

# 균일 흐름 중에 놓인 2차원 가변익 주위의 유동가시화 및 PIV 해석

오경근\*, 최희종\*\*, 이경우\*\*, 최민선\*\*\*, 이승건\*\*\*\*

\*목포해양대학교 대학원, \*\*목포해양대학교 해양시스템공학부,  
\*\*\*목포해양대학교 기관시스템공학부, \*\*\*\*부산대학교 조선해양공학과

## Flow Visualization and PIV Analysis around a 2-Dimensional Flapped Foil

Kyoung-Gun Oh\* · Hee-Jong Choi\*\* · Gyoung-Woo Lee\*\*  
Min-Son Choi\*\*\* · Seung-Keon Lee\*\*\*\*

- \* Graduate School, MMU, Chukkyo-dong 571-2, Korea
- \*\* Division of Ocean System Engineering, MMU, Chukkyo-dong 571-2, Korea
- \*\*\* Division of Marine System Engineering, MMU, Chukkyo-dong 571-2, Korea
- \*\*\*\* Department of Naval Architecture, Pusan Uni., Jangjyun-dong San 30, Korea

### ABSTRACT

Maneuverability of ships has been receiving a great deal of attention both concerning navigation safety and the prediction of ship maneuvering characteristics, to improve it High-lift device could be applied to design of rudder at design stage. Now, we carried out the flow visualization and investigation of flow field around a flap rudder(trailing-edge flap). Flow visualization results of flap deflection shown as the flow around a NACA0020 Flap Rudder will be conducted in a Circulating Water Channel. The purpose of this investigation will be to investigate the development of the separation region on the flap rudder with the variation of the angle of attack and determine the angle of attack at which the flow separates and reattaches.

## 1. 서 론

선박 조종성능 개선작업의 일례로 선박의 변침 및 보침성능에 주된 역할을 하는 조타기(Rudder)의 성능 평가가 중요하고, 때에 따라서는 특수타 채용 문제도 적극적으로 검토, 적용되고 있는 실정이다[1][7]. 그 중 플랩을 가지는 타는 높은 양력을 나타내는 것으로 알려져 있고[2][3][6][7], 선박의 조종성능 중 저속비대선의 경우 매우 중요시되는 선박의 침로안정성 개선에 높은 효과가 있는 것으로 알려져 있다[1].

본 연구에서는 플랩을 가지는 2차원 익 주위의 유동현상을 고찰하기 위하여, 실험 계측 기법으로서 물수채 주위의 유동장에 대하여 동시 다점으로 속도계측이 가능한

PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용한 플랩 타 주위 유동에 대하여 가시화 실험을 행하고, 영각(Angle of attack)과 플랩각(Flap angle)변화에 따른 익주위의 유동특성을 알아본다.

## 2. 실험장치 및 실험

본 연구에서는 플랩을 가지는 타 주위의 유동해석을 위해 Fig. 2.와 같은 소형 회류수조를 이용하였다. 소형회류수조의 시험부는 길이 1000 mm, 폭 190 mm, 높이 270 mm 인 사각형이다. 또한, 실험대상인 익 상부의 수면파에 의한 빛 굴절현상을 없애기 위하여 상부에 얇은 유리를 설치하여 4각형 유로를 만들었다. 주 날개와 플랩의 각도변화를 위하여 관측창 우측에 가변 축을 설치하였다. 가시화 실험에 이용된 플랩타는 NACA 0020단면을 가지는 익을 선정하

