

# 氣液二相流의 管內流動에 관한 研究

尹 在 福\*

## Abstract

The effects of pressure gradients and flow characteristics on the mixed flow of air and water in a pipe have been investigated experimentally. The entrance lengths based on the pressure gradients,  $-\frac{dp}{dl}$ , were obtained by changing the ratio of air and water in a horizontal pipe.

The pressure gradients were almost constant after a transient (point of the pipe, and the entrance length increased as the ratio of air and water increased, however, the pressure gradient in the pipe increased as the mixed ratio of air and water decreased.

## I. 서 론

氣液二相 液體의 흐름은, 공업상의 중요한 과제로서 boiler, 증기관 內의 흐름 등에 대한 문제와 연관시켜 지금까지 많은 연구가 각 방면에서 이루어지고 있다.

水平管內의 二相流에 대하여서는, Martinelli씨 등의 광범위한 실험결과가 있고, 수직관내 二相流에 대해서도 공기-물의 二成分系의 경우, 증기-물의 一成分系의 경우 많은 실험결과가 발표되어지고 있다. 그러나 氣液兩相의 혼합부 직후의 유동이든가, 管路內에 존재하는 bent, 급축소, 급확대 등을 지나는 流動에 관해서는, 今後의 연구의 소지가 많다. 이와 같은 영역에서는 흐름의 방향은 流動樣相이 현저하게 바뀌든가, 또는 確立流動 영역에서는 현저하게 다른 靜壓변동이 일어나는 특징을 볼 수 있고, 確立된 흐름은 별도로 규명하지 않으면 안 된다.

氣液二相流에 있어서 이와 같은 흐름을 非確立流라고 한다. 실제의 공업상의 문제 해결에 있어서 氣液二相流體의 流動조건은 공장의 종류, 그의 용량 및 작동조건에 의해서 크게 달라 지지만 非確立流를 수반하지 않은 흐름은 거의 없으며, 특히 극단의 경우는 管路 全體가 이 非確立 영역에 있는 곳도 적지 않다.

\*機械工學科 副教授

위에서 말한바와 같이 確立流動現象을 究明하는 목적을 가지고 광범위한 자료를 얻기 위하여 管의 bent, 급확대, 급축소 등으로 인한 영향을 조사하기 위한 연구의 일환으로 이 실험을 하여 그 결과를 분석하려 한다. 즉 내경 1 inch의 水平管을 가지고 水量과 空氣量의 혼합비율을 변화시켜 氣水 혼합 직후의 管軸에 따르는 壓力勾配의 변화 및 流動樣相과 이들의 관련성, 氣水 혼합점에서 壓力勾配가 確立流動이 될 때까지의 거리를 중심으로 하여 조사하기로 하였다.

## II. 이론과 고찰

氣泡流의 流動狀態는 環狀流와는 매우 다르고 관벽에 작용하는 剪斷力은 環狀流와 다른 경향이 있음을 표시하고 있다. 그러나 이 流動狀態에 적당한 고려를 하면 氣泡流에 대해서는 液相에 상당하는 평균 流速을 구할 수가 있다.

氣泡流에서 環狀流에 걸친 넓은 범위의 氣水 二相流에 대해서는 二相流의 마찰손실과 全量이 液相으로 흐르는 경우의 마찰손실의 比를 알 수 있다. 氣液二相流의 관벽의 마찰은 高速流의 경우 管徑이 증대하면 감소한다. 이것은 單相流의 경우와 같다. 그러나 液體의 流速이 낮은 경우의 管徑은 壓力勾配에 영향을 준다.

