

플랩을 갖는 날개 주위의 유동 특성과 PIV 해석에 관한 연구

이경우* · 최희종** · 이승건***

* 목포해양학교 해양시스템공학부 교수, ** 목포해양학교 해양시스템공학부 초빙교수, ***부산대학교 공과대학 조선해양공학과 교수

A Study of the Flow Pattern and the PIV Analysis around a Flapped Foil

Gyoung-Woo Lee* · Hee-Jong Choi*** · Seung-keon Lee***

*Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

**Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

***Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요 약 : 선박의 조종성능은 선체와 프로펠러 그리고 타의 상호작용에 의하여 결정되며 선박의 항해 시 선박의 안전성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그 중에서 선체에 부착된 타의 성능은 선박의 조종성능과 직접적인 관계를 가지고 있으며, 타에 의한 선박의 조종성능을 향상시키기 위하여 특수타를 채택하는 사례가 늘어가고 있는 실정이다. 본 논문에서는 특수타의 일종인 플랩타의 2차원 단면에 대한 연구를 수행하였다. 플랩타의 성능을 예측하기 위하여 주날개의 받음각과 플랩의 각도를 바꾸어 가면서 모형실험을 수행하였으며 모형실험 시 유동장내의 속도분포를 얻기 위하여 PIV계측기법 중 동일입자 추적법의 하나인 2프레임 입자추적법을 사용하였다. 모형실험은 $Re=1.027 \times 10^4$ 에서 수행하였으며, 계측된 결과들을 서로 비교하였다.

핵심용어 : 선박조종성능, 플랩타, PIV계측기법, 2프레임 입자추적법

Abstract : Ship maneuverability is mainly determined according to hull-propeller-rudder system of a ship and directly related to the ship safety during the operation in the ocean. Among hull-propeller-rudder system the rudder system had direct concern with the ship maneuverability and a special rudder has been recommended to improve the ship maneuverability. In this paper the study of flapped rudder's 2-dimensional section was accomplished. Model tests had been carried out with different angles of attack of a main foil and flap's deflection angles to predict the performance of the flapped rudder and the 2 frame particle tracking method had been used to obtain the velocity distribution in the flow field during model tests. $Re=1.027 \times 10^4$ had been used during the whole experiments and measured results had been compared with each other.

Key words : Ship maneuverability, Flapped rudder, PIV analysis, 2 frame particle tracking method

1. 서 론

선박 조종성능 개선작업을 위하여 선박의 변침 및 보침성능에 주된 역할을 하는 조타기(rudder)의 성능 평가가 중요하다.

선박의 조종성능의 향상을 위하여 경우에 따라서는 특수타 채용 문제도 적극적으로 검토, 적용되고 있는 실정이며, 그 중에서 플랩을 갖는 타(이하 플랩타로 표기)는 일반적으로 사용되어 지고 있는 타에 비하여 높은 양력을 발생시키는 것으로 보고되어지고 있고, 저속으로 항해하는 저속비대선의 침로 안정성의 개선에 탁월한 효과를 보이는 것으로 널리 알려져 있다(강, 1993 ; 손 등, 1997 ; 안 등, 1999 ; Kato et al., 1968 ; Kerwin et al., 1972).

본 연구는 특수타의 일종으로서 플랩타의 성능예측을 위한 것이다. 플랩타의 성능예측을 위하여 플랩타의 단면에 해당하

는 플랩을 갖는 날개형상에 대응하는 모형(이하 2차원 플랩타로 표기)을 제작하였으며, 회류수조에서의 모형실험을 통하여 모형주위의 유동장을 가시화하였다. 유동장의 해석을 위하여 PIV(particle image velocimetry, 입자영상유속계)에 의한 계측기법을 사용하였다. 모형실험은 주날개의 받음각(이하 주날개각으로 표기)과 플랩의 각도(이하 플랩각으로 표기)를 바꾸어 가면서 수행하였으며, 계측된 모형실험결과들은 각각의 주날개각과 플랩각에 대하여 상호 비교·검토하였다.

