

점성유동 해석을 통한 Roll Damping 연구

홍춘범* · 부경태* · 홍삼권* · 이동연*

*삼성중공업(주) 조선해양연구소

A Study on Roll Damping by Numerical Analysis of Viscous Flow

CHUN-BEOM HONG*, KYUNG-TAE BOO*, SAM-KWAN HONG* AND DONG-YEON LEE*

*Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co. Ltd

KEY WORDS: 횡동요, 3 자유도 운동, 감쇠 계수, 점성유동해석

ABSTRACT: A Numerical analysis method is developed in order to compute the flow and wave field for 2-dimensional floating body in the free roll motion with 3 degrees of freedom. Navier-Stokes and continuity equations are governing equations in the present study. Finite Difference method is introduced to discretize the governing equation. The free surface is traced by the interface tracking method and the grid system is fitted to boundaries including free surface and body surface, which is moving in the flow field. The numerical scheme is based on Marker and Cell method. For the sake of validation of the numerical method, the computed roll decay factors according to the midship section shapes are compared with measured results. The numerical results are discussed in order to understand the effect of midship section shape on roll motion.

1. 서 론

FPSO, FSRU, FSO 등 많은 유전개발 관련 특수선들은 보통 20년 내지 30년 동안 고정되어 운용 되므로 투입해역까지 이동 후에는 속도 성능이나 조종 성능은 보다 주로 운동 성능이 주요 성능 인자로 작용한다. 운동 성능의 평가 결과를 토대로 계류계와 topside 부분을 설계가 수행되고 선체 설계도 이를 토대로 이루어지고 있다. 합리적인 선박의 설계를 위해서 운동 성능의 정확한 평가는 필수적이다. 이러한 운동 성능의 평가는 주로 실험과 수치 해석을 통해서 이루어지고 있으며, 실험을 통해서 결과를 얻기까지 많은 시간이 소요되기 때문에 운동 해석을 위한 수치 해석도 병행하는 것이 일반적이다. 운동 해석을 위한 수치 해석 코드는 diffraction에 기초한 3차원 패널법을 사용하고 있다. 이는 포텐셜을 기초로 사용되어지고 있기 때문에 점성 영향이 강한 경우 그 영향을 나타내지 못하는 단점을 갖고 있다. 이를 개선하기 위해서, 점성 영향이 강한 횡동요 운동의 경우 여러가지의 경험식을 사용하여 이를 보완하고 있다. 그러나 경험식을 사용할 경우 특수한 경우에

대한 결과의 정도가 떨어지는 것이 사실이기 때문에 경험식의 이용을 대체하기 위한 다른 방법이 요구되어진다.

CFD(전산유체역학)를 이용하여 부유체의 운동 성능을 해석하는 사례가 많아지고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 횡동요 문제에 대해서는 점성의 영향을 무시하기 어려우므로 CFD의 적용이 필요한 연구 분야이다. 특히 bilge keel과 같은 부가물이 부착된 선박의 경우 bilge keel에 의한 횡동요 감쇠가 커지는 현상의 원인은 점성효과에 의하여 발생된 eddy에 의한 것이라고 이미 잘 알려져 있다. 이러한 분야에 대한 연구는 최근 들어 활발하게 진행 중이다. Korpus (1997) 등은 potential theory와 점성 유동 해석을 비교하여 potential theory에 의한 계산 결과가 phase의 크기와 가속력을 과대 추정하고 있고 bilge keel의 harmonic 효과를 고려하기 어렵다는 것을 보여주었고 점성 유동 해석을 이용하여 횡동요 감쇠를 추정하고자 하였다. 그러나 자유 수면을 고려하지 않아 자유 수면의 효과는 알 수 없었다. 이에 반하여 Sarkar (2000) 등은 VOF를 이용하여 자유 수면의 영향도 고려한 바가 있다. 자유 수면에서 쇄파 현상 등이 발생하는 경우 VOF 또는 Level set법 등의 적용이 장점을 가지고 있으나, 일반적인 선박의 roll 운동에서는 복잡한 자유 수면 현상이 발생되지 않아 interface tracking method를 이용하여도 좋은 결과를 보여줄 수 있다. 또한 그들의 연구에서는 단순 사각형의 물체에 대한 강제 동요 시 수치 계산을 수행하여 기본적인

제1저자 홍춘범 연락처: 대전광역시 유성구 문자동 103-28

042-865-4782 cb.hong@samsung.com

인 연구로서 좋은 예를 보여주었으나 조선소에서 현실적으로 적용하기에는 대상 모형이 적합하지 않았다.

