

미세사각채널에서 CO₂의 이상유동 양식에 관한 연구

김용찬[†] · 윤 린* · 정진택**

Two-Phase Flow Patterns of CO₂ in a Heated Narrow Rectangular Channel

Yongchan Kim, Rin Yun, and Jin Taek Chung

Abstract. The heat transfer and pressure drop characteristics of CO₂ are substantially different from those for CFC and HCFC refrigerants. In addition, geometric effects on two-phase flow patterns of CO₂ are also very significant in many respects. Therefore, two-phase flow patterns of CO₂ in a narrow rectangular channel or a small diameter tube whose gap size or hydraulic diameter is less than 2 mm are very important to understand heat transfer characteristics and to develop an appropriate heat transfer correlation. In the present study, the evaporation process of CO₂ in a narrow rectangular channel is visualized at various test conditions, and then the effects of operating conditions are analyzed.

Key Words : Two-phase flow pattern(이상유동 양식), Narrow rectangular channel(미세사각채널), CO₂(이산화탄소), Flow visualization(유동가시화)

기호설명

- G mass flux, kg/m²s
- j superficial velocity
- q heat flux, kW/m²
- T_c saturation temperature, °C
- x vapor quality
- ρ density, kg/m³

1. 서 론

CO₂는 기존의 CFC 혹은 HCFC냉매와 열전달 특성이 매우 다르다. CO₂의 증발열전달계수는 기존 냉매에 비해 2-3배가량 높고, 비교적 낮은 건도 영역에서 액막의 깨짐현상이 발생한다. 또한, CO₂의 압력강하는 매우 작게 나타나는데, 이와 같은 CO₂의 증발특성을 설명하기 위해서는, CO₂의 이상유동 양식을 파악하는 것이 반드시 필요하다. 알려진 바와 같이, 기포생성의 특성으로부터 핵비등 열전달을 설명할 수

있고 액막의 형태는 흐름비등 열전달과 밀접한 관련을 갖는다. 미세관 혹은 미세채널에서 이상유동 양식이 큰 내경의 관내 이상유동 양식과 큰 차이를 보이는 사실은 기존 연구를 통해서 알려졌으나, 아직까지 큰 내경을 가진 관에서의 이상유동 양식에 관한 연구로 초점이 맞추어져 있다. 따라서, 고발열체의 전자장비 냉각이나 평판형 원자로의 연료 냉각을 위해서는 미세사각채널에서의 이상유동 양식에 관한 연구가 필요하다. 특히, 작은 채널 크기로 인해 기포의 원활한 생성 및 성장이 제한받게 되는데, 이 점이 미세관과 큰 내경의 관에서 이상유동 양식의 차이를 주는 주요한 원인이다.

미세유로에서 이상유동 양식에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Mishima등은⁽¹⁾ 미세사각채널에서 물과 공기의 혼합물을 이용하여 이상유동양식을 고찰하였다. 미세사각채널의 높이는 각각 1.0, 2.4, 그리고 5.0 mm이고, 미세채널의 영향으로 기포류에서 납작하거나 눌린 형태의 기포가(pancake shape and crushed cap bubbles) 발견되었다. 또한, 채널 높이가 1.0 mm로 감소하는 경우에 처언류(churn flow) 영역이 감소하거나 사라지는 현상도 관찰되었다. Fujita등은⁽²⁾ 큰 내경의 채널과 비교해서 미세채널 내의 이상

