을 고려한다면 펜더의 영향을 고려한 동적 변위 추정방법의 적용이 바람직하다고 할 수 있다. 이때, 펜더와 부유체간의 간격(clearance)의 영향이 고려되어야 한다.

한편, 정반력형 펜더는 온도, 경년(經年), 전단변형 등의 영향을 받는다. 동적 하중에 대하여는 히스테리시스와 더불어 약간의 반력 증가를 보인다. 한편, 고무의 중요한 성질중 하나인 Creep 특성은 10% 이내로 제한되는 것이 권장되며 그 이상의 경우 불안정성이 나타난다고 보고되고 있다. 일반적으로 펜더 제작상의 오차를 포함하는 반력특성에 미치는 제반 영향을 고려했을 때, 펜더변형 산정을 위하여는 펜더의 정격반력이 15% 감소하고 돌핀설계하중 산정을 위하여는 10% 증가하는 것으로 취급한다.

일단, 흡수되어야 하는 부유체의 계류에너지 크기가 정해지면 계류시설 및 펜더 각각의 허용하중, 고무펜더의 종류 및 등급, 허용응력 그리고 안전계수를 적절히 선정하여야 한다.

돌핀 설계기법

돌핀 설계를 위하여는 설치 대상해역의 지반조사에 따른 타당성 검토가 선행되어야 한다. 지반 기술자들은 설치지점의 기초지반에 대한 지반조사를 통하여 돌핀 기초와 지반의 상호역학관계를 면밀히 검토할 필요가 있다. 아울러 유사한 조건에서의 과거 경험, 설계 자료, 해석 및 설계 방법, 영향 인자, 특히 실패의 경험 등이 반영되어야 한다.

지반공학적 지반조사를 통하여는 지반의 전단강도, 상대밀도, 압축성 등 기초해석과 지반/구조물 상호작용 해석에 사용되는 자료를 얻을 수 있다. 현장조사는 시료채취 및 보오링과 현장시험을 포함한다. 현장에서 채취된 시료는 실내시험을 통하여 지반 물성치를 결정하는 데에 사용된다. 예비조사단계에서의 지반조사는 돌핀의 설치위치 및 구조 형식을 결정하는데 사용한다. 또한, 지반특성에 따라서 선정된 돌핀 구조 및 기초형식에 따라 현장시험의 범위 및 방법이 결정된다.

보오링 시료에 대한 시험이 이루어지는 경우, 지질학적 조사 자료와 지반공학적 자료를 복합적으로 평가하는 것이 중요하다. 현장시험은 시료 채취에 의한 교란효과가 없는 실제 상태의 지반 물성을 결정하기 위하여 수행된다. 현장시험의 결과는 실내시험의 결과와 복합적으로 분석되어 기초설계에 필요한 공학적 지반물성치가 결정되어진다. 지반의 합리적 거동 예측을 고려한 기초해석을 위해서는 실내시험에 지반특성 및 분류, 강도특성, 압축특성, 탄성계수 및 반복하중에서의 거동특성 등의 사항이 포함되어야 한다. 지반물성치가 결정되면 하중조건, 지반구조 등이 고려되어 구조물 설치시의 지반거동 해석과 설치후 하중조건하에서의 응력변화가 추정될 수 있다. 지진의 가능성이 높은 지역에서는 지진하중에 의한 영향이 고려되어야 한다.

설치 대상해역의 해저 지반에 일본의 Kami-Goto 프로젝트에서처럼 강성이 큰 기초암반이 존재하며 지진의 영향이 없는 경우에는 케이슨 형식의 중력식 돌핀의 적용이 유망시 된다. 하지만 중력식 돌핀은 적용될 수 있는 지반조건의 제약과 아울러 그 제작 및 설치 비용이 매우 비싼 단점을 갖는다. 대형 케이슨(caisson) 구조의 제작뿐만 아니라 기초암반까지의 토층의 제거, 사석(捨石) 기초(rubble mound)와 자갈층(gravel layer) 공사 및 수평 고르기(leveling) 등 특수 바아지선이 필요 되는 지반공사에는 막대한 공사비용이 소요된다. 또한, 돌핀 설치 이후 지반의 안정 (settlement)이 적은 범위에서 균일하게 일어나도록 기저층의 정지(compacting layer)가 세심히 고려 수행되어야 하며, 케이슨 안정성 확보를 위하여 foot protection이 필요로 된다. 중력식 돌핀에 설치되는 펜더에 대하여는 케이슨의 전도(顚倒)에 대한 안전율의 검토가 필요 된다.

말뚝 지지형 돌핀은 연약지반과 같은 중력식 돌핀의 설치가 허용되지 않는 지반에 적용이 고려되어지며, 그 제작 및 설치 비용이 상대적으로 낮은 장점을 갖는다. 중력식과 비교할 때 유연구조 방식(flexible structure type)이고 부유체의 계류에너지는 펜더 변형뿐만 아니라 말뚝의 굽힘 변형에 의해 흡수되어진다. 이러한 경제적 이점과 말뚝 변형에 의한 에너지 흡수 능력은 높게 평가되어 많은 경우에서 중력식 돌핀을 대체할 것으로 전망되며, 일본의 국가프로젝트인 Mega-Float의 부유체의 계류에 적용되고 있다.

