

해상관측시설을 위한 파랑하중과 계류계 해석
- 모래중에 묻힌 원형파일의 수평력 추정방법을 중심으로 -

윤길수⁽¹⁾, 김용직⁽²⁾, 김동준⁽²⁾, 강신영⁽³⁾

**Analysis of Wave Load and Mooring System
for Ocean Monitoring Facilities**

- About an estimation method for horizontal force of circular pile in sand -
by

Gil Su Yoon⁽¹⁾, Yong Jig Kim⁽²⁾, Dong Joon Kim⁽²⁾
and Sin Young Kang⁽³⁾

요약

해양관측시설은 고정식과 부유식으로 나뉘는데 본 고에서는 부유식 해상관측시설과 관련된 파랑하중 및 계류계에 대해 다루었다. 부유식 해상관측시설의 일 예에 대해 운동계산과 표류력 계산을 수행하고 고찰하였다. 또한 계류앵커의 일종인 원형 파일앵커가 수평력을 받는 경우의 모형실험과 파주력 계산을 위한 프로그램을 작성하여 그 계산결과와 비교 고찰하였다. SCUBA 활동으로 설치가능한 파일앵커의 파주력 추정에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract

Ocean monitoring facilities are divided into two types, fixed type and floating type. This paper deals with wave load calculation and mooring system for a floating monitoring facility. Wave load and drift forces are calculated for an example case of floating monitoring buoy. To enlarge holding power of anchor, circular pile model test was performed. A program for horizontal force of circular pile in sand was made and the calculated result showed fairly good agreement with the result of model test. It is expected that this method will provide good estimation for the holding power of the prototype of circular pile anchor which is relied upon SCUBA activity for installation.

Keywords: Wave load, Drift force, Circular pile, Model test, Sand, Horizontal force

(1) 정회원, 부경대학교 해양공학부

(2) 정회원, 부경대학교 선박공학과

(3) 정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

1. 서론

해양오염의 중요원인 중의 하나인 누유와 관련하여 해상관측자료는 대단히 중요하며 그 관측시설이 필수적이다. 해상관측시설은 고정식과 부유식 두가지로 나눌 수 있다. 고정식 해상관측시설은 주로 해안에 접해있으므로 파력 계산시 천수변형된 입사파에 대해 Morison 식으로 계산된다. 해상에 떠있는 부유식 해상관측시설에 미치는 파랑하중과 표류력 계산은 3차원 특이점 분포법에 의해 계산하여야 한다.

한편, 해상의 누유사고는 태풍과 같은 악천후에 수중의 압초에 좌초되어 일어나는 경우가 허다하므로 태풍시에 해황에 대한 자료가 중요하다. 태풍시의 해황에 대한 자료를 얻기 위해서는 현장에 설치되어 있는 부유식 해상관측시설을 통해 얻어지는 관측자료가 가장 중요하게 된다. 태풍시 해상에 떠있는 해상관측시설을 유지하기 위해서는 외력을 견딜 수 있는 계류계와 그 힘을 해저바닥의 저항력으로 견디어야만 한다. 따라서 계류된 해상관측시설을 포함한 다양한 해양구조물들을 위해서 파주력이 큰 앵커의 개발은 단순히 위치 유지에 그치지 않고 해양오염 방지 차원에서도 중요하다고 생각된다.

따라서 본 고에서는 파주력이 큰 앵커를 제안하기 위한 기본실험인 수평력을 받는 원형 pile 모형실험을 수행하여 얻어진 실험결과를 수치해석 방법과 비교, 분석함으로써 그 유용성에 대하여 논하고자 한다.

2. 부유식 해상관측시설의 운동성능

해상의 누유사고는 태풍과 같은 악천후에 수중의 압초에 좌초되어 일어나는 경우가 허다하므로 태풍시에 해황에 대한 자료가 중요하다. 태풍시의 해황에 대한 자료를 얻기 위해서는 현장에 설치되어 있는 부유식 해상관측시설을 통해 얻어지는 관측자료가 가장 중요하게 된다. 평상시에는 물론 태풍시에도 해상에 떠있는 해상관측시설을 이용하여 관측하기 위해서는 해상관측시설의 자체운동이 작아야만 한다. 그러기 위해서는 설치해역의 우월 파랑주파수와 의 공진을 피해야 하며

또한 원하는 곳에 유지하기 위해서는 외력을 견딜 수 있는 계류계와 그 힘을 해저바닥의 저항력으로 견디어야만 한다. 따라서 파주력이 큰 앵커의 개발은 부유식 해상관측시설을 위해서는 물론 해양오염 방지 차원에서도 중요하다. 부유식 해상관측시설을 통하여 전달되는 파력을 비롯한 외력을 계류계로 전달된 힘은 앵커에서 지탱하여 주어야만 하는데 본 논문에서는 파주력이 큰 앵커를 제안하기 위해 원형 pile 모형실험을 수행하고자 한다.

2.1 원통형 해상관측시설의 운동성능 및 표류력 산정

부유식 해상관측시설들은 대부분 그 형상이 수직 원통형 또는 원반형, 구형 등이므로 2차원 해석법으로는 신뢰성을 기대할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 이를 위한 3차원 해석법을 개발·적용하였다. 경계치문제(boundary value problem)를 포텐셜 유동(potential flow)의 가정하에 정식화하였고, 그 수치해를 Green 적분방정식(Green integral equation) 해법에 기초하여 구하는 전산 프로그램을 작성하였다. 이 방법은 부유체의 표면에 Green 함수(Wehausen et al., 1960)로 표현되는 특이점(singularity)을 분포하여 파 기진력과 동유체력계수들(부가질량 및 감쇠력계수)을 구하고, 이를 이용한 운동방정식을 풀어 운동응답을 구하는 방법이다. 특이점으로는 소오스와 더브렛을 함께 사용하였으며, 판요소로 3각형 요소와 4각형 요소를 병행 사용하였다. 불규칙파수(irregular frequency) 현상을 제거하기 위해 개발된 적분방정식 해법을 적용하였으며, 시간평균 표류력의 계산은 원인별 성분파악이 가능한 물체표면 직접적분법을 사용하였다.

