

초대형 부유식 해상구조물 설계를 위한 유탄성해석 소프트웨어 적용

Application of Hydroelastic Analysis Software on Very Large Floating Structures



나 성 원*



송 명 관**

* 삼성중공업(주) 건설사업부 부유식해상구조물개발TF 차장
** 삼성중공업(주) 건설사업부 부유식해상구조물개발TF 과장

1. 서 론

항만시설, 산업시설, 레저 관광시설 및 자원개발 등을 위한 연안 개발과 해양 개발의 수요가 증대되고 있다. 연안개발을 위해서는 매립이나 파일, 자켓, 케이슨 등을 이용하는 방법이 널리 적용되며 해양자원의 개발을 위해서는 자켓이나 GBS 타입의 구조물이 많이 사용되어 왔으나, 개발지역의 수심이 깊어짐에 따른 개발비용의 증가와 개발에 따른 환경영향을 최소화하기 위해서 보다 효율적이고 친환경적인 방법이 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키는 방법으로 초대형 부유식 구조물(VLFS, Very Large Floating Structure)에 대한 연구가 널리 수행되고 있으며 실 구조물에 대한 적용 또한 증가하고 있다. 부유식 구조물은 수심의 증가에 따른 공사비의 상승이 미미하고 환경에 대한 영향이 적은 등의 장점이 있으나, 파랑에 대한 안정성, 침수에 대한 안전성 등 일반 구조물에 비해 공학적으로 면밀히 검토되어야 할 사항들이 다수 존재한다. 본 기사에서는 초대형 부유식 해상구조물에 대한 기본적인 개념 및 사례를 소개하고, 부유식 해상 구조물의 설계에 있어 핵심적인 기술의 하나인 유탄성 해석 방법에 대한 사례를 소개하고자 한다.

2. 초대형 부유식 해상구조물(VLFS)

2.1 VLFS의 특징

일반적으로 VLFS라 함은 강재나 콘크리트로 만든 부체(pontoon) 위에 시설물을 설치한 영구적 구조물로 연직방향의 하중은 부력에 의해 지지되고 수평방향의 운동은 계류시설에 의해 구속되게 된다(그림 1). 또한, 필요에 따라서는 육상과의 연계를 위한 연결교량과 파랑하중을 저감하기 위한 소파시설이 함께 구성되기도 한다. 이와 같은 부유식 구조물은 매립 등의 방법을 이용한 개발과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다:

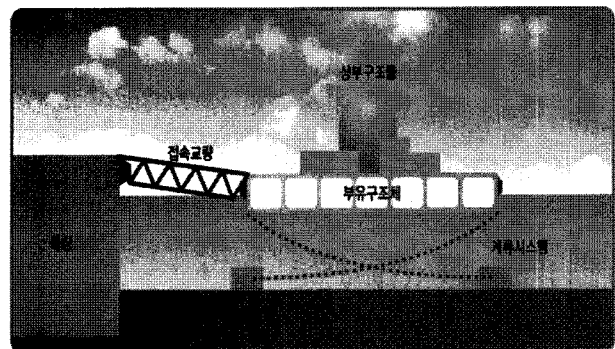


그림 1 VLFS 개념도

- (1) 수심의 증가에 따른 공사비의 증가가 미미하여 대수심 지역에서의 적용에 적합하다.
- (2) 지반 조건에 대한 영향이 적어 연약한 해저지반 지역에서의 적용이 용이하다.
- (3) 육상에서 제작된 후 진수되기 때문에 공사 중의 환경오염을 최소화할 수 있다.
- (4) 부유체 아래로의 해수 운동이 자유로워 해수교환 불량 등에 의한 오염이 없다.
- (5) 확장, 이동 및 철거가 용이하다.
- (6) 부유체 제작 후 해상 운송이 가능하기 때문에 시공장소의 선택이 유연하다.
- (7) 부유체는 부력의 확보를 위하여 내부가 비어있기 때문에 내부공간의 활용이 가능하다.
- (8) 모듈화 하여 제작한 후 해상접합을 통하여 시공하기 때문에 공기의 단축이 가능하다.
- (9) 내진성능이 우수하다.
- (10) 조석에 따른 구조물의 건현의 변화가 없다.

또한, 부유식 구조물의 재료로는 강재와 콘크리트 등의 사용이 가능하며, 콘크리트 부유체는 강재 부유체에 비하여 다음과 같은 장점을 갖는다:

- (1) 표면 부식이 없기 때문에 도장 등을 주기적으로 관리할 필요가 없어 유지관리가 저렴하다.
- (2) 일반적으로 제작비가 저렴하다.
- (3) 부유체의 자체 자중이 강재에 비해 무겁기 때문에 안정성 확보를 위한 별도의 발라스팅이 필요하지 않다.
- (4) 피로성능이 우수하여 지속적인 파랑하중이 작용하는 해상구조물에 적합하며, 특히, 우수한 내충격성능 및 저온에서의 우수한 재료특성은 저온 및 유빙에 대한 고려가 필요한 극지 해양 플랜트 등에의 적용에 적합하다.

