

농촌지역의 효율적인 간이 상수처리에 관한 연구

이흥근 · 백남원 · 백도현
서울대학교 보건대학원

A Study on Efficient Simple Water Supply System in Rural Areas

Hong Keun Lee · Nam Won Paik · Do Hyeon Paik
Graduate School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

The purpose of this study was to establish acceptable criteria for the design of simple water treatment plant in rural areas. To develop efficient simple water treatment methods for rural areas, water quality in the study areas was investigated and rapid and slow filtrations in pilot-scale were tested under various conditions.

The main results of this study are as follows.

It was found that the water qualities of the study areas exceed the drinking water standards, which implies that some treatments are required in rural areas.

Treatment efficiencies of both rapid sand and dual-media (sand and anthracite) filtration without pre-treatment such as flocculation and sedimentation are very low, which were turned out to be unadequate for the rural areas.

Treatment efficiencies of both vertical and horizontal slow filtration without chlorination are very high for consumed KMnO_4 , $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, turbidity, and very low for coliform and bacteria.

Treatment efficiencies of both vertical and horizontal slow filtration with chlorination are very high over the most pollutants. A slow filtration with chlorination is efficient for the rural areas. An adequate depth of sand layer is over 60 cm.

A horizontal filtration is more economical than a vertical filtration. A horizontal filtration can be operated for a relatively long periods of time without sand washing or replacement because clogging is removed by simple back-washing.

Keywords : Filtration, chlorination, rural area, water quality treatment

I. 서 론

1970년대부터 10개년 계획에 의하여 전국 농·어촌지역에 설치한 간이급수시설은 농·어촌지역의 생활향상에 크게 기여한 바 있으나 현재 대부분의 간이급수시설은 10년 이상된 노후시설이며 설치 당시의 기술적인 결함, 시설의 부족과 시설의 노화, 손실부분의 미보완 등의 운영 및 관리미숙으로 인해 많은 문제점이 나타나고 있다.

농·어촌지역에서 이용되고 있는 수원은 대부분 지표수와 지하수에 의존하고 있는데 지표수가 수원인 경우에 축산폐수, 생활하수, 강우시 토양유출, 농

경지에 투입되는 비료 및 농약사용 등에 의하여 상당히 오염되어 있으며 지하수의 경우도 오염되어 있다. 전통적인 상수처리는 응집, 침전, 여과, 염소소독의 과정을 거치며 원수의 수질 정도에 따라 전·후염소처리, 활성탄처리 과정이 포함된다. 현재 우리나라의 도시에서 이용되는 대부분의 상수처리방법은 응집침전, 여과 및 병원성 미생물제거를 위한 염소처리과정 등으로 되어 있다. 그러나 농촌간이급수시설은 일부지역의 염소소독장치를 제외하고는 다른 처리시설이 설치되어 있지 않고 이미 설치된 시설마저 적절하게 운영되지 않아 탁도와 미생물 등의 오염수준이 음용수수질기준을 초과하고 있는 경

우가 많다. 따라서 이러한 지역에서 음용수수질기준을 달성하기 위해서는 적절한 정수처리시설이 필요하다. 1800년대 초 영국에서 처음으로 완속모래여과방법에 대한 기술개발을 시도하였고, 1900년대에 미국환경보호청에서 Pilot-plant를 설치하여 수직완속모래여과를 실시하였으며 차후에 급속모래여과방법을 개발하여 현재까지 상수처리에 이용하고 있다. 그러나 현재 도시지역에서 주로 이용되고 있는 급속모래여과방법은 응집조, 부상지, 침전지 등의 전처리시설을 필요로 하기 때문에 농촌지역에서 이용하기에는 운전 및 유지관리에 많은 어려움이 있다. 이에 반해 완속모래여과방법은 장치가 간단하고 비교적 운전 및 유지관리가 쉬워 비전문가도 운전할 수 있으며, 또한 경제적이기 때문에 토지 확보가 용이한 지역에서의 간이급수처리시설로 가장 많이 이용되고 있다.¹⁻³⁾

본 연구는 상수공급 취약지역으로 판단되는 농촌 지역에 적합한 효율적인 간이상수처리기술을 개발하는데 기본 목표를 두고 있다. 연구내용은 농촌지역의 간이상수도에 대한 수질검사를 실시하여 문제점을 파악하고 그 문제점을 해결할 수 있는 간편하고 효율적인 간이상수처리기술을 제시하기 위하여 약품응집 등 전처리과정이 생략된 급속여과와 수직완속여과 그리고 역세척이 간편하다는 점을 포함하여 운전이 용이한 수평완속여과 등을 Pilot-plant로 제작하여 실험하였다. 실험방법은 소독실시여부에 따른 효과와 완속여과장치의 모래층 깊이를 변화시키며 처리효율을 비교분석하여 간이상수 처리에 필요한 중요 설계인자를 제시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 간이급수시설의 수질조사

수질조사지역은 강원도 춘천군과 양구군지역의 12개리를 선정하여 수질검사를 실시하였으며 수질조사항목은 음용수 수질기준항목중 과망간산 칼륨소비량을 포함한 18개의 이화학적 항목과 대장균군을 포함한 2개의 생물학적 항목에 대해 조사하였다.

각 항목별 분석방법을 살펴보면 수온은 100°C 봉상 알콜 온도계로, pH는 pH meter로, 탁도는 탁도계(turbidimeter, HACH Co., U.S.A.)로, KMnO_4 소비량은 KMnO_4 적정법으로, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 인도페놀법으로, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 카드뮴 환원법 또는 이온크로마토그래

피법으로, 잔류염소는 DPD법으로, 경도는 EDTA적정법으로, 중금속류는 원자흡광광도법(Varian AA-30A)으로, 대장균군은 MPN법으로, 그리고 일반세균은 수질오염공정시험법 중 일반세균시험법에 따라 Nutrient 배지를 사용하여 측정하였다.

2. 간이 상수 처리 실험

1) 간이 상수 처리 실험장치

본 연구를 수행하기 위해서 제작한 Pilot-plant는 원수공급조, 여과지, 소독조, 처리수조로 구성되어있다. 여과지를 중력식으로 하기 위해 원수공급조를 여과지 상단부위에 설치하였다. 수직급속여과시설의 전체적 계통도는 Fig. 1에, 수직완속여과의 계통도는 Fig. 2에, 수평완속여과의 계통도는 Fig. 3에 나타내었다. 각 구성요소의 자세한 설명은 다음과 같다.

(1) 원수공급조

원수공급조는 원수공급펌프에서 공급되는 원수의 수위동요를 안정시키고 원수량을 일정하게 조절하여 정수작업을 정확하고 쉽게 할 수 있도록 하기 위하여 유량계를 설치하였고 수직여과시설에서 원수공급조 크기는 가로 80 cm, 세로 80 cm, 높이 40 cm로 하였고 수평여과시설에서 원수공급조 크기는 내경 35 cm, 높이 190 cm인 무색 투명한 아크릴을 사용하였다.

