

케티너리 계류 浮遊式 방파제 擧動의 時間領域 해석 Time Domain Analysis of the Motions of Catenary Moored Floating Breakwater

全 仁 植*
In Sik Chun*

要 旨: 本 論文에서는 規則 또는 不規則波와 定常外力이 3次元的으로 複合되어 있는 外力條件에서 케티너리 繫留浮體의 6 自由度 運動變位 및 繫留張力의 時系列을 계산하기 위한 時間領域解法을 제시하였다. 入射波浪의 無限大 周波數에 대한 附加質量係數, 그리고 波浪減衰係數와 波浪強制力係數의 周波數에 대한 變化는 特異點分布法을 이용하여 결정하였으며, 이들 係數들을 이용하여 구성되는 時間領域에서의 運動方程式은 Wilson- θ 기법을 이용하여 解를 구하였다. 時間領域解法의 結果를 定常外力 조건에서 Newton 方法의 解와, 變動外力 條件에서 周波數領域解法의 結果와 각각 比較한 結果 이들이 서로 잘 일치함을 확인하였다. 아울러, 不規則波 條件에서 一般的인 諸元을 갖는 浮遊式 防波堤를 設定하여 本 技法의 適用을 例示하였다.

Abstract □ A numerical technique is presented to calculate the motions of 6 d.o.f and mooring tensions for a catenary moored floating breakwater. The breakwater may be subjected to the 3-D combination of regular or irregular waves and stationary forces. The added mass coefficients at the infinite frequency of input wave and the variations of damping and exciting force coefficients are calculated using the source distribution method. The coefficients are used to constitute motion equations in time domain which are solved by Wilson- θ method. The solutions agree quite well with either static displacement determined from Newton method under the stationary force only or 6 d.o.f determined from the frequency domain analysis under regular wave only. An example analysis is also done for a floating breakwater to demonstrate its applicability.

1. 緒 論

항만 및 연안역 이용이 증대하고 防波堤를 설치할 입지가 多變化됨에 따라 기존의 着底 重力式 방파제는 많은 한계점을 노출하고 있으며, 각 이용목적에 보다 적합한 新型 방파제의 개발이 절실히 요구되고 있다. 浮遊式 방파제는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 임의 형태의 浮遊體를 繫留라인으로 拘束하여 입사파랑의 에너지를 부체 및 계류선의 운동으로 減衰시키는 형태로서 일본 및 미국에서는 많은 성공적인 시공실례를 가지고 있다(韓國海洋研究所, 1989). 부유식 방파제의 장점은 軟弱地盤에 설치가 가능하며 이동설치가 가능하다는 점이다. 특히, 着底式 방파제와는 달리 海水交換機能을 가지고 있으며 양식장 및 어장에 매우

有用하게 설치할 수 있다.

浮遊式 방파제를 설계하기 위해서는 透過 및 反射率, 浮遊本體의 縱, 橫 荷重 및 局部荷重, 계류시스템, 부체의 移動限界 등 여러 사항을 포괄적으로 고려하여야 한다. 특히, 부체의 이동한계는 방파제 주변의 航路를 감안하여 설정되어야 하며 이를 위해서는 바람, 해류등에 의한 定常變位와 파랑에 의한 變動變位 등이 정확히 파악되어야 한다(上田茂, 白石悟, 1981). 부유식 방파제의 계류방식은 계류력이 계류선의 重量에 의해서 제공되는 케티너리 방식이며, 全等(1991)은 定常外力下에서 부체의 위치 및 回轉 變位를 Newton 방법을 이용하여 계산하는 기법을 제시한 바 있다. 또한, 特異點分布法(source distribution method)을 사용하여 부체 주변의 回折 및 放射問題를 해석하고

*韓國海洋研究所 海洋工學研究部 (Ocean Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

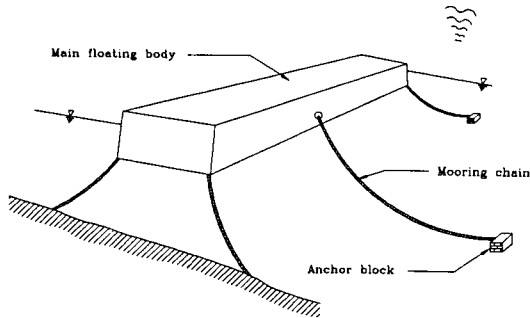


Fig. 1. Definition sketch of a floating breakwater.

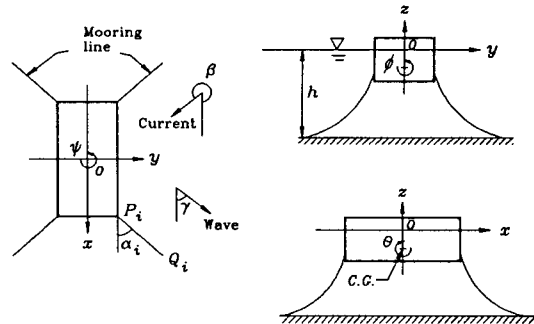


Fig. 2. Definition of coordinate system.

부체의 변동변위 및 계류장력을 결정하는 周波數領域解法을 시도하였다.

