308 大韓機械學會論文集 第15卷 第1號, pp. 308~322, 1991.

〈論 文〉

상반류(물/공기) 유동한계에 관한 연구

오율권* · 조상진** · 김상녕*** · 이종원****

(1990년 8월 22일 접수)

Counter-Current Flow Limit of a Vertical Two Phase(Water/Air) Flow

Yool-Kwon Oh, Sang-Jin Cho, Sang-Nyung Kim and Jong-Won Lee

Key Words: Counter-Current Flow Limit or Flooding(상반 유동한계), Wallis' Correlation (Wallis 상관식), Flooding Point(충수점), Flooding Front(충수 전선), Non-Dimensional Superficial Velocity(무차원 표면 속도)

Abstract

A set of experiments of Counter-Current Flow Limit(CCFL or Flooding) was performed to improve the drawbacks of Wallis' Correlation which neglects the effects of channel size, channel length, injection method and the boundary conditions at the inlet of liquid and gas phase. In these experiments using water and air, the followings were found; (i) The effects of channel size and length were quite significant. In large tubes($D>20$mm), the flooding front occured at the bottom of the channel and when the gas flow increased the front moved upward; however, in small tubes($D<20$mm), there were no upward movement of flooding front and the flooding just occured at the liquid inlet. (ii) The effect of water inlet device was not as significant as that of channel length though the inlet boundary conditions could affect the flow development and flooding afterward. (iii) Once the flooding front reached the inlet of water injection device, an newly reduced flow condition was set up and resulted in another flooding corresponding to the new condition.

기 호 설 명

A : 표면적(surface area : m²)
Cd : 유출계수(discharge coefficient)
d : 수막 내의 임의의 내경(any diameter within annular liquid film)
D : 관의 내경(tube diameter)
j : 겉보기 속도(superficial velocity : m/sec)
j^* : 무차원 겉보기속도(non-dimensional superficial velocity)
$j_g^*(NJG)$: 공기의 무차원 겉보기속도(nondimensional superficial velocity of air)
$j_L^*(NJL)$: 물의 무차원 겉보기속도(nondimensional superficial velocity of water)
$\Delta P(PCH)$: 관내의 압력차(channel pressure difference : N/m²)
u : 상 속도(phase velocity)
W : 유량(mass flow rate : kg/sec)
α : 기공률(void fraction)
δ : 수막의 두께(liquid film thickness)
μ : 점성 계수(viscosity : N sec/m²)
ρ : 밀도(density : kg/m³)
τ : 전단응력(total shear stress)

* 정회원, 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과
** 경희대학교 공과대학 원자력공학과
*** 정회원, 경희대학교 공과대학 원자력공학과
**** 정회원, 경희대학교 공과대학 기계공학과

τ_i : 경계면에서의 전단응력(interfacial shear stress)

하 첨 자

g : 공기(air)

L : 물(water)

1. 서 론

2상유동(two phase flow)에서는 일반적으로 기체의 유속이 액체의 유속보다 빠르며 이러한 서로 다른 상(phase)간의 상대속도로 인하여 액체와 기체의 경계면에 전단응력(shear stress)이 작용하게 된다. 상간의 상대속도가 증가하면 전단응력도 증가하고 이러한 전단응력의 증가로 인해 액체면에 파(wave)가 형성되고, 유동에 여러가지 복잡한 현상을 유발하게 된다. 특히 액체와 기체의 상반류(counter-current flow)의 경우 이런 두 상의 속도가 어떤 상대속도에 도달하면 경계면(interface)에 파가 형성되고 압력 강하 또한 증가하게 된다. 이렇게 되면 유로(flow channel)가 막히게 되고 더 이상 상반유동이 형성될 수 없게 된다. 즉 이렇게 되는 현상을 상반 유동한계(Counter Current Flow Limit : CCFL) 혹은 Flooding이라고 한다. 이러한 CCFL현상은 여러가지 에너지 사업 분야에서 많이 사용되고 있는데 특히 원자력 발전소의 안전성 평가에 있어 LOCA(Loss of Coolant Accident)사고시 노심상부주입계통(upper head injection system)의 노심 냉각 효율성 평가, 노심 용융 사고시 용융 핵연료의 거동 해석, reflooding시 downcomer및 quenching front의 거동 예측등에 이용된다. 또한 냉각탑(cooling tower)에서 공기의 최대 유속 예측등에도 중요하게 이용된다.

이러한 중요성때문에 오래 전부터 CCFL현상에 대해 많은 연구가 진행되어 왔으며 이 결과로 현재는 Wallis관계식이 널리 쓰이고 있다. 그러나 이 관계식에서는 각 상의 주입구 모양이 국한되어 있고 CCFL에 영향을 미치는 관의 크기, 길이, 주입방법, 주입구형상 등 변화에 대한 현상해석이 결여되어 있다. 그후로 계속적인 연구가 진행 되고 있지만 실효를 거두지 못하고있는 실정이며 전산기를 이용한 해석적 방법 역시 현상의 복잡성 및 CCFL 현상에 영향을 끼치는 미묘한 변수(관의 형태, 관의 길이, 주입구의 다양한 모양변화, 주입방법등)들로 인하여 성과를 거두지 못하고 있다.

그러므로 본 실험의 목적은 CCFL에 영향을 미치는 관의 크기, 길이, 주입구 형상 등 변화에 대한 현상해석과 이의 영향을 고려한 관계식의 개발에 있다. 그러므로 본 실험에서의 물의 주입량을 관에 수막(film)이 형성시킬 수 있는 유량으로 고정시킨 상태에서 공기의 유량을 증가시켜, CCFL이 발생하였을때 공기와 물의 유량을 측정하였다. 그리고 관의 길이, 크기 그리고 물의 주입구 구조(예각, 둔간, 톱니, 다공)의 변화에 따른 CCFL의 영향에 관하여 실험을 수행하였다.

2. 이 론

2.1 일반이론

본 일반 이론에서는 각 상의 주입 방법과 주입구의 모양 변화가 상반유동한계 현상의 변수로써 어떤 영향을 미치는가를 살펴보았다. 2상류의 형태는 여러가지로 분류할 수 있지만 본 연구에서는 Fig.1과 같이 상반수직환상류(counter-current vertical annular flow pattern)에 대해서 모델링하였다. 즉 Fig.1과 같은 모델을 도입, 분리유동모델(separated flow model)을 사용해서 관내부에서 운동량 변화를 해석하고, 이를 기초로 하여 주입 방법과 주입구 모양의 변화가 상반유동한계와 관내의 압력강하에 어떤 영향을 미치며 이러한 영향을 어떤 변수로 표현이 가능한지를 알아보고자 한다[1].

