

수평Y자형 분지관에서 증기-물 이상류의 상분리에 관한 실험적 연구

안 수 환*

(1999년 12월 21일 접수)

Experimental Studies on Phase Separation of Steam-Water Two Phase Flow in Horizontal Y-Branching Conduit

Soo Whan Ahn

Key Words: Steam-Water Two Phase Flow(증기-물 이상류), Phase Separation(상분리), Horizontal 45° Wye (수평 45°분지), Dispersed Bubble Flow(기포류), Pressure Gradient(압력구배)

Abstract

The Characteristics of dividing the dispersed bubble, plug, and slug steam-water flow in the horizontal junctions with horizontal branches have been experimentally investigated. The experimental investigation of the separation phenomena in a 45 ° horizontal wye with equal pipe inner diameter of 25 mm is presented to provide a data base for the development and verification of the analytical models. The phase separation and pressure distribution in the three legs of each test section are obtained through the set of measurements made in the present work. And the dependence of phase separation on different parameters, such as inlet quality and mass flux, is discussed.

1. 서 론

이상류는 많은 동력 플랜트, 화학 플랜트에 관련된 공조 냉동 장치, 보일러, 수냉각형 원자로, 각종 증발기나 증류탑, 응축기 그리고 증기터빈에서 원유를 가열하는 증기배관 등에서 일어나는 주요 과정이다. 따라서 장치나 배관내에서 이상류의 유동 상태를 이해하는 것은 이들 기기의 설계상 매우 중요하다. 특히 배관 장치의 분지에서 일어나는 기액이상유동현상은 복잡한 분지 관을 많이 갖고 있는 냉장고와 같은 가전제품의 응축기나 증발기의 제품 성능에 매우 중요한 영

향을 미친다. 분지관에서 이상류에 관한 문제는 Honan & Lahey,⁽¹⁾ Fouda,⁽²⁾ Whalley & Azzopardi⁽³⁾ 그리고 Collier⁽⁴⁾ 등이 분지 관에서 상분리 현상에 대해 비교적 깊게 연구한 바 있다. 특히 Saba & Lahey⁽⁵⁾는 내경이 38mm인 T형 시험부에서 공기/물 이상류의 상분리 현상에 대해서 실험을 하여 해석 모델을 개발하는데 필요한 기초 자료를 제공한 바 있다. 그 자료는 주로 성층류와 스텝류에 있어서의 공기와 물의 비율과 분지관 입구 압력, 그리고 길이에 따른 압력구배에 대한 상분포 현상에 관한 것이었다. 측정된 T접합부(junction)의 차압 변화를 이용하여 분지 관에서 아음속인 두 성분의 이상(two phase)혼합류에 대한 상분포를 해석할 수 있는 실험적모델을 개발하는데 이용된바 있다. Saba & Lahey⁽⁵⁾는 이 실험적 모델을 바탕으로 5개의 보존 방정식을 사용하여 분지관내의 상분리현상을 이론적으로 해석하였다. Seeger & Reimann⁽⁶⁾는 50mm내경의 수평 T-접합부에서 차압 변화를 실험적으로 조사하였으며 작동 유체가 공기-물과 증기-물인 경우에 대하여 비

* 회원, 경상대학교 수송기계공학부, 해양산업연구소
E-mail : swahn@gshp.gsnu.ac.kr
TEL : (0557)640-3125 FAX : (0557)640-3128

