

유체 공급장치를 활용한 간극유동 제어에 관한 수치적 연구

서대원*, 오정근**, 이승희†*

인하대학교 선박공학과*, 인하대학교 정석물류통상연구원**

A Numerical Study on the Control of the Gap Flow Using a Fluid Supply Device

Dae-Won Seo*, Jungkeun Oh** and Seung-Hee Lee†*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University*
Jungseok Research Institute of International Logistics and Trade, Inha University**

Abstract

Recently, horn-type rudders are generally being used at high speed container ships and are frequently suffering from the cavitation occurs on the rudder surface in the vicinity of the gap between the horn and rudder plate. In the present study, a fluid supplying device is employed as to decrease the gap cavitation of the horn-type rudder. The device is devised to inject the water against the pressure side through the nozzle installed inside of the gap to control the gap flow. Numerical calculations are performed to investigate the effectiveness of the device and the results show that the device can noticeably reduce the gap cavitation. The rates of water injection for achievement of the maximum retardations of gap flow are also sought.

※Keywords: Horn-type rudder(훈타), Gap flow control(간극 유동제어), Cavitation(공동현상), Fluid supplying device(유체 공급 장치), Numerical Simulation(수치해석)

1. 서론

최근 선박의 대형화 및 고속화 추세에 따라 프로펠러, 타, 안정기용 핀 등에서 공동현상이 자주 발생하고 있다. 이러한 공동현상은 날개 주위로 흐르는 물이 흡입면을 지날 때 증기압보다 낮은

압력영역에서 형성되며, 공동이 유동방향으로 진행하다가 압력을 회복되면서 높은 영역에 이르러 순간적으로 붕괴하면서 소멸된다. 공동의 붕괴 및 소멸 과정에서 발생하는 강한 충격력은 날개 면에 가해지게 되며 이러한 현상이 지속적, 주기적으로 발생할 때에는 날개 표면이 침식되거나 심한 경우에는 운항 중에 날개가 부분적으로 파손되는 경우도 발생할 수 있다.

캐비테이션 발생을 피하기기 위해 선박 제어용

접수일: 2009년 6월 23일, 승인일: 2009년 11월 2일

† 교신저자, shlee@inha.ac.kr, 032-860-8813

핀에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 특히 최근 6년 동안 타에 발생하는 캐비테이션 문제가 크게 대두되어 캐비테이션 발생을 줄이기 위한 다양한 연구가 수행되었다.

일반적으로 고속 컨테이너선의 프로펠러 후류의 고속영역에서 작동하는 선박 타는 프로펠러 후류의 회전유동에 의해 타로 유입되는 유동의 받음각이 증가하여 타의 앞날 부근에 얇은 층 캐비테이션(Fig. 1 (D))과 간극유동과 주유동이 만나면서 흡입면의 간극 주위에서 캐비테이션(Fig. 1 (A, B, C))이 발생하게 된다.

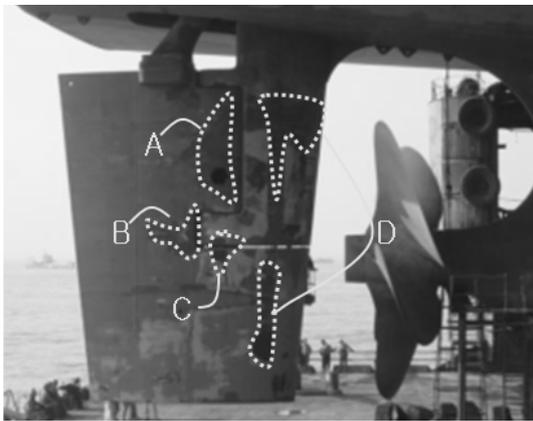


Fig. 1 Damages caused by cavitations on the surface of a horn-type rudder

이러한 타 캐비테이션 중 간극 주위에 발생하는 캐비테이션은 타에 큰 손상을 입힌다. 간극주위에서 발생하는 캐비테이션 현상을 감소시키기 위해 간극 사이에 차단봉(Bu et al. 2004, Paik et al. 2004, Oh et al. 2009a, 2009b)이나 유동분사 장치(Seo et al. 2009), 틸새유동 차단 장치(Oh et al. 2008), baffle plate등을 장착하여 간극을 통해 드나드는 유량을 감소시켜 간극 주위의 캐비테이션을 감소시킨 연구가 수행된 바 있다.

