

## CFD에 의한 2차원 Sharp Plane의 각도변화에 따른 유동특성에 관한 연구

금종윤\*, 박성호\*, 박주현\*, 송근택\*\*, 모장오\*\*, 이영호\*\*\*

### (A CFD Study on Flow Characteristics with Inclined Angles of Two-Dimensional Sharp Plane)

J. Y. KUM, S. H. PARK, J. H. PARK, K. T. SONG, J. O. MO, Y. H. LEE

**Key words** : CFD(전산유체역학), Sharp Plane (끝이 날카로운 평판), Turbulence Intensity(난류강도), Finite Difference Method(유한차분법), vorticity(와도), frequency analysis(주파수 분석), Karman vortex(카르만 와류)

#### Abstract

Recently, the use of numerical simulation has been increased rapidly because of the development of high performance computer systems. The present study is aimed to investigate flow characteristics of a two-dimensional sharp plane. Unsteady calculation by FDM(Finite Difference Method) based upon SOLA scheme which was performed at  $Re=2 \times 10^4$  in viscous incompressible flow within a finite domain on the irregular grid formation. Total numbers of irregular grids are  $8 \times 10^4$ . The minimum grid size is 1/100 of the plane length L which is the representative length. The inclined angles of every objects are  $15^\circ, 30^\circ$  and  $45^\circ$ . And, the edge angle of the plane is  $30^\circ$ . This study discussed the flow characteristics in term of the turbulent intensity, vorticity and frequency analysis. Developed flows show that the periodic Karman vortices occur at the back of the plane.

#### 1. 서론

끝이 날카로운 평판은 우리 주위에서 흔히 찾아 볼 수 있는 형상으로서 평판의 각도 변화 시 평판의 후류에 발생하는 유체의 특성을 관찰하는 것은 평판의 경계층과 관련하여 매우 중요한 의미를 갖는다.<sup>1)</sup> 평판 위를 흐르는 유체는 보통 층류경계층으로 시작하여 결국 유체역학적 특성이 상이한 난류경계층으로 발달하게 된다. 유체가 경사면을 따라 흘러내려 갈 때 흐름의 방향으로 압력의 상승이 있는 경우 유체입자의 운동에너지는 유체의 점성으로 인한 마찰 때문에 소모되고 전진속도는 점차 감

소 하게 된다. 결국 벽면 가까이에 있는 유체입자는 압력상승에 이기지 못하고 그 흐름은 정지하게 된다. 이 유체의 감속운동은 음의 압력구배를 형성하고 경계층이 불안정하게 되어 박리(separation)와 와류(vortex flow)의 형성으로 에너지 손실을 크게 한다. 이 경우 가장 대표적인 유동현상은 물체후부에서 주기적으로 방출되는 와류의 거동이며 특히 평판 선단의 edge에 의해 변하는 후류의 유동특성과 이에 관한 유체역학적인 고찰은 매우 중요하다. Shin<sup>2)</sup> 등은 자유유동 난류강도 변화에 따른 평판 위 천이 경계층의 유동특성에 관한 실험적 연구를 하였는데 분석결과에 의하면 천이 경계층 바로 위 자유유동의 난류 특성보다는 초기 평판 선단에 유입되는 난류 특성이 더 지배적으로 천이 시작점, 천이 길이 및 천이경계층내 난류 분포와 천이 거동에 영향을 미침을 밝혔다. 또한 Song<sup>3)</sup> 의 2차원 장방형 각주유동의 공력특성에 관한 연구에서는 각

\*한국해양대학교 기계공학과

\*\*한국해양대학교 대학원

\*\*\*한국해양대학교 기계·정보공학부

주의 종횡비 및 영각의 변화와 각주 모서리에 의한 각주 후면의 공력특성을 밝히고 있다.

한편 본 연구는 속도벡터, 난류운동에너지, 속도의 주파수 분석, 압력분포 등을 이용하여 sharp plane의 각도에 따른 유동특성에 대한 해석을 목적을 하고 있다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식의 차분화

본 계산에서 사용한 식은 유체의 지배 방정식인 Navier-Stokes방정식과 연속방정식이며, 2차원의 경우 x, y성분에 대한 Navier-Stokes방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \cdot u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

여기서, u, p, Re 는 각각 속도, 압력, 레이놀즈수를 의미하며, 유입속도 U와 sharp plane의 길이에 의하여 무차원화 하였다.

Fig.1과 같은 변수분포를 갖는 부등 간격 격자 상에서 차분근사를 행하기로 한다. 본 연구에서는 수치안정성을 유지하기 위해 풍상차분을 사용하며, 보존형의 스킴 중에서 MAC법의 중심 차분과 부분도너셀(Partial-Donor Cell)의 풍상차분을 병용하였다.

