

# 非定常流의 流量測定

任 將 淳\*

## 1. 서 론

最近의 科學技術의 進歩에 따라서 非定常流의 計測問題가 많은 關心을 모으고 있으며 이에 關한 論文도 많은 數가 發表되고 있다.

內燃機關, 往復式 pump, 壓縮機는 물론 Turbo式의 流體機械, 蒸氣 및 gas turbine에 있어서도 機械內部 및 이것에 關聯한 管路內의 흐름狀態는 機械가 一定한 條件下에서 安定으로 運轉되고 있다 하여도 미시적인 觀點에서 보면 항상 非定常的인 要表가 포함된 非定常狀態가 된다. 이것은 機械內에서의 回轉車의 回轉, 流體의 流動에 있어서 일어나는 剝離에 따라 發生하는 vortex 등에 起因하는 것이다.

流體의 흐름 속에는 항상 어느 程度의 變動成分이 包含되고 있으며 따라서 機械性能의 엄밀한 評價나 性能改善에는 이러한 흐름의 非定常性을 고려하면서 必要한 測定을 行하여야 한다.

또한 管路의 流量 또는 어떠한 點에서의 流速을 測定하고 제어할 必要가 있을 경우에는 흐름 狀態의 時間的인 급격한 變化를 追跡할 수 있는 檢出器가 必要하며 이때 測定의 精度는 計器의 動特性에 따라 支配될 것이다. 따라서 이 경우 計器는 應答性이 좋으며 또 그 指示值가 測定되는 量과 直線的인 關係에 있는 것이 좋겠다.

一般적으로 定常流에 대하여 使用이 規定되고 있는 計器를 非定常流에 대해 使用하면 큰 誤差가 生기는 것이 대부분이며 이러한 點을 충분히 고려하여 計器를 選擇하여 使用할 必要가 있다.

現在의 단계에서는 非定常流의 性質, 그 自體에도 더욱 未知의 點이 있으며 또한 測定方法 및 測定計器도 계속적으로 새로운 것들이 出現되고 있으므로 이들 非定常流의 計測에 대해 全般的인 問題를 記述 한다는 것은 매우 어려우며 따라서 여기서는 非定常流의 流動을 支配하는 力

\* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

學的 無次元 parameter 를 述하고 非定常流의 測定原理를 概說하기로 한다.

## 2. 非定常流에 있어서 無次元Parameter 와 非定常의 尺度

非定常流에 있어서는 流體의 運動方程式을 解折的으로 論다는 것은 一般적으로 매우 곤란하기 때문에 最近에는 大型 computer 를 使用하여 數值解를 求하는 方法을 채택하고 있다. 그러나 이것도 한계가 있어 實用上 부디치고 있는 非定常流의 大部分은 그 本質을 떠나지 않는 범위에서 近似的으로 푸는 경우가 많다. 이것도 불가능한 경우에는 흐름의 相似性을 支配하는 無次元 Parameter 를 써서 問題를 解決하는 方式을 使用한다.

問題를 간단히 하기 위하여 二次元流을 생각하고 그림 1과 같이 흐름방향의 壁에 따라 x 軸을, 그리고 이것에 直角方向에 y 軸을 잡으면 Navier-Stokes의 運動方程式의 x 方向의 式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

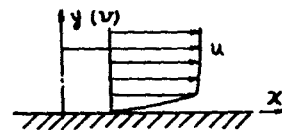


그림 1. 壁面에 따른 흐름

다만 u, v는 각각 x, y 方向의 速度, p는 壓力, t는 時間, ν는 流體의 動粘性係數를 表示한다.

흐름의 非定常性을 알려면 加速度的 非定常項  $\frac{\partial u}{\partial t}$ 와 對流項  $u \frac{\partial u}{\partial x}$ ,  $v \frac{\partial u}{\partial y}$  및 粘性 抵抗項  $\nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 의 關係를 알아볼 필요가 있다. 그때 x 方

向(主流)의 速度  $u$ 가 이것에 直角인 速度  $v$ 에 비해 충분히 크고 또한 壁面에 直角인 方向( $y$ )의 句配  $\frac{\partial}{\partial y}$ 가 主流方向의 句配  $\frac{\partial}{\partial x}$ 에 비해 충분히 큰 것을 생각하면 對流加速度項으로  $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 를, 粘性低抗項으로는  $v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 을 代表로 잡을 수가 있다.

지금 物體의 主流方向( $x$ )의 代表길이를  $L$ (管內 흐름에서는 管길이, 流體속에 있는 어떤 物體의 경우는 그 길이) 壁面에 直角方向( $y$ )의 代表 길이를  $d$ (管內 흐름에서는 管의 안지름, 流體속에 있는 어떤 物體의 경우는 物體의 두께, 또는 지름)로 表示하는 것으로 한다. 또 非定常流로 脈動流를 예로 하고 그 周波數를  $n$ , 主流의 代表速度를  $V$ 로 잡는다. 또한 크기의 程度와 같은 경우를 記號 $\sim$ 로 表示하면  $u \sim V$ ,  $\frac{\partial}{\partial t} \sim n$ ,  $\frac{\partial}{\partial x} \sim 1/L$ ,  $\frac{\partial^2}{\partial y^2} \sim 1/d^2$  임으로 다음의 關係가 얻어진다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} \sim nV, u \frac{\partial u}{\partial x} \sim \frac{V^2}{L}, v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \frac{vV}{d^2} \dots (2)$$

만약 流體의 壓縮性을 고려해야할 경우에는 壓縮波의 傳播速度를  $C$ 라 하면 그 영향은 Mach 數  $Ma = V/C$  로 表示된다.

