

〈論 文〉

받음각을 갖는 평판보의 유동 여기진동에 관한 연구

이기백* · 손창민** · 김봉환***

(1991년 5월 23일 접수)

A Study on Flow Induced Vibration of Cantilever Plate with Angle of Attack

Ki Baik Lee, Chang Min Son and Bong Hwan Kim

Key Words : Flow-Induced Vibration(유동여기진동), Angle of Attack(받음각), Cantilever Plate(평판보), Vortex Shedding Frequency(와유출주파수), Wake(후류), Dynamic Response(동적응답), LDV(레이저 도플러 유속계)

Abstract

Experimental studies are conducted to investigate the Flow-Induced Vibration mechanism for cantilever plate model with the angle of attack ($\alpha=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$). Research is divided into two parts. First, the flow fields around two dimensional flat plate model are investigated using LDV system. Second, the vortex shedding frequency and response spectra of cantilever plate are obtained experimentally using gap sensor and hot wire anemometer. Finite element method program was used in order to predict the flow field and pressure field around thin flat plate. And some predicted results were compared with the experimental data. The aspect ratio of test model is $d/t=25$ (d : width, t : thickness). From the measurement of the flow field it was found that in the case of small inclined ($\alpha=10^\circ, 20^\circ$) relatively, the separated boundary layer at sharp leading edge developed smoothly downstream. With increasing the angle of attack of the plate, stagnation region was appeared on the back side of the plate and separated boundary layer was extended downstream. These trends are a good agreement with the computational results. It was found by analysis of response spectra of cantilever plate that the influences of vortex shedding frequency were important at the large angle of attack ($\alpha=30^\circ$), and two peak values appear in entire test model at 24Hz, 150Hz.

기호설명

d : 평판보의 폭
 D : 평판보의 유동방향 투영면적 ($=d \cdot \sin \alpha$)
 E : 탄성 계수 (Young's modulus)
 fvs : 와 유출 주 파 수 (Vortex shedding frequency)

G : 전단 탄성 계수 (shear modulus)
 L : 평판보의 길이
 N : 스펙트럼의 앙상블 평균수
 Re_d : 레이놀즈수 [$=U_\infty \cdot d / \nu_{air}$]
 St_b : 스트로할수 [$=fvs \cdot D / U_\infty$]
 t : 평판보의 두께
 U : 유동방향 (X 방향)의 평균속도
 U_∞ : 균일류의 속도
 V : 속도 벡터

*정회원, 부산대학교 기계공학과

**정회원, 항공우주연구소 추진기관연구실

***정회원, 현대중공업 종합연구소

ω	: 횡방향의 변위
W	: 변위 함수
X, Y, Z	: 좌표계
α	: 평판보의 받음각
ν_{air}	: 공기의 동점성 계수
ν	: 프와송 비 (Poisson's ratio)
ρ_{air}	: 평판보의 밀도

하첨자

air	: 공기
al	: 알루미늄
d	: 평판보의 폭
D	: 평판보의 투영면적
us	: 와류출
∞	: 상류 (upstream)

1. 서론

구조물이 바람을 받을 때에 발생하는 현상은 일반적으로 정적거동 및 동적거동으로 대별할 수 있다. 정적거동에는 풍압에 의한 변형, 응력, 변위 및 정적 불안정 현상(좌굴등)이 있으며, 동적 불안정성에는 공기흐름의 난류에 의한 불규칙 진동과 동적 불안정 현상(와여기진동, galloping, flutter 등)이 있다. 이와 같은 유동의 동적인 영향에 대해 본격적으로 연구가 시작된 것은 1940년의 Tacoma Narrows Bridge 사고 이후이다.

이러한 동적거동을 일으키는 공기역학적 여기는 첫째, 유동에 잠겨진 둔탁한 물체(bluff body)의 후류에서 주기적으로 발생하는 와에 의한 여기(vortex excitation) 둘째, 구조물에 작용하는 랜덤유동과 와의 상호작용에 의한 여기(random gust or vortex excitation) 셋째, 구조물에 작용하는 비정상력과 작용각의 특성에 의한 자려진동(self-excited oscillation)으로 구분 할 수 있다.

최근에는 각종 구조재료의 고강도화 및 공법의 진보, 설계의 합리화에 의한 구조물의 경량화, 장대화가 가능하게 되어서 비교적 강성이 낮고 구조감쇠가 작은 구조물이 많이 나타나고 있다. 이런 점은 진동이 문제가 될 수 있는 구조물의 증가를 의미하고 있다. 특히, 이러한 유체역학적 기진력에 의한 진동은 익형, 항공기, 선박, 해양구조물, 건축구조물, 열교환기 그리고 각종 회전체등의 안정성에 관련되기 때문에 매우 중요하다.

Ansari⁽¹⁾는 터빈 블레이드(turbine blade) 진동 문제를 평판보의 모델을 기초로 하여 실제 모델의 해석에 이르기까지 연구하였으며, 수학적 모델링 및 유한요소법, 홀로그래픽 간섭계를 이용한 모드 해석방법도 수행하였다. 그의 연구에 의하면 비틀어진 날개(blade)의 경우, 길이방향(beamwise)과 폭방향(chordwise)의 굽힘이 연성된 진동(bending-bending vibration)이 일어남을 보고하였다.

Dutton 등⁽²⁾은 나비밸브(butterfly valve)에 작용하는 유체력을 압력분포에 의한 공기역학적 회전력으로 표현하고 평판모델에서의 유동장 및 압력분포를 조사하였고, 받음각을 갖는 평판에 의한 와발달 구조 및 유동장 해석을 수치적 기법을 이용하여 수행하였다^(3,4). 익형에서의 와발달구조를 가지적으로 실험한 Freymuth⁽⁵⁾의 연구는 가속유동, 정상유동 등에서 받음각의 변화에 따른 와(vortex)의 형성과 발달, 진행과정을 잘 보여주고 있다.

이와 같은 종래의 연구들은 터빈의 회전수를 주요변수로 해석하여 유동의 영향을 고려하지 않았거나, 유체역학적인 해석만을 수행하여 진동을 일으키는 주요한 인자인 와의 발생과 변동압력분포에 의한 응답을 조사하지 않음으로 유동여기진동(flow-induced vibration)의 구조를 명확히 규명하지 못하고 있다.

본 연구에서는 고강도 알루미늄 합금으로 제작된 평판보의 받음각(α)를 10° 에서 30° 까지 10° 씩 변화시킨 3가지의 모델에 대해, 각 모델의 Re_α 수 변화에 대한 후류의 스펙트럼분석, 레이저 도플러 유속계(laser doppler velocimetry)를 이용한 유동장 해석 및 평판보의 응답을 실험을 통해 조사, 분석하고 유동장과 측정이 용이하지 않은 얇은 평판주위의 압력분포에 대한 전산해석을 수행함으로써 유동여기진동 구조의 규명을 시도하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 수행한 실험내용은 크게 두분야로 나뉘어진다. 첫째로는 레이저 도플러 유속계(laser doppler velocimetry)를 이용하여 시험구간내에 2차원적으로 설치된 실험모델의 받음각(α) 및 Re_α 수의 변화에 따른 유동방향 평균속도와 난류강도 분포를 측정하였고, 둘째로는 유동내에 수직으로 설치된 평판보의 받음각과 Re_α 수를 변화 시켜감에

Table 1 Material property of cantilever plate

	Young's modulus	Shear modulus	Possion's ratio	Density
2024-T3 (Super Duralumin)	(E) 72.4GPa	(G) 28.0GPa	(ν) 0.33	(ρ_{al}) 2.77×10^{-3} Kg/cm ³

다른 와류출주파수(vortex shedding frequency)와 평판보의 응답스펙트럼(response spectrum)을 구하였다.

