

물 재이용을 위한 다중수원 혼합 비율 산정 기술 개발

이상호*, 이주영
국민대학교 건설시스템공학과

Development of Technology for Calculating Mixing Ratio of Multi-source Waters for Water Reuse

Sangho Lee*, Juyoung Lee
Department of Civil Engineering, Kookmin University

요약 물 재이용은 기후요인과 관계없이 안정적인 수량을 확보할 수 있으나, 다른 수원에 비하여 수질과 비용 측면에서 불리한 점을 가지고 있다. 따라서 본 연구는 물 재이용의 효율성을 제고하기 위한 방법으로서 다중수원(빗물, 지표수, 지하수 등)의 혼합 활용의 가능성을 수질 측면에서 검토하기 위한 목적으로 추진되었다. 먼저 다중수원으로부터의 유입수를 혼합하여 활용할 때의 재이용수 수질기준 부합 여부를 검토하였으며, 다양한 혼합 유입수에 대하여 물 재이용 수질기준을 고려한 처리공정 적용비율의 최적화 방안을 모색하였다. 연구결과 각각의 수원별로 수질특성이 상이하고 활용목적별 수질기준도 다르므로 다중수원의 혼합비율을 조절함으로써 수질기준에 대한 부합성이 높은 유입수를 만들 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 혼합비율별 수질기준 부합여부를 정리한 표를 작성하였으며, 이는 다중수원 활용을 위한 의사결정을 지원하는 자료가 될 것으로 기대한다. 한편, 다중수원 유입수의 혼합 만으로는 수질기준을 모두 만족시킬 수 없는 경우가 있기 때문에 수처리 공정을 적용해야 하므로 본 연구에서는 수처리 공정의 적용방법과 수처리 비율을 결정하기 위한 방법론을 개발하였다.

Abstract Regardless of climate factors, wastewater reuse provides an ongoing water supply. However, several disadvantages are associated with water quality and cost compared to other water sources. Mixed utilization of multiple water sources (rainwater, surface water, groundwater, etc.) may improve the efficiency of water reuse. This study investigates the potential of the method and evaluates the water quality. Mixed multiple water sources were first examined to determine if they complied with the water quality standards for recycled water. Thereafter, a plan was developed for optimizing the application ratios of water treatment processes for various mixed feed waters by considering the recycled water quality standards. Our results revealed that water quality characteristics differ for each water source, and the water quality standards for each purpose of use are different. By adjusting the mixing ratio of multiple water sources, the feed water can fulfill the required water quality standards. We further present a table to summarize whether the water quality standards for each mixing ratio were met. This data can be used to support decision-making for the use of multiple water sources. Since water quality standards may not be met by merely mixing multi-source inflow water, this study also established a methodology to determine the application method and water treatment ratio for the water treatment process.

Keywords : Water Reuse, Multiple Water Sources, Mixing, Water Quality Standards, Optimization, Water Treatment

본 논문은 환경부의 재원으로 한국수자원공사(K-water)의 연구과제(A-C-002)로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sangho Lee(Kookmin University)

email: sanghlee@kookmin.ac.kr

Received November 18, 2022

Revised January 10, 2023

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

물은 사람들이 살아가는데 필요한 중요한 자원이며 농업, 산업, 에너지 부문의 발전을 위한 필수 요소이나 증가하는 수요와 기후 변화는 물의 수요와 공급 간의 불균형을 초래하고 있다 [1]. 사람들의 활동을 위한 물의 취수는 1900년대 0.67조 m³/년에서 2000년 3.79조 m³/년으로 증가하였으며, 이는 2050년까지 55 % 증가할 것으로 추정된다 [2]. 한편, 우리나라는 연평균강수량에 비해 인구밀도가 높아 1인당 연평균강수량이 2591 m³로 세계평균의 13 %에 불과하며 1인당 이용 가능한 수자원은 연평균 1511 m²로 국제인구행동연구소의 물 스트레스 (Water-stressed) 국가로 평가받고 있다 [3]. 따라서 물의 수급 불균형 문제를 해결하기 위한 지속가능한 대안이 전세계적으로 필요하고 우리나라도 예외가 아니라고 판단된다 [4].

부족한 물을 확보하는 여러 가지 방법 중에서 최근 관심을 모으고 있는 것은 물 재이용이다. 이는 단순히 사용한 물을 재사용함으로써 물 부족을 완화시킨다는 의미 이상을 가지고 있으며, 물 재이용을 통해서 기존 수자원 관리의 선형경제구조 수준을 넘어서 적극적인 형태의 순환경제구조로 전환하는 것을 촉진하는 의미를 포함한다 [5]. 즉, 기존에 사용 후 방류수질 기준 이하의 수준으로 처리된 뒤 방류되던 물을, 추가로 처리하여 재이용할 수 있는 단계까지 수질을 끌어올림으로써 방류수를 최소화하고 재활용을 극대화하는 것은 수자원 순환경제구조 실현에 도움이 된다 [6]. 우리나라 물 재이용량은 2018년

기준으로 전체 수자원 이용량 대비 4 %인 총 15.2억 m³이며 하수처리장 방류수 중약 15.5 %를 재이용하는 것으로 조사되었다 [7].

재이용에 의하여 확보된 물은 주로 비음용 목적으로 활용된다. 일부 국가에서는 직접 또는 간접 음용수 재이용을 실행하고 있으며, 해수담수화와 비교했을 때 상대적으로 낮은 에너지 사용량(1 kWh/m³)을 보일 수 있는 것으로 보고되고 있다 [8]. 그러나 사용자들의 수용성 문제 때문에 직접 음용수 재이용 뿐 아니라 간접 음용수 재이용도 제한적으로만 적용되고 있으며, 우리나라 뿐 아니라 전 세계적으로 주로 먹는물 외의 용도로 물 재이용이 적용이 되고 있다 [9]. 도시용수로서의 물 재이용은 지난 20년동안 물 부족 지역을 중심으로 지속적으로 증가되었으나 일부 사례에서는 사회적 및 경제적 진입장벽이 존재하는 것으로 분석되었다 [10]. 농업용수 확보를 위한 물 재이용도 계속 증가하는 추세이나, 수질 안정성 측면에서의 타당성에 대한 지속적인 논의가 있다. 한편, 생활하수 처리수의 재처리와 폐수 재이용을 통한 공업용수 확보도 많은 관심을 모으고 있으며 다양한 행태로 진행되고 있다 [11-14].

