

Implementation of Polyacrylamide in the Agricultural Environment and its Recent Review

Yonghun Choi, Minyoung Kim*, Youngjin Kim, Jonggil Jeon, and Myungchul Seo¹

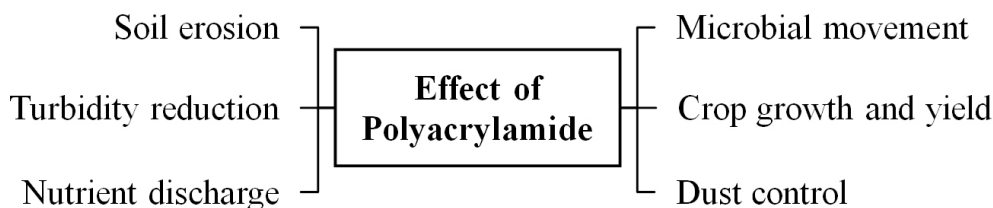
Disaster Prevention Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju 55365, Korea

¹*Crop Production and Physiology Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Jeonju 55365, Korea*

(Received: August 26 2016, Revised: September 22 2016, Accepted: September 28 2016)

Nonpoint sources of pollution (NPS) is defined as diffuse discharges of pollutants (e.g., nutrient, pesticide, sediment, and enteric microorganism) throughout the natural environment and they are associated with a variety of farming practices. Previous studies found that water soluble anionic polyacrylamide (PAM) is one of the highly effective measures for enhancing infiltration, reducing runoff, preventing erosion, controlling nonpoint source of pollutants, and eventually protecting soil and water environment. Potential benefits of PAM treatment in agricultural soil and water environments have been revealed by many research and they include low cost, easy and quick application, and suitability for use with other Best Management Practices (BMPs) for NPS control. This study reviews the various applications of PAM and discusses its further potentials in agricultural environment.

Key words: Polyacrylamide, Runoff, Soil erosion, Infiltration, Non-point source pollution, Turbidity control, Crop growth, Nutrient, Dust control



Application of anionic Polyacrylamide (PAM) in agricultural environment.

*Corresponding author: Phone: +82632384156, Fax: +82632384145, E-mail: mykim75@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ0100832016)", National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

우리나라는 기후변화에 따른 강우특성의 변화와 복잡한 토지이용형태 등으로 인해 자연적, 인위적 토양유실에 매우 취약하다. 환경부가 실시한 ‘전국 표토 침식 예비조사 (2012)’에 의하면, 전 국토의 30% 정도에서 연간 1 m²당 3.3 kg 이상의 표토가 유실되는 것으로 이는 경제협력개발기구 (OECD)의 토양 침식등급 중 최고 등급인 ‘매우 심함’에 해당하는 것으로 나타났다. 이에 환경부는 표토자원의 유실을 방지하고, 토양생태계의 환경적 기능을 유지하기 위한 ‘표토보전 5개년 종합계획’을 수립하였다 (Ministry of Environment, 2013).

토양유실은 작물이 생육하는 기반인 토양의 물리성을 악화시켜 농업과 임업 등의 생산 및 경제적 활동을 저해할 뿐만 아니라, 수생태계를 포함한 전반적인 환경 분야에도 미치는 영향이 매우 크다 (Ministry of Environment, 2012). 특히 농지에 살포된 농약, 비료, 토사 및 퇴비 (액비) 등은 농업지역의 주요 비점오염원으로, 농경지의 비점오염 유출과 토양유실은 표토자원 감소와 토양비옥도 저하의 요인으로 작용하게 된다. 이로 인하여 농경지에서는 작물생산량 감소 및 품질 저하 문제가 발생할 뿐만 아니라, 하류 하천 및 호수에서의 부영양화 문제, 수생생물의 서식 공간 파괴 등 많은 문제들이 발생하게 된다 (Choi et al., 2012).

우리나라는 2004년에 4대강 비점오염 종합관리대책을 시작으로 관련 정부기관들이 합동으로 비점오염원 관리대책을 수립하고, 수질오염 총량제를 도입하는 등 관련 법규를 정비하고, 비점오염을 저감하기 위한 노력을 지속적으로 하고 있다 (Choi, 2006). 토양유실 및 농업비점오염원 저감을 위해 다양한 물리학적, 영농학적 기법 개발 및 모델링을 통한 최적 영농관리방안 모색 등이 이루어져왔다. 몇 가지 사례를 들면, 논 담수위 조절용 물꼬장치를 이용하여 비점오염원 배출을 저감하는 연구 (Lee et al., 2010), 관개용수 사용량 저감에 따라 오염원 유출을 최소화하는 SRI (System of Rice Intensification) 연구 (Park et al., 2011), 고랭지 밭 토양유실 저감을 위한 지표피복 연구 (Choi et al., 2011), 농경지의 최적관리기법 적용에 따른 삭감효과 산정을 위한 모델 개발 연구 (National Institute of Environmental Research, 2011), SWAT 모형을 이용하여 최적관리기법 (수변완충지대, 식생여과대)에 따른 비점오염 제거효율을 비교·분석한 연구 (Park et al., 2010), 그리고 WEPP 모형을 이용하여 우회수로 및 식생수로의 유출 및 토양유실 저감효과를 분석한 연구 (Choi et al., 2011) 등이 있다.

Rural Research Institute (2011)에 따르면 인공습지, 초생대 등 식생형 관리기법, 등고선 경작, 발두렁 재배 등 영농 관리기법, 우회수로, 터널형 배수로 등 시설형 관리기법, 영양물질, 휴양지 지면 정리 등 현장 관리기법 등 지금까지 개발된 최적 영농관리방안은 약 160여개에 이른다고 한다. 하지

만 이들 대부분의 저감방안들은 사후대책 및 관리에 초점을 맞춘 것들로 값비싼 설치 및 유지관리비용, 미흡한 사후관리 등으로 인해 많은 문제를 초래하기도 했다. 이에 Shin et al. (2013)은 발생 후 관리가 아닌 보전경운, 농지보호, 피복작물 재배, 석고비료 사용 등 친환경 관리를 통한 발생원 관리가 더 중요하다고 강조하였다. 뿐만 아니라, 환경부의 “제2차 비점오염원관리 종합대책 (‘12~’20)”에서도 사전 예방적 관리 등 발생원 단계에서 비점오염원을 관리해야 한다고 보고하는 등 사전 예방차원에서의 대책 마련에 초점이 맞추어지고 있다 (Ministry of Environment, 2012).

