

Original article

eDNA 포집용 채수 필터시스템 개발과 집수매거 취수지 내에서의 성능평가

곽태수 · 김원석¹ · 이선호¹ · 곽인실^{1,*}

경상국립대학교 기계공학부, ¹전남대학교 해양융합과학과

Development of the Filterable Water Sampler System for eDNA Filtering and Performance Evaluation of the System through eDNA Monitoring at Catchment Conduit Intake-Reservoir. *Tae-Soo Kwak* (0000-0002-3079-5436), *Won-Seok Kim*¹ (0000-0003-3368-3891), *Sun Ho Lee*¹ (0000-0002-3820-8515) and *Ihn-Sil Kwak*^{1,*} (0000-0002-1010-3965) (School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52725, Republic of Korea; ¹Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea)

Abstract A pump-type eDNA filtering system that can control voltage and hydraulic pressure respectively has been developed, and applied a filter case that can filter out without damaging the filter. The filtering performance of the developed system was evaluated by comparing the eDNA concentration with the conventional vacuum-pressured filtering method at the catchment conduit intake reservoir. The developed system was divided into a voltage control (manual pump system) method and a pressure control (automatic pump system) method, and the pressure was measured during filtering and the pressure change of each system was compared. The voltage control method started with 65 [KPa] at the beginning of the filtering, and as the filtering time elapsed, the amount of filtrate accumulated in the filter increased, so the pressure gradually increased. As a result of controlling the pressure control method to maintain a constant pressure according to the designed algorithm, there was a difference in the width of the hydraulic pressure fluctuation during the filtering process according to the feedback time of the hydraulic pressure sensor, and it was confirmed that the pressure was converged to the target pressure. The filtering performance of the developed system was confirmed by measuring the eDNA concentration and comparing the voltage control method and the hydraulic control method with the control group. The voltage control method obtained similar results to the control group, but the hydraulic control method showed lower results than the control group. It is considered that the low eDNA concentration in the hydraulic control method is due to the large pressure deviation during filtering and maintaining a constant pressure during the filtering process. Therefore, rather than maintaining a constant pressure during filtering, it was confirmed that a voltage control method in which the pressure is gradually increased as the filtrate increases with the lapse of filtering time is suitable for collecting eDNA. As a result of comparing the average concentration of eDNA in lentic zone and lotic zone as a control group, it was found to be 96.2 [ng μL^{-1}] and 88.4 [ng μL^{-1}], respectively. The result of comparing the average concentration of eDNA by the pump method was also high in the lentic zone sample as 90.7 [ng μL^{-1}] and 74.8 [ng μL^{-1}] in the lentic

Manuscript received 3 December 2021, revised 12 December 2021,
revision accepted 13 December 2021

* Corresponding author: Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-653-6620
E-mail: iskwak@chonnam.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

zone and the lotic zone, respectively. The high eDNA concentration in the lentic zone is thought to be due to the influence of microorganisms including the remaining eDNA.

Key words: eDNA, filterable water sampler, hydraulic pressure, filter case, monitoring

서 론

채수기는 물을 측정하거나 분석하기 위하여 강, 호수와 바다의 물을 퍼올리는 기구이다. 채수기의 종류는 그 목적에 따라 바닷물의 온도, 염분, 화학성분 등을 측정하기 위한 전도채수기와 상단에 절연체 뚜껑이 달려있어 전기나 열이 통하지 않는 절연채수기, 일정 시간 동안 일정량의 물을 자동으로 끌어올려 연속적인 수질의 변화를 측정하기 위한 자동채수기 등이 있다. 특히, 자동채수기는 환경부의 ‘수질 및 수생태계 보전에 관한 법률’에 의거하여 해당 기관에 설치, 운영되고 있다(Kim *et al.*, 2010). 최근 채수 및 담수의 수질 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 수생생물의 종과 다양성 평가를 통한 생물학적 수질환경을 모니터링하는 eDNA 분석 기술이 주목받고 있다(Kwak *et al.*, 2021). eDNA 분석 기술은 서식처에서 확보된 유기체의 DNA를 추출하여 분석하는 기술로서 생물종을 직접 포획하지 않고 수중에 있는 DNA를 포집하여 서식생물의 종을 신속하게 분석하므로 채집시간과 비용을 크게 절감할 수 있다(Kim *et al.*, 2021). 국립수산과학원은 해양환경 모니터링을 위해 CTD (Conductivity, Temperature, Depth)와 해양환경 관측센서를 연계하여 수심, 수온, 염분뿐만 아니라 광합성 광도, 질산염 농도, 용존 산소 등 해양환경 특성을 파악하는 용도로 채수 성능에 수질측정 성능을 추가한 로제트 채수기(Rosette sampler)를 개발하였다(Lee *et al.*, 2021). 현장 측정용 유량 센서를 자동채수기에 설치하고 원격 모니터링 기능을 장착하여 성능기준 개선 및 수질관리 체계를 구축하는 기술을 적용한 센서부착형 자동채수기를 개발하였다(Kim *et al.*, 2021). 유기물 측정법 중에서 채수시료의 여과 전, 후 총유기탄소량(Total Organic Carbon, TOC) 분석과 BOD 분석 결과 상관성 및 현탁물에 TOC 분석과 BOD 분석 결과 상관성 및 고형물에 대한 환경적 영향을 분석하기 위해 연소산화법과 습식산화법을 이용한 자동연속 유기물 측정 결과, 연소산화법의 원리를 이용한 TOC 측정기를 사용하는 것이 적절함을 제시하였다(Lee *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2018). 종래의 채수기는 일정량의 물을 채수 또는 센서를 이용한 탁도, 영양염, 용존산소 등의 화학적 수질 환경 특성을 분석하는 데 국한되어 있다. eDNA를 이용한 생태학적 수질특성 분석을 위해서는 별도의 분석이 독립적으로 이루어져야 하는 한계

