

<論 文>

## 2次元 表面 温排水의 擴散 (I)

—Richardson 數의 影響과 熱 境界層의 移動을 中心으로—

이 상 준\* · 정 명 균\*

(1984년 7월 24일 접수)

### Diffusion of Two-Dimensional Surface Discharge of Heated Water in a Rectangular Reservoir(I)

—Richardson Number Effects and Movement of Thermal Interface—

Sang Jun Lee and Myung Kyoon Chung

#### Abstract

Thermal structure of two-dimensional surface discharge of the heated water into a rectangular resesvoir is investigated by a laboratory simulation with a shallow open channel and a relatively large reservoir. Experimental study is focused on the nature of interfacial mixing between a flowing layer of the hot water and the underlying cold water.

For various conditions, mean temperature field, surface velocity distribution and turbulent mixing process have been quantitatively obsesved. It is found that the Richardson number strongly affects the integral structure of the flow field, and the buoyancy plays a role to control the turbulent diffusion process.

#### 기 호 설 명

$g$  : 중력 가속도

$H$  : 온수의 깊이

$H_i$  : 온수의 입구 깊이

$k$  : 유체의 열전도율

$R_i$  : 총괄 Richardson 수

$$\left( = \beta \Delta T \frac{gH}{U^2} = - \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{gH}{U^2} \right)$$

$R_{i_0}$  : 초기  $R_i$  수  $\left( = \beta \Delta T_i \frac{gH_i}{U_i^2} \right)$

$t$  : 시간

$T$  : 평균 온도

$T_i$  : 온수의 입구 온도

$T_w$  : 냉수 온도

$\Delta T$  : 온수와 냉수의 온도차 ( $T_i - T_w$ )

$U$  : 길이 방향의 표면 속도

$x$  : 길이 방향의 좌표

$y$  : 수직(깊이)방향의 좌표

$\alpha$  : 열확산계수

$\beta$  : 체적 팽창 계수

$\rho$  : 냉수의 밀도

$\Delta \rho$  : 온수와 냉수의 밀도차

\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

발전소의 열 교환기를 거친 뜨거운 냉각수를 강, 바다, 호수등에 직접 방출하게 됨으로써 환경적, 기상학적 요소 및 생태계에 큰 영향을 미치게 된다<sup>(1-3)</sup>.

증가 추세에 발전 용량과 대단위 발전소의 집중화로 이러한 열오염(thermal pollution) 문제는 발전소 효율 및 환경 오염등에 영향을 주기에 충분한 소지를 내포하고 있다<sup>(4)</sup>. 이와 같은 열 방출(thermal discharge)의 효과들을 적절하게 예측하기 위해서는 방출 구조에 따르는 온도 분포에 대한 지식과 냉각수의 재순환을 극소화 시키기 위한 혼합 정도를 알아야 한다<sup>(5)</sup>.

본 실험에서는 표면 방출에 의한 열확산 현상을 연구하기 위하여 2차원 개수로를 통한 흐름을 시뮬레이션하였다.

이와 같은 2차원 연구는 열오염 문제의 기본 특성인 난류 열확산을 이해하는데 3차원 실험보다 더 분명한 정보를 제공할 것이다<sup>(6,7)</sup>.

본 실험에서는 유동 조건을 표시하는 무차원 數로 널리 이용되고 있는 Richardson數( $R_i$ )를 변수로 하여  $R_i$ 의 변화에 따른 온도 분포, 표면 유동 속도와 확산을 등을 연구하였다. 아울러 이러한 열 구배에 의한 성층화 유동(stratified flow)에서  $R_i$ 가 유동 특성과 어떤 상관 관계를 가지는 가를 알아보기 위하여 같은  $R_i$  값을 갖는 다른 조건들의 실험을 수행하였다. 비슷한  $R_i$  값에서의 온도 분포를 비교 분석함으로써 아직까지 정립되고 있지 않는 열오염 현상 해석에서의 지배 변수로서의  $R_i$ 의 위치를 확인하고, 부력 효과에 의한 흐름의 난류 구조가 어떻게 영향 받는가 하는 문

제에도 관심을 두었다.

