

Fick 확산 모형을 이용한 하상 굴착 공시로부터의 부유물질 농도 산정

Estimation of Suspended Solids Concentration Caused by Stream Bed Excavation Works through the Application of the Fickian Diffusion Model

안 명 길* / 전 병 호**

Ahn, Myung Kil / Jun, Byong Ho

Abstract

Excavation works on stream beds have been done for various reasons including aggregate collection, sediment dredging, bridge constructions, or laying pipes under the ground. These activities may cause significant loadings of SS (suspended solids) resulting in water pollution and other detrimental effects to the surrounding environment. This research investigates application potential of a fickian diffusion model, derived from two dimensional advection-diffusion equation through some simplifying assumptions, as a planning tool for the estimation of SS loadings from excavation works and evaluation of pollution prevention measures in case that sophisticated numerical simulation models are not applicable due to various practical reasons. Through a case study of the Juncheon stream in the Donghae City on the Kangwondo Province, this study demonstrates applicability of the fickian diffusion model as a practical method for the preliminary estimation of SS loadings from excavation works and evaluation of performance of fabrics made of synthetic fiber for the reduction of downstream SS concentration with deficient field data.

Keywords: stream bed excavation, fickian diffusion model, suspended solids, water pollution, sediment transport

요 지

하상 굴착 공사는 골재 채취, 토사 준설, 교량 건설 또는 하천을 횡단하여 매설하는 관로 공사 등 여러 가지 경우에 이루어지고 있다. 이러한 하상 굴착 공사 과정에서 발생하는 다량의 부유물질(SS)은 수질을 오염시키며 환경에 악영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 현장 여건상 정교한 수치해석모형을 적용할 수 없는 경우에, 2차원 이송-확산 모형을 단순화하여 유도한 Fick 확산 모형에 의하여 부유물질의 농도를 산정하고 오탐 방지 시설 설치에 따른 부유물질 농도의 저감 효과를 평가하는 방법을 검토하였다. 강원도 동해시에 위치한 전천의 송유관로 매설공사를 대상으로, Fick 확산 모형이 하상 굴착으로부터 발생하는 부유물질의 농도 산정과 오탐방지막의 설치에 따른 오염 저감 효과를 사전에 예비적으로 평가하는 실무적인 방법이 될 수 있음을 제시하였다.

핵심용어: 하상굴착, Fick 확산모형, 부유물질, 수질오염, 토사이송

* 삼척산업대학교 토목공학과 교수

** 육군사관학교 토목공학과 교수

1. 서 론

하상 굴착 공사는 골재 채취, 토사 준설, 교량 건설 또는 하천을 횡단하여 매설하는 관로 공사 등 여러 가지 경우에 이루어지고 있다. 그런데, 이러한 하상 굴착 공사 과정에서 발생하는 다량의 부유물질(SS)은 수질을 오염시키며 수중생태계에 악영향을 미치게 된다. 최근 환경오염과 생태계 보전에 대한 전국민적인 관심이 고조되어 감에 따라 하상 굴착에 따른 부유물질 농도의 산정과 이에 따른 수질 오염과 생태계 피해를 줄이기 위한 저감대책 수립은 그 중요성을 더해가고 있다.

이렇게 하상 굴착 과정에서 발생하는 부유물질의 농도를 산정하는 방법으로는 오염물의 이송-확산 과정을 나타내는 방정식으로 구성된 수학적인 모형의 해를 구하는 방법과 스케일 모형을 이용하는 수리 모형 실험에 의한 방법이 있다.

수리모형 실험은 현지 하천에 대한 수리학적인 모형을 만들고 부유물질을 발생시켜 그 농도의 시공간적 분포를 측정함으로써 실제 하천에서의 부유물질 확산을 해석하게 된다. 그러나, 모형상에서 발생한 수리학적인 현상을 실제 하천의 상황으로 상사화시키는 것이 곤란할 뿐만 아니라, 막대한 시설비와 실험 시간이 소요된다. 수학적인 모형에 의한 방법으로는 수치해석모형에 의한 방법, 해석해에 의한 방법, 수역 분할 혼합 모형에 의한 방법이 있다(浦港綜合製鐵(株), 1982). 수치해석 모형에 의한 방법은 이송-확산 방정식의 근사해를 유한차분법 또는 유한요소법 등에 의하여 구하는 방법이다. 계산 과정은 먼저 하천의 유속과 수심을 연속방정식과 운동량방정식으로부터 계산하고, 이를 이용하여 부유물질의 이송-확산에 의한 농도장의 변화를 계산한다. 따라서, 유속과 수심의 계산치가 실제 하천에서 측정된 실측치와 일치하여야 정확한 부유물질의 농도장을 계산할 수 있다. 해석해에 의한 방법은 부유물질의 이송-확산 방정식을 간략화할 수 있는 몇 가지 가정들로부터 구해진 해석적인 해를 이용하여 단기적이고 미시적인 부유물질의 이송-확산 현상을 파악하는 방법이다.