일반적으로 돌핀의 각 지지말뚝에는 강관(鋼管)이 사용되며 계류부유체의 거동에 기인하는 횡하중에 대한 충분한 저항능력을 갖도록 설계되어야 한다. 이때, 말뚝에 작용하는 하중은 곧 펜더의 반력이 된다. 탄성이론에 따르면 횡하중에서의 변형에 의한 말뚝의 흡수에너지는 강관의 내부응력의 자승에 비례한다. 강구조물의 설계에는 흔히 허용응력을 재료의 최소항복응력의 2/3 이내로 제한하는 즉, 안전율 1.5의 기준이 적용되어지나, 펜더가 없는 단순 강관 말뚝의 경우는 흡수에너지의 관점에서의 안전율 평가에 따라 발생 응력이 최소항복응력의 0.82배 이내로 허용되는 기준이 적용되기도 한다.

단일 말뚝에 펜더가 부착된 경우를 예로 들면, 펜더와 말뚝의 변형에 따른 전체 시스템의 흡수에너지는 말뚝의 발생응력이 허용응력에 도달할 때까지의 펜더의 흡수에너지와 말뚝응력이 허용응력에 도달할 때까지의 말뚝의 흡수에너지의 합으로 주어진다. 그 이후 변형의 진전에 의해 말뚝응력이 항복응력에 도달할 때까지의 흡수에너지는 각각 펜더와 말뚝이 가지는 잉여에너지가 된다.

강관 말뚝에 허용응력이 발생할 때의 말뚝의 최대 횡저항력 및 이에 필요한 말뚝의 관입깊이 그리고 그때의 말뚝상단 변형 등의 산출에는 말뚝과 지반과의 상호영향이 고려되며, 이를 위하여 p-y 곡선에 의한 유사정적해석법을 비롯한 여러 가지 해석방법이 개발되어 제안되고 있다.

지금까지는 주로 단일 말뚝에 관한 설계기법에 대하여 간략히 기술하였다. 대형 부유구조물의 경우에는 돌핀 지지구조가 여러 개의 말뚝으로 구성되고 말뚝 상단을 서로 연결하는 돌핀상부구조에 펜더가 설치되는 형태를 취하게 된다. 이때에는 펜더 반력이 각 말뚝 상단에 효과적으로 전달되며 펜더 설치에 따른 구조적 안전을 고려한 돌핀상부구조의 설계가 수행되어야 하며, 말뚝의 변형 및 그 때의 발생응력의 검토를 위하여 전체 돌핀구조해석이 요구된다.

상술한 준 정적 설계기법의 보완 및 개선을 위하여는 부유체의 거동과 펜더의 변형 그리고 말뚝형 돌핀의 경우 지반과 지지말뚝간의 상호영향을 고려한 돌핀의 거동이 서로 연계된 종합적 거동해석에 따른 설계기법의 적용이 필요하다. 또한, 상기한 설계기법에 의해 선정된 계류시스템은 모형시험을 통하여 그 성능이 확인되어야 한다. 고무펜더의 축척효과를 고려할 때 가능한 대형 모형에 대한 모형시험이 바람직하며 계류시스템의 최종 안전성은 실해역 시험을 통하여 확인되어야 한다.

3.3. 유탄성 응답해석기술

해양공간을 적극적으로 이용하기 위한 노력이 구체화되면서 종래의 구조물에 비해 엄청나게 큰 부유식구조물의 개념이 대두되고 있다. 대표적인 예가 일본의 Mega-Float 계획으로 길이가 수 Km에 달하고 폭이 600m가 넘는 부유식 해상 비행장에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이와 같은 대형 부유구조물은 길이와 폭의 치수에 비해 깊이 치수가 매우 작기 때문에 상하방향의 강성이 상대적으로 작다. 그 결과 파랑하중에 의한 상하방향의 응답은 탄성변형이 지배적으로 나타나게 되고 이러한 탄성변형은 유장을 변화시켜 이로 인해 작용하는 유체력도 변하게 된다. 그러므로 대형 부유구조물의 응답해석에서는 구조물을 강체로 가정하는 기존의 해석방법으로는 신뢰성 있는 해석결과를 기대할 수 없다. 따라서 유체와 구조물의 탄성변형의 상호간섭효과를 고려한 유탄성 응답해석 방법의 적용이 필수적이다.

3.3.1 유탄성 해석방법

지금까지 알려져있는 해석방법은 크게 모드법과 이산화법으로 대별할 수 있다.

