

## 이중확산의 영향을 받는 염수침입의 혼합과정 연구

황진환<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>동국대학교 사회환경시스템공학과

## Mixing Process of Double Diffusive Salt Wedge

Jin Hwan Hwang<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil & Env. Eng, Dongguk University, 3-26 Pil-dong, Chung-gu, Seoul 100-715, Korea

### 요 약

일반적으로 해수가 강으로 침입하거나 담수가 해양으로 유입을 하면 두 유체간의 밀도차에 의한 밀도류의 성질을 가진다. 하지만, 염분과 온도가 동시에 밀도의 차를 결정하는 경우, 특히 이 중 하나가 중력과 불안정한 수직 분포를 갖게되면 이중확산이 혼합을 결정하는 중요한 요인이 된다. 본 연구에서는 고온, 고염의 수괴가 저온, 저염의 수괴로 진입할 때 기계적 혼합과 이중확산에 의한 대류가 혼합에 미치는 상대적 영향을 비교 연구하였다. 실험실에서 차갑고 염도가 없는 주 흐름에 온도가 높고 염분이 높은 밀도류를 조심스럽게 방류시켜 정상상태의 염수침입 형태를 유지하였다. 수평방향으로 따라 밀도율(Turner 1979)이 15정도 되면 온도와 염분의 유출입량비율이 가파르게 변화하였고, 전체적으로 방출구 부분에서 이중확산의 영향이 강하게 나타나게 되며 이 경우에는 총 방출량도 함께 증가하였다. 아울러 밀도율이 낮은 경우 밀도율이 높은 경우에 비해서 약 6~10배의 높은 혼합율을 보였다.

**Abstract** – Salt wedge into the river from the sea or fresh water flume (fresh wedge) in the ocean from the sea has density current characteristics. However, when temperature and salinity simultaneously determine the density of wedges, one of salinity and temperature can distributed in the reversed profiles against gravity, even though the density profile is stable. In this case, the double diffusive process is critical in determining mixing rate. The present work studies relative contribution of shear driven mechanical mixing component and double diffusive layering process, when warm salty denser water is introduced into the cold fresh lighter water column. Laboratory experiment releases warm salty denser water into cold fresh lighter water controlling discharge amount to achieve the steady state of density current. When longitudinal density rate becomes 15, the released amount ratio of salt and heat changes sharply and in the releasing point, vigorous mixing occurs with increase of discharged amount due to double diffusion. Double diffusion distabilizes gravitational stability and enhances the mixing rate up to 6~10 times at the lower density ratio comparing to the higher density ratio.

**Keywords:** Salt wedge(염수 침입), Density current(밀도류), Double diffusion(이중 확산), Mixing (혼합)

### 1. 서 론

고밀도의 수괴가 저밀도의 수괴를 만났을 때 밀도차에 의한 밀도류가 발생한다. 일반적으로 해수는 염분과 온도에 의하여 밀도가 결정된다. 염분이나 온도가 단독으로 밀도를 결정할 때, 중력에 대한 밀도류 경계면의 안정성은 밀도류의 상부를 흐르는 유체의 관성과 균형을 이루게 되며, 이때 밀도가 다른 두 수괴의 경계층에서

전단응력이 발생하고 이로 인한 혼합이 발생한다. 그러나 두 개의 물질, 즉, 온도와 염분이 동시에 밀도차이를 결정하고 두 개 중 한 개의 물질이 불안정한 수직 분포를 이룬다면, 이중확산에 의한 대류가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 따뜻하고 염분이 높은 수괴가 차갑고 염분이 낮은 수괴로 진입할 때 기계적 혼합과정과 이중확산에 따른 대류에 의한 혼합과정을 비교연구하였다.

밀도류는 자연적으로 발생하거나 인간이 인위적으로 만든 시스템에서 수괴의 혼합에 중요한 역할을 한다. 자연적인 현상으로는 대기 중에 서로 다른 온도에 의해 발생된 밀도차이가 존재하는 두

<sup>†</sup>Corresponding author: jinhwang@dgu.edu

대기층이 만나서 폭풍을 만들기도 한다. 인위적인 현상으로는 미국 미시시피 강에서 1988년 가뭄으로 인해 강의 유출량이 감소하여 멕시코만에서 부터 염수가 저층에 유입되어 뉴올리안즈의 용수공급에 위협을 가하기도 하였다. 또한 유조선이나 혹은 기름 저장소에서 유출된 기름띠는 인간이 만들어낸 밀도류의 예라고 할 수 있다.

