

단독 타 주위의 유동 특성에 대한 연구

최정은,^{*1} 김정훈¹

FLOW CHARACTERISTICS AROUND A RUDDER IN OPEN WATER CONDITION

J.E. Choi^{*1} and J.H. Kim¹

The flow characteristics around a rudder in open water condition is analyzed by the computational method. Reynolds averaged Navier-Stoke's equation is utilized for the computation. The computational hydrodynamic force coefficients are verified through comparing with the experimental results. The information of these flow characteristics is necessary to predict cavitation and maneuvering performances, to estimate steering gear capacitance, and to get the bending moment which is useful for the structural analysis. The pressure distribution, the three-dimensional flow separation, and the tip vortices are investigated. The pattern of the three-dimensional flow separation is analyzed utilizing a topological rule. The tip vortices are also investigated through a visualization technique.

Key Words : 타 단독 상태(Rudder Open Water Condition), 3차원 유동박리(Three-Dimensional Flow Separation), 타 끝단 보오텍스(Rudder Tip Vortex), 유체력 계수(Hydrodynamic Force Coefficient)

1. 서 론

타는 선체와 프로펠러 후류에 위치해 있으므로 타 주위 유동은 아주 복잡하다. 타 주위 유동은 유입류가 결정적인 역할을 하므로 선체와 프로펠러 후류 속도장을 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 그러나 프로펠러 후류 속도장을 정확하게 추정하는 것은 상당한 시간과 노력이 소요된다. 따라서 선체와 프로펠러 후류에 위치한 타 주위의 유동 특성 파악에 앞서 타 단독 상태에서의 유동 특성을 파악하는 것이 필요하다. 타 단독 상태에서의 유동은 타의 캐비테이션 성능 뿐만 아니라 조종성능 추정, 스티어링 기어 용량 산정 및 벤딩 모멘트 추정을 통한 구조해석 문제와도 직접적인 관련이 있다.

타 주위의 대표적 유동 특성으로는 타 양 끝단에서 발생하는 끝단 보오텍스, 3차원 유동박리, 그리고 캐비테이션 등이 있다. 타와 같이 유한 길이의 양력체는 받음각이 있는 경우, 타 양 끝단에서 흡입면과 압력면의 차이에 기인하여 span방향으로 swirl velocity가 생긴다. 이러한 유동은 타면을 따라 발

전하면서 끝단 보오텍스가 생성된다. 생성된 끝단 보오텍스는 주유동과 합쳐져 유기항력을 발생시키고 소음발생의 원인으로 작용하는 등 여러 가지 불리한 유체역학적 현상을 동반한다. 3차원 유동박리는 2차원 유동박리와는 달리 상당히 복잡하며 그 동안 많은 연구가 있어 왔다[1,2,3]. 최근 대형 컨테이너선의 고속화로 인하여 프로펠러 후류의 유속이 증가되어 프로펠러와 타에 작용하는 음압력을 증가시킨다. 타에 작용하는 압력이 증기압 이하로 감소하게 되면 타 면에 캐비테이션이 발생하게 되어 타를 침식시키는 주요한 요인이 된다.

단독 타에 작용하는 유체력에 대한 연구는 주로 실험적[4], 수치적 방법[5]으로 수행되고 있다. 그리고 최근 혼 타에서 빈번하게 발생되고 있는 캐비테이션에 대한 실험적[6], 수치적 연구[7,8,9]도 활발히 수행되고 있다. 본 연구에서는 타에 작용하는 유체력과 타 주위의 유동특성인 타 끝단 보오텍스와 3차원 유동박리 현상을 수치적 방법으로 조사하였다. 수치해석 결과 검증은 민계식 등[4]의 모형시험 결과를 이용하였다. 격자생성은 Gridgen을 사용하였으며 수치해석은 Fluent V6.2를 사용하였다. 대상 타는 최근 대형 조선소에서 건조 인도한 바 있는 7,800TEU급 컨테이너선의 혼 타를 간극효과를 무시한 전가동타로 이상화하였으며 모형선 레이놀즈수에서 계산을 수행하였다.