一般的으로  $Ma < 0.2$  이면 壓縮性의 영향은 적어서 무시된다. 壓縮波의 波長은 主流方向( $x$ )의 代表길이  $L$ 의 order 를 갖고, 그리고 振幅은 지름  $d$ 의 order 를 가짐으로<sup>(1)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t} \sim \frac{C}{L} \text{ 또는 } \frac{V}{d}, \frac{\partial u}{\partial t} \sim \frac{VC}{L} \dots (3)$$

여기서 式(2)의 各項의 比를 잡고 式(3)을 사용하면

$$\frac{\partial u}{\partial t} / u \frac{\partial u}{\partial x} \sim \frac{nL}{V} \sim \frac{C}{V} \dots (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \frac{nd}{V} \cdot \frac{Vd}{v} = \frac{nd^2}{v} \dots (5)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \frac{VL}{v} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^2 \dots (6)$$

윗式의 各項은 無次元數  $d/L$ ,  $C/V$ ,  $nd/V$  (또는  $nL/V$ ),  $Vd/v$  (또는  $VL/v$ ) 組合으로 되어 있다.  $d/L$  은 流路(物體)의 가로와 세로의 치수比로서 流路(物體)의 形狀을,  $C/V$  는 Mach 數로 流體의 壓縮性을,  $Vd/v$  는 Reynolds 數로서 粘性의 影響을 表示한다. 또  $nd/V$  는

Strouhal 數  $St$ 로서 흐름의 非定常의 程度를 表示하는 것이며 運動方程式(1)의 加速度의 比定常項과 對流項의 比이다.

nozzle 이나 orifice와 같이 두 點사이의 差壓에 의해 流量을 求하는 計器에 있어서는  $St < 0.02 \sim 0.002$  면 準定常流로 생각할 수가 있고<sup>(2)</sup> 흐름狀能은 물론 時間에 따라 變化하지만 各 순간을 定常流로 생각하여 流動를 解折할 수가 있다.

단면적이 一定한 直線管路에 있어서는 主流速度의 길이 方向( $x$ )의 變化는 斷面內( $y$  方向)에 比較하여 적어서  $u \frac{\partial u}{\partial x} \sim 0$  이 되고 對流加速度를 無視해도 좋은 경우가 된다.

管內 흐름에 있어서는 式(5)로부터 알 수 있는 것과 같이 Strouhal 數  $St$  와 Reynolds 數  $Re$ 의 곱 즉  $nd^2/v$  이라는 parameter가 流體 摩擦의 影響을 表示하는 것이고 이 값의 크기에 의하여 管內의 流速分布가 큰 影響을 받는다.

그림 2는 그 예를 表示하는 것으로서 脈動流에 있는 速度分布의 한 周期사이의 變化를 보여준다.<sup>(3)</sup> 여기서는 管의 지름  $d$  대신 管의 반지름  $a$ 를, 그리고 脈動周波數  $n$  대신에 角振動數  $W = 2\pi n$ 을 잡고 있고  $a^2w/v = 1$ 과 25의 경우를 比較하고 있다.

實線:  $a^2w/v = 25$ , 虛線:  $a^2w/v = 1$

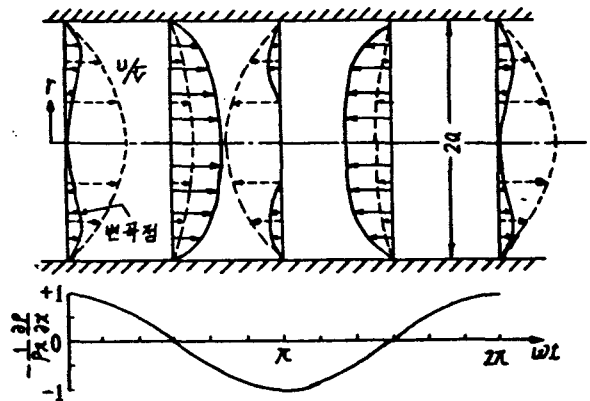


그림 2 脈動流에 있어서 速度分布  $a^2w/v = 1$ 의 경우를 보면 速度形狀은 壓力變動과 거의 같은 位相으로 變化하며 壓力句配  $\frac{\partial p}{\partial x}$ 가 크면 클수록 速度가 빠르고 또 各瞬間의

速度分布形狀은 포물선형이다.

한편  $a^2 w / \nu = 25$ 의 경우는 速度와 壓力과는 같은 位相으로 變化하지 않고 速度分布形狀에 變曲點을 갖는 것 같은 순간도 있다. 또 뒤에 記述하는 것과 같이 流動이 層流로부터 亂流로의 遷移를 定하는 Reynolds 數  $Rec$  도 위에 말한 無次元 parameter  $a^2 w / \nu$ 에 의해 규정된다(그림 3 참조).

