

계류생태계 보전을 고려한 환경친화적 사방 전략(I)

박 재 현¹⁾

¹⁾ 진주산업대학교 산림자원학과

Consideration on Environmentally Friendly Erosion Control Strategy for Conservation of Stream Valley Ecosystem (I)

Park, Jae-Hyeon¹⁾

¹⁾ Dept. of Forest Resources, Jinju National University, Jinju, Korea

ABSTRACT

This study was carried out to introduce current status to discuss erosion control strategy for the conservation of stream valley ecosystem. To restore stream valley ecosystem, we should establish restoration plans to keep the original shape of stream. It is necessary to use environmentally sound materials with conservation of valley stability.

Valley construction for erosion control works should be evaluated continuously based on concepts of conservation and development of stream valley ecology. It is categorized in point of the important of class of stream valley conservation ahead planning and constructure. We suggest that the development of stream valley construction needs to prevent mass movement of soil sediments. In addition, it is established the basal strategy to protect macro and micro aquatic organisms in stream valley ecosystem.

Key words : *Erosion control strategy, restoration plan, stream valley ecosystem*

I. 서 론

최근 자연환경의 훼손이 심해지자 계류와 산 복비탈면에서 시행되고 있는 치산·사방사업에 대한 관심이 증대되고 있다. 그러나 치산·사방사업은 산지와 계류의 자연생태계, 경관보전 문제와 일부 상치되는 문제를 안고 있다. 따라서 국민의 생명과 재산을 지키는 방재사업이라 하더라도 자연환경의 보전과 조화되는 사업의 실시는 시대적 요청이 되었고, 환경보전과 조

화되지 않는 치산·사방사업의 실행은 불가능하다고 해도 과언은 아니게 되었다. 이러한 시점에서 산지와 계류면에서의 생태계보전과 치산·사방사업과의 관계에 대해서 생각해 볼 필요가 있다.

사방사업은 본래 산림이 갖고 있는 수원함양 기능, 국토보전기능 및 휴양기능 등의 공익적 기능을 발휘하도록 도움을 주는 사업이므로 자연과의 조화를 꾀하고, 자연과 위화감 없는 공법이 도입되어야 하나 오히려 사방공사에 의해

사방시설 주변의 경관손상, 공사 중의 탁수유출 및 소음, 자연도가 높은 계류생태계에 미네르스적 영향을 미치고 있기도 하다. 따라서 앞으로의 사방사업은 방재공간의 확보와 더불어 주변환경에 잘 조화되고 생물자원이 풍부한 환경공간이 확보되도록 배려해야 할 것이고, 이러한 의미에서 우리나라의 사방사업에 참고가 될 수 있도록 환경을 배려한 외국의 환경친화적 사방사업에 대한 자료의 분석이 필요하다(전근우, 2002).

자연하천의 유로 형태는 자연의 법칙성을 가지며, 그 상태로 일정한 평형을 유지하고 있다. 유수는 그 하천 고유의 유로를 형성함과 동시에 하상이나 호안의 변화를 나타내는 미지형을 형성한다. 하지만 일반적으로 하천개수는 하천의 자연지형을 크게 변화시키고 단조롭게 만든다(松永, 1993).

계류생태계의 종다양성은 여울이나 소 등 계류의 미지형으로 인해 유지되는 부분이 크지만 지형의 변화는 미지형 형성에 불안정을 가져오게 된다. 즉, 사행유로에서의 여울과 소는 안정적이지만 계류의 직강화는 계류생태계를 불안정하게 만드는 요인이 되며, 이는 계류의 미지형 회복에 심각한 변화를 안겨준다. 따라서 계류생태계의 자연성을 나타내는 현재 계류의 사행유로를 고려하여 계류생태계 복원계획을 설정하는 일이 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 계류에 사방댐이나 기슭막이 등 인공구조물은 토사생산·이동을 제어하는 사방·치산사업을 통하여 계류의 형상이 변화하고 계류생태계에 영향을 미칠 수 있다.

계류는 수중과 수변생태계를 포함하는 생태적 위치를 지니며 계류생태계는 동·식물 서식에 필요한 다양한 미소환경을 가지고 있어 타지역보다 종 다양성이 매우 높고, 어름치, 금강모치, 수달 등의 멸종위기 및 보호야생동물, 희귀종, 천연기념물이 다수 서식하는 지역으로 위치적으로는 상류 산지유역을 포함하며, 야계·야계적 하천, 하천과는 다른 특성을 지니고 있다. 이러한 관점에서 이 논고는 계류생태계를 보전하기 위한 사방전략을 고찰해 봄으로써

계류의 환경복원을 위한 각종 사업에 효율적으로 적용할 수 있는 기본전략을 모색하는데 그 목적이 있다.

