

난류이해의 필요성과 모형화 과정에 대해서



손민우 |
 충남대학교 토목공학과 교수
 mson@cnu.ac.kr

1. 우리 생활과 연구활동에서의 난류

넓은 컵 속에 가는 흡알갱이를 가라앉힌 이후에 물을 회전축을 따라 아주 조용히 저었을 때 물은 금방 뿌영게 변한다. 물이 탁해진 것은 바닥에 있던 흡알갱이가 떠올랐기 때문이다. 신경을 곤두세워 z방향 w유속이 발생하지 않도록 저어 보아도 흡알갱이는 위쪽으로 떠오를 것이다. 뽕얀 설렁탕에 검은 후추를 뿌리고 숟가락으로 한번 휘익 저었을 때 후추는 그릇의 경계를 따라 하나의 원운동만 하는 것이 아니라 저었던 회전반경보다 훨씬 작은 원을 그리면서도 돌게 된다. 가끔은 원래 저었던 회전운동과 반대방향으로 회전하는 작은 후추알갱이도 발견할 수 있다. 이러한 현상은 모두 난류에 의한 운동으로 이해할 수 있다. 주흐름과 다른 거동을 나타내고 무작위성을 보이는 난류 운동에 의해 바닥의 흙이 떠오르고, 후추가 제각각으로 움직이며 커피와 설탕은 물에 더 빨리 녹아든다.

보다 전문적인 공식을 통해서 난류가 지배적인 흐름특성이 되는 상황을 살펴보자. 조그만 수로에서 물이 아주 천천히 흘러가는 상황을 가정하기 위해 수심 30 cm, 유속 1 cm/s의 흐름을 가정하고 20℃ 물의 동점성 계수를 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 둔 조건에서 Reynolds Number를 계산하면 $Re = (VD)/\nu = (0.3 \times 0.01)/(1.0 \times 10^{-6}) = 3,000$ 이 된다. Reynolds Number가 실험실 조건의 경우 2,300, 개수로 조건의 경우 1,300을 크게 상회할 때 난류가 지배적인 환경이 된다는 상식에 비추어 볼 때 위의 예처럼 자연흐름에서 보기 힘들 정도의 작고 느린 흐름조건에서도 난류에 대한 고려가 필요하다는 사실을 알 수 있다. 정교한 유체역학적 측면에서 난류가 완전히 무시되어도 좋은 흐름 조건은 점도가 아주 높은 토마토케첩 제조 공정이나 흐름의 규모가 매우 작은 LCD판 코팅 정도에 해당될 뿐 수공학과 관련된 거의 모든 경우의 흐름에서는 난류를 무시하기 힘들 것이다.

매우 정교한 실험실 조건에서 아주 예민하게 유속을 측정하더라도 매번 적지 않게 달라지는 유속 측정값에 고개를 갸우뚱 거린 경험이 많을 것으로 생각된다. 이것을 주위의 진동이나 온도차, 측정시의 오차, 기계 신호가 가지는 근본적 진동 등 실험자가 철저히 제어할 수 없는 변화에 따른 결과로 이해하는 것은 난류를 고려하지 않

았기 때문에 범할 수 있는 오류이다. 동일한 조건에서도 매번 달라지는 유속은 난류가 있기에 당연히 발생하는 현상으로 평균값과 진폭을 통해 주흐름과 난류가 가지는 특성을 이해하는 것이 보다 바람직할 것이다.

본 기사에서는 이상의 예와 같이 항상 우리 주위에 존재하고 수공학과 관련된 많은 현상에 직접적으로 영향을 주는 난류에 대해 간략히 살펴보고 어떤 방법으로 모형화하여 그 특성을 짐작해볼 수 있을지에 대해 살펴본다.