본 연구에서는 중앙 단면의 형상에 따른 횡동요 감쇠를 해석하기 위하여 수치 해석법을 개발하였다. 계산 모형으로 일반적인 FPSO의 중앙 횡단면이 선택되었고 bilge keel의 부착 유무 및 그 길이가 횡동요 감쇠에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 자유 수면의 처리는 interface tracking method를 사용하여 계산 시간을 절감하였다. 모형 시험과 보다 유사한 조건으로 계산하기 위하여 3 자유도 문제로 정식화 하였으며 격자계는 경계 적합 좌표계를 사용하여 계산의 효율을 높였다. 계산된 결과는 수조 시험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였고 자유수면, 마찰력 및 압력이 횡동요 감쇠에 미치는 영향에 대하여 서술하였다.

2. 문제의 정식화

2.1 초기 조건 및 경계조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 초기 조건을 보여 준다. 초기에 정수 중에 선박이 초기 횡동요 각도를 유지하고 있다. 자유수면의 형상은 interface tracking method를 이용하여 구하였으며 자유수면 경계조건은 식(1, 2)에 나타내었다. 선체 표면 조건은 no-slip 조건을 사용하였으며 원방경계는 압력에 대해서는 정수압 조건을 속도에 대해서는 zero-gradient 조건을 사용하였다.

$$p' = p_{air} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = w - u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2)$$

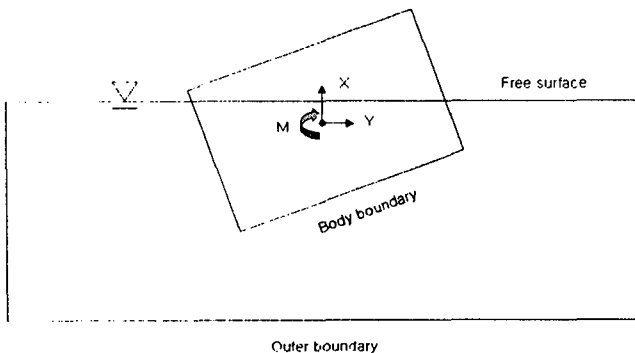


Fig. 1 Schematic of the free-rolling system

2.2 지배방정식 및 수치해석법

Fig. 1의 X, Y는 각각 x 및 y 방향의 합력을 나타내고 M은 무게 중심을 축으로 회전하는 모멘트이다. 합력 및 모멘트는 선체에 작용하는 압력 및 전단력과 선체의 중량의 합에 의해 평형을 이루며 이때 발생하는 각각속도와 가속도는 다음 시간 단계에서의 선체의 이동거리 (sway, heave) 및 회전 각도 (roll)를 정해준다. 모멘트에 의한 회전은 무게중심을 축으로 회전하는 것으로 가정하였다. 운동 방정식의 유체력을 구하기 위하여 2차원 비압축성 Navier-Stokes방정식 및 연속 방정식을 지배 방

정식으로 도입하였고 식(3, 4)에 나타내었다.

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (4)$$

지배 방정식은 유한 차분법에 의하여 차분화하고, 계산 algorithm은 Marker and Cell method를 도입하였다. 식(3)의 대류항은 3차 풍상 차분법 (Kawamura and Kuwahara, 1987), 그 외의 공간 미분항은 2차 중심 차분법을 사용하였다. 그리고 전진 차분법을 이용하여 시간에 대한 미분항을 표현하였다.

2.3 격자계 구성 및 이동 방법

본 연구에서 사용된 격자계는 격자 간격의 완만한 변화와 경계에서의 직교성 그리고 물체면의 집중성을 보장하기 위하여 타원형 편미분방정식을 이용하여 생성되었다. 격자 조절할 수는 초기치 설정이후 운동 방정식을 만족하는 선체 이동 및 자유 수면의 변동에 맞추어 필요에 따라 반복적으로 수정하는 방법을 사용하였다 (Hilgenstock, 1998). Figs. 2 ~ 3는 횡동요각에 따라 생성된 격자계를 보여주고 있고 Fig. 4는 bilge keel 부근의 격자계를 보여주고 있으며 앞에서 언급한 직교성과 집중성이 잘 유지되고 있다.

