

## 재래식 정수처리공정에서 조류입자 제거를 위한 DAF Hybrid 공정의 실험적 적용과 입자특성 변화

곽동희 · 유승준<sup>†</sup>

서남대학교 환경화학공학부  
590-711 전북 남원시 광치동 720  
(2008년 2월 2일 접수, 2008년 2월 26일 채택)

### Experimental Application of DAF Hybrid Process to Remove Algae Particles for Conventional Water Treatment Processes and Change of Particle Characteristics

Dong-Heui Kwak and Seung-Joon Yoo<sup>†</sup>

Faculty of Environmental and Chemical Engineering, Seonam University, 720 Gwangchi-dong, Namwon-city, Chonbuk-province 590-711, Korea  
(Received 2 February 2008; accepted 26 February 2008)

#### 요 약

우리나라는 상수도시설의 노후화와 그 동안의 상수원 수질변화에 대응한 정수처리공정의 개량과 개선이 요구되어 지고 있는 상황에 있어서, 기존의 정수처리공정에 어떠한 시설개량이나 설비의 보완 없이 DAF 공정을 추가하여 점토와 조류입자를 효과적으로 제거할 수 있는 DAF hybrid 공정의 적용성을 살펴보고자 일련의 실험을 실시하였다. DAF 공정의 설치위치에 조류입자의 제거에는 응집이나 침전지 전단을 이용하는 DAF-CGS 공정조합보다는 침전지 후단 또는 여과지 전단을 이용하는 DAF-CSF 방식이 더 효과적인 것으로 나타났다. 또한, DAF-CSF hybrid 공정을 도입함으로써 기존의 상수처리조건과 동일한 처리속도(수리학적 부하량)에서 처리효율이 향상될 것이며, 높은 수리학적 부하에서도 재래식 상수도시설에 적용하여 안정된 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

**Abstract** – There are many water treatment plants built over couple of decade ago in Korea. For most of those plants, they are required a countermeasure to cope with the deterioration caused from the superannuated facilities and the objective materials change of water treatment from inorganic particles like clay to algae particles due to eutrophication of lake and reservoir. A series of field and laboratory experiments was performed to investigate the feasibility of DAF hybrid process and the variation of particle characteristics by applying the additional DAF unit in conventional water treatment processes. On the basis of this experiments, the DAF was effective as an additive process in filtration basin (DAF-CSF combination processes). Using DAF-CSF combination process, the efficiency of stable particle removal can be achieved to produce the safe drinking water.

Key words: DAF, Particle Separation, Zeta Potential, Sedimentation, Water Treatment

#### 1. 서 론

우리나라의 강우는 6~9월에 집중되기 때문에 효율적인 수자원의 활용을 위하여 많은 댐을 건설하여 왔으며 이에 따라 국내의 상수원은 호소수가 차지하는 비율이 상대적으로 크다. 우리나라의 지형적 특성과 여름철에 집중된 높은 강우강도에 의하여 상수원에는 점토, 실트 그리고 모래와 같은 무기성 입자가 일시적으로 다량 유입되게 되며 이는 실제 정수처리공정에서 상당히 큰 부담으로 작용하고 있다[1]. 이 무기성 입자는 대체적으로 비중이 높고 빠르게 침전하는 경향을 나타내어 상수원의 조류입자와는 상반된 입자특성을

가지고 있다[2]. 한편, 우리나라의 인공댐이나 호소는 주변 오염물의 유입으로 부영양화 되고 있고, 이에 따라 조류의 급격한 번식으로 유발되는 녹조현상(algae bloom)은 국내 여러 상수 원수에 저밀도 조류입자 농도가 급격히 증가되어 이 입자들의 부상 경향 때문에 침전공정에서 문제가 나타나고 있다.