우리나라에서 물 재이용은 비음용 목적의 생활용수, 농업용수, 공업용수 등 다양한 사용처를 가지고 있다. 우리나라 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행규칙상의 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준에 의하면 물 재이용의 용도는 도시 재이용수, 조경용수, 친수용수, 하천 유지용수, 농업용수(직접 식용, 간접 식용), 습지용수, 지하수 충전, 공업용수 등으로 구분된다. 수요

Table 1. Water quality guidelines for water reuse in Korea

Water source	Biochemical oxygen demand (BOD)	Electrical conductivity (EC)	Turbidity (TUR)	Total coliform Unit/mL (TC)	pH
	mg/L	μS/cm	NTU	Unit/mL	-
Urban non-potable reuse (UR)	5	-	2	N.D.	5.8~8.5
Landscape reuse water (LR)	5	-	2	200	5.8~8.5
Recreation reuse water (RR)	3	-	2	N.D.	5.8~8.5
River maintenance reuse (MR)	5	-	-	1,000	5.8~8.5
Irrigation reuse water, direct human consumption (IR)	8	700	2	N.D.	5.8~8.5
Industrial process reuse (PR)	6	-	10	200	5.8~8.5

수질항목으로는 생물학적인 안전성과 관련된 총대장균군수와 결합잔류염소, 심미적인 영향과 관련된 탁도와 부유물질, 냄새, 색도, 수질오염과 관련된 생물화학적 산소요구량(BOD: Biochemical Oxygen Demand, 이하 BOD), 총질소, 총인, 수소이온농도, 염화물, 전기전도도 등이 있다. 각각의 용도별로 수질항목별 기준값은 상이하며, 특히 지하수 충전의 경우는 먹는물의 수질기준을 준수해야 한다. Table 1은 물 재이용수 기준 중에서 대표적인 용도별 항목에 대한 수질기준을 비교하고 있다 [15].

물 재이용은 기후요인과 관계없이 안정적인 수량을 확보할 수 있으나 [16], 다른 수원에 비하여 수질과 비용 측면에서 불리한 점도 가지고 있으며 이로 인한 사용자들의 반대여론이 발생하기도 한다 [17]. 즉, 물 재이용 시스템의 유입수는 비교적 높은 농도의 유기오염물질이 포함되어 병원성 미생물에 의한 오염 가능성도 존재한다 [18,19]. 또한 경우에 따라서는 미량오염물질에 의한 수질저하가 문제가 될 수 있다 [20]. 따라서 이를 안전하게 처리하기 위하여 물리화학적 처리가 필요하며 중수도의 경우 생물학적 처리가 적용되기도 하며, 시설 설치비용과 운영 및 유지관리 비용이 높아질 수 있다 [9,10].

따라서 물 재이용의 단점을 보완하기 위해서는 빗물과 지하수 등 다른 사용가능한 수원과 혼합하여 사용하는 것이 고려될 수 있다 [21]. 실제로 싱가포르 등의 국가에서는 다양한 다중수원의 활용에 의하여 물 재이용의 효과를 높이고 있다 [22]. 다중수원활용은 안정적인 수자원의 확보와 물 공급 안정성 향상, 비용 절감 등의 목적으로 최근 활발하게 검토되고 있다 [23]. 대표적인 사례로는 빗물이용과 중수도의 하이브리드 시스템이 있으며, 이 경우 수량이 불안정하고 수질이 양호한 빗물과 수량이 안정적이

고 수질이 다소 낮은 중수의 복합활용은 시너지 효과를 발휘하는 것으로 보고되고 있다 [24,25]. 그러나 아직까지 우리나라에서 다중수원 활용은 제한적으로만 고려되었으며, 특히 수질 측면에서의 다중수원 활용 최적화에 대한 연구는 진행된 적이 없다.

따라서 본 연구에서는 물 재이용의 효율성을 제고하기 위한 다중수원(빗물, 지표수, 지하수 등)의 혼합 활용의 가능성을 수질 측면에서 검토하고자 하였다. 먼저 다중수원으로부터의 유입수를 혼합하여 활용할 때의 재이용수 수질기준 부합 여부를 검토하였다. 그리고 다양한 혼합 유입수에 대하여 물 재이용 수질기준을 고려한 처리 공정 적용비용의 최적화 방안을 모색하고자 하였다.

2. 실험 및 연구 방법

2.1 실험 재료 및 방법

2.1.1 실험 대상 원수

본 연구에서 사용한 다중수원의 경우, 빗물, 지하수, 하천수, 하수 2차 처리수로 사용하였으며, 각각 수원은 건물 옥상, 지하수 펌프장, H 수중 보, G 환경사업소에서 취수하였다. 취수 후에는 냉장고에서 4 °C 이하의 조건으로 보관하였으며 24시간 이내에 실험 및 분석을 수행하였다.

2.1.2 수처리 방법 및 조건

본 연구에서 선택한 수처리 방법은 정밀여과(MF: Microfiltration, 이하 MF)와 입상활성탄 여과(GAC: Granular activated carbon, 이하 GAC)를 조합하는 것이며, 전자는 입자성 물질(탁도)과 미생물 제거를 목적으로 하였고 후자는 유기 오염물질 제거를 목적으로 하였다. 사용한 막과 활성탄의 사양과 실험조건은 Table 2에 제시되어 있다.

2.1.3 수질 분석

분석항목은 물 재이용 수질기준 상의 항목에 포함되어 있는 BOD, 전기전도도, 탁도, 총대장균군을 선정하였으며, 분석조건은 수질오염공정시험법[26]에 준하여 설정하였다.