미국, 유럽 등과 같은 선진국에서는 토양유실 방지 및 수생태계 환경개선을 목적으로 친환경 고분자응집제 (Polyacrylamide, PAM)를 이용한 연구들을 많이 해오고 있다 (Lentz et al., 1992; Sojka et al., 2007; NRCS, 2011). PAM은 설치 및 처리 비용이 저렴하며, 적용가능지역의 제한이 없으며, 기존의 최적 관리방안과 적절한 연계가 가능할 뿐만 아니라 토양 물리성 개량에도 매우 효과적인 것으로 알려져 있다 (Wallace et al., 1986; Ministry of Environment, 2014). 좁은 면적에 다양한 영농형태가 존재하는 우리나라의 경우 이러한 PAM의 경제적, 사회적 부가가치는 더욱 클 것이라 사료된다. 이에 본 연구에서는 PAM에 대한 기본적인 정보를 제공하고, 국내·외 연구사례들을 소개함으로써 보다 다양하고 폭넓은 PAM의 적용가능성을 살펴보고자 한다.

고분자응집제 (Polyacrylamide, PAM) 천연가스로부터 합성되는 PAM은 폴리에틸렌 ((CH₂-CH₂)_n)과 비슷한 화학구조를 가지고 있으나, 폴리에틸렌과 다르게 2개의 탄소 분자에 결합된 1개의 수소분자가 아미드 그룹인 -CONH₂로 치환되어 있다 (Ross et al., 2003). PAM의 단일 폴리머는 C₃H₅NO 구조 (분자량 71.08)를 가지는 Acrylamide이며, PAM의 처리유무에 따른 토양입자의 미세구조 변화는 Fig. 1에 잘 나타나 있다.

양이온, 비이온 그리고 음이온성을 가지는 PAM은 강력한 흡착 관능기를 가지며, 토양 내 양이온과 치환된다 (Green et al., 2000). 다시 말해, 물속에 포함된 칼슘이온이 토양입자를 둘러싸고 있는 확산이중층을 감소시켜 토양입자와 PAM 분자간의 응집을 원활하게 한다. 이로 인해 토양입자 간 결합력이 증대되고 그 결과 토양구조가 안정화되며 토양유실 또한 억제되게 된다 (Sojka et al., 2007).

PAM의 효과는 토양입자 표면에 얼마나 잘 흡착하느냐에 따라 달라지는데, PAM의 분자량 (molecular weight), 전하 (charge), 전하밀도 (charge density) 등과 토성, 점토형태, 유기물 함량, 토양수의 이온형태 등의 영향을 받는다. PAM의 분자량은 일반적으로 1몰 (mole)당 수천 그램 (g)에서 20 Mg까지 다양하며, 분자량이 증가할수록 폴리머 사슬 (polymer chain) 길이와 PAM 용액의 점성 또한 증가한다 (Barvenik,

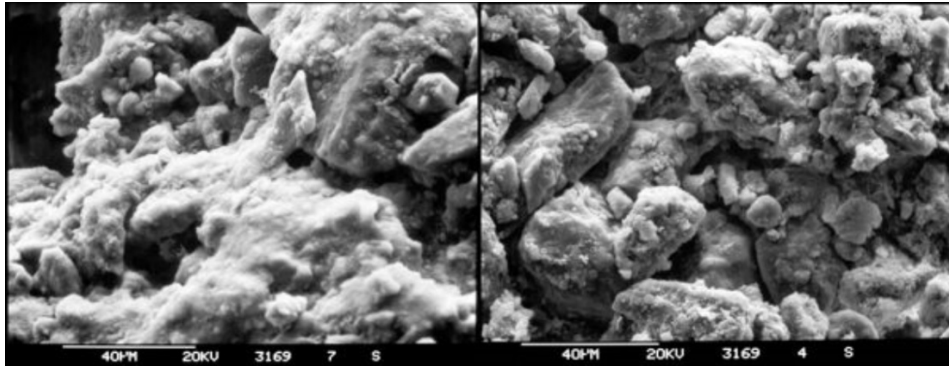


Fig. 1. Comparative scanning electron microscope (SEM) images of PAM-treated (left) and untreated (right) soil surface (Ross et al., 2002).

1994).

Levy and Agassi (1995)는 두 개의 서로 다른 분자량 (0.2 vs. $20 \text{ Mg}\cdot\text{mol}^{-1}$)을 가지는 PAM의 성능을 비교한 결과, 보다 높은 분자량을 가지는 PAM의 경우 표토손실 저감 및 침투율 증가에 더 효과적이라는 연구결과를 보고하였다. 뿐만 아니라 Green et al. (2000)은 토성에 따른 PAM의 성능은 각기 다르지만, 사질토의 경우 $12 \text{ Mg}\cdot\text{mol}^{-1}$ 분자량을 가지는 PAM이 침투율 증가에 탁월하다는 연구결과를 발표한 바 있다. 이와 같이 PAM의 분자량이 높을수록 더 효과적이라는 연이은 연구결과들로 인해 이후 관련 제조회사들은 높은 분자량 ($10\sim 20 \text{ Mg}\cdot\text{mol}^{-1}$)의 PAM을 생산하는데 초점을 맞추었다. 기후 및 영농형태에 따라 사용하는 PAM의 적정 분자량은 각기 다른데, 건조 혹은 반 건조지역의 경우 $12\sim 15 \text{ Mg}\cdot\text{mol}^{-1}$, 천수답 및 스프링클러 관개지역의 경우 $10\sim 15 \text{ Mg}\cdot\text{mol}^{-1}$ 정도가 효과가 있는 것으로 연구결과 밝혀졌다 (Lentz and Sojka, 1994; Lentz and Sojka, 1996).

