

FLUENT 코드를 이용한 타 단면의 점성 유동 해석

부경태^{†*}, 한재문*, 송인행*, 신수철*

삼성중공업*

Viscous Flow Analysis for the Rudder Section Using FLUENT Code

Boo Kyungtae*, Han Jaemoon*, Song Inhaeng*, and Shin suchel*

Samsung Heavy Industries Co., LTD*

Abstract

Lately, the cavitation and erosion phenomena in the rudder have been increased for high-speed container ships. However, cavitation is not prone to occur in model experiments because of low Reynolds number. In order to predict the cavitation phenomena, the analysis of the viscous flow in the rudder gap is positively necessary. In this study, numerical calculation was applied to the two-dimensional flow around the rudder gap using FLUENT code. The velocity and pressure field were numerically acquired and cavitation phenomena could be predicted. And the case that the round bar was installed in the rudder gap was analyzed. For reducing the acceleration force when fluid flow through the gap, modified rudder shape is proposed, It is shown that modified rudder shape restrain the pressure drop at the entrance of the gap highly both in the computational results and in the model experiment, and reduce the cavitation bubbles.

※Keywords: rudder cavitation(타 캐비테이션), cavitation phenomena(공동현상), CFD(수치 해석), Reynolds number effect(레이놀드수 효과)

1. 서언

최근 선박이 고속화 되면서 타(rudder)에서 발생하는 공동 현상에 의한 침식 형상이 주요한 문제로 대두되고 있다. 타 표면의 캐비테이션은 타

에 진동을 발생시키고 기포가 깨지면서 발생하는 충격파에 의해 피로 파괴를 일으킨다. 이러한 공동 현상의 발생은 프로펠러에 의해 유기된 입사각을 가진 유동이 타를 지나면서 고정타(horn part)와 가동타(movable part) 사이에 존재하는 좁은 간극 사이로 유체가 흘러들어가기 때문에 발생된다. 간극 사이로 들어간 유동은 좁은 간극 사이를 지나면서 압력이 선형적으로 떨어지다가 주 유동과 만나 유동 방향이 바뀌므로 순간적인 가속을

접수일: 2003년 4월 23일, 승인일: 2003년 8월 6일
†주저자, E-mail: kyungtae.boo@samcong.com
Tel:042-865-4733

받는데, 이로 인해 타 벽면의 압력이 떨어지기 때문에 공동이 발생된다. 그러나 타 간극 주위에서의 공동 현상은 모형시험에서는 실선에 비하여 Reynolds수가 낮아 실험적으로 모사가 잘 이루어지지 않는다. 그리고 간극 내의 유동은 점성 효과가 크게 나타나는 경계층이 발달된 지역이므로 Panel법이나 Euler식을 이용하는 것은 좋은 선택이 못된다. 따라서 본 연구에서는 점성 영향을 고려하기 위해 상용 코드인 Fluent를 이용하여 Navier-Stokes 식을 해석하였고 얻어진 압력 분포들을 통해 타 공동 현상 발생 부위를 추정하였으며, 공동 현상을 지연시킬 수 있는 방안들을 검토하였다. 또한 Reynolds수가 공동 현상에 끼치는 영향도 함께 계산하여 모형시험과 실선에서 발생하는 차이를 설명하였다.

2. 수치 계산법

2.1 수치 계산식

연속 방정식과 Navier-Stokes식을 지배 방정식으로 하였고 난류 해석을 위하여 벽항수를 이용한 $k-\epsilon$ 식(Launder/Spalding 1974)을 해석하였으며 사용된 무차원화 변수는 다음과 같다.

$$C_p = 2[P - P_\infty] / \rho u_{in}^2 \quad (1)$$

$$C_l = 2L / \rho u_{in}^2 c \quad (2)$$

$$Q = 2 \left[\int_{gap} \rho u dA \right] / \rho u_{in} c \quad (3)$$

여기서 P_∞ 는 출구 압력을 L 은 양력을 나타내며 입구 속도(u_{in})와 코드 길이(c)를 이용해 무차원하였다. 작동 유체의 밀도(ρ)는 998.2 kg/m^3 이고 점도(μ)는 $1.307 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 이다.

