

## 초대형 부유식 해상구조물의 유탄성 거동 분석

## Hydroelastic Analysis of Very Large Floating Structure

지광습\* · 이승오\*\* · 김진균\*\*\* · 이필승\*\*\*\* · 이승정\*\*\*\*\*

Zi, Goangseup · Lee Seung Oh · Kim Jin Gyun · Lee Phill Seung · Lee Seung Jung

## 1. 서 론

초대형 부유식 해상구조물 기술의 발전은 심미적인 친환경 해상공간을 개발하여 연안의 친수환경 조성 및 그 사용성 향상을 기대하게 한다. 특히 기존의 매립이 가지고 있는 고비용 문제와 심각한 환경오염 문제를 해결할 수 있는 대안으로 각광받고 있다. 기존의 대표적인 연구로는 MOB 프로젝트(ONR, 1997~2000), MHP 프로젝트(NFESC, 1998~2004), 메가 프로젝트(TRAM, 1995~2001) 등이 있으며 일본과 미국을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 국내에서는 한국해양연구원이 1999년 이후 연구를 진행하고 있다. 초대형 부유식 해상구조물은 일반적으로 길이  $10^3 \sim 10^4 m$ , 무게  $10^6 ton$  이상인 구조물을 말하며, 구조물의 상대적 길이가 파랑에 비해 매우 크기 때문에 일반 부유식 구조물과 달리 강체가 아닌 연성체로 거동한다. 따라서 기존의 강체설계법을 이용해 구조물 해석을 수행할 경우 구조물의 거동을 명확하게 해석하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 유탄성 해석 기법이 필요하다.

본 연구에서는 유탄성 해석 프로그램의 하나인 HYDRAN(HYDroelastic Response ANalysis, Riggs, 2006)을 활용하여 초대형 부유식 해상구조물의 유탄성 해석을 실시하였다. 먼저 수치해석 결과의 수렴성을 검증하기 위해 파장과 요소크기의 비를 이용하였으며, 조선분야에서 광범위하게 사용되는 해석 프로그램인 WAMIT과 HYDRAN의 해석 결과를 비교 검토하였다. 또한 대상 구조물에 대한 강체 해석과 유탄성 해석결과를 비교·분석하였다. 이를 통해 초대형 부유식 해상구조물의 명확한 거동 해석을 위한 유탄성 해석의 필요성과 유탄성 해석을 위한 HYDRAN의 사용성을 검증하는데 중점을 두고 본 연구를 수행하였다.

## 2. 연구의 방법

## 2.1 이론적 배경

유탄성 해석의 이론적 방법과 지배방정식은 다음과 같다. 유탄성 해석 기법은 유체와 구조체의 연성해석을 통해 구조체에 입사하는 파랑에 대한 거동을 해석한다. 이를 위해 유체를 비압축성, 비점성, 비회전류로 가정하여 동역학적 포텐셜 이론을 이용해 해석하고, 구조체의 경우는 이산화된 동역학 방정식을 이용한다. 이때 일반적으로 구조체의 감쇠력은 미소하여 무시할 수 있으며 물체의 운동은 입사파와 같은 진동수를 가지는 정상조화운동으로 가정한다. 이를 연성하여 정리하면 입사파랑에 대한 구조체의 변위는 다음 식 (1)을 통해 얻어진다(ISSC, 2006).

$$[-\omega^2(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_w) - i\omega\mathbf{C}_w + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_w)]\mathbf{u} = \mathbf{f}_w \quad (1)$$

식 (1)에서 아래첨자  $s$ 는 구조물, 아래첨자  $w$ 는 유체장에 관한 것이다.  $\omega$ 는 진동수,  $\mathbf{u}$ 는 변위를 의미하며,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{f}_{ext}$ 는 각각 질량매트릭스, 감쇠매트릭스, 강성매트릭스, 유체력 벡터를 의미한다.

