

가속화되는 토양유실과 방지대책

손 광 익 (영남대학교 토목공학과 교수)

집중호우로 인한 토사유출에 의한 피해가 금년 7월 22일과 23일 수원 및 용인 일대 개발지역에서 발생하였다. 이와 같은 피해는 토사유출에 대한 우리의 무관심 속에 각종 개발사업으로 인하여 절토된 부분이 아무런 대책 없이 나지로 방치되어 이미 예견되었던 일인 것이다. 이와 같이 전 국토에 걸친 각종 개발사업은 주변 여건의 급격한 변화를 초래하여 과거와 동일한 강우와 같은 자연현상에도 불구하고 더욱 심화된 침식이나 퇴적을 유발하게 된다. 인위적 개발은 물론 추풍령과 같은 고령지에서의 농경지 유실 또한 일부 방송사에서 관심을 가지고 방영할 만큼 어느새 우리에게 심각한 자연자원의 보전문제로 대두되고 있으며 강원도 고성지방의 대규모 산불과 같은 재앙은 식생의 파괴는 물론 토성을 변화시켜 토양의 침식 및 퇴적을 더욱 가속화시키고 있다.

이와 같이 점차 가속화되는 양상을 보이고 있는 토사유출에 대처하기 위해서는 우선 토양침식의 가속화 현황 및 토양침식이 미치는 영향에 대한 이해를 통한 대책수립의 기본 전략이 수립되어야 한다. 우리나라의 경우 일반적으로 공학적인 토양보전 접근만이 시도되어 왔으나 성공적인 대책수립을 위해서는 경제적, 사회적, 환경적, 인구학적, 그리고 정치적 인자의 상호영향이 고려되어야 한다. 따라서 본 고에서는 최근 토사유출의 가속화 현황에 대한 검토를 통한 토양침식의 심각성과 토양침식조절을 위한 일반적인 기본 전략 및 공학적 접근 기법에 대하여 개략적으로 기술하고자 한다.

1. 토양침식의 영향 및 가속화 현황

토양침식이 미치는 영향의 범위에 따라 침식이 발생된 유역내에 영향을 미치는 경우와 토양침식이 일어나지 않은 인근 타유역에 영향을 미치는 경우가 있다. 유역내에 영향이 미치는 경우란 이러한 토양의 침식에 의한 토양의 재혼합, 유역으로의 유출, 토양구조의 파괴 등에 의해 농경지의 유기물이나 영양분의 손실과 함께 토양의 습윤도 저하로 인한 토양의 건조화에 의해 농작물의 생산성 감소는 물론 이에 따른 퇴비나 비료구매에 따른 생산단가의 증가를 들 수 있다. 경우에 따라서는 농경지의 생산력 감소로 장기적으로는 불모지대화 되는 현상도 발생하게 된다. 토양침식이 타유역에 미치는 영향으로는 하류하천이나 저수지에 토사가 퇴적되어 수로의 통수능 저하와 이로 인한 홍수범람 및 저수지의 사용연한 단축, 퇴사와 함께 인이나 질소와 같은 오염물질의 유입으로 인한 수질오염과 같은 환경문제 등 상수도 시설과 관계 시설의 운영 및 관리에도 악영향을 미치게 된다.

이와 같이 각종 농경 및 산림활동은 토사침식의 직접적인 원인이 된다. 뿐만 아니라 관개, 생활 및 공업용수 취수, 하천주변의 공업화 및 도시화 등 인류의 산업활동은 간접적으로 많은 토사침식을 초래하고 있다. 이러한 인위적 변화는 하천의 흐름특성 및 유로 변화 등을 유발하여 개울이나 습지에서의 생태학적 변화를 초래하고 바람직하지 못한 퇴적이나 침식을 가속화시킬 수 있어 인류의 각종 활동이 토양침식과 퇴적현상에 미치는 영향에 대한 깊은 이해가 요구된다. 그러나 자연적 토양침식과 인위적 활동에 의한