상수원의 부영양화로 인한 원수중의 조류제거를 원활히 처리할 수 있는 부상분리 기술 중의 하나인 DAF(dissolved air flotation) 공정은 표면전하의 반발작용과 세포표면의 친수성 때문에 침전법으로는 제거가 곤란한 조류(algae), 자연적인 색도 및 부유물질 등의 제거에 효과적인 방법으로 알려져 있다[3]. 부상분리에 있어서 결정적인 요소는 오염물질의 물에 대한 친수성(hydro-philicity)을 작게 하여 미세한 기포를 접촉시키는 것인데, 이러한 방식으로 물보다 더 무거운 밀도를 가진 오염물질도 부상시킬 수 있다. 특히, 수중의 조

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sjyoo001@hanmail.net

<sup>‡</sup>이 논문은 서강대학교 최정송 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

류를 분리 제거하는 처리공정으로서 부상공정의 하나인 DAF공정이 유용한 것으로 오래 전부터 알려져 왔다[4, 5]. 반면 원수 중에 존재하는 무기성 입자의 제거에는 통상 정수장에서 일반적으로 적용되어지고 있는 CGS(conventional gravity sedimentation) 공정이 효과적인 것으로 인식되어 국내외에서도 정수처리공정에서는 침전공정이 대부분 채택되어 운전되고 있다.

이와 같은 상황을 반영하여 최근 국내 원주권 광역상수도과 목포권 광역상수도에는 DAF 공정이 도입되었으며 앞으로도 부상공정의 도입은 증가될 것으로 예상되고 있다. 그러나 국내 상수도시설은 사회기반시설로서 그 사용연한이 길어 쉽게 시설가동을 중단하거나 기존 시설을 폐기하고 새로운 시설을 건설하기에는 경제적으로나 시간적으로 무리가 따른다. 따라서 기존의 상수도 시설에서 정수처리공정을 개량하여 필요한 기능을 보완하거나 효율향상을 꾀하는 것이 현실적인 대안이다.

기존의 재래식 상수도시설은 입자분리기능을 수행하는 공정으로써 대부분 침전-여과공정으로 구성되어져 있다. 따라서 최근 호소에서 유입되는 원수중의 조류입자의 제거를 위하여 도입하는 DAF Hybrid 공정은 침전공정의 이전에 또는 침전공정을 거친 뒤 여과지 이전에 설치할 수 있는 DAF-CGS(conventional gravity sedimentation) 방식과 DAF-CSF(conventional sand filtration) 방식이 될 것이다. 본 연구에서는 이와 같은 재래식 정수처리공정에 DAF 공정을 조합시키는 DAF Hybrid 공정의 적용에 따라 나타나는 입자의 제거효율과 특성변화 등을 살펴보고자 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 우리나라는 상수 원수의 상반된 특성을 가진 두 가지 입자군을 제거해야 할 과제에 직면하여 있지만 국내에서는 이와 같은 대별된 특성의 입자의 동시제거를 위한 복합공정의 연구는 아직 많지 않다[6, 7]. 장차 이와 같은 국내의 수질특성이 반영되어 기존 상수도시설에 무기성 입자와 조류입자의 제거를 위하여 복합공정에 대한 연구가 많이 확대될 것으로 예상된다. 아울러 머지않아 우리나라도 신규 상수도시설뿐 아니라 기존 상수도시설에도 침전과 부상, 여과공정이 결합된 다양한 Hybrid 공정의 도입이 활발히 적용될 것으로 예상된다.

이와 같은 배경으로, 본 연구에서는 그동안 국내 수질특성을 고려되지 못하고 일률적으로 설계되어진 기존의 재래식 상수도시설을 보완하고 개선하는 과정에 있어서, 고비중의 무기성 입자와 저비중의 조류입자를 동시에 제거하기 위하여 DAF Hybrid 공정의 적용에 필요한 수중의 입자특성의 변화와 적용방법 등에 대한 연구를 수행하고 실제 정수처리 현장에 유용한 설계와 운전정보를 제공하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 연구를 위하여 제작한 실험장치(처리능력 1.0 m<sup>3</sup>/day)는 다음

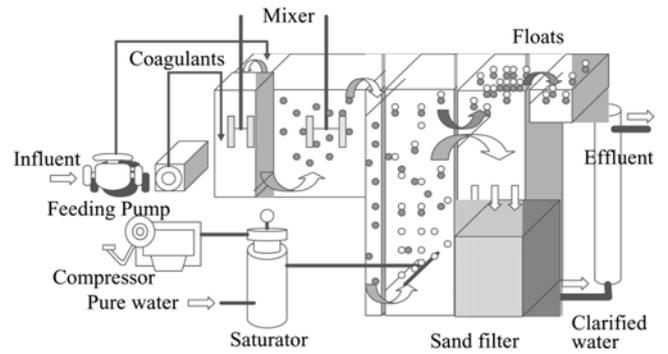


Fig. 1. Schematic diagram of DAF-CSF pilot plant.