2. 실험장치 및 실험

본 연구의 목적인 특수타의 일종으로서 플랩타의 성능예측을 위하여 2차원 플랩타를 제작하고, 모형실험을 수행하였다. 모형실험을 위하여 제작된 플랩타 단면의 형상을 Fig. 1에 도

* 대표저자 : 이경우(종신회원), kwlee@mmu.ac.kr 061)240-7083

** 정회원, choihj1988@hanmail.net 011)5509-0005

*** 정회원, leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441

시하였으며, 2차원 플랩타의 주날개와 플랩의 제원은 Table 1에 나타내었다. 주날개의 제작 시 사용된 날개의 단면형상은 NACA 0020을 사용하였다.

Fig. 1에서 α 로 표기한 주날개각은 유동장의 상류로부터의 유입유동과 주날개각(Ange of attack)을 나타내고, δ 로 표기한 플랩각은 플랩이 주날개의 코드선(chord line)의 연장선과 이루는 각을 나타내며, 주날개각과 플랩각이 상호 독립적으로 각도 변화가 가능하게 하기 위하여 주날개와 플랩을 힌지를 사용하여 연결하였으며, 주날개각과 플랩각은 시계방향의 회전을 양(+)¹의 방향으로 결정하였다.

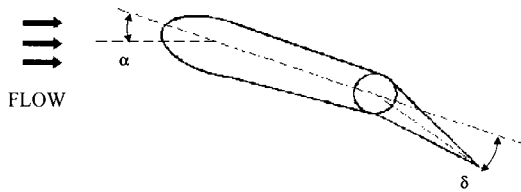


Fig. 1 Schematic Diagram of Test Setup and Flap Rudder

Table 1 Principal particulars of the flapped rudder

	Main Foil	Flap
Chord (mm)	100	50
Span (mm)	100	100
Section type	NACA 0020	NACA 0020

Fig. 2에서는 모형실험을 위하여 사용된 회류수조장치를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보여지는 회류수조 중에서 모형실험을 위하여 사용된 실험부의 길이는 100mm, 너비가 190mm이며 높이가 270mm이다. 실험대상인 플랩타 상부의 자유수면 영역에 의해 발생하는 수면파로 인한 빛의 굴절현상을 제거하기 위하여 상부에 얇은 유리를 설치하여 4각형 수로를 만들었다.

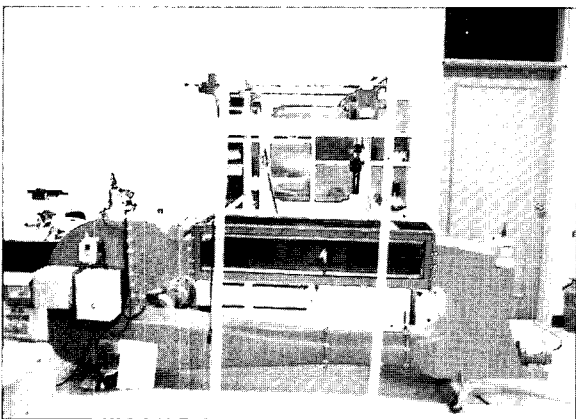


Fig. 2 Circulating water equipment

3. PIV 계측 기법

유체역학과 관련된 기기의 설계 또는 성능 평가를 위한 제반 사항은 대상 물체주위의 유동장 거동을 정량적으로 평가하

는 문제와 직결된다. 유동가시화(flow visualization)기법은 유동장의 거동을 알아보는 방법으로 흐름 중에 추적입자를 주입하고 적당한 조명과 카메라를 이용하여 순간 또는 시간 평균의 유동장을 촬영하고, 촬영된 이미지의 해석을 통하여 유동장의 정보를 알아내어 유동장의 유체역학적 특성을 고찰하는 방법이다. 유동가시화기법은 여러 종류가 있지만, 그 중에서 PIV에 의한 계측기법은 최근의 디지털영상기법과 컴퓨터관련 하드웨어의 비약적인 발전에 기인하여 크게 발전하였으며, 특히 유동변수를 동시다점으로 계측할 수 있는 장점으로 인하여 널리 사용되어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 2차원 플랩타 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. 조명으로 레이저 sheet beam을 유동장에 조사한다.
3. 유동장에 주입된 입자에 대해 연속적인 두 개 이상의 화상을 획득하기 위하여 충분히 긴 촬영 노출시간을 취하며, 화상을 잘 얻기 위하여 고해상도의 video camera를 사용한다.
4. 화상(image)구별을 결정하기 위하여 화면을 분석하며, 이 화면으로부터 유동장의 속도벡터를 구할 수 있다.