이상의 例에서 알 수 있는 바와 같이 直求管内의 速度分布나 遷移를 定하는 臨界 Reynolds 數는 流體摩擦의 影響이 決定的이지만 一般의인 경우에는 非定常性의 影響은 먼저 記述한 바와 같이 運動方程式의 加速度項中에서 非定常項과 對流項의 比로서 생각하여도 충분하다.<sup>(1)</sup>

그 경우에는 Strouhal 數  $St = nL / \nu$  ( 또는  $nd / \nu$ ) 이외에 比수인  $L/d$ , Mach 數  $Ma = V/C$ 를 고려하여도 좋으며 특히 低速의 경우에는  $Ma$ 數의 影響은 생각하지 않아도 된다.

뒤에 6에서 기술하는 바와 같이 管路의 脈動流를 tank를 設置해서 감쇠시켜 그 流量을 nozzle, orifice 등의 流量計로 測定하는 것이 있으며 이 경우의 脈動流成分에 의한 測定誤差를 支配하는 것으로는 다음과 같은 無次元 parameter가 알려져 있다.<sup>(4)</sup>

$$N_H = \frac{XP}{M} \frac{n}{F} \frac{p_0 - p}{\bar{p}} \dots \dots \dots (7)$$

여기서  $X$ 는 tank의 體積,  $\bar{p}$ 는 tank內的 平均壓力이다.

지금 管路의 斷面積을  $A$ , tank의 等價길이를,  $le$ , 平均流速을  $\bar{V}$ 로 하면  $X = A \cdot le$ ,  $M = A \cdot \bar{V} \cdot \bar{p}$  임으로 式(7)은 다음과 같이 쓰여진다.

$$N_H = \frac{A \cdot le \cdot \bar{p} \cdot n}{A \cdot \bar{V} \cdot F} \cdot \frac{p_0 - p}{\bar{p}} = \frac{nle}{\bar{V}} \cdot \frac{p_0 - p}{F} \dots \dots \dots (8)$$

따라서  $N_H$ 는  $nle / \bar{V}$ 인 Strouhal 數와  $p_0 - p / \bar{p}$ 인 壓力 比의 곱으로 되며 이경우에도 Strouhal 數가 測定誤差를 支配하는 것을 알 수 있다.

### 3. 臨界 Reynolds 數와 脈動流成分

管内의 流動이 層流에서 亂流로 遷移하는 臨界 Reynolds 數  $Rec$ 는 흐름內에 包含되어 있는 脈動의 量에 따라 變化한다.

이 事實은 特히 差壓流量計나 Pitot管 等과 같이 흐름에 따라 設置한 固體面上의 壓力差에 의하여 流量 및 流速을 求하는 計器에 있어서는 충분한 주의를 기울여야 한다. 定常流에 있어서는 Reynolds 數  $Re = Vd / \nu$ 가 臨界值  $Rec \approx 2200$  이하이면 흐름은 層流이며 亂流로의 遷移는 거의 일어나지 않는다.

지금 管内의 時間平均流速( $V$ 의 時間平均值)을  $\bar{V}$ ,  $\bar{V}_p$ 를 脈動流成分의 速度振幅,  $w = 2\pi n$ 을 脈動의 角振動數,  $Re = \bar{V} \cdot d / \nu$ 를 脈動流의 Reynolds 數로 할 때 臨界 Reynolds 數  $Rec$ 를  $\Omega = a\sqrt{w/\nu}$ 인 parameter 로하여  $\lambda = \bar{V}_p / \bar{V}$ 에 대해 表示하면 그림 3과 같이 된다.<sup>(6)</sup> 各  $\Omega$ 에 대한 曲線의 윗쪽이 不安定(脈動이 增幅된다)한 領域이고 아래쪽은 安定한 領域(層流가 된다.)이다. 지금  $\Omega =$ 一定의 線, 즉 脈動周波數  $n$ 이 一定한 線에 對해 考察해 본다.  $\lambda = 0$  (定常流)의 경우로부터  $\lambda$ 를 增加해 감에 따라 臨界 Reynolds 數의 값은 定常流의 값 약 2200부터 增大하여 最大값에 到達한후 감소하여 처음 값보다도 작어진다. 이 最大값은  $\Omega$ 가 감소하면 커지며  $\Omega = 7.8$ 에서는 약 2800이었던 것이  $\Omega = 4.0$ 에서는 약 5100이 된다. 또  $\Omega$ 에 대한 曲線의 오른쪽 밑으로 기준部分에 있는 II 記號는 送流가 發生하는 點을 表示하고  $\lambda$ 의 값이 낮은 部分의 記號 I로 表示된 것은 管斷面의 速度分布 曲線에 그림 2에서 본 것과 같은 變曲點이 나타나기 시작하는 點이다.

### 4. Orifice 및 pitot管에 의한 測定の 問題點

定常流의 測定에는 이미 잘 알려진 orifice 및 pitot 管이 많이 사용되고 있다.