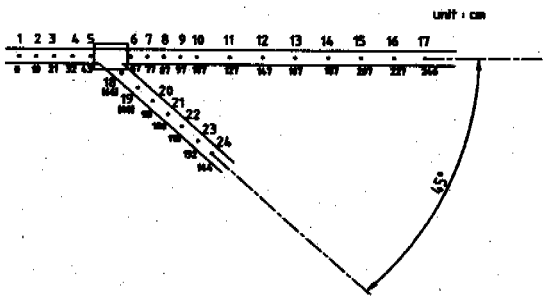


Fig. 1 Schematic diagram of test section

교하였다. 또한 Henry⁽⁷⁾는 분지대입력관의 지름비가 0.2인 수평 T-시험부에서 환상의 공기-물 유동(annular air-water flow)의 상분리현상에 대하여 조사하였다. Henry는 건도와 질량 유속이 각각 $0.1 < x_1 < 0.6$ 과 $200 < G_1 < 850 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 범위로서 매우 낮은 유동분리율(flow split ratio)을 취급하였다. 이러한 연구들은 실험과 이론적으로 수평분지관에 대하여 취급하였다. 그리고 Ballyk⁽⁸⁾ 등은 내경이 비교적 작은 25.6mm인 수평 분지T관내의 증기/물 환상류(annular flow)에 대한 압력, 기공률 그리고 건도 등을 조사한 결과 전상분리(total separation)는 입구유량중 30% 이상 지관으로 흐를 때 일어났음을 보였다. 이상과 같이 분지관내의 이상류 유동특성에 관한 연구들은 대부분 T형 분지관을 모델로 한 것이다. 이에 반해 Y형분지관의 혼합 이상류에 관한 연구는 매우 드문 실정이며 Honan & Lahey⁽¹⁾가 행한 바 있다. Honan & Lahey⁽¹⁾는 수직 Y형 분지관에서 공기-물의 이상류에 관한 실험적 연구를 행하였다. 국내에서 채널유동의 이상류 유동에 대한 연구는 Y형 분지관에서 기체와 액체가 혼합되어 성층류를 형성하는 유동에 대한 이론적해석은 인왕기 등,⁽⁹⁾ R-22냉매가 T형 분지관을 유동하는 경우의 유동특성은 조흥기 등⁽¹⁰⁾이, 그리고 미세수평유로에서의 물-공기 이상류에 대한 유동양식과 압력강하는 이한주 등^(11,12)이 각각 행한 바 있다. 그리고 국외의 최근 증기-물 분지관의 연구는 Peng et al.⁽¹³⁾이 있다. 본 연구는 Fig. 1과 같이 45°로 분지된 수평Y분지 관내를 유동하는 증기-물 이상류의 스텝류, 프러그류, 그리고 기포류^(11,14,15)에 대한 상분리현상을 조사하기 위해 입구관와 지관의 유량비, 흡입압력 등을 변수로 한 실험으로 채널

길이에 따른 압력구배, 건도 그리고 상(phase)분리율을 구하여 최적의 분지 관을 설계함으로써 배관중에 임의의 기기(펌프 등)를 설치하는 경우보다 매우 저렴하게 산업 기기에 적용하여 운전할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험적 연구

분지관에서 이상 유동(two phase flow)의 분리현상을 연구하기 위하여 본 연구에서 사용한 물/증기 계통의 장치는 Fig. 2와 같다. 시험부는 수평 관과 지관의 길이는 각각 2,700 mm, 1,000 mm이고 관의 내경은 25.5 mm이며 동(copper)관을 사용하였다. 시험부중에서 45°로 Y분지되는 부분의 제작은 200 x 180 x 80mm의 투명 아크릴 블록으로부터 드릴작업으로 중심에서는 내경이 25.5mm가 되도록 구멍(hole)을 만들고 가장자리에서는 28mm 구멍(hole)을 만들어 동과이프와 틈이나 턱이 없이 연결시켰다. 시험부의 유동이 가능한 한 정상 상태에 가깝도록 하기 위해 입구관으로 들어오는 관의 수평부는 2 m로 충분한 길이가 되도록 하였다. 작동 유체는 증기와 물을 사용한다.

측정에는 시험부 입구와 출구에서 수시로 온도와 압력을 측정하여 작동 유체의 물성치를 파악하였다. 증기의 공급은 관류형가스텀보일러(BO-50G, Booster Boiler Co.)에 의하였으며, 보일러 발생증기압력은 3기압으로 유지하였으며 시험부에 유입되는 증기압력은 압력조절기로 조절하였다. 물은 탱크로부터 펌프와 여과기를 지나 혼합기에서 증기와 혼합되어 측정부로 유입된다. 여과기(fiber type)는 20 μm 직경의 입자를 제거할 수 있는 섬유질 구조이다. 이때 시험부로 유입되어 들어오는 증기와 물의 역류를 막기 위해 역지(check)밸브를 설치하였다. 물은 계수용탱크에서 증기와 분리되어 응축탱크로 되돌아온다. 그리고 유동에 따른 물의 정적압력변화를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 Y관 주위에 24곳의 압력탭(tap)을 설치하여 길이에 따른 차압변화를 다채널 압력변환장치(DAQ/DB K/10/15)로 측정하였다. 이때 압력센서의 최대측정범위는 30 kPa이고 차압센서는 시험부에서 90 cm 수직하에 위치시켰고, 그 사이는 물로만 채워진 실리콘튜브로 연결되었