[†]고려대학교 기계공학과

E-mail : yongckim@korea.ac.kr

*고려대학교 공학기술연구소

**고려대학교 기계공학과

유동양식은 표면장력과 액상의 점성에 큰 영향을 받는다는 내용을 실험적연구를 통해 제안하였다. Wilmarth와 Ishii⁽³⁾는 수직 및 수평 이상유동 양식을 역시 미세사각채널에서 물과 공기의 혼합물을 이용하여 관찰하였다. 그들은 미세사각채널에서의 이상유동 양식을 크게 기포류, 슬러그류, 환상류로 분류하였고 기존의 이상유동 양식 천이모델들과의 비교를 통해, 기포류에서 슬러그류의 천이가 Mishima 와 Ishii의 모델과 잘 일치함을 설명하였다. Xu⁽⁴⁾는 각각 0.3, 0.6, 그리고 1.0 mm의 채널 높이를 갖는 수직방향 미세채널에서 이상유동 양식을 고찰하였다. 그의 연구에 따르면 채널높이가 감소할수록 기포류 - 슬러그류, 슬러그류 - 환상류로의 천이가 보다 낮은 겉보기 (superficial) 기체속도에서 발생하였다. 지금까지의 연구 결과 중 미세사각채널에서 CO₂의 유동양식에 관한 연구는 매우 드물 뿐 아니라, 대부분의 유동양식에 관한 연구가 단열조건에서 물과 공기로 수행되었다. Bergles등이⁽⁵⁾ 언급했듯이 가열조건에서의 이상유동 양식과 단열조건에서의 그것은 본질상 크게 다르게 나타난다.

본 연구의 목적은 가열조건 시 미세사각채널에서 CO₂의 이상유동 양식을 고찰하는데 있다. 특히, 건도 및 질량유속에 따른 이상유동 양식의 변화, 그리고 R-22의 유동양식과의 다른점 등을 관찰하였다. 본 가시

화의 결과들은 미세채널에 CO₂의 열전달 및 압력강하 특성들을 해석하는데 기본 자료를 제공할 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험부 및 가열방법

Fig. 1의 (a)와 (b)는 유동가시화를 위한 시험부를 나타낸다. 시험부는 크게 3부분으로 나눌 수 있는데 바닥몸체와 위몸체, 그리고 강화유리로 구성되었다. 바닥몸체에 폭 16 mm, 깊이 2 mm의 사각채널을 가공하였고, 두꺼운 강화유리가 미세사각채널 위에 설치될 수 있도록 위몸체와 바닥몸체를 설계하였다. 시험부는 5 MPa이상의 고압을 견뎌야 하기 때문에 바닥몸체와 위몸체는 스테드(stud)볼트와 너트를 사용하여 강하게 고정시켰다. 또한 열적으로 바닥몸체와 위몸체를 분리하기 위해서 스테드볼트 주위에 원통형의 단열봉을 삽입하였다. 시험부의 입구와 출구는 Fig. 1(a)와 같이 바닥몸체를 가공한 후 외경 12.7 mm의 튜브를 용접하였다. 시험부에 열을 가하기 위해서, 길이 75 mm, 외경 5.98 mm, 그리고 100 W용량의 카드리지 히터를 바닥몸체에 설치하였고, 균일한 열유속조건을 유지하기 위해서 동일한 간격으로 이들을 배치하였다.

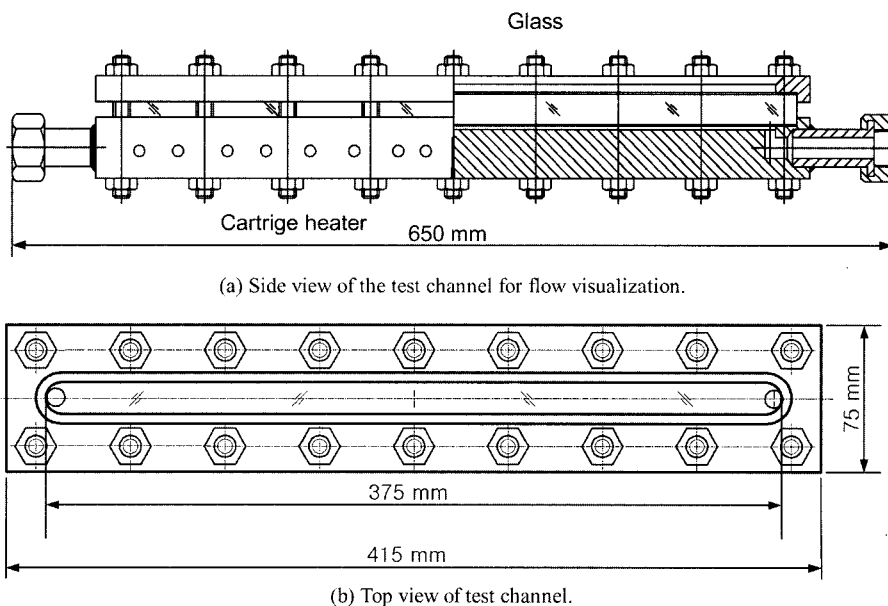


Fig. 1. Side and top view of test channel.