또한 프로펠러 후류에 있는 타 캐비테이션을 효과적으로 모사하기 위해 포텐셜 이론을 이용한 수치적 연구(Kong et al. 2002, Kim et al. 2006)와 이상화한 프로펠러 후류의 점성유동 계산

을 이용한 수치적 연구(Bu et al. 2004, Choi and Chung 2007) 등에서 프로펠러 후류의 유동장을 고려하여 타 캐비테이션을 감소시키기 위한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 선박의 저속 조종 성능을 향상시키기 위해 응용된 칸다 장치(Seo et al. 2008b, 2008c)를 활용하여 타의 간극 유동을 차단함으로써 고속에서 간극유동에 의해 발생하는 캐비테이션 손상(Fig. 1 (A, B, C))을 줄이기 위한 수치적인 연구를 수행하였다. 이 연구의 주안점은 타의 간극을 통하여 압력면 쪽으로 물을 분사하여 압력면에서 유입되는 간극유동을 차단함으로써 타 캐비테이션을 저감할 수 있는지 여부를 확인하는 것이다.

본 연구의 대상은 타 캐비테이션이 문제 되는 8000TEU급 컨테이너 선의 혼-타이다. 혼과 핀틀의 대표적인 단면에 대한 2D 수치계산을 통해 압력면 간극으로 유입되는 유동을 효과적으로 차단하기 위한 유체공급량을 조사하였으며, 그 분석결과를 3차원 타 형상에 적용하여 일반적인 혼-타의 간극을 통하여 압력면 방향으로 유체를 공급하면 간극유동을 억제할 수 있음을 확인하였다.

타 주위 캐비테이션 유동 특성은 RANS 방정식에 캐비테이션 모형을 적용하여 FLUENT Ver. 6.3으로 계산하였다. 이 때 수치격자로는 GRIDGEN (Ver.15.9)을 사용하여 구성된 육면체 격자를 사용하였다.

2. 대상 모형 및 계산조건

2.1 타의 제원 및 형상

Fig. 2에는 본 연구의 대상선박인 8000TEU급 컨테이너선의 혼-타 형상을 보이고 있는데 이 선박은 설계속도 25 kts에서 타 캐비테이션이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그림과 같이 이 혼-타의 스펠은 12.3m이며, 혼 단면(horn section)인 section A의 코드길이는 0.8m 핀틀부 단면(pintle section)인 section B의 코드길이는 0.746m이다. 또한 수직간극 V1과 V2, 수평간극 H2의 길이는 50mm이고, H1의 간극 길이는 100mm이다.

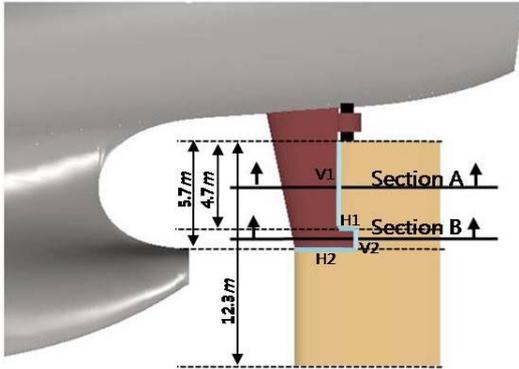


Fig. 2 Schematic diagram of the rudder

Fig. 3은 상부 수직 간극(V1)을 구성하는 고정부 단면(fixed portion)이며 유체를 공급하기 위한 노즐은 회전축에 배치되어 있다.

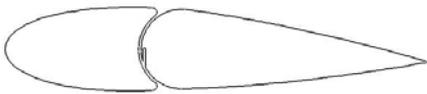


Fig. 3 The shape of horn section (section A)

Fig. 4는 가동부 단면(movable portion)으로서 수직간극(V2)를 구성하며 마찬가지로 그림과 같이 압력면 쪽으로 들어오는 간극유동을 막기 위한 노즐을 회전축에 배치하였다. 노즐의 간극은 혼과 타판 사이의 간극과 같은 50mm이며, 노즐배치에 관한 자세한 내용은 Seo et al. (2008c)의 논문에서 상세히 기술되어 있다.



