

## KRISO 3600TEU 컨테이너선 모형 주위의 국부유동 계측에 관한 연구

반석호\*, 김우전\*\*, 김도현\*\*

### Experimental Investigation of Local Flow around KRISO 3600TEU Container Ship Model in Towing Tank

Suak-Ho Van\*, Wu-Joan Kim\*\* and Do-Hyun Kim\*\*

#### 요 약

저항 및 자항 등의 유체성능이 뛰어난 선형을 개발하기 위해서는 선체에 작용하는 여러 방향의 힘은 물론 그러한 결과를 발생시키는 선체 주위의 유동 현상에 대한 이해가 필수적이다. 이러한 국부 유동 현상의 규명을 위해 일반 상선 및 특수선 주위의 전체 파형과 속도 분포 등의 국부 유동현상을 관측할 수 있는 종합적인 국부유동 계측 시스템이 개발되었다. 이를 사용하여 KRISO 3600TEU 컨테이너선(KCS) 주위의 국부유동을 계측하였다. 본 자료는 날씬하고 빠른 현대적인 상선의 유동을 이해하는데 매우 귀중한 자료일 뿐만 아니라 계산유체역학 기법을 이용한 계산 결과의 검증을 위해서도 매우 중요한 자료로 평가된다.

#### Abstract

It is very important to understand the flow characteristics for design of the hull forms with better resistance and propulsive performance. The experimental results explicating the local flow characteristics are also invaluable for validation of the CFD codes for both inviscid and viscous flow calculations. This paper describes the techniques and equipment developed for the measurement of wave pattern on the free surface and local mean velocity fields around the stern of the modern container ship with bow and stern bulbs in KRISO towing tank. The results contained in this paper can provide the valuable information on the flow characteristics of the modern commercial hull form of small block coefficient with high speed.

---

접수일자 : 2000년 1월 24일, 승인일자 : 2000년 5월 2일

\*정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소 해양운송시스템 개발단(E-mail : shvan@kriso.re.kr)

\*\*정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소 해양운송시스템 개발단

## 1. 서 언

통상의 예인수조 시험에서는 저항, 자항 요소 등의 총량 계측(global measurement)이 강조되어왔다. 하지만 저항, 자항, 조종 및 운동 등유체 성능이 뛰어난 선형을 개발하기 위해서는 선체에 작용하는 여러 방향의 힘은 물론 그러한 결과를 발생시키는 선체 주위의 유동 현상에 대한 이해가 필수적이다. 이러한 국부 유동 현상의 규명이 선형 변환과 연계될 수 있으면, 선박유체역학의 이론과 해석을 바탕으로 보다 나은 선형을 개발할 수 있는 길이 열릴 수 있다. 현재까지 공개된 선체 주위의 국부유동 계측 자료는 일부 수확 선형이나 Series 60과 같은 표준 모형선에 국한되어 있고, 오늘날 건조되고 있는 실제 상선 선형에 대한 database는 세계적으로도 매우 드문 형편이다. 최근에 선형의 저항성능 평가에 활용하기 위해 많은 연구가 진행되고 있는 수치계산(CFD) 결과의 검증에 위해서도 정도 높은 국부 유동 계측 자료에 대한 필요성이 더욱 강조되고 있다[1].

본 논문에서는 선체 주위의 파형과 선미 경계층 내의 유속 분포와 같은 국부 유동 현상의 규명을 위해 개발한 계측 장비의 구성, 계측 기법 및 해석 기법 등을 기술하였다. Servo-needle 형식의 파고계와 5개의 5공 피토프관을 일정 간격으로 연결한 Pitot-tube rake를 사용하여 선측 파형과 종절단선(longitudinal cut)에 따른 파형, 횡절단선(transverse cut)에 따른 파형, 선체 후반부와 반류 영역에서의 국부 유속 등을 계측하는 방법을 상세히 기술하였다. 또한 개발된 국부유동 계측 시스템을 사용하여 계측한 KRISO 3600TEU 컨테이너선의 모형선 주위의 파형과 속도장 등의 유동 특성에 대하여 알아보았다.

## 2. 국부 유동 계측 시스템 구성

### 2.1 선측 파형 계측

선측 파형은 조파 저항의 관점에서 매우 중요한 선형 판정 기준이 된다. 이를 손쉽게 계측하기 위

해서 저항이나 자항 시험 중에 예인 전차에 부착된 카메라로 찍은 사진을 판독하거나 시험 중에 망원경으로 선측 파형을 읽어서 구할 수 있다. 모형선 만재 홀수선의 위, 아래에 모형 scale에서 1cm 간격의 수선을 추가하여 표기하였다. 길이 방향으로의 기존의 20등분외에도 선수부와 선미부에 1/2간격의 스테이션들을 표시하여 약 24개 스테이션에서의 값을 읽었고, 사진은 다른 실험 중에 촬영할 수 있으므로 선측 파고 계측을 위한 실험은 따로 실시하지 않아도 된다.

