

ORIGINAL ARTICLE

그물망 압착식 섬유여과장치를 이용한 물 재이용 시스템 개발

김정숙 · 김미란 · 조명찬¹⁾ · 장정국^{1)*}

(주)케이이피, ¹⁾동서대학교 에너지환경공학과

Development of Water Reusing System by Using Net3FM (Net Fit Fiber Filter Module)

Jeongsook Kim, Mi-Ran Kim, Myung-Chan Jo¹⁾, Jeong-Gook Jang^{1)*}

KEEP Co., Ltd, 124 Dream E-Vally, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

¹⁾Department of Energy and Environment Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

Abstract

This study was carried out to develop pilot plant Net3FM(Net Fit Fiber Filter Module) system and to suggest optimum operating condition for municipal wastewater reuse. SS concentration of biologically treated sewage effluent was reduced from 1.5~5.4mg/L to 0.4~1.0mg/L without coagulant injection in Net3FM system, and the SS removal efficiency was average 84.7%. And also, the removal efficiencies of COD and T-P were decreased slightly due to the SS removal by filtration. Coagulation-Filtration test was conducted to enhance the removal efficiencies of SS and T-P. The optimum dosage of coagulant was injected automatically by auto-controlling system, which is controlled by detecting value of turbidity of secondary sewage effluent. SS, COD and T-P concentrations in filtrated effluent were 0.21~0.57, 1.6~6.2 and 0.137~0.392mg/L with coagulant injection by in-line mixer in Net3FM system, respectively. The removal efficiencies of SS and T-P were highly increased to 92.8% and 89.8%, respectively. It was due to the combined the processes of coagulation and filtration. Net3FM system was evaluated that the removal efficiency of pollutants in secondary sewage effluent and the utilization potential as reclaimed water technology were very high.

Key words : Water reuse, Fiber filter, Coagulation, T-P removal

1. 서론

근래 들어 경제활동의 증가로 물 수요는 늘어나는 반면, 한정된 수자원으로 인해 물 순환 불균형이 초래되고 있는 실정이다. 따라서 정부에서는 정책적으로 하수처리수 재이용을 상수·하수에 이은 '제3의 물 산업(The 3rd Water Industry)'으로 육성할 계획에 있으며, 2016년까지 연간 12.4억톤의 물을 재이용하는

계획을 수립하여 진행하고 있다. '오염된 물의 고도처리 및 재사용 기술'의 개발은 수질환경개선 뿐만 아니라 정화된 물을 재사용할 수 있음으로써 수자원의 양적문제는 물론 질적 문제를 보완할 수 있는 측면에서 매우 중요하고 시급한 과제라 할 수 있다.

한편, 오·폐수 고도처리 기술 중 물리·화학적인 방법인 여과기술은 물의 고도처리는 물론 수자원 재이용 기술로도 적극적으로 활용되고 있다. 여과기술

Received 17 October, 2012; Revised 11 December, 2012;

Accepted 26 December, 2012

*Corresponding author : Jeong-Gook Jang, Department of Energy and Environment Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

Phone: +82-51-320-1792

E-mail: jgjang@gdsu.dongseo.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 다른 기술에 비하여 비교적 운전이 용이하며 시설 및 유지관리비가 저렴할 뿐만 아니라 막분리, 흡착 등의 처리와 연계하여 사용할 경우 타 시설의 성능을 향상시키고 유지관리를 용이하게 해줄 수 있어 매우 광범위하게 적용될 수 있는 기술이다(Yao 등, 1971; Lee 등, 2007). 여과기술 중 섬유여과는 일반적인 모래여과와 분리막을 이용한 정밀여과의 중간정도에 위치한 여과방식이다. 섬유여과는 모래여과에 비해 $0.5\mu\text{m}$ 정도의 작은 입径의 물질까지 높은 효율로 제거할 뿐만 아니라 막여과에 있어서 막 모듈의 오염문제 및 경제성 등의 단점을 해결한 방식이라고 평가받고 있다(Kang 등, 2004; Cha 등, 2005). 또한 섬유여과기술과 응집기술을 연계한 처리기술은 탁도 및 부유물질 제거성을 크게 향상시킬 뿐만 아니라 총인(T-P)의 제거에 탁월한 효과를 나타내고 있으며, BOD, COD 및 T-N도 일부 제거되는 특징이 있다(Chi, 1979)