시간영역해법은 성격상 파랑하에서의 變動變位만을 계산할 수 있으며, 정상외력이 공존하는 경우에는 부체의 最終 位置 및 回轉變位를 계산하기 위해서 정상변위를 별도로 계산하여 변동변위에 합해야하는 문제점이 있다. 또한, 시간영역해법을 不規則波에 적용하는데는 線形波 가정하에서 各 周波數 成分에 해당하는 운동변위를 계산하여 합해야 되기 때문에 계산에 많은 시간이 소요된다. 時間領域解法은 이와 같은 시간영역해법의 문제점들을 해소할 수 있으며 케티너리 계류와 같은 非線形 계류시스템에도 효과적으로 적용할 수 있다. 이 방법은 Ogilvie(1964)에 의해 최초 제안된 이래 주로 船體의 운동을 해석하기 위하여 많이 사용되어 왔다(Choi and Choi, 1990; Oortmerssen and Boom, 1986). 본 연구에서는 波浪과 海流가 3차원적으로 복합되어 있는 외력조건에서 비선형 케티너리 계류방식의 부체의 운동 및 繫留張力을 계산하기 위한 시간영역해법을 제시하고 浮遊式 방파제에 대한 適用性을 파악하고자 한다.

2. 運動方程式

Fig. 2는 浮體의 운동 해석을 위해서 본 연구에 사용된 座標系를 보여준다. 慣性座標系의 原點은 靜水面에 걸치는 부체단면의 중앙에 위치하며 수평면에서 부체의 張軸을 x 축, 短軸을 y 축으로 하고, 연직방향을 z 축으로 취하기로 한다. 부체의 운동을 나타내는 6自由度의 位置 및 回轉變位는 부체의 무게중심(C.G.로 표기)을 기준으로 설정한다. 회전변위는 무게중심에서

좌표축의 시계방향을 양방향으로 취하였다. x, y, z 축을 기준으로 한 위치변위 ξ, η, ζ 는 각각 Surge, Sway, Heave로, 회전변위 ϕ, θ, ψ 는 각각 Roll, Pitch, Yaw로 정의하기로 한다. 계류선, 파랑, 해류가 각각 부체와 이루는 相對角, α_i, β_i 와 γ_i 는 양방향의 x 축으로부터 반시계방향으로 취한다.

상기 좌표계를 갖는 부체의 운동을 지배하는 방정식은 다음과 같은 流體力, 慣性力, 復原力의 평형관계로 구성할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^6 (M_{jk} \ddot{x}_k + R_{jk} \dot{x}_k) = \int_{S_F} p n_j dS, \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

여기서, j, k =운동변위를 나타내는 添字, 숫자의 순서별로 surge, sway, heave, roll, pitch, yaw를 지칭, M_{jk} = k 부체의 질량계수, R_{jk} =방향의 운동에 의한 j 방향의 복원력 계수, p_j =부체표면 S_F 에서 압력의 j 방향 성분, n_j =부체표면에서 j 방향의 방향여현, x_k =부체 무게중심을 기준으로 한 k 방향 변위($\xi, \eta, \zeta, \phi, \theta, \psi$)

復原力은 부체의 浮力에 의한 복원력과 계류선의 張力에 의한 복원력으로 구분할 수 있으며, 유체력은 해류, 바람 등에 의한 저항력 및 평균 波 漂流力 등의 定常外力과 파랑의 입사와 부체주변의 回折에 의한 波浪強制力, 그리고 부체자체의 動搖에 의한 附加質量力과 波浪減衰力 등으로 구분할 수 있다. 따라서, 이들을 반영하여 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^6 (M_{jk} + m_{jk}) \ddot{x}_k + N_{jk} \dot{x}_k + (B_{jk} + K_{jk}) x_k = F_j^s + F_j^f, \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

여기서, m_{jk} = 附加質量 계수, N_{jk} = 波浪減衰力 계수, B_{jk} = 浮力 剛性 메트릭스, K_{jk} = 繫留 剛性 메트릭스, F_j^s = 定常外力, F_j^f = 波浪強制力

파랑강제력은 角周波數 ω , 振幅 \bar{a} 를 갖는 입사파에 대해서 複素數 형태의 파랑강제력 계수 C_j 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j^f = \bar{a}C_j e^{-i\omega t} \quad (3)$$

식 (2)에서 부가질량계수와 파랑감쇄력 계수는 입사파 波數의 함수이며, 식 (3)에서의 파랑강제력 계수는 파수와 波向의 함수이다. 이들 계수들은 공히, 부체에 의한 입사파의 攪亂程度에 의해서 좌우되므로 이들을 결정하는 것은 일종의 放射-回折문제의 해석으로 귀착된다. 방사-회절문제의 해석에는 여러 技法이 있으나 본 연구에서는 境界要素法の 일종인 特異點分布法을 이용하여 上記 계수들을 결정하였다. 특이점 분포법은 지배방정식인 Laplace 방정식과 浮體表面 경계조건을 제외한 他 경계조건들을 만족시키는 Green 함수를 설정하고 이를 부체표면 경계조건에 대입하여 유체영역 임의점에서의 속도 포텐셜을 결정하는 방식이다(Chakrabarti, 1987; Garrison, 1978). 이 방법은 수심이 一定한 경우에만 적용가능하나 부체표면을 정밀히 반영할 수 있으며 3차원 문제에서 상기 流體力 계수들을 비교적 빠른 시간내에 계산할 수 있는 장점이 있다. 이미 全等(1991)에서 浮遊式防波堤의 擧動解析을 위하여 본 방법을 적용한 바 있으며 자세한 설명은 생략하기로 한다.

