

흔-타의 간극 캐비테이션 침식 저감을 위한 실험적 연구

김성표[†]*, 박제준*, 김용수*
장영훈*, 최영복*, 백부근**

대우조선해양(주)*
한국해양연구원 해양시스템안전연구소**

An Experimental Research on Gap Cavitation Erosion of Semi-spade Rudder

Sungpyo Kim[†]*, Jaejun Park*, Yongsoo Kim*
Younghun Jang*, Youngbok Choi* and Bugeun Paik**

DAEWOO Shipbuilding & Marine Engineering Co., LTD.*
Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI**

Abstract

Cavitation related erosion damages on semi-spade rudder generally occur at around leading edge of lower-face and behind gap of lower pintle. To get the idea of gap entrance profile for the latter case, a series of tests with large models has been carried out at MOERI. In the tests, the flow pattern around lower pintle have been investigated and visualized by high speed camera. Additionally, cavitation inception tests and pressure measurements have also been conducted for better comparison. As a result a new model (F rudder) has been developed. The new model turned out to have stable pressure distribution along the surface and so the cavitation inception speeds within $\pm 5^\circ$ of rudder angle were delayed approx. 4 knots in average.

※Keywords: Semi-spade rudder(흔-타), Gap cavitation(간극 캐비테이션), High speed camera(고속카메라), Pressure measurement(압력 계측)

1. 서론

상선에 있어서 방향타의 캐비테이션 침식 현상은 과거에도 있어왔지만 대부분 오랜 운항에 의한 경미한 손상이어서 그다지 문제시 되지 않았지만

오늘날의 고속/고마력/대형화된 선박, 특히 추진기의 부하가 큰 대형 컨테이너 선박들은 인도 후 수년 내에 타 일부가 유실될 정도의 심각한 침식 손상이 보고되는 경우도 종종 발생하고 있어 선주와 조선소 모두에게 해결해야 할 숙제로 남아있다.

Fig. 1은 대형 컨테이너 운반선에 발생하는 흔-타의 침식 현상을 보인 것인데 가장 일반적인 침식 손상은 두 영역 즉, 흔-타 축심 아래의 앞날

접수일: 2006년 6월 9일, 승인일: 2006년 9월 13일

†교신저자: spkim@dsme.co.kr, 055-680-5562

근처와 하부 핀들의 간극 주위에서 가장 심각한 손상이 발생한다. 특히 혼-타의 경우 Fig. 2에 보인 것과 같은 간극 주위의 침식은 좌우 양현에 동시에 발생하는 특성을 보인다.

타에 있어서 침식의 원인이 되는 캐비테이션 현상은 추진기 후류의 직접적인 영향을 받으므로, 추진기의 설계 차이에 의한 원인도 일부 포함되긴 하지만 후류의 회전 성분 때문에 Fig. 3에 보인 바와 같이 추진기 축심 상부는 좌현에서 우현쪽으로 향하는 유입류, 그리고 축심 하부는 그 반대 방향의 타 유입류가 만들어 지므로 가동부의 좌현 축심 아래 부분은 항상 캐비테이션 침식에 노출되어 있게 되며(Brix et al. 1993, p117), 추진기면 바깥에 위치한 타의 상부는 반류 영향에 의해 유속이 느리므로 하부에 비해 캐비테이션 발생 위험이 상대적으로 낮다.

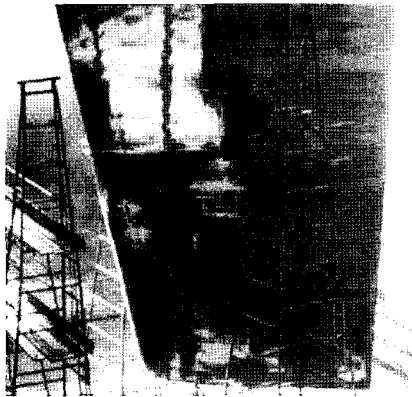


Fig. 1 Typical erosion damage occurred on the surface of semi-spade rudder due to cavitation



