강원 농업생명환경연구 24(2) : 30-39
Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences Vol.24 No.2 June, 2012

고랭지 밭의 토양유실 특성 및 토양유실 방지를 위한 최적영농관리방안 : PAM 및 Biopolymer의 적용가능성 평가

최용범[1,2], 임정은[2], 정영상[2], 이상수[2], 옥용식[2*]
[1]강원도농업기술원, [2]강원대학교 바이오자원환경학과
(2012년 04월 23일 접수, 2012년 06월 15일 수리)

Best Management Practices for Sloping Upland Erosion Control : Feasibility of PAM and Biopolymer Application

Choi, Y. B.[1,2], J. E. Lim[2], Y. S. Jung[2], S. S. Lee[2] and Y. S. Ok[2*]
[1]Gangwondo Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 200-150, Korea
[2]Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Abstract

In Korea, many upland agricultural fields are located in Gangwon province. These fields consists of weathered soils with high sand content. With this reason, soil erosion is very severe during rainfall events resulting in the decreases of plant nutrients, soil organic matter and crop productivity. To prevent soil erosion, many agricultural practices, such as contour plowing, film mulching, plant residue cover, perennial plants covering, vegetation cover and etc., have been applied to upland agricultural fields but these practices have limitation of economic or practical aspect in Gangwon province. This review paper introduced Polyacrylamide (PAM) and biopolymer to reduce the soil erosion at upland agricultural field as the best management practices (BMPs).

Key words: Biopolymer, BMPs, PAM, Sloping upland, Soil erosion.

서 론

토양유실(soil erosion)이란 물이나 바람에 의해 토양 표층의 일부분이 원래의 위치에서 탈리되어 이동되는 현상으로 원인에 따라 수식(water erosion)과 풍식(wind erosion)으로 구분할 수 있다(구 등, 2007). 토양유실은 토양 표면에서 일어나는데 농경지의 경우 침식이 심하면 비옥한 표토가 대량으로 손실되고 이와 함께 토양 내 비료 성분의 손실까지 동반되기 때문에 이는 고랭지 농경지 지력 보전과 직결된다(김 등, 2006; 황 등, 1993).

국내의 경우 대부분의 토양유실은 수식에 의해 발생하는 것으로 알려져 있는데 이는 빗방울이 낙하하여 지면을 타격할 때 토양입단이 파괴되어 비산되므로 이를 비산침식(splash erosion)이라고 정의한다(정 등, 2005). 빗방울에 의한 타격의 강도는 강우가 지니는 에너지(kinetic energy)의 크기에 비례하며 이에 대한 토양의 침식 저항성(erodible resistance)은 토양이 지니고 있는 내수성 입단(water-stable aggregates)의 안정성에 따라 크게 좌우된다. 이외에도 토양이 작물 등에 의해 피복되어 빗방울의 낙하 에너지가 감소한다면 비산 침식은 현저히 감소하는 것으로 알려져 있다. 강우 시 지면에 도달한 빗방울은 일정 부분이 토양 속으로 침투하고 남은 물은 표면을 따라 흐르게 되는데 이를 유거수(surface water runoff)라 정의한다. 유거수는 흐르면서 토양표면을 깎아 내리므로 이는 토양의 비옥도와 생산성을 저하시킬 뿐만 아니라 생태계를 파괴하는 요인이 되므로 농업환경의 보전측면에서 중요하게 다루어지고 있다(양과 옥, 2005).

토양유실에 직접적인 영향을 미치는 요인으로는 지형, 기상조건, 토양의 성질, 작물의 생육 등이 있으며 이는 경사지에 위치한 토양, 특히 고랭지 밭에서 더욱 중요하다

*Corresponding Author: Ok, Y. S. (E-mail: soilok@kangwon.ac.kr)

(우, 1976). 우리나라의 고랭지 논과 밭의 경지면적은 73,971 ha이며 강원도는 36,941 ha로 전국 고랭지 면적의 약 50%를 차지하고 있다. 이 중 강원도의 고랭지 밭은 전국 고랭지 밭 면적의 63%에 해당하는 32,317 ha이며 수계별 분포에서는 한강수계 94.3%, 동해안 수계 4.4% 그리고 낙동강수계 1.2%의 순으로 한강수계가 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다(신 등, 2005).

우리나라 고랭지 밭은 점착력이 약한 화강암 풍화토가 많고 사질 계열의 토양이며 이로 인해 영농활동 시 강우에 의한 토양유실 및 비점오염물질의 유출이 심각하다(이와 양, 2001; 심 등, 2005). 또한 여름철 집중강우 시 상류에서 발생한 다량의 탁수가 저수지로 유입되어 심각한 수준의 환경적, 생물학적 문제를 초래하게 된다. 특히, 다양한 오염원을 함유한 탁수가 단시간에 과량 유입됨으로써 부영양화(eutrophication)의 원인을 제공한다(최, 1997).

현재까지 토양유실을 경감하기 위한 방법으로는 완충식생대, 등고선 경작, 식생배수로, 작물 잔류물에 의한 피복, 피복작물의 재배, 식생사면 조성, 다년생 작물재배 등이 제안되어 왔으며(정 등, 2005), 최근에는 미국과 서구 선진국을 중심으로 폴리머 소재에 관한 연구가 진행되고 있는데 토양유실 저감 및 제어에 효과가 탁월한 것으로 알려져 있어 국내적용에 대한 검토가 요구된다. 이에 본 보문은 고랭지 밭에서의 토양유실 특성과 토양유실 저감을 위한 기존의 최적영농관리방안(Best Management Practices; BMPs)을 살펴보고 새롭게 연구 중인 polyacrylamide (PAM)와 biopolymer의 국내 적용가능성을 제안하고자 한다.

토양유실의 과정

비산침식(splash erosion)

비산침식(splash erosion)은 빗방울의 타격에 의한 토양침식으로 빗방울이 지면을 타격하면서 토양 입자가 튀어오르는 현상에 의해 일어난다(Fig. 1). 이 때 입단이 약한 경우 빗방울의 타격에 의해 토양 입단이 파괴되기 쉽다(심 등, 2005; 정 등, 2005). 더욱이 빗물은 비산된 토사뿐만 아니라 지표면의 공극을 막아 침투성을 감소시켜 유거수에 의한 침식을 증가시킨다.

