



# 선형설계와 수치계산기법 응용

강 국 진\*

## Hull Form Design and Application of CFD Techniques

K. J. Kang

Computational methods can be classified roughly into two parts: one is the methods based on a potential flow theory, and the other is numerical solvers(CFD) based on Navier-Stokes equation. Methods based on a potential theory are more effective than CFD when the free surface effect is considered. Especially Rankine source method seems to become widespread for simulations of wave making problems. For computations of viscous flow problems, CFD techniques have rapidly been developed and have shown many successful results in the viscous flow calculation. Present paper introduces a computational system "WAVIS" which includes a pre-processor, potential and viscous flow solvers and a post-processor. To validate the system, the calculated results for modern commercial hull forms are compared with measurements. It is found that the results from the system are in good agreement with the experimental data, illustrating the accuracy of the numerical methods employed for WAVIS.

**Key Words:** 선형(Hull Form), 파도(Wave), 반류(Wake), 전산유체역학(CFD), 포텐셜유동(Potential Flow), 점성유동(Viscous Flow)

### 1. 서 론

선박의 유체역학적 성능은 크게 저항, 추진, 운동, 조종성능으로 나뉘어지며, 이러한 성능이 선주의 요구조건에 적합하도록 선형(船型)이 설계되어야 한다. 이 가운데 운동성능과 조종성능은 선박의 주요제원(배수량, 길이, 폭, 흘수), 수선면적과 타(舵)의 형상 등이 정해짐에 따라 거의 결정되어진다고 볼 수 있다. 따라서 설계자들은 일단 선박의 주요제원이 결정되면 저항이 적고 추진효율이 좋은 선형, 그리고 이 선형에 적합하고 효율이 좋은 추진기를 설계하는 것에

많은 노력을 기울인다.

선박의 저항은 크게 유체의 점성에 기인하는 마찰저항과 형상저항, 그리고 자유표면의 존재로 인해 발생하는 조파저항 성분으로 나눌 수 있다.

새로운 선박을 설계할 때, 이러한 저항성분들이 작도록 선형을 잘 설계하는 것은 매우 중요하며, 이를 위해서 선체주위의 유동특성과 저항성능을 추정하는 과정이 필요하다. 현재까지는 예인수조에서 모형시험으로 실선의 저항 특성을 추정하는 방법이 주로 사용되어 왔으나, 시간과 경비가 많이 소요되는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 전산 유체역학(CFD)의 기법을 이용한 소위 '수치수

\* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학센터

조(numerical towing tank)'가 대안으로 제시되고 있다. 이러한 수치계산 시스템은 주어진 선형의 유동현상과 저항특성을 적은 비용으로 단기간에 예측할 수 있도록 해주기 때문에, 초기 설계 단계에서 여러 가지 선형을 검토하여 우수한 선형을 선택할 수 있도록 도와주는 매우 유용한 도구가 된다. 또한 수치 계산으로부터 구해지는 많은 자료는 선체주위의 유동 현상을 파악하는데 큰 도움을 줄 수 있다는 장점이 있다. 단점으로는 실험의 정확도에 아직은 미치지 못하고 있다는 것이다.

선박해양공학연구소에서는 최근에 이러한 수치수조의 기본단계로서 종합적인 선형 평가용 수치계산 시스템 WAVIS (WAVE and VIScous flow analysis program for hull form evaluation)을 개발하였다.[1] 이 시스템은 포텐셜 및 점성유동의 수치계산 기능을 가지고 있으며, 사용자 편의를 고려하여 전·후 처리 기능(pre- and post- processor)을 갖추고 있다.

본 논문에서는 WAVIS에 대하여 간략히 소개하고, 몇가지 적용예를 보이고자 한다.

## 2. 선형 평가용 수치계산 시스템(WAVIS)

### 2.1 선형 정의 및 수치 격자계[2]

수치계산을 통하여 선형의 유체동력학적인 특성을 평가하기 위해서는 선형자료로부터 선형을 정의하고, 이를 바탕으로 선체표면 격자계와 3차원 공간 격자계를 구성하는 전처리 작업이 필요하다.

