

〈講 座〉

海洋構造物에 작용하는 荷重

Fluid Loadings on Offshore Structures

金 泰 麟*
Kim, Tae-In*

- 머리말
- I. 波浪 및 海流에 의한 荷重
 - Morison 式
 - Diffraction 問題
- II. 碎波衝擊荷重
- III. 風荷重
- IV. 雪氷荷重
- 맺는 말

- $\sigma (= 2\pi / T)$: 角周波數
- ω : 粗度
- ϵ : 誤差
- ν : 動粘性計數

머 리 말

해양구조물에 작용하는 하중은 波浪(waves)과 海流(currents), 바람(wind), 雪氷(ice) 및 地震(earthquake) 등에 의해 생성된다. 이들 하중의 상대적인 크기와 구조물에 미치는 영향은 구조물의 種類 및 形態, 그리고 海域의 環境에 따라 다르다. 일반적으로 波浪에 의한 하중이 구조물의 設計 및 動的 舉動을 결정하는 지배적인 요소이다. 대부분의 경우 海流에 의한 하중은 波浪에 의한 하중의 약 10~15% 이하이다. 北極지방의 海域에 건설되는 구조물(arctic gravity platform)의 경우 氷荷重(ice load)이 支配的인 요소가 된다. 바람에 의한 하중은 상대적으로 작으나 때로 乳遊構造物(floating structure)이나 비교적 水深이 깊은 곳에 건설되는 固定構造物(fixed structure)의 舉動에 상당한 영향을 미치는 경우가 있다.

記 號

- A : 구조물의 投影面積
- C_D, C_M, C_L : 波力係水
- D : 구조물의 直徑
- d : 水深
- F, F_D, F_I : 波力
- H : 波高
- $K(=UmT/D)$: Keulegan-Carpenter數
- $k(=2\pi/L)$: 波數(Wave number)
- L : 波長
- M : 모멘트
- P : 壓力
- $Re(=UmD/\nu)$: Reynolds數
- $s(=z+d)$: 海床上 연직거리
- T : 週期
- U : 水平速度
- V : 구조물의 水中體積
- η : 自由水面
- ϕ : 速度 포텐셜
- ρ : 流體密度



金泰麟 1948年 7月 15日生
忠南 燕岐郡 東面 내관리 583
서울 麻浦區 西橋洞 337-11
陸軍士官學校 B.Sc
서울大學校 B.Ec
美 Oregon州立大學 M. Sc, Ph. D/84.3
現 陸軍士官學校 土木科 副教授

이들 하중의 설계조건은 통상 50년~100년에 한번 발생할 수 있는 海上의 條件(sea state)을 고려하여 決定論的(deterministic approach)으로 결정하는 것이 通常이나, 구조물의 運轉시 일어나는 構造的 特性을 파악하기 위하여 平常時 支配的인 海上의 條件을 適用하여 推計學的(stochastic approach) 分析을 並行할 필요가 있다.

1. 波浪 및 海流에 의한 荷重

波浪 및 海流에 의한 하중은 海水가 구조물 周圍를 流動할 때 생기는 水理現象에 따라 두 서로 다른 方法에 따라 決定된다. 海洋構造物의 細部材나 Cable, Pipeline 등과 같이 部材의 直徑(D)이 入射波(incident wave)의 波長(L)보다 현저히 작을 경우에는(D/L < 0.2) 부재의 後面에 생기는 剝離現象(flow separation)이 荷重을 결정하는 지배적인 水理現象이 되며, 이 때 부재에 의한 波浪의 變形은 무시할 수 있다. 이 경우 구조물은 Morison式의 적용領域에 있다. 한편 重力式 구조물이나 乳遊 또는 固定구조물의 主部材와 같이 部材의 直徑이 波長에 비해 상당한 比의 값을 갖는 경우 (D/L > 0.2)에는 入射波는 구조물에 의해 현저히 散亂(scattering), 또는 廻折(diffraction)된다. 이 때 구조물 後面에서의 剝離現象은 Caisson과 같이 모가 나 있는 경우가 아니면 일반적으로 매우 작아서 海水의 流動을 理想流體와

