

조선해양공학 분야의 가시화기법

현범수[†] · 도덕희^{*}

Visualization Techniques for Marine Engineering Research

Beom-Soo Hyun and Deog-Hee Doh

Abstract. This paper describes the general aspects of various visualization techniques employed for marine engineering research including classical naval architecture, ocean engineering and other related topics. Visualization techniques performed mostly by authors' were introduced here, which range from old fashioned methods such as paint and tuft tests to the newly emerging PIV technique and Sonar in broad sense. Brief explanation of each technique was made for the instruction purposes. It is strongly recommended that the interdisciplinary project with experts in other research areas is necessary in order to develop more advanced and profitable techniques.

Key Words : Visualization techniques(가시화 방법), Marine and ocean engineering(해사, 해양공학), Painting and tuft method(착색법, 터프법), PIV(입자영상유속계)

1. 서 언

조선해양분야, 그중에서도 선박해양유체분야는 공학에서는 비교적 오래된 고전학문 분야의 하나이다. 고전적인 여타 공학분야가 다 그렇듯이 초기 조선분야도 실무를 담당하는 기술자와 이론을 추구하는 학자들 간에 상호 교류보다는 기술자의 노하우에 의하여 건조가 이루어 졌고 학자들은 이상유체에 대한 해석적인 방법으로 학문적인 관점에서만 발전을 이룩하였다고 볼 수 있다. 또한 과거 조선해양유체분야에서 주로 관심을 가졌던 연구분야는 선박의 안전성, 내항성, 내파성 등 해상의 파도와 관련된 동유체력해석분야였기 때문에 점성유동보다는 비점성유동해석이 주를 이뤘고, 그 결과로서 유동장 내부의 흐름에 대한 관심은 상대적으로 적었다. 이는 점성유체에 관심을 가지고 실험적으로 접근한 기계분야와 차이를 보이는 대목으로서, 아직도 조선해양유체분야는 기계유체 분야와는 달리 실험유체역학 (EFD; experimental fluid

dynamics)에는 불모지나 다름이 없다고 말할 수 있다. 따라서 종래에 사용하던 유동가시화 사례도 선박의 표면에 페인트를 발라 선체표면의 유선을 관찰한다던지 물체 외부에 실 같은 것들을 메달아 경계층 내부 유동에 대한 기초적인 조사를 하는게 고작이었다. 최근들어 레이저의 발달로 레이저유속계(LDV), 입자영상유속계(PIV/PTV)와 같은 기법이 타 분야에서는 보편화 되고 있지만 우리 분야는 LDV를 제외하고는 아직도 소수의 연구자만이 관심을 가지고 있을 뿐이다. 다루는 유체유동이 물이고 온도의 변화가 거의 없는 외부유동장 (external flow)을 다루기 때문에 정상 비압축성 유동해석이 주를 이루며 적용하는 가시화 기법도 비교적 단순한 몇 기술에 국한되어있다.

본 논문에서는 전통적인 조선해양공학의 범주를 좀더 넓게 확장하여 유사분야인 해양환경, 연안공학, 해양과학분야 까지를 본 저자들의 연구사례를 중심으로 폭넓게 소개하고자 한다. 조선분야의 선박과 프로펠러 주위 가시화, 2차원 몰수실린더와 날개단면 가시화, 3차원 양력날개 가시화를 소개하며, 해양공학분야는 해상에 유출된 기름과 관련한 해양환경공학 연구(oil spill), 연안공학분야에서 하천의 흐름을 가시화 하는 연구, ice engineering에서 얼음을 관찰하는

[†]한국해양대학교 해양시스템공학부

E-mail: bshyun@mail.hhu.ac.kr

^{*}한국해양대학교 기계정보공학부

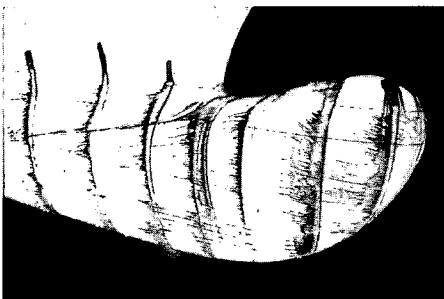
연구를 소개할 것이다. 끝으로 해양과학분야는 외국에서는 해양환경조사나 해저탐사 등을 위하여 소나(Sonar)를 이용한 가시화기술, 어업기술분야는 조선공학 기반기술의 하나인 양력날개설계기술을 활용한 전개관 해석기술 사례를 소개하고자 한다.

2. 가시화의 종류 및 사례

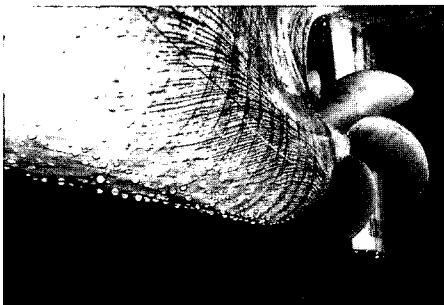
가시화의 종류는 물체표면 페인트 테스트와 Tuft 테스트, Laser sheet을 이용한 단면가시화, PIV 및 PTV, 그리고 수중음향 특성을 이용한 소나 기술이 있다. 이상을 분야별로 간략히 연구사례를 소개하면 다음과 같다.

