

정사각 덕트 초임계 상태 이산화탄소 가스 냉각과정 중 2차 유동 특성 측정 연구

한성호* · 최영돈[†] · 서정식* · 김용찬* · 김민수**
(2007년 11월 8일 접수, 2007년 12월 26일 심사완료)

Experimental Study on the Secondary Flow Characteristics of a Supercritical Carbon Dioxide Flow in a Gas Cooling Process Within a Square Duct

Seong-Ho Han, Young-Don Choi, Jung-Sik Seo, Young-Chan Kim and Min-Soo Kim

Key Words: LDV(레이저 도플러 유속계), Supercritical-Point(초임계점), Carbon Dioxide(이산화탄소), Refrigerant(냉매), Gas Cooling(가스쿨링)

Abstract

The carbon dioxide properties change sharply near the critical or pseudo-critical point in the heat transfer processes. The reduction in turbulent, convective heat transfer parameters observed in some supercritical data and in experiments with common gases can be due to property variation, acceleration, buoyancy or combinations of these phenomena, depending on the conditions of the applications. In this study, the measurement for the secondary flow driven by buoyancy was carried out on the supercritical carbon dioxide turbulent flows in the different boundary condition with the constant mass flow rate. The available measuring techniques were used to clarify the behaviour of any supercritical fluid. Laser Doppler Velocimeter (LDV) and a special device was used to measure the secondary velocity and turbulent characteristics of the supercritical flows.

기호설명

D_h : 수력직경
 f_D : 신호 주파수
 \dot{m} : 질량유량
 q : 열유속
 Re : 레이놀즈 수
 ΔT : 온도변화량
 Δt : 시간변화량

U : x 방향 평균속도
 \tilde{u} : x 방향 순간속도
 u' : x 방향 요동속도
 V : y 방향 평균속도
 $\overline{v^2}$: y 방향 레이놀즈응력 텐서
 x : 폭 방향 좌표
 y : 수직 방향 좌표
 z : 주유동 방향 좌표

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : ydchoi@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3355 FAX : (02)928-1067

* 고려대학교 기계공학과
** 서울대학교 기계공학과

1. 서론

지난 10년간 오존층 파괴의 위협 증대에 따라 이산화탄소 초임계 냉동사이클에 대한 관심이 증

대되어 왔다. 특히 최근 초임계 이산화탄소 사이클은 자동차, 에어컨, 히트펌프 온수기 또는 환경제어기 등에 적용되는 대체 기술로 각광을 받고 있다. 특히 이산화탄소는 대기의 성분 물질이기 때문에 대기로부터 분류하는데 드는 에너지 소비를 제외하면 어떠한 지구 온난화 문제도 발생시키지 않는다.⁽¹⁾ 또한 하한계치(TLV, Threshold Limit Value)가 높아서 암모니아에 비해 대기 중에 많은 양이 있어도 인체에 해를 미치지 않으며, 가연성이 없고 가격이 저렴하다. 하지만 시스템의 작동압력이 높고 냉매가 초임계 영역에서 냉각되며, 초임계 냉동사이클을 이루고 있으므로 적절한 요소기기의 설계가 요구된다. 이산화탄소를 작동유체로 할 때 작동 압력이 기존의 증기압축 냉동시스템보다 매우 높으므로 장치의 소형화, 압축효율의 향상 등의 장점을 살릴 수 있다.⁽²⁾

임계점 부근의 열전달(가열, 냉각)과정의 해석 및 실험에서 가장 중요한 사항은 임계점 부근의 열역학적 물성치가 급격하게 변하는 것이다.⁽³⁾ 유체의 비열이 급격하게 커지는 것을 비롯하여 전달 물성인 열전도율도 임계점에서 무한대가 된다. 또한 점성계수도 임계점을 지나면서 급격히 감소하므로 이러한 점을 고려하여 임계점 부근 열전달 특성이 연구되어야 한다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 초임계 상태 이산화탄소 난류유동에서 부력에 의해서 발생하는 2차유동 특성과 유동의 열성층화가 임계점 부근에서 난류 생성과 난류구조 변화에 미치는 영향, 열경계층의 발달 과정을 조사하여 초임계 이산화탄소 열전달 특성 연구의 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 측정 이론

2.1 LDV 측정

LDV 측정기술은 레이저 빔을 이용한 비 삽입식 광학적 측정 방법이다. 유체 내에 흐르는 매우 작은 입자들에 레이저 빔을 투사하면 유체속도와 비례하는 도플러 쉬프트 주파수를 갖는 산란광이 발생하게 된다. 도플러 쉬프트 주파수, f_D 와 순간 속도, \tilde{u} 와의 상관식은 식 (1)과 같