그러나 이들은 모두가 흐름의 上流와 下流의 固

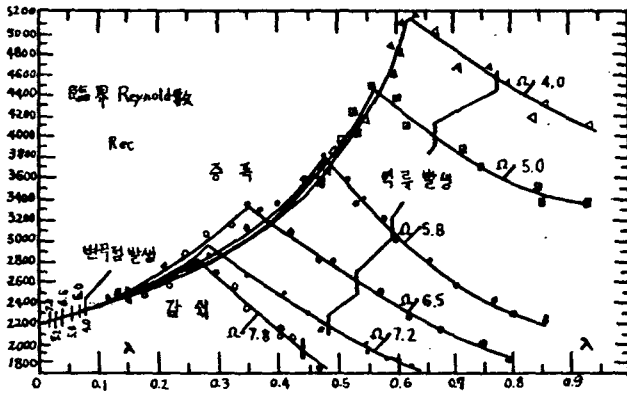


그림 3. 脈動流에 있어서 臨界 Reynold 數

面에 있어서의 壓力差에 의한 것이므로 流量  
 流速을 求함에 있어서 흐름의 非定常成分이  
 없다면 測定誤差가 發生할 수 있다.  
 지금 그림 4 와 같은 orifice 의 흐름을 예로들어

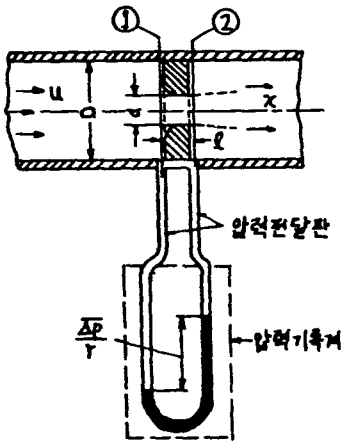


그림 4. Orifice meter

非定常性의 問題를 새각해 보자. 非定常性의 영  
 향만을 생각하기 위해 式(1)에 있어서 점성항을  
 생략하고 x 方向의 一次元흐름이라 하면,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (9)$$

이 경우 연속방정식은 A를 斷面積으로 하고  
 非壓縮性流體를 가정하면

$$uA = \text{Const} \dots\dots\dots (10)$$

式(9)를 斷面①부터 ②까지 積分하면

$$P_1 - P_2 \equiv \Delta p = (1 - m^2) \frac{U_2^2}{2} + \int_1^2 \frac{\partial u}{\partial t} dx, (m = A_2 / A_1) \dots\dots\dots (11)$$

定常流에서는  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$  임으로 첫식부터

$$U_2 = \sqrt{2\Delta p / (1 - m^2) \rho} \dots\dots\dots (12)$$

여기에 流量係數를  $C_D$ 로 하면 質量流量은

$$M = C_D \rho A_2 U_2 = C_D A_2 \sqrt{2\rho / (1 - m^2)} \times \sqrt{\Delta p} \text{ (定常流에 있어서 流量公式)} \dots\dots\dots (13)$$

非定常流에 있어서는 물론  $\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0$  이지만 式  
 (5)에서 볼 수 있는 것과 같이 Strouhal 數가  
 충분히 적으면 式(11)의  $\frac{\partial u}{\partial t}$  를 포함하는 항이  
 무시되며 形式的으로는 式(13)의 關係가 成立한  
 다. 이 경우  $\Delta p$ 는 速度 u와 同位相으로 時間에  
 따라 變化한다. 이 條件이 成立하기 위해서는 2  
 에서 記述한 것 같이

$$St = d \cdot \omega / \bar{u} \leq 0.02 \sim 0.002 \text{ (3)} \dots\dots\dots (14)$$

St 가 이 關係를 만족할 때를 準定常流라 한  
 다. 實用的으로는  $M(t)$ 의 時間平均값이 필요한  
 때가 많다. 따라서 式(11) (13)을 참조하여 그  
 平均값을 求하면

$$M(t) = \frac{1}{T} \int_0^t M(t) dt = C_D A_2 \sqrt{\frac{2\rho}{1 - m^2}} \cdot \frac{1}{T} \int_0^t \sqrt{\Delta p(t) dt}, (T \text{는 脈動週期}) \dots\dots\dots (15)$$

여기서  $\int_0^t \sqrt{\Delta p(t)} dt / T = \sqrt{\overline{\Delta p(t)}}$  를 쓰면  

$$\overline{M(t)} = C_D A_2 \sqrt{2\rho} / (1 - m^2) \cdot \sqrt{\overline{\Delta p(t)}} \dots (16)$$

이것은 식(13)에서  $\sqrt{\Delta p}$  를  $\sqrt{\overline{\Delta p(t)}}$  로 놓은 것과 같다. 따라서 差压의 순간적인 값  $\Delta p(t)$  의 平方根을 時間的으로 平均하는 것 같은 電氣回路를 쓰면  $\sqrt{\overline{\Delta p(t)}}$  를 얻을 수 있으며 따라서 식(16)으로부터 平均流量을 求할 수 있다.

만약 orifice에서 檢出되는 差压  $\Delta p(t)$  를 그림 4와 같은 Manometer에서 읽으면 그 값은 다음과 같은  $\Delta p(t)$  의 平均값으로 된다.

$$\overline{\Delta p(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t) dt \dots (17)$$

이 값을 流量公式 (13)의  $\Delta p$  대신에 사용하면 그때의 流量은

$$Mm = C_D A_2 \sqrt{2\rho} / (1 - m^2) \cdot \sqrt{\overline{\Delta p(t)}} \dots (18)$$

$\sqrt{\overline{\Delta p(t)}}$  >  $\sqrt{\Delta p(t)}$ 의 관계가 있으므로  $Mm$  >  $M(t)$ 로 되고 脈動流에 있어서는 Manometer의 읽기에 의하여 算出된 流量은 올바른 값이 주어지지 않는다.