2.1 조선분야

조선해양분야에 적용하는 가시화 기법은 비교적 단순한 몇 기술에 국한되어있다. 그중 가장 오래된 선박분야 연구의 경우 선체표면 페인트 테스트와 Tuft 테스트가 있다. 이중 페인트 테스트는 선체표면의 정해진 스테이션(station)에 페인트를 칠한 후 예인수조(towing tank)에서 일정속도로 예인하게 되면 Fig. 1에 보는 바와 같이 유선이 나타나게 된다. 선수부 실



(a) Bow



(b) Stern

Fig. 1. Paint test (From KRISO).

험을 통하여 선수벌브로 인한 유동장의 변화 파악, 빌지킬 (bilge keel)이나 특수선의 side thruster, sonar dome 등의 부착위치가 파악되며, 선미부의 유선으로부터는 프로펠러로 유입되는 유동의 방향과 크기를 짐작할 수 있기 때문에 추진효율의 측면에서 바람직한 선미형상을 도출하는데 참고자료로 이용될 수 있다.

Tuft 테스트는 Fig. 2와 같이 선체표면에서 일정거리 떨어진 경계층 내부에 가는 실을 메달아 유선을 가시화 하는 방법이다. 이러한 방법은 선체표면이나 주위의 흐름을 예측하여 선체부기물이나 추진기의 설계에 기초자료로 삼기위한 것이다. 사용하는 실과 바늘로 인하여 유동장을 교란하는 단점 등으로 인하여 현재는 별로 사용하지 않는 가시화기법이다.

프로펠러의 성능계측과 캐비테이션 가시화는 캐비테이션터널에서 수행된다. 캐비테이션터널은 일종의 회류수조로서 완전히 밀폐된 회류공간을 보통 1기압 범위내에서 가압하거나 감압할 수 있도록 설계되며, 압력조절은 원하는 캐비테이션 수를 맞추는 방식을 택하게 된다.

일반 조명이 차단된 상태에서 스트로보(stroboscope)를 사용하여 조명의 주파수와 조사시간을 프로펠러의 회전수 (혹은 회전수의 고차하모닉)와 동기화시키게 되면 마치 프로펠러와 주변 유동이나 캐비테이션 패턴이 정지해 있는 것처럼 보이게 된다. Fig. 3은 이렇게 촬영된 프로펠러의 날개끝에서 발생하여 전개되는 trailing vortex pattern을 잘 보여주고 있다. 프로펠러의 효율감소, 소음발생 및 침식 등 각종 부작용을 일

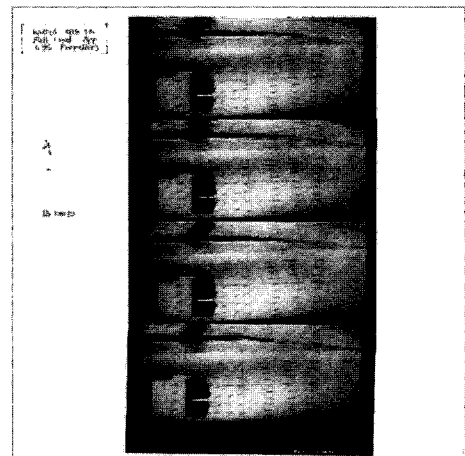


Fig. 2. Tufts test on ship.

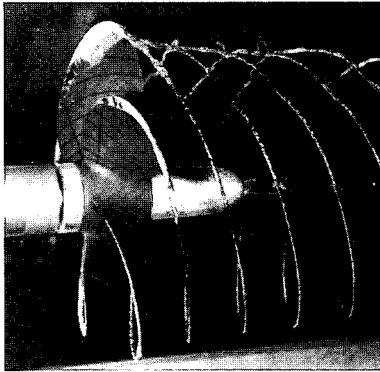


Fig. 3. Cavitation test.

크는 캐비테이션 현상 중에서 가장 먼저 발생되는 것이 날개끝 보오텍스로 인한 tip vortex cavitation 현상이기 때문에 프로펠러 문제중 가장 중요한 문제의 하나로 인식되고 있다. 또한 날개에 형성된 캐비테이션의 3차원 이미지를 보다 정밀하게 계측하기 위하여는 두 대 이상의 영상장비를 사용하는 스테레오식 다중촬영법 등 다양한 방법이 제안되고 있다.

3차원 회전날개의 끝에서 발생하는 날개끝 보오텍스를 연구하기 위하여 3차원 타원날개나 사각날개의 끝단유동을 가시화하는 시도가 여러 연구자에 의하여 이루어져 왔다⁽¹⁾⁽²⁾. (Arndt, 1991; 현범수 등, 1993)

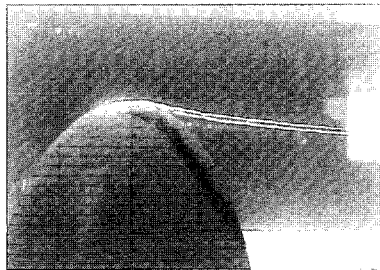


Fig. 4. Tip vortex cavitation.

