

예인수조용 스테레오스코픽 입자영상유속계 시스템의 불확실성 해석

서정화¹·설동명²·한범우³·유극상¹·임태구⁴·박성택¹·이신형^{1,5†}
서울대학교 조선해양공학과¹
대한민국 해군 전력분석시험평가단 함정기술처²
현대중공업 선박연구소³
선박해양플랜트연구소⁴
서울대학교 해양시스템공학연구소⁵

Uncertainty Assessment of a Towed Underwater Stereoscopic PIV System

Jeonghwa Seo¹·Dong Myung Seo²·Bum Woo Han³·Geuksang Yoo¹·Tae Gu Lim⁴·Seong Taek Park¹·Shin Hyung Rhee^{1,5,†}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Naval Ship Engineering Division, Naval Force Analysis Test & Evaluation, Republic of Korea Navy²
Hyundai Maritime Research Institute³
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering⁴
Research Institute of Marine System Engineering, Seoul National University⁵

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Test uncertainty of a towed underwater Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) system was assessed in a towing tank. To estimate the systematic error and random error of mean velocity and turbulence properties measurement, velocity field of uniform flow was measured. Total uncertainty of the axial component of mean velocity was 1.45% of the uniform flow speed and total uncertainty of turbulence properties was 3.03%. Besides, variation of particle displacement was applied to identify the change of error distribution. In results for variation of particle displacement, the error rapidly increases with particle movement under one pixel. In addition, a nominal wake of a model ship was measured and compared with existing experimental data by five-hole Pitot tubes, Pitot-static tube, and hot wire anemometer. For mean velocity, small local vortex was identified with high spatial resolution of SPIV, but has serious disagreement in local maxima of turbulence properties due to limited sampling rate.

Keywords : Particle image velocimetry(입자영상유속계), Towing tank test(예인수조 시험), Test uncertainty(실험 불확실성), Turbulent flow (난류 유동)

1. 서론

최근 Energy Efficiency Design Index(EEDI)의 발효로 인해 선박의 연료 효율에 대한 관심이 커져가기 때문에 다양한 유체역학적 기능을 하는 부가물을 장착하여 선박의 추진 효율을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 부가물은 대개 선체 주위에서 발달된 난류 경계층 내부에서 작동하는 만큼 부가물이 장착될 위치의 정확도 높은 유동장 정보가 요구되며, 또한 부가물이 장착된 이후의 유동장 변화에 대해서도 연구할 필

요가 있다. 이를 위해 전산유체역학 기법을 통해 선체와 부가물 주위의 유동장을 계산하는 연구가 수행되어 왔다 (Kawamura, et al., 2012; Wie & Kim, 2012; Shin, et al., 2013).

수치 해석 뿐만 아니라 같은 주제에 대해 실험적인 연구가 수행되기도 하였다 (Korkut, 2006; Nagaya, et al., 2011), 실험 시설 중 예인수조는 상대적으로 큰 모형을 이용해 실험을 할 수 있으며 초기 난류 성분과 측벽 효과를 무시할 수 있고 자유수면을 포함한 해양 환경의 모사가 가능하다는 장점을 가지고 있어 부가물에 대한 정밀한 실험에 적합하다. 일반적으로 예인수조에서는 선미 유동장 계측을 위해 5공 피토관(five-hole pitot tube)이 사

용되었으며 (Kim, et al., 1997) 몇 가지 공개된 선형에 대해서는 5공 피토크관을 이용해 계측된 유동장 정보를 선박 자체의 저항, 저항 정보와 더불어 전산유체역학 해석의 비교검증 자료로 제공된 바 있다 (Kim, et al., 2000; Van, et al., 2000; Kim, et al., 2001; Van, et al., 2003). 하지만 피토크관은 한 점의 평균 속도를 계측하는 기법으로 실험 시간이 크게 늘어나고 공간 해상도가 제한적이며 난류 연구에 필요한 시계열(time series)에 대한 요동 성분을 얻을 수 없다는 한계가 있다. 따라서 피토크관 시스템은 높은 공간 해상도와 난류 성분에 대한 계측이 요구되는 선체 부가물에 대한 연구에는 충분한 신뢰성을 확보하기가 어렵다. 따라서 최근 피토크관을 대체할 새로운 유동 계측 기법들이 시도되었는데 레이저 도플러 속도계(laser doppler velocimetry, LDV), 입자영상유속계(particle image velocimetry, PIV)는 광학적인 계측 기법으로 유동장에 영향을 미치지 않고 데이터의 정밀도가 높기 때문에 예인수조에 적용할 수 있는 새로운 유동장 계측 시스템으로 각광받고 있다 (Gjelstrup, 2009). 이 중 LDV는 피토크관과 같은 점계측 기법이기에 순간 속도장의 계측이 불가능하여 선미에서 발달된 비정상(unsteady) 유동의 계측에 적용하기에는 한계가 있다.

반면 PIV는 한 번에 특정 평면의 속도장 성분을 계측할 수 있고 평균 속도장과 난류 성분을 얻어 낼 수 있기 때문에 피토크관 시스템에 비해 실험 시간을 크게 단축시킬 수 있어 많은 관심의 대상이 되어왔다. 가장 기본적인 구조의 2차원 PIV 시스템이 예인수조 시설에 우선 적용되었는데 이를 이용해 계측한 2차원 유동장의 적층을 통한 균함 모형의 3차원 선미 유동장 해석 (Gui, et al., 2001), 파랑 중에 놓인 동일 모형의 위상별 선미 유동장 계측 (Longo, et al., 2007), 수면 관통 물체 주위의 유동장 계측 (Seol, et al., 2013)이 수행되었다.

그리고 두 대의 카메라를 이용해 2차원 평면의 3차원 속도 성분을 얻어낼 수 있는 스테레오스코픽 입자영상유속계(stereo particle image velocimetry, SPIV)가 예인수조에 도입되어 활용되었다. 균일류 기반의 교정시험 (Grizzi, et al., 2010), 평면 운동 시험(planar motion mechanism, PMM) 중인 균함모형 주위의 유동장 계측 (Yoon, 2009), 저속 비대선 선미 유동장 결과에 대한 비교검증 (Kim, et al., 2011)과 프로펠러 후류의 계측 Hwang, et al., 2012)이 대표적인 연구 사례이다.

