

## 조위변화에 따른 오탉방지막 계류라인의 거동 Behavior of Mooring Line of Silt Protector According to the Change of Sea Level

홍남식<sup>1</sup> · 김정윤<sup>1</sup> · 강석욱<sup>1</sup>  
Namseeg Hong<sup>1</sup>, Jungyoon Kim<sup>1</sup>, and Seokwook kang<sup>1</sup>

### 1. 서 론

오탉방지막은 해상이나 하천에서 준설 및 매립공사등으로 인한 부유사 확산을 방지하는 막체구조로서 부력이 우수한 Polystyrene계로 원통형 부체를 이루는 부체부, 고장력 합성섬유를 사용하여 외력에 대하여 저항하고 여과기능이 있는 막체부, 그리고 막체부의 이동을 막기 위해 해저면에 고정시키는 계류라인(Mooring Line) 및 블록(Anchor Block)부로 이루어져 있다. 특히 계류라인은 와이어로프 또는 체인 등으로 부체부와 앵커블럭을 연결시켜주는 역할을 한다.

현재 국내에서는 계류라인에 발생하는 장력을 얻기 위해 항만공사 표준시방서 규정을 적용하고 있다. 즉, 만조위를 기준으로 파랑, 조류 및 바람등에 의해 막체 및 부체에 작용하는 외력을 유사정적하중의 개념을 이용하여 산정한 후 막체에 관한 해석적 해를 사용하여 얻은 막체 및 부체장력을 계류라인의 장력으로 단순 분해하여 계산한다. 이 방법은 계류라인이 팽팽하게 긴장되어 처짐(Sag)이 거의 발생하지 않는 경우라야 적용 가능하며 시공 후 계류라인에 인장강도를 넘어서는 과도한 장력이 발생할 가능성이 있다. 이외에도 조차가 커 조위 변화 폭이 큰 경우에 만조위시를 기준으로 팽팽하게 시공된 계류라인이 조위가 하강하면서 장력이 이완되므로 부체의 변위가 증가하여 일부라인은 장력이 다시 복원되거나 반대방향의 라인은 장력이 더 이완되거나 혹은 장력이 완전히 풀려 오탉방지막 구조체 전체의 불안정성을 야기시킬 수도 있을 것으로 사료된다. 실제 오탉방지막 시공후의 문제점을 조사해 보면 조위변화가 큰지역에 설치한 경우에 상기의 이유로 오탉방지막이 불안정하게 거동하는 것을 알 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 조위변화에 따른 오탉방지막 계류라인의 거동을 조사해 봄으로써 계류라인의 장력 변화로 인한 오탉방지막의 불안정한 거동을 분석하여 설계 및 시공시의 문제점을 파악하고자 한다. 막체 및 부체에 작용하는 외력 및 장력 산정은 항만공사 표준시방서 규정을 적용하였으며 계류라인의 거동해석을 위해 CASALM이라는 상용프로그램을 사용하였다.

### 2. 해석 방법

#### 2.1 외력 및 외력산정

오탉방지막 구조에 작용하는 외력 및 장력산정을 위해 항만공사 표준시방서 규정을 적용하였다. 물론, 적용규정은 설계를 위한 개략적인 근사식을 근거로 만든 규정이므로 정확하지는 않으나, 입력에 해당하는 외력 및 장력의 근사치를 사용하였다 하더라도 계류라인의 거동에 큰 영향이 없을 것으로 예상되므로 본 연구의 목적인 계류라인의 거동특성 분석을 수행하는데 문제가 없을 것으로 사료된다.

항만공사 표준시방서에 따르면 단위면적당 부체에 작용하는 풍하중  $P_1$ , 막체에 작용하는 조류에 의한 수하중  $P_2$  및 파랑에 의한 파력하중  $P_3$ 는 다음식과 같다.

$$P_1 = \frac{\rho' \times C_{d1} \times U^2}{2g} \cos^2 \theta_1 \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{\rho' \times C_{d2} \times U^2}{2g} \cos^2 \theta_2 \quad (2)$$

$$P_3 = \frac{\rho' \times C_{d3} \times U^2}{2g} \cos^2 \theta_3 \quad (3)$$

<sup>1</sup> 동아대학교 토목해양공학부(School of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Busan, Korea)

여기서,  $\rho', \rho$  는 공기와 해수의 단위중량,  $g$  는 중력 가속도,  $U, V$  는 풍속과 조류속,  $C_{d1}, C_{d2}, C_{d3}$  는 해당 저항계수,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  는 각각 바람, 조류, 파랑의 유입 각도이며,  $V_0$  는 파랑으로 인한 수평방향 물입자의 평균유속으로 다음과 같다.

$$V_0 = \frac{\pi H}{2T} \left( \coth \frac{2\pi h}{L} + \operatorname{cosech} \frac{2\pi h}{L} \right) \quad (4)$$

여기서,  $H, L, h$  는 각각 파고, 파장, 그리고 수심을 나타낸다.

