

유동의 가시화를 위한 컴퓨터 그래픽스



● 1959년생
● 유체 역학 분야에서 CFD를 전공하고, 특히 점성유체에 대한 수치해법의 개발과 비압축성 유동해석 등의 연구에 종사하고 있다.

申 炳 錄

東北大學機械航空工學科 助手



● 1932년생
● 전산유체역학(CFD)을 전공하고, 특히 Navier-Stokes 방정식에 대한 수치해법의 개발과 터보 기계 내부유동 해석 등의 연구에 종사하고 있다.

大宮司久明

東北大學機械航空工學科 教授

1. 머리말

전산유체역학 (CFD: computational fluid dynamics)은 최근 대형컴퓨터의 연산속도가 GFLOPS(매초당 실수의 사칙연산 회수, $G=10^9$)를 넘어서고, 계산 해법이 플럭스 분리(flux splitting), TVD, ENO스킴 등의 새로운 사고의 도입으로 개량되어 감에 따라 충분히 실용적인 것이 되었다. 즉, CFD는 이학·공학의 연구기관이나 산업계에서 유체와 유동을 수반하는 현상의 해명에 유용하게 쓰이며, 또 유동에 관계하는 기계나 구조물의 개발·설계, 성능가선, 환경 어세스먼트(assessment) 등에 널리 이용되고 있다. CFD에 있어서 현재 무엇보다도 중요한 과제는 난류와 혼상류(混相流), 고분자류(高分子流), 희박류(稀薄流) 등에 대한 유동모델을 확립하는 일이다. 이런 배경과 중요성의 인식으로 특히 난류모델은 많은 연구자들에 의해 정력적으로 연구가 계속되고 발전하여 왔다. 그럼에도 불구하고 아직 보편적으로 적용될 수 있는 것은 없으며, 조금 복잡한 난류의 예측은 실험이 아니고는 곤란한 상황에 있다.

이제부터 기술하고자 하는 CG(computer graphics)는 유동의 모델링, 계산스킴, 전처리로서의 격자형성과, 후처리로서의 CG로 이루어

지는 일련의 수치(數值)유동 시뮬레이션 행정(行程)중에서 가장 문제가 적은 부분이다. 그러나 유동의 가시화를 위한 CG는 유동의 정보를 무엇보다도 합리적으로 파악할 수 있기 때문에, CFD의 이점을 살리기 위해서는 필요불가결한 것이고 그 역할 또한 크다고 할 수 있다. CG의 방법과 시스템은 거의 완성단계에 가깝고, 특히 최근에는 GWS(graphics workstation)의 개발로 CG를 위한 프로그래밍이 용이하게 되었다. CG의 보급과 확대를 위해서는 CG시스템을 어떻게 구성해 가는가가 당면의 과제라 할 수 있다.

2. 가시화(可視化)된 유동

약 10년 전의 CG장치로는 XY플로터와 그래픽 디스플레이(graphic display)를 들 수 있고, 이것들을 이용하여, 격자, 등고선(graphic display)을 들 수 있고, 이것들을 이용하여 격자, 등고선(等高線), 속도벡터분포가단색(monochrome)으로 그려졌다. 그 후 10여 년 간 CG 장치는 놀라운 발전을 이루어 CFD가 컬러유체역학(color fluid dynamics)이지는 않은가 할 정도로 컬러플하고 깨끗한 도면을 다수 작성할 수 있게 되었다. 또한 자동 영상 컷(cut; 장면) 촬영장치의 개발로 애니메이션(animation)도 비교적 쉽게 제작할 수 있게

되었다. 이 글에서는 우선 CG에 의해 유동이 어떻게 가시화되는가에 대하여 간단히 설명한다.

2.1 스칼라 량

2차원 유동의 압력, 밀도, 온도, 마하수(mach 數)와 같은 스칼라 량의 분포는 등고선으로 나타낼 수 있다. 등고선의 값은 보통 등간격으로 취하고 수치를 기입하지 않는 경우가 많으나, 예를 들어 등와도선(等渦度線)은 부등간격으로 하고 정(正)의 값은 실선으로, 부(負)의 값은 점선으로 나타내는 일도 있다. 컬러 그래픽 장치를 이용한 경우에는 등고선의 값을 색으로 식별하기도 하고, 또는 물리량의 값에 따라 색을 입혀 컬러 분포도를 작성할 수도 있다. 그림 1은 아(亞)음속 터빈에 대한 정·동익렬 간섭 유동의 절대 마하수 분포를 나타낸다.⁽¹⁾