### 2.2 국부 유속 계측장비

선체 주위의 3차원 유속을 계측하기 위하여 5공 피토프관(five-hole Pitot tube)을 사용하였다. 실험 시간을 줄이기 위해 한번에 여러 위치에서의 유속을 계측할 수 있도록 5개의 5공 피토프관을 4cm 간격으로 묶은 rake를 제작하였다. 모형선의 반쪽(선저 중앙부)의 범위까지 계측이 가능하도록 rake와 3축 이송장치 사이를 연결하는 어댑터를 사용하였다. 어댑터는 계측 중 항력과 교란을 최소로 하기 위하여 유선형 단면을 택하였으며 rake가 어댑터에 삽입되도록 홈을 파서 제작하였다. Fig. 1에서는 국부유속을 계측하기 위한 시스템의 구성도를 보이고 있으며, Fig. 2에서는 5공 관과 rake, 어댑터를 연결한 사진을 보이고 있다. 5공관의 캘리브레이션은 종방향의 속도 성분이 작고 횡단면에서의 속도 성분이 큰 경우에도 정확도를 유지하기 위해서 2차원 차트 캘리브레이션 방법[2]을 사용하였다. 압력 변환기는 예인 수조에서 기존에 사용하던 Validyne사의 DP-15을 사용하였으며 사양은 Table 1, 캘리브레이션 결과는 Fig. 3에 표시하였다.

각 피토프관의 구멍에서의 압력은 비닐관을 통해 차분형 압력 변환기(DP-15)에 연결되고, 각각의 피토프관의 구멍에서의 압력 차이가 신호 증폭기인 Carrier Demodulator(CD-10)로 입력된다. 여기서 나오는 analog 신호는 NEFF system을 통하여 digital 신호로 변환되어 PC로 입력되고, 피토프관의 각 구멍에서의 압력들의 차로 이루어진

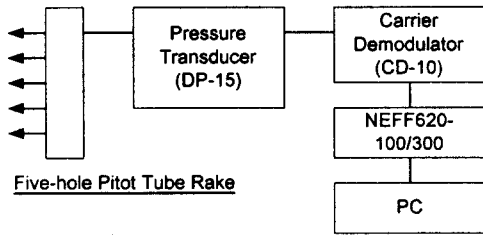


Fig. 1 Schematics of local mean velocity measurement system



Fig. 2 Five-hole Pitot tube rake and adapter to traversing mechanism

Table 1 Specifications of pressure transducer DP-15

Manufacturer	Validyne Engineering Co.
Type	Variable Reluctance Differential Pressure Transducer
Model	DP15
Diaphragm	Range Dash No. 32
Range	2.0 psi or 140 CmH <sub>2</sub> O
Accuracy	±0.25% FS , including nonlinearity, hysteresis, repeatability
Thermal zero shift	1% FS/100°F typical
Zero Balance	5 mV/V

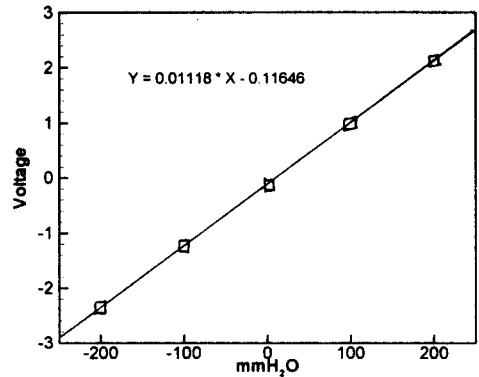


Fig. 3 Typical calibration chart of a pressure transducer DP-15

압력계수로 환산된 후, 캘리브레이션 차트의 계수와와의 비교를 통하여 속도의 크기와 방향이 계산된다. 이때 캘리브레이션 차트와 계측된 압력 계수와와의 비교를 위해서는 2차원 spline 법이 사용되었고, 각각의 피토관에 대한 고유 상수는 국부유동 계측 전에 캘리브레이션하여 결정하였다(2).

피토관 등의 유동계측 장비를 효과적으로 이동시키기 위해서 3차원 이송 장치(traversing mechanism)을 사용하였다. 이송 장치는 예인전차의 공간적인 여유가 부족하기 때문에 계측 rail과 모형선 사이에 설치되도록 제작하였으며, 모형선 진행방향, 폭방향, 깊이 방향으로 0.95m, 0.60m, 0.60m의 범위에서 이동이 가능하다. 각 방향의 이동축은 400W AC servo motor (Panasonic MSM042A1E)로 구동되며, motor와 회전축은 timing belt로 연결되어 1:2의 비로 감속된다. Motor driver는 엔코더의 펄스로 제어하며, 1/100mm까지 제어가 가능하므로 매우 정확하게 위치를 제어할 수 있었다.