式 (2)에서 定常外力項을 제외하면 角周波數 ω 를 갖는 입사파에 대한 平衡方程式은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega^2(M_{jk} + m_{jk}) - i\omega N_{jk} + (B_{jk} + K_{jk})] X_j e^{i\delta_j} = C_j, \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

여기서, X_j 는 $x_j(t)$ 의 振幅, δ_j 는 $x_j(t)$ 의 입사파에 대한 位相差이다. 식 (4)는 순수 周波數 領域으로 표현되어 있으며 X_j 와 δ_j 를 구함으로써 파랑에 의한 6 자유도의 변동변위를 결정할 수 있다. 단, 定常外力이 共存할 때는 정상변위 및 정상 평형상태를 먼저 결정하고 이 상태에서의 유체력 계수 및 복원력 계수들을 식 (4)에 대입하여 부체의 변동변위를 결정해야 한다. 波漂流力을 포함할 시는 정상변위와 변동변위의 계산을

상호 반복수행해야 하므로, 유체력 계수들을 매번 계산하는 것은 매우 번거롭다. 실제로는 부체에 대한 波向의 상대적 변화가 매우 미미하며, 정상변위에 의한 부체 吃水深의 변화가 매우 작기 때문에 유체력 계수 및 浮力剛性 메트릭스는 처음 한번만 계산하여 사용하고 계류강성 메트릭스만 반복 계산해도 무방하다. 질량계수 메트릭스와 부력강성 메트릭스의 결정방법에 대해서는 Mei(1983)에 자세히 수록되어 있다.

3. 浮體擧動의 시간영역 해석

動的 浮體擧動 해석에서 波浪減衰力 項이 시간에 따라 변하는 형태로써 다음과 같은 식이 제시된 바 있다(Hoof, 1982).

$$[M_{jk} + m_{jk}(\infty)]\ddot{x}_k(t) + \int_{-\infty}^t L_{jk}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + (B_{jk} + K_{jk})x_k(t) = F_j^s + F_j^f \quad (5)$$

여기서, $m_{jk}(\infty)$ 는 $\omega = \infty$ 에서의 附加質量 係數이며 L_{jk} 는 부체운동의 과거 履歷을 반영하는 記憶函數 (Memory function)이다. 물리적으로 식 (5)는 부체 주변의 放射 포텐셜이 현재의 부체운동에 과거 부체운동의 영향이 결합되어 결정됨을 의미한다. 小山健夫等(1982)은 시간영역해법과 주파수영역해법의 비교에서 상기 無限大 角周波數에서의 부가질량 계수와 기억함수를 다음과 같이 유도하였다.

$$m_{jk}(\infty) = m_{jk}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty L_{jk}(\tau) \sin \omega \tau \, d\tau \quad (6)$$

$$L_{jk}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty N_{jk}(\omega) \cos(\omega t) \, d\omega \quad (7)$$

부가질량계수 $m_{jk}(\omega)$ 는 일반적으로 큰 주파수에서 일정한 값으로 收斂하며 파랑감쇄력 계수 $N_{jk}(\omega)$ 는 冑으로 수렴한다. 본 연구에서는 일정한 간격으로 주파수를 증가시켜 가며 앞서 설명한 특이점 분포법을 적용하여 $m_{jk}(\omega)$ 와 $N_{jk}(\omega)$ 를 계산하였다. 값이 일정하게 나타나는 附加質量係數를 $m_{jk}(\infty)$ 로 취하였으며, 계산된 $N_{jk}(\omega)$ 를 이용하여 식 (7)로부터 기억함수를 계산하였다.

식 (5)를 수치적으로 해석하여 6 自由度 운동변위 $x_k(t)$ 의 시계열을 계산할 수 있다. 식 (4)의 周波數領域解法과는 달리 정상외력 F_j^s 를 포함한 상태 그대로 방정식을 풀 수 있으며 계산된 운동변위는 定常變位와 파랑에 의한 變動變位를 동시에 포함한다. 해석질차는 먼저 변위, 속도, 加速度的 초기치를 설정하고 Δt 의 시간 増分値마다 이들 변수를 반복적으로 구한다. 방정식의 減衰力項이 時間依存性을 갖고 있기 때문에 解가 發散하기 쉬우며 해법의 선택에 많은 주의를 요한다. 여기에서는 시간 증분치 Δt 에 관계없이 안정된 解를 구할 수 있는 Wilson- θ 방법(Bathe, 1982)을 이용하였다.

반복계산에서, 즉, $t=n\Delta t$ 일때 平衡方程式은 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{jk}^T \ddot{x}_{k,n} + \Delta t \sum_{i=0}^n [L_{jki} \dot{x}_{k,n-i}] + R_{jk,n} x_{k,n} = F_j^s + F_{j,n}^v \quad (8)$$

여기서, $M_{jk}^T = M_{jk} + m_{jk}(0)$

$$R_{jk,n} = B_{jk} + K_{jk,n}$$

식 (8)에서 添字 n 은 n 번째 반복계산임을 의미한다. 식 (8)은 다시

$$M_{jk}^T \ddot{x}_{k,n} + (\Delta t L_{jk,0}) \dot{x}_{k,n} + R_{jk,n} x_{k,n} = F_j^s + F_{j,n}^v - \Delta t \sum_{i=0}^{n-1} [L_{jki} \dot{x}_{k,n-i}] \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (9)는 $n-1$ 시간스텝까지의 기억함수에 의한 변동 감쇄력을 방정식의 右邊에 위치시켜 파랑강제력과 같이 變動外力으로 처리한 형태이며 Wilson- θ 기법에 의해서 용이하게 解를 구할 수 있다. 이 기법에서 $\theta \geq 1.37$ 의 조건이 만족되는 한 Δt 에 관계없이 해가 收斂하나 식 (5)에서의 積分項이 區分區積法(Trapezoidal rule)으로 구해지기 때문에 해의 정밀도를 고려하여 Δt 를 결정한다. 기억함수는 특히 부체가 작은 경우 단시간내에 零에 수렴하므로 事前에 기억함수의 형태를 관찰하여 비교적 큰 값을 갖는 초기부분이 충분히 반영되도록 Δt 를 결정하여야 한다. 또한, 기억함수의 성격상 식 (5)의 적분항을 해석하기 위하여 부체운동의 過去値를 모두 이용할 필요는 없으며 기억함수의 형상을 관찰, 함수가 총

분히 零으로 수렴된 시점을 적분구간의 上限値로 선택하면 된다.

