

건설환경 공학에서 전산유체역학의 현재와 미래

Future and Present of CFD in Construction and Environmental Engineering



이 승 수*

* 충북대학교 토목공학부 교수

최근 기후변화에 따라 강풍, 홍수를 비롯한 극한 기상의 잦은 출현으로 전 세계적으로 많은 피해가 발생하는 추세이다(IPCC AR4). 특히 해수온도의 상승으로 태풍의 강도 증가가 예상되며, 이에 따른 강풍의 피해도 적지 않게 나타나고 있다. 그림 1과 2는 2003년도에 한반도 전역에 큰 피해를 발생시킨 바 있는 태풍 매미와 1992년도에 미국 동남부에 큰 피해를 입힌 허리케인 Andrew에 의한 피해의 일부이다.

강풍이 인간에게 주는 피해는 다양하다. 태풍은 그 자체만으로도 보행을 비롯한 실외활동에 지장을 줄 뿐만 아니라, 건축물의 파괴를 초래하며, 구조물의 파편은 인간에게 2차적인 피해를 가져다 준다. 특히 최근 급속도로 진행되고 있는



그림 2 허리케인 Andrew(1992)의 피해



Crashed Crane during Typhoon MAEMI (2003)

그림 1 태풍 매미(2003)에 의한 피해



그림 3 도시지역 건축물에 대한 풍동실험

초고층 건물과 장대교량의 건설들은 이러한 강풍에 대해 상대적으로 취약한 구조물에 해당하여 설계 단계부터 풍하중과 풍응답에 대한 철저한 분석과 대비가 요구되고 있다.

일반적으로 구조물의 설계하중 산정단계에서 내풍특성은 그림 3에서 보는 바와 같이 풍동실험을 이용하는 경우가 많으나 최근 전산해석 기술의 발달로 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)의 적용사례가 증가하고 있으며, 1990년대 이후 전산풍공학(Computational Wind Engineering)이 하나의 학문이자 방법론으로 자리매김하고 있다. 본 기고에서는 건설환경 분야의 전산풍공학 적용사례를 중심으로 그 현재와 미래를 바라보고자 한다.

1. 전산풍공학의 방법론

전산풍공학은 전통적인 풍공학과 전산역학이 결합된 방법론으로 정의할 수 있다. 특히 풍동실험이 어렵거나 불가능한 경우의 대안으로 수치 풍동(Numerical Wind Tunnel)의 관점에서 접근되고 있어, 구조물에 작용하는 풍하중 해석뿐만 아니라 풍환경 해석, 대기 오염물질의 확산 해석, 실내의 환기, 화재 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 그림 4는 일반적인 전산풍공학의 절차를 나타낸다.

실제 풍환경으로서 바람장의 유동을 지배하는 물리적 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

