



## Analysis of the mixing effect of the confluence by the difference in water temperature between the main stream and the tributary

Ahn, Seol Ha<sup>a</sup> · Lee, Chang Hyun<sup>b</sup> · Kim, Kyung Dong<sup>c</sup> · Kim, Dong Su<sup>d</sup> · Ryu, Si Wan<sup>e</sup> · Kim, Young Do<sup>f\*</sup>

<sup>a</sup>Master Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

<sup>c</sup>Ph.D Course, Department of Civil Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

<sup>e</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

<sup>f</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

Paper number: 22-114

Received: 18 November 2022; Revised: 9 December 2022; Accepted: 12 December 2022

### Abstract

The river confluence is a section in which two rivers with different topographical and hydrodynamic characteristics are combined into one, and it is a section in which rapid flow, inflow of sediments, and hydrological topographic changes occur. In the confluence section, the flow of fluid occurs due to the difference in density due to the type of material or temperature difference, which is called a density flow. It is necessary to accurately measure and observe the confluence section including a certain section of the main stream and tributaries in order to understand the mixing behavior of the water body caused by the density difference. A comprehensive analysis of this water mixture can be obtained by obtaining flow field and flow rate information, but there is a limit to understanding the mixing of water bodies with different physical properties and water quality characteristics of rivers flowing with stratigraphic flow. Therefore, this study attempts to grasp the density flow through the water temperature distribution in the confluence section. Among the extensive data of the river, vertical data and water surface data were acquired, and through this, the stratification phenomenon of the confluence was to be confirmed. It was intended to analyze the mixed pattern of the confluence by analyzing the water mixing pattern according to the water temperature difference using the vertical data obtained by measuring the repair volume by installing the ADCP on the side of the boat and measuring the real-time concentration using YSI. This study can supplement the analysis results of the existing water quality measurement in two dimensions. Based on the comparative analysis, it will be used to investigate the current status of stratified sections in the water layer and identify the mixing characteristics of the downstream section of the river.

**Keywords:** Water temperature, Density flow, Mixed aspect, Water body mixing

## 본류와 지류의 수온 차에 의한 합류부 혼합 양상 분석

안설하<sup>a</sup> · 이창현<sup>b</sup> · 김경동<sup>c</sup> · 김동수<sup>d</sup> · 류시완<sup>e</sup> · 김영도<sup>f\*</sup>

<sup>a</sup>명지대학교 토목환경공학과 석사과정, <sup>b</sup>명지대학교 토목환경공학과 박사과정, <sup>c</sup>단국대학교 토목공학과 박사과정, <sup>d</sup>단국대학교 토목공학과 교수, <sup>e</sup>창원대학교 토목공학과 교수, <sup>f</sup>명지대학교 토목환경공학과 교수

### 요 지

하천 합류부는 서로 다른 지형학적 특성과 수리학적 특성을 가지는 두 개의 하천이 하나로 합쳐지는 구간으로 급격한 흐름의 변화 및 퇴적물의 유입과 수리학적 지형변화가 발생하는 구간이다. 합류부 구간에서는 물질의 종류 또는 온도 차로 유체의 흐름이 밀도 차이로 발생하게 되는데 이것을 밀도류라고 한다. 밀도 차이에 의해 성층이 생긴 수체혼합거동을 파악하기 위해서는 본류 및 지류의 일정 구간을 포함하는 합류부 구간에 대한 정밀한 계측 및 관찰이 필요하다. 이러한 수체 혼합에 대한 종합적인 분석은 유속장 및 유량 정보를 취득하여 파악할 수 있지만, 성층류가 흐르는 하천의 서로 상이한 물리적 특성과 수질특성을 가지는 수체의 혼합양상 및 그에 따른 물질혼합양상을 파악하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 합류부 구간에서의 수온 분포를 통하여 밀도류를 파악하고자 한다. 하천의 광범위한 데이터 중 연직 자료와 수표면 자료를 취득하였고, 이를 통해 합류부의 성층현상을 확인하고자 하였다. ADCP를 보트 측면에 설치하여 저속운동으로 수리량을 측정하는 방식과 YSI를 이용해 측선설치 없이 측선 선정 후 보트를 이용하여 흐름에 직각인 방향으로 이동하며 실시간 농도를 측정하는 방식으로 얻은 연직자료 중 수온, 전도도(Conductivity) 등의 직독식 센서 데이터 값을 사용하여 수온 차에 따른 수체혼합 패턴을 분석하여 합류부의 혼합양상을 분석하고자 하였다. 본 연구는 기존 수질 측정의 한계였던 1차원적인 측정결과가 나타내는 분석결과를 2차원적으로 보완이 가능하며, 비교 분석한 결과를 토대로 밀도류에 따른 혼합양상 결과가 지니는 혼합패턴을 분석한다면 향후 하천 하류구간의 취수 시스템에 많은 도움을 줄 뿐만 아니라 합류부 구간의 혼합패턴에 따라 수층 내 성층구간의 현황조사와 하천 합류부의 혼합특성 파악하여 합류구간의 수질 관리방안이나 수체 흐름특성을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어:** 수온, 밀도류, 혼합양상, 수체혼합

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-330-6407

E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Kim, Young Do)

## 1. 서론

하천 합류부는 서로 다른 지형학적 특성과 수리학적 특성을 가지는 두 개의 하천이 하나로 합쳐지는 구간으로 급격한 흐름의 변화 및 퇴적물의 유입과 수리학적 지형변화가 발생하는 구간이다. 합류부에서는 물질의 종류 또는 온도 차에 의해 밀도 차이로 유체의 흐름이 발생하는 밀도류 현상을 야기한다. 밀도류는 수온 성층이 생성된 경우에 발생하며, 본류와 유입수와의 밀도 차이가 크게 나는 경우에 발생하게 된다. 밀도류는 동일한 밀도를 가진 수층을 따라 이동하게 되며, 이는 유입수의 밀도와 유입 홍수량 그리고 성층구조에 따라 표층류(overflow), 중층류(interflow), 바닥류(underflow)의 형태로 나타난다(Fischer *et al.*, 1979; Chung and Gu, 1998). 이러한 합류부 측선에서 밀도류로 인해 녹조현상 이슈가 최근 대두되고 있다. 4대강 사업으로 8개 보를 건설하게 되면서 낙동강의 물이 정체되고 이에 따라 매년 여름 성층화 현상으로 인해 남세균 녹조가 더 심하게 발생하는 문제가 있다. 4대강 사업 전에는 낙동강에서 성층현상이 발생하지 않았지만, 다기능보의 건설과 하도의 준설로 낙동강의 수심은 더욱 깊어졌으며 유속이 느려져 지체시간 또한 증가하였다. 이로 인하여 수심이 깊은 곳과 다기능보 인근에는 성층현상이 발생하였다(Choi *et al.*, 2017).

이러한 녹조현상을 해결하기 위한 물 환경 및 수자원의 효율적인 관리를 위한 기초 자료는 부족한 실정이다. 또한 밀도류의 거동에 대한 정확한 예측에 앞서 기초자료 확보는 하천 중·하류 수질 관리 방안 마련에 있어서 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서 밀도류의 거동에 대한 정보를 얻고자 하였다.

