

발 간 등 록 번 호

11-1541000-001486-01

연근해 어선용 표준형 추진기 개발

(Development of Standard Propellers for Coastal Fishing Vessels)

충 남 대 학 교

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “연근해 어선용 표준형 추진기 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2012 년 05 월 31 일

주관연구기관명 : 충남대학교
주관연구책임자 : 이 창 섭
세부연구책임자 : 이 창 섭
연 구 원 : 류 재 문
연 구 원 : 안 병 권
협동연구기관명 : 서울대학교
협동연구책임자 : 서 정 천
협동연구기관명 : 부산대학교
협동연구책임자 : 김 문 찬
협동연구기관명 : 한국해양연구원
협동연구책임자 : 문 일 성

요 약 문

I. 제 목

연근해 어선용 표준형 추진기 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

국제적인 유류비 상승과 어선의 노후화 등으로 인한 어업 경쟁력의 약화 및 채산성 악화를 극복하기 위한 방안으로 연근해 어선용 표준형 추진기의 개발이 절실히 필요하다. 원양어선의 추진장치로 덕트 추진기를 설치하여 효율 증가를 확인한 내용을 확장하여 연근해 어선의 추진기로 덕트 추진기를 설계, 보급할 필요가 있다. 또한 소형어선에 적합한 한국형 프로펠러를 개발 보급할 필요가 있다.

III. 연구개발 내용 및 범위

어업별, 톤급별 선형, 선미 반류, 추진특성 조사를 실시하여, 각 어선에 적합한 추진기를 찾아낸다. 먼저 어선에 적합한 고효율 추진기 계열을 개발하고, 중소형 어선의 추진기 설계에 쉽게, 널리 활용될 수 있는 어선용 추진기 최적화 프로그램을 개발, 보급하도록 한다. 특히 근해 130톤급 예망 어선에 적합한 덕트-추진기의 적용 가능성을 심층 연구하며, 이를 위하여 덕트-추진기 선체 상호작용을 이해할 수 있는 이론을 개발하고, 모형시험/실선시운전을 통하여 이를 검증함으로써 새로운 복합 추진기 시스템의 개발을 체계화한다.

IV. 연구개발결과

1. 덕트-추진기와 선미 반류의 상호작용을 고려한 유동해석 프로그램 개발
2. 130톤급 예망 어선용 덕트-프로펠러 최적 설계
3. 130톤급 예망 어선 대상선에 대한 자/저항 모형시험 및 덕트-프로펠러 모형시험 수행
4. 130톤급 예망 어선 대상선에 덕트-프로펠러 장착하여 실선 시운전 수행
5. 190톤급 선망 어선용 고정피치 프로펠러 설계
6. 190톤급 선망 어선 대상선에 대한 자/저항 모형시험 및 프로펠러 모형시험 수행
7. 기존의 MAU 계열 프로펠러 보다 효율과 캐비테이션 특성이 우수한 새로운 KF 계열 프로펠러 개발

V. 연구성과 및 성과활용 계획

1. 연구 성과

- 선체-추진기 상호작용을 고려한 추진기 설계 기술 확보

- 캐비테이션을 고려한 덕트-프로펠러 설계 기술 확보
- 덕트-프로펠러, 전류고정날개와 같은 복합 추진기 도입을 통한 추진 효율 향상
- 전류고정날개를 적용한 선박용 덕트-프로펠러(10-2011-0014225) 특허 출원
- 130톤급 예망 어선의 덕트-프로펠러 실선 시운전을 통한 효율성 검증
- 우수한 성능의 새로운 계열 프로펠러(KF-Series) 개발

2. 성과 활용 계획

참여기업은 연구 성과를 적용하여 실용화하기에 충분한 제반 기술을 보유 하고 있으므로 연구결과의 우수성이 널리 홍보되어 수요가 확보 될 경우 참여기업에 기술이전을 통하여 실용화를 시도할 예정이다. 실용화시에는 참여기업이 필요로 할 경우 기술자문 또는 지도 등의 지원이 가능하도록 할 것이다. 유류비의 급격한 상승으로 어선 추진효율의 증가가 절실한 상황이어서, 실선에서 최종 성능 확인이 된 이후에 연근해 어선의 개량사업을 정부의 지원으로 추진하도록 기획사업을 추진하겠다.

SUMMARY

I. Title

Development of standard propellers for coastal fishing vessels

II. Purposes and needs of research development

The increase of the oil price and the deterioration of the fishing vessels are the main causes of the weakening of the competitiveness and the worsening of the profitability. To overcome these problems, it is necessary to develop standardized propellers for the coastal fishing vessels. To improve the efficiency for the trawler, the ducted-propellers should be considered first, and be fitted on the fishing vessels to be verified the improvement in the design stage. For the smaller fishing vessels in our nation, it is necessary to acquire a series-propeller data covering the unique requirement of our small fishing vessel owners.

III. Contents and scopes of research development

It is essential to measure the wake, to study the propulsive characteristics for various fishing vessels and to look for the energy-efficient propellers for various class of fishing vessels. We first develop the design and analysis method suitable for the non-conventional ducted-propellers, which are especially suitable for the high-powered vessels like the trawlers, and then develop KF-Series propellers designed especially to meet the requirements of the local fishing vessels. In this paper, we introduced a new interaction model between the duct-propeller and the hull. The new extrapolation method was applied for the analysis of the model test in the towing-tank, and will be scrutinized by reviewing the full-scale trial data of the 130ton-class trawler.

IV. Results

1. To develop the interaction model between the ducted-propellers and the shear flow in the stern area.
2. Optimum design of the 130ton-class ducted-propeller for the fishing vessels.
3. For the 130ton-class trawler, the resistance/self-propulsion tests in the towing tank are carried and the open-water tests are performed for the ducted-propeller.
4. The full-scale ducted-propeller will be manufactured and installed on the 130ton-class fishing vessels, and will be tested its performance in full-scale

trials.

5. Design of the fixed pitch propeller for the new 190ton-class purse seiner.
6. For the 190ton-class purse seiner, the resistance/self-propulsion tests in the towing tank are carried and the open-water tests are performed for the propeller.
7. New KF-Series propellers are developed to have higher efficient vessel when compared to vessels equipped with MAU-Series propellers.

V. Research outcomes and its applications

1. Research outcomes

- A tool to design the propellers, considering the interaction between the hull and the propellers.
- A tool to design the ducted-propellers, considering the cavitations.
- Improvement of the propulsive efficiency, by introducing the ducted-propellers to the trawler, and by improving the efficiency through the introduction of the compound propulsors consisting of the ducted-propellers and the pre-swirl stators.
- Patent (10-2011-0014225) of the ducted-propeller with the pre-swirl stator.
- Validation of the effectiveness of the ducted-propeller to the 130-ton-class trawlers through the full-scale sea trials.
- Development of new propeller series(KF-Series) with higher efficiency when compared with the existing MAU-Series propellers, designed especially for local low-pitch fishing vessels.

2. Application plan

- The companies participating in this project are capable and possesses the proper technology to apply the present outcomes to the real fishing vessels
- Successful application to a real fishing vessel will promote and spread the adaption of the ducted-propellers to many vessels.
- Technical advises and the guides will be available for the dissemination of the new energy-saving device.
- Due to the sharp increase of the fuel price, more energy-efficient propulsive device will be in need.
- Planning and policy to disseminate the fuel-saving device to the fishery people is to be pursued at the government level.

CONTENTS

Chapter 1. Summary of research development	11
Section 1. Purposes and needs of research development	11
1. Purposes of research development	11
2. Needs of research development	11
Section 2. Contents and scopes of research development	12
Chapter 2. Current status of domestic and foreign technology	13
Section 1. Status of domestic technology	13
Section 2. Status of domestic technology	14
Chapter 3. Contents of the research and results	15
Section 1. Study of hull, stern shear flow and propulsion performance	15
1. Status of domestic coastal fishing vessels	15
2. 130ton-class trawler	15
3. 190ton-class purse seiner	40
Section 2. Study of ducted-propeller and interaction between the hull and the propeller	49
1. Introduction of KPA14	49
2. Design of ducted-propeller	54
Section 3. Development of propeller series and optimization program	83
1. Introduction	83
2. Design of series propeller	84
3. Open-water performance test of series propeller	91
4. Wake distributions	129
5. Investigations of performance	132
6. Development program	137
7. Example design using new series propeller	149
8. Conclusion	149
Chapter 4. Achievement and contribution of the research	151
Section 1. Annual achievement of research	151
1. 1 st year (2009)	151
2. 2 nd year (2010)	152
3. 3 rd year (2011)	152
4. Final appraisal	153
Section 2. Contribution on technology development of related field	154

Chapter 5. Research outcome and its application plan	155
Section 1. Industrial applications	155
Section 2. Educational and commercial applications	155
Section 3. Patent, commercial product and paper publication	155
1. Patent	155
2. Paper publication	155
Section 4. Further study and application to other studies	156
Chapter 6. Research information collected during research development	157
Chapter 7. References	159
Chapter 8. Appendix	163
Attach 1. Report of the resistance/self-propulsion model test for 130ton-class trawler	
Attach 2. Report of the resistance/self-propulsion model test for 190ton-class purse seiner	

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	11
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	11
1. 연구개발의 목적	11
2. 연구개발의 필요성	11
제 2 절 연구개발의 내용 및 범위	12
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 1 절 국내기술동향	13
제 2 절 국외기술동향	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제 1 절 연구 대상 어선의 선형, 선미 반류, 추진특성 조사	15
1. 국내 연근해 어선현황 분석	15
2. 130톤급 예망 어선	15
3. 190톤급 선망 어선	40
제 2 절 덕트-추진기의 성능 및 선체-추진기 상호작용 해석	49
1. KPA14 소개	49
2. 덕트프로펠러 설계	54
제 3 절 어선용 추진기 계열 및 최적화 프로그램 개발	83
1. 서언	83
2. 계열 프로펠러 설계	84
3. 계열 프로펠러 단독 성능 시험	91
4. 반류분포	129
5. 성능검토	132
6. 프로그램 개발	137
7. 계열 프로펠러를 사용한 설계 예	149
8. 결론	149
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	151
제 1 절 연도별 연구목표 달성도	151
1. 1차년도 (2009 년도)	151
2. 2차년도 (2010 년도)	152
3. 3차년도 (2011 년도)	152
4. 최종 평가	153
제 2 절 관련분야의 기술발전예의 기여도	154

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획	155
제 1 절 실용화·산업화 계획(기술실시 등)	155
제 2 절 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획 등	155
제 3 절 특허, 논문 성과	155
1. 특허 출원	155
2. 논문	155
제 4 절 추가연구, 타연구에 활용 계획	156
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	157
제 7 장 참고문헌	159
제 8 장 부 록	163
첨부 1. 130톤급 예망어선 대상선 저/자항 및 캐비테이션 모형시험 보고서	
첨부 2. 190톤급 선망어선 대상선 저/자항 및 캐비테이션 모형시험 보고서	

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구개발의 최종 목표는 연근해 어선의 항해 선속과 어업생산성의 10% 이상 향상 또는 유류소비량을 10% 이상 감소시킬 수 있는 효율적인 연근해 어선용 표준형 추진기를 모형/실선 시험을 통하여 개발하는 것이다.

2. 연구개발의 필요성

국제적인 유류비 상승과 어선의 노후화 등으로 인한 어업 경쟁력의 약화 및 채산성 악화를 극복하기 위한 방안으로 연근해 어선용 표준형 추진기의 개발이 절실히 필요하다. 최근 원양어선의 추진장치로 덕트 추진기를 설치하여 효율 증가를 확인한 내용을 확장하여 연근해 어선의 추진기로 덕트 추진기를 설계, 보급할 필요가 있다. 또한 소형어선에 적합한 한국형 프로펠러를 개발 보급할 필요가 있다.

가. 연구개발의 과학기술, 사회경제적 중요성

(1) 기술적 측면

한국 조선산업이 세계 1위인 위치에 걸맞게 추진기(프로펠러) 설계, 생산 관련 일반적인 기술은 세계 최고 수준이며, 성능 추정 및 설계 프로그램도 개발되어 널리 사용되고 있다. 그러나 어선에 적합한 추진기에의 적합한 연구, 개발은 상대적으로 미흡한 상황이고, 기술도 보급되지 않고 있다. 특히 중소형 어선의 추진기에 관한 연구는 선형 및 선미 유동장에 대한 연구도 빈약할 뿐 아니라, 어업별, 톤수별 차이가 크므로 간단하게 계열 프로펠러 자료를 적용할 수 없다. 나아가 덕트-추진기에 의한 효율 향상은 기존의 경우는 예인선 등에서 그 효과를 인정하였으나, 최근에 트롤선에서 연료소비량 절감과 어업생산성 향상이 확인되는 등 새롭게 연구, 개발하여야 할 필요성이 유류값 상승과 더불어 크게 대두되고 있다고 본다. 그러나 덕트-추진기는 덕트와 프로펠러의 간극이 적어 프로펠러 날개 끝에 캐비테이션 발생의 가능성이 높아지므로 캐비테이션 침식문제, 어로작업에 치명적인 캐비테이션 소음 등의 문제가 발생하기 쉬우므로, 이를 회피/최소화할 수 있는 전문적인 연구가 수반되어야 한다.

(2) 경제·산업적 측면

10% 효율향상은 아주 파격적인 기술혁신을 뜻한다. 유류값 상승으로 어선 운항 자체가 제한받고 있는 시점에서 효율향상은 그대로 조업경비 절감으로 수익성과 직결됨을 예상할 수 있다. 복합추진기의 보급으로 수많은 연근해 어선의 추진기를 대체하는 효과도 크리라고 본다. 수산업 분야의 에너지 절약형 선도 기술로 활용가능하다.

(3) 사회·문화적 측면

수산업 분야의 탄소 배출량 규제에 대비한 어선의 엔진과 추진 효율 증대를 위한 선도 연구에 기여한다. 특히 탄소 배출량 감소로 인간, 동물의 건강을 포함하는 인류사회의 친환경문제에 기여하는 바가 크다.

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

1. 연근해 어선의 추진기 실태 조사 및 추진기의 특성 규명

- 어업별, 톤급별 선형, 선미 반류, 추진특성 조사
- 선형별 추진기 특성 조사, 평가
- 덕트-추진기 선체 상호작용 이론 개발
- 어선용 추진기 계열 개발용 고효율 추진기 연구

2. 연근해 어선의 추진기 설계 및 문제점 보완

- 어업별, 톤급별 추진기 설계 및 평가
- 추진기 설계법 평가 및 추진효율 증가 방법 연구
- 덕트-추진기 설계, 모형시험 평가
- 어선용 고효율 추진기 계열 개발
- 어선용 추진기 최적화 프로그램 개발

3. 연근해 어선의 추진기의 표준안 제시 및 시험 검증

- 근해 130톤급 예망 어선용 덕트 추진기 개발 및 실선시험
- 근해 190톤급 선망 어선용 고정 피치 추진기 개발
- 연안 20톤급, 10톤급, 5톤 이하 소형선용 고정 피치 추진기 개발

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내기술동향

대형선박용 일반적인 추진기의 설계 수준은 국내기술이 세계최고 수준이며 기술의 안정화 단계에 있다고 볼 수 있으나, 어선 추진기의 경우는 아직도 최고 효율의 추진기를 장착하지 못해 유류를 낭비하고 있는 실정이다. 이러한 현상은 국내 연구진의 보유기술이 다양한 연근해 어선 추진기에 적용될 기회를 갖지 못한 때문이다.

다음은 국내 연구진에 의한 연구개발 실적으로 현재 국내외 상선에 적용되고 있는 기술이다.

- 프로펠러의 정상, 비정상 성능 추정을 위한 이론 개발(Kerwin/Lee, 1978): 보오텍스 격자법(Discrete Vortex Method, DVM)에 의해 프로펠러의 정상/비정상 성능 추정할 수 있는 이론을 개발하여 프로펠러 설계법을 한 단계 진보시킨 기술이다.
- 프로펠러의 캐비테이션 성능 추정 프로그램 개발(이창섭, 1980): DVM을 이용하여 프로펠러의 캐비테이션 거동을 이론적으로 추정한 최초의 논문으로 지속적인 향상을 통하여 현재는 캐비테이션에 의한 선미 변동압력을 최소화하는 연구 등에도 확장 활용되고 있다.
- 일본 MAU 계열 프로펠러의 전산화 및 최적화 프로그램 개발(서정천/이창섭, 1984)(송인행, 2000): 일본에서 공개하지 않은 MAU 프로펠러 계열자료를 전산화하여 최적화를 수행하고 최적 직경 등 주요 형상을 주는 프로그램의 개발을 시작으로 전산화의 노력을 계속해 왔다.
- 대형 상선용 프로펠러 씨리즈 개발(김문찬/이진태, 1988, 이진태/이창섭/김문찬/김호충, 1989, 이진태/김문찬/안종우/반석호/김호충, 1991, 이진태/김문찬/안종우/김호충, 1991): 기존의 NACA 단면의 프로펠러 자료를 이용하여 프로펠러 날개수 4개에 대하여 회귀해석을 통해 씨리즈화 하였으며 전 세계적으로 최초로 캐비테이션 성능과 효율을 고려한 단면을 대우와 공동 개발하여 프로펠러 날개수 4개에 대한 KD 씨리즈를 완성하였고 그 후 송인행 박사를 중심으로(서정천/김문찬/문일성 공동 연구) 단면의 개발을 계속하여 세계에서 가장 우수한 단면 KH40을 개발하였으며 현재 국내 대형조선소들에서 사용하고 있다.
- 패널법에 의한 프로펠러 정상 성능해석 연구(김영기 등, 1993): 포텐셜기저 패널법에 의해 프로펠러의 정상성능을 해석할 수 있는 이론이 미국 M.I.T.에서 이진태박사에 의해 최초 개발된 이후, 국내에서도 자체 기술력으로 핵심 모듈을 개발하여 패널법을 개발하여 보급하기 시작하였다.

- 덕트-프로펠러 시스템의 유체역학적 특성 해석(김문찬/이창섭, 1987)(표상우/서정천, 1999): DVM과 패널법에 의해 덕트-프로펠러의 정상/비정상 성능을 추정할 수 있는 이론이 개발되어 보급되었다. 여기에 사용된 이론이 본 연구에서 중요한 연구 틀로 활용될 것이다.
- 선체-프로펠러-주기관 사이의 맞춤에 의한 선박추진 계통의 최적화(안성수/이창섭, 1993): 프로펠러의 설계는 선체-프로펠러-주기관 사이의 최적화된 맞춤에 의해 완성된다. 특히 소형 어선의 경우에는 주기관에 맞는 프로펠러를 선정하는 것이 중요한 설계 절차이다. 최적화 연구의 경험과 계열 프로펠러 연구의 경험이 본 연구에서도 핵심 기술로 활용되었다.
- 패널법에 의한 프로펠러 캐비테이션 추정 프로그램 개발(김영기/이창섭, 1996): 패널법에 의한 캐비테이션 추정 이론은 세계 최고 수준의 연구 결과를 보인다. 어선 프로펠러의 경우는 특히 캐비테이션의 발생을 사전에 파악하여 캐비테이션 소음을 최소화하는 것이 중요하므로 캐비테이션 터널 시험과 함께 이론적이 추정법이 중요하게 사용될 것이다.
- 비대칭고정날개 추진기 시스템 연구(김문찬 등, 2004): 프로펠러 효율감소의 1/3은 프로펠러와 함께 회전하는 후류성분에 의한 에너지 손실이다. 이를 극복하기 위한 가장 이상적인 추진장치로 CRP(Contra-Rotating Propeller, 상반회전프로펠러)가 있으나 축계의 복잡성으로 실용화가 중단되어 있다. 이와 유사한 연구가 전류고정날개(Pre-Swirl Stator)를 사용하는 방법으로 김문찬 등 연구자에 의해 특허로 인정된 고급 기술이다. 특히 본 특허는 좌우 동수의 날개를 사용하지 않고 선미반류에 적합한 비대칭형 전류고정날개를 채택한 것이 특징이다.

제 2 절 국외기술동향

외국의 경우도 우리나라와 마찬가지로 대형선의 설계 기술은 첨단수준이지만, 소형선에 대하여는 최적의 추진기를 장착하는 지 명확치 않다. 다만 일본이 MAU 계열 프로펠러를 개발하여 중, 소형선에 적용하고 있으나, 최근의 고유가와 엄격해진 진동, 소음 수준을 만족하기에는 문제점이 많다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구 대상 어선의 선형, 선미 반류, 추진특성 조사

1. 국내 연근해 어선현황 분석

우리나라 수산업의 경우 수산자원량에 적합한 어업세력의 범위를 설정하여 지속적인 수산 자원의 이용·관리를 위해 업종별 어업허가의 수를 정한 허가정수가 설정되어 있으며 2007년 해양수산부, 해양수산통계연보 기준 우리나라의 연안어업 허가건수는 64,247건이 처분되어 있다. 연안어업의 허가건수 중 연안복합어업이 가장 많은 30,753건이고, 다음은 연안자망어업으로 19,273건, 연안통발 10,672건, 연안조망 1,475건의 순이었다. 근해 어업의 경우 13개 업종에 21개의 명칭으로 허가되고 있으며 채낚기어업 1,031건, 자망어업 949건, 연승어업 859건 순으로 허가건수가 많으며, 일부업종 중 중형기선저인망어업과 기선권현망어업 두 종은 어업자원 보호와 경비절감 등 경쟁력 제고를 위해 기관마력을 제한하고 있다. 중형기선저인망어업의 경우 주기관 회전수가 1,200rpm 미만은 450PS 이하, 1,200rpm 이상은 550PS 이하, 기선권현망어업의 경우 주기관 회전수가 1,200rpm 미만은 220PS 이하, 1200rpm 이상은 350PS 이하로 제한하여 운영하고 있다.

조사결과 현재 국내 어선들의 선형과 추진기 특성에 대한 자료는 지극히 제한되어 있으며 체계적으로 관리되고 있지 못한 실정이었다. 따라서 연구 목적에 부합하는 대상선을 선정하여 선형 및 추진특성을 직접조사 및 실측을 통해 파악해 나가기로 하였다.

1차년도에 130톤급 근해 트롤어선인 “공선호”를 대상선으로 선정하고 대상선의 선형 및 추진 특성에 대한 연구를 수행하였다. 제한된 대상선의 선형 정보를 바탕으로 선도를 다시 작성하여 저항, 자항 및 반류특성 파악을 위한 3차원 모델링을 바탕으로 모형제작과 선형시험을 수행하였다. 대상선의 프로펠러에 대한 설계 정보가 전혀 없어, 예비 프로펠러를 실측하여 추진성능을 해석 및 평가 하였다. 또한 캐비테이션 발생 정도를 계산하고 기진력 해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 대상선과 유사계열 어선의 추진효율 향상을 위한 설계방향을 도출, 제시 하였다. 2차년도에는 190톤급 근해 선망어선 개발 선형을 바탕으로 모형선 제작 및 추진기 설계를 수행하였다.

2. 130톤급 예망 어선

가. 130톤급 예망어선 선형 및 추진기 특성 조사

(1) 대상선 선정 및 선형분석

(가) 대표적 130톤급 예망어선인 “공선호”을 대상선으로 선정

표 3.1.1 대상선(공선호)의 주요 특성

선명	공선호	선질	강
선박번호	0706001-6261104	최대 선속	11.5 Knots
선적항	경남 사천시	추진기관	디젤 1278PS (939kW)
총톤수	139톤	회전수	1600RPM
분류	어선	감속비	4.45:1
용도	근해 대형 트롤어업	추진기 제조사	VOLVO-PENTA

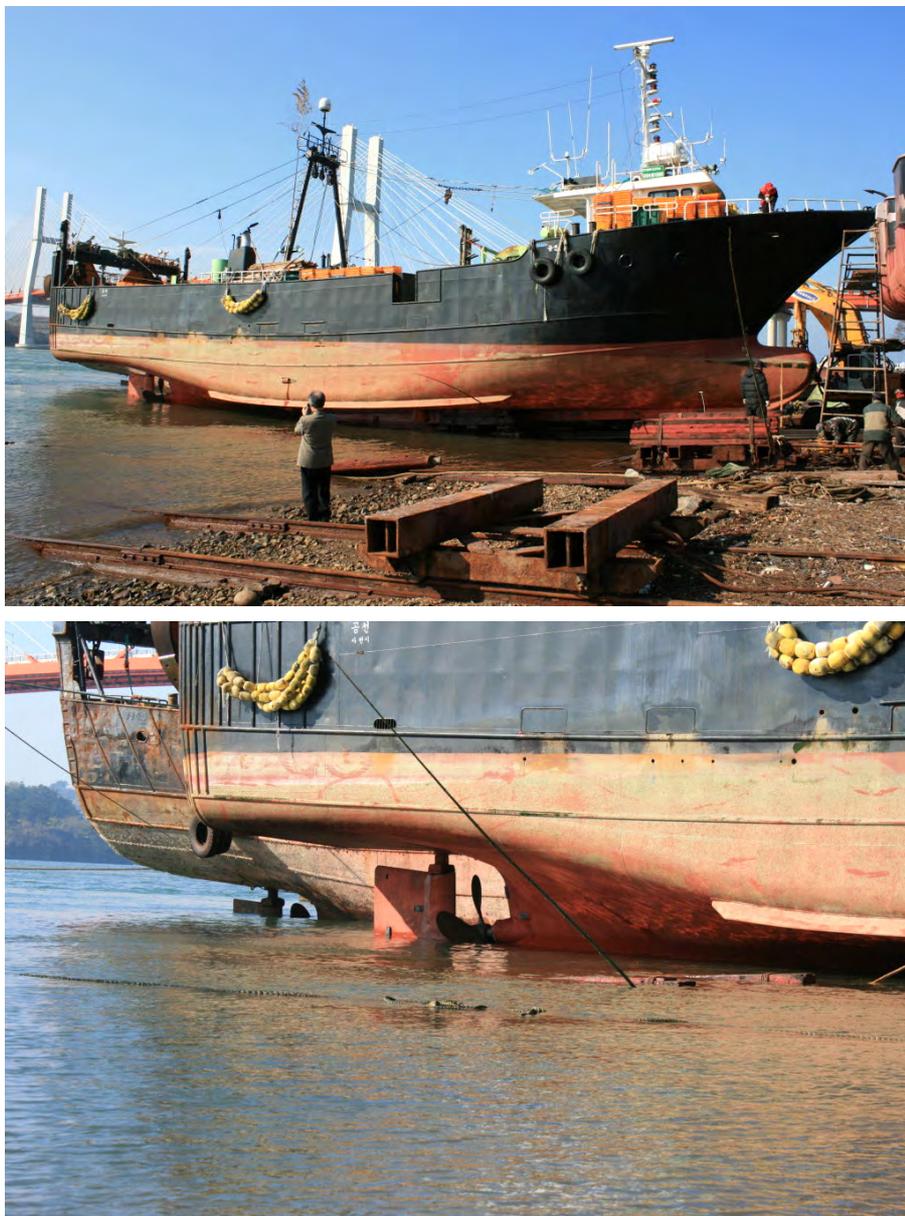


그림 3.1.1 대상 어선으로 선정된 공선호(130톤급 예망어선)

(나) 공선호 선형분석 및 선도 작성

- offset 자료의 데이터로부터 HCAD(선형설계프로그램)을 이용하여 공선호 선도제작
- 선형을 분석하고 모형선 제작을 위한 3차원 모델링 완성

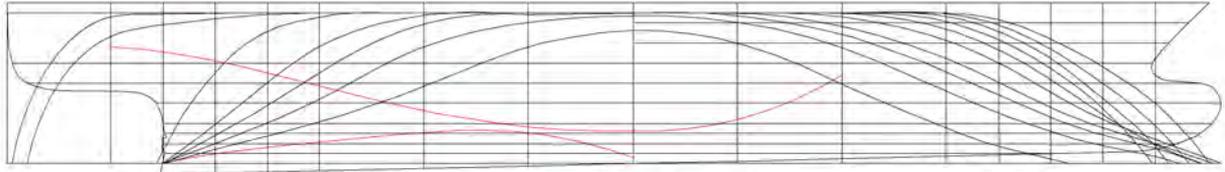


그림 3.1.2 공선호 선도

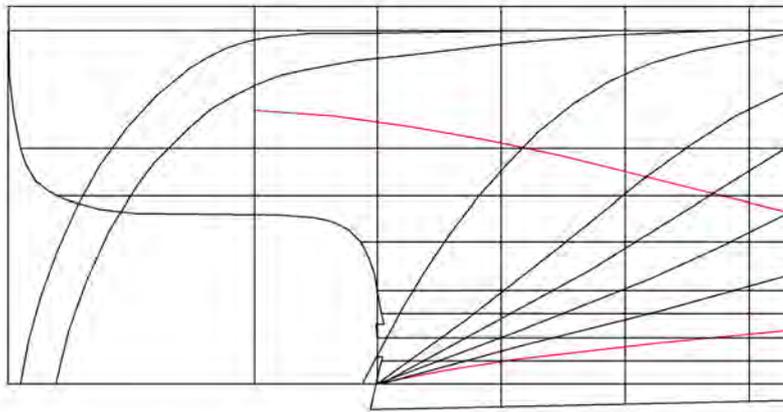


그림 3.1.3 공선호 선미 측면도

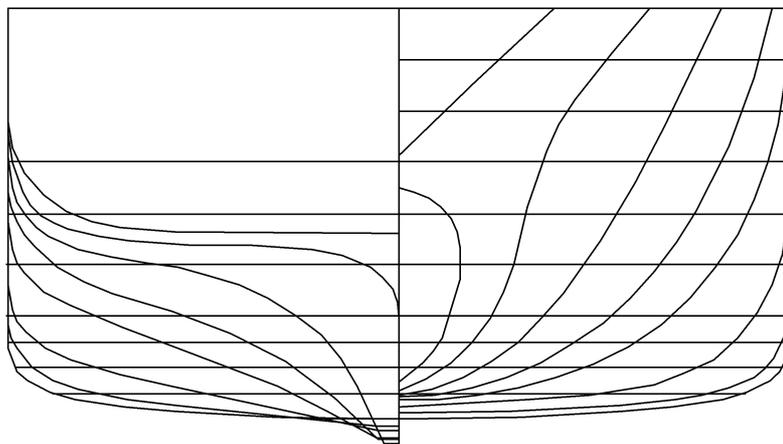


그림 3.1.4 공선호 정면도

(2) 대상선 추진기 실측

(가) 공선호 프로펠러 실측 및 3차원 형상 모델링

- 공선호의 프로펠러 도면이 없어, spare 프로펠러를 실측하여 3차원 형상모델링을 수행하였다.
- 먼저 실측치를 프로펠러 형상 변수(피치비, 레이크, 스큐 및 코드길이)로 변환하고 순정 과정을 거쳐 3차원 형상을 모델링하고 성능해석을 수행하고 대상선의 실제 프로펠러 특성과 비교 검증하였다.
- 프로펠러를 압력면이 상방으로 향하도록 거치하고 피치게이지를 사용하여 게이지에 표시되는 눈금을 기록하였다. 회전중심으로부터 날개끝(tip)까지의 수평연결선을 프로펠러 기준선으로 하여 0.0(deg.)로 정하고, T.E.방향 (+)deg. L.E.방향을 (-)deg.로 정하였다. 계측 결과는 표 3.1.3에 수록하였다.

표 2 대상선(공선호)의 프로펠러 주요 특성

날개 수	4	Diameter	1,920 mm
재질	HBsC1	Pitch	1,180 mm



그림 3.1.5 공선호 프로펠러(spare)

표 3 공선호 실선 프로펠러 계측 테이블

r/R	r (mm)		Angle (deg)	TE	20.0	10.0	5.0	0.0	-5.0	-10.0	-15.0	-20.0	-25.0	-30.0	-40.0	LE	Angle (deg)
0.2	198.4	Height	26.0	1103.0	1099.0	1072.0		1043.0		1024.0		980.0		947.0	915.0	882.0	-48.0
		Thk.			19.0	30.0		45.0		57.0		65.0		59.0	45.0		
0.5	496.0	Height	15.0	1163.0		1148.0	1132.0	1116.0	1099.0	1082.0	1069.0	1053.0		1021.0		986.0	-41.0
		Thk.				18.0	25.0	30.0	35.0		44.0	41.0	34.0				
0.7	694.4	Height	12.0	1192.0		1184.0	1168.0	1155.0	1135.0	1120.0	1105.0	1088.0	1073.0			1054.0	-30.0
		Thk.				15.0	19.0	26.0		31.0	31.0	26.0	24.0				
0.9	892.8	Height	9.0	1221.0			1209.0	1190.0	1173.0	1159.0	1143.0					1135.0	-17.0
		Thk.					13.0	17.0	15.0	14.0	10.0						

(나) 측정치를 프로펠러 형상 변수로 변환

- x(+) : 하류방향, y(+) : 수직상방향, z(+) : 좌현
- 0(deg) 위치에서 0.2R단면 두께의 절반 지점을 x방향 원점으로 하고 0.2R에서의 rake를 0으로 하였다.
- Tip을 프로펠러 기준선으로 정하였으므로 Tip에서의 skew는 0이다.
- 날개수 : 4, 직경 : 1984.0 mm, 평균 피치비 : 0.583
- 표 3.1.4의 r/R=1.0 위치는 2차식 외삽법으로 추정하였다.

표 4 프로펠러 형상정보로 변환하기 위한 1차 처리 (단위:mm)

r/R	0.2	0.5	0.7	0.9	1.0
r	198.4	496.0	694.4	892.8	992.0
center of section	1020.5	1101.0	1142.0	1181.5	0.0
Rake	0.0	80.5	121.5	161.0	180.2
Pitch	1075.1	1137.9	1182.9	1190.8	1193.0
P/D	0.542	0.574	0.596	0.600	0.601
phi(rad)	0.712	0.350	0.265	0.209	0.193
Skew(deg)	-11.000	-13.000	-9.000	-4.000	0.000
Skew(rad)	-0.192	-0.227	-0.157	-0.070	0.000
Chord	338.4	516.1	527.4	414.2	0.0
L.E.					
θ	-0.838	-0.716	-0.524	-0.297	0.000
X	-143.4	-49.1	22.9	104.8	180.2
Y	132.8	374.3	601.4	853.8	992.0
Z	-147.4	-325.4	-347.2	-261.0	0.0
T.E.					
θ	0.454	0.262	0.209	0.157	0.000
X	77.6	127.9	160.9	190.8	180.2
Y	178.3	479.1	679.2	881.8	992.0
Z	87.0	128.4	144.4	139.7	0.0

(3) 계측된 프로펠러 형상의 순정

(가) 날개 외곽선

- 허브비(Hub ratio)를 0.18로 정하고 주어진 지점(0.2R, 0.5R, 0.7R, 0.9R)의 계측 값을 크게 해치지 않는 범위 내에서 피치비, 레이크, 스큐, 코드길이의 수작업을 통해 순정을 하였으며, 순정 후 스큐와 코드는 제공된 형이 포함된 4차 다항식으로 곡선적합 하고, 스큐와 레이크는 반경 0.18R에서 각각 0의 값을 가지도록 변환하였다. 순정 결과는 표 3.1.5에 일반적인 프로펠러 오프셋 정보로 나타내었고 그림 3.1.6에 계측값과 비교하여 도시하였다.

표 3.1.5 계측 값으로부터의 변환 및 순정(skew:degree, other:mm)

r/R	0.18	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.975	1
pitch	1070.7	1075.1	1085.3	1096.1	1117.3	1139.3	1161.7	1182.9	1192.2	1190.8	1188.3	1186.8	1185.3
rake	0.0	6.2	21.5	36.0	62.7	86.7	108.1	128.7	148.3	167.2	176.3	180.8	185.2
skew	0.00	-0.30	-0.99	-1.57	-2.26	-2.16	-1.16	0.75	3.49	6.87	8.3373	9.69	10.78
chord	320.3	337.7	378.1	414.4	475.2	519.7	544.8	544.2	505.7	402.2	300.9	219.2	0.0

- Mean pitch ratio(P/D) : 0.5872
- Expanded Area ratio(A_E/A_0) : 0.4794

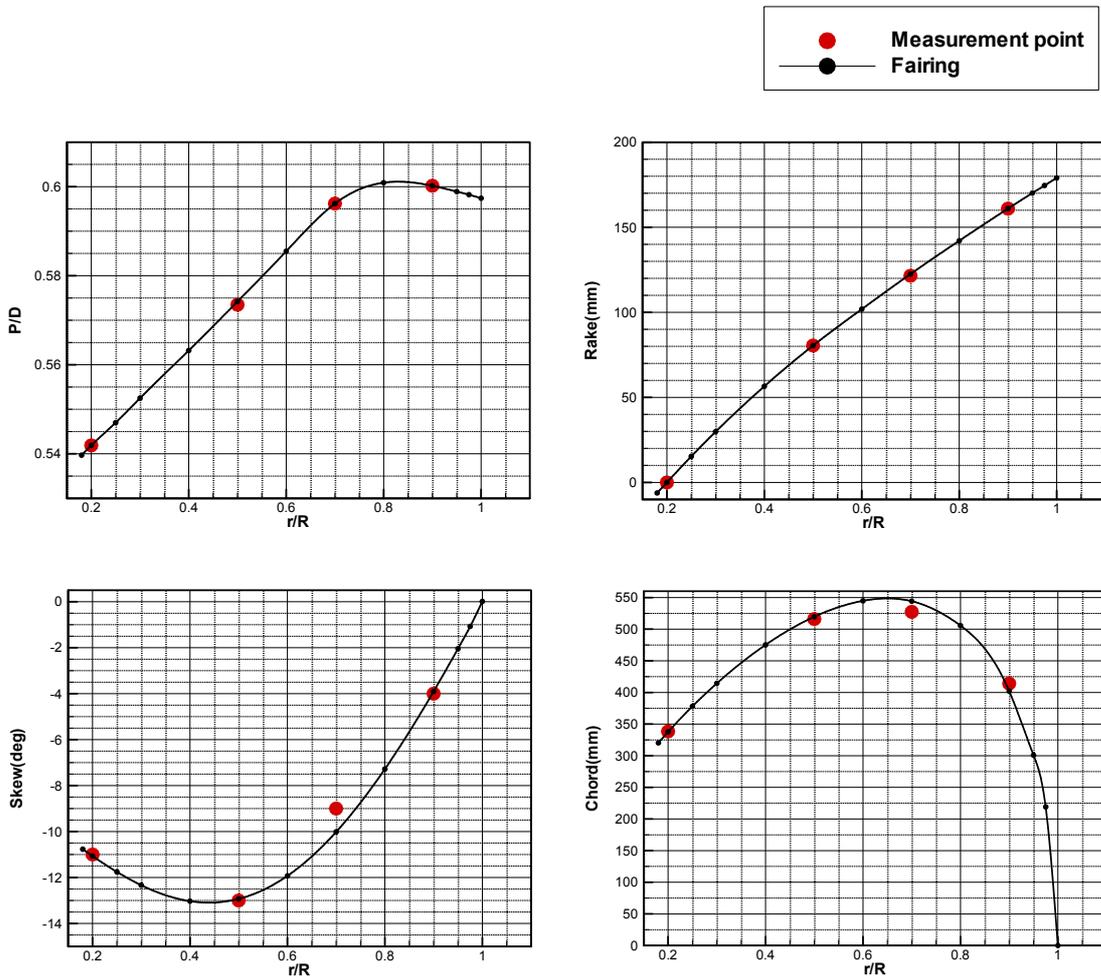


그림 3.1.6 반경별 계측 값의 곡선적합을 통한 형상정보 순정

(나) 반경별 단면의 두께

- 각 반경별 단면은 계측된 값이 상당히 불안정 하여 보간을 한다 하여도 단면 오프셋으로 직접 사용할 수는 없으므로 일반적으로 쓰이는 단면을 사용하기로 한다. 공선호 프로펠러에 사용된 단면은 MAU 단면으로 추정되지만 선박 프로펠러에 가장 널리 쓰이는 NACA66 a=0.8 meanline camber 단면을 사용하기로 한다. 각 반경별 최대 캠버와 두께는 계측 값을 4차 다항식을 통해 곡선 적합하되 최대 두께만 근사하는 과정이므로 단면의 앞날과 뒷날에서 두께가 0이 되는 구속을 생략하고 코드방향 위치에는 관계없이 최대 두께를 획득하였다.

표 3.1.6 반경별 최대 두께

r/R	0.2	0.5	0.7	0.9
thickness(mm)	65.0	41.0	30.6	16.2

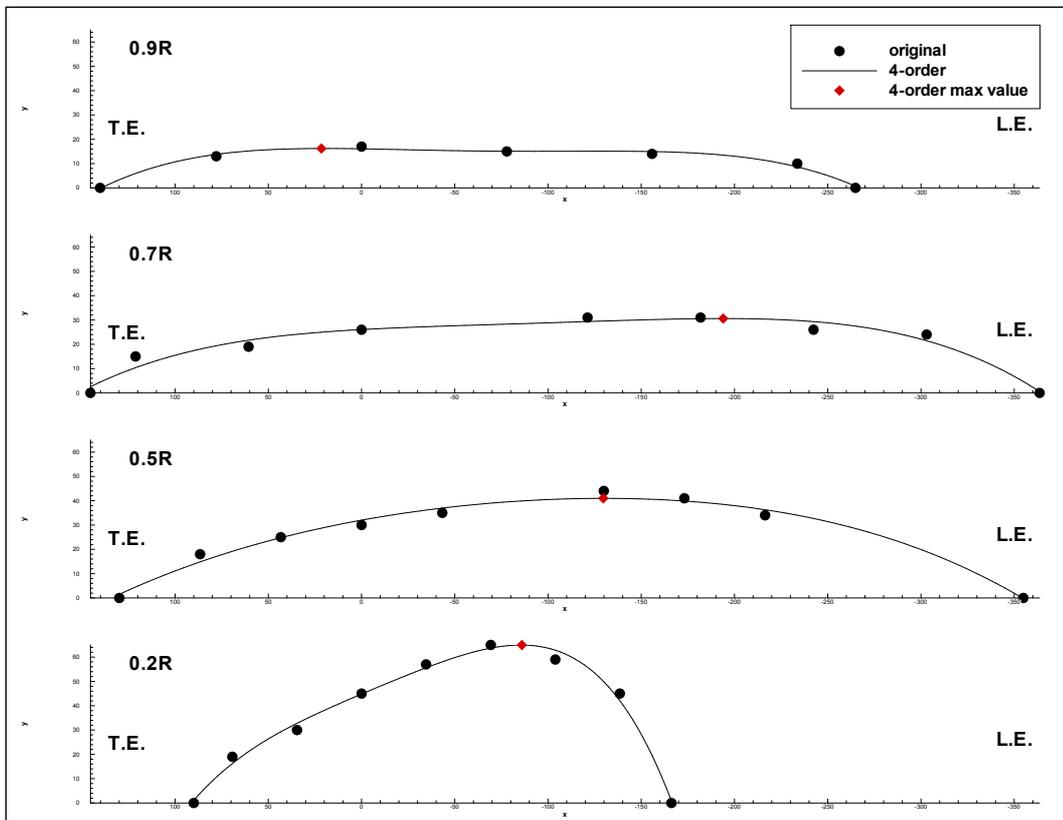


그림 3.1.7 4차 다항식 최소제곱법에 의한 코드방향 두께 분포의 곡선적합

(다) 반경별 단면의 캠버

- 캠버는 두께 측정 위치정보(압력면)와 해당 반경 피치각을 통해 구할 수 있다. 두께 측정은 그림 3.1.8의 압력면(C)과 흡입면(D) 사이에서 단면의 코-피리선에 수직인 방향으로 계측했다고 가정한다. 이 가정을 통해 계측 지점의 코드방향 좌표(x_c , y_c)와 그

위치에 해당하는 캠버(AB)를 구할 수 있다. 압력면에 해당하는 계측 지점의 코드방향 좌표를 구하기 위해 우선 불안정한 계측 지점을 매끄럽게 그림 3.1.9와 같이 보간하고 계측 지점과 피치각을 나타내는 코-꼬리선의 수직거리(BC)를 계산하면 두께의 절반과 코-꼬리선의 차이가 B점에서의 캠버량이 된다.

- 계산된 각 반경별 코드방향 캠버량은 그림 3.1.10에 코드길이를 무차원화 하여 도시 하였으며, 여기서는 각 반경별로 최대 캠버량만을 취한다(표 3.1.7).

$$\overline{BC} = \sqrt{x_L^2 + y_L^2} \cdot \sin(\phi - \psi); \quad \psi = \tan^{-1}\left(\frac{y_L}{x_L}\right)$$

$$\overline{AB} = \frac{\overline{CD}}{2} - \overline{BC}$$

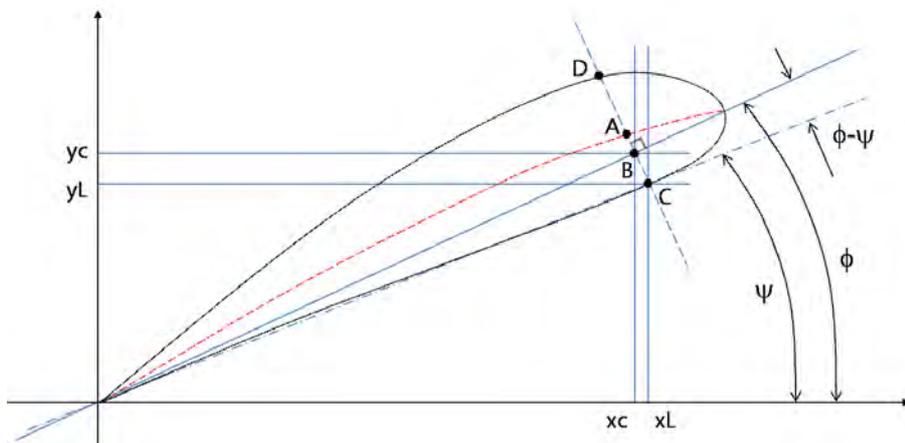


그림 3.1.8 캠버계산을 위한 개략도

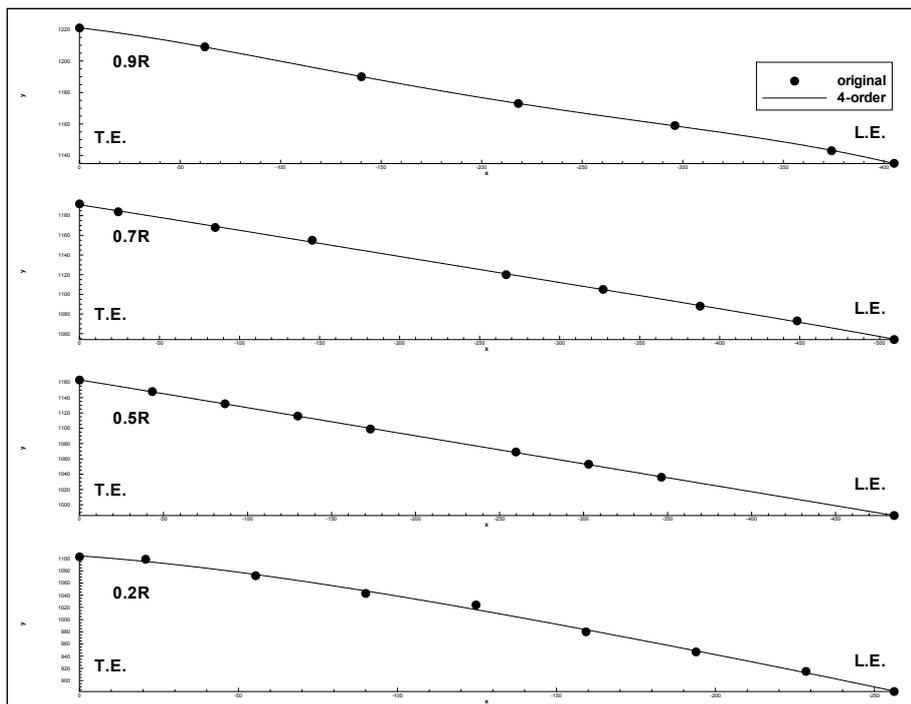


그림 3.1.9 4차 다항식 최소제곱법에 의한 압력면 위치데이터의 곡선적합

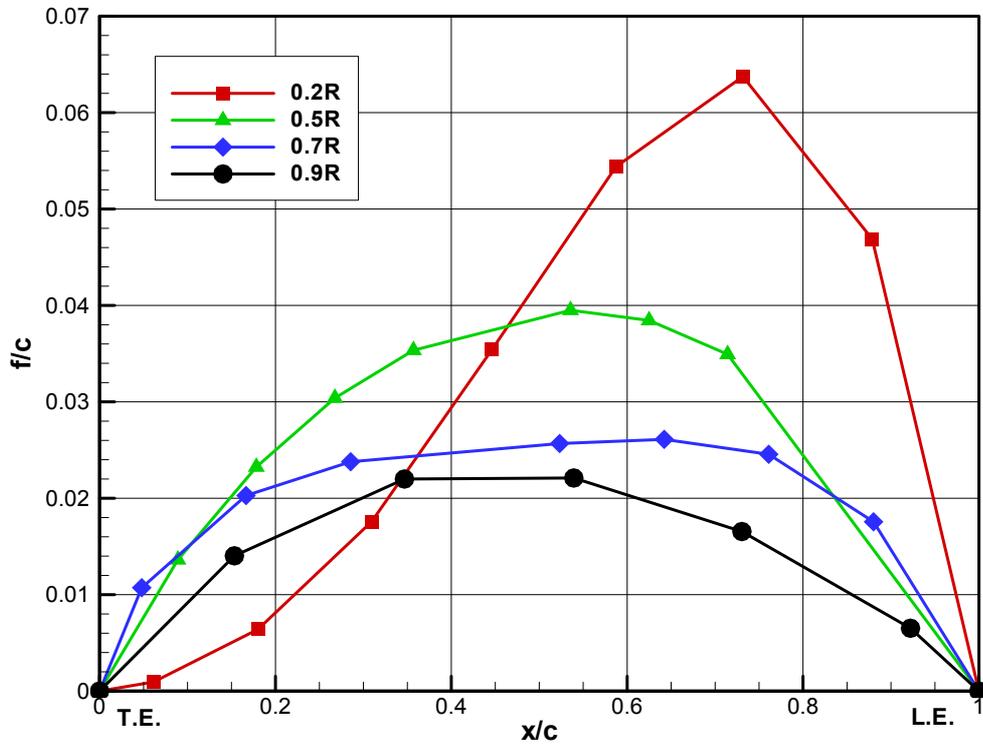


그림 3.1.10 각 반경별 코드방향 무차원 캠버분포

표 3.1.7 반경별 최대 캠버량

r/R	0.2	0.5	0.7	0.9
camber(mm)	21.6	20.4	13.8	9.2

(라) 반경방향 캠버 및 두께 분포의 적용

- 계측값을 바탕으로 추정된 최대두께(표 3.1.6)와 최대 캠버(표 3.1.7)를 이용하여 반경 방향으로 0.18R~1.0R까지 확장한 결과를 표 3.1.8에 정리 하고 3차원 형상 모델링한 결과를 그림 3.1.11에 도시하였다.

표 8 계측 값으로부터 순정된 최종 프로펠러 형상 오프셋 (skew:degree, other:mm)

r/R	0.18	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.975	1
pitch	1070.7	1075.1	1085.3	1096.1	1117.3	1139.3	1161.7	1182.9	1192.2	1190.8	1188.3	1186.8	1185.3
rake	0.0	6.2	21.5	36.0	62.7	86.7	108.1	128.7	148.3	167.2	176.3	180.8	185.2
skew	0.00	-0.30	-0.99	-1.57	-2.26	-2.16	-1.16	0.75	3.49	6.87	8.73	9.69	10.78
chord	320.3	337.7	378.1	414.4	475.2	519.7	544.8	544.2	505.7	402.2	300.9	219.2	0.0
camber	20.060	21.600	24.785	26.630	24.798	20.400	16.538	13.800	11.625	9.200	6.348	3.827	0.000
thickness	66.748	65.000	60.626	56.237	48.036	41.000	34.611	29.324	23.583	15.693	10.265	6.684	0.000

- Mean pitch ratio(P/D) : 0.5872
- Expanded Area ratio(A_E/A₀) : 0.4794

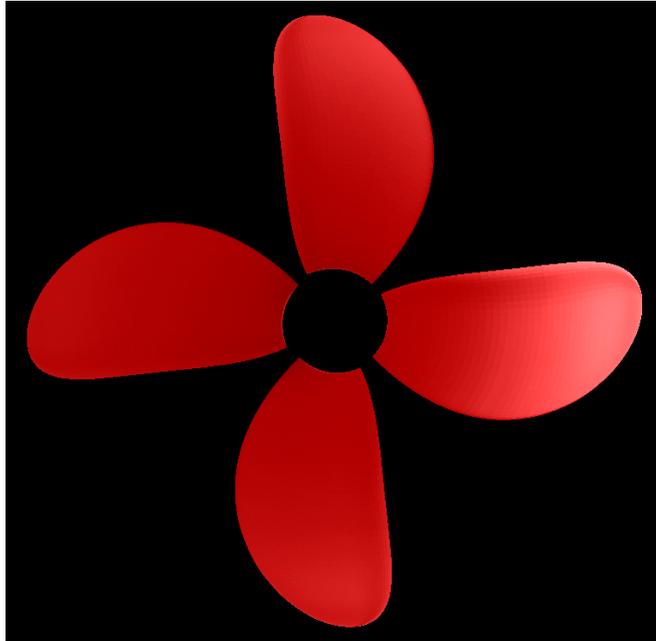


그림 3.1.11 순정을 거친 최종 3차원 형상(looking upstream)

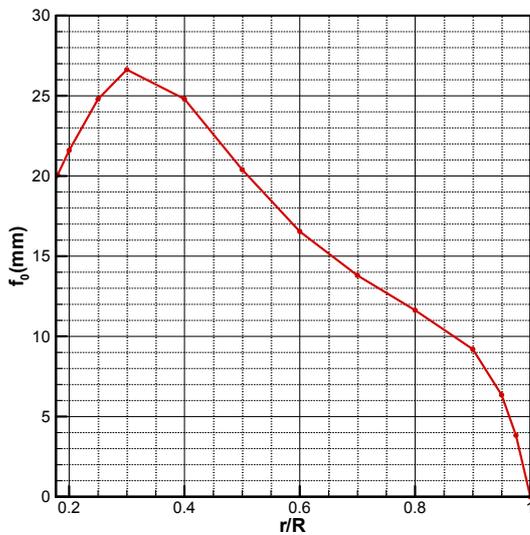


그림 3.1.12 반경방향 최대캠버 분포

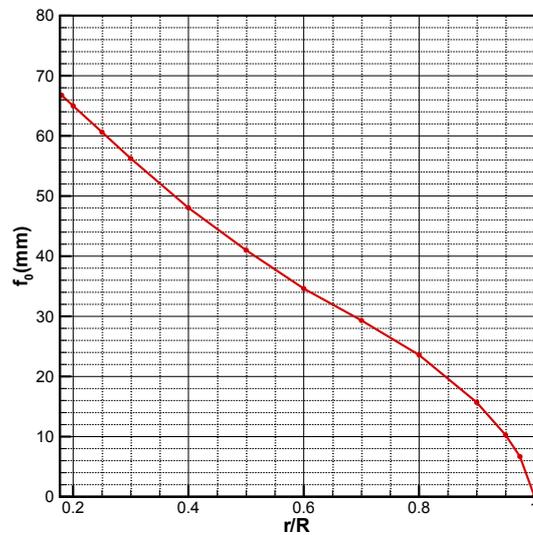


그림 3.1.13 반경방향 최대 두께 분포

(4) 프로펠러 형상 계측결과의 검증

- 계측을 통해 획득한 형상 데이터를 사용하기 전에 두 가지 프로그램(MAU Series 성능 추정 프로그램과 양력면이론에 의한 성능해석 프로그램 KPA4)을 사용해 대상선의 전 반적인 성능과 유사한지 확인하는 과정을 통해 계측결과를 검증하는 것이 필요하다. 선속, 프로펠러 직경 및 회전수를 알고 있으나 반류계수는 현재 미지의 상태로서 $w_T=0$ 으로 가정하고 계측을 진행한다. 계산의 기본 정보는 표 3.1.9와 같고 MAU-series와 양력면 이론에 기반한 VLM 프로그램으로 대상프로펠러의 단독성능을 추정된 결과를 그림 3.1.14에 도시하고 표 3.1.10에 설계점 J_A 에서의 결과를 각각 정리하였다.

- 두 프로그램을 적용할 때 기본적인 형상 즉, 날갯수, 확장면적비, 피치비를 동일하게 하였으나, 실물의 계측에 의해서는 캠버의 코드방향 분포 형상을 정확하게 알 수 없어 NACA a=0.8 평균선으로 대체 적용하였으므로, 두 프로그램이 동일한 결과를 줄 수는 없다. 두 계산 사이에 추력 K_T 의 값이 차이가 있으나 유사한 경향을 준다고 평가할 수 있다. 다만 새로 생성한 프로펠러의 효율이 높은 점과, 캐비테이션 발생 지연 성능이 우수 점을 고려하여 NACA a=0.8 평균선을 사용하기로 한다.

표 9 Principal data of the propeller

Num. of blades	4
Diameter	1.92 m
Engine Power(MCR)	1278 PS
Propeller RPM	359.55
J_A	0.514
P/D	0.5872
A_E/A_0	0.4794

표 10 Prediction result of the propeller open-water performance at assumed design J_A

	MAU-Series	VLM (KPA4)
J_A	0.514	
K_T	0.0787	0.1022
$10K_Q$	0.1063	0.1340
η_o	0.6026	0.6237

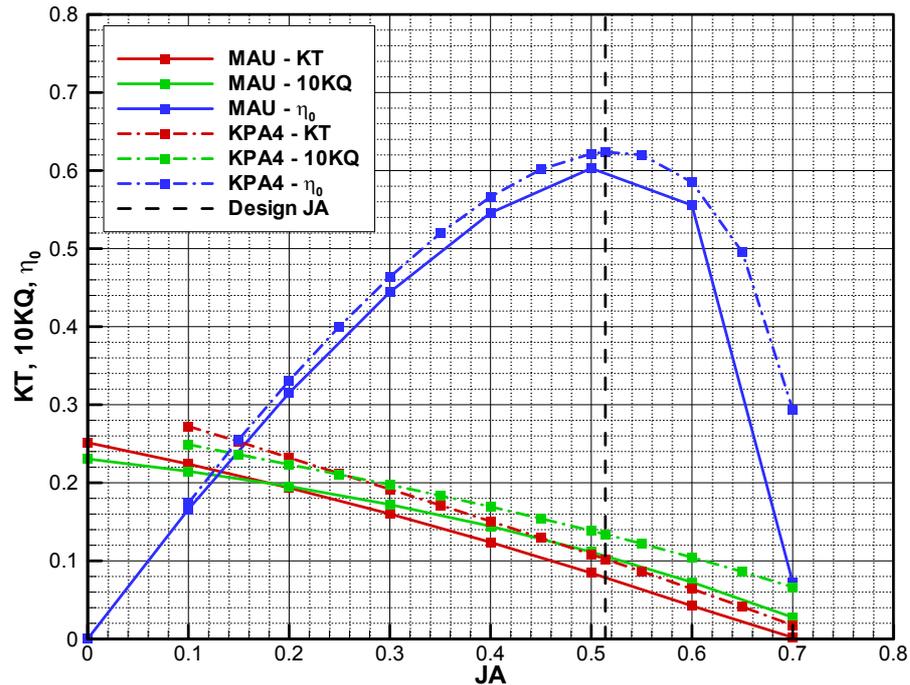


그림 3.1.14 MAU-series and VLM.을 이용한 프로펠러 단독성능 추정 결과

(5) MAU $B_p-\delta$ 도표에 의한 최적 프로펠러 여부 검증

- 현재 공선호에 장착된 프로펠러가 최적의 프로펠러인지 여부를 검토하기 위해서 MAU $B_p-\delta$ 도표를 이용하기로 한다. 표 3.1.11의 계산 조건을 사용하여 확장면적비 $A_E/A_o = 0.4, 0.55, 0.7$ 각각에 대하여 그림 3.1.15와 같이 최적점 찾기를 수행한 후에 캐비테이션 기준을 적용하면, MAU 계열 프로펠러를 사용하여 최적화된 프로펠러의 제원을 얻는다. 그 결과를 표 3.1.11에 정리하였다.
- 공선호 재고 프로펠러를 측정한 자료를 사용하여 KPA4 프로그램으로 계산한 성능 결과, 동일한 기하학적 형상에 대한 MAU 계열을 이용한 성능 추정, MAU $B_p-\delta$ 도표를 이용한 최적 프로펠러에 대한 성능 결과를 표 3.1.12에 정리하였다.
- 표 3.1.12에 의하면 MAU 계열에 의한 최적 프로펠러의 직경 $D=1.957\text{m}$ 와 공선호에 장착된 프로펠러의 직경 $D=1.92\text{m}$ 사이에는 약 2%의 차이가 있음을 우선 알 수 있다. 그러나 캐비테이션 기준을 적용하여 최적화하여 구한 프로펠러의 확장면적비 $A_EA_o = 0.730$ 이 현재 공선호에 장착된 프로펠러의 확장면적비 $A_EA_o = 0.4794$ 와 약 50% 정도의 차이가 있는 것을 알 수 있다.
- 표 3.1.12는 또한 확장면적비의 차이에 의해 KPA4 추정 효율 $\eta_o=0.624$ 와 최적 프로펠러의 효율 $\eta_o=0.566$ 사이에 약 7%의 효율 차이가 있음을 알 수 있다.
- 현재 공선호에 장착된 프로펠러가 최적 프로펠러와 큰 차이를 보이므로, 현재 장착된 프로펠러에 대해 캐비테이션에 의한 침식, 진동 등의 문제가 있는지 향후 우선적으로 캐비테이션 터널에서의 모형시험을 통하여 검토되어야 한다
- 최적 프로펠러의 형상은 예인수조와 캐비테이션 터널에서의 모형시험을 수행한 후에 결정되어야 한다.

표 3.1.11 Optimum design point calculation by $B_p-\delta$ chart

RPM	1600 : 359.55(reduction)			
P_B	1278 PS			
η_t	0.99			
P_D	1263.9 PS			
V_S	11.5 knots			
η_R	1.0			
$1-w$	1.0			
V_A	11.5 knots			
$\sqrt{B_p}$	5.34			
h	1.143			
A_E/A_o	0.4	0.55	0.7	opt.= 0.730
δ	63.8	62.57	61.42	61.20
Diameter	2.040	2.001	1.965	1.957
P/D	0.69	0.74	0.76	0.760
η_o	0.61	0.59	0.57	0.566

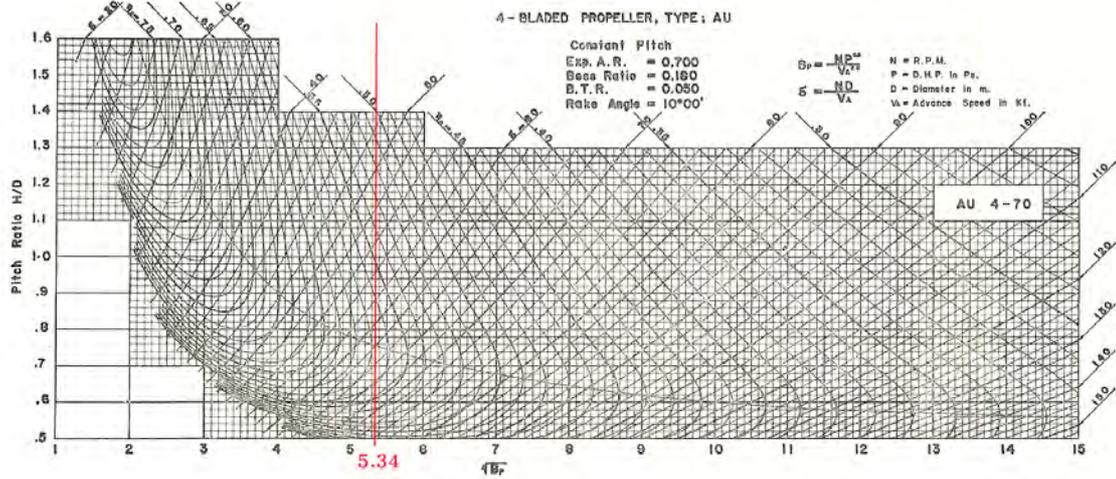


圖-17 $\sqrt{B_p}-\delta$ 型式設計圖表 (AU 4-70)

그림 3.1.15 $B_p-\delta$ curve at 4-blades and $A_E/A_0=0.70$ propeller

표 3.1.12 Comparison of geometry and efficiency predicted by various methods

	공선호 계측 프로펠러에 대해 KPA4 이용 성능 추정	계측 프로펠러 성능의 MAU 계열 자료 적용 성능 추정	공선호 추진정보 (표 3.1.11) 사용하여 MAU $B_p-\delta$ 도표로 최적 프로펠러 계산
A_E/A_0	0.4794	- 좌동 -	0.730
$D(m)$	1.920	- 좌동 -	1.957
P/D	0.587	- 좌동 -	0.760
η_o	0.624	0.603	0.566

나. 130톤급 예망어선 저항추진 시험 및 캐비테이션 시험

130톤급 예망어선 공선호에 대하여 저항추진시험 및 캐비테이션 시험을 수행하였다. 결과는 모형시험 보고서로 대체하며 부록에 수록하였다.

(1) 저항추진 시험

선형 도면 및 자료에 의하여 축척비 1/7.936인 모형선을 목재로 제작하였다. 모형선의 난류 추진을 위해 선체에는 스티드를 부착하였다. 모형프로펠러는 도면에 의하여 축척비 1/7.936으로 알루미늄으로 제작하였다. Box keel, Shoe piece, Rudder, Duct(설계 프로펠러 모형시험) 부가물을 제작하여 부착하였다. 다음 그림 3.1.16과 그림3.1.17은 모형선에 전체 부가물이 부착된 상태를 보여주고 있으며 표 3.1.13은 모형선의 주요 제원이다. 본 연구에서 실시된 모형 시험은 모두 한국해양연구원의 선형시험수조에서 수행되었으며 각종 계측치들은 전산화된 자료취득장치를 통해서 얻어졌다.



그림 3.1.16 모형선에 전체 부가물이 부착된 상태

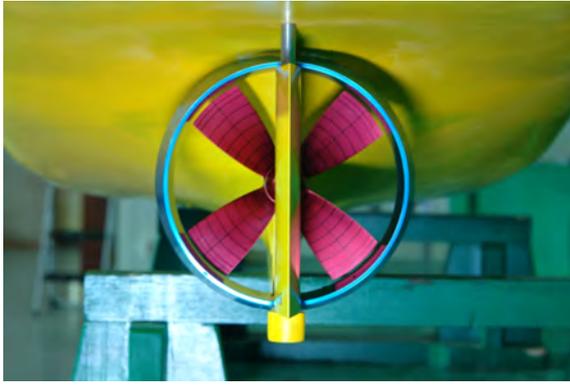


그림 3.1.17 모형선에 설계 덕트-프로펠러가 부착된 상태

표 3.1.13 모형선 주요 제원 (KS1286)

Designation	File No.: SYMBOL(unit)	s1286s02		s1286s02	
		SHIP	MODEL	SHIP	MODEL
Scale ratio	SCALE	7.936		7.936	
Load condition		Design		Design(w/ Duct)	
Draft, moulded	TF(m)	2.250	0.2835	2.250	0.2835
	TA(m)	2.250	0.2835	2.250	0.2835
	TMEAN(m)	2.250	0.2835	2.250	0.2835
Length between per.	LPP(m)	26.000	3.2762	26.000	3.2762
Breadth, moulded	B(m)	7.500	0.9451	7.500	0.9451
Depth, moulded	D(m)				
Number of propeller	NOPROP		1		1
Length of waterline	LWL(m)	28.381	3.5762	28.381	3.5762
Wetted surface area	S(m ²)	288.2	4.5764	300.6	4.7723
Bilge keel area	SBK(m ²)	0.0	0.0000	0.0	0.0000
Trans. area above WL	AT(m ²)	25.3	0.4011	25.3	0.4011
Displacement volume	DISV(m ³)	306	0.6120	306	0.6120
KB above moulded BL	KB(m)				
LCB from midship, f+	LCB(m)				
LCF from midship, f+	LCF(m)				
Block coef.	CB		0.697		0.697
Load waterline coef.	CW				
Midship section coef.	CM				
Prismatic coef.	CP				
	LPP/B		3.4667		3.4667
	LPP/T		11.5556		11.5556
	B/T		3.3333		3.3333
	LCB% (fwd.+)				

시험항목과 모형상태 및 시험조건은 다음과 같다.

표 3.1.14 130톤급 예망어선 시험 항목(KS1286)

단계	시험항목	부가물	시험조건
재고 프로펠러	프로펠러 단독성능평가	Stock Propeller	1개
	재고프로펠러	Box keel, Shoe piece, Rudder	1흘수, 11속도
	자항성능평가		1흘수, 11속도
	예망시 자항성능평가		1흘수, 3속도
	반류분포계측	Box keel, Shoe piece	1흘수, 2 속도
	유선조사시험	Box keel, Shoe piece, Rudder	1흘수, 1속도
설계 프로펠러	프로펠러 단독성능평가	Design Propeller	1개
	저항성능평가	Box keel, Shoe piece, Rudder, Duct	1흘수, 11속도
	자항성능평가		1흘수, 11속도
	예망시 자항성능평가		1흘수, 3속도

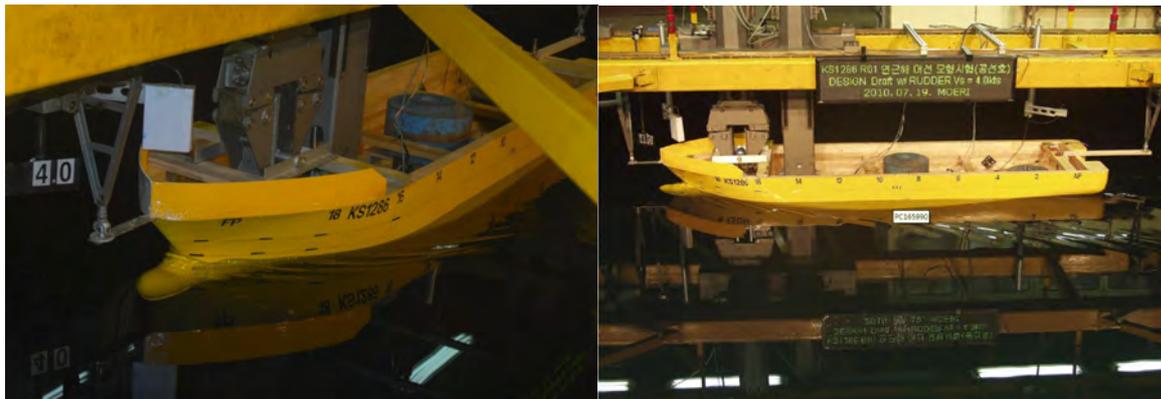


그림 3.1.18 Photographs of the Running Ship Model(KS1286, Design draft, 4 knots)



그림 3.1.19 Photographs of the Running Ship Model(KS1286, Design draft, 11.5 knots)

(2) 캐비테이션 시험

캐비테이션 터널에서 공선호 프로펠러(KP935)와 설계된 덕트 프로펠러(KP1064)의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측시험을 수행하였다. 모형시험은 어선의 항주상태 및 어업시 예인상태의 두 가지 경우에 대하여 수행하였으며, 이때 사용한 반류 스크린은 항주상태의 반류를 사용하였다.

반류 스크린은 당 연구원의 표준기법을 사용하여 생성하였으며, 어선 프로펠러의 캐비테이션 성능을 파악하기 위한 모형시험은 당 연구원의 중형 캐비테이션 터널(시험부; 0.6m*0.6m*2.6m; width*height*length)에서 수행하였다.

표 3.1.15 시험 조건

Hull form	KS1286	
Wake Screen Fabrication	Design Draft (순항)	
Propeller	KP935, w/15% Sea Margin	KP1064, w/15% Sea Margin
Cavitation Observation	순항 및 예인상태의 설계흡수	순항 및 예인상태의 설계흡수
Pressure Fluctuation Measurement Test	순항 및 예인상태의 설계흡수	덕트-프로펠러로 계측불가

표 3.1.16 모형 프로펠러의 주요 제원

Model Propeller Number	KP935	KP1064
Scale Ratio, λ	7.936	7.936
Full-Scale Propeller Diameter, D_s	1.984 m	1.984m
Model Propeller Diameter, D_m	250.0 mm	250.0mm
Hub-Diameter Ratio, d_H/D	0.1770	0.200
Number of Blades, Z	4	4
Mean Pitch-Diameter Ratio, $(P/D)_{mean}$	0.6068	0.8046
Expanded Area Ratio, A_E/A_O	0.4974	0.4855
Chord-Diameter Ratio at 0.7R, $C_{0.7R}/D$	0.2834	0.2605
Skew Angle Extent, θ_s	13.04°	0.0°
Rake-Diameter Ratio at Tip	10.919 mm	0.0mm
Blade Section Type	NACA66	NACA66
Propeller Rotation Direction	R.H.	R.H.
Material of Model Propeller	Aluminum	Aluminum

표 3.1.17 캐비테이션 시험 조건(KP935)

Model Propeller Number	KP935	
Load Condition	Design draft(cruise)	Design draft(Trawl)
Test Date	February 08, 2011	February 08, 2011
Water Temperature	4.5°C	4.5°C
Atmospheric Pressure	100.1 kPa	100.1 kPa
Full-Scale Propeller Brake Power	1277.6 PS	1277.6 PS
Full-Scale Propeller Rotational Speed	377.44 rpm	360.56 rpm
Full-Scale Propeller Shaft Submergence	1.787m	1.787m
Dynamometer	J25	J25
Tip Clearance	0.2506m	0.2506m
Model Propeller Rotational Speed, n_m	25.0rps	25.0rps
Advance Coefficient, J_A	0.3367	0.1738
Thrust Coefficient, K_T	0.1732	0.2319
Cavitation Number, $\sigma_{n0.7R}$	1.3845	1.5171
Reynolds Number, R_n	0.65×10^6	0.65×10^6
Air Content, α/α_s	63.0%	63.0%

표 3.1.18 캐비테이션 시험 조건(KP1064)

Model Propeller Number	KP935	
Load Condition	Design draft(cruise)	Design draft(Trawl)
Test Date	April 16, 2012	April 16, 2012
Water Temperature	12.8°C	12.8°C
Atmospheric Pressure	100.24 kPa	100.24 kPa
Full-Scale Propeller Brake Power	1277.6 PS	1277.6 PS
Full-Scale Propeller Rotational Speed	337.66 rpm	311.03 rpm
Full-Scale Propeller Shaft Submergence	1.787m	1.787m
Dynamometer	J25	J25
Tip Clearance	w/ Duct	w/ Duct
Model Propeller Rotational Speed, n_m	25.0rps	25.0rps
Advance Coefficient, J_A	0.4302	0.3756
Thrust Coefficient, K_T	0.1874	0.2053
Cavitation Number, $\sigma_{n0.7R}$	1.6061	1.8928
Reynolds Number, R_n	0.76×10^6	0.76×10^6
Air Content, α/α_s	59.8%	59.8%

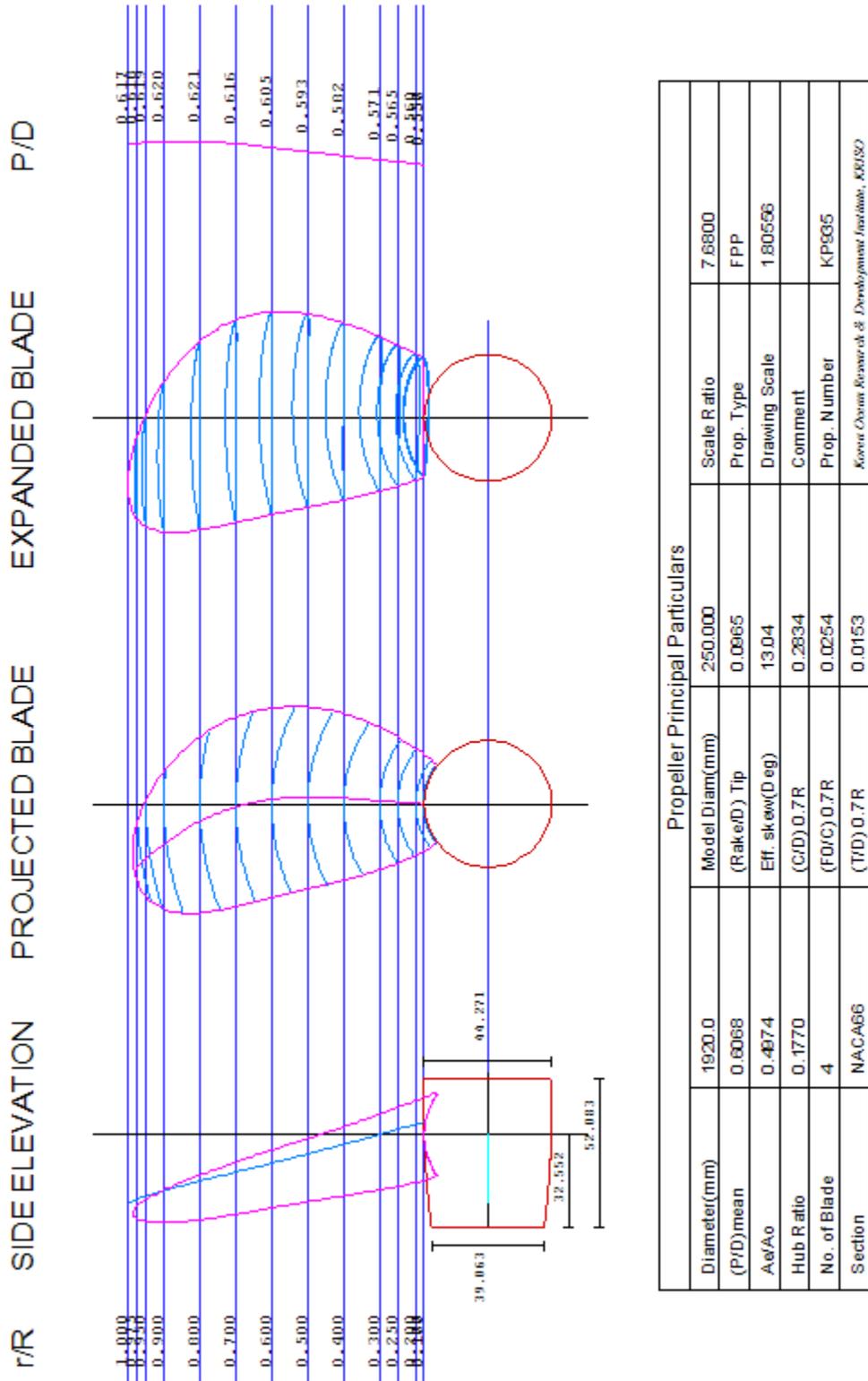


그림 3.1.20 재고프로펠러 도면 (KP935)

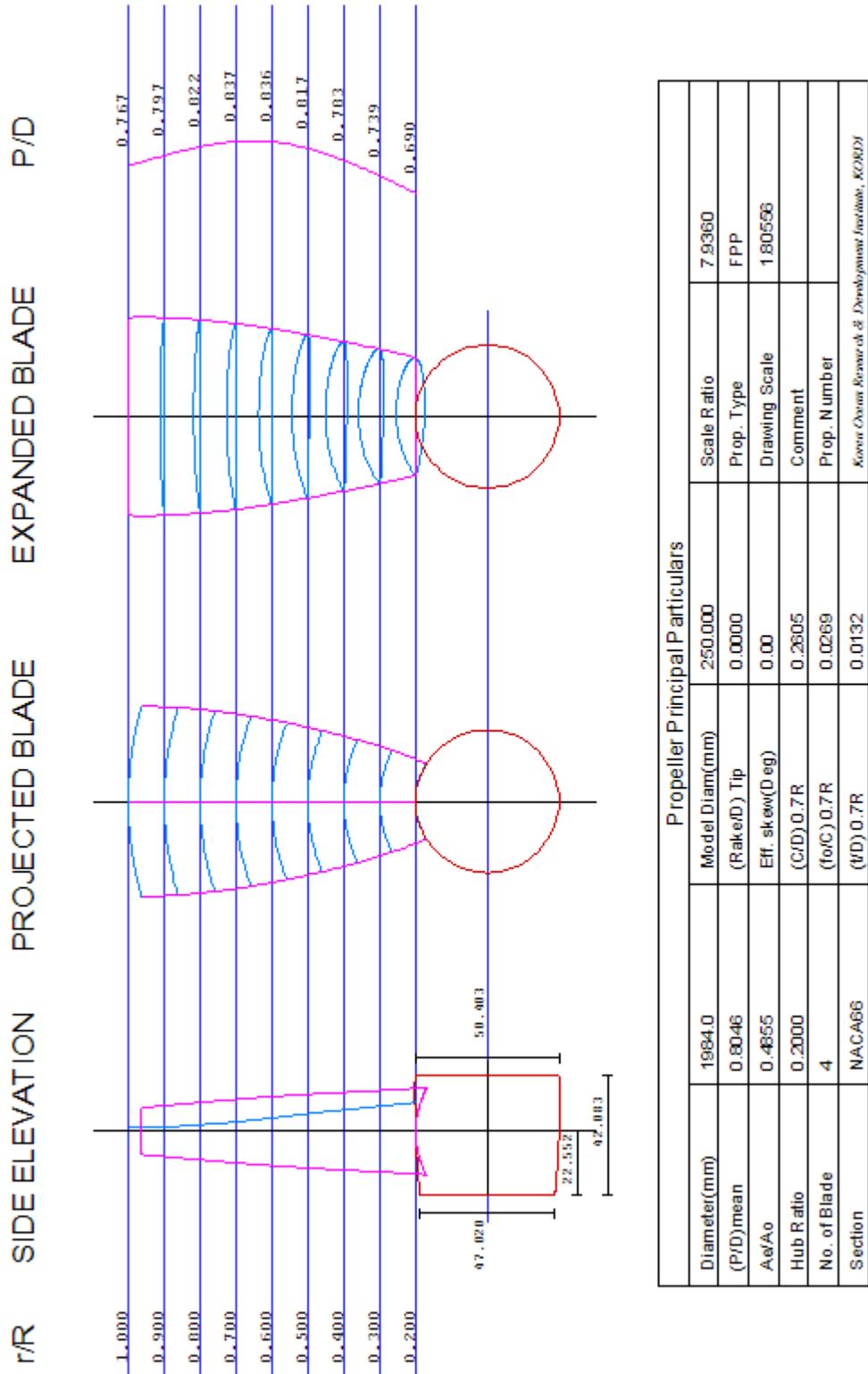


그림 3.1.21 설계 프로펠러 도면 (KP1064)

(3) 성능평가 시험 요약

(가) 저항추진 시험

항주 및 예인 운항 상태의 저항성능 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

표 3.1.19 저항추진 시험 결과(Design draft, 프로펠러 KP935)

선속		PE (kW)	η_D	P_D (kW)	N(rpm)	t	w_S	η_R
5.0	항주	11	0.499	22	117.59	0.394	0.286	1.002
11.5		338	0.487	693	344.88	0.341	0.312	1.002
5.0	예인	208	0.329	630	311.44	0.167	0.284	0.994

표 3.1.19 저항추진 시험 결과(Design draft, 프로펠러 KP1064)

선속		PE (kW)	η_D	P_D (kW)	N(rpm)	t	w_S	η_R
5.0	항주	14	0.622	22	106.73	0.116	0.156	0.976
11.5		372	0.560	664	308.94	0.107	0.157	0.976
5.0	예인	210	0.357	589	274.97	-0.117	-0.152	0.957

(나) 캐비테이션 시험

캐비테이션 터널에서 공선호 프로펠러(KP935)와 설계된 덕트프로펠러(KP1064)의 캐비테이션 시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

표 3.1.19 캐비테이션 시험 결과(Design draft, 프로펠러 KP935)

Test Item	Load Condition at cruise		Load Condition at Trawl	
	Suction Side	Pressure Side	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Not Appeared	Sheet Cavitation	Not Appeared
Range of Blade Angle	- 30° ~ 230°	-	-30° ~ 230°	-
Maximum Extent	28% at 20°	-	25% at 20°	-

표 3.1.19 캐비테이션 시험 결과(Design draft, 프로펠러 KP1064)

Test Item	Load Condition at cruise		Load Condition at Trawl	
	Suction Side	Pressure Side	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Not Appeared	Sheet Cavitation	Not Appeared
Range of Blade Angle	- 30° ~ 90°	-	50° ~ 280°	-
Maximum Extent	20% at 30°	-	3% at 260°	-

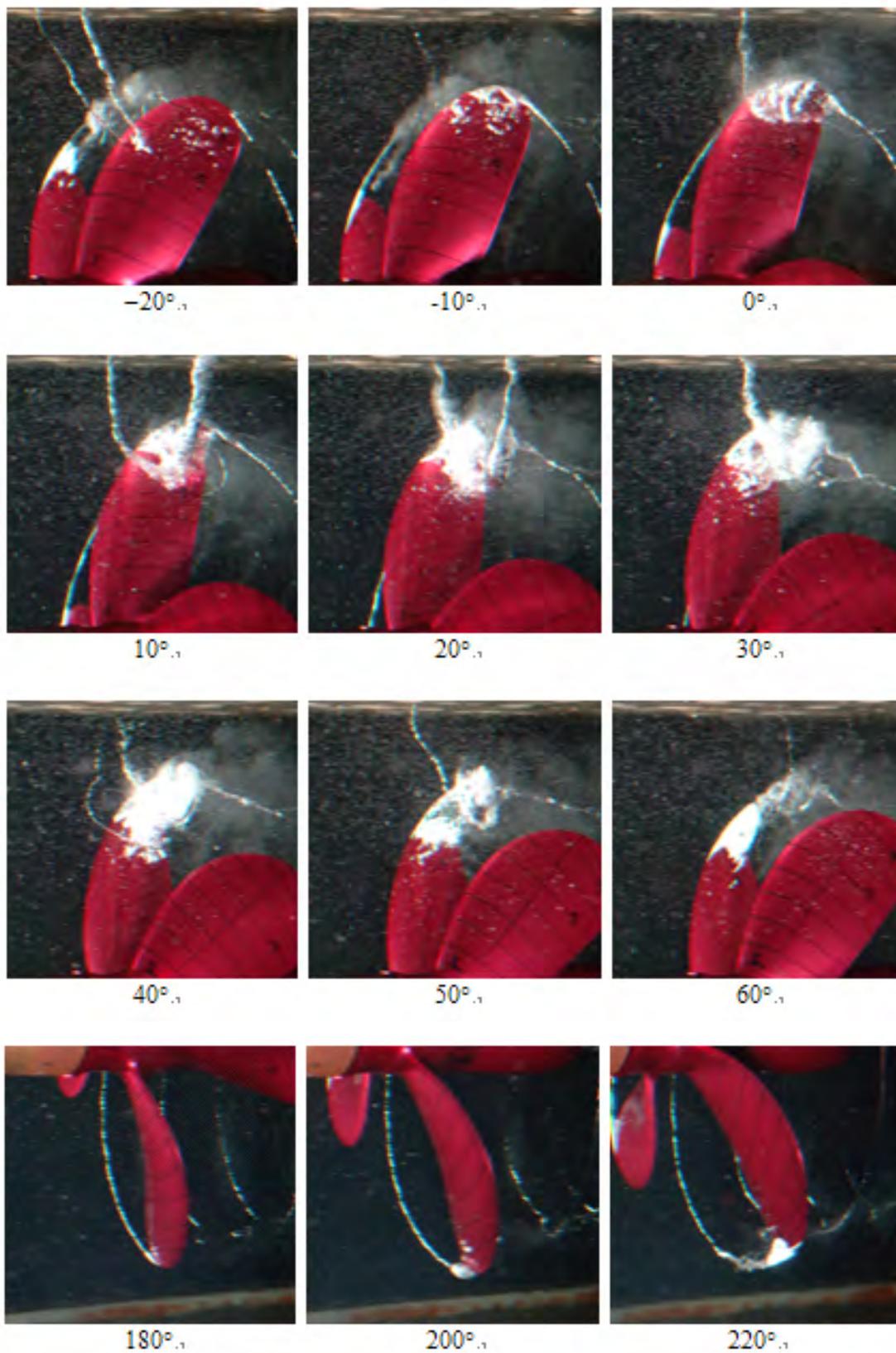


그림 3.1.22 Photographs of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller(cruise)

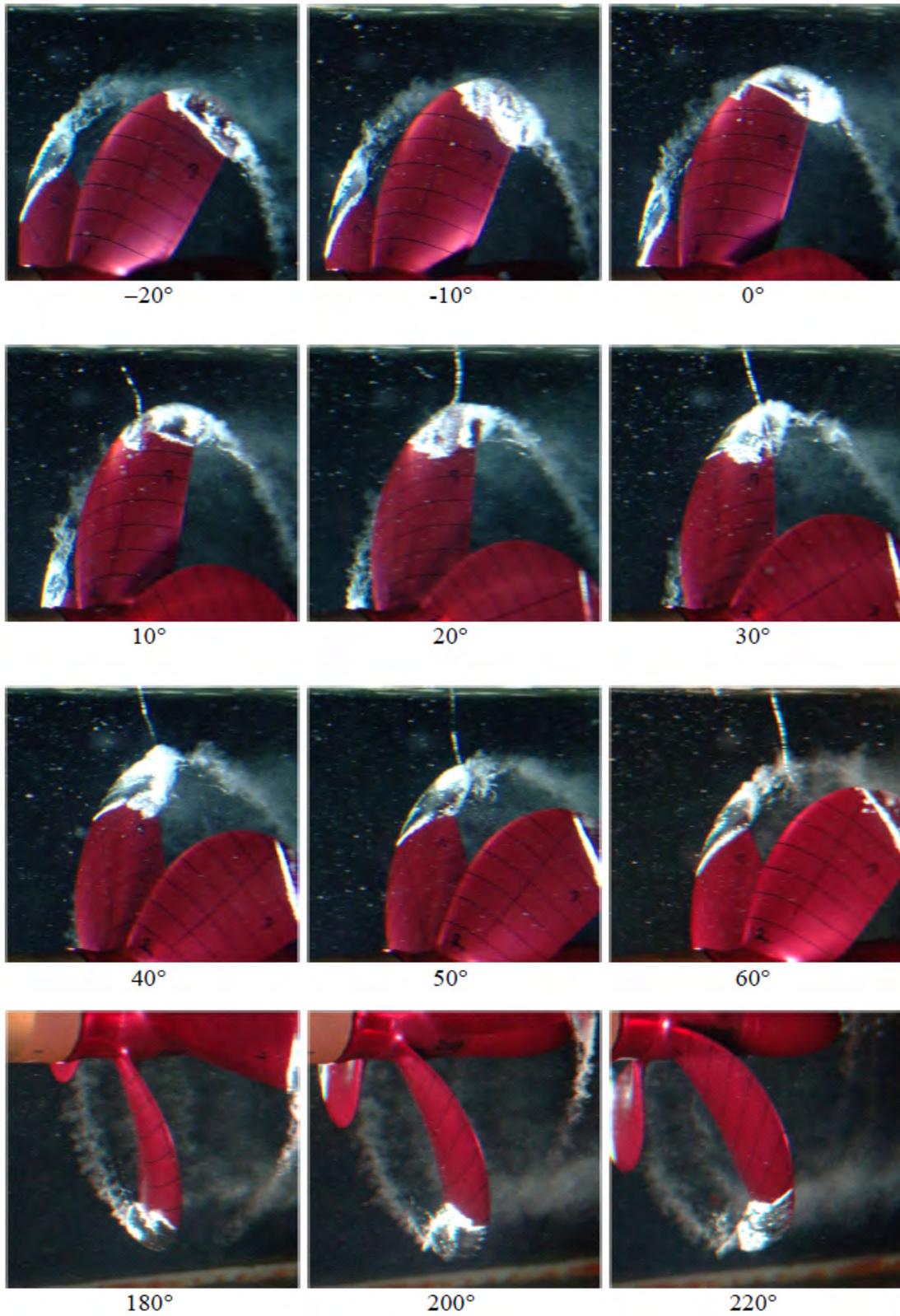


그림 3.1.23 Photographs of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller(Trawl)

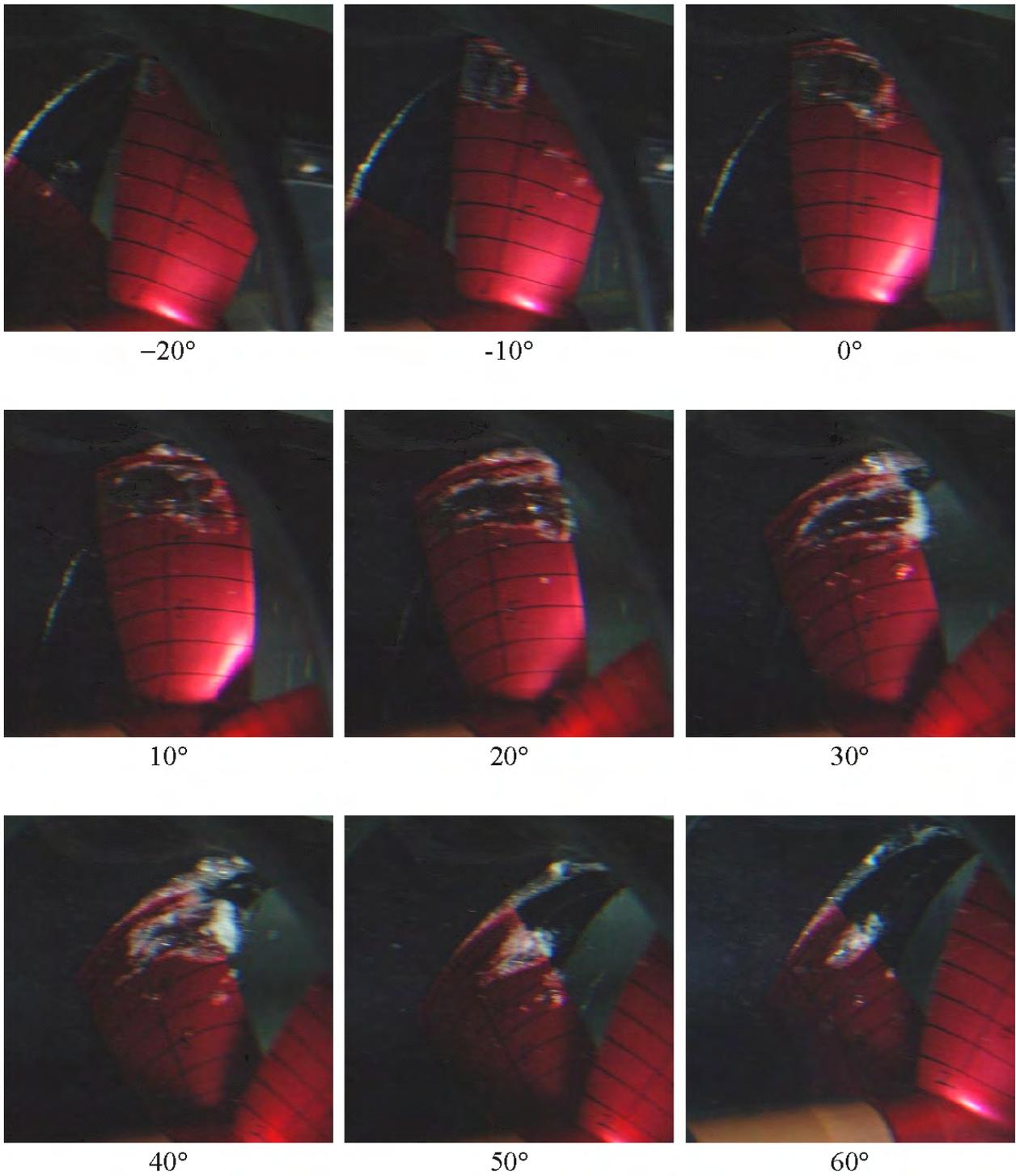


그림 3.1.24 Photographs of the Cavitation Patterns of KP1064 Propeller(Cruise)

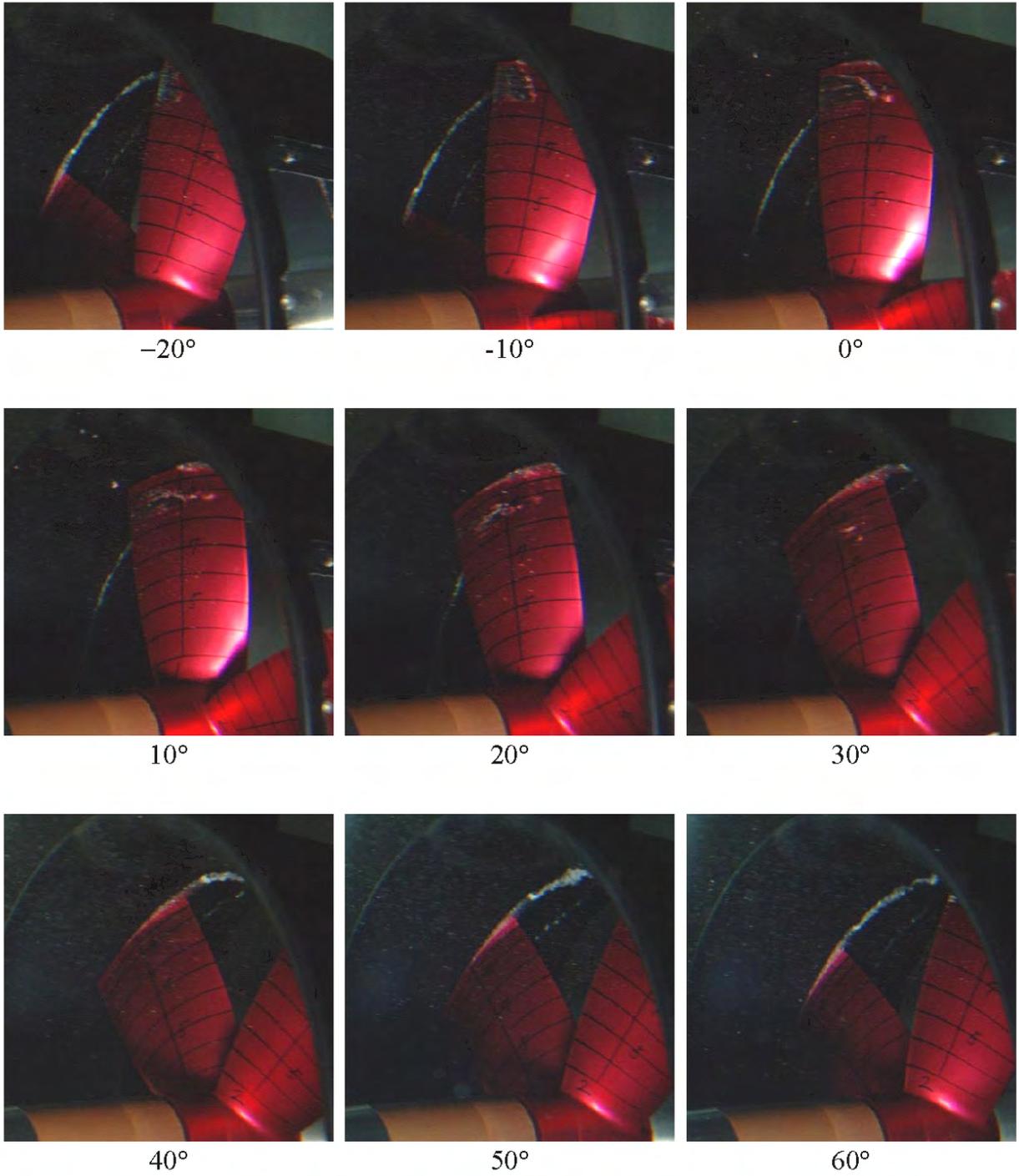


그림 3.1.25 Photographs of the Cavitation Patterns of KP1064 Propeller(Trawl)

다. 130톤급 예망어선 모형시험 결과 분석

기존 재고 프로펠러의 캐비테이션 시험에서는 넓은 범위에 걸쳐 캐비테이션이 발생하는 것이 검증되었다. 또한 침식에 가장 큰 악영향을 끼치는 서 공기방울형 캐비티(bubble cavity)가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 매우 특이한 사례로 프로펠러 표면에서 상방향 선미부를 따라 반시계 방향으로 회전하는 Propeller hull vortex cavitation (PHVC)이 강하게 발생하는 것이 관찰되었는데 PHVC는 날개가 지나갔음에도 사라지지 않고 마치 번개와 같은 모습이 유지되었다. 이상의 캐비테이션 관찰시험 결과를 종합해 볼 때 대상선의 프로펠러는 최악의 상태에서 운영되고 있다고 할 수 있으며, 이는 어선의 추진효율 감소와 소음 및 진동의 증가에 따른 어획량 감소로 직결될 것이다. 또한 선체에 작용하는 변동압력은 캐비테이션 관찰에서 예상되었듯이 매우 큰 값(약 20kPa)을 나타낸다.

3. 190톤급 선망 어선

가. 190톤급 선망어선 선형 및 추진기 특성 조사

130톤급 선망 어선에 대한 연구는 중소조선연구원에서 수행중인 과제인 “수산업 기술경쟁력 강화를 위한 미래형 어선기술 개발”과 연계하여 연구하는 방안을 논의하였다. 이에 따라 본 과제는 상기 과제와 협력하여 190톤급 선망어선의 추진기에 대한 연구를 수행하였다.

추진기의 설계 및 성능시험에 필요한, 개발 선형 자료를 중소조선 연구원으로부터 제공받았다. 본 과제에서는 획득한 자료를 바탕으로 모형선을 건조하고 190톤 선망 설계선의 예인수조 시험(저항시험, 자항시험, 반류조사시험)을 수행하였다.

나. 190톤급 선망어선 저항추진 시험 및 캐비테이션 시험

190톤급 선망어선 공선호에 대하여 저항추진시험 및 캐비테이션 시험을 수행하였다. 결과는 모형시험 보고서로 대체하며 부록에 수록하였다.

(1) 저항추진 시험

선형 도면 및 자료에 의하여 축척비 1/7.936인 모형선을 목재로 제작하였다. 모형선의 난류 축진을 위해 선체에는 스티드를 부착하였다. 모형프로펠러는 도면에 의하여 축척비 1/7.936으로 알루미늄으로 제작하였다. Box keel, Shoe piece, Rudder 부가물을 제작하여 부착하였다. 다음 그림 3.1.24는 모형선에 전체 부가물이 부착된 상태를 보여주고 있다. 본 연구에서 실시된 모형시험은 모두 한국해양연구원의 선형시험수조에서 수행되었으며 각종 계측치들은 전산화된 자료취득장치를 통해서 얻어졌다.



그림 3.1.26 Photographs of the Model Ship (KS1354)

표 3.1.21 Principal Dimension of the Hull form (KS1354)

Designation	File No.: SYMBOL(unit)	s1354s02	
		SHIP	MODEL
Scale ratio	SCALE	9.6	
Load condition		Design	
Draft, moulded	TF(m)	2.610	0.2719
	TA(m)	2.610	0.2719
	TMEAN(m)	2.610	0.2719
Length between per.	LPP(m)	38.000	3.9583
Breadth, moulded	B(m)	8.600	0.8958
Depth, moulded	D(m)		
Number of propeller	NOPROP		1
Length of waterline	LWL(m)	42.627	4.4403
Wetted surface area	S(m ²)	423.4	4.5941
Bilge keel area	SBK(m ²)	0.0	0.0000
Trans. area above WL	AT(m ²)	57.5	0.6237
Displacement volume	DISV(m ³)	460	0.5199
KB above moulded BL	KB(m)		
LCB from midship, f+	LCB(m)		
LCF from midship, f+	LCF(m)		
Block coef.	CB	0.559	
Load waterline coef.	CW		
Midship section coef.	CM		
Prismatic coef.	CP		
LPP/B		4.4186	
LPP/T		14.5594	
B/T		3.295	
LCB% (fwd.+)			

시험항목과 모형상태 및 시험조건은 다음과 같다.

표 3.1.22 130톤급 예망어선 시험 항목(KS1354)

단계	시험항목	부가물	시험조건
1차년도 재고프로펠러	저성능평가	Box keel, Shoe piece, Rudder	1홀수, 10 속도
	자향성능평가		1홀수, 7 속도
	반류분포계측	Box keel, Shoe piece	1홀수, 1속도
2차년도 설계프로펠러	프로펠러 단독성능평가	Design Propeller	1개
	자향성능평가	Box keel, Shoe piece, Rudder	1홀수, 7속도



그림 3.1.27 Photographs of the Running Ship Model(KS1354, Design draft, 12.0 knots)



그림 3.1.28 Photographs of the Running Ship Model(KS1354, Design draft, 15.0 knots)

(2) 캐비테이션 시험

캐비테이션 터널에서 190톤 어선 프로펠러(KP1069)의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측 시험에 대한 결과를 Part II에서 설명하고 있다. 모형시험은 어선의 항주상태에서 설계선속 (13knots) 및 설계시 사용한 엔진의 마력조건(NCR 1058.9kW x 300rpm) 두 가지 경우에 대하여 수행하였으며, 이때 사용한 반류 스크린은 항주상태의 설계선속의 반류를 사용하였다. 프로펠러 설계를 위한 해상여유는 15%를 기준으로 하였으며, 축전달효율은 96%를 사용하였다.

반류 스크린은 한국해양연구원의 표준기법을 사용하여 생성하였으며, 어선 프로펠러의 캐비테이션 성능을 파악하기 위한 모형시험은 한국해양연구원의 중형 캐비테이션 터널(시험부; 0.6m*0.6m* 2.6m; width*height*length)에서 수행하였다.

변동압력의 경우 주어진 날개끝 간극에서 시험을 수행하여야 하지만, 본 어선의 경우 당 연구소에 보유한 실험시설의 한계치에 가까운 날개끝 간극을 가지고 있다. 또한 변동압력의 값이 PHVC(Propeller Hull Vortex Cavitation)에 의하여 매우 불규칙하게 계측되어 변동압력의 계측지점을 실험시설의 최대치로 확장하여 계측하였다. 따라서 변동압력의 경우 경향 파악을 위한 것이다.