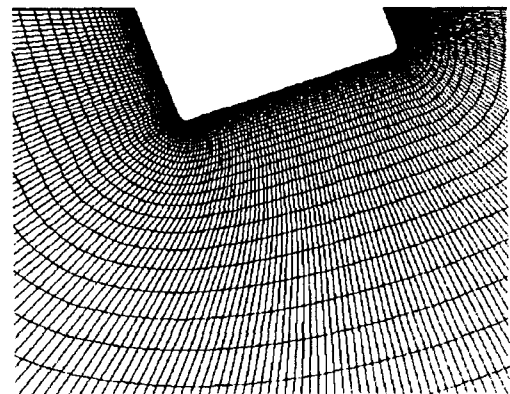


Fig. 2 Grid system (roll angle = 20°)

3. 수치계산법 검증

수치 계산법에 대한 검증을 위하여 Fig. 2에 나타내는 일반적인 중앙 횡단면에 대한 수치해석을 수행하였다. 격자 및 시간 간격의 의존성을 확인하였고 그 결과는 Table. 1에 나타내었다. 실선의 1/60인 모형시험과 계산 조건을 동일하게 주었다. 여기서 T는 주기를 ζ는 decay factor를 나타내고 있고, $T_{(\Delta y_2, \Delta t_2)}$ 와 $\zeta_{(\Delta y_2, \Delta t_2)}$ 는 각각 격자크기가 Δy_2 이고 시간간격이 Δt_2 인 경우의 주기 및 decay factor이다. $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$ 는 각각 5, 1, 0.5mm이고 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ 는 각각 0.005, 0.001, 0.0001초이다.

4. 모형시험

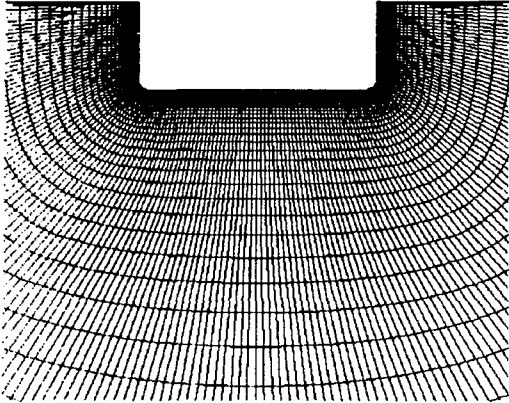


Fig. 3 Grid system (roll angle = 0°)

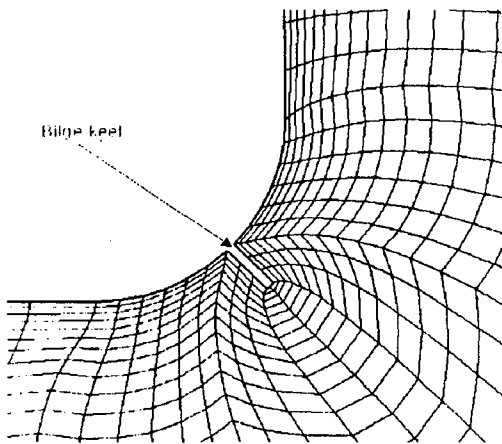


Fig. 4 Grid system around bilge keel

Table 1 Comparison of period and decay factor according to the size of grid and time increment

	$\Delta y_1, \Delta t_2$	$\Delta y_2, \Delta t_2$	$\Delta y_3, \Delta t_2$	$\Delta y_2, \Delta t_1$	$\Delta y_2, \Delta t_3$
$T/T_{(v2, \Delta t_2)}$	1.02	1.0	0.99	1.02	1.0
$\zeta/\zeta_{(v2, \Delta t_2)}$	1.2	1.0	0.99	1.01	1.0

Table 1에서 볼 수 있듯이 주기는 격자의 크기나 시간 간격에 대하여 민감하지 않으나 감쇠 계수는 격자 크기에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 난류 모형을 도입하지 않았으므로 모형 시험과는 정량적으로 차이가 있을 수 있으나 2차원 자유 횡동요 감쇠에 대한 모형 시험의 어려움으로 정량적 비교는 수행하지 않았다. 격자 크기 및 시간 간격 크기의 의존성을 확인하여 격자 크기는 1mm, 시간 간격의 크기는 0.001초를 수치 해석법의 적용에서 표준 격자 및 시간 간격으로 사용하였다.