이것은 氣流速이 어느 정도 큰 경우이고, 管徑이 증가하면 氣水와의 사이에 slip가 증가하고 그 결과 壓力勾配가 증가한다. 管의 粗度는 관찰에 다소 영향을 준다. 벽이 몹시 거치른  $\left(\frac{\epsilon}{D} \approx 10^{-2}\right)$  경우, 영향이 크지만 管의 粗度가  $\left(\frac{\epsilon}{D} < 10^{-3}\right)$  정도이면 그 영향은 대단히 적다. 긴 管이 사용되는 경우에는 流出入端을 제외하고는 거의 全長에 걸쳐서 定常流이다. 이 流出入端의 영향에 대해서는 많은 연구가 되어지고 있으며, 이 실험에 의하면 流入端에서의 壓力勾配는 그 上流보다 특히 유량이 많을수록 상당히 크게 된다.

單相流의 경우와 같이 흐름의 기구에 미치는 管流入部 길이의 영향은 특히 벽의 마찰이 크고, 또한 氣體의 slip이 적은 경우에는 管徑에 대한 管長의 比가 증가함에 따라 감소한다. 그러나 이와 반대로 관벽이 매끈하고 氣體의 slip이 큰 경우의 流入部의 現象은 管徑에 대한

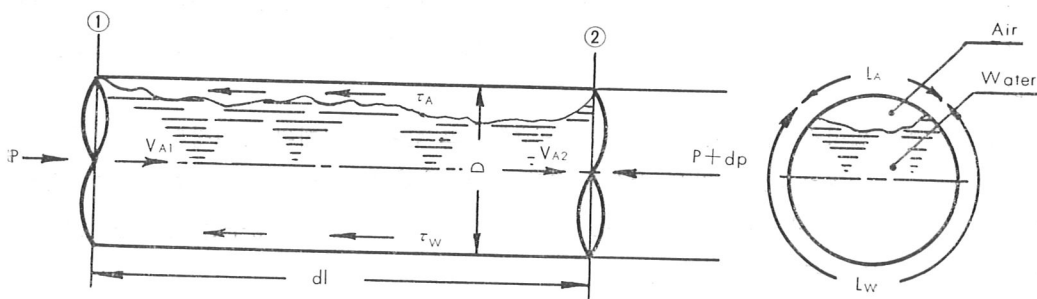


그림 1 자유물체도

管長의 比 뿐만 아니라 管長 자체에 의하여도 확실히 영향을 준다. 氣水 혼합점 직후에 있어서의 非確立流動영역의 壓力勾配의 變化를 高찰하여 보면 그림 1의 자유물체도에서 공기부와 관벽 사이의 전단응력을  $\tau_A$  (kg/m<sup>2</sup>), 水부와 관벽 사이의 전단응력을  $\tau_W$  (kg/m<sup>2</sup>), 接氣 길이 (dry perimeter)를  $L_A$  (m), 接水 길이 (wetted perimeter)를  $L_W$  (m)라고 하고, 단면 ①에 작용하는 壓力을  $p$  (kg/m<sup>2</sup>), 단면 ②에 작용하는 壓力을  $p+dp$  (kg/m<sup>2</sup>)라고 하며, 단면 ①의 공기 및 물의 속도를  $v_{A1}$  (m/sec),  $v_{W1}$  (m/sec), 단면 ②의 공기 및 물의 속도를  $v_{A2}$  (m/sec),  $v_{W2}$  (m/sec)라고 하고, 管의 직경을  $D$  (m), 管의 길이를  $dl$ 이라고 하면 운동량 방정식을 이용하여

$$p \frac{\pi}{4} D^2 - (p+dp) \frac{\pi}{4} D^2 - \tau_A L_A dl - \tau_W L_W dl = \frac{G_A}{g} (v_{A2} - v_{A1}) + \frac{G_W}{g} (v_{W2} - v_{W1}) \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $G_A$  (kg/sec),  $G_W$  (kg/sec)는 공기 및 물의 重量流量이고  $g$  (9.8m/sec<sup>2</sup>)는 중력가속도이다. (1)식을 정리하면

$$\frac{G_A}{g} (v_{A1} - v_{A2}) + \frac{G_W}{g} (v_{W1} - v_{W2}) = dp \frac{\pi}{4} D^2 + \tau_A L_A dl + \tau_W L_W dl \dots \dots \dots (2)$$