국내 밀도류 거동 해석에 관한 연구를 살펴보면 Yoon *et al.* (2008)은 대청호에서의 하천 밀도류의 특성에 대해 수치모의를 진행하였고, Choi and Choi (2017)은  $k-\varepsilon$  난류모형을 이용하여 중층 밀도류가 하류 방향으로 전파되면서 연직방향으로 확산되고 유속이 감소하며, 연직방향 확산률이 점차 감소되는 것을 모의하였다. 또한 Chung *et al.* (2005)은 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 저수지 탁수의 밀도류 거동과 시·공간적 분포를 예측하고 실측값과 비교하여 모형의 적용가능성을 평가하였다. Park and Chung (2014)은 안동호와 임하호 연결에 따른 물의 이동과 수온성층의 변화에 대해서 연구를 진행하였고, Oh and Choi (2015)는 새만금호 내의 밀도 변화가 주로 풍수기 기간에 집중되는 현상이 나타나, 성층현상은 하구 지역의 여름철 상류 유입량에 민감하게 반응하는 것을 주장하였다. 이처럼 국내 연구 동향에 대해서 살펴보면 주로 성층화된 하천·호소에 대한 수치모의와 정체수역의 수온성층 구조 영향 분석이 주를 이루었다. 따라서 본 연구에서는 정체수역이

아닌 하천 합류 구간의 실측계측자료를 이용한 수온 차에 의한 밀도류 분석을 진행하였다.

현재 국가에서는 수질측정망, 유량측정망, 강수량측정망, 수위측정망 등 여러가지 측정망을 운영 하고 있는데 측정 측선에 대한 고정적 측정을 통해 자료를 제공하고 있다. 이러한 자료는 인근 하천의 전체적인 수질과 유량의 대표 측선이나 대표 자료라고 보기 어렵다. 이러한 여러 가지 측정망을 동시에 측정하기에는 공간적으로 일치하지 않기 때문에 합류 하천에서의 복잡한 수질 분석을 하기에는 한계가 있다. 사회적으로 통용된 수질, 수리 측정 방법에는 도섭법, 교량법, 보트법 등이 많이 사용되고 있다. 도섭법과 교량법 사용시 측선 측정으로 계속되고 이에 따라 측정 방법에 따른 측정 시간 등의 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 보트를 타고 하천 횡방향으로 이동하면서 일정간격으로 수심과 유속 측정을 진행하여 타 측정 방법에 비해서 더 고차원의 자료를 취득할 수 있는 보트법을 이용하였고, 그 과정에서 ADCP와 YSI를 이용하여 수심과 유속 측정을 하고 수질 항목 자료를 취득하여 분석을 진행하였다.

본 연구에서는 낙동강과 금호강 합류부 구간을 대상으로 성층구간의 현황조사와 혼합특성파악을 파악하고자 수표면 전도도(Conductivity) 컨투어 그래프와 수온 및 전도도(Conductivity) 연직 그래프, 하천단면 수온 및 전도도(Conductivity) 농도분포를 검토하였으며, 비교 대상지역의 계절별 분석을 위해 2021년 04월 15일, 2021년 08월 19일, 2021년 11월 17일의 자료를 적용하여 분석을 진행하였다.

## 2. 대상지역 및 연구방법

### 2.1 연구대상지역

낙동강은 하천길이 510.36 km, 유역면적 23,384.21 km<sup>2</sup>의 영남지방을 유역권으로 한다. 금호강은 하천길이 119.23 km, 유역면적 2,092.42 km<sup>2</sup>로 대구광역시 달서구 성서지구에서 낙동강에 합류한다. 본 연구의 대상지역은 금호강과 낙동강 합류 측선으로 대상구간 범위는 강정고령보 하류에서 고령교까지 약 15 km 구간으로 선정하였다(Fig. 1). 금호강 합류부의 주요 특징으로는 성서공단이 위치해 대도시인 대구광역시를 관류하여 폐수의 직접적인 영향을 미쳐 수질이 전반적으로 나빠지며, 합류부 기준 상류 약 1 km 내에 국내 최대 규모의 강정고령보가 위치한다. 또한 물이 보를 채운 후 그대로 월류되는 방류 방식으로 강정고령보를 통해 방류되는 수체의 온도와 지류(금호강)의 수온차가 발생하기 때문에 밀도 성층을 관찰

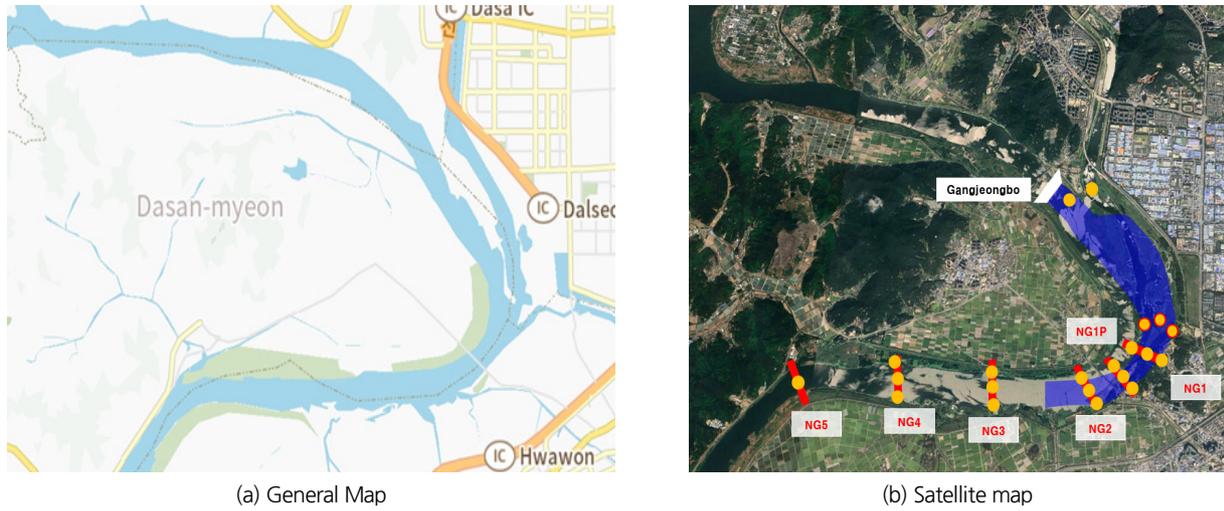


Fig. 1. Research target area



Fig. 2. Measuring equipment

하기 좋다는 점을 고려하여 해당 지역을 선정하게 되었다. 특히 녹조 문제뿐만 아니라 여름철 홍수시 유입된 탁수가 중층 밀도류를 형성하며 수질관리에 많은 문제를 초래하고 있어 밀도류의 거동에 대한 정보와 적절한 조절대책이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 낙동강과 금호강 합류부 구간에서의 수온, 전도도 자료를 수집하여 수표면 컨투어, 연직그래프, Surfer를 이용한 등농도선도를 통하여 분석을 진행해 보았다.

## 2.2 자료 취득 방법

대상구간에서 ADCP와 YSI-EXO를 이용하여 수리-수질 자료를 취득하였다. 모니터링 수행에는 ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)와 다항목 수질 측정기인 YSI-EXO를 사용하여 대상 유역인 금호강 합류부에서의 측정자료를 취득하였다 (Fig. 2).