항만공사 표준시방서에 규정된 부채 및 막체의 양 끝단의 장력을 구하는 식은 부채에 작용하는 풍하중과 막체에 작용하는 수하중 및 파력하중은 균등한 크기로 작용하는 것으로 보고, 부채와 막체의 양단은 구속되어 있는 것으로 가정하여 L. Prandtl 의 유사 (Quasi) Membrane 근사 해석해를 적용한 듯이 보여진다. 즉, 부채와 막체 양단의 단위 길이당 장력  $T_1$  과  $T_2$  는 아래와 같이 주어진다.

$$T_1 = \frac{P_1 \times a}{2 \times f} \sqrt{a^2 + 4f^2} \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{(P_2 + P_3) \times a}{2 \times f} \sqrt{a^2 + 4f^2} \quad (6)$$

여기서,  $2a$  는 막체의 길이 방향으로의 Anchor 의 간격이며  $f$  는 막체 중앙의 변형량을 나타낸다. 부채의 직경  $d$ , 막체폭  $B$  로 이루어진 전체 막장력은 아래와 같으며,

$$T = T_1 \cdot d + T_2 \cdot B \quad (7)$$

양단에 발생한 전체장력의 수직성분을 취하면 부채 및 막체의 수평방향의 막면 수직방향 하중을 얻게된다. 즉, 수직방향 하중은 다음과 같다

$$F = 2T \sin \alpha \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$  는 양 끝단의 막면 휨 각도로 앵커간격, 외력 크기, 막 자체의 인장 강성에 의해 결정된다.

본 연구에서는 막면 휨각도  $21.8^\circ$  를 적용하기 위하여 앵커간격은 10m 로 고정하고 막체폭은 1m 단위로 3m 를 사용하였다.

## 2.2 CASALM 계류해석

본 연구에서 오탉방지막 계류 해석을 위해 사용한 소프트웨어는 TTI(Tension Technology International) 에서 개발한 CASALM(Combined Catenary and Single

Anchor Leg Mooring)으로 다양한 형태의 계류해석에 유용한 소프트웨어이다.

부채부(Buoy)에 바람, 조류 및 파랑등에 의한 외력을 작용시키기 전에 정수압 상태의 고요한 바다(Calm water)에 오탉방지막을 설치한 것으로 보고 계류 해석하는 중립 평형 해석을 우선 수행한다. 즉, 부채부의 부력과 막체부의 수중무게 및 계류라인 장력의 수직성분이 서로 평형을 이루며 양쪽 케이블은 케이블 자체의 수중무게로 인해 그 형상이 대칭을 이루면서 Catenary 곡선을 이루어 대칭인 동일한 크기의 장력이 계류라인에 발생하게 된다. 이때 양케이블에 발생하는 장력이 케이블 자체의 절단강도를 넘어서지 않게 안전율을 고려하며 케이블의 길이를 조절한다.

중립 평형상태에서 부채에 외력을 작용시키면 Fig.1 에서 보듯이 좌측 케이블은 긴장되고 우측의 케이블은 일부가 해저면에 접지되는 거동을 하면서 부채변위, 계류라인 장력, Anchor Angle, 계류라인의 해저면 접지길이 및 케이블 수중 곡선길이인 Total Scope 등을 얻게 된다.

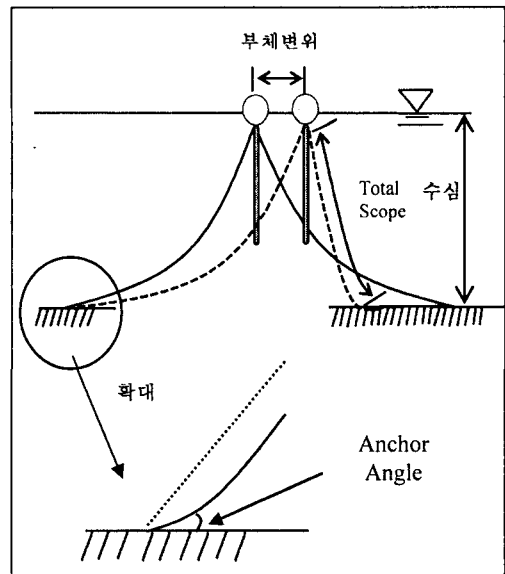


Fig. 1. 오탉방지막의 거동.

## 3. 해석 결과 및 분석

본 연구에서 계류라인의 거동분석을 위해 해석한 오탉방지막의 제원은 Table 1 에 외력산정을 위한 조건은 Table 2 에 주어진다.