침식과의 관계에 대해서는 아직 명확히 밝혀진 바가 없다. 일부 과학자(UNESCO, 1982)는 지구 전체적으로 볼 때 현재의 토양침식 진행속도가 자연적 진행 속도보다 약 2.5배 정도라고 보고하였으며 이러한 수치는 비교적 설득력이 있는 것으로 현재까지 받아들여지고 있다. 미국의 Piedmont지역에서의 토양침식과 관련, 인위적 활동이 미치는 영향을 보면, 1700년대 European침강이 발생할 당시 지형학적인 토양침식은 미미하였으며, 인류의 각종 활동에 의한 영향은 거의 없었으나 산지에서의 농경활동과 개간사업으로 인하여 1800년대 후반부와 1900년대 초 구곡이 형성되기 시작하였으며 사면의 침식이 심하고 하천과 저수지에서는 많은 퇴적이 발생되었으며 평지의 비옥한 토지는 습지로 변한 예가 있다 1900년대 중반부터 토양의 보전정책에 의하여 산지의 침식은 감소되었으나 토사유출량의 감소로 인하여 상류 하천의 하상은 저하된 반면 하류에서의 퇴적은 증가되어 하구와 저수지에서는 또 다른 퇴적문제가 발생되었다 Tanzania에서 실시된 실험에 의하면 지형학적 인자가 동일한 경우에도 토양표면의 식생종류에 따라 토사유출량 및 유출손실비(강우량과 유출량의 비)가 각각 0~59.2ton/ha/yr 및 0.4~50.4%로 그 변화폭이 대단히 큰 것으로 보고되었다. 즉, 토지사용 용도 또는 재배 농작물 변경에 의한 토양침식 및 퇴적에 대한 영향도 큰 것으로 알려져 있다.

토양침식 문제는 한때 열대지방, 건조지대, 또는 반건조 지역에서만 나타나는 국부적인 현상으로만 이해되었으나 이제 이러한 현상은 한대지역 등 지구전역에 걸쳐 나타나는 것으로 알려지고 있다. 중국의 황토고원의 경우 기원전 220년부터 토양침식이 기하급수적으로 증가하고 있는 것으로 알려져 있으며, 예멘의 Haraz 계단식 산지경사 지역의 경우 계단사면에서 토양침식이 발생되면서 연 1~3cm의 토양층 감소를 초래하여 지금은 다수 지역이 불모지대화 되어 대부분의 주민들은 이주하고 말았다. 토양침식율은 일반적으로 기복이 심하지 않은 지역에서는 연 0.0045ton/ha, 기복이 심한 지역에서는 연 0.45ton/ha 정도며 농경지의 경우 연 45~450ton/ha의 침식이 발생한다고 알

려져 있다. 중국 하천의 자료를 이용한 연구 결과 지구 전체의 연간 토양침식율은 $51.2 \times 10^9 \text{ton}$ 으로 추정되었으며 타 지역에 대한 연구결과에 의하면 약 $15 \sim 20 \times 10^9 \text{ton}$ 으로 추정된다. 우리나라 대관령의 고령지 경우, 지난 수년사이 토사침식에 의해 표토층이 거의 다 유실되어 농작물 재배가 불가능한 단계에 이르고 있다는 보고도 있다.

1930년대 토양보전이란 응용과학의 출현 이후 지난 수 십년간 각 국가 단위뿐만 아니라 범 세계적으로 토양보전을 위한 정책수립은 관련기관의 중요한 관심대상이 되어왔다. 이러한 가운데서도 토양의 침식현상은 계속 진행되고 있다. 황해에 퇴적된 퇴적층 조사에서 完新世(Holocene) 초기나 중기 때 보다 더 많은 퇴사량이 강을 통해 흘러든다는 사실이 발견되었고 흑해에서도 지난 2,000 년 간의 토양침식율은 과거 20,000 년에 걸친 토양침식율에 비해 세배이상 증가하였으며 이는 삼림벌목이나 농경활동이 원인이라는 연구결과가 있다. 또한 저수지 퇴적량을 기초로 동남아시아의 토양침식이 20세기 토양의 이용용도 변화에 따라 5~10배 이상 증가했다는 사실과 토양 침식량은 인구 증가비의 1.6배의 비로 증가하고 있다는 사실도 발표된 바 있다(그림 1. 참조). 또한 영국의 Warwickshir강의 부유사를 조사한 결과 인(P)과

