

하천식수(植樹)의 수리학

윤 세 의*

1. 서론

하천의 치수와 이수기능 뿐만 아니라 친수기능이 요구되고 있어서 하천부지에 식수의 필요성이 대두되고 있는 실정이며, 수목이 가지고 있는 환경보존 기능이 크게 인식되고 있다. 하천부지의 수목은 야생동물의 서식처를 제공하고, 흐름의 유속을 저하시켜서 입자상태의 부유물질을 침전, 퇴적시킨다. 수목은 이들의 침전물질 중에 포함된 질소, 인 등을 흡수하여 하천의 정화기능을 증대시킨다. 특히 인은 토립자에 잘 흡착하여 부유사농도와 인의 농도간에는 강한 상관관계가 있음이 발표되었다. 제방부근의 식수는 제방자체의 침식을 방지하고 사면의 안정성을 증대시키고, 나아가 차량의 소음을 분산, 공기정화 등의 기능도 있다. 또한 하천식수로 인하여 흐름의 유속을 저하시켜서 하상의 전단력을 감소시키므로 하상의 침식을 방지하는 기능도 있다.

그러나 하천내의 식수는 하천수위를 상승시켜서 홍수소통을 방해하고, 수로내의 수목군의 위치에 따라서 제방침식을 가속시키기도 하고, 식수 주위에 부착물로 인하여 하천시설물의 기능을 감소시키는 경우도 있다. 따라서 하천부지에 식수를 계획할 경우에는 이러한 수리학적 특성의 변화를 명확히 분석할 필요가 있다. 또한 인간과 동물활동에 피해가 있는가를 면밀히 검토해야 하며 연구대상도 크

게 3가지로 구분된다.

- ① 하천, 운하와 같이 흐름이 연속적인 경우
- ② 고수부지, 여수로, 배수하천과 같이 비연속적인 흐름의 경우
- ③ 호수, 저수지, 하구와 같이 파(波)가 항상 존재하는 경우

공학적으로 사용되고 있는 식생의 응용과 그 효과를 표 1에 정리하였다.

특히 도시 주변 하천의 자연환경을 복원하려는 구간에서는 하천식수의 효과가 크다고 판단된다. 하천식수로 인한 장점뿐만 아니라 단점에 대한 충분한 검토가 진행된 후 하천에 식수를 하여야 한다. 하천식수에 따른 수위, 수목에 작용하는 힘, 조도계수, 침식기능, 전단력, 제방의 안정성, 오염물질의 거동, 생태계 등의 변화에 관한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

2. 흐름이 수목에 작용하는 힘

수목에 작용하는 힘은 유수와 바람에 의한 것으로 크게 분류되고 있으나, 여기서는 유수에 의한 힘만을 설명한다. 일반적으로 덩불 형태의 수목 주위의 흐름은 그림 1과 같이 수목의 전면에서는 후면에서보다 큰 압력을 받고 있으며, 와류와 난류가 수목의 후면에서 발생하고 있다.

유수에 의해서 수목에 작용되는 외력모멘트는 식(1)과 같다.

* 경기대학교 토목공학과 교수

표 1. 식생의 응용과 그 효과

Application	Effect on Influence	Surface competence				Surface water regime				Soil water				Properties of soil mats				Air flow								
		Soil detachment	Mechanical strength	Infiltration	Retarding/ arresting	Erosion	Rainfall interception	Overland flow/runoff	Infiltration	Subsurface drainage	Surface drag	Evaporation/ irrigation	Soil moisture	Stability	Root fixation	Anchorage/ reinforcement	Arching/ retentive	Surface compressing	Surface matting	Surcharge	Windloading	Root wadding	Surface drag	Flow deflection	Noise attenuation	Filter particles
Slope stabilisation	Embankments and cuttings Cliffs and rockfaces		●		●	●					●	●	●		●	●	●	●	●	●						
Water erosion control	Rainfall and overland flow Gully erosion	●	●	●	●	●	●	●	●																	
Watercourse and shoreline protection	Continuous flow channels Discontinuous flow channels Large water bodies (shorelines)	●	●		●	●				●					●	●		●		●						
Wind erosion control																						●	●	●	●	
Vegetation barriers	Shelter Noise reduction																					●	●	●	●	
Surface protection and trafficability		●	●	●		●					●	●	●					●								
Water management in small catchments						●	●	●	●	●	●															
Plants as indicators																										

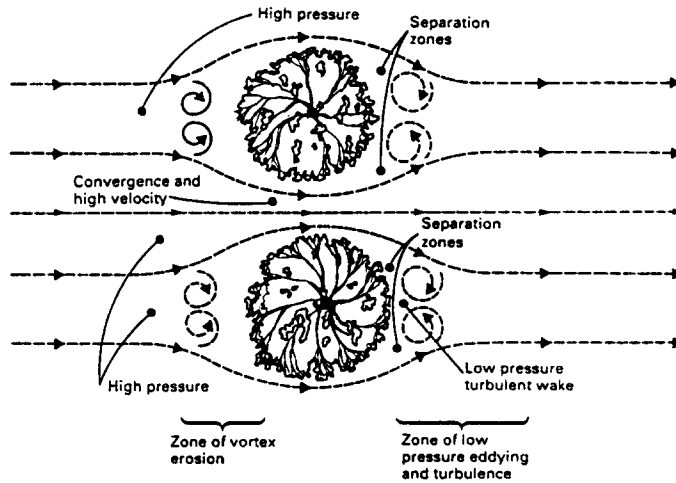


그림 1. 수목 주위의 흐름

$$M = 1/2 \rho C_D S u^2 L$$

(1)

S : 유수중 수목의 투형면적

u : 유속

여기서, M : 유수에 의한 모멘트

L : 지표면에서 항력 중심까지의 거리

ρ : 물의 밀도

C_D : 수목의 항력계수

수목에 작용하는 항력의 작용면적은 계획고수위

까지 나무가지를 베어 낼 경우에는 줄기(stem)의 면적만을 고려하고, 수심이 증가하여 수관부(樹冠部, foliage)까지 물이 흐르는 경우는 수관부 면적까지 고려한다. 또한 홍수시에 고목이나 부유물에 의해 흐름을 방해하는 부착물이 있을 경우에는 부착물에 의해 면적이 증대된다. 부착물을 고려하지 않을 경우에는 줄기부분과 수관부의 모멘트를 합하여 총 모멘트를 구한다.