상기와 같은 장점에도 불구하고 부유식 구조물은 일반적인 구조물과 달리 파랑에 의한 동요, 계류, 염해에 대한 내구성, 보강재의 내부식 성능, 균열제어, 균열 및 충돌 파손 등에 대한 안전성 등이 보다 면밀하게 검토되어 설계가 이루어져야 한다.

2.2 부유식 구조물 사례

부유식 구조물의 적용 분야로는 교량, 방파제, 공항, 인공섬, 해양 플랜트, 에너지 저장시설 등 그 범위가 매우 광범위하며, 콘크리트 부유식 구조물에 대한 각 분야별 사례를 그림 2~10에 나타내었다. 특히, 그림 7은 삼성중공업 건

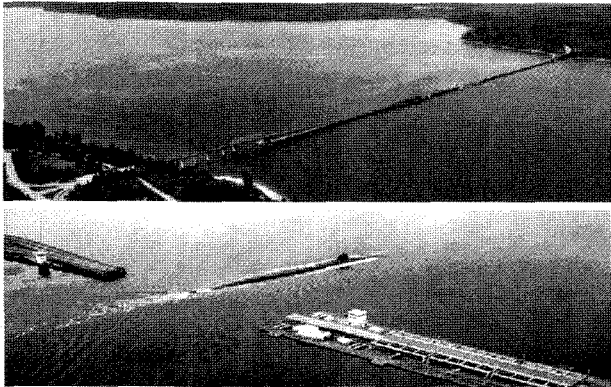


그림 2 Hood Canal Bridge(미국, 씨애틀)

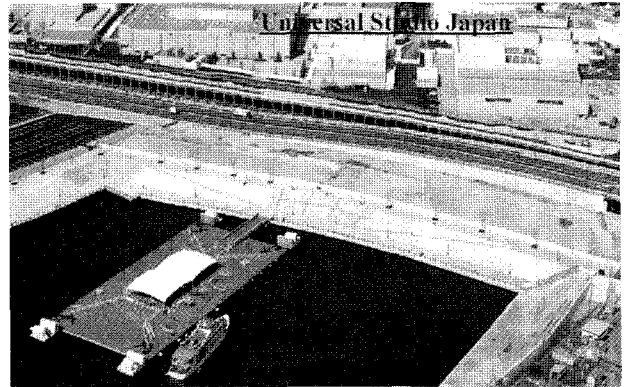
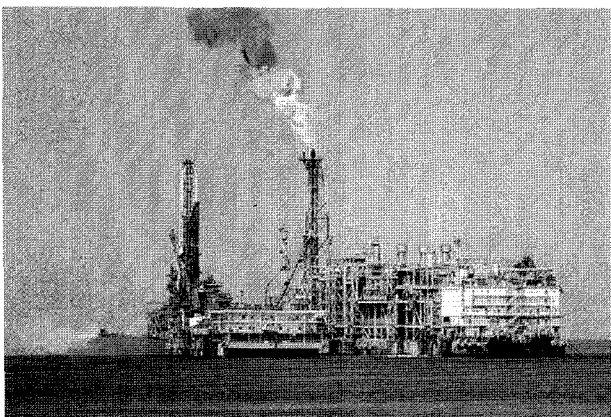
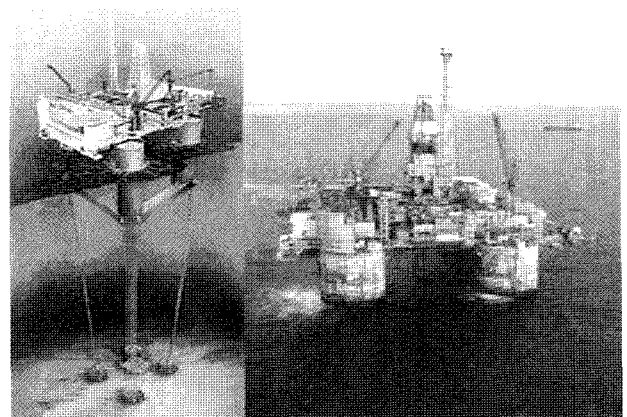


그림 3 응급 구호 시설(일본, 오사카)



(a) N'Kossa barge(콩고)



(b) Heidrun TLP(북해)