3차원 유동의 경우에도 물체표면이나 유동장 내의 어느 특정한 면에 대하여, 2차원의 경우와 같이 등고선도나 컬러 분포도를 작성할 수 있다. 그림 2에 축류송풍기 로터 표면의 압력 분포를 나타낸다.⁽²⁾ 또, 3차원 공간내에 등고면(等高面)을 만들고 음면(陰面)처리와 음영(陰影)처리를 하여 표시할 수도 있다. 이 등고면을 반투명하게 하면 몇 개의 등고면을 동시에 나타낼 수 있고, 이를 이용한 예로서 난류 데이터 베이스(컴퓨터 내에서 만들어진 난류

로, 난류모델의 연구에 빼놓을 수 없는 풍부한 정보를 제공함)로 작성한 등와도면은 난류의 조직구조 파악에 이용되고 있다.

2.2 속도 벡터

속도 분포는 속도 벡터 또는 유선(流線)으로 나타낼 수 있다. 그림 3(a)는 2차원 익렬유동에 대하여 비정상(非定常)해석으로 구한 속도 벡터를 익(翼)표면 압력분포와 함께 나타낸 것으로, 여러 가지 색깔은 속도의 크기를 나타낸다.⁽³⁾ 그림 3(b)는 전 절에서 설명한 등압선으로 그림 3(a)의 속도장에 해당하는 압력분포이다. 비정상 유동에서는 유선(stream line; 어떤 순간의 속도 벡터를 접선방향으로 이은 선), 유적선(path line; 동일한 유체입자의 운동궤적), 유맥선(streak line; 굴뚝에서 나오는 연기와 같이 어느 공간점을 통과한 모든 유체입자의 순간궤적)이 서로 다르므로, 후류(後流)의 와동(渦動)과 같은 유동의 표현은 흔히 유맥선이나 이동좌표계에서 본 유선으로 가시화한다. 한편, 물체 표면에 인접한 격자면 내의 속도로부터 얻게되는 유선은 오일 프로우 패턴(oil flow pattern)이라고 하여, 한계유선(limiting stream line)을 근사하여 묘사하고, 또 타임 라인(time line; 수소 기포법으로 얻어지는 선에 상당한 것으로 유동을 가로지르는