접수일: 2007년 7월 25일, 심사완료일: 2008년 3월 4일.

1 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

* Corresponding author, E-mail: jechoi@hhi.co.kr

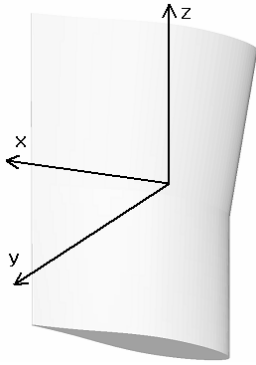


Fig. 1 Coordinate System.

2. 수치 해석

본 계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 유동 방향이 양(+)의 x축이고 중력의 반대 방향이 양의 z축으로 하는 우수좌표계이며, 타 축과 프로펠러 중심 축을 지나는 점을 원점으로 하였다.

2.1 지배방정식

비압축성 난류유동에 대한 지배방정식은 질량과 모멘텀 보존식인 연속방정식과 Reynolds averaged Navier-Stokes식이며 다음과 같이 표현된다. 다음 수식에서 표현된 물리량들은 선속(V_0), 타의 평균코르드길이(\bar{c})와 유체 밀도(ρ)로 무차원화된 양이다.

연속방정식

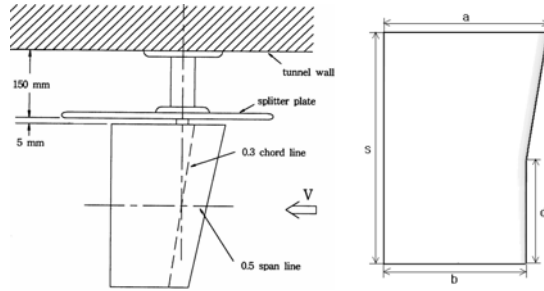
$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

여기서 U_i ($=U, V, W$)는 $x_i=(x, y, z)$ 방향의 속도 성분이다.

Reynolds averaged Navier-Stokes's Equations

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{R_N} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \tag{2}$$

여기서 p 는 정압력을, R_N 은 레이놀즈수를, $-\overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력을 나타낸다. 난류단점을 위하여 표준 k- ω 와 realizable k- ϵ 난류모형을 이용하였다.



(a) Arrangement of model test (b) Shape
Fig. 2 Arrange of model test and shape of a rudder.

2.2 수치해석 기법

계산 영역은 유한개의 작은 격자로 나누어지며 지배방정식은 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환된다. 공간이산화 처리는 cell-centered 유한체적법을, 시간이산화는 1차 정도의 implicit법을 사용하였다. 대류항은 QUICK scheme을, 확산항은 중앙차분법을 사용하였다. 속도-압력 연성은 SIMPLEC algorithm을 적용하였다.

3. 대상 타, 계산조건 및 격자생성

대상타는 수치해석 결과 검증을 위하여 모형시험 결과가 있는 전가동타 SS1[4]과 7,800TEU급 컨테이너선의 혼 타를 간극효과를 무시한 전가동타(LCR)이다. SS1에 대한 모형시험과 수치해석은 Fig. 2(a)와 같은 조건에서 수행되었으며, LCR에 대한 수치해석은 타 단독 상태에서 수행하였다. 여기서 주의할 점은 SS1인 경우 타 상방에 원형의 분리판이 설치되어져 있는 것이다. 대상타의 기하학적 특성과 수치해석에 적용된 계산영역과 격자수는 Fig. 2(b)와 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Characteristics of the objective rudders and calculation condition.

Name	SS1	LCR
Section type	NACA00	NACA64
a (m)	0.272	0.215
b (m)	0.200	0.188
s (m)	0.400	0.285
d (m)	0.000	0.128
A_T (m ²)	0.094	0.057
V_0 (m/s)	6.000	2.010
R_N	1.24×10^6	3.54×10^5
Cal. domain	$-3.0 \leq x/c \leq 6.0$ $-3.0 \leq y/c \leq 3.0$ $-3.2 \leq z/c \leq 3.2$	$-3.0 \leq x/c \leq 5.5$ $-3.0 \leq y/c \leq 3.0$ $-3.0 \leq z/c \leq 4.4$
No. of grid	359,328	347,688

여기서 A_T 는 투영면적을 나타낸다. 격자는 육면체 격자이고 타면으로부터 첫 번째 격자간격은 약 $y^+ \approx 50$ 이다.