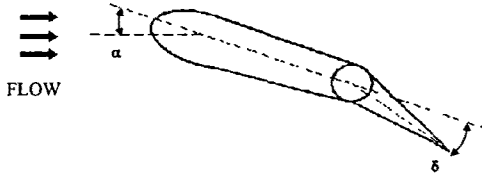


Fig. 1. Schematic Diagram of Test Setup and Flap Rudder

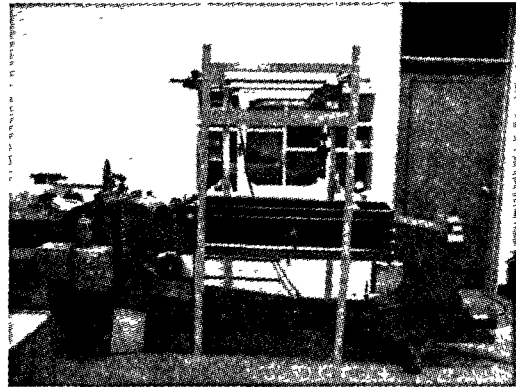


Fig. 2. Circulating water equipment

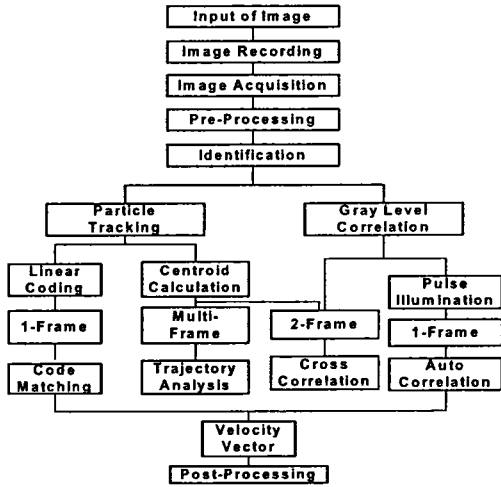
플랩이 부착된 타의 플랩 영향을 알아보기 위해 익은 Fig. 1.과 같이 주 날개위해 주 날개의 경우  $\alpha = 20^\circ$ 로 고정하고, 플랩 각의 경우  $\delta = 0, 10, 20, \pm 40^\circ$ 로 설정, 익주변의 유동 장을 해석하였다. 플랩은 주 날개부분과 익 전연(leading edge)에서 2/3, 후연(trailing edge)으로부터 1/3되는 지점에 힌지로 연결, 필요로 하는 각도를 조절할 수 있도록 제작하였다.

## 3. PIV 해석

유체역학과 관련된 기기의 설계 또는 성능 평가를 위한 제반 사항은 대상 물체 주위의 유동장 거동을 정량적으로 평가하는 문제와 직결된다. 유동 가시화

(Visualization) 기법은 유동장의 거동을 알아보는 방법으로 흐름 중에 추적 입자를 주입하고 적당한 조명과 카메라를 이용하여 순간 또는 시간 평균의 유동 장을 촬영하여 물수체의 유체역학적인 특성을 고찰하는 방법이다. 가시화기법은 여러 종류가 있지만, 그중 PIV(Particle Image Veloimetry, 입자영상유속계)는 최근, 디지털 영상기법과 컴퓨터 관련 하드웨어의 비약적인 발전에 기인하여 유동변수를 동시다점으로 계측할 수 있어 유동장 해석에 각광을 받고 있다[4][5][8]. 이러한 PIV의 원리는 유동장에 추종성(traceability)이 뛰어난 입자를 분포시켜 이들 입자의 순시적인 위치를 미소시간간격을 두고 계측, 속도를 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 2차원의 계조치 상호상관 PIV 해석기법[8]을 적용, 유동 정보를 구하였다. 본 연구에 사용된 PIV 해석 절차는 Fig 3.과 같다.

추종성이 우수한 입자로서 직경이 100~150 $\mu$ m인 PVC 입자를 사용하였다. 속도 계측은 1회 영상에 대하여 공간 해상도 40 $\times$ 30개의 공간 벡터를 구하였으며 영상 입력 및 재생 장치로서 고성능 디지털 카메라를 이용하였다. 이미지 보드는 DT3155 (640  $\times$  480 픽셀, B&W)이며 팬티엄 급의 주 처리 컴퓨터에 내장하여 이용하였다. 연속된 유동장의 이미지에 대하여 거의 동일한 시간 간격으로 반복 처리하여 더한 것을 시간 평균의 속도 값으로서 이용하였다. 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상을 이용하여 이들의 계조치에 대하여 식(1)과 같은 상호 상관 계수를 이용하여 최대 상관 계수의 위치를 속도 벡터의 종점 좌표로 정하는 방법을 택하였다.



$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g})^2}}$$

Fig. 3. Flow chart of PIV processing

여기서  $C_{fg}$ 는 상호상관계수,  $f, g_i$ 는 상관 영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 "-"는 평균을 뜻한다.

