

해양 연직 혼합의 이중확산 실험을 위한 시뮬레이션

이한빛^{1,2} · 강솔잎¹ · 양우현^{1*}

¹전북대학교 사범대학 과학교육학부/융합과학연구소, 전주 54896

²전북교육청, 전주 55065

Simulation for Double Diffusion Experiment of Ocean Vertical Mixing

Han Bit Lee^{1,2}, Sol Ip Kang¹, and Woo Hun Ryang^{1*}

¹Division of Science Education and Institute of Fusion Science, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

²Jeonbuk State Office of Education, Jeonju 55065, Korea

초 록: 등밀도 성층 조건에서 이중확산에 의해 형성되는 연직 혼합 구조를 수치 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 비정수압 2차원 연직 단면 모델을 이용하여 열·염분의 분자확산계수 차이를 반영한 Fortran 기반 수치 계산을 수행하였다. 계산 결과는 Python을 활용하여 시각화하여 시간에 따른 온도, 염분, 밀도 분포의 변화를 분석하였다. 초기 단계에서는 열 확산이 염분 확산보다 빠르게 진행되며, 경계면 부근에서 온도 요동이 선행적으로 나타났다. 열과 염의 확산 효과로 밀도 구조의 공간적 변동성이 증가하고, 연직 혼합이 점차 발달하는 양상이 확인되었다. 결과적으로 이중확산에 의한 연직 혼합 과정을 시각적으로 제시함으로써 해양 성층 구조의 시간적 발달에 대한 직관적 이해를 제공하였다. 이는 중등학교 예비 교원과 학생들이 해수의 수온과 염분 차이에 따른 밀도 변화 과정을 직관적으로 이해하는데 도움이 될 것이다.

중심어: 이중확산, 연직 혼합 과정, 열·염분 확산계수

Abstract: The vertical mixing structure induced by double diffusion under equal-density stratification conditions was investigated through numerical simulations. A Fortran-based numerical model was developed to account for the differing molecular diffusion coefficients of heat and salt, employing a non-hydrostatic two-dimensional vertical cross-sectional framework. The simulation results were subsequently visualized using Python to examine the temporal evolution of temperature, salinity, and density distributions. During the initial stage, thermal diffusion proceeded more rapidly than saline diffusion, leading to temperature perturbations in the vicinity of the density interface. The results indicate that the differential diffusion of heat and salt enhanced the spatial variability of the density structure, thereby promoting the gradual development of vertical mixing. Overall, this study provides an intuitive understanding of the temporal evolution of a two-layer stratified ocean system by visually demonstrating the vertical mixing process driven by double diffusion. The findings are expected to support prospective teachers as well as middle and high school students in developing a clearer conceptual understanding of density variations in seawater arising from differences in temperature and salinity.

Keywords: Double diffusion, Vertical mixing process, Diffusion coefficient of heat and salt

*Corresponding Author: Woo Hun Ryang

Phone: +82-(0)63-270-2790

E-mail: ryang@jbnu.ac.kr



All the content in Journal of Science & Science Education(JSSE) is Open Access, meaning it is accessible online to everyone, without fee and authors' permission. All JSSE content is published and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Under this license, the authors retain full ownership of their work, while permitting anyone to use, distribute, and reproduce the content in any medium, as long as the original authors and source are cited. For any reuse, redistribution, or reproduction of a work, users must clarify the license terms under which the work was produced.