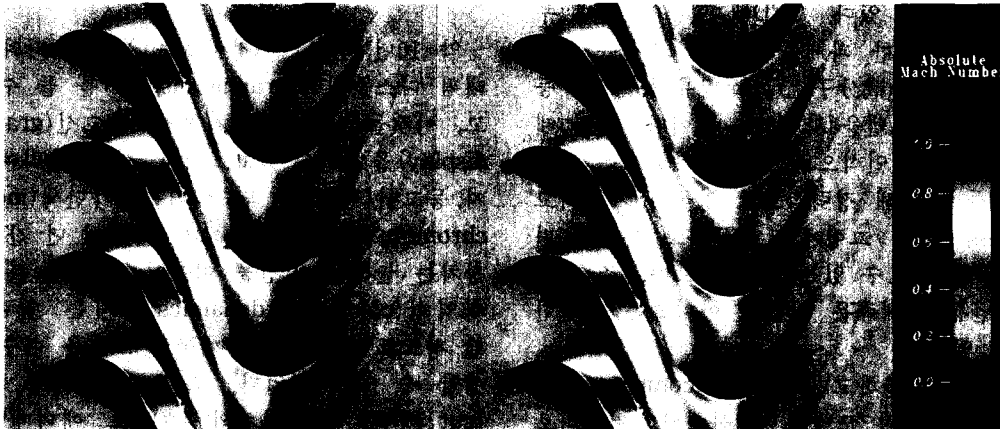


그림 1 아음속 터빈에 대한 정·동익렬 간섭 유동의 절대 마하수

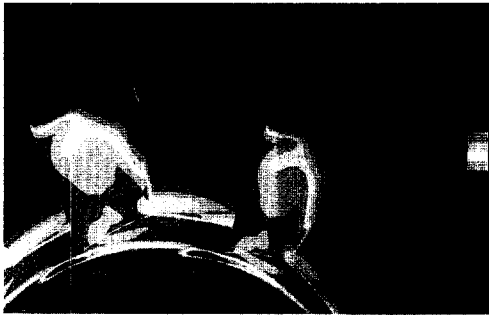


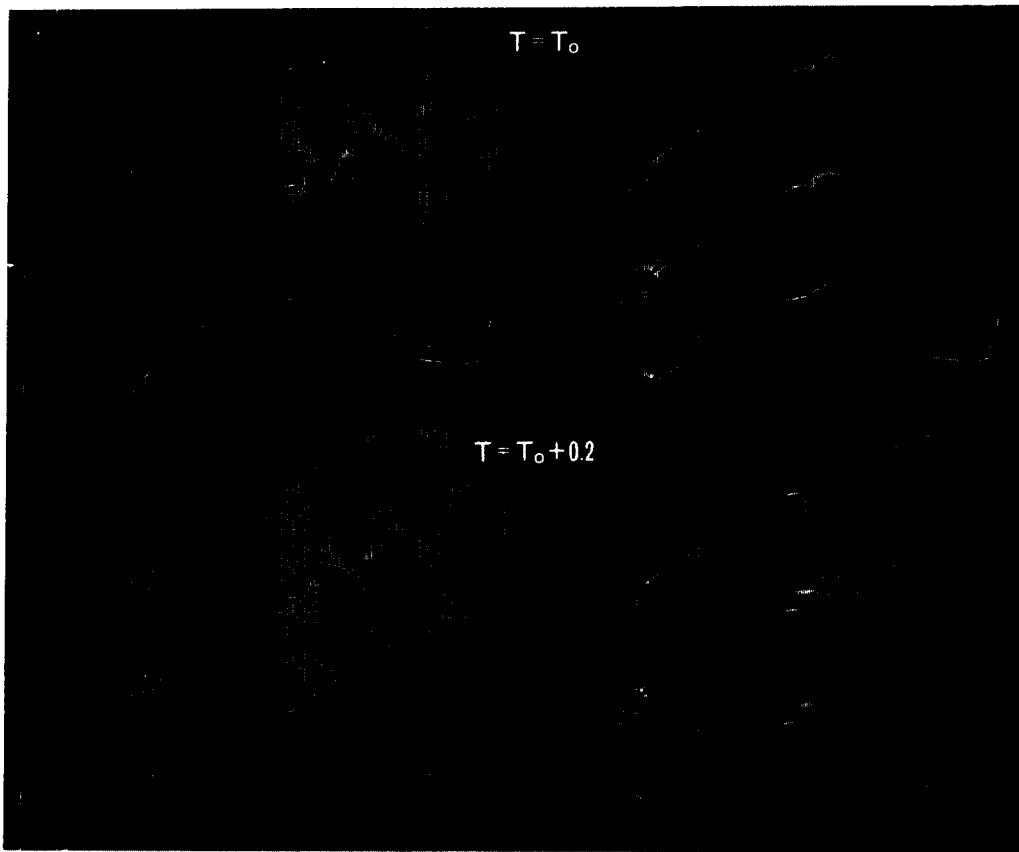
그림 2 축류 송풍기 로터 표면의 압력분포

한 직선상에 유체입자를 일제히 출발시켰을 때에 그 입자들이 형성한 선은 난류에의 천이 과정 등의 표시에 적당하다. 그림 4(a)는 천

(遷)음속 압축기 로터의 계산에서 얻은 익(翼) 부압(負壓)면상의 오일 프로우, 또 그림 4(b)는 로터의 선단(先端) 틈새로부터 흐르는 유적 선을 나타낸다.⁽⁴⁾ 이 그림들로 충격파 배후(背後)의 박리영역과 누설와동(leakage vortex)의 상태가 쉽게 이해된다.

2.3 볼륨 렌더링 (Volume Rendering)⁽⁵⁾

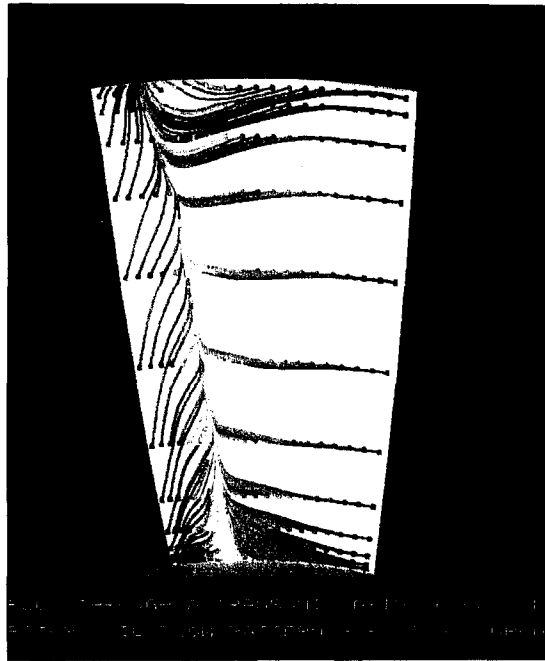
기계공학 분야에서는 아직 이용되고 있지 않으나 기상학의 수치 예보에서 습도의 3차원 분포(구름)를 나타내기 위하여, 혹은 천문학에서 초신성(超新星)의 폭발이나 블랙홀(black hole) 주변의 애크리이션(accretion) 유동을 3차원 밀도장으로 나타내기 위하여 볼륨 렌더링