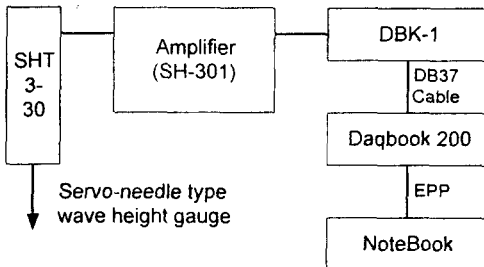
### 2.3 종단면 파형 계측장비

기존에 사용하던 용량식 또는 저항식 파고계는 물이 wire를 따라 올라오고 wire 및 지지대로 인해 수면에 교란이 발생하는 등 어려움이 있다. 본 연구에서는 이런 어려움을 극복하기 위해 이동 중

에도 계측이 가능하고, 수면에 교란을 거의 일으키지 않는 서보방식 파고계(servo-needle type wave height gauge)를 사용하였다. Table 2와 Fig. 4에서는 서보방식 파고계의 사양과 계측 시스템의 구성을 보였으며, Figs. 5와 6에서는 파고계의 사진과 캘리브레이션 결과를 보였다.

**Table 2** Specifications of wave height gauge and amplifier

Manufacturer	West Japan Fluids Engineering Laboratory Co.
Type	Servo-needle Type Wave Height Gauge
Model	SH-301(Amp), SHT3-30(Sensor)
Range	±5V/FS (Amp), ±150 mm (Sensor)
Sensitivity	0.05 mm
Nonlinearity	±0.2% FS
Stability	±0.1 %FS

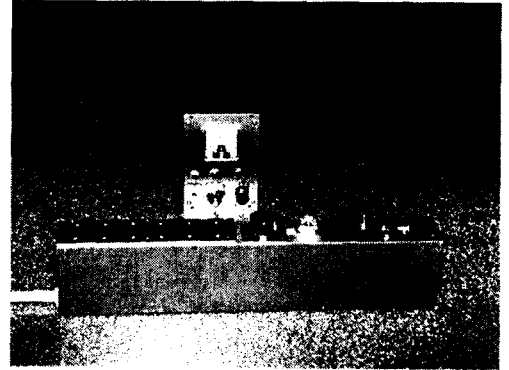


**Fig. 4** Schematics of wave height measurement system

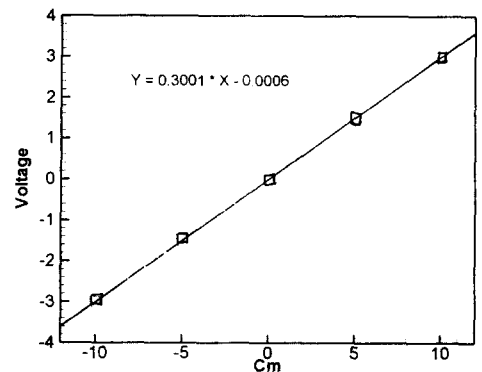
종단선을 따라 파형을 계측하기 위해서는 3개의 파고계를 별도로 제작한 어댑터에 부착하여 동시에 세 위치에서의 파고를 계측할 수 있도록 하였다. 임의의 종방향 cut에 파고계를 고정할 수 있도록 수조 반쪽의 길이를 갖는 외팔보를 제작하였다. 외팔보는 실험이 없는 경우 접어서 수조벽에 고정시킬 수 있도록 하였고, 외팔보 위에는 servo-motor로 구동되는 sub-carrige 3개를 부착하여 각각의 sub-carrige에 파고계를 부착할 수 있도록 하여 계측 위치 이동에 소요되는 시간

을 최소화하였다.

파고계 amplifier에서 나오는 analog 신호는 Daqbook A/D 변환기를 이용하여 디지털화하였고, Daqview라는 S/W를 사용하여 NoteBook 컴퓨터의 enhancement parallel port (EPP)를 통해 자료를 취득하였다.



**Fig. 5** Servo-needle type wave height gauge(SHT3-30) and amplifier(SH-301)



**Fig. 6** Typical calibration chart of a wave height gauge SHT3-30

## 2.4 횡단면 파형 계측장비

선수부와 선미 후류 부분은 longitudinal cut 방법으로 접근이 불가능하므로 파고계를 모형선과 함께 움직이면서 횡단면을 따라 파고를 계측할 수 있는 transverse cut 시스템을 구성하였다.

앞에서 설명된 3차원 이송장치(3-D traversing mechanism)를 이용하여 위치를 이동하였고 2개(선수부) 또는 3개(선미부)의 servo-type 파고계를 묶어서 한번에 2~3개 위치에서의 파고를 동시에 계측할 수 있도록 하였다. 또한 선수부의 flare가 큰 선형의 경우에는 가능한한 선체 가까운 위치에서 파고를 계측할 수 있도록 Fig. 7과 같이 안쪽의 파고계를 기울여서 사용하였다. 본 실험에 사용한 파고계의 경우 기울어진 각도가 20°에서도 정확한 계측값을 주는 것을 확인하였다.