ADCP는 수중으로 전송된 일정 주파수의 초음파가 부유물

질에 의해 산란하여 반사되는 초음파의 도플러 효과를 이용하여 수심에 따른 3차원 유속정보를 수집하고, 이를 이용하여 유량을 측정하는 장비이다 (Mueller and Wagner, 2009). 또한 수질 항목측정을 위해서 다항목 수질모니터링시스템인 YSI를 사용하여 수온, 전도도에 대한 자료를 수집하였다.

대상지역에서 금호강과 낙동강 본류의 혼합 양상을 보기 위해서 측정 장비인 ADCP를 배에 부착하여 유속 및 수심 자료를 취득하였고, YSI를 이용하여 수질항목자료를 취득하였다. 이때 하천 흐름방향으로 횡단면을 지그재그로 이동식 측정 (Fig. 3)을 진행하여 2차원 횡단면 자료를 취득하였고, 또한 횡단면 이동 중 배를 멈추어 고정식 방법을 이용하여 연직 방향의 3차원 데이터를 YSI를 이용하여 하천의 상하 방향으로 자료를 측정하는 등 복합모니터링을 통하여 하천의 전체적인 데이터를 취득하였다.



Fig. 3. Data acquisition instrumentation information

2.3 연구방법

대상 지역의 밀도류 분석을 위해서는 수온과 전도도 값을 분석 대상 데이터로 선정하였다. 특성이 다른 두 개의 하천이 합류함에 있어서 수온 차가 발생하게 되고 이때 수온약층이 발달하여 밀도 차에 의한 성층이 발생하게 되는 수온의 특성과, pH, DO 등 타 수질항목의 값에 비해서 측정값의 범위가 넓게 나타나며 두 수체의 전도도 값의 차이가 클수록 비교에 적합하다는 전도도 값의 특성을 이용하여 두 데이터를 선정하고 연구의 전반적인 분석을 진행하였다.

수온 차에 의한 합류부 혼합 영향을 분석하기 위하여 3가지 CASE로 순서를 나누어서 연구를 진행하였다. CASE NO.1은 전도도 수표면 컨투어 자료와 전도도와 수온 연직 그래프를 봄, 여름, 가을 계절별 비교를 통하여 분류와 지류의 흐름을 파악하고 수온과 밀도 차에 의한 성층 발달과 혼합영향에 대해서 두 가지 종류의 그래프를 비교 분석을 진행하였다(Table 1). 우선적으로 전도도 수표면 컨투어 자료를 통해서 1차원적으로 표면만 보았을 때 혼합이 완료된 측선을 파악하고, 전도도와 수온 연직 그래프를 통해서 2차원적으로 보았을 때의 혼합 완료 측선을 확인해 보았다. CASE NO.2는 전도도 연직 그래프에서의 합류 완료 전과 합류 완료 후의 수치를 수심별, 계절별로 정량적 비교를 진행하였다. 합류 완료 전, 성층이 형성되었다고 판단되는 NG1측선과 합류가 완료되었다고 판단되는 NG5 측선을 성층의 깊이와 동일하게 깊이 1~2 m, 2~4 m, 4~6 m로 나누어서 로우데이터의 최소값과 최대값을 각각 비교를 해보았다. CASE NO.3은 ‘Surfer’ 프로그램을 이용하여 크리깅 기법을 통해 전도도와 수온 등농도선도 그리드를 그려서 하천 단면을 시각화하여 분석을 진행하였다. 분류와 지류의 농도 차이를 더 가시적으로 나타내기 위하여 등농도선도를 선택하였고, 이를 통하여 분류와 지류의 흐름과 그에 따른 혼합 영향 분석을 진행하였다.

Table 1. Hydrodynamic characteristic by site observation period

	Spring	Summer	Autumn
Measurement date	2021.04.15	2021.08.19	2021.11.17
Mainstream (CMS)	110.3	160.8	18.3
Tributary (CMS)	20.0	18.7	5.3
Flow rate ratio	5.5	8.6	3.5

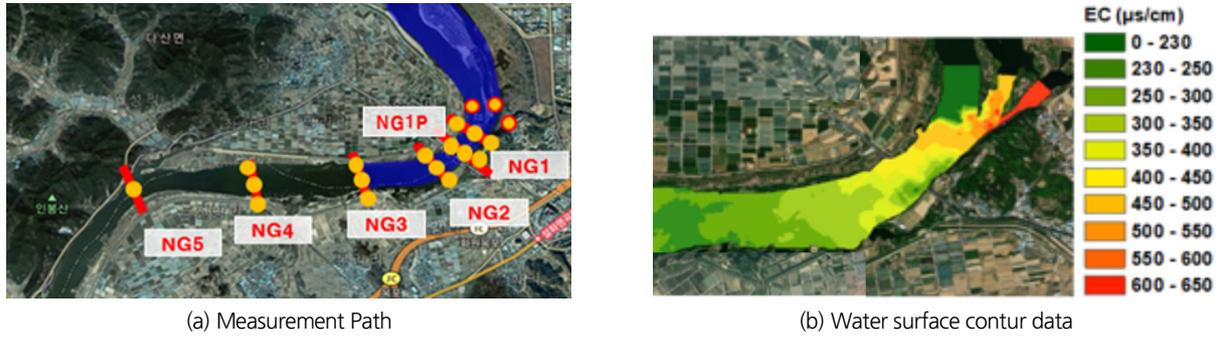
3. 실험 결과

3.1 수표면 컨투어와 연직 그래프 비교 분석

계측결과를 봄, 여름, 가을 계절별로 나누어서 분석을 진행해 보았다. 조사 단면은 금호강 합류 후 NG1~NG5 측선까지 총 6개의 단면으로 나누었고 합류점에서부터 NG1 측선까지는 200 m, NG1 측선부터 NG1P 측선까지와 NG1P 측선부터 NG2 측선까지는 500 m, NG2 측선부터 NG3 측선, NG3 측선에서 NG4 측선, NG4 측선에서 NG5 측선까지는 각각 2 km 간격으로 지정하였고, 각 측선을 좌안에서 우안까지 차례로 P1~P5까지 지점을 지정하였다(Fig. 4).

2021년 04월 15일의 봄 수표면 컨투어 자료를 보면 NG1P 측선까지 금호강과 진천천의 영향이 미치는 것을 확인 할 수 있다. 또한 낙동강의 흐름이 NG1P 측선 이후 좌안에서 다시 영향이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 전도도 연직 그래프(Fig. 5)의 NG1 측선을 보아 왼쪽의 P1과 P2가 낙동강 분류, 오른쪽의 P3, P4, P5가 금호강 지류인 것을 확인 할 수 있다. 같은 구간의 수온 연직그래프(Fig. 6)를 확인했을 때 낙동강 분류 부분이 수온이 더 낮은 것을 확인 할 수 있고, 3 m 이하의 하층구간을 보게 되면 수온이 조금 낮아지면서 낙동강 분류의 영향을 받은 것을 확인 할 수 있다. 이후에 NG1P 구간을 살펴 보게 되면, 깊이 0~2 m, 2~4 m, 4~6 m까지 성층이 발생한 것을 볼 수 있다. 성서 공단의 영향으로 높은 전도도 값을 나타내는 금호강이 NG1P 구간에서 성층을 보이다가 구간이 지남에 따라 점차 혼합이 되고 있는 모습을 볼 수 있고, 이후 NG4 구간에서 혼합이 완료되는 것을 확인 할 수 있다.