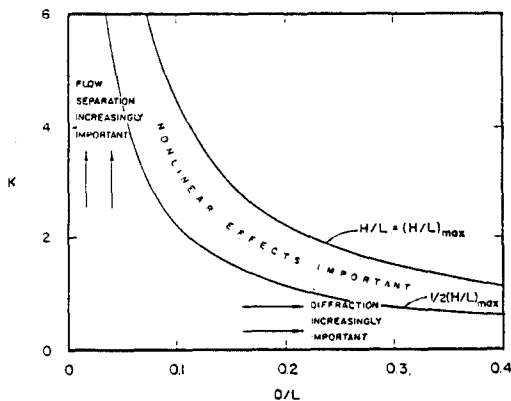


그림1. 波力計算에 있어서 領域의 區分

같이 취급할 수 있다. 이와 같은 구조물은 diffraction 解法의 適用 領域에 있다.

그림 1은 수직 pile의 경우에 대하여 이들 두 領域의 適用範圍를 보여주고 있다. 그림 1에서 K는 $K = U_m T / D$ ($U_m =$ 최대 水平速度, $T =$ 波의 週期)로 定義되는 Keulegan-Carpenter數이다. K와 D/L의 값이 상당히 작은 경우에는 剝離現象이나 Diffraction이 거의 없어 波力은 온전히 入射波에 의한 慣性力만이 지배하며 이 때 구조물에 작용하는 힘은 Froude-Krylov 力으로 알려져 있다. 波形傾斜 H/L이 큰 경우에는 Morison式의 領域이나 diffraction 領域에 있어서 非線型 效果가 중요함을 알 수 있다.

1. Morison式

Morison式의 適用 領域에서 部材에 작용하는 瞬間波力(instantaneous wave force)은 다음과 같이 주어진다.

$$F = F_D + F_I = \frac{1}{2} \rho C_D A |U| U + \rho C_M V \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

여기서 $\rho =$ 海水의 密度, $A =$ 流動方向으로의 部材의 投射面積, $V =$ 部材에 의해 占有된 海水의 體積, $U =$ 流體의 速度이며, 抗力係數(drag coefficient) C_D 와 慣性力 係數(inertial coefficient) C_M 은 實驗的으로 결정되는 값이다. 式(1)은 波力을 定常流(Steady flow)에서의 抗力成分(drag force)과 不定流(Unsteady flow)에서 流體의 減加速에 의한 慣性力 成分(intertial force)의 합으로 나타낼 수 있다는 개념에 근거한 것이다. 이는 理論에 바탕을 둔 것이지만 係數 C_D 및 C_M 은 구조물의 형태와 流動條件에 따라 實驗的으로 決定된다. 式(1)은 1950년에 Berkeley대의 대학원생 Morison 등(1)에 의해 제안된 이후 계속 보완되어 細部材의 波力 計算에 널리 이용되고 있다. 海流가 흐르는 경우 式(1)에서 U는 波流速과 海流速의 Vector 합이 되며 구조물 자체가 움직이는 경우에 U는 구조물과 流體의 相對速度가

된다.

式(1)에서 係數 C_D 및 C_M 의 決定은 波力에 의한 하중의 결정에 대단히 중요하다. 次元解析에 의하면 이들 계수들은 다음과 같은 因子(parameters)들의 函數이다.

$$\{C_D\} = f_1\left(\frac{UmT}{D}, \frac{UmD}{\nu}, \frac{\epsilon}{D}, \frac{t}{T}\right) \quad (2a)$$

$$\{C_M\} = f_2\left(\frac{UmT}{D}, \frac{UmD}{\nu}, \frac{\epsilon}{D}, \frac{t}{T}\right) \quad (2b)$$

여기서 $K = UmT/D$ 는 Keulegan-Carpenter 數이며 $Re = UmD/\nu$ 는 Reynolds 數, $\epsilon/D =$ 相對粗度이다. $K < 10$ 인 범위에서 慣性력이 相對적으로 크고 $K > 15$ 이면 抗力項이 波力을 지배한다. 實驗에서 計測된 波力資料로부터 C_D 및 C_M 을 결정하는 방법에는 세가지가 있다. 곧,

- (1) Fourier 平均法(Fourier average method)
- (2) 最小自乘法(Least-squares method)
- (3) 最大值法(Maximum value method)

이다.