본 실험에 사용한 풍동은 최대풍속 15m/s의 개방회로(open circuit) 아음속풍동(subsonic wind tunnel)으로 시험부는 200mm×200mm의 사각형이며, 유동과 나란한 방향으로 700mm의 시험구간을 가진다⁽⁶⁾. 풍동은 유동의 맥동을 줄이기 위한 압축탱크, 난류성분을 줄이기 위하여 스크린이 설치되어 있는 정류실(settling chamber), 가속 및 흐름을 균일하게 하기위한 축소노즐과 시험구간으로 구성되어 있다. 시험구간의 유동특성은 균일유동장에서 0.8% 미만의 난류강도를 가진다. 실험에 사용된 속도범위는 3.0m/s~10.0m/s 로서 평판폭(d) 차원의 Re_d 수는 7,700~25,500의 범위에 해당한다.

시험용 평판보는 항공재료로 사용되는 고강도 알루미늄합금인 2024합금(super duralumin : T₃ 열처리)을 사용하였으며, Fig. 1과 Table 1에 치수 및 재질을 나타내었다. 평판보는 두께가 1.6mm이며, 모서리를 밀링가공하여 날카로운 끝단을 갖도록 하였다. 이렇게 제작된 평판보는 15mm두께의 아크릴로 제작된 고정구에 완전고정되어 방진 테이블위에 설치되었다(Fig. 2).

(1) 레이저 도플러 유속계

레이저 도플러 유속계(LDV)를 사용하여 시험구간내에서 유동방향에 받음각(angle of attack)을 갖도록 설치된 2차원 모델에 대해 받음각과 Re_d 수를 변화 시키면서 각 모델의 유동방향 평균속도 및 난류강도 분포를 측정하였다. Fig. 3는 LDV시스템의 개략도이다. 광학계는 차동형 전방산란법을 채택하였고 광원은 출력이 35mW이고 파장이 6328 Å인 헬륨-네온 레이저를 사용하였다⁽⁷⁾.

하나의 광원에서 나온 광은 광선 분할기(beam-splitter)를 통과하면서 두개의 광으로 나누어지며, 그 중 하나는 브라그-셀(bragg-cell)을 지나면

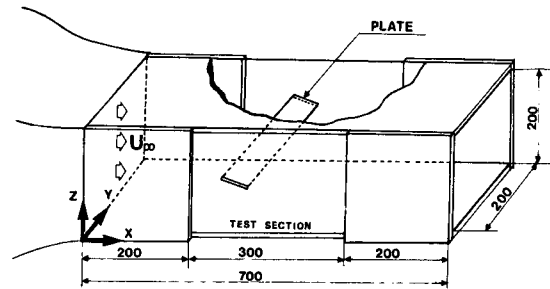


Fig. 1 The schematic diagram of a wind tunnel and its test section

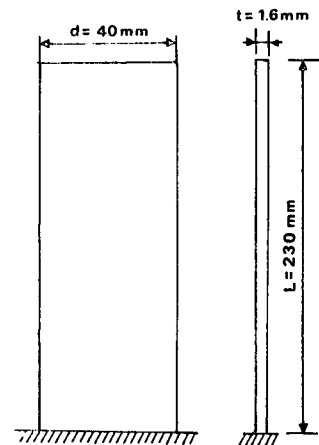


Fig. 2 Experimental apparatus

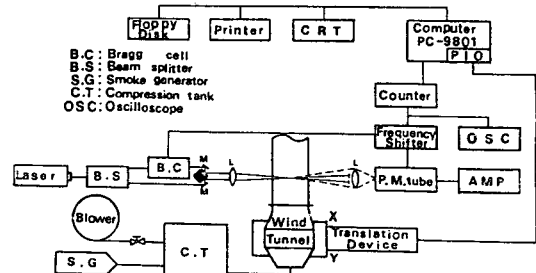


Fig. 3 The schematic diagram of the flow field measurement apparatus

서 주파수를 변조 시키는데 이는 유동속도의 방향을 알기 위함이다. 이렇게 주파수가 변조된 광과 기존의 광사이의 간격은 5cm로서, 모델의 인접한 위치에서 측정체적(probe volume)을 형성시키는데 어려움이 있으므로 본 실험실에서 제작한 광간격조정기를 설치하여 1cm로 간격을 조정함으로써 이것이 가능하도록 하였다. 두 광이 교차하는 부분에서 측정체적이 형성되고, 입자발생기에서 나오는 입자가 측정체적을 통과할 때 나오는 산란광이 광증폭관(P.M. tube)에서 검출되어 도플러 신호로 나타나게 된다. 이 도플러 신호는 신호처리계(TSI model 1990c, counter type)를 통해 최종적으로 디지털 신호로 마이크로 컴퓨터(NEC 9801)에 입력되어 속도 및 난류강도등을 계산, 저장하게 된다.

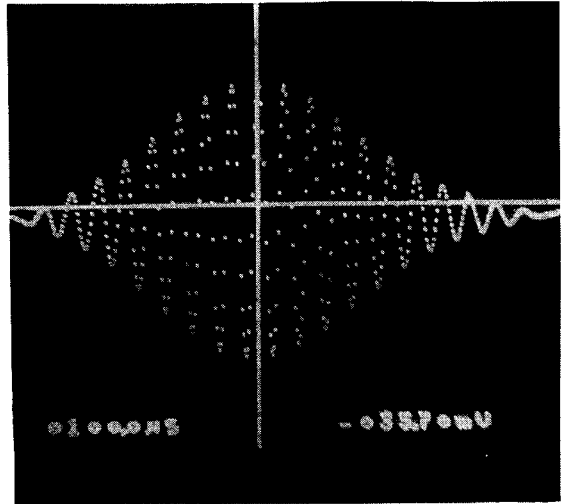


Fig. 4 Doppler signal burst

Fig. 4는 광증폭관(P.M. tube)에서 나온 도플러 신호를 신호처리계(counter)를 통해 기저(pedestal)성분을 저주파수 필터로 제거하고 오실로 스코프에서 촬영한 도플러 신호이다.

측정위치의 이동은 2차원 자동이송장치를 데이터의 처리와 함께 마이크로 컴퓨터를 통해 제어함으로써 실험의 신뢰도를 높이고 자동화를 꾀하였다. 이송장치는 X방향으로 35 μ m/pulse, Z방향으로 0.6 μ m/pulse의 분해능을 가진다⁽⁸⁾.

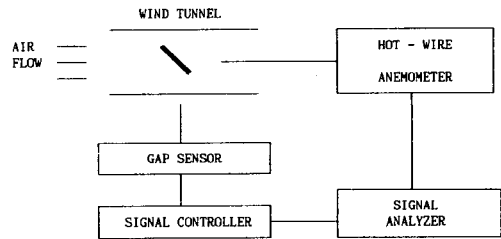


Fig. 5 The schematic diagram of the spectral analysis system

LDV로 유속을 측정하는 경우에 산란입자의 공급이 큰 문제가 되는데, 특히 개방식 풍동의 경우 산란입자의 회수가 불가능 하기 때문에 산란입자의 조건을 만족하는 많은 양의 입자가 필요하게 된다⁽⁸⁾. 200W carteridge heater주위에 석면 심지를 감고, 심지 하단부를 경유탱크에 담기게하고, 히터로 가열한다. 송풍기를 가동시키면 입자가 발생되고, 이렇게 발생된 입자는 압축탱크에서 공기와 균일하게 혼합된 후에 풍동의 시험구간으로 보내지게 된다. 입자가 측정체적을 지날때의 도플러 신호(Fig. 4)를 살펴보면 1 μ m 내외의 크기를 가지고 있어 산란입자로서 효과적으로 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다^(9,10).

