연근해 어선용 표준형 추진기 개발

A Study on Development of Standard Propellers for Coastal Fishing Vessels

이창섭†*, 강대선**, 이건화*, 김문찬***, 문일성****
Chang-sub Lee†*, Dae-sun Kang**, Kun-hwa Lee*, Moon-chan Kim***, Il-sung Moon****

요 약 문

최근 국제유가 상승과 탄소배출량 규제에 따른 친환경 선박의 개발 요구가 증대되고 있으며 이는 일반선 뿐만 아니라 어선에서도 마찬가지이다. 본 논문에서는 유류비 증가 및 어선의 노후화 등으로 인한 국내 어업 경쟁력의 약화 및 채산성 악화를 극복하기 위한 방안으로 연근해 어선용 추진기 개발을 위한 연구를 수행하였다. 현재 국내 어선현황에 기초하여 대표 선종인 130톤급 예망어선을 대상선으로 선정하고 추진기의 추진성능을 이론 및 실험적으로 평가 · 분석하였으며, 모형 시험 및 수치 해석 결과를 종합해 볼 때, 대상선의 프로펠러는 과도한 캐비테이션이 발생되는 상태에서 매운 높은 수준의 소음과 진동이 발생하는 것으로 추측된다. 이는 어선의 추진력 감소에 따른 연료비의 증대, 캐비테이션에 의한 추진기 손상, 과도하게 발생되는 소음에 따른 어획량 감소의 주된 원인이 된다. 본 연구를 통해 일반 상선의 추진성능 평가에 적용되는 최신 기술을 어선 추진기에 적용하여 모형시험 및 이론 성능 평가 과정을 정립하였으며, 이를 통해 앞으로 어선 추진기의 성능을 상당 부분 개선할 수 있음을 확인하였다.

※ **핵심용어** : 프로펠러(Propeller), 덕트추진기(Ducted Propeller), 어선(Fishing Vessel), 모형시험(Model Test), PHVC(Propeller hull vortex cavitation),

* 충남대학교 선박해양공학과
** 인하대학교 조선해양공학과
*** 부산대학교 조선해양공학과
**** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
† 논문주저자

1. 서 론

현재 우리는 급변하는 국제정세와 요동치는 국제유가로 인해, 이에 대한 대비가 필요한 시대를 살아가고 있다. 화석연료의 과다사용에 따른 대기 중 CO_2 함량 증가가 이상기후현상과 같은 지구환경 변화의 주요 원인으로 지목되고 있고, CO_2 배출량 제한요구나 새로운 녹색에너지의 개발에 관한 요구가 그 어느 때보다도 거세지고 있는 것이다. 무엇보다도 이러한 상황에 대처하기 위한 우리의 노력이 기계적인 성능 등 에너지 효율을 향상시키는 방향, 그리고 더 나아가 대체에너지를 개발하는 방향이 되어야 할 것이다.

이러한 유류비 상승과 어선의 노후화 등으로 인한 어업 경쟁력의 약화 및 채산성의 악화를 극복하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 연료 절감장치 개발 등의 사례는 상당한 효과를 보이는 것으로 보고되고 있다.

하지만 무엇보다 에너지를 소비하는 추진기 자체가 고효율의 특성을 가지는 것이 중요하다고 할 수 있다.

세계 1위의 위업을 달성하고 있는 국내의 일반 상선의 추진기 설계 및 생산기술은 세계최고의 수준을 보유하고 있지만, 어선에 적합한 추진기에 대한 연구 및 개발은 상대적으로 미흡한 편이며, 전문적인 기술력 또한 적용되지 못하고 있는 현실이다.

이에 따라 본 연구는 연근해 어선의 항해 선속과 어업생산성 10%이상 향상, 유류소비량 10%이상 감소시킬 수 있는 효율적인 연근해 어선용 표준형 추진기를 모형/실선 시험을 통하여 어업별, 톤급별로 개발하는데 그 목적이 있다. 그러기 위해서는 먼저 어선에 적합한 고효율 추진기 최적화 프로그램 개발 및 보급이 필요하다. 특히, 근해 130톤급 예망어선에 적합한 덕트-추진기의 적용가능성에 대한 심층 연구와 이를 위한 덕트-추진기 선체 상호작용을 이해할 수 있는 이론을 개발하여야 한다. 아울러 모형시험 및 실선시운전을 통하여 이를 검증함으로서 새로운 복합 추진기 시스템 개발의 체계화가 요구된다.

이를 위해 본 논문에서는 현업에 종사하고 있는 대표 선종인 130톤급 예망어선을 대상선으로 선정하고, 해당 어선의 선형 및 추진기의 특성을 조사, 분석하였다. 그리고 모형선을 제작하여 반류계측, 저항시험, 자항시험, 프로펠러단독성능 시험 및 캐비테이션 시험을 수행하였다.