또한, 2021년 08월 19일의 여름 수표면 컨투어 자료(Fig. 7)를 보면 NG1 측선 약 200 m 떨어진 측선에서 금호강과 진천천의 영향이 좌안에서 멈춘 것을 확인 할 수 있다. 또한 낙동강의 흐름이 좌안으로 흐르면서 금호강과 진천천을 덮는 듯한 형상을 띄고 있고, NG2 측선 이후 다시 금호강과 진천천의 영향이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 전도도 연직 그래프(Fig. 8)의 NG1 측선을 보아 왼쪽이 낙동강 분류, 오른쪽이 금호강 지류인 것을 확인 할 수 있다. 같은 구간의 수온 연직그래프(Fig. 9)를 확인했을 때 강정 고령보의 영향을 받는 낙동강 분류 부분의 수온이 더 높아 1도 정도 차이가 나는 것을 확인 할



(a) Measurement Path

(b) Water surface contour data

Fig. 4. Nakdong river-Geumho river confluence lateral line measurement path (Spring)

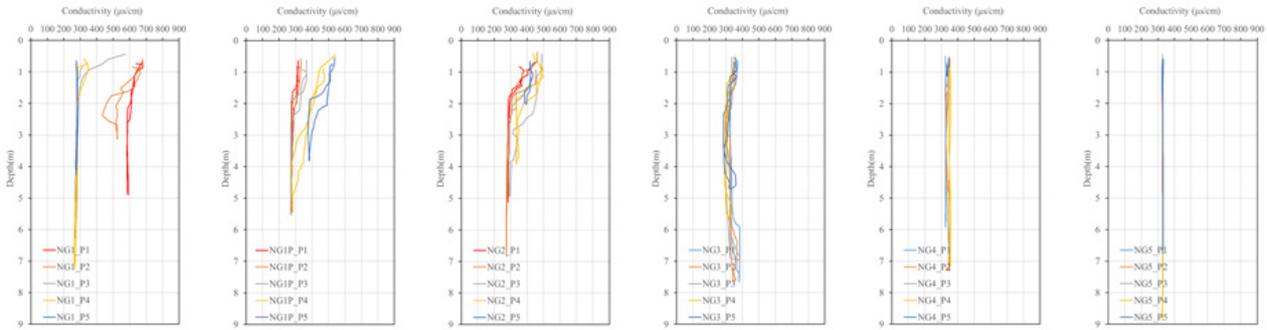


Fig. 5. CASE NO.1\_Conductivity vertical graph (Spring)

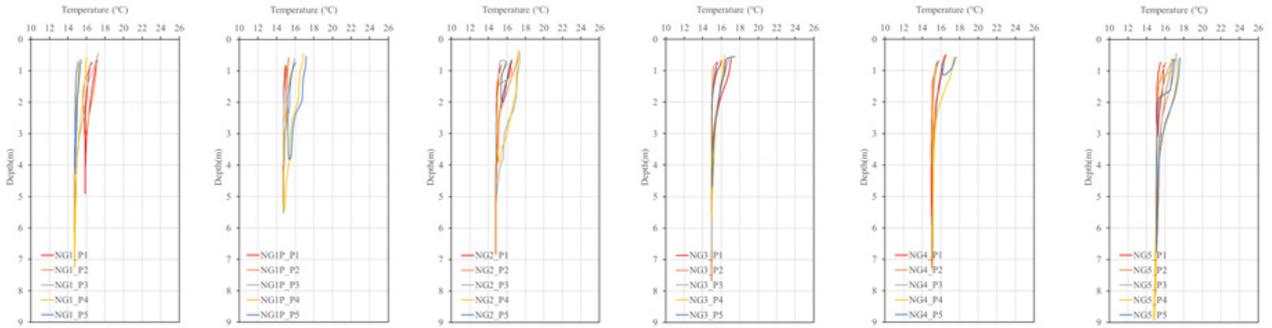
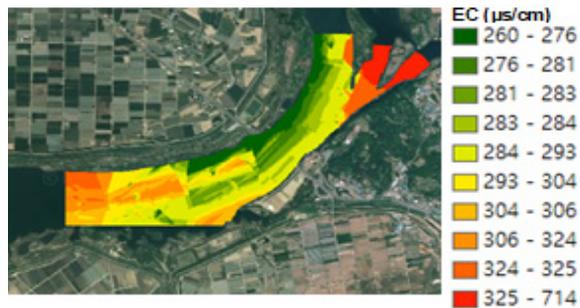


Fig. 6. CASE NO.1\_Temperature vertical graph (Spring)



Water surface contour data

Fig. 7. Nakdong River-Geumho River confluence lateral line measurement path (Summer)

수 있고, 그에 따라 밀도 차에 의한 성층이 발생한 것을 알 수 있다.

전도도 그래프의 NG1P 측선에서 성서 공단의 영향으로 높은 전도도 값을 나타내는 지류가 성층을 보이다가 구간이 진행됨에 따라서 점차 혼합되고 있는 양상을 볼 수 있고, NG4 측선에서 혼합이 완료된 모습을 확인 할 수 있다.

2021년 11월 17일의 가을 수표면 컨투어 자료(Fig. 10)를 보면 NG1 측선 약 200 m 떨어진 측선에서 금호강과 진천천의 영향이 좌안에서 멈춘 것을 확인 할 수 있다. 또한 낙동강의 흐름이 좌안으로 흐르면서 금호강과 진천천을 덮는 듯한 형상을 띄고 있고, NG2 측선 이후 다시 금호강과 진천천의 영향이

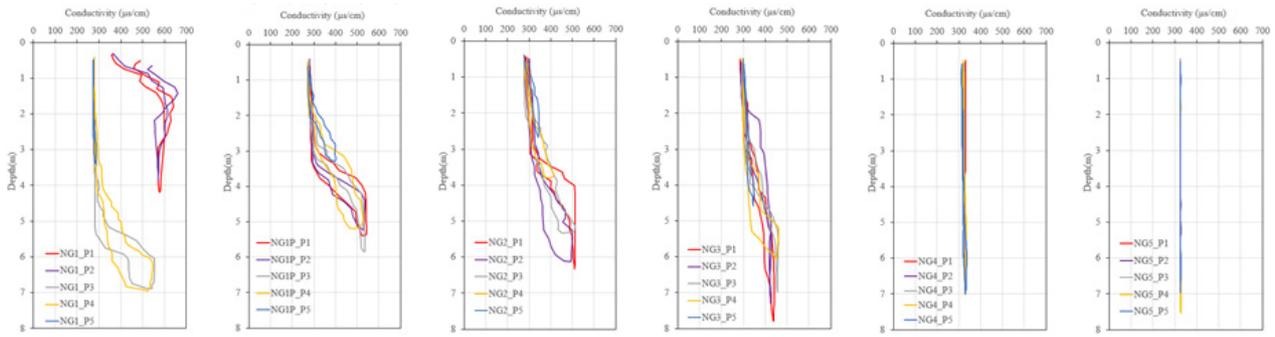


Fig. 8. CASE NO.1\_Conductivity vertical graph (Summer)