(2) 와유출 주파수 및 평판보의 응답 측정

평판보의 유동여기진동 특성을 알아보기위해 아크릴로 제작된 시험부 상, 하면에 흡을 내어 그 사이로 평판보를 수직하게 설치하고, 시험부 밖으로 3cm돌출된 끝단에 Gap sensor(Keyence AH-416)를 설치하여 유동여기력에 의한 평판보의 응답신호를 구하였고, 와유출주파수의 측정에는 열선풍속계(hot-wire anemometer : KANOMAX)를 사용하였

다. 측정위치는 평판보의 L/2지점에서, 두 방향(X, Y) 미소이송장치를 이용하여 찾아나갔다. 이렇게 얻은 두 아날로그 신호를 FFT(scientific atlanta SD-380, Iwatsu SM-21088)로 처리하여 평판보의 응답특성 및 평판보로 부터의 와유출주파수를 측정하였다. Fig. 5는 주파수분석 시스템의 개략도이다.

2.2 실험방법

(1) 유동장 측정

Fig. 3에 나타난 LDV system으로 유동장을 측정하였는데, 먼저 입자발생기(Fig. 3~5)를 작동하여 산란입자를 발생시켜 풍동을 통해 시험구간을 지나게하고 오실로스코프를 통해 도플러 신호(Fig. 4)가 나오는지 확인하고 유량조절밸브로 실험하고자 하는 레이놀즈수로 속도를 맞춘다. 스태핑 모터로 구동되는 2차원 이송장치의 총 이동거리 및 측

정간격을 설정하고, 그 값을 컴퓨터에 입력한다. 실험을 위해 설정한 총이송거리는 X방향 75mm, Y방향 72mm이고, 측정간격은 X방향으로 1.25mm, Y방향으로 1.2mm이다. 이렇게 설정된 실험 조건에 따라 각 측정지점에서 100개의 순간속도를 계산하여 그 평균값을 속도로 저장하고, 난류강도 역시 프로그램에 의해 앙상블 평균하여 저장된다. 한 지점의 측정이 완료되면 자동으로 다음위치의 측정이 이루어 지는데, 실험모델에 의해 광이 차단 될 경우 자동으로 다음 위치로 이동하도록 프로그램 되어 있다. 전 유동장에 대한 측정이 완료되면 풍동은 처음위치로 귀환하게 되고, 실험이 종료된다.

(2) 와유출 주파수 및 평판보의 응답 측정

유동에 의해 가진되고 있는 평판보의 응답과 와유출주파수를 동시에 측정하였다. 평판보의 응답 스펙트럼은 평판보의 끝단에 설치된 Gap sensor로부터의 아날로그신호를 FFT에 연결하여 얻어지며, 앙상블 평균값(N=500)을 내장된 디스크 드라이브에 의해 디스켓에 저장하고, 플로터로 출력된다.

와유출 주파수의 측정을 위해 열선 풍속계의 탐침자(probe)를 유동에 직각방향으로 L/2의 위치에 설치하였다. 먼저, 평판보의 양단에서 측정하고 다음으로 후류에서 측정하여 비교분석하였다. 측정위치의 이동은 X, Y 두방향 미소이송장치를 설치하여 이송하였으며, 열선풍속계로 부터의 출력을 FFT로 처리하여, 앙상블 평균값을 저장하고 플로터로 기록해서 해석하였다.

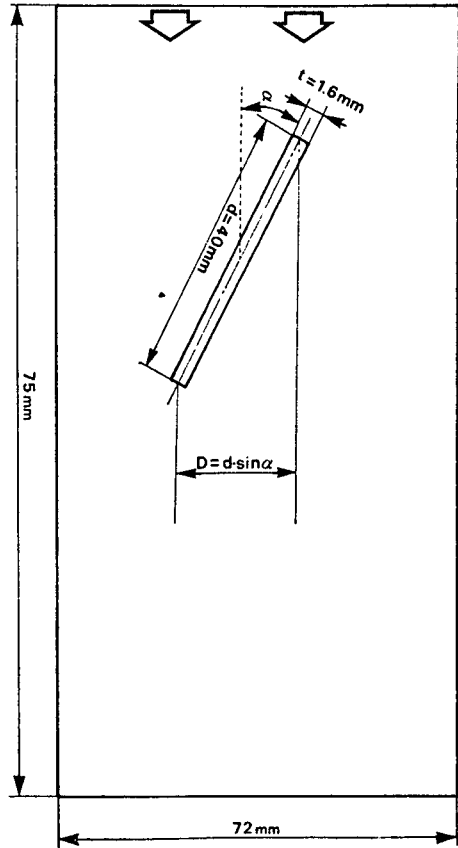


Fig. 6 Description parameters and geometrical configuration of 2-D flat plate model

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동장 해석

(1) 유동방향 등속도 분포

유동내에 잠겨진 둔탁한 물체(bluff body)의 유동특성은 물체표면에서 마찰에 의한 유체에너지의 소산으로 경계층 내에서 속도는 감소하며 압력이 증가함에 따라 경계층은 두꺼워 지고, 박리되어 넓은 맥동 후류를 형성하게 된다. 이러한 둔탁한 물체인 경우 형상의 변화에 따라 유동박리현상은 달리지게 되며, 잘 알려진대로 날카로운 모서리가 있는 물체는 경계층의 특성에 관계없이 유동 박리가 일어난다.

Fig. 6에는 유동장 측정을 위해 2차원 평판모델

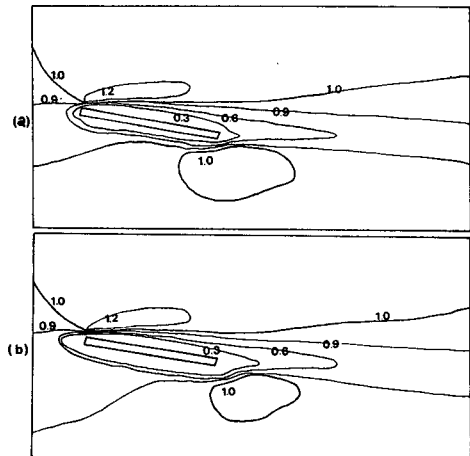


Fig. 7 Equi-velocity (U/U_∞) contours of the streamwise velocity for $\alpha=10^\circ$, (a) $Re_d=18,000$ (b) $Re_d=22,000$

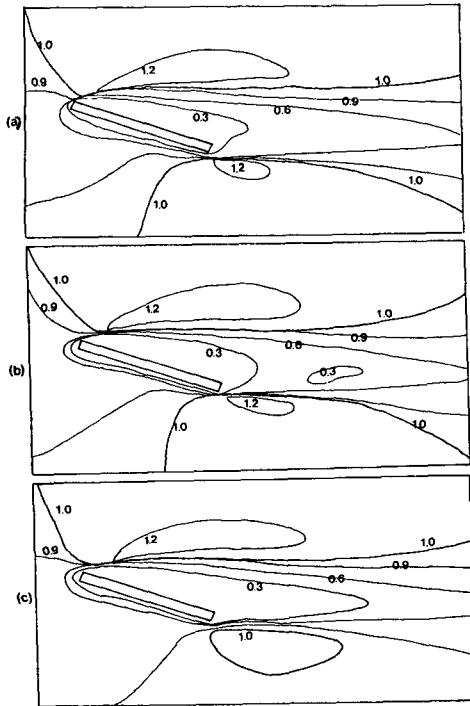


Fig. 8 Equi-velocity (U/U_∞) contours of the streamwise velocity for $\alpha=20^\circ$, (a) $Re_d=16,000$ (b) $Re_d=20,700$ (c) $Re_d=25,000$