일반적으로 파랑에 의한 6 自由度의 변동변위는 繫留剛性 매트릭스에 민감하지 않다. 따라서, 식 (9)의 반복계산에서 계류강성 매트릭스 $K_{jk,n}$ 는 定常外力이 없는 상태에서는 초기 停止時의 강성 매트릭스를 계산하여 계속 사용해도 무방하다. 그러나, 定常變位는 강성 매트릭스에 의해 민감하게 반응하므로 定常變位를 동시에 결정할 때는 每 시간 스텝마다 강성 매트릭스를 변화시켜 주어야 한다. 임의 시점에서 강성 매트릭스는 그 시점에서의 변위에 의해서 결정되며 원칙적으로는 한 시간 스텝내에서도 정확한 강성 매트릭스를 구하기 위한 反復計算을 수행하여야 한다. 그러나, 본 연구에서는 Δt 동안에 매트릭스의 변화가 거의 미미하다고 보고 바로 前 시간 스텝에서의 변위를 이용, 강성 매트릭스를 계산하여 現 시간 스텝에 이용하는 방식으로 하였다. 이 방식은 시간 스텝내에서는 線形 계류방식을 따르고 있으나 매 시간 스텝마다 매트릭스를 새로 구성하므로 非線形 계류의 특성을 잘 반영할 수 있다. 매 시간스텝마다 매트릭스를 구성하지 않고 前 시간스텝 변위에서의 非線形 繫留力을 계산하여 現 시간스텝에 직접 이용하는 방법이 있으나 이 방법은 대부분의 경우 해가 發散하게 됨을 확인하였다.

식 (9)에서 입사파의 주파수에 의존하는 항은 波浪強制力뿐이다. 따라서, 불규칙파에 대해서는 線形波 가정하에서 各 成分波의 파랑강제력을 계산하고 이들을 합한 總 파랑강제력에 대하여 時間領域解法을 적용하면 된다. 즉, 스펙트럼으로부터 다음식으로 정의되는 N 개의 성분파를 계산한다.

$$\bar{\eta}(t) = \sum_{m=0}^N a_m e^{i\epsilon_m} e^{i\omega_m t} \quad (10)$$

여기서, ϵ_m 은 亂數이며 a_m 과 ω_m 은 각각 m 번째 성분파의 진폭과 각 주파수이다. 따라서, 식 (3)을 참조하여 파랑강제력을 이들 성분파의 個別 파랑강제력의 線形 합으로서 표현하면,

$$F_j^v = \sum_{m=0}^N a_m e^{i\epsilon_m} C_{j,m} e^{i\omega_m t} \quad (11)$$

와 같다.

4. 케티너리繫留 剛性매트릭스의 구성

케티너리 계류는 외력에 따라 弛緩繫留 상태 또는 앵커점에서 地面과 각을 이루고 있는 緊張繫留 상태를 이루나(新井信一, 1979) 일반적인 부유식 방파제에서는 항시 이완상태로 유지함이 바람직하다. 또한, 부체변위에 대하여 긴장계류의 폭이 좁아 파랑에 의한 변동외력에도 이완상태에서 곧 바로 破斷狀態, 즉 계류선이 직선이 되는 상태로 가는 경향이 있다. 이 경우는 Taut 계류에 해당되어 계류선 材質에 따르는 스프링 상수 등을 고려하여야 한다. 따라서, 케티너리 계류의 긴장상태는 현실적으로 큰 의미가 없으며, 본 연구에서는 항시 弛緩狀態를 유지하는 케티너리 방식을 채택하여 이에 해당하는 케티너리 식들을 이용하여 계류강성 매트릭스를 구성하였다.

케티너리 계류선은 入力値로서 각 라인의 浮體附着點의 좌표 (x_B, y_B, z_B)와 앵커점의 좌표 (x_Q, y_Q, z_Q), 단위길이당 중량 ω_k , 初期 수평장력 T_H 의 세가지가 주어진다(Fig.3 참조). 入力値에서 각 계류선의 길이 S_0 를 일단 계산하면 이를 이용하여 부체운동시에 계

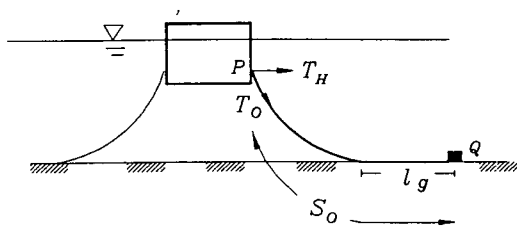


Fig. 3. Catenary mooring line of loose state.

류장력의 수평성분과 연직성분을 계산하게 된다. 케티너리의 弛緩狀態에서의 강성매트릭스 구성과 계류장력 계산을 위한 기법은 이미 全等(1991)과 韓國海洋研究所(1990)에 의하여 제시한 바 있으므로, 자세한 설명은 생략하기로 한다. 단, 임의 시간 스텝에서 계류선의 浮體 부착점 위치 (慣性座標系)는 부체 무게중심의 위치변위 ξ, η, ζ 와 회전변위 ϕ, θ, ψ 의 Euler角 變換을 이용하여 계산하였다.

