

論 文

용존공기 부상법(Dissolved Air Flotation)을 이용한 정수처리 Water Treatment Using DAF(Dissolved Air Flotation)

이병호* · 김재훈**

Byoung-Ho Lee · Jae Hoon Kim

Abstract

Treatment efficiencies of water quality parameters such as $KMnO_4$ Demand, UV_{254} , Turbidity, and LAS(Linear Alkyl Sulfonate) were compared between DAF(Dissolved Air Flotation) and CGS(Conventional Gravitational Sedimentation).

The experimental results showed that DAF is much more efficient in treatment of water quality parameters than CGS. The optimum pH was about 7, and optimum alum ($Al_2(SO_4)_3$) dose was about 30 ppm for DAF treatment.

Economic aspects were also analyzed for both systems. Even though production cost per ton of drinking water is slightly higher in DAF than in CGS, it turned out that construction cost and land value of CGS far surpass the production cost.

DAF system is superior in removal efficiency of impurities and in production cost as a whole to CGS system.

1. 서 론

국내 기존의 정수처리공정은 응집침전과 급속모래여과 및 염소소독 등이 주요 골격으로 이루어져 있는데, 현재와 같이 수질이 악화된 상수원으로 부터는 기존의 시스템으로 양질의 상수를 생산하기는 어려운 실정이다. 이러한 이유로 낙농장물을 상수원으로 사용하고 있는 정수장들은 오존과 활성탄을 이용한 고도정수처리 시설을 도입하였거나, 도입할 계획을 갖고 있다.^{2,3)}

Zabel은 상수처리에서 DAF의 장점에 대하여 조류성장이 큰 물이나 탁도가 낮은 물 그리고 높은 색도를 갖는 물의 처리에 효과가 좋다고 발표했다.⁴⁾ 그는 DAF의 장점 중에는 쉽게 운전할 수 있으며 45분이내로 안정된 수질을 얻을 수 있고 고/액 분리 시간이 침전조에 비해 월등히 작고 분리효율이 높으며 특히 슬리지의 고형물 농도가 응집 침전법보다 높은 것 등을 들었다.⁴⁾

다른 학자들도 DAF가 낮은 밀도를 갖는 물질을 제거하는데는 침전법보다 훨씬 효과가 좋은 것으로 주장하고 있다.^{6,10)} 그들은 상수처리에 나타나는 물질들로 박테리아, 조류, Giardia Cysts와 Aluminium에 의한 수산화물이나 알루미늄과 결합된 휴믹물질(Humic

* 울산대학교 토목공학과 교수

** 울산대학교 토목공학과 환경공학 전공 석사과정

Substances)들의 처리 효과가 좋다고 보고했다. 6.10)

본 연구에서는 낙동강물을 상수원으로 사용하고 있는 S정수장의 수질을 개선할 수 있는 시설개량 방안의 수단으로 DAF(Dissolved Air Flotation)가 사용될 수 있는지에 대한 가능성을 파악하고, 고도정수처리 시스템의 단위공정으로시도 도입이 가능한 지를 검토하기 위하여 행하여졌다.

DAF의 우수한 기능이 학계에 발표되면서 미국에서도 1982년 Massachusetts주의 Lenox수원지에서 처음으로 DAF System을 도입한 이래 Pittsfield, Cleveland, Ashley 등의 수원지에서 작게는 수만톤/day에서 크게는 수십만톤/day의 플랜트가 건설되어 성공적으로 운영이 되고 있는 것으로 알려져있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 pilot test의 규모로 제작된 DAF System을 사용하였고 구체적인 dimension은 Table 1과 같다. DAF의 주요 구성요소는 공기 부상분리조(Flotation Tank), 가압Tank(Air Dissolving Tank), 응집조(Coagulation and Flocculation Tank)와 약품 공급Tank 등으로 구성되어 있으며 Fig. 1에 보여주고 있다.