표 3.1.23 시험 조건

Hull form	KS1354
Wake Screen Fabrication	Design Draft (순항)
Propeller	KP1069, w/15% Sea Margin
Cavitation Observation	13knots, NCR 1058.9kW x 300rpm
Pressure Fluctuation Measurement Test	13knots, NCR 1058.9kW x 300rpm

표 3.1.24 모형 프로펠러의 주요 제원

Model Propeller Number	KP1069
Scale Ratio, λ	9.6
Full-Scale Propeller Diameter, D_s	2.40 m
Model Propeller Diameter, D_m	250.0 mm
Hub-Diameter Ratio, d_H/D	0.170
Number of Blades, Z	4
Mean Pitch-Diameter Ratio, $(P/D)_{mean}$	0.5761
Expanded Area Ratio, A_E/A_O	0.5905
Chord-Diameter Ratio at 0.7R, $C_{0.7R}/D$	0.3385
Skew Angle Extent, θ_s	19.15°
Rake-Diameter Ratio at Tip	0 mm
Blade Section Type	NACA66
Propeller Rotation Direction	R.H.
Material of Model Propeller	Aluminum

표 3.1.25 캐비테이션 시험 조건(KP1069)

Model Propeller Number	KP1069	
Load Condition	Design draft (Target Speed)	Design draft (Target Power)
Test Date	May 29, 2012	May 29, 2012
Water Temperature	20.5°C	20.5°C
Atmospheric Pressure	100.94 kPa	100.94 kPa
Full-Scale Propeller Brake Power	1154.2 PS	1439.6 PS
Full-Scale Propeller Rotational Speed	289.27 rpm	308.63 rpm
Full-Scale Propeller Shaft Submergence	2.11 m	2.11 m
Dynamometer	J25	J25
Tip Clearance	0.2136 m	0.2136 m
Model Propeller Rotational Speed, n_m	25.0 rps	25.0 rps
Advance Coefficient, J_A	0.4150	0.4083
Thrust Coefficient, K_T	0.1191	0.1219
Cavitation Number, $\sigma_{n0.7R}$	1.6367	1.4378
Reynolds Number, R_n	1.19×10^6	1.19×10^6
Air Content, α/α_s	62.2%	62.2%

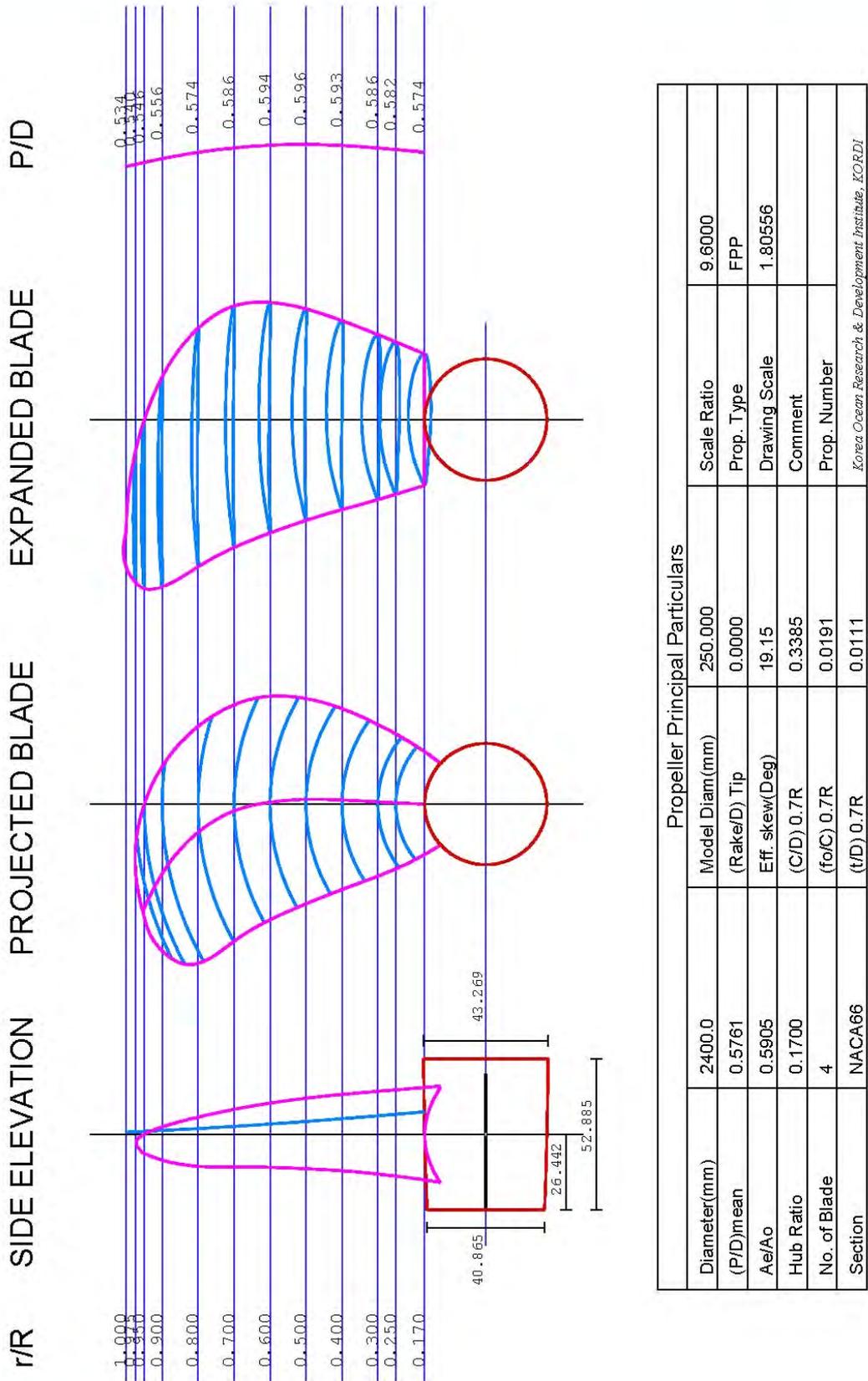


그림 3.1.29 설계 프로펠러 도면(KP1069)

(3) 성능평가 시험 요약

(가) 저항추진 시험

항주 및 예인 운항 상태의 저항성능 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

표 3.1.19 저항추진 시험 결과(Design draft, KS1354)

프로펠러	PE (kW)	η_D	P_D (kW)	N(rpm)	t	w_S	η_R
KP827	793	0.578	1371	303.5	0.261	0.281	1.000
KP1069	793	0.558	1421	344.23	0.259	0.280	0.998

(나) 캐비테이션 시험

항주상태에서 설계선속(13knots) 및 설계시 사용한 엔진의 마력조건(NCR 1058.9kW x 300rpm) 두 가지 조건에서 설계프로펠러 KP1069에 대한 캐비테이션 시험 결과는 다음과 같다.

표 3.1.19 캐비테이션 시험 결과(Design draft, 프로펠러 KP1069)

Test Item	Load Condition at Design Draft(Target Speed)	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Sheet Cavitation
Range of Blade Angle	- 10° ~ 60°	30° ~ 340°
Maximum Extent	13% at 20°	2% at 250°

표 3.1.19 캐비테이션 시험 결과(Design draft, 프로펠러 KP1069)

Test Item	Load Condition at Design Draft(Target Power)	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Sheet Cavitation
Range of Blade Angle	- 10° ~ 65°	30° ~ 340°
Maximum Extent	15% at 20°	3% at 250°

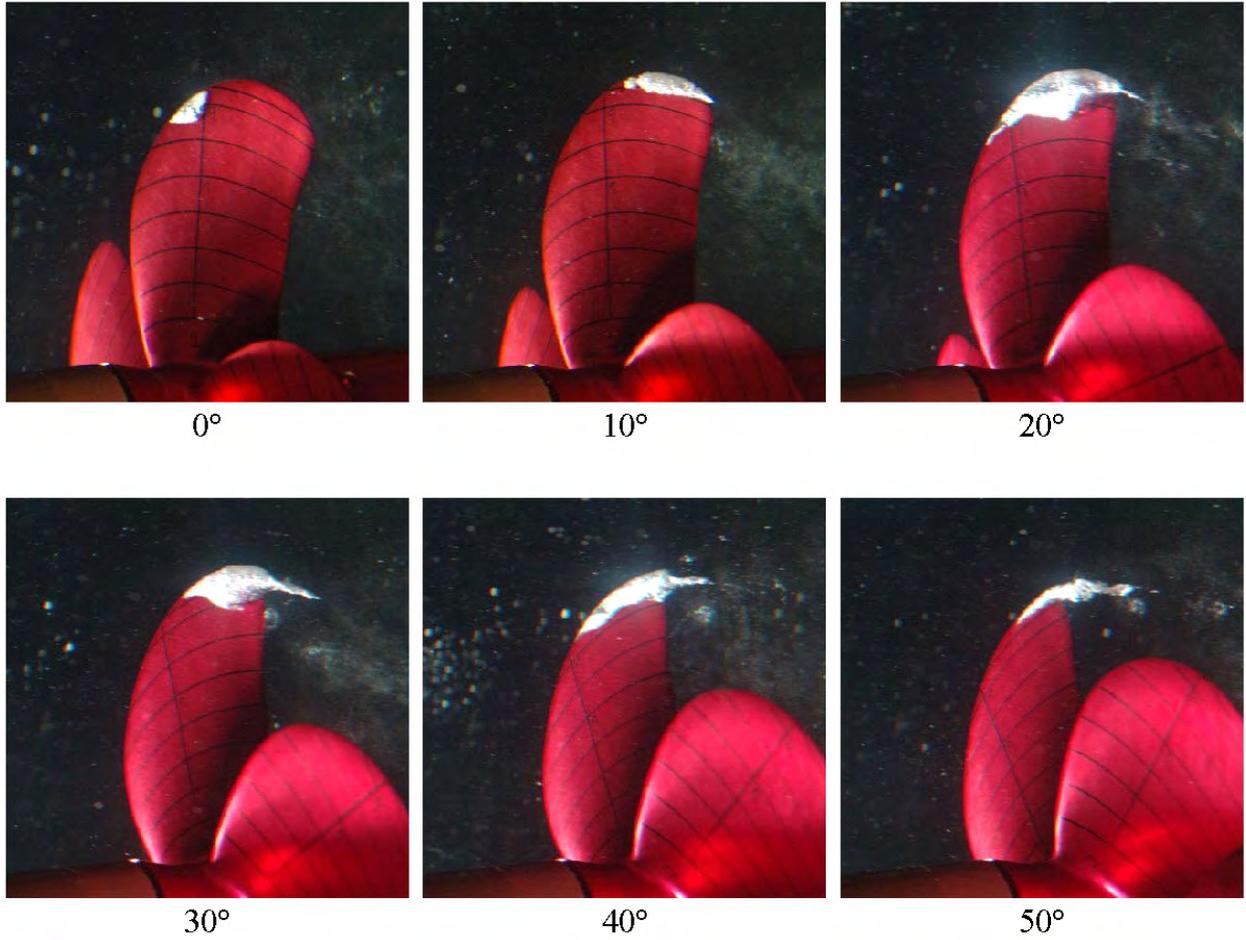
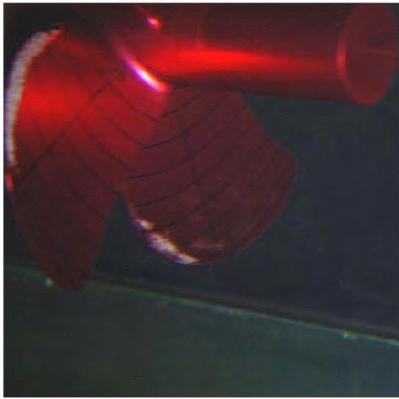
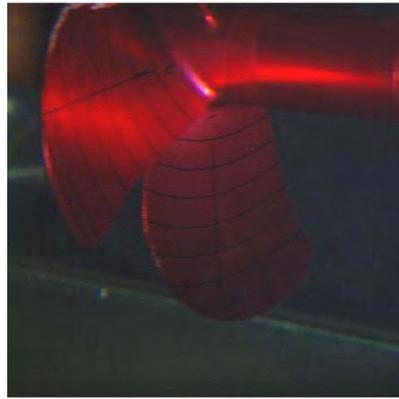


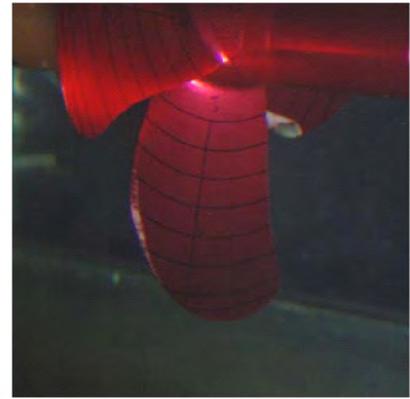
그림 3.1.30 Photographs of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller(suction side)



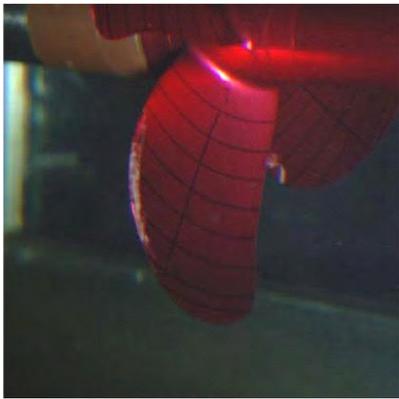
150°



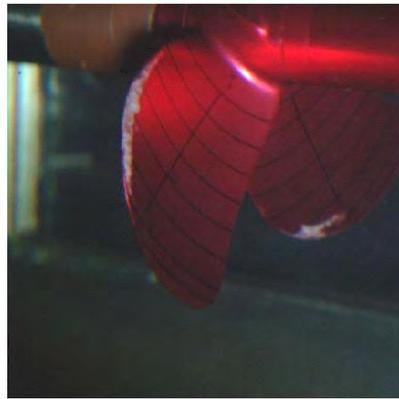
170°



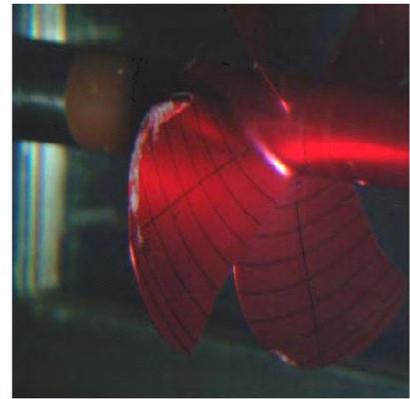
190°



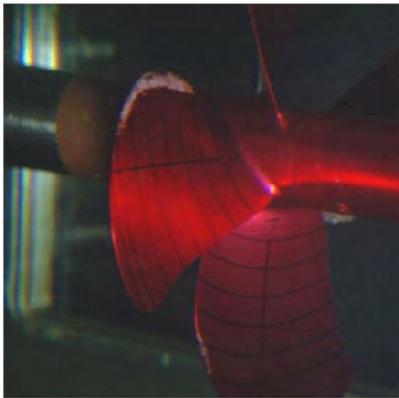
210°



230°



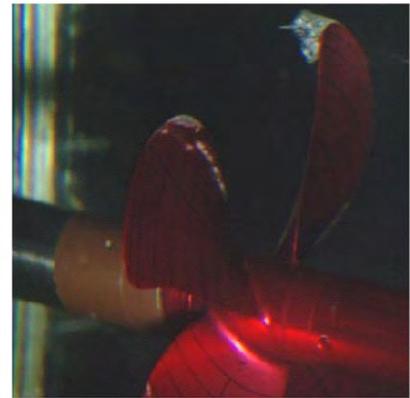
250°



270°



290°



310°

그림 3.1.31 Photographs of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller(pressure side)

제 2 절 덕트-추진기의 성능 및 선체-추진기 상호작용 해석

1. KPA14 소개

본 과제에의 어선용 Ducted propeller 설계는 KPA14 를 근간으로 이루어졌다. 이는 서울대학교 서정천 등에 의해 개발되었으며 교란 포텐셜을 기저로 하는 패널 방법을 사용하여 정상 및 비정상 유동 중의 덕트 프로펠러 주위의 유동을 계산하는 프로그램이다. 수렴성 향상을 위해 새로운 Kutta조건이 적용되었으며 날개의 후류면 위치계산을 위하여 덕트의 영향을 고려한 비선형 모델이 사용되었다. 비정상 유동중 해석은 정상 유동중의 해석 결과를 바탕으로 매 시간마다 각 날개의 위치에서 해를 새로 계산하는 방법을 사용하여 수행된다.

가. 지배방정식

정상 및 비정상 유동중의 프로펠러 주위의 유동을 해석하기 위해 포텐셜을 기저로 한 패널 방법이 널리 사용되어 왔으며 그에 대한 자세한 설명은 Lee[1] 와 Hsin[2] 등에 언급되어 있다. 덕트를 가진 프로펠러에 대해서도 같은 지배방정식을 사용하며 그 식은 다음과 같다.

$$2\pi\phi_p = \iint_{S_B} \left[\phi_q \frac{\partial}{\partial n_q} \left(\frac{1}{R(p;q)} \right) - \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_q \frac{1}{R(p;q)} \right] dS + \iint_{S_w} (\Delta \phi)_q \frac{\partial}{\partial n_q} \left(\frac{1}{R(p;q)} \right) dS \quad (3.2.1)$$

여기서, p, q 는 각각 유속도 포텐셜의 계산점과 특이점을 표시하며 $R(p;q)$ 는 두점 사이의 거리를 나타낸다. 덕트를 가진 프로펠러 S_B 는 날개와 허브 그리고 덕트로 나눌 수 있으며 그 후류면 S_w 는 날개 및 덕트의 후류면으로 나누어 생각할 수 있다.

나. 수치해석

정상 및 비정상 유동중에서 지배방정식 (3.2.1)을 수치적으로 풀기 위하여 다음의 방법들이 사용되었다.

(1) 정상 유동중의 해석

지배방정식을 수치적으로 풀기 위하여, 프로펠러 날개, 허브, 덕트와 그 후류면들을 곡면패널로 이산화 하였으며 그 모양은 그림 3.2.1에 보였다. 사용된 다이폴과 소스가 패널 위에서 일정세기를 갖는다고 가정하면 식 (3.2.1)은 다음과 같이 이산화 할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{N_T} a_{i,j} \phi_j + \sum_{m=1}^{M_p+M_D} (\Delta \phi)_m W_{i,m} = \sum_{j=1}^{N_T} b_{i,j} \sigma_j \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (3.2.2)$$

여기서, N_P, M_P 는 각각 주 날개의 코드방향과 스팬방향의 패널개수이고 N_D, M_D 는 주날개 위 덕트부분의 코드의 총 패널개수 방향과 회전방향의 패널개수이며 N_H 는 주날개 허브부분의 패널개수이다. 이 때 주날개 위의 총 패널개수 N_T 는 $N_P \times M_P + N_D \times M_D + N_H$ 로 나타낼 수 있다

.영향계수 $a_{i,j}$ 와 $b_{i,j}$ 는 j번째 패널에 분포되어 있는 단위세기의 다이폴과 소스에 의해서 i 번째 패널의 계산점에 유기되는 속도포텐셜이다. 후류 영향계수 $W_{i,m}$ 는 날개 및 덕트 후류의 m번째 스트립 위의 패널에 분포되어 있는 단위세기의 다이폴들에 의해서 i번째 패널의 계산점에 유기되는 속도포텐셜이다. $(\nabla\phi)_m$ 은 날개 및 덕트 뒷날의 윗면과 아랫면의 포텐셜차이며 σ_j 는 날개 및 덕트 위에서의 소스세기이다.

이산화된 식(3.2.2)의 근사해를 구하기 위해서, 덕트의 회전방향으로는 균일분포, 날개의 반경방향으로는 반코사인 분포를, 그리고 날개 및 덕트의 코드 방향으로는 코사인분포를 사용하여 패널을 분포하였고 후류면에서는 반코사인 분포를 사용하였다. (그림3.2.1). 이는 유동변화가 급격하게 이루어진다고 생각되는 날개 끝단과 날개 앞날, 그리고 날개 뒷날에 더 조밀하게 패널을 분포시키기 위해서이다. 후류면의 위치계산을 위해 비선형 모델[3]을 사용하였으며 덕트의 영향을 포함하였다. 영향계수 및 행렬의 계산, 그리고 Kutta 조건은 Pyo등[4]의 방법을 사용하였다.

(2) 비정상 유동중의 해석

시간 영역에서 정의되는 비정상 유동문제를 풀기 위해 시간을 균일 간격으로 나누고, 매 시간, 주 날개에서 정상유동 문제를 푼 후, 그 결과를 이용하여 나머지 날개에 대한 특이점 값을 매 시간 새로 계산하였다. 이 계산에 사용된 이산화된 식은 다음과 같다[5]

$$\sum_{j=1}^{N_T} a_{i,j} \phi_j(n) + \sum_{m=1}^{M_P+M_D} W_{i,m,1} (\Delta\phi)_{m,1}(n) = B_i(n) \quad (3.2.3)$$

$$B_i(n) = \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_T} b_{i,j}^k \sigma_{i,j}^k(n) - \sum_{k=2}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_T} a_{i,j}^k \phi_j^k(n) - \sum_{k=2}^{N_B} \sum_{m=1}^{M_P+M_D} \sum_{l=1}^{N_W} W_{i,m,l}^k (\Delta\phi)_{m,l}^k(n) - \sum_{m=1}^{M_P+M_D} \sum_{l=2}^{N_W} (\Delta\phi)_{m,l}(n)$$

여기서 N_B 는 프로펠러의 날개수이며, N_W 는 날개 및 덕트 후류면의 유선방향 패널개수이고 n은 시간을 나타내며 첨자 k는 k번째 날개에서의 값을 의미한다.

매 시간 모든 특이점의 값을 알기 때문에 날개의 뒷날에서 떨어져 나가는 보오텍스의 세기를 계산할 수 있고, 매 시간마다 전 시간에 구해진 값들을 이용하여 위의 절차를 되풀이하면 원하는 값들을 구할 수 있다. 이 방법은 매 시간 모든 날개를 동시에 푸는 직접적인 방법보다 수렴을 위해 더 많은 횟수의 계산을 하여야하는 단점은 있지만 계산해야 하는 행렬의 크기가 작고 계산시간이 덜 걸린다는 장점이 있다. 자세한 계산은 김 등[5]의 방법을 사용하였다.

다. 계산결과

(1) 정상 유동중의 덕트

프로그램을 검증하기 위한 첫 번째 과정으로 프로펠러가 없는 축대칭 덕트에 대한 계산을 수행하였다. 덕트의 단면은 NACA0010이고 박음각은 0도이며 덕트의 앞날 반경은 덕트 코드 길이의 1/10이다. 이러한 긴 덕트의 계산은 압력계산 시 많은 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다. 본 계산의 경우 코드방향으로는 코사인 분포를, 원호방향으로는 균일 간격을 사용하여 패널을 분포시켰다 (그림 3.2.2). 계산에서 구한 덕트 안쪽의 압력분포가 그림 3.2.3에 보여지고 있으며 이를 고차의 패널방법[6]의 결과와 비교를 하였다. 비교결과 서로 좋은 일치를 보임을 알 수 있다.

(2) 정상 유동중 덕트프로펠러

정상 유동중 덕트 프로펠러의 성능 해석프로그램의 수렴성을 검증하기 위하여 피치비 P/D가 1.4인 Ka4-70 형태의 임펠러와 JD75형태[7]의 덕트를 갖는 덕트 프로펠러에 대해 계산을 수행하였다. 그림 3.2.4는 덕트의 코드방향 패널개수를, 그림 3.2.5는 덕트의 원호방향 패널개수를 고정시킨 상태에서 덕트의 회전방향 순환변화를 도시하고 있으며 두 경우 모두 좋은 수렴성을 보여주고 있다. 프로펠러와 덕트간의 간격에 따른 순환변화를 그림 3.2.6에 나타내었다. 간격이 감소하면서 덕트의 순환 최대값이 증가하여 회전방향 변화력이 감소하므로써 생기는 결과로 다른 수치계산 결과와 일치한다.[8] 마지막으로 실험결과가 있는 No. 19a 형태[9]의 덕트에 대해서 계산을 수행하고 그 결과와 실험치를 그림 3.2.7에 도시하였다. 계산된 덕트 및 임펠러의 K_T, K_Q 가 실험치와 좋은 일치를 보여주고 있다. 이 때 계산에 사용된 덕트의 길이는 임펠러의 반경과 같으며 간격은 임펠러 반경의 0.0125배이고 임펠러의 날개는 Ka4-70 형태이며 피치비 P/D는 1.2이다.

(3) 비정상유동중 덕트프로펠러

비정상 유동중 덕트 프로펠러의 성능 해석 프로그램의 수렴성을 검증하기 위해서 3cyclic 유입 유동[5]을 사용하여 계산하였다. 주날개 위의 한 점에 대해 ($r/R = 0.72$ 날개가 회전하면서 변화하는 순환을 그림 3.2.8과 3.2.9에 도시하였다. 고정된 날개의 패널개수에 대해 그림 3.2.8은 덕트의 코드방향 패널 변화에 따른 수렴성을, 그림 3.2.9는 덕트의 원호방향 패널개수에 대한 수렴성을 보여주고 있다. 마지막으로 비정상 프로그램의 성능검증의 하나로 정상 유동의 경우를 비정상 프로그램으로 해석하여 그 결과를 실험값 및 정상유동 프로그램과 비교하였다. 그 결과 좋은 일치를 보이고 있음을 확인하였으며 그림 3.2.10에 도시하였다. 계산에 사용된 덕트와 임펠러는 그림 3.2.1의 JD75와 Ka4-70이다.

라. KPA14에 대한 고찰

KPA14 는 정상 비정상중의 덕트 프로펠러의 성능을 해석하는 프로그램이다. 계산 결과는 좋은 수렴성을 보였으며 계산값과 실험치와도 좋은 일치를 보였다. 본 연구에서 KPA14 프로그램이 덕트 프로펠러 추력 및 토크 계산 활용 가능함을 확인하였다.

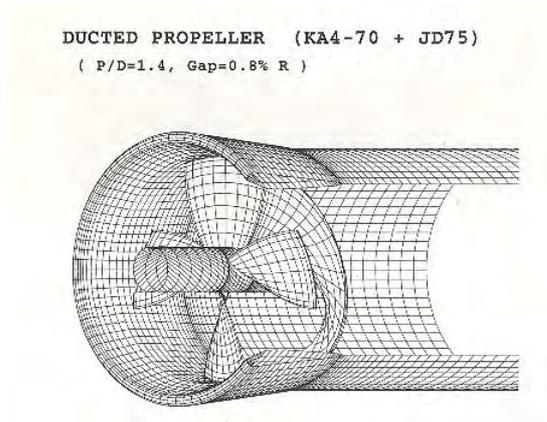


그림 3.2.1 덕트(JD75)+임펠러(KA4-70) 계산을 위한 이산화 모양

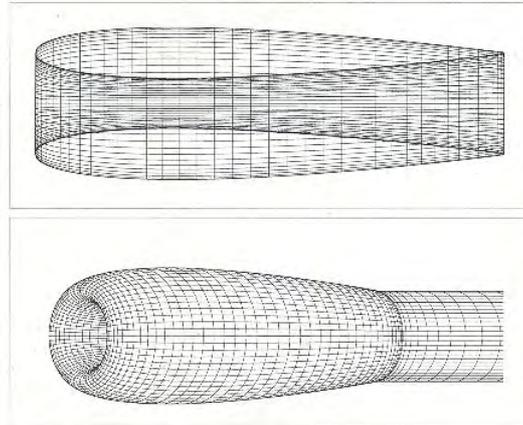


그림 3.2.2 긴 덕트위의 패널 분포

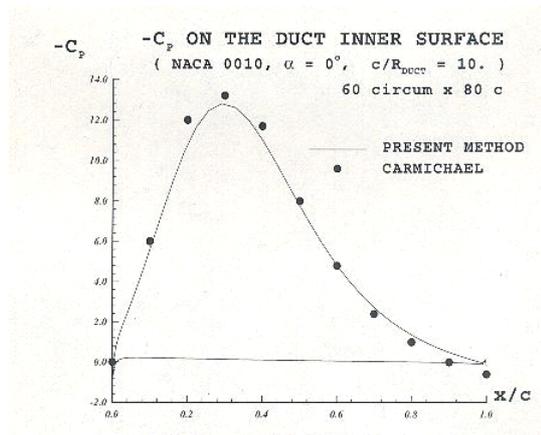


그림 3.2.3 덕트 안쪽의 압력분포 ($-C_p$)

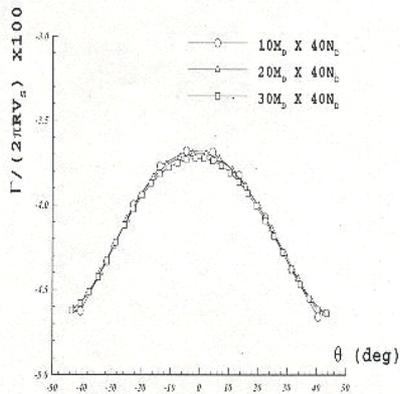


그림 3.2.4 정상 유동중 덕트의 원호방향
패널변화에 따른 순환의 수렴성

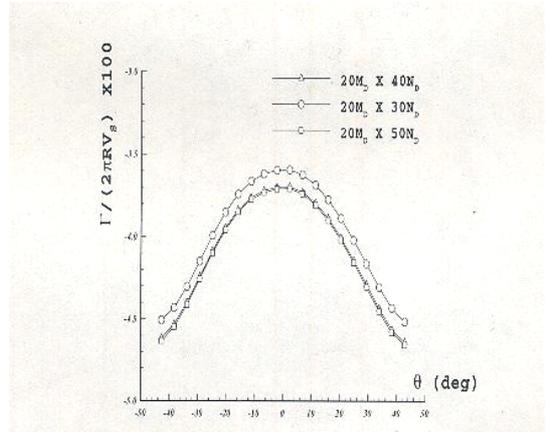


그림 3.2.5 정상 유동중 덕트의 코드방향
패널변화에 따른 순환의 수렴성

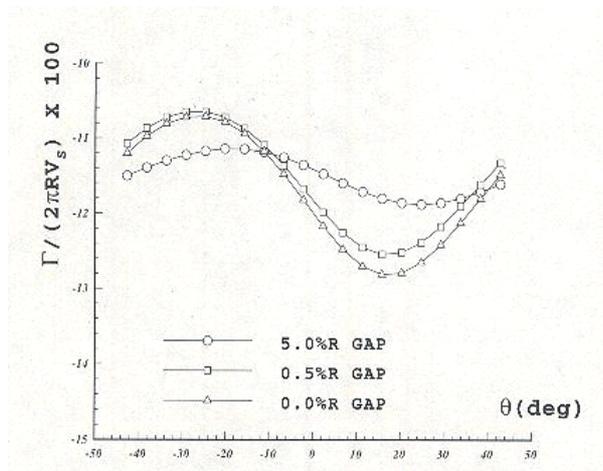


그림 3.2.6 덕트와 임펠러의 간격 변화에 따른
순환변화

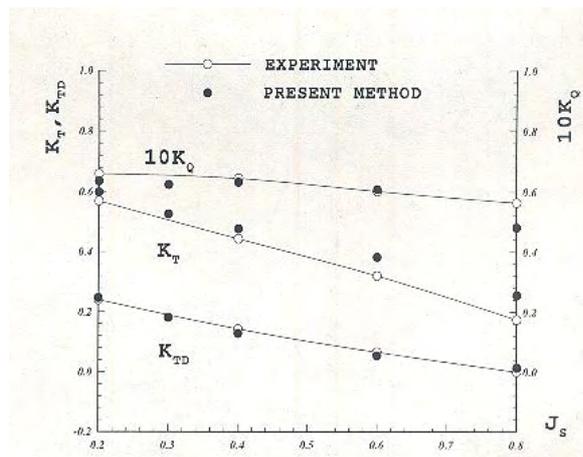


그림 3.2.7 정상 유동중 덕트프로펠러의
추력(K_T)과 토크 계수(K_Q)

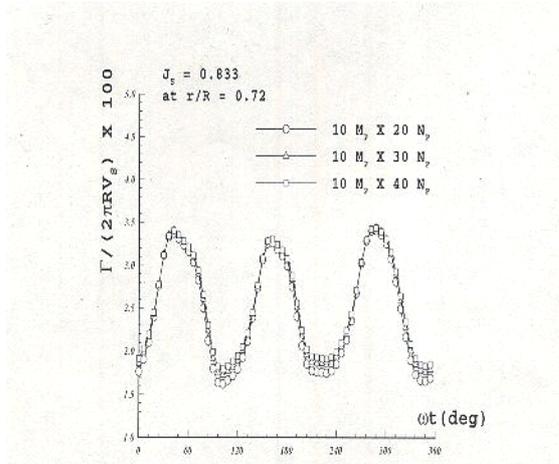


그림 3.2.8 비정상 유동중 덕트 코드방향 패널변화에 따른 순환의 수렴성

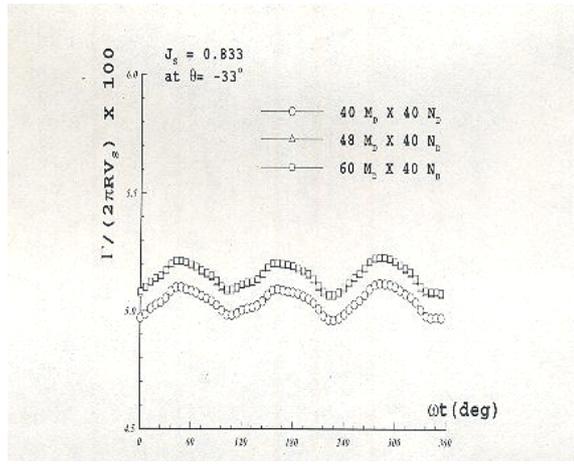


그림 3.2.9 비정상 유동중 덕트 원호방향 순환변화에 따른 순환의 수렴성

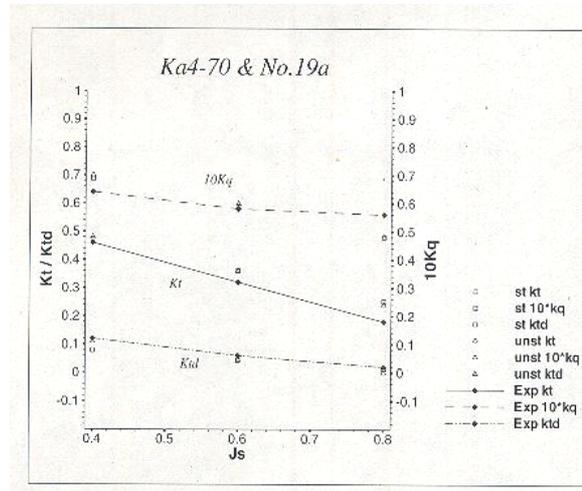


그림 3.2.10 임펠러와 덕트의 추력(K_T) 및 토크 계수(K_Q)

2. 덕트프로펠러 설계

가. 개요

오늘날 프로펠러 설계는 여러 전문기관에서 쌓인 실적선 자료와 설계자의 경험을 바탕으로 이루어진다. 본 연구에서는, 자료나 경험을 배제하고, 이론적이고 수치적으로 프로펠러를 설계하는 한 가지 방법을 제시하고, 실제 한국 연근해에서 운항중인 공선호에 부착될 어선용 덕트 프로펠러의 임펠러 설계를 진행하였다. 설계조건으로 요구선속, 엔진 rpm, 마력 등이 주어졌다. 이 밖에도 선미 형상에 따른 직경 제약조건이 설계에 포함되어야 하며, 덕트프로펠러의 경우, 일반 프로펠러와는 달리 덕트의 공간이 필요하므로, 그에 따른 추가적인 제약조건 역시 포함된다.

덕트프로펠러는 저속에서 높은 추력을 내야 하는 선박에서 높은 효율을 보이고 있으며 노

즐이 프로펠러를 보호해 주는 역할도 수행할 수 있기 때문에 어선에 매우 적합하다. 따라서, 본 연구에서는 실제 운항중인 어선, 공선호를 대상선으로 하여, 경험과 데이터에 의존하지 않고, 이론적인 접근으로 덕트프로펠러를 설계하는 한 가지 procedure 를 제시하였다.

설계에는 덕트프로펠러 비정상 운동 해석프로그램인 KPA14를 사용하였으며, 본 연구에서는 정상 상태에서의 해석값을 사용하였다. 또한 KPA14 프로그램은 패널방법을 기반으로 만들어진 해석프로그램이다.

프로펠러를 설계함에 있어, 고려해야 할 점은 매우 많다. 소음, 강도, 효율, 캐비테이션 등 설계관점에 따라 매우 다양한 프로펠러 설계법이 존재할 수 있다. 본 연구에서는 그 중에서 가장 많이 고려되는 부분이라고 할 수 있는 효율을 높이면서 캐비테이션을 고려할 수 있는 설계 procedure 를 연구하였다. 우선 기본설계단계에서 최소 EAR 을 선정하여 캐비테이션을 고려하였다. 상세설계 단계에서는 Newton's method 를 사용하여 설계제약조건을 만족하면서 효율을 최적화하는 방법을 사용하였다. 그 결과 효율 향상의 의미 있는 결과를 얻을 수 있었으며, 또한 최적화 단계에서 C_p 곡선을 조절할 수 있도록 함으로써 추가적으로 캐비테이션에 유리한 설계를 할 수 있도록 하였다.

나. 덕트형상

덕트프로펠러는 공동 감소 또는 추진효율 향상을 목적으로 프로펠러 주위에 노즐이 설치된 특수프로펠러로서, 가속형(accelerated type) 과 감속형(decelerated type) 으로 구분된다.

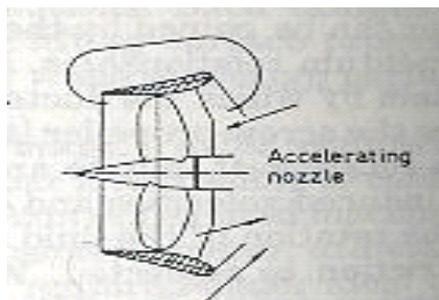


그림 3.2.11 Accelerating nozzle

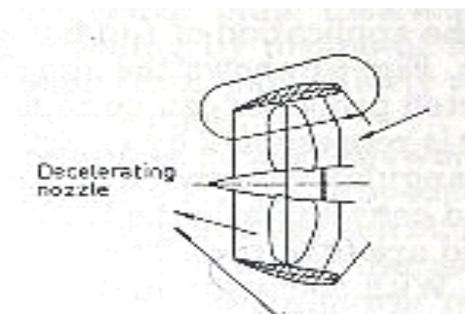


그림 3.2.12 Decelerating nozzle

그림 3.2.11과 같은 모습을 가진 가속형 노즐은 선박 프로펠러의 부하가 큰 경우, 또는 프로펠러의 직경이 제한될 경우에 널리 사용된다. 가속형 노즐은 부하가 큰 프로펠러의 효율을 증가시키는 수단으로 사용되는데 이 때 노즐은 양의 추력을 발생시킨다.

반면 그림 3.2.12와 같은 모습을 한 감속형 노즐은 임펠러에서의 정적압력을 증가시키기 위하여 사용되며 덕트는 음의 추력을 발생시킨다. 이와 같은 노즐은 프로펠러의 공동 발생을 지연시키기 위해 사용할 수 있으며, 함정에서는 중요한 성능 중 하나인 소음 수준을 줄일 수 있다.

한편, 같은 가속용 프로펠러라고 하더라도 노즐의 디자인에 따라 다양한 성능차이를 보이는데, 간단히 다음 두 노즐의 경우를 보도록 한다.

그림 3.2.14의 노즐의 경우 더 둥글고 상대적으로 굽은 trailing-edge 를 가진 것을 확인할 수 있는데, 이는 후진에서의 flow separation 을 줄여준다. 하지만 첫 번째 노즐의 경우보다 전진 시 효율은 약간 떨어진다. 통상적으로 그림 3.2.13과 같은 NSMB Nozzle No.19A 가 효율향상의 목적으로 많이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 효율향상을 위하여 NSMB Nozzle No.19A를 사용하였다.

NOZZLE No.19A

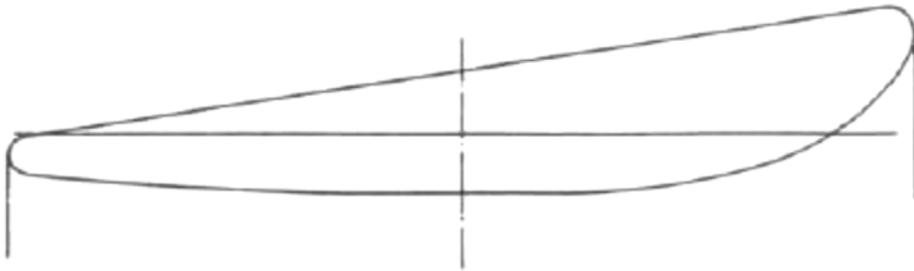


그림 3.2.13 Example of accelerating nozzle (NSMB nozzle No.19A)

MARIN's Nozzle No. 37, L/D = 0.5 DIMENSIONS ARE GIVEN IN % OF LENGTH OF NOZZLE

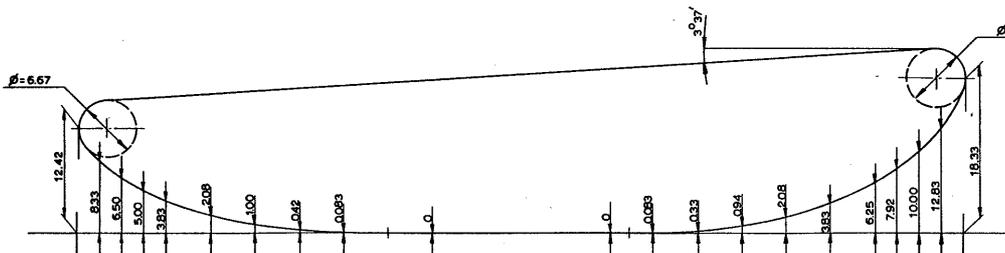


그림 3.2.14 Example of accelerating nozzle (MARIN nozzle No. 37)

다. 대상선 및 설계조건

본 연구의 설계대상선은 총톤수 139톤의 어선으로 한국 근해에서 어업하고 있는 공선호이다.

표 3.2.1 Given condition for the propeller design

Engine Data	Diesel 1278 PS(939kW) X 1600RPM
Reduction Ratio	4.45 : 1
Design Speed	11.5knots

공선호의 설계조건은 표 3.2.1과 같다. 어선의 경우 그물을 예망하면서 조업을 한다. 예망을 할 때는 그물을 끌어야 하기 때문에 추가적인 저항이 많이 걸리게 되어, 선속은 약 4knots 로 운항한다고 한다. 표 3.2.1에 적혀있는 design speed 는 조업 지역까지 이동할 때, 즉 그물을 끌지 않는 상태에서의 선속이다. 이러한 이유로 엄밀히 따지면, design speed가 두 가지가 되어야 하는데, 현실적으로 이는 불가능하므로, 11.5 knots 에서 설계를 진행한다. 표 3.2.1에 명시되어 있는 설계조건은 주로 엔진에 대한 데이터이다. 설계조건에 맞추어 엔진을 정하는 것이 일반적인데, 현재의 설계조건은 이미 엔진 데이터가 정해진 상태이므로, 그에 맞추어 설계를 진행한다. 엔진은 Diesel 939kW 에 RPM 1600 이고, 감속비는 4.45:1 이다. 즉 프로펠러 RPM 은 약 359.55 임을 알 수 있다.

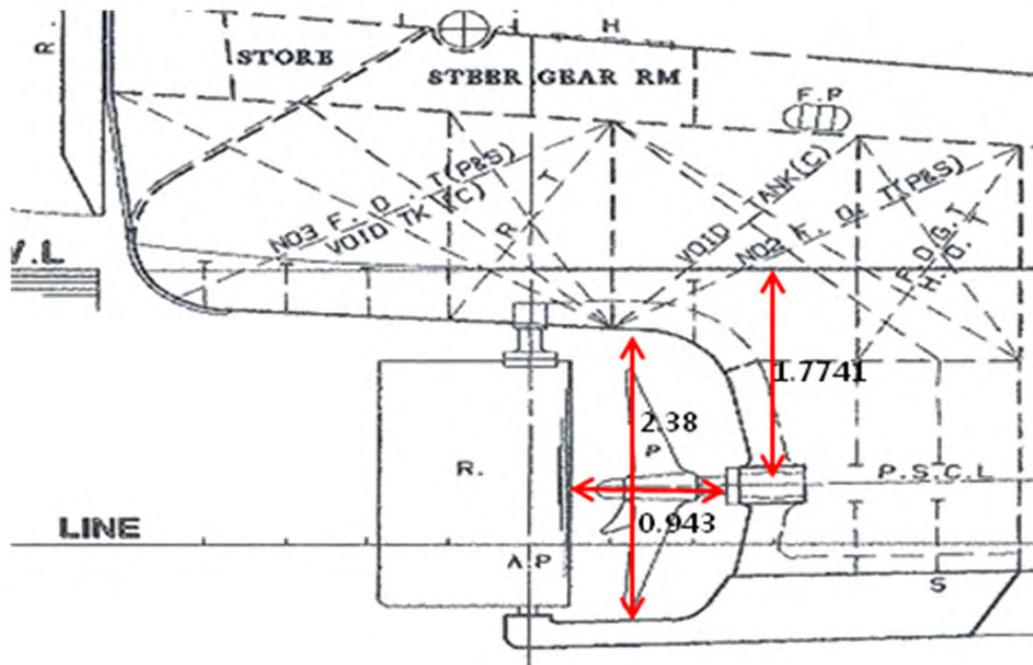


그림 3.2.15 Stern shape of the target ship

추가적인 제약조건이 없는 상황에서는, 위 표 3.2.1의 설계조건만을 고려한 상태에서 설계를 진행하면 되지만, 프로펠러 설계에는 항상 다양한 변수와 제약조건들이 있기 마련이다. 본 설계의 대상선은 그림 3.2.15와 같은 선미의 형상을 띄고 있는데, 이러한 선미 형상 때문에 직경의 제약이 필요하게 된다. 전문적으로 선박과 프로펠러를 동시에 설계하는 기관에서는 선미의 형상을 수정하는 방안도 생각할 수 있겠지만, 이미 엔진, 대상선이 확정되었고, 선미 형상을 수정할 수 없는 현 조건에서는 프로펠러 직경을 제한하는 방법밖에 없다. 그림 3.2.15를 살펴보면, shaft 는 수심 1.77 m 부근에 위치하고 있고, 프로펠러가 차지할 수 있는 총 공간은 연직방향으로 2.38 m 가 된다. 공선호에 부착되어있는 기존 프로펠러의 직경은 1.984 m 가량 되는데, 덕트프로펠러의 노즐을 선체의 일부분을 도려낸 후 설치하는 것으로 하여 덕트프로펠러의 임펠러는 기존과 마찬가지로 직경 1.984m로 결정하였다.

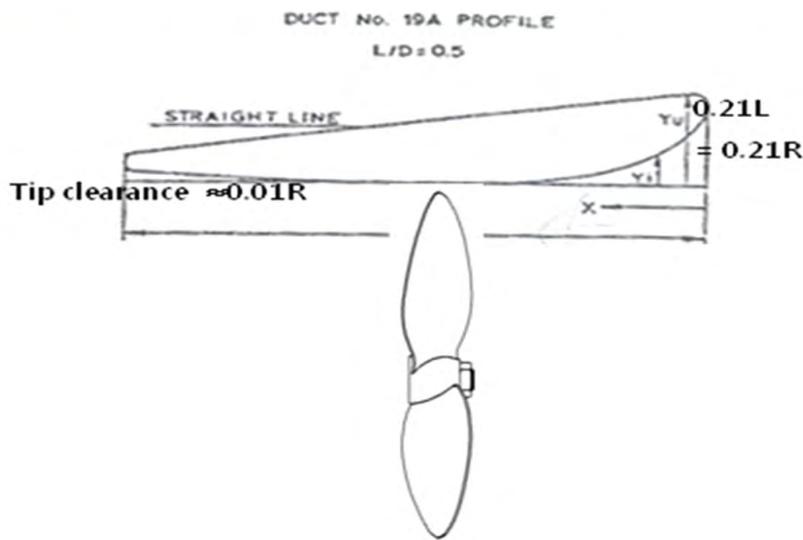


그림 3.2.16 Schematic diagram of the ducted propeller

그림 3.2.16을 보면 ducted propeller 가 차지하는 공간을 확인할 수 있다. 일반적인 프로펠러는 직경에 해당되는 공간만이 필요하지만 ducted propeller 의 경우 duct 가 차지하는 공간을 추가적으로 고려해야 한다. 그림 3.2.16에서 보이는 것처럼, impeller 와 duct 사이의 공간인 tip clearance 약 0.01R, duct 의 연직방향 크기를 약 0.21R 이라고 하면 임펠러 직경 대비 총 1.22 D 만큼의 공간을 차지하게 된다. 이 때 tip clearance 는 0.0125R 로 고정한다.

라. 덕트프로펠러 설계

(1) 설계의 흐름도

덕트프로펠러 설계는 그림 3.2.17과 같이 크게 기본설계 과정과 상세설계 과정으로 나누어서 진행하였다.

먼저 기본설계에서는 Ka-series chart를 이용한 확장면적비(EAR) 및 P/D(피치비)의 초기

값 선정 및 Burrill's chart를 이용한 캐비테이션 발생여부 판정을 통한 EAR 선정, 그리고 KPA14를 이용한 기본설계에서의 최종 EAR 및 P/D 선정을 수행하고, 상세설계에서는 반경별 형상의 최적화를 위하여 Newton's method를 이용한 반경별 P/D, C/D(코드비)를 선정하였다.

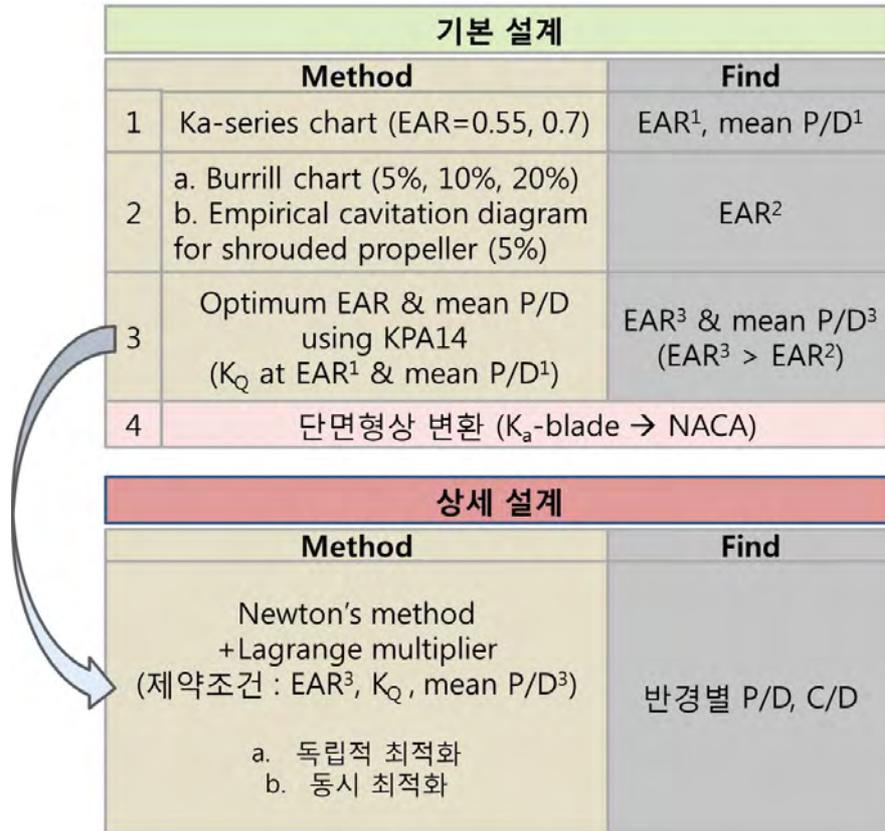


그림 3.2.17 Flow chart of the design proposed in this study

(2) 기본설계

(가) Series chart를 통한 1차적 최적값 선정

일반적인 프로펠러의 경우, 기본설계 단계에서 최적 mean P/D, EAR, D 을 선정할 때 주로 B-series c 나 MAU-series 를 사용한다. Ducted propeller 역시 기본적인 설계를 위해 사용되는 것이 Ka-series 이다.

$$\begin{aligned}
 K_T &= \sum_{x,y} C_T(x,y) \{P/D\}^x \{J\}^y \\
 K_Q &= \sum_{x,y} C_Q(x,y) \{P/D\}^x \{J\}^y \\
 K_{Tn} &= \sum_{x,y} C_{Tn}(x,y) \{P/D\}^x \{J\}^y \\
 \frac{K_Q}{J^5} &= \frac{P_D n^2}{2\pi\rho V_A^5} \tag{3.2.4}
 \end{aligned}$$

이러한 기본설계는 실험자료를 종합해 이를 데이터로 만들고, 여러 포인트에서 추력, 토크 등을 예측하여 식 (3.2.4)와 같은 회귀식을 만들어[10], 프로펠러의 기본적인 대표값을 알고

있으면, open water 상태에서의 성능을 추정할 수 있고, 이를 통해 기본설계를 할 수 있게 해준다. 식 (3.2.4)는 Ka-series 의 회귀식인데, 일반적인 series 의 값과는 다르게 덕트의 추력에 관한 회귀식이 추가적으로 존재한다. 식에서 추력, 토크 계수는 mean P/D, J 에 관한 함수로 표현되어 있고, 그 앞의 계수값들이 표 로 정리되어 있다. 식 (3.2.4)를 chart 로 그린 것이 그림 3.2.18이다. 이 차트는 blade 4개, EAR = 0.7 인 Ka-series 를 전진비 J 에 관하여, P/D 별로 도시해 놓은 것이다. 이 Series chart 에서 최고효율을 갖는 mean P/D, D 를 선정한다. 식 (3.2.4)의 마지막 식의 좌변과 같이 나누어 주면, 직경에 해당되는 항이 없어지게 된다. 여기서 우변의 항은 앞서 설계조건으로 주어진 RPS, delivered power, design speed 을 의미한다. 여기서 design speed 는 선속 11.5knots 에서 공선호의 모형실험 결과 나온 반류계수 $w = 0.312$ 를 고려한 값을 사용한다.

$$K_Q = CJ^5 \tag{3.2.5}$$

결과적으로 식 (3.2.5)와 같이 설계조건에 따른 상수값 C가 정해지고 토크 계수와 전진비 간의 함수가 된다.

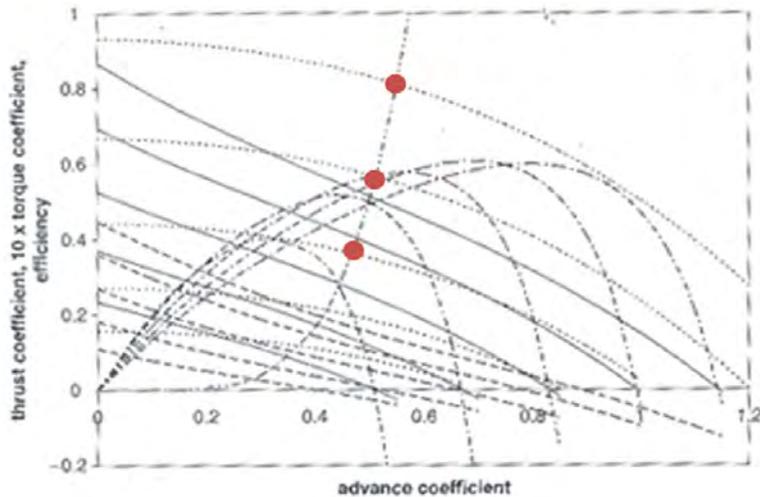


그림 3.2.18 Ka 4-70 series chart

이 곡선을 chart 에 표시하고, mean P/D 별 토크 곡선과 만나는 점을 그림 3.2.18에 표시하였다. 이렇게 만나는 점의 J 가 design J, 그 때의 직경이 최적 직경 D 가 된다. 또한 여러 mean P/D 의 값 중 최고효율을 갖는 mean P/D 가 최적점이 된다. 또한 여기에 다.항에서 언급한 직경 제약조건을 추가하여, 최적효율을 얻는 설계값을 구한다.

여기서, 기본설계의 중요한 값 중 하나인 EAR 에 관한 최적화가 존재하지 않는다. B - series 와 같은 경우 식 (3.2.4)의 변수에 EAR 에 관한 항이 추가적으로 존재하여 EAR 에 관한 최적화도 동시에 진행할 수 있으나 Ka - series 에서는 식 (3.2.4)에서 보는 바와 같이 EAR 에 관한 항이 빠져 있다. 다만 EAR 0.55, 0.7 두 가지에 대해서만 series chart 가 존재할 뿐이다. EAR 이 다른 3가지 이상의 chart 가 존재한다면 interpolation 이 가능하지만 이

역시 불가능하다. 따라서 EAR 0.55 로 고정해놓고 mean P/D, D 에 관한 최적화를 우선적으로 진행하였으며 EAR 에 관한 최적화는 추후에 진행하도록 하였다. 또한 이러한 일련의 과정들은 계산의 정확성을 높이기 위해 직접 프로그래밍하여 계산하였다.

표 3.2.2 Found parameters through the basic design using Ka-series chart (EAR 0.55)

EAR	0.55
Mean P/D	0.776
D(m)	1.984

표 3.2.2는 이러한 계산과정을 통해 얻은 설계값이다. 최적 직경이 직경제한 조건인 1.984m 에 딱 맞는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 설계조건에 맞는 최적직경의 값이 제한조건인 1.984m 보다 크다는 것을 의미한다.

(나) 1차 cavitation 판정기준

① Burrill chart

일반적으로 프로펠러를 설계할 때 확장면적비 EAR(Expanded Area Ratio) 가 클수록 캐비테이션에 유리하지만 효율에서는 작은 EAR 의 그것보다는 떨어진다. 따라서 프로펠러를 설계함에 있어서, EAR 에 따른 캐비테이션 발생 정도를 예측하고 타당한 EAR을 선정하는게 매우 중요한 변수가 된다. 일반적인 프로펠러의 경우는 그림 3.2.19와 같은 Burrill chart 를 참고하는 경우가 많다. 이는 프로펠러의 캐비테이션 넘버와 추력 등을 입력하면, 어느 정도의 캐비테이션이 발생하는지 가늠할 수 있도록 도와주는 chart 이다.

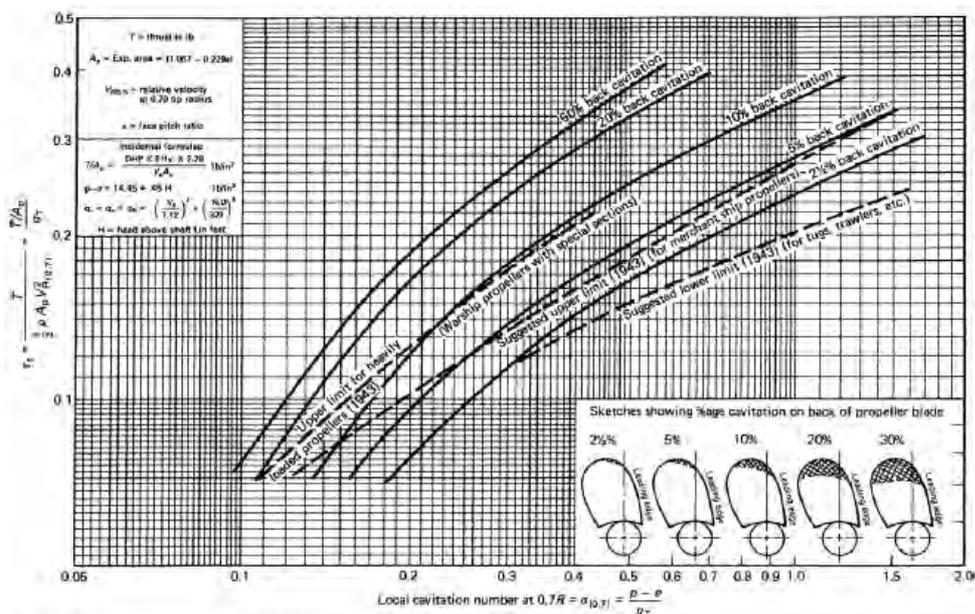


그림 3.2.19 Burrill cavitation diagram for uniform flow [11]

$$\sigma_{0.7R} = \frac{p_o - p_v}{q_{0.7R}}$$

$$p_o = p_{atm} + \rho g(h + \zeta_A), (\zeta_A = 0, \text{파고})$$

$$q_{0.7R} = \frac{1}{2} \rho (V_A^2 + (0.7 \times 2\pi m R)^2)$$

$$\tau = \frac{T / A_P}{q_{0.7R}}, A_E \approx \frac{A_P}{(1.067 - 0.229P/D)}$$

$$p_{atm} = 101300 \text{ N/m}^2, p_v = 1646 \text{ N/m}^2 (15^\circ \text{C})$$

$$h \approx 1.7741 \text{ m}, V_A \text{ 는 모형실험 결과 } 0.7R \text{ 에서의 반류로 계산}$$

$$T = 87000 \text{ N} (11.5 \text{ knots 운항})$$

$$P/D = 1.19 (\text{기본설계 결과})$$

$$EAR (5\% - 1.117, 10\% - 0.861, 20\% - 0.651)$$
(3.2.6)

식 (3.2.6)은 Burrill chart 의 계산방식을 따라 계산한 결과이다. 추력은 design point 인 11.5 knots 에서의 프로펠러 추력으로 계산되었다. 식의 맨 아래를 보면 EAR 을 작게 할수록 캐비테이션에 취약해 많은 캐비테이션을 발생할 것이라고 Burrill chart 를 통해 확인할 수 있다. 하지만 이러한 Burrill chart 의 경우, 일반 프로펠러에 적용하는 chart 임을 생각하면 본 연구의 설계 대상인 Ducted propeller 에 적용하기엔 무리가 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 Ducted propeller 에 적용할 수 있는 이와 같은 chart 를 이용하여야 할 것이다.

② Ducted propeller 에서의 캐비테이션 판정

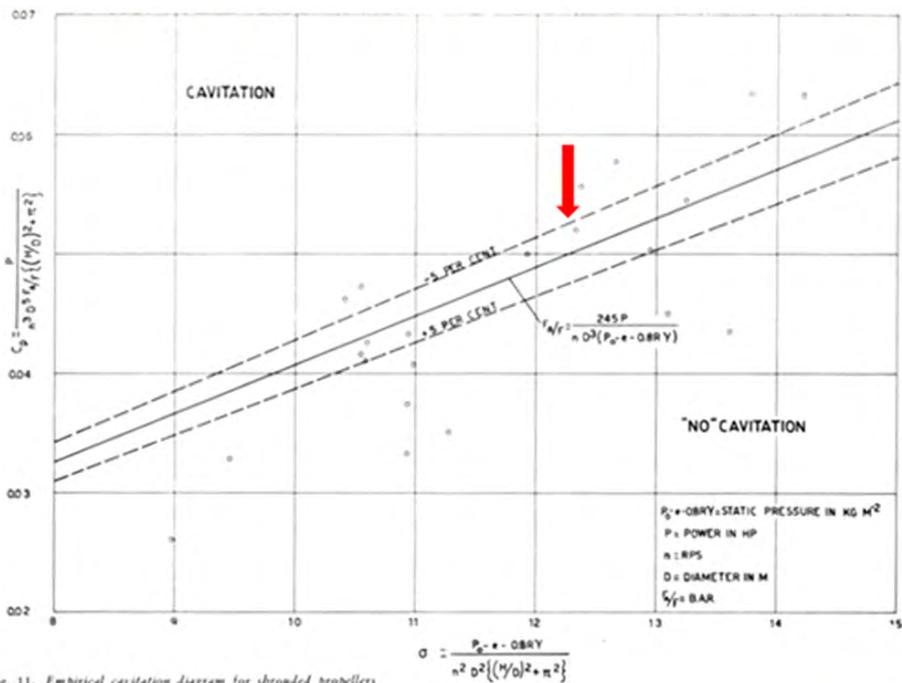


Fig. 11. Empirical cavitation diagram for shrouded propellers

그림 3.2.20 Empirical cavitation diagram for shrouded propellers

그림 3.2.20은 shrouded propellers 에 Burrill chart 처럼 사용할 수 있는 cavitation diagram 이다. Burrill chart 와는 그 계산에 사용되는 값들의 단위는 다르지만 그 기본 형태는 비슷함을 확인할 수 있다. 식 (3.2.6)에서 했던 방법과 같은 계산과정을 단위만 바꾸어 다시 진행한다.

$$\sigma = \frac{P_o - e - 0.8R\gamma}{n^2 D^2 \{(H/D)^2 + \pi^2\}}$$

$$P_o = p_{atm} + \rho g h, \text{ (단위 } kg/m^2 \text{ 명시, } kgf/m^2 \text{ 라 추정)}$$

$$C_p = \frac{P}{n^3 D^5 F_A / F \{(H/D)^2 + \pi^2\}}$$

$$F_A / F = B.A.R \approx E.A.R$$

$$p_{atm} = 101300 N/m^2, e = p_v = 1646 N/m^2 (15^\circ C)$$

$$h \approx 1.7741 m, 0.8R\gamma = 0.8 \times 1.63 \times 0.5 \times \rho g = 6556 N/m^2$$

$$P_o - e - 0.8R\gamma = 110937 N/m^2 = 11308.56 kgf/m^2$$

$$P = (693000/746)/\eta_s, \text{ (단위는 HP, shaft horse power)}$$

$$(693000W \text{ 는 } 11.5 \text{ knot 에서의 deliverd horse power 실험값)}$$

$$EAR \text{ } 5\% - 0.75 \tag{3.2.7}$$

식 (3.2.7) 역시 Burrill chart 와 비슷한 방식으로 계산이 진행된다. 다만 두 가지 특징이 있는데, 우선 Burrill chart 와는 달리 10%, 20% 기준이 없다는 것과, 다른 하나는 같은 5% 일 때의 최소 EAR 이 Burrill chart 의 그것보다 낮다는 것이다. 후자의 경우, 그 이유를 덕트 프로펠러의 형상으로 인한 유속의 증가를 이유로 들 수 있다. 유속이 증가하면서 angle of attack 이 감소해 캐비테이션이 덜 발생하기 때문이다. 전자의 경우, 일반적인 경우 back cavitation 발생 정도를 5~15% 로 하는 경향이 있기 때문에 그림 3.2.20의 diagram 에서 명시된 5% 기준 하나만으로 최소 EAR 을 확정하기에는 다소 무리가 있다.

③ Burrill chart 에서의 확장

①, ②에서 언급한 것처럼 Burrill chart 의 경우 Ducted propeller 의 캐비테이션 판정기준으로 사용할 순 없고, 그림 3.2.20의 diagram 에는 back cavitation 10%, 20% 에 해당하는 값이 명시되어 있지 않다. 따라서, Ducted propeller 의 back cavitation 10%, 20% 기준의 값을 구하기 위해 식 (3.2.6)에서 구한 Burrill chart 값과 식 (3.2.7)의 값을 이용한 extrapolation 을 사용하였다.

표 3.2.3 Extrapolated results of the shrouded propeller from Burrill cavitation diagram

	Burrill	Shrouded propeller
5% back cavitation	0.601	0.45
10% back cavitation	0.477	0.358
20% back cavitation	0.353	0.265

표 3.2.3의 음영으로 표시된 부분이 extrapolation 으로 계산된 결과이다. 미리 언급한 것처럼 Burrill chart 와 Ducted propeller 용 cavitation diagram 은 사용되는 단위가 다를 뿐 그 기본적인 계산 방식은 비슷하다. 이러한 점을 근거로 Burrill chart 에서의 5%, 10%, 20% EAR 의 비율이 Ducted propeller 의 그것과 같다고 가정하고 계산하였다. 그 결과 Ducted propeller 의 10% back cavitation EAR 은 0.358 이 나왔고, 이 계산결과를 토대로 설계의 최소 EAR 은 0.358로 정해졌다.

(다) Optimum EAR, mean P/D 선정

EAR, mean P/D 은 상호 연관 지어지면서 프로펠러의 효율을 결정하게 된다. 하지만 EAR, mean P/D 가 변화할 때 설계조건을 만족시키면서 변화하여야 되는데, 이것은 주로 엔진 데이터를 의미한다. 즉 프로펠러 효율은 선박을 전진시키는데 필요한 마력과, 프로펠러가 내는 추력의 비율로 그 효율을 결정하게 되는데, 마력은 설계조건으로 고정된 것이고, 같은 마력에서 높은 추력을 내는 프로펠러가 바로 좋은 효율을 갖는 것을 의미한다. 이러한 프로펠러의 효율을 나타내는 여러 지수 중 하나인 준 추진 효율을 예로 들어 설명해보면,

$$\begin{aligned}
 & \text{준추진 효율}(\eta_D) \\
 \eta_D &= \eta_B \cdot \eta_H = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_T}{P_D} \cdot \frac{P_E}{P_T} \\
 &= \frac{TV_A}{2\pi n Q_D} \cdot \frac{Q_D}{Q} \cdot \frac{T(1-t)V}{TV(1-w)} \\
 &= \eta_O \cdot \eta_R \cdot \eta_H \tag{3.2.8} \\
 Q &= \rho n^2 D^5 K_Q
 \end{aligned}$$

식 (3.2.8) 를 보면, 선체효율 (η_H) 과, 상대효율(η_R)은, 선박 형상에 의한 계수이므로, 프로펠러 설계에 국한된 본 연구의 경우에는 변화하지 않는다. 결국 프로펠러 단독효율(η_0)만 남게 되고, 이 식의 분모가 공급되는 마력인 엔진 데이터, 분자가 같은 엔진 조건, 디자인 스피드에서 낼 수 있는 추력이 된다. 그리고 식 (3.2.8) 마지막의 토크 Q 의 식을 보면, RPS 와 직경 역시 고정되어 있기 때문에, K_Q 가 같다는 것은 즉 설계조건을 만족하는 것이 되고, 설계에 있어 최적 효율을 갖는다는 것은 같은 K_Q 의 값을 갖으면서 최고의 효율을 낼 수 있는 프

로펠러임을 의미한다. K_Q 값이 다를 때에는 엔진 조건이 다를 것을 의미하기 때문에 그 때의 효율 비교는 무의미함을 알 수 있다. 즉 최적 EAR, mean P/D 선정 및 차후에 진행될 상세설계에 있어서 K_Q 값을 고정시킨 상태에서 설계를 진행하였으며, 이는 모든 설계의 1차적인 제약조건이 된다. 따라서 표 3.2.3에서 1차적으로 결정된 EAR 0.55, mean P/D = 0.776, D = 1.984m 인 값을 가질 때의 K_Q 제약조건이 된다. Design point 에 따른 Design 전진비에서의 Ka-series 계산값은 0.0298 이다.

언급한대로 현재의 EAR 0.55 mean P/D 은 EAR 0.55 이 고정된 상태에서 mean P/D 를 최적화 한 값이므로, 상호 변화하면서 최적 효율을 갖는 값을 찾으려 한다. EAR 0.5 ~ 0.7 까지 변화시켜가면서 $K_Q=0.0298$ 의 값을 갖는 mean P/D 를 구하고, 그 때의 효율비교를 하였다.

표 3.2.4 Optimization of EAR and mean P/D

EAR	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Mean P/D	0.776	0.776	0.777	0.7870	0.7985
Kt	0.2586	0.2565	0.2539	0.2538	0.2529
Kq	0.0298	0.0298	0.0298	0.0298	0.0298
efficiency	0.4716	0.4685	0.4645	0.4638	0.4618

EAR에 따른 효율 곡선

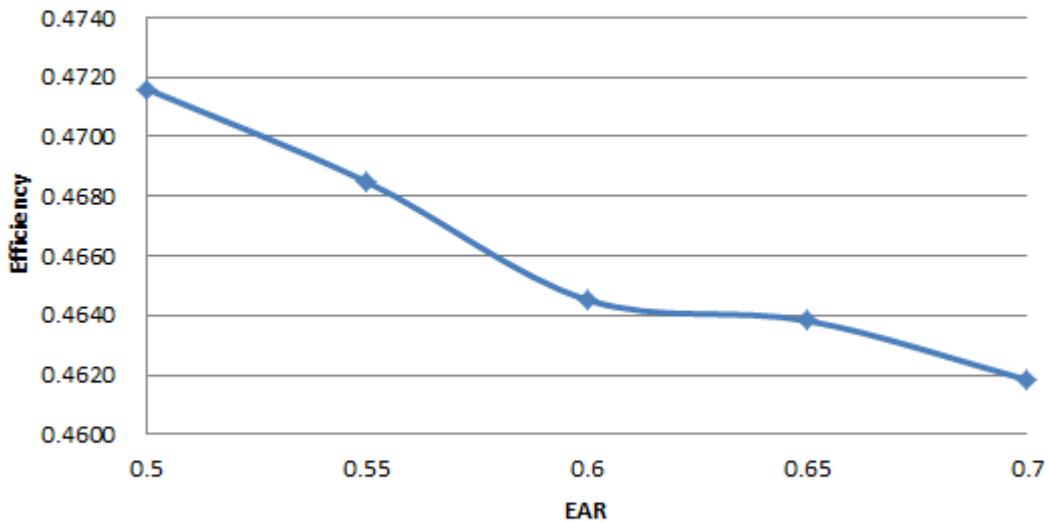


그림 3.2.21 Efficiency curve according to EAR

표 3.2.4 는 K_Q 를 맞춰가면서 그 때의 EAR, mean P/D, 효율 등을 정리한 표이고, 그림 3.2.21은 EAR에 따른 효율 곡선을 나타낸 것이다. 표 3.2.4와 그림 3.2.21을 참고하면, EAR 0.5 에서 효율이 가장 좋음을 확인할 수 있다. 앞서 캐비테이션 1차 관점에서 얻은 최소 EAR 이 0.358 이었는데, $0.5 > 0.358$ 이므로 이 기준을 만족시킴을 알 수 있다. 따라서 Ka-series 를 사용한 최종 기본설계결과는 다음과 같다.

표 3.2.5 Final result of the parameters through basic design considered the cavitation phenomenon

D(m)	1.984
Mean P/D	0.776
EAR	0.5
Kq	0.0298
Eff.	0.4716

(3) 날개 형상 재정의

일반적으로 널리 사용되는 NACA section 의 경우 그림 3.2.22에서 보는 바와 같이, mean camber line 을 기준으로 두께를 가감하여 그 geometry 를 정의한다. 하지만 Ka-series 의 경우, 그림 3.2.22에서 보는 바와 같이 maximum thickness 를 기준으로 Chord방향으로 back, face 면의 좌표를 정의한다. 향후 진행할 상세설계 및, 실제 제작을 고려하여, Ka-series 를 일반적인 NACA 단면을 갖는 geometry 로 변형시킬 필요가 있다. Ka-series 는 기본적으로 0.2R~1.0R 까지 geometry가 정의되어 있으며, 이러한 geometry 변환은 0.2R~1.0R 까지 모두 같은 방법으로 수행되었다.

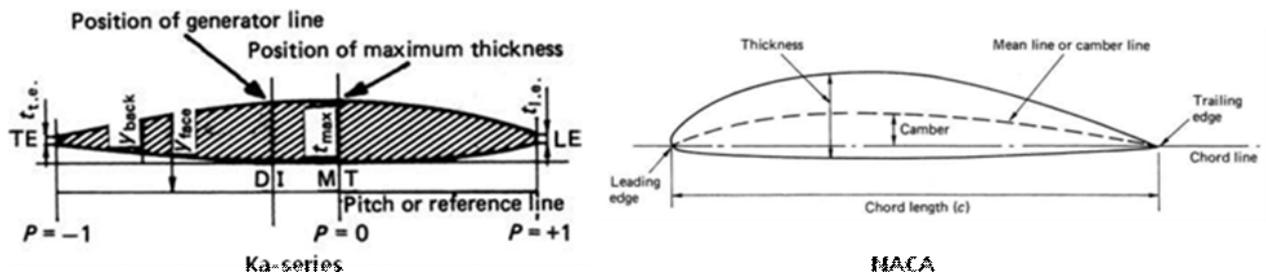


그림 3.2.22 Definition of Ka(left) and NACA(right) blade section

그림 3.2.23에서 Ka section 은 Ka-series의 정의 그대로 maximum thickness 에 대하여, Chord 방향으로 face, back 좌표를 모두 입력하여 얻은 실제 모습이다. 그리고 NACA section 은 NACA66 ($a = 0.8$) 을 토대로, thickness 와 camber 를 바꾸면서 Ka-series 의 geometry 와 가장 근접하게 그 값을 맞춘 것이다. 기본적인 section 의 형상이 다르기 때문에 일치하게 맞출 순 없으나, 그림 3.2.23에서 나타나는 정도의 차이는 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 판단된다. 이와 같은 작업을 0.2R ~ 1.0R 까지 반복하였으며, 그림 3.2.23에는 0.2R과 0.6R 에서의 단면 형상을 도시하였다. 또한 Ka-series 는 const pitch, no skew, no rake 를 갖는데, 이를 반영하여 geometry를 구성하였다.

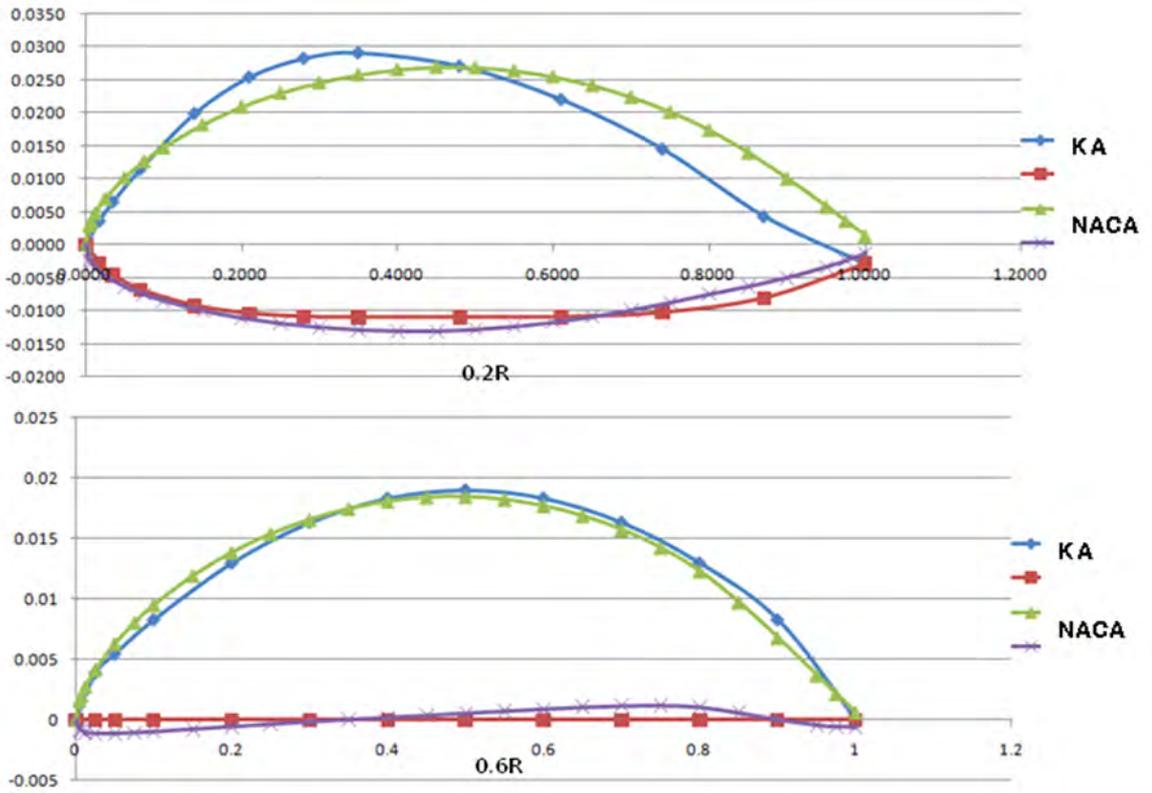


그림 3.2.23 Comparison of sectional shapes between Ka and NACA blade at $r/R=0.2$ (upper) and 0.6 (lower)

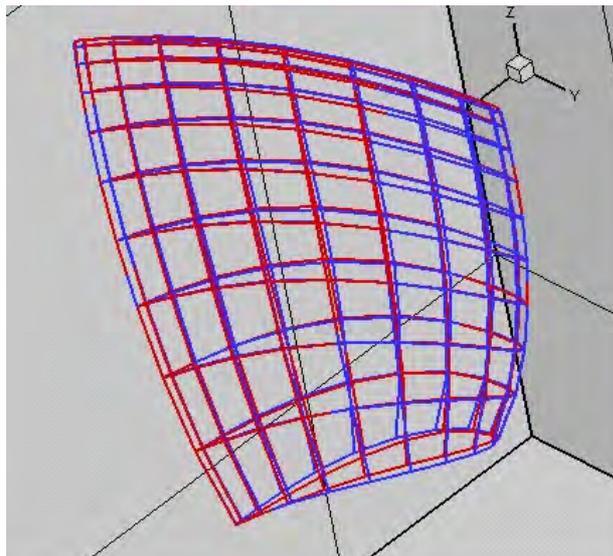


그림 3.2.24 Comparison of three dimensional blade geometry between Ka and NACA section

그림 3.2.24는 변환 전·후의 Ka-series 와 NACA geometry 를 동시에 도시하여 비교한 것이다. 이를 보면 geometry 가 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 이 후 설계는 변환된 geometry 를 사용하여 진행하도록 한다. 변환된 geometry 의 계산값을 기존 Ka-series 와 비교한 결과값은 다음과 같다.

표 3.2.6 Computational results of the changed geometry with NACA sectional shape

	Ka-series	NACA	NACA(수정)
Kq	0.298	0.0268	0.0297
Eff.	0.4716	0.5002	0.4887

표 3.2.6의 가운데 NACA 값이 위와 같은 geometry 변환으로 얻어진 계산값이다. Kq 가 정확히 맞지 않음을 확인할 수 있다. 이는 설계조건에 부합하지 않기 때문에 수정을 하기 위해 mean P/D 를 수정한다. Kq 에 맞추어 mean P/D 를 수정하면 mean P/D = 0.81 에서 설계 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있었는데, 그 결과값은 표 3.2.6의 오른쪽과 같다. 이러한 geometry 변환을 통해, 설계조건은 만족하면서 Ka-series 의 최적화 결과를 만족할 수 있는 geometry 를 얻어내었으며, 이를 표 3.2.7에 나타내었다. 표 3.2.7의 geometry 가 최종적인 기본설계 결과이며, 향후 진행될 상세설계의 기본값으로 사용된다.

표 3.2.7 Impeller geometry through the basic design

r/R	P/D	Xm/D	Skew	C/D	F/C	T/D
0.2	0.81	0	0	0.1653	0.0424	0.04
0.3	0.81	0	0	0.1885	0.0637	0.0352
0.4	0.81	0	0	0.2097	0.0501	0.03
0.5	0.81	0	0	0.2289	0.0437	0.0245
0.6	0.81	0	0	0.2461	0.0386	0.0185
0.7	0.81	0	0	0.2605	0.0269	0.0132
0.8	0.81	0	0	0.2709	0.0173	0.009
0.9	0.81	0	0	0.2773	0.0115	0.0059
1	0.81	0	0	0.2778	0.0094	0.005

(4) 상세설계

기본설계에서는 EAR, mean P/D, D 을 정하고, NACA section 으로 바꾸어 주었다. 일반적인 프로펠러와는 달리 EAR 에 관한 series chart 가 없었기 때문에, 이를 최적화하는 방법과, NACA section 으로 바꾸어 주는 방법이 기본설계의 큰 줄기라고 할 수 있었다. 이제부터 진행될 상세설계는, Pitch, Chord 등의 반경별 0.2R~1.0R 에서의 각각의 값을 구하는 과정이 진행된다. 상세설계 단계야말로, 경험자의 설계와 데이터가 필요한 시점이라고 할 수 있는데, 이론적인 접근 방법을 택한 본 연구에서는 그러한 방법의 접근은 불가능하다. 따라서, 설계조건이 정해진 상태에서 효율을 극대화하는 수치적인 방법으로 접근을 하였다. 더불어 기본설계 단계에서의 1차 캐비테이션 판정 기준 외에 추가적으로 캐비테이션을 고려할 수 있는 방법을 상세설계에서 추가하였다. 이러한 최적화 방법은 수치적으로 여러 방법이 있지만, 본 연구에서는 Newton's method 를 이용하였다.

(가) Newton's method

Newton's method 의 기본 원리는 아주 간단하다. 현재 상세설계의 경우 앞서 언급한대로 수치적인 방법으로 접근한다. 따라서, 기본설계로 얻은 값을 기본값으로 시작하여, 최적 효율을 얻을 수 있는 설계점에서의 이동이 필요한데 이를 위해 Newton's method 가 사용된다. 초기값에서 설계점으로 이동하면서 극값을 갖는, 즉 미분값이 0 이 되는 점으로 계속 이동하여 최종적으로 그 점에 도달하도록 하는 것이 Newton's method 의 원리라고 할 수 있다. 우선 기본적인 함수의 예를 들어 Newton's method 의 원리를 설명하도록 한다.

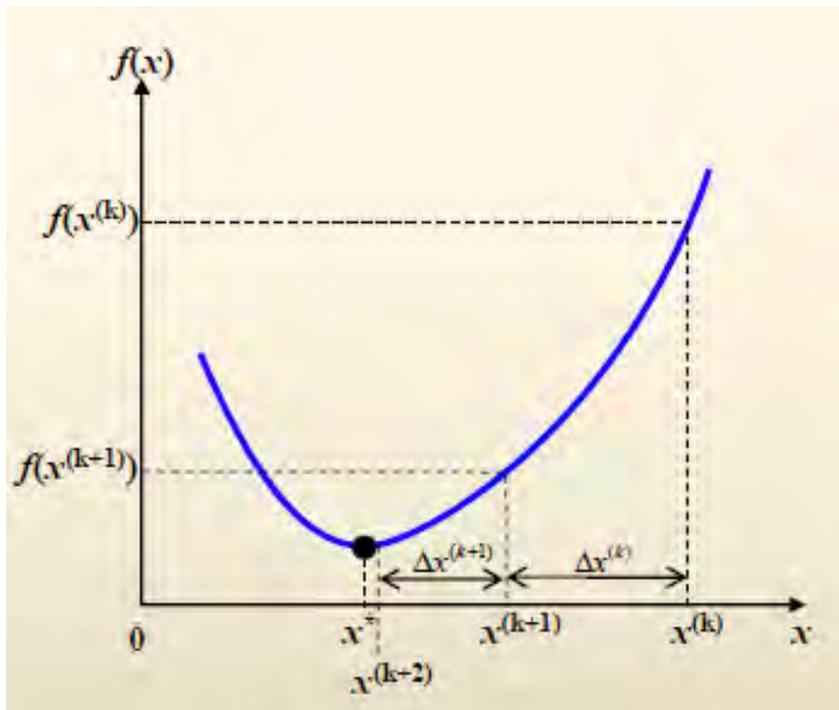


그림 3.2.25 Newton's method

그림 3.2.25의 곡선과 같은 함수가 있다고 생각할 때 Newton's method 는 다음과 같은 문제 풀이로 귀결된다.

표 3.2.8 Problem of Newton's method

Given	$f(x)$
Find	x^* : $f(x)$ 의 극값을 갖는 점

즉 어떠한 $f(x)$ 가 주어졌을 때, 그림 3.2.25의 점으로 표시된 부분과 같은 극값을 갖는 점을 구하는 것이 Newton's method 이며, 그 flow chart 를 그림 3.2.26에 도시하였다.

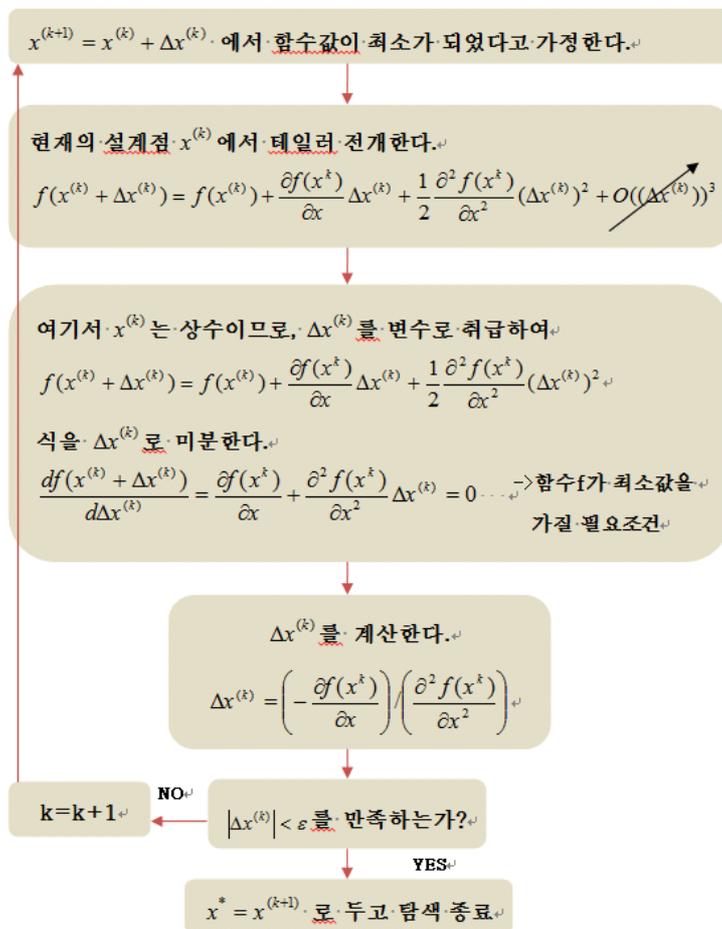


그림 3.2.26 Procedure of solving problem

(나) Newton's method - 설계에의 적용

그림 3.2.25와 같은 단순한 함수의 경우에는 Newton's method 를 사용한 극값을 얻는 방법이 매우 효과적이다. 일반적인 수식으로 표현할 수 있는 경우는 그 정확도가 매우 높다고 할

수 있다. 하지만, 설계에 있어서 극대값을 갖는, 즉 최고 효율을 갖는 점을 찾는 것은 생각처럼 단순하지가 않다. Newton's method 가 local optimization 의 특성을 띄고 있는데 비해 설계에서의 효율값은 수많은 local 극값을 가지는 형태일 것이기 때문이다. 이를 그림으로 표현하면 그림 3.2.26과 같다.

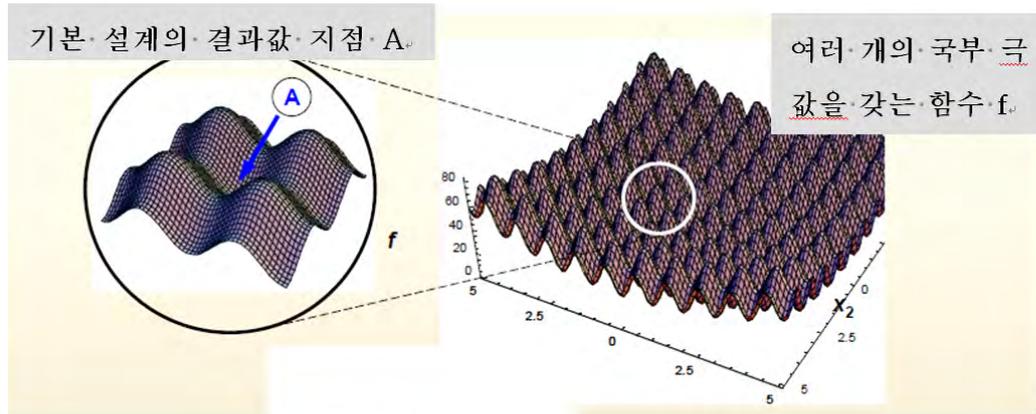


그림 3.2.26 Characteristic of the local optimization

그림 3.2.26을 보면 함수 f 는 매우 여러 개의 local 극값을 갖음을 확인할 수 있다. 여기서 함수 f 는 본 설계에서, input 변수가 impeller geometry 이고, 결과값이 해석프로그램의 결과인 효율이 될 것이다. 그림 3.2.26의 경우는 과도한 국부 극값을 갖는 모습을 표현한 것이지만, 실제 설계에 있어서도 비슷한 형태의 모습을 띠는 것이다. 따라서, 그림 3.2.24와 같이 극값을 정확히 찾아가는 형태의 결과는 기대할 수 없으며, 그림 3.2.26의 A 와 같이 초기값을 잘 넣어주어야 한다. 여기에서 초기값은 설계에 있어서는 기본설계 결과로 나온 기본설계 geometry 가 될 것이다. 기본설계 geometry 를 초기값으로 넣어주면, local optimization 의 한계상 극소값을 찾을 수도 있고 최고 효율을 가지는 한 점을 찾지는 못하겠지만, 기본설계 결과에서 얻어진 값 역시 1차 최적화의 의미를 갖기 때문에, local optimization 으로도 효율 향상을 기대할 수 있을 것이다. 또한 Newton's method 를 사용하면서, 한가지 더 유의해야 할 점은 제약조건이 존재한다는 것이다. 가장 기본적인 제약조건은 엔진데이터를 만족시키기 위한 torque identity 가 될 것이고, 원하는 제약조건을 추가시키면서 수치적으로 최적화할 수 있는 프로그래밍이 필요하다. 이러한 프로그래밍을 위한 접근 방법을 설명한다.

우선 이 수치적 접근 방법의 기본은 Newton's method 의 $f(x)$ 함수의 특성이다. 설계에 있어서 $f(x)$ 는 언급한 것처럼, x 라는 변수는, 반경 방향별 pitch, chord 등 매우 많은 다변수이며, 그 결과값인 $f(x)$ 는, 변수를 입력받았을 때, 해석프로그램인 KPA14 를 돌렸을 때의 효율이라고 할 수 있다. KPA14 는 패널방법으로 짜여진 매우 복잡한 프로그램으로, 일반적인 식으로 표현이 불가능하다. 따라서 수치적으로 접근하기 위해서는 다변수 함수 $f(x)$ 에 대한 테일러 전개식을 사용하여 3차 이상의 항을 무시하고, 2차 식으로 근사하는 방법이 사용된다.

다변수 함수 $f(x)$ 에 대한 점 (x^*) 에서의 전개식은 식 (3.2.9)와 같다.

$$\begin{aligned}
f(x) &= f(x^*) + \nabla f(x^*)^T (x - x^*) + \frac{1}{2} (x - x^*)^T H(x^*) (x - x^*) \\
&= f(x^*) + c^T d + \frac{1}{2} d^T H(x^*) d \\
(c &= \nabla f(x^*)^T, d = (x - x^*) \text{라 가정})
\end{aligned} \tag{3.2.9}$$

이 식을 d로 미분한 결과는 x로 미분한 결과와 같으며 이는 식 (3.2.10)과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(d)}{\partial d} &= \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \nabla f(x^*) + H(x^*) (x - x^*) \\
&= c + H(x^*) d
\end{aligned} \tag{3.2.10}$$

식 (3.2.10) 의 H(x) 는 Hessian Matrix 로서, n개의 변수에 대한 Hessian Matrix 는 식 (3.2.11)에 표시하였다.

$H(x) \Rightarrow$ Hessian Matrix

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \tag{3.2.11}$$

식 (3.2.9), (3.2.10) 에서 x 는 Newton's method 의 극값을 얻기 위한 새로운 설계값을 의미하고, x* 는 이동하기 전 기본값을 의미한다. 어떠한 점 x에서 극점을 갖는다는 것은 미분값이 0 이 된다는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(d)}{\partial d} &= \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \nabla f(x^*) + H(x^*) (x - x^*) \\
&= c + H(x^*) d = 0, (c = \nabla f(x^*), d = (x - x^*)) \\
\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix} &= - \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{3.2.12}$$

이러한 원리로 식을 세워 정리하면 식(3.2.12)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 $x_1^{(0)} \dots x_n^{(0)}$ 은 언급한대로 초기설계점, $\Delta x_1^{(0)} \dots \Delta x_n^{(0)}$ 은 극점을 갖는 다음 설계점으로의 이동을 의미하며, 식 (3.2.12)의 행렬방정식을 풀어 초기점에서 다음 설계점으로의 이동값을 구하는 문제로 귀결되게 된다. 결국 Hessian matrix 의 값을 수치적으로 계산할 수 있다면, Newton's method 의 해를 구할 수 있게 된다. 이는 식 (3.2.13)과 같은 수치적인 방법으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} &\approx \frac{1}{h^2} (f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} &\approx \frac{1}{k^2} (f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} &\approx \frac{1}{4hk} (f_{i+1,j+1} - f_{i+1,j-1} - f_{i-1,j+1} + f_{i-1,j-1}) \end{aligned} \quad (3.2.13)$$

(h, k are increments in both x, y directions ; ; evenly spaced)

① 제약조건의 추가

(나)의 과정과 같이 Newton's method 를 풀면 극값을 찾을 수 있지만, 가장 중요한 설계조건을 만족하지 않는 단순 효율의 극대값을 위한 설계점을 찾아가게 된다. 설계조건인 Kq 를 만족시키지 못하면, 그 효율은 의미가 없다는 것을 이미 언급하였다. 또한 1차 캐비테이션 판정기준에 따라 EAR역시 만족시켜야 하며, 기본설계에 의해 얻어진 mean P/D 역시 제약조건에 추가시켜도 무방하다. 따라서, Newton's method 에 제약조건을 추가시키는 수치적인 방법이 필요하다.

$$\begin{aligned} EAR = \frac{A_E}{A_O} &= \frac{Z \int_{r_n}^R c dr}{\pi D^2 / 4} \approx \frac{Z \cdot \Delta x \left(\frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{C_2 + C_3}{2} + \dots + \frac{C_{n-1} + C_{n+1}}{2} \right)}{\pi D^2 / 4} \\ &\approx 0.5817 \end{aligned}$$

$$\text{mean } P/D = \frac{\int_{x=x_h}^{1.0} px dx}{\int_{x=x_h}^{1.0} x dx} \approx \frac{\sum_{i=1}^n p(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} = 1.21 \quad (3.2.14)$$

$$Kq = 0.0703$$

식 (3.2.14)를 살펴보면 제약조건 중 EAR, mean P/D 값은 프로펠러 geometry 를 반경으로 적분하여 얻는 값을 알 수 있는데, 수치적으로 식과 같이 표현하였고, Kq 값은 표 3.2.6의 기본설계 결과값을 이용하였다. 이러한 조건을 만족하면서 설계점을 찾아가기 위해서는 식 (3.2.15)와 같은 수정이 필요하다.

$$f(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = \eta_p(x_1, \dots, x_n) + \lambda_1 \{C_1(x_1, \dots, x_n) - const1\} + \dots + \lambda_m \{C_m(x_1, \dots, x_n) - constm\} \quad (3.2.15)$$

제약조건이 없을 때 본 설계에서의 함수 $f(x)$ 는 언급한대로, KPA14 를 돌렸을 때 나오는 효율값이다. 하지만 제약조건이 추가가 되면 기존 식 $f(x)$ 는 식 (3.2.15)의 $\eta_p(x_1, \dots, x_n)$ 가 되고, 여기에 $const1, const2, constm$ 은 추가하고자 하는 제약조건이 되고 식에 추가된다. 예를 들어, 제약조건을 EAR, mean P/D, Kq 세가지로 놓고 그 값을 기본설계시의 해당되는 값으로 고정시킨다면, $const1, const2, const3$ 가 그 값에 해당되게 된다. 즉 설계변수 x_1, \dots, x_n 가 변화하면서 극값을 찾아가더라도, 설계변수에 따른 EAR, mean P/D, Kq 는 일정한 값을 만족하게 된다.

② 설계변수 interpolation 을 통한 계산시간 단축

최적화를 위해서는 Newton's method 의 $f(x)$ 에 해당하는 KPA14 프로그램을 돌려야 하는데, 이는 그림 3.2.27과 같은 방법으로 이루어진다.

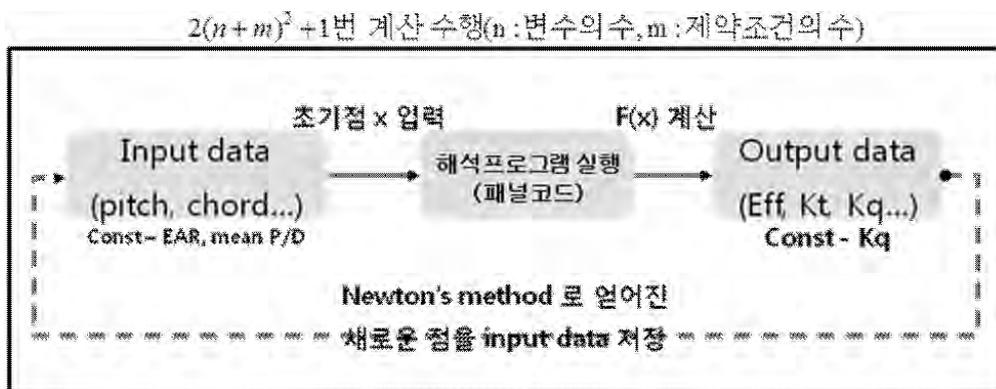


그림 3.2.27 Flow chart of Newton's method in developed program

그림 3.2.27과 같이 Hessian matrix 를 풀기 위해서는 반복적으로 KPA14 를 실행시켜주어야 하는데 초기점에서 다음 설계점으로 이동하기 위해 필요한 계산량은 Figure 21 과 같다. 이에 따르면, 식 (3.2.15)에서와 같이 변수 n개, 제약조건 m 개라고 했을 때 단 한번의 설계점을 찾기 위한 계산횟수가 $2(n+m)^2 + 1$ 번임을 의미한다. 제약조건의 경우, 함부로 건드

릴 수 없는 것이고, 변수 n 의 경우, Pitch 하나만 최적화 한다고 했을 때에서 0.2R~1.0R 까지 변수의 개수가 9개가 된다. 그리고 앞서 언급한대로, 수식으로 표현할 수 있는 일반적인 함수와는 다르게 최적값을 쉽게 찾을 수 없기 때문에 많은 iteration 을 해야한다는 점을 생각하면, 한번의 KPA14 실행시간이 10초 가량이라고 하더라도 매우 긴 계산시간이 필요함을 알 수 있다.

$H(x) \Rightarrow$ Hessian Matrix

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad n(n-1)/2 \text{ 개의 값}$$

$\frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \approx \frac{1}{h^2} (f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}) \Rightarrow$ 2번의 계산

$\frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \approx \frac{1}{k^2} (f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}) \Rightarrow$ 2번의 계산

$\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \approx \frac{1}{4hk} (f_{i+1,j+1} - f_{i+1,j-1} - f_{i-1,j+1} + f_{i-1,j-1}) \Rightarrow$ 4번의 계산

$\therefore 4 \cdot \frac{(n-1)n}{2} + 2n + 1 = 2n^2 + 1$ 번의 계산 수행과 $n \times n$ 행렬 *inverse matrix* 계산

그림 3.2.28 Amount of the calculation for solving Hessian matrix

이러한 이유로 최적설계에 있어서 계산시간을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 설계조건은, 언급한대로 조절할 수 없고, 또 변수 전체를 생각하면 많은 부분을 차지하지 않기 때문에 변수의 개수를 줄이는 방법을 택하였다. 프로펠러 geometry 의 경우, pitch, chord 등의 값이 반경 방향으로 급격하게 변화하는 경우는 찾아보기 힘들다. 또한 hub 쪽보다 tip 쪽에 가까울수록 그 값이 성능에 미치는 영향이 더 크다. 이러한 이유로, 0.2R 부터 1.0R 까지의 값중, 0.2R, 0.6R, 0.8R, 1.0R 4가지의 값으로 interpolation 을 하여, 그 사이의 값들을 구하는 방법을 택하였다. 즉 pitch, chord 등의 변수군들마다 4가지의 변수만을 대표값으로 하여 프로펠러 geometry 를 정의하였다. Interpolation 의 방법으로는 Cubic spline 을 사용하였으며, 그림 3.2.29에 이를 도시하였다. 표시된 부분이 직접 변수로 선택된 부분이고 곡선이 interpolation 으로 완성된 값들을 연결한 것이다. 결과적으로 변수들의 분포를 잘 반영하면서, 그 숫자는 반이하로 줄였기 때문에, 계산시간은 1/4 이하로 줄일 수 있다.

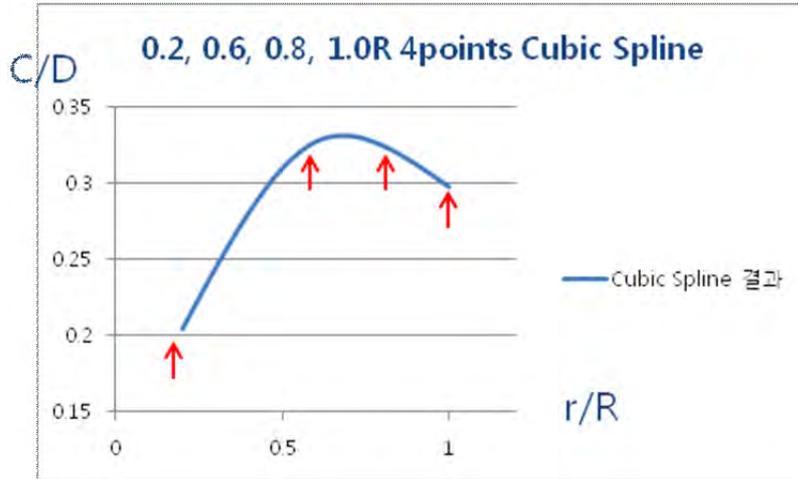


그림 3.2.29 4 points interpolation result about C/D

(다) 최적화 결과

프로펠러의 성능평가를 할 때는 크게 두가지 조건에서 하게 된다. 하나는 open water, 하나는 선미 반류장에 있을 때이다. Open water 는 말 그대로, 프로펠러 단독상태임을 의미하는 것으로, 프로펠러로 들어오는 유입류가 모두 균일한 상태임을 의미한다. 선미 반류장에서는, 실제로 프로펠러가 설치될 선박의 뒤에 위치하였을 때를 의미한다. 본 연구에서는, open water 상태와 선미 반류장에 있을 때의 상태 모두 최적화를 진행하였다.