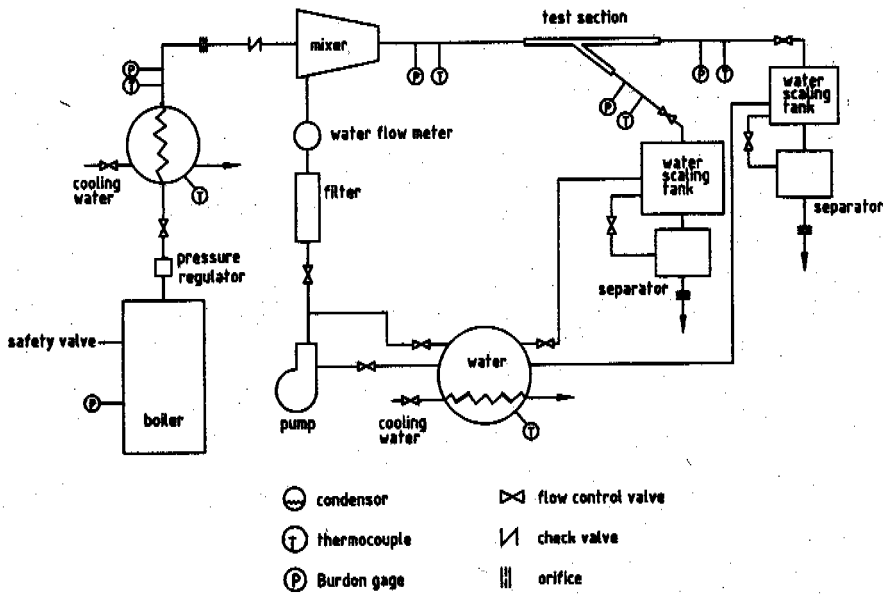


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

다. 차압센서는 정수두압으로 보정하였고, 차압계에서 나온 신호는 증폭기를 거쳐 데이터획득장치에서 10초간 수집하고 그 값들을 평균하여 데이터의 자료처리에 사용하였다. 측정용관은 내경을 1.5mm로 하고 기체 유입을 막기 위하여 파이프 바닥에 설치하였다. 시험부입구(Fig. 1의 1 지점)에서의 측정값들을 기준값(P_1)으로 취급하고 그 기준 점과 측정 지점간의 압력을 차압으로 하였다. Fig. 2에서 혼합기 출구의 유체 작동 압력은 0.1에서 0.5기압까지 펌프와 공급증기압력에 의해 변화시켰으며 브로드게이지로 확인하였다. 증기의 유량측정은 증기분리기(separator)를 통과하여 배출되는 증기를 보정된 오리피스로 측정하였다. 물 유량은 시험부측에 유입하는 곳은 물유량계(magnetic type)로, 시험부 출구측에서는 물계수형 탱크(water scaling tank)로 각각 측정하였다. 작동유체의 온도는 Fig. 2에서와 같이 k형 열전대를 사용한 온도측정 자료획득장치에 의하여 점검하였다. 모든 경우에서 혼합기 이후에서 시험부입출구 온도차는 최대 5°C 이하였다. 주행관(run tube)과 지관(branch tube)의 유량은 출구측에 설치된 스토틀벨브에 의하여 조절하였다. 실험에서 중요한 측정 및 분석 대상은 측정부길이에 따른 압력 변화, 건도(dryness), 상분리율(phase separation ratio) 등이다.

