

< 論 文 >

비정상 열확산 현상의 실험적 연구

이 상 준* · 정 명 균**

(1985년 8월 22일 접수)

Experimental Study of Unsteady Thermally Stratified Flow

Sang Jun Lee and Myung Kyoon Chung

Key Words: Unsteady Thermal Diffusion(비정상 열확산), NMR-CT(핵자기 공명 단층촬영기) Flow Image(유속 영상), Richardson Number(리차드슨 수)

Abstract

Unsteady thermally stratified flow caused by two-dimensional surface discharge of warm water into a oblong channel was investigated. Experimental study was focused on the rapidly developing thermal diffusion at small Richardson number.

The basic objectives were to study the interfacial mixing between a flowing layer of warm water and an underlying body of cold water and to accumulate experimental data to test computational turbulence models.

Mean velocity field measurements were carried out by using NMR-CT (Nuclear Magnetic Resonance-Computerized Tomography). It detects quantitative flow image of any desired section in any direction of flow in short time.

Results show that at small Richardson number warm layer rapidly penetrates into the cold layer because of strong turbulent mixing and instability between the two layers. It is found that the transfer of heat across the interface is more vigorous than that of momentum. It is also proved that the NMR-CT technique is a very valuable tool to measure unsteady three dimensional flow field.

기 호 설 명

g : 중력 가속도

kG : kiloGauss, 자장의 세기

H : 온수의 깊이

H_i : 온수의 입구 깊이

pH : 수소 이온 농도

mM : 모울 농도

Re_i : 입구 Reynolds 수 $(= \frac{H_i U_i}{\nu})$

R_i : 총괄 Richardson 수 $(= \beta \Delta T \frac{gH}{U^2} = - \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{gH}{U^2})$

Ri_o : 입구 R_i 수 $(= \beta \Delta T_i \frac{gH_i}{U_i^2})$

RF : Radio frequency

t : 시간

T : 평균 온도

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

T_h : 온수의 입구 온도
 T_c : 냉수 온도
 ΔT : 온수와 냉수의 온도차 ($T_h - T_c$)
 U : 흐름 방향의 속도
 U_i : 입구 평균 속도
 X : 흐름 방향의 좌표
 Y : 수직(깊이) 방향의 좌표
 Y_0 : 속도(U)가 0인 깊이
 Z : 횡축 방향 좌표
 β : 체적 팽창 계수
 ρ : 냉수의 밀도
 $\Delta\rho$: 온수와 냉수의 밀도차

1. 서 론

상온의 물이 가득 들어 있는 사각 단면의 2차원 덕트로 온수를 표면 방출시킬 때 나타나는 성층화된 흐름(stratified flow)을 실험적으로 연구하였다. 이와 같은 현상은 발전소로부터 냉각 배수나 혼합 chamber 내부 흐름과 같이 우리 주위에서 쉽게 접할 수 있는 공학적 실제 문제로서 오래전부터 많이 연구되어 왔다^(1,2). Polk 등⁽³⁾은 열방출이 환경 및 생태계 등에 미치게 될 제반 문제들을 최소화하고 발전소 효율을 극대화하기 위해서는 혼합구조에 대한 충분한 이해와 열방출에 따른 온도분포를 적절하게 예측할 수 있어야 한다고 주장하였다. 그러나 이러한 열방출로 성층화된 흐름의 열적 구조를 예측하기란 쉽지 않다. 왜냐하면 두층사이의 혼합 과정은 열 및 운동량 전달의 상호 작용에 의해 이루어지므로, 열방출은 열적 구조뿐만 아니라 속도장에도 변화를 가져오기 때문이다. 또한 흘러 들어오는 온수가 냉수로 가득찬 덕트속에 누적됨으로써 시간 경과에 따라 윗부분의 온수층이 냉수속으로 침투해 들어가는 이른바 비정상 확산 현상이 야기된다. 따라서 시간에 따른 속도장과 온도장의 변화에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 이와 같은 연구를 통해서 다른 농도를 가진 두 층 사이의 혼합 현상에 대한 충분한 이해를 얻게 됨으로써 보다 일반적이고 완벽한 해석적 방법들이 개발되어, 주어진 모든 조건에서의 열적 구조를 예측할 수 있게 될 것이다.

본 연구에서 냉수로 가득찬 2차원 덕트로 표면 방출되어 흘러 들어오는 온수층의 밀도가 아랫층의 냉수보다도 낮기 때문에 안정되게 성층화(statification)되어 있다. 성층류의 안정성(stability)은 보통 Richardson 수(R_i)로써 표시하는데, 이는 관성력에 대한 부

력의 비값으로 주어진다.

Ellison과 Turner⁽⁴⁾는 소금물을 이용한 성층류 흐름에서의 혼합 영역(mixing region)을 실험적으로 연구하였다. 그들은 R_i 수가 약 0.8보다 크게 되면 entrainment 되는 것은 실질적으로 억제되어짐을 발견하였다. 극부적인 구배 Richardson 수(R_i)는 극부적 평행상태에 있는 자유 전단 흐름에서의 안정도를 나타내는 매개변수가 된다는 것을 Gibson과 Launder⁽⁵⁾, Launder⁽⁶⁾는 이론적으로 밝혔다. 또한 Lee와 Chung⁽⁷⁾은 총괄 R_i 수가 이와같은 2차원 표면 열방출 현상 해석에 있어 가장 중요한 지배변수임을 실험적으로 확인하였다.