입구면 경계조건은 균일류의 유입속도 성분을 사용하였으며 출구면 경계조건은 일정한 값의 정압력을 사용하였다. 계산시간의 효율성을 고려하여 벽함수를 사용하였다.

4. 결과 및 토의

단독 타 주위의 유동 특성을 다음과 같은 순서로 조사하였다.

- 타에 작용하는 유체력계수 특성
- 타 끝단 보오텍스
- 3차원 유동박리

타에 작용하는 유체력계수 특성

본 수치해석 결과를 검증하기 위하여 민계식 등[4]의 모형 시험 결과를 이용하였다. 검증 항목은 다음 식으로 정의되는 양력계수(C_L), 항력계수(C_D)와 모멘트 계수(C_M)이다.

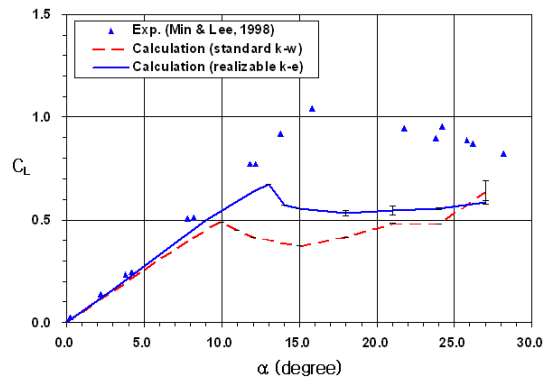
$$C_L = \frac{Lift}{0.5\rho A_T V_O^2} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{Drag}{0.5\rho A_T V_O^2} \quad (4)$$

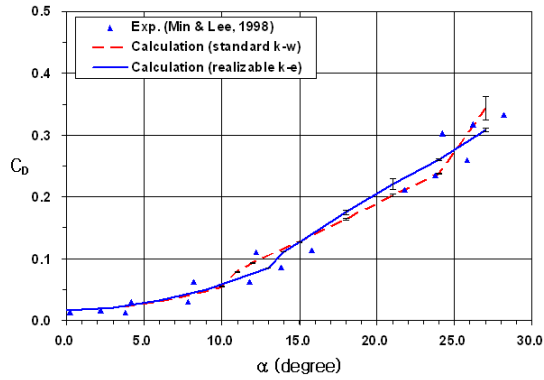
$$C_M = \frac{Moment}{0.5\rho c A_T V_O^2} \quad (5)$$

여기서 $\bar{c}(=A_T/s)$ 는 타의 평균 코드 길이이다.

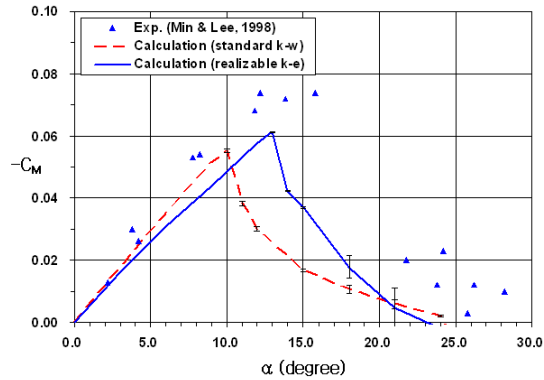
Fig. 3은 SS1에 작용하는 여러 가지 받음각에 대한 양력계수, 항력계수와 모멘트 계수를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 타에 작용하는 유체력계수는 입사각이 실속각(stall angle)보다 적은 경우는 비실속 영역으로 입사각과 유체력계수는 비례하고 있으며 실험값과 비교하여 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 입사각이 실속각보다 큰 경우는 유동박리가 발생하는 실속영역이 된다. 생성된 유동박리는 유동을 따라 이동, 확산되고 유동은 비정상상태로 되어 유체력계수는 주기적으로 진동하는 특성이 있다. 수치해석에서의 실속각은 모형시험에서의 실속각보다 작게 나타나고 있는데, 이는 벽함수 사용에 기인된 것이라 사료된다. Fig. 3에 표현된 실속영역에서의 유체력계수는 1주기에 대한 평균값과 진폭을 나타낸다. 일반적으로 실속은 실선 scale에서보다 모형선 scale에서보다 낮은 입사각에서 나타나는 것으로 알려져 있다. 그리고 본 수치해석 결과를 보면 적용한 난류모형에 따라서도 차이가 난다. 3차원 유동박리에 대한 구조적 특성은 다음 장에서