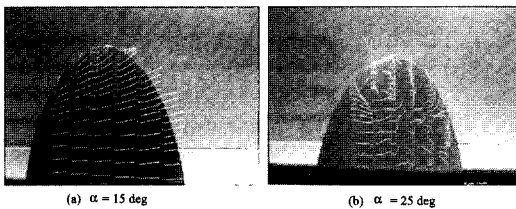
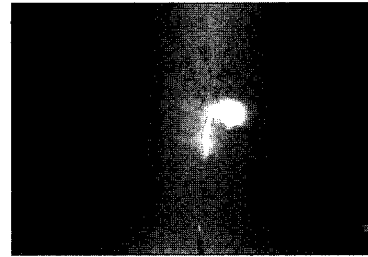
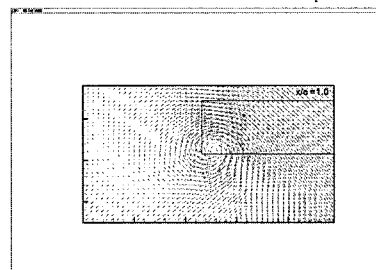


Fig. 5. Tufts test on elliptic wing.

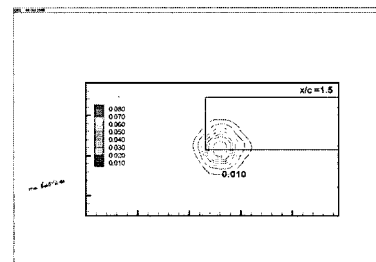
그중 본 저자의 연구결과만 소개하면, 먼저 Fig. 4는 수조내 압력을 날개끝 캐비테이션이 발생하는 캐비테이션수로 조절한 후 받음각 5도에서 압력면을 촬영한 사진이다. 압력면과 흡입면에서 모여들어 roll-up되는 과정에 나타나는 꼬매기 형태 (braided)의 tip vortex 패턴이 선명하게 보이고 있다. Fig. 5에 타원날개의 표면유동을 관찰하기 위한 Tuft 테스트 결과가 주어 져 있다. 좌측은 받음각 15도에서 날개의 흡입면을 따라 촬영된 사진인데 날개끝을 향하여 흐름이 모이면서 보오텍스가 roll-up되는 것이 보인다. 우측은 받음각 25도에서 과도한 받음각의 영향으로 날개가 양력면의 기능을 완전하 상실하여 날개 전면에 걸쳐 실속 현상(stall)이 일어난 모습을 보여주고 있다. 단 본 tuft 테스트는 그 자체로 유동장을 교란하고 있기 때문에 사용시와 해석시 신중을 기해야 한다.



(a) Visualized image



(b) Velocity field

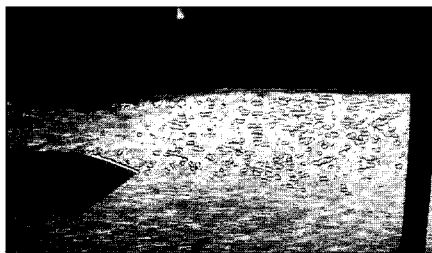


(c) Vorticity field

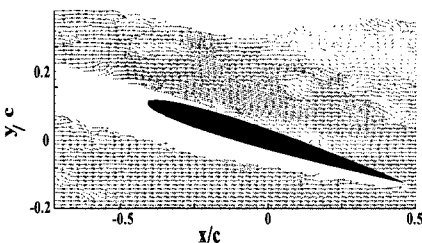
Fig. 6. Tip vortex structure.

Fig. 6은 Laser sheet로 tip vortex의 하류 한 단면에서 단층촬영한 영상이다. 받음각 10도에서 tip vortex core의 구조가 매우 잘 보이고 있다. 우측에 있는 그림들은 PIV로 계측한 사각날개의 tip vortex 단면에 대한 유속분포와 와도분포인데, 특히 와도분포가 tip vortex의 축대칭적인 유동구조를 명확하게 증거하고 있다. 이러한 날개는 추진기뿐만 아니라 수중익선의 수중익에 사용되기도 한다. 이 경우 수중익과 자유표면과의 상호작용 해석이 중요한데 이는 자유표면에서 발생하는 쇄파현상의 이해와 해석, 수중익의 성능해석 등에 중요한 정보가 되기 때문이다. Fig. 7은 회류수조에 설치한 2차원 NACA0012 단면 사각날개를 Laser sheet로 가시화 하는 장면이다. PIV 해석을 위하여는 비교적 저해상도인 DT3155 이미지 보드 (640×480 픽셀)를 사용하였음에도 불구하고 국부적인 와동이나 수표면 부근의 속도결손이 잘 보여지고 있다⁽³⁾. (현범수 등, 2000b)

이와 유사한 연구로서 Fig. 8은 수면하에 설치된 물수실린더에 의하여 생성되는 쇄파 (breaking wave) 현상의 PIV 계측결과이다⁽⁴⁾. (현범수 등, 2000a) 여기서는 평균유속분포와 순간와도분포가 참고로 소개되어 있다. 물수실린더가 수면근처로 접근할수록 자유표면과의 상호작용이 활발해져서 무한유체중의 실린더 후방 유동현상과는 매우 다른 경향이 나타나게 된다.



(a) 2 - D image by Laser sheet

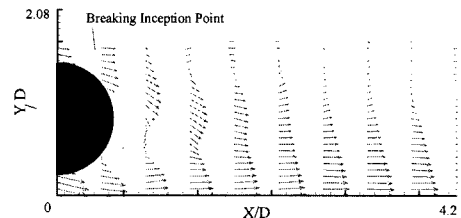


(b) Velocity field

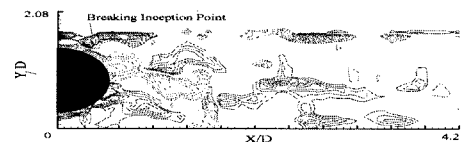
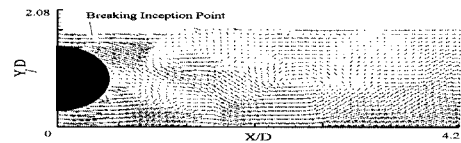
Fig. 7. Flow around a rectangular wing.