가 있다. 수중에 잔존하는 유기체의 eDNA를 확보하기 위해서는 채수기를 이용한 채수, 포집, 원심분리기를 이용한 추출, eDNA 분석 과정을 거친다. 진공압을 이용한 포집 방식은 채수한 시료를 실험실에서 포집하는 방식이므로 상대적으로 많은 시간이 소요되고 시간 지연에 따른 DNA의 구조 변성 가능성이 높아 현장에서 채수와 포집이 동시에 가능한 펌프 방식의 eDNA 채수 필터시스템이 요구되고 있다. 펌프를 이용한 방식은 포집 과정에서 높은 압력에 의해 필터가 손상될 가능성이 있으므로 유체의 흐름을 방해하지 않고 적절한 압력과 유속을 유지하여 필터의 손상 없이 포집하는 필터케이스가 최근에 개발되었다(Lee *et al.*, 2021). 그러나 MCE (Mixed Cellulose Ester) 멤브레인 필터를 이용한 필터링은 수중의 유기물과 채수량이 많아짐에 따라 필터링 압력은 필연적으로 증가한다. 필터에 포집된 eDNA는 필터링 압력이 점진적으로 증가하여 과도한 압력에 도달하면 포집된 eDNA는 다시 유출될 가능성이 높다. 따라서 필터링이 종료될 때까지 포집된 eDNA가 다시 유출되지 않는 채수 및 포집시스템이 요구된다.

본 연구는 필터의 손상 없이 포집할 수 있는 필터케이스(Lee *et al.*, 2021)를 적용하고, 전압 제어와 압력 제어를 각각 할 수 있는 펌프 방식의 eDNA 포집 및 채수가 동시에 가능한 시스템을 개발하였다. 개발된 채수 필터시스템을 이용하여 집수매거 취수원의 eDNA를 모니터링하고 종래의 진공압 방식의 포집 및 추출 실험 결과와 eDNA 농도를 비교함으로써 채수 성능을 평가하였다.

실험 및 방법

1. 채수 필터시스템 설계 및 제작

eDNA 모니터링을 위한 채수 필터시스템은 조사지에서 채수와 포집이 동시에 이루어져야 채수 후 실내 이동에 따른 DNA 변성 예방과 시간적, 공간적 제약에서 자유로운 편의성을 확보할 수 있다(Lee *et al.*, 2021). Fig. 1은 채수와 포집을 동시에 할 수 있는 채수 필터시스템의 개요도이다. 현장 채수와 동시에 포집할 수 있는 시스템은 필터의 손상을 최소화하는 필터케이스 적용과 채수가 용이하고 필터링 압력을 유지할 수 있는 펌프 방식이 적합하다. 채수와 동시에 포집 필터링이 진행됨에 따라 필터는 유기

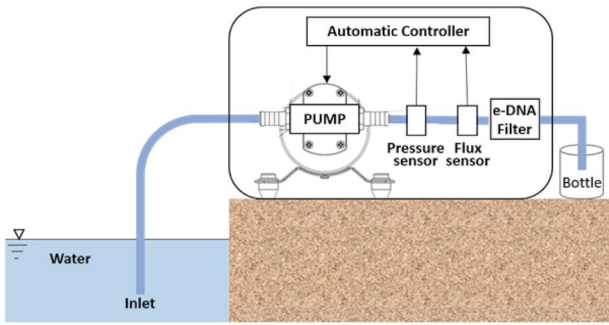


Fig. 1. Schematic diagram for water sampling using automatic pump system.

