

海洋構造物에 作用하는 波浪荷重에 對한 考察

崔 恒 洵*

1. 序 言

海洋構造物에 作用하는 設計外力으로는 波浪荷重, 風力, 潮力 그리고 地震力 등을 열거할 수 있다.

이들중에서 風力은 水面 위 大氣에 노출된 構造物의 部分, 即 cellar deck에서 derrick에까지 作用하므로 모우멘트가 커지며, 特히 semi-submersible이 메인되는 狀態에서는 風力으로 인한 安定性의 저하가 크게 문제 된다. 그러나 操業時 風力 자체는 비록 設計風速이 70kts 이상이지만 공기의 密度가 물에 비하여 대략 1/850 밖에 되지 않아 波浪荷重보다 그 값이 적다.

潮力은 潮流에 起因하는 抗力을 말하는데, 設計潮流의 速度가 보통 2~3kts에 불과하므로 設計外力에서 충분히 무시할 수 있다. 다만 피로파괴가 우려되는 自由表面 근처에 位置한 T- 또는 K-joint에 대한 集中應力計算에서는 이를 고려해 주어야 한다. 왜냐하면 潮力은 潮流의 方向으로만 作用하므로 集中應力을 증가시키는 效果가 있기 때문이다.

한편 地震力은 地震으로 나타나는 海底面의 加速運動에 따라 固定構造物의 경우에는 이로 인하여 構造物이 相對振動을 하게되며 이로부터 慣性力이 外力으로 作用하게 된다. 그리고 부유구조물에는 流體의 動壓이 作用하게 되는데 地震帶가 아닌 海域 또는 水深이 100m 이상인 海域에서는 地震力이 一般적으로 波浪荷重보다 작다.

따라서 보통의 設計條件에서는 外力중에서 波浪荷重이 제일 크게 作用하며 이를 正確하게 推定하는 일이 成功의인 設計를 위한 主要因子가 된다.

이를 수행하기 위하여는 무엇보다 먼저 對象海域에 對한 長期的인 波浪資料를 測定, 수집하여 이를 統計的으로 처리하여야 한다. 이러한 資料를 근거로 한 波浪荷重의 計算方法으로는 소위 말하는 反復周期(return period) 50年 또는 100年에 該當하는 設計波高를 擇하여 波浪荷重이 最大值가 되는 位相에서 이를 計算하는

方法(design wave method)과 어느 一定한 海象狀態(sea state)를 基準으로 波浪荷重의 確率的 分布를 求하고 이를 利用하여 統計的方法으로 設計條件을 決定하는 方法(reliability method)이 있다. 後者의 方法은 波浪資料의 統計的 不確實性을 어느 程度 극복할 수 있는 長點이 있으나, 그 結果의 解析상에 難해한 點이 있고 特히 計算量이 膨대하여 現場에서는 주로 前者의 方法이 채택되어 使用되고 있다. 이 方法을 使用하는 데에도 steel jacket platform이나 gravity platform 같이 海底面에 固定된 構造物의 경우와 semi-submersible 또는 drill ship 같은 부유구조물의 경우에 差異가 있으며, 또한 構造物部材의 크기에 따라 波浪荷重의 特性이 달라진다.

부유구조물에 作用하는 波浪荷重의 計算方法으로 固定式構造物에 널리 使用되고 있는 Morison's formula를 조금 수정하여 利用하는 方法이 있으나 一般적으로 造船工學에서 잘 알려지지 않는 船舶에 對한 波浪荷重計算方法을 使用한다. 따라서 本考察에서는 固定式構造物에 作用하는 波浪荷重의 一般의 特性을 次元解析을 통하여 살피고 荷重條件에 따른 計算法을 紹介하며 이들의 使用上의 문제점과 그 結果가 지니는 意味를 簡略히 論議하고자 한다. 本考察에서는 자세한 數式的 展開에 目的을 두지않고 오히려 基本力學의 觀點에서 問題를 생각하고자 함에 있으므로 좀더 깊은 內容을 理解하려는 讀者는 論文말미에 수록한 參考文獻 [1]과 [2]를 참조하시기 바란다.

2. 波浪荷重의 特性

波에 수반하는 물粒子的 構造物에 對한 相對加速度와 相對速度에 의하여 構造物에는 여러가지 形態의 힘이 作用하게 된다. 크게 보아서 相對加速度에 比例하는 慣性力(inertia force)과 相對速度의 自乘에 比例하는 抗力(drag force)으로 나눌 수 있지만 모든 힘의 成分을 총괄적으로 記述하기란 매우 어려운 일이다.

接受日字: 1981年 4月 22日, 1981年 4月 18日 蔚山에서 열린 本學會의 春季學術講演會에서 發表된 論文임.