위 시험을 통해 어선의 특성 및 문제점을 파악하고, 추진기 성능에 대한 이론해석의 결과와 비교, 평가하여 향후 고효율 프로펠러의 설계 자료로 활용될 수 있도록 하였다.

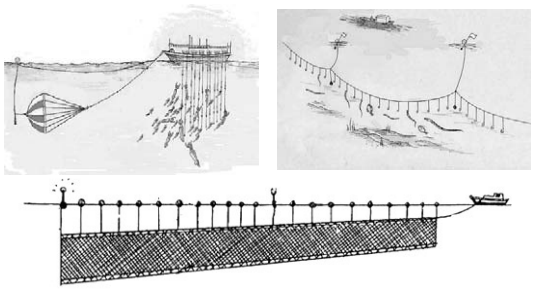
본 연구를 통하여 어선추진기의 고정 설계 개념에서 벗어나 복합 추진기를 설치하기 위한 선미 유동장과 추진 장치의 상호작용의 중요성을 정립할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 유류비 절감을 통한 채산성 향상과 탄소 배출량 규제에 대한 선도적 역할 및 친환경 문제에 기여하는 바가 클 것으로 예상된다.

2. 어선현황 조사

본 연구를 위해 우선 우리나라의 어선현황 파악이 중요하며, Table 1은 우리나라 근해 어선의 어법 종류별 어선의 규모와 척수를 보여준다. 척수와 톤수에서 근해 채낚기 어선이 가장 큰 규모이지만,

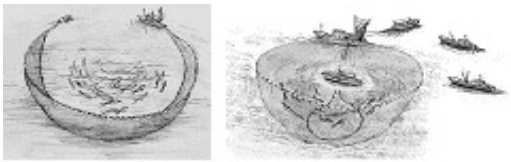
Table 1 우리나라 근해어선의 종류 및 특성 (해양수산부, 해양수산통계연보 2007)

어업종류	어선의 규모		척수/톤수	
	구톤수	신톤수	척수	톤수
외끌이대형기	80~170톤	60~140톤	52	4,839
쌍끌이대형기	80~170톤	60~140톤	88	11,080
대형트롤	100~170톤	70~140톤	58	8,088
대형선망	70~150톤	50~130톤	191	26,191
근해채낚기	10~130톤	8~90톤	679	26,266
근해안강망	10~130톤	8~90톤	266	14,054
근해봉수망	10~100톤	8~70톤	9	151
근해유자망	10~100톤	8~70톤	464	14,816
근해통발	10~100톤	8~70톤	119	13,943
근해연승	10~100톤	8~70톤	495	13,585
동해구기선저인망	20~80톤	20~60톤	44	2,609
외끌이중형기저	20~80톤	20~60톤	44	2,354
쌍끌이중형기저	20~80톤	20~60톤	22	1,134
동해구트롤	20~80톤	20~60톤	38	1,994
기선권현망	50톤	40톤	469	16,995
소형선망	10~30톤	8~20톤	105	1,748
근해형망	25톤미만	20톤미만	119	1,757
잠수기	10톤미만	8톤미만	250	13,943



채낚기(좌), 근해연승(우), 근해유자망(하)

대형트롤(좌), 외끌이 저인망(중), 쌍끌이 저인망 (우)



소형 선망어업(좌), 대형 선망어업(우)

Fig. 1 근해어업의 조업모식도

연구범위를 추진기의 추진력이 어획강도(조업시 어로작업의 힘 또는 추진력에 포함된 어로작업의 힘, 그물을 끄는 장력 등)에 크게 영향을 주는 어업어선으로 한정하면 대형 인망 및 선망어선으로 범위가 좁혀진다. Fig. 1에 보이는 인망류 어업의 대형트롤어업어선과 외끌이/쌍끌이 대형기선저인망 어업어선 그리고 대형선망 어업어선 순으로 어획강도에 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

3. 대상선 선정 및 선형 조사

어선 중에서 실제 어로작업에 종사하는 조업선은 어로작업에 종사하지 않는 비조업선과 일반선박에 비하여 선저가 플랫(flat)하고, 흘수가 높은 것이 특징인데, 그것은 제1차 산업의 생업에 종사하는 만큼 조업의 도구인 어망, 로프 등이 생명과도 같은 것이어서 어느 정도의 파도에서는 그것을 버려두고 간다는 것이 어선에서는 거의 있을 수가 없는 일이다. 따라서 이러한 선형은 규모가 작으면서도 능파성이 커지도록 하기위한 것인 반면, 잔파도에서는 배의 흔들림을 최소화하여 배의 안정성(작업성)을 유지토록 함으로서 바다생활의 피곤을 빨리 회복하고자 한 것이라고 볼 수 있다.