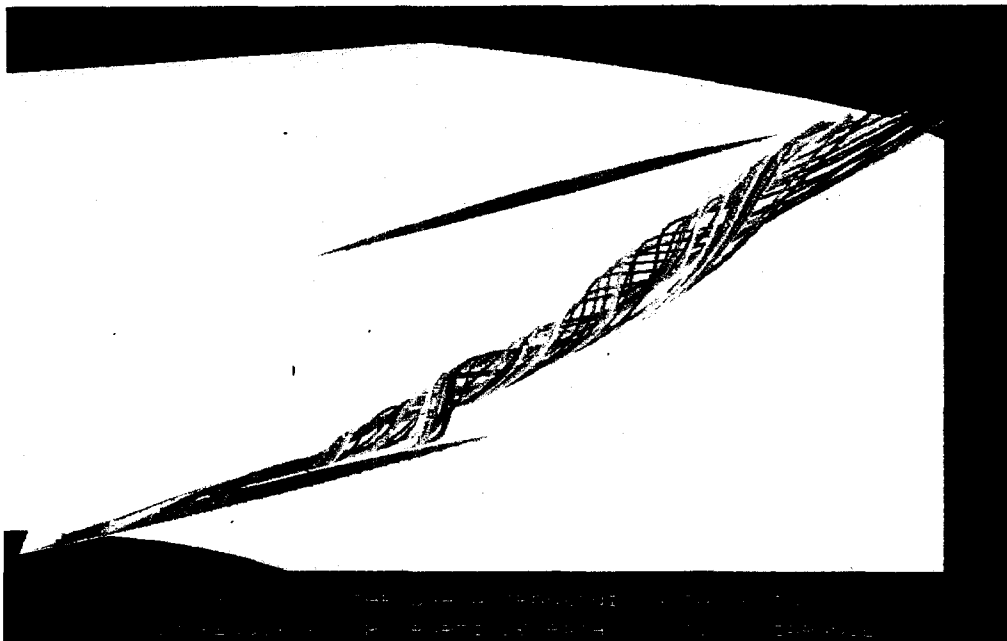
(a) 속도벡터

(b) 등압력선

그림 3 2차원 익렬 유동의 속도 벡터와 압력분포



(a) 익 부면의 오일 프로우



(b) 로터 선단 틈새의 누설와동

그림 4 천음속 압축기 로터의 유동

법이 이용되고 있다. 이 방법은 스칼라 량의 3차원 데이터를 가시화하는 새로운 수법으로, 주어진 공간내의 방사율과 불투명도에 대해 방사(放射)수송문제를 풀어 화상을 얻는다.

2.4 유동장의 형상(形狀)

3차원 유동장의 표현에 있어서, 물체표면이나 그 밖의 경계에 대하여 종래에는 경계상의 계산격자나 메쉬(mesh)를 이용하여 표현하였다. 그러나 이 유동장도 거리에 따라 휘도(輝度)를 변화시키거나 음면을 작은 점선으로 표시함으로써 원근감을 낼 수 있다. 최근에는 격자면이나 요소에 색을 입혀 음면소거(消去)나 음영을 내는 방법도 많이 이용되고 있다.

2.5 애니메이션

16mm영화나 비디오의 보급으로 애니메이션의 이용이 늘게 되었다. 16mm영화는 국제적으로 통용되므로 문제가 없으나, 비디오는 부라운관의 주사선(走査線)의 수와 컬러신호 형식이 맞지 않으면 재생할 수 없으므로 주의를 요한다. 그림 1과 그림 3은 16mm영화로 제작한 것의 일부를 나타낸 것이다. 애니메이션은 이와 같은 비정상(非正常)현상의 이해에 유용할 뿐더러, 3차원 계산 결과를 놓고 방향을 바꾸어가며 관찰하는 목적으로도 이용된다.