선박의 윗선이 주어지면 먼저 선형을 정의하고 그로부터 선체표면 격자계를 생성한다. 3차원 곡선을 표현하기 위해 구간 적분 직선거리를 매개변수로 하는 불균일 파라미터화를 사용한다. 위치가 주어진 점들을 이용하여 그 사이를 삼간하기 위해서는 구간별 허미트 삼간법 중에서 삼간 조건으로 구간의 양쪽 끝의 위치와 기울기만을 사용하는 Ferguson 기본벡터를 이용한다.

각 스테이션마다 주어진 윗선을 판별하여, 특이적인 경우에는 그 점에 기울기 지정을 위한 정수를 부여하였고, 하나의 곡선으로 표현하기 힘든 복잡한 선형을 표현할 수 있도록 한다. 각 스테이션에서의 모양이 정의되면 지정된 연직위치에서의 수선을 구하게 되는데, 선수부와 선미부의 곡률 변화가 심한 곳에서는 수선의 끝단 처리를 위해 미리 수학적으로 정의된 곡선의 형태를 이용한다. 이렇게 수선의 모양이 결정되면 선수부와 선미부에 많은 새로운 스테이션 윗선이 구해질 수 있고, 자세히 정의된 선수와 선미부의 형태를 그대로 이용하는 윗곡선 맞춤 격자계를 얻을 수 있다. Fig. 1에는 선수부와 선미부에 생성된 조밀한 스테이션에서의 선체표면 정의점들을 보이고 있다.

개발된 선체 표면 격자계 생성 프로그램에서는 선미선, 선수선, 바닥 중심선, 그리고 설계수선으로 이루어지는 네 개의 경계선 안에 정해진 개수의 격자가 주어진 분포 함수에 따라 배치된다. 이러한 방법은 선체를 하나의 균일한 간격의 직사각형으로 변환할 수 있게 하여 유동 해석용 프로그램을 단순화하고, 그 정확도를 유지할 수 있게 한다. 특히 선체 표면 근처의 경계층과 선미 반류를 해석하기 위해 점성 유동을 계산할 때, 벽면 근처에서 생기는 복잡한 현상

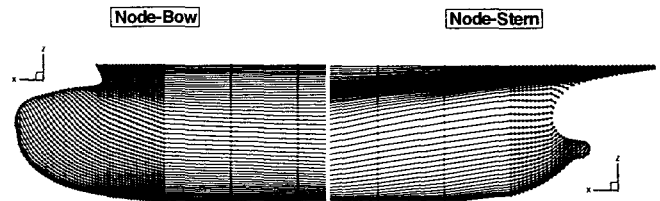


Fig. 1 Transverse node distribution

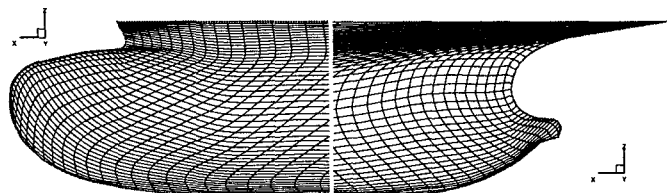


Fig. 2 Surface mesh for a container ship

을 정확히 재현하기 위해서는 필수적인 격자 구조라고 할 수 있겠다. 또한 이러한 하나의 블록으로 구성된 선체표면 격자계는 비선형 자유수면 조건을 사용한 포텐셜 유동 계산에서 선측파형의 변화에 따른 선체표면 격자의 변환을 용이하게 한다. Fig. 2에는 컨테이너선의 유동 계산을 위한 선체 표면 격자계를 보이고 있다.

이미 주어진 선체 표면 격자계를 이용하여, 선체 주위의 난류 유동 계산에 쓰일 수 있는 3차원 공간 격자계를 대수학적인 방법과 타원형 편미분 방정식의 해를 통해 구하는 방법을 개발하였다. 대수학적인 방법으로는 가장 널리 쓰이고 있는 Transfinite 삼각법을 이용하였는데, 각 경계면에서의 격자 길이비를 공간격자계의 내부에서도 동일하게 유지할 수 있도록 배치함수를 도입하였다. 그리고 Poisson 방정식의 해를 이용하여 공간 격자계를 구하였는데, 격자계 조절함수를 이용하여 선체 표면에서의 격자 간격과 교차 각도를 정의할 수 있게 하였다. 특히 위의 두 방법을 혼용하여 각 방법의 단점을 극복하고, 한 방법만으로는 표현하기 힘들었던 실용적인 선체 주위의 난류 계산용 격자계 구성방법을 개발함으로써 실용적인 상선의 점성저항 추정이나 반류 분포 예측에 쉽게 이용되도록 하였다.