Table 1. Dimension of DAF and filtration pilot plant

Description	Processes	Dimension
Pre-treatment	Coagulation	V 50 l, A 0.1 m <sup>2</sup> , W400×L250×H500
	Flocculation	V160 l, A 0.2 m <sup>2</sup> , W400×L500×H800
DAF	Contact zone	V 64 l, A0.12 m <sup>2</sup> , W400×L200×H800
	Separation zone	V224 l, A0.28 m <sup>2</sup> , W400×L700×H800
DAF-Sand Filter	Contact zone	V 64 l, A0.12 m <sup>2</sup> , W400×L200×H800
	Separation zone	V140 l, A0.28 m <sup>2</sup> , W400×L700×H500
	Sand filter	V 84 l, A0.28 m <sup>2</sup> , W400×L700×H300

Note) V: volume, A: surface area, W: width, L: length, H: height.

의 Fig. 1과 같으며 실험장치의 세부 공정은 다음의 Table 1에 나타난 바와 같이 전처리공정 150 l, 부상공정(접촉과 분리 존) 384 l 등으로 구성되어 있다. 여기서 DAF Hybrid 공정으로써, DAF-CGS 공정은 DAF 공정을 거친 뒤 응집침전을 한 번 더 거치는 형태로 실험을 수행하였고 이 실험은 모래여재가 충전되지 않은 상태이다. DAF-CSF 공정은 분리 존(zone)에 그림의 하단부와 같이 모래여재를 충전하여 여과지내에 설치되는 DAF 공정을 가상하여 실험을 수행하였다.

### 2-2. 시료 및 운전방법

시료는 실험실에서 인공 합성원수를 제조하여 실험하거나 필요에 따라 하천수를 채수하여 실험에 활용하였다. 이는 기존의 재래식 상수도시설과의 비교에 유효하게 사용될 수 있도록 수질 및 처리조건은 현장의 정수처리공정과 가능한 한 동일한 조건을 유지함을 원칙으로 진행하였다. 실험 방법은 수질환경공정시험법에 의거 실시하며 이 시험방법에 제시되지 않은 항목은 Standard Method를 이용하였다[8]. 본 연구를 위하여 인공 합성된 원수에 첨가한 무기성 점토입자의 조성표와 실험에 적용된 원수의 수질범위를 다음의 Table 2와 같다.

실험에 사용된 조류 종은 Fig. 2와 같이 국내 상수원에서 가장 흔하게 나타나는 *Microcystis aeruginosa*이다. 이는 남조류에 해당하

Table 2. Raw water quality of stream water and artificial water

Description	Raw water quality	Artificial water
pH	6.8-7.2	6.8-7.1
Turbidity (NTU)	2.0-20.0	10-120 : clay (spiked)
Alkalinity (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	10.0-30.0 CaOH <sub>2</sub> (injected)	10.0-30.0 CaOH <sub>2</sub> (spiked)
BOD (mg/l)	1.5-2.0	-
COD (mg/l §)	2.5-3.0	-
SS (mg/l)	1.8-2.5	10-120 : clay (spiked)
Chemical composition of clay	SiO <sub>2</sub> 0.46, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.02, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.35, CaO 0.03, etc 0.14 analysed by XRF	

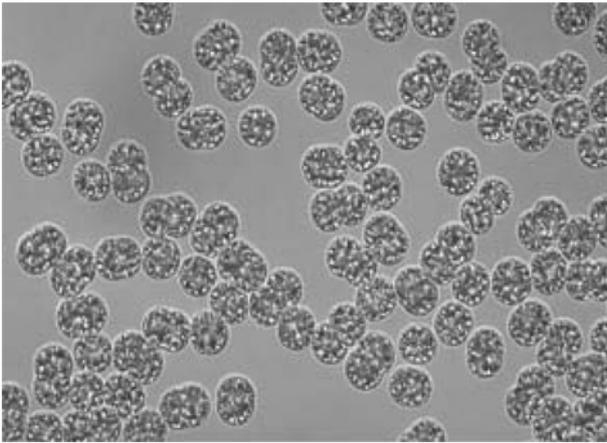


Fig. 2. Photograph of *Microcystis aeruginosa* used in this experiment.