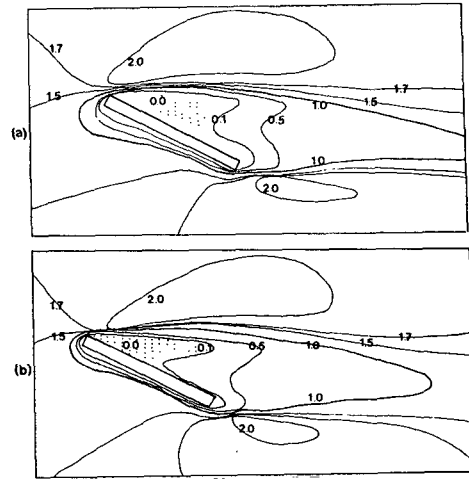
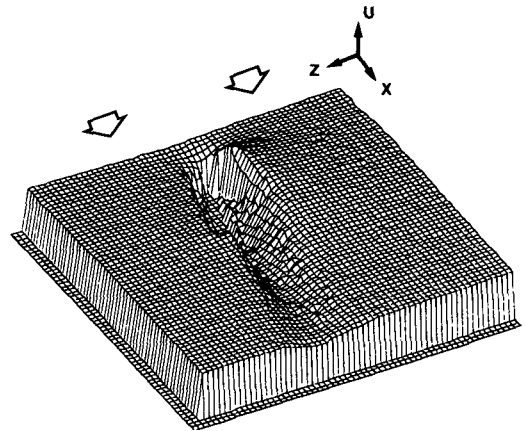


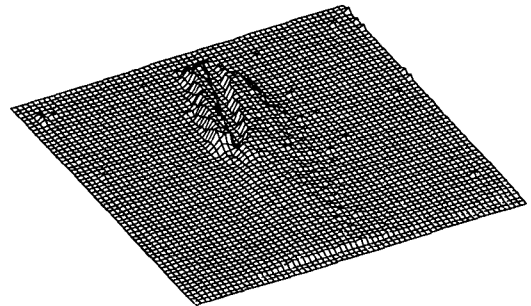
Fig. 9 Equi-velocity (U/U_∞) contours of the streamwise velocity for $\alpha=30^\circ$, (a) $Re_d=16,000$ (b) $Re_d=22,000$

주위에 설정된 검사면을 나타내었다.

유동방향 등속도 분포를 나타내는 Fig. 7($\alpha=10^\circ$)을 보면, 앞전에서 유동박리가 일어나고 있으며 하류로 갈수록 경계층이 확장되고 있다. 그러나 뒷전에서는 박리가 일어나지 않고 있음을 알 수 있다. Re_d 수가 증가함에 따라 관성력의 영향이 상대적으로 증가하였고 Fig. 7(b)의 $Re_d=22,000$ 에서는 박리된 층류경계층의 폭이 상당히 줄어들었으며, 평판앞면에서 경계층이 완만하게 발달되고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(a) ($\alpha=20^\circ$)에서 보이는 것처럼 받음각이 증가함에 따라 뒷전에서도 박리가 일어나고 있으며 하류로 갈수록 경계층이 확장되고 있다. Re_d 수가 증가하면서 아랫면에 부딪히는 유체의 속도는 감소하고 있으며, 이러한 영향은 점점 더 넓은 영역으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 유동장의 두드러진 변화가 $\alpha=30^\circ$ 에서 나타난다. Fig. 9를 보면, 평판 앞전에서 경계층의 박리가 일어나고 있으며 속도가 0인 정체영역이 평판 앞면의 가운데 부분에 존재하고 있음이 보인다. 또한 경계층 외부유동도 급격하게 속도가 증가하면서 평판주



(a) Streamwise velocity profile $\alpha=20^\circ$, $Re_d=16,000$



(b) Turbulence intensity profile $\alpha=20^\circ$, $Re_d=16,000$

Fig. 10 Three dimensional plots of streamwise velocity and turbulence intensity profile development ($\alpha=10^\circ$)

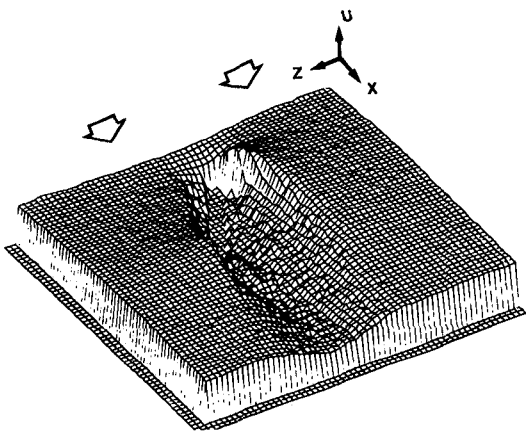
위를 흘러가고 있다. Re_a 수가 좀더 증가한 $Re_a=22,000$ 에서는 정체영역이 평판의 앞전에 존재하고 앞전과 뒷전에서 박리된 경계층이 후류에서 만나면서 폐영역(closed region)을 형성하고 있음이 관찰된다.

결론적으로, 반음각이 작은($\alpha=10^\circ, 20^\circ$) 경우에 유동장은 Fig. 7, 8에서 볼 수 있는 것처럼 표면 마찰에 의해 경계층이 서서히 성장하면서 후류로 확대되고 있으며, 반음각이 커짐에 따라 유동이 평판의 양단을 돌아 재빨리 유입되지 못하므로 정체영역이 나타나고, 후류의 폭도 훨씬 넓어짐을 알 수 있다.

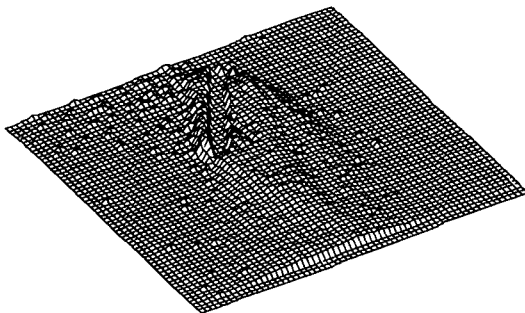
(2) 3차원 속도분포

Fig. 10, Fig. 11 그리고 Fig. 12는 반음각(α)의 변화에 따른 평판주위의 흐름을 3차원적으로 나타내었다. 반음각이 10° (Fig. 10)인 경우 유동방향으로

의 투영면적(D)이 작기 때문에 후류의 폭은 상대적으로 좁고, 평판 아랫면으로 부딪히는 유동도 매끄럽게 흘러가다가 뒷전에서 약간 유입됨을 알 수 있다. 그러나 앞전을 지나는 유동은 자유유동보다 높은 속도를 가지고 흘러감을 알 수 있다. 이렇게 앞전을 지나는 유동이 뒷전을 지나는 유동보다 빠른 속도를 가짐에 따라 후류는 약간 아래쪽으로 치지면서 속도가 회복되어 가고 있다. 반음각이 커짐에 따라 후류의 폭이 넓어지고 있다. 그러나 20° (Fig. 11)의 경우에도 상류유동은 크게 방해받지 않고 있으며, 앞전과 끝전을 지나는 빠른흐름이 있음을 알 수 있다. 유동장의 두드러진 차이가 30° (Fig. 12)에서 관찰된다. 우선 평판 아랫면에 유동이 부딪히면서 상당한 저항을 갖고 속도가 감소하고 있음이 관찰되고 앞전에서의 박리에 의해 평판 앞전의 윗면에서 속도는 거의 없었으며, 특이할 만