이러한 밀도류에 대한 연구는 다양하게 시도되어 왔지만, 기존의 연구들은 대부분 유체의 밀도 차를 고려함에 있어서 한가지의 용매 혹은 물질을 이용하였다(e.g., Brandt and Fernando, 1996). 그러나 온도와 염분 두 개가 동시에 밀도를 결정할 때 이러한 밀도류의 혼합과정은 더욱 복잡하여 진다. 이렇게 두 개의 물질이 동시에 밀도차이를 결정하는 복잡한 상황에서 이중확산이 발생하게 된다. 이중확산은 기본적으로 온도 혹은 열의 분자확산 계수가 염분의 확산 계수보다 100배가 큰 점에서 기인한다(Turner 1979). 염분이 안정한 수직구조를 가지고 분포하여 있을 때 온도는 이에 반해 불안정한 상태로 분포하였더라도 밀도적인 측면에서는 안정한 상태이다. 그러나 온도의 높은 확산 능력에 의해서 전체적으로 불안정한 상태로 다다르게 될 수 있으며, 이때 이중확산이 발생한다. Stern(1960)은 이러한 현상이 해양에서 발생할 수 있음을 밝혔다. Turner(1979)는 이론과 실험을 통해 안정성에 대한 기준을 제시하였고 동시에 기본적인 경계면을 통과하는 유출입량을 제시하였다. 이러한 이중확산에 의한 혼합과정은 대양에서 저위도 극 지역의 혼합과정과 이송과정을 설명하는데 매우 중요하다(Kelly, 2001). 이중확산의 경우 서로 다른 확산율로 밀도가 강화되는 현상을 보이는데 이러한 과정은 해양순환에서 거대 발달의 한 원인이기도 하다. 저위도 지역에서 발견되는 고온 외류의 소멸과정에서 주변 경계부의 확산현상은 역시 이중확산의 영향이 크다고 할 수 있다.

성층이 이중확산 구조를 가질 때, 염분과 온도의 밀도에 대한 상대적 영향력이 중요하게 된다. 이러한 상대적 밀도의 영향은 밀도율로 정의 되고, 밀도율 ( $R_\rho$ )은

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

과 같이 정의된다(Turner, 1979). 여기서  $\Delta T$ 와  $\Delta S$ 는 경계층을 위 아래로 상부와 하부의 수괴의 온도와 염분의 차이이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 온도와 염분의 밀도 확장 계수이다. 따뜻하고 염분이 높은 밀도류는 밀도율이 낮다. 이 밀도율에 대한 안정성은 일단  $R_\rho$ 가 1 보다 작다는 것은 밀도 자체가 불안정한 상태를 의미하며, 밀도가 안정한 상태라 하더라도 이중확산구조에 의한 층화현상(double diffusive layering)에서는 밀도율( $R_\rho$ )이 1에 가까워질수록 강하게 나타나게 되며(e.g., Turner 1979) 혼합층이 매우 불안정한 상태가 된다. 이중확산구조를 갖는 밀도류의 형성은 해양에서 여러 형태로 발견되는데, Rehmann and Duda(2000)는 New England 앞의 대륙붕에서 여름철에 전단응력의 영향을 받는 이중확산구조의 밀도류의 존재를 관측하였고, Padman(1994)은 동북극해의 수온약층에서 운동량과 물질의 이송이 전단응력과 이중확산의 영향을 동시에 받으며

수송과 혼합이 이루어지는 것을 발견하였다.

한 개의 요소 혹은 물질이 수괴를 성층화 시킬 때, 유체의 흐름은 유체의 부력과 관성에 대한 상대적인 비율에 의해 결정된다. 이 상대적인 비율을 일반적으로 리차드슨 수(Richardson number)라고 하며 다음과 같이 정의한다.

$$Ri = \frac{g'h}{U_1^2} \quad (2)$$

여기서 밀도류의 두께를  $h$ , 유입되는 밀도류의 진행 평균 속도를  $U_1$  그리고 상대증량을  $g'$  정의한다. 여기서  $g'(\rho_1 - \rho_0 / \rho_0 g)$ 로 정의 되면,  $g'$ 는 중력가속도,  $\rho_0$ 은 전체수괴의 평균밀도 이며  $\rho_1$ 은 특정 물질이 용해되어 있는 수괴층의 평균밀도로 정의할 수 있다(Turner, 1979). 리차드슨 수는 강한 성층화를 의미한다. 일반적으로 한 개의 물질이 밀도차이를 결정하는 현상에서의 밀도류 해석은 다양한 방법으로 연구되어져 왔다. Benjamin(1968)은 밀도차가 많이 나는 경우에 경계면에서 혼합과 점성에 대한 영향을 무시할 수 있어서 빈 공동의 문제와 마찬가지로 해결 할 수 있으며, 안정화 분석을 통하여 빈 공동의 문제로 접근할 수 있는 기준을 제시하였다. Britter와 Simpson(1978)은 밀도류의 전단부분(head)에서 매우 활발한 혼합이 일어나는 것을 지적하였고, 정상상태를 유지할 수 있는 유체 실험과 운동량 균형 방정식을 연구하여 Kelvin-Helmholtz 불안정상태가 발생하는 것을 밝혔다.