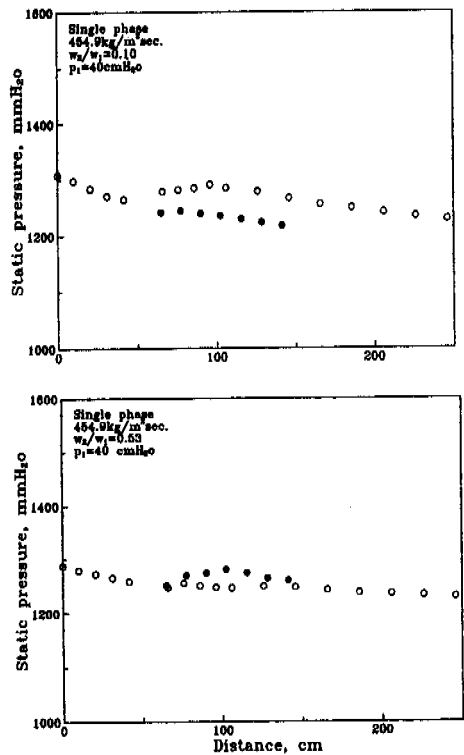


Fig. 3 Example of measurements for pressure distributions(solid symbol; branch tube)

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 기준(reference)값을 확인하기 위해 증기공급없이 물만 공급한 경우 주행관과 지관에서 변화하는 압력 값들을 보여준다. 주행관으로 흐르는 유량비(w_2/w_1)와 지관으로 흐르는 유량비(w_3/w_1)에 대한 압력값들은 w_2/w_1 가 클수록 지관의 압력(solid symbol)이 크고 w_2/w_1 가 작을수록 지관의 압력은 작아진다. 이는 시험부 끝에 위치한 스톱밸브의 배압 때문이라 사료된다. Fig. 3의 각 측정위치는 Fig. 1에 나타나있다. 초기압력 값들이 모두 1300 mmH₂O로 높게 나타나는 것은 압력센서를 시험부에서 수직으로 90cm 밑에 위치하기 때문이다. Figs. 4와 5는 Fig. 1의 측정지점들에 대한 주행관과 지관의 차압변화값의 한 예를 도시한 것이다.

각관에서 접합부의 압력들은 최소자승법에 의해 충분히 발달된 압력 형상으로부터 결정되었다. 분지 Y관의 유동에서 두 가지의 압력 변화가 매우 관심을 끈다. 즉, 지관(branch)유체의 흐름으로 인하여 지관에서는 압력이 강하하고 주행관(run)에서의 압력 상승하였다. 이러한 현상은 Y분지관에서 유동을 분지 시킴으로 인하여 발생하는 베르누이효과 때문이라 사료된다. 여기서 압력 변화들을 가역 과정(실선)과 비가역과정(대시선, 실제 실험치)으로 나눌 수 있다. 이 두값들의 차이는 Y분지부근에서 일어나는 유동의 손실을 의미한다. Table 1에서 입구관(inlet tube)에 대한 주행관과 지관의 차압들, (ΔP_{2-1})와 (ΔP_{1-3})의 결정은 Figs. 4와 5에서처럼 실선 부분인 가역 과정으로부터 구한 것이다. 시험 부의 1지점의 압력 값을 기준값(P_1)으로 하였으며 각 시험의 경우에 대한 기준값은 Table 1에 나타나 있다. 지관(branch tube)에 비해 주행관(run tube)에서 유동과 라메타에 대한 차압변화가 크게 나타나고 있음을 보여준다. 이는 주행관에서는 유동흐름의 관성효과가 크게 나타나기 때문에 입구의 작은 유동 파라메터값들의 차이에서도 주행관에서 크게 확대되는 것이라 사료된다.

Table 1은 Fig. 1과 같이 시험부 내경이 25.5mm 인 45°로 분지된 동일한 수평 Y분지 관에서 입구의 증기 및 물의 유량과 흡입 압력(P_1)을 파라미터로 한 대표적 실험값들이다. 대체로 유동양상은 기