만약 定常流  $M_0$ 에 振幅  $aM_0$  ( $a < 1$ ), 角振動數( $e$ )로 되는 脈動流가 重복되었다고 하면 순간流量은

$$M(t) = M_0 (1 + a \sin wt), a < 1 \dots (19)$$

이 경우에 대해 식(15) (18)의 關係를 求하면

$$Mm = M_0 (1 + E) \text{ 여기서 } E = \frac{a^2}{2} \frac{1}{1 - m^2} \dots (20)$$

脈動的 Strouhal 數가 크고  $\frac{\partial u}{\partial x}$ 의 項을 무시할 수 없을 때는 orifice를 通하는 質點流量  $M(t)$ 는  $C_D A_2 \rho u_2(t)$ 로 주어짐으로 식(11)부터

$$\Delta p(t) = \frac{M^2(t) (1 - m^2)}{2\rho C_D^2 A_2^2} + \rho \int_0^2 \frac{\partial u}{\partial t} dx$$

여기서 연속의 관계  $uA = u_2 A_2$ 를 사용하여 積分하여

$$\Delta p(t) = \frac{M^2(t) (1 - m^2)}{2\rho C_D^2 A_2^2} + \frac{\ell c}{A_2 C_D} \frac{dM}{dt} \dots (21)$$

다만  $\ell c$ 는 orifice 구멍 부분의 등가길이이다. 여기서 식(19)의 관계를 사용하여  $\Delta p(t)$ 를 식

(17)에서 算出하면

$$\Delta p(t) = \frac{M_0^2 (1 - m^2)}{2\rho C_D^2 A_2^2} \left\{ 1 + \left(\frac{a^2}{2}\right) \dots (22) \right.$$

이것을 식(20)과 함께 생각하면 알 수 있다. 이와 같이 平均压力  $\overline{\Delta p(t)}$ 에 關한 限 脈動 Strouhal 數가 큰 경우에도 적은 경우와 같은 關係가 成立한다.

그러나 다음에 나타내는 바와 같이 脈動的 流速波形( $M(t)$ )와 差压波形( $\Delta p(t)$ )와는 位相角이 생긴다. 즉 식(21)에 식(19)를 쓰고 식(22)의 關係에 주의하면

$$\overline{\Delta p(t)} = \overline{\Delta p(t)} \left\{ 1 + \frac{2a}{(1 + a^2/2)} \sin(wt - \theta) - \frac{(a^2/2)}{(1 + a^2/2)} \cos 2wt \right\} \dots (23)$$

$$\tan \theta = \frac{2\pi S_t (\ell c / d)}{1 - m^2} \dots (24)$$

즉 位相角  $\theta$ 는 strouhal 數  $S_t$ , orifice 구멍의 길이  $\ell c$ 의 직경  $d$ 에 대한 比 및 面積比  $m$ 이 커질수록 증가한다.

이 경우에는 差压  $\Delta p(t)$ 를 지연시간이 없이 檢出하는 檢出要素를 사용한다 해도 이것이 그대로 流量計를 사용하여 流量制御를 하는 경우에는 이렇한 점을 주의하여야 한다.

다시  $S_t$ 가 큰 경우에는 구멍으로부터의 噴流 形狀이 定常流의 경우와는 다르기 때문에 올바른 流量係數를 얻기가 어렵다.

위의 考察은 식(19)에 있어서  $a < 1$ 의 경우에 대한 것이지만  $a > 1$ 이면 脈動中에 orifice 구멍을 逆流하는 수가 있어 測定誤差는 더욱 증가한다. 이와같은 경우에는 orifice 流量計는 恰當하지 않아 測定에는 다른 裝置를 使用하긴 하나 어떠한 補助手段(6)을 併用할 必要가 있다.

이상의 여러가지 점을 고려하면 位相角  $\theta$ 가 적은, 이른바 準定常流의 상태에서 orifice 流量計를 使用하는 것이 바람직하며 그 條件은 다음과 같이 된다. (6)

$$2\pi S_t (\ell c / d) (1 - m^2) < 0.1 \quad (\theta < 5^\circ 40')$$

..... (25)  
 그림 5에 이 條件을 만족하는 St의 상한 값을 표시한다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 orifice는 구멍의 측방향 길이  $le$ 가 짧아서 venturi計等에 비하면 아주 높은 周波數의 脈動의 測定에 견딜 수 있다.

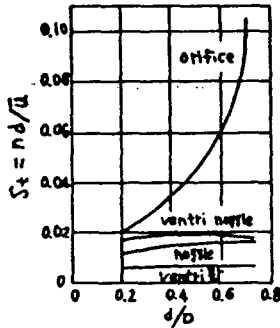


그림 5. 교축유량계의 한계 Reynolds 數

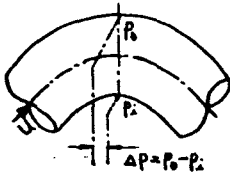


그림 6. Bend 流量計

그림 6은 管路의 bending에 의하여 생기는 内外壁面의 壓力差  $\Delta p = p_1 - p_2$ 를 測定해서 流量을 求하는 것인, 이른바 Bend 流量計이나 管路의 同一斷面에서 壓力이 測定되기 때문에 測定斷面의 位置(흐름方向에서 測定한)의 차이에 의한 위에서 말한 바와 같이 문제는 적다고 생각할 수 있다.

pitot 管에 있어서도 그림 7에 표시한 바와 같이 流速을 求하기 위한 差壓은 흐름方向의 서로 다른 位置(1)과 (2)에서 測定되므로 脈動周波數가 어느 값 이상이면 差壓  $\Delta p = p_1 - p_2$ 와 流速과의 사이에 位相差가 생기고 pitot 管을 둘러싼 주위의 흐름의 상태는 準定常狀能와는 다르게 된다. 그러므로 이때는 定常流에서 檢定한 pitot 管의 測定에 대해서 準定常流로 가정한 수 있는 流速條件 및 脈動에 따르는 測定誤差의 量에 대하여는 지금의 단계에서는 명확하지 않지만 일반적으로

으로 말할 수 있는 것은 pitot 管의 치수가 작고 差壓測定斷面 (1)(2)의 간격이 좁은 것이 좋다.