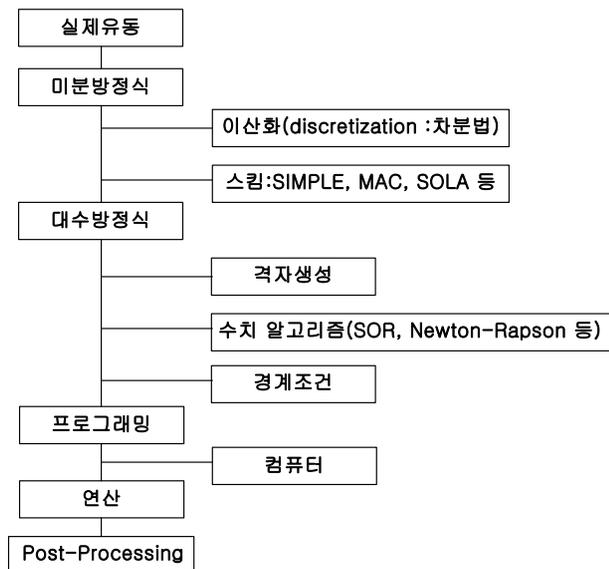


그림 4 전산풍공학의 절차

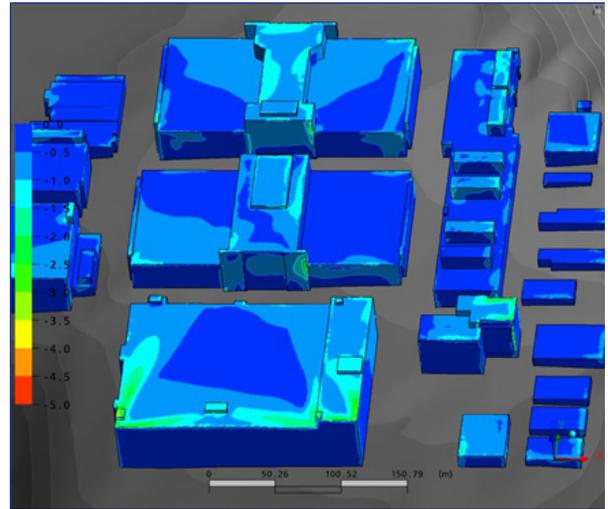


그림 5 건물군의 전산 모델링

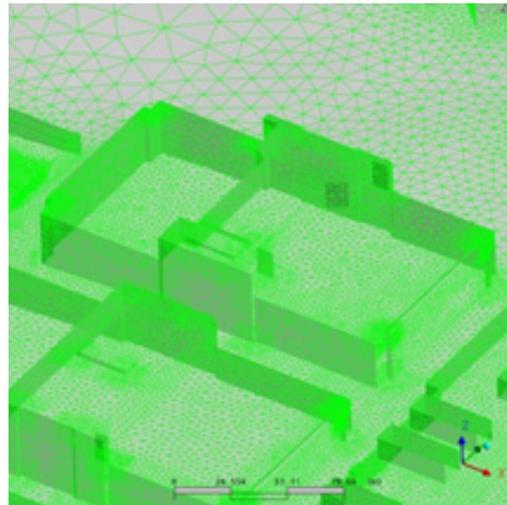


그림 6 이산화된 공간 영역과 건물군

풍공학에서 대상으로 하는 지표부근의 풍속이 100m/s를 초과하는 경우는 거의 없으므로 대기는 비압축성으로 고려되며 확산이나 화재와 같이 온도의 효과를 무시할 수 있는 경우에는 중성대기로서 부력에 의한 대기의 수직운동은 무시하게 된다.

식 (1)과 (2)로 주어지는 편미분 방정식이 지배하는 대기 공간을 유한한 자유도의 움직임으로 모사하기 위하여 다양한 방법의 이산화가 수행되는데, 주로 유한체적법(Finite Volume Method), 유한요소법(Finite Element Method) 및 유한차분법(Finite Difference Method)가 이용되고 있다. 각각은 수치적 특성이 상이하여 적용 대상과 문제에 따라 장단점이 있다. 참고로 엔지니어링 현업에서 많이 이용되고 있는 범용 전산유체해석 프로그램인 FLUENT는 유한체적법 기반이며 CFX는 유한요소법 기반이다.

이와 같은 이산화의 결과로 그림 5와 같은 건물군이 그림 6과 같이 그물망 형태의 격자계로 변환된다. 아울러 식 (1), (2)의 수학적 미분방정식도 유한한 자유도로 이산화된 대수방정식으로 변환되어 수치해석의 결과 풍속, 풍압 등의 수치해를 얻게 된다.

2. 전산풍공학의 적용사례

본 절에서는 전산풍공학에 의한 적용사례를 소개하고 가능성과 미래를 전망하고자 한다.

그림 7은 전산유체역학에 의해 다중박공 지붕구조를 갖는 공장형 건물에 작용하는 풍압 분포의 해석결과이다. 박공지붕의 모서리 부근에 발달하는 높은 부압과 정압이 잘