\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 · 공학박사 · E-mail : [g-zi@korea.ac.kr](mailto:g-zi@korea.ac.kr) - 발표자\*\* 정회원 · 홍익대학교 건설도시공학부 전임강사 · 공학박사 · E-mail : [seungoh.lee@hongik.ac.kr](mailto:seungoh.lee@hongik.ac.kr)\*\*\* 학생회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 · E-mail : [simpleis@korea.ac.kr](mailto:simpleis@korea.ac.kr)\*\*\*\* 정회원 · 삼성중공업주식회사 과장 · 공학박사 · E-mail : [phillseung.lee@samsung.com](mailto:phillseung.lee@samsung.com)\*\*\*\*\* 학생회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 · E-mail : [fincher7vn@korea.ac.kr](mailto:fincher7vn@korea.ac.kr)

### 2.2 유탄성 해석 프로그램

유탄성 해석 프로그램에는 WAMIT(Newman, 1987), MEGA(Seto, 2003), KU-VLFS(Yasuzawa, 1999), VODAC(Ijima, 1997), LGN(Ertekin, Kim, 1999), HOBEM/VADA (Hong, 2000), HYDRAN(Riggs, 2006), LS DYNA(Blatz and Eisner, 2007) 등이 있다.

본 연구에서는 다양한 프로그램 중 단일프로그램으로 유탄성 해석이 가능하고 삼차원 판구조의 유한요소 해석이 가능한 HYDRAN을 이용하였다. HYDRAN의 경우 해석결과를 SAP2000, ABAQUS 등으로 입출력하는 것이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그림 1, 그림 2, 그림 3은 HYDRAN의 유탄성 해석 결과를 SAP 2000과 Matlab을 이용해 보여준 것이다. 추가적으로 대상구조물을 해석하는데 사용된 WAMIT은 조선분야에서 일반적으로 사용되고 있는 범용 프로그램으로 HYDRAN의 해석 결과와 비교하여 두 프로그램의 성능을 검증하였다.

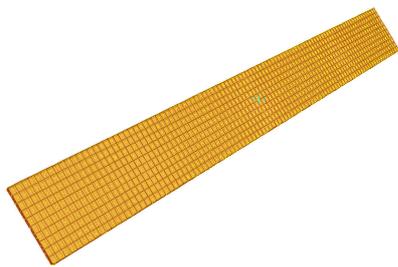


그림 2. 강체거동 (SAP2000)

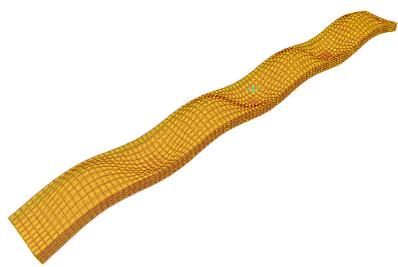


그림 3. 연성체거동 (SAP2000)

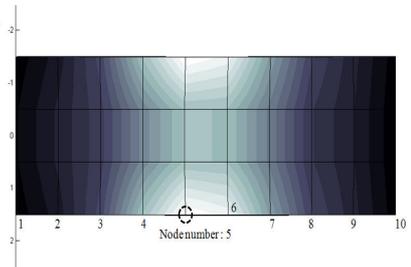


그림 4. 단면력도 (Matlab)

### 3. HYDRAN의 성능 검증

#### 3.1 요소길이에 따른 수렴성 검증

유탄성 해석의 수렴성 검증을 위해 요소길이와 구조물길이의 비, 요소길이와 파랑길이의 비에 따른 유탄성 해석을 수행하였다. 그림 4는 대상구조물의 형상을 보여주며, 표 1은 대상구조물의 채원과 물성치, 요소 크기에 따른 해석 대상구조물의 분류를 표기하였다. C1~C5까지 구조물은 요소길이가 다를 뿐 채원과 물성치는 동일하다. 대상구조물의 탄성계수는 명확한 연성거동을 확인하기 위해 일반콘크리트의 탄성계수보다 작은 값인 15GPa을 사용하였으며, 흘수는 1m로 규정하였다. 또한, 대상구조물을 파랑주기 2~18초, 입사각 0°, 30°, 45°, 90°에 대하여 유탄성 해석을 수행하였다. 일반적으로 내해의 파랑 주기는 4~10초로 알려져 있으므로 2~18초까지의 파랑주기는 연구범위로 타당하다고 볼 수 있다.