수역 분할 혼합 모형에 의한 방법은 부유물질의 농도를 예측해야할 대상 수역을 몇 개로 분할하고, 각 구획 내에서 부유물질이 완전 혼합한다고 가정하고 평형 상태에 도달한 시점에서의 농도를 구하는 방법으로서, 부유물질 농도를 장기적이고 거시적으로 파악하는 방법이다.

수학적인 모형에 의한 부유물질의 농도 산정 방법 중에서 모형의 보정과 검증이 제대로 이루어질 경우에 수

치해석모형에 의한 방법이 해석해나 수역 분할 혼합 모형에 의한 방법 보다 실제의 현상에 가깝게 부유물질 농도장을 파악할 수 있는 방법이다. 그러나, 바람에 의한 유황의 변화, 부유물질 발생량의 시간적 변화, 하천 단면 자료와 조도계수 산정, 부유물질 확산 계수의 공간적 분포 설정 등 여러 가지 조건을 실제 하천에서의 조건과 일치시킨 상태에서 모의하기 위해서는 많은 시간과 노력이 소요될 뿐만 아니라 현장에서의 실측 자료가 미흡해서 모형의 보정과 검증이 불가능한 경우가 많다(浦港綜合製鐵(株), 1982).

따라서, 본 논문에서는 현장 여건상 정교한 수치해석 모형을 적용할 수 없는 경우에, 2차원 이송-확산 방정식을 단순화하여 유도한 Fick 확산 모형에 의하여 부유물질의 농도를 산정하는 방법을 검토하였다. 그리고, 강원도 동해시에 위치한 전천의 송유관로 매설공사를 대상으로, Fick 확산 모형이 하상 굴착으로부터 발생하는 부유물질의 농도 산정과 오탁방지막의 설치에 따른 오염 저감 효과를 평가하는 방법으로서의 적용성을 검토하였다.

2. 부유물질 이송-확산의 기본 이론

수중에서 이송-확산-반응에 의한 오염물질의 농도변화를 나타내는 방정식은 일반적으로 식 (1)과 같이 나타내어진다(Hemond et al., 1994).

$$\frac{dC}{dt} = -\vec{V} \cdot \nabla C + \nabla \cdot D(\nabla C) + r \quad (1)$$

여기서, C 는 오염물질의 농도(M/L^3), \vec{V} 는 유속벡터(L/T), D 는 확산계수(L^2/T), r 은 생성/소멸 반응에 의하여 증가 또는 감소하는 오염물질의 농도(M/L^3)를 나타낸다. 수심방향으로 잘 혼합되는 균일하고 무한히 넓은 2차원 수체에 순간적으로 오염물질이 투입되었을 때의 농도장은 식 (1)로부터 다음과 같이 유도된다(Hemond et al., 1994).

$$C(x, y, t) = \frac{S}{4\pi H t \sqrt{D_x D_y}} e^{-((x-V_x t)^2/4D_x t + (y-V_y t)^2/4D_y t)} \cdot e^{-kt} \quad (2)$$

여기서, C 는 오염물질의 농도(M/L^3), S 는 단위 시간당 투입된 오염물질의 양(M/T), H 는 평균수심(L), x , y 는 오염물질 투입지점으로부터 x 축과 y 축 방향으로의 거리(L), t 는 오염물질 투입후 경과한 시간(T), V_x , V_y 는 x 축과 y 축 방향의 평균유속(L/T), D_x , D_y

는 x 축과 y 축 방향의 확산계수 $[L^2/T]$, k 는 감쇄계수 $[T^{-1}]$ 이다. 만일 윗 식 (2)에서와 같은 수체에서 오염 물질이 연속적으로 투입되는 경우에 대해서는 식 (2)를 시간에 대하여 평균하여

$$\overline{C(x, y)} = \frac{1}{T} \int_0^T C(x, y, t) dt \quad (3)$$

와 같이 구하게 되며, 연속적으로 투입되므로 $T \rightarrow \infty$ 일 때의 값을 구하게 된다(金政鉉, 1991).

x 방향으로만 유속이 존재하며 $T \rightarrow \infty$ 일 때의 식 (3)에 대한 해는 巖井 등에 의하여 다음과 같이 구해졌다(金政鉉, 1991).

$$\overline{C(x, y)} = \frac{S \cdot e^{-(V_x x/2D_x - kt)}}{2\pi H \sqrt{D_x D_y}} \cdot K_0 \left[\frac{V_x}{2} \sqrt{\frac{1}{D_x} \left(\frac{x^2}{D_x} + \frac{y^2}{D_y} \right)} \right] \quad (4)$$

윗식에서 t 는 오염물질 유입지점으로부터 오염물질의 농도를 계산하고자 하는 하류의 어느 한 지점까지 물이 유하하는데 소요되는 시간 (T) 이다. 이때 $K_0(x)$ 는 제2종 Bessel 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$K_0(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xu}}{\sqrt{u^2 - 1}} du \quad (5)$$

본 연구에서는 식 (4)를 적용하여 하상 굴착 공사로부터 발생하는 부유물질의 농도 분포를 계산하였다.