2.2 실험방법

Pilot test 규모의 DAF장치를 U시에 위치한

Table 1. DAF System Dimension

Item	Description
Air Flotation Tank	Diameter = 0.95 m Height = 1.1 m Volume = 0.78 m ³
Air Dissolving Tank (ADT)	Diameter = 0.95 m Height = 1.1 m
Coagulation & Flocculation Tank	1.65 m × .60 m × .75 m = 0.74 m ³

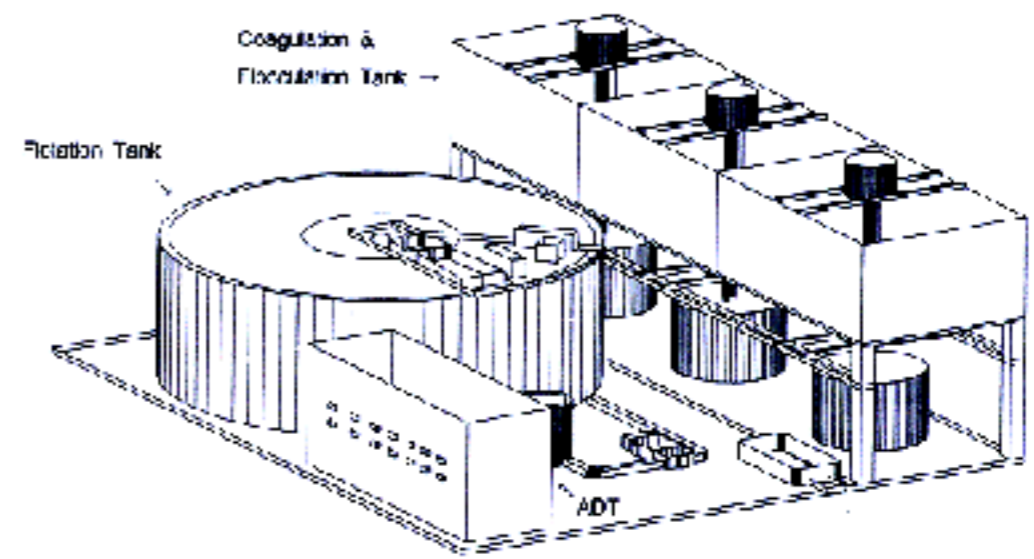


Fig. 1. DAF(Dissolved Air Flotation) System used in the Experiment

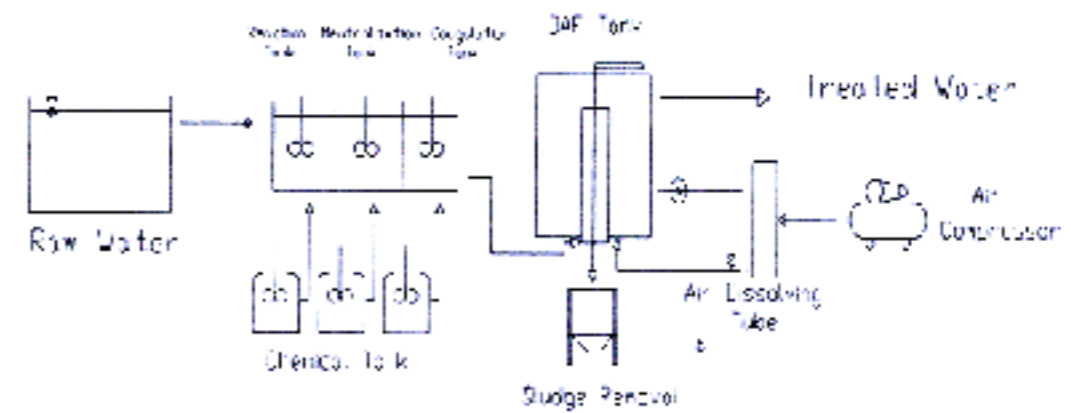


Fig. 2. Flow Diagram of the Experiment

S정수장에 설치하여 기존의 정수처리방법 CGS(Conventional Gravitational Sedimentation)과 DAF처리에 대한 효과에 대하여 비교 연구하였다. DAF의 실험장치에 대한 Flow Diagram은 Fig. 2에 나타내었다. 실험은 처리유량의 변화에 대한 효율과, 응집제의 변화, 그리고 ADT내의 압력을 변화시키면서 A/S비율(공기/고형물, mL/mg) 변화에 따르는 처리 효율을 비교 검토하였다. 현재 기존의 정수장에서 사용되는 약품비와 전력비 그리고 처리장 면적등의 경제성에 대한 검토도 이루어졌다. 비교 검토한 항목으로는 DO, pH, Turbidity, LAS(Linear Alkyl Sulfonate), NO₃⁻, NH₃, Cl⁻, KMnO₄, Alkalinity, Hardness를 측정하였으며 모든 분석은 Standard Methods⁹⁾에 따라 시행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

실험은 '95년 3월 14일, 3월 21일, 4월 7일, 4월 28일 4일간 5~6시간씩 실시하였다.