* 正會員, 서울大學校工科大學

이러한 波浪荷重의 定性的特性을 究明하기 위하여 海洋構造物의 部材들이 大部分 circular pile로 이루어진 點을 감안하여 아래 그림에 보인 바와 같이 垂直柱狀體에 作用하는 波浪荷重에 對한 차원해석을 수행한다.

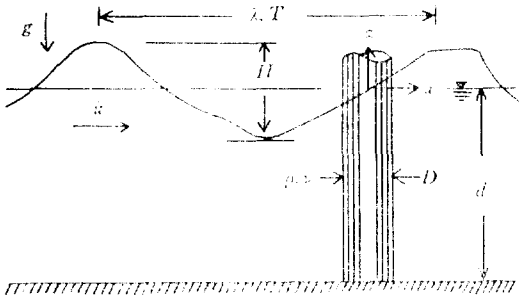


Fig. 1 Schematic illustration of wave loading on a pile

波浪荷重 F 에 영향을 미치는 因子로는 다음과 같이 9개를 選定할 수 있다. 卽, 幾何學的 變數로 水深 d , 波高 H , 波長 λ 그리고 pile의 直徑 D 등 4개를, 運動學的 變數로 波의 周期 T , 물 粒子의 水平方向速度 \dot{u} 와 重力加速度 g 등 3개를 그리고 물의 物質的 性質로 密度 ρ 와 動粘性係數 ν 등 모두 9개가 된다.

波浪荷重 F 는 이들 變數 9個의 函數로 다음과 같이 表示한다.

$$F = f_1(d, H, \lambda, D, T, \dot{u}, g, \rho, \nu) \quad (1)$$

Buckingham의 π -theorem에 따라 다음식을 쉽게 얻을 수 있다.

$$F = f_2(d/\lambda, H/\lambda, \dot{u}D/\nu, \dot{u}T/D, \dot{u}/\sqrt{gD}) \rho \dot{u}^2 D^2 \quad (2)$$

이제 이들 6개의 무차원수를 하나하나 차례대로 고찰하기로 한다.

① d/λ 는 水深과 波長の 比로서 設計波로 擇한 波가 주어진 海域에서 어떠한 流體粒子의 運動을 유발하는 가를 決定하는 因子다. 즉 $d/\lambda > 0.5$ 일 경우 海底面은 流體粒子의 運動에 別다른 影響을 끼치지 못하여 流體粒子는 圓形의 軌道상에서 운동하게 되며, 이는 곧 deep water를 意味하게 된다.

한편 $d/\lambda < 0.5$ 이면 粒子의 運動은 海底面의 影響을 받아 橢圓의 軌道를 그리게 되는 finite-depth water의 問題가 된다.

이는 波의 進行을 記述하는 線型的 dispersion relation

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3)$$

으로 부터 쉽게 이해할 수 있다.

여기서 ω : 원진동수 ($=2\pi/T$)

k : 파수 ($=2\pi/\lambda$)이다.

즉, 식(3)에서 볼 수 있듯이 수심 d 의 效果는 $\tanh kd$ 에 表示되어 있는데, $kd \geq \pi$ 일 때 $\tanh kd \approx 1$ 이 되어 水深 d 의 影響이 없어진다. $k=2\pi/\lambda$ 의 관계로 부터 $d/\lambda \geq 0.5$ 를 얻게 된다.

② H/λ 를 보통 wave steepness라 하며 물 粒子의 運動學的 特性을 支配하는 因子이다. 이는 또한 重力波理論을 展開하는 perturbation parameter가 된다[3].

波浪荷重의 觀點에서는 H/λ 의 最大值를 어떻게 취하느냐에 있다. 왜냐하면 같은 設計 波高에 대하여도 H/λ 의 값에 따라 물 粒子의 速度와 加速度가 거의 선형적으로 증가하고 이는 곧 波浪荷重의 2次포물선적 내지는 선형적 증가를 뜻하기 때문이다.

古典理論에 의하면 深海에서 H/λ 의 最大值는 $1/7$ 로 알려져 있고 有限水深의 경우 $1/7 \tanh kd$ 로 알려져 있다[4].

그러나 實際海象에서는 이처럼 가파른 波가 實測되지 않으며 設計波의 경우 대개 $0.08 < H/\lambda < 0.1$ 範圍의 값을 갖는다.

③ D/λ 는 波長에 對한 실린더 直徑의 相對的 크기를 나타내는 變數로서 波의 進行이 物體가 存在함으로써 얼마만큼 攔되는가를 나타낸다. 즉 D/λ 의 값이 매우 작은 slender body의 경우 波는 物體에 의하여 거의 攔 받지 않고 進行을 계속할 것이며(transmission), 반대로 d/λ 가 어느 값 이상에 달하면 物體주위에서의 波의 攔은 무시할 수 없을 만큼 커질 것이고(reflection) 따라서 파랑하중의 mechanism이 달라져 계산법 또한 이에 對應하는 것이어야 한다.