Stefan⁽⁸⁾은 근본적으로 2층인 흐름(two-layered flow)으로 거의 정상 상태의 성층화 흐름을 만들어 실험을 수행하였다. Komori 등⁽⁹⁾은 개수로 흐름(open channel flow)의 윗부분을 증기로 가열함으로써 매우 안정된 농도구배를 가진 성층 흐름을 만들어 안정된 성층화가 난류구조에 미치는 영향을 실험적으로 조사 연구하였다. 여기서 그들은 속도와 온도의 난류 떨림(turbulent fluctuation)이 극부 구배 R_i 와 상관 관계에 있음을 주장하였다.

지금까지의 대부분의 연구들은 두층 사이의 혼합이 느린 높은 R_i 수에 대한 것으로서, 시간 경과에 따라 열 및 운동량 이동이 느려 거의 정상 상태로 해석하였다.

이와 같은 비정상 열확산 현상을 이론적으로 해석하기 위한 기존의 수학적 계산 모델들은 계산상의 경제성등으로 계산 범위(깊이)가 크게 제한을 받는다⁽¹⁰⁾. 따라서 이러한 모델의 점검 및 비교를 위해서는 짧은 시간내에 충분한 열확산이 일어나는 아주 낮은 R_i 수의 실험을 요하게 된다.

그러나 낮은 R_i 수에 대한 체계적인 연구는 여러가지 기술적 문제등으로 거의 없는 실정이다. 즉 표면 방출에 따른 열확산 현상에 대한 많은 실험적 연구들이 수행되어 왔음에도 불구하고 시간에 따라 변화해 나가는 과도적 유동장 구조에 대해서는 거의 알려져 있지 않다. 이것은 기존의 측정 장비 및 측정 방법으로 짧은 시간내에 전체 속도장을 측정하기에는 많은 어려움이 따르기 때문이다. 좀 다른 경우이기는 하지만 Boyle과 Golay⁽¹¹⁾는 LDV를 이용한 반복적 실험을 통하여 2차원 재순환 흐름의 과도적 변화를 통계적 평균으로부터 구하였다. 그들은 순수한 ensemble 평균에 필요한 실행할 수 없을 정도로 많은 반복 실험의 횟수를 줄이기 위하여 ensemble 평균과 시간 평균의 특성을 복합한 방법을 사용하였다.

윗부분은 충분한 난류흐름이고 혼합 경계층 아래에는 역방향 속도 성분이 있게되는 본 연구에서 LDV 측정 장치나 수소 기포에 의한 가시화 방법과 같은 기존하는 측정 방법으로는 과도적 흐름 현상을 해석하는데 많은 어려움이 따른다.

그래서 본 연구에서는 새로운 영상 시스템으로 인체 단층 촬영에 많이 사용되고 있는 핵자기공명 단층촬영기(NMR-CT)를 이용하여 속도 측정을 수행하였다⁽¹²⁾. 유속 측정을 위해 새롭게 개발된 NMR 위상 영상법을 사용하여 원하는 임의 단면에서의 임의 방향방향의 유속 영상(flow velocity image)을 짧은 시간내에 구할 수 있다. 속도 빠르기를 명암(스칼라)으로 구분할 수 있기 때문에 알고자 하는 단면에서의 속도장을 VAX 11/780 컴퓨터 단말기를 통해 한 눈에 볼 수 있다. 이와 같은 특성을 이용하면 큰 와류(large eddy)들의 이동 현상이나, coherent 구조와 같은 복잡한 유체역학 문제들을 정량적으로 해석할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 새로운 NMR-CT 위상 영상법의 정확성을 검토하기 위하여 먼저 정상 상태의 등온 유동에 대하여 LDV로 측정된 결과와 비교하였다.

온도장의 과도적 변화를 측정하기 위하여 9개의 열전대를 하나의 가느다란 유리관에 장착하여 만든 열전대 다발들을 사용하였다.

본 연구에서는 초기 조건(입구 R_i 수)의 변화에 따른 속도 분포, 온도 분포, 확산율, 계면의 변화등을 연구하며, 난류 혼합과 계면의 불안정에 기인한 속도장과 온도장의 변화과정을 가시화 사진과 비교 분석한다.

2. 실험 장치 및 측정 방법

2.1 실험 장치

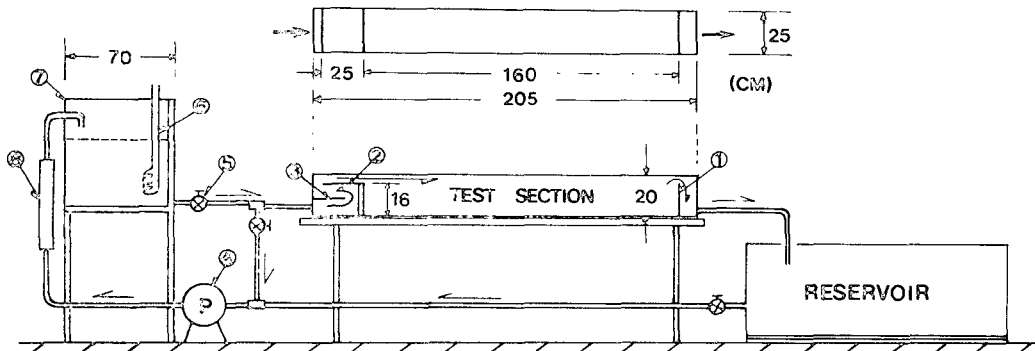
LDV와 NMR-CT 시스템의 측정에 적합하겠끔 제작된 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 나와있다.