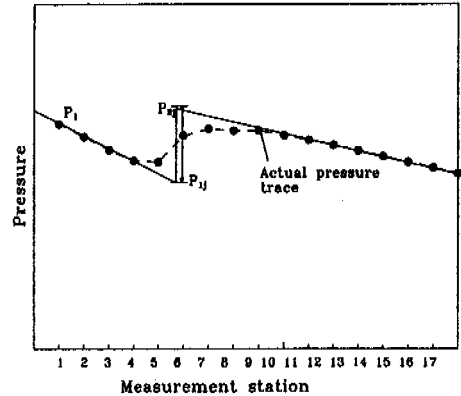


Fig. 4 (ΔP_{2-1})_j in a 45° wye

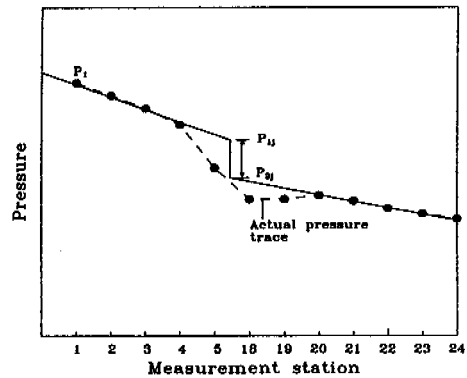


Fig. 5 (ΔP_{1-3})_j in a 45° wye

포유동과 프러그(plug)유동 그리고 슬러그(slug)유동이었다.^(13,14) 동일한 입구 유입압력(P_1)에서 유입 질량 속도(G_1)가 크고 흡입 건도(x_1)는 작을수록 입구 관과 주행관 사이의 차압(ΔP_{2-1})_j 그리고 입구관과 지관 사이의 차압(ΔP_{1-3})_j의 절대치는 커졌다. 이는 분지관내 증기보다 물의 유량이 많을수록 유체이동에 대한 관성력이 증가하기 때문이라 사료된다. 비교를 위하여 Table 2는 Saba & Lahey⁽⁵⁾ 결과의 수평 T 분지관에 대한 공기-물 계통의 내경 38mm의 성층류에 대한 값들을 포함하였다. Table 1의 경우와 달리 동일한 입구 압력(P_1)에서 입구 질량 속도(G_1)가 크고 흡입 건

Table 1 Phase separation data(steam-water) in a horizontal 45° wye

Run	kg/m ² sec.	x ₁ (%)	w ₂ /w ₁	x ₂ /x ₁	P(kg/cm ²)	(ΔP ₂₋₁) _i (kPa)	(ΔP ₁₋₃) _i (kPa)	flow regime
1	409.8	0.04	0.10	0.61		0.25	0.07	
2	419.6	0.04	0.12	0.70		0.32	0.05	
3	411.8	0.04	0.15	0.78		0.29	0.01	
4	415.7	0.04	0.21	0.80	0.2	0.25	-0.02	bubble
5	429.4	0.04	0.25	0.86		0.23	-0.05	
6	390.5	0.04	0.45	1.09		0.19	-0.11	
7	409.8	0.04	0.56	1.22		0.16	-0.14	
8	405.9	0.04	0.66	1.71		0.13	-0.16	
9	292.2	0.06	0.02	0.35		-0.04	-0.12	
10	280.4	0.06	0.20	0.43		0.04	-0.11	
11	292.2	0.06	0.30	0.68	0.2	0.05	-0.06	plug
12	272.5	0.06	0.59	0.88		0.07	-0.04	
13	284.3	0.06	0.66	0.98		0.06	0.01	
14	284.0	0.06	0.73	1.15		0.06	0.01	
15	300.0	0.06	0.76	1.22		0.05	0.02	
16	351.0	0.14	0.09	0.46		0.21	-0.01	
17	331.4	0.14	0.16	0.67		0.14	-0.03	
18	351.0	0.13	0.33	0.79	0.3	0.07	-0.04	plug
19	331.4	0.13	0.81	1.43		0.01	-0.03	
20	350.9	0.13	0.85	1.55		-0.02	-0.06	
21	245.5	0.25	0.14	0.55		0.15	0.03	
22	252.9	0.23	0.22	0.78		0.13	-0.03	
23	252.0	0.23	0.25	0.89	0.4	0.12	-0.05	slug
24	252.2	0.23	0.56	1.18		0.11	-0.05	
25	245.7	0.24	0.59	1.23		0.11	-0.05	