① Open water

기본설계 결과가 open water 상태로 계산된 결과이기 때문에, 기본설계의 K_q 값을 설계조건으로 놓고, EAR 역시 1차 캐비테이션 판정기준이기 때문에 고정값으로 놓는다. 이러한 상태에서 표 3.2.7의 geometry 를 기본설계점으로 놓고, Newton's method 를 프로그래밍하여, 최적화를 하였다. 본 논문에서의 모든 최적화는 iteration 50번 이상씩 수행되었으며, K_q 를 만족시키는 값중 가장 효율이 높을 때를 최적설계점으로 지정하였다.

○ 변수군의 독립적 최적화 (Optimization I)

일반적으로 프로펠러 geometry 는 pitch, chord, camber, thickness, skew, rake 등으로 구성된다. 이런 모든 값들을 최적화 할 수도 있지만, 본 논문에서는 프로펠러 성능에 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있는 pitch, chord 에 대해서 최적화를 진행하였다. Pitch, chord 를 최적화 하는데 있어서, propeller geometry 와 그 성능은 상호 독립적인 관계가 아닌, 영향을 주기 때문에, 동시에 최적화를 진행하는게 더 정확할 것이라 판단되지만, 우선 Newton's method

의 가능성에 대해서 확인하기 위해 pitch, chord 최적화를 따로 진행하였다. 다만, 상호 영향을 고려하기 위하여, Pitch 최적화 - Chord 최적화 - Pitch 최적화 순으로 계산을 진행하였다.

○ 변수군의 동시 최적화 (Optimization II)

앞서 언급한 바와 같이, 여러 변수군의 동시 최적화를 할 경우 더 좋은 결과값을 얻을 수 있을 것이라고 생각하여 동시 최적화의 시도를 해보았다. 동시에 최적화를 한다는 것은 식 (3.2.15) 에서 변수군 x_1, \dots, x_n 에 pitch, chord 등을 동시에 넣어서 최적화를 한다는 것을 의미한다. 독립적인 최적화에서는 x_1, \dots, x_n 에 pitch 의 4변수로 최적화를 한 후 chord 의 4변수를 다시 최적화를 하는 것이었고, 동시에 최적화는 pitch, chord 8변수로 하여 최적화를 하는 것을 의미한다. 제약조건은 전과 동일하다. 계산시간은 증가하지만 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단하였다. 이러한 시도로 기본설계 결과값에서 동시 최적화를 하였지만, 좋은 결과를 얻지 못하였다. 이는 local optimization 의 한계성에, 많은 변수의 최적화라는 점이 더해 좋은 결과를 얻지 못한 것이라고 분석하였다. 기본점을 좀 더 최적화하기에 좋은 값을 넣으면 좋을 것이라 분석하고, pitch 최적화를 한번 진행한 결과를 기본설계값으로 다시 동시 최적화를 진행하였다. 그림 3.2.30~32는 각각 기본설계, 독립최적화, 그리고 동시최적화에 따른 임펠러 형상을 보이고 있으며, 동시최적화의 경우가 보다 현실적인 형상을 보이고 있다.

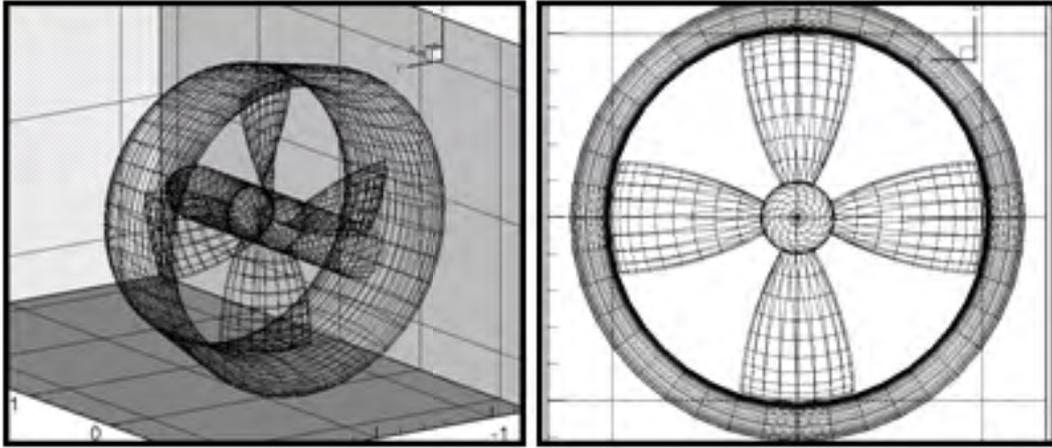


그림 3.2.30 Impeller geometry with nozzle from the basic design

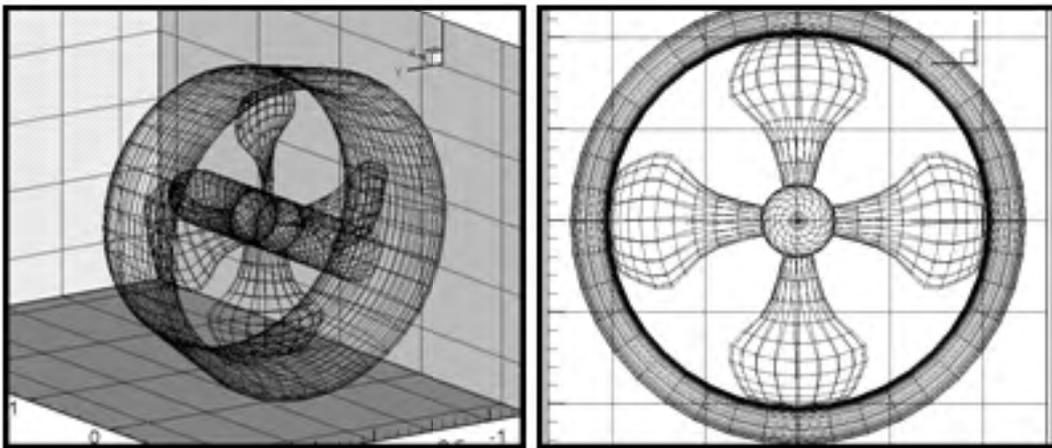


그림 3.2.31 Impeller geometry with nozzle from detail design (optimization I)

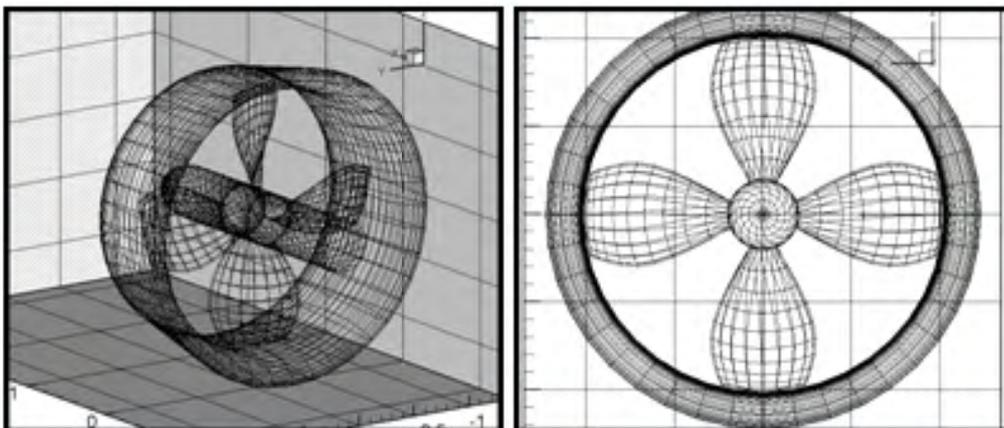


그림 3.2.32 Impeller geometry with nozzle from detail design
(optimization II)

② With wake

wake 를 고려한 설계라는 것은 실제 선미 반류장에 위치해 있을 때를 기준으로 설계를 하는 것을 의미한다. 모든 선박은 마치 지문과 같이, 선미 형상에 따른 다양한 반류장을 형성하게 된다. 반류장이 잘 나오면 효율에 이롭고, 또 그에 따라 프로펠러 설계를 잘 하게 되면 좋은 효율을 갖는 선박이 완성되는 것이다. 본 연구에서는, 설계 대상선이 이미 선정되어 있고, 선미 형상을 수정할 수 없기 때문에, 이미 대상선에 대한 선미 반류장을 실험한 결과를 토대로 설계하도록 한다.

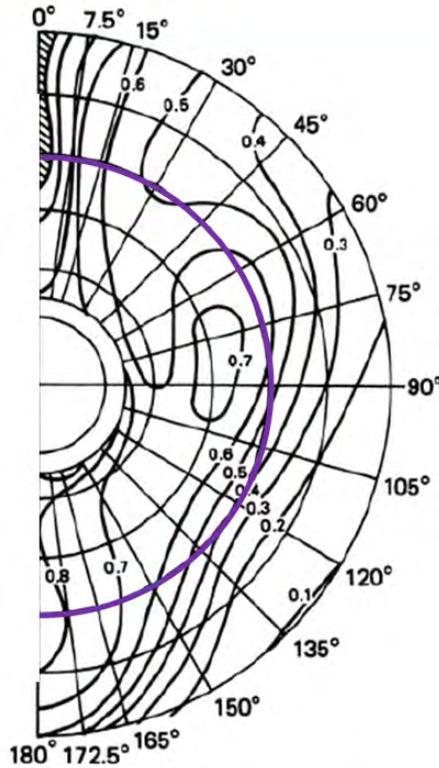


그림 3.2.33 General wake field

일반적인 반류장은 그림 3.2.33과 같이 좌우 대칭되어 나타나는게 일반적이며, 선미 형상에 따라, θ 및 반경 별로 다른 유속분포를 가지게 된다. 따라서 open water 상태와는 달리 반경 별로 받는 하중이 다르고, 같은 프로펠러라도 반류장에 있을 때는 다른 성능을 나타낸다. 따라서 반류장을 고려한 설계가 실제 선박의 운항에 있어서 더 유리할 것이다. 이러한 이유로 대상선이 정해지면 모델선을 제작하여 반류장을 계측한다. 본 연구에서도, 공선호의 모델선에 대한 실험이 수행되었으며, 이를 토대로 한 설계가 진행되었다. 정확한 설계를 위해서는 θ 별 달라지는 유속까지 고려한 설계를 해야한다. 그리고 이러한 반류장을 해석하는 것을 비정상 유동 해석이라고 하는데, KPA14 해석 기능 중에 비정상 유동 해석도 포함되어 있지만, 이는 시간이 많이 소요되므로, 정상 유동으로 해석한다. 따라서 θ 방향으로는 일정하다고 놓고, r/R 방향으로 각 반경에서의 평균유속값으로 계산한다. 즉 그림 3.2.33의 선분으로 표시한 것처럼, 같은 반경에서는 평균값을 이용하도록 한다. 공선호의 이러한 반경별 circumferential mean velocity의 값은 표 3.2.13에 나타내었다.

표 3.2.13 Circumferential mean velocity of each radius

r/R	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
VA	0.2523	0.456	0.595	0.67	0.691	0.698	0.709	0.725	0.739
VR	-0.1056	-0.091	-0.08	-0.072	-0.067	-0.066	-0.066	-0.068	-0.072
VT	0.0231	0.003	-0.014	-0.017	-0.002	0.007	-0.01	-0.028	-0.021

실험값은 0.3R~1.0R 까지만 존재하므로 0.2R 에서의 값은 extrapolation 으로 계산하였다. 또한 반류장 중 성능에 가장 큰 영향을 미치는 axial velocity 는 그림 3.2.34와 같다.

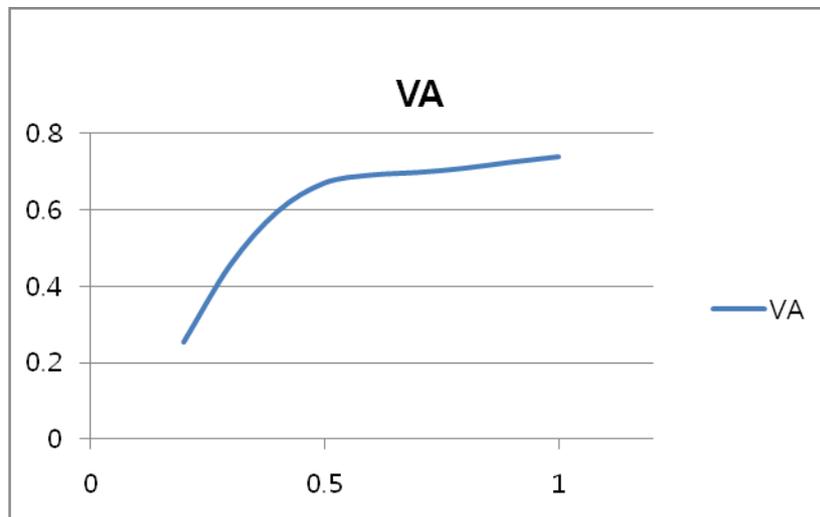


그림 3.2.34 Axial velocity vs radius

이러한 wake data 를 넣고, open water 최적화와 같은 방법으로 최적화, 동시 최적화를 진행하여 최종적으로 그림 3.2.35와 같은 덕트 프로펠러 형상을 얻었으며, 자세한 geometry는 표 3.2.14에 나타내었다.

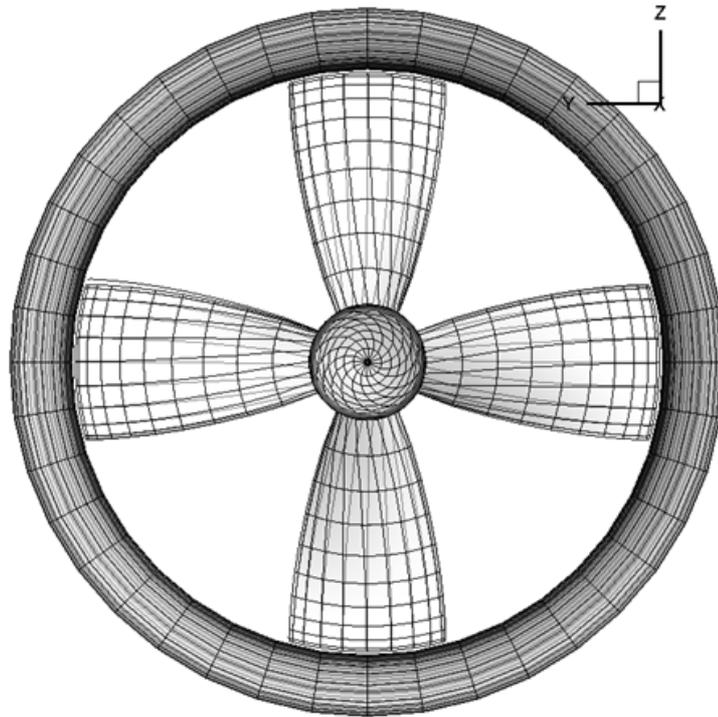


그림 3.2.35 Optimized impeller geometry by the proposed design procedure

표 3.2.14 Final geometry using the proposed optimization procedure

Impeller	최적설계 결과					
No. of blades	4			EAR	0.5	
Diameter	1.984			Tip clearance	0.0125R	
(wake adapted)						
r/R	P/D	Xm/D	THM	C/D	F/C	T/D
0.2	0.6904	0	0	0.1653	0.0424	0.0400
0.3	0.7394	0	0	0.1885	0.0637	0.0352
0.4	0.7833	0	0	0.2097	0.0501	0.0300
0.5	0.8173	0	0	0.2289	0.0437	0.0245
0.6	0.8362	0	0	0.2461	0.0386	0.0185
0.7	0.8367	0	0	0.2605	0.0269	0.0132
0.8	0.8221	0	0	0.2709	0.0173	0.0090
0.9	0.7973	0	0	0.2773	0.0115	0.0059
1	0.7675	0	0	0.2778	0.0094	0.0050
KT	0.2567	KQ	0.0278	Efficiency	0.730735	

마. KPA14로 계산한 POW 및 고찰

wake가 고려된 최적화된 임펠러 형상(그림 3.2.35 및 표3.2.14)을 이용하여 KPA14를 이용한 POW test를 simulation해 보았으며, 그림 3.2.36과 같은 결과를 얻을 수 있었으며 최적화 형상을 제작하여 수행한 POW test의 결과와 매우 유사하였다.

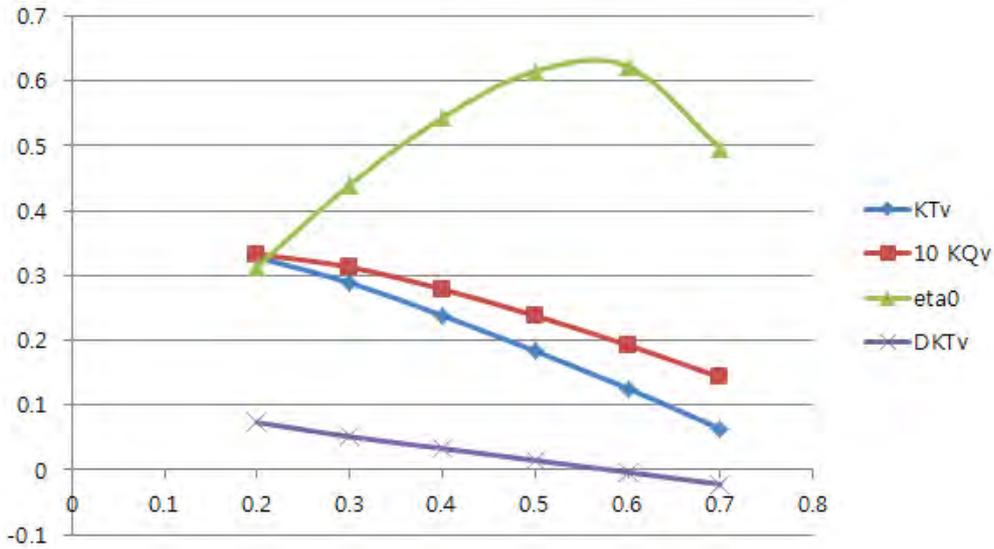


그림 3.2.36 POW simulation using KPA14

본 연구에서는 pitch, chord 만 최적화하였는데 그 이유는 첫째, pitch, chord 가 프로펠러의 특성을 대표할 수 있는 값이기 때문이고, 다른 하나는 thickness, camber 등 다른 변수를 건드릴 때 겪을 수 있는 리스크 때문이다. 시리즈 프로펠러의 경우, 오랜 시간의 연구 끝에 개발된 프로펠러이다. 예를 들어 thickness 를 건드리면 강도상의 문제가 생길 수 있고, camber 키우면 효율의 향상이 있을 수 있으나 실제 작동할 시에 캐비테이션 문제가 치명적으로 발생할 수 있다. 여러 번의 모형실험이 불가능하고, 캐비테이션을 정확히 예측할 수 없는 현재의 상황에서 이러한 점들은 매우 큰 위험이라고 할 수 있다. 하지만, 이론적으로 pitch, chord 외에 같은 방법으로 최적화가 가능하다. 역시 제약조건을 정한 후 최적화를 한다면 보다 나은 효율을 가지는 geometry 를 얻을 수 있을 것이다. 또한 현재 설계는 impeller 에 대해서만 최적화가 이루어져있다. 이는 NSMB 19A 가 매우 좋은 효율을 얻을 수 있는 덕트임이 이미 밝혀졌고, 이러한 이유로 덕트프로펠러 설계에 있어서 덕트 설계보다는 impeller 설계가 중요시되기 때문이다. 하지만 duct 의 offset data 를 알고 있기 때문에, 이 역시 같은 방법으로 최적화를 진행할 수 있을 것이다.

제 3 절 어선용 추진기 계열 및 최적화 프로그램 개발

1. 서언

MAU 계열 프로펠러의 경우, 캐비테이션과 날개에 발생하는 유체력 보다는 효율과 제작의 용이성에 더 높은 비중을 두고 개발되어졌다. 그러한 이유로 캐비테이션이나 날개 끝 보오텍스로 인한 소음 진동이 문제가 되고 있다. 이는 효과적인 작업에 방해가 되고 생태계에 악영향을 미치게 된다. 또한, MAU 계열에서 제공하는 도표의 경우, 넓은 마력대와 낮은 영역대의 피치비를 가지는 어선용 프로펠러를 설계하는 데 어려움이 있어왔다. 소형어선의 경우 통상 날개수를 3개를 사용하게 되는데 MAU 시리즈의 경우 전개면적비가 0.35와 0.5로 구성되어 있어 캐비테이션의 위험이 큰 경우 사용이 어려운 측면이 있었다. 실제로 어선의 경우는 조업시 부하가 많이 걸리게 되어 캐비테이션의 발생량이 많아진다. 이러한 이유로 본 연구에서는 전개면적비 0.65를 추가하였으며 또한 피치비가 대부분 적으므로 낮은 피치비 영역에서 시리즈를 구성하도록 하였다.

지난 연구에서는 MAU 계열 프로펠러보다 효율과 캐비테이션 성능이 우수한 계열 프로펠러를 제공하기 위하여, 상선에서 많이 사용하고 있는 NACA 단면과 최근 상선에서 많이 사용하여 효율 및 진동 소음에서 효과가 좋은 것으로 밝혀진 팁 레이크 및 캐비테이션에 유리한 비교적 큰 스큐를 적용하여 새로운 계열 프로펠러를 제공하고자 하였다.

2차 년도에는 1차 년도에 제시한 형상에서 제작의 용이성과 날개끝에서 발생하는 유체력을 개선하여 보다 설계가 용이하고 캐비테이션과 변동압력을 감소시킬 수 있는 방향으로 형상에 대한 개선과 표준화 작업이 이루어졌다. 또한, 계열 프로펠러 성능도표를 작성하기 위한 다항식을 제시하였으며, 보다 용이한 설계와 제작을 위하여, 직경 및 확장면적비 도출 프로그램과 도면을 생성할 수 있는 프로그램을 일부 제시하였다.

3차 년도에는 2차 년도에 제시한 KF 계열 프로펠러 중 기준프로펠러($P/D=0.55$, $AE/AO=0.50$)대비 피치비와 확장면적비를 변화시킨 5개의 모형 프로펠러를 제작하여 한국해양연구원 예인수조에서 모형시험을 수행하였고, 모형시험결과와 VLM으로 해석한 수치해석 결과를 비교 검증하였으며, 모형시험 경향성을 반영한 계열 프로펠러 성능 보정을 통해 계열 프로펠러 성능 도표를 완성하였다. 또한 계열 프로펠러 성능 도표를 바탕으로 설계 및 제작의 용이성을 위한 직경 최적화 프로그램을 완성하였다.

본 연구에서 제시하고자 하는 주요 내용은 다음과 같다.

- 계열 프로펠러 모형시험
- 모형시험 결과와 VLM으로 해석한 수치해석 결과 비교
- 모형시험 결과에 따른 계열 프로펠러 간의 경향성 분석
- 모형시험 경향성을 반영한 계열 프로펠러 성능 보정 및 성능도표 완성
- 설계 및 제작의 용이성을 위한 프로그램 완성

2. 계열 프로펠러 설계

가. 어선 프로펠러의 MAU 계열 도표에서의 분포

기존 어선의 자료 중 50톤급의 중소형 어선의 피치비와 $\sqrt{B_p}$ 를 조사하여 MAU 계열 차트에 분포시켜 보았다.(그림 3.3.1) $\sqrt{B_p}$ 의 경우는 3~9 사이의 비교적 넓은 영역대의 분포를 보였으며, 피치비의 경우는 최적 곡선에 미치지 못하는 낮은 영역대의 분포를 보였다. 따라서, 다양한 선종을 대상으로 하는 MAU 계열 차트로는 넓은 영역의 $\sqrt{B_p}$ 와 낮은 피치비를 사용하는 어선용 프로펠러를 설계하기에는 다소 어려움이 있을 거라 판단된다.

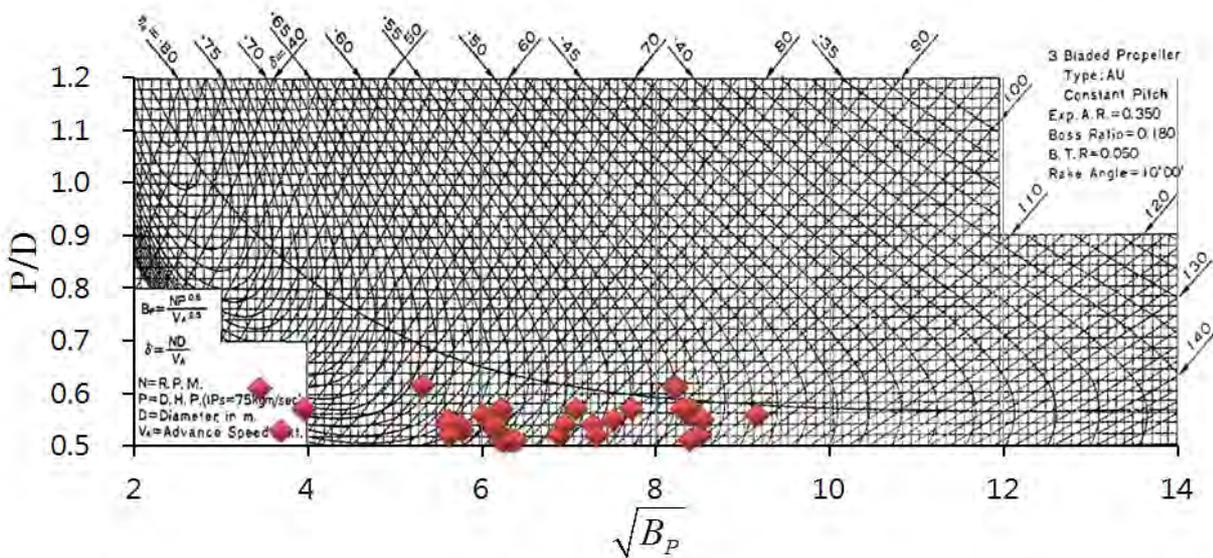


그림 3.3.1 Pitch ratio distribution by $\sqrt{B_p}$ on MAU-series chart

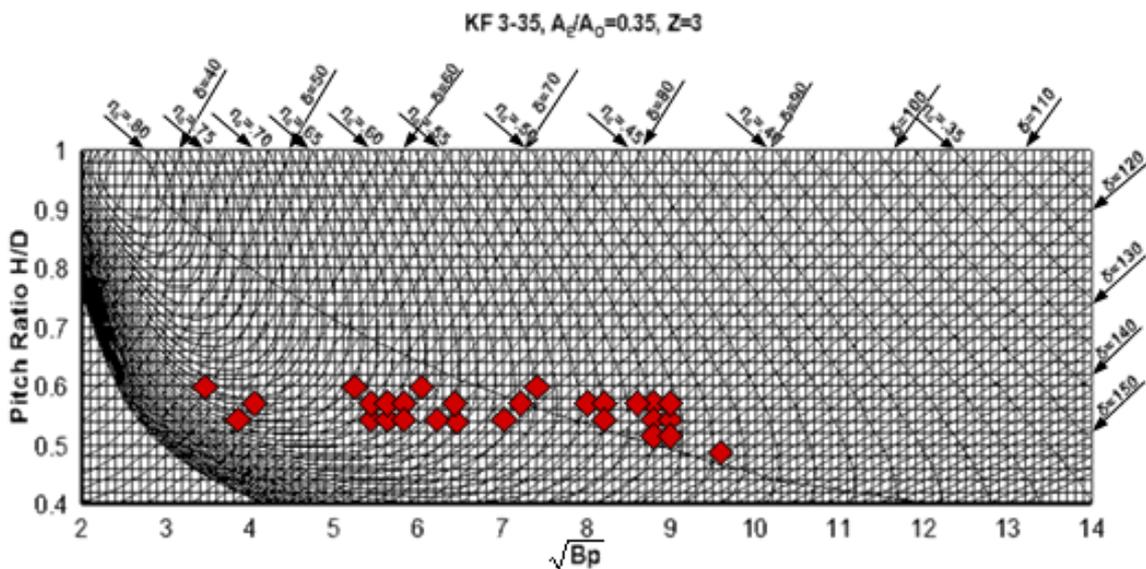


그림 3.3.2 Pitch ratio distribution by $\sqrt{B_p}$ on KF-series chart

나. 어선 프로펠러의 KF 계열 도표에서의 분포

본 연구를 통해 개발되어진 연근해 어선용 고효율 KF 계열 프로펠러의 BP- δ 도표를 아래에 나타내어 기존의 MAU 계열 BP- δ 도표와 비교해 보았다. 낮은 피치비 영역을 사용하는 어선용 프로펠러 설계를 위해 피치비 0.4의 낮은 피치비에서도 설계가 가능하도록 BP- δ 도표가 작성되었으며, MAU 계열에서 최적곡선에 미치지 못하던 프로펠러 설계 조건들이 KF 계열 BP- δ 도표에서는 최적곡선 근처에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이로써 어선용 고효율 프로펠러 설계가 용이하게 되었다.

다. NACA 계열 프로펠러 설계

새로운 계열 프로펠러 설계에는 NACA 계열을 사용하였으며, 그 중 선박에 일반적으로 많이 사용되어지는 NACA66(Mod.)단면과 $a=0.8$ 평균캠버선을 사용하였다. 또한, 어선용 프로펠러의 설계를 위한 차트를 작성하기 위해서는 그 기준이 되는 프로펠러를 선정한 후, 기준프로펠러의 피치비와 확장면적비를 변화시켜가며 그 성능에 대하여 알아보아야 한다. 기존 MAU 계열프로펠러의 경우, 전개면적비가 0.35와 0.50에 한정되어 있으며, 피치비의 영역도 0.5~1.2로 비교적 좁은 영역이다. 따라서 본 연구에서는 MAU 계열보다 넓은 영역대의 전개면적비와 피치비를 제공하고자 한다. 특히 낮은 피치비의 영역을 커버하기 위하여, 피치비의 경우, 0.40~1.00으로, 확장면적비의 경우, 0.35~0.65로 그 값을 변화시켜 보다 폭넓은 영역의 자료를 제공하고자 하였다.

(1) MAU 시리즈 프로펠러

MAU 시리즈 프로펠러는 날개수 3개인 경우, 확장면적비 0.35와 0.50에 한정되어 있으며, 피치비는 0.5~1.2로 어선과 같이 피치비가 낮은 경우에 적용하기 어려운 문제점이 있다.

표 3.3.1 Applicable range of MAU series propeller

날개수	확장면적비	프로펠러 명칭	피치비
3	0.35	KF 3-35	0.5-1.2
	0.50	KF 3-50	

(2) KF 시리즈 프로펠러

연근해 어선용으로 개발되어진 고효율 KF 시리즈 프로펠러는 날개수 3개인 경우, 확장면적비 0.35~0.65로 변화의 폭을 넓혔으며, 피치비의 경우 0.4~1.0으로 피치비가 낮은 경우에도 적용할 수 있도록 설계되었다.

표 3.3.2 Applicable range of KF series propeller

날개수	확장면적비	프로펠러 명칭	피치비
3	0.35	KF 3-35	0.4-1.0
	0.50	KF 3-50	
	0.65	KF 3-65	

(가) 1차년도 기준 Propeller의 형상

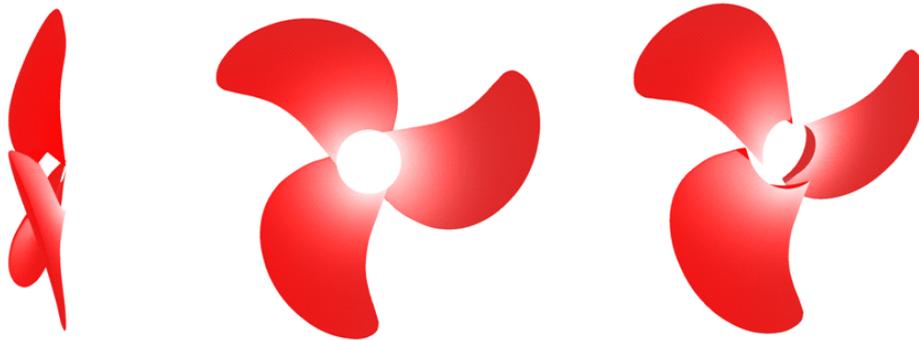


그림 3.3.3 Shape of KF3-50-55 propeller, 1st year
($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

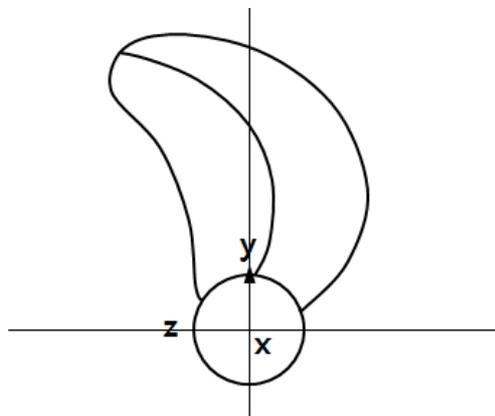


그림 3.3.4 Skew distribution of
KF3-50-55 propeller outline,
1st year ($A_E/A_0=0.50$,
 $P/D=0.55$)

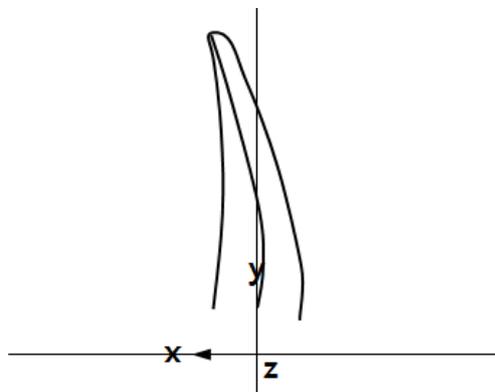


그림 3.3.5 Rake distribution of
KF3-50-55 propeller outline,
1st year ($A_E/A_0=0.50$,
 $P/D=0.55$)

(나) 2차년도 기준 Propeller의 형상

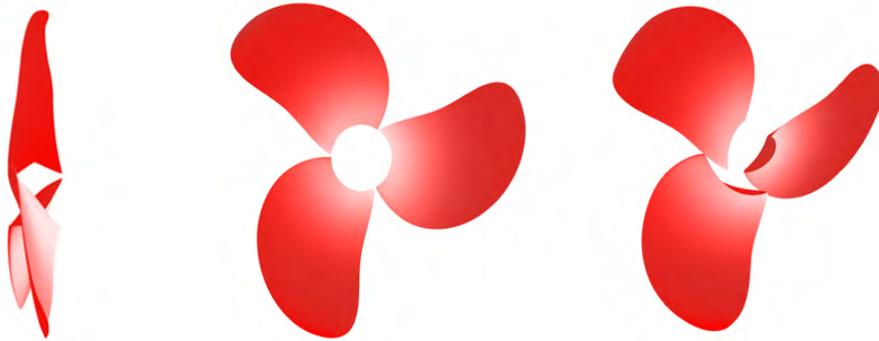


그림 3.3.6 Shape of KF3-50-55 propeller, 2nd year
($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

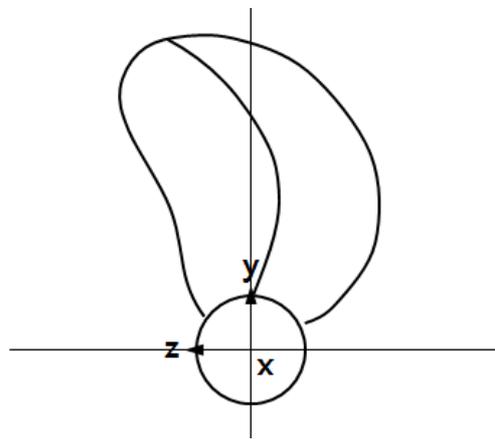


그림 3.3.7 Skew distribution of
KF3-50-55 propeller outline, 2nd
year ($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

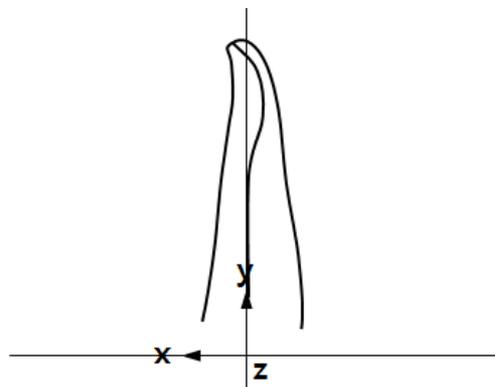


그림 3.3.8 Rake distribution of
KF3-50-55 propeller outline, 2nd
year ($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

(다) 1차년도와 2차년도의 기준 Propeller 비교

① 1차년도 기준 Propeller

표 3.3.3 Radial values of 1st year KF3-50-55 propeller($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

r/R	Pitch/ Diameter	Rake/ Diameter	Skew (degree)	Chord/ Diameter	Camber/ Chord	Thickness/ Diameter
0.180	0.251	0.000	-2.932	0.240	0.030	0.048
0.200	0.288	-0.003	-5.569	0.248	0.031	0.046
0.250	0.373	-0.008	-8.906	0.268	0.031	0.043
0.300	0.454	-0.013	-10.596	0.292	0.030	0.039
0.400	0.584	-0.020	-10.965	0.329	0.023	0.033
0.500	0.675	-0.023	-9.180	0.361	0.018	0.027
0.600	0.717	-0.024	-5.550	0.380	0.014	0.021
0.700	0.707	-0.020	0.006	0.381	0.013	0.017
0.800	0.654	-0.014	7.184	0.355	0.011	0.012
0.900	0.550	-0.004	15.218	0.292	0.011	0.008
0.950	0.486	0.002	19.502	0.223	0.010	0.006
0.980	0.440	0.006	21.585	0.150	0.010	0.004
1.000	0.395	0.009	24.143	0.010	0.010	0.003

② 2차년도 기준 Propeller

표 3.3.4 Radial values of 2nd year KF3-50-55 propeller($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

r/R	Pitch/ Diameter	Rake/ Diameter	Skew (degree)	Chord/ Diameter	Camber/ Chord	Thickness/ Diameter
0.180	0.480	0.000	-2.932	0.239	0.033	0.052
0.200	0.488	0.000	-4.333	0.251	0.034	0.050
0.250	0.505	0.000	-6.962	0.277	0.035	0.045
0.300	0.520	0.000	-8.715	0.299	0.034	0.040
0.400	0.545	0.000	-10.000	0.336	0.030	0.032
0.500	0.565	0.000	-8.840	0.364	0.027	0.025
0.600	0.578	0.000	-5.522	0.379	0.025	0.020
0.700	0.584	-0.005	-1.141	0.381	0.023	0.015
0.800	0.580	-0.014	3.929	0.355	0.022	0.011
0.900	0.558	-0.018	9.249	0.288	0.021	0.007
0.950	0.538	-0.015	12.066	0.222	0.020	0.006
0.975	0.525	-0.009	13.531	0.166	0.018	0.005
1.000	0.505	0.010	15.000	0.010	0.000	0.005

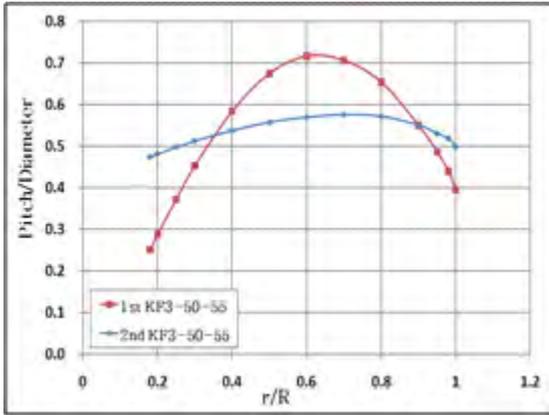


그림 3.3.9 Comparison of Pitch/Diameter

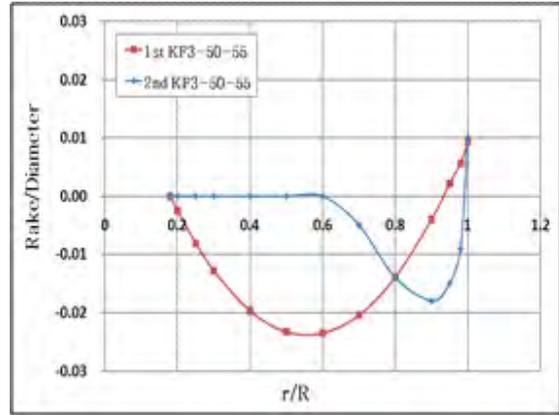


그림 3.3.10 Comparison of Rake/Diameter

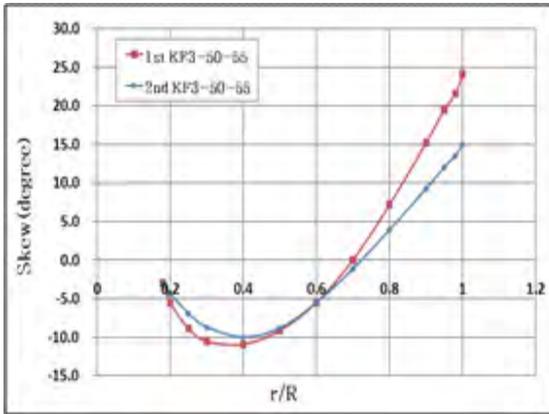


그림 3.3.11 Comparison of Skew (degree)

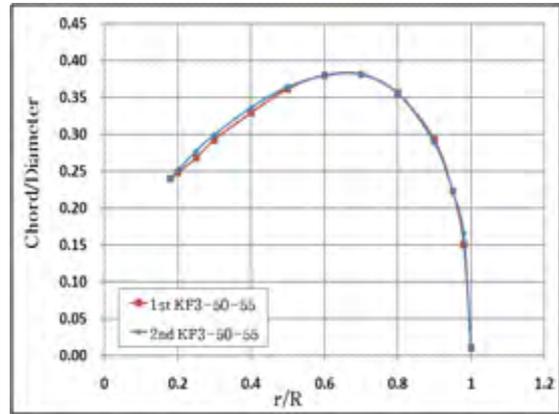


그림 3.3.12 Comparison of Chord/Diameter

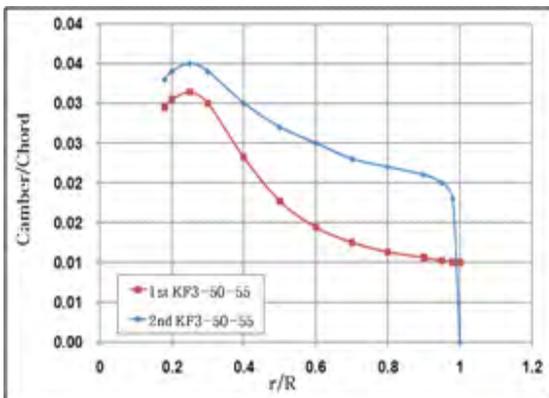


그림 3.3.13 Comparison of Camber/Chord

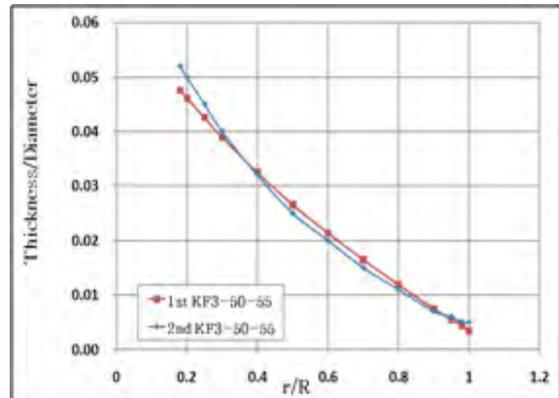


그림 3.3.14 Comparison of Thickness/Dia.

(라) 계열 도표 작성을 위한 형상 변환

본 연구에서는 $P/D=0.55$, $AE/AO=0.50$ 인 프로펠러를 기준으로, 피치비(0.4~0.7)와 확장면적비(0.35~0.65)를 변화시켜, 새로운 계열 차트를 작성하기 위한 이론 해석 및 모형시험용 계열 프로펠러를 설계하였다. 특히, 피치비와 확장면적비는 KF3-50-55를 기준으로 하여 반경별로 일정비율 만큼 감소 및 증가 시켜 변화를 주었고, 캠버와 두께는 MAU 계열과 마찬가지로 기준프로펠러의 캠버비(f_0/C)와 두께비(T/D)를 유지하도록 설계하여 표 3.3.5에서 명시한 KF 계열을 완성하였다.

표 3.3.5 Characteristics of propeller for KF series

AE/AO (P/D)mean	0.35	0.50	0.65
0.40	KF3-35-40	KF3-50-40	KF3-65-40
0.55	KF3-35-55	KF3-50-55	KF3-65-55
0.70	KF3-35-70	KF3-50-70	KF3-65-70

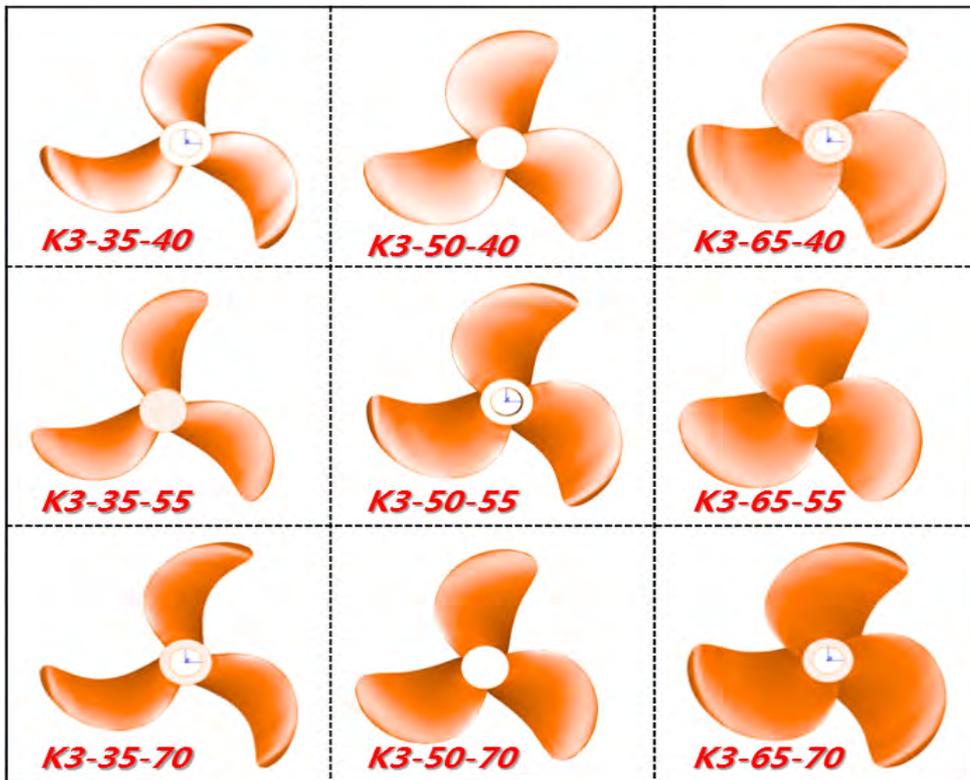


그림 3.3.15 Design variation of standard KF series propeller

3. 계열 프로펠러 단독 성능 시험

가. POW test(Propeller Open-Water test, 프로펠러 단독시험)

- POW test(Propeller Open-Water test, 프로펠러 단독시험)이란 프로펠러 단독의 추진성능을 균일유동장(uniform flow field)에서 모형 프로펠러를 가지고 결정하는 시험이다.
- 프로펠러축의 몰수 깊이는 (1.0 ~ 1.5)D 정도를 유지하여 공기흡입의 영향 등 자유수면의 영향을 피할 수 있어야 한다. 최근의 프로펠러 동력계(dynamometer)는 모두 strain-gauge type이며, 회전수 n(rps), 추력 T(N), 토크 Q(Nm)를 계측한다.
- 모형을 실선의 프로펠러로 확장하기 위해서는 모형시험시 상사법칙을 지켜야한다.

(1) 기하학적 상사 (Geometric similarity) : 모형과 실선의 형상이 닮은꼴, 동일한 무차원 반경에서의 피치각이 같아야한다.

$$\phi_M = \phi_S$$

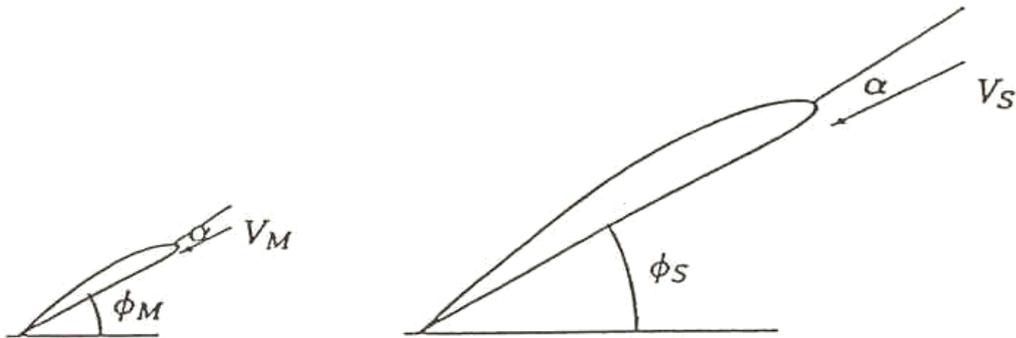


그림 3.3.16 Geometric similarity

모형과 실선사이의 닮은꼴로부터 배와 프로펠러의 축척비도 동일하다.

$$\lambda = \frac{L_S}{L_M} = \frac{D_S}{D_M}$$

(2) 운동학적 상사 (Kinematic similarity)

프로펠러 주위 유선의 상사. 동일한 무차원 반경에서의 받음각이 같아야 한다.

$$\alpha_M = \alpha_S$$

기하학적 상사조건식에서 운동학적 상사조건식을 빼면 교란되지 않은 유입유동의 유체

역학적 피치각(hydrodynamic pitch angle of undisturbed flow) β 의 값이 모형과 실선에서 동일하다는 조건을 얻는다.

$$\beta_M = \beta_S$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{V}{\pi n D}\right)_M = \tan^{-1}\left(\frac{V}{\pi n D}\right)_S$$

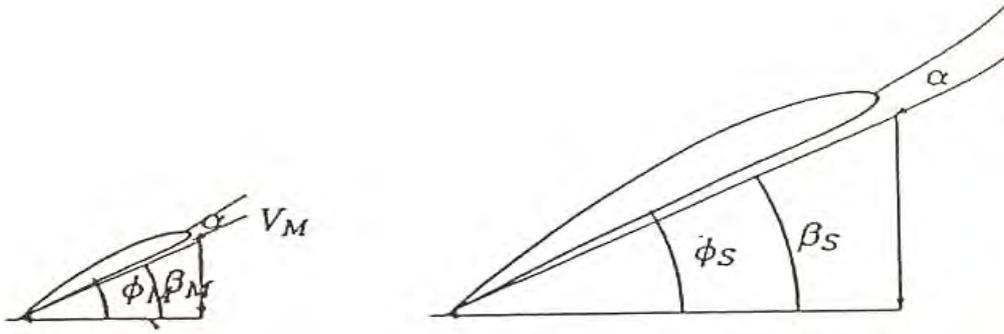


그림 3.3.17 Kinematic similarity

위의 식으로부터 다음과 같이 모형 - 실선사이에 전진계수가 같아야 한다는 조건을 얻는다.

$$\left(\frac{V}{nD}\right)_M = \left(\frac{V}{nD}\right)_S$$

$$\therefore \text{Kinematic similarity} \Leftrightarrow J_M = J_S$$

즉, 운동학적 상사의 의미가 전진계수의 상사와 동일한 의미로 쓰일 수 있음을 알 수 있다.

(3) 역학적 상사 (Dynamic similarity)

프로펠러에 작용하는 힘 요소의 상사. Froude수를 정의할 때, 속도와 길이의 특성치로서 선속과 배의 길이를 이용하여 정의하고 있지만, 날개 끝의 회전속도 πnD 와 프로펠러 직경 D 를 사용하여 Froude 수를 $F_n = \pi nD / \sqrt{gD}$ 로 정의 할 수도 있다. 회전수 Froude수의 상사로부터

$$(F_n)_M = (F_n)_S \rightarrow \frac{\pi n_M D_M}{\sqrt{g D_M}} = \frac{\pi n_S D_S}{\sqrt{g D_S}}$$

$$n_M = n_S \sqrt{\frac{D_S}{D_M}} = n_S \sqrt{\lambda}$$

즉, Froude scaling에 의하면, 모형 프로펠러의 회전수는 실선 프로펠러보다 $\sqrt{\lambda}$ 배 만큼 빨리 회전시켜야 한다.

또한, 선속을 기반으로 하는 Froude수의 정의로부터

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_S}{\sqrt{gL_S}} \rightarrow V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}}$$

즉, 선속 기반 Froude scaling에 의하면, 모형선은 실선보다 $1/\sqrt{\lambda}$ 만큼 천천히 예인되어야 한다. 위의 식들로부터

$$\frac{V_M}{n_M D_M} = \frac{V}{\sqrt{\lambda}} \frac{1}{n_S \sqrt{\lambda}} \frac{1}{D_S/\lambda} = \frac{V_S}{n_S D_S}$$

$$\therefore \text{Froude scaling} \Rightarrow J_M = J_S$$

운동학적 상사와 역학적 상사로부터 각각 동일한 식을 유도할 수 있었다. 하지만 이 수식에 포함된 의미 차이만큼 이 식들은 차이가 있다. 즉, 전자는 운동학적 상사법칙이 전진계수의 등치성과 동일한 의미를 갖지만, 후자의 경우는 역학적 상사법칙인 Froude scaling이 전진계수 등치성의 필요조건이지 충분조건은 아니기 때문이다. 실제 프로펠러의 모형시험에서는 전진속도와 회전속도를 동일한 비만큼 증가시켜서 동일한 전진계수를 유지하면서도 Reynolds수를 높이도록 시험상태를 결정한다.

(4) 프로펠러 Reynolds수의 정의

$$R_n = \frac{l_{0.7R} V_R}{\nu}$$

여기서 $l_{0.7R}$ 은 대표단면인 반경 $0.7R$ 에서의 프로펠러 코드길이, V_R 는 이때 유입되는 프로펠러의 상대유입속도이다.

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi n D)^2}$$

$$\frac{V_R}{nD} = \sqrt{J_A^2 + (0.7\pi)^2} \equiv a$$

이 식으로부터 Reynolds수는 $R_n \frac{l_{0.7R} V_R}{\nu} = a l_{0.7R} \frac{nD}{\nu}$ 로 표현될 수 있다. 만일 전진계수 등치성 $J_{AM} = J_{AS}$ 에 의해 모형 - 실선 사이에 위 식의 a 의 값이 같고, $v_M = v_S$ 라면, Reynolds scaling은

$$l_{0.7RM} n_M D_M = l_{0.7RS} n_S D_S \rightarrow n_M = n_S \lambda^2$$

즉, h형 프로펠러의 회전수는 실선 프로펠러의 회전수보다 λ^2 배의 빠른 속도로 회전시켜야 한다. 그러나 선박의 저항시험과 마찬가지로 Froude수와 Reynolds수를 동시에 만족시킬 수는 없다. Froude scaling에 의하면 모형 프로펠러는 실선보다 $\sqrt{\lambda}$ 배만큼 빠르게 회전하여야 하고, Reynolds scaling에 의하면 실선보다 λ^2 배만큼 빠르게 회전시켜야 하므로 모순이 되기 때문이다. 잘 알고 있는 사실이지만, 모형선 - 실선 사이의 Reynolds수의 등치성은 $n_S = 1, \lambda = 40$

인 대표적인 경우, $n_M = 1600rps = 96000rpm$ 으로 회전시켜야 하는데 이는 물리적으로 불가능하다. 실제 프로펠러 동력계의 최고 회전수는 대략 2,400rpm정도이다.

- (5) 모형선 - 실선 프로펠러 사이에 Reynolds수를 같게 한다면, 점성에 의해 지배받는 프로펠러 날개의 경계층의 두께 - 코드비가 동일하게 된다. 즉,

$$\frac{\delta_M}{l_M} = \frac{\delta_S}{l_S}$$

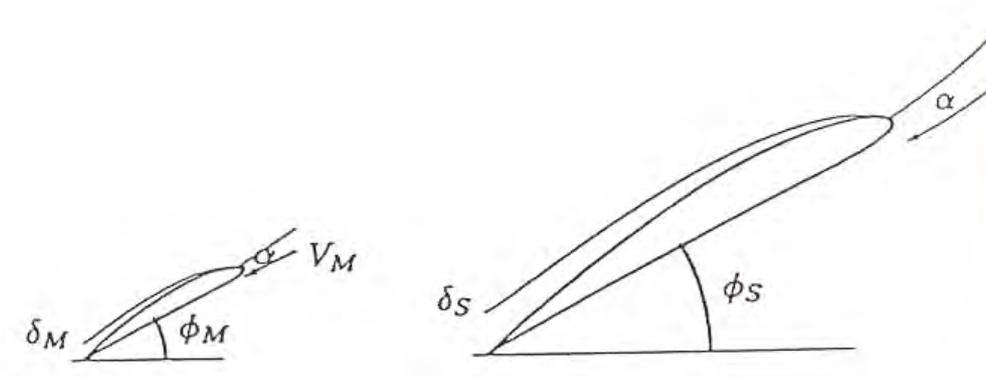


그림 3.3.18 Dynamic similarity

- (6) 프로펠러의 모형시험에서 기하학적 상사법칙, 운동학적 상사법칙(즉, 전진계수 등치성 $J_M = J_S$)을 반드시 만족시켜야 한다. 축심의 물수깊이가 직경보다 큰 경우는 수면과의 영향을 무시할 수 있으므로, Fn scaling은 무시할 수 있다. Reynolds scaling도 만족시킬 수 없으나, 가능하면 날개 표면에서의 층류를 피할 수 있도록 $Rn > 10^6$ 이상이 되도록 실험의 전진속도와 회전수를 결정한다.

- (7) POW 모형시험시의 계측량

Symbol	Meaning	Units
T	Thrust	N
Q	Torque	N·m
n	Rotational speed	s ⁻¹
VA	Speed of advance	m/s

(8) POW실험 결과 해석을 위한 무차원 물리량

Symbol	Definition
Thrust coefficient	$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$
Torque coefficient	$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$
Advance coefficient	$J_A = \frac{V_A}{nD}$
Open-water efficiency	$\eta_0 = \frac{J_A K_T}{2\pi K_Q}$

여기서 프로펠러의 단독효율은 추진동력과 전달동력의 비로부터 위의 무차원화된 계수의 함수로 유도되었다.

(가) 추진 하중 계수 (Thrust loading coefficient)

$$C_{Th} = \frac{T}{0.5\rho V_A^2 \frac{4}{\pi} D^2} = \frac{8}{\pi} \frac{K_T}{J_A^2}$$

대표적인 프로펠러 성능 곡선과 이 프로펠러의 추력하중계수를 그림 3.3.19에 보인다. C_{Th} 곡선은 추진성능 해석시에 많이 쓰이는 K_T/J^2 곡선과 동일함을 알 수 있다.

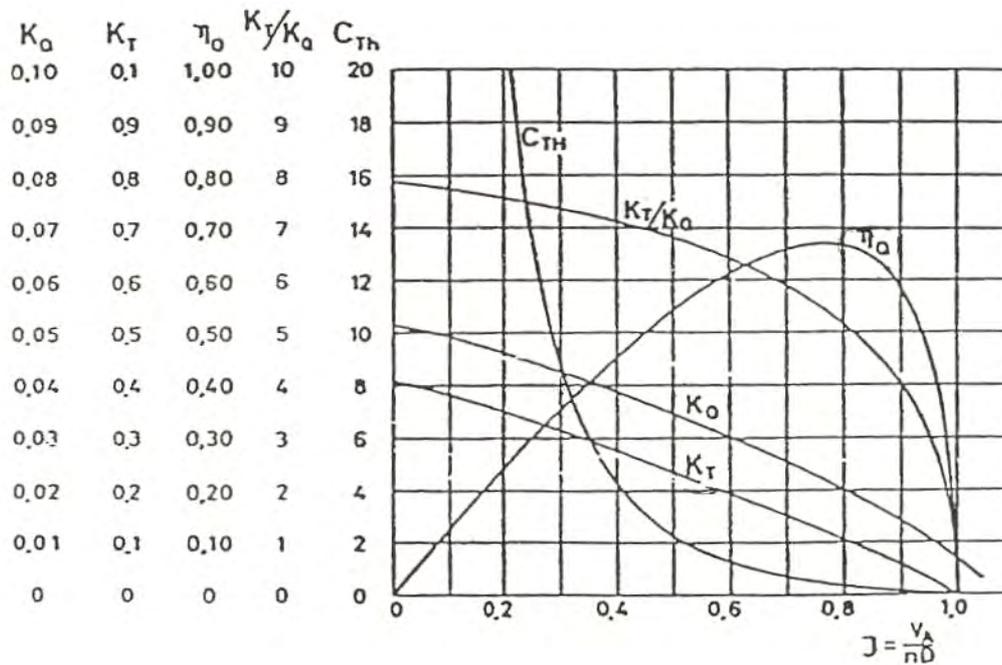


그림 3.3.19 전진계수 J의 함수로 표현된 프로펠러 계수

나. 계열 프로펠러 단독성능 시험 준비

52톤 어선을 대상으로 개발되어진 KF 계열 프로펠러의 단독 성능 검증을 위해 $P/D=0.55$, $AE/AO=0.50$ 인 기준 프로펠러대비 피치비(0.4~0.7)와 확장면적비(0.35~0.65)를 변화시킨 5개의 프로펠러를 제작하여 2012년 2월 9일에 한국해양연구원 예인수조에서 모형시험을 수행하였다.

표 3.3.6 Characteristics of propeller for KF series

A_E/A_O (P/D) _{mean}	35	50	65
40	KF3-35-40	KF3-50-40	KF3-65-40
55	KF3-35-55	KF3-50-55	KF3-65-55
70	KF3-35-70	KF3-50-70	KF3-65-70
85	KF3-35-85	KF3-50-85	KF3-65-85



그림 3.3.20 5case model propellers for POW Test

아래 사진은 한국해양연구원(KORDI)에서 보유하고 있는 프로펠러 단독성능 시험을 위한 POW Jig 및 Dynamometer(H29)와 5개의 모형프로펠러의 단독성능 시험을 수행한 예인수조 (Towing Tank, 제원:L*W*D > 200*16*7)이다. (그림 3.3.21~22)

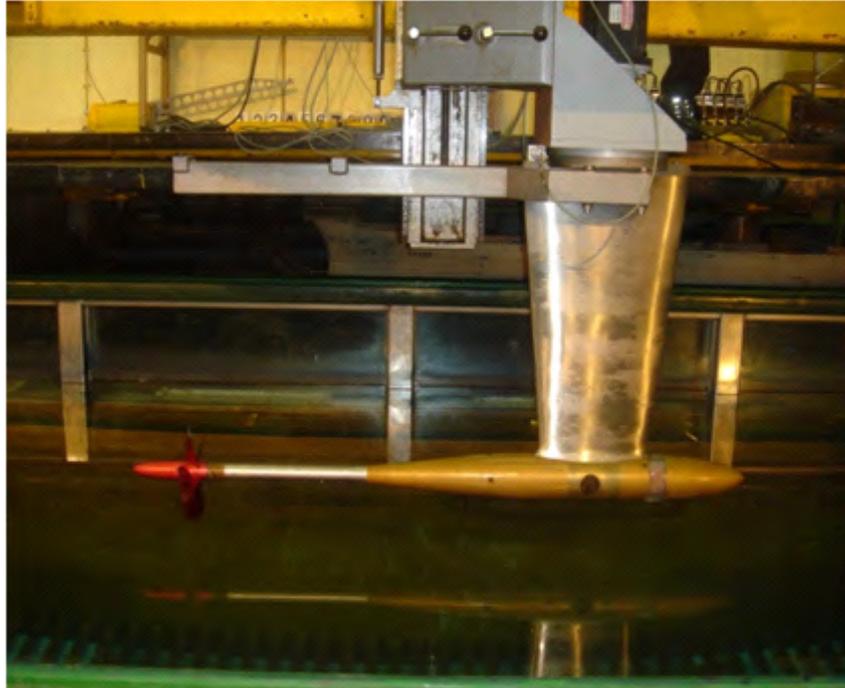


그림 3.3.21 POW Jig & Dynamometer(H29) in KORDI



그림 3.3.22 Towing Tank (L*W*D > 200*16*7) in KORDI

계열 프로펠러의 단독성능 시험을 위해 피치비와 확장면적비를 변화시킨 5개 모형 프로펠러를 아래와 같이 제작하였다.



그림 3.3.23 5case model propellers for POW Test



그림 3.3.24 KF-3-50-55(AE/AO=0.50, P/D=0.55) Model Propeller (Pressure Side)



그림 3.3.25 KF-3-50-40($AE/AO=0.50$, $P/D=0.40$) Model Propeller (Pressure Side)



그림 3.3.26 KF-3-35-55($AE/AO=0.35$, $P/D=0.55$) Model Propeller (Pressure Side)



그림 3.3.27 KF-3-50-70($AE/AO=0.50$, $P/D=0.70$) Model Propeller (Pressure Side)



그림 3.3.28 KF-3-65-55($AE/AO=0.65$, $P/D=0.55$) Model Propeller (Pressure Side)

다. 계열 프로펠러 단독성능 시험 결과

5개의 계열 프로펠러 단독성능 시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 모형 프로펠러 제원 및 단독성능 시험 결과

(가) KF3-50-55(AE/AO=0.50, P/D=0.55) Model Propeller

표 3.3.7 Prop. characteristics & P.O.W. results for KF3-50-55

PROP. CHARACTERISTICS		P.O.W. RESULTS				
Prop. NO.	KP987	TEST NO. : KP986a				
NAME	fish-01	TEST DATE : 12-02-09				
DIAM.(mm)	250	RPS : 18.5				
BLADE NO.	3	RnMEAN : 8.34E05				
λ	5.2	WATER TEMP. : 13.7 °C				
(P/D)ROOT	0.4738	J	KT	10KQ	η_0	Rn E05
(P/D)0.7R	0.5765	0.0000	0.2424	0.2093	0.0000	8.21
(P/D)TIP	0.4985	0.0500	0.2276	0.2001	0.0905	8.21
(P/D)MEAN	0.552	0.1000	0.2118	0.1906	0.1769	8.21
AE/AO	0.5067	0.1500	0.1954	0.1806	0.2583	8.23
RH/R	0.18	0.2000	0.1785	0.1701	0.3340	8.24
(C/D)0.7R	0.3807	0.2500	0.1613	0.1592	0.4031	8.26
(TO/D)0.7R(x103)	14.98	0.3000	0.1438	0.1477	0.4649	8.28
RAKETIP(°)	1.191	0.3500	0.1261	0.1356	0.5180	8.31
EFF.SKEW(°)	25	0.4000	0.1079	0.1226	0.5603	8.34
ROTATION	R.H.	0.4500	0.0892	0.1088	0.5872	8.38
SECTION	NACA66	0.5000	0.0697	0.0939	0.5907	8.42
MATERIAL	AL.	0.5500	0.0490	0.0777	0.5520	8.46
MANUFACTURE	KRISO	0.6000	0.0267	0.0601	0.4242	8.51
OTHERS:		0.6500	0.0024	0.0409	0.0607	8.56
		0.6547	0.0000	0.0390	0.0000	8.56

(나) KF3-50-40 (AE/AO=0.50, P/D=0.40) Model Propeller

표 3.3.8 Prop. characteristics & P.O.W. results for KF3-50-40

PROP. CHARACTERISTICS		P.O.W. RESULTS				
Prop. NO.	KP987	TEST NO. : KP987a				
NAME	fish-02	TEST DATE : 12-02-09				
DIAM.(mm)	250	RPS : 22.0				
BLADE NO.	3	RnMEAN : 9.85E05				
λ	5.2	WATER TEMP. : 13.7 °C				
(P/D)ROOT	0.3491	J	KT	10KQ	η_0	Rn E05
(P/D)0.7R	0.4248	0.0000	0.1671	0.1244	0.0000	9.76
(P/D)TIP	0.3673	0.0500	0.1542	0.1195	0.1027	9.76
(P/D)MEAN	0.4068	0.1000	0.1405	0.1136	0.1968	9.77
AE/AO	0.5067	0.1500	0.1261	0.1069	0.2816	9.78
RH/R	0.18	0.2000	0.1109	0.0994	0.3551	9.80
(C/D)0.7R	0.3807	0.2500	0.0949	0.0912	0.4140	9.82
(TO/D)0.7R(x103)	14.98	0.3000	0.0780	0.0824	0.4520	9.85
RAKETIP(°)	1.191	0.3500	0.0601	0.0728	0.4599	9.88
EFF.SKEW(°)	25	0.4000	0.0411	0.0625	0.4186	9.92
ROTATION	R.H.	0.4500	0.0208	0.0515	0.2893	9.96
SECTION	NACA66	0.4978	0.0000	0.0402	0.0000	10.01
MATERIAL	AL.					
MANUFACTURE	KRISO					
OTHERS:						

(다) KF3-35-55 (AE/AO=0.35, P/D=0.55) Model Propeller

표 3.3.9 Prop. characteristics & P.O.W. results for KF3-35-55

PROP. CHARACTERISTICS		P.O.W. RESULTS				
Prop. NO.	KP988	TEST NO. : KP988a				
NAME	fish-03	TEST DATE : 12-02-09				
DIAM.(mm)	250	RPS : 20.0				
BLADE NO.	3	RnMEAN : 6.31E05				
λ	5.2	WATER TEMP. : 13.7 °C				
(P/D)ROOT	0.4738	J	KT	10KQ	η_0	Rn E05
(P/D)0.7R	0.5765	0.0000	0.2210	0.1778	0.0000	6.21
(P/D)TIP	0.4985	0.0500	0.2083	0.1716	0.0966	6.21
(P/D)MEAN	0.552	0.1000	0.1948	0.1642	0.1888	6.22
AE/AO	0.3547	0.1500	0.1807	0.1560	0.2765	6.22
RH/R	0.18	0.2000	0.1660	0.1472	0.3590	6.24
(C/D)0.7R	0.2665	0.2500	0.1509	0.1381	0.4348	6.25
(TO/D)0.7R(x103)	14.98	0.3000	0.1354	0.1285	0.5031	6.27
RAKETIP(°)	1.191	0.3500	0.1194	0.1186	0.5608	6.29
EFF.SKEW(°)	25	0.4000	0.1030	0.1080	0.6071	6.31
ROTATION	R.H.	0.4500	0.0858	0.0965	0.6368	6.34
SECTION	NACA66	0.5000	0.0678	0.0836	0.6454	6.37
MATERIAL	AL.	0.5500	0.0487	0.0690	0.6178	6.40
MANUFACTURE	KRISO	0.6000	0.0282	0.0518	0.5199	6.44
OTHERS:		0.6500	0.0058	0.0315	0.1905	6.48
		0.6623	0.0000	0.0259	0.0000	6.49

(라) KF3-50-70 (AE/AO=0.50, P/D=0.70) Model Propeller

표 3.3.10 Prop. characteristics & P.O.W. results for KF3-50-70

PROP. CHARACTERISTICS		P.O.W. RESULTS				
Prop. NO.	KP989	TEST NO. : KP989a				
NAME	fish-04	TEST DATE : 12-02-09				
DIAM.(mm)	250	RPS : 16.0				
BLADE NO.	3	RnMEAN : 7.27E05				
λ	5.2	WATER TEMP. : 13.7 °C				
(P/D)ROOT	0.603	J	KT	10KQ	η_0	Rn E05
(P/D)0.7R	0.7337	0.0000	0.3216	0.3244	0.0000	7.10
(P/D)TIP	0.6344	0.0500	0.3044	0.3102	0.0781	7.10
(P/D)MEAN	0.7026	0.1000	0.2864	0.2957	0.1541	7.10
AE/AO	0.5067	0.1500	0.2680	0.2810	0.2277	7.11
RH/R	0.18	0.2000	0.2494	0.2662	0.2982	7.13
(C/D)0.7R	0.3807	0.2500	0.2308	0.2514	0.3653	7.14
(TO/D)0.7R(x103)	14.98	0.3000	0.2122	0.2365	0.4284	7.16
RAKETIP(°)	1.191	0.3500	0.1937	0.2215	0.4871	7.19
EFF.SKEW(°)	25	0.4000	0.1752	0.2064	0.5404	7.21
ROTATION	R.H.	0.4500	0.1567	0.1908	0.5882	7.24
SECTION	NACA66	0.5000	0.1381	0.1747	0.6291	7.28
MATERIAL	AL.	0.5500	0.1191	0.1577	0.6611	7.32
MANUFACTURE	KRISO	0.6000	0.0994	0.1396	0.6799	7.36
OTHERS:		0.6500	0.0788	0.1200	0.6793	7.40
		0.7000	0.0568	0.0984	0.6431	7.45
		0.7500	0.0330	0.0744	0.5294	7.50
		0.8000	0.0069	0.0475	0.1850	7.55
		0.8125	0.0000	0.0403	0.0000	7.57

(마) KF3-65-55 (AE/AO=0.65, P/D=0.55) Model Propeller

표 3.3.11 Prop. characteristics & P.O.W. results for KF3-65-55

PROP. CHARACTERISTICS		P.O.W. RESULTS				
Prop. NO.	KP990	TEST NO. : KP990a				
NAME	fish-05	TEST DATE : 12-02-09				
DIAM.(mm)	250	RPS : 17.5				
BLADE NO.	3	RnMEAN : 1.02 E06				
λ	5.2	WATER TEMP. : 13.7 °C				
(P/D)ROOT	0.4738	J	KT	10KQ	η_0	Rn E06
(P/D)0.7R	0.5765	0.0000	0.2483	0.2200	0.0000	1.00
(P/D)TIP	0.4985	0.0500	0.2334	0.2113	0.0879	1.00
(P/D)MEAN	0.552	0.1000	0.2170	0.2017	0.1712	1.00
AE/AO	0.6528	0.1500	0.1997	0.1912	0.2493	1.00
RH/R	0.18	0.2000	0.1817	0.1800	0.3213	1.04
(C/D)0.7R	0.4904	0.2500	0.1635	0.1683	0.3865	1.01
(TO/D)0.7R(x103)	14.98	0.3000	0.1449	0.1560	0.4435	1.01
RAKETIP(°)	1.191	0.3500	0.1263	0.1432	0.4913	1.01
EFF.SKEW(°)	25	0.4000	0.1073	0.1298	0.5263	1.02
ROTATION	R.H.	0.4500	0.0879	0.1157	0.5441	1.02
SECTION	NACA66	0.5000	0.0677	0.1008	0.5345	1.03
MATERIAL	AL.	0.5500	0.0465	0.0849	0.4794	1.03
MANUFACTURE	KRISO	0.6000	0.0235	0.0678	0.3310	1.04
OTHERS:		0.6469	0.0000	0.0504	0.0000	1.04

(2) 모형 프로펠러 단독 성능 곡선 (P.O.W CHART)

(가) KF3-50-55(AE/AO=0.50, P/D=0.55) Model Propeller

표 3.3.12 Performance of KF3-50-55

J	Kt	10Kq	η_o
0.00	0.2424	0.2093	0.0000
0.05	0.2276	0.2001	0.0905
0.10	0.2118	0.1906	0.1769
0.15	0.1954	0.1806	0.2583
0.20	0.1785	0.1701	0.3340
0.25	0.1613	0.1592	0.4031
0.30	0.1438	0.1477	0.4649
0.35	0.1261	0.1356	0.5180
0.40	0.1079	0.1226	0.5603
0.45	0.0892	0.1088	0.5872
0.50	0.0697	0.0939	0.5907
0.55	0.0490	0.0777	0.5520
0.60	0.0267	0.0601	0.4242
0.65	0.0024	0.0409	0.0607

KF3-50-55

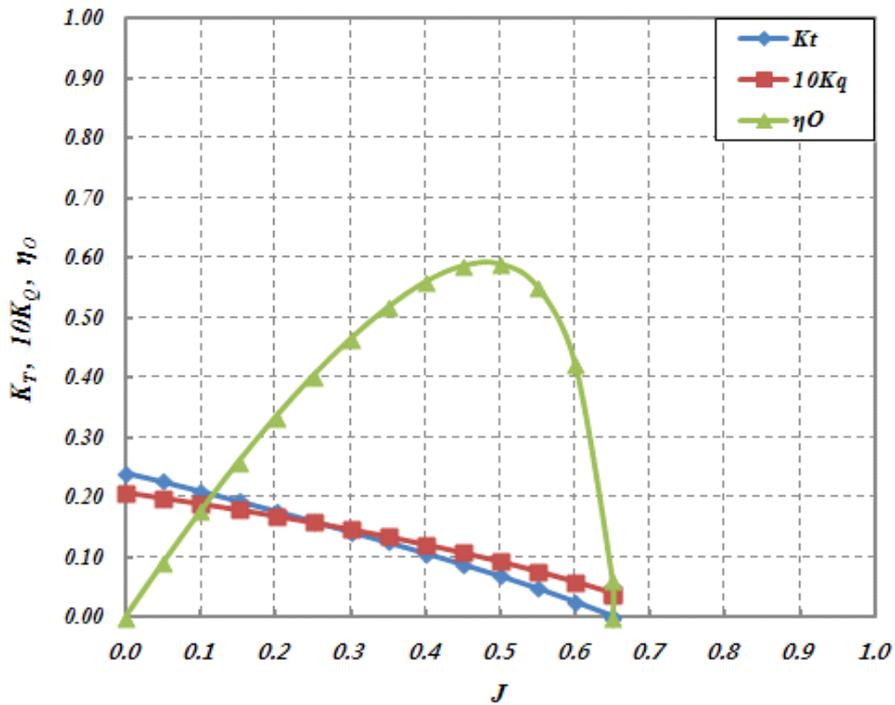


그림 3.3.29 Performance of KF3-50-55

(나) KF3-50-40 (AE/AO=0.50, P/D=0.40) Model Propeller

표 3.3.13 Performance of KF3-50-40

J	K_t	$10K_q$	η_O
0.00	0.1671	0.1244	0.0000
0.05	0.1542	0.1195	0.1027
0.10	0.1405	0.1136	0.1968
0.15	0.1261	0.1069	0.2816
0.20	0.1109	0.0994	0.3551
0.25	0.0949	0.0912	0.4140
0.30	0.0780	0.0824	0.4520
0.35	0.0601	0.0728	0.4599
0.40	0.0411	0.0625	0.4186
0.45	0.0208	0.0515	0.2893
0.50	0.0000	0.0402	0.0000

KF3-50-40

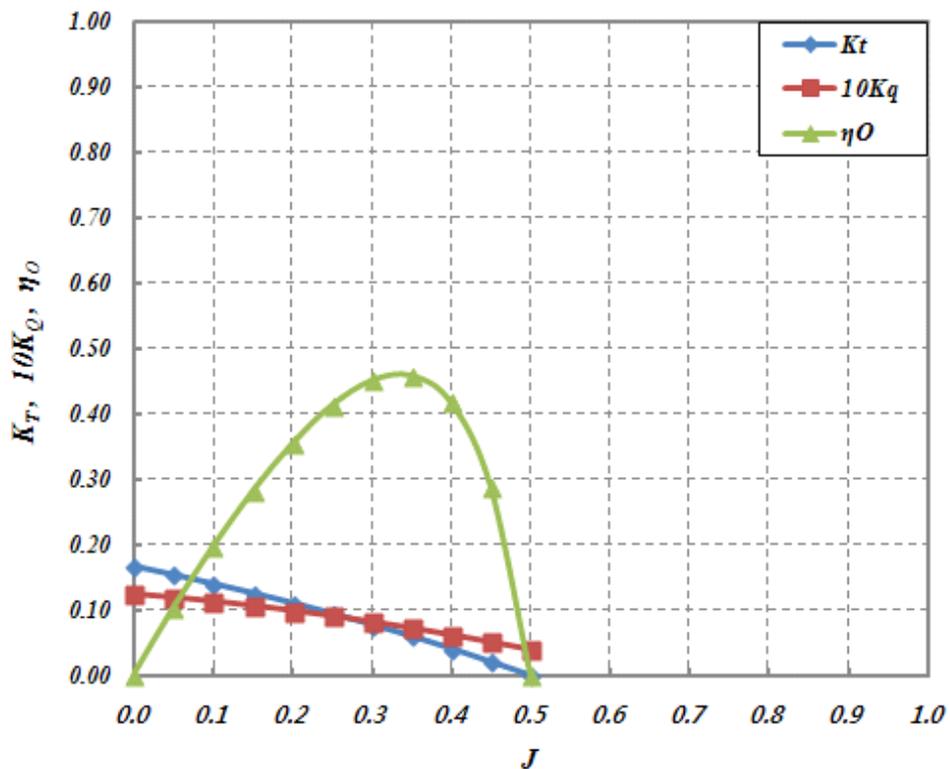


그림 3.3.30 Performance of KF3-50-40

(다) KF3-35-55 (AE/AO=0.35, P/D=0.55) Model Propeller

표 3.3.14 Performance of KF3-35-55

J	K _t	10K _q	η _o
0.00	0.2210	0.1778	0.0000
0.05	0.2083	0.1716	0.0966
0.10	0.1948	0.1642	0.1888
0.15	0.1807	0.1560	0.2765
0.20	0.1660	0.1472	0.3590
0.25	0.1509	0.1381	0.4348
0.30	0.1354	0.1285	0.5031
0.35	0.1194	0.1186	0.5608
0.40	0.1030	0.1080	0.6071
0.45	0.0858	0.0965	0.6368
0.50	0.0678	0.0836	0.6454
0.55	0.0487	0.0690	0.6178
0.60	0.0282	0.0518	0.5199
0.65	0.0058	0.0315	0.1905
0.66	0.0000	0.0259	0.0000

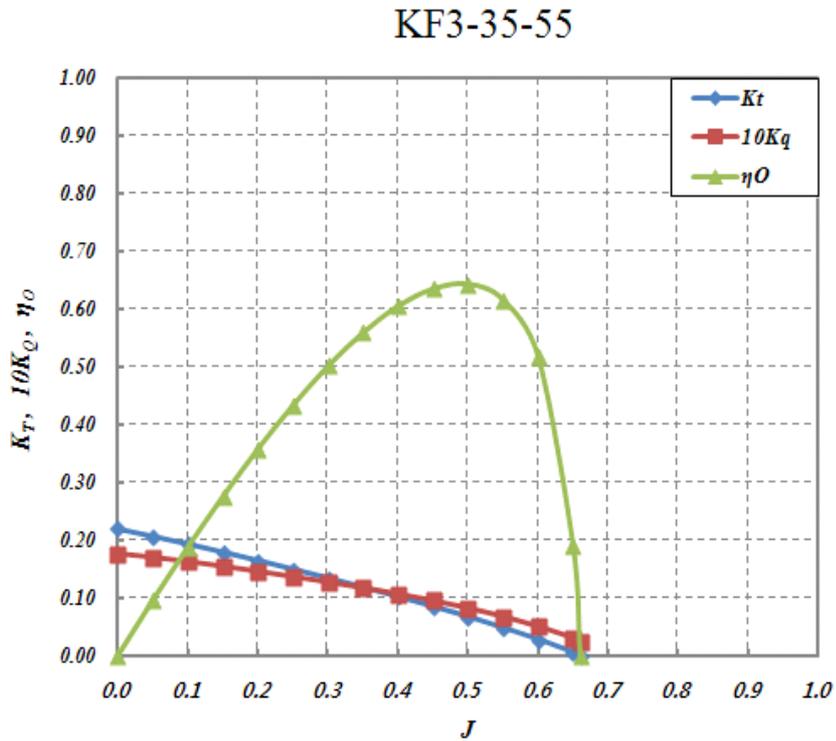


그림 3.3.31 Performance of KF3-35-55

(라) KF3-50-70 (AE/AO=0.50, P/D=0.70) Model Propeller

표 3.3.15 Performance of KF3-50-70

J	K_t	$10K_q$	η_o
0.00	0.3216	0.3244	0.0000
0.05	0.3044	0.3102	0.0781
0.10	0.2864	0.2957	0.1541
0.15	0.2680	0.2810	0.2277
0.20	0.2494	0.2662	0.2982
0.25	0.2308	0.2514	0.3653
0.30	0.2122	0.2365	0.4284
0.35	0.1937	0.2215	0.4871
0.40	0.1752	0.2064	0.5404
0.45	0.1567	0.1908	0.5882
0.50	0.1381	0.1747	0.6291
0.55	0.1191	0.1577	0.6611
0.60	0.0994	0.1396	0.6799
0.65	0.0788	0.1200	0.6793
0.70	0.0568	0.0984	0.6431
0.75	0.0330	0.0744	0.5294
0.80	0.0069	0.0475	0.1850
0.81	0.0000	0.0403	0.0000

KF3-50-70

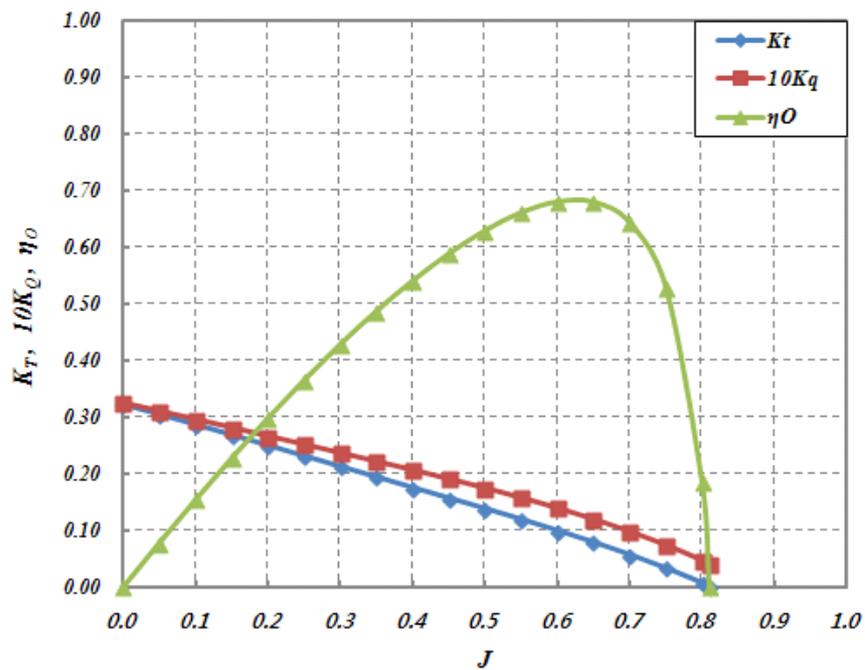


그림 3.3.32 Performance of KF3-50-70

(마) KF3-65-55 (AE/AO=0.65, P/D=0.55) Model Propeller

표 3.3.16 Performance of KF3-65-55

J	K _t	10K _q	η _o
0.00	0.2483	0.2200	0.0000
0.05	0.2334	0.2113	0.0879
0.10	0.2170	0.2017	0.1712
0.15	0.1997	0.1912	0.2493
0.20	0.1817	0.1800	0.3213
0.25	0.1635	0.1683	0.3865
0.30	0.1449	0.1560	0.4435
0.35	0.1263	0.1432	0.4913
0.40	0.1073	0.1298	0.5263
0.45	0.0879	0.1157	0.5441
0.50	0.0677	0.1008	0.5345
0.55	0.0465	0.0849	0.4794
0.60	0.0235	0.0678	0.3310
0.65	0.0000	0.0504	0.0000

KF3-65-55

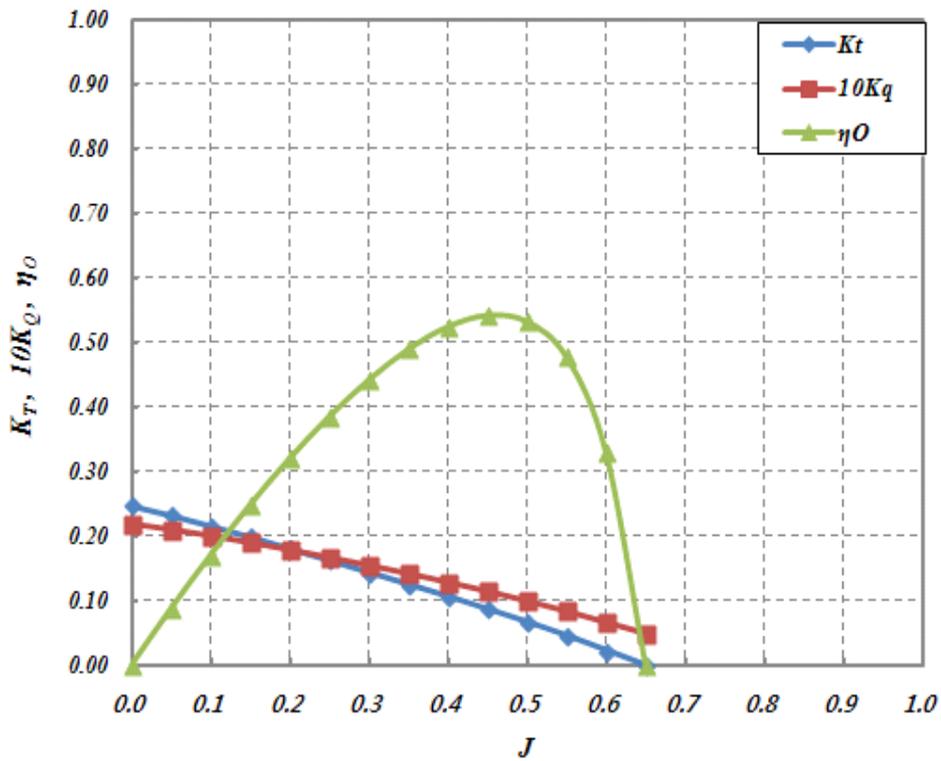


그림 3.3.33 Performance of KF3-65-55

(3) 모형 프로펠러 단독 성능 비교

(가) 피치비 변화에 따른 단독 성능 비교

같은 확장면적비 $AE/AO=0.50$ 에 피치비가 다른 $P/D=0.40$, $P/D=0.55$, $P/D=0.70$ 의 모형 프로펠러의 단독성능을 비교해 보았다. 피치비가 커짐에 따라 K_T , K_Q 및 단독효율 값이 커지는 것을 확인하였다.

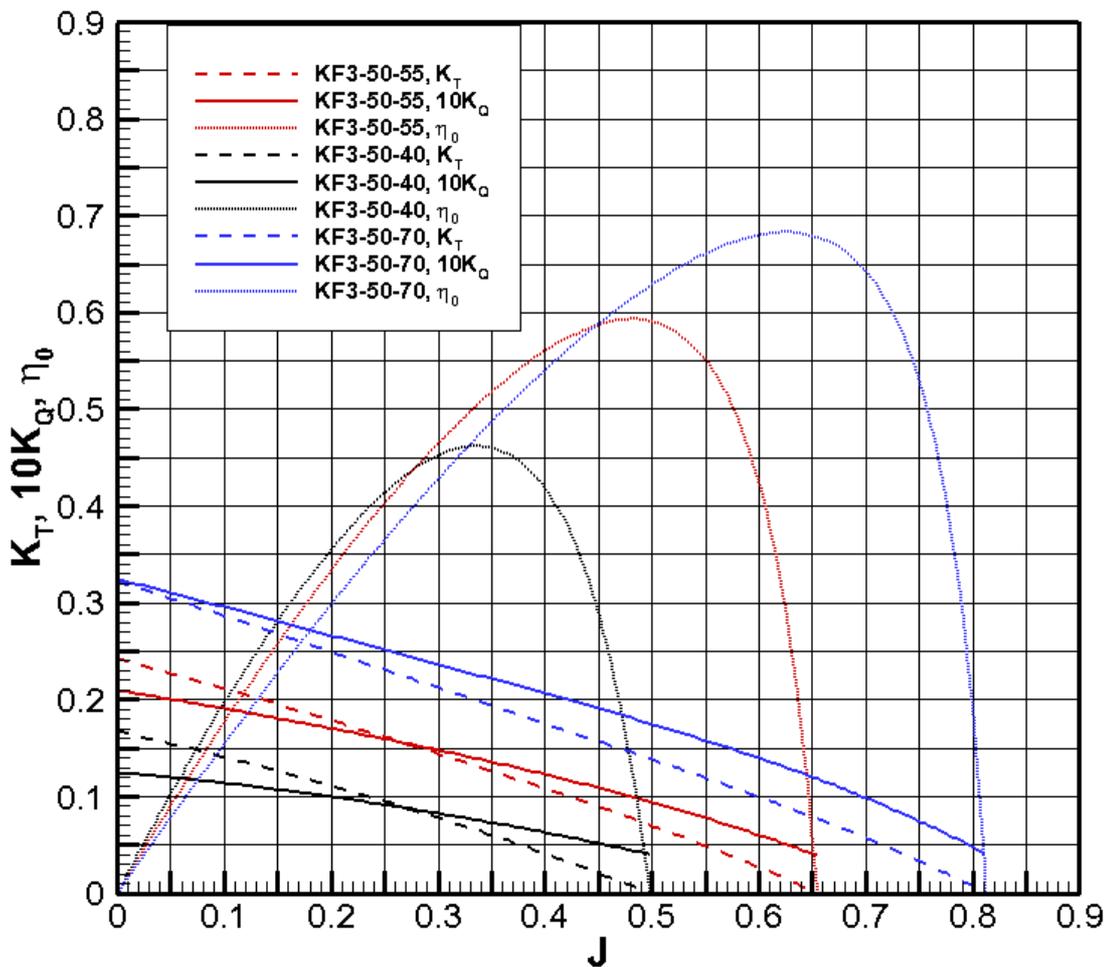


그림 3.3.34 Comparison of the change of pitch ratio

(나) 확장면적비 변화에 따른 단독 성능 비교

같은 피치비 $P/D=0.55$ 에 확장면적비가 다른 $AE/AO=0.35$, $AE/AO=0.50$, $AE/AO=0.65$ 의 모형 프로펠러의 단독성능을 비교해 보았다. 확장면적비가 커짐에 따라 K_T , K_Q 값은 커지고 및 단독효율 값은 작아지는 것을 확인하였다. 확장면적비 $AE/AO=0.35$ 의 경우 낮은 전진비 ($J=0.1\sim 0.3$)에서 값이 더 큰 폭으로 감소하는 것을 확인하였다.

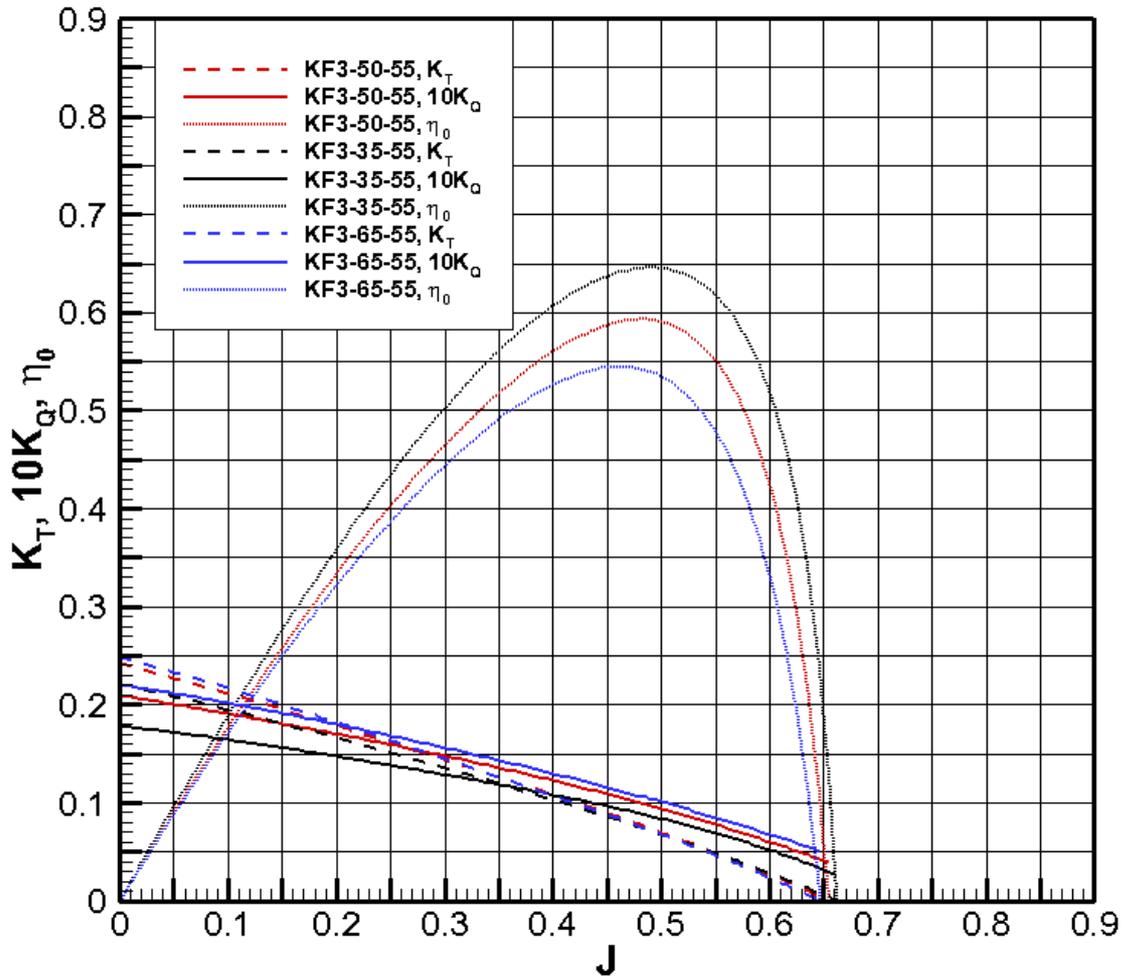


그림 3.3.35 Comparison of the change of expended area ratio

(다) 5개의 계열 프로펠러 단독 성능 곡선을 아래 그래프에 나타내어 보았다.

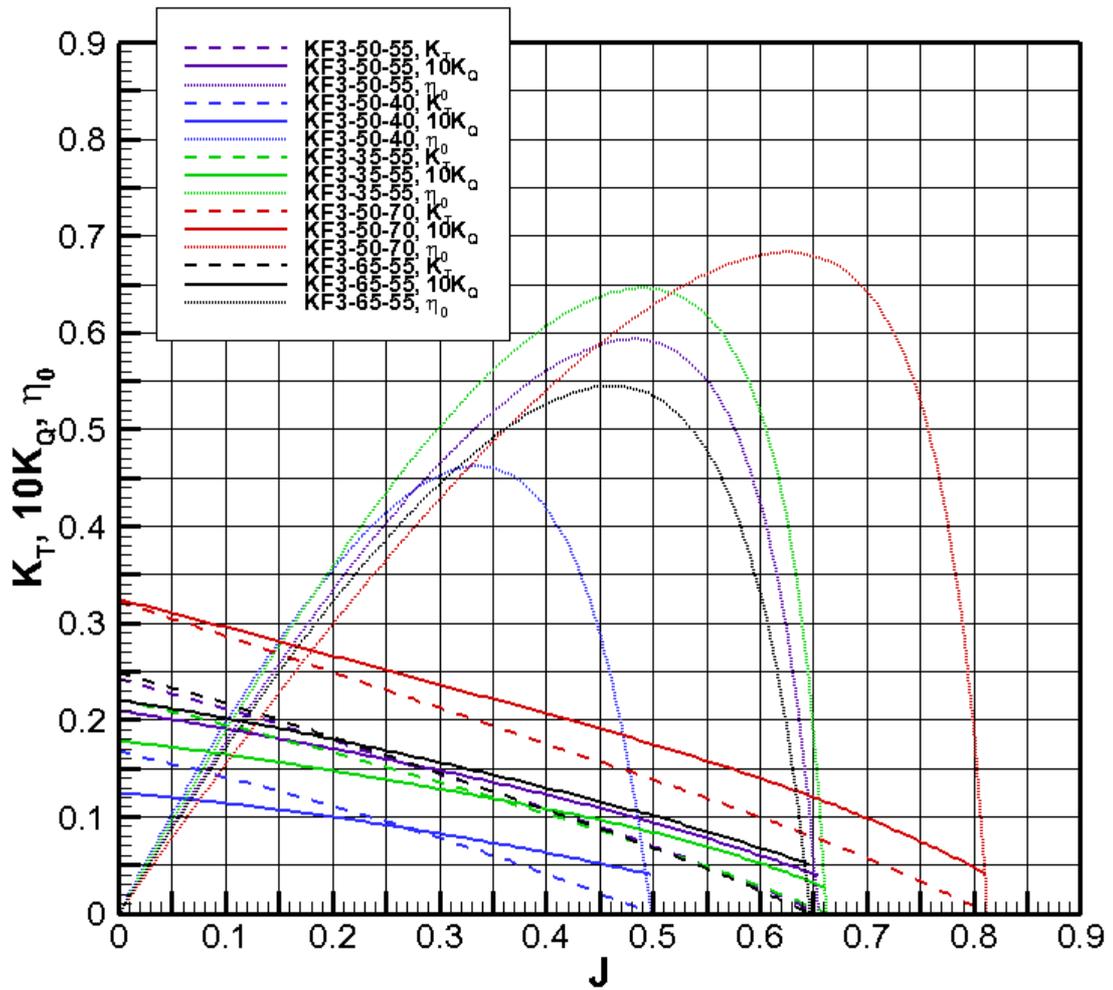


그림 3.3.36 Performance of the 5case model propeller

(4) 모형 프로펠러 단독 성능과 수치해석 결과 비교

(가) KF3-50-55(AE/AO=0.50, P/D=0.55) Model Propeller

모형시험과 수치해석의 추력계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.3$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었다.

표 3.3.17. Performance of KF3-50-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	K_T	K_T	K_T
0.00	0.2424	0.2208	9.80%
0.05	0.2276	0.2098	8.50%
0.10	0.2118	0.1979	7.03%
0.15	0.1954	0.1851	5.55%
0.20	0.1785	0.1715	4.11%
0.25	0.1613	0.1569	2.80%
0.30	0.1438	0.1415	1.64%
0.35	0.1261	0.1252	0.75%
0.40	0.1079	0.1080	-0.06%
0.45	0.0892	0.0899	-0.73%
0.50	0.0697	0.0709	-1.66%
0.55	0.0490	0.0510	-3.96%
0.60	0.0267	0.0303	-11.76%
0.65	0.0024	0.0086	-72.16%

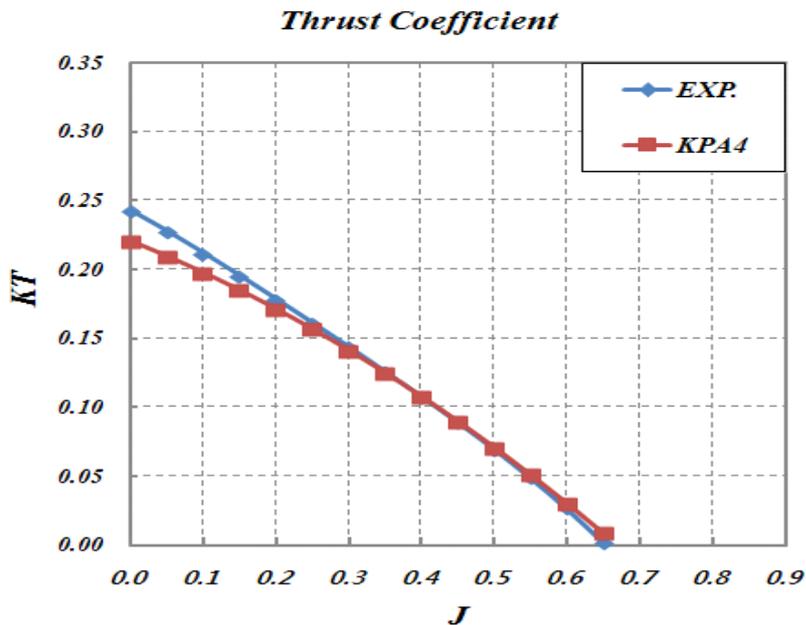


그림 3.3.37 Comparison of Thrust Coefficient

모형시험과 수치해석의 토크계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.3$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었다.

표 3.3.18. Performance of KF3-50-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	10K _Q	10K _Q	10K _Q
0.00	0.209	0.188	11.59%
0.05	0.200	0.183	9.57%
0.10	0.191	0.177	7.87%
0.15	0.181	0.170	6.39%
0.20	0.170	0.162	5.11%
0.25	0.159	0.153	4.12%
0.30	0.148	0.143	3.29%
0.35	0.136	0.132	2.66%
0.40	0.123	0.120	2.02%
0.45	0.109	0.107	1.42%
0.50	0.094	0.093	0.55%
0.55	0.078	0.078	-1.02%
0.60	0.060	0.063	-4.02%
0.65	0.041	0.046	-10.58%

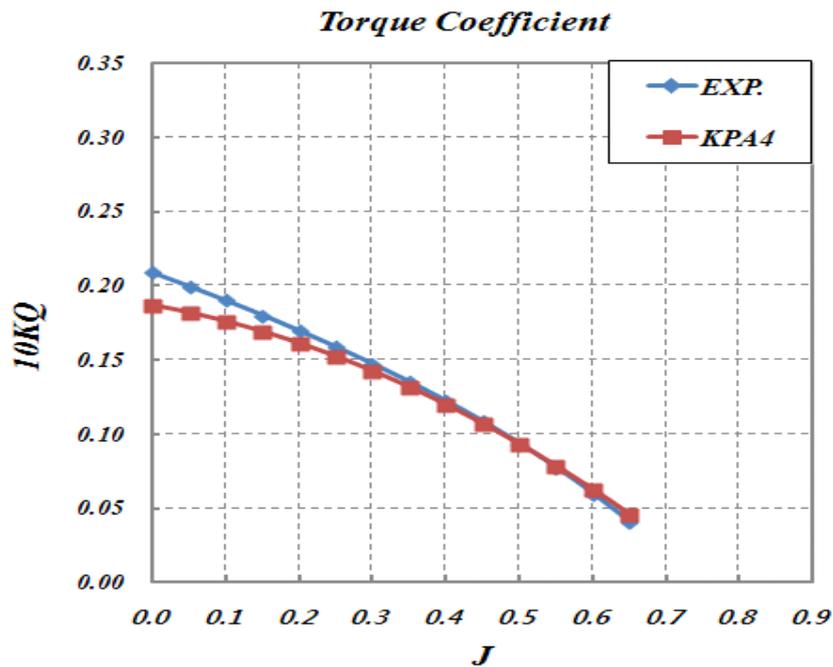


그림 3.3.38 Comparison of Torque Coefficient

모형시험과 수치해석의 단독효율을 비교해 보았다. 2% 내외의 오차 범위에서 거의 비슷한 결과를 얻었다.