2.2 연구 방법

2.2.1 다중수원 활용 시스템 정의

Fig. 1은 본 연구에서의 다중수원 활용 시스템의 범위와 구성을 나타내고 있다. 다중수원으로는 빗물(RW: Rain Water, 이하 RW), 지하수(GW: Ground water, 이하 GW), 지표수(SW: Surface Water, 이하 SW), 재이용수(WW: Reclaimed Wastewater, 이하 WW)의 4가지를 여러 가지 비율로 혼합한 유입수를 고려하였다. 활용 목적으로는 Table 1에 제시된 도시 재이용수(UR: Urban Water, 이하 UR), 조경용수(LR: Landscape Reuse Water, 이하 LR), 친수용수(RR: Recreational Reuse Water, 이하 RR), 하천 유지용수(MR: River Maintenance Reuse Water, 이하 MR), 농업용수(IR: irrigation reuse water, 이하 IR), 공업용수(PR: Process Reuse Water, 이하 PR)의 6가지를 고려하였

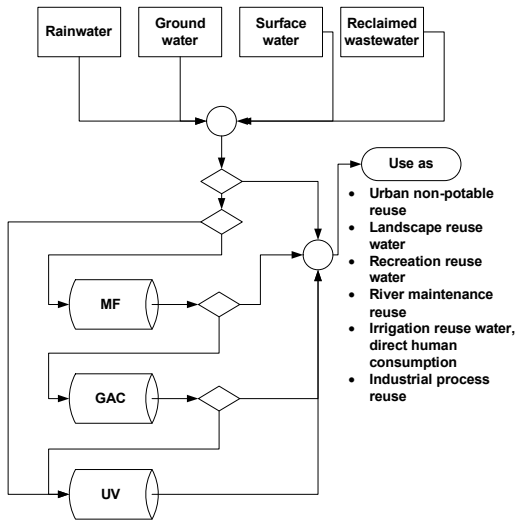


Fig. 1. Process scheme for utilization of multiple water sources

다. 만약 다중수원을 혼합한 유입수가 수질기준에 부합하는 경우는 처리하지 않고 바로 활용하고 그렇지 못한 경우에는 수질기준에 부합하기 위하여 전체 또는 일부를 MF와 GAC로 처리하는 방법을 고려하였다.

Table 2. Optimum parameters for group model

Type	Specification	Operating conditions
Microfiltration (MF)	Type: hollow fiber Nominal pore size: 0.1 μm Materials: Poly vinylidene fluoride (PVDF)	Flux: 30 L/m ² -hr
Granular activated carbon (GAC)	Norit 830, 8x30 mesh	Flow rate: 300 ml/min
UV disinfection	Low pressure mercury UV lamp, 16W	20 sec

2.2.2 다중수원 혼합수의 수질 계산

다양한 비율의 다중수원 혼합수에 대한 수질을 모두 분석하는 대신 본 연구는 이론적인 계산을 수행하였다. 다중수원 혼합수의 이론적 수질은 물질수지에 기반하여 다음의 식으로 계산하였다.

$$c_{m,j} = \frac{\sum_{i=1}^n c_{i,j} V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

여기서 $c_{m,j}$ 은 다중수원 혼합수 중 j 번째 오염물질의 농도이며, $c_{i,j}$ 는 i 번째 다중수원의 j 번째 오염물질 농도, V_i 는 i 번째 다중수원의 부피이다.

수질기준을 만족하지 못하는 유입수의 경우 이를 만족시키기 위해서 유입수 중 일부를 처리한 후 처리하지 않은 유입수와 혼합하는 방법을 검토하였으며, 이에 대한 이론적인 비율을 계산하기 위하여 다음과 같은 식을 유도하였다. j 번째 오염물질의 수질기준을 $c_{c,j}$ 라고 하고 $c_{m,j}$ 가 이를 초과한다면 부피 V 의 유입수 중에 비율 R 에 해당하는 부분에 대하여 제거율 r 을 가지는 수처리 방법으로 처리한 후 남은 미처리된 유입수와 혼합하여 수질기준을 만족시킬 수 있다. 이때 R 의 최소값에 대하여 다음의 식이 성립하여야 한다.

$$\frac{(1-R)c_{m,j}V + R(1-r)c_{m,j}V}{V} = c_{c,j} \quad (2)$$

위의 식을 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c_{m,j} - c_{m,j}rR = c_{c,j} \quad (3)$$

즉, 수질기준을 만족시키기 위한 최소의 처리 비율 R 은 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{cases} 1 - \frac{c_{c,j}}{c_{m,j}} \\ R = \frac{c_{m,j}}{r} & \text{if } c_{m,j} > c_{c,j} \\ R = 0 & \text{if } c_{m,j} \leq c_{c,j} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 R 이 0 또는 이에 가까운 값을 가지는 것이 좀 더 경제적이며, 1 또는 이에 가까운 값을 가지는 것은 수처리 공정의 적용에 의한 추가적인 비용이 소요된다는 것을 의미하게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1 다중수원 유입수 수질 비교

Table 3은 본 연구의 대상으로 한 다중수원 유입수의 수질을 비교하여 제시하고 있다. 빗물의 경우 총대장균군을 제외한 모든 수질항목에서 가장 양호한 수질을 나타냈다. 지하수는 BOD와 전기전도도, 탁도가 빗물보다 다소 높은 편이었지만 총대장균군은 검출되지 않았다. 지표수는 가장 탁도가 높은 것으로 나타났으며 하수처리

수는 BOD와 총대장균군 항목에서 가장 높은 값을 보였다. 모든 유입수에서 pH는 6.5~7.9로 중성으로 나타났다.

앞서 분석된 수질을 Table 1의 용도별 수질기준과 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. O으로 표시된 것은 수질기준에 부합되는 것이며, X로 표시된 것은 수질기준을 부합하지 못하는 것을 의미한다. 빗물은 도시 재이용수와 친수용수, 농업용수 기준을 만족하지 못하는데 이는 총대장균군 항목이 기준치 이상이기 때문이었다. 반면에 조경용수와 하천 유지용수, 공업용수의 경우 검토대상 수질항목을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 반면 지하수의 경우 모든 용도에 대한 검토대상 수질기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 지표수는 탁도와 총대장균수 기준을 만족하지 못하는 경우가 빈번하게 나타났으며, 하수처리수는 BOD와 탁도, 총대장균수 기준을 만족하지 못하는 경우가 대부분이었다. 따라서 하수처리수의 재이용을 위해서는 유기물 제거를 위한 흡착, 산화, 또는 생물학적 분해 등의 공정과 탁도 제거를 위한 침전 또는 여과 공정, 그리고 미생물 불활성화를 위한 소독공정 등이 필요하다. 한편, 모든 유입수가 농업용수에 대한 전기전도도 기준을 만족하는 것으로 나타나서 용존이온의 추가적인 제거는 어느 경우든 필요하지 않을 것으로 판단된다.