먼저, 운동량 변화를 식 (1)과 같이 나타낼 수

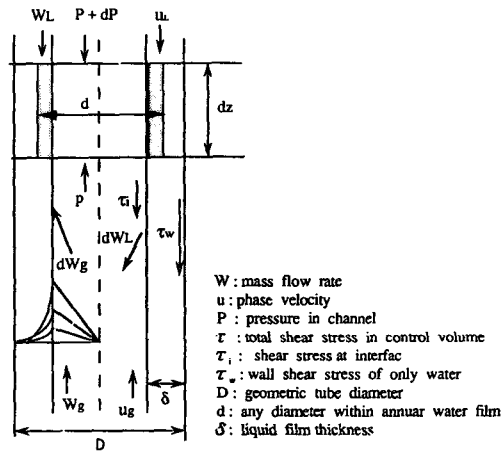


Fig. 1 Vertical annular flow flooding model

있다.

$$-A\,dp-dF_g-dF_L-g\,[A_L\rho_L+A_g\rho_g]=d[W_Lu_L+W_gu_g] \quad (1)$$

양변을 dz으로 나누어 각 항별로 정리하면 식 (2), (3), (4), (5)과 같다.

$$\frac{dp}{dz}=\left(\frac{dp}{dz}F\right)+\left(\frac{dp}{dz}a\right)+\left(\frac{dp}{dz}z\right) \quad (2)$$

$$\left(\frac{dp}{dz}F\right)=-\frac{1}{A}\left(\frac{dF_g}{dz}+\frac{dF_L}{dz}\right) \quad (3)$$

$$-\left(\frac{dp}{dz}a\right)=G\frac{2d}{dz}\left(\frac{x^2v_g}{\alpha}+\frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)}v_L\right) \quad (4)$$

$$-\left(\frac{dp}{dz}z\right)=g(\alpha\rho_g+(1-\alpha)\rho_L) \quad (5)$$

이 결과식의 유도 과정에서 마찰력에 의한 압력 강하 항은 다음 식 (6), (7)을 기초로 했다.

$$(dF_L+S)=-A_L\left(\frac{dp}{dz}F_L\right)dz \quad (6)$$

$$(dF_g+S)=-A_g\left(\frac{dp}{dz}F_g\right)dz \quad (7)$$

그리고 식 (2)에 의하면 관내의 압력강하는 마찰 응력, 중력 그리고 그리고 가속력에 의한 압력강하의 합으로써 이루어지며 특히 공기의 겉보기 속도(superficial velocity)가 증가함에 따라 경계면에서 마찰에 의한 압력강하가 증가하고, 수막의표면 장력과 낙하하는 중력과의 세 힘의 상호 작용에 의해 수막의 표면에 파형이 형성된다.

그리고 임계 속도에 도달하면 수로 내부에 수반(entrainment)이 발생하여 상반유동한계를 유발시킨다. 따라서 식 (2)의 세 항들중 가속력에 의한 운동량 변화는 무시할 수 있다. 그러므로 식 (1)의 오른쪽 항은 가정에 의해 무시하고, Fig. 1에서 표시한 각각의 변수들을 계산하여 대입하면 식 (8)과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$-\frac{dp}{dz}\left(\frac{d^2-(D-\delta)^2}{d^2}\right)-\frac{dp}{dz}\left(\frac{(D-\delta)^2}{d^2}\right)-g\left[\left(\frac{d^2-(D-\delta)^2}{d^2}\right)\rho_L-\left(\frac{(D-\delta)^2}{d^2}\right)\rho_g\right]=\frac{1}{A}\left(\frac{dF_g}{dz}+\frac{dF_L}{dz}\right) \quad (8)$$

여기서 마찰응력의 수학적 정의를 도입하여 식을 변경하면 식 (9)과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{4}\left[\frac{dp}{dz}+g\,\rho_g\right]\left(\frac{(D-\delta)^2}{d}\right)+\frac{1}{4}\left[\frac{dp}{dz}+g\,\rho_l\right]\left(\frac{(D-\delta)^2-d^2}{d}\right)=\tau \quad (9)$$

이 식에 경계면에서의 마찰응력의 정의를 도입하면 식 (10)로 정의할 수 있다.

여기서

$$\tau=\tau_i\left(\frac{(D-2\delta)}{d}\right)+\frac{1}{4}\left(\frac{dz}{dp}+\rho_Lg\right)\times\left(\frac{(D-2\delta)^2-d^2}{d}\right)$$

$$\tau_i=-\frac{1}{4}\left(\frac{dp}{dz}+\rho_g\right)(D-2\delta) \quad (10)$$

이 결과식 (9), (10)에 의해 나타난 수로내부의 마찰 응력 분포 곡선은 Fig.1에 나타나 있다. 결국 이 두식을 분석해보면 관의 기하학적 직경과 증기로심(vapour core)의 직경 그리고 수막의 두께의 함수로 표시 된다.

이 중 특히 수막의 두께와 형태는 유량 및 주입구의 형태 변화와 주입방법의 변화에 따라 변하는 값이며 증기심(vapour core)의 직경 역시 주입 되는 유량이 동일하다 하더라도 주입구 형태에 따라 수막의 분포형태가 변함에 따라 변화함을 알 수 있다. 따라서 상반유동한계 현상을 유발시키는 가장 중요한 변수들은 기체의 겉보기속도(superficial velocity)와 이 값의 증가에 따른 경계면에서의 마찰 응력의 증가이며, 이 마찰응력은 결국 각상의 주입방법이나 주입구의 형태변화의 함수임을 알 수 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 이러한 새로운 변수들은 도입하여 실험을 통하여 CCFL현상에 미치는 영향을 검토, 증명하고 이들 새로운 변수들을 상관식에 삽입하고자 한다. 그리고 본 유도 과정에서 도입된 기공률(void fraction)은 식 (11), (12)와 같다.

$$\alpha=\left(\frac{(D-\delta)^2}{D^2}\right) \quad (11)$$

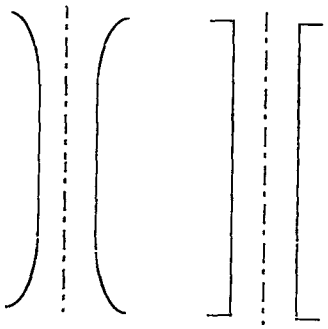
$$(1-\alpha)=\left(\frac{D^2-(D-\delta)^2}{D^2}\right) \quad (12)$$

2.2 Wallis의 상관식[2]

1969년 Wallis는 non-dimensional superficial velocities을 다음과 같이 정의 하였다.

$$J_k^*=\frac{J_k\rho_k^{1/2}}{[gD(\rho_L-\rho_g)]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

Wallis에 의하면 flooding point는 식 (14)의 상관식으로 표시되며 상수 m과 C는 다음아래와 같이



(1) Round - edged tube. (2) Sharp - edged tube.

Fig. 2 Tube Geometries(Wallis, 1969)

정의된다.

$$J_G^{*1/2}+mJ_L^{*1/2}=C \tag{14}$$

(i) 중력이 점성력보다 훨씬 클 때, 즉 Grashof 수(N_L)가 클 때

$$\begin{cases} m=1 & \text{for round-edged tubes.(Fig. 2)} \\ 0.88<C<1 & \\ C=0.725 & \text{for sharp-edged tubes.(Fig. 2)} \end{cases}$$

변수 C는 관의 주입구 형태의 영향을 받는다.

(ii) 중력이 점성력에 비해서 무시할 수 있을 때, 즉 Grashof 수(N_L)가 작을 때

$$\begin{cases} m=5.6N_L^{-1/2} & \\ C=0.725 & \text{for round-edge tubes.(Fig.2)} \end{cases}$$

이와같이 Wallis flooding 상관식은 주입구 경계조건을 상당히 조악하게 반영하고 있을 뿐만 아니라 관의 크기, 관의 길이 등의 효과는 거의 무시하고 있다.

3. 실험장치

실험 장치는 크게 세 부분으로 나눌 수 있으며 이는 각기 액체주입구 부분, 기체 주입 부분, 주 시험부로 나눌 수 있다. 이들 세부적인 설계 기준과 이론을 부분별로 기술하면 다음과 같으며 전체적인 실험장치의 도면은 Fig. 3과 같다.

