

흐름중 부유쓰레기 차단막에 작용하는 장력계산

조일형⁽¹⁾, 최학선⁽²⁾, 유정석⁽²⁾

Tension calculation on trash curtain in current

by

I.H. Cho⁽¹⁾, H.S. Choi⁽²⁾ and J.S. Yu⁽²⁾

요 약

본 논문에서는 현수선 모델에 기초를 둔 해석방법을 사용하여 부유쓰레기 차단막에 작용하는 흐름에 의한 장력 및 항력을 계산하였다. 흐름에 의한 항력은 차단막의 법선방향으로만 작용하여 차단막에 걸리는 장력은 일정하다고 가정하였다. 계산 모델로 차단막이 흐름방향과 대칭으로 설치된 경우와 비대칭으로 설치된 경우를 다루었다. 형상계수와 설치각도와 같은 차단막의 설치형상을 바꿔가면서 차단막에 작용하는 장력과 항력의 변화를 살펴보았다. 계산 결과는 형상계수가 증가함에 따라 장력계수도 커지며 형상계수가 큰 범위에서는 장력계수의 증가폭이 커짐을 보여주고 있다. 또한 차단막을 흐름방향과 비대칭으로 설치하였을 때 경사각도를 증가시키면 장력계수가 줄어든다는 사실을 발견하였다. 계산모델은 한강 지류인 탄천에 설치한 길이 200m의 부유쓰레기 차단막에 적용하였다. 계산결과에 의하면 차단막 양 끝에 설치한 앵커블록이 견딜 수 있는 최대 흐름속도는 2m/sec이다.

Abstract

Herein, a theoretical method based on the catenary model is applied to obtain the tension and drag forces acting on the trash curtain which is deployed at river for the prevention of floating debris inflow into the ocean. Under the assumption that fluid drag is perpendicular to the trash curtain, the tension and drag forces are uniform along the trash curtain. As a numerical model, the trash curtain is moored both symmetrically and asymmetrically with respect to the flow. The tension and drag forces on the trash curtain are investigated according to the change of gap ratio and inclined angle of the trash curtain. Numerical results show that tension parameter is increased as the gap ratio is increased. It is found that tension parameter is reduced as the inclined angle is increased in the case of asymmetric deployment. The numerical model is applied to the specific problem for the trash curtain (200m) deployed at the Tancheon on the Han river. The maximum inflow velocity that anchor system can endure is 2m/sec.

Keywords: trash curtain, tension, drag force, current, floating debris, anchor system

(1) 정희원, 제주대학교 해양산업공학부 cho0904@cheju.cheju.ac.kr

(2) 정희원, 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소

1. 서 론

바다는 고유의 자정능력과 완충능력을 가지고 있으므로 오랜 기간의 환경파괴에 쉽게 그 오염의 징후를 드러내지 않는다. 그러나 일단 자정능력의 한계를 넘어 순환계가 파괴될 경우, 원상복구가 거의 불가능하거나, 설사 원상회복이 되더라도 그때까지는 막대한 노력과 비용 그리고 시간이 필요하다. 바다 속으로 던져지는 쓰레기의 종류도 시대가 변하면서 아주 달라졌다. 플라스틱이나 깡통, 유리병같이 썩지 않거나 부식되는 데 수백 년 이상 걸리는 온갖 폐기물들이 바다로 마구 버려지게 되자 바다의 쓰레기 오염은 또 하나의 중요한 환경문제로 대두되기 시작했다. 바다에 버려지는 쓰레기 중에서도 물에 뜨는 플라스틱이 가장 문제가 되는데 그 이유는 장구한 세월 동안 분해되지 않고 남아서 여러 가지 피해를 유발하기 때문이다.