I. 서 론

해수의 밀도는 해양의 물리적 특성을 결정하는 핵심 변수이며, 수온과 염분의 상호작용에 의해 정의된다[1]. 이를 정확히 이해하는 것은 해양학 학습의 필수적인 기초가 된다. 현재 중등교사는 교육 현장에서 주로 평면적인 T-S 다이어그램이나 정적인 그래프 등 텍스트 중심의 자료를 통해 밀도 개념을 다루고 있다[2]. 이러한 방식은 두 변수가 복합적으로 작용하여 나타나는 해양의 역동적인 변화를 학생들이 심층적으로 이해하고 직관적으로 파악하는 데 한계가 있다. 수온과 염분의 확산 속도 차이로 발생하는 이중확산(double diffusion)은 해수의 밀도 분포와 연직 구조, 혼합 과정을 설명하는 중요한 현상임에도 불구하고 미세 규모의 역학적 특성상 교육 현장에서 실험적으로 재현하거나 시각화하기가 매우 까다로운 주제이다. 이를 해결하기 위해 해양의 다양한 현상들을 데이터 기반의 Python 등의 디지털 프로그램을 이용하여 시각화하는 활동이 도입되고 있다[3-5]. 학생들은 디지털 시뮬레이션 활동을 통해 관련 개념을 유기적으로 연결하고 스스로 질문을 던지는 과정을 경험하게 된다. 2022 개정 과학과 교육과정은 탐구 과정을 '지식·이해', '과정·기능', '가치·태도'의 세 차원으로 재구조화하고, '과정·기능'에서 디지털 도구의 활용과 시각적 모델링의 중요성을 명시하였다[6,7]. 성취 기준과 해설을 통해 데이터 기반의 탐구 활동과 시뮬레이션을 활용한 시각화 경험을 대폭 확대할 것을 권장하고 있다[6,8,9]. 학생들이 과학적 사실을 직관적으로 체득할 수 있는 다양한 디지털 교수·학습 자료 개발이 필수적이다[3-5,10,11].

이에 본 연구는 이중확산 현상의 수치 모델링을 구현하여, 학생들이 솔트 핑거(salt fingers) 및 대류층화 현상을 직접 시뮬레이션함으로써 해수의 수온과 염분에 따른 밀도의 변화와 물리적 특성을 직관적으로 이해하는데 도움을 주고자 한다. 교사와 학생은 구축된 코딩 자료를 통해 매개변수를 조정하여 물리적 변화를 즉각적으로 확인할 수 있다. 사용자 친화적 교육용 모델링 가이드로서 역할을 기대한다. 본 연구는 궁극적으로 추상적인 해양 물리 현상에 대한 학생들의 학습 이해도를 높이는 동시에, 데이터 기반 디지털

탐구 수업에 대한 교사들의 심리적 장벽을 낮추고 현장 접근성을 제고하는 데 기여할 것이다.

II. 이중확산

해양 연직 혼합은 해양 내부에서 열, 염분, 영양염과 같은 물리·화학적 성분이 수직 방향으로 이동하는 과정으로, 해양의 열 수지와 물질 순환을 조절하는데 중요한 역할을 한다[1]. 이러한 연직 혼합은 단순한 난류 혼합뿐만 아니라, 미세한 물리적 불안정에 의해서도 발생할 수 있는 이중확산 현상이 있다[1]. 이중확산은 서로 다른 분자 확산계수를 갖는 두 물리량이 동시에 밀도에 영향을 미칠 때 발생하는 유체의 불안정 현상으로 정의된다[12]. 해양 환경에서는 주로 온도와 염분이 밀도를 결정하는 주요 요인으로 작용하며, 이 두 물리량은 분자 확산 속도가 서로 크게 다르다[12]. 일반적으로 열의 분자 확산계수는 염분의 분자 확산계수보다 훨씬 크기 때문에 온도와 염분이 서로 상쇄되어 밀도가 동일하게 유지되는 조건에서도 시간 경과에 따라 국지적인 밀도 불균형이 발생할 수 있다[13]. 이러한 특성으로 인해 겉보기에는 안정해 보이는 성층 조건에서도 미세한 연직 불안정이 점진적으로 발달한다[14].

이중확산 과정은 온도와 염분의 연직 구배 비율로 정의되는 경사비 R_ρ 에 의해 조절되며, 다음과 같이 정의된다[15].

$$R_\rho = \frac{\alpha \frac{\partial T}{\partial z}}{\beta \frac{\partial S}{\partial z}} \quad (1)$$

여기서 α 는 열팽창계수이며, β 는 염분에 관련된 밀도 변화의 계수이다. 이중확산은 $1 < R_\rho < K_T$ (열 확산계수)/ K_S (염분 확산계수) 조건에서 발생하며, 이때 열 확산과 염분 확산의 비는 약 100 정도의 값을 갖는다[1,13].