Fig. 3에는 대형 유조선주위의 점성유동 계산을 위해 생성된 격자계의 일부를 보인다. 종래의 일정한 단면에서 생성된 격자계와는 달리 선체를 하나의 블록으로 하고, 선수 및 선미의 형태를 따르는 O-O형의 기하학적인 특징을 가지는 3차원 격자계를 생성하였다. 이를 통해 난류 모형과 벽함수 등을 이용하여, 경계층내의 유동을 추정할 때 필요한 선체 표면으로부터의 거리를 정확하게 정의할 수 있게 하였다.

2.2 포텐셜 유동 해석

최근 들어 조파저항 문제를 점성에 대한 고려를 통해 풀려는 시도가 있긴 하나, 아직도 조파저항 문제는 점성을 고려하지 않은 포텐셜 유

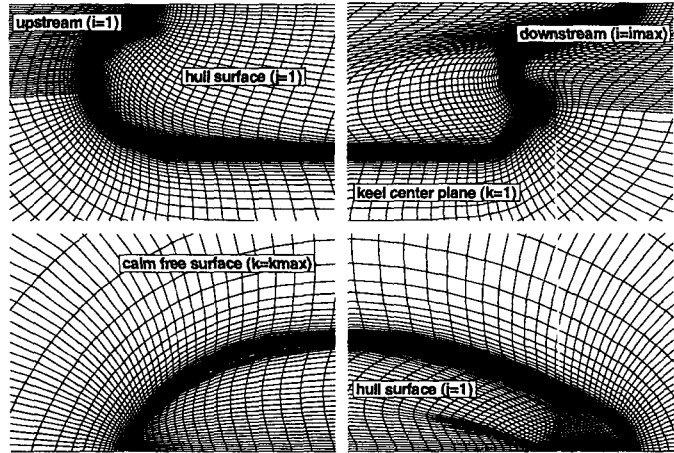


Fig. 3 Field grid arrangement for a 300K VLCC

동을 가정하여 푸는 경우가 보통이다. 배의 조파저항 문제에는 여러 가지 수치해석 방법이 사용될 수 있으나 현재 주류를 이루고 있는 것이 Rankine source법이다.

Rankine source법에서 조파저항 문제를 다룰 때에는 유수면 조건식의 처리가 매우 중요한데, 최근의 연구 동향은 주로 비선형 자유수면 조건식을 만족시키는 비선형 해를 구하는데 그 초점이 맞추어져 있다.[3] 이를 이용한 실용 컨테이너선에 대한 비선형 계산 결과를 Fig 4에 보인다.[4] 선형해에서는 잘 모사되지 않았던 발산파가 실험과 거의 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 아직까지도 실제 선형설계 단계에서 비선형해를 이용하는 데에는 여러 가

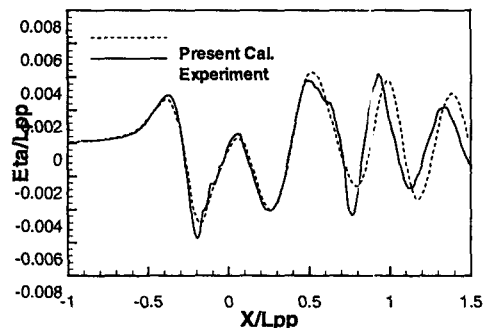


Fig. 4 Comparison of wave profiles along a longitudinal cut at  $Y/L_{pp} = 0.1024$

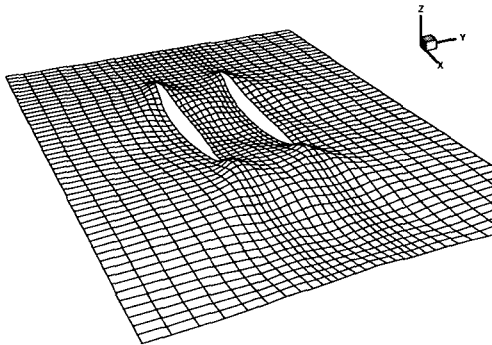


Fig. 5 Wigley catamaran with separation length of  $0.4L_{pp}$  ( $Fn=0.4$ )