2. 난류에 대한 고려가 중요한 수공학 분야 (확산 등의 예)

이송(Advection), 확산(Diffusion), 분산(Dispersion)에 대해 꽤 오랜 기간 공부한 전문가의 경우라도 그 차이와 메커니즘에 대해 혼돈하고 있는 경우를 종종 볼 수 있다. Fischer *et al.*(1979)이 집필한 “Mixing in Inland and Coastal Waters”의 1.2.1장에서 소개되는 용어 정리를 참고하면 세 용어의 정의와 차이를 짐작할 수 있다. 결론적으로 말하면 이송과 확산은 물질이 퍼져나가는 메커니즘을 칭하는 것이고 분산은 다양한 방향의 이송과 확산이 만들어 내는 현상을 말하는 것으로 이해할 수 있다. 물에 다른 알갱이가 섞여있는 조건에서 물 알갱이가 흘러가는 방향으로 다른 알갱이가 따라가는 경우, 보다 과장하여 이야기하여 물 알갱이가 다른 알갱이를 업고 나아가 그 알갱이의 위치를 이동시키는 과정을 이송으로 생각할 수 있다. 확산은 물의 흐름과 관련 없이 물에 섞인 다른 알갱이가 퍼져서 이동하는 과정을 이야기한다. 주흐름이 전혀 없을 것으로 판단되는 욕조 속 목욕물에 염료 한 방울을 조용히 떨어뜨렸을 때 염료가 퍼져나가는 과정이 확산이라는 메커니즘에 의해 이해될 수 있다. 이것은 물 알갱이가 염료 알갱이를

업고 이동하여 위치를 변화시키는 것으로 볼 수 없고 물 알갱이가 염료 알갱이가 서로 부딪치는 브라운 운동(Brownian Motion)에 의한 결과이다. 분산은 이송이나 확산처럼 물질의 위치를 이동시키는 원인을 칭한다기 보다는 이송과 확산의 복합적 작용에 의해 물질이 퍼져나가는 현상을 말한다. 즉 이송과 확산이 동시에 발생시키는 종방향 확산(Shear Diffusion), 확산이 주원인이 되는 횡방향 확산(Transverse Diffusion) 등으로 발생하는 입자 흩어짐(Particle Scattering)의 결과를 칭하는 것으로 메커니즘에 대한 규명 보다는 주로 실험적, 경험적 상수에 의해 정량화하여 이해할 수 있다. 따라서 이송과 확산에 대한 정확한 이해 및 모형화가 이루어진다면 분산으로 칭해지는 현상의 원인 및 결과 역시 수월하게 이해할 수 있을 것이다.

이송의 경우는 크기, 방향, 경향 등이 주흐름에 의해 비교적 명쾌하게 이해될 수 있을 뿐 아니라 대다수의 수공학자들에게 친숙한 개념으로 큰 어려움 없이 이해 및 예측이 가능하다. 확산은 무작위성(Randomness), 등방성(Isotropy) 등의 특성을 나타내며 물질 자체가 가지는 다양한 특성에 큰 영향을 받는 것으로 모형화는 물론 이해 역시도 수월하지는 않다. 정확한 의미에서 확산의 메커니즘은 분자들 또는 알갱이들끼리 부딪치는 브라운 운동 뿐이다. 하지만 이 유일한 메커니즘으로는 이해할 수 없는 현상들이 우리가 경험하는 확산현상의 대부분을 차지한다. 길이, 폭, 높이가 10 m, 8 m, 4 m인 밀폐된 항온실의 한쪽 구석에서 성냥으로 불을 켜 준 경우, 대각선 맞은 편에서 이산화황(SO₂)의 냄새를 맡게 될 때까지의 시간을 이산화황의 분자확산계수가 약 $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 라는 실험적 가정 아래 단순한 차원해석으로 짐작할 경우, 약 100일로 계산된다. 이러한 결과는 우리의 실제 경험과는 매우 큰 차이를 보이는 것으로 분자의 브라운 운동만을 고려하여서는 실제 자연에서 발생하는 확산현상을