理想流體라 가정하여 diffraction理論에 의하면 실린더의 단위 수직거리에 作用하는 波浪荷重은 다음과 같다[5]:

$$\Delta F = 2\rho \frac{\lambda^2}{2\pi^2} A\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) \ddot{u} \quad (4)$$

$$\text{여기서 } A\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \left[J_1'\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 + Y_1'\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \right]^{1/2}$$

\ddot{u} = 물 粒子의 加速度

J_1 = 제 1종의 Bessel 函數

Y_1 = 제 2종의 Bessel 函數

이제 amplitude function $A\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$ 의 變化를 살펴기 위하여 $A^*\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \frac{2\lambda}{\pi^2 D} A\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$ 를 도입하고 $\pi D/\lambda$ 에 따른 값을 계산하면 Fig. 2와 같다. 한편 $\pi D/\lambda \ll 1$ 라는 가정에서 $A^*\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$ 의 근사해를 구하면 $A^*\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$

$\cong \frac{\pi D}{\lambda}$ 가 된다[6].

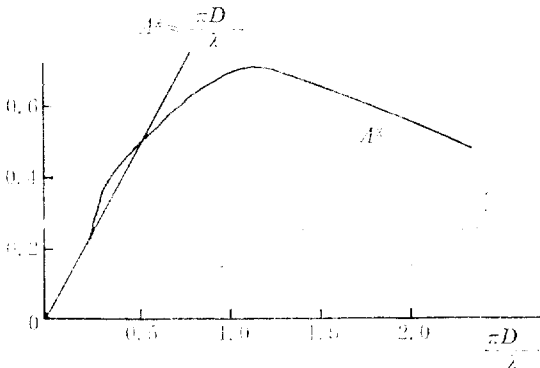


Fig. 2 Approximate and exact values of modified diffraction amplitude function

이 그림에서 쉽게 판별할 수 있듯이 $\frac{\pi D}{\lambda} \approx 0.5$ 까지는 近似解를 利用할 수 있으나 $\pi D/\lambda > 0.5$ 에서는 그러하지 못하다.

다시 말하면 $\frac{D}{\lambda} \leq 0.2$ 에서는 reflection을 고려할 필요가 없으나 $D/\lambda > 0.2$ 인 경우에는 반드시 이를 고려하여야 한다.

④ $\dot{u}D/\nu$ 는 잘 알려져 있는 바와 같이 Reynolds number이며 점성의 효과를 表示하는 무차원수이다. 流體의 粘性에 起因하는 抗力은 마찰저항과 pressure (또는 form) drag으로 大別할 수 있으나 大部分의 海洋構造物의 部材를 이루고 있는 원형실린더에서는 마찰저항은 pressure drag에 비해 무시할 만큼 작다. 均一定常流에 놓인 원형실린더에 作用하는 pressure drag은 많은 實驗을 통하여 잘 알려져 있으나, 波浪에서와 같은 加速流體場의 경우에는 實驗間에 많은 차이를 보이고 있어 아직은 正說이 定立되어 있지 못한 형편이다.

이중에서 Sarpkaya[7]의 結果가 주목을 끌고 있으나 實際에 있어서는 흔히들 定常流에 대한 結果를 利用하고 있다.

Fig.3에 보인 Reynolds number에 따른 抗力係數 (drag coefficient) C_D 를 살펴보면 laminar boundary layer ($Re < 10^5$)에서 박리가 일어나면 抗力係數는 매우 커져 10에서 1.2의 값을 갖고 critical Reynolds number ($4 \sim 5 \times 10^5$)에서는 급격히 감소되어 最少值 대략 0.3까지 이르다가 turbulent boundary layer ($Re > 10^6$)로 넘어가면 Reynolds number에 무관하게 抗力係數는 대략 0.6~0.7이 된다.

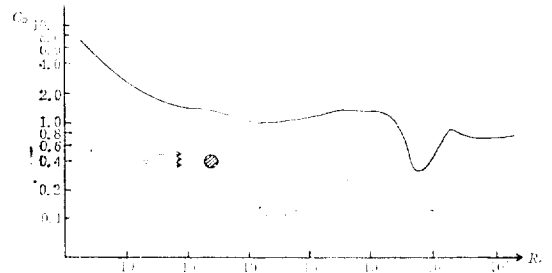


Fig. 3 Drag coefficients as function of the Reynolds number for two-dimensional circular cylinders

한편 流體粒子의 速度는 波의 zero up-crossing과 zero down-crossing에서 零이 되고 波頂과 波底에서 最大值가 되므로 이에 對應되는 Reynolds number의 값은 0에서 $R_{e,max}$ 가 되나 設計時에는 R_e 의 最大值에서 抗力係數를 決定한다.

⑤ $\dot{u}T/D$ 는 Keulegan-Carpenter[2] number (K_C)라 불리며 海洋構造物에 作用하는 波浪荷重研究에 重要한 役割을 한다.

