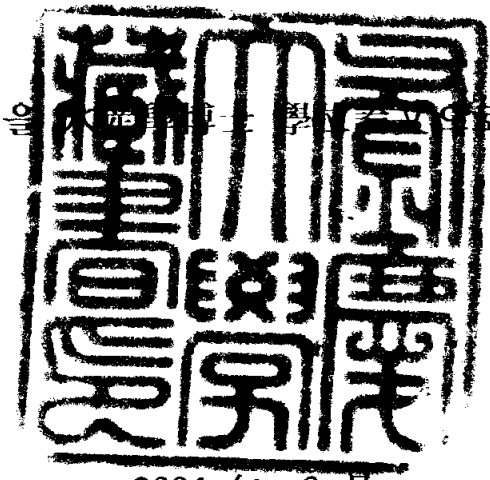
水産學博士 學位論文

어구전개용 캔버스 카이트의 유체역학적 특성

指導敎授 李 珠 熙



이 論文을 水産學博士 學位論文으로 提出함

2004 年 8 月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

水 産 物 理 學 科

裵 俸 晟

裵俸晟의 水産學博士 學位論文을 認准함

2004 年 6 月 日

主 審 水産學博士 李 春 雨

委 員 水産學博士 權 炳 國

委 員 水産學博士 金 炯 碩

委 員 水産學博士 辛 鍾 根

委 員 水産學博士 李 珠 熙

목 차

Abstract ix

제1장 서 론 1

1.1. 연구 배경 1

1.2. 연구의 목적 및 개요 4

제2장 양·항력 특성 실험 7

2.1. 서론 7

2.2. 재료 및 방법 9

2.2.1. 실험 수조 9

2.2.2. 모형 평판 및 범포 11

2.2.3. 측정 장치 19

2.2.4. 실험 및 분석 방법 22

2.3. 결과 및 고찰 25

2.3.1. 범포 모형의 만곡꼭지점 위치 및 만곡도 25

2.3.2. 종횡비에 따른 양·항력 비교 27

2.3.3. 다각형 모양에 따른 양·항력 비교 42

2.3.4. 만곡도에 따른 양·항력 비교 46

2.4. 요약 52

제3장 PIV 및 CFD에 의한 유동장 해석 실험 57
3.1. 서론 57
3.2. 재료 및 방법 59
3.2.1. PIV 장치 및 실험 방법 59
A. 화상발생 장치 62
B. 화상저장 장치 62
C. 화상처리 장치 63
D. 가시화 방법 64
E. 모형 및 실험 방법 68
3.2.2. CFD 해석 방법 70
A. 해석 조건 70
B. 수치해석 방정식 72
3.3. 결과 및 고찰 75
3.3.1. 범포 형태별 유동장 해석 78
A. 사각형 범포 78
B. 삼각형 범포 82
C. 역삼각형 범포 86
3.3.2. 범포 형태간 유동장 비교 89
3.4. 요약 91

제4장 범포의 어구 적용 실험 93
4.1. 서론 93
4.2. 재료 및 방법 95
4.2.1. 어구 적용 방법 95
4.2.2. 실험 장치 및 모형 97
4.2.3. 실험 방법 100
4.3. 결과 및 고찰 103
4.3.1. 범포의 양·항력 비교 103
4.3.2. 범포의 유속에 따른 형상 변화 110
4.3.3. 부자와 범포의 양·항력 비교 113
4.4. 요약 120

제5장 종합고찰 122

감사의 글 132
참고문헌 134

List of Figures

Fig. 2-1. Schematic drawing of vertical circulating water channel. 10

Fig. 2-2. The design drawing of plate models. 12

Fig. 2-3. The design drawing of canvas kite models. 14

Fig. 2-4. The camber of canvas kite in the flowing water. 17

Fig. 2-5. Experimental set-up for the efficiency test. 20

Fig. 2-6. The installation frame of the models. 21

Fig. 2-7. The efficiency of the rectangular plate in accordance with the angle of attack. 34

Fig. 2-8. The efficiency of the rectangular canvas kite in accordance with the angle of attack. 35

Fig. 2-9. The efficiency of the trapezoid canvas kite in accordance with the angle of attack. 36

Fig. 2-10. The efficiency of the inverted trapezoid canvas kite in accordance with the angle of attack. 37

Fig. 2-11. The efficiency of the triangular plate in accordance with the angle of attack. 38

Fig. 2-12. The efficiency of the inverted triangular plate in accordance with the angle of attack. 39

Fig. 2-13. The efficiency of the triangular canvas kite in accordance with the angle of attack. 40

Fig. 2-14. The efficiency of the inverted triangular canvas kite in accordance with the angle of attack. 41

Fig. 2-15. The efficiency of the rectangular canvas kite by camber ratio in accordance with the angle of attack. 49

Fig. 2-16. The efficiency of the triangular canvas kite by camber ratio in accordance with the angle of attack. 50

Fig. 2-17. The efficiency of the inverted triangular canvas kite by camber ratio in accordance with the angle of attack. 51

Fig. 3-1. Experimental set-up of the PIV system. 60

Fig. 3-2. Timing diagram for external triggering. 63

Fig. 3-3. Schematic diagram of PIV. 64

Fig. 3-4. The principle of the grey level cross-correlation. 67

Fig. 3-5. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the rectangular canvas in accordance with angle of attack(α). 80

Fig. 3-6. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the triangular canvas in accordance with angle of attack(α). 84

Fig. 3-7. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the inverted triangular canvas in accordance with angle of attack(α). 87

Fig. 4-1. The applicative device of the canvas kite as buoyant article. 96

Fig. 4-2. The insallation frame of kite. 97

Fig. 4-3. The design drawing of experimental models. 98

Fig. 4-4. The efficiency of the triangular and the half-conoid canvas in accordance with flow speed(α =20°). 107

Fig. 4-5. The efficiency of the triangular and the half-conoid canvas in accordance with flow speed(α =25°). 108

Fig. 4-6. The efficiency of the triangular and the half-conoid canvas in accordance with flow speed(α =30°). 109

Fig. 4-7. The drawing of the full scale bottom trawl net. 114

Fig. 4-8. The connective method of the canvas kite and the net. 115

Fig. 5-1. The water flow around the rectangular canvas. 124

Fig. 5-2. The water flow around the triangular canvas. 126

Fig. 5-3. The water flow around the plate and the canvas. 129

List of Tables

Table 2-1.	Principal characteristics of the circulating water channel	9
Table 2-2.	The used models in efficiency test by its shape and size	18
Table 2-3.	The vertex position of camber and camber ratio	26
Table 2-4.	The attack angle and the efficiency of test model in accordance with polygonal shape and aspect ratio	32
Table 2-5.	The attack angle and the efficiency of test model in accordance with polygonal shape and camber ratio	48
Table 3-1.	Experimental condition of the PIV system	61
Table 3-2.	Processing condition of CFD	71
Table 3-3.	The efficiency comparison between the CFD result and the experiment result	75
Table 4-1.	The experimental cases by the model and condition	99
Table 4-2.	The camber change of canvas by the flow speed	112
Table 4-3.	The comparative table for the efficiency of the canvas kite.	119

List of Photos

Photo 2-1. The view of vertical circulating water channel. 10

Photo 2-2. The view of the efficiency test of a model. 24

Photo 3-1. The view of the PIV test. 69

Photo 4-1. The measuring of the shape change of canvas. 102

The hydrodynamic characteristics of the canvas kites as an opening device for fishing gear

Bong-Seong BAE

Department of Fisheries Physics, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

As far as an opening device of fishing gears is concerned, applications of a kite are under development around the world. The typical examples are found in the opening device of the stow net on anchor and the buoyancy material of the trawl.

While the stow net on anchor has proved its capability for the past 20 years, the trawl has not been wildly used since it has been first introduced for the commercial use only without sufficient studies and thus has revealed many drawbacks. Therefore, the fundamental hydrodynamics of the kite itself need to be studied further.

This research aims at establishing the fundamental characteristics of the kite through the analysis of the flow field around various types of kites.

Three approaches were adopted for the analysis; mechanical test, visualization by PIV(particle image velocimetry) and numerical simulation.

Models of plate and canvas kite were deployed in the circulating water channel for the mechanical test. For this situation, the lift and drag tests were performed considering a change in the shape of objects, which resulted in a different aspect ratio of rectangle, trapezoid and triangle. Camber ratio was also tested in a similar way.

During the mechanical tests, the flow field was visualized via PIV system and was simulated via FVM(finite volume method) using the same boundary conditions as in the tank.

In addition, several methodologies were designed to find the most effective triangular model as a buoyancy device applied to a fishing gear. Comparisons of drag/lift were made by installing the model in an install frame instead of a fishing gear.

The results obtained from the above approaches are summarized as follows, where aspect ratio, attack angle, lift coefficient, maximum lift coefficient and drag coefficient are denoted as A, B, C_L, C_{Lmax} and C_D respectively :

A. The efficiency test of the plate and the canvas kite

1. In case of the rectangular plate, C_{Lmax} was produced as 1.46~1.54 with $A \leq 1$ and $40° \leq B \leq 42°$. And when $A \geq 1.5$ and $20° \leq B \leq 22°$, C_{Lmax} was 1.07~1.11. In case of the rectangular canvas, C_{Lmax} was 1.75~1.91 with $A \leq 1$ and $32° \leq B \leq 40°$. And when $A \geq 1.5$ and $18° \leq B \leq 22°$, C_{Lmax} was 1.24~1.4.

2. In case of the trapezoid kite, C_{Lmax} was produced as 1.65~1.89 with $A \leq 1.5$ and $34° \leq B \leq 44°$. And when A=2 and B=14~48, C_L was around 1. In case of the inverted trapezoid kite, C_{Lmax} was 1.57~1.74 with $A \leq 1.5$ and $24° \leq B \leq 36°$. And when A=2, C_{Lmax} was 1.21 with B=18°.

3. In case of the triangular plate, C_{Lmax} was produced as 1.26~1.32 with $A \leq 1$ and $38° \leq B \leq 42°$. And when $A \geq 1.5$ and $20° \leq B \leq 50°$, C_L was around 0.85. In case of the inverted triangular plate, C_{Lmax} was 1.46~1.56 with $A \leq 1$ and $36° \leq B \leq 38°$. And when $A \geq 1.5$ and $22° \leq B \leq 26°$, C_{Lmax} was 1.05~1.21.

4. In case of the triangular kite, C_{Lmax} was produced as 1.67~1.77 with $A \leq 1$ and $46° \leq B \leq 48°$. And when $A \geq 1.5$ and $20° \leq B \leq 50°$, C_L was around 1.1. In case of the inverted triangular kite, C_{Lmax} was 1.44~1.68 with $A \leq 1$ and $28° \leq B \leq 32°$. And when $A \geq 1.5$ and $18° \leq B \leq 24°$, C_{Lmax}

was 1.03~1.18.

5. The ratio between lift force and drag force(C_L/C_D) was increased as each aspect ratio of all the models was increased.

6. For a model with A=1/2, an increase in B caused an increase in C_L until C_L has reached the maximum. Then there was a tendency of a gradual decrease in the value of C_L and in particular, the rectangular kite showed a more rapid decrease.

7. For a model with A=2/3, the tendency of C_L was similar to the case of a model with A=1/2 but the tendency was a more rapid decrease than those of the previous models.

8. For a model with A=1, an increase in B caused an increase in C_L until C_L has reached the maximum. Soon after the tendency of C_L decreased dramatically except for the triangular model.

9. For a model with A=1.5, the tendency of C_L in accordance with B was various in the rectangular model and trapezoid. In the triangular model with $20° \leq B \leq 50°$, the change of C_L was very small as 0.75~1.22.

10. For a model with A=2, the tendency of C_L in accordance with B was almost the same in the rectangular, trapezoid and triangular model. There was no considerable change in the models with $20° \leq B \leq 50°$.

11. The tendency of kite model's C_L in accordance with increase of B was increased rapidly than plate models until C_L has reached the maximum. Then C_L in the kite model was decreased dramatically but in the plate model was decreased gradually. The value of C_{Lmax} in the kite model was higher than that of the plate model, and the kite model's attack angel at C_{Lmax} was smaller than the plate model's.

12. The inverted model's C_L in accordance with increase of B reached the maximum rapidly, then decreased gradually compared to the non-inverted models. Others were decreased dramatically.

13. For comparison of the kite which has each other camber ratio, in the rectangular kite, the tendency of C_L in accordance with B was various. In the triangular kite, the pattern of C_L was increased gradually.

14. The drag force in accordance with increase of B was increased in all models. The force was small at a low camber ratio, but the value of C_L/C_D was high.

15. In the models which has camber ratio above 0.15%, the wave motion of canvas was observed frequently at a small attack angle.

16. According to the measured result from PIV, the velocity outside the curved area was high in all canvas models. The maximum velocity was observed at the attack angle of the maximum lift force without a vortex.

The vortex motion occurred at the rear edge of the models. As the attack angle increased, this phenomenon was considerable. At larger angle than the attack angle of the maximum lift force, the lift force was reduced because the vortex occurred in the after area of curved side, and the state began to be unstable.

B. The visualizing test of the canvas kite using the PIV and CFD

1. According to comparison of the measured and analyzed results from mechanical tests, PIV test and CFD test, the results of all test were similar.

2. The numerical results of C_L and C_D were 5~20% less than those of the tests with B=10, 20 and 30. In particular, B=40 showed the 20% discrepancy.

3. The numerical results of the ratio of drag and lift were 8~13% less than those of the tests with B=10 and 10% less than those of the tests with B=20, 30 and 40.

4. Pressure distribution gradually became stable in B=10. In particular, the rectangular and triangular types had the centre of the high pressure field towards the leading edge and the inverted triangular type had it towards the trailing edge.

5. In case of the rectangular and triangular kites with B=20, vortex by the boundary layer separation was seen in the leading edge and the flow

towards the trailing edge was more turbulent. But, the inverted triangular typed kite was seen to be stable without any boundary layer separation or turbulence and it also showed a smooth pressure difference in the suction/pressure side.

6. The increase of the attack angle resulted in the eddy in order of the rectangular, triangular and inverted triangular type. The magnitude of the eddy followed the same order.

7. The effect of edge-eddy was biggest in the triangular type followed by the rectangular and then the inverted triangular type.

C. The application test of the canvas kite to the fishing gear

1. The camber showed a gradual increase with an increase of fluid velocity. There was a big discrepancy in B=20 unlike B=30.

2. Even if the kite retreats along the fluid flow, there is little relationship with the velocity change.

3. Lifts tested with the kites were bigger and drags were smaller than those of the tests with the float only.

The obtained results after the analysis of above all, can be summarized as follows :

1. In the relationship between aspect ratio and lift force, the attack angle which had the maximum lift coefficient was large at the small aspect ratio models, At the large aspect ratio models, the attack angle was small.

2. The action point of dynamic pressure in accordance with the attack angle was close to the rear area of the model with the small attack angle, and with large attack angle, the action point was close to the front part of the model.

3. In the effect of camber to lift force, as the flow direction in the rear edge of the model moved downwards by a change of camber and attack angle, the lift force was increased.

4. The kite as the buoyancy device or the opening device will be very useful when the appropriate applications and the stability are satisfied.

5. A half-cone typed kite with B=20 is most recommended with the anticipation of the big C_L / C_D and the stability.

제1장 서 론

1.1. 연구 배경

2차 세계대전 이후, 어업은 선박의 대형화와 고성능화, 자재의 다양화, 기기 및 각종 계측기술의 발달로 과거에 비하여 새로운 어구어법의 개발 및 개량이 활발히 이루어져 왔다. 그 중에 어구에 가장 큰 변화를 주게 된 것은 합성수지의 발달일 것이다. 천연섬유에 비하여 강하고 마찰이 적은 합성섬유는 그물의 재료로서 매우 적합하였으며, PVC 등 여러 가지 재질의 수지가 개발되어 각종 어구에 사용되었다. 그러나 그 중에서 대형 부자(浮子, float)나 철재로 된 전개판 또는 전개장치 등은 가격, 조업 중 안전성 등의 문제가 있어 어구 개량의 여지가 여전히 남아있다고 하겠다.

트롤, 저인망 등의 어업은 그물을 예망할 때 그물의 입구를 상하좌우로 전개시켜야 하는데 위쪽으로 벌리기 위해 보통 PVC 부자를 사용하고 있으나, 가격이 비싸고 부피가 크며 양망 시 파망(破網)의 원인이 되고 있으며, 수심이 깊은 곳에서 수압에 의해 파손되는 경우도 있다. 이와 관련한 연구로 PVC 부자를 대신하여 캔버스 카이트(이하 '범포'라 한다)의 유체력으로부터 발생하는 양력을 어구 전개에 이용한 연구(光沢 등, 1996; 유 등, 2003)와 곡면을 한 덮개, 반원추 등과 비슷한 모양의 플라스틱을 부력재로 사용한 연구(Catasta, 1959; Edwards, 1987; Lange, 1989) 그리고 익형 부력체를 이용한 카이트에 대한 연구(권, 1995) 등이 있다. 또 전개판 대신 범포를 사용하거나(井上 등,

2002) 범포를 날개그물 앞쪽에 부착하여 그물이 전개되도록 한 연구(松田 등, 1988, 1989; 胡 등, 1989)와 이것과 유사한 방법으로 외끌이기선저인망의 전개장치로 사용한 연구(辛 등, 1988) 등이 있다. 그 동안의 연구로 범포를 부력재로 사용하는 트롤이 이미 개발되어 사용중이지만, 널리 보급되지는 못하고 있는 실정이며 충분한 연구가 더 필요하다.

위 연구 사례들은 범포를 어구에 부착하여 어구 전체의 형상 변화를 관찰한 연구가 대부분이다. 이러한 점에서 향상된 성능의 어구를 개발하기 위해서는 범포 자체에 대한 유체역학적 특성에 대한 연구도 필요할 것이다. 범포 자체의 유체역학적 특성에 관하여 石崎 등(1999)이 총 5가지 형태의 범포에 대해 영각에 따른 형상 변화 및 양·항력을 측정한 연구 사례가 있으나, 이와 같은 관련 연구는 많지 않다. 또한, 범포에 대한 기초적 연구는 범선의 돛에 대한 연구(Yoshimura, 2002)나 자원관리형 어구 개발 연구(Madsen, 2001, 2002)처럼 여러 가지 분야에 응용될 수 있을 것이다.

한편, 최근 계측장비의 발달과 컴퓨터의 성능 향상으로 유체의 복잡한 흐름을 가시화하는 방법이 많이 개발되었으며, 이 중 PIV(particle image velocimetry)와 같은 방법은 조선·해양분야의 연구에는 오래 전부터 이용되었으나 어구 관련 연구에 이용한지는 얼마 되지 않았는데 安 (2000)의 오징어채낚기 물돛 개량 연구와 朴 (2003)의 전개판의 유체역학적 특성 연구에 이용되었다.

또, 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)의 발달로 실험적 방법을 행할 수 없는 해석도 컴퓨터에 의한 simulation 작업으로 해석할 수 있

게 되었다. 바로 언급한 두 연구도 이러한 방법을 사용하였으며, 權(1993)이 離散渦法을 이용하여 전개판 주위의 흐름을 해석한 것이 어구 관련 연구로는 처음이었다.

본 연구는 위에서 언급한 여러 가지 실험 및 해석방법으로 범포에 작용하는 힘과 모형 주위의 유체흐름을 측정하여 임의 형태의 모형을 만난 유체가 그 주위에서 어떻게 운동하는지를 알아보고 그 현상을 양·항력 측정 결과와 비교해 유체의 흐름 방향과 모형에 작용하는 힘의 상관관계를 해석해 보고자 하였다. 또, 여러 가지 범포 중 어구에 적용이 가장 용이하다고 판단되는 것을 선택하여 어구에 부착하는 방법을 고안하고 그와 같은 방법으로 취부장치에 설치하여 양·항력 측정 실험을 통해 성능을 서로 비교하였다.

1.2. 연구의 목적 및 개요

어구는 성능향상, 효율성, 조업안전, 경제성 등 여러 가지 필요에 의해서 개발, 개량되고 있다. 더불어 최근 범포를 자루형 예망 어구에서 PVC 부자나 전개판을 대신하는 전개장치로 사용하려는 연구가 여러 곳에서 진행중이다. 그런데, 범포를 부착한 어구 전체의 성능에 관해서는 다양한 연구가 시도되고 있으나 어구 설계 전 단계에서 꼭 필요한 범포 자체의 유체역학적 특성에 대한 연구는 미미하다.

따라서, 본 연구의 목적은 범포가 사용되는 어구 개발 및 개량에 있어서 목적에 맞고 효율적인 범포의 형태와 크기를 선택할 수 있는 설계 자료를 확보하기 위하여 여러 가지 범포에 대하여 그 유체역학적 특성과 범포 주위의 흐름을 해석함으로써 범포가 수중 흐름 속에서 가지는 기초적 특성을 구명하는데 있다.

한편, 본 연구의 중점 대상은 범포이며, 평판(plate)은 범포의 비교 대상으로서 같이 실험·분석하였다.

연구는 회류수조에서 역학적 특성 실험, 가시화 실험, 유한체적법에 의한 수치시뮬레이션으로 진행하였다.

역학적 실험은 모형별 양력계수, 항력계수, 양항비를 비교·분석할 목적으로 여러 가지 평판 및 범포 모형을 제작하고 육분력계 등의 역학적 계측장비를 사용하여 시행하였다.

가시화 실험은 역학적 실험의 양·항력 값과 모형 주위의 흐름 패턴을 상호

비교하여 그 관계를 분석할 목적으로 모형별로 비교적 유동장 해석이 필요하다고 판단되는 영각(迎角)을 결정한 다음, 영각에 따른 모형 주위의 흐름을 레이저, CCD 카메라 등 PIV 가시화 장치를 이용하여 계측하였다.

수치시뮬레이션은 PIV 실험결과를 비교·검증하기 위하여 수조실험과 동일한 조건에서 모형 설계 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 할 모형을 설계한 다음, 해석 프로그램을 이용, 모형별 영각에 따른 모형 주위의 유동장을 해석하였다.

어구 적용 실험은 여러 가지 범포 중 어구에 적용했을 때 가장 용이하다고 판단되는 것을 트롤에 실제로 부착하였을 때를 가정하여 양·항력 특성실험을 행하고 유속에 따른 범포의 형상 변화를 관찰하였다.

본 연구의 개요를 보면, '제 1 장 서론'에서는 연구의 배경, 목적, 개요에 대하여 설명하였다.

'제 2 장 양·항력 특성 실험'에서는 기본적인 형태라 볼 수 있는 사각형, 사다리꼴, 삼각형으로 종횡비에 따라 스테인리스와 범포로 각각 제작하고, 수직순환형 회류수조에서 육분력계를 이용하여 양력과 항력을 측정하였다. 그리고 실험결과를 이용하여 재질, 형태, 종횡비, 만곡도에 따라 변화하는 양력계수, 항력계수, 양항비를 분석하여 각 모형별 특성을 제시하고 전개장치로서 적합한 모형도 제시하였다.

'제 3 장 PIV와 CFD에 의한 유동장 해석 실험'에서는 양·항력 실험에서 사용한 일부 모형에 대하여 모형 주위를 흐르는 유체의 유동을 입자영상속도법(PIV)이라는 가시화 방법을 이용하여 계측하고 해석 프로그램을 이용하여 수

조실험과 동일한 조건으로 수치시뮬레이션을 수행함으로써 모형을 만난 유체가 어떻게 운동하는지 알아보고 양·항력 측정 결과와 비교해 유체의 흐름 방향과 모형에 작용하는 힘과의 관련성을 설명하였다.

'제4장 범포의 어구 적용 실험'에서는 양·항력 특성 실험, PIV와 CFD에 의한 유동장 가시화 실험에서 나온 결과를 분석하여 여러 가지 범포 중 어구에 적용했을 때 가장 용이하다고 판단되는 한 개 모형을 트롤에 실제로 부착하는 방법을 제시하고 동일한 방법으로 취부장치에 거치하여 각도별 양·항력 특성 실험을 행하였다. 또, 그 결과를 분석하여 부력재로서 가장 적합한 범포 및 그 부착방법에 대하여 고찰하였다.

'제5장 종합고찰'에서는 본 연구의 결과를 종합적으로 분석·고찰하여 최종 결론을 제시하였다.

제2장 양·항력 특성 실험

2.1. 서론

범포를 어구에 부착하여 사용하는 대부분의 경우는 어구를 예망(曳網)할 때 범포에 생기는 유체력을 이용하여 어구를 전개시키고자 할 때이다. 즉, 안강망에서는 그물 입구의 좌우에, 트롤에서는 그물 입구의 위쪽 또는 날개그물 앞쪽에 부착하여 전개장치로 사용된다. 따라서, 범포를 효과적으로 어구에 사용하기 위해서는 범포 자체에 작용하는 양력과 항력 등 역학적 힘의 특성을 아는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 보면, 범포도 전개판의 경우와 마찬가지로 전개력이 크고, 항력이 작으며, 안정성이 좋은 것이 전개장치로서 효과적이다.

또, 어구는 전체가 유연 구조물이므로 수중에서 여러 가지 힘에 의해 형상이 쉽게 변할 수 있으며 이에 따라 어구에 부착한 범포의 영각도 변하게 될 것이다. 이 때 영각의 변화에 따라 전개력의 변화가 큰 것은 어구 전체에 작용하는 힘의 균형을 맞추기 힘들어 사용하기 부적합하다. 범포의 전개력은 범포의 크기로서 어느 정도 조절이 가능하므로, 결국 전개력과 양항비가 비록 작을지라도 넓은 영각 범위에서 고른 전개력을 갖는 것이 우수한 성능을 나타낼 수 있다고 생각된다.

현재 해외 어선에서 범포를 부착한 어구(일명 kite net)를 사용하고 있는데, 그물입구 쪽에 위치한 천정망의 앞쪽에 한 개의 커다란 범포를 부착하여 부력을 얻도록 한 것과 두 개의 범포를 날개그물 쪽으로 조금 띄워서 부착한 것이

있다. 이러한 그물은 예망 중 좌우로 방향을 바꿀 때 어구의 형상이 비틀리는 단점을 가지고 있으며 네트드럼을 사용하기에도 불편하다. 이것은 비틀림이 어려운 범포 1~2개를 크게 사용함으로써 발생되는 것이다. 따라서 작은 범포를 여러 개 다는 것도 이러한 문제를 해결할 수 있는 좋은 방안이 될 것이며, 아울러 개별식 범포의 여러 가지 형태에 대한 역학적 특성도 구명할 필요가 있다.

한편, 항공역학에서는 날개 및 비행기 몸체가 될 수 있는 다양한 형태의 고형체에 대하여 양·항력 실험을 한 사례(Hoerner, 1975)가 있으며, 트롤 전개판의 양·항력에 대하여 종합적으로 기술한 사례(李, 1989c; 松田, 2001)도 있다. 범포의 형태별 특성 구명에 꼭 필요한 범포 자체에 대한 양·항력 실험은 방법과 해석에 있어서 이러한 관련 연구와 아주 유사하다 할 수 있다. 보통의 양·항력 실험은 모형과 물의 흐름이 이루는 각도를 달리하면서 흐름과 반대되는 방향의 항력과 그것에 수직으로 작용하는 전개력을 측정하고 각도별 양·항력계수 및 양항비를 계산한다.

따라서, 본 장에서는 여러 가지 범포의 종횡비, 다각형 종류에 따른 유체역학적 특성을 구명하고자 사각형, 사다리꼴, 삼각형으로 모형 평판과 범포를 제작하여 양·항력 실험을 실시하고 양력계수, 항력계수 및 양항비를 계산하여 각 모형별 특성을 알아봄으로써 전개장치로서 적합한 모형을 파악하고자 하였다.

2.2. 재료 및 방법

2.2.1. 실험 수조

실험 수조는 국립수산과학원에 설비된 수직순환형 회류수조로서 수조의 기본적인 사양을 Table 2-1에 나타내었다. 수조 본체의 크기는 25.1(L)×4.5(W)×8.3(D) *m* 이고 약 280 *ton* 의 물을 적재하고 있으며 관측창의 크기는 8.0(L)×2.8(W)×1.4(D) *m* 이다. 설정 가능한 유속은 0~3.2 *m/s* 이며, 단면 유속분포는 1.04 *m/s* 에서 ±2.0 %, 2.05 *m/s* 에서 ±1.0 % 이내이다. 고속기동이 가능하며 기포제거장치, 표면류가속장치, 제파판 등이 설치되어 있다.

본 회류수조의 관측부는 옆면뿐만 아니라 밑면도 투명한 창으로 되어 있어 본 연구의 가시화 실험이 가능하도록 되어 있다. 실험 수조의 개략적인 제원과 구성은 Fig. 2-1과 같다.

Table 2-1. Principal characteristics of the circulating water channel

terms	specifications
water capacity (*ton*)	280
measuring window (*m*)	8.0(L)×2.8(B)×1.4(H)
depth (*m*)	1.4
current velocity (*m/s*)	0~3.2
impeller & motor	2 impellers(4 blades), AC 90 kW×2

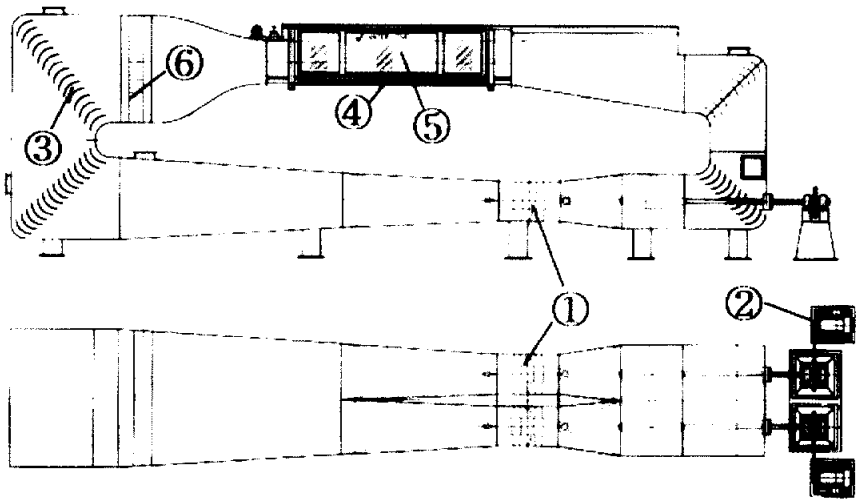


Fig. 2-1. Schematic drawing of vertical circulating water channel.
① impeller ② AC motor ③ guide vane
④ under observation panel ⑤ side observation panel
⑥ rectifying netting

(a) side view (b) upper view

Photo 2-1. The view of vertical circulating water channel.

2.2.2. 모형 평판 및 범포

본 실험에서는 범포처럼 흐름 중에 만곡이 생기는 경우와 만곡이 전혀 없는 경우를 비교해 보기 위하여 범포와 형태 및 크기가 같은 스테인리스(stainless) 평판도 범포와 같이 제작하여 실험하였다.

평판은 비교적 강도가 큰 오스테나이트-페라이트(austenite-ferrite) 2상계 스테인리스강(크롬 18~30 %, 니켈 6~12 %, 탄소 0.10 % 이하)을 사용하였다.

평판의 형태 및 크기를 Fig. 2-2에 나타내었다. 평판은 종횡비가 각각 1:2, 1:1.5, 1:1, 1.5:1, 2:1 인 사각형 5종(177×354 mm, 204×306 mm, 250×250 mm, 306×204 mm, 354×177 mm)을 제작하고 사각형 모형에 내접하는 이등변삼각형 모형 5종도 제작하였다. 여기서 실험 시 모형에서 물이 흐르는 방향과 수직인 방향의 길이를 익장(翼長), 평행한 방향의 길이를 현장(弦長)이라 한다. Fig. 2-2에 나타낸 바와 같이 각 모형은 Rs1~Rs5, Ts1~Ts5로 구별하였으며, Ts 모형을 180° 회전하여 실험할 경우, 식별자 r을 덧붙여 Tsr로 표기하고 전자를 삼각형, 후자를 역삼각형이라고 정하였다.

사각형 모형의 면적은 0.0625 m^2, 삼각형 모형의 면적은 0.03125 m^2로 각각 모두 동일하다. 두께는 3 mm이며 차후, PIV(Partical Image velocimetry) 측정을 위하여 검은색 무광 페인트를 도장하고 취부 장치와 줄로 묶을 수 있도록 각 모서리마다 직경 2 mm의 구멍을 만들었다.

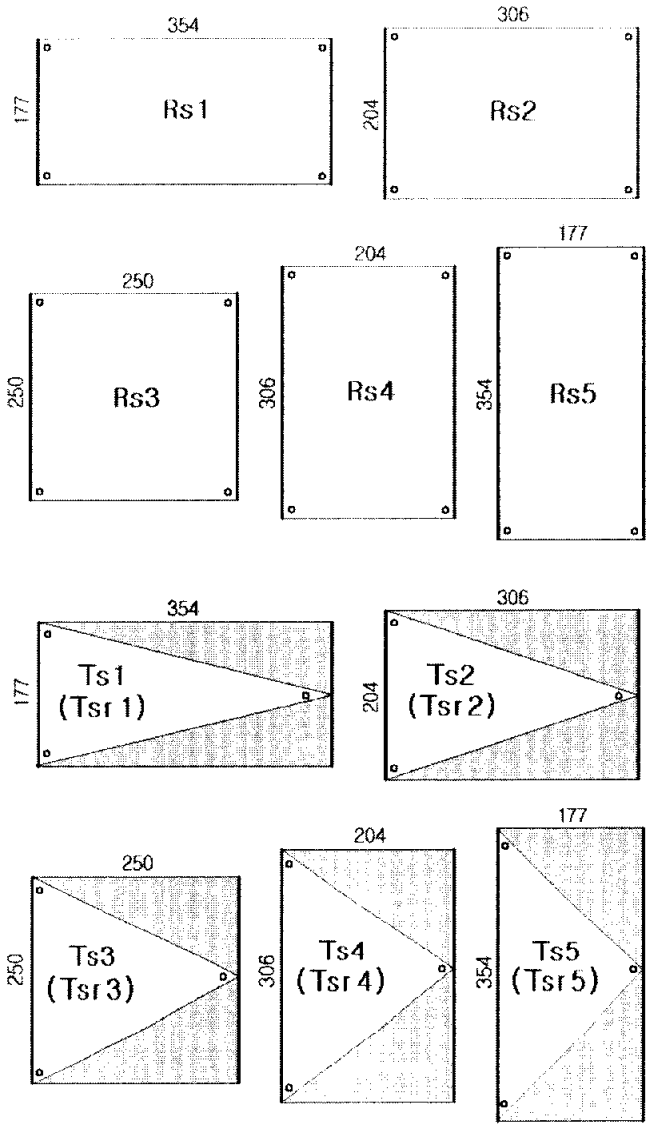


Fig. 2-2. The design drawing of plate models.