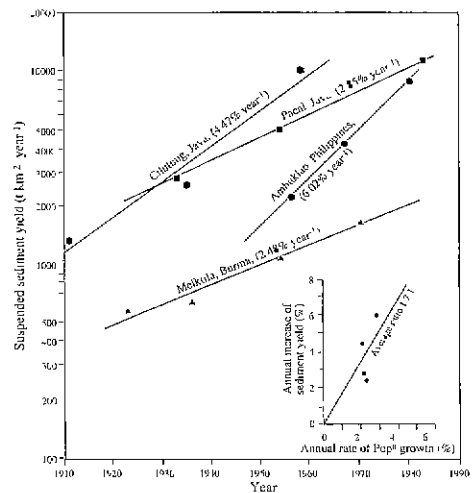


그림 1. 20세기 동남아시아의 토양침식량의 증가 추이도

비점원 오염물질의 유입은 토양침식에 의하여 2 배 이상 증가한 사실도 입증된바 있다. 이와 같이 토양침식율이 가속화되는 것은 인류의 활동에 의한 영향으로 밝혀지고 있다. 도시지역 개발후의 토사유출량이 개발이전 보다 20,000~40,000배까지 이른다고 보고된 연구결과도 있으며 Wolman(1967)은 지난 200년간 삼림, 농경, 방목 및 도시건설 등 Washington D.C. 주변의 토지이용에 따른 토사유출량의 변화를 분석하여 건설활동에 의한 토사유출량이 4~5배 이상 증가한 사실을 보고하였다.(그림 2. 참조)

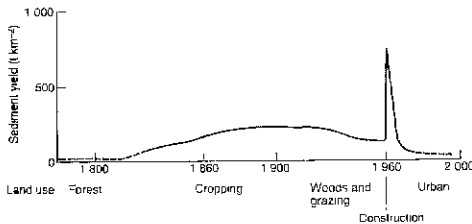


그림 2. 토양의 이용 변화에 따른 토사유출량의 변화추이(Wolman, 1967)

2. 침식조절 기법의 분류

개발사업은 지질학적, 지형학적으로 각기 다른 조건하에서 이루어지므로 최적의 토양침식조절기법이란 개발사업 개시 이전에 각종 조절대책을 수립하는 것이다. 토양침식조절 기법은 토사의 발생원인과 토사침식의 억제 및 토사의 이송 중 어떤 단계에서 침식조절을 실시하는가에 따라 다음과 같이 크게 세가지로 분류할 수 있다

- (1) 배수조절 ; 유출을 넓은 지역으로 분포시키거나 저류하는 기법
- (2) 침식조절 ; 토사침식량을 조절하는기법
- (3) 유사조절 ; 사업지구로부터의 토사유출을 억제하는 기법

또한 토양의 침식 및 퇴사를 조절하는 방법에 따라 아래와 같이 분류할 수도 있다.

- (1) 식생기법 : 식생이 토양의 침식성을 감소시키는 특성을 이용.
- (2) 토양관리기법 : 토양내 영양분 조절을 통해 식생의 성장을 촉진시키거나 물리적으로 침식을