모드법

모드법에서는 구조물 자체의 고유모드를 구한 후 구조물의 응답을 일반좌표계를 사용하여 고유모드들의 중첩으로 표현한다. 이때 사용되는 고유모드들은 유한요소법 등을 사용하여 얻은 공기 중에서의 구조물의 고유모드(dry mode) 또는 정수중의 모드(wet mode) 가 사용되며 여기에는 강체모드도 포함된다. 강체모드를 포함한 각 고유모드에 대해서 유체력을 계산하고 구조 운동방정식과 유체력을 결합하여 일반좌표에 대한 구조-유체 연성방정식을 얻고 이의 해를 사용하여 실재 변위응답을 얻는다. 각 모드에 대한 유체력의 계산은 주로 경계요소법이 사용된다. 기존의 강체운동만을 고려한 계산방법에서는 방사파의 유체력을 6개의 강체모드에 대해서만 계산하는 것에 비해서 여기서는 6개의 강체모드에 추가하여 다수의 중요한 탄성모드에 대한 방사파 유체력을 계산하는 것이 기존의 방법과 다른 점이라 할 수 있다.

이산화법

이산화법은 구조물과 유체를 각각 유한개의 요소로 이산화하고 구조와 유체가 접하는 물수면에서의 유체력을 고려하여 직접 해석하는 방법이다. 구조에는 주로 유한요소법을 적용하고 유체는 경계요소법이나 유한요소법을 사용되고 있는데 3차원 해석의 경우 보다 간편한 경계요소법이 주로 사용된다.

3.3.2 해석 모델

부유구조물의 형태에 따라 해석을 보다 효율적으로 수행하기 위하여 여러 가지 해석 모델이 사용되고 있다. 부체 모듈이 종횡 또는 원형으로 배치되어 결합된 부유구조물에 대해서는 부체를 강체로 취급하여 부체간 상호간섭을 고려한 유체력을 계산하고 1차원 또는 2차원 탄성모델에 결합시킨 해석모델, 구조물을 탄성 스프링으로 지지된 평판으로 치환한 평판모델 및 3차원 구조모델 등이 사용되고 있다.

3.3.3 유탄성 응답해석 기술의 과제

대형 부유구조물의 경우 입사파의 파장은 구조물의 치수에 비해 상대적으로 매우 짧다. 따라서 지금까지의 해석기법을 사용하여 보다 정확한 응답해석을 위해서는 매우 많은 요소분할이 필요하고 이에 따라 유체력을 산출하는데 방대한 계산량이 요구된다. 현재로서는 이러한 점이 설계단계에서 대형 부유구조물의 유탄성 응답해석을 수행하는데 가장 큰 난점이라 할 수 있다. 따라서 각 설계단계에서 실용적으로 적용 가능하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 모델 기법 및 해석기법의 개발이 요구하다.

4. 결 언

파랑응답 해석기술은 부유식 해양구조물의 설계에 있어 작업조건을 만족시키고 거친 해상에서의 생존여부를 판단해야 하므로 오랫동안 이론 및 실험적 연구가 지속되어온 분야이다. 종래의 해석기술은 해양에서의 파랑, 바람, 조류 등에 의한 환경외력을 개별적으로 추정하는 수준에 머물렀으나 파랑 중에 보다 우수한 성능과 안정성이 높은 부유구조물의 개발을 위해서 점차로 각 환경인자의 상호작용을 고려하고 비선형 현상을 해석하는 방향으로 연구가 진행중에 있다.

계류시스템의 안전한 설계는 부유구조물의 위치유지는 물론 심각한 해상상태에서도 부유구조물의 손상 및 손실을 방지함으로써 전체 구조물 시스템의 안전성 확보에 의한 경제적 손실 방지란 점에서 매우 중요하다. 따라서 구조물의 설치 장소 및 종류에 따른 설계 및 해석기법의 확립이 중요하며 이를 검증할 수 있는 실험기법의 개발이 병행되어야 할 것이다.

해양공간을 적극적으로 이용하기 위한 노력이 구체화되면서 종래의 구조물에 비해 엄청나게 큰 부유식 해양구조물의 개념이 대두되고 있으며 이에 따라 구조물간의 상호간섭과 구조물의 탄성변형이 중요한 문제로 제기되고 있다.

해양공간 이용을 위한 부유식 초대형 구조물을 설계, 건조하기 위해서는 전술된 해양 환경인자의 복잡한 상호작용, 초대형 구조물의 위치유지에 적합한 계류시스템의 설계, 구조물간의 상호간섭과 탄성변

형을 고려한 해석기술 등이 유기적으로 통합된 파랑 응답 해석기법이 필요할 것이며 이를 위한 이론 및 실험적 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

홍 사 영

- 1960년 3월 12일생
- 1994년 서울대 조선해양공학 박사
- 1985년~ 현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야: 해양공학, 부유구조물 동역학

홍 섭

- 1959년 6월 2일생
- 1992년 독일 Aachen 공대 해양공학과(박사)
- 1993년 ~ 현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야: 해양공학, 파이프 및 라이저, 계류시스템

김 병 현

- 1956년 1월 26일생
- 1993년 2월 서울대 조선해양공학 박사
- 1982년 3월 ~ 현재 한국기계연구원 구조시스템연구부 책임연구원
- 관심분야: 구조진동 해석, 유한요소해석, 동특성최적화, 유연성해석, 내진해석