이처럼 성공적인 연구 사례를 바탕으로 국내외의 많은 예인수조 시설에는 유동장 계측을 위해 SPIV 시스템을 도입하여 활용하고 있다. 이들 시스템은 점차적으로 피토크관을 대체하고 있으며 앞으로는 앞서 언급한 부가물 주위 유동장과 같이 피토크관으로는 수행하지 못하는 도전적인 실험 주제에도 적용될 것으로 기대된다. 하지만 아직까지 예인수조 PIV 시스템의 특성을 고려한 실험 신뢰도에 대한 구체적인 기준이 없고 예인수조들 간의 경험이나 환경에 따른 실험 절차의 차이가 상이하여 불확실성 해석을 포함한 시스템 자체의 특성에 대한 연구가 필요한 실정이다. 물론 2차원 PIV에 대한 불확실성 해석 기법이 제안된 바 있으나 (ITTC, 2008a) 이는 예인수조의 특수한 실험 환경을 고려하지 않은 일반

적인 PIV 실험에 대한 내용이며 2차원 PIV에 비해 더 많은 요소를 고려해야 하는 SPIV 해석에 적용하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 서울대학교 예인수조에 새롭게 설치된 SPIV 시스템의 기본 성능과 실험 불확실성을 평가하고 선미 유동장 계측 결과를 기존 실험 결과와 비교하였다. 우선 불확실성 해석을 위해 기존 케이스에 대한 반복 실험을 수행하였으며 이후 입자 변위에 대한 균일류 계측 결과를 비교하여 SPIV 시스템이 일정한 신뢰도를 갖는 실험 환경을 산출하였다. 그리고 모형선의 선미 유동장을 계측하여 그 결과를 CFD 검증 자료로 제공되는 5공 피토크관 결과 (Kim, et al., 2000)와 풍동에서 이중 선체 모형을 이용해 계측된 열선 유속계 결과 (Kim & Lee, 1999), 서울대학교 예인수조에서 계측된 Pitot-static tube 계측 결과와 비교하여 SPIV 시스템의 계측 특성을 확인하였다.

2. 실험 장비

본 실험은 서울대학교 예인수조에서 수행되었다. Fig. 1은 예인수조와 예인전차의 개략적인 배치 구조이다. 모형선의 선미 방향이 +x, 우현 방향이 +y, 위쪽이 +z 인 직교 좌표계가 사용되었다. SPIV 시스템과 모형선은 예인전차에 설치되어 -x 방향으로 예인된다.

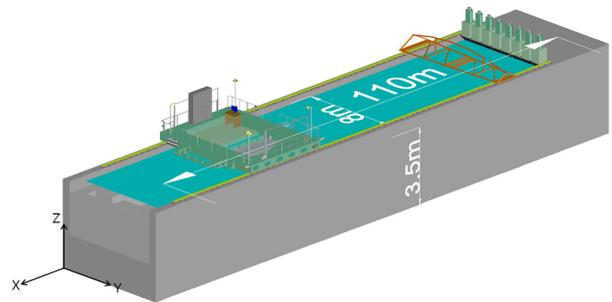


Fig. 1 Schematic diagram of the towing tank

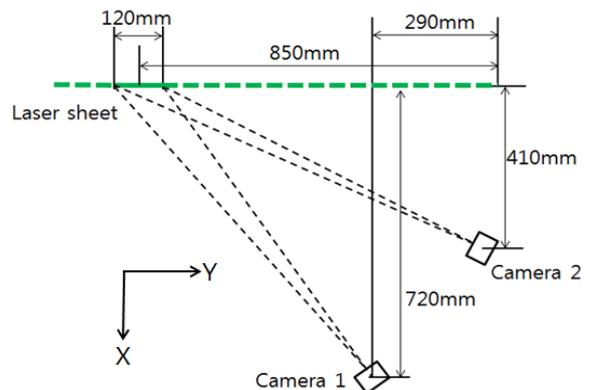


Fig. 2 Optical arrangement of the SPIV system

서울대학교 예인수조의 SPIV 시스템은 독일의 LaVision 사에

서 서울대학교와의 협력 하에 설계 및 제작한 것으로 최대 펄스 출력 200mJ의 Nd:YAG 레이저와 해상도 2500 × 2000 픽셀, 다 이네믹 레인지 12bit의 디지털 카메라 2기로 구성되어 있다. 카메라 라는 수면을 관통한 실린더 안에 수직으로 설치되어 45로 놓인 거울을 통해 유동장을 관측한다. 레이저 시트의 두께는 3mm이다. 본 연구에서는 주로 사용되는 프로펠러의 지름을 기준으로 관측면의 크기를 정하였는데, 초점거리 50mm f1.4 렌즈를 장착 하여 얻어지는 관측 평면의 크기는 110mm × 120mm이다. Fig. 2는 SPIV 시스템의 광학적 배치도이며, Fig. 3은 SPIV 시스템과 모형선의 배치도이다.

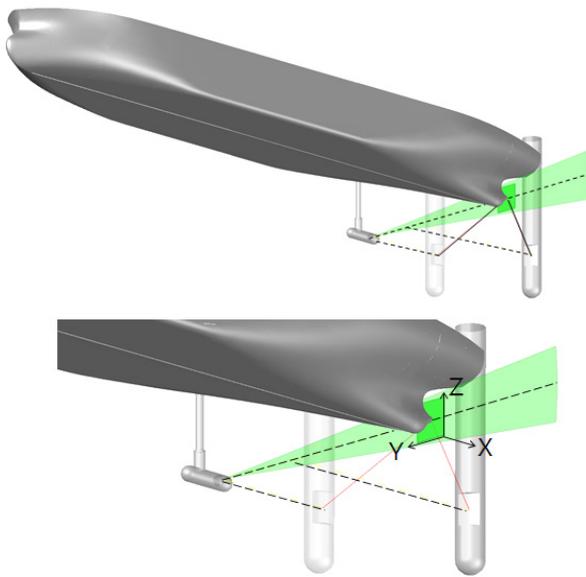


Fig. 3 Towed underwater SPIV system and test model

SPIV 시스템은 이송장치에 연결되어 모형선과 함께 예인전차에 고정되는데 SPIV시스템의 이송 범위는 모형선의 중앙을 기준으로 y 방향으로 -100mm ~ +400mm, z 방향으로는 수면을 기준으로 -350mm까지이다.

추적 입자로는 평균 지름 18 μ m의 폴리아미드(polyamide) 입자가 사용되었다. 입자영상에서 픽셀 당 0.005개 이상의 입자가 관측되도록 1리터의 폴리아미드 입자는 약간의 계면활성제, 40리터의 물과 혼합 탱크에서 미리 섞여 있다가 공기압을 이용하여 예인수조 안에 살포되었다. 1회의 실험에 투입되는 추적 입자의 양은 예인수조 용량에 비하면 극히 작은 양이기 때문에 예인수조에서 수행되는 저항 시험 결과에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 폴리아미드는 비중이 1.03으로 물과 유사하여 추중성이 매우 뛰어나며 저렴한 가격으로 대량의 추적 입자가 필요한 예인수조 실험에 활용하기에 적합하다. 예인수조 내에 추적 입자를 균일하게 분포시키기 위해 입자 살포 이후 모형선을 3회 왕복한 후 본 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 한 번의 예인전차 운행 중 1초 당 7.2장의 입자영상 쌍이 기록되어 총 250장의 입자영상 쌍이 34.7초간 얻어졌으며 이를 해석해 얻어진 순간 속도장으로부터 평균 속도장을 얻었다.