Fig. 4 The shape of pintle section (section B)

일반적으로 선박의 최대 타각은 $\pm 35^\circ$ 이지만 실제 운항 상에서 최대 작동각으로 사용되는 경우는 극히 드물며, 보통 $3^\circ \sim 4^\circ$ 의 타각으로 선박의 직진성을 확보할 수 있다고 한다 (Choi and Chung 2007). 최근 이러한 작은 타각에서도 캐비테이션에 의한 타 침식이 발생되고 있으므로 본 연구에

서는 타각 3° 일 때 축척비 10:1인 모형 주위에 발생하는 타 캐비테이션 현상을 수치적으로 해석하였다.

3. 수치해석

3.1 계산 알고리즘

캐비테이션의 발생할 경우 타 주위의 유동은 물과 증기의 상변화가 존재하는 이상(Two Phase) 유동이며, 비압축성 난류유동의 특성을 갖는다고 가정한다. 이상 유체의 지배방정식은 질량과 운동량 보존식인 연속방정식과 Reynolds averaged Navier-Stokes으로 표현되며 자세한 식은 Seo et al.(2008a)에 나타나 있다.

지배방정식을 유한체적법(Finite Volume Method)으로 차분화하였다. 지배방정식은 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환하였으며 이 때 대류항과 체적비(volume of fraction)는 QUICK법, 확산항은 중심 차분법, 시간에 대한 미분항은 1차 음해법을 사용하여 이산화하였다. 또한 다양한 난류모형 중에서 Seo et al.(2008a)가 모형시험결과와 캐비테이션 형상을 비교·검토할 때 사용한 Realizable $k-\epsilon$ 모형을 사용하였으며, 압력방정식으로는 Rhin/Chow방법을 수정한 FLUENT의 표준방법을 (FLUENT 2005), 속도-압력의 연성은 SIMPLEC 방법을 사용하였다. 또한 완화계수 값으로는 압력에 대해서는 0.3, 운동량에 대해서는 0.5, 난류에 대해서는 0.5를 주었다.

3.2 격자구성 및 계산 조건

2D 수치계산 영역은 3D의 계산영역과 동일하며, 총 격자수는 40,000개이다. 3D 수치계산 영역은 Fig. 5에 보인다. 유동방향은 +X축, 이에 직교하는 연직 상방향은 +Z축으로 정하였으며 타 표면 격자수는 스펀방향으로 100개, 코드 방향으로 100개, 수평간극과 수직 간극에 각각 25개를 분포시켰으며, 총 격자수로는 1,600,000개를 사용하였다.

계산영역으로 C-H형 topology를 선택하였으며, 이 때 최대 코드길이 C로 무차원한 계산영역의 범위는 각각 $-3 < X/C < -2.5$ 와 $-2.5 < Y/C <$

2.5 에 해당되며, 간극 주위의 유동을 집중적으로 보기 위해 Z 방향으로 스펀이 끝나는 부분 외에 격자를 분포하지 않아 타에 의한 3차원 효과를 제외시켰다. 타각에 의한 격자의 질을 향상시키기 위한 방법으로서 고정부와 가동부 사이에 격자점이 일치하지 않는 non-matching interface를 사용하였다. 또한 유체 분사로 인한 격자의 영향을 알아보기 위해 Seo et al.(2008b)를 참고하여 난류경계층의 특성을 잘 표현하기 위하여 벽면에서 가장 가까운 격자점의 Y+ 값이 45를 넘지 않도록 조절하였다.

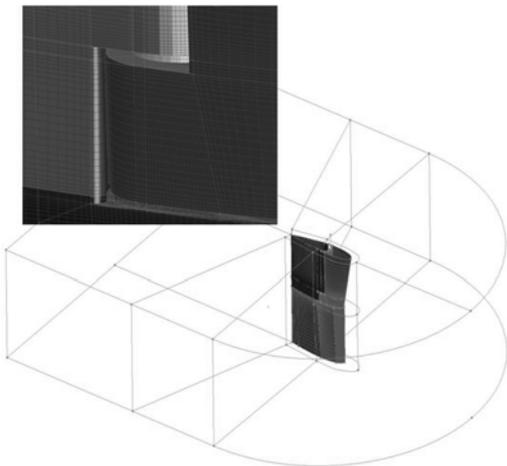


Fig. 5 Grid system around the rudder

경계조건으로는 유입면에서는 균일류 조건 ($u = 1, v = w = 0$)을, 유출면에서는 정압력이 일정하다는 조건을 사용하였으며, Z축의 상부에서는 대칭조건을, 날개표면에서는 계산시간의 효율성을 고려하여 벽항수를 사용하였다. 또한 유동을 공급하기 위한 노즐 경계면에서는 공급유량에 맞추어 수직속도 성분을 정의하였다(Dirichlet boundary condition).