화상을 처리하는 기법 중 동일입자 추적법으로 4프레임 입자추적법과 2프레임 입자추적법이 있다. 4프레임 입자추적법은 연속하는 4시각의 순간적인 트레이서 입자화상을 사용하여 동일입자를 추적하는 기법으로 동일입자 추적법 중 가장 먼저 소개된 기법이며 화상의 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 가지고 있으므로 고속의 흐름에서 입자 획득률이 우수함을 알 수 있다(박 등, 1995 ; 이 등, 1994 ; 조 등, 1996 ; Gray et al., 1995 ; (주)아이아이티, 1998).

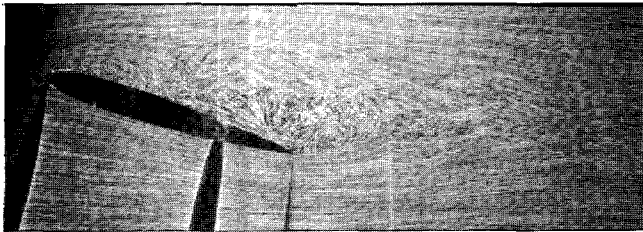
본 연구에서는 추종성이 우수한 입자로서 직경이 100~150 μ m인 polyvinyl chloride입자를 사용하였다. 속도벡터를 구하기 위한 격자의 크기는 40 \times 30이며, 유동장의 이미지는 고성능 디지털카메라를 사용하여 획득하였으며, Pentium급의 컴퓨터를 사용하여 유동해석을 수행하고, 유동장의 정보인 평균 속도벡터, 평균운동에너지 분포 등을 구하였다. 유동해석은 동일입자추적법 중의 하나인 2프레임 입자추적법을 사용하였다. 컴퓨터에 내장된 이미지보드는 DT3155 (640 \times 480 픽셀, B&W)이다.

4. 계측결과 및 고찰

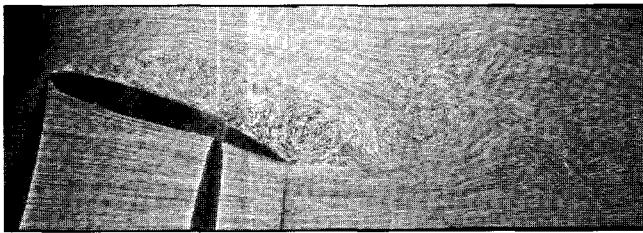
4.1 유동가시화 결과

플랩을 갖는 2차원 날개 주위의 유동특성을 조사하기 위하여

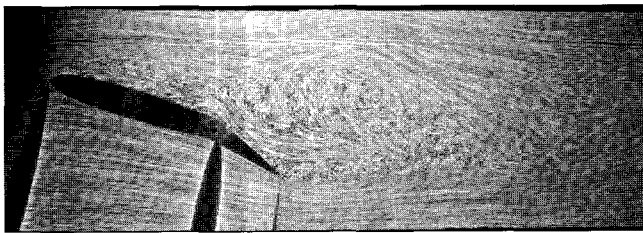
$Re=1.027 \times 10^4$ 에서 고해상도 디지털카메라를 이용하여 유동장을 촬영하였으며, 동일한 주날개각에 대하여 플랩각을 변화시켜가면서 유동양상을 서로 비교하였다. Fig. 3은 20°로 고정된 주날개각에 대하여 플랩각을 변화시켜가면서 유동장을 촬영하고 유동장의 차이를 서로 비교한 것으로 날개주위의 유동양상을 광원인 레이저로 비추어 상류로부터 날개주변의 유동장에 유입한 추적입자를 촬영한 것이다. (a)~(d)에서는 주날개각에 비하여 플랩각이 양의 회전각을 가지는 데 비하여 (e)에서는 음의 플랩각을 주어서 유동장을 촬영하였다.