(2)식을 미분형으로 고치면

$$-\left( \frac{G_A}{g} \frac{dv_A}{dl} dl + \frac{G_W}{g} \frac{dv_W}{dl} dl \right) = dp \frac{\pi}{4} D^2 + \tau_A L_A dl + \tau_W L_W dl \dots \dots \dots (3)$$

그런데, 空氣部 및 水部の 平均속도를  $v_A, v_W$  또 공기 및 물만이 全部 管内를 채웠을 때의 平均속도를  $v_{A0}, v_{W0}$ 라 하고,  $K_W$ 를 氣水 혼합부의 전체적에 대한 물의 체적 즉, 물의 체적률이라고 하면

$$v_A = v_{A0} / (1 - K_W)$$

$$v_W = v_{W0} / K_W$$

이 성립되고 이것을 (3)식에 대입하고 정리하면,

$$\frac{G_W}{g} \frac{v_{W0}}{K_{W2}} \frac{4}{\pi D^2} \frac{dK_W}{dl} - \frac{G_A}{g} \frac{v_{A0}}{(1-K_W)^2} \frac{4}{\pi D^2} \frac{dK_W}{dl} = \frac{dp}{dl} + \frac{4}{\pi D^2} \tau_A L_A + \frac{4}{\pi D^2} \tau_W L_W \dots \dots \dots (4)$$

여기서 좌변 제 1 항을  $-\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_W$ , 제 2 항을  $\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_A$ , 우변 제 2 항을  $\left(\frac{dp_F}{dl}\right)_A$ , 제 3 항을  $\left(\frac{dp_F}{dl}\right)_W$ 라고 하면,

$$-\left(\frac{dp}{dl}\right) = \left(\frac{dp_M}{dl}\right)_W + \left(\frac{dp_M}{dl}\right)_A + \left(\frac{dp_F}{dl}\right)_W + \left(\frac{dp_F}{dl}\right)_A \dots \dots \dots (5)$$

로 표시된다. 여기서 (5)式的  $\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_W$  와  $\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_A$  는 물 및 공기의 운동량항이고  $\left(\frac{dp_F}{dl}\right)_W$  와  $\left(\frac{dp_F}{dl}\right)_A$  는 물 및 공기의 벽면 사이에서 일어나는 마찰항이고 式에서 보는 바와 같이 氣水兩相

의 운동량변화에 따르는 勾配와 流體와 管벽 사이에 작용하는 전단응력에 기인하는 壓力勾配의 습이라고 생각할 수 있다. 공기의 양이 그렇게 많지 않은 경우 (5)式的 우변 제 2 항은 공기에 의한 운동량의 항이므로 무시하여도 무방하다고 생각되며, 공기와 물의 전단응력을 비교하면  $\tau_A \cdot L_A \ll \tau_W \cdot L_W$ 로 볼 수 있다. 따라서 壓力勾配는 물의 운동량변화와 물과 管벽 사이에서 작용되는 전단응력에 의하여 결정된다고 보면 아래와 같은 式이 성립된다.

$$\left(-\frac{dp}{dl}\right) \approx \left(\frac{dp_M}{dl}\right)_W + \left(\frac{dp_F}{dl}\right)_W \dots\dots\dots (6)$$

### III. 실험장치 및 방법

실험장치는 그림 2에서 보는 바와 같이 water tank ①에서 tank valve ②를 지나 pump ③을 거쳐 壓力調整水槽 ④에 이른다. 이 壓力水槽는 일정한 소정의 압력을 ⑤의 handle의 조작으로 유지할 수 있으며 그 구조는 일정한 水頭를 유지하게 하기 위하여 二重 tank 장치로 만들어졌다. 이 tank에서 over flow되는 물은 pipe ⑥을 지나 다시 water tank ①로 되돌아 간다. 압력이 조정된 물은 pipe ⑦을 거쳐 flow meter ⑧로 물의 流量(m<sup>3</sup>/sec)를 측정한다. ⑧을 거쳐 나온 물은 氣水 혼합장치 ⑨에서 air compressor ⑩에서 나온 압축공기와 혼합되어진다. ⑨에서 혼합된 氣水二相流體는 pipe ⑪를 거쳐 다시 water tank ①로 되돌아 가며, 물은 이와 같은 장치에 의해 순환한다.