이해하기 어렵고 뭔가 다른 메커니즘에 큰 영향을 받는다는 사실을 유추할 수 있다. 이러한 발견에 기초하여 제안된 아이디어가 난류확산이다. 즉 확산현상은 브라운 운동 뿐 아니라 난류에 의해서도 발생하며 그 강도가 브라운 운동에 비해 매우 크다는 것이 난류 확산의 기본 가정이다. 밀폐되고 온도가 유지되는 실내에서조차 동점성계수가 매우 낮은 공기에서는 난류가 발생하게 되고 이 영향으로 수십 초 이내에 성냥이 연소되는 냄새를 맡을 수 있게 된다. 엄밀히 말하면 난류확산은 이송에 해당될 수 있다. 물질의 이동을 유발하는 유체알갱이(Carrier Fluid, 수공학의 경우에는 물)가 희석된 물질을 업어서 옮기는 과정에 의한 희석물질의 퍼짐이 난류 확산의 기본이 되는 만큼 이송에 해당되는 것이 보다 타당할 것이다. 하지만 방향성이 없고 무작위한 특성이 분자확산현상과 매우 유사하여 난류확산으로 불리게 된 것으로 짐작된다. 수공학의 적용대상인 물 속에서도 가는 유사(가는 모래, 실트, 점토, 유기물, 오염물 등)의 확산은 알갱이의 브라운 운동으로 이해하기에는 어려운 점이 많이 있으며 난류 확산의 개념을 도입할 때 그 강도와 발생빈도가 쉽게 해석될 수 있다. 1장의 제일 첫 부분에서 예로 언급된 컵 속에서 부유하는 가는 흩알갱이와 같이 부유사 문제, 만곡이 심하지 않은 수로에서의 횡방향 확산 문제, Jet 조건에서의 온배수 확산문제, 밀도성층화 조건으로 안정된 저수지 조건에서의 오염물 확산 문제, 보 하류 및 제방 근처의 흐름 교란 지점에서의 수리학적 문제 등이 모두 난류에 큰 영향을 받는 경우이다.

실제로 많은 수리학적 기본공식이 난류이론을 공부하는 과정을 통해 보다 깊게 이해될 수 있다. 경험식처럼 이용하는 유속의 연직분포형인 로그법칙($u(z) = u_* / \kappa \ln(z) + \text{Constant}$)은 난류를 모형화하는 방법 중 하나인 혼합길이이론(Mixing Length Theory)으로부터 수학적 유도

과정을 통해 제시되는 공식이다. 하천공학에서 널리 이용되는 마찰속도 u_* 역시 이 과정을 통해 제안되는 개념으로 모두 난류모형화에 대한 지식이 바탕되어야 이해할 수 있는 것들이다. 이와 비슷한 예는 기본적인 운동량 방정식에서도 볼 수 있다. 이상유체와는 차이를 나타내는 물에 대한 지배방정식에서 전단응력이 과연 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 에 가까운 동점성계수의 작은 값과 유속경사로 대표될 수 있을까하는 의문은 난류전단력에 대한 개념이 추가되면서 자연스럽게 무시될 수 있는 가정으로 넘어가게 된다.

3. 난류와 관련된 기본적 개념

많은 연구자들이 난류를 기본적으로 소용돌이(와, Eddy)로 가정하고 기본개념을 이해하고자 시도한다. 대신 이 와들은 크기와 방향이 무작위하여 일정 크기(예를 들어 만곡부에서의 이차류) 이하의 와들에 대한 벡터평균을 구했을 경우 0에 수렴한다고 가정된다. 이러한 가정은 난류가 흐름의 특성이 아닌 유체 물성치에 의존하는 난류 자체의 특성을 가진다는 말로 표현할 수 있다. 즉 난류는 어떤 크기 이하의 와로 진행됨에 따라 원래 가졌던 흐름의 특성을 잃고 난류 자체의 특성만을 따르며 점점 작은 와로 분화되어 나가다 유체의 특성(대부분의 경우 점성)에 의해 소멸되어 나간다는 것이다. 이러한 과정은 Energy Cascade로 불린다. Energy Cascade는 기본적으로 에너지의 유입과 소멸의 과정을 잘 설명하고 있다. 고인 물에 돌맹이 하나를 던졌을 때는 큰 에너지가 물 속에 유입된 것으로 생각할 수 있다. 유입된 에너지는 여러 형태로 소멸될 수 있을 것이다. 수면에 파장을 만들고 공기와의 마찰로 일부의 에너지가, 소리와 열을 발생시키며 또 다른 일부의 에너지가 소멸될 것이다. 하지만 유입된 에너지의 큰 부분은 난류현상에 의해 소