5. 浮遊式 방파제에 대한 적용 예

부체운동의 시간영역 해석의 例示를 위하여 일반적인 부유식 방파제 규모의 부체를 설정하여 운동변위 및 계류장력의 時系列을 계산하였다. 계산에 사용된 입력조건은 다음과 같다.

- 水深 : 30.0 m
- 부체의 크기 : 30.0 m × 8.0 m × 6.0 m
- 부체의 중량(공기중) : 96,000.0 kg
- 吃水深 : 4.0 m
- 무게중심의 위치 : 水面下 2.86 m

케티너리 계류선은 총 6개이며 이들의 入力 및 初期條件은 Table 1과 같다. 계류선의 입력조건은 부체 부착점 및 앵커점의 위치, 단위길이당 重量과 초기 수평장력이다. 초기조건은 외력의 不在時에 케티너리식을 이용하여 입력조건으로부터 결정하였다. 계류선 중량에 의한 부체의 初期 沈下는 매우 미미하므로 무시하였다.

Table 1. Input and initial conditions of catenary mooring lines

Item	Line no.	(Unit)	1	2	3	4	5	6
Body attachment point, (x_B, y_B, z_B)		m	15.4, -3	0.4, -3	-15.4, -3	-15.4, -3	0, -4, -3	15, -4, -3
Anchor point, (x_Q, y_Q, z_Q)		m	100, 100, -30	0, 100, -30	-100, 100, -30	-100, -100, -30	0, -100, -30	100, -100, -30
Weight per unit length, ω_k		Kgf/m	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
Initial horizontal tension, T_H		Kgf	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
Initial tension, T_0		Kgf	6900.0	6900.0	6900.0	6900.0	6900.0	6900.0
Mooring line length, S_0		m	145.3	113.1	145.3	145.3	113.1	145.3
Initial ground length, l_g		m	112.0	79.8	112.0	112.0	79.8	112.0

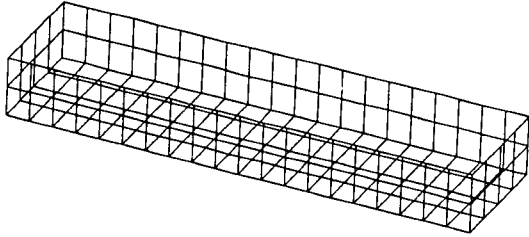
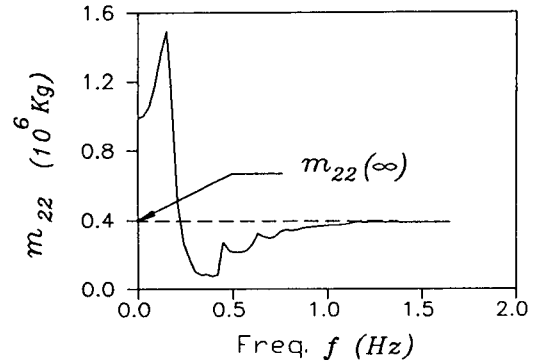


Fig. 4. Discretization of the immersed surface of floating body for the application of the source distribution method.

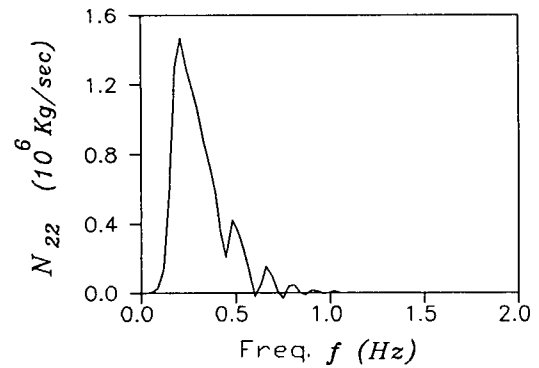
特異點分布法을 적용하기 위하여 水面下 부체표면을 Fig. 4와 같이 총 176개의 小面積 요소로 분할하였다. 요소의 크기는 $x-y$ 면과 $x-z$ 면은 $1.5m \times 2.0m$, $y-z$ 면은 $2.0m \times 2.0m$ 로 하였다. 부가질량계수와 減衰係數는 $0.03 Hz$ 의 주파수 간격으로 계산하였으며 Fig. 5는 Sway에 대하여 계산된 계수들을 보여준다. 高周波數에서 부가질량계수는 일정한 값으로, 감쇄계수는 거의 零으로 수렴함을 관찰할 수 있으며 이 현상은 다른 성분의 계수들에도 나타난다. 따라서, 식 (6)에서의 無限 주파수에서의 부가질량계수 $m_{jk}(\infty)$ 또는 기억함수 L_{kj} 를 계산하기 위한 限界 주파수를 1.62로 취하였다. 부체가 停止시에 總 質量係數 M_{ii}^T 와 復原力 剛性 매트릭스 $R_{ii,0}$, 固有 運動週期 T_i^T 를 Table 2에 제시하였으며 T_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$T_i^T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{ii}^T}{R_{ii,0}}}, \quad i=1, \dots, 6 \quad (12)$$

Fig. 6은 식 (9)에 의하여 계산된 Sway, Heave, Roll에 대한 記憶函數의 시간 변화를 보여준다. 기억함수는 전반적으로 초기에 큰 값을 가지나 시간이 지남에 따라 零으로 수렴하여 부체의 現 운동에 대한 과거운동이 잘 반영되고 있다. 대략적으로 기억함수의 변화주기가 5초 이내에서 크게 변화함을 알 수 있으며, 식 (5)에서의 적분항의 정밀도를 감안하여 시간 영역해석에서의 時間 增分値를 $\Delta t = 0.2$ 로 취하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. Variations of hydrodynamic coefficients for the sway motion with respect to wave frequency: (a) added mass coefficient; (b) damping coefficient.