2.1 부착물을 고려하지 않을 경우

줄기부분에 작용하는 모멘트를 구할 때 수목의 투영면적 S는 줄기의 높이(ho)×줄기의 직경(D)으로 계산하고, L은 줄기 높이의 1/2로 계산하며, 항력계수 C_D 는 줄기를 원주형으로 간주하여 1.2를 사용한다. 수관부에 작용하는 모멘트를 구할 때 S는 식(2)으로 계산하고, L은 침수된 수관부 중심에서 하상까지의 거리이다.

$$S = N \cdot d \cdot L \quad (2)$$

여기서, N : 계획고수위 아래의 나무가지 수
 d : 가지의 평균직경
 L : 가지 하나의 평균길이

항력계수 C_D 는 Reynold수(ud/ν)를 이용하여 가지에 잎이 붙어 있지 않은 경우는 그림 2, 잎이 붙어 있는 경우에는 그림 3, 밀생도를 고려할 경우에는 그림 4를 이용하여 구할 수 있다.

그림 2~4 에서와 같이 잎이 붙어 있지 않은 경우에 C_D 는 0.4~0.8 사이의 값을 나타내며, 가지에 잎이 붙어 있는 경우의 C_D 는 잎이 붙어 있지 않은 경우의 2~3배 정도로 증가된 값을 나타낸다. 또한 밀생도가 증가하면 C_D 는 작아지는 경향을 나타내고 있으며 밀생도 λ 는 수목의 실제 체적에 대한 수목 부분의 가상 직사각형 유체체적의 비를 뜻한다.

2.2. 부착물을 고려한 경우

유목(流木)에는 산간부에서 대규모 토사붕괴나 토석류에 의해 쓰러진 나무가 호수에 의해 하도로

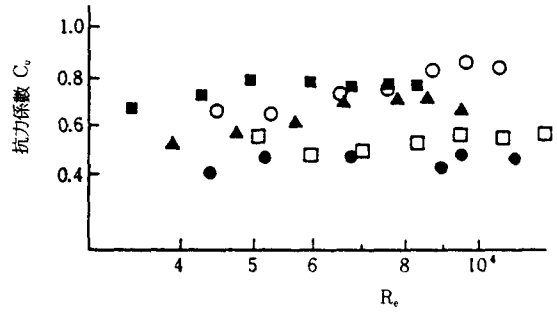


그림 2. 잎이 붙어 있지 않을 경우의 C_D 와 Re 상관도

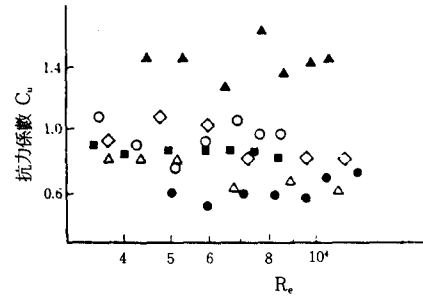


그림 3. 잎이 붙어 있는 경우의 C_D 와 Re 상관도

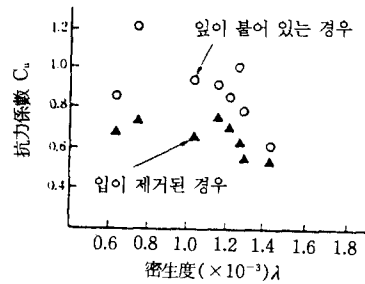


그림 4. 밀생도와 C_D 의 상관도

유출되는 경우와 고수부지상에 퇴적된 고목, 역세 등의 죽은 초목류가 홍수시 하도로 유하하는 경우로 구분된다. 여기서 취급하는 것은 후자에 속한다. 주흐름(主流)의 유황 및 식생분포를 고려하여 유목류의 퇴적장소를 추정한다. 유목의 퇴적장소는 식생이 존재하는 위치와 거의 일치하며, 유목이 퇴적하기 쉬운 장소로는 고수부지에 식생이 발달한 곳, 유속이 빠른 저수로의 흐름이 고수부지로 넘치는 곳, 고수부지로 넘친 물이 다시 저수로로 되돌아오는 곳 등이다. 유량이 증가하여 고수부지 수심

특집 : 자연형 하천계획

이 수목의 높이보다 커지면 유목은 수몰된 수목의 영향을 거의 받지 않으므로 퇴적량이 감소한다. 고수부지로 물이 빈번히 넘치는 장소를 추정하여, 이미 존재하는 수목을 이용하고 또한 이를 적당한 밀도, 높이를 갖도록 조성하면 유목류를 적극적·집중적으로 유도하여 홍수후 산재하여 퇴적하는 유목류의 제거비용도 절감시킬 수 있다.

고목이나 부유물이 수목에 부착한 경우에는 항력 작용면적이 증가하여 모멘트도 증가한다. 실제 수목간의 간격이 1m 이하인 경우에는 모든 수목에서, 4m 이하에서는 2/3 이상의 수목이 부착물에 의한 폐쇄현상이 발생된다고 발표되었다. 이때 S는 폐쇄된 부분의 투형면적이고 항력계수는 폐쇄상황에 따라 적절히 선택해야 한다. 줄기부분도 포함되어 수목전체면에 부착물로 폐쇄된 경우는 그 형상을 원주로 가정하여 C_D 는 1.2로 채택한다. 수관부만이 폐쇄된 경우에는 그 형상을 구(球)형으로 보아 수관부가 수몰된 경우에 $C_D=0.5$, 수몰되지 않을 경우에는 중간값 $C_D=0.9$ 를 선택한다.