SPIV 시스템을 이용해 계측된 유동장은 LaVision 사의 Davis V8.0 프로그램을 이용하여 해석되었다. 실험을 수행하기 전 교정 시험판을 이용한 교정시험을 예인수조 밖에 위치한 소형 수조에서 수행하였다. 일반적으로 예인수조용 SPIV 시스템은 예인수조 안에서 교정시험을 수행하게 되는데 이 경우 교정시험판과 광학 시스템 구성 요소의 세부적인 조정이 어렵기 때문에 본 연구와 같이 외부에서 교정시험을 수행한 이후 SPIV 시스템을 설치하는 방식에서 더 높은 신뢰도를 기대할 수 있다.

교정시험판은 z 방향 깊이가 주어진 Dual-Plane 교정시험판을 이용하였으며 각 카메라에서 촬영된 교정시험판의 영상에서 점들의 위치를 3차 다항식으로 근사하였다. 이 때 흰색 점의 위치에 대해 근사식에서 얻어진 값과 실제 영상에서 얻어진 값의 오차는 카메라 1에 대해 0.13 픽셀, 카메라 2에 대해 0.21 픽셀의 표준편차 값을 갖는다. Fig. 4는 각 카메라에서 촬영된 교정시험판 영상이다.

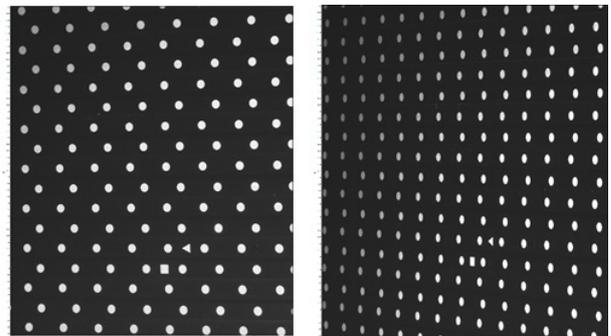


Fig. 4 Captured images of the calibration target (left: camera 1, right: camera 2)

3차원 속도 성분의 해석을 위해 우선 각 카메라로부터 얻어진 입자 영상은 이미지상의 밝기 정보에 대한 Low-pass 필터를 통해 배경 이미지를 걸러낸 뒤 교정 시험 결과를 바탕으로 왜곡의 보정이 수행되었다 (Scarano, et al., 2005). 그리고 보정된 입자 영상에 대해 2차원 속도 벡터를 구하였다. 64 × 64 픽셀의 조사 구간에 대해 상호상관법(cross-correlation)을 이용한 2차원 입자 변위의 해석이 2회 이루어진 뒤 다시 32 × 32 픽셀의 조사구간에 대한 상호상관법을 2회 적용하는 멀티 패스(multi-pass) 기법이 사용되었다. 가장 마지막 단계에서 이산화되어 얻어진 입자 변위 값에 대해서 가우시안 분포(gaussian distribution)를 적용하여 픽셀 단위 이하의 변위를 검출해내었다.

각 조사 구간은 50%의 오버랩이 적용되었으며, 계측면에서 얻을 수 있는 벡터의 수는 상대적으로 낮은 공간 해상도를 갖는 카메라 2를 기준으로 구해졌다. 한 계측면에서 약 13,000개의 속도 벡터를 얻을 수 있는데 이는 하나의 벡터가 가로 세로 길이가 약 1.0mm 인 영역의 대표 벡터가 됨을 의미한다. 양 카메라에서 얻어진 2차원 속도장 결과는 교정시험 결과와 비교되어 3차원 속도 성분을 구하게 된다.

얻어진 3차원 속도 벡터는 실험 환경에서 물리적으로 가능한 범위의 속도 크기를 적용한 필터링을 수행하였다. 균일류 계측과

공칭반류 계측 모두 가장 마지막에 얻어진 3차원 속도 벡터는 예인 속도를 기준으로 x 방향에 대해서는 -10% ~ +110%까지, y, z 방향에 대해서는 -30% ~ +30%까지의 허용 범위를 적용하여 이 범위를 넘어서는 속도 벡터를 걸러낸 뒤 평균속도 \bar{V} 를 취하고 예인속도 U로 무차원화하였다.

$$\bar{V}/U = \frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} V_i/U \quad (1)$$

얻어진 평균 속도와 각 순간속도장과의 차이를 구해 요동 성분 V' 을 얻었다. 얻어진 요동 성분을 이용하여 난류운동에너지 (trbulence kinetic energy, TKE) k를 구하였다.

$$V'/U = \sqrt{\frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} (\bar{V}/U - V_i/U)^2} \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) / U^2 \quad (3)$$

실험에 사용된 모형선은 Kim, et al. (1999)의 연구에서 사용된 KVLCC2 선형으로, 1/100 스케일로 제작되었다. 흘수선 아래의 선체 표면은 레이저의 반사를 줄이기 위해 무광 흑색으로 도색되었다. Fig. 5는 실험을 위해 도색된 모형선의 선미 사진으로, 도색되지 않은 선형과 비교하였다.

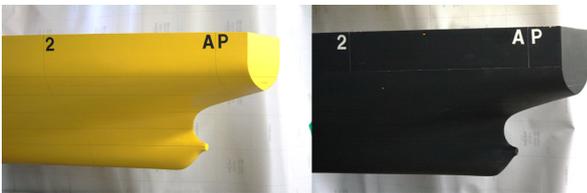


Fig. 5 Test model (left: original model, right: painted model)

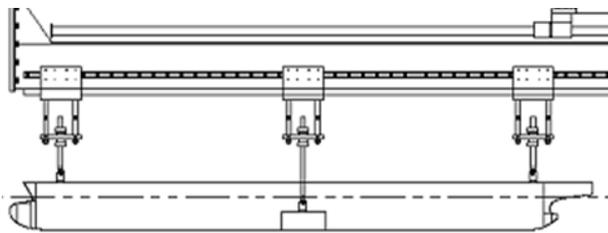


Fig. 6 Fixing mechanism of the test model

모형선은 비교 검증 자료로 제공되는 다른 실험과 동일하게 일체의 트림이나 침하가 없는 상태로 고정되어 예인되었다. 일반적으로 예인 중인 모형선은 정상 상태로 간주되지만 실제로는 주기적인 진동이나 자세 변화가 수반되기 때문에 자세가 고정되지 않는다면 유동장 계측 결과에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 본 연구

에서는 선체 자세의 고정을 위해 일차적으로 항주 중 수면과 흘수선이 일치하도록 무게분포를 조절하였으며 이후 Fig. 6에서와 같이 선수와 선미에 리드 스크류를 장착하여 자세를 고정하였다. 이에 더해 선체 중앙의 체결부를 통해 모형선의 예인을 위한 힘을 전달하여 선수와 선미 자세의 변화가 없도록 하였다.

SPIV 시스템을 이용한 공칭 반류 계측의 경우 프로펠러 축을 중심으로 110mm×120mm의 영역을 계측하였는데 이는 프로펠러 반지름을 기준으로 y 방향으로는 -1.1R ~ 1.1R, z 방향으로는 -1.2R ~ 1.2R까지의 범위이다.