Fourier 平均法은 實測된 波力을 Fourier 成分들의 疊으로 나타내고 한週期동안 平均함으로써 C_D 와 C_M 을 구한다. 最小自乘法은 式(2)로 주어진 理論値와 實測値의 差($\epsilon = F_m - F$)를 한週期동안 最小로 하는 ($\frac{\partial \epsilon^2}{\partial C_D} = 0$, $\frac{\partial \epsilon^2}{\partial C_M} = 0$ 의 條件) C_D 및 C_M 을 구하는 방법이다. 最大值法은 U 가 最大일 때 $\frac{dU}{dt} = 0$, 또한 $\frac{dU}{dt}$ 가 最大일 때 $U = 0$ 이라는 점을 이용하여 각각의 경우의 힘의 實測値로부터 式(1)에서 직접 C_D 및 C_M 을 결정하는 방법이다. Fourier 平均법과 최소자승법에 의해 구한 C_M 의 값은 같고 C_D 의 값은 약간 다르다.

이들 방법들은 波浪의 한週期동안 C_D 및 C_M 의 값이 一定하다고 가정된 것이며 $K < 8$, 또는 $K > 20$ 의 범위에서 滿足하게 적용될 수 있다. 그러나 $8 < K < 20$ 의 범위에서 이들 평균 C_D 및 C_M 의 값은 波力의 개략의 예측치를 제공해 준

다. 이 경우 瞬間 C_D 및 C_M 값의 결정방법은 Sarpkaya(2)에 의해 제안된 바 있다.

일반적으로 C_D 및 C_M 의 결정에 있어서 流體의 속도(U) 및 가속도($\frac{dU}{dt}$)는 적절한 波浪理論(wave theory)으로부터 계산된다. 이들 波浪理論과 그 適用範圍에 대해서는 전년도의 講座(1988년 9월, 12월호)에서 다룬 바 있다.

式(1)로 주어진 Morison式에서 係數 C_D 및 C_M 의 결정을 위해 주로 圓形 단면을 가진 Cylinder部材에 대한 광범위한 研究가 遂行되었다. 이들 연구 결과 제안된 C_D 및 C_M 값들은 實驗條件과 海水의 流動速度(wave kinematics)를 결정하는데 이용된 波浪理論의 差異, 係數들의 결정방법의 차이때문에 서로 다른 값들을 보인다.

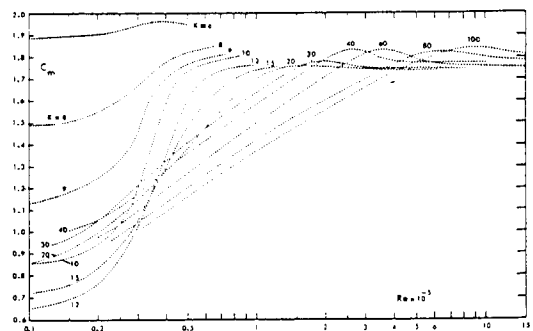
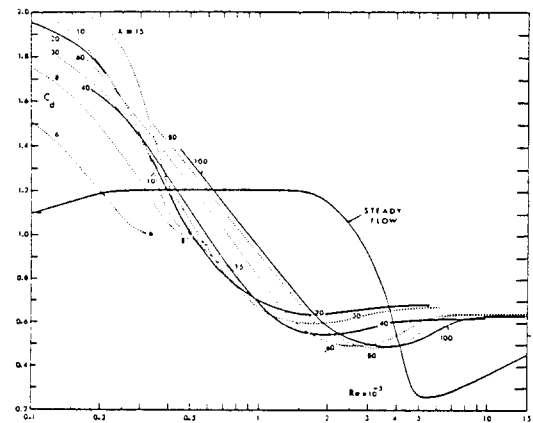


그림 2. Keulegan-carpenter數(K) 및 Reynolds數(Re)에 따른 C_D 및 C_M 값의 變化[Sarpkaya(3)]

그림2는 Sarpkaya(3)가 U字관을 이용하여 광범위한 Re 와 K 의 범위에서 週期的인 水平운동을 하는 流動(oscillatory wave)條件에서 구한 C_D 와 C_M 값의 Re 와 K 값에 따른 변화를 보여주고 있다. 이들 C_D 및 C_M 값은 部材의 表面粗度, 部材의 傾斜, 隣接部材와의 相互간섭效果, 固定境界面과의 隣接效果(wall-proximity effects)등에 따라 변화하며 이에 대한 연구가 수행되어져 오고 있다. 圓形단면을 가진 cylinder이외의 구조물 형태에 관한 연구는 극히 制限되어 球(sphere)形 구조물에 대한 실험이 수행되었을 뿐이다. 係數 C_D 및 C_M 에 관한 실험과 그 결과는 Hogben등(4)에 의해 잘 要約된 바 있다.

