

# 판다효과를 이용한 익 주위의 유동제어에 관한 실험적 연구

오경근\*\* · 조대환\*\* · 이경우\*\*\* · 고재용\*\*\*

\*목포해양대학교 대학원, \*\*목포해양대학교 기관시스템공학부, \*\*\*목포해양대학교 해양시스템공학부

## An Experimental Study on Flow control around Foil with Coanda effect

Kyoung-Gun Oh\* · Dae-Hwan Cho\*\* · Gyoung-Woo Lee\*\*\* · Jae-Yong Ko\*\*\*

\* Graduate School, MMU, Mokpo, 530-729, Korea

\*\* Faculty of Marine Engineering, MMU, Mokpo, 530-729, Korea

\*\*\* Faculty of Ocean System Engineering, MMU, Mokpo, 530-729, Korea

**요 약 :** 물제트분사장치가 부착된 NACA-0021 익 주변의 흐름을 입자영상유속계를 이용하여 고찰하였다.  $R_e = 6.0261 \times 10^4$  에서 영각( $\alpha$ )을  $0^\circ \sim 35^\circ$  로 변화시키며, 물제트분사 속도를 0[m/s], 9.2[m/s]의 2가지로 조절한 결과 익 후류영역에서는 박리 후 비정상적인(unsteady) 재순환재부착 영역이 형성되었으며, 박리영역의 폭이 판다 효과(Coanda effect)를 갖는 물제트분사로 인하여 최대 1/3만큼 감소하는 경향을 확인하였다. 물분사가 없는 조건에서의 박리는 영각( $\alpha$ )  $17^\circ \sim 18^\circ$  부근에서 시작되는 것이 관측되었으나, 물제트분사를 시켰을 경우  $20^\circ \sim 21^\circ$  에서 박리가 시작되는 것을 유동관측을 통해 알 수 있었다. 유동계측을 통해 익의 후연부(trailing edge)에서 생성되었던 와(vortex, eddy)가 물제트분사로 인해 소멸되는 것을 알 수 있었고, 영각이 작고 물분사 유속이 빠를 수록 박리영역의 감소가 더욱 가속화됨을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 물제트분사장치, 입자영상유속계, 판다 효과, 재순환영역

**ABSTRACT :** The flow around a foil with waterjet was investigated using the two-frame PIV(CACTUS 3.1) system. After separation, unsteady recirculation & reattachment region was shown as a result at reading edge. Separation area was decreased to 1/3 more by waterjet system with coanda effect. Angle of attack and waterjet velocity was a variable in the experiment. Each parameters was controlled to  $0^\circ \sim 35^\circ$  and 0[m/s] ~ 9.2[m/s]. The separation of flow appeared at first when the angle of attack is  $17^\circ \sim 18^\circ$ . However, according to grew up of velocity, beginning of the separation was delayed. In this experiment, vortex and separation region was disappeared by blown when each parameters are low level, and separation controlled more certainly.

**KEY WORDS :** Water-jet, Particle Image Velocimetry, Coanda effect, Recirculation Region

### 1. 서 론

익(foil) 유동은 기하학적으로 형상이 복잡하며, 영각( $\alpha$ )과 속도에 따라 박리점 및 박리영역이 다르다. 익은 현재까지도 선박 및 항공기 등에 양력발생장치의 목적으로 주로 사용되고 있으며, 제어력 즉 물리적인 힘에 관해서는 규명이 잘 되어 있으나 유동특성과 관련된 연구는 미흡한 실정이다. 특히 박리 및 와류와 그 변형도가 미치는 영향에 관해서는 완벽한 이해가 이루어지지 않고 있다. 이와 같은 특성과 낮은 레이놀즈 수에서의 양력값의 결과는 익 표면에서의 유속과 상당한 차이

를 보이기 때문에 익주위의 유동특성에 관한 실험적 연구는 매우 중요하다. 또한 선박의 고속화 대형화 추세에 따라 조종 성능 문제가 야기되었고, 그 결과 현재 국제해사기구(IMO)에서는 선박고유의 조종성능 불량에 기인한 사고 방지의 목적으로 선회시험과 지그-제그시험으로 조종성능 기준안을 마련적용하고 있는 실정에서 고양력 발생을 위한 방법 중 하나인 물제트분사장치가 부착된 익에 대한 연구가 필요하게 되었다.