3. 수목군의 조사사항

수목군이 번무(繁茂)한 하도에서는 ① 수목군내의 흐름이 다른 하도 부분에 비교하여 유속이 느리게 되고 ② 수목군내의 낮은 흐름이 주변의 빠른 흐름과 혼합됨에 따라서 유속이 감소되는 특징이 있다. 이는 수목군을 큰 조도 덩어리로 취급하여 그 크기와 분포를 흐름의 계산에 고려할 필요성이 있다.

수목군을 고려한 부등류 계산에서는 상기 ①의 특징에 대하여서는 수목군의 범위를 사수역(死水域)으로 가정하여 이를 하도단면적에서 제외시키고 ②의 특징에 대하여서는 전단력을 부가함으로써 수목군의 영향을 반영하기도 한다. 이 계산법을 사용할 때는 수목군의 범위, 높이 및 밀생의 상황을 조사하고 아울러 홍수 흔적수위와 유량자료를 조사해야 한다.

3.1 수목군의 번무 형태 조사

① 번무범위

수목군 번무범위를 알 수 있는 축척의 항공사진을 기초로 수목군의 범위를 1/2,500~1/5,000의 평면도에 기입하고 현장을 확인한다.

② 높이

수목군이 수몰한 경우에는 수목군 위로 물이 흐른다. 따라서 수위가 어느 정도 되면 수몰하는가를 조사하여 사수역 설정에 사용한다. 각 수목군의 높이를 측정할 때 수관부 상단에 표시물을 부착하여 항공하면 단시간내에 수목군의 높이를 측정할 수 있다. 번무범위와 높이를 파악하려면 수목이 매년 성장하는 것을 고려하여 연속적으로 자료를 수집해야 한다.

③ 밀생상태

일반적으로 밀생한 수목군내에서는 사수역 혹은 그에 가까운 상태로 된다. 그러나 수목끼리 접하지 않은 수목군에서는 수목군내에 무시할 수 없는 흐름이 발생 되므로 이러한 수목군을 사수역으로 취급하면 유하능력을 과소 평가할 우려가 있다. 이러한 경우에는 밀생도에 따라 그 사수역의 범위를 축소시키거나 혹은 항력 환산에 의한 조도계수를 설정하여 흐름을 계산한다.

④ 수종

수목관리상의 기초자료로 각 수목군을 구성하는 수종에 대해서 현지 조사해야 한다.

3.2 홍수 흔적 조사

수목군이 침수한 홍수를 대상으로 홍수 흔적조사를 해야 한다. 정기 횡단측량단면 이외의 단면에 대하여도 흔적수위를 얻는 것이 바람직하다. 또 조사대상 지역에서 홍수시와 비홍수시에 수목형상이 크게 변화될 경우에는 홍수시의 수목현황을 과거의 항공사진이나 현장조사, 벌채(伐採)기록 등에 의해 파악해야 한다.

3.3 유속분포조사

제방부근을 따라 번무하고 있는 수목군은 제방보호효과를 가지고 있다. 그러나 수목군이 하도의 중심부에 위치하여 주흐름을 분리시킬 때에는 제방부

근의 유속을 증대시키는 경우도 있다. 따라서 제방 부근의 유속이 어느 정도의 크기가 되는가 혹은 거기에 수목군이 있다면 어떤 영향을 주는가를 판단할 필요가 있다. 수목군 주위의 유속분포 파악방법은 항측에 의한 표면 유속 자료 해석과 횡단 유속분포 해석이 있다. 수목군을 이용하여 제방주변의 유속을 저감시키려면 제방과 수목군의 거리를 수심에 비해 충분히 작게 해야 한다. 즉 수목군이 제방과 접해 있으면 제방보호에 도움이 된다. 그러나 주흐름과 접한 쪽에서는 간섭작용에 의하여 수목군 내부의 유속이 증가하여 수목군의 폭을 너무 작게 설계하면 간섭 영향이 제방에 미치게 된다. 예를들면 수목밀도가 1본/m², 가지의 굵기 0.06m, 항력계수 1.4, 경계혼합계수 0.02 일 경우의 최소필요 수목군폭 b_w 는 그림 5과 같다.

4. 수목군이 존재하는 하도에서의 수리특성

수목군이 존재하는 하도의 수리계산에는 수목군 내가 사수역상태 혹은 그에 가까운 상태가 되는 경우와 수목군 주변의 유속이 빠른 흐름과 늦은 흐름의 혼합에 따라 빠른 흐름이 감속되는 두가지 점을 고려하여 유속분포와 수위를 구할 때 사용한다. 사수역에 대한 하천단면적 감소와 흐름의 혼합에 의한 저항의 증대현상이 발생된다. 일반적으로 일차원 해석에서는 정도가 높은 합성조도계수를 설정해야 되는데 이것도 수목의 번무상태나 수위변화에 따라 변화하기 때문에 정확한 합성조도계수를 추정하는 것은 곤란하다. 또한 2차원 해석은 계산시간과 노력이 크게 요구되고 있다. 일반적인 부등류계산에 비해 저수로와 고수부지에 각각의 조도계수를 구하고 흐름과 수목군의 경계에서 유체혼합의 정도를 반영하는 경계혼합계수를 설정하는 등 설정해야 할 인자가 많다. 이러한 인자들을 설정할 때는 인자들이 가지고 있는 물리적인 의미를 손상시키지 않도록 해야 한다. 따라서 혼적수위를 이용하여 검증할 때 단순히 각 인자를 변화시켜서 실측치에 가깝게 하는 것이 아니고 혼적수위, 유량의 정도 등의 분석을 통하여 표 2와 같은 단계를 걸쳐 합리적이