따라서 본 연구에서는 기존 중력식 여과기의 단점을 보완한 섬유여과기술을 고안하였으며 이의 상용화를 위해 보다 경제적이고 효율적인 ‘상용화급 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템’을 개발하고 연속 장기운전을 통한 하수처리 방류수 재이용을 위한 최적 방

안을 제시하는 것이 목적이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치 제작

본 연구에서는 500 ton/day 규모의 상용화급 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템을 이용하여 하수방류수 내 오염물질 제거특성을 조사함으로써 본 시스템에 의한 하수방류수 재이용 가능성을 검토하고자 하였다. 상용화급 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템은 크게 응집공정과 섬유여과공정으로 구성되어 있다. 본 시스템의 응집공정은 약품탱크, 약품정량펌프, 무동력 관 혼화장치(In-line mixer), 혼화조로 구성되었으며, 무동력 관 혼화장치 전후의 압력차는 약 0.5 kg/cm^2 로 장치의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 시스템 내로의 하수방류수 유입은 수중펌프를 이용하여 공급하였으며, 정량펌프에 의해 약품탱크에서 이송된 일정량의 약품과 함께 무동력 관 혼화장치를 통해 혼합조로 공급되도록 하였다. 혼화조 내에서 일정시간 체류한 하수방류수는 그물망 압착식 섬유여과장치로 공급하였으며, 보다 간단한 시스템 구성을 위해 혼화조 크기를 줄일 수 있도록

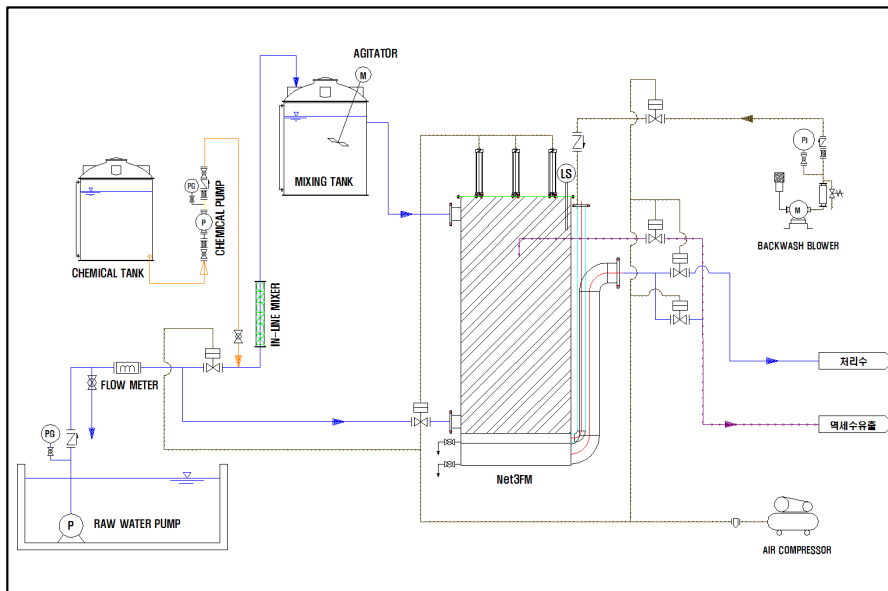


Fig. 1. Flow diagram of pore controllable Net3FM System.

별도의 실험실 테스트(lab-test)를 통해 혼화조 내 최적 체류시간을 2.5분으로 설정하였다.

본 시스템의 섬유여과공정에는 공극제어형 그물망 압착식 섬유여과장치를 적용하였다. 공극제어형 그물망 압착식 섬유여과장치는 여재인 섬유사 다발을 여과장치 내부의 다공관 주위에 설치하고 그물망으로 섬유사 전체를 조여 공극을 작게 한 후 부유물질을 함유한 원수를 통과시켜 깨끗한 여과수를 배출하는 장치이다. 이 장치는 기존 중력식 여과장치의 단점을 보완하여 여과 및 세척성을 향상시킬 목적으로 고안된 에너지 절약형 섬유여과기이다. 본 시스템은 하수방류수 재이용 공정으로의 적용가능성을 검토하기 위해 부산환경공단 N 하수처리장 내 최종침전지 후단에 설치하여 운전하였으며 부산시 N 하수처리장의 최종침전지에서 배출되는 방류수를 대상원수로 하였다.