1962년 F. Thomas는 에어포일(Air-Foil) 표면에 공기를 분사시켜 양력증가가 나타나는 것을 실험적으로 측정하였다[3].

Attinello등은 분사플랩(blow flap)을 이용한 에어포일로 양력발생이 증가됨을 실험적으로 밝혔다[1][4]. 대부분의 연구가 항공분야인 항모탑재기(STOL)나 수직이착륙기(VTOL)와 같은 분야에 집중되어 있었다.

Justin E. Kerwin등은 1972년 플랩이 부착된 조타를 선

\*대표저자 : 정희원, 984117@mmu.ac.kr 016) 871-2178

\*\*정희원, dhcho@mmu.ac.kr 061) 240-7104

\*\*\*정희원, kwlee@mmu.ac.kr 011) 9339-3589

\*\*\*정희원, kojy@mmu.ac.kr 016) 655-7129

박에 적용 연구하여 괄목할 만한 성과를 이뤘으며[20], 국내 연구로는 1979년 Min에 의해 회전실린더가 부착된 조타의 양력증가가 연구되었다[5].

1998년 이후 표면 물체트분사가 양력증가에 미치는 영향에 관한 실험적 연구가 국내에서 수행되었으나 유동특성이 미치는 영향에 대한 연구는 찾아보기 힘들며, 실험적으로도 드물다.

본 연구에서는 큰다 효과를 갖는 물체트분사장치가 달린 익의 유동특성이 양력발생에 미치는 영향을 분석하기 위한 기초 연구로서 물분사장치가 부착된 익 주위의 유동장을 PIV (Particle Image Velocimetry; 입자영상유속계) 시스템을 이용하여 계측하고, 유동특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 실험

Fig. 1과 2는 PIV 시스템의 개략도이다. 영상처리시스템은 크게 아르곤-이온 레이저(Argon-ion laser, 5W), 레이저 시트, 고속카메라(Fast Cam), 영상처리장치(CACTUS 3.1), 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성되며, 물분사장치가 부착된 익 주위의 속도장 측정에 사용된 회류수조의 시험부는 길이  $L=1m$ , 너비  $B=0.3m$ , 깊이  $D=0.3m$ 의 사각형의 유로이다. 수조 안에 물분사장치가 부착된 익을 설치하고 수면파에 의한 빛의 굴절현상을 없애기 위하여 상부에 얇은 유리를 설치하여 채널형 유로를 만들었다.

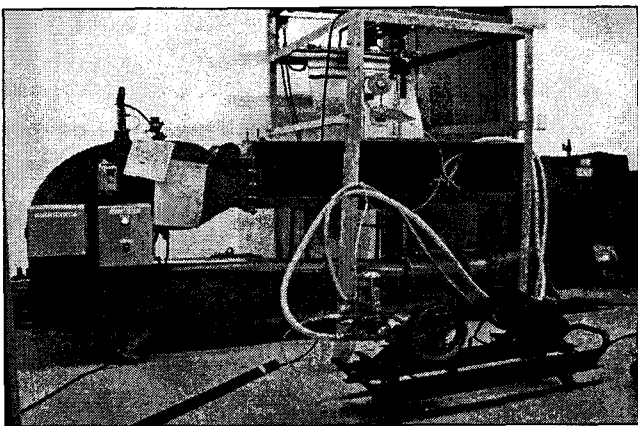


Fig. 1. 소형 회류수조 및 물분사용 피스톤펌프

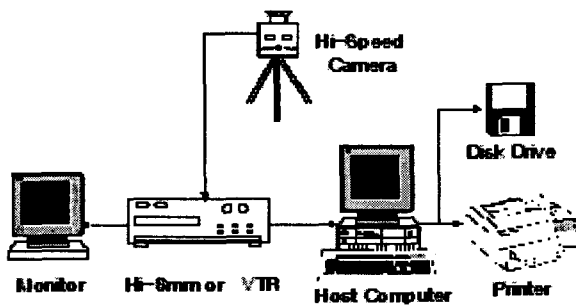


Fig. 2. 영상처리 시스템

실험용 익은 각부의 주요치수가 Chord= 150mm, Span=150 mm이며, NACA0021 단면을 갖는다. 물분사에 의한 유동특성을 분석하기 위해 영각( $\alpha$ )은  $0^\circ \sim 35^\circ$  로 설정하였고, 물 분사유속은  $0[m/s]$ ,  $9.2[m/s]$ 의 2가지로 설정하였다. 물 분사를 위한펌프는 최대압력이  $20kg/cm^2$ 인 피스톤 펌프를 사용하였다.

