

# 고랭지 밭 토양유실 방지를 위한 폴리머 소재(폴리아크릴아마이드 및 바이오폴리머)의 현장적용성 평가: 작물재배실험

## Effects of Polyacrylamide and Biopolymer on Soil Erosion and Crop Productivity in Sloping Uplands: A Field Experiment

최용범 · 최봉수 · 김세원\* · 이상수 · 옥용식<sup>†</sup>  
Yong Beom Choi · Bong Su Choi · Se Won Kim\* · Sang Soo Lee · Yong Sik Ok<sup>†</sup>

강원대학교 바이오자원환경학과 · \*강원도농업기술원

Department of Biological Environment, Kangwon National University · \*Gangwondo Agricultural Research & Extension Services

(2010년 10월 19일 접수, 2010년 11월 17일 채택)

**Abstract :** Use of polymeric soil amendments is an emerging way to reduce soil erosion, and improve crop productivity and soil quality. Objective of this study was to evaluate the effects of anionic polyacrylamide (PAM) and synthetic biopolymer on soil erosion, crop growth and soil quality. The aqueous solutions of PAM and biopolymer at 40 kg/ha were applied to loamy soil plots (3 m width by 18 m long) having a 20% slope during radish (*Raphanus sativus*) cultivation. Results showed that PAM and biopolymer treatments increased aggregate stability up to 11% compared to the untreated control. Treatments of PAM and biopolymer also increased leaf length of radish but there was no significant difference in crop yield. Soil loss was decreased by up to 41% using the polymeric soil amendments; however, no difference in runoff was found, compared to the untreated control. Soil loss was logarithmically increased against an increase in rainfall intensity ( $R^2 = 0.85$ ). Our findings suggest that proper use of polymeric soil amendments would be beneficial to maintain soil quality and reduce soil erosion in sloping uplands.

**Key Words :** Aggregate Stability, Biopolymer, Plant Growth, Polyacrylamide (PAM), Sloping Uplands, Soil Erosion

**요약 :** 본 연구에서는 경사도 20%의 강원도 경작지 실험포장(가로 3 m×세로 18 m)을 대상으로 자연강우 조건하에서 폴리머 기반 토양개량제인 polyacrylamide (PAM) 및 바이오폴리머의 처리가 토양유실 및 작물의 생장에 미치는 영향을 평가하였다. 40 kg/ha PAM 및 바이오폴리머 처리시 토양입단 안정도는 대조구에 비해 최대 11% 증가하였다. 생육조사 결과 폴리머 처리에 따라 무(*Raphanus sativus*)의 엽장은 증가하였으나 수확량의 경우 유의적인 차이를 나타내지는 않았다( $P>0.05$ ). 토양유실의 경우 폴리머 기반 토양개량제 처리시 토양유실량이 최대 41% 감소하였으나 유거수량에는 유의적인 차이가 없었다. 또한 토양유실량은 강우강도의 증가에 따라 대수관계( $R^2 = 0.85$ )로 증가함을 확인하였다. 이상의 결과로부터 피복이 완전치 못한 경사지 경작지에 대한 폴리머 기반 토양개량제 사용은 토양유실 저감에 효과적이며 작물생육 촉진 및 토양질 향상에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어 :** 토양입단안정성, 바이오폴리머, 식물생장, 폴리아크릴아마이드(PAM), 경사지밭, 토양유실

### 1. 서론

국내 고랭지 밭 면적은  $7.4 \times 10^4$  ha로 우리나라 전체 밭 면적의 10.4%를 차지하고 이중 60% 이상이 강원도에 위치하고 있다.<sup>1)</sup> 고랭지 밭은 해발 400 m 이상에서 경작이 이루어지고 있으며 일부는 30% 이상의 급경사 지역에 위치하고 있어 여름철 집중 강우시 토양유실로 인한 지력손실과 환경오염이 심각한 실정이다.<sup>2,3)</sup> 특히 토양유실은 입단의 안정성 저하 및 분산·탈리를 초래하고 그 결과 표토의 자갈 및 모래의 함량이 높아져 토양 물리성의 저해 및 강우에 의한 유실을 가속화시켜 농업생산성 감소로 이어진다.<sup>3)</sup>