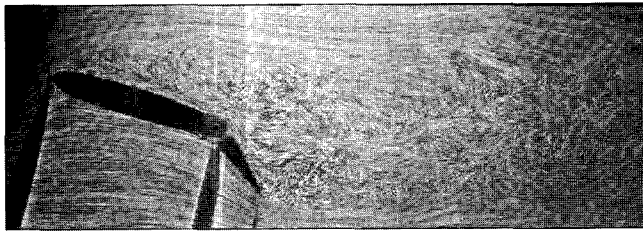
(a) $\delta=0^\circ$



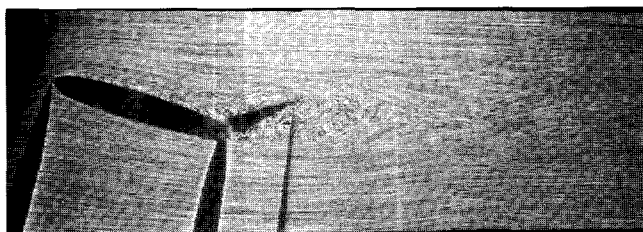
(b) $\delta=10^\circ$



(c) $\delta=20^\circ$



(d) $\delta=40^\circ$



(e) $\delta=-40^\circ$

Fig. 3 Flow visualizations ($\alpha=20^\circ$)

(a)는 20°의 주날개각에 대하여 플랩각이 0°인 경우의 유동을 촬영한 것이다. 날개주위의 유동특성에 대한 연구에서 물체주변의 압력 차이에 의해 발생하는 박리현상이 주요한 고려 대상이며, 본 연구에서는 주날개각이 12°근방에서 박리현상이 발생하는 것을 목격할 수 있었다.

(b)는 20°의 주날개각에 대하여 플랩각이 10°인 경우의 유동을 촬영한 것이다. 플랩을 기준으로 상면과 하면의 압력구배에 의해 플랩의 상면에 박리현상을 동반하는 경계층이 생성되고 플랩의 upstream 방향의 양력이 발생한다. 이것은 날개 전체의 양력증가의 원인이 된다.

(c)는 20°의 주날개각에 대하여 플랩각이 20°인 경우의 유동을 촬영한 것이다. 이 경우에 주날개각에 따른 양력효과와 플랩각에 의한 양력효과가 서로 더해진 것을 알 수 있다.

(d)는 20°의 주날개각에 대하여 플랩각이 40°인 경우의 유동을 촬영한 것이다. 이 경우에 날개의 경계층 두께가 증가하였으며, 앞의 결과와 비교하여 박리점이 전연 쪽으로 이동한 것을 알 수 있다. 또한 과도한 플랩각의 조작으로 날개의 하면에서부터의 upstream으로 인한 박리현상이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 주날개와 플랩의 박리현상으로 날개 상면에 걸쳐 폭넓은 와류동이 생성되어 상면의 자유유동을 교란시키는 것을 볼 수 있다. 그리고 (c)와의 비교하여 플랩각의 증가로 인하여 불규칙 회전유동 영역이 크게 발달된 것을 볼 수 있으며, 주날개와 플랩의 downstream과 upstream의 영향으로 플랩타의 후류영역에서 와류동을 관찰할 수 있다.

(e)는 20°의 주날개각에 대하여 플랩각이 -40°인 경우의 유동을 촬영한 것이다. 플랩각을 주날개각과 비교하여 음의 방향으로 회전시켰을 때 어떤 유동양상이 발생하는 지에 대하여 알아보고자 한 것으로 영상에서 알 수 있는 바와 같이 주날개의 박리영역과 플랩의 박리영역이 서로 상쇄되는 경향을 나타내었다.

4.2 PIV 계측 결과

Fig. 4~6은 플랩타주위의 유동장을 PIV계측기법을 이용하여 얻은 플랩타주위의 유동에 대한 2차원 속도분포를 서로 비교한 것이다. x-축은 관측부의 폭, 그리고 y-축은 관측부의 깊이를 나타낸다.