실험은 실선 기준 15.5knots에서 수행되었으며 이 때의 프루드 (foude) 수는 0.142이다. 모형선의 선수부에는 국제 수조 회의 (international twing trnk cnference, ITTC)의 기준에 따라 난류 촉진을 위한 스테르드를 부착하였다. 기존의 실험 결과들과 동일하게 프로펠러가 설치되는 스테이션(station) 0.35의 위치에서 유동장 계측을 수행하였다. Table 1은 모형선의 주요 치수이다.

Table 1 Principal particulars of KVLCC2

Item	Full Scale	Model Ship
Scale Ratio	1	1/100
Waterline Length (m)	325.5	3.255
Beam (m)	58.0	0.58
Draft (m)	20.8	0.208
Block Coefficient	0.8098	
Wetted Surface Area (m ²)	27,194	2.719
Displacement (m ³)	312,622	0.312
Propeller Diameter (m)	9.8	0.098
Reynolds Number	2.14 × 10 ⁹	2.32 × 10 ⁶
Froude Number	0.142	

균일류 계측과 공칭반류 계측 모두 동일한 카메라 배치 상태와 해석 기법이 적용되었다. Fig. 7은 모형선 반류 계측 실험의 사진이다.

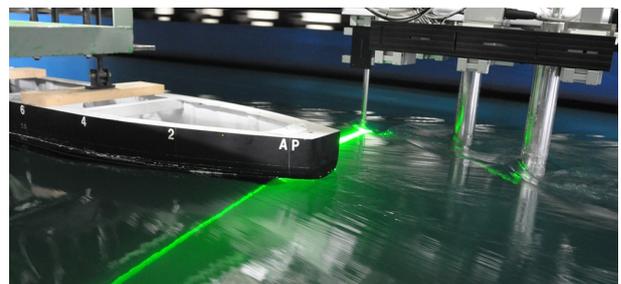


Fig. 7 Snapshot of the SPIV test

PIV 계측 시스템과의 비교를 위해 사용된 Pitot-static tube 시

스텝은 외경 2mm, 압력 계측공 지름 1mm로 전체압과 정압의 차를 수두압의 값으로 계측하여 아래와 같이 베르누이의 식을 이용해 x 방향의 속도성분 크기만을 얻을 수 있다.

$$u = \sqrt{2gh} \tag{4}$$

여기서 g는 중력 가속도, h는 차압계에서 계측된 수두이다.

피토크 관 계측은 프로펠러 중심을 기준으로 1.1R의 영역에 대해 y, z 방향으로 0.1R 간격으로 수행되었다. 여기서 R은 모형선의 프로펠러 반지름으로 49mm이다. 차압의 계측은 Validyne 사의 DP14 차압계, Validyne 사의 CD 18앰프, National Instruments 사의 NI USB 6225 시스템을 이용해 수행되었으며 50Hz의 샘플링 레이트(sampling rate)로 5초간 기록되어 얻은 평균값을 속도 계산에 이용하였다. 차압계의 교정 시험과 설치의 정확도를 바탕으로 추산된 불확실성은 모형선 예인 속도의 0.54%이다.

3. SPIV 불확실성 해석 이론

KVLCC2 모형선의 선미 유동장 계측에 앞서 SPIV 시스템 계측 결과의 신뢰도와 SPIV 시스템 자체가 유동장에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 실험 모형 없이 예인전차를 균일한 속도로 달리면서 얻어지는 균일 유동을 SPIV로 계측하여 그 결과를 얻었다.

저항이나 피토크 관 계측과 같은 일반적인 예인수조 실험에서는 데이터 샘플의 수와 무관하게 한 번의 예인전차 운동을 통해 얻어지는 평균 데이터만을 유의미한 실험 결과로 제공하게 되는데 (ITTC, 2008b), 이와 마찬가지로 예인수조 PIV 실험에서도 개별 순간 속도장들이 실험 결과로 활용되기보다는 순간 속도장으로부터 얻은 평균 속도장과 난류 성분만이 활용되기 때문에 SPIV의 알고리즘으로부터 얻어지는 순간 속도장 자체의 불확실성 보다는 표준화된 예인수조 PIV 실험 절차를 확립하고 이를 따를 때 얻어지는 평균 속도장과 난류 성분에 대한 불확실성 범위를 산정할 필요가 있다.

SPIV 시스템은 해석 과정이 복잡하기 때문에 불확실성 해석에 있어서 다른 계측 원리를 이용한 계측 결과를 기준으로 삼아 비교하는 기법으로 불확실성 해석을 수행하는 방식이 사용될 수 있다 (ASME, 2005). 따라서 우선 예인전차의 속도를 다른 방법으로 계측한 뒤 이 값을 예인수조용 SPIV를 이용하여 얻은 균일 유동장결과와 비교하여 평균 속도 결과의 불확실성 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 예인 수조 벽면에 14,000mm의 간격으로 표지를 3개 설치하여 그 사이의 거리 L_1 과 L_2 를 지나는데 걸리는 시간 t 를 계측하여 예인전차의 평균 속도를 얻었다. 예인전차에는 두 개의 광학 센서가 설치되어있으므로 1회의 전차 운행에서 4번의 속도 계측이 이루어진다. 표지 위치의 허용 오차는 0.5mm이며, 광학 센서는 1초에 1,024회의 신호를 받기 때문에 아래의 수식을 통해 얻어진 전차 속도의 불확실성은 평균 속도의 계측에 있어서는 무시할만한 수준의 오차를 갖는다.

$$U = \frac{1}{4} \left(\frac{L_1}{t_{1,a}} + \frac{L_1}{t_{1,b}} + \frac{L_2}{t_{2,a}} + \frac{L_2}{t_{2,b}} \right) \tag{5}$$

PIV 시스템의 불확실성에 대한 연구에서 입자 영상에 나타나는 추적 입자의 변위는 가장 중요한 요소 중에 하나이다 (Timmins, et al., 2012). 입자의 변위가 1픽셀 이하로 작은 경우 오차가 크게 발생하며 너무 큰 입자 변위에서는 추적 입자가 계측면을 통과하여 지나가버린다. 일반적인 예인수조 SPIV를 이용한 선미 유동장 계측에서는 예인 속도의 20% 미만부터 90% 이상인 속도 구간이 함께 존재하기 때문에 이 속도 구간에어 얻어지는 입자 변위를 적절하게 조절하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 기준 입자 변위로 입자영상 상에서 5픽셀 내외의 변위를 갖는 350 μ m의 변위 조건에 대해 반복 계측을 수행하고 신뢰도 95% 범위의 고정오차(systematic error)와 우연오차(random error)를 구하였다. 고정 오차는 실제 값과 계측 값의 차이로 정의되는데 여기서는 x 방향 평균 속도에 대해서는 표지를 통해 얻은 전차의 평균 속도, y, z 방향 속도와 모든 요동 성분에 대해서는 0을 실제 값으로 보았다. 다만 SPIV의 불확실성은 한 평면상의 속도 분포 전체를 하나의 불확실성 범위로 나타내어야 하는 만큼 계측 평면상의 속도 분포의 95%를 포함하는 범위를 대표 고정오차 값으로 표시하였다. 우연오차에 대해서도 동일하게 각 지점의 우연오차 값의 95%를 포함하는 범위의 값을 대표 우연오차로 정하였다. 그리고 최종 불확실성은 각 지점의 최종 불확실성을 각각 구하고 이들의 95%를 포함하는 범위의 경계값을 나타내었다.