면상침식(sheet erosion)

유거수는 지면에 도달한 빗방울이 토양에 침투된 후 남은 물이 지표면을 따라 흐르는 것을 말한다. 토양 입자가 유거수와 함께 흐를 때에 지면이 고른 곳에서는 지표면 전체에 얇은 표면류(surface flow)를 형성하여 균일한 두께로 흘러내리면서 토양을 점차 깎아내리게 되는데 이를 면상침식(sheet erosion)이라 한다(Fig. 2)(정 등, 2005; Hillel, 1998). 면상침식은 새롭게 형성된 사면의 초기 단계에서 발생하며 이 후 흐름이 집중되어 세류침식으로 발달한다.

Fig. 1. Soil erosion by water begins when a raindrop splash dislodges soil particles(NRCS: http://photogallery.nrcs.usda.gov/Index.asp).

Fig. 2. Severe sheet and rill erosion on highly erodible soils in Cass County, Iowa after heavy rains(NRCS: http://photogallery.nrcs.usda.gov/Index.asp).

세류침식(rill erosion)

물이 지표면을 흐르면서 작은 골이 형성되어 일어나는 침식과정을 세류침식(rill erosion)이라 한다(Fig. 2). 이는 면상침식에서 발생하는 작은 물줄기가 많아지면 여러 개의 물줄기가 형성되어 발생한다(정 등, 2005; Hillel, 1998). 세류침식은 토양유실의 피해를 입지만 간단한 농기계 및 작업으로 농경지를 복구할 수 있는 정도의 피해이다. 이 외에 불규칙적으로 형성된 세류간침식(inter-rill erosion)도 존재한다.

협곡침식(gully erosion)

강우강도 및 강우량의 증가로 골이 더 깊어지고 넓은 도

랑(furrow)이 형성되어 사람과 장비의 접근이 어려워진 침식을 협곡침식(gully erosion)이라 한다(Fig. 3). 협곡침식으로 발전된 골은 토지의 관리가 매우 어려우며 인위적인 관리를 필요로 한다(정 등, 2005; Hillel, 1998). 협곡침식으로 파괴된 농경지의 경우에는 농기계가 들어갈 수 없어 경작지 개간에 어려움을 겪는다.

Fig. 3. Severe gully erosion on loess soils in western Iowa (NRCS: http://photogallery.nrcs.usda.gov/Index.asp).

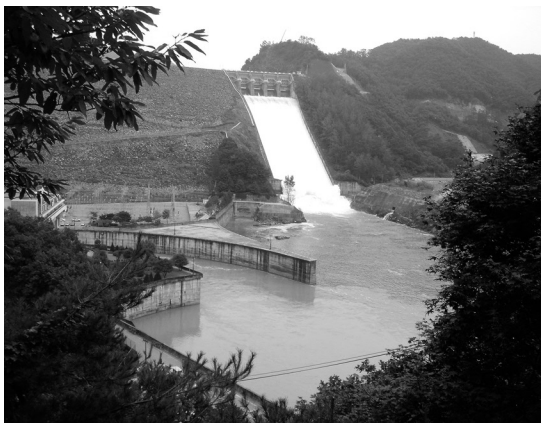

Fig. 4. The inflow of turbid water into Soyang river (전, 2007).

토양유실의 주요 영향

사회경제적인 영향

1990년대 후반부터 대두된 소양강댐 흙탕물 문제는 사회경제적 측면에서 부정적인 영향을 미치고 있다. 특히 수상레저스포츠와 같은 관광산업에 미치는 영향, 환경·미관적 측면, 내수면 어업 종사 어민 피해 등 그 피해규모는 상당할 것으로 추산된다(Fig. 4)(전 등, 2004; 전, 2007). 또한 토양유실로 인한 경작지 감소와 토양 비옥도의 저하 등은 작물생산을 위한 초기 투자비용을 증가시키고 작물 생산량 감소를 초래하여 농산물 가격 상승 요인이 되기도 한다.

상수원에 미치는 영향

토양유실로 인한 탁수의 수계 유입은 이를 상수원으로 이용하는 지역에 심각한 악영향을 초래한다. 탁수를 상수원으로 이용할 경우 정수를 위해 약품의 사용량을 늘려야 하는데 춘천시의 경우 정수처리 비용 증가로 매년 약 0.5~2억원의 추가비용을 지출하고 있으며, 고농도 탁수 유입으로 인한 정수처리 시스템의 과부하 문제, 다량의 정수용 약품 사용으로 인한 시민의 건강상 불안감 증가 문제 등이 발생하고 있는 실정이다(윤 등, 2003; 전 등, 2004; 전, 2007). 한편, 탁수는 유역 내 운영특성에 따라 수개월씩 저수지 내에 체류하면서 댐을 수원으로 하는 하류 정수처리 시스템의 장애를 초래하기도 한다.

Fig. 5. Eroded soil from upland agricultural field on river (전, 2007).

하천환경에 미치는 영향

탁수를 통해 유출된 입자가 큰 모래의 경우 유속이 빠를 때에 하천 바닥을 따라 흐르다가 유속이 느려지는 경우 하상에 쌓이게 된다(Fig. 5). 이 경우 하상 내 토사 퇴적에 의하여 수생생물의 서식공간이 파괴되며(권 등, 2000; 전, 2007), 이로 인해 저서생물의 개체수가 감소하여 이를 먹이로 이용하는 어류의 개체수도 감소하게 된다. 따라서 토사의 하천유입은 생물상의 파괴를 야기하여 생태학적으로 매우 심각한 요소로 작용하게 된다.