떨린다. 던져진 돌맹이 하나가 만들어 낸 큰 와
한 개는 그 에너지의 일부를 전개하여 크기가 작
은 여러 개의 와를 만들어 낸다. 여러 개의 작은
와는 다시 에너지의 일부를 전개하여 더 작은 와
를 더 많이 만들어낸다. 이러한 전개현상이 반복
되다 매우 작은 크기의 와까지 전개되었을 때는
유체가 가지는 점성에 의해 더 이상 와가 발생할
수 없게 되어 와가 가지는 에너지를 소멸시키게
된다. 돌맹이가 만들어 낸 최초의 큰 와는 고인
물의 규모나 돌맹이의 크기 등 경계조건의 영향
을 받으며 흐름 및 원상태에 의존하게 된다. 그
다음에 전개되는 와 역시 어느 정도는 이러한 것
들의 영향을 받지만 점점 영향이 줄어들다 어느
정도 크기 이하의 와로 진행되면서 최초의 영향
또는 경계 및 원상태의 기억을 잃게 된다
(Memory Loss). 이러한 단계를 난류론에서는
Energy-containing Range와 Universal
Equilibrium Range로 구분한다. Universal
Subrange는 다시 Inertial Subrange와
Dissipation Range로 나누어진다. 두 단계 모
두 최초의 기억은 잃어버린 상태지만 난류의 특
성과 유체의 물성치 중 어느 것에 의존하는지에
따라 구분된다. Inertial Subrange 상태에 해당
하는 크기의 와들은 더 작은 와를 만들기 위해
에너지를 전개시키는 비율이 일정한 값을 나타낸
다. 이 값은 한 주기의 와들이 가지는 에너지의
합과 그 주기를 로그축에 도시하였을 때 약 $-5/3$
의 기울기로 나타나게 된다(Pope, 2000, pp.
233 참고). 이러한 결과는 어떤 유체에, 어떤 흐
름조건에 적용하여도 나타나는 공통된 현상으로
앞에서 언급한 난류 자체의 특성으로 이해된다.
Inertial Subrange보다 더 작게 전개된 와들은
Dissipation Range로 분류되며 와들이 가지는
난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)가
유체의 점성에 의해 소멸된다. 소멸되는 과정은
오직 유체의 점성에 의해서만 결정되므로 흐름
및 난류 특성과는 무관한 유체의 물성치에만 의

존한다는 것이 이 단계에 대한 가정이다. 이러한
난류의 특성은 난류에 대한 실험을 수행하고 난
류특성에 대한 측정이 성공하였는지를 확인할 때
도 유용하게 사용된다. 측정된 유속의 평균값과
섭동값(Fluctuation)을 통해 난류에너지를 확인
하고 Fourier Transform 과정을 통해 와의 주
기별 난류운동에너지를 로그축에서 도시한 이후,
 $-5/3$ 에 해당하는 기울기가 발견되는 경우에는
난류특성에 대한 측정이 성공하였다고 주장할 수
있는 것이다. Universal Equilibrium Range
로 전개될 때의 와의 크기는 가장 큰 와(본 기사
의 예에서는 돌맹이를 던졌을 때 발생하게되는
최초의 큰 와)의 약 $1/6$ 에 가깝다는 것이 난류론
에서의 일반적인 가설이다.

난류가 방향, 크기 등이 제각각인 와의 집합이
라고 상상한다면 정밀한 정상류 실험 중에 나타
나는 측정유속의 섭동현상도 쉽게 이해될 수 있
다. 정밀하게 정상류 조건을 만들고 동일한 위치
에서 반복적으로 측정을 실시하더라도 매 측정시
에 불규칙하고 다른 크기의 와가 측정위치에서
발생하게 될 것이다. 만약 주흐름의 방향과 반대
방향의 와가 측정위치에 발생한다면 평균유속값
보다 낮은 유속을, 같은 방향의 와가 발생한 경
우는 큰 유속을 나타내며 유속 측정값이 섭동하
게 된다. 주흐름 방향과 같은 와가 발생하는 경
우라도 그 와의 크기 및 회전속도에 따라서 평균
값보다 훨씬 큰 유속이나 약간 큰 유속이 측정될
것이다.

