

나선형 부유 고분자 여재의 Coalescence 특성을 이용한 비점오염원 저감시설의 유수분리특성 연구

강성원 · 김석구 · 김영임 · 윤상린 · 김수혜* · 김미경†,**

한국건설기술연구원 첨단환경연구실 · *(주)해동에이앤씨 · **국립환경과학원 한강물환경연구소

(2007년 7월 11일 접수, 2007년 8월 6일 채택)

A Study on the Characteristics of Oil-water Separation in Non-point Source Control Facility by Coalescence Mechanism of Spiral Buoyant Media

Sung-Won Kang · Seog-Ku Kim · Young-Im Kim · Sang-Leen Yun · Soo-Hae-Kim* · Mee-Kyung Kim†,**

Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology · *HAE-DONG A&C

**Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT : Non-point source control system which had been designed only for oil-water separation in the fields of oil refinery and garage was upgraded in this research for the removal of runoff pollutants in impervious urban area. Pollutants including oil from driveway and bridge were eliminated by two types of pathway in the system. One is the coalescence mechanism that the oil droplets in the runoff come into contact with each other in the spiral buoyant media surface and form larger coalesced droplets of oil that are carried upstream to the oil layer. The other is the precipitation that solids in runoff were settled by gravity in the system. In this research, coalescing characteristics of oil and water separation were investigated through image analyses, and efficiencies of the non-point source control system were evaluated using dust in driveway and waste engine oil. Media made of high density and high molecular weight polyethylene was indeterminate helical shape and had sleek surface by analysing SEM photographs and BET. Surface area and specific gravity of media which were measured directly were 1,428 mm² and 45.3 kg/m³ respectively. From the image analyses of the oil droplets photographs which were taken by using microscope, it was proved clearly that the coalescence was the main pathway in the removal of oil from the runoff. Finally, the performances of the non-point source control system filled up with the media were suspended solid 86.6~95.2%, COD_{Cr} 87.3~95.4%, n-Hexane extractable materials 71.8~94.8% respectively.

Key Words : Coalescence, Oil/water Separation, Non-Point Source, Droplet Size Distribution, Image Analysis

요약 : 본 연구에서 개발한 시스템은 기존에 사용되던 유수분리기를 유류가 혼입되어 발생하는 도로, 교량 등의 도시 불투수면 비점 오염저감장치로 업그레이드한 것으로서 유적입자가 coalescence 원리에 의하여 고밀도 고분자 폴리에틸렌 소재를 사용하여 제작된 메디아의 표면과 공간 사이를 타고 이동하면서 합체되어 유적의 크기가 증가한 후 부상하여 제거되는 기전과 SS 성분의 고형물이 침전에 의해 제거되는 원리를 이용한 도시 비점오염저감시설이다. 따라서 본 연구에서는 coalescence 기전을 통해 유수분리가 일어나는 나선형 고분자 여재의 유수분리 특성을 image analysis를 통해 규명하였으며 또한 도로노면 먼지와 폐엔진오일을 이용하여 비점오염원 저감시설에 유입되는 폐수를 모사하여 비점오염원 저감시설의 유수분리 성능을 실험하였다. 연구에 사용된 여재는 부정형의 투명한 나선형 구조를 갖고 있으며, SEM 사진 및 BET 측정 결과 매끄러운 표면 특성을 나타내고 있다. 직접 측정 방법으로 여재의 표면적을 측정한 결과, 여재 1립당 표면적은 1,428 mm²로 나타났으며, 단위당 중량은 45.3 kg/m³로 조사되었다. 또한 폐수 내 기름 입자의 액적크기를 현미경으로 촬영하여 이미지 분석을 수행한 결과, 메디아를 통한 폐수내 기름성분의 제거가 coalescence에 의해 일어나고 있음을 증명하였다. 마지막으로 나선형 부유 메디아를 적용한 비점오염저감시설의 성능평가 결과, 유량이 따라서 부유성 고형물은 86.6~95.2%, COD_{Cr} 87.3~95.4%, n-Hexane 추출물 71.8~94.8%의 제거효율을 나타내어 본 장치의 처리성능은 기존의 비점오염원 저감시설의 처리대상물질인 유기물과 부유물질 뿐만 아니라 유류의 제거에도 효과적인 것으로 평가되었다.