3.2 다중수원 유입수 혼합에 의한 수질 조정

3.2.1 2가지 다중수원의 혼합

Fig. 2는 2종류의 다중수원을 혼합하였을 때 혼합비에 따른 수질의 변화를 나타낸 것이다. 수질이 가장 양호한 조합인 빗물(RW)과 지하수(GW)의 경우(Fig. 2(a))에는 전기전도도를 제외한 다른 항목에서는 혼합비율에 따른 농도의 변화가 비교적 크지 않은 것을 볼 수 있다. 반면에 수질 차이가 비교적 큰 지표수(SW)와 지하수(GW)를 혼합한 경우(Fig. 2(b))에는 혼합비율에 따른 수질변화가 좀 더 크게 나타났다. 다른 조합에서도 유사한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 오염물질 농도의 절대값은 다르지만 전체적인 경향은 비슷하게 나타났다. 이러한 결과는 서로 다른 유입수를 혼합함으로써 수질을 조절함으로써 추가적인 처리를 하지 않더라도 용도별로 적용되는 수질기준을 만족할 수 있게 할 수 있다는 것을 보여준다. 즉, 이는 수질이 다른 유입수의 혼합비를 조절함으로써 수질기준을 만족시키는 최적의 조건을 찾을 수 있음을 의미한다.

Table 3. Water quality parameters for multi-source waters

Water source	Biochemical oxygen demand (BOD)	Electrical conductivity (EC)	Turbidity (TUR)	Total coliform Unit/mL (TC)	pH
	mg/L	μS/cm	NTU	Unit/mL	-
Rainwater (RW)	1.0	40	1	50	6.5
Ground water (GW)	2.0	600	1.3	0	7.5
Surface water (SW)	2.5	150	4	400	7.3
Wastewater (WW)	5.5	530	2.5	30,000	7.9

Table 4. Suitability of different water sources for various water usages

Source	UR				LR				RR				MR				IR				PR			
	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
RW	O	-	O	X	O	-	O	O	O	-	O	X	O	-	-	O	O	O	O	X	O	-	O	O
GW	O	-	O	O	O	-	O	O	O	-	O	O	O	-	-	O	O	O	O	O	O	-	O	O
SW	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X
WW	X	-	X	X	X	-	X	X	X	-	X	X	X	-	-	X	X	O	X	X	X	-	O	X

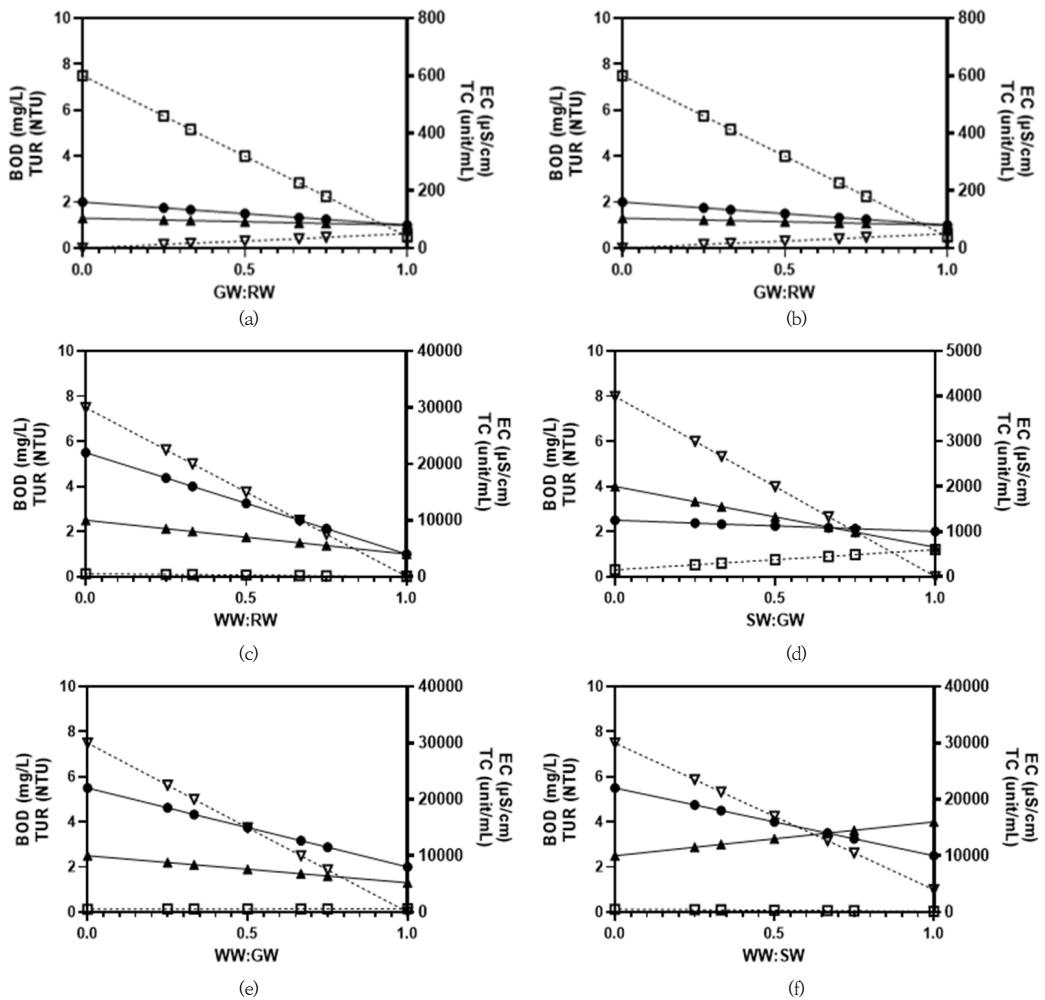


Fig. 2. Effect of mixing ratio on water quality (a) rainwater (RW) and ground water (GW) (b) rainwater (RW) and surface water (SW) (c) rainwater (RW) and wastewater (WW) (d) ground water (GW) and surface water (SW) (e) ground water (GW) and wastewater (WW) (f) surface water (SW) and wastewater (WW) (●: BOD, □: Electrical conductivity, ▲: Turbidity, ▽: Total coliform)