PAM의 전하밀도 (charge density)는 일반적으로 $20\sim 40\%$ 사이이며, 토양 내 물이 침투하는데 영향을 미친다 (Michaels, 1954). Green et al. (2000)은 사질토의 경우 30% 의 전하밀도를 가지는 PAM의 효과가 가장 뛰어나다는 연구결과를 발표하였다. 이온전하는 PAM과 토양입자간의 흡착작용에 중요한 역할을 하는데, 다시 말해, 음전하를 띠어 서로 밀어내는 토양입자와 PAM 사이에 이가 양이온 (divalent cations)이 가교역할 (bridging)을 하게 된다 (Shainberg et al., 1990; Laird, 1997). Laird (1997)는 이온을 제거한 PAM 용액 ($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)과 CaCl_2 (0.005 M)를 20 g 의 점토, 미사질 양토를 섞어 만든 현탁액을 가지고 침강실험을 한 결과, 이가 양이온을 포함한 PAM 용액의 침강효과가 더 뛰어나다는 연구결과를 밝힌 바 있다.

PAM의 효과는 토양의 건조·습윤 과정과도 연관이 있다. Nadler (1992)은 건조과정을 한번 거친 토양의 경우 극소량의 폴리머만이 토양표면으로부터 분리되는 현상을 발견하였다. 뿐만 아니라 Shainberg et al. (1990)은 건조과정과 비건조과정을 거친 토양을 PAM과 인산석고를 이용하여 처리한

후 토양 내 물의 침투현상을 측정하였는데, 그 결과 건조과정을 거친 토양의 경우 약 2배 정도 침투율이 높음을 발견하였다. 이는 토양의 건조과정을 거치면서 PAM이 토양입자 표면에 수화반응 없이 직접적으로 결합하기 때문으로, 다시 말해 이온교환반응보다 더 큰 결합에너지가 발생하여 토양입자간 흡착을 더 강화되기 때문으로 사료된다.

고분자응집제 (PAM)의 농업·환경분야 적용 사례

PAM은 토양물리성 개량, 작물생육 향상, 토양유실 저감, 그리고 농업비점오염원 저감 등 농업 및 환경분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 미국에서는 약 $400,000 \text{ ha}$ 에 달하는 넓은 토지에 PAM이 사용되고 있다 (Sojka et al., 2007). PAM은 가장 효과적이고 경제적인 수질개선방안으로 미 연방법안 및 각 주의 법원법에 의해 권장되었고, 미국 자연자원보전국 (NRCS)은 PAM 사용시 고려사항과 사용기준 등을 마련하기도 했다 (NRCS, 2011). 미국뿐만 아니라 호주, 캐나다, 중앙아메리카, 아프리카, 스페인, 포르투갈, 프랑스 및 이스라엘에 이르기까지 여러 국가에서 PAM에 대해 관심을 가지기 시작했다. 본 장에서는 PAM이 가지는 효과에 대해서 좀 더 자세하게 알아보려고 한다.

토양물리성 개량 토양의 물리적 특성 중에서 침투율과 토양입단의 안정성은 중요한 토질지표로 알려져 있다 (Doran and Parkin, 1996). 토양의 침투율이 감소하게 되면 강우시 지표유출이 증가하게 된다. 그에 따라 토양 유실량은 증가하며, 토양의 질 또한 떨어지게 된다. 따라서 좋은 토양입단구조는 침투를 위해 적당한 공극을 유지하는데 도움을 준다 (National Institute of Forest Science, 2010). 빗방울이 떨어질 때 토양과 충돌하는 힘에 토양입자는 분산되거나 딱딱하게 굳게 되는데, 이로 인해 토양표면에 수막현상과 다짐 (압밀)이 발생하게 되면서 씨앗의 발아와 식물의 성장을 방해하게 된다 (McIntyre, 1958; Shainberg and Singer, 1985; LeBissonnais, 1996).

이에 과거 연구들은 천수답이나 관개전에서 PAM을 사용

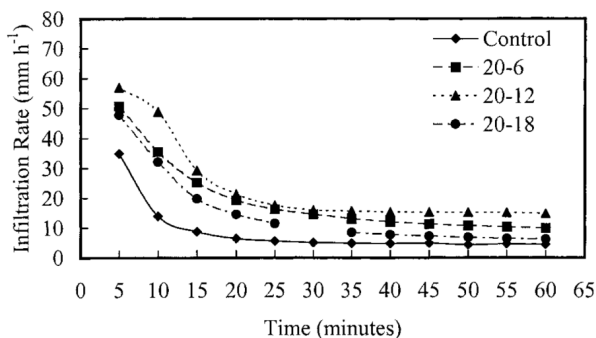


Fig. 2. The effect of PAM application on infiltration rate over time (Green et al., 2000).

Note) 20 kg·ha⁻¹ of PAM application, 6, 12, and 18 Mg·mol⁻¹ of molecular weights.

할 경우 토양 물리성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행한 바 있다 (Levy et al., 1992; Stern et al., 1992; Norton and Dontsova, 1998; Green et al., 2000). Shainberg and Levy (2004)는 PAM과 석고를 함께 사용할 경우 토양 내 침투량은 약 10배 정도 증가하는 것을 확인하였다. Green et al. (2000) 또한 PAM 처리량과 침투계수간의 양의 상관관계가 있음을 확인하였으며, 각각 다른 분자량을 가지는 PAM에 대해서도 동일한 연구결과를 발견하였다 (Fig. 2).

작물 생육 및 생산 PAM이 일반적으로 토양의 수리전도도, 침투계수, 통기성, 토양의 입단화 등 물리적 특성을 개량시키며, 이로 인해 작물 활착 및 성장률이 촉진된다는 여러 연구결과들이 발표된 바 있다 (Rubio et al., 1992; Flanagan et al., 2003). 뿐만 아니라 PAM을 사용할 경우 토양 내 작물 유효수분량을 충분히 유지할 수 있으며, 이로 인해 용수 사용 효율성이 증진되고, 작물 수분스트레스 또한 감소된다는 연구결과 또한 많이 보고된 바 있다 (Bjorneberg et al., 2003;

Abu-Zreig et al., 2007; Lentz and Sojka, 2009).