회류수조의 시험부 유속은 축류펌프를 구동하는 전력변환장치인 인버터(YASKAWA사 모델: CIMR -XCAA2094)의 주파수에 따라 결정되고, 실험에서 채택한 주파수는 10Hz이며, 이 때 대표길이를 코드길이 150mm로 하였으며, 레이놀즈 수(Reynolds Number)는  $R_e = 6.0261 \times 10^4$ 이다.

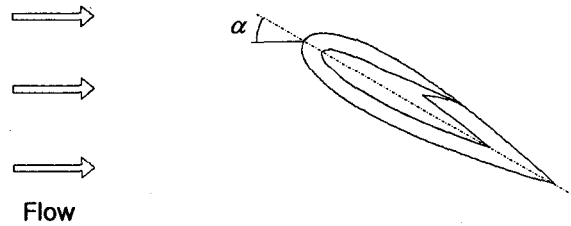


Fig. 3. 실험 유동장의 개략도

Fig. 3은 실험 대상의 유동장을 개략적으로 보여주고 있다. 유로 내부의 흐름은 좌측에서 우측으로 흐르며, 해석영역은  $331 \times 166 [mm]$ 로 유입류와 익주변의 유동 및 박리후 유동을 계측할 수 있도록 설정하였다. 좌표축  $x$ 는 유동방향,  $y$ 축은 회류수조의 깊이방향을 나타낸다.

## 3. PIV 계측 기법

유체역학과 관련된 기기의 설계 또는 성능 평가를 위한 제반 사항은 대상 물체주위의 유동장 거동을 정량적으로 평가하는 문제와 직결된다. 유동장의 거동을 알아보는 방법인 유동가시화(flow visualization)기법은 흐름 중에 추적 입자를 주입하고, 적당한 조명과 고속카메라를 이용하여 순간 또는 시간평균의 유동장을 촬영하고, 촬영된 이미지의 해석을 통하여 유동장의 정보를 알아내어 유동장의 유체역학적 특성을 고찰하는 방법이다. 유동가시화기법은 여러 종류가 있지만, 그 중에서 PIV에 의한 계측기법은 최근 디지털영상기법과 컴퓨터관련 하드웨어의 비약적인 발전에 기인하여 크게 발달하였다. 특히 하드웨어의 비약적인 발전에 기인하여 크게 발달하였으며, 유동변수를 동시다점으로 계측할 수 있는 장점으로 인하여 널리 사용되어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 2차원 익 주위의 유동장 해석을 위하여 PIV에 의한 계측기법을 사용하였으며, 그에 따른 계측절차는 다음과 같다.

1. 흐름에 충분히 잘 따르는 부력을 가진 적당히 작은 물질 즉, 추종성(traceability)이 뛰어난 물질을 유동장에 주입한다.
2. 조명으로서 레이저 sheet beam을 유동장에 조사한다.

3. 유동장에 주입된 입자에 대해 연속적인 두 개 이상의 영상을 획득하기 위하여 충분히 긴 촬영 노출시간을 취하며, 영상들을 잘 얻기 위하여 고해상도의 고속카메라를 사용한다.
4. 영상(image)구별을 결정하기 위하여 화면을 분석하며, 이 화면으로부터 유동장의 속도벡터를 구할 수 있다.