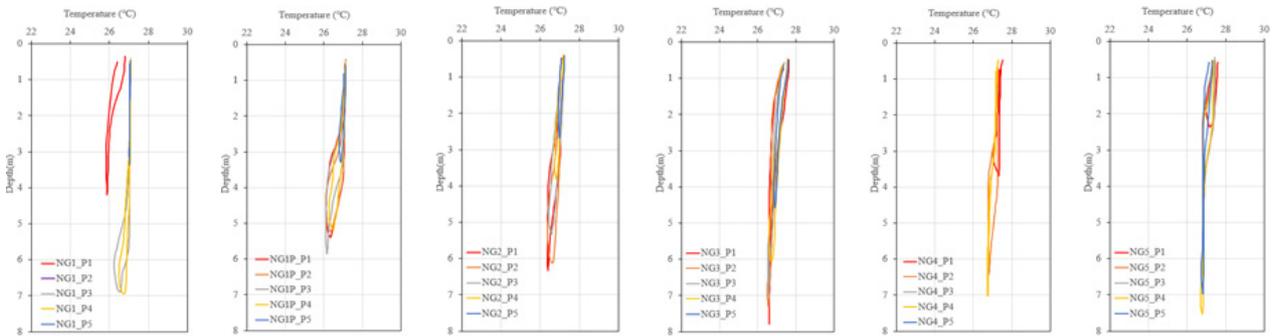
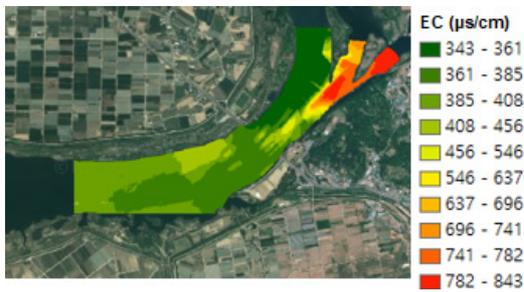


Fig. 9. CASE NO.1\_Temperature vertical graph (Summer)



Water surface contour data

Fig. 10. Nakdong River-Geumho River confluence lateral line measurement path (Autumn)

나타나는 것을 확인 할 수 있다. 전도도 연직 그래프(Fig. 11)의 NG1 측선을 보아 왼쪽이 낙동강 본류, 오른쪽이 금호강 지류인 것을 확인 할 수 있다. 같은 구간의 수온 연직 그래프(Fig. 12)를 확인했을 때 봄의 경우와 동일하게 지류의 수온이 낙동강 본류의 수온보다 더 높은 것을 확인 할 수 있고, 그에 따라 밀도 차에 의한 성층이 발생한 것을 알 수 있다.

마찬가지로 전도도 그래프의 NGIP 측선에서 성서 공단의 영향으로 높은 전도도 값을 나타내는 지류가 깊이 0~3 m, 3~6 m로 성층을 보이다가 구간이 진행됨에 따라서 점차 혼합되고 있는 양상을 볼 수 있고, 점차 혼합이 되면서 NG4 측선에서

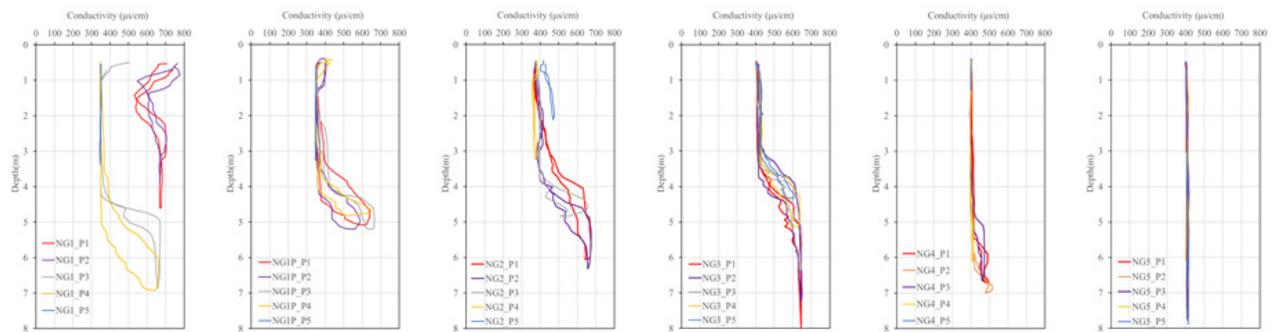


Fig. 11. CASE NO.1\_Conductivity vertical graph (Autumn)

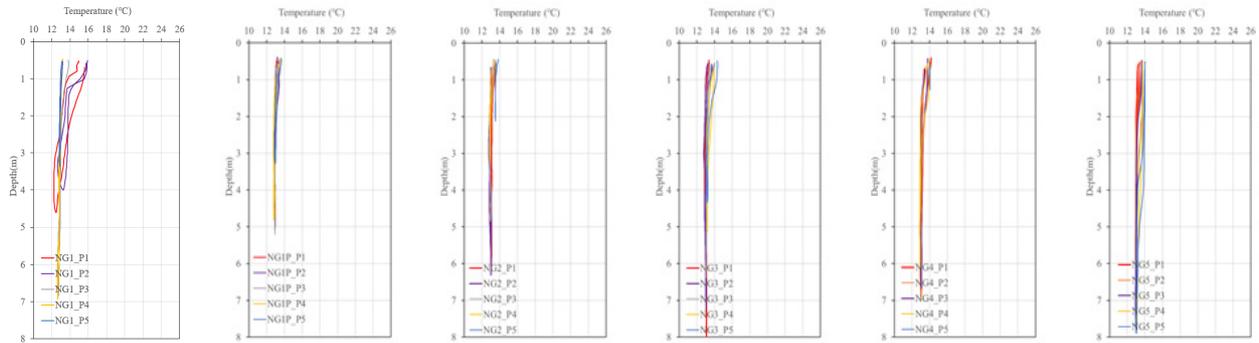


Fig. 12. CASE NO.1\_Temperature vertical graph (Autumn)

혼합이 완료된 모습을 확인 할 수 있다.

### 3.2 연직 그래프에서의 수치 비교

계절에 따른 CASE NO.1의 결과를 가시적으로 도출하기 위하여 전도도 연직 그래프(Figs. 13~15)를 정량적으로 비교하기 쉽게 수치를 정리해 보았다. 측선 선정의 기준으로는 표면은 혼합이 완료 되었지만 연직으로는 혼합이 완료되지 않은 NG1P 측선과, 연직방향으로 혼합이 완료된 NG5 측선을 비교 대상으로 선정하였다.

봄의 NG1P 측선을 생성된 성층의 깊이에 따라 깊이 1~2 m, 2~4 m, 4~6 m로 나누어 보았을 때, 상층부는 지류인 금호강의 영향을 받아 전도도 값이 540~407  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 상대적으로 높은 값은 보이고, 하층부는 본류인 낙동강의 영향을 받고 있어 332~281  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 같은 측선상이지만 깊이에 따라 아직 혼합이 완료되지 않아 최솟값과 최댓값을 비교하였을 때, 259  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 큰 편차를 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다(Table 2). 그러나 연직으로 완전히 혼합된 후인 NG5 측선의 수치를 확인해봤을 때는 앞선 NG3 측선과 같은 깊이와 같은 깊이 1~2 m, 2~4 m, 4~6 m로 비교를 하였음에도 330~331  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 331~330  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 330~329  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 최솟값과 최댓값을 비교하였을 때, 2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 차이밖에 나지 않는 것을 확인 할 수 있었다 (Table 3).