반건조 기후지역의 경우, 수박, 감자, 옥수수, 수수를 대상으로 한 PAM의 효과를 분석결과, 수확량이 각각 36.76%, 24.83%, 20.20%, 30.78% 증가한 것으로 나타났다. 농업용수 이용효율 또한 30.15%, 18.83%, 13.42%, 6.24% 가량 높아진 것으로 나타났다 (Bai et al., 2015). Xingdong et al. (2011)은 단위면적당 (m²) 약 0.5~2.5 g 정도 PAM을 처리한 결과 옥수수 생산량이 약 5.54~14.13% 증가하였으며 파종을 또한 1.2~3.0% 향상되었다고 발표하였다. 이와 비슷한 연구결과는 Wu et al. (2012)의 연구에서도 찾아볼 수 있는데, 옥수수의 지상 및 뿌리부 바이오매스량의 변화를 살펴 본 결과 PAM을 사용한 경우 아래 Fig. 3에 나타난 바와 같이 긍정적인 효과가 있음을 알 수 있다.

농경지 발생 토사유실 저감 고랑관개시 표토에 처리된 PAM은 지표유출수 흐름에 의한 토양입자 분리를 막고, 강우시 빗방울 타격에 의한 토양입자의 확산을 억제하여 토양 표면의 막힘 현상 및 토사유실을 줄인다 (Sojka and Lentz, 1997). 뿐만 아니라 PAM은 토양의 침투능을 보전하여, 수질을 개선할 뿐만 아니라 관개용수 사용량을 절감하는 효과도 가진다 (Lentz and Sojaka, 1994).

PAM의 초기 연구들은 대부분 경운층을 대상으로 이루어졌으며 이후 천수답 농업과 스프링클러 관개를 하는 지역으로 확대 적용되었다 (McIntyre, 1958). 연구 초기에는 경운층 (Plow layer) 전체에 응집제를 처리하는 방법이 사용되었는데 (Sojka and Lentz, 1994a), 이는 소요 노동력과 비용이 많이 든다는 문제를 야기하여 이후 토양층 전체가 아닌 표토에만 처리하여 효과를 분석하는 연구들이 진행되었다 (Norton et al., 1993; Shainberg et al., 1994). 결과 토양층 전면이 아닌 표토처리만으로도 충분한 효과가 있으며, 이를 통해 PAM

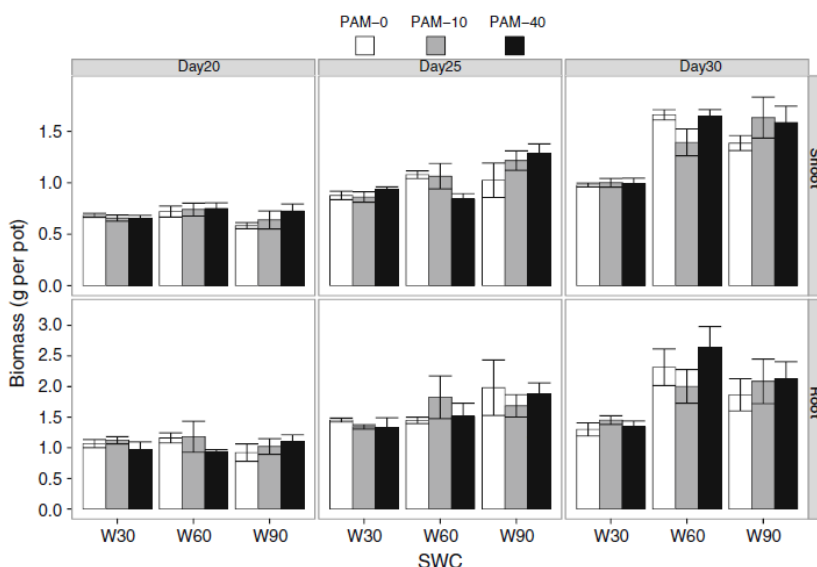


Fig. 3. The effect of PAM application on the distribution of maize's shoots and roots biomass (Wu et al., 2011).

처리면적, 비용 및 소요 노동력을 줄일 수 있었다. 이후 관개용수, 액비에 PAM을 녹여 표토에 살포하는 등 다양한 사용 방법들이 개발되었다 (Shainberg et al., 1994).

McElhiney and Osterli (1996)는 세립질 토양에서 PAM을 처리한 결과 토양입단이 안정화 되고, 토양침투율이 10~40% 정도 증가되어 이로 인해 토양유실이 감소하였다는 연구결과를 발표하였다. 국내에서는 Yoon et al. (2003)이 고분자응집제 처리를 통해 토양유실을 67%까지 감소할 수 있음을 보고한 바 있으며, Kwon et al. (2000)은 인공강우실험을 통해 PAM 처리시 유사량이 38~97%까지 감소한다고 보고하였다. Kim et al. (2015)은 각기 다른 경사의 시험포 (10, 20, 30%)를 대상으로 두 종류의 토양개량제 (PAM, PAM+gypsum)을 사용해 토양유실 저감효과를 구명하였다. 무처리 시험포에 비해 PAM과 PAM+gypsum을 살포한 시험포에서 유출이 각각 31.8%와 35.6% 감소하였고, 토양유실은 각각 11.4%와 33.4% 저감된 것으로 연구결과 나타났다. Choi et al. (2009)은 실내 인공강우 장치를 이용하여 PAM의 토양유실 저감 효과를 평가하고 PAM의 적용가능성을 확인하였다. 토양 시험포의 경사를 10%, 20%로 설정하고, 7가지 종류의 PAM을 시험처리 한 후, 처리하지 않은 토양 시험포 (대조구)와 비교하였다. 그 결과 토양유실량은 약 85~88%, 지표유출수 내 탁도는 약 84.8~94.7% 저감된 것으로 나타났다. Lentz et al. (1992)는 관개용수에 PAM을 섞어 약 2.5 ppm의 농도로 표토에 살포한 결과 약 30% 경사를 가진 지역에서 지표유출수에 의한 세립 침식이 억제되었으며, 5~20 ppm의 농도로 사용할 경우 약 98%까지 유거수 내 침전물의 발생이 줄었다는 연구결과를 발표한 바 있다. Kim et al. (2014)은 Kaolin 점토시료를 가지고 탁도 저감시험을 실시하였다. 1리터의 실린더에 다양한 농도의 PAM (0, 20, 40, 60, 80, 100 ppm)과 점토용액을 섞은 후 실시간 침전실험을 한 결과 PAM 사용량과 침강속도 및 탁도저감을 간에는 양의 상관관계가 있다는 연구결과를 발표하였다 (Fig. 4). Entry et al. (2003)은 고랑부분에 PAM을 표토처리 한 전후의 결과를 비교해 본 결과, 지표유출수 내 탁도가 많이 저감됨을 알 수 있었다 (Fig. 4).