어선현황의 조사 결과 현재 우리나라 어선들의 선형과 추진기 특성에 대한 자료는 지극히 제한되어 있으며 체계적으로 관리되고 있지 못한 실정이다. 따라서 우리나라 어선의 어업별/톤급별 선형 및 추진특성을 파악하기 위해 업종별 대상어선 중 척수가 가장 많은 톤급의 어선 1종을 모델로 선정하여 선형 및 추진특성을 직접조사 및 실측을 통해 파악해 나가기로 하였다.

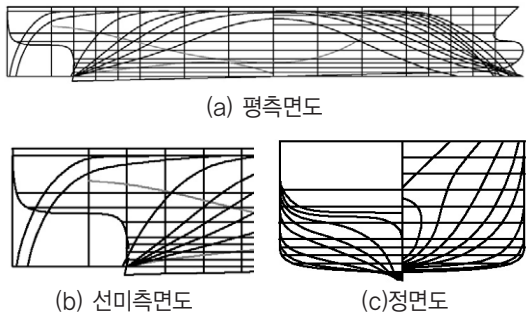
대상선은 어획강도가 주기관의 출력에 영향을

받는 대표적 연근해 어선인 130톤급 트롤어선으로 선정하였다. 대상선의 주요항목은 Table 2와 같으며 선형은 본선 건조시의 도면을 입수하여 Fig. 3과 같이 선도를 작성하고 저항 및 선미 반류 특성을 조사하기 위해 모형선을 제작하였다. 프로펠러는 제작도면이 존재하지 않은 관계로 실측을 통하여 형상정보를 획득하고 모형 프로펠러를 제작하였다.

Fig. 2 대상선 (공선호, 130톤급 트롤어선)

Table 2 모델선의 주요 특성

선 질	강
분 류	어선(조업선)
용 도	근해 대형 트롤어업
총 톤 수	139톤
최대 선속	11.5knots
엔 진	디젤 1,278PS(939kW)
회 전 수	1,600RPM
감 속 비	4.45:1
추진기 날개수	4
추진기 직경	1,920 mm
추진기 평균피치	1,180 mm



(a) 평측면도

(b) 선미측면도 (c)정면도

Fig. 3 대상선도의 선도(Lines)

4. 대상선의 추진기 조사

대상선의 추진기 설계 및 제작 도면을 구할 수가 없어 예비 추진기(중고 도입품 설치)를 실측하여 추진기의 형상을 획득하고 성능 및 특성을 연구하였다.

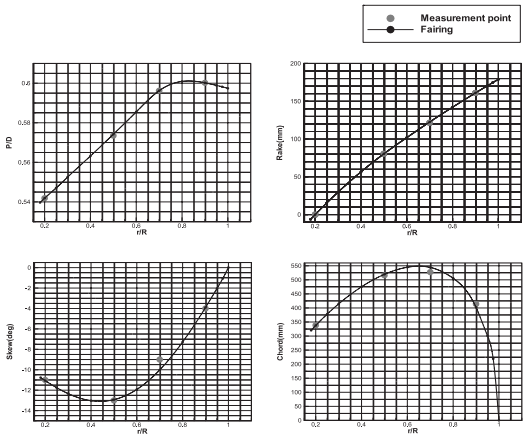


Fig. 4 최소제곱 곡선적합을 이용한 반경별 계측 값(점)과 순정값(곡선)

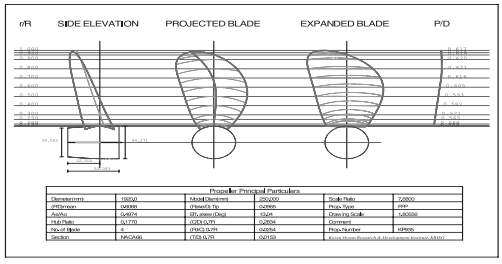


Fig. 5 추진기 제작도면(KP535)

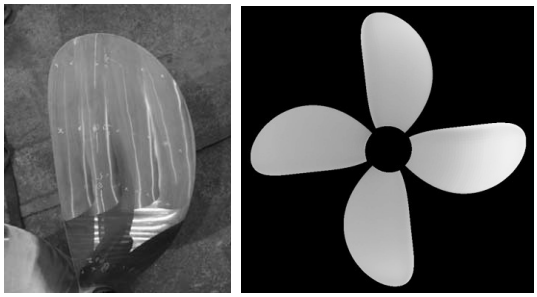


Fig. 6 실 추진기(좌)와 계측된 추진기의 3차원 모델링(우)

추진기의 치수 계측은 피치게이지 등을 사용하여 수행되었다. 추진기를 압력면이 상방으로 향하도록 거치하고 회전중심으로부터 날개끝(tip)까지의 수평 연결선을 기준선으로(0도) 정하고, 앞날 방향을 (+)각, 뒷날 방향을 (-)각으로 정하였다.