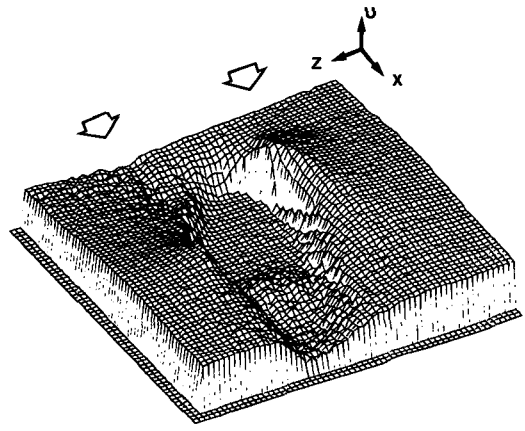


(a) Streamwise velocity profile $\alpha=20^\circ$, $Re_a=16,000$

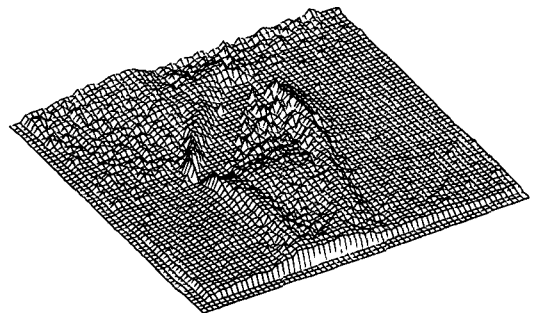


(b) Turbulence intensity profile $\alpha=20^\circ$, $Re_a=16,000$

Fig. 11 Three dimensional plots of streamwise velocity and turbulence intensity profile development($\alpha=20^\circ$)



(a) Streamwise velocity profile $\alpha=30^\circ$, $Re_a=16,000$



(b) Turbulence intensity profile $\alpha=30^\circ$, $Re_a=16,000$

Fig. 12 Three dimensional plots of streamwise velocity and turbulence intensity profile development($\alpha=30^\circ$)

한 것은 뒷전을 지나면서 와(vortex)의 유입에 의해 속도가 회복 되다가 다시 감소 하여 후류로 이어지고 있는 것이다.

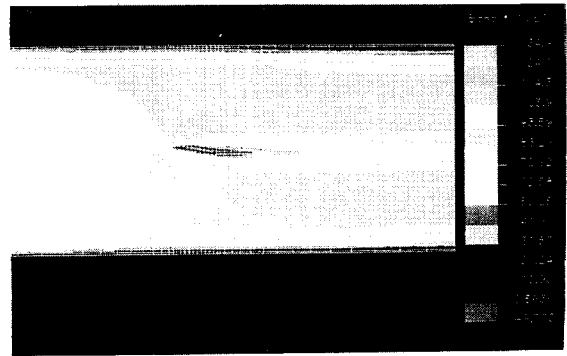
난류강도분포는 10° 와 20° 의 경우에는 후류에서 완만한 분포를 보이나, 30° 에서는 후류경계를 따라서 발달하고 있다.

(3) 유동장 및 압력분포의 전산해석

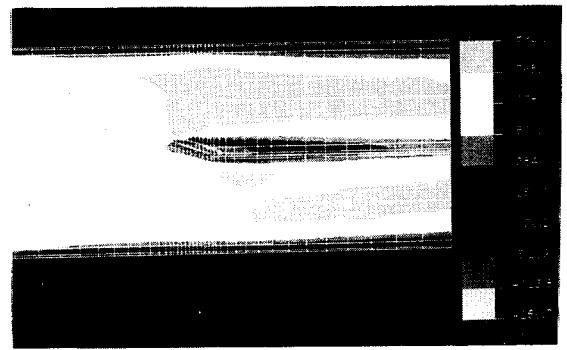
2차원 평판모델을 지나는 유동장을 수치적으로 재현하여 실험결과와 비교하고, 특히 측정이 용이하지 않은 얇은 평판주위의 압력분포를 예측하여 받음각의 변화에 따른 유동여기구조를 분석하고자 상용화된 유한요소 프로그램인 NISA II(3D-Fluid)를 사용하여 SUN 386i에서 계산을 수행하였다. 계산방법은 먼저 본 실험에 사용된 시험구간과 동일한 경계를 검사면으로 설정하고 계산을 수행하였다. 층류해석을 통한 경계조건을 가자고 난류해석($k-\epsilon$ model)을 수행함으로써 수렴조건을 만족시켰다.

Fig. 13에 받음각의 변화에 따른 유동장의 전산해석결과를 나타내었다. 먼저 받음각이 10° , $Re_d=22,000$ 인 경우를 살펴보면, 상류의 자유유동이 평판의 아랫면에 부딪히면서 상당한 유속의 감소가 관찰되는 반면에 윗면을 지나는 유동은 높은 속도로 앞전을 지나고 있음이 관찰된다. 후류는 평판의 윗면으로 부터 유속이 서서히 증가하여 경계층을 형성하면서 회복되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 13(b)의 받음각이 20° , $Re_d=22,000$ 에서 관찰되는 것과 같이 후류는 요동하고 있는데, 이것은 평판의 양단에서 발생하는 와의 규모가 상당히 커짐으로 인해 이러한 영향이 유동을 요동하게 하는 것으로 생각되어 진다. 이와 같은 전산해석의 결과는 앞서 설명한 실험결과와 비교해 볼 때 정성적으로는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 정량적으로 다소 차이가 있는 것은 사용한 상용 프로그램이 평판의 앞전에서 완전히 박리되어 후류로 발달되지 않고 받음각이 낮아 앞전에서 박리되고 재부착되는 유동을 민감하게 해석해내지 못하기 때문인 것으로 생각되어 진다.

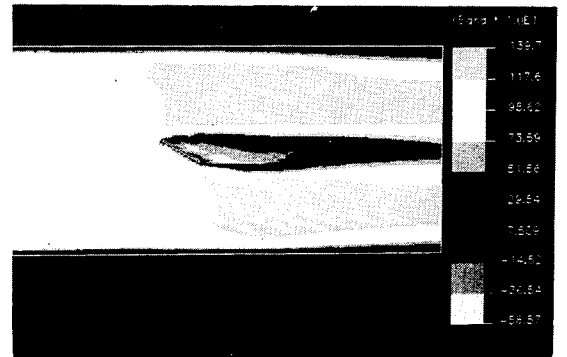
Fig. 14는 받음각의 변화에 따른 평판 주위의 압력분포를 계산한 결과이다. 받음각이 10° , $Re_d=22,000$ 인 Fig. 14(a)를 살펴보면, 유동장에서 관찰된 것과 같은 유동분포에 의해 평판 앞전의 아랫면에서는 정(+)의 압력 분포가 있으며 윗면에서는 부(-)의 압력분포가 존재하고 있음으로 보아 양력



(a) $\alpha=10^\circ$, $Re_d=22,000$



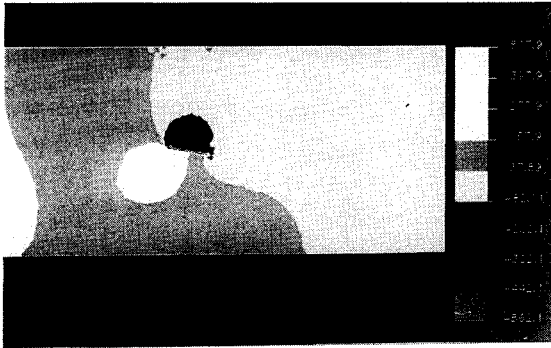
(b) $\alpha=20^\circ$, $Re_d=16,000$



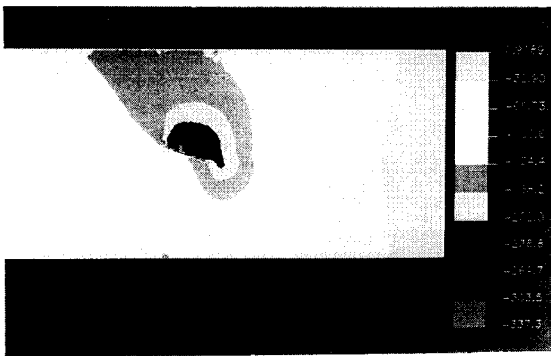
(c) $\alpha=30^\circ$, $Re_d=22,000$

Fig. 13 Computational results of flow fields

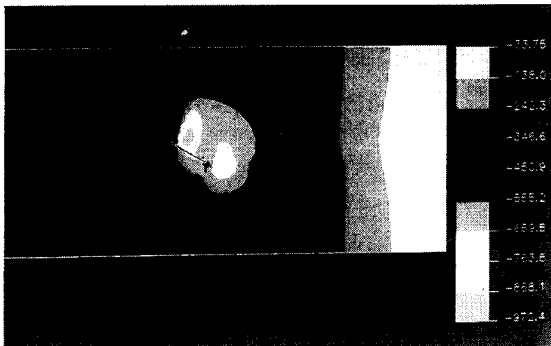
방향으로 상당한 유체력이 작용하고 있고, 이러한 작용력은 받음각이 증가함에 따라 항력방향으로 치우치게 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 14(c)에서 평판의 양단에서 상당히 낮은 압력의 영역이 관찰되는데 이것은 유동해석을 통해서 예측한 바와 같이 와의 형성이 활발해지고 또 대규모화되기 때문인 것으로 생각된다.



