춘계 한강 수질의 실시간 수심별 변동특성 Real-Time Variation of Water Quality with Water Depth in the Han River during the Spring Season

정진홍 · 임현만 · 윤영한 · 박재로 · 김원재[†]

Jin-Hong Jung · Hyun-Man Lim · Young H. Yoon · Jae-Roh Park · Weon-Jae Kim[†]

한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소

Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received February 26, 2016; Revised March 8, 2016; Accepted March 11, 2016)

Abstract : A profiling monitoring system has been developed to monitor the water quality variations according to each water depth and applied for a test-bed. The key parameters were derived to disclose the aquatic ecology and environment of river systems, and the real-time monitoring techniques to profile the variations of each parameter were verified. Monitoring parameters were configured to include water quality, hydrodynamic, and weather conditions. Considering the water depth of the 4 major rivers in Korea, a profiling monitoring system with 1.0 m water depth interval for each monitoring has been established. To understand the real-time variation properties in the Han river, the monitoring system has been installed and operated at the YangHwa-Dock as a test-bed. Based on the results of the detailed analyses on the spring season, as the characteristic diurnal and water-depth-related variations for water temperature, pH, dissolved oxygen (DO), and chlorophyll-a were observed, it could be concluded that the real-time water-depth profiling monitoring system is a very effective tool for the proper management of river environment.

Key Words : Aquatic Ecosystem, Aquatic Environment, Monitoring System, Real-Time Monitoring, Water-Depth Profile

요약 : 수심에 따른 수질 변동을 모니터링할 수 있는 수심 프로파일 모니터링시스템을 개발하여 대하천의 현장에 적용하고자 하였다. 이를 위하여 하천의 수생태 및 수환경 변화를 반영할 수 있는 핵심 항목을 도출하고, 수심별 실시간 모니터링 기법 및 시스템을 개발하였다. 모니터링 항목은 수질, 유황 및 기상 항목을 포함하도록 구성하였다. 대하천의 수심을 고려하여 1.0 m 간격으로 모니터링이 가능한 시작품을 제작하고, 한강 수질의 실시간 수심별 변동특성을 파악하기 위하여 양화선착장을 test-bed 대상으로 선정하여 모니터링시스템을 구축·운영하였다. 춘계를 대상으로 상세분석을 실시한 결과, 수온, pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a 등의 항목에서 뚜렷한 일주변화 및 수심별 변화가 관찰되어 수심별 실시간 모니터링이 하천 수환경의 적절한 관리를 위한 매우 유효한 수단인 것으로 나타났다.

주제어 : 수생태, 수환경, 모니터링시스템, 실시간 모니터링, 수심 프로파일

1. 서론

가뭄 및 홍수 피해 빈발에 따른 근원적 대책을 마련하기 위하여 한강, 낙동강, 금강 및 영산강 등을 대상으로 한 국책사업으로 4대강 살리기사업이 추진되어 완료되었다.¹⁾ 순영향과는 별도로 보 건설과 하도 정비에 따른 수심, 유속 및 체류시간 등 하천환경의 변화로 인해 수생태 환경의 교란이 예측되고 있으나 이에 대한 정량적 모니터링시스템이 부재한 실정이다.

2012년 이후 2015년까지 낙동강뿐만 아니라 한강에서도 심한 녹조가 발생한 바 있다. 2015년에는 관측 이래 최초로 한강의 도심구간에서도 심각한 수준의 녹조가 발생하여 “조류경보”가 발령됨으로써 시민들의 큰 우려를 자아내었으나 이에 대한 정량적 원인규명조차 충분히 진행되지 않은 상황으로, 향후에도 매해 녹조가 발생할 수 있는 개연성이 상존하고 있다.^{2,3)}

특히, 2012년 10월 중·하순에 걸쳐 최악의 금강·낙동강 물고기 폐죽음 사고가 발생함에 따라 이에 대한 정부 차원

의 합동조사가 진행되었다. 각종 수질검사, 기생충 및 바이러스 감염 여부, 독성물질 유입 여부 등에 대해서 정밀조사를 실시하였음에도 불구하고 정확한 원인을 규명하지 못하여 “미제사건”이 된 실정이다.⁴⁾ 물고기 집단 폐사가 발생하기 이전에 핵심 모니터링 지표에 대한 수심별 실시간 모니터링이 상시 진행되었다면 이에 대한 예방 및 신속한 대응이 가능했을 뿐만 아니라 원인규명 또한 적절하게 수행될 수 있었을 것으로 판단된다.