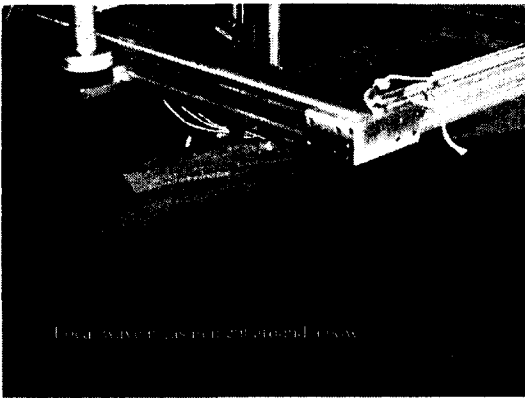


Fig. 7 Wave height measurement around a bow with the gauge inclined by 19°

### 3. KRISO 3600TEU 컨테이너선 주위의 국부유동 계측 결과

앞에서 설명한 계측 시스템을 이용하여 날선하고 설계 속도가 높은 3600TEU급 컨테이너선을 대상으로 국부유동 계측 실험을 수행하였다. KRISO 3600TEU 컨테이너선은 원래 하나의

선수 선형과 세 개의 선미 선형이 설계되었으나 그중 F1+A2의 선형에 대하여 국부유동이 계측되었다. 이 선형은 현대적인 컨테이너선의 형태를 가지고 있는 매우 실용적인 선형으로서 종래의 유동 계측 자료가 공개된 70년대의 선형에 비해 그 실용성이 크게 돋보인다고 할 수 있다. 본 KRISO 3600TEU 컨테이너선을 KCS(KRISO Container Ship)로 명명하였고, 2000년에 Sweden Gothenburg에서 열리는 CFD Workshop의 세 가지 test case 선형 중의 하나로 선택되었으며, 본 논문에 정리된 계측 결과를 Workshop에서 여러 CFD code의 검증을 위해서 사용하기로 하였음을 밝혀둔다.

#### 3.1 모형선

유동 계측에 사용한 모형선은 프로펠러의 지름이 25cm인 KRISO 표준에 맞추기 위해 31.6의 축적비로 제작되었다. 실선과 모형선의 주요 제원은 Table 3에 나타내었고, 선형의 body plan과 선수와 선미의 윤곽선은 Fig. 8에 표시하였다. 실선 속도 24 노트에 해당하는 Froude 대응 속도 2.196 m/sec로 모형선이 예인 되었고,  $L_{pp}$ 를 기준으로 하였을 때 해당되는 무차원 수는 각각  $Fn=0.26$ ,  $Re=14,000,000$ 이다. 항주 중 침하나 트림이 허용될 경우, 선체의 상하 이동으로 인하여 피토판이나 파고계가 손상될 위험이 있을 뿐 아니라, 계측위치가 불확실해질 가능성이 있다. 이를 방지하고자 모형선은 두 개의 고정장치에 의해서 예인 전차에 고정되었고, 파형이나 속도장 등의 국부유동 계측시에 침하와 트림은 허용되지 않았다.

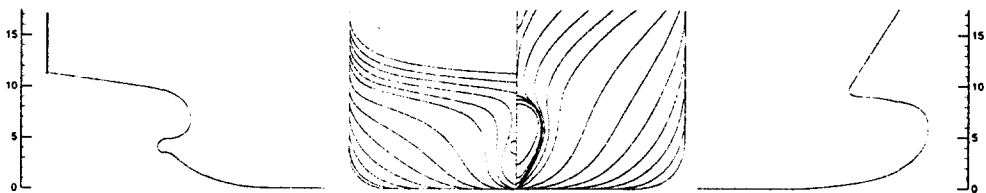


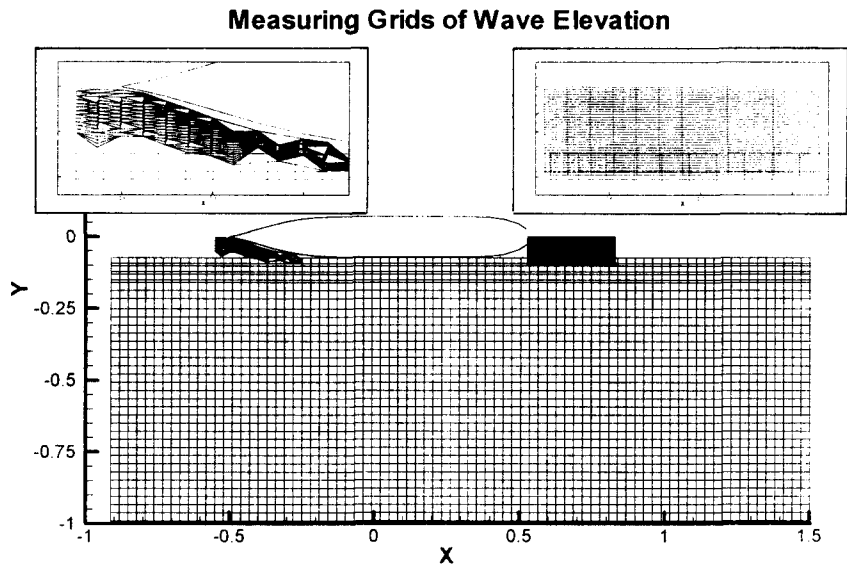
Fig. 8 Body plan and side profile of KRISO 3600TEU container ship(F1+A2)

