

3.2 흐름의 분류 및 특성

1. 흐름의 분류

자연계에서 흐름에 영향을 미치는 지배적인 외력으로는 관성력, 중력, 점성력, 탄성력, 표면장력 등을 들 수 있다. 개수로 흐름의 상태나 거동은 기본적으로 흐름의 관성력과 점성 및 중력의 상대적인 크기에 의하여 지배되며, 탄성력과 표면장력은 대부분의 개수로 흐름에는 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서, 관성력에 대한 점성이나 중력의 영향을 기준으로 흐름을 구분할 수 있다. 즉, 관성력에 대한 점성의 영향을 기준으로 층류 (laminar flow)와 난류 (turbulent flow), 관성력에 대한 중력의 영향을 기준으로 상류 (subcritical flow)와 사류 (supercritical flow)로 구분한다.

개수로 흐름은 다양한 흐름 특성들을 기준으로 분류할 수도 있다. 즉, 수심, 유속 및 유량과 같은 흐름 특성의 시간적 변화를 기준으로 정류 (정상류, steady flow)와 부정류 (unsteady flow)로, 흐름 특성의 공간적 변화를 기준으로 등류 (uniform flow)와 부등류 (nonuniform flow)로 각각 구분할 수 있다. 또한, 부등류는 변화류 (varied flow)라고도 하며, 흐름특성의 공간적 변화에 따라 급변류 (rapidly varied flow)와 점변류 (gradually varied flow)로 구분한다 (표 3.1 참조).

표 3.1 개수로 흐름의 구분

구 분 인 자	흐름의 구분	
점성의 영향	층류 (laminar flow)	난류 (turbulent flow)
중력의 영향	상류 (subcritical flow)	사류 (supercritical flow)
시간적 변화	정류 (steady flow)	부정류 (unsteady flow)
공간적 변화	등류 (uniform flow)	부등류 (nonuniform flow)
변화의 정도	점변류 (gradually varied flow)	급변류 (rapidly varied flow)

2. 정류와 부정류

개수로의 임의점에서 수심 및 유속 등의 흐름 특성이 시간에 따라 변하지 않는 흐름을 정류라 하고, 시간에 따라 흐름특성이 변하는 흐름을 부정류라 한다. 대부분의

개수로 흐름은 정류로 가정할 수 있으나 홍수와 같이 시간에 따라 흐름 특성이 변할 경우 부정류로 다루어야 한다. 정류에서는 유량 Q 를 흐름단면적 A 와 단면평균유속 V 의 곱으로 나타낸다.

$$Q = AV \quad (3.3)$$

또한, 정류에서는 임의의 단면에서 유량이 일정하기 때문에 각각의 흐름 단면에 대하여 다음 관계가 성립하며, 이를 정류에 대한 연속방정식 (continuity equation)이라 한다.

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 = \text{일정} \quad (3.4)$$

식 (3.4)는 유량이 일정하다는 정류 가정에 근거한 것이므로 하천에 강우가 있거나 하천이 합류되어 수로로 물이 유입되는 경우, 또는 하천으로부터 취수하거나 지천이 있어 수로로부터 물이 유출되는 경우에는 적용할 수 없다. 이러한 흐름에 대해서는 흐름의 시간적 변화를 고려해야 한다.

3. 등류와 부등류

공간에 따라 흐름 특성이 변하지 않는 흐름을 등류라 하고, 공간에 따라 흐름 특성이 변하는 흐름을 부등류라 한다. 특히, 흐름특성이 시간과 공간에 관계없이 일정한 흐름을 정상등류 (steady uniform flow)라 하고, 이때 수심을 등류수심 (normal depth)이라 한다. 정상등류는 개수로 흐름을 해석하는 가장 기본적인 흐름이며, 뒤에서 언급되는 등류라는 용어는 정상등류를 뜻한다. 등류는 실제로는 충분히 긴 수로에서만 발생하며, 원칙적으로 유선이 하상과 평행한 거의 수평한 직선이어서 흐름 내에서의 압력은 정수압으로 분포한다. 한편, 수면이 수로바닥과 평행을 이루면서 시간에 따라 수심이 변하는 흐름을 비정상등류 (unsteady uniform flow)로 정의할 수 있으나 이는 실제로 발생하기 어려운 흐름이다.