3.1 액체 주입구 부분

주 시험부에 물을 공급하기 위한 물공급 장치에 있어서 우선 1차 저장 탱크에 물을 저장하여 단순

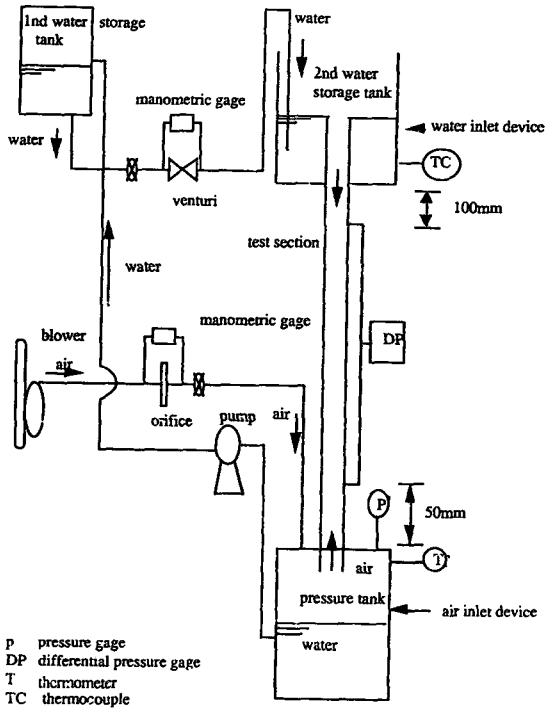


Fig. 3 A schematic diagram of experimental apparatus

히 자유낙하에 의해서만 물이 주입되도록 설치하였으며 정상상태를 유지하기위해 1차 저장탱크의 수위를 일정하게 유지할 수 있도록 펌프 작동 자동차단장치를 설치하였다. 물의 경로는 1차 저장탱크에 저장된 물의 관(25.4mm)을 따라 2차 저장탱크를 통하여 주 시험부로 유입되며 주 시험부를 흐른 물은 압력 탱크에 저장된다. 이 물은 다시 재 순환 펌프에 의해서 다시 1차 저장 탱크로 유입되게 된다. 그리고 재 순환펌프는 CCFL이 발생할 수 있는 물의 최대 유량 이상을 공급할 수 있는 수준의 용량으로 선택하였다. 또한 게이트 밸브에 의해서 조절된 액체의 유량은 벤추리관을 사용하여 측정하였으며 이들의 유출계수(discharge coefficient : Cd)는 실험 장치의 용량에 준하여 측정, 보정하였다.

3.2 기체 주입구 부분

기체 주입구 부분에는 60.8mm동관을 통하여 송풍기(3마력)로 공기를 주입하였다. 그리고 공기의 유량은 오리피스를 사용하여 측정하였다. 공기의

Table 1 Various tube-length used in experiments

Diameter	Length(mm)	Inlet-type	Symbol
80(mm)	1300, 1000, 850, 550, 450, 350	Plate	Pl. 80. *
	550, 450, 350	Obtuse	Obu.80. *
	550, 450, 350	Acutic	Acu. 80. *
	550, 450, 350	Dentic	Den. 80. *
60(mm)	1300, 1000, 850, 550, 450, 350	Plate	PL. 60. *
	550, 450, 350	Obtuse	Obu. 60. *
	550, 450, 350	Acutic	Acu. 60. *
50(mm)	1300, 1000, 850, 550, 450, 350	Plate	PL. 50. *
	550, 450, 350	Obtuse	Obu. 50. *
	550, 450, 350	Acutic	Acu. 50. *
	550, 450, 350	Dentic	Den. 50. *
40(mm)	1300, 1000, 850, 550, 450, 350	Plate	PL. 40. *
	550, 450, 350	Obtuse	Obu. 40. *
	550, 450, 350	Acutic	Acu. 40. *
	550, 450, 350	Dentic	Den. 40. *

경로는 송풍기에서 나온 공기가 압력탱크를 통하여 주 시험부로 유입되어 대기로 나가게 된다. 이들의 유출계수는 실험장치의 특성과 용량에 준하여 측정, 보정하였다. 그리고 유출계수를 보정하기 위하여 물과 공기 각각 직접 물통에 받는 방법과 피토우 관(pitot tube)을 사용하는 등 두 가지 방법을 병행하였다.

3.3 주 시험부

시험부는 내부를 직접 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴관을 사용하였으며, 관의 내경이 각각 80 mm, 60mm, 50mm, 40mm의 경우에 대하여 1300 mm, 1000mm, 850mm, 550mm, 450mm, 350mm 로 길이를 줄여가면서 상반유동한계 현상을 관찰할 수 있도록 설치하였다. 그리고 주 시험부는 2차 저장탱크와 압력탱크 사이를 연결하였다(Fig. 3, Table 1). 2차 저장 탱크 내의 물의주입구 형태는 Fig. 4와 같이 제작하였다.

또한 관의 내부에서 상반유동한계가 발생시, 압력 차를 측정할 수 있도록 압력탭을 2차 저장탱크로 부터는 100mm, 공기 주입부분의 압력 탱크로부터 50mm떨어진 위치에 설치했으며 마노미터(manometer)에 사용된 시약은 관의 내경, 길이변화에 따라 측정이 가능한 가솔린, 물, 메탄올등을 사용하였다.

시험부 입구 형태 변화에 따른 상반유동한계의 현상을 알아보고자 시험부 하단 형태(sharpe edged type)는 고정시킨 채, Fig. 5에서와 같이 예각, 둔각, 다공, 톱니모양으로 시험부 상단의 입구

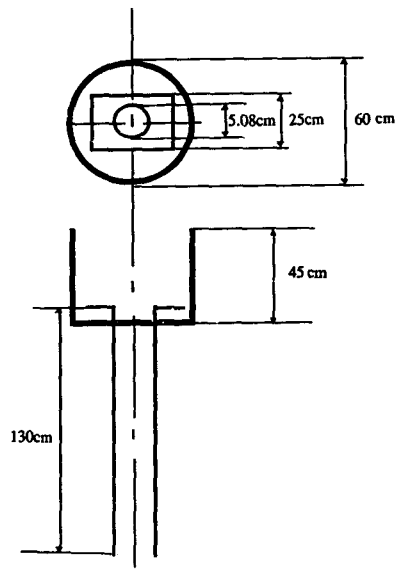


Fig. 4 Water injection device type

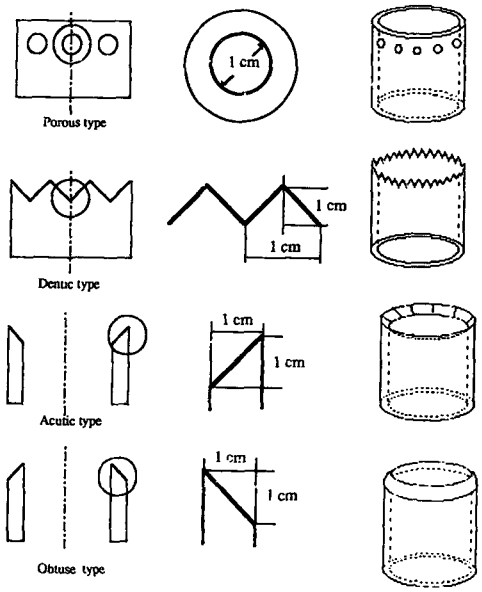


Fig. 5 Various geometric configuration of the water inlet

형태만을 변화하여 제작하였다.

4. 상반유동한계 실험

충수점(flooding point)의 측정을 용이하게 하기 위해 물의 유량을 고정시켜 둔 상태에서 공기의 유량만을 점차적으로 증가시키면서 상반유동한계가 발생하도록 하였으며 정상상태가 이루어지도록 충분히 천천히 공기유량을 증가시키면서 수로 양단간의 압력 강하와 공기의 유량을 측정하였다. 이 과정에서 각 상의 물성(온도, 압력 등) 및 유량을 측정하였다. 특히 매번 실험마다 물의 유량과 이에 따른 수막의 형태, 상반유동한계가 발생시에 충수형태(flooding pattern)의 변화와 수반의 유무등을 육안으로 관찰했다. 그리고 충수점(flooding point)를 측정함에 있어 아래와 같은 네가지 방법으로 실험을 수행하였다.