이러한 점을 고려한 본 실험의 목적은  $R_i$ 의 영향과 界面(interface)에서의 혼합 현상을 조사하는 것이며 아울러 온 배수의 영향 예측을 위한 데이터(data) 축적과 기존 수학적 모델의 점검 및 새로운 계산 모델에 필요한 모델 상수의 결정에 필요한 자료를 제공하는 것이다.

기존의 수학적 계산 모델들은 계산상의 경제성등으로 계산 범위(길이)가 제한을 받아 이와 같은 非定常 열오염 문제의 해석에 많은 어려움이 따른다<sup>(8)</sup>.

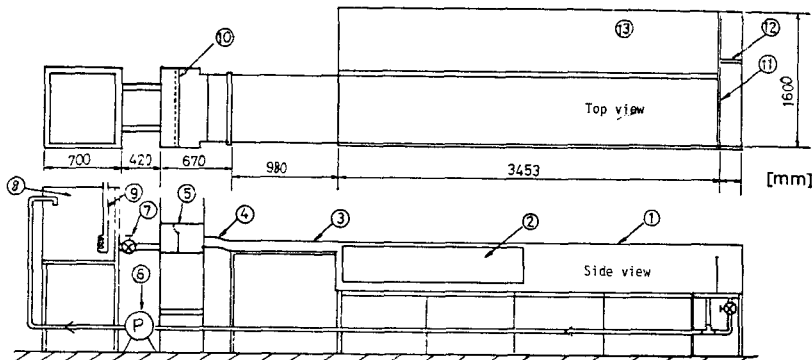
짧은 시간내에 충분한 열 확산이 일어나는 아주 낮은  $R_i$ 의 실험을 새로운 측정 시스템을 개발하여 수행한 후, 계산 모델과 비교 검토하는 단계에 있다.

2. 실험 장치와 실험 방법

2.1. 실험 장치

2차원 열확산 실험 연구에서는 2차원 조건을 만족시키고 벽면 효과 등을 제거하기 위하여 방대한 규모의 실험을 요한다. 충분한 2차원성을 만족시키기 위해서는 형상비가 큰 사각 단면을 가진 긴 냉수 용기가 필요하며 열수층의 입구 속도와 길이도 충분하여야 한다.

위와 같은 조건들을 만족시킨 실험 장치의 개략도가 Fig. 1에 표시되어 있다. 水中 가열기가 장착된 항온조 ⑧에서 일정 온도로 가열된 열수가 밸브 ⑦에 의하여 일정 유량으로 조절된 후 속도 조절 장치로 들어간다. 속도 조절 장치를 통과한 온수는 길이 125cm의 입구 평판을 지난다. 충분히 발달된 2차원화한 열수가 냉수 위를 흘러가게 되는 메인탱크 ①에서 표면속도



① Main tank, ② Visualization section, ③ Inlet device, ④ Flexible connector, ⑤ Velocity controller, ⑥ Pump, ⑦ Valve, ⑧ Constant temperature regulated tank, ⑨ Immersion heater, ⑩ Baffle Screen, ⑪ Partition, ⑫ Weir, ⑬ Auxiliary tank

Fig. 1 Schematic arrangement of flow system

와 온도 분포가 측정 되어진다. 또한 유동 및 혼합 현상을 직접 눈으로 보기 위하여 양쪽 벽면 입구 부위에 길이 1.8m의 가시화 창을 만들었다. 출구측 높이는 위어(weir)를 조정하여 변화를 줄 수 있게 하였다.

## 2.2. 실험 방법

실험 조건으로서는 우선 정확한 2차원 유동이 성립되어야 하며 실험중 유량 및 대기 온도의 변화가 적어야 한다. 실내 온도와 냉수의 온도차가 크게 되면 본 실험과 같은 저속 흐름에서는 벽면을 통한 대류 열전달로 인한 열 손실 효과를 무시할 수 없게 된다.

그러므로 온도차가 적고, 측정 시간동안 대기 온도 변화가 적은 시간을 택하여 실험을 행하였으며, 측정은 중앙에서 하였다. 또한 입구측 평판과 출구측 위어(weir)의 정확한 수평 조절을 통하여 흐름이 2차원성을 가지게 하였고, 실험을 시작하기 전 주탱크내의 냉수는 정지 상태에 있게 하였다.

사용된 온도 측정 시스템의 개략도는 Fig. 2에 나타나 있다. 이 시스템은 열전대를 외부의 기준 접점(reference junction)을 통하지 않고 바로 자체 내부의 thermistor 및 냉 접점(cold junction)을 이용하여 온도를 구하게 되어 있다<sup>(9)</sup>.