2.2. 실험방법

본 개발대상 기술인 ‘상용화급 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템’의 성능평가는 부산시 N 하수처리장의 최종침전지에서 배출되는 방류수를 대상으로 실시하였으며 부유물질, 탁도, COD 및 T-P 등의 제거효율을 검토하였다. 본 연구에서 사용한 그물망 압착식 섬유여과장치(Pore controllable Net Fit Fiber Filter Module: Net3FM)는 처리용량 500 ton/day, 여과속도 200 m/day로 운전하였다. 여과공정은 응집제 주입 유·무에 따라 운전하여 그물망 압착식 섬유여과장치의 유출수 특성을 평가하였다. 응집제 주입은 급속혼화를 위한 탱크를 설치하지 않고, 여과 전단계에 in-line mixer를 설치하여 운전하였으며 응집제는 jar test를 통하여 선정된 응집제를 정량 펌프를 이용하여 주입하였다. 역세척은 물과 공기를 이용하였으며, 물과 공기가 동시에 주입되는 시간은 2분이다. 역세척률은 응집제를 주입하지 않을 경우에는 생산량의 약 0.7%를 사용하였으며, 응집제를 주입하는 경우에는 생산량의 약 4.2%를 사용하였다. 섬유여과장치의 운전 상태는 Table 1과 같다.

시료의 수질분석은 Standard method에 따랐으며, 인의 분석은 시료 채취 후 가능한 신속하게 측정하였다. 총인(T-P)은 과황산 소화법(Persulfate Digestion Method, Standard Method 4500-P.B 5)으로 시료를 산화하였

으며, 산화 후 추출된 정인산 이온(orthophosphate ion, PO_4^{3-})은 아스코르빈산법(Ascorbic Acid Method) (Standard Method 4500-PE)을 이용하여 측정하였으며 이때 측정 한계값은 0.01 mg P/L이다(APHA, 1992). 정인산염의 농도는 spectrophotometer(Shimadzu UV-1650 PC)를 사용하여 880nm의 파장에서 측정하였다.

Table 1. Experimental condition of Pore controllable Net Fiber Filter Module System

Item		Characteristics
Media	material	nylon
	filter module length(mm)	2,000
Flux($m^3/m^2/day$)		200
Backwash condition		water + air
Backwash time(min)		2

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염물질 제거 특성

고도처리를 위해 현장에서 주입되는 응집제의 농도는 대략 30~60 mg/L 정도로 알려져 있다(Kim 등, 2009). 본 연구에서는 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템의 유지관리비용을 절감하기 위한 방안으로, 기존 고도처리공정에 비해 보다 적은 양의 응집제 투입 시에도 T-P농도를 기준치 이하로 저감시킬 수 있는지를 검토하고자 하였다. Table 2는 정상상태에서의 운전결과를 나타낸 것이다. 응집과 여과 공정을 연계한 경우 오염물질의 제거효율은 여과공정 단독 운전에 비해 모든 항목의 평균제거 효율이 높게 나타났으며, 특히 T-P의 경우 응집제를 주입한 경우의 처리효율은 89.8%로 응집제를 주입하지 않은 경우의 17.4%에 비해 월등하게 높게 나타났다. 인이 AI 응집제에 의하여 제거되는 메커니즘은 수중 인의 화학적 형태, 농도 및 응집제 주입 시 생성되는 알루미늄 가수분해종의 종류에 따라서 달라지나 일반적으로 알루미늄과 인의 착화합물 생성, 알루미늄 침전물 표면에서의 흡착 및 고분자성 AI 가수분해종에 의한 콜로이드성 인의 정전기적 중화 등에 의해 제거된다.