시간영역해법의 정확도를 고찰하기 위해서 식 (9)에서 波浪強制力 F_j^r 와 정상외력 F_j^s 을 제외하고, 초기치로서 Sway 방향으로 $x_{2,0} = +1.0 m$ 또는 Heave 방향으로 $x_{3,0} = +1.0 m$ 을 입력하여 부체의 擧動을 계산하였다. Fig. 7은 계산된 부체변위의 시계열을 보여준다. Sway와 Heave의 운동주기가 공히 Table 2에 열거한 固有運動週期와 잘 일치함을 알 수 있다.

다음에 定常外力을 부여하기 위하여 부체에 대하여 $\beta = 90^\circ$ 의 각도를 가지고 흐르는 海流를 설정하고

Table 2. Virtual mass coefficients, restoring force coefficients and natural periods of 6 d.o.f motions

Item	i	1 (Surge)	2 (Sway)	3 (Heave)	4 (Roll)	5 (Pitch)	6 (Yaw)
M_{ii}^T (kg or $kg \cdot m^{-2}$)		0.105×10^7	0.135×10^7	0.194×10^7	0.135×10^8	0.144×10^9	0.119×10^9
$R_{ii,0}$ (kg/sec^2 or $kg \cdot m^2/sec^2$)		0.571×10^4	0.138×10^5	0.237×10^7	0.208×10^8	0.186×10^9	0.957×10^9
T_i^T (sec)		85.2	62.1	5.7	5.1	5.5	70.2

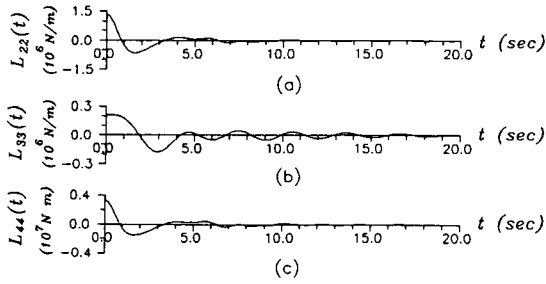


Fig. 6. Memory functions: (a) sway; (b) heave; (c) roll.

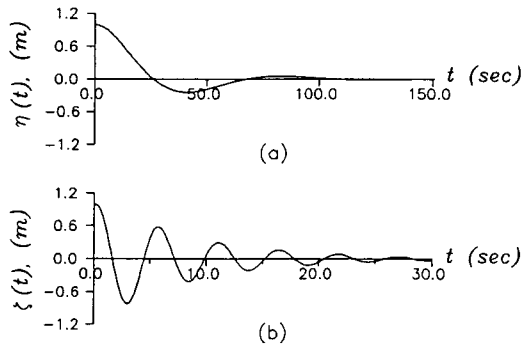


Fig. 7. Time histories of motions after instantaneous releases from the initial displacements of +1.0 m: (a) sway; (b) heave.

시간영역기법에 의하여 정상변위를 계산하여 이를 Newton 기법에 의한 解와 비교하였다. 해류의 形態抵抗係數는 0.5로 하였으며 時間領域解法에서 계류강성메트릭스는 매 시간 스텝마다 계산하였다. 해류의 속도변화에 대한 이들 기법의 차이를 Fig. 8에 도시하였다. 대략적으로 0.5 m/sec 이내에서는 크게 차이가 없으나 해류속도가 증가할수록 차이가 증가한다.

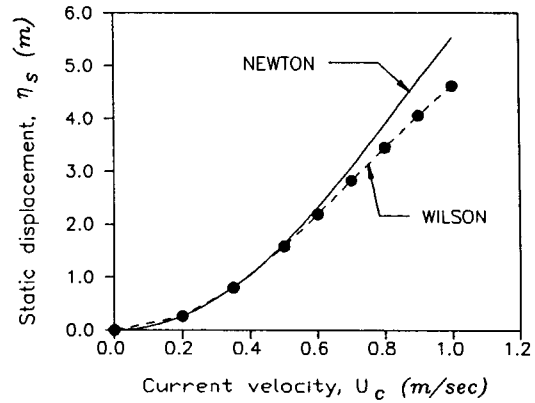


Fig. 8. Comparison of static displacements for the change of current velocity (—: Newton method; ●●●: time domain analysis using Wilson-θ method).

이는 해류속도가 증가할수록 정상변위가 증가하고, 따라서 계류장력의 非線形性이 증가하여 결국 時間領域解法에서 선형 강성 메트릭스의 사용에 의한 誤差의 증가에 기인된 것이다. 이 오차는 앞서 설명한 것처럼, 한 시간 스텝내에서도 정확한 강성메트릭스를 구성하기 위한 반복계산을 수행하면 해소될 것으로 판단된다.