또한 만약 그림 8과 같이 흐름의 方向이 時間에 따라 變化한다면 pitot 管 주위의 흐름은 더한층 복잡하게 되고 測定誤差도 커질 것이다. 즉

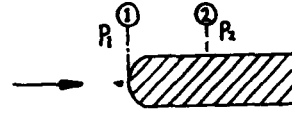


그림 7 pitot 管의 흐름

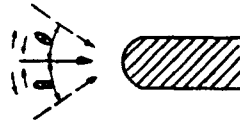


그림 8 변동흐름

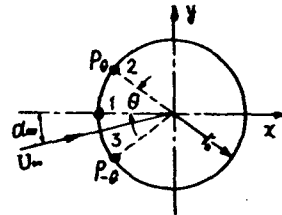


그림 9 원통형 pitot 管의 흐름

變角度  $\theta$ 와 脈動周波數에 따라 誤差는 變한다. 이 種類의 흐름을 생각하기 위해 그림 10과 같은 円筒形의 3개의 구멍을 가진 pitot 管을 예를 들자.

흐름의 速度  $u_\infty$ 를 갖고 pitot 管의 方向 ( $x$ )에 대해서  $\alpha_\infty$ 의 角으로 流入할 때 어떤 位置의 角도  $\theta$ 에 있는 점 2의 壓力  $p_\theta$ 의 無次元값 (壓力係數)을 求하면 다음과 같이 된다. (7)

$$C_p = \frac{p_\theta - p_\infty}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2} = 1 - \sin^2(\alpha_\infty + \theta) + 2\Omega \left\{ 2 \cos(\alpha_\infty + \theta) - \cos \alpha_\infty \right\} - 2\delta \left\{ 2 \sin(\alpha_\infty + \theta) \sin \alpha_\infty \right\} \dots (26)$$

$$\text{여기서 } \Omega = r_0 \dot{\alpha}_\infty / u_\infty^2, \delta = r_0 \ddot{\alpha}_\infty / u_\infty \dots (27)$$

이며  $\dot{\alpha}_\infty$ 는 흐름의 加速度,  $\ddot{\alpha}_\infty$ 는 그 角도의 變化速度,  $p_\infty$ 는 교란되지 않는 곳에서의 壓力이다.

式(26)에서 알 수 있는 바와 같이 円周位置

$\theta$ -點의 壓力係數  $C_\theta$ 는 時間적으로 變化하는 量으로 表示하는  $\Omega, \delta$ 의 函數이다. 따라서 이들을 무시하여 定常流動으로 생각하여 求한 速度는 상당한 誤差가 생기는 것을 알 수 있다.

원래 원통형의 3개의 구멍을 가진 pitot 管은 定常流의 測定을 목적으로 해서 円筒面上에 比較的 接近하여 3개의 測定구멍을 설치하여 흐름方向의 작은 變化에도 민감하게 만들어져 있으므로 測定하는 흐름 速度의 크기 뿐만 아니라 그 方向까지도 時間에 따라 크게 變化하는 흐름의 測定에는 부적당하다.

지금 한 흐름으로서  $u_\infty = u + u_p \sin wt$ 와 같은 경우에는 式(27)의 parameter 중  $\delta$ 는 0,  $\Omega$ 는 다음과 같이 된다.

$$\Omega = \left(\frac{u_p}{u}\right) \left(\frac{r_0 \omega}{u_\infty}\right) \cos wt \dots\dots\dots (28)$$

즉  $(u_p/u)$ 는 脈動速度振幅比이며  $(r_0 \omega/u_\infty)$ 는 一種의 Strouhal 數의 하나로서 pitot 管의 흐름에 있어서도 Strouhal 數가 重要한 의미를 갖는 것을 알 수 있다.

또 円筒形 pitot 管의 後流에 있어서는 흐름이 剝離가 생겨 소용돌이를 發生시키고 그 狀能가 時間적으로 격렬하게 變動하는 경우가 있다. 이 경우에는 後流의 영향이 上流의 測定點 2, 3에 미치고 따라서 이것이 誤差의 원인이 된다.

以上の 結論으로 하여 말할 수 있는 것은 pitot 管은 非定常流의 計測에는 맞지 않으나 脈動振幅과 周波數가 충분히 적은 경우에 사용하면 測定誤差가 적으므로 잘 檢定하여 使用할 수가 있다.

이 경우 물론 될 수 있는한 작은 寸수의 pitot 管이 바람직하다.

5. 壓力導管, 壓縮性等에 關한 주의사항

脈動成分을 갖는 흐름을 orifice 나 pitot 管을 사용하여 測定하는 경우 흐름에 接하여 壓力檢出要素를 設置하고 差壓을 測定하여 기록하는 경우에는 문제가 없지만, 檢出差壓을 導管으로 manometer 에 (壓力指示部) 傳達하고 이것을 읽

도록 하면 指示量은 脈動에 따라 動搖한다.