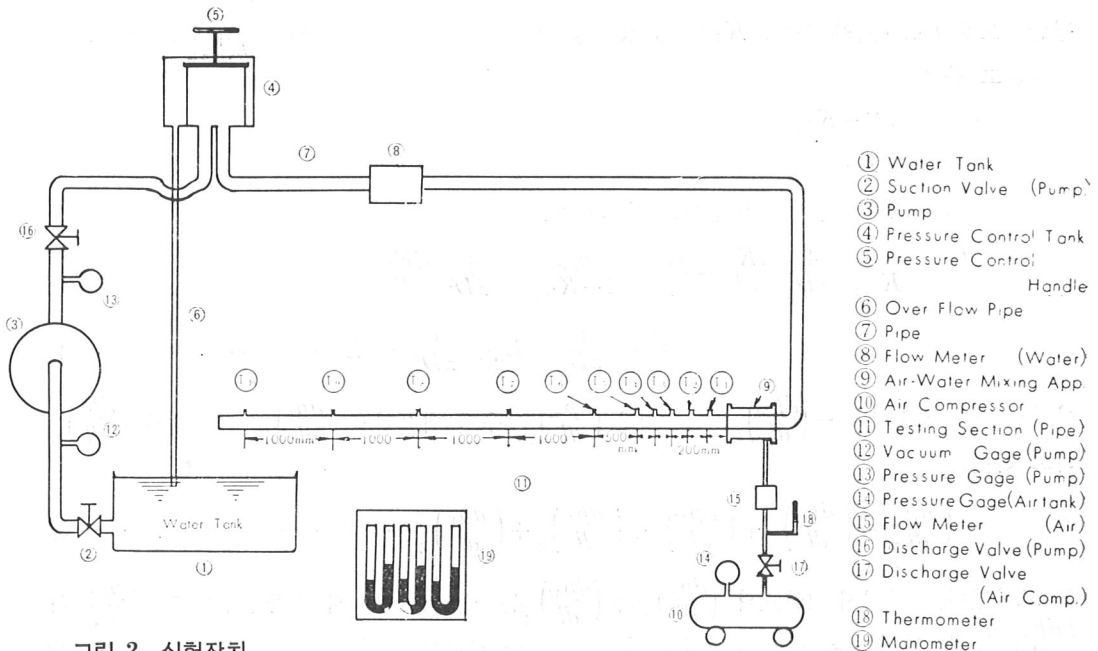


그림 2 실험장치

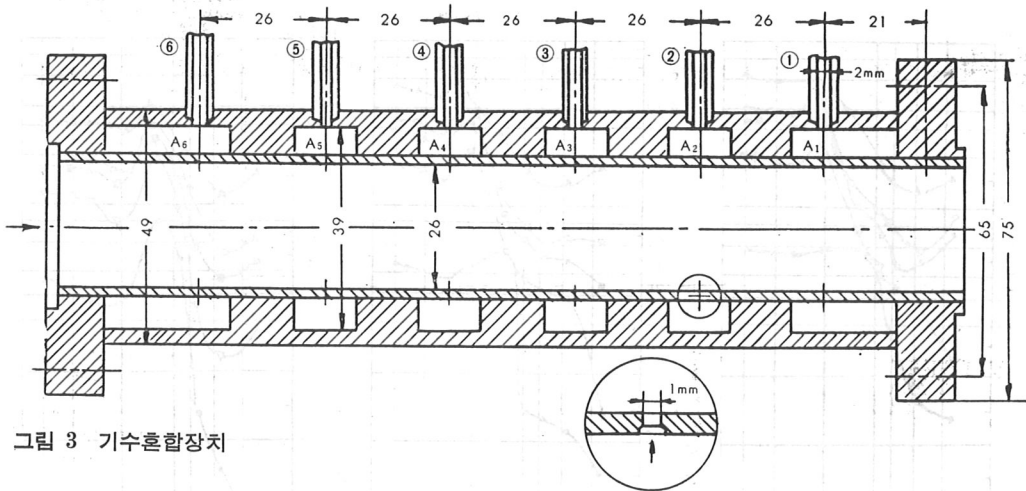


그림 3 기수혼합장치

pump에서 얻어지는 양정은 vacuum gage ⑫와 pressure gage ⑬에 의해 측정되어지며 air compressor ⑩에서 나오는 공기의 압력은 pressure gage ⑭에서 읽을 수 있으며, 空氣의 流量은 flow meter ⑮에서 計測할 수 있다. valve ⑯, ⑰는 각기 pump에서 나오는 유량과 air compressor에서 나오는 공기의 流量을 조정하며, 온도계 ⑱는 공기온도를 측정한다. 氣水혼합장치 ⑨는 그림 3과 같고 그림 4는 본 실험장치 전경이다. 