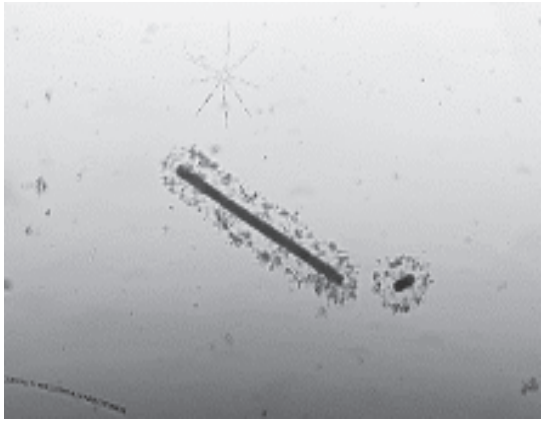

Fig. 6. Clay particles attached on phytoplankton (전, 2007).

호수환경의 피해

호수로 유입된 탁수는 점토입자와 유기물 및 양분을 다량 함유하고 있어 수계를 오염시키는 대표적인 비점오염물질로 작용하게 된다. 이는 인의 함량이 높아 호수에서 제한 영양소로 작용하며 식물플랑크톤의 개체수를 증가시켜 부영향화의 요인이 된다. 또한 토양유실로 인해 유입된 탁수는 오염원일 뿐만 아니라 호수를 파괴하는 요인으로 어류 및 저서생물에 큰 영향을 미치고 있다(김 등, 2006). 호수 내에서 탁수로 인한 탁도의 증가는 식물플랑크톤의 증식에 악영향을 끼치는데, 탁도 증가는 수중의 빛 투과도 감소의 주원인으로 작용하여 광합성 속도를 저하시키며, 탁수 내의 점토(clay) 입자는 조류세포 표면에 흡착하여 침강속도를 증가시켜 사멸속도를 증가시킨다(Fig. 6)(전, 2007).

기존의 토양유실 관리방안

등고선 경작 및 피복 재배

등고선 경작은 경사지 밭에서 경운, 파종 및 재배가 수평면에 따라 나란히 이루어지는 농법으로 경사도가 7% 미만인 경우에 등고선 경작만으로도 토양유실이 억제되며, 또한 경사와 수직방향 이랑 사이의 빗물 체류 및 강우 유출수 침수를 통해 토양유실을 억제한다. 피복재배는 작물의 수확 후 지면노출을 방지하기 위해 짚, 풀, 비닐 등을 덮는 것을 말한다. 피복재배의 경우는 고랭지 농경지에서 많이 시행하는 방법으로 토양유실 방지뿐만 아니라 양분 및 수분 손실 억제 등 작물생육 조건의 만족도가 높은 방법이다. 언급한 두 방법을 병행하여 등고선 방향으로 이랑을 조성하고 피복을 하여 우격침식을 효율적으로 방지할 수 있다(정 등, 2005).

작물잔류에 의한 피복

작물잔류에 의한 토양 피복 효과는 수확 후 뿌리 등을 경작지에 남겨둠으로써 토양유실 및 양분의 손실을 저감하는 효과를 가져온다(정 등, 2005). 작물잔류 피복은 경작을 하고 남은 잔류물을 사용하므로 자원의 재활용 및 비용절감효과를 기대할 수 있으며 소규모 경작지 농가에서 간편하게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 잔류물 위에 다른 작물을 재배할 경우 존치물(crop residue)을 제거해야 하는 번거로움이 있다.

다년생 작물재배

일년생 작물의 경우 재배 후에 작물이 없는 상태에서는 약한 비와 바람에 의해서도 토양의 유실이 쉽게 일어나지만 다년생인 과수작물을 재배할 경우 재배의 면적이 넓고 연중 토양 피복 상태를 유지하므로 토양유실을 방지할 수 있다. 이와 같은 다년생 작물재배 방법은 장기적인 계획으로 가능하므로 단기간에 효과를 기대하기 어려운 단점을 가지고 있다.

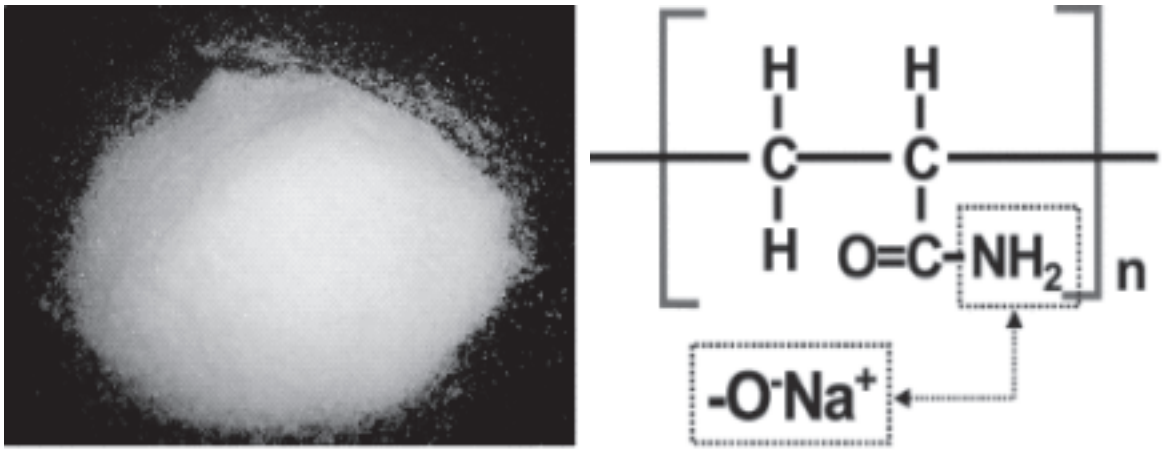

Fig. 7. Commercial PAM (left) and its structural formula (right) (Entry et al., 2002).

녹비작물 재배

주 작물의 수확 후 호밀, 헤어리베치 등의 녹비작물을 재배하면 피복에 의하여 토양유실을 억제할 수 있는데(농촌진흥청, 2002; 정 등, 2005), 일반적으로 가을철에 주 작물 수확 후 재배하므로 여름철보다는 겨울철이나 봄철의 토양유실 저감에 효과가 있다. 녹비 작물은 토양유실의 저감뿐만 아니라 경작 전 경운에 의한 후작물의 양분 공급원으로서의 역할을 하는 것으로도 알려져 있다(Choi, 2008). 녹비작물 재배의 경우는 주로 겨울철 및 봄철에 토양유실을 방지한다는 관점에서 볼 때 주로 여름철 몬순기후의 영향을 받는 우리나라의 기후 조건을 고려한다면 추가적인 연구가 필요하다.