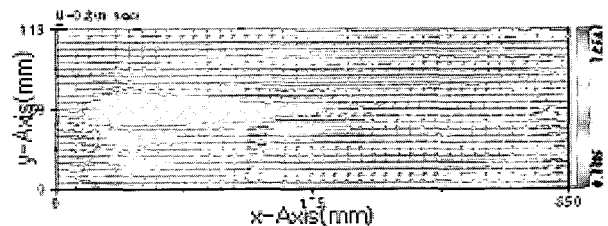


Fig. 4 Average velocity ($\alpha=0^\circ, \delta=0^\circ$)

Fig. 4는 주날개각이 0°이고, 플랩각이 0°인 경우에 대한 유동장의 속도분포를 나타낸 것이다. 이 경우에 유입유동이 균일하다고 가정하면 날개가 상하로 대칭의 형상을 가지므로 유

체 유동의 속도분포도 상하가 대칭이 되어야 한다. 그러나 계측결과에서 볼 수 있는 바와 같이 날개의 전연의 근방에서 날개의 하면의 속도분포가 상면의 속도분포보다 조금 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 플랩 연결부에서는 속도분포는 상면에 비해 하면에서 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 유입유동의 흐름이 정확히 상하가 균일한 정상상태의 유동을 만들지 못한 것에 기인하며, 특히 현지가 설치된 지점에서는 제작상 불가피하게 레이저가 비취지지 않는 영역이 발생하여 계측상의 문제를 유발시키는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5~6은 고정된 주날개각에 대하여 플랩각을 변화시키면서 PIV계측을 수행하고 유동장의 속도분포를 구하여 서로 비교한 것이다. Fig. 5는 20°의 주날개각에 대한 것이고, Fig. 6은 30°의 주날개각에 대하여 플랩각을 변화시키면서 유동장을 속도분포를 구한 것이다. 전반적으로 볼 때 계측결과와 공통된 사항은 주날개각의 증가에 따른 박리 현상과 경계층의 증가를 정량적으로 알 수 있으며, 플랩각의 경우에는 $\alpha=2\delta$ 에서 가장 큰 양력을 일으킨다는 것을 알 수 있다. 서로 다른 플랩각에 의한 유동장의 속도분포의 비교에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 주날개각에서도 플랩각이 증가할 때 박리현상이 주날개의 전연 쪽으로 치우친다는 것을 알 수 있으며, 플랩의 후연방향으로의 급격한 상향유동을 목격할 수 있었다. 그리고 날개 전체의 후면에는 vortex core의 모습도 확인된다.

플랩각이 커지면서 박리점이 날개의 전연 쪽으로 이동하여 항력 증가를 유발하고 있으며, 경계층 영역의 증가와 플랩의 윗면의 upstream의 형상을 볼 때 상대적인 양력증가 효과를 기대할 수 있을 것으로 추정된다.

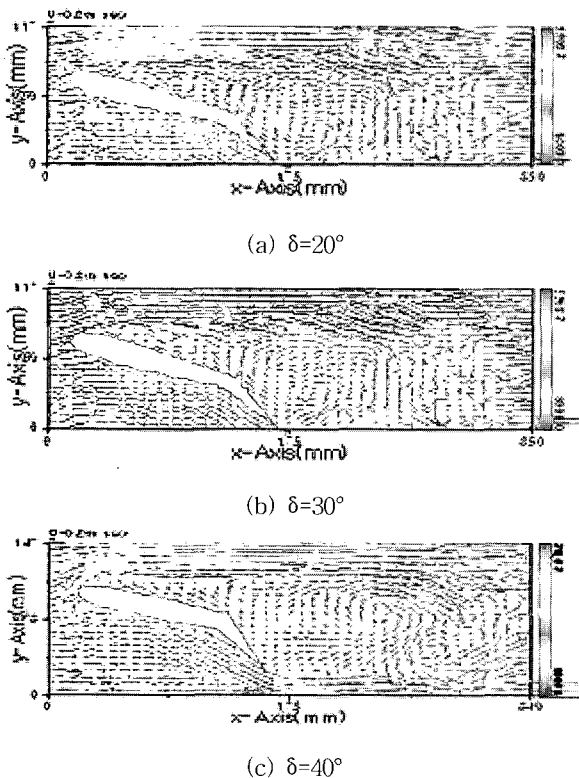


Fig. 5 Average velocity ($\alpha=20^\circ$)

