〈연구동향〉

해양구조물의 동적거동에 파랑이 미치는 영향

조 용 준*

서 론

대부분의 해양구조물은 水平部材로 구성된 steel jacket 형태인 데 이러한 부재들은 海水位의 증가가 충분치 못할 경우 파랑으로 인한 영향은 무시할 수 있다. 따라서 20년 혹은 30년전에 설치된 구조물의 경우 이러한 부재들은 파랑현상에 대한 고려없이 설계가 이루어졌다. 그러나 침하로 인하여 해수위와 부재간의 거리가 감소됐을 가능성이 있고 그동안에 축적된 파랑자료들을 바탕으로 한 통계치들은 設計波高가 다소 과소하게 산정됐다는 것을 입증하였다. 따라서 American Petroleum Institute는 최근 모든 해양구조물의 소유주들에게 수평부재들이 파랑에 노출됐을 경우에도 안전하다는 증거를 제시하라고 요구했다. 수평부재에 대한 波力은 보통 해수위가 상승하면서 부재와 접촉하는 순간에 부재가 겪게되는 slamming force, 일단 부재가 해수에 침수되었을 경우 우리가 흔히 이야기하는 Morison 형태의 파력 그리고 부력으로 구성이 되는 데 slamming force와 Morison 형태의 파력을 결정하는 일은 상당히 어려운 과제인 데 이러한 어려움은 slamming force의 경우 slamming force의 계수가 부재의 거동에 민감하게 변하기 때문에 기인하며 또한 Morison force의 渦流가 연직부재의 경우와는 달리 비대칭으로 생성되기 때문에 抗力과 慣性力 항의 계수를 결정하는 일은 쉬운일이 아니다[Chaplin, 1991]. 위에서도 언급한것처럼 수평부재에 연직방향으로 작용하는 힘은 세가지 성분으로 구성되는 데 해수면과 부재가 접촉하는 순간에 작용하는 slamming force, F_s, 는

$$F_s = K_s\ W^2 \tag{1}$$

로 주어지며 여기서 $K_s = \rho DC_s/2$이며, ρ는 물의 밀도, D는 부재의 직경, C_s는 slamming 계수 그리고 W는 물입자의 연직방향 유속을 의미한다. 부재가 침수 하였을 경우 파력, F_m은, 다음과 같이 주어지며

$$F_m = K_d\ W\,|\,W\,| + K_m\ \dot{W} \tag{2}$$

여기서 $K_d = \rho DC_d/2$, $K_m = \rho(\pi D^2/4)C_m$이며 $\dot{W}$는 물입자의 연직방향 가속도를 의미하며 C_d와 C_m은 각각 항력계수와 관성력계수를 의미한다. 또한 부력, F_b, 는

$$F_b = \pi\ \rho g(\pi D^2/4) \tag{3}$$

로 주어지며 g는 중력가속도를 의미한다. 본고에서는 이러한 고찰을 토대로 그동안 상대적으로 연구가 미흡했던 해양구조물의 동적거동에 해수면의 변위가 미치는 영향에 대한 최근의 연구들을 推計學적인 접근방법을 중심으로 검토하여 요약, 정리하고자 한다.

이론적 고찰

파랑현상에 의해 수평부재에 작용하는 총 힘은 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$F_t = K_s\ W^2\ \delta(\eta - h)\ H(W) + [K_d\ W\,|\,W\,| + K_m\ \dot{W} + F_b]\ H(\eta - h) \tag{4}$$

여기서 $\delta(\cdot)$은 Dirac delta 함수이고 $H(\cdot)$는 Heaviside unit step 함수이다[Abraniwutz 외, 1968]. 방정식 (4)에서 첫번째 항은 $\eta = h$이고 $W>0$인 경우에 발생하는 Morison force와 부력을 나타낸다. 수평부재는 간헐적으로 침수하게되고 따라서 부재에 가해지는 파력은 시간영역에서 불연속한 데 방정식(5)는 이러한 불연속성을 설

---

* 서울시립대학교 토목공학과 전임강사.