핀틀부 단면 코드의 길이 0.746m를 기준으로 한 레이놀즈 수가 약 4.45×10^6 일 때 2D 수치계산을 수행하였다. 또한 3차원 혼-타의 계산에서는 캐비테이션 수가 1일 때 캐비테이션 모델을 사용하여 캐비티의 형상을 추정하였다.

계산에 사용된 무차원수는 압력계수와 캐비테이션 수이며 다음 식과 같이 정의된다. 이 때 대기압 P_{atm} 는 101.3 kPa, 밀도 ρ 는 998.2 kg/m³, 그리고 20°C인 물의 증기압 p_v 는 2.3 kPa로 주었다.

$$C_P = \frac{p - p_{atm}}{\frac{1}{2} \rho V^2}, \quad \sigma_v = \frac{p_{atm} - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

또한 유체 공급장치의 노즐을 통해 압력면 간극으로 분사되는 유동의 모멘텀 계수(C_j)는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_j = \frac{\dot{m} V_{jet}}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S C} \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 유체 공급장치의 노즐을 통해 분사되는 질량유량(kg/s)이며, V_{jet} 는 노즐을 통해 빠져나가는 유동의 평균유속, C 는 날개의 코오드 길이, ρ, V_∞ 는 유입되는 유동의 밀도와 속도, S 는 노즐의 분출구 면적, 즉, 노즐의 스펀방향 길이와 노즐 높이의 곱을 의미한다.

4. 유체 공급장치를 활용한 타의 간극 주위의 캐비테이션 성능변화

4.1 2차원 유동해석 결과

Fig. 6에는 혼 단면(horn section)의 압력면에서 간극을 통하여 공급하는 유동의 운동량을 변화시켰을 때 나타나는 간극 주변 압력분포가 비교되어 있다. Fig. 6(a)는 $C_j = 0.000$ 일 경우로 간극을 통하여 유체를 공급하지 않을 때이며, Fig. 6(b)~(d)은 유체공급 장치를 활용하여 압력면 방향으로 공급되는 유동의 운동량을 증가시켜가며 계산한 경우이다.

그림을 살펴보면 $C_j = 0.000$ (Fig. 6(a))일 때 혼 압력면의 끝단부에서 간극사이로 빨려 들어가는 유동과 혼의 끝단부의 심한 곡률로 인해 국부

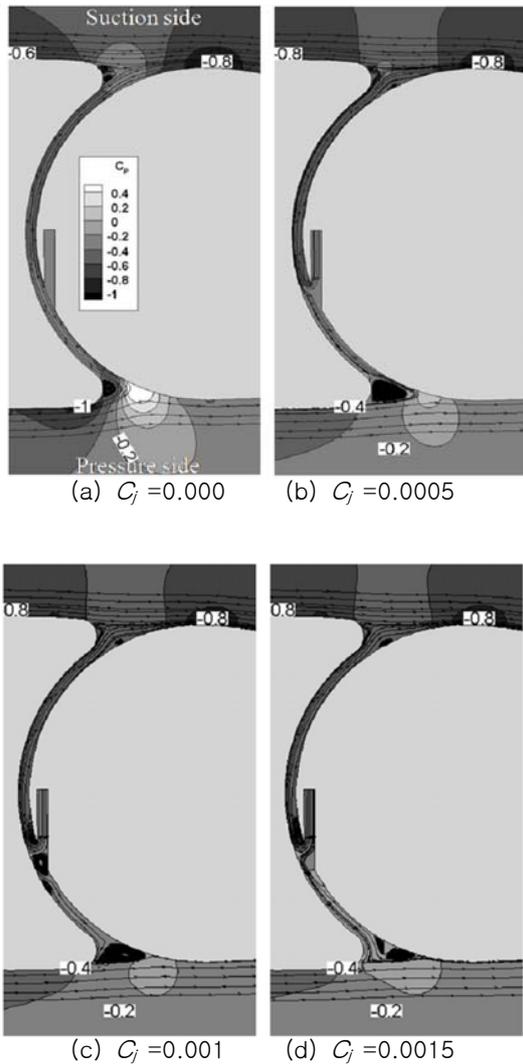


Fig. 6 The C_p distributions around the horn section at various C_j ($R_r=4.45 \times 10^6$, $\alpha=3^\circ$)

