

미국 건설사업장 유출수 탁도 저감 기술 소개



강지훈 ▶▶▶

코오롱건설 기술연구소 환경연구소 선임연구원
kangji98@kolon.com



최영화 ▶▶▶

블루그린링크(주) 대표 이사
bglink@hanmail.net

미국 환경부는 인간의 토지 사용으로 인해 발생하는 토사 및 탁수 유출을 지표수 수질오염의 주요인으로 보고 있다 (US EPA, 2009). 미세 토사와 함께 유입되는 여러 오염 물질들은 부영양증 수질오염을 일으키는 원인이 되며, 탁수 자체로는 수중으로 투과되는 빛을 차단하고 용존 산소의 양을 감소시켜 수중생태계에 큰 피해를 줄 수 있다. 건설사업장의 경우 다른 토지 이용에 비해 더 많은 토양 침식을 일으킬 수 있으며, 그 시간당 토사 유출 정도는 농경지 및 산지에 비해 100 배 이상이라고 알려져 있다 (Pitt et al., 2007). 일반적으로 건설현장에서 사용되는 토사 유출 저감 기술로는 토양의 유실을 원천적으로 차단하는 토사 유실 방지 기술 (erosion control)과 빗물과 함께 유실된 토사가 인근 수역으로 유입되는 것을 제어하는 토사 유출 제어 기술 (sediment control)로 구분된다. 토사 유출 제어 기술을 이용한 BMP (Best

Management Practice) 중 대부분은 물리적인 처리 방법(침전, 여과)으로서 완전한 유출 제어가 어렵고, 특히 탁도의 대부분을 차지하는 점토($2 \mu\text{m}$ 이하)의 경우 처리가 어려우므로 만족할 만한 방류수질을 기대하기 어렵다 (Line and White, 2001). 따라서 실제 현장에서 적절한 BMP들이 적용되더라도 최종 방류수의 탁도는 수천에서 수만 NTU(Nephelometric Turbidity Unit; NTU)까지 이를 수 있다고 보고되었다 (McCaleb and McLaughlin, 2008).

2009년 말 미국 환경부에서는 건설사업장 강우 유출수의 탁도 저감을 위해 탁도 규제를 공표하였다 (US EPA, 2009). 본 규제에 따르면 2011년 8월을 기점으로 하여 20 에이커가 넘는 면적의 경우 일 최대 (daily maximum) 방류수 탁도가 280 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) 이하가 되어야 하며, 2014년 2월부터는 10 에이커 이상의 모든 건설사업장에 확대 적용될 예정이다. US EPA (2009)에 따르면 탁도 저감 기술에 있어 두 가지 방법을 소개하고 있다. 첫째로는 능동적 처리 시스템(Active Treatment System: ATS)으로서 하폐수 처리 공정 플랜트와 유사한 시설로 여과 필터 (media filtration) 또는 별도의 응집·교반 장치를 현장에 설치하여 유출수의 탁도를 낮추는 방법이다. 여과 필터 방법은 고농도 탁수를 직접적으로 처리하기에는 오염 부하가 매우 높아 유지 관리가 어렵다. 따라서 독립적으로 사용되기 보다는, 응집·교반 처리 후단에 적용되곤 한다. 두 번째 탁도 저감 방법은 수동적 처리 시스템(Passive Treatment System: PTS)이

라 불리는데 분말 혹은 고체 상태로 응집제 제품을 기존의 BMP들에 적용한다. PTS는 강우 시 응집제가 흐르는 유출수에 기계적 도움 없이 용해되는 원리를 이용, 응집된 입자가 침강하도록 유도하여 수질을 제어하는 방법이다. 미국 전체 건설사업장을 놓고 보면 ATS의 경우 연간 91억 달러가 소요되며, PTS 적용시 10억 달러로 예상된다. 탁도 규제를 통한 수질 개선의 가치는 9억 달러까지 이를 것으로 예상되며 PTS가 비용적 측면에서 유리하다고 보고되었다. 따라서 미국의 많은 건설업체 및 응집제 제조회사에서는 PTS를 기반으로 한 탁도 저감기술에 많은 관심을 기울이고 있다. 본 기사는 미국 건설현장에서 흔히 사용되는 토사유출 및 유실방지를 위한 BMP와 이들에 적용된 PTS기술을 소개하고자 한다.