**Table 3** Principal particulars of KRISO 3600TEU container ship(KCS)

	Ship	Model
Scale ratio	31.5994	
Lpp (m)	230.000	7.2786
B (m)	32.200	1.0190
D (m)	19.000	0.6013
T (m)	10.800	0.3418
L <sub>WL</sub> (m)	232.500	7.3577
S (m <sup>2</sup> )	9498.0	9.5121
∇ (m <sup>3</sup> )	52030.0	1.6490
C <sub>B</sub>	0.6505	
C <sub>W</sub>	0.8314	
C <sub>M</sub>	0.9849	
C <sub>P</sub>	0.6605	
LCB % (fwd.+)	-1.4800	

### 3.2 파형 계측 결과

상세한 파형 자료를 확보하기 위하여 선측 파형과 선수미 주위의 횡방향을 가르는 국부 파고를 계측하였으며, 또한 36개의 횡방향 위치에서 종방향선을 따르는 파고를 계측하여 전체 파형 자료를 확보하였다. 선수미의 국부 파고를 계측할 때, 파고계가 모형선과 같이 움직이게 되는 점을 고려하여 서보 방식의 비접촉식 파고계를 사용하였으며, 선수 주위는 2개의 파고계를, 선체 후방에서는 3개의 파고계를 어댑터에 고정하여 동시에 2~3 위치에서 파고를 계측하도록 하였다. 파고계는 3축 이송 장치를 제어하여 계측 위치로 이동시켰으며, 모형선이 1회 항주하는 동안 파고계를 횡방향으로 2cm씩 이동시키며 최대 36개의 위치에서의 파고를 계측하였다. 선수에는 Flare가 있어 파고계를 수면에 연직하게 설치할 경우 모형선에 근접한 위치에서는 파고 계측이 불가능하므로, 1개의 파고계는 연직 방향에 대하여 19° 만큼 기울여서 설치하였다. 이 때 횡방향 계측 위치는 파고계를 정수면에 수직하게 설치하였을 때와는 같지



**Fig. 9** Wave height measurement grids (every 10 points for longitudinal cuts)

않으므로, 계측된 파고와 기울림각을 이용하여 계측 위치를 보정하였다. F.P. 전방 21 스테이션에서 15 스테이션사이의 20개의 종방향 위치에 대하여 파고계를 횡방향으로 이동시키며 선수 주위의 국부 파고를 계측하였다. 선체 후방에서는 트랜섬 뒤쪽 0.02m에서 2.184m(트랜섬 후방 6스테이션)에 걸쳐 0.5스테이션 또는 1스테이션 간격을 두고 10개의 종방향 위치에 대하여 파고계를 횡방향으로 이동시키며 계측하였다.

모형선의 중앙 횡단면상의 선측에서 3cm 떨어진 위치로부터 수조 측면 소파기의 간섭을 받지 않는 위치까지 36개의 횡방향의 위치에서 종방향선(longitudinal cut)을 따르는 파고를 계측하였다. 모형선의 F.P. 전방 3m에서 계측을 시작할 수 있도록 optical 스위치를 설치하였으며, 반사파가 충분히 계측될 때까지 100Hz의 Sampling rate로 40초간 파고를 계측하였다.

선체 표면을 따르는 파형을 계측하기 위하여, 모형선 주위의 파계가 정상 상태에 이르렀을 때 스틸 카메라와 디지털 비디오 카메라를 이용하여 선측을 수차례 근접 촬영하였으며, 사진에 나타난 파형과 모형선에 표시된 눈금을 참조하여 선체 표면을 따르는 파형을 구하여 Fig. 10에 보였다. 선수 근처에서 이중 파고와 비슷한 현상이 관측되고 선미부근에서는 트랜섬 효과로 인하여 선미 파고가 높여서 파형이 편편한 상승을 보이고 있다.

종절단법에 의해 계측된 파형과 선수부와 선미부의 국부 파형, 그리고 선측 파형 등 Fig. 9에 표시된 계측 영역을 종합하여 모형선의 항주로 생성되는 전체 파계를 Fig. 11에 나타내었다. 각기 세 부분으로 나누어져서 계측된 파형의 겹치는 부분을 비교해 본 결과 그 차이는 무시할 만하였다. 선미 후방에서는 불충분한 트랜섬 효과로 인하여 매우 불안정한 파계가 형성되고, 계측 결과에는 뾰족뾰족한 contour 형상으로 나타나고 있다. 이런 현상은 기존의 포텐시얼 이론 계산에서 dry transom modeling으로는 구현하기 힘든 현상으로 수치 계산을 통해서 재현하기는 상당히 힘들 것으로 생각된다. 그 외의 선수나 선측 파형은 매우 전형적인 가로파와 발산파로 이루어진 con-

tainer 운반선의 파계를 보여주고 있다.