압력계수가 -1까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 낮은 압력은 압력면 방향으로 유동을 공급하면 사라지는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(b)~(d)). 이는 공급된 유동이 압력면에서 간극을 통하여 들어오는 유동을 효과적으로 차단하여 간극유량을 줄여줌으로서 압력면 혼의 끝단 부 압력이 상대적으로 높아짐에 기인한다. 즉, 혼 단면에서 혼의 끝단부에서 발생하는 낮은 압력점은 간

극 유동에 의해 지배되므로 간극유동을 막을 경우 캐비테이션의 위험을 피할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 6(c)에서 보듯이 C_j 가 0.001이 되면 혼의 끝단부 압력이 상당히 회복된 것을 알 수 있다.

혼 단면의 흡입면 부근에서 유동공급이 없을 경우(Fig. 6(a)) 혼 표면에서 압력계수가 -0.6까지 떨어지나 운동량 계수가 0.0005 (Fig. 6(b))로 증가하면 압력이 -0.8로 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 간극 유동 차단에 의해 흡입면 전체의 압력이 낮아지고 양력이 증가하였기 때문이다. 또한 흡입면의 가동부 앞날 부근에 나타나는 낮은 압력점($C_p=-0.8$)은 간극유동을 차단하여도 회복되지 않는 것으로 보아 가동부 주위의 유동은 간극유동보다는 가동부의 곡률과 그 주위 유동의 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 따라서 이러한 부분의 압력분포를 개선하기 위해서는 고정부의 형상이나 가동부 앞날 부근의 곡률에 따른 흡입면 주위의 압력분포 변화를 확인하기 위한 연구가 필요할 것으로 보인다.

Table 1은 유체공급 장치를 통해 압력면에서 간극을 통하여 공급된 유동의 운동량에 따른 혼 단면의 간극 유량과 양력성능의 변화를 수치적으로 계산한 결과를 비교하고 있다.

Table 1 Comparison of the influence of injection upon the gap flow and lift (horn section)

C_j (kg/s)	Flow rate (kg/s)		Flow reduction (%)	C_L
	Pressure side	Suction side		
0.0000 (0.00)	-20.0	20.0	-	0.192
0.0005 (5.78)	-3.14	8.92	55.4	0.224
0.0010 (8.18)	0.54	7.64	61.8	0.235
0.0015 (10.69)	3.23	7.46	62.7	0.241

유체공급 노즐을 통해 압력면 방향으로 유체가 공급되지 않을 경우($C_j = 0.000$) 압력면에서 간극

으로 20kg/s유량이 유입되고 동일한 양이 흡입면으로 빠져 나가게 된다. 그러나 유동을 공급할 경우($C_j = 0.0005 \sim 0.0015$) 압력면에서 간극으로 들어오는 유동이 줄어들어 흡입면으로 나가는 유량도 줄어들게 된다. 또한 $C_j = 0.001$ 인 경우에는 압력면에서 간극을 통해 들어오는 유량은 없어지고 유체공급장치 노즐을 통해 공급한 유량만 흡입면 간극을 통해 빠져나가게 됨을 볼 수 있다. $C_j = 0.001$ 인 경우 간극유동이 효과적으로 차단되어 흡입면 간극으로 빠져나가는 유량이 $C_j = 0.000$ 일 때에 비해 약 62% 감소하고 양력성능도 23% 정도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 핀틀부 단면(pintle section)의 간극에서 압력면 방향으로 다양한 운동량의 유동을 공급하였을 때 간극의 흡입면과 압력면 부근에서의 압력분포를 나타낸다. Fig. 7(a)는 $C_j = 0.000$ 일 경우로 유동을 공급하지 않을 때이며, Fig. 7(b)~(d)는 유체공급 장치를 활용하여 압력면 쪽으로 공급되는 유동의 운동량을 증가시켜가며 계산한 경우이다.