표 3.3.19. Performance of KF3-50-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	η_0	η_0	η_0
0.00	0.000	0.000	0.00%
0.05	0.091	0.091	-0.98%
0.10	0.177	0.178	-0.78%
0.15	0.258	0.260	-0.79%
0.20	0.334	0.337	-0.96%
0.25	0.403	0.408	-1.27%
0.30	0.465	0.472	-1.60%
0.35	0.518	0.528	-1.86%
0.40	0.560	0.572	-2.03%
0.45	0.587	0.600	-2.12%
0.50	0.591	0.604	-2.20%
0.55	0.552	0.569	-2.97%
0.60	0.424	0.461	-8.07%
0.65	0.061	0.195	-68.86%

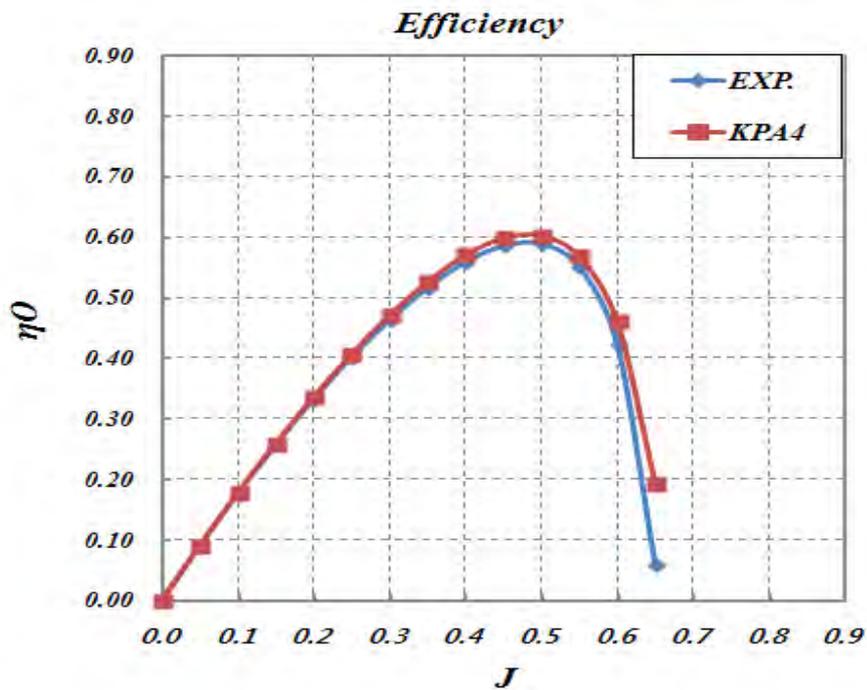


그림 3.3.39 Comparison of Efficiency

(나) KF3-50-40 (AE/AO=0.50, P/D=0.40) Model Propeller

모형시험과 수치해석의 추력계수를 비교해 보았다. 5% 내외의 오차 범위에서 거의 비슷한 결과를 얻었다.

표 3.3.20. Performance of KF3-50-40

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	K_T	K_T	K_T
0.00	0.1671	0.1590	5.09%
0.05	0.1542	0.1485	3.83%
0.10	0.1405	0.1370	2.54%
0.15	0.1261	0.1245	1.27%
0.20	0.1109	0.1110	-0.11%
0.25	0.0949	0.0965	-1.68%
0.30	0.0780	0.0810	-3.73%
0.35	0.0601	0.0645	-6.84%
0.40	0.0411	0.0470	-12.55%
0.45	0.0208	0.0285	-26.99%
0.50	0.0000	0.0090	-100.00%

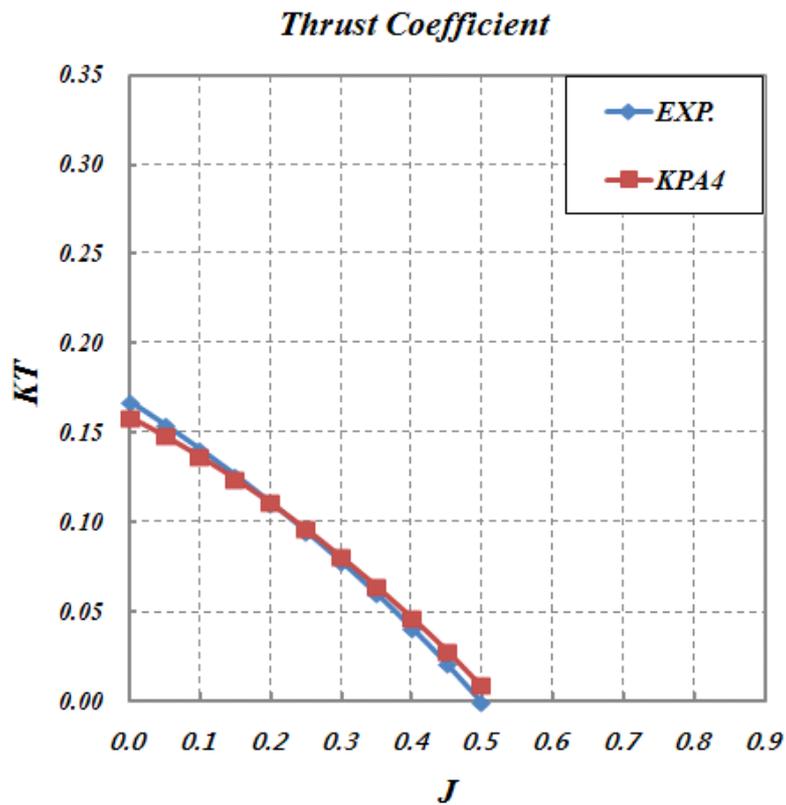


그림 3.3.40 Comparison of Thrust Coefficient

모형시험과 수치해석의 토크계수를 비교해 보았다. 6% 내외의 오차 범위에서 거의 비슷한 결과를 얻었다.

표 3.3.21. Performance of KF3-50-40

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	10K _Q	10K _Q	10K _Q
0.00	0.1244	0.1171	6.19%
0.05	0.1195	0.1130	5.77%
0.10	0.1136	0.1081	5.11%
0.15	0.1069	0.1024	4.36%
0.20	0.0994	0.0960	3.51%
0.25	0.0912	0.0889	2.60%
0.30	0.0824	0.0810	1.73%
0.35	0.0728	0.0724	0.60%
0.40	0.0625	0.0630	-0.76%
0.45	0.0515	0.0529	-2.55%
0.50	0.0402	0.0420	-4.22%

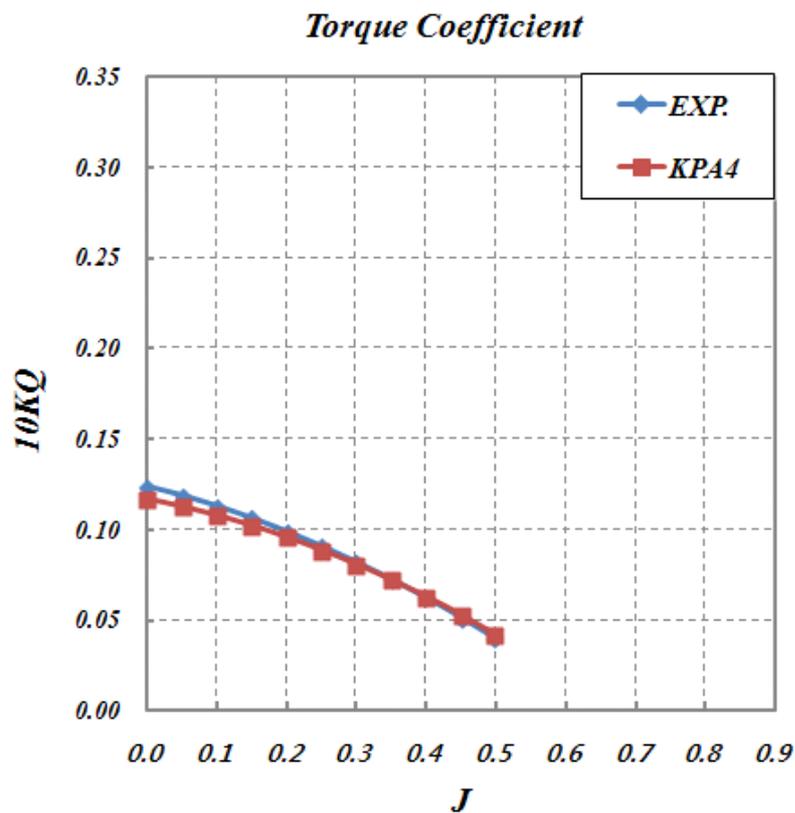


그림 3.3.41 Comparison of Torque Coefficient

모형시험과 수치해석의 단독효율을 비교해 보았다. $J=0.3\sim 0.4$ 구간에서 수치해석이 모형시험보다 6~7% 정도 높은 결과를 얻었다.

표 3.3.22. Performance of KF3-50-40

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	η_0	η_0	η_0
0.00	0.0000	0.0000	0.00%
0.05	0.1027	0.1046	-1.83%
0.10	0.1968	0.2018	-2.44%
0.15	0.2816	0.2902	-2.96%
0.20	0.3551	0.3680	-3.49%
0.25	0.4140	0.4320	-4.17%
0.30	0.4520	0.4776	-5.36%
0.35	0.4599	0.4966	-7.40%
0.40	0.4186	0.4751	-11.88%
0.45	0.2893	0.3861	-25.08%
0.50	0.0000	0.1701	-100.00%

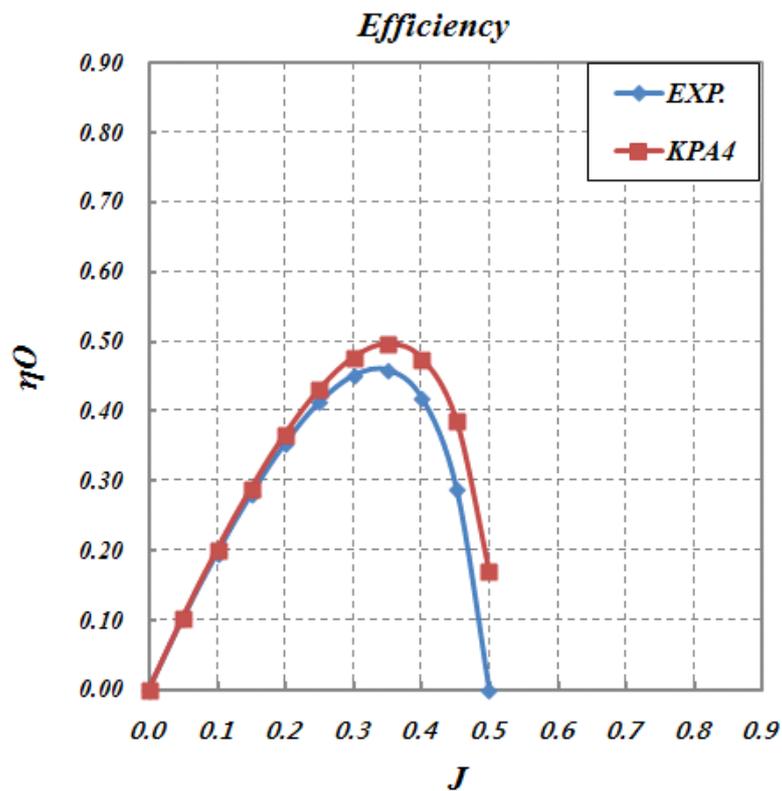


그림 3.3.42 Comparison of Efficiency

(다) KF3-35-55 (AE/AO=0.35, P/D=0.55) Model Propeller

모형시험과 수치해석의 추력계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.3$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었다.

표 3.3.23. Performance of KF3-35-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	K_T	K_T	K_T
0.00	0.2210	0.1789	23.53%
0.05	0.2083	0.1740	19.74%
0.10	0.1948	0.1671	16.55%
0.15	0.1807	0.1601	12.90%
0.20	0.1660	0.1515	9.59%
0.25	0.1509	0.1414	6.70%
0.30	0.1354	0.1299	4.24%
0.35	0.1194	0.1169	2.16%
0.40	0.1030	0.1024	0.60%
0.45	0.0858	0.0864	-0.73%
0.50	0.0678	0.0690	-1.71%
0.55	0.0487	0.0501	-2.70%
0.60	0.0282	0.0297	-4.89%
0.65	0.0058	0.0078	-25.26%

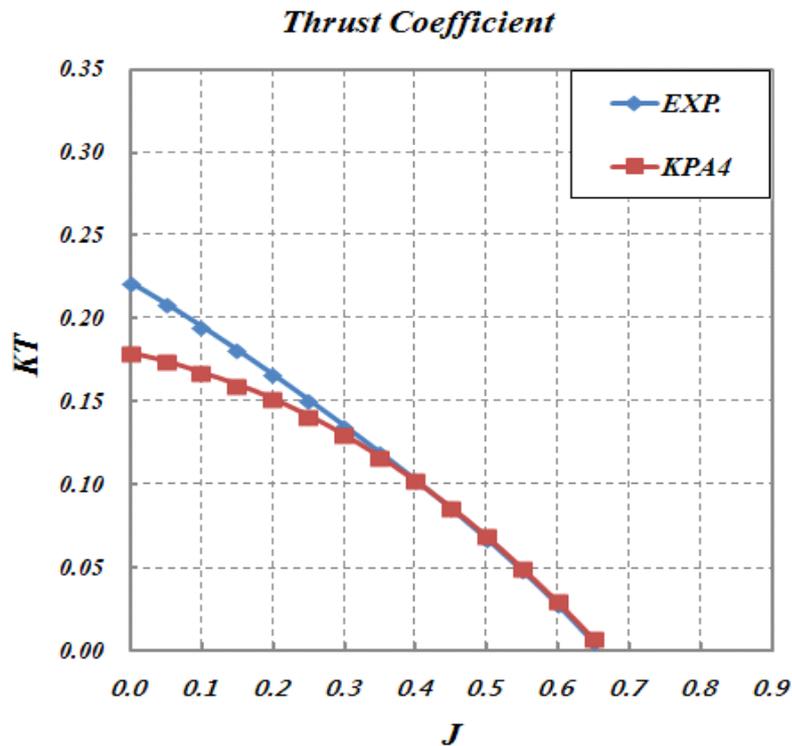


그림 3.3.43 Comparison of Thrust Coefficient

모형시험과 수치해석의 토크계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.2$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었다.

표 3.3.24. Performance of KF3-35-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	10K _Q	10K _Q	10K _Q
0.00	0.1778	0.1628	9.22%
0.05	0.1716	0.1598	7.41%
0.10	0.1642	0.1551	5.87%
0.15	0.1560	0.1504	3.73%
0.20	0.1472	0.1445	1.90%
0.25	0.1381	0.1373	0.59%
0.30	0.1285	0.1289	-0.31%
0.35	0.1186	0.1193	-0.56%
0.40	0.1080	0.1084	-0.37%
0.45	0.0965	0.0963	0.20%
0.50	0.0836	0.0830	0.74%
0.55	0.0690	0.0684	0.84%
0.60	0.0518	0.0526	-1.58%
0.65	0.0315	0.0356	-11.54%

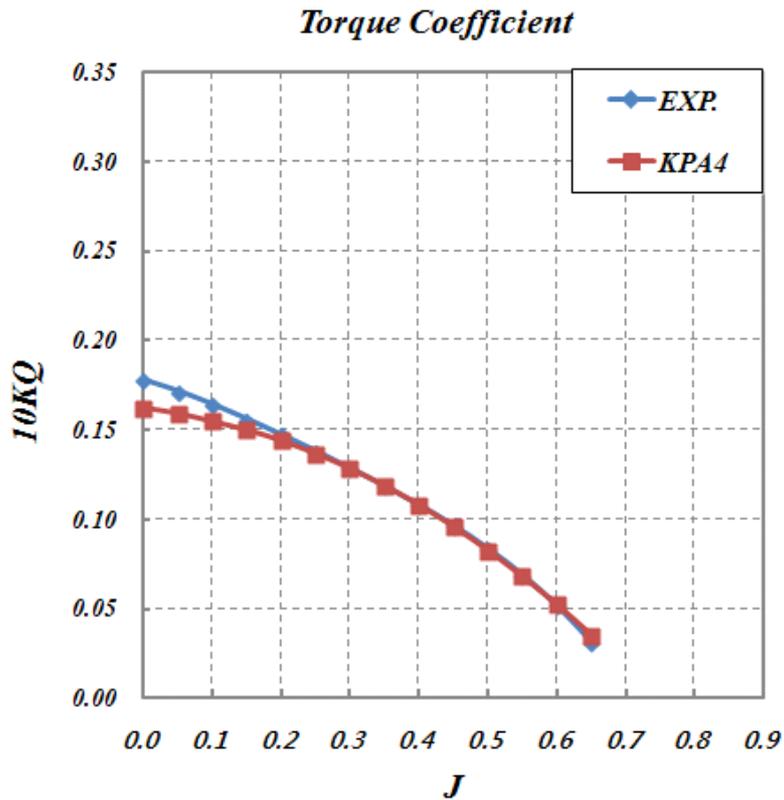


그림 3.3.44 Comparison of Torque Coefficient

모형시험과 수치해석의 단독효율을 비교해 보았다. $J=0.1\sim 0.2$ 구간에서 약 8% 정도 오차를 보였으며, $J=0.4\sim 0.5$ 구간에서 약 2% 정도의 비슷한 결과를 얻었다.

표 3.3.25. Performance of KF3-35-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	η_0	η_0	η_0
0.00	0.0000	0.0000	0.00%
0.05	0.0966	0.0867	11.48%
0.10	0.1888	0.1715	10.08%
0.15	0.2765	0.2541	8.84%
0.20	0.3590	0.3338	7.54%
0.25	0.4348	0.4098	6.08%
0.30	0.5031	0.4811	4.56%
0.35	0.5608	0.5459	2.73%
0.40	0.6071	0.6013	0.97%
0.45	0.6368	0.6427	-0.92%
0.50	0.6454	0.6615	-2.43%
0.55	0.6178	0.6403	-3.51%
0.60	0.5199	0.5380	-3.36%
0.65	0.1905	0.2254	-15.51%

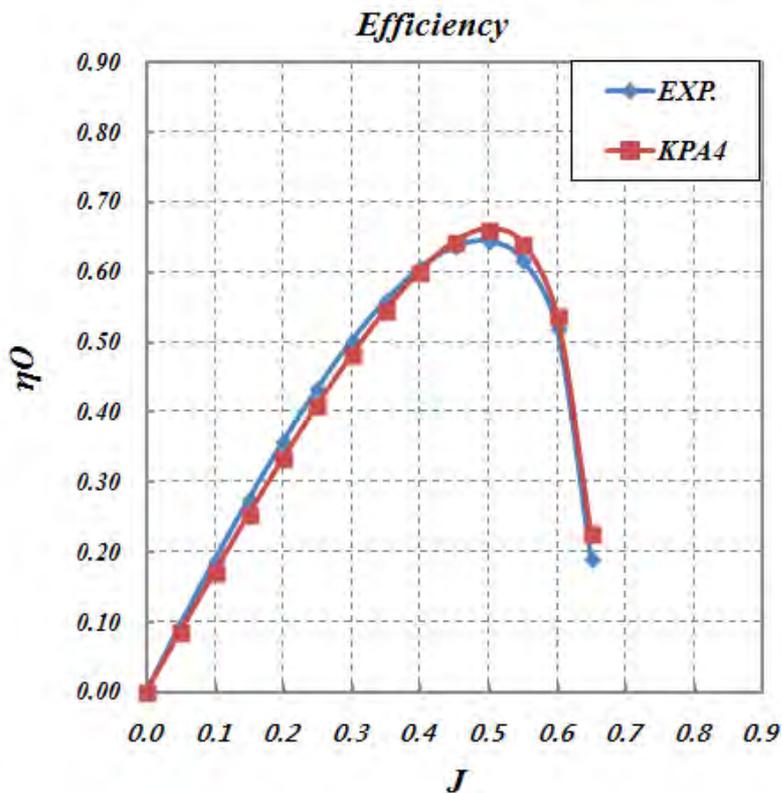


그림 3.3.45 Comparison of Efficiency

(라) KF3-50-70 (AE/AO=0.50, P/D=0.70) Model Propeller

모형시험과 수치해석의 추력계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.3$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었다.

표 3.3.26. Performance of KF3-50-70

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	KT	KT	KT
0.00	0.3216	0.2816	14.20%
0.05	0.3044	0.2697	12.85%
0.10	0.2864	0.2572	11.34%
0.15	0.2680	0.2441	9.80%
0.20	0.2494	0.2303	8.31%
0.25	0.2308	0.2158	6.94%
0.30	0.2122	0.2007	5.71%
0.35	0.1937	0.1850	4.71%
0.40	0.1752	0.1686	3.91%
0.45	0.1567	0.1516	3.38%
0.50	0.1381	0.1339	3.14%
0.55	0.1191	0.1156	3.06%
0.60	0.0994	0.0966	2.91%
0.65	0.0788	0.0770	2.38%
0.70	0.0568	0.0567	0.16%
0.75	0.0330	0.0358	-7.80%
0.80	0.0069	0.0142	-51.51%

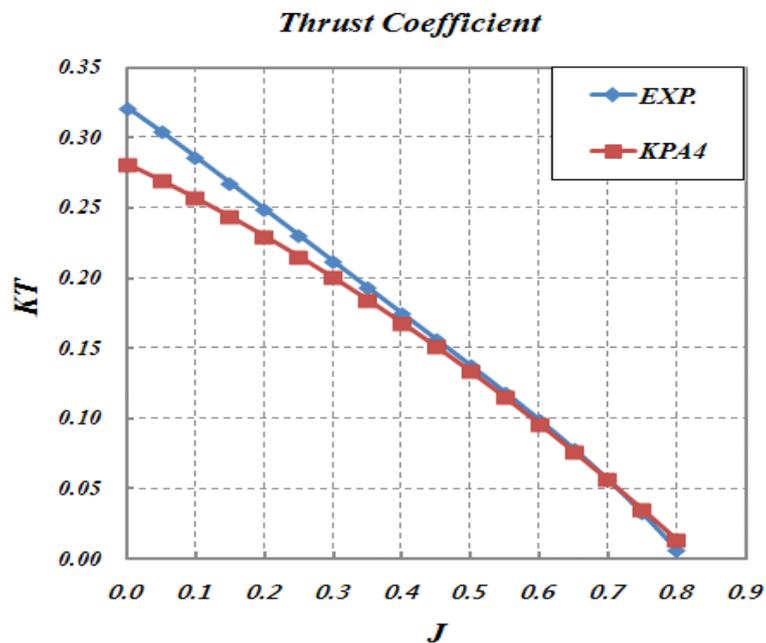


그림 3.3.46 Comparison of Thrust Coefficient

모형시험과 수치해석의 토크계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.3$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었다.

표 3.3.27. Performance of KF3-50-70

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	10KQ	10KQ	10KQ
0.00	0.3244	0.2792	16.17%
0.05	0.3102	0.2733	13.50%
0.10	0.2957	0.2663	11.04%
0.15	0.2810	0.2582	8.82%
0.20	0.2662	0.2491	6.88%
0.25	0.2514	0.2388	5.26%
0.30	0.2365	0.2275	3.94%
0.35	0.2215	0.2152	2.95%
0.40	0.2064	0.2017	2.33%
0.45	0.1908	0.1872	1.95%
0.50	0.1747	0.1716	1.84%
0.55	0.1577	0.1549	1.83%
0.60	0.1396	0.1371	1.82%
0.65	0.1200	0.1183	1.46%
0.70	0.0984	0.0984	0.04%
0.75	0.0744	0.0774	-3.85%
0.80	0.0475	0.0553	-14.13%

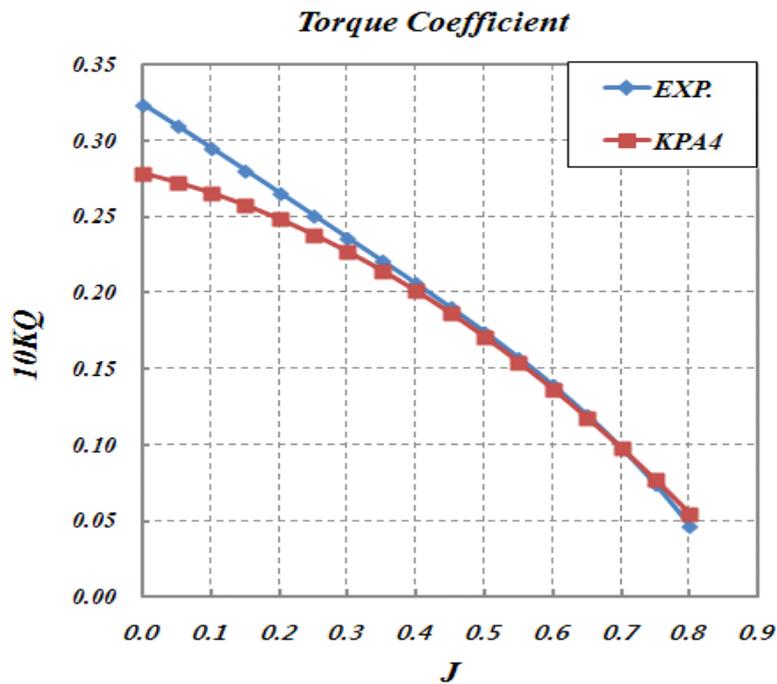


그림 3.3.47 Comparison of Torque Coefficient

모형시험과 수치해석의 단독효율을 비교해 보았다. 2% 내외의 오차 범위에서 거의 비슷한 결과를 얻었다.

표 3.3.28. Performance of KF3-50-70

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	η_0	η_0	η_0
0.00	0.0000	0.0000	0.00%
0.05	0.0781	0.0785	-0.57%
0.10	0.1541	0.1537	0.27%
0.15	0.2277	0.2257	0.90%
0.20	0.2982	0.2943	1.34%
0.25	0.3653	0.3596	1.59%
0.30	0.4284	0.4212	1.71%
0.35	0.4871	0.4790	1.71%
0.40	0.5404	0.5322	1.54%
0.45	0.5882	0.5800	1.41%
0.50	0.6291	0.6211	1.29%
0.55	0.6611	0.6532	1.21%
0.60	0.6799	0.6727	1.07%
0.65	0.6793	0.6732	0.90%
0.70	0.6431	0.6423	0.12%
0.75	0.5294	0.5521	-4.10%
0.80	0.1850	0.3275	-43.53%

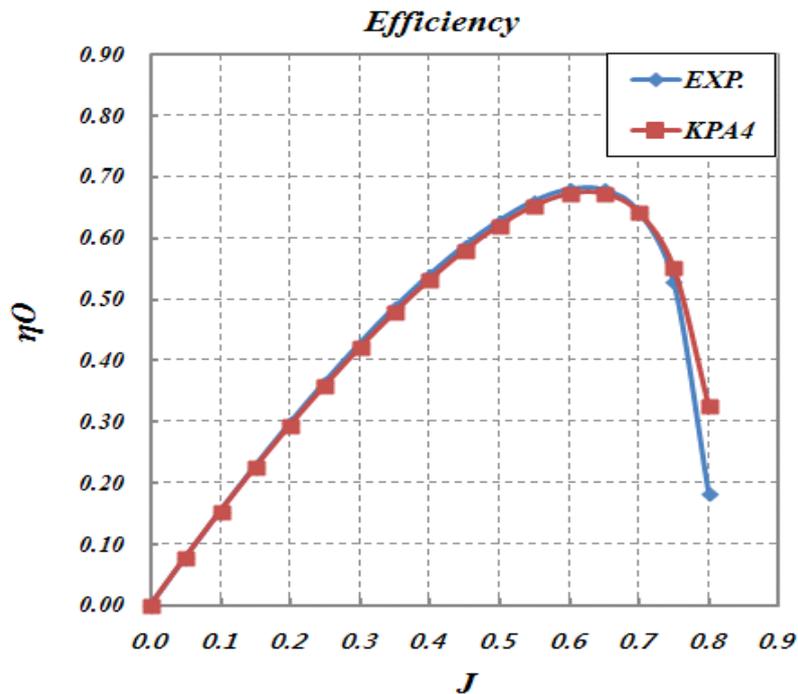


그림 3.3.48 Comparison of Efficiency

(마) KF3-65-55 (AE/AO=0.65, P/D=0.55) Model Propeller

모형시험과 수치해석의 추력계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.2$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었고, $J=0.5\sim 0.6$ 에서는 모형시험 결과가 낮은 것을 확인하였다.

표 3.3.29. Performance of KF3-65-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	KT	KT	KT
0.00	0.2483	0.2248	10.44%
0.05	0.2334	0.2130	9.56%
0.10	0.2170	0.2005	8.23%
0.15	0.1997	0.1872	6.65%
0.20	0.1817	0.1733	4.88%
0.25	0.1635	0.1585	3.14%
0.30	0.1449	0.1431	1.27%
0.35	0.1263	0.1269	-0.47%
0.40	0.1073	0.1100	-2.45%
0.45	0.0879	0.0924	-4.82%
0.50	0.0677	0.0740	-8.49%
0.55	0.0465	0.0549	-15.25%
0.60	0.0235	0.0350	-32.93%
0.65	0.0000	0.0145	-100.00%

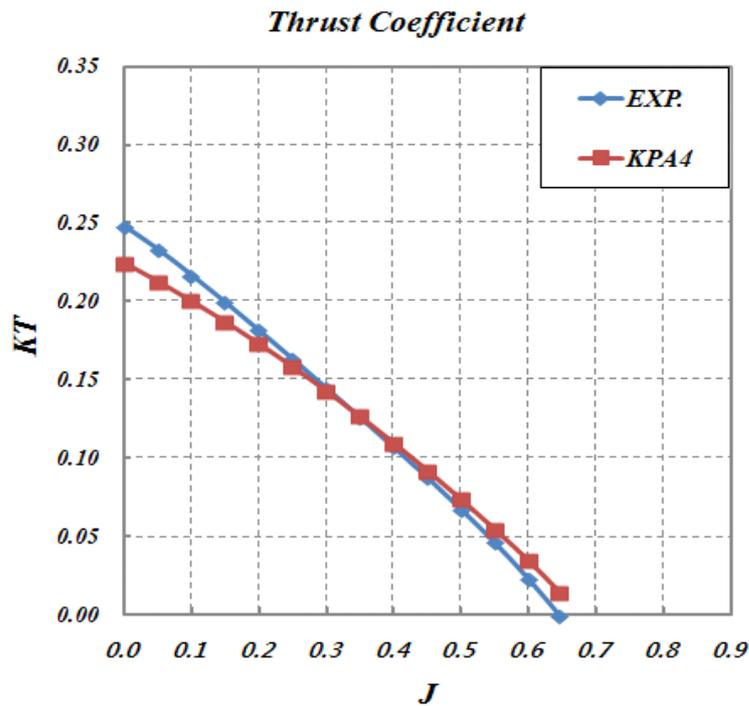


그림 3.3.49 Comparison of Thrust Coefficient

모형시험과 수치해석의 토크계수를 비교해 보았다. 낮은 전진비 $J=0.1\sim 0.2$ 에서 수치해석이 모형시험보다 낮은 결과 값을 얻었고, $J=0.5\sim 0.6$ 에서는 모형시험 결과가 낮은 것을 확인하였다.

표 3.3.30. Performance of KF3-65-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	10KQ	10KQ	10KQ
0.00	0.2200	0.1904	15.56%
0.05	0.2113	0.1863	13.42%
0.10	0.2017	0.1812	11.30%
0.15	0.1912	0.1752	9.16%
0.20	0.1800	0.1681	7.08%
0.25	0.1683	0.1601	5.15%
0.30	0.1560	0.1510	3.29%
0.35	0.1432	0.1410	1.56%
0.40	0.1298	0.1300	-0.14%
0.45	0.1157	0.1180	-1.93%
0.50	0.1008	0.1050	-3.99%
0.55	0.0849	0.0910	-6.71%
0.60	0.0678	0.0760	-10.82%
0.65	0.0504	0.0601	-16.09%

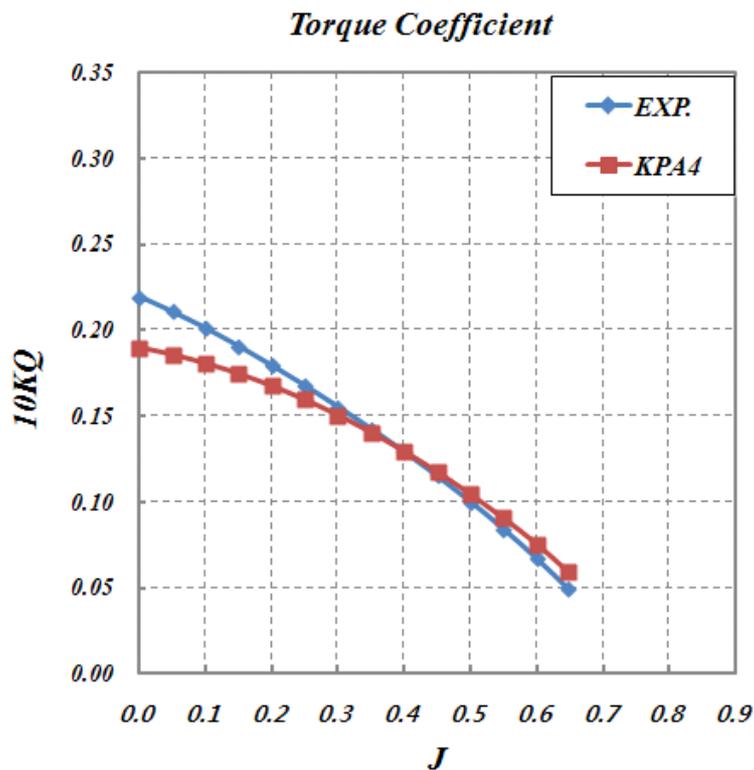


그림 3.3.50 Comparison of Torque Coefficient

모형시험과 수치해석의 단독효율을 비교해 보았다. 2% 내외의 오차 범위에서 거의 비슷한 결과를 얻었다.

표 3.3.31. Performance of KF3-65-55

	EXP.	KPA4	Diff. (A-KPA4)/KPA4
J	η_0	η_0	η_0
0.00	0.0000	0.0000	0.00%
0.05	0.0879	0.0910	-3.40%
0.10	0.1712	0.1761	-2.76%
0.15	0.2493	0.2552	-2.29%
0.20	0.3213	0.3281	-2.05%
0.25	0.3865	0.3941	-1.92%
0.30	0.4435	0.4523	-1.96%
0.35	0.4913	0.5013	-2.00%
0.40	0.5263	0.5387	-2.31%
0.45	0.5441	0.5606	-2.94%
0.50	0.5345	0.5607	-4.69%
0.55	0.4794	0.5278	-9.16%
0.60	0.3310	0.4401	-24.79%
0.65	0.0000	0.2494	-100.00%

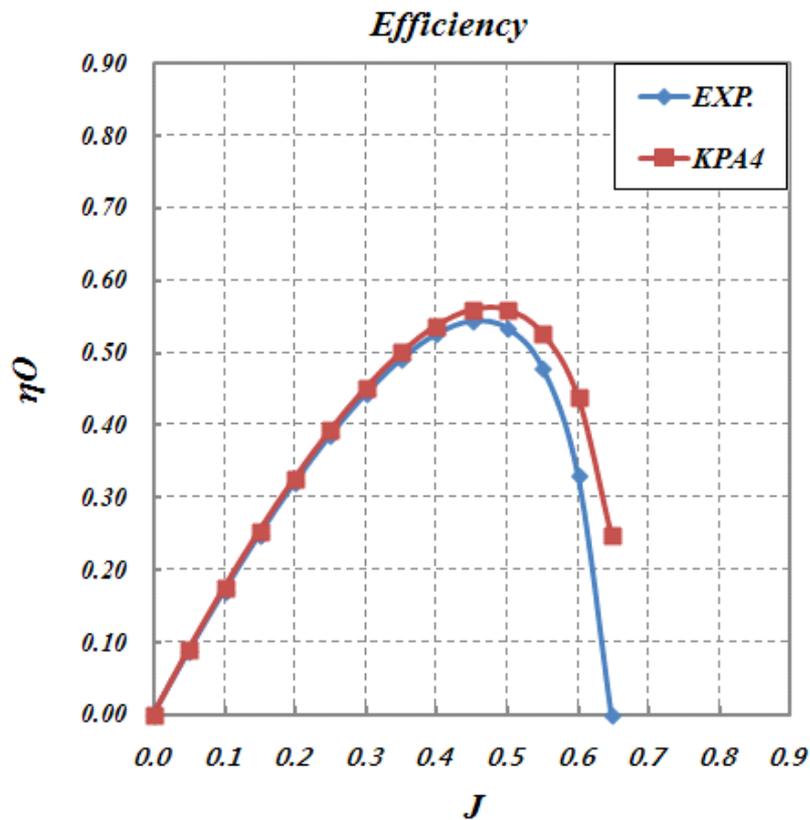


그림 3.3.51 Comparison of Efficiency

4. 반류분포

기준선으로 선정된 52톤급 채낚기 어선에 대한 명확한 반류정보가 공개되어 있지 않으므로, 일반적으로 어선의 선형이 대체로 유사하다는 점을 착안하여 52톤급 채낚기 어선의 반류정보는 표준 어선형의 반류정보(그림 3.3.52, 그림 3.3.53, 3.3.그림 54)를 수정하여 사용하였다.

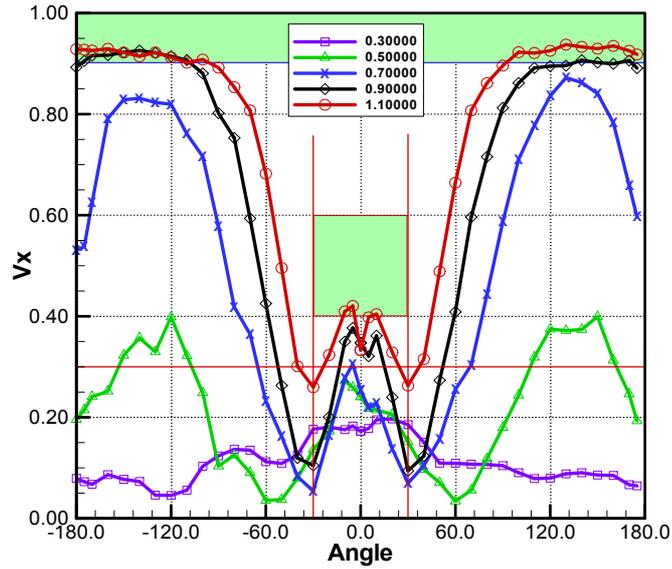


그림 3.3.52 Wake distribution of standard fishing vessel

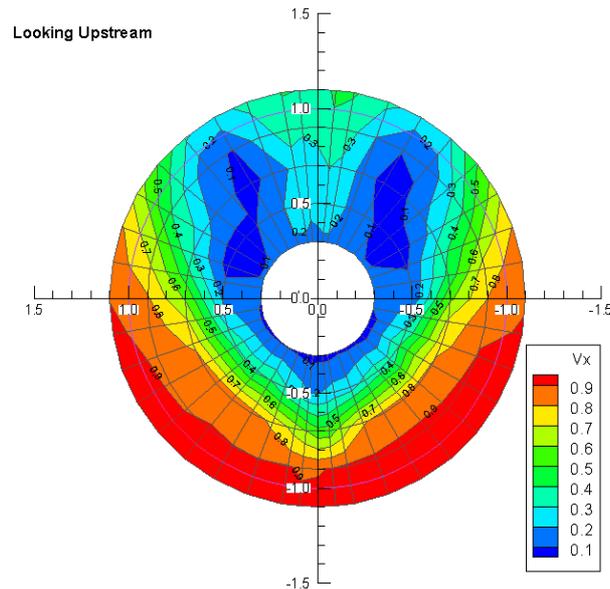


그림 3.3.53 Axial mean velocity of standard fishing vessel

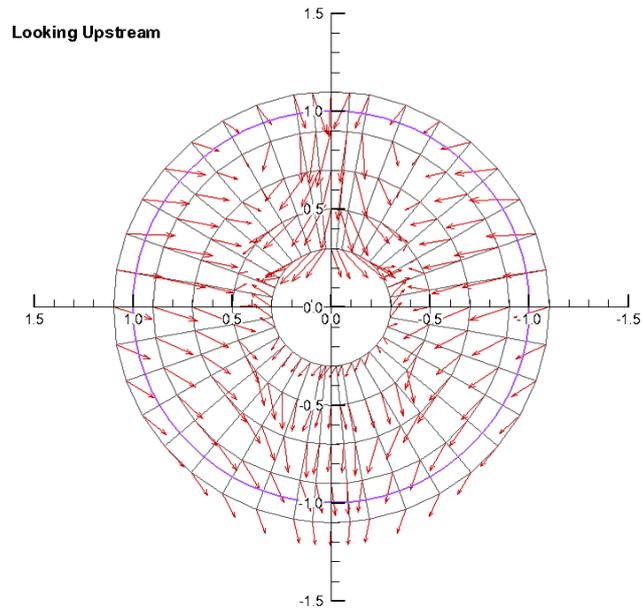


그림 3.3.54 Radial and Tangential mean velocity of standard fishing vessel

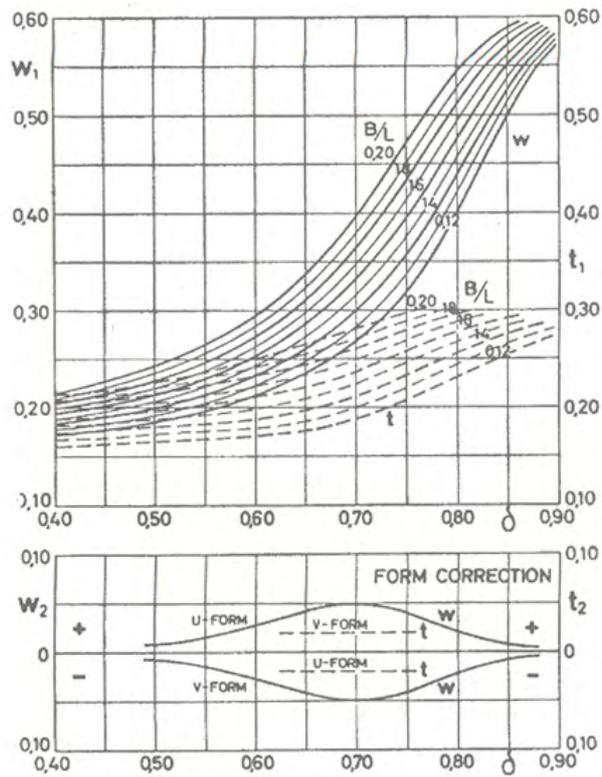


그림 3.3.55 Wake and thrust deduction fraction for single-screw ship (Harvald, 1983)

52톤급 채낚기 어선의 반류 추정방법은 표준어선형의 계측된 공칭반류(nominal wake)를 이용하여 평균유효반류를 추정하고, 표준어선형의 공칭반류와 Harvald 도표에서 추정된 52톤급 채낚기 어선의 공칭반류의 비만큼 유효반류를 수정하여 반경별 프로펠러의 유입속도를 구하였다.(표 3.3.32)

표 3.3.32 Estimated circumferential mean velocities of the 50ton class jigging fishing vessel

r/R	V _X /V	V _R /V	V _T /V
0.180	0.418	0.037	0.032
0.200	0.414	0.017	0.028
0.250	0.412	-0.011	0.021
0.300	0.419	-0.036	0.016
0.400	0.445	-0.075	0.008
0.500	0.486	-0.102	0.003
0.600	0.573	-0.110	0.004
0.700	0.672	-0.110	0.005
0.800	0.726	-0.112	-0.001
0.900	0.763	-0.110	-0.006
0.950	0.778	-0.106	-0.007
0.975	0.786	-0.103	-0.006
1.000	0.793	-0.100	-0.006

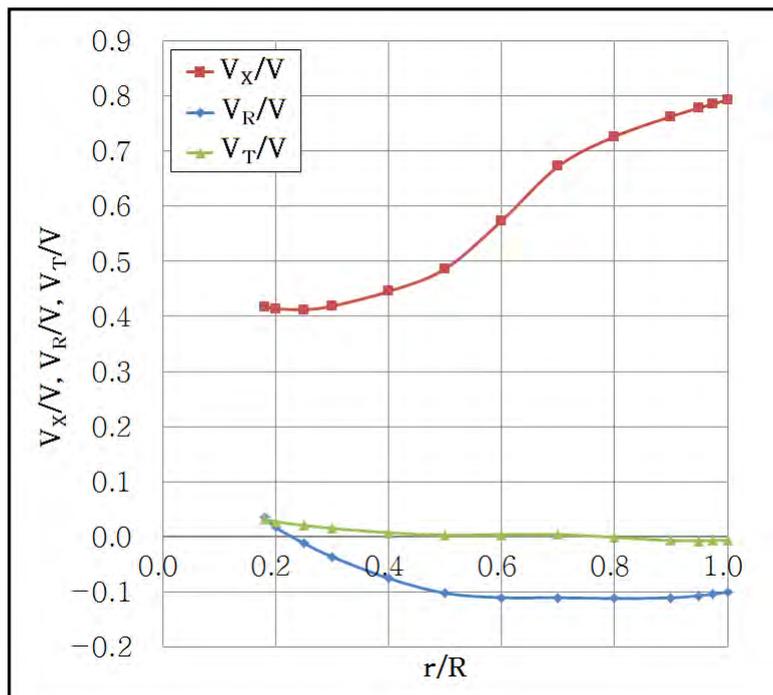


그림 3.3.56 Radial distribution of estimated mean velocities for the 50ton class jigging fishing vessel

5. 성능검토

가. 수치해석 및 단독성능 시험을 통한 성능 검토

균일유동상태의 MAU 계열 프로펠러와 수치해석을 통해 계산한 KF 계열 프로펠러, 그리고 선체반류가 고려되어진 불균일유동상태의 KF 계열 프로펠러에 대하여, 회전수를 포함하지 않는 K_T/J^2 에 대응하는 추진기 효율을 비교하여 보았다. 또한, KF3-50-55 프로펠러 단독성능 시험결과와 비교해 보았으며, 선체반류가 고려되어진 불균일유동상태에서의 KF 계열 프로펠러 효율을 예측해 보았다.

표 3.3.33 Comparison of propeller efficiency by propeller series type

TYPE	MAU KF3-50-55 (AE/AO=0.50, P/D=0.55)	KPA4 KF3-50-55 (AE/AO=0.50, P/D=0.55)	KPA4 KF3-50-55 (AE/AO=0.50, P/D=0.55)	EXP. KF3-50-55 (AE/AO=0.50, P/D=0.55)
Inlet flow	Uniform	Uniform	Non-uniform	Uniform
K_T/J^2	1.3406	1.3406	1.3406	1.3406
η_o	0.4862	0.4959	0.5135	0.4881
Difference	Reference	(+) 2.001 %	(+) 5.620 %	(+) 0.391 %

- (1) 회전수를 포함하지 않는 동일한 K_T/J^2 에서 MAU 시리즈와 KF 시리즈 성능을 비교하였다. 수치해석을 통한 성능 비교에서는 KF 시리즈가 균일유동에서 약 2%, 불균일유동에서 약 5.6% 효율증가를 보였다.
- (2) KF3-50-55 프로펠러의 단독성능 시험결과와 비교해 본 결과 균일유동에서 MAU 계열 프로펠러 대비 약 0.4% 효율 증가를 보였다. 수치해석 결과와 비교해 보았을 때 다소 작은 증가를 보였지만, 실선의 반류를 고려한 불균일유동 조건에서는 약 4%의 효율증가가 예상된다.
- (3) 또한, 상선에서 많이 사용하고 있는 NACA 단면과 최근 상선에서 많이 사용하여 효율 및 진동 소음에서 효과가 좋은 것으로 밝혀진 팁 레이크 및 캐비테이션에 유리한 비교적 큰 스큐를 적용하여 설계되었기 때문에 날개끝 보오텍스 및 날개끝 보오텍스 캐비테이션을 감소시켜 효율 및 진동 소음 감소에 탁월한 효과가 기대된다. 향후 캐비테이션 시험을 통해 캐비테이션 성능을 검증할 예정이다.

표 3.3.34 Performance of MAU-series propeller in uniform flow ($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

KF3-50-55 MAU				
J	KT	10KQ	η_O	KT/J ²
0.05	0.2003	0.1665	0.0957	80.113
0.10	0.1865	0.1592	0.1864	18.645
0.15	0.1718	0.1512	0.2713	7.636
0.20	0.1564	0.1424	0.3498	3.911
0.25	0.1403	0.1327	0.4208	2.245
0.30	0.1235	0.1221	0.4831	1.373
0.35	0.1061	0.1106	0.5346	0.866
0.40	0.0882	0.0981	0.5719	0.551
0.45	0.0697	0.0847	0.5892	0.344
0.50	0.0507	0.0702	0.5747	0.203
0.55	0.0313	0.0546	0.5012	0.103
0.60	0.0115	0.0380	0.2890	0.032
0.61	0.0075	0.0345	0.2107	0.020
0.62	0.0035	0.0310	0.1106	0.009

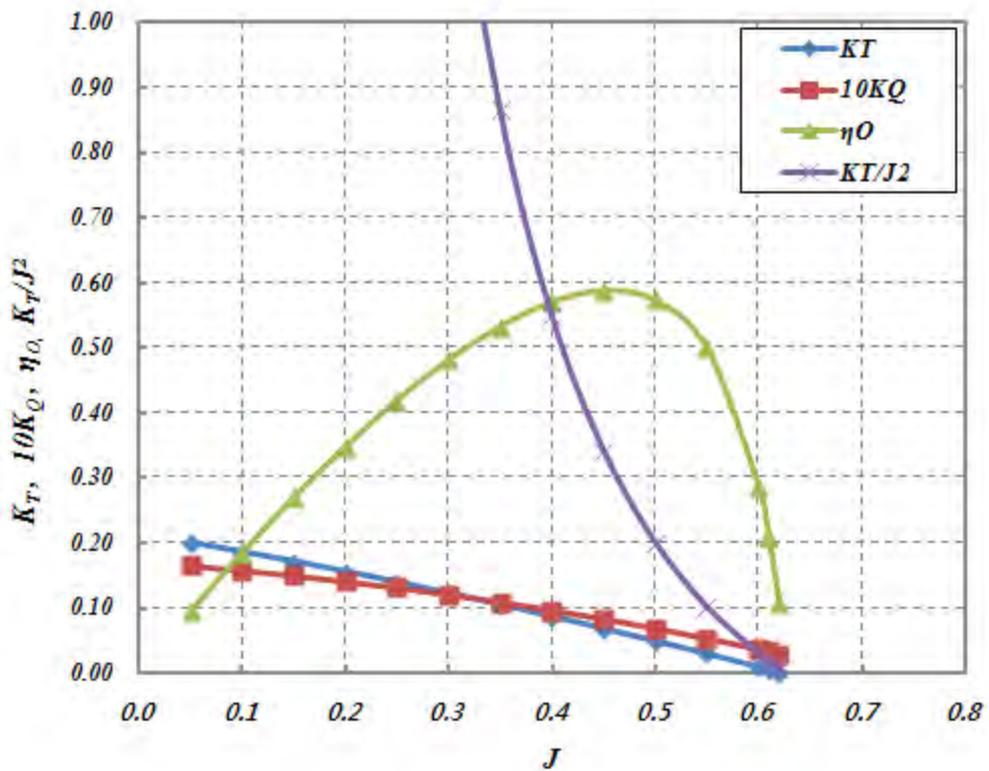


그림 3.3.57 Performance of MAU-series propeller in uniform flow ($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

표 3.3.35 Performance of KF-series propeller in uniform flow by experiment ($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

KF3-50-55 EXP.				
J	KT	10KQ	η_0	KT/J ²
0.05	0.2272	0.2007	0.0901	90.873
0.10	0.2107	0.1901	0.1764	21.071
0.15	0.1943	0.1797	0.2582	8.637
0.20	0.1779	0.1693	0.3344	4.447
0.25	0.1612	0.1588	0.4040	2.579
0.30	0.1442	0.1478	0.4657	1.602
0.35	0.1267	0.1363	0.5178	1.034
0.40	0.1085	0.1239	0.5576	0.678
0.45	0.0895	0.1104	0.5807	0.442
0.50	0.0696	0.0957	0.5790	0.279
0.55	0.0487	0.0795	0.5357	0.161
0.60	0.0265	0.0616	0.4101	0.074
0.65	0.0029	0.0418	0.0713	0.007
0.70	-0.0222	0.0198	-1.2477	-0.045
0.75	-0.0490	-0.0045	13.0776	-0.087

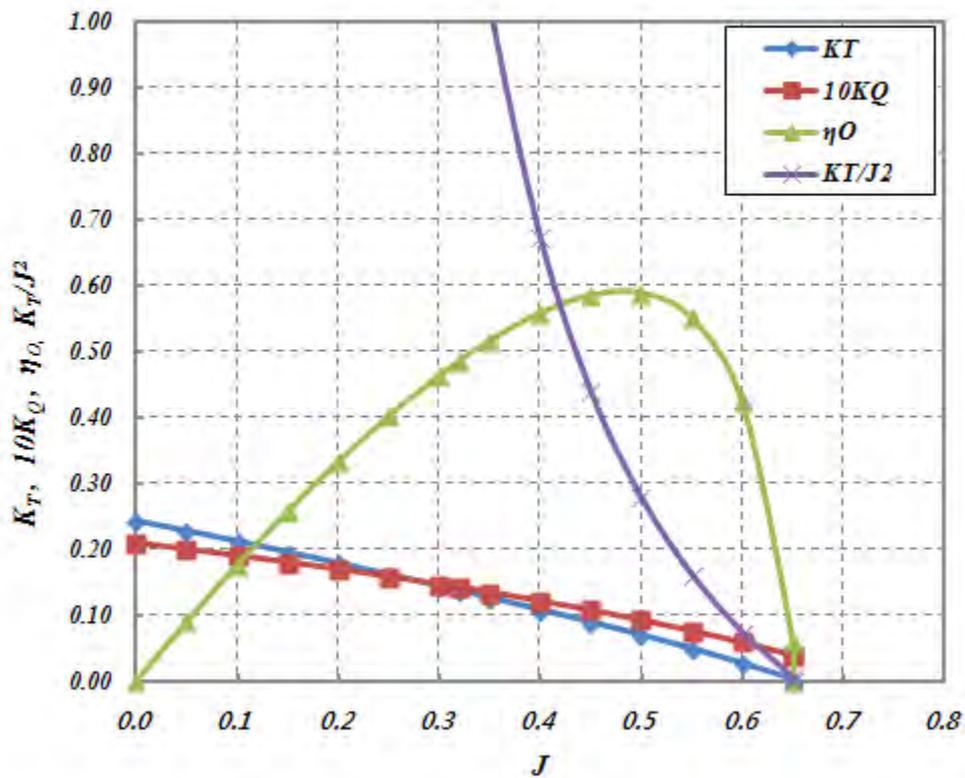


그림 3.3.58 Performance of KF-series propeller in uniform flow by experiment ($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

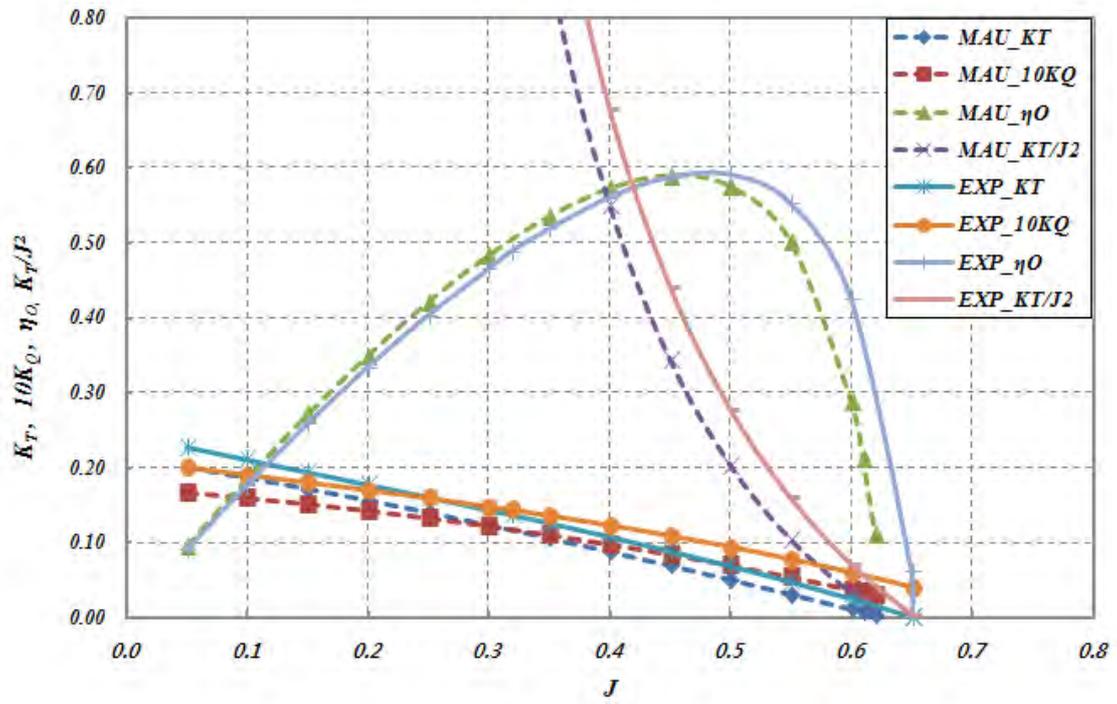


그림 3.3.59 Comparison of propeller efficiency by propeller series type
($A_E/A_0=0.50$, $P/D=0.55$)

참고) Tip Rake 적용 관련 특허 자료

특허, “팁부분에 곡선 레이크를 형성한 선박용 프로펠러” (현대중공업 주식회사)

본 발명은 선박용 프로펠러의 팁부분에 곡선 레이크를 적용하여 프로펠러 팁부분에 발생하는 공동현상을 감소시킴으로써 공동현상으로 인한 선박의 진동과 소음을 저감시킬 수 있는 곡선 레이크를 적용한 프로펠러에 관한 것이다. 본 발명은 선박의 프로펠러에서 발생하는 공동현상의 체적이 팁부분에 적절한 곡선의 레이크를 적용하여 약 30%정도 감소시키게 하며, 이로 인한 변동압력 값도 약 30% 정도 줄일 수 있는 것을 특징으로 하고 있다. 본 발명은 주로 엔진출력이 500마력을 초과하는 일반상선의 프로펠러에서 스쿠각으로 인하여 발생하는 레이크를 고려하지 않고 프로펠러 기준선에 대하여 팁에서 14~45℃, 허브에서는 3~10℃의 레이크를 가지고 최대 레이크 값이 0.6~0.95r/R에 위치하도록 두께 분포선이 순정이 된 프로펠러이다.

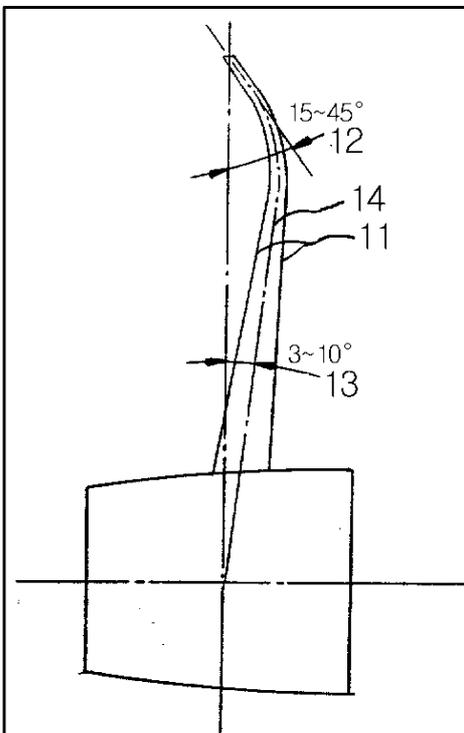


그림 3.3.60 팁부분에 곡선 레이크를 형성한 프로펠러 측면도



그림 3.3.61 팁부분에 곡선레이크가 형성된 프로펠러의 공동현상 사진

6. 프로그램 개발

본 연구에서는 이론해석과 모형시험으로 도출된 프로펠러 성능결과를 바탕으로 성능표현 수식을 개발하고, 최적직경 및 도면을 도출할 수 있는 프로그램을 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

가. 어선용 계열 프로펠러의 성능표현을 위한 수식 개발

프로펠러 단독특성은 실험결과를 토대로 만들어진 비교적 간단한 고차 다항식을 통해 예측할 수 있다. 즉, 추력계수 K_T 와 토크계수 K_Q 를 날개수와 확장면적비, 피치비와 전진계수의 고차 다항식으로(함수로) 가정하고 최소 자승법을 이용하여 다항식의 계수를 구함으로써 수식 표현이 가능해지며 이 수식을 통해 프로펠러의 단독 특성을 예측할 수 있는 것이다. 즉,

$$K_T = f(J_A, P/D, A_E/A_O, Z) \quad (3.3.1)$$

$$10K_Q = g(J_A, P/D, A_E/A_O, Z) \quad (3.3.2)$$

그러나, 윗식처럼 4개의 독립변수에 대한 회귀해석은 너무 많은 변수사이의 연결 항(coupling terms)을 필요로 하므로 오히려 오차를 크게 할 수 있다. 이를 피하기 위해 날개수와 확장면적비가 주어진 상태에서 추력계수와 토크 계수를 전진계수와 피치비의 함수(다항식)만으로 표현할 수 있다. 즉 주어진 $Z, A_E/A_O$ 에 대해 $K_T, 10K_Q$ 를 다음과 같이 다항식으로 표시하면,

$$K_T = \sum_{i,j} C_{i,j}^T (P/D)^i J^j \quad (3.3.3)$$

$$10K_Q = \sum_{i,j} C_{i,j}^Q (P/D)^i J^j \quad (3.3.4)$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (3.3.5)$$

위식에서 K_T 를 풀어서 3차 다항식으로 다시 쓰면 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} K_T &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 C_{i,j}^T (P/D)^i J^j \quad (3.3.6) \\ &= C_{0,0}^T (P/D)^0 J^0 + C_{0,1}^T (P/D)^0 J^1 + C_{0,2}^T (P/D)^0 J^2 + C_{0,3}^T (P/D)^0 J^3 \\ &\quad + \dots + C_{3,3}^T (P/D)^3 J^3 \end{aligned}$$

본 연구에서는 KF 계열 프로펠러의 성능을 도출할 수 있는 수식을 개발하였다. 또한, 수치

해석 결과와 계열 프로펠러 모형시험결과를 비교 분석하여 계열간의 경향성을 파악한 후, 계열 프로펠러 성능추정 수식을 완성하였다. KF 계열 도표 작성을 위한 추력 및 토크 다항식의 계수 값을 표 3.3.37과 같이 도출하였다.

완성된 성능추정 수식을 이용하여 확장면적비 0.35, 0.50, 0.65에 따른 계열 프로펠러 단독 성능 도표(그림 3.3.62~3.3.64) 및 BP- δ 도표(그림 3.3.65~3.3.67)를 완성하였다.

이로써 지금까지 어선용 프로펠러로 사용되어지던 MAU 계열보다 효율 및 캐비테이션 성능이 우수한 KF 계열로 프로펠러 설계가 가능하게 되었다. 또한, 어선용 BP- δ 도표를 완성함으로써 피치비 0.4를 포함하는 낮은 피치비 영역에서의 프로펠러 설계가 가능하게 되었으며, 설계시 최적곡선 근처에서의 설계가 가능하게 되어 선박의 운항측면에서 보다 경제적이고 효율적인 어업활동을 할 수 있게 되었다.

표 3.3.36 Applicable range of the polynomials

날개수	확장면적비	프로펠러 명칭	피치비
3	0.35	KF 3-35	0.4-1.0
	0.50	KF 3-50	
	0.65	KF 3-65	

⌘ 3.3.37 Coefficients and terms of K_T and $10K_Q$ polynomials
for KF Series propellers

$$K_T = \sum_{i,j} C_{i,j}^T (P/D)^i (J_A)^j \quad 10K_Q = \sum_{i,j} C_{i,j}^Q (P/D)^i (J_A)^j$$

	i	j	KF 3-35	KF 3-50	KF 3-65
C_{ij}^T	0	0	-0.064857	-0.032796	-0.021000
	0	1	0.629408	0.264218	0.165781
	0	2	-3.214759	-1.653449	-1.533064
	0	3	2.707181	0.792241	0.936804
	1	0	0.538320	0.500848	0.466560
	1	1	-3.258989	-2.110465	-1.464577
	1	2	12.622637	6.959376	5.184021
	1	3	-11.832949	-4.740495	-4.010362
	2	0	-0.060331	-0.018305	0.035442
	2	1	3.728477	2.401106	1.322450
	2	2	-15.639856	-8.994591	-5.696463
	2	3	15.536203	7.108025	5.158064
	3	0	0.054551	0.040548	0.016737
	3	1	-1.483172	-1.003659	-0.503941
	3	2	6.224610	3.733232	2.123030
3	3	-6.420743	-3.180651	-2.114568	
	i	j	KF 3-35	KF 3-50	KF 3-65
C_{ij}^Q	0	0	-0.012405	0.003840	-0.003111
	0	1	0.230695	0.537036	1.038314
	0	2	-0.335559	-1.684033	-4.144943
	0	3	-0.711846	0.642412	3.701563
	1	0	0.035872	0.116281	0.177686
	1	1	-0.927414	-2.710823	-4.473954
	1	2	1.794942	8.505902	17.091332
	1	3	0.995451	-5.460793	-16.281439
	2	0	0.560369	0.441666	0.368562
	2	1	0.578327	3.190747	5.252095
	2	2	-2.851243	-12.572315	-22.581715
	2	3	0.129912	9.327939	22.022174
	3	0	0.009526	0.062816	0.091346
	3	1	-0.269171	-1.440876	-2.233433
	3	2	1.344377	5.685922	9.529367
3	3	-0.434116	-4.508454	-9.416819	

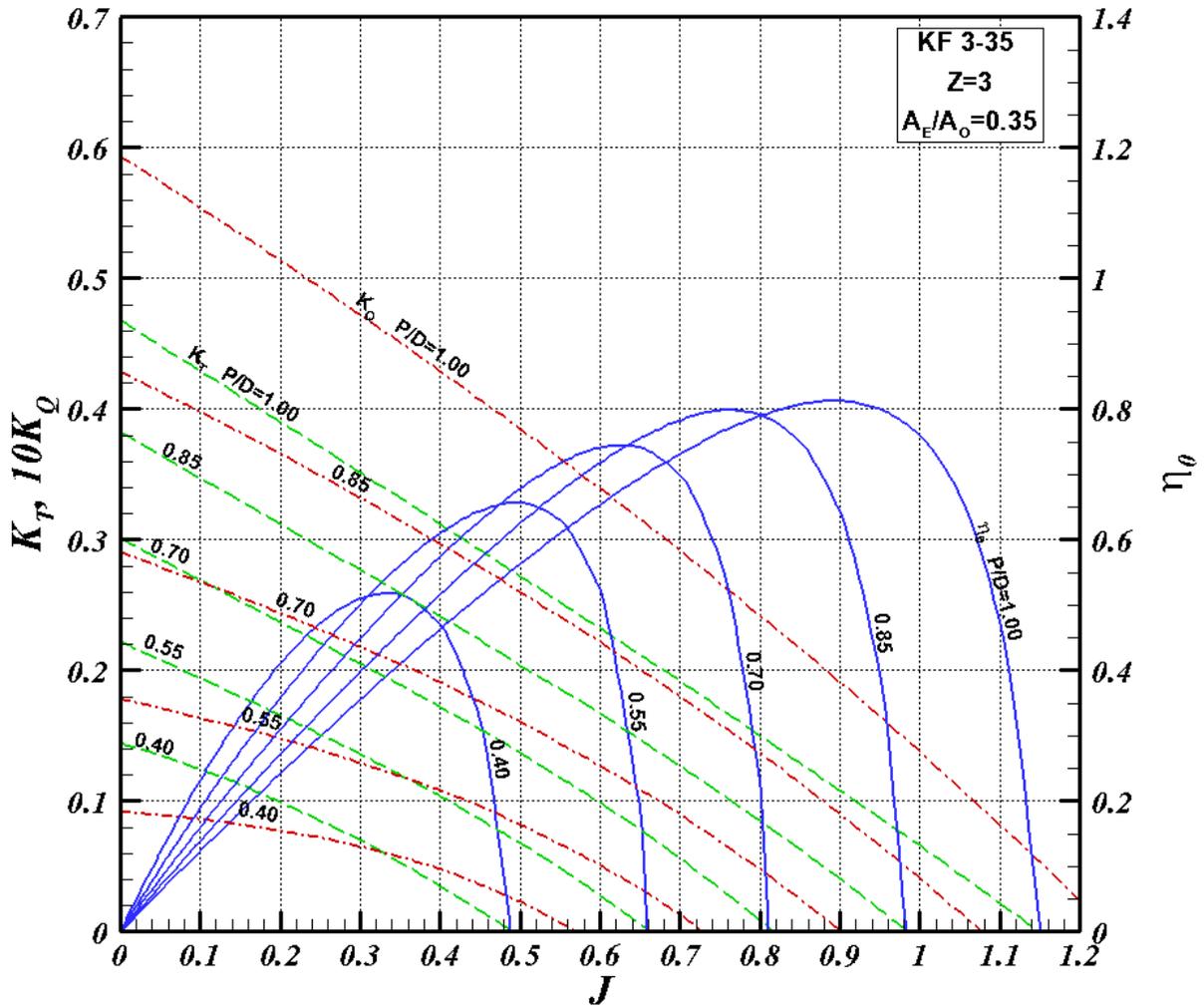


그림 3.3.62 Open-Water performance of propellers of KF3-35 type

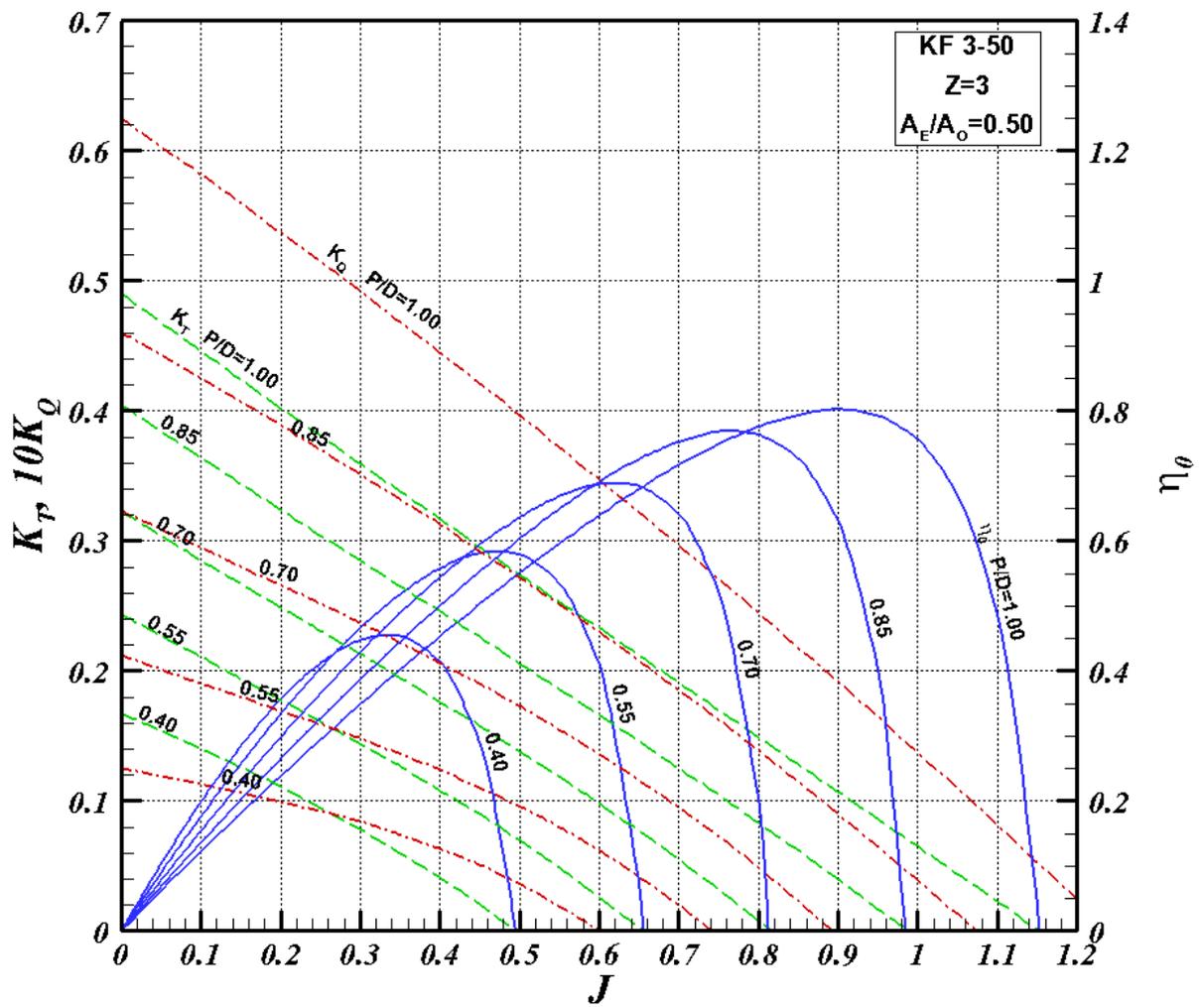


그림 3.3.63 Open-Water performance of propellers of KF3-50 type

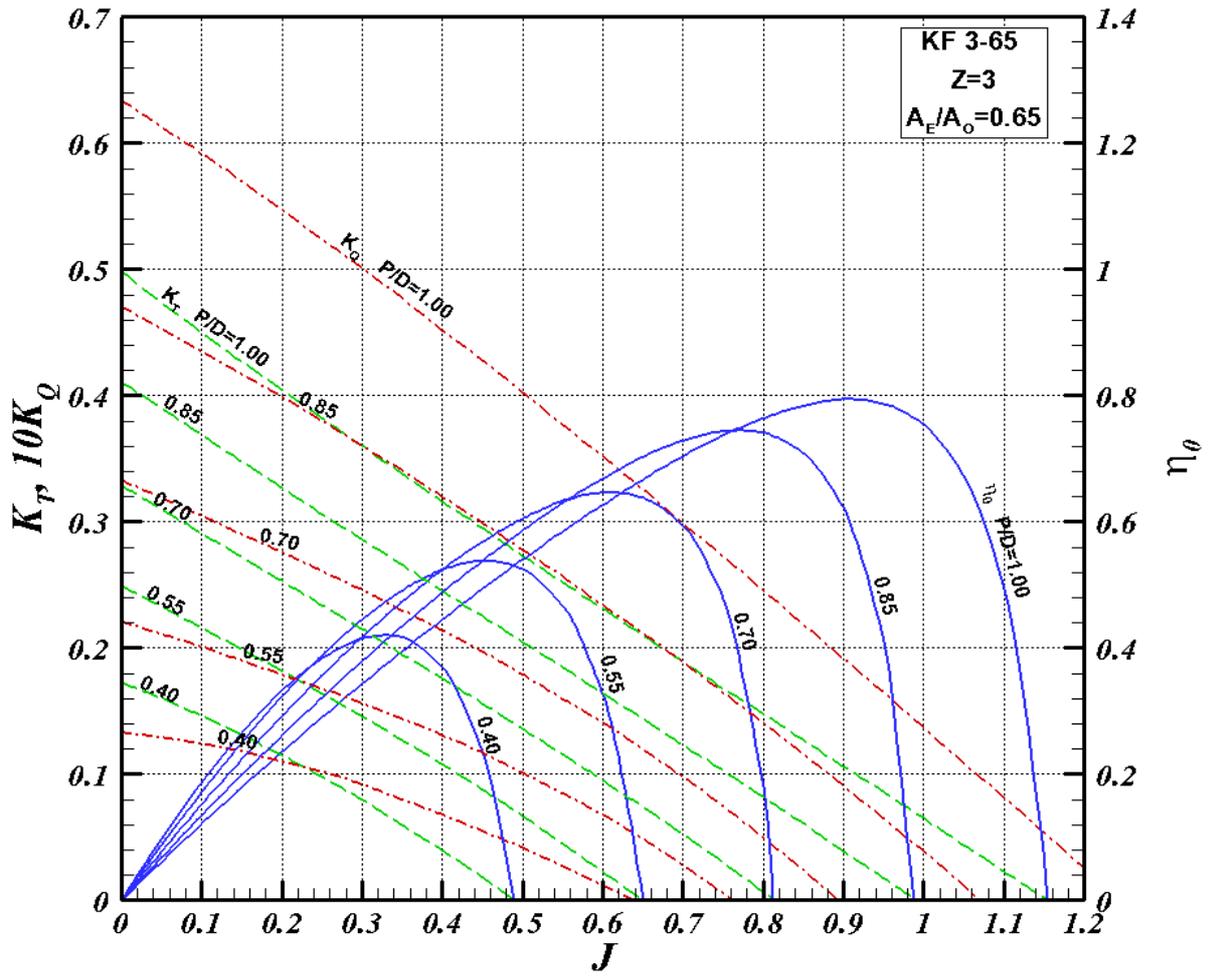


그림 3.3.64 Open-Water performance of propellers of KF3-65 type

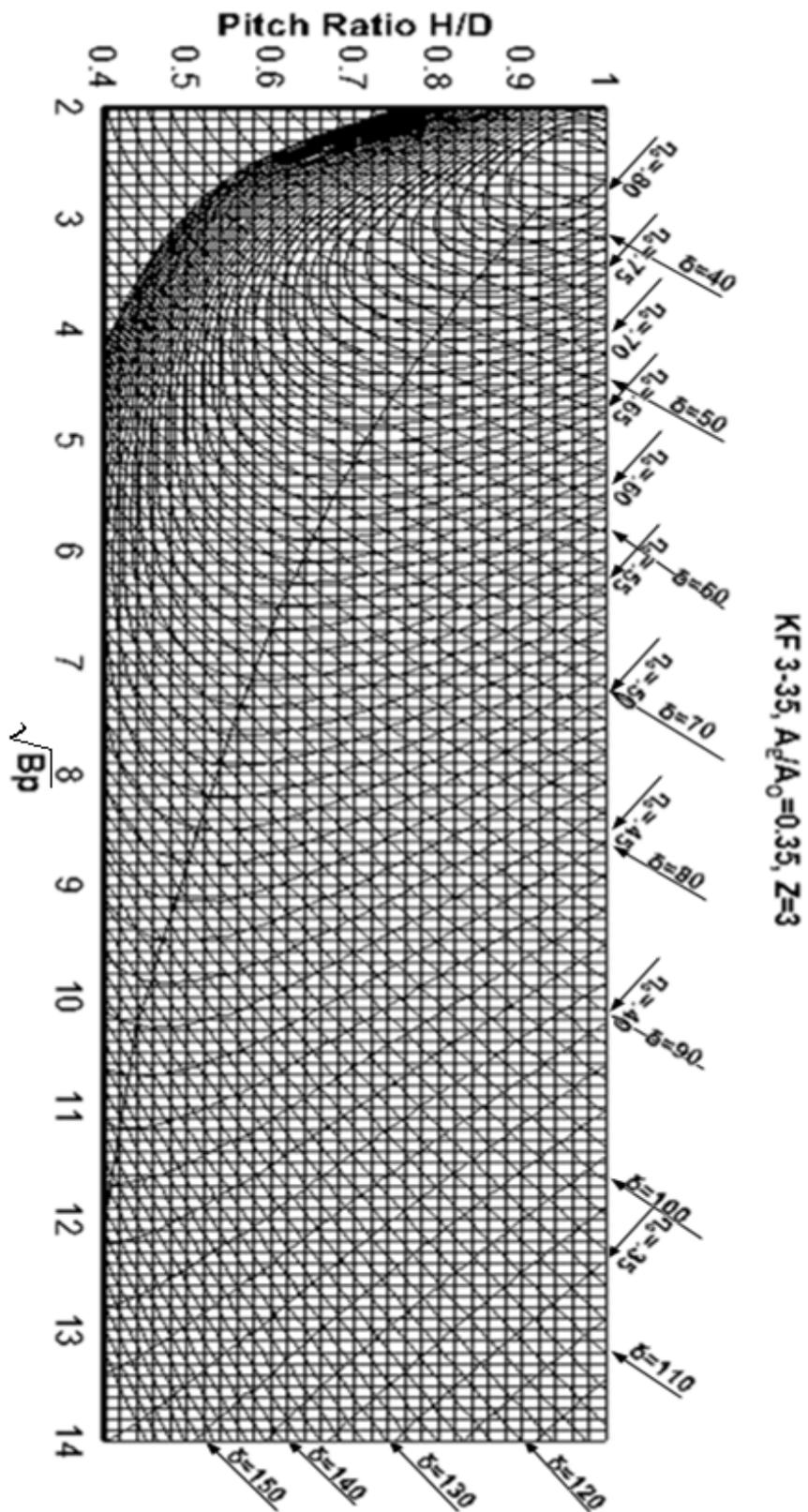


그림 3.3.65 B_p - δ chart of propellers of KF3-35 type

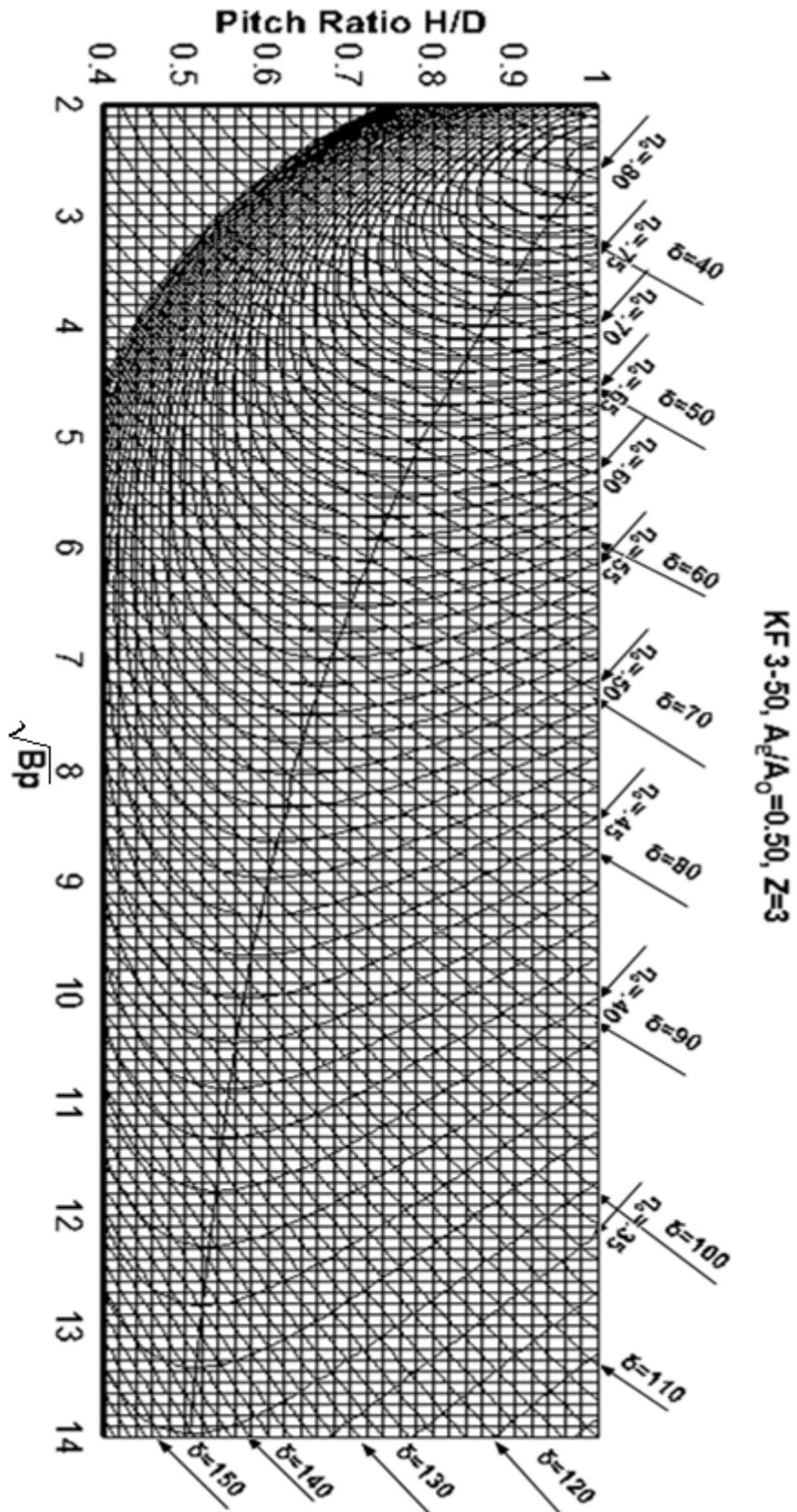


그림 3.3.66 B_p - δ chart of propellers of KF3-50 type

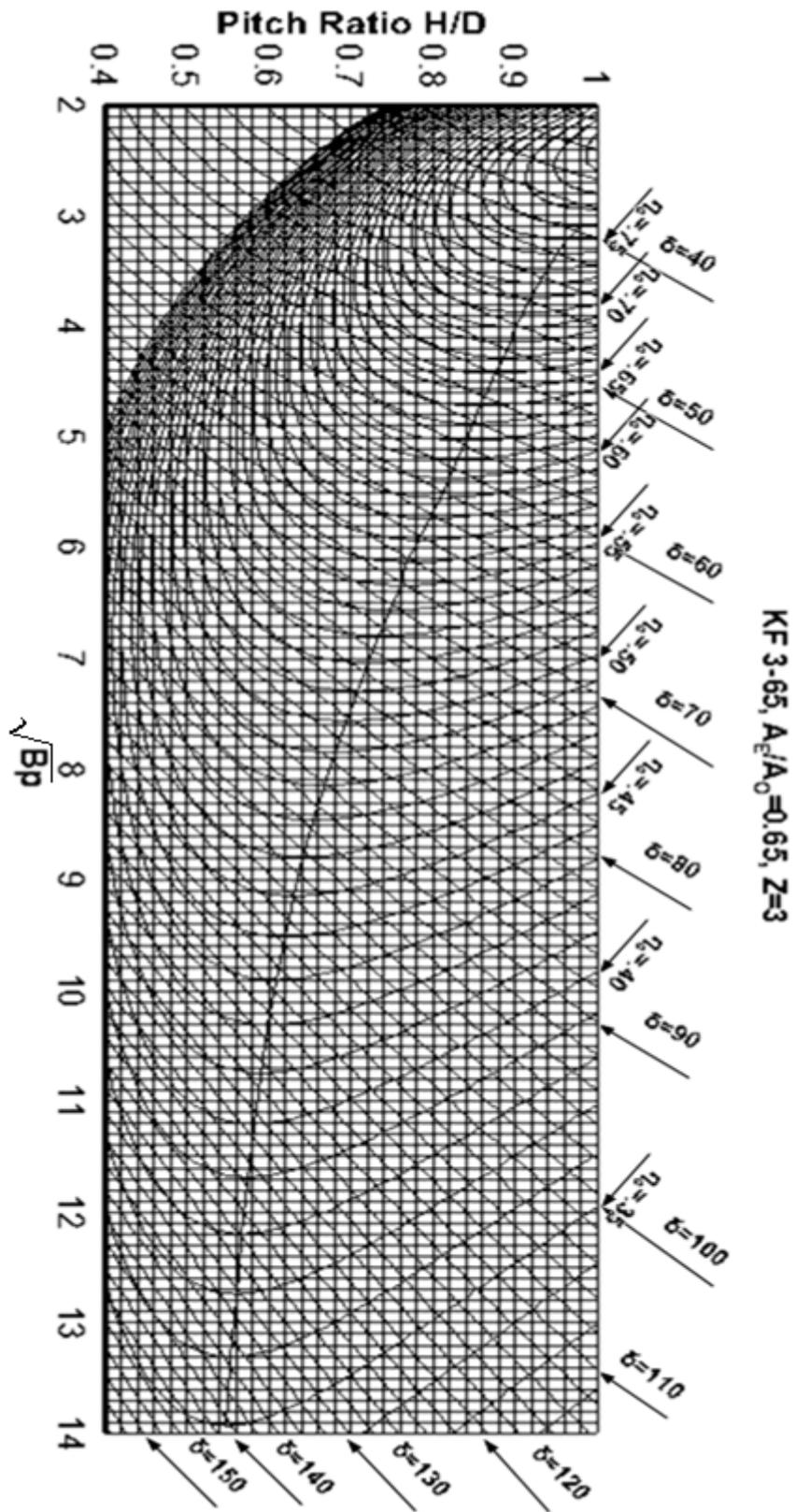


그림 3.3.67 B_p - δ chart of propellers of KF3-65 type

나. 프로펠러 최적직경 도출을 위한 프로그램

프로펠러의 초기설계 단계에서는 직경 및 확장 면적비가 필요하다. 본 연구에서는 이론해석과 모형시험을 통하여 도출된 결과를 이용하여 초기설계 단계에서 추정된 자항요소를 이용하여 프로펠러 최적 직경과 확장면적비를 도출 할 수 있는 프로그램을 필요로 한다. 본 연구에서는 변분법에 의한 최적화 기법을 통하여 이론해석으로 도출되어진 계열자료를 전산화하여 최적 직경을 도출하는 프로그램을 제시하고자한다.

표 3.3.38 Parameter of initial program for optimum diameter and expanded area

변수명	입력형식 및 내용
NVEL	속도 계산 갯수
IGIVND(0/1)	프로펠러 직경이 주어진 경우 1, 아니면 0
GIVND	프로펠러 직경이 주어진 경우의 직경, D(m)
IDDOWN(0/1)	직경감소율 적용일 경우 1, 아니면 0
DDOWN	직경감소율(소형선의 경우 2%를 사용)
IAE(0/1)	확장면적비가 주어진 경우1, 아니면 0
DAE	확장면적비
PM	해상여유(15%의 해상여유는 1.15입력)
SVS	선속(knots)
EHP	유효 동력(PS)
SDT	추력 감소 계수, t
SWT	반류 계수, wt
SETAR	상대 회전 효율, ηR
PRPM	프로펠러 회전수(RPM)
PDHP	Engine DHP(PS)
NBLADE	프로펠러 날개수, Z
SHDEP	축 몰수 깊이(m)

표 3.3.38은 프로그램을 구성하기 위한 변수로서, 최적값을 도출하는 과정은 다음과 같다.

(1) 무차원화된 동력상수 C

$$C = \frac{K_Q}{J_A^5} \quad (3.3.7)$$

(2) 효율 η_o 를 최대로 하는 구속조건식, G

$$G = K_Q - C J_A^5 \quad (3.3.8)$$

(3) 목적함수 F

$$F = \eta_o = \frac{J_A K_T}{2\pi K_Q} \quad (3.3.9)$$

(4) η_o 값을 최대화 하는 P/D , J_A , A_E/A_o 를 구하여 ②를 만족하는지 검토

(5) Lagrange multiplier λ 를 도입하여, 새로운 목적함수 H 정의

$$H = F + \lambda G \quad (3.3.10)$$

(6) K_T , K_Q 의 미분식을 이용하여 H 를 J_A , P/D 로 미분

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_T}{\partial J} &= \sum_{ij} C_{ij}^T (P/D)_j^i (J)^{j-1} \\ \frac{\partial K_T}{\partial (P/D)} &= \sum_{ij} C_{ij}^T i (P/D)_j^{i-1} (J)^j \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

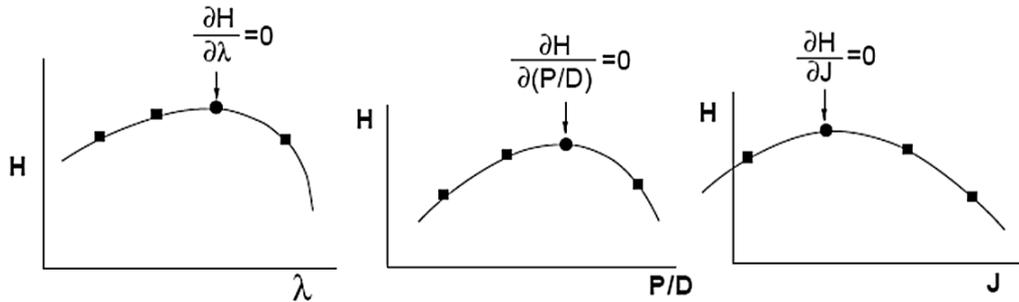


그림 3.3.68 Optimization of λ , P/D , J_A

(7) H 를 미분 하여 정리하면

$$\left\{ \frac{\partial K_Q}{\partial (P/D)} \right\} \left\{ J \left\{ \frac{\partial K_T}{\partial J} \right\} - 4K_T \right\} + \frac{\partial K_T}{\partial (P/D)} \left\{ 5K_Q - J \left\{ \frac{\partial K_Q}{\partial J} \right\} \right\} = 0 \quad (3.3.12)$$

(8) P/D , J_A 를 미지수로 가지는 비선형 연립방정식

$$\begin{aligned} f_1(P/D, J_A) &= 0 \\ f_2(P/D, J_A) &= 0 \end{aligned} \quad (3.3.13)$$

(9) K_T , K_Q 가 P/D , J_A 의 다항식으로 표현 가능하고, 미분 가능하므로 $f_1(P/D, J_A) = 0$, $f_2(P/D, J_A) = 0$ 가 미분가능하다. 따라서, Newton - Raphson Method를 활용하여, P/D , J_A 를 구하여 최적 직경을 도출한다.

현재 수치해석 및 모형시험 결과를 바탕으로 최적 직경 도출 프로그램 개발을 완료하였다. 또한, 기존의 복잡한 설계 단계를 거치지 않고 표준화된 데이터를 이용하여 설계에서 형상 구현까지 자동적으로 수행할 수 있게 하였으며 차후 GUI를 이용하여 사용자가 보다 편리하게 설계를 수행할 수 있도록 할 예정이다.

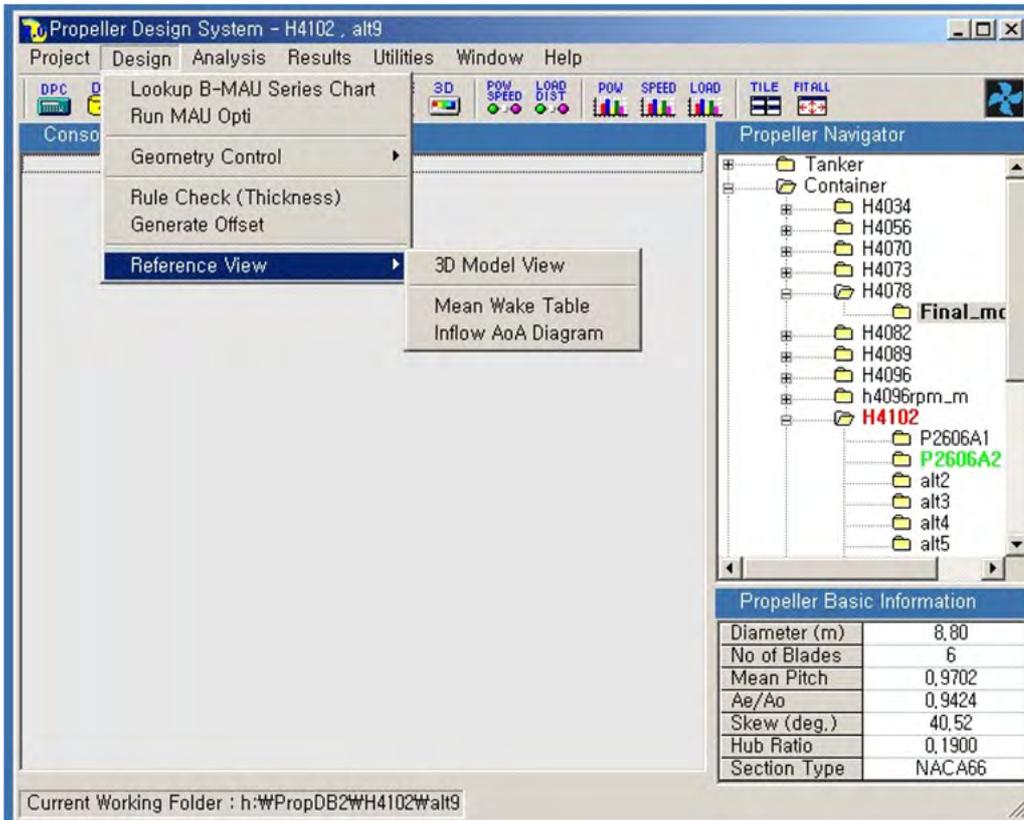


그림 3.3.69 Example of the program to design for propellers

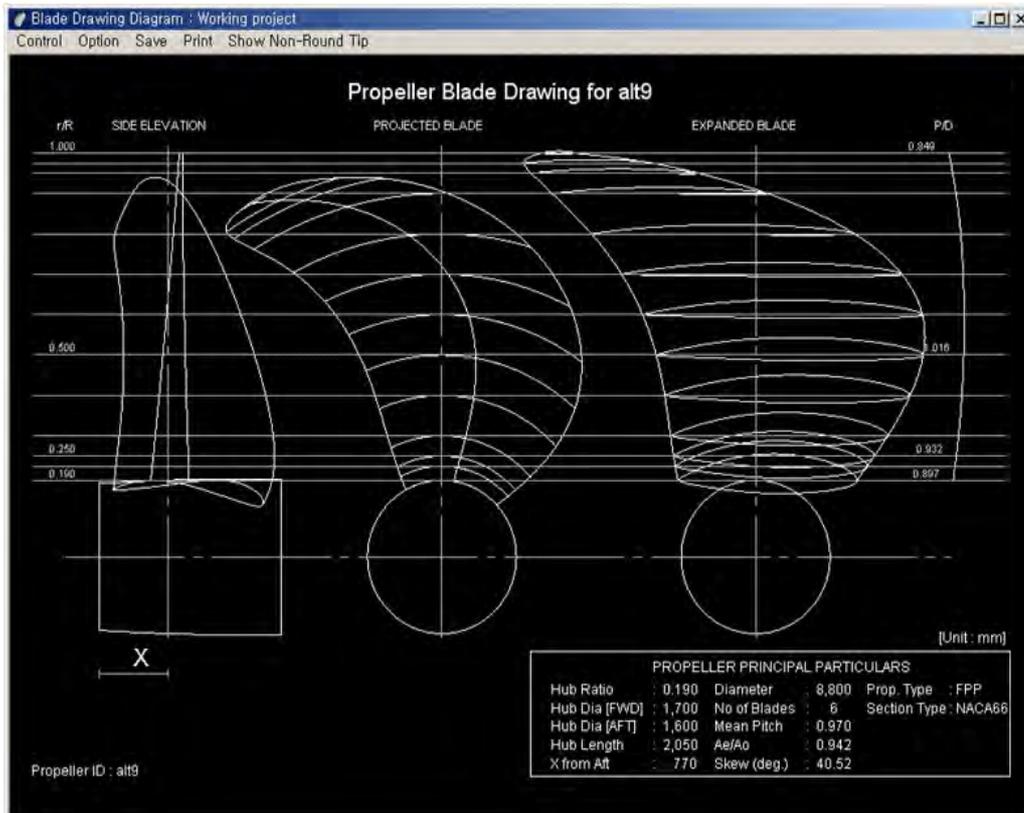


그림 3.3.70 Example of the automated program to make drawings

7. 계열 프로펠러를 사용한 설계 예

MAUOPTI : MAU계열을 이용한 최적 직경 계산 프로그램

KFOPTI : 새로 개발된 KF계열을 이용한 최적 직경 계산 프로그램

새로 개발된 계열 프로펠러 자료를 활용하여 작성된 최적 직경 계산 프로그램(KFOPTI)를 사용하여 모형시험 자료가 존재하는 130톤급 예망어선의 대상선인 공선호의 자료를 입력하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 거의 비슷한 속도를 내면서 직경을 3.5% 줄일 수 있으면서도 효율은 2.4% 증가 되었다.

표 3.3.39 기존의 MAU계열과 새로운 KF 계열을 이용한 최적 직경 계산 비교 예

	$V_S(\text{knot})$	Diam.(m)	P/D	A_E/A_0	η_0
MAUOPTI	11.92	2.015	0.731	0.571	0.586
KFOPTI	11.98	1.945	0.742	0.646	0.600

8. 결론

본 연구에서는 고유가시대에 어민들이 조업 활동을 보다 효율적이고 경제적으로 할 수 있도록 효율 및 캐비테이션 측면에서 우수한 어선용 고효율 시리즈(KF series) 프로펠러를 개발을 완료하였다.

1차년도 연구에서는 기존의 MAU 시리즈를 사용하여 효율과 캐비테이션 성능 측면에서 우수하지 못한 프로펠러를 사용해 오던 어선용 프로펠러를 보다 효율이 높고 소음, 진동 등이 우수한 새로운 시리즈를 개발하여 제안하였다. 소형어선의 경우 통상 날개수를 3개를 사용하게 되는데 MAU 시리즈의 경우 전개면적비가 0.35와 0.5로 구성되어 있어 캐비테이션의 위험이 큰 경우 사용이 어려운 측면이 있었다. 실제로 어선의 경우는 조업시 부하가 많이 걸리게 되어 캐비테이션의 발생량이 많아진다. 이러한 이유로 본 연구에서는 전개면적비 0.65를 추가하였으며 또한 피치비가 대부분 적으므로 낮은 피치비 영역 0.4~1.0 에서 시리즈를 구성하도록 하였다.

또한, MAU 계열 프로펠러보다 효율과 캐비테이션 성능이 우수한 계열 프로펠러를 제공하기 위하여, 상선에서 많이 사용하고 있는 NACA 단면과 최근 상선에서 많이 사용하여 효율 및 진동 소음에서 효과가 좋은 것으로 밝혀진 팁 레이크 및 캐비테이션에 유리한 비교적 큰 스쿠를 적용하여 새로운 계열 프로펠러를 제공하였다.

2차년도 연구에서는 1차 년도에 제시한 형상에서 제작의 용이성과 날개끝에서 발생하는 유체력을 개선하여 보다 설계가 용이하고 캐비테이션과 변동압력을 감소시킬 수 있는 방향으로 형상에 대한 개선과 표준화 작업이 이루어졌다. 또한, 계열 프로펠러 성능도표를 작성하기 위한 다항식을 제시하였으며, 보다 용이한 설계와 제작을 위하여, 직경 및 확장면적비 도출 프로그램과 도면을 생성할 수 있는 프로그램을 일부 제시하였다.

3차년도 연구에서는 2차 년도에 개발한 어선용 계열 프로펠러 중 기준프로펠러 (P/D=0.55, AE/AO=0.50)대비 피치비와 확장면적비를 변화시킨 5개의 모형 프로펠러를 제작하여 한국해양연구원 예인수조에서 모형시험을 수행하였고, 모형시험결과와 VLM으로 해석한 수치해석 결과를 비교 검증하였으며, 모형시험 경향성을 반영한 계열 프로펠러 성능 보정을 통해 계열 프로펠러 성능 도표를 완성하였다. 또한 계열 프로펠러 성능 도표를 바탕으로 설계 및 제작의 용이성을 위한 직경 최적화 프로그램을 완성하였다.

3차년도 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리하였다.

- 모형시험결과와 수치해석 결과를 비교한 결과, 추력계수 및 토크계수의 경우 낮은 전진비에서 수치해석 결과가 모형시험결과 대비 약 10% 정도 낮게 계산된 것을 확인하였다. 수치해석 결과를 바탕으로 모형시험 결과에 따른 계열 간의 경향성 파악을 통해 계열 프로펠러 성능을 보정하였다.
- 회전수를 포함하지 않는 동일한 K_T/J^2 에서 MAU 시리즈와 KF 시리즈 성능을 비교하였다. 수치해석을 통한 성능 비교에서는 KF 시리즈가 균일유동에서 약 2%, 불균일유동에서 약 5.6% 효율증가를 보였으며, KF3-50-55 프로펠러의 단독성능 시험결과와 비교해 본 결과 균일유동에서 MAU 계열 프로펠러 대비 약 0.4% 효율 증가를 보였다. 수치해석 결과와 비교해 보았을 때 다소 작은 증가를 보였지만, 실선의 반류를 고려한 불균일유동 조건에서는 약 4%의 효율증가가 예상된다. 또한, 상선에서 많이 사용하고 있는 NACA 단면과 최근 상선에서 많이 사용하여 효율 및 진동 소음에서 효과가 좋은 것으로 밝혀진 팁 레이크 및 캐비테이션에 유리한 비교적 큰 스큐를 적용하여 설계되었기 때문에 날개끝 보오텍스 및 날개끝 보오텍스 캐비테이션을 감소시켜 효율 및 진동 소음 감소에 탁월한 효과가 기대된다. 향후 캐비테이션 시험을 통해 캐비테이션 성능을 검증할 예정이다.
- 계열 도표를 작성하기 위하여 성능에 대한 다항식을 제시하였으며, 수치해석 결과와 계열 프로펠러 모형시험결과를 비교 분석하여 계열간의 경향성을 파악한 후, 다항식 계수를 도출하였다. 이를 통하여 확장면적비 0.35, 0.50, 0.65에 따른 피치비 0.4-1.0에 대한 어선용 고효율 계열 프로펠러 도표를 완성하였다.
- 현재 수치해석 및 모형시험 결과를 바탕으로 최적 직경 도출 프로그램 개발을 완료하였다. 또한, 기존의 복잡한 설계 단계를 거치지 않고 표준화된 데이터를 이용하여 설계에서 형상 구현까지 자동적으로 수행할 수 있게 하였으며 차후 GUI를 이용하여 사용자가 보다 편리하게 설계를 수행할 수 있도록 할 예정이다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연도별 연구목표 달성도

연도별 세부연구개발 목표를 기준으로 구분하여 연구내용 및 달성도를 다음과 같이 요약하였다.