이 실험장치의 중요 치수는 시험부관의 직경이 1inch이고, 길이 6m의 水平管을 氣水혼합부에 이어 놓았으며 관의 壓力測定用 tap는 氣水혼합부로부터 5개는 200mm 간격을 가지고 뚫었으며 다음은 500mm 간격으로 한개, 1000mm 간격으로 4개 도합 10개의 tap 구멍을 뚫었다. 그림 3의 氣水혼합부는 시험부의 관과 동일 직경 1inch의 水管路에 반경방향으로 공기가 들어가도록 구멍이 뚫어져 있다. 그림에 표시한 바와 같이 空氣流入 구멍은 1mm 직경의 것을 줄당 18개 원주를 등분하여 뚫었으며, 이것을 26mm 간격으로 管路에 따라 6줄 마련하였다.

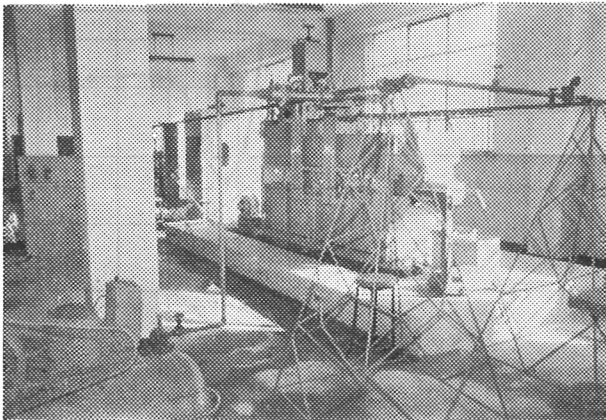


그림 4 실험장치 전경

실험에 있어서는 流入하는 공기량이 二相流管路에서의 靜壓변동에 의해서 시간적으로 변화하는 것을 막고 언제나 소정의 공기유량을 유지할 수 있도록 하였다.