Table 2. Experimental Conditions

Date	Water treated (m ³ /day)	A/S ratio (mL/mg)	Pressure within ADT Tank (kg/cm ²)	Al ₂ (SO ₄) ₃ used (mg/l)	Water temp (°C)	pH
3/14	52	0.017	4.3	40	11.2	6.2
	81			26	11	6.47
3/21	72	0.017	4.3	0	13	7.8
				5.1	12.5	9.4
				13.6	13	7.8
				17.0	10	6.9
				27.2	10	7.1
		0.020	4.6	27.2	10	6.8
0.022	4.9	27.2	10	6.7		
4/7	72	0.018	4.6	29.24	15.8	4.91
					15.2	5.8
					15.5	6.8
					15.4	7.4
4/28	74.4	0.017	4.6	0	19	4.7
				8	18	5.2
				22	18	8.9
				29	18	9.2
				40	18	9.9
				56	18	11

각 실험에 대한 조건을 Table 2에 나타내었다.

기존의 S정수장에는 낙동강물이 주 상수원인데 처리용량의 부족으로 수질이 극히 나쁜 상태로 고도정수처리 시설의 도입이 검토되고 있는 상태이다. 특히 flocc이 부유하는 등 침전효과가 매우 좋지 않은 상태이다. S정수장의 처리용량 및 조건은 Table 3과 같다.

Table 2에서와 같은 조건 변화에 대한 DAF의 처리효율을 Table 3과 같은 조건하에서

CGS System의 처리효율을 동시에 조사하였다.

두 System의 각 조건에 대한 실험에서 얻은 결과를 Table 4에 나타내었다.

i) pH에 대한 효과

Table 4에서 볼 수 있는 것과 같이 pH는 중성인 pH7 부근에서 DAF의 처리효율이 좋은 것을 볼 수 있다. 특히 KMnO₄소비량이나 LAS의 처리에서 pH에 따르는 효율이 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있는데 KMnO₄소비량의 pH에

Table 3. CGS System Configuration of the S Water Treatment Plant

Water Treated (m ³ /day)	Coagulant and Flocculant (mg/l)	Size	
20,000	Alum : 20 and PAC : 40	flocculation Tank	3 m × 10 m × 9 m = 270 m ³
		sedimentation tank	52 m × 10 m × 4.5 m = 2,340 m ³
		sand filtration	6 m × 8.5 m × 2.3 m = 117 m ³

