난류모델의 역할

최 홍 식 (상지대학교 토목공학과 조교수)

Q 수공학에서 난류모델은 어떻게 사용됩니까?

A 유체역학 특히 수리학에서 극히 이상적인 것을 제외하고 실제적 흐름은 난류의 성격을 지니게 된다. 난류는 불규칙하고 무작위적인 3차원 부정류 흐름으로, 유체의 성질에 의해 영향을 받는 것이 아니고 흐름상태에 영향을 받는다. 이러한 복잡성 때문에 난류운동과 이에 수반되는 열 및 질량의 전달을 이론적으로 예측하기란 매우 어려운 실정이다. 이와 같은 수리학의 문제는 난류의 흐름으로 해석하여 예측하여야하나, 그 해결방법에 있어서 실험은 극히 작은 규모의 흐름특성까지 측정해야하는 기술적 어려움과 비용도 매우 많이 드는 등 비경제적이어서 난류모델을 이용한 수치해석에 의한 해석이 급증하고 있는 실정이다.

최근 컴퓨터의 급속한 발달에도 불구하고 난류흐름의 해석에 대한 정확한 방법은 나오지 않고 있다. 유체의 운동을 기술하는 식인 Navier-Stokes 방정식은 수치적 방법을 통하여 해석할 수는 있으나, 난류운동은 평균흐름의 영역보다 그 크기에 있어서 Reynolds 수의 3/4 승의 역수에 비례하므로, 3차원 난류문제의 해석에는 적어도 수치해석 격자가 Reynolds 수의 9/4 승 정도는 되어야 하므로 컴퓨터의 기억용량과 계산속도에 있어서 문제의 해를 제공하기에는 적합치 못하다. 따라서 이 식 자체를 해석하는 것은 극히 어렵기 때문에 이와 같은 유체운동의 상세한 해석보다는 지배방정식을 난류운동보다 상당히 큰 시간에 대해서 평균하여, 이 평균류에 대한 유속, 압력, 온도 및 농도 분포를 결정하는 것이 보편적인 해석방법이다. 그러나 시간평균 과정에서 비선형항에 의한 Reynolds 응력항의 발생으로 완전한 연립방정식을 제공할 수가 없어 경험적인 입력자료에 의해서 연립방정식을 폐합하여야 하므로 이를 위해서 난류모델을 사용하게 된다.

최근까지 난류해석, 즉 Reynolds 응력항의 해석은 경험적 또는 반경험적인 실험공식의 형태로 사용해 왔다. 실험적인 방법은 실험을 통해서 얻은 결과를 보간하여 사용하는 것으로 Chezy 식이 고전적인 예이며, 주로 차원해석을 통한 실험자료 분석으로 매우 유용한 실험공식을 만들어 내게 된다. 이러한 실험공식은 간단한 수리현상을 설명할 수 있으나, 복잡한 구조의 수리현상에 대해서는 부족할 뿐더러 범용성에 한계가 있다. 이러한 견지에서 유체흐름에 대한 이론적 지식을 이용하여 또다른 접근방법이 난류모델의 구성과 해석으로, 이 방법은 경험적인 관계와 더불어 일반 타당성을 가진 질량, 운동량 및 에너지 보존법칙 등에 근거를 두고 있다.

Reynolds 응력항의 해석을 위한 와점성(Eddy-viscosity) 개념은 층류의 점성응력과 유사하게 Reynolds 응력이 평균유속경사와 와점성계수, ν_t와의 곱의 형태로 나타난다고 가정한다. 위와 같은 와점성 개념은 난류운동 역시 분자구조에 따른 유체운동으로부터 유도된 Stokes의 점성법칙과 동일한 것이라는 가정에서 출발한 것으로 난류에 의한 와(Turbulent eddies)는 분자와 같은 유체 덩어리로 간주되어, 서로간의 충돌로 운동량을 교환한다고 보았다. 분자점성은 분자간의 평균 자유거리(Mean free path) 및 평균속도에 비례한다. 따라서 와점성

계수는 유동성분을 특성화하는 평균유속을 사용한 속도경사 및 유동의 전형적인 거리 L 즉, Prandtl의 혼합거리(Mixing length)의 곱으로 표시되어 진다. 분자운동과 난류운동과의 유사에 의한 이론이 원칙적으로 맞지 않음이 지적되고 있으나, 이러한 와점성 개념은 비교적 쉽게 계산할 수 있다는 측면에서 널리 사용되고 있다.

난류모델은 와점성 개념을 사용하지 않고, Reynolds 응력항에 대한 수송방정식의 형태로 개발되었다. 난류모델 분류의 기준은 와점성 개념의 사용여부에 달려 있다. 그러나 가장 간단한 모델과 가장 진보된 와점성 모델과는 커다란 차이점이 있다. 예를 들면 상수의 와점성 계수의 사용은 난류모델과는 별로 관련이 없고, 따라서 일반적인 평균흐름장을 잘 나타내지 못한다. 이러한 모델들은 난류가 발생하는 지점에서 난류에 의한 와가 소멸된다고 가정하여 난류에 의한 수송이 없음을 의미한다. 따라서 어떤 지점에서의 난류상태가 다른 지점에서 난류의 생성에 의해서 영향을 받는다면 난류의 수송을 무시한 단순한 모델은 부적합하다. 난류의 수송을 고려하기 위하여 난류의 특성을 나타내주는 수송방정식은 온도/농도 방정식과 같이 흐름의 평균운동에 의한 대류이송, 난류에 의한 확산이송항을 포함하고 있다. 몇몇의 난류모델은 속도의 유동성분을 특성화시킨 단일 속도척도 V에 대한 수송방정식을 사용하고, 다른 것은 거리척도 L에 대한 방정식을 사용하며, 더욱 복잡한 것은 한 개 이상의 속도척도 즉, Reynolds 응력항에 대한 수송방정식을 풀게 된다. 일반적으로 Reynolds 응력항의 해석을 위해 몇 개의 수송방정식을 사용하는가에 따라서 0-, 1-, 2-, 4-방정식, Stress/Flux 난류모델 등으로 구분된다.