(2) 여과지

수직급속여과지는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 10 mm 두께의 무색 투명한 아크릴을 사용하여 내경 15 cm인 원통형으로 제작하였고 여과지 하부층에는 자갈층을 지지하기 위한 스크린과 여과집수장치를 설치하였다.

여과지 하부층으로부터 작은 자갈 10 cm, 왕사 10 cm로 하여 모래층을 지지하도록 하였으며, 0.6~0.7 mm의 직경을 가진 균등한 모래(균등계수:1.7이하, 비중:2.55~2.65, 최소(대)경: 0.3~2.0 mm)를 가지고 VRSF70(vertical rapid sand filtration), VRSFC70(vertical rapid sand filtration and chlorination)에서는 각각 70 cm로 충전하였고 이층여과(모래와 안트라사이트)인 VRSAF70(vertical rapid sand anthracite filtration), VRSAFC70(vertical rapid sand anthracite filtration and chlorination)에서는 모래와 안트라사이트를 각각 35cm로 충전하였고, 여재 종류를 제외한 단층 및 이층여과지의 Pilot-plant는 동일하다.

수직완속여과지는 내경 35 cm인 원통형으로 제작

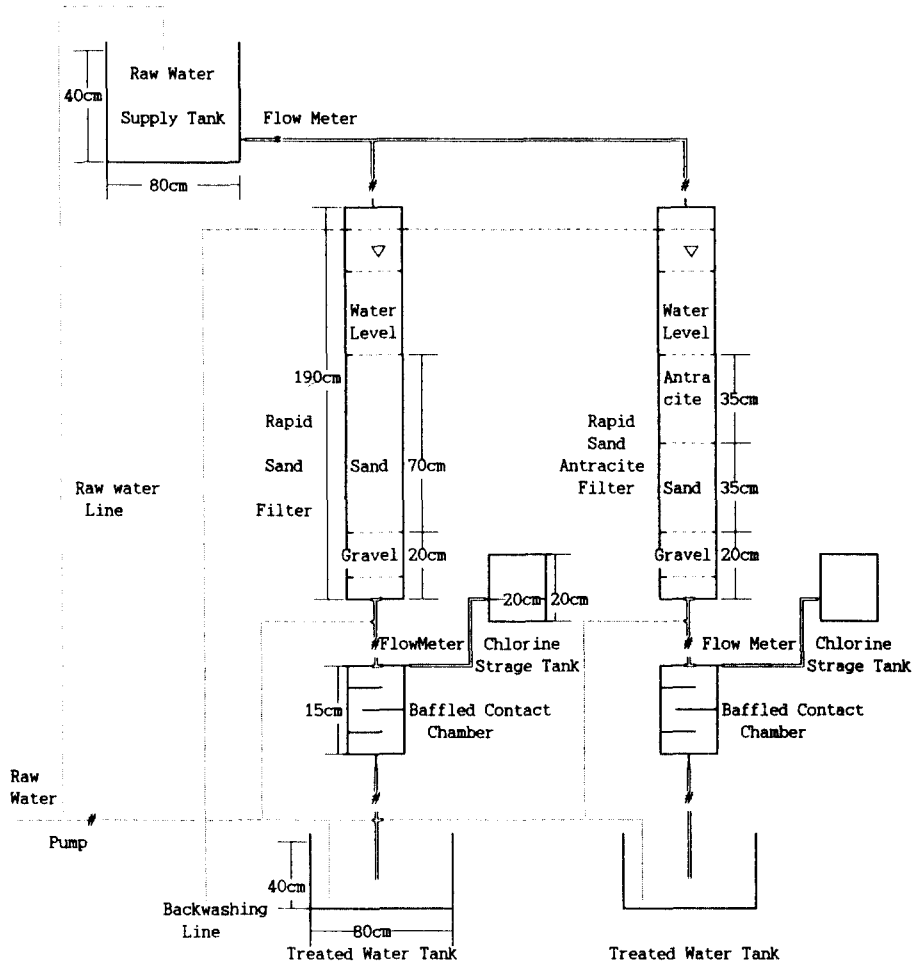


Fig. 1. Schematic diagram of rapid filter pilot-plant.

하였고 여과지 하부층에는 자갈층을 지지하기 위한 스크린과 여과집수장치를 설치하였으며, 급속여과와 같이 유량계를 설치하였다. 여과지 하부층으로부터 굵은 자갈 10 cm, 작은 자갈 10 cm, 왕사 10 cm로 하여 모래층을 지지하도록 하였으며, 0.3~0.5 mm의 직경을 가진 균등한 모래(균등계수:1.7 이하, 비중:2.55~2.65, 최소(대)경:0.2~2.0 mm)를 가지고 VSSF80(vertical slow sand filtration), VSSFC80(vertical slow sand filtration and chlorination)에서는 각각 80 cm로 충전하였고, VSSFC60에서는 60 cm, VSSFC45에서는 45 cm로 충전하였다. 모래층을 제외한 모든 Pilot-plant는 동일하다(Fig 2).

수평완속여과지는 10 mm 두께의 무색 투명한 아

크릴을 사용하여 내경 35 cm인 원통형을 제작하였고 여과지 하부층에는 자갈층을 지지하기 위한 스크린과 여과집수장치를 설치하였으며, 여과수를 일정 범위의 여과율로 배수시키기 위하여 유량계를 설치하였다. 여과지 하부층으로부터 굵은 자갈 10 cm, 작은 자갈 10 cm, 왕사 10 cm로 하여 모래층을 지지하도록 하였으며, 0.3~0.5 mm의 직경을 가진 균등한 모래(수직완속여과와 동일한 모래)를 가지고, HSSF80(horizontal slow sand filtration), HSSFC80(horizontal slow sand filtration and chlorination)에서는 각각 80 cm로 충전하였고, HSSFC60에서는 60 cm, HSSFC45에서는 45 cm로 충전하였다. 모래층을 제외한 모든 Pilot-plant는 동일하다. 수평여과에서는 운전기간 중 손실되는 모래