Calm water에서 자유 감쇠 실험은 SSMB(Samsung Ship Model Basin)에서 수행되었다. 자유 감쇠 실험의 목적은 주어진 하중 조건에서 실험 대상 선박의 고유 주기와 횡동요 감쇠 계수를 파악하는 것이다. Fig. 5는 접촉식 6자유도 계측 장비가 설치된 실험의 setup 사진이다. Fig. 6은 calm water에서의 자유 감쇠 실험 사진이다. 3가지 중앙 횡단면 형상에 대하여 모형 시험을 수행 하였다. Fig. 7은 중앙 횡단면 및 bilge keel의 형상을 나타내고 있다. 선폭은 46m, 흘수는 18.18m이고 bilge keel의 길이는 작은 것은 0.4m 큰 것은 0.6m이다.

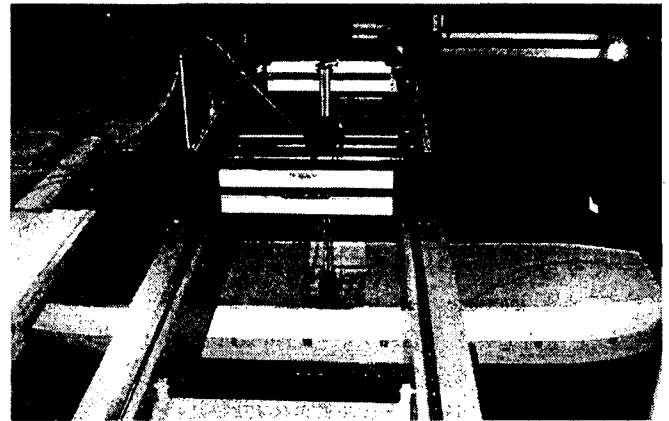


Fig. 5 Experimental setup

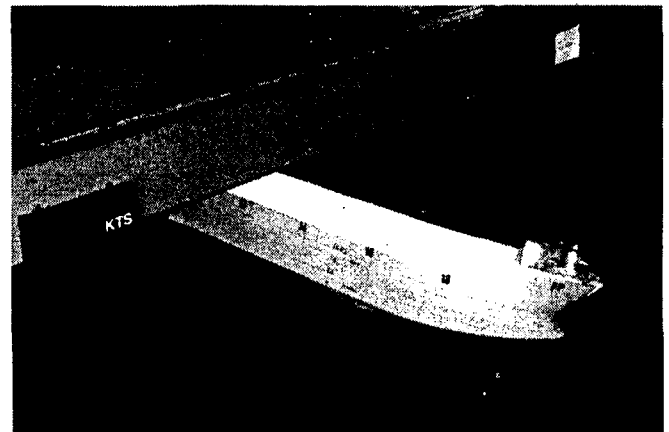


Fig. 6 Snapshot of free roll decay test

6. 수치 계산법 적용

중앙 횡단면 형상에 따른 횡동요 감쇠 효과를 해석하기 위하여 모형 시험과 같은 조건의 중앙 횡단면의 2차원 유동 해석을 수행하였다. Bilge keel이 있는 경우와 없는 경우, 또한 bilge keel 크기에 따른 횡동요 감쇠 계수 등을 비교하고 그 차이가 발생한 원인을 수치 해석 결과를 분석하여 알아본다. Figs. 8과 9는 3가지 형상에 따른 횡동요와 모멘트의 시간에

대한 변화를 보이고 있다. Bilge keel이 부착된 경우의 횡동요 감쇠는 bilge keel이 없는 경우에 비교하여 크게 나타났고, 또한 bilge keel의 크기가 클수록 횡동요 감쇠 계수는 커지는 것을 볼 수 있다. Table 2는 모형시험과의 비교로서 정성적인 일치 를 잘 보여주고 있다. 본 연구에서 난류 모형을 적용하지 않아 모형 시험의 횡동요 감쇠 계수 보다 계산된 계수가 크게 나타 난 것으로 판단되고 특히 0.6m bilge keel이 부착된 경우의 모 형 시험과 계산의 차이가 가장 크다. Bilge keel이 커지면서 발 생되는 eddy는 더욱 복잡해 질 것으로 예상되며 이를 수치해 석으로 예측하기 위해서는 보다 조밀한 격자계와 난류 모형의 도입이 필요할 것이다.