2.2 해석 모델과 경계 조건

본 연구에서 Fig.1에 보인 타의 단면 I은 NACA0021을 단면 II는 NACA0020을 사용하였다. 단면 I을 먼저 해석하고 그 결과를 바탕으로 새로운 단면 NACA63m-20을 제안하여 기존 단면 II와

비교 하였다. Fig.2는 각 단면을 비교한 그림인데 화살표를 따라 고정타는 앞날에서 그리고 가동타는 뒷날에서부터 시계방향으로 돌아가면서의 길이를 girth-length라 하고 해당되는 위치를 이해할 수 있도록 도표에서 고정타와 가동타 각 각의 무차원된 girth-length 값을 상사내 숫자로 나타내었다. 그리고 격자계는 Fig.3에서 보듯이 C type을 선택하고 복합(Multi-block) 격자계를 이용한 정렬 격자계를 구성하였다. 그러나 간극 주위는 정렬 격자계의 경우 격자질이 좋지 않아 비정렬 격자계를 도입하여 모든 계산에서 약 70,000 개의 격자가 사용되었다. 해석 영역은 코드 길이에 대해 앞으로 5배 뒤로 17배 그리고 대칭 조건이 사용되는 위, 아래로는 4.5배의 범위를 잡았고 경계 조건은 식(4),(5)와 같이 입구에는 속도값을 주었고 출구는 균일한 압력을 가정하였다.

$$u_{in} = \frac{\mu}{\rho c} \times Reynolds \ number \quad (4)$$

$$P_{out} = P_\infty \quad (5)$$

출구의 경우 속도 분포를 알 수 없으므로 흐름 방향으로 속도 변화가 없다는 Neumann 조건이 수치 해석에서 일반적으로 이용된다. 그러나 본 유동의 경우는 속도 보다 압력이 빨리 정상 상태에 이른다고 판단하고 출구에 일정한 압력값을 주었다. 그 결과 정확도의 차이가 없는 안정적인 해를 보이면서 Neumann조건보다 매우 빠른 수렴성을 보였다.

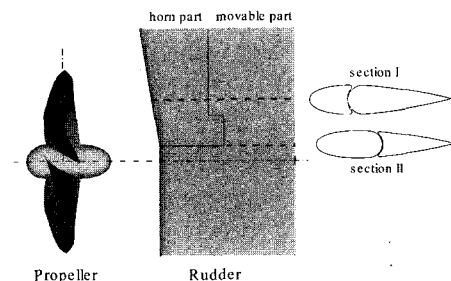


Fig. 1 Configuration of propeller and rudder.

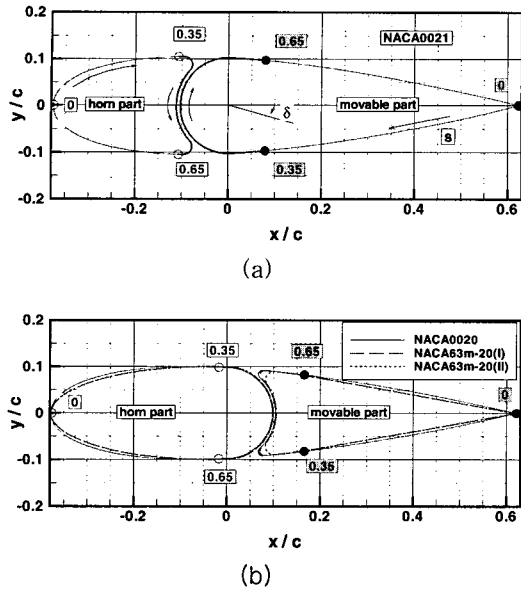


Fig. 2 rudder sections.

where, the figure in the box is shown the value of s/s_{MAX} , and s is the girth-length.