본 실험에서 사용한 범포는 신축이 거의 없고 물도 잘 통과되지 않는 것을 사용하였다. 범포의 재질은 폴리아미드(polyamid, PA) 계열이며, 두께는 1 mm이다. 또 표면 마찰의 영향을 최소화하기 위하여 가는 원사(10번수)로 짜여진 것을 사용하였으며, PIV 측정을 위하여 짙은 암록색인 것을 사용하였다. 수중에서의 비중은 약 1.19이었다.

모형 범포의 형태 및 크기는 Fig. 2-3과 같다. 모형 범포는 크게 사각형, 사다리꼴, 삼각형으로 나눌 수 있는데 평판과 크기가 같은 모형 범포 10종(R1~R5, T1~T5)과 밑변(윗변 길이는 밑변의 절반임)과 높이의 길이가 서로 다른 사다리꼴 모형 범포 5종(Z1~Z5)을 제작하였다. 또 흐름을 받고 있는 범포의 만곡(camber)에 따른 역학적 특성을 알기 위하여 크기가 250×252 mm, 250×257 mm, 250×264 mm, 250×275 mm, 250×287 mm인 사각형 모형 범포 5종(CR1~CR5) 및 삼각형 모형 범포 5종(CT1~CT5)도 제작하였다.

이 모형에서 치수의 계산은 Fig. 2-5와 같이 수직인 흐름에 자유롭게 만곡을 이루는 범포의 단면은 포물선에 가장 가깝다고 생각하여 각각 a 길이가 b 길이의 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %인 값에 해당하는 $\widehat{ABC}$의 길이를 식 (2-1)을 이용하여 계산하였다.

$$\widehat{ABC}=\frac{1}{2}\sqrt{b^2+16a^2}+\frac{b^2}{8a}\ln\left(\frac{4a+\sqrt{b^2+16a^2}}{b}\right) \tag{2-1}$$

또, 삼각형 평판과 마찬가지로 사다리꼴, 삼각형의 밑변을 물이 흘러오는 쪽으로 위치시켰을 때를 기본으로 하고 반대의 경우를 역사다리꼴, 역삼각형이라고 정하였다.

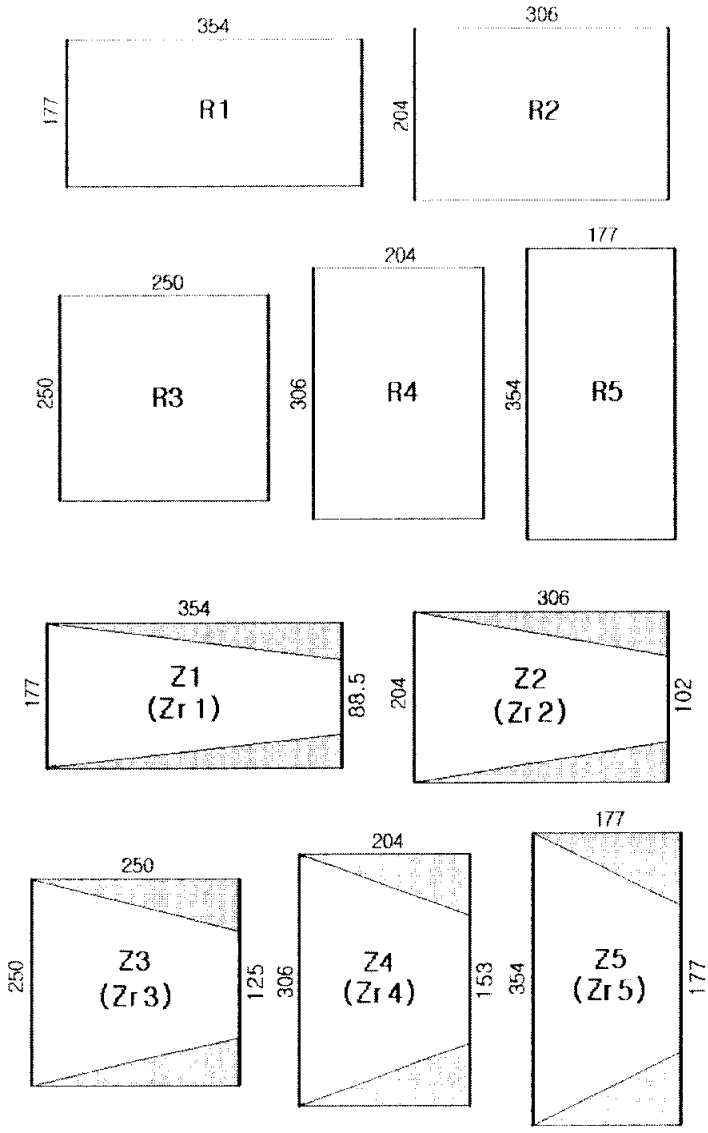


Fig. 2-3. The design drawing of canvas kite models.

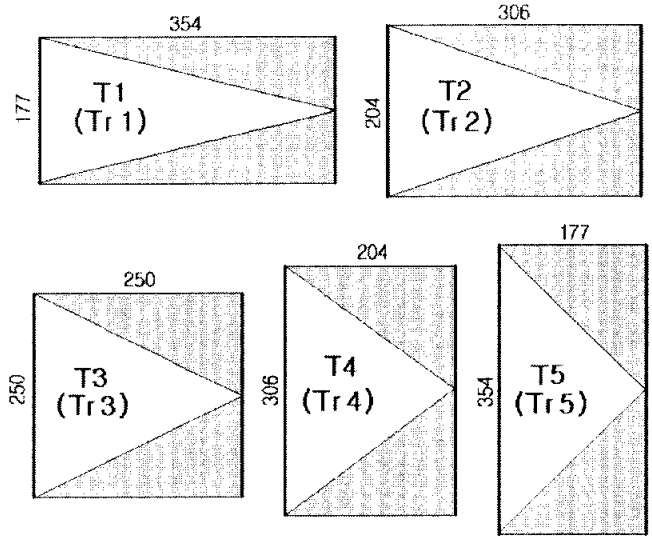


Fig. 2-3. Continued.

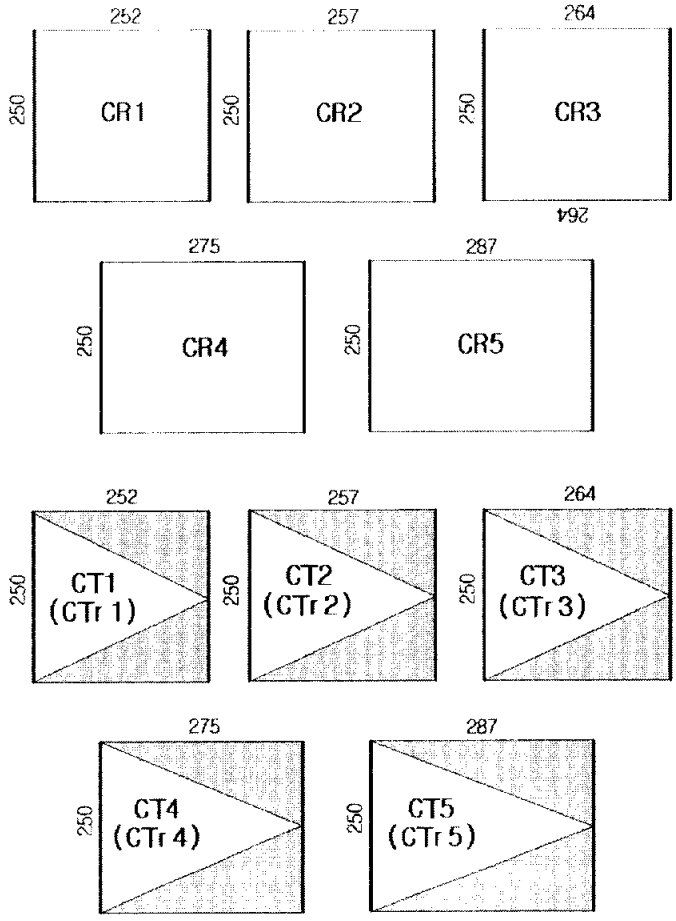


Fig. 2-3. Continued.

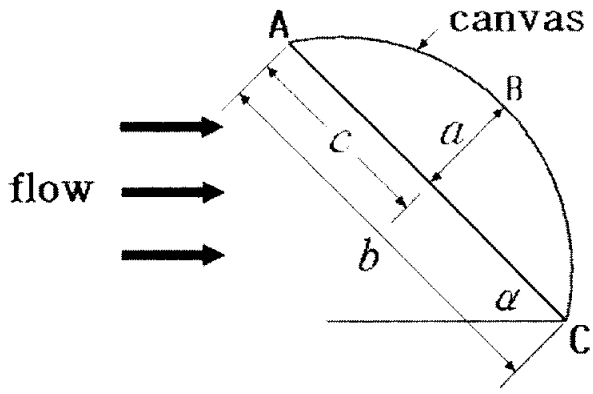


Fig. 2-4. The camber of canvas kite in the flowing water.

한편, 실험 중 범포 모형의 실제 만곡도를 구하기 위하여 회류수조 아래쪽에 CCD 카메라를 설치하고 영각(α) 20°, 40°, 60°일 때 사진을 찍고 촬영된 사진을 이용하여 Fig. 2-4에서 만곡도 r은 a/b, 만곡꼭지점 위치 p는 c/b으로 계산하여 분석하였다.

한편, 본 실험에서는 각 모형 범포에서 익장에 해당하는 변은 일직선으로 고정시키고 나머지 부분은 물의 흐름에 자연스럽게 만곡이 생기도록 하여 실제로 범포를 어구에 사용할 경우와 가깝게 하면서 결과 분석도 용이하도록 하였다.

모형 범포에서 일직선상에 놓일 변은 천의 가장자리를 접어서 재봉을 하였는데 직경 4 mm의 스테인리스 봉이 정확히 들어가도록 제작하였으며 매끈한 쪽이 물의 흐름을 받도록 하여 접은 선의 영향을 최소화하였다.

이상과 같이 모형의 형태 및 크기에 따라 나뉘어지는 모형 55종을 각 모형을 나타내는 식별문자로 정리하여 Table 2-2에 나타내었다.

Table 2-2. The used models in efficiency test by its shape and size

material & shape		size (span × chord, *mm*)				
		177 × 354	204 × 306	250 × 250	306 × 204	354 × 177
stainless plate	rectangle	Rs1	Rs2	Rs3	Rs4	Rs5
	triangle	Ts1	Ts2	Ts3	Ts4	Ts5
	triangle	Tsr1	Tsr2	Tsr3	Tsr4	Tsr5
canvas kite	rectangle	R1	R2	R3	R4	R5
	trapezoid	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
	trapezoid	Zr1	Zr2	Zr3	Zr4	Zr5
	triangle	T1	T2	T3	T4	T5
	triangle	Tr1	Tr2	Tr3	Tr4	Tr5
	-	250 × 252	250 × 257	250 × 264	250 × 275	250 × 287
	rectangle	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5
	triangle	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
	triangle	CTr1	CTr2	CTr3	CTr4	CTr5

2.2.3. 측정 장치

본 실험의 양·항력 측정 장치를 Fig. 2-5에 나타내었다. 물의 흐름에 의하여 모형에 작용하는 XY분력을 측정하는 장치로는 6분력계(Denshikogyo Co., DL-61025, 10 kg)와 모형을 거치하는 취부장치(Fig. 2-6)로 되어 있는데, 취부장치에 부착된 직경 22 *mm* 스테인리스 봉으로 6분력계와 연결되어 있다. 취부장치는 용접에 의한 뒤틀림이 없도록 용접 없이 재료를 절단 후 조립하였는데, 두께 10 *mm* 인 스테인리스 강판(페라이트계 스테인리스강 : 크롬 12~27 %, 탄소 0.20 % 이상)을 폭 10 *mm* 로 레이저로 절단하여 전체 프레임(1,000×500 *mm*)을 만들고 물이 흘러오는 쪽 프레임은 봉이 되도록 가공하였으며 프레임 내부에 모형을 부착할 수 있는 직경 4 *mm* 스테인리스 봉 2개를 수직으로 나란히 부착하였다. 프레임과 스테인리 봉의 연결은 조임장치를 하여 단단히 연결될 수 있도록 제작하였으며, 육분력계와 연결되는 직경 22 *mm* 봉도 프레임과 조립식으로 제작하였다.

또한, 육분력계에서 나오는 값은 증폭기(Kenek Co., VO-203A)와 A/D변환기(NI Co., PCI-6034E, 32ch-16bit)를 통하여 컴퓨터에 저장되도록 시스템을 구성하였으며 시스템 제어소프트웨어는 labVIEW 6.1를 사용하였다. 유속의 측정은 프로펠러 유속계(Kenek Co., VOT-400-20)를 사용하였다.

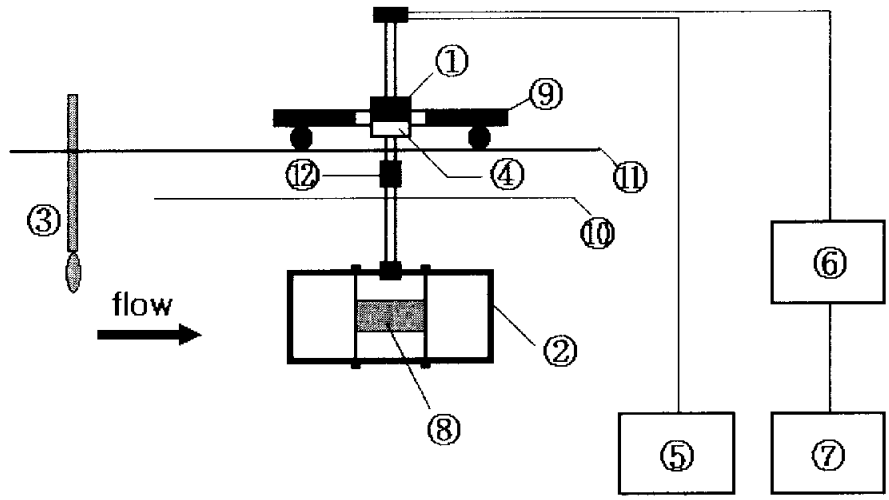


Fig. 2-5. Experimental set-up for the efficiency test.

① six component load cell ② installation frame ③ current meter
④ angle controller ⑤ angle control box ⑥ strain amplifier
⑦ computer ⑧ model ⑨ moving traverse ⑩ water line
⑪ moving rail ⑫ connector

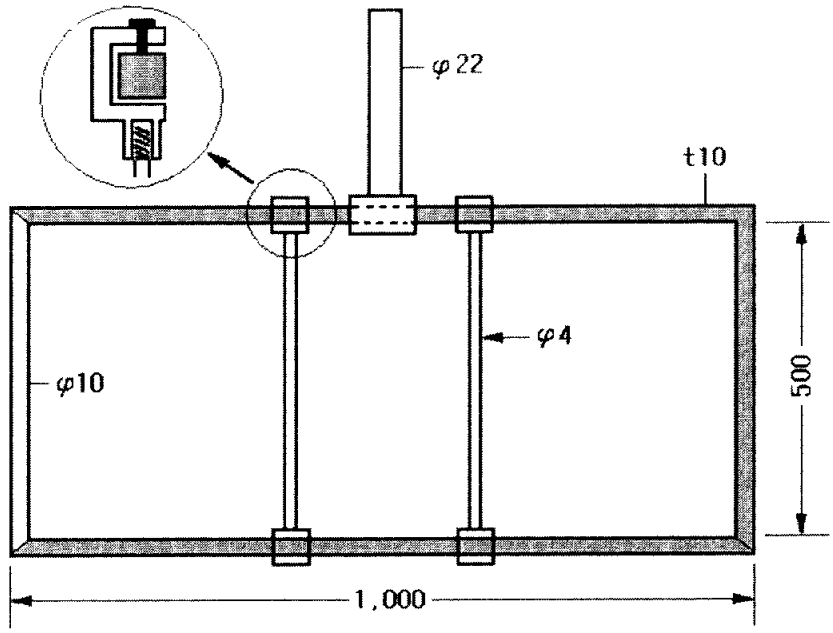


Fig. 2-6. The installation frame of the models.

2.2.4. 실험 및 분석 방법

모형 평판(15종) 및 범포(40종)의 영각별 양·항력을 측정하기 위하여 먼저 취부장치에 모형을 고정(CR1~CR5, CT1~CT5 모형은 $250\times250\ mm$ 크기로 취부에 설치함)시킨 후 취부를 육분력계에 장착하고 유속계를 사용하여 유속을 확인한 뒤, 양력과 항력을 측정하였다. 실험 중 영각의 조절은 육분력계에 부착된 각도제어장치를 labview 6.1을 사용하여 제어하였다.

수조 내 모형의 수평 위치는 좌우벽면으로부터 약 $1.4\ m$ 떨어지고 전후로부터 약 $4\ m$ 떨어진 수조의 중앙부이다. 또 육분력계가 센서로부터 힘의 작용점이 $0.6\ m$ 인 곳에서 가장 오차가 없으므로 모형의 수직 위치는 모형의 중심이 수심 $0.4\ m$ 가 되는 곳으로 정하였다.

실험에 사용할 유속을 결정하기 위해 R1, R5 모형에 대하여 $0.1\ m/s$ 간격으로 $0.1\sim1.0\ m/s$ 구간에서, 영각은 2° 간격으로 0~90°까지 양·항력을 측정하였고 그 결과를 이용하여 $0.6\ m/s$(레이놀즈수 $8.85\times10^4\sim1.77\times10^5$)를 다른 모든 실험의 유속으로 정하였다. 레이놀즈수의 계산은 식 (2-2)와 같으며, 동점성계수는 수온 13℃ 일 때의 값이다.

$$R=\frac{\rho lv}{\mu}=\frac{lv}{\nu}=\frac{(0.177\sim0.354)\times0.6}{1.2\times10^{-6}} \tag{2-2}$$

ρ : 밀도(kg/m^3), l : 길이(m), v : 유속(m/s),
μ : 점성계수($N\cdot s/m^2$), ν : 동점성계수(m^2/s)

양·항력 측정 실험은 모든 모형에 대하여 1초에 1,000개의 데이터를 20초간을 측정하였으며 영각 0~60° 구간에서 2° 간격으로 각도을 올리면서 측정

하고 다시 영각을 60°에서 0°로 낮추면서 측정하여 2회 측정하고 그 평균값을 취하였다.

양력계수(C_L), 항력계수(C_D), 양항비(C_L/C_D) 등은 측정된 양력과 항력으로부터 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho S V^2} \tag{2-3}$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho S V^2} \tag{2-4}$$

$$\frac{C_L}{C_D} = \frac{F_L}{F_D} \tag{2-5}$$

여기서, F_L은 양력(N), F_D는 항력(N), ρ는 물의 밀도(999 kg/m^3 ≒102 $kg \cdot s^2/m^4$), S는 모형의 최대 투영면적(m^2), V는 유속(m/s)이다.

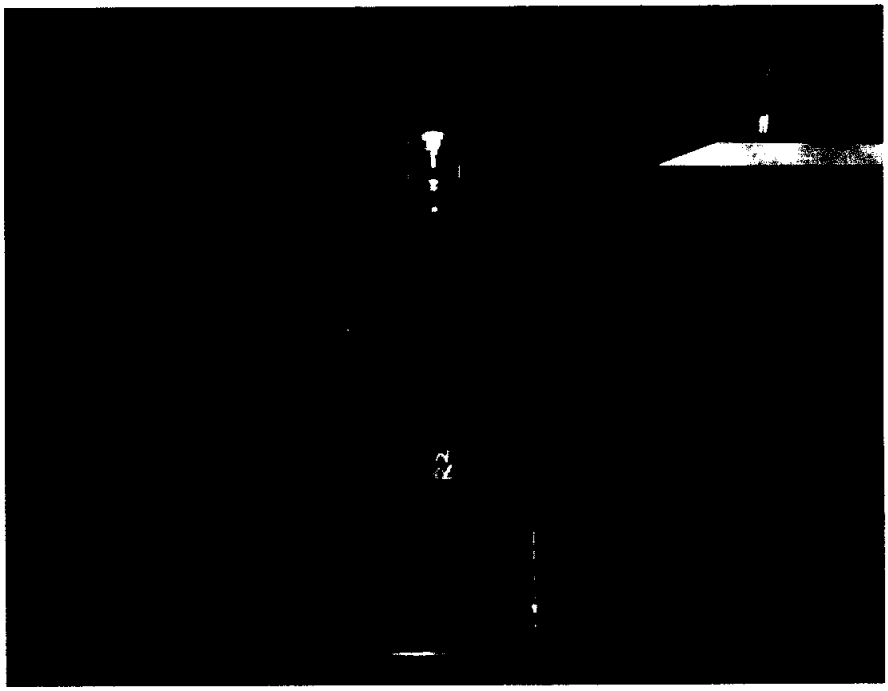


Photo 2-2. The view of the efficiency test of a model.

2.3. 결과 및 고찰

2.3.1. 범포 모형의 만곡꼭지점 위치 및 만곡도

각 범포 모형의 만곡꼭지점 위치 및 만곡도를 Table 2-3에 나타내었다. 영각이 커질수록 만곡꼭지점의 위치가 50%에 가까워지는 현상은 모든 모형에서 같았다. 그러나 영각 20도에서 직사각형 모형은 약 42%, 사다리꼴 모형은 약 36%, 역사다리꼴 모형은 약 47.5%, 삼각형 모형은 약 31%, 역삼각형 모형은 약 52.6%로서, 모형에서 물의 유체력을 많이 받을 수 있는 곳에서 만곡꼭지점이 만들어진다고 판단된다. 또, 작은 차이지만, 직사각형, 사다리꼴, 삼각형 모형에서는 종횡비가 클수록, 역사다리꼴, 역삼각형 모형에서는 작을수록 만곡꼭지점의 위치도 컸다.

또, 만곡도는 전 모형에서 종횡비가 클수록 컸으며, 직사각형, 사다리꼴, 삼각형 모형에서는 영각이 클수록 컸고 역사다리꼴 모형에서는 거의 차이가 없었으며 역삼각형 모형에서는 작을수록 컸다. 이것은 역사다리꼴, 역삼각형 모형에서 적은 면적을 차지하는 앞부분이 영각이 증가하여도 유체력의 증가가 크지 않기 때문으로 판단된다. 또 직사각형 모형이 사다리꼴 모형보다 컸는데 면적이 넓어서 많은 유체력을 받기 때문으로 판단된다.

Table 2-3. The vertex position of camber and camber ratio

model	attack angle					
	20°		40°		60°	
	p	r	p	r	p	r
R1	41.48	8.27	42.29	8.37	47.33	8.39
R2	41.65	8.35	42.44	8.43	47.20	8.57
R3	42.15	8.33	42.78	8.58	47.57	8.75
R4	42.37	8.45	42.69	8.75	47.52	8.84
R5	42.23	8.54	42.86	8.81	47.88	8.87
Z1	35.41	7.64	37.83	7.64	48.44	7.75
Z2	35.79	7.71	38.59	7.69	48.47	7.88
Z3	36.43	7.88	39.31	7.74	49.59	7.98
Z4	37.22	7.95	39.32	7.85	49.78	8.05
Z5	36.73	8.12	39.81	8.03	49.63	8.15
Zr1	47.75	7.66	46.55	7.64	48.82	7.64
Zr2	47.73	7.78	46.27	7.79	48.73	7.73
Zr3	47.62	7.82	46.25	7.80	48.41	7.82
Zr4	47.65	7.96	46.34	7.94	48.49	7.92
Zr5	47.59	8.10	45.71	8.10	48.40	8.04
T1	30.36	6.91	32.93	6.95	43.34	7.13
T2	30.77	7.04	33.56	7.11	43.37	7.24
T3	31.50	7.22	34.21	7.23	44.52	7.30
T4	32.12	7.27	34.38	7.32	44.78	7.40
T5	31.83	7.42	34.85	7.55	45.58	7.57
Tr1	52.72	7.07	51.60	6.96	50.92	6.85
Tr2	52.70	7.21	51.27	7.05	50.63	6.98
Tr3	52.60	7.27	51.15	7.20	50.41	7.12
Tr4	52.55	7.32	51.14	7.27	50.45	7.19
Tr5	52.57	7.51	50.79	7.48	50.30	7.37

* p: vertex position of camber(%), r: camber ratio(%)

2.3.2. 종횡비에 따른 양·항력 비교

종횡비에 따른 평판과 범포의 유체역학적 특성을 구명하고자 사각형, 사다리꼴, 삼각형 모양으로 종횡비를 1:2, 1:1.5, 1:1, 1.5:1, 2:1가 되도록 모형 평판과 범포를 제작하여 양·항력을 측정한 결과는 Table 2-4 및 Fig. 2-7, Fig. 2-8, Fig. 2-9, Fig. 2-10, Fig. 2-11, Fig. 2-12, Fig. 2-13, Fig. 2-14와 같다.

사각형 평판의 경우(Fig. 2-7), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:1 이하인 Rs1, Rs2, Rs3에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 40~42°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 1.5:1 이상인 Rs4, Rs5에서는 전자보다 빨리 증가하고 20~22°에서 최대값이 나타났다.

최대 C_L은 Rs1, Rs2, Rs3가 1.46, 1.54, 1.52이고 Rs4, Rs5가 1.11, 1.07로 전자의 경우가 컸으나 전자의 경우 양항비가 약 1.23~1.25이고 후자는 약 2.71~3으로서 종횡비가 1.5:1 이상인 모형이 전개장치로서 더 양호한 성능을 나타내었다.

사각형 범포의 경우(Fig. 2-8), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:1 이하인 R1, R2, R3에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 32~40°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 1.5:1 이상인 R4, R5에서는 전자보다 빨리 증가하고 18~22°에서 최대값이 나타났다.

최대 C_L은 R1, R2, R3가 1.79, 1.91, 1.75이고 R4, R5가 1.4, 1.24로 전자의 경우가 컸으나 전자의 경우 양항비가 약 1.41~2.01이고 후자는 약 3~3.4로서 종횡비가 1.5:1 이상인 모형이 전개장치로서 양호한 성능을 나타내었다.

이상에서와 같이 사각형 모형에서는 범포가 평판보다 C_L이 크게 나타났고 최대 C_L을 갖는 영각을 지나면 평판 모형은 C_L이 완만하게 감소하는 반면 범포 모형은 빨리 감소하는 경향이 나타났다.

사다리꼴 범포의 경우(Fig. 2-9), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1.5:1 이하인 Z1, Z2, Z3, Z4에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 34~44°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 2:1인 Z5에서는 전자보다 빨리 증가했다가 14~48°의 긴 구간에서 약 1 전후의 값을 나타냈다.

최대 C_L은 Z3가 1.89로 가장 컸으며 Z1, Z2, Z4는 약 1.7 전후였다. 최대 C_L을 갖는 영각에서 양항비가 가장 큰 모형은 Z4이며 그 값은 1.81이었다. 전개효율 면에서는 Z4가 가장 좋다고 할 수 있으나 안정성 면에서는 Z5가 더 양호한 성능을 나타내었다.

역사다리꼴 범포의 경우(Fig. 2-10), 영각에 따른 C_L의 변화는 Zr1, Zr2에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 36°, 34°에서 최대값이 나타났으며 Zr3에서는 32°에서 최대 C_L(1.74)이 나타난 후 급격히 떨어지는 특징을 보였다. 또 Zr4에서는 24°에서 Zr5에서는 18°에서 최대 C_L이 나타났으며 그 값은 Z3에 비하여 점점 작아졌다.

이상에서와 같이 사다리꼴과 역사다리꼴 범포 모형에서는 Zr1, Zr2, Zr3가 Z1, Z2, Z3보다 C_L이 조금 작게 나타났으며 최대 C_L이 나타나는 영각도 작았다.

삼각형 평판의 경우(Fig. 2-11), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:1 이하인 Ts1, Ts2, Ts3에서는 영각이 증가함에 따라 비교적 완만하고 일정하게 증가하다가 38~42°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 1.5:1 이상인 Ts4, Ts5에서는 전자보다 빨리 증가하였다가 20~50°의 긴 구간에서 약 0.85 전후의 값을 나타냈다.

최대 C_L은 Ts1, Ts2, Ts3가 1.29, 1.32, 1.26이고 Ts4, Ts5가 0.95, 0.91로 전자의 경우가 컸으나 전자의 경우 양항비가 약 1.16~1.33이고 후자는 약 1.70~1.79로서 종횡비가 1.5:1 이상인 모형이 전개장치로서 더 양호한 성능을 나타내었다.

역삼각형 평판의 경우(Fig. 2-12), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:1 이하인 Tsr1, Tsr2, Tsr3에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 36~38°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 1.5:1 이상인 Tsr4, Tsr5에서는 전자보다 빨리 증가하였다가 22°, 26°에서 최대값이 나타났다.

최대 C_L은 Tsr1, Tsr2, Tsr3가 1.46, 1.56, 1.46이고 Tsr4, Tsr5가 1.21, 1.05로 전자의 경우가 컸으나 전자의 경우 양항비가 약 1.31~1.45이고 후자는 약 2.01~2.53로서 종횡비가 1.5:1 이상인 모형이 전개장치로서 더 양호한 성능을 나타내었다.

이상에서와 같이 삼각형과 역삼각형 평판에서는 Tsr 모형이 Ts 모형보다 C_L이 조금 크게 나타났으며 최대 C_L이 나타나는 영각은 조금 작았다.

삼각형 범포의 경우(Fig. 2-13), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:1 이하인 T1, T2, T3에서는 영각이 증가함에 따라 비교적 완만하고 일정하게 증가하다가 46~48°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 1.5 이상인 T4, T5에서는 전자보다 조금 빨리 증가하였다가 20~50°의 긴 구간에서 약 1.1 전후의 값을 나타냈다.

최대 C_L은 T1, T2, T3가 1.75, 1.77, 1.67이고 T4, T5가 1.22, 1.07로 전자의 경우가 컸으나 전자의 경우 양항비가 약 1.26~1.33이고 후자는 약 1.40~1.45로서 종횡비가 1.5:1 이상인 모형이 전개장치로서 더 양호한 성능을 나타내었다.

역삼각형 범포의 경우(Fig. 2-14), 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:1 이하인 Tr1, Tr2, Tr3에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 28~32°에서 최대값이 나타난 반면, 종횡비가 1.5:1 이상인 Tr4, Tr5에서는 전자보다 빨리 증가하였다가 24°, 18°에서 최대값이 나타났다.

최대 C_L은 Tsr1, Tsr2, Tsr3가 1.59, 1.68, 1.44이고 Tr4, Tr5가 1.18, 1.03으로 전자의 경우가 컸으나 전자의 경우 양항비가 약 1.32~1.58이고 후자는 약 1.79~2.22로서 종횡비가 1.5 이상인 모형이 전개장치로서 더 양호한 성능을 나타내었다.

이상에서와 같이 삼각형과 역삼각형 범포에서는 Tr 모형이 T 모형보다 C_L이 조금 작게 나타났으며 최대 C_L이 나타나는 영각도 작았다.

종합적으로 분석해 보면, 종횡비가 1.5:1 이상인 모형과 이하인 모형의 영각

에 따른 C_L 변화의 패턴이 각각 분리되어 나타났는데, 전자의 경우가 후자보다 최대 C_L이 나타날 때의 영각이 작았으며, C_L의 크기는 작았으나 양항비는 모두 크게 나타나 전개장치로서 양호한 성능을 나타내었다. 또, 종횡비가 점점 증가할수록 최대 C_L이 나타날 때의 영각이 점점 작아지고 최대 C_L을 갖는 영각 이후에서 C_L이 작아지는 현상도 점점 빨라지는 것으로 나타났으며 각 모형의 형태별 C_L 변화 그래프의 패턴도 점점 비슷해지는 현상이 나타났다.