건설 사업장에서 탁도 저감을 위해 사용되는 응집제

일반적으로 탁수 처리에 사용되는 응집제로는 크게 금속 계열 응집제 (alum, poly-aluminum, ferric chloride 등)과 폴리머 계열 응집제 (polyacrylamide: PAM, biopolymer)가 있다. 하폐수처리 공정에서 흔히 사용되는 금속 계열 응집제는 비용은 저렴한 반면 건설 사업장에 적용하기에는 상대적으로 공정이 복잡 (예: pH 조정)하고 응집 입자의 크기가 작아 다량의 응집제가 필요한 것은 물론 만족할 만한 침강 시간을 확보하기에는 많은 부지면적이 소요된다. 따라서 건설사업장 내 탁수 처리에 사용된 경우는 드물다. 반면, 폴리머 계열 응집제는 적은 양으로도 효과적인 응집이 가능하고, 그 응집 입자의 크기가 커서 간단한 장치를 이용해 빠른 탁수 처리가 필요한 건설 사업장에서 금속 계열 응집제에 비해 상대적으로 많이 쓰이고 있다.

표 1은 미국 노스캐롤라이나 수질관리과에서 정한 건설사업장 탁수 처리시 사용 가능한 응집제 목록이다. PAM 계열의 고분자 유기응집제가 주를 이루며,

자연 분해가 용이한 바이오폴리머(biopolymer) 계열의 응집제도 포함되어 있다. PAM 자체는 독성이 없으나, 제조과정 중에 폴리머화 되지 않은 아크릴아마이드 단위체 (acrylamide monomer)의 경우 발암물질이 될 수 있다고 알려져 있다 (Sojka et al., 2007). 이러한 독성문제를 고려해 환경 목적으로 사용되는 PAM제품의 경우 잔여 아크릴아마이드 함량 0.05 % 이하로 제조되어야 하며, 일반적으로 사용되는 PAM 농도 (10 ppm 이하)에서는 안전하다고 알려져 있다. PAM은 전하 별로 양성, 중성, 혹은 음성 PAM 제품으로 생산되며, 그 독성은 음성 PAM이 가장 낮다고 알려져 있다. PAM 제품별로 보면 액상, 분말 혹은 고체 블락(흔히 log라 불림)으로 제조되며, 액상은 ATS을 위해 그리고 분말과 log는 PTS를 위한 응집제로 사용되고 있다 (그림 1). 바이오폴리머는

표 1. 미국 노스캐롤라이나 수질관리과에서 허용한 응집제 종류

Company	Product	Max recommended dosage (ppm)
Applied Polymer System	APS 705	27.7
	APS 712	59.3
	APS 730	5.6
	APS 740	5.2
	APS 703d	Log form
	APS 703d#3	Log form
	APS 706b	Log form
Leaner Meaner Greener, Inc	L.M.G. Dust	500
	Magnet 281 Solution	
	L.M.G. Dust Magnet 163 Powder	0.5
Paschal Associates Sales	PFR P251	25
Storm Klear*	3 % Liqui-Floc	9.4
	DBP-2100	28.1
Southeastern Laboratories	SEL FLOC 6026	7.5
Halosource, Inc*	GelFloc	2.6
	LBP-2101	500
Ashland Hercules Water Tech	Ashland Charge Pac 55	10

* Biopolymer product (출처: <http://portal.ncdenr.org>)



그림 1. 수동적 처리 시스템(Passive Treatment System)을 위해 사용되는 응집제

카이토산(chitosan)을 주성분으로 한 응집제로서 액상 혹은 파우치(pouch)에 들은 분말 형태로 판매되는데, 합성제품인 PAM보다는 독성이 적어 환경친화적인 것으로 알려져 있다.

PAM은 1990년대 이후에는 농업 분야에서도 활발하게 사용되고 있다. 토양 중 PAM 분자는 2가 양이온과 결합하여 점토 입자간 확산이중층의 거리를 감소시켜 토양 입자의 응집력을 증가시킬 수 있다. 따라서 토양 표면 및 입단을 물리 화학적으로 안정화시키고랑 관개시나 강우시 토사 유출을 방지하고 물의 토양 침투를 증가시키는 목적으로 국내에서도 사용되어 왔다 (최용범외, 2010). 도로 건설현장에서는 하이드로시더 (hydroseeder)를 이용해 잔디씨, PAM, 하이드로멀치(hydrmulch)를 함께 절토 경사면에 뿌려 토양 침식 방지와 안정화, 그리고 절개면 녹화를 향상시킬 수 있다 (그림 2). 탁수 처리면에서 보면 혼탁한 탁수에 PAM이 주입될 경우 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 선형 PAM 주변으로 미세 입자들이 모여 플락(floc)을 형성하고 빠른 침전을 하게 된다. 건설사업장 탁수의 경우 해당 토양에 대해 Jar 테스트를 실시하여 특정 PAM제품을 선별하는데, 일반적으로 कै올리나이트 (Kaolinite) 점토 광물을 다량 포함한 탁수의 경우 응집 효과가 뛰어나며, 2:1 점토 광물인 스멕타이트 (Smectite)나 버미큘라이트 (Vermiculite) 함량이 많을수록 응집 효과는 떨어진다고 보고되었다 (McLaughlin and Bartholomew, 2007).