3. CG에 의한 가시화의 방법

작도용 프로그램은 식의 연산보다도 논리적인 순서의 실행을 많이 포함하고 있으므로, CFD 연구자에게는 이와 같은 프로그램에 익숙하지 않은 점도 있어 어렵게 느낄지도 모른다. 그러나 최근 3차원 그래픽 기능을 갖는 GWS가 개발되고, CG 소프트웨어도 충실한 편이어서 CG를 위한 프로그래밍을 이전에 비해 쉽게 할 수 있게 되었다.

3.1 CG를 위한 언어

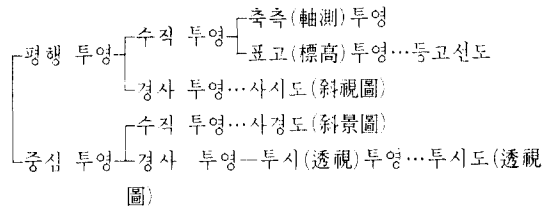
계산을 위한 프로그램 언어 즉, FORTRAN

은 거의 모든 컴퓨터에 사용되나, CG를 위한 언어는 극단적으로 말하며 메이커마다, 계산센터마다 각각 다르다고 할 수 있다. 그러나 각기 언어는 달라도 그 내용에 있어서는 서로 공통되는 부분이 많다. 작도를 위한 명령어(command)는 CALCOMP사의 것이 비교적 오래전부터 표준적으로 쓰이고 있고, 대략 다음과 같은 내용들로 구성되어 있다.

- 작도의 개시, 종료
 - 펜, 색의 선택, 원점(原點)의 이동, 확대, 축소의 지정
 - 실선, 쇄선, 화살표, 원호, 타원 등의 작도
 - 영수자(英數字), 기호, 실수(實數)의 작도
 - 좌표축의 작도
 - 색의 배합과 견본 표(table)
 - 삼각형, 사각형 등 도형 내부에 색 입히기
- 색은 RGB(빛의 3원색)를 16~256단계로 지정할 수 있으며, 프로그램의 내용을 알면 다른 CG시스템의 작도명령어로 바꾸어 쓰기가 쉽다.

3.2 투영법(投影法)

단면(單面) 투영법에는 다음과 같은 것들이 있다.

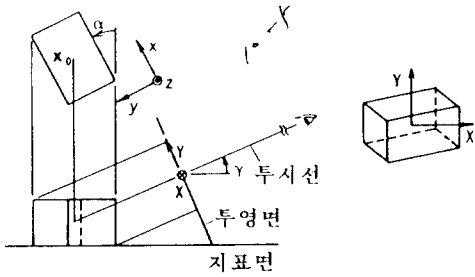


투영의 방법으로는 물체를 무한히 먼 곳에서 평행하게 본 축측(軸測; axonometrie) 투영도(그림 5(a))가 가장 일반적으로 이용되나, 물체를 가까운 곳에서 본 사경도(그림 5(c))도 입체감을 내는 데 이용된다. 또 입체감을 내는 것과 동시에 지표에 연직된 선이 기울어 지지 않도록 투영한 투시도(그림 5(b))가 이용되는 가 하면, 조금 다른 방향에서 본 두 개의 투시도를 옆에 나란히 놓음으로써 입체도를 만드는 방법도 이용된다.⁶⁾ CG에서는 투영이 모두 계

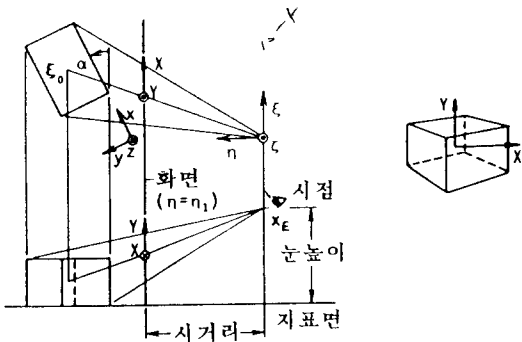
산으로 이루어지므로 이를 위해 다음과 같은 식(1), (2), (3)이 필요하다.