섬유여과장치에 의해 오염된 물을 처리할 경우 부

유물질이나 탁도 등은 제거가 용이하나 인 성분의 경우 제거효율이 낮거나 거의 제거되지 않는다. 하수 방류수의 재이용을 위해서 방류수 내 T-P의 제거는 반드시 이루어져야 하며, 적정수준 이하로 T-P를 저감시키기 위해서는 응집과 여과공정이 함께 병행하여야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 응집제 주입에 따른 T-P 제거율을 평가하였다. 응집제는 일반적으로 현장에서 많이 사용하고 있는 PACI(Polyaluminum Chloride)를 사용하였다. 응집제 농도는 10, 30, 50, 70 mg/L가 되도록 주입하였으며 주입하지 않고 운전한 결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. T-P 제거율은 응집제 주입농도가 높을수록 증가하였으나 30 mg/L 이상에서는 거의 미미한 처리효율을 나타내었다. 응집제 농도를 20 mg/L로 주입한 경우의 유출수 T-P 농도는 0.221 mg/L로 나타났는데, 2012년 1월 1일부터 하수 처리용량 500 m³/day이상인 경우 T-P의 기준치는 지역별로 0.2~2 mg/L 이하로 적용되고 있으므로

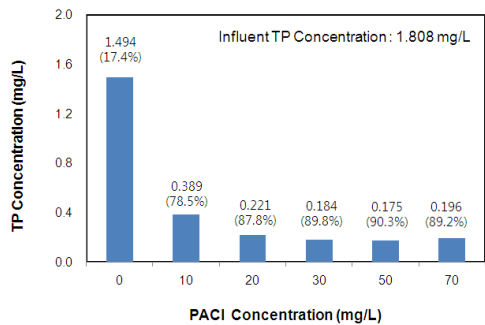


Fig. 2. Effect of PAC concentration on effluent T-P concentration.

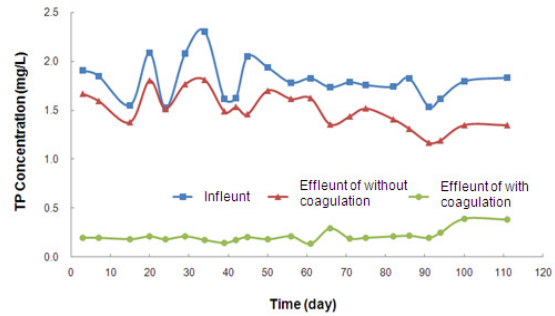


Fig. 3. Variation of effluent T-P concentration with coagulant injection.

지역의 기준에 맞추어 적절한 응집제량을 주입하여 운전하면 될 것으로 판단된다. Fig. 3은 정상상태에서의 응집공정과 섬유여과공정을 연계한 경우와 섬유여과공정만 단독으로 운전한 경우의 실험 결과를 비교한 것이다.

3.2. 역세주기 및 수량

일반적으로 여과공정의 지속시간은 유입수 수질에 따라 차이를 보이는데, 응집제를 투여하지 않은 상용 화급 그물망 압착식 섬유여과시스템은 역세공정을 거치지 않고 5시간 이상 연속운전이 가능한 것으로 나타났다. 이것은 증력식 섬유여과기(Gravity Flow Filter, GFF)의 약 1.24시간 보다 월등히 높은 것으로 장시간 여재의 막힘없이 여과가 지속됨을 알 수 있다 (Ministry of Environment, 2006) 장치의 연속운전 가능여부 판단기준은 처리수 유량변화량으로 설정하였으며, 처리유량이 초기 처리유량의 90% 이내로 감소하는 시점으로 판단하였다. 한편 응집공정을 연계하

Table 2. Summary of operating results at steady state condition

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)		Efficiency (%)	
		Without Coagulation	With Coagulation	Without Coagulation	With Coagulation
COD _{Mn}	6.7 (4.5~9.2)	5.4 (4.3~7.8)	3.3 (1.6~6.2)	19.4	50.7
SS	3.34 (1.52~5.44)	0.51 (0.38~1.03)	0.24 (0.21~0.57)	84.7	92.8
Turbidity (NTU)	1.90 (0.81~2.90)	0.42 (0.31~0.68)	0.20 (0.10~0.38)	77.9	89.5
T-P	1.808 (1.536~2.306)	1.494 (1.232~1.853)	0.184 (0.137~0.392)	17.4	89.8