1. 1차년도 (2009 년도)

세부연구개발 목표	가중치 (%)	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)	연구 내용 요약
어업별, 톤급별 선형, 선미 반류, 추진기 특성특성 조사, 평가	20	다양한 어선의 반류/추진특성 조사	100	<ul style="list-style-type: none"> - 국내 어선 현황 및 특성 조사/분석 - 일본의 어선 추진기 관련 자료조사/분석 - 대표적 연근해 어선인 130톤급 대상선을 선정하고 추진특성 연구
덕트-추진기 선체 상호작용 이론 개발	50	상호작용 해석 프로그램 확보	100	<ul style="list-style-type: none"> - 덕트-추진기와 선미반류의 상호작용을 연구한 기존 사례들 조사 - 포텐셜을 기저로 한 패널방법으로 선미반류의 영향을 포함하는 덕트-추진기 유동해석 방법 모색, 해석 프로그램 개발
어선용 추진기 계열 개발용 고효율 추진기 연구	30	기존 계열이 포함하지 못하는 설계 영역의 배려 여부	100	<ul style="list-style-type: none"> - 기존의 MAU 계열 프로펠러 보다 효율과 캐비테이션 성능이 우수한 새로운 KF 계열 프로펠러 개발 - 캐비테이션 성능을 위해 MAU계열 3익 프로펠러가 제공하지 못하는 확장면적비 0.65를 추가하여 개발 - 낮은 피치비의 영역을 커버하기 위하여, 피치비 0.40~1.00으로, 확장면적비 0.35~0.65로 변화시켜 보다 폭넓은 영역 확보

2. 2차년도 (2010 년도)

세부연구개발 목표	가중치 (%)	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)	연구 내용 요약
어업별, 톤급별 추진기 설계법 및 추진효율 증가 방법 연구	20	설계법이 잘 갖추어져 있는지 평가	100	- 전산화된 계열 프로펠러를 활용한 최적 직경 도출 프로그램 작성 - 덕트 프로펠러에 적합한 전류고정 날개 설계
덕트-추진기 설계 및 모형 시험	50	덕트-프로펠러 단독시험 효율평가, 덕트-프로펠러 캐비테이션 성능평가	100	- 130톤 예망 대상선의 덕트-프로펠러 최적설계 - 130톤 예망어선의 저/자항시험 수행 및 캐비테이션 시험 수행
어선용 고효율 추진기 계열 개발 및 추진기 최적화 프로그램 개발	30	계열 추진기 자료의 전산화 달성 여부	100	- 성능 향상을 위한 KF계열 프로펠러의 형상을 개선 - KF 계열 프로펠러의 단독시험 수행 - 시험결과를 바탕으로 성능표현 수식 도출 및 전산화

3. 3차년도 (2011 년도)

세부연구개발 목표	가중치 (%)	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)	연구 내용 요약
근해 130톤급 예망 어선용 덕트 추진기 개발	40	덕트-프로펠러 실선 장착 및 성능평가	90	- 설계된 덕트-추진기 모형실험결과 10% 이상의 효율 향상 기대 - 130톤급 근해 예망어선 연구 대상선 공선호에 개발된 덕트-프로펠러 추진기 장착하여 실선 시운전 수행 (예정) - 시운전 시험은 2012년 8월말까지 수행(예정)
근해 190톤급 선망 어선용 고정 피치 추진기 개발	30	고정피치 추진기의 성능 평가	100	- 190톤 선망 어선의 자/저항 모형시험 및 캐비테이션 시험 수행
연안 20톤급, 10톤급, 5톤 이하 소형선용 고정 피치 추진기 개발	30	고정피치 추진기의 성능 평가	100	- 기존 MAU 자료의 설계가능 범위를 넓혀, 국내 연안 소형어선의 추진기 설계에 적합한 계열 프로펠러 개발, 최적 직경 도출 프로그램을 활용한 설계 가능

4. 최종 평가

세부연구개발 목표	가중치 (%)	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)	연구 내용 요약
근해 130톤 예망 어선용 덕트 추진기 개발 및 실선 시운전 평가	40	추진효율 10% 향상 달성 여부, 덕트-추진기 캐비테이션 침식 회피	90	<ul style="list-style-type: none"> - 130톤급 근해 예망어선 연구 대상 선 공선호에 개발된 덕트-프로펠러 추진기 장착하여 모형시험에 의해 10% 이상 효율 향상 가능성을 확인. - 덕트-프로펠러의 효율향상과 동시에 캐비테이션의 피해가 최소화되었음을 캐비테이션 터널 시험으로 확인. - 2012년 8월중, 실선 시운전 수행 (예정) - 실선 추진효율 달성 확인(예정)
근해 190톤 선망 어선용 고정 피치 추진기 개발	30	근해 190톤급 선망 어선 추진기의 최적화 가능성 평가	100	<ul style="list-style-type: none"> - 190톤급 선망어선의 저/자항시험과 고정피치 프로펠러 추진기 캐비테이션 시험 수행
소형선용 추진기 계열 개발	30	국내 어선의 추진기 설계 범위에 맞는 추진기 최적화 프로그램 개발 여부	100	<ul style="list-style-type: none"> - 어선용 프로펠러의 작동역역에 대하여 기존의 MAU계열이 포함하지 못하는 영역을 포함하고 새로운 단면을 가진 KF계열 프로펠러 개발 - 개발된 계열 프로펠러의 모형시험 자료를 바탕으로 전산화 수행 - 전산화된 계열 프로펠러 자료를 활용한 최적 직경, 확장면적비 도출 프로그램 개발

제 2 절 관련분야의 기술발전예의 기여도

본 연구를 통하여 다음과 같은 기술 발전이 있었다. 일반 상선에 적용되고 있는 추진기 설계 기술에 비하여 낙후 되었던 어선 추진기 분야에 최신의 설계 기술을 도입하였다. 기존의 추진기 보다 좋은 효율을 갖는 추진기 계열이 개발되었으며 활용 가능하게 될 것으로 예상된다.

- 덕트-프로펠러, 전류고정날개와 같은 복합 추진기 도입을 통한 추진 효율 향상
- 선체-추진기 상호작용을 고려한 추진기 설계 기술
- 캐비테이션을 고려한 덕트-프로펠러 설계 기술
- 기존의 계열 프로펠러보다 우수한 성능의 새로운 계열 프로펠러(KF-Series) 개발

또한 어선추진기의 고정 설계 개념을 깨뜨리고 복합추진기를 설치하기 위해서, 선미유동장과 추진 장치의 상호작용의 중요성을 일깨운 좋은 연구이다. 본 연구결과가 활발히 보급된다면 연료비 절감 및 친환경 어업을 달성하기 위해 널리 사용될 것으로 예상된다. 어선 추진기는 물론 일반 상선 및 특수선 분야의 추진기에도 활용이 가능한 기술이므로 다양한 분야에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제 1 절 실용화·산업화 계획(기술실시 등)

참여기업은 연구 성과를 적용하여 실용화하기에 충분한 제반 기술을 보유 하고 있으므로 연구결과의 우수성이 널리 홍보되어 수요가 확보 될 경우 참여기업에 기술이전을 통하여 실용화를 시도할 예정이다. 실용화시에는 참여기업이 필요로 할 경우 기술자문 또는 지도 등의 지원이 가능하도록 할 것이다.

제 2 절 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획 등

대한조선학회 등 관련 학회의 학술대회 발표 및 논문 투고를 통해 홍보 및 기술확산 될 계획이다.

제 3 절 특허, 논문 성과

1. 특허 출원

출원일자 : 2011.02.17.

출원번호 : 10-2011-0014225

출 원 인 : 충남대학교산학협력단

출 원 국 : 대한민국

발 명 자 : 이창섭, 안병권, 서정천, 김문찬, 문일성

발명명칭 : 전류고정날개를 적용한 선박용 덕트-프로펠러

2. 논문

개재 연도	논문명	저자	학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
2010	연근해 어선의 추진 효율 개선 방안 연구	장현길, 안병권, 이창섭, 강대선, 문일성	한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집	2010년 6월	국내	비SCI
2010	보텍스 방법을 이용한 2차원 날개 단면의 난류 유동 해석	김유철, 서정천, 이경준	한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집	2010년 6월	국내	비SCI
2010	VIC 방법에 의한 프로펠러 주위의 점성유동 해석	이준혁, 김유철, 서정천, 이운모	한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집	2010년 6월	국내	비SCI
2010	어선용 고효율 표준 계열 프로펠러를 위한 설계 연구	이진희, 김문찬, 신병철, 도인록, 천장호, 이창섭	한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집	2010년 6월	국내	비SCI

게재 연도	논문명	저자	학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
2011	연근해 어선용 프로펠러의 추진성능 연구	이건화, 장현길, 안병권, 이창섭, 문일성, 강대선	한국해양과학기술협 의회 공동학술대회 논문집	2011년 6월	국내	비SCI
2011	보오텍스 인 셀 방법을 이용한 점성유동해석 연구	이준혁, 서정천, 김유철, 이경준	한국전산유체공 학회 학술대회 논문집	2011년 5월	국내	비SCI
2011	VIC(Vortex-In-Cell)방법 을 이용한 순간출발하는 프로펠러 주위의 점성유동해석	이준혁, 김유철, 이운모, 서정천	대한조선학회 논문집	Vol.49(No.1)	국내	비SCI
2011	어선용 고효율 표준 시리즈(KF 시리즈) 프로펠러를 위한 설계 연구	이원준, 김문찬, 이창섭, 천장호, 장진열, 문원준	한국해양환경공 학회 논문집	Vol.14(No.2)	국내	비SCI
2011	덕트프로펠러 설계기법 연구	김우진, 서정천, 이준혁	대한조선학회 추계학술대회논문집	2011년11월	국내	비SCI
2012	어선용 고효율 시리즈(KF 시리즈) 프로펠러에 대한 성능 연구	장진열, 김문찬, 이원준, 문원준, 이창섭, 문일성	한국해양과학기술협 의회 공동학술대회 논문집	2012년 6월	국내	비SCI

제 4 절 추가연구, 타연구에 활용 계획

덕트-프로펠러 설계 기술은 어선뿐만 아니라 덕트를 사용하는 다른 특수선 분야에도 적용될 수 있는 기술이다. 다만 달라지는 선형에 따른 선체-추진기 상호작용을 고려해야 하므로 이에 대한 연구가 필요하게 될 것이다. 또한 덕트-프로펠러의 성능 수치해석 및 모형시험의 실선 확장에 있어서 좀 더 정도 높은 해석 결과를 도출할 수 있도록 덕트에 의한 가속 효과를 추정하는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

현재 에너지절약 추진장치로 각광을 받고 있는 전류고정날개(Pre-Swirl Stator, PSS)의 보급 중에, 효율의 증가는 얻었으나 PSS 날개의 진동 문제가 발견되어 어려움이 있다고 보고되고 있다. 본 연구에서 특히 출연된 덕트 프로펠러의 개념을 활용하여 PSS의 날개 주위에 덕트를 효율적으로 장착하여 효율의 증가에 진동의 감소효과를 얻을 수 있을 것이며, 따라서 본 연구결과가 대형 수출선에도 적용이 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

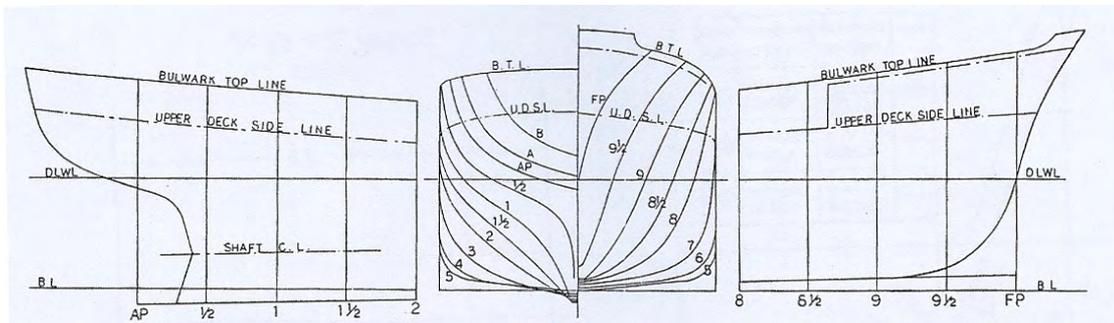
개발된 어선용 추진기 계열은 많은 기준 프로펠러를 가질수록 설계에 활용될 수 있는 범위가 넓어진다. 연구비 규모의 제한으로 3-익으로 제한되고 그 안에서도 5종의 기준프로펠러만으로 연구가 이루어 졌으나 향후 추가 연구가 요구될 경우 날개수, 확장면적비, 피치비의 다양한 변화를 가지는 연구를 수행할 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

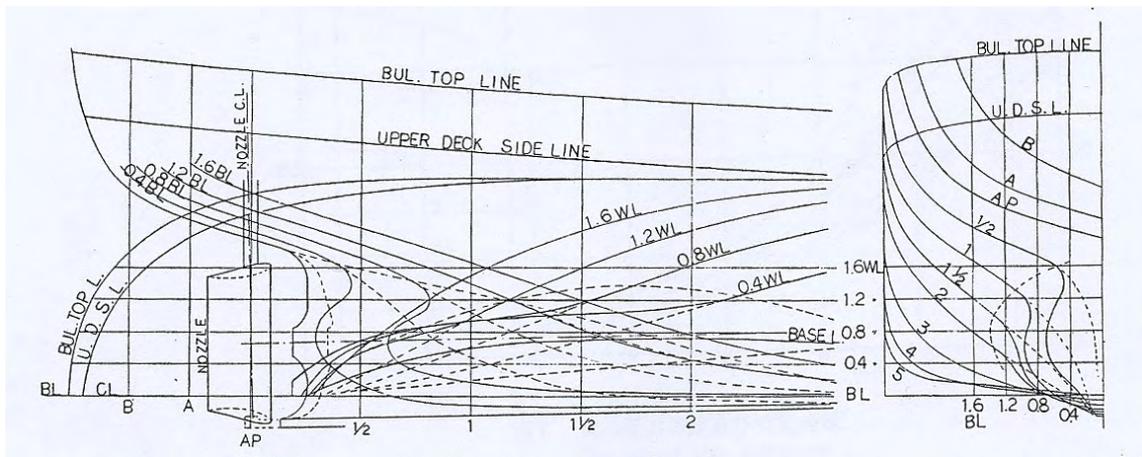
▶ 일본 및 유럽 어업선진국의 자료조사

일본 및 유럽 어업선진국 자료분석을 수행하였으며(대표적 사례 조사결과는 참고문헌에 정리하였음[29]~[41]), 그 중 덕트-추진기를 장착한 일본의 어선 자료(Kobayashi 1984)를 집중 검토함으로써, 국내 연근해 트롤 어선에 적용하는 방안을 찾고자 하였다.

Kobayashi(1984)의 논문을 보면, 반류조사(wake survey)가 없음을 알 수 있다. 이 시기에 일본에서도 반류조사를 생략하고 프로펠러를 설계했다는 반증일 것이다. 또한 덕트-추진기의 성능평가 방법에서 덕트-추진기를 일체로 보는 방법을 선택하였는데, 당시만 해도 복합추진기에 의한 실선 성능 추정법이 잘 정립되어 있지 않았다. 본 연구에서는 Kobayashi가 수행한 것처럼 덕트에 작용하는 추력을 계측하였고, 추진성능해석법으로는 복합추진기의 성능해석방법으로는 본 연구팀이 개발한 성능추정방법을 적용하였다.



< 통상의 저인망 어선 선형 >



< 선미노즐을 가진 선형 >

- 이 면은 공백입니다. -

제 7 장 참고문헌

- [1] J.-T. Lee, "A Potential Based Panel Method for The Analysis of Marine Propellers," Ph.D. thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, August, 1987.
- [2] C-Y Hsin, "Development and Analysis of Panel Method for Propellers in Unsteady Flow," Ph.D. thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, September, 1990.
- [3] D. S. Greeley J. E. Kerwin, "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow," Trans. SNAME, Vol.90, 1982.
- [4] Sangwoo Pyo, Jung-Chun Suh, Kwang Kim, "Improvements on a steady Panel Method for Propellers," Proceedings of CHMHM'97, Shanghai, China, August 25-27, 1997
- [5] 김 광, 서정천, 표상우 "비정상 유동중의 프로펠러 해석," 추계학술대회 논문집, 대한조선학회, 1997
- [6] R. L. Carmichael and L. L. Erickson, "Pan Air—a Higher Order Panel Method for Predicting Subsonic and Supersonic Linear Potential Flows About Arbitrary Configurations," AIAA Paper 81-0252, 1981.
- [7] Z. -B. Sheng, J.-S. Yang, , and Y.-Y. Cai, "A Collection of Series Test Charts of Marine Propellers of China", Published by the Editorial Office of Shipbuilding of China, 1983
- [8] J. E. Kerwin, S. A. Kinnas, J.-T. Lee and W.-Z. Shih, "A Surface Panel Method for the Hydrodynamic Analysis of Ducted Propellers," Trans. SNAME, No.4, 1987.
- [9] C. Kawakita, "A Surface Panel Method for Ducted Propellers with New Wake Model Based on Velocity Measurements," Journal of SNAJ, Vol.172.
- [10] Oosterveld, M.W.C. 1970, "Wake adapted ducted propellers", Netherlands Ship Model Basin, Publication No. 345
- [11] Carlton, J.S. 1994, "Marine Propellers and Propulsion," Butterworth-Heinemann, ISBN 075061143
- [12] 국토해양부, 해운민원시스템, <http://badasori.mltm.go.kr/index.jsp>
- [13] 한국어선협회, 1980~1995, 어선(漁船)
- [14] 이창섭, 서정천, 현범수, 김문찬, 서성부, 문일성, 2007, 선박추진과 프로펠러 설계, 문운당
- [15] "선체설계기준 (III)", 조선공업협회, 1992.
- [16] 이창역, 2008, 선박설계, 청문각, 경기도 파주.

- [17] 水産廳, 1992, 標準漁船 開發을 爲한 調査研究
- [18] 수산청, 1994, 표준어선형 연구개발: FRP연안어선 4종 개념 및 기본설계
- [19] 수산청, 1994, 표준어선형 연구개발: FRP연안어선 5종 개념 및 기본설계
- [20] 수산청, 1994, 표준어선형 연구개발: 마력추정도표
- [21] 수산청, 1995, 표준어선형 연구개발: FRP연안어선 5종 개념 및 기본설계 3(1) - 3(2).
- [22] 상공부, 1991, 합성수지어선의 설계 및 생산기술개발에 관한 연구. 1
- [23] 서정천, 이창섭, 1984, MAU 프로펠러 단독특성의 수식표현, 한국기계연구소 소보, 11, pp. 95-101.
- [24] 문일성, 김건도, 유용완, 류민철, 이창섭, “선체반류를 고려한 프로펠러 최적 스큐화”, 대한조선학회논문집, v.40, no.5, pp.26-35, 2003년 10월
- [25] 송인행, 노인식, 이태구, “강도를 고려한 고스큐 프로펠러 날개의 형상 설계”, 대한조선학회논문집, v.45, no.4, pp.411-416, 2008년 8월
- [26] 나운철, 송인행, 안종우, “선박 프로펠러용 고효율 2차원 날개단면 개발”, 대한조선학회논문집, v.34, no.1, pp.11-23, 1997년 2월
- [27] 辛横尾一, 矢崎 敦生, 昭和 48年 7月 (1973), プロペラ設參計 と 考法図表集, 株式會社 成山堂書店
- [28] 특허, 현대중공업 주식회사, “팁부분에 곡선 레이크를 형성한 선박용 프로펠러”
- [29] Kobayashi, Tsutomu, “소형어선의 프로펠러 설계에 대하여,” 어선 제216호, 1978년 8월, pp. 50-58.
- [30] Yamasaki, S., “저예망 어선용 고성능 프로펠러에 대하여,” 나가시마 프로펠러(주), 어선 제337호, 1998년 10월, pp. 73-78.
- [31] Yokoyama, N. & Imanari, E., “목조 소형트롤어선의 자항시험,” 일본어선연구기보 제13호, 1959년 10월, pp. 21-30.
- [32] Kobayashi, Tsutomu, “노즐러더 Propeller장비 어선의 모형시험성적에 대하여,” 수산공학연구소기보 -어선공학- 제5호, 1984년 3월, pp 1-18.
- [33] Hamuro, C, Imanari, E. & Ikeda, A., “오토 트롤망 어선에서 추진기날개의 각도변화에 따른 속도변화와 망높이 변화와의 상관관계의 도출과 망높이 자동제어장치에의 적용에 관한 연구(I),” 어선연구기보 제26권(통권 제59호), Mar. 1972, pp. 1-62.
- [34] 鬼頭史城, “Kort nozzle 부착 프로펠러의 지식,” 가모메 프로펠러 설계실, 1968년 4월, pp. 1-40.
- [35] 横山信立·小林 務·今成榮一, “목조 소형트롤어선의 파랑중 자항시험,” 어선연구기보 제14호, 1960년 3월, pp. 1-20.
- [36] Kobayashi, Tsutomu, “일본형 어선의 추진성능 및 내항성능에 관한 수조시험 성적에 대하여,” 어선연구기보 제21권(통권 제44호), Mar. 1967, pp. 1-30.

- [37] 정성재, 홍진근, 최종덕, 김수호, “트롤어선용 노즐 프로펠러 추진기 설계에 관한 연구,” J. Kor. Soc. Fish. Tech, 44(3), 239–249, 2008. DOI:10.3796/KSFT.2008.44.3.239.
- [38] Oosterveld, M.W.C., "Ducted Propeller Systems suitable for Tugs and Pushboats," Publication No. 383 of the NSMB, 1972.
- [39] Takekuma, K., "Evaluation of Various Types of Nozzle Propellers and Reaction Fin as the Device for the Improvement of Propulsive Performance of High Block Coefficient Ships," Shipboard Energy Conservation Symposium, SNAME, Sept 22–23, 1980, pp. 343–360
- [40] Minchev, A., Nielsen, J.R. and Lundgren, E., "Ducted Propeller Design and Verification for Contemporary Offshore Support Vessels," First Int'l Symp on Marine Propulsors, smp'9, Trondheim, Norway, June 2009, 6p.
- [41] Holtrop, J., "Extrapolation of Propulsion Tests for Ships with Appendages and Complex Propulsors," Marine Technology, Vol. 38, No. 3, July 2001, pp. 145–157.

- 이 면은 공백입니다. -

제 8 장 부 록

본 연구를 수행하면서 실시한 모형시험 보고서를 자체 양식에 따라 작성하여 부록으로 첨부합니다.

첨 부 : 모형시험 보고서

첨부 1. 130톤급 예망어선 대상선 저/자항 및 캐비테이션 모형시험 보고서

첨부 2. 190톤급 선망어선 대상선 저/자항 및 캐비테이션 모형시험 보고서

- 이 면은 공백입니다. -

MODEL TEST REPORT



Title
연근해 어선 추진기의 모형시험 및 성능평가

대상선박	공선호
Ship Owner	
Ship & Propeller Model No.	KS1286, KP935
Test Items	Resistance, Self-propulsion, Wake survey, Paint, Cavitation, Pressure fluctuation

Report No.	
Project Manager	iLsung Moon
Date	30-May-2012
Scale Ratio	7.936

Summary :

대상선(공선호)에 대한 일련의 선형시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.
Design draft, 프로펠러(KP935), w/o Sea margin

선속		P_E (kW)	η_D	P_D (kW)	N(rpm)	t	w_s	η_R
5.0	만재	11	0.499	22	117.59	0.394	0.286	1.002
11.5	운항	338	0.487	693	344.88	0.341	0.312	1.002
5.0	예인	208	0.329	630	311.44	0.167	0.284	0.994

PART I

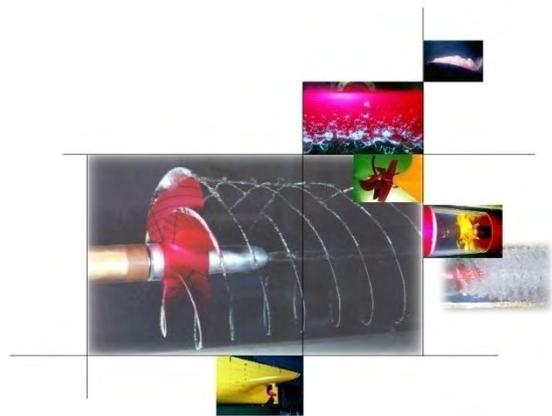


표 목 차

Table 1	Principal Dimensions of the Hull Form (KS1286)	.....	T-1
Table 2	Principal Dimensions of the Stock Propeller (KP935)	.....	T-2
Table 3	Principal Dimensions of the Design Propeller (KP1064)	.....	T-3
Table 4	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP935)	.....	T-4
Table 5	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1064)	.....	T-5
Table 6	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1064 & Duct, CFD results)	.....	T-6
Table 7	Resistance Performance (KS1286, Design draft, Cruise)	.....	T-7
Table 8	Model Test Results (KS1286, Design draft, Cruise, Stock P.)	.....	T-8
Table 9	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise, Stock P.)	.....	T-9
Table 10	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise, Stock P.)	.....	T-10
Table 11	Resistance Performance (KS1286, Design draft, Trawl)	.....	T-11
Table 12	Model Test Results (KS1286, Design draft, Trawl, Stock P.)	.....	T-12
Table 13	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl, Stock P.)	.....	T-13
Table 14	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl, Stock P.)	.....	T-14
Table 15	Resistance Performance (KS1286, Design draft, Cruise with Duct)	.....	T-15
Table 16	Model Test Results (KS1286, Design draft, Cruise with Duct, Design P.)	.....	T-16
Table 17	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise with Duct, Design P.)	.....	T-17
Table 18	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise with Duct, Design P.)	.....	T-18
Table 19	Resistance Performance (KS1286, Design draft, Trawl with Duct)	.....	T-19
Table 20	Model Test Results (KS1286, Design draft, Trawl with Duct, Design P.)	.....	T-20
Table 21	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl with Duct, Design P.)	.....	T-21

Table 22	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl with Duct, Design P.)	.....	T-22
Table 23	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-I (KS1286, Design draft, 4.0knots)	.....	T-23
Table 24	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-II (KS1286, Design draft, 4.0knots)	.....	T-24
Table 25	Harmonic Analysis of Velocity Components (KS1286, Design draft, 4.0knots)	.....	T-25
Table 26	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-I (KS1286, Design draft, 11.5knots)	.....	T-26
Table 27	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-II (KS1286, Design draft, 11.5knots)	.....	T-27
Table 28	Harmonic Analysis of Velocity Components (KS1286, Design draft, 11.5knots)	.....	T-28

그림 목 차

Figure 1	Photographs of the Model Ship(KS1286)	.....	F-1
Figure 2	Drawing of the Stock Propeller (KP935)	.....	F-2
Figure 3	Drawing of the Design Propeller (KP1064)	.....	F-3
Figure 4	Photographs of the Design Propeller and Duct	.....	F-4
Figure 5	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP935)	.....	F-5
Figure 6	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1064)	.....	F-6
Figure 7	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (CFD Result)	.....	F-7
Figure 8	Resistance Coefficients (KS1286, Design draft)	.....	F-8
Figure 9	Propulsive Coefficients (KS1286, Design draft, Stock Propeller)	.....	F-9
Figure 10	Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Stock Propeller)	.....	F-10
Figure 11	Resistance Coefficients (KS1286, Design draft, with Duct)	.....	F-11
Figure 12	Propulsive Coefficients (KS1286, Design draft, with Duct, Design Propeller)	.....	F-12
Figure 13	Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, with Duct, Design Propeller)	.....	F-13
Figure 14	Circumferential Distribution of Velocity Components (KS1286, Design draft, 4.0 knots)	.....	F-14
Figure 15	Iso-Axial Velocity Contours (KS1286, Design draft, 4.0 knots)	.....	F-15
Figure 16	Transverse Velocity Vectors (KS1286, Design draft, 4.0 knots)	.....	F-16
Figure 17	Radial Distribution of Harmonic Amplitudes of Velocities (KS1286, Design draft, 4.0 knots)	.....	F-17
Figure 18	Radial Distribution of Circumferential Mean Velocity Components (KS1286, Design draft, 4.0 knots)	.....	F-18
Figure 19	Circumferential Distribution of Velocity Components (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-19
Figure 20	Iso-Axial Velocity Contours (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-20
Figure 21	Transverse Velocity Vectors (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-21

Figure 22	Radial Distribution of Harmonic Amplitudes of Velocities (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-22
Figure 23	Radial Distribution of Circumferential Mean Velocity Components (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-23
Figure 24	Photographs of the Running Ship Model (KS1286, Design draft, 4.0 knots)	.....	F-24
Figure 25	Photographs of the Running Ship Model (KS1286, Design draft, 1.5 knots)	.....	F-25
Figure 26	Paint Test Results - 1 (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-26
Figure 27	Paint Test Results - 2 (KS1286, Design draft, 11.5 knots)	.....	F-27

1 시험 내용

본 보고서에서는 공선호의 저항추진 성능시험에 대한 내용과 결과를 정리하여 수록하였다.

(1) 모형선 제작

연구원은 선형 도면 및 자료에 의하여 축척비 1/7.936 인 모형선을 목재로 제작하였다. 모형선의 난류측진을 위해 선체에는 스테르드를 부착하였으며 선형의 주요제원은 Table 1 과 같다.

(2) 모형 프로펠러

모형프로펠러는 도면에 의하여 축척비 1/7.936 으로 알루미늄으로 제작하였다. 주요 제원은 아래와 같이 정리하여 수록하였다.

- 모형 재고 프로펠러 (KP935): Table 2, Figure 2
- 모형 설계 프로펠러 (KP1064): Table 3, Figure 3

(3) 부가물 제작

다음 항목의 부가물을 제작하여 부착하였다. Figures 1 과 4 에는 모형선에 전체 부가물이 부착된 상태를 보여주고 있다.

- Box keel
- Shoe piece
- Rudder
- Duct(설계프로펠러 모형시험)

(4) 모형시험 항목

본 연구에서 실시된 모형시험은 모두 연구원의 선형시험수조에서 수행되었으며 각종 계측치들은 전산화된 자료취득장치를 통해서 얻어졌다.

시험항목과 모형상태 및 시험조건은 다음과 같다.

단계	시험항목	부가물	시험조건
	프로펠러 단독성능평가	Stock Propeller	1 개
	재고프로펠러	Box keel, Shoe piece, Rudder	1 흘수, 11 속도
	저항성능평가		1 흘수, 11 속도
	예망시 저항성능평가		1 흘수, 3 속도
	반류분포계측	Box keel, Shoe piece	1 흘수, 2 속도
	유선조사시험	Box keel, Shoe piece, Rudder	1 흘수, 1 속도
설계프로펠러	프로펠러 단독성능평가	Design Propeller	1 개
	저항성능평가	Box keel, Shoe piece, Rudder, Duct	1 흘수, 11 속도
	저항성능평가		1 흘수, 11 속도
	예망시 저항성능평가		1 흘수, 3 속도

참고로 본 연구소 선형시험수조의 제원은 다음과 같다.

- 예인수조: 200m(길이) x 16m(폭) x 7m(깊이)
- 예인전차: 최대속도 6m/sec

시험해석은 1978 ITTC Performance Prediction 방법을 따르되 Froude 의 가정을 바탕으로 2 차원 해석법을 적용하였다. 상세한 해석방법 및 기호설명은 부록 A 와 B 에 각각 수록하였다.

2 연구 내용 및 결과

2.1 성능평가시험

대상선의 성능평가를 위하여 프로펠러의 단독성능시험, 저항 및 자항시험, 반류분포계측시험, 유선조사시험을 수행하였다. 예망시의 자항성능 평가는 추정된 어망의 저항력을 바탕으로 하여 자항시험을 수행하였다.

a. 설계프로펠러 단독성능시험

프로펠러 단독성능시험은 균일류 중에서의 프로펠러의 성능을 계측하는 시험으로 프로펠러의 회전수(n)을 일정하게 놓고, 전진속도(V_A)를 여러 가지로 변화시켜 추력 및 토크를 측정하였다

설계프로펠러의 단독성능시험은 균일류 중에서 수행하였지만, 모형선 및 실선에의 프로펠러는 덕트 내에서 작동한다. 따라서 단독성능 곡선은 프로펠러의 작동상태에서 덕트의 효과를 고려하여야 한다. 덕트가 없는 상태에서의 POW 와 덕트가 있는 상태에서의 POW 를 동일한 유입속도에서 계산을 수행하였고, 그 결과로부터 동일한 추력이 발생할 때 덕트에서의 가속효과를 산정하였다. 계산결과에 의한 프로펠러 단독특성은 아래 표와 같이 정리하였다.

프로펠러	단독성능 해석 결과	단독성능 특성 곡선
설계프로펠러 (KP1064)	Table 6	Figure 7

재고프로펠러는 통상의 프로펠러 단독성능 시험결과를 정리하였으나, 설계프로펠러 단독성능은 각 계측값들을 무차원화한 후 덕트의 가속효과(ΔJ)를 고려하여 단독성능 해석결과를 아래의 표와 같이 정리하였다.

프로펠러	단독시험 결과	단독시험 특성 곡선
재고프로펠러 (KP935)	Table 4	Figure 5
설계프로펠러 (KP1064)	Table 5	Figure 6

b. 저항시험

선체에 작용하는 저항은 물의 점성으로 인한 점성저항과 파도를 발생시키는 조파저항으로 크게 두 가지 형태로 나뉘어지며, 점성저항은 Reynolds 수(관성력/점성력), 조파저항은 Froude 수(관성력/중력)에 의해서 지배된다.

이 두 가지 상사법칙을 동시에 만족시키기 위해서는 유체의 동점성계수가 배길이의 축척비의 3/2 승에 비례해야 하는데, 실제로 이와 같은 유체에서 모형시험을 한다는 것이 불가능하다. 따라서 점성저항이 선체근방에서만 작용하고, 조파저항은 중력에 의해서 멀리 전파해 나가는 실제의 유체현상을 고려하면, 저항시험의 상사법칙은 2 가지 성분으로 분리할 수 있어서 실선의 저항을 모형시험결과로부터 추정할 수 있게 된다.

전술한 상사법칙에 의해 실선의 전저항계수는 다음 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$C_{TS} = C_{FS} + (C_{TM} - C_{FM}) + C_A \quad (1)$$

모형선-실선 상관수정계수 C_A 는 연구원에서 수행한 유사선의 모형시험 결과와 실선 시운전 결과를 토대로 **0.00040** 를 사용하였다.

설계프로펠러의 덕트는 추진장치 혹은 선체 부가물로 고려할 수 있다. 본 연구에서는 덕트가 선체와 shoe piece 에 함몰되어 부착되는 방식이기 때문에 선체의 부가물로 간주하여 저항시험에 포함시켰다. 이 경우 실선확장시에 Reynolds 수에 따른 영향을 Hoener 의 실험자료를 이용하여 확장하는 방법이 있으나, 그 값이 선체 저항에 비하여 크지 않기 때문에 구별하지 않고 전체저항을 ITTC 1978 방법을 수정 없이 사용하였다.

c. 어망의 저항추정

예인상태에서의 어망의 저항력은 다음과 같이 추정하였다. 재고프로펠러를 사용할 경우 설계선속(11.5 노트) 으로 항주하던 어선이 그물을 예인하는 경우 5 노트로 감속되는 것을 가정하면, 설계선속에서의 전달마력이 예인을 하는

선속에서에의 전달마력과 같게 되어야 한다. 예인상태에서는 저항이 커지게 되어 프로펠러의 효율이 감소되는데, 이 때 전달효율이 예인하지 않을 상태의 60%(재고프로펠러 해석결과)로 줄어든 것이라 가정하면 다음 식(2)와 같이 어망의 저항력을 추정할 수 있다.

$$\frac{EHP_{5\text{knots}} + R_{FN} \times V_{5\text{knots}}}{\eta_D \times 0.6} = DHP_{11.5\text{knots}} \quad (2)$$

여기서 R_{FN} 은 어망의 저항

일반적으로 어망의 저항은 다음 식과 같이 간단히 표현될 수 있다 (김대안, 1997).

$$R_{FN} = kSV^{1.8} \quad (3)$$

여기서 S 는 그물의 면적, V 는 예인속도, k 는 예인상태에 따른 계수이다.

식 (3)에서 선속에 따른 저항력은 선속의 1.8 승에 비례하므로, 5 노트 에서 저항을 바탕으로 다른 시험선속에서 어망의 저항력은 선속의 1.8 승 비례관계로 추정하였다.

d. 자항시험

자항시험에서는 모형선을 예인하면서 프로펠러를 회전시켜 프로펠러가 발생시키는 추력, 토크, 회전수 및 예인력을 동시에 계측하며, 연구원의 수조에서는 한 개의 속력에 대하여 3 개의 프로펠러 회전수를 변화시키면서 시험을 수행하였다. 시험결과로부터 모형선의 자항점(식 4)에 해당하는 마찰수정량에 대응하는 회전수(n_M), 추력(T_M), 토크(Q_M)를 구하였다. 이 결과와, 저항시험 및 프로펠러 단독시험의 결과를 이용하여 자항요소 t_M , w_M , η_R 을 계산하였다. 통상의 프로펠러 추진시험의 경우 실선의 성능추정은 ITTC 1978 해석법을 이용하여 실선성능을 추정하였다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_M S_M V_M^2 [C_{VM} - (C_{Fs} + C_A)] \quad (4)$$

덕트프로펠러의 실선성능 추정을 위해서 Stierman(1984)의 운동량 이론을 사용하였다. 이 이론에 의하면 모형반류 (w_M) 는 점성반류 (w_{VM}) 와 포텐셜반류(w_{PM})로 나눌 수 있다. 즉,

$$w_M = w_{VM} + w_{PM} \quad (5)$$

자항시험 해석으로부터 구해진 t_M , w_M 을 이용하여 모형선의 점성반류는 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$1 - w_{VM} = \frac{c^2 - a}{2c} \quad (6)$$

여기서

$$a = \frac{R - F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 \frac{\pi}{4} D^2 (1 - H_r^2)}$$

$$c = \frac{1 - w_M}{1 - t_M} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{a}{(1 - t_M)(1 - w_M)^2}} \right)$$

F_D 는 예인력, D 는 프로펠러직경, H_r 은 허브비이다. 포텐셜 반류, 추력감소계수 및 상대회전효율은 척도영향을 무시하고, 점성반류 w_{vs} 는 ITTC 1978 절차를 이용하여 w_{VM} 으로부터 구할 수 있다.

$$w_{PS} = w_{PM} \quad (7)$$

$$t_S = t_M \quad (8)$$

$$\eta_{RS} = \eta_{RM} \quad (9)$$

$$w_{VS} = w_{VM} \frac{C_{FS} + C_A}{C_{FM}} \quad (10)$$

계측된 시험결과는 연구원에서 개발한 ITTC 1978 해석 프로그램을 이용하여 실선성능을 추정하였다.

e. 예인상태의 자항시험

그물의 저항력은 Reynolds 수에 의해서 지배된다. 따라서 모형상태에서의 저항력은 식(2)를 이용하여 직접 구하는 경우 프로펠러의 부하가 과도하기 때문에 자항시험 해석에서의 마찰수정량에 대응하는 양으로 c.에서 추정된 그물의 저항력을 감소시킨 값을 모형상태의 모형그물의 저항력으로 추정하였다.

$$F_{DFN} = -C_{FS} / C_{FM} * R_{FNM} \quad (11)$$

예인상태의 자항시험을 위해서 그물을 사용하지 않고, 추정된 모형그물의 저항력과 d. 자항시험에서의 마찰수정량을 동시에 고려하여 새로운 자항점에 대응하는 회전수(n_M), 추력(T_M), 토크(Q_M)를 구하였다.

예인상태에서의 자항시험 해석은 d.에서 구해진 시험해석 방법과 동일한 해석법을 적용하였다.

저항추진시험의 결과는 아래 표와 같이 정리하여 수록하였다.

시험번호	시험조건	모형시험 결과 Table	추진계수 및 실선성능곡선	시험사진
S1286S02C	항주중	Tables 7~10	Figures 8~10	Figures 24~25
S1286S02T	예망상태	Tables 11~14		-
S1286S12C	항주중	Tables 15~18	Figures 11~13	-
S1286S12T	예망상태	Tables 19~22		-

f. 반류분포 조사 시험

반류분포 계측시험은 프로펠러 면에서의 유속의 축방향, 반경방향, 접선방향의 속도성분을 구하기 위한 시험으로 5 개의 피토 튜브의 조합으로 이루어진 레이크를 이용하여 수행하였다.

각각의 피토 튜브 끝단에는 5 개의 구멍이 뚫려 있으며, 각 구멍은 피토 튜브 내부에 있는 튜브와 연결되어 있다. 이 구멍들 중의 하나는 피토 튜브 끝단의 중앙에, 한 쌍은 반경방향 면에 또 다른 한 쌍은 접선방향 면에 정렬되어 있으며, 각 피토 튜브의 측면에는 4 개의 정압 구멍이 뚫려져 있다.

반류분포 계측시험으로부터 얻은 결과를 아래와 같이 정리하여 수록하였다.

선형	KS1286	
시험번호	S12865K04	S1286K03
시험조건	4.0 노트	11.5 노트
계측결과와 평균 속도성분 표	Table 23~25	Table 26~28
속도성분의 조화해석 표	Table 14	Table 17
원주방향 속도성분 분포도	Figure 14	Figure 19
축방향 등속도 분포도	Figure 15	Figure 20
반경방향 속도벡터 분포도	Figure 16	Figure 21
반경방향 조화진폭 분포도	Figure 17	Figure 22
반경방향 원주평균속도 분포도	Figure 18	Figure 23

g. 유선가시화시험

페인트 시험(유막법)을 유동 가시화 방법으로 사용하였다. 유선가시화를 통하여 선체주위의 유선을 관찰하여 선형에 따른 국부적인 유동현상을 파악하였다. 페인트는 유성물감, 폴리왁스, 오일 등을 모형선의 예인속도에 따라 적정비율로 혼합하여 사용하였다. 그 결과는 아래의 표와 같이 수록하였다.

속도	11.5 노트
시험결과 (사진)	Figures 26~27

3 해석 결과

대상선(공선호)에 대한 일련의 선형시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 저항추진 시험을 수행하였으며 그 결과는 아래와 같다.

Design draft, 재고프로펠러(KP935)

선속		P_E (kW)	η_D	P_D (kW)	N(rpm)	t	w_s	η_R
5.0	항주	11	0.499	22	117.59	0.394	0.286	1.002
11.5		338	0.487	693	344.88	0.341	0.312	1.002
5.0	예인	208	0.329	630	311.44	0.167	0.284	0.994

Design draft, 설계프로펠러(KP1064)

선속		P_E (kW)	η_D	P_D (kW)	N(rpm)	t	w_s	η_R
5.0	항주	14	0.622	22	106.73	0.116	0.156	0.976
11.5		372	0.560	664	308.94	0.107	0.157	0.986
5.0	예인	210	0.357	589	274.97	-0.117	-0.152	0.957

Tables

	공선호	
		5/30/2012
Table 1	Principal Dimensions of the Hull Form (KS1286)	

Designation	File No.:	s1286s02		s1286s02	
		SYMBOL(unit)	SHIP	MODEL	SHIP	MODEL
Scale ratio	SCALE	7.936		7.936	
Load condition		Design		Design(w/ Duct)	
Draft, moulded	TF(m)	2.250	0.2835	2.250	0.2835
	TA(m)	2.250	0.2835	2.250	0.2835
	TMEAN(m)	2.250	0.2835	2.250	0.2835
Length between per.	LPP(m)	26.000	3.2762	26.000	3.2762
Breadth, moulded	B(m)	7.500	0.9451	7.500	0.9451
Depth, moulded	D(m)				
Number of propeller	NOPROP	1		1	
Length of waterline	LWL(m)	28.381	3.5762	28.381	3.5762
Wetted surface area	S(m ²)	288.2	4.5764	300.6	4.7723
Bilge keel area	SBK(m ²)	0.0	0.0000	0.0	0.0000
Trans. area above WL	AT(m ²)	25.3	0.4011	25.3	0.4011
Displacement volume	DISV(m ³)	306	0.6120	306	0.6120
KB above moulded BL	KB(m)				
LCB from midship, f+	LCB(m)				
LCF from midship, f+	LCF(m)				
Block coef.	CB	0.697		0.697	
Load waterline coef.	CW				
Midship section coef.	CM				
Prismatic coef.	CP				
LPP/B		3.4667		3.4667	
LPP/T		11.5556		11.5556	
B/T		3.3333		3.3333	
LCB% (fwd.+)					

	공선호	
		5/30/2012
Table 2	Principal Dimensions of the Stock Propeller (KP935)	

Designation	FILE NO.: SYMBOL	s1286s02
Scale ratio	SCALE	7.936
Diameter of ship propeller (m)	DIA. S	1.984
Diameter of model propeller (m)	DIA. M	0.2500
Expanded blade area ratio	EAR	0.4974
Propeller pitch ratio, mean	PRMEAN	0.6068
at tip	PRTIP	0.6173
at 0.7R	PR70R	0.6161
at root	PRROOT	0.5573
Chord length-diameter ratio (0.7R)	CR70	0.2834
Max. blade thickn. -dia. ratio (0.7R)	TR70	0.0153
Hub-diameter ratio	HDR	0.1770
Rake angle (deg)	RDR	10.9190
Skew angle (deg)	SKEW	13.04
Number of blades	NPB	4
Turning direction		R.H.
Material		AL
Propeller section type		NACA66
Propeller stock number		KP935

	공선호	
		5/30/2012
Table 4	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP935)	

Propeller KP935 **Scale Ratio: 7.936**

Test	No.	Date	Temp. (deg)	Density (Kg/m3)
POW	P935O01	03-Jun-10	14.2	999.08

KP935 Propeller dimensions				
Diameter	ship(m)	1.9840	Chord length-dia.ratio (0.7R)	0.2834
	model(m)	0.2500	Max. blade thick.-dia.ratio(0.7R)	0.0153
			Hub-diameter ratio	0.1800
Expanded area ratio		0.4974	Rake angle (deg)	10.9200
Pitch ratio	mean	0.6068	Skew angle (deg)	13
	at tip	0.6173	Number of propeller blades	4
	at 0.7R	0.6161	Turning direction	R.H.
	at root	0.5573	Material	AL
Blade roughness KP(micron)		30.0	Propeller section type	NACA66

	Model scale			Full Scale		
	RPS	Temp.	Prop. Rn	Temp.	Prop. Rn	
J	KT	10KQ	ETAO	KT	10KQ	ETAO
0.000	0.2839	0.2634	0.000	0.2839	0.2634	0.000
0.050	0.2705	0.2539	0.085	0.2705	0.2539	0.085
0.100	0.2557	0.2439	0.167	0.2557	0.2439	0.167
0.150	0.2398	0.2335	0.245	0.2398	0.2335	0.245
0.200	0.2230	0.2227	0.319	0.2230	0.2227	0.319
0.250	0.2054	0.2113	0.387	0.2054	0.2113	0.387
0.300	0.1871	0.1992	0.448	0.1871	0.1992	0.448
0.350	0.1681	0.1864	0.502	0.1681	0.1864	0.502
0.400	0.1484	0.1727	0.547	0.1484	0.1727	0.547
0.450	0.1281	0.1580	0.581	0.1281	0.1580	0.581
0.500	0.1069	0.1422	0.598	0.1069	0.1422	0.598
0.550	0.0849	0.1251	0.594	0.0849	0.1251	0.594
0.600	0.0619	0.1065	0.555	0.0619	0.1065	0.555
0.650	0.0376	0.0862	0.451	0.0376	0.0862	0.451
0.700	0.0118	0.0642	0.205	0.0118	0.0642	0.205
0.722	0.0000	0.0540	0.000	0.0000	0.0540	0.000

	공선호	
		5/30/2012
Table 5	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1064)	

Propeller **KP106** **Scale Ratio:** **7.936**

Test	No.	Date	Temp. (deg)	Density (Kg/m3)
POW	P1064O02	15-Feb-12	13.4	999.23

KP106		Propeller dimensions			
Diameter	ship(m)	1.9840	Chord length-dia.ratio (0.7R)		0.2605
	model(m)	0.2500	Max. blade thick.-dia.ratio(0.7R)		0.0132
Expanded area ratio		0.4855	Hub-diameter ratio		0.2000
Pitch ratio	mean	0.8046	rake angle (deg)		0.0000
	at tip	0.7675	Skew angle (deg)		0
	at 0.7R	0.8367	Number of propeller blades		4
at root		0.6904	Turning direction		R.H.
Blade roughness KP(micron)		30.0	Material		AL
			Propeller section type		NACA66

		Model scale			Full Scale		
		RPS	Temp.	Prop. Rn	Temp.		Prop. Rn
		16.0	13.4	4.953E+05	15		5.649E+06
J(POW)	J(ΔJ cor.)	KT	10KQ	ETAO	KT	10KQ	ETAO
0.3000	0.072	0.2962	0.3686	0.092	0.2962	0.3686	0.092
0.3500	0.148	0.2748	0.3478	0.186	0.2748	0.3478	0.186
0.4000	0.222	0.2531	0.3266	0.274	0.2531	0.3266	0.274
0.4500	0.294	0.2310	0.3051	0.355	0.2310	0.3051	0.355
0.5000	0.365	0.2086	0.2831	0.428	0.2086	0.2831	0.428
0.5500	0.435	0.1858	0.2604	0.494	0.1858	0.2604	0.494
0.6000	0.503	0.1625	0.2370	0.549	0.1625	0.2370	0.549
0.6500	0.569	0.1388	0.2126	0.591	0.1388	0.2126	0.591
0.7000	0.634	0.1144	0.1869	0.618	0.1144	0.1869	0.618
0.7500	0.698	0.0892	0.1595	0.621	0.0892	0.1595	0.621
0.8000	0.760	0.0630	0.1301	0.585	0.0630	0.1301	0.585
0.8500	0.820	0.0356	0.0982	0.473	0.0356	0.0982	0.473
0.9000	0.879	0.0069	0.0633	0.152	0.0069	0.0633	0.152
0.9110	0.891	0.0000	0.0548	0.000	0.0000	0.0548	0.000

KORDI	공선힬	
		5/30/2012
Table 6	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1064 & Duct, CFD results)	

J	KT w/ duct	KT w/o duct	J 수정량
0.3	0.2366	0.3069	0.2244
0.4	0.2014	0.2639	0.1845
0.5	0.1656	0.2139	0.1339
0.6	0.1262	0.1633	0.0947
0.7	0.0818	0.1106	0.0640
0.8	0.0343	0.0552	0.0422

	공선호	
		5/30/2012
Table 7	Resistance Performance (KS1286, Design draft, Cruise)	

Draft FP/AP: 2.25 2.25 **Scale Ratio :** 7.936
appendages: 1 Rudder **Analysis Code :** 1111000

Test No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1286 Ship dimension	
				Ship	Model
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45	LPP(m) 26.000 3.2762
SEA			15.0	1025.87	B(m) 7.500 0.9451
Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -				D(m)	
* Model-ship correlation line : 1957 ITTC				XP(m)	
* 2-dimensional method				LWL(m) 28.381 3.5762 CB 0.6972	
* Correlation allowance (2-D) : CA = .000400				S(m2) 288.2 4.5764 CW	
* w/ Bilge keel resistance				SBK(m2) 0.0 0.0000 CM	
* w/ Air resistance : CAA = .0010*AT/S				AT(m2) 25.3 0.4011 CP	
				DISV(m3) 306.0 0.6120	
				KB(m) LPP/B 3.47	
				LCB+f(m) B/TM 3.33	
				LCF+f(m) LCB%	

VS (knot)	PE (kW)	CTS (e-3)	CR (e-3)	CFS (e-3)	CFM (e-3)	CTM (e-3)	RTM (N)	VM (m/s)	FN
4.00	5.7	4.436	1.634	2.315	3.879	5.512	6.72	0.7305	0.1233
5.00	11.2	4.459	1.733	2.238	3.713	5.446	10.37	0.9131	0.1542
6.00	18.9	4.351	1.685	2.178	3.586	5.271	14.46	1.0957	0.1850
7.00	30.1	4.364	1.748	2.129	3.483	5.231	19.53	1.2783	0.2159
8.00	50.0	4.852	2.276	2.088	3.398	5.674	27.66	1.4609	0.2467
9.00	89.5	6.100	3.560	2.053	3.325	6.884	42.49	1.6435	0.2775
10.00	162.1	8.052	5.542	2.022	3.262	8.804	67.08	1.8261	0.3084
11.00	271.8	10.145	7.662	1.995	3.206	10.868	100.19	2.0088	0.3392
11.50	337.7	11.033	8.563	1.983	3.181	11.744	118.33	2.1001	0.3546
12.00	411.3	11.827	9.368	1.971	3.157	12.525	137.41	2.1914	0.3700
13.00	623.4	14.098	11.661	1.949	3.112	14.773	190.22	2.3740	0.4009

	공선호	
		5/30/2012
Table 8	Model Test Results (KS1286, Design draft, Cruise, Stock P.)	

Draft FP/AP: **2.25 2.25**
appendages: **1 Rudder**

Scale Ratio : **7.936**
Condition : **KP935**

NOPROP : **1**

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45
SP	S1286S02	10-7-19	18.3	998.45
POW	P935O01	10-6-3	14.2	999.08

KP935 Propeller dimension			
DIA.s	1.984	CR70(chord)	0.2834
DIA.m	0.25	TR70(thick)	0.0153
EAR	0.4974	HDR(hub)	0.177
PRMEAN	0.6068	Rake(deg)	10.919
TIP	0.6173	SKEW(deg)	13.04
0.70R	0.6161	Turn.	R.H.
ROOT	0.5573	Mater.	AL
Type	NACA66	Z :	4

KS1286	Ship dimension			
	Ship	Model		
LPP(m)	26.000	3.2762		
B(m)	7.500	0.9451		
D(m)				
XP(m)				
LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
S(m2)	288.2	4.5764	CW	
SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
DISV(m3)	306.0	0.6120		
KB(m)			LPP/B	3.47
LCB+f(m)			B/TM	3.33
LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	VM (m/s)	RTM (N)	FD (N)	TM (N)	QM (Nm)	NM (rps)	THDF	WFTM	ETAR	CR (e-3)
4.00	0.730	6.72	1.42	8.35	0.270	4.34	0.365	0.281	1.002	1.634
5.00	0.913	10.37	2.05	13.74	0.439	5.48	0.394	0.286	1.002	1.733
6.00	1.096	14.46	2.76	19.75	0.629	6.55	0.408	0.291	1.002	1.685
7.00	1.278	19.53	3.56	27.02	0.858	7.64	0.409	0.295	1.002	1.748
8.00	1.461	27.66	4.43	38.72	1.205	8.93	0.400	0.300	1.002	2.276
9.00	1.644	42.49	5.38	60.33	1.810	10.65	0.385	0.304	1.002	3.560
10.00	1.826	67.08	6.39	95.86	2.771	12.79	0.367	0.307	1.002	5.542
11.00	2.009	100.19	7.48	142.42	4.005	15.05	0.349	0.311	1.002	7.662
11.50	2.100	118.33	8.04	167.35	4.665	16.13	0.341	0.312	1.002	8.563
12.00	2.191	137.41	8.62	193.38	5.351	17.18	0.334	0.314	1.002	9.368
13.00	2.374	190.22	9.83	267.25	7.264	19.73	0.325	0.316	1.002	11.661

	공선호	
		5/30/2012
Table 9	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise, Stock P.)	

Draft FP/AP: 2.25 2.25
appendages: 1 Rudder

Scale Ratio : 7.936
Condition : KP935

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45
SP	S1286S02	10-7-19	18.3	998.45
POW	P935O01	10-6-3	14.2	999.08

VS (knot)	PE (kW)	PD (kW)	N (rpm)	FN
4.00	6	11	93.06	0.1233
5.00	11	22	117.59	0.1542
6.00	19	39	140.61	0.1850
7.00	30	61	163.83	0.2159
8.00	50	100	191.25	0.2467
9.00	90	179	228.16	0.2775
10.00	162	327	273.64	0.3084
11.00	272	557	322.08	0.3392
11.50	338	693	344.88	0.3546
12.00	411	843	366.83	0.3700
13.00	623	1321	421.87	0.4009

Analysis method -- Based on 1978 ITTC

performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness KP = 30.e-6

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : CA = .000400

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : CAA = .0010*AT/S

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	288.2	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

VS (knot)	CTS (e-3)	CR (e-3)	ADVCA	THDF	WFTM	WFTS	ETAH	ETAR	ETAO	ETAD
4.00	4.436	1.634	0.481	0.365	0.281	0.281	0.883	1.002	0.590	0.522
5.00	4.459	1.733	0.472	0.394	0.286	0.286	0.849	1.002	0.586	0.499
6.00	4.351	1.685	0.471	0.408	0.291	0.291	0.835	1.002	0.586	0.490
7.00	4.364	1.748	0.469	0.409	0.295	0.295	0.838	1.002	0.585	0.492
8.00	4.852	2.276	0.456	0.400	0.300	0.300	0.857	1.002	0.582	0.500
9.00	6.100	3.560	0.427	0.385	0.304	0.304	0.884	1.002	0.564	0.499
10.00	8.052	5.542	0.394	0.367	0.307	0.307	0.913	1.002	0.541	0.495
11.00	10.145	7.662	0.366	0.349	0.311	0.311	0.945	1.002	0.515	0.488
11.50	11.033	8.563	0.357	0.341	0.312	0.312	0.958	1.002	0.508	0.487
12.00	11.827	9.368	0.349	0.334	0.314	0.314	0.971	1.002	0.501	0.488
13.00	14.098	11.661	0.328	0.325	0.316	0.316	0.987	1.002	0.477	0.472

	공선호	
		5/30/2012
Table 10	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise, Stock P.)	

Draft FP/AP:	2.25	2.25	Scale Ratio :	7.936
appendages:	1 Rudder		Condition :	KP935

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45
SP	S1286S02	10-7-19	18.3	998.45
POW	P935O01	10-6-3	14.2	999.08

VS (knot)	PE (kW)	PB (kW)	N (rpm)	FN
4.00	6	11	93.06	0.1233
5.00	11	23	117.59	0.1542
6.00	19	39	140.61	0.1850
7.00	30	62	163.83	0.2159
8.00	50	101	191.25	0.2467
9.00	90	181	228.16	0.2775
10.00	162	330	273.64	0.3084
11.00	272	563	322.08	0.3392
11.50	338	700	344.88	0.3546
12.00	411	852	366.83	0.3700
13.00	623	1334	421.87	0.4009

Analysis method -- Based on 1978 ITTC

performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness $KP = 30.e-6$

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : $CA = .000400$

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : $CAA = .0010*AT/S$

* Transmission Efficiency = .990

* w/o DCFC-DWC correction

* w/o CP-CN correction

KS1286	Ship dimension		
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	288.2	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

KORDI	공선호	5/30/2012
		Table 11
Resistance Performance (KS1286, Design draft, Trawl)		

Draft FP/AP: 2.25 2.25 **Scale Ratio :** 7.936
appendages: 1 Rudder **Analysis Code :** 1111000

Test No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1286		Ship dimension			
				Ship	Model	Ship	Model		
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45	LPP(m)	26.000	3.2762		
SEA			15.0	1025.87	B(m)	7.500	0.9451		
Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -					D(m)				
* Model-ship correlation line : 1957 ITTC					XP(m)				
* 2-dimensional method					LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
* Correlation allowance (2-D) : CA = .000400					S(m2)	288.2	4.5764	CW	
* w/ Bilge keel resistance					SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
* w/ Air resistance : CAA = .0010*AT/S					AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
					DISV(m3)	306.0	0.6120		
					KB(m)			LPP/B	3.47
					LCB+f(m)			B/TM	3.33
					LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	PE (kW)	CTS (e-3)	CR* (e-3)	CFS (e-3)	CFM (e-3)	CTM (e-3)	RTM (N)	VM (m/s)	FN
4.00	85.8	66.645	63.842	2.315	3.879	67.721	82.55	0.7305	0.1233
5.00	162.1	64.411	61.685	2.238	3.713	65.398	124.56	0.9131	0.1542
6.00	271.8	62.526	59.861	2.178	3.586	63.446	174.02	1.0957	0.1850

*CR 에는 어망의 예인력이 포함되어 있음

	공선호	
		5/30/2012
Table 12	Model Test Results (KS1286, Design draft, Trawl, Stock P.)	

Draft FP/AP: **2.25 2.25**
appendages: **1 Rudder**

Scale Ratio : **7.936**
Condition : **KP935**

NOPROP : **1**

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45
SP	S1286S02	10-7-19	18.3	998.45
POW	P935O01	10-6-3	14.2	999.08

KP935 Propeller dimension			
DIA.s	1.984	CR70(chord)	0.2834
DIA.m	0.25	TR70(thick)	0.0153
EAR	0.4974	HDR(hub)	0.177
PRMEAN	0.6068	Rake(deg)	10.919
TIP	0.6173	SKEW(deg)	13.04
0.70R	0.6161	Turn.	R.H.
ROOT	0.5573	Mater.	AL
Type	NACA66	Z :	4

KS1286	Ship dimension			
	Ship	Model		
LPP(m)	26.000	3.2762		
B(m)	7.500	0.9451		
D(m)				
XP(m)				
LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
S(m2)	288.2	4.5764	CW	
SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
DISV(m3)	306.0	0.6120		
KB(m)			LPP/B	3.47
LCB+f(m)			B/TM	3.33
LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	VM (m/s)	RTM (N)	FD (N)	TM (N)	QM (Nm)	NM (rps)	THDF	WFTM	ETAR	CR*
4.00	0.730	82.55	1.42	97.99	2.470	10.58	0.172	0.291	0.988	63.842
5.00	0.913	124.56	2.05	147.08	3.696	13.01	0.167	0.284	0.994	61.685
6.00	1.096	174.02	2.76	205.10	5.159	15.30	0.165	0.318	0.990	59.861

*CR 에는 어망의 예인력이 포함되어 있음

	<p style="text-align: center;">공선호</p>	
		5/30/2012
Table 13	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl, Stock P.)	

Draft FP/AP:	2.25	2.25	Scale Ratio :	7.936
appendages:	1 Rudder		Condition :	KP935

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45
SP	S1286S02	10-7-19	18.3	998.45
POW	P935O01	10-6-3	14.2	999.08

VS (knot)	PE (kW)	PD (kW)	N (rpm)	FN
4.00	111	348	254.49	0.1233
5.00	208	630	311.44	0.1542
6.00	346	1031	366.19	0.1850

Analysis method -- Based on 1978 ITTC

performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness $KP = 30.e-6$

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : $CA = .000400$

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : $CAA = .0010*AT/S$

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	288.2	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

VS (knot)	CTS (e-3)	CR* (e-3)	ADVCA	THDF	WFTM	WFTS	ETAH	ETAR	ETAO	ETAD
4.00	86.102	83.300	0.179	0.172	0.291	0.267	1.130	0.988	0.286	0.319
5.00	82.560	79.834	0.184	0.167	0.284	0.262	1.128	0.994	0.294	0.329
6.00	79.655	76.990	0.182	0.165	0.318	0.286	1.170	0.990	0.290	0.336

*CR 에는 어망의 예인력이 포함되어 있음

	공선호	
		5/30/2012
Table 14	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl, Stock P.)	

Draft FP/AP:	2.25	2.25	Scale Ratio :	7.936
appendages:	1 Rudder		Condition :	KP935

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R01	10-7-19	18.3	998.45
SP	S1286S02	10-7-19	18.3	998.45
POW	P935O01	10-6-3	14.2	999.08

VS (knot)	PE (kW)	PB (kW)	N (rpm)	FN
4.00	111	351	254.49	0.1233
5.00	208	637	311.44	0.1542
6.00	346	1042	366.19	0.1850

Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -
 * Model-ship correlation line : 1957 ITTC
 * Propeller blade roughness KP = 30.e-6

* 2-dimensional method
 * Correlation allowance (2-D) : CA = .000400
 * w/ Bilge keel resistance
 * w/ Air resistance : CAA = .0010*AT/S
 * Transmission Efficiency = .990

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	288.2	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

* w/o DCFC-DWC correction
 * w/o CP-CN correction

	공선호	
		5/30/2012
Table 15	Resistance Performance (KS1286, Design draft, Cruise with Duct)	

Draft FP/AP: 2.25 2.25 **Scale Ratio : 7.936**
appendages: 1 Rudder **Analysis Code : 1111000**

Test No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1286		Ship dimension			
				Ship	Model	Ship	Model		
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23	LPP(m)	26.000	3.2762		
SEA			15.0	1025.87	B(m)	7.500	0.9451		
Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -					D(m)				
* Model-ship correlation line : 1957 ITTC					XP(m)				
* 2-dimensional method					LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
* Correlation allowance (2-D) : CA = 0.000400					S(m2)	300.6	4.7723	CW	
* w/ Bilge keel resistance					SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
* w/ Air resistance : CAA = 0.0010*AT/S					AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
					DISV(m3)	306.0	0.6120		
					KB(m)			LPP/B	3.47
					LCB+f(m)			B/TM	3.33
					LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	PE (kW)	CTS (e-3)	CR (e-3)	CFS (e-3)	CFM (e-3)	CTM (e-3)	RTM (N)	VM (m/s)	FN
4.00	7.1	5.312	2.512	2.315	3.978	6.491	8.26	0.7305	0.1233
5.00	13.8	5.271	2.548	2.238	3.806	6.355	12.63	0.9131	0.1542
6.00	23.1	5.085	2.422	2.178	3.674	6.096	17.45	1.0957	0.1850
7.00	36.3	5.041	2.427	2.129	3.568	5.995	23.36	1.2783	0.2159
8.00	59.1	5.499	2.927	2.088	3.479	6.406	32.60	1.4609	0.2467
9.00	103.4	6.760	4.223	2.053	3.404	7.626	49.12	1.6435	0.2775
10.00	184.3	8.779	6.273	2.022	3.338	9.611	76.42	1.8261	0.3084
11.00	304.1	10.887	8.407	1.995	3.281	11.688	112.45	2.0088	0.3392
11.50	371.8	11.647	9.180	1.983	3.254	12.435	130.76	2.1001	0.3546
12.00	441.2	12.165	9.710	1.971	3.229	12.939	148.15	2.1914	0.3700
13.00	666.7	14.459	12.026	1.949	3.183	15.209	204.37	2.3740	0.4009

	공선호	
		5/30/2012
Table 16	Model Test Results (KS1286, Design draft, Cruise with Duct, Design P.)	

Draft FP/AP: 2.25 2.25
appendages: 1 Rudder

Scale Ratio : 7.936
Condition : KP1064J

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23
SP	S1286S12	12-2-18	13.4	999.23
POW	P1064O02	12-2-15	13.4	999.23

KP106 Propeller dimension			
DIA.s	1.984	CR70(chord)	0.2605
DIA.m	0.25	TR70(thick)	0.0132
EAR	0.4855	HDR(hub)	0.2
PRMEAN	0.8046	RDR(rake)	0
TIP	0.7675	SKEW(deg)	0
0.70R	0.8367	Turn.	R.H.
ROOT	0.6904	Mater.	AL
Type	NACA66	Z :	4

	KS1286 Ship dimension			
	Ship	Model		
LPP(m)	26.000	3.2762		
B(m)	7.500	0.9451		
D(m)				
XP(m)				
LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
S(m2)	300.6	4.7723	CW	
SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
DISV(m3)	306.0	0.6120		
KB(m)			LPP/B	3.47
LCB+f(m)			B/TM	3.33
LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	VM (m/s)	RTM (N)	FD (N)	TM (N)	QM (Nm)	NM (rps)	THDF	WFTM	ETAR	CR (e-3)
4.00	0.730	8.26	1.61	7.33	0.303	3.97	0.093	0.157	0.974	2.512
5.00	0.913	12.63	2.32	11.66	0.480	4.98	0.116	0.156	0.976	2.548
6.00	1.096	17.45	3.14	16.43	0.676	5.93	0.129	0.162	0.977	2.422
7.00	1.278	23.36	4.05	22.32	0.914	6.88	0.135	0.169	0.979	2.427
8.00	1.461	32.60	5.04	31.82	1.282	8.03	0.134	0.171	0.980	2.927
9.00	1.644	49.12	6.12	49.36	1.928	9.57	0.129	0.169	0.982	4.223
10.00	1.826	76.42	7.28	78.65	2.972	11.50	0.121	0.163	0.984	6.273
11.00	2.009	112.45	8.52	116.91	4.319	13.53	0.111	0.158	0.985	8.407
11.50	2.100	130.76	9.17	136.16	4.994	14.45	0.107	0.157	0.986	9.180
12.00	2.191	148.15	9.83	154.03	5.618	15.26	0.102	0.160	0.987	9.710
13.00	2.374	204.37	11.22	213.43	7.621	17.39	0.095	0.177	0.989	12.026

	공선호	
		5/30/2012
Table 17	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise with Duct, Design P.)	

Draft FP/AP:	2.25	2.25	Scale Ratio :	7.936
appendages:	1 Rudder		Condition :	KP1064J

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23
SP	S1286S12	12-2-18	13.4	999.23
POW	P1064O02	12-2-15	13.4	999.23

VS (knot)	PE (kW)	PD (kW)	N (rpm)	FN
4.00	7	11	85.37	0.1233
5.00	14	22	106.73	0.1542
6.00	23	37	126.93	0.1850
7.00	36	59	147.43	0.2159
8.00	59	96	172.20	0.2467
9.00	103	170	204.51	0.2775
10.00	184	317	246.17	0.3084
11.00	304	537	289.09	0.3392
11.50	372	664	308.94	0.3546
12.00	441	790	326.24	0.3700
13.00	667	1219	371.67	0.4009

Analysis method -- Based on 1978 ITTC

performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness KP = 30.e-6

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : CA = 0.000400

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : CAA = 0.0010*AT/S

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	300.6	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

VS (knot)	CTS (e-3)	CR (e-3)	ADVCA	THDF	WFTM	WFTS	ETAH	ETAR	ETAO	ETAD
4.00	5.312	2.512	0.621	0.093	0.157	0.148	1.064	0.974	0.611	0.634
5.00	5.271	2.548	0.615	0.116	0.156	0.156	1.047	0.976	0.608	0.622
6.00	5.085	2.422	0.616	0.129	0.162	0.162	1.039	0.977	0.609	0.618
7.00	5.041	2.427	0.614	0.135	0.169	0.169	1.041	0.979	0.607	0.619
8.00	5.499	2.927	0.599	0.134	0.171	0.171	1.045	0.980	0.601	0.615
9.00	6.760	4.223	0.569	0.129	0.169	0.169	1.048	0.982	0.591	0.609
10.00	8.779	6.273	0.529	0.121	0.163	0.163	1.050	0.984	0.563	0.582
11.00	10.887	8.407	0.498	0.111	0.158	0.158	1.056	0.985	0.545	0.567
11.50	11.647	9.180	0.488	0.107	0.157	0.157	1.059	0.986	0.536	0.560
12.00	12.165	9.710	0.481	0.102	0.160	0.160	1.069	0.987	0.529	0.559
13.00	14.459	12.026	0.448	0.095	0.177	0.177	1.100	0.989	0.503	0.547

	공선호	
		5/30/2012
Table 18	Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Cruise with Duct, Design P.)	

Draft FP/AP: 2.25 2.25 **Scale Ratio : 7.936**
appendages: 1 Rudder **Condition : KP1064J**

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23
SP	S1286S12	12-2-18	13.4	999.23
POW	P1064O02	12-2-15	13.4	999.23

VS (knot)	PE (kW)	PB (kW)	N (rpm)	FN
4.00	7	11	85.37	0.1233
5.00	14	22	106.73	0.1542
6.00	23	38	126.93	0.1850
7.00	36	59	147.43	0.2159
8.00	59	97	172.20	0.2467
9.00	103	172	204.51	0.2775
10.00	184	320	246.17	0.3084
11.00	304	542	289.09	0.3392
11.50	372	671	308.94	0.3546
12.00	441	798	326.24	0.3700
13.00	667	1232	371.67	0.4009

Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness $KP = 30.e-6$

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : $CA = 0.000400$

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : $CAA = 0.0010*AT/S$

* Transmission Efficiency = 0.990

* w/o DCFC-DWC correction

* w/o CP-CN correction

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	300.6	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

KORDI	공선호	5/30/2012
		Table 19
Resistance Performance (KS1286, Design draft, Trawl with Duct)		

Draft FP/AP: 2.25 2.25 **Scale Ratio : 7.936**
appendages: 1 Rudder **Analysis Code : 1111000**

Test No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1286		Ship dimension			
				Ship	Model	Ship	Model		
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23	LPP(m)	26.000	3.2762		
SEA			15.0	1025.87	B(m)	7.500	0.9451		
Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -					D(m)				
* Model-ship correlation line : 1957 ITTC					XP(m)				
* 2-dimensional method					LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
* Correlation allowance (2-D) : CA = 0.000400					S(m2)	300.6	4.7723	CW	
* w/ Bilge keel resistance					SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
* w/ Air resistance : CAA = 0.0010*AT/S					AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
					DISV(m3)	306.0	0.6120		
					KB(m)			LPP/B	3.47
					LCB+f(m)			B/TM	3.33
					LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	PE (kW)	CTS (e-3)	CR* (e-3)	CFS (e-3)	CFM (e-3)	CTM (e-3)	RTM (N)	VM (m/s)	FN
4.00	87.3	64.968	62.169	2.315	3.978	66.147	84.15	0.7305	0.1233
5.00	164.7	62.760	60.037	2.238	3.806	63.844	126.91	0.9131	0.1542
6.00	276.0	60.872	58.210	2.178	3.674	61.884	177.14	1.0957	0.1850

*CR 에는 어망의 예인력이 포함되어 있음

	공선호	
		5/30/2012
Table 20	Model Test Results (KS1286, Design draft, Trawl with Duct, Design P.)	

Draft FP/AP: 2.25 2.25
appendages: 1 Rudder

Scale Ratio : 7.936
Condition : KP1064J

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23
SP	S1286S12	12-2-18	13.4	999.23
POW	P1064O02	12-2-15	13.4	999.23

KP106 Propeller dimension			
DIA.s	1.984	CR70(chord)	0.2605
DIA.m	0.25	TR70(thick)	0.0132
EAR	0.4855	HDR(hub)	0.2
PRMEAN	0.8046	RDR(rake)	0
TIP	0.7675	SKEW(deg)	0
0.70R	0.8367	Turn.	R.H.
ROOT	0.6904	Mater.	AL
Type	NACA66	Z :	4

	KS1286 Ship dimension			
	Ship	Model		
LPP(m)	26.000	3.2762		
B(m)	7.500	0.9451		
D(m)				
XP(m)				
LWL(m)	28.381	3.5762	CB	0.6972
S(m2)	300.6	4.7723	CW	
SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
AT(m2)	25.3	0.4011	CP	
DISV(m3)	306.0	0.6120		
KB(m)			LPP/B	3.47
LCB+f(m)			B/TM	3.33
LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	VM (m/s)	RTM (N)	FD (N)	TM (N)	QM (Nm)	NM (rps)	THDF	WFTM	ETAR	CR*
4.00	0.730	84.15	1.61	73.57	2.603	9.38	-0.122	-0.114	0.952	62.169
5.00	0.913	126.91	2.32	111.54	3.906	11.44	-0.117	-0.049	0.957	60.037
6.00	1.096	177.14	3.14	151.44	5.327	13.34	-0.149	-0.021	0.953	58.210

*CR 에는 어망의 예인력이 포함되어 있음

	공선호	
		5/30/2012
Table 21	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl with Duct, Design P.)	

Draft FP/AP:	2.25	2.25	Scale Ratio :	7.936
appendages:	1 Rudder		Condition :	KP1064J

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23
SP	S1286S12	12-2-18	13.4	999.23
POW	P1064O02	12-2-15	13.4	999.23

VS (knot)	PE (kW)	PD (kW)	N (rpm)	FN
4.00	112	323	225.30	0.1233
5.00	210	589	274.97	0.1542
6.00	350	936	321.53	0.1850

Analysis method -- Based on 1978 ITTC

performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness $KP = 30.e-6$

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : $CA = 0.000400$

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : $CAA = 0.0010*AT/S$

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	300.6	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

VS (knot)	CTS (e-3)	CR* (e-3)	ADVCA	THDF	WFTM	WFTS	ETAH	ETAR	ETAO	ETAD
4.00	83.608	80.809	0.333	-0.122	-0.114	-0.207	0.930	0.952	0.393	0.348
5.00	80.150	77.427	0.326	-0.117	-0.049	-0.152	0.970	0.957	0.385	0.357
6.00	77.282	74.620	0.335	-0.149	-0.021	-0.155	0.994	0.953	0.395	0.374

*CR 에는 어망의 예인력이 포함되어 있음

	공선호	5/30/2012
		Table 22
Trial Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Trawl with Duct, Design P.)		

Draft FP/AP: 2.25 2.25 **Scale Ratio :** 7.936
appendages: 1 Rudder **Condition :** KP1064J

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1286R11	12-2-18	13.4	999.23
SP	S1286S12	12-2-18	13.4	999.23
POW	P1064O02	12-2-15	13.4	999.23

VS (knot)	PE (kW)	PB (kW)	N (rpm)	FN
4.00	112	326	225.30	0.1233
5.00	210	595	274.97	0.1542
6.00	350	945	321.53	0.1850

Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness $KP = 30.e-6$

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : $CA = 0.000400$

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : $CAA = 0.0010*AT/S$

* Transmission Efficiency = 0.990

KS1286 Ship dimension			
LWL(m)	28.381	Tm(m)	2.250
S(m2)	300.6	AT(m2)	25.3
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	1.984

* w/o DCFC-DWC correction

* w/o CP-CN correction

Table 23

Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-I (KS1286, Design draft, 4.0knots)

Test Number	s1286K04	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	4.00	Water Temp.(deg)	18.4					
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	2.25 2.25	Model Speed(m/s)	0.7305	Model Prop. Dia(m)	0.2500					
	Angle (Deg.)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	r/R	100	110	120	130	140	150	160	170	175	180	185
		190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
0.3000	VX/V	0.024	0.038	0.054	0.058	0.101	0.036	0.246	0.347	0.446	0.516	0.598
		0.636	0.670	0.603	0.659	0.651	0.583	0.463	0.179	0.107	0.052	0.144
		0.261	0.431	0.519	0.560	0.606	0.565	0.617	0.612	0.511	0.495	0.374
	VR/V	-0.020	-0.012	-0.021	-0.032	-0.019	-0.030	-0.049	-0.070	-0.080	-0.092	-0.106
		-0.123	-0.145	-0.155	-0.181	-0.190	-0.168	-0.129	-0.018	0.075	0.043	0.067
		-0.018	-0.110	-0.148	-0.162	-0.171	-0.145	-0.142	-0.124	-0.104	-0.089	-0.078
	VT/V	0.022	-0.003	-0.002	0.017	0.009	-0.016	-0.058	-0.079	-0.114	-0.111	-0.135
		-0.114	-0.114	-0.040	-0.011	0.053	0.123	0.182	0.151	0.109	0.044	-0.133
		-0.215	-0.214	-0.158	-0.089	0.000	0.049	0.082	0.115	0.106	0.120	0.096
0.5000	VX/V	0.106	0.063	0.080	0.095	0.177	0.355	0.528	0.744	0.873	0.903	0.933
		0.942	0.948	0.952	0.940	0.924	0.907	0.801	0.424	0.189	0.124	0.207
		0.454	0.785	0.890	0.885	0.910	0.916	0.901	0.888	0.881	0.874	0.813
	VR/V	-0.021	-0.053	-0.037	-0.030	-0.017	0.019	0.026	0.036	0.016	-0.028	-0.056
		-0.075	-0.095	-0.112	-0.125	-0.139	-0.154	-0.164	-0.081	0.070	0.104	0.064
		-0.067	-0.155	-0.152	-0.139	-0.120	-0.115	-0.097	-0.078	-0.059	-0.036	-0.001
	VT/V	-0.091	0.047	-0.074	-0.084	-0.122	-0.170	-0.201	-0.233	-0.229	-0.219	-0.203
		-0.177	-0.164	-0.147	-0.114	-0.082	-0.049	0.085	0.249	0.169	-0.109	-0.182
		-0.288	-0.138	-0.050	0.014	0.054	0.097	0.118	0.144	0.156	0.170	0.172
0.7000	VX/V	0.040	0.078	0.091	0.084	0.163	0.353	0.685	0.818	0.895	0.919	0.924
		0.934	0.929	0.937	0.930	0.928	0.932	0.935	0.641	0.094	0.040	0.137
		0.742	0.976	0.972	0.966	0.961	0.957	0.940	0.940	0.934	0.925	0.880
	VR/V	0.001	0.012	0.003	-0.002	0.018	0.008	0.028	0.013	0.000	-0.024	-0.044
		-0.059	-0.074	-0.083	-0.095	-0.107	-0.118	-0.138	-0.131	0.016	0.034	0.021
		-0.145	-0.138	-0.123	-0.112	-0.103	-0.091	-0.078	-0.067	-0.052	-0.036	-0.003
	VT/V	-0.034	-0.007	-0.017	-0.023	-0.062	-0.125	-0.197	-0.200	-0.200	-0.189	-0.176
		-0.157	-0.145	-0.119	-0.102	-0.080	-0.052	0.003	0.203	0.080	-0.031	-0.117
		-0.155	-0.002	0.039	0.069	0.099	0.122	0.151	0.173	0.187	0.212	0.215
0.9000	VX/V	0.075	0.073	0.084	0.060	0.127	0.323	0.645	0.844	0.903	0.945	0.955
		0.959	0.956	0.953	0.951	0.955	0.952	0.954	0.907	0.055	0.022	0.142
		0.933	0.962	0.963	0.957	0.960	0.960	0.956	0.949	0.941	0.935	0.885
	VR/V	0.020	-0.012	0.007	-0.009	0.057	0.007	0.060	0.057	0.005	-0.043	-0.075
		-0.094	-0.118	-0.138	-0.151	-0.162	-0.180	-0.187	-0.196	0.046	0.019	0.065
		-0.195	-0.186	-0.178	-0.161	-0.144	-0.137	-0.118	-0.095	-0.071	-0.040	0.010
	VT/V	-0.006	-0.062	-0.005	-0.014	-0.066	-0.122	-0.160	-0.192	-0.190	-0.177	-0.162
		-0.143	-0.132	-0.120	-0.099	-0.080	-0.066	-0.046	0.054	0.038	-0.017	-0.131
		-0.072	0.009	0.030	0.046	0.064	0.086	0.099	0.114	0.126	0.143	0.148
1.1000	VX/V	0.047	0.026	0.043	0.037	0.079	0.270	0.658	0.808	0.901	0.935	0.937
		0.943	0.940	0.946	0.943	0.943	0.950	0.959	0.968	0.070	0.027	0.450
		0.980	0.981	0.983	0.973	0.967	0.965	0.945	0.943	0.938	0.931	0.869
	VR/V	-0.010	0.016	-0.005	0.009	0.030	-0.002	0.042	0.031	-0.024	-0.058	-0.084
		-0.103	-0.124	-0.132	-0.146	-0.159	-0.168	-0.186	-0.169	-0.017	0.023	-0.151
		-0.183	-0.188	-0.173	-0.160	-0.152	-0.139	-0.121	-0.109	-0.089	-0.067	-0.027
	VT/V	-0.041	-0.026	-0.036	-0.032	-0.066	-0.135	-0.212	-0.214	-0.209	-0.190	-0.174
		-0.154	-0.141	-0.117	-0.104	-0.085	-0.066	-0.043	0.038	0.060	-0.026	-0.086
		-0.029	0.041	0.065	0.080	0.105	0.123	0.149	0.170	0.185	0.212	0.221
r/R	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000				
VX/V	0.365	0.541	0.629	0.660	0.672	0.680	0.685	0.683	Volumetric			
VR/V	-0.084	-0.069	-0.056	-0.047	-0.046	-0.052	-0.061	-0.067	Mean of VX/V = 0.650			
VT/V	-0.002	-0.030	-0.041	-0.023	-0.003	-0.006	-0.016	-0.014	Nominal Wake Fraction(WN) = 0.350			

Table 24

Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-II (KS1286, Design draft, 4.0knots)

Test Number	s1286K04	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	4.00	Water Temp.(deg)	18.4
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	2.25 2.25	Model Speed(m/s)	0.7305	Model Prop. Dia(m)	0.2500

Angle (Deg.)		300	310	320	330	340	350	355	360
r/R									
0.3000	VX/V	0.238	0.147	0.078	0.039	0.080	0.057	0.033	0.024
	VR/V	-0.060	-0.052	-0.014	-0.019	-0.012	-0.018	-0.027	-0.020
	VT/V	0.074	0.054	0.065	0.036	0.024	0.018	0.024	0.022
0.5000	VX/V	0.718	0.488	0.216	0.138	0.095	0.099	0.086	0.106
	VR/V	0.008	0.005	-0.022	-0.021	-0.023	-0.022	-0.028	-0.021
	VT/V	0.175	0.122	0.008	-0.041	-0.082	-0.085	-0.076	-0.091
0.7000	VX/V	0.764	0.552	0.266	0.122	0.091	0.100	0.116	0.040
	VR/V	0.007	0.009	0.010	0.004	0.001	0.003	0.001	0.001
	VT/V	0.202	0.173	0.103	0.020	-0.018	-0.013	-0.011	-0.034
0.9000	VX/V	0.806	0.648	0.277	0.044	0.047	0.061	0.081	0.075
	VR/V	0.039	0.056	0.046	0.022	-0.007	0.006	0.009	0.020
	VT/V	0.154	0.151	0.094	0.023	0.008	-0.003	0.000	-0.006
1.1000	VX/V	0.762	0.568	0.222	0.081	0.025	0.039	0.046	0.047
	VR/V	0.019	0.022	0.012	0.026	-0.003	-0.004	0.006	-0.010
	VT/V	0.215	0.200	0.116	0.056	-0.021	-0.033	-0.036	-0.041

r/R	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
VX/V	0.365	0.541	0.629	0.660	0.672	0.680	0.685	0.683
VR/V	-0.084	-0.069	-0.056	-0.047	-0.046	-0.052	-0.061	-0.067
VT/V	-0.002	-0.030	-0.041	-0.023	-0.003	-0.006	-0.016	-0.014

Volumetric
 Mean of VX/V = 0.650
Nominal Wake Fraction(WN) = 0.350

Table 25

**Harmonic Analysis of Velocity Components
(KS1286, Design draft, 4.0knots)**

Test Number	s1286K04	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	4.00	Water Temp.(deg)	18.4
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	2.25 2.25	Model Speed(m/s)	0.7305	Model Prop. Dia(m)	0.2500

k		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r/R		Harmonic analysis of axial velocity component										
0.3000	a(k)	0.365	-0.211	-0.209	0.095	-0.022	0.061	-0.036	0.024	-0.026	-0.002	-0.012
	b(k)	0.000	0.032	-0.001	0.001	-0.008	-0.010	0.006	-0.005	0.013	-0.005	-0.002
	c(k)	0.365	0.214	0.209	0.095	0.024	0.062	0.037	0.024	0.029	0.006	0.012
0.5000	a(k)	0.629	-0.281	-0.337	0.033	-0.064	0.116	-0.032	0.056	-0.049	0.027	-0.028
	b(k)	0.000	0.027	0.006	0.003	0.003	-0.005	-0.006	-0.011	-0.003	-0.005	0.002
	c(k)	0.629	0.282	0.337	0.033	0.064	0.116	0.032	0.057	0.049	0.027	0.029
0.7000	a(k)	0.672	-0.313	-0.323	-0.007	-0.069	0.125	-0.032	0.087	-0.063	0.051	-0.063
	b(k)	0.000	0.005	0.027	0.001	0.003	-0.016	-0.007	-0.009	0.006	-0.001	0.006
	c(k)	0.672	0.314	0.324	0.007	0.069	0.126	0.033	0.087	0.063	0.051	0.064
0.9000	a(k)	0.685	-0.345	-0.324	-0.030	-0.055	0.121	-0.014	0.096	-0.059	0.057	-0.078
	b(k)	0.000	0.007	0.012	0.003	0.005	0.001	0.002	-0.004	-0.001	-0.006	-0.002
	c(k)	0.685	0.345	0.325	0.030	0.056	0.121	0.015	0.097	0.059	0.057	0.078
1.1000	a(k)	0.677	-0.376	-0.312	-0.038	-0.042	0.114	-0.012	0.081	-0.057	0.050	-0.073
	b(k)	0.000	0.005	0.019	-0.002	-0.001	-0.009	-0.002	-0.002	0.007	-0.001	0.007
	c(k)	0.677	0.376	0.313	0.038	0.042	0.115	0.012	0.081	0.058	0.050	0.073
r/R		Harmonic analysis of radial velocity component										
0.3000	a(k)	-0.084	0.048	0.043	-0.038	0.029	-0.027	0.014	-0.014	0.011	-0.005	0.008
	b(k)	0.000	-0.005	0.002	-0.005	0.001	-0.001	-0.001	0.001	-0.001	0.001	0.000
	c(k)	0.084	0.048	0.043	0.039	0.029	0.027	0.014	0.014	0.011	0.005	0.008
0.5000	a(k)	-0.056	0.056	-0.002	-0.046	0.016	-0.018	0.028	-0.018	0.017	-0.019	0.014
	b(k)	0.000	0.005	0.006	0.000	-0.002	-0.005	-0.002	-0.003	-0.001	-0.002	0.000
	c(k)	0.056	0.057	0.006	0.046	0.016	0.019	0.028	0.018	0.017	0.019	0.014
0.7000	a(k)	-0.046	0.066	-0.002	-0.020	0.005	-0.010	0.016	-0.011	0.012	-0.013	0.014
	b(k)	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.001	0.000
	c(k)	0.046	0.066	0.002	0.020	0.005	0.010	0.016	0.011	0.012	0.013	0.014
0.9000	a(k)	-0.061	0.103	-0.002	-0.043	0.001	-0.015	0.024	-0.013	0.018	-0.021	0.018
	b(k)	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	-0.002	-0.004
	c(k)	0.061	0.103	0.002	0.043	0.001	0.015	0.024	0.013	0.018	0.021	0.018
1.1000	a(k)	-0.071	0.099	0.003	-0.029	-0.003	-0.011	0.017	-0.008	0.010	-0.015	0.009
	b(k)	0.000	0.003	0.000	0.001	-0.002	0.001	-0.001	0.003	-0.001	0.004	-0.003
	c(k)	0.071	0.099	0.003	0.029	0.003	0.011	0.017	0.008	0.010	0.015	0.009
r/R		Harmonic analysis of tangential velocity component										
0.3000	a(k)	-0.002	0.015	0.004	0.003	-0.002	-0.006	0.000	-0.006	0.002	0.002	0.003
	b(k)	0.000	-0.057	-0.058	0.089	-0.049	0.034	-0.023	0.016	-0.013	0.007	-0.008
	c(k)	0.002	0.059	0.058	0.089	0.049	0.035	0.023	0.017	0.013	0.008	0.008
0.5000	a(k)	-0.041	-0.018	-0.018	-0.001	0.008	0.006	0.010	0.007	0.003	0.003	-0.001
	b(k)	0.000	-0.149	-0.048	0.068	-0.016	0.057	-0.033	0.033	-0.032	0.027	-0.020
	c(k)	0.041	0.150	0.051	0.068	0.018	0.058	0.034	0.033	0.032	0.027	0.020
0.7000	a(k)	-0.003	-0.008	-0.009	-0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	-0.002	0.004	-0.002
	b(k)	0.000	-0.167	-0.034	0.041	0.006	0.038	-0.015	0.022	-0.024	0.016	-0.021
	c(k)	0.003	0.168	0.035	0.041	0.007	0.038	0.015	0.022	0.024	0.016	0.021
0.9000	a(k)	-0.016	0.003	0.001	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.002	-0.001	-0.001	-0.005
	b(k)	0.000	-0.142	-0.026	0.019	0.013	0.023	-0.002	0.008	-0.011	0.006	-0.013
	c(k)	0.016	0.142	0.026	0.019	0.013	0.023	0.003	0.008	0.012	0.006	0.014
1.1000	a(k)	-0.004	-0.009	-0.013	-0.005	-0.002	-0.001	-0.003	-0.001	-0.002	0.002	0.000
	b(k)	0.000	-0.179	-0.030	0.021	0.023	0.025	0.003	0.007	-0.010	0.004	-0.009
	c(k)	0.004	0.179	0.032	0.022	0.024	0.025	0.004	0.007	0.010	0.005	0.009

Table 26

Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-I (KS1286, Design draft, 11.5knots)

Test Number	s1286K03	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	11.50	Water Temp.(deg)	18.4						
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	2.25 2.25	Model Speed(m/s)	2.1001	Model Prop. Dia(m)	0.2500						
Angle (Deg.)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
r/R	100	110	120	130	140	150	160	170	175	180	185		
	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290		
0.3000	VX/V	0.005	0.005	0.030	0.026	0.094	0.172	0.313	0.442	0.569	0.644	0.697	
		0.713	0.761	0.777	0.746	0.735	0.672	0.568	0.398	0.236	0.089	0.197	
		0.355	0.565	0.697	0.741	0.765	0.765	0.740	0.706	0.653	0.579	0.528	
	VR/V	-0.004	-0.002	-0.012	-0.018	-0.032	-0.050	-0.048	-0.056	-0.055	-0.073	-0.097	
		-0.118	-0.150	-0.176	-0.197	-0.207	-0.191	-0.169	-0.169	-0.036	0.045	0.074	0.039
		-0.036	-0.148	-0.206	-0.211	-0.198	-0.174	-0.147	-0.124	-0.104	-0.086	-0.072	-0.072
	VT/V	-0.005	-0.004	0.010	-0.027	-0.038	-0.072	-0.087	-0.122	-0.155	-0.160	-0.153	
		-0.126	-0.112	-0.072	-0.025	0.066	0.123	0.202	0.244	0.201	0.031	-0.169	
		-0.213	-0.188	-0.117	-0.037	0.057	0.093	0.116	0.138	0.155	0.156	0.149	
0.5000	VX/V	0.040	0.041	0.044	0.063	0.210	0.492	0.742	0.878	0.914	0.938	0.954	
		0.959	0.960	0.960	0.950	0.943	0.920	0.863	0.430	0.186	0.120	0.221	
		0.489	0.857	0.900	0.923	0.929	0.925	0.930	0.918	0.915	0.895	0.885	
	VR/V	-0.011	-0.009	-0.011	-0.008	0.019	0.044	0.055	0.037	0.009	-0.037	-0.070	
		-0.102	-0.125	-0.149	-0.172	-0.191	-0.213	-0.242	-0.109	0.066	0.100	0.056	
		-0.152	-0.240	-0.208	-0.191	-0.171	-0.153	-0.125	-0.105	-0.076	-0.043	-0.006	
	VT/V	-0.035	-0.036	-0.038	-0.053	-0.109	-0.183	-0.228	-0.231	-0.217	-0.209	-0.193	
		-0.177	-0.155	-0.131	-0.108	-0.078	-0.007	0.089	0.290	0.166	-0.092	-0.192	
		-0.288	-0.111	-0.044	0.038	0.075	0.114	0.140	0.167	0.186	0.198	0.200	
0.7000	VX/V	0.052	0.012	0.012	0.090	0.298	0.529	0.793	0.898	0.921	0.926	0.937	
		0.938	0.936	0.942	0.942	0.950	0.947	0.934	0.706	0.089	0.044	0.161	
		0.779	0.931	0.946	0.949	0.948	0.948	0.937	0.934	0.929	0.923	0.914	
	VR/V	0.003	0.010	0.001	0.016	0.004	0.011	0.025	0.011	-0.013	-0.033	-0.056	
		-0.075	-0.097	-0.114	-0.136	-0.159	-0.178	-0.209	-0.205	0.036	0.037	0.014	
		-0.220	-0.216	-0.187	-0.162	-0.143	-0.123	-0.104	-0.085	-0.066	-0.043	-0.008	
	VT/V	-0.002	-0.012	-0.010	-0.058	-0.130	-0.179	-0.215	-0.216	-0.218	-0.198	-0.181	
		-0.161	-0.148	-0.127	-0.103	-0.075	-0.035	0.040	0.220	0.081	-0.021	-0.136	
		-0.167	0.037	0.057	0.083	0.114	0.142	0.166	0.188	0.210	0.224	0.239	
0.9000	VX/V	0.028	0.029	0.022	0.072	0.285	0.600	0.769	0.878	0.920	0.943	0.956	
		0.962	0.969	0.974	0.969	0.973	0.972	0.969	0.953	0.048	0.035	0.168	
		0.971	0.965	0.966	0.966	0.967	0.962	0.967	0.958	0.954	0.944	0.930	
	VR/V	0.012	0.010	0.003	0.039	0.014	0.075	0.073	0.038	-0.018	-0.055	-0.086	
		-0.112	-0.130	-0.149	-0.166	-0.182	-0.196	-0.211	-0.231	0.041	0.029	0.066	
		-0.214	-0.206	-0.188	-0.177	-0.161	-0.148	-0.127	-0.110	-0.087	-0.054	-0.010	
	VT/V	-0.025	-0.026	-0.018	-0.069	-0.144	-0.221	-0.238	-0.250	-0.234	-0.214	-0.194	
		-0.175	-0.154	-0.134	-0.114	-0.092	-0.067	-0.044	0.056	0.026	-0.013	-0.152	
		-0.059	0.006	0.025	0.047	0.063	0.083	0.100	0.116	0.130	0.145	0.152	
1.1000	VX/V	0.017	0.018	0.009	0.025	0.149	0.425	0.743	0.869	0.941	0.947	0.984	
		0.990	0.995	1.000	1.005	1.017	1.017	1.016	1.029	0.252	0.210	0.699	
		1.027	1.039	1.034	1.025	1.020	1.014	1.003	1.001	0.989	0.983	0.964	
	VR/V	0.015	0.015	0.003	0.009	-0.014	0.013	0.043	0.014	-0.042	-0.069	-0.093	
		-0.110	-0.127	-0.141	-0.154	-0.169	-0.178	-0.190	-0.165	-0.017	0.011	-0.145	
		-0.182	-0.194	-0.182	-0.169	-0.159	-0.147	-0.131	-0.115	-0.097	-0.073	-0.045	
	VT/V	0.007	-0.014	-0.008	-0.022	-0.098	-0.172	-0.233	-0.228	-0.223	-0.197	-0.172	
		-0.153	-0.139	-0.120	-0.102	-0.085	-0.062	-0.036	0.024	0.012	-0.001	0.013	
		-0.031	0.041	0.066	0.085	0.109	0.129	0.150	0.170	0.194	0.210	0.233	
r/R	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000					
VX/V	0.456	0.595	0.670	0.691	0.698	0.709	0.725	0.739	Volumetric Mean of VX/V = 0.689				
VR/V	-0.091	-0.080	-0.072	-0.067	-0.066	-0.066	-0.068	-0.072	Nominal Wake Fraction(WN) = 0.311				
VT/V	0.003	-0.014	-0.017	-0.002	0.007	-0.010	-0.028	-0.021					

Table 27

Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-II (KS1286, Design draft, 11.5knots)

Test Number	s1286K03	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	11.50	Water Temp.(deg)	18.4
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	2.25 2.25	Model Speed(m/s)	2.1001	Model Prop. Dia(m)	0.2500

Angle (Deg.)		300	310	320	330	340	350	355	360
r/R									
0.3000	VX/V	0.359	0.234	0.107	0.067	0.062	0.011	0.011	0.005
	VR/V	-0.063	-0.053	-0.035	-0.022	0.004	-0.008	-0.008	-0.004
	VT/V	0.103	0.072	0.054	0.024	0.005	0.011	0.011	-0.005
0.5000	VX/V	0.850	0.664	0.410	0.166	0.062	0.040	0.035	0.040
	VR/V	0.017	0.025	0.008	0.012	-0.022	-0.012	-0.012	-0.011
	VT/V	0.210	0.191	0.135	0.050	-0.005	-0.035	-0.031	-0.035
0.7000	VX/V	0.880	0.744	0.477	0.164	0.036	0.022	0.047	0.052
	VR/V	0.013	0.027	0.017	0.007	0.017	0.002	0.007	0.003
	VT/V	0.242	0.225	0.178	0.096	0.033	0.019	0.004	-0.002
0.9000	VX/V	0.892	0.775	0.556	0.253	0.023	0.015	0.023	0.028
	VR/V	0.033	0.060	0.049	0.038	0.016	0.010	0.019	0.012
	VT/V	0.162	0.161	0.145	0.104	0.023	-0.016	-0.024	-0.025
1.1000	VX/V	0.904	0.776	0.545	0.321	0.027	0.014	0.017	0.017
	VR/V	0.018	0.043	0.017	-0.016	0.010	0.011	0.014	0.015
	VT/V	0.244	0.233	0.190	0.075	0.024	0.015	0.018	0.007

r/R	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
VX/V	0.456	0.595	0.670	0.691	0.698	0.709	0.725	0.739
VR/V	-0.091	-0.080	-0.072	-0.067	-0.066	-0.066	-0.068	-0.072
VT/V	0.003	-0.014	-0.017	-0.002	0.007	-0.010	-0.028	-0.021

Volumetric
 Mean of VX/V = 0.689
Nominal Wake Fraction(WN) = 0.311

Table 28

**Harmonic Analysis of Velocity Components
(KS1286, Design draft, 11.5knots)**

Test Number	s1286K03	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	11.50	Water Temp.(deg)	18.4						
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	2.25 2.25	Model Speed(m/s)	2.1001	Model Prop. Dia(m)	0.2500						
		k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r/R		Harmonic analysis of axial velocity component											
0.3000	a(k)	0.456	-0.273	-0.249	0.077	-0.042	0.067	-0.028	0.023	-0.030	0.016	-0.014	
	b(k)	0.000	0.019	0.015	-0.003	-0.008	-0.004	-0.008	0.002	-0.004	0.005	0.002	
	c(k)	0.456	0.274	0.250	0.077	0.043	0.067	0.029	0.023	0.030	0.016	0.014	
0.5000	a(k)	0.670	-0.267	-0.360	-0.024	-0.112	0.100	-0.027	0.084	-0.036	0.037	-0.034	
	b(k)	0.000	0.022	0.008	0.002	0.004	-0.006	-0.003	-0.009	0.002	-0.002	0.007	
	c(k)	0.670	0.267	0.360	0.024	0.112	0.100	0.027	0.084	0.036	0.037	0.035	
0.7000	a(k)	0.698	-0.286	-0.336	-0.060	-0.119	0.089	-0.033	0.095	-0.045	0.060	-0.055	
	b(k)	0.000	0.009	0.017	0.011	0.010	0.000	0.001	-0.010	-0.001	-0.010	-0.002	
	c(k)	0.698	0.286	0.336	0.061	0.119	0.089	0.033	0.096	0.045	0.061	0.055	
0.9000	a(k)	0.725	-0.309	-0.323	-0.075	-0.116	0.068	-0.039	0.094	-0.044	0.079	-0.057	
	b(k)	0.000	0.003	0.004	0.006	0.008	0.003	0.002	-0.004	0.000	-0.004	0.003	
	c(k)	0.725	0.309	0.324	0.076	0.116	0.068	0.039	0.094	0.044	0.079	0.058	
1.1000	a(k)	0.751	-0.373	-0.312	-0.088	-0.084	0.066	-0.016	0.076	-0.033	0.053	-0.045	
	b(k)	0.000	-0.020	-0.015	-0.017	-0.004	-0.003	0.008	0.006	0.016	0.004	0.009	
	c(k)	0.751	0.373	0.313	0.090	0.085	0.066	0.018	0.076	0.036	0.053	0.046	
r/R		Harmonic analysis of radial velocity component											
0.3000	a(k)	-0.091	0.066	0.036	-0.040	0.042	-0.026	0.021	-0.017	0.011	-0.011	0.008	
	b(k)	0.000	0.002	-0.001	-0.004	-0.004	-0.002	0.002	-0.001	0.002	0.000	0.000	
	c(k)	0.091	0.066	0.036	0.040	0.042	0.026	0.021	0.017	0.011	0.011	0.008	
0.5000	a(k)	-0.072	0.100	-0.001	-0.052	0.016	-0.027	0.032	-0.023	0.025	-0.022	0.022	
	b(k)	0.000	0.006	0.005	0.003	-0.001	0.000	-0.003	0.002	-0.002	0.003	-0.001	
	c(k)	0.072	0.100	0.005	0.052	0.016	0.027	0.032	0.023	0.025	0.022	0.022	
0.7000	a(k)	-0.066	0.099	-0.008	-0.023	0.009	-0.016	0.023	-0.017	0.019	-0.021	0.017	
	b(k)	0.000	0.003	-0.003	-0.001	0.000	0.002	-0.001	0.001	-0.001	0.001	0.000	
	c(k)	0.066	0.099	0.009	0.023	0.009	0.016	0.023	0.017	0.019	0.021	0.017	
0.9000	a(k)	-0.068	0.118	0.005	-0.041	-0.002	-0.022	0.024	-0.013	0.023	-0.020	0.019	
	b(k)	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	-0.002	-0.001	-0.001	0.002	0.001	0.003	
	c(k)	0.068	0.118	0.006	0.041	0.003	0.022	0.024	0.013	0.023	0.020	0.019	
1.1000	a(k)	-0.077	0.101	0.008	-0.028	0.000	-0.011	0.023	-0.001	0.016	-0.013	0.005	
	b(k)	0.000	0.002	-0.002	0.000	-0.001	0.002	-0.002	0.002	-0.003	0.002	-0.003	
	c(k)	0.077	0.101	0.008	0.028	0.001	0.011	0.023	0.002	0.016	0.014	0.005	
r/R		Harmonic analysis of tangential velocity component											
0.3000	a(k)	0.003	-0.010	0.003	0.004	0.002	0.000	0.003	-0.002	0.004	-0.001	0.000	
	b(k)	0.000	-0.090	-0.062	0.092	-0.048	0.043	-0.035	0.022	-0.013	0.015	-0.013	
	c(k)	0.003	0.091	0.062	0.092	0.048	0.043	0.035	0.023	0.013	0.015	0.013	
0.5000	a(k)	-0.017	-0.005	-0.012	-0.002	0.002	0.000	0.000	0.002	-0.003	0.003	-0.004	
	b(k)	0.000	-0.168	-0.068	0.056	-0.025	0.061	-0.028	0.040	-0.031	0.023	-0.024	
	c(k)	0.017	0.169	0.069	0.056	0.025	0.061	0.028	0.040	0.031	0.023	0.024	
0.7000	a(k)	0.007	-0.009	-0.005	-0.004	0.002	0.005	-0.001	0.008	-0.004	0.006	-0.007	
	b(k)	0.000	-0.193	-0.056	0.025	-0.006	0.039	-0.014	0.027	-0.021	0.021	-0.020	
	c(k)	0.007	0.193	0.056	0.025	0.007	0.039	0.014	0.028	0.021	0.022	0.022	
0.9000	a(k)	-0.028	-0.005	0.008	0.006	0.002	-0.001	-0.003	0.000	-0.003	0.002	-0.003	
	b(k)	0.000	-0.171	-0.051	0.004	0.005	0.023	0.004	0.017	-0.004	0.011	-0.007	
	c(k)	0.028	0.171	0.052	0.007	0.005	0.023	0.005	0.017	0.005	0.012	0.008	
1.1000	a(k)	0.003	0.000	-0.004	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	
	b(k)	0.000	-0.192	-0.045	0.010	0.021	0.027	0.007	0.009	-0.006	0.001	-0.009	
	c(k)	0.003	0.192	0.045	0.010	0.021	0.027	0.007	0.009	0.007	0.001	0.009	