국내 고랭지 밭의 경우 토양입자간 점착력이 약한 화강암 풍화토가 많아 강우시 토양유실과 더불어 질소, 인 등 영양염류 및 탁수에 의한 비점오염을 유발하게 된다.<sup>5)</sup> 비점오염으로 인한 수계생태계 교란과 관광자원 질 저하는 장기적으로는 음용수 질 저하뿐 아니라 경제·사회적 비용까지

증대시키는 결과를 가져올 수 있다.<sup>4)</sup>

기존의 토양유실 및 비점오염원에 대한 대책으로는 등고선 경작, 승수로 설치, 초생대 및 초지 조성, 녹비작물 재배, 부초 설치 등 식물에 의한 토양피복 및 토양 물리성 개선, 지형특성을 고려한 저감방안 등이 제시되었다.<sup>5,6)</sup> 그러나 기존 비점오염 저감방안은 강원도 고랭지 밭과 같은 잦은 객토 및 높은 경사도 등 특수성을 지닌 지역에서 효용성이 낮으며 물리적 저감시설 건축의 한계성이 있어 새로운 방안의 마련이 요구된다.<sup>7,8)</sup>

미국을 중심으로 합성 고분자 폴리머인 polyacrylamide (PAM)를 이용한 토양유실 저감방안이 다양하게 시도되고 있다.<sup>9-13)</sup> 토양 중 PAM 분자는 2가 양이온과 결합하여 점토입자간 확산이중층의 거리를 감소시키며 토양 입자의 응집력을 증가시키는 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup> 또한 PAM은 토양 표면 및 토양 입단을 물리·화학적으로 안정화시키고 강우시 유거수와 탁수 발생을 감소시켜 토양유실을 원천적

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: soilok@kangwon.ac.kr Tel: 033-250-6443 Fax: 033-241-6640

**Table 1.** Physicochemical properties of soil used in the study (n=3)

pH (1:5)	EC <sup>a)</sup> (dS/m)	OM <sup>b)</sup> (g/kg)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	Exchangeable cations			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
				Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>(+)</sub> /kg)	K <sup>+</sup> (cmol <sub>(+)</sub> /kg)	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>(+)</sub> /kg)				
6.59±0.05	0.51±0.11	13.2±2.6	576±10.8	5.90±0.46	0.56	2.25	48±5.6	36±4.5	16±3.2	Loam
6.0-6.5 <sup>c)</sup>	<2.0	20-40	200-400	5.0-6.0	0.5-1.0	1.5-2.5	-	-	-	-

<sup>a)</sup> Electrical conductivity

<sup>b)</sup> Organic matter

<sup>c)</sup> Optimum range<sup>38)</sup>

으로 차단할 목적으로 사용할 수 있는 것으로 보고 되었다.<sup>15)</sup> 특히 30% 이상 경사지에서 PAM 처리를 통한 토양유실 저감 사례가 보고된 바 있어 국내 고랭지 밭에 적용 가능할 것으로 판단된다.<sup>15,16)</sup>

최근 들어 자연 혹은 산업부산물의 이용 및 재활용을 통한 바이오폴리머(biopolymer) 토양개량제의 소재개발 및 적용성 평가 또한 활발히 진행되고 있다. 바이오폴리머의 경우 PAM에 비해 생물학적 분해가 용이하고 주재료로 자연 소재 및 산업부산물을 사용하기 때문에 저비용의 친환경적 토양개량제로 분류된다.<sup>17,18)</sup> 바이오폴리머 소재로는 키토산, 감자, 옥수수 및 밀 등에서 얻어지는 전분, 당 및 셀룰로오스 등이 대표적이다. 특히 셀룰로오스와 전분은 강한 응집력으로 인해 토양 안정화제로 널리 이용되고 있다.<sup>17-19)</sup>