식생 사면정비

경사지에 식생 사면을 조성하여 산사태 및 토양유실 방지의 목적을 위해 사용되는 방법이며 밭 가장자리 사면정비, 사태방지, 하천 유실방지, 가장자리 유실방지 등 토양유실을 방지하는 효과가 있으며 시각적인 정비효과도 큰 것으로 알려져 있다(전, 2007).

식생우회수로 설치

식생에 의한 토양유실 저감방법으로 주로 임야와 접한 경작지의 상단에 위치하는 수로로써 경작지 외부의 우수가 경작지로 유입되는 것을 방지하며 우수를 우회 유출시킨다(정 등, 2005). 수로의 설치는 식생이 불량하고 유출수에 의해 유실이 쉽게 발생할 수 있는 곳에 설치해야 한다. 이 방법은 배출 수로에 식생을 조성함으로써 유속감소, 토사유출 방지, 유거량 감소 및 침식감소의 효과를 얻을 수 있다(농촌진흥청, 2002).

계단식 경작지

경사도를 완화시켜 유속증가와 같은 토사유출을 증가시키는 원인을 제어함으로써 토양유실을 저감하는 방법이다(정 등, 2005). 주로 경사가 급한 지역에서 농경지 조성방법으로 사용되었으며 경사지 토양유실 방지효과도 탁월한 것으로 알려져 있다. 국내에서는 계단식 경사지보다는 등고선 경작이 주로 행해지고 있으며, 태국 등 동남아 국가에서 활발히 이용되고 있는 농업방법의 하나이다.

고분자 응집제

국내 고랭지 경작지는 그 동안 효율성 증대를 위해 농경지 면적을 대형화해 왔다. 이로 인해 발생하는 대량의 토양유실을 저감시키기 위한 방안으로써 기존에 사용된 무경운 재배나 피복 같은 기법들은 많은 효과를 거두었으나 피복작물이나 등고선 경작과 같은 방법의 경우 방대한 면적에는 적용이 쉽지 않아 여전히 보완할 문제점이 많은 실정이다. 따라서 기존의 방법 외에 토양유실을 원천적으로 차단할 수 있는 새로운 방안에 대한 모색이 필요하다.

최근 토양유실을 줄이고 표면의 토양 조직을 안정화시키는 방법으로 고분자 응집제인 PAM과 biopolymer에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 효과들이 입증되고 있다. 국내에서도 이와 같은 PAM과 biopolymer에 대한 토양유실 효과 연구가 활발히 이루어져 기존의 방법과 유기적으로 조합하여 토양유실 저감방안을 마련할 필요성이 있다.

고분자 응집제의 변천 및 형태

전분이나 아교와 같은 천연수용성 고분자가 응집효과를 나타낸다는 것은 오래 전부터 알려져 왔다. 합성고분자 응집제의 역사는 1951년 미국에서 토양단립제로서 발표된 것이 처음이며 이 후 아크릴(acrylic)계의 수용성 고분자가 광물질 미세입자의 응집에 탁월한 효과가 있다는 것을 보고된 바 있으며 같은 해에 폴리아크릴산소다의 응집제가 특허로 출원되었다. 고분자 응집제는 형태별로 분말, 용액, 에멀젼(emulsion) 상태로 분류할 수 있는데 개발 초기에는 분말형태가 주로 사용되었으며 최근에는 사용의 편리성과 성능이 우수한 에멀젼 상태의 고분자 응집제도 많이 사용되고 있다.

고분자 응집제의 종류

고분자 응집제는 제조공정에 따라 천연고분자 및 합성고분자로 분류 할 수 있으며, 응집 작용기에 따라서 음이온성, 양이온성, 중성 응집제로 나눌 수 있다. 또한 고분자 응집제는 형태별로 분말, 용액, 에멀젼 상태로 분류할 수 있으며 결합한 이온의 전하 종류에 따라서 각기 다른 3가지 구조로 구분되고 각각 토양을 응집시키는 특성도 상이하다.

Polyacrylamide(PAM)의 이론적 고찰

PAM의 기본특성

PAM은 폭넓은 종류의 고분자 혼합물을 지칭하는데 관능기(functional group)의 종류, 갯수, 길이에 따라 수 백 종류의 PAM을 합성할 수 있다. 일반적으로는 최소한 분자량이 1,000 이상인 고분자로서 강력한 흡착 관능기를 가지는 화합물을 유기 고분자 응집제인 PAM이라 지칭한다. PAM의 amide기는 나트륨 이온 또는 양성자를 포함하

는 관능기와 치환되며 물에 쉽게 용해되어 음전하를 띄게 된다(Entry et al., 2002).

PAM은 Fig. 7에서 제시된 형태의 구조를 단위체로 하는 수용성 고분자 물질로 토양의 결합력을 증가시켜 토양유실을 억제하는 것으로 알려져 있다(권 등, 2000). 이를 통해 음이온의 PAM이 수처리용으로 사용될 때 수중에 현탁 분산되어 있는 미세입자를 결합시키게 된다.

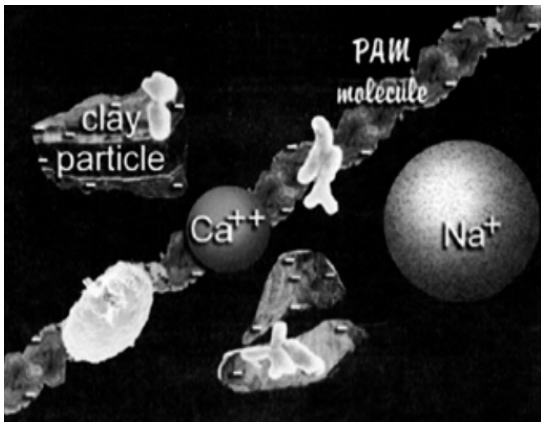

Fig. 8. Conceptual diagram of PAM molecule adhering to soil particles (Entry et al., 2002).