반경 방향은 0.2R 0.5R, 0.7R, 0.9R 네 가지를 선정하고 피치게이지를 회전시키면서 각 지점에서의 게이지가 나타내는 값 및 두께를 계측하였고, 계측된 값들은 추진기 형상정의에 따라 일반적인 추진기 오프셋의 형태로 변환하였다. 계측오차는 Fig. 4와 같이 다항식 최소제곱법을 사용하여 매끄럽게 순정하였다. 제작도면과 실제 추진기와 계측 데이터의 3차원 모델링 결과를 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

5. 반류 계측 및 저항추진 시험

대상선은 그물을 끄는 방식으로 어로작업을 하기 때문에 프로펠러의 추진성능은 어획량에 직접적인 영향을 주고 있다. 모형선은 축척비 1/7.936의 목재로 제작되었으며 선체부가물은 Box keel, Shoe piece, Rudder등이 부착되어 있다.

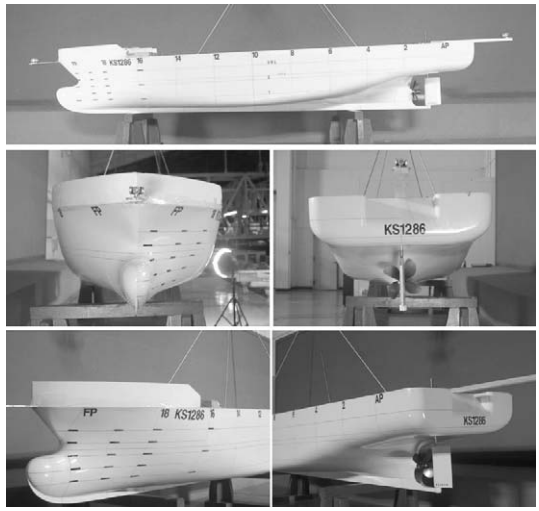
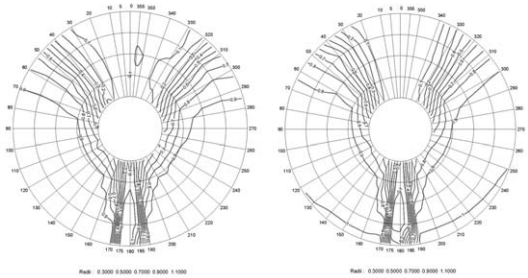


Fig. 7 부가물이 부착된 모형선

본 연구에서 실시된 모형시험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 선형시험수조에서 수행되었으며, 성능평가는 프로펠러의 단독시험, 저항 및 자항시험이 수행되었다. 예망상태의 자항시험은 모형그물을 사용하지 않고 추정기법을 사용하였다. 모형그물의 저항력을 추정한 후 만재운항 상태 자항시험에서의 마찰수정량을 동시에 고려하여 새로운 자항점에 대응하는 회전수, 추력, 토오크를 구하였다.



(a) 4.0knots (b) 11.5 knots

Fig. 8 Iso-axial velocity contours

반류 계측시험은 대상선 어선의 작업시 예망 속도(4.0knots)와 최대속도(11.5knots)에서 수행하였다(Fig. 8). 반류계측 결과는 선형에서도 유추할 수 있듯이 0도에 해당하는 부분에서 급격한 변화를 가지는 저속구간이 계측되었다.

이는 프로펠러의 캐비테이션 성능에 매우 좋지 않은 결과를 가져올 것으로 예상된다. 또한 어선의 특성상 선미에 위치하는 슈피스(Shoe piece)의 영향으로 180도 부근에도 동일한 형태의 저속구간이 발생하고 있다.

그리고 저항추진 시험 결과를 대표 선속에 대하여 Table 3에 정리하였다. 일반적인 상선에 비하여 매우 낮은 단독효율과 선각효율을 나타내고 있다. 대상선으로 선정한 어선의 경우 건조된지 오래된 선박으로 선형과 추진기의 정확한 형상에 오류가 있을 수 있으나, 계측된 자항계수를 분석하면 초기에 설계단계에서 최적화된 선형 및 추진기의 설계가 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 특히, 단독효율의 경우 자항점에 대한 검토만으로도 많은 효율증가가 기대된다.