첫째, 실험 수로에 일정량의 유량이 흐르도록 밸브(valve)를 조절하여 충분히 수막이 형성되고 정상상태로 유지됨을 확인한 다음, 연속적으로 공기의 유량을 증가시키면서 상반유동한계를 발생시킨다. 상반유동한계가 발생하면 액주가 유로에 형성되므로 수로의 양단간에 커다란 압력차가 발생하게 된다. 이러한 압력 강하를 야기시키는 공기의 유량을 고정된 액체의 유량에 대한 충수점으로 정했다.

둘째, 기존의 실험에서는 상반유동한계의 발생 위치에 관한 언급이나 정의가 없으므로 본 실험에서는 수로를 관측하면서 공기의 유량을 계속적으로 증가시켜서 상반유동한계의 발생 지점이 수로 하단의 압력탭 바로 위에서 발생시, 공기의 유량을 고정된 물의 유량에 대한 충수점으로 정의했다.

세째, 두번째와 같은 방법으로 Table 1과 같이 각각의 관의 길이 변화에 대한 상반유통한계 실험을 수행하였다.

본 실험을 수행 도중 관의 길이가 긴 것은 재순환 펌프의 진동에 따라 수막이 정상상태의 파를 형성하지 못하므로 상반유동한계가 발생시에 되도록 재순환펌프의 작동을 중지하였으며 또한 관이 수직하지 않으면 수막의 두께가 달라져서 물의 주입구의 입구에 상반유동한계가 발생하므로 관이 수직이 되도록 관심을 가져야만 했다. 그리고 관이 짧은 것은 상반유동 한계가 순간적으로 발생하므로 계측오차를 줄이기 위하여 반복 실험을 하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 표준 실험관에서의 상반유동한계 실험

표준 실험관에서의 상반유동한계에 관한 실험은 Wallis를 비롯한 기존의 실험자들에 의해서 밝혀진 사실들을 확인하고, 본 실험의 목적인 관의 직경, 길이 그리고 주입구 형태에 따른 효과를 비교하기 위한 참고 자료로 사용하기 위해 관의 상단부에 평판을 부착한 내경이 50mm, 길이가 1300mm인 관에서 수행하였다(Fig.4).

(1) 본 실험 방법에서 언급한 바와 같이 관 전체에, 고르게 수막이 형성되도록 물의 유량을 0.1603 kg/sec으로 고정시키고, 공기의 유량을 증가시키면 Fig.6와 같은 현상들을 확인 할수 있었다[3]. 이를 구체적으로 설명하면, 0.01204kg/sec이하의 공기유량까지의 공기와 수막이 외관상 아무런 변화없이 상반류를 이루며 흐른다〔Fig.6.(a)〕. 그러나 공기 유량이 보다 많아지면 관내에서 작은 물방울이 형성되며〔Fig.6.(b)〕, 공기유량이 더욱 증가하면 물방울의 크기와 수가 증가한다〔Fig.6.(c)〕. 그리고 계속 공기 유량을 증가시키면 물과 공기가 뒤엉킨 물기둥이 관내에서 형성되며, 이 물기둥은 일정한 위치를 중심으로 상하 요동(fluctuation)하게 된다.

(2) 공기유량이 0.01204kg/sec에 도달하면, 충

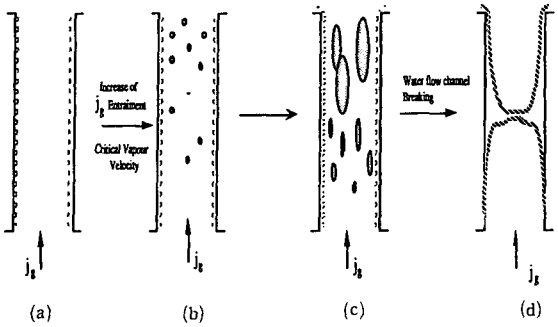


Fig. 6 Flooding sequence

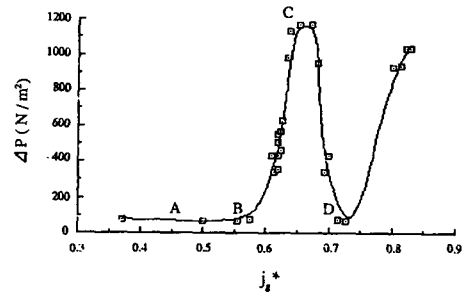


Fig. 7 Pressure drop in a single 50mm-diameter, 130cm-long channel

수 전선이 관의 하단부(기체 주입구)에서 발생하며, 공기의 유량이 증가함에 따라 상부로 거슬러 올라가는 현상을 관찰할 수 있었다[4]. 이는 물이 관의 상단부로 부터 수로를 따라 내려오면서 수막을 형성할때, 관의 하단부가 관의 상단부로부터 멀리 떨어져 있으므로 수막의 유속이 가장 빠른 곳, 즉 상대속도가 가장 큰 곳이 될 것이다. 따라서 상반 유동한계 조건을 만족하는 상대속도가 일정하다고 가정하면 공기의 유량이 증가한다는 것은 공기의 유속이 증가함을 의미하는 것이므로 물의 속도가 감소하여도 상반유동한계가 발생하게 된다. 그러므로 공기의 유량이 증가하면 관의 상부(액체 주입구에서는 물의 속도가 저속이므로)에서부터 물의 유속이 발달되므로(상반유동한계 조건에 도달하므로) 충수전선이 관의 상부로 이동하게 된다. 이러한 현상 때문에 관의 길이가 상반유동한계에 영향을 끼치리라고 판단된다.

(3) 공기 유량을 더욱 증가시키면 충수전선은 관을 거슬러 올라가 관의 상단부에 이르르게 된다. 이때 물이 관내로 거의 유입되지 못하는 정체현상이 발생된다. 그러므로 관내로부터 역류된 물이 2차 저장 탱크에 모여 수위를 증가시키게 된다. 이때 탱크내의 수두가 증가되고, 이증가된 수두가 상반유동한계를 야기시키는 공기의 물을 밀어 올리는 힘을 능가하면, 관내로 물의 유입이 재개된다. 이 재개된 물의 유입량은 처음 유량보다 적으므로 상반유동한계가 되기 위해서는 공기의 유량은 더욱 증가되어야 한다. 즉 적은 물의 유량에 대한 새로운 상반유동한계 조건을 만족하게 될때 또 다른 상반유동한계가 관의 하단부에서 발생한다.

(4) 위의 현상을 그림으로 그리면 Fig. 7로 나타낼수 있으며 이를 부언하여 설명하면, (a) 공기의 유량이 0.56555미만에서는, 즉 A부분에서는 단지 수막에 의한 압력이 유지된다. (b) 공기 유량이 증가하여 0.56555인 B부분에서는 충수전선이 관의 하단부에서 발생하여 이와 동시에 압력강하가 증가하기 시작한다. (c) 공기 유량을 계속 증가시키면 충수전선이 관을 따라 올라가며 또한 압력강하가 더욱 증가하게 된다. (d) 그러나 C지점, 즉 공기 유량이 0.71671부근에 이르면 압력강하가 갑자기 떨어지게 된다. 바로 이 순간이 위에서 언급하였던 충수전선이 관의 상단부에 이르는 순간으로, 충수전선 주위에 모여 있던 물기둥을 이룬 관 내의 모든 물이 관 밖으로 밀려나가고 또한 새로운 물도 관 내로 유입되지 못하는 정체현상이 일어나는 지점이다. 이렇게 되면 관내에는 공기만이 흐르게 되므로 관의 상단부와 하단부의 압력차는 급격히 줄어든다. 이런 상태가 계속되면 2차 저장 탱크내의 수위가 증가하고, 공기에 의한 유동한계를 극복할 수 있는 새로운 수위에 도달하면 다시 물이 유입된다. (e) 재개된 물은 공기 유량이 0.79211인 D지점부터는 압력강하가 다시 증가 된다. 이와 같이 관내의 압력강하 현상은 다른 여러 이유로 설명될 수 있겠지만 공기의 유량이 증가하므로 상반유동한계 발생시에 관 내의 정체되는 물의 양, 즉 물기둥의 길이가 증가하므로 이에 따른 수압이 증가하기 때문이다.