주제어 : 합체, 유수분리, 비점오염원, 유적크기분포, 이미지 분석

1. 서론

현재까지 우리나라의 수질오염관리는 주로 점오염원을 중심으로 이루어져 왔으며, 하수처리장 증설 및 하수관거정비

사업으로 대표되는 점오염원 위주의 수질정책은 사실상 한계에 도달한 것으로 사료된다. 우리나라 4대강의 비점오염원에 의한 오염부하는 약 22~37%인 것으로 보고되고 있으며 특히 팔당 상수원의 경우, 오염 부하의 44.5%가 비점오염원에 의한 것이며 향후 증가추세에 있는 것으로 예측되고 있다. 즉, 오염원의 관리가 일정 수준에 도달하면서 비점오염물질이 차지하는 비중이 상대적으로 증가하여 비점오염원의

† Corresponding author
E-mail: mkkim@mc.go.kr
Tel: 031-772-1467

Fax: 031-772-1468

처리 없이는 수질 기준을 만족할 수 없는 시점에 이르렀으며, 비점오염원에 대해 집중적 관리를 하지 않는다면 2020년에는 380.9 톤/일(BOD 기준)까지 증가할 것으로 전망되었다.¹⁾ 최근 정부는 비점오염물질 제어의 중요성을 인식하여 2004년부터 “4대강 비점오염관리 종합대책”을 추진하면서 비점오염 제어시설 시범사업을 진행 중이며, 2006년 4월부터 비점오염물질에 대한 내용이 대폭 반영된 “수질환경 보전법”이 본격 시행됨에 따라 주요개발사업 및 사업장에 대한 비점오염방지시설 설치가 의무화되었다.

도로노면의 비점오염은 강우유출이 크다는 특성과 함께 차량에 의한 지속적인 오염의 축적과 first flush effect가 명확히 나타나는 특징이 있으며, 강우시 유류와 중금속 등과 함께 다량의 입자상 물질을 유출시키는 것으로 알려져 있다.^{2,3)} 이러한 비점오염원의 처리는 오염원에서 멀어질수록 처리가 어렵고 처리비용이 증가하기 때문에 비점오염의 발생원에서 처리하는 것이 바람직하며, 비점오염원이 일단 강우 유출수나 지표수로 유입되면 관리는 더욱 어려워진다.⁴⁾ 이와 같은 도로노면 등 도시지역에서 발생하는 비점오염원을 처리하기 위해 고안된 처리시설은 크게 저류형, 침투형, 식생형 그리고 초기우수의 직접 처리를 위해 개발된 장치형 등으로 대별된다. 이 중 장치형 비점오염원 처리시설로는 Stormceptor, Stormfilter, CDS(Continuous Deflective Separation), Stormsys, Eco-Tank 등이 있다.⁵⁾ 도로에서 배출되는 비점오염원 중 자동차로부터 기인되는 유류는 기존의 부유성 입자물질의 제거에 초점을 맞춘 시설로는 처리되기 어려우며 소량의 유출로도 수계 환경과 심미적 영향이 크다는 특징이 있으며 특히 PAH와 같은 물질이 함유되어 있어 더 많은 관심과 주의가 필요하다.