영상을 처리하는 기법 중 동일입자 추적법으로 4프레임 입자추적법과 2프레임 입자추적법이 있다. 4프레임 입자추적법은 연속하는 4시각의 순간적인 트레이서 입자영상을 사용하여 동일입자를 추적하는 기법으로 동일입자 추적법 중 가장 먼저 소개된 기법이며 영상의 입력 시간간격은 충분히 짧고 동시에 일정하며 유동장의 속도가 공간적, 시간적으로 급하게 변화하지 않는다는 가정을 두고 있다. 그에 비하여 2프레임 입자추적법은 4프레임 입자추적법에 비하여 최종유효 입자수가 20~30%정도 증가하며, 속도구배가 큰 영역에서 얻어진 속도벡터는 보다 짧은 시간간격에 동일입자추적이 가능한 원리적인 장점을 갖고 있으므로 고속의 흐름에서 입자 획득률이 우수함을 알 수 있다(박준수등, 1995)(이영호등, 1994)(조대환등, 1996)(Gray et al., 1995)((주)아이아이티, 1998).

본 연구에서는 추종성이 우수한 입자로서 직경이 100~150[ $\mu\text{m}$ ], 비중이 1.02 전후인 polyvinyl chloride입자를 사용하였다. 해석된 속도벡터는 80x40개이며, 유동장의 이미지는 고속카메라를 사용하여 획득하였다. 획득한 영상은 컴퓨터를 사용하여 유동해석을 수행하고, 유동장의 정보인 평균속도벡터, 평균운동에너지 분포 등을 구하였다. 유동해석은 동일입자 추적법 중의 하나인 2프레임 입자 추적법을 사용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 PIV 계측으로 얻어진 유선도이며, 영각  $\alpha=0^\circ$  를 나타내고 있다. 유선도는 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 50회의 영상에 대해 동일입자 추적을 행하여 얻은 순간 속도 벡터를 산술평균한 평균값을 이용하였으며, 그래프는 Tecplot s/w(version 8,0)를 이용하여 작성되었다. 익의 상면과 하면에서 유선은 시험단면의 기하학적 중심선인 익현선을 기준으로 대칭을 이뤘다.

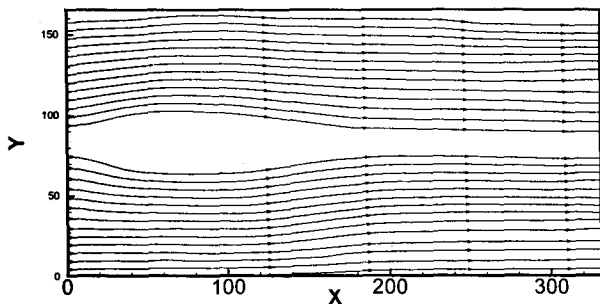
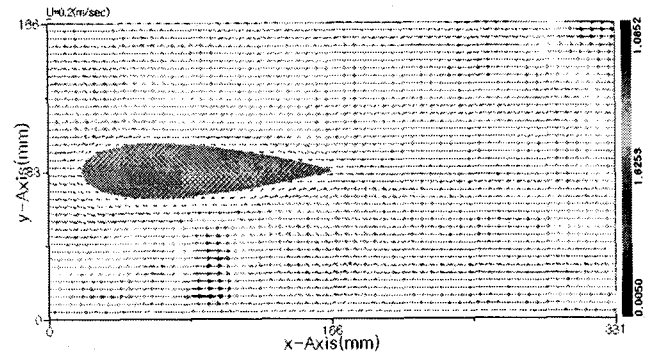
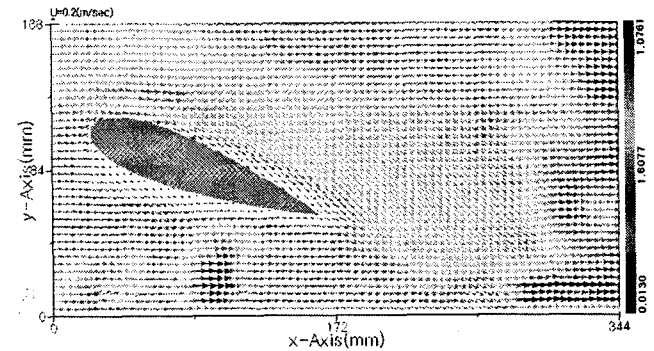


Fig. 4 .영각  $0^\circ$ 에서의 유선(Streamline)