는 중으로써 상수처리장 관리현장에서 상수에 맛, 냄새와 DBPs 전구물질로 작용하여 정수장에서는 주 관리대상이 되고 있다[7]. 본 실험에 사용한 조류는 Allen's media 배지에 일정한 온도(25±1 °C), 광주기조도 1,900~2,000 Lux, 명암주기 18 hr : 6 hr, 교반속도 95 rpm에서 계대배양 하였다.

한편, 본 연구에서 DAF공정을 기존의 표준 2차 처리 정수시스템에 도입할 경우, 정수처리공정의 배열을 기본적으로 결정하여야 한다. 재래식 정수처리공정에서 기존 시설을 그대로 유지한 상태로 DAF 공정을 도입할 경우에, 플록형성지 일부를 DAF 공정의 접촉존과 부상존으로 활용하는 방법과 여과지 유입부에 DAF 공정을 도입하는 방법을 들 수 있다.

따라서, 본 연구에서의 시설개량에 관한 기본 계획은 플록형성지의 후단 또는 침전지의 전단을 부상조로 이용하는 DAF-CGS (conventional gravity sedimentation) 방식과 여과지 상부에 부상조를 추가하는 DAF-CSF(conventional sand filtration) 방식으로 대별하여 우선적인 효율 비교와 입자특성 변화 등을 통한 기초연구를 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 플록의 제타전위

DAF공정에서의 입자의 제타전위는 처리효율을 좌우하는 결정적인 인자로 알려져 있으며[9, 10], 본 절에서는 먼저 기포와 입자간의 결합에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나인 입자의 제타전위를 살펴 보았다. 하천수에 점토를 첨가하여 탁도를 30 NTU (Nephelometric Turbidity Unit)로 고정시킨 다음, 응집제 PACl을 10 ppm씩 증가하

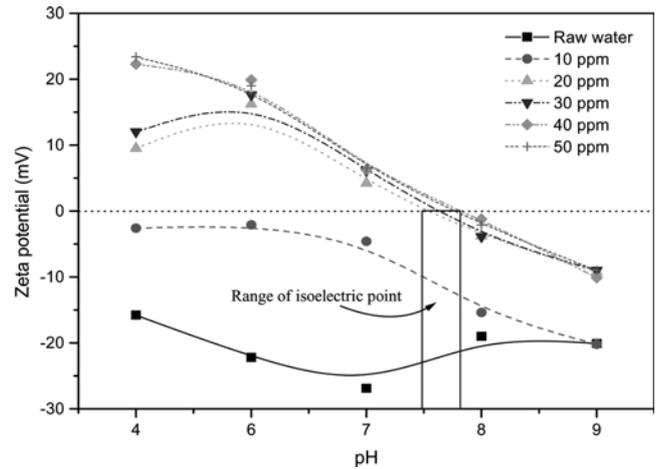


Fig. 3. Variation of Zeta potential in term of coagulant dosage for stream water.

여 응집한 후 제타전위를 측정하였다. 교반 시간은 1분간의 135 rpm 급속 혼합후, 10분간 45 rpm의 속도로 완속 교반을 하였고 이후 미세 기포를 주입하여 DAF 공정 전후의 제타전위를 측정하였다. 여기서 모든 제타전위 측정치는 5회 측정 후 이를 평균하여 나타낸 값이다. 이 제타전위의 측정은 여러 pH의 조건에 따라 측정하였으며 Fig. 3에 나타난 바와 같이 약 -25 mV~+25 mV의 범위를 나타내었다.