하천에서 발생하고 있는 녹조 또는 물고기 집단 폐사 등 수질오염 관련 사고의 원인과 현황을 더욱 정확하게 파악하고, 적절한 대책을 적기에 수립하기 위해서는 주요 수질 항목에 대한 수심별 프로파일을 실시간으로 분석하는 것이 매우 유효한 대책이 될 수 있다. 예를 들어, 녹조 발생 시에는 클로로필 a(Chl-a), 용존산소량(DO, dissolved oxygen), pH, 수온 등의 수심별 프로파일이 모니터링되어야 한다. 물고기 집단 폐사와 관련해서는 수심별로 용존산소량(DO)(하층부의 산소농도 저하에 의한 폐사 여부), 암모니아(생물학수의 유입 여부 및 생태독성에 의한 폐사 여부), 클로로필 a(조류

[†] Corresponding author E-mail: wjkiml@kict.re.kr Tel: 031-910-0303 Fax: 031-910-0291

독소 및 아가미 폐색에 의한 폐사 여부), 수온(성층현상 및 수온약층 형성 여부), 탁도 및 전기전도도(밀도류 형성 여부) 등에 대한 프로파일이 필요하다.⁵⁾

대하천을 중심으로 4대강 살리기사업에 따른 하천 수심의 변화(6 m)를 반영한 수심별 프로파일 모니터링시스템의 구축이 시급한 실정이다. 주요 수질항목으로는 용존산소량(DO), 클로로필 a, 수온, pH, 전기전도도, 탁도, 유기물(COD (chemical oxygen demand), TOC (total organic carbon)) 및 영양염류(총인(T-P), PO₄-P, 총질소(T-N), 암모니아성 질소(NH₃-N)) 등을 들 수 있다. 특히 중소규모 강우 시 강우 초기에 지천으로부터 유입되는 고농도 오염물질이 수환경에 미치는 영향에 대응하기 위해서는 용존산소량(DO)의 수심별 모니터링이 필수적이다. 이와 같은 모니터링시스템을 통하여 수질오염 예방, 녹조발생 방지, 물고기 폐사 등의 원인을 규명하고, 이에 대한 근본적 해결방안을 마련할 수 있을 것이다. 이러한 수환경의 수심별 변화 양상은 환경부에서 구축·운영하고 있는 간헐적, 지점별 1점식 모니터링 체계(수질자동측정망)만으로는 높은 정도로 파악하는 데 한계가 있다고 할 수 있다.⁶⁻⁸⁾

본 논문에서는 대하천의 수질사고 예방과 적정 관리방안을 마련하는 데 활용할 수 있는 수심 프로파일 모니터링시스템을 개발하고, 한강의 실시간 수심별 수질 변동특성을 파악하기 위하여 양화선착장을 test-bed 대상으로 선정하여 시범적으로 구축·운영하였다. 이 결과의 일부로서, 동절기에서 하절기로 변화하는 과정에서 수질변동이 뚜렷하게 관찰되는 춘계를 대상으로 모니터링 데이터의 상세분석을 실시하여 pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a 등을 포함한 수질항목의 실시간 수심별 모니터링이 하천 수질관리를 위해 필수적임을 제시하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1. 수심 프로파일 모니터링시스템 구축

운영자가 설정한 시간간격에 따라 운전모드의 변경이 가능한 시스템을 구축하였다. 컴퓨터 시각(표준시)을 기준으로 일정 시간간격으로 모니터링할 수 있으며, 환경설정 모드에

서 운영자가 설정할 수 있도록 하였다.

수심은 초음파수위계를 설치하여, 초음파 수위 계측값으로부터 수위값을 차감하여 산출하도록 구축하였다. 수심별 시료 채취 및 분석은 기본 단위수심을 0.5 m로 설정하였으며, 시료채취를 위한 원치의 이동거리 역시 0.5 m를 기본 단위로 구동하도록 하였다. 단, 본 test-bed에서는 1.0 m의 수심 간격으로 모니터링이 이루어지도록 운영하였다.