(a) Lift coefficient



(b) Drag coefficient



(c) Moment coefficient

Fig. 3 Lift, drag and moment coefficient at various angle of attacks utilizing standard k- ω and realizable k- ϵ turbulence models : SS1, $R_N=3.54 \times 10^5$.

자세히 다루기로 한다. 실속영역에서의 양력계수는 입사각 증가에 무관하게 일정한 값을 갖는 경향이 있으나 항력계수는 계속 증가하여 양항력비가 급격히 감소한다. 그리고 모멘트 계수도 급격히 감소한다.

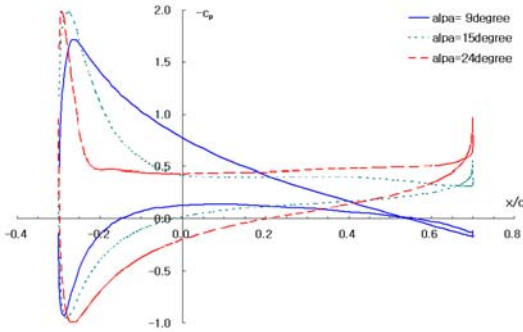


Fig. 4 Distribution of pressure coefficient on the section of $z=0$: SS1, $R_N=3.54 \times 10^5$.

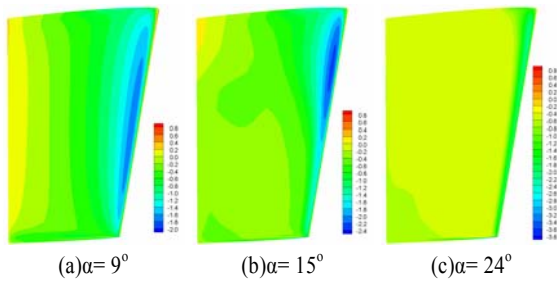


Fig. 5 Distribution of pressure coefficient on the suction side : SS1, $R_N=3.54 \times 10^5$.

여기서 흥미로운 사실은 입사각이 24° 이상의 대각도에서는 (realizable k- ϵ 계산 결과 참조) 모멘트계수의 부호가 바뀐다는 것이다. 이것은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 유동박리 영역이 크게 확장되어 표면압력계수 분포가 달라짐으로 생기는 현상이다.

Fig. 4는 타의 중앙 단면($z=0$ 단면)의 여러 가지 받음각에 대한 표면압력계수 분포를 realizable k- ϵ 를 적용하여 구한 그림이다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 유동박리가 발생하는 영역에서는 표면압력계수는 일정한 값을 가지며 입사각이 증가함에 따라 유동박리 영역은 증가한다. 이러한 유동박리 영역 증가는 모멘트계수를 감소시킨다. 유동박리에 기인한 타 표면압력 분포 변화는 타에 작용하는 유체력 뿐만 아니라 캐비테이션 성능과도 밀접한 관계가 있다.