명한 것으로 새로운 접근방법이라 하겠다[Chung과 C. C. Tung, 1992]. 또한 일반적인 해양구조물의 운동방정식은

$$M\ddot{R}+C\dot{R}+KR=F-C_d\dot{R}\,|\dot{R}| \qquad (5)$$

로 주어지며 여기서 $F=M\dot{V}+C\dot{V}+KV$, R은 구조물과 유체입자의 상대변위, M은 구조물의 유효질량, C는 hydrodynamic damping coefficient, K는 구조물의 stiffness, V는 유체입자의 이동거리, 첨자 ·은 시간에 대한 미분을 나타낸다. 방정식(5)는 항력항으로 인한 비선형 미분방정식이고 불규칙한 파랑장의 경우 statistical equivalent linearization method, 혹은 비선형 항을 급수전개한 후 축차적으로 풀어나가는 perturbation method등으로 그 해를 구하게된다. 파력에 의한 구조물의 상대변위, R(t),는 다음과 같은 선회적분 (Convolution integral)의 형태로 주어지며

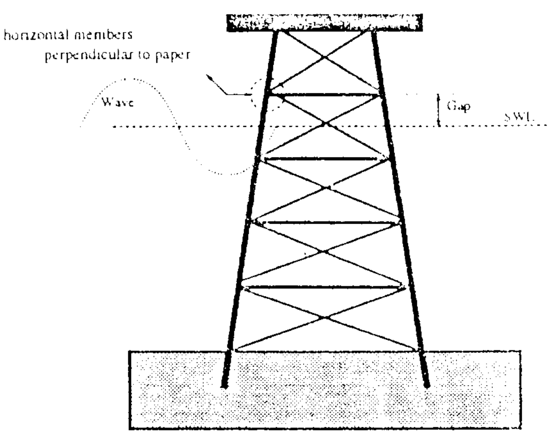

Figure 1: A Jacket-Type Drilling Platform

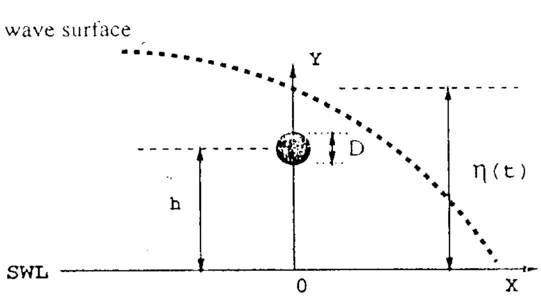

Figure 2: Definition Sketch

$$R(t)=\int h(t-\tau)F(\tau)d\tau-\int h(t-\tau)C_d\dot{R}(\tau)\,|\dot{R}(\tau)|\,d\tau \qquad (6)$$

여기서 h(·)는 unit Impulse response 함수이다. 구조물 변위에 대한 autocorrelation 함수, $R_{RR}(\tau)$,는 statistical equivalent linearization method를 사용하면

$$\begin{aligned}R_{RR}(\tau)&=E[R(t)R(t+\tau)]\\&=\iint h(t-\tau_1)h(t+\tau-\tau_2)E[F(\tau_1)F(\tau_2)]\,d\tau_1\,d\tau_2\\&=\iint h(t-\tau_1)h(t+\tau-\tau_2)R_{FF}(\tau_2-\tau_1)\,d\tau_1\,d\tau_2\end{aligned} \qquad (7)$$

로 주어지며 여기서 E[·]는 인자의 기대치를 의미하며 포함된 random 변수들의 종합확률밀도함수를 도입하여 구하게된다. 해양구조물의 동적설계에 가장 기본적인 정보를 제공하는 동적응답 spectrum은 auto correlation 함수의 fourier transform으로 정의되는 데 다음과 같다.

$$S_{RR}(\omega)=|H(\omega)|^2 S_{FF}(\omega) \qquad (8)$$

여기서 $H(\omega)$는 unit Impulse response function의 fouier transform으로 주어지는 치환함수 (transfer function)이며 S(·)는 첨자로 표시한 양의 spectrum을 의미한다.