여름의 NG1P 측선을 생성된 성층의 깊이에 따라 깊이 1~2 m, 2~4 m, 4~6 m로 나누어 보았을 때, 상층부는 본류인 낙동강의 영향을 받아 전도도 값이 276~277  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 상대적으로 낮은 값은 보이고, 하층부는 지류인 금호강과 진천천의 영향을 받고 있어 450~533  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 같은 측선상이지만 깊이에 따라 아직 혼합이 완료되지 않아 최솟값과 최댓값을 비교하였을 때, 257  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 큰 편차를 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다 (Table 4). 그러나 연직으로 완전히 혼합된 후인 NG5 측선의 수치를 확인해봤을 때는 앞선 NG1P 측선과 같은 깊이와 같은 깊이 1~2 m, 2~4 m, 4~6 m로 비교를 하였음에도 326~326

$\mu\text{s}/\text{cm}$ , 326~326  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 326~327  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 최솟값과 최댓값을 비교하였을 때, 1  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 차이밖에 나지 않는 것을 확인 할 수 있었다(Table 5).

또한, 가을의 NG1P 측선을 생성된 성층의 깊이에 따라 깊이 1~3 m, 3~6 m로 나누어 보았을 때, 상층부는 낙동강의 영향을 받아 전도도 값이 354~373  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 상대적으로 낮은 값은 보이고, 하층부는 금호강과 진천천의 영향을 받고 있어 389~648  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 같은 측선상이지만 깊이에 따라 아직 혼합이 완료되지 않아 최솟값과 최댓값을 비교하였을 때, 294  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 큰 편차를 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다(Table 6). 그러나 연직으로 완전히 혼합된 후인 NG5 측선의 수치를 확인해봤을 때는 앞선 NG1P 측선과 같은 깊이와 같은 깊이 1~3 m, 3~6 m로 비교를 하였음에도 399~406  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 411~415  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 최솟값과 최댓값을 비교하였을 때, 16  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 차이밖에 나지 않는 것을 확인 할 수 있었다(Table 7).

### 3.3 연직 그래프와 하천 단면 등농도선도

수온 연직 그래프(Fig. 16)를 살펴보면 NG1 측선에서 지류인 P1과 P2가 수온이 더 낮은 것을 확인 할 수 있다. NG1P 측선에서도 상층과 하층이 1도 이상 수온 차이가 나는 것을 통해 성층이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 전도도 연직 그래프(Fig. 17)를 확인하였을 때도 밀도 차에 따라 지류가 하층 부분에 영향을 미치고, 본류가 상층 부분에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 NG1P에서 NG4 측선으로 흘러감에 따라서 그래프가 일자로 합쳐지면서 NG4, NG5 측선에서 혼합이 완료되는 모습을 확인 할 수 있다.

또한 연직 그래프를 가시화하기 위해서 하천 단면 수온 등농도선도(Fig. 18)와 Conductivity 등농도선도(Fig. 19)를 그려보았다. 크리깅 기법을 통하여 그리드 작업을 진행하였고, 수온 등농도선도는 파란색이 상대적으로 수온이 낮은 지류인 금호강, 빨간색을 본류인 낙동강으로 나타내었다. NG1의 그리드를 보면 상대적으로 수온이 낮은 금호강과 진천천의 영향

이 들어오는 것을 확인 할 수 있고, 연직 그래프(Fig. 16)에서 보듯이 낙동강의 하층 부분이 금호강과 진천천의 영향을 받아 수온이 낮아진 것을 등농도선도에서도 확인 할 수 있다. 또한 이후 측선에서는 수온이 낮은 지류가 하층에 깔려있어 성층이 형성된 것을 확인 할 수 있다. 조사 기간이 여름이어서 수표면이 데워진 것을 감안한다면 전반적으로 균등하게 혼합이 완료된 것을 확인 할 수 있다.

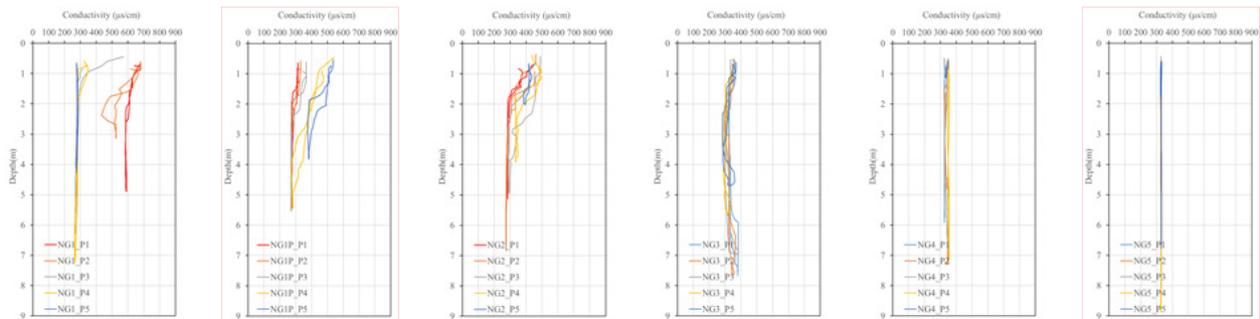
전도도 등농도선도(Fig. 19)는 초록색이 상대적으로 낮은 농도인 낙동강 본류, 붉은색이 지류인 금호강으로 나타내었다. NG1의 그리드를 확인해 보았을 때, 본류 쪽 하단으로 영향을 미치며 이후의 구간을 확인하였을 때도 성층으로 인해서 수온이 낮았던 지류가 하층에 깔려있는 모습을 볼 수 있고, 이후 NG5 측선에서 수체가 혼합이 완료된 것을 확인 할 수 있다.

**Table 2.** Conductivity value of NG1P lateral line (Spring)

NG1P_Conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )		
Depth (m) 1~2	Depth (m) 2~4	Depth (m) 4~6
540~407	399~332	332~281

**Table 3.** Conductivity value of NG5 lateral line (Spring)

NG5_Conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )		
Depth (m) 1~2	Depth (m) 2~4	Depth (m) 4~6
330~331	331~330	330~329



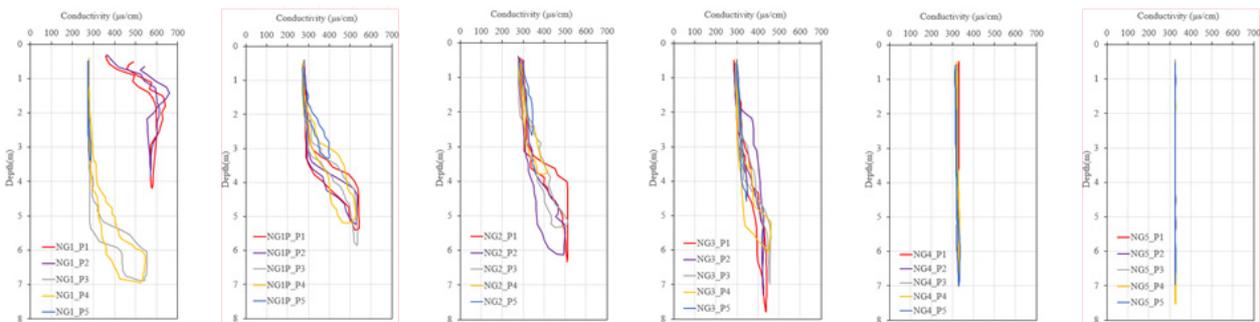
**Fig. 13.** CASE NO.2\_Conductivity vertical graph (Spring)