축측 투영

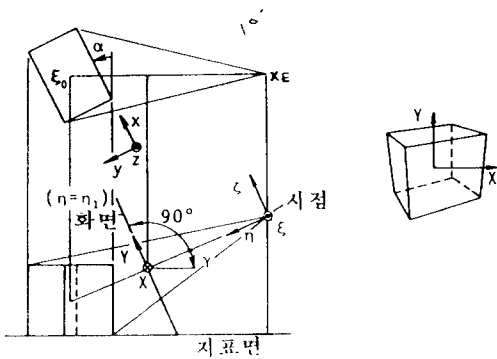
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$



지표면
(a) 축측투영



(b) 투시도



(c) 사경도

그림 5 투영법

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ z-z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

투시도

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_E \\ y-y_E \\ z-z_E \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \eta_1 \begin{bmatrix} \xi/\eta - \xi_0/\eta_0 \\ \zeta/\eta - \zeta_0/\eta_0 \end{bmatrix}$$

사경도

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_E \\ y-y_E \\ z-z_E \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \eta_1 \begin{bmatrix} \xi/\eta - \xi_0/\eta_0 \\ \zeta/\eta - \zeta_0/\eta_0 \end{bmatrix}$$

최근에는 컴퓨터에 입력된 3차원의 도형을 확대, 축소, 평행이동, 회전하는 3차원 그래픽 기능을 갖는 GWS가 보급되어 있다.

3.3 등고선, 컬러 분포도

수치 계산에 이용되는 구조(構造)격자의 경우에는 등고선을 그리는 라이브러리 서브루틴(library subroutine)이 보통 준비되어 있다. 그러나 유한요소법(FEM)의 경우에는 요소(要素)의 형태에 따라 등고선의 프로그램이 달라지게 되므로, 적당한 것이 준비되어 있다고만 할 수 없다. 식(4)에 등고선 그리는 방법에 대한 개요를 설명한다.

우선 주어진 절점(節點)의 값 u_i 를 다음과

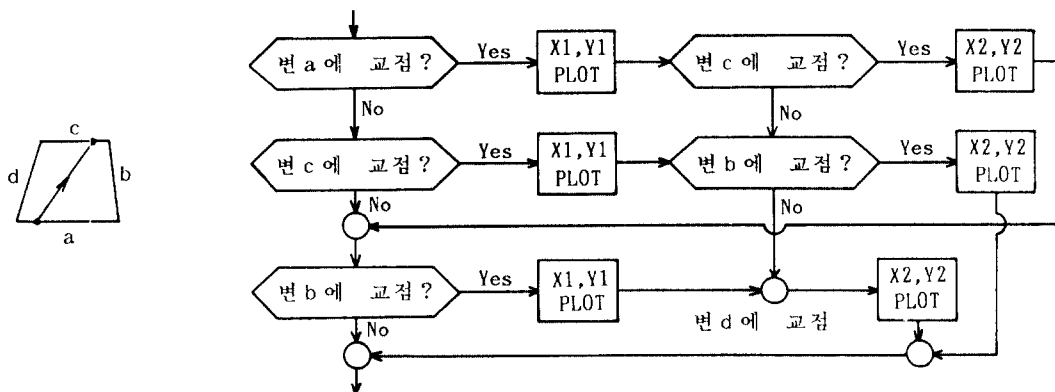


그림 6 사변형 요소의 등고선 작성 흐름도

같이 수정한다.

$$\bar{u}_i = \begin{cases} u_i - c & (|u_i - c| \geq \epsilon) \\ \epsilon & (0 \leq u_i - c < \epsilon) \\ -\epsilon & (-\epsilon < u_i - c < 0) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 c 는 그리고자 하는 등고선의 값이고, \bar{u}_i 에 대하여 등고선 $\bar{u}=0$ 을 그리면 된다. 또 ϵ 은 작은수로, 등고선이 절점위를 지나지 않도록 하고 있다. 어느 변(邊)에 대한 양측 절점의 값을 \bar{u}_i, \bar{u}_j 라 하면, $\bar{u}_i, \bar{u}_j < 0$ 인 때의 등고선은 이 변과 교차한다. 임의의 사변형 쌍 1차(bilinear)요소에 등고선을 그리는 순서는 그림 6과 같다. $X1, Y1$ 은 등고선의 기점, $X2, Y2$ 는 중점으로 이들의 위치는 선형보간으로 구한다. 또, 등고선을 그릴 때에는 펜을 떼지 않고 연속하여 그리는 것이 바람직하다.