일반적으로 기름이 포함된 폐수의 우수분리는 기름과 물의 비중차에 의해 제거되거나 친유성 소재를 이용한 흡착에 의해 제거, 그리고 원심분리와 여과에 의한 제거방법이 일반적으로 사용된다. Coalescence(합체)를 이용한 우수분리도 물과 기름의 비중차에 의한 원리에 기초하고 있다.⁶⁻⁸⁾ 유류가 포함된 폐수로부터 기름은 Stoke's Law에 따른 속도로 제거되며, 기름 입자의 부상 혹은 침전 속도는 기름입자 크기와 입자간의 간격에 따라 예측 가능하다. 본 연구에서 제안한 시스템은 기존에 사용되던 우수분리기를 유류가 혼입되어 발생하는 도로, 교량 등의 도시 불투수면 비점오염저감장치로 업그레이드한 것으로서 유적입자가 coalescence 원리에 의하여 고밀도 고분자 폴리에틸렌 소재를 사용하여 제작된 매디아의 표면과 공간 사이를 타고 이동하면서 합체되어 유적의 크기가 증가한 후 부상하여 제거되는 기전과 SS 성분의 고형물이 침전에 의해 제거되는 원리를 이용한 도시 비점오염저감시설이다.

본 연구에서는 나선형의 부유성 여재의 coalescence에 의한 오일제거 기전을 규명하며 전술한 시스템의 처리성능을 시험하여 도시비점오염저감시설의 성능을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 coalescence 기전을 통해 우수분리가 일어나는 나선형 고분자 여재의 특성을 image analysis를 통해 규명하였으며, 도로노면 먼지와 폐엔진오일을 이용하여 비점오염원 저감시설에 유입되는 폐수를 모사하여 비점오염원 저감시설의 우수분리 성능을 실험하였다.

2.1. 여재 특성 및 우수분리 특성 규명 실험

여재의 표면 특성 파악을 위하여 BET 측정과 직접 측정 방법을 통하여 표면적을 측정하였으며 SEM으로 여재의 표면 사진을 촬영하였다. 여재의 표면적은 단위당 표면적을 규정하기 위하여 W 100 mm × L 100 mm × H 100 mm의 20개의 시료군(단위 군당 시료의 중량은 45.3 g)을 조성하여 측정하였다. 각 시료군에서 임의의 여재 105개를 취하여 폭과 길이를 실제 측정된 값을 원 데이터로 하여 Mathematica 5.1 프로그램을 이용하여 시료군의 단위 부피당 중량 및 표면적을 환산하였다. 여재는 첨가물이 없는 고밀도 고분자 polyethylene 소재로 제작되었으며 여재의 물리 화학적 특성은 Table 1과 같다.

Polyethylene 소재의 나선형 고분자 여재의 우수분리를 coalescence 기전에 의한 것으로 보고 이를 규명하기 위해서 별도의 반응기를 제작하여 폐엔진오일을 이용한 유류폐수를 조제하여 반응기에 유입시키며 유입폐수와 여재층 통과 후의 시료 그리고 최종 유출수를 각각 채취하여 오일입자의 크기와 분포를 조사하였다. 오일입자의 크기와 분포는 광학현미경(Axioskop 2 plus, Zeiss)을 이용하여 촬영한 사진을 대표적 image analysis 프로그램인 Image-Pro Plus system(Media cybernetics company)을 이용하여 분석하였으며 입자를 계수하였다.

2.2. 우수분리 성능실험

본 연구에서는 강우유출수내 비점오염원을 제거하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 이용하여 유류 및 먼지 등의 고형물이 포함된 인공 도로노면 유출수의 처리성능을 평가하였다. 장치는 오염과 부식을 방지하기 위해 약 1.2 m³ 용적의 스텐레스 스틸로 제작되었으며, 유입부에 분배판을 두어 폐수의 short-circuiting을 방지하고 폐수 내 함유되어 있는 고형물질의 침전을 유도한 후, 첫 번째 여재층인 silt chamber

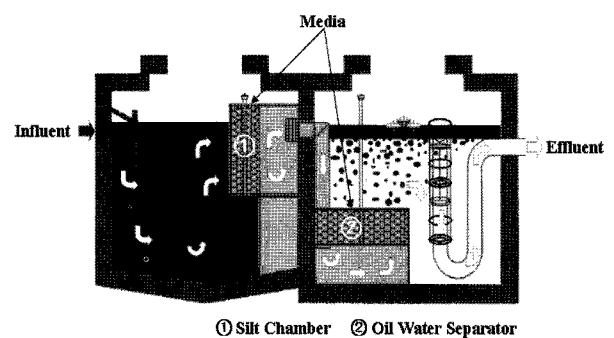


Fig. 1. Schematic diagram of the non-point source control system with the media.