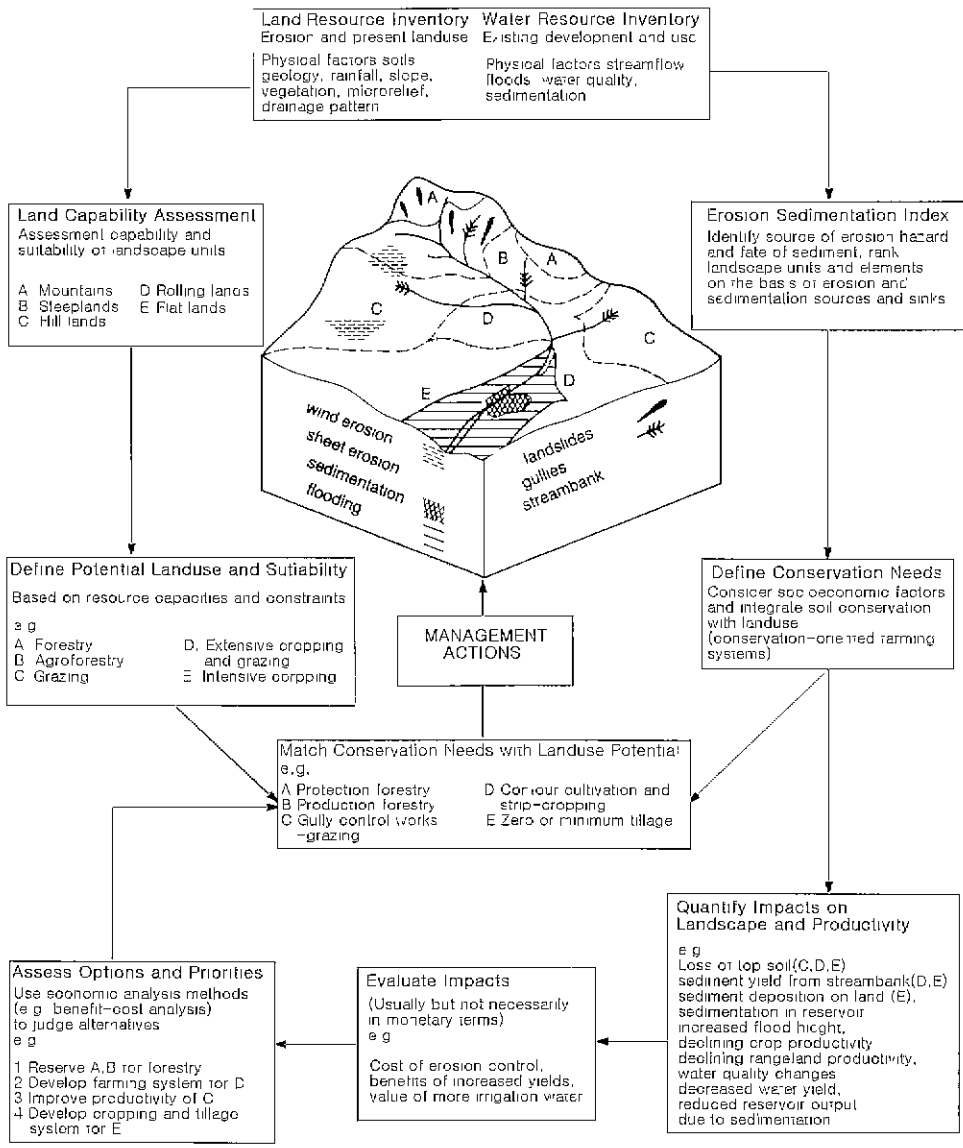
표 1. 침식조절기법의 분류

대분류	소분류
배수조절	Catch drain and perimeter bank
	Diversion channel
	Rock lined channel
	Conc lined channel
	Berm drain
	Cascading drain
	Roadside catch drain/table drain
	Temporary culvert crossing
	Check dam(Loose-rock dam)
	Gabion
	Temporary diversion dyke
	Temporary perimeter dyke
	Temporary interceptor dyke
유사조절	Sediment retention pond
	Sediment Basin
	Filter dam and sediment weir
	Sump
	Sump pit
	Vegetative buffer strip
	Shake-down area

대분류	소분류
침식조절	Mulching
	Revegetation(Turfing)
	Spot-turfing and close turfing
	Fibromatting and hydroseeding
	Terracing/Benching
	Cover crops
	Vetiver grass
	Interlocking conc. block
	Crib wall
	Reinforced conc. wall
	Reinforced earth wall
	Reinforced steel anchor wall
	Rubble wall
	Rip-rap
	Plastic sheet
	Bakau-fencing
	Soil-cement treatment
	Sand bund/bag
	Earth bund
	Geotextiles for erosion control
Road base an pavement	

강하도록 토성을 구조적으로 향상시키는 기법.
 (3) 물리적인 기법 · 계단식 지형을 만들거나 방풍막
 과 같이 바람이나 물의 흐름을 조절할 수 있는 구
 조물 설치를 통하여 침식을 조절하는 기법.
 일반적으로 식생기법과 토양관리기법의 병행은 그

효과를 배가시킬 수 있는 반면 물리적 기법은 이송현
 상을 조절할 수는 있지만 토사발생을 방지하지는 못
 한다. 본 고에서는 전자의 분류기법에 따라 각 조절
 기법에 해당하는 각종 세부적인 기법을 나열하였다.
 단, 모든 조절기법 명칭은 영어원문으로 기술하였다.



*A, B, C, D, E refer to landscape units shown in the diagram.