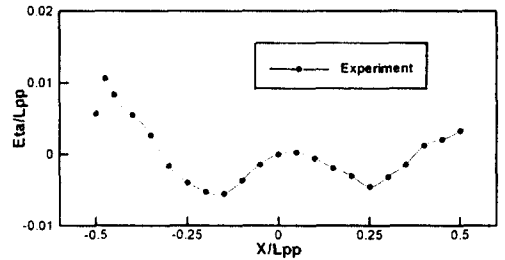


Fig. 10 Wave elevation along the KRISO 3600TEU container ship(KCS)

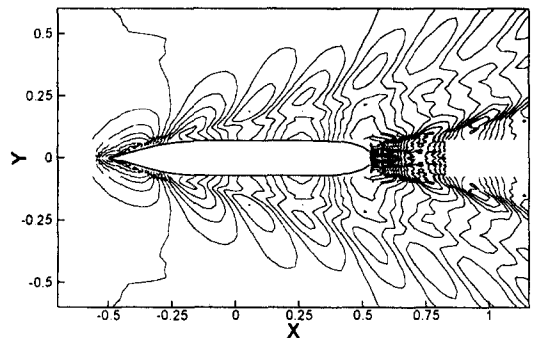
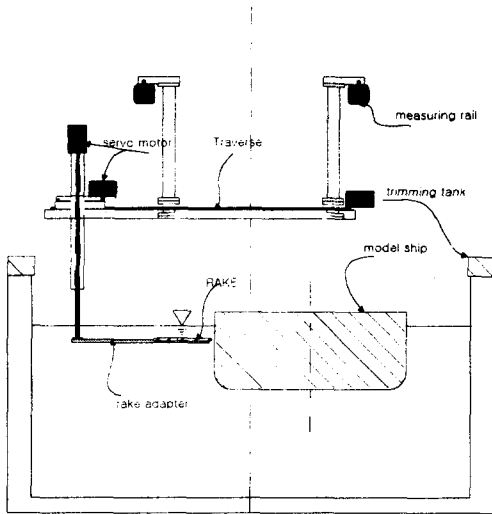


Fig. 11 Measured wave pattern around KRISO 3600TEU container ship at  $Fn=0.26$  (contour interval: 0.1% of  $Lpp$ )

### 3.4 국부 유속 계측 결과

국부 유속은 난류 경계층의 영향이 큰 선미부에 대해서 계측하였다. 선미부의 스테이션중 St.2, St.1, St.0.35, St.-0.5767, St.-2에서 계측을 수행하였고, 이중 St.0.35는 추진기면이다.

Traversing mechanism의 이송가능 범위의 제한으로 Fig. 12에서 보인 바와 같이 모형선을 예인 수조 중앙에서 우측으로 25~30cm 정도 옮겨서 고정시키고 좌현쪽을 계측하였으며, 계측 자료의 대칭성을 확인하기 위해 우현 쪽 4cm 까지를 계측 범위에 포함시켰다. 계측점을 가능한 한 선체에 접근시키기 위해서는 계측위치나 이송 장치의 이동 순서에 세심한 주의가 필요하다. 피토판



**Fig. 12** Layout of three-dimensional traversing mechanism for local velocity measurement

을 모형선 선체에 바짝 붙인 상태에서 모형선의 station marking을 기준으로 계측하고자하는 스테이션의 위치를 확인하고, 이로부터 1cm정도 떨어진 위치를 첫 계측점으로 선택하고 이송장치를 이용하여 바깥쪽으로 Pitot-tube rake를 움직이면서 계측하였다. Rake에 묶인 Pitot tube의 간격이 4cm이므로 1cm간격으로 3번 계측한 후에는 깊이 방향으로 이동시켜 계측하였다. 가능한 한 수면 가까운 깊이에서의 계측을 위하여 파형 계측 실험에서 구한 파고를 참조하여 St. -2, St. -0.5767, St. 0.35 (수면상승)은 2cm 깊이에서, St. 1, St. 2(수면강하)에서는 4cm 깊이를 시작점으로 하였다.

유속 계측 실험 준비를 마친 후 모형선을 떼어 내고 open-water 상태에서 Pitot tube만을 예인하여 캘리브레이션 값과 비교하고, 모든 시험이 끝난 후에도 open-water 상태에서의 값을 확인하였다. 5개의 Pitot tube 중에서 open-water 상태에서의 값이 캘리브레이션 값과 1% 정도 차이가 나는 경우가 있었으며 이 값을 보정하여 주었다. 한 위치에 대해서 50Hz의 Sampling rate로 6초간 계측하여 1회 예인시 3~4 위치의

자료를 구할 수 있었다. 한 스테이션의 속도장을 구하기 위해서는 모두 50~70번의 run이 필요하며 800~1000개의 피토투브 위치에서의 계측을 수행했다.