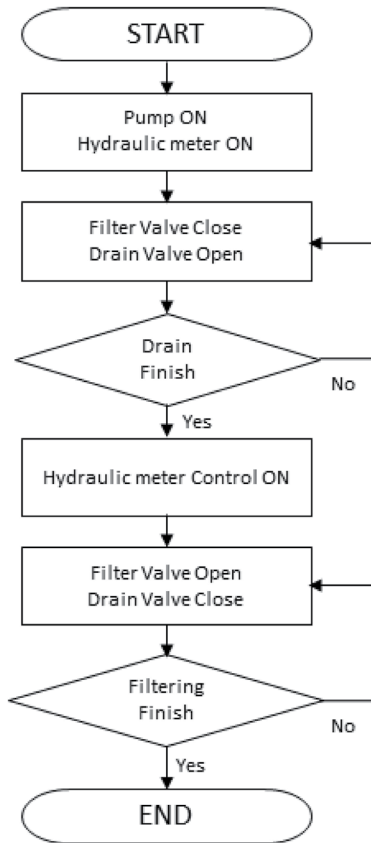


Fig. 2. Flow chart for hydraulic control in automatic pump system.

물을 포함한 미세입자들이 축적되어 시간이 지날수록 필터링 압력은 높아지는 특징이 있다. 따라서 펌프를 제어하여 일정 압력을 유지하는 방식과 펌프의 구동력을 일정하게 유지하여 강제적으로 필터링을 할 수 있도록 일정 전압을 유지하는 방식의 시스템을 설계하고 제작하였다. Fig. 2는 일정 압력제어 방식의 알고리즘을 플로우 차트로 나타낸 것이다. 드레인 모드와 필터링 모드로 구분되어 있으며

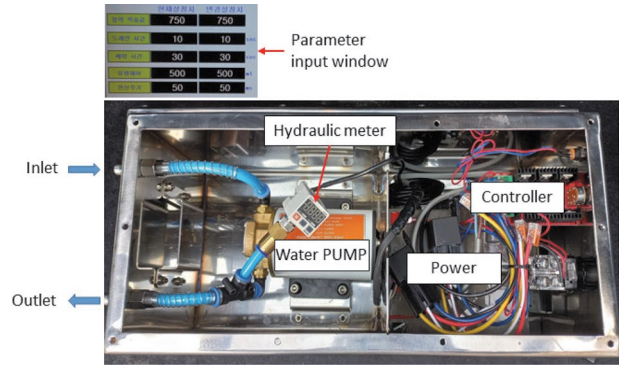


Fig. 3. Photograph of fabricated hydraulic control water sampling system.

초기 드레인은 펌프 내 유체를 채우기 위한 작업을 수행하고 이후에 필터링이 진행되도록 설계하였다. 이와 같은 알고리즘으로 제작된 시스템은 컨트롤러와 컨트롤 패널, 충전식 전원장치, 펌프, 압력센서 등으로 구성되어 있다(Fig. 3). 개발된 채수 필터시스템은 전압제어(Manual pump system) 방식과 압력제어(Automatic pump system) 방식으로 구분하여 필터 내부 압력을 측정하고 각 시스템의 압력 변화를 비교하였다. 각 시스템의 압력 변화 모니터링은 150초 동안 진행하였으며 실험용수는 수돗물을 수조에 채워 동일한 조건에서 실험하였다. 전압제어 방식은 초기 전압을 2.5 [V]로 설정한 후 필터링하면서 필터 내부의 압력을 측정하였다.

2. 집수매거 취수지의 eDNA 포집

개발된 시스템의 성능을 평가하기 위해 집수매거 취수지를 대상으로 채수와 포집을 수행하고 기존의 진공압 방식과 비교 검토하였다. 집수매거 취수 방식은 유공 콘크리트 또는 철근 콘크리트제의 관거를 이용하여, 주로 하천 독의 내외지, 하천부, 호수와 늪 부근의 복류수를 취수할 때 설치한다. 지하수위가 높고, 투수 계수가 큰 장소를 선정하여, 자갈층 또는 모래층 속의 복류수 흐름 방향에 직각으로 배관하여 취수한다. 집수매거 취수지는 하천 독으로 수위를 유지하므로 유속이 거의 없어 정수역에 해당한다. 정수역 환경에서는 정수역 환경을 선호하는 분류군과 오염에 대한 상대적 내성범위가 넓은 깔따구류(Chironomidae) 등의 중수 및 개체수 밀도가 높게 나타난다(Jo et al., 2019). 유수역 환경에서는 유수성 환경과 입자가 큰 하상구조를 선호하는 분류군의 출현이 높다(Peitz 2003; Davis et al., 2003; Sin et al., 2008). eDNA 모니터링을 위해서 정수역에 해당하는 하천 독 상류와 유수역에 해

