

## 해양 관측용 부이의 개념 설계 연구

조 규 남\* · 이 우 섭\*\*

(97년 5월 16일 접수)

### A Study on the Conceptual Design of Oceanographic Buoy Systems

Kyu-Nam Cho\* · Woo-Sup Yi\*\*

**Key Words** : Conceptual Design, Dynamic Analysis, Cable-Buoy System, Wave Force

#### Abstract

The major subject of this paper is the conceptual design of a cable-buoy system based on mechanics of floating bodies and mooring lines. The goal is to present a systematic relevant analysis procedure for the conceptual design of oceanographic buoy systems. The dynamics of a free floating body with an anchoring line is studied and a model is proposed through the primary engineering.

#### 1. 서 론

부이 시스템의 개념설계를 수행하기 위해서는 먼저 기존의 상용되고 있는 부이 시스템들의 종류와 제원등을 조사하고, 이를 근거로 사용목적에 따라, 초기에 주요 제원등을 가정한다. 이와 같은 초기 시스템에 대하여 준정적 해석을 수행하고 안정성 여부와 거동 해석등을 통한 초기설계의 타당성을 검토한다. 다음에 정확한 거동을 파악하기 위한 동적 시뮬레이션등이 필요하게 된다. 즉, 부이에 있어서도 선박설계와 같은 개념으로 'parent buoy'의 제원등을 참고로 하여 부이 시스템의 제원을 선정하고, 이에 따른 해석을 수행하여 최종제원을 정할 수 있겠다. 본 논문에서는 초기에 정해진 제

원에 근거하여 부이 시스템에 대한 관련 준정적 해석을 수행한 결과를 다루었다. 다음으로 보다 상세한 거동파악을 위하여, 컴퓨터를 이용한 동적거동 시뮬레이션을 수행하여 준정적해석과 비교 검토 하였다. 이러한 해석 결과에 따라 부이 시스템의 총체적인 기능 및 안정성 등이 확인되면, 이 부이 시스템을 하나의 모델로 제시할 수 있겠다.

#### 2. 부이 시스템의 개념 설계

##### 예상설치 지역선정

예상설치 지역으로 제주 남서방 85마일에 위치한 이어도 근방을 선정하고 이에 대응하는 각가지

\* 홍익대학교

\*\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

자료등을 설계의 지표로 사용한다. 정확한 위치는 북위 32° 07' 04", 동경 125° 10' 46" 이다. 이어도는 한국의 최남단 마라도로부터 78해리, 중국의 동단 동도로부터 134해리, 일본의 서단 남여군도로부터 160 해리 떨어진 곳으로 대만, 홍콩, 필리핀, 싱가포르등 남방항로에서 한국 서해안의 목포, 군산, 인천항 및 부산, 울산, 포항, 동해안에 이르는 주항로상에 위치하고 있을 뿐만 아니라 중국상해에서 일본의 長崎에 이르는 항로, 상해에서 부산에 이르는 항로등 등 동양 3국을 뱃는 주요한 지점이기도 하다. 이곳은 태평양연안 년중 태풍의 중심 진로의 한가운데 위치하고 있기 때문에 각종 해상 데이터의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다.<sup>1)</sup>

예상설치 지역의 환경조건

제주도 서남단에서 220° 방향으로 85해리에 위치한 이어도는 제일 얇은 곳이 5.5m 밖에 되지 않아 바닷물에 부딪쳐 파랑이 일고 있으므로 파랑도 라고 불리우기도 한다. 암초 부근의 수심은 약 50m 이며 이곳은 동지나해에서 황해로 접어드는 입구의 중앙이며 최대조차는 약 2.5m 로 추정되며 여름철에는 우리나라쪽으로 북상해오는 태풍의 진로이기도 하며 겨울철에는 강한 북서 계절풍의 진로이기도 하다. 조류도 쿠로시오 지류의 영향으로 강하게 작용한다.