즉 쇄파로 인하여 수면부근 유동장에 명확한 유속 결손이 확인되면서 실린더 후방으로 형성되는 Karman vortex street의 크기와 방향이 수면 아래쪽으로 현격하게 휘어지는 것을 볼 수 있다. 쇄파현상을 breaker와 그 후류유동으로 묘사하는 가정이 이러한 점성유동 특성에서 출발하고 있다. 유사한 수면과 연구로 Melville *et al.* (2002)의 PIV 계측결과가 Fig. 9에 소개되어 있다⁽⁵⁾. 2차원 단층촬영, 파동현상과 관련된 난류성분과 coherent structure의 분리를 위한 기법, 조명의 수면 굴절현상 보정 등 수면과 계측시 직면하는 여러 문제를 짚어볼 수 있는 논문이다. 우측에는 굴절현상의 보정을 마친 후의 자유표면 형상과 속도분포의 예가 소개되어 있다.

한편 프로펠러 유동은 3차원성이 매우 강하므로 2차원 PIV로는 상세유동구조를 파악하기가 매우 어려운 복잡유동이나, 최성환 등(1999a)⁽⁶⁾은 수조내에 회전하는 프로펠러에 의하여 형성된 유동에 대하여 Fig. 10과 같이 2대의 카메라를 이용한 3차원 측정 및 PTV 해석법을 개발하였다. 3차원 유동장의 가시화를 위하여 필요한 체적(volume)형태의 조명으로는 수은등을 사용하였다. Fig. 11은 물리공간에 대한 카메라와의 상대적 위치와 추적입자의 3차원위치 이동량을

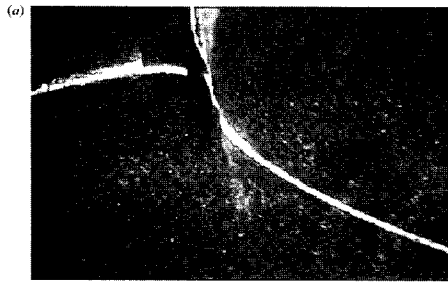


(a) Velocity field

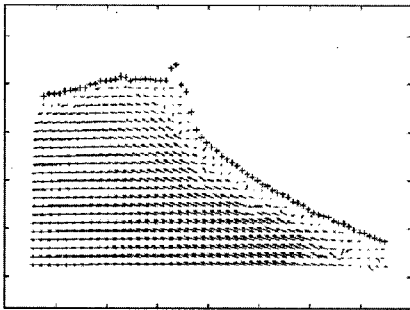


(b) Vorticity field

Fig. 8. PIV results on breaking wave generated by a submerged cylinder.



(a) Visualized free-surface image



(b) Processed flow field

Fig. 9. Study on free-surface flow.

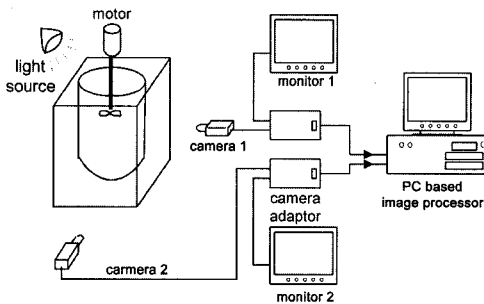


Fig. 10. 3D-PTV system for propeller test.

구하여 얻어진 순간속도벡터의 분포로서 수조바닥으로부터 높이가 300 mm일 때의 3차원 속도벡터분포를 보인다. 프로펠러회전에 의한 대규모 와구조가 명확히 드러나 있음을 알 수 있다.

2.2 연안 · 해양 공학분야

연안공학이나 해양공학이라는 학문분류는 비교적 최근의 분류로서, 과거에는 토목공학에서 교량건설, 해안선 개발, 하천 하류의 토사이동예측 등을 위하여 연안 이내의 수역에서 국부적으로 수행하여 오던 연구였으나, 70년대 석유과동을 전후하여 보다 깊은 해수역의 개발과 이용으로 인간의 관심영역이 넓어지면

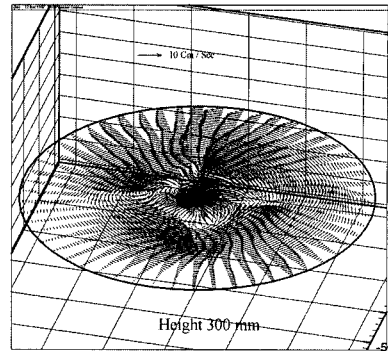


Fig. 11. 3-D velocity vectors.

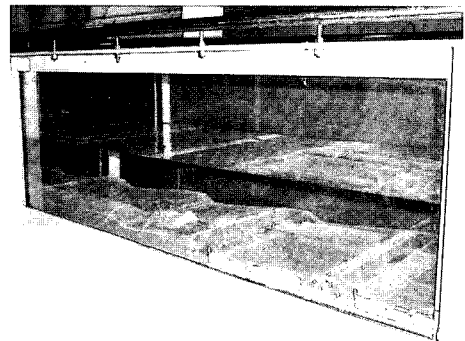


Fig. 12. Sand dunes installed in 2-D flume.