Fig. 2 Cavitation erosion damage around the entrance of the vertical gap

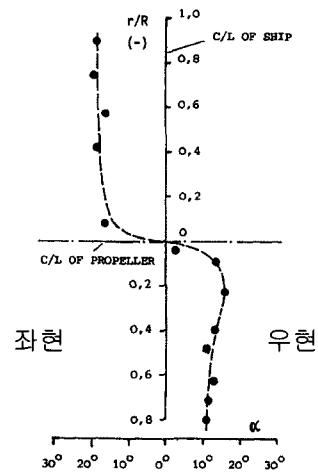


Fig. 3 An amount of oblique inflow at the rudder (model test results of single screw container vessel with fixed pitch propeller, sense of rotation: clockwise, Ship speed: 26.6 kts at PD=36765kW)

최근에 대우조선해양주는 이러한 가동부의 침식을 저감하고 간극 주위의 침식을 근본적으로 없애는 방안으로써 입사류와 같은 방향으로 타의 앞날(leading edge)부분이 비틀어진 단면(twist)을 가진 전가동타(full spade rudder)를 대형 컨테이너 선박에 적용하여 인도한 바 있다. 전가동타(full spade rudder)는 타 자체 무게뿐만 아니라 타에 걸리는 하중이 하나의 축에 의해 지지되는 구조이므로 과거에는 비교적 소형 선박에 적용되어 왔으나, 대형 선박의 캐비테이션 침식 문제해결을 위한 새로운 방안으로 발전하고 있다.

그러나, 타의 제작비, 고객의 선호도 등 여러가지 요인에 의해 혼-타를 선정해야 하는 경우가 아직은 지배적이며, 타 캐비테이션에 의한 침식 손상이 발생한 선박의 수리방안 마련 등의 목적으로도 혼-타의 침식 억제 기술이 필요한 상황이다.

위에서 살펴본 바와 같이 혼-타에서의 침식 발생이 가장 우려되는 부위는 간극 주변과 좌현 축심 아래의 앞날이다. 축심 아래 면은 혼-타에서도 비틀어진 단면을 적용하여 상당한 수준의 개선을 기대할 수 있으며, 또한 간극 주변의 캐비테이션 침식을 억제하기 위한 실험적인 연구를 수행하여

새로운 단면 형상을 개발 하였다. 이 연구 결과 중 의미 있는 몇 가지의 시험 결과를 소개하고자 한다.

2. 모형 시험의 수행

최대 출력 약 9 만 3 천 마력의 엔진을 장착한 8,000TEU 급 대형 컨테이너 선박을 대상으로 선정하고, 이 선박에 장착되는 흔-타 모델을 최대한 크게 제작하였다. 간극 주위의 유동 현상을 관찰하기 위해서는 모형의 크기는 클수록 좋는데 본 모형시험에서는 모형 스케일을 1/10 로 결정하고 하부 핀들이 모형의 중심이 되도록 타의 위와 아래를 트리밍하여 Fig. 5와 같은 부분 모델(part model)을 만들었다(백부근 등 2006).

추진기에 의해 가속되는 타 유입류의 속도(Vt)는 추진기와 타의 상대적인 위치에 따라 달라지는데 하부 핀들의 중간 높이에서의 유속을 균일하게 적용하기로 하였고, 당사 실적선 자료를 토대로 타 유입류의 속도(Vt)를 선속(Vs) 보다 20%높은 유속을 갖도록 결정하였다. 본 연구에서의 모든 시험은 추진기 후류를 고려하지 않은 균일류에서 수행 하였다.

타 캐비테이션 시험을 수행할 캐비테이션 수(σ)의 영역은 대상 선박을 포함하는 4,000TEU 급 이상의 컨테이너 선박이 포함 될 수 있는 넓은 영역을 선정하였다. 모형시험 수행을 위해 선정된 캐비테이션 수는 1.0, 1.2, 1.4 1.6 의 4 개이다.

참고로, 대상 선박의 캐비테이션 수는 1.2 근처인 것으로 계산되었다.

캐비테이션 수는 다음과 같이 계산 하였다.

$$\sigma = (P_o - P_v) / (0.5\rho V_t^2) \quad (1)$$

여기서 P_o 는 캐비테이션 터널 관측부의 압력이고 P_v 는 해수의 증기압, ρ 는 물의 밀도 이다. 그리고 V_t 는 타 유입류의 속도를 의미하는데 모형시험 상황에서는 흔-타 모델의 AP 점을 지나는 터널 내부 유속을 사용하였다.