Table 4. Results of Experiments

Date of Experiment	Water Quality Parameters	DO (mg/l)	pH	Turbidity (NTU)	LAS (mg/l)	NO ₃ N (mg/l)	NH ₃ N (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	KMnO ₄ demand	Alkalinity	Hardness	
	Water Quality Standards	—	6.5-8.5	less than 2	less than 0.5	less than 10	less than 0.5	less than 150	less than 10	—	less than 300	
3/14	Water Used	Raw Water	7.3	7.87	6	0.284	3.329	0.1828	51.77	14.11	72	—
		CGS Treated	7.2	7.4	4.3	0.240	3.376	0.1592	53.9	8.82	62	—
		DAF Treated (81t/day)	10.4	6.47	2.0	0.063	3.352	0.1515	49.64	3.821	30	—
		DAF Treated (52t/day)	10.3	6.2	1.9	0.067	3.36	0.1577	50.35	4.114	24	—
3/21	Al ₂ (SO ₄) ₃ used	Raw Water	7.7	7.9	0.7	0.039	3.04	0.1492	46.1	12.78	69.3	106
		CGS Treated	7.73	7.4	0.3	0.036	3.35	0.1365	52.5	7.78	57.75	102
		0 mg/l	10.1	7.8	0.8	0.038	3.44	0.1495	47.5	15.42	68.25	112
		5.1 mg/l	10.3	9.4	0.72	0.0003	3.16	0.1560	48.6	10.43	84	74
		13.6 mg/l	9.73	7.8	0.39	0.017	3.14	0.1664	45.4	6.61	56.7	102
		17 mg/l	9.93	6.9	0.21	0.029	3.09	0.1488	47.2	4.55	40.95	110
		27.2 mg/l	10.1	7.1	0.22	0.012	3.18	0.1612	50.4	3.67	34.65	108
3/21	A/S ratio (mL/mg)	0.017	10.1	7.1	0.22	0.012	3.18	0.1612	50.4	3.67	34.65	108
		0.020	10.7	6.8	0.22	0.0008	3.13	0.1549	45.4	2.79	31.5	112
		0.022	10.8	6.7	0.24	0.0186	3.12	0.1515	45.7	3.37	29.4	106
4/7	Various pH	Raw Water	5.23	7.5	1.38	0.066	2.619	0.0285	53.18	27.04	40	112
		CGS Treated	5.54	7.6	1.02	0.028	2.135	0.0288	51.05	21.45	24	104
		4.9	9.06	4.9	0.95	0.024	2.119	0.0285	47.5	11.17	6	106
		5.8	9.26	5.8	0.95	0.016	2.330	0.0291	51.76	10.58	10	107
		6.8	9.87	6.8	0.35	0.012	2.158	0.0328	53.88	8.23	22	104
		7.4	10.06	7.4	0.54	0.021	2.194	0.0337	51.76	9.11	38	107
4/28	Al ₂ (SO ₄) ₃ used	Raw Water	6.34	7.2	2.6	0.08	3.668	0.0582	47.50	12.05	36	114
		CGS Treated	6.95	6.8	0.89	0.033	4.144	0.0672	46.79	9.11	26	90
		0 mg/l	8.96	4.7	1.32	0.012	3.969	0.0384	50.4	9.7	2	112
		8 mg/l	9.36	5.2	1.2	0.012	4.043	0.0251	48.21	9.40	2.5	98
		22 mg/l	9.36	8.9	0.54	0.010	4.003	0.035	47.50	6.76	44.5	87
		29 mg/l	9.56	9.2	0.44	0.005	4.03	0.0012	48.21	4.70	63	88
		40 mg/l	9.26	9.9	0.97	0.018	4.043	0.0318	49.63	4.41	75	75
		56 mg/l	9.66	11.2	0.96	0.019	4.269	0.0421	51.05	4.41	117	65

