

풍공학에 있어서의 전산해석과 풍동실험

최 창 근*
김 윤 식**

1. 서론

Structure와 flow, 크게는 인간생활과 자연생활을 대상으로하는 풍공학에 있어서 가장 중요한 해석방법으로써 전산해석과 풍동실험을 들 수 있다. 금세기 후반에 들어 컴퓨터의 출현 모든 공학분야의 발전에 크게 기여하고 있다는 것은 모두가 인지하는 사실이다. 풍공분야에 있어서도 컴퓨터는 데이터의 처리를 양적으로는 물론 질적으로도 크게 향상시켜주었고 流動場에 구조물이 존재할 때 그 주위를 통과하는 유체에 대한 기존의 사공방식에 새로운 변화를 주고 있다. 그러나 유체라는 것은 매우 복잡하여 이상화된 이론적 취급만으로는 충분히 규명될 수 없는 점도 있고 또한, 이론의 결과를 실제에 이용하기 위해서는 그것을 확인할 필요가 있기 때문에 풍동실험을 하게 된다. 최근 컴퓨터의 발달과 계산기술의 향상에 큰 성과를 올리고 있으나, 구조물의 유체력탄성거동시에 구조물에 미치는 非定常유체력의 평가에는 풍동실험을 이용하는 것이 현재의 풍공학의 주류라 할 수 있다.

본고에서는 현재 풍공학에서 다루어지고 있는 주요 토픽중 몇가지를 컴퓨터를 이용한 수치해석적 입장과 풍동을 통한 실험적 입장에서 고찰해보고자 한다.

2. 컴퓨터에 의한 기류의 수치해석

컴퓨터에 의한 기류의 해석은 최근의 슈퍼컴퓨터의 발달과 함께 주로 항공분야를 중심으로 기체를 지배하는 기초방정식을 수치적으로 계산하는 수법의 개발이라는 형태로 활발히 행하여 지고 있다. 풍공학분야에 있어서도 풍동실험에 비해 시간적, 경제적으로 유리한 방법으로써, 또한 풍동실험이 곤란한 유동장의 현상을 파악하기 위한 방법으로써 수치해석법이 연구되고 있다.

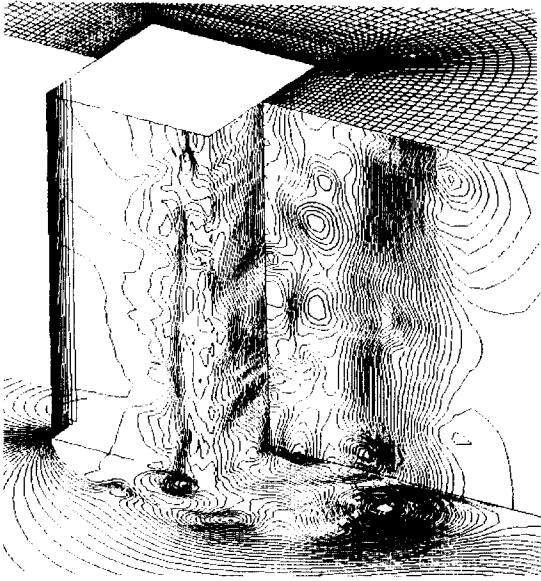
Navier-Stokes 방정식은 충격파나 剝離, 또는 亂流를 포함하는 모든 유체의 운동을 기술하고 있다고 평가되고 있다. 그렇다면 이 방정식을 적당한 초기, 경계조건하에서 풀면 유체의 모든 문제는 해결된다. 그러나 난류의 경우, 그것의 정확한 수학적 표현이 현재로서는 도저히 불가능하므로 실제의 계산에는 시간적 평균화된 모델에 의해 근사방정식을 취급하게 된다(참 1). 즉, 이러한 근사방정식을 푸는 수학적방법의 개발이 컴퓨터를 이용한 기류의 주된 과제라 할 수 있다. 여기에서는 이러한 수치해석방법중에서 현재 주로 사용되는 차분법과 渦点法의 수치해석 결과를 예로 들기로 한다.