그림 2. 하이드로시더를 이용한 절토면 안정화 작업

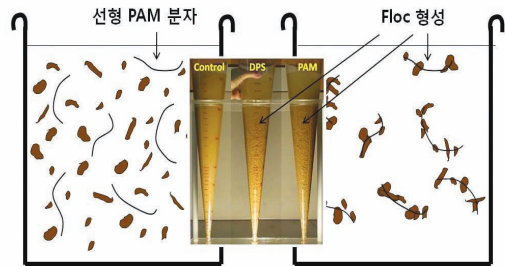


그림 3. 응집제를 이용한 부유물질 응집 개념

부담(Check Dam)을 이용한 탁수 처리

부담은 유속을 감소시켜 토사의 유출을 저감하는 최적관리기술(Best management practice; BMP)로 탁수가 이동하는 도랑이나 배수로 등에 설치된다. 미 교통국의 경우 부담 설치를 위해 바위부담(rock check dam)을 주로 사용해 왔으나 최근에는 분말 PAM을 적용하기 용이한 섬유질로 만들어진 섬유부담 (Fiber check dam)의 사용을 권장하고 있다 (그림 4). 섬유부담 제품으로는 섬유 물질에 따라 코코넛 나무 물질로 만들어진 로그 (coir log), 볏짚으로 만들어진 와틀 (straw wattle), 익셀시어로 만들어진 와틀(excelsior wattle) 등이 쓰이고 있다. 섬유부담 설치 과정에 대한 설명은 King and McLaughlin(2009)에 자세히 소개되어 있다. 섬유부담에는 주로 분말 형태의 PAM을 많이 사용하는데, 최적 응집 효과를 위해 통상 부담당 100 g의 PAM을 탁수가 지나갈 만한 곳에 뿌린다 (그림 5). 강우가 시작되면 뿌려진 PAM은

자동으로 수화(hydration)를 통해 활성화가 되며, 섬유 매트 표면에 젤형태로 패치(patch)를 형성하게 된다. 현장 적용 시 중요한 점은 각 부땀간의 거리가 이전 부땀에서 탁수가 고여 있을 경우 다음 부땀 바닥 이상으로 고여있지 않도록 하는 것이다. 부땀 앞면에서는 낙차와 충돌에 의해 탁수와 PAM간의 교반이 일어나게 되며, 부땀 뒤에서는 침전의 기회를 갖게 된다. 실제 노스캐롤라이나 도로 공사 배수로에 적용된 사례를 보면 PAM 없이 바위 부땀만을 사용할 경우 3800 NTU가 넘는 탁수를 방류했으나, PAM을 이용한 섬유부땀의 경우 그 방류수 탁도는 98% 이상 감소된 50 NTU 이하로 나타났다 (McLaughlin et al., 2009). 본 사례에 따르면 자갈부땀에서 PAM을 이용한 섬유 부땀 BMP로 전환할 경우 새롭게 제정된 탁도 기준 (280 NTU) 이하로 방류수 수준을 맞출 수 있



그림 4. 도로 공사 측면 배수로에 설치된 부땀들

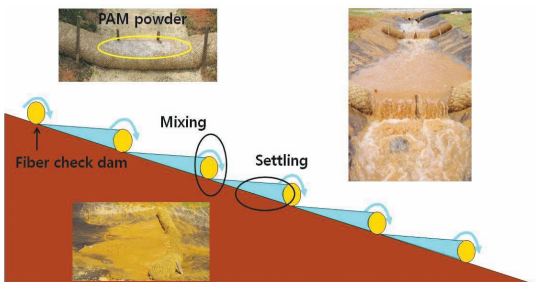


그림 5. 섬유 부땀을 이용한 탁수 처리

을 것으로 예상된다. 또한 침강 확보를 위해 다음에 소개될 침사지 혹은 토사탈수백과 연계된 BMP의 경우 더 나은 탁도 저감 효율을 얻을 수 있을 것이다.