상층과 하층의 밀도가 동일하도록 설정된 조건에서 초기에는 안정한 성층 상태처럼 보이지만, 온도와 염분의 확산 속도 차이로 인해 경계면에서 이중확산 불안정이 점진적으로 나타날 수 있다[14]. 상층이 고온·고염, 하층이 저온·저염인 조건에서는 이러한

불안정이 연직 혼합을 유발하며, 이는 해양 내부에서 열과 염분 수송을 조절하는 중요한 물리적 메커니즘으로 알려져 있다[12]. 이중확산 현상은 실험실 규모의 수조 실험을 통해 관찰할 수 있으나, 초기 조건 설정과 시간에 따른 구조 변화를 정량적으로 분석하는 데 한계가 있으므로, 이를 보완하기 위한 수치 시뮬레이션 실험이 필요하다[15,16].

III. 연구 방법

3.1. Fortran 코딩 : 수치 모델 구성 및 매개변수 조정

본 연구는 이중확산에 의해 발생하는 연직 혼합 구조를 모사하기 위해 비정상압 2차원 연직 단면 수치 모델을 사용하였다. 시뮬레이션 코드는 연구 목적에 맞게 일부 수정한 오픈소스 Fortran 코드를 사용하였다[17]. 계산 알고리즘을 변경하지 않고, 초기화 단계에서 정의되는 매개변수만을 조정하는 방식으로 수치계산을 진행하였다.

모델 영역은 길이 20 m, 수심 2 m의 2차원 연직 단면으로 설정하였으며, 양측의 경계는 순환 조건을

적용하였다. 격자 간격은 $\Delta x = \Delta z = 1 \times 10^{-1}$ m, 시간 간격은 $\Delta t = 1$ s이다. 초기 밀도장은 두께 1 m의 두 층이 포개진 구조로 설정하였다. 상층은 고온·고염, 하층은 저온·저염의 조건으로 전체 밀도가 동일하도록 구성하였다. 상층과 하층 사이의 수온 차이는 10°C로 설정하였다. 염분 차이는 초기의 밀도장이 균일하도록 아래와 같은 선형화된 상태방정식을 이용해 결정하였다[1].

$$\rho' = \rho - \rho_0 = \rho_0(\beta S' - \alpha T') \tag{2}$$

수치 모델의 초기화 단계에서 열 확산계수(kht, kzt), 염분 확산계수(khs, kzs), 난류 점성계수(ah, az), 해저 마찰계수(r)가 정의되는 sub.f95 파일의 Fortran 코드 일부를 볼 수 있다(Fig. 1). 각 매개변수의 모델 적용값과 실험 및 관측값을 제시하였다(Table 1). 이중확산 과정의 핵심 요인인 열과 염분의 확산 특성의 연산시간을 빠르게 하기 위해 실제 확산계수 값에 비해 약 1000배의 열 확산계수(kht, kzt)와 염분 확산계수(khs, kzs)를 조정하여 사용하였다. 난류의 영향을 적게 하고자, 난류 점성 계수(ah, az)는 $1.0 \times$

```
! diffusivity for heat (artificially increase by factor of 1000)
kht = 1000.*1.e-7
kzt = 1000.*1.e-7
! diffusivity for salt (artificially increase by factor of 1000)
khs = 1000.*1.e-9
kzs = 1000.*1.e-9
! ambient viscosity
ah = 1.e-4
az = 1.e-4
r = 1.e-3
```

Fig. 1. Excerpt from the Fortran source code (sub.f95) showing the initialization of model parameters.

Table 1. Model-applied values and experimental/observational values for each parameter [1,18].

기호 / 변수명	구분	모델 적용값	단위	실험 및 관측값
kht	열 확산계수(수평)	1.0×10^{-4}	m^2s^{-1}	$\cong 1.5 \times 10^{-7}$
kzt	열 확산계수(연직)	1.0×10^{-4}	m^2s^{-1}	$\cong 1.5 \times 10^{-7}$
khs	염분 확산계수(수평)	1.0×10^{-6}	m^2s^{-1}	$\cong 1.5 \times 10^{-7}$
kzs	염분 확산계수(연직)	1.0×10^{-6}	m^2s^{-1}	$\cong 1.5 \times 10^{-7}$
ah	난류 점성 계수(수평)	1.0×10^{-4}	m^2s^{-1}	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^3$
az	난류 점성 계수(연직)	1.0×10^{-4}	m^2s^{-1}	$1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$
r	해저 마찰 계수	1.0×10^{-3}	-	$2.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$

$10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 의 값으로 작게 적용하였고, 해저 마찰 계수(r)도 1.0×10^{-3} 으로 작게 설정하였다(Table 1). 수치계산은 Fortran 언어를 이용해 수행하였으며, 각 시간 단계에서의 온도(T), 염분(S), 밀도(ρ) 분포를 텍스트 기반 데이터 파일 형식($t.dat$, $s.dat$, $\rho.dat$)으로 출력하였다.