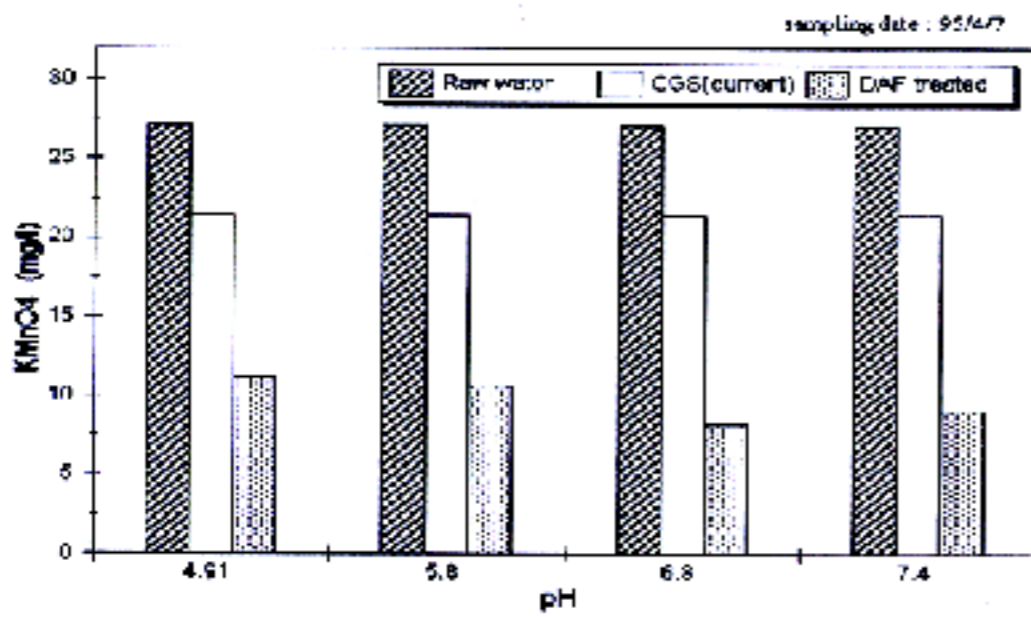


Fig. 3. $KMnO_4$ Demand Removal Efficiency with pH Variation

다른 처리효율과 기존의 CGS효율을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

ii) Alum($Al_2(SO_4)_3$)의 투입량

Alum의 투입량에 따르는 처리효율을 살펴 보았다. $KMnO_4$ 소비량은 Alum 30mg/l 정도에서 한계 처리효율에 이르는 것을 Table 4에서 볼 수 있고 LAS도 마찬가지로 Alum 투입량 약 30mg/l에서 최소에 이르렀다. 투입량 증가에 따라 처리효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 형성된 floc이 과다한 Alum의 투입에 따르는 charge reversal 현상에 의한 것으로 생각된다. 따라서 S정수장의 원수에 대한 Alum 최적

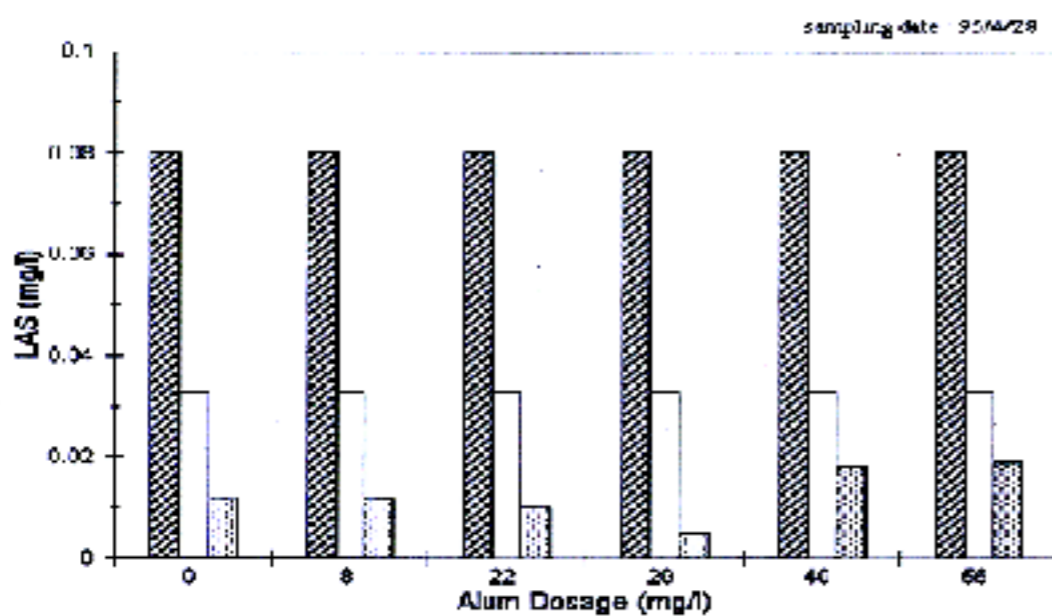


Fig. 4. LAS Removal with Various Alum Dosage

량은 약 30mg/l으로 판단되며 LAS의 Alum 투입량에 따르는 처리효율을 Fig. 4에 나타내었다.

iii) SS(Suspended Solids)

SS처리는 CGS에 비하여 DAF에서 탁월한 처리 효율이 나타났다. S정수장은 용량의 부족으로 많은 부유물질이 침전지에서 월류가 되고 있었기 때문에 최적의 침전지 운전상태와 DAF의 최적처리와의 비교는 불가능했다. 그러나 DAF의 운전은 Table 2에서와 같은 조건하에서 A/S비율(공기/고형분, mL/mg)을 변화시키면서 SS의 처리 효율을 조사하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있는 것과 같이 A/S의 비에 큰 차이가 없이 큰 효과가 있는 것을 보여 주고 있다. 본 연구에서 최적의 A/S상태에서 실험이 되었다고 볼 수는 없어도 95% 이상의 SS가 제거되었다. Edzward는 실험실과 Pilot 실험에서 조건에 따라 80~90% 이상이 제거가 되는 것으로 발표했다.¹⁰⁾ Sandbank는 Pond로부터 채취한 시료를 TSS 90% 이상 처리가 가능한 것으로 보고했으며 algae는 A/S 비가 0.009~0.55까지 변화시키면서 실험한 결과 70~90% 이상 제거시킬 수 있다고 발표했다.⁸⁾ 이와 같이 DAF의 최적조건을 찾아 운전