Table 1. Physical, mechanical, thermal and electrical properties of raw material of the spiral buoyant media

	Items	Value	Unit	Test Standard
Physical properties	Density	930	kg/m ³	ISO 1183
	Mass melt-flow rate (MFR) 190°C/21.6 kg	<0.1	g/10 min	ISO 1133
	Water absorption (23°C-sat)	<0.01	%	ISO 62
	Humidity absorption (23°C/50%RH)	<0.01	%	ISO 62
	Elongational Stress F (150/10)	0.51	MPa	ISO 11542-2
	Intrinsic viscosity	3150	mL/g	ISO 1628-3
	Viscosity number	3850	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628
Mechanical properties	Tensile modulus (1 mm/min)	680	MPa	ISO 527-2/1A
	Tensile stress at yield (50 mm/min)	17	MPa	ISO 527-2/1A
	Tensile strain at yield (50 mm/min)	20	%	ISO 527-2/1A
	Nominal strain at break (50 mm/min)	>50	%	ISO 527-2/1A
	Tensile creep modulus (1 h)	430	MPa	ISO 899-1
	Tensile creep modulus (1,000 h)	220	MPa	ISO 899-1
	Charpy impact strength (14°V-notch both sides)	130	kJ/m ²	ISO 11542-2
	Shore hardness D scale 15 sec value	61	-	ISO 868
	Ball indentation hardness 30 sec value	35	N/mm ²	ISO 2039-1
	Wear by sand slurry method (based on GUR 4120=100)	80	-	Internal
Thermal properties	DTUL @ 1.8 MPa	42	°C	ISO 75-1/-2
	DTUL @ 0.45 MPa	65	°C	ISO 75-1/-2
	Vicat softening temperature B50 (50°C/h 50N)	80	°C	ISO 306
	Coeff.of linear therm. expansion (parallel)	2	E-4/°C	ISO 11359-2
	Flammability @1.6mm nom. thickn. thickness tested (1.6)	HB 1.6	class mm	UL94 UL94
	Thermal conductivity at 23°C	0.41	W/(m K)	Internal
	Specific heat at 23°C	1.84	kJ/(kg-°K)	Internal
	Electrical properties	Relative permittivity - 100 Hz	2.1	-
Relative permittivity - 1 MHz		3	-	IEC 60250
Dissipation factor - 100 Hz		3.9	E-4	IEC 60250
Dissipation factor - 1 MHz		10	E-4	IEC 60250
Volume resistivity		>1E12	Ohm*m	IEC 60093
Surface resistivity		>1E12	Ohm	IEC 60093
Electric strength		45	kV/mm	IEC 60243-1
Comparative tracking index CTI		600	-	IEC 60112