다음의 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 응집제의 투입을 상수에 따라 제타전위도 대체로 상승하는 경향을 나타내고 있으며, pH 증가에 비례하여 대체적으로 제타전위는 감소하였다. 이 경향은 일반적 실험 자료와도 유사한 결과이다. pH에 변화에 의한 플록의 제타전위와 더불어 미세 기포의 제타전위도 기존의 문헌 자료를 통하여 살펴 보면, DAF공정에서 압력탱크(saturator)에서 분출되는 미세기포의 제타전위는 Tambo 등[9]는 0~350 mV, Okada 등[10]은 0~50 mV, Dockko과 Han[11]의 경우는 0~25 mV로 보고하고 있다.

#### 3-2. DAF-CGS와 DAF-CSF의 비교 평가

앞에서 기초적으로 살펴본 입자와 기포의 제타전위 등의 물성특성을 바탕으로, DAF-CGS와 DAF-CSF 방식을 상호 비교 평가하였다. 여기서 DAF-CSF 방식은 DAF-CGS와 용이한 비교를 위하여 CGS-DAF(침전후 부상)으로 처리를 한 결과이며 제타전위와 더불어 탁도와 SS (Suspended solids)의 기본적 수질항목을 비교 평가하였다. 실험결과는 다음의 Table 3 및 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

전 pH 영역을 고려하면 DAF+CGS 경우가 그 변동폭이 약 ±25 mV 정도로 크며 DAF+CSF 방식이 약 ±15 mV로 변동이 작게 나타났

Table 3. Results of zeta potential measurement for DAF-CGS and DAF-CSF combinations

Description	Coagulants dosage	Zeta potential (mV)					Note
		pH 4	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	
DAF+CGS	Run-A	22.3	11.0	7.8	-2.2	-11.7	
	Run-B	18.5	9.3	4.4	-3.4	-18.6	
	Run-C	9.0	3.9	2.6	-5.9	-22.9	
DAF+CSF	Run-A	10.6	6.4	3.1	-8.3	-14.3	
	Run-B	8.7	3.7	1.6	-4.8	-15.0	
	Run-C	8.1	2.2	-2.0	-7.9	-15.5	

Note) Turbidity of Run-A : 8.8 NTU, Run-B : 25.2 NTU, Run-C : 94.5 NTU.

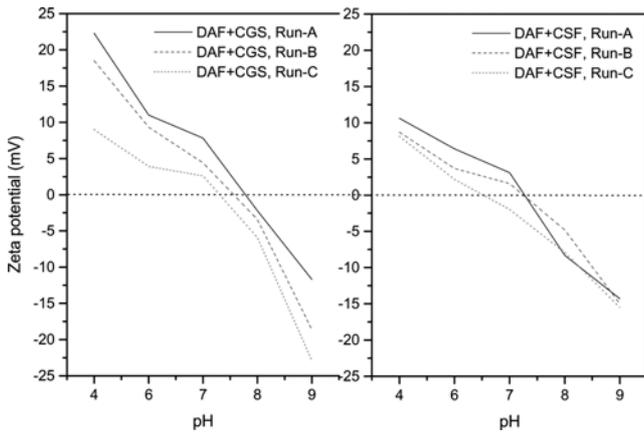


Fig. 4. Comparison of zeta potential between DAF+CGS and DAF+CSF.