당하는 하천 독 하류에서 채수와 포집을 하였다. 개발된 시스템은 현장 채수 및 필터링을 동시에 수행하였으며, 비교를 위한 진공압 방식 포집은 동일한 지점에서 원수를 채수하여 실험실에서 진공압 장치로 필터링하였다. 정수역에서는 전압제어 방식(Manual)과 압력제어 방식(Auto) 채수 필터시스템을 구분하고 실험실에서의 진공압 방식으로 포집된 대조군과 비교하였다. 정수역과 비교하기 위한 유수역에서는 전압제어 및 압력제어를 구분하지 않고 제작된 채수 필터시스템으로 현장에서 채수와 포집을 동시에 수행하고 실험실에서의 진공압 방식으로 포집된 대조군과 비교하였다. Fig. 4는 전라남도 보성취수장 집수매거 취수지에서 eDNA 모니터링을 수행한 정수역과 유수역 사진이며, Fig. 5는 개발된 채수 필터시스템을 이용한 채수 및 필터링 사진이다. 2021년 10월 15일 13시 30분경 정수역에서 샘플링을 시작하였으며, 수심 1m의 동일 지점에서 5회 반복하여 채수하였다. 채수 시간은 필터링 2분, 필터교체 1~2분, 채수 필터시스템 내부 세척 필요시 10~30여 초

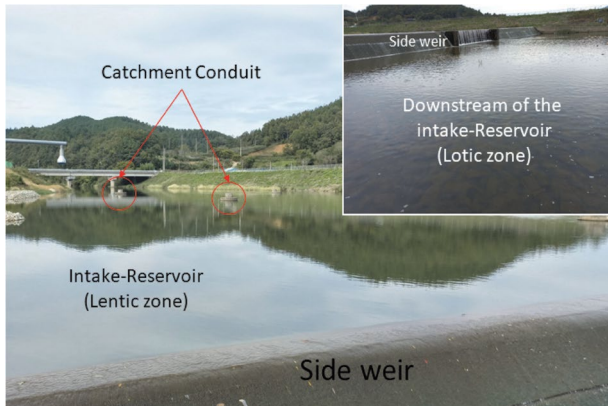


Fig. 4. Photograph of the site where the water sampling was conducted.

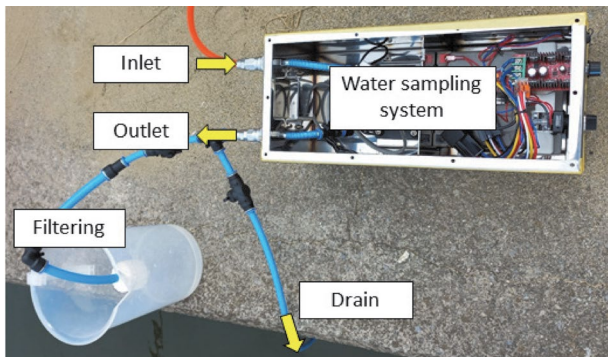


Fig. 5. Photograph of water sampling using pump type system (manual).

정도 소요되어 5분/회 정도였다. 정수역과 비교를 위해 유수역은 수심 50 cm 동일 하상에서 5회 반복하여 정수역과 동일한 방법으로 채수하였다.

3. eDNA 추출 및 농도측정 방법

개발된 시스템과 MCE 멤브레인 필터(Mixed Cellulose Ester, Pore size 0.45 μm ; Diameter 47 mm; Advantec, Japan)를 이용하여 정수역과 유수역에서 각각 필터링을 한 후 필터지를 수거하였다. 포집이 끝난 필터지는 분리되어 DNA lysis 용액에 침지하여 필터에 부착된 DNA를 용출시키는 처리를 거쳐 추출한다. 대조군은 진공압을 이용한 기존방식으로 포집하여 eDNA를 추출하고 그 결과를 비교하였다. 필터 교체 시 발생할 수 있는 오염방지를 위해서 멸균된 포셉으로 필터를 고정 및 수거하였다. 채수량은 각각 500 mL로 설정하였으며, 포집된 각각의 필터지는 멸균된 Conical (Falcon, 15 mL) 튜브에 넣고 DNA 추출 키트(DNeasy Blood and Tissue Kit, Qiagen, Germany)를 이용하여 지정된 비율(Miya *et al.*, 2015; Aman *et al.*, 2020; Otsathanunkul *et al.*, 2020; Sanches *et al.*, 2020; Schabacker *et al.*, 2020)에 따라 3차 멸균수(1,200 μL), Protease K (60 μL) 및 버퍼 ATL (540 μL)을 혼합하고 혼합 용액을 Conical 튜브에 분주하였다. 혼합 용액을 분주한 Conical 튜브는 56°C 항온수조에 넣어 30분 동안 용해시켰으며, 추가적으로 버퍼 AL (200 μL)을 넣고 56°C 항온수조에 10분 동안 용해시킨 후 원심분리기에서 6,000 g의 속도로 원심분리와 버퍼용액 혼합을 반복하여 eDNA를 추출하였다. 또한 마이크로 플레이트 판독기(Thermo Fisher Multiskan GO)를 사용하여 DNA 농도 및 품질을 측정하였다(Djurhuus *et al.*, 2017). DNA 추출은 마이크로 플레이트 판독기로 평균 흡광도 비율 260 nm와 280 nm 파장으로 DNA 순도를 평가하였다. 기존 연구(Djurhuus *et al.*, 2017)에 따라 DNA 순도는 1.8~2.0 비율 이내에 도달한 경우 분석에 사용할 수 있다.