두께 12mm 아크릴 판으로 제작된 2차원 덕트는 전체 길이가 205cm, 깊이 20cm, 폭 25cm로 되어있으며 이중에서 처음 냉수로 가득 채워지는 부분은 길이 160cm에 깊이가 16cm이다.

유량계를 거쳐 항온조로 들어오는 물을 일정 온도로 가열하기 위한 수중 가열기(immersion heater)의 총용량은 8.8kW로 실험 조건에 맞추어 일정량을 사용하였다. 항온조에서 일정 온도, 일정 유량으로 조절된 온수는 배플(baffle)을 거쳐 균일한 흐름이 되어 길이 25cm의 입구 평판을 흘러 지나게 된다. 출구 위어(weir)의 높이는 임의로 조절할 수 있게 하였다.

시험구간에서의 유동의 2차원성은 염료를 이용한 가시화 방법과 NMR-CT의 축방향(axial) 유속 영상(흐르는 방향에 수직인 단면에서의 속도장)으로부터 쉽게 확인하였다.

온도 측정시 28개 열전대를 입구 부분에 1개 그리고 입구로부터 10, 20, 30cm 위치에 각각 9개씩 하나의 가는 유리 관속에 장착하였다. 윗부분의 6개 열전대는 약 8mm 간격이고 아래부분 3개는 약 15mm 간격으로 되어있다. 실험에서 사용된 열전대는 직경 0.5mm의 K-type(Alumel-Chromel)으로, 유리관의 작은 구멍을 통해 밖으로 나와있는 센서 부위는 용해 용접한 후에 폭시로 얇게 코팅하여 물속에서 전기적으로 절연되게 하였다.



① Outlet weir ② Inlet plate ③ Baffle ④ Pump ⑤ Control valve ⑥ Immersion heater
⑦ Constant temperature regulated tank ⑧ Flowmeter

Fig. 1 Schematic diagram of flow system

2.2 NMR-CT

핵자기 공명 현상은 그 발견 이래 원자핵 각각의 고유 진동수 특성을 이용하여 동위 원소 식별 및 성분 분석 등 물리, 화학, 생물과 같은 기초과학 분야에서 많은 연구가 되어 왔다. 최근에는 이 현상을 이용한 핵자기공명 단층촬영기(NMR-CT)가 개발되어 3차원 영상처리까지 가능하다. 화학적 특별 영상능력외에 인체에 무해한 점과 높은 해상도 능력(high resolution capacity) 등으로 인하여 의학 분야에서 X-ray CT를 대체할 영상시스템으로 각광을 받고 있다⁽¹⁴⁾.

NMR 영상의 기본 원리는 다음과 같다: 강한 균일 정자장내에 위치한 물체(sample)가 내부 수소핵의 세차운동(precession) 주기와 같은 주파수의 radio wave (RF)에 노출될 때 공명(resonance)을 일으키게 된다. 이때 공명하는 양자들로부터 에너지가 방사(radiate back)되어 나온다. 물체로부터 발생한 이 신호를 FFT (Fast Fourier Transform)하여 우리가 알고자 하는 단층 영상을 얻게 되는 것이다.

본 연구에서 사용된 1.5KG(Gauss) KAIS NMR 영상 시스템의 사진이 Fig. 2에 나와 있다. 이것은 1.5 KG 상자성, X·Y·Z 경사 코일(gradient coil)과 RF 코일 그리고 기타 부속 전기 전자 장비들로 이루어져 있다. 여기서 서로 직교한 X·Y·Z 경사 자계는 원하는 단면을 선택하기 위한 위치 좌표를 부과하는데 사용된다.

유체역학 분야 연구에 사용할 수 있게 새롭게 개발된 NMR 유속 영상법⁽¹⁵⁾은 물 자체가 포함하고있는 수소핵이 유속과 같이 흐르면서 방사하는 신호를 직접 FFT 방식으로 3차원 phase encoding 하여 유속 영상(flow image)을 알아내는 것이다. 이 새로운 방법은 경사 자계와 선택적 RF 펄스(selective RF pulse)의

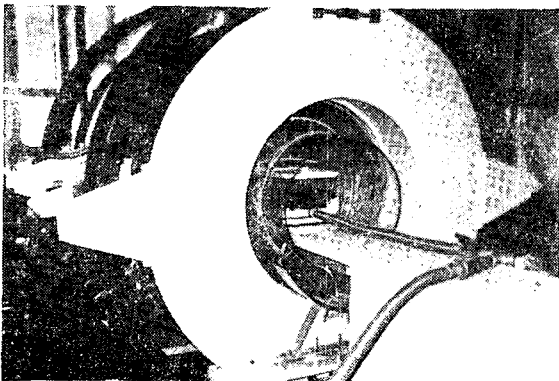


Fig. 2 Sideview of NMR-CT with arranged flow system

특정한 펄스 차폐(pulse sequence)에 의해 임의 단면에서 임의 방향의 속도성분에 대한 유속 영상을 얻는다. 자세한 것은 참고문헌 (13, 15)를 참조하면 된다.

속도가 위상 변화에 선형적으로 비례하므로 구해진 위상 분포로부터 바로 원하는 속도 정보를 얻을 수 있다. 이때 비례상수는 NMR-CT 시스템의 측정조건에 의해 결정된다. 이 방법으로 측정 가능한 유속 한계는 약 5m/sec로 사료된다.