3.2. Python 시뮬레이션 : 결과 후처리 및 시각화

Fortran 수치 계산 결과의 후처리 및 시각화는 Python

환경에서 수행하였다. Numpy를 이용해 Fortran 코드에서 출력된 온도($t.dat$), 염분($s.dat$), 밀도($\rho.dat$) 파일을 불러온 후, 모델 격자 크기(NX , NZ)와 저장 시간 간격에 맞추어 자료를 Python 시뮬레이션 코드로 재구성하였다(Fig. 2). 이후 각 시간 단계의 연직 단면 분포를 추출해 Matplotlib를 이용해 색상 분포 형태로 시각화하였다(Figs. 3, 4). 분석은 시간에 따른 온도, 염분, 밀도 분포의 변화 양상을 비교하는 방식으로 수행하였다. 온도와 염분, 밀도 분포는 1분, 4분, 7분,

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from pathlib import Path

# 격자 설정
NX = 201
NZ = 21
dx = 0.1
dz = 0.1
DATA_DIR = Path(".")
T_FILE = DATA_DIR / "t.dat"
S_FILE = DATA_DIR / "s.dat"
RHO_FILE = DATA_DIR / "rho.dat"

# 좌표
x = np.arange(NX) * dx
z = (np.arange(NZ) + 0.5) * dz
Zplot = -z
extent = [x.min(), x.max(), Zplot.min(), Zplot.max()]
Xg, Zg = np.meshgrid(x, Zplot) # (NZ, NX)

# 텍스트 데이터 읽기
def read_dat_text(path: Path, ncol: int) -> np.ndarray:
    data = np.loadtxt(path, dtype=float)
    data = np.asarray(data).reshape(-1)
    if data.size % ncol != 0:
        raise ValueError(f"{path.name}: 값 개수 {data.size}가 ncol={ncol}로 나누어 떨어지지 않음")
    return data.reshape(-1, ncol)

# 특정 시간의 단면 추출
def frame_slice(arr2d: np.ndarray, minute: int) -> np.ndarray:
    itop = (minute - 1) * NZ
    ibot = itop + NZ
    if ibot > arr2d.shape[0]:
        raise ValueError(f"minute={minute}프레임 범위 초과 (rows={arr2d.shape[0]})")
    return arr2d[itop:ibot, :] # (NZ, NX)
def plot_1_4_7_10(field_all, rho_all, label, vmin=None, vmax=None, cmap="viridis",
                  zmin=-2.0, zmax=0.0):
    fig, axes = plt.subplots(1, 4, figsize=(8.4, 4.6), sharey=True, constrained_layout=True)
    for ax, minute in zip(axes, [1, 4, 7, 10]):
        F = frame_slice(field_all, minute)
        R = frame_slice(rho_all, minute)

        F = np.flipud(F)
        R = np.flipud(R)
        im = ax.imshow(
            F, origin="lower", extent=extent, aspect="auto",
            vmin=vmin, vmax=vmax, cmap=cmap
        )
```

Fig. 2. Python code for data visualization.

```

# 등치선 ax.contour(Xg, Zg, R, levels=10, linewidths=0.8)
ax.set_title(f"{minute}min")
ax.set_xlabel("x (m)")
ax.set_xticks([0, 5, 10, 15, 20])
ax.set_ylim(zmin, zmax)
axes[0].set_ylabel("z (m)")
axes[0].set_yticks(np.arange(zmin, zmax + 1e-9, 0.2))
cbar = fig.colorbar(im, ax=axes, fraction=0.04, pad=0.02)
cbar.set_label(label)
plt.show()

# 데이터 로딩
t_all = read_dat_text(T_FILE, NX)
s_all = read_dat_text(S_FILE, NX)
rho_all = read_dat_text(RHO_FILE, NX)

# 온도 1분, 4분, 7분, 10분
plot_1_4_7_10(t_all, rho_all, "Temperature (T)")

# 염분 1분, 4분, 7분, 10분
S1, S4, S7, S10 = frame_slice(s_all, 1), frame_slice(s_all, 4), frame_slice(s_all, 7),
frame_slice(s_all, 10)
vminS = float(np.nanmin(np.r_[S1.ravel(), S4.ravel(), S7.ravel(), S10.ravel()]))
vmaxS = float(np.nanmax(np.r_[S1.ravel(), S4.ravel(), S7.ravel(), S10.ravel()]))
plot_1_4_7_10(s_all, rho_all, "Salinity (S)", vmin=vminS, vmax=vmaxS)

