

공기안정식 초대형부유구조물의 거동에 관한 연구

A Study on The Behavior of Very Large Floating Structure Using Pneumatic Stabilized Platform

홍 상 현* · 권 동 호** · 이 승 준*** · 이 종 세****

Hong, Sang Hyun · Kwon, Dong Ho · Lee, Seung Jun · Lee, Jong Seh

요 약

공간부족과 해안 매립으로 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 초대형부유구조물이 각광 받고 있으며, 대표적인 구조형식으로는 폰툰식과 반잠수식이 있다. 하지만 다양한 환경에 적용하기에는 구조적으로 한계를 가지고 있으며, 이를 극복하기 위해 부유체 하부에 수직으로 결합된 실린더에 공기를 가두어 지지되는 공기안정식 플랫폼이 제안되어졌으나 아직 개념단계에 머무르고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 공기안정식 초대형부유구조물의 실린더 내부 공기상태에 따른 안정성을 검토하기 위하여 유체정역학적 관계를 통해 실린더 내부의 공기 복원력 변수를 산정하였으며, 선형과랑하중에 따른 구조물의 응답을 최소화 할 수 있는 변수의 범위를 제시하였다.

keywords : 공기안정식, 공기 복원력, 탄성 지지된 보, 초대형부유구조물, VLFS

1. 서 론

1900년도 이후 경제성장과 산업고도화에 따른 각종 산업시설의 증설로 인해 발생된 육상의 공간부족 문제를 해결하기 위하여 해안을 매립하여 개발하였으나 해안선의 파괴, 해양환경오염 등 새로운 문제점을 야기하였다. 1900년대 후반에 들어 해안 매립의 부작용을 해결하기 위한 해결책으로 Armstrong(1924)에 의해 최초로 제안되어 졌던 초대형부유구조물(Very Large Floating Structure, VLFS)이 각광받고 있다. 초대형부유구조물의 구조형식에는 일반적으로 부유구조물이 해수와 직접 접촉하는 직접 배수방식인 폰툰식(Pontoon Type)과 상부구조물, 수직기둥, 수중폰툰으로 구성되는 반잠수식(Semi-submersible Type)이 고려되고 있다. 하지만 폰툰식의 경우 안정성 유지를 위하여 흘수를 깊게 해야 하며, 깊어진 흘수로 인해 진수 및 이 폰툰많은 제약이 따른다. 또한 반잠수식의 경우 연결 갑판부의 면외하중에 의한 처짐이 크게 나타나 초대형부유구조물에 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Seidl(1980)이 부유체 하부에 수직으로 결합된 실린더 안에 공기를 가두어 부유체가 지지되는 간접 배수방식의 공기안정식 플랫폼을 개발해야 하며, 깊어진 흘수로 인해 진수 및 이 폰툰많은 실험적으로 제안하였다. 초대형부유구조물로서의 공기안정식 플랫폼방식인 을 확인하기 위해서는 실린더 내부폰툰겔두어진 압축성 공기의 복원력과 외부 과랑하중에 대한 분석이 필수적이다. 본

* 학생회원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정 jerom1st@hanyang.ac.kr

** 한양대학교 토목공학과 석사과정 kdh04@hanyang.ac.kr

*** 한양대학교 토목공학과 석사과정 sj5523@hanyang.ac.kr

**** 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 jonglee@hanyang.ac.kr

연구에서는 공기안정식 부유구조물 실린더 내부 공기의 복원력을 유체정역학적 변수로 산정하였으며, 이 변수에 따른 다양한 선형파랑하중에 대한 거동분석을 통해 변수의 최적 범위를 제시하였다.

2. 유체정역학적 변수 산정 및 운동방정식

2.1. 압축성 공기의 지지력 산정을 위한 유체정역학적 변수

공기안정식 부유구조물 실린더 내부의 평형상태는 그림 1과 같으며 p_a , p_0 , C_0 는 대기압, 실린더 내부압력, 실린더 내부 공기층 높이를 나타낸다. y , η , p 는 각각 외력(F)이 가해 졌을 때의 실린더의 수직 변위와 내부 공기의 압축된 높이 그리고 내부압력을 나타낸다. 실린더 내부 공기의 평형상태를 이상기체법칙을 통해 나타내면 $p_0 C_0 = p(C_0 - \eta)$ 와 같으며 실린더 내부압력의 변화율은 식 (1)과 같다.

$$\frac{dp}{d\eta} = \frac{p}{C_0 - \eta} \quad (1)$$

η 가 C_0 보다 훨씬 작다는 가정을 통해 식 (1)은 $dp/d\eta = p/C_0$ 로 나타낼 수 있으며, 내부압력(p)는 근사적으로 $p = p_a + \rho_w g h_0$ 와 같이 나타낼 수 있다(Seidl, 1980). 여기서 ρ_w , g 는 해수의 밀도, 중력가속도를 나타낸다. 외력에 대한 내부 공기의 복원력은 내부압력의 변화율과 단면적 A_w 을 통해 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{air} = -k_{air}\eta = -\left(A_w \frac{dp}{d\eta}\right)\eta = -\rho_w g A_w f_a \eta \quad (2)$$

여기서 f_a 는 실린더 내부 공기 복원력 변수로서 $f_a = (p_a + \rho_w g h_0)/(\rho_w g C_0)$ 로 나타낼 수 있다.