1994년 UN의 환경프로그램에 의해 발간된 "State of the Seas Report"에 의하면 해양으로 유입되는 오염물질의 약 75-80%는 육상에서 배출된 것으로 보고되고 있다. 육상에서 기인된 오염물질은 홍수·폭우시 일시에 강으로 대량 유입되고 있다. 한강 수상폐기물 조사결과에 의하면 1996년에 438.4톤과 1997년에 557.8톤으로 매년 증가하는 추세에 있으며, 월별 수거량에서는 장마철인 6월에서 8월에 수상폐기물이 집중됨을 알 수 있다. 이러한 수거량은 실제 발생량에 비해 극히 일부뿐이며, 실제 바다로 유입되는 폐기물의 양은 훨씬 많을 것으로 예측된다. 즉, 바다 쓰레기 문제는 육상 쓰레기 문제의 연장선상에 놓여 있다. 육상에서 배출된 폐기물이 바다로 유입되면 일부는 해저에 가라앉고, 나머지는 바람, 조류, 파도 등에 의해 인근해 해역으로 넓게 확산된다. 넓게 분포된 쓰레기를 수거하는 것은 쉬운 일이 아니며 많은 인력과 수거비용이 소요된다. 육상 쓰레기중 플라스틱과 같은 부유물이 바다로 유입되는 것을 사전에 막기 위하여 강이나 하천에 차단막을 설치하는데, 이때 흐름중 차단막에 작용하는 장력과 항력을 정확히 알아야만 효율적인 차단막을 제작할 수 있으며, 또한 차단막을 고정시키기 위해 필요한 앵커시스템을 설계할 수 있다.

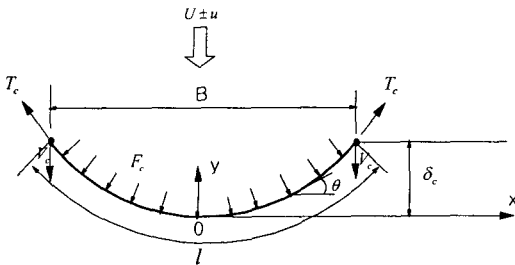
차단막은 오염물질의 종류에 따라 크게 3가지

로 나눌 수 있다. 기름 유출 사고시 기름의 확산을 막기 위하여 설치하는 오일붐(oilboom)과 준설공사시 부유하는 세립토의 확산을 막는 오타방지막(silt curtain) 그리고 부유쓰레기 차단막(trash curtain)이 대표적인 차단막이다. 차단막의 4가지 주요 구성 요소는 차단막을 수면위로 띄우는 부력부, 오염물질을 차단하는 차단부, 차단부를 수직방향으로 유지시키는 역할을 하는 발라스트(ballast), 그리고 차단막에 작용하는 장력을 지지하는 장력지지부이다. 차단막에 작용하는 장력을 추정하는 대표적인 연구로 Cross and Hoult[1970]와 Milgram[1971]의 논문을 들 수 있다. 그들은 흐름에 의한 항력이 차단막에 법선방향으로만 작용하여 차단막에 작용한 장력은 일정하다는 가정에서 출발하는 현수선(catenary) 모델에 기초를 둔 해석방법을 제시하여 흐름중에 놓여진 오일붐에 작용하는 장력을 계산하였다. Sawaragi[1987,1989]는 Milgram[1971]의 해석방법을 오타방지막에 적용하여 한쪽 끝단이 부력체에 연결되어 있고 다른 한 쪽 끝단이 해저면 바닥에 고정되어 있을 때 흐름과 파도에 의한 오타방지막에 작용하는 장력과 항력을 수치적으로 구하고, 체계적인 모형실험을 수행하여 오타방지막의 항력계수를 경험적으로 구하였다. Swift[1992]는 법선방향의 항력뿐만 아니라 차단막이 흐름과 평행하게 놓여질 때 생기는 접선방향의 항력을 고려하여 오일붐의 길이방향에 따라 변하는 장력 분포를 수치적으로 구하였다.