서 해저유전발굴, 망간단괴 등 해양자원개발에 기존의 조선공학자들이 참여하게 되면서 광의의 조선해양공학 분야로 자리매김 되었다.

먼저 Fig. 12는 하천이나 바다의 해저면에 형성되는 sand dune 현상을 연구하기 위하여 2차원 flume에 아크릴로 설치한 sand dune 실험모형을 보여주고 있으며 Fig. 13은 PIV로 계측한 평균유속분포, 유선 및 난류용력 성분이 보여지고 있다^(7, 8). (Hyun *et al.*, 2003; Balachandar *et al.*, 2003) 토사의 이동 측면에서 많은 연구가 진행되고 있는데 토사이동 현상 자체가 평균유동의 관점보다는 특정한 이벤트(소위 sweep과 ejection이라 불리는 quadrant analysis 성분들)에 대한 이해가 필요하기 때문에 비정상 유동계측에 대한 심도있는 이해가 필요한 분야이다.

Fig. 14는 수력도약이 발생하여 물과 공기가 혼합된 유동장과 이를 LSPIV라는 기법으로 해석한 유속분포가 보여지고 있다⁽⁹⁾. (Fujita *et al.*, 1998) 여기서 유동장의 크기는 가로 3미터 정도로서 통상의 PIV 실험의 계측영역과는 달리 비교적 넓은 영역이다.

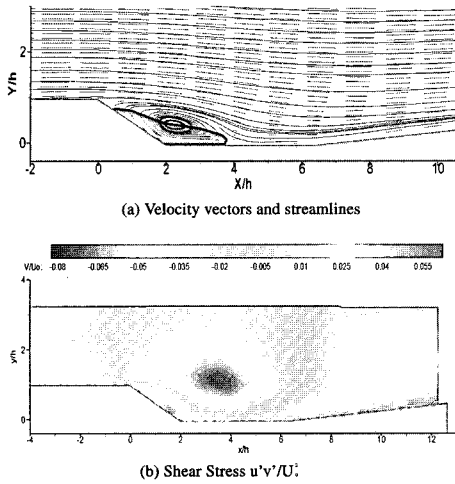


Fig. 13. PIV results on the flow over repeated dunes.

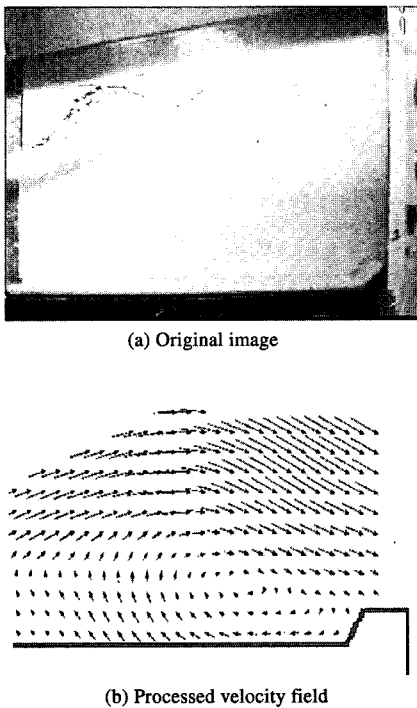


Fig. 14. LSPIV application on bubbly flow.

LSPIV란 “large scale PIV”의 줄임말로써 기존 PIV 기법을 macroscopic한 거대 유동장 해석에 이용하는 기술을 말한다. 즉 높은 상공이나 산, 고층건물에서 하천에 떠다니는 기포덩어리나 불순물 집단의 표류, 해상에 유출된 기름층의 이동 등과 같은 큰 구조를 비디오카메라로 촬영한 후, 이를 하나의 유체입자 (혹은

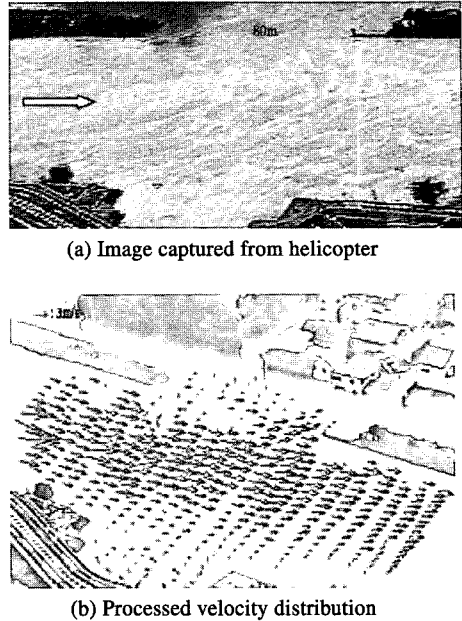


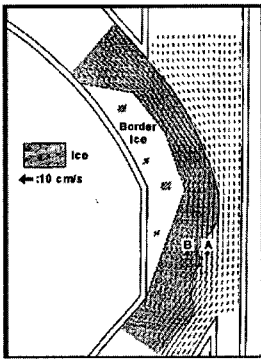
Fig. 15. LSPIV application on river flow.