수심별 모니터링 간격은 표층으로부터 0.5 m 수심을 최초 분석지점으로 설정하고, 이후 1 m씩 수심을 증가시키면서 분석하도록 설정·운영하였다. 매 수심에서 다음 단계의 수심으로 이동 후 시료채취 여부는 환경설정에서 설정할 수 있도록 하였고, 시료채취를 하지 않는 구간에서는 별도의 밸브 조작 없이 배수(drain) 조건에서 다음 구간으로 지체 없이 이동할 수 있도록 구축하였다. 이전 분석지점으로부터 하상까지 잔여 수심이 1.0 m 이상일 경우에는 0.5 m 하단부에서 추가로 시료를 분석하고, 1.0 m 미만일 경우에는 추가분석을 실시하지 않도록 구성하였다(안전율 0.5 m 고려). 예를 들어, 수심 4.6 m일 경우에는 4.0 m 지점이 마지막 분석지점이고, 수심 5.1 m일 경우에는 4.5 m 지점이 마지막 분석지점이 된다.

모니터링시스템의 수심별 분석주기는 default로 매 시간당 1회로 설정하였다(Table 1). 수질시료의 채취 및 분석 절차는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 ① 수조 사전 배수 → ②

Table 1. Analysis frequency of each item

Item	Analysis frequency
Multi-probe	<ul style="list-style-type: none"> Water temperature, pH, DO, electric conductivity, Chl-a, turbidity: 1 time/hr for each water depth
T-N/T-P NH ₃ analyzer	<ul style="list-style-type: none"> 1 time/hr for the surface water (water depth: 0.5 m) Introduced late in 2014
Ultrasonic level gauge	
Rainfall gauge	
Thermometer (Air temperature)	12 times/hr
Pyranometer	
Wind anemometer

Fig. 1. Sampling and analysis schedule logic.

배관 만수 → ③ 수조 만수 → ④ 수조 안정화 → ⑤ multi-probe 분석 → ⑥ 수조 안정화 → ⑦ 수조 배수의 순서로 구성하였으며, 1 사이클에 5분씩 소요하도록 구축하였다.

초음파수위계, 강우량계, 온도계(기온), 일사량계 및 풍향 풍속계 등으로 계측되는 유황 및 기상 항목은 매 시간당 12 회씩(1 회/5분) 모니터링하도록 구축하였다(Table 1).

안정적 전원 공급이 가능하도록 UPS/AVR을 설치하였다. 서버와는 별도로 안정적인 데이터의 수집 및 관리를 위하여 자체 DB를 마련하고, 30일 동안 데이터를 보관하도록 설정하였다. 유지관리의 효율성을 제고하기 위하여 장래 측정항목의 추가에 유연하게 대응할 수 있는 시스템을 구축하였다.

2.2. 수심 프로파일 모니터링시스템 test-bed 구축

수심 프로파일 모니터링시스템의 test-bed 대상지에 대한 검토사항은 다음과 같다. ① 대하천의 수심별 프로파일 모니터링이 필요한 지점, ② 수심별 수질의 대표성 확보가 가능한 지점, ③ 실시간 모니터링시스템 구축이 가능한 지점(전기, 통신 등), ④ 지속적인 유지관리가 용이한 지점 등의 검토를 거쳐 한강 하류의 신곡수중보로부터 11.4 km 상류에 위치하는 양화선착장 지점을 test-bed 구축 대상지로 선정하였다(Fig. 2).

Test-bed는 ① 대상지 구축 기본방향 설정, ② 대상지 선정, ③ 설계서 작성 및 ④ 수심 프로파일 모니터링시스템 설치 등의 절차에 따라 구축되었다.

Fig. 3은 본 모니터링시스템이 현장에 설치되어 가동 중인 모습으로, 수심별로 시료를 채수하기 위한 윈치 설비와 시료가 채수된 후 저류된 다음 multi-probe에 의해 분석되는 수조를 촬영한 사진이다.

Fig. 4는 본 모니터링시스템의 DB와 관련된 이미지로서, 모니터링 데이터의 실시간 감시화면(a)과 데이터 조회화면(b)을 갈무리한 영상이다.