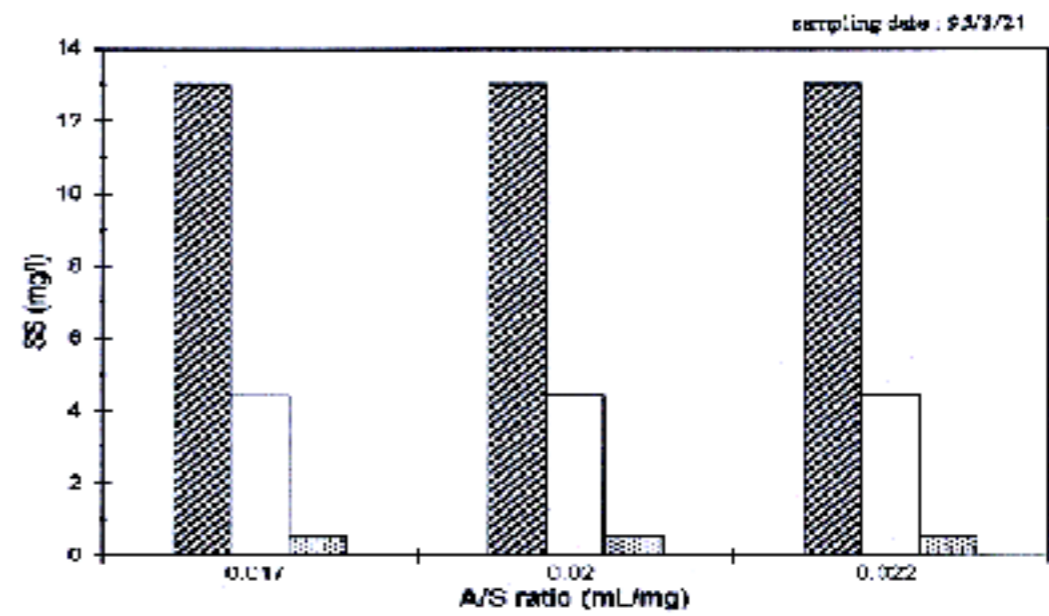


Fig. 5. SS Removal with A/S ratio (mL/mg)

Table 5. SS Removals by CGS and DAF

	Raw Water	CGS	DAF			
			A/S ratio	0.017	0.020	0.022
SS Concentration (mg/l)	13	4.42		0.5	0.5	0.5

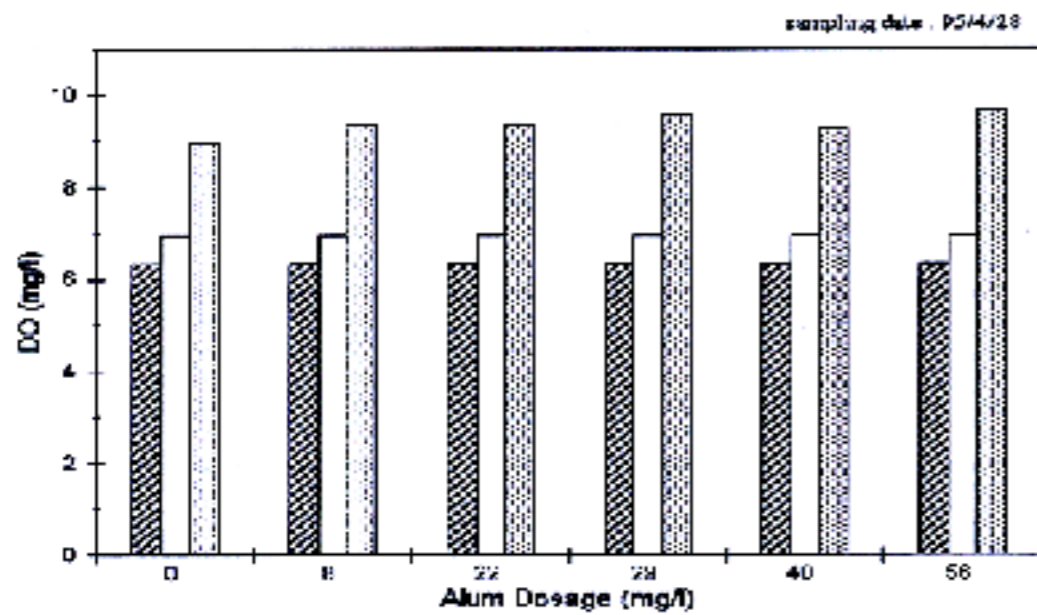


Fig. 6. DO Concentrations after Treatment

할 때 Suspended Solids를 90~95% 이상 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