부이시스템의 예상 설치 지역인 이어도의 환경 조건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 주변해역 수심 : 55m
2. 설계파고 :
  - 하계 : 태풍
  - 파향 : S, SSW
  - 파고 : 15m
  - 주기 : 15 sec
  - 동계 : 북서계절풍
  - 파향 : NNW, NW
  - 파고 : 10m
  - 주기 : 12sec
3. 조차 : 2.5m
4. 조류 : 2.0m/sec
5. 풍속 : 50m/sec
6. 주변퇴적물 : 점토성 사질

부이 시스템 선정

본 부이는 그림 1과 같이 상단으로부터 Top mark, 송신안테나, 주간표시판, 태양전지, 무선자료 송신 모뎀 장치, 야간등명기 및 지지대, 부이 몸통, 발란스 중량채 (부이 몸통 내에 설치)등으로 이루어진 본체와 연결줄, 부가 부이(필요시), 고정추로 이루어진 계류장치로 구성하여 설계하였다. 각 구성요소의 자세한 사항은 여기서는 다루지 않고 무게와 위치, 형상 등의 선정은 각 가지 설계인자들을 고려하여 이루어졌으며, 초기 설계에 대한 각종 해석수행등을 Feedback 하여 최종 재원을 결정하였다.<sup>7)~9)</sup>

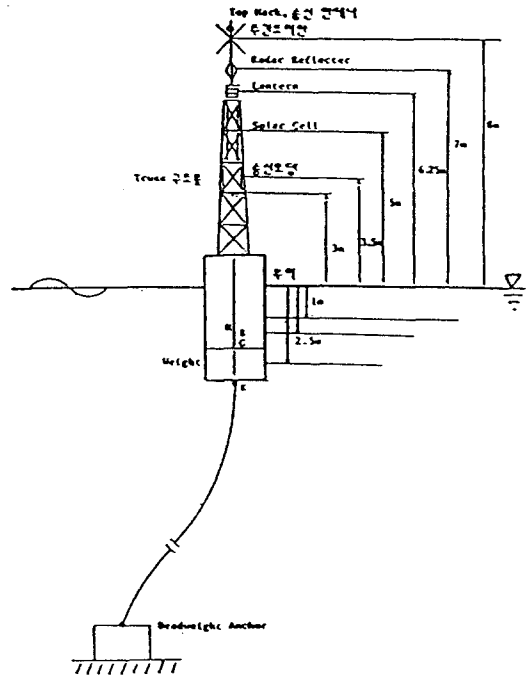


그림 1. 부이시스템 개념도

부이시스템의 개념설계

1) 부이-케이블 시스템의 재원

그림 1에서 보여지는 부이-케이블 시스템의 재원은 다음과 같다.

- 총중량(계류장치 포함) 9.66 TON
- 배수체적 9.42477 m<sup>3</sup>

- 홀 수 선(기준점 k로부터) 3.0 m
- 부력중심(기준점 k로부터) 1.5 m
- 각종 구성요소 무게 및 위치 (수선기준)
 

주간표시판	5 kg, 8 m
데이터 반향기	10 kg, 7 m
등	10 kg, 6.25 m
태양 전지	5 kg, 5 m
송신모뎀	10 kg, 3.5 m
트러스 구조물	1000 kg, 3.0 m
부이 몸통	1036 kg, -1.5 m
중량체	6000 kg, -2.5 m
연결줄	1584 kg, -3.0 m
총 계	9660 kg
- Buoy Chamber Dimension (실린더형)
 

직 경	2 m
높 이	4 m

2) 안정성 해석

부이 시스템의 안정성 검토를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약하였다.<sup>7),11)</sup>

- 중심위치 결정 (수선 기준)

$$CG = \frac{\sum Widi}{\sum W} = -1.871 \text{ m}$$

- 부심, 중심 메타센터 산정

$$KG = 1.129 \text{ m}$$

$$KB = 1.5 \text{ m}$$

$$BM = I/\nabla = 0.083 \text{ m}$$

- 메타센터 높이의 산정

메타센터의 산정은 KB, BM, KG를 사용하여 구한다.

$$GM = KB + BM - KG = 0.454 \text{ m (+)}$$

위의 결과에서 보는바와 같이 그림 1에서 보여준 제원을 갖는 부이 시스템은 양의 GM을 가지게 되어 안정(Stable) 하다고 할 수 있겠다.