그림 4 부유식 해양 플랜트

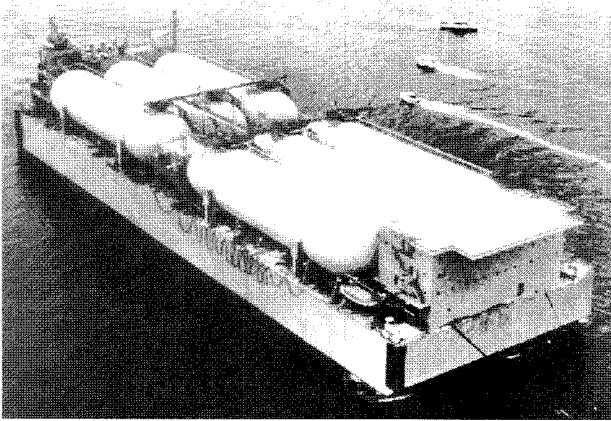


그림 5 Ardiana Sakti LPG 저장시설

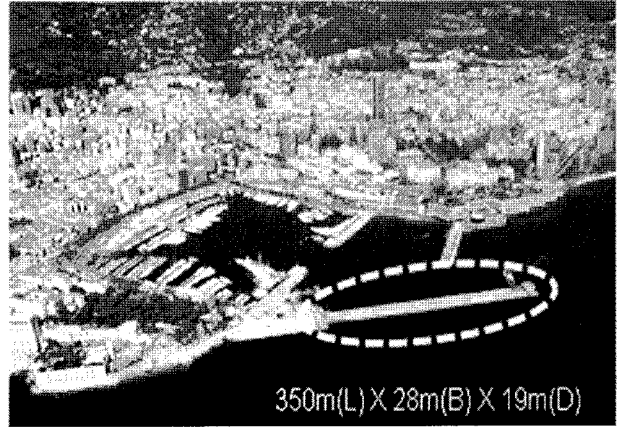


그림 6 모나코 방파제

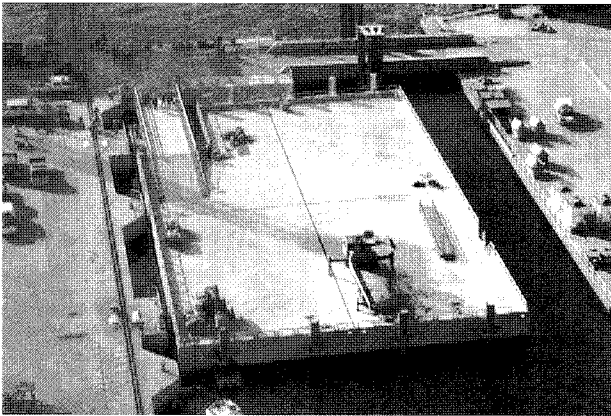


그림 7 부유식 해상 적치장(삼성중공업 조선소)

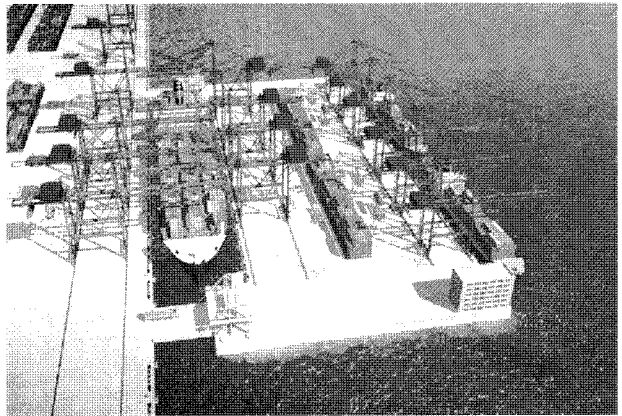


그림 8 이동식 컨테이너 부두

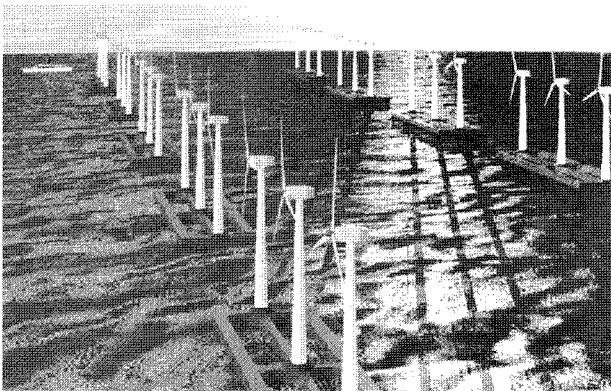


그림 9 부유식 해상 풍력 단지

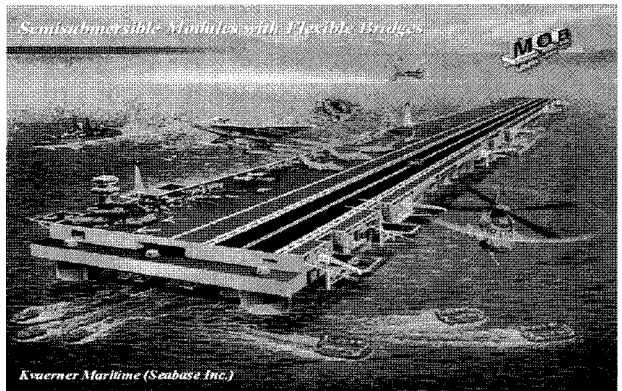


그림 10 Mobile Offshore Base

설사업부에서 부유식해상구조물 관련 기술 개발을 위해 시험 시공된 시험체로서 현재 조선소 내 부유식 도크 인근의 해상 적치장으로 사용되고 있다. 그림 8은 한국해양연구원과 삼성중공업이 공동으로 개발 중인 이동 가능한 부유식 컨테이너 부두(하이브리드 안벽)에 대한 조감도이며, 그림 9와 10은 해외에서 개발이 진행 중인 해상 풍력단지 및 부유식 해상 기지를 나타낸 조감도이다.