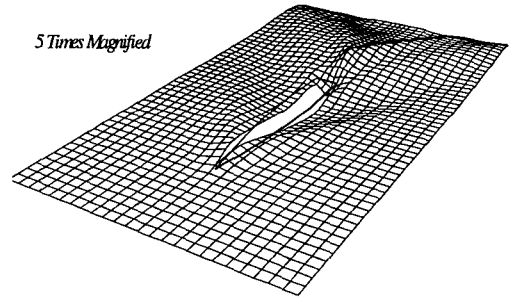


Fig. 6 Wave pattern of athena hull (including the trim & sinkage effects)

지 어려움이 있어 선형해가 종종 사용되고 있는 실정이다. 그러나 그 계산결과의 해석에 주의를 기울여야 하고 선형화의 한계를 명확히 인지하고 있어야 한다.

다음에는 포텐셜 유동 계산 프로그램이 실제의 다양한 선형 개발 및 최적화에 사용된 예를 보인다. 우선 Fig. 5는 catamaran 선형의  $Fn = 0.4$ 에서의 파계를 보여주고 있고, 이 계산을 통해서 두 선체 사이에서 작용하는 파계의 상호작용을 이해할 수 있다. 그리고 Fig. 6에서는 트림과 침하를 고려한 트랜섬 선미를 가지는 고속선의 하나인 Athena선형의  $Fn = 0.48$ 에서의 파계를 보이고 있다. 적절한 트랜섬 모델링을 통하여 복잡한 선미 파계의 추정이 가능하였다. 현재 대부분의 선박이 트랜섬 선미형태를 채택하고 있기 때문에 트랜섬 선미 처리 기법에 대한 보다 많은 연구가 요구되고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 패널법을 이용한 포텐셜 유동 계산 프로그램은 실제의 다양한 선형에 적용이 가능하며 선형의 조파저항 추정뿐만 아니라 선형 최적화에도 쉽게 적용될 수 있는 매우 유용한 수단임을 알 수 있다.

### 2.3 점성유동 해석

선체 주위의 난류유동을 해석하여 표면 마찰저항과 형상저항 등을 계산하고 추진기 면에서의 반류를 예측하기 위해서는, 통상적으로 난류유동의 지배방정식인 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS)방정식을 풀어야한다. 이

때, 난류유동에 의한 응력항을 모델링하여 사용하게 되는데, 이러한 난류모형 중 흔히 공학적으로 사용되고 있는 대표적인 것으로는 Baldwin-Lomax model과 같은 대수학적인 모형과  $k-\epsilon$  model과 같은 2-방정식 모형 등을 들 수 있다. 또 RANS방정식의 해를 수치계산을 통하여 구하기 위해서 방정식을 이산화하여야 하는데, 현재 널리 사용되고 있는 방법으로는 유한 차분법, 유한 요소법, 그리고 유한 체적법 등을 들 수 있다. 특별한 경우를 제외하고 물은 비압축성 유체로 취급되므로 질량보존 법칙(연속 방정식)을 만족하여야만 한다. 따라서 운동량 보존법칙을 만족하는 속도장이 연속 방정식에 만족되도록 압력장을 결정하는 방법이 쓰이고 있다.

점성저항을 계산하기 위해서는 우선 경계층 및 반류에서의 속도와 압력분포를 구하여 선박의 진행방향에 대한 선체표면 적분을 시도하면 된다. 이때 계산 결과에 가장 많은 영향을 미치는 것이 난류 모형이라고 할 수 있다. 특히 점성유동 계산의 결과로 제공되는 추진기 면에서의 공칭 반류는 선박의 추진 성능을 결정하고 추진기의 캐비테이션 및 소음 특성에 지대한 영향을 줄 수 있으므로 효과적인 프로펠러 설계를 위해서 매우 중요한 정보이다. 이러한 선미 경계층과 반류의 올바른 예측을 위해서는 빌지 보텍스의 위치와 크기를 올바르게 계산해야 하는데, 채용된 난류 모형에 따라 계산 결과가 많이 달라짐을 볼 수 있다.