Figs. 10 ~ 12는 각각의 횡단면 주위의 압력 분포와 속도 벡 터를 보이고 있다. Bilge keel이 부착되지 않은 경우에 vortex는 약하게 발생하는 반면 bilge keel이 부착된 경우 강한 vortex를 유발한다. 이러한 vortex는 압력 손실을 유발하여 큰 횡동요 감 쇠를 발생시킨다.

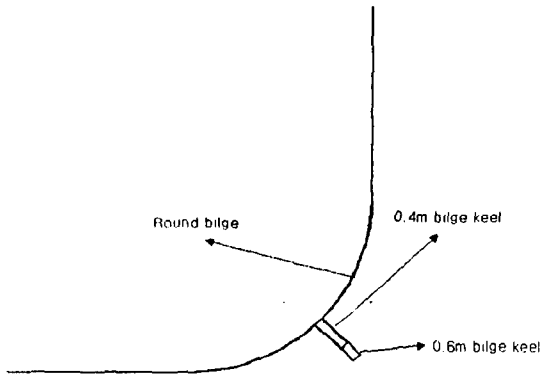


Fig. 7 Configuration of midship section

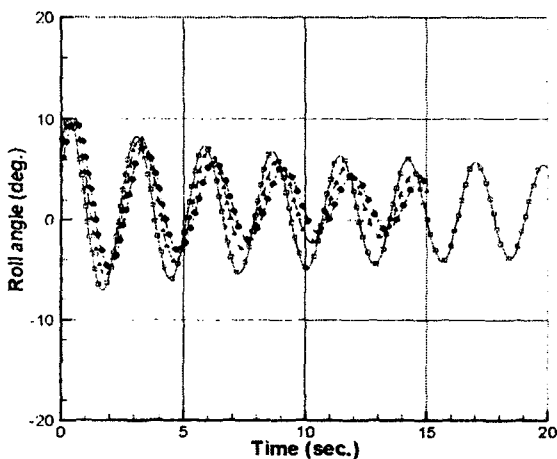


Fig. 8 Time history of roll angle from free roll simulation

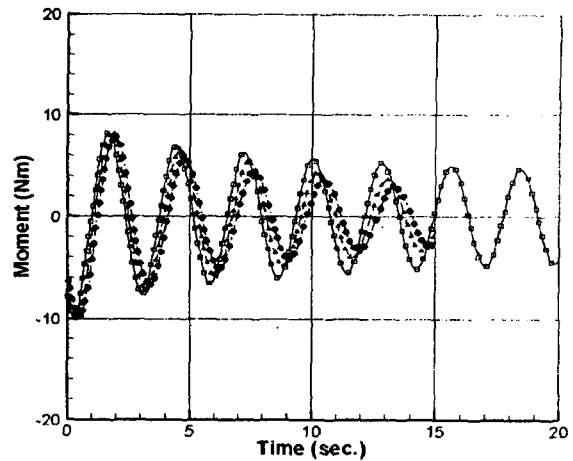


Fig. 9 Time history of moment from free roll simulation

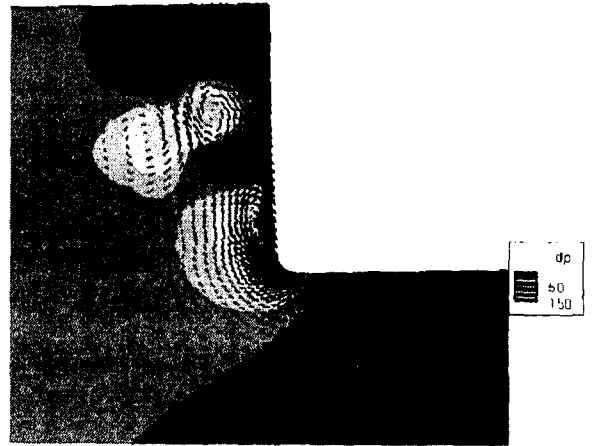


Fig. 10 Computed pressure distribution and velocity vector around round bilge

5. 결 론

본 연구에서는 자유 횡동요 감쇠에 대한 수치해석 및 모형 시험을 수행하여 중앙 횡단면 형상에 따른 횡동요 감쇠 현상 의 특성을 파악하였다. 수치해석은 3자유도를 고려하여 개발되 었고 자유수면 및 점성의 효과가 고려된 횡동요 문제를 수치 적으로 모사할 수 있었다.

수치해석에 사용된 격자 및 시간간격의 의존성을 확인하여 적절한 계산 조건을 설립하였고 중앙 횡단면의 형상에 따른 횡동요 감쇠 특성을 수치해석을 통하여 알아보았고 모형시험 의 결과와 정성적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 정량적 인 일치하는 수치해석법을 개발하기 위해서는 난류모형의 도 입이 필요할 것으로 판단된다.

수치해석의 결과의 분석을 통하여 bilge keel이 횡동요 운동을