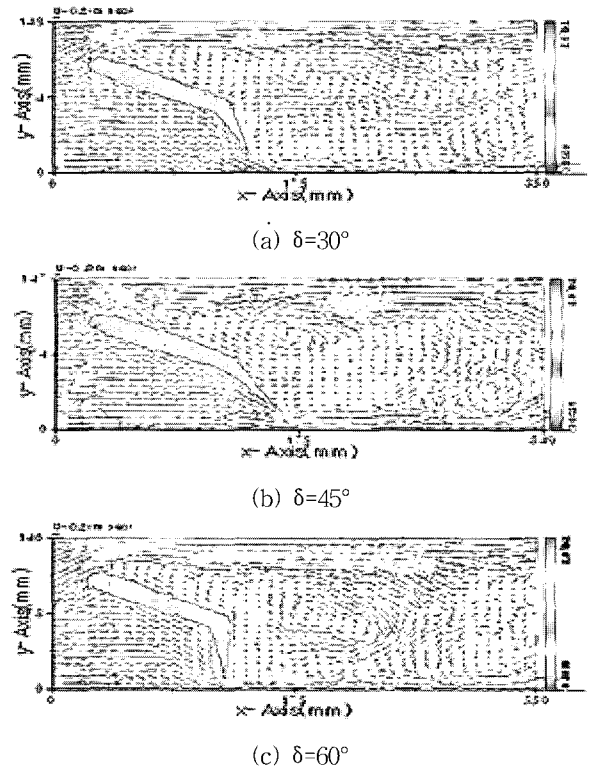


Fig. 6 Average velocity ($\alpha=30^\circ$)

Fig. 7은 주날개각 0°에서 플랩각을 각각 0°와 20°로 고정했을 때 평균 운동에너지의 분포이다. (b)에서와 같이 주날개각 없이 플랩각만을 20°로 주었을 때 날개 상면에서의 속도증가로 인해 (a)보다 운동에너지가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다.

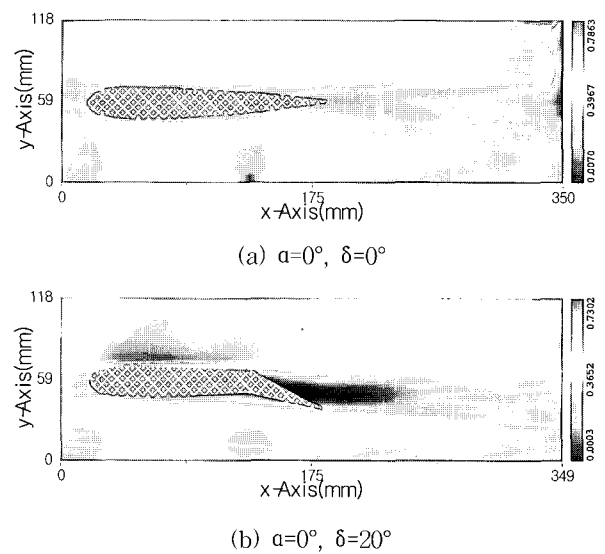
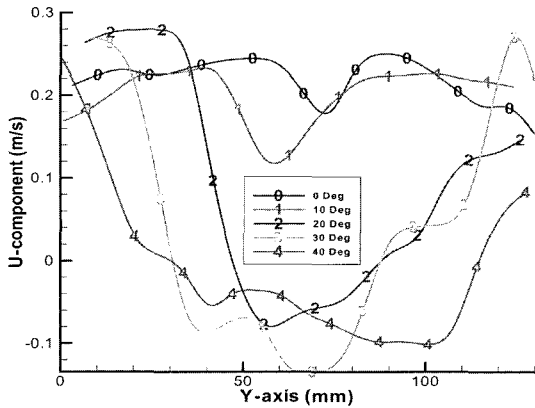