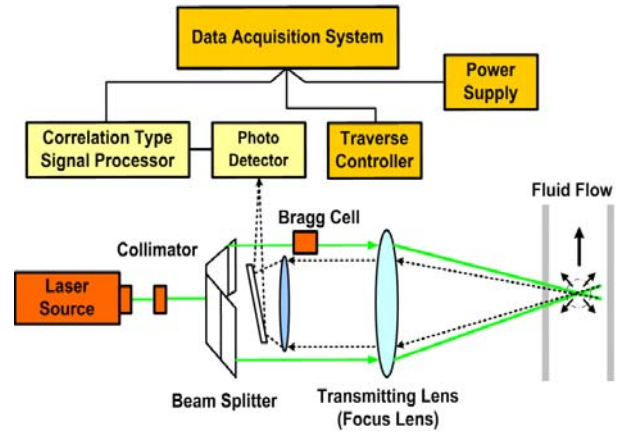


Fig 1 Schematic of LDV system

다.

$$f_D = 2\tilde{u}\sin x/\lambda \quad (1)$$

여기서 λ 는 레이저 파장, x 는 교차하는 레이저 빔의 반각(half angle)이다. 2-성분 이온 LDV 시스템은 Fig. 1과 같이 Dantec 제품이며 측정렌즈의 초점 거리는 400mm이고 레이저 광은 Spectra-physics사의 이온 레이저로써 최대 출력은 6W이다. LDV 시스템은 Fig. 1에서와 같이 레이저 광, Fiber Flow Components, Processor, 이송장치 등으로 구성되어 있다. 측정부위에 대한 이동은 2차원 이송장치를 사용하였다. 이송장치는 최대 690mm까지 이송되며 증가폭은 최소 0.1mm 단위까지 가능하다.

유체가 물일 경우 일반적으로 산란입자를 별도로 추가하지 않아도 함유 물질로부터 산란광을 얻을 수 있으나 본 연구에서는 산란입자 실리콘 카바이드(직경: $1.5 \mu\text{m}$, 밀도: 3.2 g/cm^3)를 첨가하여 더욱 향상된 신호를 얻었다. 실험 간 측정된 data는 50,000개를 120초 동안 수집하였으며 각각의 평균값을 취하게 된다. Photomultiplier로부터 온 신호는 상관 방식 분석장치(Correlation Type Processor)로 분석하였으며 주파수 여과장치, 증폭기, 디지털 출력기, D/A 변환기 등으로 이루어 졌다.

2.2 자료 처리 방법

속도는 식 (2)와 같이 평균값과 편차값으로 나누어서 계산한다.

$$\tilde{u} = U + u' \quad (2)$$

이때 평균 속도성분과 요동 속도성분, 요동속도의 RMS 값은 다음과 같이 정의된다.

가. 평균 속도성분

$$U_{weighted} = \frac{\sum \tilde{u}_i \Delta t_i}{\sum \Delta t_i} \quad (3)$$

여기서 $i = 1, 2, 3 \dots N$ 이다.

나. 요동 속도 성분

$$u' = \sqrt{\frac{\sum (\tilde{u} - U)^2 \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}} \quad (4)$$

다. RMS 값

$$\sigma = \sqrt{u'^2} \quad (5)$$

RMS 값인 σ 는 유동장에서 측정되는 자료의 요동속도 성분의 곱에 제곱근으로 나타낼 수 있다.

2.3 실험 장치

실험 장치는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 마그네틱 기어펌프, 질량유량계, 예열부, 시험부, 열교환기, 수액기와 냉매량 조절탱크 등으로 구성되어 있다. 먼저 시스템으로 냉매를 주입시키고 어느 정도 압을 올리는 작업을 수행한다. 그 다음 바이패스를 통하여 냉매의 온도를 떨어뜨린 다음 다시 바이패스를 잠그고 시스템 전체로 냉매를 순환시킨다. 냉매의 주 순환은 마그네틱 기어 펌프에 공급되는 직류 전압의 조절에 의해서 조절 되고, 과냉 상태의 냉매유량은 마그네틱 기어 펌프를 지나 질량유량계에 의해 측정되어지며 냉매의 온도를 높이기 위해서 시험부로 들어가기 전 7개의 예열부에 냉매가 흐르는 방향과 반대 방향으로 예열된 물을 순환시킨다. 이 예열부는 이중 관으로 구성되어 있어서 안으로는 냉매가 흐르고 바깥 부분은 물을 순환시키게끔 되어 있다. 질량 유량계를 지난 액상의 냉매는 예열 과정을 거치