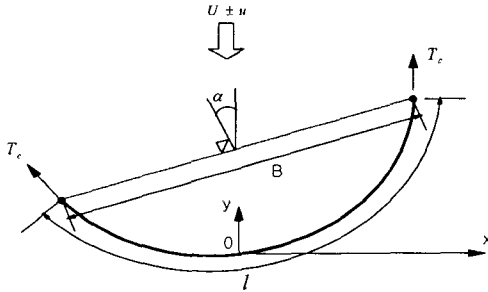
본 논문에서는 현수선 모델에 기초를 둔 해석방법을 강이나 하천에 설치하여 부유쓰레기를 차단하는 차단막에 적용하여 차단막에 작용하는 장력 및 항력을 계산하였다. 차단막이 흐름방향과 대칭으로 설치된 경우와 비대칭으로 설치된 경우에 대하여 형상계수와 설치각도의 변화에 따른 장력계수의 변화를 살펴보고, 차단막의 장력지지부인 케이블의 강성계수의 변화에 따른 장력계수의 변화를 살펴보았다. 흐름중 차단막에 작용하는 장력계산의 적용 예로서 길이 200m, 홀수 1.0m인 단천에 설치된 차단막에 작용하는 장력을 3가지 유속($U=1, 2, 3m/sec$)에 대하여 계산하였고, 차단막을 고정하기 위해 양 끝단에 설치한 매설형 앵커블록의 파지력을 구하여 앵커블록이 지지할 수 있는 최대유속을 구하였다.

2. 흐름중 차단막에 작용하는 장력 계산법

이 절에서는 강한 흐름이 존재하는 강이나 하천에 설치한 차단막에 작용하는 항력과 장력을 구하는 해석방법을 소개하고자 한다. 차단막에 작용하는 장력과 항력은 흐름의 속도와 방향, 설치된 차단막의 형상, 수면아래의 차단부의 형상에 따라 변한다.



(a) Symmetric



(b) Asymmetric

Fig. 1 Definition sketch of trash curtain in current

Fig. 1a에 보인 것처럼 길이 l 인 차단막에 상류로부터 내려오는 흐름에 의하여 일정한 크기의 장력 (T_c)과 항력 (F_c)이 작용한다고 생각하자. 유속이 U 이고, 흐름 방향이 y 축과 평행할 때 차단막의 법선방향의 유속은 $U \cos \theta$ 이다. 단위 길이당 차단막에 작용하는 항력 F_c 는 다음 식으로 주어진다.

$$F_c = \frac{1}{2} C_D \rho d U^2 \cos^2 \theta \quad (1)$$

여기서 C_D 는 항력 계수, d 는 차단막의 홀수, θ 는 x 축과 차단막의 접선방향이 이루는 각도를 나타낸다.

(x, y) 평면에서 차단막의 설치형상을 나타내는 곡선을 $y=f(x)$ 라 할 때, 차단막의 미소요소에 대하여 법선 방향의 힘의 평형식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F_c = T_c \frac{f''(x)}{\{1+f'(x)^2\}^{3/2}} \quad (2)$$

여기서 $f'(x) = df(x)/dx, f''(x) = d^2f(x)/dx^2$ 이다. 차단막 중앙부 ($\theta=0$)에 작용하는 항력을 $\sigma_c = \frac{1}{2} C_D \rho d U^2$ 라 하면, F_c 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_c = \sigma_c \cos^2 \theta = \frac{\sigma_c}{\{1+f'(x)^2\}} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$T f''(x) - \sigma_c \{1+f'(x)^2\}^{1/2} = 0 \quad (4)$$

윗식은 차단막의 접선방향의 항력과 차단막의 굽힘 강성(bending stiffness)을 무시하였을 때 만족하는 미분방정식이다.

차단막 중앙부에서의 경계조건식 ($f(0) = f'(0) = 0$)을 대입하여 위에 주어진 미분 방정식을 풀면, $f(x)$ 는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{T_c}{\sigma_c} \left(\cosh \frac{\sigma_c x}{T_c} - 1 \right) \quad (5)$$

차단막의 전체 길이는 아래식으로부터 얻어진다.

$$l = \int_{-B/2}^{B/2} \frac{dx}{\cos \theta} = \int_{-B/2}^{B/2} \sqrt{1+f'(x)^2} dx \quad (6)$$

$$= \frac{2T_c}{\sigma_c} \sinh \frac{\sigma_c B}{2T_c}$$

여기서 B 는 설치된 차단막의 개구부의 폭이다. 무차원 값인 장력계수 ($\tau_c = \frac{T_c}{\sigma_c l}$)와 형상계수 ($R_{gc} = \frac{B}{l}$)도입하여 식 (6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tau_c \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

차단막의 형상계수(gap ratio) R_{gc} 가 주어지면 방정식 (7)을 풀어 장력계수(tension parameter) τ_c 을 구한다. 방정식 (7)은 τ_c 에 대한 비선형 방정식이다. 본 연구에서는 비선형 방정식을 푸는 대표적인 수치해법인 Newton-Raphson 축차법(iteration method)을 사용하여 해를 구하였다.