Fig. 3. Monitoring system: (a) Winch and sampling apparatus, (b) water tank and multi-probe.

Fig. 4. DB server screens: (a) real-time monitoring, (b) data query.

Fig. 2. Location of test-bed at the YangHwa-Dock in the Han River (11.4 km upstream from the ShinGok submerged weir).

2.3. 수심 프로파일 모니터링시스템 test-bed의 주요 구성내용

일반항목의 분석장치 사양은 수온 및 pH, 용존산소량(DO), 전기전도도, 탁도 및 클로로필 a 등의 수질항목을 측정할 수 있는 일체형 multi-probe type으로 선정하였다. 수온 및 pH, 용존산소량(DO), 전기전도도, 탁도, 클로로필 a 항목은 측

Table 2. Main components of each equipment

Type of equipment	Main components
<p>Instrumentation and control equipment</p>	<ul style="list-style-type: none"> Instrumentation and control equipment: RTU+PLC Water quality measuring devices: corrosion-resistant multi-probe (DO, Chl-a, pH, water temperature, turbidity, conductivity) Contactless ultrasonic level gauge Weather monitoring devices: rainfall gauge, thermometer, pyranometer, wind anemometer
<p>Construction and electrical equipment</p>	<ul style="list-style-type: none"> Light and heat transfer equipment Telecommunications equipment: integrated wiring system Lightning protection and grounding equipment
<p>Sampling equipment</p>	<ul style="list-style-type: none"> Winch Pipeline Submersible pump

Table 3. Advanced configurations of the monitoring system

Equipment	Configuration
Sampling equipments	Sampling pump
	Feed piping
	Water tank
	Winch
Analysis facilities	Power equipment
	Ventilation equipment
	Anti-disaster equipment
Measurement equipments	Multi-probe
	Ultrasonic level gauge
	Rainfall gauge
	Thermometer
	Pyranometer
	Wind anemometer
Data transmission system	Data transmission equipment
	Wireless modem for alarm
	Monitoring and control equipment
Other facility	UPS/AVR

정대상 수심별로 이화학적 특성을 즉시 분석할 수 있도록 응답속도가 빠른 계측기를 선정하였다.

Table 2와 3에는 한강에 구축된 test-bed와 관련하여 기기 설비의 주요 구성 및 상세 구성내역을 정리하여 제시하였다.

3. 연구결과 및 고찰

수심 프로파일 모니터링시스템 test-bed를 한강에 구축하여 2013년 11월 말부터 시운전을 개시하여 2014년 말까지 운영을 지속하였다. 기온이 영하로 떨어지는 동계에는 운전을 중지하였으며, 현장 여건상의 제 문제로 인해 운전을 정지한 시기도 상당기간 포함된다. 계절에 따른 변동특성을 분석하기 위하여 편의상 ① 봄(춘계): 3~5월, ② 여름(하계): 6~8월, ③ 가을(추계): 9~11월, ④ 겨울(동계): 12~2월로 운전시기를 구분하였다.

모니터링 데이터의 상세분석은 계절에 따라 구분된 데이터를 기반으로 (1) 시계열 변동특성 분석, (2) 일주기 변동특성 분석 및 (3) 수심 프로파일 변동특성 분석의 절차에 따라 진행하였다. 본고에서는 동절기에서 하절기로 변화하는 과정에서 수질변동이 뚜렷하게 관찰되는 춘계(2014년)를 대상으로 한 상세분석 결과를 중심으로 그래프를 도시하였다.

3.1. 시계열 변동특성 분석

계절별 시계열 변동특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

일사량의 일주 변화와 계절별 변화가 관찰되었다. 일사량은 기온과 수온, pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a의 시계열 변동과 일주 변동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.⁹⁻¹²⁾

2014년 춘계의 심한 가뭄으로 인한 수환경의 악화가 관찰되었다. 하계에도 7월 말까지 극심한 가뭄이 지속되었다.

기온의 일주 변화와 계절별 변화가 관찰되었다.