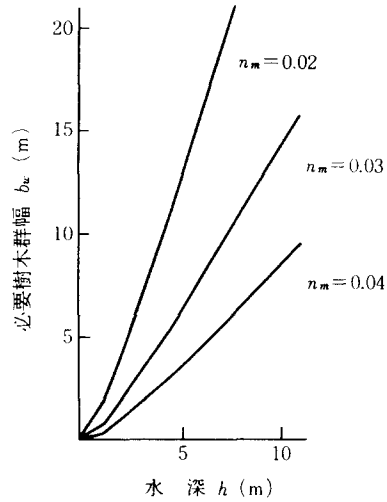


그림 5. $b_w \sim h$ 의 관계

고 효율적으로 인자를 설정하는 것이 중요하다. 그림 6은 수목군을 고려한 부등류 계산의 검증 수순을 표시하였다.

4.1 수목군을 고려한 부등류 계산법

우선 밀생한 수목군의 범위를 사수역으로 단면적에서 제외한다. 유속이 다르다고 판단되는 저수로, 고수로를 분할한다. 각 분할단면의 평균유속은 운동방정식과 연속방정식으로 구한다.

1) 사수역의 설정

수목이 밀생한 경우에는 수목군 내부의 저항이 증대되기 때문에 수목군내 유속이 주위에 비해 매우 작아짐으로 이를 사수역으로 간주한다. 또 이들의 수목군 직하류측에는 그림 7과 같이 5° 범위를 사수역으로 간주한다. 사수역의 크기를 결정하는 방법의 적합성은 혼적수위의 재현계산으로 검증한다.

2) 계산단면의 설정

계산에 이용하는 단면은 정도가 높게 측량된 지점을 기준으로 하고 상하류 단면의 변화가 심한 지점이나 수목군의 존재에 의해 유수단면적의 종단변화가 큰 지점에서는 내삽단면(內插斷面)을 설정한

표 2. 계산수위가 혼적수위를 재현할 수 없는 경우의 검토사항

계산의 경향	수목군의 취급		그 외의 변수	비 고
	사수역	유효역		
홍수규모의 증대에 따른 계산 수위가 상대적으로 높아짐.	① 사수역을 너무 넓게 잡지 않았나? ② 수목군 경계에서의 경계혼합 계수가 과대하지 않은가? ③ 수목군내를 사수역으로 간주 해도 좋은가?	① 수목조도를 너무 크게 잡지 않았나?	저수로와 고수부지와 경계 혼합 계수의 재검토	수목군이 유하 능력에 미치는 영향을 과대평가 여부와 별채에 의한 효과를 과대평가.
홍수규모의 증대에 따라 계산 수위가 상대적으로 낮음	① 사수역을 너무 좁게 잡지 않았나? ② 수목군 경계에서의 혼합경계 계수를 너무 작게 잡지 않았나?	① 수목조도계수를 과소하게 설정하지 않았나? ② 수목군내를 유효역으로 취급해도 좋은가?	저수로와 고수부지의 경계혼합계수의 적정성 검토.	수목군의 유하 능력에 미치는 영향을 과소평가
계산수위가 전반적으로 높음 $F=0$ $\Delta = +$			① 저수로 조도가 너무 크지 않은가? ② 고수부지 조도가 너무 크지 않은가?	
계산수위가 전반적으로 낮음 $F=0$ $\Delta = -$			① 저수로 조도가 너무 작지 않은가? ② 고수부지 조도가 너무 작지 않은가?	