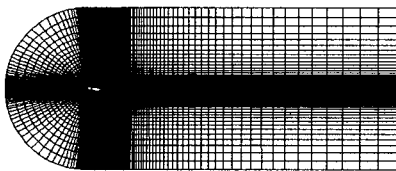


Fig. 3 Grid arrangement.

3. 수치 계산 및 토론

3.1 단면 I의 수치 해석

받음각 (α)이 -8° , 0° , 그리고 8° 에 대해서 타각 (δ)이 각각 0° , 6° 인 경우를 해석하였고 식(1)에 의해 무차원된 압력값 (C_p)을 비교하였다. 여기서 운동과 압력 에너지의 합이 입구에서 1이 되도록 무차원 할 수 있는데 그럴 경우 속도가 없는 정체점에서는 C_p 가 1이 된다. 그러나 RANS 해석의 경우에는 점성에 의한 에너지 손실과 난류 모델링 때문에 그보다 값이 조금 작아질 수 있다. Fig.4는 여러 수치 방법을 통해 얻어진 $-C_p$ 분포를 비교한 그림이다. 그림에서 점성 효과를 고려하지 않

은 Panel법이나 Euler식의 경우 틈새안($S/S_{MAX} \approx 0.4 \sim 0.6$)은 Rans 해석에 비해 압력이 높으면서 공동 현상이 우려되는 간극 입, 출구 부근에서 과도한 저압을 예측하고 있어 간극 주위 유동 해석 방법으로 타당하지 않다고 판단된다. RANS 해석 결과만을 보면 고정타 앞날($S/S_{MAX} = 0$)에 $-C_p$ 가 -1 이 되는 정체점이 나타나고 간극 입, 출구 ($S/S_{MAX} \approx 0.6, 0.4$)에서는 유동 방향이 바뀌어 가속이 일어나기 때문에 압력이 일시적으로 상승하거나 떨어지는 것이 확인된다. 이런 경향은 가동타에서도 나타나는데 앞에서 흘러 들어온 유동이 틈새로 들어가기전($S/S_{MAX} \approx 0.4$) 또다른 정체점을 만들고 틈새를 빠져 나오면서($S/S_{MAX} \approx 0.6$) 가속에 의해 압력이 떨어지므로 공동 현상이 예견될 수 있다. Fig.5에서는 유선과 압력을 도시하였다. 그림에서 양력이 발생하는 방향으로 유동이 틈새로 흘러 들어가고 흘러 들어간 유동은 가동타 표면을 따라 가다 주 유동과 만나 회전하고 있다. 이때 유동은 회전 중심으로 가속을 받게 되므로 타 표면에 공동 현상이 예측 되어지는 저압 영역이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이 곳에서 압력이 떨어지는 것을 조종하기 위해 틈새 내부에 바를 설치함으로써 유동 저항을 키워 내부를 지나가는 유량이 줄어들도록 시도 하였다. 유량이 줄어들면 유동 가속력 또한 같이 줄어들기 때문이다. Fig.6는 간극의 절반을 반지름으로 하는 round bar와 smooth bar가 설치된 간극 내부의 형상인데 그 결과 Fig.7과 같은 압력 분포가 얻어졌다. 이 결과를 보면 바가 있는 위치($S/S_{MAX} = 0.5$)에서 유로가 좁아지므로 유속이 빨라져 압력이 크게 떨어지고 간극 출구($S/S_{MAX} \approx 0.6$)에서는 bar를 설치하지 않거나 smooth bar가 설치되었을 때 서로간에 압력 변화가 없고 round bar의 경우에 압력이 다소 올라가는 것을 알 수 있다. 그 결과를 설명하기 위해 Table 1, 2에 해석된 각 경우에서의 양력과 틈새를 지나는 유량을 비교해 보았다. 두 변수간의 관계는 틈새 내부가 같다면 양력이 증가할수록 유량이 Table 1에서 보듯이 증가할 것이다. 그러나 Table 2에 bar를 설치하고 타각이 6° 인 경우의 해석 결과에서는 틈새 내부에 다른