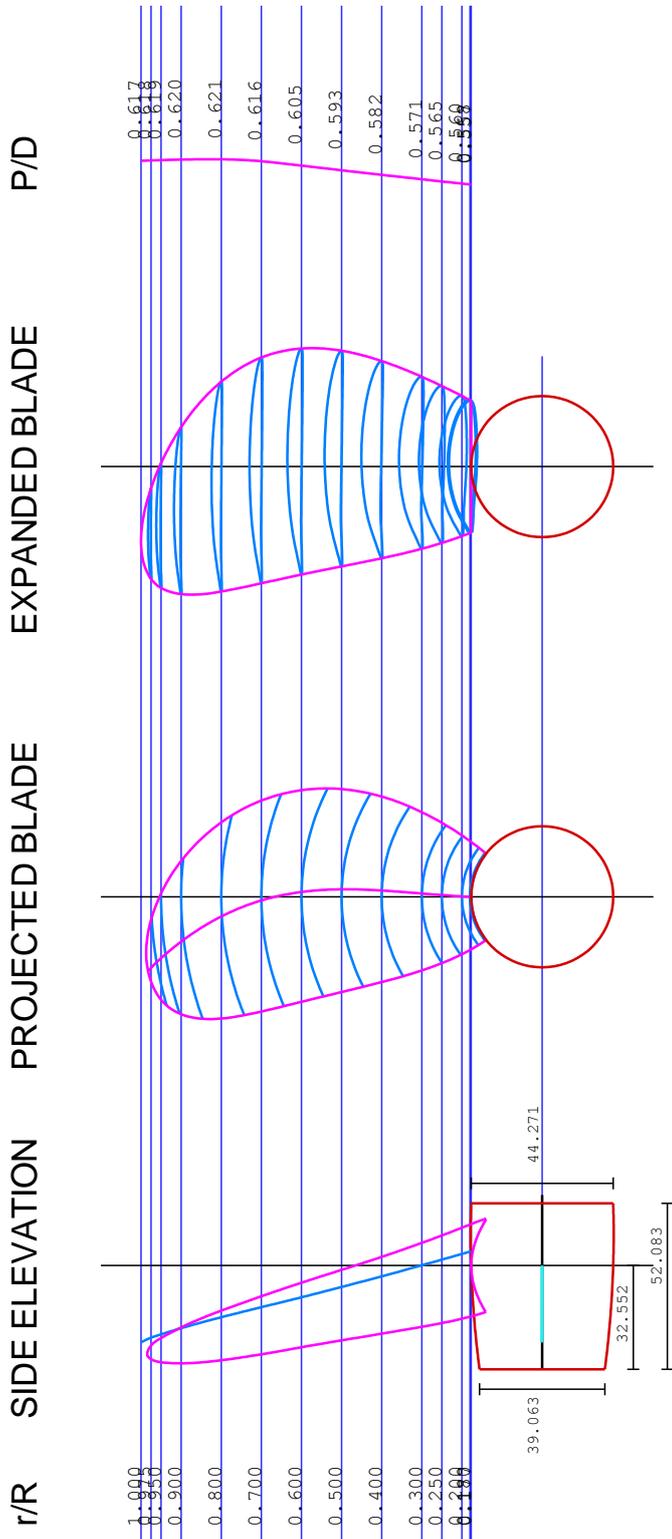
FIGURES

	<p>공선호</p>	
<p>Figure 1</p>	<p>Photographs of the Model Ship (KS1286)</p>	<p>5/30/2012</p>
		<p>-</p>

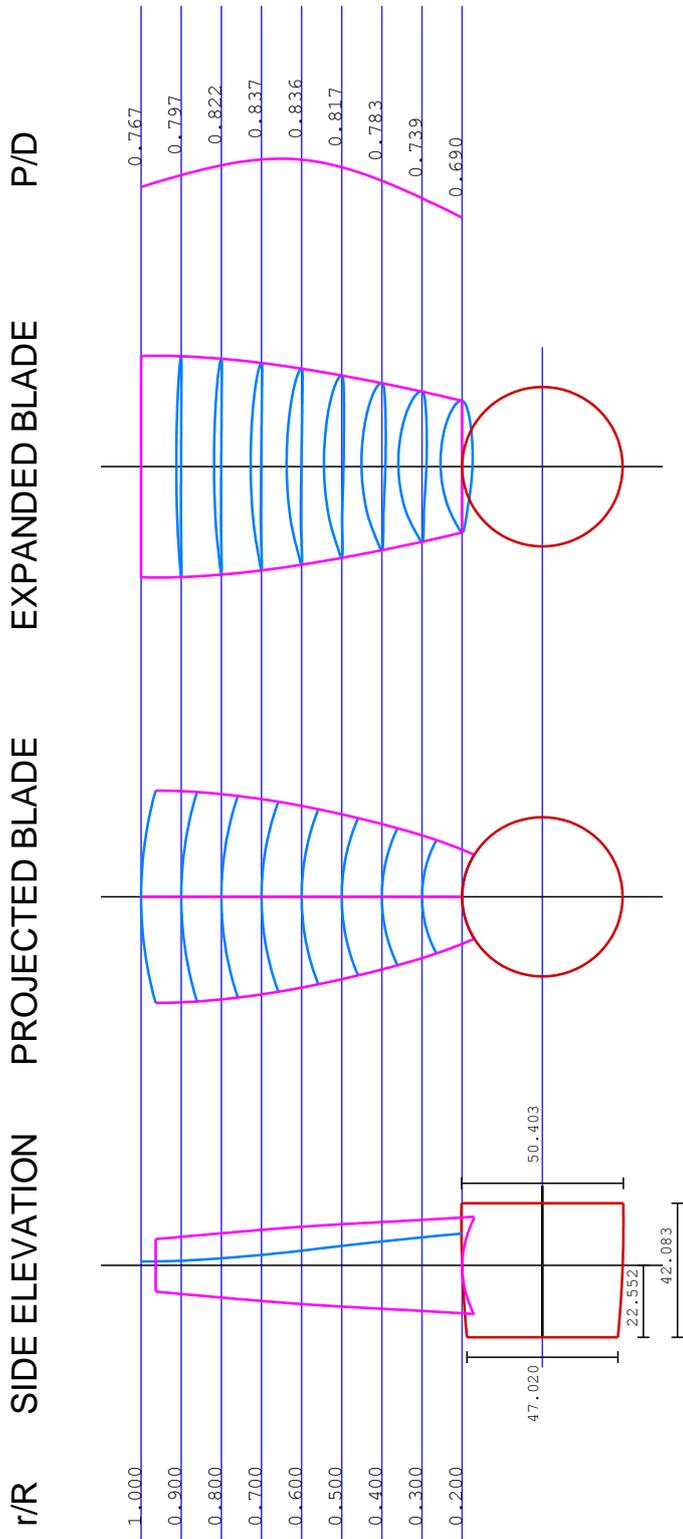


Figure 2

Drawing of the Stock Propeller (KP935)

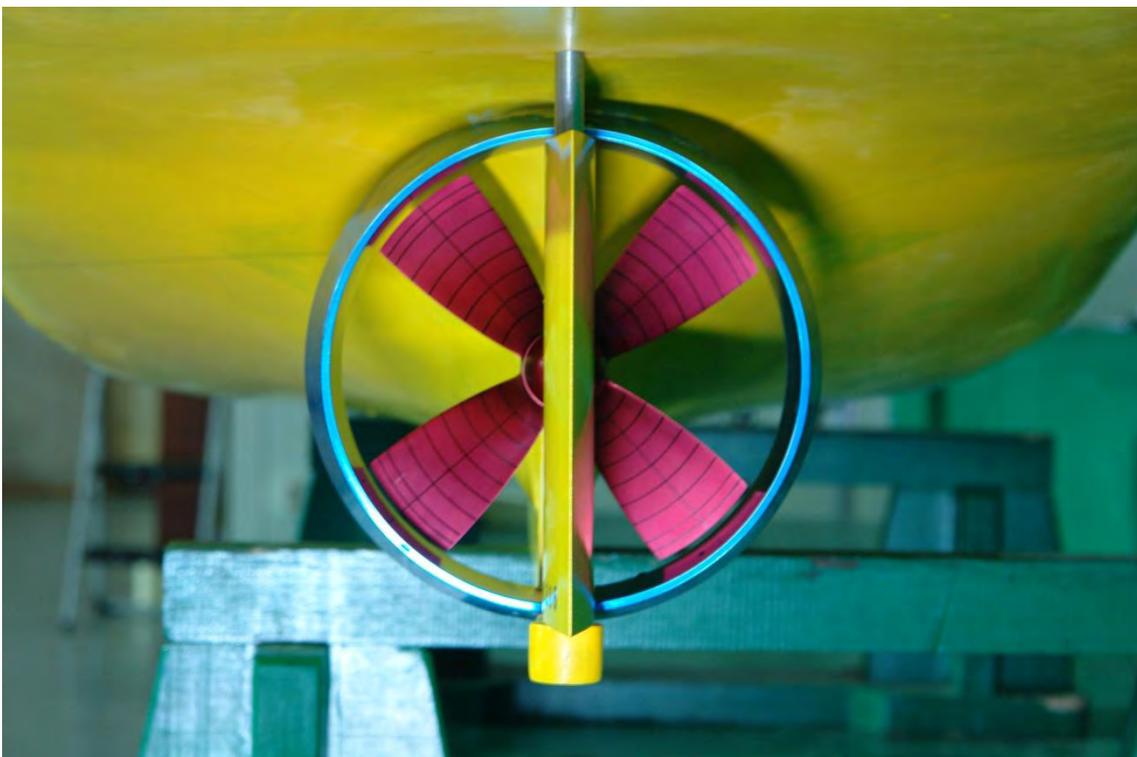
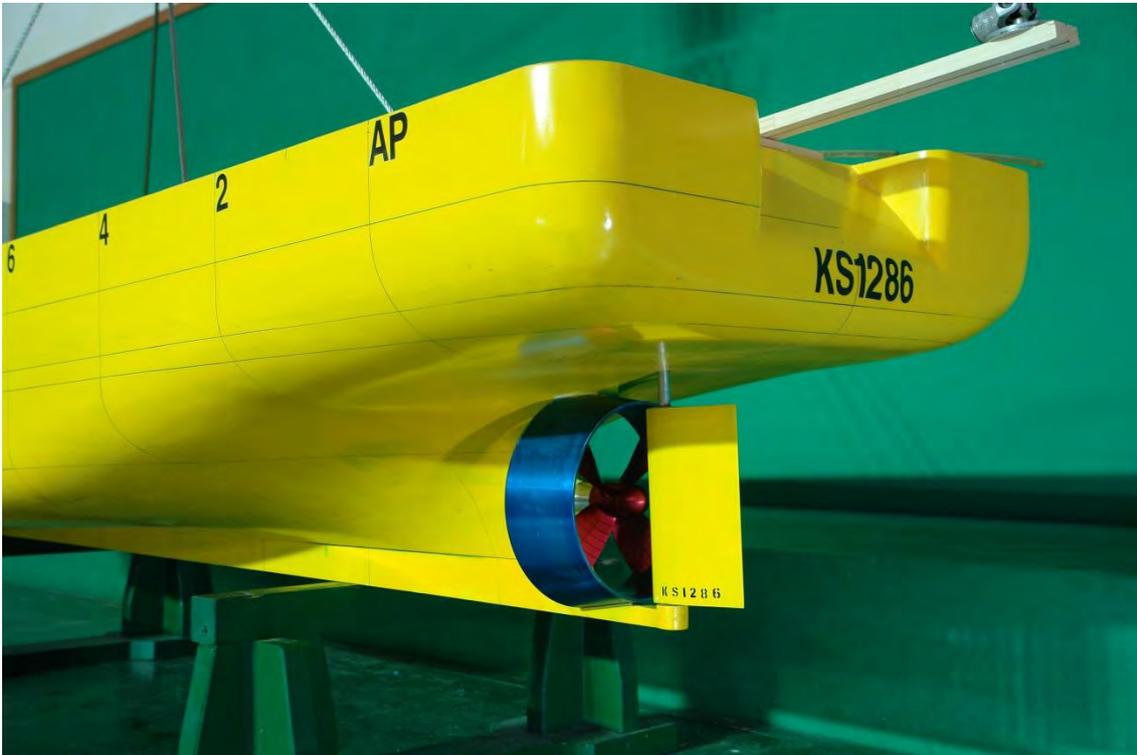


Propeller Principal Particulars						
Diameter(mm)	1920.0	Model Diam(mm)	250.000	Scale Ratio	7.6800	
(P/D)mean	0.6068	(Rake/D) Tip	0.0965	Prop. Type	FPP	
Ae/Ao	0.4974	Eff. skew(Deg)	13.04	Drawing Scale	1.80556	
Hub Ratio	0.1770	(C/D) 0.7R	0.2834	Comment		
No. of Blade	4	(F0/C) 0.7R	0.0254	Prop. Number	KP935	
Section	NACA66	(T/D) 0.7R	0.0153	Korea Ocean Research & Development Institute, KRISO		



Propeller Principal Particulars						
Diameter(mm)	1984.0	Model Diam(mm)	250.000	Scale Ratio	7.9360	
(P/D)mean	0.8046	(Rake/D) Tip	0.0000	Prop. Type	FPP	
Ae/Ao	0.4855	Eff. skew(Deg)	0.00	Drawing Scale	1.80556	
Hub Ratio	0.2000	(C/D) 0.7R	0.2605	Comment		
No. of Blade	4	(fo/C) 0.7R	0.0269	Prop. Number		
Section	NACA66	(t/D) 0.7R	0.0132	Korea Ocean Research & Development Institute, KORDI		

	<p>공선호</p>	
<p>Figure 4</p>	<p>Photographs of the Design Propeller and Duct</p>	<p>5/30/2012</p>



	공선호	
		5/30/2012
Figure 5	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP935)	-

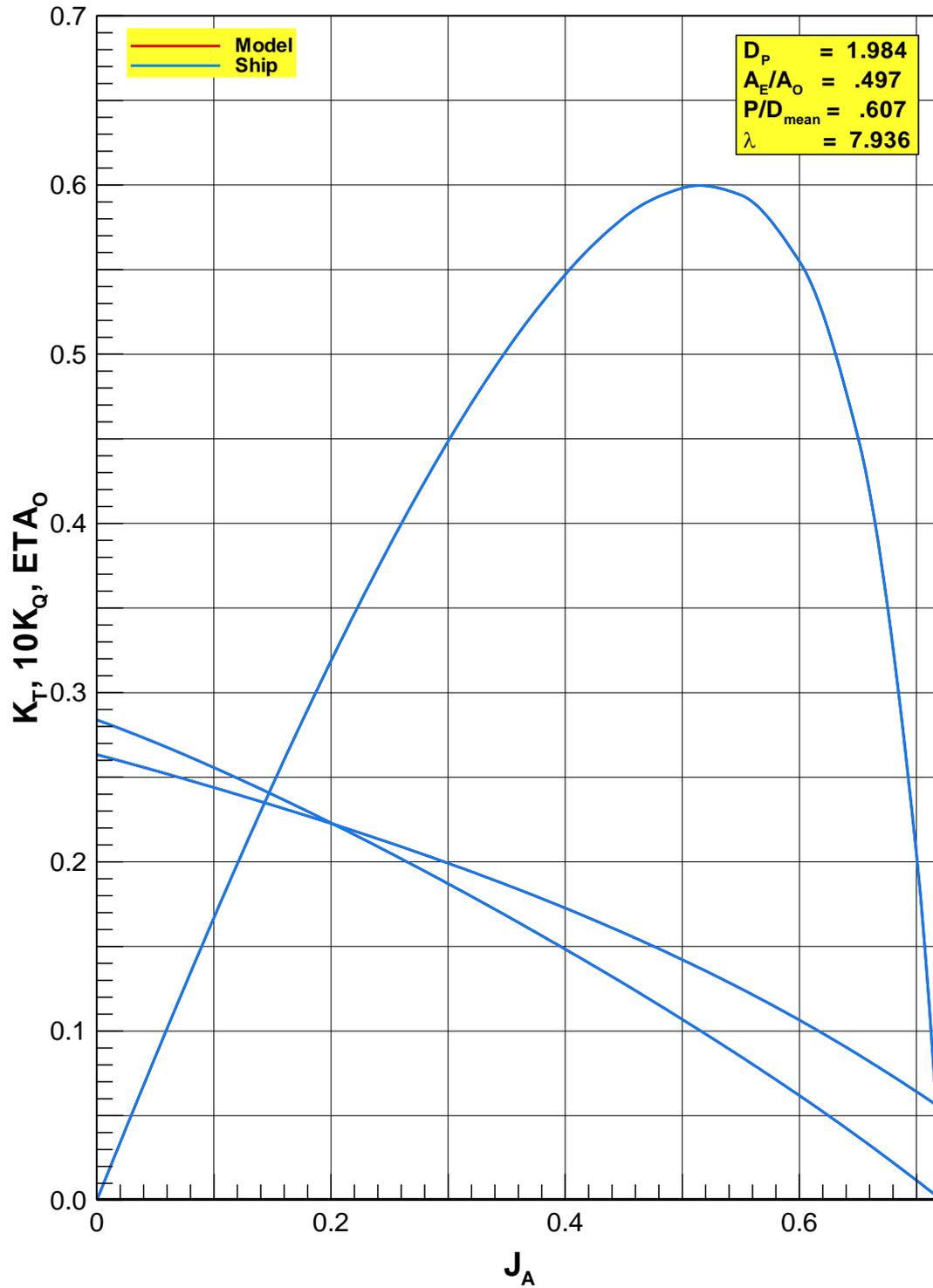
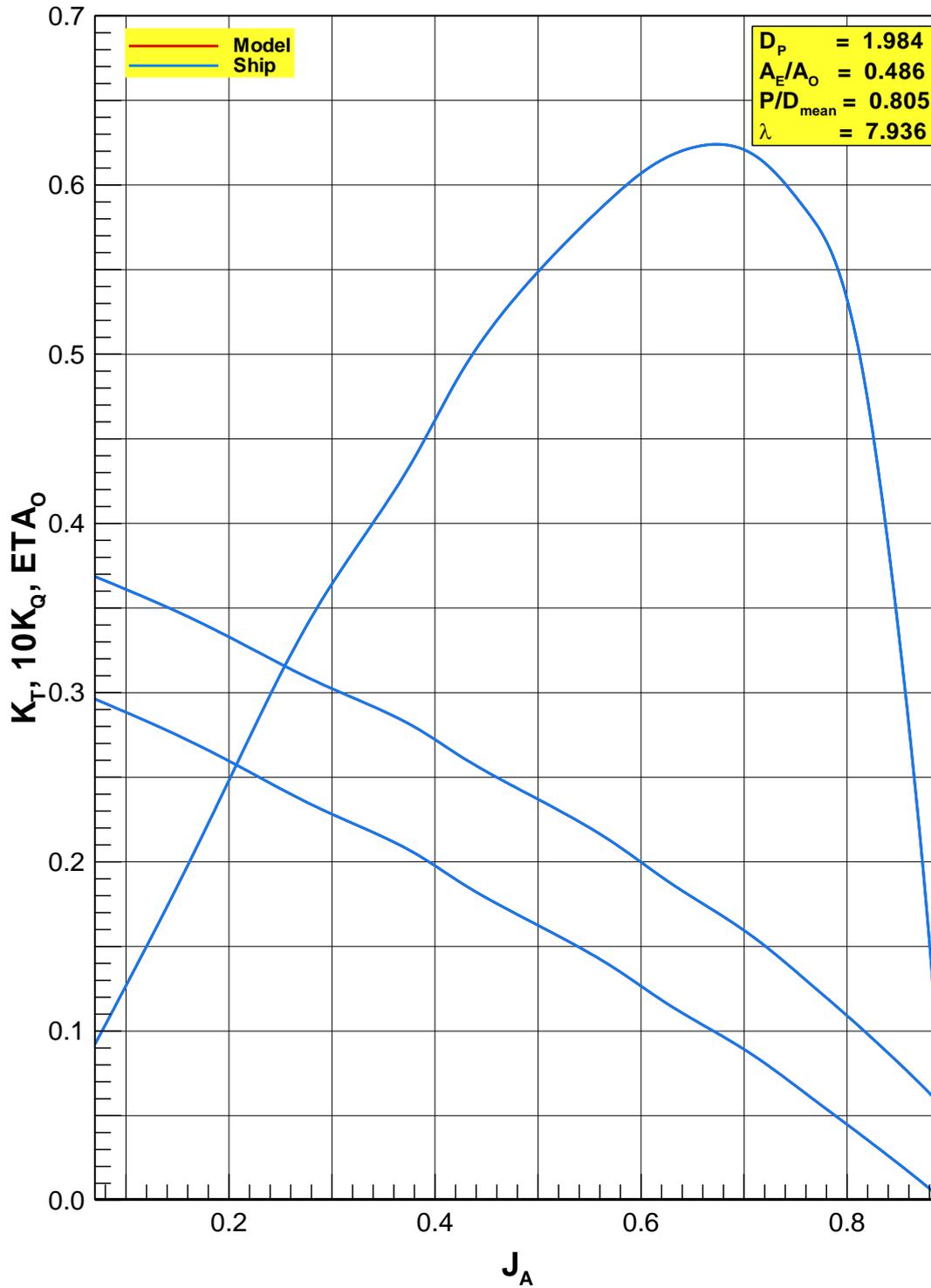
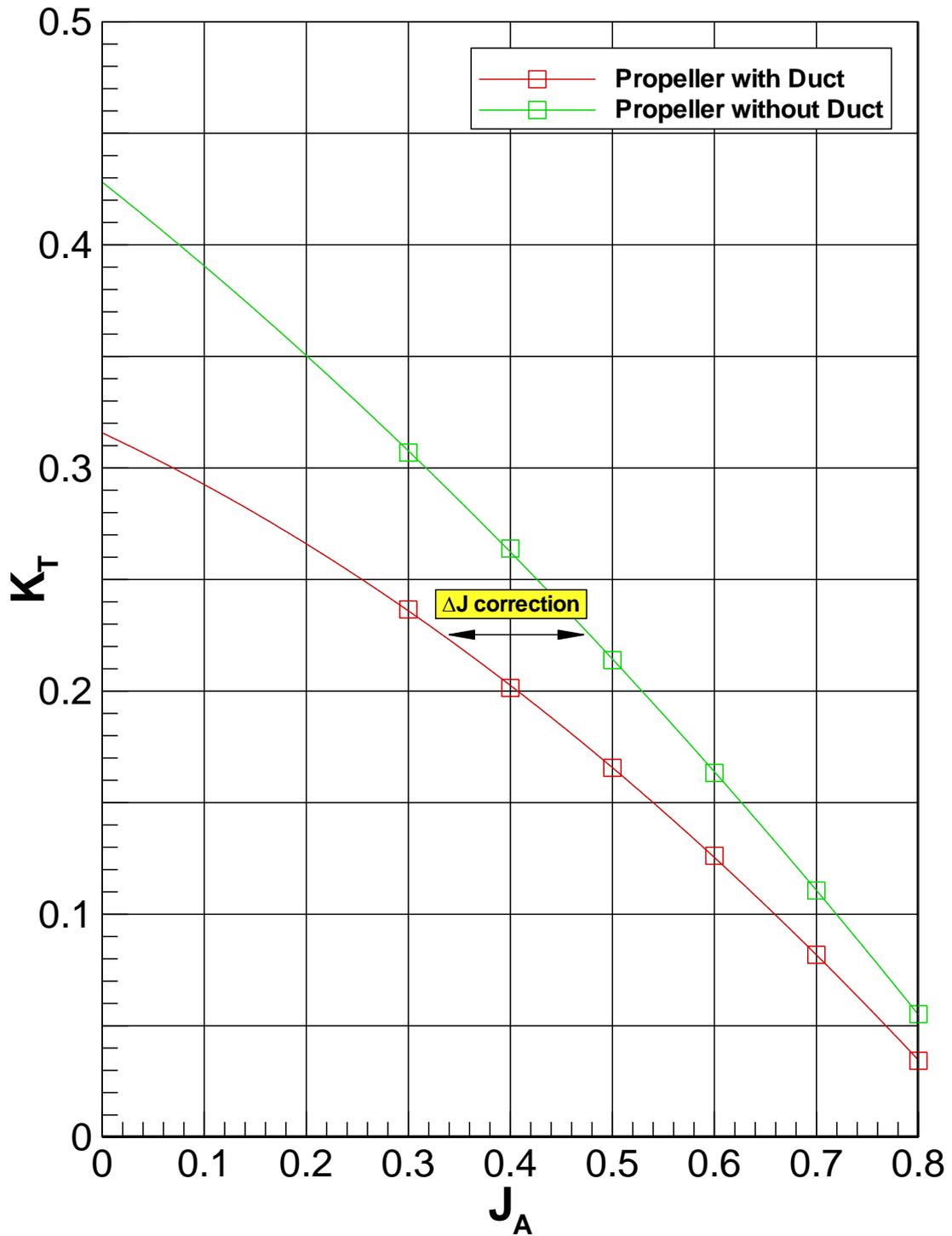


Figure 6

Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1064)



	공선호	
		5/30/2012
Figure 7	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (CFD Result)	-



	공선호	
		5/30/2012
Figure 8	Resistance Coefficients (KS1286, Design draft)	-

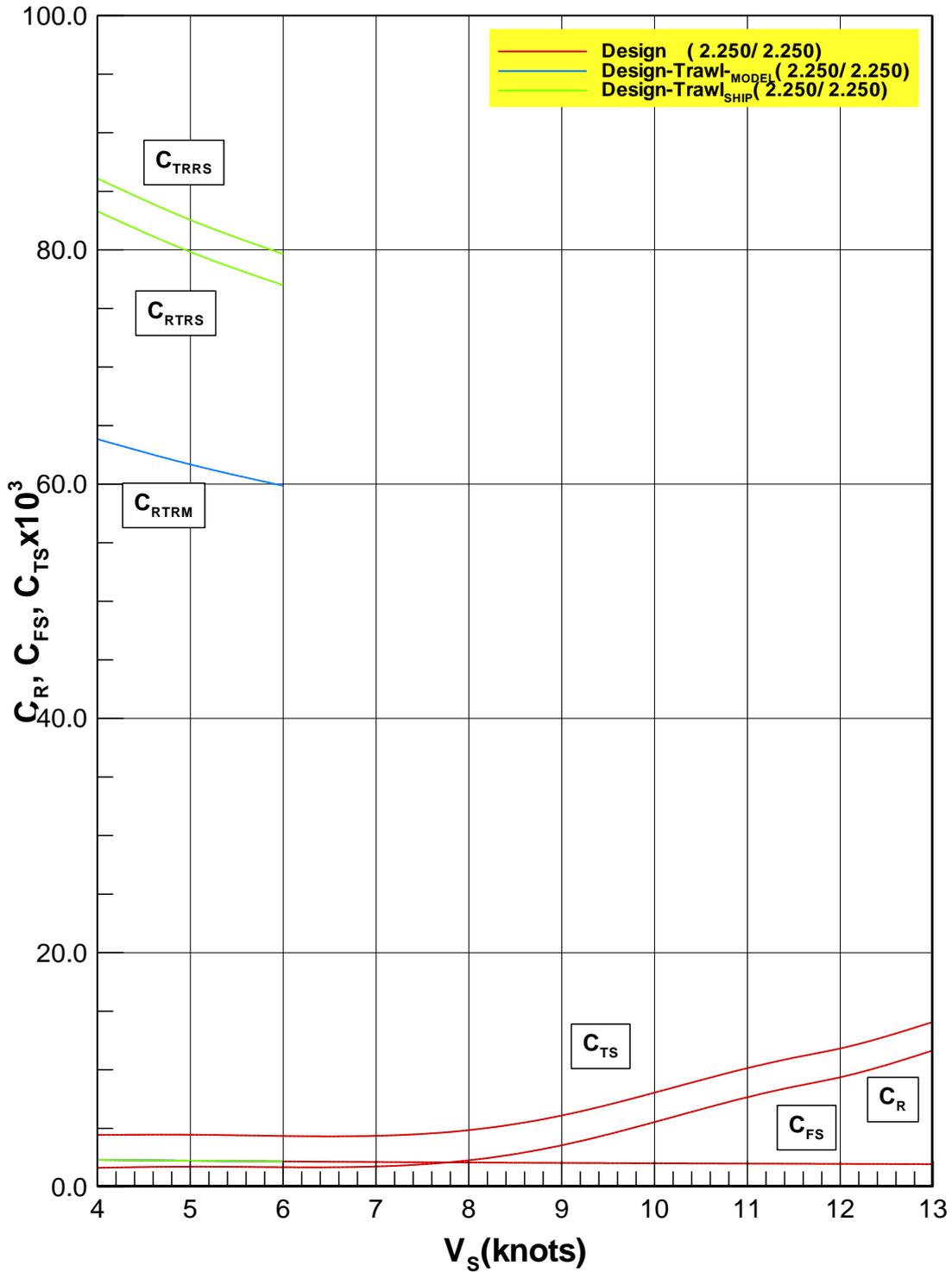
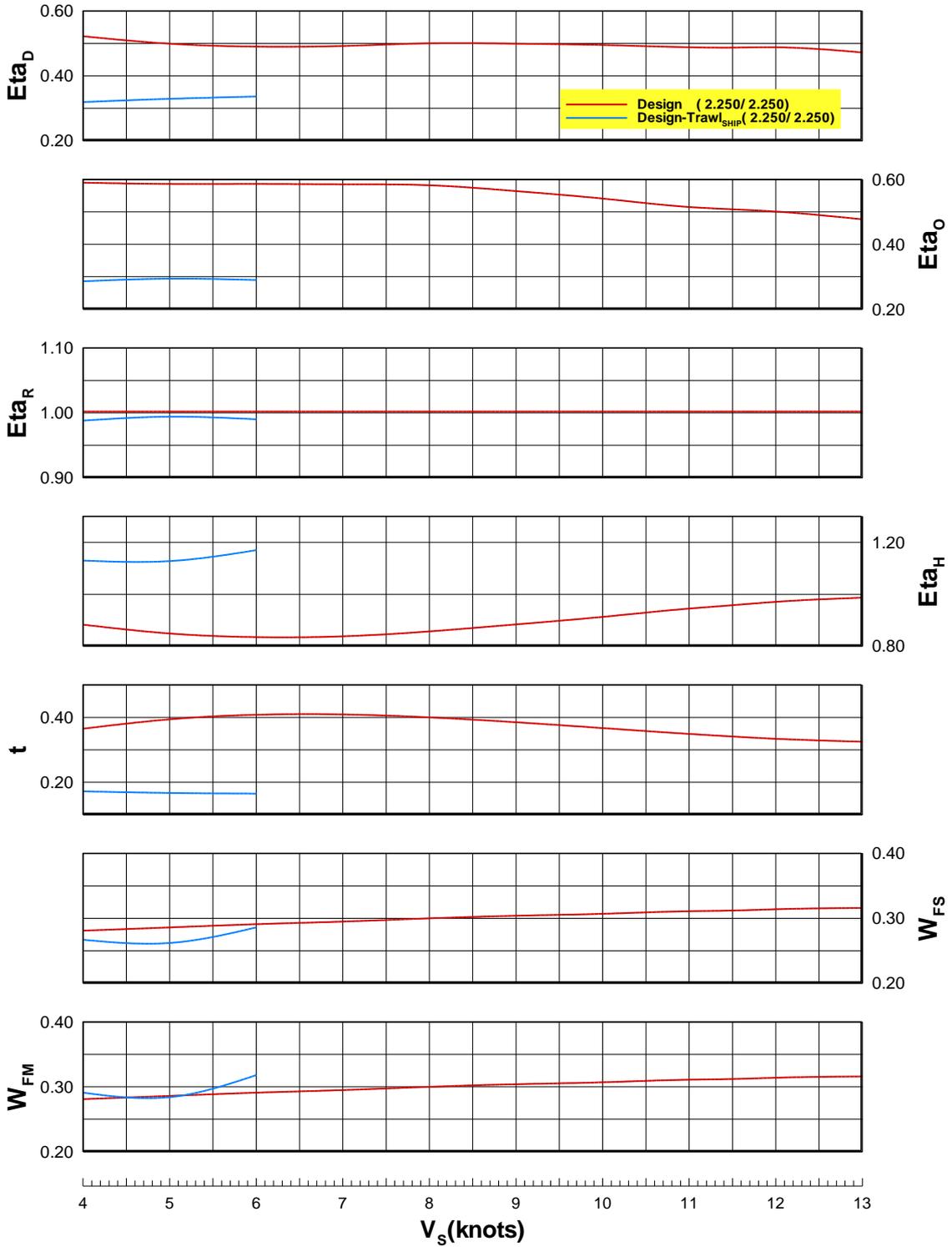


Figure 9

**Propulsive Coefficients
(KS1286, Design draft, Stock Propeller)**



	공선호	
		5/30/2012
Figure 10	Prediction of Powering Performance (KS1286, Design draft, Stock Propeller)	-

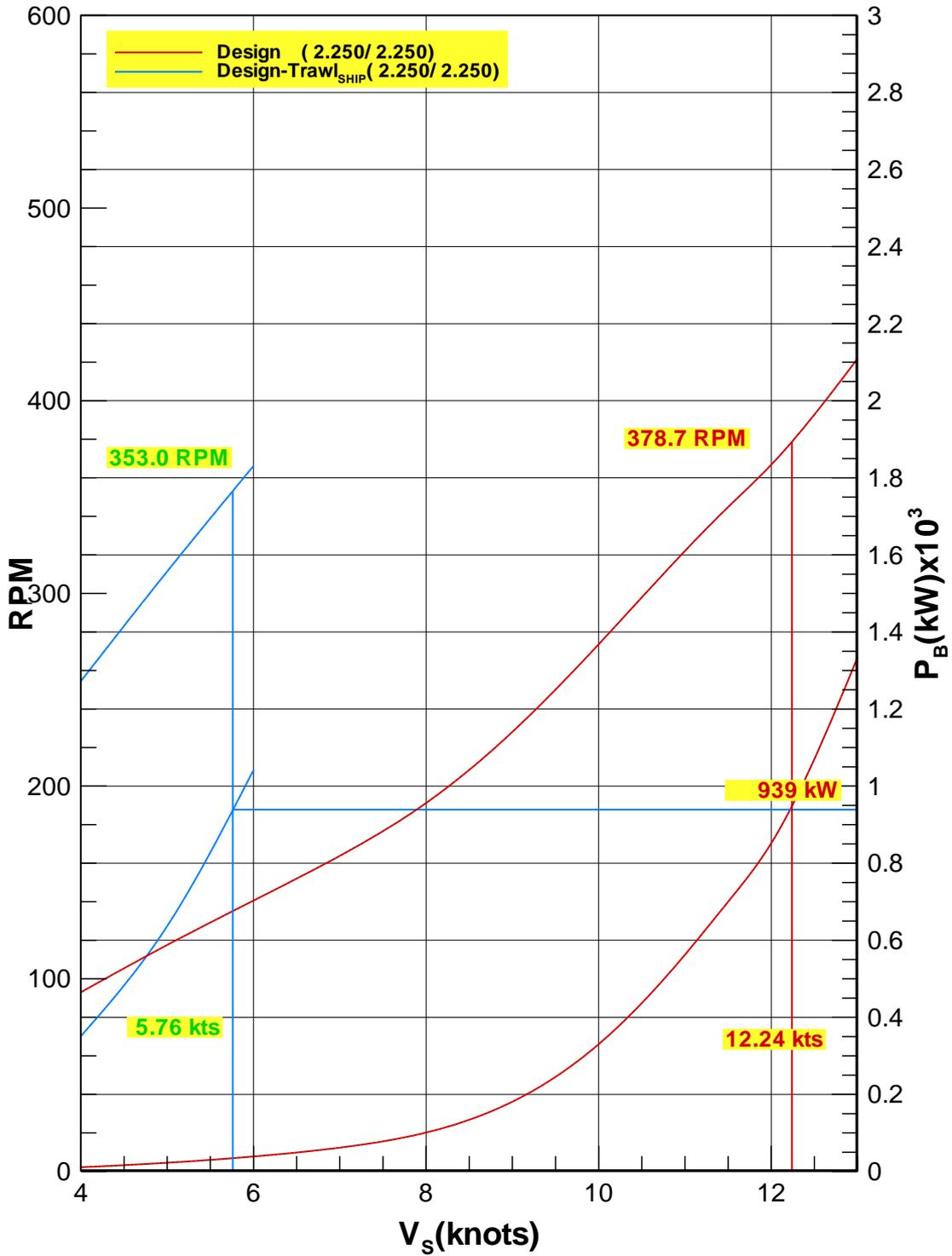


Figure 11

Resistance Coefficients
(KS1286, Design draft, with Duct)

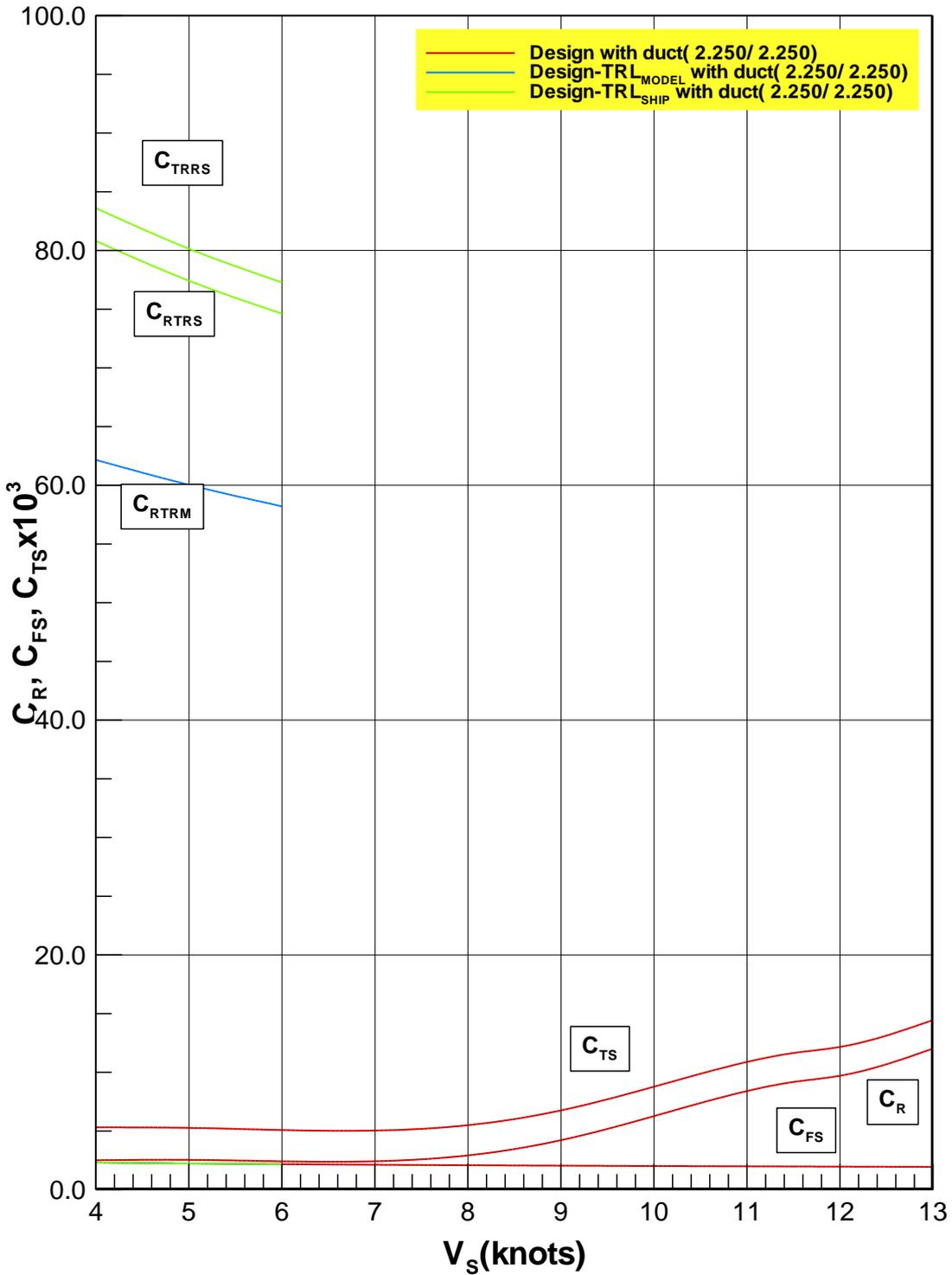


Figure 12

**Propulsive Coefficients
(KS1286, Design draft, with Duct, Design Propeller)**

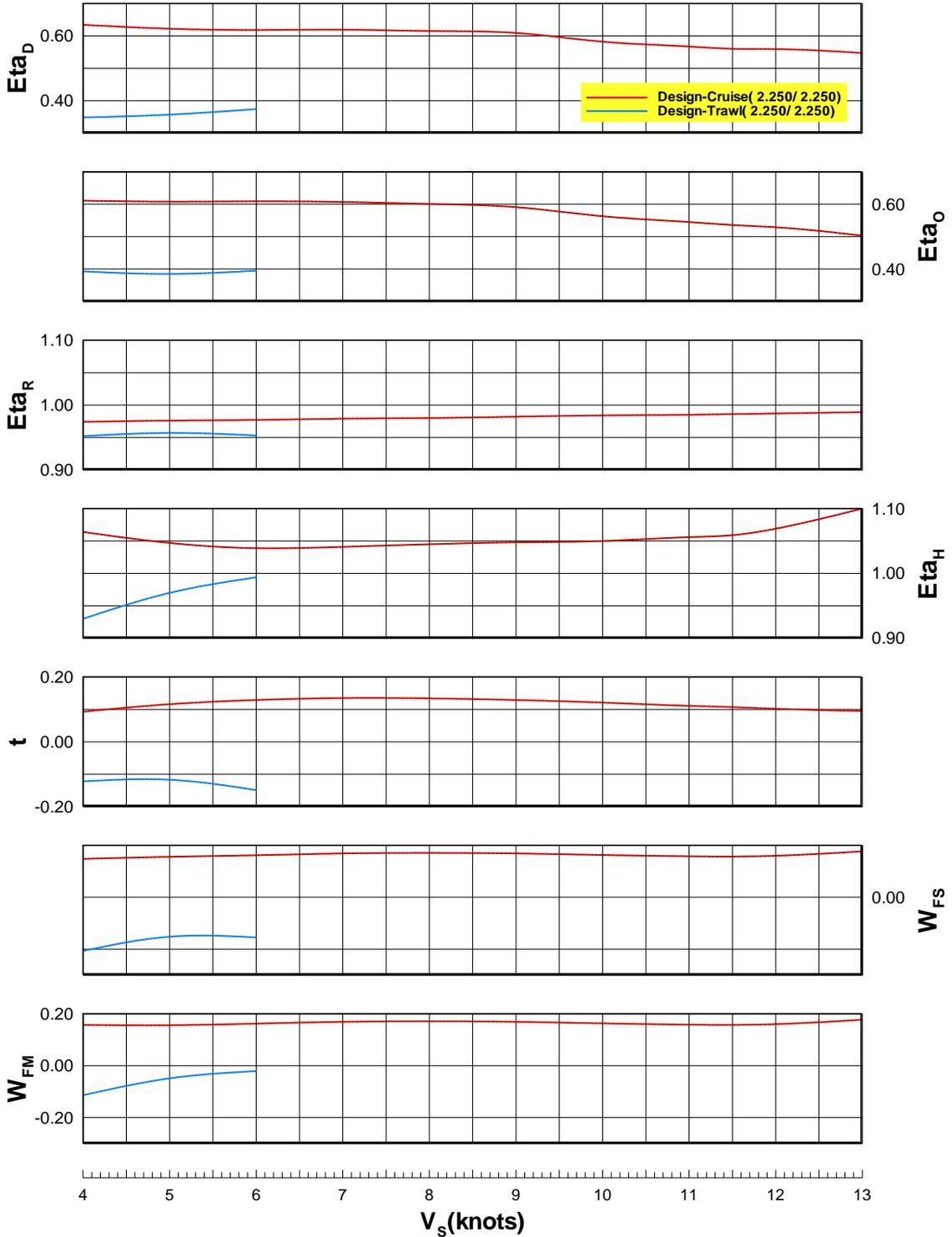


Figure 13

Prediction of Powering Performance
(KS1286, Design draft, with Duct, Design Propeller)

-

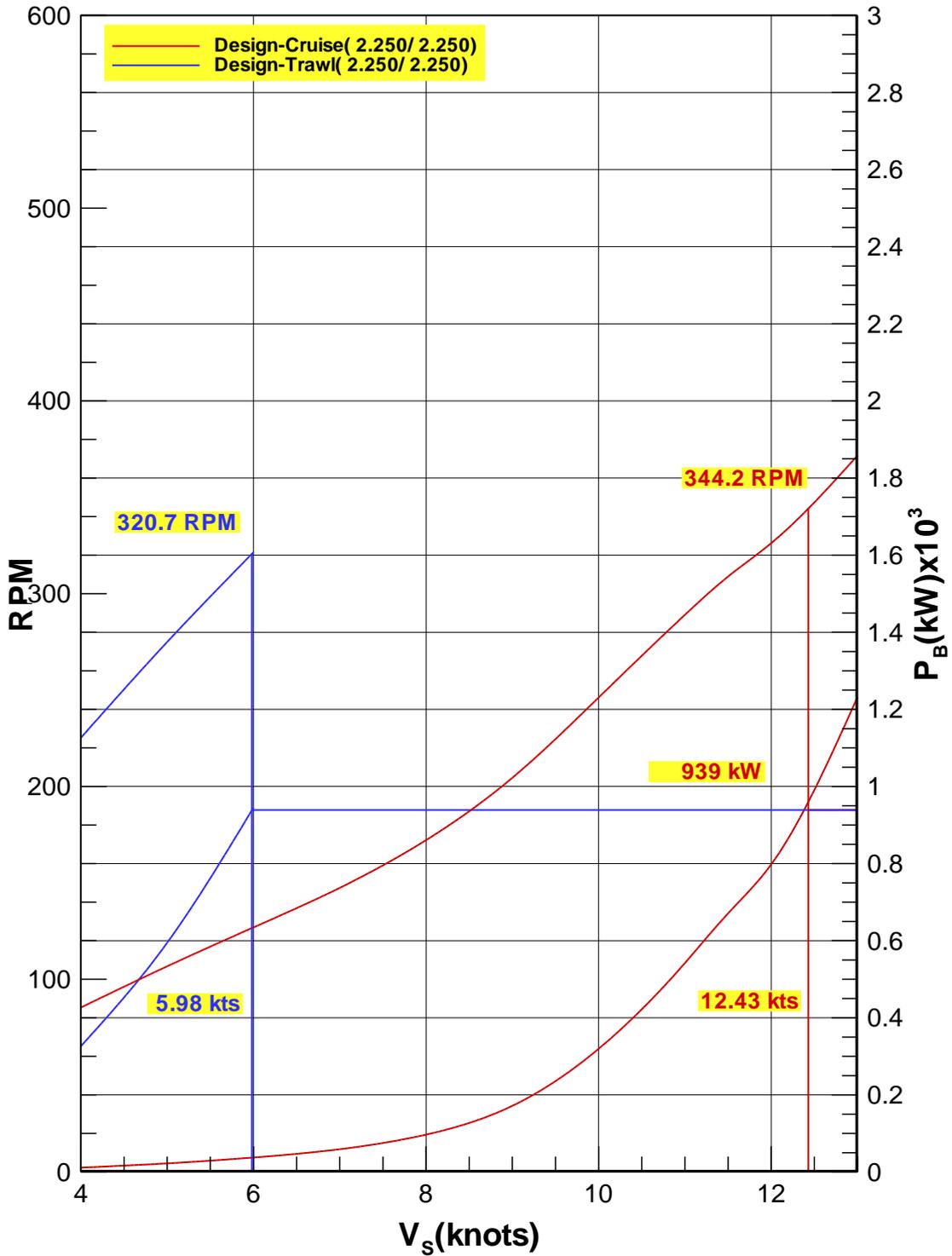


Figure 14

**Circumferential Distribution of Velocity Components
(KS1286, Design draft, 4.0 knots)**

-

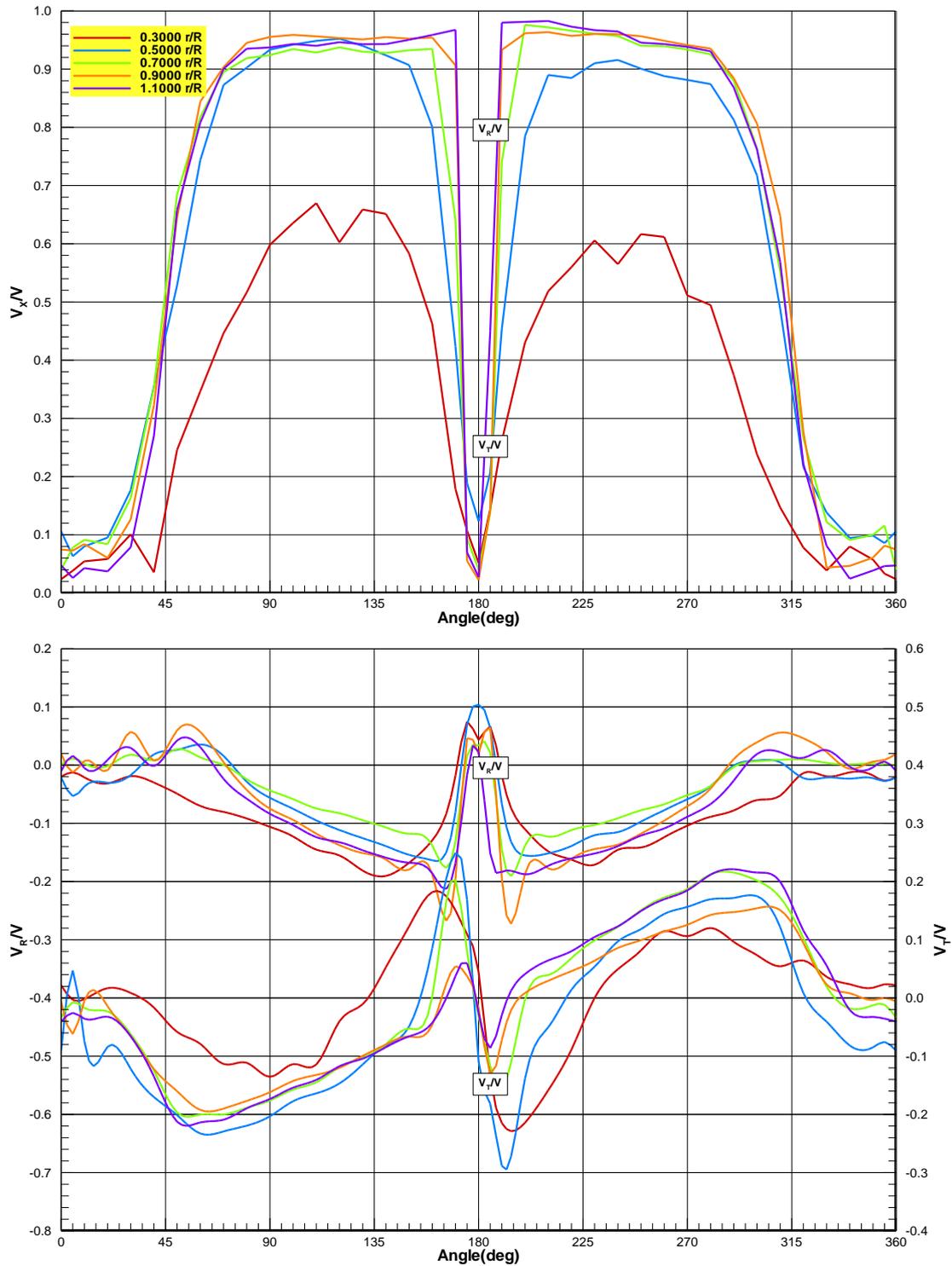
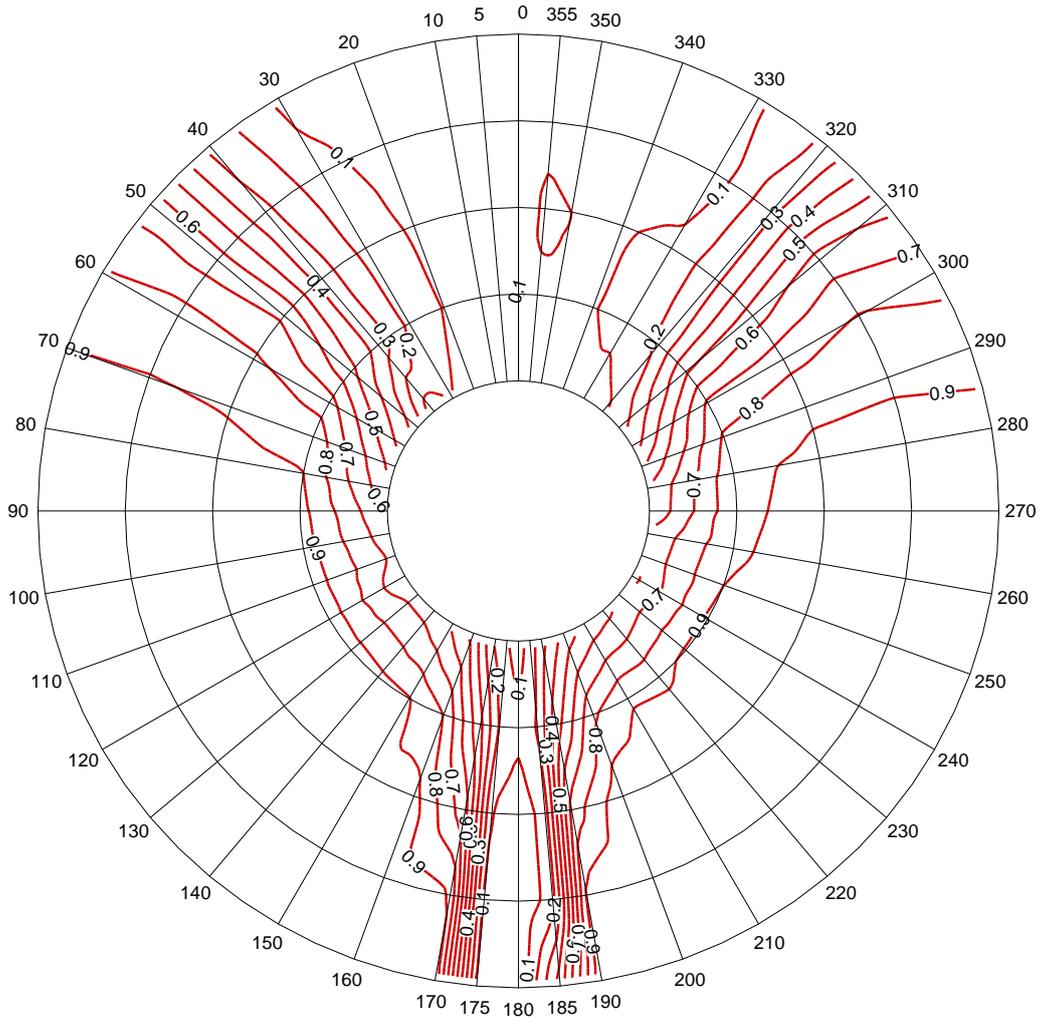


Figure 15

**Iso-Axial Velocity Contours
(KS1286, Design draft, 4.0 knots)**



Radii : 0.3000 0.5000 0.7000 0.9000 1.1000

Figure 16

**Transverse Velocity Vectors
(KS1286, Design draft, 4.0 knots)**

-

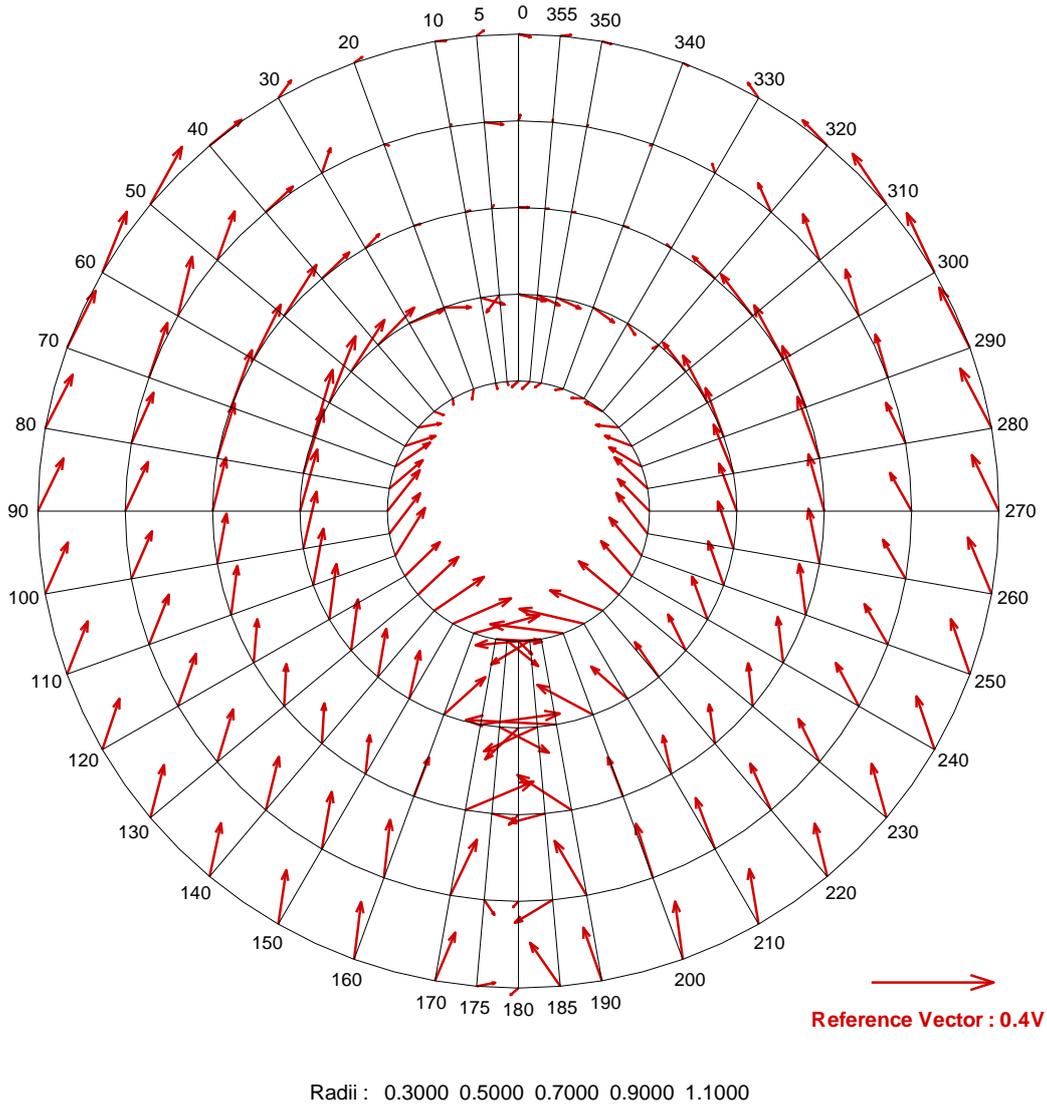


Figure 17

Radial Distribution of Harmonic Amplitudes of Velocities (KS1286, Design draft, 4.0 knots)

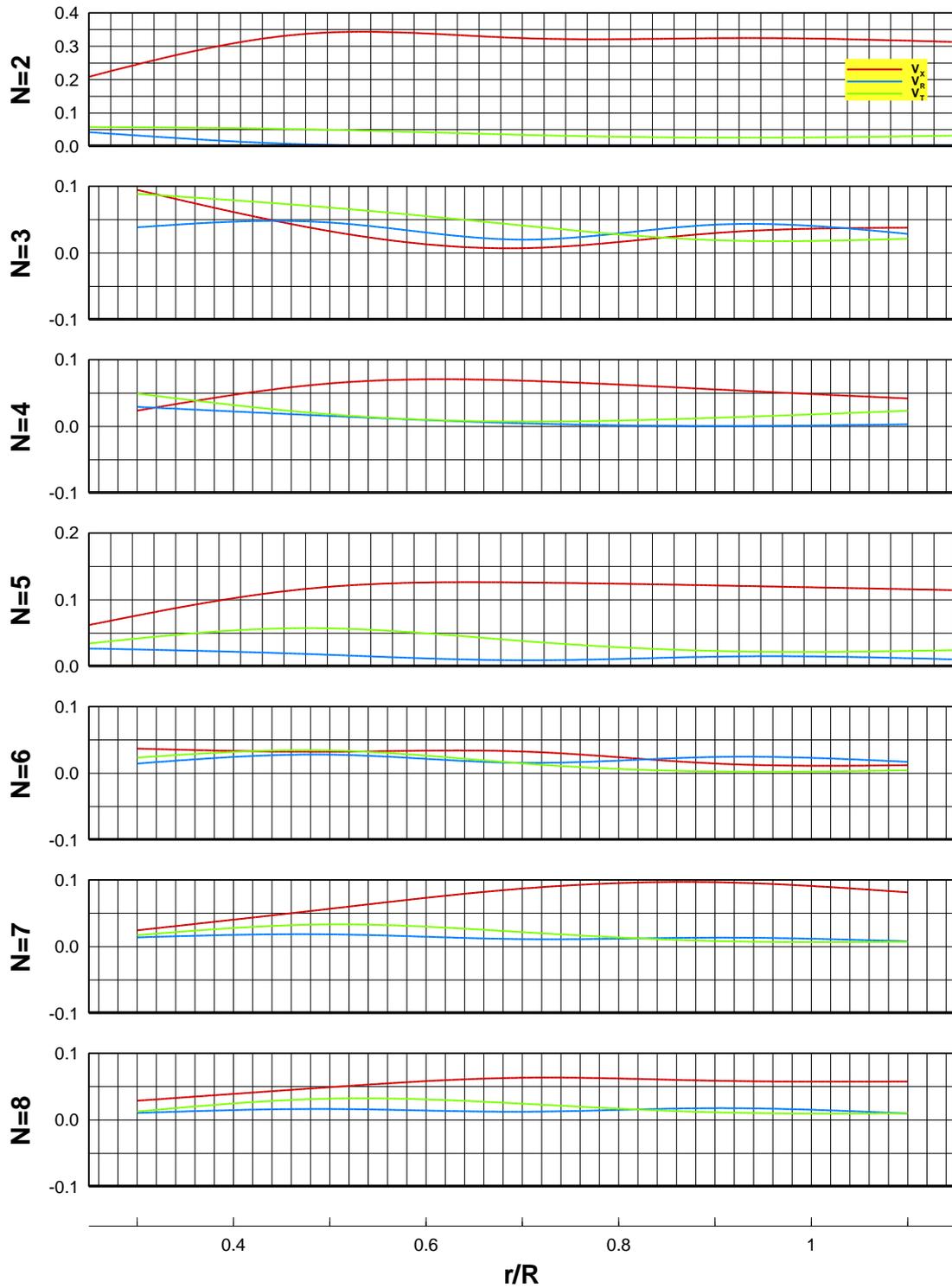


Figure 18

Radial Distribution of Circumferential Mean Velocity Components (KS1286, Design draft, 4.0 knots)

-

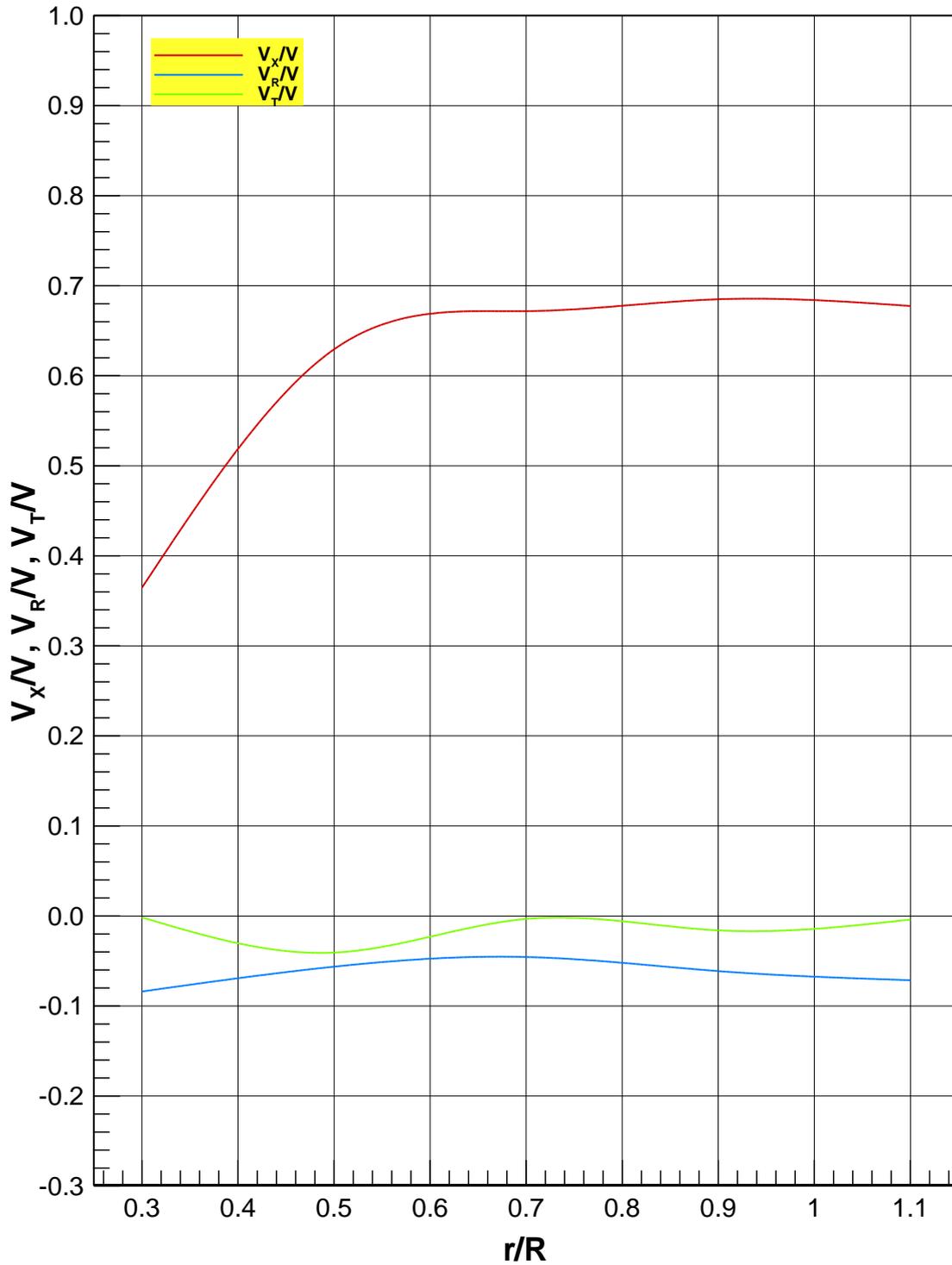


Figure 19

**Circumferential Distribution of Velocity Components
(KS1286, Design draft, 11.5 knots)**

-

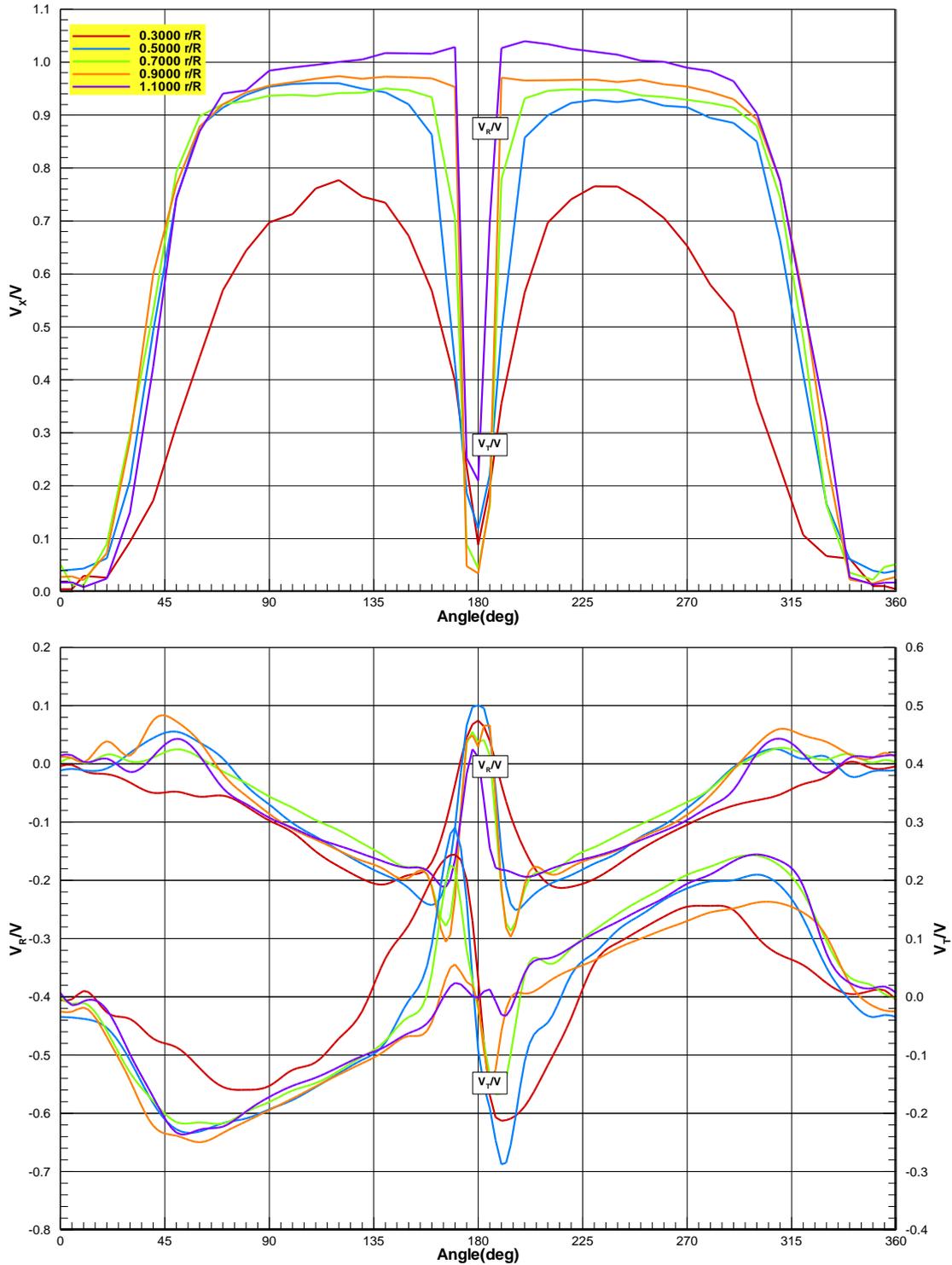
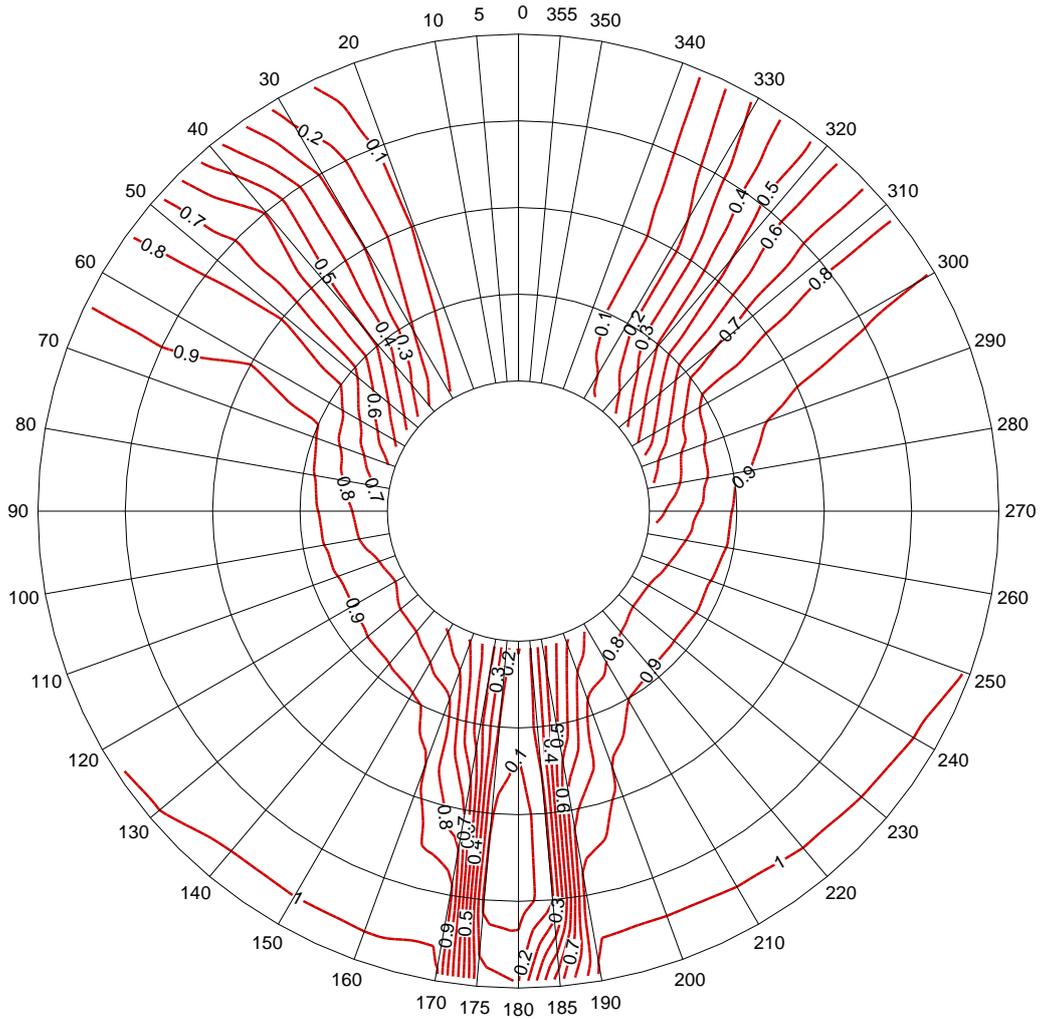


Figure 20

**Iso-Axial Velocity Contours
(KS1286, Design draft, 11.5 knots)**



Radii : 0.3000 0.5000 0.7000 0.9000 1.1000

Figure 21

**Transverse Velocity Vectors
(KS1286, Design draft, 11.5 knots)**

-

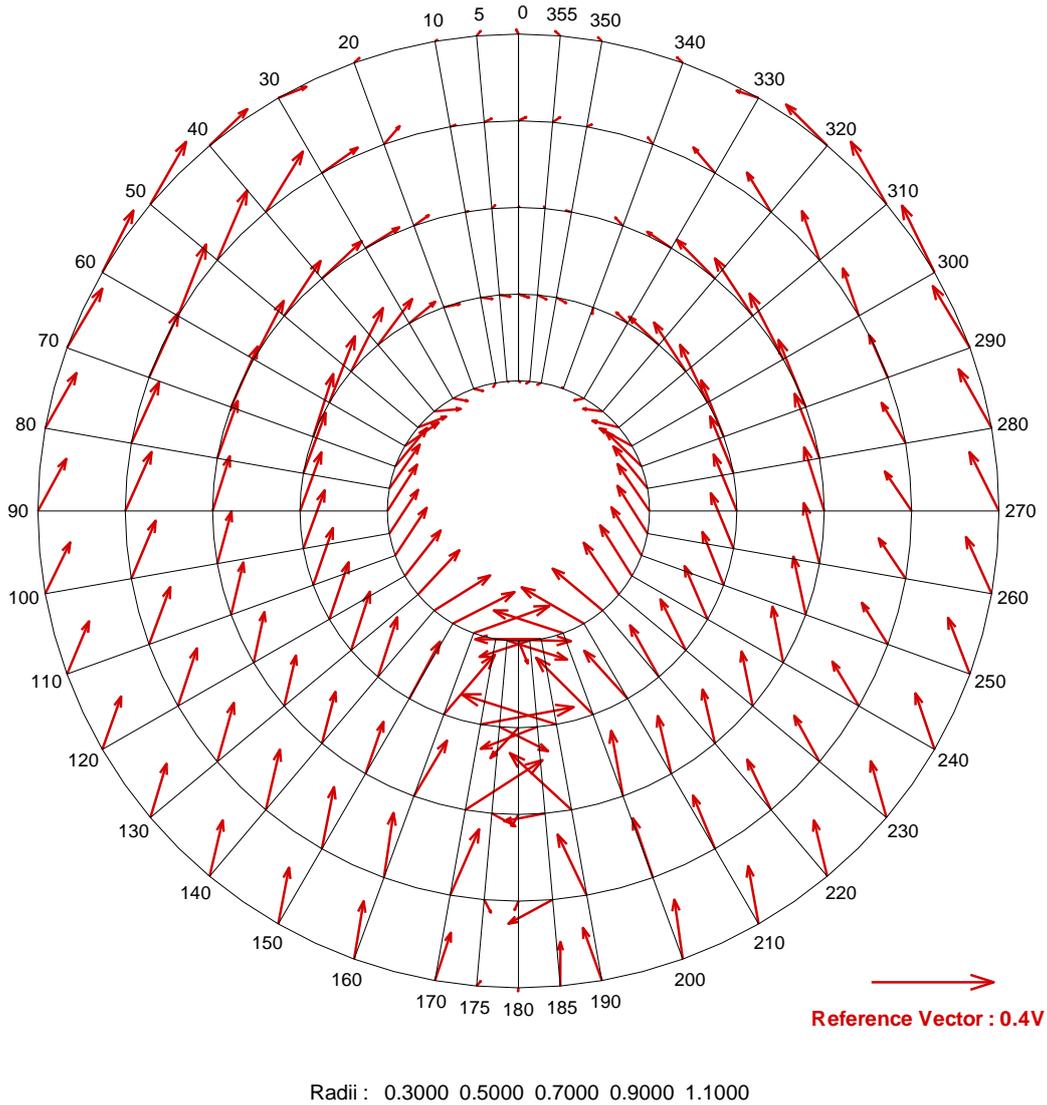


Figure 22

Radial Distribution of Harmonic Amplitudes of Velocities (KS1286, Design draft, 11.5 knots)

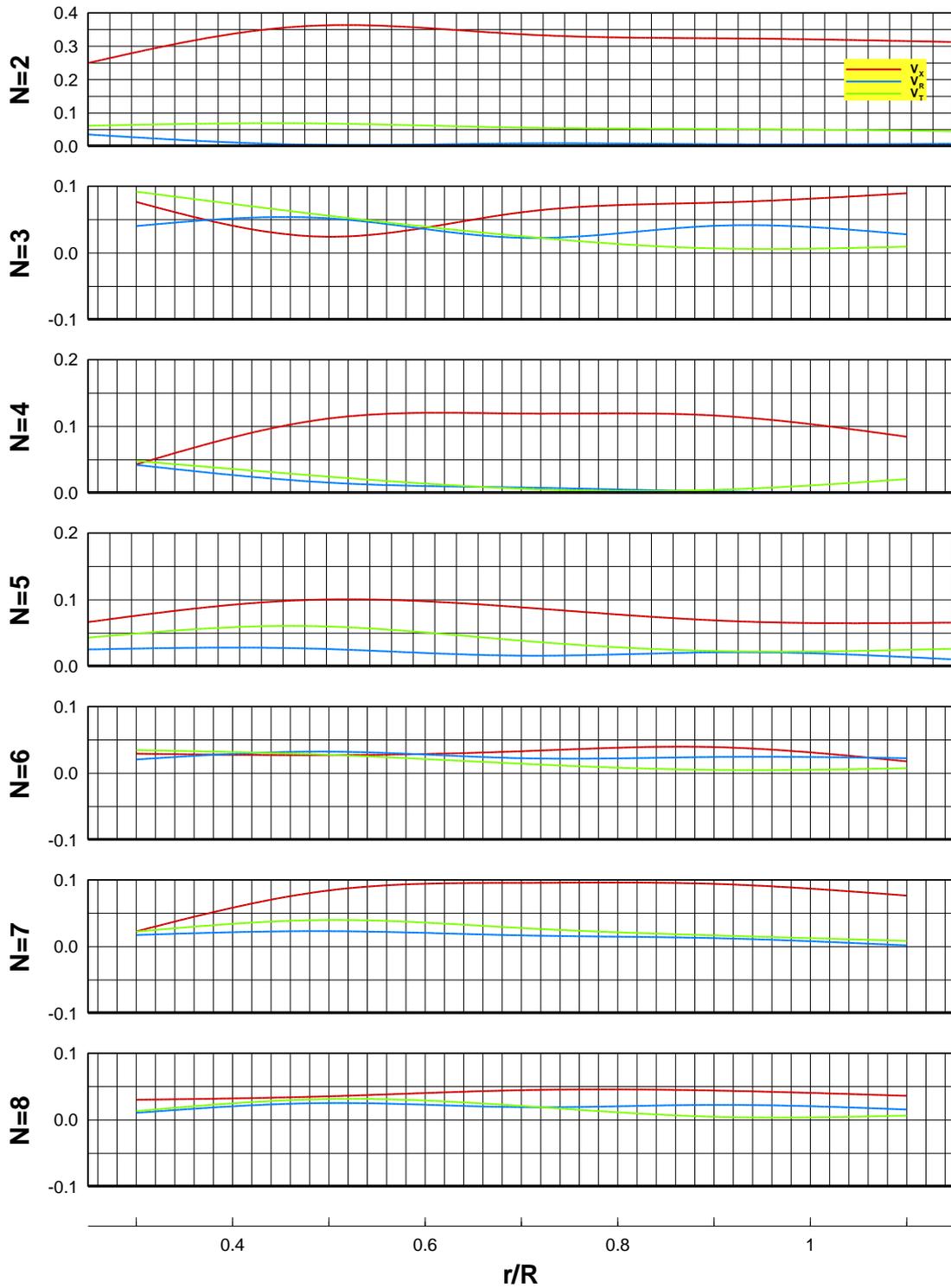


Figure 23

Radial Distribution of Circumferential Mean Velocity Components (KS1286, Design draft, 11.5 knots)

-

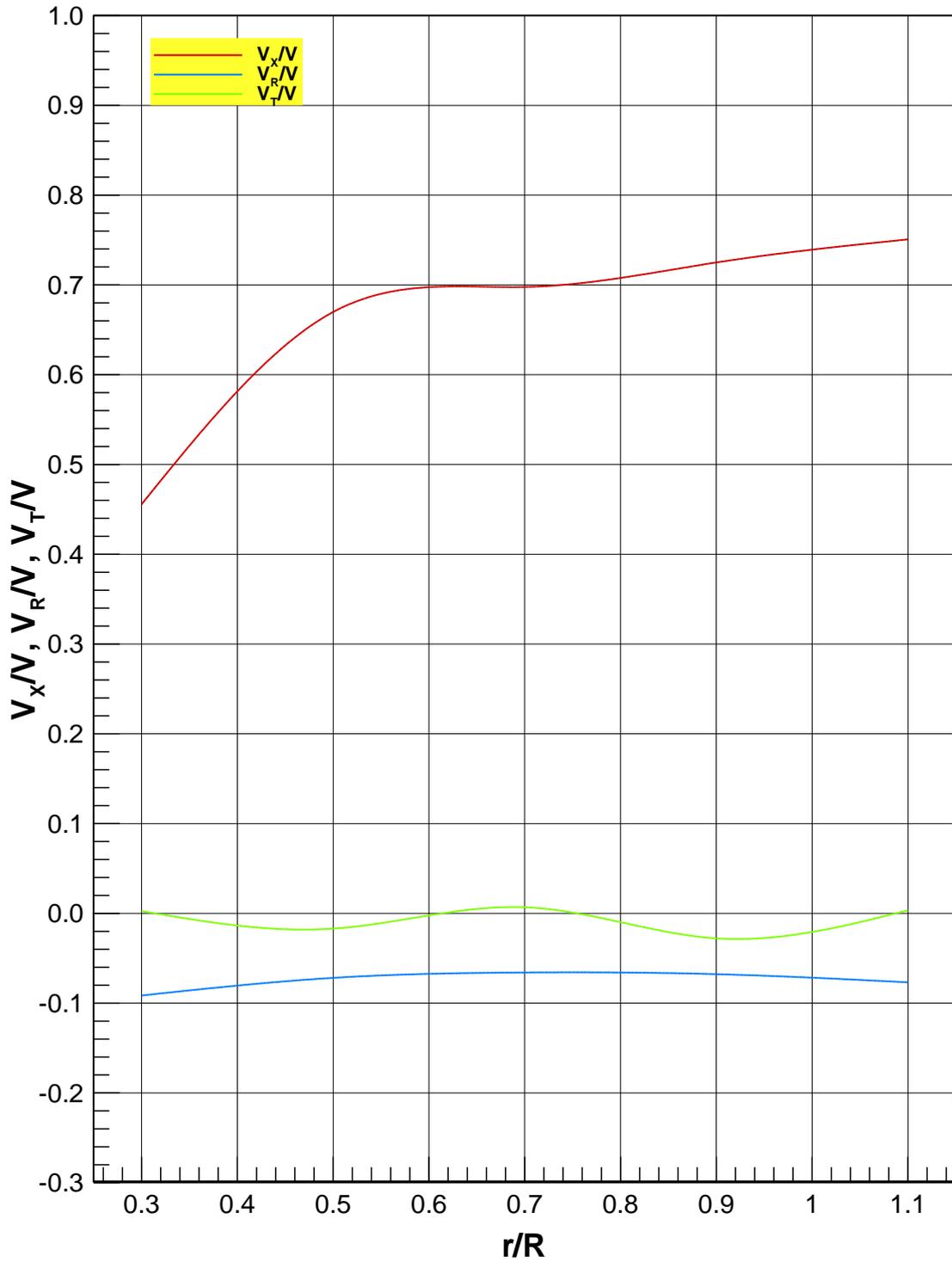
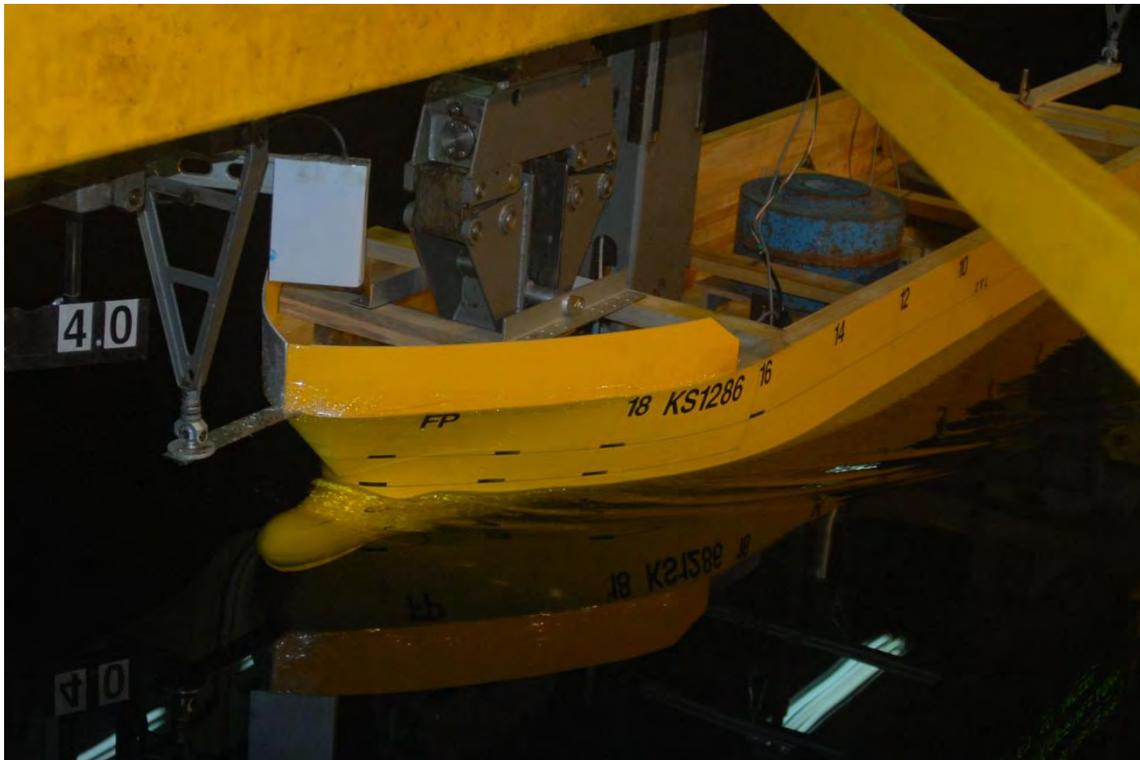


Figure 24

Photographs of the Running Ship Model
(KS1286, Design draft, 4.0 knots)



	<p>공선호</p>	<p>5/30/2012</p>
<p>Figure 25</p>	<p>Photographs of the Running Ship Model (KS1286, Design draft, 1.5 knots)</p>	<p>-</p>



	<p>공선호</p>	
<p>Figure 26</p>	<p>Paint Test Results – 1 (KS1286, Design draft, 11.5 knots)</p>	<p>5/30/2012</p>
		<p>-</p>

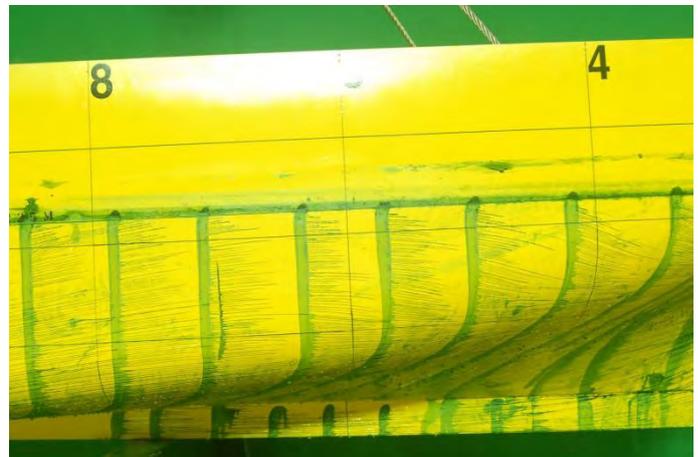
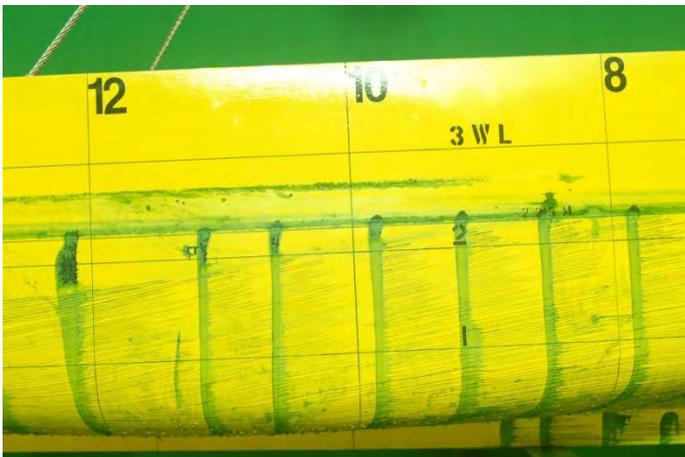
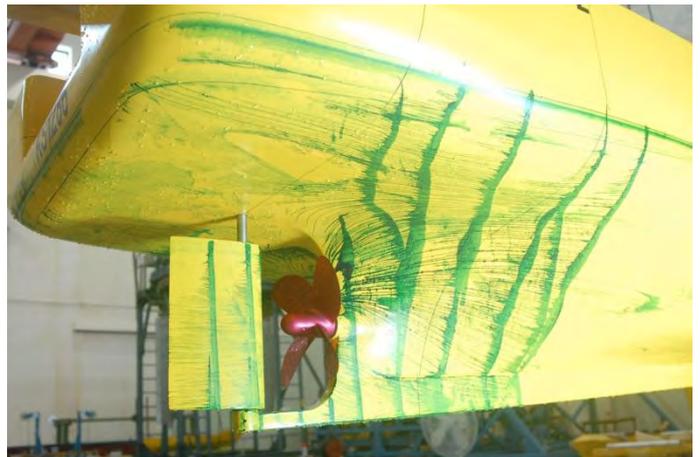
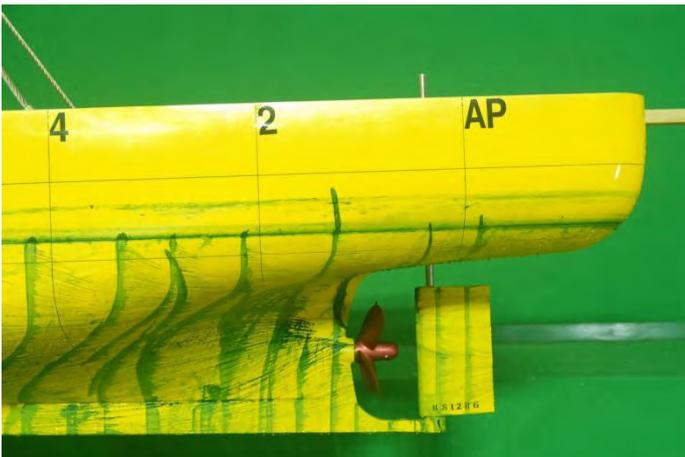
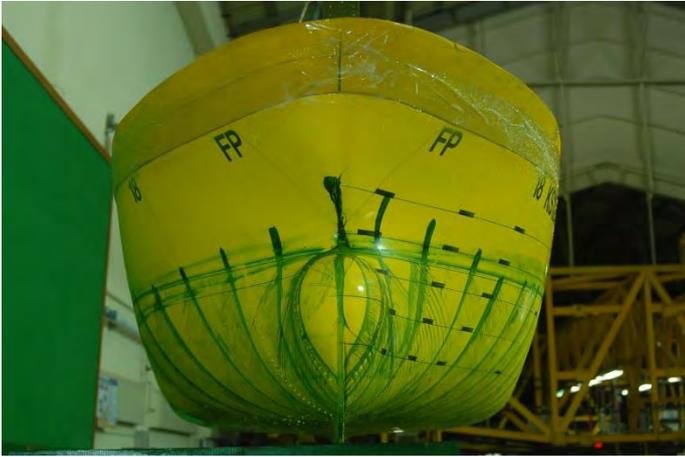


Figure 27

Paint Test Results – 2
(KS1286, Design draft, 11.5 knots)

-



APPENDICES

A. Test Descriptions

B. Nomenclature

A. Test Descriptions

A-1 Propulsion Tests

Model tests required for the full scale performance prediction comprise the resistance test, the self-propulsion test and the propeller open-water test.

In the resistance test the model is towed at the speeds giving the same Froude numbers for the model and ship, and the total resistance of the model R_{T_M} is measured.

In the self-propulsion test, the model is propelled with its own propeller at the so-called ship propulsion point over the desired range of speeds. In order to compensate for the model's increased frictional resistance due to the difference in Reynolds numbers of the model and ship, the model is towed by the resistance dynamometer. This towing force is calculated as follows:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_M S_M V_M^2 [C_{VM} - (C_{F_S} + C_A)] \quad (1)$$

For each speed, propeller thrust (T_M), torque (Q_M) and propeller revolution (N_M) are measured.

In these tests, a model is connected to the towing carriage by a resistance dynamometer at the center of buoyancy and restrained from yaw and sway.

To get the open-water characteristics of the propeller, the open-water test is performed and thrust, torque and rate of revolution are measured, keeping the rate of advance is varied so that a loading range of the propeller is examined.

A-1.1 Analysis of Model Test Results

Model Resistance R_{T_M} measured in the resistance tests is expressed in the non-dimensional form

$$C_{T_M} = \frac{R_{T_M}}{\frac{1}{2} \rho S_M V_M^2} \quad (2)$$

This is reduced to the residual resistance coefficient C_R by following relation.

$$C_R = C_{T_M} - C_{F_M} \quad (3)$$

Thrust T_M , and torque Q_M , measured at the self-propulsion tests are expressed in non-dimensional form as follows:

$$K_{T_M} = \frac{T_M}{\rho N_M^2 D_{P_M}^4} \quad (4)$$

$$K_{Q_M} = \frac{Q_M}{\rho N_M^2 D_{P_M}^5} \quad (5)$$

With K_{T_M} as input, J_{T_M} and $K_{Q_{T_M}}$ are read off from the model propeller characteristics. Then the wake fraction w_{TM} and the relative rotative efficiency η_R are calculated by the following relations.

$$w_{TM} = 1 - \frac{J_{TM} D_{P_M} N_M}{V_M} \quad (6)$$

$$\eta_R = \frac{K_{Q_{TM}}}{K_{Q_M}} \quad (7)$$

The thrust deduction is obtained from

$$t = \frac{(T_M - R_{T_{MC}} + F_D)}{T_M} \quad (8)$$

where $R_{T_{MC}}$ is the resistance corrected for the differences in temperature between resistance and self-propulsion tests:

$$R_{T_{MC}} = R_{T_M} \times \frac{C_{F_{MC}} + C_R}{C_{F_M} + C_R} \quad (9)$$

where $C_{F_{MC}}$ is the frictional resistance coefficient at the temperature of the self-propulsion test.

A-1.2 Total Resistance of Ship

The total resistance coefficient of a ship is defined as

$$C_{T_S} = C_{F_S} + C_A + C_R + C_{AA} \quad (10)$$

where C_{AA} is the air resistance coefficient:

$$C_{AA} = 0.001 \times \frac{A_T}{S_S} \times \frac{V_R^2}{V_S^2} \quad (11)$$

where V_R is the relative head wind speed.

If the ship is fitted with bilge keels, the total resistance coefficient is calculated as follows:

$$C_{T_s} = \frac{S_s + S_{BK_s}}{S_s} \times (C_{F_s} + C_A) + C_R + C_{AA} \quad (12)$$

A-1.3 Scale Effect Corrections for Propeller Characteristics

The characteristics of the full scale propeller are calculated from the model characteristics as follows:

$$K_{T_{os}} = K_{T_{om}} - \Delta K_{T_o} \quad (13)$$

$$K_{Q_{os}} = K_{Q_{om}} - \Delta K_{Q_o} \quad (14)$$

where

$$\Delta K_{T_o} = -\Delta C_D \times 0.3 \times \frac{P_{0.7R}}{D_p} \times \frac{c_{0.7R} Z}{D_p} \quad (15)$$

$$\Delta K_{Q_o} = \Delta C_D \times 0.25 \times \frac{c_{0.7R} Z}{D_p} \quad (16)$$

and ΔC_D is the difference in drag coefficient, such that

$$\Delta C_D = C_{D_M} - C_{D_s} \quad (17)$$

where

$$C_{D_M} = 2 \times \left(1 + 2 \frac{t_{0.7R_M}}{c_{0.7R}} \right) \times \left(\frac{0.044}{R_{n0.7R}^{1/6}} - \frac{5}{R_{n0.7R}^{2/3}} \right) \quad (18)$$

$$C_{D_s} = 2 \times \left(1 + 2 \frac{t_{0.7R_M}}{c_{0.7R}} \right) \times \left(1.89 + 1.62 \log \frac{C_{0.7R}}{k_p} \right)^{-2.5} \quad (19)$$

If ΔC_D is less than zero,

$$\Delta C_D = 0 \quad (20)$$

is used.

The blade roughness k_p is assumed as $3 \times 10^{-5} m$, and the local Reynolds number at

$0.7R$ is calculated as follows:

$$R_{n0.7R} = c_{0.7R_M} N_M D_{P_M} \frac{\sqrt{J_{O_M}^2 + (0.7\pi)^2}}{V_M} \quad (21)$$

A-1.4 Full Scale Wake

The full scale wake is calculated from the model wake w_{TM} , and the thrust deduction t :

$$w_{TS} = (t + 0.04) + (w_{TM} - t - 0.04) \times \frac{C_{F_S} + C_A}{C_{F_{MC}}} \quad (22)$$

In the formula, the factor 0.04 is used to take account for rudder effect. If full scale wake w_{TS} is greater than model wake w_{TM} , following formula is used.

$$w_{TS} = w_{TM} \quad (23)$$

A-1.5 Standard Prediction

The load of the full scale propeller is obtained from the following relation.

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S_S}{2D_{P_S}^2} \times \frac{C_{T_S}}{(1-t)(1-w_{TS})^2} \quad (24)$$

With this value of K_T/J^2 as input, J_{TS} and $K_{Q_{TS}}$ are read off from the full scale propeller characteristics and the following quantities are calculated.

* the effective power:

$$P_E = 1.36 \times \frac{\rho_S}{2} S_S V_S^3 C_{T_S} \times 10^{-3} : (PS) \quad (25)$$

* the rate of revolutions:

$$N_S = \frac{(1-w_{TS})V_S}{J_{TS} D_{P_S}} : (RPS) \quad (26)$$

* the delivered power:

$$P_D = 1.36 \times 2\pi \times \rho_S D_{P_S}^5 N_S^3 \frac{K_{Q_{TS}}}{\eta_R} \times 10^{-3} : (PS) \quad (27)$$

* the thrust of the propeller:

$$T_s = \frac{K_T}{J^2} J_{TS}^2 \rho_s D_{P_s}^4 N_s^2 : (N) \quad (28)$$

* the torque of the propeller:

$$Q_s = \frac{K_{Q_{TS}}}{\eta_R} \rho_s D_{P_s}^5 N_s^2 : (N \cdot m) \quad (29)$$

* the total efficiency:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \quad (30)$$

* the hull efficiency:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w_{TS}} \quad (31)$$

A-2 Wake Survey Test

The wake survey test to determine the axial, radial and tangential velocity components in the propeller plane is executed by means of a rake assembly of 5 pitot tubes. The head of each pitot tube contains five holes joined by small diameter internal tubes: one on the center, one pair aligned with the radial plane, and the other pair in the tangential plane. Four static holes joined to a common internal tube is located at the middle part of each pitot tube.

A-2.1 Velocity Components

The pressure difference between center and static holes is measured by the differential type pressure transducer and the axial velocity component V_x can be obtained. From the results, iso-axial velocity contours are plotted to give the wake distribution at the propeller plane.

The tangential and radial velocity components V_t and V_r can be computed from the pressure differences between the pair of holes in the tangential and radial plane, respectively. Also the transverse component of velocity vector V_{tr} is computed as follows:

$$V_{tr} = \sqrt{V_t^2 + V_r^2} \quad (32)$$

The transverse flow direction at the propeller plane can be easily seen by plotting these velocity vectors.