(5) 또한 본 실험에서 정의한 충수점에서, 물의 유량이 많은 경우(NJL=0.43073)가 적은 경우보다(NJL=0.40645) 적은 공기 유량에서 충수전선이 발생되며 따라서 압력강하의 급격한 증가도 적은 공기유량에서 발생한다(Fig.8). 이것은 물의 유량이 증가하면 수막의 두께가 증가하므로 관내를 흐를수 있는 공기의 단면적이 감소한다. 그러므로

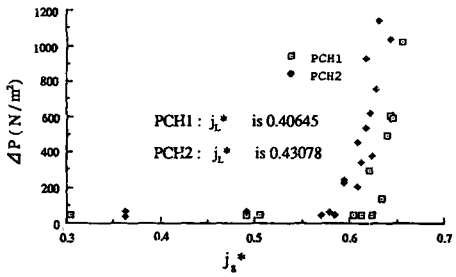


Fig. 8 Pressure drop in the channel vs. air nondimensional superficial velocity

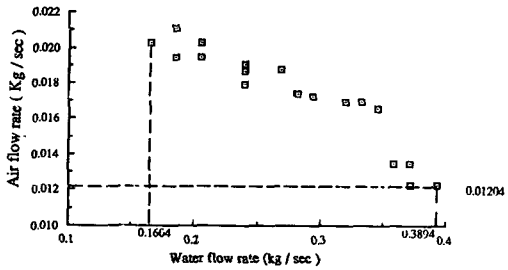


Fig. 9 Water flow rate vs. air flow rate in a tube with attached plate(D:5cm)

Table 2 Experimental data analysis on the standard tube

Nondimensional superficial veldcity of water j_L^*	Nondimensional superficial veldcity of air j_g^*	Caculation value (NJG) $j_g^*{}_{cal}$	Error
0.26612	0.48525	0.49574	-0.01
0.29753	0.47562	0.47813	-0.003
0.32252	0.46192	0.46413	-0.002
0.34184	0.44984	0.45330	-0.003
0.35826	0.44476	0.44409	0.001
0.37337	0.43582	0.43563	0.0002
0.38794	0.43052	0.43746	0.003
0.40265	0.41992	0.41921	0.001
0.41416	0.41687	0.41276	0.004
0.42496	0.40867	0.40671	0.002
0.43487	0.40524	0.40116	0.004
0.44379	0.39867	0.39616	0.003

적은 공기유량만으로 상반유동한계를 일으킬수 있는 공기유속을 얻을수 있기 때문이다.

(6) Fig. 9는 충수점에서 상반유동한계 발생시, 표준관에 대한 실험결과로 물의 유량이 증가하면 이에 상응하는 공기의 유량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 다른 실험자들이 상반한계유동 실험에서도 동일한 경우를 보이고 있으며 Wallis관계식도 이를 예측한 사실이다[1,4,5]. 본 실험에서 표준관내에 수막을 형성할수 있는 최소의 물의 유량은 0.1604 kg/sec이며, 0.3894 kg/sec 이상에서는 상반유동한계가 관의 하단부에서 발생하여 공기가 증가함에 따라 관을 따라 위로 올라가는 현상을 관찰할수 없었으며, 0.01204 kg/sec의 공기유량에서 순간적으로관의 상단부, 즉 액체 주입구에서 발생한다.

이상의 현상들을 반복 실험한 결과 재현성과 그때의 공기와 물의 유량과 관내의 압력차 값에 상당한 신뢰성을 보여 주었다. 본 실험에서 측정값들은 최소자승법에 의해서 분석하였으며 Table 2는 표준관에 의한 실험 결과이다.

5.2 관의 길이 변화에 따른 상반유동한계 실험

(1) 관의 길이를 변화시키면서 일정한 물의 유량에 대해서 공기의 유량을 증가시키면 표준 관에서의 현상과 같이 충수전선이 관의 하단부에서 발생하며, 공기가 증가함에 따라 관을 따라 위로 상승하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 길이에 상관없이 충수전선이 관의 상단부에 다다르면 물이 관내로 유입되지 않는 정체현상을 관찰할 수 있었으나,

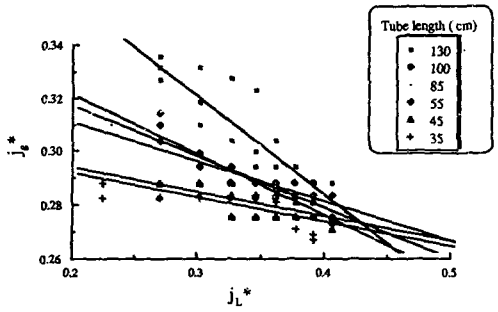


Fig. 10 The nondimensionalized superficial velocity of the air vs. water on the various length of attached plate-tube (D:80mm)

긴 관보다 짧은 관에서 물의 정체현상이 보다 오랫동안 지속되었다. 이는 관의 하단부에서 상반유동한계가 발생하면 2차 저장탱크의 수위가 증가하는데, 긴 관의 경우는 관내로 부터 역류되는 물의 양이 많으므로 짧은 관의 경우보다 2차 저장탱크의 수위가 이 정체현상을 극복할 수 있는 정도까지 빨리 증가하기 때문이다. 그러므로 관의 길이가 감소하면 할수록 상반유동한계가 발생하여 다시 감소된 유량에서 새로운 상반유동한계가 발생하는 주기는 길어진다.

(2) Fig. 10은 내경이 40mm인 관의 길이를 변화시키면서, 본 실험에서 정의한 충수점에서 상반유동한계가 발생하였을때, 물의 유량에 대한 공기 유량과의 관계를 무차원 속도로 나타낸 것이다. 여기서 물의 유량은 수막을 형성할 최소유량(0.16604 kg/sec)에서부터 일정한 간격으로 증가시켰다. 그러므로 관의 길이가 감소함에 따라 물의 무차원 겉보기 속도에 대한 공기의 무차원 겉보기 속도의 Wallis변화율(변수, m)이 감소함을 알수 있었다. 이것을 웰리스의 관계식〔식 (14)〕을 적용하면 C와 m은 Table 3(a)와 같다.

내경이 60mm인 관의 상단부에 평판을 부착한 실험결과는 Fig. 11과 같이 나타난다. 그러므로 본 실험에서 평판을 부착한 관은 Wallis의 결과와 비교하면 Round edged형태보다는 Sharp edged형태와 거의 일치함을 알 수 있다.