式(1)로 주어진 Morison式은 流動의 速度(U) 方向으로 部材에 작용하는 波力으로서 抗力成分 F_D 와 慣性力成分 F_I 는 서로 位相(phase)이 다르기 때문에 最大波力은 각 成分의 最大値의 算術合보다는 작다. 波浪의 進行方向에 수직으로 놓인 水平部材나 傾斜部材의 경우 式(1)로 주어진 水平力외에 水平力과 直각方向으로 作用하는 揚力(Lift force)을 받게 된다. 揚力은 流動方向의 部材後面에 생기는 過流(vortex shedding)모양의 交替에 따라 그 方向이 上下로 바뀌는데 部材의 피로파괴(fatigue failure)의 원인이 된다. 部材에 作用하는 全波力은 式(1)로 주어지는 水平力(in-line force)과 揚力의 vector합이기 때문에 揚力은 下중을 증가시키는 역할을 한다. 揚力은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A U^2 \quad (3)$$

여기서 F_L = 揚力, C_L = 揚力係數(Lift force coefficient)이다. 그림3은 Sarpkaya(3)에 의해 제안된 C_L 값의 K 및 Re 값에 따른 변화를 보여주고 있다.

2. Diffraction 問題

Morison式은 구조물때문에 入射波의 流動場이 변화하지 않는다는 假定에 기초하고 있다. 그러

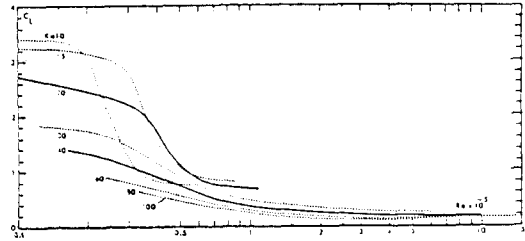


그림3. Keulegan-Carpenter數(K) 및 Reynolds數(Re)에 따른 C_L 값의 變化[Sarpkaya(3)]

나 重力식 Platform이나 貯油탱크, 乳遊式 또는 固定式 platform의 主部材등과 같이 $D/L > 0.2$ 의 값을 갖는 구조물에 있어서는 波浪의 散亂 및 廻折效果를 고려하지 않으면 안된다. 예로 전형적인 中력식 Platform의 低部 직경은 100m, 기둥의 직경은 20m 정도이다.

Diffraction영역에서의 波力計算은 통상 두단계로 이루어진다.

첫 단계는, 구조물 표면에서의 流速이 零이라는 條件을 포함하여 波動의 境界條件을 만족시키는 解를 구한다. 이때 流體의 粘性效果는 무시하며 流動이 非廻轉性(irrotational flow)이라고 보아 流動場은 速度potential로 표시된다. 곧, 全 속도 potential ϕ 는

$$\phi = \phi_i + \phi_s \quad (4)$$

로 쓸 수 있으며 ϕ_i = 入射波에 의한 potential, ϕ_s = 散亂波에 의한 potential이다. 구조물 표면에서의 境界條件으로부터 散亂波 potential ϕ_s 는 다음 條件을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = - \frac{\partial \phi_i}{\partial n} \quad ; \text{海面上 구조물 표면상} \quad (5)$$

다음 단계로, 구해진 速度 potential ϕ 로 부터 구조물에 작용하는 波力을 算定한다. 壓力 p 는 Bernoulli 方程式으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$p = - \rho gz - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad ; \text{海面下 구조물 표면상} \quad (6)$$

平均海面下 깊이 z 에서 구조물에 작용하는 水平力 F_z 및 全모멘트 M 은 다음과 같이 계산된다.

$$F_z = - \int_0^{2\pi} p(\theta, \frac{D}{2}) \frac{D}{2} \cos \theta d\theta \quad (7)$$

$$M = \int_{-d}^0 F_z(z+d)dz \quad (8)$$

式(5)와 自由水面 및 海床에서의 境界條件을 만족시키는 ϕ_s 를 구하는 방법에는 다음 세가지가 있다.