침사지(Settling basin)를 이용한 탁수 처리

일반적으로 침사지는 택지 공사와 같은 평면 공사 현장에서 최종 방류 직전에 토사 및 부유 물질을 모아 침전시키는 용도로 쓰인다. 또한 지하 공사 및 교량 교각부 기초 공사를 위한 가시설 또는 가물막이를 공사하는 경우, 시설 내부에 지하수/하천수가 침투 되는데, 이 때에 별도의 침사조를 만들어 탁수를 처리하기도 한다. 일반적으로 침사지 내에서의 토사 체류시간은 24시간 이하이며, 이 때 많은 부분의 모래(sand)나 거대 미사(silt)들이 침전하게 된다. 하지만 미세 미사 및 점토의 경우 주어진 체류시간에 침전하지 않아 상등수는 여전히 혼탁한 것이 보통이다. 대규모 현장의 경우 흔히 ATS 방법으로 양수시에 액체상의 응집제를 주입하여 침사조 내에서 응집 침전을 한다 (그림 6). 소규모의 탁수를 처리할 때에는 연동펌프(peristaltic pump)를 이용해 응집제 주입을 하기도 한다. 하지만 최근 저비용의 PTS의 방법으로 처리하는 사례도 늘고 있는데, log 형태의 응집제(PAM log, GelFloc)를 탁수가 지나갈 만한 자리에 설치하고 일련의 교반·응집 반응을 침사조 내에서 일으킬 수 있



그림 6. 침사지 (settling basin) 탁수 처리에 사용되는 응집제 주입 장치

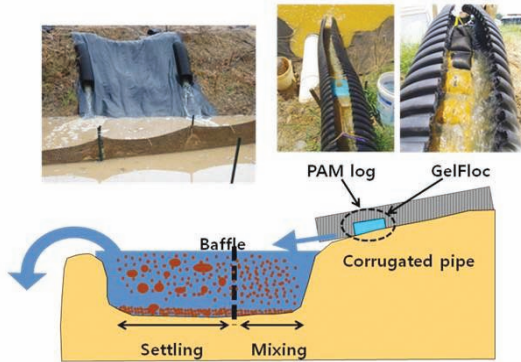


그림 7. PAM log 혹은 GelFloc(biopolymer)을 이용한 탁수 처리

다 (그림 7). Log형태의 응집제는 유입되는 유출수와 PAM간의 교반을 향상시키기 위해 흔히 굴곡 있는 파형관(corrugated pipe)에 설치된다. 침사지 내에는 다공성 배플(porous baffle)을 설치하여, 탁수가 침전지에 유입했을 시 발생하는 에너지를 분산시키는 역할을 한다. 이 때 PAM log에서 용해된 PAM 분자와 탁수 안에 있는 토양 입자들은 교반·응집되고, 다공성 배플 통과 후에는 플라크 형태로 침전하게 된다. PAM log를 파형관에 적용한 사례(Bhardwaj and McLaughlin, 2008)를 살펴보면 유입수 탁도(290 - 314 NTU)에 대해 침사조 내 다공성 배플 없이 처리할 경우 배출수 탁도는 70 NTU 이하로 감소하였고, 다공성 배플을 사용할 경우 배출수 탁도는 40 NTU 이하로 감소하였다. 한편 같은 농도의 탁수에 대해 소규모 ATS 방법인 휴대용 액체이송펌프(peristaltic pump)를 이용해 액상 PAM을 주입할 경우 근사한 수준의 탁도 저감이 이루어졌다 (약 50 NTU). 본 사례는 소규모 탁수 처리의 경우 PTS를 이용한 방법이 펌프를 이용한 ATS와 유사한 수준으로 탁도를 저감시킬 수 있다는 것을 보여준다.

침사지를 건설할 공간이 없거나 탁수를 양수하기가 어려운 상황에서는 침사지의 역할을 하는 토사탈수백(sediment dewatering bag)을 이용할 수 있다 (그림 8). 토사탈수백은 토목섬유(geotextile)로 제조되며, 다양한 크기로 판매되기 때문에 탁수 처리 용량에 따라 선택할 수 있다. Vetter and McLaughlin



그림 8. 토사 탈수백 (Sediment dewatering bag)을 이용한 탁수 처리

(2006)에 따르면 토사 탈수백 경우에도 응집제 도움 없이는 원수 탁도(400?600 NTU) 대비 그 탁도 저감 효율이 20%에 불과했다. 하지만 PAM과 함께 사용했을 때는 토사탈수백의 섬유공 (sieve size)보다 큰 플라크 입자가 형성되어 대부분 여과 처리 되므로 배출수의 탁도가 98 % (15 NTU 이하)로 감소되었다고 보고 되었다. 본 사례는 토사 필터백을 이용한 탁수 처리시에도 PAM 처리를 해야만 고효율의 탁도 저감을 이룰 수 있다는 것을 보여준다.