Fig.1로부터 부등간격에 대한 보정식을 구하면 식 (2.3), (2.4)와 같은 식으로 표현된다.

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \Delta t \left[ \frac{p_{i,j}^n - p_{i+1,j}^n}{(A+B)/2} - FUX^n - FUY^n + VISX^n \right] \quad (2.3)$$

$$v_{i,j}^{n+1} = v_{i,j}^n + \Delta t \left[ \frac{p_{i,j}^n - p_{i,j+1}^n}{(C+D)/2} - FVX^n - FVY^n + VISY^n \right] \quad (2.4)$$

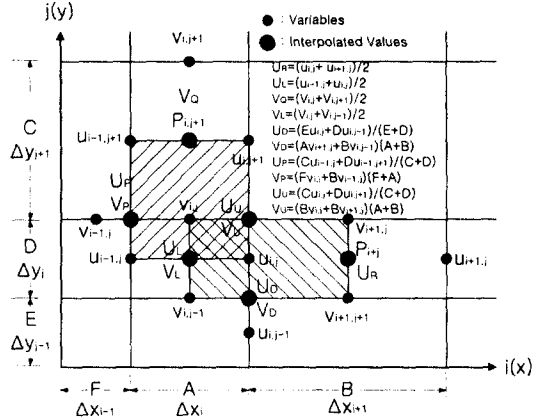


Fig.1 Variables on Irregular Grid Distribution

여기에서 FUX, FUY, FVX, FVY는 대류항이고, VISX, VISY 점성항을 의미한다.

### 2.2 계산방법

본 연구의 Re수는 Nam<sup>4)</sup>등의 실험 결과와 동일한 값인  $2 \times 10^4$ 로 하였다.

흐름장 전체에 무차원속도 ( $u=1, v=0$ )를 균일하게 분포시킨 뒤 시간간격  $\Delta t=0.001$ 에 무차원 시간 200까지 계산을 진행시켰다. 계산격자 ( $i, j$ )는  $400 \times 200$ 의 크기를 가지며 최소격자의 크기는 1/100의 크기를 갖는다.

속도 및 압력의 반복 수렴 판정 조건으로서는 격자에서의 발산(divergence)의 최대값 0.0001을 기준으로 하였다. 초기조건으로서 압력은 전 영역에서 0의 값을 부여하였고, 속도는 전 영역에서 대표속도의 값을 부여하였다.

수치해석은 MAC법의 대류항 기법과 SOLA알고리즘을 사용하였으며, 압력의 포아존 방정식은 압력과 속도의 동시 완화법을 이용하였다. 특히 대류항의 이산화방법으로서 기존의 등간격 격자상의 보존형 기법을 개선하여 부등간격 격자 상에서도 보존형을 유지할 수 있는 기법을 채택하여 공간 해상도를 높였다. 평판의 각도는 유체의 유동 방향에 대해  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 변화시켰으며, 평판의 양 끝단 경사각은  $30^\circ$ 로 동일하게 하였다.

Table 1. Computational Conditions

ITEM	CONDITIONS	
Plane Length	L	1
Reynolds Number	Re	20,000
Angle of Plane	$\theta$	15°, 30°, 45°
Grid Number	MX × NY	400 × 200
Minimum Grid Size		L/100
Time Interval	$\Delta t$	0.001
Maximum Divergence	dm	0.0001
Finishing Time	T	200

2.3 경계조건

Fig. 1에서 경계조건과 격자분포를 도식적으로 보이고 있다. 상방 및 하방경계조건에는 보통 slip 조건 또는 주기조건을 부여하나 본 계산에서 no-slip조건을 채택하였고 각주의 경계조건은 격자의 경계면을 각주면으로 생각하여 사각격자를 이어 경사면을 표시하였으며 이 면을 통한 법선 방향의 속도성분은 항상 존재하지 않는다는 부착조건(no-slip조건)을 부여하였다.

유입조건은 동일한 유입속도 값을 부여하여 균일 유동으로 가정하였다. 유출조건에서는 물리적인 환경을 수치해석의 기법으로 표현하므로 상류 측으로 수치적인 영향이 전파되어 경우에 따라서는 계산자체가 불가능하게 되기 때문에 경계조건의 설정에 유의하여야 한다. 본 계산에서는 속도 값에 대하여  $\Delta v = 0$ 의 Neumann의 유출경계조건을 부여하였다.