토양유실 방지를 위한 PAM의 사용

토양유실 방지용 폴리머(polymer)는 제2차 세계대전에서 도로나 활주로 건설에 도움을 주기 위해 처음으로 사용되었으며(Wilson and Crisp, 1975), 실제로 농업분야에서 PAM이 사용된 것은 1950년대 초반이다(Weeks and Colter, 1952). 최근에는 PAM을 포함한 토양 개량제가 토양의 물리적 특성을 개선하여 토양을 안정화시키는 혼합제로 사용되고 있다. 실제 연구에서 토양을 안정화시키기 위해 토양개량제인 PAM을 ha당 수 백 킬로그램씩 경작지에 투입한 결과 경작지에서 유출되는 침전물의 감소가 확인된 바 있다(Mitchell, 1986; Paganyas, 1975). 이 후 1990년대에는 용해성 음이온 형태의 PAM이 관개수 내에 1～10 g/m^3 비율로 적용되어 토양유실 방지 및 수분침투능력 강화에 높은 효과가 있음이 확인된 바 있다(Lentz and Sojka, 1994; Lentz et al., 1992; McCutchan et al., 1994). 미국에서는 1995년부터 토양침식 방지를 위해 널리 판매되고 있으며, 1999년에는 약 400,000 ha의 농경지에 PAM이 적용되었다. 또한 미국에서는 1995년 미국천연자원보전국(Natural Resources Conservation Service; NRCS)에서 토양유실 방지를 위한 PAM의 사용 지침서가 발간된 바 있다(Anonymous, 1995). 즉 토양유실 방지를 위한 PAM은 가장 효과적인 방법 중 하나로 인정되어 적용되었으며 경제성 면에서도 효과적이라는 것이 검증되었다. PAM은 입자의 결합력을 강화시켜 토양구조를 안정화시킴으로써 토양유실을 예방하고 저감시킨다. 따라서 토양입단파괴에 대한 저항력을 증가시키고 유출수 내에서 토양입자가 빠르게 이동하는 것을 막을 수 있다(Orts et al, 2001). 이외에도 물속에 포함된 칼슘 이온은 토양입자를 둘러싸고 있는 전기적 이중층을 감소시키고, 토양입자들과 PAM 분자(음이온) 표면을 연결하여 응집을 가능하게 한다(Orts et al, 2001; Wallace et al., 1996).

특히 칼슘 이온은 침투와 침식제어를 위한 PAM을 사용할 때 관개수 내에서 중요 요소로 작용한다(Fig. 8). 또한 수화 반경이 상대적으로 적어 응집을 보조하는 역할을 한다. 이와 반대로 나트륨 이온은 큰 수화 반경을 지니고 있어 이온 결합이 어렵고, 입자를 응집시키기 보다는 분산을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Entry et al, 2002).

PAM의 지속적인 연구는 건설현장의 유실방지에도 효과적이라는 것이 밝혀졌으며, 미국 Idaho에서의 연구에서는 3년 동안 94%의 관개유출수 침전물(sediment)을 감소시키는 것으로 보고되었다(Lentz and Sojka, 1994). 또한 1～2%의 경사도에 지속적으로 투입되었던 PAM의 효과는 PAM의 농도, 노출시간, 유입량비, PAM의 총량 등에 따라 변하는 것이 보고되었다(Entry et al, 2002). Fig. 9는 PAM 처리 전과 후의 토양표면 사진으로 처리 전에는 불규칙한 배열상태가 관찰되나 처리 후에는 PAM으로 인해 토양입자가 서로 엉겨 붙는 것을 확인할 수 있다. 이는 PAM이 토양에 투입될 때 입자들과 결합하여 토양입자간 결합력을 증진시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 한편, PAM을 이용한 토양유실 효과가 보고된 주요 선행연구들을 Table 1에 정리하였다.

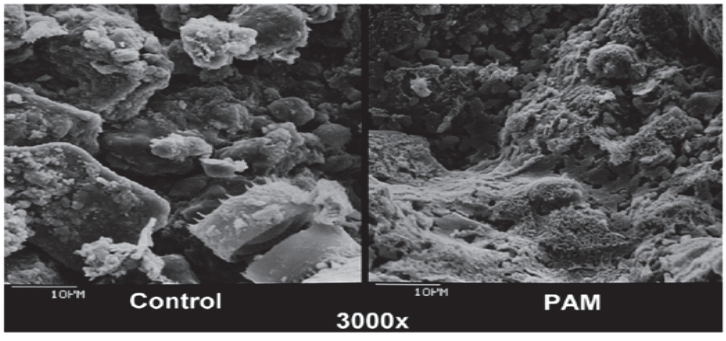

Fig. 9. SEM images of soil surface treated with PAM (Entry et al., 2002).

Table 1. Application case of PAM

Applications	References
토양 표면의 구조개선으로 침투성 증대효과	Shainberg et al., 1990
경사도 13도 지역에 PAM 40 kg/ha 처리 후 토양 유실량 67% 감소	윤 등, 2003
PAM 처리 후 인공강우 살포 시 토양 유사량 및 유출량 최대 97% 감소	권 등, 2000
PAM 처리가 토양의 결합능 증대를 도와 토양유출억제	Barvenik, 1994
PAM 의 처리가 겨울철에도 가능함, 잔유물이 없어 작업에 미치는 영향 없음	Seybold, 1994
Polymer가 토양 입자사이를 연결 및 응집시켜 토양유실을 억제	Theng, 1982
양이온, 중성, 음이온으로 존재하는 Polymer 중 음이온 polymer가 가장 효과적이고 적용성도 가장 뛰어남	Shainerg and Levy, 1994
경사도 4도 지역에 PAM 20 kg/ha 처리 후 토양유실량 50～70% 감소	Levy et al., 1991
석고(Phosphogypsum)와 PAM 혼합처리 시 토사 유출량이 15～82% 감소	Stern et al, 1992
경사도 11～20도 지역에 PAM 15 kg/ha, 30 kg/ha 처리 후 토양유실량 감소	Zang and Miller, 1996
PAM 20 kg/ha 처리 후 토양 침투능 증가, 유출량 감소 효과	Kiran, 1999

PAM의 환경적 안전성

현재까지 PAM의 사용으로 인한 수중의 동물이나 토양의 미생물, 농작물에 대한 부작용은 보고된 바 없으며(Kay-Shoemake et al, 1998), PAM에 대한 환경적 독성 평가에 대한 내용도 보고된 바 없다.