흐름 방향으로 7개 위치에서 각각 위치에 4개의 열전대를 가는 유리관에 장착하여 이송 장치로 깊이 방향으로 움직여 냉수 탱크내의 온도 분포를 측정하였다.

실험에서 사용된 열전대는 직경 0.5mm의 K-type (alumel-chromel)으로, sensor 부위는 fusion 용접하여 그 위에 conap-epoxy를 발라 물속에서 전기적으로 절연되게 하였으며, 굳은 후 비이딩 부분을 작게 갈아내었다.

혼합 현상 및 界面 변화를 가시화 하기 위하여 1kW 할로겐 램프를 조명하면서 앞쪽에 설치한 카메라로 시간을 재 가면서 사진을 촬영하였다.

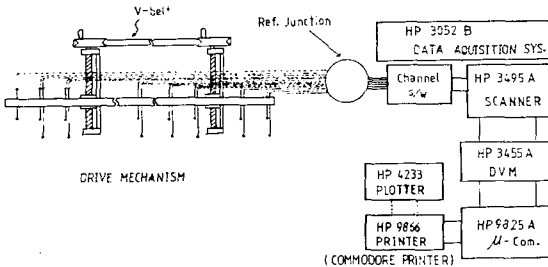


Fig. 2 Arrangement of temperature measurement system

각 구간에서의 표면 속도는 표시되어 있는 일정 깊이를 통과하는데 경과한 시간을 GraLab 600 Timer를 사용하여 측정으로써 구하였다.

## 3. 실험 결과 및 검토

### 3.1. 온도장과 $R_{i0}$ 수의 영향

시간에 따라 변화하는 상태를 여러가지의 초기 Richardson 수( $R_{i0}$ )에 대하여 측정하였으며 중요한 매개 변수들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Boundary conditions and governing parameter

Run No.	Outlet Richardson No. $R_{i0}$	Temp. Difference $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Inlet Depth $H_i(\text{mm})$	Inlet Velocity $U(\text{cm/s})$
5	0.4	6	25	2.44
6	2.03	6	25	1.16
7	0.392	8.7	22.7	3.03
8	1.14	8	30	1.91
9	0.242	11.5	14.4	3.64
10	4.6	9.5	30.7	1.0
11	2.97	9	29.9	1.2
12	0.23	8.5	19.0	3.12
13	0.63	12.8	15.0	2.35
14	0.123	11.8	10.4	4.26

여기서 Richardson 수,  $R_i$ 는

$$R_i = -\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{gH}{U^2} = \beta\Delta T \frac{gH}{U^2}$$

로 정의되며 층상 유동(stratified flow)의 안정도를 나타내기도 한다. 초기 Richardson 수  $R_{i0}$ 는

$\Delta T_i$ : 온수와 냉수의 온도차

$H_i$ : 입구에서의 온수의 깊이

$U_i$ : 입구에서의 온수의 표면 속도

를 기준으로 계산하였다.

먼저  $R_{i0}$ 의 영향을 비교하기 위하여  $R_{i0}=2.97$ (Run 11)과  $R_{i0}=0.23$ (Run 12)의 두 가지 경우의 온도 분포를 표면으로부터의 깊이의 함수로 경과 시간에 따라 Fig. 3(a)과 (b)에 표시하였다. 여기서 온도는 온수의 입구 온도  $T_i$ 와 냉수 온도  $T_c$ 의 차이로, 깊이는 온수의 입구 깊이  $H_i$ 로 무차원화시켰다. 그림에서 위치 2,4,6은 입구로부터 22cm, 62cm, 102cm 거리이다.