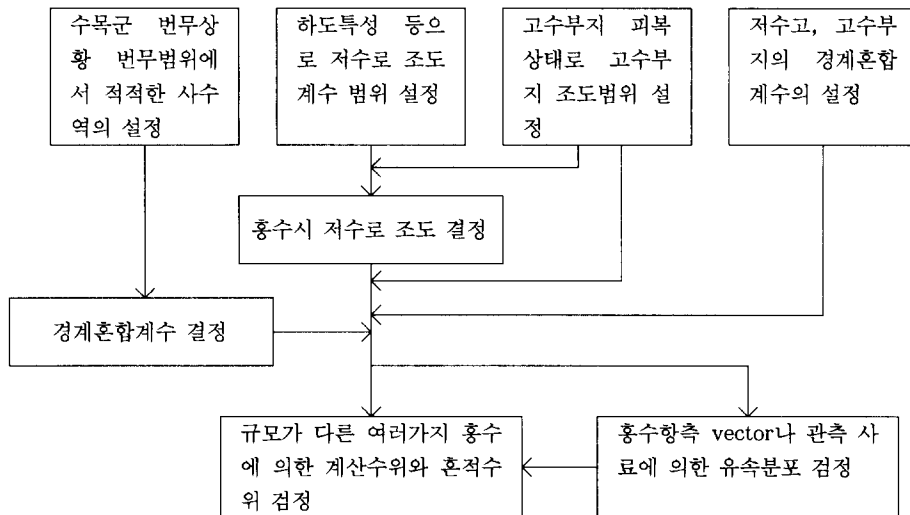


그림 6. 수목군을 고려한 부등류 계산법에 의한 수면형의 평가 흐름도

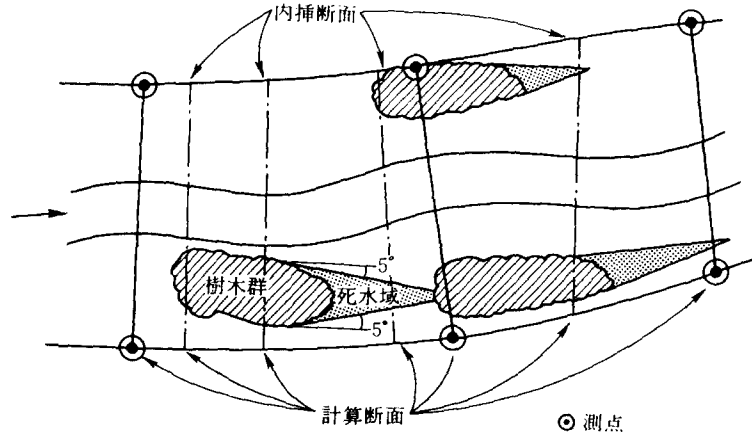


그림 7. 사수역 및 계산단면의 결정

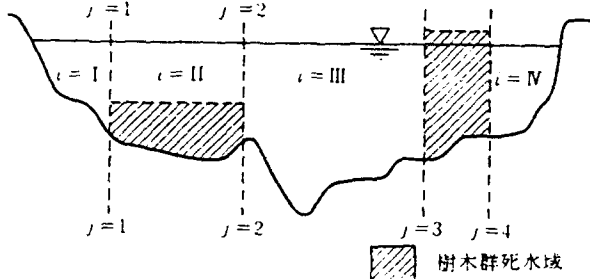


그림 8. 단면 분할 형상

한다.

분할단면 i 에서의 운동방정식은 식(3)과 같다.

$$\frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3} S_{bi}} + \frac{\sum_j (\tau_j' S_{w_j}')}{\rho g} + \frac{\sum_j (\tau_j S_{w_j})}{\rho g} = A_i I_b \quad (3)$$

여기서,

$u_i, n_i, R_i, A_i, S_{bi}$: 분할단면 i 의 평균유속, 조도계수, 경심, 사수역을 제외한 단면적, 저면 전단력이 작용하는 윤변장

τ_j, S_{w_j} : 사수역의 수목군 경계에서 작용하는 전단력과 윤변장

τ_j', S_{w_j}' : 사수역의 수목군 경계 이외에 작용하는 전단력과 윤변장

I_b : 하상경사

\sum_j : $j=1, 2$ 의 인자의 크기를 더한 값

식(3)의 좌변 1항은 분할단면 i 에서 유수의 저면에 작용하는 전단력이고 2항과 3항은 운동량 교환에 따라 발생되는 전단력이다. 우변은 분할단면 전체의 유체저항을 의미한다. 전단력 τ, τ' 는 인접한 분할단면간의 속도차의 2승에 비례한다.

$$\tau = \rho f u_i^2 \quad (4)$$

다.

3) 횡단면 분할

설정된 계산단면에 있어 하도횡단면 형상, 수목군의 번무현황 등의 상황에서 유속차가 크다고 판단되는 위치에 횡단면을 여러개로 분할한다. 이는 저수로, 고수부지와 같은 횡단면 내에서의 유속차이나 수목군과 주흐름과의 유속차가 큰 경계부근에서 생기는 흐름의 운동량 교환에 따른 저항증대를 계산시 적절히 고려하기 위해서이다. 수목군의 상단부에 흐름이 생길 경우에는 그림 8에서 II와 같이 단면을 분할한다.

4) 횡단면의 유속분포

각각의 분할단면에서 흐름을 등류로 가정하여 운동방정식과 연속방정식을 이용하여 평균유속을 구

특집 : 자연형 하천계획.....

$$\tau' = \rho f (\Delta u)^2 \sin(\Delta u) \quad (5)$$

τ 는 수목군내를 사수역으로 간주하므로 유속 자체의 2승에 비례하고, Δu 는 τ' 가 작용하는 경계에 인접하는 단면과의 유속차이다. f 는 경계조도계수이며, 이것에 대해서는 후술한다. $\sin(\Delta u)$ 는 u 가(-) 값 일 때는 -1, (+) 값 일 때는 +1로 한다. 즉 유속이 빠른 쪽의 흐름에 대해서는 τ' 가 저항으로 유속을 감소시키는 방향으로 작용하고, 유속이 낮은 쪽의 흐름에서는 τ' 가 가속하는 방향으로 작용한다.

연속방정식은 식(6)과 같다.

$$Q = \sum(u_i A_i) \quad (6)$$

이상의 연속방정식과 운동방정식에서 u_i 에 관한 2차, 연립방정식을 구성하고 이것을 수치적으로 풀어서 각 분할단면의 평균유속을 구한다.

5) 종단수위 계산

횡단유속분포 u_i 를 이용하여 하상·하안 및 수목군이 홍수류에 미치는 저항을 직접 계산하고 흐름 방향의 운동량방정식을 적용하여 종단수위를 계산하는 식은 식(7)과 같다.

$$\left[H + \frac{1}{A} \sum \frac{u_i^2 A_i}{2g} \right]_2 - \left[H + \frac{1}{A} \sum \frac{u_i^2 A_i}{2g} \right]_1 = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{A} \sum \frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} \right]_1 + \left[\frac{1}{A} \sum \frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} \right]_2 \right. \\ \left. \left[\frac{\sum \tau_i S_{wi}}{\rho g A} \right]_1 + \left[\frac{\sum \tau_i S_{wi}}{\rho g A} \right]_2 \right\} \Delta X \quad (7)$$

여기서 첨자 1은 하류측 단면의 수리량 값이고, 첨자 2는 상류측 단면의 값이며, $A = \sum A_i$ 이다. 수목군의 존재에 의한 수위상승량은 하천양안의 수목군의 폭이 하천폭에 대한 비가 20% 정도이면 수목군의 밀생도가 높아져도 수위상승량은 약 10% 정도로 발표되었다.