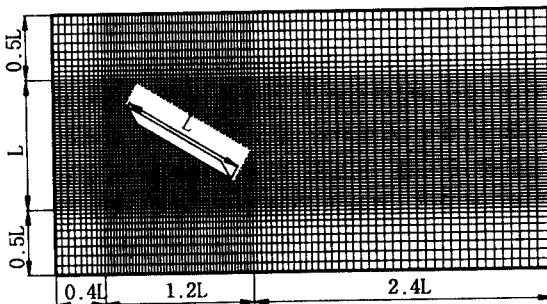


Fig2. Calculation Domain (400×200)

2.4 격자 생성방법

차분법에서는 사용되는 격자에 따라서 계산조건 등이 변화하고, 이것이 변화됨으로 해서 프로그래밍의 방법과 데이터의 입력 개수와 방법, 컴퓨터의 계산용량 및, CPU 프로세스 시간, 해의 정확성, 안정성, 수렴성 등이 변화하게 된다. 근래에 와서는 컴퓨터의 고성능화로 물체의 경계에 맞추어서 격자를 형성하는 여러 가지 기법들이 소개되고 있다. 본 연구에서는 사각형의 부등간격 격자를 기본으로 사용하였으며, 특히 유출구와 그 주위의 경계를 부등간격으로 정의하였다. 본 논문에서 사용된 부등격자의 식은 다음과 같다.

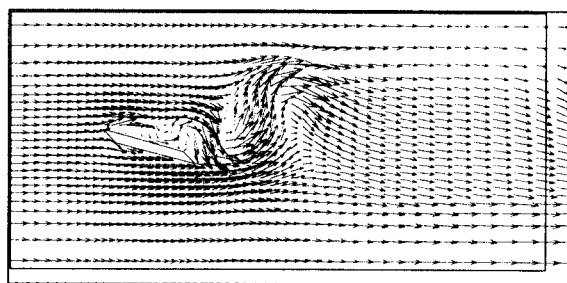
$$n^* = \frac{n - n_a}{n_e - n_a} \quad 0 \leq n^* \leq 1, \quad n_a \leq n \leq n_e$$

$$s = Pn^* + (1 - P) \left( 1 - \frac{\tanh[Q(1 - n^*)]}{\tanh Q} \right) \quad (2.5)$$

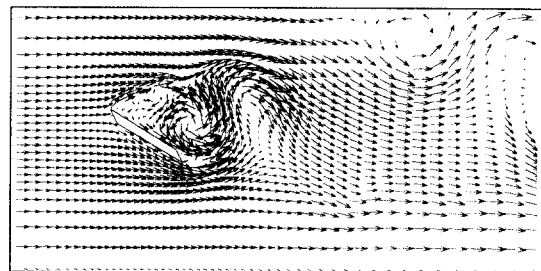
3. 결과 및 고찰

Fig.3은 영각의 변화에 따른 순간속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 나타내듯이 물체의 각도가 커질수록 평판 상부에서 유체의 속도가 빠르게 나타나고 있으며, 그 영향이 물체의 후방에 대하여 영향을 미침을 알 수 있다. 45°의 경우 물체의 후류의 유동특성이 다른 경우와 달리 복잡하게 이루어져있음을 볼 수 있다. 이는 물체 선단에서 박리가 크게 형성되어 와류가 크게 발생되고 이의 영향으로 후류에 불규칙적인 와류가 발생함을 알 수 있다. Fig.4는 유체의 와도를 나타낸 것으로 그림의 점선은 (-)값을, 실선은 (+)값을 나타낸다. 15°인 경우는 모서리 부분에서의 와류가 형성되지 않고 평판의 후류 부분에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 30°와 45°의 경우는 전반부 후반부 전체적으로 와류가 형성됨을 알 수 있고 특히 45°인 경우에는 평판 상부와 하부에 대칭적으로 와류가 형성됨을 알 수 있다. 또한 sharp plane의 각도가 커질수록 평판의 선단부에 박리가 크게 형성되어 물체의 후류에 대하여 와류의 영향이 크게 된다는 것을 알 수 있다.