Table 3 Result of powering performance (design draft, KP935)

	Ship speed (knot)	
	11.5(cruise)	4.0(trawl)
PE (kW)	338	111
ηD	0.487	0.319
PD (kW)	693	348
N (rpm)	344.88	254.49
t	0.341	0.172
Ws	0.312	0.267
ηR	1.002	0.988

6. 추진기의 성능 및 특성 조사

먼저 계측을 통해 획득한 형상을 바탕으로 MAU Series 성능추정 프로그램과 양력면 이론에 의한 성능해석 프로그램(KPA4)을 사용해 추진기의 단독성능을 계산하였다. 또한 MAU $B_P-\delta$도표를 사용하여 캐비테이션 기준이 고려된 최적 직경 및 효율을 계산하였다. 또한 MAU $B_P-\delta$도표를 사용하여 캐비테이션 기준이 고려된 최적 직경 및 효율을 계산하였다. 대상선 재고 추진기를 계측한 자료를 사용하여 KPA4 프로그램으로 계산한 성능 추정(a), 동일한 기하학적 형상에 대한 MAU 계열을 이용한 성능 추정(b), MAU $B_P-\delta$도표를 이용한 최적 추진기에 대한 성능 추정(c) 결과를 Table 4에 정리하였다. Table 4에 의하면 MAU계열에 의한 최적 프로펠러(c)는 대상선에 장착된 추진기(a, b)보다 약 2% 큰 직경과 약 35% 넓은 확장면적비를 요구하고 있다. 또한 확장면적비의 차이에 의해 KPA4 추정효율과 최적추진기의 효율 사이에 약 7~10%의 효율 차이가 있음을 알 수 있다.

현재 모델선에 장착된 추진기는 최적추진기와 큰 차이를 보이므로, 현재 장착된 추진기에 대해 캐비테이션에 의한 침식, 진동 등의 문제가 있는지 우선적으로 모형시험을 통하여 검토한 후에 최적 추진기 모형의 수정(조정)여부가 결정되어야 할 것으로 판단된다.

Table 4 단독특성 추정 및 캐비테이션 기준이 고려된 최적 직경 계산

	KPA4(a)	MAU(b)	MAU opt.(c)
A_E/A_O	0.4794	- 좌동 -	0.730
D	1.920	- 좌동 -	1.957
P/D	0.5872	- 좌동 -	0.760
η_o	0.624	0.603	0.566

두 번째로, 계측된 반류를 적용하여 계측된 추진기에 대하여 캐비테이션, 변동압력, 축기진력에 대하여 계산을 수행하였고, Fig 9, Fig 10, Fig 11에 도시하였다. 계산에 사용된 반류분포는 상단면에서 무차원 반류 0.1~0.5로 분포하여 저속유입구간이 상당이 크므로 프로펠러의 받음각 증가에 의해 비교적 많은 캐비테이션이 발생한 것으로 유추할 수 있다.

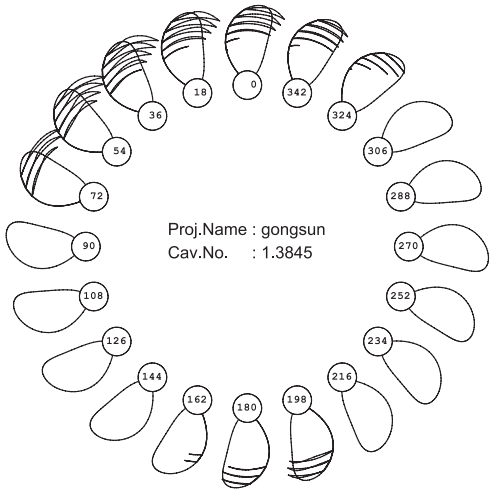


Fig. 9 캐비테이션 추정

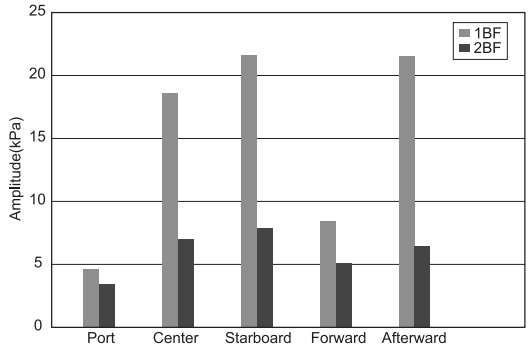


Fig. 10 변동압력 추정

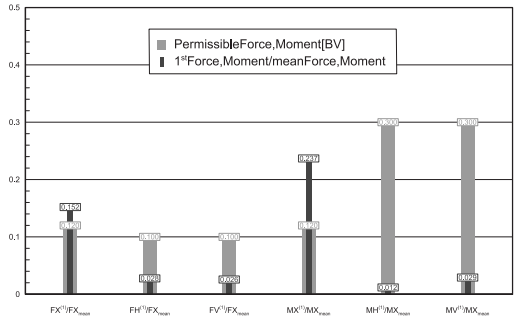


Fig. 11 축기진력 추정

반류분포의 형상은 불균일하고 프로펠러의 0.7R~1.0R에 해당하는 부분은 회전하는 동안 무차원 반류의 0.1~0.9까지 전 영역에 걸친 속도 변화를 느끼게 되므로 변동압력 또한 높게 계산되었다. 이와 같은 결과는 선미 반류가 프로펠러의 성능에 지배적인 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이며, 효율 향상을 위한 프로펠러 설계에서 반류의 영향을 고려하는 것이 중요한 항목임을 알 수 있다.