Table 2-4. The attack angle and the efficiency of test model in accordance with polygonal shape and aspect ratio

medel	attack angle (°)	C_{Lmax}	C_D	C_{Lmax}/C_D
Rs1	42	1.46	1.19	1.23
Rs2	42	1.54	1.25	1.23
Rs3	40	1.52	1.22	1.25
Rs4	22	1.11	0.41	2.71
Rs5	20	1.07	0.36	3.00
R1	40	1.79	1.26	1.41
R2	38	1.91	1.22	1.56
R3	32	1.75	0.87	2.01
R4	22	1.40	0.47	3.00
R5	18	1.24	0.37	3.40
Z1	44	1.68	1.24	1.35
Z2	42	1.73	1.19	1.45
Z3	40	1.89	1.17	1.61
Z4	34	1.65	0.91	1.81
Z5	38	1.09	0.75	1.45
Zr1	36	1.58	1.18	1.34
Zr2	34	1.57	1.03	1.53
Zr3	32	1.74	1.06	1.64
Zr4	24	1.60	0.72	2.23
Zr5	18	1.21	0.42	2.87

Table 2-4. Continued

medel	angle (degree)	C_{Lmax}	C_D	C_{Lmax}/C_D
Ts1	42	1.29	1.11	1.16
Ts2	40	1.32	1.07	1.23
Ts3	38	1.26	0.95	1.33
Ts4	30	0.95	0.56	1.70
Ts5	28	0.91	0.51	1.79
Tsr1	36	1.46	1.01	1.45
Tsr2	38	1.56	1.19	1.31
Tsr3	36	1.46	1.02	1.42
Tsr4	26	1.21	0.60	2.01
Tsr5	22	1.05	0.42	2.53
T1	46	1.75	1.38	1.27
T2	48	1.77	1.33	1.33
T3	46	1.67	1.32	1.26
T4	38	1.22	0.84	1.45
T5	38	1.07	0.76	1.40
Tr1	32	1.59	1.20	1.32
Tr2	32	1.68	1.20	1.40
Tr3	28	1.44	0.91	1.58
Tr4	24	1.18	0.66	1.79
Tr5	18	1.03	0.46	2.22

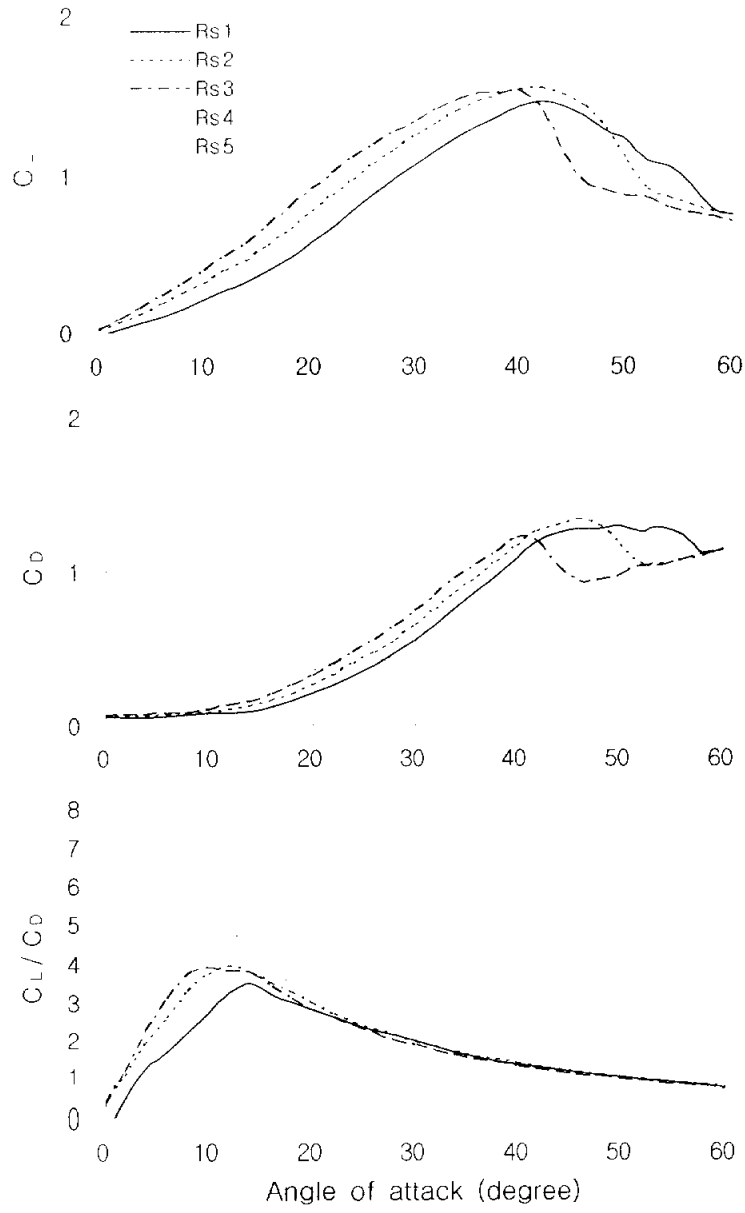


Fig. 2-7. The efficiency of the rectangular plate in accordance with the angle of attack.

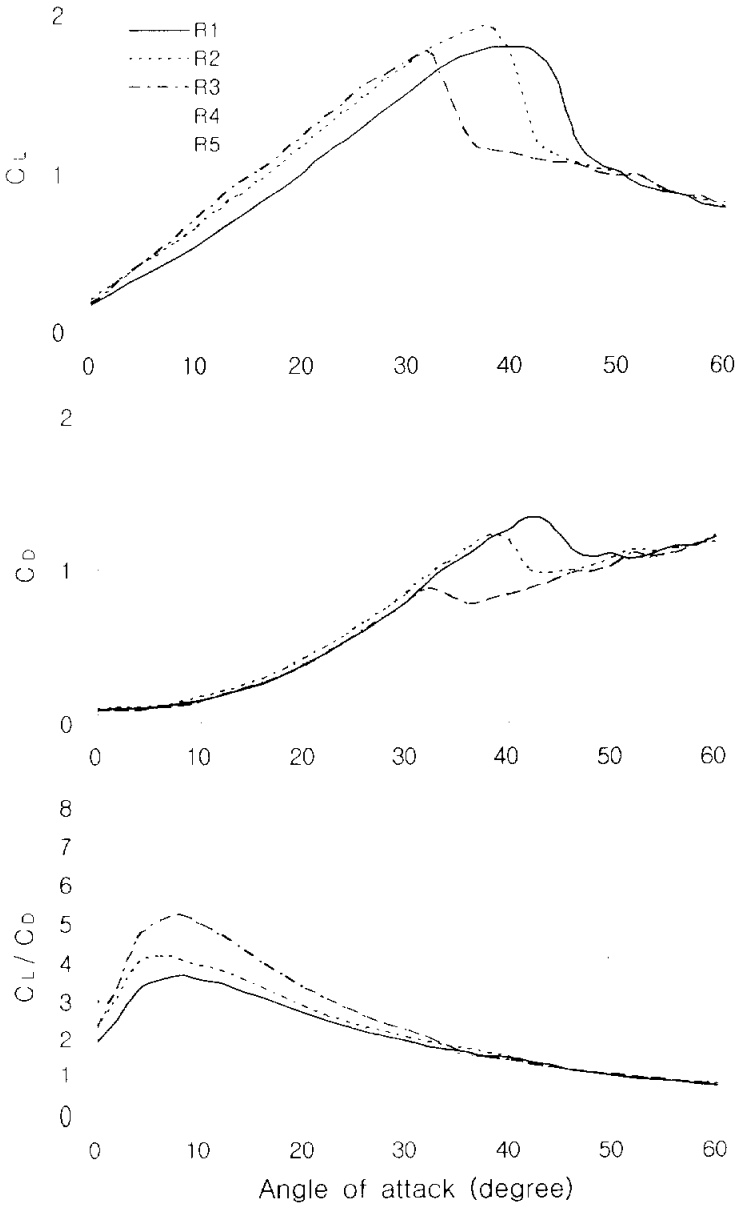


Fig. 2-8. The efficiency of the rectangular canvas kite in accordance with the angle of attack.

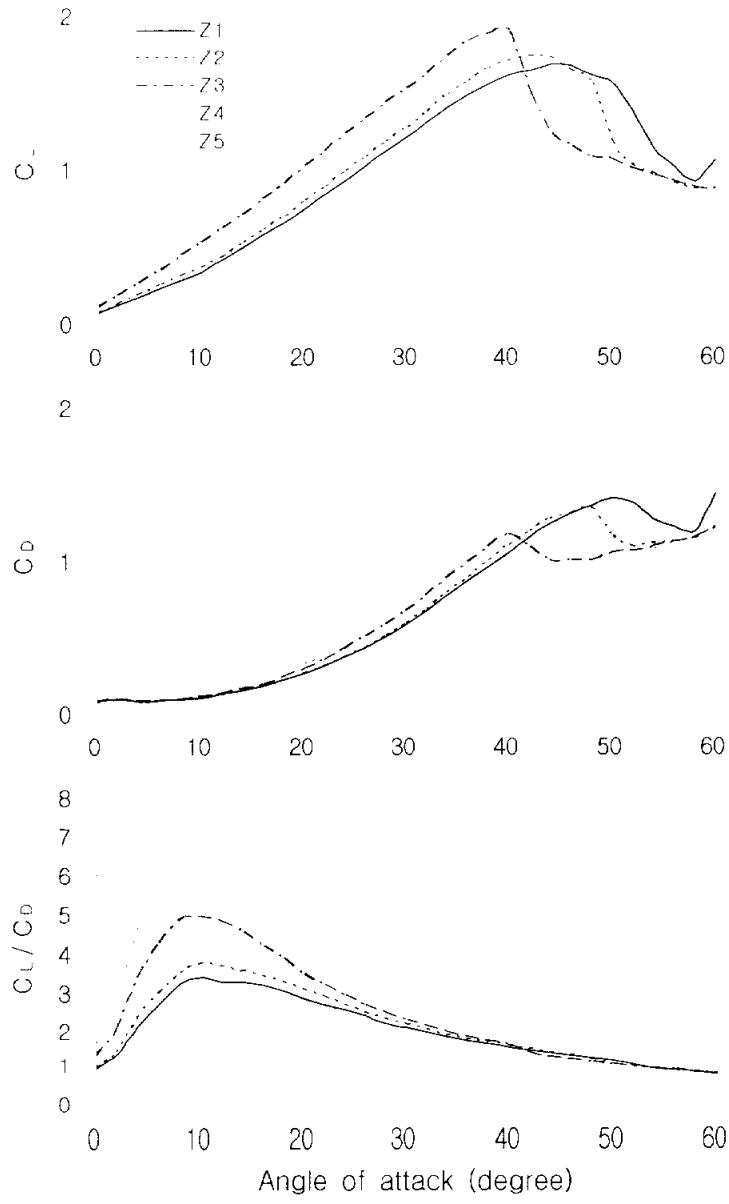


Fig. 2-9. The efficiency of the trapezoid canvas kite in accordance with the angle of attack.

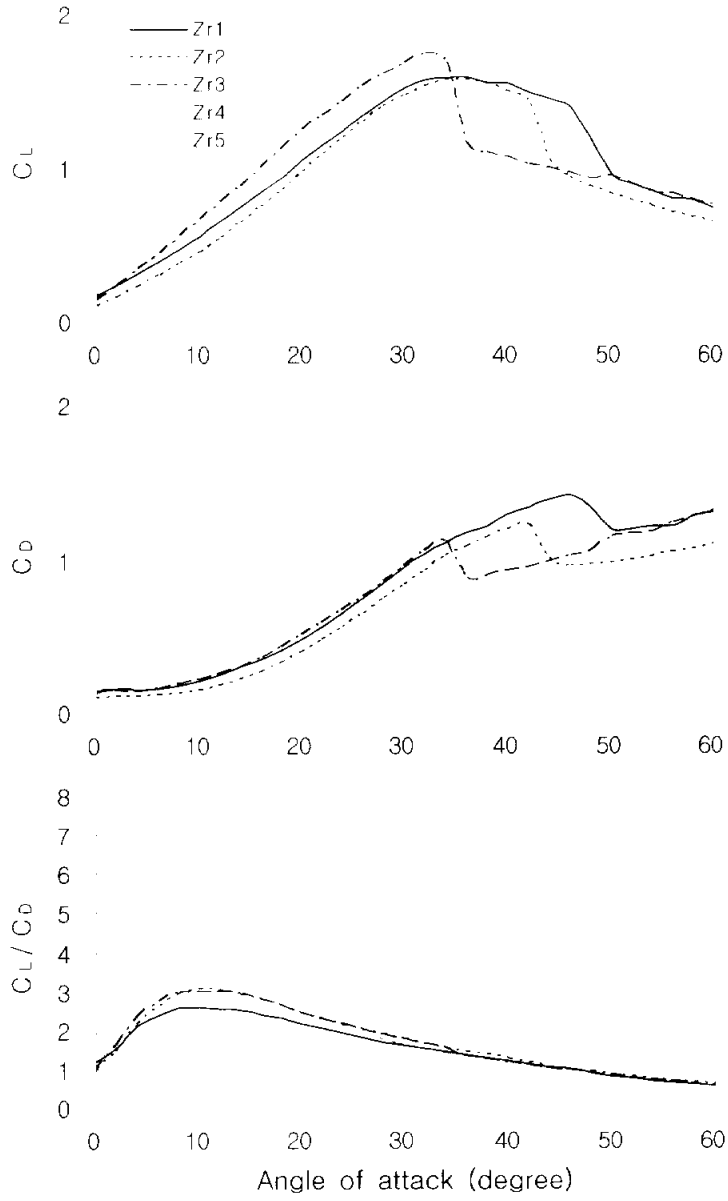


Fig. 2-10. The efficiency of the inverted trapezoid canvas kite in accordance with the angle of attack.

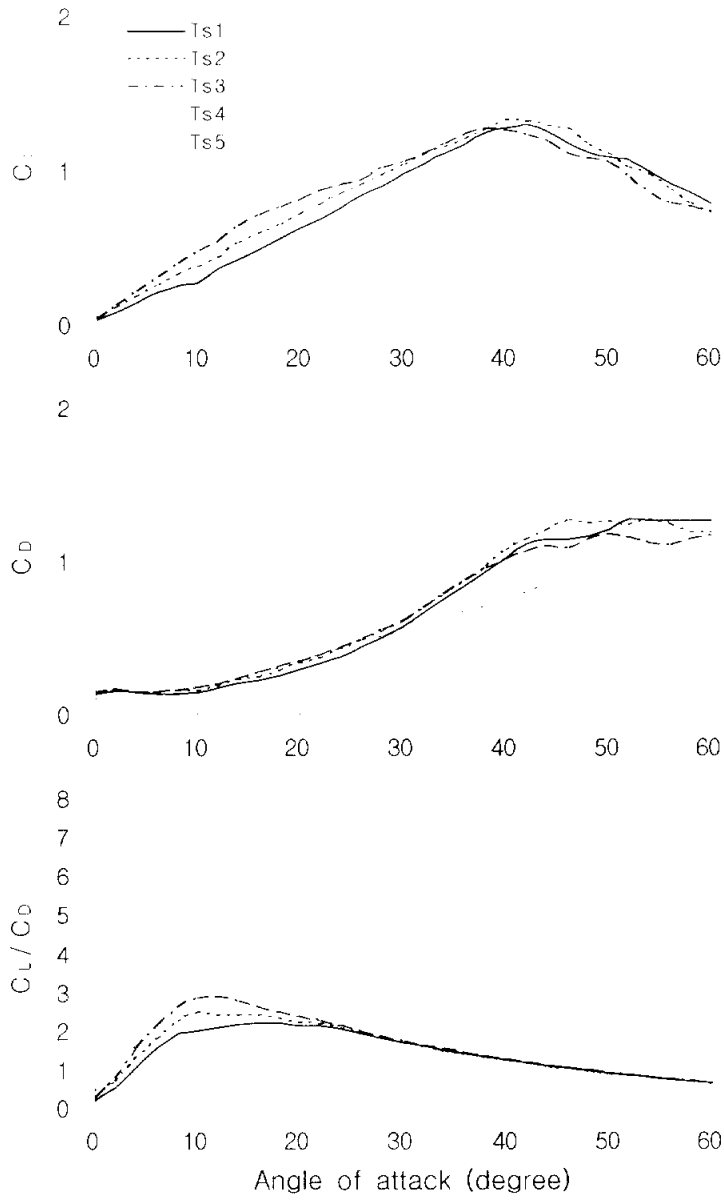


Fig. 2-11. The efficiency of the triangular plate in accordance with the angle of attack.

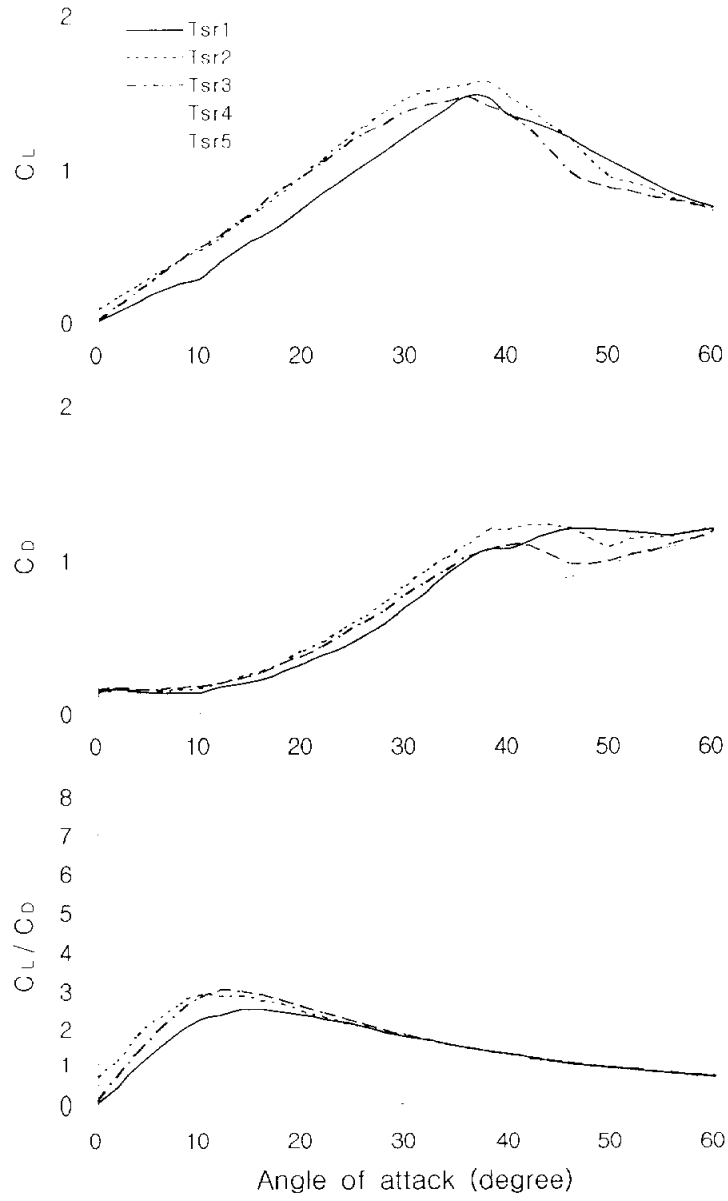


Fig. 2-12. The efficiency of the inverted triangular plate in accordance with the angle of attack.

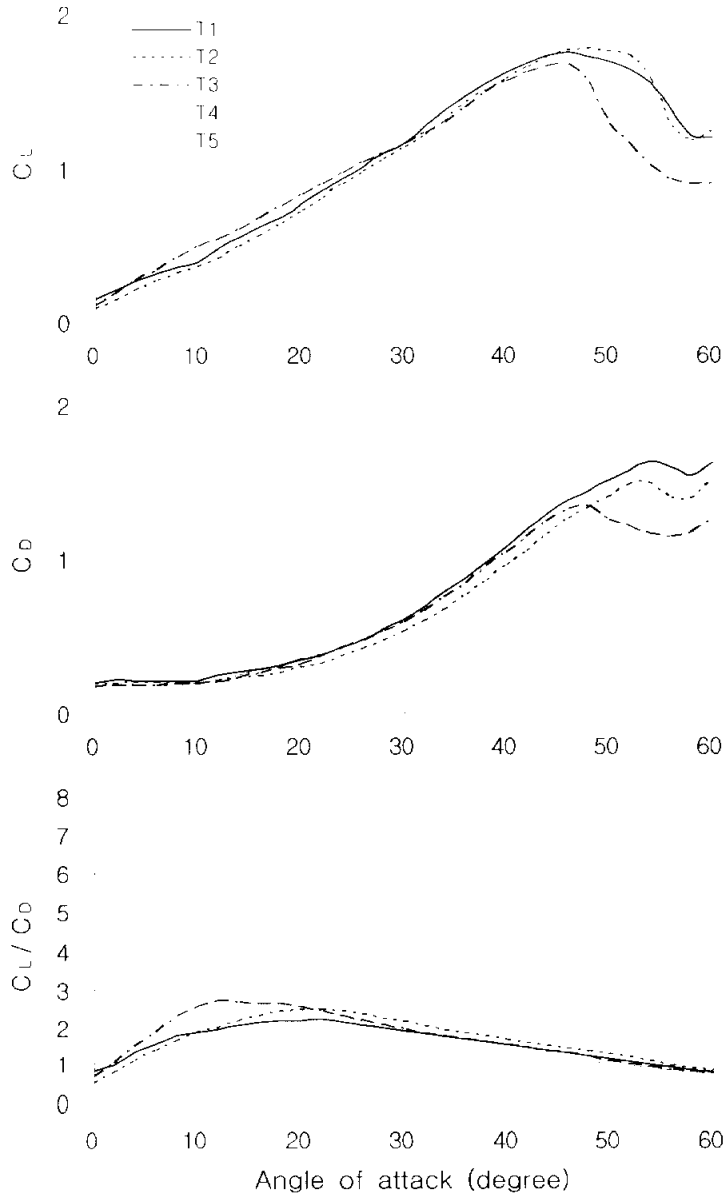


Fig. 2-13. The efficiency of the triangular canvas kite in accordance with the angle of attack.

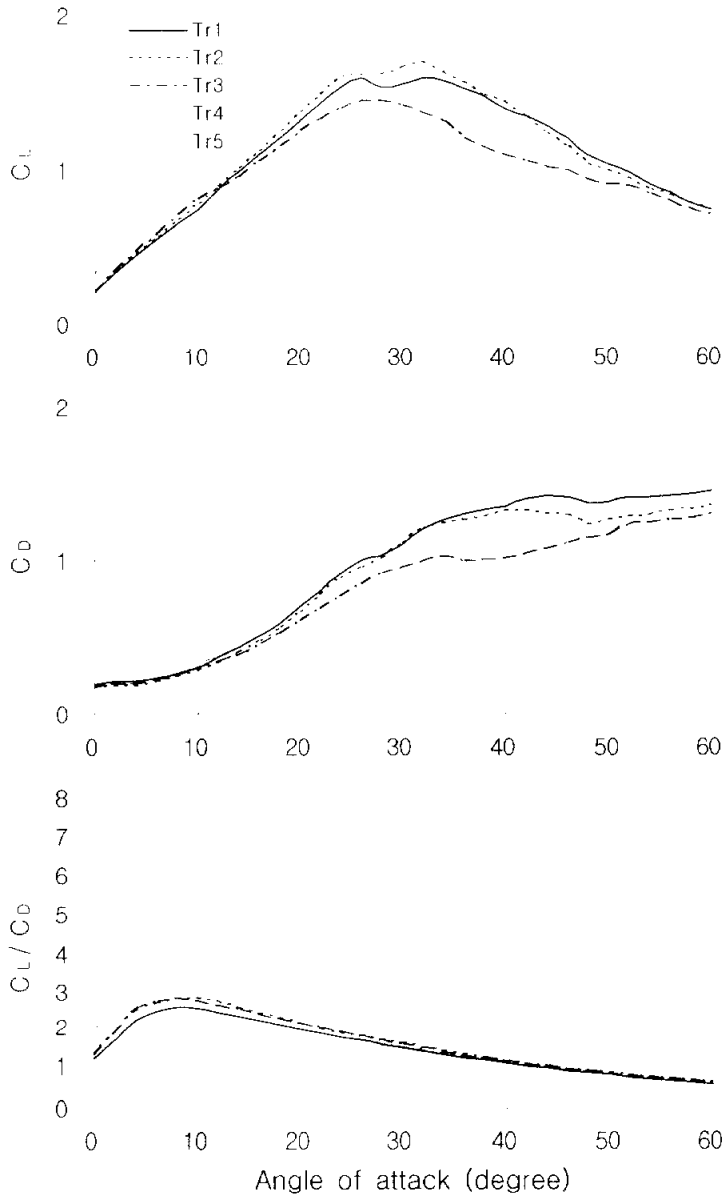


Fig. 2-14. The efficiency of the inverted triangular canvas kite in accordance with the angle of attack.

2.3.3. 다각형 모양에 따른 양·항력 비교

같은 종횡비에서 다각형의 모양에 따른 평판과 범포의 유체역학적 특성은 다음과 같다.

종횡비가 1:2인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 영각이 증가함에 따라 최대 C_L이 될 때까지 모두 일정하게 증가하다가 그 이후로 대부분 서서히 떨어지는 패턴을 보였는데, R1에서는 비교적 다른 것에 비하여 급격하게, Zr1, Tsr1, Tr1은 비교적 완만하게 떨어졌다. Zr1, Tsr1, Tr1은 최대 C_L을 가지는 영각도 32°, 36°, 36°로서 다른 것에 비하여 작게 나타났다. 또, 평판 모형인 Rs1, Ts1, Tsr1은 최대 C_L이 1.46, 1.29, 1.46으로서 범포 모형에 비하여 낮았다. 한편, 최대 C_L에서의 양항비는 R1, Tsr1이 영각 40°, 36°에서 1.41, 1.45로서 가장 높았다.

종횡비가 1:1.5인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:2인 모형의 경우와 비슷한 패턴을 띠었다. 영각이 증가함에 따라 최대 C_L이 될 때까지 모두 일정하게 증가하다가 그 이후로 대부분 서서히 떨어지는 마찬가지의 패턴을 보였는데, R2에서는 비교적 다른 것에 비하여 급격하게, Tsr2, Tr2은 비교적 완만하게 떨어졌다. 하지만 모두 이전의 모형보다도 다소 급격하게 떨어지는 패턴이 나타났다. Zr2, Tsr2, Tr2는 최대 C_L을 가지는 영각이 34°, 38°, 32°로서 다른 것에 비하여 작게 나타났다. 또, 평판 모형인 Rs2, Ts2, Tsr2은 최대 C_L이 1.54, 1.32, 1.56으로서 범포 모형에 비하여 앞의 모형

과 마찬가지로 낮았다. 한편, 최대 C_L에서의 양항비는 R2가 영각 38°에서 1.56로서 가장 높았다.

종횡비가 1:1인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 영각이 증가함에 따라 최대 C_L이 될 때까지 모두 일정하게 증가하다가 그 이후로 삼각형 모형을 제외하고는 급격히 떨어지는 패턴을 보였는데, R3와 Zr3가 비교적 다른 것에 비하여 급격하게 떨어졌다. 모형 중 R3와 Z3에서 영각 32°, 40°일 때 최대 C_L인 1.75, 1.89가 각각 나타났으며, 평판 모형인 Rs3, Ts3, Tsr3은 최대 C_L이 1.52, 1.26, 1.46으로서 범포 모형에 비하여 다소 낮은 것은 마찬가지였다. 한편, 최대 C_L에서의 양항비는 R3가 영각 32°에서 2.01로서 가장 높았다.

종횡비가 1.5:1인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 이전의 모든 모형에 비하여 두드러진 특징이 나타났는데, C_L의 크기는 다르지만 Rs4, R4, Zr4에서 영각 22~24°일 때 최대 C_L이 나타났으며 모두 비슷한 변화 패턴이 나타난 반면, Z4만 영각 34°일 때 최대 C_L이 나타났다. 최대 C_L이 가장 큰 값을 가지는 것은 Z4와 Zr4로서 각각 1.65, 1.60이다. 삼각형 각 모형에서는 최대 C_L이 0.95~1.22 정도로 차이가 많이 없고 영각 20~50° 구간에서 C_L이 약 0.75~1.22 사이의 값으로 고른 분포를 나타냈다. 또, 평판 모형인 Rs4, Ts4, Tsr4은 최대 C_L이 1.11, 0.95, 1.21으로서 범포 모형에 비하여 다소 낮은 것은 마찬가지였다. 한편, 최대 C_L에서의 양항비는 R4가 영각 22°에서 3.00으로서 가장 높았다.

종횡비가 2:1인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 매우 두드러진 특징이 나타났는데, 사각형과 사다리꼴 그룹과 삼각형 그룹의 C_L의 변화 그래프가 각각 거의 일치되게 나타났다는 것이다. Rs5, R5, Z5, Zr5에서는 영각 18~20° 구간에서 거의 최대 C_L이 나타난 후, 약간 떨어졌다가 영각 50°까지 거의 큰 변화가 없는 패턴이 나타났다. Ts5, Tsr5, T5, Tr5에서도 영각 20~50° 구간에서 C_L이 거의 큰 변화가 없는 패턴이 나타났다. 또, 평판 모형인 Rs5, Ts5, Tsr5은 최대 C_L이 1.07, 0.91, 1.05로서 범포 모형에 비하여 다소 낮은 패턴은 마찬가지였으나 변화 그래프가 거의 일치되어 큰 차이는 없었다. 한편, 최대 C_L에서의 양항비는 R5가 영각 18°에서 3.40으로서 가장 높았다.

종합적으로 분석해 보면, 영각에 따른 C_L의 변화는 범포 모형이 평판 모형보다 큰 값을 보이며 증가하다가 최대 C_L을 갖는 영각을 지나고 나면 급격히 떨어지는 반면 평판 모형은 완만하게 떨어지는 패턴이 나타났다. 또 최대 C_L을 가질 때의 영각은 범포 모형이 평판 모형보다 작았으며 최대 C_L은 범포 모형이 평판 모형보다 더 컸다. 그리고 사다리꼴과 삼각형 모형에서 역사다리꼴, 역삼각형 모형이 기본 사다리꼴과 삼각형 모형에 비하여 큰 값을 보이며 증가하다가 최대 C_L을 갖는 영각을 지나고 나면 완만히 떨어지는 반면 기본 형태의 모형은 급격히 떨어지는 패턴이 나타났다. 또 최대 C_L을 가질 때의 영각은 기본 형태의 모형이 아닌 것에 비하여 컸으며 최대 C_L도 더 컸다. 위 현상은 종횡비가 2:1 이상(삼각형 모형에서는 1.5:1 이상)인 모형에서는

영각에 따른 C_L의 변화가 모든 형태의 모형이 점점 비슷해져서 점점 구별하기 어려워지나 자세히 살펴보면 동일한 현상이 계속 나타나고 있다.

2.3.4. 만곡도에 따른 양·항력 비교

만곡도(camber ratio)에 따른 범포의 유체역학적 특성을 구명하고자 사각형, 삼각형 모양으로 만곡도가 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %인 모형 범포를 제작하여 양·항력을 측정한 결과는 Table 2-5 및 Fig. 2-15, Fig. 2-16, Fig. 2-17과 같다.

사각형 범포의 경우(Fig. 2-15), 영각에 따른 C_L의 변화는 CT1, CT2에서는 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하다가 영각 32°, 34°에서 최대값(1.78, 1.82)이 나타났으며, CT3에서는 영각 24°까지는 일정하게 증가하고 32°까지는 변화가 없다가 최대 C_L을 가지는 36°까지 다시 증가하였다가 이후 감소하는 패턴이 나타났다. 또 CT4는 영각 26°까지 일정하게 증가하였다가 34°까지 다시 감소한 다음 최대 C_L을 가지는 38°까지 다시 증가하였다가 이후 감소하는 패턴이 나타났다. CT5는 영각 34°에서 최대 C_L이 나타났으며 영각 30~48° 구간에서는 C_L이 약 1.3 정도로 변화가 없었다.

삼각형과 역삼각형 범포의 경우, 서로 결과가 많이 다르게 나왔다. 먼저 삼각형 모형에서(Fig. 2-16), 영각에 따른 C_L의 변화는 영각이 증가함에 따라 모두 일정하게 증가하는 패턴이 나타났는데 만곡도가 작은 순으로 C_L이 더 컸다. 그리고 만곡도가 작은 순으로 먼저 최대 C_L에 도달한 후 급격히 감소하는 패턴이 나타났다. 최대 C_L과 그 때의 영각은 CT1이 1.78(46°), CT2가 1.82(50°), CT3가 1.78(52°), CT4가 1.57(56°), CT5가 1.42(56°)였다. 한편, 역삼

각형 모형에서는(Fig. 2-17) 영각 10~40° 구간에서 C_L이 약 0.9~1.28 정도로 변화 없이 완만한 패턴이 나타났다.

영각에 따른 항력은 전 모형에서 영각이 증가함에 따라 일정하게 증가하는 패턴이었고 만곡도가 작은 모형이 큰 모형에 비하여 작게 나타났으며, 양항비는 값이 크게 나타났는데 영각 35° 이후부터는 차차 비슷하게 수렴되었다.

또한, 만곡도가 5 %에서 10 % 로 증가할 때는 최대 C_L이 증가하였으나 만곡도가 15 %, 20 %, 25 % 에서는 점점 감소하고 있어 만곡이 양력에 중요한 역할을 하며, 트롤의 전개판과 같이 최대의 양력을 얻기 위한 적정 만곡도가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 영각의 증가에 따른 C_L의 변화에서 증감을 반복하는 현상은 영각에 따라 범포의 형태가 변하기 때문으로 짐작할 수 있는데, 만곡도 15% 이상의 모형에 따라 어떤 각도 이상이 되면 이러한 현상이 나타나고 영각이 작을수록 범포가 물결치는 현상도 관찰되었다. 따라서 실제 만곡도는 측정이 불가능하였다.

Table 2-5. The attack angle and the efficiency of test model in accordance with polygonal shape and camber ratio

medel	attack angle (°)	$C_{L\,max}$	C_D	$C_{L\,max}/C_D$
CR1	32	1.74	0.90	1.94
CR2	34	1.82	0.98	1.86
CR3	36	1.66	0.97	1.72
CR4	38	1.56	1.03	1.51
CR5	34	1.40	0.88	1.59
CT1	46	1.78	1.29	1.38
CT2	50	1.82	1.32	1.38
CT3	52	1.78	1.31	1.35
CT4	56	1.57	1.28	1.22
CT5	56	1.42	1.22	1.16
CTr1	26	1.28	0.83	1.54
CTr2	22	1.26	0.77	1.64
CTr3	26	1.16	0.90	1.28
CTr4	24	1.10	0.92	1.19
CTr5	38	1.02	1.30	0.78

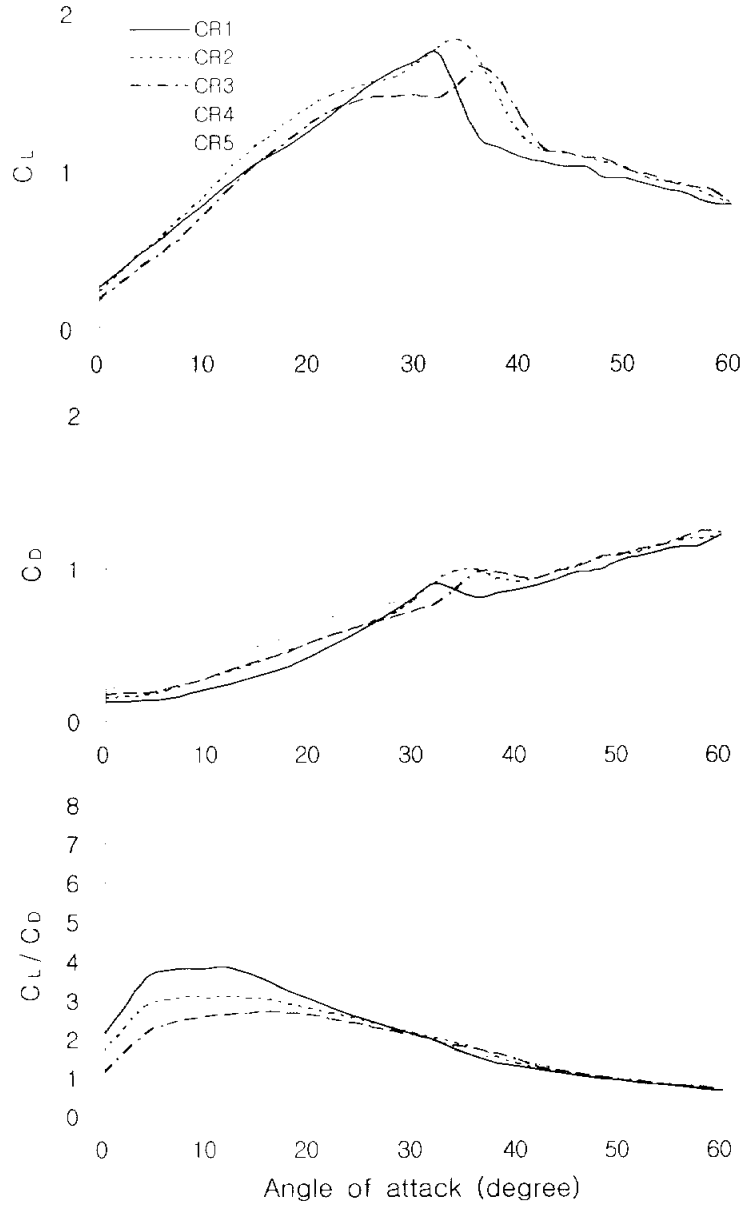


Fig. 2-15. The efficiency of the rectangular canvas kite by camber ratio in accordance with the angle of attack.