3. 적용 대상 하천: 강원도 동해시 전천

전천 유역은 동해시 북평항구 바로 남쪽에 위치하며 삼화동에서 발원하여 북동쪽으로 유하하다가 신흥천과 합류한 후 동쪽으로 흘러 동해에 유입된다. 전천은 표고 1,350m의 최상류 수원지에서 발원하여 하구 지점의 해안까지 유로연장 11.5km를 유하하는 하상경사가 비교적 급한 하천으로서, 하구의 해안과 만나는 지점에는 충격선상지를 형성하고 있다. 유역의 형상은 선형으로서 유역의 남북 평균 폭은 8.0km, 동서로는 15.0km가 되고 유역면적은 110.0km²이다(동해시, 1985).

전천은 대체로 저수로를 따라 흐름이 형성되고 있으며, 하폭은 70m~250m 내외이고 수심은 1.25m 내외이다. 하상경사는 하류부(하구~전천교) 1/650, 중류부(전천교~소비천 합류점) 1/160, 상류부(소비천 합류점 보다 상류쪽) 1/80로 비교적 급류 하천을 형성하고 있다.

하천을 가로질러 통과하는 관로의 설치는 대부분 하구

와 여기에서 3.0km 상류 지점 사이에서 이루어지고 있으며, 본 연구에서 분석한 관로매설사업도 이 구간의 No. 4 지점에서 이루어진다. 이 구간에 대한 최심하상고와 하폭의 분포는 표 1과 같다.

관로 매설 공사가 예정되어 있던 시점인 1995년 2월 전천의 굴착 예정 지점인 No. 4 지점에서 하천 단면을 따라 13개 지점에 대하여 유속과 수심을 측정하였다. 측정 결과 매설 예정지점에서의 평균유속은 0.237m/s이고 유량은 43.0m³/s였다. 이 지점 하류에 위치한 No.3+74m지점에서 하천 단면을 따라 18개 지점에서 유속과 수심을 측정한 결과 평균유속은 0.235m/s이고 유량은 44.5m³/s였다. 이들 측정 결과를 요약하면 표 2와 같다.

표 1. 전천 굴착예정 구간의 최심하상고와 하폭

측 점	하구로부터 거리(m)	최심하상고 (EL.m)	하 폭 (m)	비 고
No. 0	0	-1.90	130	굴착예정지점
No. 1	150	-1.95	170	
No. 2	300	-1.95	190	
No. 3	450	-0.85	160	
No. 4	600	-1.40	140	
No. 5	750	-2.23	70	
No. 6	900	-1.87	190	
No. 7	1,050	-0.20	170	
No. 8	1,200	-0.60	170	
No. 9	1,350	-1.10	140	
No. 10	1,500	-0.10	150	북평교
No. 11	1,650	-0.22	150	
No. 12	1,800	-0.68	180	
No. 13	1,950	0.20	220	
No. 14	2,100	0.80	250	
No. 15	2,250	1.20	190	
No. 16	2,400	1.75	190	
No. 17	2,550	1.80	180	
No. 18	2,700	2.20	180	철도교
No. 19	2,850	2.50	180	
No. 20	3,000	3.30	200	

표 2. 굴착예정지점과 하류부의 수심-유속 측정 결과

측 점	유량 (m ³ /s)	단면적 (m ²)	유로폭 (m)	평균유속 (m/s)	평균수리심(m)	비 고
No.3+74m	44.5	189.0	130.0	0.235	1.45	굴착예정지점
No. 4	43.0	181.3	95.0	0.237	1.91	
평 균	43.8	185.2	112.5	0.236	1.68	-

4. 하상 굴착에 따른 부유물질 농도의 산정

4.1 부유물질 발생원단위

하상 준설이나 굴착시 발생하는 부유물질의 양은 다음의 식에 의하여 구할 수 있다(環境處, 1990).

$$W_s = W^* \times Q_s \quad (6)$$

여기서

$$W_s = \text{부유물질 발생량}(t/hr)$$

$$Q_s = \text{준설 또는 굴착량}(m^3/hr)$$

$$W^* = \text{준설구역의 부유물질 발생원 단위}(t/m^3)$$

표 3은 준설 공법과 토질에 따른 부유물질 발생원단위를 보여주고 있는데 그레브 준설의 경우가 오톤 펌프 준설에 비해 많은 양의 부유물질을 배출하는 것을 알 수 있다. 그리고, 준설공법, 준설 기계의 용량, 준설할 토사의 종류가 같더라도 굴착 지점 부근의 유속, 굴착선의 조작 방법, 굴착 깊이 등에 따라 부유물질 발생원단위가 달라지므로 시공 조건 등에 따라 보간 등의 방법으로 적절히 보정하여 사용해야 한다(油谷進介외, 1993).