二相流의 관내 압력강하는 manometer로 管路에 연한 두 점간의 差壓을 측정하고 이것에 의해서 결정하였다. 差壓을 測定할 때의 tap은 氣水 혼합부에서 최초의 1m에서는

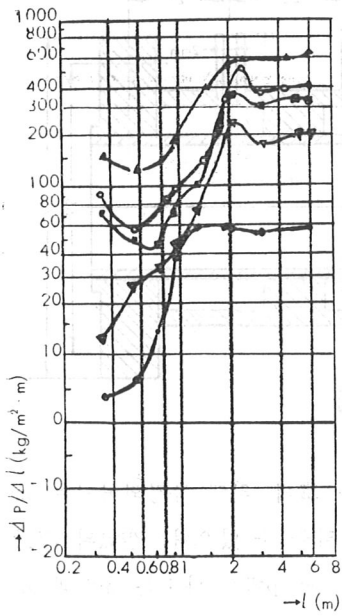


그림 5

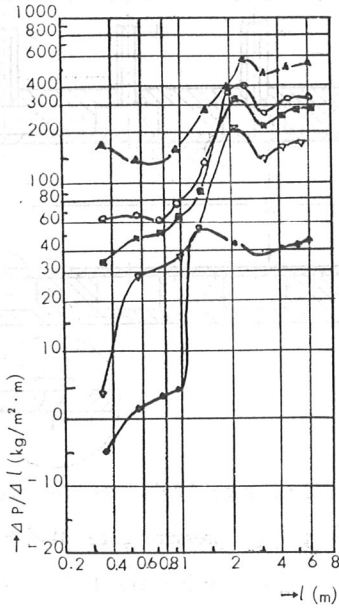


그림 6

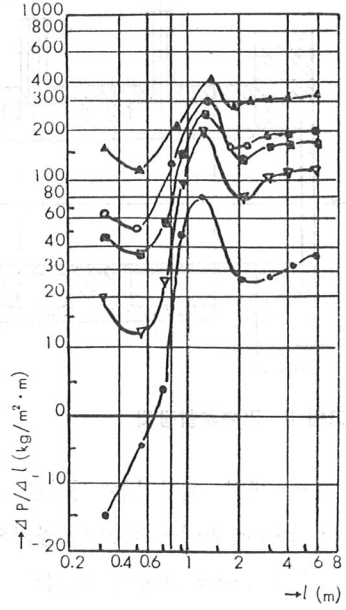


그림 7

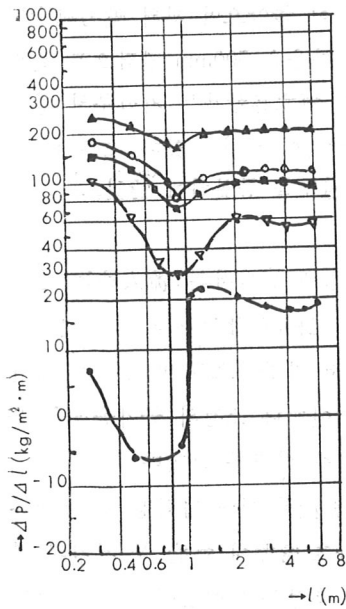


그림 8

$G_w = 0.142 \text{ kg/sec}$  - 1 - ●  
 $0.337 \text{ kg/sec}$  - 2 - ▽  
 $0.500 \text{ kg/sec}$  - 3 - ■  
 $0.606 \text{ kg/sec}$  - 4 - ○  
 $0.901 \text{ kg/sec}$  - 5 - ▲

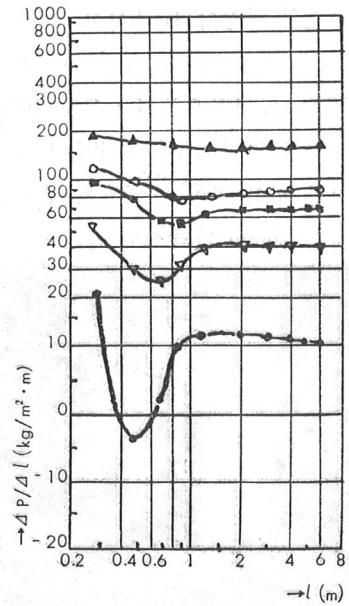


그림 9

$T_1-T_3$ ,  $T_2-T_4$ ,  $T_3-T_5$ ,  $T_4-T_6$ ,  $T_5-T_7$ 로 하고, 그 후로는 간격없이  $T_7-T_8$ ,  $T_8-T_9$ ,  $T_9-T_{10}$  순으로 壓力 tap을 택했다.