개발된 전산 프로그램의 검증을 위해 비교자료가 있는 구형 부유체에 대한 계산이 수행되었고, 이에 대한 계산을 통해 개발된 프로그램으로부터 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 전산 프로그램은 다양한 형식의 해상관측용 부유체들(Berteaux, 1976)에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 실제시설에

대한 적용예로서 직경 2.6m 홀수 3.77m인 원통형 해상관측용 부이에 대한 계산을 수행하였다. 그림1에는 이 부이의 개형이 보여지고 있다. 이 부이를 해상에 계류하고 관측용 장비들을 탑재하면 필요한 해상자료를 얻을 수 있다. 그림2에는 이 부이의 수면아래 면요소 분할이 보여지고 있고(444개의 요소로 분할), 표1에는 계산에 사용된 주요요목이 보여지고 있다.

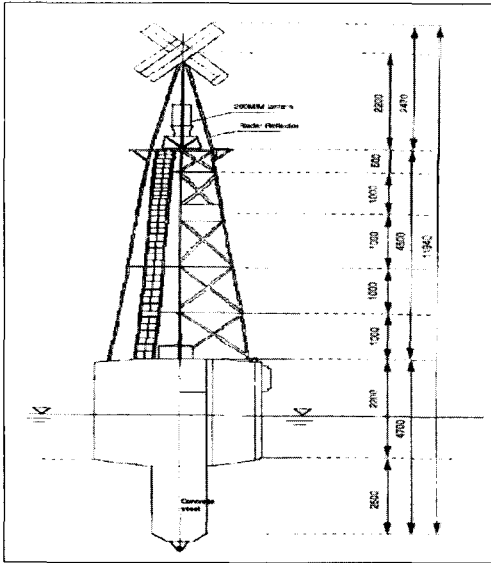


Fig. 1 Profile of the floating buoy for ocean monitoring.

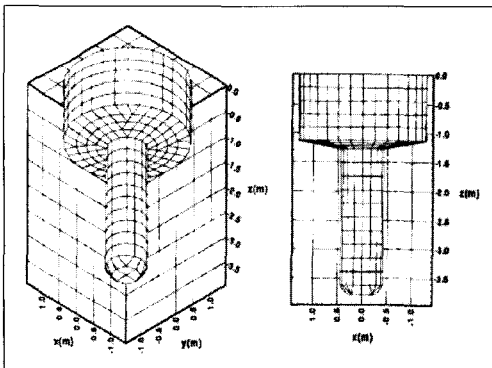


Fig. 2 Facet representation of the floating buoy (N=444)

Table 1. Principal particulars of the floating buoy

| Particulars | Values |
|------------------------------------|--------------------|
| Diameter (upper) | 2.6 m |
| Diameter (lower) | 0.85 m |
| Draft | 3.77 m |
| Displaced volume | 7.5 m ³ |
| Coordinate of CG(Z _G) | -0.87 m |
| Coordinate of CB(Z _B) | -0.87 m |
| Gyradius of pitch | 1.5 m |

계류계는 유연성이 커서 입사파 주기에 해당하는 고주파수 운동에는 영향을 주지 않는다고 가정하였고, 점성에 의한 등가 선형감쇠계수는 운동진폭에 비례하므로 이에 의한 감쇠력들은 운동진폭의 2승에 비례하는 다음과 같은 비선형 감쇠력으로 가정하였다.

$$B_{11}^* = 2.57 (Kg/m) * \omega | \xi_1 | \quad (1)$$

$$B_{33}^* = 0.0268 (Kg/m) * \omega | \xi_3 | \quad (2)$$

$$B_{55}^* = 15.2 (Kg \cdot m^2) * \omega | \xi_5 | \quad (3)$$

여기서 B_{11} , B_{33} , B_{55} 는 각각 surge, heave, roll 의 감쇠계수이며 ω 는 파의 각속도, ξ_1 , ξ_3 , ξ_5 는 각각 surge, heave, roll 진폭을 뜻한다.

따라서 이를 고려한 운동방정식은 반복법(iteration method)에 의해 해가 계산되었다. 이 부이의 형상이 축대칭이므로 입사파의 방향에 따른 차이는 없고, 계산에서도 편의상 입사각 γ 를 0°로 취하여 전후동요(surge), 상하동요(heave), 종동요(pitch)가 나타나도록 하였다.

그림 R_b3에는 전후동요의 계산결과가 보여지고 있다. 는 부이 물체(상부)의 반경을 나타낸다. 수심 h 를 무한수심, 30m, 20m, 10m인 네가지 경우로 하여 계산하였고, 파수가 매우 낮은 영역에서만 수심의 영향이 나타남을 볼 수 있다.