$$F(X) = \sinh(R_{gc}X) - X = 0, \quad (X = \frac{1}{2\tau_c}) \quad (8)$$

$$X^{k+1} = X^k - \frac{\sinh(R_{gc}X) - X}{R_{gc} \cosh(R_{gc}X) - 1}$$

여기서 k 는 축차수(iteration number)를 나타낸다. 초기치(X^1)를 주고 허용오차 범위내 일정한 값을 가질 때까지 위의 계산을 반복한다.

Fig. 2는 수치계산을 통하여 얻은 형상계수와 장력계수 사이의 관계곡선이다. 형상계수가 크다는 것은 전체길이에 비하여 개구부의 폭이 큰 것으로 설치된 차단막의 곡률이 작다는 것을 의미한다. 장력계수는 형상계수가 작은 범위내에서는 완만히 증가하다가 형상계수가 큰 범위에서는 증가폭이 커짐을 볼 수 있다. 주어진 설치형상(R_{gc})에서 장력계수(τ_c)가 구해지면 차단막에 작용하는 장력($T_c = \tau_c \sigma_c l$)을 구할 수 있다. 설치될 차단막의 길이가 같을 때 차단막의 곡률이 커지도록 설치형상을 바꾸면 차단막에 걸리는 장력은 줄어든다. 양 끝단에서의 흐름방향의 항력은

$$V_c = T_c \sin \theta \text{이므로, } V_c = T_c \frac{f(B/2)}{\sqrt{1+f(B/2)^2}}$$

로 표현할 수 있다. 앞에서 구한 $f(x)$ 을 대입하여 양 끝단에서의 무차원된 항력을 구하면

$$\frac{V_c}{\sigma_c l} = \tau_c \tanh \frac{1}{2\tau_c R_{gc}} \quad (9)$$

이다. 또한 식 (5)에 $x = B/2$ 을 대입하면 중앙부에서의 굽은 변위량을 구할 수 있다.

$$\frac{\delta_c}{B} = \frac{\tau_c}{R_{gc}} \left(\cosh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} - 1 \right) \quad (10)$$

Fig. 3과 4는 각각 양 끝단에서의 무차원된 항력과 중앙부에서의 굽은 변위량을 그렸다. 무차원된 항력은 장력계수와 마찬가지로 형상계수가 증가함에 따라 증가하고 있다. 그러나 중앙부의 굽은 변위량은 반대의 경향을 보여주고 있다.

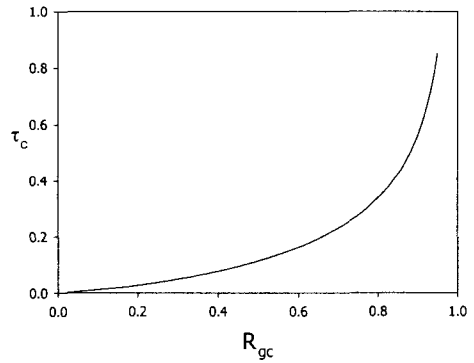


Fig. 2 Relation curve between gap ratio and tension parameter at symmetric deployment

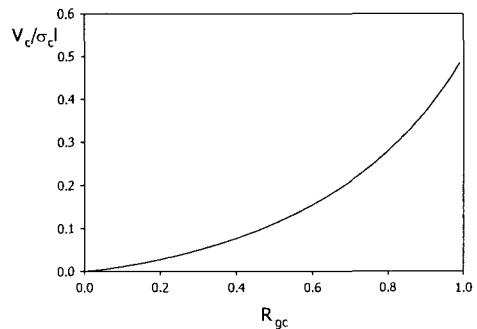


Fig. 3 Non-dimensional drag force of trash curtain

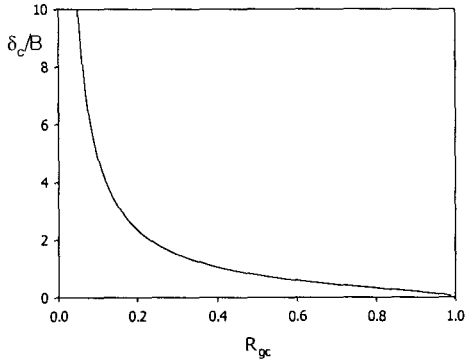


Fig. 4 Non-dimensional displacement of trash curtain at center

지금까지는 차단막이 y축에 대칭으로 설치된 경우에 대하여 살펴보았다. 차단막이 Fig. 1b와 같이 y축에 대하여 비대칭으로 설치될 때 위와 비슷한 유도과정을 통하여 형상계수와 장력계수 사이의 관계식을 유도할 수 있다(Milgram[1971]).