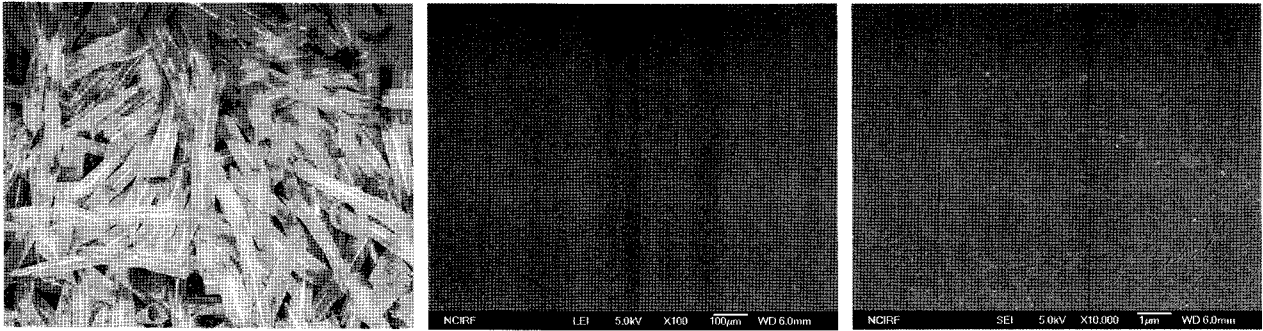
에서 SS 성분을 침전에 의해 제거하고 두 번째 여재층에서 coalescence를 유도하여 폐수 내 포함되어 있는 기름을 제거한 후 기름층 하부의 처리수를 배출하도록 한 시스템이며, 반응기 위에 부상되어 분리된 기름은 정기적으로 제거하였다.

본 실험에 사용된 폐수는 자동차 폐엔진오일과 도로노면에서 수거한 먼지(수거된 먼지는 200 µm 입도의 체로 채거름하여 200 µm 이하의 먼지를 24시간 건조기에서 건조하여 제조)를 수돗물에 혼합하여 제조하였다. 제조된 인공폐수는 masterflex pump를 이용하여 체류시간(5~60분)을 변화시키며 반응기로 유입하였다. 본 장치의 성능실험은 2006년 10월부터 2007년 2월까지 평균 주2회 수행되었으며 유입부와 유출부에서 채취한 시료는 n-Hexane 추출물질, COD_{Cr}, SS를 수질오염공정시험법⁹⁾과 Standard Methods¹⁰⁾에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여재 특성

본 연구에 사용된 여재의 형상은 Fig. 2(a)와 같은 투명한 나선형의 구조를 갖고 있으며 그 크기와 모양이 다양하고 부유성의 특징을 지니고 있다. 여재의 표면특성을 파악하기 위하여 SEM 사진을 촬영한 결과는 Fig. 2의 (b), (c)와 같이 매끄러운 표면 특성을 나타내고 있으며, 표면적 계산을 위해 BET 측정장치를 이용하여 여재의 비표면적을 측정한 결과, SEM 사진에서 본 것과 같이 여재의 표면에 공극이 존재하지 않고 매끄러운 재질로 제작되어 측정 불가능한 것으로 나타났다. 직접 측정의 방법으로 여재의 표면적을 측정한 결과는 여재 1립당 표면적은 1,428 mm²로 나타났으며, 이를



(a) Shape of the spiral buoyant media (b) SEM photograph of a media($\times 100$) (c) SEM photograph of a media($\times 10,000$)
Fig. 2. External shape and surface characteristics of the media.

단위 부피당 면적으로 환산하면 $711 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 단위 밀도는 $45.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 으로 각각 조사되었다.

연구에 사용된 유류폐수 내 기름 입자의 유적 크기를 현미경으로 촬영하여 이미지 분석을 수행하여 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 그림을 통해 확인한 바와 같이 유입수 내 포함된 기름액적은 대부분이 $50 \mu\text{m}$ 이하의 크기이며, 유입수 내