II. 계류생태계 보전과 유역의 토사동태

1. 유역의 토사동태

대체로 산림지의 비탈면에서 표면침식의 주된 원인이 되는 표면유하수가 발생하는 경우는 거의 없다. 따라서 토사생산형태는 비탈면붕괴가 주가 된다는 사고방식이 강하게 인식되어 있다(Nakamura *et al.*, 1995; 清水 등, 1995; 박재현 등, 2000). 강우의 대부분은 낙엽·낙지층, 부식층 및 하부산림토양으로 흡수되고, 중간류(中間流) 혹은 기저류(基底流)를 통해서 계류로 유출한다. 또한, 몇몇 특수한 지형·지질구조를 나타내는 구역을 제외하고는 붕괴발생 후 신속하게 식생으로 피복되기 때문에 표면침식은 적다고 할 수 있다.

대개 비탈면붕괴는 0차곡(0次谷)으로 불리는 계류 상류의 오목한 부분, 혹은 경사변환점의 하부비탈면에서 발생하는 것으로 알려져 있다(羽田野, 1974). 0차곡의 매설과정에 대해서는 Reneau와 Dietrich(1989)가 미국서해안에서 0차곡에 매설되어 있는 나무 조각의 탄소동위원소검정으로 장기적 토사생산과정을 추정, 0차곡붕괴의 발생빈도는 $10^3 \sim 10^4$ 년이라고 하였다. 우리나라와 일본에서 조사된 사례는 없지만 비탈면붕괴의 빈도와 비유송토사량을 파악해 보면 이보다 더 짧아진다고 생각된다. 즉, 지금까지 실시되어 온 연구결과, 0차곡붕괴의 발생빈도는 약 $10^1 \sim 10^2$ 년이다(中村, 1990; 清水 등, 1995). 더구나 비탈면하부가 세굴을 받은 결과, 새롭고 급준한 비탈면이 계안에 발달해서 침식을 가중시키고 있다.

우리나라와 일본의 하도에서 장기간 토사이동을 현지 관측한 사례는 거의 없다. 그러나 미국에서는 일찍부터 실적을 쌓아 관측 결과가 다수 보고되고 있는데, Gilbert(1917)의 연구가 최초이다. 이에 따르면 하류역분류지점의 계상이 최고 수위에 달하는데 약 10~20년이 걸리

고, 그 후 원래의 계상 높이까지 저하하는 데에는 다시 30~40년이 더 걸린다고 보고하였다. 이와 같은 현상은 미국 캘리포니아주 북부의 레드우드크리크유역에서도 보고되고 있고, 흩덩어리가 하도를 파상적으로 이동하는 모양이 장기관측에 의해 확인되고 있다(Madej and Ozaki, 1996). 이 연구 결과 계상이 상승한 후 원래의 계상 상태로 돌아가는데 약 15년이 걸리고, 피크시 하류로의 이동속도는 약 700m/년으로 계산되었다.

일반적으로 토사유출에 수반해서 계류의 하상(계상, 溪床)이 상승하고 하강하는 경우, 횡단형의 최저계상 높이는 빠른 속도로 원래의 상태로 돌아가지만, 평균계상높이로 돌아가기 위해서는 오랜 시간이 걸린다(Meade, 1982). 이는 계상이 낮아지는 과정에서 계류면에 퇴적지(lateral deposits)를 남기기 때문이고, 이들 퇴적지는 수년에서 수 백년까지 체류하게 된다. 수변립은 이런 퇴적면에 성립한다. 결국, 하도 내 토사체류에 의한 토사이동의 물결(wave of sediment)은 하류로 향하여 편평하게 되어 가는 것이라고 말할 수 있다(Hey, 1979). Everitt(1968)는 토사퇴적지 상에 성립한 유사한 임령의 활엽수림의 분포해석으로부터 평균침식률을 계산하였다. 마찬가지로 Nakamura(1986), Nakamura *et al.*(1995)는 연대분포 및 그 연속식으로부터 $10^1 \sim 10^2$ 년 정도의 평균토사체류시간과 사행천에서의 토사의 이동속도 1,000m/년을 산출하였다.

비탈면에서 토사생산과 하도의 유송을 장기적으로 논의한 연구는 매우 적다(Nakamura *et al.*, 1995). 그러나 이 문제는 토사수지와 토사운반경로의 문제로 계류에서의 생물상과 관계되고, 사방사업계획을 논할 때 어떻게든 해결하지 않으면 안 되는 과제이다. 따라서 개개의 현상에 관한 역학적 해석이 진척되고는 있지만 시공간 규모를 확대한 경우, 거의 추측 단계를 벗어나지 못하는 것이 현재의 상황이다. 아무리 실험실 내에서의 이론을 현지 유역에 적용하려고 해도 이론이 요구하는 높은 정도의 평가는 어렵다. 예를 들면 비탈면붕괴의 경우, 붕괴의 한 요인인 풍화토양깊이에 따른 유역분포

를 정확히 평가할 수 없다. 유송토사량 계산의 경우에도 사력의 대표적인 입경분포를 어떻게 결정할 것인가에 대해서도 현지조사방법조차 확립하지 못할 뿐만 아니라 풍화·마모에 따른 입자크기의 시간적 변화도 고려되고 있지 않다(池田 등, 1986).