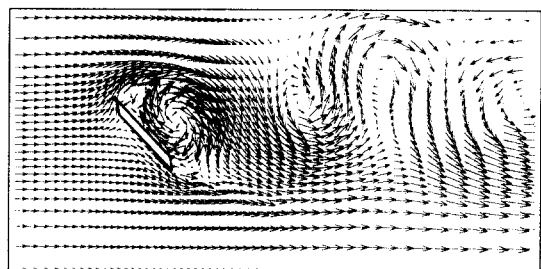
Fig.5는 무차원 시간 120에 대하여 각도에 따른 난류운동에너지의 결과를 나타내고 있다. 각도가 15°와 45°인 경우 평판 근방에서 강하게 나타나고 있으나, 30°인 경우는 물체 후방의 상벽 경계



(a)  $\theta = 15^\circ$  (T=120)

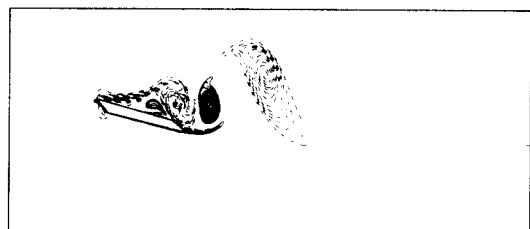


(b)  $\theta = 30^\circ$  (T=120)

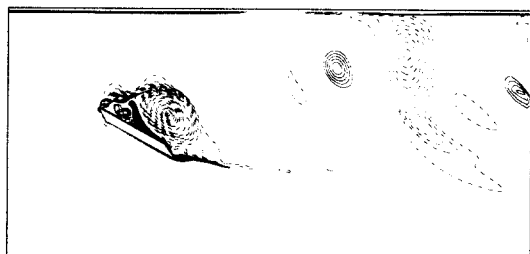


(c)  $\theta = 45^\circ$  (T=120)

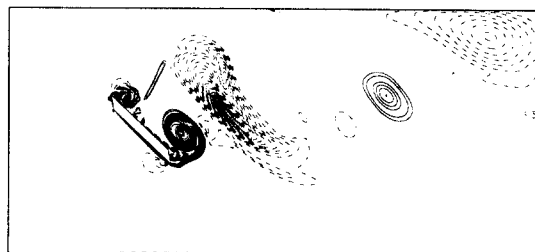
Fig 3. Instantaneous Velocity Vector



(a)  $\theta = 15^\circ$  (T=120)

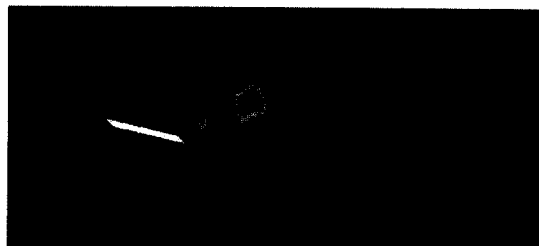


(b)  $\theta = 30^\circ$  (T=120)



(c)  $\theta = 45^\circ$  (T=120)

Fig 4. Instantaneous Vorticity



(a)  $\theta = 15^\circ$  (T=120)



(b)  $\theta = 30^\circ$  (T=120)



(c)  $\theta = 45^\circ$  (T=120)

Fig. 5 Turbulent Kinetic Energy (T=120)

에서 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 난류운동에너지의 시간에 따른 변화를 분석한 결과 최대에너지가 평판 근방에서 시간에 따라 하류의 상벽을 향하여 주기적으로 이동함을 알 수 있었다.