국내 현장 별 특성에 따른 탁수 처리 기술 적용성 검토

국내 건설 현장에서 탁수 유출이 발생하고 이에 대한 제어가 필요한 현장은 표 2와 같이 나열할 수 있으며, 각 현장에 대한 적절한 처리 방법에 대한 의견을 제시 하였다. 일반적으로 살펴보면 간헐적으로 발생하는 저용량 탁수 처리를 위해서는 비용이 적게 드는 PTS 사용이 적절한 반면, 대용량으로 장기간 처리를 해야 할 경우 정확한 응집제 주입과 수질 모니터링을 함께 병행할 수 있는 ATS 기술이 바람직하겠다. 또한 토양 침식이 빈번하고 고농도의 탁수가 발생하는 현장의 경우 두 기술을 통합하여 PTS를 통한 전처리, 그리고 최종 유출 직전에 ATS으로 처리하는 방법이 적절하겠다. 단, 실제 건설 현장은 제시된 내용 보

표 2. 건설 현장 특성에 따른 적용 가능 기술 형식

현장 종류	현장 특성	적용 가능 기술 형식
도로/철도	<ul style="list-style-type: none"> - 절토 경사면이 많아 빗물 유실에 의한 탁수 유출 부하 높음 - 공사 부지 내 침사지 활용 가능 부지 적음 (부지 내 건설 장비 이동이 많아 부지 외에서 탁수 처리 가능) 	<ul style="list-style-type: none"> - 토사 유실 방지 시설 적용 필요 (토사 유출 제어 시설 설치 공간 부족) - 차집/처리 공간 작아 PTS 기술 적절
항만/단지	<ul style="list-style-type: none"> - 부지 경사가 완만해 단위 면적당 토사 유실량이 작으나, 상대적으로 면적이 넓어 강우시 유출 유량 많음 - 재해 목적 저류지, 침사지 등 차집 가능 및 집중 처리 가능 구간 많음 	<ul style="list-style-type: none"> - 침사지 공간 확보 필요 (집중 호우 시, 탁수 유출 유량 많음) - 다지점, 분산형 PTS 기술 적용 - 고유량 시, ATS 기술 적용
도심건축	<ul style="list-style-type: none"> - 지하 토목 공사로 지하수 유입에 의한 탁수 유출 - 탁수 처리 부지가 협소하고, 토목 장비 사용 위해 탁수 외부 반출 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 처리시설 활용 부지가 매우 협소함 - 탁수 처리 민원이 빈번하여, 수질 보증 가능한 ATS기술이 적절
골프장	<ul style="list-style-type: none"> - 산지에 조성되는 경우가 많아, 급경사지에 발생하는 탁수 부하가 매우 높음 - 공사 기간 대부분(별개제근, 조형 공정) 탁수 유출에 대한 위험도 높음. - 수질 양호한 계곡/개천으로 유입되어 탁수 유입에 의한 수질 변동 민감도 높음 	<ul style="list-style-type: none"> - 급경사 조건으로 탁수 유출 유속이 매우 빠르고, 절토/성토 지역 변화가 많아 전처리 토사 유출 저감 시설 적용이 난해함 - 최종 침사지 유입 전 PTS를 통한 사전 처리 - 최종 침사지 이후 ATS 적용 (적정 처리 수질 확보)
준설/매립	<ul style="list-style-type: none"> - 강우에 관계 없이, 항상 탁수 발생 - 해안 준설/매립 시 미세 점토로 인한 혼탁수 발생 및 유량 매우 높음 - 탁수가 직접 수계로 유입됨에 따라 수질 변동 민감도 높음 	<ul style="list-style-type: none"> - 대규모 침사지 적용 필요 - 고유량 탁수 유출로 PTS 기술로만은 부족함 - ATS 기술을 중심으로 부가적으로 PTS 이용

다 공사 형식, 부지 특성 등에 따라 다양한 변수가 발생할 수 있으므로, 건설 현장 환경 관리자의 올바른 기술적 판단이 필요하다.