3. VLFS 설계를 위한 유탄성 해석

3.1 유탄성 해석 개요

일반적으로 VLFS의 설계에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 하중은 장주기 파랑에 의한 새깅(Sagging)과 호깅(Hogging)에

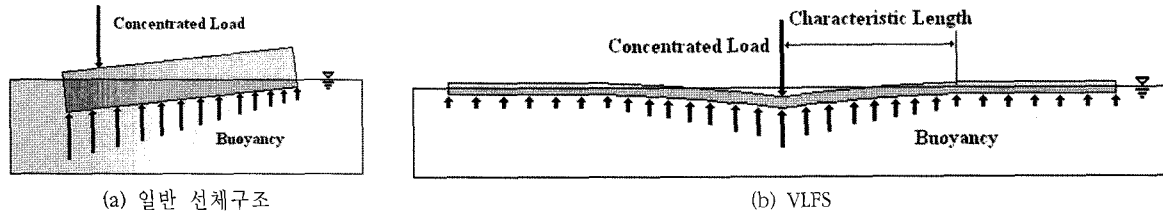


그림 11 일반 선체구조와 VLFS의 거동특성비교

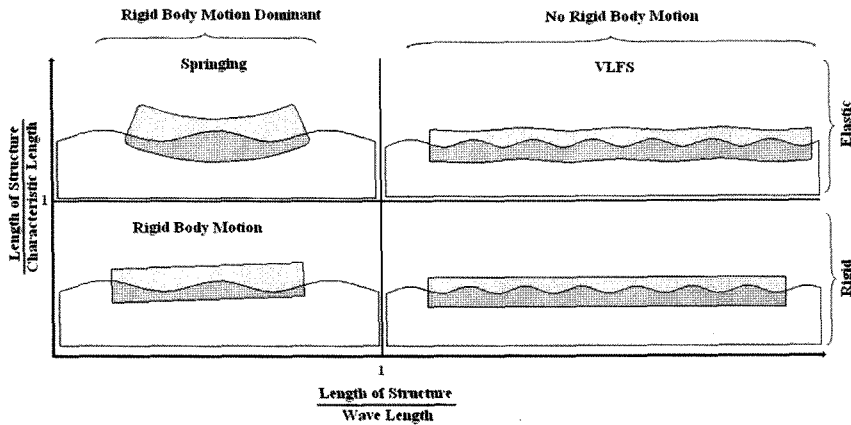


그림 12 구조물 길이에 대한 특성길이와 파랑주기에 따른 거동특성

의한 하중이다. 선박의 경우 선체의 높이가 높기 때문에 휨 강성이 커서 선체를 강체로 가정하는 것이 가능하다. 따라서, 파랑에 의해 선체에 작용하는 압력을 경계적분법을 이용한 Hydrodynamics 해석을 통하여 산정하고, 산정된 압력을 정적하중으로 고려하여 선체에 대한 정적 구조해석을 수행하는 것이 일반적이다. 그러나, VLFS의 경우에는 면적에 비하여 부체의 두께가 얇기 때문에 강체로 가정하는 것이 불가하며, 유체와 구조체 간의 상호 동적효과를 고려한 유탄성(Hydroelastic) 해석이 필수적이다. 그림 11은 집중하중에 의한 VLFS의 거동과 일반 선체의 거동의 차이를 나타내고 있다. 또한, 그림 12는 구조물의 길이에 대한 특성길이($\lambda_c = 2\pi(EI/K_c)^{1/4}$) 및 파랑주기에 따른 부유식 구조물의 거동특성 특성을 보여준다.

3.2 유탄성 해석의 이론적 배경

VLFS의 유탄성 해석을 위한 다양한 방법이 연구되고 있으며, 크게 시간영역 해석법과 주파수영역 해석법으로 분류할 수 있다. 시간영역 해석법으로는 구조계와 유체계의 운동방정식을 상호 연계(coupled)하여 직접 적분법으로 해석하는 방법과 유체계에 대한 주파수 영역 해를 탄성계의 운동방정식에 대입하여 해를 구하는 방법이 있다. 주파수 영역 해석법으로는 산란 및 방사 포텐셜을 구한 후, 유체-구조계의 운동 방정식에 적용하는 직접법과 구조계의 모달 해석과 유체계의 동수역학(hydrodynamics) 해석을 각각 수

행한 후 모드 중첩법을 이용하여 해를 구하는 방법이 있다. 모든 중첩법을 이용한 방법은 현재 가장 널리 이용되는 방법이며, 본 기사에서 소개하고자 하는 HYDRAN에서도 채택되고 있는 방법으로서 이에 대한 이론적 배경을 설명하면 다음과 같다.