부심, 중심, 메타센터의 위치는 다음 그림 2와 같다.

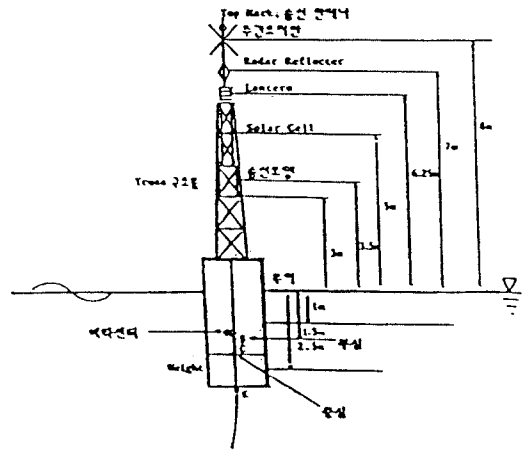


그림 2. 부이 시스템의 부심, 중심, 메타센터의 위치

3) 체인 케이블의 제원

체인 케이블의 제원은 다음과 같다. 체인의 제원은 HAMANAKA INTERNATIONAL 사의 체인 품목들 중에서 선정하였다.

- 직경 40 mm
- 공기중에서의 단위 길이당 무게 35.40 kgf/m
- 수중에서의 단위 길이당 무게 30.46 kgf/m
- 전단하중(Breaking Strength) 91400 kgf
- 길이 120 m

4) 체인 케이블의 준정적 해석<sup>7),13)</sup>

체인 케이블의 구조적 안전성을 준정적 해석방법으로 다음과 같이 수행하였다. 여기에서 준정적 해석방법이란 해상의 부이에 걸리는 최대의 동적하중을 정적으로 처리하여 해석하는 것을 의미한다. 부이 및 체인 케이블의 동적인 거동을 고려한 보다 엄밀한 해석 결과는 3장에 나타나 있다. 다음의 계산에서 각종 유체력의 계산식은 참고문헌<sup>8) 10)</sup>에 근거하고, 항력계수의 선정에는 DnV규칙<sup>12)</sup>에서 권장하는 값을 사용하였고 주어진 환경조건을 근거하였다.

i) 풍하중의 계산

$$Fa = 0.5 \times \rho_a \times C_D \times Sa \times Va^2 / g \text{ (kgf)}$$

여기서  $\rho_a$  = 공기의 밀도

$C_D$  = 항력계수

$S_a$  = 수면상의 부이의 투영면적

$V_a$  = 풍속

$g$  = 중력가속도

ii) 조류 및 파도에 의한 유체력 계산

$$F_w = 0.5 \times \rho_w \times C_D \times S_w \times V_f^2 / g \text{ (kgf)}$$

여기서  $\rho_w$  = 해수의 밀도

$C_D$  = 항력계수

$S_w$  = 수면하의 부이의 투영면적

$$V_f = V_c + V_u$$

$V_u$  = 파도에 의한 수면유체입자의 수  
평 최대속도

$V_c$  = 조류의 속도

그러므로 바람, 조류 및 파도에 의해 부이가 받게 되는 최대 수평력 ( $T_0$ )은 다음과 같이 구해진다.

$$T_0 = F_a + F_w$$

iii) 체인 케이블의 장력계산

장력계산에 있어서의 설계수심은 최대 장력이 걸리는 상황을 고려하기 위하여 평균수심에 조차의 증가분과 파고의 절반을 합한 것으로 하며, 이 설계수심에서 부이의 흘수를 빼면 최종적으로 해저면으로부터 부이 하단까지의 수직거리( $V_m$ )를 얻는다.