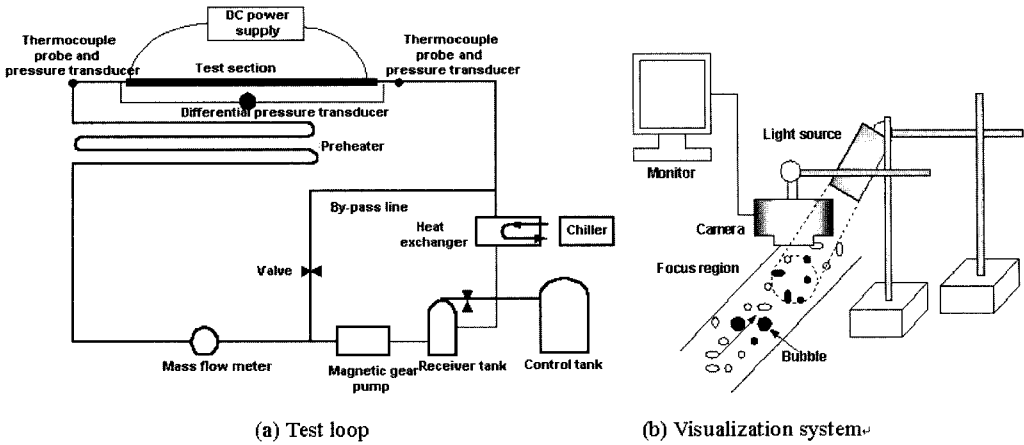


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

2.2 실험장치

Fig. 2(a)는 유동가시화를 위한 실험장치를 나타낸다. 시험장치는 크게 마그네틱 기어펌프, 질량유량계, 예열기, 가시화부, 냉매량 조절 탱크, 그리고 응축부로 구성되어있다. 기어펌프는 시험부 내에 CO₂를 순환시키고, 예열기는 가시화부 입구의 CO₂의 건도를 조절한다. 가시화부를 통과한 이상상태의 CO₂는 응축부를 지나면서 완전히 과냉상태가 되고 다시 기어펌프를 통해 시험장치를 순환하게 된다. 시험부에서 CO₂의 증발압력은 응축부 내 이차유체의 온도와, 냉매량 조절탱크를 통한 시험부 내부의 냉매량을 통해 조절하였다.

2.3 가시화방법 및 측정값의 불확실도

가시화부 입구에서의 CO₂는 과냉액체 혹은 이상상태이고, 이는 예열기를 통해 조절하였다. 카메라가 위치한 부분에서 정확한 건도를 측정하기 위해서는 채널 내의 CO₂에 실제로 전달된 열량을 측정하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 CO₂를 과냉상태로 유지한 채 이의 시험부 입출구 엔탈피 변화와 카트리지 히터에 공급된 열량과 비교하여 실제 CO₂에 공급된 열량을 산출하였다. 히터로 공급된 열량 중 실제 84%의 열량이 미세사각채널 내의 CO₂로 공급되었으며, 이는 채널 내의 CO₂의 건도를 계산하는데 사용하였다. 가시화부는 크게 Fig. 2(b)와 같이 카메라와 광원, 그리고 가시화채널로 구성되어있다. Table 1은 본 시험에 사용된 카메라와 광원의 사양을 나타낸다. 광원은 카메라의 뒤편에, 카메라는 가시화채널에 수직으로 설치하였다. 광원은 스트로보와 같이 0.7 μs의 주

기를 갖고 발광하였고, 이 순간에 카메라는 셔터가 눌러있는 동안 연속적으로 사진을 찍도록 하였다. 카메라와 가시화채널과의 거리, 그리고 광원의 강도는 액막과 기포를 기준으로 가장 선명한 영상을 얻을 수 있도록 조절하였다. 카메라에서의 기포와 기체의 동적 영상은 확대된 이미지로 모니터를 통해 관찰하였고, 외부 빛의 영향을 최소화하기 위해 암실과 같은 환경에서 실험을 수행하였다. Table 2는 본 실험의 주요 변수인 포화온도, 질량유속, 열유속, 그리고 건도의 변화를 나타낸다.