Fig. 2 Experimental apparatus

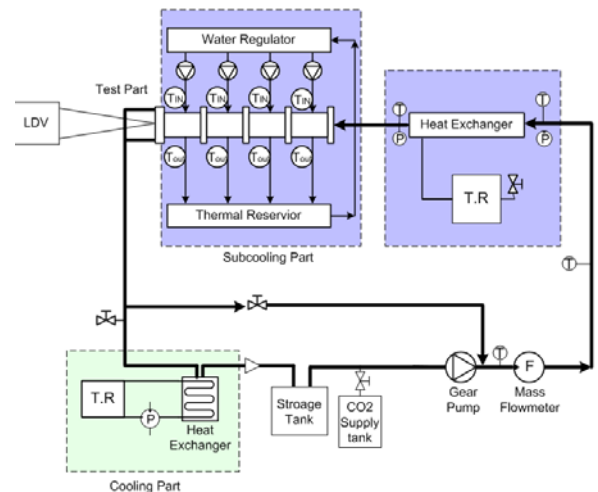


Fig. 3 Schematic of experimental setup

면서 온도가 높아지고 실험 조건에 맞는 초임계 상태가 된다. 시험부 입구에 초임계 상태로 들어온 냉매는 2차 유체인 물과 열교환하며 가스냉각 과정을 거친 후 수액기로 들어간다. 수액기에서 나온 액상의 냉매는 열교환기에서 더 냉각되어 과냉 상태의 액상으로 다시 펌프로 흐르게 하는 시스템이다. Fig. 3은 시스템 구성도에서 7개의 예열부(subsection)를 하나의 일부분으로 간주하고, 냉각시키는 부분과 예열하는 부분을 간략하게 나타낸 그림이다.

초임계 과정의 압력은 100기압에 이르므로 예열기 이후의 압력을 제한하기 위해 릴리프 밸브를 이용, 안전장치를 추가로 설치하였으며, 기체 냉각 과정에 대한 열전달 특성을 실험적으로 구

한다. 기어펌프는 액체 이산화탄소 유동의 구동력을 공급하고 질량유량계로 유량을 측정한다. 다음 예열부로 압력을 상승시킨다. 이는 히터로 압력을 상승시키는 것보다 더욱 안정된 상태를 유지할 수 있으며 예열부의 온도는 항온조를 이용하여 일정한 온도를 유지시켰다. 냉각부는 2중 중심 원관식 대향류 열교환기로 되어 있으며 시험부에 이산화탄소 가스가 들어가기 전에 적당한 온도로 냉각시켜준다. Fig. 4에서 유입덕트는 시험부와 같이 SUS 실린더에 중심부를 가공하여 4벽이 단열된 시험부와 동일한 유로를 형성하여 시험부로 유동이 유입되기 전에 완전발달 되게 한다. 유입덕트 전에는 여러 U밴드를 통해 유동을 안정시키는 정류상자가 설치되어 있다.

2.4 시험부

시험부는 4개의 독립된 열교환기로 구성되어 있다. 그 단면은 Fig. 5와 같이 가공된 SUS봉에 고온 고압에도 변형이 없는 단열재 울템(ulitem)을 삽입하여 상하벽을 단열시킨다. 울템의 크기를 조절하여 시험부 단면형상을 정사각형과 임의 종횡비의 직사각단면 유로를 형성한다. 시험부 유로 양측에 각 4개씩의 유로를 가공하여 냉각수가 이산화탄소 유동과 대향류로 흐르게 하여 초임계 이산화탄소 유동을 냉각시킨다.

각 벽면에서 일정 열유속 조건은 4개의 시험부 열교환기에서 냉각수 질량유량을 $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_4$ 라 하고 열교환기에서의 온도차를 $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4$ 라 하며 냉각수의 비열을 일정하다고 할 때 $\dot{m}_1 \Delta T_1 = \dot{m}_2 \Delta T_2 = \dot{m}_3 \Delta T_3 = \dot{m}_4 \Delta T_4$ 의 조건을 냉각수 유량 조절로 맞추어 실현한다.

Fig. 6과 같이 4각 시험부와 마주보게 설치된 2-Color LDV를 시험부 끝단에 설치된 창을 통해 쏘아서 벽면 열전달에 의해서 발생한 2차유동분포와 난류특징을 측정한다. LDV의 초점은 시험부 유로 출구면에 위치시키고 출구면을 Scanning 하면서 2차유동속도와 난류성분을 측정한다.