여 실험한 상용화급 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템에서는 주입 응집제의 농도에 따라 차이가 있었으나 대체적으로 30분~2시간 사이에 처리수량이 감소하는 현상이 나타났다. 따라서, 인 제거를 위해 응집제를 투여할 시에는 섬유여과에 적절한 응집제 농도를 선정함과 동시에 응집제 농도에 따른 적정한 역세주기를 선정하여야 한다. 이에 대한 연구는 향후 계속해서 진행할 예정이다. 역세에 필요한 역세수량은 Table 3에 나타낸 바와 같이, 여과공정 단독 운전 시 역세수율은 원수유입량의 0.56~0.83%이지만 응집공정과 연계하여 사용할 경우에는 1.67~6.70%로 역세수량이 증가하였다. 중력식 섬유여과기와 모래여과기의 여과공정 단독 운전 시 역세수율은 각각 2.8, 5~15로 본 연구에 사용된 그물망 압착식 섬유여과시스템의 역세수율이 월등히 우수하다는 것을 알 수 있었다 (Kang 등, 2004).

Table 3. Backwashing cycle and flow rate

Item	Backwashing cycle	Backwashing flow rate ¹⁾
Without Coagulation	4~6 hr/cycle	0.56~0.83 %
With Coagulation	0.5~2 hr/cycle	1.67~6.70 %

1) Backwashing flow rate is defined that the flow rate percentage of backwashing to treated water.

3.3. 물 재이용을 위한 응집제 주입 자동제어 시스템 구축

물 재이용을 위한 응집제 주입 자동제어 시스템 구축은 장치의 상용화를 위한 필수불가결한 부분이다. 일반적으로 응집제 주입여부 및 주입량 결정은 T-P 농도에 따라 결정할 수 있으나, 탁도를 이용한 제어방법이 인 농도를 이용한 제어방법보다 재이용 시 더욱 적으로 사용할 수 있다. 따라서 본 연구를 수행하는 동안 유입수의 탁도에 따라 응집제가 주입되도록 하는 응집제 주입 자동제어 시스템을 구축하였다. 응집제 주입은 유입수 탁도 농도에 의해 설정되고 설정치 이하일 경우에는 응집제의 주입이 중단된다. 운전 중 설정치보다 높은 탁도의 유입수가 여과조내로 들어올 경우 자동적으로 응집제가 주입되며, 유입수 탁도 수준에 따라 운전 MODE I~III으로 구분하여 응집제가 주입되도록 구축하였다. 본 연구에서 구축된 응집제 주입 자동제어 시스템의 흐름도는 Fig. 4와 같다. 원수의 탁도가 설정치 A이하일 경우에는 응집제의 주입 없이 여과장치를 통과하게 된다. 여과처리를 거친 유출수의 탁도가 기준치를 만족하면 바로 방류되고 만족하지 못할 경우에는 응집제 주입 MODE I의 단계로 넘어가 저농도의 응집제가 주입되어 응집처리를 거치게 된다. 원수의 탁도가 설정치 A이상이고 B이하일 경우에는 응집제 주입 MODE I의 단계를 거치게 되고, 설정치 B이상일 경우에는 응집제 주입 MODE

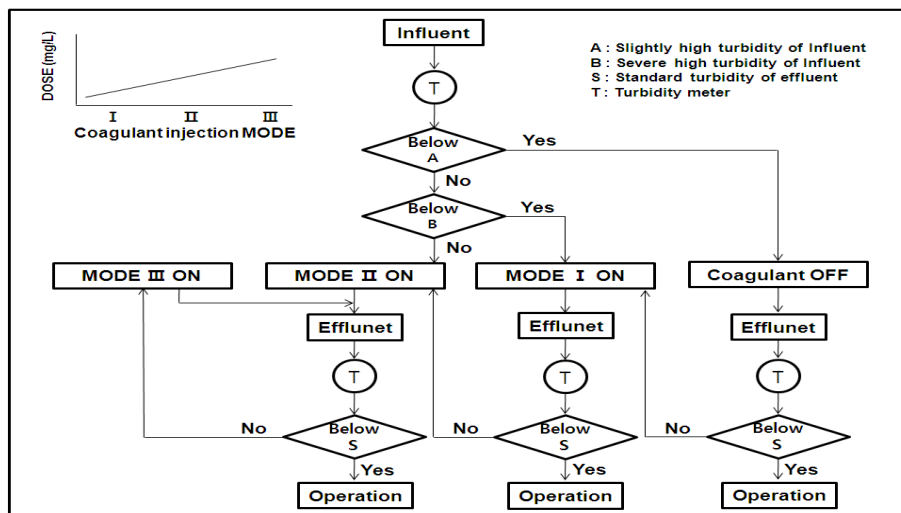


Fig. 4. Flow chart of auto-controlling system for reusing water.