(3) Table 3 (b), (c), (d)는 관의 상단부의 형태를 예각, 둔각, 톱니로 교체하며 550mm, 450mm, 350 mm로 길이를 감소하면서 실험한 결과를 Wallis

Table 3 (a) Compare m with c on attached plate type-tube according to various length

Diameter (mm) / Length (mm)	80		60		50		40	
	c	m	c	m	c	m	c	m
1300	0.8045	0.5701	0.6878	0.775			0.4264	0.3648
1000	0.7682	0.4564	0.6322	0.547	0.849	0.6177	0.3636	0.225
850	0.7716	0.4288	0.6118	0.4678	0.7708	0.4354	0.352	0.1891
550	0.7177	0.3116	0.5592	0.4137	0.7498	0.3835	0.3381	0.1478
450	0.6743	0.2104	0.5909	0.394	0.434	0.3141	0.3098	0.091
350	0.674	0.2052	0.5103	0.3383	0.4216	0.2675	0.3083	0.0916

Table 3 (b) Compare m with c on attached dentic type-tube according to various length

Diameter (mm) / Length (mm)	80		60		50		40	
	c	m	c	m	c	m	c	m
550	0.8639	0.7573	0.6325	0.7124	0.4479	0.3092	0.33	0.119
450	0.7296	0.341	0.5313	0.3297	0.4315	0.2692	0.3199	0.1031
350	0.6881	0.2516	0.5355	0.3499	0.4281	0.253	0.3227	0.1105

Table 3 (c) Compare m with c on attached obtuse type-tube according to various length

Diameter (mm) / Length (mm)	80		60		50		40	
	c	m	c	m	c	m	c	m
550	0.791	0.4277	0.4988	0.2918	0.4602	0.3559	0.2057	0.1364
450	0.7573	0.4545	0.502	0.3207	0.4529	0.3476	0.3104	0.0838
350	0.6587	0.1705	0.433	0.0551	0.441	0.314	0.3244	0.1399

Table 3 (d) Compare m with c on attached acutic type-tube according to various length

Diameter (mm) / Length (mm)	80		60		50		40	
	c	m	c	m	c	m	c	m
550	0.7541	0.3455	0.4552	0.0144	0.4933	0.4077	0.3075	0.0939
450	0.7394	0.37	0.4532	0.0123	0.4853	0.4387	0.3076	0.0801

상수인 C와 m의 값으로 나타낸 것이다. 여기서도 평판을 부착한 관과 같이 공기와 물의 무차원 겉보기 속도의 변화률(m)은 관의 길이가 감소함에 따라 감소한다. 그리고 각각의 상단부의 형태에 따른 물의 유동은 Fig. 12와 같이 관찰되었다. 그러나 다공의 형태는 본 실험에서 정의한 충수점에서 상반유동한계가 발생되지않고, 곧바로 관의 상단부에, 즉 액체 주입구에서 발생하므로 언급하는 것을 제외하였다.

(4) Fig. 13은 물의 무차원 겉보기 속도(j_L^*)를 0.26601(실제물의 유량은 0.1604 kg/sec)으로 고정시킨 경우에 관의 내경이 80mm, 60mm, 40mm인

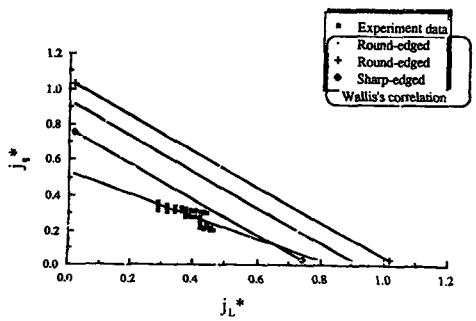


Fig. 11 Compare experiment data with Wallis's correlation (D : 6cm)

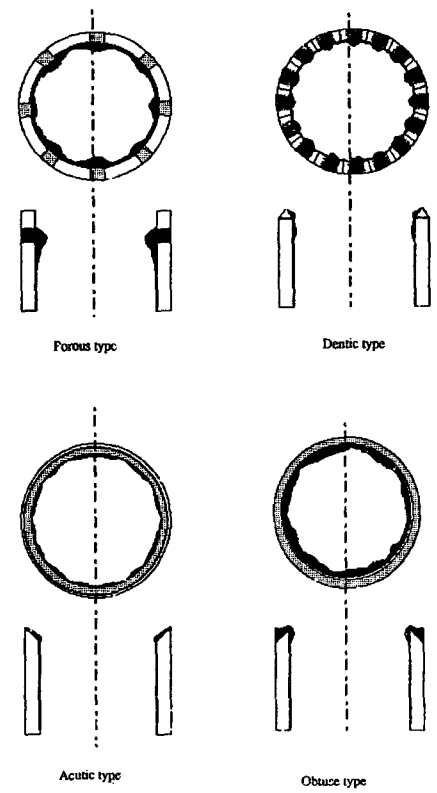


Fig. 12 Water flow pattern on the various water inlet type

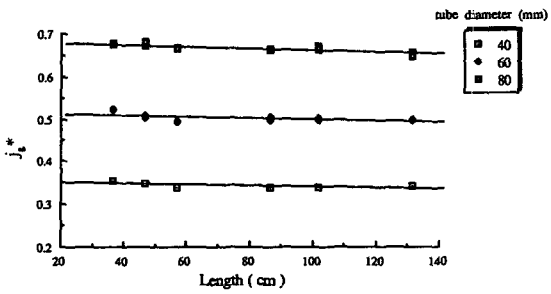


Fig. 13 The non-dimensional superficial velocity of air vs. the various length of tube (j_L^*=0.2660, D:80mm, 60mm, 40mm)

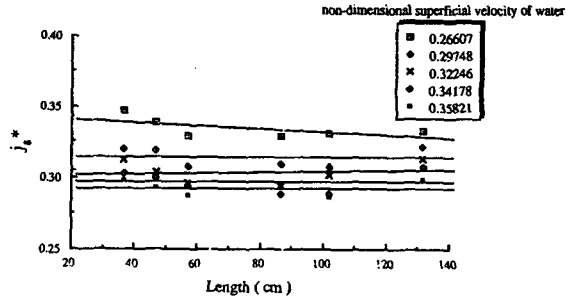


Fig. 14 The nondimensionalized superficial velocity of air vs. water on the various tube-lenght(D : 4cm)

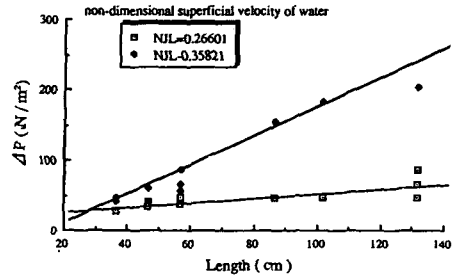


Fig. 15 Pressure vs. lenght of tube(D : 8cm)

각각에 대하여 관의 길이의 변화에 따른 공기의 무차원 겉보기 속도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 관의 크기에 상관없이 관의 길이에 대한 공기유량의 변화율, 즉 길이가 증가하면 공기 유량이 감소하는 비율은 별다른 차이를 나타내지 않는다. 그러나 관의 내경이 80mm인 그래프가 60mm, 40mm인 관의 그래프보다 위쪽에 존재한다. 이와같은 현상들중 전자에서는 상반유동한계 조건이 일정하다면, 관의 길이가 긴 관은 짧은 관 보다 관의 상단부에서 충수점과의 거리가 멀며 따라서 입구에서 멀어질수록 수막의 두께가 얇아(속도가 발달되므로)지며 속도가 증가한다. 또한 후자의 이유는 일정한 물의 유량에서 내경이 큰관이 작은 관보다는 관의 내경에 대한 수막의 두께의 비가 작기 때문에, 공기가 흐를수 있는 단면적이 증가하므로 공기의 유량이 증가해야만 유동한계를 만족하는 조건에 도달하기 때문이다.

(5) Fig. 14는 물의 유량 변화 및 관의 길이변화에 대한 공기의 무차원 겉보기 속도를 나타낸 것으로 물의 유량이 증가하면 공기의 유동 단면적이 감소하기 때문에 적은 공기 유량으로 충수점에 도달함을 보이고 있으며 이때 길이 효과는 앞에서 설명한 바와 같다.

(6) Fig. 15에서 나타 나듯이 관의 길이가 증가하면 관내의 압력강하는 증가한다. 그러나 물의 유량이 많은(NJL=0.35821)경우, 즉 수막의 두께가 두꺼운 경우는 수막이 얇은(NJL=0.26601)경우보다 동일한 공기 유량에서 압력강하가 크게 나타난다. 그러므로 상반유동한계 발생시, 물의 유량이 많아지면 물기등의 높이가 관의 길이 변화에 따라 크게 영향을 받지만, 물의 유량이 적은 경우에는 물기등의 높이는 관의 길이 변화에 영향을 덜 받음을 알수 있었다.