\dot{u} 를 粒子速度의 最大值, T 를 波의 周期라 했으므로 그들의 積 $\dot{u}T$ 는 粒子가 半周期 동안 進行한 거리로 생각할 수 있다. 따라서 Keulegan-Carpenter number는 構造物 寸수에 대한 粒子運動의 相對的 거리라 할 수 있다.

即, $\dot{u}T/D$ 의 값이 크면 粒子는 半周期 사이에 비교적 긴 距離를 進行하게 되어 境界層이 충분히 形成되고 박리가 발생하여 粘性抗力이 크게 作用하게 된다.

反面에 $\dot{u}T/D$ 의 값이 적으면 粒子의 進行거리가 構造物의 寸수에 비해 짧은 경우를 意味하게 된다. 即, 加速運動이 커서 粘性의 效果보다는 慣性力의 效果가 크며 또한 diffraction의 影響을 고려하여야 한다.

다음 章에서 討論할 波浪荷重計算式으로 가장 普遍的으로 使用되고 있는 Morison方程式(식 6)에서 얻어지는 粘性抗力과 慣性力의 각각의 最大值를 이 Keulegan-Carpenter number로 表示하면 다음 式과 같이 된다.

$$\frac{\text{最大粘性抗力}}{\text{最大慣性力}} = \frac{1}{\pi^2} \frac{C_D}{C_M} K_C \quad (5)$$

여기서 C_M 은 慣性力係數(inertia coefficient)를 뜻한다.

問題를 간단히 하기 위하여 $C_D=1$, $C_M=2$ 라 가정하면 抗力과 慣性力의 最大值의 比는 K_C 에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

一般的으로 $K_C \leq 5$ 인 波浪荷重條件에서는 抗力을 무시하고 理想流體라 가정하여 慣性力을 理論的으로 求

할 수 있다. 反面에 $K_c \leq 35$ 일 경우에는 慣性力을 無視하고 抗力만을 고려해도 무방하나 이 경우 理論的 解析方法은 不可能하며 實測 또는 scale effect를 고려하여 模型實驗으로 부터 抗力을 推定해야 한다.

⑥ u/\sqrt{gD} 는 船舶의 抵抗理論에서 잘 알려져 있는 Froude number이며 특히 造波抵抗에 支配的인 影響을 준다.

물론 海洋構造物에도 造波抵抗이 作用하게 되나 그 양이 粘性抗力이나 慣性力에 비해 극히 미미하므로 보통의 경우 무시해도 무방하다[8].

以上 6個의 無次元數로 海洋構造物에 作用하는 波浪荷重의 特性은 一般的으로 考察하였고 다음 章에서는 計算法에 對하여 論하기로 한다.

3. Morison's Formula

Morison's formula는 1950年代 이래 海洋構造物, 특히 部材의 寸수가 비교적 작은 steel jacket platform 같은 固定式 構造物에 作用하는 波浪荷重의 計算式으로 널리 使用되고 있다. 단위수직거리 Δz 에 作用하는 波浪荷重 ΔF 는 다음식으로 表示된다[9].

$$\frac{\Delta F}{\Delta z} = \frac{\rho}{2} C_D A \dot{u} |\dot{u}| + \rho C_M V \ddot{u} \quad (6)$$

여기서 A 는 投影面積, V 는 沒水容積 그리고 \ddot{u} 은 물粒子的 加速度를 의미한다. 따라서 원형실린더의 경우 $A=D$, $V=\frac{\pi D^2}{4}$ 가 된다.

이 식은 이미 古典流體力學에서 잘 알려져 있는 粘性抗力에 대한 項과 慣性力에 대한 項을 선형적으로 결합한 형태에 불과하다. 速度의 절대값 $|\dot{u}|$ 은 抗力의 作用方向이 速度의 方向과 같음을 表示하기 위하여 必要하다. 이 식을 사용하여 波浪荷重을 계산하는 절차는 매우 簡單하다. 即, 設計波로 選定한 波浪條件에 가장 잘 부합되는 波理論을 선택하여(文獻 2參照) 물粒子的 速度 \dot{u} 와 加速度 \ddot{u} 를 계산하고자 하는 部材의 位置에 對應하는 位相에서 求한다. 抗力係數 C_D 와 慣性力係數 C_M 은 實驗 또는 經驗을 밑바탕으로 決定하면 部材의 크기(예를 들어 원형실린더의 直徑 D)에 따라 波浪荷重을 計算할 수 있다.

그러나 이 方程式이 지닌 基本假定은 部材의 寸수 D 가 波長 λ 에 比하여 매우 작아, 波는 構造物에 依해 實質的으로 攔되지 않으며 또한 部材간의 相互影響을 무시할 수 있다는 點이다. 이 假定은 Gulf of Mexico 等地의 海域에 投入된 steel jacket platform에는 별다른 異議없이 받아들일 수 있으나, gravity platform의

경우와 같이 column의 直徑이 20m에 이르는 大型構造物에서는 이 方法의 有効性에 對하여 根本的인 檢討가 이루어져야 한다. 이에 對하여는 다음 章에서 論하기로 한다.