## 4. 계측 결과와 고찰

### 4.1 유동가시화 결과

플랩을 가지는 2차원 익 주위의 유동특성을 조사하기 위하여  $Re = 1.027 \times 10^5$ 에서 고속카메라와 고해상도 비디오카메라를 이용하여 가시화 실험을 실시하였다. Photo 4.1~4.5는 주 날개각( $\alpha$ )은  $20^\circ$ 고정하고 플랩각( $\delta$ )를 변화하였을 때, 익 주위의 유동현상을 레이저 광원을 이용하여 조사, 상류로부터 익 주변 유동장에 유입한 추적 입자를 촬영한 장면을 나타낸다. 주 날개각과 플랩각의 변화는 타 단독시험 결과[6]를 참조하여 설정하였다. 또한 상반된 플랩 각에 따른 유동특성을 알아보기 위해 photo 4.5와 같은 반대방향의 플랩각 조작도 실시하였다.

Photo. 4.1은 주익각( $\alpha$ )을  $20^\circ$ , 플랩각( $\delta$ )를  $0^\circ$ 으로 고정한 유동가시화를 나타내고, 플랩이 없는 전형적인 2차원 익 주위의 유동을 보여주고 있다. 익주위의 유동특성을 알아보는 데는 물체주변의 압력 차이에 의해 발생하는 박리현상이 매우 중요한데, 본 연구에서 대략적으로 영각이  $12^\circ$ 근방에서 박리현상이 관찰되었다. 이러한 2차원 익의 박리현상 및 박리점 위치는 항력과 양력 현상에 큰 영향을 미치지만, 본 연구에서는 우선 주타각과 플랩각의 상호작용을 알아보는 관점에서 초기 박리점 이동 현상에 대한 고찰은 생략하였다. 박리점 이동에 따른 항력과 양력변화는 추후 다른 논문에서 다루도록 한다.

Photo. 4.2는 플랩각을  $10^\circ$ 로 조작하였을 때의 익 주위 유동가시화 사진을 보여주고 있다. 플랩익의 아랫면과 윗면의 압력구배에 의해 플랩의 윗면에 박리현상을 동반하는 경계층이 생성되고 플랩익의 upstream 방향의 양력이 발생한다. 이것은 전체 익의 양력증가의 원인이 된다.

Photo. 4.3은 주익각  $\alpha$ 를  $20^\circ$ 로 고정시키고 플랩각을  $20^\circ$ 로 변화시킬 때의 익주위의 유동현상을 보여주고 있다. 이 경우는 주익각과 플랩을 동시에 조작했을 때의 양력증가를 보여주는 가시화 사진이다. 플랩타의 경우, 주익의 영각에 따른 양력 효과와 플랩익의 양력효과가 더해진다는 것을 알 수 있다.

Photo. 4.4는 주익각  $\alpha$ 를  $20^\circ$ 로 고정시키고 플랩각을  $40^\circ$ 로 변화시킬 때의 익주위의 유동현상을 보여주고 있다. 익의 경계층 두께가 증가하고 박리점 현상이 주날개 익의 leading edge쪽에서 나타난다. 또한 과도한 플랩각의 조작으로 익 아랫면에서부터의 upstream으로 인한 박리현상도 발생한다. 주날개 익과 플랩익의 박리현상으로 익 상면에 걸쳐 폭넓은 회전 유동영역이 생성되어, 상면의 자유유동을 교란시킨다. Photo 4.3과 비교해서 플랩각의 증가로 인하여 불규칙 회전유동 영역이 크게 발달되고, 주익과 플랩의 downstream과 upstream의 영향으로 플랩의 후류영역에서 vortex를 관찰할 수 있다.