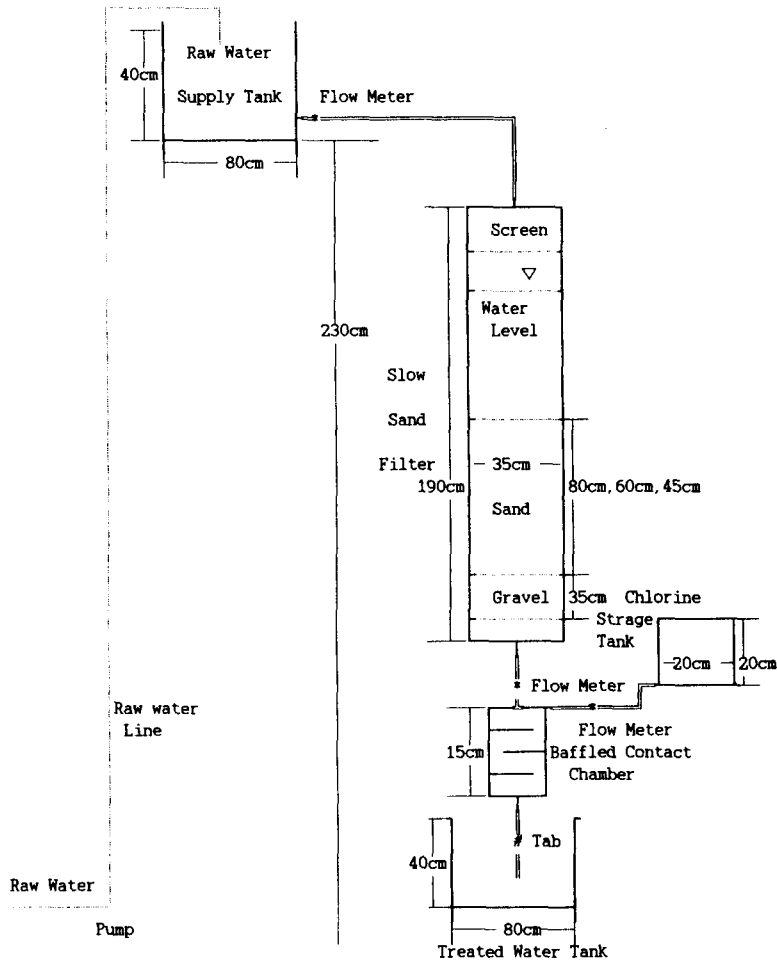


Fig. 2. Schematic diagram of vertical slow filter pilot-plant.

의 재주입을 위하여 충전탑(resanding) 3개와 역세척(back-washing)을 실시할 수 있는 장치를 설치하였다(Fig 3).

(3) 소독조

소독조는 여과수에 함유된 미생물을 살균시키는 역할을 하며 소독조 크기는 가로 10 cm, 세로 15 cm, 높이 10 cm로 설치하였다. 소독조안에 3개의 정류판을 설치하였고 소독용액 저장조의 크기는 가로 20 cm, 세로 20 cm, 높이 10 cm로 설치하였으며 중력식으로 하기 위하여 소독조 상단에 설치하였다. 또한 염소용액을 일정하게 주입할 수 있도록 정량펌프(peristaltic pump)를 사용하여 소독조에 주입하였다.

(4) 처리수조

처리수 저장조의 크기는 가로 80 cm, 세로 40 cm, 높이 40 cm로 설치하였으며 처리수를 받아 저장하는 역할을 한다.

2. 처리 원수 및 소독수 제조

수원을 오염시키는 오염물질은 토지이용과 계절에 따라 다소 변동이 있는데 실험에 사용되는 원수는 수도물을 받아 일정기간 정체시킨 후 축산폐수, 질산성 질소의 표준액인 질산칼륨 및 흙 등을 사용하여 유기물, 탁도 및 미생물의 농도를 일정 범위로 조절하였다. 소독장치에 사용한 염소용액은 일반적으로 농·어촌지역과 소규모지역에서 사용하고 있는 클로로칼키분말을 수도물과 일정한 비율로 혼합시킨 용액을 사용하였다.

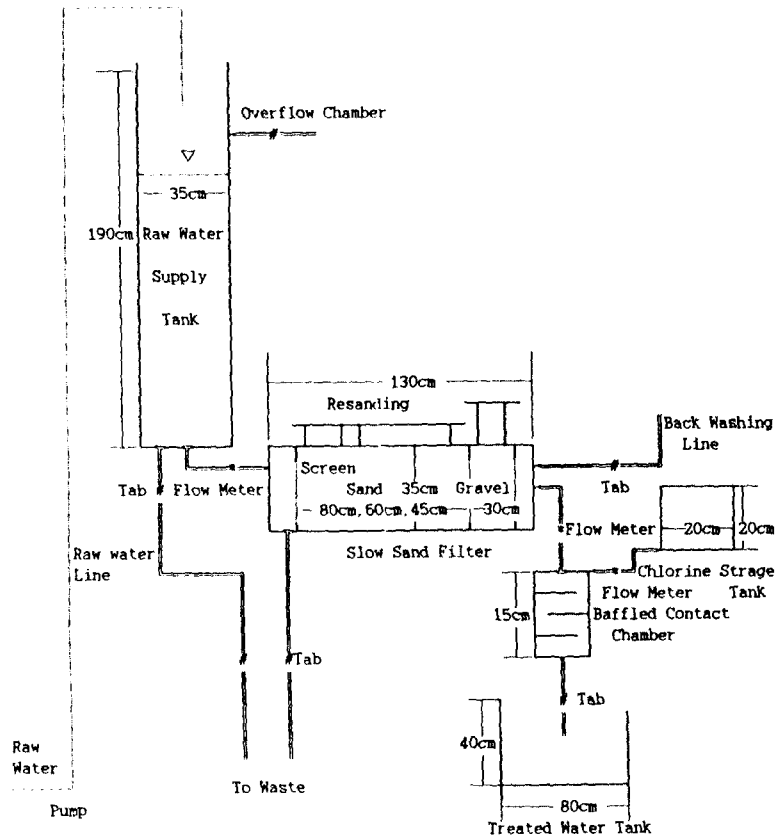


Fig. 3. Schematic diagram of horizontal slow filter pilot-plant.

Table 1. Classification of experimental methods

Mode	Filtration	Media		Chlorination
		Sand	Sand & Anthracite	
	Vertical Rapid Filtration			
VRSF70	70 cm	○		
VRSFC70	70 cm	○		○
VRSAF70	70 cm		○	○
VRSAFC70	70 cm		○	○
	Vertical Slow Filtration			
VSSF 80	80 cm	○		
VSSFC80	80 cm	○		○
VSSFC60	60 cm	○		○
VSSFC45	45 cm	○		○
	Horizontal Slow Filtration			
HSSF80	80 cm	○		
HSSFC80	80 cm	○		○
HSSFC60	60 cm	○		○
HSSFC45	45 cm	○		○

3. 실험 및 분석방법

실험방법은 Table 1에 나타난 것과 같이 크게 급속수직여과와 완속수직여과, 완속수평여과로 구분할 수 있으며 각각의 모래층의 깊이와 소독유무에 따라 실험을 실시하였다. 분석방법은 수도전의 수질 분석방법과 동일한 방법으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수도전의 수질상태

수도전의 수질상태는 Table 2와 같이 천전4리에서는 질산성질소가 음용수수질기준을 초과하였으며 야촌리와 지석리지역에서 대장균군이 검출되었고 울문 1리 중간과 말단, 지내 1리, 용산 2리, 발산 2리, 산천 1리, 천전 4리, 유포 3리, 임당 1리, 야촌리, 지석리, 덕곡리 말단등 11개 지역에서 일반세균이 검출되었다. 특히 야촌리와 지석리는 대장균군이, 지석리는 일반세균이 음용수수질기준을 초과하여