LDV 창은 지름 2cm, 두께 1.5cm 강화유리로 구성되어 있고 그 형상은 Fig. 7과 같다. 본 실험장치를 구성하고 있는 질량유량계, 입출구 압력계, 냉각수 유량계, Thermocouple의 제



Fig. 4 Experimental apparatus of test section

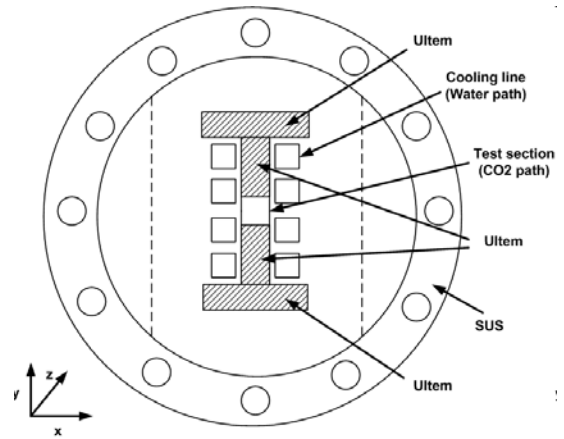


Fig. 5 Schematic of test section

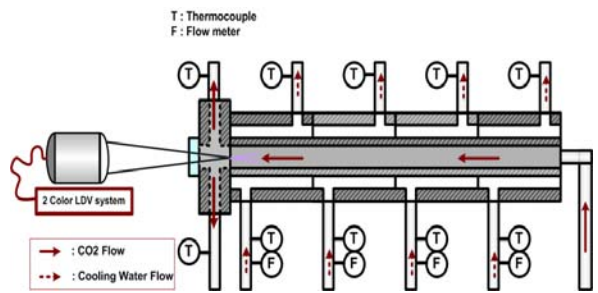


Fig. 6 Schematic of cooling part

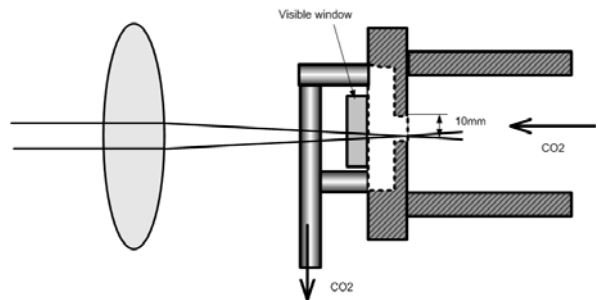


Fig. 7 Schematic of visible region

Table 1 Specifications of measurement device

	Location	Manufacturer	Model No.	Accuracy
Mass flow meter	liquid, vapor CO ₂	OVAL corporation	CN006	± 0.1%
Liquid turbine meter	water cooling	INVALCO	FMC46021397	± 0.05%
Pressure transducer	vapor CO ₂ inlet	Setra	280E	± 0.11 %
Pressure transducer	vapor CO ₂ outlet	Setra	C206	± 0.13 %
Thermocouple	test section	Omega Engineering Inc.	T type	0.5 °C or 0.4 %

원은 Table 1과 같다.

2.5 냉각 시스템

시험부를 일정 열유속 냉각조건을 만족시키기 위한 냉각 시스템은 Fig. 8(a)와 같다. 항온조에서 일정온도의 냉각수를 공급하면 펌프와 유량계를 통과한 후 2개의 볼유량계로 같은 유량으로 배분하여 시험부 양쪽면의 유로로 공급된다.

시험부에는 각 4개의 유로가 있고 4개의 유로의 분배는 Fig. 8(b)와 같은 분배관으로 동일유량으로 분배시킨다.

유량계는 시험부 열교환기 입구전에 설치하고 시험부 열교환기를 통과 직전과 직후 온도차를 측정하여 냉각수 시스템의 온도, 유량의 조절로 일정 열유속의 크기를 조절할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 조건

입구길이 변화에 따른 냉각과정의 유동 속도의 변화를 측정하기 위해서 Fig. 9와 같이 초임계 이산화탄소의 압력, 이산화탄소의 유량, 열유속 조건의 변화시키며 실험을 수행하였다. 이산화탄소의 초임계압력은 7.353 MPa이며 초임계온도는 31.05°C 이다. 따라서 초임계영역의 조건을 맞추기 위해 본 실험에서의 평균 입구온도는 43.082 °C, 평균 입구 압력은 7.53 MPa로 설정하였고 이 경우의 밀도와 점성계수는 640.6 kg/m³, 19.49 × 10⁻⁶ kg/m · s, 레이놀즈 수는 6555의 값을 가지게 되어 난류영역이 된다.