Table 3는 본 실험에서 주요 측정값들의 불확실도를 나타낸다. 불확실도는 Moffat이⁽⁶⁾ 제시한 RRS 방법을 통해 계산하였고, 95% 신뢰구간에 위치한 실험

Table 1. Specifications of camera and shout duration light source

Items	Specifications
CCD	1/1.8-in. high density CCD
Lens	4x Zoom-Nikkor, f=8-32, F2.6-5.1
Shooting distance	0.02 m - ∞
Flash lamp	Xenon flash lamp (Max. = 7 W)
Light duration of the flash	0.7 μ second

Table 2. Test conditions

Test parameters	Values
Saturation temperature	5°C
Mass flux	217 - 1302 kg/m ² s
Heat flux	0 - 250 kW/m ²
Vapor quality	0.0 - 1.0

Table 3. Parameters and estimated uncertainties

Parameters	Uncertainty
Temperature	±0.1°C
Pressure	±2.1 kPa
Mass flow of refrigerant	±0.2%
Heat transfer rate of test section	±5%
Vapor quality at the test section	±0.04

조건에서 계산한 불확실도를 평균한 값이다.

3. 결과 및 토의

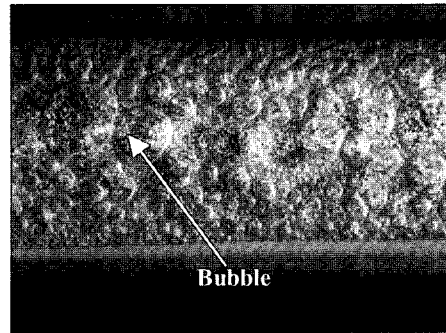
3.1 미세사각채널 내 유동양식의 분류

미세사각채널의 폭과 깊이의 비가 본 시험부와 같이 큰 경우에 이상유동 양식의 특징은 폭방향 및 길이방향으로 크게 나타나나, 길이방향으로는 큰 특성을 나타내지 못한다 (Xu⁽⁴⁾). 따라서, 본 연구에서의 이상유동 양식의 특징은 폭방향과 길이방향에 따른 기포와 액막의 변화로 결정하였다. 본 가시화 실험을 통해 이상유동 양식을 크게 기포류, 슬러그류, 그리고 환상류로 구분하였고, 각 유동양식에 대한 사진과 그림은 Yun and Kim⁽⁷⁾에 자세히 나타내었으며 본 논문에서는 각 유동양식의 특징을 설명하였다.

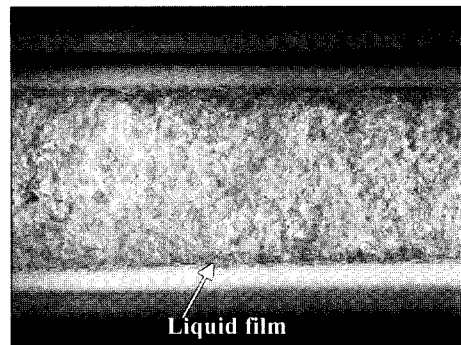
기포류(bubbly flow): 일반적으로 채널의 바닥과 양 측면에서 기포가 발생하고 성장한다. 채널의 양 측면에는 산발적으로 작은 크기의 기포가 분포하는 반면, 채널의 중앙에는 상대적으로 큰 크기의 기포가 위치하는데 이는 채널벽면에서 떨어진 작은 기포들이 비교적 속도가 빠른 채널 중앙으로 모여 서로 합쳐졌기 때문이다.

간헐류(Intermittent flow): 이 유동은 다양한 크기의 기포들이 촘촘히 채널전체를 차지하는 것으로 특징지을 수 있다. 채널 중앙에는 비교적 큰 크기의 기포들이 합쳐져서 길고 더욱 큰 기포를 형성하나 채널 깊이의 제한으로 인해 납작하게 늘린 형태를 가진다. 또한 채널벽면에는 액상과 작은 기포들이 서로 혼합된 복잡한 형태를 취하고, 채널중앙의 기체와 채널 벽면의 액과 기포의 혼합물의 경계는 매우 복잡한 형태를 나타낸다.