토양에서 PAM은 화학적, 물리적, 생물학적, 광화학적 반응에 의해 1년에 10%가 분해되는데 주로 자외선이나 생물학적으로 분해가 이루어지고(Tolstikh et al, 1992), 분해 후 원상태로 변환되지 않는다(Macwilliams, 1978). 음이온의 PAM을 정해진 규정을 준수하며 사용하면 환경적으로 안전하지만 양이온이나 중성 PAM의 경우에는 독성을 가지고 있어 사용 시 주의를 요한다(Entry et al, 2002).

바이오폴리머(Biopolymer)의 이론적 고찰

바이오폴리머의 기본특성

폴리머는 고분자 유기물질의 기본 단위인 단량체(monomer)가 둘 이상 중합되어 형성되는 다량체(polymer)이다. 전통적으로 폴리머에는 천연고분자 물질인 바이오폴리머가 있고, 석유화학계통의 합성 고분자 폴리머가 있다. 이 중 바이오폴리머는 PAM과 달리 자연계에 존재하는 생물이 가진 유기물질(biomass)로부터 만들어진 것으로 그 유래를 불문하고 생물학적으로 분해 가능한 폴리머를 일컫는다. 이는 곡물이나 미생물로부터 만들어지기 때문에 자연계에서 쉽게 분해되어 퇴비와 같이 생물체가 흡수 이용할 수 있는 형태로 바뀔 수 있다. 즉 자연계의 바이오매스를 원료로 사용하여 제조되고 사용 후에는 자연계 내에서 미생물에 의해 완전 분해되는 환경 친화적인 소재이다.

바이오폴리머로 이용되는 물질은 주로 다당류이며 이러한 다당류는 겔(gel) 생산을 위해 일반적으로 이용되고 있으며 식품, 약품 및 산업 생산품에까지 널리 이용되고 있다. 이상의 다당류는 크게 식물유래 다당류와 미생물유래 다당류로 구분할 수 있다(Momeni, 2001).

식물유래 다당류는 최근 수년 동안 이용된 바이오폴리머로 그 이용범위가 점점 확대되고 있으며, 감자, 밀, 옥수수 등으로부터 얻어지는 전분(starch), 당(sugar), 셀룰로오스(cellulose)등이 대표적이다. 이 중 전분은 고등식물의 주 양분저장원으로서 다당류 상태로 이루어져 있다. 이러한 다당류는 아밀로스(amylose)와 아밀로펙틴(amylopectin)으로 구성되어 있으며(Parker and Ring, 2005) 자연 상태에 존재하는 바이오폴리머로써 구입비용이 저렴하다(Fig. 10, 11).

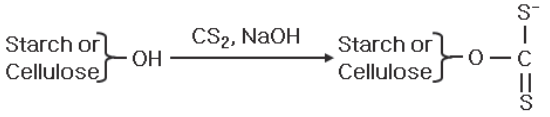

Fig. 10. The formation of xanthate by starch and cellulose (Orts et al., 2001).

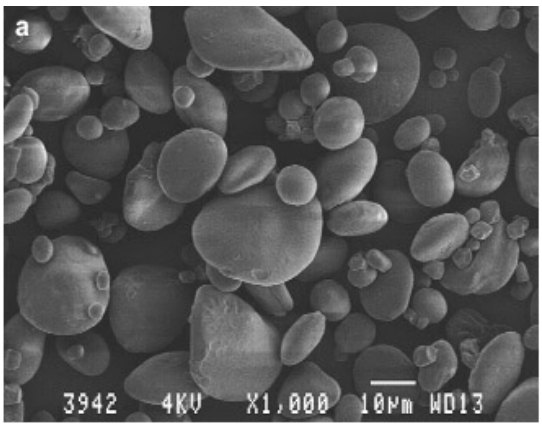

Fig. 11. SEM image of wheat starch (Sarazin et al., 2008).

Table 2. Application case of Biopolymer

Applications	References
식물잔유물로 옥수수 줄기를 처리한 결과 88.3%의 침출량 감소(유속 7.6 Lpm)	Evans et al., 1982
식물잔유물 처리로 토양 침출량 52%~71% 감소	Brown, 1985
식물잔유물 처리로 토양 내 양분 유실 85% 감소	Evans et al., 1995
점토가 많은 토양에서 칼슘이 토양유실을 감소시키며 전기전도율을 개선	Shainberg et al.,1990; Wallace and Wallace, 1996
밀, 옥수수, 감자의 전분 xanthate를 80 ppm 처리 후 토양 유실을 75%~87% 감소, 셀룰로오스 xanthate 80 ppm 처리 후 토양 유실을 80% 이상 감소	Orts et al., 2001

한편 미생물 유래 다당류는 식물유래 다당류와 달리 1960년대부터 이용되었다. 오래전부터 알려진 주요 Exopolysaccharide는 다음과 같다. *Xanthomonas campestris*에 의해 생성되는 Xanthan gum, *Pseudomonas aeruginosa* 및 *Azotobactor vinelandii*에 의해 생성되는 Alginate, *Alcaligenes*균에 의해 생성되는 Curdian 및 Scleroglucan, Pullulan, Dextran 등이 있다(Momeni, 2001).

토양유실 방지를 위한 바이오폴리머의 사용

현재까지 토양유실을 방지하기 위한 바이오폴리머의 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 토양유실방지를 위한 기능성 바이오 폴리머 소재의 개발에 관한 연구가 절실히 요구되는 상황이다. 특히 기존에 개발된 고착제에 비해 환경 중에서 독성발현을 최소화할 수 있는 바이오폴리머의 개발은 기존의 토양유실저감방법이 지니고 있는 환경적, 경제적 문제점 등을 해결할 수 있으며, 생분해 가능한 물질을 이용하는 친환경적 처리기술로서 다양한 유형의 경사지에 적용이 가능할 것이다.