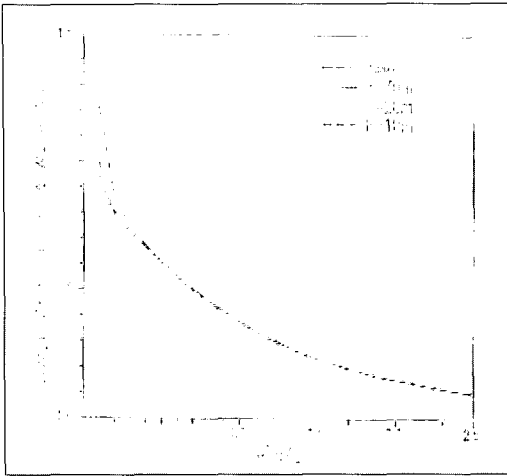


Fig. 3 Surge responses of the floating buoy

이 전후동요는 복원력이 없으므로 공진점이 없고, 저주파수에서는 동적효과가 없어 수면에서의 유체입자 운동과 같은 운동을 하게되며 고주파수에서는 파장이 짧아지고 물체 관성력이 커지므로 운동이 줄어드는 일반적 경향이 잘 나타나고 있다. 저주파수 영역에서 수심이 얇을 때 전후동요 진폭이 파 진폭보다 큰 것은 천수효과로 유체입자의 운동이 수직방향 진폭(파진폭) 보다 수평방향 진폭이 크기 때문이다.

그림 4에는 상하동요의 계산결과가 보여지고 있고, 저주파수 영역에서도 수심의 영향이 거의 없음을 볼 수 있다.

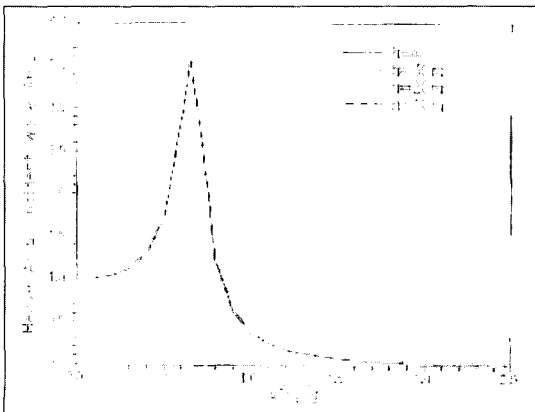
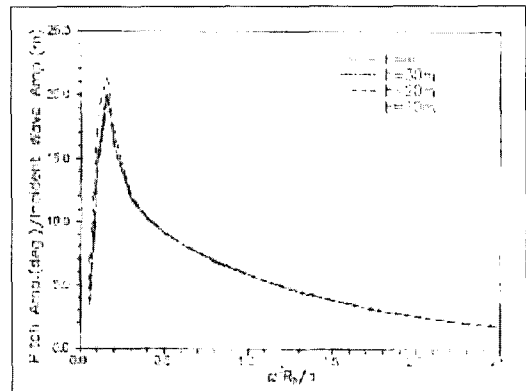


Fig. 4 Heave responses of the floating buoy

저주파수 영역에서 물체운동이 거의 정적인 상태로 일어나므로 상하동요 진폭이 입사파 진폭과 같음을 볼 수 있고, 고주파수 영역에서는 운동이 급격히 줄어듦을 볼 수 있다. 중간영역, 즉 $\omega^2 R_b/g$ 가 0.65인 부근에서 공진현상이 나타남을 볼 수 있는데, 이는 상하동요가 복원력을 갖고 있으므로 고유운동(natural motion)이 존재하고 이 고유운동과 파의 강제력이 공진을 일으키기 때문이다.

그림5에는 중동요의 계산결과가 보여지고 있다. 저주파수 영역에서 수심에 따른 동요의 차이를 볼 수 있는데, 수심이 얇을 때 중동요가 큰 것은 같은 주파수라도 파장이 짧아져 파 기울기가



커지기 때문이다.

Fig. 5 Pitch responses of the floating buoy

중동요의 경우에도 복원력이 존재하므로 공진현상이 발생하는데, 이 부이의 경우 GM이 비교적 작아서 (약 0.3m) $\omega^2 R_b/g = 0.15$ 부근에서 공진현상이 발생하고 있다.

그림 6에는 수평방향 시간평균 표류력이 보여지고 있다. 이 표류력에는 수심에 따른 영향이 거의 보이지 않는데, 이는 수심의 영향이 나타날 수 있는 저주파수 영역에서 물체와 파와의 상대운동이 없는 준정적인 운동을 하므로 표류력이 발생하지 않기 때문이다. $\omega^2 R_b/g = 0.7$ 부근 (2.4초)에서 최대의 표류력 drift force/ $\rho g R_b A^2 = 1.6$ (파고 1m 인 경우, 4.2 ton) 이 나타나는데 이는 이 부근에서 그림 8에서 보여진 바와 같이 상하동요가 커져 물체와 파와의 상대운동도 크기 때문이다. 이 최대치가 나타나

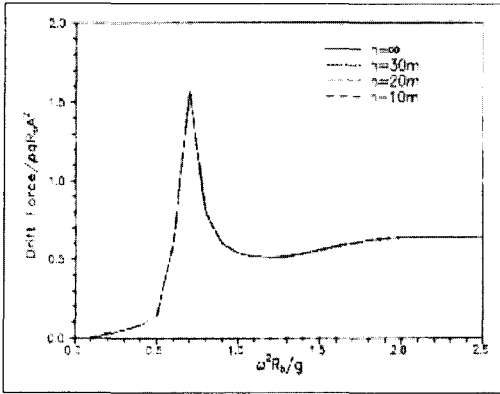


Fig. 6 Horizontal drift forces of the floating buoy

는 주파수 이상에서는 대체로 일정한 크기의 표류력을 보이는데, 이는 이 고주파수 영역에서는 물체운동이 작고 입사파의 파장이 짧아 파가 거의 전반사되기 때문이다.