2.3 측정 장치 및 측정 방법

(1) 정상 상태

먼저 NMR-CT의 속도장 측정 가능성과 정확도를 검증하기 위하여 일정 온도의 물을 순환시켜 흐름을 정상 상태 조건으로 하여 LDV 시스템(TSI 9100-9)으로 측정하였다. 속도는 Tracker 타입의 신호처리기(signal processor, TSI 1090-1A)로부터 나오는 순간 접압을 HP 3437A system voltmeter로 150번 평균하여 구하였다. 이 모든 데이터 처리는 PET 마이크로 컴퓨터를 사용하여 온라인화 하였다.

NMR 유속 영상에서는 수소 이온 농도를 증가시켜 측정시간을 줄일 목적으로 물에 $MnCl_2$ 0.05mM을 첨가하기도 한다. 이럴 경우 512×256 크기의 영상 데이터(20×20 cm 단면)를 얻는데 약 1분의 시간이 소요되는데, 소요시간은 데이터 크기에 비례한다. 영상 데이터를 애널로그 AP 500 array processor와 함께 VAX 11/780 컴퓨터로 처리하여 256×256 크기의 유동속도장을 구하게 된다.

우리가 65,536 (256×256)개 위치에서의 속도를 일반적인 LDV 측정 장치로 측정하는에는 18시간(한 위치당 측정시간을 1/2초로 하였을때) 이상이 소요된다.

(2) 비정상 상태

항온조내의 수중 가열기 용량, 흘러들어오는 입구 유량, 출구 위어(weir) 높이를 적절히 조절하여 3가지 입구 Richardson 수(Ri_0)의 실험을 수행하였다. 여기서 입구 Richardson 수(Ri_0)는

$$Ri_0 = \beta \Delta T_i \frac{g H_i}{U_i^2}$$

로 정의되는데, ΔT_i , H_i , U_i 는 냉수 용기 입구에서의 두층사이의 온도차, 온수층의 깊이와 평균 속도이며, β 는 온수온도에서의 체적팽창계수이다. 3가지 Ri_0 를 이루고 있는 매개변수들은 Table 1에 나와있다. 본 연구를 수행하는 동안 냉수온도는 거의 $16^\circ C$ 를 유지하였다.

입구에서의 온수 깊이 H_i 에 기초한 Reynolds 수

Table 1 Experimental parameters and inlet Richardson numbers

Inlet richardson No. Ri_0	Flow rate Q (cm ³ /sec)	Inlet depth H_i (mm)	Temp. difference ΔT (°C)	Inlet Reynold's No. $Re. (= \frac{U_i H_i}{\nu})$
1.42×10^{-3}	240	4.8	6.5	977
2.5×10^{-3}	180	3.9	12	733
9.9×10^{-2}	180	13.9	10.5	733

($R_0 = \frac{H_i U_i}{\nu}$)가 300 이상이므로 입구 속도가 난류임을 알 수 있다⁽¹⁶⁾. 속도 측정의 경우 NMR 데이터 크기를 128×128로 하여 측정시간을 짧게 하였다. 사용된 온도 측정 시스템의 개략도는 Fig. 3에 나타나 있다. 이 HP 3052B data acquisition 시스템은 외부의 기준 접점(reference junction)을 사용하지 않고 바로 자체내부의 thermistor 및 냉접점(cold junction)을 이용하여 온도를 구하게 되어 있다. 온도측정에 있어서 열전대 하나로부터 나오는 온도 신호(기전력)를 4번씩 읽어 컴퓨터 메모리에 기억시키는 과정을 순서대로 28개 열전대를 거친 다음 다시 역순으로 기억시킨 후 이전 앞 데이터의 평균을 구하고 온도로 환산하였다. 이 방법으로 28개 열전대의 온도를 모두 읽는데 약 10초가 소요된다.

실험은 항온조로부터 일정온도 일정유량의 온수를 냉수로 가득 채워진 덕트로 표면 방출시킴으로써 시작된다.

속도와 온도 측정은 덕트의 중앙 수직 평면상에서 일정 시간 간격으로 수행하였다. 혼합 현상 및 계면 변화를 가시화하기 위하여 시험구간(test section)위에 설치한 1kW 할로겐 램프를 슬릿을 통해 조명하면서 앞쪽에 설치한 카메라로 측정 시간에 맞추어 촬영하였다.

가시화용 염료로 pH 변화에 따라 색깔이 변화하는 티몰 블루(thymol blue) 수용액을 사용하였다. 즉 냉수 용기에 약간의 가성소다(NaOH)를 풀어 약 알칼리성

(pH≥9)으로 만든 다음 온수와 함께 오렌지색의 티몰 블루 수용액(pH≤7.5)을 방출시키면 냉수와 접하는 순간 pH 변화에 따라 담청색으로 바뀐다⁽¹⁷⁾. 이것으로 온수층과 냉수층의 계면 변화와 혼합 현상을 연구할 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 NMR-CT의 검증

냉수 용기로 유입되는 정상 상태의 흐름이 모두 난류인 3가지 다른 유량 조건(120, 180, 240cm³/sec)에 대해 NMR-CT에 의한 유속 측정의 정확도를 LDV 시스템으로 검증하였다.

여기서는 대표적인 것으로 유량이 180cm³/sec인 경우에 대해서만 나타내었다. Fig. 4는 입구로부터 30cm 위치의 y-z평면(흐름 방향에 수직인 단면)에서 구한 x방향 속도 성분(u)의 유속 영상이다.