유역의 토사동태에 대해서는 산지비탈면에서 계측된 토사생산량과 하도에서 관측된 토사수송량의 불균형에 따라 논의가 시작되었다. 이 불균형은 최초 토사수송률(sediment delivery ratio)의 형태로 논의되었다(Roehl, 1962). 토사수송률은 산지비탈면의 토사생산량에 대한 하도수송토사량의 비율로 정의되고, 유역면적의 증가에 따라 저하하는 것이 일반적이다. 미국에서는 100km^2 의 유역에서 10%정도의 토사수송률이 보고되고 있는데, 이러한 경향도 유역조건에 따라서 다르고, 평균값으로 논의하는 것도 어렵다(Walling, 1983). 결국, 유역을 블랙박스로 다룬 연구에는 한계가 있고, 계류의 생태계를 보전하기 위해서는 토사의 생산에서 유송, 유송에서 체류, 다시 체류에서 재이동이란 일련의 움직임을 명확하게 할 필요가 있다. 이러한 관점에서 선구적 연구자는 Dietrich와 Dunne(1978)이었다. 이들이 수행한 연구에서는 산지소유역에서의 토사생산·체류·수송형태가 상세하게 논의되었고, 체류시간(residence time)의 추정도 시도되었다. 그 후, 미국서해안지역에서 지형학팀이 산림유역에 있어서 이 문제를 집중적으로 논의하고 흥미 있는 결과를 이끌어 내었지만, 모델을 만든 다음에도 가정의 타당성 등 아직 많은 문제점을 안고 있다(Swanson *et al.*, 1982).

실제유역에서 토사수지에 대한 과학적 상황은 아직 현상론적 단계에 있다고 할 수 있다. 또한, 지역성도 강해 그 계산결과를 항상 현지현상과 대비시키고, 모니터링 할 필요가 있다. 그 때문에 이제까지 만들어진 사방댐의 퇴사자료와 현행 계산결과와의 합치성을 검사하는 것이 시급하다고 생각된다. 그러나 우리나라와 일본에서 실시되고 있는 사방댐에 대해서 댐 퇴사상황이 계속적으로 관측되고 있는 예는 적다.

기존시설의 모니터링은 사방계획의 타당성

및 계류환경의 보호를 목적으로 한 계류관리에 있어 필수적이라 할 수 있다. 유역에서 생산된 토사의 대부분은 비탈면 끝이나 하도범람원에서 체류하고, 순간적으로 유하할 가능성은 세립토사를 제외하고는 극히 적다. 또한, 하류의 하도 뿐만 아니라 계류생태계를 유지하기 위해서도 이후 어느 정도의 토사는 유하시키지 않으면 안 된다. 즉, 수계 일관적인 토사관리를 실현하기 위해서도 하도조절량, 허용유사량 등 산출과정의 정확성과 과학적 검증을 실시하지 않으면 안 된다.

2. 토사동태 및 계류의 구조와 기능

산지계류에서의 토사이동은 토사생산과 유출의 시간적 불연속성 및 이로 인해 초래되는 토사생산량과 수류에 의한 수송가능량의 불균형에 의해서 특징지어진다. 즉, 유역비탈면에서 광범위하게 붕괴가 발생하고 토사가 생산되어도 수계차수가 작은 계류는 이것을 운반할 수 없고, 계상이나 계안, 비탈면 끝부분에 저류된다. 저류된 토사를 운반하기 위해서는 토석류형태가 필요하고, 이로 인해 불안정 퇴적물을 계류로부터 제거한다. 토석류가 발생한 후의 계류에는 토석류단구나 계상에 노출된 기암이 관찰되는 일도 많다. 이런 계류에서는 그 후 호우가 발생해도 토사는 유출되지 않고, 불안정토사가 다시 모이기까지 지속성을 확보하게 된다.

토사생산과 유출의 상반적 대치는 계상의 급격한 상승과 하강을 초래하고, 횡단적으로 요철이 있는 계단모양의 범람원지형을 형성한다. 또한, 계류 하부가 넓은 구간에서는 그물모양의 유로가 발달하고, 유로변동에 따른 2차유로, 방사상 유로가 형성된다. 범람원의 최저나 2차유로 등의 지형은 그 후 토사동태에도 영향을 미치고, 여러 가지 기반지질·수분조건·교란강도·빈도 등 입지환경을 제공한다. 나지면이 홍수에 의해서 형성되면 수목이나 초본류의 종자가 일제히 침입하고, 외관적으로는 나무의 높이가 잘 맞는 천연생 일제림이 성립되는 경우가 많다. 아울러 유로로부터 멀어짐에 따라 퇴적물의 평균입자크기는 작아지고, 수분 및

유기물함유율은 동시에 증가한다. 즉, 기질조건과 계류지형은 매우 밀접하게 관련되어 있다.