Table 5에 제시된 결과는 2가지 유입수의 혼합비율에 따라 용도별 수질기준 상의 수질항목 만족 여부를 O/X로 표시한 것이다. 여기서 혼합비율은 각 수원별 상대 분율로 나타내었다. 예를 들어 빗물(RW)과 지하수(GW)를 3:1로 혼합한 경우 각각 3/4와 1/4로 표시하도록 하였다. 표에 나타난 결과를 보면 도시 재이용수와 친수용수, 농업용수는 총대장균군이 불검출되어야 하기 때문에 빗물을 지하수와 혼합하더라도 수질기준을 만족할 수 없는 것을 알 수 있다. 반면에 지표수를 빗물과 혼합하였을 때 비율이 1:3인 조건에서 도시 재이용수, 조경용수, 친수용수, 농업용수에 대한 탁도 기준을 만족시킬 수

있는 것을 확인할 수 있다. 하수처리수와 빗물 혼합한 경우에도 혼합비율이 1:3 (1/4과 3/4), 1:2 (1/3과 2/3), 1:1 (1/2과 1/2) 조건에서 상기 용도에 대한 탁도 기준을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한 하수처리수는 BOD가 5.5 mg/L로 측정되어 도시 재이용수, 조경용수, 하천유지용수의 BOD 기준인 5 mg/L를 약간 초과하는데 다른 BOD가 낮은 유입수와 1:3~3:1 범위의 비율로 혼합함으로써 기준을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 BOD 기준이 3 mg/L인 친수용수의 경우 하수처리수와 지표수의 조합으로는 수질목표 달성이 불가능하였으며, 하수처리수 및 지하수의 1:3 비율과 하

Table 5. Effect of mixing ratio on suitability for different water usages (Binary mixing)

Source		UR				LR				RR				MR				IR				PR			
RW	GW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	○	○	○	○	X	○	-	-	○	○	-	○	X	○	○	○	○
2/3	1/3	○	-	○	X	○	-	○	○	○	○	○	X	○	-	-	○	○	-	○	X	○	○	○	○
1/2	1/2	○	-	○	X	○	-	○	○	○	○	○	X	○	-	-	○	○	-	○	X	○	○	○	○
1/3	2/3	○	-	○	X	○	-	○	○	○	○	○	X	○	-	-	○	○	-	○	X	○	○	○	○
1/4	3/4	○	-	○	X	○	-	○	○	○	○	○	X	○	-	-	○	○	-	○	X	○	○	○	○
RW	SW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
2/3	1/3	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/2	1/2	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/3	2/3	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/4	3/4	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
RW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
2/3	1/3	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
1/2	1/2	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
1/3	2/3	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/4	3/4	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
GW	SW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
2/3	1/3	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/2	1/2	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/3	2/3	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/4	3/4	○	-	X	X	○	-	X	X	○	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
GW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
2/3	1/3	○	-	○	X	○	-	○	X	○	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
1/2	1/2	○	-	○	X	○	-	○	X	X	○	○	X	○	-	-	X	○	-	○	X	○	○	○	X
1/3	2/3	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/4	3/4	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
SW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
2/3	1/3	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/2	1/2	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/3	2/3	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X
1/4	3/4	○	-	X	X	○	-	X	X	X	○	X	X	○	-	-	X	○	-	X	X	○	○	○	X

수처리수 및 빗물의 1:3과 1:2 조합에서만 수질목표 달성성이 가능하였다. 이러한 결과는 2가지 다중수원의 수질과 최종 처리수질 목표가 정해지면 함수식과 표를 이용하여 최적의 혼합비율을 결정할 수 있음을 보여준다. 또한 각 수원에 대한 생산단가 정보가 있으면 최적의 경제성을 가지는 혼합비율 역시 산출할 수 있다.

3.2.2 3가지 다중수원의 혼합

Table 6은 3종류의 다중수원을 혼합하였을 때의 용도별 수질항목의 기준 만족 여부를 나타내고 있다. 2종류의 다중수원을 혼합한 경우에 비하여 좀 더 복잡한 양상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 유입수별 가장 낮

은 값을 보이는 수질항목이 서로 상이하기 때문이다. 예를 들면 총대장균군수를 줄이기 위해서는 지하수의 비율이 높은 것이 유리하며, 탁도와 전기전도도, BOD를 줄이기 위해서는 빗물의 비율이 높은 것이 유리하다. 반면에 하수처리수의 비율이 높아지면 오염물질의 농도가 전반적으로 높아지며, 특히 탁도의 경우 지표수 비율의 영향을 가장 크게 받는다. 앞서 설명한 바와 같이 다중수원의 혼합비율을 조정함으로써 수질을 조정할 수 있으며, Table 6은 최적의 혼합비율을 도출하기 위한 기초자료로서 활용될 수 있다. 예를 들면 친수용수에서 BOD만 고려할 때 최적의 빗물, 지표수, 하수처리수 혼합비율은 표에 의하면 2:1:1(1/2, 1/4, 1/4), 1:2:1(1/4, 1/2,

Table 6. Effect of mixing ratio on suitability for different water usages (Tertiary mixing)

Source			UR				LR				RR				MR				IR				PR							
RW	GW	SW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
1/3	1/3	1/3	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/2	1/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
1/4	1/2	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
2/5	2/5	1/5	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	○	○	○	○	X	○	-	○	X				
1/4	1/4	1/2	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
2/5	1/5	2/5	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/5	2/5	2/5	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
RW	GW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
1/3	1/3	1/3	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
1/2	1/4	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
1/4	1/2	1/4	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
2/5	2/5	1/5	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
1/4	1/4	1/2	○	-	○	X	○	-	○	X	X	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
2/5	1/5	2/5	○	-	○	X	○	-	○	X	X	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
1/5	2/5	2/5	○	-	○	X	○	-	○	X	X	-	○	X	○	-	-	X	○	○	○	X	○	-	○	X				
RW	SW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
1/3	1/3	1/3	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/2	1/4	1/4	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/4	1/2	1/4	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
2/5	2/5	1/5	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/4	1/4	1/2	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
2/5	1/5	2/5	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/5	2/5	2/5	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
GW	SW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
1/3	1/3	1/3	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/2	1/4	1/4	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/4	1/2	1/4	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
2/5	2/5	1/5	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/4	1/4	1/2	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
2/5	1/5	2/5	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				
1/5	2/5	2/5	○	-	X	X	○	-	X	X	X	-	X	X	○	-	-	X	○	○	X	X	○	-	○	X				