맺음말

본문에 소개된 PAM을 이용한 탁도 저감 기술은 현재 미국 환경부에서 선택한 모델 PTS 기술로서 ATS 기술과 더불어 국내 건설사업장에서 발생하는 비점오염원 관리 분야에 시사하는 바가 크다. 국내에서는 공사 후에 발생하는 비점오염원에 대해 수질환경보전법에 의거 비점오염원 방지시설 설치를 의무화하고 있다. 하지만 공사 중 발생하는 비점오염원에 대한 규제는 미비하여 적절한 관리가 이루어지지 않고

있다 (최영화, 2009). 미국의 경우 국내와 유사하게 수질오염총량관리제에 실시하고 있으며 최근에는 비점오염원의 지표가 될 수 있는 탁도에 대한 규제를 모든 건설사업장에 적용하였다. 국내에서도 2007년 이후 건설환경기본계획(국토해양부, 2007)을 통해 건설사업장 내 토사 및 오염물질 유출 방지를 7대 추진전략으로 계획한 바 있어, 향후 현장에서 발생하는 비점오염원에 대한 법규 및 규제가 마련될 것으로 예상된다. 따라서 차후 계획 수립 및 정책 입안 시 미국의 탁도 규제를 선례로 삼을 필요가 있으며, 현재 국내 건설현장에 맞는 BMP를 고안 할 필요가 있다. 이와 더불어 4대강 준설과 관련해 일부 구간에서 제기되는 탁수 유출과 향후 지류 사업과 관련해 본 기술을 적용할 수 있는지 예비 조사가 필요하다고 하겠다. 🌊

참고문헌

1. US EPA (U.S.EnvironmentalProtectionAgency). 2009. Development document for final effluent guidelines and standards for the construction and development Category (EPA-821-R-09-010). Washington,DC.
2. Pitt, R., S.E. Clark, and D. Lake. 2007. Construction site erosion and sediment controls. DESTech Publications, Lancaster, PA.
3. Sojka, R.E., D.L. Bjorneberg, J.A. Entry, R.D. Lentz, and W.J. Orts. 2007. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. *Advances in Agronomy*. 92:75?162.
4. Line, D.E., and N.M. White. 2001. Efficiencies of temporary sediment traps on two North Carolina construction sites. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*44(5):1207-1215.
5. McCaleb, M. M., and R. A. McLaughlin. 2008. Sediment trapping by five different sediment detention devices on construction sites. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering* 51(5): 1613-1621.
6. McLaughlin, R.A., and N. Bartholomew. 2007. Effects of polyacrylamide and soil properties on flocculation. *Soil Science Society of America Journal* 71(2): 537-544.
7. McLaughlin R.A., S.E. King, G.D. Jennings. 2009. Improving construction site runoff quality with fiber check dams and polyacrylamide. *Journal of Soil and Water Conservation* 64(2):144-154.
8. 최용범, 최봉수, 김세원, 이상수, 옥용식. 2010. “고랭지 밭 토양유실 방지를 위한 폴리머 소재(폴리아크릴 아마이드 및 바이오폴리머)의 현장적용성 평가: 작물재배실험”, *대한환경공학회지* 32(11):1024-1029.
9. King, S. E., and R. A. McLaughlin. 2009. SoilFacts: Fiber check dams and polyacrylamide for water quality improvement. North Carolina Cooperative Extension Service AG-439-71-W.
10. McLaughlin, R.A., and M. M. McCaleb, 2010. Passive Treatment to meet the EPA turbidity limit. TMDL 2010: Watershed Management to Improve Water Quality. November 14-17, 2010, Baltimore, MDUSA. Chaubey and Yagoweds. StJoseph, MI :American Society of Agricultural and Biological Engineering, Publication Number711P0710cd.
11. Bhardwaj, A.J., and R.A. McLaughlin. 2008. Simply polyacrylamide dosing systems for turbidity reduction in stilling basins. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering* 51(5): 1653-1662.
12. Vetter, J.W. and R.A. McLaughlin. 2006. Chemical treatment to reduce turbidity in borrow pit discharges. World Congress of Soil Science, July 10-14, Philadelphia,PA,USA.
13. 최영화, 2010. 건설 현장 내 비점오염원 처리 시설의 제거 특성 평가. *한국방재학회지* 9(2):52-60.
14. 국토해양부, 2007. 제2차 건설환경기본계획, pp 63-109.