일반적으로 유로주변은 계상으로부터의 높이가 낮고, 여름철의 홍수, 초봄의 눈 녹은 물에 의해서 침수되고, 유수에 의해 교란을 받고 있다. 또한, 유로변동이 빈발하고 교란강도도 매우 높다. 이 때문에 운반되기 쉬운 유기물·세립토사는 항상 하류로 유송되고, 유수에 의해서 운송되기 힘든 굵은 모래만이 잔존하게 된다. 이와는 대조적으로 유로에서 떨어진 퇴적면이 높다면, 드물게 발생하는 대규모 증수에 의해서 침수된다고 해도 퇴적물을 씻어내는 것보다는 상류에서 운반되어 온 세립토사 및 유기물을 퇴적시키는 경향이 있다(Johnson *et al.*, 1976). 이런 계류변의 다양한 지형구조와 수변림의 다양성은 계류생태계에서의 물질순환에도 많은 영향을 미친다. 수변림의 종다양성을 통해 다른 분해속도를 갖는 낙엽은 서로 다른 시기에 공급된다. 낙엽·낙지의 분해속도는 수변에서 볼 수 있는 질소성분이 많은 오리나무과가 가장 높고, 단풍나무과, 자작나무과가 중간 정도, 비탈면의 노령림에서 볼 수 있는 너도밤나무과 등의 잎이 낮다(Kikuzawa, 1983; Cummins *et al.*, 1989; 柳井과 寺澤, 1995). 이런 분해속도와 공급시기의 차이는 섭식하는 수생곤충의 군집구조에도 영향을 준다. 온대낙엽활엽수림 지역을 흐르는 계류의 낙엽·낙지는 봄에 급격하게 감소한다(岸과 中村, 1995).

계류의 물질수지는 생산과 유송이 한 시기에 집중하는 경향이 있다. 낙엽은 지역에 따라 다소 다르지만 10~11월에 집중하고, 유송은 봄의 융설·융해 시기든지 여름의 호우시기에 집중한다. 집중적인 생산으로 단숨에 바다까지 흘러나간다면, 유기물은 수생생물이 이용하지 못하게 된다. 유로에 직접 들어가지 않는 가을의 낙엽은 일단 이런 계류의 지형면에서 저류되어 분해되고, 물의 수위가 높아질 때 조금씩 유로로 공급된다(Jones and Smock, 1991). 계류의 활동으로 형성된 다양한 지형면은 유로 내 낙지현존량의 급격한 변동을 가져오고, 이를 서서히 공급하는 중요한 기능을 하고 있다.

유로가 넓은 확폭부에서는 빈번하게 발생하는 계상교란의 영향으로 공급되는 일사량은 산지 계류 중에서도 매우 높다. 게다가 2차유로의 발달과 이들 유로에서의 얇고 느린 흐름도 영향을 주어 수온의 상승과 계류 내 1차생산량의 증가가 나타난다. 확폭부에서의 계류수송력(stream power)의 저하는 결과적으로 토사, 낙엽·낙지, 유목 등 상류에서 운반되어 오는 물질의 정체를 재촉한다. 산지계류에서 Lamberti *et al.*(1989)가 실시한 낙엽유하실험에 의하면, 확폭부의 낙엽저류기능은 협착부와 비교해서 5배 이상 높아지고 있다. 계류에서 떠내려오는 유목의 분포량도 이런 확폭부에서 2~5배정도 높고, 특히 유량과 유로폭이 급격하게 변화하는 2차유로의 입구 부근에서 체류하는 경우가 많다(Nakamura and Swanson, 1994). 또한, 도류목이 유하해 낙엽·낙지를 차단시켜 확폭부에서의 물질저류효과를 높인다(Speaker *et al.*, 1984). 즉, 2차유로가 발달하는 확폭부에서는 정체하는 도류목의 약 17%가 웅덩이형성에 관여하고 있는데 반해, 단일유로의 협착부에서는 5%정도에 지나지 않는다(Nakamura and Swanson, 1994).

계상에 발달한 두꺼운 퇴적물은 광범위하게 퍼진 하상공극수역(hyporheic zone)을 형성한다. 사력퇴, 범람원 등의 지형면을 통과할 때 공극수역이 영양염인 질소의 근원으로써 기능을 하는 것인가, 수조(sink)로써 기능하는 것인가는 산림계류와 같이 질소성분이 제한되어 있는 계통인가, 밭에 인접해서 유입하는 질소성분이 높은 계통인가에 따라서 다르다(Jones and Holmes, 1996). 따라서 계류에 설치되어 있는 사방댐이나 기슭막이 등 인공구조물에 의하여 계류에 떨어진 낙엽·낙지 성분들로 인해 계류의 물질공급이 차단되거나 집적되는 것은 질소성분의 집적과 관계되므로 이에 대한 영향을 평가하는 것도 대단히 중요하다.