이것은 導管内 流體의 往復運動에 의한 것으로 導管의 粘性抵抗과 内部流體의 慣性때문으로서 導管과 manometer 指示量의 움직임은 檢出端과는 다른 波形을 表示한다. 이것을 防止하기 위하여 導管과 manometer 部分에 충분한 流體抵抗을 주어 内部의 流體가 거의 움직이지 않는 상태로 하여 manometer 의 눈금을 읽도록 한다. 이 경우 얻어진 差壓은 式(17)에서 정의된 差壓의 平均값  $\Delta p(t)$ 이다. 따라서 여기에 따라 算出된 平均流量  $Mm$ 은 실제의 값  $M(t) = M_0$  보다 크게 됨으로 式(20)에 의해 이것을 補正해야 한다. 脈動에 따른 導管内의 움직임을 방지하기 위해 程度以上の 抵抗을 주면 平均流量이 變化하는 경우의 manometer 指示의 추적이 어렵게 된다.

아래에 檢出部에서 얻은 差壓  $\Delta p(t)$ 의 올바른 時間平均値  $\Delta p(t)$ 를 얻기 위한 必要한 條件들을 든기로 한다.

(i) manometer 를 포함한 壓力導管의 通路 斷面積에 變化가 없도록 均一하게 한다.

즉 壓力 tap 部分에 piezometer ring 등과 같은 것은 使用을 피하도록 한다. 또 壓力檢出部로부터 manometer 에 連結하는 導管의 길이를 똑같이 하여 導管의 配置를 幾何學的으로 對칭으로 한다. 이러한 배려는 특히 壓縮性流體(氣體)의 測定에 대해서 주의를 요한다. 이러한 배려가 없으면 현저한 오차를 유발할 수 있다.

(ii) manometer 나 導管에 설치된 脈動防止用 抵抗은 流速의 1 乘에 比例하는 線形抵抗 일 것. 부득이하게 valve 나 絞縮等을 사용하면 流速의 2 乘에 比例하는 非線形抵抗이 생길 수가 있어 올바른 平均壓力  $\Delta p(t)$ 가 얻어지지 않는다.

壓力 tap 으로부터 導管으로 옮기는 部分에서는 流體에 난류가 發生하기 쉽고 특히 脈動成分이 많은 氣體流動의 測定에 있어서 문제가 되며 난류의 영향에 의해 線形抵抗이 안될 수가 있다. 그 對策으로는 導管의 거의 전부에 液體를 채워진 導管部分을 매우 짧게 하는 것이다. 線形抵抗

을 얻기 위하여는 가는관을多數 平行으로 組合시켜 만든 것을 사용한다. 여기서 抵抗細管内의 흐름에 대한 Reynolds 數를 200 以下로 한다.

(iii) manometer 系의 液柱의 固有振動數를 脈動周波數보다 충분히 적게 한다.

앞에서 말한 바와 같이  $Ma$ 가 충분히 적을 때에는 非壓縮性의 가정어 허용되며 그 한계는 약  $Ma < 0.2$  이다.

壓縮性을 고려해야될 경우에는 誤差의 發生원인이 많은 式(20)의 관계가 거의 通用되지 않게 된다. 脈動波形이 絞縮部에서 反射하여 高調波를 포함한 복잡한 波形으로 된다. 그림10은 그 한 例로서 空氣의 壓力을 計器壓으로  $0 \sim 27 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위에서 변화시켜 壓縮性의 영향을 조사한 波形의 하나이다. (8)

周波數가  $33 \text{ C/S}$  로부터  $36 \text{ C/S}$  사이에서  $\Delta p(t)$  波形의 變化가 크며 또한 양쪽의 脈動의 基本周波數와 다른 二次的脈動周波數가 보인다.

### 6. Tank에 의한 脈動의 減衰

脈動流成分을 많이 포함한 경우 및 流體의 壓縮性이 문제가 되는 경우에는 orifice 流量計를 사용함에 따라 그 誤差가 크게되어 경우에 따라서는 100%를 넘는 것도 적지 않다. 따라서 우리는 이미 往復式 蒸氣機關에 의해 管路에 극심한 脈動을 일으키는 것과 같은 機械를 管路가 포함하는 경우에는 그림 11과 같이 流量計와 脈動流의 중간에 적당한 용량의 tank를 설치하여 流量計를 通하는 흐름의 脈動을 감쇄시켜 測定積密

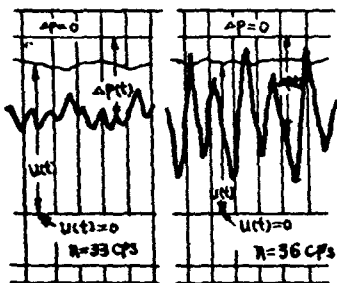


그림 10. orifice 에 있어서 差壓速度과형의 곡선

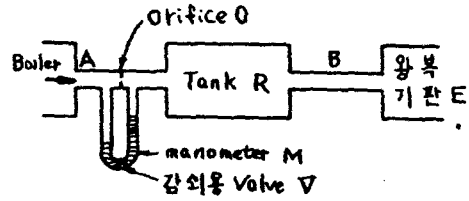


그림 11. 맥동감쇠용 tank의 설치

도를 높이는 方法을 사용하였다. 이때 감쇄특성은 式(7)의 無次元數(Hodgen 數)로서 결정되며 그값  $N_H$ 가 클수록 orifice 流量計에 의한 測定誤差는 감소한다. 그림 12는 그 狀況을 表示한 實驗結果이다. (2)