불확실성 해석 이후 50, 100, 200, 350, 450, 550, 650, 800 μ m의 입자 변위에 대한 균일 유동 계측을 수행하였다. 이 구간은 입자 영상 기준으로는 0.7에서 11픽셀까지이며 레이저 시트 두께 기준으로는 두께의 1.7%에서 27%까지이다. 자유수면의 영향을 배제하기 위해 수심 250mm 지점의 유동장을 계측하였다.

4. 균일류 계측 결과

Table 2 Uncertainty assessment results

Item	Systematic error (%)	Random error (%)	Total uncertainty (%)
u/U	0.89	1.14	1.45
v/U	0.75	0.90	1.17
w/U	0.22	0.31	0.38
u'/U	2.52	0.25	3.03
v'/U	2.55	0.26	2.93
w'/U	0.85	0.53	1.00

일반적인 SPIV 시스템의 불확실성에 있어서 계측면에 수직인 속도 성분은 계측면 상의 두 속도 성분보다 큰 불확실성을 가지

는 것이 잘 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 x 방향 속도 성분에 대해 가장 큰 불확실성이 나타나고 y, z 방향 속도 성분은 유사한 크기의 작은 불확실성이 기대되었다. 하지만 평균 속도와 요동 성분 모두에서 x, y 방향 성분의 오차가 크게 나타났는데 이는 에인수조용 SPIV 시스템을 이용한 균일류 계측 결과에서 공통적으로 나타난 현상이다 (Yoon, 2009; Grizzi, et al., 2010).

본 에인수조용 SPIV시스템에서 카메라의 배치는 실험 환경 조성의 한계로 인해 카메라의 중심축과 좌표계의 y축이 이루는 각도가 25°로 일반적인 SPIV 시스템보다 작게 설정된다. 이로 인해 y 방향 속도 성분의 계측에 있어서 불확실성이 증가하게 된다. 다만 카메라의 중심축과 z축은 수직을 이루기 때문에 통상적으로 기대되는 수준의 낮은 불확실성을 보이게 된다.

Fig. 8은 입자 변위를 변화시켜가며 얻은 x 방향 평균 속도장과 요동 성분의 비교 결과이다. 1회의 에인전차 운행에서 얻어진 평균 속도장과 요동 성분의 공간 평균값과 공간 분포의 표준 편차를 함께 나타내었다. 입자의 변위가 1 픽셀 내외인 50 μ m, 100 μ m 조건에서는 뚜렷이 구분되는 높은 오차 값을 가지지만 입자의 변위가 200 μ m를 넘어가면 해석 값이 일정하게 수렴하는 것이 확인되었다. 이는 요동 성분에 대해서도 동일한 결과를 보인다. 일반적인 선미 유동장 계측 결과에서 x 방향 속도는 에인속도를 기준으로 20%에서 100%까지의 속도 분포를 보인다. 따라서 이 속도 범위에 대해 200 μ m에서 800 μ m까지의 입자 변위를 가지도록 시간 간격을 설정하여 SPIV 실험을 수행할 경우 앞서 구한 불확실성 결과를 적용할 수 있을 것으로 보인다.

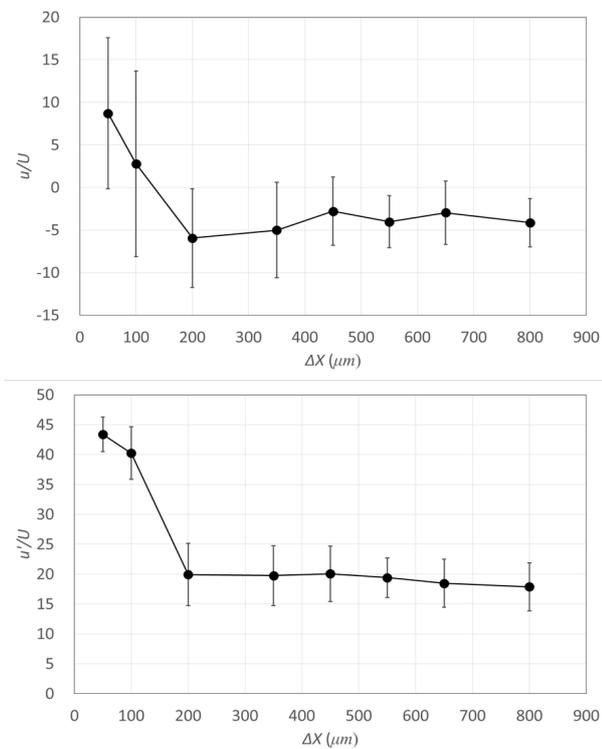


Fig. 8 Variation of error and particle displacement (top: $u/U \times 1000$, bottom: $u'/U \times 1000$)

5. KVLCC2 공칭반류 계측 결과

불확실성 해석 이후 프로펠러 위치의 유동장을 SPIV 시스템을 이용하여 계측하였다. Fig. 9는 그 결과로, 프로펠러 디스크가 포함되는 영역인 우현의 49mm × 98mm 영역의 속도장만을 계측하여 대칭으로 나타내었다. 저속 비대칭 유동의 대표적인 특징인 강한 밀지 보오텍스가 잘 확인되었으며, 원점 아래의 저속 구간에서 밀지 보오텍스와 반대 방향의 보오텍스가 확인되었다.

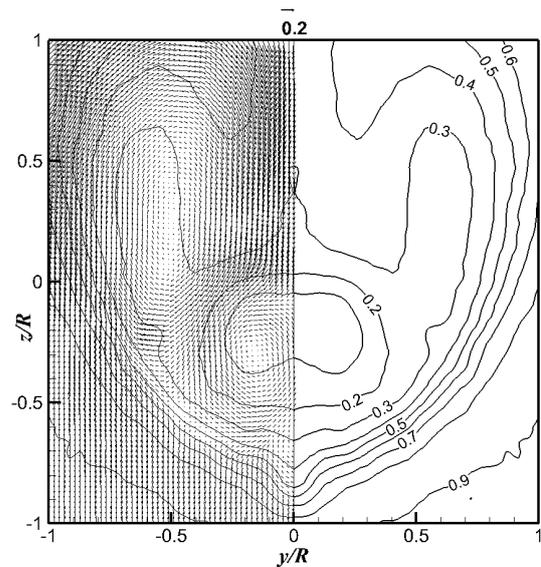


Fig. 9 Mean velocity results at station 0.35 by SPIV

실험 결과의 정확한 비교를 위해 프로펠러 평면 위치의 실험 결과를 Pitot-static tube를 이용한 실험 결과와 전산유체역학 검증 자료로 제공되는 5공 피토관 결과 (Kim, et al., 2000), 열선 유속계 결과 (Kim, et al., 1999)와 비교하였다. Fig. 10은 $0 < y/R < 1$, $-1 < z/R < 1$ 의 영역에 대한 각 실험 결과의 비교로, yz 속도 벡터의 경우 계측 평면에 동일한 갯수의 벡터가 나타나도록 대표 벡터를 취하였다.