- (1) 解析的 方法(A analytical method)
- (2) 積分方程式 方法(Integral equation method)
- (3) 有限要素法(Finite element method)

解析的 方法은 海面上으로 솟아있는 軸對稱 斷面을 가진 구조물(axysymmetric bodies)에만 적용 가능하다. 圓形 cylinder에 대한 線型 diffraction理論은 1954년 MacCamy와 Fuchs(5)에 의해 확립되었으며 이후 여러 연구자들에 의해서 Stokes 2次波에 대한 非線型 解까지 확장되었다. 그림4는 수직 cylinder에 대한 線型 diffraction 解析 결과 最大水平力의 理論値와 實驗値를 비교하고 있다.

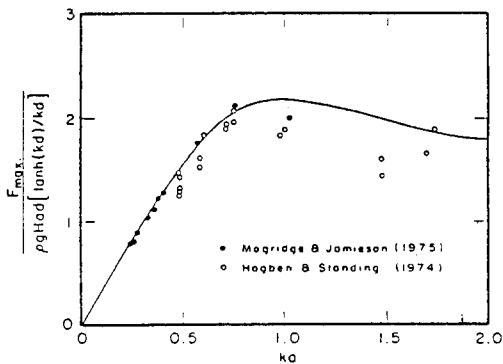


그림4. 線型 diffraction理論에 의한 수직 cylinder 部材에 작용하는 最大水平力과 實驗値의 比較

積分方程式 方法은 보다 일반적인 형태의 구조물에 관한 diffraction문제를 해결하는 技法으로서 “wave source分配法”이라고도 한다. 海面下에 있는 구조물 표면에 연속적으로 단위強度의 point source를 位置시켰을 때 式(2)의 散亂波 potential ϕ_s 가 구조물의 全表面 S에 위치한 source들의 線型합이 되도록 source의 強度를 결정할 수 있다. 곧,

$$\phi_s(X) = \frac{1}{4\pi} \int_S f(\xi) G(x, \xi) ds \quad (9)$$

로 주어지며 여기서 $X(x,y,z)$ 은 임의점, $\xi(\xi, \eta, \xi)$ 는 source point이며, $G(x, \xi)$ 는 Green函數이고 $f(\xi)$ 는 source의 強度이다. Green函數는 流動場내에서 Laplace方程式을 만족시키며, 海床 및 海面의 境界條件을 만족하여야 하며 그러한 Green函數가 John(6)에 의해 구해진 바 있다.

式(9)에서 source強度는 $f(\xi)$ 는 式(9)을 式(5)에 대입하고 source point에서의 singularity에 留意하면 다음과 같은 제2種 Fredholm積分方程式을 얻게 되고 이로부터 구하게 된다.

$$-\frac{1}{2} f(x) + \frac{1}{4\pi} \int_S f(\xi) \frac{\partial G}{\partial n}(x, \xi) ds = - \frac{\partial \phi_i}{\partial n}(x) \quad (10)$$

式(10) 및 式(9)는 통상 海面下 구조물 표면을 有限개의 小面으로 나누고 各面에서 source強度가 一定하다고 보아 積分式을 有限개의 對數式으로 變換하고 電子計算機를 이용하여 구하는 것이 보통이다. wave source法에 의한 다양한 구조물의 diffraction數值解法이 電算 program化 되어 있으며 그 결과가 報告되고 있다.

만약 구조물의 斷面이 垂直軸에 대하여 對稱(vertical axisymmetric)이거나, 任意斷面형의 cylinder가 入射波와 직각으로 無限히 놓여 있거나 (vertical plane problem), 또는 任意斷面형의 垂直 cylinder인 경우에는 (horizontal plane problem) 문제는 2次元으로 簡略化되어 表面積分은 一連의 線積分으로 變換될 수 있다.

Fenton(7)은 對稱 Green函數를 이용하여 효율적으로 수직축 대칭 구조물에 작용하는 波力과 모멘트를 계산한 바 있다. Vertical plane problem은 2次元 Green函數를 이용하여 浮遊防波堤, 또는 繫線으로 결박되었거나 拘束이 없는 浮遊구조물에 의한 反射 및 透過效果를 예측하는 데도 이용하고 있다. 양편이 流動에 노출되어 있는 얇은 不透水性 壁體구조물의 경우에는 source法보다 doublet(dipole)을 分布시킴으로써 source가 가지는 速度의 不連續性을 除去할 수 있다. 이때 式(10)은 제1種 Fredholm方程式이 된다.

