파랑하중에 의한 비평형부력의 영향

Effect of Disequilibriating Buoyancy of Wave

박 영 희*· 노 혁 천**· 김 승 억***· 나 성 원****

Park, Young Hee*· Noh, Hyuk Chun**· Kim, Seung Eock***· Na, Seong Won****

요 약

콘크리트 부유구조물에서 파랑하중의 영향에 의하여 발생하는 부재내력 산정식을 제시하였다. 기존의 설계식은 구조물의 길이와 파장 길이가 일치할 때에 적용이 가능하다. 그러나 대부분의 경우 구조물의 길이와 파장 길이가 일치하지 않기 때문에 비평형 부력에 의한 추가적인 모멘트가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 부유구조물을 강체로 가정하고 비평형 부력의 영향을 고려한 설계식을 제시하였고 이를 유한요소해석에 의한 결과와 비교하여 그 타당성을 보여주었다.

핵심 용어 : 부유식 구조물, 파랑하중, 부재력, 비평형 부력, 탄성변형

1. 서 론

해양공간 개발의 필요성과 그에 대한 이용가치는 부족한 육상공간의 대체와 해양기술의 발달에 따라 그 중요성에 대한 인식이 팽창하고 있다. 해양구조물은 주로 부유식 해상구조물(이하, 부유구조물)로서, 그 이용으로는 컨테이너 터미널, 마리나리조트, 해상공항, 해상저장기지 등 다수가 포함된다. 부유구조물은 이동이 가능하고, 증설, 확장, 철거가 용이하며, 지진에 대한 상대적 안전성 등의 장점을 가지고 있다(Watanabe *et al.*, 2004).

파랑하중은 해상 부유구조물에 작용하는 주된 환경하중의 하나로 설계하중의 큰 부분을 차지하고 있다(해양수산부, 2005; 한국선급, 2007). 따라서 부유구조물의 설계에는 파랑하중은 물론 파랑하중과 부유구조물 사이의 역학적 관계에 대한 이해가 필수적이다. 이에는 부유구조물의 규모에 따른 거동의 영향도 포함되는데, 즉, 소규모의 부유구조물일 경우에는 구조물을 강체(rigid body)로 고려하여도 무방하나, 구조물이 대형화되면 유연성(flexibility) 증가에 따른 탄성변형의 영향을 무시할 수 없다(김병완 등 2006). 이에 따라 유탄성해석 등의 높은 수준의 해석을 수행할 필요가 발생하게 된다.

본 논문에서는 부유구조물의 설계에서 파랑하중의 고려 시 나타날 수 있는 비평형부력에 의한 영향을 고찰한다. 비평형부력은 초대형 부유구조물의 길이와 설계파장의 차이에 의하여 유발되는 것으로서 부유구조물에 무시할 수 없는 추가내력을 유발할 수 있는 것으로 고찰되었다. 그러나 전술한 바와 같이, 대형 구조물의 경우에는 유연성의 증가로 인하여 비평형부력에 의한 추가내력이 일부 감소하게 되는데, 이를 수치해석을 통하여 검토하고 그 결과를 제시하였다.

2. 파랑하중에 의한 부재력 산정

2.1 기존의 부재력 산정 방법

파랑하중은 부유구조물에 호깅 또는 새깅모멘트를 유발하며 동시에 이와 관련된 전단력을 유발하게 된다. 이러한 내력들은 구조물의 길이(L)가 설계파의 파장(L_D)이 일치한다는 조건하에 산적/적용하고 있으며, 보다 일반적으로 $L = mL_D$인 경우에 대하여도 적용이 가능하다.

파랑하중을 코사인 함수로 가정하고 작용위치 x에 나타나는 단위길이당 부력을 표현한 후 부유구조물에 발생하는 전단력 $Q_w(x)$와 굽힘모멘트 $M_w(x)$를 얻기 위하여 연속적분을 수행하고 경계조건을 적용하면 식 (1)을 얻는다(Gregory, 1986).