# 밀도 1분, 4분, 7분, 10분
R1, R4, R7, R10 = frame_slice(rho_all, 1), frame_slice(rho_all, 4), frame_slice(rho_all, 7),
frame_slice(rho_all, 10)
vminR = float(np.nanmin(np.r_[R1.ravel(), R4.ravel(), R7.ravel(), R10.ravel()]))
vmaxR = float(np.nanmax(np.r_[R1.ravel(), R4.ravel(), R7.ravel(), R10.ravel()]))
plot_1_4_7_10(rho_all, rho_all, "Density (rho)", vmin=vminR, vmax=vmaxR)

```

Fig. 2. (continued).

10분 경과 시점에 따라 시계열로 제시하였다(Figs. 3, 4). 밀도가 동일한 조건에서 시작된 성층 구조가 시간의 경과에 따라 이중확산 불안정으로 전이되고 연직 혼합 구조가 발달하는 과정을 볼 수 있다.

IV. 연구 결과

4.1. 열-염 확산

시간에 따른 연직 단면 온도와 염분 분포 변화의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다(Fig. 3). 1분 경과 시점은 상층의 고온-고염 영역과 하층의 저온-저염 영역이 명확히 구분되는 2층 구조가 유지되고 있다. 온도와 염분 모두 경계면 부근($z = -1.0$ m)에서 급격한 수직 구배를 보이며, 수평 방향으로 거의 균일한 분포를 나타낸다. 이는 초기 조건에서 설정된 등밀도 성층 구조가 아직 교란되지 않은 상태를 의미한다. 이 시점은 수직 구조의 요동이 거의 관찰되지 않아 이중확산 불안정이 본격적으로 발달하기 전의 초기 확산 단계로 해석된다. 온도의 변화는 $z = -1.1 \sim -0.9$ m의 범위로 나타나고, 염분 변화는 $z = -1.1 \sim -1.0$ m의 범위로 나타난다(Fig. 3a). 열 확산이 염분 확산보다 빠

르기 때문에 나타나는 결과이다. 4분 경과 시점은 경계면 부근($z = -1.0$ m)을 중심으로 연직 방향의 요동이 뚜렷하게 나타난다. 온도 분포는 상층 고온의 물이 하층 방향으로 가늘고 길게 연장된 연직 구조가 다수 형성된다. 염분 분포는 온도 분포와 유사한 형태의 구조가 나타나지만 공간적 연속성의 크기는 온도 분포에 비해 상대적으로 약하게 나타난다. 하부 $z = -2.0$ m의 부근에서 열 확산이 염분 확산에 비해 더 활발히 나타난다(Fig. 3b). 이는 해수에서 열의 분자 확산계수가 염분보다 크기 때문에, 동일한 성층 조건에서도 온도장이 먼저 반응하는 특성을 반영한 결과이다[12]. 이 시점은 이중확산 과정의 초기 변화를 주도하는 단계로 볼 수 있다. 7분 경과 시점은 연직 방향으로 연장된 온도 구조가 더욱 깊은 영역까지 확장되며, 상층과 하층의 경계가 점차 흐려진다. 염분 분포에서도 연직 구조의 연장이 뚜렷해지며, 온도 분포와 유사한 공간 패턴이 형성된다(Fig. 3c). 이 시점부터는 온도와 염분 분포가 결합된 형태로 변화하며, 이중확산에 의한 연직 혼합이 본격적으로 발달하는 단계로 해석된다[15]. 10분 경과 시점은 온도와 염분 모두 비교적 완만한 수직 구배를 보인다. 초기의 뚜