iv) DO(Dissolved Oxygen)

Concentration after Treatment

물에 활성을 넣어 계속적인 물의 자체 정화에 도움이 되고 후속 처리에 도움이 될 수 있는 DO의 농도는 CGS의 처리후 농도인 약 7 ppm에 비하여 DAF에서 약 10 ppm정도로 훨씬 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 대한 한가지 실험예를 Fig. 6에 나타내었다.

3.2 CGS와 DAF System에 대한

경제성 검토

DAF System의 처리효율이 CGS에 비하여 탁월한 효과가 있음에도 불구하고 현장에 좀처럼 도입이 되지 못하는 이유는 경제성에서 떨어지지 않나하는 우려에서 기인하는 바가 크다. 그러므로 두 system에 대한 경제성을 검토해보는 것은 상당히 중요하다.

S정수장에서 실험당시에 CGS에 사용되는 응집제 및 전력량과 DAF에서 사용되는 응집제와 전력 사용량을 생산되는 물의 톤당 비용으로 환산하여 비교하였다. 운영비용에 대한 종합적인 비교를 Table 6에 나타내었다.

Table 6에서 볼 수 있는 것과 같이 DAF System이 CGS System보다 4원/ton정도 높은 것으로 나타났으나 CGS는 실제 플랜트의 운전 비용이고 DAF는 pilot 규모이기 때문에 소규모의 톤당 처리비용이 운전을 위한 최소기본경비 때문에 실제플랜트에서 보다 높게 나타나는 것을 감안하면 DAF운전비용이 CGS보다 높다고 단정짓기는 어렵다. 최소한 운전비용의 차이가 4원/ton 보다는 낮다고 볼 수 있다.

Table 6. Operating Cost Comparisons between CGS and DAF

Item	CGS	DAF	Description
Al ₂ (SO ₄) ₃	0.02 kg/ton × 500 won/kg = 10 won/ton	0.03 kg/ton × 500 won/kg = 15 won/ton	
PAC (Poly Aluminium Chloride)	0.04 kg/ton × 1000 won/kg = 40 won/ton	—	
Power	0.026 kw/ton × 35 won/kw = 0.91 won/ton	1.15 kw/ton × 35 won/kw = 40.25 won/ton	
Total	50.91 won/ton	55.25 won/ton	
Area ratio (Area/ 20,000 ton)	52 m × 10 m × 2ea = 1040 m ²	0.71 m ² × 20,000 t/70t = 202 m ²	D = 0.95 m h = 1.1m V = 0.78 m ³

3.3 토의 및 고찰

기존 CGS의 처리 경우에는 최적의 운전조건에서 비교가 된 것은 아니다. 실제의 plant에서 최적의 운전 조건을 찾아서 운영하는 것은 처리수질에 대한 위험 부담이 따르기 때문에 이를 찾아서 운전을 한다는 것은 쉬운일이 아니다.

본 연구는 처리수의 용량 초과로 인하여 수질이 극도로 떨어지는 상황에서 CGS의 시설개량에 대한 대체 시스템으로서의 대안으로 DAF에 대한 실험을 실시하였다. 뿐만아니라 DAF System의 절대적인 고처리효율은 고도정수처리에 대한 수단으로서도 충분한 가치가 있다. 특히 처리수에서의 DO증가는 많은 정수장에서 고도정수처리시스템의 일환으로 BAC를 도입하고 있는데 BAC의 전단계로서 훌륭한 시스템이 될 수 있다. $KMnO_4$ 소비량, LAS, Turbidity 등에서 CGS시스템에서 보다 DAF에서 탁월한 처리효과가 있는 것을 볼 수 있다. Table 7에 CGS와 DAF에 대한 처리효율의 비에 대하여 정리하였다.