전체적으로 4종의 실험 결과가 유사한 경향을 보였지만 계측 특성의 차이로 인해 몇 가지 차이점을 확인할 수 있다. 원점 아래에 나타난 $u/U < 0.2$ 의 저속 구간에서의 유동은 x 방향 속도 성분의 크기가 다른 속도 성분의 크기에 비해 작기 때문에 피토관과 열선 유속계의 계측 범위를 벗어난 피치(pitch)각이나 요(yaw)각을 가진 유동이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, x 방향 성분만을 계측하는 Pitot-static tube는 SPIV와 유사한 계측 결과를 보였다. 따라서 다른 계측 기법으로는 확인할 수 없는 국부 보오텍스의 형성을 SPIV의 장점인 높은 공간 해상도를 바탕으로 계측할 수 있음을 알 수 있다.

또한 $y > 0$ 인 영역에서 z축 주위의 $u/U = 0.4$ 경계를 통해 확인되는 저속 유동이 열선 유속계 결과에서는 나타나지 않았다. 이는 열선 유속계 실험에 사용된 계측 시스템과 계측 환경의 특성이 에인수조 실험과 다르기 때문으로 생각되지만 다른 선형에

대해 풍동에서 이중모형을 이용한 피토관 계측 실험 (Kim, et al., 2005)에서는 오히려 예인수조 결과와 유사한 경향이 확인되었기 때문에 열선 유속계 결과의 차이에 대해 확실한 결론을 내릴 수는 없었다.

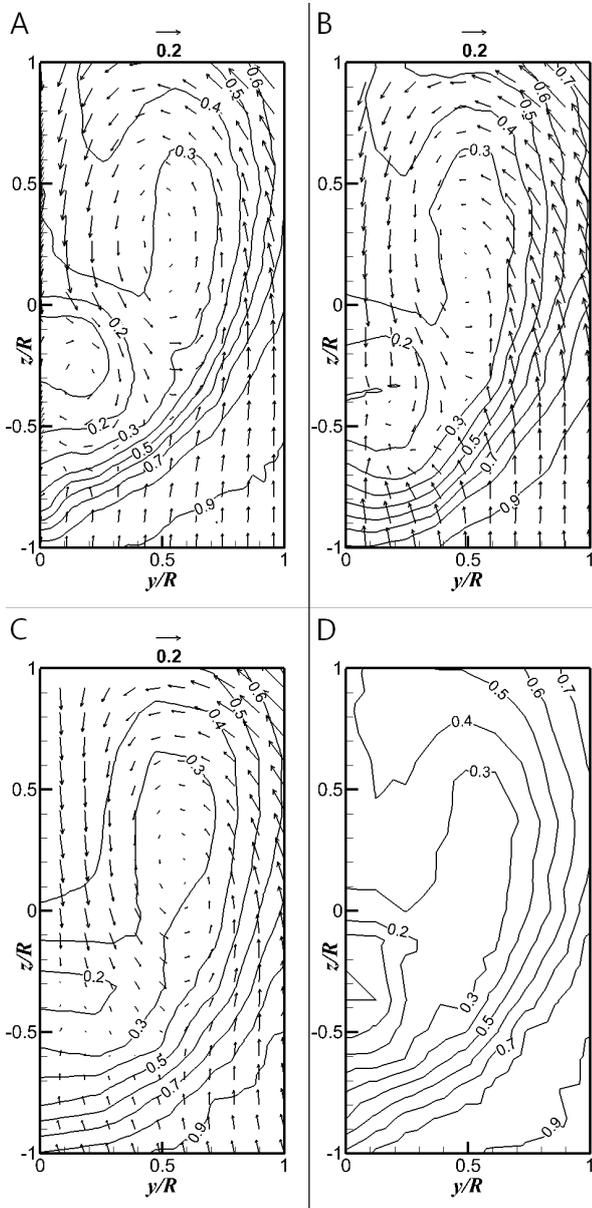


Fig. 10 Mean velocity at station 0.35 (A: SPIV, B: 5-hole Pitot tube, C: hot wire anemometer, D: Pitot-static tube)

Fig. 11은 원점을 기준으로 동일 반지름에 대한 x 방향 평균 유속 분포를 비교한 결과이다. $r/R = 0.6, 0.8$ 의 경우 실험 결과들 간에 차이가 있는 것이 확인되었다. 이 영역은 x 방향 속도 구배가 큰 구역이기 때문에 속도 계측 자체의 정확도뿐만 아니라 계측 위치의 정확도 또한 요구된다. SPIV의 경우 한 번에 전체 평면의 유동 성분을 계측할 수 있기 때문에 매번 계측 위치를 지정해 주어야 하는 점계측 기법들에 비해 더 정확한 결과를 얻을

수 있다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 열선 유속계 결과는 다른 실험 결과와 비교하였을 때 $0^\circ, 180^\circ$ 지점에서의 속도 차이가 두드러지게 나타났다.

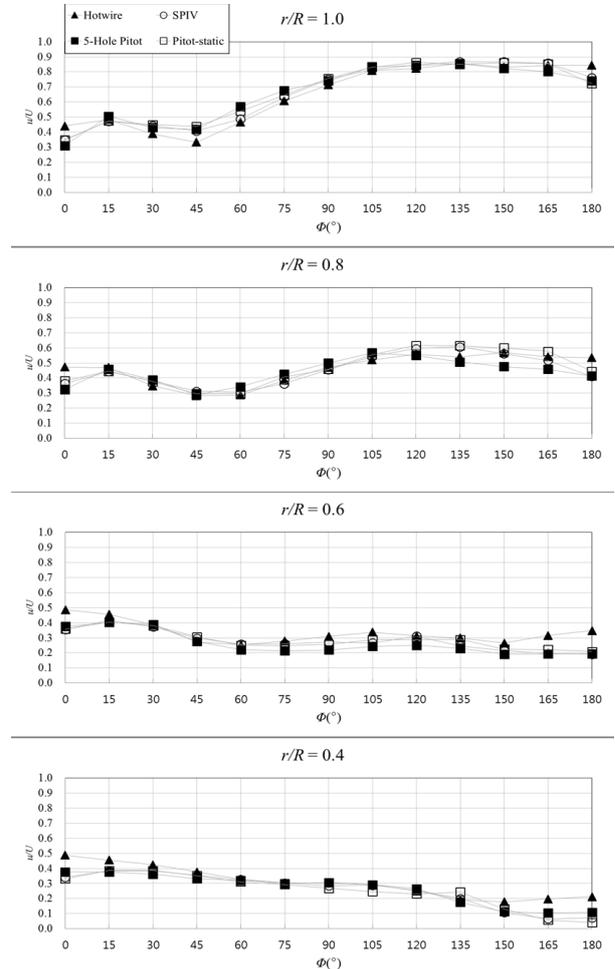


Fig. 11 Comparison of u/U

SPIV를 이용해 얻어진 속도장 결과에서 요동 성분을 이용해 TKE를 구하여 열선 유속계 결과와 비교하였다. Fig. 12는 TKE 계측 결과의 비교이다. 전체적으로 TKE는 유속의 구배가 큰 부분에 집중되어 있는 것으로 나타났으며, $k \times 1000 = 5, 10$ 의 경계는 두 실험 결과 모두 잘 일치했다.