Arita와 Jirka(1987a)는 일반적인 형태의 염수침입(salt wedge)에서 경계면 혼합과 침투과정을 분석하였다. 여기서 two-layer model을 도입하였는데, 하나는 상층의 매우 활발한 혼합 층과 다른 하나는 수동적인 하층으로 규정하였다. Arita and Jirka(1987b)는 실험을 통해 이 two layer 침입 모델에서 경계층사이의 혼합은 무시할 수 있음을 입증하였다. 비슷한 실험으로 Sargent and Jirka(1987)가 물리 실험을 수행하였으며 밀도 경계층은 간헐적인 내부과가 부서져 혼합되어 침입하지만, 비교적 안정한 층이 존재하는 것을 밝혔다. 그들의 실험에서 각 점성과 난류의 전단응력은 비슷한 크기로 비교적 수직 혼합에 영향이 매우 작은 것으로 가정하였다. 이러한 안정성에 대한 연구는 Scotti와 Corcos(1972)의 channel 실험을 통하여 입증되었다.

본 실험에서는 이중확산 구조를 가진 밀도류의 수직 혼합과정에 대한 연구를 위해 실험실 물리 실험을 수행하였다. 온도가 낮고 염도가 없는 유체에 온도가 높고 염분이 높은 밀도류를 방출하였다. 차고 염도가 없는 유체는 밀도류와 반대 방향으로 방출하고, 방출량을 조절함으로써 밀도류를 정상상태(steady state)로 유지하여서 실험 수행중 그 위치를 일정하게 유지하였다. 이 실험의 주 목적은 이중확산에 의한 혼합과 전단응력에 의한 기계적 혼합과정이 동시에 발생할 때 리차드슨 수와 밀도율이 어떻게 혼합과 밀도류의 구조를 결정하는 지를 연구하는 데 있다. 염

<sup>1</sup>본 실험에서는 정상상태를 유지하고 있기 때문에 사실상 밀도류와 주변수괴의 유속의 차이다.

분과 온도의 입출량을 염분과 온도의 수평 분포에 의해서 계산하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

경계층에서의 이중확산구조의 밀도류와 그 위를 흐르는 주 유체 흐름의 운동과 유출입량은 Fig. 1에서 보여주는 물리 실험을 통하여 연구하였다. 원 실험장치는 Britter와 Simpson의 1978년 장치와 유사하며 본 실험 장치는 Garcia와 Parsons(1996)의 일반 밀도류에 의한 염수침입 실험에서 사용한 것과 같은 구조를 가지고 있다. 이 실험장치의 특징은 밀도류의 반대 방향으로 주 흐름을 방류함으로써 밀도류를 정상상태로 고정하여 전체 유출입량을 밀도류의 방류량으로 설정할 수 있는 장점에 있다. 밀도류의 방류량은 실험 장치에 부착되어 있는 마노미터와 벤츄리 미터, 혹은 오리피스 미터를 이용하여 결정할 수 있다.

실험 장치는 실험의 검증과정을 간략하기 위하여 Parsons(1998)의 장치와 동일 하게 설계되었고 본 연구에서는 온수공급을 위한 장치를 추가하였다. 주 저장장치(온도가 낮고 염분이 없는 주 흐름에 사용하는 물)와 혼합 저장장치(온도가 높고 동시에 염분이 높은 밀도류)는 각각 40,000 liter를 수용할 수 있으며 약 20~30분 정도 초기 설정 조건과 유사한 수준에서 실험을 수행할 수 있다. 밀도류는 수두유지탱크(constant head tank)를 이용하여 장시간 정상상태로 방출할 수 있도록 설계되었다. 주 수로의 물은 1.5-HP의 펌프로 순환되어 다공 분사형 방출장치(headbox)를 통해 방출된다. 방출된 유체는 벌집 구조를 가진 평형판(straightener)을 이용하여 큰 와류를 제거하고 수로를 통과한 물은 수위 조절을 위한 위어를 넘어서 원래의 저장탱크로 돌아 오게 된다. 실험대상부는 길이 3.2 m, 넓이 0.3 m이며 깊이는 0.5 m 이지만, 실험에 따라서 수위는 조정

되었다. 벽면은 3 cm 두께의 Plexiglas로 구성되어 열 손실을 최소화하였다.

밀도류는 프로펠러형 혼합기를 통해 지속적으로 혼합되며 수두 유지 탱크를 통과하여 PVC관에 부착된 오리피스 미터와 마노미터를 이용하여 방출량을 결정할 수 있다. 관의 최저점에서부터 확장기를 사용하여 제트에 의한 난류를 방지한다. 밀도류가 수두유지탱크와의 압력차에 의해 발생하는 “short circuiting”의 방지를 위해 판형 굴절기를 사용하였다.