$R_{i0}=2.97$ 인 경우, 시간의 경과에 따라 온수층이 비

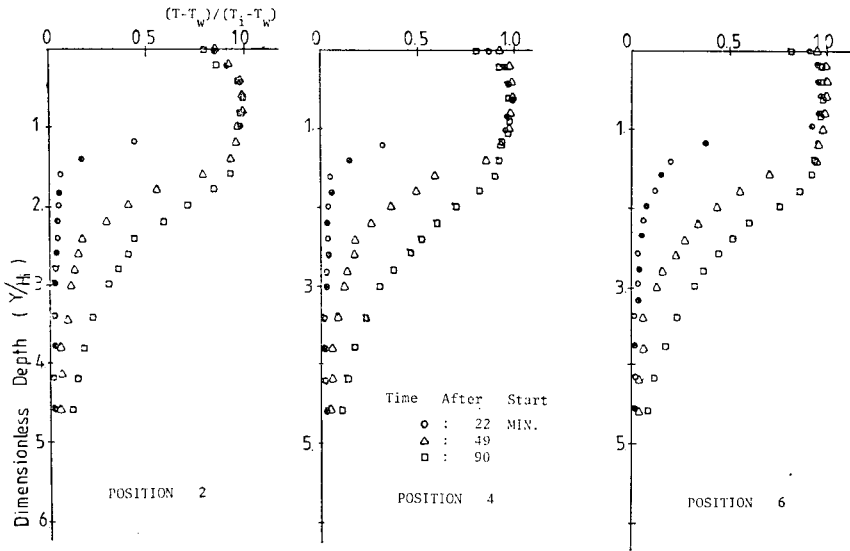


Fig. 3(a) Temperature vs. depth and time,  $R_{i_0}=2.97$ (Run 11)

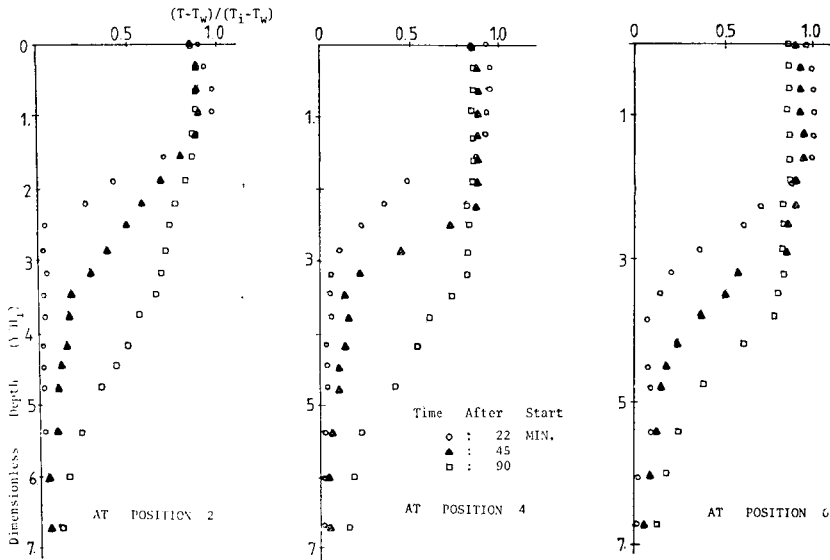


Fig. 3(b) Temperature vs. depth and time,  $R_{i_0}=0.23$  (Run 12)

교적 천천히 냉수 속으로 확산하여 들어가며, 무차원 깊이 ( $y/H_t$ ) 1.2 까지는 시간 경과에 따라 거의 변화가 나타나지 않고 있다. 반면  $R_{i_0}=0.23$  인 경우에는 시간에 따라 급격히 냉수의 온도가 증가하며,  $y/H_t \approx 1.2$  까지의 온도는 시간에 따라 감소함을 볼 수 있다. 이것으로  $R_{i_0}$  가 작을 수록 두 층 사이의 혼합이 활발하게 되어 온수층이 냉수속으로 깊이 확산하여 감을 알 수 있다.

흐름 방향으로의 온도 분포 변화를 알아 보기 위하여 비슷한 시간대에서 비교하여 보면,  $R_{i_0}=2.97$ 에서는 초기 혼합 과정 이후 거리에 따라 거의 변화가 없는 데 비하여,  $R_{i_0}=0.23$  인 경우에는 경계층이 유동 방향으로 나아감에 따라 급격히 감소한다.

$R_{i_0}$ 에 따른 온도 분포의 변화 경향을 비교하여 볼 수 있도록 위치 6(102cm)에서 40분대의 온도 분포를 Fig. 4에 표시하였다. 여기서 보면  $R_{i_0}$ 가 작을수록 온

도 변곡점의 위치가 낮으며, 온도 구배의 감소가 현저하게 나타난다.