**Table 4.** Conductivity value of NG1P lateral line (Summer)

NG1P_Conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )		
Depth (m) 1~2	Depth (m) 2~4	Depth (m) 4~6
276~277	278~423	450~533

**Table 5.** Conductivity value of NG5 lateral line (Summer)

NG5_Conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )		
Depth (m) 1~2	Depth (m) 2~4	Depth (m) 4~6
326~326	326~326	326~327



**Fig. 14.** CASE NO.2\_Conductivity vertical graph (Summer)

**Table 6.** Conductivity value of NG1P lateral line (Autumn)

NG1P_Conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )	
Depth (m) 1~3	Depth (m) 3~6
354~373	389~648

**Table 7.** Conductivity value of NG5 lateral line (Autumn)

NG5_Conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )	
Depth (m) 1~3	Depth (m) 3~6
399~406	411~415

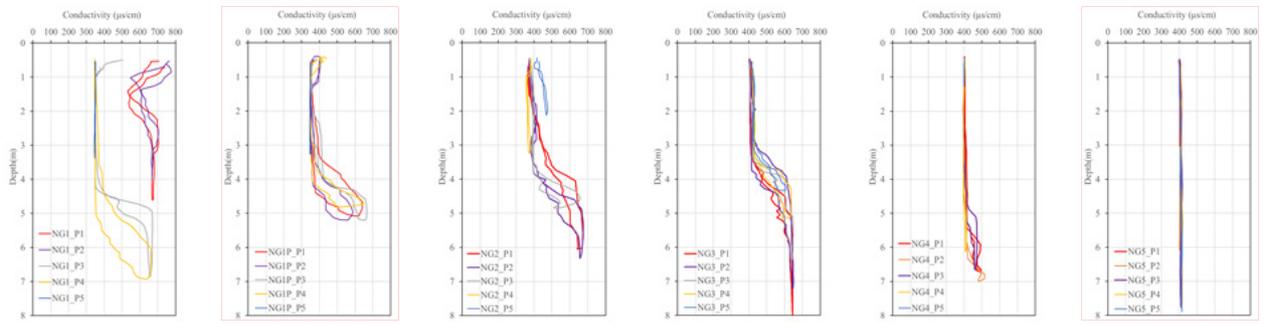


Fig. 15. CASE NO.2\_Conductivity vertical graph (Autumn)

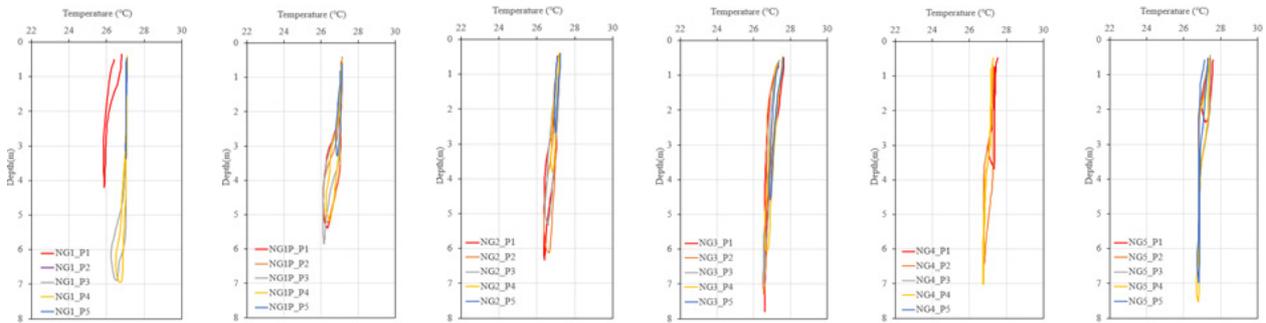


Fig. 16. CASE NO.3\_Temperature vertical graph (Summer)

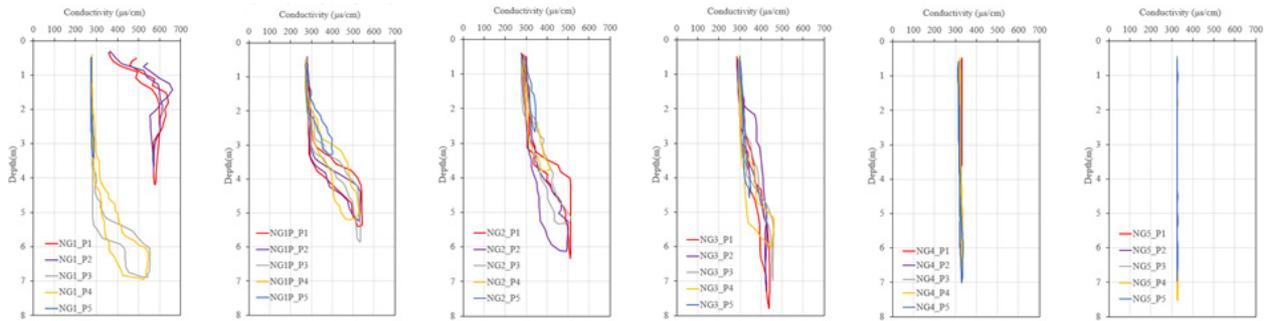


Fig. 17. CASE NO.3\_Conductivity vertical graph (Summer)

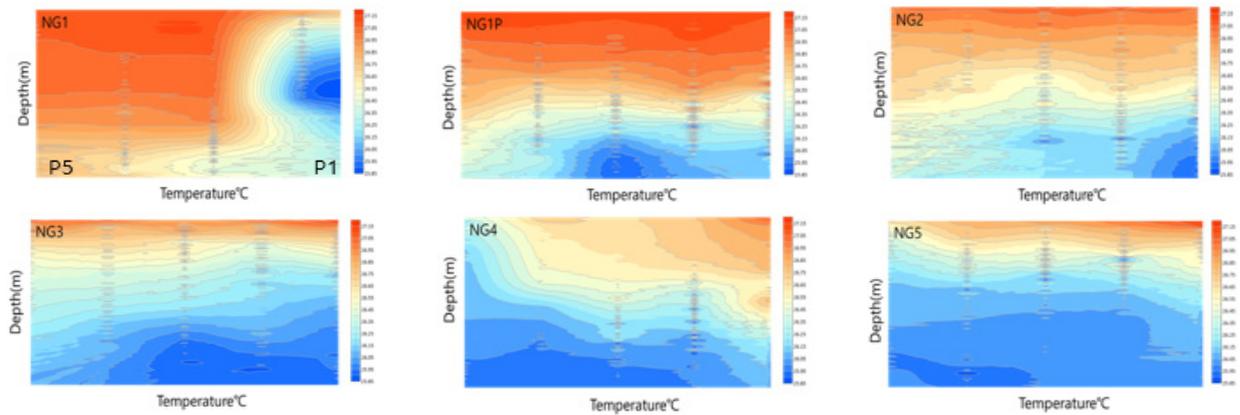


Fig. 18. CASE NO.3\_Water temperature isometric density map of river section (Summer)