국내의 경우 폴리머 기반 토양개량제의 투입에 따른 비점오염 저감 및 식물생장에 미치는 영향에 대한 연구는 극히 부족한 실정이며, PAM과 바이오폴리머의 국내 적용성 평가를 통한 최적투입기술의 개발 또한 필요하다.<sup>20,21)</sup> 이에 본 연구에서는 강원도 고랭지 밭을 대상으로 여름철 집중강우시 토양유실의 저감대책으로 PAM과 바이오폴리머의 국내 현장적용성을 평가하고자 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 토양 및 폴리머 기반 토양개량제

토양의 pH 및 electrical conductivity (EC)는 각각 pH meter와 EC meter를 이용하여 측정하였으며, 토양 유기물 함량 및 유효인산은 각각 Walkley Black method와 Lancaster method에 준하여 UV Spectrophotometer (UVIKON-XS, France)를 사용하여 분석하였다.<sup>40)</sup> 치환성 양이온(K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)은 1 N ammonium acetate (NH<sub>4</sub>OAc)를 이용하여 추출한 후 유도결합플라즈마 발광광도계(Inductively coupled plasma mass spectrometry[ICP], GBC Integra XMP, GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Australia)를 사용하여 측정하였다.<sup>41)</sup> 실험포 토양은 미사 36% 및 점토 16%로 구성된 양토로 pH 6.95, 유기물함량은 13.2 g/kg이며, 유효인산함량은 국내 밭 토양의 적정범위(200-400 mg/kg)보다 다소 높은 576 mg/kg로 조사되었다(Table 1).

PAM 및 바이오폴리머 투입시 유거수 및 토양유실 감소량 측정을 위해 강원도 홍천군 내면 자운 2리에 가로 3 m

및 세로 18 m, 경사도 20%의 실험포장을 조성하였다. 식물 생육 실험을 위해 주변 고랭지 밭과 동일하게 경운, 시비를 한 실험포에 25일간 육묘한 무(*Raphanus sativus*)를 정식하였다. 이후 40 kg/ha 입상(granular) 타입의 PAM을 600 mg/L 농도로 24시간 동안 희석하여 토양 표면에 균일하게 살포하였다.<sup>22)</sup> 본 실험에서는 상업적으로 시판되는 PAM인 Soilfix G1 (Ciba Chemical Co., Germany)을 사용하였으며, 바이오폴리머의 경우 4 g 리그닌(lignin), 0.4 g 옥수수 전분(corn starch) 및 16 g acrylamide와 1.2 g of potassium persulfate (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)를 사용하여 합성, 건조 후 입상타입으로 분쇄하였고, PAM과 동일한 농도(600 mg/L)와 투입량(40kg/ha)으로 처리하였다.<sup>23)</sup>

### 2.2. 토양 입단 안정성 및 작물생육 평가

폴리머 기반 토양개량제 처리에 따른 토양의 입단안정성은 wet-sieving apparatus (Eijkkelkamp, Netherlands)를 사용하여 측정하였다.<sup>39)</sup> 또한 정식 77일째에 무 수확과 동시에 생육조사를 실시하였다. 무의 생육평가인자로 지상부의 엽장, 생엽중 및 엽수, 지하부의 근장 및 근중을 조사하였다.

### 2.3. 유거수 및 토양유실

강우시 폴리머 기반 토양개량제의 토양유실 저감 효율을 평가하기 위하여 강우가 멈춘 후 유거수 및 토양유실량을 측정하였으며 유거수량을 평가한 후 토사를 분리, 건조시킨 후 토양유실량을 조사하였다. 실험포 실험이 진행되는 동안 자연 강우는 총 4회 발생하였으며, 평균 강우량 및 최대 강우량은 Table 2와 같다.

### 2.4. 통계분석

통계분석은 SAS software Ver. 9.1을 이용하여 분산분석

**Table 2.** Characteristics of rainfall events during radish cultivation in 2009

Sampling date	Rainfall term	Rainfall* (mm)	Mean rainfall* (mm/day)	Maximum rainfall* (mm/h)
July 10	July 8-9	196	98.0	125.0
July 16	July 11-15	353	70.6	39.0
July 27	July 17-26	154	15.4	23.5
August 13	August 07-12	177	29.5	13.5

\* Data were achieved from the Korea meteorological administration.