Table 2. Water quality in tab water

Item (unit)	Sampling site	YULMUN	YULMUN	GINEA	YONGSAN	BALSAN	SANCHUN
		1 RI A* (GROUND)	1 RI B (GROUND)	1 RI B (SURFACE)	2 RI B (SPRING)	2 RI B (GROUND)	1 RI B (GROUND)
pH		6.36	6.65	6.90	6.80	6.72	6.75
Consumed KMnO ₄ (mg/l)		2.48	0.62	0.31	0.93	0.93	2.79
NH ₃ -N (mg/l)		N.D.	N.D.	0.01	0.02	N.D.	0.04
NO ₃ -N (mg/l)		4.3	3.7	1.3	1.8	3.2	2.7
Turbidity (NTU)		0.5	0.7	1.5	0.2	0.8	0.4
Residual chlorine (mg/l)		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Hardness (mg/l)		46	43	20	20	24	42
Cl (mg/l)		3.5	10.6	3.5	1.8	3.5	1.8
SO ₄ ²⁻ (mg/l)		9	10	2	N.D.	1	9
F (mg/l)		0.69	0.52	0.36	0.07	0.18	0.08
Cu (mg/l)		0.10	0.02	0.10	0.03	0.03	0.02
Fe (mg/l)		N.D.	N.D.	0.02	0.01	0.01	0.01
Cr ⁶⁺ (mg/l)		N.D.	0.01	0.03	0.02	0.01	N.D.
Mn (mg/l)		N.D.	-	-	-	N.D.	0.01
Pb (mg/l)		0.035	-	-	-	N.D.	N.D.
Zn (mg/l)		0.061	-	-	-	0.071	-
Cd (mg/l)		0.003	-	-	-	0.002	-
Phenol (mg/l)		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Coliform(count/50 ml)		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bacteria (count/1 ml)		2	8	8	11	6	24

N.D. : Non-detected

* : A = Near tap from Water Source, B = Remote tap from Water Source

** : Excess of water quality standard

NTU : Nephelometric Turbidity Units

Table 2. Continued

Item(unit)	Sampling site	CHUNJUN	YUPO	IMDANG	YACHON	GISUK	DUKGOK
		4 RI B (GROUND)	3 RI B (GROUND)	1 RI B (GROUND)	RI B (SURFACE)	RI B (SURFACE)	RI B (SURFACE)
pH		6.33	6.38	6.71	6.76	7.15	7.33
Consumed KMnO ₄ (mg/l)		0.31	0.62	N.D.	0.32	1.26	0.95
NH ₃ -N (mg/l)		N.D.	0.06	N.D.	N.D.	0.04	0.02
NO ₃ -N (mg/l)		11.2**	3.9	3.8	2.1	1.0	0.7
Turbidity (NTU)		0.2	0.2	0.5	0.7	1.0	0.6
Residual chlorine (mg/l)		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Hardness (mg/l)		85	62	32	24	20	17
Cl (mg/l)		10.6	10.6	1.7	3.4	1.8	1.8
SO ₄ ²⁻ (mg/l)		20	9	9	8	N.D.	1
F (mg/l)		0.40	0.26	0.30	0.24	0.01	-
Cu (mg/l)		0.08	0.04	0.07	0.01	0.03	N.D.
Fe (mg/l)		0.02	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.
Cr ⁶⁺ (mg/l)		0.01	N.D.	0.01	N.D.	0.01	0.01
Mn (mg/l)		-	-	-	-	-	0.06
Pb (mg/l)		-	-	-	-	-	N.D.
Zn (mg/l)		-	-	-	-	-	0.059
Cd (mg/l)		-	-	-	-	-	0.001
Phenol (mg/l)		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Coliform(count/50 ml)		N.D.	N.D.	N.D.	2**	33**	N.D.
Bacteria (count/1 ml)		8	6	5	4	148**	2

일부지역의 수질이 이미 오염되었음을 보여주고 있으므로 이에 대한 대책이 요구된다.

위와 같이 수도전의 수질검사결과에 의하면 과망간산칼륨소비량, 질산성질소, 탁도, 대장균군, 일반세균 등에 오염되어 있으나 현 간이상수시설에는 소독장치와 여과장치를 설치한 지역은 거의 없어 적절한 음용수를 공급할 수 있는 시설의 설치가 미흡하다고 볼 수 있다.

따라서 과망간산칼륨소비량, 질산성질소, 탁도 등과 같은 이화학적 오염물질의 처리가 가능하면서 초기투자비가 적게 들고 운영관리가 쉬운 여과장치의 설치가 요구되며 대장균군, 일반세균 등과 같은 생물학적 오염에 대한 처리가 가능하도록 소독장치를 고안하여 설치하여야 한다.

2. 간이상수처리 실험

1) 여과시설별 처리효율

(1) 수직급속여과

Pilot-plant에서 원수를 수직급속모래여과법과 수직급속이층여과법에 의해 처리한 처리수의 각 항목별 수질분석결과와 처리효율은 Table 3과 같다.

수직급속모래여과에서 각 항목별 처리효율은 KMnO_4 소비량에 대해서 12~14%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 에 대해서 8~14%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대해서 4~5%, 대장균군에 대해서 36%로 나타났다.

수직급속이층(모래와 안트라사이트)여과법에 의해 처리한 처리수의 각 항목별 수질분석결과와 처리효율은 KMnO_4 소비량에 대해서 17~21%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 에 대해서 5~6%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대해서 3~10%, 대장균군에 대해서 66%로 나타났다.

급속여과에 의한 각 항목별 처리효율이 매우 낮아 간이급수시설로서는 부적합한 것으로 나타났다. 이는 급속여과에서 필수적인 단계인 약품응집 및 침전 등의 전처리과정을 생략한데서 오는 현상이다.

도시지역에서 채택되고 있는 급속여과방법은 중·소규모 정수시설에서 보편적으로 활용하고 있는데 원수는 약품응집 및 침전 등과 같은 전처리시설을 거친 다음 여과, 염소소독의 4단계를 거쳐 처리하게 된다. 이러한 약품응집 등의 처리시설은 운전, 유지관리 및 경제성을 고려할 때 농촌지역의 간이급수시설로는 부적합한 것으로 판단된다.

(2) 수직 및 수평 완속여과

완속여과법으로 처리한 처리수의 각 항목별 수질분석결과와 처리효율은 Table 4와 같다.

수직완속여과에 의한 각 항목별 처리효율은 KMnO_4 소비량에 대해서 63~67%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 에 대해서 51~62%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대해서 57~69%, 대장균군에 대해서 70~75%, 일반세균에 대해서 70%를 나타내었다.

수평완속여과에 의한 각 항목별 처리효율은 KMnO_4 소비량에 대해서 60~61%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 에 대해서 65~77%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대해서 51~70%, 대장균군에 대해서 80~83%, 일반세균에 대해서 79~82%를 나타내었다.