Fig.6은 와류방출 부분의 입의 점( $x=1.71$ ,

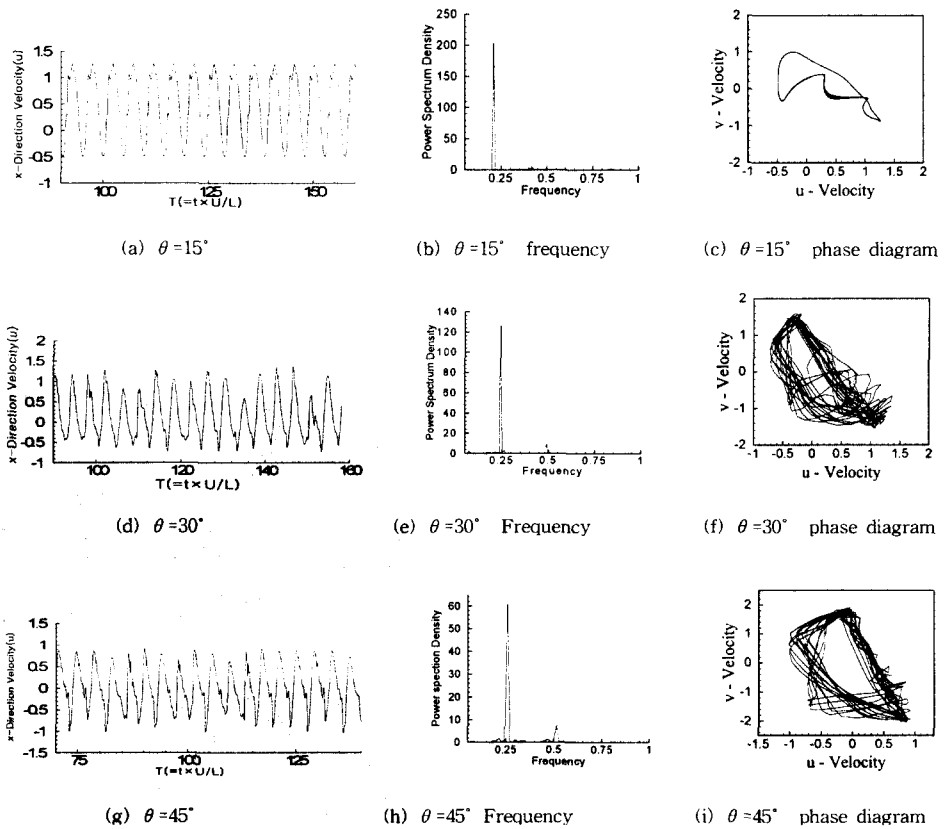


Fig. 6 Frequency Analysis

y=1.71)에 대한 시간에 따른 속도의 변화의 결과를 나타내고 있다. 영각이 15° 인 경우는 일정한 주기성을 갖고 있으나, 30° 와 45° 의 경우는 보다 불규칙한 파형을 나타내고 있다.

시간에 따른 속도의 변화를 FFT분석한 결과 15° 의 경우는 한 개의 주파수(Fig.6 b)를 가지며, 30° 와 45° 의 경우는 탁월주파수 이외의 주파수인 고차주파수가 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 주파수에 대한 결과와 다음의 식을 이용하여 Strouhal수를 구할 수 있다.

$$St = f \cdot L / U \quad (3.1)$$

여기서, L은 평판의 길이, U는 유입속도(대표속도)를 의미한다.

Table 2.는 각도에 따른 주파수 및 Strouhal수에 대하여 나타낸 결과이며, 주파수 및 Strouhal수가

각도의 증가와 함께 증가함을 알 수 있다. 또한 Fig.6 (c),(f),(i)로부터 각도가 15° 인 경우는 주기적이며, 30° 및 45° 인 경우는 탁월주파수를 중심으로 고차주파수의 영향이 크게 나타남을 알 수가 있다.

Table 2. Strouhal numbers for angles

angle	Strouhal number
15°	0.209
30°	0.245
45°	0.257

#### 4. 결론

경사진 평판상에서 유체의 감속운동은 음의 압력

구배를 형성하고 경계층이 불안정하게 되어 박리(separation)와 와류(vortex flow)의 형성으로 에너지 손실을 크게 한다. 이는 물체의 후류에도 큰 영향을 미친다. 따라서 물체후류의 유동특성과 이에 관한 유체역학적인 고찰은 매우 중요하다. 본 논문은 이러한 사실을 바탕으로 속도벡터, 난류운동에너지 속도의 주파수분석, 압력분포 등을 이용하여 유한공간에서 sharp plane의 각도에 따른 유동특성에 대해 수치해석을 하였다.

본 수치해석을 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 속도벡터와 와도를 해석한 결과 sharp plane의 각도가 커질수록 평판 상부에서 유체의 속도가 빠르게 나타나고 평판의 선단부의 박리가 크게 형성되어 물체의 후류에 대하여 와의 영향이 크게 나타났다.
- ② 난류운동에너지의 시간에 따른 변화를 분석한 결과 최대에너지가 평판 근방에서 시간에 따라 하류의 상벽을 향하여 주기적으로 이동하는 것을 알았다.
- ③ 시간에 따른 속도의 변화를 FFT와 phase diagram으로 분석한 결과  $15^\circ$ 의 경우는 일정한 주기성을 가지며,  $30^\circ$ 와  $45^\circ$ 의 경우는 비주기성을 가짐을 알았다.

## 후기

이 연구는 2000년도 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : 2000-1-30500-003-3)의 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

## 참고문헌

1. 김춘식, 이영호, 최민선. 유체역학. 효성출판사.2001
2. 신성호, 전우평, 강신형. 자유유동 난류강도 변화에 따른 평판위 천이 경계층의 유동특성에 관한 실험적 연구. 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제9호, pp.1335~1348. 1998
3. 송근택, CFD에 의한 2차원 장방형 각주유동의 공력특성에 관한 연구, 한국해양대학교 대학원 기계공학전공 공학석사 학위논문. 1998
4. 남구만, 김성운. PIV에 의한 Sharp Plane의 각도변화에 따른 유동특성 연구. 한국해양대학교 학부 졸업논문. 2001

5. 손호석, 2차원 장방형 각주유동의 주파수 특성에 관한 연구. 한국해양대학교 대학원 기계공학전공 공학석사 학위논문. 1996