농경지 영양물질 관리 토양 내 영양물질은 강우시 지표유출 및 지중 침출을 통해 용존 상태로 손실되거나, 침식되는 토양입자에 흡착된 형태로 손실되기도 한다. 이렇듯 토양 내 영양물질의 손실은 토양의 비옥도 및 생산성을 감소시키며, 이로 인한 농업생산비용을 증가시킨다. 뿐만 아니라 농경지로부터 유출된 영양염류는 부영양화 문제 등 수질오염의 원인이 된다 (Choi et al., 2012).

Wang et al. (2011)은 PAM을 처리한 토양의 침식퇴적물 및 유거수를 비교한 결과 K^+ , NH_4^+ 및 NO_3^- 농도가 저감되었으며, 극소량 살포한 경우 ($1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ PAM)에서도 NH_4^+ 를 제외한 대부분의 K^+ , NH_4^+ 및 NO_3^- 의 부하량이 상당히 감소됨을 발견하였다. 좀 더 살펴보면, K^+ 의 경우 총 부하량이 60.1%에서 16.4%로 저감되었으며, NH_4^+ 와 NO_3^- 의 경우 약 86% 저감되었다. Sojka and Entry (2000)는 축산분뇨가 살포된 농경지에 PAM 화합물, 즉 PAM+Al (SO_4)₃와 PAM+CaO을 표토처리한 결과 상당량의 NH_4^+ , PO_4^{3-} 과 총 인이 저감되었다는 연구결과를 발표하였다. Kim et al. (2015)은 실내 인공강우장치와 토양칼럼을 이용하여 침출실험을 실시한 결과, PAM이 토양 내 물과 영양염류 이동기작에 영향을 미치는 것을 밝혔다. PAM 처리구 내 투수계수는 투입된 PAM량에 따라 증가하였으며, 영양염류의 경우 38~99% 저감된 것으로 연구결과 나타났다.

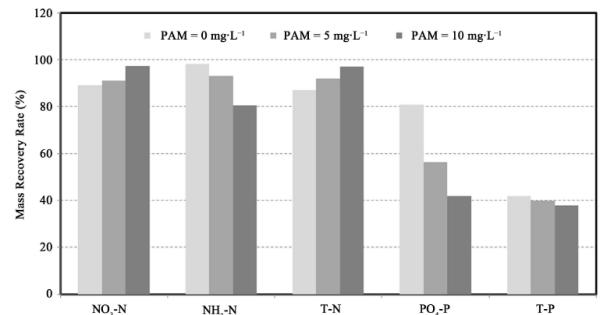


Fig. 5. Mass recovery of major nutrients at different concentrations of PAM (Kim et al., 2015).



Fig. 4. The effect of PAM on turbidity reduction (left: Kim et al., 2011, right: Entry et al., 2002).

가축분뇨 자원화에 따른 환경미생물 관리 Sojka and Entry (2000)는 축산폐수가 살포된 토양에 PAM을 처리한 후 강우시 농경지로부터 유출되는 유거수와 지중침출수를 채취해서 분석한 연구를 수행하였다. 연구결과 PAM을 처리하지 않은 대조구에 비해 처리한 시험구에서 총 대장균군(total coliform), 분변성 대장균군(fecal coliform), 분변성 연쇄상구균군(fecal streptococci) 및 영양물질이 약 1/10 정도로 감소한 것으로 밝혀졌다. PAM 처리에 따라 토양 중 미생물 이동과 관련한 연구는 또 있는데, 연구결과는 다소 상이했다. Wong (2001)의 연구에 따르면 1/1000 정도 감소한 MS2 바이러스와는 달리 대장균과 박테리오파지 수에는 PAM의 영향이 크게 없는 것으로 나타났다.

환경미생물의 경우 물속에 자유롭게 존재하는 경우는 드물고, 대부분 토양층을 구성하는 고체물질에 흡착(부착)되어 이동하게 된다(National Institute of Environmental Research, 2011). 환경 미생물의 이동 및 생존은 이류, 분산, 흡착(부착)과정을 통해 이루어지는데, 흡착물질의 특성(표면적, 입도 등), 토양수의 화학성(이온강도, pH 등) 및 미생물 자체의 특성(세포면의 전하, hydrophobicity 등)의 영향을 받는다(Bhattacharjee et al., 2002; Zhuang and Jin, 2008). 따라서 PAM이 직접적으로 축산폐수를 살균, 소독하지는 않지만, PAM에 의해 응집된 입자들로 인해 환경미생물의 이동 및 생태에 영향을 미쳤을 것이라 유추해 볼 수 있다.