Photo. 4.5는 Photo. 4.4의 반대 경우로 플랩 각을 조작한 경우로써, 주익의 박

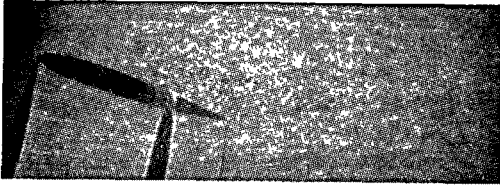


Photo 4.1 Flow visualization ( $\alpha=20^\circ, \delta=0^\circ$ )

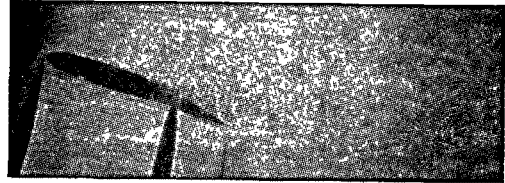


Photo 4.2 Flow visualization ( $\alpha=20^\circ, \delta=10^\circ$ )

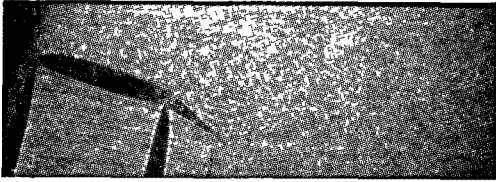


Photo 4.3 Flow visualization ( $\alpha=20^\circ, \delta=20^\circ$ )

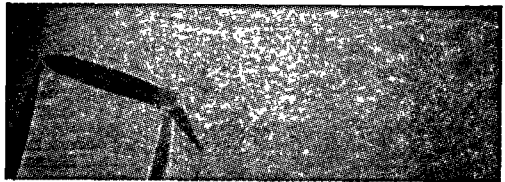


Photo 4.4 Flow visualization ( $\alpha=20^\circ, \delta=40^\circ$ )

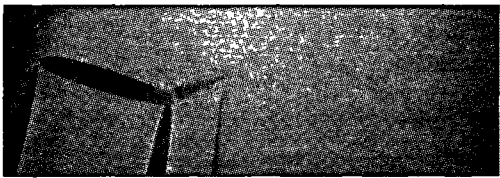


Photo 4.5 Flow visualization ( $\alpha=20^\circ, \delta=-40^\circ$ )

리영역과 플랩 익의 박리영역이 서로 상쇄되는 경향을 보인다. 이 경우는 항력을 최소화할 수 있는 각도 제어의 예를 보여준다.

#### 4. 2 PIV 계측 결과

Fig. 4.6~4.12는 PIV을 이용한 2차원 속도 계측의 결과이다. y축은 관측부의 깊이, x축은 관측부 폭을 나타낸다.

주 날개각과 플랩각을 변화시키지 않을 때 즉 흐름에 평행한 상태인 결과를 Fig 4.6에 나타낸다. 흐름에 평행인 경우 날개 상하면의 속도 성분이 평행을 이루어야하나 계산 결과에서 볼 수 있듯이 하면의 속도 벡터가 날개 전연에서는 상면의 속도보다 조금 빠르게 나타나고 플랩 연결부에서는 속도가 상면에 비해 낮게 나타났다. 이는 유입류의 흐름이 정확한 균일 정상흐름이 아닌 것에 기인하며 플랩 연결부, 즉 힌지가 설치되어 있는 지점은 힌지부분의 공동(제작상 불가피하게 설치됨) 부분에 기인한다고 할 수 있다.

계측결과의 공통된 사항은 주날개각의 증가에 따른 박리 현상과 경계층의 증가를 정량적으로 알 수 있고 플랩각의 경우 상대적으로  $\alpha = 26$ 의 경우가 제일 양력이 커지는 것을 알 수 있다. 계산 결과에서 볼 수 있듯이 동일한 영각에서도 플랩 각이 증가 할 때 전자보다도 박리현상이 주익의 L.E. 쪽에 치우쳐있는 것을 알 수 있고, 플

랩 익의 T.E. 방향으로 급격한 상향 유동을 확인할 수 있다. 또한 전체 익 후면에는 vortex core의 모습도 확인된다. 이러한 현상은 Fig. 4.2(a)보다도 상대적인 박리점의 이동으로 인한 항력 증가를 나타내고 있고, 양력의 측면에서 경계층 영역의 증가와 플랩의 윗면의 upstream의 형상을 볼 때 상대적인 양력 증가 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되나, 실속현상을 동반한 유동장 형태를 보이는 것으로 판단되어 보다 해석적인 설명이 필요하다.