그림 7에는 수심이 충분히 깊을 때의 표류력 이 성분별로 보여지고 있다

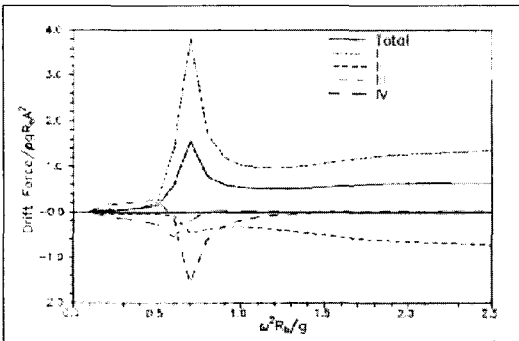


Fig. 7 Components of horizontal drift force of the floating buoy

수심이 유한할 때의 결과도 이와 거의 차이가 없기 때문에 수록하지 않았다. 이 부이는 구형이 아니기 때문에 회전운동과 가속도의 곱에 의한 표류력 성분(곡선 IV)도 발생한다. 4가지 성분중 상대파고의 제곱에 의한 표류력 성분(곡선 I)이 제일 크며, 총 표류력(곡선 Total)의 약 2배 정도임을 알 수 있다. 상하동요 공진점 부근에서의 표류력의 최대치도 이 성분에 기인한다. 두번째 성분(곡선 II)는 속도의 제곱에 의한 항으로 이 성분은 성분 I 과는 달리 항상 음의 방향(파 진행

방향의 반대방향)으로 작용하는데 이는 물체 앞쪽에서의 유속이 물체 뒤쪽보다 크기 때문이다.

세번째 성분(곡선 III)과 네번째 성분(곡선 IV)은 물체운동과 압력구배 혹은 가속도와 곱에 기인하므로 위상등에 따라 음양이 바뀌며, 상대운동이 없는 저주파수 영역과 운동자체가 감소하는 고주파수 영역에서는 그 크기가 매우 미미하다.

이상에서 적용예로 택한 원통형 해상관측용 부이에 대한 계산결과를 고찰하였다. 이러한 계산결과들은 이들 시설의 설계 및 설치·운영에 중요한 기초자료로서 활용된다. 즉, 탑재된 관측장비들이 양호한 자료를 얻기 위해서는 대체로 이들 시설의 파랑중 동요가 작을수록 바람직한데, 그림 4와 그림 5에 보여진 바와 같은 운동 응답 해석결과는 공진주파수를 설치해역의 파랑 탁월주파수 범위밖에 놓이도록 부이의 형상과 치수를 조정하는데 활용할 수 있고, 또 이들을 통해서 댐퍼 등의 설치효과도 미리 예측할 수 있다. 또한 그림 6과 그림 7에서 보여진 수평방향 표류력은 황천중에서 계류계에 걸리는 최대하중을 예측하는데 활용할 수 있으므로 계류계의 설계에 있어 중요한 기초자료가 된다. 본 수치해법은 원칙적으로 대상 부유체의 형상에 제약을 받지 않으므로 향후 다양한 형상의 부유식 해상관측시설들의 설계 및 설치·운영에 폭 넓게 적용할 수 있을 것이다.

2.2 모래중에 묻힌 원형 파일의 횡하중 계산방법

부유식 해상관측시설은 바람, 파랑, 조류에 의해 받는 외력을 계류삭을 통하여 해저바닥에 묻힌 앵커의 파주력으로 견디어 내야만 한다. 외력은 특히 태풍과 같은 횡파중에서는 더욱 커진다. 본고에서는 모래중에 묻힌 원형파일에 수평력이 작용할 경우에 그 파일이 견딜 수 있는 파주력을 계산하는 방법에 대해 논하기로 한다. 본 계산방법은 McClell and Focht (1958)와 Reese and Matlock (1974)의 방법에 기반을 두고 있다. 그림 8(a)에 일반적인 하중을 받는 한 파일이 보인다. 그림 8(b)에 하중이 가해지기 전의 깊이 x_i 에서의 파일 주위의 토압을 보이며, 그림 8(c)에는 하중이 가해진 뒤의 상황이 보인다.

깊이 x_i 에서 파일이 수평적으로 y_i 만큼 움직

인 것으로 가정된다. 횡방향 움직임에 대한 토질의 작용 p_i 는 깊이 x_i 에서 파일의 단위길이에 작용하는 전체 토압 합력이다. p 와 y 의 상관관계가 그림 8 (d)에 보인다.

p 와 y 의 상관관계는 soil의 형태, 파일의 강성도, 설치방법, 하중의 특징, 하중의 시간적변화 등 많은 요소들에 따라 변한다. 파일의 깊이에 따라 다른 p - y 곡선이 있으며, 그런 곡선들의 군이 그림 8(e)에 보인다.

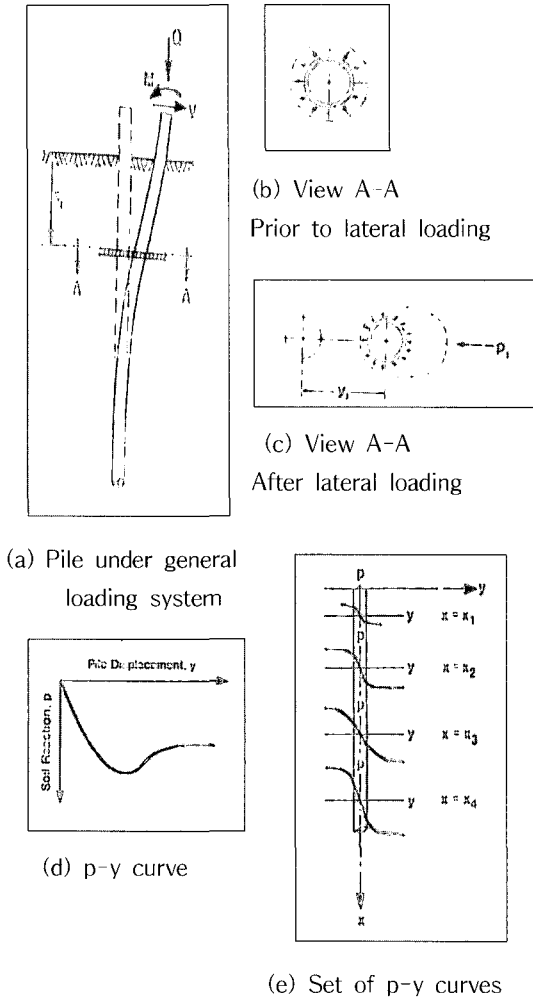


Fig. 8 Soil-piling interaction. (Ref. 5)