3.2. coalescence에 의한 기름입자 제거기전

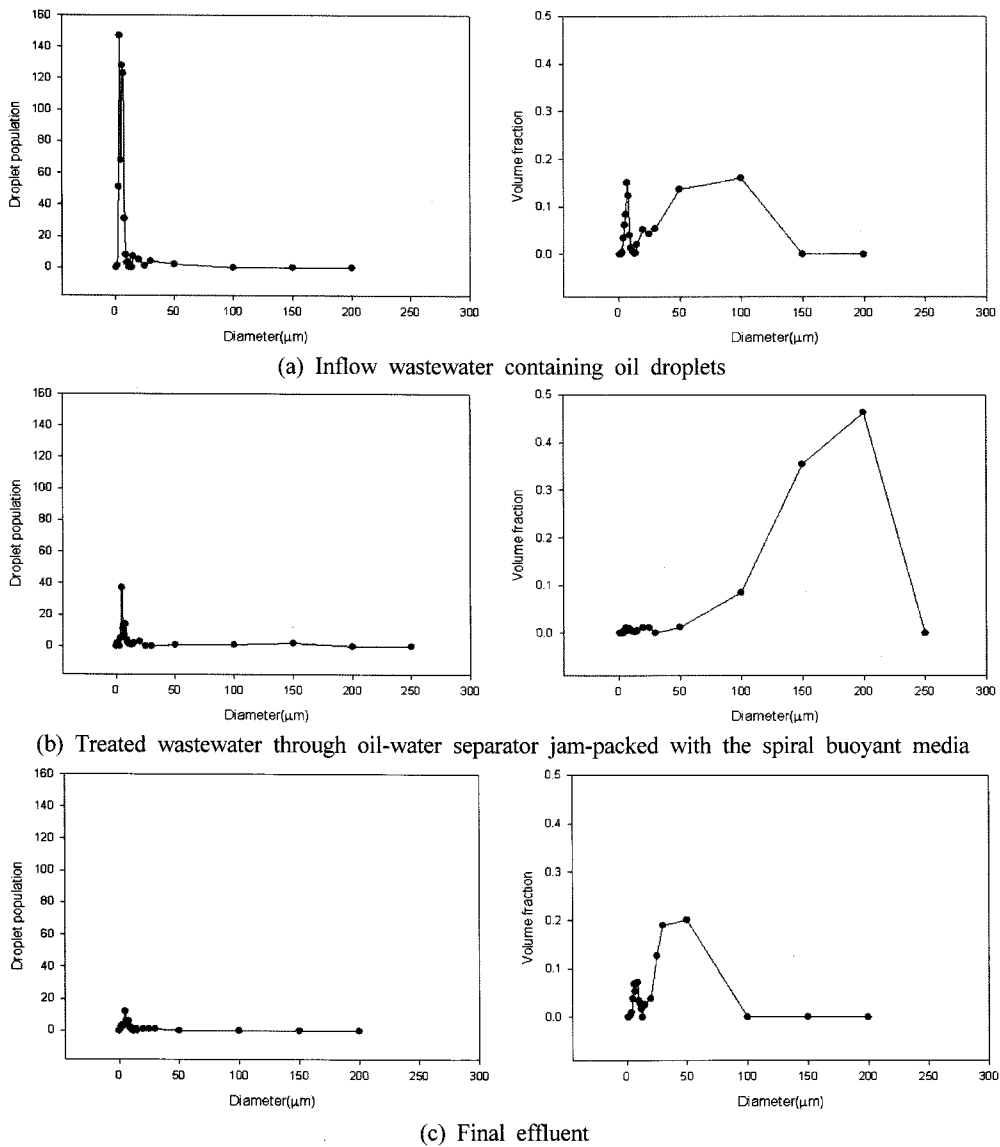


Fig. 3. Droplet size distribution and volume fraction from image analyses.

기름액적의 부피를 환산하여 부피분율을 도시한 결과는 Fig. 3(a)에 나타내었다. 이러한 유입수가 매디아 충전부를 통과하면서 나선형 부유 고분자여체에 의해 coalescence가 일어나 액적의 크기가 증가하여 직경이 큰 액적의 부피분율이 증가하고 있다(Fig. 3(b)). 즉, 매디아 충전부를 통과한 폐수 내에 포함된 기름입자 중 150~200 μm 범위의 입자들의 부피분율이 증가한 것으로 분석되었다. 최종적으로 유출수 내의 기름입자는 부상되어 불과 분리되어 최종 배출수내의 기름액적의 수가 크게 감소하고 있으며 유출수내 잔존한 액적의 크기도 10 μm 이하의 미세입자들인 것으로 나타났다(Fig. 3(c)). 이는 전술한 바와 같이 매디아를 통한 폐수 내 기름성분의 제거가 coalescence에 의해 일어나고 있음을 증명하였으며, 본 연구에서 사용된 매디아의 경우 효과적인 유류 제거 성능을 보이는 것으로 사료된다.