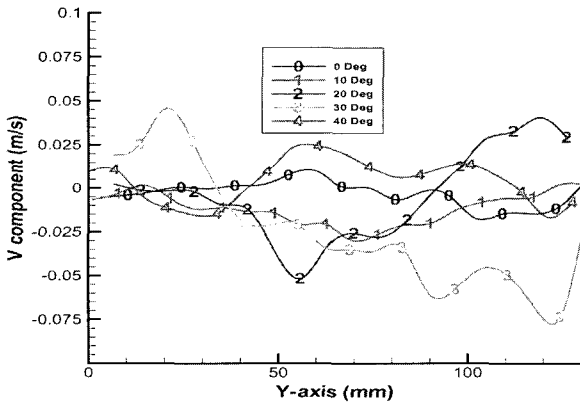
Fig. 7 Average kinematic energy

Fig. 8은 플랩타의 150mm지점인 날개의 후연근처에서 2차원 속도벡터 분포를 정량적으로 도식화한 그래프이다. 플랩각의 변화에 따른 영향으로 인해 발생하는 양력과 항력의 변화 관계 등을 속도 구배를 통하여 알아보려 상기 위치에서 2차

원 플랩타의 상하방향(코드 방향과 수직)으로 20개의 u, v 성분 분을 얻어 도식화하였다. (a)그래프 계측 결과에서 볼 수 있듯이 0°와 10°에서는 유입하는 유체의 속도가 거의 일정하나 실속 영역인 20°, 30°, 40°에서는 그래프 y축의 50~80영역에서 급속히 감소한다. 이러한 날개의 후연 주위의 속도 변화는 날개의 상하의 역압력 구배 현상으로 인한 양력의 증감 현상을 설명하고 있고, 또한 익 주위의 정량적인 속도변화를 관측할 수 있음을 보이고 있다.



(a) u-velocity



(b) v-velocity

Fig. 8 Velocity distribution along trailing edge

5. 결론

유동 가시화 기법을 이용하여 플랩타 주위의 유동 특성을 가시화하고 주날개각과 플랩각의 변화에 따른 2차원 날개주위의 유동 특성을 PIV계측기법을 사용하여 해석하였다. 본 연구 내용을 요약하면 다음과 같다,

- 레이저를 이용한 가시화가 플랩을 가지는 2차원 날개주위의 유동현상을 이해하는데 유용한 방법임을 알 수 있었다.
- 주날개각과 플랩각의 변화에 따른 박리현상과 양력, 항력의 발생과정 및 증감을 가시화 기법을 통하여 조사하였고, 최종적으로 PIV계측기법을 이용하여 주날개각 변화에 따른 플랩 주위의 속도 변화를 추적할 수 있었다.
- PIV계측기법을 이용한 플랩 주위의 유동장 해석기법이 유동장 해석에 유용한 방법임을 알 수 있었고, 플랩각의 변화에 따른 유동장에 대한 보다 체계적인 유체역학적 해석이 필요하다고 생각된다. 또한, 자유수면의 영향, 벽면의 영향, 박리점 이동에 따른 항력과 양력변화 및 플랩의 최적 조타 범위에 대한 정량적인 속도장 해석 등에 대하여 추후의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 강창구(1993), 2차원 플랩타의 간극이 양력에 미치는 영향, 대한조선학회논문집, 제30권 제4호.
- [2] 박준수, 권순홍, 하동대, 최장운, 전환수(1995), PIV를 이용한 다수원주 주위의 유동장 해석, 대한조선학회 추계학술발표 논문집.
- [3] 손경호, 김진형, 김현수, 김윤수, 하문근(1997), 특수타의 채택이 침로 안정성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한조선학회논문집, 제34권 제3호.
- [4] 안해성, 김효철(1999), An Application of Coanda Effect to a Flapped Rudder, 대한조선학회논문집, 제36권 제1호.
- [5] 이영호, 김춘식, 최장운(1994), PIV의 성능개선에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제18권 제3호.
- [6] 조대환, 최장운, 도덕희, 이영호(1996), 이미지 보오드를 이용한 PIV시스템의 개발, 한국박용기관학회지, 제20권 제5호.
- [7] (주)아이아이티(1998), CACTUS'97 사용자 설명서.
- [8] Gray C. and Bruce T.(1995), "The Application of Particle Image Velocimetry(PIV) to Offshore Engineering", ISOPE.
- [9] Kerwin J. E., Mandel P. and Lewis S. D.(1972), "An Experimental Study of a Series of Flapped Rudder", Journal of Ship Research.
- [10] Kato H., et al.(1968), Flapつき舵の研究 - 第1報 : 單獨試験の結果 -, 日本造船學會論文集, 第124號.

원고접수일 : 2005년 4월 6일

원고채택일 : 2005년 8월 24일