(Analysis of Variance; ANOVA)을 실시하였으며, 각 처리구 간 토양 입단안정성, 무의 생육, 토양유실 및 유거수의 변화를 95% 유의수준으로 검증하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 토양 입단안정성

폴리머 기반 토양개량제 처리에 따른 입단의 안정성 변화를 조사하였다(Fig. 1). 토양 입단 안정성은 대조구와 비교하여 PAM 처리시 6%, 바이오폴리머 처리시 11% 증가하였으며, 바이오폴리머 처리시 대조구와 95% 유의수준에서 증가하는 것으로 조사되었다. 이는 폴리머 기반 토양개량제 투입시 토양 표면 경화층 형성을 방지하고 토양 입자간 응집력을 증대시켜 토양 입단의 공극율 및 안정성이 증가하였다는 기존 연구들과 동일하였다.<sup>24)</sup> Lee et al.은 20 kg/ha PAM 처리시 토양 표면 경화층(0~2 mm)의 누적 공극율이 최대 80%까지 향상됨을 보고하였다.<sup>25)</sup> 또한 폴리머 기반 토양개량제는 토양 입단을 개선하여 투수율을 증가시키는 것으로 알려져 있다.<sup>25,26)</sup> Shainberg et al.는 PAM 처리시 강우에 의한 토양 경화층 형성이 감소되어 투수율은 2.0에서 23.5 mm/h로 증가하였고 80 mm 강우시 토양 투수

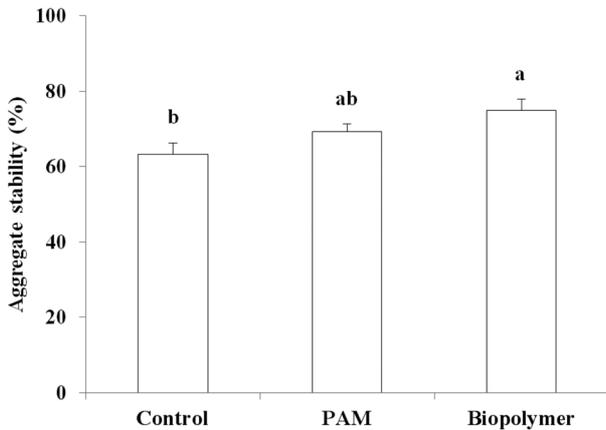


Fig. 1. Change in soil aggregate stability (%) in radish fields by polyacrylamide (PAM) and biopolymer treatments along with the untreated control. Vertical error bars indicate standard deviation and the same letter is not different at 0,05 significant level.

Table 3. Growth parameters of radish leaf and root by polyacrylamide (PAM) and biopolymer treatments

Amendment	Leaf			Root	
	Length (cm)	Fresh weight (g/plant)	Number	Length (cm)	Fresh weight (g/plant)
Control	40,8 b*	140,0 ns**	19,8 ns	27,6 ns	1365,0 ns
PAM	43,0 a	143,0 ns	17,5 ns	28,2 ns	1390,0 ns
Biopolymer	44,0 a	138,0 ns	19,5 ns	27,6 ns	1313,0 ns

\* Same letter indicates no significant difference within each treatment using Tukey's test at 0,05 significant level.

\*\* ns: Not significant.

량이 3배 이상 증가됨을 보고하였다.<sup>15)</sup> Orts et al.는 PAM 처리시 토양 점토 입자와 PAM 분자 간의 높은 결합력으로 투수율과 수분보유능이 증가되고 토양 입단을 안정화시키는 것으로 보고하였다.<sup>27)</sup> 이외에도 폴리머 기반 토양개량제는 토양 입단 내 수분을 흡수하기 때문에 물리적인 공극율을 증가시킬 수 있다고 보고된 바 있다.<sup>28,29)</sup>