### 2.2 측정과 실험순서

실험은 다음과 같은 순서로 이루어졌다. 먼저 주 저장 장치와 혼합 저장장치에 물을 채우고 실험 대상온도와 염분에 도달하도록 온수와 염화칼슘을 투입하고 혼합을 하였다. 이후 먼저 밀도류를 방류한 후 주 흐름을 방류하여 리차드슨수가 실험 목적치에 도달하도록 각 방류량을 조정하였다. 밀도류가 정상상태에 도달할 때의 각 저장장치의 온도와 염분 그리고 방류량을 기록하였다. 실험의 지속 시간은 약 20~30분으로 주 저장장치의 물이 오차 이상의 범위로 벗어나기 전까지 실험이 가능하지만, 실험의 정확도를 높이기 위해 가능한 빠른 시간내에 수행하였다.

주 흐름의 깊이는 포인트 게이지를 이용하여 측정하였으며, 상대적 오차는 0.5%보다 작았다. 주 흐름의 방류량은 반지름의 비율이 0.47과 0.71인 두 개의 벤츄리 미터를 사용하여 결정하였다. 이때 큰 비율의 벤츄리 미터를 사용하였을 때 측정 가능한 범위는 1900-13000 cm<sup>3</sup>/sec 였으며 작은 직경의 벤츄리를 이용하였을 때 측정 범위는 약 800-3400 cm<sup>3</sup>/sec이었다. 밀도류의 방류량은 오리피스 미터를 사용하여 측정하였다. 이때 오리피스의 반지름 비율은 약 0.195였으며 최고 측정 가능 방출량은 103 cm<sup>3</sup>/sec 최소 측정 가능량은 15 cm<sup>3</sup>/sec이었다. 측정 범위의 오차는 최대 방출시 1.5%, 최소 방출 시 약 5%의 오차를 발생한다.

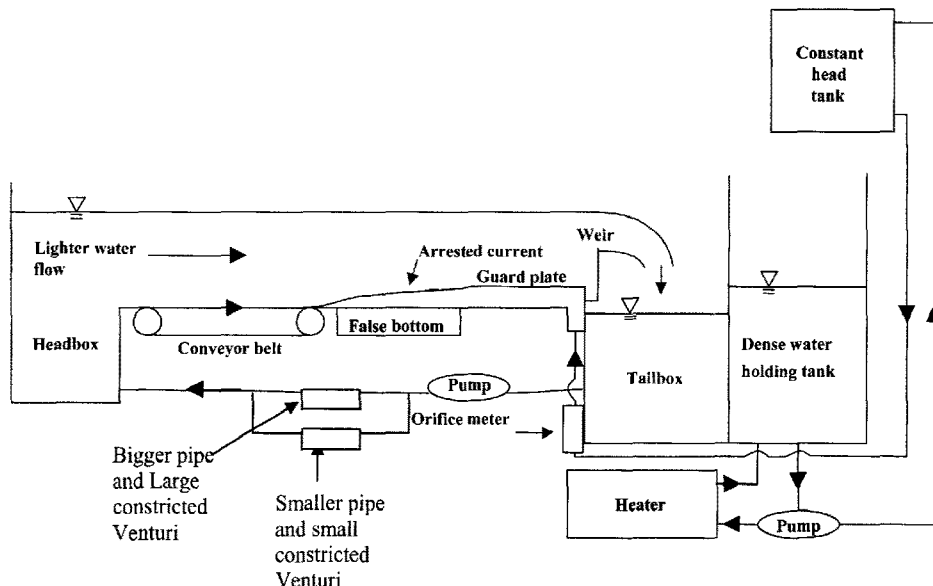


Fig. 1. Schematic of the experimental facility. The conveyor belt was not used in this experiment.

온도와 전기전도도는 Precision Measurements Engineering 에서 개발된 model 125 MicroScale Conductivity-Temperature Instrument (MSCTI)를 사용하였다. MSCTI는 Velmex Unislid에 부착하여 수직이동을 조정하였고, 수조위에 이동 카트를 설치하여 수평방향으로 이동시켰다. 장치들의 조합을 이용하여 온도, 전도도, 이를 통한 염분 및 밀도를 다양한 위치에서 측정할 수 있다. MSCTI는 수직으로 약 10 cm/s 으로 이동하고 검출 속도는 100 Hz를 사용하였다. 센서에서 나온 전기적 신호는 National Instruments의 DAQ카드를 이용, 16bit 해상도로 검출하여 LabVIEW 소프트웨어를 사용하여 자료화하여 저장하였다. 온도와 염분의 계산은 Rehmann(1995)의 방식을 통해 계산하였고 밀도는 Ruddick(1985)를 바탕으로 계산 하였다. 밀도류의 높이는 두 수괴의 밀도차이의 중간 값이 발생하는 점으로 결정하였다(Sargent and Jirka, 1987). 열과 염분에 의한 밀도 확장 계수는 각각 상부유체와 하부 유체의 평균 온도와 염분을 기준으로 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 경계면을 통한 염분과 온도의 상대적 혼합비율