경제성의 검토에서 DAF처리수의 단가가 CGS보다 약 4원/ m^3 만큼 높은 것으로 나타나고 있으나 이에 대한 비율은 DAF의 규모가 커질수록 상당히 작아진다. 더구나 여기의 비교에는 건설단가에 대한 비교와 처리장의 토지비용에 대한 부분은 빠져있다. 건설단가가 CGS의 경우가 높고(정확한것은 경우에 따라 다름) 처리상의 면적은 CGS의 경우가 약 6배가량 더 필요한 것을 감안할 때 DAF의 처리단가가 CGS보다 오히려 훨씬 낮을 수 있다. 효율적인 면과 처리단가 측면에서 모두 DAF System이 CGS System보다 앞선다고 볼 수 있다.

따라서 DAF System은 상차 CGS의 시설개량을 위한 대체 시스템이나 고도정수처리의 단위공정으로도 도입될 수 있는 것으로 밝혀졌다.

4. 결 론

DAF(용존공기부상법)에 의한 처리효율이 LAS, $KMnO_4$ 소비량, 탁도 등에서 CGS(응집침전법)보다 매우 우수한 것으로 나타났다. 처리수의 DO농도도 DAF의 처리수에서 약 10mg/l으로 3mg/l정도 CGS처리수보다 높았

Table 7. Representative Comparisons of Efficiencies for the two Systems

	Raw Water	CGS	DAF
DO 증가율 (mg/l)	6.3	6.95 10.3%	9.56 51.7%
$KMnO_4$ Demand & Removal Rate (mg/l)	12.5	9.1 27.2%	4.7 62.4%
LAS (mg/l)	0.08	0.033 58.8%	0.005 93.8%
Turbidity (NU)	2.6	0.89 65.8%	0.44 83.1%
UV_{254}	0.244	0.102 58.2%	0.069 71.7%

다. DAF의 운전조건은 pH 7, Alum 약 30mg/l정도에서 최적으로 나타났다. DAF에서는 PAC(고분자응집제)를 사용하지 않고 Alum만을 사용했음에도 Alum과 PAC를 모두 사용한 CGS보다 우수한 처리효율을 보여주고 있다.

경제적인 면에서도 CGS를 위한 면적을 DAF에서는 약 1/6으로 줄일 수 있고 건설단가에서도 DAF System이 훨씬 낮기 때문에 운전단가에서 톤당 CGS처리비용보다 약간 높은 DAF처리수에 대한 비용이 결과적으로 낮다고 볼 수 있다. 따라서 처리효율과 경제적인 측면에서 모두 유리한 DAF System의 현장도입은 기존의 시설개량을 위해서나 고도정수처리 기법중의 단위공정으로 도입되는 것은 타당하다.

5. 감사의 글

본 연구를 하는데 지원하여주신 (주)동신유압에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. "낙동강 수질오염 대책 및 음용수 공급방안에 관한 세미나" 대한 상하수도학회 서울대학교 공학연구소. 1993. 3. 4.

2. "낙동강 맑은물 관리기술에 관한 세미나" 부산수산대학교 환경문제연구소 1994. 10
3. "화명정수장 입상활성탄(BAC) 시설공사 Pilot-Plant 실험연구" 1993.11 부산직할시
4. Thomas Zabel "The Advantages of Dissolved-air Flotation for Water Treatment" Journal AWWA 1991.
5. Zerox Corporation Technical Reports #29103-2-91(94-96) "WATER AND WASTE TREATMENT USING ADVANCED DISSOLVED AIR FLOTATION" The 1991 Annual Conference of the Korea Society of Water Pollution Research and Control
6. J.P. Malley and J.K. Edward "Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters", J Water SRT-Aqua Vol. 40. No. 1. pp 7-17. 1991
7. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse, McGraw-Hill 1991.
8. E. Sandbank and G. Dhelef "Harvesting of algae from high-rate ponds by flocculation-flotation, Water Science Technology Vol. 19. No 12. 1987
9. Standard Methods for The Examination of Water and Waste Water, 18th Edition 1992
10. James K. Edzwald John P. Walsh. "Dissolved Air Flotation: Laboratory and Pilot Plant Investigations". AWWA Research Foundation. 1992.