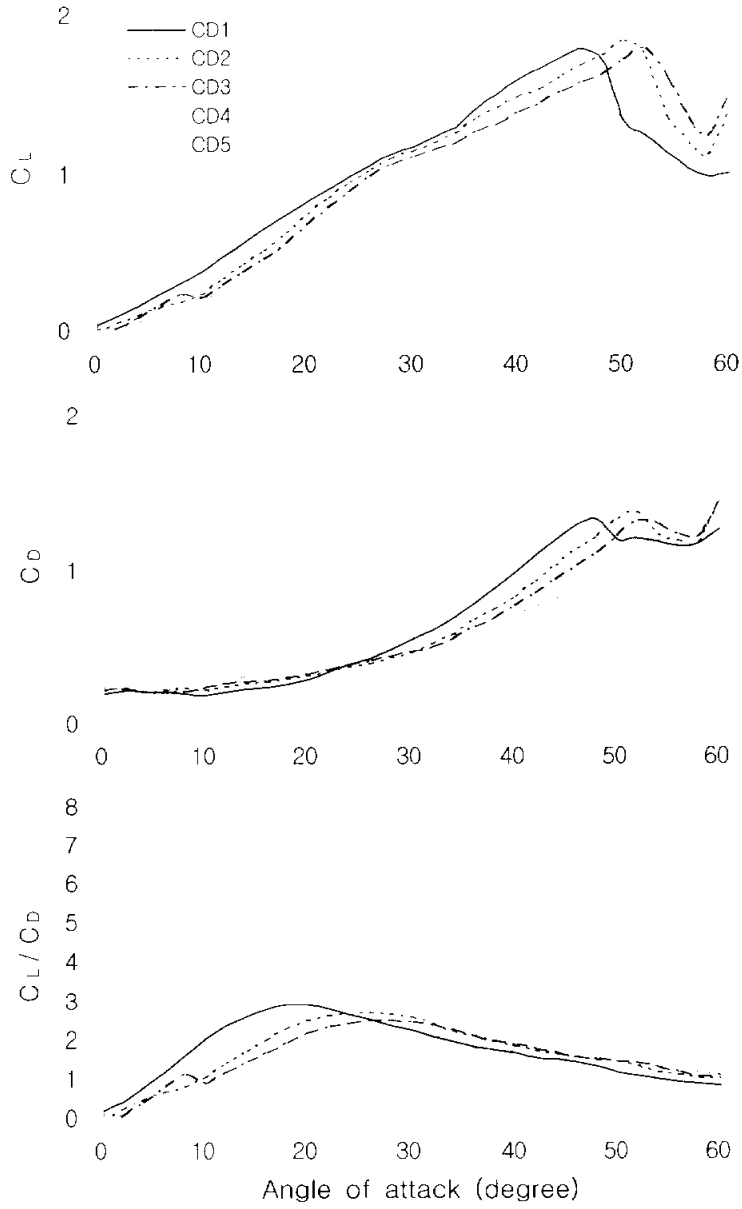


Fig. 2-16. The efficiency of the triangular canvas kite by camber ratio in accordance with the angle of attack.

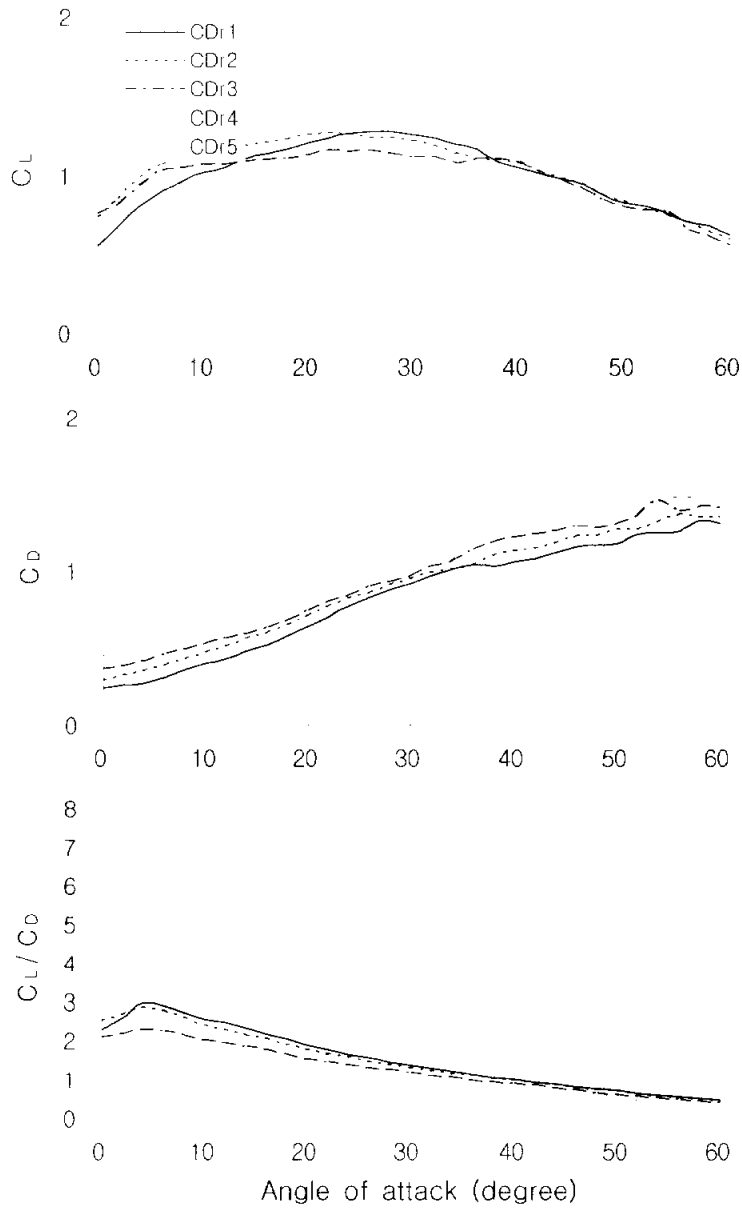


Fig. 2-17. The efficiency of the inverted triangular canvas kite by camber ratio in accordance with the angle of attack.

2.4. 요약

종횡비, 다각형의 모양에 따른 평판과 범포의 유체역학적 특성을 구명하고자 사각형, 사다리꼴, 삼각형 모양으로 종횡비를 1:2, 1:1.5, 1:1, 1.5:1, 2:1가 되도록 모형 평판과 범포를 제작하고 회류수조에 설치하여 양·항력 실험을 수행하였다. 또, 만곡도(camber ratio)에 따른 범포의 유체역학적 특성을 구명하고자 사각형, 삼각형 모양으로 만곡도가 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %인 모형 범포를 제작하고 마찬가지 방법으로 양·항력 실험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 범포 모형의 만곡꼭지점 위치 및 만곡도

1) 모형에서 물의 유체력을 많이 받을 수 있는 곳에서 만곡꼭지점이 만들어지며, 직사각형, 사다리꼴, 삼각형 모형에서는 종횡비가 클수록, 역사다리꼴, 역삼각형 모형에서는 작을수록 만곡꼭지점의 위치도 컸다.

2) 만곡도는 전 모형에서 종횡비가 클수록 컸으며, 직사각형, 사다리꼴, 삼각형 모형에서는 영각이 클수록 컸고 역삼각형 모형에서는 작을수록 컸다. 또, 직사각형 모형이 사다리꼴 모형보다 컸다.

2. 종횡비에 따른 양·항력 비교

1) 사각형 평판의 경우, 종횡비가 1:1 이하인 모형에서는 영각 40~42°에서 최대 C_L이 1.46~1.54, 1.5:1 이상인 모형에서는 20~22°에서 1.07~1.11 정도

였다. 사각형 범포의 경우, 종횡비가 1:1 이하인 모형에서는 영각 32~40°에서 최대 C_L이 1.75~1.91, 1.5:1 이상인 모형에서는 18~22°에서 1.24~1.4 정도였다. 사각형 모형에서는 범포가 평판보다 C_L은 크게, 양항비는 작게 나타났다.

2) 사다리꼴 범포의 경우, 종횡비가 1.5:1 이하인 모형에서는 영각 34~44°에서 최대 C_L이 1.65~1.89, 2:1인 모형에서는 14~48°에서 C_L이 약 1 전후였다. 역사다리꼴 범포의 경우, 종횡비가 1.5:1 이하인 모형에서는 영각 24~36°에서 최대 C_L이 1.57~1.74, 2:1인 모형에서는 18°에서 1.21이었다. 또, 사다리꼴 모형이 역사다리꼴보다 C_L은 조금 크게, 양항비는 작게 나타났다.

3) 삼각형 평판의 경우, 종횡비가 1:1 이하인 모형에서는 영각 38~42°에서 최대 C_L이 1.26~1.32, 1.5:1 이상인 모형에서는 20~50°에서 C_L이 약 0.85 전후였다. 역삼각형 평판의 경우, 종횡비가 1:1 이하인 모형에서는 영각 36~38°에서 최대 C_L이 1.46~1.56, 1.5:1 이상인 모형에서는 22~26°에서 1.05~1.21 정도였다. 또, 삼각형 모형이 역삼각형보다 C_L이 작게, 양항비도 작게 나타났다.

4) 삼각형 범포의 경우, 종횡비가 1:1 이하인 모형에서는 영각 46~48°에서 최대 C_L이 1.67~1.77, 1.5:1 이상인 모형에서는 20~50°에서 C_L이 약 1.1 전후였다. 역삼각형 범포의 경우, 종횡비가 1:1 이하인 모형에서는 영각 28~32°에서 최대 C_L이 1.44~1.68, 1.5:1 이상인 모형에서는 18~24°에서 1.03~1.18 정도였다. 또, 삼각형 모형이 역삼각형보다 C_L은 크게, 양항비는 작게 나타났

다.

5) 전 모형에서 종횡비가 클수록 양항비도 크게 나타났으며, 역삼각형 범포 중 종횡비가 2:1인 모형이 영각의 변화에도 가장 일정한 C_L이 나타났다.

3. 다각형 모양에 따른 양·항력 비교

1) 종횡비가 1:2인 모형의 경우, 영각이 증가함에 따라 최대 C_L이 될 때까지 모두 증가하다가 떨어지는 패턴을 보였는데, 사각형 범포가 비교적 다른 것에 비하여 급격하게 떨어졌다. 역사다리꼴, 역삼각형 모형은 최대 C_L을 가지는 영각이 32~36°로서 다른 것에 비하여 작았다.

2) 종횡비가 1:1.5인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 종횡비가 1:2인 모형의 경우와 비슷하였으며 모두 이전의 모형보다 다소 급격히 떨어졌다. 마찬가지로 역사다리꼴, 역삼각형 모형은 최대 C_L을 가지는 영각이 32~38°로서 다른 것에 비해 작았다.

3) 종횡비가 1:1인 모형의 경우, 영각이 증가함에 따라 최대 C_L이 될 때까지 모두 일정하게 증가하다가 삼각형 모형을 제외하고는 급격히 떨어졌다.

4) 종횡비가 1.5:1인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 사각형과 사다리꼴 모형에서는 각각 C_L의 크기와 변화 위치가 다양하게 나타났으며, 삼각형 모형에서는 영각 20~50° 구간에서 C_L이 약 0.75~1.22 사이의 값으로 고른 분포를 나타냈다.

5) 종횡비가 2:1인 모형의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 사각형과 사다리

꼴 그룹과 삼각형 그룹의 C_L의 변화 그래프가 각각 거의 일치되게 나타났으며 모두 영각 20~50° 구간에서 거의 큰 변화가 없었다.

6) 영각에 따른 C_L의 변화는 범포가 평판보다 큰 값을 보이며 증가하다가 최대 C_L 이후 급격히 떨어지는 반면 평판 모형은 완만하게 떨어졌으며 최대 C_L은 범포 모형이 평판 모형보다 컸으며 그 때의 영각은 작았다.

7) 역사다리꼴과 역삼각형 모형이, 아닌 것에 비하여 영각에 따른 C_L이 빨리 증가했다가 완만히 떨어지는 반면, 그 외 모형은 급격히 떨어지는 패턴이 나타났으며 최대 C_L과 그 때의 영각이 모두 컸다.

4. 만곡도에 따른 양·항력 비교

1) 사각형 범포의 경우, 영각에 따른 C_L의 변화는 만곡도가 5 %, 10 %인 모형에서는 '증가→감소', 만곡도 15 %인 모형에서는 '증가→지속→감소', 만곡도가 20 %인 모형에서는 '증가→감소→증가→감소'의 패턴이 나타났고 만곡도가 25 %인 모형에서는 영각 30~48° 구간에서 C_L이 약 1.3 정도로 변화가 없었다.

2) 삼각형 범포의 경우, 기본 삼각형 모형에서는 영각이 증가함에 따라 모두 C_L이 일정하게 증가하는 패턴이었으며 만곡도가 작은 순으로 C_L이 더 컸고 최대 C_L에 빨리 도달했다. 역삼각형 모형에서는 모두 영각 10~40° 구간에서 C_L이 약 0.9~1.28 정도로 변화 없이 완만한 패턴이었다.

3) 영각에 따른 항력은 전 모형에서 영각이 증가함에 따라 증가하는 패턴이었고 만곡도가 작을수록 작았으며, 양항비는 크게 나타났다.

4) 만곡도 15 % 이상의 모형에서 영각이 작을수록 범포가 물결치는 현상이 많이 관찰되었다.

제3장 PIV 및 CFD에 의한 유동장 해석 실험

3.1. 서론

본 실험에서 사용한 모형주위 유동장 해석방법은 유체의 유동을 실제로 계측하는 PIV(Particle Image velocimetry)와 해석프로그램을 이용하여 컴퓨터에서 계산하는 CFD(computational fluid dynamics)를 사용하였다.

PIV는 유동장에 비중이 유체와 거의 동일하고 빛을 잘 반사하는 가시화용 소립자(Particle)들을 유동장에 투입하고 이들의 운동을 관찰하기 위하여 시간차를 두고 찍은 2장의 사진을 디지털 화상처리 기술을 이용하여 계측하는 유동장 속도 계측법의 하나이다(이, 1996). 이 방법은 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속적으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 Navier-Stokes 방정식에 대입하여 압력구배항을 공간적분하면 벽면의 정압 및 유동장의 압력을 구할 수가 있다.

유동장의 가시화 기술은 전통적으로 조선해양공학 분야에서 가장 발달하였으며, 최근에는 유사 분야인 해양환경, 연안공학, 해양과학분야까지 여러 가지 가시화 기법들을 사용하게 되었다. 대표적인 가시화 방법에는 페인트 테스트, Tuft 테스트, 캐비테이션 테스트, 수포기포 테스트, 그리고 PIV 등이 있는데, 그 중 어구어법 분야에서는 전개판을 대상으로 수포기포 테스터를 많이 사용하였다. 수포기포 테스터는 3차원 공간 해석이 가능한 장점이 있으나 이동거리에 따라 기포가 흩어지는 것이 단점이다. 이와 같은 방법을 사용한 연구로

전개판의 유체역학적 특성에 관한 연구(崔, 1993)와 오타보드의 유체특성에 관한 연구(朴, 1994) 등이 있다.

본 실험에서 사용한 가시화 방법인 PIV 테스트는 2차원 해석이라는 단점을 가지고 있지만, 국부적인 와동이나 수표면 부근의 속도결손을 가시화할 수 있다는 장점이 있다(현 등, 2000). 본 실험과 가장 유사한 연구로 양항비가 크면서 안정성이 우수한 트롤 전개판 설계를 위해 PIV를 이용하여 만곡형 전개판의 유동장을 계측한 사례가 있다(박 등, 2002).

한편, CFD는 유체의 흐름을 실험에 의한 측정방법이 아닌 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법을 이용하여 해석하는 것이다. 이 방법은 많은 비용과 시간이 드는 실험에 의한 방법보다 빠르고 경제적인 장점이 있으며, 실험적 방법을 행할 수 없는 경우도 컴퓨터에 의한 시뮬레이션 작업으로 해석할 수 있다. 또, 이 방법은 단순히 흐르는 유체의 운동뿐만 아니라 열 전도, 동결과 끓음의 현상변화, 연소와 같은 화학작용, 추진기의 회전과 같은 기계적 운동, 고형 구조물의 압력과 변형 등 다양한 분야에 이용되고 있다.

현재 관련 해석 프로그램이 많이 나와 있는데, 가장 대표적인 것이 플루언트(fluent)이다. 플루언트는 유한 비압축성 영역에서부터 극초음속 영역 전반에 걸쳐 난류유동, 비정상상태 해석, 다양한 열 전달 해석, 화학반응 유동 등을 해석할 수 있는 범용 프로그램이다. 본 실험에서 사용한 해석 프로그램은 플로웍스(FloWorks)로서 플루언트와 유동 해석방법이 같다.

본 해석의 장점은 이전의 양·항력 실험, PIV 실험에서 사용한 모형을 전산유체를 이용하여 앞의 실험 결과와 비교해 봄으로써 그 결과를 검증할 수 있

으며, 모형 실험이 불가능한 부분도 해석해 볼 수 있다는 것이다.

위 두 실험방법을 통하여 여러 가지 범포 모형 주위의 다양한 유체흐름을 가시화함으로써 어떤 형태의 물체를 만난 유체가 어떻게 운동하는지를 알아보고 양·항력 측정 결과와 비교해 유체의 흐름 방향과 여러 가지 모형에 작용하는 힘과의 상관관계를 알아보고자 하였다.

3.2. 재료 및 방법

3.2.1. PIV 장치 및 실험 방법

PIV 실험의 주요 구성을 Fig. 3-1에 나타내었다. 본 실험에 사용한 실험 수조는 양·항력 측정 실험에서 사용한 동일한 수조이며, 모형을 설치하는 취부 장치도 같은 것을 사용하였다. 단, Fig. 3-1과 같이 취부 장치 위쪽에 원판을 만들어 스테인리스 봉에 끼우고 수면에서 30 mm 정도 잠기도록 설치하였다. 원판(PIV screen)의 지름은 600 mm이고 두께는 15 mm이며, 촬영된 사진이 선명하도록 표면에는 무광 페인트를 칠하였다. 주요 가시화 장치로는 화상발생 장치, 화상저장 장치, 화상처리 장치로 나눌 수 있으며, 실험 조건은 Table 3-1과 같다.

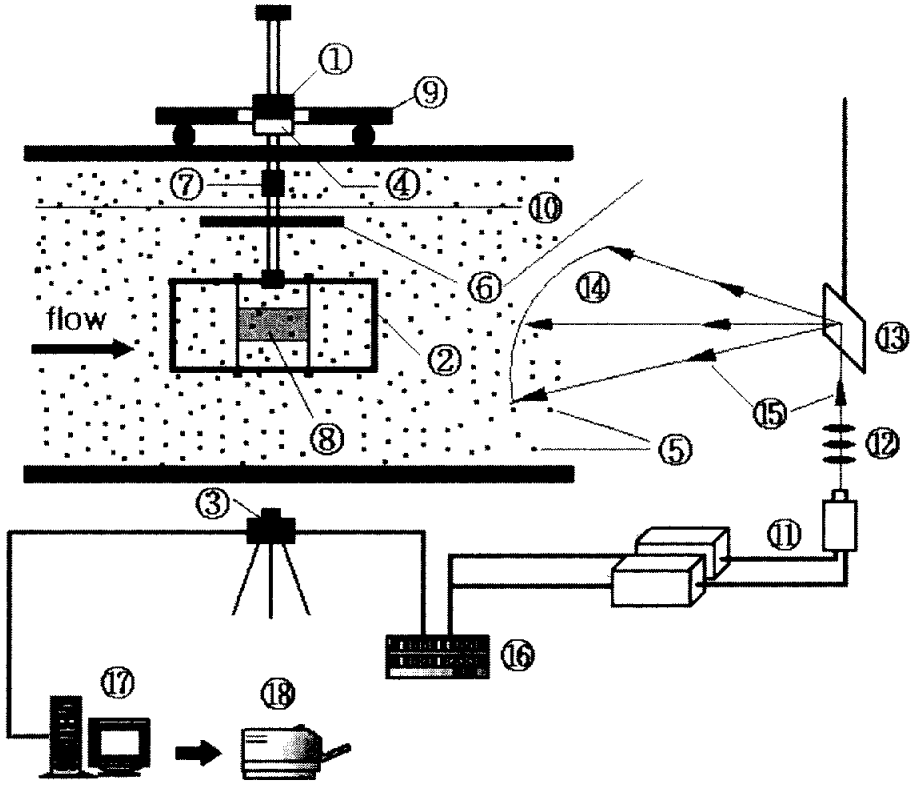


Fig. 3-1. Experimental set-up of the PIV system.

① six component load cell ② installation frame ③ CCD camera
④ angle controller ⑤ particle ⑥ PIV screen ⑦ connector
⑧ model ⑨ moving plate ⑩ water line ⑪ Nd:YAG laser
⑫ cylindrical lens ⑬ reflector ⑭ light sheet ⑮ laser beam
⑯ synchronizer ⑰ host computer and software ⑱ color printer

Table 3-1. Experimental condition of the PIV system

Articles	Item	Specification
Visualization equipment	Image board	Epix PIXCI D/D2X ($2\times2k$ *pixel*)
	Light source	200 *mJ*, Nd:YAG Laser
	Light sheet	Cylindrical Lens (width : 3 *mm*)
Measuring Condition	Working fluid	Water
	Particle	silver coated glass sphere (13 μm)
	Inlet velocity	0.6 *m/sec*
	Input device	Kodak ES-4.0 ($2\times2k$ *pixel*)
Image processing	Host computer	CPU speed : 2.0 *GHz*
	Number of time mean data	100 *Frames*
	Identification	Two-frame gray-level cross correction algorithm

A. 화상발생 장치

광원은 Neodym-YAG 이중 레이저를 사용하였다. 카메라의 촬영 시기는 동조기를 통해 제어되며 그 시간적 상관관계를 Fig. 3-2에 나타내었다. 두 레이저는 카메라의 조리개가 열려있을 때 발사되어야 하는데, 조리개가 닫혔다가 다시 열리는데 걸리는 최소 시간은 10 μs(TPW, Transfer pulse width)이다. 카메라가 연속적으로 두 장의 이미지를 캡쳐하기 위해서는 카메라의 조리개가 첫 번째 열린 시간 200 μs(TPD, Transfer pulse delay) 내에 1번 레이저가 발사되어야 하고 TPW 이후에 2번 레이저가 발사되도록 설정하여야 한다. 따라서, 본 실험에서는 기동펄스폭을 100 μs로 두었으며, 레이저의 기계적 지연이 175 μs이므로 1번 레이저는 60 μs, 2번 레이저는 2,060 μs의 지연을 두어 두 레이저의 시간차가 2,000 μs가 되도록 설정하였다. 또 이러한 사이클이 1초에 8회 반복되도록 하였다. 발사된 레이저광은 수조 관측창 후미 쪽 물 속에 위치한 반사경에 의해 90도로 반사되어 광막(光幕)을 형성하며 모형의 중심을 통과하도록 하였다.

B. 화상저장 장치

CCD 카메라(Kodak ES-4.0, 2×2k *pixel*)는 수평방향으로 만들어진 광막을 잘 촬영할 수 있도록 회류수조의 아래쪽에서 위를 향하도록 설치하였으며, 촬영 영역은 400×400 *mm*이 되도록 설정하였다. 카메라에서 촬영된 2차원 영상을 2048×2048 *pixel* 의 bmp 파일로 저장하였다.

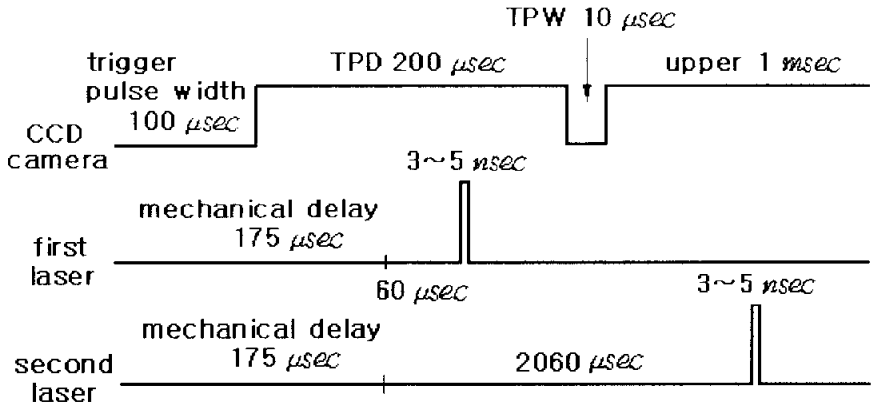


Fig. 3-2. Timing diagram for external triggering.

C. 화상처리 장치

화상처리 장치는 화상캡쳐보드(Epix PIXCI D/D2X)와 화상캡쳐 소프트웨어(XCAP ver. 2.1) 및 화상해석 소프트웨어(Visual PIV(Inteck Systems)로 구성하였다. 화상캡쳐보드는 CCD 카메라를 통해 입력되는 아날로그 영상신호를 256계조의 밝기 정보를 같는 2차원 디지털 영상정보로 바꾸어 컴퓨터가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 컴퓨터에 저장하는 역할을 한다.

컴퓨터에 저장된 쌍을 이루는 두 장의 화상을 이중화상 계조치 상호상관법에 의하여 입자패턴의 추적을 행함으로써 유동장 해석하였다. 해석 데이터는 Tecplot ver. 9.0을 이용하여 도식화하였다.

D. 가시화 방법

PIV를 이용한 가시화의 기본 개념을 Fig. 3-3에 나타내었다. 유동장의 가시화는 유체에 투입된 수많은 소립자의 미소시간(Δt)동안 이동한 거리와 방향을 화상으로 계측하고 이를 디지털 화상처리기법으로 처리하면 된다. 소립자가 x방향으로 이동한 속도를 u, y방향으로 이동한 속도를 v라 하면 소립자의 변위 (u, v)는 식 (3-1)과 식 (3-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \lim_{t_1 \to t_2} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{3-1}$$

$$v = \lim_{t_1 \to t_2} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \tag{3-2}$$

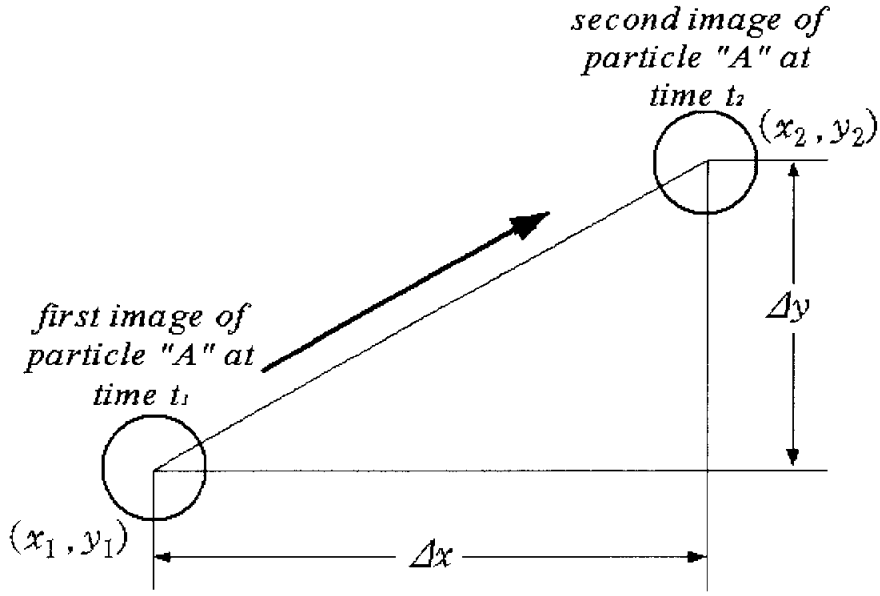


Fig. 3-3. Schematic diagram of PIV.

PIV의 계측 및 처리는 전체 촬영 구간을 일정한 영역으로 구분한 뒤, 영역 내 소립자가 만들어 내는 산란 이미지의 강도분포에 대한 푸리에변환이나 직접적인 상관계수 계산으로부터 조사구간의 평균속도를 구하는 방법이며, 본 실험에서는 후자의 방법중 이중화상 상호상관법을 이용하였다. 즉, 미소 시간 간격을 두고 촬영한 두 개의 화상에서 첫 번째 화상(2048×2048 *pixel*)의 바탕에 두 번째 화상 중 일정 영역의 이미지(32×32 *pixel*)를 바둑판처럼 이동하며 겹치면서 겹치는 부분의 두 이미지의 상호상관함수를 계산하고, 그 값이 가장 큰 점을 평균 변위로 결정함으로써 이미지의 이동 속도를 구하였다. 속도벡터를 계산하는 알고리즘은 계조치 상호상관법을 사용하였다.

계조치 상호상관법의 원리를 FIg. 3-4에 나타내었으며 연속된 두 프레임간의 상관함수는 식 (3-3)과 같다.

$$c(s,t)=\sum_{x}\sum_{y} f(x,y)\,w(x-s,y-t) \tag{3-3}$$

여기서 미소영역 $w(x,y)$의 크기는 $J\times K$이며 전체영역 $f(x,y)$의 크기는 $M\times N$이다. 또 s=0, 1, 2, …, $M-1$이고 t=0, 1, 2, …, $N-1$이다. 그러나 식로 주어지는 함수식은 $w(x,y)$ 및 $f(x,y)$의 진폭 변화에 매우 민감하여 다음의 식 (3-4)로 정의되는 상호상관계수를 구하여 최대상관의 위치를 계산하였다.

$$\gamma(s,t)=\frac{\sum_{x}\sum_{y}[f(x,y)-\bar{f}(x,y)][w(x-s,y-t)-\bar{w}]}{\left\{\sum_{x}\sum_{y}[f(x,y)-\bar{f}(x,y)]^2\sum_{x}\sum_{y}[w(x-s,y-t)-\bar{w}]^2\right\}^{1/2}} \tag{3-4}$$

여기에서 $\bar{w}$는 $w(x,y)$ 영역내의 평균치(1회계산)이며 $f(x,y)$는 w가 현재

위치하는 곳의 평균값을 의미한다. 이 때 상관계수 $\gamma(s,t)$는 -1과 1사이의 값을 갖게 된다.

Fig. 3-4에서 원점이 제1프레임 상에서 속도벡터를 구하기 위한 가상격자의 중심, 즉 벡터의 시점을 나타낸다. 이 점을 중심으로 제2프레임 상에서 M(또는 N, 일반적으로 $M=N$)의 표시 값으로 정의되는 탐색영역 반경내의 모든 픽셀의 위치 (s,t)에서 $(J\times K)$의 값으로 표시되는 상관영역에 대한 $\gamma(s,t)$의 값을 구한다. 다음으로 이 값들 중에서 최대치의 위치를 찾으면 이 곳이 제2프레임에서의 벡터의 종점이 된다(Liu, 1991).

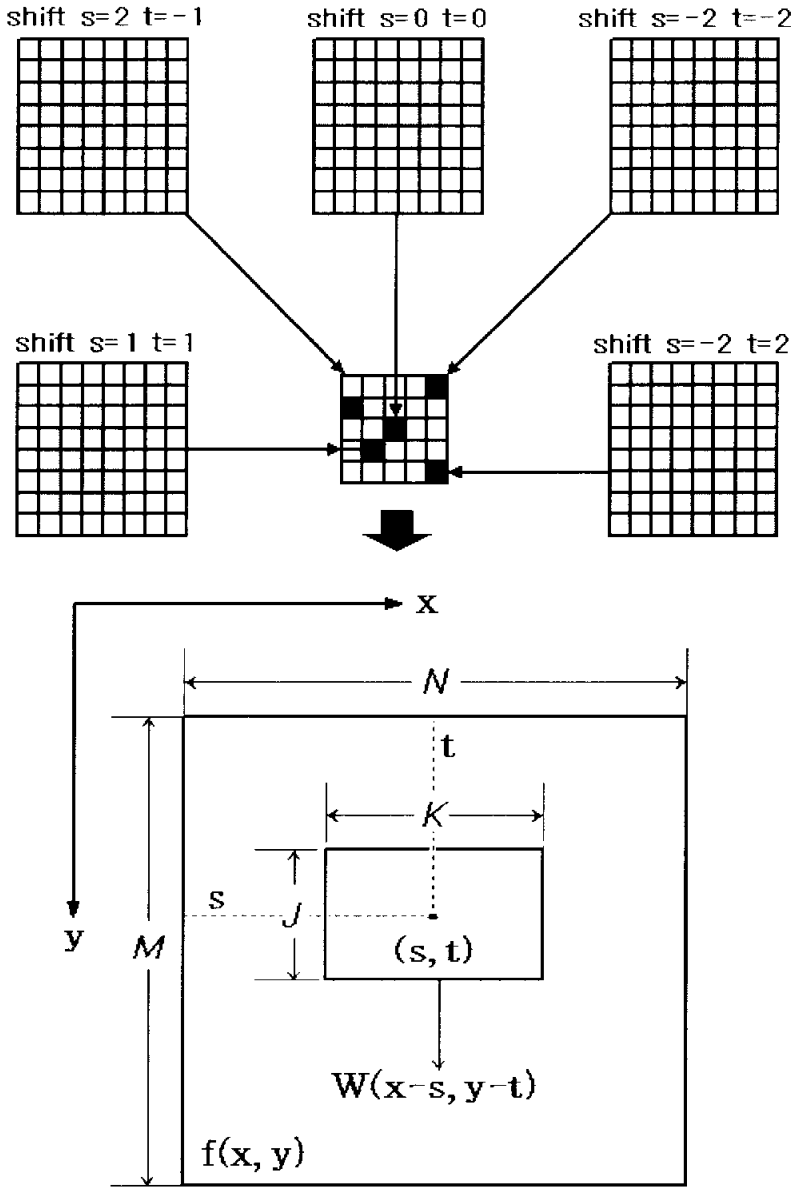


Fig. 3-4. The principle of the grey level cross-correlation.