Table 2 Phase separation data(air-water) in horizontal tee⁽⁵⁾

Run	kg/m ² sec	x ₁ (%)	x ₂ (%)	x ₃ (%)	w ₂ /w ₁	P(kPa)	(ΔP ₁₋₂) _i (kPa)	(ΔP ₂₋₁) _i (kPa)	flow regime
1		0.00	0.000	0.000	0.3	41.37	0.62	0.69	single phase
2		0.00	0.000	0.000	0.5	41.37	0.14	0.69	"
3		0.00	0.000	0.000	0.7	41.37	0.00	0.48	"
4		0.10	0.000	0.143	0.3	41.37	1.03	1.45	stratified
5		0.10	0.000	0.200	0.5	34.47	0.62	1.17	"
6		0.10	0.001	0.329	0.7	34.47	0.28	0.89	"
7		0.25	0.006	0.350	0.3	41.37	2.07	1.93	"
8	1555.6	0.25	0.008	0.488	0.5	41.37	1.03	2.07	"
9		0.25	0.011	0.799	0.7	41.37	0.69	1.72	"
10		0.50	0.013	0.695	0.3	48.26	2.89	3.51	"
11		0.50	0.012	0.975	0.5	41.37	2.27	3.79	wavy
12		0.50	0.025	1.580	0.7	48.26	1.52	3.10	stratified
13		1.0	0.054	1.420	0.3	62.05	4.34	3.99	slug
14		1.0	0.085	1.980	0.5	48.26	3.10	4.27	"
15		1.0	0.084	4.17	0.7	48.26	2.27	3.88	"
16		0.00	0.000	0.000	0.3	55.15	1.39	1.45	slug
17		0.00	0.000	0.000	0.5	48.26	0.48	1.17	single phase
18		0.00	0.000	0.000	0.7	55.15	0.00	0.76	"
19		0.10	0.002	0.142	0.3	62.05	3.03	3.58	wavy
20		0.10	0.006	0.198	0.5	48.26	2.24	3.31	"
21		0.10	0.008	0.315	0.7	55.15	1.65	2.07	"
22		0.25	0.024	0.347	0.3	68.94	4.82	4.34	slug
23	2041.8	0.25	0.024	0.476	0.5	41.37	3.10	4.89	"
24		0.25	0.032	0.759	0.7	62.05	2.21	4.14	"
25		0.50	0.078	0.687	0.3	48.26	7.03	5.93	"
26		0.50	0.085	0.924	0.5	41.37	5.51	6.20	"
27		0.50	0.091	0.470	0.7	48.26	3.30	5.65	"
28		1.0	0.166	1.380	0.3	48.26	9.90	9.24	"
29		1.0	0.158	1.870	0.5	55.15	7.24	10.61	"
30		1.0	0.160	2.850	0.7	55.15	4.41	8.82	"

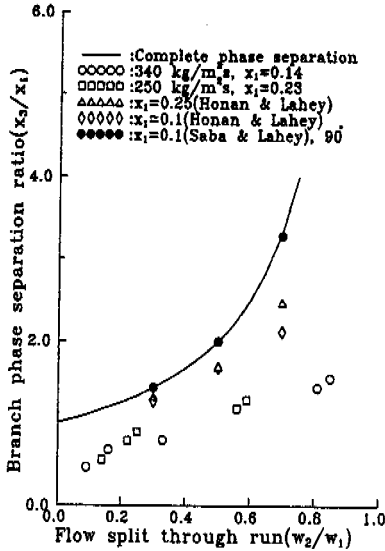


Fig. 6 Branch phase separation ratio in a 45° wye

도(x_1)가 작을수록 입구관과 주행관 사이의 차압 ($\Delta P_{2,1}$)는 증가하고 입구 관과 지관 사이의 차압 ($\Delta P_{1,3}$)는 감소하였다. 이러한 현상은 Table 1은 분지관의 각이 45°이고 Table 2의 결과는 90°구조에서 발생하는 베르누이효과의 차이로 판단된다. Fig. 6은 45°로 분지된 증기-물 계통의 수평분지관에서 주행관 유동분지율(w_2/w_1)에 따른 분지관 상분지율(x_3/x_1)을 나타낸다. 비교를 위하여 Honan & Lahey⁽¹⁾와 Saba & Lahey⁽⁵⁾의 결과를 포함하였다.