유동해석시 상관영역)로 보고 해석하는 기술이다. Fig. 15는 Fujita & Hino (2002)가 PIV를 이용하여 실제 강어귀에서의 표면유동속도를 측정된 사례를 보이고 있다⁽¹⁰⁾. 좌측그림에서 화살표는 강물이 흐르는 방향을 나타내고 있으며 강의 폭은 80 m이다. 우측그림은 강물의 표면에서의 속도분포를 보이고 있다. 이 결과를 얻어내기 위하여 헬리콥터에 장착된 카메라의 영상을 이용하였다는 점에서 주목할 만하다. 강물의 표면의 실제 속도분포는 헬리콥터의 이동에 의하여 이동되는 배경영상을 제거함으로써 얻어지게 된다.

LSPIV를 응용한 다른 예로서 하천에 떠다니는 얼음덩어리의 이동현상을 해석한 예가 Fig. 16에 나타나 있다. 왼쪽은 상공촬영한 영상이며 우측은 이를 해석한 속도분포도이다⁽¹¹⁾. (Ettema *et al.*, 1997) 한편 해양환경공학적인 문제로서 해상에 유출된 기름을 가두어 수거하는 기술이 연구되고 있다. 가장 보편적인 방법으로서 오일펜스를 사고현장에 설치하여 그 안에 기름을 가두어 두고 스키머(skimmer)라 불리는 펌프로 회수하는 방식이 채택되고 있다. 그런데 해상의 조류속도가 0.5노트만 되어도 기름이 펜스를 넘어 빠져나가는 현상을 피할 수 없으며 이를 대비하여 이중삼중으로 펜스를 설치하는게 통례였다. 이때 이중으로 설치하는 펜스의 크기라든지 간격을 결정하는 것이 중요하며 그러한 배경 하에 회류수조에 이중펜스



(a) Actual video image



(b) convection velocity field of floating ice

Fig. 16. Application on ice engineering.

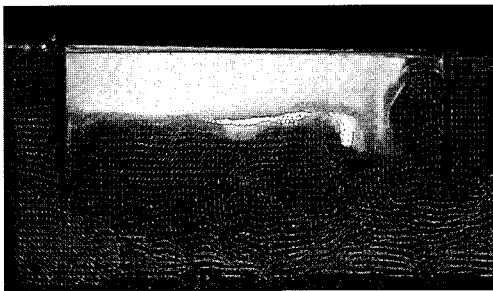
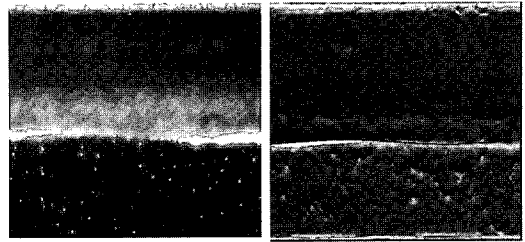


Fig. 17. Flow field on and around the oil-water interface.

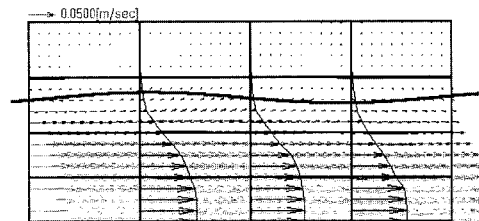
를 설치한 후 공기층을 붓고 Fig. 17과 같은 실험을 실시하였다⁽¹²⁾. (도덕희 등, 1999) 이 그림은 가두어진 기름층의 형상을 보여주고 있는데, 통상의 저해상도 캠코더와 이미지보드 (640픽셀 × 480픽셀) 3세트로 관심영역을 1/3씩 나누어 동시에 촬영한 후 이를 연동시켜서 하나의 이미지로 결합한 소위 “파노라마 PIV” 해석결과이며 기름층과 해수에서의 계측된 유속벡터가 함께 그려져 있다.



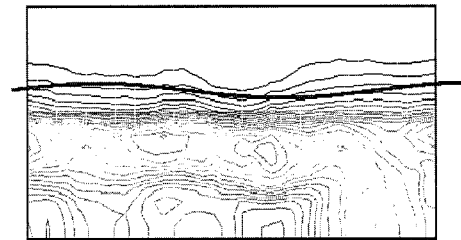
(a) Original image

(b) Filtered image

Fig. 18. Close-up view of moving boundary of oil-water interface.



(a) Mean velocities at 0°

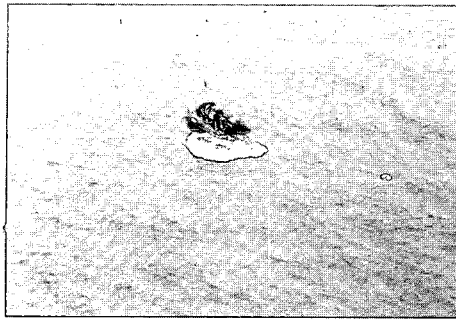


(b) Turbulent intensity u' at 0°

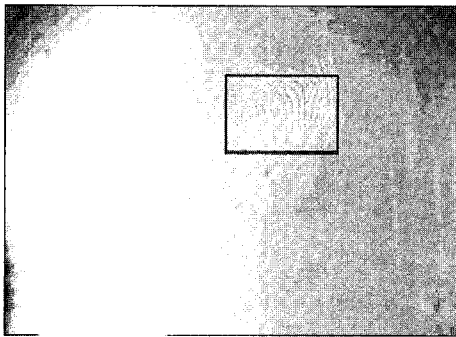
Fig. 19. Phase averaged results on moving boundary.