수직 및 수평완속여과법에 의한 처리수는 미생물에 대해서 음용수수질기준에 부적합하여 안전한 음용수를 공급하기 위해서는 소독장치를 추가 설치하여야 한다. 수직 및 수평완속여과의 처리효율을 비교하여 보면 암모니아성질소에서 다소 차이를 나타내지만 거의 유사한 처리효율을 보이고 있는 것으로

Table 3. Experimental results and treatment efficiencies in vertical rapid sand filtration 70 cm and vertical rapid dual media(sand & anthracite) filtration 70 cm

Item (Units)	No. of Samples	Raw Water	VRSF70		VRSAF70	
			Treated Water	Treatment Efficiency(%)	Treated Water	Treatment Efficiency(%)
Consumed KMnO_4 (mg/l)	1	10.76	9.49	11.80	8.54	20.63
	2	12.67	10.83	14.13	10.49	17.20
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/l)	1	4.25	3.90	8.24	3.98	6.35
	2	9.04	8.16	14.13	8.60	4.86
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)	1	18.20	17.40	4.40	17.60	3.29
	2	18.10	16.80	5.31	16.20	10.49
Coliform (count/50 ml)	1	5.400	3.500	35.70	1.800	66.17
	2	-	-	-	-	-

Table 4. Experimental results and treatment efficiencies in vertical (VSSF80) and horizontal slow sand filtration 80 cm (HSSF80)

Item (Units)	No. of Samples	VSSF80			HSSF80		
		Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)	Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)
Consumed KMnO ₄ (mg/l)	1	12.67	4.74	62.59	12.47	4.90	59.60
	2	14.20	4.70	66.90	13.20	5.10	61.36
NH ₃ -N (mg/l)	1	9.04	4.40	51.32	3.40	1.20	64.71
	2	6.50	2.50	61.54	1.50	0.35	76.67
NO ₃ -N (mg/l)	1	18.10	8.30	56.74	14.10	4.20	70.21
	2	14.70	4.60	68.71	14.60	7.10	51.34
Coliform (count/50 ml)	1	5,400	1,600	70.37	1,600	270	83.13
	2	480	120	75.00	1,100	223	79.93
Bacteria (count/1 ml)	1	-	-	-	4,120	756	81.65
	2	3,200	950	70.31	2,590	548	78.84

나타났다.

수평완속여과는 1990년 Udom Kompayak¹⁰⁾에 의하여 최초로 소개되었으며 운전중 여과층의 앞부분에 쌓이는 찌거기를 역세척으로 용이하게 제거시킬 수 있어 수직여과에 비해 장기간동안 모래층의 세척이나 교환없이도 운전이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 관리자가 부족한 우리 농촌의 실정에 비추어 볼 때, 수평완속여과는 적합한 수처리방법이라고 할 수 있을 것이다.

2) 소독장치가 추가되었을 때의 처리효율

(1) 수직급속여과

Table 5는 수직급속모래여과와 수직급속이층여과 방법으로 처리한 처리수에 염소소독을 추가한 실험의 수질분석결과와 처리효율을 나타내고 있다. 단 염소소독실시에 있어서 실험번호 1, 2는 염소접촉시간을 15분으로 한 것이고 실험번호 3, 4는 염소접촉시간을 45분으로 한 것이다.

수직급속모래여과의 경우, 각 항목별 처리효율은 KMnO₄소비량에 대해서 9~30%, NH₃-N에 대해서는 6~15%, NO₃-N에 대해서 10~23%, 탁도에 대해서는 51~73%, 대장균군에 대해서는 85~100%, 일반세균에 대해서는 89~100%를 나타내었다. 이때 처리수의 잔류염소의 농도는 0.06~0.42 mg/l이었다. 또한 염소소독을 실시할 때는 생물학적 수질항목이 음용수수질기준에 적합한 것으로 나타났다.

여과처리만 했을 경우와 비교하면 KMnO₄소비량에 대해서 처리효율이 평균 12.97%에서 21.12%로 8.14% 증가하였으며, NH₃-N에 대해서는 평균 0.59%,

NO₃-N에 대해서는 10.9%, 대장균군에 대해서는 60.55% 증가한 것으로 나타났다.

수직급속이층(모래와 안트라사이트)여과의 경우, 각 항목별 처리효율은 KMnO₄소비량은 25~60%, NH₃-N은 6~8%, NO₃-N은 13~30%, 탁도는 54~75%, 대장균군은 85~100%, 일반세균은 89~100%를 나타내었다. Cleasby¹⁰⁾에 의하면 대장균군의 처리효율은 계절에 상관없이 86~97% 이상으로 보고되어 본 연구와 비슷한 결과를 보이고 있다.

여과처리만 했을 경우와 비교하면 KMnO₄소비량에 대해서 처리효율이 평균 18.92%에서 37.76%로 18.84% 증가하였으며, NH₃-N에 대해서는 평균 0.86%, NO₃-N에 대해서는 평균 13.08%, 대장균군에 대해서는 평균 30.62% 증가한 것으로 나타났다.

(2) 수직 및 수평 완속여과

수직완속여과와 수평완속여과에 염소소독을 추가 실시한 처리수의 수질분석결과와 처리효율은 Table 6과 같다. 단 염소소독에 있어서 실험번호 1, 2는 염소접촉시간을 15분으로 하였고 실험번호 3, 4는 염소접촉시간을 45분으로 하였다.

수직완속여과의 경우, 각 항목별 처리효율은 KMnO₄소비량에 대해서 72~87%, NH₃-N에 대해서 81~96%, NO₃-N에 대해서 62~87%. 탁도에 대해서 71~78%, 대장균군의 처리효율은 100%, 일반세균에 대해서 99.74% 이상을 나타내었다. 그리고 염소소독을 실시할 때는 미생물이 거의 사멸되어 음용수 수질기준에 적합한 것으로 나타났다.

Table 5. Experimental results and treatment efficiencies in vertical rapid sand filtration and chlorination 70 cm (VRSFC70) & vertical rapid dual media (sand and anthracite) filtration and chlorination 70 cm (VRS AFC70)

Item (Units)	No. of Samples	VRSFC70			VRS AFC70		
		Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)	Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)
Consumed KMnO ₄ (mg/l)	1	15.83	12.88	18.63	15.83	11.03	30.32
	2	12.67	10.44	9.49	12.67	9.49	25.10
	3	13.57	9.49	30.07	13.57	5.43	59.96
	4	20.58	15.18	26.23	20.58	13.24	35.67
NH ₃ -N (mg/l)	1	2.50	2.34	9.40	2.50	2.36	5.60
	2	9.04	7.68	15.04	9.04	8.48	6.19
	3	2.24	2.10	10.25	2.24	2.05	8.49
	4	6.44	5.64	12.42	6.44	6.08	5.59
NO ₃ -N (mg/l)	1	13.90	12.50	10.07	13.90	13.08	5.90
	2	18.10	15.60	13.26	18.10	15.40	14.80
	3	14.00	11.70	16.43	14.00	9.80	30.00
	4	23.20	17.80	23.28	23.20	19.10	21.98
Turbidity (NTU)	1	5.50	1.50	72.73	5.50	1.60	70.91
	2	3.50	1.70	51.43	3.50	1.60	54.29
	3	4.70	1.50	68.09	4.70	1.50	68.09
	4	9.80	2.60	73.46	9.80	2.50	74.49
Coliform (count/50 ml)	1	5,400	N.D.	100.00	5,400	5	99.91
	2	5,400	24	99.56	5,400	3	99.95
	3	2,400	350	85.42	2,400	300	87.50
	4	4	N.D.	100.00	4	N.D.	100.00
Bacteria (count/1 ml)	1	39,100	3	99.99	39,100	22	99.99
	2	27,260	240	99.12	27,260	32	99.88
	3	38,000	5,100	86.58	38,000	4,700	87.63
	4	18	2	88.89	18	1	9.44