2-1. 차분법

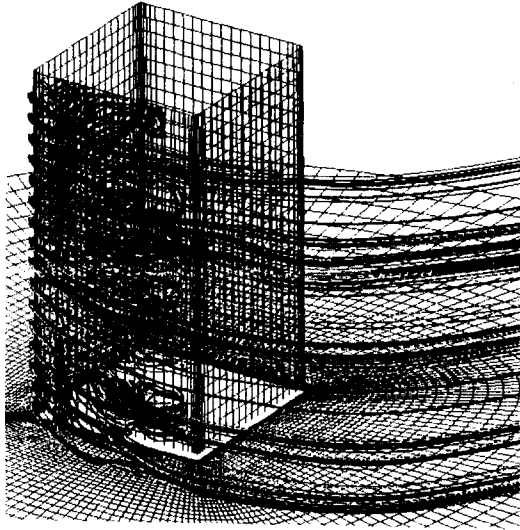
그림 1은 일반좌표계로 나타낸 비압축 3차원 Navier-Stokes 방정식을 차분법에 의해 직접적으로

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정



(a) 순간압력분포($Re = 100000$)



(b) 유선분포

그림 1. 정사각주 주위의 순간압력과 유선분포

로 적분하여 해석한 결과이다. $B:D:H=1:1:1$:4인 정사각주 주위의 유동장을 $200 \times 100 \times 100$ 의 격자점을 이용하여 순간압력분포와 표면유선분포를 나타내고 있다(자세한 수치해석알고리즘에 대해서는 문헌 2를 참고).

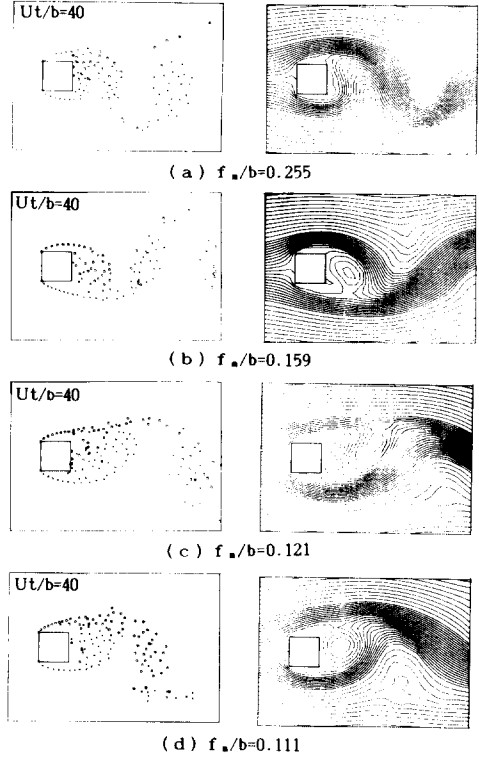


그림 2. 상하진동하는 정사각단면 주위의 기류 (f_m : 강제진동 진동수, b : 정사각형의 폭)

2-2. 와점법

와점법에서는 물체주위의 potential flow와 剝離剪斷層을 복합시키므로써 박리를 동반하는 비정상 기류를 나타낸다. 따라서 이러한 상사는 형식적으로는 레이놀즈수가 무한대의 극한을 갖는 것에 상응한다. 차분법에 비해 계산순서가 비교적 간단하며 높은 레이놀즈수의 기류의 해석에 적합한 이 방법은 정지 기류중의 물체가 급격히 일정속도로 움직이기 시작했을 때에 물체주위의 비정상기류를 계산하여 각 시간간격에 따른 모든 와점에서의 기류의 특성을 계산해 간다. 그림 2는 진동하는 2차원 정사각형단면주위의 기류의 와점분포와 유선을 나타내는 해석결과이다(문헌 3 참고).

3. 풍동실험에 의한 구조물의 공기역학적 해석

앞서 언급한 바와 같이 물체주위의 유동장을

수치해석에 의해 표현하는 데에는 한계가 있다. 특히 풍공학에서 다루는 대부분의 구조물(토목, 건축, 기계, 해양구조물)등은 뾰족한 형태의 것이 대부분이며 이러한 형태의 구조물주위의 기류(유체)는 일반적으로 박리를동반한 비정상기류이다. 또한 기류에 의해 구조물에 탄성거동이 발생했을 때 즉, gap flow나 jet flow 등과 같이 비정상성이 높은 기류에 의해 구조물에 진동이 발생했을 경우에는 풍동실험에 의해 해석을 할 수 밖에 없다(참 4).

이 장에서는 풍동을 통한 실험적 입장에서 현재의 컴퓨터나 계산하기 어려운 공기역학적 진동현상을 중심으로 몇가지 예를 살펴보고자 한다.