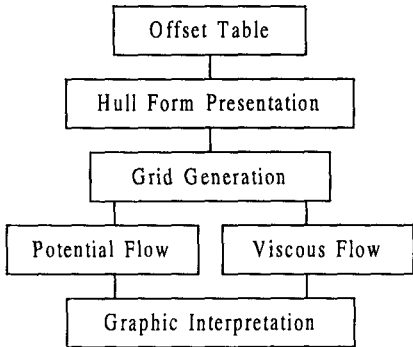


Fig. 7 Schematics of WAVIS

WAVIS에서는 선체주위의 난류장 계산을 위해서, RANS방정식을 푸는데 semi-implicit finite-volume 방법을, 난류모델로는 realizable k-epsilon 그리고 벽가까이에서는 벽함수를 사용하였다. 대류항의 이산화에는 QUICK법, 확산항에는 2차 중앙 차분이 각각 이용되었다. 압력장과 속도장을 푸는데는 SIMPLEC가 이용되었으며, 정규격자계를 사용함에 따라서 발생하는 압력의 진동현상을 방지하기 위해서 인공적인 압력확산항을 첨가하였다. 그리고 초기의 급격한 가속으로 인한 해의 발산현상을 방지하기 위하여 이중모형에 대한 포텐셜 해로부터 구한 속도와 압력을 초기조건으로 사용하였다.

2.4 수치계산 시스템(WAVIS)의 구성

지금까지의 수치계산 시스템을 하나의 통합 환경에 구현하여 사용의 편의성을 도모하기 위해서 Fig. 7과 같은 종합적인 선형 평가용 수치계산 시스템 WAVIS를 개발하였다.

공학용 워크스테이션뿐만 아니라 일반 개인용 컴퓨터에서 작동하는 launcher 프로그램으로 선형의 윤셋이 주어지면, 일관 작업을 통하여 선형 정의, 선체표면 격자계 생성, 공간 격자계 구성, 포텐셜유동 계산, 점성유동 계산, 결과해석 등이 이루어지도록 하였다. 이러한 WAVIS의 개발에 힘입어 보다 나은 선형의 개발이 저렴한 비용과 짧은 시간에 가능하게 되었다. 더불어 전방 수입에 의존하던 선형 개발 프로그램의 국내 개발 및 배포를 이룰 수 있게 되었다.

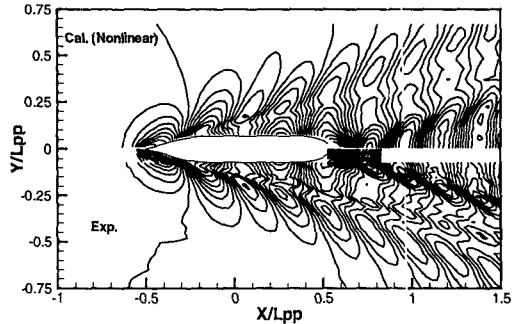


Fig. 8 Comparison of calculated wave pattern for a container ship (Fn=0.26)

3. 수치계산 시스템(WAVIS)의 응용에

개발된 WAVIS의 실용성과 정확도를 검증하기 위해 대표적인 계산예를 보이고자 한다.

우선 포텐셜 유동 계산의 예로서 비선형 자유수면 경계조건을 사용하여 계산한 3,600TEU 컨테이너선 주위의 파형을 실험과 비교하여 Fig. 8에 보인다.[4] 그리고, 삼동선에 대한 계산 결과를 Fig. 9에 보인다.

다음으로 30만톤급 대형 유조선 주위의 점성 유동 계산을 통해 얻어진 추진기 단면에서의 속도 분포를 비교하여 Fig. 9에 보인다.[5]

상기 결과 모두 실험과의 좋은 일치치를 보이고 있다. 이러한 일반 상선의 선형 평가를 위해 개발된 시스템의 계산 결과들은, 수치계산이 실제의 모형시험을 대신하는 이른바 '수치수조(numerical towing tank)'의 가능성을 보여주고 있다.