7. 캐비테이션 및 변동압력 계측 시험

대상선 프로펠러의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측을 위해 한국해양연구원 중형 캐비테이션터널(시험부 0.6m × 0.6m × 2.6m ; width × height × length)에서 시험을 수행하였다.

모형시험은 어선의 항주상태(cruise) 및 어업시 예망상태(trawl)의 두가지 경우에 대하여 수행하였다. 이때 사용한 반류스크린은 항주상태와 예망상태시의 반류차가 거의 없어 항주상태(11.5knots)의 반류를 사용하였으며, 반류스크린은 해양연구원 표준기법을 사용하여 생성하였다.

Fig. 12는 모형시험을 통해 관측된 항주 상태 시

20° 부근의 캐비테이션 패턴, Fig. 13은 예망 상태시 20° 부근의 캐비테이션 패턴을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 14와 Fig. 15는 180°부근의 캐비테이션 패턴을 보여주고 있다. 시험 결과 항주와 예망상태 모두 180° 근처에서도 발생될 정도로 넓은 회전 범위에 걸쳐 캐비테이션이 발생하였다.

캐비테이션의 특성도 소음, 진동 및 프로펠러 표면침식에 좋지 않은 공기방울형 캐비티(bubble cavity)가 많이 발생하였으며, 캐비테이션의 두께도 매우 두껍게 관찰되었다. 또한 일반적인 캐비테이션의 현상과 달리 "PHVC(Propeller hull vortex cavitation)"가 관찰되었다. PHVC는 항주상태에서 더 과도하게 발생하였으며, 이에 대한 면밀한 연구를 위하여 고속카메라를 이용한 관찰을 시도하였다.

캐비테이션 시험과 병행하여 변동압력을 계측하고, Fig. 16, Fig. 17에 결과를 도시하였다. 선체에 작용하는 변동압력은 수치해석과 캐비테이션 관찰에서 예상되었듯이 매우 큰 값(약20kPa)을 나타낸다.

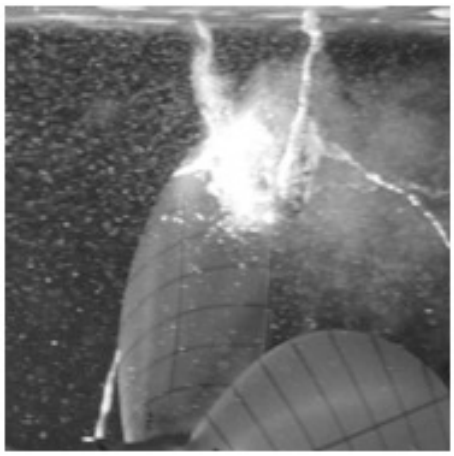


Fig. 12 캐비테이션 시험 결과
(항주시, 11.5knots, 20°)

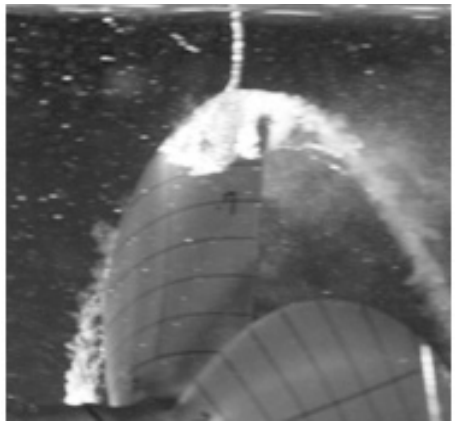


Fig. 13 캐비테이션 시험 결과
(예망시, 4.5knots, 20°)

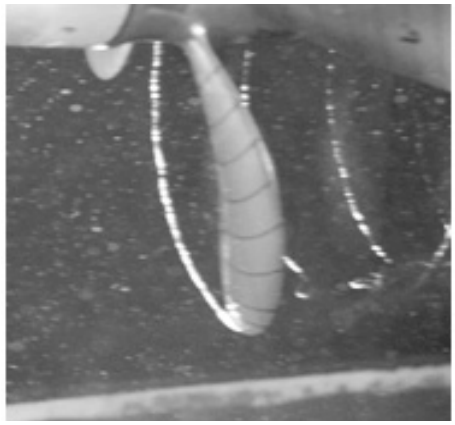


Fig. 14 캐비테이션 시험 결과
(항주시, 11.5knots 180°)