2.3 모래의 p-y 곡선

모래중에 묻힌 파일이 정적인 하중을 받는 경우 p - y 곡선은 그림 9와 같이 하나의 포물선과 세

개의 직선들로 구성되어 있다. 그림 9 중의 한개의 깊이 x 에 대한 하나의 p - y 곡선을 나타내는 과정은 다음과 같다. 수평력을 받는 파일의 해석을 위해 그 파일의 p - y 곡선군이 필요하다.

- 1) 모래의 내부마찰각 ϕ 를 결정한다.
- 2) 다음 값으로 지정되는 판단 근거를 계산한다 (Reese et al. (1974).

$$\alpha = \frac{\phi}{2}, \quad \beta = 45 + \frac{\phi}{2}, \quad K_0 = 0.4 \quad (4)$$

$$K_0 = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (5)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \phi/2) \quad (6)$$

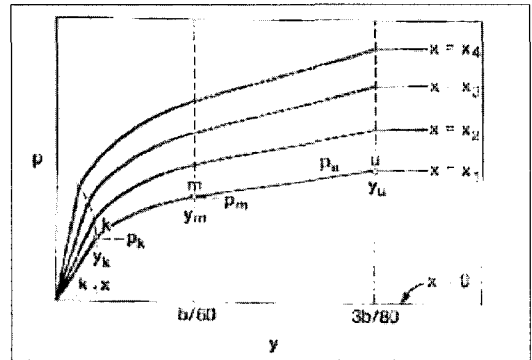


Fig. 9 Family of p - y curves for static and cyclic loading

- 3) 지질의 저항을 계산하기 위해 다음 식들을 사용한다.

- (1) 지반 근처의 극한저항

$$p_u = A \gamma x (b F_1 + x F_2) \quad (7)$$

- (2) 지반 아래 상당한 거리의 극한저항

$$p_u = A \gamma x b F_3 \quad (8)$$

여기서 A 는 정적 또는 주기적인 외력을 받는 경우, 그림 10으로 주어진 무차원계수이다.

본 고에서는 정적인 외력을 받는 경우인 A_c 를 $2.878 - 0.755 (x/b) - 0.0489 (x/b)^2 + 0.0471 (x/b)^3 - 0.0046 (x/b)^4$ 로 근사하였다. 여기서 b 는 파일의 직경을 뜻한다.

$$F_1 = K_p - K_a \quad (9)$$

$$F_2 = \tan(45 + \phi/2) (F_4 + F_5) \quad (10)$$

$$F_3 = K_p^2 (K_0 \tan \phi + K_p) - K_a \quad (11)$$

$$F_4 = (K_p - K_0) \tan \phi/2 \quad (12)$$

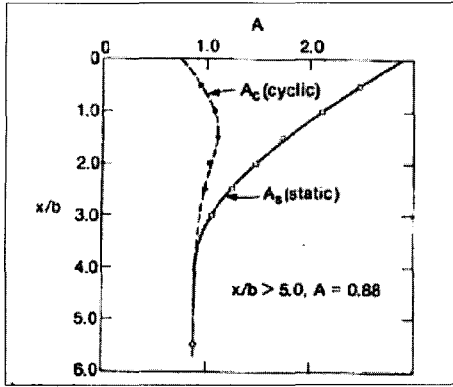


Fig. 10 Nondimensional coefficient A for sand (Ref. 5)

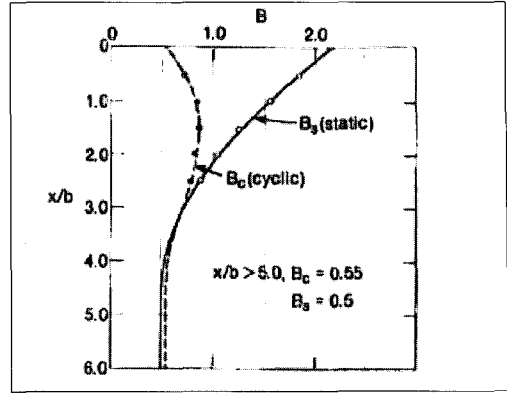


Fig. 11 Nodimensional coefficient B for sand (Ref. 5)

$$F_5 = K_0 \tan \phi \sin(45 + \phi/2) \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \phi/2}\right) \quad (13)$$

F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 값들은 ϕ 값에 따라 변하는 계수들이다.

4) 저항이 같은 깊이를 구하기 위해 식 (7)과 (8)을 같게 놓아 x 에 대해 풀면 다음과 같이 x_r 이 구해진다.

$$x_r = b \left(\frac{F_3 - F_1}{F_2} \right)$$

5) u 점을 다음 식으로 정한다.

$$x \leq x_r \quad p_u = \text{식 (7)}$$

$$x \geq x_r \quad p_u = \text{식 (8)}$$

$$y_u = 3b / 80$$

6) m 점은 다음과 같이 구한다.

$$p_m = B p_u / A$$

$$y_m = b / 60$$

여기서 B 는 정적 또는 주기적인 외력을 받는 경우, 그림11로 주어진 무차원계수이다.