수온 또한 기온의 하강과 상승에 따라 동계에 지속적으로 하강하다가 춘계에 상승하여 하계와 추계 초반에 28~30℃까지 이른 다음, 추계 전 기간에 걸쳐 지속 하강하여 동계에는 2℃ 전후에 도달하고 있음이 관찰되었다. 뚜렷한 일주 변동이 관찰되었다. 특히, 춘계에는 표층부에서 동계보다 뚜렷한 일주 변동이 확인되었다. 또한 일사량의 다소에 따른 수온 변동의 종속성이 관찰되었다. 일사량이 충분한 경우, 일사량 피크로부터 3~4시간 지연된 수온 피크가 관찰되었다. 수온의 일주 변동은 표층으로부터 3 m 이내(특히, 2 m 이내에서 집중적으로)에서 관찰되었다.

Test-bed 구축지점이 신곡수중보로부터 11 km 이상 상류에 위치하고 있음에도 불구하고, 만조기에는 한강 하류부 수위 상승의 직·간접적인 영향을 받아 최대 1 m 이내의 일 2회에 걸친 규칙적인 수위 변동이 관찰되었다. 수위의 변동 폭은 만조기와 간조기를 거치면서 2주일 주기의 사인(sine)함수의 형태를 나타내었다.

Fig. 5. Time-series variations of each monitoring item: (a) Solar radiation, (b) Rainfall intensity, (c) Air temperature, (d) Water temperature, (e) Water depth, (f) pH, (g) DO, (h) Chl-a, (i) Turbidity, (j) Conductivity.

pH는 연중 일주 변동이 관찰되었다. 동계와 하계 및 추계에는 일주 변동이나 수심에 따른 차이가 크지 않았으나 춘계에 특히 뚜렷한 일주 변동과 수심별 차이가 관찰되었다.

용존산소량(DO)은 동계에 수온의 하강에 따라 지속적으로 상승하는 경향이 나타났다. 동계의 일주 변동은 확인되지 않았으며 표층부가 오히려 낮아지는 역전 현상이 관찰되었다. 춘계에는 조류의 활성 증가에 따라 뚜렷한 일주 변동이 관찰되었다. 일사량 피크로부터 3~4시간 지연된 피크가 관찰되었다. 춘계에는 표층부보다 중층부에서 높은 용존산소량(DO)이 관찰되었다. 가뭄이 지속된 하계(고수온기)에는 용존산소량(DO)의 일주 변동과 수심에 따른 뚜렷한 차이가 나타났으며, 특정 시기를 중심으로 뚜렷하고 지속적인 저하 현상과 일시적 회복 현상이 반복되었다. 저층부에서 표층부보다 낮은 값을 나타내었다. 특히, 2014년 하계(7월 9일~7월 22일)에는 2주일 이내의 짧은 기간 동안 7 mg/L 수준에서 1 mg/L 이하까지 지속적으로 하강하여 수생태 환경에 큰 스트레스를 주었을 것으로 판단된다. 추계와 동계를 맞아 다시 지속적으로 상승하여 추계에는 5.5 mg/L 이상을, 동계에는 7.0 mg/L 이상을 유지하였다. 일주 변동의 특성에 따르면 클로로필 a보다는 수온의 일주 변동과 유사한 패턴을 따르는 것으로 나타났다.

클로로필 a의 적절한 모니터링을 위해서는 데이터의 추이를 지속적으로 검토함과 동시에, 최소 2주일에 1회 이상(가능하면 1주일에 1회)의 빈도로 현장에 설치되어 있는 계측기를 유지관리하고 검·보정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 클로로필 a는 동계 및 춘계에 주간과 야간의 시간대에 따라 표층부의 데이터가 중·하층부에 비해 큰 폭으로 변동하는 특성을 보이는 등 조류 밀도의 성층 현상 및 광 조건에 따른 수층별 이동 현상이 관찰되었다. 동계 및 춘계에 걸쳐 주간에 감소하고 야간에 증가하는 전반적인 일주 변화가 관찰되었는데, 이와 같은 현상은 표층부에서 특히 강하게 나타났다. 클로로필 a는 4월 초의 약 1주일간 40~90 µg/L 수준의 고농도로 계속되었는데 이 시기는 일사량이 많고 기온과 수온이 상승하기 시작하며, pH와 용존산소량(DO) 또한 큰 폭으로 일주 변동하면서 증가한 시기와 일치한다. 이 시기의 클로로필 a 농도의 상승 원인에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.¹³⁾