III. 계류생태계 보전과 환경친화적 사방 구조물

1. 환경친화적 사방구조물의 전망과 과제

계류생태계를 보존하기 위한 기술적 중심과

제는 생태계구성요인의 연계를 유지하는 것이다. 이를 위해서는 토사나 물질의 이동, 유로변동 등 계류가 가진 동적구조가 유지되지 않으면 안 된다. 일본에서는 1997년에 신하천법이 제정되어 하천환경의 정비·보전이 내부목적화되고, 현재는 산지에서 평야, 바다로 도달하기까지의 유역종합토사관리가 요구되고 있다. 이제까지 계류나 야계에 설치되는 각종 사방공사의 목적이 어떤 방법으로 토사생산을 억제해서 평야부 하류역으로 유하시키지 않도록 하는가에 초점을 두었으나, 이후에는 어떤 하류로 공급하는가가 중심과제가 되고 있다. 따라서 재해출처로써의 토사억제, 생태계유지를 위해 필요 불가결한 토사조절의 발상전환이 필요하다. 버드나무 등 수변림을 구성하는 종들 대개는 사력이 빈번하게 이동하는 입지를 좋아하고, 안정한 입지에서는 다른 수종과의 경쟁에서 도태된다. 내구년수가 긴 구조물의 설치에 계상의 안정화를 초래하고, 계류가 본래 가진 동적구조를 억제한다. 따라서 동적구조유지의 관점에서는 대상으로 하는 자연현상의 시간에 응하는 구조물의 내구성을 설정하는 것이 타당하고, 짧은 시간단위에서 파괴되는 것을 전제조건으로 한 구조물설치도 생각하지 않으면 안 된다. 이러한 관점에서 구조물파괴는 실패사례가 아니고, 유로 및 계상변동 등 자연교란을 허용하는 성공사례로써 해석될 수 있다. 예를 들어 자연보존을 목적으로 하는 국립공원 및 자연공원의 계곡 내에 설치되는 각종 인공구조물의 철거는 실제로 계류생태계의 안전 및 보존을 위하여 필요한 조치일 수 있다. 따라서 식물 등 생물재료에 의해서 만들어진 구조물은 파괴돼 유출되어도 유해한 폐기물로는 작용하지 않는다. 그러나 시멘트콘크리트 등 인공적인 재료를 사용한 구조물은 파괴되어 계류에 존치되거나 하류로 유입되면 계류생태계를 교란시키는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 토지이용과 그에 따른 계류재해를 생각하면 이런 변동의 허용성, 구조물의 유연성에 대해서도 한계가 있다.

계류에 대한 계층구분은 이미 Frissell *et al.*

(1986)과 Swanson *et al.*(1990)에 의해서 제안되었으나 구조물의 안정성을 요구하는 크기는 유역 및 수계차수에 따라 다를 것이다. 따라서 넓은 구역에서 발생하는 자연재해에 대해서 현재의 사방이 기술적으로 대응하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 좁은 영역에서 발생하는 자연교란에 대해서는 유역 전체에서 처리하는 것을 고려한다면 변동을 허용하는 것이 가능하고, 유연한 구조물설치를 생각할 수 있다. 유역적 관점에서는 각종 토사재해로부터의 안전확보가 중심과제로 거론되고, 계류환경의 분단을 최소한으로 억제하는 시설계획을 생각하지 않으면 안 된다. 유로구간 크기에서는 토지·생물·유수환경계의 연계 유지가 중심과제로 시선이 집중되고, 내구년수가 짧은 구조물을 생각할 수 있다. 이러한 관점에서라면 계류생태계 보전을 고려하여 계류에 설치되는 사방구조물은 내구년수가 짧은 환경친화적 구조물이 적합하다고 할 수 있다.

현재까지 토사관리를 목적으로 한 사방계획의 사고방식이 사방댐이나 유로공사와 같은 공작물에 의한 안정계류종단형의 수립이었던 것에 반해서(武居, 1998), 계류생태계 보전을 위한 사방공사의 시점은 횡단형이 중요시된다고 할 수 있다. 즉, 수변립의 수관에 의해 일사차단이 탁월한 산지계류에서는 수서식물에 의한 광합성량은 극히 적고, 에너지의 대부분을 계류 외에서 생산되는 유기물에 의지하지 않으면 안 된다. 이 에너지원의 거의가 가을에 수변립에서 떨어진 낙엽이고, 계류 내의 생물군집은 계외(系外)로부터의 에너지공급에 의지하고 있다고 할 수 있다(Fisher and Likens, 1973). 계안 비탈면에서 단구, 범람원을 거쳐서 사력퇴, 유로에 이르는 횡단변화는 영양염 등 물질의 생산·체류·유출구조와 강하게 관계되어 있고, 육지지역과 수역의 연속성을 확보한다는 의미에서도 중요하다. 그러나 계류에 시공된 횡단구조물은 국소 세굴이나 퇴적을 막는 효과는 매우 높지만, 계류생태계의 기본구조인 여울과 웅덩이의 구조를 변화시킨다(Takahashi and Higashi, 1984). 따라서 허용범위 내에서 형성되

는 얇은 여울과 웅덩이의 반복, 사력퇴·범람원의 발달, 유로변동 등은 생물서식지를 제공하는 의미에서도 보전되고 확보되지 않으면 안 된다. 이러한 의미에서 보전되어야 할 만한 가치가 있는 계류 또는 계류변에 설치되는 사방구조물의 영향은 계류생태계 보전을 위해서는 마이너스 효과를 가진다고 할 수 있다.