감쇠시키는 원인을 알 수 있었고 CFD를 이용하여 roll damping의 해석의 기초연구가 되었으며 향후 3차원 6자유도 문제를 해석할 수 있는 수치해석법 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

- Korpus, R.A. and Falzarano, J.M. (1997). "Prediction of Viscous Ship Roll Damping by Unsteady Navier-Stokes Techniques", Transactions of the ASME, TVol. 119, pp 108 - 113
- Sarkars, T. and Vassalos, D. (2000). "A RANS-based technique for simulation of the flow near a rolling cylinder at the free surface", Journal of Marine Science and Technology, Vol 5, pp 66 - 77.
- SKawamura, T. and Kuwahara, K. (1984). "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", AIAA paper, 84-0340.
- Hingenstock, A. (1988). "A fast method for the elliptic generation of three-dimensional grids with full boundary control", Numerical Grid Generation in Computational Fluid Mechanics, pp 137 - 146

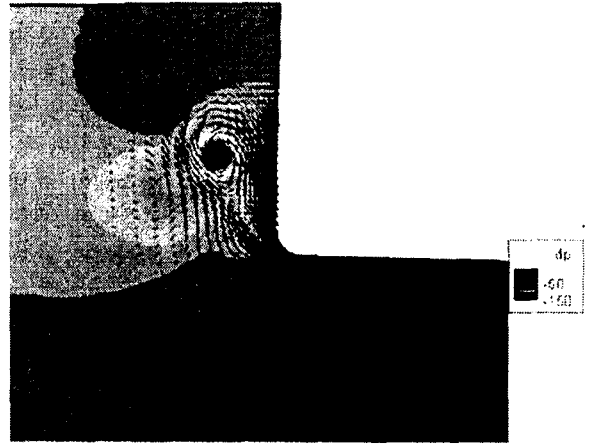


Fig. 11 Computed pressure distribution and velocity vector around 0.4m bilge keel

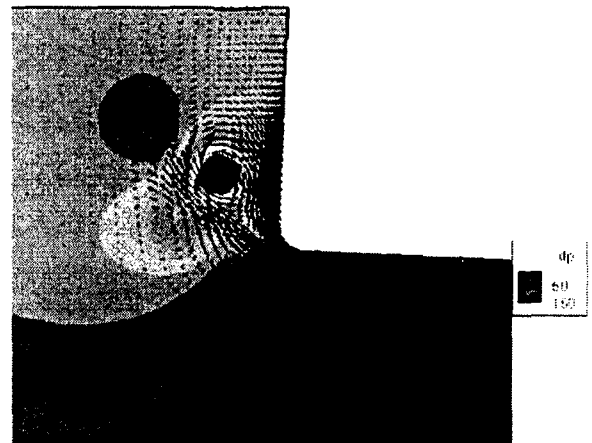


Fig. 12 Computed pressure distribution and velocity vector around 0.6m bilge keel