컬러 분포도는 다음과 같은 방법으로 그릴 수 있다. 첫번째의 방법은 두 등고선의 사이에 지정된 색을 입히는 방법이다. 예를 들어 삼각형 1차요소의 경우에는, 그림 7에 나타내는 바와 같이 다섯 종류의 다각형을 생각할 수 있고 이 중에서 해당되는 것을 골라 색을 입히게 된다. 이 방법을 이용하면 충격과 등의 불연속을 명료하게 표현할 수 있다. 두번째의 방법은 삼각형 또는 사변형 요소의 정점에 물리량의 값에 따라 색을 지정하고, 요소내에 색을 보간하여 입히는 방법이다. 이것을 그로우 쉐딩(grow

shading)이라고 하는데, 이 때 색은 선염(渲染)되어 연속적으로 변화하게 된다. 이것에 대한 서브루틴은 대략 GWS에 준비되어 있으므로 이용하는데 편리하다. 또, 3차원 공간내에 있는 물체표면의 컬러 분포도를 묘사할 때에는 최근의 GWS의 경우에 시선의 방향을 지정하면 투영과 음면처리가 자동적으로 이루어지게 되어 있다.

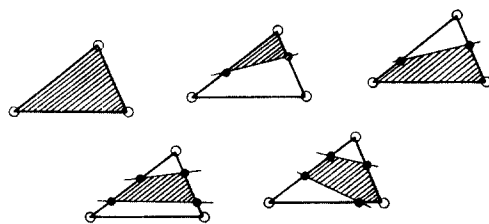


그림 7 삼각형 1차 요소의 등고선 영역

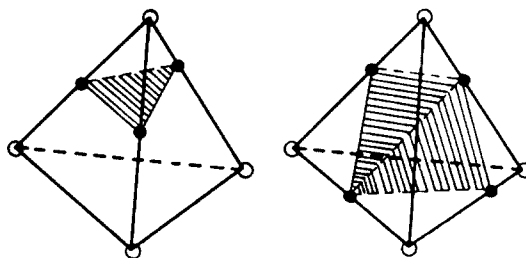


그림 8 사각형 1차 요소의 등고면

3차원 공간내의 등고면은 다음 방법으로 묘사할 수 있다. FEM의 요소는 사면체 요소로 분할할 수 있고, 육면체 삼중 1차(trilinear) 요소는 다섯개의 사면체요소로 분할된다. 각 사면체에 대한 등고면은 그림 8과 같이 각 모서리 위의 등고면과의 교점의 위치를 1차 보간으로 구하고, 이들의 교점을 잇는 삼각형에 그 법선의 방향에 따라 밝기를 바꾸어 색을 입힘으로써 나타낼 수 있다.

3.4 유선 그리는 법

유적선 $x(t)$ 는 식(5)와 같이 유속 $u(x, t)$ 를 시간적분함으로써 구할 수 있다.

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t u(x, t) dt \quad (5)$$

실제로 유적선을 x_1 에서 Δt 시간 후의 x_2 까지 연장하기 위한 계산은 식(6)의 예측자(predictor)와 식(7)의 수정자(corrector)법으로 계산해야 할 것이다.

$$\text{예측자} : x_2 = x_1 + u_1 \Delta t \quad (6)$$

$$\text{수정자} : x_2 = x_1 + \frac{1}{2}(u_1 + u_2) \Delta t \quad (7)$$

여기서 유속 u_1, u_2 의 값은 격자점의 u 로부터 보간으로 구한다. 위의 식에서 $u(x, t)$ 대신에 어느 시간의 유속 $u(x, t_0)$ 를 이용하면 유선을 얻을 수 있다. 그러나 이 방법으로는 2차원의 비압축성 유동이나 정상(定常)압축성 유동에서 닫혀야 할 유선이 반드시 닫힌다는 보장을 할 수 없다. 이것을 확실히 닫히게 하기 위해서는 유동함수 Ψ 를 도입하여 그에 대한 등고선으로써 유선을 그려야 한다. 이 경우 유동함수에 대한 격자점의 값은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi(x) = \Psi(x_0) - \int_{x_0}^x (\rho v dx - \rho u dy) \quad (8)$$

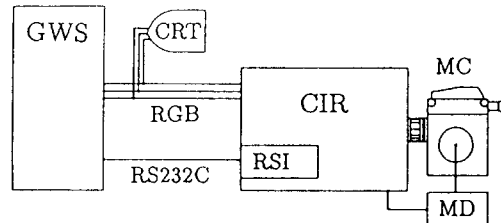
식(8)에 의하여, 혹은 보다 정확하게는 미분방정식, 식(9)를 수치적으로 풀어 결정한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\rho} \Psi_x + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\rho} \Psi_y = -\zeta \quad (9)$$