이 方法의 實際應用에서 가장 어려운 點은 C_D 와 C_M 의 값을 어떻게 選定하느냐에 있다. 식(6)에서 쉽게 인지할 수 있듯이 이 두 係數 C_D 와 C_M 의 값은 波浪荷重의 結果에 직접적인 影響을 준다. 따라서 1950年 이래 지금까지도 이 問題에 對한 理論的인 그리고 實驗的인 研究가 海洋工學研究의 重要한 課題로 남아 있다.

많은 模型實驗結果들이 報告되고 있으나 이들간에는 相當한 차이들을 보이고 있으며 Hogben et al.[10]에 이들 結果가 集大成되어 있다. 특히 관심을 끄는 Kim과 Hibbard[11]의 결과는 Australia해안에 實際로 設置된 platform에서 計測한 것으로 이들은 C_D 와 C_M 이 deterministic mechanics에서 이야기하는 것처럼 어느 하나의 特定值가 아니라 probabilistic mechanics의 立場에서 어느 한 平均値를 中心으로 일정한 確率로 分布되어 있다고 주장한다. 即, C_D 와 C_M 共히 비교적 logarithmic normal 分布函數에 근사하게 分布되어 있으며 C_D 의 平均値는 0.61, coefficient of variation은 $V_{C_D}=0.24$ 이며 C_M 의 平均値는 1.20, coefficient of variation은 $V_{C_M}=0.22$ 임을 밝혔다.

한편 海洋構造物을 規制하는 各種 Rule에서도 이 Morison's formula의 使用을 권장하고 있으며 $0.7 \leq C_D \leq 1.5$ 그리고 $1.0 \leq C_M \leq 2.5$ 범위의 값을 인정하고 있어 設計者의 判斷이 매우 重要하다(예를 들어 文獻 12參照).

많은 경우에는 Keulegan-Carpenter의 實驗結果[2]가 좋은 基準이 된다. 이들의 結果는 Fig. 4와 5에 圖示하였다.

實際數値는 式(6)에서 求할 수 있듯이 抗力은 실

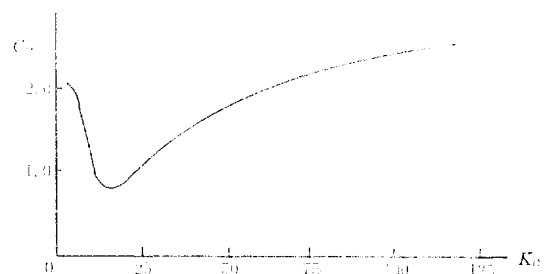


Fig. 4 Variation of drag coefficient of circular cylinders

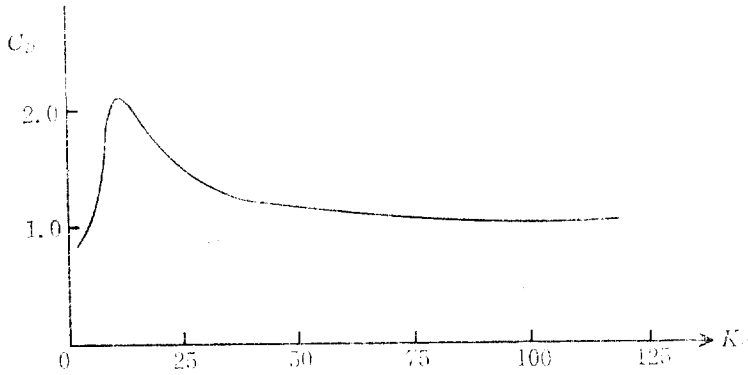


Fig. 5 Variation of inertia coefficient of circular cylinders

린더半徑에 그리고 粒子速度의 自乘에 비해하며, 慣性力은 실린더半徑의 自乘에 그리고 加速度에 비해한다. 따라서 실린더의 半徑이 커지면 相對的으로 慣性力이 重要해지고 비교적 半徑이 작은 실린더부재에서는 抗力이 相對的으로 重要하다.

自由表面 근처에서 粒子의 運動이 지수적으로 증가하기 때문에 특히 抗力이 크게 증가하며 이는 波高 H 가 클수록 더욱 그러하다. 따라서 自由表面 근처에 위치한 T -또는 K -joint의 溶接부위는 이로 인한 피로강도에 대한 검사가 要求된다.

이 章을 맺으며 言及해 두고자 하는 것은 前述한 抗力係數 및 慣性力 係數들의 統計的 分布를 Rule에서도 요즈음 인정하고 있어 이를 이용한 reliability method의 사용이 차츰 많아지고 있으며 이로부터 좀더 事實에 가까운 最適設計를 기할 수 있다는 것이다.