모형시험은 각각의 캐비테이션 수에 대해 0° ~ 10°사이를 2°간격으로 타각을 회전시키면서 고속

카메라 촬영, 캐비테이션 초생시험 그리고 일부 모델에 대한 압력의 계측을 수행하여 CFD 해석의 검증 및 추진기 후류와 간극을 고려한 해석의 검증 자료로 활용하였다(박제준 등 2006).

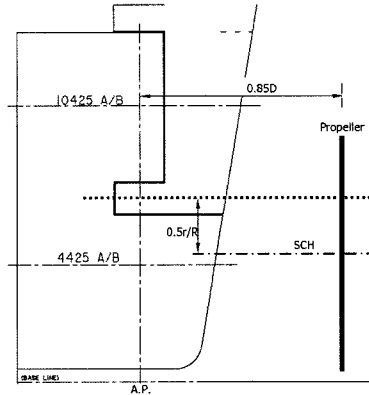


Fig. 4 Arrangement of propeller and rudder position

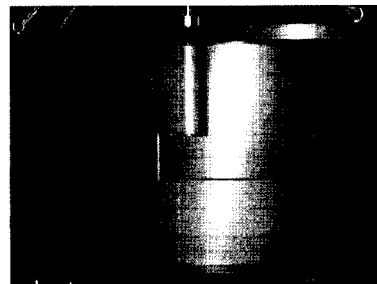


Fig. 5 Semi-spade rudder model for cavitation tests in MOERI (part model, scale ratio= 1/10)

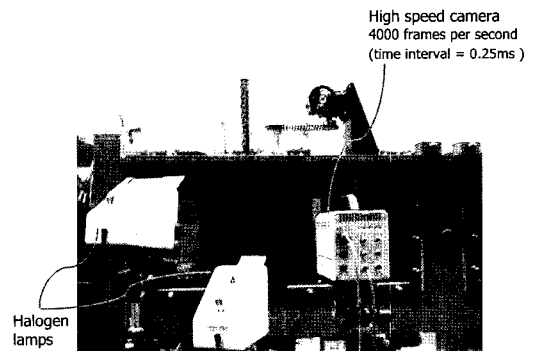


Fig. 6 Model test setup for cavity observation & recording with high speed camera

Table 1 Alternatives for model tests

모델	후폭비 (t/c ratio) %		간극 (mm)	설명
	고정부	가동부		
A	22	22	50	- 전통적 간극 형상
B	21	22	50	- 새로운 간극 형상 - 배플 플레이트 부착
C	21	22	50	- 전통적인 간극 형상 - 배플 플레이트 부착
D	21	22	20	- 새로운 간극 형상 - 배플 플레이트 부착
F	22	22-top, 21-bottom	20	- 새로운 간극 형상 - 배플 플레이트 부착 - 압력 계측용 모델 구성
G	22-top, 21-bottom	22-top, 21-bottom	50	- 전통적인 간극 형상 - 배플 플레이트 미 적용 - 압력 계측용 모델 구성

Fig. 6은 고속카메라 촬영을 위해 셋업한 시험 장비들을 보여주고 있으며, Table 1에 본문에서 언급할 혼-타 모델에 대한 특징을 설명하였다. 모든 모델의 핀들 수직 간극 내부에 돌출부(half round bar)를 설치하였다.

3. 캐비테이션 관측 시험 결과

3.1 단면 형상에 따른 캐비테이션 비교

Fig. 7에 보인 두 모델, B, C rudder의 단면은 하부 핀들의 중심 높이의 단면인데 두 모델 모두 고정부 후폭비(thickness-chord ratio)는 21%, 가동부 22%인 NACA643 단면을 채택하였고, 새로

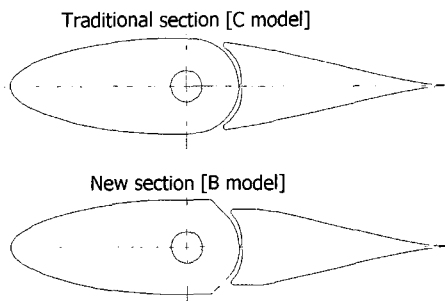


Fig. 7 Comparison of section shape of lower pintle

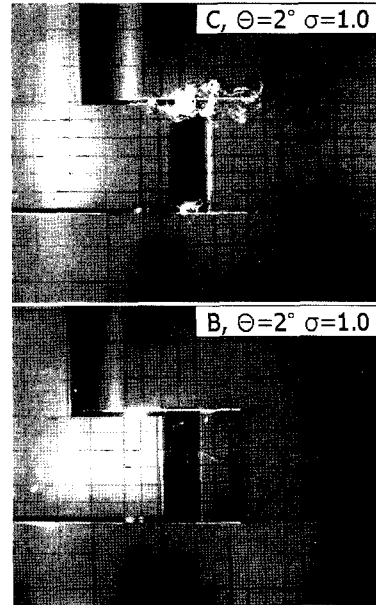


Fig. 8 Observed gap cavitation around lower pintle with traditional section shape and newly developed section (C rudder: with traditional shape, B rudder: with new section shape)