#### 3.2. 작물생육 특성

폴리머 기반 토양개량제 투입시 작물생육에 미치는 영향을 평가하기 위하여 무의 지상부(엽장, 생엽중 및 엽수) 및 지하부(근장 및 근중)의 생육을 조사하였다(Table 3). 대조구와 비교하여 PAM 및 바이오폴리머 처리구에서 엽장은 각각 5.1% 및 7.3% 증가( $P<0.05$ )하였으나 폴리머 처리구 별로 유의적 차이는 없었다. 엽장을 제외한 생육인자(생엽중, 엽수, 근장 및 근중)의 경우 대조구 및 처리구에서 유의한 차이가 없었다. 기존의 연구에서 폴리머 기반 토양개량제는 아미노기의 질소, 에스터기 및 카복실기의 탄소성분으로 인해 식물의 생육이 증가됨을 보고한 바 있어 이는 본 연구와 부분적으로 유사한 결과로 판단된다.<sup>30,31)</sup> 김과 김의 연구에 의하면 토양에 0.1% PAM을 처리시 파종 후 23일 동안 시금치(*Spinacia oleracea* L.) 생체중이 3.5배 증가되었고 이는 토양의 물리·화학적 개선으로 인한 작물생육 향상에 기인한 것임을 보고하였다.<sup>32)</sup> 이외에도 농경지 토양 내 PAM 투입시 종자의 발아율 증가 및 대조구에 비해 높은 작물 생육 및 생산성 등이 보고된 바 있다.<sup>33,34)</sup>

#### 3.3. 토양유실 저감효과

폴리머 기반 토양개량제 투입시 대조구에 비해 강우에

Table 4. Soil loss (ton/ha) and runoff (ton/ha) by polyacrylamide (PAM) and biopolymer treatments

Sampling date	Soil loss (ton/ha)			Runoff (ton/ha)		
	Control	PAM	Biopolymer	Control	PAM	Biopolymer
July 10	46,16 a*	23,29 c	34,39 b	19,43 ns**	19,96 ns	20,50 ns
July 16	35,22 a	22,92 c	24,00 b	31,16 ns	31,16 ns	31,16 ns
July 27	18,73 a	11,16 c	16,58 b	8,76 ns	7,70 ns	82,30 ns
August 13	20,80 a	13,76 c	18,47 b	13,56 ns	11,96 ns	12,50 ns
Total	120,91	71,13	93,44	72,91	70,78	72,39

\* Same letter indicates no significant difference within each treatment for each sampling day using Tukey's test at 0,05 significant level.

\*\* ns: Not significant.

의한 토양유실이 감소하는 것으로 조사되었다(Table 4). 토양유실량은 PAM 및 바이오폴리머 투입 후 대조구에 비해 각각 41%와 23% 감소하였으나( $P < 0.05$ ) 유거수량은 대조구와 비교하여 PAM 및 바이오폴리머 모두 유의적 차이가 없었다. 이는 폴리머 기반 토양개량제 투입으로 토양 표면의 점토입자 결합력 증가 및 탈리현상 감소에 의한 영향으로 판단된다. 본 연구에서 각 처리간 유거수량의 차이가 없는 것은 높은 농도(600 mg/L)의 폴리머 기반 토양개량제 투입 시 토양 표면 공극의 감소로 유거수량은 증가하지만 토양유실량은 감소한다는 기존 연구결과와 동일하였다.<sup>22,35,36)</sup> 따라서 폴리머 기반 토양개량제 투입 시 토양 특성별 투입량 및 처리농도, 경사도 등과 같은 지리적 요인에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

또한 폴리머 처리시 토양유실량은 강우강도 증가시 대수관계( $R^2=0.85$ )로 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 강우시 무처리 토양의 유실패턴과 동일하지만 폴리머 기반 토양개량제에 의한 토양 점토입자의 응집 및 입단의 안정화로 토양유실량은 현저히 감소하는 것으로 판단된다. PAM의 경우 강우시 토양 전해질 내  $Ca^{2+}$ 에 의해 토양입자와 PAM 분자 사이에 양이온 가교를 형성하여 토양 입단을 안정화 시키는 것으로 보고되었다.<sup>11,13,14)</sup> 일례로 PAM을 5 kg/ha 수준으로 소량 투입시 토양 용액 내 전해질과 결합하여 토양 입단이 안정화되고 토양 물리성이 향상됨이 보고되었다.<sup>37)</sup> Levy et al.은 4% 경사지에 20 kg/ha PAM처리시 토양 입단의 안정화로 50~70% 토양유실량이 감소됨을 보고 하였다.<sup>30)</sup> 이와 유사하게 권 등은 인공강우를 이용한 30% 경사도 및 PAM을 처리한 토양에서 최대 97% 토양유실 저감효과를 보고하였다.<sup>20)</sup>