난류가 각각 다른 방향, 크기, 회전주기를 가
지는 와라고 생각한다면 측정기기의 크기나 측정
주기에 따라서 측정할 수 있는 와의 최소크기가
달라진다는 점도 난류흐름에 대한 실험시 유용하
게 이용할 수 있는 아이디어이다. 요즘은 많이
대체되었다고는 하지만 아직도 기계공학의 많은
분야에서 이용되는 X 모양의 Hot-wire를 이용
하는 경우, 센서에 해당하는 X 모양 Wire의 크
기에 따라서 측정가능한 와의 최소직경이 결정되

게 된다. 만약 Wire의 크기보다 와의 크기가 작다면 측정이 이루어지지 않는다고 가정하는 것이 바람직하다는 것으로 이는 기기의 측정주기에도 동일하게 적용가능한 생각이다. 수공학 분야와 관련된 측정시 기기의 크기 및 주기에 대한 결정은 Nezu and Nakagawa(1993)의 “Turbulence in open-channel flows”의 pp. 30을 참고하여 이루어질 수 있다. 이 참고문헌에 따르면 최소측정주기와 센서의 최대크기는 유속 및 수심을 고려하여 결정될 수 있으며 수심 0.1 m, 유속 0.5 m/s인 경우는 약 80 Hz 이상의 주기와 0.37 mm 이하의 크기의 센서를 이용해서, 수심 5 m, 유속 1 m/s인 흐름의 경우는 3 Hz 최소주기, 0.58 mm 최대크기의 기기를 이용하여 난류에 대한 측정이 가능하다. 하지만 이러한 기준은 Inertial Subrange에서 나타나는 -5/3의 기울기를 간신히 확인할 수 있는 것으로 측정시의 오차나 보다 수월한 분석을 위해서는 더 작은 크기의 센서와 더 높은 주기의 측정빈도가 적용되어야 할 것이다.

4. 난류의 모형화

공학에서 모형은 크게 세 가지 종류 나뉜다. 물리모형(Physical Model), 수치모형(Numerical Model), 실험실모형(Laboratory Model)으로 수치모형과 실험실모형은 대부분의 공학자에게 익숙한 개념이다. 물리모형은 대부분의 경우 지배방정식에 해당하는 것으로 모형이 입력에 따른 현상의 결과를 모사해내는 것이라 생각할 때 수학적 표현법을 통해 현상을 모사하는 방식으로 이해할 수 있다. 본 기사에서는 난류현상을 수학적으로 모사하는 방법, 즉 물리모형에 대해 살펴본다. 난류의 개념과 접근법을 간략히 소개하는 본 기사의 목적에 따라 수식에 대한 구체적 서술을 배제하고 모형화 방법의 전체적인 흐름을 살

펴보는 것에 주안점을 둔다.

난류를 모형화하는 방법은 크게 Direct Numerical Simulation(DNS), Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 모형, Large Eddy Simulation(LES)로 나뉠 수 있다.

DNS는 비선형항을 가지는 운동량방정식을 수치기법을 통해 계산하는 방법으로 초기값 또는 경계조건에 극소의 변화를 주어 Deterministic Navier-Stokes 식으로 난류가 가지는 무작위성 및 비선형성을 계산할 수 있는 장점이 있는 반면 난류 자체에 대한 심도 깊은 이해가 선행되어야 하며 수치비용이 막대하게 요구되는 점, 고도의 수치기법을 이용해야 한다는 점 등으로 인해 현재까지 수공학 분야의 실무에서 활발히 적용되지는 못하고 있다. 하지만 난류에 대한 기초 연구의 도구로 점점 이용도가 증가하고 있으며 컴퓨터 하드웨어의 발전과 함께 수치비용에 관한 문제도 많이 개선되는 추세이다.