A-2.2 Harmonic Series

The velocity components at the propeller plane are considered as a periodic function of period 2π for each radius and represented by the Fourier Series.

$$\begin{aligned} V_i &= a_o + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)) \\ &= a_o + \sum_{k=1}^n (c_k \cos(k\theta - \phi_k)) \end{aligned} \quad (33)$$

A-2.3 Mean Velocity Components

Circumferential mean velocity is the mean value of the measured velocity at the radius r and computed as follows:

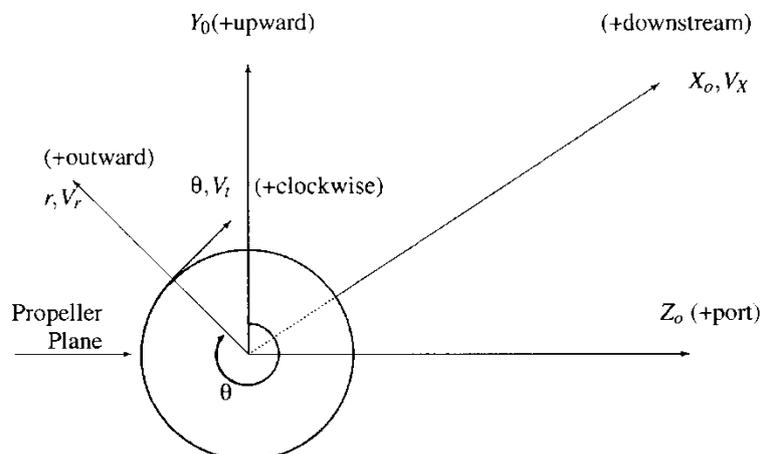
$$V_{Mi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_i(\theta) d\theta \quad (34)$$

Total mean velocity is obtained from the value of circumferential mean velocity from propeller hub to propeller tip at the propeller plane and computed as follows:

$$V_{TMI} = \frac{2\pi \int_{r_h}^{r_p} V_{Mi} \cdot r \cdot dr}{\pi(r_p^2 - r_h^2)} \quad (35)$$

Wake fraction represents the nominal wake fraction without propeller at the stern and is computed as follows:

$$w_N = 1 - \frac{V_A}{V} = 1 - V_{TMX} \quad (36)$$



B. Nomenclature

B-1 Geometry of Ship and Propeller

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
A_E	AE	Expanded blade area	Outside of hub	m^2
A_M	AM	Midship section area	Midway between FP and AP	m^2
A_O	AO	Propeller disc area	$\frac{\pi D_P^2}{4}$	m^2
A_P	-	Projected area		m^2
A_T	AT	Transverse projected area of ship above waterline		m^2
A_W	AW	Waterplane area		m^2
$a_{x0.8}$	-	Longitudinal clearance from propeller to stern frame at a height of 0.8R above the propeller axis.		m
a_z		Vertical clearance to hull		m
B	B	Breadth, moulded of ship		m
BA	BA	Bulb section area in submerged part at FP		m
BAR	BAR	Bulb-midship section area ratio	$\frac{BA}{A_M}$	
BB	BB	Bulb breadth in submerged part		m
BBR	BBR	Bulb-midship breadth ratio	$\frac{BB}{B}$	
BH	BH	Bulb height of maximum length position		m
BHR	BHR	Bulb height-fwd draft ratio	$\frac{BH}{T_F}$	
BL	BL	Bulb length from maximum fore end to AP in submerged part		m
BLR	BLR	Bulb-ship length ratio	$\frac{BL}{L_{PP}}$	
c	C	Chord length of propeller blade section		
C_B	CB	Block coefficient	$\frac{\nabla}{L_{PP}BT}$	
C_M	CM	Midship section coefficient	$\frac{A_M}{BT}$	
C_P	CP	Prismatic coefficient, longitudinal	$\frac{\nabla}{A_M L_{PP}}$	
C_W	CW	Load waterline coefficient	$\frac{A_W}{L_{PP}B}$	

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
$cR_{0.7R}$	CR070	Chord length-diameter ratio at 0.7R	$\frac{c_{0.7R}}{D_p}$	
$c_{0.7R}$	CH070	Chord length of blade at 0.7R		<i>m</i>
D	D	Depth, moulded of ship		<i>m</i>
D_p	DP	Diameter of a propeller		<i>m</i>
d	DH	Hub diameter		<i>m</i>
EAR	EAR	Expanded area ratio	$\frac{A_E}{A_O}$	
f_o	-	Maximum camber of propeller blade section		
G	-	Non-dimensional circulation	$\frac{\Gamma}{2\pi U_R}$	
h	-	Depth of submergence of the propeller axis		<i>m</i>
HDR	HDR	Hub-diameter ratio	$\frac{d}{D_p}$	
i_G	RAKG	Rake from the propeller plane to the tip generation line	Aft displacement is positive	<i>m</i>
KB	KB	Center of buoyancy above moulded baseline		<i>m</i>
LCB	LCB	Center of buoyancy from midship	Fwd. positive	<i>m</i>
LCF	LCF	Center of floatation from midship	Fwd. positive	<i>m</i>
L_{OS}	LOS	Length overall, submerged		<i>m</i>
L_{PP}	LPP	Length between perpendiculars		<i>m</i>
L_{WL}	LWL	Length of load waterline		<i>m</i>
N_p	NOPROP	Number of propellers		
P	P	Propeller pitch in general		
PR_{mean}	PRMEAN	Propeller pitch ratio, mean		
PR_{root}	PRROOT	Propeller pitch ratio at root		
PR_{tip}	PRTIP	Propeller pitch ratio at tip		
$PR_{0.7R}$	PR070	Propeller pitch ratio at 0.7R		
RDR	RDR	Propeller rake-diameter ratio	$\frac{i_G}{D_p}$	
S	S	Wetted surface area of a ship		<i>m</i> ²
S_{BK}	SBK	Wetted surface area of bilge keels		<i>m</i> ²
T	T	Draft, moulded of ship		<i>m</i>
T_A	TA	Draft at after perpendicular		<i>m</i>
T_F	TF	Draft at forward perpendicular		<i>m</i>
T_{mean}	TMEAN	Mean draft of AP and FP		<i>m</i>
$\frac{t_o}{c}$	-	Thickness-chord ratio		

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
$tR_{0.7R}$	TR070	Maximum blade thickness-diameter ratio at 0.7R	$\frac{t_{m0.7R}}{D_p}$	
$t_{m0.7R}$	TM070	Maximum blade thickness at 0.7R		<i>m</i>
U_R	-	Resultant velocity at 0.7 radius	$nD\sqrt{J_A^2 + 0.7^2\pi^2}$	
X_p	XP	Longitudinal propeller position	Distance between propeller plane and AP	<i>m</i>
Z	NPB	Number of propeller blades		
α	-	Angle of attack relative to zero-lift line		
δ	-	Taylor's diameter coefficient	$\frac{ND}{V_a}$	
θ_s	SKEW	Skew angle		deg.
λ	SCALE	Scale ratio		
Γ	-	Radial circulation distribution		
∇	DISV	Displacement volume		<i>m</i> ³

B-2 Resistance and Propulsion

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
C_A	CA	Incremental resistance coefficient for model-ship correlation	$\frac{R_A}{1/2 \rho S V^2}$	
C_{AA}	CAA	Air resistance coefficient	$\frac{R_{AA}}{1/2 \rho S V^2}$	
C_D	CD	Drag coefficient of propeller		
C_F	CF	Specific frictional resistance coefficient	$\frac{R_F}{1/2 \rho S V^2}$	
C_N	CN	Trial correction for rpm		
C_P	CP	Trial correction for power		
C_R	CR	Specific residuary resistance coefficient	$\frac{R_R}{1/2 \rho S V^2}$	
C_T	CT	Specific total resistance coefficient	$\frac{R_T}{1/2 \rho S V^2}$	
C_V	CV	Specific total viscous resistance coefficient	$\frac{R_V}{1/2 \rho S V^2}$	
C_W	CW	Specific wavemaking resistance coefficient	$\frac{R_w}{1/2 \rho S V^2}$	
F_D	FD	Towing force in a self-propulsion test, measured		N
F_{D_0}	FDO	Towing force in a self-propulsion test, calculated	$\frac{C_{F_M} - C_{F_S} - C_A}{1/2 \rho_M S_M V_M^2}$	
F_n	FN	Froude number		
J	ADVC	Advance coefficient of ship	$\frac{V}{ND_p}$	
J_A	ADVCA	Advance coefficient of propeller	$\frac{V_A}{ND_p}$	
K_Q	KQ	Torque coefficient	$\frac{Q}{\rho N^2 D_p^5}$	
K_T	KT	Thrust coefficient	$\frac{T}{\rho N^2 D_p^4}$	
k	C3	Three dimensional form factor	$\frac{C_V - C_F}{C_F}$	
k_P	KP	Blade roughness of a propeller		m
k_S	KS	Hull roughness of a ship		m

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
N	N	Rate of revolution		<i>revs/sec</i>
P_B	PB	Brake power		KW,PS
P_D	PD	Delivered power at propeller		KW,PS
P_E	PE	Effective power		KW,PS
Q	Q	Torque		$N - m$
R_A	RA	Model-ship correlation allowance		N
R_{AA}	RAA	Air resistance		N
R_F	RF	Frictional resistance	Due to fluid friction on surface	N
R_n	RN	Reynolds number		
R_R	RR	Residuary resistance	$R_T - R_F$	N
R_T	RT	Total resistance	Total towed resistance	N
R_V	RV	Total viscous resistance		N
R_W	RW	Wavemaking resistance	Due to formation of surface waves	N
T	T	Thrust		N
t	THDF	Thrust deduction fraction	$\frac{T - R_T}{T}$	
V	V	Speed of ship		<i>m/sec</i> <i>knot</i>
V_A	VA	Speed of advance of propeller	Speed in relation to water flow	
w	WFT	Taylor wake fraction	$\frac{V - V_A}{V}$	
ΔC_F	DCF	Roughness allowance		
ΔC_{FC}	DCFC	Trial correction for C_F		
η_D	ETAD	Propulsive efficiency or quasi-propulsive coefficient	$\frac{P_E}{P_D}$	
η_H	ETAH	Hull efficiency	$(1 - t)/(1 - w)$	
η_O	ETAO	Propeller open-water efficiency		
η_R	ETAR	Relative rotative efficiency		
ν	NU	Coefficient of kinematic viscosity		m^2/sec
ρ	RHO	Mass density		kg/m^3

Subscript M : Value for model ship or propeller
 Subscript S : Value for full scale ship or propeller
 Subscript T : Value from thrust-identity
 Subscript O : Value for propeller open-water characteristics

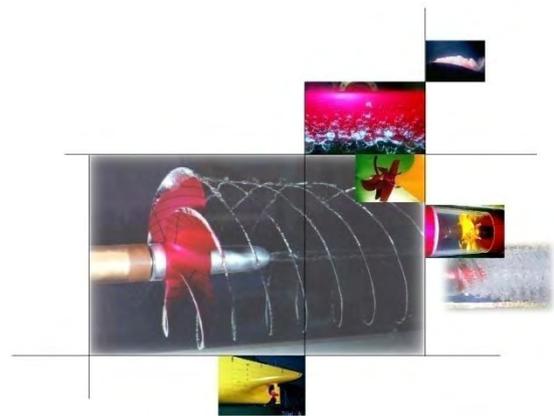
B-3 Wake Survey

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
a_k	A	Fourier cosine coefficients		
a_0	A0	Fourier coefficient		
b_k	B	Fourier sine coefficients		
c_k	C	Harmonic amplitude		
r	R	Radial coordinate		
V	V	Velocity of undisturbed flow or speed of ship model		m/sec
V_i	VI	Nondimensional velocity components		
V_M	VM	Mean velocity at the radius r		m/sec
V_r	VR	Radial velocity component		m/sec
V_{TM}	VTM	Mean velocity at the propeller plane		m/sec
V_t	VT	Tangential velocity component		m/sec
V_{tr}	VTR	Transverse component of velocity vector		m/sec
V_x	VX	Axial velocity component		m/sec
w_N	WN	Froude wake fraction	$\frac{V - V_A}{V_A}$	
θ	ANG	Position angle		deg.
ϕ	PHI	Phase angle		deg.

Subscript i : Axial, radial or tangential velocity components

PART II

CAVITATION TESTS



List of tables

- | | |
|---------|--|
| Table 1 | Principal Particulars of the Propeller |
| Table 2 | Conditions for Cavitation Test(KP935) |
| Table 3 | Conditions for Cavitation Test(KP1064) |
| Table 4 | The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935 in the Load Condition at Cruise |
| Table 5 | The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935 in the Load Condition at Trawl |

List of figures

Figure 1	Drawing of KP935 Propeller	.....	F1
Figure 2	Drawing of KP1064 Propeller	.....	F2
Figure 3	Drawing of KP1064 Propeller Duct	.....	F3
Figure 4	Iso-Axial Velocity Curves of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel (Cruse Design Draft)	.....	F4
Figure 5	Comparison of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel with the Wake Measured in the Towing Tank (Design Draft)	.....	F5
Figure 6	Sketches of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller (Load Condition at Cruse; Suction Side)	.....	F6
Figure 7	Photographs of the cavitation patterns of KP935 Propeller (Load Condition at Cruse; Suction Side)	.....	F7
Figure 9	Sketches of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller (Load Condition at Trawl; Suction Side)	.....	F9
Figure 10	Photographs of the cavitation patterns of KP935 Propeller (Load Condition at Trawl; Suction Side)	.....	F10
Figure 12	The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935 (Load Condition at Cruse)	.....	F12
Figure 13	The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935 (Load Condition at Trawl)	.....	F13
Figure 14	Photographs of the cavitation patterns of KP1064 Propeller (Load Condition at Cruse; Suction Side)	.....	F14
Figure 15	Photographs of the cavitation patterns of KP1064 Propeller (Load Condition at Trawl; Suction Side)	.....	F15

1. Introduction

캐비테이션 터널에서 공선호 프로펠러(KP935)와 설계된 덕트 프로펠러(KP1064)의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측시험에 대한 결과를 Part II 에서 설명하고 있다. 모형시험은 어선의 항주상태 및 어업시 예인상태의 두 가지 경우에 대하여 수행하였으며, 이때 사용한 반류 스크린은 항주상태의 반류를 사용하였다.

반류 스크린은 당 연구원의 표준기법을 사용하여 생성하였으며, 어선 프로펠러의 캐비테이션 성능을 파악하기 위한 모형시험은 당 연구원의 중형 캐비테이션 터널(시험부; 0.6 m × 0.6 m × 2.6 m; width × height × length)에서 수행하였다.

Hull Form (KS1286)

Wake Screen Fabrication : Design Draft(순항)

Propeller (KP935, w/ 15% Sea Margin)

Cavitation Observation : 순항 및 예인상태의 설계흘수

Pressure Fluctuation Measurement Test : 순항 및 예인상태의 설계흘수

Propeller (KP1064, w/ 15% Sea Margin)

Cavitation Observation : 순항 및 예인상태의 설계흘수

Pressure Fluctuation Measurement Test : Duct Propeller 로 계측불가

2. Propeller Geometry

The principal particulars of the design propeller and the propeller drawing are presented in tables and figures as follows:

Model Propeller Number	KP935	KP1064
Principal Particulars of the Propeller	Table 1	Table 1
Propeller and Duct Drawing	Fig. 1	Fig. 2, Fig. 3

Table 1 Principal Particulars of the Propeller

Model Propeller Number	KP935	KP1064
Scale Ratio, λ	7.936	7.936
Full-Scale Propeller Diameter, D_s	1.984 m	1.984 m
Model Propeller Diameter, D_m	250.0 mm	250.0 mm
Hub-Diameter Ratio, d_H/D	0.1770	0.200
Number of Blades, Z	4	4
Mean Pitch-Diameter Ratio, $(P/D)_{mean}$	0.6068	0.8046
Expanded Area Ratio, A_E/A_O	0.4974	0.4855
Chord-Diameter Ratio at $0.7R$, $C_{0.7R}/D$	0.2834	0.2605
Skew Angle Extent, θ_s	13.04°	0.0°
Rake-Diameter Ratio at Tip	10.919 mm	0.00 mm
Blade Section Type	NACA66	NACA66
Propeller Rotation Direction	R.H.	R.H.
Material of Model Propeller	Aluminum	Aluminum

3. Tests Descriptions

Wake reproduce results are presented in tables and figures as follows:

(a) Hull Form (KS1286)

Wake Reproduce Results	Design Draft
Measured Axial Velocity Contour in Cavitation Tunnel	Fig. 4
Measured Axial Velocity along the Circumferential Direction	Fig. 5

In Fig. 4 and 5, the reproduced velocity distributions along the circumferential direction at various radial positions are compared with the corresponding one measured in the KORDI towing tank. The reproductions are considered acceptable.

The cavitation test conditions are determined by the torque identity method from the results of resistance, self-propulsion and open-water test in the towing tank. The blade angular position of a key blade is measured from the vertically upward position in clockwise direction when the propeller is viewed from afterward. The test items and conditions are as follows:

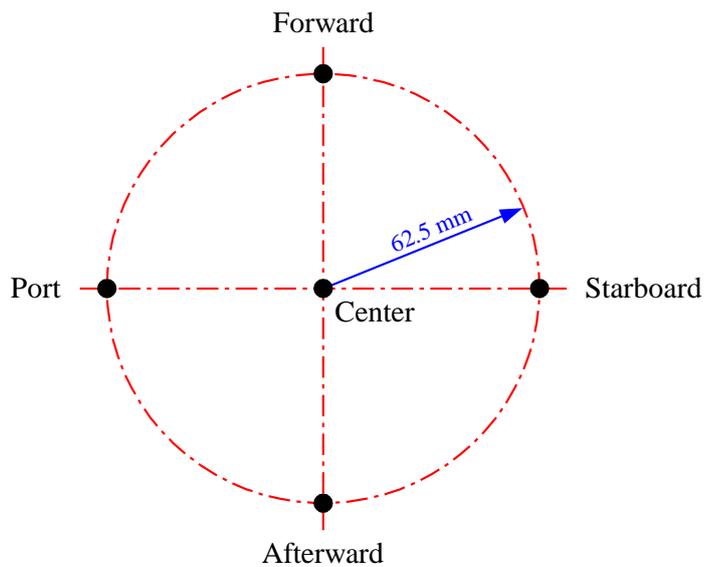
(b) Cavitation Observations

Propeller	KP935		KP1064	
	순항	예인	순항	예인
Load Condition	순항	예인	순항	예인
Test Condition	Table 2		Table 3	
Suction Side Cavitation Sketch	Fig. 6	Fig. 9	-	-
Suction Side Cavitation Photographs	Fig. 7-8	Fig. 10-11	Fig. 14	Fig. 15
Pressure Side Cavitation Sketch	-	-		
Pressure Side Cavitation Photographs	-	-		

(c) Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation

Propeller	KP935		KP1064	
Load Condition	순항	예인	순항	예인
Test Condition	Table 2		Table 3	
Pressure Fluctuation Amplitude	Table 4	Table 5	-	-
	Fig. 12	Fig. 13	-	-

The pressure fluctuation was measured on a flat plate above the propeller. The XTM-190-25A pressure transducers of 25 psi (172.4 kPa) are used to pick up the pressure values. The five pick-up positions on the plate are depicted below.



Location of five pressure transducers on the flat plate

Using the method recommended by ITTC, the full-scale pressure fluctuation amplitudes can be predicted from the model scale measurement according to the following formula,

$$P_{si} = P_{mi} \times \frac{\rho_s}{\rho_m} \left(\frac{n_s}{n_m} \right)^2 \left(\frac{D_s}{D_m} \right)^2$$

Table 2 Conditions for Cavitation Test (KP935)

Model Propeller Number	KP935	
Load Condition	Design draft(Cruise)	Design draft(Trawl)
Test Date	February 08, 2011	February 08, 2011
Water Temperature	4.5°C	4.5°C
Atmospheric Pressure	100.1 kPa	100.1 kPa
Full-Scale Propeller Brake Power	1277.6 PS	1277.6 PS
Full-Scale Propeller Rotational Speed	377.44 rpm	360.56 rpm
Full-Scale Propeller Shaft Submergence	1.787m	1.787m
Dynamometer	J25	J25
Tip Clearance	0.2506m	0.2506m
Model Propeller Rotational Speed, n_m	25.0rps	25.0rps
Advance Coefficient, J_A	0.3367	0.1738
Thrust Coefficient, K_T	0.1732	0.2319
Cavitation Number, $\sigma_{n0.7R}$	1.3845	1.5171
Reynolds Number, R_n	0.65×10^6	0.65×10^6
Air Content, α/α_s	63.0%	63.0%

Table 3 Conditions for Cavitation Test (KP1064)

Model Propeller Number	KP1064	
Load Condition	Design draft(Cruise)	Design draft(Trawl)
Test Date	April 16, 2012	April 16, 2012
Water Temperature	12.8°C	12.8°C
Atmospheric Pressure	100.24 kPa	100.24 kPa
Full-Scale Propeller Brake Power	1277.6 PS	1277.6 PS
Full-Scale Propeller Rotational Speed	337.66 rpm	311.03 rpm
Full-Scale Propeller Shaft Submergence	1.787m	1.787m
Dynamometer	J25	J25
Tip Clearance	w/ Duct	w/ Duct
Model Propeller Rotational Speed, n_m	25.0rps	25.0rps
Advance Coefficient, J_A	0.4302	0.3756
Thrust Coefficient, K_T	0.1874	0.2053
Cavitation Number, $\sigma_{n0.7R}$	1.6061	1.8928
Reynolds Number, R_n	0.76×10^6	0.76×10^6
Air Content, α/α_s	59.8%	59.8%

4. Summery

Based on the cavitation observation and the pressure fluctuation measurement tests, the following characteristics can be deduced.

(a) Cavitation Observations (KP935)

Test Item	Load Condition at Cruse	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Not Appeared
Range of Blade Angle	- 30° ~ 230°	-
Maximum Extent	28% at 20°	-

Test Item	Load Condition at Trawl	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Not Appeared
Range of Blade Angle	-30° ~ 230°	-
Maximum Extent	25% at 20°	-

(b) Predicted Full-Scale Peak Pressure Fluctuation(KP935)

Load Condition	Cruse	Trawl
Harmonic Component	1 st Blade Frequency	2 nd Blade Frequency
Amplitude	19.493kPa	11.216kPa
Location	Center	Center

Table 4 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935 in the Load Condition at Cruse

Psi (kPa)	Port	Center	Starboard	Forward	Afterward
P _{s1}	4.829	19.493	17.193	6.910	16.967
P _{s2}	4.898	8.384	8.488	3.154	7.498
P _{s3}	3.647	5.745	6.453	2.997	5.497
P _{s4}	3.116	4.764	5.042	2.737	4.503

Table 5 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935 in the Load Condition at Trawl

Psi (kPa)	Port	Center	Starboard	Forward	Afterward
P _{s1}	4.521	5.822	9.545	1.726	5.058
P _{s2}	5.162	11.216	7.744	4.295	7.793
P _{s3}	1.934	7.832	3.139	1.715	3.540
P _{s4}	1.704	4.605	2.043	1.490	2.414

(a) Cavitation Observations (KP1064)

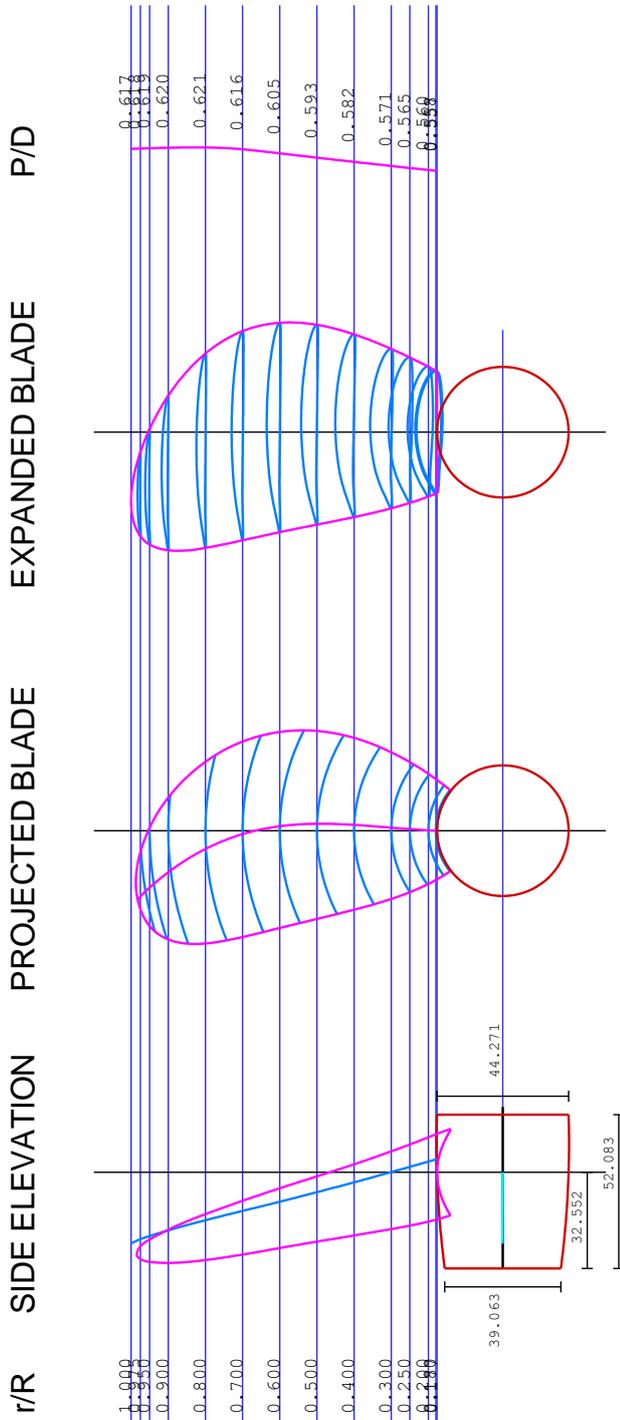
Test Item	Load Condition at Cruse	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Sheet Cavitation
Range of Blade Angle	- 30° ~ 90°	50° ~ 280°
Maximum Extent	20% at 30°	3% at 260°

Test Item	Load Condition at Trawl	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Not Appeared
Range of Blade Angle	-30° ~ 80°	-
Maximum Extent	15% at 30°	-

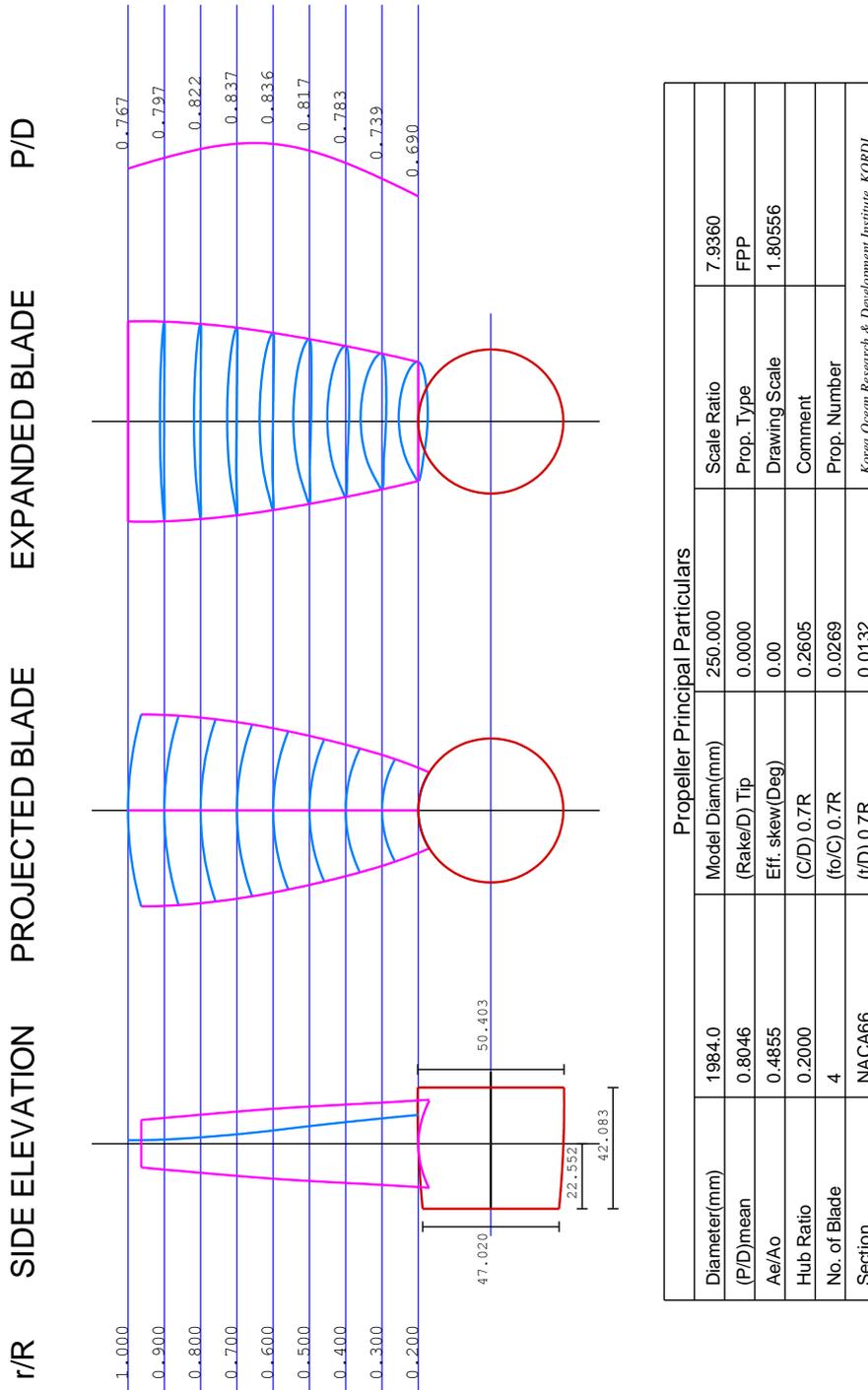
FIGURES

Figure 1

Drawing of KP935 Propeller



Propeller Principal Particulars					
Diameter(mm)	1920.0	Model Diam(mm)	250.000	Scale Ratio	7.6800
(P/D)mean	0.6068	(Rake/D) Tip	0.0965	Prop. Type	FPP
Ae/Ao	0.4974	Eff. skew(Deg)	13.04	Drawing Scale	1.80556
Hub Ratio	0.1770	(C/D) 0.7R	0.2834	Comment	
No. of Blade	4	(F0/C) 0.7R	0.0254	Prop. Number	KP935
Section	NACA66	(T/D) 0.7R	0.0153	<i>Korea Ocean Research & Development Institute, KRISO</i>	



	<p>공선후</p>	
<p>Figure 3</p>	<p>Drawing of KP1064 Propeller Duct</p>	<p>April 16, 2012 <i>Duct Propeller</i></p>

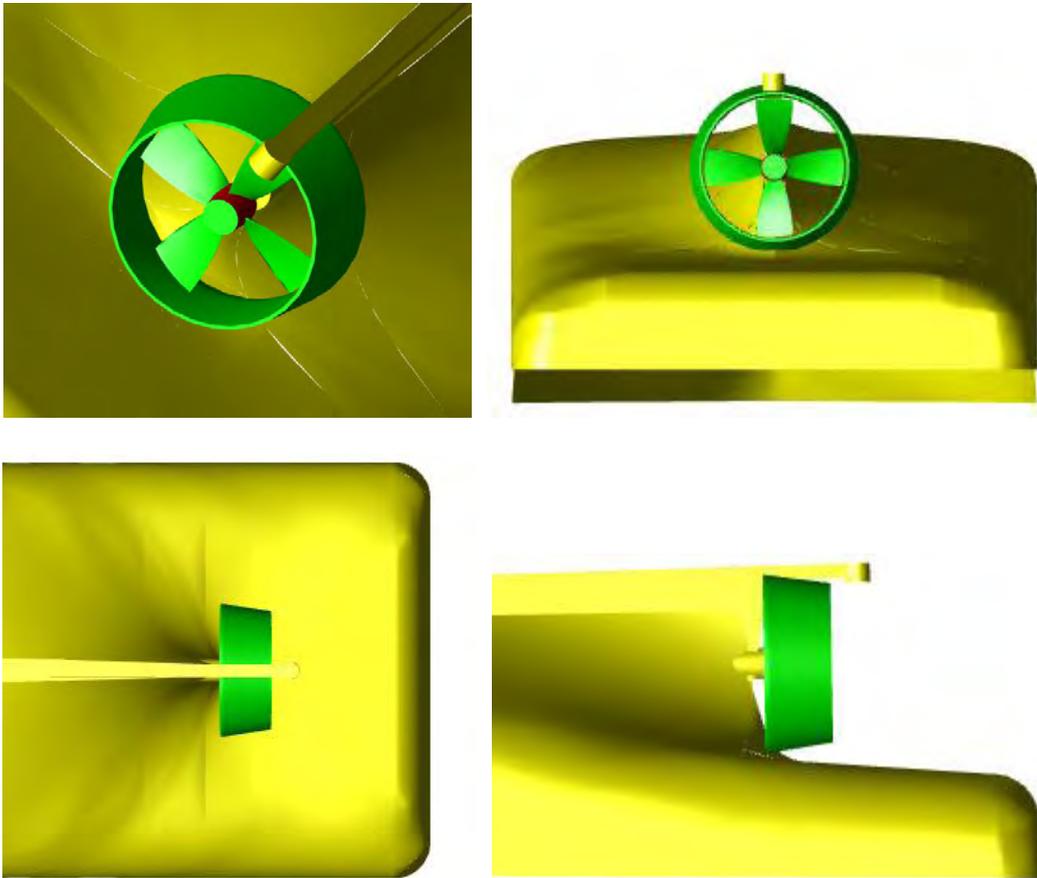


Figure 4

Iso-Axial Velocity Curves of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel

February 08, 2011

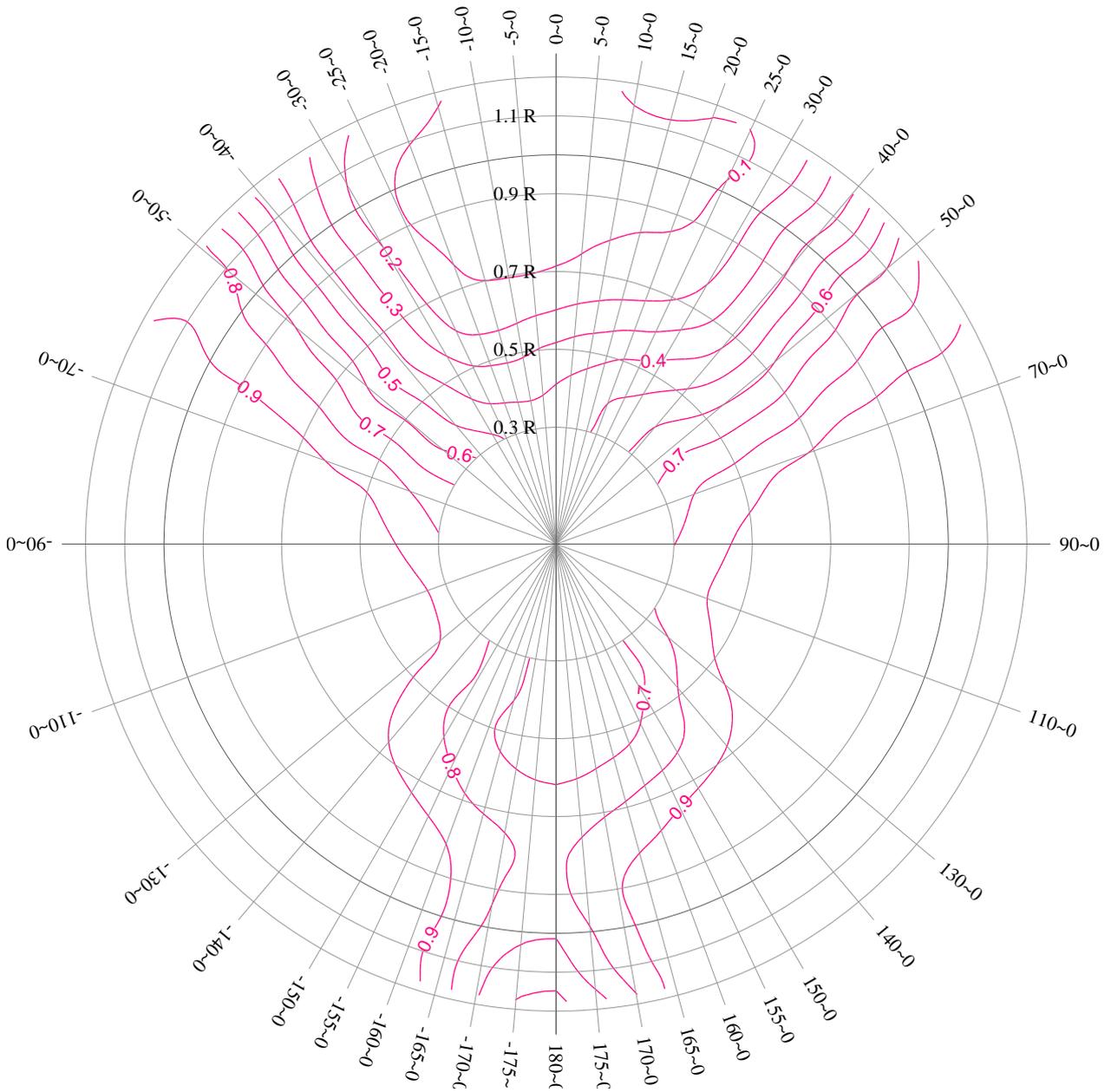
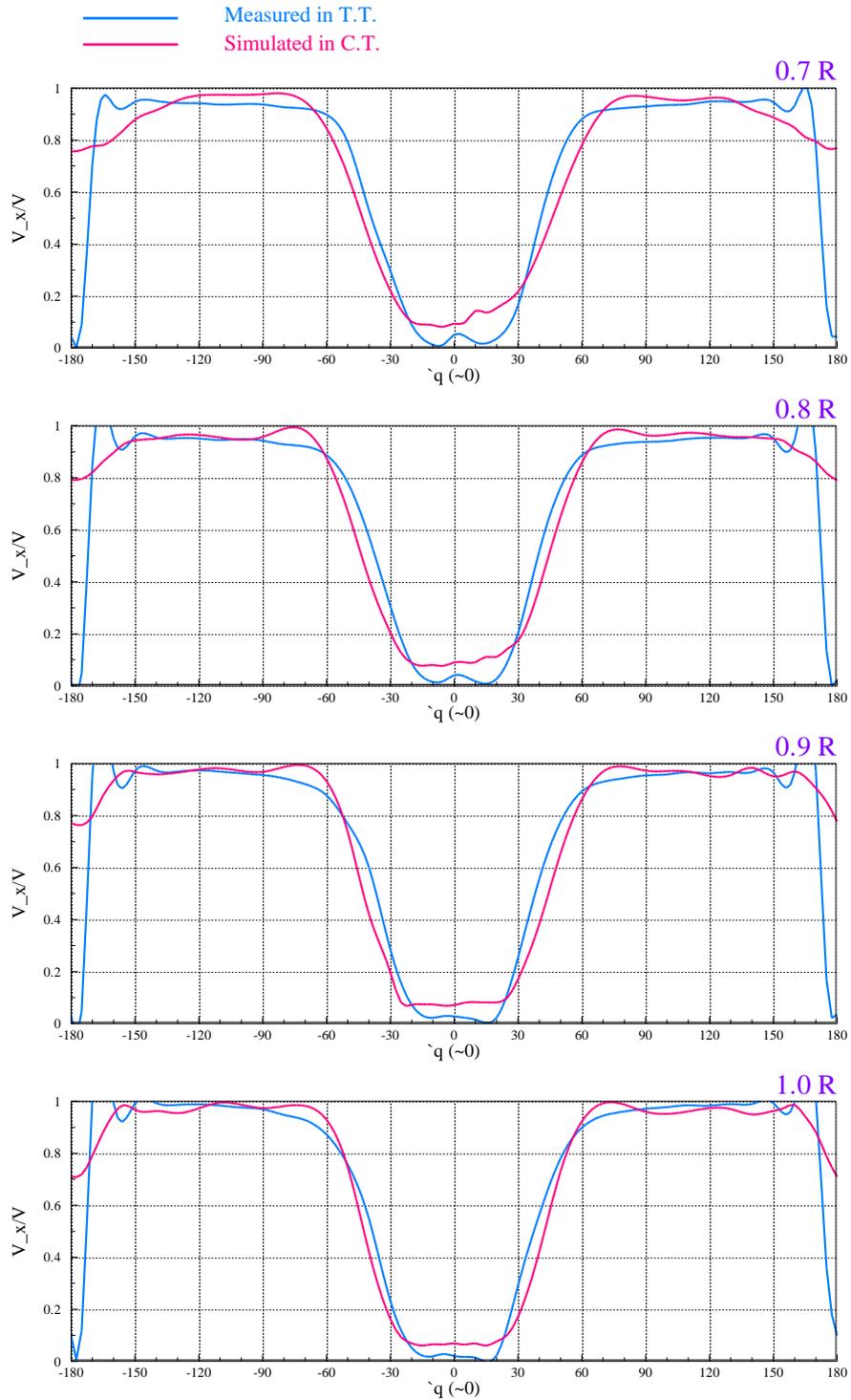
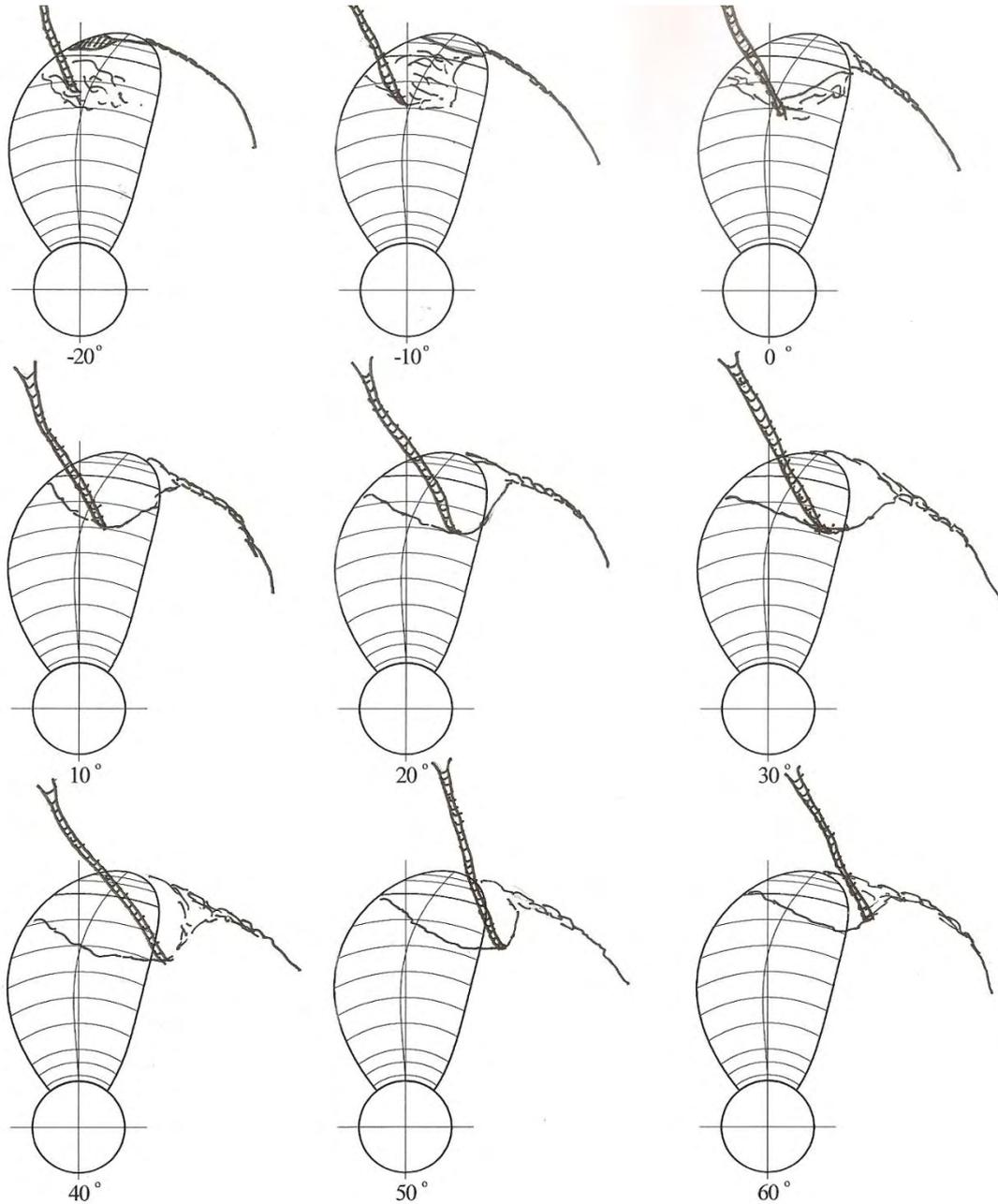


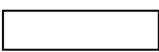
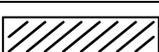
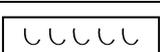
Figure 5

Comparison of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel with the Wake Measured in the Towing Tank



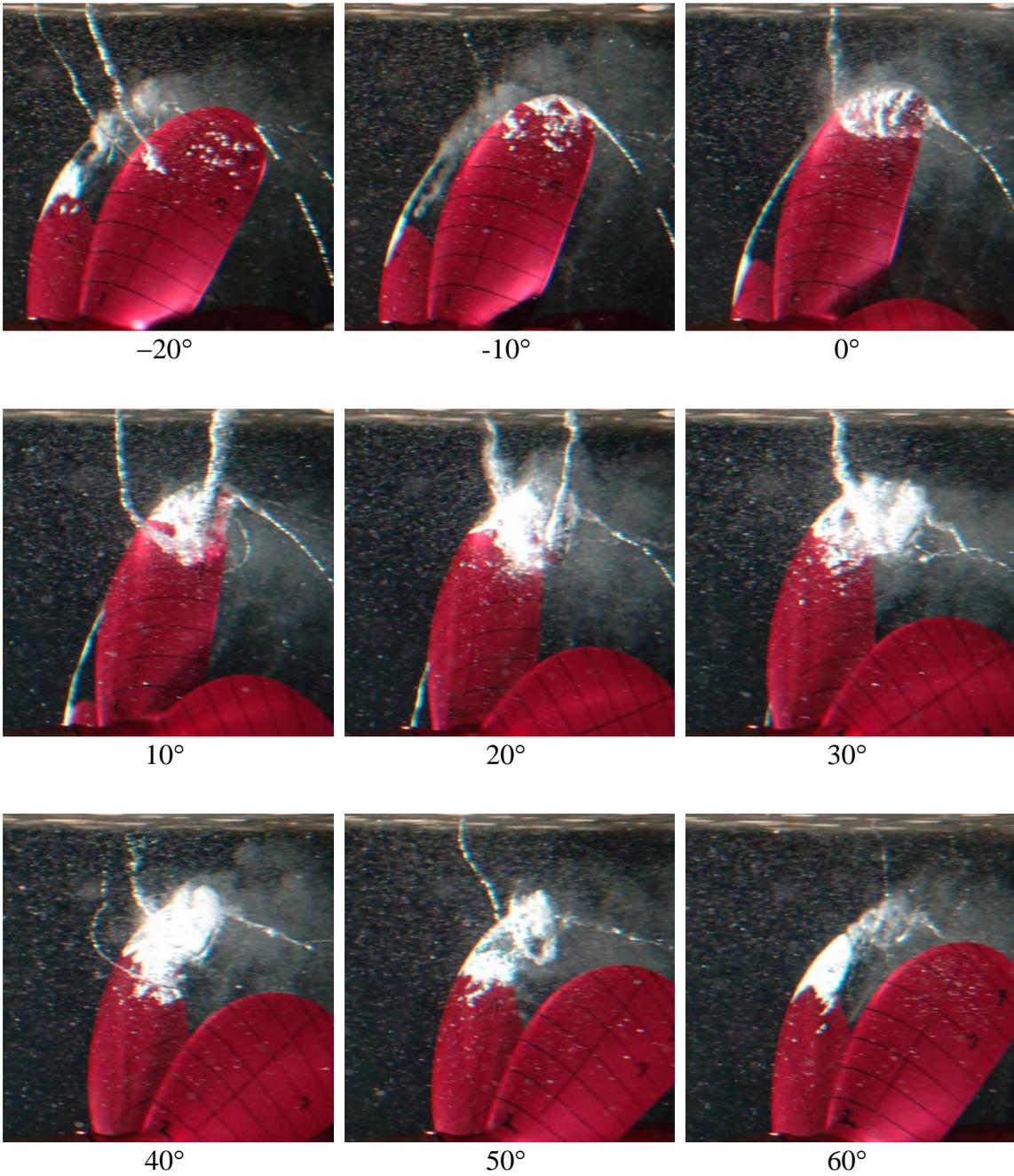
	공선힬	Load Condition at Design Draft
		Cruse
	Figure 6	Sketches of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller	Suction Side



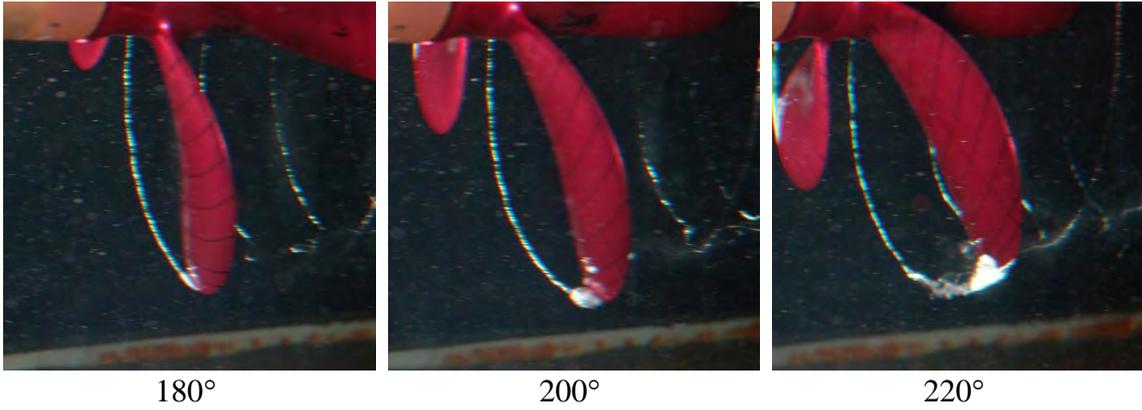
	Continuous type of the sheet cavitation		Bubble cavitation
	Intermittent type of the sheet cavitation		Thick sheet cavitation

Z

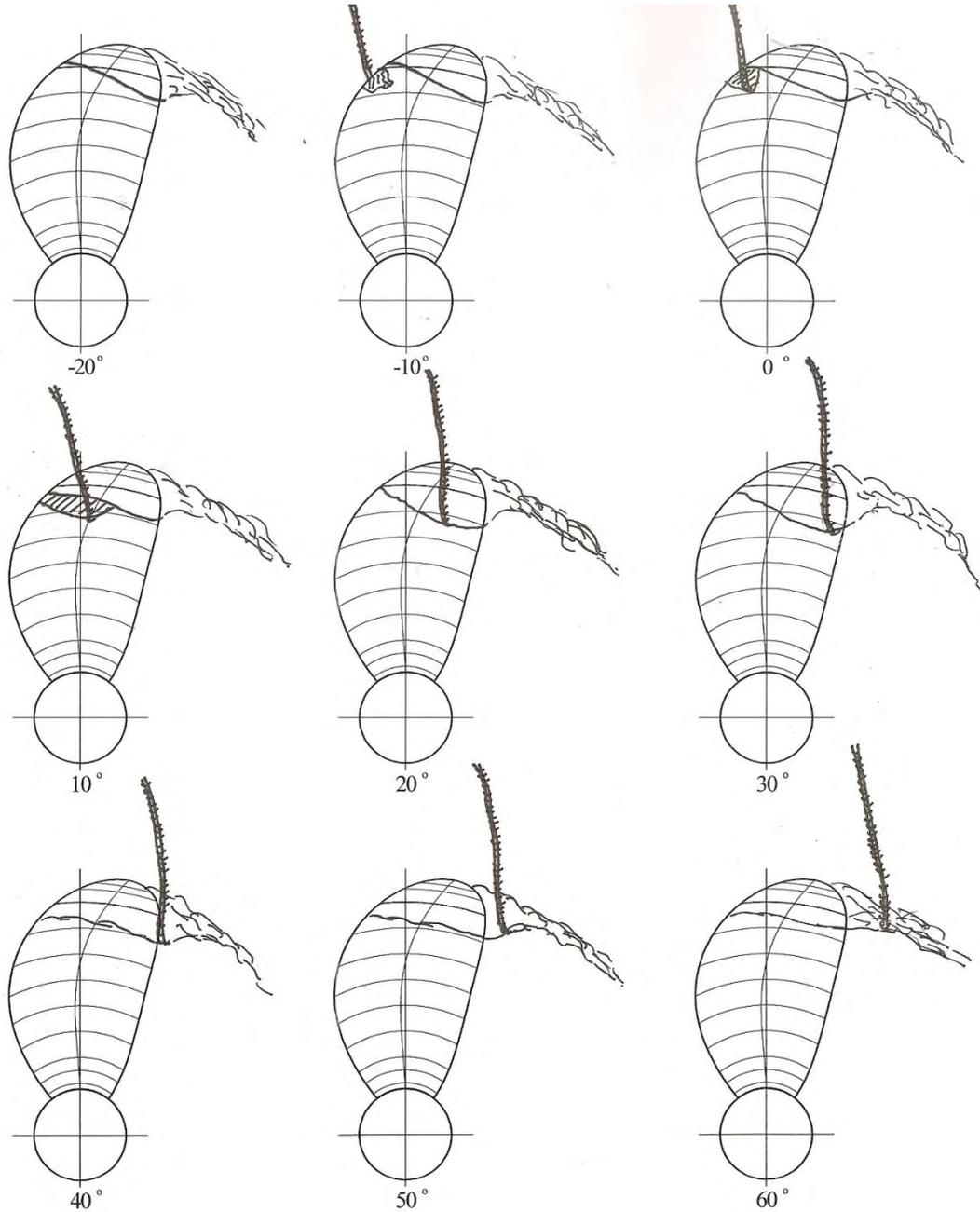
KORDI	공선희	Cruse
		February 08, 2011
Figure 7	Photographs of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller(Cruse)	Suction Side

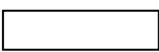
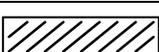
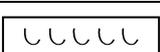


KORDI	공선후	Cruse
		February 08, 2011
Figure 8	Photographs of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller(Cruse)	Suction Side

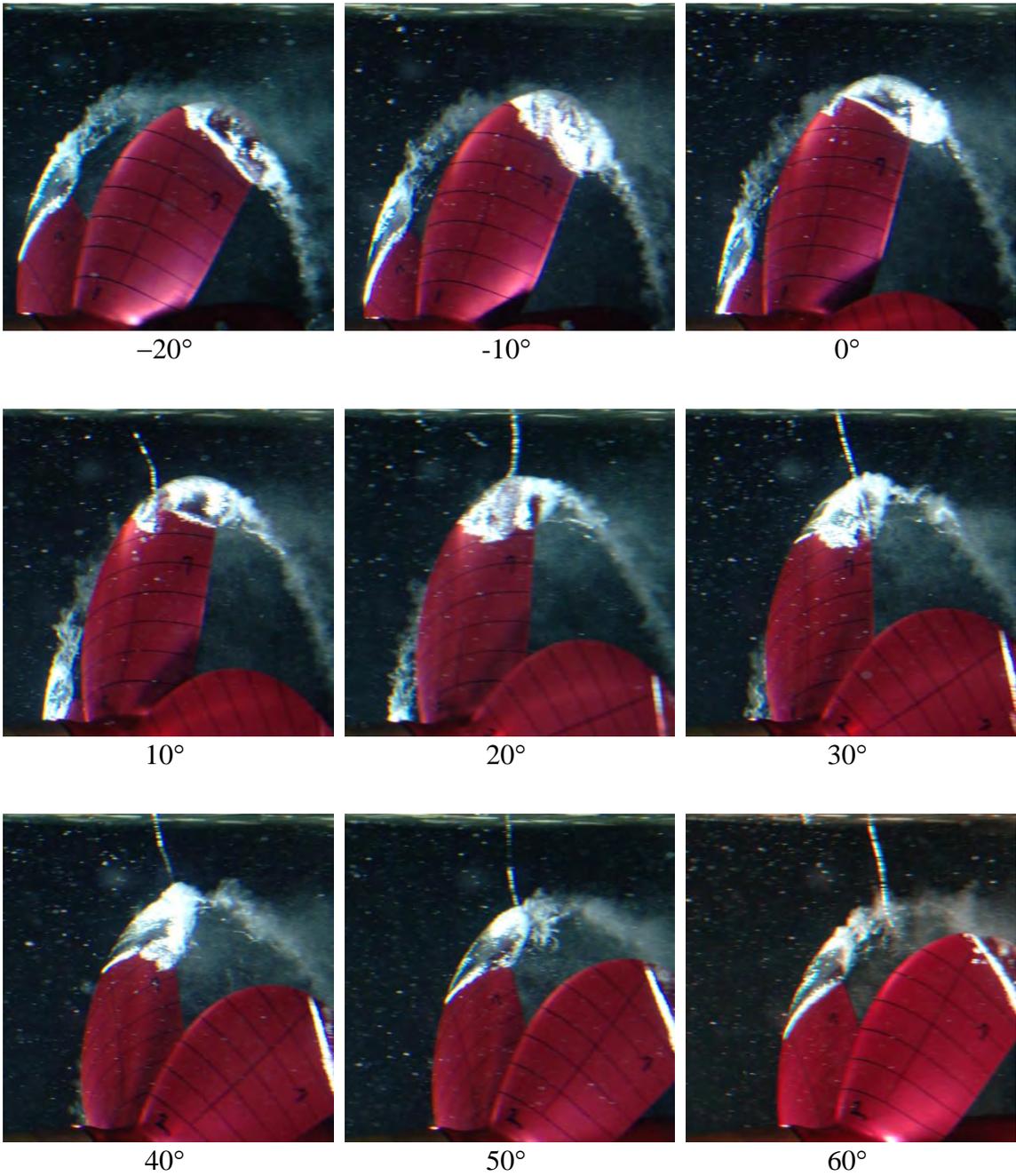


	공선호	Trawl
		February 08, 2011
Figure 9	Sketches of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller (Trawl)	Suction Side



	Continuous type of the sheet cavitation		Bubble cavitation
	Intermittent type of the sheet cavitation		Thick sheet cavitation

KORDI	공선힬	Trawl
		February 08, 2011
Figure 10	Photographs of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller(Trawl)	Suction Side



KORDI	공선힬	Trawl
		February 08, 2011
Figure 11	Photographs of the Cavitation Patterns of KP935 Propeller(Trawl)	Suction Side

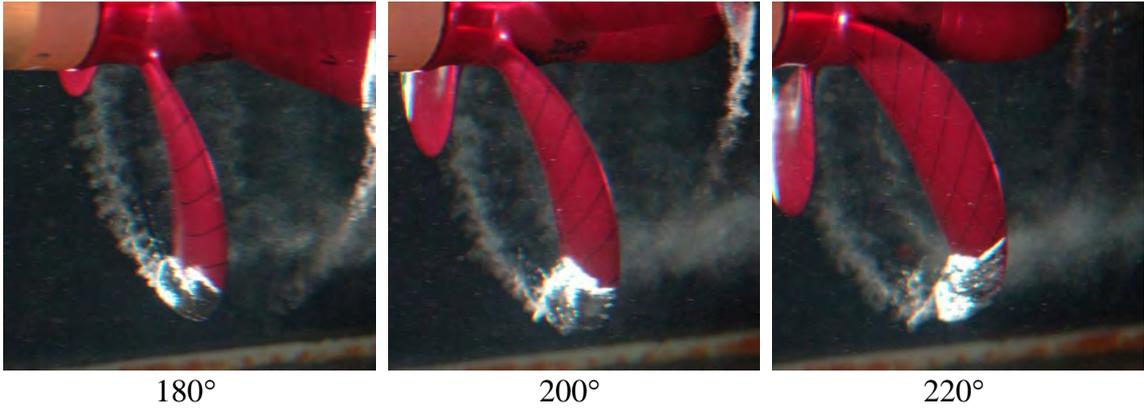


Figure 12	공선호 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935	Load Condition at Design Draft
		February 08, 2011
		Cruse

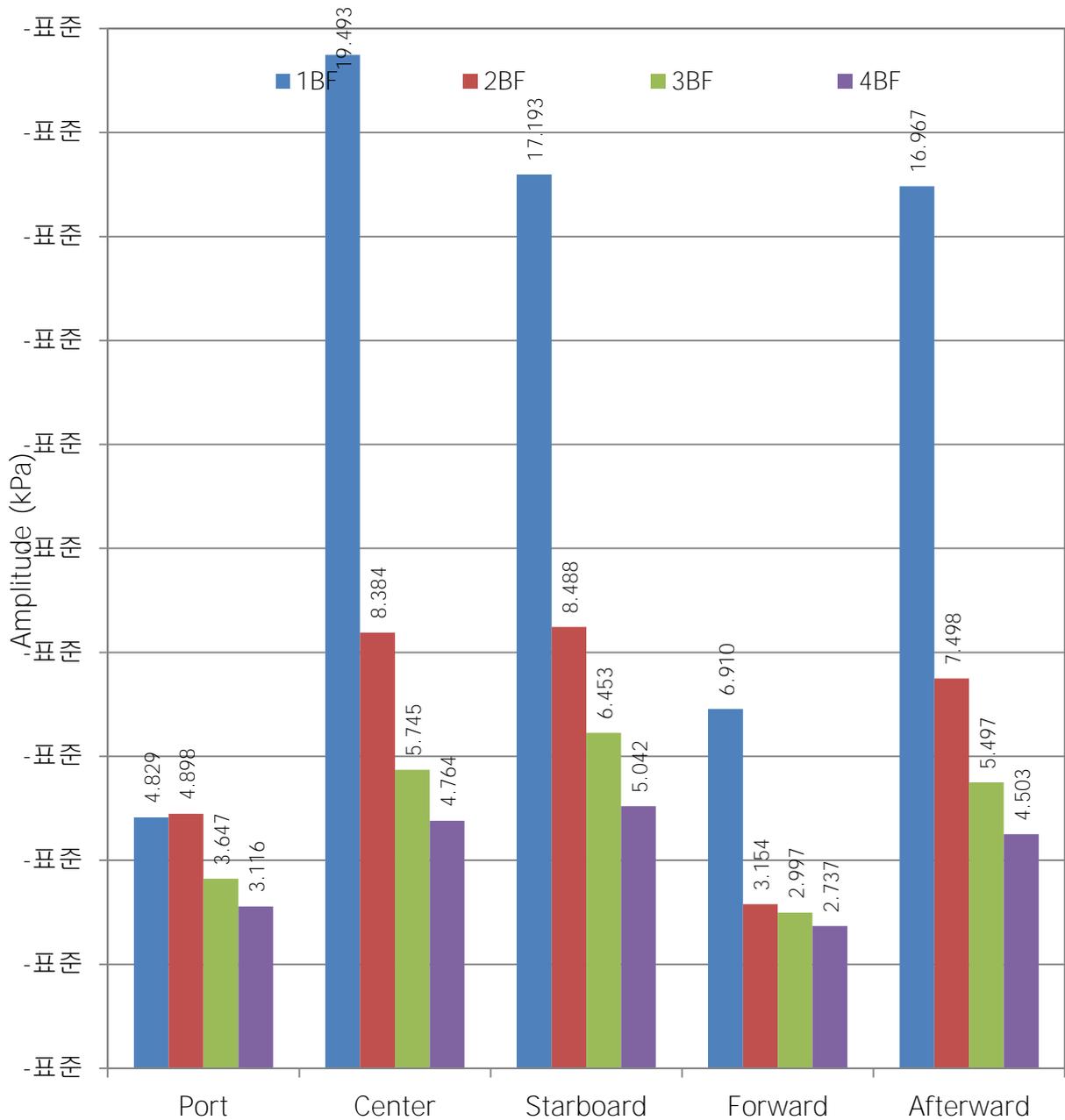
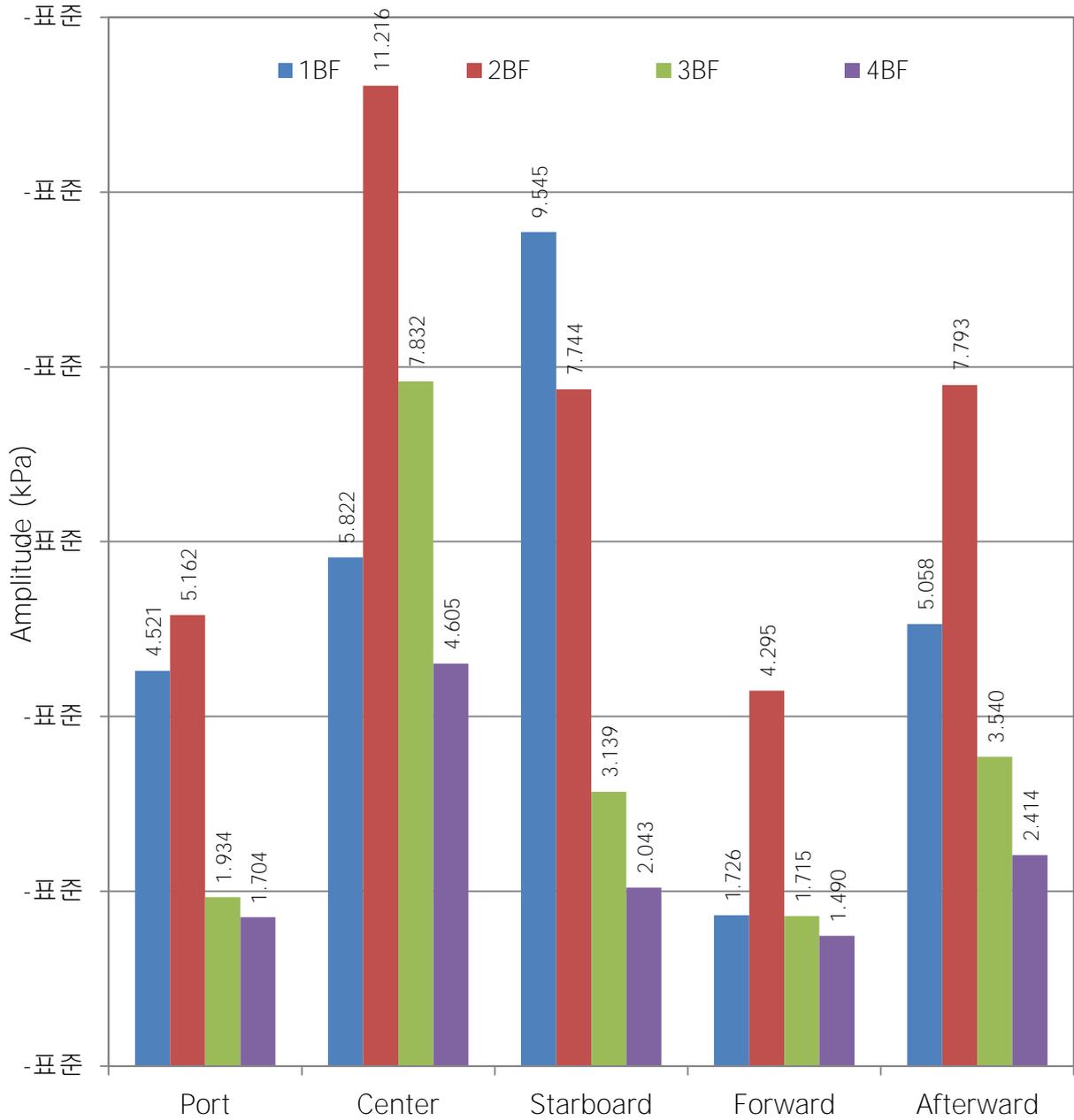


Figure 13	공선호 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP935	Load Condition at Design Draft
		February 08, 2011
		Trawl



KORDI	공선힬	Cruse
		April 16, 2012
Figure 14	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1064 Propeller(Cruse)	Suction Side

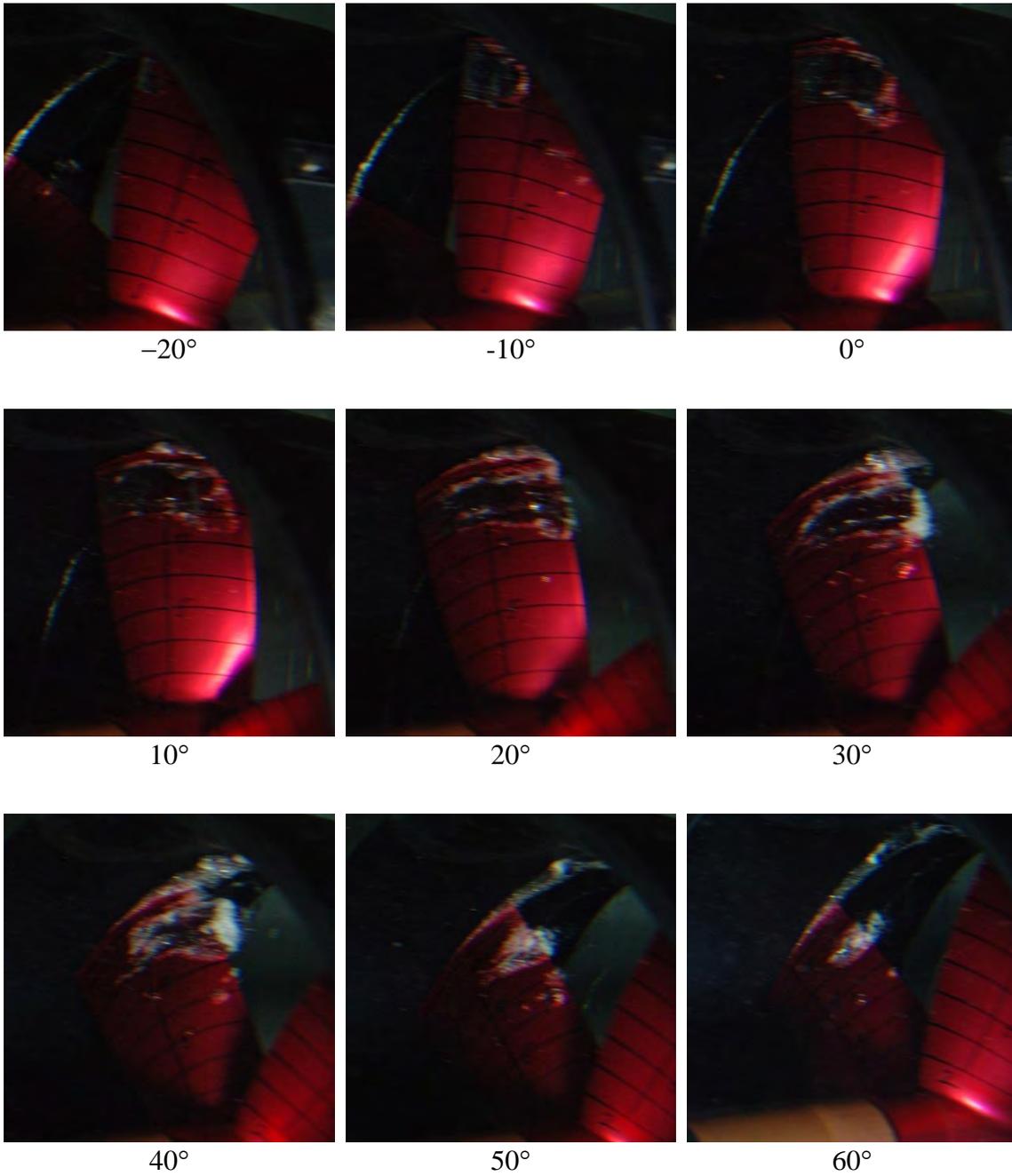


Figure 15	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1064 Propeller(Cruise)	KORDI	공선후	Cruse
				April 16, 2012
				Pressure Side

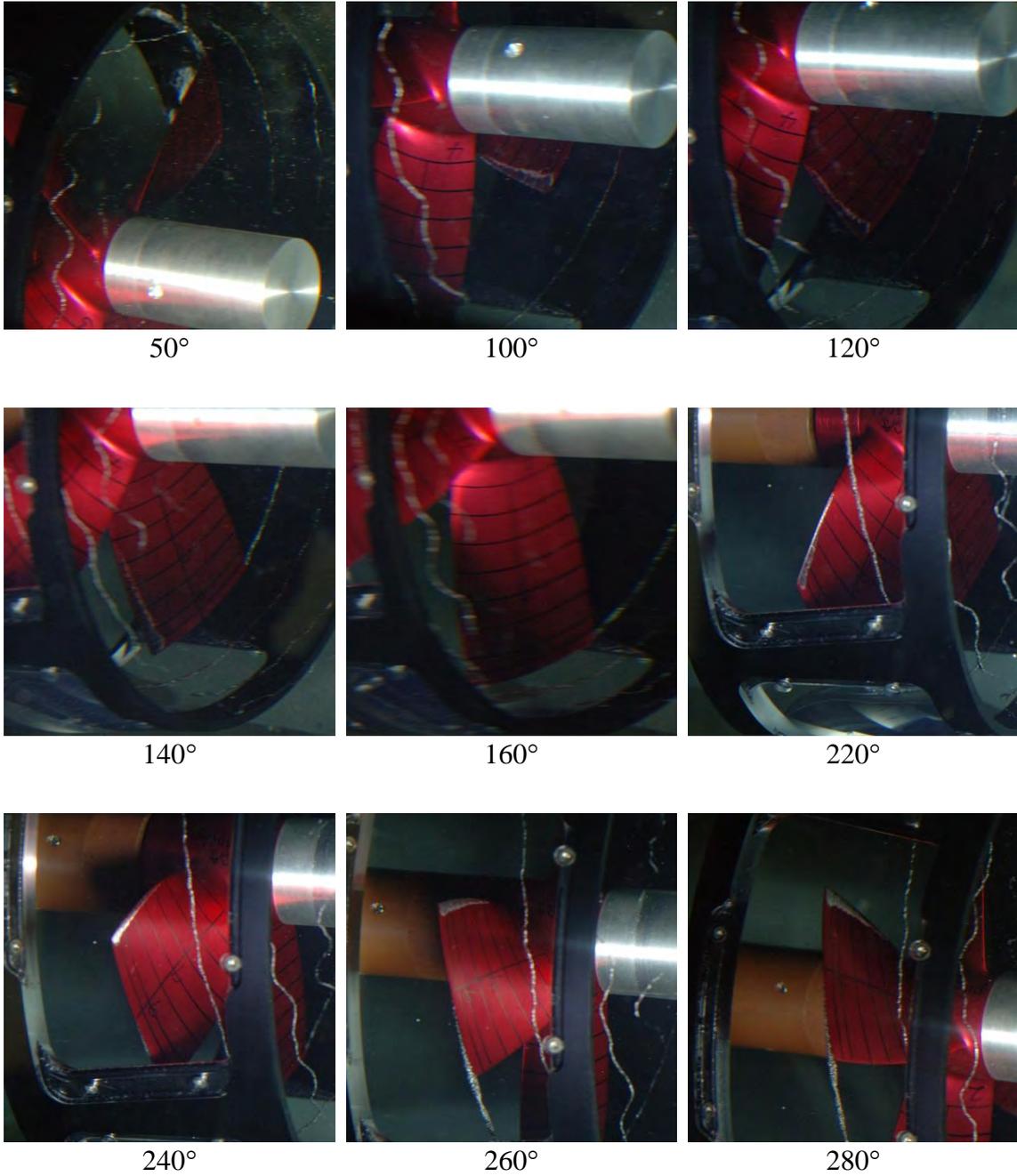
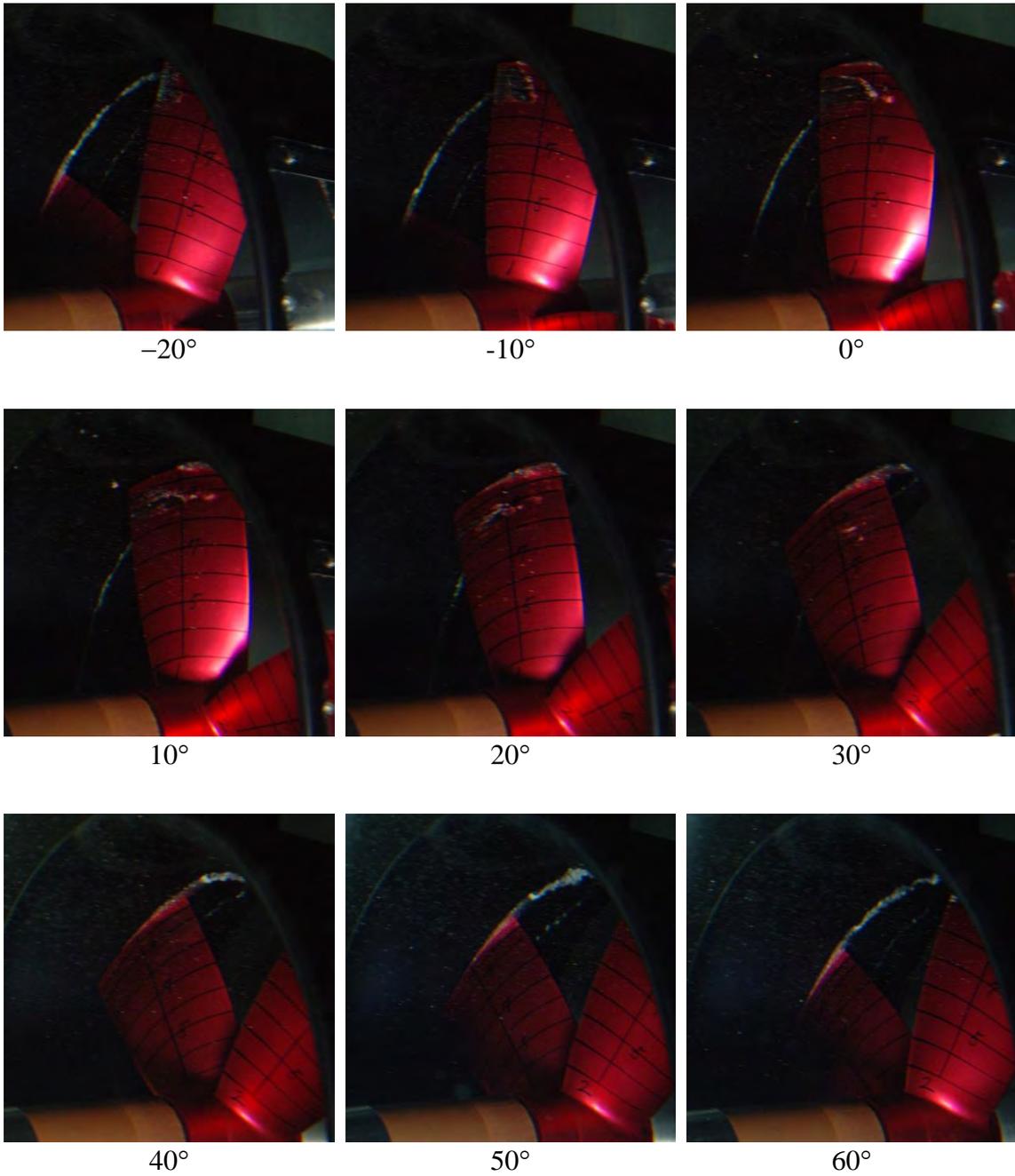


Figure 16	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1064 Propeller(Trawl)	KORDI	공선희	Trawl
				April 16, 2012
				Suction Side



APPENDIX

Nomenclature

■ Nomenclature

<u>Symbol</u>	<u>Definition</u>
A_E/A_o	Expanded area ratio
C	Chord length of propeller blade sections
D	Propeller diameter
D_m	Diameter of a model propeller
D_s	Diameter of a full-scale propeller
d_H/D	Hub-diameter ratio
h	Depth of submergence of the propeller shaft
J_A	Advance ratio based on propeller inflow velocity, V_A/nD
K_T	Propeller thrust coefficient, $T/\rho n^2 D^4$
n	Number of revolution of a propeller per second, <i>rps</i>
n_m	Number of revolution of a model propeller per second
n_s	Number of revolution of a full-scale propeller per second
N	Number of revolution of a propeller per minute, <i>rpm</i>
p_o	Static pressure for calculation of a cavitation number
p_v	Vapor pressure of sea water or fresh water
P_{mi}	<i>i</i> -th harmonic component of pressure fluctuation amplitude of model test
P_{si}	<i>i</i> -th harmonic component of pressure fluctuation amplitude of full-scale ship
R	Propeller radius
R_n	Reynolds number, based on ship speed & chord-length of blade section at $0.7R$
t_c	Tip clearance from propeller tip to hull surface vertically
V_A	Mean axial velocity of onset flow at the propeller plane
V_S	Ship speed
w	Taylor wake fraction
x, y, z	Cartesian coordinate system, <i>x</i> positive downstream from the propeller plane, and <i>y</i> vertically upward and <i>z</i> portside from the propeller axis
Z	Number of blades
α/α_s	Air content ratio
θ	Angular position of the reference line of the key blade of a propeller, measured from a vertically upward position in a propeller rotation direction
λ	Scale ratio
ρ	Fluid density
ρ_m	Density of fresh water
ρ_s	Density of sea water
$\sigma_{n0.7R}$	Cavitation number at $y = 0.7R, z = 0$ based on $n, (p_o - p_v)/\frac{1}{2}\rho n^2 D^2$

MODEL TEST REPORT



Title
연근해 어선 추진기의 모형시험 및 성능평가

대상선박	190 톤 선망
Ship Owner	190 톤 선망
Ship & Propeller Model No.	
Test Items	Resistance, Self-propulsion, Wake survey, Paint, Cavitation, Pressure fluctuation

Report No.	
Project Manager	iLsung Moon
Date	30-May-2012
Scale Ratio	1/9.6

Summary :

KS 1354 (Design draft, 15 노트)

프로펠러	P_E (kW)	η_D	P_D (kW)	N (rpm)	t	w_s	η_R
KP827	793	0.578	1371	303.50	0.261	0.281	1.000
KP1069	793	0.558	1421	344.23	0.259	0.280	0.998

PART I

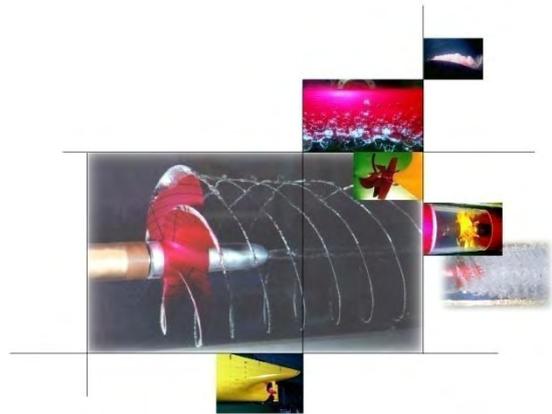


표 목 차

Table 1	Principal Dimensions of the Hull Form (KS1354)	.....	T-1
Table 2	Principal Dimensions of the Stock Propeller (KP827)	.....	T-2
Table 3	Principal Dimensions of the Design Propeller (KP1069)	.....	T-3
Table 4	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP827)	.....	T-4
Table 5	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1069)	.....	T-5
Table 6	Resistance Performance (KS1354, Design draft)	.....	T-6
Table 7	Model Test Results (KS1354, Design draft, Stock P.)	.....	T-7
Table 8	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock P.)	.....	T-8
Table 9	Trial Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock P.)	.....	T-9
Table 10	Model Test Results (KS1354, Design draft, Design P.)	.....	T-10
Table 11	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design P.)	.....	T-11
Table 12	Trial Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design P.)	.....	T-12
Table 13	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-I (KS1354, Design draft, 15.0knots)	.....	T-13
Table 14	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-II (KS1354, Design draft, 15.0knots)	.....	T-14
Table 15	Harmonic Analysis of Velocity Components (KS1354, Design draft, 15.0knots)	.....	T-15

그림 목 차

Figure 1	Photographs of the Model Ship(KS1354)	.....	F-1
Figure 2	Drawing of the Stock Propeller (KP827)	.....	F-2
Figure 3	Drawing of the Design Propeller (KP1069)	.....	F-3
Figure 4	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP827)	.....	F-4
Figure 5	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1069)	.....	F-5
Figure 6	Resistance Coefficients (KS1354, Design draft)	.....	F-6
Figure 7	Propulsive Coefficients (KS1354, Design draft, Stock Propeller)	.....	F-7
Figure 8	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock Propeller, at NCR)	.....	F-8
Figure 9	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock Propeller, at NCR w/ 15% S.M.)	.....	F-9
Figure 10	Propulsive Coefficients (KS1354, Design draft, Design Propeller)	.....	F-10
Figure 11	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design Propeller, at NCR)	.....	F-11
Figure 12	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design Propeller, at NCR w/ 15% S.M.)	.....	F-12
Figure 13	Circumferential Distribution of Velocity Components (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	.....	F-13
Figure 14	Iso-Axial Velocity Contours (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	.....	F-14
Figure 15	Transverse Velocity Vectors (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	.....	F-15
Figure 16	Radial Distribution of Harmonic Amplitudes of Velocities (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	.....	F-16
Figure 17	Radial Distribution of Circumferential Mean Velocity Components (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	.....	F-17
Figure 18	Photographs of the Running Ship Model (KS1354, Design draft, 12.0 knots)	.....	F-18
Figure 19	Photographs of the Running Ship Model (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	.....	F-19

1 시험 내용

본 보고서에서는 190 톤급 선망선의 저항추진 성능시험에 대한 내용과 결과를 정리하여 수록하였다.

모형선 제작

연구원은 선형 도면 및 자료에 의하여 축척비 1/9.6 인 모형선을 목재로 제작하였다. 모형선의 난류축진을 위해 선체에는 스티드를 부착하였으며 선형의 주요제원은 Table 1 과 같다.

모형 프로펠러

재고프로펠러는 연구원이 보유한 프로펠러 중에서 선정하였고, 설계프로펠러는 도면에 의하여 축척비 1/9.6 으로 알루미늄으로 제작하였다. 주요 제원은 아래와 같이 정리하여 수록하였다.

모형 재고 프로펠러 (KP827): Table 2, Figure 2

모형 설계 프로펠러 (KP1069): Table 3, Figure 3

부가물 제작

다음 항목의 부가물을 제작하여 부착하였다. Figures 1 에는 모형선에 전체 부가물이 부착된 상태를 보여주고 있다.

Box keel

Shoe piece

Rudder

모형시험 항목

본 연구에서 실시된 모형시험은 모두 연구원의 선형시험수조에서 수행되었으며 각종 계측치들은 전산화된 자료취득장치를 통해서 얻어졌다.

시험항목과 모형상태 및 시험조건은 다음과 같다.

단계	시험항목	부가물	시험조건
1 차년도 (재고프로펠러)	저항성능평가	Box keel, Shoe piece, Rudder	1 흘수, 10 속도
	자항성능평가		1 흘수, 7 속도
	반류분포계측	Box keel, Shoe piece	1 흘수, 1 속도
2 차년도 (설계프로펠러)	프로펠러 단독성능평가	Design Propeller	1 개
	자항성능평가	Box keel, Shoe piece, Rudder	1 흘수, 7 속도

참고로 본 연구소 선형시험수조의 제원은 다음과 같다.

예인수조: 200m(길이) x 16m(폭) x 7m(깊이)

예인전차: 최대속도 6m/sec

시험해석은 1978 ITTC Performance Prediction 방법을 따르되 Froude 의 가정을 바탕으로 2 차원 해석법을 적용하였다. 상세한 해석방법 및 기호설명은 부록 A와 B 에 각각 수록하였다.

2 연구 내용 및 결과

2.1 성능평가시험

대상선의 성능평가를 위하여 프로펠러의 단독성능시험, 저항 및 자항시험, 반류분포계측시험을 수행하였다.

프로펠러 단독성능시험

프로펠러 단독성능시험은 균일류 중에서의 프로펠러의 성능을 계측하는 시험으로 프로펠러의 회전수(n)을 일정하게 놓고, 전진속도(V_A)를 여러 가지로 변화시켜 추력 및 토크를 측정하였다

프로펠러 단독성능은 각 계측값들을 무차원화한 후 해석결과를 아래의 표와 같이 정리하였다.

프로펠러	단독시험 결과	단독시험 특성 곡선
재고프로펠러 (KP827)	Table 4	Figure 4
설계프로펠러 (KP1069)	Table 5	Figure 5

저항시험

선체에 작용하는 저항은 물의 점성으로 인한 점성저항과 파도를 발생시키는 조파저항으로 크게 두 가지 형태로 나뉘어지며, 점성저항은 Reynolds 수(관성력/점성력), 조파저항은 Froude 수(관성력/중력)에 의해서 지배된다.

이 두 가지 상사법칙을 동시에 만족시키기 위해서는 유체의 동점성계수가 배길이의 축척비의 $3/2$ 승에 비례해야 하는데, 실제로 이와 같은 유체에서 모형시험을 한다는 것이 불가능하다. 따라서 점성저항이 선체근방에서만

작용하고, 조파저항은 중력에 의해서 멀리 전파해 나가는 실제의 유체현상을 고려하면, 저항시험의 상사법칙은 2 가지 성분으로 분리할 수 있어서 실선의 저항을 모형시험결과로부터 추정할 수 있게 된다.

전술한 상사법칙에 의해 실선의 전저항계수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$C_{TS} = C_{FS} + (C_{TM} - C_{FM}) + C_A$$

모형선-실선 상관수정계수 C_A 는 연구원에서 수행한 유사선의 모형시험 결과와 실선 시운전 결과를 토대로 **0.00037** 를 사용하였다.

자항시험

자항시험에서는 모형선을 예인하면서 프로펠러를 회전시켜 프로펠러가 발생시키는 추력, 토오크, 회전수 및 예인력을 동시에 계측하며, 연구원의 수조에서는 한 개의 속력에 대하여 3 개의 프로펠러 회전수를 변화시키면서 시험을 수행하였다. 시험결과로부터 모형선의 자항점에 해당하는 마찰수정량에 대응하는 회전수(n_M), 추력(T_M), 토오크(Q_M)를 구하였다. 이 결과와, 저항시험 및 프로펠러 단독시험의 결과를 이용하여 자항요소 t_M , w_M , η_R 을 계산하였다. 실선의 성능추정은 ITTC 1978 해석법을 이용하여 실선성능을 추정하였다.

설계흘수에서의 저항추진시험의 결과는 아래 표와 같이 정리하여 수록하였다.

시험번호	시험조건	모형시험 결과 표	추진계수 및 실선성능곡선	시험사진
S1354R01	재고프로펠러	Table 6	Figure 6	Figures 18~19
S1354S02		Tables 7~9	Figures 7~9	-
S1354S05	설계프로펠러	Tables 10~12	Figures 10~12	-

반류분포 조사 시험

반류분포 계측시험은 프로펠러 면에서의 유속의 축방향, 반경방향, 접선방향의 속도성분을 구하기 위한 시험으로 5 개의 피토 튜브의 조합으로 이루어진 레이크를 이용하여 수행하였다.

각각의 피토 튜브 끝단에는 5 개의 구멍이 뚫려 있으며, 각 구멍은 피토 튜브 내부에 있는 튜브와 연결되어 있다. 이 구멍들 중의 하나는 피토 튜브 끝단의 중앙에, 한 쌍은 반경방향 면에 또 다른 한 쌍은 접선방향 면에 정렬되어 있으며, 각 피토 튜브의 측면에는 4 개의 정압 구멍이 뚫려져 있다.

반류분포 계측시험으로부터 얻은 결과를 아래와 같이 정리하여 수록하였다.

선형	KS1354
시험번호	S1354K03
시험조건	15.0 노트
계측결과와 평균 속도성분 표	Tables 13~14
속도성분의 조화해석 표	Table 15
원주방향 속도성분 분포도	Figure 13
축방향 등속도 분포도	Figure 14
반경방향 속도벡터 분포도	Figure 15
반경방향 조화진폭 분포도	Figure 16
반경방향 원주평균속도 분포도	Figure 17

3 해석 결과

대상선에 대한 일련의 선형시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

저항추진 시험을 수행하였으며 그 결과는 아래와 같다.

KS 1354 (Design draft, 15 노트)

프로펠러	P_E (kW)	η_D	P_D (kW)	N (rpm)	t	w_s	η_R
KP827	793	0.578	1371	303.50	0.261	0.281	1.000
KP1069	793	0.558	1421	344.23	0.259	0.280	0.998

Tables

KORDI	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 1	Principal Dimensions of the Hull Form (KS1354)	-

Designation	File No.: s1354s02	
	SYMBOL(unit)	SHIP MODEL
Scale ratio	SCALE	9.6
Load condition		Design
Draft, moulded	TF(m)	2.610 0.2719
	TA(m)	2.610 0.2719
	TMEAN(m)	2.610 0.2719
Length between per. Breadth, moulded	LPP(m)	38.000 3.9583
	B(m)	8.600 0.8958
Depth, moulded	D(m)	
Number of propeller	NOPROP	1
Length of waterline	LWL(m)	42.627 4.4403
Wetted surface area	S(m ²)	423.4 4.5941
Bilge keel area	SBK(m ²)	0.0 0.0000
Trans. area above WL	AT(m ²)	57.5 0.6237
Displacement volume	DISV(m ³)	460 0.5199
KB above moulded BL	KB(m)	
LCB from midship, f+	LCB(m)	
LCF from midship, f+	LCF(m)	
Block coef.	CB	0.559
Load waterline coef.	CW	
Midship section coef.	CM	
Prismatic coef.	CP	
LPP/B		4.4186
LPP/T		14.5594
B/T		3.295
LCB% (fwd.+)		

KORDI	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 2	Principal Dimensions of the Stock Propeller (KP827)	-

Designation	FILE NO.:	s1354s02
	SYMBOL	
Scale ratio	SCALE	9.6
Diameter of ship propeller (m)	DIA. S	2.400
Diameter of model propeller (m)	DIA. M	0.2500
Expanded blade area ratio	EAR	0.6200
Propeller pitch ratio, mean	PRMEAN	0.7050
at tip	PRTIP	0.6501
at 0.7R	PR70R	0.7195
at root	PRROOT	0.6921
Chord length-diameter ratio (0.7R)	CR70	0.3489
Max. blade thickn. -dia. ratio (0.7R)	TR70	0.0111
Hub-diameter ratio	HDR	0.1700
Rake angle (deg)	RDR	0.0000
Skew angle (deg)	SKEW	19.02
Number of blades	NPB	4
Turning direction		R.H.
Material		AL
Propeller section type		NACA
Propeller stock number		KP827

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Table 3 Principal Dimensions of the Design Propeller (KP1069)	5/30/2012

Designation	FILE NO.:	s1354s05
	SYMBOL	
Scale ratio	SCALE	9.6
Diameter of ship propeller (m)	DIA. S	2.400
Diameter of model propeller (m)	DIA. M	0.2500
Expanded blade area ratio	EAR	0.5905
Propeller pitch ratio, mean	PRMEAN	0.5761
at tip	PRTIP	0.5340
at 0.7R	PR70R	0.5863
at root	PRROOT	0.5742
Chord length-diameter ratio (0.7R)	CR70	0.3385
Max. blade thickn. -dia. ratio (0.7R)	TR70	0.0111
Hub-diameter ratio	HDR	0.1700
Rake angle (deg)	RDR	0.0000
Skew angle (deg)	SKEW	19.15
Number of blades	NPB	4
Turning direction		R.H.
Material		AL
Propeller section type		NACA66
Propeller stock number		KP1069

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 4	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP827)	-

Propeller KP827 **Scale Ratio: 9.6**

Test	No.	Date	Temp. (deg)	Density (Kg/m3)
POW	P827O01	27-Nov-07	18.9	998.34

KP827 Propeller dimensions					
Diameter	ship(m)	2.4000	Chord length-dia.ratio (0.7R)		0.3489
	model(m)	0.2500	Max. blade thick.-dia.ratio(0.7R)		0.0111
			Hub-diameter ratio		0.1700
Expanded area ratio		0.6200	rake angle (deg)		0.0000
Pitch ratio	mean	0.7050	Skew angle (deg)		19
	at tip	0.6501	Number of propeller blades		4
	at 0.7R	0.7195	Turning direction		R.H.
	at root	0.6921	Material		AL
Blade roughness KP(micron)		30.0	Propeller section type		NACA

J	Model scale			Full Scale		
	RPS	Temp.	Prop. Rn	Temp.	Prop. Rn	
	16.5	18.9	7.801E+05	15	1.555E+07	
	KT	10KQ	ETAO	KT	10KQ	ETAO
0.000	0.3478	0.3769	0.000	0.3478	0.3769	0.000
0.050	0.3322	0.3629	0.073	0.3322	0.3629	0.073
0.100	0.3141	0.3466	0.144	0.3141	0.3466	0.144
0.150	0.2943	0.3288	0.214	0.2943	0.3288	0.214
0.200	0.2733	0.3099	0.281	0.2733	0.3099	0.281
0.250	0.2516	0.2903	0.345	0.2516	0.2903	0.345
0.300	0.2295	0.2703	0.405	0.2295	0.2703	0.405
0.350	0.2073	0.2500	0.462	0.2073	0.2500	0.462
0.400	0.1851	0.2296	0.513	0.1851	0.2296	0.513
0.450	0.1631	0.2091	0.559	0.1631	0.2091	0.559
0.500	0.1411	0.1883	0.596	0.1411	0.1883	0.596
0.550	0.1190	0.1670	0.624	0.1190	0.1670	0.624
0.600	0.0966	0.1449	0.637	0.0966	0.1449	0.637
0.650	0.0736	0.1216	0.626	0.0736	0.1216	0.626
0.700	0.0494	0.0966	0.570	0.0494	0.0966	0.570
0.750	0.0236	0.0693	0.406	0.0236	0.0693	0.406
0.792	0.0000	0.0438	0.000	0.0000	0.0438	0.000

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 5	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1069)	-

Propeller KP1069 **Scale Ratio: 9.6**

Test	No.	Date	Temp. (deg)	Density (Kg/m3)
POW	P106O01	06-Mar-12	13.3	999.24

KP106		Propeller dimensions			
Diameter	ship(m)	2.4000	Chord length-dia.ratio (0.7R)		0.3385
	model(m)	0.2500	Max. blade thick.-dia.ratio(0.7R)		0.0111
			Hub-diameter ratio		0.1700
Expanded area ratio		0.5905	Rake angle (deg)		0.0000
Pitch ratio	mean	0.5761	Skew angle (deg)		19.1
	at tip	0.5340	Number of propeller blades		4
	at 0.7R	0.5863	Turning direction		R.H.
	at root	0.5742	Material		AL
Blade roughness KP(micron)		30.0	Propeller section type		NACA66

	Model scale			Full Scale		
	RPS	Temp.	Prop. Rn	Temp.	Prop. Rn	
J	KT	10KQ	ETAO	KT	10KQ	ETAO
0.000	0.2781	0.2625	0.000	0.2781	0.2625	0.000
0.050	0.2639	0.2504	0.084	0.2639	0.2504	0.084
0.100	0.2471	0.2375	0.166	0.2471	0.2375	0.166
0.150	0.2286	0.2239	0.244	0.2286	0.2239	0.244
0.200	0.2089	0.2097	0.317	0.2089	0.2097	0.317
0.250	0.1885	0.1950	0.385	0.1885	0.1950	0.385
0.300	0.1677	0.1797	0.446	0.1677	0.1797	0.446
0.350	0.1467	0.1639	0.499	0.1467	0.1639	0.499
0.400	0.1255	0.1474	0.542	0.1255	0.1474	0.542
0.450	0.1040	0.1302	0.572	0.1040	0.1302	0.572
0.500	0.0819	0.1121	0.581	0.0819	0.1121	0.581
0.550	0.0588	0.0928	0.555	0.0588	0.0928	0.555
0.600	0.0342	0.0722	0.452	0.0342	0.0722	0.452
0.650	0.0072	0.0498	0.150	0.0072	0.0498	0.150
0.663	0.0000	0.0438	0.000	0.0000	0.0438	0.000

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 6	Resistance Performance (KS1354, Design draft)	-

Draft FP/AP: 2.61 2.61 **Scale Ratio : 9.6**
appendages: 1 Rudder **Analysis Code : 1111000**

Test No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1354 Ship dimension	
				Ship	Model
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.14	LPP(m) 38.000 3.9583
SEA			15.0	1025.87	B(m) 8.600 0.8958
Analysis method -- Based on 1978 ITTC performance prediction method -				D(m)	
* Model-ship correlation line : 1957 ITTC				XP(m)	
* 2-dimensional method				LWL(m) 42.627 4.4403 CB 0.5585	
* Correlation allowance (2-D) : CA = .000370				S(m2) 423.4 4.5941 CW	
* w/ Bilge keel resistance				SBK(m2) 0.0 0.0000 CM	
* w/ Air resistance : CAA = .0010*AT/S				AT(m2) 57.5 0.6237 CP 0.5585	
				DISV(m3) 460.0 0.5199	
				KB(m) LPP/B 4.42	
				LCB+f(m) B/TM 3.30	
				LCF+f(m) LCB% 0.00	

VS (knot)	PE (kW)	CTS (e-3)	CR (e-3)	CFS (e-3)	CFM (e-3)	CTM (e-3)	RTM (N)	VM (m/s)	FN
5.00	19.0	5.129	2.516	2.108	3.710	6.226	9.85	0.8302	0.1258
7.00	54.4	5.366	2.852	2.008	3.480	6.332	19.63	1.1622	0.1761
9.00	119.9	5.562	3.118	1.938	3.322	6.441	33.01	1.4943	0.2265
11.00	225.5	5.731	3.340	1.885	3.204	6.544	50.10	1.8264	0.2768
12.00	301.7	5.906	3.537	1.863	3.154	6.692	60.96	1.9924	0.3019
13.00	406.4	6.257	3.909	1.842	3.110	7.018	75.04	2.1585	0.3271
14.00	559.8	6.899	4.570	1.824	3.069	7.639	94.73	2.3245	0.3523
15.00	792.8	7.945	5.632	1.807	3.032	8.665	123.35	2.4905	0.3774
16.00	1143.1	9.439	7.141	1.791	2.999	10.140	164.24	2.6566	0.4026
17.00	1627.0	11.200	8.918	1.777	2.967	11.885	217.32	2.8226	0.4277

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 7	Model Test Results (KS1354, Design draft, Stock P.)	-

Draft FP/AP: **2.61 2.61**
appendages: **1 Rudder**

Scale Ratio : **9.6**
Condition : **KP827**

NOPROP : **1**

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.14
SP	S1354S02	11-4-18	13.8	999.14
POW	P827O01	07-11-27	18.9	998.34

KP827 Propeller dimension			
DIA.s	2.4	CR70(chord)	0.3489
DIA.m	0.25	TR70(thick)	0.0111
EAR	0.62	HDR(hub)	0.17
PRMEAN	0.705	Rake(deg)	0
TIP	0.6501	SKEW(deg)	19.02
0.70R	0.7195	Turn.	R.H.
ROOT	0.6921	Mater.	AL
Type	NACA	Z :	4

	KS1354 Ship dimension			
	Ship	Model		
LPP(m)	38.000	3.9583		
B(m)	8.600	0.8958		
D(m)				
XP(m)				
LWL(m)	42.627	4.4403	CB	0.5585
S(m2)	423.4	4.5941	CW	
SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
AT(m2)	57.5	0.6237	CP	0.5585
DISV(m3)	460.0	0.5199		
KB(m)			LPP/B	4.42
LCB+f(m)			B/TM	3.30
LCF+f(m)			LCB%	0.00

VS (knot)	VM (m/s)	RTM (N)	FD (N)	TM (N)	QM (Nm)	NM (rps)	THDF	WFTM	ETAR	CR (e-3)
11.00	1.826	50.10	7.26	57.85	1.948	10.39	0.260	0.276	0.999	3.340
12.00	1.992	60.96	8.40	71.04	2.378	11.40	0.260	0.281	0.999	3.537
13.00	2.158	75.04	9.60	88.50	2.937	12.54	0.261	0.284	0.999	3.909
14.00	2.324	94.73	10.86	113.48	3.721	13.91	0.261	0.284	0.999	4.570
15.00	2.491	123.35	12.18	150.51	4.860	15.58	0.261	0.281	1.000	5.632
16.00	2.657	164.24	13.56	204.11	6.484	17.60	0.262	0.276	1.000	7.141
16.50	2.740	189.25	14.27	237.10	7.475	18.70	0.262	0.273	1.000	8.005

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 8	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock P.)	-

Draft FP/AP: **2.61** **2.61**
appendages: **1 Rudder**

Scale Ratio : **9.6**
Condition : **KP827**

NOPROP : **1**

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.14
SP	S1354S02	11-4-18	13.8	999.14
POW	P827O01	07-11-27	18.9	998.34

VS (knot)	PE (kW)	PD (kW)	N (rpm)	FN
11.00	226	369	202.76	0.2768
12.00	302	493	222.27	0.3019
13.00	406	670	244.60	0.3271
14.00	560	942	271.22	0.3523
15.00	793	1371	303.50	0.3774
16.00	1143	2062	342.71	0.4026
16.50	1367	2526	364.20	0.4152

Analysis method -- Based on 1978 ITTC
performance prediction method -

* Model-ship correlation line : 1957 ITTC

* Propeller blade roughness $KP = 30.e-6$

* 2-dimensional method

* Correlation allowance (2-D) : $CA = .000370$

* w/ Bilge keel resistance

* w/ Air resistance : $CAA = .0010*AT/S$

KS1354 Ship dimension			
LWL(m)	42.627	Tm(m)	2.610
S(m2)	423.4	AT(m2)	57.5
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	2.400

VS (knot)	CTS (e-3)	CR (e-3)	ADVCA	THDF	WFTM	WFTS	ETAH	ETAR	ETAO	ETAD
11.00	5.731	3.340	0.505	0.260	0.276	0.276	1.023	0.999	0.598	0.611
12.00	5.906	3.537	0.499	0.260	0.281	0.281	1.029	0.999	0.596	0.613
13.00	6.257	3.909	0.490	0.261	0.284	0.284	1.032	0.999	0.588	0.606
14.00	6.899	4.570	0.476	0.261	0.284	0.284	1.032	0.999	0.576	0.594
15.00	7.945	5.632	0.457	0.261	0.281	0.281	1.028	1.000	0.563	0.578
16.00	9.439	7.141	0.434	0.262	0.276	0.276	1.020	1.000	0.544	0.554
16.50	10.294	8.005	0.423	0.262	0.273	0.273	1.015	1.000	0.533	0.541

KORDI	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 9	Trial Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock P.)	-

Draft FP/AP:	2.61	2.61	Scale Ratio :	9.60
Appendages:			Condition :	KP827

NOPROP : 1 Test option :

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1354	Ship dimension		
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.17	LBP(m)	38.00	LWL(m)	42.63
SP	S1354S02	11-4-18	13.8	999.17	B(m)	8.6	S(m2)	423.4
POW	KP827	07-11-27	18.9	998.34	DISP(m3)	460	DIA(m)	2.4
					AT(m2)	57.5	SBK(m2)	0.0

Ship Speed		Brake Power		Speed of Shaft	
(knot)	(m/s)	(kW)	(PS)	(rpm)	(rps)
11.00	5.66	373	507	202.76	3.3793
12.00	6.17	498	677	222.27	3.7045
13.00	6.69	677	921	244.60	4.0767
14.00	7.20	951	1,293	271.22	4.5203
15.00	7.72	1,385	1,883	303.50	5.0583
16.00	8.23	2,083	2,832	342.71	5.7118
16.50	8.49	2,551	3,469	364.20	6.0700

Condition	Ship Speed (knots)	Speed of Shaft (rpm)	Sea Margin (%)
Trial	15.35	316.54	-
Service	15.00	-	15
	Main Engine Power =		1593 kW
	Transmission Efficiency =		0.99

[Notes]

- For explanations of abbreviations see list of symbols.
- Reynolds and Froude number based on $L_{wl} = 42.627$
- Frictional resistance determined according to the ITTC-1957 formula.
- A model-ship correlation allowance, $C_a = 0.00037$
- A resistance of above-water part through the air, $C_{air} = 0.0001358$
- Power corrected by $C_p = 1$, RPM corrected by $C_n = 1$, $C_{np} = 1$ applied.
- The results have been obtained by Froude scaling from self-propulsion point of ship corresponding to a scale effect correction on resistance determined by means of the ITTC-1957 formula.
- The results are valid for unrestricted deep water of 15.0 deg C and a mass density of 1025.9 kg/m³, clean surfaces of hull and propeller blades and no effects of wind and waves.