비산먼지 저감 대부분의 도로나 건설현장에서는 노지 상태로 표토가 교란되고, 상당량의 점토 및 실트입자들이 바람에 의해 대기 중으로 먼지처럼 확산된다. 도시지역의 경우 각종 경제활동으로 중금속 등에 의해 토양이 오염되기도 한다. 오염된 미세먼지에 과도하게 노출될 경우 사람은 건강적인 문제가 발생하게 된다. 비록 많은 연구들이 이루어지지 않았지만, 석고와 함께 PAM을 표토에 사용할 경우 바람으로 인해 발생하는 비산먼지를 저감할 수 있다며, 특히 급경사지나 건설현장 같은 경우에 사용한 경우 효과가 좋았다는 연구 결과가 발표되었다(Hayes et al., 2005). Movahedan et al. (2012)은 PAM을 섞은 토양을 이용하여 최대풍속 26 m·h⁻¹ 하에서 풍동실험을 실시하였다. 미사질과 점토질 토양을 대상으로 PAM (25 g·m⁻²)을 처리한 경우와 무처리한 경우를 비교한 결과, 최소 90% 풍식이 저감된 것으로 연구결과 밝혀졌다(Movahedan et al., 2012).

환경 및 건강학적 영향 고분자응집제(PAM)은 아크릴아마이드(Acrylamide, AMD)의 연결 형태인데, 물질안전보건자료(MSDS)에 따르면, 아크릴아마이드는 동물실험에서 매우 높은 양에 노출될 경우 발암의 위험이 있으며, 특정량 이상 섭취시 동물과 사람의 신경계에 독성을 나타낼 수 있다고 보고되어 있다. 따라서 PAM이 자연분해 될 경우 독성 성

분이 유출되는지를 규명하기 위한 연구들이 진행된 바 있다.

일반적으로 PAM은 토양에 처리된 후 매년 10%정도가 햇빛 및 환경미생물에 의해 자연분해 되는데, 음이온 PAM의 경우 장기적으로 사용하여도 환경영향에 대한 위해성이 없을 뿐만 아니라, 수생 생물에게도 안전하다는 연구결과가 발표되었다(Barkenik, 1994). 또한 수생태계에 있어 PAM의 유독성을 평가하기 위해 분말(powder), 에멀전(emulsion) 등 5가지 형태의 PAM 제품을 *Hyalella Azteca* 등 5종의 어류를 대상으로 담수독성시험을 실시한 결과, 유독성이 크게 없는 것으로 나타났다(Weston et al., 2009). 음이온 PAM은 대부분 토양입자 또는 침전물에 부착된 상태로 존재하기 때문에 PAM이 강, 하천 등 수계로 유입되는 양은 지극히 적다는 연구결과도 있다(Sojka et al. 2007).

1990년대 많은 과학자들은 다양한 실내 및 현장실험을 실시하였는데, 1~10 ppm (10 g·m⁻²)의 비율로 토양을 처리한 후 토양 및 유출수를 대상으로 시간경과에 따른 잔류량을 분석한 결과 큰 문제가 없다는 결론에 이르렀다(Lentz et al., 1992; Lentz and Sojka, 1994; McCutchan et al., 1994; Trout et al., 1995; Sojka and Lentz, 1997). 일반적으로 응집력은 양이온성 PAM이 더 뛰어나지만, 수중 동물들에게 독성으로 작용하기 때문에 토양개량의 목적으로 사용이 극히 제한되며, 음이온성 PAM만이 농업 및 환경분야에 사용할 수 있다(Barvenik, 1994; Sojka et al., 2007). 이렇듯 음이온성 PAM은 통상 권고기준을 준수한다면 환경 및 건강상에 위해요인이 거의 없는 것으로 나타났다.

Conclusions

고분자응집제(PAM)은 미국 자연자원보호청(National Resources Conservation Practice)이 채택한 비점오염저감 방안 중 하나이며, 미국 및 유럽 등지에서는 관련 사용지침 또한 마련되어 있을 정도로 널리 사용되고 있다. 아직 국내에서는 관련 연구 및 적용 사례가 많지 않지만 토양유실 방지 및 비점오염저감 등 효과는 잘 알려져 있다(NRCS, 2011). PAM은 군 주둔지역, 건설 및 절성토 공사현장, 자연·인공 우수배출로, 도로 옆 배수로, 사토장 및 토취장, 농경지 정지작업현장 또는 파종 후 식생 활착이 진행 중인 지역, 휴경지 등 다양한 지역과 분야에서 활용되어 왔다. PAM이 가진 장점은 단순히 토양의 물리성 및 표토환경을 개선하는 것을 넘어서 수생태계 환경을 보호할 뿐만 아니라 작물 생산에도 큰 역할을 한다는 것이다. 하지만 재사용이 어렵다는 점, 햇빛과 기계적 교란에 의해 효과가 떨어진다는 점, 관련 지침에 준하지 않고 과다하게 사용할 경우 토양표면의 공극을 막고, 침투력을 저하시킬 수 있다는 점 등 단점 또한 분명히 존재한다(Wallace et al., 1986).

PAM 사용에 있어서 가장 우선시 되어야 할 것은 토양의

성질을 파악하는 것이며, 그 다음이 과연 PAM을 사용했을 경우 경제적인지를 고려해야 한다. 기존 연구들에 따르면 토양유실 저감을 위한 적정 PAM사용량은 약 $10\sim 20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 이다. PAM의 시중가 (kg 당 4,500원)를 고려한다면 ha 당 소요되는 PAM 구입비는 45,000~90,000원 정도이다. 이에 비해 PAM 사용에 따른 경제적 이익은 작물생육 촉진, 토양유실 저감, 농업생산량 증가, 비점오염원 저감에 따른 환경개선 등이 될 수 있다. 그러나 PAM을 적용하여도 작물과 토양 관리 방법에 따라 경제적 이익이 발생하지 않을 수도 있다. 다시 말해 기존 연구자들에 의해 검증된 토양과 작물에 대해서만 PAM의 적용이 경제적인 대안이 될 수 있다는 것이다. 따라서, 국내 영농환경 및 토양특성을 고려한 효과를 정확하게 검증하기 위해서는 관련 연구의 뒷받침이 더 필요하다. 본 논문에서 소개된 국내·외 연구사례들을 바탕으로, 국내에서도 관련 연구가 더욱 활성화되어 지속가능한 농업·농촌 환경 조성 및 발농업 경쟁력의 토대를 마련할 수 있기를 기대해 본다.