E. 모형 및 실험 방법

PIV 실험에 사용한 모형은 양·항력 측정 실험 결과, 사각형, 삼각형, 역삼각형 범포 모형 중 영각에 따른 양력의 패턴과 양항비를 고려할 때 영각의 변화에 따른 양력의 변화가 적고 낮은 영각에서 높은 양력을 갖는 종횡비 2:1인 것을 사용하였다. 또, 이 세 가지 모형이 영각 20°를 기준으로 할 때 양호한 양력과 양항비를 가지므로 본 실험에서는 실험 영각을 10°, 20°, 30°, 40°로 결정하였다.

실험 방법은 우선 수조 속에 레이저광을 받아 빛을 산란하도록 직경 13 μm인 분말 소립자(silver coated glass sphere) 900 g을 물 속에 투입하였다. 각 모형을 수조 내에 설치한 후, 회류수조실 전체를 암실로 만든, 들고 펄스 레이저광을 계속 주사하도록 한 후, 각 영각별로 100회 계측하였다.

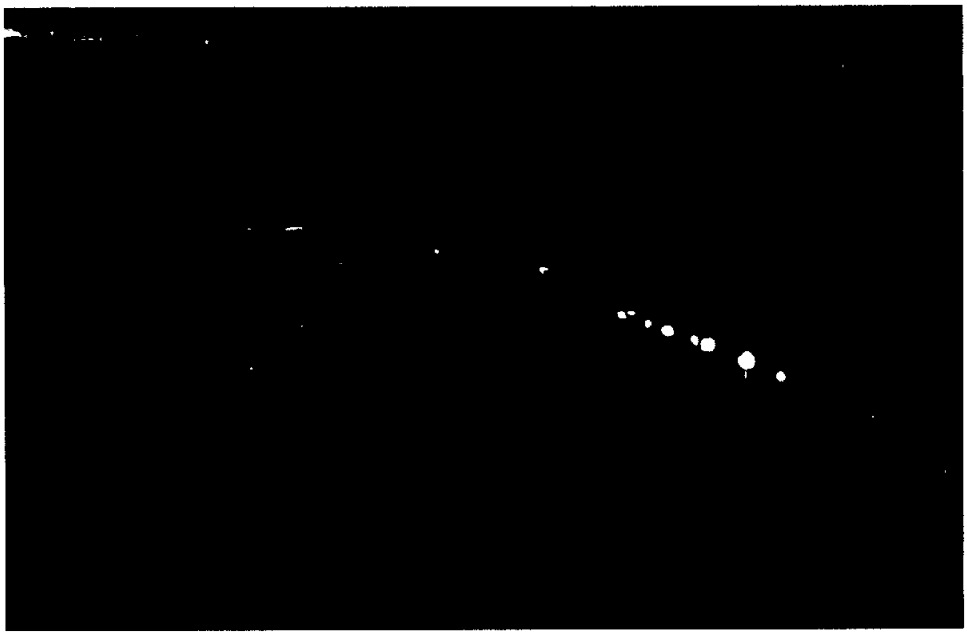


Photo 3-1. The view of the PIV test.

3.2.2. CFD 해석 방법

A. 해석 조건

해석 프로그램은 코스모스사의 플로웍스 2003을 사용하였으며, 분석 시 사용한 해석 조건은 Table 3-2와 같다. 해석에 사용한 모형은 PIV 실험에 사용한 것과 동일하며, 모형의 디자인은 PIV 실험 시 CCD 카메라로 촬영한 모형의 영상을 solidworks 2001+를 이용하여 입체적으로 렌더링(rendering)하였다. 모형 실험에서는 현장(弦長) 방향뿐만 아니라 익장(翼長) 방향으로도 아주 약간의 만곡이 발생하지만, 이는 무시하였다. 또한, 모형 실험에서 모형의 지지대로 사용한 직경 4 mm 스테인리스 봉도 없는 것으로 간주하였다. 유속은 수조 실험과 마찬가지로 0.6 $m/\sec$ 로 설정하였다.

해석 영역의 경계처리는 표준 경계 모드(모형의 크기에 따라 충분히 흐름의 변동이 없는 육면체 영역을 해석 영역으로 설정)를 사용하였고 경계조건은 물체표면에서는 점착조건과 표면 압력구배 가 0인 조건을 사용하였으며, 방정식은 유동과 난류에 관한 식만 사용하였다. 정렬 격자의 Cell 수, Fluid 수, Solid 수, Partial 수 등은 모형마다 달라지는데, 각각 약 300,000~420,000, 160,000~270,000, 10,000~40,000, 100,000~160,000 정도이다. 결과는 해석 데이터를 이용하여 벡터, 압력, 흐름, 난류에 대하여 도식화하였다.

Table 3-2. Processing condition of CFD

Item	Specification
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Medium	Water(fluid)
Equations	Flow/Turbulence
Cell number	300,000~420,000
Fluid number	160,000~270,000
Solid number	10,000~40,000
Partial number	100,000~160,000
Flow speed	0.6 m/s
Material	Standard solid

B. 수치해석 방정식

본 해석에 사용한 프로그램 플로웍스는 유한체적법을 사용하는 것으로서 수치해석의 기본 방정식은 속도와 압력을 시간평균값과 변동성분으로 분해한 레이놀즈 방정식을 Navier-Stokes 방정식에 대입한 식을 사용하는데, 층류는 물론이고 난류의 모델에 적용하는 유용한 수치해석 방법이며, 그 유도식은 다음과 같다.

유체의 질량, 운동량, 에너지 보존법칙은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0 \tag{3-5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \tag{3-6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H \tag{3-7}$$

여기서, t는 시간, u는 유속, ρ는 유체밀도, S_i는 단위질량당 외체적력, E는 단위질량에 작용하는 총 에너지, P는 총 압력, Q_H는 단위체적당 열생성항(source term), τ_{ik}는 전단응력, q_i는 확산에 의한 x_i 방향의 열유속이다.

Boussinesq의 가정에 의하면, Reynolds의 응력은 $\tau_{ij}^R = -\overline{\rho u_i u_j}$로 정의되고 식 (4-4)와 같이 정의되며, 뉴턴유체에서는 전단응력은 식 (4-5)와 같이 정의된다.

$$\tau_{ij}^R = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{3-8}$$

$$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{3-9}$$

여기서, $\mu=\mu_l+\mu_t$, δ_{ij}는 Kronecker delta function(1($i=j$), 0($i\neq j$)), μ_l는 동점성계수, μ_t는 난류와(turbulent eddy)점성계수, k는 난류운동(turbulent kinetic)에너지이다. $k-\varepsilon$ 모델 구조에서는 μ_t는 난류운동에너지(k)와 그 소산율(ε)로 정의된다.

$$\mu_t=f_\mu\frac{C_\mu\rho k^2}{\varepsilon} \tag{3-10}$$

여기서, f_μ는 난류점성 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$f_\mu=[1-\exp(-0.025R_y)]^2\left(1+\frac{20.5}{R_T}\right) \tag{3-11}$$

여기서, $R_T=\frac{\rho k^2}{\mu_l\varepsilon}$, $R_y=\frac{\rho\sqrt{k}y}{\mu_l}$ 이고 y는 외벽으로부터의 거리이다.

한편, 난류운동에너지와 그 소산율을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k k)=\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_k}\right)+S_k \tag{3-12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_k}\right)+S_\varepsilon \tag{3-13}$$

여기서 사용된 생성항(source term) S_k와 S_ε는 다음과 같다.

$$S_k=\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon+\mu_t P_B \tag{3-14}$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left(f_1\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\mu_t C_B P_B\right)-C_{\varepsilon 2}f_2\frac{\rho\varepsilon^2}{k} \tag{3-15}$$

또, P_B는 부력 때문에 생기는 난류이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B}\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial x_i} \tag{3-16}$$

여기서, g_i는 중력가속도의 x_i 방향의 성분이고 상수 σ_B=0.9, 상수 C_B는 P_B>0 일 때는 1, 그 외에는 0 인데 본 해석에서는 P_B는 고려하지 않았다.

$f_1 = 1+\left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3$, $f_2 = 1-\exp\left(-R_T^2\right)$ 이며, C_μ, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k, σ_ε은 모두 경험상수로서 C_μ=0.09, $C_{\varepsilon 1}$=1.44, $C_{\varepsilon 2}$=1.92, σ_k=1.0, σ_ε=1.3을 사용하였다.

양력과 항력은 각 구간별 압력분포를 양력 및 항력 방향의 성분을 적분하여 구하는 방법으로 식 (4-13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overrightarrow{F_p} = -\sum_{n=1}^{n}(p-p_{ref})A\hat{n} = -\sum_{n=1}^{n}pA\hat{n}+p_{ref}\sum_{n=1}^{n}A\hat{n} \tag{3-17}$$

여기서, $\overrightarrow{F_p}$는 양력 또는 항력, p는 압력, n은 구간 수, A는 표면적, $\hat{n}$은 구간의 단위면적이다.

3.3. 결과 및 고찰

모형 주위의 유동장을 해석하기 위하여 종횡비가 2:1인 사각형, 삼각형, 역삼각형 범포를 영각 10°, 20°, 30°, 40°에서 PIV 및 CFD 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 3-3 및 Fig. 3-5, Fig. 3-6, Fig. 3-7과 같다.

Table 3-3. The efficiency comparison between the CFD result and the experiment result

model	angle	calculration			experiment		
		C_L	C_D	C_L/C_D	C_L	C_D	C_L/C_D
rectangle	10°	0.76	0.13	5.67	0.91	0.14	6.69
	20°	1.07	0.38	2.81	1.12	0.39	2.87
	30°	0.95	0.50	1.91	1.00	0.54	1.86
	40°	0.59	0.48	1.23	1.04	0.80	1.29
triangle	10°	0.57	0.21	2.67	0.61	0.21	2.99
	20°	0.84	0.37	2.26	0.86	0.35	2.48
	30°	0.85	0.50	1.71	0.98	0.55	1.78
	40°	0.76	0.64	1.19	1.07	0.81	1.31
inverted triangle	10°	0.79	0.32	2.47	0.94	0.34	2.80
	20°	1.09	0.58	1.86	1.02	0.50	2.03
	30°	0.87	0.62	1.41	0.97	0.67	1.44
	40°	0.81	0.74	1.10	0.98	0.93	1.06

Table 3-3은 영각 변화에 따른 수치해석에 의한 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D의 변화와 실험에 의한 계측된 실험값을 보여주고 있다.

사각형 범포는 영각 10°에서 C_L은 0.76, C_D는 0.13으로 실험값보다 C_L은 약 16% 작게, C_D는 7% 작게 나타났다. 영각 20°에서는 C_L은 1.07, C_D는 0.38로 C_L은 4%, C_D는 3% 정도 작게 나타나 거의 유사한 결과를 보여주었다. 영각 30°에서는 C_L은 0.95, C_D는 0.50으로 C_L은 5%, C_D는 7% 작게 나타났다. 영각 40°에서는 40%가 넘는 차이가 나타나 정량적인 값을 비교할 수 없었다. 이러한 현상은 삼각형과 역삼각형 모델에서도 유사하게 나타났으며, 수치해석에 의한 해석값이 실험값에 비하여 영각 10°, 20°, 30°에서는 5~20% 정도 작게 나타났으며, 영각 40°에서는 20% 이상의 차를 보였다. 그러나, 양항비 변화 패턴은 영각 10°에서는 8~13% 정도 작게 나타났으며, 영각 20°, 30°, 40°에서는 실험값과의 차이가 10% 이하로 모두 유사하게 나타났다.

이러한 수치해석 결과는 모형실험과 실험값의 절대적인 정량적 비교는 다소 경우에 따라 무리가 될 수 있으나, 영각 변화에 따른 계수의 변화 패턴이 유사하게 나타나고 영각 변화에 따른 유동장의 변화가 매우 유사하게 나타나 수치해석적 방법이 범포와 같은 유연체의 유체역학적 특성해석은 물론이고, 각종 모멘트를 계산하는 데에도 손쉽게 이용될 수 있으므로 생각되며, 극히 예민한 해석에도 그 활용이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 본 실험에서는 최대 C_L이 나타나는 영각보다 영각이 클 경우, 실험값과의 차가 크게 나타났는데, 이러한 현상은 실험에 의한 계수값은 일정한 시간동안 측정된 평균 계측 값인

반면, 수치해석에 의한 값은 반복된 수렴과정 중 하나에 해당되는 것으로 사실상의 순간 계수값을 의미하고 있다. 따라서 최대 C_l 이후의 영각에서와 같이 칼만 볼텍스와 유사한 형태의 주기적인 와동현상과 주변 압력장의 변화가 심하게 일어날 경우, 그 과정 중 하나의 순간 압력장의 분포를 가지고 해석을 해야 함으로 정량적인 비교에는 어려움이 있다. 그러므로 수치해석을 이용하여 범포와 같은 유연체의 유체역학적 특성 연구를 수행할 경우, 정량적인 특성값은 심한 와동 및 난류가 일어나기 전에 사용하는 것이 신뢰성이 있을 것으로 판단되며, 이러한 현상이 일어났다고 하더라도 수렴 중 반복해서 나타나는 유동현상을 PIV에 의한 속도장과 순차적으로 비교를 함으로써 정성적인 난류 유동장의 특성을 파악할 수 있었으며, PIV에 의한 속도장을 통계적 기법을 이용해 평균난류강도를 구하고, 이 결과를 수치해석 결과와 비교함으로써 난류 유동 특성을 이해할 수 있을 것이다.

3.3.1. 범포 형태별 유동장 해석

A. 사각형 범포

영각 변화에 따른 사각형 범포의 익장(翼長) 방향의 중앙 횡단면 주변의 유동을 실험에 의해 계측한 속도장과 수치해석에 의한 압력장과 속도장을 2차원적으로 나타내어 보면 Fig. 3-5와 같다.

Fig. 3-5와 같이, 영각 10°에서 PIV에 의한 속도장을 보면, 날개의 후연에 속도성분의 감소가 약간 나타났으나 유동 박리와 같은 현상이 관찰되지 않았으며 범포 모형의 면을 따라 원활한 유동을 보여주어 거의 층류에 가까운 정상상태로 볼 수 있었다. 수치해석에 의한 압력장을 보면 박리나 와동은 관찰되지 않았으며, 압력장의 분포도 점층적으로 나타나 안정된 압력장을 보여주었다. 범포의 압력면 전연부에서 최대 압력 101,688 Pa을, 흡입면 전연부에서 최소 압력 100,942 Pa으로 계산되었다. 또한, 전체적인 범포의 만곡 변화도 일정하게 나타나 자연스러운 호의 형태를 보여주었다.

영각 20°에서는 전연부에서부터 현장(弦長)의 2/3 영역에서 경계층 박리에 의한 역압력구배와 와동이 상당히 발전된 형상을 관찰할 수 있으며, 압력장에서도 PIV 결과와 같은 영역에서 상당히 큰 와동과 압력이 낮은 영역이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 수치해석에 의해 계산된 최대 압력은 101,553 Pa, 흡입면 전연부에서 최소 압력 100,706 Pa이였다.

영각 30°와 40°에서는 PIV와 수치해석 압력장에서 전연부에서부터 심한 와동과 고압력 영역과 저압력 영역이 순차적으로 나타나는 칼만볼텍스의 모습이

관찰되었다. 이미 최대 C_l이 나타나는 영각보다 높은 영각이므로 심한 양항력 값의 진동과 압력변화가 관찰되었으며 수치해석에 의한 압력장에서도 경계층 박리와 재순환에 의하여 높거나 낮은 와동이 생성과 소멸을 반복함에 따라 영역별 압력 변화가 수렴과정 중 반복적으로 나타나 정량적인 해석 값은 신뢰하기 힘들었다.

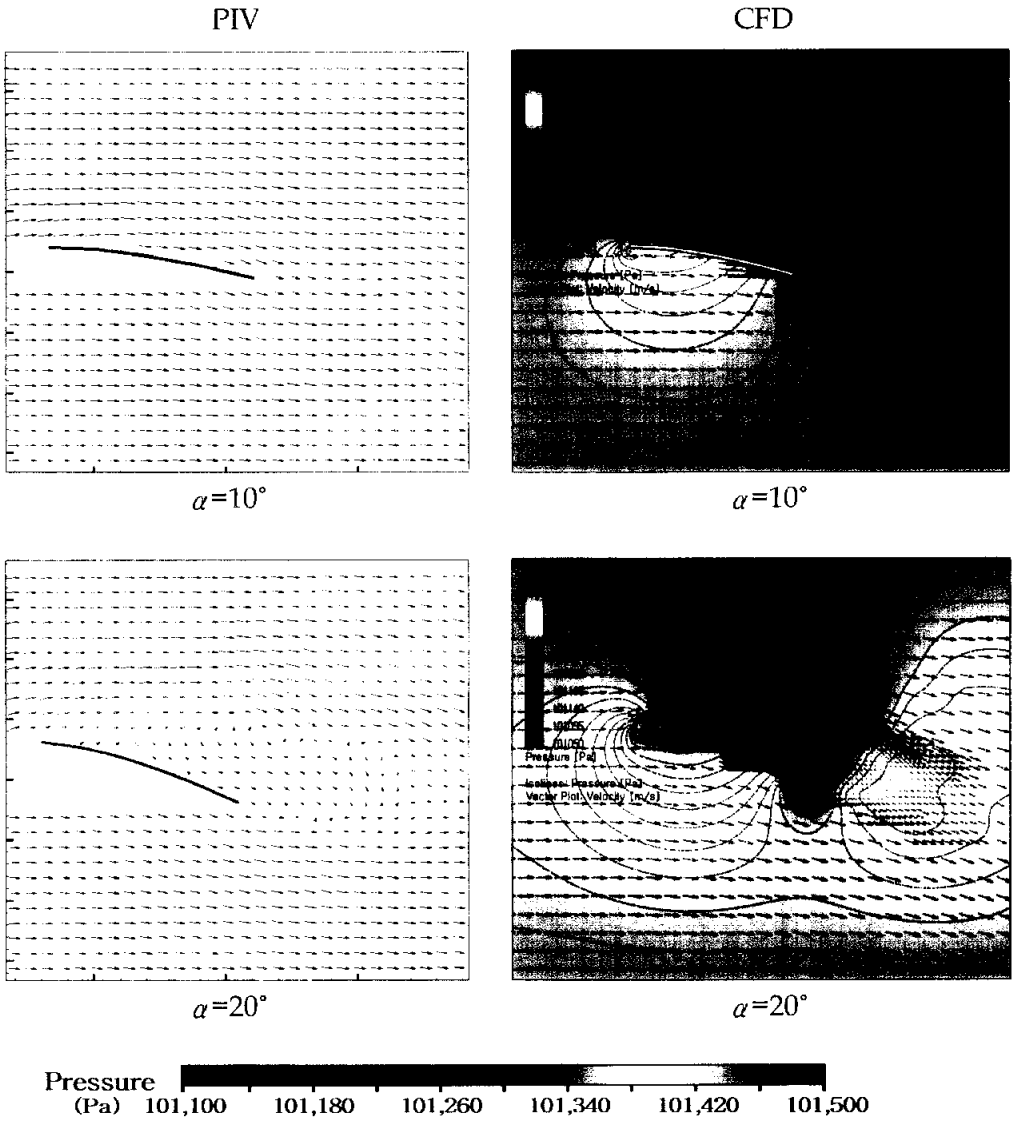


Fig. 3-5. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the rectangular canvas in accordance with angle of attack(α).

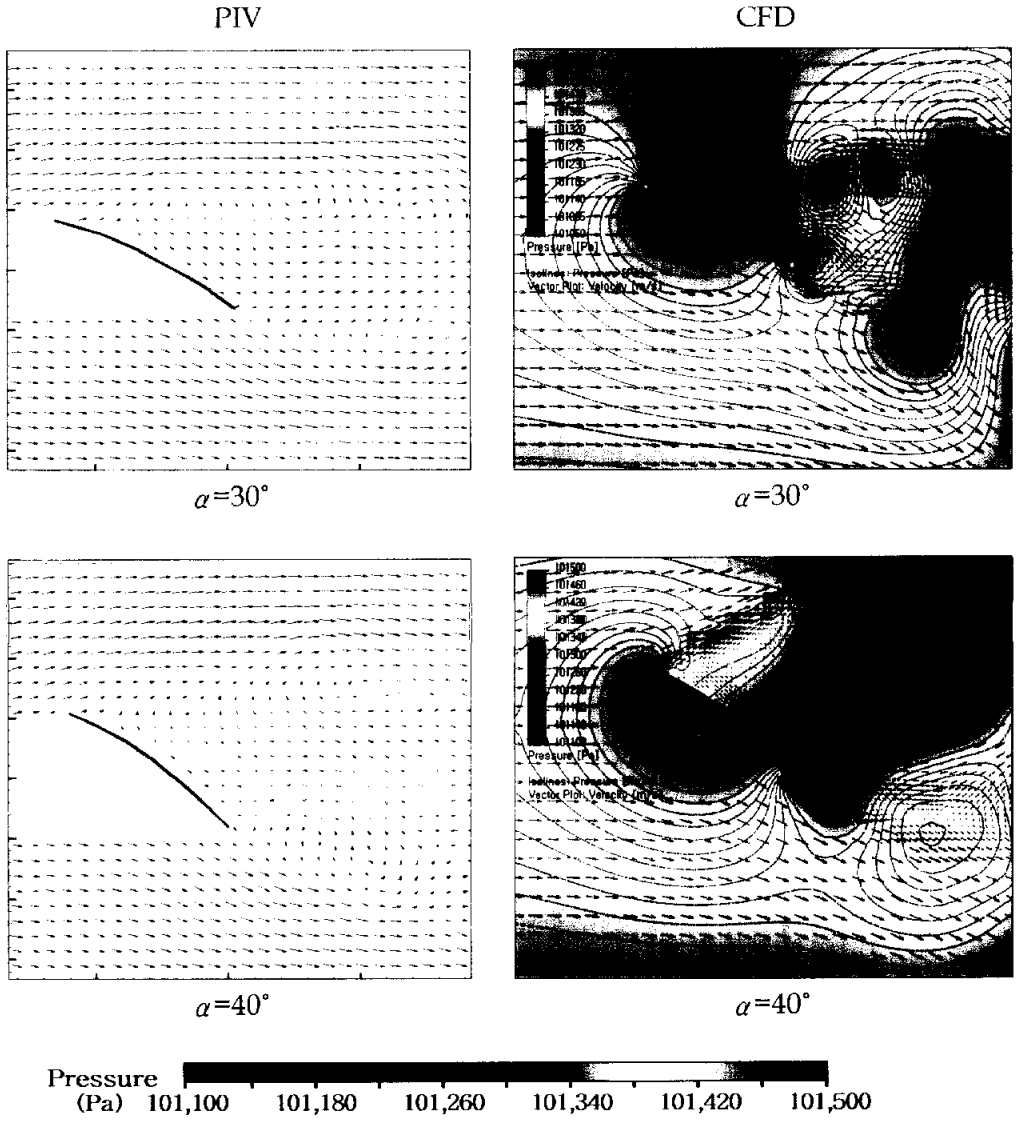


Fig. 3-5. Continued.

B. 삼각형 범포

Fig. 3-6은 영각 변화에 따른 삼각형 범포 주변의 유동장을 PIV에 의한 속도장과 수치해석에 의한 압력장과 속도장을 비교하여 나타내었다.

Fig. 3-6과 같이, 영각 10°에서 PIV에 의한 속도장을 보면 범포 모형의 면을 따라 원활한 유동을 보여주어 거의 층류에 가까운 정상상태로 볼 수 있었다. 수치해석에 의한 압력장 또한, 박리나 와동은 관찰되지 않았으며, 압력장의 분포도 점층적으로 나타나 안정된 압력장을 보여주었다. 다만, 압력면의 고압력 영역 중심의 전연 쪽으로 약간 치우친 경향을 나타났으며, 압력면 후연쪽에서도 약한 고압력 영역이 나타났다. 최대 압력은 101,495 Pa, 최소 압력은 101,090 Pa으로 계산되었다. 또한, 전체적인 범포의 만곡 변화도 일정하게 자연스러운 호의 형태를 보여주었다.

영각 20°에서는 전연부에서부터 현장의 3/4 영역에서 경계층 박리에 의한 와동이 나타나면서 후연으로 갈수록 난류가 심하게 나타났다. 수치해석 결과에서도 같은 영역에서 큰 와동과 압력이 낮은 영역이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 최대 압력은 101,510 Pa, 압력면 전연부에서 최소 압력 101,020 Pa이였다.

영각 30°와 40°에서는 사각형 범포에서와 같이 전연부에서부터 경계측 박리가 관찰되어 와동과 복잡한 유동 현상이 관찰되었다.

삼각형 범포에서는 압력장의 분포가 대체적으로 전연을 중심으로 점층적으로 변화하는 현상을 관찰할 수 있었으며 흡입면과 압력면의 압력차가 작았다. 이것은 삼각형 범포의 형상이 전연에서 후연으로 갈수로 익단와(tip vortex)에

의한 3차원 성분의 혼입(混入)으로 3차원 유동이 나타나 압력 분포가 후연으로 갈수록 교란이 나타난 것으로 판단된다. 이렇게 후연부에서 압력차가 유지되지 않으므로 인해 최대 C_L이 낮게 나타난 반면, 와동의 발생과 소멸로 인한 진동은 감소되었고, 최대 C_L일 때의 영각 이후에도 다른 모델에 비하여 상대적으로 안정된 모습을 보였다.

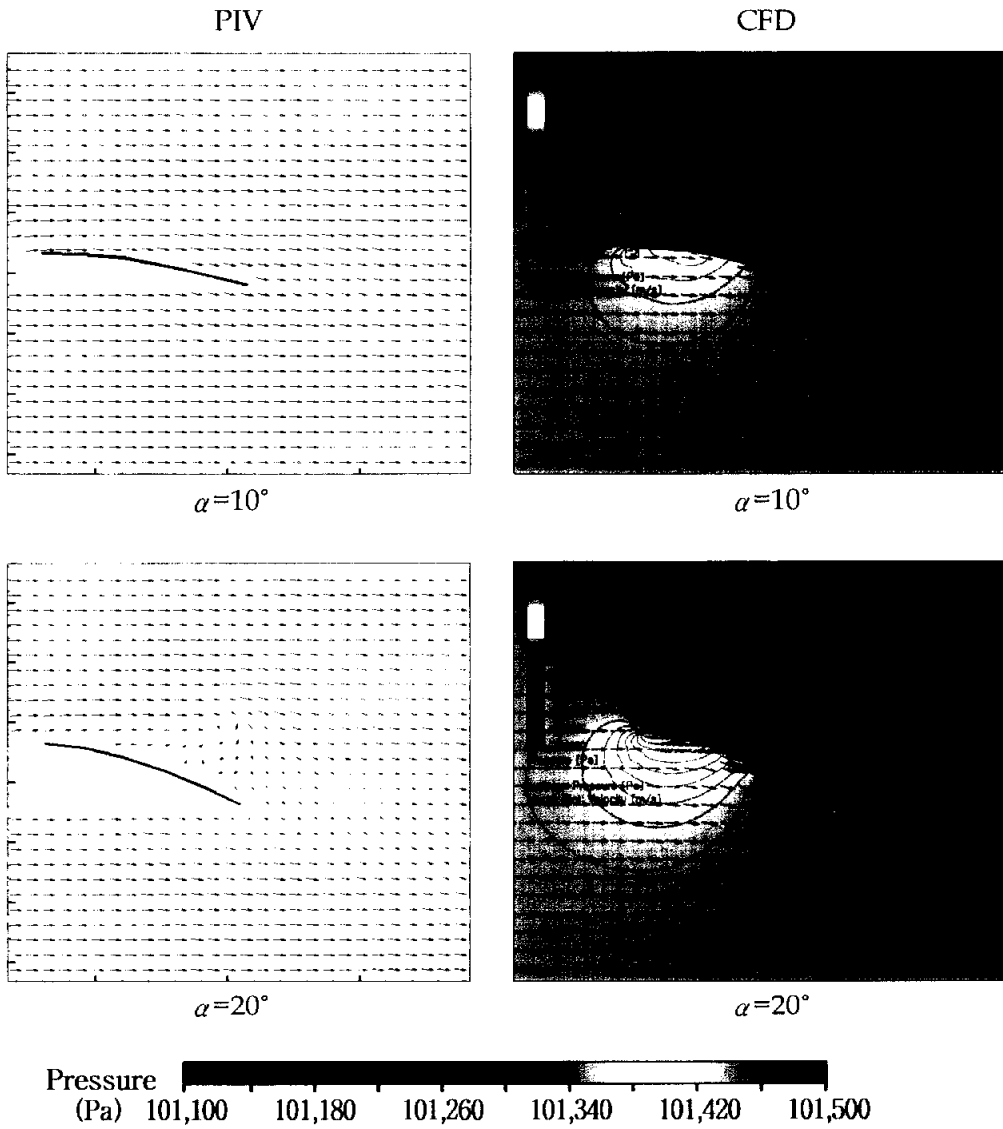


Fig. 3-6. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the triangular canvas in accordance with angle of attack(α).

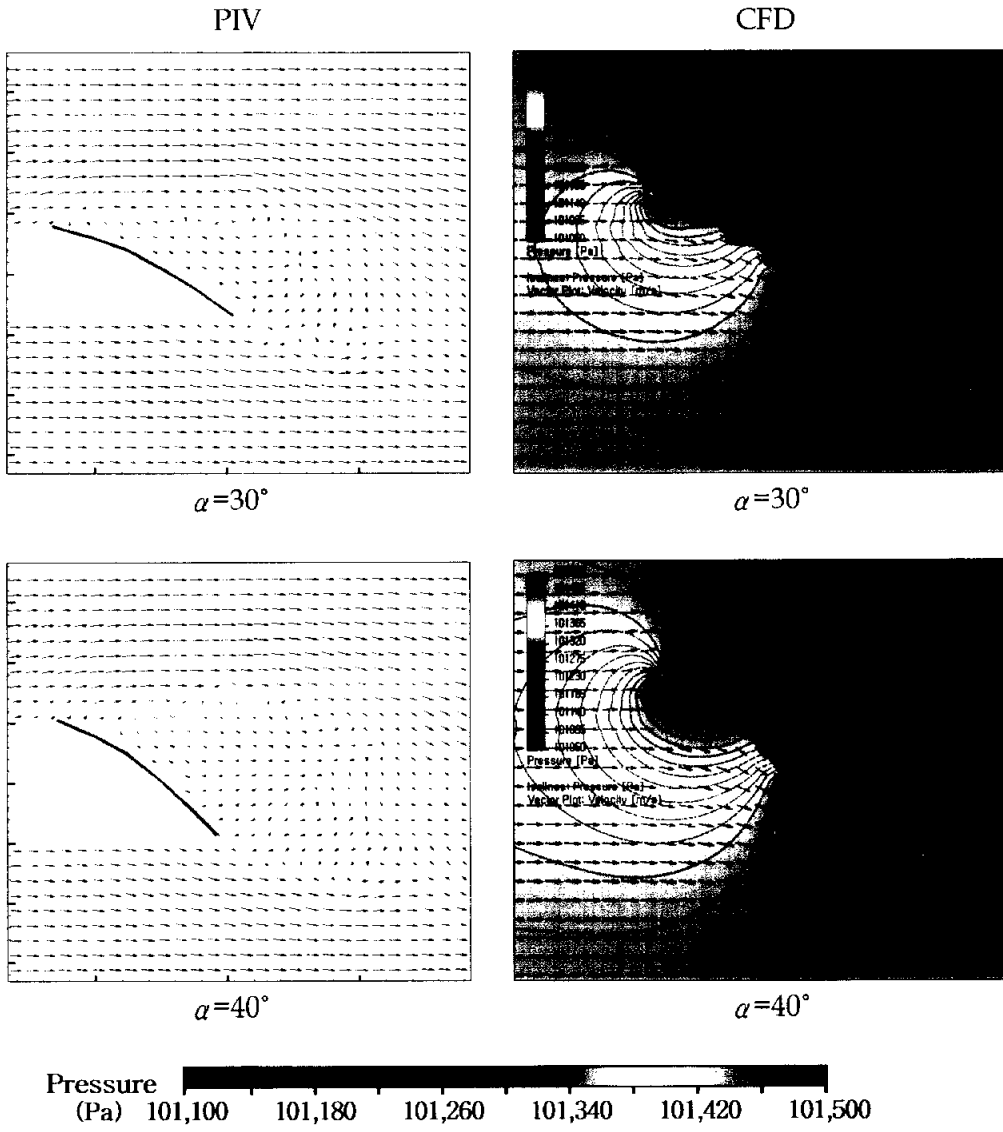


Fig. 3-6. Continued.

C. 역삼각형 범포

Fig. 3-7은 영각 변화에 따른 역삼각형 범포 주변의 유동장을 PIV에 의한 속도장과 수치해석에 의한 압력장과 속도장을 비교하여 나타내었다.