* 현대건설 사원 (E-mail : heep80@empal.com)

** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : cpebach@sejong.ac.kr)

*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 정교수 · 공학박사 (E-mail : sekim@sejong.ac.kr)

**** 정회원 · 삼성중공업 공학박사 (E-mail : seongwond.na@samsun.com)

$$Q_w(x) = \pm \rho g B \frac{H_D L_D}{4\pi} sin \frac{2\pi}{L_D} x \ , \quad M_w(x) = \mp \rho g B \frac{H_D L_D^2}{8\pi^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{L_D} x \right) \tag{1}$$

여기서, ρ와 g는 각각 해수의 밀도와 중력가속도를 나타내며, H_D, B는 각각 파고와 부유구조물의 폭을 나타낸다. 그러나 이들 결과는 부유구조물 길이 L이 설계파장 L_D의 정수 배일 경우에만 적용이 가능하며, 이들 사이에 차이가 있을 경우 $(L - mL_D \neq 0)$에는 부재위치별로 발생하는 내력을 정확하게 표현할 수 없다.

2.2 비평형부력을 고려한 내력산정

비평형부력은 그림 1에 보인 바와 같이 부유구조물의 길이와 설계파장과의 불일치에 의한다. 구조물의 길이와 설계파장사이의 관계는 $L/2 = nL_D + \alpha L_D$, $(0 \leq \alpha \leq 1.0)$로 나타낼 수 있다. 이 경우 그림 1의 평형상태는 성립하지 않으며, 비평형부분의 상태에 따라 흘수의 증감이 나타난다.

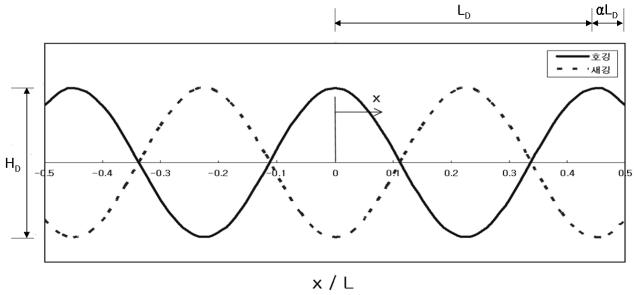


그림 1. 구조물의 길이와 파장 길이가 일치하지 않는 경우

부력에 의한 평형관계는, 부유구조물 자체의 중량을 $W_1 = \gamma_c V_c$라 하고, 구조물의 상부에 작용하는 상재하중을 W_2라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_2 + W_1 = BL\gamma_w \overline{d} \tag{2}$$

여기서, γ_c와 V_c는 각각 부유구조물 재료의 단위체적중량과 부피이며, $\overline{d}$는 비평형부력에 의하여 변화된 흘수(draft)이다. 식 (2)의 평형관계에 따른 흘수 변동량은 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

$$\delta d = \frac{H_D}{4\pi(n+\alpha)} sin 2\alpha\pi \tag{3}$$

그러므로 흘수의 변동성분을 포함하여 부력을 나타내면 다음과 같다.

$$b_x = \rho g B \left(\frac{H_D}{2} cos \frac{2\pi}{L_D} x - \frac{H_D}{4\pi(n+\alpha)} sin 2\alpha\pi \right) \tag{4}$$

2.2.1 전단력

식 (4)를 적분하고 경계조건을 적용하면 전단력은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Q_w = \int b_x dx = \rho g B \left[\frac{H_D L_D}{4\pi} sin \frac{2\pi}{L_D} x - \frac{H_D \sin 2\alpha\pi}{4\pi(n+\alpha)} x \right] \tag{5}$$

2.2.2 굽힘모멘트

식 (5)의 전단력식을 적분하여 굽힘모멘트에 관한 식을 구하면 다음과 같다.

$$M_w = \rho g B \left[\left\{ - \frac{H_D L_D^2}{8\pi^2} cos \frac{2\pi}{L_D} x - \frac{H_D \sin 2\alpha\pi}{8\pi(n+\alpha)} x^2 \right\} + \frac{H_D}{8\pi} \left\{ \frac{L_D^2}{\pi} cos 2(n+\alpha)\pi + \frac{L^2}{4(n+\alpha)} sin 2\alpha\pi \right\} \right] \tag{6}$$

적분상수는 경계조건 $M_w|_{x=\pm\frac{L}{2}}=0$을 적용하여 구할 수 있다. 최대굽힘모멘트와 그 발생위치는 식 (6)의 x에 대한 미분을 통하여 얻을 수 있으며, 보통은 부유구조물의 중앙에서 얼마간 치우진 위치에서 발생하게 된다.