환상류(Annular flow): 이 유동은 채널중앙에 위치한 기체상과 채널벽면의 액막으로 구성된다. 일정 건도 이상에서 증발이 진행될수록, 채널중앙의 기체영역은 점점 증가하고 채널벽면의 액막이 서서히 나타난다. 마침내, 채널벽면에 위치하던 비교적 큰 기포들



(a) Flow pattern of CO₂
(G = 217kg/m²s, x=0.01, T_c = 5 °C).



(b) Flow pattern of CO₂
(G = 217kg/m²s, x=0.14, T_c = 5 °C).

Fig. 3. Effect of vapor quality on flow pattern.

이 기체영역으로 모두 흡수되고 기포의 생성으로 대표되는 핵 비등은 점점 억제된다. 또한, 액막표면에서의 기포의 터짐과 불규칙한 액막의 요동에 의해 작은 크기의 액적은 채널중앙의 기체영역에 계속해서 유입되게 된다.

3.2 건도에 따른 유동양식의 변화

Fig. 3(a)와 (b)는 질량유속이 217 kg/m²s, 증발온도가 5°C일 때 건도에 따른 대표적인 유동양식을 나타낸다. 건도의 증가에 따라 기포류에서 간헐류로, 간헐류에서 환상류로의 유동양식 전이를 관찰할 수 있는데, Fig. 3(a)와 같이 0.1이하의 낮은 건도에서는 기포류 및 슬러그류 형태가 나타난다. 이에 반해, 건도가 0.1이상에서는 간헐류와 환상류의 경계유동이 나타나다가, Fig. 3(b)와 같이 0.14이상의 건도에서는 채널중앙이 기체로 채워졌으며 벽면 부근에서 액상과 기체가 섞여있는 환상류가 나타난다.

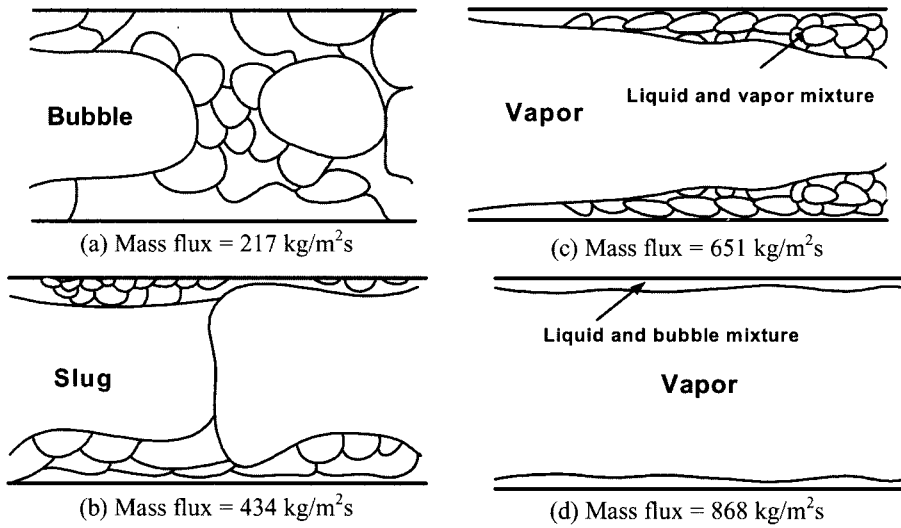


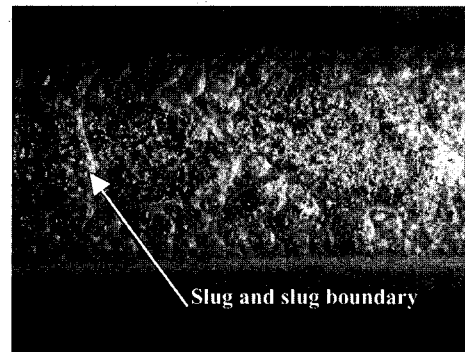
Fig. 4. Schematics of flow patterns with increase of mass flux ($q = 100 \text{ kW/m}^2$, $T_e = 5^\circ\text{C}$, $x = 0.18$).