개발한 모델인 B rudder는 기존 단면의 간극 입구 부분 형상을 극부적으로 수정한 형상으로 이해할 수 있다. 또한, 수평 및 수직 방향의 간극 크기는 모두 실선 스케일로 50mm로 통일하였다.

개발 모델인 B rudder는 CFD 계산을 통해 개발한 모델로서 흡입면의 간극 입구에 발생하는 급격한 압력 저하 현상과 간극을 따라 심한 압력의 변동을 개선한 모델로서 고정부와 가동부의 간극 주위 표면에 일정한 수평 구간을 두고 고정부와 가동부 사이에 적정 수준의 단차를 둔 것이 특징이다.

Fig. 8은 두 모델의 타각 2°일때 흡입면을 고속 카메라로 촬영한 영상을 비교한 것인데 기존의 단면 대비 개발 단면인 B rudder는 캐비티가 거의 보이지 않을 정도로 개선된 것으로 밝혀졌다. 또한, 기존 단면인 C rudder의 수평 간극 주위에 집중적으로 발생한 캐비테이션 형상은 Fig. 2에 보인 일반적인 침식 손상의 형상과 매우 유사한 모습을 하고 있음을 알 수 있다.

3.2 배플 플레이트의 캐비테이션 영향

A rudder 와, C rudder 는 동일한 단면 형상을 가진 모델인데 단지 C rudder 에만 수평 간극의 가동부 에지(edge)에 폭 100mm 의 배플 플레이트를 장착하고 동일한 조건에서 시험을 수행하였다.

Fig. 9 는 두 모델을 타각 2°에서 동일한 조건으로 수행한 시험 결과 사진인데 배플 플레이트에 의한 캐비티 양상의 차이는 거의 없는 것으로 밝혀졌다. 다만 배플 플레이트는 타각이 커지면 좀더 앞날 근처에서 생성되어 수평 간극 통해 빠져나오는 캐비티(Fig. 11의 왼쪽 그림 참조)를 모재로부터 분리시켜주는 역할을 수행할 수 있는 것으로 평가되었다.

3.3 수평 간극의 크기 영향

B rudder 와, D rudder 는 동일한 단면 형상을 가진 모델인데 단지 D rudder 는 수평 방향의 간극을 50mm 에서 20mm 로 줄여서 제작한 모델이다. 실선에서 흔-타의 간극을 줄이는 것은 제작

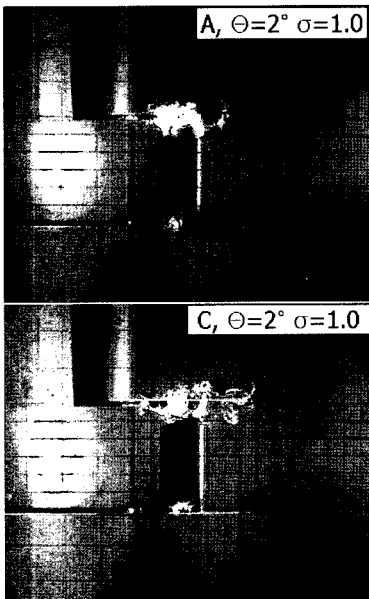


Fig. 9 Observed gap cavitation with and without baffle plate (A rudder: without baffle plates, C rudder: with baffle plates)

및 조립 오차를 감안하면 결코 간단한 일은 아니지만 간극 내부로 유입되는 유량을 최소한으로 줄임으로써 캐비테이션 특성에 상당한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되었다.