Fig. 5는 타의 흡입면에 작용하는 표면압력계수 분포를 나타낸다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 유동박리가 발생하지 않은 경우($=9^\circ$)에는 타의 전반부에 최소압력이 균일하게 나타나며 타 길이방향으로 점차 압력이 회복됨을 알 수 있다. 그러나 입사각이 큰 경우($=15^\circ, 24^\circ$), 특이점이 존재하는 bubble type의 유동박리(Fig. 10참조)가 일어나며 압력은 타 전반부에서 급격히 회복되고 곧 일정한 값을 갖는다. 타의 양 끝단에서 압력분포

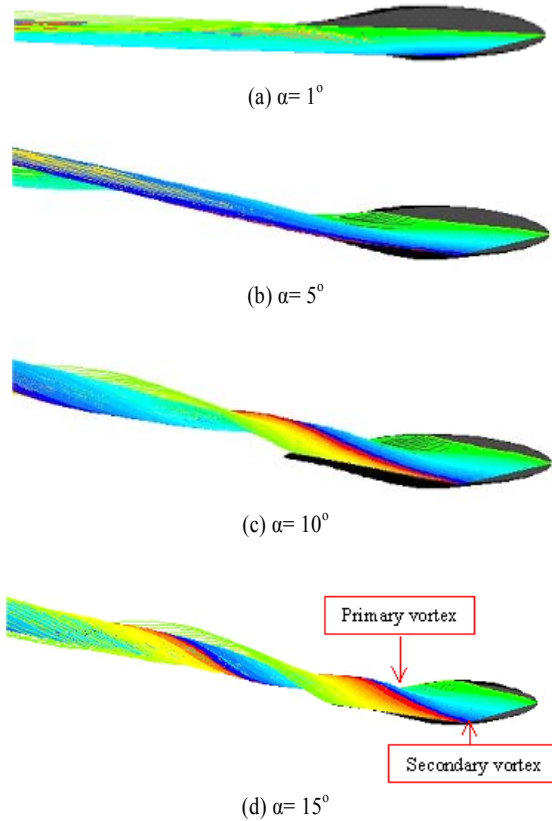


Fig. 6 Visualization of rudder-tip vorticies at bottom side : LCR, $R_N=3.49 \times 10^5$.

가 서로 다른 것은 Fig. 2(a)에서 보인 원형의 분리판 영향으로 유동박리가 제어된 것에 기인한 것이다.

타 끝단 보오텍스

Fig. 6은 타 끝단 보오텍스를 pathline을 이용하여 가시화한 그림이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 입사각의 크기가 증가함에 따라 끝단 보오텍스의 세기가 증가한다. 끝단 보오텍스는 2개의 보오텍스로 구성되어 있다. 1차 보오텍스(primary vortex)는 흡입면과 압력면의 압력차이에 기인하여 타 끝단을 가로지르는 유동이 생기게 되고 이 유동이 주 유동과 합쳐지면서 흡입면 끝단에서 발생하는 보오텍스이다. 2차 보오텍스(secondary vortex)는 타 끝단 압력면에서 유동이 타 면과 분리되어 주유동과 합쳐지면서 생성되는 보오텍스이다. 생성된 1차와 2차 보오텍스는 타면과 분리되면서 roll-up하여 유동을 따라 이동, 확산한다.

Fig. 7과 8은 타 끝단 보오텍스의 생성 및 진행 과정을 보여 주고 있다.