결과 및 고찰

1. MCE 필터링의 포집

채수 필터시스템의 필터링 압력은 포집 성능에 영향을 미친다. 필터링 시 낮은 압력은 포집 성능 저하와 과도한 시간적 소모를 유발하며, 지나치게 높은 압력은 MCE 필터에 손상을 일으킬 가능성이 높다(Lee *et al.*, 2021). Fig. 6과 Fig. 7은 전압제어 방식과 압력제어 방식의 채수 필터시

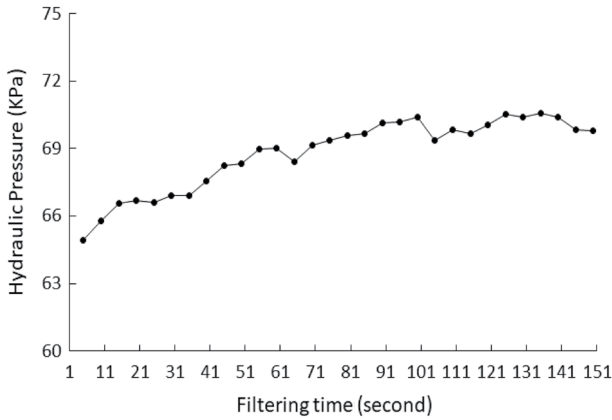


Fig. 6. Variation of hydraulic pressure vs. filtering time in using manual pump system.

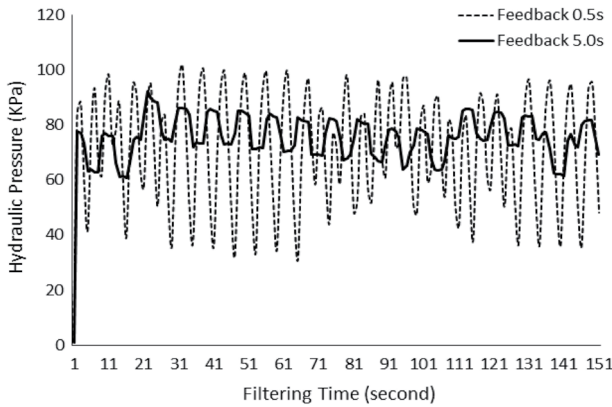


Fig. 7. Variation of hydraulic pressure vs. filtering time using automatic pump system.

시스템으로 각각 필터링하면서 압력 변화를 모니터링한 결과이다. Fig. 6의 측정 결과에서 필터링 초기에 65 [KPa]로 시작하여 필터링 시간이 경과함에 따라 점진적으로 증가하여 70 [KPa]를 초과하였다. 이는 필터에 축적되는 여과물의 양이 증가하므로 압력이 점진적으로 증가하는 것으로 사료된다. 한편, 압력제어 방식은 초기 압력을 75 [KPa]로 설정하고 Fig. 2와 같이 설계된 알고리즘에 따라 일정 압력제어를 하며 필터링 압력을 측정하였다(Fig. 7). 압력제어 방식은 압력 센서의 피드백 시간에 따라 압력의 변화가 크게 차이가 났으며 피드백 시간이 길어질수록 압력 변화의 폭이 감소하였다. Fig. 8에서와 같이 피드백 시간을 1초로 설정한 경우에 압력은 29.0~106.9 [KPa]로 압력 변화의 폭은 77.9 [KPa]로 가장 크게 나타났으며, 5초로 설정한 경우에는 60.8~92.3 [KPa]로 압력 변화의 폭이 31.5 [KPa]로 가장 낮게 나타났다. 따라서 압력 변화의 폭이 낮

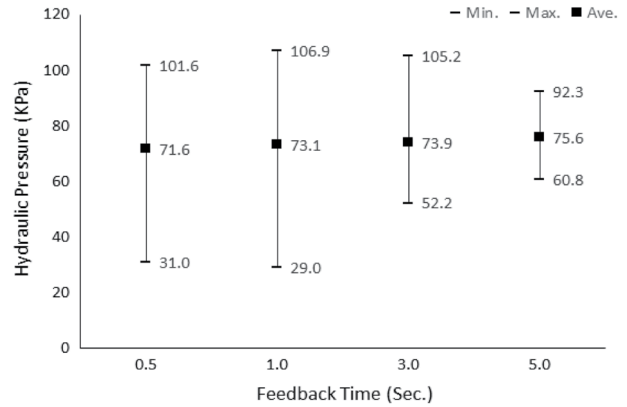


Fig. 8. Range of hydraulic pressure vs. feedback time using automatic pump system.

을수록 설정된 압력에 가깝게 유지하면서 포집이 가능하므로 피드백 시간을 5초로 설정하여 eDNA 모니터링 실험을 수행하였다.