그리고 낮은 값일 수록 조금의 변화에도 界面에서의 혼합이 활발하여 그 양상이 크게 달라진다.

$R_{i0}$ 가 1보다 클 경우, 초기 혼합이 크게 억제됨을 나타내고 있다. 동시에 부력에 의해 界面(interface)에서의 난류떨림이 억제되어 유동이 안정화 되어진다.

본 실험에서 중요한 목적중의 하나인, 실제로  $R_{i0}$ 가 이와 같은 열확산 현상의 유일한 지배 변수인가, 아니면 다른 매개 변수가 개재되어야 하는 가하는 문제를 알아 보기 위하여 서로 다른 조건들의 조합에 의해 만들어진 2개의 비슷한  $R_{i0}$ 을 갖는 실험 결과들을 비교하여 보았다.

먼저 Fig. 5에서  $R_{i0}=0.242$ (Run 9)와  $R_{i0}=0.23$ (Run 12)의 40분대에서의 온도분포를 비교하여 보았

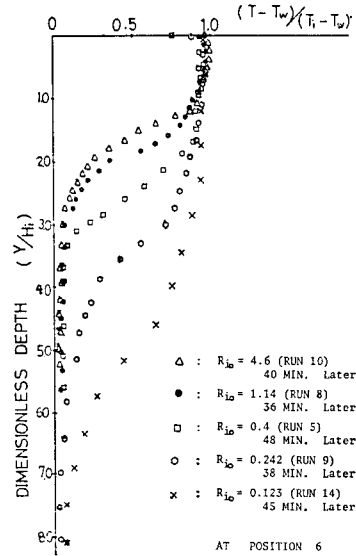


Fig. 4 Temperature vs. depth and  $R_{i0}$

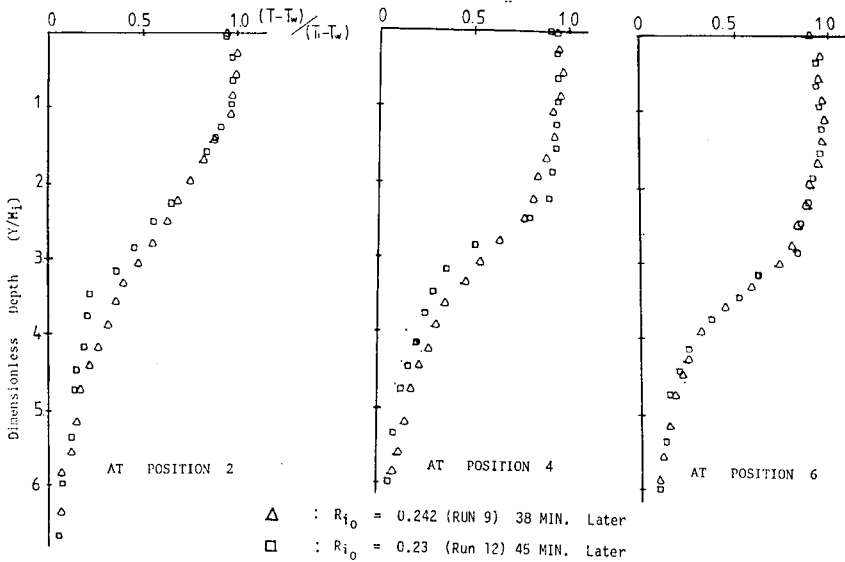


Fig. 5 Comparison between Run 9 and Run 12

다. 비교하는 조건에서 약간의 차이는 있으나, 충분히 발달된 흐름 영역인 위치 6에서는 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

또  $R_{i0}=0.362$ (Run 7)과  $R_{i0}=0.4$ (Run 5)의 무차원화된 온도 분포를 20분, 40분, 100분대의 3개의 시간대로 나누어서 Fig. 6(a)~(b)에 각각 나타내었다. 3개의 시간대에서 실험 결과들은 거의 일치 함을 알

수 있다. 특히 위치 4와 위치 6에서는 아주 잘 일치하고 있다. 이로부터 이와 같은 유동 현상의 열확산 해석에  $R_{i0}$ 의 영향이 지배적이며, 가장 중요한 변수라는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 界面(interface) 변화의 표면 속도