부이 하단에서 케이블 장력의 수직방향 성분 ( $F_4$ )은 다음 공식에 의해 계산된다.<sup>7)</sup>

$$F_4 = W \times \ell / 2 + V_m / 2 \times (W^2 + 4 \times T_0^2 / (\ell^2 - V_m^2))^{0.5}$$

여기서  $W$  = 수중에서의 단위길이당 무게

$\ell$  = 체인 케이블의 길이

수직방향 성분 ( $F_4$ )에 의한 부이의 흘수변화( $\Delta$

$V$ )는 다음과 같다.

$$\Delta V = (F_4 - F_4') / kb$$

여기서  $F_4'$  = 정수 (Calm Water) 상태에서 부이에 걸리는 체인의 자중

$kb$  = 부이의 부력 스프링

주어진 자료에 의해 위의 식들을 사용하여 흘수 변화량을 구해보면 부이가 물속에 잠기는 값으로 나온다. 따라서 부이 물수시의 장력을 다음과 같이 계산 한다.

iv) 부이 물수시 장력 계산 (그림 3)

위의 경우에 대한 관련 계산식은 다음과 같다.

$$T_0 = 0.5 \times \rho_w \times C_D \times S_w \times V_f^2 / g$$

$$F_4 = F_4' + kb$$

$$T_u = \text{부이하단에서의 장력} \\ = (T_0^2 + F_4^2)^{0.5}$$

$$F_2 = \text{앵커위치에서의 케이블 장력의 수직성분} \\ = F_4 - W \times \ell$$

$$T_b = \text{앵커위치에서의 케이블 장력} \\ = (T_0^2 + F_2^2)^{0.5}$$

$$H_m = \text{앵커로부터 부이까지의 수평거리} \\ = (T_0 / W) \times \log((T_u + F_4) / (T_b + F_2))$$

$$H_0 = \text{부이의 수평이동거리} \\ = H_m - 68.0$$

$$V = \text{앵커로부터 부이 하단까지의 거리} \\ = (T_u - T_b) / W$$

$$\theta = \text{앵커 위치에서의 체인 케이블 각도} \\ = \tan^{-1} (F_2 / T_0)$$

준정적 해석 결과 부이 하단부에서 체인 케이블에 걸리는 최대장력( $T_u$ )은 10326 kgf 로서 이때 체인의 안전계수는 다음과 같이 된다.

$$\text{체인 케이블의 안전계수} = BS / T_u = 91400 / 10326 \\ = 8.9$$

$$\text{여기서 BS} = \text{체인의 전단하중 (Breaking Strength)} \\ = 91400 \text{ kgf}$$

위의 계산 결과에서 체인 케이블의 강도가 실제

걸리는 장력에 비하여 크게 나왔으나, 해석상의 여러 불확실성등을 고려하고 또한 체인의 무게가 무거울수록 부이의 외력에 의한 위치 이동량이 적으므로 그대로 사용하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

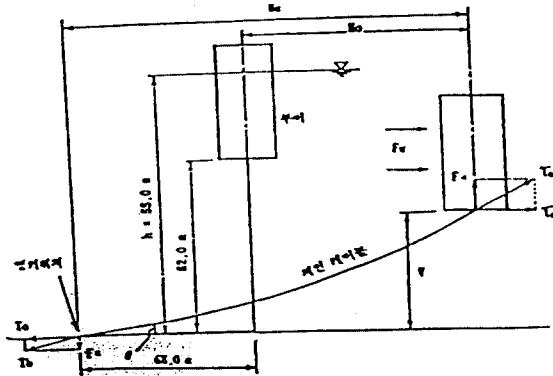


그림 3 몰수된 부이의 경우

5) 조류에 의한 부이의 수평이동<sup>7),13)</sup>

파도 및 바람의 영향이 크지않은 일반적인 해상 조건에서 조류에 의한 부이의 수평이동량은 다음과 같이 계산된다.[그림 4]