4. Diffraction Effect

Diffraction effect란 加速流體場에 놓인 物體 주위에서의 流體粒子의 加速運動으로 인한 附加된 動流體力의 效果(transmission effect)와 物體表面에서 산란된 流體運動으로 인한 動流體力의 效果(reflection effect)로 大別할 수 있다.

即, 前者는 物體의 크기가 入射波의 波長에 비해 작을 때 支配的인 영향을 발휘하며 後者는 物體의 크기가 波長과 서로 견줄 수 있는 범위에서 그 영향이 크게 나타난다. 그러나 入射波의 波長이 物體의 크기에 비해 아주 작을 때에는 reflection은 크지만 動流體力은 오히려 줄어든다(이를 흔히 hydrodynamic admittance라 부른다).

2章의 ③에서 論議한 바와 같이 $D/\lambda < 0.2$ 인 범위에

서는 reflection을 무시할 수가 있어서 transmission 效果만 고려하여도 무방하다. Transmission 效果는 D/λ 가 아주 작은 경우 物體의 added mass에 流體의 加速度를 곱한 added mass force와 거의 일치한다[13]. 또한 added mass는 物體形象에 따라 그리고 진동수에 따라 변하는 값이지만 $D/\lambda < 0.2$ 의 범위, 그리고 또한 水面下 깊이 沒水된 物體에 대하여는 自由表面의 영향을 무시하고 無限流體場에서의 added mass를 使用하여도 무방하다.

한편 $D/\lambda > 0.2$ 인 경우에는 reflection effect가 매우 重要하므로 別途의 고려가 필요하다. 특히 2章 ⑤에서 討議한 바와 같이 $K_c \leq 5$ 인 경우 慣性力이 支配的으로 作用하므로 reflection에 대한 正確한 究明없는 波浪荷重計算의 신빙성을 기대할 수 없다. 이를 배경으로 소위 말하는 diffraction theory가 발전하게 되었다. 이 경우란 前述한 바와 같이 $K_c \leq 5$ 의 범위이며 粘性 抗力을 무시할 수 있는 범위이므로 流體粒子의 運動이 非回轉性이라는 가정을 덧붙여 粒子의 運動을 속도 포텐셜을 導入하여 기술한다. 이제 전체 포텐셜을 入射波의 運動을 表示하는 incident wave potential Φ_I 와 diffraction potential Φ_D 의 합으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\Phi_T = \Phi_I + \Phi_D \quad (7)$$

Incident wave potential은 使用者의 決定에 따라 理論으로부터 그의 解析的 表現式을 쉽게 얻을 수 있다. 한편 diffraction potential Φ_D 는 연속방정식인 Laplace 방정식의 解로서 다음의 境界條件들을 만족시켜야 한다.

$$\begin{aligned} \text{① 自由表面境界條件: } & \Phi_{zz} + 2F\Phi_z \cdot F\Phi_z \\ & + \frac{1}{2}F(\Phi_z \cdot F\Phi) + g\Phi_z = 0 \text{ on } y = \zeta \end{aligned} \quad (8)$$

② 海底面條件: $\Phi_z(x, y, -d, t) = 0$ (9)

③ radiation condition: 波는 物體밖의 방향
으로 전파하며 그 크기는 水面上의 거리 R
에 대하여 $O(R^{-1/2})$ 의 관계로 감소한다. (10)

④ 物體表面境界條件: $\frac{\partial}{\partial n}(\Phi_I + \Phi_D) = 0$ (11)

여기서 n 은 物體表面에서의 法線方向으로의 단위벡
타를 뜻한다.

임의의 형상을 갖는 物體에 대한 問題는 Green定
理를 利用하여 數值的으로 求하게 된다. 即, 선형화시
킨 自由表面境界條件과 式 (9)와 (10)을 만족하는 一
定세기의 pulsating source를 物體表面에 分布시키고
그 세기는 나머지 境界條件 (11)이 만족되도록 近似的
으로 求하는 方法이다[14].

海洋構造物의 部材로 많이 使用되는 垂直圓형실린더
에 대한 問題는 아래와 같이 비교적 간단하게 解析의
인 方法으로 解를 얻을 수 있다[5].

入射波를 선형중력파라 가정하면 Fourier series로 전
개된 Φ_I 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\Phi_I = -\frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh k(x+d)}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{\infty} (i)^m J_m(kr) e^{i\alpha\theta} \quad (12)$$

여기서 입사파는 양의 x 방향으로 進行한다고 가정
했으며 自由表面上에서의 거리 R 과 양의 x 軸과 이루
는 角이 θ 이다. 그리고 J_m 은 m -order의 第一種 Bessel
函數를 표시한다.

이제 Φ_D 를 다음과 같은 表現式으로 나타낼 수 있다
고 가정한다.

$$\Phi_D = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m (i)^m H_m^{(1)}(kr) e^{i\alpha\theta} \quad (13)$$

여기서 $H_m^{(1)}$ 은 第一種의 Hankel 函數이며 A_m 은 미
지의 계수이다.