4. 층류와 난류

관성력에 대한 점성의 비를 기준으로 흐름을 층류, 천이류 및 난류로 구분한다. 관성력에 비해 점성력이 클 경우 유체 입자가 매끈한 일정한 경로를 따라 이동하고 얇은 유체 층이 서로 인접한 층 위에서 미끄러지는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 흐름을 층류라 한다. 반면, 관성력에 비해 점성력이 약할 경우 유체 입자가 불규칙한 경로를 따라 이동하게 된다. 이러한 흐름을 난류라 하며, 층류와 난류의 혼합된 상태를 천이류라 한다.

관성력에 대한 점성력의 크기는 다음과 같이 Reynolds수 R_e 로 정의할 수 있다.

$$R_e = \frac{VL}{\nu} \quad (3.5)$$

위 식에서 V 는 흐름의 평균유속, L 은 특성길이, ν 는 물의 동점성계수이다. 특성길이 L 은 관수로에서는 관의 지름 D 를 사용하나, 개수로 흐름에서는 동수반지름 R 을 사용한다. 동점성계수 ν 는 점성계수 μ 를 밀도 ρ 로 나눈 값이다. 일반적으로 개수로 흐름에서는 Reynolds수가 500보다 작으면 층류, 500에서 2,000이면 천이류, 2,000 이상이면 난류로 구분한다.

5. 상류와 하류

관성력에 대한 중력의 비를 기준으로 흐름을 상류와 하류로 구분하며, 관성력에 대한 중력의 비는 Froude수로 정의한다.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.6)$$

위 식에서 V 는 흐름의 평균유속, g 는 중력가속도, L 은 특성길이이며, 개수로 흐름에서 특성길이는 수심을 사용한다.

관성력에 비해 중력이 클 경우 즉, $F_r < 1$ 또는 $V < \sqrt{gy}$ 일 경우 유속이 작아 하류 (downstream)에서의 교란이 상류 (upstream)로 전파되므로 상류의 흐름이 하류

단의 영향을 받게 되며, 이를 하류통제 (downstream control)라 한다. 이러한 흐름을 상류라 하며 일반적으로 하상경사가 완만한 수로에서의 느린 흐름이다.

한편, 관성력에 비해 중력이 작을 경우 즉, $F_r > 1$ 이거나 $V > \sqrt{gy}$ 일 경우 유속이 커서 하류에서의 교란이 휩쓸려 내려가 상류 흐름에 영향을 주지 않으며, 이를 상류통제 (upstream control)라 한다. 상류의 흐름조건에 의해 지배되는 흐름을 사류라 한다.

식 (3.6)으로부터 관성력과 중력이 같은 경우 즉, $F_r = 1$ 이거나 $V = \sqrt{gy}$ 일 경우의 흐름을 한계류 (critical flow)라 한다. 한계유속 $\sqrt{gy}$ 는 수심이 작은 곳에서 수면 위를 전파하는 중력파의 전파속도 (celerity)와 같다. 중력파는 상류일 때는 전파속도가 유속보다 크기 때문에 상류로 전파될 수 있으나, 사류에서는 전파속도가 유속보다 작기 때문에 상류로 전파되지 못한다. 따라서, 중력파가 상류로 전파되는지의 여부가 상류와 사류를 구별하는 기준으로 사용되기도 한다.

6. 점변류와 급변류

유속이 증가 또는 감소하면 연속방정식을 만족시키기 위해 수심이 감소 또는 증가하게 되며, 이러한 흐름을 부등류 (nonuniform flow) 또는 변화류 (varied flow)라 한다. 부등류에는 비교적 긴 거리에 걸쳐 수심이 완만하게 변하는 점변류 (gradually varied flow)와 여수로에서의 흐름과 같이 짧은 구간에서 수심이 급격히 변하는 급변류 (rapidly varied flow)가 있다. 급변류는 국부적인 현상으로 알려져 있으며, 뒤에서 다룰 도수 (hydraulic jump)나 단락 (hydraulic drop)이 그 예이다.

점변류의 비교적 짧은 구간에서 발생하는 수두손실은 등류의 수두손실과 같다고 가정하지만, 급변류에서는 이러한 가정을 적용할 수 없다. 이는 원심력에 의해 유선이 위로 볼록한 부분에서의 압력은 정수압보다 작아지고, 반대로 아래로 오목한 부분에서는 정수압보다 커지기 때문이다. 또한, 수로가 급경사일 경우에는 유수단면 깊이 d 가 하상에서 수면까지의 연직거리인 수심 y 와 다르며, 압력수두는 $y \cos^2\theta$ 가 된다.