주어진 오탉방지막의 제원을 사용하여 만조위

수심 7m, 부채와 해저면 앵커사이의 직선길이 14m(초기 직선 긴장각 30°)에 대하여 중립평형 해석을 해 본 결과, 케이블의 절단장도를 넘어서지 않기 위해서는 최소한 15.65m의 케이블 길이가 필요한 것으로

Table 1. 오락방지막의 제원

부채직경 (d)	0.35m
막체폭 (B)	1m × 3 = 3m
앵커 간격 (2a)	10m
케이블 직경	14mm
케이블 강성	3 × 10 <sup>7</sup> kg/cm
케이블 절단강도	9830 kg
단위길이당 케이블 수중 단위 중력	0.00581 kg/cm

Table 2. 외력산정 조건

공기의 단위중량(ρ')	1.29kgf/m <sup>2</sup>
해수의 단위중량(ρ)	1030kgf/m <sup>3</sup>
풍속(U)	42.4m/sec
조류속(V)	0.65m/sec
저항 계수(C <sub>d1</sub> )	1.0
저항 계수(C <sub>d2</sub> )	1.13
저항 계수(C <sub>d3</sub> )	1.13
바람 유입 각도(θ <sub>1</sub> )	0°
조류 유입 각도(θ <sub>2</sub> )	0°
파랑 유입 각도(θ <sub>3</sub> )	0°
파고(H)	1.36m
만조위 수심(h)	7m

나타났다. 중립평형 해석후 Table 2에 주어진 조건등을 이용하여 얻은 부채 외력을 작용시켜 계류라인 해석을 하였다.

조위변화에 따른 계류라인의 거동분석을 위해 수심을 만조위 7m부터 0.2m씩 5m까지 감소시키면서 해석을 수행하였다. 뿐만 아니라, 케이블 길이가 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 케이블 길이를 0.1m 증가시켜 상기와 같은 수심변화에 대하여 동일한 계류라인 해석을 하였다.

Fig.2는 케이블 길이 15.65m일때의 수심변화에 따른 긴장 및 이완케이블의 장력변화를 Fig.3는 케이블 길이 15.75m일때의 수심변화에 따른 긴장 및 이완케이블의 장력변화를 나타낸다.

Fig.2에서 보듯이 거의 평행하게 긴장된 케이블 길이에 대해서는 조위가 하강하면 장력이 이완되는 것을 알 수 있으며 긴장측 케이블은 장력이 급격히 감소한 후 일정한 크기의 장력을 유지하나, 이완측 케이블의 경우에는 급격히 장력이 감소한 후 더 이상 장력이

존재하지 않게 된다. Fig.3에서 보듯이 케이블 길이를 증가시키면 조위가 하강하더라도 장력변화가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Fig.4에서 보듯이 조위가 하강하면 부채변위가 증가하면서 긴장측 케이블은 새로운 평형에 도달하여 일정한 장력을 유지하나, 이완측 케이블은 일부가 해저면에 접지되어 장력이 완전히 풀리기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 케이블 자체 길이의 증가도 장력의 감소를 일으키는 것을 알 수 있다.

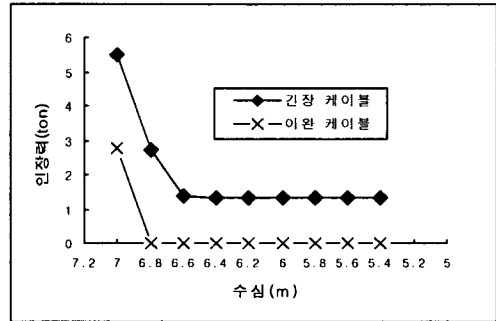


Fig. 2. 수심변화에 따른 계류라인 장력 (케이블 길이=15.65m).

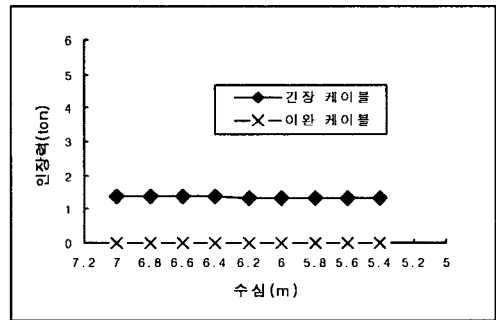


Fig. 3. 수심변화에 따른 계류라인 장력 (케이블 길이=15.75m).