### 7. 非定常流의 測定方法과 各流量計, 및 流速計의 使用限界

非定常流의 計測에는 여러種類의 裝置와 方法이 使用되나 그 測定原理에 의해 分類하면 다음과 같다. (9)

i) 連續的인 測定.

a) 흐름안에 電氣의 中間 parameter를 만들어 그의 變化로부터 流速을 求하는 것. (例) 永丸磁場을 갖는 電磁流量計, ion 流量計.

b) 흐름안에 機械的 中間 parameter를 만들어 그 量을 質量流量에 比例시키는 것. (例) corioli 流計, gyroscope 流量計, turbo流量計.

c) 흐름안에 熱的 中間 parameter를 만들어 그 量의 變化로부터 流速을 求하는 것. (例) calorimeter 流量計

d) 흐름안에 熱的物體를 놓고 그 熱的平.의 變化로부터 流速을 求하는 것. (例) 熱線流速計 熱 film 流速計.

e) 흐름안에 固體를 놓고 흐름에 의한 壓力變化를 檢出하는 것. (例) 差壓式 流量 및 流速計, 抵抗式 流量計.

ii) 不連續的인 測定.

a) 흐름안에 電氣的 中間 parameter를 週期的으로 만드는 것. (例) 交番磁場을 갖는 電磁流量計.

b) 흐름안에 超音波를 보내 超音波 振動의 中



間 parameter 를 만드는 것. (例) 超音波流量計.  
 c) 흐름안에 laser 光을 보내 흐름안의 微粒子에 의한 中間 parameter 를 만드는 것.(例) laser 流速計.

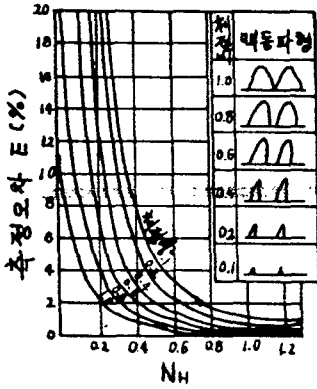
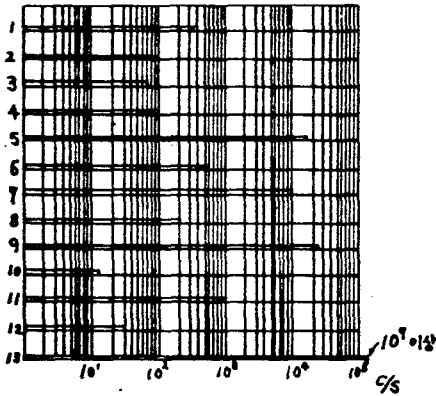


그림 12. 1 cylinder 증기기관에 있어서 맥동류에 측정 오차와  $N_H$ 의 관계



- |                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 1. gyro corioli 유량계 | 8. 속도와 압력의 관계에 의한 유량계 |
| 2. turbo 유량계        |                       |
| 3. 축류형 turbo 유량계    | 9. 초음파 유량계            |
| 4. 접선형 turbo 유량계    | 10. calorimeter 유량계   |
| 5. 영구자장의 전자 유량계     | 11. 이온 유량계            |
| 6. 교번자장의 전자유량계      | 12. flow marker 유량계   |
| 7. 열선 유속계           | 13. laser 유속계         |

그림 13. 유량계의 사용 가능 범위

d) 흐름안에 機械的 中間 parameter 를 週期的으로 만드는 것. (例) 振動式 corioli 流量計, 振動式 gyro 流量計.

e) 흐름안에 熱的 中間 parameter 를 週期的

으로 만드는 것. (例) 溫度가 正弦波形으로 變하는 熱表를 갖는 calorimeter 流量計

f) 흐름안에 流速에 比例해서 도는 回轉車를 挿入하는 것. (例) turbine 式 流量計

g) 흐름안에 tracer (marker) 를 週期的으로 만드는 것. (例) ion 流量計, 放射能 流量計, 鹽水 速度計.

以上 記述한 原理에 따른 流量 및 流速計의 代表的인 것을 選定하여 그 使用可能한 脈動周波數의 범위를 表示하면 대략 그림 13 과 같이 된다. (9) 이들 限界는 各計器의 動特性에 의해 定해진 것이다.

参考文献

- (1) 古屋, 機教材, No 367 "非定常流體・熱現象と計測" (1972-9) 1.
- (2) Oppenheim, A. K., Chilton, E. G., Trans. ASME 77 (1955-2) 231.
- (3) Uchida, S., Z. Angew. Math. U. Phys. 7-2 (1956) 403
- (4) Hodgson, J. L., Trans. Inst. Nav. Archit., 64 (1922) 184.
- (5) Sarpkaya, F., Trans. ASME., 85-3 (1966-9), 589.
- (6) Mottram, R. C. and Zarek, J. M., Inst. Mech. Engrs., "The symposium on the measurement of pulsating flow, (1970), 44.
- (7) 萬面外 3 名 日本機械學會前刷 No 153 (1966-4) 109, 113,
- (8) Sparles, C. R., ASME. "Flow measurement symposium (1966), 124
- (9) Katys, G. P. "Contineous measurement of unsteady flow" pergamon press (1966) 3, 207.