이산화탄소의 압력을 높이기 위해서 액상의 냉

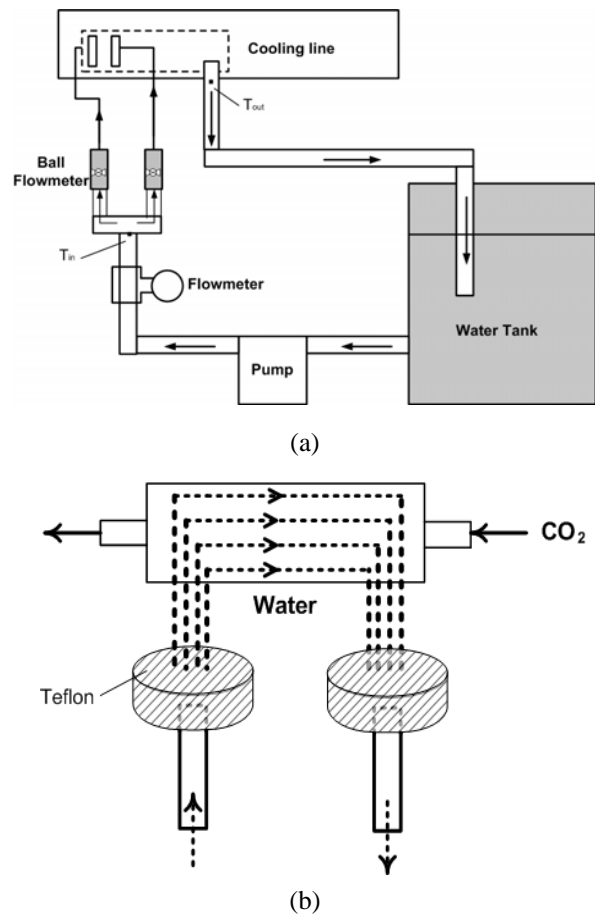


Fig. 8 Schematic of cooling water line

매를 항온조와 연결된 예열부를 통해 이산화탄소 온도를 증가시켜 실험 조건에 맞는 임계상태로 만든다. 이때 이산화탄소의 온도는 입구압력이 일정하게 될 때까지 항온조의 온도를 조정하여 설정하게 된다. 따라서 Fig. 9에서 입구압력의 값들이 다소 차이가 나는 것은 입구압력을 일정하게 유지시키기 위해 진행된 과정에서 차이가 나

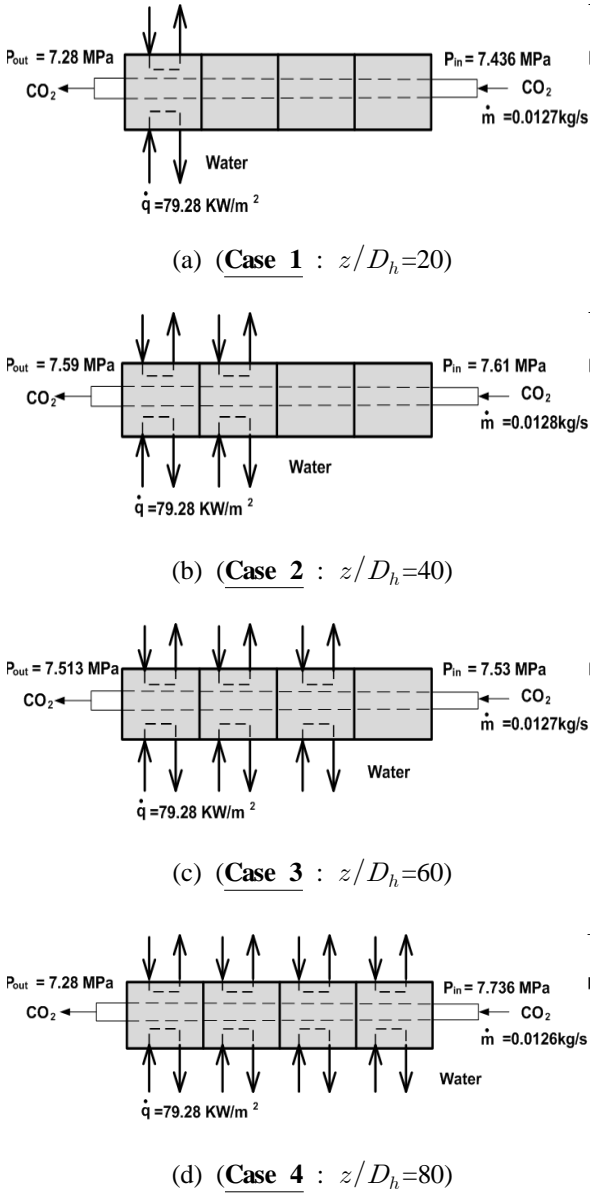


Fig. 9 Schematic of completed test cases

타나게 된다. 1초 간격으로 받는 다채널 기록계의 이산화탄소 유량의 표준편차는 0.0002 kg/s 이하, 입구압력과 출구압력의 표준편차가 1 bar 이하, 입구 온도의 표준편차가 $0.2^\circ C$ 이하일 때를 정상상태로 가정하였다.