이것으로부터 덕트내의 유동장이 2차원 성을 거의 만족시키고 있음을 알 수 있다. 여기서 속도의 빠르기는 명암으로 나타내게되며 아래의 검은 부분은 역방향 속도를 나타낸다. 윗부분에 있는 3개의 화살표는 흐르는 방향을 나타내기 위한 것이다. Fig. 5는 2차원 덕트의 중앙을 따라 위치한 x-y평면(옆 벽면에 평행한 단면)에서 구한 x방향 속도 성분(U)의 sagittal 유속 영상이다. 여기서 명암등급(gray level)의 간격을 크게 함으로써 등속도 분포를 쉽게 알 수 있게 하였다. 즉 속도 빠르기를 스칼라양으로 나타내기 때문에 한 단면에서의 속도장 구조를 한눈에 알 수 있다. 이 유속 영상으로부터 구한 x=10cm, 20cm에서의 유속분포를 LDV 시스템으로 구한 결과와 비교한 것이 Fig. 6 (a), (b)에 나와 있다. 여기서보면 두 결과가 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 물표면 가까이에서는 삼각형으로 표시한 NMR 값이 원으로 표시한 LDV 값보다 약간 적게 나타난다. 이것은 선택된 단면부분에 물표면 바깥부분이 들어간 것이 아닌가 한다.

또한 아랫부분의 역방향 속도 구간에서는 NMR 값이 LDV 측정치보다 약간 큰값을 주고 있는데 이는 LDV

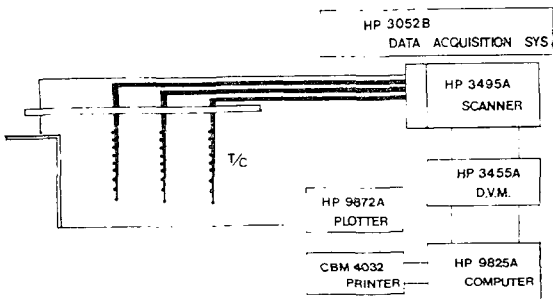


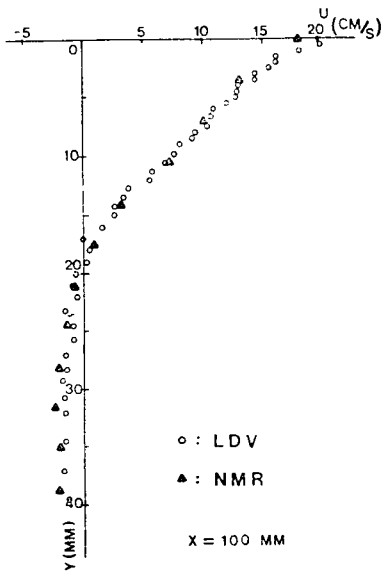
Fig. 3 Arrangement of temperature measurement system



Fig. 4 Flow velocity image in axial ($y-z$) view at $X=30\text{cm}$ ($Q=180\text{cm}^3/\text{sec}$)



Fig. 5 Flow velocity image in sagittal ($x-y$) view for $Q=180\text{cm}^3/\text{sec}$



(a)

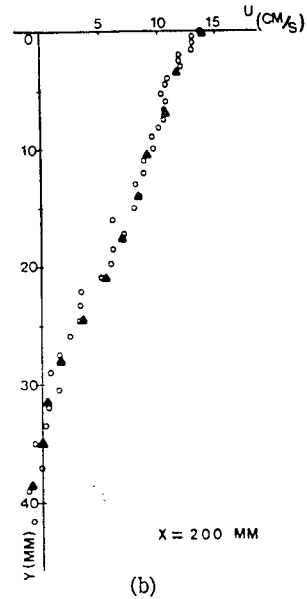


Fig. 6 Comparison of the results from the flow velocity measurements obtained by the NMR and LDV systems ($Q=180\text{cm}^3/\text{sec}$)

측정시 입자들이 저속 구간에서 유동 속도를 따라가지 못하는 것을 의미한다.

3.2 비정상 열확산

시간에 따른 속도장과 온도장의 변화를 3가지 입구 Richardson 수 ($Ri_0=1.42 \times 10^{-3}$, 2.5×10^{-3} , 9.9×10^{-2})에 대하여 측정하였다.

Fig. 7 (a)~(c)는 $Ri_0=2.5 \times 10^{-3}$ 경우의 유동 방향의 위치와 시간에 따른 온도변화를 깊이의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 온도는 온수의 입수온도 T_h 와 냉수온도 T_c 의 차이 ΔT 로 무차원화 하였다.

온수층과 냉수층을 구분짓는 경계면 (interface)을 구하는데 사용되어지는 온도 변곡점 (thermocline)은 온도 구배가 최대인 깊이를 말한다. Fig. 7에서 보면 각 위치에서 온도 변곡점이 시간에 따라 일정하게 하강한다 유동 방향으로 나아가감에 따라 변곡점에서의 온도 구배 ($\Delta T/\Delta y$)는 적어진다.