II의 단계를 거치게 된다.

4. 결론

오염된 물의 고도처리 및 재사용 기술에 대한 수요가 증가하고 있는 현시점에서 기존 중력식 여과기의 단점을 보완하기 위하여 독자적인 기술로 개발한 그물망 압착식 응집-섬유여과장치의 상용화를 위한 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 기존 중력식 여과기의 단점을 보완하여 보다 경제적이고 효율적인 공극제어형 그물망 압착식 응집-섬유여과장치의 상용화 가능성을 제시하였으며, 하수처리장 방류수 처리 및 물 재이용 기술로의 활용가능성이 높다고 평가되었다.

2) 응집제를 투여하기 전의 상용화급 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템의 제거성능은 SS의 경우 하수 방류수 내 함유된 농도는 약 1.52~5.44 mg/L로 실험기간내 수질이 비교적 안정적이고 낮았으며, 여과처리수 내 SS 농도는 0.38~1.03 mg/L로 평균 84.7%의 처리효율을 나타냈다. 또한, COD 및 T-P 농도도 다소 저감되는 것으로 나타났는데, 이는 부유물질이 제거됨에 따라 나타난 결과라고 생각된다.

3) 응집공정과 여과공정을 연계한 하수 방류수 내 오염물질 제거성능은 하수 방류수의 COD_{Mn}, SS 및 T-P 농도가 각각 4.5~9.2, 1.52~5.44 및 1.536~2.306 mg/L였으나, 응집제를 주입한 후 유출수는 각각 1.6~6.2, 0.21~0.57 및 0.137~0.392로 나타났다. 그물망 압착식 섬유여과장치 운전 시 전 단계에 응집공정을 설치할 경우 총인 제거가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 응집공정을 병행할 경우 부유물질의 제거효율도 증가하는 것으로 나타났다.

4) 섬유여과장치의 역세공정시 섬유세척에 필요한 역세수량은 여과공정 단독 운전시에는 처리수량의 0.56~0.83%이나, 응집공정과 연계하여 사용할 경우에는 1.67~6.70%로 역세수량이 증가하였다.

5) 물 재이용을 위한 응집제 주입 ON/OFF을 제시하였으며, 유입수의 탁도에 따라 응집제가 주입되는 자동 제어시스템을 제안하였다.

참고 문헌

- APHA, 1992, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th den. American Publ. Hlth. Assoc, Washington, DC. U.S.A.
- Cha, J. H., Lee, J. J., Lee, J. H., Bae, S. B., Eo, S. K., Kim, C. W., 2005, Particle retention and Filtration characteristics of Fiber Filter, Proceedings of Korean Society of Evinronmental Engeers, 1464~1470
- Chi, T., Alkiviades, C. P., 1979, Advances in deep bed filtration, American Institute of Chemical Engineers, 25(5), 737-759.
- Kang, Y. B., Song, H. J., Park, T. G., 2004, Filtration Technology for the Effluent of Wastewater Treatment Plant using Twist (PCF) - Filter, Water treatment technology, 12(3), 55~61.
- Kim, D. J., Park, S. K., Lee, Y. H., Yang, H. C., 2009, Coagulation Characteristics of Wastewater Treatment Process Using Completely Mixed Chamber, Korea marine engineering academic journal, 33(8), 1187~1195.
- Lee, J. J., Im, J. H., BenAim, R., Kim, J. R., Kim, Y. J., Poo, K. M., Kim, C. W., 2007, Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module(3FM), Water Science and Technology, 55(12), 77-83.
- Ministry of Rnvironment, 2006, A High Level of Treatment of Sewage and Wastewater and Its Core Technology, Verification of The Middle and Hige Capacity of The Gravity Flow Fiber Appling for A sewage Treatment , 139-151
- Yao, K. M., Habibian, M. T., O'Melia, C. R., 1971, Water and waste water filtration: Concenpts and applications, Environmental Science and Tech., 5(11), 1105-1112.