$C_j = 0.000$ (Fig. 7(a))일 때 간극을 통하여 압력면에서 흡입면 방향의 유동이 발생하는데 비해 유체를 공급할 경우에는 간극유동이 차단되는 현상을 볼 수 있다. 또한 유동을 공급하지 않은 경우 타판의 흡입면과 압력면 앞날부에서는 압력계수가 -1이나 유체를 공급할 경우($C_j = 0.001$) 압력계수가 -0.8로 회복되는 것을 알 수 있다.

Table 2는 간극을 통해 압력면으로 공급된 유체의 운동량에 따른 간극유동과 양력성능의 변화를 나타낸 것이다. 유체공급 노즐을 통해 압력면 쪽으로 유체가 공급되지 않을 경우($C_j = 0.000$) 압력면에서 간극으로 22.86 kg/s의 유량이 유입되고 동일한 양이 흡입면으로 흘러 나가게 된다. 그러나 간극으로 유체를 공급할 경우($C_j = 0.0005 \sim 0.0015$) 압력면에서 간극으로 흘러 들어오는 유량이 줄어들어, 흡입면으로 나가는 유량 또한 감소하게 된다. $C_j = 0.001$ 인 경우에는 압력면에서 간극을 통해 들어오는 유량이 2.2kg/s로 감소하게 되고 10.38kg/s의 유량만 흡입면으로 빠져나가게 된다. 따라서 $C_j = 0.001$ 인 경우에 흡입면 간극을 통하여 빠져나가는 유량은 $C_j = 0.000$

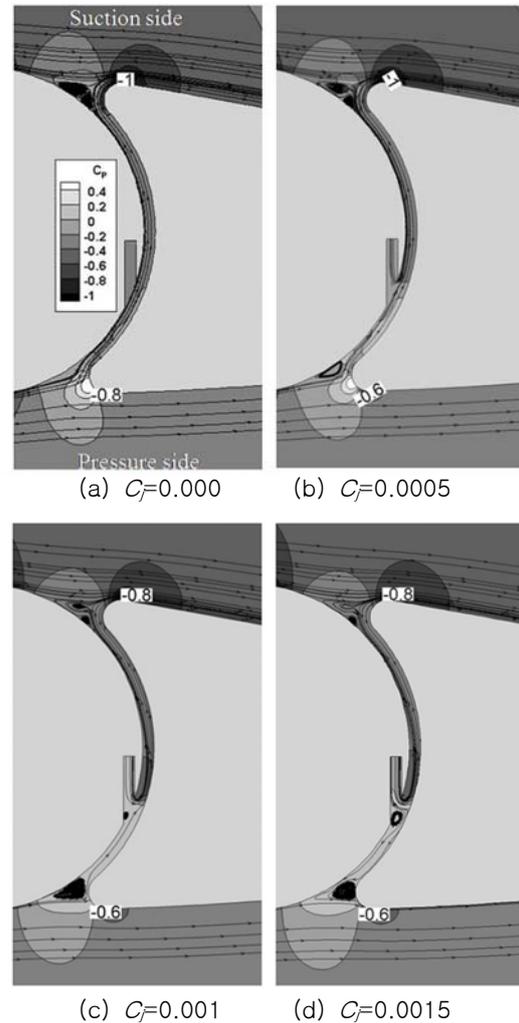


Fig. 7 The C_p distributions around the pintle section at various C_j ($R_f = 4.45 \times 10^6$, $\alpha = 3^\circ$)

에 비해 약 54.6%가 줄어들게 되며, 이에 따라 양력성능은 약 17% 증가하게 됨을 볼 수 있다.

흔 단면과 핀틀부 단면에서 $C_j = 0.0015$ 이상이 되면 공급된 유동의 일부가 압력면으로 흘러나가게 되어 간극유동의 감소율과 양력성능 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 따라서 적절한 운동량 계수를 0.001로 선정하였으며 4.2절의 3차원 타 해석의 경우에는 운동량 계수 C_j 를 0.001로 고정하여 수치계산을 수행하였다.