3.3 질량유속에 따른 유동양식의 변화

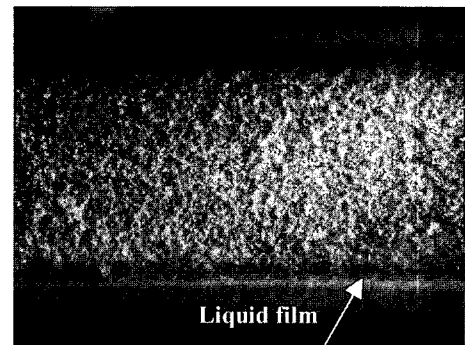
Fig. 4의 (a-d)는 질량유속에 따른 CO_2 의 유동양식을 나타낸다. 질량유속은 217에서 $868 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 변화시켰고, 열유속은 100 kW/m^2 로, 증발온도는 5°C 로, 건도는 0.18로 고정하여 시험하였다. Fig. 4에 도시한 바와 같이 질량유속이 증가할수록 채널 중앙의 기체 영역은 점차 증가하고 채널 벽면에서의 액막은 뚜렷이 나타나게 된다. 일반적으로 질량유속이 증가할수록 기포류에서 슬러그류로, 슬러그류에서 환상류로의 유동양식의 천이가 보다 낮은 건도에서 발생한다. 이와 같은 현상은 액적이 액막에서 떨어져 나와 채널중앙으로 활발히 유입되는 과정으로 설명할 수 있는데, 질량유속이 증가할수록 빠른 기체속도로 인해 액막과 기체의 경계가 굉장히 불규칙해 지고, 이에 따라 보다 많은 액적이 기체로 유입되기 때문이라 생각된다.

3.4 CO_2 와 R-22의 유동특성의 비교

Fig. 5(a)와 (b)는 동일한 증발온도, 질량유속, 그리고 건도에서 유체에 따른 유동양식의 변화를 나타낸다. CO_2 의 경우 슬러그류를 나타내나, R-22는 완전히 발달한 환상류를 보여주고 있다. 즉, R-22의 경우가 CO_2 에 비해 보다 낮은 건도에서 유동양식의 천이가 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 증발압력을 변화시키며 수직 사각채널에서 물의 증발현상을 가시화한 Hosler⁽⁸⁾의 실험결과에서도 보여지는데, 기체상과 액체상의 밀도비에 의한 기공률이 압력의 증가에 따라



(a) Flow pattern of CO_2
($G=260 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x = 0.07$, $T_e = 5^\circ\text{C}$).



(b) Flow pattern of R-22
($G = 260 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x = 0.07$, $T_e = 5^\circ\text{C}$).

Fig. 5. Comparison of flow pattern between CO_2 and R-22.

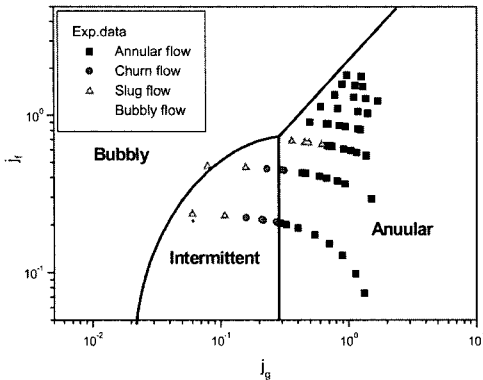


Fig. 6. Flow pattern map with respect to superficial velocity.

감소하기 때문이라 생각된다. 실제로 CO₂와 R-22의 경우 증발온도 5°C에서 액체/기체의 밀도비는 각각 7.85, 50.9이다.