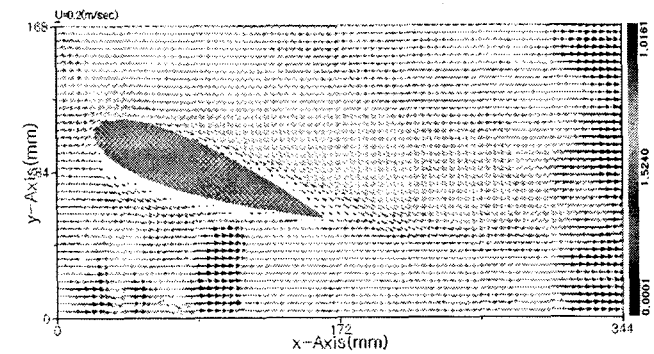


(a)  $0^\circ$



(b)  $20^\circ$

Fig. 5. X방향 속도성분(물분사 없음)



(c)  $20^\circ$

Fig. 6. X방향 속도성분(물분사 9.2,m/s)

Fig. 5와 6에서 익의 하면에 나타나는 어두운(붉은색) 영역은 조사된 레이저가 익의 공극에 의해 굴절되어 나타나는 현상에 의한 결과로 차후 개선을 필요로 한다.

Fig. 5의 (a)는 유선과 동일한 상태에서의 속도성분을 화상표와 길이에 비례하여 나타내고 있다.

본 실험에서 물분사노즐의 위치는 익 후연으로부터 코드길이의 40%에 위치한다. 이곳으로 노즐 위치가 설정된 이유는 선행연구의 결과인 노즐 위치에 따른 효과가 최고인 곳이기 때문이다.

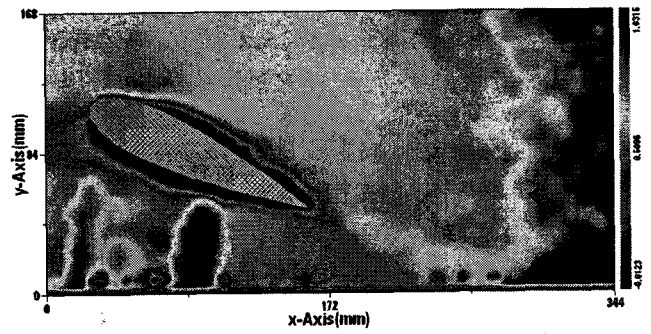
물분사는 2절에서 설명된 것과 같이 피스톤펌프를 사용하였으며, 흡입류는 회류수조의 추적 입자가 들어있는 물을 사용하고, 분출은 익의 노즐에서 이뤄질 수 있도록 하였다. 이때분출

로인 노즐을 통해 빠져나가지 못한 흡입류에 대해서는 별도의 배출관을 수조에 설치하여 수조에서 펌프로 유입된 물은 손실 없이 펌프를 통해 수조로 돌아갈 수 있도록 설치하였다.

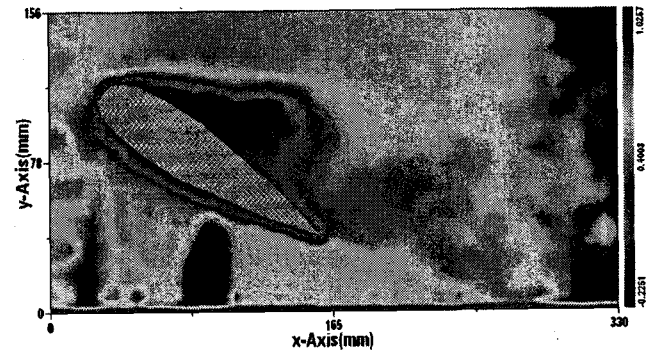
Fig. 5의 (b)는 영각 20° 일 때 물분사장치를 가동하지 않은 상태에서의 평균속도벡터를 나타내고 있으며, Fig 6은 물분사장치의 유속을 가동이 가능한 최대 범위인 9.2[m/s]로 했을 때의 평균속도벡터분포를 나타내고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 물분사를 가해졌을 때의 평균벡터의 크기가 (b)와 비교하여 익 하면의 속도성분까지 영향을 줄 만큼 크게 관찰되었으나, 물분사 유속이 유입속도에 비하여 30배 이상으로 현재의 프로그램으로는 동시 계측이 어려워 전체 유동장을 중심으로 계측하였다.