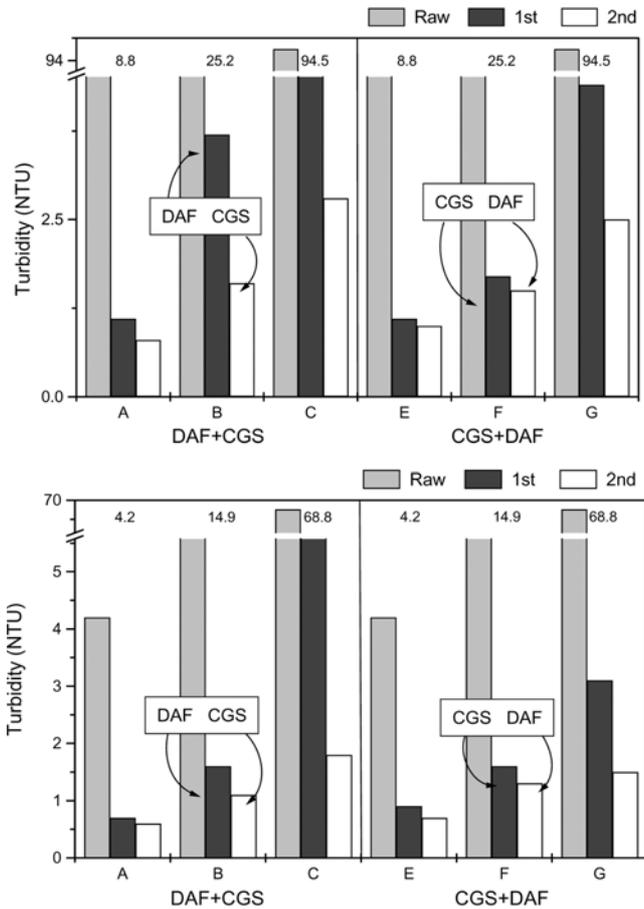


Fig. 5. Comparison of turbidity treatment efficiency between DAF+CGS and DAF+CSF.

다. 그러나 통상의 정수처리과정에서의 pH 운전범위 6.5~7.5 범위에서 DAF+CGS의 제타전위는 약 -2 mV~10 mV 정도를 나타내었으며 DAF+CSF의 제타전위는 -5 mV~5 mV 정도의 범위를 나타내었다. 이 실험결과를 토대로 살펴보면 전반적으로 침전공정을 거치고 여과지로 유입된 물은 제타전위가 평균적으로 5 mV가 감소할 것으로 예상되었다.

다음으로 항목별 제거효율 실험을 실시한 결과는 다음의 Fig. 5와 같으며 DAF+CGS 방식과 DAF+CSF 방식간의 큰 차이는 보이

지 않고 있다. 일반적으로 원수의 탁도가 높을 때 제타전위가 대체적으로 약간 낮은 조건을 나타내며, DAF+CSF 방식에 있어서 응집-침전공정을 미리 거치는 이유로 DAF 공정에서는 제타전위가 다소 낮게 나타나고 있어 이로 인한 DAF공정의 효율저하가 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 DAF+CFS 방식에서는 저하된 제타전위의 상승을 유도하고 다른 DAF 처리조건을 양호하게 조성하기 위해서 재응집 과정의 도입에 대한 심층적 검토가 필요할 것으로 예상된다.

3-3. DAF-CSF 공정조합의 정수처리효율 평가

앞에서 검토한 비교 실험결과를 종합하여 보면, 두 공정의 조합간에 큰 차이를 확인하기에는 무리가 있다. 특히 무기성 점토입자의 첨가를 통하여 실험한 입자의 분리효율에는 두 공정조합 방식간의 차이를 발견하기 어렵다. 이와 더불어 조류입자의 제거실험에서는 DAF-CSF 방식이 DAF-CGS 방식보다 제거효율이 약간 상승하는 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 본 실험결과로 공정조합의 결과를 단정하기는 어려우나 앞에서 비교평가한 결과를 토대로 본 절에서는 DAF-CSF 공정조합의 정수처리효율을 살펴보았다.

본 실험에서는 Turbidity, SS, KMnO<sub>4</sub> 소비량, Chlorophyll-a 등에 대하여 기존의 정수처리공정의 처리효율과 비교하였다. 실험결과, 다음의 Fig. 6~8에 나타내었듯이 기존의 상수처리조건과 동일한 처리속도(수리학적 부하량)를 적용하였을 경우 DAF-CGS 공정조합이 모든 항목에서 효율이 향상될 것으로 나타났다.

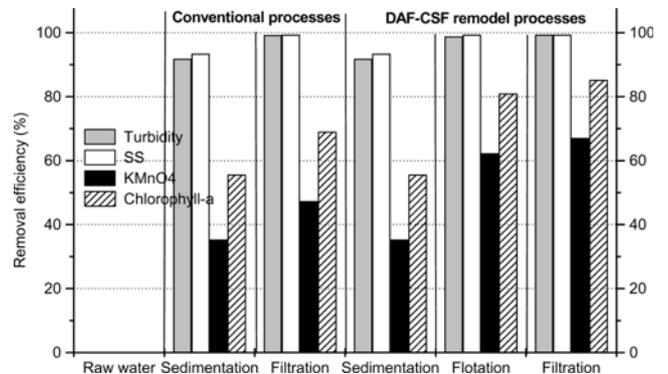


Fig. 6. Comparison of removal efficiency between conventional processes and DAF-CSF processes.