온도 변곡점은 온도 구배가 최대인 깊이를 말하며,

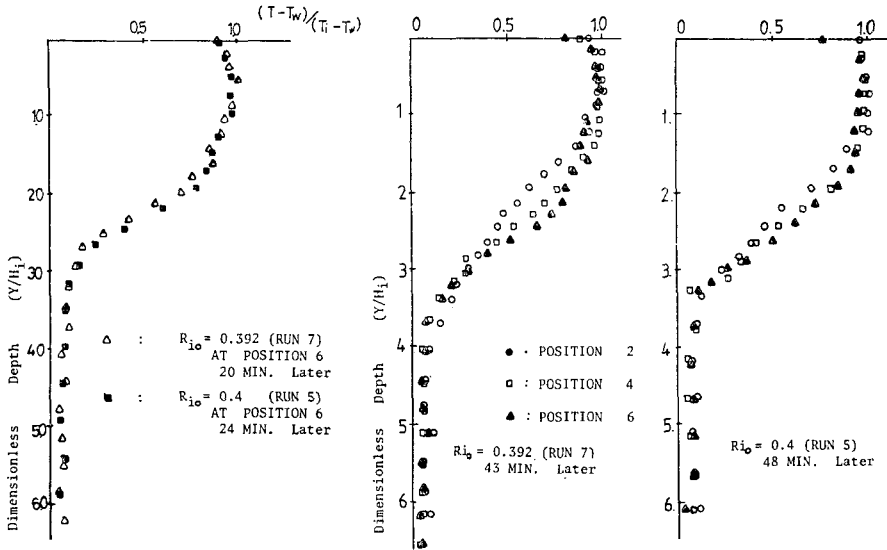


Fig. 6(a) Comparison between Run 5 and Run 7

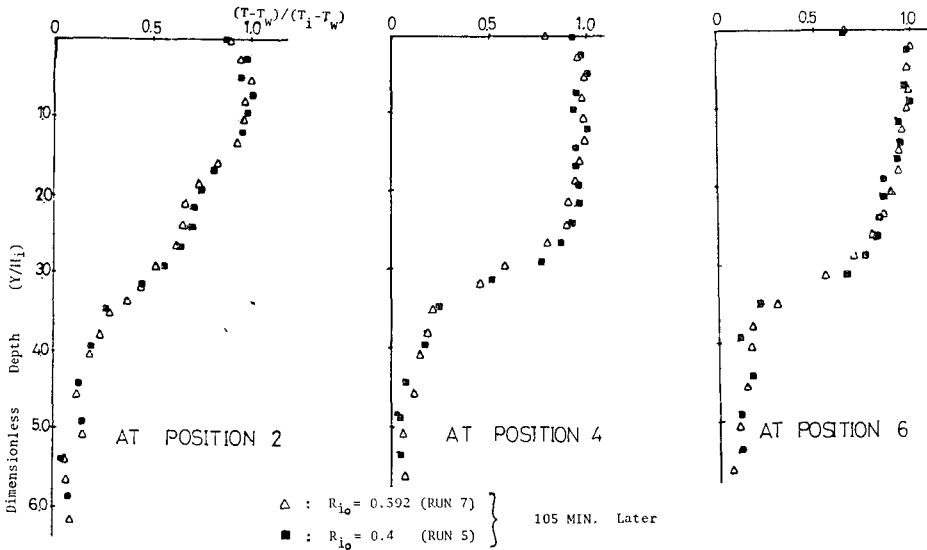


Fig. 6(b) Comparison between Run 5 and Run 7

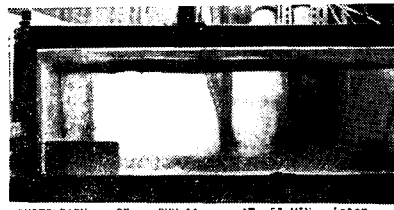
이 점들을 연결하여 만들어진 선을 界面(interface)이라고 한다. 편의를 위해 온수와 냉수 온도의 중간인 지점을 말하는 사람도 있으나, 여기서는 온도 구배가 양에서 음으로 바뀌는(온도 변곡점) 점을 찾아내어 그 점들을 연결하여 구한다. 즉, 界面은 온수층과 냉수층을 구분짓는 경계라는 의미에서 사용되고 있다.