$$4\tau_c^2 \sinh^2\left(\frac{R_{gc}}{2\tau_c} \cos \alpha\right) + R_{gc}^2 \sin^2 \alpha = 1 \quad (11)$$

경사각도 $\alpha=0$ 는 대칭인 경우로 위식은 식 (7)로 바뀐다. Fig. 5는 4개의 경사각도 ($\alpha=0, 30, 45, 60^\circ$)에 대한 장력계수를 그린 그림이다. 같은 형상계수에서 경사각도가 클수록 장력계수가 줄어드는 것을 알 수 있다.

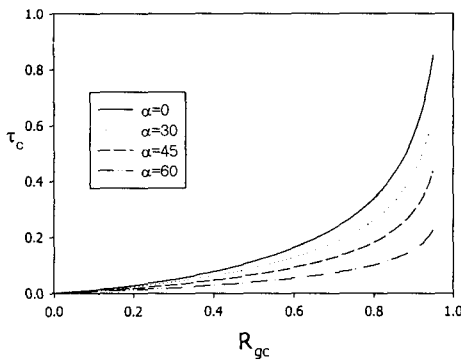


Fig. 5 Relation curve between gap ratio and tension parameter at asymmetric deployment

앞서 유도한 식 (7)과 (11)은 차단막의 길이가 장력을 받아도 늘어나지 않는다는 가정에서 출발하였다. 그러나 차단막에 큰 장력이 작용할 때 차단막의 장력지지부인 케이블의 길이는 늘어난다. 케이블의 초기길이를 l_0 , 케이블의 단면적을 A , 강성계수를 E , 장력 T_c 에 의해 늘어난 케이블의 길이를 l 이라 할 때, Hooke의 법칙에 따라 장력은 다음 식을 만족한다.

$$T_c = EA\left(\frac{l}{l_0} - 1\right) \quad (12)$$

새로운 무차원 변수 $\xi = \frac{l}{l_0}$, $R_E = \frac{EA}{\sigma_c l_0}$ 을 도입하여 차단막이 y축에 대칭으로 설치되었을 때 만족하는 식 (7)과 식(12)을 다시 쓰면 $\xi = 2\tau_c \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c}$, $\tau_c = R_E(\xi - 1)$ 이다. 두식에서 ξ 을 소거하면 아래식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2R_E} = \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} - \frac{1}{2\tau_c} \quad (13)$$

R_{gc}, R_E 가 주어지면 식 (13)을 풀어 장력계수 τ_c 을 구할 수 있다. Fig. 6은 3가지 R_E 에 대하여 장력계수를 그린 그림이다. R_E 가 클수록 강한 케이블을 뜻하며, $R_E = \infty$ 는 케이블이 늘어나지 않음을 의미한다.

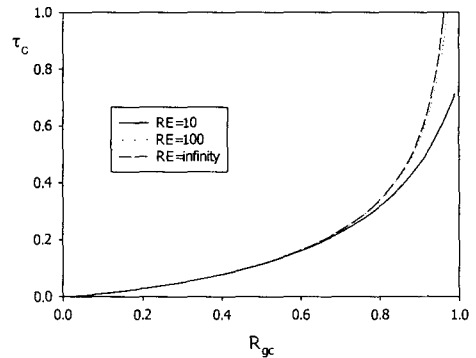


Fig. 6 Relation curve between gap ratio and tension parameter considering cable elongation

차단막에 작용하는 장력을 구하기 위해서는 항력계수 C_D 을 알아야 한다. 본 논문에서는 수면 아래의 차단부는 흐름에 의해 변형되지 않는다는 가정을 하여 유체장에 놓여진 길이 a , 높이 b 인 평판에 대한 항력계수로부터 $C_D=1.5$ 로 잡았다 (Table 1 참조).