3.2.1 유체모델

유체 모델은 선형 포텐셜 이론에 바탕을 두고 있다. 유체 운동이 미소하다고 가정하면, 주파수 ω 의 규칙파에 대한 전체 속도 포텐셜 Φ 는 위치함수 $\mathbf{r}=[x_1, x_2, x_3]^T$ 와 구조변위 \mathbf{u} 에 의하여 다음 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\Phi = [\Phi_I + \Phi_D + i\omega\phi_R \mathbf{u}] e^{i\omega t} \quad (1)$$

여기서, Φ_I , Φ_D , Φ_R 은 각각 입사포텐셜, 산란포텐셜, 방사포텐셜이다. 산란포텐셜과 방사포텐셜 또한 유체영역 Ω 에서 지배방정식을 만족시켜야 하고, 자유수면과 해저면에 대한 경계조건을 각각 만족시켜야 한다:

$$\nabla^2 \Phi = 0, \quad r \in \Omega \quad (2)$$

$$-\omega^2 \Phi + g \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} = 0, \quad x_3 = 0 \quad (3)$$

$$\lim_{x_3 \rightarrow -\infty} \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

여기서, g 는 중력가속도이다. 또한, ϕ 는 부유체로부터 무한 방사 거리에서 Sommerfeld 방사조건을 만족시켜야 하며, 부유체의 침수표면 S 에서는 다음과 같은 Sound hard 조건을 만족시킨다고 가정한다:

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \text{ on } S \quad (5)$$

여기서, \mathbf{n} 은 침수표면의 외향수직 단위벡터이며, 방사포텐셜은 다음 식 (6)을 만족시켜야 한다:

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = \mathbf{n}^* \text{ on } S \quad (6)$$

여기서, \mathbf{n}^* 은 일반화 정규변위, 즉, 부유체의 정규변위이다. 속도포텐셜이 결정되면 Euler 적분을 통하여 구조물에 대한 선형 동적 압력이 산정된다:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, ρ 는 유체의 단위질량이다. 임의 형상의 구조물 주변의 유체흐름의 해석을 위해서는 Green 함수를 이용한 경계 적분법(boundary integral equation method)이 널리 사용된다:

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi} \int_S \sigma(\mathbf{r}_1) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) dS \quad (8)$$

여기서, $\sigma(\mathbf{r}_1)$ 은 $\mathbf{r}_1=(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$ 위치에서의 특이점의 강도이고, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$ 는 Green 함수이다. 여기에 사용되는 복소수 Green 함수는 다음 식 (9)와 같다.

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \frac{1}{R} + PV \int_0^\infty \frac{\mu+k}{\mu-k} e^{\mu(z_3+\xi_3)} J_0(\mu r) d\mu - 2\pi i k e^{k(z_3+\xi_3)} J_0(kr) \quad (9)$$

여기서,

$$R = \sqrt{(x_1-\xi_1)^2 + (x_2-\xi_2)^2 + (x_3-\xi_3)^2} \quad (10)$$

$$r = \sqrt{(x_1-\xi_1)^2 + (x_2-\xi_2)^2} \quad (11)$$

이며, PV는 principal value 적분을 표시하고, $k=\omega^2/g$ 는 wave number를 나타낸다. 이러한 Green 함수는 식 (2), (3), (4) 및 Sommerfeld 방사조건을 만족시킨다. 따라서, 특이점은 침수면에 분포되어 있고, 이 점들에서의 강도는 위 식 (5)에서

의 포텐셜이 침수면에서의 경계조건(식 (5), (6))을 만족하도록 수치적으로 결정된다. 이러한 해는 전체 침수면에서의 제2종의 2차원 Fredholm 적분방정식의 해를 구함으로써 구해질 수 있다. 이와 같이 특이점의 강도가 결정되면 속도포텐셜이 구해진다.

3.2.2 구조 모델

구조 모델을 위하여 HYDRAN은 3차원 Mindlin 쉘 유한요소를 사용한다. 정수역학적 강성(hydrostatic stiffness)의 정식화를 위해서는 Huang과 Riggs(2000)의 정식화를 적용하는데 유체 압력 및 구조 기하학적 강성(geometric stiffness)을 고려하여 산정된다. 기하학적 강성은 구조물이 정수에 잠겨서 중력과 정수압만을 받게 될 때에 발생하는 구조 내부 응력을 바탕으로 한다. 이것은 정수역학적 강성에 대한 엄밀한 정식화 과정이며, 이전에 제시되었던 방법들보다 복잡하다.