탁도의 적절한 모니터링을 위해서는 데이터의 추이를 지속적으로 검토함과 동시에, 최소 2주일에 1회 이상(가능하면 1주일에 1회)의 빈도로 현장에 설치되어 있는 계측기를 유지관리하고 검·보정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 탁도는 수심별 변동의 규칙성이 관찰되지 않았다. 탁도의 시계열 변동은 상류 유역으로부터의 강우유출수의 유입에 기인하는 것으로 판단된다. 현장에서는 강우가 발생하지 않은 경우라고 하더라도 상류 지역의 강우가 수일 이상의 유달시간이 경과한 후 하류부에 영향을 미치고 있음이 확인되었다. 탁도는 데이터 자체의 변동이 커 특성을 더 잘 도시하기 위하여 5 hour 이동평균 그래프로 일차 가공하여 도

시하였다.¹⁴⁾

전기전도도는 평상시 수심별 변동이 관찰되지 않았으나, 일부 시기에 한하여 수심별 변동이 관찰됨으로써 중소규모 강우에 따른 초기 강우유출수 또는 전기전도도 유발 오염물질의 일시적 유입 등 그 원인에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 나타났다. 탁도의 증가 시기와 맞물려 전반적인 상승이 관찰되었으나 추가적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

2014년 11월 7일부터 12월 7일까지 약 한 달간 풍향 및 풍속을 1회/hr의 주기로 연속 계측하였다. 풍향 및 풍속은 실시간 측정이 가능하나 데이터 양식의 통일성을 확보하기 위하여 타 데이터의 분석주기와 일치시켰다. 풍속은 11월 말까지는 상대적으로 잠잠하다가 12월 이후 닥친 한파와 더불어 급속히 거세지는 특성을 나타내었다.

봄철의 시계열 변동특성을 2014년 4월 3일~4월 15일에 걸쳐 상세 분석하여 도시한 그래프는 위의 Fig. 5와 같다. Fig. 5(b)의 그래프는 모니터링 기간 동안 강우사상이 발생하지 않았음을 의미한다.

3.2. 일주기 변동특성 분석

일주기 변동특성을 파악하기 위하여 각 계절에 걸쳐 모니터링된 전체 데이터를 수심에 따라 시간대별로 정리한 다음, 해당 시간대별 평균을 산출하여 24시간 동안의 변동특성을 도시하였다. 봄철의 일주기 변동특성을 2014년 4월 3일~4월 15일에 걸쳐 상세 분석한 결과는 다음의 Fig. 6과 같다.

일사량, 기온, 수온, pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a에서 뚜렷한 일주 현상이 관찰되었다. 동계와 달리 pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a에서도 일주 현상이 관찰된다는 점이 뚜렷한 차이점인 것으로 나타났다.

수온은 주간대(오후 3시 전후)에 표층부가 심층부에 비해 1℃ 이상 높은 것으로 나타났다. 수온의 상승은 대체로 2 m 이내의 표층부에서 집중적으로 관찰되었다.

pH는 주간대를 중심으로 표층부가 심층부에 비해 0.1 전후의 높은 값을 나타내었다.

용존산소량(DO)은 대체로 표층부에서 가장 낮은 값이 관찰되었으며, 수심 1.5~2.5 m의 범위에서 일중 높은 값이 나타났다.

클로로필 a의 일주 변동에서 특징적인 것은 표층부에서의 농도가 시간대에 따라 심하게 변한다는 점이다. 일중 대체로 높은 값을 나타내나 일사량이 많은 10~16시의 시간대에 걸쳐 전 수층에서 가장 낮은 분포를 나타내었다.

일주 현상에서의 피크값은 일사량이 13시 전후로 선행하고, 기온과 수온이 15시 전후에, 그 후 pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a가 16~20시에 걸쳐 형성되었다.

탁도 및 전기전도도에서는 일주 현상이 관찰되지 않았다. 탁도는 수심이 깊어질수록 증가하고, 전기전도도는 수심이 깊어질수록 감소하는 경향이 관찰되었다.

Fig. 6. Diurnal variations of each monitoring item: (a) Solar radiation, (b) Air temperature, (c) Water temperature, (d) pH, (e) DO, (f) Chl-a, (g) Turbidity, (h) Conductivity.