$V_c$  = 최대 조류속도

$T_0$  = 조류에 의한 수평유체력  
 $= 0.5 \times \rho_w \times C_D \times S_w \times V_c^2 / g$  (kgf)

$\ell_0$  = 해저면으로부터 들려진 체인 케이블의 길이  
 $= (V^2 + 2 \times V \times T_0 / W)^{0.5}$

여기서  $V$  = 해저면으로 부터 부이하단까지의 수직거리 (평균수심일때)

$F_4$  = 부이하단에서의 장력의 수직성분  
 $= W \times \ell_0$

$T_u$  = 부이하단에서의 장력  
 $= (T_0^2 + F_4^2)^{0.5}$

$H_0$  = 부이의 수평이동 거리  
 $= H_m + V - \ell_0$

이상과 같은 식을 사용하여 부이의 수평이동 거

리( $H_0$ )를 구해보면 결과는 24.6 m 가 나오게 된다.

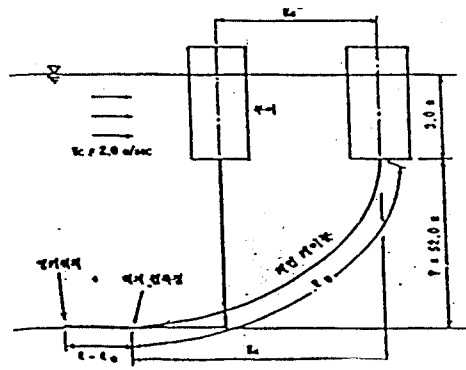


그림 4 조류에 의한 부이의 수평이동

3. 컴퓨터를 이용한 모의 실험

모의실험을 하기 위해서 다음과 같은 이론식을 적용하고, 필요한 프로그램을 개발하여 부이의 거동을 분석하여 보았다.

부이의 동적거동 해석

1) 부이의 수평운동(Surge Motion)해석 (그림 5)  
 수면 근방에서 유체입자의 수평방향 속도 및 가속도는 다음식을 이용하여 구한다.<sup>6),9)</sup>

$u(x,y)$  = 유체의 수평방향 속도  
 $\approx \omega \times A_w \times (\cosh(kh) / \sinh(kh)) \times \sin(kx - \omega t) + V_c$

$x(x,t)$  = 유체의 수평방향 가속도  
 $\approx \omega^2 \times A_w \times (\cosh(kh) / \sinh(kh)) \times \sin(kx - \omega t)$

여기서  $\omega = 2\pi / T$

$T$  = 파주기

$A_w = H / 2$

$H$  = 파고

$k$  = 파수(Wave Number)

$h$  = 수심

$x$  = 부이의 수평방향 위치 (m)

$t$  = 시간(sec)

$V_c$  = 조류의 속도

수면근방에서 부이에 작용하는 유체력은 다음식

을 이용하여 구하며 그항을  $F_d$ 와  $F_i$ 로 표시하면 다음과 같다.

$$F_d = \text{유체의 상대속도에 의한 항력}$$

$$= 0.5 \times \rho_w \times C_D \times S_w \times |u(x,t) - \dot{x}| \times (u(x,t) - \dot{x})$$

$$F_i = \text{유체가속도에 의한 관성력}$$

$$= \rho_w \times C_i \times \nabla \times a_x(x,t)$$

여기서  $C_i$  = 관성력계수  
 $C_M$  = 부가질량계수  
 $\nabla$  = 부이의 배수량  
 $\dot{x}$  = 부이의 수평방향속도