Fig. 10 은 B rudder 와 D rudder 를 동일 조건에서 시험한 사진인데 B rudder 의 캐비티가 이미 많지 않아 비교하기가 쉽지는 않지만 수평간극을 통해 흘러나오는 소량의 캐비티가 하부 핀들의 가동부 중간으로 모여드는 캐비티가 사라지고,

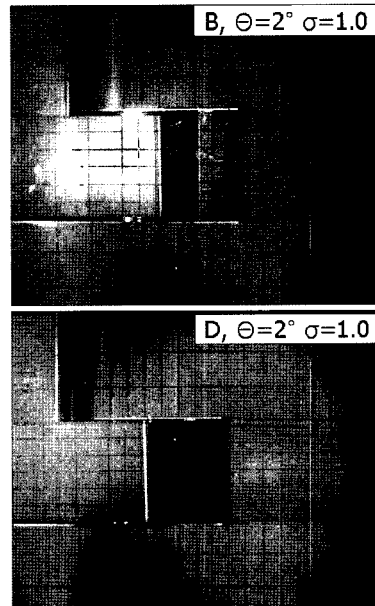


Fig. 10 Observed gap cavitation with large and small horizontal gap (B rudder: with larger gap, D rudder: with smaller gap)

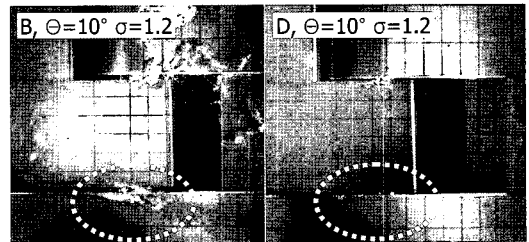


Fig. 11 Observed gap cavitation with large and small horizontal gap (B rudder: with larger gap, D rudder: with smaller gap)

특히 Fig. 11과 같이 큰 타각에서 좀더 앞날 근처의 수평 간극을 빠져 나오는 캐비티가 없어지는 현상이 발견되어 수평 간극을 최대한 줄이는 것이 침식 현상을 억제하는데 큰 도움을 줄 것으로 판단되었다.

3.4 최종 개발 단면과 기존 단면의 비교

F rudder 와, G rudder 는 하부 핀들의 중간 높이 단면에서의 압력을 계측하기 위해 제작된 모델들인데 한편으로는 본 연구를 통해 최종 개발된 형상과 기존 형상의 캐비테이션 현상을 비교하기 위한 모델이기도 하다.

F rudder 는 본 연구를 통해 개발된 최종 모델로서 고정부 전체의 후폭비(thickness-chord ratio)는 22%로 적용하였고 가동부의 최상부 단면은 22%, 최하부는 21%의 후폭비를 적용하였다. 이러한 고정부와 가동부의 후폭비 차이는 간극 입구의 단차를 좀더 크게 만들기 위한 목적이다. G rudder 는 전통적인 단면형상을 가진 기존의 모델인데 고정부와 가동부 공히 최상부 단면의 후폭비는 22% 최하단 후폭비는 21%를 적용하였다. Fig. 12는 타각 2°의 동일한 캐비테이션 수에서 관측된 캐비테이션 현상인데 기존의 단면을 적용한 G rudder 대비 F rudder 의 간극 주위에는 캐비티가 거의 사라진 것을 알 수 있으며 전체 타각 영역에서 모두 향상된 결과를 얻었다.

4. 간극 캐비테이션 초생 시험 결과

캐비테이션 시험을 수행한 총 7 개의 모든 모델에 대해 캐비테이션 초생 시험을 수행 하였다. 이 시험은 하부 핀들의 간극 주위에서 발생하는 캐비티만을 대상으로 수행 하였고, 대부분의 초생은 하부 핀들 수직 간극의 상하부 모서리에서 발생하는 것으로 관측되었다.

Fig. 13은 간극 캐비테이션 초생 시험결과를 선속과 타각을 기준으로 정리한 그래프인데 선속은 대상 선박을 기준으로 식 (2)와 같이 구하였다. 7 개의 모델 형상은 기존의 단면과 새로운 단면을 갖는 두 가지 부류로 대별할 수 있는데, 이 두 부류의 초생 시험 결과는 Fig. 13에 보인 경향에서