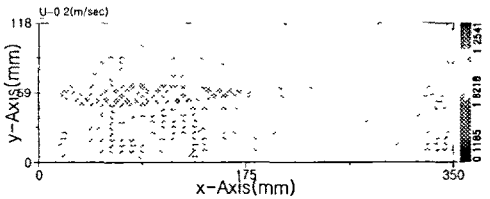


Fig. 4.6 Average Velocity ( $\alpha=0^\circ, \delta=0^\circ$ )

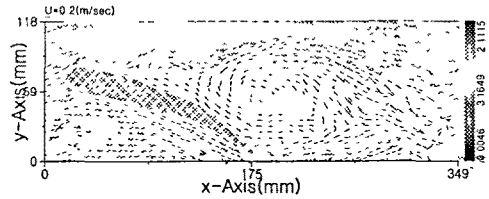


Fig. 4.7 Average Velocity ( $\alpha=20^\circ, \delta=20^\circ$ )

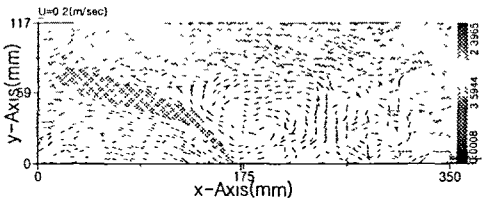


Fig. 4.8 Average Velocity ( $\alpha=20^\circ, \delta=30^\circ$ )

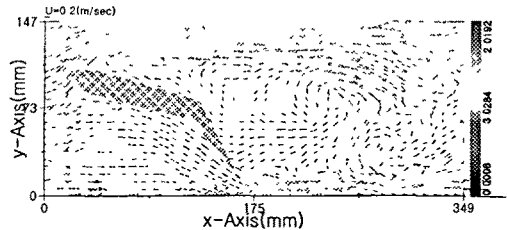


Fig. 4.9 Average Velocity ( $\alpha=20^\circ, \delta=40^\circ$ )

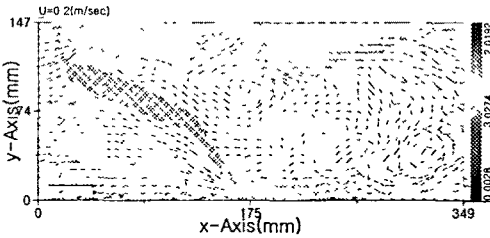


Fig. 4.10 Average Velocity ( $\alpha=30^\circ, \delta=30^\circ$ )

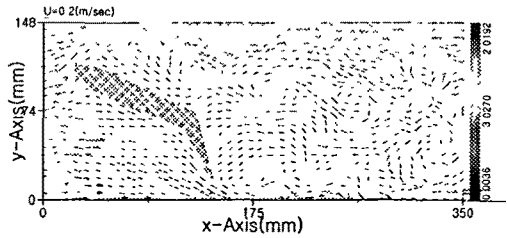


Fig. 4.11 Average Velocity ( $\alpha=30^\circ, \delta=45^\circ$ )

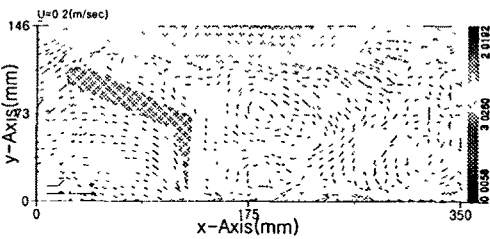


Fig. 4.12 Average Velocity ( $\alpha=30^\circ, \delta=60^\circ$ )

Fig. 4.13과 14는 영각 0°에서 플랩각을 각각 0°와 20°로 했을 때 평균 운동에너지의 분포이다. 영각 없이 플랩각만을 20°로 주었을 때 익 상면에서의 속도증가로 인해 운동에너지가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 4.15와 16은 플랩타의 150mm지점(trailing edge)에서의 2차원 속도 분포를 정량적으로 도식화한 그래프이다. 플랩각의 변화에 따른 영향으로 인하여 발생하는 양력과 항력의 변화관계 등을 속도 구배를 통하여 알아보하고자 상기 위치에서 2차원 플랩타의 폭 방향(코드 방향과 수직)으로 20개의 u, v 성분을 얻어 도식화하였다.