3.2 2차유동 분포 측정

Fig. 10은 입구압력과 입구온도 및 이산화탄소 유량이 동일한 조건에서 입구길이 변화에 따른 초임계 이산화탄소의 2차유동 속도 분포이다. 벽면에서 냉각에 의해 이산화탄소의 밀도가 급격히

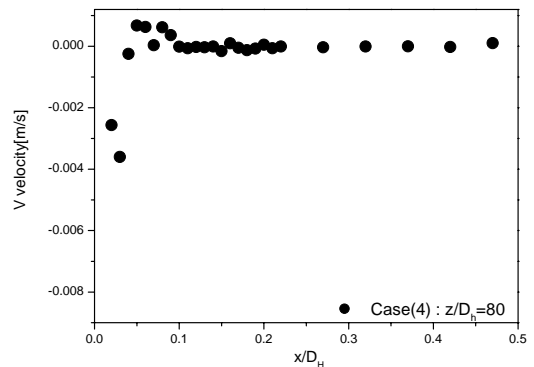
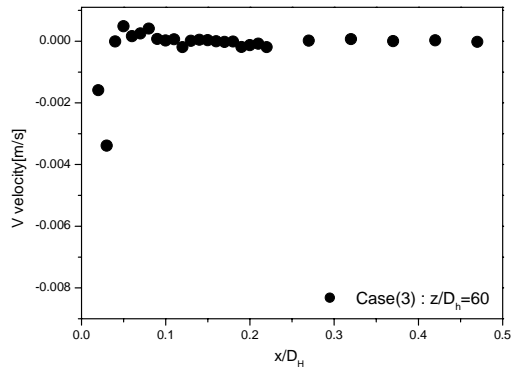
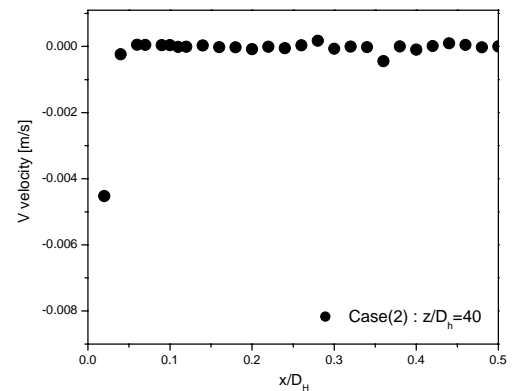
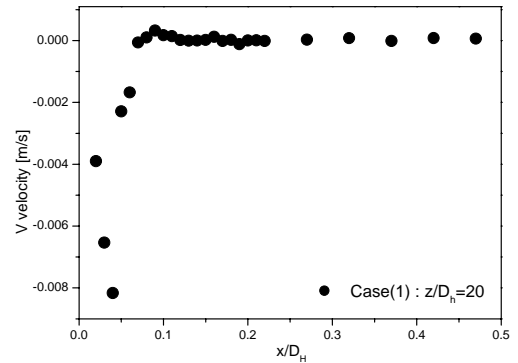


Fig. 10 Distributions of v velocity

증가하여 벽면을 따라 강하하는 2차유동이 생기 것을 확인할 수 있다. 그러나 2차유동 속도가 유동이 진행함에 따라 감소하는 것은 가스 상태의 이산화탄소가 액체 상태로 변하기 때문이다.

본 실험 결과 2차유동은 벽면 인접부에서 경계층 형태로 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. $z/D_h = 20$ 에서는 음방향 V 속도의 최고속도가 0.008 m/s에 도달하다가 $z/D_h = 40$ 에서 0.0045 m/s로 감소하고 $z/D_h = 60$ 에서 0.0035 m/s로 감소한 후 더 이상 감소하지 않는다. 이것은 초임계 이산화탄소가 벽면 냉각과정에서 급속히 밀도가 증가함으로써 일어나는 것이고 임계점을 지난 후 밀도 증가가 둔화되기 때문이다.