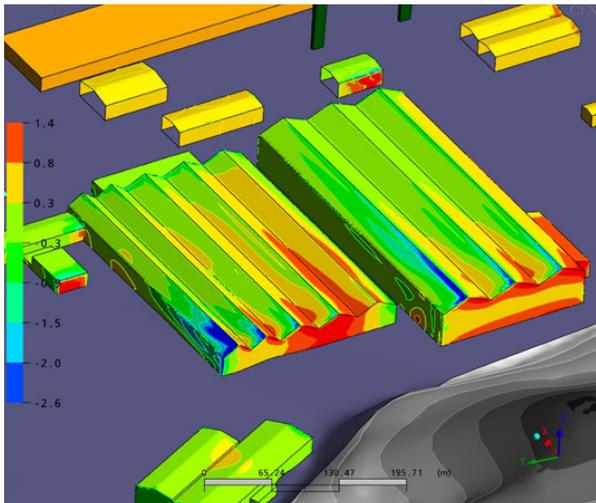


그림 7 다중박공 지붕을 갖는 공장형 건물의 외부 풍압 분포

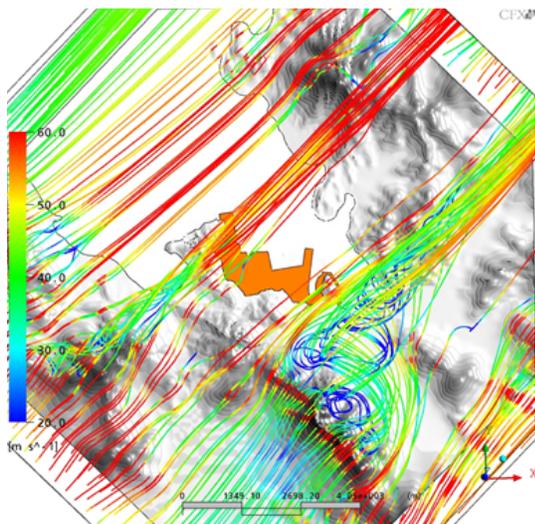


그림 8 풍환경 해석결과

예측되고 있어 구조물의 외장재에 작용하는 풍하중 산정이 가능함을 보이고 있다. 그러나 그림 7의 결과는 시간 평균된 풍압 분포로서 순간적인 극한 풍압의 추정을 위해서는 난류의 영향을 고려한 비정상 해석이 요구된다. 그러나 현재 일반적으로 가장 많이 적용되고 있는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식과 k-ε 계열의 난류모형은 난류의 영향이 고려된 평균 유동해석에는 적합하나 일반적으로 변동 유속과 그에 따른 극한 풍속 및 풍압은 다소 부정확한 것으로 알려져 있다. 이에 대한 대안으로 최근 대와동모사(Large Eddy Simulation)이 이용되고 있으나 RANS에 비해 상당히 많은 격자와 전산해석 시간 등의 문제로 실제 풍환경이나 풍하중 해석에는 한계를 나타내고 있다.

그림 8은 산지지형을 포함하는 비교적 넓은 영역에 대한 풍환경 분석의 사례이다. 대상 영역에 남서풍이 유입되는 경우 산지 지형의 후류에 위치함에 따라 균질의 바람장 대신 소용돌이와 같은 와류 영역에 놓여 비정상적인 풍환경이 발달할 수 있음을 예측할 수 있다.

그림 9~11은 병렬교에 작용하는 풍하중의 산정을 위해 구성된 격자계와 해석결과로 나타난 유선 및 풍압분포를 나타낸다. 특히 풍압 분포에서 나타난 바와 같이 풍하중 교량의 경우 풍상층 교량의 후류에 위치함에 따라 교량 상판 전후의 압력차가 매우 작아 도로교설계기준에서 제시하는

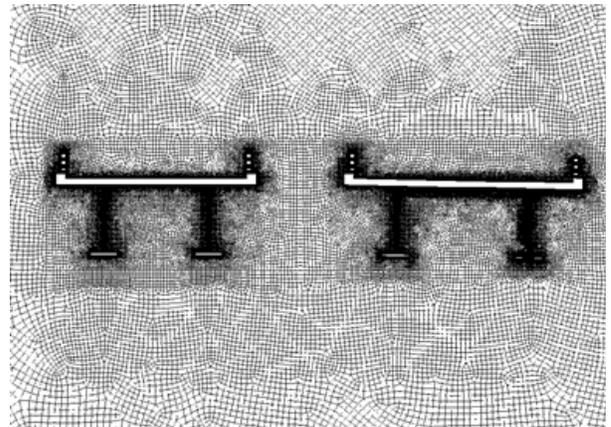


그림 9 병렬교 주위의 격자계

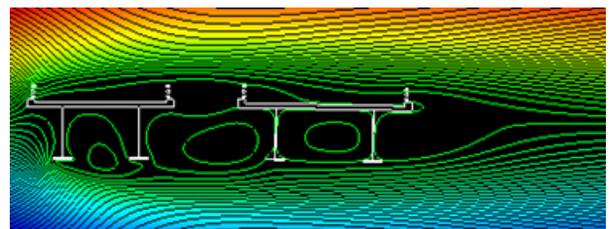


그림 10 병렬교 주위의 유선

풍하중 보다 매우 작은 하중이 작용함을 알 수 있다. 교량 구조물중 사장교나 현수교와 같이 장대교량은 특히 정적 및 동적 풍하중이 매우 중요한 설계 요소이다. 이러한 장대교량의 내풍성능 향상과 설계기술 확보를 위해 2008년부터 초장대교량 사업단이 발족하여 관련 분야의 연구개발을 수행 중으로서 그 중 전산유체역학을 이용한 교량 내풍 성능 해석기술 개발이 진행되고 있다. 그림 12는 해당 연구의 결과로 가상의 거마대교 교량에 대한 3차원 유동장 해석결과의 일부이며, 풍동 실험결과와 비교하여 매우 근사한 공기력 계수의 추정이 가능함을 확인한 바 있다.