첫 계측 스테이션은 선미 트랜섬 끝단의 바로 뒤 3cm 지점의 수직면(St. -0.5767)으로 택해 모형선의 중앙선을 기준으로 삼을 수 있도록 하였고 자유수면을 이용해 깊이 방향의 원점으로 택하였다. 계측 스테이션을 옮길 때에는 미리 계산된 스테이션 간격만큼 traversing mechanism를 이동한 후 안쪽 Pitot tube를 모형선에 가까이 접근시켜 종방향 위치를 확인하고, 모형선과의 간격을 계측한 후 자유수면으로 이동하여 깊이방향 위치를 점검하여 traversing mechanism에서의 위치를 나타내는 값과 모형선 또는 수면과의 상대 위치를 이중으로 확인하였다.

Figs. 13~17에는 KCS에 대해서 각 단면에서의 축방향 속도 contour와 횡방향 속도 vector를 나타내었다. St. 2에서는 그 앞 쪽의 선체에서 형성된 경계층 내의 유동이 오목한 곡률을 갖는 부분으로 몰려 이 부분의 경계층이 두꺼워지며, 상대적으로 수선면 부근과 선저쪽에는 경계층이 얇은 것을 알 수 있다. St. 1에서는 선미 밸브의 위쪽 단면이 급속히 줄어들어 이 부분에 두꺼운 경계층이 형성됨을 알 수 있다. 또한 선미 밸브의 위쪽의 선체에 가까운 부근에서는 약하지만 아래 방향으로의 속도 성분이 관측되고 바깥쪽에는 위를 향하는 속도 성분이 관측되고 있다. 이러한 횡방향 속도 성분의 분포가 추진기면에서 중심선 위쪽의 bilge vortex의 형성에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 St. -0.5767에서 더욱 두드러져서 확인한 vortex의 형성을 보여주고 있는데, 이는 St. 0.35보다 St. -0.5767에서 vortex roll-up 과정이 훨씬 많이 진행되었다는 것을 말해주고 있다. St. -2에서는 그러한 vortex 유동이 많이 약해지며 통상의 반류 형태를 보이고 있다. 본 연구에서 계측한 컨테이너 선의 경우에는 bilge vortex의 강도가 비대선에 비해 상대적으로 약한데, 이는 선체 중앙과 선미부에 이르는 형상이 매우 날씬하여 횡방향의 속도 성분이 작고,



경계층내의 유동도 선체의 종방향을 잘 따르고 있기 때문이다.