본 절에서는 온도와 염분의 경계층을 통한 유출입량을 계산하였다. 기존의 이중확산연구에서는 염분과 온도의 유출입량의 비율을 계산하기 위하여 에너지와 질량의 균형모델을 사용하였다. 예를 들어 Shirtcliffe(1973)은 소금과 설탕의 총 질량이 보존되어야 함으로 유출입량은 경계면 사이의 농도의 시간 변화율과 유출입량이 비례되어야 함을 보였다. 그래서 입출량 비율( $R_f$ )은  $\beta\Delta S$ 와  $\alpha\Delta T$ 의 변화율 함수와 동일하다. 실험 장치가 유량의 정상상태를 유지시킨다면, 총 유출입량의 관계는 Fig. 2에서와 같은 검사체적 방법을 이용하여 유도하였을 때, 열과 소금의 질량의 균형은 다음과 같아진다.

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial F_T}{\partial z} \quad (3)$$

$$u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = -\frac{\partial F_S}{\partial z} \quad (4)$$

여기서  $F_T$ 와  $F_S$ 는 한 측정지점에서의 총 온도와 염분의 수직방향으로의 유출입량과 동일하다. 경계면을 통과하는 총 염분의 유출입량은 위의 식을  $z=0$ 에서  $z=h$ 까지 적분하는 것과 동일하고, 바닥에서의 유출량이 0임을 유의하면,

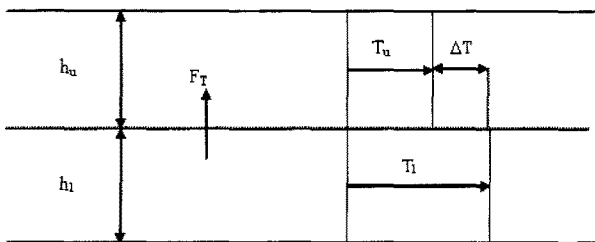


Fig. 2. A sketch of temperature profile, and flux. The thin dot line represents the diffusive interface.

$$-\int_0^h \frac{\partial F_S}{\partial z} dz = -F_{Sh} = \int_0^h u \frac{\partial S}{\partial x} dz + \int_0^h w \frac{\partial S}{\partial z} dz \quad (5)$$

연속 방정식을 이용하면 경계층을 통과하는 유출량은,

$$-F_{Sh} = \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (uS) dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial z} (wS) dz \quad (6)$$

마지막 적분은 직접 계산이 가능하고 Leibniz 법칙을 이용하여 왼쪽 편의 첫번째 적분을 전개할 수 있다.

$$-F_{Sh} = \frac{d}{dx} \left( \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} uS dz \right) - uS|_{z=h} \frac{dh}{dx} + wS|_{z=h} \quad (7)$$

경계조건이 적용된다면,  $z = h(x)$ 에서

$$w = u \frac{dh}{dx} \text{ at } z = h \quad (8)$$

그러면 방정식 7은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Sh} = -\frac{d}{dx} \left[ \int_0^h uS dz \right] \quad (9)$$

또한 같은 방식으로 열손실이 없다면, 온도의 유출량은

$$F_{Th} = -\frac{d}{dx} \left[ \int_0^h uT dz \right] \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다. 위의 두 식의 의미는 수평으로의 유출입량의 차이는 경계면을 통과하는 수직 유출입량으로 나타낼 수 있다는 것이다. 여기서 수평방향으로는 염분과 온도가 일정하다고 가정하자. 만약 상층과 하층의 염분 차이가  $\Delta S$ 이면,

$$\begin{aligned} F_{Sh} &= -\frac{d}{dx} \left[ \Delta S \int_0^h u dz \right] \\ &= -\frac{d\Delta S}{dx} \int_0^h u dz - \Delta S \frac{d}{dx} \left[ \int_0^h u dz \right] \end{aligned} \quad (11)$$

연속 방정식을 적용하고 위의 수식에서 적용한 방법을 이용하면, 방정식 11의 마지막 항이 0이 인 것을 알 수 있다. 따라서 유출입량 비율은

$$R_f = \frac{\beta F_{Sh}}{\alpha F_{Th}} = \frac{\frac{d}{dx}(\beta\Delta S)}{\frac{d}{dx}(\alpha\Delta T)} = \frac{d(\beta\Delta S)}{d(\alpha\Delta T)} \quad (12)$$

이와 같은 유출입량 비율은 Shirtcliffe(1973)의 실험에서 검증되었으며, 입출량 비율은  $\beta\Delta S$ 와  $\alpha\Delta T$  그림을 이용하여 결정할 수 있다.