4.2 Manning의 조도계수

하도내의 흐름에는 하상면 이외에도 저수로와 고수부지의 경계와 수목군의 사수역과 주 흐름 경계 부근에서도 흐름의 간섭에 의해 저항이 생긴다. 이들의 조도계수는 혼적수위에 의해 검증하는 것을 원칙으로 한다. 또 수목군이 완전히 수몰하여 수목군 위에 흐름이 생기는 경우의 조도계수에 대해서는 기왕홍수의 재현계산에 의해 설정함을 원칙으로 한다.

1) 저수로의 조도계수

저수로의 조도계수 결정시 하상의 영향이 지배적인 경우는 일반적으로 사용하는 방법을 사용하고, 저수로 하안의 식생이 무시할 수 없을 경우에는 식생을 포함한 저수로의 조도계수를 일률적으로 결정하기 어렵기 때문에 기왕홍수의 혼적수위로부터 조도계수를 검증할 필요가 있다.

2) 고수부지 조도계수

고수부지의 조도계수는 주로 번무한 수목의 높이에 지배되므로 수심과 조도의 높이에 따른 조도계수를 이용하는 것이 합리적이다. 이는 그림 9에서 구할 수 있다.

수목군 지역을 사수역으로 볼 수 없을 정도로 수목이 띄엄띄엄 있는 고수부지의 조도계수는 아래의 방법으로 구한다.

수목 줄기부의 항력 W_d 와 수관부의 항력 W_u , 하상표면의 저항 W_f 라고 하면, 이 힘들의 합이 유수에 작용하는 중력과 평형상태로 가정하면 식(8)과 같다.

$$\rho g B h I = W_f + W_d + W_u \quad (8)$$

여기서, B : 하천폭
h : 수심
I : 동수경사

Manning의 식은 합성조도계수를 N이라고 하면 식(9)와 같다.

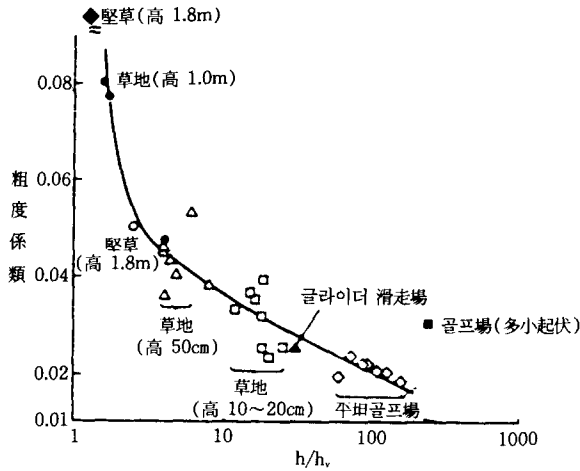


그림 9. 고수부지에서 조도계수와 수심과 풀의 높이비의 관계

$$u = \frac{1}{N} h^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

식(8)과 식(9)를 연립하여 I를 소거하면 식(10)이 얻어진다.

$$N^2 = \frac{h^{1/3}}{\rho g u^2 B} (W_f + W_d + W_u) \quad (10)$$

우측의 첫번째 항은 고수부지 표면에서 받는 저항이다. 고수부지의 조도계수 n_b , 폭 B일 때 유수에 의한 저항 W_f 는 식(11)과 같다.

$$W_f = \frac{\rho g u^2 n_b^2 B}{h^{1/3}} \quad (11)$$

우측 두번째 항은 줄기부의 저항을 나타내고 직경 D인 수목이 a의 밀도(본/m²)의 경우 W_d 는 식(12)와 같다.

$$W_d = \frac{1}{2} a B C_D \rho D h u^2 \quad (12)$$

이때 수심 h가 줄기 높이 h_0 보다 클 경우는 $h = h_0$, $C_D = 1.2$ 로 한다. 우측 세번째 항은 수관부의

저항을 나타내고 W_u 는 식(13)과 같다.

$$W_u = \frac{1}{2} a B C_D \rho a_u u^2 \quad (13)$$

a_u 는 부착물이 없는 경우에 수몰하는 가지에 대한 총 투영면적이고, 부착물이 있을 경우에는 수관부의 투영면적이다. 따라서,

a) 줄기부만 침수하는 경우의 조도($h \leq h_0$)

$$N = [n_b^2 + \frac{a}{2g} C_D D h^{4/3}]^{1/2} \quad (14)$$

b) 수관부까지 침수하는 경우의 조도($H \geq h \geq h_0$)

$$N = (n_b^2 + \frac{a}{2g} h^{1/3} [C_D D h_0 + C_u a_u])^{1/2} \quad (15)$$

c) 완전 수몰된 경우

수몰된 수목군 위에는 수목의 높이가 다르므로 요철에 의한 저항 뿐만 아니라 수목군 위의 흐름과 수목군내의 흐름이 연직방향으로 운동량 교환이 발생하므로 인한 저항이 작용한다. 이때는 수목군 위의 조도계수를 가정하여 흐름 전체를 해석하고 혼적수위를 이용하여 조도계수를 구한다.

한편 풀로 균등히 덮힌 수로에서는 그림 10을 이용하여 조도계수를 구할 수도 있다.

4.3 단면형상에 기인하는 저항

하도가 그림 11와 같은 경우 분할단면마다 등류 가정조건으로 힘의 평형식을 구하면 식(16), (17) 및(18)과 같다.