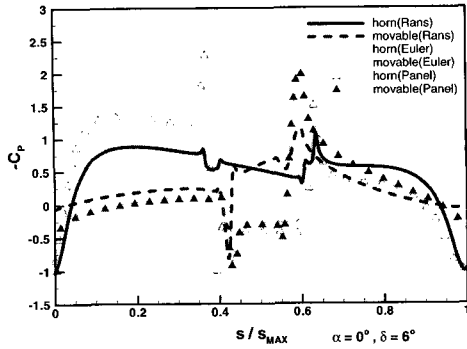


Fig. 4 Pressure distributions ($Re=1.6 \times 10^6$, NACA0021). where, the definition of girth-length (s) was shown in Fig.2 (a).

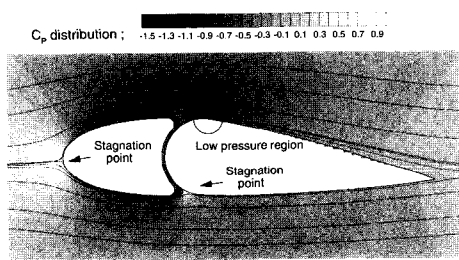


Fig. 5 Obtained results by analyzing the RANS equation ($Re=1.6 \times 10^6$, NACA0021). where, $\alpha = 0^\circ$, $\delta = 6^\circ$.

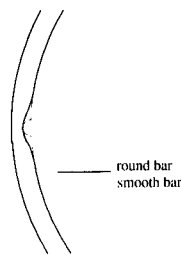


Fig. 6 Rudder gap shape with bar.

Table 1 Lift coefficients and mass flux ($Re=1.6 \times 10^6$, section: NACA0021).

α, δ	$0^\circ, 0^\circ$	$0^\circ, 6^\circ$	$8^\circ, 0^\circ$	$8^\circ, 6^\circ$	$-8^\circ, 6^\circ$
C_L	0	0.21439	0.45983	0.53306	-0.2038
Q	0	0.01262	0.01470	0.01663	-0.0028

Table 2 Lift coefficients and mass flux ($\alpha=0^\circ, \delta=6^\circ, Re=6.4 \times 10^6$, section: NACA0021).

bar	no	round	smooth
C_L	0.24458	0.24367	0.23417
Q	0.01766	0.01253	0.01752

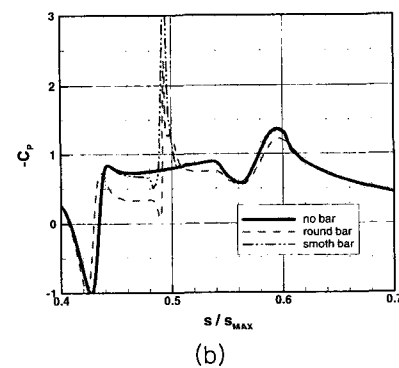
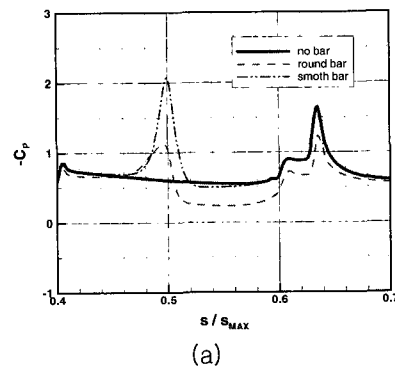


Fig.7 Pressure distribution in the gap ($Re=6.4 \times 10^6$): (a) horn (b) movable part.