References

- Abu-Zreig, M., M. Al-Sharif, and J. Amayreh. 2007. Erosion control of arid land in Jordan with two anionic polyacrylamide. *Arid Land Res. Manag.* 21:315-328.
- Bai, G., C. Zou, S. Du, and Z. Ren. 2015. Effects of polyacrylamide on water use efficiency and output value of different crops in arid and semi-arid regions. *Nongye Gongcheng Xuebao/Trans. of CSAE.* 31:101-110.
- Barvenik, F.W. 1994. Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Sci.* 158:235-243.
- Bhattacharjee, S., J.N. Ryan, and M. Elimelech. 2002. Virus transport in physically and geochemically heterogeneous subsurface porous media. *J. of Contam. Hydrol.* 57:161-187.
- Bjorneberg, D.L., F.L. Santos, N.S. Castanheira, O.C. Martins, J.L. Reis, J.K. Aase, R.E. Sojka. 2003. Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration, *J. Soil Water Conserv.* 58:283-289.
- Choi, J.Y. 2006. Status and prospect of the non-point source control policy, *KWRA.* 39(12): 12-18.
- Choi, J.W., D.S. Shin, I.J. Kim, and K.J. Lim. 2011. Evaluation of runoff and sediment yield reduction with diversion ditch and vegetated swale using WEPP model, *J. of KWRA.* 44(11): 863-873.
- Choi, Y.B., J.E. Lim, Y.S. Jung, S.S. Lee, and Y.S. Ok. 2012. Best management practices for sloping upland erosion control: feasibility of PAM and biopolymer application. *J. of Agri. Life and Environ. Sci.* 24(2):30-39.
- Choi, B.S., J.E. Lim, Y.B. Choi, K.J. Lim, J.D. Choi, J.H. Joo, J.E. Yang, and Y.S. Ok. 2009. Applicability of PAM (Polyacrylamide) in soil erosion prevention: rainfall simulation experiments. *Korean Journal of Environmental Agriculture.* 28(3):249-257.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality.* SSSA, Special Publication 49. Madison, WI, pp. 25-37.
- Entry, J.A., I. Phillips, H. Stratton, and R.E. Sojka. 2003. Polyacrylamide+ $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ and polyacrylamide+CaO remove coliform bacteria and nutrients from swine wastewater. *Envir. Pollut.* 121:453-462.
- Entry, J.A., R.E. Sojka, M. Watwood, and C. Ross. 2002. Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants. *Envir. Pollut.* 120:191-200.
- Flanagan, D.C., L.D. Norton, J.R. Peterson, and K. Chaudhari. 2003. Using polyacrylamide to control erosion on agricultural and disturbed soils in rainfed areas: advances in the use of polyacrylamide (PAM) for soil and water management. *J. Soil Water Conserv.* 58:301-311.
- Green, V.S., D.E. Stott, L.D. Norton, and J.G. Graveel. 2000. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1786-1791.
- Hayes, S.A., R.A. McLaughlin, and D.L. Osmond. 2005. Polyacrylamide use for erosion and turbidity control on construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 60(4):193-199.
- Kim, M.Y., S.H. Kim, S.B. Lee, and Y.H. Cho. 2014. Development of a hybrid best management practice system for control of agricultural nonpoint water pollution, *J. Agric. Chem. Environ.* 3:161-168.
- Kim, M.Y., I.H. Song, M.K. Kim, S.H. Kim, Y.J. Kim, Y.H. Choi, and M.C. Seo. 2015. Effect of Polyacrylamide application on water and nutrient movements in soils. *J. Agric. Chem. Environ.* 4:76-81.
- Kwon, K.S., K.J. Lee, B.J. Koo, and J.D. Choi. 2000. Effect of PAM on soil erosion from Alpine agricultural fields. *J. Agr. Sci.* 11:91-99.
- Laird, D.A. 1997. Bonding between Polyacrylamide and clay mineral surfaces. *Soil Sci.* 162(11):826-832.
- LeBissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: 1. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47:425-437.
- Lee, S.B., M.Y. Kim, S.H. Kim, S.H. Yum. 2010. Reduction of sediment discharge from a paddy field. *Proceedings of the 2010 KSAE Annual Conference, October 15~16, Konkuk University, Korea.*
- Lentz, R.D. and R.E. Sojka. 1994. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. *Soil Sci.* 158:274-282.
- Lentz, R.D. and R.E. Sojka. 1996. Polyacrylamide application to control furrow irrigation-induced erosion. *Proceedings of the 27th International Erosion Control Association meetings, pages 419-430. Seattle Washington, 27 Feb.-1 Mar., 1996.*
- Lentz, R.D. and R.E. Sojka. 2009. Long-term polyacrylamide formulation effects on soil erosion, water infiltration, and