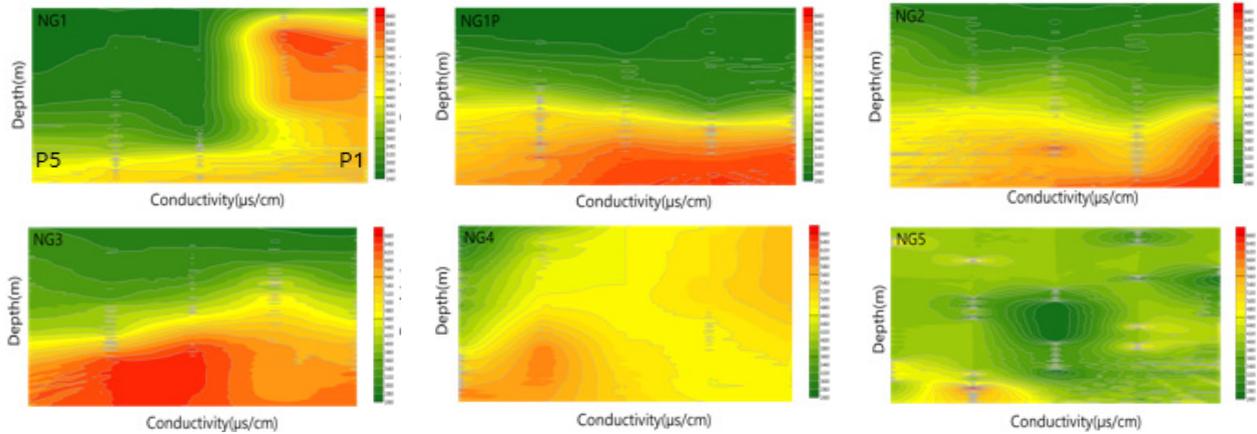


Fig. 19. CASE NO.3\_Conductivity isometric density map of river section (Summer)

#### 4. 결론

본 연구는 낙동강-금호강의 합류부의 수질 계측 결과를 이용하여 그래프와 그리드 작업을 통하여 시각화를 통해 본류와 지류의 수온 차에 의한 혼합 영향을 계절별로 분석을 진행하였다. 수심 자료 및 수질 정보를 얻기 위해서 ADCP와 YSI를 이용하여 대상 구간 내의 수온과 전도도(Conductivity)값의 계측을 진행하였다.

CASE NO. 1을 봄, 여름, 가을로 나누어 분석을 진행해 보았을 때, 봄과 가을은 본류인 낙동강이 지류인 금호강보다 수온이 낮아서 지류 아래로 침투하여 성층현상이 발생하고, 여름은 지류인 금호강이 본류인 낙동강보다 수온이 낮아서 본류 아래로 침투하여 성층현상이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

CASE NO. 2를 통해서 연직그래프에서의 수표면은 혼합이 완료되었지만 연직방향으로는 혼합이 완료되지 않은 NG1P 측선과 연직방향으로 혼합이 완료된 NG5 측선에 대해서 수온과 전도도의 수치 비교 분석을 진행하였다. NG1P 측선에서 성층의 깊이 별로 나누어서 비교를 하였을 때, 상층부는 수온이 높은 수체의 영향을 받고 하층부는 수온이 낮은 수체의 영향을 받아서 전도도의 값이 큰 편차를 보이는 것을 확인하였다. 그에 반해 NG5 측선은 수치가 거의 일치하는 것을 확인함으로써 혼합 영향 분석을 1차원적인 방법(수표면)을 통해서만이 아니라 2차원적인 방법(연직)을 추가하여 복합적 분석을 진행해야 한다는 것을 정량적인 방법을 통해서도 확인 할 수 있었다.

CASE NO. 3은 앞선 결과들을 가시화하기 위하여 하천 단면 농도분포를 수온과 전도도 등농도선도를 통하여 나타내보았다. 수온 그리드를 확인해 보았을 때, 연직 그래프에서 확인한 바와 같이 수온이 상대적으로 낮은 금호강과 진천천의 영향

이 들어오면서 낙동강의 하층 부분이 수온이 낮아진 것을 확인할 수 있었고, 그에 따라 수온 차에 의해 성층이 형성되어 NG4 측선에 가서 혼합이 연직방향으로 완료된 것을 확인할 수 있다. 전도도 그리드도 마찬가지로 성서공단의 영향으로 농도가 높은 금호강 지류가 본류 하단에 영향을 미치고, 그로 인해 성층이 발생하여 지류가 하층에 깔려있는 것을 볼 수 있으며, NG5 측선에서 수체가 혼합이 완료되는 것을 확인할 수 있었다.

CASE들을 통해서 수표면 키투어 그래프와 수온, 전도도 연직 그래프의 혼합완료 측선에 대해서 비교를 해보았을 때, 서로 혼합완료측선이 상이함을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 기존 수질 측정의 한계였던 1차원적인 측정결과가 나타내는 분석의 한계를 2차원적으로 보완이 가능할 것을 알 수 있었다. 또한 혼합 완료 측선이 상이한 이유가 성층 때문임을 다양한 방법을 통해 원인을 규명해 보았으며, 본류와 지류의 수온 차에 의해 발생하는 밀도류가 합류부 측선에서 혼합에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 밀도류의 거동에 대한 정보를 얻을 수 있었고, 이를 통해 낙동강 중·하류 물 환경 및 수자원의 효율적인 관리를 위해 본류와 지류의 혼합되는 양상에 대하여 낙동강 중·하류 수질 관리 방안 마련에 대한 기초 자료로 활용될 것으로 사료되며 또한 하천 합류부의 하류 말단부 취수원 선정이나 하천 내 부유성 물질 혹은 호소 내 빈산소층 분석 등 다양한 연구에 활용될 수 있다는 기대효과를 볼 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의

지원(2021003030005)에 의해 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Choi, H., Han, K., and Park, J. (2017). "Reproducibility evaluation of stratification using EFDC model in Nakdong River." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 3, pp. 561-573.
- Choi, S., and Choi, S.U. (2017). "Numerical simulation of dense interflow using the k- $\epsilon$  turbulence model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 9, pp. 637-646.
- Chung, S., OH, J., and Ko, I. (2005). "Simulations of temporal and-spatial distributions of rainfall-induced turbidity flow in a reservoir using CE-QUAL-W2." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 8, pp. 655-664.
- Chung, S.W., and Gu, R. (1998). "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 7, pp. 704-711.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, Inc., New York, NY, U.S.
- Mueller, D.S., and Wagner, C.R. (2009). *Measuring discharge with acoustic doppler current profilers from a moving boat*. US Department of the Interior, US Geological Survey, Reston, VA, U.S.
- Oh, C., and Choi, J. (2015). "Consideration on changes of density stratification in Saemangeum reservoir." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 81-93.
- Park, H., and Chung, S. (2014). "Water transportation and stratification modification in the Andong-Imha linked reservoirs system." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 30, No. 1, pp. 31-43.
- Yoon, S., Jung, S., and Choi, J. (2008). "Variation of inflow density currents with different flood magnitude in Daecheong reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 12, No. 41, pp. 1219-1230.