종류의 bar가 설치되었으므로 양력과 유량간의 선형성을 볼 수는 없다. 오히려 smooth bar를 설치한 경우 양력은 떨어지면서도 통과 유량은 bar를 설치하지 않은 경우와 큰 차이가 없어 bar가 유동 저항으로의 역할을 크게 하지 못하고 있음을 알 수 있다. 그에 반해 round bar는 양력을 크게 떨어뜨리지 않으면서 통과 유량을 줄여주고 있다. 통과 유량이 차이가 없으면 간극 출구를 지나는 유동이 같은 가속력을 받을 것이고 따라서 압력 저하도 Fig.7 (a),(b)에서 각 각 출구에 해당하는 $S/S_{MAX} \approx 0.6$ 부근에서 차이가 나타나지 않는다. 그러나 round bar를 설치한 경우에는 유량이

상대적으로 작아지고 그림에서 무차원된 압력이 각각 0.4와 0.15정도 올라가 공동 현상 발생 가능성을 그만큼 낮출 수 있음을 알 수 있다. 따라서 smooth bar의 설치에 공동 현상을 억제 하는데 아무런 효과가 없으며 간극 내 round bar를 설치하는 것이 타 표면의 공동 현상을 억제 할 수 있다고 결론 지을 수 있다. 그러나 bar자체에서 발생하는 공동 현상은 피할 수 없으므로 교체할 수 있어야 한다.

3.2 단면 II의 수치 해석

경우는 프로펠러 중앙과 같은 높이에서의 타 단면이므로 받음각에 대한 고려를 하지 않고 타각 (δ)이 6° 인 경우에 Fig.2 (b)의 3가지 단면에 대해서 해석하였다. 수정된 두 단면은 항력을 줄이기 위해 앞날이 가늘어 졌고 뒷날의 두께는 좀 더 얇게 하였다. 뒷날의 두께를 얇게 가져간 이유는 양력을 증가 시킬 목적이다. 참고로 NACA에 비교해 앞날 형상은 같으나 뒷날이 얇은 MP단면은 실험적으로 10%이상 양력이 증가된다고 보고 되어 있다. 여기서 63m-20(II)는 63m-20(I)에 비해 간극 입, 출구에서 면적이 넓어지더라도 곡률 반경을 키워 유체가 가속을 덜 받으면서 유연하게 흐를 수 있도록 제안된 것이다(Fig.8). 그래서 위 세 가지 형태의 단면에 대해 유동을 해석하고 공동 현상 발생 가능성을 비교하였다. 그 결과 Table 3에서 반경의 증가와 함께 양력이 증가되고 이 때문에 위 아래 압력 차가 상대적으로 커지므로 유량 또한 함께 늘었음을 확인할 수 있었다. 여기서 간극의 존재는 양력을 떨어뜨리지만 반경을 크게 한 경우에 양력이 덜 떨어지는 점은 더 한 연구를 통해 확인이 필요하다. 그러나 압력 분포를 도시한 Fig.8에서 유량의 증가에도 불구하고 약 25% 이상 압력이 덜 감소함을 확인할 수 있다.

$$\Delta P \propto m \frac{v^2}{R} \quad (5)$$

이러한 원인은 압력과 가속력의 관계를 나타낸 식(6)을 통해 설명할 수 있다. 유량이 증가하면 유속이 증가되므로 이로 인한 유동 가속이 더 커지

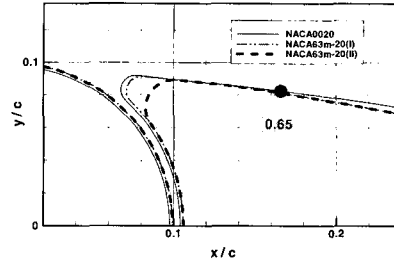


Fig. 8 An enlarged figure of the rudder section.

where, the figure in the box is shown the value of s/s_{MAX} , and s is the girth-length.

Table 3 Lift coefficients and mass flux ($\alpha=0^\circ \delta=6^\circ, Re=1.6 \times 10^6$).

section	0020	63m-20(I)	63m-20(II)
C_L	0.296698	0.308372	0.316186
Q	0.008237	0.008465	0.008712

고 따라서 공동 현상 발생 가능성이 증가되어야 한다. 이점을 역으로 이용하기 위해 간극 내에 round bar를 설치하여 유량을 줄임으로써 압력 저하를 억제할 수 있었다. 그러나 본 경우는 Fig. 8에서 보듯이 유로가 넓어져 유동 저하가 줄고 유량은 증가되지만 단면적의 증가로 유속은 줄고 반경이 커져 식(6)을 적용할 경우 압력 변화를 줄일 수 있게 된다. 따라서 입, 출구의 곡률 반경을 키워줌으로써 유동의 가속력에 공동 현상이 억제된 것이다.