有限要素法은 다양한 구조물의 diffraction문제의 解決에 점차 이용도가 증가하고 있다. 구조물 표면을 포함하는 境界值問題의 解는 流動場에서의 流體에너지와 境界面을 통한 일(work)과 관련된 functional이 最小값을 갖도록 결정된다. 3次元 문제에서는 보통 tetrahedral 또는 brick-shape의 要素(element)가 주로 사용되며 速度 potential의 補間函數로는 2次式이 주로 이용된다. 이때 散亂波가 구조물로부터 無限거리방향으로 진행해야 한다는 放射條件(radiation condition)을 만족시켜야 하며, 이는 보통 구조물로부터 상당한 거리에 있는 境界面에 放射條件을 직접 적용시키는 방법, 內部領域(interior region)과 外部領域(exterior region)으로 나누고 境界面에서 matching 시키는 hybrid element법, 최외부 요소를 무한대의 길이로 취하여 逆指數함수의 보간함수를 導入하는 방법 등이 적용된다. Zienkiewicz 등(8)은 hybrid element에 의해 放射條件을 다루었을 때 有限要素法에 의해 복합기둥형 구조물에 작용하는 波力を 계산하였으며, 이를 wave source 法の 결과와 비교한 것은 그림5에 보인 바와같다. 有限要素法의 경우 상당히 큰 mesh를 사용한 경우에도 wave source法에 상당히 근접한 결과를 보여준다.

II. 碎波衝擊荷重(Wave Slamming)

海面上的의 部材에 波浪이 衝擊하여 碎波될 때는 충격으로인한 壓力이 작용하게 된다. 水平 cylin-

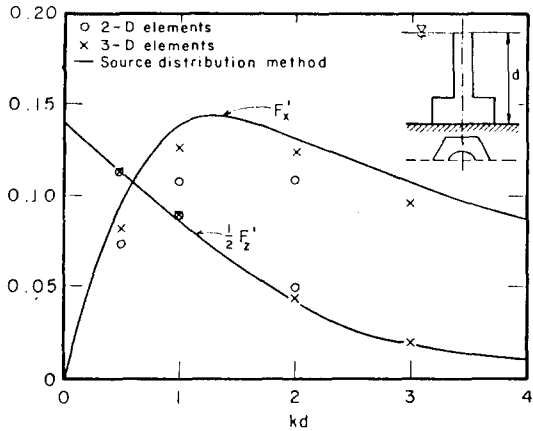


그림 5. 有限要素法에 의한 最大水平力($F_x' = F_x / \frac{1}{2} \rho g H d^2$)과 最大수직력($F_z' = F_z / \frac{1}{2} \rho g H d^2$): source 分配法과의 比較

der 部材에 대하여 단위 길이당의 충격력은 다음과 같이 주어진다.

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_s D W^2 \tag{11}$$

여기서 C_s = 충격계수, D = 部材의 直徑, W = 海面上 流體粒子的 衝擊速度이다. 圓形斷面의 cylinder의 경우 C_s 의 理論的인 값은 π 이나 실제의 平均값은 $C_s = 3.5$ 정도이다.

III. 風荷重(Wind Load)

海面上的의 구조물 부분에 작용하는 風荷重은 통상 다음의 實驗式으로 決定된다.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_h A V^2 \tag{12}$$

여기서 C_h = 形狀係數, A = 구조물의 投射面積, V = 設計風速이다.

IV. 雪水荷重(Ice Load)

北極海에 建設되는 東洋 platform은 주로 重力式이며 여기에 작용하는 주된 荷重은 海流에 의해 浮動되어오는 氷河가 구조물에 충격할 때 생

성된다. 근래는 雪水荷重에 대한 연구가 진행되고 있으며 이에 대하여 讀者는 참고문헌(9)을 參考하기 바란다.