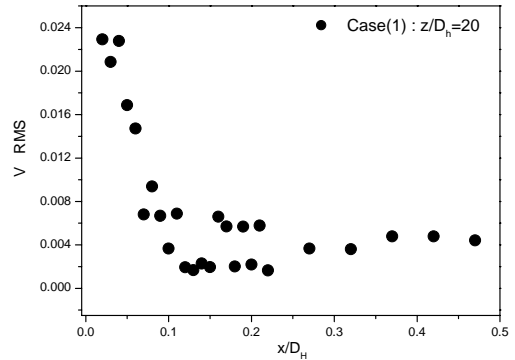
3.3 RMS 측정

Fig. 11은 입구길이 변화에 따른 초임계 이산화탄소의 RMS 분포이다. 유동분포에서는 유동이 진행함에 따라 유동의 속도가 감소하는 결과를 나타냈다. 하지만 초임계 이산화탄소의 유동은 벽면에서 냉각과정이 발생하는 동안 벽면에서의 밀도변화는 급격하게 일어나 2차유동의 강도는 더욱 커지게 된다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 최대 RMS의 값은 유동이 진행될수록 작아지지만 벽면부근에서의 RSM 값은 더욱 커지는 결과를 나타내고 있다. 이것은 벽면 부근에서의 2차유동 강도가 더욱 커지는 것으로 설명되어 질 수 있다. 특히 RMS의 평균값을 취해보면 $z/D_h = 80$ 일 때 가장 크게 나타나 유동이 진행될수록 밀도 변화에 의한 2차유동의 강도가 커지는 것을 잘 나타내고 있다.

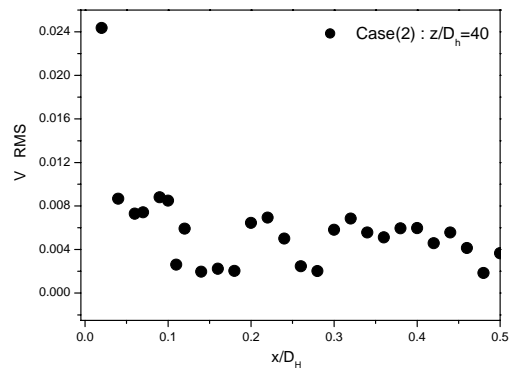
Fig. 12는 입구길이 변화에 따른 RMS와 수치해석의 결과를 비교한 그림이다. 여기서 RMS 값은 유동의 요동 성분으로 수치해석에서 레이놀즈 응력(Reynolds stress) 값으로 나타내어질 수 있다.

수치해석의 경우 질량유량(\dot{m}) = 0.0127 kg/s, $q = -80,000 W/m^2$, 일 때 좌우 벽면에서 열유속이 일어나는 동일한 입구압력과 입구온도 조건에서 수치해석을 수행하였고 수치해석에 관한 내용은 참고문헌으로 남긴다.⁽⁵⁾

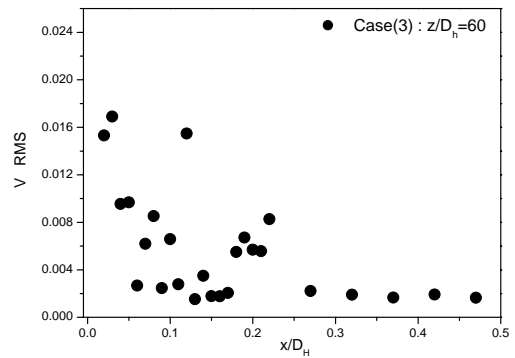
Fig. 12 (a)에서는 수치해석 결과와 실험 결과가 다소 차이가 나는데 이는 수치해석에서는 완전 발달되었다고 가정하였기 때문에 생기는 것이다. 실험에서는 냉각되는 부분이 Fig. 9(a)와 같이



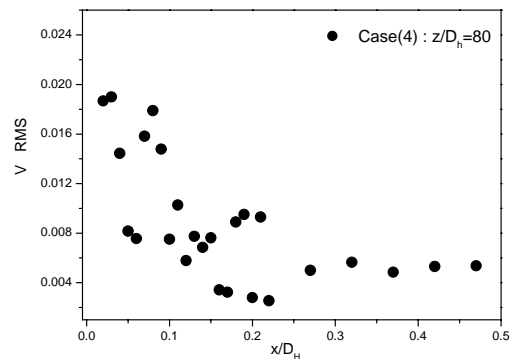
(a) (Case 1 : $z/D_h=20$)



(b) (Case 2 : $z/D_h=40$)



(c) (Case 3 : $z/D_h=60$)