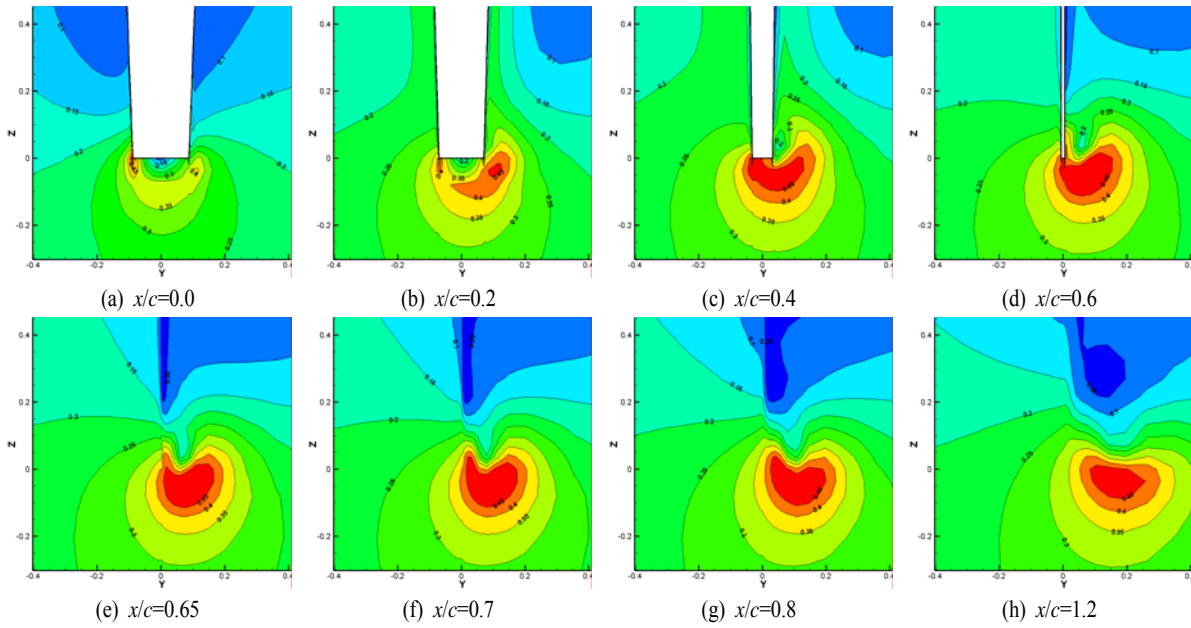


Fig. 7 Contours of swirl velocity along x-planes of the bottom part of a rudder : LCR, $\alpha = 12^\circ$, $R_N = 3.49 \times 10^5$.

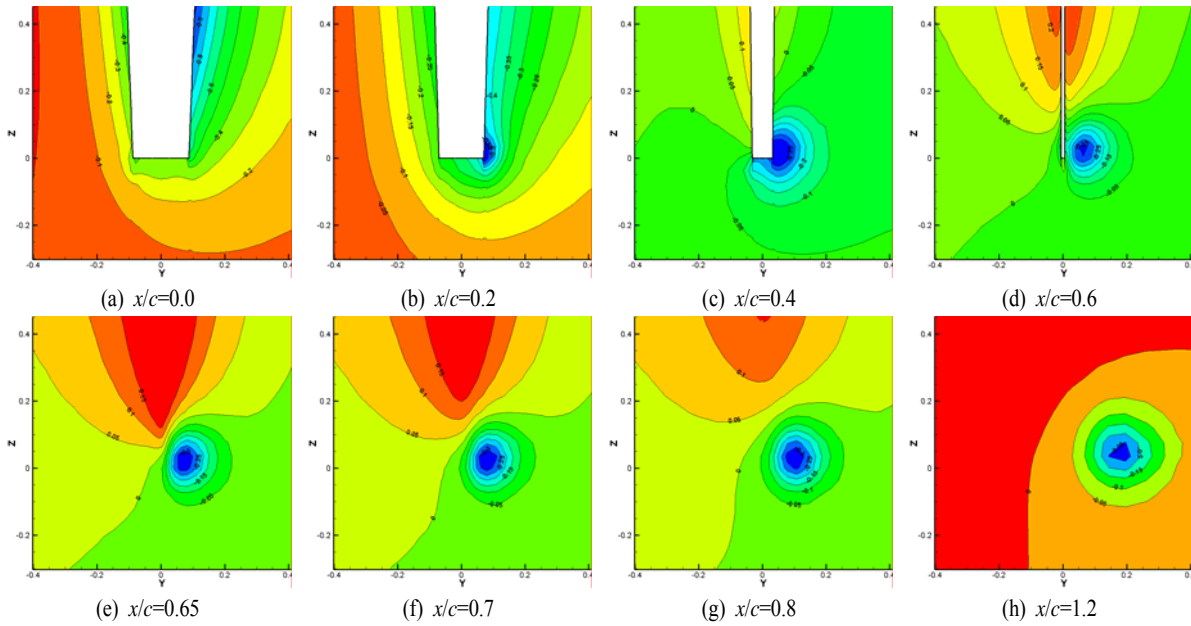


Fig. 8 Contours of pressure coefficient along x-planes of the bottom part of a rudder : LCR, $\alpha = 12^\circ$, $R_N = 3.49 \times 10^5$.