3-1. WAKE GALLOPING

비교적 근접히 배치된 두 구조물이 유동장에 존재할 때 하류측 구조물은 상류측 구조물의 wake (박리전단층)의 영향에 의해 진동이 발생하는 경우 있는데, 이러한 진동을 wake galloping (문헌에 따라서 표현의 차이는 있으나)이라 한다. 특히 사장교의 twin cable, 원자력발전소의 냉각탑, 연립굴뚝등과 같은 원형구조물에서 이 진동에 의한 피해가 자주 발생하고 있다. 이 진동현상의 원인은, 두개의 구조물이 서로 근접하여 배치되어 있을 경우 상류측 구조물의 wake 내부 또는 부근에 하류측 구조물이 존재하기 때문에 단독의 구조물의 경우에는 발생하지 않는 gap flow, accelerated flow or wake displacement, jet flow, bistable flow 등이 발생하기 때문에 기류직각방향 또는 타원형의 진동이 발생하게 된다. 이 진동의 발생메카니즘을 간단히 설명하기 위해 기류직각방향의 진동이 발생하는 직렬배치에서의 경우를 예로 든다. 그림 3에서 상류측원주의 wake내에 있던 하류측원주(a)가 하향이동을 하게 되면 wake를 변형시키게 되어 하류측원주(b)의 외측에는 가속화된 기류가 통과하게 되어 負壓이 증가하게 된다. 이 부압의 증가는 하향이동을 하면 할수록 커지나, 어느 위치를 한계로 하류측원주의 외측을 통과하던 기류가 내측으로 통과하는 gap flow로 급변하여 하류측원주(c)의 내측에 부압이 증가하게 된다. 이에 따라 원주는 이동방향을 바꾸어 상향이동하게 되며 이러한 메카니즘

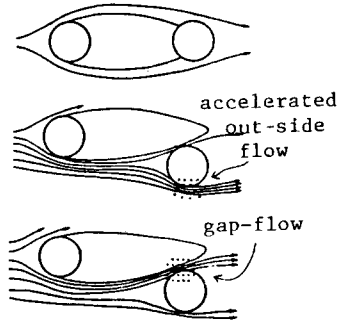


그림 3. 진동하는 두원주 주위의 기류의 양상

을 반복하면서 진동을 유지하게 된다. 즉, accelerated out-side flow와 gap flow의 비정상적인 전환이 이 진동의 원인이며 이 진동은 중심간격이 원주직경의 약 2.5배에서 5.5배의 범위에서 발생한다(참 6).

3-2. RAIN VIBRATION

최근 사장교의 케이블이 비바람시에 격한 진동을 일으키는 것이 종종 문제가 되고 있다. 이와 같은 진동은 과거 캐나다 및 일본 등지에서 송전선이 비바람에 의해 진동을 일으켜 "Rain dancing" 또는 "Rain vibration"으로 불리워지는 현상과 흡사한 것으로 현재 현상규명과정의 단계에 있어 많은 연구자들의 관심이 집중되고 있다. 일련의 실험연구와 실측보고에 의하면 이 현상의 특징으로(참 7).

1) Polyethylene으로 피복된 케이블에 발생하며, 케이블의 직경은 150-200mm에서 발생하기 쉽다.

2) 한정된 풍속범위에서 발생하며 그 범위는 약 6-18m/s이다.

3) 진동은 케이블 면내 진동이며 바람이 교량축 직각방향에서 어느 정도 각도를 갖고 작용할 때에 발생한다.

4) 풍방향에 대하여 負의 句配를 갖는 케이블에 주로 발생함.

이러한 특징을 갖는 rain vibration을 실험실내에 재현시켜 그 원인을 검토한 결과, 이 진동의 주원인은 그림 4와 같은水路의 형성과 그림 5와 같은 기류의 3차원성에 있다고 판단되고 있