3.2.3 운동 방정식

유체력을 받는 구조체의 운동방정식은 다음과 식 (12)와 같이 구성된다:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_f) \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}_f(t) \quad (12)$$

여기서, \mathbf{M}_s 는 구조질량행렬, \mathbf{K}_s 는 구조강성행렬, \mathbf{K}_f 는 정수역학적 강성행렬이고, $\mathbf{F}_f(t)$ 는 동수력(hydrodynamic force), $\mathbf{u}(t)$ 는 부유체의 구조변위이다. 식 (12)를 주파수 영역에 대한 식으로 변환하면 식 (13)과 같은 운동방정식을 구할 수 있다:

$$[-\omega^2 \mathbf{M}_s + i\omega \mathbf{C}_s + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_f)] \mathbf{u} = \mathbf{F}_f \quad (13)$$

식 (1)을 식 (7)에 대입하면 그 결과는 다음 식 (14)와 같다:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = -i\rho\omega[\phi_I + \phi_D + i\omega\phi_R \mathbf{u}] e^{i\omega t} \quad (14)$$

위의 식 (14)와 같은 동수압력 p 를 구조물의 침수면에 대하여 적분하여 동수역학적 유체력(hydrodynamic fluid force) \mathbf{F}_f 를 구할 수 있으며, 그 결과는 다음 식 (15)와 같다:

$$\mathbf{F}_f = [\omega^2 \mathbf{M}_f - i\omega \mathbf{C}_f] \mathbf{u} + \mathbf{F}_w \quad (15)$$

여기서, \mathbf{M}_f 와 \mathbf{C}_f 는 유체추가질량행렬 및 파동감쇠행렬이고, \mathbf{F}_w 는 입사포텐셜(Φ_I) 및 산란포텐셜(Φ_D)로부터 유발되는 가진력 벡터이다. 따라서, 위의 식 (15)를 식 (13)의 운동방정식에 대입하면 다음 식 (16)과 같은 새로운 운동방정식의 구성이 가능해진다:

$$[-\omega^2(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_f) + i\omega(\mathbf{C}_s + \mathbf{C}_f) + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_f)]\mathbf{u} = \mathbf{F}_w \quad (16)$$

3.2.4 해석과정

HYDRAN은 강체동수역학(hydrodynamics)해석에서 널리 사용되는 방법과 동일하게 속도포텐셜을 구하기 위하여 Green 함수를 경계적분법을 사용한다. 해를 구하는 방사포텐셜의 수를 줄이기 위하여, 축소기저법(reduced-basis approach)이 적용되며, 특히, 구조변위는 일정 개수의 정규 진동모드의 조합으로 표현된다. 이러한 모드중첩법은 방사포텐셜의 수를 구조물의 자유도수보다 작은 수로 감소시킨다. 이것은 방사포텐셜은 국부적인 유한요소 형상함수보다는 전체변위형상에 상응하는 것을 의미한다. 따라서, 운동방정식은 다음 식 (17)과 같이 구성된다:

$$[-\omega^2(\mathbf{M}_s^* + \mathbf{M}_f^*) + i\omega(\mathbf{C}_s^* + \mathbf{C}_f^*) + (\mathbf{K}_s^* + \mathbf{K}_f^*)]\mathbf{p} = \mathbf{F}_w^* \quad (17)$$

여기서, $\mathbf{M}_s^* = \Psi^T \mathbf{M}_s \Psi$, $\mathbf{K}_s^* = \Psi^T \mathbf{K}_s \Psi$, $\mathbf{K}_f^* = \Psi^T \mathbf{K}_f \Psi$ 이며, \mathbf{M}_s , \mathbf{K}_s , \mathbf{K}_f 은 각각 구조물의 질량행렬, 강성행렬, 정수역학적 강성행렬이고, \mathbf{C}_s^* 은 모드에 대한 구조 감쇠계수 대각행렬이다. 파랑에 의한 가진하중 항은 다음 식 (18)과 같이 구해진다:

$$\mathbf{F}_{wj}^* = i\rho\omega \int (\Phi_I + \Phi_D)n_j^* dS \quad (18)$$

또한, \mathbf{M}_f^* 와 \mathbf{C}_f^* 의 각 항들은 다음 식 (19) 및 식 (20)과 같이 구해진다.

$$\mu_{ij} = \rho Re \int_s \Phi_{Ri} n_j^* dS \quad (19)$$

$$\lambda_{ij} = -\rho\omega \Im m \int_s \Phi_{Ri} n_j^* dS \quad (20)$$

여기서, Re 와 $\Im m$ 는 각각 실수부와 허수부이다. 일반화된 정규변위 n_j^* 는 j 번째 구조모드의 정규화된 구조변위이다.

3.2.5 해상 불규칙 응답

불규칙 일방향 파랑에 대한 응답은 전달함수를 이용하여 산정된다. 파의 진폭에 대해서 Rayleigh 확률분포가 가정되므로, 유의 응답진폭 R_e 는 일반적으로 다음과 같이 구할 수 있다:

$$R_e = 1.86R_s = 3.72 \sqrt{m_0} \quad (21)$$

여기서, m_0 는 다음과 같이 구해진다.

$$m_0 = \int_0^\infty H^2(\omega) S_n(\omega) d\omega \quad (22)$$

여기서, $H(\omega)$ 는 응답진폭의 전달함수이고, $S_n(\omega)$ 는 입력파랑 스펙트럼이다. $S_n(\omega)$ 로는 Bretschneider 식, ISSC 식, JONSWAP 식, IITC 식, P-M-Wind 식, P-M-Hs 식 등이 적용될 수 있다.