먼저 성층화된 열염분의 수직구조는 Fig. 3과 같으며, 각 실험에서 수행된 수직 분포구조를 이용하여 위에서 유도된 검사체적 방식으로 4-5개의 검사 체적으로 나누어서 계산하였다. Fig. 4는 각 온도와 염분의 차이를 보여주고 있다. 식 (12)에서와 같이 이 그림에서의 경사가 수직성분들의 상대적 유출입량의 비율이라

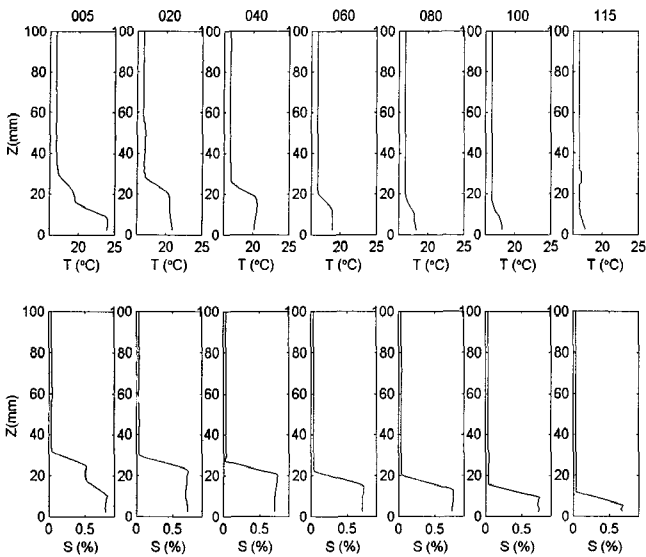


Fig. 3. Temperature and salinity vertical profiles: Each numbers on the top of the each plot tells distance from the releasing point.

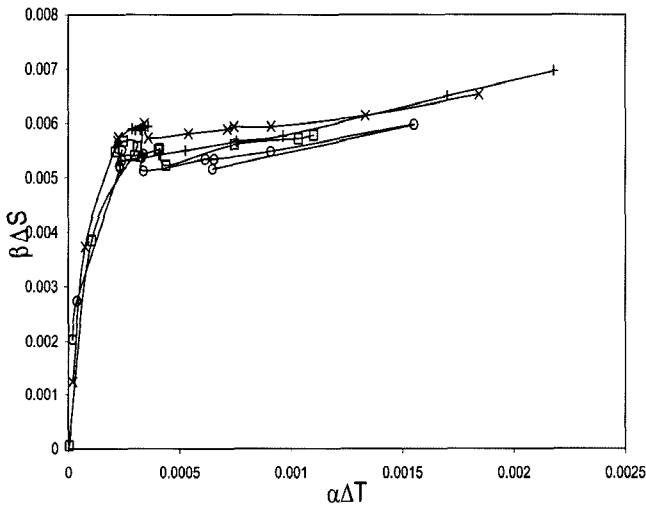


Fig. 4. The flux ratio of heat and salinity.  $R_p$  at the releasing point of  $+ \cdot$  is 3.212  $\times$  3.488;  $\square \cdot$  is 5.241;  $\circ \cdot$  is 8.017 and  $\beta \Delta S$  vs.  $\alpha \Delta T$  shows two linear regions separated by a sharp transition.  $12 < R_p < 18$ , there is transition of flux ratio of heat and salt.

고 할 수 있다. 원점에서 가장 먼 점이 방출구에서 측정된 값이며 점차적으로 작아져 밀도율이 15정도 되면서 가파르게 변화한다. 이것의 물리적 의미는 방출구 부분에서는 상대적으로 비슷한 속도로 온도와 염분이 유출입 된다고 할 수 있거나 열이 매우 빨리 혼합된다고 할 수 있으며 이것은 이중확산의 영향이라고 할 수 있다. 이후 일정양의 온도가 방출되고 난 후에는 염분이 열보다 상대적으로 많이 남아 있어서 염분의 더 많은 양이 밀도류의 전단 부에서 혼합되는 것으로 풀이할 수 있다. 방출구 부분에서 이중확산의 영향이 강하게 나타날 경우에는 전체적인 총 방출량도 함께 증가할 것이다. 이것은 이중확산에 의해서 부력 안정성이 감소하여 경계층에서의 불안정성 증가로 이어지게 되어 총 방출량도 함께 증가하게 된다.