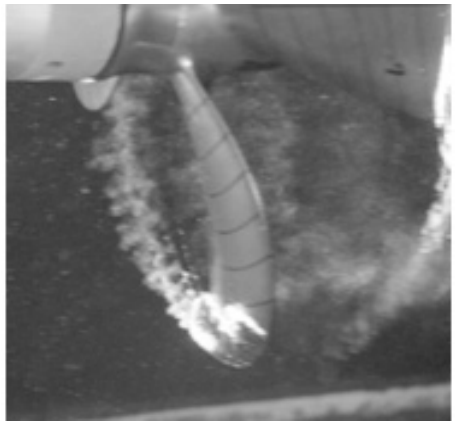


Fig. 15 캐비테이션 시험 결과
(예망시, 4.5knots, 180°)

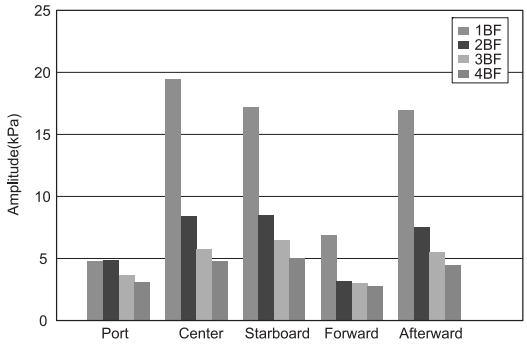


Fig. 16 변동압력 계측 시험 결과
(항주시, 11.5knots)

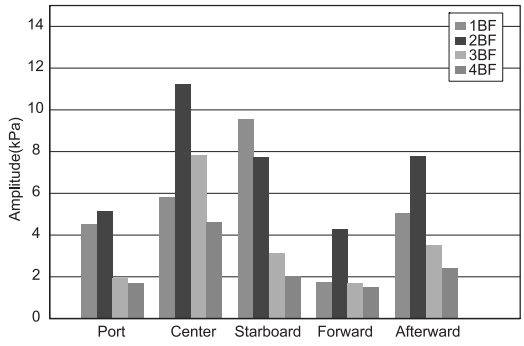


Fig. 17 변동압력 계측 시험 결과
(예망시, 4.5knots)

8. 모형 시험 결과 분석

8.1 반류와 캐비테이션의 관계

프로펠러의 캐비테이션은 프로펠러에 유입되는 반류 및 운항조건(추력계수 및 캐비테이션 수)에 의하여 지배된다. 본 연구에서 채택한 대상선의 경우 프로펠러의 캐비테이션에 매우 좋지 않은 반류의 형태를 가지고 있으며, 캐비테이션 수 또한 매우 적은 상태이다. 따라서 과도한 캐비테이션은 이미 예상된 현상이었으나, 0도 및 180도에서의 두꺼운 캐비테이션은 프로펠러의 최적설계를 통하여 감소시킬 수 있다고 판단된다.

특히 반류의 영향은 프로펠러의 캐비테이션에 매우 큰 영향을 미친다. Fig. 18의 선미 축 방향 반류분포를 살펴보면, 동일 반경에서 프로펠러가 회전함에 따라 유입되는 속도의 변화가 매우 가파르게 변화하고 있다. 이것은 프로펠러의 한 지점에서 급격한 속도변화를 의미하며, 이로 인하여 프로펠러에 발생하는 캐비테이션의 볼륨이 매우 급격하게 변화할 수 있음을 의미한다.

또한 급격한 변화와 함께 0도 부근에서 매우 낮은 저속구간은 프로펠러의 국부적인 받음각을 상승시켜 캐비테이션의 볼륨을 증가시킨다. 따라서 대상 어선의 선미 선형개선을 통하여 프로펠러의 캐비테이션 성능을 상당부분 개선할 수 있음을 알 수 있다.

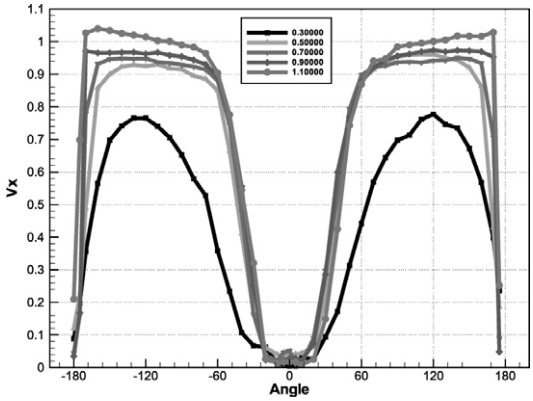


Fig. 18 선미 축 방향 반류 분포

8.2 Propeller hull vortex cavitation

본 연구에서 관찰된 가장 특징적인 현상은 PHVC이다. Fig. 16의 변동압력계측은 20kPa 정도의 계측값을 보이고 있으나, 초기에 계측된

변동압력은 20kPa을 훨씬 넘는 계측값을 나타내었다. Fig. 16은 10번 이상의 계측을 수행하면서 PHVC에 의한 변동압력으로 추정되는 결과를 제외한 결과이다.