또한 움직이는 기름-물 경계의 내면과 현상을 심도 있게 해석하기 위하여 줌렌즈로 기름층의 작은 영역 (여기서는 1 cm 정도)을 확대하여 경계면 유동의 순간유속분포를 도출한 예를 소개한다⁽¹³⁾. (도덕희 등, 2000)

Fig. 18(a)는 카메라로 기록된 임의의 시각에서의 영상을 나타낸다. 이 영상을 개선하기 위하여 다양한 필터를 사용함으로써 Fig. 18(b)와 같은 기름-물 경계면에 대한 비교적 명확한 윤곽의 영상이 얻어지며 이들 윤곽에 대하여 곡선 fitting함으로써 경계면의 함수 곡선군이 얻게 된다. 주기적으로 이동하는 경계면의 동일한 위상의 이미지들만을 추출하기 위하여 conditional sampling을 실시하여 도출한 특정 위상에서의 평균속도분포와 난류성분은 Fig. 19와 같다. 이와 같



(a) Sea trial test



(b) Dispersions of the pollutants

Fig. 20. Full-scale test for pollutant material movements.

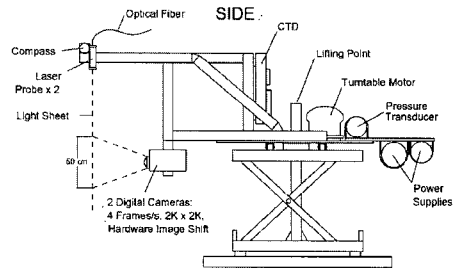
이 이동경계층 유동의 위상학적 해석사례는 주기적으로 유동하는 유동장에 대한 위상평균이 가능함을 시사하였으며, 이는 기름-물 경계선 부분에 있어서의 역학적 전달메커니즘규명 연구가 가능함을 시사한다.

LSPIV 기법이 오염물질 이동 및 확산예측에 적용한 사례도 있다. Fig. 20의 좌측은 실험장치이고 우측은 측정하여 얻어낸 오염물질의 확산을 보이고 있다⁽¹⁴⁾. (최성환 등, 1999b)

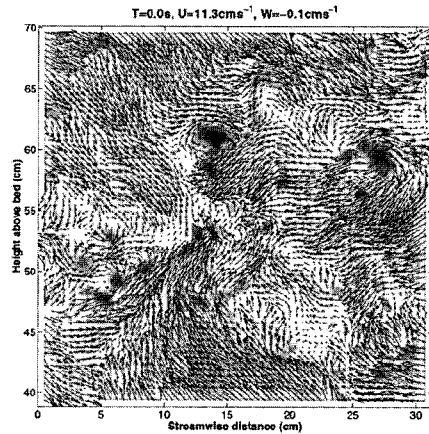
2.3 기타

이밖에도 해양과학 분야의 가시화 사례로는 해저면의 유동계측을 위하여 수중에 직접 PIV 계측장치를 제작·설치한 Nimmo Smith *et al.* (2002)의 최근 연구결과가 있다⁽¹⁵⁾. Fig. 21에는 실험장치의 개략도와 유속계측결과가 소개되어 있다. 아직은 초보단계로서 작은 1 m 미만의 계측영역에 대하여 응용되었을 뿐이나 PIV 장치가 과거의 소나(Sonar) 방식을 보완할 수 있는 가능성을 보여주는 좋은 사례이다.

지금까지 소개한 가시화방법과는 크게 다르지만 해양탐사에 가장 많이 사용되는 기술로는 단연 소나기술을 꼽을 수 있다. 이는 소나를 이용한 기술로서 비



(a) Submersible PIV platform



(b) Flow field near sea bottom

Fig. 21. Measurement of bottom boundary layer of the coastal ocean.

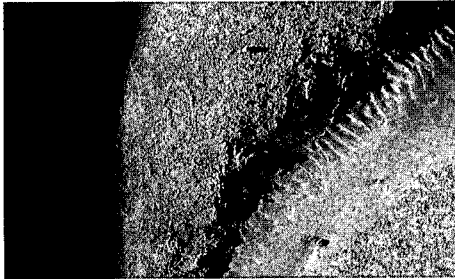
교적 고해상도의 상세계측에 사용되는 sidescan sonar와 상대적으로 넓은 계측영역을 커버하는 multibeam sonar가 주로 활용된다. 해저에 남파된 선박의 이미지와 해저지형의 이미지를 multibeam sonar로 영상처리한 그림들이 Fig. 22에 소개되어 있는데 놀랍도록 정밀하게 영상이 재구성되어 있음을 볼 수 있다.

마지막으로 본 저자가 수행한 연구중 수산업과 관련된 재미있는 사례를 하나 소개한다. 트롤어선의 그물을 넓게 전개하기 위하여 사용하는 전개판(otterboard)은 비행기 날개나 선박의 수중익(hydrofoil), 타(rudder)와 같은 3차원 양력면으로서 유체역학적인 관점에서 양력이론의 직접적용이 가능하다.