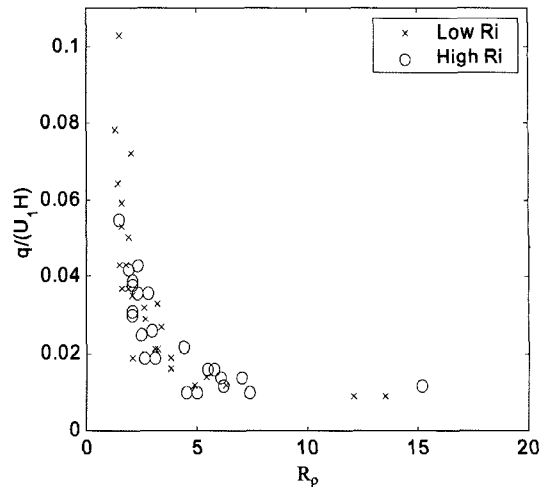


Fig. 5. Bulk mixing rate vs. bulk density ratio measured at 5cm from the released point.

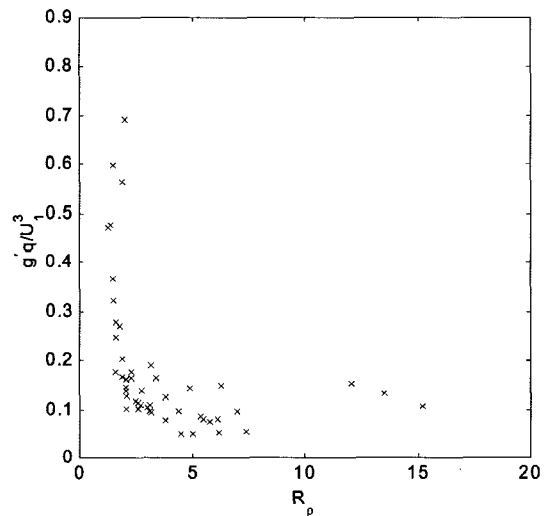


Fig. 6. The relationship between density ratio and normalized flux. When density ratio is smaller than 2, the flux increases sharply as discussed in Turner's laboratory experiment (1979).

### 3.2 총 혼합물

혼합에 있어서 이중확산이 밀도류와 주 흐름에 대한 방출량에 미치는 영향은 Fig. 5에서 밀도율과 방출량의 비율 관계로 나타나 있다. 자료는 리차드슨 수가 높은 경우와 낮은 경우 두 가지 경우로 분리되어 표현되었다. 자료가 비록 산란되어 분포되었지만, 상대적으로 낮은 밀도율을 보이는 경우의 방출량 비율(6~10%)보다 높은 밀도율을 보이는 경우에 방출량 비율(1%)이 약 1/6의 값을 보인다. 이 실험 결과는 전체 혼합량에 있어서 이중확산 구조가 밀도율이 7이상이 될 때 표에서 일정한 값을 보이는 것으로 나타나며, 이것은 Turner(1979)의 실험에서 논의하였듯이 이중확산의 영향이 크지 않음을 보여준다. 우리가 분류한 두개의 리차드슨 수가 특수한 경향을 보이지 않고 분포하는 반면에 이중확산이 혼합비율을 결정하는 데 매우 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 본 실험에서는 Turner에서의 실험과 같이 부력에 의한 유출입량은 사실상 배출구에서의 유출량과 동일하며, 정규화된 부력 유출입량은 밀도율이 감소하면 증가하는 것을 보인다(Fig. 6). 총

량의 관점에서 주 실험의 결과는 밀도율이 혼합량을 결정하는 중요한 인자로서 특히 밀도율의 감소는 중력 안정성의 중요한 결정 요인이다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

본 실험의 목적은 온도와 염분이 동시에 밀도를 지배하는 염수 침입에서 혼합과정에서의 이중확산의 영향을 평가하는 것이다. 실험실 물리실험에서 차갑고 염분이 없는 주 흐름에 온도가 높고 염분이 높은 밀도류를 방출하였다. 이러한 현상은 주로 극지방에서 발생한 저염분의 환류가 고염분의 주변 난류대로 침입하는 현상에서 일반적으로 발생한다. 주 흐름의 방류량을 조절함으로써 밀도류를 정상상태로 유지할 수 있었다. 정상상태를 유지함으로써 밀도류의 온도와 염분을 측정할 수 있었으며 이것을 통해 밀도류에서의 온도와 염분의 연직기울기를 재현할 수 있었다. 실험에서 두 개의 주 무차원 수는 리차드슨 수와 밀도율이었다. 리차드슨 수는 부력과 운동량의 상대적 비를 의미하며 밀도율은 온도와 염분이 밀도연직구조에 기여하는 상대적 비를 나타내는 지표이다.