2.3 제안식에 대한 검증

제안식에 의해 발생하는 내력의 특성을 검토하기 위하여 길이 350m, 폭 50m의 부유구조물에 적용해 보고자 한다. 설계파고 H_D=3.6m이며, 설계파장 L_D는 비평형력에 의한 영향을 고려하기 위하여 다소간의 변경을 두었다. 먼저 설계파장의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 설계파장 50m에 대하여 $\pm 0.01m$, $\pm 0.1m$의 범위에 있는 파장을 선택하였다.

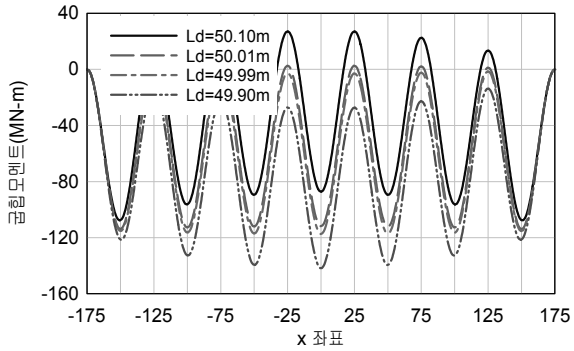
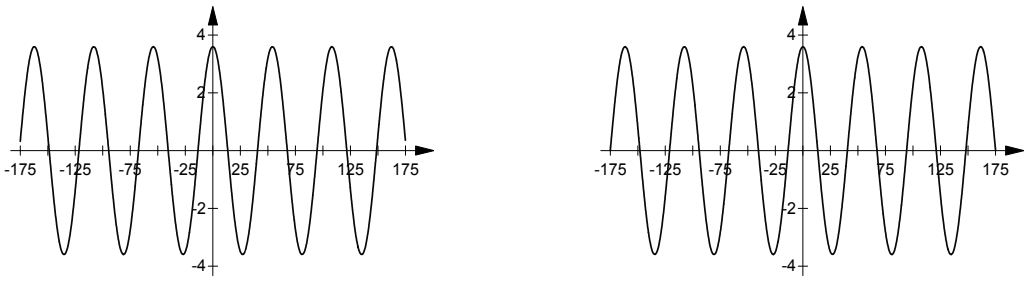


그림 2. 설계파장 L_D의 변동에 따른 굽힘모멘트의 분포

그림 2에서 보는 바와 같이 매우 미미한 설계파장의 변동의 경우에도 굽힘모멘트에는 주목할 만한 변동이 있는 것을 알 수 있다.



파랑 1 ($L_D=54.08m,\ n=3,\ \alpha=0.2359$)　　파랑 2 ($L_D=53.846m,\ n=3,\ \alpha=0.250$)

그림 3. 실적용 설계파랑 및 이와 근접한 설계파랑

그림 3의 좌측에 나타낸 파랑은 고려중인 길이 350m, 폭 50m의 격실형 부유구조물이 설계대상 위치지점의 환경을 적용하여 얻은 실제의 설계파장($\alpha=0.2359$)을 나타낸 것이며, 우측의 파장은 실제 파장과 유사하게 α를 임의로 0.25로 잡은 경우에 대한 파장을 보여주고 있다.