3.5 애니메이션의 제작법

컬러 그래픽 디스플레이의 CRT(cathod-ray tube) 화면에 나타난 영상을 직접 무비 카메라(movie camera)로 촬영하는 방법은 간단하긴 하나 많은 시간과 노력(勞力)이 필요하다. 그림 9에는 자동 영상 커트 촬영장치를 이용한 본 연구실의 16mm영화 제작장치에 대한 구성도를 나타내었다. 이 그림에서 CIR(color image recorder)은 GWS로부터 차례차례로 보내오는 RGB신호를 필터(filter)를 통하여 빨강·초록·파랑의 영상으로 분리하는 기기(器機)로, 무비 카메라와 함께 GWS의 신호에 의해 제어된다. 비정상(非正常) 2차원 유동의 경우에는 계산량이 그다지 많지 않으므로 GWS로 유동의 계산을 하면서 CG처리도 동시에 할 수 있으나, 3차원 유동의 경우에는 유동의 계산을 슈퍼 컴퓨터로, 그리고 CG처리를 GWS가 담당하는 방법이 취해지고 있다. 이때, 기억용량의 부족을 해소하기 위하여 몇몇 장면마다 유동의 데이터를 기억시킨 후 보간으로 영상을 발생시키는 방법이 계산효율이라는 면에서도 유리하다.

비디오를 제작할 경우에는 GWS에서 온 RGB 신호를 우선 스캔 컨버터(scan converter)와 엔코더(encoder)에 넣어 주사선의 수와 컬러 신호형식(S-VHS 등)을 TV용으로 변환시킨 후, 커트 촬영장치가 있는 VTR을 이용하여



* GWS : graphics work station, CRT : cathod-ray tube, RGB : red-green-blue, CIR : color image recorder, RSI : RS232C interface, MC : movie camera, MD : motor driver.

그림 9 16mm 영화 제작장치의 구성도

제작해야 한다. 16mm 영화에서는 보통 1초간의 애니메이션에 장면이 24컷 필요하나, TV에서는 30컷 필요하다. VTR대신에 레이저(laser) 비디오 레코더로 레이저 디스크를 매체로 한 애니메이션 제작방법도 있다. 일반적으로, 16mm 영화는 필름의 종류나 현상공정 때문에 일정한 품질의 유지가 어렵고, 비디오는 주사선의 수가 약 반으로 줄어드는 단점이 있기 때문에 화질의 저하를 막기 어렵다.

4. 맺음말

지금까지 유동의 가시화를 위한 CG와 애니메이션에 대하여 설명하였다. CG처리를 위해서는 대형 컴퓨터보다도 워크 스테이션(WS), 특히 3차원 그래픽스 기능을 갖춘 GWS가 훨씬 편리하다. GWS와 CG용 소프트웨어는 최근 몇 년 사이에 눈에 띄게 발전하여, 일본의 경우만 하더라도 20여사에서 100여종에 가까운 GWS가 판매되고 있다. 그러나 이것들에 사용되고 있는 CPU는 R3000, R6000, MC 68040, MC88100, PA-RISC, SPARC, POWER-아키텍처 등으로 비교적 그 수가 적고, 사용된 CPU에 따라 대개의 성능이 결정된다. 유동의 가시화를 위한 소프트웨어도 상당한 수가 판매되고 있고, 또 대부분 범용성이 있어 쉽게 사용할 수 있는 것들이 많다. 이와 같은 추세로 금후 CG에 의한 유동의 가시화가 자연적으로 확대 이용되어 갈 것이고, 가시화

기술 발전 또한 가속될 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) Yamamoto, S. and Daiguji, H., 1989, "A Numerical Method for Solving the Unsteady Compressible Navier-Stokes Equations," Proc. ISCFD-Nagoya, Vol. 2, pp. 710~715.
- (2) Shin, B. R., 1991, "Numerical Schemes for the Incompressible Navier-Stokes Equations and Their Applications," Ph.D. thesis, Tohoku University, Chapter 5.
- (3) Shin, B.R., Ikohagi, T. and Daiguji, H., 1990, "Numerical Simulation of the Unsteady Wake in 2-D Incompressible Cascade Flows," Proc. 2nd KSME-JSME Fluid Eng. Conf., Seoul, Vol. 1, pp. 440~445.
- (4) Yamamoto, S. and Daiguji, H., 1991, "Numerical Methods for Transonic Cascade Flow Problems," Computers and Fluids, Vol. 19, No.3/4, pp. 461~478.
- (5) Levoy, M., 1988, "Display of Surface from Volume Data," IEEE Computer Graphics and Appl., May, pp. 29~37.
- (6) Nichols, B.D. and Hirt, C.W., 1973, "Calculating Three-Dimensional Free Surface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures," Vol.12, No.2, p. 234.