셀룰로오스나 전분은 응집력으로 인해 토양 안정제로서 이용되고 있다(Coltrinari, 1994; Maher, 1981; Menefee and Hautala, 1978; Swanson et al., 1975). 식물잔유물 및 바이오폴리머가 적용된 토양유실 방지에 관한 주요 선행연구를 Table 2에 요약하였다. 셀룰로오스나 전분은 그 효과가 PAM에 미치지는 못하나 토양침식으로부터 유발되는 침출물을 상당량 줄일 수 있으므로(Orts et al., 2001), 향후 바이오폴리머의 토양투입방법을 연구함으로써 유실방지 효과를 최대화할 수 있을 것으로 기대된다.

바이오폴리머의 환경적 안전성

PAM은 정유과정에서 발생하는 단량체 형태로 재활용이 불가능한 폴리머이다. 이에 반해 바이오매스(자연계에 존재하는 생물이 가진 유기 물질을 총칭)는 재생 가능하며 환경 친화적이라는 두 가지 측면에서 중요한 의미를 갖고 있어 바이오폴리머 연구를 가능하게 한다.

한편 바이오캡슐화(bio-encapsulation)는 미생물 바이오폴리머가 막의 생성하여 토양 내의 유해물질을 안정화하는 과정으로 미생물 사슬이 유해물질을 분해하고 토양에서 공극을 채우고 토양의 표면강도를 강화시켜 시멘트벽과 같은 형태의 집단을 형성한다(Momeni, 2001). 이처럼 바이오폴리머 사용의 다른 이점은 환경적으로 유해한 토양을 큰 덩어리로 고정화할 수 있다는 것이다.

결론

토양유실은 환경적 측면 외에 사회적으로도 많은 문제를 야기하고 있다. 게다가 대규모 경작지의 증가로 토양유실문제의 심각성이 높아지고 있으며 이에 대한 방지대책의 필요성이 강조되고 있다. 현재 국내에서의 토양유실 저감에 관한 방법은 여러 가지가 있으나 적용되는 기술은 주로 식생대 조성이나 경작방법의 개선 등이 있으며 현장조건 및 토양상태에 따라 적용방법이 모두 달라지는 등 그 한계점을 지니고 있다. 이에 본 보문에서는 토양유실 방지를 위한 고분자 폴리머 물질에 대한 국내 적용가능성을 살펴보고자 하였다. 미국을 포함한 일부 국가에서는 고분자 폴리머에 대한 연구가 상당히 진행된 상태이며 폴리머가 토양유실 저감 뿐 아니라 영양물질 제어에도 상당한 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다. 이는 폴리머의 연구 가치와 현장적용 가능성이 높다는 것을 뒷받침하고 있으며 향후 폴리머의 제조와 효율성 평가 등에 대해 충분히 연구하고 그 활용방안을 모색하는 것은 토양유실 저감방안의 중요 분야로 판단되며 국내 고랭지 농경지 및 기타 비점오염원의 방지를 위한 효과적인 방안이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경기술개발사업 Eco-Star Project “효율적 비점오염원 관리기술” 및 농촌진흥청 공동연구사업 “옥수수 녹비 무경운 재배시 토양환경 변동 및 환경보존기능 평가”의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 토양 분석은 강원대학교 농업생명과학연구원의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문의 작성에 근간이 된 보고서를 제공해주시고 많은 도움을 주신 강원발전연구원 전만식

연구위원, 강원대학교 최중대 교수님, 강원대학교 김범철 교수님 그리고 환경부 김동진 사무관님께 감사드립니다.

참고문헌

Anonymous (1995) Natural Resources Conservation Service West National Technical Center Interim Conservation Practice Standard-Irrigation Erosion Control 1212(Polyacrylamide)-WNTC 201. NRCS. USA.

Barvenik. F. W. (1994) Polyacrylamide characteristics related to soil application. Soil Sci. 58:235-243.

Brown, M. J. (1985) Effect of grain straw and furrow irrigation stream size on soil erosion and infiltration. J. Soil Water Conserv. 40(4):389-391.

Choi, B. (2008) Fate of root-deposited nitrogen of several green manure legume in low input crop production. Ph.D. Thesis. Osaka Prefecture University, JAPAN.

Coltrinari, E. (1994) Selective recovery of heavy metals using xanthates. US Patent 5,320,759.

Entry, J. A., Sojka, R. E., Watwood, M., Ross, C. (2002) Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants. Environ. Pollut. 120(2):191-200.

Evans, R. G., Aarstad, J. A., Miller, D. E. (1982) Integrating furrow irrigation with trash tillage techniques. ASAE Paper 82-2578, ASAE, St. Joseph, MI, p.12.

Evans, R. G., Girgin, B. N., Chenoweth, J. F., Kroeger, M. W. (1995) Surge irrigation with residues to reduce soil erosion. Agr. Water Manage. 27(3-4):283-297.

Hillel, D. (1998) Environmental soil physics. University of Massachusetts, Academic press. San Diego, USA.

Kay-Shoemake, J. L., Watwood,. M. E., Lentz, R. D., Sojka, R. E. (1998) Polyacrylamide as an organic nitrogen source for soil microorganisms with potential impact on inorganic soil nitrogen in agricultural soil. Soil Biol. Biochem. 30(8-9):1045-1052.

Kiran, C. (1999) Polyacrylamide soil amedment effects on soil erosion from steep slopes. MS Thesis. Purdue University, USA.

Lentz, R. D., Shainberg, I., Sojka, R. E., Carter, D. L. (1992) Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1926-1932.

Lentz, R. D., Sojka, R. E. (1994) Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. Soil Sci. 158(4):274-282.

Levy, G. J., Ben-Hur, M., Agassi, M. (1991) The effect of polyacrylamide on runoff erosion and cotton yield from fields irrigated with moving sprinkler systems. Irrigation Sci. 12(2):55-60.

MacWilliams, D. C. (1978) Acrylamides. In Encyclopedia of Chemical Technology. 3rd. Ed., Vol. 1. I. Kirk and D. F. Othmer (eds.). Wiley, New York, pp.298-311.