관로 매설 예정 지점의 하천 단면에 대한 시추 조사를 실시하였다. 시추 조사는 상류에서 하류를 바라보는 방향에서 좌안에서 우안까지 1번부터 4번 시추공까지 4개

지점에 대하여 실시하였다. 시추공 1번은 좌안의 홍수터로서 충적층 지대이고, 2번과 3번은 하상바닥이며, 4번은 우안의 홍수터 충적층 지대이다. 시추 조사 결과를 요약하면 표 4와 같다.

표 4. 하상 굴착 예정 지점의 시추 조사 결과

시추공 번호	심도(m)	지질 분석 내용	비 고
1	0.0~2.6 2.6~10.5	실트질 세립모래(SM) 표층은 전담토, 약간의 유기물 실트질세립~중립모래(SM), 하부에 점토 박층	좌안의 홍수터 (표고 0.93m)
2	0.0~1.0 1.0~4.2	입도 분포가 불량한 세립~중립 모래(SM), 실트 및 약간의 자갈 입도 분포가 양호한 실트질 세립~조립의 모래(SW-SM)	하상바닥 (표고 -1.56m)
3	0.0~2.9 2.9~4.1	실트를 함유한 입도 분포가 양호 한 세립~조립의 모래(SW-SM) 약간의 조개껍질 및 실트를 함유 한 세립~조립의 모래(SW-SM)	하상바닥 (표고 -1.76m)
4	0.0~2.1 2.1~3.1	점토질 실트(ML), 약간의 자갈 및 모래 함유 세립모래질 실트(ML)	우안의 홍수터 (표고 2.77m)

표 3. 준설 공법과 토질에 따른 부유물질 발생원단위 ((株)株木建設, 1980)

공 법	용 량	준 설 토 사			발생원단위 (t/m ³)	시간당발생량(t/sec)
		실트이하	점토이하	분 류		
그레브	8m ³	58.0	34.6	실트성점토	9.91×10 ⁻³	1.740×10 ⁻³
		58.0	34.6	"	89.03×10 ⁻³	14.433×10 ⁻³
	4m ³	54.8	41.2	점 토	84.20×10 ⁻³	4.678×10 ⁻³
		15.0	1.0	"	8.40×10 ⁻³	0.310×10 ⁻³
	3m ³	45.0	3.5	실트성흙	15.84×10 ⁻³	0.444×10 ⁻³
		62.0	5.5	"	11.90×10 ⁻³	0.334×10 ⁻³
87.5		6.0	"	17.11×10 ⁻³	0.480×10 ⁻³	
드래그석션	2400P _s ×2	92.0	20.7	실트성흙	7.09×10 ⁻³	1.560×10 ⁻³
		88.1	19.4	"	2.10×10 ⁻³	7.495×10 ⁻³
	1800P _s	83.2	33.4	점 토	25.19×10 ⁻³	6.455×10 ⁻³
버 킷	0.2m ³	10.4	1.5	모래성흙	17.58×10 ⁻³	1.074×10 ⁻³
		27.7	12.5	"	55.77×10 ⁻³	3.408×10 ⁻³
오톤용 펌프	4000P _s	90.0	40.0	점 토	1.35×10 ⁻³	0.130×10 ⁻³
	1590P _s	99.5	50.5	"	1.27×10 ⁻³	0.076×10 ⁻³
	1590P _s	99.5	50.5	"	1.20×10 ⁻³	0.072×10 ⁻³
	1590P _s	99.5	50.5	"	1.55×10 ⁻³	0.093×10 ⁻³
	1590P _s	99.5	50.5	"	15.72×10 ⁻³	0.576×10 ⁻³
	810P _s	70.0	23.0	점토성흙	3.50×10 ⁻³	0.037×10 ⁻³
	810P _s	95.0	32.0	점 토	1.45×10 ⁻³	0.077×10 ⁻³
	147P _s	98.0	57.0	"	0.44×10 ⁻³	0.185×10 ⁻³
밀 폐	8m ³	80.0	14.0	실트성흙	3.50×10 ⁻³	0.185×10 ⁻³

표 5. 굴착 예정 지점의 하상토 입도 분포

종 류	입경(mm)	중량 백분율(%)	누가 백분율(%)
점 토	0.002 이하	10	10
실 트	0.002~0.005	5	15
	0.005~0.010	5	20
	0.010~0.020	5	25
	0.020~0.030	5	30
	0.030~0.074	10	40
모 래	0.074~0.200	10	50
	0.200~0.300	10	60
	0.300~0.420	10	70
	0.420~0.500	10	80
	0.500~1.000	10	90
	1.000~2.000	10	100

그리고, 시추 조사한 내용을 고려하여 굴착 예정 지점의 하상토 입도 분포를 추정된 결과는 표 5와 같다.