그림 3. 토양보전을 위한 전략수립절차(Perrens and Trustrum, 1984)

3. 침식조절 전략

토양침식 조절기법의 주 목적은 자연적 토양침식 발생율을 유지하면서 농작물의 생산량을 최대화하고 경우에 따라서는 침식량을 줄여 농경지로부터의 영양분 손실을 억제하며 하천 및 저수지는 물론 연안에서의 최적 및 오염을 최소화하는데 있다. 즉, 침식조절이란 자연현상인 토양침식을 방지하기 보다는 허용 토사유출량 미만으로 토사유출을 억제하는 것이다. 따라서 토양침식 조절을 위한 전략수립에 기초가 되는 것은 바로 허용 토사유출량의 결정이다.

3.1 허용 토사유출량

토양형성을과는 달리 토양의 손실량이 얼마일 때 토양의 평형상태가 유지될 것인가하는 연구 또한 수행되고 있는데 허용 토양손실량이란 농지의 비옥도가 20~25년 동안 유지될 수 있는 최대 허용 침식율로 정의된다. 농경지의 경우 허용 토사유출량 또는 허용 토양침식량을 산정하기 위해서는 토양형성율이 산정되어야 하나 이론적으로 토양이 매년 얼마나 형성되고 있는가 하는 이론은 현재까지 없다. 따라서 지구전역에 걸쳐 산정된 각종 연구결과를 참고로 할 수 밖에 없는 실정이다. Alexander(1988)는 그 손실량이 약 0.3~2.0ton/ha 정도이며 대부분의 토양

은 1ton/ha 이하라고 발표하였다. 이는 약 0.1mm/yr의 토양손실률에 해당한다 일반적인 허용 토양손실량은 약 11ton/ha 이나 침식에 민감한 경우의 권장치는 2ton/ha 이다. 농경지의 비옥도 기준으로써가 아닌 비점원 오염이 발생치 않을 농경지로부터의 허용 토양손실량은 1ton/ha로 알려져 있다.(Hudson, 1981) Zachar(1982)는 평균적으로는 0.1mm/yr로 그 범위는 0.01~7.7mm/yr에 달한다고 발표하였다. 미국의 북동쪽은 약 0.1mm/yr, 대평원은 0.2mm/yr, 남서쪽은 0.02mm/yr 정도로 알려져 있으며 영국의 경우 0.1mm/yr 정도인 것으로 알려져 있다.

3.2 침식조절 설계 절차

일반적으로 가장 이상적인 토양침식조절기법은 침투를 증가시켜 유출량을 감소시키고 유출수의 유속을 줄여주는 식생기법이며 가장 비효율적인 기법은 물리적인 기법으로 토양의 침식 자체를 근본적으로 방지하는 기법이 아니기 때문이다 따라서 식생기법만으로는 조절이 곤란한 유출이 과다한 지역의 경우 식생기법의 보완 수단으로 물리적인 기법을 병행하는 것이 통상적인 침식조절 방법이다 침식조절을 위한 전략 수립은 통상 그림 3.과 같은 순서에 따라 결정한다.