여과처리만 했을 경우와 비교하면 KMnO₄ 소비량에 대해서 처리효율이 평균 64.75%에서 80.63%로 15.88% 증가하였으며, NH₃-N에 대해서는 33%, NO₃-N에 대해서는 평균 15.31%, 대장균군에 대해서는 평균 27.31%, 일반세균에 대해서는 29.63% 증가한 것으로 나타났다.

수평완속여과의 경우, 각 항목별 처리효율은 KMnO₄ 소비량에 대해서 66~70%, NH₃-N에 대해서 76~95%, NO₃-N에 대해서 53~75%, 탁도에 대해서 73~79%, 대장균군은 100%, 일반세균에 대해서 99.92% 이상을 나타내었다. 수평여과에서는 모래층의 앞부분에 쌓여있는 찌꺼기(clogging)를 제거시키기 위해서 역세척(back-washing)을 실시함으로써 여과율의 감소를 방지할 수 있으며 장기간 동안 모래층의 세척없이 운전이 가능할 것으로 판단된다. 또한 모래층의 깊이가 낮아 모래층을 완전히 교

체시킬 때에도 큰 어려움이 없는 것으로 판단된다. 따라서 수평여과시설은 수직여과시설보다 더 경제적인 것이며 단위공정의 유지가 더 간편하고 쉬울 것이다.

여과처리만 했을 경우와 비교하면 KMnO₄ 소비량에 대해서 처리효율이 평균 60.48%에서 67.97%로 7.49% 증가하였으며, NH₃-N에 대해서는 평균 15%, NO₃-N에 대해서는 평균 7.7%, 대장균군에 대해서는 평균 18.47%, 일반세균에 대해서는 19.69% 증가한 것으로 나타났다. 급속여과의 경우처럼 염소소독은 상수처리에 생물학적인 요소 뿐만 아니라 산화작용에 의해 기타 수질오염물질의 처리에도 도움을 주는 것으로 나타나 수처리 과정에서 필수적임을 보여주고 있다.

3) 여과모래층의 깊이에 따른 처리효율

위의 여과시험과 소독시험을 통하여 소독장치를

Table 6. Experimental results and treatment efficiencies in vertical slow sand filtration and chlorination 80 cm (VSSFC80) & horizontal slow sand filtration and chlorination 80 cm (HSSFC80)

Item (Units)	No. of Samples	VSSFC80			HSSFC80		
		Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)	Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)
Consumed KMnO ₄ (mg/l)	1	12.67	2.67	79.48	12.47	4.02	66.69
	2	15.83	2.53	84.02	15.24	4.74	68.82
	3	13.57	1.81	86.66	13.20	4.50	65.90
	4	20.58	5.69	72.35	15.24	4.50	70.47
NH ₄ -N (mg/l)	1	9.04	1.72	80.97	3.40	0.80	76.47
	2	2.50	0.30	88.00	3.95	0.55	86.07
	3	2.24	0.08	96.43	1.50	0.22	85.33
	4	6.44	0.37	94.25	3.95	0.20	94.93
NO ₃ -N (mg/l)	1	18.10	6.90	61.80	14.10	4.00	71.63
	2	13.90	3.20	84.17	21.90	5.70	73.97
	3	14.00	2.90	79.27	14.60	6.80	53.42
	4	23.20	3.04	86.90	21.90	5.50	74.90
Turbidity (NTU)	1	3.50	1.00	71.43	6.50	1.70	73.84
	2	5.50	1.20	78.18	9.40	2.50	73.40
	3	4.70	1.40	75.00	4.50	0.95	78.89
	4	9.80	2.20	77.55	9.00	2.20	75.56
Coliform (count/50 ml)	1	5,400	N.D.	100.00	2,600	N.D.	100.00
	2	5,400	N.D.	100.00	2,000	N.D.	100.00
	3	2,400	N.D.	100.00	2,600	N.D.	100.00
	4	4	N.D.	100.00	2,000	N.D.	100.00
Bacteria (count/1 ml)	1	39,100	N.D.	100.00	12,000	N.D.	100.00
	2	27,260	N.D.	100.00	4,100	N.D.	100.00
	3	38,000	99	99.74	12,000	10	99.92
	4	18	N.D.	100.00	4,100	N.D.	100.00

포함하는 완속여과법이 간이상수도의 처리에 적합할 것으로 판단되며 이에 대한 설계를 할 때 고려할 수 있도록 모래층의 깊이에 대한 실험을 실시하였다.

(1) 수직완속여과

수직완속여과법에서 모래층의 깊이를 변화시켜 처리한 처리수의 각 항목별 수질분석결과와 처리효율은 Table 7과 같다. 단 염소소독실시에 있어서 실험번호 1, 2는 염소접촉시간을 15분으로 하였고 실험번호 3, 4는 염소접촉시간을 45분으로 하였다.

Table 7에서 보는 바와 같이 각 항목별 처리효율은 모래층의 깊이가 60 cm일 때, KMnO₄소비량에 대해서 37~63%, NH₄-N에 대해서 48~60%, NO₃-N에 대해서 58~76%, 탁도에 대해서 60~68%, 대장균군에 대해서 100%, 일반세균에 대해서 99.92% 이상의 제거를 나타내었다. 이 때 처리수의 잔류염소 농도는 0.26~0.29 mg/l이었다.

모래층의 깊이가 45 cm일 때, KMnO₄소비량에 대

해서 5~11%, NH₄-N에 대해서 21~38%, NO₃-N에 대해서 20~40%, 탁도에 대해서 44~57%, 대장균군에 대해서 99.46% 이상, 일반세균에 대해서 99.42% 이상의 제거를 나타내었다. 이 때 처리수의 잔류염소농도는 0.22~0.26 mg/l이었다.