Honan & Lahey⁽⁵⁾는 작동유체가 공기와 물인 38mm 내경, 45°지관에서 수직방향으로 유동하는 기포류에 관하여 취급하였다. 그리고 Saba & Lahey⁽⁵⁾는 Honan & Lahey⁽¹⁾와 동일한 작동유체 및 내경치수에서 수평 T분지관에서 유동양상이 성층류인 경우에 대하여 실험적연구를 행하였다. Honan & Lahey⁽¹⁾의 결과는 45°수평분지관에 관한 본 연구의 결과보다 지관상분리율이 높게 나타났다. 이는 45° 수직상방향유동의 경우에는 분지관 관내 유체의 위치에너지가 작용하고 상방향으로 향하는 물의 관성력이 감소되기 때문이라 사료된다. Saba & Lahey⁽⁵⁾의 경우 완전상분리가 일어나는 것은 90°로 분지된 경우 지관과 주행관에서 작용하는 물과 공기의 관성력 차이가 크기 때문이

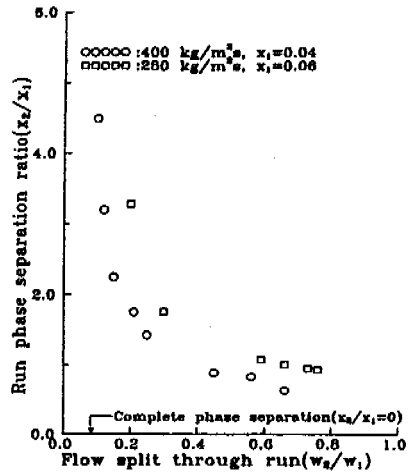


Fig. 7 Run phase separation ratio in a 45° wye

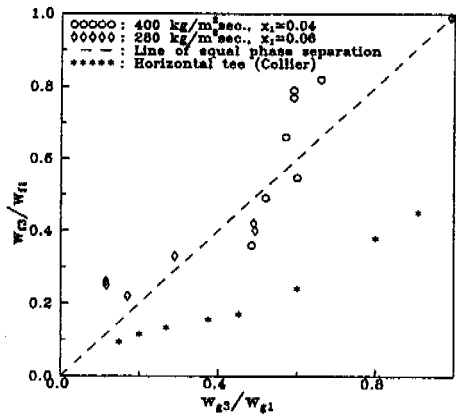


Fig. 8 Phase separation in a 45° wye

라 판단된다. 증기질량연속방정식에서

$$x_1 w_1 = x_2 w_2 + x_3 w_3 \quad (1)$$

이다. 식 (1)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{1 - \frac{x_3 w_3}{x_1 w_1}}{w_2/w_1} \quad (2)$$

그리고 전체질량방정식으로부터

$$\frac{w_2}{w_1} + \frac{w_3}{w_1} = 1 \quad (3)$$

이다. 식 (2)과 (3)으로부터 건도비(x_2/x_1)는

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{1 - \frac{x_3}{x_1} \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)}{w_2/w_1} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 완전 상분리율은 $x_2/x_1=0$ 로 정의된다. 식 (4)를 이용하여 Table 1로부터 주행관을 통과하는 유동의 분지율(w_2/w_1)에 대한 주행관 상분리율(x_2/x_1)을 Fig. 7에 나타내었다. 질량유속 $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 입구건도(x_1)가 0.06인 경우보다 $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x_1=0.04$ 인 경우가 완전상분리에 가깝다. 이는 본 연구의 범위에서는 입구건도보다 질량유속이 지관상분리에 영향을 많이 준다는 것을 보여준다. Fig. 8은 전체증기유량 중에서 지관으로 유동하는 증기의 비율(w_{g3}/w_{g1})에 대한 지관으로 흐르는 물의 유량비(w_{f3}/w_{f1})의 변화를 도시하였다. 대시(dashed)선은 지관으로 흐르는 물과 증기의 상분리율이 동일한 경우를 의미한다. $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x_1=0.04$ 에서는 지관으로 흐르는 증기의 비율(w_{g3}/w_{g1})이 증가할수록 물이 지관으로 분리되는 비율의 크기가 높아지나, $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x_1=0.06$ 에서는 오히려 물이 지관으로 분리되는 비율이 졌다. 이는 시험부 입구에서 물의 비율이 높고 유속이 빠를수록 지관으로 흐르는 물의 비율(w_{f3}/w_{f1})은 지관으로 흐르는 증기의 비율(w_{g3}/w_{g1})에 따라서 크게 증가함을 의미하며, 이것은 본 연구의 경우 지관과 주행관의 끝부분에 있는 정지 밸브에 의하여 유량을 각각 조절하였기 때문에 관성력이 높은 물이 지관으로 흐르는 유동의 변환이 더 쉽게 일어나는 것에 기인된다고 사료된다. 비교를 위하여 입구와 주행관의 내경은 3.8 cm 이고 지관의 내경은 2.54 cm 인 수평 T 형 분지관에서 질량유속이 $135 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 인 경우의 Collier 결과⁽⁴⁾를 포함하였다. 균일 상분리선보다 훨씬 낮은 지관 분리율을 나타낸다. 이는 Collier의 연구는 지관내경의 크기가 입구와 주행관보다 작은 T 형 분지관에서는 밀도가 큰 유체일수록 지관 분리율이 낮아지기 때문이라 판단된다. 본 연구에서의 불확실성⁽¹⁶⁾은 온도에서는 $\pm 2 \%$, ($\Delta P_{2.1}$)는 $\pm 12 \%$, ($\Delta P_{1.3}$)는