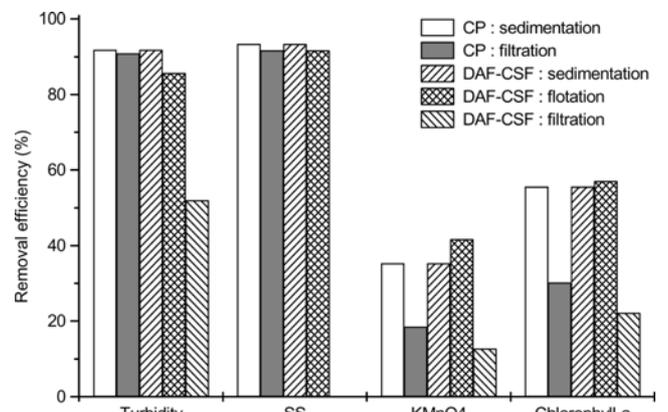


Fig. 7. Comparison of removal efficiency between conventional processes and DAF-CSF processes in terms of unit process.

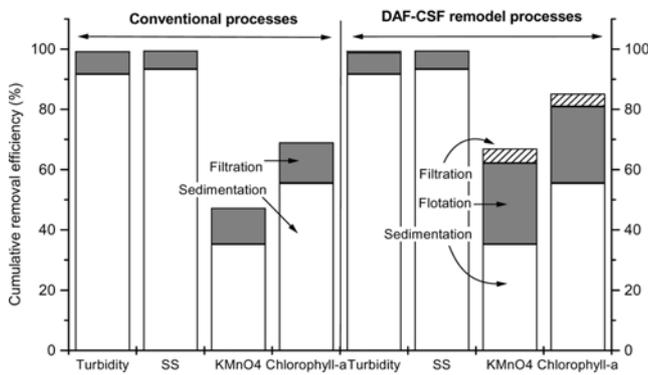


Fig. 8. Comparison of cumulative removal efficiency between conventional processes and DAF-CSF hybrid process in terms of removal fraction.

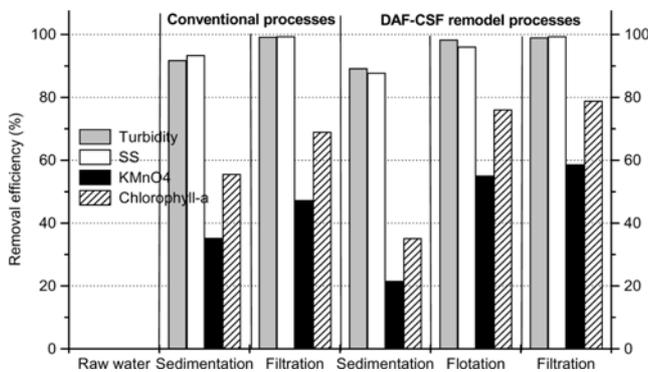


Fig. 9. Comparison of removal efficiency between conventional processes and DAF-CSF hybrid processes under high rate velocity.

### 3-4. DAF-CSF 복합공정의 처리속도 능력 평가

앞에서 살펴본 바와 같이 통상적으로 운전되는 표준 수리학적 부하율을 토대로 본 절에서는 높은 수리학적 부하율에서의 효율을 살펴 보았다. 이는 DAF-CSF 복합공정 연구의 근본적 목적중의 하나인 정수생산 능력증대의 일환으로 수처리 속도의 향상을 꾀할 경우 어느 정도의 효율을 나타낼 수 있을 것인가에 대하여 살펴본 것이다. 이때의 비교대상은 DAF-CSF 복합공정의 도입여부에 대한 타당성에 초점을 맞추어 통상의 처리속도로 운전되는 기존의 응집-침전, 여과 공정이다. 다음의 Fig. 9에서와 같이 처리속도(수리학적 부하율  $12.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hr}$ )를 기존의 속도에 약 3배 가량 빠르게 향상시켜도 본 DAF-CSF hybrid 공정을 적용하여 처리효율의 큰 변화 없이 정수처리가 가능한 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