Fig.4의 형상은 Fig.5~7으로부터 다시 확인할 수 있다. 또한, 케이블 길이를 약간 증가(10cm)시키면

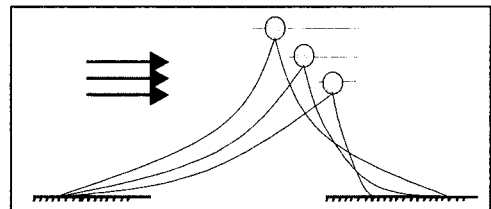


Fig. 4. 수심변화에 따른 거동형상.

Fig.5에서 나타나듯이 긴장측 저면 앵글이 약간 감

소하며, Fig.6 에서 보듯이 이완측 케이블의 Total Scope 는 거의 변화지 않고, Fig.7 에서 보듯이 부체변위는 증가하는 경향이 있으나 Fig.2 와 Fig.3 를 비교해

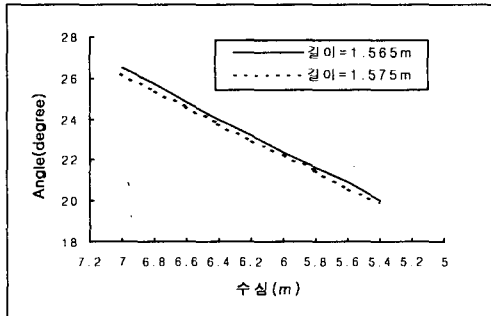


Fig 5. 수심변화에 따른 긴장케이블 저면 앵글 (케이블 길이=15.65m).

보면 수심이 감소하면서 긴장측 케이블의 장력은 거의 비슷하게 나타난다.

그러므로, 안전율을 고려하여 팽팽하게 적정케이블의 길이를 정하더라도 수심이 하강하면 부체변위는 증가하고 긴장측 해저면 앵글은 감소하여 긴장측 케이블은 거의 일정한 장력을 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나, 반대쪽 이완케이블의 기능은 상실되기 때문에 구조체 전체의 불안정성을 초래할 수도 있을 뿐만 아니라 조류나 파랑의 방향이 바뀔 경우 원래의 오탁방지막 형상으로 복원되지 않을 수도 있을 것으로 사료된다.

위에서 기술했듯이 조위변화에 따른 오탁방지막 계류라인의 거동은 복잡하기 때문에 시공 및 설계시 세심하게 다뤄져야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 조위변화에 따른 오탁방지막 계류라인의 거동을 조사하였으며, 거동분석으로부터 안전율을 고려하여 팽팽하게 적정케이블의 길이를 정하면 수심이 하강하더라도 긴장측 케이블은 거의 일정한 장력을 유지하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 이완케이블 기능은 상실되어 구조체 전체의 불안정성을 초래할 수도 있는 것을 알 수 있었다.

향후, 보다 더 정확한 해석을 위해 다음과 같은 해석 방법의 보완이 필요할 것으로 사료된다.

- 1) 정확한 의력산정
- 2) 막체해석을 통한 부체 및 막체 장력 산정
- 3) 부체, 막체 및 계류라인의 상호작용을 고려한 거동해석

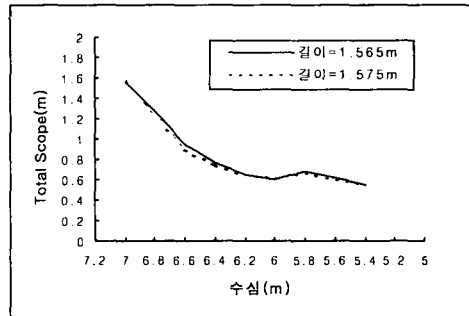


Fig 6. 수심변화에 따른 이완케이블 Total scope (케이블 길이=15.65m).

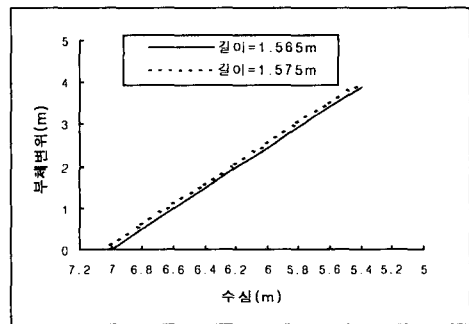


Fig 7. 수심변화에 따른 부체변위 (케이블 길이=15.65m).

#### 사 사

본 연구의 수행을 위한 해인 이엔씨의 지원에 감사사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 항만공사 표준시방서, 해양수산부, 1994.
- Buoy Engineering, H.O. Berteaux, 1975
- CASALM MANUAL, TTI, 1997
- Prandtl L., 1906. Further Development of the Analogy for Membrane Analysis. *Physik. Z.*, Vol. 4, No. 2.
- [www.taiyokogyo.co.jp/sipro/Frames/Fdefault.htm](http://www.taiyokogyo.co.jp/sipro/Frames/Fdefault.htm)