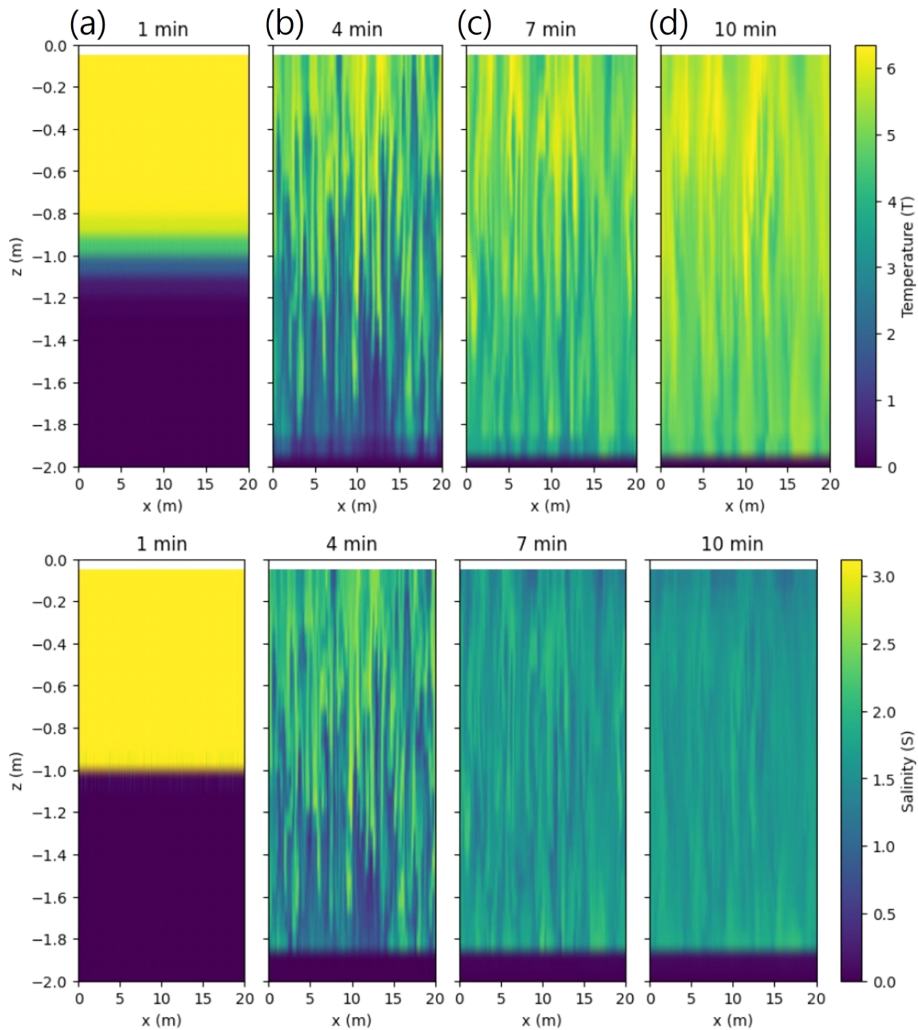


Fig. 3. Temporal evolution of temperature and salinity distributions. (a) at 1 minute, (b) at 4 minutes, (c) at 7 minutes, (d) at 10 minutes.

렸한 2층 구조는 상당 부분 약화되었으며, 연직 방향으로 혼합이 뚜렷하게 보인다(Fig. 3). 이는 확산 과정이 지배적인 상태로 전이되면서 상층과 하층의 물성이 점차 혼합되고 있음을 보여준다. 이러한 변화는 열과 염분의 확산 특성 차이에 의해 시작된 이중확산 과정이 시간의 경과에 따라 보다 균질한 연직 구조로 진화하는 해양 연직 혼합의 전형적인 특성과 일치한다.

4.2. 밀도 변화

연직 밀도 변화를 보여주기 위한 시뮬레이션은

1분, 4분, 7분, 10분의 간격으로 나타내었다(Fig. 4). 1분 시점은 전 수심에 걸쳐 밀도값이 거의 균일하게 유지되며, 초기 조건에 설정된 등밀도 성층 상태가 유지되고 있다(Fig. 4a). $z = -1.2 \sim -0.9$ m의 범위에서 매우 얇은 띠 형태의 밀도 변동이 관찰되는데, 이는 온도와 염분 분포에서 나타나는 급격한 수직 구배가 밀도 계산에 국지적으로 반영된 결과로 해석된다. 이 시점은 연직 방향으로 연장된 밀도 구조가 거의 나타나지 않는다. 4분 경과 시점은 연직 방향으로 연장된 밀도 분포의 공간적 변동성이 뚜렷하게 증가한다. 경계면 부근($z = -1.0$ m)에서 형성된 밀도 요동이 연

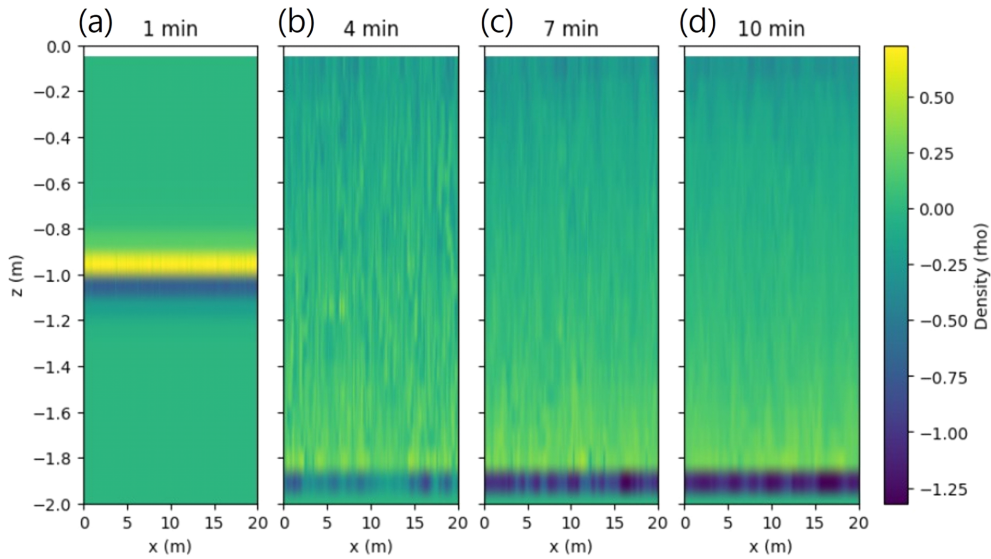


Fig. 4. Temporal evolution of density distribution. (a) at 1 minute, (b) at 4 minutes, (c) at 7 minutes, (d) at 10 minutes.

직 방향 $z = -1.8 \sim -0.2$ m의 범위로 연장되며, 얇고 불규칙한 밀도 구조가 다수 관찰된다(Fig. 4b). 이러한 구조는 상층에서 하층으로 길게 이어지는 형태를 가지며, 밀도장이 더 이상 수평적으로 균일하지 않음을 보여준다. 7분 경과 시점은 밀도 요동이 하층 깊은 영역까지 확장된다. 하층 하부 $z = -2.0 \sim -1.8$ m의 범위에서는 전의 시점보다 상대적으로 큰 밀도 변화가 집중적으로 나타나며, 밀도장의 변동성이 크게 증가하였다(Fig. 4b, c). 