본 연구에서는 PAM 처리시 기존 연구와 유사한 토양유실 감소를 나타내었으나 토양 표면 유거수 감소를 위해서는 토양특성에 적합한 투입방법의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

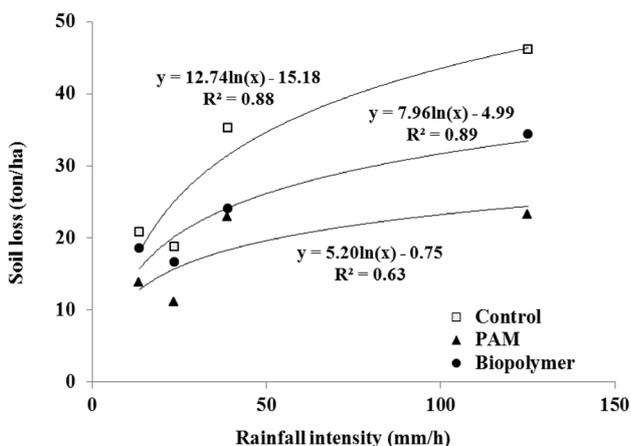


Fig. 2. Relationship between soil loss (ton/ha) and rainfall intensity (mm/h) in soils treated with polyacrylamide (PAM) and biopolymer.

#### 4. 결론

집중 강우에 의한 유거수 및 토양유실 발생은 농업생산성의 저하뿐 아니라 수계생태계 교란 및 부영양화 등 심각한 환경오염의 원인이 된다. 특히 국내 고랭지 지역과 같은 사질 경사지의 경우 그 피해가 막대하여 적절한 관리 대책 마련이 시급히 요구된다. 본 연구에서는 토양질 개선 및 토양유실 저감 방안으로 폴리머 기반 토양개량제(PAM 및 biopolymer)의 국내 현장적용성을 평가하였다. 폴리머 기반 토양개량제 처리시 토양 입단의 안정성은 대조구와 비교하여 최대 11% 증가하였다. 폴리머 기반 토양개량제는 무의엽장을 증가시켰으나 수량에 있어 유의적 차이는 없었다. 폴리머 기반 토양개량제 처리시 토양유실량은 최대 41% 감소하였으며, 또한 토양유실량은 강우강도의 증가에 따라 대수관계로 증가( $R^2=0.85$ )하는 것으로 조사되었다. 본 연구를 통해 폴리머 기반 토양개량제의 사용은 경사지 토양의 물리성 개선 및 토양유실 방지에 효과가 있는 것으로 판단되어 국내 도입이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 향후 폴리머 기반 토양개량제의 효용성을 높이기 위하여 국내 현장적용성을 고려한 최적투입기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 환경기술개발사업 Eco-STAR Project “효율적 비점오염원 관리기술” 중 “농촌 비점오염원 제어를 위한 효율적인 관리기술 개발” 및 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ0074092010)의 지원에 의해 이루어졌습니다. 시료의 기기분석은 강원대학교 공동실험실습관, 농업생명과학연구원 및 환경연구소의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

#### 참고문헌

1. Partab, T., “Evolving sustainable production systems in sloping upland areas: land classification issues and options,” *Asian Productivity Organization*, Tokyo, Japan, pp. 1~221(2004).
2. Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R., “Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits,” *Sci.*, **267**, 1117~1123(1995).
3. 최중대, 박지성, 김정제, 양재의, 정영상, 윤세영, “산지에서 환경보전형 농업을 위한 토양의 질 평가: 유사자료의 분석과 최적영농방법의 제안,” *한국환경농학회지* **19**(3), 201~205(2000).
4. 박철수, 정영상, 주진호, 양재의, “강원도 고랭지의 석비레