시공 여건과 하상토의 토질분포가 동일하더라도 굴착 지점 부근의 유속에 따라 부유물질의 발생량이 달라지게 된다. 유속이 작을 경우에는 입경이 작은 부유물질까지도 굴착 지점 부근에 대부분 침전되게 되지만, 이와는 반대로 유속이 커지면 침전된 입자까지도 재부상하여 하류로 유송되어 진다. 유속에 따라 재부상하여 하류로 유송될 수 있는 토사 입경의 한계는 다음의 식에서 구해진다(浦港綜合製鐵(株), 1982; 油谷進介의, 1993).

$$V_e = \sqrt{\frac{8.0 \cdot \beta}{f} \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot d} \quad (7)$$

여기서,

V_e = 재부상을 일으킬 수 있는 한계유속(cm/s)

f = 마찰저항계수(대략 0.025)

g = 중력가속도 (980cm²/s)

d = 입자의 직경(cm)

ρ_s, ρ = 각각 입자 및 물의 밀도(g·sec²/cm⁴)

β = 상수(매끈한 침전 표면에서는 0.04정도, %

砂連이 있을 경우에는 0.1~0.25)

표 3에서 부유물질 발생원단위는 입경 0.074mm인 실트 이하의 입자가 확산할 수 있는 유속 조건을 기준으로 표준화한 것이므로(浦港綜合製鐵(株), 1982; 油谷進介의, 1993), 본 연구에서는 굴착 지점에서의 유속이 유송할 수 있는 한계 입경을 계산해서 표 3으로부터 구한 발생원단위를 현지 하천 유형에 맞게 보정하였다.

굴착 예정 지점의 평균유속이 0.236m/s이므로, 식

(7)에 다음의 수치를 대입하여 유송 한계내의 토사 입경을 구하면,

$$\beta = 0.2, f = 0.025, g = 980 \text{ cm}^2/\text{sec},$$

$$\rho_s = 2.65/980 \text{ g} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4,$$

$$\rho = 1.0/980 \text{ g} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4, V_e = 23 \text{ cm/sec 이므로,}$$

$$V_e (= 23) = 321.70 \sqrt{d} \text{ 에서}$$

유송 한계 입경 $d = 0.051\text{mm}$ 로 계산되며, 표 5에 의하면 유송 한계 입경 이내의 입자는 전체 하상토의 약 35% 정도를 차지하고 있다. 따라서, 굴착 예정 지점의 발생원단위 보정량은 입경 0.074mm 이내인 실트 이하의 하상토 양에 대한 유속 0.236m/s일 때 재부상될 수 있는 한계 입경 0.051mm 이내의 하상토의 비율로 산정되며, 이렇게 산정된 보정 비율은 전체 발생원단위의 0.88(=35%/40%)이다.

본 연구에서 적용한 부유물질의 발생원단위는 부유물질 발생량이 가장 많은 그래브공법을 기준으로 하였고 하천의 규모와 시공 조건을 고려하여 굴착 기계의 규모는 3m³ 용량에 준하는 경우를 가정하였다. 그리고, 시추 조사로부터 굴착 예정 지점의 하상토는 실트이하가 40% 이내인 조립토인 것으로 나타남에 따라 발생원단위 W_s 는 표 3으로부터 15.84×10⁻³t/m³로 하였다.

굴착량 Q_s 는 굴착 길이를 대상 지역의 하천폭 140m로 보고, 관로 매설 공사의 규모와 시공 여건을 감안하여 굴착폭 14m, 깊이 4m로 굴착하는 경우를 기준으로 하였다. 그리고, 시공 계획상 공사 기간은 30일로 하고, 1일 작업시간을 6시간으로 가정하여 시간당 굴착량을 다음과 같이 산정하였다.

$$Q_s = \frac{140 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 4 \text{ m}}{30 \text{ days} \times 6 \text{ hrs/day}} = 43.6 \text{ (m}^3/\text{hr)} \quad (8)$$

따라서, 시간당 부유물질 발생량은 식 (6)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$W_s = (15.84 \times 10^{-3}) \text{ t/m}^3 \times 0.88 \times 43.6 \text{ m}^3/\text{hr} = 0.6 \text{ (t/hr)} \quad (9)$$

식 (9)에서 0.88은 앞에서 굴착 예정 지점의 하천 유형을 고려하여 산정한 발생원단위의 보정 비율이다. 이와 같이 하여 계산된 1시간당 부유물질 발생량은 0.6(t/hr)가 된다. 그러나, 굴착작업의 시행 과정에서 발생할 수 있는 여러 가지 작업 조건과 안전을 등을 고려하여 시간당 부유물질 발생량을 계산치의 2배에 해당

표 6. 수평 방향 확산계수

최대 유속 (m/sec)	확산 계수 (cm ² /sec)
0.00~0.30	10 ⁴
0.31~3.00	10 ⁵
3.00 이상	10 ⁶

하는 1.2(t/hr)로 결정하였다.