3.3 유수분리 및 고형물 분리 성능실험

실험에 사용된 폐수의 유입수질은 부유성 고형물 1,082~1,530 mg/L, COD_{Cr} 425~504 mg/L, n-Hexane 추출물 81.5~102.9 mg/L의 농도 범위를 나타내었다. 그리고 체류시간별 성능을 파악하기 위하여 유입유량을 0.1~0.9 m³/h(5 min~45 min)로 조절하면서 유수분리 및 고형물 분리 성능실험을 수행하여 n-Hexane 추출물, SS, COD_{Cr}에 대한 처리성능을 분석한 결과는 Fig. 4와 같다.

전반적으로 전체 평가항목에서 유입 유량의 증가에 따라 처리효율이 감소하는 경향을 보이면서 유출수 내 부유성 고형물 52.3~194.8 mg/L, COD_{Cr} 19.4~58.5 mg/L, n-Hexane 추출물 4.7~26.2 mg/L의 농도 범위를 나타내었다. 즉, 유량에 따라서 부유성 고형물은 86.6~95.2%, COD_{Cr} 87.3~95.4%, n-Hexane 추출물 71.8~94.8%의 제거효율을 나타내어 유량 증가 시 부유성 고형물이나 COD_{Cr}보다 n-Hexane 추출물의 제거 효율이 더 크게 영향을 받는 것으로 사료되었다.

결론적으로 coalescence 기전을 이용한 나선형 부유 고분자여체가 충전된 본 장치의 처리성능은 기존의 비점오염원 저감시설의 처리대상물질인 유기물과 부유물질 뿐만 아니라 유류의 제거에도 효과적인 것으로 평가되었다.¹¹⁾ 또한 본 시설의 운전 결과, 유류와 고형물 및 COD_{Cr}의 제거 효율을 고려하였을 때 유입유량 0.6 m³/h(체류시간 30 min)가 타당한 설계치인 것으로 판단된다.

4. 결론

1) 본 연구에 사용된 여체는 부정형의 투명한 나선형 구조를 갖고 있으며, SEM 사진 및 BET 측정 결과 매끄러운 표면 특성을 나타내고 있다. 직접 측정 방법으로 여체의 표면적을 측정한 결과, 여재 1립당 표면적은 1,428 mm²으로 나타났으며, 단위당 중량은 45.3 kg/m³으로 조사되었다.

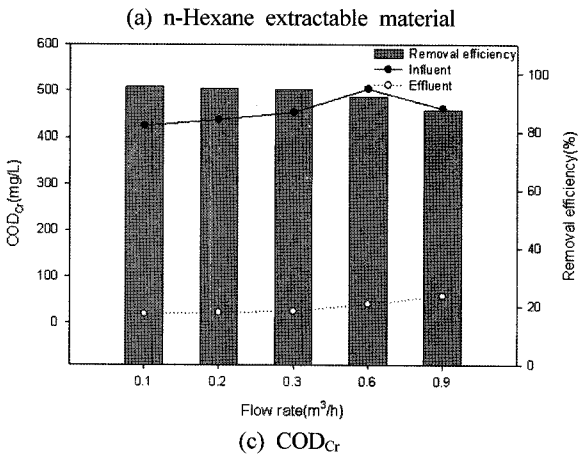
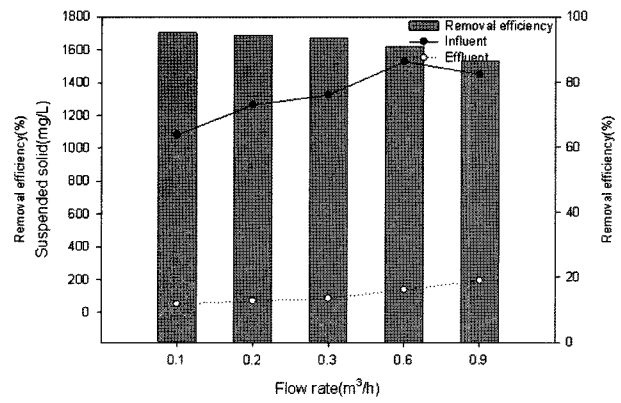
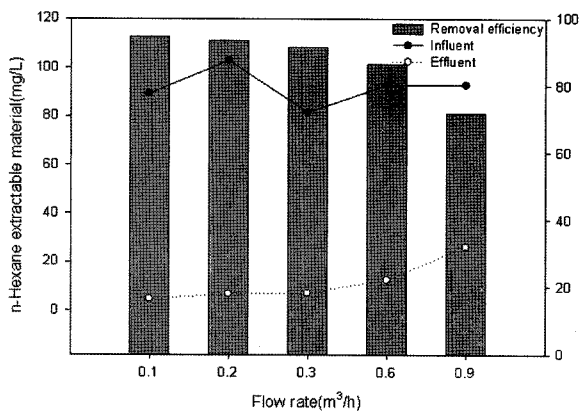