또한, 외부하중(F)에 대한 지지력은 부력과 관련하여 식 (3)으로 나타낼 수 있으며,

$$F = k'(\eta - y) \quad (3)$$

부력지지 강성은 $k' = \rho_w g A_w$ 로 나타낼 수 있다.

2.2. 선형파랑하중 및 동적 운동방정식

2차원 영역에서의 비회전, 비압축성 유체입자의 운동은 $\nabla^2 \phi = 0$ 와 같은 Laplace 방정식을 만족한다(Newman, 1986). 여기서 ϕ 는 속도퍼텐셜을 나타내며, 파고와 진폭이 수심과 파장에 비해 작은 미소진폭파로 가정하면 그림 2와 같은 선형파랑으로 나타낼 수 있다. 최대파고 H , 파장 λ , 파주기 T , 평균수심 h 인 규칙 파의 위치 x , 시간 t 에서 파형은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \quad (4)$$

여기서 k , ω 는 각각 파수($2\pi/\lambda$)와 파랑의 고유주파수($2\pi/T$)를 나타낸다.

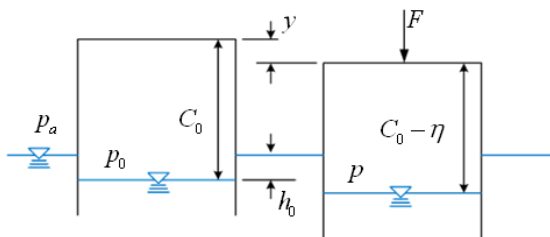


그림 1 외부하중에 따른 실린더 내부 평형상태

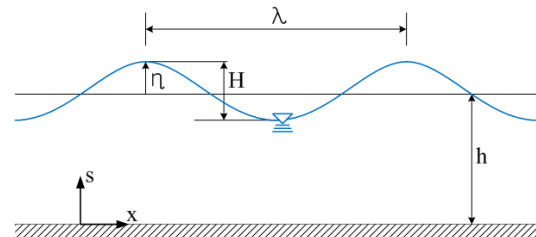


그림 2 선형파랑하중

파랑하중에 노출된 공기안정식 부유구조물은 그림 3과 같이 실린더 내부의 공기에 의해 구조물에 전해지는 파랑하중은 감소하게 되며, 이는 그림 4와 같이 탄성 지지된 보 모델링 가능하다.

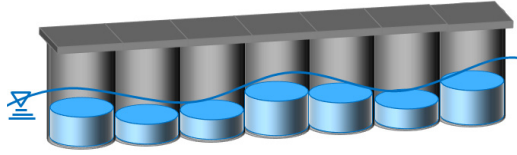


그림 3 공기안정식 부유구조물의 거동

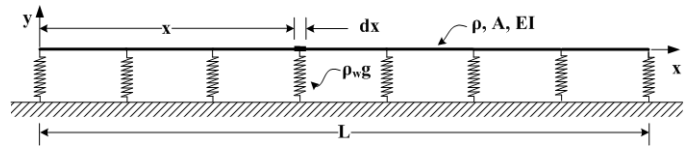


그림 4 탄성 지지된 보

식 (2), (3)을 사용한 탄성 지지된 보의 동적 운동방정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) dx = -\rho_w g dx \eta + \rho_w g dx \eta - \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - c dx \frac{\partial y}{\partial t} - \rho_w g dx f_a \eta \quad (5)$$

이를 다시 정렬한 뒤 선형파랑인 식 (4)를 대입하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho_w g y = \frac{H}{2} \rho_w g (1 - f_a) \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

식 (6)을 유한요소법으로 해석하기 위하여 다시 표현하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}} + (\mathbf{K} + \mathbf{k}')\mathbf{y} = \mathbf{F}(t) \quad (7)$$

여기서 \mathbf{M} , \mathbf{K} , \mathbf{y} 는 구조물의 질량, 강성행렬, 변위를 나타내며 \mathbf{k}' 은 부력 지지강성인 $\rho_w g A_w$ 로 구성된다. 구조물의 감쇠행렬 \mathbf{C} 는 Rayleigh 감쇠인 $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$ 를 이용하였으며 α 와 β 는 비례상수로서 모드별 감쇠비에 의해 결정된다. $\mathbf{F}(t)$ 는 식 (4)에 의한 선형파랑하중과 식 (2)에 의한 실린더 내부 공기 복원력의 합으로 나타낼 수 있으며, 실린더 내부 공기 복원력은 변수 $f_a = (p_a + \rho_w g h_0) / (\rho_w g C_0)$ 에 의해 결정된다. 파랑에 의한 부가질량행렬과 감쇠행렬도 추가적으로 고려되어야 하지만 우선 공기 복원력 변수 f_a 에 의한 구조물의 응답을 확인하기 위하여 본 연구에서는 배제하였다.