(a) $\alpha=10^\circ$, $Re_a=22,000$



(b) $\alpha=20^\circ$, $Re_a=16,000$



(c) $\alpha=30^\circ$, $Re_a=22,000$

Fig. 14 Computational results of pressure fields

3.2 와유출 주파수 특성 및 평판보의 응답

(1) 와유출 주파수의 특성

유동에 의해 진동하고 있는 평판보의 후류에서 와유출 특성을 알아보기 위해 받음각이 30° , $Re_a=20,000$ 인 경우에 측정위치를 Fig. 15에 나타나 있는 바와 같이 변화시켜 가면서 와유출 주파수를 측정하였다. 먼저 평판의 끝단에서 약 $d/4$ 떨어

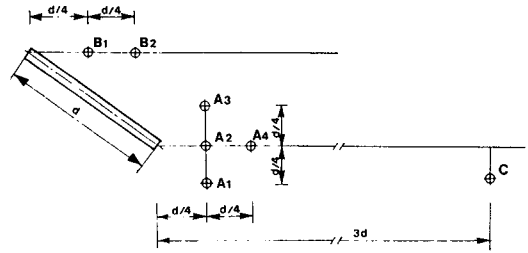


Fig. 15 Geometrical configuration of measuring position for vortex shedding frequency

진 위치에서 유동에 직각방향으로 약 $d/4$ 간격으로 측정하였다. Fig. 16은 받음각이 30° 인 경우의 측정 위치별 와유출주파수 특성을 나타낸다. 받음각이 30° 인 경우 A_1 위치에서 측정된 와유출 신호를 보면 와유출 주파수와 함께 평판보의 고유주파수(24Hz)의 영향이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 평판보가 진동하면서 유동을 교란 시키기 때문일 것으로 생각된다. 그러나 A_2 , A_3 로 측정위치를 옮겨 감에 따라 유동이 평판보의 진동에 의해 교란되어 와유출의 영향은 나타나지 않고 있다. A_2 의 위치에서 유동방향으로 $d/4$ 떨어진 A_4 의 위치에서 측정된 신호를 보면 평판진동의 영향이 다소 나타나고 있으나 A_2 의 위치보다 와유출 세기가 강하여 와유출에 의해 야기된 진동이 잘 관찰 되었다. 다음으로 평판의 앞단에서 유동방향으로 $d/4$ 씩 이동하면서 측정된 결과를 살펴보자. Fig. 16에 나타난 것처럼, B_1 의 위치에서는 와유출 신호가 검출되지 않고 있으며 B_2 의 위치로 이동함에 따라 와유출 신호가 검출됨을 알 수 있다. 따라서 평판의 앞단이 끝단보다 와의 유입반경이 크다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 상당히 후류로 떨어진 C의 위치에서 측정된 결과를 살펴보면, 와유출 주파수의 영향이 지배적으로 나타나 있음을 알 수 있다. 그러나 평판보의 진동에 의한 영향이 미소하지만 관찰되는 것으로 보아 이러한 영향이 평판에서 상당히 떨어진 후류에도 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

결론적으로, 이러한 실험을 통해 평판보의 인접한 위치에서 와유출 주파수의 측정은 진동하는 평판보의 교란에 의해 영향을 받으므로, 이러한 영향을 적게 받는 후류에서 지배적인 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

잘 알려진대로 횡유동(cross flow)을 받는 실린더의 경우 레이놀즈수가 10^3 에서 2×10^5 범위에서

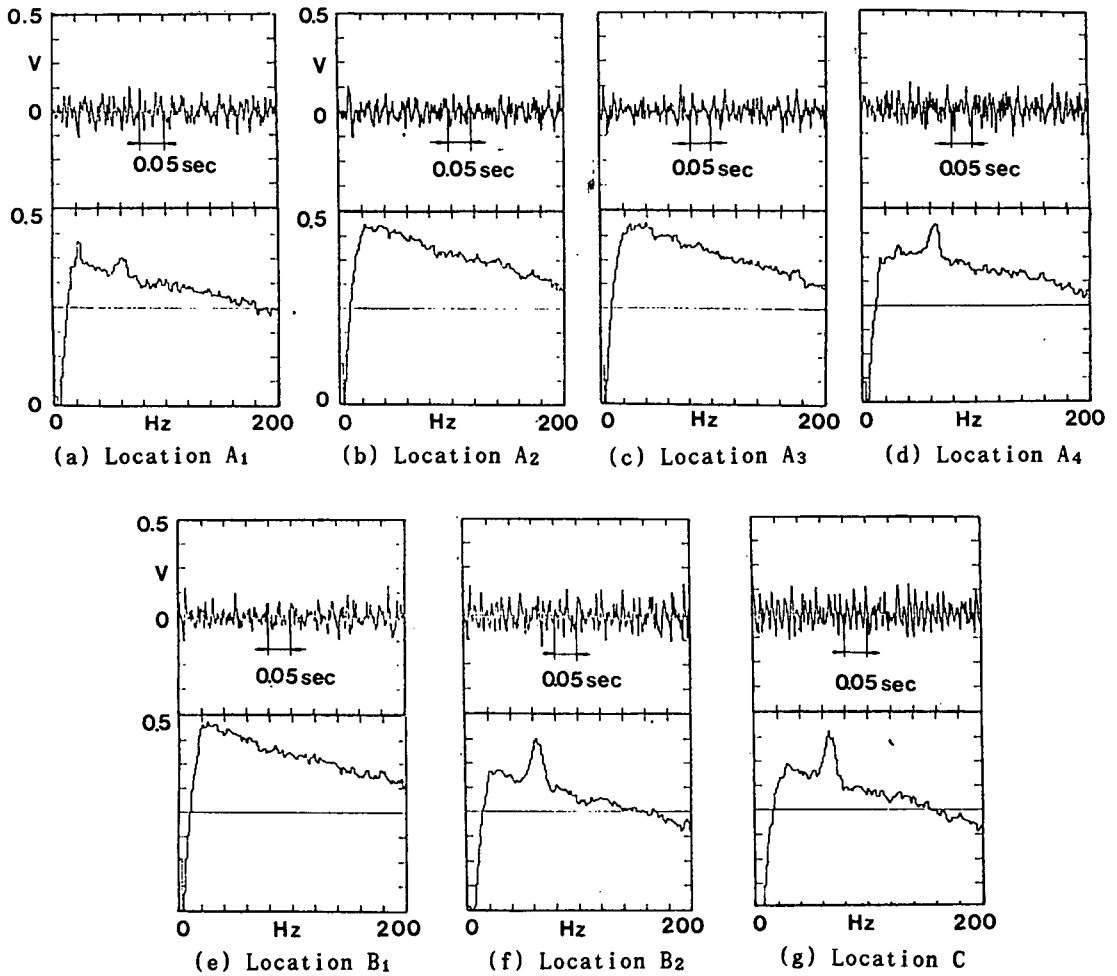


Fig. 16 Spectra of vortex shedding frequency

St 수는 약 0.2의 값을 가진다. 그러나 평판의 경우는 이와 다르다. 평판에서의 St 수는 평판 끝단의 형상과 평판의 두께의 영향을 받게된다. 받음각을 갖지 않는 경우 유동에 나란한 얇은 평판($d/t=33$)의 후류에서 발생하는 와류출에 의한 St 수는 약 0.156의 값을 가진다⁽⁹⁾.