저수로

$$\tau_{mc} S_{mc} + \tau_{as1} (H - Z_1) + \tau_{as2} (H - Z_2) = \rho g A_{mc} I_b \quad (16)$$

좌안 고수부지

$$\tau_{fp1} S_{fp1} - \tau_{as1} (H - Z_1) = \rho g A_{fp1} I_b \quad (17)$$

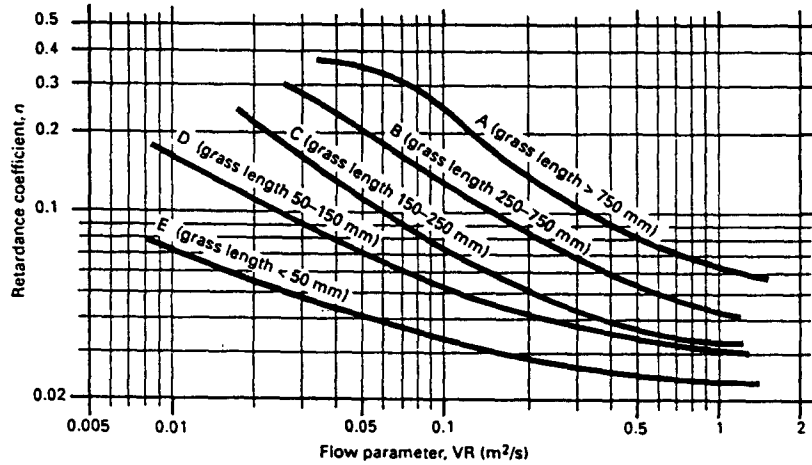


그림 10. 단위폭당 유량과 조도계수의 관계

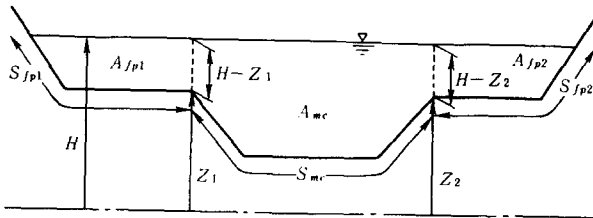


그림 11. 분할단면의 형상

우안 고수부지

$$\tau_{fp2} S_{fp2} - \tau_{as2} (H - Z_2) = \rho g A_{fp2} I_b \quad (18)$$

여기서 S는 운변장, H는 수위, A는 분할단면적, I_b 는 하상경사, Z는 표고이다. 첨자 mc, fp1, fp2는 각각 저수로, 좌안 고수부지, 우안 고수부지의 수리량이고, as1, as2는 좌안고수부지와 저수로, 우안고수부지와 저수로의 경계를 나타낸다.

τ_{mc} , τ_{fp} 는 저면에 작용하는 전단력이다. 또 τ_{as} 는 저수로 흐름과 고수부지의 흐름과의 운동량 교환에 의한 전단력으로 식(19)로 나타낸다.

$$\tau_{asi} = \rho f (u_{mc} - u_{fp_i}) \quad (i=1,2) \quad (19)$$

f는 경계혼합계수로 저수로 폭과 하폭의 비(b/B)가 0.12~0.6의 범위에서는 평균적으로 0.17이다.

4.4 수목군과 수목군외의 경계부에서의 전단력
수목군 내의 유속은 주변 유속에 비해 매우 낮으므로 운동량 교환이 발생됨으로 인하여 전단력이 발생된다. 이러한 간섭에 의한 전단력은 식(20)으로 표시된다.

$$\tau = \rho f (u_i - u_j) | u_i - u_j \quad (20)$$

u_i : 해당 분할단면의 평균유속
 u_j : 인접 분할단면의 평균유속

수목군에 의한 사수역과 그에 인접한 분할단면의 경계에서는 식(20)에서 u_i 혹은 u_j 가 0이 된다.

f의 값은 주흐름부의 조도계수, 수심, 밀생도, 수목군의 위치 등의 영향을 받고 있지만 기왕의 적용 사례에 의하면 수목군이 제방에 접하고 있는 경우에는 $f=0.03$, 두 개의 흐름사이에 수목군이 끼어 있을 경우 $f=0.1$ 로 하면 된다. 한편 아래의 식으로도 계산이 가능하다.

1) 수목군이 두 개의 주흐름부에 끼어 있는 경우

$$f: \frac{K\sqrt{h}}{u_m\sqrt{b}} \leq 0.4 \quad f = 0.072 \frac{K\sqrt{h}}{u_m\sqrt{b}} \quad (21)$$

.....하천식수(植樹)의 수리학

$$\frac{K\sqrt{h}}{u_m\sqrt{b}} \leq 0.4 \quad f = 0.017 + 0.029 \frac{K\sqrt{h}}{u_m\sqrt{b}} \quad (22)$$

2) 수목군이 제방에 접해있는 경우

$$f = 0.04 \times \{1 - \exp(-0.06b/L_w)\} + 0.007 \quad (23)$$

여기서,

$$L_w = 0.04 \times \{h^3 K^2 / (2F_m^3 g)\}^{1/4} \quad (24)$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{a_w C_0 / 2g}} \quad (25)$$

$$F_m = \frac{2gn_m^2}{h^{1/3}} \quad (26)$$

$$a_w = \frac{N_a}{Ah} \quad (27)$$

여기서, b는 수목군의 폭, h는 수목수심, C₀는 수목군의 저항계수, A는 번무면적, N은 수목수, a는 수목 1본당의 줄기 및 가지의 총 투영면적이다.

실험에 의하면 수목군 경계에 있어서 와동성계수와 전단력은 수목군내와 수목군외의 유속비가 각각 1/2, 1/3 인 경우에 최대가 된다.

5. 허용최대유속

풀(grass)로 완전히 덮힌 수로의 경우에는 풀의

높이보다 수심이 얇은 경우는 풀로 인하여 조도가 증가되다가 수심이 더욱 증가하면 풀은 동요되며 흐름을 홀으려 놓아 조도가 급격히 증대한다. 수심이 증가하여 풀을 완전히 수몰시킬 경우에 조도계수 값은 급격히 감소한다. 이는 흐름에 의해 풀이 쓰러져서 간섭(interface) 영향보다도 표면조도가 주로 지배하기 때문이다. 일반적으로 알려진 최대 허용유속의 기준은 풀이 균일하게 조성된 경우에 한하여 표 3과 같다.