그림에서 보는 바와 같이 끝단 보오텍스의 발생초기에는 흡입면 끝단 주위에 강력한 swirl velocity를 가지며 유동방향으로 진행함에 따라 확산된다. 그리고 앞에서 설명한 바와 같이 타 끝단 보오텍스의 swirl velocity는 주유동과 합쳐져 가속되기 때문에 압력은 낮아진다.

3차원 유동박리

3차원 유동박리는 skin friction line으로부터 해석할 수 있다. 본 논문에서 조사한 3차원 유동박리 현상은 벽함수를 이용한 수치적 방법으로 해석한 것이므로 정량적 분석에는 약간의 오차가 있을 것으로 사료된다. 그러나 유동박리에 대한

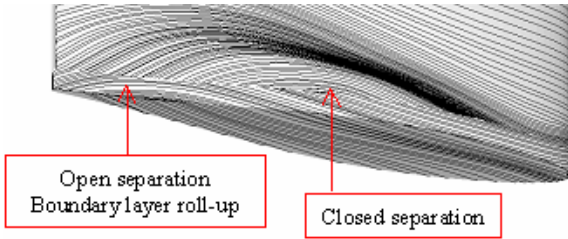


Fig. 9 Skin friction lines showing 3-dimenaional flow-separation of free-shear layer type at a tip of a rudder : LCR, $\alpha=12^\circ$, $R_N=3.49 \times 10^5$.

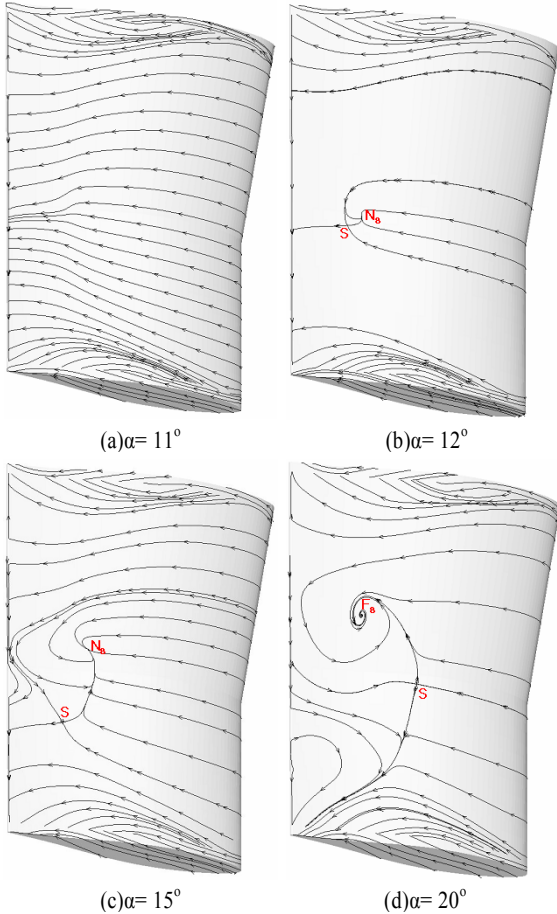


Fig. 10 Skin friction lines on a rudder surface showing 3-dimensional flow separation of bubble and free-vortex layer type : LCR, $R_N=3.49 \times 10^5$.

정성적 특성 연구는 가능하리라 판단된다. 타에 발생하는 유동박리 특성은 끝단에 발생하는 free-shear layer 형태의 유동박리와 타 면에 발생하는 bubble 형태의 유동박리이다.

Fig. 9는 타 끝단에서 발생하는 free-shear layer 형태의 유동박리를 잘 보여주고 있다.

Table 2 Locations of singular points at various angles of attack.

α (degree)	Nodal point (x,y,z)	Saddle point (x,y,z)
12	(0.341,0.055,0.061)	(0.393,0.041,0.021)
15	(0.306,0.064,0.159)	(0.399,0.038,-0.129)
20	(0.340,0.054,0.288)	(0.141,0.100,0.038)

Fig. 9에서 보는 바와 같이 타 끝단에서 발생하는 유동박리는 "open separation"과 "closed separation"의 2가지 free-shear layer 형태가 동시에 나타난다. 여기서 흥미로운 사실은 "open separation"은 primary vortex와 "closed separation"은 secondary vortex와 각각 관련되어져 있다는 것이다.