Ri_0 에 따른 온도 변화를 연구하기 위하여 $x=20\text{cm}$ 위치에서 $t=1$ 분, 3 분, 5 분후의 온도분포를 Fig. 8에 표시하였다. 3가지중 가장 낮은 $Ri_0=1.42 \times 10^{-3}$ 의 경우 변곡점에서의 온도구배가 완만하며, 온수층의 확산율이 매우 크다. 가장 큰 $Ri_0=9.9 \times 10^{-2}$ 경우에 있어서는 강한 부력작용으로 두층 사이의 혼합이 억제

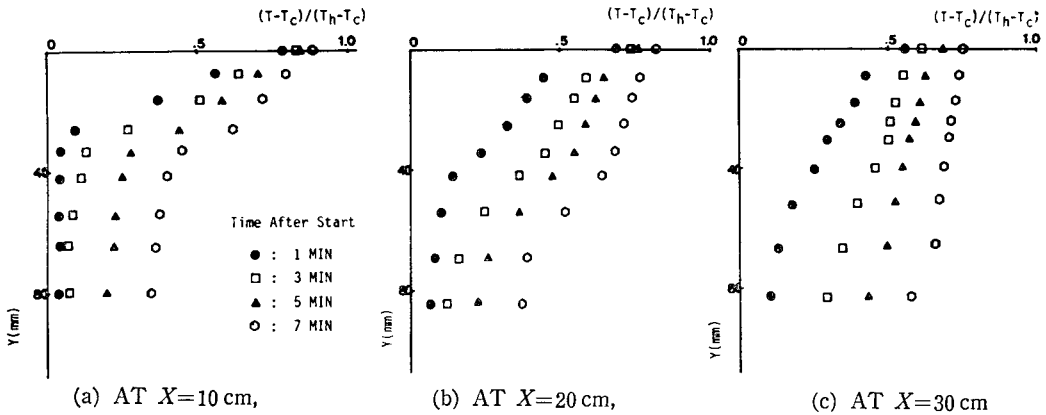


Fig. 7 Temperature profile vs. Depth and Time, $Ri_0=0.0025$

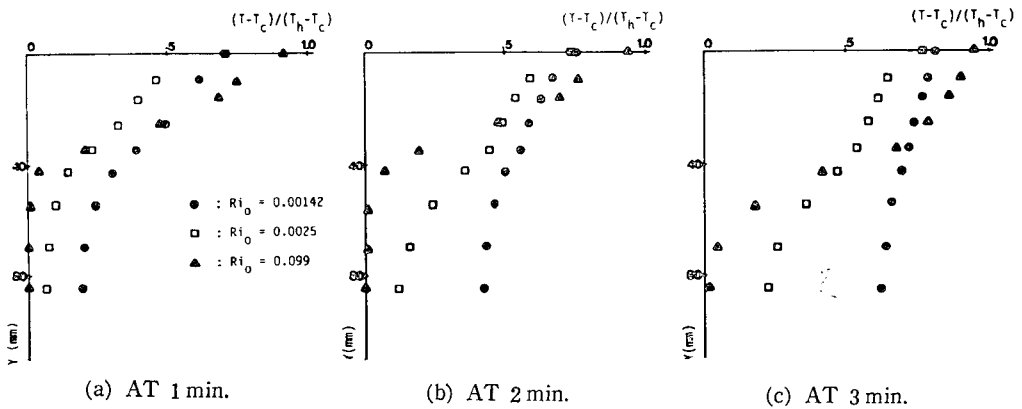


Fig. 8 Temperature profile vs. Depth and Ri_0 , at $X=20$ cm

되어 열확산이 다른 두 경우에 비해 상당히 느리다. 또한 계면(interface)에서의 온도 구배도 크다.

온도 측정에 맞추어 일정 시간 간격으로 촬영한 혼합과정의 가시화 사진을 통해 시간에 따른 계면(interface)의 위치 변화와 떨림 정도를 한눈에 볼 수 있다.

$Ri_0=9.9 \times 10^{-2}$ 경우의 가시화 사진 Fig. 9 (a)를 보면 3분까지는 부력 작용과 출구 위의 영향으로 난류 확산이 심하게 억제되고 있으며 7분경까지는 전체 깊이의 1/3 정도로 서서히 확산해 나아간다. 계면은 안정되어 있으며 초기 혼합은 억제되고 있다.

Fig. 9 (b) ($Ri_0=2.5 \times 10^{-3}$)의 3분 사진을 보면 입구 부분에서 초기 혼합이 시작되고 계면에서 가느다란 실모양의 filament 들이 나타나고 있다. 7분 경에는 입구로부터 50cm 까지 물표면으로부터 3/4 깊이에 거의 일직선으로 평평하게 위치해 있다. Ri_0 가 가장 낮은 Fig. 9 (c)의 경우 계면 부근에서의 난류 떨림이 활발하여 계면이 불안정하다. 두층사이의 혼합과 함께

초기 혼합이 활발하여 5분경 20~30cm 사이의 일부를 제외하고는 온수층이 냉수 용기의 밑바닥까지 이르고 있음을 가시화 사진으로부터 바로 알 수 있다.

정지 상태에 있는 냉수위로 온수를 갑자기 표면방출 시킴에 따라 유동장은 불안정하게 된다. 시간이 지남에 따라 유동장이 안정화되어지고 아랫부분에 재순환 영역(역방향 속도 영역)이 형성되며 부력 작용의 영향으로 열확산이 서서히 진행하게 된다.

$Ri_0=2.5 \times 10^{-3}$ 경우의 시간에 따른 속도변화를 Fig. 10(a)(b)에 나타내었다. (a), (b)는 각각 입구로부터 10, 20cm 위치에서 2분 간격으로 측정된 속도 분포이다. 여기서 보면 3분까지는 초기 혼합과 부력 작용의 영향으로 에너지 전달(운동량 이동)이 억제되고 있으며, 3분 이후 부력과 관성력의 상호작용으로 운동량이 아주 천천히 냉수속으로 이동해 감을 알 수 있다. 재순환 영역에서는 두 위치에서의 속도 변화 정도가 비슷하다.