- 성토지 토양 특성,” 한국토양비료학회지, **37**(2), 66~73(2004).
5. Clark, E. H., Haverkamp, J. A. and Chapman, W., “Eroding soils: the off-farm impacts,” *Conservation Foundation*, Washington, DC, USA(1985).
  6. Myers, N., “Gaia: An Atlas of Planet Management,” *Anchor/Doubleday*, Garden City, NY, USA(1993).
  7. 전만식, “소양강댐 흙탕물 저감대책,” 강원발전연구원, pp. 39~49(2008).
  8. Troeh, F. R., Hobbs, J. A. and Donahue, R. L., “Soil and Water Conservation,” *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, USA(1991).
  9. Bjorneberg, D. L. and Aase, J. K., “Multiple polyacrylamide applications for controlling sprinkler irrigation runoff and erosion,” *Appl. Eng. Agric.* **16**(5), 501~504(2000).
  10. Lentz, R. D. and Sojka, R. E., “Applying polymers to irrigation water: Evaluating strategies for furrow erosion control,” *Trans. ASAE*, **43**, 1561~1568(2000).
  11. Flanagan, D. C., Chaudhari, K. and Norton, L. D., “Polyacrylamide soil amendment effects on runoff and sediment yield on steep slopes: Part II. Natural rainfall conditions,” *Trans. ASAE*, **45**(5), 1339~1351(2002).
  12. Bjorneberg, D. L., Santos, F. L., Castanheira, N. S., Martins, O. C., Reis, J. L., Aase, J. K. and Sojka, R. E., “Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration,” *J. Soil Water Conserv.*, **58**(5), 283~289(2003).
  13. Sojka R. E., Bjorneberg, D. L., Entry, J. A., Lentz, R. D. and Orts, W. J., “Polyacrylamide in agriculture and environmental land management,” *Adv. Agron.*, **92**, 75~162(2007).
  14. Orts, W. J., Sojka, R. E., Glenn, G. M. and Gross, R. A., “Preventing soil erosion with polymer additives,” December, *Polymer News*, **24**, 406~413(1999).
  15. Shainberg, I., Warrington, D. N. and Rengasamy, P., “Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing,” *Soil Sci.*, **149**(5), 301~307(1990).
  16. Agassi, M. and Ben-Hur, M., “Stabilizing steep slopes with soil conditioners and plants,” *Soil Technol.*, **5**(3), 249~256(1992).
  17. Shainberg, I. and Levy, G. J., “Organic polymer s and soil sealing in cultivated soils,” *Soil Sci.*, **15**(4), 267~272(1994).
  18. Menefee, E. and Hautala, E., “Soil stabilisation by cellulose xanthate,” *Nature*, **275**, 530~532.
  19. Sojka, R. E., Entry, J. A., Orts, W. J., Morishita, D. W., Ross, C. W. and Home, D. J., “Synthetic-and bio-polymer use for runoff water quality management in irrigated agriculture,” *Water Sci. Technol.*, **51**, 107~115(2005).
  20. 권기수, 이기중, 구본준, 최중대, “PAM을 이용한 고랭지 농경지의 토양 유실방지 효과,” 강원대학교 농업과학연구원 논문집, **11**, 91~99(2000).
  21. 최봉수, 임정은, 최용범, 임경재, 최중대, 주진호, 양재의, 옥용식, “경사지 토양유실 방지를 위한 PAM (Polyacrylamide) 시제품의 효율성 비교평가: 실내 인공강우 실험,” 한국환경농학회지, **28**(3), 249~257(2009).
  22. Lee, S. S., Gantzer, C. J., Thompson, A. L. and Anderson, S. H., “Polyacrylamide and gypsum amendments for erosion and runoff control on two soil series,” *J. Soil Water Conserv.*, **65**(4), 233~242(2010).
  23. Chen, L., Guangxia, W., Huanzhen, M., Zonghuan, Y., Li-anyi, T. and Xiangwei, L., “Synthesis and application of lignin-based copolymer LSAA on controlling non-point source pollution resulted from surface runoff,” *J. Environ. Sci.*, **20**(7), 820~826(2008).
  24. Flanagan, D. C., Norton, L. D. and Shainberg, I., “Effect of water chemistry and soil amendments on a silt loam soil: Part I. Infiltration and runoff,” *Trans. ASAE*, **40**(6), 1549~1554(1997).