Fig. 3-7과 같이, 영각 10°에서 PIV에 의한 속도장을 보면 범포 모형의 면을 따라 원활한 유동을 보여주었으며, 전연에서 1/2을 지나면서 곡면의 변화가 커짐에 따라 아래쪽으로 향하는 속도성분이 강하게 나타났다. 수치해석에 의한 압력장과 속도장에서 박리나 와동은 관찰되지 않았으며, 범포 면을 따라 점층적인 압력장의 변화로 안정된 모습을 보여주었다. 다만, 압력면의 고압력 영역의 중심이 후연으로 치우친 경향이 나타났으며, 최대 압력은 101,532 Pa, 최소 압력은 100,899 Pa로 높은 압력차를 보여주었다. 또한, 범포의 만곡 변화도 후연에서 크게 나타났다.

영각 20°에서는 범포의 후연부에서 속도 감소가 관찰되었으나 이상적인 정상 상태의 유선을 보여주었다. 압력 분포에서도 경계층 박리나 와동의 발생 없이 흡입면과 압력면의 압력차가 원활히 유지되고 있는 현상이 관찰되어 안정된 모습을 보여주었다. 또한, 최대 압력은 102,677 Pa, 압력면 전연부에서 최소 압력은 97,423 Pa로 흡입면과 압력면의 압력차가 가장 큰 상태임을 알 수 있었다.

영각 30°와 40°에서는 전연에서부터 속도성분의 감소와 후연에서 와동이 나타나는 모습이 관찰되었다. 수치해석 결과에서도 이러한 모습이 관찰되었으나, 이러한 유동은 압력차가 회복되는 과정에서 나타나는 유동의 순환에 의한 현상으로 삼각형 범포에서와 같이 3차원 성분이 심하게 나타나는 와동과는 다른 모습을 보여 주었다.

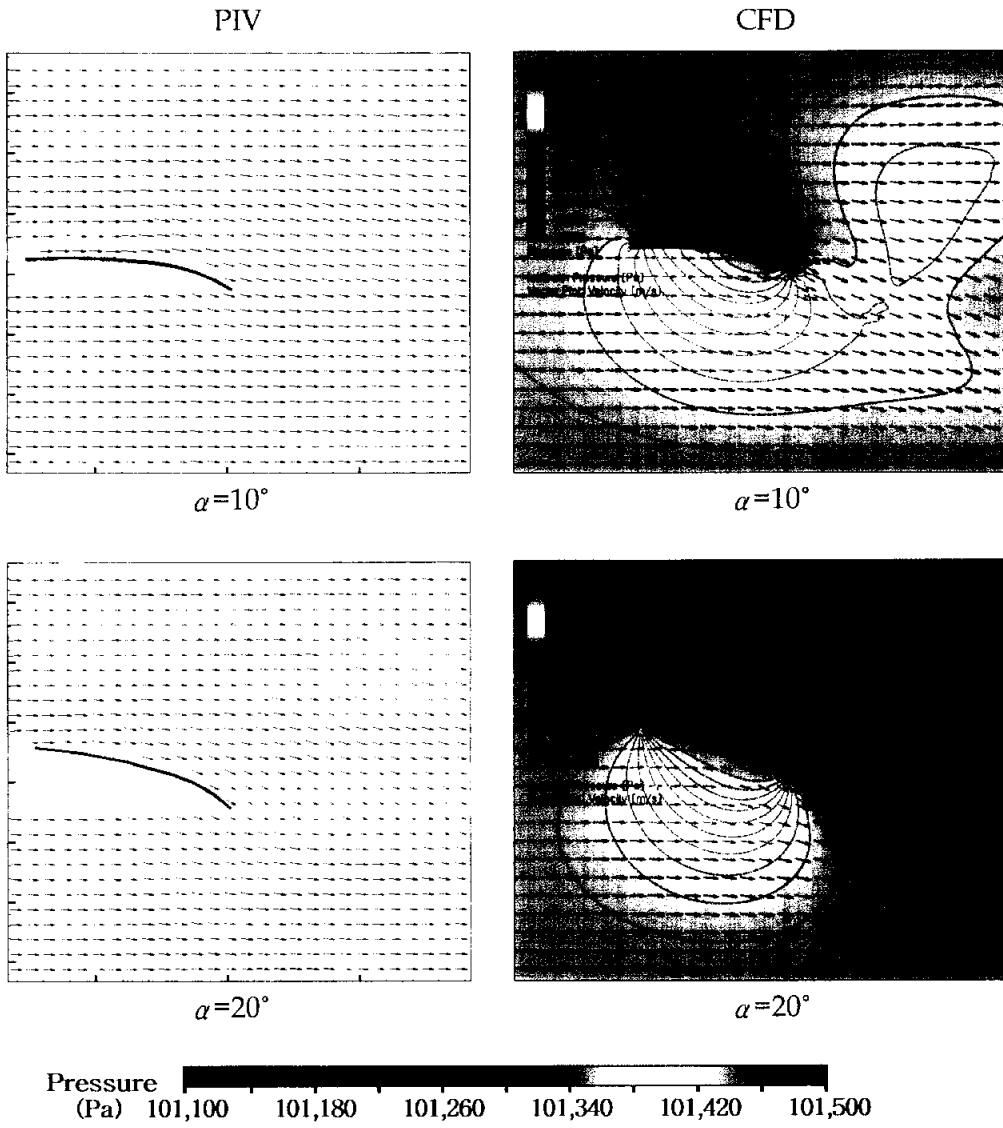


Fig. 3-7. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the inverted triangular canvas in accordance with angle of attack(α).

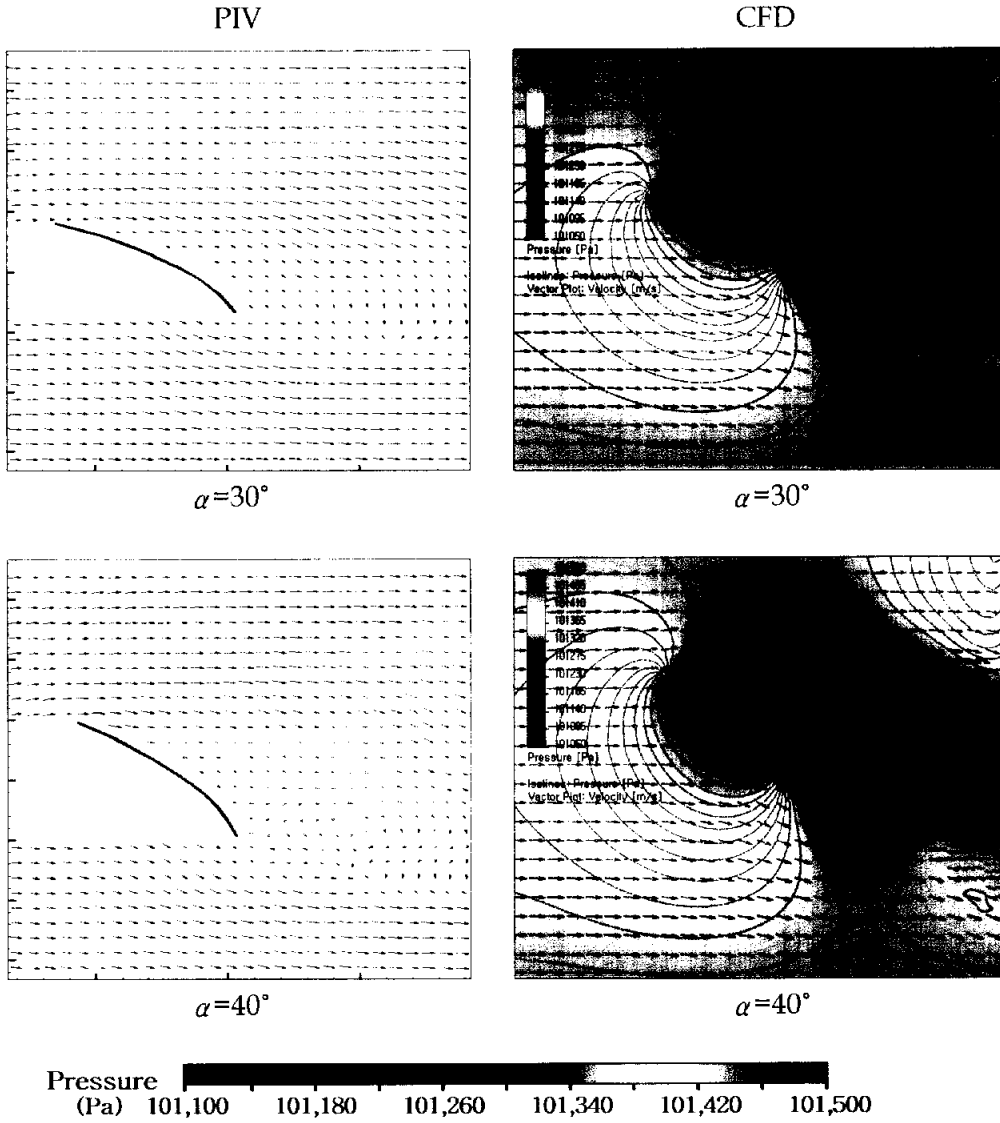


Fig. 3-7. Continued.

3.3.2. 범포 형태간 유동장 비교

영각이 증가함에 따라 와(渦)의 발생은 사각형, 삼각형, 역삼각형 순으로 나타났으며, 와의 크기도 이와 같은 순으로 사각형에서는 영각 20° 정도의 낮은 영역에서도 심하게 나타났다.

사각형 범포에서는 익단에서 발생한 3차원 성분의 유동 혼입에 의한 와동이 상대적으로 적고, 압력면에서 고압력 영역의 중심이 전연 쪽으로 나타났다. 압력차와 경계측 박리에 의한 재순환 영역에서 심한 와동이 영각 20° 정도의 낮은 영역에서도 발생하여 영각이 증가할수록 심한 와동이 나타났다. 이러한 영향으로 사각형 모형은 낮은 영각에서 양력계수가 높게 나타나지만, 영각이 증가할수록 양력계수의 감소도 크게 나타나며, 영각 20° 이상에서는 심한 진동과 함께 불안정한 특성이 나타났다.

삼각형 범포에서는 와동의 발생과 크기는 사각형 범포에 비하여 작았으나 흡입면의 고압력 영역 중심이 전연 쪽으로 상당히 치우쳐 있고, 후연으로 갈수록 익단와의 영향이 커지는 형상적 특징으로 인하여 압력차를 유지하기 어렵기 때문에 전반적으로 낮은 양력계수를 보여주었으며 다만, 영각의 변화에 비하여 양항력 변화가 작게 나타났다.

역삼각형의 경우 형상적 특성으로 낮은 영각에서도 압력차를 잘 유지하고, 후연의 범포 곡면이 변화가 커 후류를 아래 방향으로 가속하여 상대적으로 영각 10°와 같은 낮은 영각에서 높은 양력계수를 보여주었다. 다만, 최대양력계수는 사각형 범포에 비하여 낮았으나 영각의 변화에도 양·항력과 유동은 안정적이었다.

익단와의 발생과 크기는 모형에 따라 유동에 확연한 차이를 보였다. 익단와의 영향이 가장 크게 나타나는 범포 모형은 삼각형 모형이 가장 크고 사각형, 역삼각형 순으로 나타났다. 이러한 영향은 압력면의 고압력 영역 중심에도 변화를 주어 삼각형과 사각형 모형은 전연 쪽으로 치우쳐 있고 역삼각형은 후연 쪽으로 그 중심이 이동해 있었다. 범포를 중심으로 한 압력면과 흡입면의 고압력 영역 중심과 저압력 영역 중심의 변화는 범포에 작용하는 힘의 방향에 직접적으로 영향을 주게 된다.

사각형 범포에서는 경계층 박리로 인하여 형성된 재순환 영역에서의 압력이 상대적으로 커지며, 압력분포도 일반적인 날개이론으로 구한 분포와 매우 상이한 양상을 보인다. 즉, 흡입면 상의 압력이 날개 표면에서 가장 낮고 외부로 가면서 회복되는 경향을 보이나, 사각형 범포에서는 등압선이 날개의 익현의 방향으로 변화하였기 때문에 양력 방향보다 항력 방향으로 작용할 개연성이 높고, 또한, 실속 또는 심한 불안정성의 원인으로 작용하게 된다.

역삼각형 모형의 경우 주변의 등압선이 코드방향으로 비교적 고르게 분포되어 있음을 알 수 있으며 특히 전개판의 흡입면의 압력이 낮아졌고, 압력면 상에서도 범포의 전연과 후연에서 압력이 높은 영역이 넓게 나타나 양호한 압력분포가 얻어졌다.

범포의 유체역학적 특성은 흡입면과 압력면의 압력차와 유체의 운동량이 범포에 미치는 영향에 따라 얻어지게 되므로, 범포의 형상을 개발할 때에는 어떻게 압력차를 유지시키는가와 압력분포에 의한 힘의 방향을 고려하여 행하는 것이 매우 중요하다고 할 것이다.

3.4. 요약

범포 형상별 주위의 유동 특성을 규명하고자 사각형, 삼각형, 역삼각형 모양의 범포를 영각을 달리하여 PIV 측정 및 그와 같은 실험조건으로 컴퓨터를 이용하여 수치 해석을 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 범포의 수치해석 결과와 실험값의 양·항력계수 비교

1) 수치해석에 의한 해석 결과, C_L, C_D는 실험값보다 전체적으로 작게 나타났으며 영각 10°, 20°, 30°에서는 5~20% 정도 작게, 영각 40°에서는 20% 이상 작게 나타났다.

2) 수치해석에 의한 해석값의 양항비 변화는 영각 10°에서는 8~13% 정도 작게 나타났으며, 영각 20°, 30°, 40°에서는 실험값과의 차이가 10% 이하로 모두 유사하게 나타났다.

2. 범포 형태간 유동장 비교

1) 영각 10°에서 흐름은 범포 모형의 면을 따라 원활한 유동을 보여주어 거의 층류에 가까운 정상상태로 볼 수 있었다. 특히, 역삼각형의 경우, 전연에서 1/2을 지나면서 곡면의 변화가 커짐에 따라 아래쪽으로 향하는 속도성분이 강하게 나타났다.

2) 영각 10°에서 압력장의 분포도 점층적으로 안정된 양상을 보여주었다. 특히, 사각형과 삼각형은 압력면의 고압력 영역의 중심이 전연 쪽으로 약간 치

우친 경향이 나타났으며, 역삼각형은 후연으로 치우친 경향이 나타났다.

3) 영각 20°에서 사각형과 삼각형 범포는 전연에서부터 경계층 박리에 의한 와동이 나타나면서 후연으로 갈수록 난류가 심하게 나타났다. 그러나 역삼각형 범포는 경계층 박리나 와동의 발생 없이 흡입면과 압력면의 압력차가 원활히 유지되어 안정된 모습을 보여주었다.

4) 영각 30°와 40°에서 사각형, 삼각형 범포는 PIV와 수치해석 압력장에서 전연부에서부터 경계층 박리가 관찰되어 와동과 복잡한 유동 현상이 관찰되었으며, 역삼각형 범포는 전연에서부터 속도성분의 감소와 후연에서 와동이 나타나는 모습이 관찰되었다.

5) 영각의 증가에 따른 와(渦)의 발생은 사각형, 삼각형, 역삼각형 순으로 나타났으며, 와의 크기도 이와 같은 순이었다.

6) 익단와의 영향이 가장 크게 나타난 모형은 삼각형 범포가 가장 크고 다음으로 사각형, 역삼각형 순이었다.

제4장. 범포의 어구 적용 실험

4.1. 서론

범포의 양·항력 특성 실험, PIV 실험, CFD 해석 등 앞에서 실시한 이전의 실험 및 해석을 통하여 범포 형태에 따른 범포 자체의 유체역학적 특성을 알아보았다. 그런데 범포는 유연체이므로 유속변화와 그 밖의 요소에 의하여 그 형태가 다양하게 변화하므로 이전 실험에서 도출된 특성치를 이용하여 어구를 설계한다면 여러 가지 오류가 발생할 수 있다. 따라서 범포를 어구에 부착할 때에는 부착 및 운용의 편의성을 감안하여야 하고 실험 시 도출된 범포의 특성치를 계산하여 어구에 적용할 수 있도록 실험 시와 가장 유사한 형태를 갖도록 부착하여야 한다. 그런데 두 경우의 형상이 완전히 일치하지 않는 경우가 많으므로 그동안 응용 분야에서는 범포를 직접 그물에 부착하여 유속의 변화에 따른 그물 자체의 형상변화 등을 관찰하는 연구를 많이 해왔다.

한편, 자루형 예망 그물에 있어서 고기를 잘 잡기 위해서는 선박이 그물을 예망할 때 그물의 입구(網口)가 잘 전개되도록 하여야 한다. 그물입구를 전개시키기 위하여 처음에는 그물입구에 그 형태를 잡아주는 틀이나 장대를 부착하였으며 이후에 부자(浮子)가 개발되면서 이것으로 대체되었고 어구가 대형화 될 수 있었다. 부자가 가지는 여러 가지 장점도 있지만 안전성, 취급불편 등 단점도 가지고 있어 범포를 부력재로 사용하기 시작하였다. 이것이 처음 고안되었을 때에는 사각형 범포 한 장을 천장망 위에 부착하거나 뜸줄 앞쪽에

줄을 하나 더 내고 그 사이에 범포를 연결하는 방법이 사용되었다. 그러나 이러한 방법은 투망 초기의 전개가 어렵고 예망 중 좌우로 방향을 바꿀 때 어구의 형상이 비틀리는 단점이 있었다. 이것은 비틀림이 어려운 범포 1개를 크게 사용함으로써 발생되는 것이다. 이 문제를 해결하기 위하여 범포 2개를 양쪽 날개 쪽으로 분리하여 사용한 경우(光沢 등, 1996)가 있었는데 범포의 양력이 양 측면으로 분산되어 효율이 많이 떨어진다는 단점이 있었다. 현재까지의 여러 가지 관점에서 볼 때 범포 부력재는 뜸줄 가운데를 중심으로 개별식으로 부착하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

한편, 범포의 양·항력 특성 실험과 PIV 및 CFD 분석을 통하여 범포 주위의 유동장을 가시화한 결과, 종횡비 2:1인 삼각형 범포가 타 모형에 비하여 어구 부착의 용이성, 안정성 등을 고려하여 어구에 사용하기 가장 적합한 모형으로 생각되며, 영각 10° 이하는 C_L이 아직 증가 중에 있고 30° 이상에서는 양항비가 적으므로 20~30°에서 운영되는 것이 바람직하다고 생각되었다.

따라서, 본 실험에서는 범포를 트롤과 같은 자루형 그물에 부착하여 부력재로 사용할 경우, 가장 적합하다고 판단된 범포를 실제로 어구에 부착하는 방법을 고안하고 그 때의 연결상태를 재현하여 유속에 따른 형상변화 및 양·항력 특성치를 도출함으로써 향후 범포를 부착한 어구 개발 연구의 기초적 자료를 얻고자 하였다. 즉, 본 실험에서는 종횡비가 2:1인 삼각형 범포를 자루형 그물의 천장망 앞쪽에 몇 가지 방법으로 부착할 경우의 역학적 특성을 서로 비교해 보았다.

4.2. 재료 및 방법

4.2.1. 어구 적용 방법

본 실험에서 사용한 범포의 어구 적용 방법을 Fig. 4-1에 나타내었다. Fig. 4-1(a)는 자루형 그물의 기존 뜸줄 위쪽에 범포를 연결할 길이 만큼 한 줄을 나란히 만들고 두 줄을 부자(浮子)를 관통시켜 연결한 뒤, 삼각형 범포의 밑변을 앞쪽으로 향하게 하여 두 꼭지점을 새로 만든 줄에 연결하고 다른 한 꼭지점은 뜸줄에 연결된 그물부의 한 매듭에 연결한 것이다. 여기서 기존의 뜸줄을 하부 뜸줄(head rope), 새로 만든 줄을 상부 뜸줄(float rope)이라 하였다. 그림에서 흐름이 없을 때에는 만곡현의 시고(矢高, camber) a와 d의 길이는 0이다. 또 범포의 양 측면을, 물의 저항을 받을 때 만곡이 생기지 않도록, 그물과 연결시켜 놓은 경우와 연결하지 않은 경우로 나누어 실험하였다.

Fig. 4-1(b)는 기본적으로는 (a)와 비슷한 방법으로 연결하지만 뜸줄에 범포의 두 꼭지점을 직접 연결하고 처음부터 만곡이 생기도록 a의 길이를 주어 원추를 반으로 잘라놓은 듯한 모양으로 부착한 것이다. 이 경우에도 ∠APO의 크기에 따라 두 경우로 나누어 실험하였다. 범포의 양 측면은 물의 저항을 받을 때 들리지 않도록 그물면에 연결되어 있다.

따라서 본 실험에서는 위에서 언급한 4가지의 경우에 대하여 어구에 범포를 부착하였을 때와 같은 모양으로 취부장치에 부착하고 양·항력 및 형상변화를 측정하였다.

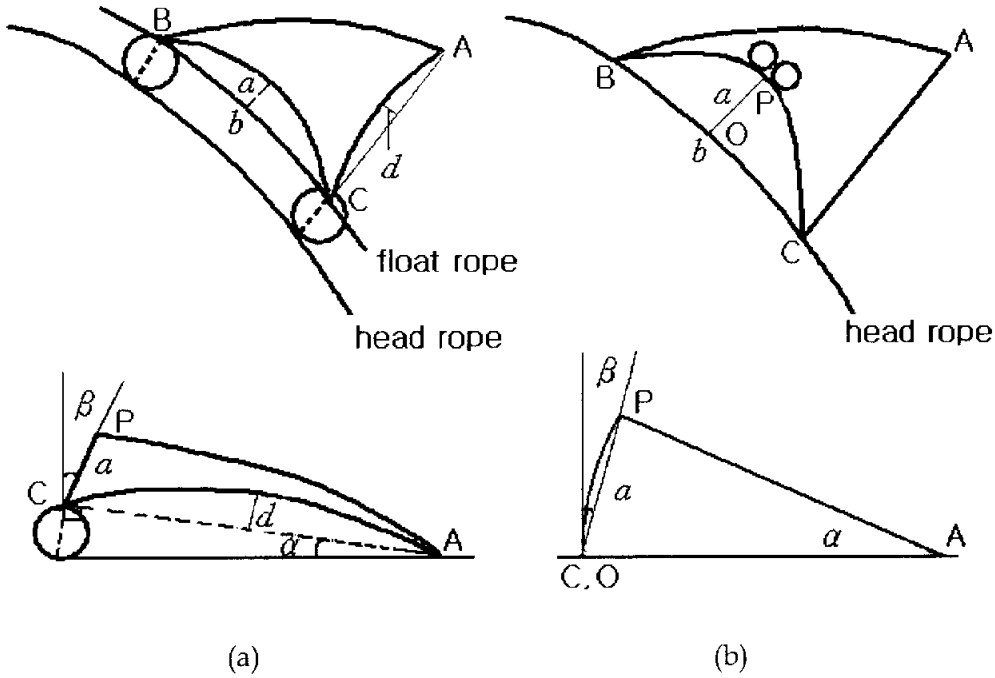


Fig. 4-1. The applicative device of the canvas kite as buoyant article.

4.2.2. 실험 장치 및 모형

실험에서 사용한 실험 수조, 계측 장치는 제2장 양·항력 특성 실험에서 사용한 것과 같다. 다만, 취부장치는 본 실험에 적합하도록 Fig. 4-2와 같이 일부 수정하여 사용하였다. 즉, 굵기가 10 *mm*인 직사각형 틀의 내부에 직경이 4 *mm*인 스테인리스 봉 두개를 177 *mm* 거리를 띄워 서로 평행하게 고정시키고, 종횡비가 2:1인 삼각형 범포가 꼭 맞도록 직경이 3 *mm*인 스테인리스 봉 2개를 직각으로 고정시켰다.

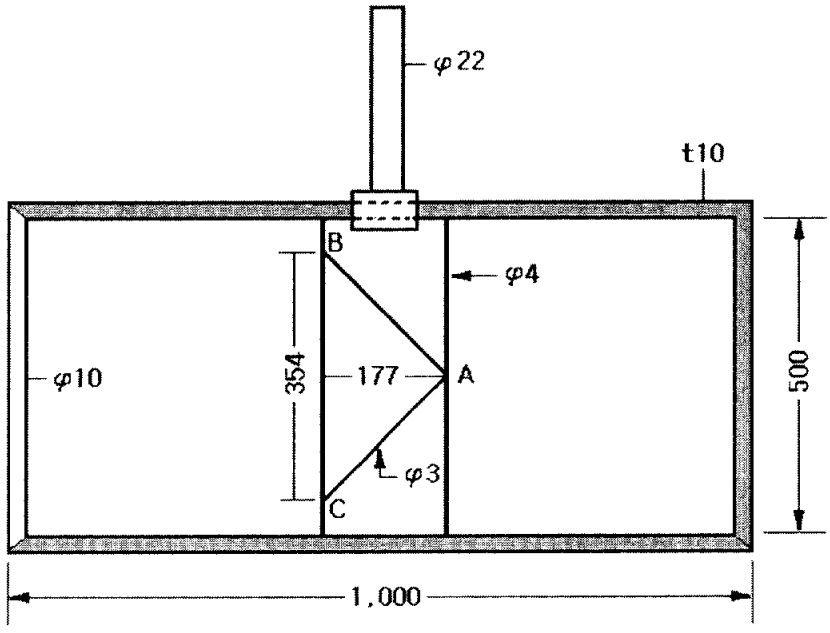
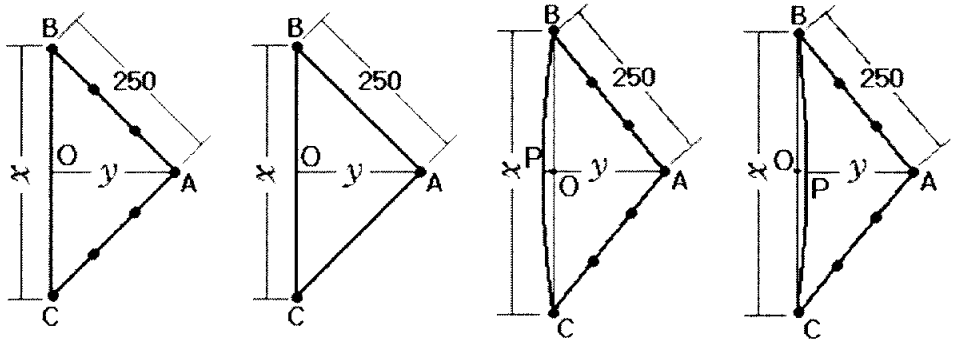


Fig. 4-2. The insallation frame of kite.

실험에 사용한 범포 모형의 형태 및 규격은 Fig. 4-3 및 Table 4-1과 같다. 그림에서 A, B형은 Fig. 4-1(a)의 경우를 실험하기 위해 제작한 종횡비 2:1인 모형 범포이고 C, D형은 Fig. 4-1(b)의 경우를 실험하기 위해 제작한 것인데, C형은 $\overline{PA}$를 177 mm로 고정 설계한 것이고 D형은 ∠APO를 90°로 고정 설계한 것이다. 또, C, D형은 어구에 설치되었을 때 밑면과 모선의 각(α)이 각각 20°, 25° 및 30°가 되도록 설계하였다. 범포의 전개도에서 삼각형의 양옆 변은 모두 250 mm로 통일하였다. 따라서 전개도에서 삼각형의 밑변은 그림과 같이 원호 모양으로 된다.

범포의 재질은 폴리아미드(polyamid, PA), 두께는 1 mm이다. 범포를 취부장치에 연결하는 방법은 범포의 각 꼭지점 A, B, C를 취부장치의 점 A, B, C에 대응하여 연결하고 양옆 변은 균등하게 3등분하여 2지점을 취부장치의 스테인리스 봉에 바느질로 묶었다. 그러나 B형은 묶지 않았다.



(type A) (type B) (type C) (type D)

Fig. 4-3. The design drawing of experimental models.

Table 4-1. The experimental cases by the model and condition

model case	$\angle \alpha(^\circ)$	$\angle$APO($^\circ$)	$\overline{BC}$, $\widehat{BC}$ (x mm)	$\overline{PA}$ (y mm)	connection of side line
type A1	20	-	354	177	○
type B1	20	-	354	177	×
type C1	20	80	381	177	○
type D1	20	90	380	166	○
type A2	25	-	354	177	○
type B2	25	-	354	177	×
type C2	25	77.5	394	177	○
type D2	25	90	392	160	○
type A3	30	-	354	177	○
type B3	30	-	354	177	×
type C3	30	75	410	177	○
type D3	30	90	406	153	○

* ○ : connected, × : disconnected

4.2.3. 실험 방법

범포를 어구에 적용하는 위의 두 가지 방안은 Fig. 4-1과 같이 모두 초기 부력을 위한 작은 부자를 사용하는 것이다. 그러나 부자의 양·항력은 계산에 의하여 가능하므로 본 실험에서는 부자 없이 범포만 취부에 설치하여 실험하였다.

실험에 사용한 모형과 실험 조건에 따라 나누어지는 경우의 수는 Table 4-1에 나타낸 바와 같으며, 표에서 영각은 20°, 25°, 30° 세 경우에 대하여, 모형의 형태는 삼각평면형과 반원추형 범포에 대하여 실험하였다.

한편, Table 4-1에서 A, B형은 Fig. 4-1의 (a)와 같이 연결하는 것인데 그 형상처럼 범포를 영각 $\alpha°$ 만큼 들리도록 하여 가늘 줄로 취부장치와 연결하여 실험하는 것이 좋겠으나 그와 같이 실험을 실시해 본 결과 범포가 움직이는 현상이 심하여 정확한 양·항력값을 얻기 힘들고 사진 촬영하여 형상변화를 관찰하기에도 어려운 점이 많았다. 또, 실제 어구에서는 두 뜸줄 사이에 부자가 있고 범포도 3~5개를 사용하며 마지막 상부 뜸줄을 하부 뜸줄에 비스듬이 연결하기 때문에 전체가 고정되어 있는 형상이다. 따라서 본 실험에서는 위의 취부장치에 삼각형 범포를 직접 연결한 후, 취부장치를 $\alpha°$ 만큼 회전시켜 필요한 계측을 하였다. 그러나 C, D형은 범포 자체 형상에서 영각(α)이 만들어지므로 취부장치는 회전시키지 않았다.

실험은 0.2~1.0 m/s 유속 범위에서 0.1 m/s 간격으로 각 모형의 양·항력을 측정하였다. 이 때 레이놀즈수는 식 (2-2)로부터 $2.96\times10^4 \sim 1.48\times10^5$ 이다.

측정 방법은 모든 모형에 대하여 1초에 1,000개의 데이터를 20초간을 측정하고 그 평균값을 취하였다. 양력계수(C_L), 항력계수(C_D), 양항비(C_L/C_D) 등은 측정된 양력과 항력으로부터 식 (2-3), (2-4), (2-5)에 의하여 계산하였다.

한편, 유속에 따른 모형 범포의 형상변화는 Photo 4-1과 같이 측정 시마다 사진을 촬영한 후 컴퓨터에서 화상 처리하여 관찰하였다. 즉, 고정되지 않은 범포의 각 변은 흐르는 물의 힘을 받아 만곡을 이루게 되는데, 이 때 만곡꼭지점의 높이 a와 d를 사진에서와 같이 그림파일의 좌표값을 이용하여 측정하였다. 또, 범포 밑변이 이루는 만곡선이 포함된 평면이 흐름에 수직인 평면과 이루는 각 β도 측정하였다.

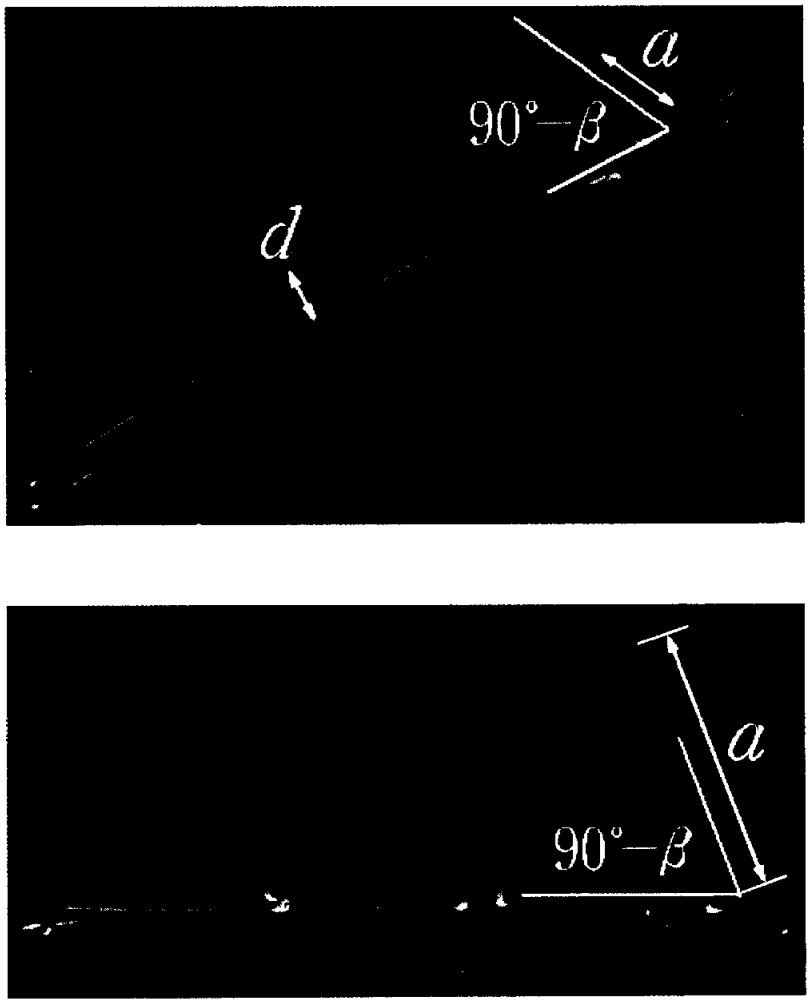


Photo 4-1. The measuring of the shape change of canvas.

4.3. 결과 및 고찰

범포를 어구에 부착하였을 때 범포의 유체역학적 특성을 알아보기 위하여 범포를 자루형 그물에 부착하는 방법을 고안하고 그 방법에 따라 모형 범포를 취부장치에 설치한 뒤, 범포의 양·항력 특성 및 유속에 따른 형상변화를 측정한 결과는 다음과 같다.