부이에 작용하는 풍력 (Wind Force)은

$$F_a = 0.5 \times \rho_a \times C_D \times S_a \times |V_a - \dot{x}| \times (V_a - \dot{x})$$

부이에 작용하는 수평방향의 총외력( $F_t$ )은 다음과 같다.[그림5]

$$F_t = F_d + F_i + F_a - F_r$$

여기서

$F_r$  = 체인 케이블에 의한 수평방향의 복원력

유체의 부가질량을 포함한 부이의 총질량은

$$M = \rho_w \times (1 + C_M) \times \nabla$$

부이의 수평운동에 대한 방정식은,

$$M \times \ddot{x} = F_t = F_d + F_i + F_a - F_r$$

부이의 수평운동 방정식을 Newmark의 시간적분법을 사용하여 수치해석한 결과가 그림 6에 나타나 있다.<sup>2)</sup>

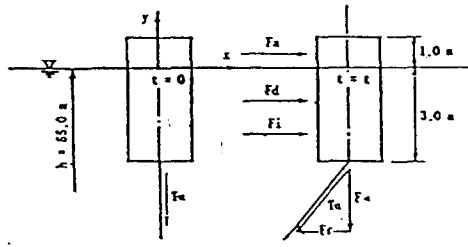


그림 5. 부이의 수평운동

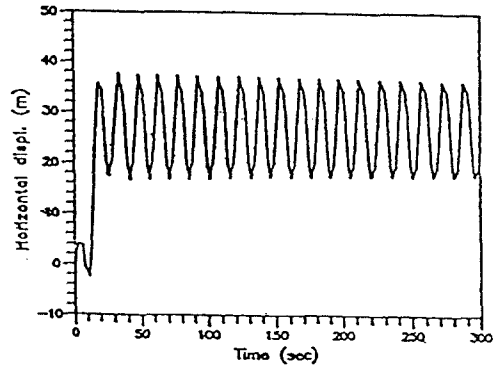


그림 6. 부이의 수평운동 해석 결과

2) 부이의 상하운동( Heave Motion ) 해석 [그림7]

부이의 상하운동해석에 있어서도 수평운동 해석의 경우와 마찬가지로 Newmark의 시간적분법을 적용하여 수치해석을 수행하였다.<sup>2),7)</sup>

부이에 작용하는 상하방향의 외력은 중력, 부력, 상대속도에 의한 항력 및 유체의 가속도에 의한 관성력을 고려하였다.

$$F_g = \text{부이의 자중}$$

$$= \rho_w \times g \times \nabla$$

$$F_b = \text{부이에 작용하는 부력}$$

$$= \rho_w \times g \times A \times B$$

여기서

$A$  = 부이의 단면적

$B$  =  $B_0 + \eta - y$

$B_0$  = 정수중에서의 부이의 침수 깊이

$\eta$  = 파도 표면의 높이

$$= A_w \times \cos(kx - \omega t)$$

$y$  = 부이의 상하방향 위치

$$F_d = \text{상대속도에 의한 상하방향의 항력}$$

$$= 0.5 \times \rho_w \times C_D \times A \times |v - \dot{y}| (v - \dot{y})$$

$$F_i = \text{유체의 가속도에 의한 상하방향의 관성력}$$

$$= \rho_w \times C_i \times \nabla \times a_y$$

여기서  $C_D$  = 부이의 수직방향 항력계수

$$v = \dot{\eta} = \omega \times A_w \times \sin(kx - \omega t)$$

$C_L = \text{부이의 상하방향 관성력 계수}$   
 $= (1 + C_M)$   
 $C_M = \text{부이의 수직방향 부가질량 계수}$   
 $a_y = \ddot{y} = -\omega^2 \times A_w \times \cos(kx - \omega t)$

부이에 작용하는 상하방향의 총 외력은,

$$F_L = -F_g + F_b + F_d + F_i$$

유체의 부가질량을 포함한 부이의 상하방향총질량은,

$$M = \rho_w \times (1 + C_M) \times \nabla$$

부이의 수직방향 운동방정식은,

$$M \times \ddot{y} = Ft = -F_g + F_b + F_d + F_i$$

운동방정식을 수치해석한 결과가 그림8에 나타나 있다. 부이의 상하 운동 범위는 부이의 수평방향 운동과 상하방향 운동을 결합하여 부이의 최종 운동 궤적을 구할 수 있는데 그림9에 그 결과가 나타나 있다.