4. HYDRAN 적용사례

4.1 HYDRAN 개요

HYDRAN은 Hydroelastic Response Analysis의 약어로 Manoa 소재 하와이 대학의 H. R. Riggs 교수에 의해 최근 개발되었다. HYDRAN은 2차원 해석만 가능하였던 기존의 프로그램들과 달리 3차원 셀요소를 이용한 유탄성 해석이 가능하며 단일 프로그램으로 전체 유탄성 해석을 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. HYDRAN의 이론적 배경은 앞서 기술한 바와 같이 구조체에 대한 고유진동해석을 통해 지지함수를 구하고 경계적분법을 이용하여 유체계에 대한 동수압을 산정한 후, 모드 중첩법을 통하여 구조계의 응답진폭함수(Response Amplitude Operators, RAO)를 구하는 방법을 채택하고 있다. 그림 13은 HYDRAN의 유탄성 해석 절차를 보여주고 있다.

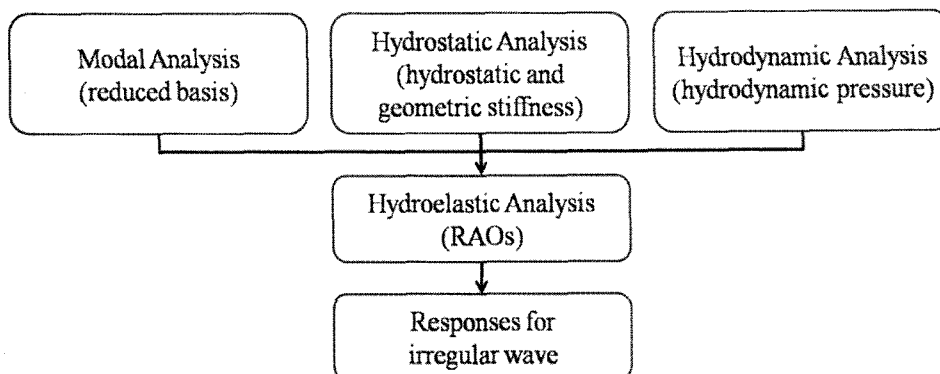


그림 13 HYDRAN의 유탄성 해석 절차

4.2 전후처리기 개발

HYDRAN은 미국 Manoa소재 하와이대학에서 개발한 in-house 소프트웨어로서 Pre-, Post-processor가 아직 개발되어 있지 않을 뿐만 아니라, 유한요소 해석 및 유탄성 해석에 필요한 서브루틴 등을 라이브러리화 시켜 놓고 스크립트 방식의 명령어에 따라서 해석에 필요한 단위 프로세스를 실행하는 방식으로 제작되어 있기 때문에 입력 데이터 작성과정은 오히려 프로그램의 소스를 작성하는 과정에 더 가깝다. HYDRAN의 이러한 방식은 이용자의 의도에 맞게 해석을 수행할 수 있는 유연성을 제공하지만, 유한요소해석, 경계적분법, 파동역학, 동역학 등의 이론적 이해가 없이는 적용하는 것이 매우 까다로우며, 명령어의 문법을 숙지하여야 하고, 입력 데이터의 양이 매우 방대하여 실무에 사

용하기에는 어려운 점이 있다. 따라서, 삼성중공업 부유식 해상구조물개발 TF에서는 사용자의 편의성을 증대시키기 위한 전후처리 소프트웨어 HEA를 개발하였다. HEA는 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS와 연계하여 부유구조물에 대한 기하학적 이산화(geometric discretization)를 수행하고 물성과 파랑에 대한 데이터 등 기본적인 입력으로부터 HYDRAN을 이용한 유탄성 해석을 수행하기 위한 방대한 양의 입력 데이터를 생성하는 기능을 가지고 있다. 또한 HEA는 HYDRAN의 수행을 통해 얻어지는 텍스트 형식의 해석결과를 재가공하여 ANSYS의 후처리기를 이용한 해석결과 시각화가 가능하도록 하는 기능을 가지고 있다. 그림 14는 HYDRAN 및 HEA를 이용한 유탄성 해석과정을 나타내고 있으며, 그림 15는 해석결과에 대한 예를 나타내고 있다.