실험의 결과에 따르면 밀도류를 따라서 밀도율이 15정도 되면 온도와 염분의 입출량 비율이 가파르게 변화하는데, 이것은 과거 Turner(1979)에서 수행된 다양한 연구 결과와 일치하며, 15이항에서 강력한 이중확산의 영향이 존재하는 반면, 이 숫자가 넘을 경우는 일반적인 전단응력에 의한 영향이 더욱 크다는 점에서 기인한다. 전체적으로 방출구 부분에서 이중확산의 영향이 강하게 나타나게 되는데 이것은 방출구 부분에서의 밀도율이 밀도류의 머리부분보다 매우 작은 점으로 설명되어질 수 있다. 이 경우에 유체는 이중확산의 영향으로 매우 불안정하여 완전한 대류에 의한 난류의 모습을 보인다. 이 경우 경우에는 총 방출량도 함께 증가 하였다. 이것은 이중확산에 의해서 부력 안정성이 감소하여 경계층에서의 불안정성 증가로 이어지게 되어 총 방출량도 함께 증가 하게 된다. 본 실험에서의 주 결과는 주 흐름의 방류량으로 정규화된 밀도류의 방출량이 밀도율의 감소와 함께 가파르게 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히, 유출실 설정된 밀도율이 매우 낮은 경우는 강한 이중확산의 영향으로 밀도율이 높은 경우에 비해서 약 6-10배의 높은 혼합율을 보이며 이것은 이전의 연구에서 관찰된 것과 같은 방식으로 설명될 수 있다.

향후에는 염분과 온도의 상대적 유출입량의 비율을 Linden(1974)의 실험에서와 같이 재현하는 연구가 필요하다. 본 연구에서 관찰되었지만, 본문에서 논의되지 않은 다양한 형태의 혼합층의 형태를 설명하는 실험이 필요할 것 이며, 이것은 해양 관측에서 계단식 수직 분포를 설명하는 또 다른 형태의 현상이 될 수 있다. 또한, 본 실험에서의 유출입량 분석은 총량개념에서 접근함으로써 경계면을 통과하는 실질적인 열과 염분의 혼합을 재현할 수 있는 실험이 향후 필요할 것이다.

## 사 사

본 연구는 2007년 정부의 재원으로 학술진흥재단의 지원으로 일부 수행되었음에 감사 드립니다(KRF-2007-331-D00566).

## 참고문헌

- [1] Arita, M and Jirka, G. H. 1987a Two-layer model of saline wedge I: Entrainment and interfacial friction. *J. Hydr. Engrg., Asce*, **113**(10), 1229-1248.
- [2] Arita, M and Jirka, G. H. 1987b Two-layer model of saline wedge II: Prediction of mean properties. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, **113**(10), 1249-1263.
- [3] Benjamin, T. B. 1968 Gravity currents and related phenomena. *J. Fluid Mech.*, **31**, 209-248.
- [4] Bradt, A. and Fernando, H.J.S., 1996 Double-diffusive convection. *Geophysical Monograph* **94**, AGU, 334 pp.
- [5] Britter, R. E. and Simpson, J.E. 1978 Experiments on the dynamics of a gravity current head. *J. fluid Mech.*, **88**, 223-240.
- [6] Garcia, M. H. and Parsons, J. D. 1996 Mixing at the front of gravity currents. *Dyn. Atmos. Oceans*, **24**, 197-205.
- [7] Kelly, D. E. 2001, Six questions about double-diffusive convection. *SOEST special publications*, 191-198.
- [8] Linden, P. F. 1974, Salt fingers in a steady shear flow. *Geophys. Fluid Dyn.*, **6**, 1-27.
- [9] Padman, L. 1994, Momentum fluxes through sheared oceanic thermohaline steps. *J. Geophys. Res.*, **99**(C11), 22,491-22,499.
- [10] Parsons, J.D. 1998, Mixing mechanisms in density intrusions. Ph. D. thesis, Univ. Illinois.
- [11] Rehmann, C.R. 1995, Effects of stratification and molecular diffusivity on the mixing efficiency of decaying grid turbulence. Ph. D. thesis, Stanford. Univ.
- [12] Rehmann, C.R. and Duda, T.F. 2000, Diapycnal diffusivity inferred from scalar microstructure measurements near the New England shelf/slope front. *J. Phys. Ocean.*, **30**, 1354-1371.
- [13] Ruddick, B.R. 1985, Momentum transport in thermohaline staircases. *J. Geophys. Res.*, **90**, 895-902.
- [14] Sargent, F.E. and Jirka, G.H. 1987, Experiments on saline wedge. *J. Hydr. Engrg., ASCE.*, **113**, 1307-1323.
- [15] Scotti, R.S. and Corcos, G.M. 1972, An experiment on the stability of small disturbances in a stratified free shear layer. *J. Fluid Mech.*, **52**, 499-528.
- [16] Shirtcliffe, T.G.L. 1973, Transport and profile measurements of the diffusive interface in double diffusive convection with similar diffusivities. *J. Fluid Mech.*, **57**, 27-43.
- [17] Stern, M.E. 1960, The "Salt-fountain" and thermohaline convection. *Tellus.*, **12**, 172-175.
- [18] Turner, J.S. 1965, The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density interface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33**, 639-656.
- [19] Turner, J.S. 1979, *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., 368 pp.

2008년 3월 5일 원고접수

2008년 4월 22일 수정본 채택