2. 정수역과 우수역의 eDNA 포집 농도

eDNA는 잔존하는 생물 군집의 다양성을 규명하고 특정 종의 유무를 확인하는 데 이용된다(Djurnuus *et al.*, 2017; Choi *et al.*, 2018; Jo *et al.*, 2019). eDNA를 포집하여 정확한 분석 결과를 얻기 위해서는 동일 지점의 시료에서 eDNA 농도를 추출하여 비교할 필요가 있다. 개발된 채수 필터시스템의 필터링 성능을 확인하기 위해 기존 진공압 방식에서 추출된 결과와 비교 검토하였다. Table 1은 필터링 조건과 eDNA 농도 및 DNA 순도 분석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9(A)는 정수역에서 전압제어(Manual pump) 방식과 압력제어(Auto pump) 방식으로 필터링한 결과를 진공압 방식의 대조군과 비교한 그래프이다. 전압제어 방식과 대조군의 eDNA 농도는 2번 샘플을 제외하면 유의미한 차이를 보이지 않았으나, 압력제어 방식은 대조군에 비해 낮게 나타났다. 압력제어 방식의 경우 필터링 시 압력 편차가 크고, 필터링 과정에서 일정한 압력을 유지하기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 따라서 필터링 시에는 일정한 압력을 유지하는 것보다 필터링 시간 경과와 함께 여과물의 증가에 따라 압력이 점진적으로 증가하는 것이 eDNA를 확보하는 데 적합함을 확인하였다. Fig. 9(B)는 우수역에서 채집한 샘플을 측정된 결과이다. eDNA 농도 평균은 대조군과 펌프 방식에서 각각 88.4 [ng μL^{-1}], 74.8 [ng μL^{-1}]로 나타났으며, eDNA 농도 편차는 펌프 방식에 비해 대조군이 높게 나타났다. 한편, 대조군으로 정수역과 우수역의 eDNA 평균농도를 비교한 결과는 각각 96.2 [ng

Table 1. Water sampling conditions and concentration analysis results.

Site	System	Sample No.	Pressure (KPa)	Volume (mL)	Concentration (ng μL^{-1})	Purity (A260/A280)
Store water	Manual	1	100	500	93.0	1.85
		2	98	500	68.7	2.10
		3	80	500	96.6	1.84
		4	94	500	100.9	1.87
		5	83	500	94.2	1.88
	Pump	1	95	500	61.7	1.87
		2	85	500	46.4	1.89
		3	75	500	74.8	1.92
		4	95	500	73.5	1.99
		5	85	500	48.2	1.93
	Automatic	1	—	500	94.2	2.01
		2	—	500	93.7	1.96
		3	—	500	94.0	2.01
		4	—	500	98.8	1.99
		5	—	500	100.5	1.96
Running water	Pump	1	85	500	68.6	1.93
		2	100	500	77.7	1.92
		3	85	500	77.3	1.93
		4	75	500	67.8	1.95
		5	95	500	82.7	1.93
	Control	1	—	500	87.5	1.98
		2	—	500	103.8	1.97
		3	—	500	64.4	2.01
		4	—	500	106.4	2.04
		5	—	500	79.9	2.00

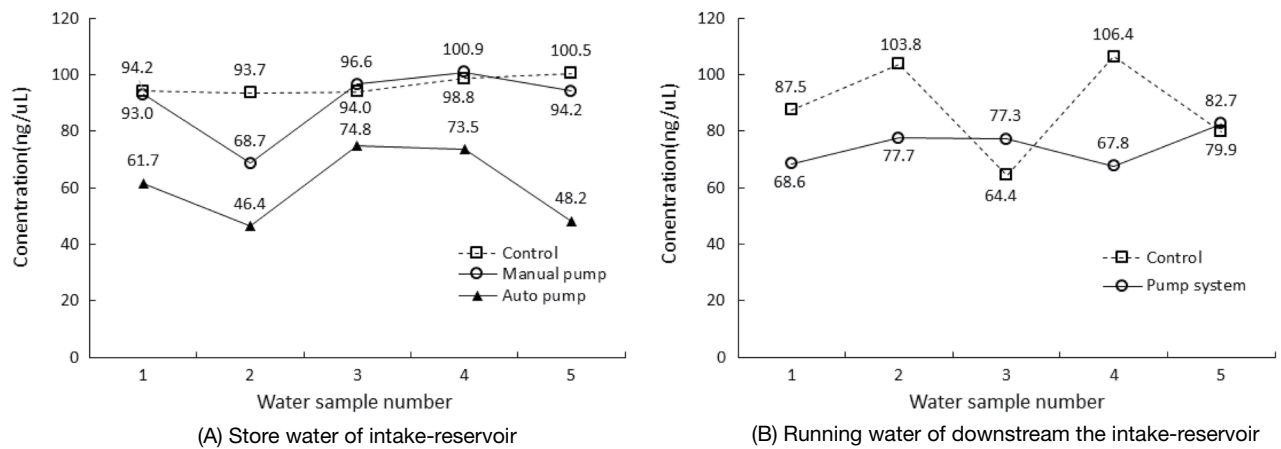


Fig. 9. Results of eDNA concentration analysis for water sampled by using developed water sampling system.