설계포인트는 양항비(lift drag ratio)가 크면서 안정성이 우수한 전개판을 설계하는 것으로서, Fig. 23은 Laser sheet로 가시화하고 PIV로 유속분포를 계측한 예를 보여주고 있다⁽¹⁶⁾. (박경현 등, 2002) Fig. 24는 연구결과 개발된 최적 날개단면 형상의 전개판으로서 현재 시판되고 있는 제품이다.



(a) Wrecked ship



(b) Sea bottom topology

Fig. 22. Sonar images (by courtesy of prof. J.S. Kim (KMU)).

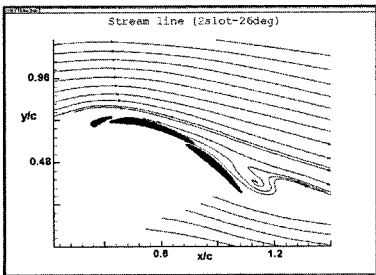
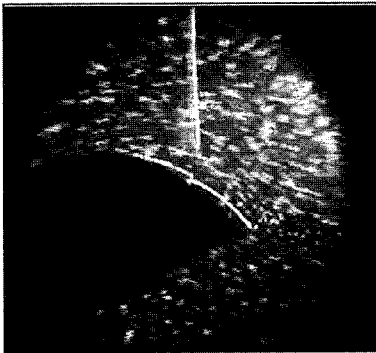


Fig. 23. Video image and processed streamlines.



Fig. 24. Newly-designed otterboard.

3. 결 언

지금까지 조선해양분야와 관련한 가시화 사례를 본 저자의 연구결과를 중심으로 살펴보았다. 지면관계로 인하여 수박 걸 할 기식으로밖에 소개할 수 없는 것이 아쉬우며, 내용도 단편적인 소개에 치우친 면이 있다. 그러나 다시 언급하거나 조선해양유체분야는 상세한 유동가시화에 관한 한 매우 열악한 상황으로서 앞으로 많은 분발이 요구된다 하겠다. 이는 토목유체분야나 수산분야도 비슷할 것으로 여겨지므로 향후 기계유체분야를 비롯한 다른 학문분야 가시화전문가들과의 상호교류가 꼭 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) Arndt, R.E.A., V.H. Arakeri and H. Higuchi, 1991, "Some observations of tip-vortex cavitation", *J. Fluid Mech.*, Vol.229, pp.269-289.
- 2) 현범수, 김문찬, 1993, "유동가시화를 통한 타원형날개주위 유동연구", 대한조선학회논문집, Vol.30, No.1.
- 3) 현범수, 최경신, 도덕희, 2000b, "PIV를 이용한 수중의 주위 복잡유동장의 정량적 계측" 대한조선학회논문집, 제37권 3호.
- 4) 현범수, 신용현, 2000a, "물수실린더에 의하여 생성되는 쇄파주위 점성유동의 고찰 (제3부 : PIV를 이용한 순간유동장 해석)" 대한조선학회논문집, 제37권 2호, pp.38-45.
- 5) Melville, W.K., F. Veron and C.J. White, 2002, "The velocity field under breaking waves: coherent structures and turbulence", *J. Fluid Mech.*, vol.454,

- pp.203.
- 6) 최성환, 도덕희, 이연원 1999a, “디지털화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발”, 한국박용기관학회지, 1999, 3, 제 23권, 제 2호, pp. 149-159.
 - 7) Hyun, B.S., R. Balachandar, K. Yu & V.C. Patel, 2003, “Assessment of PIV to Measure Mean Velocity and Turbulence in Water Flow”, *Experiments in Fluids*, Vol. 35, No. 3, Sept 2003.
 - 8) Balachandar, R., B-S. Hyun, C. Polatel and V. C. Patel, 2003, “Structure of flow over a fixed dune and effect of depth”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003 (Submitted).
 - 9) Fujita I., M.V. Muste and A. Kruger, 1998, “Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Applications”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36.
 - 10) Fujita, I., T. Hino. T., 2002, “Unseeded PIV measurement of river flow videotaped from a helicopter”, Proc. of ISFV10, Kyoto, August 26-29, Abstract p.73, Paper No. F0052.
 - 11) Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., 1997, “Particle-Image Velocimetry for Whole-Field Measurement of Ice Velocities”, *Cold Regions Science and Technology Journal*, 26(2), pp.97-112.
 - 12) 도덕희, 현범수, 최성환, 홍성대, 1999, “이중유벽 사이에 가두어진 기름층의 거동특성”, 한국해양환경공학회지 제3권 제1호, pp.25-34.
 - 13) 도덕희, 현범수, 홍성대, 조경래, 조용범, 2000, “이동경계면상의 PIV에 의한 속도분포 계측”, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, 한국해양연구소, 5월 19일, pp.125-131.
 - 14) 최성환, 홍성대, 도덕희, 이종우, 1999b, “디지털화상처리에 의한 해양유출기름 표류속도 계측기법”, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, 한국해양환경공학회, 한국해양연구소 선박해양연구소, 5, 14-15, pp.19-24.
 - 15) 박경현, 이주희, 현범수, 노영학, 배재현, 2002, “PIV를 이용한 만곡형 전개관의 유동장 계측에 관한 연구”, 한국어업기술학회지 제38권 1호, pp.43-57.
 - 16) Nimmo Smith, W.A.M., P. Atsavapranee, J. Katz, T.R. Osborn, 2002, “PIV measurements in the bottom boundary layer of the coastal ocean”, *Exp. in Fluids*, Vol. 33, pp.962-97.