그림 5는 입사파랑 0°에서 요소길이와 구조물길이의 비에 관한 수직변위 응답진폭값, 그림 6은 입사파랑 0°에서 요소길이와 파랑길이의 비에 대한 오차율 비교를 나타낸 것이다. 그림 5와 그림 6을 통해 수직변위의 응답진폭값과 상대오차의 수렴성이  $L_e/L_w$ 와  $L_e/L_w$ 가 작아질수록 향상되는 것을 확인할 수 있다.  $L_e/L_w$ ,  $L_e/L_w$ 는 그림 4에 제시하였다.

표 1. 구조물 자원 / 물성치 / 구조물의 분류

구분	값	구분	값
절점수	2882개	판두께	0.05m
요소수	2880개	굽힘두께	0.25m
탄성계수	15GPa	포아송비	0.3
전단계수	5.77GPa	흘수	1m
상관중량	7687.5 $kg/m^3$	특성길이	21.7m
하관중량	2562.5 $kg/m^3$	요소크기	1m × 1m

구분	C1	C2	C3	C4	C5
$L_e/L$	1/20	1/40	1/50	1/100	1/200
$L_e/L_w$	5/ $L_w$	2.5/ $L_w$	2/ $L_w$	1/ $L_w$	0.5/ $L_w$

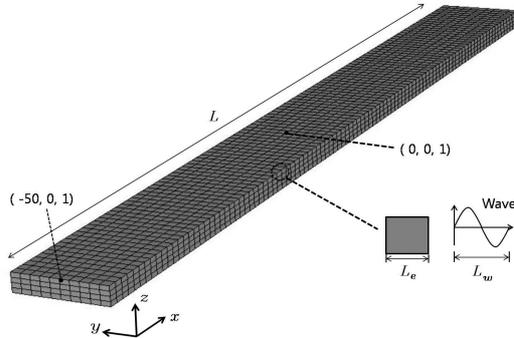


그림 5. 대상구조물 (100m×10m×2m)

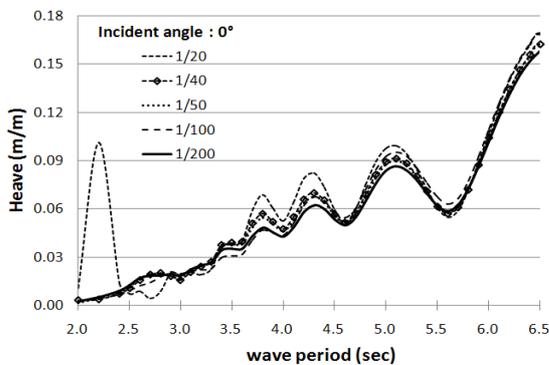


그림 6.  $L_e/L$ 에 따른 해석결과 수렴성, 파향 0°

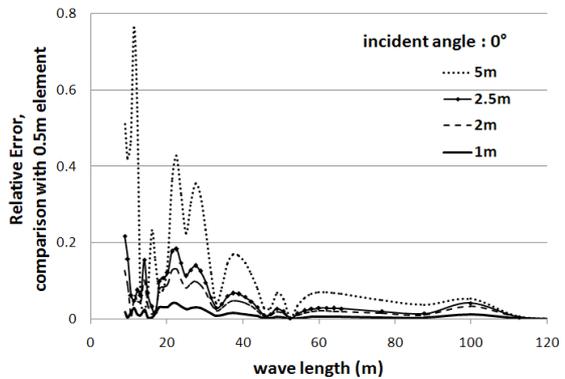


그림 7.  $L_e/L_w$ 에 따른 해석결과 수렴성, 파향 0°

해석 결과 대상구조물의 거동 수렴성은 요소길이에 대한 구조물 길이의 비( $L_e/L$ ), 요소길이에 대한 파랑길이의 비( $L_e/L_w$ )가 작을수록 타당한 결과를 보여준다. 그러나  $L_e/L$ ,  $L_e/L_w$ 가 작아질수록 해석시간 및 컴퓨터의 CPU와 메모리를 비롯한 하드웨어적 요구가 급격하게 증가하게 되므로 적절한 값으로  $L_e/L$ ,  $L_e/L_w$ 를 한정해야 한다. 해석결과  $L_e/L$ 을 1/100 이하로 할 경우 적절한 수렴성을 갖는 것으로 판단된다. 또한  $L_e/L_w$  검토에서 단파장 영역에서 발생하는 해석오차를 줄이기 위해서는  $L_e/L_w$ 를 1/10 이하로 제한해야 한다.