  25. Lee, S. S., Gantzer, C. J., Thompson, A. L., Anderson, S. H. and Ketcham, R. A., “Using high-resolution computed tomography analysis to characterize soil-surface seals,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **72**(5), 1478~1485(2008).
  26. Zhang, X. C. and Miller, W. P., “Polyacrylamide effect on infiltration and erosion in furrows,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**(3), 866~872(1996).
  27. Orts, W. J., Sojka, R. E., Glenn, G. M. and Gross, R. A., “Biopolymer additives for the reduction of soil erosion losses during irrigation,” In R. A. Gross, C. Scholz (eds.) *Biopolymers from polysaccharides and agropoteins* (ACS Series 786), *Am. Chem. Soc.*, Washington, DC, USA, pp. 102~116(2001).
  28. Bowman, D. C., Evans, R. Y. and Paul, J. L., “Fertilizer salts reduce hydration of polyacrylamide gels and affect physical properties of gel-amended container media,” *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, **115**(3), 382~386(1990).
  29. Wallace, A. and Wallace, G. A., “Effect of polymeric soil conditioners on emergence of tomato seedlings,” *Soil Sci.*, **141**(5), 321~323(1986).
  30. Levy, G. J., Ben-Hur, M. and Agassi, M., “The effect of polyacrylamide on runoff erosion and cotton yield from fields irrigated with moving sprinkler systems,” *Irrig. Sci.*, **12**(2), 55~60(1991).
  31. Lentz, R. D. and Sojka, R. E., “Long-term polyacrylamide formulation effects on soil erosion, water infiltration, and yields of furrow-irrigated crops,” *Agron. J.*, **101**(2), 305~314(2009).
  32. 김석균, 김경재, “PAM과 K-CMC처리가 토양의 이화학적 및 양배추의 수량에 미치는 영향,” 원예과학기술지, **16**(2), 222~225(1998).
  33. Entry, J. A. and Sojka, R. E., “The efficacy of polyacrylamide to reduce nutrient movement from an irrigated field,” *Trans. ASAE*, **46**(1), 75~83(2003).
  34. Cook, D. F. and Nelson, S. D., “Effect of polyacrylamide on seedling in crust-forming soils,” *Soil Sci.*, **141**(5), 328~333(1986).
  35. Lentz, R. D., “Inhibiting water infiltration with PAM and surfactants: Applications for irrigated agriculture,” *J. Soil Water Conserv.*, **58**(5), 290~300(2003).
  36. Lentz, R. D., “Inhibiting water infiltration into soils with cross-linked polyacrylamide: Seepage reduction for irrigated agriculture,” *J. Soil Water Conserv.*, **71**(4), 1352~1362(2007).
  37. Lentz, R. D., Shainberg, I., Sojka, R. E. and Carter, D. L., “Preventing irrigation furrow erosion with small application of polymers,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**, 1926~1932(1992).

38. 김계훈, 김길용, 김정규, 사동민, 서장선, 손보균, 양재의, 엄기철, 이상은, 정광용, 정덕영, 정연태, 정종배, 현해남, “토양학,” 향문사, pp. 282~342(2008).
39. RDA-NIAST, “Methods of Soil Chemical Analysis,” National Institute of Agricultural Science and Technology, *Rural Development Administration*, Suwon, Korea(1988).
40. Nelson, D. W. and Sommers, L. E., “Total carbon, organic carbon, and organic matter,” In Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E. (eds.), Methods of soil analysis Part 3 - chemical methods, *Am. Soc. Agron.-Soil Sci. Soc. Am. Inc.*, Madison, Wisconsin, USA, pp. 961~1010(1996).
41. Sumner, M. E. and Miller, W. P., “Cation exchange capacity and exchange coefficients,” In Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E. (eds.), Methods of soil analysis Part 3 - chemical methods, *Am. Soc. Agron.-Soil Sci. Soc. Am. Inc.*, Madison, Wisconsin, USA, pp. 1201~1230(1996).