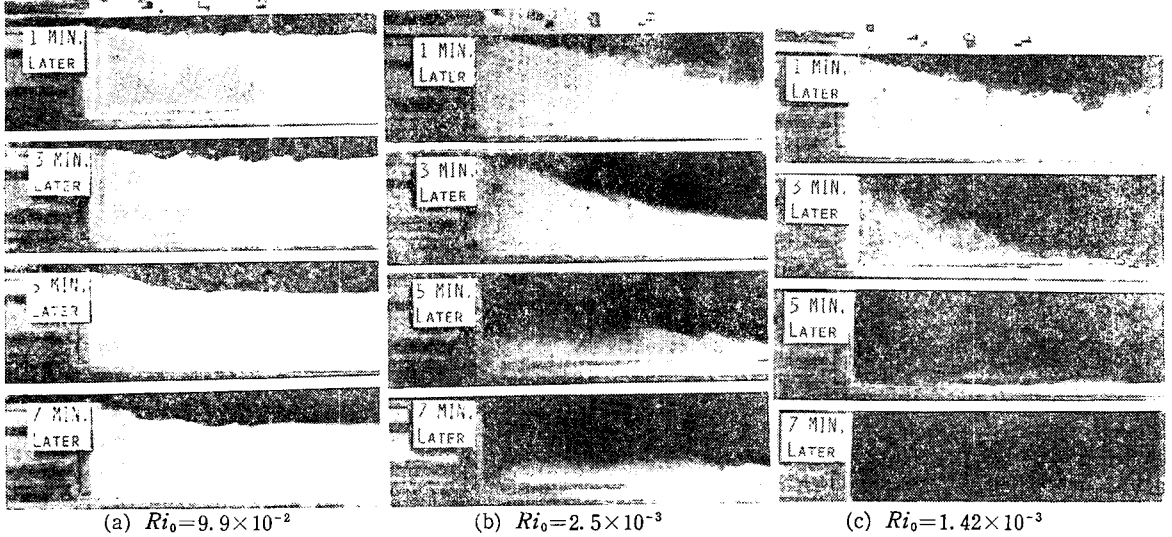


Fig. 9 Visualization of unsteady thermal diffusion

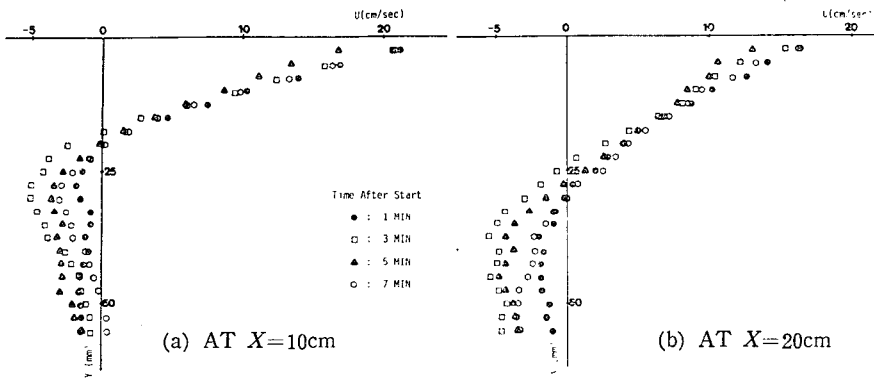


Fig. 10 Velocity profile vs. Depth and Time, $Ri_0=0.0025$

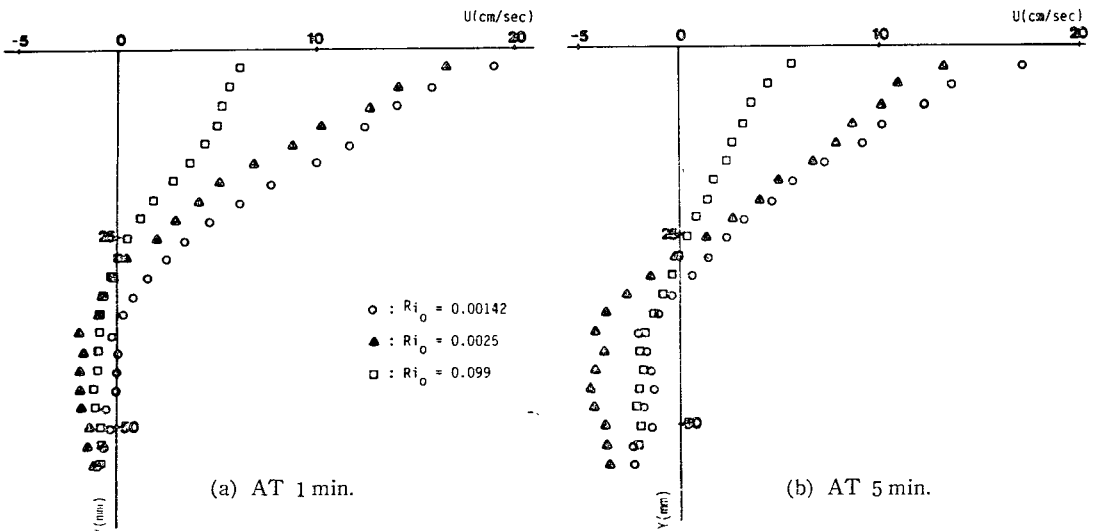


Fig. 11 Velocity profile vs. Depth and Ri_0 , at $X=20\text{cm}$

Ri_0 에 따른 유동장 변화란 연구하기 위하여 $X=20\text{cm}$ 위치에서 $t=1$ 분, 5 분후의 속도 분포를 Fig. 11 (a) (b)에 표시하였다.