Fig. 17에 본 실험에 사용된 평판보의 받음각 변화에 따른 Re_d 수와 St_D 수의 관계를 나타내었다.

받음각이 30°인 경우에는 St_D 수가 전체적으로 감소한 $St_D=0.17$ 정도의 평균값을 나타내지만 Re_d 수가 20,000이상에서는 감소하는 경향을 나타낸다. 받음각이 20°인 경우를 살펴보면 전체적으로 30°의 경우와 유사한 분포를 가지나, Re_d 수가 증가함에 따라 약 0.16의 값으로 수렴하는 양상을 나타낸다.

받음각이 10°인 경우에는 전체적으로 St_D 수가 다른 모델에 비해 낮은 값을 가지고 있으며, Re_d 수 15,000을 경계로 계단모양의 분포를 가지고 있음을 볼 수 있다.

(2) 평판보의 응답

Fig. 18, 19, 20은 받음각 변화에 따른 평판보의 응답 스펙트럼과 와류출 신호의 파워 스펙트럼변화를 보여주고 있다. 평판보의 응답 스펙트럼을 살펴보면, 전체 모델에 있어서 낮은 Re_d 수에서는 24 Hz에서 응답 주파수를 나타내고 있으나 Re_d 수가 증가함에 따라 150Hz에서도 응답 주파수를 나타내고 있다. 특이할 만한 것은 30°에서는 와류출 주파수의 영향이 평판보의 응답 스펙트럼에 나타나고 있는 것이다. 따라서 이러한 경우에는 와류출에 의

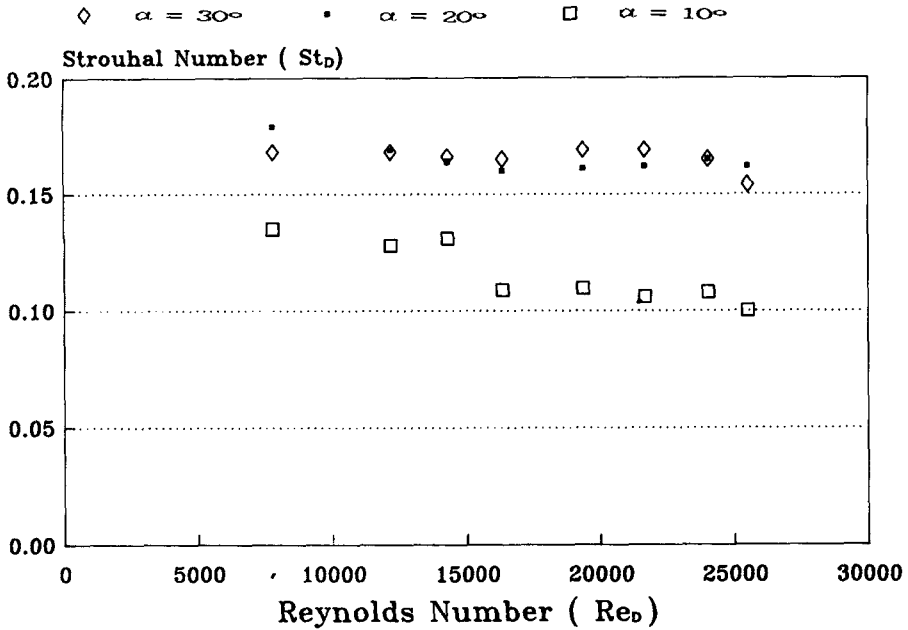
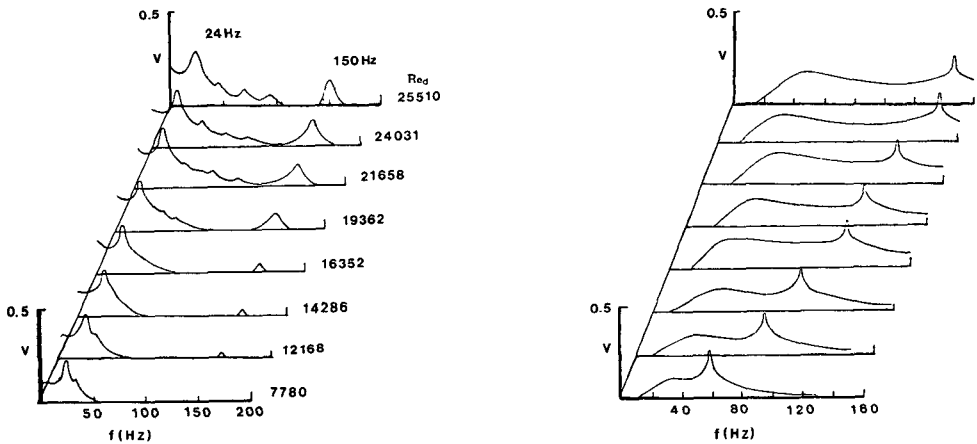


Fig. 17 Relations between Reynolds and Strouhal number



(a) Response spectra of a vibrating cantilever plate

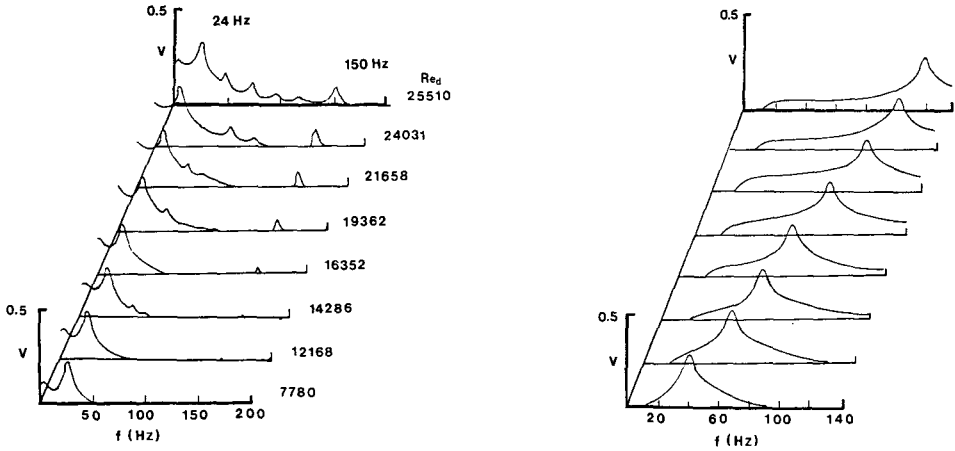
(b) Power spectrum of vortex shedding signal

Fig. 18 Response spectra of an vibrating cantilever plate and vortex shedding frequency $\alpha=10^\circ$

한 주기적인 여기력(periodic excitation force)이 평판보의 진동 거동에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다.