式(13)은 선형화된 자유표면 경계조건 그리고 境界
條件 (9)와 (10)을 만족하는 Laplace方程式의 解이다.
미지의 계수 A_m 은 아직 式(13)이 만족되지 못하고 있
는 경계조건식(11)이 실린더의 表面 $r=a$ (여기서 a 는
실린더의 半徑)에서 만족되도록 決定한다. 이로부터

간단히 $A_m = \frac{J'_m(ka)}{H_m^{(1)'}(ka)}$ 라는 解를 얻을 수 있다.

이제 Bernoulli 方程式

$$-p = \rho\Phi_I + \rho\frac{\nabla^2}{2}\Phi \cdot \nabla\Phi + \rho g z \quad (14)$$

으로부터 流體의 壓力을 計算할 수 있는데, 波로 因
한 流動에서는 式 (14)의 오른쪽 項중에서 첫項이 제
일 큰 값을 갖는다. 따라서 선형이론에서의 動流體壓
力은 $p \approx -\rho\Phi_I$ 로 간단하게 계산된다.

이 관계를 이용하여 단위수직거리에 作用하는 慣性
力은 다음의 積分으로 얻을 수 있다.

$$\Delta F = \rho a \int_0^{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} (\Phi_I + \Phi_D) \cos\theta d\theta \quad (15)$$

$$= \pi a \rho g H \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \frac{(J_1 Y_1' - J_1' Y_1)}{\sqrt{J_1'^2 + Y_1'^2}} \Big|_{ka} \cos(\omega t - \alpha)$$

이로 부터 첫 項은 incident wave potential Φ_I 의 그
리고 둘째 項은 diffraction potential의 結果임을 쉽게
파악할 수 있다. 前者를 Froude-Krylov force라 하며,
이는 물체가 存在하지 않고 波가 아무런 교란없이 進
行할 때 물체표면에 作用하는 힘을 뜻한다. 한편 後
者는 一般的으로 diffraction force라 하며 ka 가 작을 때
는 Froude-Krylov force와 같은 크기가 된다.

한편 ka 가 커지면서 reflection 效果가 나타나 diffr-
action force가 Froude-Krylov force보다 작아진다.

이는 固定構造物에 作用하는 diffraction force의 水
平方向 成分의 特性이며 垂直方向으로 作用하는 diffrac-
tion force는 ka 가 작을 때 一般的으로 Froude-Krylov
force와 π 만큼의 位相差를 보여 Froude-Krylov force
와 반대부호를 갖게된다.

어쨌든 抗力을 무시할 수 있는 波浪荷重條件에서는
上述한 方法으로 diffraction force를 얻어 Froude-
Krylov force와 합쳐 慣性力을 얻을 수 있지만 抗力을
무시할 수 없는 경우에는 波浪荷重을 正確히 推定하기
가 매우 곤란하다.

Chakrabarti [15]는 이 경우에 式(6)으로 表示된
Morison's formula를 利用하되 慣性力係數의 개념을
확충하여 inertia coefficient C_M 代身 diffraction coeffi-
cient C_R 을 使用함이 타당하다고 주장한다. 即 式(15)
로 얻은 慣性力을 Froude-Krylov force로 나는 값을
diffraction coefficient C_R 로 定義하여 Morison's formula
를 계속 그대로 使用하자는 뜻이다. 아직 이 주장을
立證하는 結果는 發表되고 있지 않으나 實際에서는 혼
히들 이 方法을 利用하고 있다.

5. 結 言

波浪荷重은 構造物의 種類, 크기 그리고 波浪條件에

따라 달라지지만 100m 이상의 水深에 設置된 海洋構造物인 경우 보통 甲板面積 5,000m²에 이르고 設計荷重은 지금까지 여타 工學에서 經驗해 보지 못한 수심MN에 이른다. 따라서 지금까지는 진정한 意味의 最適設計를 시도하지 못하였으나 그 사이 많은 경험이 蓄積되어 이제는 최적設計를 수행할 수 있는 단계에 도달하고 있다. 이를 위한 첫 과정은 餘하히 波浪荷重을 正確히 推定하느냐의 問題이다.

이를 위하여는 우선 充分한 波浪資料와 合理的인 處理方法, 그리고 事實을 충분히 반영할 수 있는 波理論의 開發과 定立이 前提되어야 하지만 本考察에서 살펴본 바와 같이 波浪荷重의 根本的인 特性을 규명하는 研究가 또한 이루어져야 한다.

이러한 基本的인 問題가 解決되어야만 비로서 이에 對應하는 合理的인 計算方法이 도출되어진다.