모래층의 깊이가 80 cm에서 60 cm로 감소하였을 때 처리효율의 변화를 살펴보면, KMnO₄소비량에 대해서 31.42%, NH₄-N에 대해서 33.47%, NO₃-N에 대해서 11.67%, 탁도에 대해서 12.37% 감소하는 경향을 나타내었고, 모래층의 깊이가 60 cm에서 45 cm로 감소하였을 때에는 KMnO₄소비량에 대해서 41.65%, NH₄-N에 대해서 24.79%, NO₃-N에 대해서 35.26%, 탁도에 대해서 10.97% 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 KMnO₄소비량, NH₄-N, NO₃-N 및 탁도에 대한 처리효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 모래층의 깊이라고 분석되었고, 대장균군과 일반세균은 모래층의 깊이에는 큰 영향을 받지

Table 7. Experimental results and treatment efficiencies in vertical slow sand filtration and chlorination 60 cm (VSSFC60) & 45 cm (VSSFC45)

Item (Units)	No. of Samples	VSSFC60			VSSFC45		
		Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)	Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)
Consumed KMnO ₄ (mg/l)	1	12.67	5.36	57.70	12.70	12.06	5.04
	2	11.40	7.17	37.10	14.50	13.93	4.34
	3	12.67	4.70	62.90	12.70	11.43	10.00
	4	11.40	6.94	39.13	14.50	12.98	10.85
NH ₃ -N (mg/l)	1	6.37	3.31	48.04	4.99	3.92	21.44
	2	6.07	2.43	59.97	4.95	3.07	37.97
	3	6.37	2.70	57.62	4.99	3.84	28.82
	4	6.07	2.42	60.13	4.95	3.05	38.38
NO ₃ -N (mg/l)	1	13.30	3.70	72.18	11.60	7.00	39.66
	2	14.40	6.10	57.64	10.65	8.50	20.18
	3	13.30	3.20	75.94	11.60	6.94	40.17
	4	14.40	5.80	59.72	10.65	8.05	24.41
Turbidity (NTU)	1	9.50	3.50	63.16	5.20	2.40	53.85
	2	6.60	2.10	68.18	6.80	3.80	44.12
	3	6.20	2.50	59.68	4.20	1.80	57.14
	4	6.00	2.30	61.67	15.00	6.20	53.68
Coliform (count/50 ml)	1	2,200	N.D.	100.00	1,600	8	99.50
	2	3,500	N.D.	100.00	2,400	13	99.46
	3	2,200	N.D.	100.00	1,600	2	99.88
	4	3,500	N.D.	100.00	2,400	6	99.75
Bacteria (count/1 ml)	1	4,410	1	99.98	4,700	4	99.91
	2	6,430	5	99.92	5,200	30	99.42
	3	4,410	N.D.	100.00	4,700	3	99.94
	4	6,430	2	99.97	5,200	10	99.81

않으며 염소처리에 의해서 제거되었다.

실험결과 모래층의 깊이가 60 cm일 때 까지가 음용수수질기준에 적합한 처리수를 생산할 수 있고, 모래층의 깊이가 45 cm일 때는 부적합한 것으로 분석되었다.

Gecaga²³⁾에 의하면 정수처리공정에서 모래층의 깊이가 최소한 60 cm까지 적합하고, 운전 기간중에 모래상부층(10~20 mm)을 규칙적으로 제거하기 때문에 1년동안 모래층을 재충진하지 않기 위해서 새로운 모래층은 100~140 cm로 재충진해야 한다고 보고하였다. Visscher²⁴⁾에 의하면 모래층의 최소 깊이는 60 cm로 하고, 새로운 모래층의 깊이는 모래상부층을 일부 제거하기 위하여 80~90 cm로 충전해야 한다고 보고하였다. 또한 Ellis²⁵⁾에 의하면 모래층의 초기 깊이는 120 cm로 하고, 운전 기간중 최소의 깊이는 65 cm로 보고하였다.

이와 같은 기존의 연구결과와 실험결과를 토대로

판단해 볼 때, 수직완속여과의 경우에는 운전상의 편의를 위해서 초기 모래층의 깊이를 100~120 cm로 하고 운전기간중에 60~65 cm가 되었을 때 모래를 재충진하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(2) 수평완속여과

Table 8은 수평완속여과법에서 모래층의 깊이를 변화시켜 처리한 처리수의 각 항목별 수질분석결과와 처리효율을 나타낸 것이다. 단 염소소독실시에 있어서 수직완속여과법과 같이 실험번호 1, 2는 염소접촉시간을 15분으로 하였고 실험번호 3, 4는 염소접촉시간을 45분으로 하였다.

모래층의 깊이에 따른 각 항목별 처리효율은 모래층의 깊이가 60 cm일 때 KMnO₄소비량에 대해서 50~60%, NH₃-N에 대해서 53~64%, NO₃-N에 대해서 52~75%, 탁도에 대해서 66~67%, 대장균군에 대해서 100%, 일반세균에 대해서 99.71% 이상의 제거를 나타내었다. 이 때 처리수의 잔류염소 농도

Table 8. Experimental results and treatment efficiencies in horizontal slow sand filtration and chlorination 60 cm (HSSFC60) & 45 cm (HSSFC45)

Item (Units)	No. of Samples	HSSFC60			HSSFC45		
		Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)	Raw Water	Treated Water	Treatment Efficiency(%)
Consumed KMnO ₄ (mg/l)	1	12.98	5.68	56.24	11.40	7.93	30.44
	2	12.67	6.30	50.04	12.70	9.53	25.04
	3	12.98	5.20	59.94	11.40	7.80	31.57
	4	12.67	6.33	50.28	12.70	9.50	25.19
NH ₃ -N (mg/l)	1	4.85	2.27	53.20	2.65	1.65	37.74
	2	3.90	1.40	64.10	3.90	1.64	23.36
	3	4.85	1.87	61.44	2.65	1.62	38.87
	4	3.90	1.34	64.27	2.14	1.50	29.90
NO ₃ -N (mg/l)	1	14.70	3.80	74.15	13.90	9.70	27.61
	2	11.20	5.40	51.78	14.60	12.10	17.12
	3	11.70	3.61	75.44	13.90	9.22	33.67
	4	11.20	5.30	52.69	14.60	11.90	18.49
Turbidity (NTU)	1	6.80	2.30	66.18	5.50	2.50	54.55
	2	6.00	2.40	66.00	5.60	2.40	57.40
	3	5.80	2.00	65.52	4.60	2.00	56.52
	4	4.80	1.60	66.67	6.80	2.90	57.35
Coliform (count/50 ml)	1	3,000	N.D.	100.00	170	N.D.	100.00
	2	80	N.D.	100.00	330	N.D.	100.00
	3	3,000	N.D.	100.00	170	N.D.	100.00
	4	80	N.D.	100.00	330	N.D.	100.00
Bacteria (count/1 ml)	1	15,000	3	99.98	750	8	98.93
	2	700	2	99.71	4,700	17	99.64
	3	15,000	1	99.99	750	6	99.20
	4	700	1	99.861	4,700	13	99.72

는 0.22~0.24 mg/l이었다.

모래층의 길이가 45 cm일 때 KMnO₄ 소비량에 대해서 25~32%, NH₃-N에 대해서 23~39%, NO₃-N에 대해서 17~34%, 탁도에 대해서 55~57%, 대장균군에 대해서 100%, 일반세균에 대해서 99.20% 이상의 제거를 나타내었다.