Table 1 Drag coefficients of plat plate

a/b	C_D
1	1.1
3	1.15
4	1.19
10	1.29
18	1.40
∞	2.01

3. 차단막 앵커시스템 설계

탄천에 설치한 차단막의 전체길이는 200m, 흘수는 1.0m이다. 설치각도 (α)를 60도로 잡았을 때, 차단막 양끝단의 좌표점은 (0,0), (100m,150m)이다. 따라서 형상계수는 0.9이다(Fig. 7 참조). 설계유속을 1m/sec, 2m/sec, 3m/sec 할 때, 차단막에 걸리는 장력은 Fig. 8, 9, 10과 같다. 형상계수 0.9에 해당되는 장력값을 읽으면 각각 2.5톤, 10톤, 22톤이다.

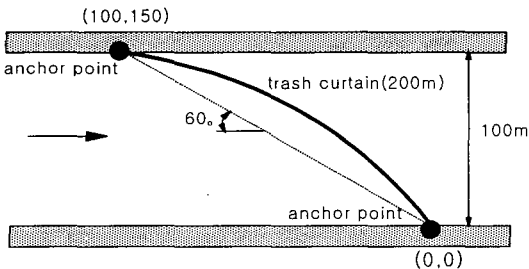


Fig. 7 Deployment sheet of trash curtain at Tancheon

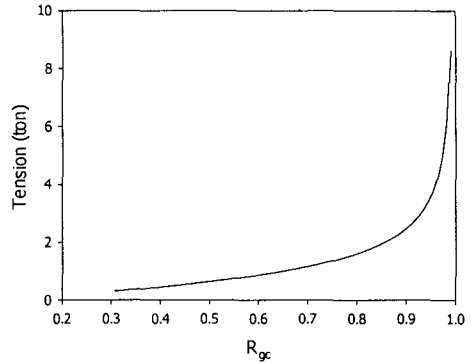


Fig. 8 Tension acting on trash curtain (U=1m/sec)

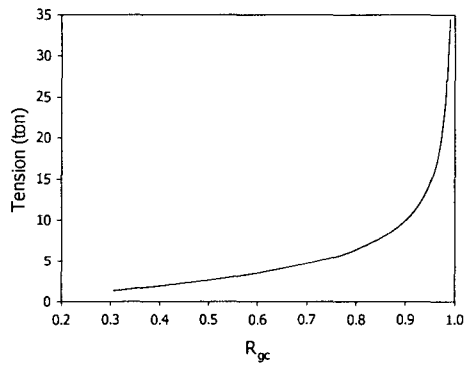


Fig. 9 Tension acting on trash curtain (U=2m/sec)

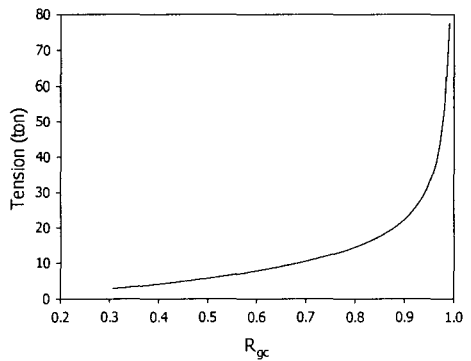


Fig. 10 Tension acting on trash curtain (U=3m/sec)

차단막을 고정하기 위해 이용되는 앵커에는 투

Table 2 Holding power coefficient

앵커의 종류	토질			
	실트 및 점토	사질토	사력	암반
스톡앵커	3-4	4-5	1.5-2.5	0.8-1.2
스톡리스 앵커	3-4	4-5	1.5-2.5	0.8-1.2
콘크리트 블록(사각형)	2-3	1.5-2.0	1.5-2.0	1.0-1.5
콘크리트 블록(달형)	2.5-3.5	1.5-3.5	1.5-2.5	1.0-1.5

설앵커와 매설앵커가 있다. 투설앵커에는 해상에서 투입·설치되는 것으로 달형, 블록형이 있으며, 가장 보편적으로 사용되고 있는 앵커이다. 달형은 주로 해저면과의 걸림 저항력을 파지력(holding power)으로 하는 것으로 스톡 앵커(stock anchor), 스톡리스 앵커(stockless anchor) 등이 있다. 한편 블록형은 해저면과의 마찰 저항력을 파지력으로 하고 싱커로도 불리며, 통상은 쇠덩어리 혹은 콘크리트 블록이 이용되며 크레인선 등에 의해 운반되어 설치된다.