4.2 하상 굴착 조건에 따른 부유물질 농도의 예측

수평 방향의 확산계수는 그 변화의 범위가 대단히 커서 하천의 유형에 맞는 값을 산정하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 일본 환경청에서 지정한 표 6의 값을 적용하였다(浦港綜合製鐵(株), 1982).

부유물질의 농도 예측시에 굴착 예정 지점 부근의 수심은 측정 결과 1.45~1.91m인 점을 고려하여 부유물질의 확산이 일어날 수 있는 확산수심은 최저 수심인 1.45m, 두 단면 수심의 평균치인 1.68m, 최고 수심인 1.91m에 대하여 각각 계산하였고, 평균유속 0.236m/sec를 적용하였다.

4.2.1 오탉방지막을 설치하지 않을 경우

부유물질의 농도는 식 (5)에 의하여 산정하였다. 그리고 이때 부유물질 농도의 산정구간은 굴착 지점 하류 50m 지점에서 600m 지점 사이의 구간으로 하였다. 확산수심이 1.68m인 경우에 계산된 부유물질의 농도 분포는 굴착지점 하류 50m 지점에서 16.2ppm으로 가장 높고 하류로 진행하면서 감소하여, 하구에 이르는 지점에서는 4.7ppm으로 감소하였다.

확산수심이 1.68m에서 1.45m로 감소할 경우에 부유물질의 농도는 전반적으로 증가하여 굴착지점 하류 50m 지점에서 18.7ppm으로 확산수심이 1.68m인 경우 보다 2.5ppm 증가하였고, 하구에 이르는 지점에서는 5.5ppm으로 0.8ppm 증가하였다.

확산수심이 1.91m인 경우에 확산수심이 증가함에 따라 부유물질의 농도는 전반적으로 감소하였다. 굴착지점 하류 50m 지점에서 14.2ppm으로 확산수심 1.68m인 경우에 비해 1.9ppm 감소하였고, 하구에 이르는 지점에서는 4.1ppm으로 0.6ppm 감소하였다.

이상에서 알 수 있듯이 확산수심이 감소하면 부유물질의 농도는 증가하였고, 역으로 확산수심이 증가하면 부유물질의 농도는 감소하였다. 그리고 확산수심의 증가 또는 감소에 따른 부유물질 농도의 변화는 굴착지점에 가까운 상류에서 그 효과가 크게 나타났고, 하류로

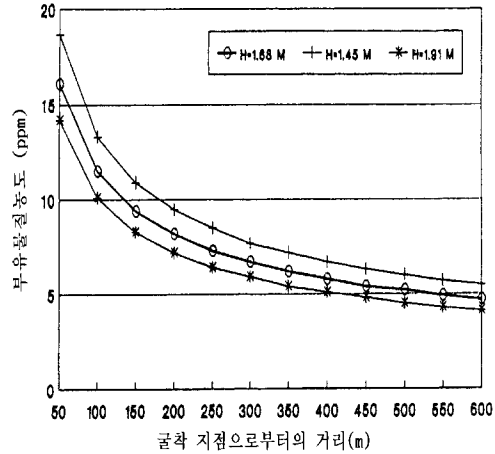


그림 1. 오탉방지막 미설치시 부유물질 농도의 변화

진행하면서 그 효과가 감쇄되어 나타남을 알 수 있다. 이상을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

우리 나라 환경정책기본법에 지정된 1등급수 하천의 부유물질 농도는 25ppm 이하이고, 해역에 있어서 1등급수의 부유물질 농도는 10ppm 이하여야 한다. 이때 해역의 1등급은 수산생물의 서식, 양식 및 산란에 적합한 수질을 의미한다.

전천의 경우 오탉방지막을 설치하지 않더라도 하천 굴착지점 50m 하류에서부터 하구까지의 부유물질 농도는 최고농도가 18.7ppm으로서 하천수질 1등급 기준을 만족하고 있고, 하구 도달시의 부유물질의 최고농도는 5.5ppm으로서 역시 해역 수질 1등급 기준을 만족하고 있다. 따라서, 부유물질이 발생하여 하구에 도착할 때까지 부유물질 농도는 하천과 해역의 수질 1등급 기준을 만족시키고 있으며, 수중생태계에 미치는 영향은 크지 아니할 것으로 판단된다.

4.2.2 오탉방지막을 설치할 경우

보다 확실한 부유물질의 저감을 위하여 오탉방지막을 사용할 경우에 대한 수질개선 효과를 분석하였다. 오탉방지막을 설치할 때의 효과는 유속의 감소에 따른 부유물질 유하거리의 단축에 의한 부유물질의 분산을 적게 하는 효과와 직접 오탉방지막에 의해 차단하는 효과로 구분된다.