<예제>

波力決定 방법의 理解를 돕기 위하여 淺海區域에 설치된 간단한 platform의 例를 들기로 한다. 潮流와 暴風時 海面上昇을 고려한 設計水深 $d = 12.5\text{m}$ 이고, platform의 主部材(그림 6의 部材 a)의 直徑 $D = 1.8\text{m}$ 이다. 設計波의 波高 $H = 7.0\text{m}$ 이고 週期 $T = 13.0\text{秒}$ 이다. 主部材에 미치는 全水平力 F 와 모멘트 M 은 얼마인가?

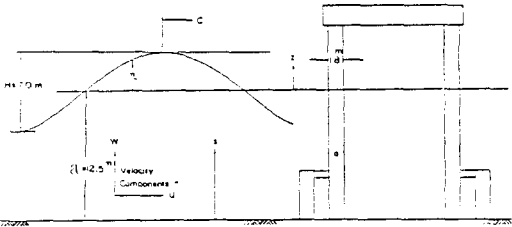


그림 6. 淺海 platform 例題

<해>

주어진 설계조건으로부터 線型波理論에 의해 구조물 지점에서의 波長을 구하면 $L = 136.9\text{m}$ 이다. 따라서 $D/L \ll 0.2$ 이므로 구조물은 Morison 式의 적용범위에 있다. 波數 $k = 0.0459\text{m}^{-1}$, 角週波數 $\sigma = 0.4833\text{sec}^{-1}$ 이다.

線型波理論에 의한 水流의 水平速度와 加速度는 다음과 같이 주어진다.

$$U(s,t) = 2.79 \cosh ks \cos \sigma t \quad (\text{m/s})$$

$$\frac{dU}{dt}(s,t) = -1.35 \cosh ks \sin \sigma t \quad (\text{m/s}^2)$$

設計波長의 波峯이 部材를 통과할 때 水面의 最大높이 $sm = 12.5 + 3.5 = 16.0\text{m}$ 이다. $0 < s < 16.0\text{m}$ 에서 最大水平速度 $U_m(s)$ 의 범위는 $2.79\text{m/s} < U_m < 3.58\text{m/s}$ 이다. 따라서 Keulegan-Carpenter 수와 Reynolds 수의 범위는

$$20.2 \leq K \leq 25.8, \quad 4.37 \times 10^6 \leq Re \leq 5.60 \times 10^6$$

($\nu = 1.15 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)이다.

그림2에서 K 와 Re 의 범위에 해당하는 係數 $C_D = 0.7, C_M = 1.7$ 로 취한다.

式(1)에서 海水의 密度 $\rho = 104\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$ 으로 취하면 部材의 微小길이 ds 에 作用하는 水平力의 성분 dF_D 및 dF_I 는 다음과 같이 주어진다.

$$dF_D(s,t) = \frac{1}{2} \rho C_D dA |U| U$$

$$= \frac{1}{2} \times 104 \times 0.7 \times (1.8 \times ds) \times (2.79)^2 \cosh^2 ks |\cos \sigma t| \cos \sigma t$$

$$= 511 \cosh^2 ks |\cos \sigma t| \cos \sigma t ds$$

$$dF_I(s,t) = \rho C_M dV \frac{dU}{dt}$$

$$= 104 \times 1.7 \times (\frac{1}{4} \times \pi \times 1.8^2 \times ds) (-1.35) \cosh ks \sin \sigma t$$

$$= -607 \cosh ks \sin \sigma t ds$$

따라서 部材 a에 作用하는 全波力의 성분은

$$F_D(t) = 511 |\cos \sigma t| \int_0^{16} \cosh^2 ks ds$$

$$= 9.81 |\cos \sigma t| \cos \sigma t \quad (\text{ton})$$

$$F_I(t) = -607 \sin \sigma t \int_0^{16} \cosh ks ds$$

$$= -10.61 \sin \sigma t \quad (\text{ton})$$

이다. 따라서 全波力은

$$F(t) = F_D(t) + F_I(t)$$

$$= 9.81 |\cos \sigma t| \cos \sigma t - 10.61 \sin \sigma t \quad (\text{ton})$$

으로 주어진다.

그림7은 波浪의 한 週期동안 水平力成分과 全波力의 變化를 보이고 있다. 最大(+)水平力은 $\sigma t = 315^\circ$ (波峯이 部材 a에 접근할 때) 발생하며 그 크기는 $F_{\text{max}} = 12.7\text{ton}$ 이다.