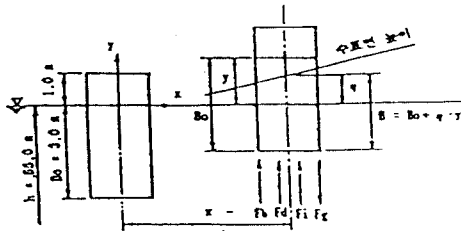


그림 7. 부이의 수직운동 해석

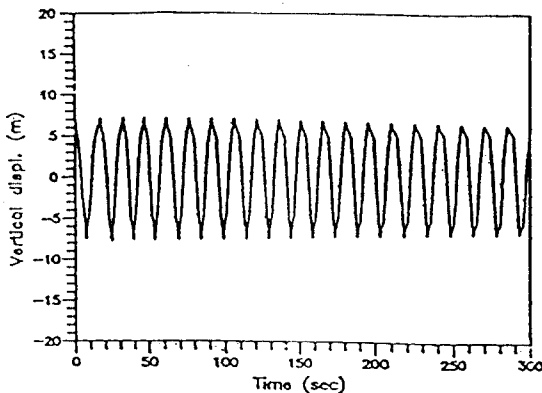


그림 8. 부이의 상하운동 해석 결과

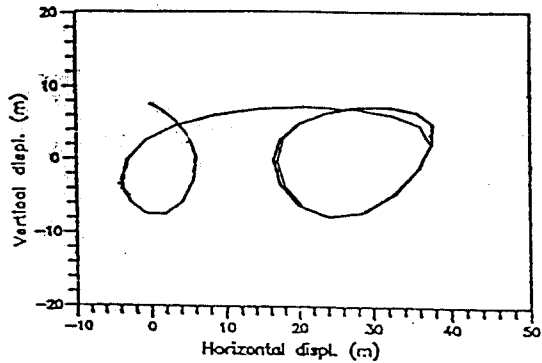


그림 9. 부이의 운동 궤적

체인 케이블의 동적 해석<sup>2)-6)</sup>

시간에 따른 부이의 운동을 체인 케이블 끝단에 강제 변위로 가하여 체인 케이블의 동적 거동을 수치적으로 해석하였다. 체인 자체에 걸리는 유체력은 파도의 영향은 무시하고 조류의 영향만을 고려하였다.

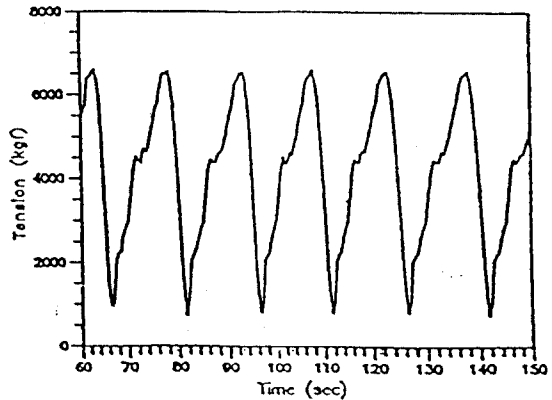


그림 10. 체인 케이블의 동적 장력

수치 해석에 있어 시간증분(Time Increment)은 0.1초로 잡았고 0초~150초에 걸쳐 시간영역 해석을 수행하였다. 정상상태 (Stationary Condition)에서의 부이 하단부에 걸리는 체인의 동적 장력이 그림 10에 나타나 있다.