2. 계류생태계 보전을 고려한 환경친화적 사방공사의 실시

유역의 곡선부 비탈면에서 표면침식, 비탈면 붕괴, 산사태 등에 의해서 생산된 토사는 대부분 직접 계류에 유입되지만, 일부는 비탈면각부에 머무르기도 한다. 이러한 붕괴토는 계류에 의한 측방침식에 따라서 서서히 유출하는 한편 때때로 계류를 막아 토석류로 유하하기도 한다. 계류 내로 공급된 토사는 계상의 상승과 지하를 반복하면서 유하하는데, 계류의 밑바닥이 넓은 구간에서는 토사가 정제하여 범람원을 발달시킨다. 계류의 지형은 이런 계상변동의 반복에 의해서 형성되고, 계류나 수변에 서식하는 동·식물은 이러한 지형의 구조와 지형변화의 빈도에 의해 규제되면서 그 서식지를 확보하고 있다. 따라서 이런 토사동태와 계류·수변생물과의 연계를 개관하고 환경과 조화되는 새로운 사방·치산사업 즉, 환경친화적 사방사업의 실시가 요구된다. 이는 보전해야 할 계류에 설치되는 인공구조물과도 직접적인 연관성을 가지고 있다. 따라서 계류생태계를 고려한다면 환경친화적 사방공사는 재료 자체가 계류 또는 계류 주변의 환경을 저해하지 않도록 환경친화적이어야 하며, 구조물 자체도 주변 경관과 조화를 이루어야 한다. 따라서 계류생태계를 고려한 환경친화적 사방공사가 이루어지기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 기본 전략이 수립되어야 할 것으로 생각된다.

(1) 일반적으로 계류의 계상은 자연적 굴곡이 유지되어 있는 경우가 많다. 따라서 계류를 횡단하는 인공구조물 즉, 사방구조물은 자연 계상 형태를 유지하도록 설계되어야 한다. 즉, 계류에 사방구조물 시공시 시행되는 공사는 대개

계상을 평탄화 하거나 직강화 하면서 설계하는 것이 일반적이므로 이때 계상의 평탄화가 진행되면, 이는 계류생태계를 교란시키는 작용을 할 수 있다. 또한, 사행유로를 직강화 하는 방법은 계류의 유량 및 수생태계의 연속성을 교란하는 요인이 되므로 원래의 계류 형태를 유지하는 것을 원칙으로 하고, 여울과 둔덕을 유지하도록 설계한다. 또한, 이들 공사로 인해 수심이 변경되거나 수심저하를 수반할 수 있으므로 계류에 서식하는 수생곤충이나 어류생태계가 교란될 수 있다. 또한, 자연스런 골짜기형 계류 구조는 계상이 주변 지하수위보다 낮아 많은 지하수가 계천으로 모여들고, 이로 인해 홍수나 갈수피해를 방지할 수 있고, 계류생태계를 유지·보전할 수 있다. 따라서 계상의 자연 구조를 유지하는 것은 계류생태계 보전에 있어 매우 중요하다고 생각된다.

(2) 대부분 계류에 설치되는 사방구조물은 시공 및 재료의 구득 용이, 강도의 요구 등의 이유로 시멘트콘크리트구조물이 많다. 그러나 이러한 재료는 계류 또는 계류변의 자연경관을 파괴하거나 수생태계에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 따라서 계류에 설치하는 사방구조물의 설계시에는 시멘트콘크리트구조 보다는 계류의 안정성을 고려한 전석(자연석), 목재 등 환경친화적인 재료의 사용이 필수적이다. 또한, 야계와 계곡은 지역적 특성에 따라 적용 공법이 다를 수 있으므로 계곡의 위치, 지형에 따라 적절한 공법을 선정·적용하도록 해야 할 것이다.

(3) 계류에서의 사방공사시 그 계류의 생물다양성을 보전하기 위한 기본적인 계류생태계 조사를 병행하고, 그에 따른 환경영향을 평가하여 사방구조물에 의한 계류생태계의 영향을 최소화하여야 한다.

(4) 계류에서 실시하는 사방공사시 수반되는 임도 및 진입로 공사 등 각종 공사에 대한 사전 영향을 평가하고, 이의 영향이 계류의 생태계보전상 중요도에 따라 등급화하여 설계·시공해야 할 것이다. 즉, 자연보존을 목적으로 하는 국립공원지역 또는 그에 준하는 자연공원지역, 치수·이수를 목적으로 반드시 필요하다고

판단되는 지역, 인근 주민의 방재상 필요 지역 등을 구분, 사방구조물의 규모 및 시공방법 등을 차등화 할 필요가 있다고 생각된다.