3.3. 수심 프로파일 변동특성 분석

수심 프로파일을 분석하기 위하여 해당 계절 동안 운전된 전 데이터를 수심별, 모니터링 시간대별로 분류하여 도시하였다. 모니터링 시간대는 편의상 ① (03~09시), ② (09~15시), ③ (15~21시) 및 ④ (21~03시)의 4단계로 구분하였다. 이는 모니터링 대상 수체인 하천에서 수생태 환경의 1차 순생산성에 대한 지표로서 클로로필 a, 용존산소량(DO)

및 pH의 일주기 변동특성에 대한 분석결과로부터, ① (03~09시)의 순생산성이 음의 값을 갖는 시간대, ③ (15~21시)의 순생산성이 양의 값을 갖는 시간대 및 ② (09~15시)와 ④ (21~03시)의 순생산성이 음 → 양 또는 양 → 음으로 변화하는 시간대를 나타낸다. 이와 같은 그래프 분석을 통하여 해당 수심에서 일중 시간대별 변화가 발생하는지 여부 및 수심별 프로파일의 변동 여부를 동시에 확인할 수 있는

Fig. 7. Variations of each monitoring item according to water depth profile: (a) Water temperature, (b) pH, (c) DO, (d) Chl-a, (e) Turbidity, (f) Conductivity.

장점이 있다.

봄철의 수심 프로파일 변동특성을 2014년 4월 3일~4월 15일에 걸쳐 상세 분석한 결과는 위의 Fig. 7과 같다.

수온에서 시간대별 변화와 수심별 변동이 동시에 관찰되었다. 시간대별로는 15~21시에 최대값을 나타내었으며, 표층에 가까울수록 높은 온도가 형성되었다.

pH에서 수심별 변동은 관찰되지 않았으나 전 수심에서 시간대별 변화가 나타났다. 시간대별로는 15~21시에 최대값을 나타내었다.

용존산소량(DO)에서는 시간대별 변화와 수심별 변동이 동시에 관찰되었다. 시간대별로는 15~21시에 최대값을 나타내었다. 수심별로는 표층에서 가장 낮은 값이, 중층(수심 1.5~2.5 m)에서 가장 높은 값이 관찰되었다.

클로로필 a에서는 뚜렷한 수심별 변동이 관찰되었다. 표층에서 가장 낮은 값이 나타났으며 수심에 따라 높아져 최대 5 µg/L 이상 증가하였다.

탁도에서는 수심별로 뚜렷한 변동 패턴이 확인되지 않았으나 시간대별 변화는 커 전 수심에서 09~15시에 최소값을 나타내었다. 특히 표층부에서의 시간대별 변화가 뚜렷하였다.

전기전도도에서는 약한 시간대별 변화가 관찰되었으며, 수심별 변동은 뚜렷하지 않았다. 시간대별로는 09~15시에 최대값을 나타내었다.

4. 결론

하천의 수환경 변화에 대응하는 모니터링 항목을 검토하여 수질, 유황 및 기상 관련 항목을 도출하고, test-bed에서의 현장분석이 필수적일 뿐만 아니라 실시간 분석이 가능한 항목을 중심으로 모니터링 항목을 선정하였다. 2013년 말부터 약 1년간 한강 신곡수중보 상류에 위치하는 양화선착장을 test-bed 대상지로 선정하여, 0.5 m 간격으로 수층별 실

시간 수질 모니터링이 가능한 수심 프로파일 모니터링시스템을 구축·운영하였다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

1) 계절별 시계열 변동특성을 분석한 결과, 일사량의 일주 변화 및 계절별 변화가 관찰되었으며 기온과 수온, pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a의 시계열 변동과 일주 변동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 수온 또한 일사량 피크로부터 3~4시간 지연된 피크를 갖는 뚜렷한 일주 변동이 표층으로부터 2 m 이내의 수심에서 관찰되었다. pH의 연중 일주 변동이 관찰되었다. 용존산소량(DO)에서는 조류의 활성화와 연동하여 일사량 피크로부터 3~4시간 지연된 뚜렷한 일주 변동이 관찰되었다. 특히, 2014년 7월, 약 2 주일에 걸친 짧은 기간 동안 심각한 수준의 용존산소량(DO) 저감이 관찰되어 수심별 실시간 모니터링의 중요성이 확인되었다.