5.3 관의 크기(내경)에 따른 상반유동한계 실험

(1) Table 4와 같이 관의 크기변화에 대한 실험결과를 Wallis의 관계식에 적용하여 웰리스 상수인 C로 나타내면, 관의 크기가 증가함에 따라 C값이 증가한다. 이것은 같은 물의 유량에서 관의 크기 증가에 대한 수막의 감소의 비가 큰관이 작은 관보다 작기때문에, 즉 공기가 흐를수 있는 공기의 유동 단면적이 커지기 때문이다.

(2) 표준관에서와 같이 관의 하단부에서 충수전선이 발생하여 관을 따라 위로 상승한다. 또한 공기의 유량을 더욱 증가시키면 충수전선이 관의 상단부에 발생되며, 압력강하가 급격하게 감소하는 현상도 관의 크기에 상관 없이 (관의 내경이 20 mm 이하에서는 충수전선이 공기 유량이 증가함에 따라 상승하는 것을 관찰할 수 있었음) 관찰되었다. 그러나 특이한 점은 관의 크기가 큰관 (D= 80mm)에서는 관의 상단부에 상반유동한계가 발생

Tabel 4 (a) Values of c as a function of tube length and diameter for the attached plate-inlet

Length (mm) / Dia (mm)	1300	1000	850	550	450	350
	c	c	c	c	c	c
80	0.7283	0.8449	0.8040	0.7498	0.7109	0.669
60		0.7658	0.7373	0.673	0.5122	0.5652
50		0.6799	0.5909	0.6322	0.5252	0.4341
40	0.4244	0.3756	0.3529	0.3622	0.3777	0.2907

Table 4 (b) Valuse of c as a function of tube length and diameter for the attached obtuse-inlet

Length (mm) / Dia (mm)	550	450	350
80	0.7817	0.7506	0.6692
60	0.4945	0.5432	0.5308
50	0.5058	0.4639	0.4341
40	0.2909	0.3029	0.4336

Table 4 (c) Values of c as a function of tube length and diameter fot the attached dentic-inlet

Length (mm) / Dia (mm)	550	450	350
80	0.8214	0.7296	0.6953
60	0.6654	0.513	0.5541
50	0.4387	0.5188	0.4671
40	0.3273	0.5029	0.4316

Table 4 (d) Values of c as a function of tube length and diameter fot ehd attached acutic-inlet

Length (mm) / Dia (mm)	550	450	350
80	0.7541	0.6997	0.7105
60	0.7593	0.6207	0.6392
50	0.5201	0.481	0.5086
40	0.4908	0.4638	0.4126

함과 동시에 관내의 감소된 유량에 의해 또 다른 상반유동한계가 관찰되었다. 그리고 큰관에서는 작은 관보다 정체현상이 짧으므로 5.2절에서 언급한 대로 다시 새로운 유동한계가 발생하는 주기가 짧게 나타난다. 이것은 관의 크기가 증가하면 물기둥의 길이가 감소하므로 2차 저장탱크로 역류되는 물의 유량이 작기 때문이다.

(3) Fig. 16은 관의 크기에 따라 본 실험에서 정의한 충수점에서 상반유동한계의 형태를 나타낸 것이다. 내경이 80mm인 관에서는 완전하지 않는 작은 물방울이 형성되며 물기둥은 짧아진다. 그러나 관의 크기가 감소함에 따라 관내에 물방울의 수와 물기둥의 높이가 증가한다. 또한 관의 크기가 증가함에 따라 관내의 압력강하는 Fig. 17과 같이 나타난다. 이를 자세히 설명하면, 관의 크기가 증가함에 따라 관내의 압력 강하는 물의 유량에 상관없이 감소한다(두 그래프의 기울기는 거의 동일함). 그러나 물의 유량이 많은 경우(NJL=0.37333)의 그

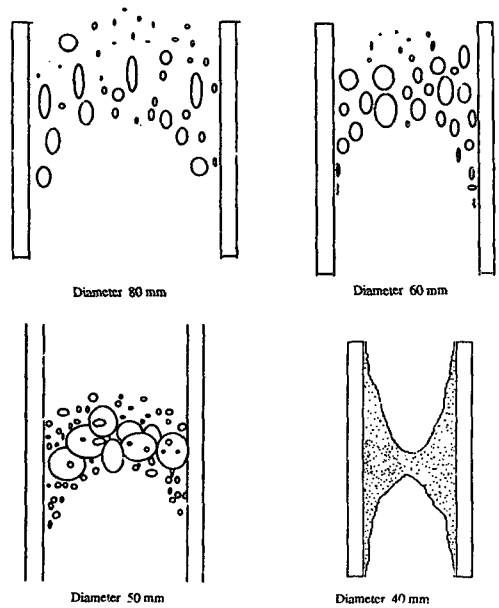


Fig. 16 CCFL phenomena by changing tube-diameter

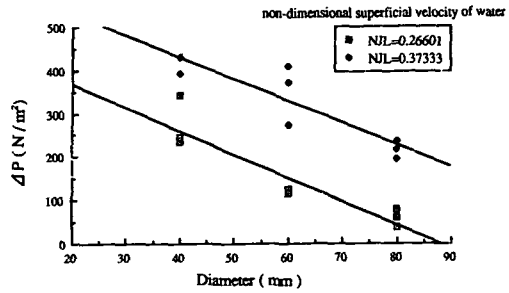


Fig. 17 Pressure vs. diameter of the tube(L : 130cm)

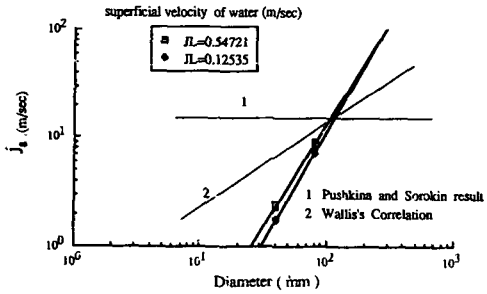


Fig. 18 Diameter effect in flooding point.

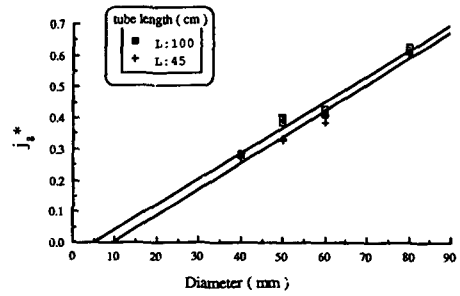


Fig. 19 Changing diameter of tube vs. the non-dimensional superficial velocity of the air(L : 100cm, 45cm, j_L^*=0.34170)

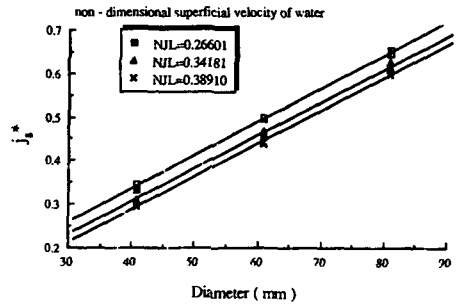


Fig. 20 Changing diameter of the tube vs. the non0dimensional superficial velocity of the air(L : 130)

래프가 적은 경우(NJL=0.26601)의 그래프로보다 위쪽에 존재한다. 이것은 동일한 크기의 관에서 물의 유량이 많은 것은 수막의 두께가 크므로 동일한 공기 유량에 물기둥의 길이가 길어지기 때문이다.