본 고에서는 정적인 외력을 받는 경우인 B_c 를 $2.140 - 0.2670 (x/b) - 0.3419 (x/b)^2 + 0.1215 (x/b)^3 - 0.0111 (x/b)^4$ 로 근사하였다.

7) k 점은 다음과 같이 구한다.

$$p_k = k_1 x y_k$$

$$y_k = \left(\frac{p_m}{k_1 x y_m^{1/n}} \right)^{n/(n-1)}$$

여기서 n 은 다음과 같이 표현된다.

$$n = \frac{p_m (y_u - y_m)}{y_m (p_u - p_m)}$$

k_1 의 값은 표에서 적당한 값을 취한다.

Table 2 Recommended Values of k_1 for Submerged Sand (Ref. 5)

| Relative density | loose | medium | dense |
|-------------------------|-------|--------|-------|
| Recommended k_1 (pci) | 20 | 60 | 125 |

본 실험을 수행한 광안리 해변의 모래는 중간 정도의 밀도를 가지고 있으므로 k_1 을 60으로 택하였다.

8) k 와 m 사이의 적당한 점들을 다음 식으로 구한다.

$$p = \left(\frac{p_m}{y_m^{1/n}} \right)^{1/n}$$

이상의 과정에 의해 원하는 임의 깊이에서의 p - y 곡선을 구할 수 있다.

3 원형파일의 실험

원형파일에 대한 수평력 실험은 부산 광안리 해변에서 수행되었으며 모래 표본의 토질실험 결과는 그림 12와 같다. 파일실험을 수행한 곳의 샘플 테스트로부터 모래의 내부마찰각을 35.6도, 유효단위중량을 112.25 lb/ft^3 (1.8 ton/m^3)으로 취하여 0.0649 lb/in^3 (0.0018 kg/cm^3)으로 입력하였다. 실험의 일련과정은 그림 13과 같으며 모형실험에 대한 계측을 수행하였다. 파일모형의 최대 수평 지지력은 그림 14와 같이 280 kgf 가 얻어졌다. 가로축은 시간을 나타내는데 초당 20개의 자료가 기록된다. 본 실험은 수동 책을 사용하였기 때문에 한번의 인장실험시 약 30 분이 걸렸다.

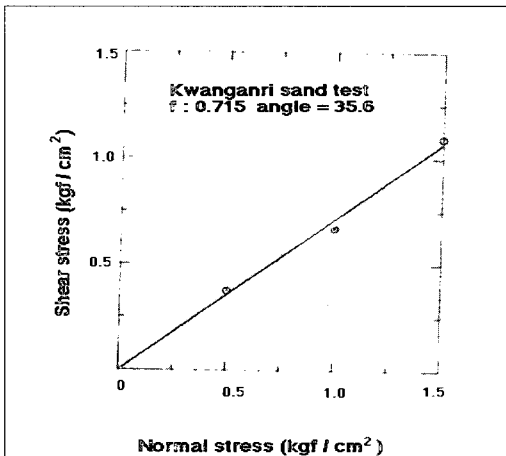


Fig. 12 Result of sand test of Kwanganri

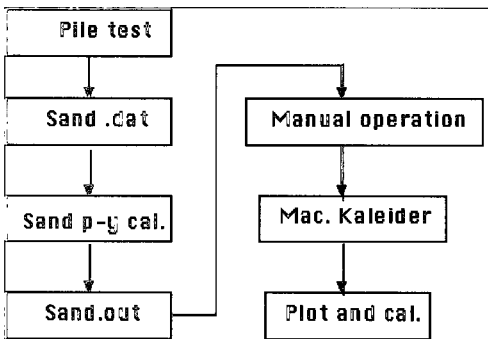


Fig. 13 Block diagram for pile experiment

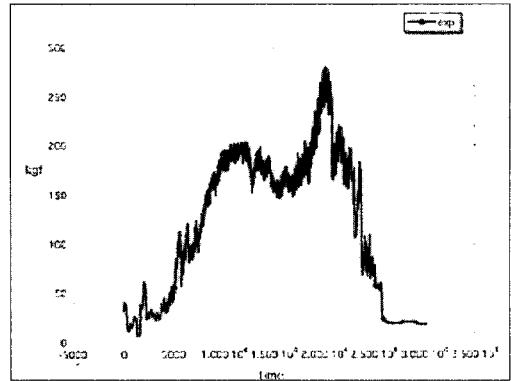


Fig. 14 Horizontal force for pile

실험에 사용된 파일은 그림 15와 같이 휘었으며 그 변위를 제어 y 값으로 취했다. 일련의 계산과정을 전산화 하여 FORTRAN 프로그램을 작성하였으며 입력자료는 표3와 같고 출력자료는 표4와 같다. 표5에 프로그램의 일부가 보인다.

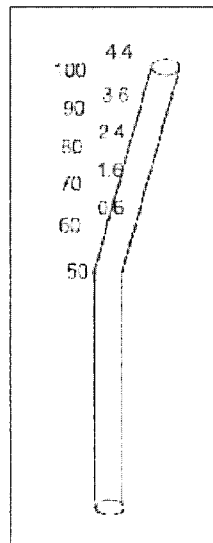


Table 3 Input data SANDF.DAT

| | |
|---------|------------------------------------|
| 35.6 | 4.4 |
| 800 | |
| 2.8783 | -0.2553 -0.0488 0.0471 -0.00462 |
| 2.1403 | -0.26705 -0.34181 0.12448 -0.01110 |
| 1.24 | |
| 11 | |
| 0.02338 | 1.4630 2.0301 4.4071 5.0761 |
| 7.3452 | 8.8142 10.2832 11.752 14.6803 |
| 17.6294 | |
| 8 | |
| 0.03837 | 0.1575 0.5315 0.9355 1.2882 |
| 1.6142 | 2.0836 2.4016 |
| 0.0349 | |

Fig. 15 Deflected pile

출력된 자료를 Macintosh Kaleider program 으로 그린 p-y 곡선은 그림 16와 같다.