3.3 Reynolds수 효과

모형 실험으로는 Reynolds수가 대단히 큰 실선 타 주위 유동은 상사가 잘 이루어지지 않는다. 그래서 통상 실험에서 무시되는 Reynolds수 효과를 수치 해석을 통해 살펴 보았다. 이를 위해 받음각이 없고 타각이 6° 인 NACA0020단면에 대해서 Reynolds수를 증가시키면서 계산하였고, 그 결과를 Fig.9과 10에 도시하였다. 여기서 Fig.10(b)에서 Reynolds수가 9배 증가했을 때 압력 변동도 약 70%이상 같이 증가되어 Reynolds수 효과가 존재함을 알 수 있고 실선에서 공동 현상 가능성

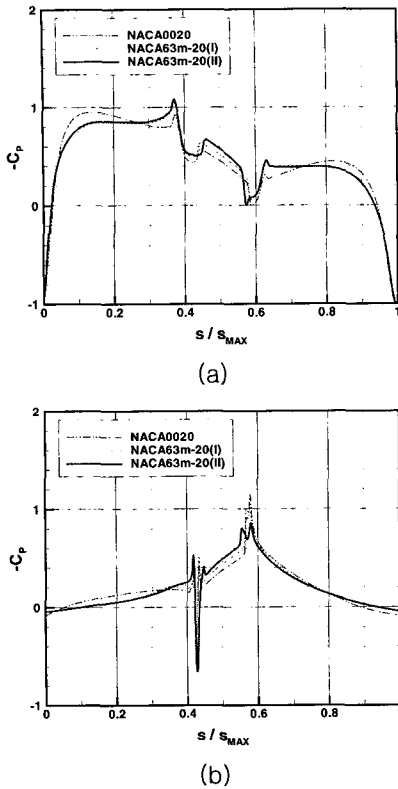


Fig. 9 Pressure distribution in the gap ($Re=1.6 \times 10^6$); (a) horn (b) movable part.

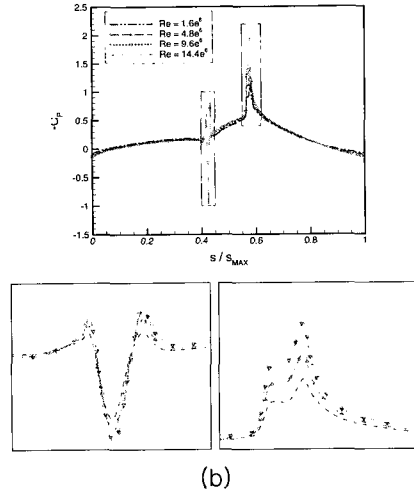
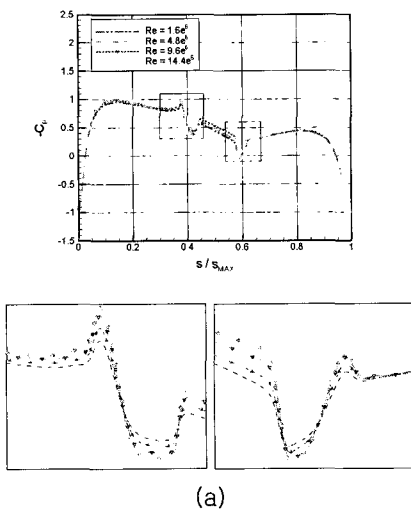


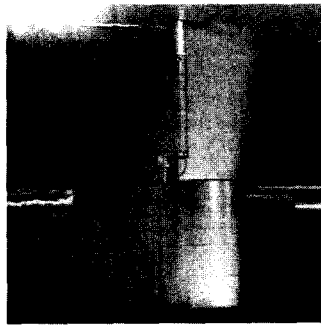
Fig. 10 Pressure distribution according to the Reynolds number ($\alpha=0^\circ$, $\delta=6^\circ$, section: NACA0021); (a)horn part, (b)movable part.