본 연구에서는 차단막을 고정하기 위한 방법으로 파지력이 높은 콘크리트 블록을 매설하는 방법을 채택하였다. 콘크리트 블록을 매설하였을 때 매설 앵커의 파지력을 구하는 식은 다음과 같다(김남형,[1995]).

$$F = \alpha KW \quad (14)$$

여기서 F 는 앵커의 파지력, W 는 앵커의 공기중에서의 중량에서 부력을 뺀 수중 중량을 뜻하며 각각의 단위는 톤이다. K 는 파지력 계수이며 α 는 중량에 의한 저감계수이다.

매설앵커의 파지력은 앵커의 중량, 형상, 해저의 지질, 지형에 의해 크게 좌우된다. 일반적으로 파지력은 앵커의 중량이 작으면 해저면과의 걸림 저항이 상대적으로 크고, 중량이 증가함에 따라 마찰 저항이 커진다. Table 2는 토질별의 파지력 계수를 보여주고 있다. 부유쓰레기 차단막이 설치될 탄천의 바닥은 실트와 점토로 이루어져 있고, 매설앵커는 사각형 콘크리트 블록이므로 파지력 계수를 2.5로 잡았다.

콘크리트 블록의 크기는 가로 2m, 세로 2m, 높이 1.0m의 콘크리트에 직경 30cm, 두께 12mm의

강관을 삽입한 형태이다. 강관의 전체높이는 3m로 콘크리트 블록 밖으로 2m가 나오며, 여기에 20mm 강판을 붙여 차단막의 양 끝단을 고정하였다. 강관안에는 콘크리트를 채워 넣어 강관이 휘어지는 것을 방지하였다(Fig. 11 참조).

중량에 의한 저감계수 α 에 대해서는 몇 가지 제안이 있지만 일본 토목학회에서 제안한 저감계수는 앵커의 수중중량 $W \leq 100$ 톤에 대해서는 $\alpha = 1$, $100 \text{톤} \leq W \leq 300$ 톤에 대해서 $\alpha = 0.4$ 로 되어 있다. 콘크리트의 밀도는 물의 밀도의 2.2배이므로 콘크리트의 수중중량(공기중 중량-부력)은 4.8톤이다. 여기에 강관의 무게와 강관에 채워진 콘크리트 무게를 합하면 대략 5톤 정도로 추산된다. 따라서 중력에 의한 저감계수를 $\alpha = 1.0$ 으로 잡았다.

파지력 계산식 (14)을 이용하여 파지력을 계산하면 12.5 ton이다. 이 값은 탄천에 설치한 부유쓰레기 차단막의 설치형상에서 2m/sec의 유속에 내려올 때의 차단막에 걸리는 장력(10 ton)을 지지할 수 있다.

4. 결론

흐름중 차단막에 작용하는 장력과 항력을 구하는 현수선 모델에 기초를 둔 이론적인 해석 방법을 소개하였고, 해석모델을 탄천에 설치한 차단막에 적용하여 계산을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개구부의 폭과 전체길이의 비인 형상계수가 커짐에 따라 장력계수가 증가하며, 차단막을 흐름방향과 비대칭으로 설치하였을 때 같은 형상계수에서 경사각도가 클수록 장력계수가 줄어든다는 사실을 알 수 있었다.

[7] Sawaragi, T., Aoki, S., 1987, "Prediction for hydrodynamic forces on silt curtains and its deformation in current", Proc. of Civil Engineering in the Ocean, JSCE, Vol.3, 203-208
[8] Sawaragi, T., Aoki, S. and Yasui, A., 1989, "Tension on silt curtains in current and waves", Proc. of 8th international conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 13-21.

[9] Swift, M. R., Celikkol, B., LeCompagnon, G. and Goodwin, C. E., 1992, "Diversion oil boom in current", J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.118, No.6, 587-597.