일반적으로 허용유속은 풀로 덮인 경우에는 2.0m/s 이하가 된다. 홍수의 빈도에 따라서 식물의 수리학적 조도계수와 침식저항 능력의 회복시간을 하천설계시에 고려하여야 한다. 침식저항은 흐름의 지속시간에도 영향을 미치며 속도와 지속시간의 관계가 그림 12와 같다. 여기서 지속시간이나 속도가 이 표의 값보다 크게 되면 피복상태나 표층의 침식이 발생됨을 의미한다.

Hewlett는 초지피복의 경우에 10시간 이상에서는 2m/s, 수시간은 3~4m/s, 2시간 이하에서는 5m/s 의 속도에 견딜 수 있으며, 장시간 흐름에는 1m/s 정도가 적당하다고 발표하였다.

6. 결론

하천을 자연상태로 보존하면서 관리하거나 혹은 기존의 하천을 자연상태로 복원하려는 하천구간에

표 3. 최대허용유속

Cover expected after two seasons	Maximum flow velocity (m/s)		
	0.5	5-10	> 10
1 Easily eroded soils (sands, sandy loams, silt loams, silts, loamy sands)			
Very good cover (100%) of creeping grasses	1.8	1.5	1.2
Good cover (88%)	1.5	1.2	0.9
Moderate cover (30%)	0.8	NR	NR
2 Erosion resistant soils (clay loams, clays)			
Very good cover (100%)	2.4	2.1	1.8
Good cover (88%)	2.1	1.8	1.5
Moderate cover (30%)	1.1	NR	NR

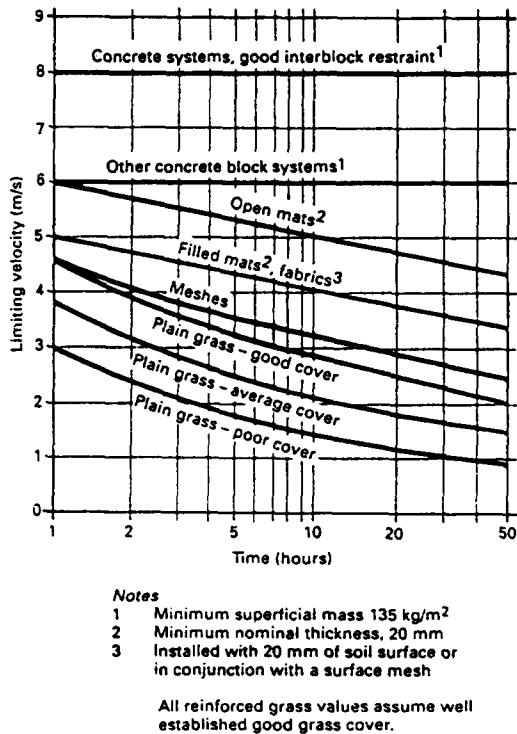


그림 12. 침식저항에 따른 시간과 속도의 관계

서는 수목에 의한 수리학적 특성을 명확히 파악하여야 한다. 하천식수에 의한 수리학적 영향 중에서 수목이 흐름에 의하여 받는 힘, 수목군의 조사방법, 조도계수의 변화, 수목에 의한 수위상승 예측방법 등에 관하여 알아보았다.

계절별로 유량의 규모가 크게 변화하여 하상계수가 매우 큰 우리나라의 하천에서는 고수부지의 활용성이 매우 크다. 따라서 고수부지 및 하천 제방에 식수를 하여 친수기능을 증대시키고 생태학적 및 환경공학적 이점을 충분히 활용할 수 있다고 판단된다. 특히 도시 하천에서는 기존 제방을 자연제방으로 복원함으로써 야생동물에게는 서식처를 시

민들에게는 휴식공간을 제공하는 기능도 할 수 있다.

앞으로 수목이 수몰되는 경우의 조도계수의 정량화, 수목층 주위의 난류 플릭스와 Reynold 응력을 고려한 흐름의 해석 등이 필요하다. 특히 후자는 유송토사량의 예측, 부유물의 농도, 하상변동, 제방의 안정도평가 등의 수리환경문제를 해결하는데 필요하다고 생각된다. 이러한 연구를 수행하기 위하여서는 기왕홍수의 흔적수위, 유량 등 하천의 기초 자료의 수집과 분석이 필수적이다.

참 고 문 헌

- 건설부(1993). 하천시설기준.
 Agricultural Experiment Station(OSU)(1990). "Model for uptake of organic chemicals by plants", Station bulletin 677, pp. 403-417.
 Coppin N.J. and Richard I.G.. *Use of vegetation in civil Engineering*, CIRIA, 1990 Hemphill, R.W. and Bramley M.E.(1989). *Protection of river and canal banks*, CIRIA.
 Shimizu Y., Tsujimoto T. and Nakagawa H.(1992) "Numerical study on turbulent flow over rigid vegetation-cover bed in open channel", JSCE, No. 447/II-19, pp. 35-44.
 Tourbier J.T. and Westmacott R.(1981). *Water resources protection technology*, ULI-the Urban Land Institute, Washington,D.C. 1981.
 建設省河川局 治水課(1994). 河道内の 樹木の 伐採. 植樹을 위한 가이드라인(案), 山海堂.
 福岡捷二, 藤田光一, 新井田 浩(1992). "樹木群이 있는 河道의 洪水位豫測", 日本土木學會論文集, No. 447/II-19, pp. 17-24.
 福岡捷二, 新井田 浩(1993). "流木類의 流下.堆積의 河道設計의 利用", 日本土木學會論文集, No. 479/II-25, pp. 51-60.