계면의 깊이는 시간에 따라 증가하며, 입구로부터 대략 위치 5(82cm)까지는 거리에 따라 증가하다가 위

치 6(102cm)을 지나면서 부더는 감소하기 시작한다. 이 때 경계층 가까이에서의 유선은 위쪽으로 향하게 되어 연속 방정식을 만족시키자면 온수의 윗부분은 가속되어져야 한다.

Fig. 7(a)~(c)에서 실험 결과로부터 구한 계면의 시간과 위치에 따른 경과 과정을 살펴보고, 50분대에서의 유동 현상을 사진으로 비교하여 보았다.

Fig. 7(a)의  $Ri_0=2.97$ 인 경우에는 입구 영역에서



PHOTOGRAPH OF RUN 11 AT 53 MIN. Later (Internally submerged)

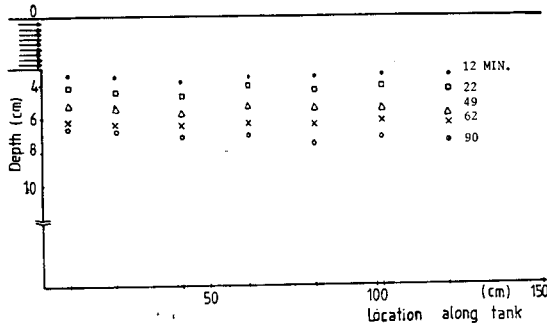
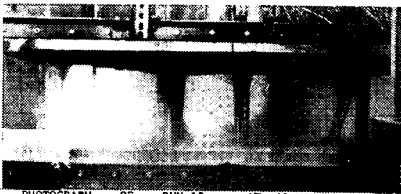


Fig. 7(a) Position of interface,  $R_{i_0}=2.97$ (Run 11)



PHOTOGRAPH OF RUN 12 AT 49 MIN. Later (Internal hydraulic jump)

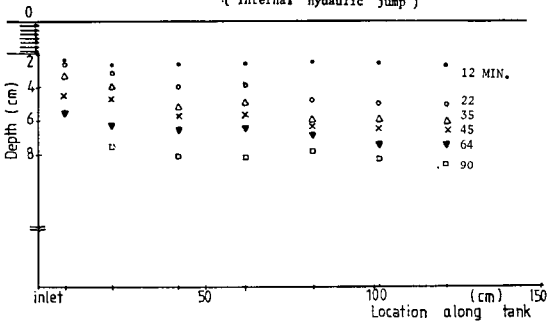
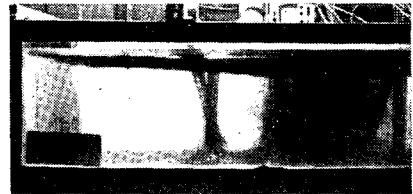


Fig. 7(b) Position of interface,  $R_{i_0}=0.23$ (Run 12)



PHOTOGRAPH OF RUN 14 AT 49 MIN. Later (Buoyant surface jet)

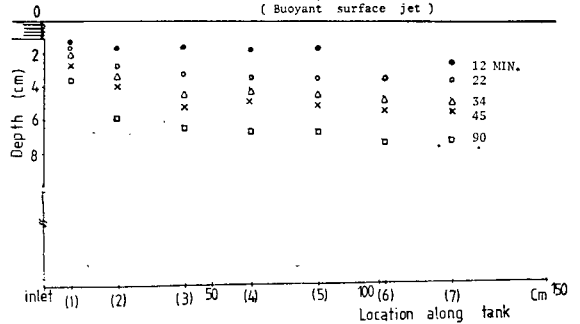


Fig. 7(c) Position of interface,  $R_{i_0}=0.123$ (Run 14)

혼합이 활발해 계면이 평평하게 냉수속에 잠겨있는 것처럼(internally submerged flow) 보이며, 이 보다 큰  $R_{i_0}$ 에서는 초기 혼합이 강하게 억제되어, 온도 분포가 안정하게 되며 계면 위, 아래에서의 난류 떨림이 억제되어 흐름이 층류적인 양상을 나타낸다.

$R_{i_0}$ 가 작을 수록 계면의 깊이는 시간 경과에 따라

더욱 더 밑으로 내려가며, 입구측에서의 구배가 완만하다.

Fig. 8은 부유물을 불표면에 띄워서 일정 구간을 지나는데 경과한 시간을 측정하여 구한 표면 속도이다.  $R_{i_0}$ 가 작을수록 표면 속도가 유동 방향에 따라 많이 감소함을 알 수 있다.