1/4), 2:2:1(2/5, 2/5, 1/5)이며, 지하수, 지표수, 하수 처리수 혼합비율은 표에 의하면 2:2:1이다. 다만 3가지 다중수원 조합의 경우 다양한 경우의 수가 있으므로 최적의 혼합비율을 산정하는 것이 2가 지 다중수원 조합에 비하여 복잡해지며, 표를 이용한 방식보다는 함수식을 이용한 최적해 계산 등의 방법을 사용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

3.2.3 4가지 다중수원의 혼합

Table 7은 4종류의 다중수원 유입수를 혼합하였을 때의 용도별 수질항목의 기준 만족 여부를 나타내고 있다. 여기서도 마찬가지로 각 용도별수질항목 만족을 위한 적정 비율이 나타나는 것을 알 수 있다. 예를 들면 도시 재이용수와 조경용수, 친수용수, 농업용수의 경우 빗물, 지하수, 지표수, 하수처리수의 비율이 2:1:1:1 또는

1:2:2:1 조건에서 탁도 기준을 만족시킬 수 있었다. 검토한 모든 조합에서 BOD는 기준을 초과하지 않았으나 총대장균군은 모두 기준을 초과하였다.

3.3 다중수원 혼합 유입수의 수처리 비율

앞에서의 결과에서 나타난 바와 같이 다중수원 유입수의 혼합비율을 조절함으로써 수질을 조정하여 용도별 수질기준을 만족시킬 수 있는 경우가 있으나 그렇지 못한 경우도 있다. 이 경우 수처리 기술을 적용해야 하나, 비용과 효율을 생각할 때 수질에 맞게 적절한 비율에 대해서만 처리를 하고 미처리하여 우회(bypass)시킨 유입수와 혼합하여 수질을 조정할 수 있다. 따라서 여기서는 몇 가지 다중수원 조합에 대한 적절한 수처리 적용 비율을 산정하고자 하였다.

Table 7. Effect of mixing ratio on suitability for different water usages (Quaternary mixing)

Source				UR				LR				RR				MR				IR				PR							
RW	GW	SW	WW	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC	BOD	EC	TUR	TC
2/5	1/5	1/5	1/5	O	-	O	X	O	-	O	X	O	-	O	X	O	-	-	X	O	O	O	X	O	-	O	X				
1/5	2/5	1/5	1/5	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X				
1/5	1/5	2/5	1/5	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X				
1/5	1/5	1/5	2/5	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X				
1/6	1/3	1/3	1/6	O	-	O	X	O	-	O	X	O	-	O	X	O	-	-	X	O	O	O	X	O	-	O	X				
1/6	1/3	1/6	1/3	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X				
1/6	1/6	1/3	1/3	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X				
1/4	1/4	1/4	1/4	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	X	X	O	-	-	X	O	O	X	X	O	-	O	X				

3.3.1 수처리 효율

정밀여과와 활성탄을 적용하여 여러 유입수를 처리한 후 그 결과를 정리하여 Fig. 3에 도시하였다. 전기전도도는 정밀여과와 활성탄 처리 전후에 변화가 없었으므로 표시하지 않았으며, 총대장균군의 경우 정밀여과 후 불검출로 나왔으므로 역시 표시하지 않고 BOD와 탁도만 나타내었다. BOD의 경우 정밀여과 후에는 약 4 % 감소하는 결과가 나왔으며 탁도는 약 92 % 감소하는 것으로 나타났다. 활성탄 처리 후 탁도는 오차범위 내에서 약간 증가하였으나 BOD 제거율은 약 61 %이었다. 정밀여과-활성탄 조합공정 전체적으로는 BOD 62 % 제거율과 탁도 90.3 % 제거율을 보였다. UV 소독의 경우 탁도와 전기전도도는 변화하지 않고 총대장균군만 불검출로 나왔으므로 그래프에 포함하지 않았다.

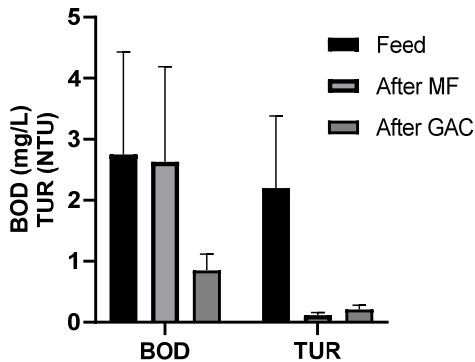


Fig. 3. Effect of mixing ratio on water quality (n=4)

3.3.2 수질기준 만족을 위한 수처리 비율 계산

다중수원 혼합 유입수에 대한 수처리 방법을 선정하기 위하여 Fig. 1에 제시된 바와 같이 몇 가지 종류의 수처리 방법을 고려하였다.

- ① 유입수 전량 무처리 (No treatment)
- ② 유입수 전량 정밀여과 처리
- ③ 유입수 전량 정밀여과-활성탄 처리
- ④ 유입수 전량 정밀여과-활성탄-소독 처리
- ⑤ 유입수 전량 소독 처리
- ⑥ 유입수 일부 정밀여과 처리 후 우회시킨 미처리 유입수와 혼합
- ⑦ 유입수 일부 정밀여과-활성탄 처리 후 우회시킨 미처리 유입수와 혼합
- ⑧ 유입수 일부 정밀여과-활성탄 처리 후 정밀여과 처리된 유입수와 혼합
- ⑨ 유입수 일부 정밀여과-활성탄-소독 처리 후 Bypass된 미처리 유입수와 혼합
- ⑩ 유입수 일부 소독 처리 후 우회시킨 미처리 유입수와 혼합

앞서 유도된 Eq. (4)를 이용하여 몇 가지 다중수원 혼합의 경우에 대한 수처리 비율을 계산하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 유입수가 수질기준을 만족하는 경우 수처리가 필요하지 않으며, 이 경우 수처리 비율은 0.0이 된다. 반면에 유입수 전부를 처리해야 하는 경우 수처리 비율이 1.0이 되며 일부 처리의 경우 0.0에서 1.0 사이의 값을 가지게 된다. 또한 각 경우에 있어 해당되는 모든 수질항목을 만족시키기 위해서는 행에 제시된 수처리 비율 중 최대값을 적용하게 된다.