최근의 연구결과

Isaacson과 Subbiah [1991]는 구조물이 위치한 지역에서의 파랑장의 frequency spectrum이 narrow band 하다는 가정을 도입하여 최대 파력의 확률밀도함수와 그 기대값을 유도해 냈다. 이런 물리양은 부재의 정적설계에 필요불가결한 정보이나 해양구조물이 심해쪽으로 접근할 수록 구조물의 진동수는 파랑의 frequency에 접근하게 됨으로 細部材의 동적거동을 고려해야만 하는 데 이 경우에는 파력을 시간영역에서의 연속함수로 취급함으로써 얻을 수 있는 파력 specturm이 가장 기본적이고도 광범위한 정보를 제공하게 된다. Laurence와 C. C. Tung [1992]은 방정식 (4)에서 물입자의 연직방향 속도와 가속도항들을 해수면의 변위에 대한 제1차, 2차 도함수로 치환하고 해수면의 변위가 Gaussian 확률분포를 따른다는 가정을 도입하여 파력 spectrum을 유도했는 데 소개하면 다음과

같다.

$$S_{FF}(\omega)=G_1 S_{\eta\eta}(\omega)+G_2 S_{\eta\eta}(\omega)$$

$$+G_3 S_{\eta\eta}(\omega)+G_4 S_{\eta\eta}(\omega) \quad (9)$$

여기서 ω는 frequency를 의미하며 G_1, G_2, G_3, G_4는 파랑 조건에 따라 변하는 계수들이다. [Chuang 과 C. C. Tung, 1992]. 한편 수평부재의 경우 변위 spectrum $S_{RR}(\omega)$에 대한 연구결과는 아직 보고된적이 없다.

맺은말

파력과 구조물의 동적응답 spectrum의 근사적 해법에 대한 최근의 연구결과에 대해 살펴보았다. 파력 spectrum에 대한 정보는 수평부재의 동적응답을 결정하는 데 반듯이 필요하고 slamming force, 항력, 관성력 계수들은 부재의 거동에 따라 변하게된다. 따라서 이러한 계수들을 정확히 결정하기 위해서는 부재의 동적거동에 대한 충분한 고려가 선행되어야만 한다. 또한 파력 spectrum을 결정하는 데 있어 사용된 Gaussian 확률분포형에서 알 수 있듯이 아직 선형 파랑 이론에서 벗어나지 못했으며 이것은 인류 활동의 대부분이 천해역에 집중되어 있는 사실을 상기할 때 비선형 파랑모형의 도입은 시급히 해결해야할 과제로 생각된다. 해양개발의 역사가 비교적 일천한 우리나라에서는 아직 이러한 문제들이 보고된 적은 없으나 향후 충분히 예상할 수 있는 일이라 생각되며 slamming force가 포함된 경우 Auto correlation 함수를 구하는 데는 아직 어려움이 많으나 equivalent linearization method의 확장적용이 가능하리라 생각되며 곧 가시적 성과들이 나오리라 기대된다.

참고문헌

1. Abramwitz, M. and Stegun, I. A, (1968), Handbook of Mathematical Functions, Dover Publication, Inc., New York, NY.
2. Chaplin, J. R., (1991). Loading on a Horizontal Cylinder in Irregular Waves at Large Scale, Int. J. of Offshore and Polar Engineering, Vol., 1, No. 4, pp. 247-254.
3. Chung, Laurece Z. H. and Tung, C. C., (1992). Rnadom Wave Force on Horizontal Members, Int. J. of Offshore and Polar Engineering (submitted).
4. Isaacson, M. and Subbiah, K., (1990). Random Wave Slamming on Cylinders, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 116, pp. 742-763.
5. Tung, C. C., (1979). On Response of structures to random waves, Applied Ocean Research, Vol. 1, No. 4, pp. 209-212
6. Tung, C. C. and Yang, C. H., (1992)/ Effects of Free Surface Fluctuation on Response of Offshore Structures, Int. J. of Offshore and Polar Engineering (submitted).