Fig. 4. Evaluation of non-point source control facility using coalescence mechanism of spiral buoyant media.

2) 폐수 내 기름 입자의 액적크기를 현미경으로 촬영하여 이미지 분석을 수행한 결과, 매디아를 통한 폐수 내 기름성분의 제거가 coalescence에 의해 일어나고 있음을 증명하였다.

3) 나선형 부유 매디아를 적용한 비점오염원저감시설의 성능평가 결과, 유량에 따라서 부유성 고형물은 86.6~95.2%, COD_{Cr} 87.3~95.4%, n-Hexane 추출물 71.8~94.8%의 제거 효율을 나타내어 본 장치의 처리성능은 기존의 비점오염원 저감시설의 처리대상물질인 유기물과 부유물질뿐만 아니라 유류의 제거에도 효과적인 것으로 평가되었다.

사 사

본 연구는 중소기업청의 “나선형 부유 고분자 여재를 이용한 비점오염방지시설 개발” 과제에 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 관계부처 공동(국무조정실, 행정자치부, 농림부, 산업자원부, 환경부, 건설교통부, 산림청), 4대강 비점오염원관리 종합대책(2004).
2. 김이형, 고석오, 이병식, 김성길, “국내 고속도로 강우 유출수의 EMCs 및 유출 부하량 산정,” 대한토목학회지 논문집, **26(2B)**, 225~231(2006).
3. 김석구, 강성원, 김영임, 윤상린, “도시지역 불투수면의

- 오염물질 유출특성 평가,” 대한환경공학회 추계학술발표회, pp. 813~818(2005).
4. 환경부(환경관리공단), 강우유출수관리매뉴얼 번역본(2004).
5. 최지용, 신창민, 비점오염원 유출 저감을 위한 우수 유출수 관리방안, KEI 연구보고서(2002).
6. Shin, C., Chase, G. G., and Reneker, D. H., “Recycled expanded polystyrene nanofibers applied in filter media,” *Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects*, **262**, 211~215(2005).
7. Deng, S., Bai, R., Chen, J. P., Jiang, Z., Yu, G., Zhou, F., and Chen, Z., “Produced water from polymer flooding process in crude oil extraction : characterization and treatment by a novel crossflow oil-water separator,” *Separation and Purification Technology*, **29**, 207~216(2002).
8. Sharifi, H. and Shav, J. M., “Secondary drop production in packed-bed coalescers,” *Chem. Eng. Sci.*, **51(21)**, 4817~4826(1996).
9. 환경부, 수질오염공정시험법(환경부고시 제2004-188호)(2004).
10. Clescerl, L. S., Greenberg, A. E., and Eaton, A. D., *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, American Public Health Association (1999).
11. 환경부, 비점오염원관리 업무편람(2006).