3.6 유동양식 선도

미세사각채널에서 CO₂의 유동양식선도를 걸보기 액체속도(superficial liquid velocity)와 걸보기 기체속도(superficial vapor velocity)를 이용하여 Fig. 6에 나타냈다. 식 (1)은 걸보기 액체속도와 걸보기 기체속도의 정의이며, G는 질량유속, x는 건도, 그리고 ρ_l과 ρ_g는 각각 액체, 기체상태의 밀도를 의미한다. 또한, 처연류와 슬러그류는 간헐류로 분류하여 도시하였다.

$$j_l = G(1-x)/\rho_l, j_g = Gx/\rho_g \quad (1)$$

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 간헐류에서 환상류로의 천이는 j_g가 0.3근처에서 발생하였고, 기포류에서 간헐류 없이 직접 환상류로의 천이는 j_g가 0.3이상 j_l가 0.8 이상에서 관측되었다. 질량유속이 증가함에 따라 기포들은 각각 독립성을 유지하려는 경향이 증가하고, 채널 전체에 촘촘하게 분포한 기포들의 경계가 서서히 없어지면서 기포류에서 환상류로 직접천이가 발생한다. 그러나, j_l 값이 0.8보다 작은 경우에는 액상의 속도가 비교적 작기 때문에 기포들이 보다 쉽게 합쳐질 수 있고, 이에 따라 간헐류가 나타난다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 가열조건 시 폭 16 mm, 깊이 2 mm

의 미세사각채널에서 질량유속은 217에서 1302 kg/m²s로, 열유속은 0 에서 250 kW/m²로, 증발온도는 5 °C로, 그리고 건도는 0.0에서 1.0까지 변화시키며 CO₂의 이상유동 양식을 고찰하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미세사각채널에서 대표적인 유동양식으로 기포류, 슬러그류, 그리고 환상류가 관찰되었다.

2) 건도의 증가에 따라 유동양식의 천이를 확연히 관찰할 수 있었다.

3) 슬러그류에서 환상류로의 천이는 CO₂에 비해 R-22가 보다 낮은 건도에서 발생하였으며, 이는 두 유체의 액상과 기상의 밀도비에 따른 기공률의 차이에서 비롯된다.

4) 질량유속이 증가할수록 액적의 활발한 유입으로 인해 유동양식의 천이는 보다 낮은 건도에서 발생하였다.

5) 기포류의 경우 수직유동이 수평유동에 비해 기포들이 서로 합쳐지기 보다는 독립성을 유지하려고 하며, 환상류로의 천이에 있어서도 수직유동의 경우에는 슬러그류의 발생 없이 기포류에서 직접 천이가 일어나는 현상이 관찰되었다.

6) j_g와 j_l를 축으로 이상유동양식 선도를 나타낼 때, 간헐류 없이 기포류에서의 환상류로의 직접 천이는 j_l가 0.8이상에서 관찰되었고, j_g가 0.3 부근에서 간헐류에서 환상류로의 천이가 발생했다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 특정기초사업 (Grant No. R01-2002-000-00481-0)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Mishima, K., Hibiki, T., and Nishihara, H., 1993, "Some Characteristics of Gas-Liquid Flow in Narrow Rectangular Ducts," Int. J., Multiphase Flow, Vol.19(1), pp.115-124.
- 2) Fujita, H., Ohara, T., Hirota, M., and Furuta, H., 1995, Gas-liquid Flows in Flat Channels with Small Channel Clearance, Proceedings of the 2nd International Conference on Multiphase Flow '95-Kyoto, Kyoto, Japan, pp. IA3-3-IA3-44.
- 3) Wilmarth, T., and Ishii, M., 1994, Two-Phase Flow

- Regimes in Narrow Rectangular Vertical and Horizontal Channels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37(12), pp. 1749-1758.
- 4) Xu, J., 1999, Experimental Study on Gas-Liquid Two-Phase Flow Regimes in Rectangular Channels with Mini Gaps, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 422-428.
 - 5) Bergles, A.E., Goldberg, P., Clawson, L.G., Roos, J., and Bourne, J.G., 1965, Investigation of Boiling Flow Regimes and Critical Heat Flux, NYO-3304-6, U.S. Atomic Energy Commission, Cambridge, Massachusetts.
 - 6) Moffat, R.J., 1985, Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 173-178.
 - 7) Yun, R., and Kim, Y., 2004, Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow of CO₂ in a Heated Narrow Rectangular Channel, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 1259-1270.
 - 8) Holser, E.R., 1968, Flow patterns in high pressure two-phase (steam-water) flow with heat addition, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, Vol.64(82), pp. 54-66.