(5) 계류생물군집 서식지의 동적안정성이 확보되는 공법을 실현시켜야 한다. 즉, 교란에 의한 동적 변화, 유출토사에 의한 단구의 형성, 계안침식에 의한 유로의 변동, 세굴과 퇴적의 반복에 의해서 계상이나 계안에 형성되는 사력 퇴적물을 비롯하여 여러 가지 퇴적형태 등이 유지되어야 한다. 더구나 이로 인해 형성되는 역류지역 등 여러 가지 계상 내의 미세구조나 하상공극수역, 동적 서식지를 유지하는 것이 계류생태계에서 군집보전의 요건이다. 따라서 사방댐 등 치산·사방공법은 과거에도 행해지고 있었지만, 대다수의 공법은 계상이나 계안의 고정 목적이요, 수심을 억제해서 하상을 유하하는 토사력을 저하시키며, 계상을 평준화해서 국소적인 세굴을 막고, 계안비탈면을 회복시켜 침식을 막아왔다. 그 결과, 계류 내·외에서의 동적변동은 억제되었으나 계류생태계에는 마이너스적 영향이 있어 왔다. 따라서 계류생태계와 조화되는 치산·사방사업을 추진하기 위해서는 대규모 사력퇴적물의 이동이나 토사 재해를 방지하는 공법을 찾아내지 않으면 안 된다. 아울러 계류에 설치되는 사방구조물은 가능하면 상·하류간 미세 토사의 이동을 억제하지 않도록 가능하면 투과형 구조물로 설계되, 장기간 저사된 토사는 일정 기간을 두고 공사 전의 상태로 준설하는 방안을 강구할 필요가 있다. 또한, 계류에 설치되는 각종 구조물의 계획·설계·시공시 기술적인 면 이외에도 시공관리면 즉, 기술자의 의식개혁이나 작업원의 교육, 공사비 등에 대한 충분한 검토와 노력이 필요하다.

IV. 결 론

계류는 수중과 수변생태계를 포함하는 생태적 위치를 지니며 계류생태계는 동·식물 서식에 필요한 다양한 미소환경을 가지고 있어 타 지역보다 종 다양성이 매우 높고, 각종 멸종위

기 및 보호야생동물, 희귀종, 천연기념물이 다수 서식하는 지역으로 위치적으로는 상류 산지유역을 포함한다. 또한, 계류는 야계·야계적하천, 강이나 하천과는 다른 특성을 지니고 있는 등 생태계 보전에 대단히 중요한 지역으로 치산·사방 공작물 시공시 그 관점을 달리해야 할 것이다. 따라서 이러한 관점에서 이 논고는 계류생태계를 보전하기 위한 사방전략을 고찰해 봄으로써 계류의 환경복원을 위한 각종 사업에 효율적으로 적용할 수 있는 기본전략을 모색하는데 그 목적이 있다.

1. 계류를 횡단하는 사방구조물은 자연 계상의 형태를 유지하도록 설계되어야 하며, 계류의 자연경관을 유지하고 수생태계의 영향을 최소화하기 위한 사방구조물의 설계시에는 계류의 안정성을 고려한 환경친화적인 재료의 사용이 필수적이다.

2. 계류에서의 사방공사시 그 계류의 생물다양성을 보전하기 위한 기본적인 계류생태계 조사를 병행하고, 그에 따른 환경영향을 평가하여 사방구조물에 의한 계류생태계의 영향을 최소화하여야 한다.

3. 계류에서 실시하는 사방공사시 수반되는 각종 공사에 대한 사전 영향을 평가하고, 설계·시공은 계류생태계 보전상 중요도에 따라 등급화 하여야 할 것이다.

4. 계류생물군집 서식지의 동적안정성이 확보되도록 대규모 사력퇴적물의 이동이나 토사 재해를 방지하는 공법을 개발해야 한다.