Table 2 Comparison of the influence of injection upon the gap flow and lift (pintle section)

C_j (kg/s)	Flow rate (kg/s)		Flow reduction (%)	C_L
	Pressure side	Suction side		
0.0000 (0.00)	-22.86	-22.86	-	0.187
0.0005 (5.78)	-9.32	15.13	33.8	0.195
0.0010 (8.18)	-2.20	10.38	54.6	0.227
0.0015 (10.69)	1.46	9.23	59.6	0.232

4.2 3차원 타 주위의 유동해석 결과

4.1절의 타 단면 주위 유동해석 결과를 통해 간극유동을 효과적으로 제어하기 위한 운동량계수를 0.001로 선정하였다.

3차원 유동해석의 경우 캐비테이션 모델을 사용하여 받음각(α) 3°, 캐비테이션 수(σ) 1, 레이놀즈 수(Rn) 4.45×10^6 에서 수치계산을 수행하였다. 수치해석 과정에서 공동현상은 증기체적비(vapor volume fraction) 10%에서 발생한다고 가정하였으며, 난류모형으로는 공동현상을 비교적 잘 예측한다고 알려져 있는 Realizable k- ϵ 모형을 사용하였다(Seo et al. 2008a).

Fig. 8은 유체 공급장치를 활용하여 압력면 간극 방향으로 유체를 공급하지 않은 경우 ($C_j=0.000$)와 공급한 경우($C_j=0.001$)에 대한 혼타의 표면 압력계수와 공동 형상을 보이고 있으며, 공동 근처에 화살표로 표시하여 공동 발생지역을 쉽게 확인 할 수 있게 하였다. 그림에서 보듯이 3차원 혼타의 간극을 통하여 압력면 방향으로 유동을 공급하여 간극유동을 줄여 줌으로써 캐비테이션의 발생이 억제되는 것을 볼 수 있다. 흡입면의 핀틀부분에서도 유동을 공급함으로써 공동 발생영역이 줄어들었음을 볼 수 있다. 그러나 상부 핀틀부에서는 수직간극유동을 차단하면 오히려 수평간극을 통한 유동이 증가함으로써 국부적으로 공동현상이 심화되는 것을 볼 수 있다.

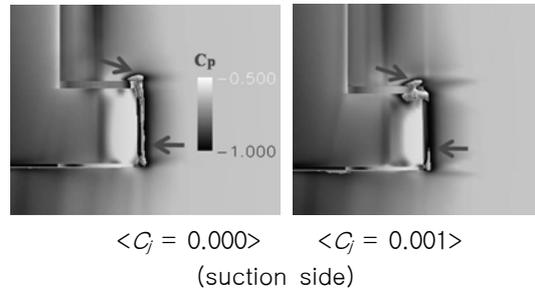
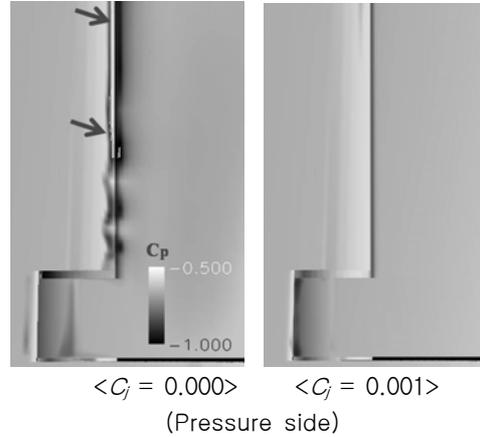


Fig. 8 Comparison of pressure distributions and cavitation shapes around the pintle at $C_j = 0.000$ and 0.001 ($Rn=4.45 \times 10^6$, $\alpha=3^\circ$, $\sigma=1.0$)

또한 Table 3에서 볼 수 있듯이 혼과 핀틀부의 간극유동을 차단함으로써 $C_j = 0.001$ 일 때 양력 성능을 약 24% 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 양력성능 관점에서도 간극유동 제어에 관한 연구가 필요할 것으로 보인다.

Table 3 Comparison of the lift performance with and without the flow injection system ($Rn=4.48 \times 10^6$, $\alpha=3^\circ$)

	$C_j = 0.000$	$C_j = 0.001$
C_L	0.188	0.234

6. 결론

본 연구에서는 타 캐비테이션을 감소시키기 위

하여 타 간극 유동을 제어할 수 있는 유체공급 장치를 활용하였다. 즉, 간극유동이 들어오는 방향으로 유동을 분사하여 이 때 얻어지는 간극유동의 저감과 타 캐비테이션 성능 향상을 수치적인 방법을 통해 추정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 2차원 유동해석 결과 혼 단면에서 유체 공급장치를 이용하여 간극을 통해 압력면 쪽으로 운동량계수 $C_f = 0.001$ 크기의 유동을 공급하였을 때 간극유동이 약 62% 감소되고, 핀들 단면에서는 약 55%가 감소됨을 확인하였다.