본 실험에 있어서 공기의 重量流量(kg/sec)을  $G_A$ , 물의 重量流量(kg/sec)을  $G_W$ 라 하고 공기와 물의 流速를 각기  $v_A$ ,  $v_W$ 라고 하면 그 범위는 아래와 같다.

$$G_A = (0.02 \sim 4.00) + 10^{-3} \text{ kg/sec}$$

$$G_W = (0.14 \sim 0.92) \text{ kg/sec}$$

$$v_A = (0.12 \sim 6.1) \text{ m/sec}$$

$$v_W = (0.17 \sim 2.7) \text{ m/sec}$$

## VI. 실험결과 및 분석

앞에서 설정한 두 점간의 靜壓差  $\Delta p$ 를 그의 管長  $\Delta l$ 로 나눈 값으로써 두 점간의 중앙에서의 壓力勾配  $\Delta p/\Delta l$ 라고 한다. 空氣의 重量流量을 일정히 하고 물의 重量流量을 변화시키어 실험한 결과를 도시하면 그림 5, 6, 7, 8 및 9와 같다.

壓力勾配는 管軸에 따라 변화하고 管端에서는 대략 일정한 값에 가까워지거나, 管軸에 따르는 변화가 유동조건에 따라서 결정되어 일정한 경향을 갖는 曲線이 된다.

前者는 壓力강하가 비교적 적고 공기의 팽창을 무시할 수 있는 경우이고 後者는 팽창에 의한 기체 체적물의 변화를 무시할 수 없는 경우이다. 壓力勾配의 변화과정은 공기와 물의 流量에 따라서 현저하게 달라지며 그 변화의 크기는 氣水 혼합점으로부터 약 3m까지의 영역에서 가장 두드러지게 나타나고 있다. 이 영역이 確立流動에 이르는 소위 遷移구역이라고 말할 수 있는 범위로 보여지며, 氣水 혼합부 직후의 非確立流動 영역이라고 말할 수 있다. 공기의 重量流量을 일정하게 하고 물의 重量流量을 변화시킨 경우 非確立 구역에서는 일반적으로 물의 유량이 변화함에 따라 壓力의 변화의 기울기가 적어지고 있다.

氣水混合點으로부터 流動遷移點까지는  $\left(\frac{dK_W}{dl}\right) > 0$ 의 영역이 된다고 볼 수 있으므로 (5)식의 우변 제 1항  $\left(\frac{dp}{dl}\right)_w$ 는 負의 값을 취한다. 또한 遷移點에 가까워짐에 따라  $K_W$ 는 증가하며,  $\left(\frac{dK_W}{dl}\right)$ 은 영에 접근하기 때문에 그 절대값은 적어질 것으로 보여지고 遷移點은 대략  $\left(\frac{dK_W}{dl}\right) = 0$ 에 해당하는 點으로 볼 수 있으므로 이 點 근처에서  $\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_w$ 는 영이 된다. 이 遷移點을 지나면 액체체적물  $K_W$ 는 유동방향으로 급격하게 감소되면서 一定한 값에 가까워진다.