인용문헌

- 박재현·우보명·이헌호. 2000. 日本에서 溪流邊의 環境復元 發展戰略IV. 한국환경복원녹화기술학회지 3(4) : 84-90.
- 전근우. 2002. 향후 10년간 산림토목사업의 방향설정-사방사업을 중심으로-. 한국산림토목환경연구회보 43 : 2-19.
- 中村太士. 1990. 地表變動と森林の成立についての一考察. 生物科學 42(2) : 57-67.
- 羽田野誠一. 1974. 崩壊性地形(その2). 講座最近の地形學8.土の基礎 22(11) : 85-93.
- 松永勝彦. 1993. 森が消えれば海も死ぬ-陸と海を結ぶ生態學. 講談社. 112-145pp.
- 清水 收・長山孝彦・齋藤正美. 1995. 北海道日高地方の山地小流域における過去8000年間の崩壊發生域と崩壊發生頻度. 地形 16(2) : 115-136.
- 武居有恒. 1998. 砂防計畫に想う. 新砂防 16(2) : 29-30.
- 池田 宏・伊勢屋ふじこ・飯島英夫. 1986. 實驗水路に形成される河川の縦斷形. 築波大學水理實驗センター報告 10 : 115-123.
- 柳井清治・寺澤和彦. 1995. 北海道南部沿岸山地地域における森林ガ河川および海域に及ぼす影響(II). 山地溪流における闊葉樹9種落葉の分解過程. 日本林學會誌 77(6) : 563-572.
- 岸 千春・中村太士. 1995. 小河川における落葉リターの收支と帶留量および保持構造に關する研究. 北海道大學 83-107.
- Cummins, K. W., M. A. Wilzbach, D. M. Gates, J. B. Perry and W. B. Taliaferro. 1989. Shredders and riparian vegetation. BioScience 39 : 24-30.
- Dietrich, W.E. and T. Dunne. 1978. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. Zeit. Geomorph. Suppl. 29 : 191-206.
- Everitt, B. L. 1968. Use of the cottonwood in an investigation of the recent history of a flood plain. American Journal of Science 266 : 417-439.
- Fisher, S. G. and G. E. Likens. 1973. Energy flow in Bear Brook, New Hampshire-an integrative approach to stream ecosystem metabolism. Ecology Monograph 43 : 421-439.
- Frissell, C. A., W. J. Liss, C. E. Warren and M. D. Hurley. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification-Viewing streams in a watershed context. Envir. Management 10(2) : 199-214.

- Gilbert, G. K. 1917. Hydraulic mining debris in the Sierra Nevada. U. S. G. S. Prof. Pap., 105.
- Hey, R. D. 1979. Dynamic process-response model of river channel development. *Earth Surface Processes* 4 : 59-72.
- Jones, J. B. and R. M. Holmes. 1996. Surface-subsurface interactions in stream ecosystems. *Tree* 11(6) : 239-242.
- Jones, J. B. and L. A. Smock. 1991. Transport and retention of particulate organic matter in two low-gradient headwater streams. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 10(2) : 115-126.
- Johnson, W. C., R. L. Burgess and W. R. Keamerer. 1976. Forest overstory vegetation and environmental on the Missouri River floodplain in north Dakota. *Ecol. Monogr.* 46 : 59-84.
- Kikuzawa, K. 1983. Leaf survival of woody plants in deciduous broad-leaved forests. 1. Tall trees. *Can. J. Bot.* 61 : 2133-2139.
- Lamberti, G. A., S. V. Gregory, L. R. Ashkenas, R. C. Wildman and A. D. Steinman. 1989. Influence of channel geomorphology on retention of dissolved and particulate matter in a cascade mountain stream. *USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-110* : 33-39.
- Madej, M. A. and V. Ozaki. 1996. Channel reponse to sediment wave propagation and movement, Redwood Creek, California, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 21 : 911-927.
- Meade, R. H. 1982. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic drainage of the United States. *J. Geol.* 90 : 235-252.
- Nakamura, F. 1986. Analysis of storage and transport processes based on age distribution of sediment. *Trans. Jpn. Geomorph. Union* 7(3) : 165-184.
- Nakamura, F., H. Maita and T. Araya. 1995. Sediment routing analysis based on chronological changes in hillslope and rivered morphologies. *Earth Surface Process and Landforms* 20 : 333-346.
- Nakamura, F. and F. J. Swanson. 1994. Distribution of coarse woody debris in a mountain stream. western Cascade Range, Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 24 : 2395-2403.
- Reneau, S. L. and W. E. Dietrich. 1989. Depositional history of hollows on steep hillslopes, Coastal Oregon and Washington. *Natl. Geogr. Res.* 6(2) : 220-230.
- Roehl, J. W. 1962. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. *Inter. Assoc. Scientific Hydrology Publ.* 59 : 202-213.
- Speaker, R., Moore, K. and S. Gregory. 1984. Analysis of the process of retention of organic matter in stream ecosystems. *Verhandlungender Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie* 22 : 1835-1841.
- Takahashi, G. and S. Higashi. 1984. Effects of channel alteration on fish habitat. *Jap. J. Limnol.* 45(3) : 178-186.
- Swanson, F. J., R. J. Janda, T. Dunne and D. N. Swanston. (eds.). 1982. Sediment budgets and routing in forested drainage basins. *USDA Forest Service General Tech. Rep. PNW-141.* 15-20pp.
- Swanson, F. J., J. F. Franklin and J. R. Sedell. 1990. Landscape patterns, disturbance, and management in the Pacific Northwest, USA. *Zonneveld, I. S. and Forman, R. T. T. (eds.), Changing landscape-An Ecological Perspective,* 191-213, Springer-Verlag.
- Walling, D. E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* 65 : 209-237.

接受 2002年 9月 15日