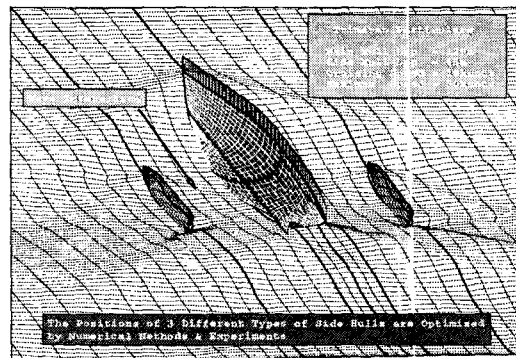


Fig. 9 Calculated wave pattern for a trimaran

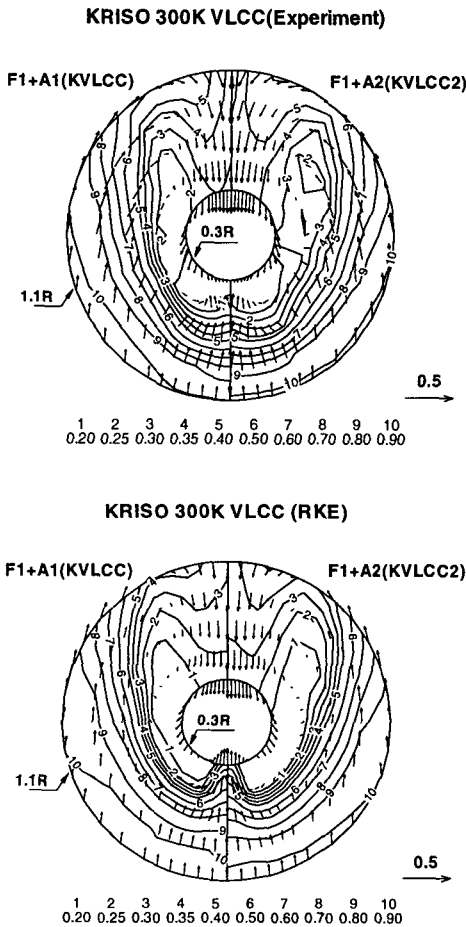


Fig. 10 Wake distribution at propeller plane of KVLC and KVLC2 (top: Exp., bottom: Cal.)

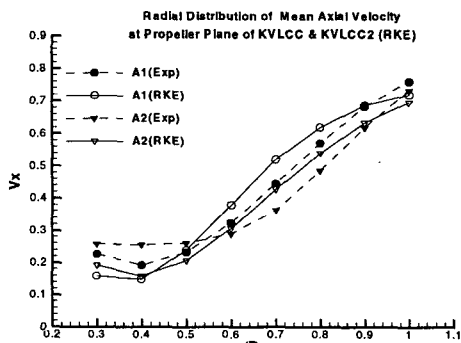


Fig. 11 Comparison of axial velocity distribution of KVLC and KVLC2 at the propeller plane

#### 4. 결 론

- (1) 선형(船型) 설계시에 선형의 저항성능 평가와 유동장의 정보를 쉽게 구할 수 있는 계산 시스템(WAVIS)의 개발에 대하여 소개를 하였다.
- (2) 개발된 계산 시스템(WAVIS)의 유효성을 평가하기 위하여 실제 선박에 대한 모형시험 결과로부터 파형과 반류를 비교를 하였으며, 좋은 일치를 얻었다.
- (3) 앞으로 선형개발시에 설계자들에게 유용한 계산시스템으로 잘 활용될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] Kim, W.J. et al., "A computational study on turbulent flow around a practical hull form with efficient grid generator," Proc. of The 3rd Osaka Colloquium on advanced CFD application to ship flow and hull form design. Osaka, Japan, 1998.
- [2] Kim, W.J., Kim, D.H., Van, S.H., "Development of 3-D field grid generating method for viscous flow calculation around a practical hull form," Journal of Society of Naval Architecture of Korea, Vol.36, No.1, pp. 70-81, 1999.
- [3] Raven, H.C., "A practical nonlinear method for calculating ship wave making and wave resistance," Proc. of the 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, 1992.
- [4] Kim, D.H., Kim, W.J., Van, S.H., Kim, H., "Calculation of potential flow around modern commercial ships using nonlinear free surface condition," Proc. of the 3rd International Conference on Hydrodynamics (ICH), Seoul, 1998.
- [5] Van, S.H. et al., "Experimental study on the flow characteristics around VLCC with different stern shapes," Proc. of the 3rd International Conference on Hydrodynamics(ICH), Seoul, Korea, 1998.