육안으로 계측되는 PHVC는 프로펠러에서 발생한 두꺼운 캐비테이션이 붕괴하는 모습으로 관찰되었으며, 변동압력이 매우 불규칙하게 계측되었다.

본 연구에서는 PHVC의 생성, 성장 및 소멸 과정을 살펴보기 위하여 고속촬영을 수행하였다. Fig. 19는 10,000fps의 속도로 촬영한 영상 중 대표적인 정지화상을 발췌한 것이다. 고속카메라 관찰결과 육안으로 관찰된 것과 달리 PHVC는 프로펠러에서 발생되어 위로 붕괴되는 것이 아니고, 강력한 보오텍스를 동반하는 유입유동에 의하여 변동압력판(선체의 경우 선미 표면)에서 발생하는 튜브형 캐비테이션과 프로펠러에서 발생한 두꺼운 날개끝 부분의 캐비테이션이 서로 만나서 성장하는 것으로 관찰되었다. 또한 성장된 PHVC는 소멸되지 않고 다음 날개와 만나서 다시 성장할 때까지 프로펠러 공간에 머물러 있는 것으로 관찰되었다. 고속카메라 관찰에 의하면, PHVC는 선미형상에 의하여 형성된 유입유동의 특성에 의한 것으로 추정된다. 즉, Fig. 18에서와 같이 축방향의 속도 변화가 급격한 경우 선미에서 발생한 강력한 보오텍스가 튜브형 캐비테이션을 발생시키는 것으로 추정된다.

따라서 PHVC를 방지하기 위해서는 선미 반류의 변화를 완만하게 하여야 함을 알 수 있으며, 이와 동시에 프로펠러의 날개끝 부분의 캐비테이션의 두께를 최소화 하는 노력을 하여야 한다.

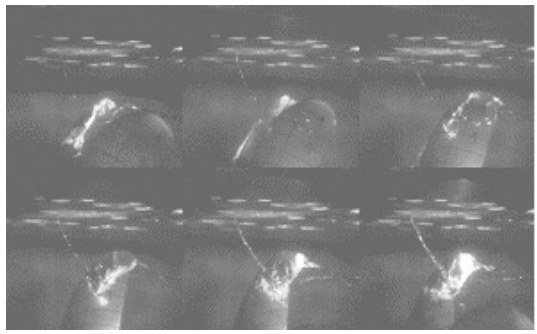


Fig. 19 Propeller hull vortex cavitation

9. 결 언

유류비 상승 대비와 채산성 악화 극복을 위해 본 연구를 수행하였다. 국내 어선현황에 기초하여 대표 선종인 130톤급 예망어선을 대상선으로 선정하여 수치계산 및 모형시험을 수행하였다. 모형시험 및 수치해석 결과를 통하여, 대상선 프로펠러의 캐비테이션 성능 및 추진성능의 문제점을 살펴보았다. 연구결과 어선의 경우 원하는 선속을 얻기 위하여 효율, 소음 및 진동에 대한 손해를 감수하면서 운영되고 있으며, 이는 선형 및 추진기의 설계를 최적화 하지 않은 결과로 사료된다. 향후 자항성에 맞는 추진기 설계, 캐비테이션 감소를 위한 추진기 설계, 선미반류 개선을 위한 부가물 설계 등의 최적설계를 수행할 경우 어선의 전반적인 효율향상을 기대할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Jang, H.G. Ahn, B.K. Lee, C.S. Kang, D.S. & Moon I.S., 2010, A study for Propulsion Efficiency Improvement of

the Coastal Fishing Boat, 2010 Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Jeju, Republic of Korea, 03-04 June 2010

(2) Kerwin, J.E. & Lee, C.S., 1978. Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting surface theory. SNAME Transactions, 86, pp.218-253

(3) Lee, C.S., Lee, J.T., Suh, J.C. & Kim, Y.G., 1992. Analysis of Excitation Forces on the Ship Hull Induced by the Propeller. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 29(1), pp.81-92

(4) Lee, C.S., Suh, J.C., Hyun, B.S., Kim, M.C., Suh, S.B. & Moon, I.S., 2008. Marine Propeller Design. 2nd Ed. Munundang : Seoul