이 더욱 커짐을 유추할 수 있었다. 일반적으로 Reynolds수가 증가하더라도 무차원된 물리량으로 표현되는 유동장의 형태는 달라지지 않지만 유동장 내 재순환 영역이 있는 경우에는 Reynolds수에 따라 형태나 강도가 변하는 것을 이미 '공동 내 유동'이나 '후방 계단 유동' 등에서 볼 수 있고 특히 강도의 증가는 유체가 받는 가속력도 함께 증가시켜 압력 변동을 키우기 때문이다.

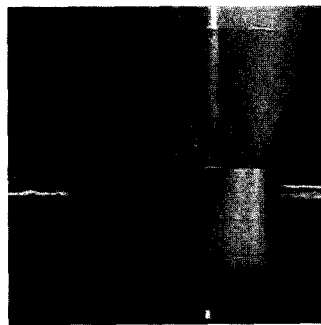
4. 결 언

상용 코드를 이용한 타 간극 유동 해석을 통해 간극 입, 출구에서 공동 현상의 발생을 판별할 수 있다. 이를 억제하기 위해 간극 내부에 bar를 설치하여 유량을 줄이려는 시도는 smooth bar의 경우 유동 저항으로써의 역할을 하지 못하여 효과가 없고 round bar를 설치했을 때 타 표면의 공동 현상을 억제할 수 있다. 그리고 간극 입, 출구의 곡률을 증가시키더라도 간극을 지나는 유량이 증가함에도 불구하고 유연한 유동 흐름으로 인해 가속력을 떨어뜨려서 공동 현상을 지연시킬 수 있다. 그러나 간극 출구의 곡률 변화에 의한 양력 증가를 설명하기 위해서는 더 한 연구가 필요하다. 그

리고 공동 현상의 발생은 절대 압력에 의해 결정되고 Reynolds수 효과가 존재하므로 실선으로의 확대 해석을 위해서는 교정식이 필요하다. Fig.11은 가시화 실험을 통해 본 연구를 통해 제안된 단면이 과거의 단면보다 공동 현상을 억제할 수 있음을 보여준다.



(a)



(b)

Fig.11 Cavitation visualization test(port 8°);
(a) original (b) modified rudder.

참 고 문 헌

- 공도성, 한재문, 유재문 2002 "선미 후류에서 작동하는 혼타의 압력 분포에 관한 연구," 대한조선학회 논문집 제 39권 제 2호 pp. 1-10.

- 공도성, 한재문, 유성선, 최순호 2001 "타 단면 변화에 따른 압력 분포의 변화 및 자항 성능에 미치는 영향에 관한 연구 - 타 공동 현상 방지에 관한 연구 2," 대한 조선 학회 논문집 제 19 권 제 2호 pp. 199-204.
- 정경남 2000 "선박의 최적 방향타 설계를 위한 실험적 연구," 대한 조선 학회 논문집 제 37권 제 2호 pp. 88-99.
- 최도형 2001 "Horn rudder 간극 주위의 2차원 난류유동 해석(1)," 한국 과학기술원.
- 최도형 2001 "Horn rudder 간극 주위의 2차원 난류유동 해석(2)," 한국 과학기술원.
- H. Söding "Limits of Potential Theory in Rudder Flow Predictions," Technical Univ. of Hamburg-Harburg, pp. 622-637.
- Launder, B.E., Spalding, D.B. 1974 "The Numerical computation of Turbulent Flows," Comp. Meth. Appl. Mech. and Eng., Vol.3, pp. 269-289.
- Peric, M. 1985 "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph.D. thesis, Univ. of London.



< 부 경 태 >



< 한 재 문 >



< 송 인 행 >



< 신 수 철 >