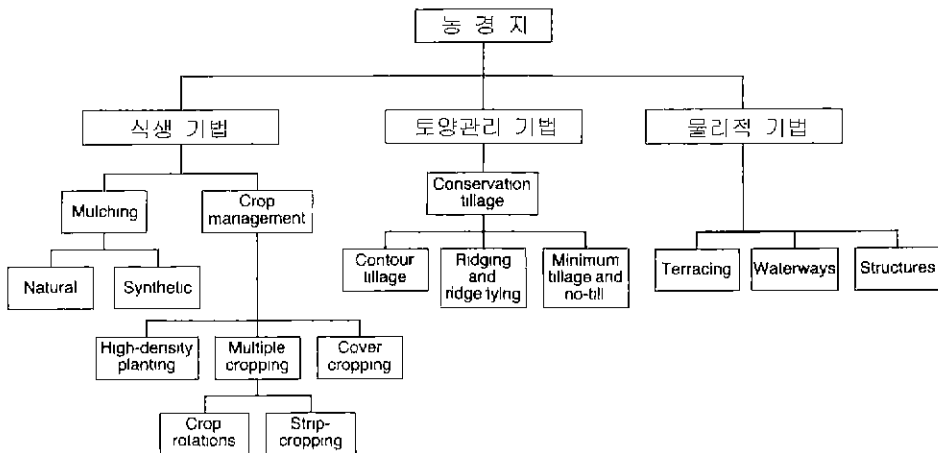


그림 4. 농경지에 대한 침식조절 기법

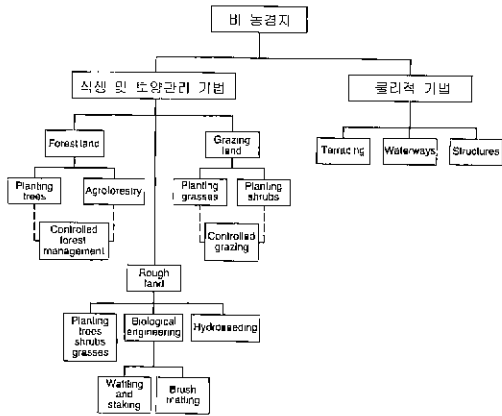


그림 5. 비 농경지에 대한 침식조절 기법

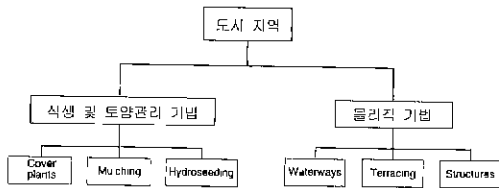


그림 6. 도시지역에 대한 침식조절 기법

(1) 토양의 잠재능 평가

토양의 침식조절 설계는 토양의 침식 위험도 분석으로부터 시작된다. 관리 잘못으로 인하여 침식이 발생한 지역과 토양의 오용으로 인하여 침식이 발생한 곳을 우선 분류하여 토양의 잠재능을 평가해야 한다. 전자의 경우 여러 기법을 이용하여 침식조절이 가능하나 후자의 경우 통상 비효율적이면서 고비용이 요구된다

(2) 토양의 보전 필요성 평가

토양의 생산성 등 경제적 가치와 사회경제적 요인을 종합하여 판단한 후 침식조절 및 토양보전이 필요한지 필요치 않는지를 판단해야 한다. 침식조절 및 토양보전의 성공여부는 침식조절이 요구되는 지역의 침식현황을 정확히 파악하여 적절한 공학적 대책을 수립하였는가와 보전을 위한 노력을 해야 할 주체의 침식에 대한 지식과 의지가 있는가에 달려있다. 예를

들어 농지의 경우 토양침식과 생산성의 상관관계에 대한 농부의 이해가 필요할 뿐만 아니라 농지의 휴식년제 도입 또는 농작물 종류의 변경 등이 필요한 경우 이를 수용할 수 있는 농부의 적극적 의지가 요구되는 것이다. 이러한 침식조절을 위한 노력과 의지만 아니라 지역의 사회경제적 여건도 동시에 만족되어야 한다. 예를 들어 침식조절을 위한 투자비용에 비해 지역의 인건비나 대체 농작물의 가격 등 경제적 여건이 향상된 소득을 보장할 수 없다면 곤란하기 때문이다.

(3) 조절기법의 환경영향 평가

이 과정은 이상의 절차에 따른 토지의 용도변환 및 토양보전기법이 미칠 환경영향을 평가하는 것으로 침식에 따른 토양의 영양분 변화는 물론 토양손실, 하천 및 저수지 퇴사, 홍수위 변화 및 수질변화 등에 미치는 영향이 주요 평가내용이다. 일반적으로 특정 지역에 대하여 침식으로 인한 토양의 영양분이나 토성의 변화 등을 분석하기 위해서는 자연상태에 대해 최소 10년 이상의 축적된 자료가 필요한 것으로 알려져 있다.

(4) 경제성 분석

이상적인 침식조절 전략수립 절차는 경제성 분석 후 환경영향평가가 수행되어야 하나 실무에 있어 이런 이상적인 절차를 거치는 경우는 농지의 경우 거의 찾아보기 힘든 것이 현실이다. 침식조절을 시행할 경우 얻어지는 생산성의 증가나 노동활동이 유발하는 경제적인 효과와 침식조절을 시행하지 않을 경우 농작물의 생산성 감소와 하천 및 저수지의 퇴사 등 하류에 미치는 여러 가지 영향을 비용으로 환산해 비교하여야 하나 간접적인 경제효과를 산정하는 방법에 따라 경제성 분석 결과는 달라질 수 있다. 케냐의 경우 (Tiffen, Mortimore and Gichuki, 1994) 농경법 개선과 계단식 농지정리 및 식생기법을 도입한 결과 토양손실은 1/3 로 줄고 생산성은 열 배 이상 증가한 사례가 있는 반면 미국의 경우(Ervin and Washburn : 1981, Muller, Klemme and Daniel , 1985)