4.3.1. 범포의 양·항력 비교

각 유형별 모형의 유속에 따른 양·항력 특성을 Fig. 4-4, Fig. 4-5 및 Fig. 4-6에 나타내었다. Fig. 4-4와 같이 영각 20°에서 유속에 따른 전개력계수 C_L의 변화를 보면, 0.2 m/s에서 A1형이 1.05로서 가장 컸고 그 다음으로 B1형, C1형, D1형 순이었다. A1형은 유속 0.4 m/s까지 완만하게 감소하다가 1.0 m/s까지 0.91 전후의 고른값을 나타내었다. B1형은 A1형보다 조금 작은 값을 유지하며 A1형과 아주 비슷한 패턴이었다. C1형은 유속 0.2 m/s에서 0.63으로 가장 작았으나 점점 커져서 유속 1.0 m/s에서는 A형과 B형의 중간 값을 나타내었다. D1형은 C1형과 거의 유사하고 그 값은 조금 작았다. A1, B1, C1, D1형 모두 유속 0.5 m/s에서는 약간 크게, 0.6 m/s에서는 약간 작게 나타났는데 이것은 해당 유속에서 유속에 따른 유체력의 증가로 범포의 모양이 변화했기 때문으로 생각된다.

한편, 유속에 따른 항력계수 C_D의 변화를 보면, 0.2 m/s에서 A1형이 0.65로서 가장 컸고 그 다음으로 B1형, D1형, C1형 순이었다. A1형은 유속 0.3

m/s부터 1.0 m/s까지 0.42 정도의 비슷한 값이 나타났다. B1형은 A1형보다 조금 작은 0.30 정도의 일정한 값이 나타났으며, C1형 및 D1형은 유속 0.2 m/s에서 약 0.1로 가장 작았으나 점점 커져서 유속 1.0 m/s에서는 C_L과 마찬가지로 A1형과 B1형의 중간 값을 나타내었다. A1, B1, C1, D1형 모두 유속의 변화에 따른 항력계수는 거의 일정하였다.

유속의 변화에 따른 양항비는 C1형이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 D1형, B1형, C1형 순이었다. 그것은 C1형이 다른 것에 비하여 C_L은 조금 작았지만 C_D은 많이 작았기 때문이다. A1, B1, C1, D1형 모두 유속 0.4 m/s에서부터 안정화되기 시작하여 그 이후는 약간의 감소와 증가는 있지만 큰 변화는 없었다.

Fig. 4-5와 같이 영각 25°에서 유속에 따른 전개력계수 C_L의 변화를 보면, 0.2 m/s에서 A2형이 1.10로서 가장 컸고 그 다음으로 B2형, C2형, D2형 순이었으나 0.5 m/s 이후부터는 A2, B2, C2형은 값이 비슷해 졌다. 따라서 C_L에 있어서 A2, B2, C2형 모두 값의 차이도 작기 때문에 그 우열을 가리기 어려웠다. A1, B1, C1, D1형과 마찬가지로 모두 유속 0.5 m/s에서는 약간 크게, 0.6 m/s에서는 약간 작게 나타났다.

한편, 유속에 따른 항력계수 C_D의 변화를 보면, 0.2 m/s에서 A2형이 0.68로서 가장 컸고 그 다음으로 B2형, C2형, D2형 순이었다. A2형은 유속 0.4 m/s부터 1.0 m/s까지 0.54 정도의 비슷한 값이 나타났다. B2형과 C2형은 유속 0.5 m/s부터 1.0 m/s까지 각각 0.5, 0.35 정도의 거의 비슷한 값을 가지며 거의

변화가 없었다. D2형은 유속이 빠를수록 아주 조금 증가하는 패턴이었다.

유속의 변화에 따른 양항비는 D2형이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 C2형, B2형, A2형 순이었다. 네 모형 모두 전 유속에서 변화 없이 거의 일정한 값이 유지되었는데 그 값은 D2형은 약 2.57, C2형은 약 2.39, B2형은 약 1.81, A2형은 약 1.62 정도이었다.

Fig. 4-6과 같이 영각 30°에서 유속에 따른 전개력계수 C_L의 변화를 보면, 0.2 m/s에서 A3형이 1.14로서 가장 컸고 그 다음으로 B3형, C3형, D3형 순이었으나 0.5 m/s까지는 C3형, B3형, D3 순이었고 이후 1.0 m/s까지는 C3형, A3형, B3형, D3형 순이었다. 따라서 C_L에 있어서 A3, B3, C3형 모두 값의 차이도 작기 때문에 그 우열을 가리기 어려웠다. 앞의 여러 모형과 마찬가지로 모두 유속 0.5 m/s에서는 약간 크게, 0.6 m/s에서는 약간 작게 나타났다.

한편, 유속에 따른 항력계수 C_D의 변화를 보면, 0.2 m/s에서 A3형이 1.10으로서 가장 컸고 그 다음으로 B3형, C3형, D3형 순이었다. A3형은 유속 0.4 m/s부터 1.0 m/s까지 0.68 정도의 비슷한 값이 나타났다. B3형과 C3형은 유속 0.4 m/s부터 1.0 m/s까지 0.5 정도의 거의 비슷한 값을 가지며 거의 변화가 없었다. D3형은 유속이 빠를수록 아주 조금 증가하는 패턴이었다.

유속의 변화에 따른 양항비는 D3형이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 C3형, B3형, A3형 순이었다. 네 모형 모두 전 유속에서 변화 없이 거의 일정한 값이 유지되었는데 그 값은 D3형은 약 2.20, C3형은 약 1.92, B3형은 약 1.63, A3형은 약 1.31 정도이었다.

이러한 결과를 바탕으로 A1에서 D3까지 12가지 모형을 자루형 그물의 부력재로 사용할 경우 가장 양호한 성능을 나타낼 것으로 예상되는 모형은 다음과 같이 선택할 수 있다. C_L은 영각 20°일 때와 30°일 때가 거의 같다. 따라서 양항비를 고려하면 영각 20°일 때의 유형이 그 값이 크므로 부력재로서 더 양호하다 하겠다. 또, 그 중에서도 값이 가장 큰 C1형이 가장 좋을 것이다. 특히, C1형은 범포의 양옆 변이 어구에 직접 연결되어 있어 견고성도 좋을 것으로 생각된다.

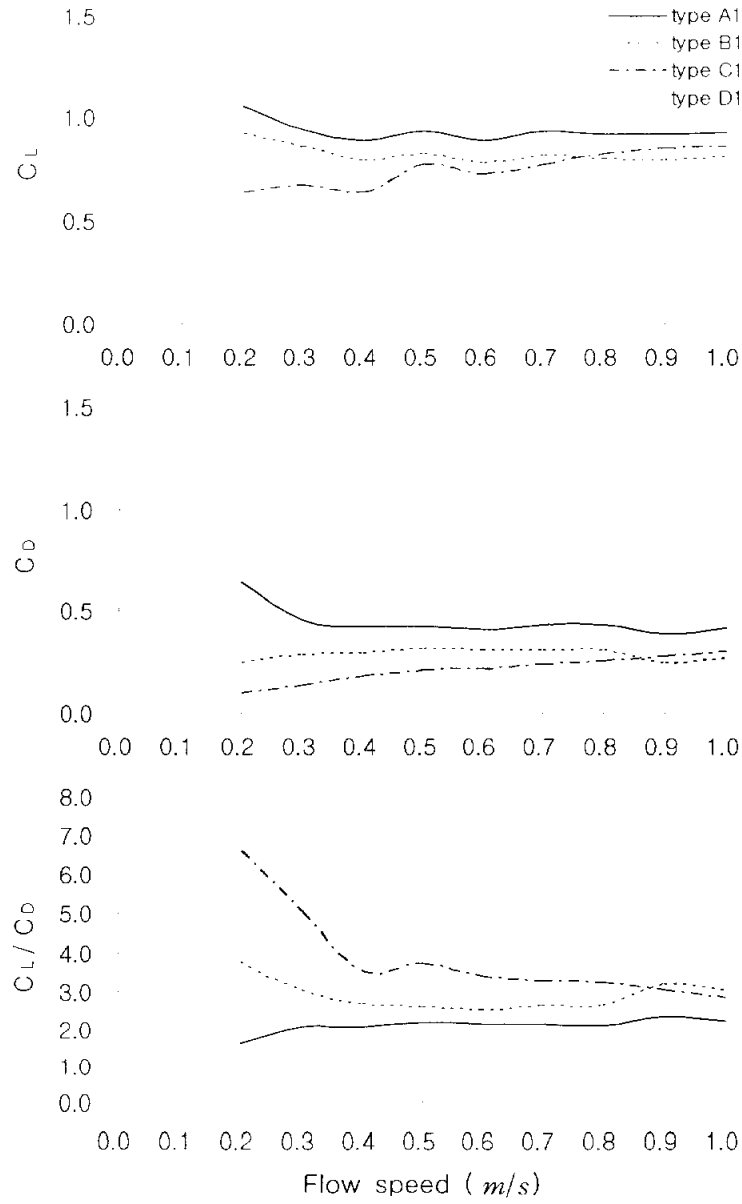


Fig. 4-4. The efficiency of the triangular and the half-conoid canvas in accordance with flow speed(α =20°).

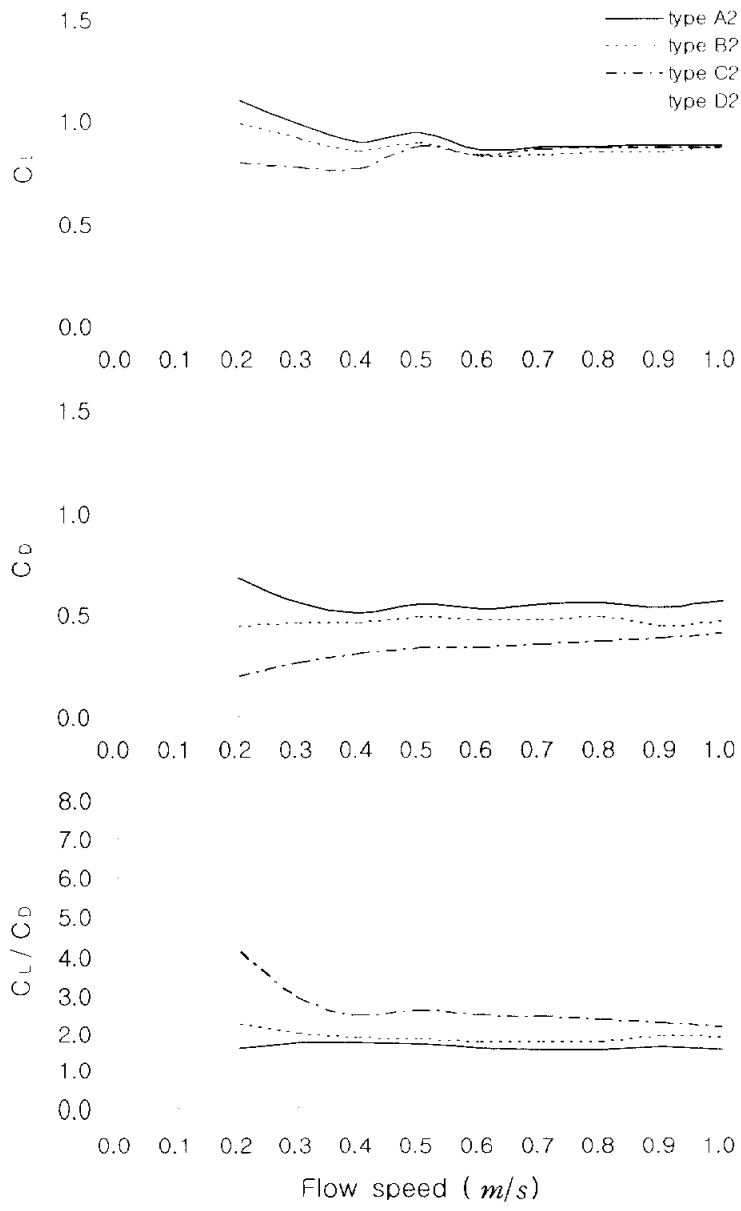


Fig. 4-5. The efficiency of the triangular and the half-conoid canvas in accordance with flow speed(α =25°).

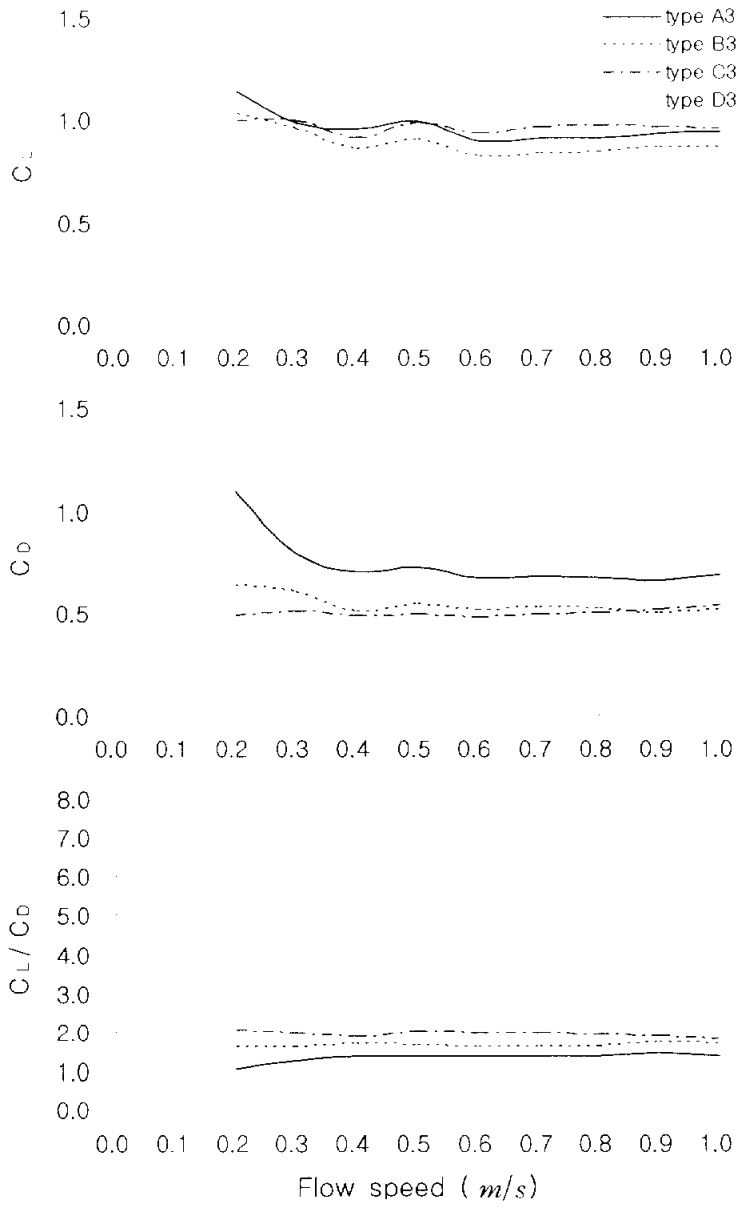


Fig. 4-6. The efficiency of the triangular and the half-conoid canvas in accordance with flow speed(α =30°).

4.3.2. 범포의 유속에 따른 형상 변화

각 유형별 모형의 유속에 따른 형상 변화를 Table 4-2에 나타내었다. 먼저 A1형은 유속 0.2 m/s에서 시고 a가 11.67 mm, 0.6 m/s에서 19.93 mm, 1.0 m/s에서 33.65 mm로서 유속이 빠를수록 그 값이 3배정도 증가하였다. A1형에서 양옆 변을 취부에 연결하지 않은 B1형도 12.39 mm, 25.96 mm, 34.72 mm로서 비슷한 경향이 나타났으며, d는 각각 7.76 mm, 12.36 mm, 16.20 mm로 나타났다.

A3, B3형의 a의 변화는 유속 0.2, 0.6, 1.0 m/s에서 각각 23.99, 26.79, 36.56 mm와 26.35, 26.44, 37.23 mm로서 A1, B1형에 비하여 0.2 m/s에서는 약 두 배 정도이지만 0.6 m/s 이상에서는 약간 큰 값을 가지는 정도였다. 범포는 흐름에 의한 유체력을 받으면 늘어나게 되는데 신장범위 내에서 처음에는 작은 힘에도 쉽게 늘어나고 이후에는 힘의 제곱근에 비례하여 늘어나다가 끝에 가서는 전혀 늘어나지 않을 것이다. 따라서 유속이 낮아 유체력이 작을 때에는 영각 20°보다 30°가 만곡이 생기기에 더 유리하기 때문에 A3, B3형이 느린 유속에서도 만곡이 많이 생기며 어느 정도이상의 유체력을 받을 수 있는 유속에서는 비슷해진다는 것을 말한다. B3형에서 d의 유속에 따른 값은 9.99, 13.85, 17.89 mm로서 B1형보다 약간 컸다.

또, A2, B2형의 a 및 d의 변화는 대부분 20°와 30°일 때 값의 중간 값으로 나타났다.

한편, 범포 밑변이 이루는 만곡선이 포함된 평면이 흐름에 수직인 평면과

이루는 각 β의 값은 A1, B1형 모두 유속 0.2 m/s에서는 14°, 1.0 m/s에서는 15°이고 A2, B2형은 각각 17°, 18°이었으며 A3, B3형에서는 20°, 21°로 나타나 흐름에 의하여 어느 정도 뒤쪽으로 밀리지만 유속이 빨라져 많은 유체력을 받아도 범포의 안쪽 면에서 전체적으로 면에 수직인 방향으로 힘을 받기 때문에 유속이 증가하더라도 β의 값은 그다지 증가하지 않는 것으로 판단된다.

한편, C1형, C2형, C3형에 있어서 유속 0.2, 0.6, 1.0 m/s에 따른 a의 변화는 각각 47.29, 65.93, 76.36 mm, 84.47, 86.49, 88.32 mm 및 97.61, 98.53, 99.89 mm로서 조금씩 증가하는 패턴이 나타났는데, 영각 20°인 C1형에서는 차이가 많이 있는 편이나 30°인 C3형에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 영각이 크면 낮은 유속에서도 범포 면에 수직이 유체력을 많이 받을 수 있기 때문으로 판단된다. 즉, a의 값은 설계에서는 C1형의 경우 61.47 mm, C2형의 경우 76.62 mm, C3형인 경우 91.62 mm인데, C1형의 경우 유속 0.2 m/s에서 47.29 mm로 나타났으며, 이것은 영각이 작고 유속도 낮아 범포가 범포 면에 수직인 방향의 유체력을 제대로 받지 못하여 설계값보다 더 작은 값이 나온 것으로 생각된다.

또, 각 β의 값은 C1형은 유속 0.2 m/s에서는 12°, 1.0 m/s에서는 13°이었으며, C2형에서는 15°, 16°, C3형에서는 17°, 18°로 나타나 흐름에 의하여 어느 정도 뒤쪽으로 밀리지만 A, B형과 마찬가지로 유속이 증가하더라도 β의 값은 그다지 증가하지 않았다.

D1형, D2형, D3형에 있어서 a의 설계값은 60.54 mm, 74.80 mm, 88.50 mm

인데, 유속 0.2, 0.6, 1.0 m/s에 따른 값의 변화는 각각 50.45, 63.75, 73.38 mm, 82.67, 84.84, 85.61 mm 및 94.72, 95.69, 97.12 mm로서 C형의 결과 패턴과 비슷하게 나타났다.

또, 각 β의 값은 D1형은 유속 0.2 m/s에서는 22°, 1.0 m/s에서는 23°이었으며, D2형에서는 26°, 27°, D3형에서는 31°, 32°로 나타나 흐름에 의하여 어느 정도 뒤쪽으로 밀리지만 A, B, C형과 마찬가지로 유속이 증가하더라도 β의 값은 그다지 증가하지 않았다.

Table 4-2. The camber change of canvas by the flow speed

model type	camber, $a(mm)$			camber, $d(mm)$		
	0.2 m/s	0.6 m/s	1.0 m/s	0.2 m/s	0.6 m/s	1.0 m/s
A1	11.67	19.93	33.65	-	-	-
B1	12.39	25.96	34.72	7.76	12.36	16.20
C1	47.29	65.93	76.36	-	-	-
D1	50.45	63.75	73.38	-	-	-
A2	18.22	25.53	34.87	-	-	-
B2	20.28	26.67	35.60	8.82	13.34	17.31
C2	84.47	86.49	88.32	-	-	-
D2	82.67	84.84	85.61	-	-	-
A3	23.99	26.79	36.56	-	-	-
B3	26.35	26.44	37.23	9.99	13.85	17.89
C3	97.61	98.53	99.89	-	-	-
D3	94.72	95.69	97.12	-	-	-

4.3.3. 부자(浮子)와 범포의 양·항력 비교

본 논문에서 사용한 범포의 어구 적용 방법에 의하면 범포를 실제로 어구에 적용할 때에는 초기 부력을 위하여 기존의 부자보다 적은 부자를 범포와 함께 사용하여야 한다. 위의 실험 결과를 토대로 실제로 조업현장에서 사용되고 있는 현용 트롤 어구에 범포를 부력재로 사용하였을 때, 부자만 사용할 경우와 범포와 부자를 병행하여 사용할 경우에 대하여 양력과 항력을 비교 및 고찰하면 다음과 같다.

Fig. 4-6은 베링해 및 오호츠크해 연안, 수심 100~200 *m*에서 운용되고 있는 3,300마력급 저층 트롤어구의 설계도이다. 어구의 규모는 전체를 뻗친 길이가 46,54 *m*이고 뜸줄부의 길이가 40.42 *m*이며, 직경이 0.240 *m*이고 부력이 4.45 *kgf*인 부자 94개를 사용(총 부력은 459.2 *kgf*, 총 침강력은 527.78 *kgf*)한다. 이중 천장망과 연결된 뜸줄의 길이는 5.2 *m*이고 부자 20개를 사용하며, 망목(網目) 0.4 *m*인 로프망이 26코 걸려있다. 따라서 한 코의 길이는 0.2 *m*, 가로 성형률은 50%, 세로 성형률은 86.6%이다.

종횡비가 2:1인 삼각형 범포를 위 어구의 뜸줄과 천장망에 부착할 때, 범포의 크기 및 연결부위를 Fig. 4-7에 나타내었다. 그림에서 삼각형 범포의 밑변은 0.8 *m*이고 그물 4코에 연결되며 꼭지점은 그물코의 한 매듭에 연결된다. 나머지 연결부위는 그물코를 이루는 로프와 연결된다.

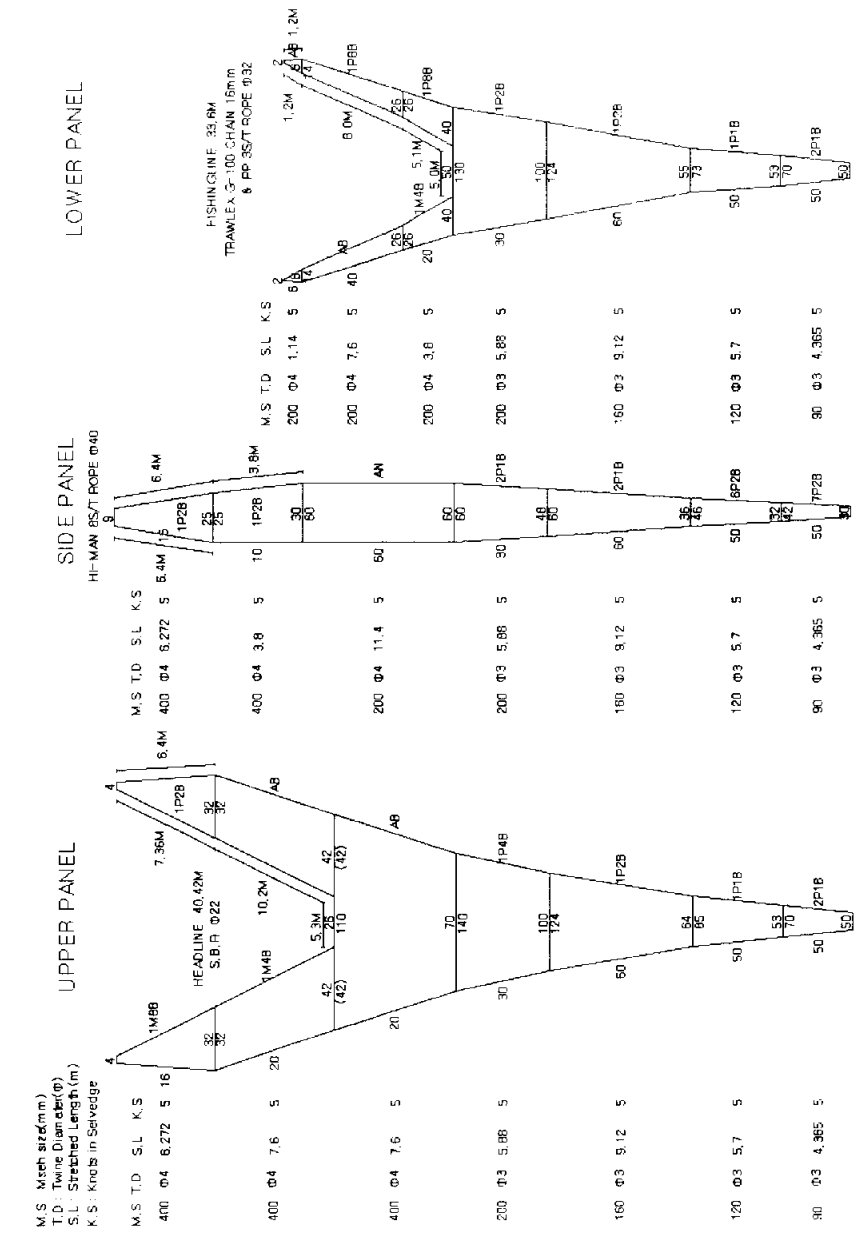


Fig. 4-7. The drawing of the full scale bottom trawl net.

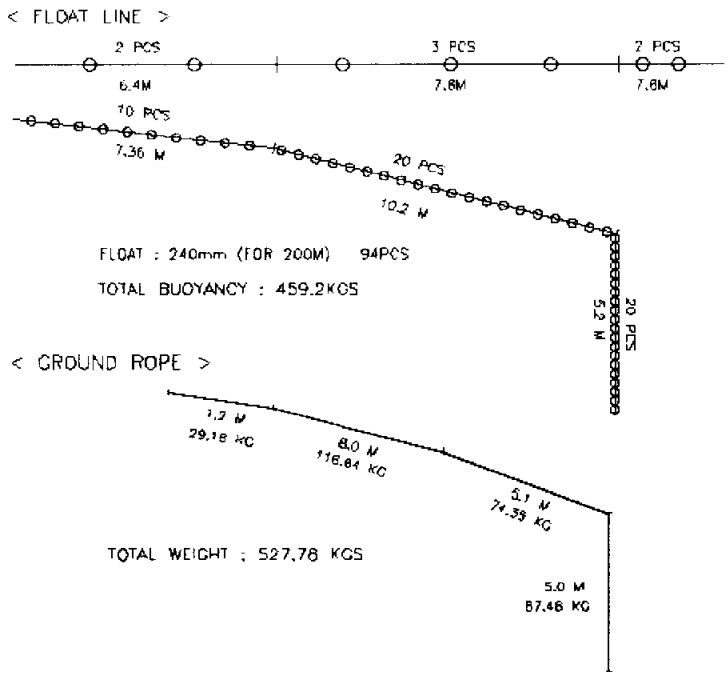


Fig. 4-7. Continued.

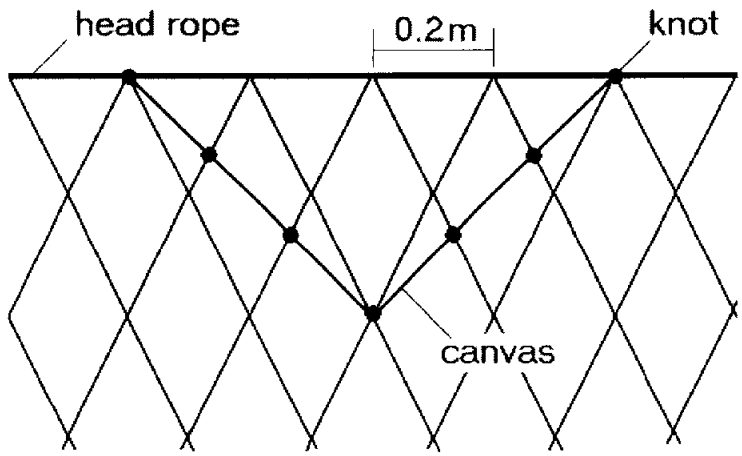


Fig. 4-8. The connective method of the canvas kite and the net.

위의 방법처럼 트롤 어구에 범포를 부력재로 사용하였을 때, 부자만 사용할 경우와 범포와 부자를 병행하여 사용할 경우에 대하여 양력과 항력을 비교 및 계산하면 다음과 같다.

부자에 의한 부력을 L_f, 부자에 의한 항력을 D_f, 범포에 의한 양력을 L_k, 범포에 의한 항력을 D_k라 하면 각각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_f = B_f \times n_f \tag{4-1}$$

$$D_f = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \times n_f \tag{4-2}$$

$$L_k = \frac{1}{2} C_L \rho S V^2 \times n_k \tag{4-3}$$

$$D_k = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \times n_k \tag{4-4}$$

여기서, B_f는 부자 한개의 부력(kgf), n_f은 부자의 개수, n_k은 범포의 개수, C_D는 항력계수, C_L은 양력계수, ρ는 해수의 밀도($105\ kg \cdot s^2/m^4$), S는 부자 및 범포의 최대 투영면적(m^2), V는 유속(m/s)이다.

또, 뜸줄부의 총 양력 L_t 및 총 항력 D_t은, 부자만 사용하는 어구의 경우 L_f, D_f와 같으며 범포와 부자를 병행하여 사용할 경우는 다음과 같다.

$$L_t = L_f + L_k \tag{4-5}$$

$$D_t = D_f + D_k \tag{4-6}$$

유형 A1의 방법으로 범포 3개를 어구에 부착할 경우에는 영각을 20°에 맞추기 위하여 직경 0.28 m(부력 6.9 kgf)인 부자 4개를 사용하여야 한다. 또, 유

속은 실 조업에서 어구가 1.7~2 m/s에서 예망되므로 그 중간 값인 1.85 m/s를 사용하기로 하고 C_L 및 C_D는 실험 유속 중 각 계수값의 크기가 비슷한 구간 중 가운데 유속인 0.6 m/s에서 측정된 계수값을 사용하기로 한다. 따라서, 위 계산식에 의하여 뜸줄부의 총 양력 L_t 및 총 항력 D_t은 다음과 같이 계산된다.

$$L_t = B_f \times n_f + \frac{1}{2} C_L \rho S V^2 \times n_k \qquad (4\text{-}5)'$$

$$= 6.9 \times 4 + \frac{1}{2} \times 0.89 \times 105 \times 0.16 \times 1.85^2 \times 3$$

$$= 104.43\ kgf$$

$$D_t = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \times n_f + \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \times n_k \qquad (4\text{-}6)'$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.5 \times 105 \times 0.06 \times 1.85^2 \times 4 + \frac{1}{2} \times 0.41 \times 105 \times 0.16 \times 1.85^2 \times 3$$

$$= 57.38\ kgf$$

또, 비슷한 방법으로 유형 C1형의 경우에는 범포 5개를 어구에 부착하고 각 범포의 가운데 위에 초기 부력재로서 직경 0.08 m(부력 0.16 kgf)인 부자를 2개씩 부착하여 총 10개를 사용한다고 하면, 뜸줄부의 총 양력 L_t 및 총 항력 D_t은 다음과 같이 계산된다.

$$L_t = 0.16 \times 10 + \frac{1}{2} \times 0.72 \times 105 \times 0.16 \times 1.85^2 \times 5$$

$$= 105.74\ kgf$$

$$D_t = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 105 \times 0.005 \times 1.85^2 \times 10 + \frac{1}{2} \times 0.21 \times 105 \times 0.16 \times 1.85^2 \times 5$$

$$= 35.36\ kgf$$

이상과 같은 방법으로 범포를 A1~3, B1~3, C1~3, D1~3형으로 어구에 부착하였을 때와 부자만을 사용하였을 때에 있어서 어구의 총 양력과 총 부력을 Table 4-3에 나타내었다. Table 4-3에서 범포를 사용하는 모든 유형에서 부자만을 사용하는 경우보다 양력은 크고 항력은 작다는 것을 알 수 있다. 특히, 양력과 항력을 비교할 때 C1형이 가장 양호하였으며, A1, B1형도 영각 20°를 맞추기 위해 기존의 부자보다 조금 큰 부자를 사용하였으나 부자의 수를 많이 줄일 수 있으므로 실용성이 있다고 하겠다. A2, A3형과 B2, B3형은 영각 25°와 30°를 맞추기 위해서는 너무 큰 부자를 사용해야 하므로 현실성이 없다고 판단되며 C3, D3형도 사용은 가능하지만 양항비가 작아서 효율적이지 못한 것으로 판단된다.

한편, 본 논문에서의 계산과는 달리 범포의 수와 면적, 사용 부자의 크기 및 수, 영각 등을 달리하여 다양한 설계를 할 수 있다. 분명한 것은 부자만을 사용할 경우보다 범포를 사용함으로써 양력은 더 크게 항력은 더 작게 할 수 있는 것은 분명하다. 따라서 범포를 어구의 부력재나 전개장치로써 사용하는 것은 그 적용방법과 안정성만 확보된다면 매우 유용한 방법이 될 것이다. 특히, 본 논문에서는 천장망에 있는 부자만 대체하여 비교하였으나 천장망에 가까운 날개 쪽에 있는 부자도 수를 줄이고 범포의 수를 늘이는 것도 좋은 방안이 될 것이다.