波力成分으로 인해 部材 a에 作用하는 모멘트成分(海床面에 대하여)은 다음과 같이 구해진다.

$$M_D(t) = 511 |\cos \sigma t| \cos \sigma t \int_0^{16} s \cosh^2 ks ds$$

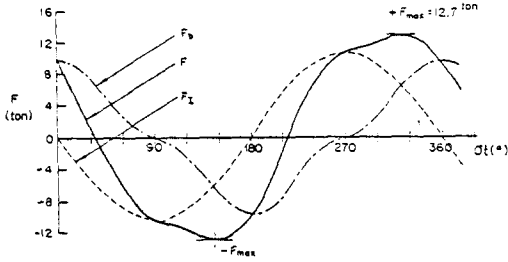


그림7. 部材 "a"에 作用하는 水平力의 時間的 變化

$$= 82.8 | \cos \sigma t | \cos \sigma t \quad (t \cdot m)$$

$$M_I(t) = -607 \sin \sigma t \int_0^{16} s \cosh ks \, ds$$

$$= -88.5 \sin \sigma t \quad (t \cdot m)$$

따라서 全모멘트는

$$M(t) = M_D(t) + M_I(t)$$

$$= 82.8 | \cos \sigma t | \cos \sigma t - 88.5 \sin \sigma t \quad (t \cdot m)$$

로 주어진다. 모멘트成分과 全모멘트의 時間에 따른 變化는 그림7에 보인 傾向과 같고, 最大 (+)모멘트는 $\sigma t = 315^\circ$ 에서 발생하며 그 크기는

$M_{max} = 106.4 \, t \cdot m$ 이다.

V. 맺는말

본 강좌에서는 주로 波濺에 의해서 海洋구조물에 작용하는 波力의 결정방법에 대해 記述하였다. 波浪荷重은 海水가 구조물 주위를 流動할 때 생기는 水理現象에 따라 두가지 다른 방법에 의해 결정된다는 것을 설명하였다. $D/L < 0.2$ 인 細部材의 경우 Morison式에 의해 荷重을 결정하며, 이때 式 (1)에서의 係數 C_D 및 C_M , 그리고 流體速度 U 의 決定方法에 따라 波力의 크기는 상당한 차이를 보일 수 있다. 따라서 設計者는 C_D 및 C_M 의 값과 U 를 決定하는 波浪理論의 選擇에 주의를 기울여야 한다. 본 강좌의 例題에서는 理解를 돕기 위하여 線型波理論을 사용하였으나, 淺海에서 設計波浪을 다룰 때는 Stokes의 高次波理論이나 Stream-function 波理論과 같은 非線型理論이 더욱 실제에 符合되는 합리적인 設計值를 提供해 준다.

참고 문헌

1. Morison, J.R., O'Brien, M.P. Johnson, J.W., and Schaaf, S.A. 1950. "The Forces Exerted by Surface Waves on Piles," *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 189, pp. 149~157.
2. Sarpkaya, 1980, "A Critical Assessment of Morison's Equation," in *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Co., chap. 3.
3. Sarpkaya, T. 1976. "Vortex Shedding and Reseintance in Harmonic Flow about Smooth and Rough Circular Cycinders at High Reynolds Numbers," *Report No. NPS-59SL 76021*, Naval Postgraduate School, Monterey, C.A.
4. Hogben, N., Miller, B.L., Pearle, J.W. and Ward, G., 1977. "Estimation of Fluid Loading on Offshore Structures," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*, Vol. 63, September, pp. 515~562.
5. MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. 1954, "Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory," U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical Memorandum No. 69.
6. John, F. 1950. On the Motion of Floating Bodies, II. *Comm. Pure and Applied Mathematics*, Vol. 3, pp. 45~101.
7. Fenton, J.D. 1978. "Wave Forces on Vertical Bodies of Revolution," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 85, pp. 241~255.
8. Zienkiewicz, O.C., Bettess, P., and Kelly, D. W., 1978. "The Finite Element Method for Determining Fluid Loadings on Rigid Structures. Two- and Three-Dimensional Formulations," In *Numerical Methods in Offshore Engineering*, John Wiley, England, pp. 141~183.
9. Bennett, F.L., and Machemehl, J.L. ed. 1985. "Civil Engineering in the Arctic Offshore," *Proceeding of the Conference Arctic*, 85, ASCE.