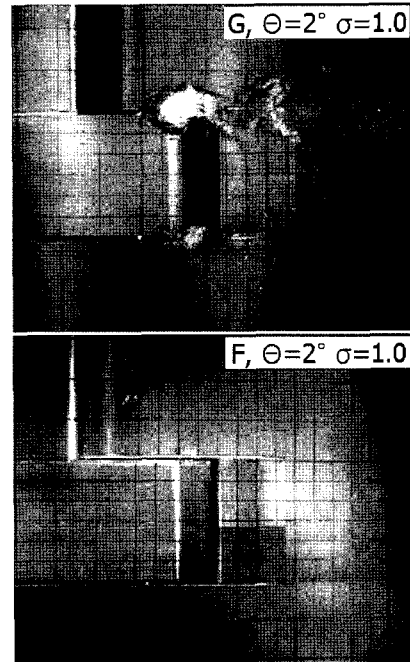


Fig. 12 Observed gap cavitation with traditional section shape and newly developed section around lower pintle (G rudder: with traditional shape, F rudder: with new section shape)

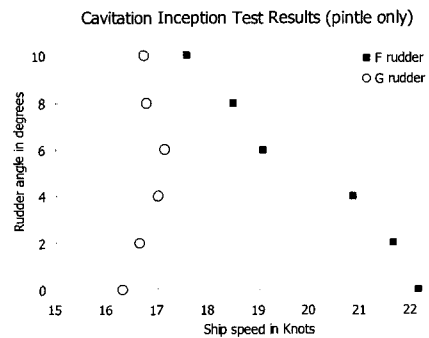


Fig. 13 Cavitation inception test results

크게 벗어나지 않는다. 그래프에서 알 수 있듯이 기존의 형상을 갖는 G rudder 는 선속이 16~17 노트 근처에서 타각에 관계없이 캐비티가 발생하기 시작하는 반면에 새로운 단면은 작은 타각에서는 약 22 노트까지 캐비티가 발생하지 않고 타각

이 커질수록 캐비테이션이 발생하는 속도가 낮아져 타각이 10°일 때 약 18 노트에서 캐비테이션이 발생하는 것으로 나타났다.

$$V_S = \sqrt{\frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho_{sea} \sigma_n}} \times \frac{1}{0.5144 V_{SR}} \quad (\text{knots}) \quad (2)$$

여기서,

P_0 =Static pressure, $\rho_{sea} \times g \times (\text{draft} - \text{핀틀 높이})$,
 Draft=13.0m, 핀틀 높이=6.95m

P_V =Vapor pressure of sea water, 1706 Pa

ρ_{sea} =Density of sea water, 1025.9 kg/m³

V_{SR} =Ratio between ship speed (V_s) and rudder inflow speed (V_i), 1.20

일반적으로 선박이 항해 중에 주로 사용하는 타각이 대략 ±5° 수준이고 이 영역에서 캐비테이션 침식 현상이 가장 두드러지게 나타나는 것을 감안하면 새로 개발된 단면의 결과는 매우 고무적인 것으로 평가되었다.

5. 압력 계측 시험 결과

압력 계측을 위해 Fig. 14에 보인 바와 같이 기존 형상인 G rudder 와 새로 개발된 F rudder 의 하부 핀틀의 중간 높이 단면에 가동부와 고정부의 표면 및 간극 내부의 벽을 따라 총 32 개의 압력 탭을 각각 설치하고 식별 번호를 붙였다. 캐비테

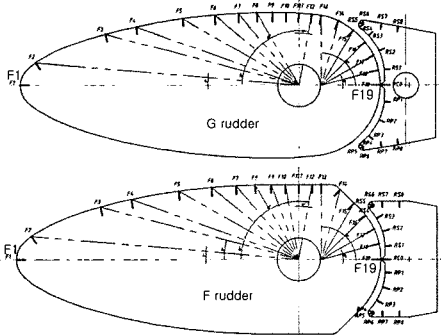


Fig. 14 Arrangement of pressure pick-ups (upper: G rudder, Lower: F rudder)

이션 수의 변화와 타각의 변화가 간극 캐비테이션에 주는 영향을 살펴보기 위하여 캐비테이션 수는 1.0 부터 1.6 까지 0.2 씩 증가시켰고 타각은 -8°(압력면)에서 10°까지 변화시켜가며 압력 계측을 수행 하였다. 두 모델에 대한 타각 2°, 캐비테이션 수 1.0 에서의 압력 계측 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 고정부와 가동부로 각각 나누어서 정리 하였다.