Table 8에서 빗물과 하수처리수를 혼합하여 도시 재이용수로 활용하는 경우 총대장균군을 제외하면 대부분 수질기준을 만족하는 것을 볼 수 있다. 다만 빗물과 하수처리수의 비율이 1:2인 경우 탁도 기준을 약간 초과하여 약 7 %의 유입수를 처리한 후 미처리된 유입수와 혼합하여 수질을 조정하는 것이 필요할 것으로 나타났다. 한편 도시 재이용수에서 총대장균군은 불검출되어야 하므로 혼합비율과 관계없이 유입수는 전량 처리되어야 한다.

Table 8. Effect of treatment ratio on suitability for different water usages (Binary mixing)

Source		UR			
RW	WW	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	0.00	-	0.00	1.00
2/3	1/3	0.00	-	0.00	1.00
1/2	1/2	0.00	-	0.00	1.00
1/3	2/3	0.00	-	0.00	1.00
1/4	3/4	0.00	-	0.07	1.00
0	1	0.15	-	0.23	1.00

Source		LR			
GW	WW	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	0.00	-	0.00	0.97
2/3	1/3	0.00	-	0.00	0.98
1/2	1/2	0.00	-	0.00	0.99
1/3	2/3	0.00	-	0.05	0.99
1/4	3/4	0.00	-	0.10	0.99
0	1	0.15	-	0.23	0.99

Source		MR			
SW	WW	BOD	EC	TUR	TC
3/4	1/4	0.00	-	-	0.90
2/3	1/3	0.00	-	-	0.92
1/2	1/2	0.00	-	-	0.94
1/3	2/3	0.00	-	-	0.95
1/4	3/4	0.00	-	-	0.96
0	1	0.15	-	-	0.97

이 경우 활성탄에 의한 유기물 처리는 필요하지 않으므로 정밀여과 또는 단순히 소독처리만으로도 재이용이 가능한 것으로 나타났다. 반면 하수처리수 단독으로 활용하는 경우 유입량의 약 15 %를 정밀여과-활성탄 여과로 처리해야만 수질기준을 만족할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 분석을 통하여 다중수원 혼합을 통한 수처리 비용의 절감 가능성을 확인할 수 있다.

위의 사례와 유사하게 지하수와 하수처리수를 혼합하여 조경용수로 활용하는 경우에도 BOD 수질기준을 만족시킬 수 있었으며, 혼합비율이 3:1, 2:1, 1:1인 경우에는 탁도 기준도 만족시킬 수 있었다. 반면에 총대장균군 기준 만족을 위해서는 혼합비율에 따라 97 %~99 %의 수처리 비율을 보이고 있어 거의 전량 처리되어야 함을 나타낸다. 따라서 이 경우 혼합비율을 조정하여 탁도 기준을 만족시킨 후 전량 소독처리를 거쳐 수질기준을 만족시키는 방법이 타당할 것으로 보인다. 한편, 하수처리수만 활용하는 경우 BOD 기준으로 전체의 15 %, 탁도 기준으로 전체의 23 % 처리가 필요하므로 활성탄과 정밀여과 처리의 적용이 필요하다.

지표수와 하수처리수를 혼합하여 하천유지용수로 활용하는 경우를 살펴보면 3:1에서 1:3까지의 혼합비율에

서는 BOD는 수질기준 이하로 나타났으나 총대장균군수 기준을 초과하여 전체의 90 %~97 %가 처리되어야 한다. 따라서 이 경우에도 입자성 물질까지 제거하는 정밀여과보다는 소독처리만을 하는 것이 타당하다. 반면에 하수처리수만 활용하는 경우에는 BOD 기준 초과로 인하여 유기물 제거를 위한 활성탄 공정의 도입이 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 물 재이용의 효율성을 제고하기 위하여 빗물, 지표수, 지하수, 하수처리수 등의 다중수원을 혼합하여 활용할 때의 수질변화에 대하여 고찰하였다. 연구 결과 상이한 수질을 가지는 다중수원의 혼합비율에 따른 수질변화를 예측할 수 있었으며, 이를 바탕으로 재이용수 수질기준과의 부합여부를 판단할 수 있는 체계적인 방법론을 개발하였다. 또한 본 연구를 통하여 다중수원 혼합비율에 따라서 재이용수 수질기준을 만족시키는 최적의 수처리 공정의 적용방법과 수처리 비율을 결정하기 위한 기법을 개발하였다. 여기서 개발된 방법을 이용하면 다중수원의 활용에 소요되는 비용을 최소화하고 적합한 수질을 유지할 수 있을 것으로 기대한다.

Abbreviations

- BOD Biochemical oxygen demand
- EC Electrical conductivity
- GAC Granular activated carbon
- GW Ground water
- IR Irrigation reuse water
- LR Landscape reuse water
- MF Microfiltration
- MR River maintenance reuse water
- PR Process reuse water
- RR Recreational reuse water
- RW Rainwater
- SW Surface water
- TC Total coliforms
- TUR Turbidity
- UR Urban reuse water
- WW Reclaimed wastewater