(d) (Case 4 : $z/D_h=80$)

Fig. 11 Distributions of RMS

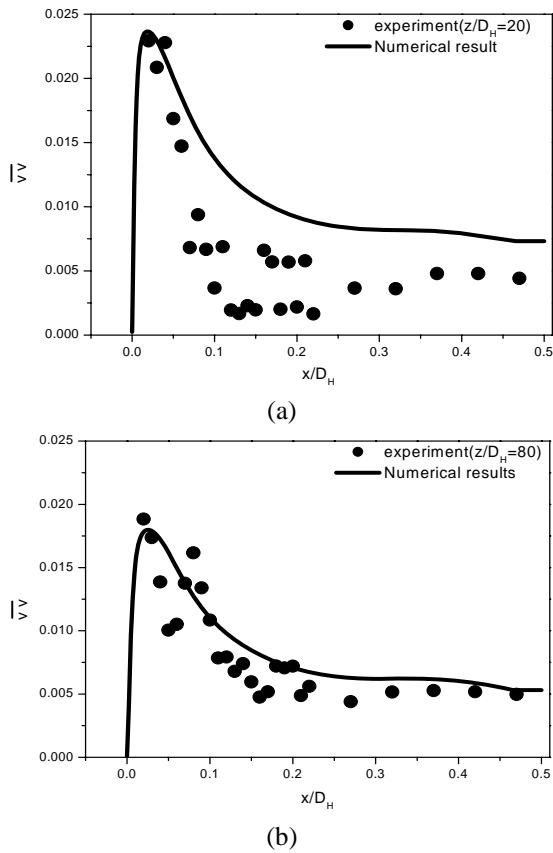


Fig. 12 Comparison between experimentally measured and numerically predicted Reynolds stress $\overline{v^2}$

유동이 완전 발달하지 못하게 되어 수치해석 결과와 차이가 나는 값을 예측한다. 하지만 $z/D_h = 80$ 인 유동이 완전 발달될 경우에는 수치해석과 실험 결과가 동일한 경향을 나타낸다.

4. 결론

정사각 단면을 갖는 초임계 상태 이산화탄소 난류유동의 냉각과정 2차유동 분포를 입구길이를 변화시키며 LDV로 측정된 결과 벽면에서 냉각에 의해 이산화탄소의 밀도가 급격히 증가하여 벽면을 따라 강하하는 2차유동이 생기는 것을 확인하였다. 그러나 2차유동 속도가 유동이 진행함에 따라 감소하는 것은 가스 상태의 이산화탄소가 액체 상태로 변하기 때문이며 본 실험결과 2차유동은 벽면 인접부에서 경계층 형태로 발생한다는 것을 확인 할 수 있었다.

음방향 V 속도의 최고속도는 입구길이 변화에 따라 감소한 후 더 이상 감소하지 않았으며, 이것은 초임계 이산화탄소가 벽면 냉각과정에서 급속히 밀도가 증가함으로써 일어나는 것이고 임계점을 지난 후 밀도 증가가 둔화되기 때문에 나타난 결과이다.

유동이 진행될수록 2차유동의 속도는 작아지지만 벽면 부근에서의 밀도변화는 증가하게 되어 2차유동의 강도는 커지게 되는 것을 실험결과로 확인할 수 있었다.

후 기

본 과제는 한국과학재단 특성기초 연구과제 (R01-2003-000-10571-0)으로 수행된 것이며 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Lorentzen, G., 1994, "The Use of Natural Refrigerants: A Complete Solution to the CFC/HCFC Replacement," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 18, No. 3, pp. 190~197.
- (2) Pettersen, J., Hanfner, A., Skaugen, G. and Rekstd, H., 1998, "Development of Compact Heat Exchangers for Co2 Air-Conditioning Systems," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 21, No. 3, pp. 180~193.
- (3) Hwang, Y. and Radermacher, R., 1998, "Theoretical Evaluation of Carbon Dioxide Refrigeration Cycle," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 4, No. 3, pp. 245~263.
- (4) Srinivas, S. P., Eckhard, A. G. and Satish R., 2001, "Convective Heat Transfer from In-tube Cooling of Turbulent Supercritical Carbon Dioxide: Part 2-Experimental Data and Numerical Predictions," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 7, No. 4, pp. 367~382.
- (5) Han, S. H., Choi, Y. D., Seo, J. S. and Shin, J. K., 2007, "Compressibility Factor Effect on the Turbulence Heat Transfer of Super Critical Carbon Dioxide by an Elliptic-blending Second Moment Closure," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 31, No. 1, pp. 40~50.