(4) Fig. 18은 충수점에서 상반유동한계가 발생할때, 관의 크기에 대한 공기의 겉보기 속도를 나타낸 것이다. 여기서 본 실험은 Pushkina and Sorokin[1]의 결과보다는 웰리스의 관계식에 근접함을 알수 있었다. 그림에서 보듯이 웰리스 관계식과 본 실험관의 차이가 나는 것은 본 실험에서는 증기 대신에 공기를 사용한 것과 기본적인 실험장치의 차이 때문으로 판단된다.

(5) Fig. 19는 관의 크기를 변화시키면서 물의 무차원 겉보기 속도를 0.34170으로 고정하여 공기 유량을 증가시키면서 실험한 결과를 관의 내경의 변화에 대한 공기의 무차원 겉보기 속도의 변화를 나타낸 것이다. 이를 부언 설명하면 관의 내경이 증가하면 공기의 유량도 따라서 증가하는 반면 관의 길이가 짧은 관은 긴 관보다 관의 크기의 증가분에 대한 공기 유량의 증가분의 비, 즉 기울기가 약간 큰 경향을 보인다. 그리고 길이가 긴관의 그래프가 짧은 관보다 아래쪽에 존재한다. 이것은 5.2절에서 언급한대로 동일한 관의 크기에서 관 길이가 증가하면 긴관이 짧은 관보다 관의 상단부에서 충수점까지의 거리가 멀어, 충수점에서 물의 유속이 증가하므로 유동한계 조건에 의해서 공기의 유속은 감소하기 때문이다. 한편 길이 증가분에 대한 수막의 두께 감소분의 비가 거의 일정하기 때문에 두그래프사이의 폭이 일정하다. Fig. 20에서와 같이 물의 유량에 상관없이 관의 크기가 증가하면 공기 유속은 증가한다. 그러나 물의 유량을 증가할수록 그래프가 아래 쪽에 존재한다. 이런 이유는 앞에서 언급 하였듯이 동일한 관의 크기에서, 물의 유량이 적은 경우가 많은 경우보다 수막의 두께가 감소하므로 유동한계조건에 의해서 공기가 흐를수 있는 유동면적이 증가 때문이다. 그러므로 물의 유량이 많은 경우는 적은 경우에 비해 동일한 공기 유량으로 유동한계조건을 만족시키지 못하므로, 공기의 유량이 감소된다.

6. 결 론

관의 길이, 크기 그리고 상단부의 형태를 변화시

키면서 상반유동한계에 관한 실험을 수행하여 다음과같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 표준 실험 수로내에서의 상반유동한계 현상

(i) 수막을 형성할 정도로 물을 고정시켜 놓고, 공기의 유량을 증가 시키면 관의 아래 부분에서 상반유동한계가 발생한다.

(ii) 이 때 공기를 어느정도 증가시키면 충수 전선(flooding front)이 관을 따라 거슬러 올라간다.

(iii) 공기를 어느 정도 증가시키면 액체 주입구에서 상반유동한계가 발생하여 물이 내려오지 못하는 정체 현상이 일어난다.

(iv) 이 정체 현상이 어느 정도 유지된다. 그리고 2차 저장탱크내의 물의 수위가 증가되면 관내로 물의 유입이 재게된다. 이때 감소된 물에의해서 수막을 형성하게 되면 새로운 상반유동한계 조건을 만족하는 충수전선이 발생한다.

(v) 상반유동한계 발생시, 물의 유량이 증가하면 공기의 유량이 감소하는 반비례한 특성을 갖는다.

(2) 관의 갈이변화에 따른 상반유동한계현상

(i) 관의 길이가 긴 관은 작은 관에 비하여 초기 상반유동한계 발생으로부터 새로운 상반유동 한계가 발생하는 주기가 짧다.

(ii) 상반유동한계 발생시, 물의 유속이 클 경우에는 관의 길이가 증가함에 따라 압력 강하가 증가한다.

(iii) 그러나 물의 유속이 작을 경우, 관의 길이가 증가하여도 압력 강하는 거의 일정해 진다.

(iv) 또한 물의 유속이 작을 경우, 관의길이가 증가하면 공기유속은 감소한다.

(v) 그러나 물의 유속이 클 경우에는 관의 길이에 상관없이 공기의 유속이 거의 일정해진다.

(3) 관의 크기 변화에 따른 상반유동한계현상

(i) 관의 크기가 큰 관은 상반유동한계가 발생하여 다시 새로운 상반유동한계가 발생하는데 소요되는 시간적 주기는 관의 크기가 작은 관보다 짧아진다.

(ii) 그리고 충수점에서 상반유동한계를 발생시키기 위해서는 관의 크기가 증가할수록 공기의 유량도 증가한다.

(iii) 충수점(flooding point)에서 상반유동한계 발생시에 관의 크기가 증가함에 따라 압력은 감소한다.

(iv) 관의 크기의 변화는 Wallis의 상관식의 C 값에 영향을 끼친다.

7. 앞으로의 장래 과제

본 실험에서는 관의 내경이 80mm, 60mm, 50mm, 40mm관을 사용하여 상반유동한계에 영향을 미치는 관의 길이, 크기, 주입구등의 효과들을 알아 보기위한 가장 기본적인 실험들을 수행하였으나 연구비 및 기간의 제약과 실험 장치를 개조해야하는 문제로 인하여 다음 사항들이 미해결 되어있으므로 이에 대한 장래 연구가 필요하다.

(1) 관의 물과 공기의 주입구 구조변화에 따른 실험 수행

(2) 40mm이하의 관을 사용한 실험이 수행 되어야 한다. (30mm, 20mm, 10mm)

(3) 본 실험에서 수행한 실험 자료와 1)항의 자료를 종합하여 보다 근본적인 상반유동한계에 대한 상관식 개발의 연구가 수행되어야 한다.

(4) 상반유동한계의 이용 분야에 따른 상사성이 성립될 수 있는 기체 주입구 모양변화에 따른 실험이 수행되어야 한다.

(5) 본 연구는 단열 조건(adiabatic)에서의 실험이므로 이를 연장하여 열의 입력이 존재하는 조건에서 실험이 필요하며 가열 효과의 영향도 분석되어야 한다.

(6) 원자로 노심의 연료 수로, 증기 발생기 수로 같은 실제 응용 분야의 실험도 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 문교부 지원 학술 연구조성 지원금으로 수행된 실험 결과 논문이며, 이에 관계자께 감사드린다.

참 고 문 헌

(1) Collier, J.G., 1972, "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill Book Company(UK), pp. 6~39.

(2) Bergles, A.E., 1969, "Two Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries", Hemisphere Publishing Company, pp. 1~34.

(3) Yukio Sudo, 1980, "Estimation of Average Void Fraction in Vertical Two-Phase Flow Channel Under Low Liquid Velocity", J. of Nuclear Science and

Technology, Japan, Vol. 17, No. 1, pp.1~15.

(4) Suzuki and Murase, 1987, "Countercurrent Air-Water Flow in Two Vertical Channels", J. of Nuclear Science and Technology, Japan, Vol. 23, No. 5., pp. 461~468.

(5) Murase, M. and Suzuki, H. 1984, "Evaluation of Conuter current Gas/Liquid Flow in Parallel Channels with Restricted Ends", Nuclear Technology, Vol. 68, pp. 408~417.

(6) Masanori Naitoh, Koichi Chino, 1978, "Restrictive Effect of Asending Steam on Falling Water during Top Spray Emergency Core Cooling", J. of Nuclear Science and Technology, Japan, Vol. 15, No. 11, pp. 806~815.

(7) Murase M. and Suzki, H. 1986, "Countercurrent Gas/Liquid Flow in Parallel Channels Simmulating a Boiling Water Reactor Core", Nuclear Engineering and Design 95, pp. 78~89.