얻어진 결과는 일반적인 p-y 곡선의 특성인 임계값 이상으로 되었다가 변위가 더 커지면 하중이 줄어드는 현상을 보이고 있다. 그러나 깊이

가 깊어지면 그러한 특성이 사라지는 것을 볼 수 있다. 전체 계산과정이 ft-lb 계를 사용하고 있으므로 얻어진 결과를 수작업으로 다시 환산하여 표6와 같은 최종결과를 구하였다.

얻어진 결과는 원하는 깊이와 변위에 해당하는 단위길이당 하중을 나타내고 있으므로 파일 길이에 따른 하중 면적을 구하면 전체 파일이 받는 힘이 계산된다. 수작업으로 구해진 계산결과로부터 파일에 수평하중은 261 kgf 로 구해졌다. 이 값을 실험 결과와 비교할 때 약 11% 적은 값이지만 실제값과 상당히 근사한 값을 구할 수 있었다.

부유식 해상관측시설의 운동 및 표류력 계산부분에서 파고가 1m 인 경우 약 4.2 ton 의 표류력이 작용하였다. 그런 표류력을 견디기 위해서 얼마만한 원형파일이 필요할 것인가라는 문제에 대한 답도 곧 구할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 4 Output data SANDF.OUT

| | | | | |
|-------------|-------|--------|--------|-------|
| 0.065 | | | | |
| XR = 11.397 | | | | |
| 1 | | | | |
| | 0.029 | 2.856 | 2.132 | |
| | 0.039 | 11.397 | 0.624 | 0.067 |
| | 0.022 | 0.624 | 0.466 | |
| | 1.250 | 0.200 | | |
| | 0.039 | 0.340 | 0.803 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 0.157 | 0.372 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 0.531 | 0.624 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 0.905 | 0.624 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 1.299 | 0.624 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 1.614 | 0.624 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 2.087 | 0.624 | |
| X, Y, P = | 0.039 | 2.402 | 0.624 | |
| 2 | | | | |
| | 1.469 | 1.791 | 1.344 | |
| | 1.968 | 11.397 | 19.571 | 0.067 |
| | 0.022 | 19.571 | 14.682 | |
| | 1.200 | 0.167 | | |
| | 1.968 | 0.175 | 20.696 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 0.157 | 18.602 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 0.531 | 19.571 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 0.905 | 19.571 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 1.299 | 19.571 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 1.614 | 19.571 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 2.087 | 19.571 | |
| X, Y, P = | 1.968 | 2.402 | 19.571 | |
| 3 | | | | |
| | 2.938 | 1.088 | 0.658 | |
| | 3.937 | 11.397 | 23.770 | 0.067 |
| Continued | | | | |

문제는 파일앵커의 설치를 SCUBA 활동에 의존하여야 하는 것으로, 부유식 해상관측시설을 수심 30m 내외의 수심에 과연 설치할 필요가 있는가라는 원론적인 회의가 제기될 수 있으나 본 계산방법은 수심에 제한없이 다양한 부유식 구조물에 작용가능하다 (Yoon,1995). 앞으로 파일앵커 계산에 포함된 여러 계수들, 파일 직경, 길이, 변위, 등을 변화시키면서 그에 상응하는 실험을 수행할 경우 실험에 설치되는 파일앵커들의 파주

력을 보다 자세하게 추정할 수 있는, 상당히 유용한 설계자료를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

Table 5 Program SANDF.FOR

```

C-PRG NAME: SANDF, SAND P-Y CURVE CAL. PROGRAM-
C-MADE BY G.S. YOON ON 16TH. OCT. 1997, REF. 809-817, PILE DESIGN,
C-BRAMLETTE MCLELLAND, MICHAEL D. REIFRL, PLANNING AND DESIGN OF
C FIXED OFFSHORE PLATFORMS
  DIMENSION A(99), B(99),XD(99),YD(99)
  DATA CK00,4I
  OPEN6, FILE='SANDF.DAT'
  OPEN6, FILE='SANDF.OUT'
  PAI=5.1415926
  READ(5,10) PHI, NA, NB
C- PHI: SAND INTERNAL ANGLE, NA, NB; NO. OF A & B
  PHR=PHI/180.*PI
  READ(5,20) K1
C- K1: RELATIVE DENSITY (RECOMMENDED K1 (pci)), Table 22-4, p.615
  READ(5,20) (A(I),I=0,NA)
  READ(5,20) (B(I),I=0,NB)
C- CAL A(I)'S FROM FIG 22-4(b), p.609 AND B(I)'S FROM FIG 22-4(c), p.610
C AND KLEIDAR PROGRAM.
  READ(5,20) BD
C- BD: PILE DIAMETER
  READ(5,30) NX
C- NX: CAL. X NO.
  READ(5,20) (XD(I),I=1,NX)
  READ(5,30) NY
C- NY: CAL. Y NO.
  READ(5,20) (YD(I),I=1,NY)
  READ(5,20) GAMMA
C- GAMMA: EFFECTIVE UNIT WEIGHT OF SOIL
  10 FORMAT(10.0,2F5)
  20 FORMAT(5F10.0)
  30 FORMAT(5, F10.0)
    
```