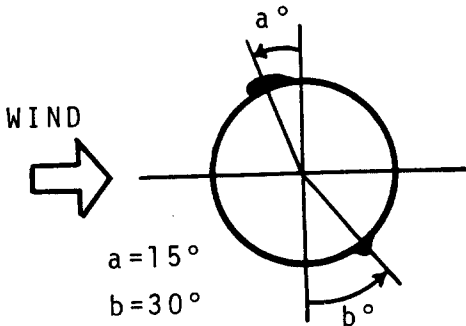


그림 4. 케이블표면의 상하면수로

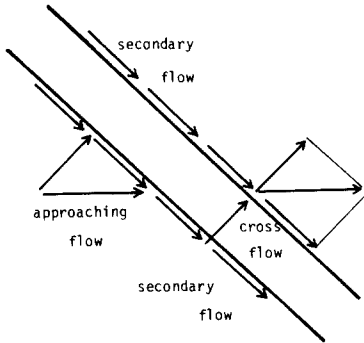


그림 5. 경사진 케이블 주위의 기류의 양상

다. 강우시 케이블표면에는 여러 갈래의 불규칙한 물줄기가 형성되어 케이블을 따라서 흘러 내린다. 이때 적당한 풍속의 바람이 적당한 각도에서 불어 주면 이 물줄기들은 케이블에 평행한 두개의 큰 물줄기 즉, 그림 4와 같이 케이블의 상하면에 수로를 형성하여 흘러 내린다. 이러한 수로형성에 의해 원래 원형이던 케이블의 단면이 변하게 되어 공기역학적으로 불안정한 단면이 되어 진동이 발생한다는 것이다(참 8). 이러한 수로형성과 함께 경사진 케이블주위를 통과하는 기류의 3차원성도 발생원인의 하나로 추측되고 있다. 바람에 직각인 케이블의 경우, 그 단면을 통과하는 기류의 양상은 단면중심에 대해 대칭(시간평균적으로)이지만, 바람에 대해 어느 정도 각도를 갖고 기울어진 케이블의 경우는 그 주위의 기류는 케이블축방향의 2차원기류를 포함한 3차원의 복잡한 기류이다(참 9). 케이블 모형에 인공적으로 축방향의 기류를 발생시켰을 때와 케이블상하면에 인공적인

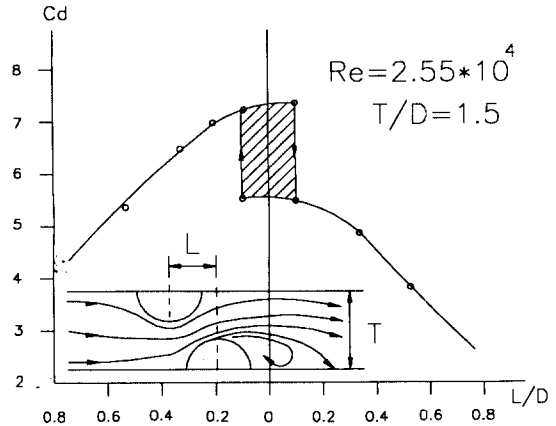


그림 6. 두반원주의 상대위치와 항력계수

수로를 부착시켰을 때에 진동이 발생한다는 것이 실험적으로 밝혀진 점에서 이 두가지의 발생요인은 어느 정도 타당성이 있다고 볼 수 있다.

3-3. BISTABLE FLOW

앞의 두가지 현상은 구조물의 동적거동을 일으켰을 때의 경우지만, 여기에서는 구조물이 진동하지 않고 정지한 상태에서 발생하는 기류의 비정상성에 대한 예로 雙安定기류(bistable flow)에 대해 살펴본다.

그림 6와 같이 구조물이 매우 근접해 있을 경우, 기류가 그 사이를 통과하면 jet flow(정의를 애매하긴하나)가 생기게 된다(참 10). 실험에 의하면 이와 같은 쌍안정적인 썸트기류는 $T/D < 2$ 에서 존재하며 이로 인한 진동현상도 보고되어 있다(참 11). L/D 에 변화를 주었을 때 $0 < L/D < 0.1$ 에서 쌍안정적인 기류가 존재함을 알 수 있다. 이 그림에서는 C_d (항력계수)로 표현되고 있지만 공기력은 풍속의 제곱에 비례하므로 이 그림으로 쌍안정기류를 확인하는 데에는 큰 문제가 없다고 본다. 즉, 쌍안정기류에 의해 사선구역과 같은 크기의 에너지를 구조물이 기류로부터 얻고 있으며, 이로 인한 진동현상도 충분히 발생가능하다고 볼 수 있다.

그림 7은 두 곡면벽을 흐르는 썸트(coander jet)기류에 일시적인 교란을 가한 뒤 제거하면 초기조건에 변화가 없음에도 불구하고 원주를 이탈하는 기류의 방향에 변화가 생긴다는 실험결