전산유체역학을 이용한 풍환경 평가에 대한 기술의 적용도 많이 시도되고 있는 사례이다. 그림 13은 한 예로서 열병합발전소의 연돌에서 배출되는 연기와 조성 성분즉 인체에 유해한 이산화질소의 확산을 전산유체역학을 이용하여 해석한 결과이다. 특히 이와 같은 대기 오염물질의 확산에

대한 문제는 풍동실험이 매우 어렵거나 거의 불가능하여 전산해석을 이용한 평가와 설계가 많이 수행되고 있다.

3. 전산풍공학의 미래

앞에서 간략하게 살펴본 바와 같이 전산유체역학을 건설 및 환경공학 분야에 적용하고 있는 사례는 많으며 최근 증가하는 추세에 있다. 그러나 대상 구조물의 외형이 매우 복잡하거나 관심 영역이 광범위한 경우 전산모델링의 난이도 증가는 물론 막대한 전산 자원의 소요로 인해 실제 적용에 많은 제약이 존재하고 있다. 그림 14에서 보이는 바와 같이 지형과 구조물이 포함된 대기 영역에 대한 전산해석을 위해서는 매우 복잡한 구조의 격자계 구축이 요구되는데, 숙련된 엔지니어라 할지라도 적게는 수 시간에서 일주일 이상의 시간에 소요되는 작업이 되기도 한다. 특히 격자의 크기가 유동 현상, 그중에서도 수치해로 구현되는 난류의 특성을 결정함에 따라 물리적 현상에 대한 이해가 필요한 작업이기도 하다. 또한 그림 14와 같이 작업이 된 경우에도 대상 지역이나 구조물의 외형에 조금의 변화가 있으면 그러한 작업을 다시 반복해야 하는 *Modeler's Nightmare*에 해당되는 일이 적지 않은 것이 전산유체역학의 적용을 저해하는 요인이기도 하다.