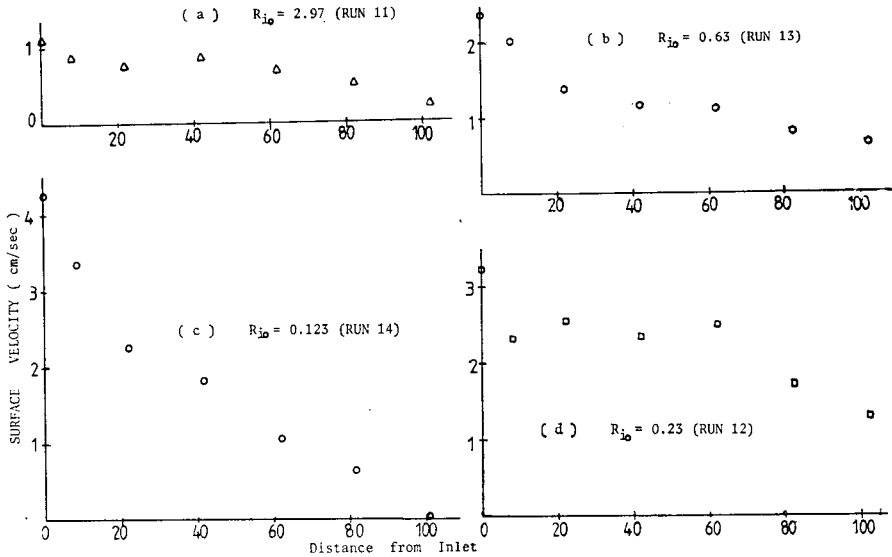


Fig. 8 Surface velocity at 50 min. later

4. 결 론

여러 값의 초기 Richardson 수에 대한 실험 결과, 온 배수의 표면 방출 효과 및 계면(interface)에서의 열적 구조와 이동 현상에 대해 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 열 오염 문제에서 부력은 난류 확산을 억제하고 있으며  $R_{i0}$ 가 가장 중요한 지배 변수이다.
- (2)  $R_{i0}$ 가 클 수록 온도 분포가 안정화되어서 열의 이동이 억제되며  $y=1.2H_i$  직후에 급격한 온도 변화가 나타난다.
- (3)  $R_{i0}$ 가 작을 수록 온도 구배의 감소가 현저하며 표면 속도도 흐름 방향으로 급격히 저하한다.
- (4) 계면(interface)은 시간경과 및 유동 방향에 따라 밀으로 내려 가는데,  $R_{i0}$ 가 작을수록 하강 정도가 크며 입구측에서의 구배는  $R_{i0}$ 가 클수록 급격하다.

참 고 문 헌

- (1) International Atomic Energy Agency, "Environmental Effects of Cooling System at Nuclear Power Plants", Vienna, 1975.
- (2) A Truck, J. Turk and J.T. Wittes, "Ecology, Pollution, Environment", pp175~189, W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1972.
- (3) M. Olszewski, "Evaporative-Pad Heat Transfer

Performance in a Simulated Waste-Heat Greenhouse Environment", AIChE. Symposium Series No. 189, pp. 310~322, 1979

- (4) A.J. Odgaard, "Hydrothermal Model Study of Intake/Discharge System for Korea Electric's Company's KORI Nuclear Power Plant," Overseers Bechtel, Report No. 80, 1981
- (5) Korea Energy Institute, "KORI units 5 & 6 Typical Technical Specification for Hydrothermal Model Studies of Intake/Discharge Systems", 1981
- (6) N. Tamai, R.L. Wiegel and G.F. Tornberg, "Surface Discharge of Horizontal Warm Water Jets", Proc. of ASCE., J. of Power Division, Vol. 95, pp. 253~276, 1969
- (7) Environmental Protection Agency, "Research on Physical Aspects of Thermal Pollution", Report 16130 DPU 02/71, Cornell Aeronautical Laboratory, Buffalo, N.Y. 1971
- (8) S.W. Park and M.K. Chung, "Prediction of 2-Dimensional Unsteady Thermal Discharge into a Reservoir", KSME, Vol. 7, No. 4, pp. 451~460, 1983
- (9) R.P. Benedict, Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements", Willey-International, 2nd Ed., 1977