Fig. 4.15의 계측 결과에서 볼 수 있듯이 0°와 10°에서는 유입하는 유체의 속도가 거의 일정하나 실속 영역인 20°, 30°, 40°에서는 그래프상 y축의 50~80영역에서 급속히 감소한다. 이러한 익 주위의 속도 변화는 익 상하의 역압력 구배 현상을 동반하여 양력을 증감시키는 현상을 설명하고 있고, 익 주위의 정량적인 속도변화를 관측할 수 있음을 보이고 있다.

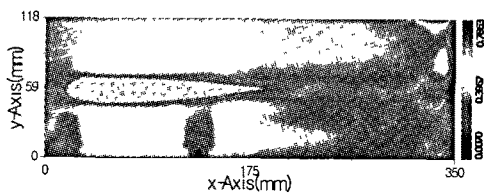


Fig. 4.13 Average Kinematic-Energy ( $\alpha=0^\circ, \delta=0^\circ$ )

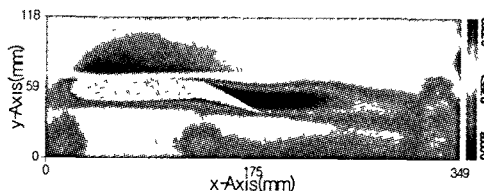


Fig. 4.14 Average Kinematic-Energy ( $\alpha=0^\circ, \delta=20^\circ$ )

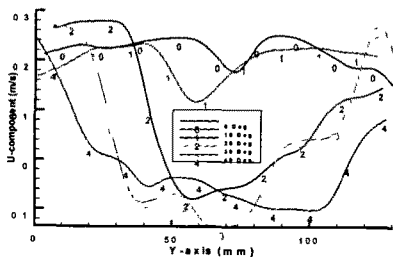


Fig. 4.15 A distribution chart of u-velocity at trailing edge

### 3. 결 론

유동 가시화 기법을 이용하여 플랩타 주위의 유동 특성을 가시화하고 영각과 플랩각의 변화에 따른 2차원 익 주위의 유동 패턴을 PIV로 해석하였다. 본 연구 내용을 요약하면 다음과 같다,

1. 레이저를 이용한 가시화가 플랩을 가지는 2차원 익 주위의 유동현상을 이해하는데 유용한 방법임을 알 수 있었다.

2. 주날개 각과 플랩각의 변화에 따른 박리현상과 양력, 항력의 발생과정 및 증감을 가시화 기법을 통하여 조사하였고, 최종적으로 PIV를 이용하여 플랩각 변화에 따른 플랩의 주위의 속도 변화를 추적할 수 있었다.

3. PIV을 이용한 플랩 주위의 유동장 해석기법이 유동장 해석에 유용한 방법임을 알 수 있었고, 플랩의 변화에 따른 유동장에 대한 보다 체계적인 유체역학적 해석이 필요하다고 생각된다. 또한, 자유표면의 영향, 벽면의 영향, 박리점 이동에 따른 항력과 양력변화와 플랩의 최적 조타 범위에 대한 정량적인 속도장 해석 등에 대하여 추후의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 손경호외, (1997), "특수타의 채택이 침로 안정성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 대한조선학회논문집, 제34권 제3호.
- [3] 안해성, 김효철, (1999), "An Application of Coanda Effect to a Flapped Rudder", 대한조선학회논문집 제36권 제1호.
- [4] 강창구, (1993), "2차원 플랩타의 간극이 양력에 미치는 영향", 대한조선학회논문집 제30권 제4호.
- [5] 권순홍외, (1995), "PIV를 이용한 다수원주 주위의 유동장 해석", 대한조선학회 추계학술 발표 논문집.
- [6] Lee, Y.H. et al., (1998), "An Introduction to PIV - Principle and Application", Flow Information Lab. Korea Maritime University.
- [7] 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.
- [8] Justin E. et al., (1972), "An Experimental Study of a Series of Flapped Rudder", Journal of Ship Research.
- [9] Gray, C. et al., (1995), "The Application of Particle Image Velocimetry(PIV) to Offshore Engineering", ISOPE.