컴퓨터 모의실험 결과 요약

2장에서 주어진 해상조건(하계)하에서 부이케이

불 시스템을 동적 모의 실험한 결과를 요약 하면 다음과 같다.

- 부이의 최대 수평이동거리 = 37.6 m
- 부이의 상하운동범위 = -7.7 m ~ +7.2 m  
(평균수면 기준)
- 체인 케이블에 유도되는 최대장력 = 6606 kgf

이결과는 부이의 이동량이나 체인 케이블의 장력에 있어 2장의 준정적 해석 결과에 비하여 작은 값을 보였으며 이는, 정적해석시에 여러 가지 불확실성을 고려하여 하중 및 가정 등이 보수적으로 산정된 것에 기인하는 것으로 생각 되며, 결국 이 부이가 목적하는 기능을 하기에 문제가 없는 결과를 주었다. 따라서 초기에 선정된 체인을 갖는 부이 시스템이 주어진 해역에 설치되어 기능을 발휘하기에 적절하다고 판단되어진다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 “해양 관측용 부이의 개념 설계”에 관한 1차 적인 연구를 주로 다루었으며 특히 선정된 해양에서의 관측 시스템에 대한 동적해석, 개념설계를 구체적으로 표출하고자 하였다.

예상 설치해역에 대한 기본적인 해상 상태의 설정을 통하여 시스템의 구성 요소간의 관련성을 재고하고 환경 조건하에서의 시스템의 거동을 재파악하여 결과적으로 부이 시스템의 구성요소 선정 및 최적 시스템의 개념 설계를 수행하였다.

본 논문에서는 선정된 해양에서의 관측 시스템에 대한 동적해석 및 개념설계를 제한적이기는 하나 성공적으로 수행하였고, 이러한 과정을 통하여 효과적인 부이시스템 설계 과정을 제시할 수 있었다.

또한 필요한 컴퓨터 프로그램을 개발하여 향후 유사한 부이시스템 설계에 응용할 수 있도록 하였다. 또한, 이를 기초로 실시간 원해 해양 및 기상 관측을 효율적으로 수행할 수 있는 계기가 만들어 질 것으로 생각한다. 또한 활용방안으로는 국가 해양

관측망 구축에 적극 활용할 수 있고 지역해상 관측에도 효율적으로 활용할 수 있겠다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 과학기술처, 파랑도 해양과학기지 건설계획안, 1994. 8
- 2) K. J. Bathe, E. L. Wilson, Numerical Methods in Finite Element Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, 1976
- 3) G. de Wit, "Choice of Umbilical Cables for Submersibles - Footprint Optimization", OTC 4278, 1982
- 4) T.U. Watson, J. E. Kuneman, "Determination of the Static Equilibrium Configuration of Externally Redundant Submerged Cable Arrays", OTC 2323, 1975
- 5) J. M. Winget, R. L. Huston, "Cable Dynamics - A Finite Segment Approach", Computers & Structures, Vol. 6, 1976
- 6) J. N. Newman, Marine Hydrodynamics, MIT Press, Massachusetts, 1977
- 7) H. O. Berteaux, "Buoy Engineering", A Wiley - International Publication, 1976
- 8) T. H. Dawson, "Offshore Structural Engineering", Prentice - Hall Inc., 1983
- 9) C. A. Brebbia, S. Walker, "Dynamic Analysis of Offshore Structures", Newnes-Butterworths 1979
- 10) 이 재 신, "해양구조물 설계개요", 광문출판사, 1989
- 11) 미국조선학회, "기본조선학", 임상전 역, 문교부, 1969
- 12) DnV, "Rules for Classification of Mobile Offshore Units", 1984
- 13) H. B. Jayaraman, W. C. Knudson, "A Curved Element for the Analysis of Cable Structures", Computer & Structures, 1981