RANS 모형은 난류에 의한 유속을 평균유속(\bar{u})과 섭동(u')으로 구분하여(Reynolds Decomposition) 운동량방정식을 간략화한 다음 여러 가정을 이용하여 모형화하는 방법을 통해 개발되었다. RANS 모형은 난류 운동을 매개화시켜 계산하기 위해 닫힘 문제(Closure)를 이용하며 DNS에 비해 매우 빠른 시간 내에 난류특성을 계산할 수 있다는 점에서 장점이 있지만 많은 물리적 가정과 간략화 과정이 요구된다는 점에서 단점을 가진다. RANS 모형은 Reynolds-응력 모형과 와점성(Eddy Viscosity) 모형으로 다시 나뉜다. Reynolds-응력 모형은 개별적인 Reynolds 응력과 난류 소산율(Turbulent Dissipation Rate)를 계산함으로써 와점성에 대한 가정을 배제할 수 있다는 점에서 장점을 가진다(Son et al., 2011). 와점성 모형은 동점성계수를 이용하여 유체 전단력을 표현하는 방식과 유사하게 난류에 의해 발생한다고 가정하는 와점성계수를 이용하고 응력-변형율(Stress-rate-

of-strain) 관계에 바탕한 수학적 추론으로 개발되었다. 따라서 이 방법의 물리적 타당성을 구체적으로 증명할 수는 없다(Pope, 2000). 와점성 모형은 다시 Uniform Eddy Viscosity 모형, 혼합길이(Mixing Length) 모형, 1식(1 Equation) 모형, 2식(2 Equations) 모형으로 세분된다. Uniform Eddy Viscosity 모형은 바닥에 수직인 모든 위치에서의 와점성계수가 동일하다는 가정에 기초하여 개발된 모형으로 Coutte Flow와 같이 수직방향에서의 난류강도가 동일할 때 이용될 수 있다. 혼합길이 모형은 와점성계수가 높이에 선형 비례한다는 가정을 이용하며 경계층(Boundary Layer) 구간과 같이 유속이 지수법칙을 따르는 구간에서 유용하게 적용할 수 있다. 1식 모형은 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)를 고려한다는 점에서 장점을 가지지만 결국 높이에 선형 비례하는 혼합길이를 이용해야 하는 단점을 가진다. 2식 모형은 현재까지 가장 널리 이용되는 난류 모형으로 $k-\epsilon$ 모형, $k-\omega$ 모형 등이 여기에 해당된다. 즉 난류운동에너지(k)와 난류소산율(ϵ 또는 ω) 사이의 균형을 표현하는 2개의 식을 이용하여 와점성계수를 계산해내는 방법으로 많은 연구에서 이 방법에 이용하여 왔다. 예를 들어 확산의 문제에서 널리 이용되는 난류확산계수 역시 2식 모형의 변수들에 기초하여 개발되어 왔으며 점착성 유사의 응집현상 등의 연구에서도 이 방법을 이용하고 있다. 뿐만 아니라 수많은 선행연구를 통해 실험적 매개변수의 값이 보정되어 왔고 현상의 물리적 특성에 부합하는 모형의 개발이 지속적으로 이루어졌기 때문에 많은 활용도를 가지고 있다. $k-\epsilon$ 모형과 $k-\omega$ 모형 사이의 장단점과 우월성에 대한 연구가 여러 차례 발표되었고 서로 상반되는 주장이 제기되었다. 예를 들어 Puleo *et al.*(2004)는 $k-\omega$ 모형이 월등히 우월하다는 결론을 제시하였고 Wilcox(1993)은 흐름의 횡방향 압력경사가 큰 값을 나타내는 경우 $k-\omega$ 모형이 보다 정확할

수 있다는 주장을 한 반면 Son *et al.*(2011)은 Puleo *et al.*(2004)의 경우와 동일한 조건으로 수치실험을 수행하여 두 모형이 거의 차이를 보이지 않거나 $k-\epsilon$ 이 모형 약간 더 정확하다고 주장하였다. 저자의 개인적인 생각으로는 두 방법이 가지는 접근법이 거의 유사하고 두 가지 모두 물리적 타당성을 명확히 증명할 수 없는 상황에서 두 모형의 우위를 비교하는 시도에 큰 의미가 없다고 판단된다. 단 확산의 문제 등과 같이 다른 관련연구들이 $k-\epsilon$ 모형에 기초하여 발전되어 온 상황에서 $k-\epsilon$ 모형이 보다 높은 실무적 활용도를 가진다고 생각된다.