Fig. 10은 여러 가지 받음각에 대한 타면의 skin friction line을 나타낸다.

입사각이 11° 까지는 타의 정체선으로 부터 분리된 skin friction line은 타의 뒷날 중앙부로 유선 집중 현상이 있으나 bubble 형태의 유동박리는 발생하고 있지 않는다. 입사각이 12° 이상에서는 압력면의 정체선을 따라 생성되는 박리선으로 부터 압력면으로 분리되는 skin friction line은 특이점이 없이 타의 뒷날로 이동한다. 그러나 흡입면으로 분리되는 skin friction line은 그림에서 보는 바와 같이 특이점 2개가 나타나는 복잡한 양상을 지닌다. 입사각이 12° 와 15° 인 경우는 타 중앙부에서 1개의 NS(nodal point of separation)와 saddle point(S)가 존재한다. 그리고 입사각이 20° 인 경우는 NS가 FS(focal point of separation)로 발전함을 알 수 있다. 타의 앞날 부근에 있는 박리선과 뒷날에 NA(nodal point of attachment)와 NS가 각각 1개가 존재한다고 하면 topology rule[10]은 다음과 같이 만족한다.

$$\Sigma_N - \Sigma_S = 2 \tag{6}$$

Table 2는 입사각 변화에 따른 특이점 위치를 나타낸다.

5. 결론

타 단독 상태에서 타에 작용하는 유체력계수, 타 양 끝단에서 발생하는 끝단 보오텍스와 3차원 유동박리의 특성에 대하여 수치적 방법으로 조사하였다. 이러한 타 단독 상태에서의 유체동역학적 특성 파악은 타 설계에 유용한 자료를 제공한다. 그러나 타는 선체와 프로펠러의 후류에 위치해 있어 선체와 프로펠러에 의해 서로 영향을 받는다. 이러한 선체-프로펠러-타의 상호작용 효과는 선박의 속도성능 뿐만 아니라 조종성능에도 많은 영향을 미친다. 차후 선체-프로펠러-타의 상호작용에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 1955, Maskell, E.C., "Flow Separation in Three-Dimensions," *RAE Report Aero. 2565*.
- [2] 1972, Wang, K.C., "Separation Patterns of Boundary Layer over an Inclined Body of Revolution," *AIAA Journal*, Vol.10, p.1044-1-50.
- [3] 1991, Kim, S.E., "Numerical Studies of Three-Dimensional Flow Separation," *Thesis of the University of Iowa*.
- [4] 1998, 민계식, 이흥기, "선박의 최적 방향타 설계를 위한 실험적 연구," *현대중공업 연구보고서, HMRI-98-07-S137*.
- [5] 2004, 부경태, 지용해, 김윤수, 신수철, "수치해석에 의한 단독 타 유체력 계산," *대한조선학회논문집*, 제41권 제2호, pp.61-69.
- [6] 2006, 백부근, 김경열, 안종우, 김용수, 김성표, 박제준, "Semi-spade 타의 간극 캐비테이션에 대한 실험적 연구," *대한 조선학회 논문집*, 제43권 제4호, pp.422-430.
- [7] 2004, Lee, D.H. and Lee, H.G., "Prediction of Rudder Cavitation Considering Propeller and Hull Effects," *The 4th Conference for New Ship and Marine Technology*.
- [8] 2007, 최정은, 정석호, "2차원 혼 타 단면의 간극유동 특성에 대한 연구," *대한 조선학회 논문집*, 제44권 제2호, pp.101-110.
- [9] 2007, 최정은, 정석호, 김정훈, "혼 타 주위의 캐비테이션 유동 특성에 대한 연구," *대한 조선학회 논문집*, 제44권 제3호, pp.228-237.
- [10] 1982, Tobak, M and Peake, D.J., "Topology of Three-Dimensional Separated Flows," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.14, pp.61-85.