이는 온도와 염분 분포에서 발달한 연직 구조가 밀도장에 반영되었음을 의미한다. 10분 경과 시점은 연직 방향으로 연장된 밀도 구조는 여전히 존재하지만, 그 형태는 보다 넓은 영역으로 확산되며 상대적으로 완만한 분포를 보인다(Fig. 4d). 이 시점은 초기의 등밀도 성층 상태가 명확히 붕괴되었으며, 밀도장이 확산 지배적인 연직 혼합 상태로 전이되었음을 보여준다. 이러한 결과는 안정한 등밀도 성층 조건에서도 이중확산이 연직 혼합을 유발할 수 있음을 명확히 보여준다[12,15].

V. 결론 및 제언

본 연구는 등밀도 성층 조건에서 이중확산에 의해 연직 혼합 구조가 형성되는 과정을 시뮬레이션을 통해

시각화하였다. Fortran 기반 수치 계산과 Python을 이용한 후처리 및 시각화를 결합함으로써, 시간에 따른 온도, 염분, 밀도 분포의 변화를 체계적으로 분석할 수 있었다. 초기 등밀도 성층 조건에서 온도와 염분 분포는 서로 다른 확산 특성에 따라 상이한 시간적 변화를 보였으며, 이러한 변화는 밀도 분포의 공간적 구조에 점진적으로 반영되었다(Figs. 3, 4). 이는 열과 염분의 확산계수 차이가 이중확산 과정의 시간적 발달 양상과 연직 혼합 구조 형성에 핵심적인 역할을 했음을 보여준다.

본 연구는 학생이 해수의 수온과 염분에 따른 밀도와 물리적 특성 변화를 직관적으로 이해할 수 있도록 시각적으로 구현했다. 예비 교사 또는 학생이 직접 매개변수를 조정하여 결과를 시각적으로 확인하는 과정은 추상적인 이론을 실제적인 탐구 경험으로 전환하는 교육적 의미가 있다. 비록 본 연구가 2차원 연직 단면 모델과 단순화된 물리 계수를 사용하였다는 제한점이 있지만, 이러한 시각적 모델링 경험은 물리적 제약으로 인해 교실 환경에서 관찰하기 어려운 해양 연직 혼합 현상을 직관적으로 이해하는데 도움을 줄 것이다. 이는 학생들의 디지털 역량과 과학적 탐구 역량 강화에 기여할 것이다. [본 연구에 사용된 Fortran/Python 코드는 제1저자에게 합리적인 요청이

있을 경우 제1저자가 이메일을 통해 제공할 것입니다(email: talmoje@naver.com).]

참고문헌

- [1] J. A. Knauss, 물리해양학 (시그마프레스, 서울, 2007).
- [2] 교육부, 2022 개정 교육과정 [별책9] 과학과 교육과정, 교육부 고시 제2022-33호 (2022).
- [3] 김수란, 박경애, 파이썬 기반 해양 데이터 시각화 수업 자료 개발-지구과학II 교과 서 조석 위상 지연을 중심으로-, 현장과학교육, **16**(4), 536-555 (2022).
- [4] 김수란, 박경애, 변도성, 정광영, 최병주, 중등학교 교과서 황해난류 오개념 분석 및 해류 데이터 시각화 수업 자료 개발, 한국지구과학회지, **44**(1), 13-35 (2023).
- [5] 김수란, 박경애, 김은숙, 해양 수치모델 데이터를 활용한 데이터 시각화 수업 자료 개발, 현장과학교육, **17**(4), 395-415 (2023).