### 3.2 WAMIT과의 비교

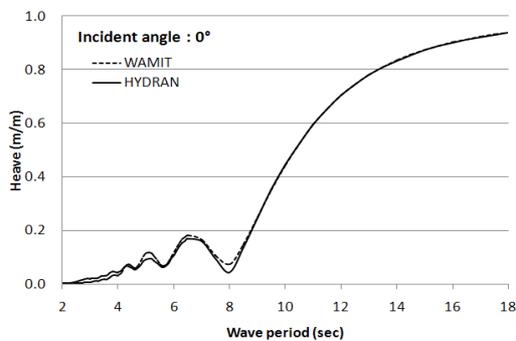


그림 8. WAMIT과 HYDRAN의 해석결과 비교

현재 널리 사용되고 있는 프로그램인 WAMIT을 이용해 대상구조물을 해석하여 이를 HYDRAN의 해석결과와 비교하였다. 대상구조물의 물성치와 자원, 파랑의 특성 등은 3.1절과 동일하다. WAMIT를 이용한 대상구조물에 대한 거동해석결과는 일부 과장을 제외하고 HYDRAN을 이용한 해석결과와 유사한 결과를 갖는다. 예를 들면, 그림 7은 입사각 0°에서 수직변위 응답진폭값에 대해 HYDRAN의 해석결과와 WAMIT의 해석결과를 비교한 것이다. 파랑주기 5초, 8초 정도를 제외하고 수직변위의 응답진폭값은 거의 일치하는 해석결과를 갖는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 강체와 연성체의 거동 비교

초대형 부유식 해상구조물에 대해 거동해석을 실시하여 강체거동과 연성체거동의 해석결과를 비교하였다. 해석 대상구조물의 물성치와 재원은 그림 4, 표 1과 동일하며  $L_c/L$ 이 1/100인 C4에 대해 해석을 수행하였다. 일반적으로 구조체의 길이가 특성길이와 입사파의 파장보다 길 경우 구조체는 연성거동을 하므로 유탄성 해석이 필요하다고 본다. 이때 특성길이( $\lambda_c$ )는 식 (2)를 통해 얻어진다(Suzuki, Yoshida, 1996).

$$\lambda_c = 2\pi \left( \frac{EI}{k_c} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

여기서, E는 탄성계수, I는 단면 이차모멘트,  $k_c$ 는 복원력의 탄성계수이다. 표 1의 재원과 물성치를 이용해 대상구조물의 특성길이를 계산하면 21.7m의 값을 얻을 수 있다. 따라서 대상구조물은 길이방향(100m)에 대해 기본적으로 연성거동을 할 것으로 예상할 수 있다.

강체와 연성체의 거동 비교를 위해 대상구조물에 대해 2~18초의 주기의 파랑을 입사각 0°, 30°, 45°, 90°로 구조물에 입사시켜 구조물의 거동을 해석하였다. 해석결과 강체거동과 연성거동은 특정파장에서 최대 80% 이상의 거동오차를 보이는 것을 확인하였다. 특히 파랑 주기 8초 이하에서 오차율이 크게 발생하였다. 이는 강체거동과 연성체거동이 명확한 거동차이가 있음을 보여준다. 따라서 초대형 부유식 해상구조물과 같이 연성거동을 하는 구조물을 해석하기 위해서는 기존의 강체 해석 기법만을 적용하기보다는 연성체 거동의 해석이 가능한 유탄성 해석 기법을 적용한 결과를 바탕으로 해석 및 설계가 수행되어야 한다고 사료된다.