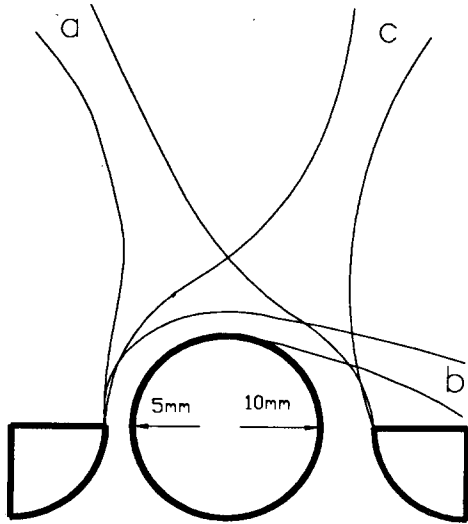


그림 7. 일시적교란에 의한 코안다노즐젯트의 방향성

과를 제시한 것이다(참 12). 양 곡면벽노즐을 통과한 두 벽면젯트기류가 주로 운동량의 비로 정의되는 위치와 방향을 갖고 원주에서 이탈해 가고 있는 (a)의 상태에서 우측 노즐출구부에 약간의 교란을 주게 되면 기류의 양상은 (b)와 같이 변한다. 이 상태에서 교란을 제거하면 기류는 (c)와 같은 방향을 갖고 흐르며 결국 (a)로 되돌아가지 않는다. 즉, 같은 경계조건임에도 불구하고 기류의 쌍안정적인 성질이 존재하며 따라서 원주에는 쌍안정적인 비정상압력분포와 힘이 작용할 수 있다.

4. 결론

풍공학의 연구수단으로써 컴퓨터를 이용한 수치해석적 입장과 풍동을 이용한 실험적 입장에서 몇가지 연구결과를 통하여 간단한 고찰을 해 보았다. 컴퓨터의 발달과 계산기술의 진보에 따라 컴퓨터에 의한 수치해석은 기존의 개념에서 벗어나 보다 복잡한 실제의 물리적 현상에 점점 접근하고 있다. 컴퓨터의 발전 못지않은 공학기술의 발전에 의해 구조물은 그 형식이 다양화, 경량화, 장대화되어 풍동실험의 필요성이 증가되고 있는 것도 사실이다. 최근에 선진외국에서는 개개

인의 연구자가 각각 독립적으로 개발한 수만개의 프로그램을 유기적으로 통합한 수치풍동이 완성되었다고 한다(참 1). 우리나라에서는 항공우주연구소에 풍속이 110m/s, 길이 약 300m, 시험부의 크기가 3×4×7인 대형 아음속풍동이 수년내에 설치된다고 한다. 컴퓨터를 이용한 수치해석이던, 풍동실험해석이던 간에 이 두가지 방법에 의해 모든 풍공학적 문제가 해결되는 것은 아니다. 어디까지나 현상태에서의 연구수단일 뿐이지 풍공학의 최종목표는 아니다. 중요한 것은 이러한 수단에 보다 많은 노력과 시간을 다하는 자세라고 생각된다.

5. 참고문헌

- 1) 高梨進, "航空機開發に生きる數値風洞", CRC ミュニケーション, No.286, 1988.
- 2) T. Tamura, K. Kuwahara, "Numerical Study of Aerodynamic Behavior of a Square Cylinder", International colloquium on BBAA, Kyoto Japan, 1988.
- 3) T. Inamura, T. Adachi, "Numerical Flow Simulation for Wind Engineering", J. of JAWE, No.28, June, 1986.
- 4) 최창근, 김윤석, "토목구조물용 풍동의 설계 및 제작", 대한토목학회지, 38권 6호, 1990. 12.
- 5) 白石 成人, 松本 勝, 金 潤石外 3人, "近接2圓柱の空力振動應答特性について", 日本風工學會誌, 第32號, 1987. 5.
- 6) 김윤택, "평행한 두원형실린더의 Galloping 현상에 관한 실험적 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1991.
- 7) 松本 勝, "ケーブルのレインバイブレーション", 日本風工學會誌, 第43號, 1990.
- 8) 金潤石, "斜張橋ケーブルのRain Vibrationに関する空氣力學的特性と制振對策について", 京都大學修士學位論文, 1988. 2.
- 9) M. Matsumoto, N. Shiraish, M. Kitazawa, C. Knisely, H. Shirato, Y.S. Kim, M. Tsujii, "Aerodynamic Behavior of Inclined Circular Cylinders", International colloquium on BBAA, Kyoto Japan, 1988.
- 10) B.W. Roberts, "Low Frequency Aeroelastic Vibration in a Cascade of Circular Cylinders",

Mechanical Engineering Science Monograph,
Inst. Mech. Eng. London, pp.1-29, 1966.

11) M.M. Zdravkovich, "Flow Induced Oscillations
of Two Interfering Circular Cylinders", J. of

Sound and Vibration, 101, pp.511-521, 1985

12) 박승오, 김문상, "Coander Nozzle Jet의 방향성에
관한 연구", 한국항공우주학회지, 12권2호, 19
84. 8.