浮體에 대하여 $\gamma=90^\circ$ 로 입사하며 입사파고 2.0 m이고 여러 주기를 갖는 규칙파 조건을 설정하여 式(4)에 의한 周波數領域解法과 時間領域解法을 각기 적용하였다. 시간영역해법에서는 총 시간 스텝을 6000 번(1200 秒)으로 하여 계산된 운동변위의 시계열중 마지막 10개 波形의 평균을 계산하여 변위의 진폭을 정하였다. Fig. 9는 이들 해법의 결과를 보여주며 서로 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 繫留剛性 메트릭스는 浮體가 정지시의 메트릭스를 그대로 이용하였다. 파

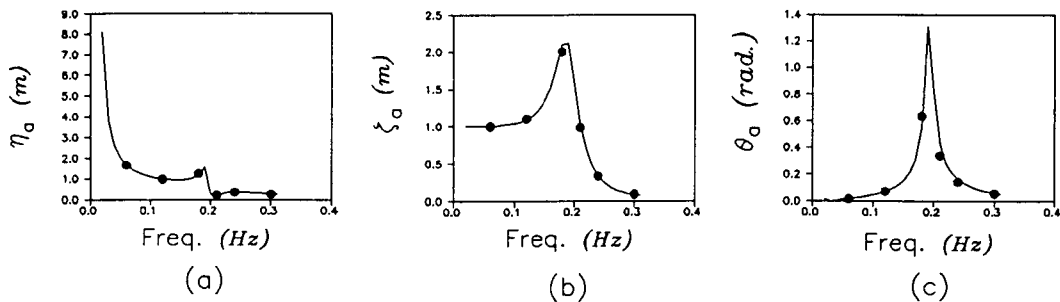


Fig. 9. Comparison of motion amplitudes (—: frequency domain analysis, ●●●: time domain analysis) : (a) sway; (b) heave; (c) roll.

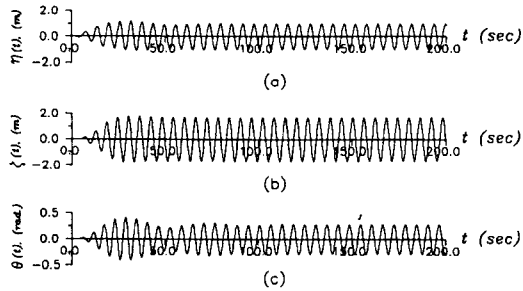


Fig. 10. Time histories of motions calculated from the time domain analysis under a regular wave ($H=2.0$ m, $T=6.0$ sec, $\gamma=90^\circ$): (a) sway; (b) heave; (c) roll.

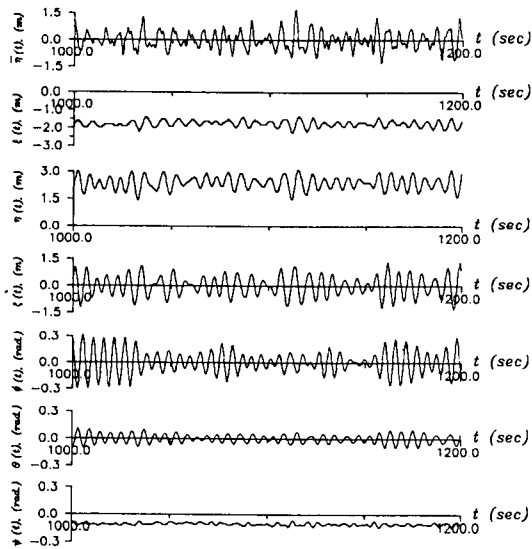


Fig. 11. Time histories of wave profile and 6 d.o.f. motions under the 3-D combination of irregular waves and steady current.

랑에 의한 부체의 변동변위는 사실상 강성메트릭스에 둔감하며, 상기 계산결과가 계류의 非線形성을 고려하여 매 시간 스텝에서 메트릭스를 변화시킨 경우의 결과와 그 차이가 매우 미미함을 확인하였다. Fig. 10은 주기가 6초인 입사파랑에 대한 계산결과이다. 세가지 변위 모두가 계산초기에는 약간의 불규칙성을 보이거나 비교적 단시간내에 안정된 波形을 보여준다. 다만, 본 계산에서는 계산 초기의 수 시간스텝동안 파랑강제력을 零에서 서서히 증가시키는 Slow start 기능을 포함하였다. Slow start 기능은 입사파 조건에 따라 계산초기에 나타나는 상당한 정도의 불규칙성과

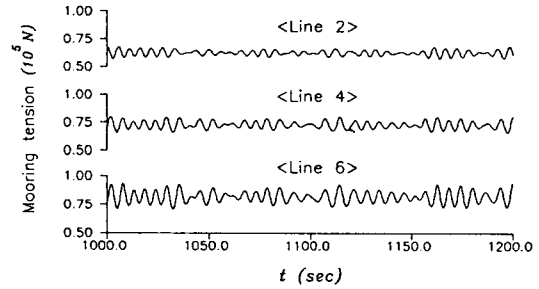


Fig. 12. Time histories of mooring tensions under the 3-D combination of irregular waves and steady current.

이에 따른 계류선의 數值的 파괴를 극복하기 위한 것이다. 아울러, 解의 早期 安定化에도 많은 도움이 되는 것을 확인하였다.

有義波高가 2.0 m이고 尖頭週期가 6.0초인 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 갖는 불규칙파에 대하여 시간영역해법을 적용하였다. 성분파의 갯수는 512개로 하였으며 부체에 대한 入射角度는 $\gamma=60^\circ$ 로 하였다. 또한, 정상외력의 효과를 포함하기 위하여 1.0 m/sec의 海流를 $\beta=135^\circ$ 의 방향으로 설정하였다. 해류에 의한 부체의 抵抗係數는 편의상 x, y방향 공히 0.5로 하였다. Fig. 11은 불규칙파의 입력파형과 계산 결과중의 마지막 200초 구간에 해당하는 부체의 운동변위를 보여준다. 位置變位중에는 Surge와 Sway가, 回轉變位중에는 Yaw가 부체의 정상변위를 포함하고 있음을 알 수 있다. Yaw에 대한 정상 변위는 케티너리 계류의 非線形 효과에 기인된 것으로 판단된다. Roll의 시계열에서는 다소의 Grouping 현상이 발견되는데 이는 입력파랑의 주기가 Roll의 固有週期에 근사하기 때문에 발생한 현상이다(Table 2 참조). Fig. 12는 Table 2에 명시한 계류선 중에서 대표적으로 라인 2, 4, 6의 繫留張力을 도시한 것이다. 각각의 계류장력은 初期張力을 포함하고 있으며 定常變位와 變動變位の 효과를 반영하고 있다. 라인 6의 계류장력이 가장 크며 또한 다른 라인보다 변동계류장력이 가장 탁월함을 알 수 있다.