2) 타의 3차원 유동해석 결과 압력면의 혼 뒷날부근에서 발생하는 캐비테이션과 흡입면의 핀들부 앞날 부근에서 발생하는 캐비테이션 현상은 간극유동을 차단하면 크게 개선됨을 확인하였다.

3) 그러나 혼-타의 핀들부 수평간극에서는 효과적인 유동차단장치가 적용되지 않았기 때문에 수직간극 유동을 차단하면 오히려 타 캐비테이션이 국부적으로 악화되고 있음을 볼 수 있다 따라서 수평간극의 영향을 줄이기 위한 연구가 추가로 수행되어야 할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 인하대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Bu, K.T., Song, I.H. and Sin, S.C., 2004, "Numerical Simulation for the Rudder in order to Control the Cavitation Phenomena," Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 42-50.
- Choi, J.E. and Chung, S.H., 2007, "Characteristics of Gap Flow of a 2-Dimensional Horn-Type Rudder Section," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 2, pp. 101-110.
- Choi, J.E., Chung, S.H. and Kim, J.H., 2007, "Cavitating-Flow Characteristics around a Horn-Type Rudder," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 228-237.
- "FLUENT 6.1 user's guide," 2005, Fluent Inc.
- Kim, G.D., Moon, I.S., Kim, K.Y., Van, S.H. and Lee, C.S., 2006, "Numerical Calculation and Validation for Rudder Cavitation of a Large Container Ship," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 5, pp. 568-577.
- Kong, D.S., Han, J.M. and Lew, J.M., 2002, "A Study on the Pressure Distributions of Horn Rudder Operating in Ship's wake," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 2, pp. 1-10.
- Oh, J.K., Lee, C.M., Lee, H.B., Seo, D.W., Rhee, S.H., Suh, J.C., Lee, S.H. and Kim, H., 2008, "Rudder Gap Cavitation and its Suppression Devices," Proc. of FEDSM2008, Aug. 10-14, Jacksonville, Florida, USA.
- Oh, J.K., Seo, D.W. and Kim, H., 2009a, "Numerical Study on the Gap Flow of a Rudder System with Bisymmetric Blocking Bar," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 5, pp. 460-470
- Oh, J.K., Seo, D.W., Kim, H. and Lee, S.H., 2009b, "A Numerical Study for Reduction of Rudder Cavitation with Gap Flow Retardation," Proc. of 10th FAST2009, Oct. 5-8, Athens, Greece, pp. 51-62.
- Paik, B.G., Kim, K.Y., Ahn, J.W., Kim, Y.S., Kim, S.P. and Park, J.J., 2008, "Experimental Study on the Gap Entrance Profile Affecting Rudder Gap Cavitation," Journal of Ocean Engineering, Vol. 35, pp. 139-149.
- Seo, D.W., Kim, J.H. and Lee, S.H., 2008a, "On the influence of End Plates upon the Tip Vortex Cavitation Characteristics of a Fin Stabilizer," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp. 18-28.
- Seo, D.W., Kim, J.H., Kim, H. and Lee, S. H.,

2008b, "A Numerical Study on the Geometry of Jet Injection Nozzle of a Coanda Control Surface," Proc. of 3rd PAMMES and AMEC2008, Oct. 20-22, Makuhari Messe, Chiba, Japan, pp. 107-116.

- Seo, D.W., Kim, J.H., Kim, H. and Lee, S. H., 2008c, "Influence of Jet Nozzle Arrangement on the Performance of a Coanda Foil," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 6, pp. 569-578.
- Seo, D.W., Lee, S.H., Oh, J.K. and Kim. H., 2009, "A Numerical Study for the Efficacy of Flow Injection on the Diminution of Rudder Cavitation," Proc. of 13th IMAM2009, Oct. 12-15, Istanbul, Turkey, pp. 523-530.



< 서 대 원 > < 오 정 근 > < 이 승 희 >