Fig. 7은 영각 25° 일 때 물분사 유무에 따른 U-성분을 표시하고 있다. 물분사가 없는 (a)에서보다 (b) 그래프의 후연부(trailing edge)에서 유속이 빠르게 나타나는 것이 밝기로 표시되고 있다. 또한, 전연부에서 발생된 박리영역의 크기가 날개상면에서 현저하게 비교됨을 알 수 있었고, 그 크기는 50%이상으로 관찰된다.

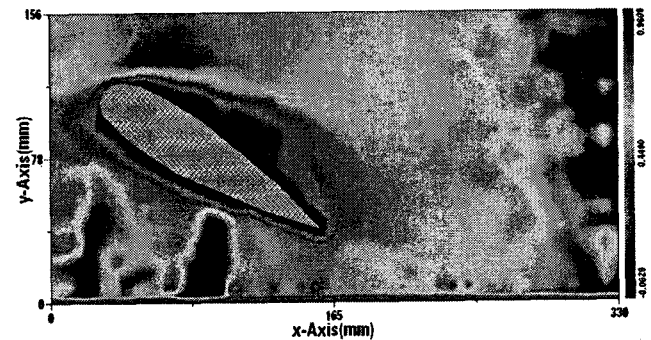
Fig. 8과 9는 각각 영각 30° 에서의 X,축방향의 평균속도 성분 분포를 나타내고 있다. (a)의 물분사가 없는 조건에서보다(b)의 물분사 속도가 9.2m/s일 때 익의 상면에 나타나는 어두운 영역 즉 박리영역(Y축 방향으로의 속도 성분은 높으나 X축 방향으로의 속도성분은 낮음)이 물분사가 없을 때와 비교했을 때 상대적으로 감소했음을 확인 할 수 있다. 이것은 물분사의 영향으로 노즐에서의 물분사가 익의 전연부에서 박리에 의해 발생된 와류의 회전방향에 대하여 반대방향으로 힘을 가해 주어 와류를 감소시켜 주게 됨에 따라 발생하는 효과이다. 또한, 판다 효과를 갖는 물분사의 영향으로 표면을 따라 분출된 물이 익의 후연부에서 떨어져 나와 후류에서의 속도가 상대적으로 높아졌음을 확인 할 수 있다.