References

- [1] T. Manungufala, "Water Scarcity: Classification, Measurement and Management", *Clean Water and Sanitation*, 1-14, Mar. 2021.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70061-8_7-1.
- [2] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Environmental outlook to 2050: The consequences of Inaction. OECD and the PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, OECD, pp.9-10
DOI: <https://doi.org/10.1787/97892264188563-en>.
- [3] Ritchie, H., Roser, M. Water Use and Stress [Internet]. Our World in Data, c2017 [cited 2022 July 20], Available from: <https://ourworldindata.org/water-use-stress> (Access date: 20 July 2022).
- [4] M.-Y. Lee, and J. A. M. Mendoza. "Evaluation and Diagnosis for Policy of Water Reuse in the Republic of Korea". *Water Cycle*, 3:171-79, pp.3-4, Jan. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.11.001>.
- [5] G. Mannina, H. Gulhan, and B.-J. Ni. "Water Reuse from Wastewater Treatment: The Transition Towards Circular Economy in the Water Sector", *Bioresour. Technology*, 363: 127951, pp.4-5, Nov. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951>.
- [6] N. Voulvoulis. "Water Reuse from a Circular Economy Perspective and Potential Risks from an Unregulated Approach" *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2:32-45, pp.32-35, Apr. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>.
- [7] Ministry of Environment Republic of Korea, Ministry of Environment in the Republic of Korea 2014-2018, Technical Report, Ministry of Environment Republic of Korea, Korea, pp.174-178.
- [8] E. W. Tow, A. L. Hartman, A. Jaworowski, I. Zucker, S. Kum, M. AzadiAghdam, E. R. Blatchley, A. Achilli, H. Gu, G. M. Urper, and D. M. Warsinger. "Modeling the Energy Consumption of Potable Water Reuse Schemes" *Water Research X*, 13:100126, pp.105-108, Dec. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100126>.
- [9] P. Jeffrey, Z. Yang, and S. J. Judd. "The Status of Potable Water Reuse Implementation" *Water Research*, 214:118198, pp.126-129, May. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118198>.
- [10] K. Lee, and W. Jepson. "Drivers and Barriers to Urban Water Reuse: A Systematic Review" *Water Security*, 11:100073, pp.8-10, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100073>.
- [11] S. Ofori, A. Puškáčová, I. Růžicková, and J. Wanner. "Treated Wastewater Reuse for Irrigation: Pros and Cons" *Science of The Total Environment*, 760:144026, pp.8-10, Mar. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>.
- [12] S. Vainhandl, and J. V. Valh. "The Status of Water Reuse in European Textile Sector" *Journal of Environmental Management*, 141:29-35, pp.31-33, Aug. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.014>.
- [13] G. Chen, Y. Ye, N. Yao, N. Hu, J. Zhang, and Y. Huang. "A Critical Review of Prevention, Treatment, Reuse, and Resource Recovery from Acid Mine Drainage" *Journal of Cleaner Production*, 329:129666, pp.7-10, Dec. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129666>.
- [14] M. Date, V. Patyal, D. Jaspal, A. Malviya, and K. Khare. "Zero Liquid Discharge Technology for Recovery, Reuse, and Reclamation of Wastewater: A Critical Review" *Journal of Water Process Engineering*, 49:103129, Oct. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103129>.
- [15] Ministry of Environment Republic of Korea, Enforcement Rules of the Water Recycling Promotion and Support Act, Technical Report, Ministry of Environment Republic of Korea, Korea, pp.77-82.
- [16] P. Tram Vo, H. H. Ngo, W. Guo, J. L. Zhou, P. D. Nguyen, A. Listowski, and X. C. Wang. "A Mini-Review on the Impacts of Climate Change on Wastewater Reclamation and Reuse" *Science of The Total Environment*, 494-495:9-17, pp.12-16, Oct. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.090>.
- [17] H. M. Smith, S. Brouwer, P. Jeffrey, and J. Frijns. "Public Responses to Water Reuse: Understanding the Evidence" *Journal of Environmental Management*, 207:43-50, pp.45-47, Feb. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.021>.
- [18] L. Rizzo, R. Kratke, J. Linders, M. Scott, M. Vighi, and P. de Voogt. "Proposed Eu Minimum Quality Requirements for Water Reuse in Agricultural Irrigation and Aquifer Recharge: Scheer Scientific Advice" *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2:7-11, pp.8-10, Apr. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.004>.
- [19] V. Zhiteneva, U. Hubner, G. J. Medema, and J. E. Drewes. "Trends in Conducting Quantitative Microbial Risk Assessments for Water Reuse Systems: A Review" *Microbial Risk Analysis*, 16:100132, pp.110-117, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mran.2020.100132>.
- [20] Z. Cao, X. Yu, Y. Zheng, E. Aghdam, B. Sun, M. Song, A. Wang, J. Han, and J. Zhang. "Micropollutant Abatement by the Uv/Chloramine Process in Potable Water Reuse: A Review" *Journal of Hazardous Materials*, 424:127341, Feb. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127341>.
- [21] X. Ma, H. Wang, L. Yu, Y. Li, Y. Fan, J. Zhang, and J. Zhang. "Multi-Preference Based Interval Fuzzy-Credibility Optimization for Planning the Management of Multiple Water Resources with Multiple Water-Receiving Cities under Uncertainty" *Journal of Hydrology*, 591:125259, pp.127-128, Dec. 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125259>.

- [22] O. Lefebvre. "Beyond Newater: An Insight into Singapore's Water Reuse Prospects" *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2:26-31, pp.28-30. Apr. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.001>.
- [23] J. Y. Kim, J. H. Jung, Y. H. Yoon, J.-S. An, W. J. Kim, and H. J. Oh. "Development of Demand Prediction Simulator Based on Multiple Water Resources" *APCBEE Procedia*, 10:224-28, pp.25-27. Jan. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.10.043>.
- [24] M. Gomez-Monsalve, I. C. Dominguez, X. Yan, S. Ward, and E. R. Oviedo-Ocana. "Environmental Performance of a Hybrid Rainwater Harvesting and Greywater Reuse System: A Case Study on a High Water Consumption Household in Colombia" *Journal of Cleaner Production*, 345:131125, pp.9-12. Apr. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131125>.
- [25] A. K. Marinoski, and E. Ghisi. "Environmental Performance of Hybrid Rainwater-Greywater Systems in Residential Buildings" *Resources, Conservation and Recycling*, 144:100-14, pp.108-110. May. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.035>.
- [26] Ministry of Environment Republic of Korea, Standard for water pollution process test, Technical Report, Ministry of Environment Republic of Korea, Korea, pp.33-37.

이 주 영(Juyoung Lee)

[정회원]



- 2018년 2월 : 국민대학교 건설시스템공학과 (건설시스템공학학사)
- 2020년 2월 : 국민대학교 건설시스템공학과 (환경공학석사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 국민대학교 환경공학 박사과정

<관심분야>

막여과 공정, 스마트시티, 인공지능, 하폐수재이용

이 상 호(Yongjun Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공업화학박사)
- 1999년 3월 ~ 2003년 3월 : Northwester Univ. Senior Researcher
- 2003년 4월 ~ 2011년 2월 : 한국 건설기술연구원 책임연구위원
- 2011년 3월 ~ 현재 : 국민대학교 교수

<관심분야>

막여과 공정, 스마트시티, 인공지능, 모델링