μL^{-1}], 88.4 [$\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$]로 나타났으며, 펌프 방식으로 정수역과 우수역의 eDNA 평균농도를 비교한 결과는 각각 90.7

[$\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$], 74.8 [$\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$]로 정수역에서 필터링한 시료에서 높게 나타났다. 정수역에서 eDNA 농도가 높게 나타난 것

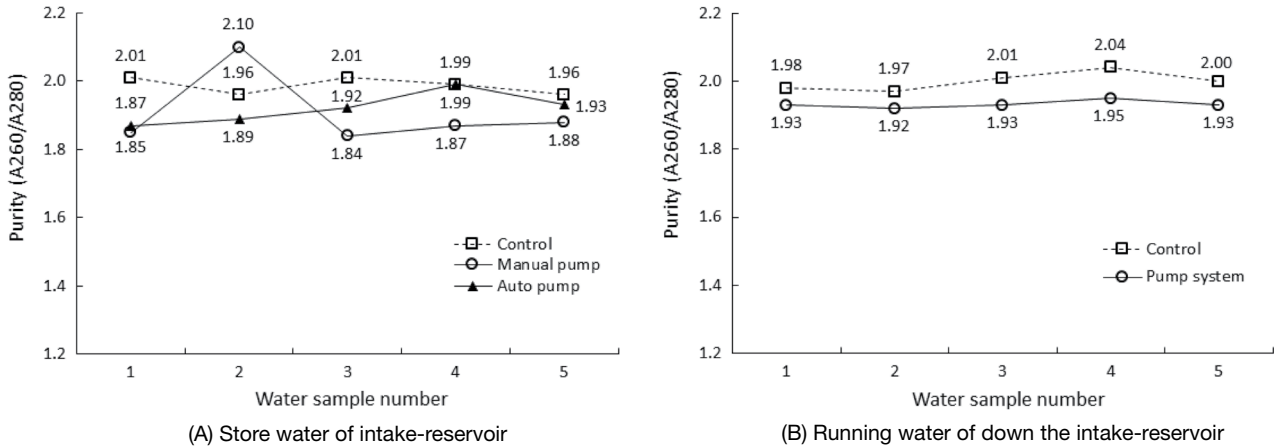


Fig. 10. Results of eDNA purity analysis for water sampled by using developed water sampling system.

은 잔존하는 eDNA를 비롯한 미세 유기물의 영향으로 사료된다. 단백질 오염 정도를 측정하기 위해 마이크로 플레이트 판독기에서 흡광도 비율 260 nm와 280 nm 파장으로 DNA 순도를 평가한 결과는 Fig. 10과 같다. DNA 순도 측정 결과에 따르면, 대조군과 채수 필터시스템을 이용한 필터링 결과는 모두 DNA 분석에 사용 가능함을 확인하였다.

적 요

필터의 손상 없이 포집할 수 있는 필터케이스를 적용하고, 전압 제어와 압력 제어를 각각 할 수 있는 펌프 방식의 eDNA 포집 및 채수 시스템을 개발하여 집수매거 취수원을 대상으로 종래의 진공압 방식의 포집 및 추출 실험과 eDNA 농도를 비교함으로써 개발 시스템의 필터링 성능을 평가하였다. 개발된 시스템은 전압제어(Manual pump system) 방식과 압력제어(Automatic pump system) 방식으로 구분하여 필터링 시 필터기 내부 압력을 측정하고 각 시스템의 압력 변화를 비교하였다. 전압제어 방식은 필터링 초기에 65 [KPa]로 시작하여 필터링 시간이 경과함에 따라 필터에 축적되는 여과물의 양이 증가하므로 압력이 점진적으로 증가하였다. 압력제어 방식은 설계된 알고리즘에 따라 일정 압력을 유지하도록 제어한 결과, 압력 센서의 피드백 시간에 따라 필터링 과정에서 압력 변동의 폭은 차이가 있으나 목표 압력에 수렴하는 것을 확인하였다. 개발된 시스템의 필터링 성능을 확인하기 위해 eDNA 농도를 측정하고 전압제어 방식과 압력제어 방식을 대조군과 비교하였다. 전압제어 방식은 대조군과 유사한 결과를 얻을 수 있었으나 압력제어 방식은 대조군에 비해 낮게 나타

났다. 압력제어 방식의 경우 필터링 시 압력 편차가 크고, 필터링 과정에서 일정한 압력을 유지하기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 따라서 필터링 시에는 일정한 압력을 유지하는 것보다 필터링 시간 경과와 함께 여과물의 증가에 따라 압력이 점진적으로 증가하는 전압제어 방식이 eDNA를 포집하는데 적합함을 확인하였다. 정수역과 유수역의 eDNA 평균농도를 대조군으로 비교한 결과, 각각 96.2 [ng μL^{-1}], 88.4 [ng μL^{-1}]로 나타났으며, 펌프 방식으로 eDNA 평균농도를 비교한 결과는 각각 90.7 [ng μL^{-1}], 74.8 [ng μL^{-1}]로 정수역에서 필터링한 시료에서 높게 나타났다. 정수역에서 eDNA 농도가 높게 나타난 것은 잔존하는 eDNA를 비롯한 미세 유기물의 영향으로 사료된다.