입径이 5미크론 이하가 되는 입자는 1시간에 10cm 밖에 침강하지 않으므로 오탉방지막의 차단효과에 의하여 제어될 수 있다(環境處, 1990). 그러나, 이러한 차

단 효과는 사용하는 오탉방지막의 재질과 토사의 입경에 따라 달라질 뿐만 아니라, 실제 차단 효과에 대한 검증된 자료가 없으므로 여기에서는 오탉방지막의 설치에 따른 유속 감소에 의한 침전 촉진 및 분산억제 효과만을 고려하였다. 굴착 지역 직상류에 오탉방지막을 설치할 경우 유속이 70%까지 감소하는 것으로 보고되었다(環境處, 1990). 본 연구에서는 굴착지점에 오탉방지막을 설치하고, 이에 따라 굴착 지점 부근의 평균유속이 36% 감소한 0.15m/s인 것으로 가정하여 오탉방지막의 효과를 분석하였다.

평균유속이 0.15m/s가 되면 재부상될 수 있는 한계 유송 입경이 0.022mm 이내가 되며 이 범위내의 하상토 백분율은 약 26%이므로, 1시간당 부유물질 발생량은 0.45(t/hr)가 된다. 여러 가지 작업조건과 안전을 등을 고려하여 시간당 부유물질 발생량은, 계산치의 2배에 해당하는 0.9(t/hr)로 하였다. 이에 따라 굴착 지점 50m 하류에서 하구까지의 부유물질 농도를 산정한 결과는 그림 2와 같다.

그림 2에서 알 수 있듯이 확산수심이 1.45m일 때의 부유물질의 굴착지점 50m 하류의 최고농도가 14.0ppm이고, 하구에서의 최고농도가 4.2ppm으로서 오탉방지막을 설치하지 않을 경우 보다 상류쪽에서는 4.7ppm, 하류쪽에서는 1.3ppm 감소하여 부유물질로 인한 오탉을 저감시키는데 기여할 것으로 나타났다. 오탉방지막의 효과도 상류쪽에서 그 효과가 더 크게 나타나며 하류쪽으로 진행하면서 그 효과가 감소하는 것으로 나타났다.

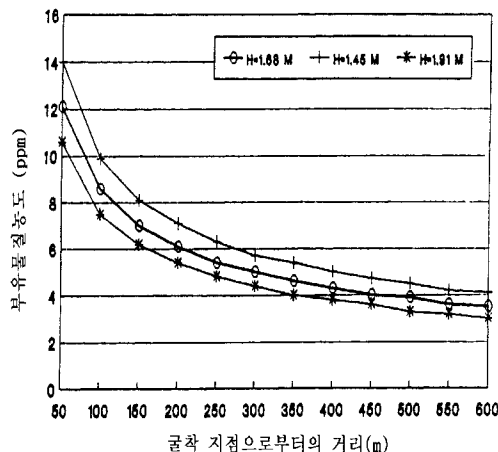


그림 2. 오탉방지막 설치시 부유물질 농도의 변화

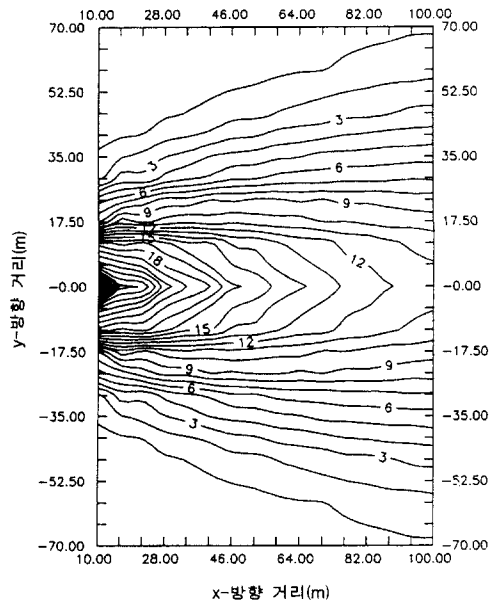


그림 3. 오탉방지막 미설치시 부유물질 농도의 2차원적 분포

하천에서 하상 굴착이 이루어지는 경우에 오탉방지막을 설치하지 않은 상태에서 평균수심 1.68m를 확산수심으로 하여 부유물질 농도의 2차원적인 분포를 계산한 결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서 굴착 지점 10m 하류에서는 34.1ppm으로 비교적 부유물질의 농도가 높지만 굴착 지점으로부터 50m 하류에서는 16.2ppm으로 부유물질의 농도가 52%나 급감하는 것을 알 수 있다. 그러나 굴착 지점으로부터 80m 하류에서는 12.9ppm으로 20% 감소하여 하류로 내려갈수록 부유물질 농도의 감소가 완만하게 이루어짐을 알 수 있다.