LES 모형은 물리적 타당성이 명확하지 않지만 간단하고 많은 실험적 검증을 거친 RANS 모형과 복잡하고 수치비용이 높지만 보다 이론적 배경이 확실한 DNS 방법의 장점들을 결합하고자 하는 목적으로 개발되었다. 크기가 매우 작아 세밀한 계산격자와 시간간격을 요구하는 작은 와는 단점 문제를 적용하고 매개화하여 계산하는 반면 비교적 큰 규모의 와는 DNS와 유사하게 난류섭동을 직접적으로 고려하여 계산하는 방법을 이용하고 있다.

5. 맺음말

이 기사에서는 난류에 대한 이해가 필요한 이유와 모형화 방법에 대한 내용이 간략히 소개되었다. 학문의 어느 분야나 선배 학자들의 피나는 노력으로 현재의 내용이 완성되어 왔고, 그로 인해서 상당기간의 학습이 필요해 누구나 어렵고 힘들다고 생각할 것이다. 난류에 대한 이해 역시 많은 이들이 어렵게 생각하고 처음 교과서를 펴올 때 당황해 하는 상황에 작은 도움이라도 되기를 바라며 이 기사를 작성하였다. 난류의 경우 다른 유체역학의 분야에서 보기 힘든 생소한 개념으로 인해 독학으로 학습을 시작하기가 상당히

어렵다. 즉 누군가에게서 학습의 시작점을 안내 받아야 비로소 교과서의 첫째 장이 이해되기 시작하는 분야다. 필요성을 인식하더라도 혼자 학습하여 후학에게 전파하기 어렵고, 체계적으로 배운 적이 없기 때문에 혼자서 학습하기 힘든 Snowball Effect가 국내 수공학계에 존재하지는 않을까 염려된다. 기사의 주제를 정할 때 떠올랐던 기억 역시 난류에 대한 주제로 글을 적게 된 이유 중 하나이다. 약 십년 전쯤 난류 모형으로 석사학위를 작성한 누군가가 자신이 난류를 공부한 이유와 그 활용방안에 대한 의문점을 토로한 적이 있었다. 지금 돌이켜 보니 전형적으로 연구와 실무가 괴리된 상황에서 가지는 의문이었고 난류에 대한 본질적인 이해보다는 계산방법의 개발에 보다 집중한 부작용으로 생각된다. 벌써 이

년이 넘게 원인과 해결방안에 대해 의견이 분분한 대규모 보 하류에서의 세굴, 합류부에서의 두부침식 등에 대한 연구를 수행하는 과정에서 주 흐름에 의한 충격과 이에 대한 보강에만 집중하는 상황 역시도 난류에 대한 이해가 많은 사람에게 확산되지 않았고 연구와 실무가 괴리되어 일어나는 현상으로 생각되어 아쉬운 마음이 든다.

본 기사의 내용은 저자가 한 학기의 절반 정도의 시간을 할애하는 과정으로 강의하면서도 시간이 부족하다고 느끼는 내용을 요약한 것으로 많은 오류와 불성실한 설명이 포함되어 있을 것이라 염려된다. 보다 구체적인 설명에 대한 요구와 오류에 대해 지적할 수 있는 기회는 항상 열려 있고 언제나 감사히 생각한다는 점을 독자에게 전달하며 본 기사를 마무리한다. 🌊

참고문헌

1. Son, M., Lee, G.-H., Lee, K.S., Lee, D.H. (2011). "Comparative study on $k-\epsilon$ and $k-\omega$ closures under the condition of turbulent oscillatory boundary layer flow at high Reynolds number." *J. of Korea Water Resource Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 189-198.
2. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press INC., Orlando, Florida.
3. Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*. IAHR,
4. Pope, S.B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge University Press, New York.
5. Puleo, J.A., Mouraenko, O., Hanes, D.M. (2004). "One-dimensional wave bottom boundary layer model comparison: Specific eddy viscosity and turbulence closure models." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 130, No. 6, pp. 322-325.
6. Wilcox, D.C. (1993). *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, CA: DCW Industries.