다른 모든 力學問題와 같이 이를 성취하기 위하여는 理論的인 研究는 물론, 造波器가 구비된 수조에서의 實驗研究 그리고 또한 實際로 설치된 구조물에서의 實測이 이루어져야 한다. 이 分野의 研究에 있어서 아직 초보단계에 있는 우리 實情을 감안하여 本小考에서는 미비하나마 波浪荷重에 대한 各략적인 討論을 하여 문제를 제기시키고 이에 對한 관심을 야기시키고자 한다.

參 考 文 獻

[1] Hogben, N.: Fluid loading on offshore structures, a state of art appraisal, wave loads., Maritime Techn. Monogr. Royal Inst. Naval Arch., 1974.
 [2] Keulegan, G.H., Carpenter, L.H.: Forces on cylinders and plates in on oscillating fluid., Journ. Research Nat. Bureau Stand., Vol. 60, No. 5, 1958, pp. 423~440.
 [3] 崔恒洵: 海洋波의 特性과 그 記術에 關한 考察., 大韓造船學會誌, 第17卷 2號, 1980, pp. 43~47.
 [4] Bretschneider, C.L.: Water loads on fixed, rigid marine structures., Handbook of ocean and underwater engineering, edited by Myers, J.J. et al., McGraw-Hill Book Co., 1969, pp. 12.

24~12. 56.
 [5] MacCamy, R.C, Fuchs, R.A.: Wave forces on piles; a diffraction theory., U.S. Army Corps Engrs. Beach Erosion Board, Techn. Memo. 69, 1954.
 [6] Choi, H.S.: Stochastisches Schwingungsverhalten von Gravitations-plattformen unter Berücksichtigung der Tragwerk-Wellen-Wechselwirkung., TUMünchen, 1979.
 [7] Sarpkaya, T.: Vortex shedding and resistance flow about smooth and rough cylinders., Proc. BOSS'76, Trondheim, 1976, Vol. 1, pp. 220~235.
 [8] Hogben, N., Standing, R.G.: Experience in computing wave loads on large bodies, 7th OTC, Houston, 1975, pp. 413~424.
 [9] Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Schaaf, S.A.: The force exerted by surface waves on piles., Petr. Trans. Amer. Inst. Min. Engrs., Vol. 189, 1950, pp. 149~154.
 [10] Hogben, N., Miller, B.L., Searle, J.W., Ward, G.: Estimation of fluid loading on offshore structures., Proc. Inst. Civil Eng., Part2, Vol. 63, 1977, pp. 515-562.
 [11] Kim, Y.Y., Hibbard, H.C.: Analysis of simultaneous wave force and water particle velocity measurements., 7th OTC, Houston, 1975, pp. 461~467.
 [12] Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore Units, Det Norske Veritas, 1975.
 [13] 朴贊旭, 崔恒洵: 規則波에 놓인 球의 水平運動에 對한 解析., 大韓造船學會誌, 第18卷 1號, 1981.
 [14] Frank, W.: Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids, NSRDC Report 2375, 1967.
 [15] Chakrabarti, S. and Tam, W.A.: Gross and local wave loads on a large vertical cylinder-theory and experiment., 5th OTC, Houston, 1973.

科學技術者倫理要綱

現代的 國家發展에 미치는 科學技術者의 役割의 重要性에 비추어 우리들 科學技術者는 우리들의 行動의 指針이 될 倫理要綱을 아래와 같이 制定하고 힘써 이를 지킴으로써 祖國의 近代化에 이바지할 것을 깊이 銘心한다.

1. 우리들 科學技術者는 모든 일을 最大限으로 誠實하고 公正하게 處理하여야 한다.
2. 우리들 科學技術者는 恒常 專門家로서의 權威를 維持하도록 努力하며 自己가 所屬하는 職場 또는 團體의 名譽를 昂揚하여야 한다.
3. 우리들 科學技術者는 法律과 公共福利에 反하는 어떠한 職分에도 從事하여서는 안되며, 의아스러운 企業體에 自己의 名稱을 빌려주는 것을 拒絕하여야 한다.
4. 우리들 科學技術者는 依賴人이나 雇傭主로부터 取得 또는 그로 因해 얻어진 科學資料나 情報에 對하여는 秘密을 지켜야 한다. 또는 他人의 資料情報을 引用할 때는 그 出處를 밝혀야 한다.
5. 우리들 科學技術者는 誇張 및 無根한 發言과 非權威的 또 眩惑的 宣傳을 삼가야 하며 또 이를 制止하여야 한다. 特히 他人의 利害에 關係되는 評價報告 및 發言에는 慎重을 期하여야 한다.
6. 우리들 科學技術者는 어떠한 研究가 그 依賴者에게 利益이 되지 않음을 아는 경우에는 이를 미리 알리지 아니하고는 어떠한 報酬를 위한 研究도 擔當하지 않는다.
7. 우리들 科學技術者는 祖國의 科學技術의 發展을 위하여 最大限으로 奉仕精神을 發揮하여야 하며 또한 이를 위한 應分의 物質的 協助을 아껴서는 안 된다.