실험결과의 표시한 바에 의하면 壓力勾配  $\left(-\frac{dp}{dl}\right)$ 의 極小値는 반드시 正의 영역에 머무르는 것은 아니고 負의 영역에 들어갈 수도 있다. 이와 같은 것이, 일어나는 이유를 설명하기 위해서는  $\left(\frac{dp_F}{dl}\right)_w$ 와  $\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_w$ 가 氣水 各 流量의 조합에 의해서 상대적으로 어떻게 변화하는가를 생각해 보면, 지금  $\left(\frac{dp_F}{dl}\right)_w$ 가 물의 운동 energy  $\frac{1}{2g}\left(\frac{v_{A0}}{K_W}\right)^2 \gamma_w$ 에 비례한다면  $\left(\frac{dp_M}{dl}\right)_w$ 는 式(5)의

우변 제 2 항에서 알 수 있듯이 물의 운동 energy는  $\left(\frac{dK_w}{dt}\right)$ 와 비례하므로  $\left(\frac{dK_w}{dt}\right)$ 가 현저하게 변화하는가, 않는가에 따라서  $\left(-\frac{dp}{dt}\right)$ 에 미치는  $\left(\frac{dp_M}{dt}\right)_w$ 의 영향이 크게 변한다. 그러므로 氣水混合點으로부터 遷移點까지의 영역에서는 혼합 직후에 있어서 통상 水流量이 비교적 적은 경우  $K_w$ 가 1보다 상당히 적은 값을 취하면  $K_w$ 의 변화폭이 크게 될 수 있지만 거꾸로  $K_w$ 가 1에 가까운 값 즉, 水流量이 큰 경우를 취하면 그의 변화폭은 극히 적게 된다. 이것은 바로 前者에서는  $\left(\frac{dK_w}{dt}\right)$ 가 크게 될 수 있는 것에 비하여 後者는 작은 변화폭에 머무르는 것을 뜻한다. 이 결과 물의 유량이 적은 경우는  $\left(\frac{dp_M}{dt}\right)_w$ 의 負의 값이 상대적으로 크게 되고,  $\left(-\frac{dp}{dt}\right)$ 를 상당히 끌어 내릴 수 있다.

## V. 결 론

水平管에 있어서 氣水混合部 直後の 流動을 실험조사한 결과를 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 管軸에 연하여는 壓力勾配는 流動樣相과 밀접한 관계가 있고, 流動이 確立할 때까지의 壓力勾配 변화는 주로 氣水兩相의 운동량 변화에 기인한다고 생각할 수 있다.
2. 氣水混合點에서 流動의 遷移點까지의 거리는 본 실험에서는 대체로 3m까지로 볼 수 있으며 遷移點 이후에는 管長의 관계없이 管長에 대한 壓力강하 $\left(-\frac{dp}{dt}\right)$ 는 거의 一定, 그림에서 水平한 값을 보여 주며, 確立流動에서의 壓力강하는 큰 차가 없음을 보여 주고 있다.
3. 空氣의 混合量이 감소함에 따라 混合部에서 遷移點까지의 길이는 감소되고 본 실험의  $G_A=0.203 \times 10^{-3}$  kg/sec에서는 1m 정도임을 알 수 있으며, 일반적으로 氣水混合比가 증가함에 따라 遷移 길이가 증대하고 있다.
4. 一定한 공기 重量流量( $G_A$ )에 대해서 물의 重量流量( $G_w$ )을 증가시켰을 때 즉, 氣水混合比가 감소함에 따라 管長에 대한 壓力勾配 $\left(-\frac{dp}{dt}\right)$ 가 증가하고 있다.
5. 確立流動이 되는 遷移點까지는 壓力勾配의 변동이 심하며 流動樣相은 管軸에 따라서 변화하고 遷移點을 경계로 해서 다른 壓力勾配現狀을 볼 수 있다.

## 參 考 文 獻

1. R.C. Martinelli, Trans. ASME 66-2 (1944) 139; R.W. Lockhart & R.C. Martinelli Chem. Engng. Progr., 44-1 (1949) 39.
2. D.J. Nicklin 外 Inst. Mech. Engrs., Paper No. 4 (1962).
3. 植田, 日本機械學會論文集, 23-132, 553.
4. 植田, 日本機械學會論文集, 33-248, 601.
5. 平田外, 日本機械學會論文集, 33-254, 1653.
6. S. Levy, Trans. ASME. Ser. C, 85 (1963~2) 137.