Maher, G. G. (1981) Flocculation of coals with water-soluble starch xanthates. US Patent 4,253,970.

McCutchan, H., Osterli, P., Letey, J. (1994) Polymers check furrow erosion help river life. Calif. Agric. 47:10-11.

Menefee, E., Hautala, E. (1978) Soil stabilisation by cellulose xanthate. Nature, 275:530-532.

Mitchell, A. R. (1986) Polyacrylamide application in irrigation water toincrease infiltration. Soil Sci. 141: 353-358.

Momeni, D. (2001) Experimental studies of biopolymers behavior in subsurface porous strata. Ph.D. Thesis. University of Southern California, USA.

Orts, W. J., Sojka, R. E., Glenn, G. M., Gross, R. A. (2001) Biopolymer additives for the reduction of soil erosion losses during irrigation. Ind. crop. prod. 11(1):19-29.

Paganyas, K. P. (1975) Results of the use of "K" compounds for the control of irrigation soil erosion. Soil Sci. 5: 591-598.

Parker, R., Ring, S. G. (2005) The physical chemistry of starch [chapter 24] pp.591-604, In: Dumitriu Severian, Editor. Polysaccharides, structural diversity and functional versatility(2nd ed.). Marcel Dekker Inc., New York, pp. 1204.

Sarazin, P., Li, G., Orts, W. J., Favis, B. D. (2008) Binary and ternary blends of polylactide, polycaprolactone and thermoplastic starch. Polymer 49:599-609.

Seybold, C. A. (1994) Polyacrylamide review: Soil conditioning and environmental fate. Soil Sci. 45: 2171-2185.

Shainberg, I., Warrington, D. N., Rengasamy, P. (1990) Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing. Soil Sci. 40:301-307.

Shainerg, I., Levy, G. J. (1994) Organic polymer s and soil sealing in cultivated soils. Soil Sci. 15:267-272.

Stern, R., Laker, M. C., Van Der Merwe, A. J., Shainberg, I. (1992) Effect of soil surface treatments on runoff and wheat yield under irrigation. Agron. J. 84:114-119.

Swanson, C. L., Wing, R. E., Doane, W. M. (1975) Removal of heavy metal ions from wastewater, US Patent

3,947,354.

Theng, B. K. G. (1982) Clay-polymer interactions: summary and perspectives. Clay. Clay. Miner. 30:1-10.

Tolstikh, L. I., Akimov, N. I., Golubeva, I. A., Shvetsov, I. A. (1992) Degradation and stabilization of polyacrylamide in polymer flooding conditions. Int. J. Polym Mater. 17: 177-193.

Wallace, A., Wallace, G. A. (1996) Need for solution or exchangeable calcium and/or critical EC level for flocculation of clay by polyacrylamides. In: Sojka, R. E., Lentz, R. D. (Eds.). Managing Irrigation-induced Erosion and Infiltration with Polyacrylamide. Proc. College of Southern Idaho. Twin Falls. ID 6-8 May (University of Idaho Misc. Publ. No. 101-96), pp.59-63.

Weeks, L. E., Colter, W. G. (1952) Effect of synthetic soil conditioners on erosion control. Soil Sci. 73:473-484.

Wilson, A. D., Crisp, S. (1975) Rigid highly carboxylated ionic polymers.In: Holiday. L. (Ed.), Ionic Polymers. Chapman and Hall. New York, pp.208-257.

Zang, X. C., Miller, W. P. (1996) Polyacrylamide effect on infiltration and erosion in furrows. Soil Sci. Soc. Am. J. 5:866-872.

구자공, 김경숙, 동종인, 박용하, 배우근, 양지원, 염익태, 윤석표, 이재영, 이주삼, 장윤영, 정재춘, 최상일, 황경엽, 황종식 (2007) 토양환경공학. 한국지하수토양환경학회편. 향문사.

권기수, 이기중, 구본준, 최중대 (2000) PAM을 이용한 고랭지 경사 농경지의 토양 유실방지 효과. 농업과학연구, 강원대학교 농업과학연구소, 11:91-99.

김범철, 강신규, 노진환, 최재석 (2006) 탁수로 인한 수중생태계 영향조사 및 저감대책 제시. 제3차 수질오염총량관리 워크샵. 환경부.

농촌진흥청 (2002) 경사지 토양보전 및 관리대책. 2002학술심포지엄, pp.55-112.

신용광, 김창길, 김태영, 주진호 (2005) 고랭지농업의 환경친화적 재편을 위한 기초연구. 한국농촌경제연구원.

심혁호, 최중대, 임경재, 신용철, 류창원, 신경식 (2005) 경사지 농경지에서의 토사유출 저감방안 연구. 한국물환경학회·대한상하수도학회 2005공동 춘계학술발표회 논문집, pp.583-586.

양재의, 옥용식 (2005) 농업환경. 강원대학교 농업전문경영인 트랙사업단.

우보명 (1976) 토양침식에 작용하는 몇가지 요인의 영향에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.

윤재홍, 강동균, 조성신, 김한섭 (2003) 경작지 토양유실 특성 및 탁수저감 방안. 한국물환경학회·대한상하수도학회 2003공동추계학술발표회 논문집, pp.55-58.

이규승, 양재의 (2001) 농업환경. 한국환경농학회.

전만식, 김범철, 김윤희 (2004) 소양호 유역 농경지 탁수 발생 현황. 제12회 세계물의 날 기념 심포지엄 논문집, pp.137-151.

전만식 (2007) 소양강 흙탕물 저감대책. 강원발전연구원 연구보고 07-18, pp.39-49.

정영상, 곽한강, 노희명, 박문희, 손보균, 윤세영, 정연태, 주진호, 황선웅, 홍순달, 하상건 (2005) 토양학. 강원대학교 농업전문경영인 트랙사업단.

최중대 (1997) 비점원오염 연구에 관한 고찰. 한국농공학회지, 39(2):6-11.

황은, 조병진, 서승덕, 박승우, 정덕현, 이기춘, 엄병현, 김철기 (1993) 농지공학. 향문사.