고정부의 그래프는 단면의 길이 비(X/Chd)를 기준으로 나타내었는데 G rudder 는 고정부의 앞날을 지나 표면을 따라 이동하는 유동이 간극의 입구인 $X/\text{Chd}=0.44$ 에서 압력계수가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 유동이 간극으로 더욱 가속된 것을 나타낸다. 또한, 유동이 간극 내부로 흘러 들면서 압력이 회복하다가 간극 내부의 돌출부(half round bar) 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 반면에, F rudder 의 경우 간극 입구에서의 급격한 압력 감소가 나타나지 않았고, 간극 내부에서도 큰 압력의 변화를 겪지 않음을 알 수 있다. 이는 일정한 수평 구간을 갖고, 가동부와 단차를 이루는 단면의 특성, 또한 간극 내부의 길이가 상대적으로 짧은 형상의 특징에 의한 것이라 평가된다.

G rudder 의 가동부 그래프를 살펴보면 거스(girth) 길이 약±86mm 근처에서 급격한 압력 상

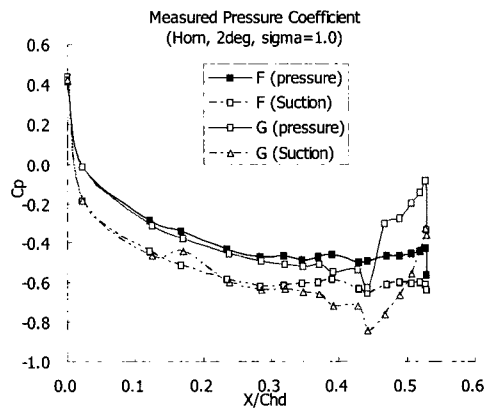


Fig. 15 Comparison of measured pressure coefficients on the horn part (2° rudder angle, sigma=1.0)

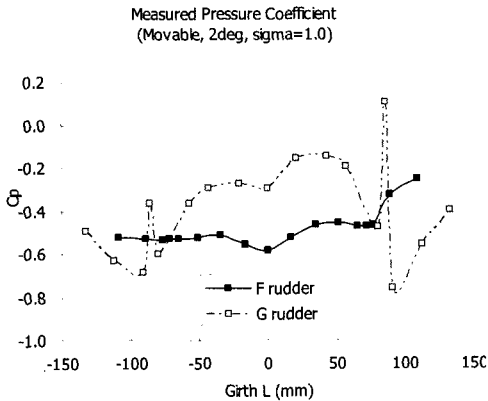


Fig. 16 Comparison of measured pressure coefficients on the movable part (2° rudder angle, sigma=1.0)

승을 보여 간극 입구가 유동과 만나 정체점의 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 반면에 F rudder의 경우 간극 입구의 단차에 의해 이러한 정체점이 존재하지 않고 전반적으로 변화가 심하지 않은 압력의 분포를 보이고 있다.

6. 결론

- 초대형 혼-타 모형을 사용하여 여러 시험 조건에서 고속 카메라를 활용한 영상 기법, 간극 캐비테이션 초생 시험, 압력의 계측을 수행하여 간극 주위의 유동 현상을 파악하였다.
- 간극 주위에 설치된 배플 플레이트는 캐비테이션 거동에 직접적인 영향을 미치지 않고, 단지 캐비테이션에 의한 모재의 손상을 억제하는 효과가 있는 것으로 판단되었다.
- 수평 간극의 크기를 최소화하여 간극 내부로 유입되는 유량을 억제함으로써 간극 주위에서 발생하는 침식 현상을 줄일 수 있다.

- 고정부의 단면 두께를 가동부 보다 크게 하고 간극 앞뒤에 단차를 두는 단면 형상을 적용한 경우(F rudder), 캐비테이션 생성을 억제하는 효과가 있어, 캐비테이션 초생을 지연시켰다(타각 5°이내 일 때 기존 단면에 비해 평균 4kts 높은 선속에서 발생)

참 고 문 헌

- 박제준, 김성표, 최영복, 김용수, 백부근, 김경열, 안중우, 2006, “ 간극을 고려한 타 주위의 점성 유동 해석,” 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp. 494-500.
- 백부근, 김경열, 안중우, 김용수, 김성표, 박제준, 2006, “ Semi-spade 타의 간극 캐비테이션에 대한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 4 호, pp. 422-430.
- Capt. J.Brix, 1993, Manoeuvring Technical Manual, Seehafen Verlag GmbH, Hamburg.