굴착 지점 50m 직하류의 부유물질 농도가 16.2ppm인 반면에 이 지점에서 측방으로 20m 떨어진 지점은 10.0ppm으로 38% 감소하였고, 측방으로 40m 떨어진 지점은 2.9ppm으로 71% 감소하였으며, 60m 떨어진 지점에서는 0.5ppm으로 83% 감소하여 측방향으로의 농도 변화율이 흐름 방향으로의 농도 변화율 보다 크게 나타났다. 한편, 굴착 지점 100m 직하류의 부유물질 농도는 11.5ppm인 반면에 이 지점에서 측방으로 20m 떨어진 지점은 9.1ppm으로 21% 감소하였고, 측방으로 40m 떨어진 지점은 4.6ppm으로 49% 감소하였으며, 60m 떨어진 지점에서는 1.6ppm으로 65% 감소하

여 하류쪽으로 진행함에 따라 측방향으로의 혼합이 증가하여 측방향 농도 변화율이 상류쪽보다 작아지는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 현장 여건상 정교한 수치해석모형을 적용할 수 없는 경우에, 2차원 이송-확산 모형을 단순화하여 유도한 Fick 확산 모형에 의하여 부유물질의 농도를 산정하고 오탉 방지 시설 설치에 따른 부유물질 농도의 저감 효과를 평가하는 방법을 검토하였다. 강원도 동해시에 위치한 전천의 송유관로 매설공사를 대상으로, Fick 확산 모형을 이용하여 하상 굴착으로부터 발생하는 부유물질의 농도 산정과 오탉방지막의 설치에 따른 오염 저감 효과를 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 확산수심이 감소하면 부유물질의 농도가 증가하며, 역으로 확산수심이 증가하면 부유물질의 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 확산수심의 증가 또는 감소에 따른 부유물질 농도의 변화는 굴착지점에 가까운 상류에서 그 효과가 크게 나타났고, 하류로 진행하면서 그 효과가 감쇄되어 작게 나타났다.

(2) 전천의 굴착 지점에 대하여 오탉방지막을 설치하지 않더라도 하천 굴착지점 50m 하류에서부터 하구까지의 부유물질 농도는 최고농도가 18.7ppm으로서 하천수질 1등급 기준을 만족하고 있고, 하구도달시의 부유물질의 최고농도는 5.5ppm으로서 역시 해역 수질 1등급 기준을 만족하고 있다. 따라서, 부유물질이 발생하여 하구에 도착할 때까지 부유물질 농도는 하천과 해역의 수질 1등급 기준을 각각 만족시키고 있으며, 수중생태계에 미치는 영향은 크지 아니할 것으로 판단된다.

(3) 오탉방지막을 설치할 경우에 굴착지점 50m 하류의 부유물질 최고농도가 14.0ppm이고, 하구에서의 최고농도가 4.2ppm으로서 오탉방지막을 설치하지 않을 경우 보다 상류쪽에서는 4.7ppm, 하구쪽에서는 1.3ppm 감소하여 부유물질로 인한 오탉을 저감시키는데 기여할 것으로 나타났으며, 오탉방지막의 효과도 상류쪽에서 그 효과가 더 크게 나타나고 하류쪽으로 진행하면서 그 효과가 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 부유물질의 흐름 방향 농도 변화율을 분석한 결과 굴착 지점 10m 하류에서는 34.1ppm으로 비교적 부유물질의 농도가 높지만 굴착 지점으로부터 50m 하류에서는 16.2ppm으로 부유물질의 농도가 52%나 급감하였다. 그러나 굴착 지점으로부터 80m 하류에서는 12.9ppm으로 20% 감소하여 하류로 내려갈수록 부유물질 농도의 변화율이 완만하게 나타남을 알 수 있었다.

(5) 부유물질의 측방향 변화율을 분석한 결과 흐름 방향 보다 변화율이 더 큰 것으로 나타났으며, 하류쪽으로 진행함에 따라 측방향으로의 혼합이 증가하여 하류쪽 측방향 농도 변화율은 상류쪽보다 작아지는 것으로 나타났다.

(6) 전천을 대상으로 Fick 확산 모형을 적용한 결과 하상 굴착으로부터 발생하는 부유물질의 농도 산정과 오탉방지막의 설치에 따른 오염 저감 효과를 사전에 예비적으로 평가하는 실무적인 방법이 될 수 있음을 알 수 있었다.

앞으로 하상 굴착시 부유물질 농도를 실측하여 Fick 확산 모형에 대한 적용성을 검증하는 과정이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 金政鉉 (1991). 水質管理, 東和技術(株).
동해시 (1985). 동해시 하수도정비 기본계획.
油谷進介, 室田 明, 岩田尙生 (1993). "浚築埋立工事における濁りの發生原單位の檢討." 日本土木學會論文集, No. 474/VI-20, pp. 67-74.
(株)株木建設 (1980). 濁りの影響濁の事前豫測マニュアル.
浦港綜合製鐵(株) (1982). 光陽製鐵所敷地造成基本設計-第8章 工事に伴う海水汚濁の檢討.
環境處 (1990). 八堂湖 試驗浚築 影響調查 報告書.
Hemond, H.F. and E.J., Fechner (1994). *Chemical Fate and Transport in the Environment*. Academic Press Inc.
(최종본 접수일 : 1997년 9월 26일)