저자정보 곽태수(경상국립대학교 기계공학부 교수), 김원석(전남대학교 해양융합과학과 박사과정생), 이선호(전남대학교 해양융합과학과 석사과정생), 곽인실(전남대학교 해양융합과학과 교수)

저자기여도 개념설정: 곽태수, 곽인실, 방법론: 곽태수, 곽인실, 분석: 김원석, 이선호, 자료제공: 곽태수, 곽인실, 자료관리: 곽태수, 곽인실, 원고 초안작성: 곽태수, 원고 교정: 곽인실, 곽태수, 원고 편집 및 검토: 곽태수, 곽인실, 과제관리: 곽태수, 연구비 수주: 곽태수. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 본 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 이 논문은 2020년도 경상국립대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Aman, J., M.T. Kinnison, V. Holmes and C. Gottsegen. 2020. Developing Cost Effective Monitoring for Rainbow Smelt Using eDNA. Casco Bay Estuary Partnership. pp. 1-29.
- Choi, B. and M. Kang. 2018. Availability evaluation of TOC as the environmental standard, survey of lakes in Nakdong river basin. *Journal of Wetlands Research* **20**(2): 173-180.
- Davis, S.D., S.W. Golladay, G. Vellidis and C.M. Pringle. 2003. Macro invertebrate biomonitoring in intermittent coastal plain stream impacted by animal agriculture. *Journal of Environmental Quality* **32**(3): 1036-1043.
- Djurhuus, A., J. Port, C.J. Closek, K.M. Yamahara, O. Romero-Maraccini, K.R. Walz, D.B. Goldsmith, R. Michisaki, M. Breitbart, A.B. Boehm and F.P. Chavez. 2017. Evaluation of filtration and DNA extraction methods for environmental DNA biodiversity assessments across multiple trophic levels. *Frontiers in Marine Science* **4**: 314.
- Jo, M.H., M.J. Lee, E.W. Seo and J.E. Lee. 2019. Analysis of functional habitat groups and community stability of benthic macroinvertebrates before and after Yeongju Dam completion in Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **37**(4): 664-671.
- Kim, G. and Y. Song. 2021. Identification of freshwater fish species in Korea using environmental DNA technique, from the experiment at the freshwater fish ecological learning center in Yangpyeong, Gyeonggi Do. *Journal of Environmental Impact Assessment* **30**(1): 1-12.
- Kim, J.H., S.K. Han, J.P. Lee and J.Y. Kim. 2010. Development of automatic water sampler with sensor for practical measurement. *Applied Chemistry for Engineering* **21**(6): 632-637.
- Kwak, I.-S., Y.-S. Park and K.-H. Chang. 2021. Application and Utilization of Environmental DNA Technology for Biodiversity in Water Ecosystems. *Korean Journal of Ecology and Environment* **54**(3): 151-155.
- Lee, S.K., Y.J. Kwon, J.L. Kim, S.M. Hwang and G.S. Jeon. 2006. Determination of on-line TOC monitoring in water quality monitoring system. *Journal of Korean Society for Environmental Analysis* **9**: 235.
- Lee, S.M., S.H. Park, I.S. Kwak, H.H. Kim and T.S. Kwak. 2021. Effect of the internal shape of eDNA filter case made by the PBF method metal 3D printer on water sampling performance. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* **20**(8): 74-79.
- Miya, M., Y. Sato, T. Fukunaga, T. Sado, J.Y. Poulsen, K. Sato and W. Iwasaki. 2015. MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. *Royal Society Open Science* **2**(7): 150088.
- Osathanunkul, M. and T. Minamoto. 2020. A molecular survey based on eDNA to assess the presence of a clown featherback (*Chitala ornata*) in a confined environment. *Peer J* **8**: e10338.
- Petiz, D.G. 1989. Macroinvertebrate biomonitoring as an indicator of water quality: status report for pipestone Creek. *Pipestone National Monument* **2002**: 1-13.
- Sanches, T.M and A.D. Schreier. 2020. Optimizing an eDNA protocol for estuarine environments: Balancing sensitivity cost and time. *Plos One* **15**(5): e0233522.
- Schabacker, J.C., S.J. Amish, B.K. Ellis, B. Gardner, D.L. Miller, E.A. Rutledge and G. Luikart. 2020. Increased eDNA detection sensitivity using a novel high-volume water sampling method. *Environmental DNA* **2**(2): 244-251.
- Sin, H.S., O. Mitamura, S.J. Kim and J.K. Choi. 2008. Characters of musim stream by surveyed sites based on EPT-group of aquatic insects. *Korean Journal of Environment and Ecology* **22**(4): 420-426.