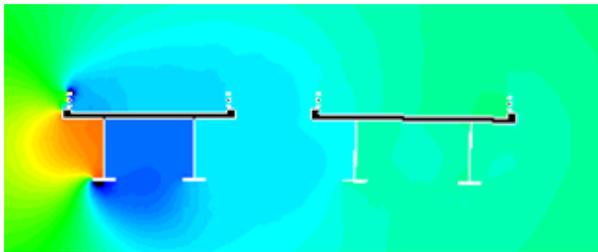


그림 11 병렬교 주위의 풍압 분포

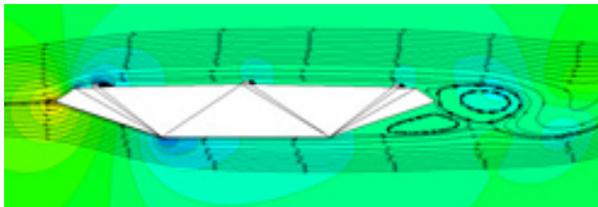


그림 12 거마대교 주위 유동장 전산해석

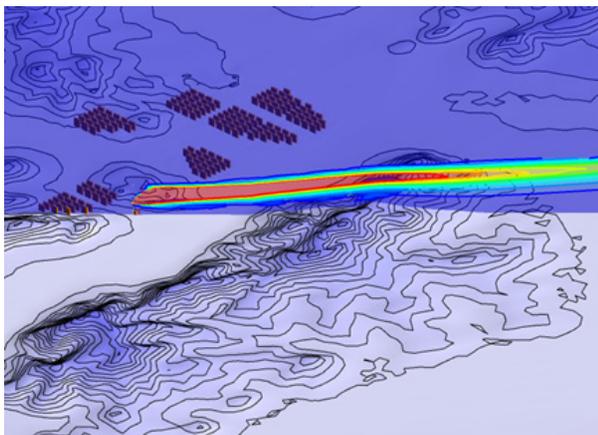


그림 13 열병합 발전소의 배연 확산 전산해석

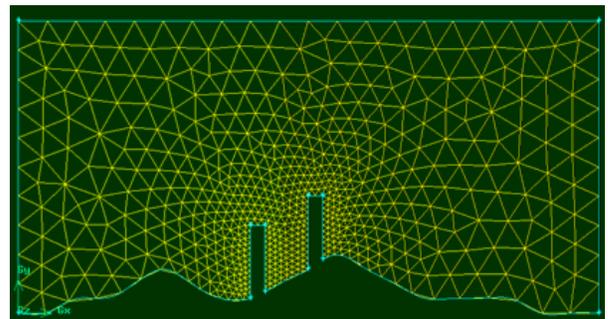


그림 14 물체 맞춤 격자계

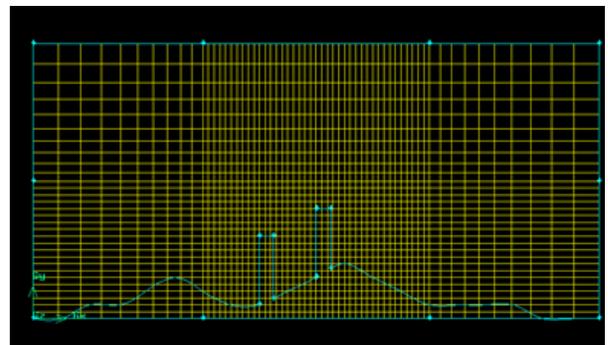


그림 15 가상경계법의 격자계

이에 최근 이러한 난점을 극복하고자 가상경계법이라는 수치해석 방법이 도입되어 적용되고 있다. 그림 15는 그림 14의 영역에 대해 가상경계법에 의한 격자계를 나타내고 있다. 즉, 물체를 포함하는 모든 영역을 직교격자로 구성하고, 지형이나 구조물의 효과는 식 (1), (2)의 지배방정식에 가상의 외력을 포함시켜 해결하는 방법이다. 이 방법은 직교격자의 활용으로 수치해의 안정성이 증대할 뿐만 아니라 물체의 형상에 관계없이 매우 손쉽게 격자를 구성할 수 있다는 장점을 갖고 있어 향후 적용이 증가할 것으로 예상된다.

전산풍공학의 또 다른 난제는 대기 움직임의 난류 특성을 모사하는 것이다. 일반적으로 유속이 증가하여 전단응력이 매우 강해지면 결국 점성력에 의한 전달만으로는 이를 감당하지 못하여 전단응력은 아주 작은 난류와도 (turbulent eddy)들로 깨어지게 되고 이에 의하여 전단응력은 유체 내부로 전달된다. 유속이 증가 할수록 난류와도 크기는 점점 작아지고 유체의 거동은 시간 평균값과 짧은 시간 주기를 갖는 변동(fluctuation)값이 존재하게 되는데 이러한 유동 현상을 난류라고 한다. 이러한 난류는 구조물의 입장에서 변동하중으로 나타나게 되며 구조물의 안정성에 영향을 미치는 극한 하중 역시 난류의 변동성에 기인한다. 전산유체역학에서 난류와 난류 에너지를 모사하기 위해서 다양한 방법들이 이용되고 있는데, 가장 대표적인 방법이 $k-\epsilon$ 난류 모델로서 난류 운동 에너지 k 및 난류 운동 에너지 소실률 ϵ 을 기본으로 하여 난류량을 예측하는 반경험(semi-empirical)모델이다. 그러나 이 방법은 모형의 한계로 변동성분의 정확한 모사에 한계를 지니며, 최근 일부 난류

성분만을 모형화하고 대부분의 변동성분을 직접 모사하는 대와동모사법(Large Eddy Simulation)의 적용이 증가하고 있다. 물론 대와동모사가 필요로 하는 막대한 전산자원으로 인해 현재는 적용이 한정적이나 전산기의 발전속도를 고려할 때 가까운 미래에는 가장 일반적인 방법으로 이용될 것으로 예상된다.

4. 맺는말

최근 기후변화에 따른 강풍의 세기 증가와 이 결과로 발생하는 풍해로 초고층건축물, 장대교량과 같이 풍해에 취약한 시설의 내풍 성능해석 및 설계가 매우 중요하게 인식되고 있다. 일반적으로 풍동실험에 의존하던 기존의 엔지니어링은 최근 전산기술의 발달과 더불어 전산유체역학을 이용한 해석기술에 의한 내풍해석이 증가하는 추세이다. 이에 본 기고에서는 건설 및 환경공학 분야에서 전산유체역학을 이용한 전산풍공학의 사례를 살펴보고 향후 발전 방향에 대해 전망하였다.

전산풍공학은 비단 구조물에 작용하는 풍하중의 평가는 물론 풍환경 평가, 오염물질 확산 해석 등 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 기존의 전산 모델링이나 난류 모형이 갖는 한계를 극복하기 위한 연구가 수행 중으로서 가까운 미래에는 전통적 풍동실험과 더불어 엔지니어링 현업에서 하중 산정의 표준절차 등으로 적용될 것으로 전망된다. 

[담당 : 전세진, 편집위원]