국내 상수도시설의 노후화와 그 동안의 상수원 수질변화에 대응한 정수처리공정의 개량과 개선이 요구되어지고 있는 상황에서, 기존의 재래식 상수도시설을 보완할 때 우리나라의 상수 원수의 처리에 보다 적합한 DAF hybrid 공정을 알아보고자 일련의 실험을 실시한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 조류입자의 제거에는 침전지 후단 또는 여과지 전단을 이용하는 DAF-CSF 공정조합이 응집지나 침전지 전단을 이용하는 DAF-CSG 보다 더 효과적인 것으로 나타났다.

(2) 전반적으로 침전공정을 거치고 여과지로 유입된 물은 제타전위가 평균적으로 5 mV가 감소되며, DAF+CFS 공정조합에서는 저하된 제타전위에 대한 대책이 필요하였다.

(3) 기존의 상수처리조건과 동일한 처리속도(수리학적 부하량)에서 DAF-CSF hybrid 공정을 도입할 경우 모든 항목에서 처리효율이 향상될 것으로 나타났다.

(4) DAF-CSF Hybrid 공정을 고율 수리학적 부하에서도 재래식 상수도시설에 적용하여 안정된 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

## 감 사

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(2004년도 특정기초연구, No. R01-2004-000-11029-0)에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다. 아울러 평생을 후학양성과 연구에만 전념하신 최청송 교수님의 명예로운 정년을 축하드리며 그간에 노고에 치하 드립니다.

## 참고문헌

- Kwak, D.-H., Jung, H.-J., Kim, S.-J., Won, C.-H. and Lee, J.-W., "Separation Characteristics of Inorganic Particles from Rainfalls in Dissolved Air Flotation: A Korean Perspective," *Sep. Sci. Technol.*, **40**, 3001-3016(2005).
- Kwak, D.-H., Lee, J.-W. and Han, M.-Y., "Verification of the Fate of Inorganic Particles by the Population Balance in DAF Process," *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, **17**(2), 517-527(2003).
- Zabel, T., "The Advantages of Dissolved-Air Flotation for Water Treatment," *Journal of AWWA*, **77**(5), 42-45(1985).
- Bare, W. F., Jones, N. B. and Middlebrooks, E. J., "Algae Removal Using Dissolved Air Flotation," *Journal WPCF*, **47**(1), 153-169(1975).
- Johnson, D., Farley, M. R. and Youngman, "Removal of Algae by Various Unit Process," Water Research Centre, Technical Report TR45, June(1977).
- Lee, J. W., Yang, T. H., Jung, H. J., Kim, S. J. and Kwak, D. H., "Hybrid Process of Powdered activated Carbon Adsorption and Dissolved Air Flotation for Simultaneous Removal of Algae and Organic Compounds," *Proceedings of IWA International Conference on Particle Separation*, June, Seoul, 327-332(2005).
- Kwak, D. H., Kim, S. J., Jung, H. J., Won, C. H., Kwon, S. B., Ahn, H. W. and Lee, J. W., "Removal of Clay and Blue-green Algae Particles through Zeta Potential and Particle Size Distribution in Dissolved Air Flotation Process," *Water Sci. Technol.*, **6**(1), 95-103(2006).
- APHA, AWWA and WEF, *Standard Method for Examination of Water and Wastewater*, 21th edition, Washington D.C. US.(2005).
- Tambo, N. and Fukushi, K., "A Kinetic Study of Dissolved Air Flotation," *Journal of JWWA*, **606**, 22-30(1985).
- Okada, K., Akagi, Y., Kogure M. and Yoshioka, N., "Analysis of Particle Trajectories of Small Particles in Flotation when the Particles and Bubbles are Both Charged," *Can. J. Chem. Eng.*, **68**, 614-621(1990).
- Han, M. Y. and Dockko, S., "Zeta Potential Measurement of Bubbles in DAF Process and its effect in the Removal Efficiency," *Journal of Water Supply*, **34**, 177-182(1999).