2) 봄철의 일주기 변동특성을 분석한 결과, 일사량, 기온, 수온, pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a에서 뚜렷한 일주 현상이 관찰되었다. 일주 현상에서의 피크값은 일사량이 13시 전후로 선행하고, 기온과 수온이 15시 전후에, 그 후 pH, 용존산소량(DO) 및 클로로필 a가 16~20시에 걸쳐 형성되었다.

3) 계절별 수심 프로파일을 분석한 결과, 수온, 용존산소량(DO)에서는 시간대별 변화와 수심별 변동이 동시에 나타났으며, pH에서는 시간대별 변동이, 클로로필 a에서는 표층에서 가장 낮은 값을 나타낸 다음 수심에 따라 높아지는 뚜렷한 수심별 변동이 관찰되었다. 수온, pH, 용존산소량(DO) 등은 15~21시의 시간대에 최대값을 나타내었다.

4) Test-bed를 활용하여 계절별, 시간별, 수심별로 변화하는 한강 양화선착장 부근의 수환경에 대한 실시간 모니터링을 수행하여, 수질사고 예·경보시스템 구축을 위한 기초자료를 마련함으로써 수생태 및 수환경을 고려한 진일보한 하천 관리방안을 제시하였다. 특히, 최근 심대한 하천환경의 변화를 맞게 된 대하천에 본 수심 프로파일 모니터링시스템을 적용할 경우, 녹조 대발생 및 물고기 집단 폐사 등의 사고를 예방하고, 수질오염 사고에 신속히 대응하는 체계를 마련하는 데 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Ministry of land, transport and maritime affairs, Headquarters for promotion of 4 major rivers, "Master plan for restoration of 4 major rivers"(2009).
2. Lee, T. G., Hwang, S. J., Park, C. W., Park, J. H., Shin, J. C., Lim, B. M., Chung, S. Y., Yang, I. W. and Shin, Y. S., "Algae management technologies for improved aquatic ecology," Korea environment corporation, pp. 11~29(2012).
3. Park, H. G., "Research on the criteria optimization for algal forecasting system (I)," National institute of environmental research(2008).
4. The Kyunghyang Shinmun, "Fish kills in the Keum river, because of 4 major river restoration projects," http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201310212225045&code=610103, Oct., 23(2013).
5. Ohgaki, S., "Water quality and ecosystem of rivers," The River Foundation, Jipbodang(2007).
6. Ministry of environment, National institute of environmental research, "Water environment information system," <http://water.nier.go.kr/main/mainContent.do>(2016).
7. Ministry of environment, Korea environment corporation, "TMS installation and operation manuals for advanced and scientific water management"(2009).
8. Kim, B. C., "Research on the structure of ecosystem of upstream of North Han river, Soyang and Paro lakes," Han river environment research center(2005).
9. Shin, J. K. and Cho, K. J., "Seasonal dynamics and pollution status of the water quality in the Kum river reservoir," *Korean J. Limnol.*, **33**(3), 251~259(2000).
10. Rim, C. S., Shin, J. K. and Cho, K. J., "The trend and assessment of water pollution from midstream to downstream of the Kum river," *Korean J. Limnol.*, **33**(1), 51~60(2000).
11. Shin, S. G., "Relationship between COD and BOD at Mulseum area downstream of the Nakdong river," *Nakdong Monthly Survey*, **49**, 2~7(2001).
12. Shin, S. G. and Baek, G. H., "Recent (2000. 3-5) water quality assessment of the Nakdong river," *Nakdong Monthly Survey*, **41**, 2~8(2000).
13. Shin, J. K., Kim, D. S. and Cho, K. J., "Dynamics of inorganic nutrients and phytoplankton in Shihwa reservoir," *Korean J. Limnol.*, **33**(2), 109~118(2000).
14. Shin, J. K., Cho, J. L., Hwang, S. J. and Cho, K. J., "Eutrophication and water pollution characteristics of the Kyungan stream to Paltang reservoir," *Korean J. Limnol.*, **33**(4), 387~394(2000).