3. 공기 복원력 변수와 선형파랑하중에 의한 수치해석

본 연구에서 공기안정식 부유구조물의 공기 복원력 변수(f_a)에 따른 상하(heave) 거동 응답을 확인하기 위하여 적용된 부유구조물의 물성치는 표 1과 같으며, 구조물의 감쇠를 결정하기 위하여 첫 번째와 두 번째 모드의 감쇠비를 각각 5%로 산정하였다. 또한 부유구조물의 응답 분석을 위하여 평균수심(h) 20m, 파고(H) 4m 조건에서 다양한 고유주파수를 가지는 선형파랑을 적용하였다.

표 1 공기안정식 부유구조물의 물성치

구분	값	구분	값
L	88 m	ρ	2,300 kg/m ³
EI	4.2e+12 Nm ²	ρ_w	1,020 kg/m ³
A	12 m ²	g	9.81 m/s ²

실린더 내부 공기 복원력 변수(f_a)는 실린더 내부 공기 조건에 따라 일반 폰툰형 부유체와 같은 0부터 공기 복원력이 외부 파랑 하중을 상쇄시켜 외력이 없어지는 이상적인 상태 1까지 나타낼 수 있다. 파랑 고유주파수가 0.727로 λ/L 이 1.13인 장주기 선형파랑을 적용하였을 경우 구조물의 전체응답은 그림 5와 같이 나타났다. 부유구조물의 응답은 중앙부에서 가장 작고 양 끝단에서 가장 크게 나타났으며, f_a 가 0.5이상의 값을 가질 때 파고에 비해 구조물의 거동이 작아짐을 확인할 수 있다. f_a 가 0과 0.75일 때 다양한 고유주파수를 가지는 선형파랑을 적용하였을 경우 부유구조물 끝단과 중앙부의 응답은 그림 6과 같다. 파랑 고유주파수가 0.6, 1.9일 때 $f_a=0$ 인 경우에는 부유구조물의 응답이 상당히 크게 나왔지만 $f_a=0.75$ 를 적용할 경우에는 응답의 크기가 상당히 감소하였다. 따라서 공기안정식 부유구조물의 경우 실린더 내부의 공기 복원력 변수는 부유구조물의 응답($|y|/|y_0|$)이 1이하를 나타낼 수 있는 0.5 이상의 값이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

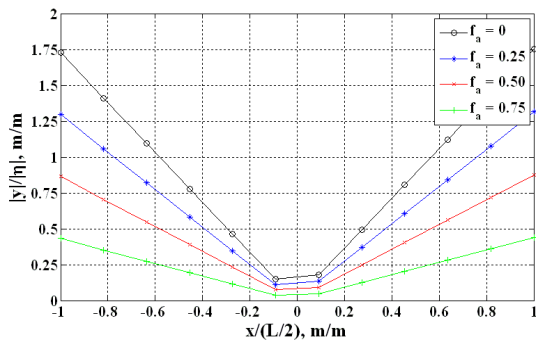


그림 5 $\omega = 0.727$ 에서 f_a 에 따른 구조물의 응답

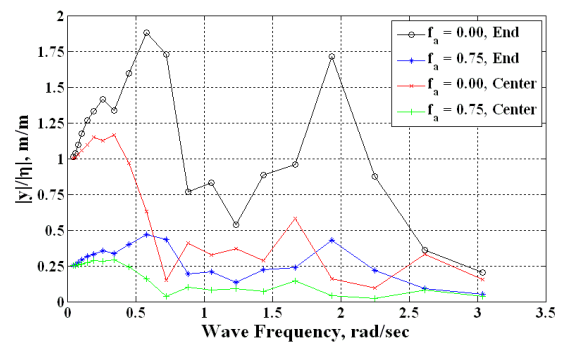


그림 6 파랑 고유주파수에 따른 끝단과 중앙부의 응답

4. 결론

본 연구에서는 공기안정식 초대형부유구조물의 실린더 내부 공기상태에 따른 안정성을 검토하기 위하여 우선 유체정역학적 관계를 통해 실린더 내부 공기 복원력 변수(f_{as})를 산정하였으며, 탄성 지지된 보로 가정된 수치예제를 통하여 동적거동해석을 수행하였다. 공기 복원력 변수가 0과 1일 경우는 공기안정식 부유구조물로서는 의미가 없는 값이며, 특정한 고유주기와 파고를 가지는 설계 파랑하중에서 안정성을 확보하기 위해서는 0.5이상의 값이 고려되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 우선 변수 f_a 의 영향을 확인하기 위하여 제한된 상태에서 해석을 수행 하였지만 향후 파랑에 의한 질량부가행렬과 감쇠행렬이 고려된 2차원 구조에 대한 해석과 테스트 모델 실험과의 비교를 통한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부의 BK21 사업의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Armstrong, E.R. (1924) Sea Station, *US Patent No. 1,511,153*.
- Newman, J.N. (1986) *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press. New York.
- Seidl, L. (1980) Development of an ASP(Air Stabilized Platform), *University of Hawaii, Department of Ocean Engineering technical report submitted to US Department of Commerce, Maritime Administration*, 88.