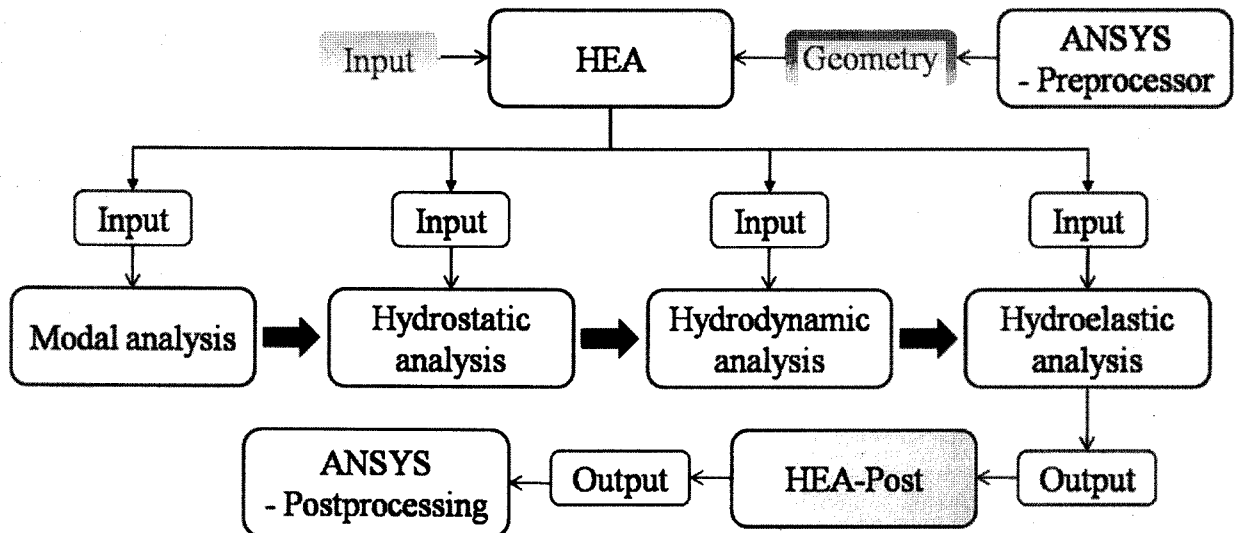
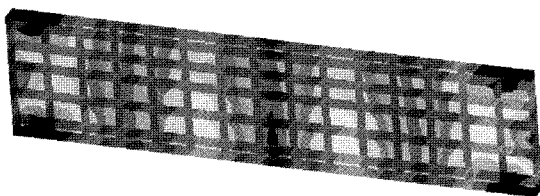
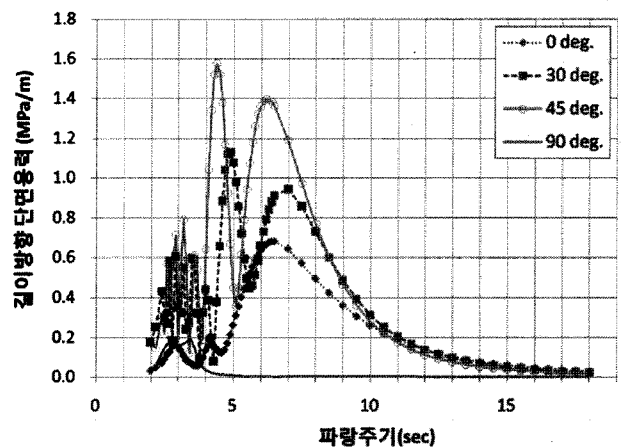


그림 14 HYDRAN 및 HEA를 이용한 유탄성 해석과정



(a) 길이방향 응력선도




(b) RAO

그림 15 HYDRAN 및 HEA를 이용한 유탄성 해석 결과

5. 맺음말

본 기사에서는 VLFS의 설계를 위한 부유구조의 파랑에 대한 동적 거동의 해석 및 분석을 위하여 개발된 유탄성해석 소프트웨어인 HYDRAN에 대하여 소개하고, 이러한 소프트웨어 사용시 사용자의 편의를 도모하기 위하여 개발된 전후처리기 대하여 설명하였다. 유탄성해석 소프트웨어 개발과 관련하여 국내에서는 다수의 연구가 수행된 바 있으나, 유탄성해석 결과를 이용하여 초대형 부유식 해상구조물의 상세설계 및 시공 사례는 없다. 이러한 초대형 부유식 해상구조물의 설계 및 시공을 위해서 유탄성해석의 이론 및 소프트웨어의 적용에 대한 설계자 및 시공 기술자들의 이론적인 이해가 선행되어야 할 것이다. 특히 수변공간의 개발 및 신재생에너지 개발에 대한 수요와 더불어 국내외에서의 초대형 부유식 해상구조물 기술개발에 대한 관심은 급격히 증대하고 있다. 유탄성해석 기술은 이러한 새로운 건설분야의 개척을 위하여 매우 중요한 기반기술 중의 하나가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 홍사영, 초대형 부유식 해상구조물 설계매뉴얼, 한국해양연구원, 2007
2. C.M. Wang, E. Watanabe, T. Utsunomia, Very Large Floating Structures, Taylor and Francis, London and Newyork, p.236, 2008
3. D. Wang, H.R. Riggs, R.C. Ertekin, "Three-Dimensional Hydroelastic Response of a Very Large Floating Structures", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.1, No.4, pp.307-316, 1991
4. H.R. Riggs, H. Suzuki, R.C. Ertekin, J.W. Kim, K. Iijima, "Comparison of Hydroelastic Computer Codes based on the ISSC VLFS benchmark", Ocean Engineering, 35, pp.587-597, 2008
5. L.L. Huang, H.R. Riggs, "The Hydrostatic Stiffness of Flexible Floating Structures for Linear Hydroelasticity", Marine Structures, 13, pp.91-106, 2000 

[담당 : 송명관, 편집위원]