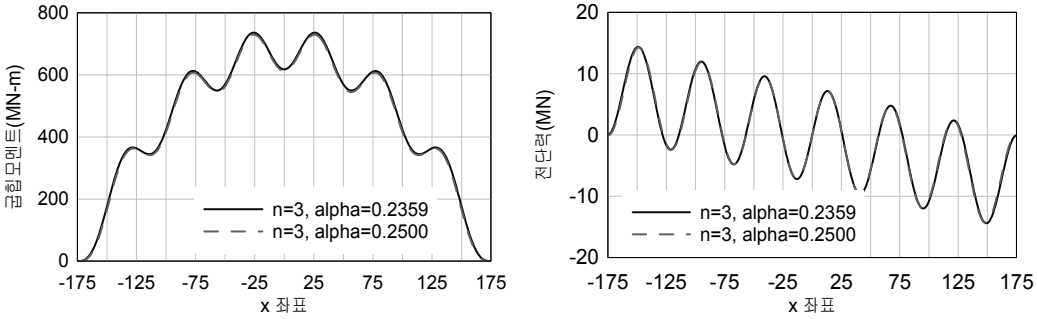


그림 4. 파랑 1, 2에 의한 굽힘모멘트와 전단력

그림 4에 나타낸 결과는 그림 3의 설계파장에 의하여 나타난 굽힘모멘트와 전단력을 보여주고 있다. 그림 2에서 제시하였듯이 n=3의 경우에 해당하는 굽힘모멘트는 약 142MN-m정도의 값을 보이고 있으나 비평형부분의 영향에 따라 굽힘모멘트가 736MN-m이상의 값을 나타내어 약 5배이상의 값을 보임을 알 수 있으며, 최대값은 중앙점이 아닌 약 26m 좌우점에 나타나고 있다. 이러한 결과는 구조물의 길이와 설계파장 사이의 길이차에 의하여 발생한 비평형부력이 매우 긴 모멘트팔과 곱해져서 발생한 것으로 그 영향이 매우 큼을 보여주고 있다.

3. 유연도를 고려한 부재력 산정

전 절에서 제시한 내력식은 구조물이 강체거동한다는 전제하에 유도된 것으로 부유구조물의 크기가 초대형화할 경우 유연도의 증가에 의하여 비평형부력에 의한 구조물 변형을 일으킬 수 있으며, 따라서 식 (3)의 흘수 변동부분은 부유구조물의 길이방향에 걸쳐 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서는 보(beam)요소를 이용한 SAP2000 해석을 수행하여 식 (6)의 그 결과를 비교하였다.

표 1에서 보는 바와 같이 식 (6)의 결과는 강체거동을 가정한 수치해석 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다. 특기할 사항은 유연도를 고려한 해석은 강체거동에 비해 크게 내력이 감소한다는 것이다. 본 해석의 경우 약 53%정도의 결과를 보여주고 있다. 이는 유연도에 의한 부유구조물의 변형에 따른 것으로서 구조가 일정부분 내에서 적응적으로 거동함을 알 수 있다. 그러나 유연도를 고려한 해석의 경우도 기존방식인 식 (1) 보다 약 3배에 가까운 값을 주고 있어 비평형부력의 영향을 고려하는 것이 매우 중요함을 보여주고 있다.

표 1. 강체거동 및 탄성체거동에 대한 해석결과 비교

Analysis Case	굽힘모멘트 결과 (MNm)			
	식 (1)	식 (6)	SAP2000(강체)	SAP2000(유연도고려)
1) 고정하중	0.00	0.00	0.00195	0.021
2) 파랑하중(호깅)	-134.08	-736.38	-718.69	-386.91
3) 파랑하중(새깅)	134.08	736.38	718.69	386.91

4. 결 론

본 연구에서는 파랑하중에 의한 초대형 콘크리트 부유식 구조물의 설계 부재력 산정에 대하여 논하였다. 설계파랑의 파장과 대상 구조체 길이와의 상관관계에 따라 발생하는 비평형부력을 고려하여 부유구조물에 발생하는 실제 내력 계산을 위한 이론식을 제시하였고, 대상구조의 유연성을 고려한 수치해석을 통하여 제안식의 적절성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 삼성중공업의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

해양수산부 (2005), 항만 및 어항설계기준.

한국선급 (2007), 한국선급기술규칙.

김병완, 김영식, 홍사영, 경조현, 조석규 (2006), 파랑하중을 받는 부유체의 강성에 따른 응답 고찰, 2006년도 정기학술대회 논문집, 한국전산구조공학회, pp.941-948.

Gregory P. Tsinker (1986) Floating Ports : Design and Construction Practices.

E. Watanabe, C.M. Wang, T. Utsunomiya and T. Moan (2004), Very Large Floating Structures: Applications, Analysis and Design, CORE Report No. 2004-02.