속도 방향이 바뀌게되는, 속도가 0 인 위치 (y_0)는 Ri_0 가 작을 수록 밑으로 내려가며 시간에 따라 많이 변화한다.

특히 $Ri_0=9.9 \times 10^{-2}$ 경우에는 y_0 가 시간에 따라 거의 변화하지 않는다. 또한 부력 작용에 의하여 난류 확산이 억제되어짐으로써 속도 변화폭이 적게 나타나고 있다. 그러나 시간에 따른 속도 변화는 온도변화에 비해 크지 않다. 이로부터 우리는 아주 낮은 Ri_0 수의 경우 열전달은 운동량 이동에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

냉수로 가득찬 2 차원 덕트에 온수를 표면 방출할때 형성되는 비정상 열확산 현상을 실험적으로 연구하였다. 공학적 및 환경공학적 실제 문제에 응용하기 위한 기초적 연구로써 그 필요성이 절실히 요구되는 낮은 Richardson 수의 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

열방출에 따른 영향 예측에 필요한 낮은 Ri_0 수의 실험 데이터를 축적함으로써 기존의 수학적 모델의 점검과 새로운 모델 개발에 필요한 입력 변수(input parameter)를 제공하게 되었다.

또한 측정 방법 및 기술적 문제로 지금까지 제한을 받아오던 속도 및 온도의 과도적 변화를 NMR-CT 와 마이크로 프로세서의 응용으로 측정할 수 있었다.

NMR 위상 영상법으로 우리가 원하는 임의 단면을 지나는 유체속도의 3 차원 분포를 한번의 영상 처리로 구할 수 있었다. 이 방법은 비정상 유동문제외에도 기존의 측정시스템으로는 측정하기 어려운 여러가지 유체역학적 문제에 응용 가능성을 가진 획기적인 기술이다.

냉수위를 흘러 지나게되는 온수층과의 혼합과정에서 Ri_0 가 작을 수록 두층 사이의 혼합이 빠르며 변곡점 부근의 온도 구배가 완만하다. Ri_0 가 아주 낮은 경우 초기 혼합과 함께 계면(interface)에서의 혼합이 활발하여 짧은 시간내에 충분한 열확산이 일어난다. 또한 운동량 이동은 열전달에 비해 활발하지 않다.

참 고 문 헌

(1) Environmental Protection Agency, Research on

Physical Aspects of Thermal Pollution, Report 16130 DPU 02/71, Cornell Aeronautical Lab, Buffalo, N.Y., 1971

(2) International Atomic Energy Agency, Environmental Effects of Cooling System at Nuclear Power Plants, Vienna, 1975

(3) E.M. Polk, B.A. Benedict and F.L. Parker, Dispersion of Thermal Discharges in Bodies of Water, Chemical Engineering Progress Symposium Series No. 119, Vol. 67, pp.111~119, 1974

(4) T.H. Ellison and J.S. Turner, Turbulent Entrainment in Stratified Flows, J. of Fluid Mechanics, Vol. 6, pp.423~448, 1959

(5) M.M. Gibson and B.E. Launder, Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer, J. of Fluid Mechanics, Vol. 80, pp.491~511, 1978

(6) B.E. Launder, On the Effects of a Gravitational Field on the Turbulent Transport of Heat and Momentum, J. of Fluid Mechanics, Vol. 67, pp. 569~581, 1975

(7) S.J. Lee and M.K. Chung, Diffusion of Two-Dimensional Surface Discharge of Heated Water in a Rectangular Reservoir (I), KSME, Vol. 8, No. 6, pp.536~543, 1984

(8) H. Stefan, Stratification of Flow from Channel into Deep Lake, ASCE, Vol. 96, No. HY7, pp. 1417~1434, 1970

(9) S. Komori, H. Ueda, F. Ogino and T. Mizushima, Turbulence Structure in Stably Stratified Open-Channel Flow, J. of Fluid Mechanics, Vol. 130, pp.13~26, 1983

(10) Z.P. Zaric, Thermal Effluent Disposal from Power Generation, pp.133~149, Hemisphere, London, 1978

(11) D.R. Boyle and M.W. Golay, Measurement of a Recirculating, Two-Dimensional, Turbulent Flow and Comparison to Turbulence Model Predictions. II: Transient Case, Trans. ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 105, pp.447~454, 1983

(12) P.R. Moran, A Flow Velocity Zeugmatographic Interlace for NMR Imaging in Humans, Mag. Res. Imaging, Vol. 1, pp.197~203, 1982

(13) Z.H. Cho, S.J. Lee and M.K. Chung, A New

- Fast NMR Flow Velocity Imaging, Submitted to Applied Physics, 1985
- (14) Z.H. Cho et al., Fourier Transform NMR Tomographic Imaging, Proc. of the IEEE, Vol. 70, No. 10, pp.1152~1173, 1982
- (15) 이상준, 정명균, 문치웅, 조장희, NMR-CT를 이용한 3차원 속도장 측정, KSME 춘계 학술대회 초록집 7-6, 1985
- (16) D. Jeffreys, The Flow of Water in an Inclined Channel of Rectangular Section, Phil. Mag. Ser. A107, p.189, 1925