6. 結 論

파랑 및 定常外力에 의한 繫留浮體의 운동을 결정하기 위한 주파수 영역해법은 부체의 정상변위와 변

동변위를 별도로 계산해야하는 불편이 따를 뿐 아니라, 불규칙과 입력과 非線形 계류시스템에 대해서 적용이 어려운 문제점이 있다. 따라서, 이 방법을 비선형 계류인 케티너리 계류시스템을 일반적으로 채택하는 浮遊式 방파제에 적용하기는 곤란하다. 本稿에서는 規則 또는 不規則波와 定常外力이 3차원적으로 복합되어 있는 外力條件에서 케티너리 계류부체의 6 自由度 운동변위의 시계열을 계산하기 위한 시간영역해법을 제시하였다. 입사파랑의 무차원주파수에 대한 附加質量係數, 그리고 波浪減衰係數와 波浪強制力係數의 주파수에 대한 변화는 特異點分布法을 이용하여 결정하였으며, 이들 계수들을 이용하여 구성되는 時間領域에서의 운동방정식은 Wilson- θ 기법을 이용하여 解를 구하였다. 시간영역해법의 유효성을 입증하기 위하여 그 결과를 定常外力 조건에서는 Newton 방법의 解와, 변동외력 조건에서는 周波數領域解法의 결과와 각각 비교한 결과 이들이 서로 잘 일치함을 확인하였다. 단, 본 연구에서는 비선형 粘性減衰力과 평균 및 變動漂流力에 대한 고려는 제외하였다.

浮遊式 방파제의 설계에서 가장 중요한 요소는 부체의 운동변위 및 계류장력의 最大值이며 이는 불규칙과 입력조건하에서 결정한 변위 및 각 계류장력에 해당하는 時系列의 통계적 분석을 통하여 결정하여야 한다. 파랑에 의한 변동변위 및 변동계류장력을 별도로 고려할 때, 부체의 변동변위는 케티너리 繫留剛性 매트릭스에 민감하지 않기 때문에 계류부체를 線形繫留시스템으로 가정해도 무방하다. 이 경우에는 입력파랑의 Rayleigh 분포특성이 운동변위 및 계류장력에 그대로 적용되며, 이들의 최대값은 상기 시간영역해법에서 결정한 時系列들로부터 용이하게 결정할 수 있다. 정상외력과 非線形 계류장력을 고려한 경우에 대해서 변위 및 계류장력의 통계적 분석을 위한 기법은 별도로 연구되어야 한다.

謝 辭

本 研究는 1992년도 海外 Post-doctor과정(韓國科學財團 후원)으로 미국 오리곤 주립대학교에서 수행한 연구중 一部를 정리한 것입니다.

參考文獻

- 全仁植, 吳榮敏, 李達秀, 1991. 浮遊式 防波堤의 繫留張力 解析, 해양연구, 13(1), 13-20.
- 韓國海洋研究所, 1989. 海岸構造物의 波力吸收를 위한 新 素材 開發 研究(I), BSPG 00077-224-2, 85-87.
- 韓國海洋研究所, 1990. 海岸構造物의 波力吸收를 위한 新 素材 開發 研究(II), BSPG 00108-299-2, 239-253.
- 上田茂, 白石悟, 1981. カテナリ理論による最適繫留索の選 定法および計算圖表, 運輸省 港灣技術研究所 報告書, No. 379.
- 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明, 1982. 船體と海洋構造物の運 動學, 成山堂書店, 201-204.
- 新井信一, 1976. 不規則波中の繫留浮體の運動に關する研究, 日本造船學會 秋季講演會論文集, 142-151.
- Bathe, K., 1982. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp. 508-511.
- Chakrabarti, S.K., 1987. Hydrodynamics of Offshore Structures. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 286-324.
- Choi, Y.R. and Choi, H.S., 1990. Transient Surge Motion of a Moored Ship in Random Waves. *Proc. the First Pacific/Astia Offshore Mechanics Symp.*, Seoul, Korea, pp. 279-285.
- Garrison, C.J., 1978. Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures: Three-dimensional Source Distribution Methods. In O.C. Zienkiewicz ed., *Numerical Methods in Offshore Engineering*, John Wiley & Sons, Chichester, U.K. pp. 87-140.
- Hooft, J.P., 1982. Advanced Dynamics of Marine Structures. John Wiley & Sons, Inc., pp. 267-272.
- Mei, C.C., 1983. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. John Wiley & Sons, Inc., 282-298.
- Ogilvie, T.F., 1964. Recent Progress Toward the Understanding and Prediction of Ship Motions. *5th Symp. on Naval Hydrodynamics*. Office of Naval Research.
- van Oortmerssen, G. and van den Boom, H.J.J., 1986. Computer Simulation of Moored Ship Behavior, *J. Wt-nvy., Port, Coastal, and Oc. Engrg.*, 112(2), pp. 296-308.