하지만 두 실험 결과는 국부적인 계측 결과에서 차이를 보였다. 열선 유속계의 평균 속도 결과에서 z축을 따라 저속구간이 나타나지 않았던 만큼 같은 구역에서 속도 구배와 연관된 TKE가 나타나지 않았다. 물론 SPIV의 난류 계측의 정확도는 낮은 샘플링 레이트로 인해 열선 유속계에 비해 떨어지는 것이 일반적이지만 앞서 평균 속도장 결과 중 열선 유속계를 제외한 SPIV와 피토관의 계측 결과에서 동일하게 저속구간이 확인된 만큼 이 구역의 TKE 분포에 대해서는 SPIV의 결과가 더욱 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

$k \times 1000$ 의 국부 최댓값은 SPIV의 경우 35, 열선 유속계의 경우 15로 나타나며 그 위치는 서로 유사하다. 예인수조용 SPIV를

이용한 동일 선형에 대한 실험 (Kim, et al., 2011)에서는 본 실험과 유사한 수준의 TKE 국부 최댓값이 나타났기 때문에 이러한 국부 최댓값의 차이는 열선 유속계와 SPIV 시스템간의 샘플링 레이트 차이에 기인하는 것으로 보인다. 물론 난류 계측에 적합한 높은 샘플링 레이트를 가진 열선 유속계의 결과가 더 높은 신뢰성을 가지기 때문에 본 시스템을 이용한 TKE 계측에서 국부 최댓값 구역의 결과는 높은 공간 해상도를 통한 난류 성분의 정성적인 공간상 분포의 확인 측면에서 그 의미를 찾을 수 있다. 그리고 실험 결과를 실제 난류 값의 정량적인 평가에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

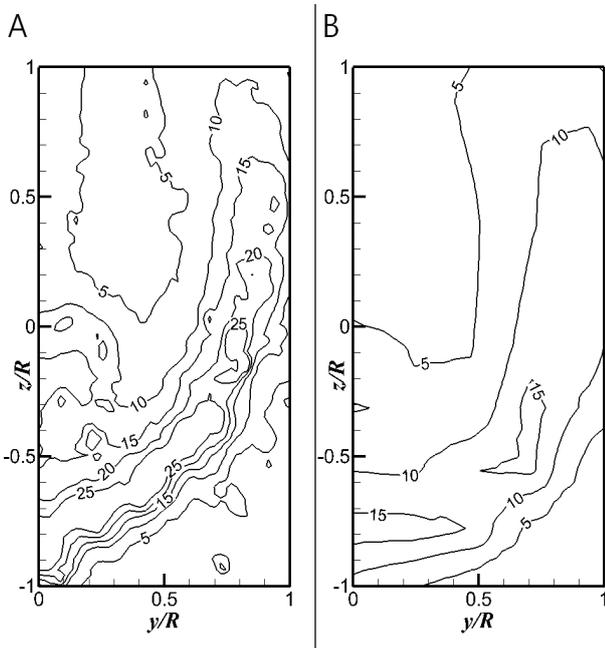


Fig. 12 $k \times 1000$ at station 0.35 (A: SPIV, B: hot wire anemometer)

앞의 u/U 결과와 동일하게 각 반지름 별 위치에 대해 TKE 값을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. TKE의 국부 최댓값이 나타나는 $r/R = 0.8$ 에서는 TKE 값이 두 실험 결과 간에 2배가량 차이가 났지만 다른 부분에서는 유사한 결과를 보였다.

6. 결론

본 연구에서는 에인수조용 SPIV 시스템의 불확실성 해석을 수행하고 그 범위를 95%의 신뢰 구간에 대해 정량적으로 나타내었다. x 방향 속도 성분의 불확실성 범위는 전차 예인 속도에 대해 평균 속도는 1.45%, 요동 성분은 3.03%로 나타났다. 실험 오차는 입자 번위가 1픽셀 이상일 경우에는 균일한 수준으로 유지되는 것으로 확인되었기 때문에 다양한 유속 분포가 기대되는 실제 실험에 적용하였을 경우에도 유사한 불확실성 범위를 가질 것으로 기대된다.