장·단기적으로 볼 때 토양의 침식조절이 경제성이 없었다는 연구결과도 있다. 통상 침식조절에 의한 경제적 효과속에는 토양이나 수자원의 개선 등 농부들이 직접적으로 얻을 수 없는 효과가 내포되어 있어 농경지의 경우 정부로부터의 지원 또는 강제성 없이는 침식조절을 하려고 하는 농부가 줄어드는 것이 추세이다.

3.3 토지용도에 따른 침식조절 기법

토지의 이용용도에 따라 침식조절기법은 달라지며 크게 농경지, 비농경지 그리고 도시지역으로 분류하여 각 토지이용 용도에 따라 적용할 수 있는 침식조절기법은 달라진다. 그림 4.~6.은 토지이용 용도별 침식조절 기법에 대한 개략도(El-Swaify, Dangler and Armstrong, 1982)로 통상 여러 방법을 병행할 때 더 좋은 효과를 얻을 수 있다.

건설현장과 같은 비농경지의 경우 각종 개발사업의 특성(건설규모 및 토양의 교란범위 등)은 물론 개발지역의 조건(토양의 종류, 지형, 기후, 계절 등)에 따라 조절기법이 달라지나 통상 아래와 같이 크게 일곱가지 정도의 일반적인 대책으로 나눌 수 있으며 조절기법의 개념은 그림 5.와 같다.

(1) 사업구역내 식물을 가능한 한 많이 남겨놓는다.

- (2) 트양이 나지상태로 노출되는 시간을 최소화한다
- (3) 교란된 토양을 통해 유출이 발생하는 것을 방지한다.
- (4) 교란된 토양을 최대한 빨리 안정화시킨다.
- (5) 사업구역을 통과하는 유출속도를 저감시킨다.
- (6) 사업에 의한 증가 유출량을 배수시킬 수 있도록 배수로를 확보한다.
- (7) 유출수에 섞여 사업지역 외로 방류되는 유사를 제거시킨다

4. 결론

전 국토에 걸친 자연적 토양침식은 물론 각종 개발사업 및 최근 발생한 대규모 산불과 같은 갑작스런 재앙으로 토양침식이 가속화 추세를 보이는 이 때 토사유출에 따른 피해의 최소화 및 자연자원인 토양을 보전하기 위한 공학적인 토양침식조절기법과 함께 경제적, 사회적, 환경적인 접근을 통한 기본전략 수립에 대하여 검토하였다. 또한 토양침식현상을 경제성 논리로만 해석할 것이 아니라 우리의 자연자원 보호차원에서 다시 한번 토양침식 현상을 되돌아보고 장기적인 대책을 수립할 수 있는 계기가 되기를 바란다. ●

〈참 고 문 헌〉

- Alexander M. J. (1990) Reclamation after tin mining on the Jos Plateau, Nigeria *Geographical Journal* 156: PP.44-50.
- Ervin D. E., R. Washburn (1981), Profitability of soil conservation practices in Missouri. *Journal of Soil and Water Conservation* 36: PP.107-11
- Hudson N. W (1981), *Soil conservation*. London, Batsford.
- Mueller D H., R. M. Klemme, T. C Daniel (1985), Short- and long-term cost comparisons of conventional and conservation tillage systems in corn production. *Journal of Soil and Water Conservation* 40: PP.466-70.
- Perrens S J., N A. Trustrum(1984), Assessment and evaluation for soil conservation policy East-West Environment and Policy Institute, Workshop Report, Honolulu, HI.
- Tiffen M , M. Mortimore, F. Gichuki (1994), More people, less erosion *Environmental recovery in Kenya*. Chichester, Wiley.
- UNESCO (1982). "Sedimentation problems in river basins." *Studies and reports in hydrology* #35.
- Wolman M. G. (1967). "A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels." *Geografiska Annaler* 49-A: PP 385-95.
- Zachar D. (1982), *Soil erosion*. Amsterdam, Elsevier.