이 때 처리수의 잔류염소 농도는 0.23~0.35 mg/l이었다. 모래층 길이가 80 cm에서 60 cm로 감소하였을 때 각 항목별 처리효율의 변화를 살펴보면, KMnO₄ 소비량에 대해서 13.84%, NH₃-N에 대해서 24.95%, NO₃-N에 대해서 4.96%, 탁도에 대해서 10.83% 감소하는 경향을 나타내었고, 모래층 길이가 60 cm에서 45 cm로 감소하였을 때에는 KMnO₄ 소비량에 대해서 26.07%, NH₃-N에 대해서 28.28%, NO₃-N에 대해서 39.30%, 탁도에 대해서 8.13% 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 수직완속여과실험의 결과와 같이 KMnO₄ 소비량, NH₃-N,

NO₃-N, 탁도에 대한 처리효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 모래층의 길이라고 분석되었고, 대장균군과 일반세균은 모래층의 길이에는 큰 영향을 받지 않으며 염소처리에 의해서 제거되었다.

IV. 결 론

본 연구과제는 상수공급 취약지역으로 판단되는 농촌지역의 간이상수도에 대한 수질조사를 실시하여 수질상의 문제점과 수처리시설의 필요성을 파악하였다. 또한 급속여과, 완속여과 및 소독에 대한 실험장치를 제작하여 여러조건하에서의 처리효율을 비교 분석하여 적절한 수처리 시설의 중요설계인자를 제시하였다.

이와같은 조사와 실험결과의 중요한 성과는 다음과 같다.

1. 수질조사지역을 대상으로 수도전의 수질조사 결과에 의하면 이화학적 항목인 질산성질소에 대해

서는 8.3%가, 생물학적 항목인 대장균군에 대해서는 16.67%가, 일반세균에 대해서는 8.3%가 음용수수질 기준을 초과하는 것으로 조사되어 수처리시설의 필요성을 보여주고 있다.

2. Pilot-plant 실험결과에 의하면 염소소독을 실시하지 않은 경우 수직급속모래여과 및 수직급속이층여과의 처리효율은 KMnO_4 소비량, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 대장균군 및 일반세균에 대해 매우 낮게 나타나 간이급수시설로서 부적합한 것으로 분석되었다.

3. 염소소독을 실시하였을 경우 수직급속모래여과 및 수직급속이층여과에서는 대장균군 및 일반세균 등은 염소소독에 의하여 대부분 사멸되었으나 KMnO_4 소비량, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 탁도 등 이화학적 항목의 처리효율이 낮게 나타나 간이급수시설로서 부적합한 것으로 분석되었다.

4. 염소소독을 실시하지 않은 경우, 모래층 길이가 80 cm, 60 cm인 수직 및 수평완속여과의 처리효율은 KMnO_4 소비량, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 탁도 등에 대해서 높게 나타났으나 대장균군과 일반세균에 대해서는 음용수수질기준에 부적합한 것으로 나타났다. 또한 모래층의 깊이가 45 cm인 경우에는 이화학적, 생물학적 항목에 대한 처리효율이 매우 낮게 나타나 간이급수시설로서 부적합한 것으로 분석되었다.

5. 염소소독을 실시한 경우에는 모래층 길이가 80 cm, 60 cm인 수직 및 수평완속여과의 처리효율은 KMnO_4 소비량, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 탁도 등에 대해서 높게 나타났고 대장균 군과 일반세균은 거의 사멸되어 음용수수질기준에 적합한 것으로 나타났다. 그러나 모래층의 깊이가 45 cm인 경우에는 대장균군과 일반세균은 거의 사멸되었으나 이화학적 항목에 대한 처리효율이 매우 낮게 나타나 간이급수시설로서 부적합한 것으로 분석되었다.

6. 수평여과방법은 역세척으로 비교적 간단히 모래층의 앞부분에 쌓이는 찌꺼기를 제거할 수 있어 수직여과에 비해 장기간동안 모래층의 세척이나 교환없이 운전이 가능하며 모래층을 완전히 교체할 때에도 모래층의 깊이가 낮아 작업이 쉽다. 또한 처리효율도 수직완속여과와 같아 관리자가 절대적으로 부족한 우리나라의 실정에 적합할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 93년도 한국과학재단(과제번호 KOSEF 90-07-00-07)의 연구비 지원에 의해 수행

되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) David, E., Leland, Mel Damewood III : Slow sand filtration at small systems in oregon, Journal AWWA, **82**(6), 50-59, 1990.
- 2) Visscher, J. T. : slow sand filtration: design, operation, and maintenance, Journal AWWA, **82**(6), 67-71, 1990.
- 3) Udom Kompayak, Thonglaw Dejthai : Treatment efficiency and filtration rate of a horizontal sand filtration system, Asia-Pacific Journal of Public Health, **4**(4), 1990.
- 4) 환경처 : 수질오염공정시험법, 1990.
- 5) 보건사회부 : 음용수 관리 관련 규정, 1990.
- 6) APHA-AWWA-WPCF : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater., Washington, D.C. (16th), 1985.
- 7) 출성군 : 통계연보, 1991.
- 8) 보건사회부 : 간이급수시설의 시공 및 관리, 1989.
- 9) 보건사회부 : 음용수관리편람, 1991.
- 10) 한국식품연구소 : 음용수수질기준 관련 제도 연구, 1992.
- 11) 보건사회부 : 음용수 수질기준에 관한 기준, 1991.
- 12) 안수한 : 수리학, 1976.
- 13) Schwartz A.N. : Using Smart, 1986.
- 14) 이홍근 외 2인 : 농어촌의 안전급수대책과 분뇨처리 방안의 설정, 1977.
- 15) Tuepker, J. L. and C. A. Buescher, Jr. : Operation and Maintenance of rapid sand mixed-media filters in a lime softening plant. Journal AWWA, **60**, 1377, 1969.
- 16) Cleasby, J.L. : filtration - back to the basics, AWWA seminar Proceedings, S-1-5, 59-84, 1981.
- 17) 한국수자원공사 : 고도 정수처리 공정에 관한 연구, 1991.
- 18) 한양대학교 : 농어촌 간이 위생급수에 관한 시설기준 연구, 1972.
- 19) Cleasby, J.L. : Slow sand filtration and direct in-Line filtration of a Surface Water, AWWA seminar Proceedings, S-6-2, 1-40, 1983.
- 20) Miltner, R.J., et al : Pilot-plant exploration of slow rate filtration, AWWA seminar Proceedings, S-6-4, 59-78, 1983.
- 21) Collins, M.R., Taylor Eighmy : Removing Natural Matter by Conventional Slow Sand Filtration, Journal AWWA, (3), 80-84, 1992.
- 22) Gecaga, G. : Simple water treatment methods, Proceedings of a workshop on training held in Zomba, Malawi, 1980.
- 23) Ellis, K. V : Slow sand filtration, Developing world water, 196-198, 1988.