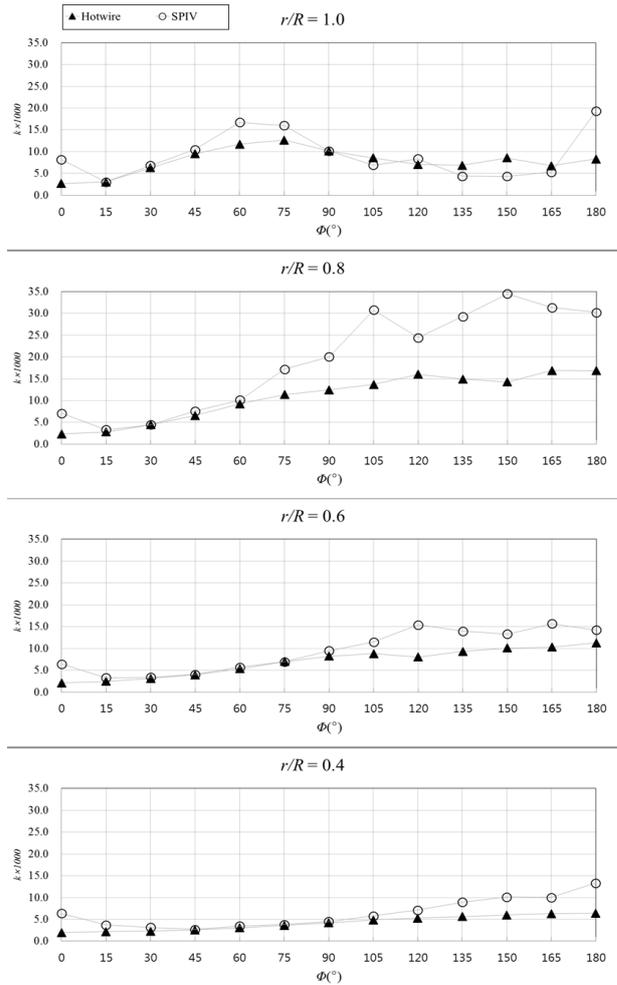


Fig. 13 Comparison of $k \times 1000$

그리고 SPIV 시스템을 이용해 KVLCC2 모형선의 선미 유동장을 계측하였다. 프로펠러 평면 위치에서 계측된 평균 속도장과 TKE는 각각 전산유체역학의 검증용 자료로 활용되고 있는 실험 결과와 비교되었으며 계측 시스템의 특성 차이로 인한 TKE의 국부 최댓값의 차이가 발생한 것을 제외하면 실험 결과는 잘 일치하였다. 이에 더해 에인수조용 SPIV 시스템은 높은 공간 해상도를 바탕으로 세밀한 국부 유동의 계측이 가능하므로 앞으로 선체 부가물에 대한 연구에 적극적으로 활용되어 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 국방과학연구소의 차세대 함정 첨단 함형 특화연구실 - 고속/저저항 미래 함정의 저항 및 소음 예측 기법 (UD120003DD), 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원 (No.20124030200030), 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2009-0083510, No. 2011-0020563, No.2013R1A1A2012597)

References

- American Society of Mechanical Engineers, 2005. Test Uncertainty. *ASME Test Code Report No 19.1*.
- Gjelstrup, P., 2009. State-of-the-art towing tank PIV and LDA systems. *Proceedings of 1st International Conference on Advanced Model Measurement Technology for EU Maritime Industry*, Nantes, France, 1–2 September 2009.
- Grizzi, S. Pereira, F. & Di Felice, F., 2010. A Simplified, Flow-based Calibration Method for Stereoscopic PIV. *Experiments in Fluids*, 48(3), pp.473–486.
- Gui, L. Longo, J. & Stern, F., 2001. Towing Tank PIV Measurement System, Data, and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512. *Experiments in Fluids*, 31(3), pp.336–346.
- Hwang, S.H. Lee, Y.Y. Ahn, H.S. Kim, J. & Van, S.H., 2012. Stereoscopic PIV analysis of flow characteristics behind tanker. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, Busan, Korea, 31 May – 01 June 2012.
- International Towing Tank Conference(ITTC), 2008a. Guide to the Expression of Uncertainty in Experimental Hydrodynamics. *25th International Towing Tank Conference*, Fukuoka, Japan, 14–20 September 2008.
- International Towing Tank Conference(ITTC), 2008b. Uncertainty Analysis: Particle Image Velocimetry. *25th International Towing Tank Conference*, Fukuoka, Japan, 14–20 September 2008.
- Kawamura, T. Ouchi, K. & Nojiri, T., 2012. Model and Full Scale CFD Analysis of Propeller Boss Cap Fins (PBCF). *Journal of Marine Science and Technology*, 17(4), pp.469–480.
- Kim, B.J. Choi, S.H. Kim, H.T. & Van, S.H., 2005. Measurement of Velocity Field Change around Stern of LNG Carrier Double Body Model by Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(5), pp.448–457.
- Kim, H.R. & Lee, S.J., 1999. Wind Tunnel Study on Flow Characteristics around KRISO 300K VLCC Double-body Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(3), pp.15–21.
- Kim, J. Hwang, S.H. Lee, Y.Y. Kim, C.M. Ahn, H.S. & Van, S.H., 2011. The flow field measurement around a model ship with stereo-PIV system in a towing tank. *Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Model Measurement Technology for EU Maritime Industry*, Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 4–6 April 2011.
- Kim, K.H. Song, I.H. & Choi, S.H., 2007. Desing Technitue of Post Swirl Stator in Container Vessels by CFD. *Journal of the Society of naval Architects of Korea*, 44(2), pp.93–100.
- Kim, W.J. Kim, D.H. Yoon, H.S. Moon, D.Y. & Van, S.H., 1997. Study on the Calibration of a Five-hole Pitot-tube for the Wake Measurement. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(2), pp.11–19.
- Kim, W.J. Van, S.H. Kim, D.H. & Lee, C.J., 2000. Experimental Study on Local Flow Characteristics and Propulsive Performance of Two KRISO 300K VLCCs with Different Stern Shapes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(3), pp.11–20.
- Kim, W.J. Kim, D.H. Kim, Y.G. Kim, S.Y. & Van, S.H., 2001. An Experimental Study on Stern Flow around a VLCC Model with Drift Angles. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(1), pp.52–61.
- Korkut, E., 2006. A Case Study for the Effect of a Flow Improvement Device (a Partial Wake Equalizing Duct) on Ship Powering Characteristics. *Ocean Engineering*, 33(2), pp.205–218.
- Longo, J. Shao, J. Irvine, M. & Stern, F., 2007. Phase-averaged PIV for the Nominal Wake of a Surface Ship in Regular Head Waves. *Journal of Fluids Engineering*, 129(5), pp.524–540.
- Nagaya, S. Ochi, F. Fukui, Y. Omori, T. Inukai, Y., 2011. Stereo PIV measurements of flow around energy saving device and twin-skeg stern ship in towing tank. *Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Model Measurement Technology for EU Maritime Industry*, Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 4–6 April 2011.
- Scarano, F. David, L. Bsibsi, M. & Callaud, D., 2005. S-PIV Comparative Assessment: Image Dewarping + Misalignment Correction and Pinhole + Geometric Back Projection. *Experiments in Fluids*, 39(2), pp.257–266.
- Seol, D.M. Seo, J. & Rhee, S.H., 2013. Towed Underwater PIV Measurement for Free-surface Effects on Turbulent Wake of a Surface-piercing Body. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3), pp.404–413.

Shin, H.J. Lee, K.H. Han, M.R. Lee, C.Y. & Shin, S.C., 2013. Pre-Swirl Duct of Fuel Oil Saving Device Design and Analysis for Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.145-152.

Timmins, B.H. Wilson, B.W. Smith B.L. & Vlachos, P.P., 2012. A Method for Automatic Estimation of Instantaneous Local Uncertainty in Particle Image Velocimetry Measurements. *Experiments in Fluids*, 53(4), pp.1133-1147.

Van, S.H. Kim, W.J. & Kim, D.H., 2000. Experimental Investigation of Local Flow around KRISO 3600 TEU Container Ship Model in Towing Tank. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(3), pp.1-10.

Van, S.H. Yoon, H.S. Lee, Y.Y. Park, I.R. Lee, C.J. & Kim, W.J., 2003. Measurement of Flow around KRISO 138K LNG Carrier Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(2), pp.1-10.

Wie, D.E. & Kim, D.J., 2012. The Design Optimization of a Flow Control Fin Using CFD. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(2), pp.174-181.

Yoon, H., 2009. *Phase-averaged Stereo-PIV Flow Field and Force/Moment/Motion Measurements for Surface Combatant in PMM Maneuvers*. Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Iowa, Iowa City, Iowa.