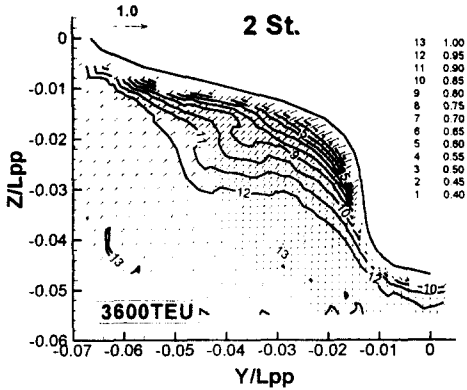


Fig. 13 Velocity field at St. 2

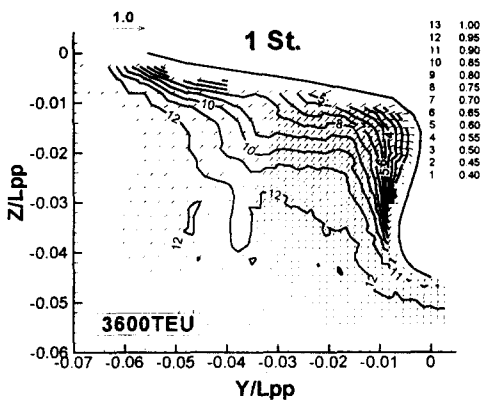


Fig. 14 Velocity field at St. 1

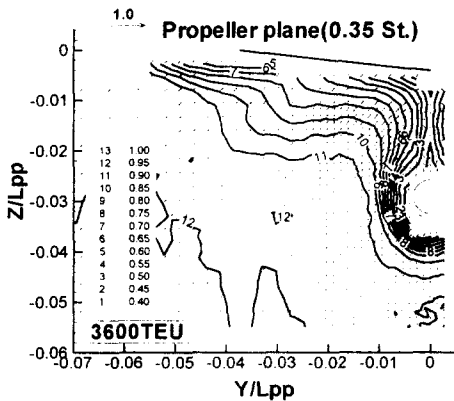


Fig. 15 Velocity field at St. 0.35

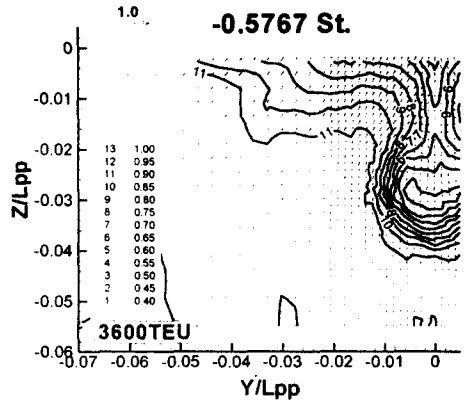


Fig. 16 Velocity field at St. -0.5767

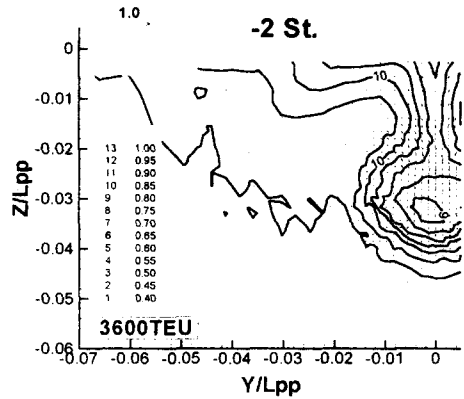


Fig. 17 Velocity field at St. -2

### 3.5 불확실성 해석

지금까지 기술한 국부유동 계측결과와의 오차를 확인하기 위해 Coleman과 Steele[3]의 방법에 따라 불확실성 해석을 수행하였다. 선측 파형의 경우에는 망원경으로 읽었거나 사진을 찍어서 판독하였기 때문에 계측 오차의 대부분이 사람의 눈에 의한 것이라고 볼 수 있다. 본 연구에서 세 사람이 각각 망원경, 사진, 디지털 비디오카메라 등을 이용하여 계측한 선측 파형은 선수 끝단을 제외하고는 대부분 1mm내외의 오차를 보여주었다. 종단선상의 파형은 시간에 따른 파형이 모두 계측값인 관계로 precision 오차는 계산하지 않았고, 파고계와 증폭기의 비선형성, 파고계의 위치,

trigger signal의 위치 등에서 기인하는 bias 오차는 0.5mm이내 인 것으로 생각된다.

선미 유동장 계측에서의 오차는 precision 오차와 bias 오차를 모두 고려하였는데, bias 오차의 원인으로는 압력 변환기와 신호 증폭기의 자체의 오차와 비선형성, A/D 변환기, 모형선의 제작 정도, 수온, 예인 전차의 속도, 피토판의 위치 등에서 기인하는 오차를 생각할 수 있다. 하지만 이러한 실험에서 오차의 대부분을 차지하는 precision 오차는 계측 위치에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었다. 각 피토판의 대표적인 위치에서의 raw data를 바탕으로 산정한 결과, 선체 표면 근처의 경계층 내부에서는 95% 신뢰 구간에서 0.8%, 경계층 외부에서는 0.3%, 그리고 선미 벌브나 트랜섬 선미 뒤의 vortex가 존재하는 영역에서는 1.2%에 이르는 것으로 산정되었다.

#### 4. 결 언

선체 주위와 자유표면의 복잡한 유동현상을 올바르게 이해하기 위해서는 국부적인 유동 자료의 확보가 필요하다. 또한 최근에 급격히 발전하고 있는 수치해석 결과의 검증을 위해서도 이러한 자료의 필요성이 더욱 더 강조되고 있다. 본 논문에서는 KRISO의 예인수조에서 국부유동의 계측을 위해 구축된 계측 장비 및 해석 기법을 소개하였다. 그리고 구축된 계측 시스템을 이용하여 KRISO 3600TEU 컨테이너선 주위의 파형 및 국부 유속을 계측하였다. 이러한 계측 결과를 통하여 조파 현상을 포함한 선체 주위의 난류 유동장을 이해 할 수 있을 뿐만 아니라, 이러한 정보를 새로운 선형의 설계에 이용할 수 있다. 이러한 연구는 시간과 노력이 많이 소요되지만, 그 결과의 중요도는 매우 크다고 할 수 있다.

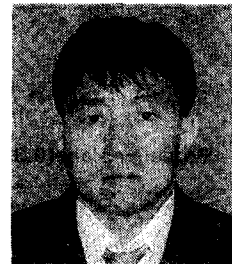
#### 후 기

본 논문은 산업자원부에서 지원한 공업기반 기술 개발사업인 '선박의 저항성능 향상 기술'의 결과[4]의 일부이며, 산업자원부와 한국산업기술평

가원 관계자에게 사의를 포함합니다. 또한 계측장비 구성 및 실험에 도움을 주신 KRISO의 수조운용팀 여러분께도 감사드립니다. 그리고 KRISO 3600TEU 컨테이너선(KCS)의 선형, 저항 및 저항 자료, 그리고 파형, 속도장 등의 국부유동 계측 자료는 <http://hyperteam.kriso.re.kr>에 공개되어있음을 알려드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김우전, 김도현, 반석호, "선체 주위의 유동해석을 위한 수치계산과 검증 실험자료에 관한 연구," 선박해양기술, 제 26호, 1998. 6.
- [2] 김우전, 김도현, 윤현세, 문덕용, 반석호, "난류 계측용 5공 피토판의 캘리브레이션 방법에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 34권 2호, 1997.
- [3] Coleman, H.W., Steel, W.G., *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, A Wiley-Interscience Publications, 1989.
- [4] 반석호 외, 선박의 저항성능 향상 기술(최종 보고서), 산업자원부, 1998, 11.



저자<반석호>