(b) 물분사 9.2m/s  
Fig. 7. 영각 25° 에서의 U-성분 비교

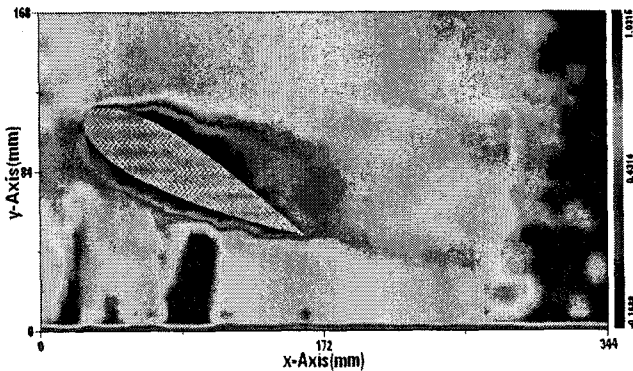


(a) 물분사 없음

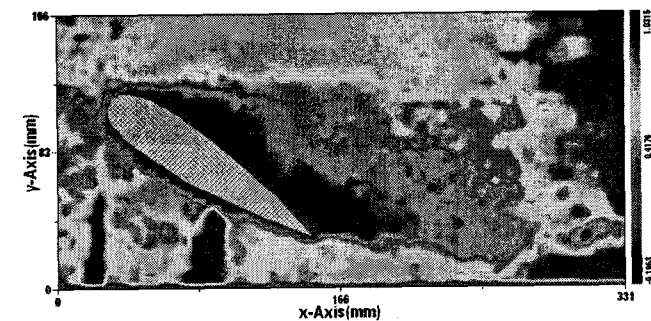


(b) 물분사 9.2m/s

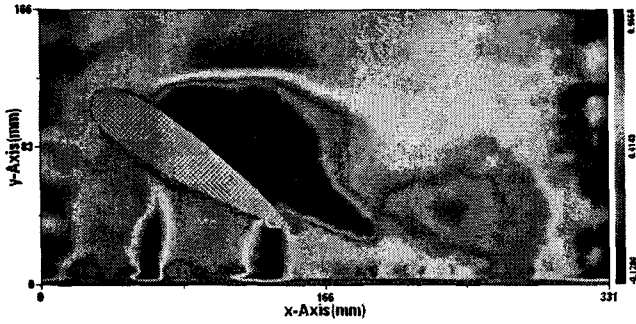
Fig. 8. 영각 30° 에서의 U-성분 비교



(a) 물분사 없음



(a) 물분사 없음



(b) 물분사 9.2m/s

Fig. 9. 영각 35° 에서의 U-성분 비교

관다 효과(coanda effect)란 간단하게 정의해서 “유체(流體)가 만곡면(彎曲面)을 흐를 때 표면에 흡착하는 경향”으로 표현될 수 있다. 본 실험에서는 초기 익의 설계단계에서 관다 효과를 고려하여 설계하였으나 표면 흡착률이 낮았고, 펌프의 분사호스 단면적  $19.63\text{mm}^2$ 와 익의 물분사 노즐 단면적  $9\text{mm}^2$ 가 서로 상이한 이유에서 생기는 압력변화의 두 가지 이유로 인해 노즐의 앞쪽에 셀로판테이프를 붙여 면적을 같게 하여 펌프에서 발생된 압력을 유지하도록 하였고, 분사된 물의 익에 대한 흡착률을 높여 표면을 따라 흘러나올 수 있도록 하였다.

영각별 유동장을 관측하는 과정에서 영각( $\alpha$ )  $17^\circ \sim 18^\circ$  일 때 박리가 시작됨을 관측하였으나 익 표면에서는 빛의 반사 등의 이유로 계측 및 해석이 어려웠다. 이것에 대해서는 차후 실험 및 계측을 통한 해석을 필요로 한다. 또한, 물분사로 인한 익 상부표면에서의 유속변화도 정확한 계측 및 해석을 필요로 한다.

## 5. 결 론

본 실험에서는 영각을  $0^\circ \sim 35^\circ$  로 변화시켜주며, 물분사 유속은  $0\text{m/s}$ ,  $9.2\text{m/s}$ 로 달리하여  $R_e = 6.0261 \times 10^4$ 에서 관다 효과를 갖는 물분사장치가 익 유동과 그에 따른 양력 변화에 미치는 영향을 알기위한 기초연구로서 익 주위의 유동장을 계측 및 분석하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 물제트분사 노즐위치를 코드 길이의 40%로 설정한 본 실험에서 물분사가 박리영역을 제어하고, 와의 발생을 억제하는데 유용함을 알 수 있었다. 또한, 박리영역의 상부에서 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
2. 물분사 유속을 증가시킴에 따라 박리영역이 최대 1/3만큼 감소하였고, 영각은 낮을수록 물분사 유속은 빠를수록 감소하는 경향이 가속화되었다.
3. 일반적으로 알려져 있는 양력계수와 박리를 관측비교한 결과 박리가 시작되는 각도와 양력계수가 감소하는 각도가 근접함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 안해성, “관다효과를 이용한 플랩이 달린 고양력 날개장치에 대한 실험적 연구”, 서울대학교 공학박사학위논문, 2003년
- [2] 박종우, “공동수조를 이용한 Coanda 날개의 성능실험”, 서울대학교 공학석사학위논문, 1998
- [3] Thomas, F., "Investigations into increasing the lift of wings by boundary layer control Through the blowing", Royal Aircraft Establishment Library Translation 1267, NoV., 1967
- [4] Attinello, J. S., "Design and Engineering Feature of Flap Blowing inatallation," Boundary Layer and Flow Control, Ed. G. V. Lachman, Pergamon Press, New York, Vol.1, 1961
- [5] Keh-Sik Min, "Experimental Study of small Flapped Rudder with Rotating Cylinder and Analytical Estimation of Improvements in Ship's Maneuvering Performance with its Application", J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 16, No.3 sep., 1979