- [6] 김연귀, 문무현, 박창용, 박재용, 장유순, 최윤옥, 고등학교 지구과학 (미래엔, 서울, 2024).
- [7] 광영순, 신영준, 2022 개정 교육과정에 대비한 과학과 통합과학 및 과학탐구실험 교육과정 개선 방안 탐색, 과학교육연구지, **45**(2), 143-155 (2021).
- [8] 윤진아, 남윤경, 2022개정 과학과 교육과정에 나타난 데이터 기반 탐구활동 분석, 교과교육학연구, **28**(4), 321-336 (2024).
- [9] 이동영, 박애령, 정주희, 황주현, 남윤경, 데이터 시각화 역량 관점에서 2022 개정 수학/과학 교육과정의 성취기준 분석, 대한지구과학교육학회지, **17**(2), 123-136 (2024).
- [10] 김소현, 유선아, 데이터 기반 모델링 활동을 통한 과학적 탐구 질문 생성과 과학 개념의 변화, 학습자중심교과교육연구, **23**(3), 747-764 (2023).
- [11] 최원근, VPython을 활용한 과학적 시뮬레이션 구성 수업 모형의 개발과 효과, 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 서울 (2024).
- [12] R. W. Schmitt, Double diffusion in oceanography, Annual Review of Fluid Mechanics, **26**, 255-285 (1994).
- [13] J. S. Turner, Buoyancy effects in fluids (Cambridge University Press, Cambridge, 1979).
- [14] M. E. Stern, The "Salt-Fountain" and Thermohaline Convection, Tellus, **12**, 172-175 (1960).
- [15] T. Radko, Double-Diffusive Convection (Cambridge University Press, Cambridge, 2013).
- [16] D. E. Kelly, H. J. S. Fernando, A. E. Garnett, J. Tanny, E. Ozsoy, The diffusive regime of double-diffusive convection, Progress in Oceanography, **56**, 461-481 (2003).
- [17] J. Kampf, 오픈소스 소프트웨어를 이용한 해양 모델링 (시그마프레스, 서울, 2013).
- [18] L. Arneborg, V. Fiekas, L. Umlauf, H. Burchard, Gravity current dynamics and entrainment—A process study based on observations in the Arkona Basin, Journal of Physical Oceanography, **37**(8), 2094-2113 (2007).