Table 4-3. The comparative table for the efficiency of the canvas kite.

model case	diameter of float (m)	number of float	projective area of kite (m^2)	number of kite	total lift force (kgf)	total drag force (kgf)
float only	0.24	20	-	-	88.93	81.29
type A1	0.28	4	0.16	3	104.43	57.38
type B1	0.28	4	0.16	3	94.78	48.56
type C1	0.08	10	0.16	5	105.74	35.36
type D1	0.08	10	0.16	5	101.84	35.18
type A2	0.34	4	0.16	3	127.35	79.82
type B2	0.34	4	0.16	3	124.22	74.33
type C2	0.08	10	0.16	5	120.83	52.64
type D2	0.08	10	0.16	5	100.31	42.17
type A3	0.42	3	0.16	2	120.18	75.03
type B3	0.42	3	0.16	2	115.76	65.93
type C3	0.08	10	0.16	5	136.36	73.54
type D3	0.08	10	0.16	5	96.12	47.43

4.4. 요약

범포를 부력재로 사용할 경우, 가장 적합하다고 판단되는 형태의 범포를 실제로 어구에 부착하는 방법을 고안하고 그 때와 같은 모양으로 취부장치에 부착하여 양·항력 특성 및 형상변화를 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 범포의 양·항력 비교

1) 영각 20°에서 유속에 따른 전개력계수 C_L의 값은 A1형이 가장 컸고 그 다음으로 B1, C1, D1형 순이었으며, 모두 유속 0.5 m/s에서는 약간 크게, 0.6 m/s에서는 약간 작게 나타났다. A1, B1, C1, D1형 모두 유속의 변화에 따른 항력계수는 거의 일정하였다.

2) 유속의 변화에 따른 양항비는 C1형이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 D1형, B1형, A1형 순이었다.

3) 영각 30°에서 유속에 따른 전개력계수 C_L의 값은 A3형, B3형, C3형이 유속에 따라 그 우열의 순서가 달랐다. 마찬가지로 모두 유속 0.5 m/s에서는 약간 크게, 0.6 m/s에서는 약간 작게 나타났다.

4) 유속의 변화에 따른 양항비는 D3형이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 C3, B3, A3형 순이었다.

5) 실험 결과, 양항비가 크고 안정성이 양호할 것으로 예상되는 C1형이 범포 부력재로서 가장 적합하다고 판단되었다.

2. 범포의 유속에 따른 형상 변화

1) 모든 유형에서 유속이 빠를수록 시고 a와 d가 커졌다.

2) A1, B1형을 영각 30°로 하였을 때 유형인 A3, B3형의 a의 변화는 A1, B1형에 비하여 0.2 m/s에서는 약 두 배 정도이지만 0.6 m/s 이상에서는 약간 큰 값을 가지는 정도였다.

3) C형, D형에 있어서 유속 따른 a의 변화는 조금씩 증가하는 패턴이 나타났는데, 영각 20°인 C1, D1형에서는 차이가 많이 있는 편이나 25°, 30°인 C3, D3형에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

4) 범포가 뒤로 밀리는 정도를 나타내는 각 β의 값은 흐름에 의하여 어느 정도 뒤쪽으로 밀리지만 유속이 빨라져도 그다지 증가하지 않는 것으로 나타났다.

3. 부자(浮子)와 범포의 양·항력 비교

1) 범포를 사용하는 모든 유형에서 부자만을 사용하는 경우보다 양력은 크고 항력은 작았다. 특히, 양력과 항력을 비교할 때 C1형이 가장 양호하였다.

2) A1형과 B1형도 영각 20°를 맞추기 위해 기존의 부자보다 조금 큰 부자를 사용하였으나 부자의 수를 많이 줄일 수 있으므로 실용성이 있다는 것으로 판단되었다.

3) 범포를 어구의 부력재나 전개장치로써 사용하는 것은 그 적용방법과 안정성만 확보된다면 매우 유용한 방법이 될 것이다.

제5장 종합고찰

비행기의 날개, 전개판 등 만곡형 물체의 양력 이론은 그 동안 베르누이 이론에 의해 지배되어 왔다. 즉, 유체의 흐름이 빠른 곳은 압력이 낮아지고 압력이 낮아진 공간 쪽으로 물체가 끌려간다는 것이다. 따라서 물체에 발생하는 양력을 물체 주위를 흐르는 유속분포에서 해석하려 하였다. 그러나 이러한 이론은 여러 가지 실례와 실험으로 의문점이 많은 이론이 되어버렸다. 최근 영국의 저명한 날개이론 학자 Gale Craig는 그의 저서 Wing theory(이, 2002)에서 이러한 고정 관념적 이론을 배제하면서 날개에 생기는 양력이 주위를 지나는 공기와의 상호작용 때문에 생기며 위로 향하는 양력이 공기들이 아래로 가속되면서 생기는 반작용력이라고 설명하고 양력을 뉴턴의 제2법칙인 작용·반작용의 개념으로 설명하였다.

따라서, 본 논문의 고찰에서는 실험의 결과를 토대로 모형 주의의 물의 흐름과 압력분포를 관찰하여 범포 및 평판에 발생하는 양력의 원인을 베르누이 이론과 뉴턴의 작용·반작용 이론에 바탕을 두고 분석하였다.

또, 역학적 실험, 가시화 실험 및 수치해석을 통하여, 부력재로 사용하였을 때 가장 성능이 우수할 것으로 기대되는 범포 모형에 대하여, 어구에 부착하는 여러 가지 방법을 고안하고 이 때의 여러 가지 장단점을 비교 분석해 보았다.

1. 종횡비와 역학적 힘의 작용

"종횡비가 작을수록 최대전개력계수를 가질 때의 영각이 크고, 클수록 작다."

이 결과를 설명하기 위해 사각형 범포 주위의 물의 흐름을 Fig. 5-1에 나타내었다. 그림에서 (a)에서와 같이 종횡비가 작고 영각이 작은 경우는 흐름에 수직으로 만나는 익장(翼長)이 짧고 길이가 긴 현장(弦長)은 흐름에 거의 평행하게 되어 흐름이 현장의 양변으로 자연스럽게 빠져나가므로 모형에 미치는 동압력이 작아지게 되고 그 중 양력으로 분리되는 힘도 작아지게 된다. 즉, 모형의 아래쪽 방향으로 흐르는 성분이 적다는 것을 의미한다.

이와 반대로, (b)에서와 같이 영각이 큰 경우는 흐름이 현장의 양변으로 자연스럽게 빠져나가지 못하고 급격히 측면으로 꺾이면서 빠져나가므로 모형에 미치는 동압력이 커지게 되고 양력과 항력도 커지게 된다. 즉, 흐름 중 현장의 양변으로 빠져나가는 요소도 있으나 이것이 자연스럽지 못하여 모형의 안쪽 면을 타고 아래쪽 방향으로 흐르는 성분이 다소 많다는 것을 의미한다.

또, 그림에서 (c)에서와 같이 종횡비가 크고 영각이 작은 경우는 흐름에 수직으로 만나는 익장이 길고 현장은 짧아서 현장의 양변으로 빠져나가는 흐름은 작아지게 되고 익장의 양변으로 빠져나가는 흐름은 많게 되는데, 특히 영각이 작은 경우 모형과 조우하는 흐름은 대부분 익장의 아래쪽 변으로 빠져나가게 된다. 즉, 영각이 작아 모형에 미치는 동압력은 작지만 모형의 아래쪽 방향으로 흐르는 성분이 많다는 것을 의미한다.

이와 반대로, (d)에서와 같이 영각이 큰 경우는 모형과 조우한 흐름이 급격

히 꺾이면서 익장의 아래쪽뿐만 아니라 위쪽으로도 빠져나가게 되므로 모형에 미치는 동압력이 커지게 되어 양력은 작아지고 항력은 커지게 된다. 즉, 흐름 중 익장의 아래쪽 변으로 빠져나가는 흐름이 위쪽으로 빠져나가는 흐름과 상쇄되어 적어진다는 것을 의미한다.

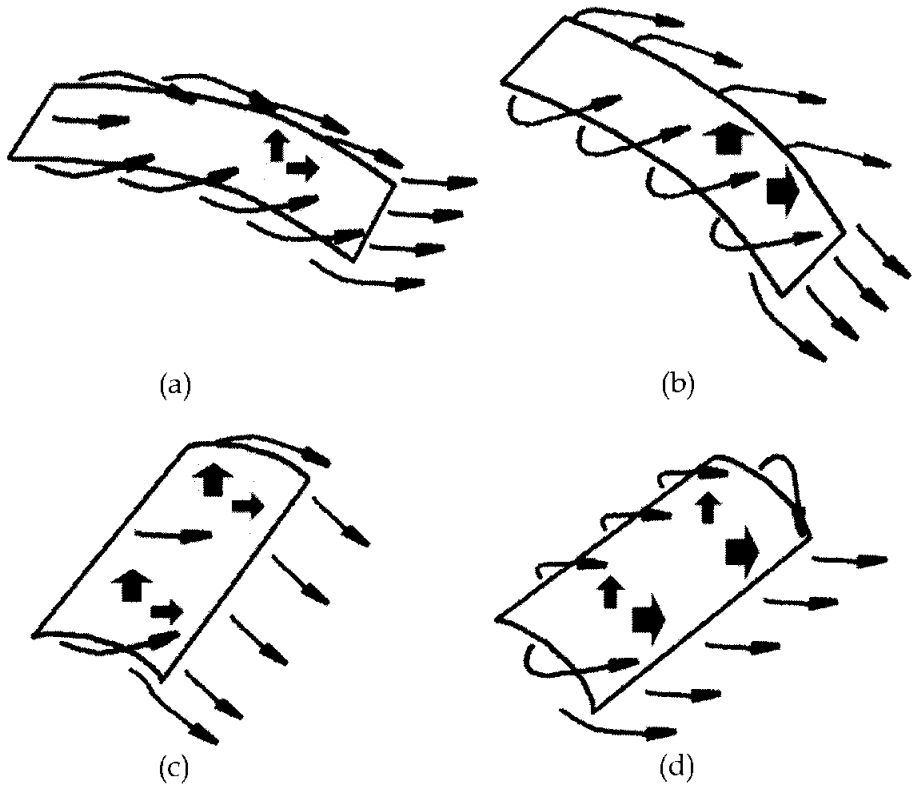


Fig. 5-1. The water flow around the rectangular canvas.

2. 영각에 따른 동압력의 작용점

"영각이 작을수록 동압력의 작용점은 모형의 뒤쪽에 가깝고, 클수록 앞쪽에 가깝다."

이 결과를 설명하기 위해 삼각형 범포 주위의 물의 흐름을 Fig. 5-2에 나타내었다. 그림에서 (a)에서와 같이 익장의 변이 앞쪽에 있고 영각이 작은 경우는 모형의 대부분 면적을 차지하는 앞쪽은 흐름에 평행하고 흐름에 압력을 받을 수 있는 뒤쪽은 면적이 작으므로 모형에 미치는 동압력이 작아지게 되고 그 중 양력으로 분리되는 힘도 작아지게 된다. 즉, 모형의 중심에서 아래쪽 방향으로 흐르는 성분이 다소 있으나 전체적으로 적다는 것을 의미한다.

이와 반대로, (b)에서와 같이 영각이 클 경우는 모형의 대부분 면적을 차지하는 앞쪽이 흐름에 동압력을 받을 수 있는 각(角)이 되고 모형과 조우한 흐름이 모형의 안쪽 면을 따라 모형의 뒤쪽 끝에서 아래쪽으로 비스듬히 빠져나가므로 양력이 발생하게 된다. 즉, 모형 주위의 흐름 중 양력을 발생시킬 수 있는 아래쪽 방향의 성분이 적지 않다는 것을 의미한다.

또, 그림에서 (c)에서와 같이 익장의 변이 뒤쪽에 있고 영각이 작은 경우는 모형의 대부분 면적을 차지하는 뒤쪽이 흐름에 동압력을 받을 수 있는 각(角)이 되고 모형과 조우한 흐름이 모형의 뒤쪽 끝에서 아래쪽으로 비스듬히 빠져나가므로 양력이 발생하게 된다. 즉, 모형 주위의 흐름 중 양력을 발생시킬 수 있는 아래쪽 방향의 성분이 많고 (b)의 경우보다 안정된다는 것을 의미한다.

이와 반대로, (d)에서와 같이 영각이 클 경우는 모형의 대부분 면적을 차지하는 뒤쪽은 흐름에 수직되어 동압력은 많이 받지만 항력이 커지고 양력으로

분리되는 힘은 작아지게 되며, 다소 흐름에 압력을 받을 수 있는 앞쪽은 면적이 작으므로 모형에 미치는 동압력이 작아지게 되고 그 중 양력으로 분리되는 힘도 작아지게 된다. 즉, 모형의 안쪽 면 앞부분에서 아래쪽 방향으로 흐르는 성분이 다소 있으나 면의 면적이 작아 그 양이 적으며, 면적이 큰 뒷부분에서는 흐름이 급히 꺾이면서 후방으로 흐르는 흐름이 많다는 것을 의미한다.

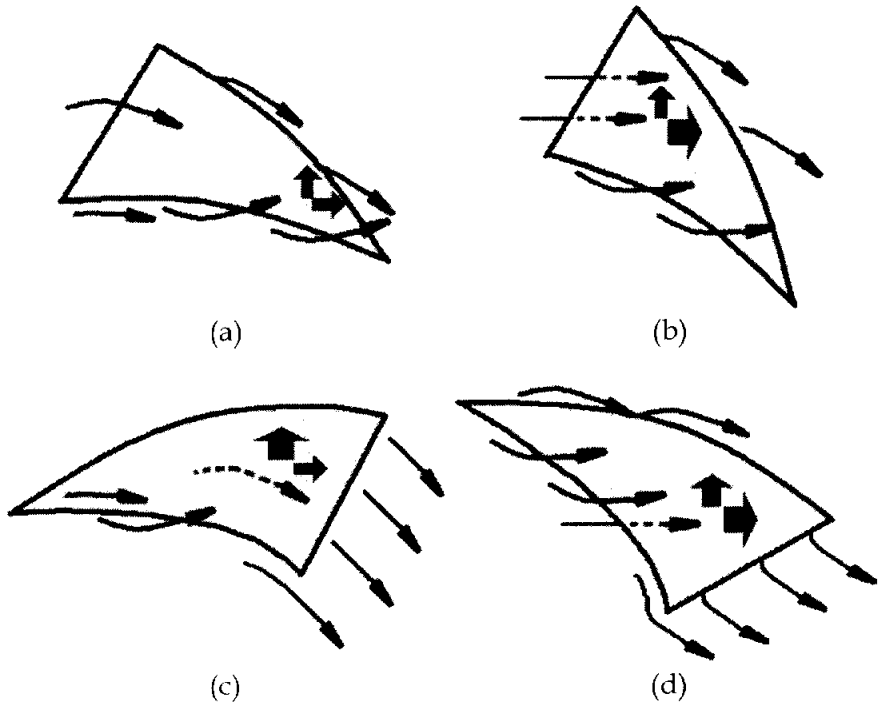


Fig. 5-2. The water flow around the triangular canvas.

3. 만곡(camber)이 양력과 항력에 미치는 영향

"만곡과 영각에 의해 모형의 끝단에서 발생하는 흐름이 아래쪽 성분방향으로 향할 수록 양력이 크다."

이 결과를 설명하기 위해 평판 및 범포 주위의 물의 흐름을 Fig. 5-3에 나타내었다. 그림에서 (a)에서와 같이 평판에서 영각이 작은 경우는 흐름이 평판 면을 따라 와동(渦動) 없이 자연스럽게 흘러가지만 평판의 뒤쪽 끝단의 방향이 후방으로 향하고 있어 평판을 이탈하는 물의 흐름방향도 자연스럽게 후방으로 흐르게 된다. 즉, 전체적으로 평판에 수직으로 작용하는 동압력이 작아 항력이 작아지게 되고 평판 뒤쪽에서 아래쪽 방향으로 흐르는 성분이 거의 없어 양력도 그다지 크지 않게 된다는 것을 의미한다.

또, (b)에서와 같이 영각이 클 경우는 흐름이 평판 면에 상당한 동압력을 작용하게 되어 항력이 커지게 되고 평판 면을 따라 흐르는 물이 평판의 뒤쪽 끝단에서 아래쪽으로 비스듬히 흘러가므로 양력도 커지게 된다. 그러나 (c)에서와 같이 영각이 너무 커지면 항력은 더욱 커지게 되는데 반하여, 평판의 뒤쪽 면에 압력이 아주 낮은 부분이 생기게 되어 와(渦)가 생기게 되고 평판의 끝단을 통과한 물이 후방으로 흘러가게 되므로 양력은 급격히 떨어지게 된다.

한편, 그림에서 (d)에서와 같이 범포에서 영각이 작은 경우는 (a)의 경우와 전체적으로 흐름의 패턴이 유사하다. 그러나 만곡으로 인하여 범포의 앞쪽 면은 흐름에 나란히 놓이게 되어 물이 자연스럽게 유입되고 뒤쪽 면은 범포의 뒤쪽 끝단이 아래쪽으로 굽어져 있기 때문에 아래쪽으로 흐르는 성분이 (a)의 경우보다 많아지게 된다.

(e)에서와 같이 영각이 최대전개력을 가질 때까지 커지면, 범포의 뒤쪽 끝단의 방향이 더욱 아래쪽 방향에 가까워지므로 아래쪽으로 흐르는 성분이 (d)의 경우보다 더욱 많아지게 된다.

그러나 영각이 (f)에서와 같이 너무 커지면 평판의 경우와 마찬가지로 항력은 더욱 커지게 되고 양력은 급격히 떨어지게 되는데 만곡이 물의 흐름을 머금고 있는 형상이 되어 평판의 경우보다 더 일찍, 더욱 급격히 떨어지게 된다.

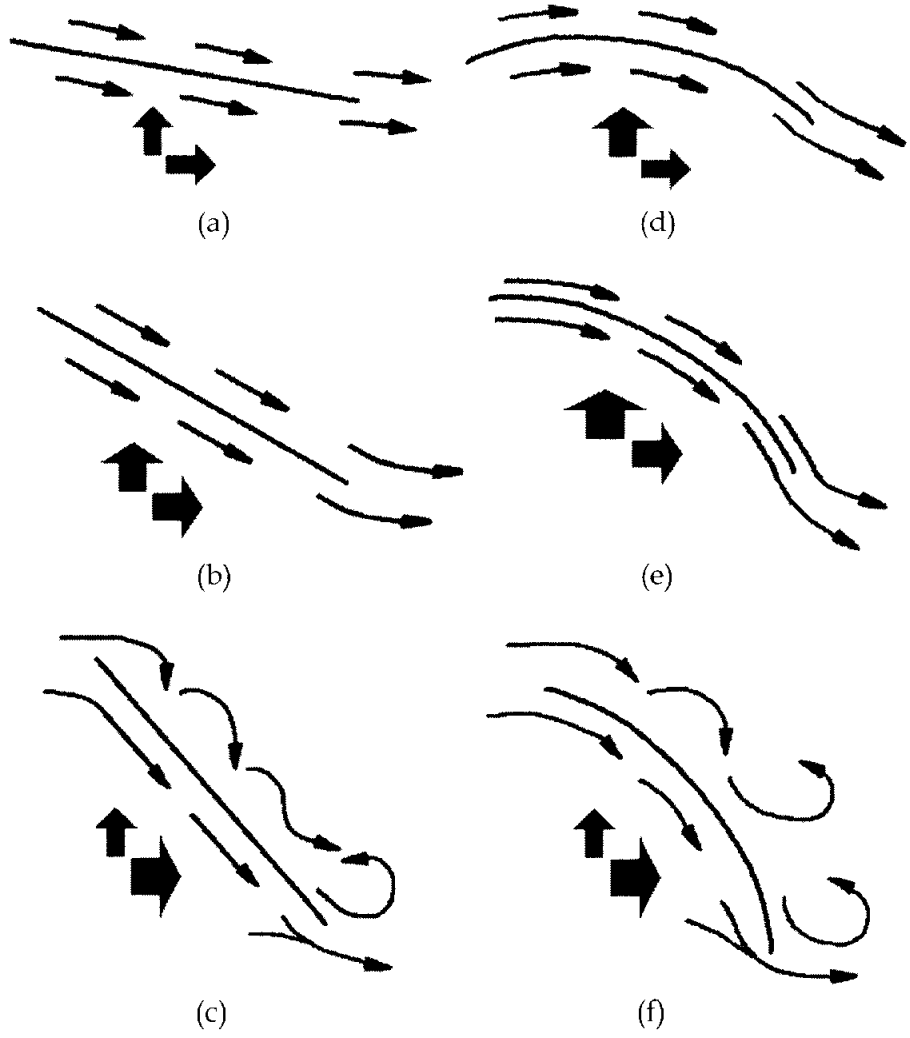


Fig. 5-3. The water flow around the plate and the canvas.

4. 범포의 어구 적용 방법에 대한 고찰

부자(浮子)는 수심에 따라 조금 차이가 있기는 하지만 다른 조건에 관계없이 거의 일정한 부력을 유지하는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 충격이나 수압에 견딜 수 있도록 만들다보니 외벽이 두껍게 되었고 그 자체의 무게가 무거워 부력만 생각한다면 비효율적이다. 다른 연구자의 실험 결과와 본 논문의 실험 결과를 보면 범포를 사용할 경우 부자에 비하여 양력은 더 크게 항력은 더 작게 할 수 있는 것이 분명하다. 따라서 어떤 형태의 범포를 어떻게 부착하는 것이 효과적인가를 알아내는 것이 중요한 관점이다. 실험을 통하여 가장 효과적일 것으로 판단되는 범포를 선택하였더라도 그 모양이 실제 어구에서는 실현하기 어려운 경우도 있으며, 실현이 가능하더라도 제작에 많은 수고가 들어가거나 구조적으로 받는 힘을 견딜 수 없는 경우라면 실용성이 없다.

본 연구에서는 4가지 부착 방법으로 영각 20°, 25°와 30° 세 각도로 어구에 부착한다고 가정해보았다. 영각 25°, 30°의 경우, 지나치게 큰 부자를 보조로 사용해야 하거나 양항비가 작아지는 문제점이 있었으며, 영각 20°의 경우에서도 부착지점이 3군데 밖에 되지 않아서 예망 중 힘을 견딜 수 있을까 의문이 생기는 것도 있었다. 따라서 실제로 사용 가능하리라 판단되는 것은 12가지 중 3가지 정도 뿐 이었다.

본 논문의 실험에서는 종횡비가 2:1인 삼각형과 역삼각형 범포가, 영각과 유속의 변화에도 양력의 변화가 적고 낮은 각도에서 양항비도 양호하여 어구에 적용하기 좋은 것으로 판단하였다. 그 중 역삼각형은 삼각형의 꼭지점 부분을 뜸줄부 또는 전방의 연결줄에 연결해야 하는데, 이런 경우 가장 힘을 많

이 받게 되는 곳이 한군데이기 때문에 파단의 우려가 있고 초기 부력재로 사용되는 작은 부자를 부착할 곳도 마땅치 않다. 따라서 본 연구에서는 삼각형의 밑변이 흐름의 앞쪽에 있는 경우를 선택하여 어구에 부착한다고 가정하였다.

이때에도 하나의 문제점이 발생할 수 있는데, 천장망의 그물코 모양과 범포의 삼각형 모양이 일치하지 않는다는 것이다. 실험에서 종횡비가 2:1인 범포가 1:2인 것보다 안정성 및 효율에서 효과적이지만, 종횡비가 1:2인 것이 천장망의 그물코 모양에 아주 가깝다. 따라서 실제로 어구에서 사용할 때 어떤 것이 더 효과적일지는 사용해보지 않고서 판단하기 어려운 문제이다. 그러나 여기서는 역학적 실험의 결과를 우선하여 종횡비 2:1인 삼각형 범포를 사용하기로 하였으며, 범포의 세 꼭지점을 천장망의 그물코 매듭에 일치시키고 양옆변을 삼등분한 네 지점과 그물코의 발을 서로 연결하는 것으로 설계하였다. 이때 실제 연결에 있어서는 서로 거리를 주어 연결하므로 물의 저항을 받으면 가운데로 만곡이 생기면서 중심으로 모일 수 있으나 영각이 작고 종횡비가 2:1이기 때문에 연결줄 길이가 짧아 이러한 현상은 아주 작을 것으로 판단된다.

이 방법이 실용성이 있는지는 향후, 실제 어구를 제작하여 해상시험과 조업시험을 통하여 검증할 수 있을 것이다. 본 논문에서 제안한 방법은 있을 수 있는 수많은 방법 중 하나에 불과하다. 앞으로 안정성과 효율성을 모두 겸비한 범포 어구가 미래에는 분명 개발될 것이라고 생각한다.

감사의 글

가난 때문에 대학을 포기해야하는 힘든 시절이 있었습니다. 그래서 선장이 되어 돈이나 벌어보자는 마음으로 부산수산대학에 입학하게 된지도 어느 듯 17년이 지났습니다. 처음 품은 길과는 달리 지금은 연구자의 길을 걷고 있습니다. 제가 이 자리에 있을 수 있는 것은 그 동안 많은 분들의 도움과 지도, 격려의 덕분입니다. 지금 그 분들을 되돌아 생각하며 지면으로나마 감사의 마을 전하고자 합니다.

먼저, 항상 아버지와 같은 인자함으로 저를 학문의 길로 인도하여 주시고 아낌없는 지도와 믿음으로 저를 이끌어주신 이주희 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 아울러, 본 논문을 정성껏 다듬어 주시고 많은 조언과 격려를 하여 주신 권병국 교수님, 이춘우 교수님, 김형석 교수님, 신종근 박사님에게도 깊은 감사를 드립니다.

또한, 제가 처음 학문의 길로 들어서도록 동기를 마련해 주시고 꿈을 심어주신 고관서 교수님, 김철호 선배님에게 감사를 드리며, 늘 넉넉한 마음으로 스승의 참 모습을 보여주신 김진건 교수님에게도 감사를 드립니다. 그리고 대학(원)시절 저에게 배움을 주신 박중희 교수님, 이병기 교수님, 윤갑동 교수님, 양용림 교수님, 신형일 교수님, 이대재 교수님, 신현옥 교수님과 그 동안 많은 관심과 격려를 하여주신 김삼곤 교수님, 강일권 교수님, 장창익 교수님, 홍철훈 교수님에게 감사의 마음을 전합니다.

본 논문과 관련된 연구를 충실히 수행할 수 있도록 여러 가지 배려와 격려

를 하여 주신 백칠인 부장님, 안희춘 과장님과 부족한 후배를 아껴주시고 좋은 조언을 하여주신 오희국 소장님, 김재오 박사님, 정의철 박사님, 박창두 박사님, 조현수 박사님에게 감사를 드립니다. 또한, 본 연구의 실험을 위해 저와 같은 마음으로 동고동락하여 준 배재현 연구사, 신정욱 후배와 업무를 덜어주기 위해 노력하여 주신 김인옥 연구사님을 비롯한 직장 선후배 여러분, 또 저를 위해 여러 가지 도움을 주신 조삼광 연구사님, 이유원 박사님, 조영복, 유제범, 김성훈, 김부영 후배에게도 감사의 마음을 전합니다.

언제나 자식을 위해 헌신하시고 사랑과 믿음으로 지켜봐 주신 아버님, 어머님, 장모님께 이 지면을 빌어 깊은 감사의 말씀을 드리며, 시종일관 애정 어린 관심을 저에게 쏟아주신 처외숙부님에게도 감사를 드립니다. 늘 곁에서 정성어린 내조로 저를 도와준 사랑스런 아내와 존재만으로도 나에게 힘과 용기를 주는 딸 주원, 아들 강서를 비롯한 가족들과 이 기쁨을 나누고 싶습니다. 또한, 바른 삶을 인도하여 주신 나의 하느님에게 감사를 드립니다.

그리고 대학, 대학원 과정 중 장학금 후원으로 저에게 큰 도움을 주신 신라문화장학재단과 산학협동재단에게도 진정한 감사의 마음을 전하며, 그동안 실천해 왔듯이 제가 받은 도움을 다시 사회에 되돌려 주는 자선과 봉사의 생활을 다할 것을 약속합니다.

끝으로, 오늘의 결실을 이룩하고자 나름대로 최선의 노력을 다해왔지만, 연구자로서 항상 부족한 점을 느끼지 않을 수 없습니다. 박사학위가 학문의 완성이 아니라 이제부터 시작이라는 겸허한 자세로 앞으로 배움에 정진하는데 최선의 노력을 다할 것을 다짐해 봅니다.

참고문헌

A. L. Fridman (1969) : Theory and design of commercial fishing gear. the ministry of higher and secondary education of RSFSR, 270~281.

Catasta, L. (1959) : Studies to improve the efficiency of otter boards and trawl floats. Modern fishing gear of the world, 251~253.

COSMOS (2003) : COSMOS FloWorks 2003 Fundamentals.

Edwards, M. L. (1987) : Want more headline height and less drag? Go fly a kite. NATL.-FISHERMAN, 68(8), 38~41.

Hoerner, S. F. (1975) : Fluid dynamic lift. chapter 5, 18.

Lange, K. (1989) : Design and operation of flexible sail kites, ICES council meeting collected papers, 7p.

Lee, S. J. (1999) : PIV Velocity Field Measurement. Lecture note of after short course. Pohang University of Science and Technology, 11~69, 10 7~141, 249~292 (in Korean).

Liu, Z. C., C. C. Landreth, R. J. Adrian and T. J. Hanratty (1991) : High resolution measurement of turbulent structure in a channel with particle image velocimetry. Experiments in fluids, vol. 10, 301~312.

Madsen, N., K. E. Hansen and T. Moth-Poulsen (2001) : The kite cover: a new concept for covered codend selectivity studies. Fisheries Research, vol. 49, 219~226.

Madsen, N. and R. Holst (2002) : Assessment of the cover effect in trawl codend selectivity experiments. Fisheries Research, vol. 56, 289~301.

N. Madsen, K. E. Hansen and T. Moth-Poulsen (2001) : The kite cover: a new concept for covered codend selectivity studies. Fisheries Research, vol. 49, Issue 3, 219-226.

Niels Madsen and Rene Holst (2002) : Assessment of the cover effect in trawl codend selectivity experiments. Fisheries Research, vol. 56, Issue 3, 289-301.

Wubbo J. Ockels(2001) : Laddermill, a novel concept to exploit the energy in the airspace. Aircraft Design, vol. 4, Issues 2-3, 81-97.

Yoshimura, Y. (2002) : A prospect of sail-assisted fishing boats. Proceedings of international commemorative symposium, 70th anniversary of The Japanese Society of Fisheries Science, 1815~1818.

光沢 崇, 藤森 康澄, 清水 晋, 梨木 勝昭, 三浦 汀介 (1996) : キャンバスカイトを用いた資源調査用中層トロール網. 日本水産學會誌, 62(2), 254~261.

朴倉斗 (1994) : オッターボードの流体特性に關する研究. 東京水産大學, 水産學博士 學位論文.

石崎 宗周, 不破 茂 (1999) : 中層トロール用キャンバスカイトの形狀と流體特性. 日本水産學會誌, 65(3), 400~407.

松田 皎, 胡 夫祥, 小池 篤 (1988) : キャンバス式中層トロール網の靜的特性. 日本水産學會誌, 54(10), 1783~1788.

松田 皎, 胡 夫祥, 石沢 聰 (1989) : キャンバス製擴網裝置, ウイングパラカイトの流體特性. 日本水産學會誌, 55(11), 1927~1934.

松田 皎 (2001) : 漁具物理學. 成山堂書店, 43～63.

井上 喜洋, 木下 弘實 (2002) : ソフト・トロール漁具開發. 水工研技報, vol. 24, 15～26.

副 大祥, 松金 皎, 小池 篤 (1989) : 模型實驗によるキャンバス式とオッター式の中層トロール網力學的特性の比較, 日本水産學會誌, 55(5), 785～790.

權炳國 (1993) : 展開板의 流體力學的 特性에 관한 硏究. 부산수산대학교, 水産學博士 學位論文.

권병국 (1995) : 쌍끌이중층망의 전개성능 향상을 위한 모형실험. 한국어업기술학회지, 31(4), 340-349.

김찬중 (1998) : 전산유체역학. 문운당, 33～36, 127～132, 315～330.

노기덕, 권병국, 안희춘 (1998) : 이산와법에 의한 원호형 Sea Anchor의 유동장 수치해석. 대한기계학회논문집 B권, 22(8), 1041～1051.

박경현, 이주희, 현범수, 노영학, 배재현 (2002) : PIV를 이용한 만곡형 전개판의 유동장 계측에 관한 연구. 한국어업기술학회지, 38(1), 43-57.

朴璟鉉 (2003) : 이중슬롯 彎曲型 展開板의 流體力學的 特性에 관한 硏究. 부경대학교, 水産學博士 學位論文.

朴星浩 (2003) : 트롤그물의 카이트 성능에 관한 모형실험. 부경대학교, 水産學碩士 學位論文, 11～18.

부정숙, 서용권, 송동주, 김경천 (1996) : 유체역학. 반도출판사, 377～467, 510～544, 558～564, 1104～1105.

신병록, 장근식, 조강래 (1997) : 전산유체역학. 대영사, 55～203, 263～293.

신화기술정보 (2002) : Solidworks 2001 plus Training Manual.

辛鍾根, 李珠熙, 吳熙國 (1988) : 외끌이 機船底引網의 展開性能에 관한 模形實驗. 韓國漁業技術學會誌, 24(1), 22～29.

安熙琦 (2000) : 오징어 채낚기 漁船의 물돛 開發 및 流體力學的트 特性 硏究. 부경대학교, 水産學博士 學位論文.

유제범, 이주희, 이춘우, 권병국, 김정문 (2003) : 無浮子 쌍끌이 中層網 어구어법의 개발 Ⅲ. 韓國漁業技術學會誌, 39(3), 197～210.

李東錡 (1989c) : 現代트로올漁法. 태화출판사, 128～145.

이승건 (2002) : 비행의 원리. 우용출판사.

이영호 (1996) : PIV의 분류 및 원리. 대한기계학회지, 36(12), 1146～1162.

李澤植 (1981) : 流體力學. 동명사, 296～305.

張志元, 徐斗玉 (1982) : 漁具工學. 신한출판사, 112～114.

장지원, 장재환, 전병두, 이운희 (1988) : 인망그물의 자동전개깃판에 관하여. 한국어업기술학회지, 24(1), 17～21.

河大連, 朴在均 (1993) : 數學英韓辭典. 형설출판사, 426p.

현범수, 최경신, 도덕희 (2000) : PIV를 이용한 수중익 주위 복잡유동장의 정량적 계측. 대한조선학회논문집, 37(3).