- yields of furrow-irrigated crops. *Agron. J.* 101:305-314.
- Lentz, R.D. and R.E. Sojka. 1994. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. *Soil Sci.* 158:274-282.
- Lentz, R.D., I. Shainberg, R.E. Sojka, and D.L. Carter. 1992. Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1926-1932.
- Levy, G.J. and M. Agassi. 1995. Polymer molecular weight and degree of drying effects on infiltration and erosion of three different soils. *Australian J. of Soil Res.* 33:1007-1018.
- Levy, G.J., J. Levin, M. Gal, M. Ben-Hur, and I. Shainberg. 1992. Polymers' effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:902-907.
- McCutchan, H., P. Osterli, and J. Letey. 1994. Polymers check furrow erosion, help river life. *Calif. Ag.* 47:10-11.
- McElhiney, M. and P. Osterli. 1996. An integrated approach for water quality: the PAM connectin pp. 27-30. In: Sojka, R.E., and R.D. Lentz (eds.) *Proceedings: Managing irrigation-induced erosion and infiltration with Polyacrylamide.* May 6~8, 1966. University of Idaho Miscellaneous Publication. 101-96. College of Southern Idaho, Twin Falls, Idaho.
- McIntyre, D.S. 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.* 85:261-266.
- Movahedan, M., N. Abbasi, and M. Keramati. 2012. Wind erosion control of soils using polymeric materials, *Eurasian J. of Soil Sci.* 2:81-86.
- Ministry of Environment. 2012. Nonpoint Source Management Program. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2013. Top soil conservation plan. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2014. Installation and management guideline of nonpoint source pollution control, Sejong, Korea.
- Nadler, A., M. Malik, and J. Letey. 1992. Desorption of polyacrylamide and polysaccharide polymers from soil materials. *Soil Technol.* 5:91-95.
- National Institute of Environmental Research. 2011. Model development for assessing the effect of Best Management Practice for non-point source management area. Incheon, Korea.
- National Institute of Forest Science. 2010. Soil management technique. Seoul, Korea.
- Norton, D. and K. Dontsova. 1998. Use of soil amendments to prevent soil surface sealing and control erosion. *Adv. GeoEcology.* 31:581-587.
- Norton, L.D., I. Shainberg, and K.W. King. 1993. Utilization of gypsiferous amendments to reduce surface sealing in some humid soils of the eastern USA. P. 77-92. In J.W.A. Poesen and M.A. Nearing (ed.) *Soil surface sealing and crusting.* Catena Suppl. 24, Catena Verlag, Crmlingen-Destedt, Germany.
- NRCS. 2011. Anionic Polyacrylamide (PAM) application. Natural Resources Conservation Service, Conservation Practice Standard. 1-3.
- Park, J.W., Y.H. Choi, M.H. Shin, C.H. Won, K.W. Park, and J.D. Choi. 2011. Evaluation of feasibility of System of Rice Intensification (SRI) for reduction of irrigation water in South Korea. *J. Korean Soc. Agric. Environ.* 53(4):49-57.
- Park, J.Y., C.G. Jung, I.K. Jung, J.W. Lee, H.J. Shin, S.J. Kim. 2010. A study on the reduction of non-point source pollution by applying Best Management Practices using SWAT model. *J. Agri. Life Sci.* 32(2): 59-64.
- Ross, C.W., R.E. Sojka, and J.A. Foerster. 2003. Scanning electron micrographs of polyacrylamide-treated soil in irrigation furrows. *J. Soil Water Conserv.* 58(5):327-331.
- Rubio, H.O., M.K. Wood, M. Cardenas, and B.A. Buchanan. 1992. The effect of polyacrylamide on grass emergence in South-Central New-Mexico. *J. Range Mange.* 45:296-300.
- Rural Research Institute. 2011. Collection of Best Management Practices for controlling agricultural nonpoint source pollution. Ansan, Korea.
- Shainberg, I. and G.J. Levy. 1994. Organic polymers and soil sealing in cultivated soils. *Soil Sci.* 158:267-273.
- Shainberg, I. and J.M. Singer. 1985. Effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of depositional crust. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1260-1263.
- Shainberg, I., D.N. Warrington, and P. Rengasamy. 1990. Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing. *Soil Sci.* 149:301-307.
- Shin, M.H., J.R. Jang, H.J. Shin, D.H. Kum, Y.H. Choi, C.H. Won, K.J. Lim, and J.D. Choi. 2013. Application of surface cover materials and soil amendments for reduction of non-point source pollution from upland fields. *J. of KSAE.* 55(4):21-28.
- Sojka, R.E. and J.A. Entry. 2000. Influence of polyacrylamide application to soil on movement of microorganisms in runoff water. *Environ. Pollut.* 108:405-412.
- Sojka, R.E., D.L. Bjorneberg, J.A. Entry, R.D. Lentz, and W.J. Orts. 2007. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. *Adv. Agron.* 92:75-162.
- Sojka, R.E. and R.D. Lentz. 1997. Reducing furrow irrigation erosion with polyacrylamide (PAM). *J. of Produc. Agri.* 10(1): 47-52.
- Sojka, R.E. and R.D. Lentz. 1994a. Polyacrylamide (PAM): A new weapon in the fight against irrigation-induced erosion. USDA-ARS Northwest irrigation and soils research laboratory station Note #01-94.
- Stern, R., A.J.V.D. Merwe, M.C. Laker, and I. Shainberg. 1992. Effect of soil surface treatments on runoff and wheat yields under irrigation. *Agron. J.* 84:114-119.
- Trout, T.J., R.E. Sojka, and R.D. Lentz. 1995. Polyacrylamide effect on furrow erosion and infiltration. *Trans. of ASAE.* 38(3):761-765.
- Wallace, A., G.A. Wallace, and A.M. Abouzamzam. 1986. Effects of soil conditioners on water relationship in soils. *Soil Sci.* 141(5):346-352.
- Wang, A.P., F.H. Li, and S.M. Yang. 2011. Effect of polyacrylamide

- application on runoff, erosion, and soil nutrient loss under simulated rainfall. *Pedosphere*. 21(5):628-638.
- Weston, D.P., R.D. Lentz, M.D. Cahn, R.D. Ogle, A.K. Rothert, and M.J. Lydy. 2009m Toxicity of anionic polyacrylamide formulations when used for erosion control in agriculture. *J. Environ. Qual.* 38:238-247.
- Wong, T.P. 2001. Polyacrylamide (PAM) effects on viruses and bacteria transport in an unsaturated Oxisol, M.S. thesis. The University of Hawaii.
- Wu, L., Y.S. Ok, X.L. Xu, and Y. Kuzyakov. 2012, Effects of anionic polyacrylamide on maize growth: a short term ¹⁴C labeling study. *Plant Soil*. 350(1):311-322.
- Xindong, W., Y. Xuefeng, L. Yumei, W. Youke, and Y. Xuefeng. 2011. Research on the water-saving and yield-increasing effect of polyacrylamide. *Procedia Environ. Sci.* 11(B):573-580.
- Yoon, J.H., D.K. Kang, S.S. Cho, and H.S. Kim. 2003. Soil erosion of tillage and the plan for reducing of turbid-water occurrence. Joint conference of the Korean Society of Water & Wastewater and Journal of Korean Society on Water Environment. pp. 55-58.
- Zhuang, J. and Y. Jin. 2008. Interactions between viruses and goethite during saturated flow: Effects of solution pH, carbonate, and phosphate. *J. of Contam. Hydrol.* 98(1-2):15-21.