$\pm 11 \%$, 그리고 입구건도는 $\pm 9\%$ 이었다.

4. 결 론

직경이 동일한 45° 경사 수평 Y분지관에서 물과 증기가 유동하는 경우의 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 45° 로 분지된 수평분지관이나 90° 분지관⁽⁵⁾ 모두 동일한 입구건도에서 w_2/w_1 이 작을수록 ($\Delta P_{1.3}$)값은 증가하였다.

(2) 수평 90° 분지관⁽⁵⁾이나 45° 수직분지관⁽¹⁾보다 수평 45° 분지관의 경우가 상분리율이 낮았다.

(3) 지관상분리율은 입구건도보다 질량유속 값에 더 많은 영향을 받았다.

참고문헌

- (1) Honan, T. J., Lahey and R. T. Jr., 1981, "The Measurement of Phase Separation in Wyes and Tees," *Nucl. Eng. Design*, Vol. 64, No. 1, pp. 93 ~ 102.
- (2) Fouda, A. E., 1975, "Two Phase Flow Behaviour in a Manifolds and Networks," Ph. D. Thesis, Chem. Eng., Univ. Waterloo, Ontario.
- (3) Whalley, P. B. and Azzopardi, B. J., 1980, "Two Phase Flow in a Tee Junction," AERE-R 9699.
- (4) Collier, J. G., 1976, "Single Phase and Two Phase Flow Behaviour in Primary Circuit Components," *Proc. of NATO Advanced Institute on Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 313 ~ 365.
- (5) Saba, N. and Lahey, R. T., 1984, "The Analysis of Phase Separation Phenomena in Branching Conduit," *Int. J. of Multi-Phase Flow*, Vol. 10, No. 1, pp. 1 ~ 20.
- (6) Seeger, W., Reimann, J., Muller, U., 1985, "Phase Separation in a T-Junction with a Horizontal Inlet," *2nd Int. Conf. on Multi-Phase Flow*, London, June 19 ~ 21.
- (7) Henry, J. A. R., 1981, "Dividing Annular Flow in a Horizontal Tee" *Int. J. of Multiphase Flow*,

- Vol. 7, pp. 343~355.
- (8) Ballyk, J. D., Shoukri, M. and Chan, A. M. C., 1988, "Steam-Water Annular Flow in a Horizontal Dividing T-Junction," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 14, No. 3, pp. 265~285.
- (9) 인 왕기, 이 상용, 1995, "Y자형 혼합지점에서 의 성층류유동 특성," 대한기계학회논문집, 제19 권, 제12호, pp. 3360~3371.
- (10) 조홍기, 박종홍, 조금남, 1999, "R-22 냉매용 증발기의 수평 Tee 분지관내 유동특성," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (B), pp. 165~170.
- (11) 이한주, 이상용, 1999, "미세 수평 사각유로 에서의 2상 유동 양식에 관한 실험적연구," 대한기계학회논문집 (B), 제23권 제4호, pp. 492~501.
- (12) 이한주, 이상용, 1999, "미세수평 사각 유로 에서의 2상유동 압력강하에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제23권 제5호, pp. 637~645.
- (13) Feng, F., Shoukri, M., Chan, A. M. C., 1996, "Effect of Branch Orientation on Annular Two-Phase Flow in T-Junctions," *J. of Fluids Eng.*, Vol. 118, pp. 166~171.
- (14) 이상용, 김병부, 김무환, 1993, 이상유동 열전달, 대영사, pp. 1~46.
- (15) 김경근, 1991, 기액이상류, 진영사, pp. 1-21.
- (16) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.