Continued ---

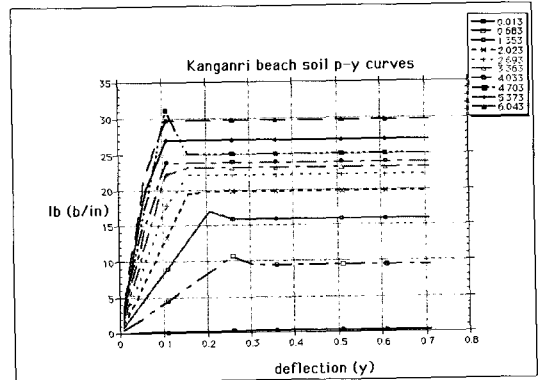


Fig. 16 Calculated p-y curves for sand of Kwanngri

Table 6 Manipulated cal. result

| Page #1 -udBr | | | | | |
|---------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | X | Y | 0.013 | 0.083 | 1.584 |
| 1 | 0.00000 | 0.00000 | 0.41000 | 0.81200 | 0.81200 |
| 2 | 0.00000 | 0.04000 | 2.48000 | 4.87000 | 4.87000 |
| 3 | 0.11000 | 0.08000 | 4.51000 | 8.93000 | 8.93000 |
| 4 | 0.15000 | 0.12000 | 6.56110 | 12.98000 | 12.98000 |
| 5 | 0.27000 | 0.16000 | 8.61110 | 17.05000 | 17.05000 |
| 6 | 0.26000 | 0.20000 | 10.35000 | 15.84700 | 15.84700 |
| 7 | 0.31000 | 0.24000 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 8 | 0.35000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 9 | 0.41000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 10 | 0.48000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 11 | 0.01000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 12 | 0.58000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 13 | 0.57000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 14 | 0.63000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |
| 15 | 0.71000 | 0.21400 | 9.43200 | 15.84700 | 15.84700 |

4. 결 론

3차원 특이점 분포방법에 의한 수치해석 프로그램을 개발하여 부유식 해상관측시설의 한예에 대해 파랑운동과 표류력에 대하여 계산하였다. 부유식 해상관측시설은 운동이 작은 것이 바람직한데 운동응답 해석결과는 공진주파수를 설치해역의 파랑 탁월주파수 범위밖에 놓이도록 부이의 형상과 치수를 조정하는데 활용할 수 있고, 또 이들을 통해서 댐퍼 등의 설치효과도 미리 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 수평방향 표류력은 황천중에서 계류계에 걸리는 최대하중을 예측하는데 활용할 수 있으므로 계류계의 설계에 있어 중요한 기초자료가 된다. 본 수치해법은 원칙적으로 대상 부유체의 형상에 제약받지 않으므로 향후 다양한 형상의 부유식 해상관측시설들의 설계 및 설치·운동에 폭 넓게 적용할 수 있을 것이다 (김용직 외, 1997). 또한, 계류계의 중요 부분인 앵커, 특히 파일앵커에 대한 기초실험 및 수치계산을 수행하였다. 원형 파일에 대한 모형실험을 수행한 결과 모래 속에 묻힌 원형 파일의 수평하중에 대한 모형실험 결과와 프로그램 계산결과가 상당히 일치하는 결과를 나타내었다.

앞으로 원형파일의 크기, 변위 등을 체계적으로 변화시키면서 실험을 보강할 경우, 또한 주기적인 외력과 수직력에 대한 연구를 포함하여 모형실험 결과를 계산결과와 비교하면 실험 파일 앵커의 파주력 추정이 용이할 것으로 생각되며 태풍시에도 견딜 수 있는 파주력이 큰 파일앵커의 개발이 가능할 것이다. SCUBA 활동이 가능한 수심 30m 이내의 천해에 부유식 해상관측시설이나 수산시설물 초기설계 및 설치시 파일앵커의 활용 및 개발에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 깊이에 무관하게 파일설치 작업이 가능한 설치매니튜레이터를 개발할 경우에는 부유식 해상관측시설은 물론 여러 가지 부유식 해양구조물의 계류앵커로서 적용가능할 것으로 생각된다.

후기

본 연구의 일부는 부경대학교 해양과학 공동연구

소를 통한 학술진흥재단의 우수연구소 지원금과 부경대학교 해양산업개발연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다. 이에 관계자 여러분들께 감사를 표합니다. 장력계측기기 개발에 참여해준 부경대학교 기계공학과 석사과정 강병철 군, 연구에 필요한 귀중한 자료를 도와주신 동아대 토목공학과 정성교 교수, 미국의 방상철 교수, 송병헌 박사, 한여름 뜨거운 태양아래 새카맣게 타면서도 성실하게 실험에 임해준 부경대학교 해양공학부 해양구조물연구실 학부생들과 한국해양대학교 해양공학과 SCUBA 팀에게도 감사의 마음을 표합니다.

참고문헌

- [1] Berteaux, H.O., "Buoy Engineering", A Willy-International Pubrication, 1976, pp.97-309.
- [2] McClelland, B. and J.A. Focht, "Soil Modulus for Laterally Loaded Piles", Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 123, 1958, pp.1049-1086.
- [3] Matlock, H. and L.C. Reese, "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 127, 1962, pp.1220-1251.
- [4] McClelland, B. and M.D. Reifel, "Planning and Design of Fixed Offshore Platforms", Van Nostrand Reinhold, 1986, pp.801-817.
- [5] Reese, L.C., W.R. Cox and F.D. Koop, "Analysis of Laterally loaded Piles in Sand", OTC 2080, 1974, pp.473-483.
- [6] Cox, W.R., L.C. Reese and B.R. Grubbs, "Filed Testing of Laterally Loaded Piles", OTC 2079, 1974, pp.459-472.
- [7] Yoon, G.S., "A Preliminary Study of a Submersible Facility for Abalone Spats", J. of the Korean Fisheries Soc. Vol.28 No.4, 1995, pp.435-442.
- [8] 김용직, 김동준, 윤길수, 류청로, 홍석원, "OWC 플랫폼 주위의 파랑변형", 한국해양공학회지 11권 2호, 1997, pp.77-90.