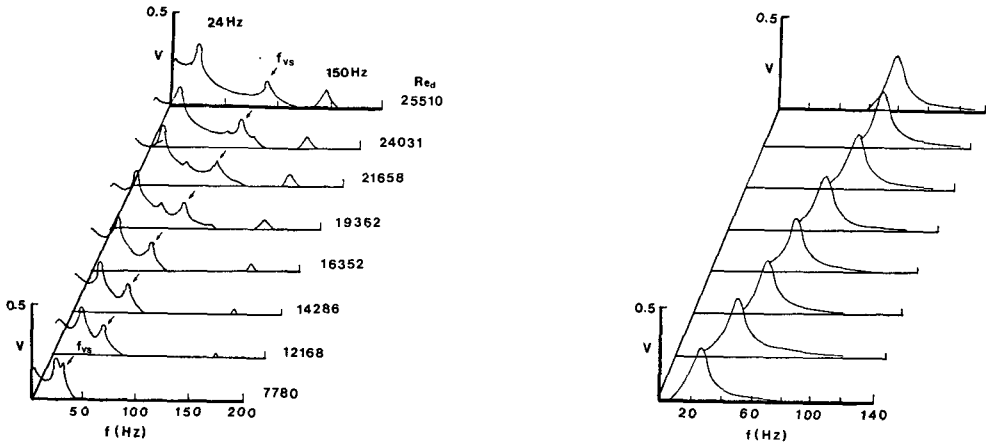
실험에 사용된 평판보의 고유 진동수들을 계산한 결과 길이방향 굽힘 모드의 1차 고유 진동수는 24.53Hz이었으며 2차 고유 진동수는 153.48Hz이었다. 실험에서 나타난 응답 주파수인 24Hz, 150

Hz와 거의 일치하였으며, 평판보의 고유진동수와 와류출 주파수가 일치하는 공진 유속은 Table 2와 같다. Table 2에 나와 있는 것과 같이 유속이 작은 경우에는 와류출 주파수가 1차 고유진동수와 일치한 경우에 와여기 진동에 의한 공진이 발생하며 비교적 높은 유속에서는 2차 고유진동수와 일치 할 때 발생하였다. 평판보의 진동은 반응각을 가짐으



(a) Response spectra of a vibrating cantilever plate (b) Power spectrum of vortex shedding signal

Fig. 19 Response spectra of an vibrating cantilever plate and vortex shedding frequency $\alpha=20^\circ$



(b) Power spectrum of vortex shedding signal plate (a) Response spectra of a vibrating cantilever

Fig. 20 Response spectra of a vibrating cantilever plate and vortex shedding frequency $\alpha=30^\circ$

Table 2 Resonance velocity at each angle of attack

Velocity (U_∞)	Resonance velocity	
	1st	2nd
Angle of attack		
10°	1.30	10.0
20°	1.90	—
30°	3.05	—

로 인해 공진 유속이 점차로 커짐을 알 수 있다. 아울러 앞에서 언급한 것처럼 평판보는 유속과 받음각의 변화에 관계없이 항상 고유 진동수에서 응답함을 알 수 있다.

4. 결 론

평판보의 받음각과 Re_d 수의 변화에 따른 유동특성 및 보의 응답특성에 대해 다음과 같은 결론을

얻었다.

(1) 2차원 평판모델 주위를 지나는 유동은 받음각이 작은 10° , 20° 의 경우에는 유동을 부드럽게 갈라놓는 유선형 물체(slender body)의 형태를 가지나, 받음각이 증가함에 따라 유동저항이 증가하고 후류의 폭이 넓어지며, 후류에서의 난류성분과 와(vortex)의 유입이 두드러지는 둔탁한 물체(bluff body)의 유동형태를 보인다.

(2) 유동장의 실험과 전산해석을 통한 결과를 비교해 볼 때 전체적인 유동의 양상은 잘 일치하고 있으나 정량적으로는 다소 차이가 있었다.

(3) 평판보의 진동거동에 있어서 와유출 주파수의 영향은 상대적으로 고주파수를 가지는 받음각이 10° , 20° 인 경우에는 잘 나타나지 않지만, 저주파수를 갖는 30° 의 경우에는 상당한 영향을 미치며, 받음각이 커짐에 따라 St_D 수도 전체적으로 증가함을 알 수 있다.

(4) 평판보의 응답은 받음각과 Re_d 수의 변화에 관계없이 항상 고유진동수에서 응답을 나타낸다.

참고문헌

(1) Khyruddin, A. Ansari, 1989, "Turbine Blade Vibration," Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol.8, pp. 875~991.

(2) Dutton, J.C., Morris, M.J. and Addy, A.L., 1989, "Compressible Flow Characteristics in Valve," Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol.8, pp.994~1039.

(3) Masaru Kiya and Miko Arie, 1977, "A Contribution to an Inviscid Vortex-Shedding Model for an Inclined Flat Plate in Uniform Flow," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 82, Part2, pp. 223~240.

(4) Terukazu Ota and Yasunori Okamoto, 1990, "Discrete Vortex Method Analysis of the Wall Effect on a Separated Flow Past an Inclined Flat Plate," Journal of JSME(B), Vol, 56, pp.21~28.

(5) Peter Freymuth, 1989, "Vortex Patterns of Dynamic Separation," Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 8, pp.392~424.

(6) Lee, Ki Baik, et al., 1990, "A Study on the Fluid Flow and Heat Transfer in Tube Banks by LDV & Holographic Interferometry," Korea

Applied Physics, Vol. 3, No.3, pp.381~391.

(7) Drain, L. E., 1980, The Laser Doppler Technique, John Wiley & Sons, New York, pp. 85~118.

(8) Lee, Ki Baik, et al., 1990, "A Study on the Flow Characteristics Between Two Circular Cylinders in Cross Flow by LDV and Holographic Interferometry," KSME Journal, Vol.4, No. 2, pp.115~119.

(9) Doyle Thompson H. and Stevenson, Warren H., 1978, Laser Velocimetry and Particle Sizing, Hemisphere Publishing Corporation.

(10) Lee, Baik Ki et al., 1988, "The Study of Flow Tracing Fidelity of Scattering Particle in Laser Doppler Velocimetry," Korea Applied Physics, Vol. 1, No. 2, pp. 108~115.

(11) Warburton, G.B., 1954, "The Vibration of Rectangular Plates," Proc. Inst. Mech. Eng., Ser. A, Vol.168, No. 12, pp 371~384.

(12) Arthur, W. Leissa, 1969, Vibration of Plates, NASA SP-160.

(13) Robert, D. Blevins, 1977, Flow-Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold.

(14) Den Hartog, J., 1956, Mechanical Vibrations, McGRAW-Hill, pp. 282~334.

(15) Andrew B. Bauer, 1961, "Vortex Shedding From Thin Flat Plates to the Free Stream," Journal of Aerospace Science, pp. 340~341.

(16) Nakamura, Y. and Tomonari, Y., 1977, "Galloping of Rectangular Prisms in a Smooth and in a Turbulent Flow," Journal of Sound & Vibration, Vol. 52, No. 2, pp. 233~241.

(17) Atsushi Okajima, Kenichiro Sugitani, and Teketo Mizota, 1983, "Strouhal Number and Base Pressure Coefficient of Rectangular Cylinders", Journal of JSME(B), Vol.49, No. 447, pp. 2551~2558.

(18) Shotaro Kodama and Junji Tani, 1989, "Vibration of a Cantilever Beam with Square Section in Smooth Flow," Journal of JSME(C), Vol. 55, No. 519, pp. 2713~2717.

(19) Lugt, H.J., 1983, Vortex Flow in Nature and Technology, pp. 101~112.

(20) Daniel, E. Bergsten, Charles Stauter, R. and

- Sanford Fleeter, 1983, "Overall Aerodynamic Performance of an Annular Flat-Plate Airfoil Cascade," AIAA Journal, Vol.22, No. 2, pp. 250~251.
- (21) Guruswamy P. and Yang, T.Y., 1981, "Aeroelastic Time Response Analysis of Thin Airfoils by Transonic Code LTRAN 2," Computers and Fluids, Vol.9, No. 4, pp. 409~425.
- (22) Kazuo Ohmi, Kensaku Imaichi and Madeleine Coutanceau, 1990, "Visualization Analysis of the Starting Flow Around a Pitching Airfoil," Journal of JSME(B), Vol.56, No. 528, pp. 2257~2267.
- (23) Jensen, D.W. and Crawley, E.F., 1984, "Frequency Determination Techniques for Cantilevered Plates with Bending-Torsion Coupling", AIAA Journal, Vol. 22, No. 3, pp. 415~420.