예를 들어, 그림 8, 그림 9는 파랑이 구조물에 0°와 30°로 입사하였을 경우 구조물의 특정지점에 대한 강체거동과 연성체거동을 비교한 결과이다. 점(0,0,1)은 구조물의 상판중앙지점, 점(-50,0,1)은 구조물 선수부의 상판 중앙지점을 의미하며 그림 4에 표시하였다. 그림 8은 강체거동과 연성체거동에 대한 점(0,0,1)에서의 수직변위 응답진폭함수값을 의미하여 두 거동의 해석결과가 명확한 차이가 있음을 보여준다. 또한 그림 9를 통해 점(0,0,1)과 점(-50,0,1)에서 강체거동과 연성체거동의 파랑 주기에 따른 해석오차를 확인할 수 있다. 특히 파랑주기 8초에서 약 80%의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

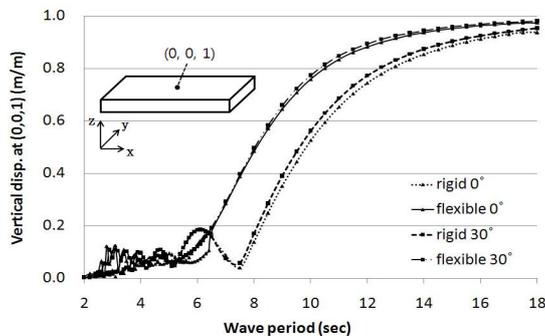


그림 9. 수직변위에 대한 연성체거동과 강체거동, 점(0,0,1)

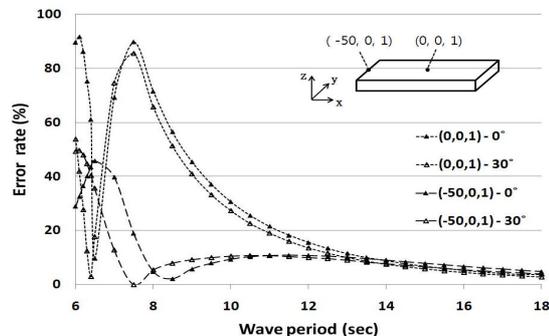


그림 10. 연성체거동과 강체거동의 수직변위차, 점(0,0,1), 점(-50,0,1)

#### 5. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. HYDRAN을 이용한 유탄성 거동 해석이 적절한 수렴성을 가지기 위해서는 요소크기가 일정한 값 이하로 제한되어야 하며 요소길이가 파랑길이 비가 1/10 이하, 요소길이가 구조물길이의 비가 1/100 이하일 경우 적절한 수렴성을 갖는다.
2. 범용 프로그램인 WAMIT과 HYDRAN의 해석결과는 거의 유사하며 이는 HYDRAN의 해석 타당성을 검증하는 예이다.
3. 연성체는 강체와 비교해 거동차이가 크기 때문에 다른 해석방법이 요구된다. 따라서 초대형 부유식 해

상구조물과 같은 연성체를 설계하는데 기존의 강체설계기법만을 적용하는 것보다는, 초대형 부유식 해상구조물의 명확한 구조해석과 설계의 안전성을 확보하기 위해서는 유탄성 해석 기법을 적용해야 한다.

#### **감사의 글**

본 연구는 2008년도 삼성중공업 초대형 콘크리트 부유구조물의 설계/시공기술에 관한 연구 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 삼성중공업에 감사드립니다.

#### **참고문헌**

1. Suzuki, H et al (2006), COMMITTEE VI.2 Very Large Floating Structures, ISSC, Volume 2, pp 391~442
2. 한국해양연구원 (2008), 초대형 부유식 해상구조물 기술개발 최종연구보고서
3. Riggs, H.R. et al. (2007), Two Benchmark Problems for Three-Dimensional, Linear Hydro-elasticity, OMAE, Volume 129, pp 149-157
4. Suzuki, h and Yoshida, K (1996), Design flow and strategy for safety of very large floating structure, VLFS'96, pp 21-27