KORDI	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 10	Model Test Results (KS1354, Design draft, Design P.)	-

Draft FP/AP: 2.61 2.61
appendages: 1 Rudder

Scale Ratio : 9.6
Condition : KP1069

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.14
SP	S1354S05	12-3-2	13.3	999.24
POW	P106O01	12-3-6	13.3	999.24

KP1069 Propeller dimension			
DIA.s	2.4	CR70(chord)	0.3385
DIA.m	0.25	TR70(thick)	0.0111
EAR	0.5905	HDR(hub)	0.17
PRMEAN	0.5761	Rake(deg)	0
TIP	0.534	SKEW(deg)	19.15
0.70R	0.5863	Turn.	R.H.
ROOT	0.5742	Mater.	AL
Type	NACA66	Z :	4

	KS1354 Ship dimension			
	Ship	Model		
LPP(m)	38.000	3.9583		
B(m)	8.600	0.8958		
D(m)				
XP(m)				
LWL(m)	42.627	4.4403	CB	0.5585
S(m2)	423.4	4.5941	CW	
SBK(m2)	0.0	0.0000	CM	
AT(m2)	57.5	0.6237	CP	
DISV(m3)	460.0	0.5199		
KB(m)			LPP/B	4.42
LCB+f(m)			B/TM	3.30
LCF+f(m)			LCB%	

VS (knot)	VM (m/s)	RTM (N)	FD (N)	TM (N)	QM (Nm)	NM (rps)	THDF	WFTM	ETAR	CR (e-3)
11.00	1.826	50.10	7.32	58.00	1.818	11.88	0.262	0.273	0.994	3.340
12.00	1.992	60.96	8.47	71.12	2.210	13.01	0.261	0.279	0.995	3.537
13.00	2.158	75.04	9.68	88.48	2.718	14.29	0.260	0.282	0.996	3.909
14.00	2.324	94.73	10.95	113.30	3.424	15.81	0.260	0.283	0.997	4.570
15.00	2.491	123.35	12.28	150.04	4.444	17.67	0.259	0.280	0.998	5.632
16.00	2.657	164.24	13.68	203.20	5.889	19.92	0.259	0.275	0.999	7.141
16.50	2.740	189.25	14.39	235.88	6.768	21.15	0.258	0.272	0.999	8.005

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 11	Full Scale Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design P.)	-

Draft FP/AP: 2.61 2.61
appendages: 1 Rudder

Scale Ratio : 9.6
Condition : KP1069

NOPROP : 1

Analysis Code : 1111000

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.14
SP	S1354S05	12-3-2	13.3	999.24
POW	P106O01	12-3-6	13.3	999.24

VS (knot)	PE (kW)	PD (kW)	N (rpm)	FN
11.00	226	394	231.75	0.2768
12.00	302	525	253.93	0.3019
13.00	406	710	278.95	0.3271
14.00	560	988	308.60	0.3523
15.00	793	1421	344.23	0.3774
16.00	1143	2124	388.13	0.4026
16.50	1367	2593	412.14	0.4152

Analysis method -- Based on 1978 ITTC
performance prediction method -
* Model-ship correlation line : 1957 ITTC
* Propeller blade roughness KP = 30.e-6

* 2-dimensional method
* Correlation allowance (2-D) : CA = .000370
* w/ Bilge keel resistance
* w/ Air resistance : CAA = .0010*AT/S

KS1354 Ship dimension			
LWL(m)	42.627	Tm(m)	2.610
S(m2)	423.4	AT(m2)	57.5
SBK(m2)	0.0	DIA(m)	2.400

VS (knot)	CTS (e-3)	CR (e-3)	ADVCA	THDF	WFTM	WFTS	ETAH	ETAR	ETAO	ETAD
11.00	5.731	3.340	0.444	0.262	0.273	0.273	1.015	0.994	0.568	0.573
12.00	5.906	3.537	0.438	0.261	0.279	0.279	1.025	0.995	0.564	0.575
13.00	6.257	3.909	0.430	0.260	0.282	0.282	1.030	0.996	0.558	0.573
14.00	6.899	4.570	0.419	0.260	0.283	0.283	1.032	0.997	0.551	0.566
15.00	7.945	5.632	0.403	0.259	0.280	0.280	1.029	0.998	0.543	0.558
16.00	9.439	7.141	0.384	0.259	0.275	0.275	1.023	0.999	0.527	0.538
16.50	10.294	8.005	0.375	0.258	0.272	0.272	1.019	0.999	0.518	0.527

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 12	Trial Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design P.)	-

Draft FP/AP:	2.61	2.61	Scale Ratio :	9.60
Appendages:			Condition :	KP1069

Test	No.	Date	Temp. (deg.)	Density (Kg/m3)	KS1354	Ship dimension		
RES	S1354R01	11-4-18	13.8	999.17	LBP(m)	38.00	LWL(m)	42.63
SP	S1354S00	12-3-2	13.3	999.24	B(m)	8.6	S(m2)	423.4
POW	KP1069	12-3-6	13.3	999.24	DISP(m3)	460	DIA(m)	2.4
					AT(m2)	57.5	SBK(m2)	0.0

Ship Speed		Brake Power		Speed of Shaft	
(knot)	(m/s)	(kW)	(PS)	(rpm)	(rps)
11.00	5.66	398	540	231.75	3.8625
12.00	6.17	530	721	253.93	4.2322
13.00	6.69	717	975	278.95	4.6492
14.00	7.20	998	1,357	308.60	5.1433
15.00	7.72	1,435	1,951	344.23	5.7372
16.00	8.23	2,145	2,917	388.13	6.4688
16.50	8.49	2,619	3,561	412.14	6.8690

Condition	Ship Speed (knots)	Speed of Shaft (rpm)	Sea Margin (%)
Trial	15.26	355.3	-
Service	14.91	-	15
	Main Engine Power =		1593 kW
	Transmission Efficiency =		0.99

[Notes]

- For explanations of abbreviations see list of symbols.
- Reynolds and Froude number based on $L_{wl} = 42.627$
- Frictional resistance determined according to the ITTC-1957 formula.
- A model-ship correlation allowance, $C_a = 0.00037$
- A resistance of above-water part through the air, $C_{air} = 0.0001358$
- Power corrected by $C_p = 1$, RPM corrected by $C_n = 1$, $C_{np} = 1$ applied.
- The results have been obtained by Froude scaling from self-propulsion point of ship corresponding to a scale effect correction on resistance determined by means of the ITTC-1957 formula.
- The results are valid for unrestricted deep water of 15.0 deg C and a mass density of 1025.9 kg/m³, clean surfaces of hull and propeller blades and no effects of wind and waves.

	G/T 190Ton Class Purse Seiner		-
			5/30/2012
Table 13	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-I (KS1354, Design draft, 15.0knots)		-

Test Number	s1354k03	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	15.00	Water Temp.(deg)	13.8
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	3.81 3.81	Model Speed(m/s)	2.4905	Model Prop. Dia(m)	0.2500

r/R	Angle (Deg.)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
		100	110	120	130	140	150	160	170	175	180	185
0.3000	VX/V	0.061	0.078	0.086	0.192	0.365	0.510	0.627	0.698	0.745	0.770	0.798
		0.812	0.814	0.784	0.729	0.639	0.469	0.224	0.115	0.136	0.147	0.138
		0.121	0.231	0.469	0.643	0.729	0.779	0.811	0.811	0.797	0.768	0.743
	VR/V	0.051	0.066	0.046	-0.017	-0.048	-0.034	-0.020	-0.028	-0.049	-0.076	-0.105
		-0.139	-0.171	-0.199	-0.212	-0.201	-0.173	-0.066	0.096	0.115	0.123	0.115
		0.101	-0.070	-0.172	-0.212	-0.212	-0.194	-0.172	-0.145	-0.117	-0.093	-0.071
	VT/V	0.046	-0.086	-0.081	-0.130	-0.148	-0.160	-0.175	-0.174	-0.165	-0.152	-0.139
		-0.115	-0.084	-0.040	0.040	0.079	0.125	0.142	0.083	0.066	0.050	-0.057
		-0.077	-0.136	-0.121	-0.055	0.040	0.073	0.106	0.129	0.149	0.160	0.173
0.5000	VX/V	0.060	0.059	0.094	0.265	0.496	0.649	0.705	0.737	0.754	0.784	0.808
		0.840	0.852	0.858	0.843	0.789	0.687	0.576	0.242	0.116	0.089	0.107
		0.239	0.579	0.681	0.794	0.851	0.864	0.854	0.839	0.805	0.779	0.749
	VR/V	0.050	0.037	0.010	-0.071	-0.067	-0.047	-0.052	-0.067	-0.088	-0.111	-0.137
		-0.165	-0.193	-0.220	-0.239	-0.246	-0.194	-0.099	0.034	0.077	0.075	0.083
		0.040	-0.094	-0.191	-0.247	-0.243	-0.225	-0.199	-0.172	-0.144	-0.117	-0.095
	VT/V	0.011	-0.058	-0.079	-0.156	-0.171	-0.174	-0.171	-0.171	-0.168	-0.164	-0.158
		-0.151	-0.135	-0.115	-0.088	-0.049	0.038	0.108	0.165	0.117	-0.066	-0.114
		-0.168	-0.117	-0.069	0.001	0.051	0.087	0.113	0.134	0.144	0.153	0.158
0.7000	VX/V	0.033	0.042	0.075	0.414	0.702	0.803	0.809	0.815	0.830	0.847	0.865
		0.884	0.900	0.906	0.917	0.916	0.898	0.829	0.500	0.152	0.098	0.156
		0.490	0.828	0.900	0.924	0.928	0.920	0.913	0.895	0.873	0.854	0.836
	VR/V	0.027	0.028	0.008	-0.050	0.002	0.012	-0.012	-0.031	-0.050	-0.068	-0.087
		-0.108	-0.125	-0.141	-0.157	-0.171	-0.185	-0.179	-0.077	0.103	0.082	0.097
		-0.075	-0.177	-0.186	-0.174	-0.162	-0.147	-0.131	-0.115	-0.095	-0.076	-0.057
	VT/V	-0.022	-0.042	-0.063	-0.166	-0.180	-0.174	-0.173	-0.169	-0.166	-0.160	-0.153
		-0.142	-0.129	-0.111	-0.092	-0.066	-0.028	0.043	0.211	0.154	-0.058	-0.154
		-0.205	-0.033	0.032	0.058	0.079	0.098	0.119	0.136	0.152	0.161	0.168
0.9000	VX/V	0.009	0.013	0.047	0.447	0.793	0.874	0.888	0.896	0.906	0.912	0.922
		0.932	0.934	0.936	0.936	0.935	0.931	0.927	0.862	0.328	0.099	0.323
		0.867	0.925	0.933	0.937	0.937	0.937	0.933	0.929	0.918	0.907	0.901
	VR/V	0.005	0.001	-0.021	-0.058	-0.015	-0.030	-0.052	-0.074	-0.094	-0.112	-0.132
		-0.150	-0.165	-0.182	-0.195	-0.209	-0.222	-0.232	-0.225	0.010	0.083	0.024
		-0.212	-0.228	-0.226	-0.216	-0.204	-0.191	-0.175	-0.160	-0.142	-0.122	-0.105
	VT/V	0.009	-0.011	-0.043	-0.169	-0.190	-0.190	-0.187	-0.183	-0.176	-0.168	-0.158
		-0.148	-0.134	-0.118	-0.102	-0.084	-0.059	0.012	0.167	0.275	-0.080	-0.272
		-0.192	-0.059	0.012	0.042	0.065	0.085	0.104	0.121	0.133	0.146	0.155
1.1000	VX/V	0.014	0.027	0.080	0.486	0.794	0.897	0.908	0.915	0.928	0.938	0.946
		0.952	0.955	0.960	0.963	0.963	0.962	0.962	0.948	0.251	0.096	0.248
		0.949	0.962	0.970	0.972	0.972	0.967	0.961	0.956	0.950	0.942	0.932
	VR/V	-0.005	-0.016	-0.031	0.023	0.061	0.034	0.011	-0.013	-0.032	-0.048	-0.064
		-0.080	-0.093	-0.106	-0.120	-0.135	-0.150	-0.176	-0.211	0.027	0.080	0.029
		-0.208	-0.176	-0.154	-0.140	-0.126	-0.113	-0.101	-0.088	-0.073	-0.057	-0.041
	VT/V	0.012	-0.026	-0.072	-0.148	-0.178	-0.177	-0.171	-0.164	-0.157	-0.148	-0.140
		-0.129	-0.118	-0.105	-0.093	-0.079	-0.061	0.015	0.059	0.081	0.042	-0.077
		-0.048	0.015	0.037	0.058	0.077	0.094	0.111	0.126	0.140	0.149	0.159

r/R	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
VX/V	0.527	0.567	0.613	0.670	0.722	0.759	0.783	0.799
VR/V	-0.075	-0.100	-0.107	-0.088	-0.076	-0.098	-0.120	-0.104
VT/V	0.009	-0.003	-0.008	-0.005	-0.001	-0.007	-0.013	-0.010

Volumetric
Mean of VX/V = 0.710
Nominal Wake Fraction(WN) = 0.290

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Table 14	Measured Velocity Components and Circumferential Mean Velocities-II (KS1354, Design draft, 15.0knots)	-

Test Number	s1354k03	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	15.00	Water Temp.(deg)	13.8
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	3.81 3.81	Model Speed(m/s)	2.4905	Model Prop. Dia(m)	0.2500

r/R		Angle (Deg.)	300	310	320	330	340	350	355	360
0.3000	VX/V		0.695	0.625	0.506	0.363	0.187	0.076	0.078	0.061
	VR/V		-0.054	-0.043	-0.045	-0.040	-0.025	0.079	0.065	0.051
	VT/V		0.182	0.183	0.169	0.158	0.136	0.092	0.085	0.046
0.5000	VX/V		0.731	0.699	0.643	0.495	0.273	0.097	0.062	0.060
	VR/V		-0.076	-0.061	-0.058	-0.077	-0.079	0.007	0.035	0.050
	VT/V		0.163	0.163	0.166	0.161	0.150	0.081	0.059	0.011
0.7000	VX/V		0.821	0.816	0.811	0.710	0.421	0.074	0.041	0.033
	VR/V		-0.039	-0.020	0.009	0.000	-0.052	0.010	0.030	0.027
	VT/V		0.172	0.176	0.177	0.185	0.171	0.062	0.043	-0.022
0.9000	VX/V		0.891	0.882	0.868	0.788	0.445	0.048	0.013	0.009
	VR/V		-0.085	-0.063	-0.042	-0.028	-0.064	-0.021	0.001	0.005
	VT/V		0.165	0.169	0.174	0.175	0.155	0.044	0.011	0.009
1.1000	VX/V		0.921	0.915	0.906	0.804	0.490	0.080	0.027	0.014
	VR/V		-0.023	0.004	0.028	0.055	0.019	-0.036	-0.015	-0.005
	VT/V		0.166	0.173	0.179	0.181	0.153	0.074	0.026	0.012

r/R	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
VX/V	0.527	0.567	0.613	0.670	0.722	0.759	0.783	0.799
VR/V	-0.075	-0.100	-0.107	-0.088	-0.076	-0.098	-0.120	-0.104
VT/V	0.009	-0.003	-0.008	-0.005	-0.001	-0.007	-0.013	-0.010

Volumetric
Mean of VX/V = 0.710
Nominal Wake
Fraction(WN) = 0.290

Table 15

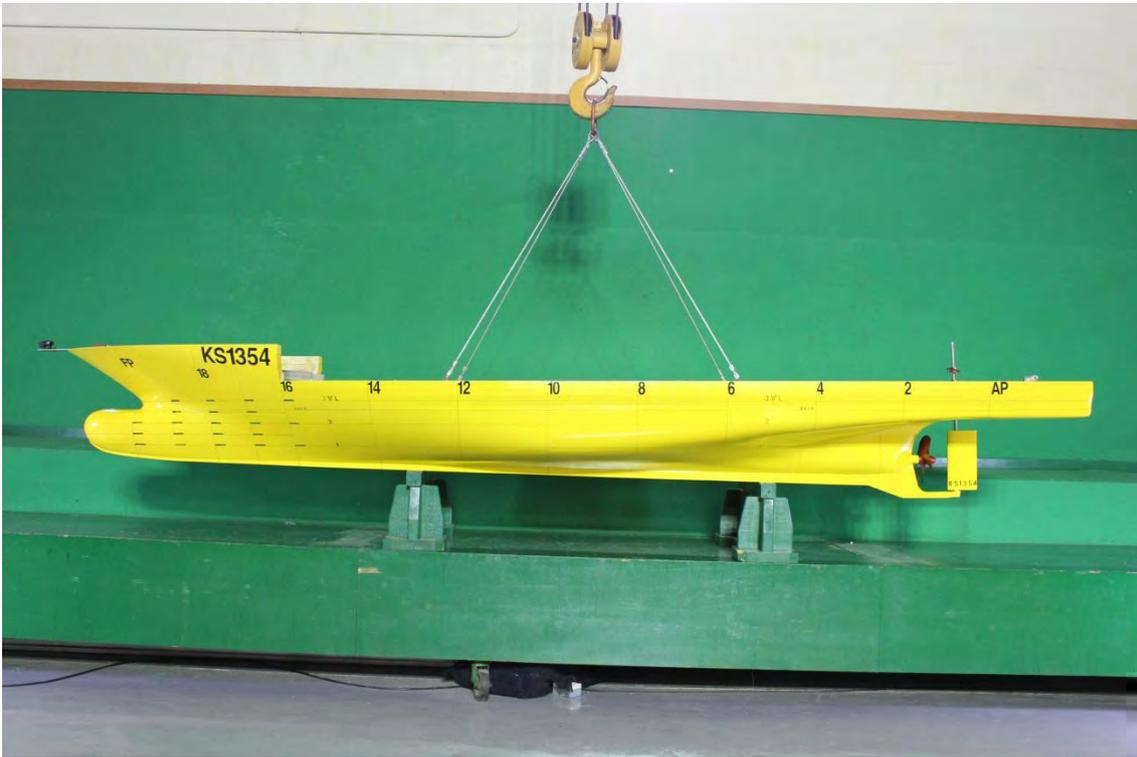
**Harmonic Analysis of Velocity Components
(KS1354, Design draft, 15.0knots)**

Test Number	s1354k03	Load Condition	Design	Ship Speed(knots)	15.00	Water Temp.(deg)	13.8
Rake Number	M1-5	TF/TA(m)	3.81 3.81	Model Speed(m/s)	2.4905	Model Prop. Dia(m)	0.2500

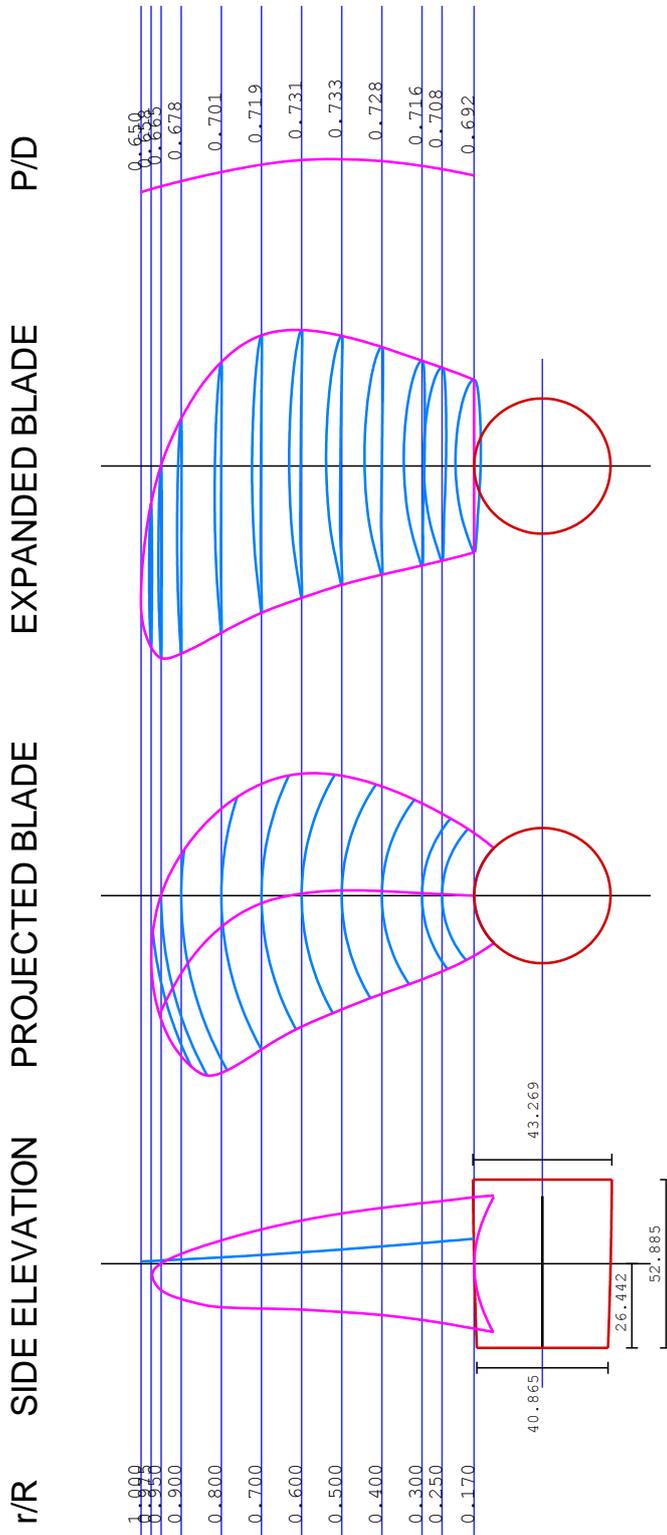
k		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r/R		Harmonic analysis of axial velocity component										
0.3000	a(k)	0.527	-0.049	-0.357	0.026	-0.099	0.006	-0.006	-0.001	0.014	-0.010	0.016
	b(k)	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
	c(k)	0.527	0.049	0.357	0.026	0.099	0.006	0.006	0.002	0.014	0.010	0.016
0.5000	a(k)	0.614	-0.102	-0.306	0.017	-0.155	0.010	-0.059	0.025	-0.021	0.024	-0.011
	b(k)	0.000	0.001	0.002	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000
	c(k)	0.614	0.102	0.306	0.017	0.155	0.010	0.059	0.025	0.021	0.024	0.011
0.7000	a(k)	0.723	-0.133	-0.263	-0.026	-0.191	-0.004	-0.115	0.028	-0.056	0.040	-0.025
	b(k)	0.000	-0.005	0.000	0.000	-0.002	0.001	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
	c(k)	0.723	0.134	0.263	0.026	0.191	0.004	0.115	0.028	0.056	0.040	0.025
0.9000	a(k)	0.783	-0.168	-0.241	-0.089	-0.174	-0.035	-0.112	0.018	-0.064	0.048	-0.039
	b(k)	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	c(k)	0.783	0.168	0.241	0.089	0.174	0.035	0.112	0.018	0.064	0.048	0.039
1.1000	a(k)	0.811	-0.170	-0.240	-0.088	-0.176	-0.030	-0.117	0.022	-0.072	0.054	-0.051
	b(k)	0.000	-0.004	0.000	-0.002	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	c(k)	0.811	0.171	0.240	0.088	0.176	0.030	0.117	0.022	0.072	0.054	0.051
r/R		Harmonic analysis of radial velocity component										
0.3000	a(k)	-0.075	0.051	0.076	-0.062	0.062	-0.018	0.033	-0.003	0.013	-0.001	0.000
	b(k)	0.000	0.006	0.003	-0.002	-0.004	-0.002	0.000	-0.002	0.000	0.000	-0.001
	c(k)	0.075	0.051	0.076	0.062	0.062	0.018	0.033	0.004	0.013	0.001	0.001
0.5000	a(k)	-0.107	0.052	0.069	-0.062	0.056	-0.019	0.031	0.002	0.015	0.006	0.006
	b(k)	0.000	0.004	0.002	0.000	0.002	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	c(k)	0.107	0.052	0.069	0.062	0.056	0.019	0.031	0.003	0.015	0.006	0.006
0.7000	a(k)	-0.076	0.070	0.027	-0.036	0.025	-0.027	0.029	-0.016	0.029	-0.008	0.023
	b(k)	0.000	0.003	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	c(k)	0.076	0.070	0.027	0.036	0.025	0.027	0.029	0.016	0.029	0.008	0.023
0.9000	a(k)	-0.120	0.087	0.025	-0.022	0.019	-0.022	0.023	-0.017	0.026	-0.014	0.026
	b(k)	0.000	0.006	0.002	0.000	0.002	-0.001	0.001	-0.001	0.001	-0.001	0.000
	c(k)	0.120	0.087	0.025	0.022	0.019	0.022	0.023	0.017	0.026	0.014	0.026
1.1000	a(k)	-0.062	0.085	0.004	-0.019	-0.003	-0.027	0.006	-0.023	0.016	-0.017	0.022
	b(k)	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	c(k)	0.062	0.085	0.004	0.019	0.003	0.027	0.006	0.023	0.016	0.017	0.022
r/R		Harmonic analysis of tangential velocity component										
0.3000	a(k)	0.009	-0.005	0.000	0.005	-0.003	-0.001	0.005	-0.005	0.005	-0.001	-0.001
	b(k)	0.000	-0.120	-0.116	0.035	-0.048	0.012	-0.014	-0.003	-0.005	-0.005	-0.002
	c(k)	0.009	0.120	0.116	0.035	0.048	0.012	0.015	0.006	0.007	0.005	0.002
0.5000	a(k)	-0.008	0.007	0.001	-0.002	0.003	0.000	0.000	0.003	-0.002	0.003	-0.002
	b(k)	0.000	-0.146	-0.086	0.018	-0.058	0.022	-0.032	0.016	-0.016	0.011	-0.008
	c(k)	0.008	0.146	0.086	0.018	0.058	0.022	0.032	0.016	0.016	0.011	0.008
0.7000	a(k)	-0.001	0.003	0.000	-0.002	-0.001	0.002	-0.003	0.002	-0.003	0.002	-0.002
	b(k)	0.000	-0.159	-0.072	-0.004	-0.045	0.016	-0.033	0.026	-0.024	0.026	-0.016
	c(k)	0.001	0.160	0.072	0.004	0.045	0.016	0.033	0.026	0.024	0.026	0.017
0.9000	a(k)	-0.013	0.010	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
	b(k)	0.000	-0.158	-0.072	-0.006	-0.040	0.019	-0.029	0.028	-0.022	0.029	-0.016
	c(k)	0.013	0.158	0.072	0.006	0.040	0.019	0.029	0.028	0.022	0.029	0.016
1.1000	a(k)	0.000	0.001	0.004	-0.005	0.005	-0.003	0.002	0.000	-0.001	0.001	-0.001
	b(k)	0.000	-0.158	-0.060	-0.021	-0.027	0.001	-0.014	0.010	-0.008	0.011	-0.005
	c(k)	0.000	0.158	0.060	0.022	0.027	0.003	0.014	0.010	0.008	0.011	0.005

FIGURES

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Photographs of the Model Ship (KS1354)	5/30/2012
Figure 1		

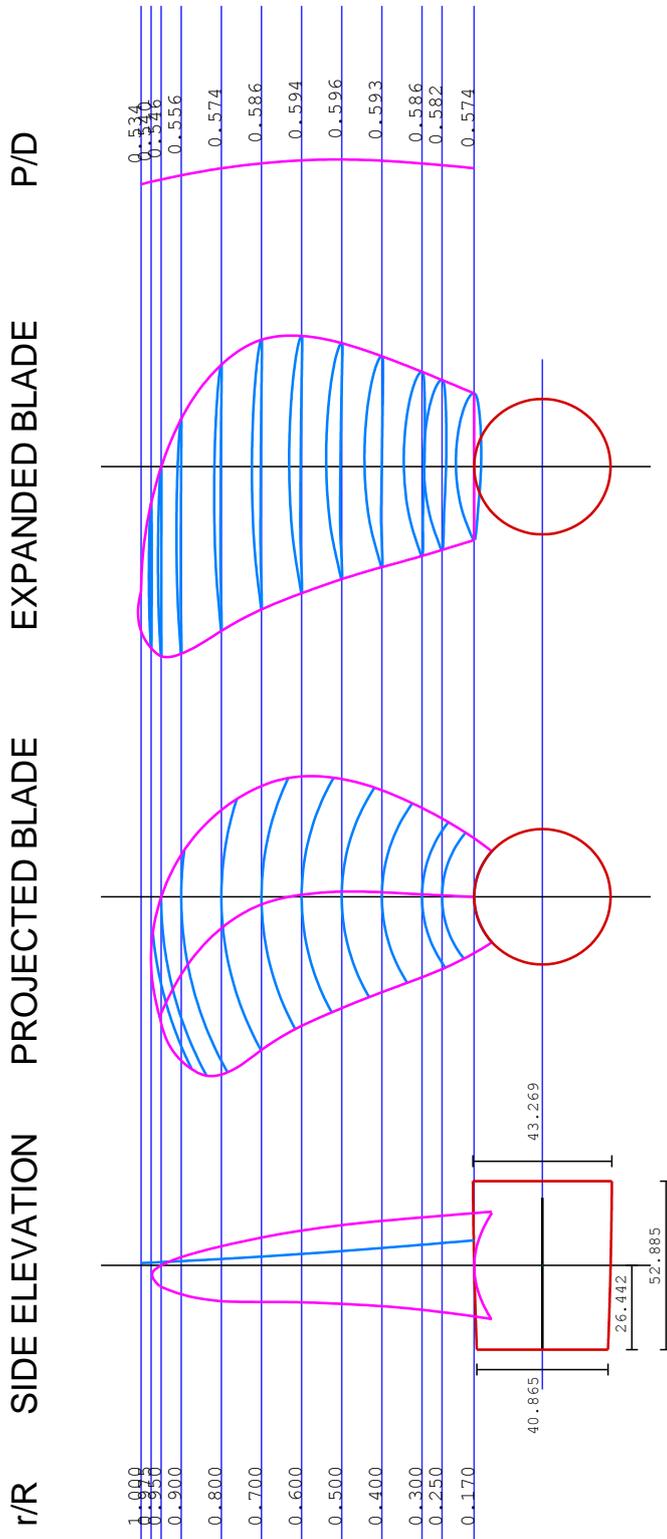


	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Drawing of the Stock Propeller (KP827)	5/30/2012
Figure 2		



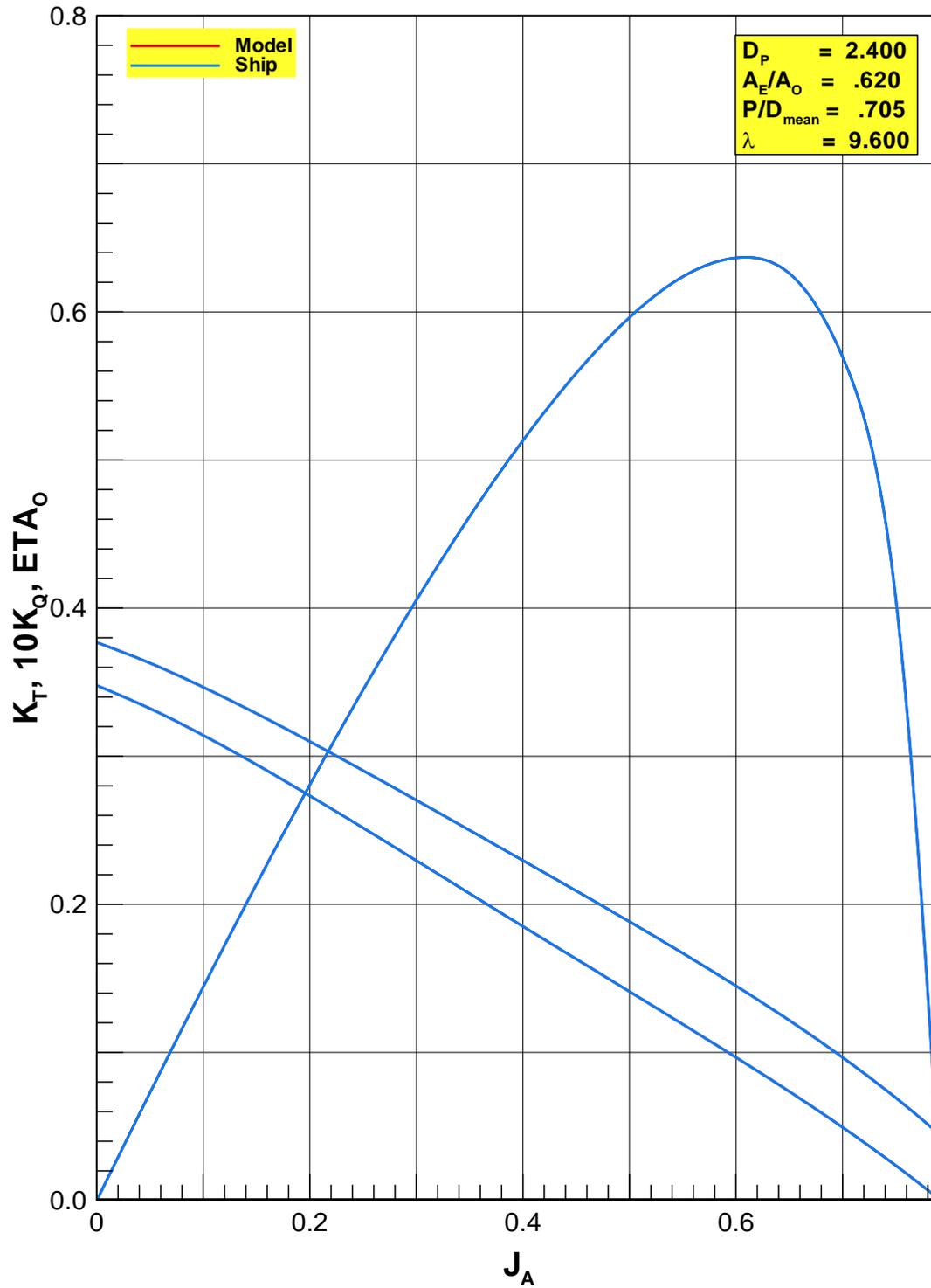
Propeller Principal Particulars						
Diameter(mm)	2400.0	Model Diam(mm)	250.000	Scale Ratio	9.6000	
(P/D)mean	0.7050	(Rake/D) Tip	0.0000	Prop. Type	FPP	
Ae/Ao	0.6214	Eff. skew(Deg)	19.02	Drawing Scale	1.80556	
Hub Ratio	0.1700	(C/D) 0.7R	0.3489	Comment		
No. of Blade	4	(F0/C) 0.7R	0.0179	Prop. Number	KP827	
Section	NACA66	(T/D) 0.7R	0.0111	Korea Ocean Research & Development Institute, KRISO		

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Drawing of the Design Propeller (KP1069)	5/30/2012
Figure 3		

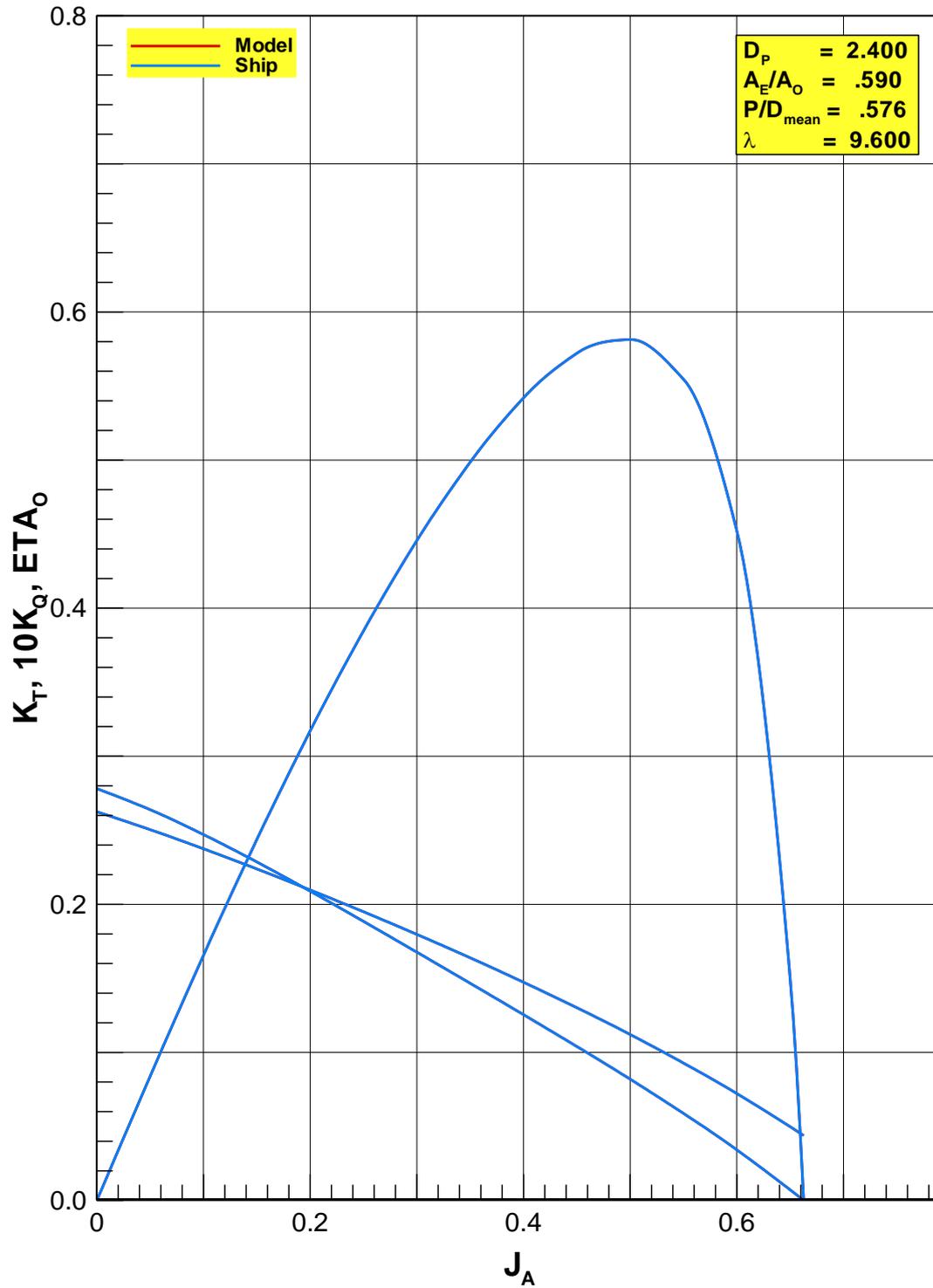


Propeller Principal Particulars						
Diameter(mm)	2400.0	Model Diam(mm)	250.000	Scale Ratio	9.6000	
(P/D)mean	0.5761	(Rake/D) Tip	0.0000	Prop. Type	FPP	
Ae/Ao	0.5905	Eff. skew(Deg)	19.15	Drawing Scale	1.80556	
Hub Ratio	0.1700	(C/D) 0.7R	0.3385	Comment		
No. of Blade	4	(fo/C) 0.7R	0.0191	Prop. Number		
Section	NACA66	(t/D) 0.7R	0.0111	Korea Ocean Research & Development Institute, KORDI		

	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Open-Water Characteristics of the Stock Propeller (KP827)	5/30/2012
Figure 4		



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 5	Open-Water Characteristics of the Design Propeller (KP1069)	-



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 6	Resistance Coefficients (KS1354, Design draft)	-

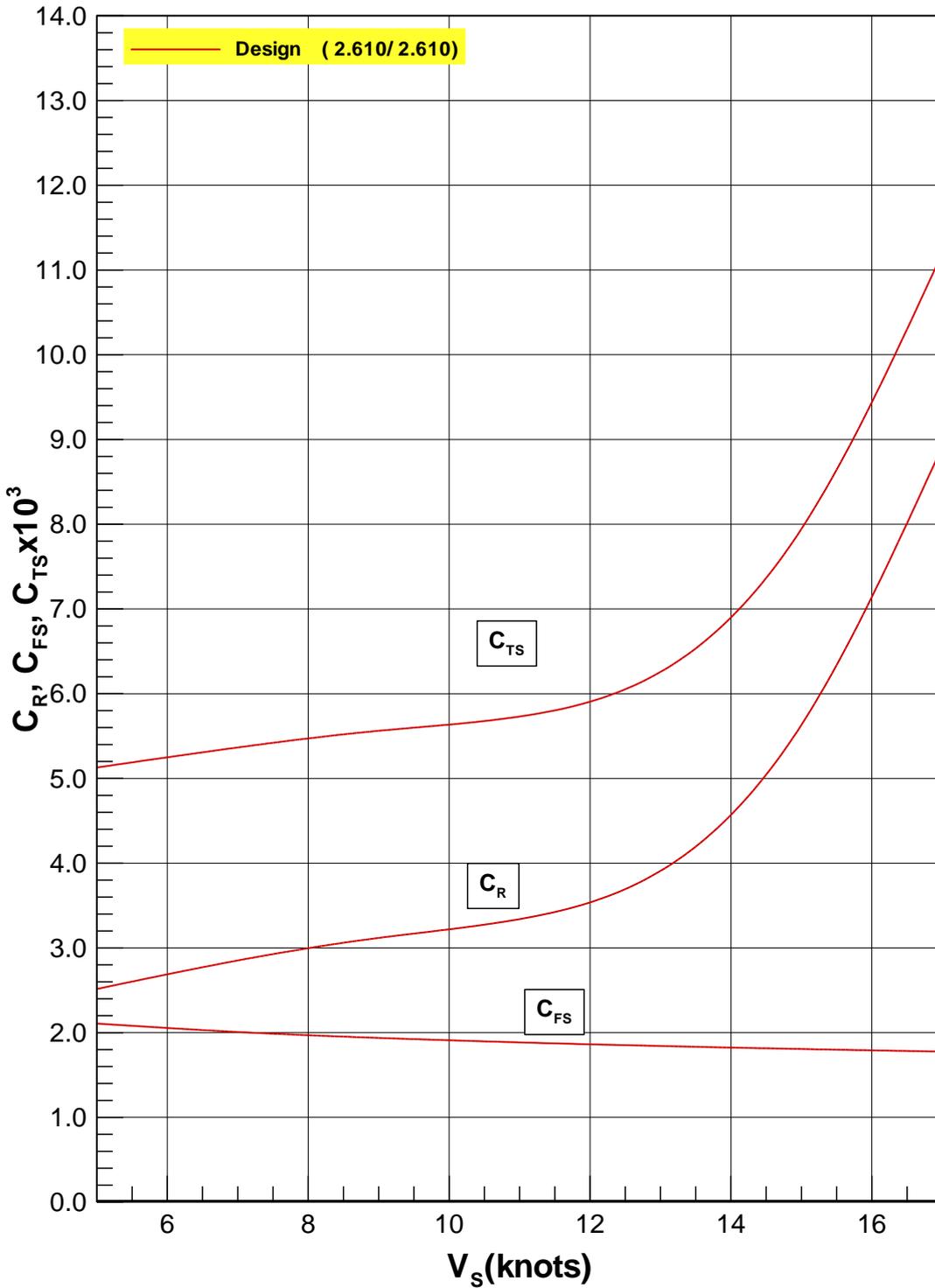
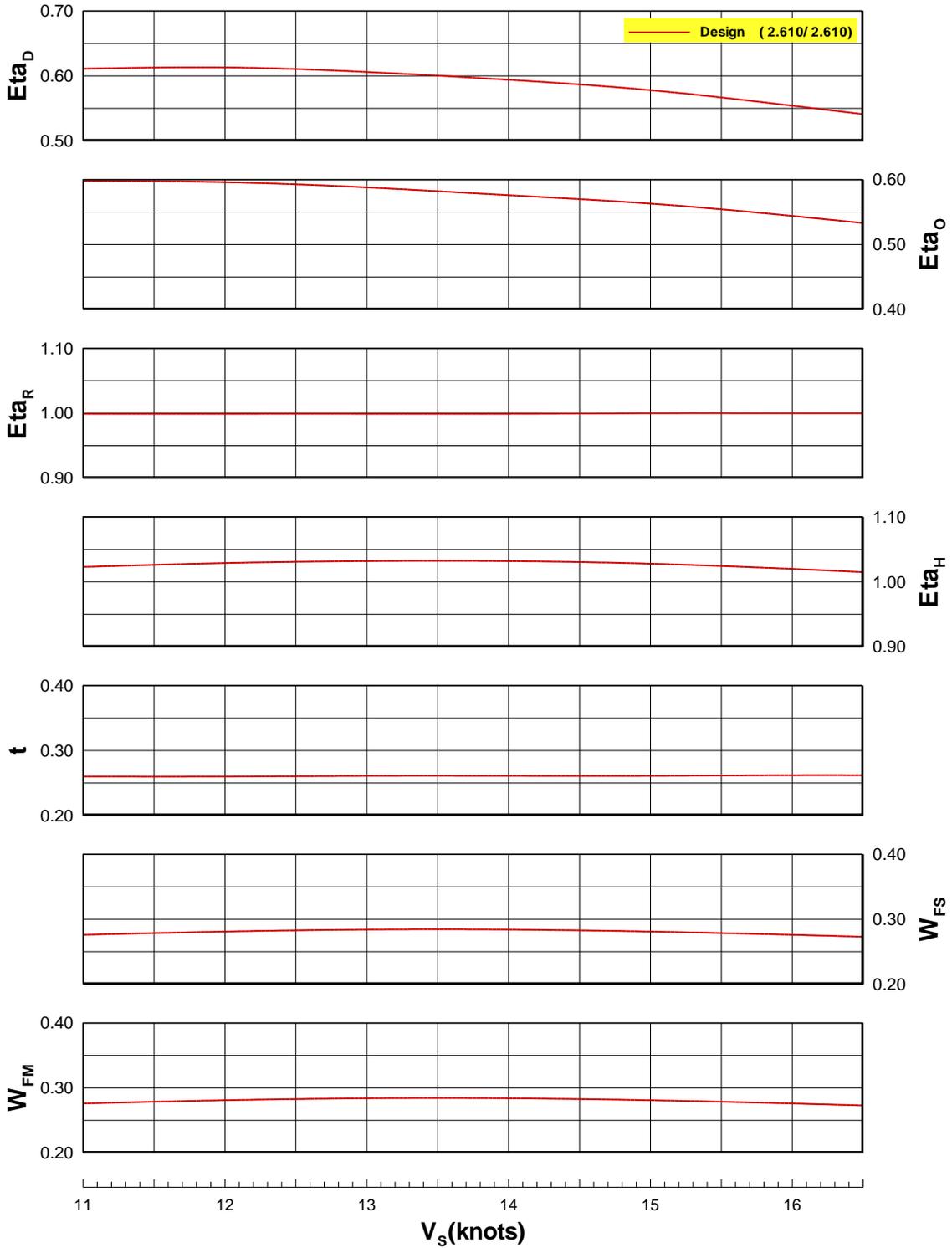
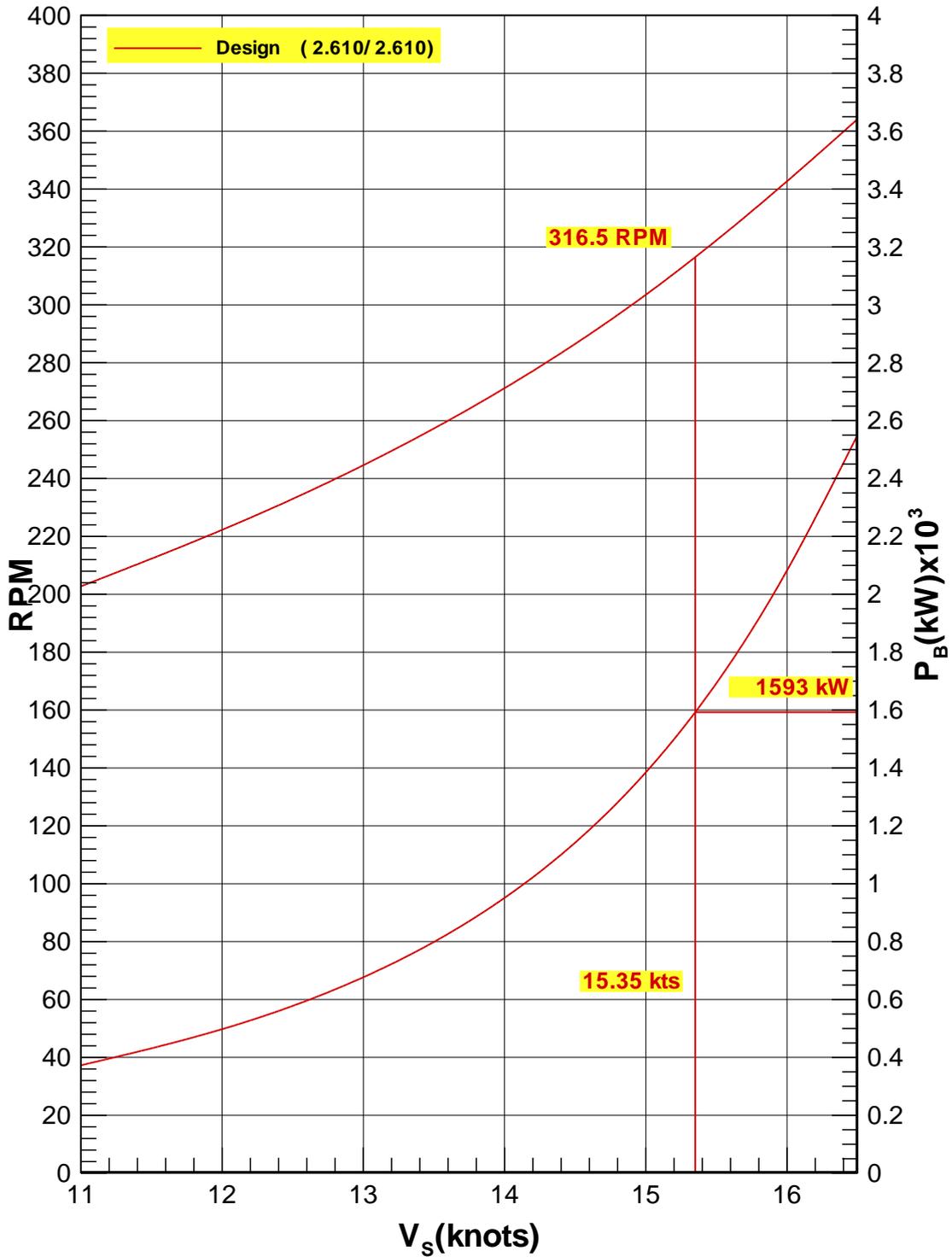


Figure 7

**Propulsive Coefficients
(KS1354, Design draft, Stock Propeller)**



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 8	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Stock Propeller, at NCR)	-



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 9	Prediction of Powering Performance](KS1354, Design draft, Stock Propeller, at NCR w/ 15% S.M.)	-

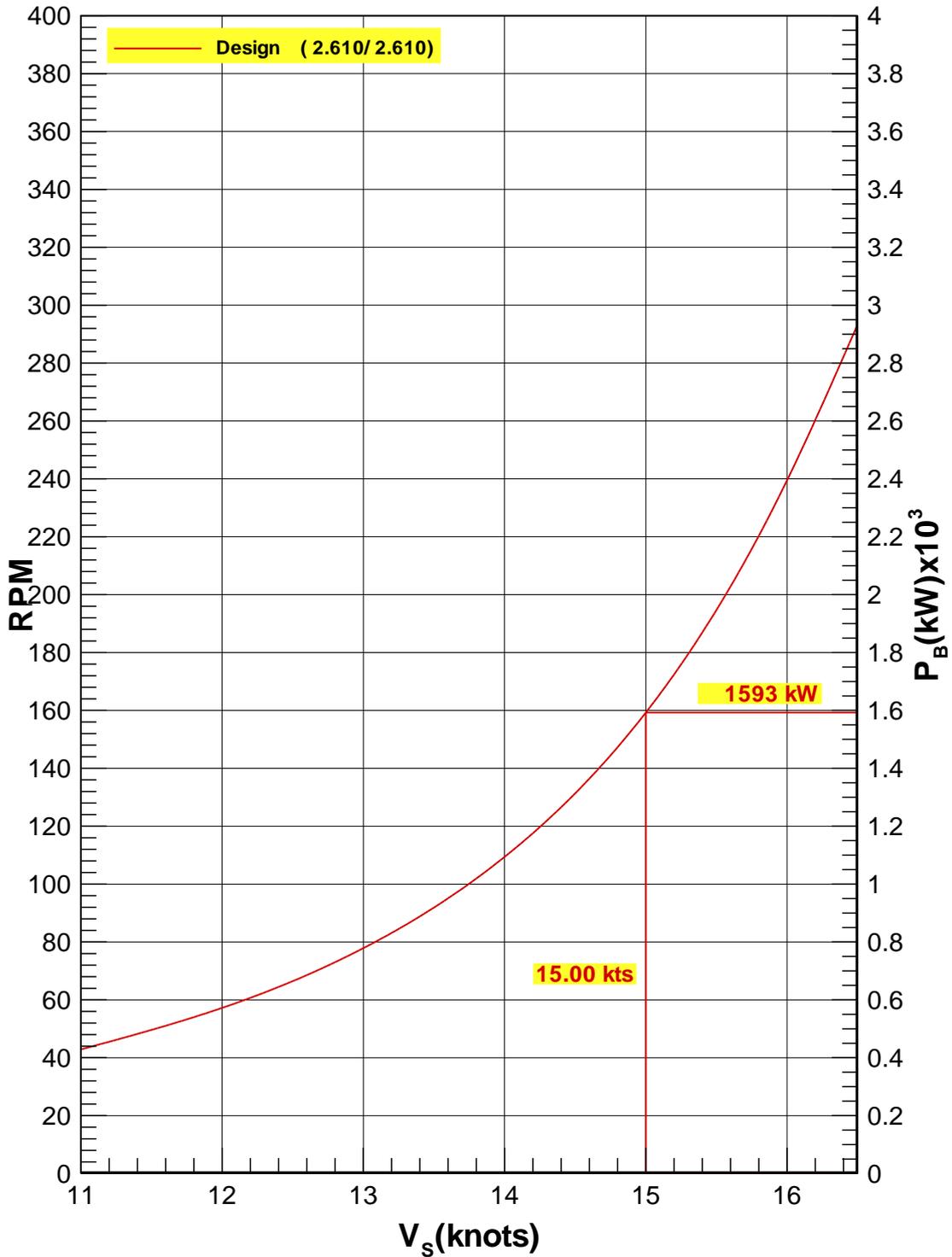
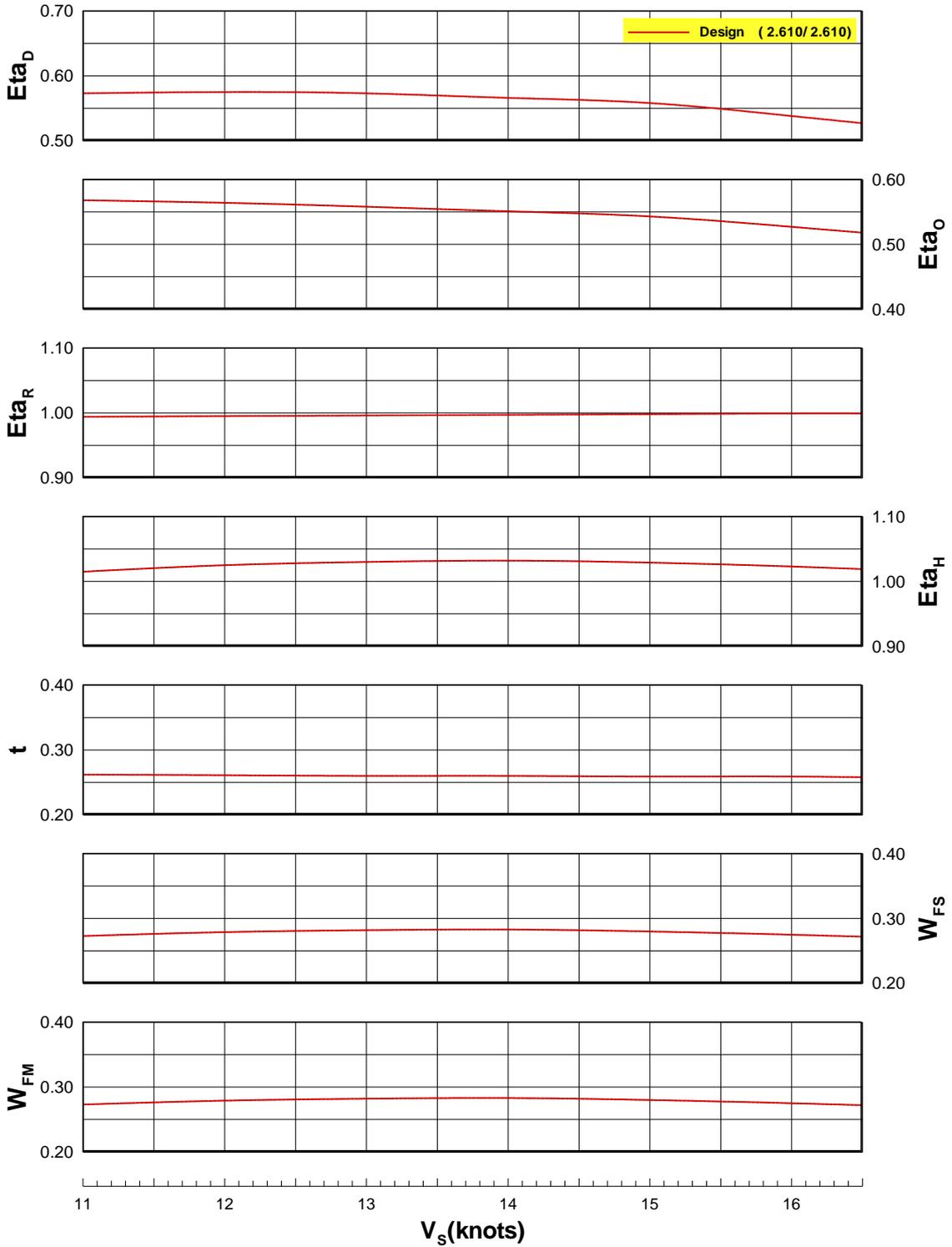
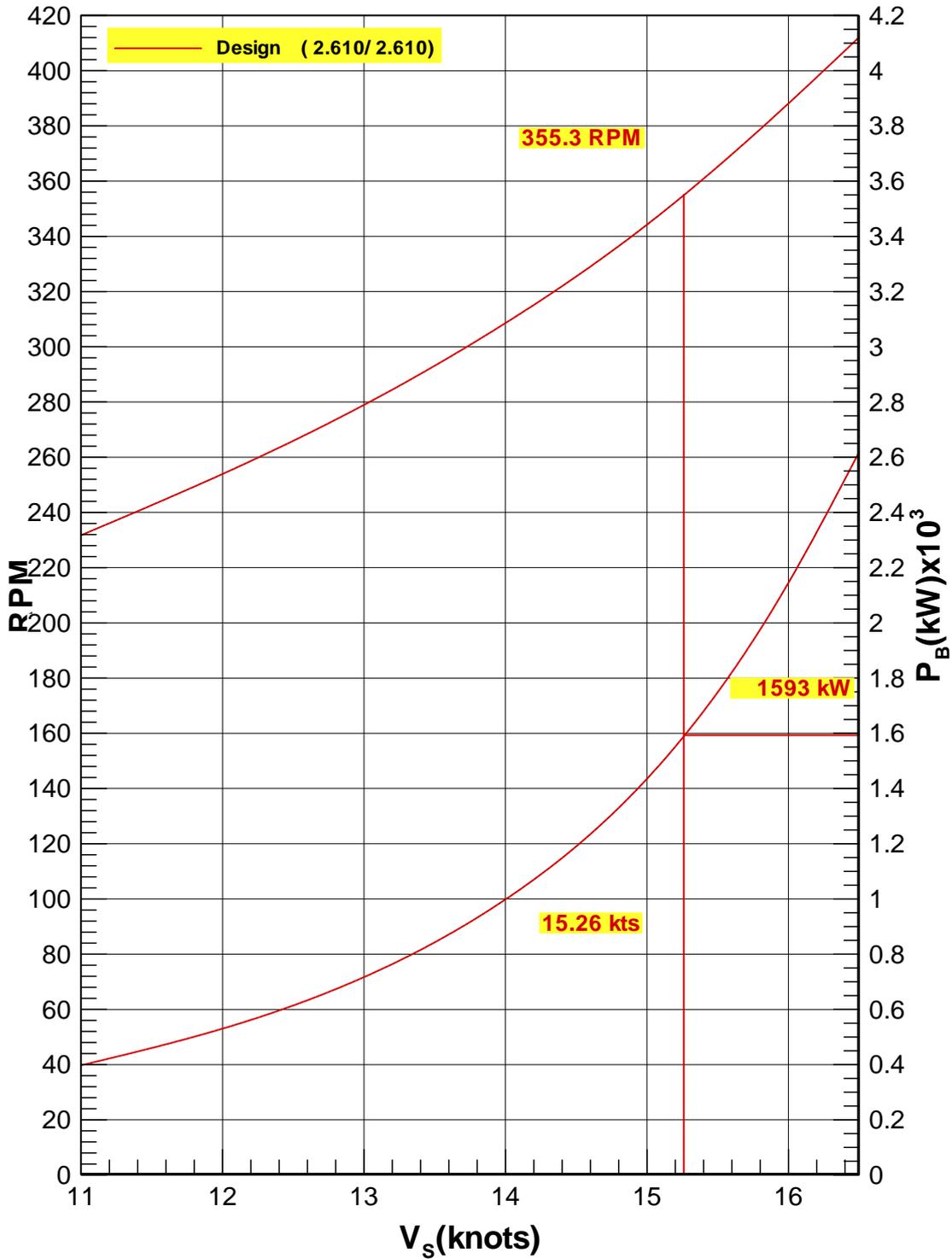


Figure 10

**Propulsive Coefficients
(KS1354, Design draft, Design Propeller)**



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 11	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design Propeller, at NCR)	-



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 12	Prediction of Powering Performance (KS1354, Design draft, Design Propeller, at NCR w/ 15% S.M.)	-

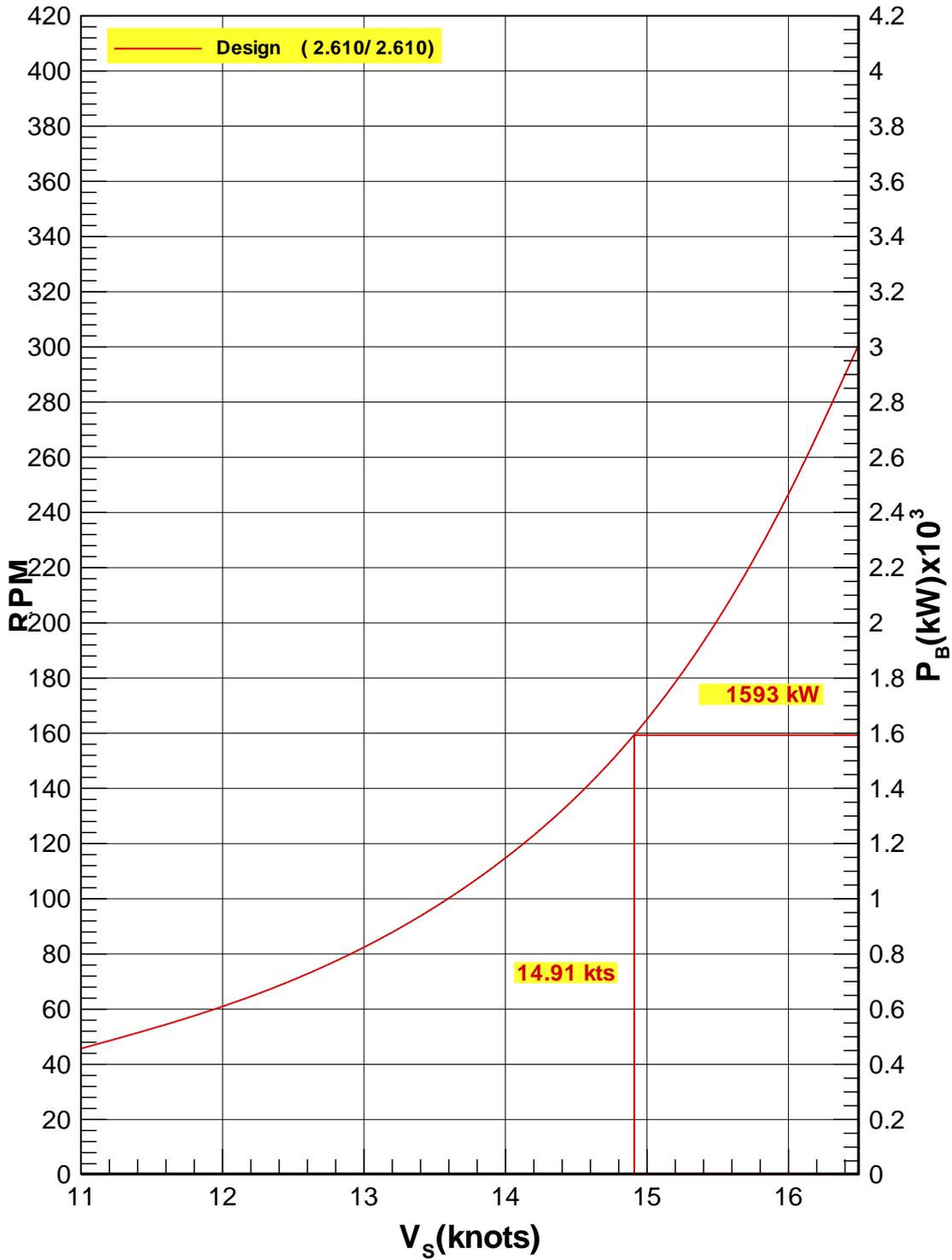


Figure 13

**Circumferential Distribution of Velocity Components
(KS1354, Design draft, 15.0 knots)**

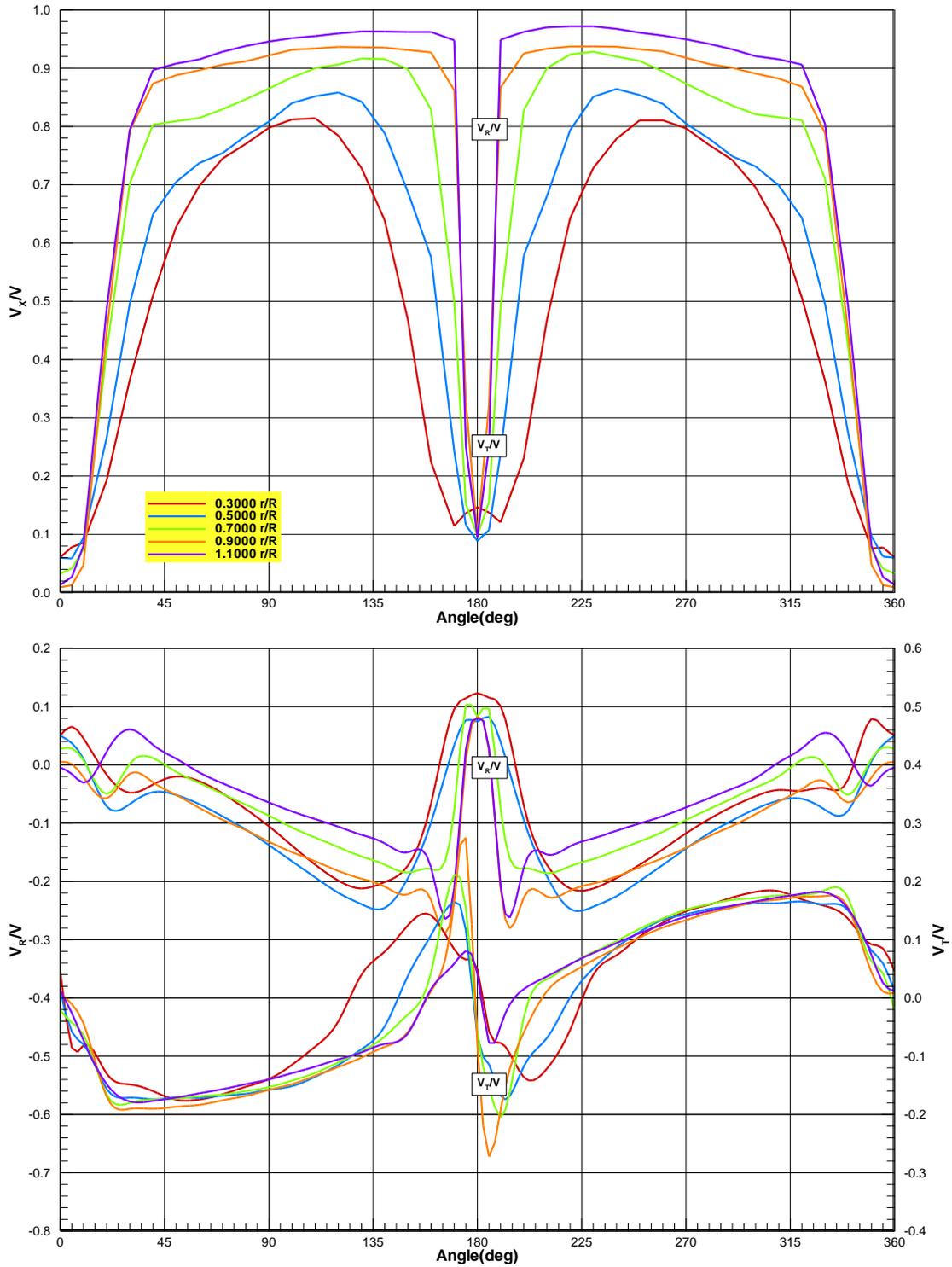
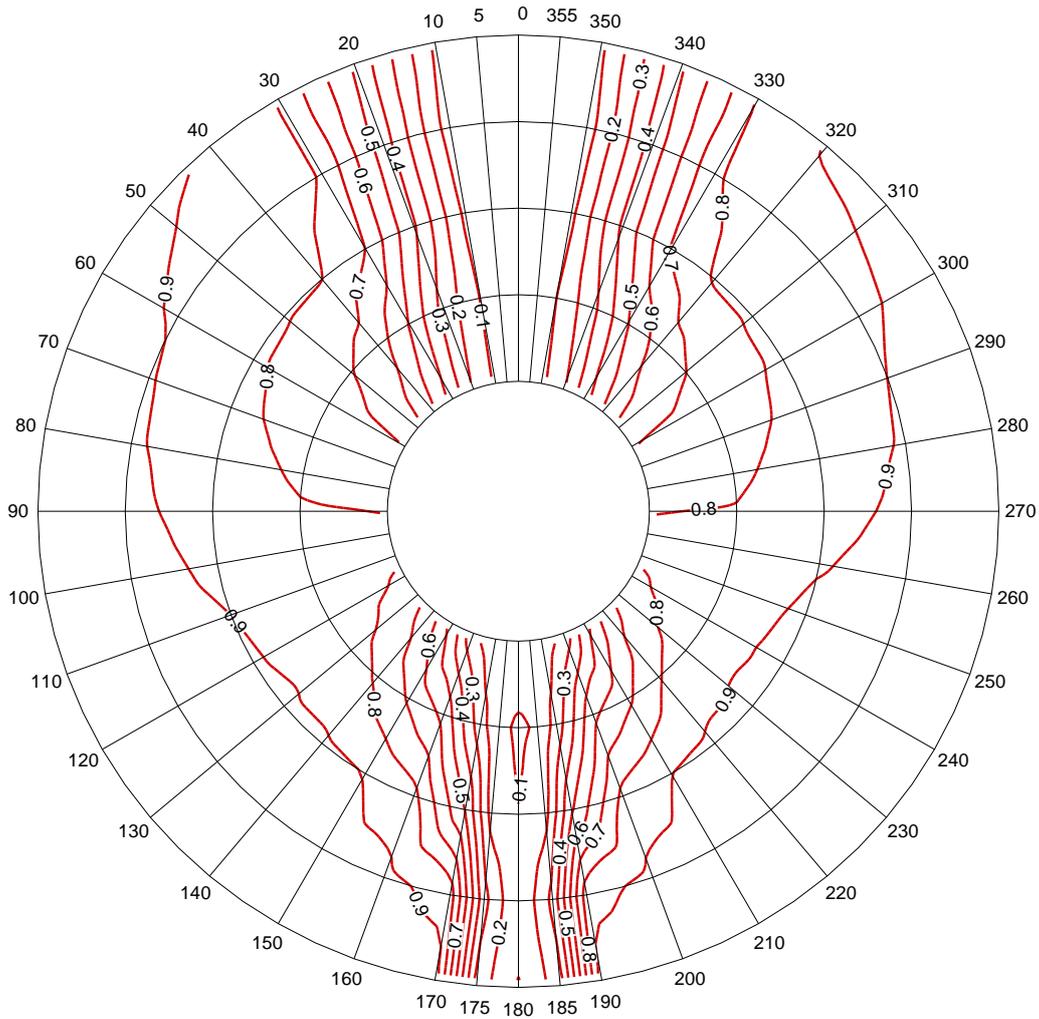


Figure 14

**Iso-Axial Velocity Contours
(KS1354, Design draft, 15.0 knots)**



Radii : 0.3000 0.5000 0.7000 0.9000 1.1000

Figure 15

**Transverse Velocity Vectors
(KS1354, Design draft, 15.0 knots)**

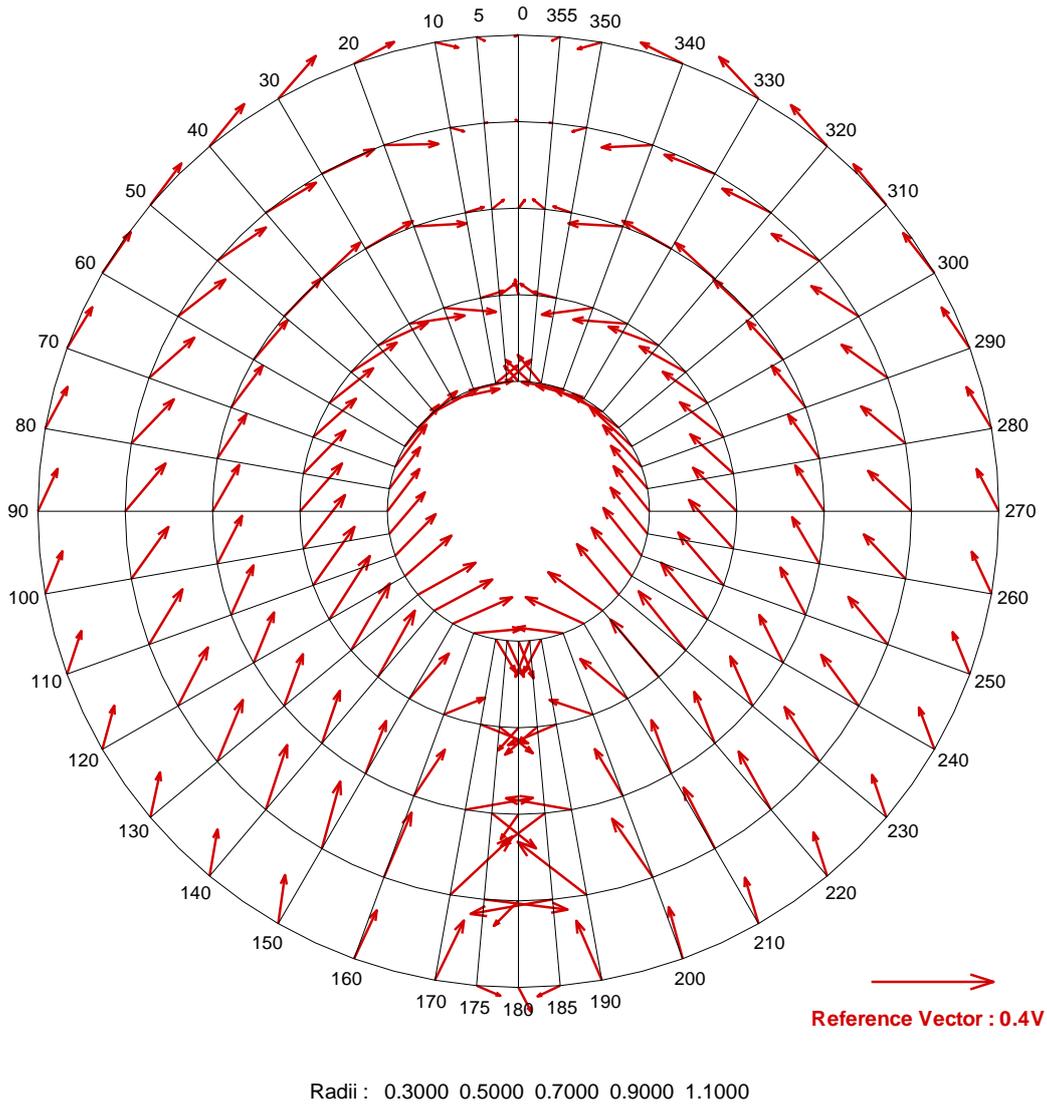
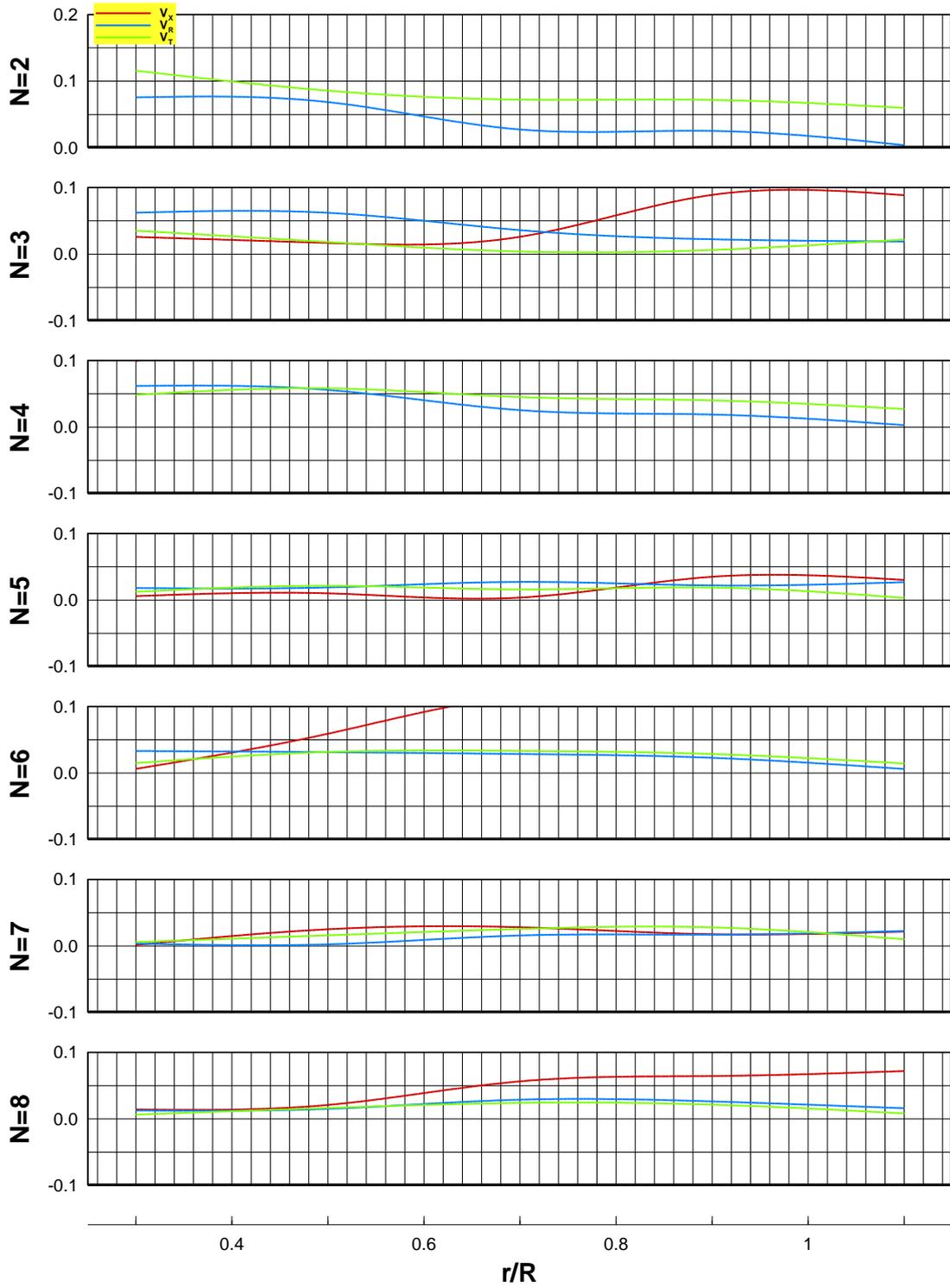
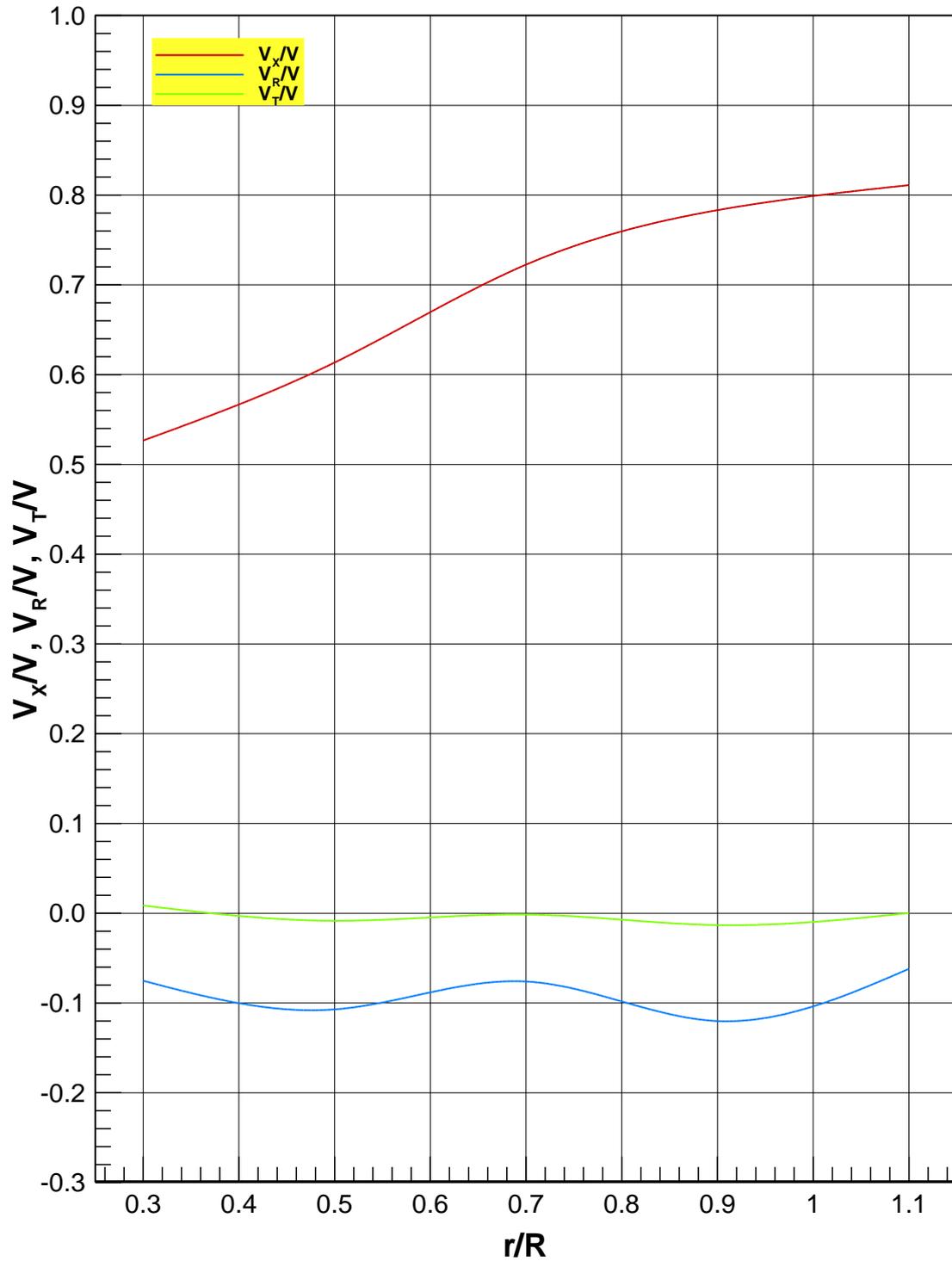


Figure 16

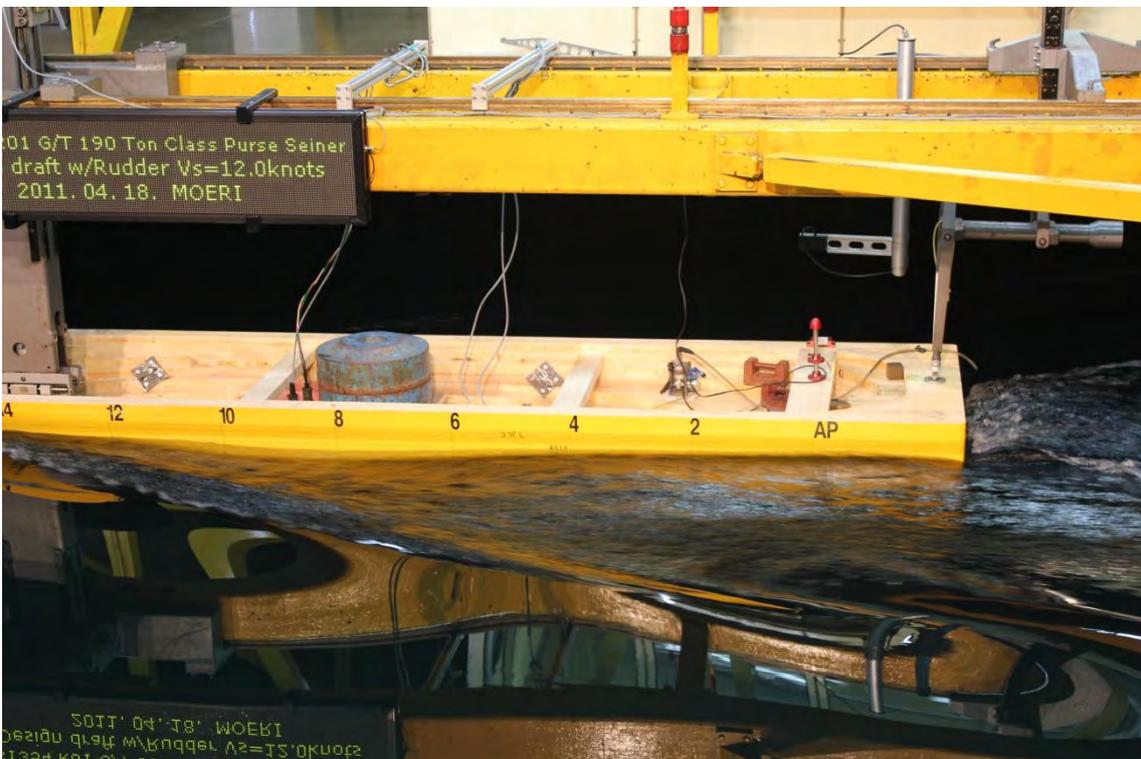
Radial Distribution of Harmonic Amplitudes of Velocities (KS1354, Design draft, 15.0 knots)



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
		5/30/2012
Figure 17	Radial Distribution of Circumferential Mean Velocity Components (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	-



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Figure 18 Photographs of the Running Ship Model (KS1354, Design draft, 12.0 knots)	5/30/2012



	G/T 190Ton Class Purse Seiner	-
	Photographs of the Running Ship Model (KS1354, Design draft, 15.0 knots)	5/30/2012
Figure 19		



APPENDICES

A. Test Descriptions

B. Nomenclature

A. Test Descriptions

A-1 Propulsion Tests

Model tests required for the full scale performance prediction comprise the resistance test, the self-propulsion test and the propeller open-water test.

In the resistance test the model is towed at the speeds giving the same Froude numbers for the model and ship, and the total resistance of the model R_{T_M} is measured.

In the self-propulsion test, the model is propelled with its own propeller at the so-called ship propulsion point over the desired range of speeds. In order to compensate for the model's increased frictional resistance due to the difference in Reynolds numbers of the model and ship, the model is towed by the resistance dynamometer. This towing force is calculated as follows:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_M S_M V_M^2 [C_{VM} - (C_{F_S} + C_A)] \quad (1)$$

For each speed, propeller thrust (T_M), torque (Q_M) and propeller revolution (N_M) are measured.

In these tests, a model is connected to the towing carriage by a resistance dynamometer at the center of buoyancy and restrained from yaw and sway.

To get the open-water characteristics of the propeller, the open-water test is performed and thrust, torque and rate of revolution are measured, keeping the rate of advance is varied so that a loading range of the propeller is examined.

A-1.1 Analysis of Model Test Results

Model Resistance R_{T_M} measured in the resistance tests is expressed in the non-dimensional form

$$C_{T_M} = \frac{R_{T_M}}{\frac{1}{2} \rho S_M V_M^2} \quad (2)$$

This is reduced to the residual resistance coefficient C_R by following relation.

$$C_R = C_{T_M} - C_{F_M} \quad (3)$$

Thrust T_M , and torque Q_M , measured at the self-propulsion tests are expressed in non-dimensional form as follows:

$$K_{T_M} = \frac{T_M}{\rho N_M^2 D_{P_M}^4} \quad (4)$$

$$K_{Q_M} = \frac{Q_M}{\rho N_M^2 D_{P_M}^5} \quad (5)$$

With K_{T_M} as input, J_{T_M} and $K_{Q_{T_M}}$ are read off from the model propeller characteristics. Then the wake fraction w_{TM} and the relative rotative efficiency η_R are calculated by the following relations.

$$w_{TM} = 1 - \frac{J_{TM} D_{P_M} N_M}{V_M} \quad (6)$$

$$\eta_R = \frac{K_{Q_{TM}}}{K_{Q_M}} \quad (7)$$

The thrust deduction is obtained from

$$t = \frac{(T_M - R_{T_{MC}} + F_D)}{T_M} \quad (8)$$

where $R_{T_{MC}}$ is the resistance corrected for the differences in temperature between resistance and self-propulsion tests:

$$R_{T_{MC}} = R_{T_M} \times \frac{C_{F_{MC}} + C_R}{C_{F_M} + C_R} \quad (9)$$

where $C_{F_{MC}}$ is the frictional resistance coefficient at the temperature of the self-propulsion test.

A-1.2 Total Resistance of Ship

The total resistance coefficient of a ship is defined as

$$C_{T_S} = C_{F_S} + C_A + C_R + C_{AA} \quad (10)$$

where C_{AA} is the air resistance coefficient:

$$C_{AA} = 0.001 \times \frac{A_T}{S_S} \times \frac{V_R^2}{V_S^2} \quad (11)$$

where V_R is the relative head wind speed.

If the ship is fitted with bilge keels, the total resistance coefficient is calculated as follows:

$$C_{T_s} = \frac{S_s + S_{BK_s}}{S_s} \times (C_{F_s} + C_A) + C_R + C_{AA} \quad (12)$$

A-1.3 Scale Effect Corrections for Propeller Characteristics

The characteristics of the full scale propeller are calculated from the model characteristics as follows:

$$K_{T_{os}} = K_{T_{om}} - \Delta K_{T_o} \quad (13)$$

$$K_{Q_{os}} = K_{Q_{om}} - \Delta K_{Q_o} \quad (14)$$

where

$$\Delta K_{T_o} = -\Delta C_D \times 0.3 \times \frac{P_{0.7R}}{D_p} \times \frac{c_{0.7R} Z}{D_p} \quad (15)$$

$$\Delta K_{Q_o} = \Delta C_D \times 0.25 \times \frac{c_{0.7R} Z}{D_p} \quad (16)$$

and ΔC_D is the difference in drag coefficient, such that

$$\Delta C_D = C_{D_M} - C_{D_s} \quad (17)$$

where

$$C_{D_M} = 2 \times \left(1 + 2 \frac{t_{0.7R_M}}{c_{0.7R}} \right) \times \left(\frac{0.044}{R_{n0.7R}^{1/6}} - \frac{5}{R_{n0.7R}^{2/3}} \right) \quad (18)$$

$$C_{D_s} = 2 \times \left(1 + 2 \frac{t_{0.7R_M}}{c_{0.7R}} \right) \times \left(1.89 + 1.62 \log \frac{C_{0.7R}}{k_p} \right)^{-2.5} \quad (19)$$

If ΔC_D is less than zero,

$$\Delta C_D = 0 \quad (20)$$

is used.

The blade roughness k_p is assumed as $3 \times 10^{-5} m$, and the local Reynolds number at $0.7R$ is calculated as follows:

$$R_{n0.7R} = c_{0.7R_M} N_M D_{P_M} \frac{\sqrt{J_{O_M}^2 + (0.7\pi)^2}}{V_M} \quad (21)$$

A-1.4 Full Scale Wake

The full scale wake is calculated from the model wake w_{TM} , and the thrust deduction t :

$$w_{TS} = (t + 0.04) + (w_{TM} - t - 0.04) \times \frac{C_{F_S} + C_A}{C_{F_{MC}}} \quad (22)$$

In the formula, the factor 0.04 is used to take account for rudder effect. If full scale wake w_{TS} is greater than model wake w_{TM} , following formula is used.

$$w_{TS} = w_{TM} \quad (23)$$

A-1.5 Standard Prediction

The load of the full scale propeller is obtained from the following relation.

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S_S}{2D_{P_S}^2} \times \frac{C_{T_S}}{(1-t)(1-w_{TS})^2} \quad (24)$$

With this value of K_T/J^2 as input, J_{TS} and $K_{Q_{TS}}$ are read off from the full scale propeller characteristics and the following quantities are calculated.

* the effective power:

$$P_E = 1.36 \times \frac{\rho_S}{2} S_S V_S^3 C_{T_S} \times 10^{-3} : (PS) \quad (25)$$

* the rate of revolutions:

$$N_S = \frac{(1-w_{TS})V_S}{J_{TS} D_{P_S}} : (RPS) \quad (26)$$

* the delivered power:

$$P_D = 1.36 \times 2\pi \times \rho_S D_{P_S}^5 N_S^3 \frac{K_{Q_{TS}}}{\eta_R} \times 10^{-3} : (PS) \quad (27)$$

* the thrust of the propeller:

$$T_S = \frac{K_T}{J^2} J_{TS}^2 \rho_S D_{P_S}^4 N_S^2 : (N) \quad (28)$$

* the torque of the propeller:

$$Q_S = \frac{K_{Q_{TS}}}{\eta_R} \rho_S D_{P_S}^5 N_S^2 : (N - m) \quad (29)$$

* the total efficiency:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \quad (30)$$

* the hull efficiency:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w_{TS}} \quad (31)$$

A-2 Wake Survey Test

The wake survey test to determine the axial, radial and tangential velocity components in the propeller plane is executed by means of a rake assembly of 5 pitot tubes. The head of each pitot tube contains five holes joined by small diameter internal tubes: one on the center, one pair aligned with the radial plane, and the other pair in the tangential plane. Four static holes joined to a common internal tube is located at the middle part of each pitot tube.

A-2.1 Velocity Components

The pressure difference between center and static holes is measured by the differential type pressure transducer and the axial velocity component V_x can be obtained. From the results, iso-axial velocity contours are plotted to give the wake distribution at the propeller plane.

The tangential and radial velocity components V_t and V_r can be computed from the pressure differences between the pair of holes in the tangential and radial plane, respectively. Also the transverse component of velocity vector V_{tr} is computed as follows:

$$V_{tr} = \sqrt{V_t^2 + V_r^2} \quad (32)$$

The transverse flow direction at the propeller plane can be easily seen by plotting these velocity vectors.

A-2.2 Harmonic Series

The velocity components at the propeller plane are considered as a periodic function of

period 2π for each radius and represented by the Fourier Series.

$$\begin{aligned} V_i &= a_o + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)) \\ &= a_o + \sum_{k=1}^n (c_k \cos(k\theta - \phi_k)) \end{aligned} \quad (33)$$

A-2.3 Mean Velocity Components

Circumferential mean velocity is the mean value of the measured velocity at the radius r and computed as follows:

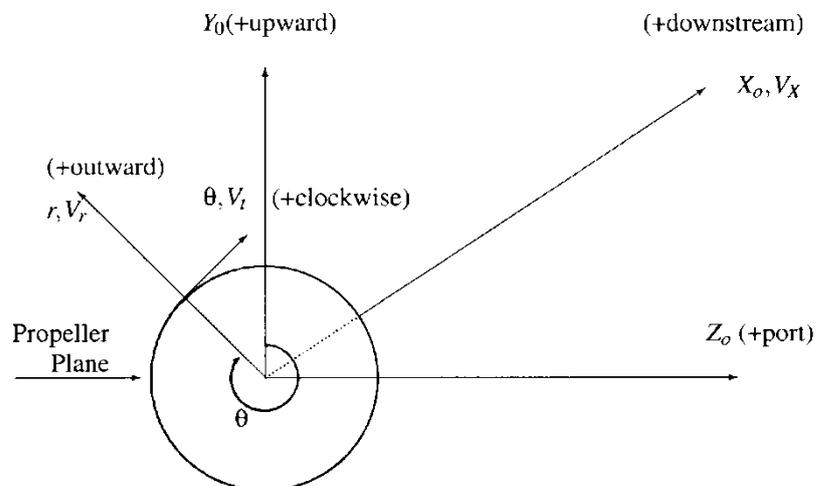
$$V_{Mi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_i(\theta) d\theta \quad (34)$$

Total mean velocity is obtained from the value of circumferential mean velocity from propeller hub to propeller tip at the propeller plane and computed as follows:

$$V_{TMI} = \frac{2\pi \int_{r_h}^{r_p} V_{Mi} \cdot r \cdot dr}{\pi(r_p^2 - r_h^2)} \quad (35)$$

Wake fraction represents the nominal wake fraction without propeller at the stern and is computed as follows:

$$w_N = 1 - \frac{V_A}{V} = 1 - V_{TMX} \quad (36)$$



B. Nomenclature

B-1 Geometry of Ship and Propeller

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
A_E	AE	Expanded blade area	Outside of hub	m^2
A_M	AM	Midship section area	Midway between FP and AP	m^2
A_O	AO	Propeller disc area	$\frac{\pi D_P^2}{4}$	m^2
A_P	-	Projected area		m^2
A_T	AT	Transverse projected area of ship above waterline		m^2
A_W	AW	Waterplane area		m^2
$a_{x0.8}$	-	Longitudinal clearance from propeller to stern frame at a height of 0.8R above the propeller axis.		m
a_z		Vertical clearance to hull		m
B	B	Breadth, moulded of ship		m
BA	BA	Bulb section area in submerged part at FP		m
BAR	BAR	Bulb-midship section area ratio	$\frac{BA}{A_M}$	
BB	BB	Bulb breadth in submerged part		m
BBR	BBR	Bulb-midship breadth ratio	$\frac{BB}{B}$	
BH	BH	Bulb height of maximum length position		m
BHR	BHR	Bulb height-fwd draft ratio	$\frac{BH}{T_F}$	
BL	BL	Bulb length from maximum fore end to AP in submerged part		m
BLR	BLR	Bulb-ship length ratio	$\frac{BL}{L_{PP}}$	
c	C	Chord length of propeller blade section		
C_B	CB	Block coefficient	$\frac{\nabla}{L_{PP}BT}$	
C_M	CM	Midship section coefficient	$\frac{A_M}{BT}$	
C_P	CP	Prismatic coefficient, longitudinal	$\frac{\nabla}{A_M L_{PP}}$	
C_W	CW	Load waterline coefficient	$\frac{A_W}{L_{PP}B}$	

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
$cR_{0.7R}$	CR070	Chord length-diameter ratio at 0.7R	$\frac{c_{0.7R}}{D_p}$	
$c_{0.7R}$	CH070	Chord length of blade at 0.7R		<i>m</i>
D	D	Depth, moulded of ship		<i>m</i>
D_p	DP	Diameter of a propeller		<i>m</i>
d	DH	Hub diameter		<i>m</i>
EAR	EAR	Expanded area ratio	$\frac{A_E}{A_O}$	
f_o	-	Maximum camber of propeller blade section		
G	-	Non-dimensional circulation	$\frac{\Gamma}{2\pi U_R}$	
h	-	Depth of submergence of the propeller axis		<i>m</i>
HDR	HDR	Hub-diameter ratio	$\frac{d}{D_p}$	
i_G	RAKG	Rake from the propeller plane to the tip generation line	Aft displacement is positive	<i>m</i>
KB	KB	Center of buoyancy above moulded baseline		<i>m</i>
LCB	LCB	Center of buoyancy from midship	Fwd. positive	<i>m</i>
LCF	LCF	Center of floatation from midship	Fwd. positive	<i>m</i>
L_{OS}	LOS	Length overall, submerged		<i>m</i>
L_{PP}	LPP	Length between perpendiculars		<i>m</i>
L_{WL}	LWL	Length of load waterline		<i>m</i>
N_p	NOPROP	Number of propellers		
P	P	Propeller pitch in general		
PR_{mean}	PRMEAN	Propeller pitch ratio, mean		
PR_{root}	PRROOT	Propeller pitch ratio at root		
PR_{tip}	PRTIP	Propeller pitch ratio at tip		
$PR_{0.7R}$	PR070	Propeller pitch ratio at 0.7R		
RDR	RDR	Propeller rake-diameter ratio	$\frac{i_G}{D_p}$	
S	S	Wetted surface area of a ship		<i>m</i> ²
S_{BK}	SBK	Wetted surface area of bilge keels		<i>m</i> ²
T	T	Draft, moulded of ship		<i>m</i>
T_A	TA	Draft at after perpendicular		<i>m</i>
T_F	TF	Draft at forward perpendicular		<i>m</i>
T_{mean}	TMEAN	Mean draft of AP and FP		<i>m</i>
$\frac{t_o}{c}$	-	Thickness-chord ratio		
<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>

$tR_{0.7R}$	TR070	Maximum blade thickness-diameter ratio at 0.7R	$\frac{t_{m0.7R}}{D_p}$	
$t_{m0.7R}$	TM070	Maximum blade thickness at 0.7R		m
U_R	-	Resultant velocity at 0.7 radius	$nD\sqrt{J_A^2 + 0.7^2 \pi^2}$	
X_P	XP	Longitudinal propeller position	Distance between propeller plane and AP	m
Z	NPB	Number of propeller blades		
α	-	Angle of attack relative to zero-lift line		
δ	-	Taylor's diameter coefficient	$\frac{ND}{V_a}$	
θ_s	SKEW	Skew angle		deg.
λ	SCALE	Scale ratio		
Γ	-	Radial circulation distribution		
∇	DISV	Displacement volume		m^3

B-2 Resistance and Propulsion

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
C_A	CA	Incremental resistance coefficient for model-ship correlation	$\frac{R_A}{1/2 \rho S V^2}$	
C_{AA}	CAA	Air resistance coefficient	$\frac{R_{AA}}{1/2 \rho S V^2}$	
C_D	CD	Drag coefficient of propeller		
C_F	CF	Specific frictional resistance coefficient	$\frac{R_F}{1/2 \rho S V^2}$	
C_N	CN	Trial correction for rpm		
C_P	CP	Trial correction for power		
C_R	CR	Specific residuary resistance coefficient	$\frac{R_R}{1/2 \rho S V^2}$	
C_T	CT	Specific total resistance coefficient	$\frac{R_T}{1/2 \rho S V^2}$	
C_V	CV	Specific total viscous resistance coefficient	$\frac{R_V}{1/2 \rho S V^2}$	
C_W	CW	Specific wavemaking resistance coefficient	$\frac{R_w}{1/2 \rho S V^2}$	
F_D	FD	Towing force in a self-propulsion test, measured		N
F_{D_o}	FDO	Towing force in a self-propulsion test, calculated	$\frac{C_{F_M} - C_{F_S} - C_A}{1/2 \rho_M S_M V_M^2}$	

F_n	FN	Froude number		
J	ADVC	Advance coefficient of ship	$\frac{V}{ND_p}$	
J_A	ADVCA	Advance coefficient of propeller	$\frac{V_A}{ND_p}$	
K_Q	KQ	Torque coefficient	$\frac{Q}{\rho N^2 D_p^5}$	
K_T	KT	Thrust coefficient	$\frac{T}{\rho N^2 D_p^4}$	
k	C3	Three dimensional form factor	$\frac{C_V - C_F}{C_F}$	
k_p	KP	Blade roughness of a propeller		m
k_s	KS	Hull roughness of a ship		m
N	N	Rate of revolution		$revs/sec$
P_B	PB	Brake power		KW,PS
P_D	PD	Delivered power at propeller		KW,PS
P_E	PE	Effective power		KW,PS
Q	Q	Torque		$N - m$
R_A	RA	Model-ship correlation allowance		N
R_{AA}	RAA	Air resistance		N
R_F	RF	Frictional resistance	Due to fluid friction on surface	N
R_n	RN	Reynolds number		
R_R	RR	Residuary resistance	$R_T - R_F$	N
R_T	RT	Total resistance	Total towed resistance	N
R_V	RV	Total viscous resistance		N
R_W	RW	Wavemaking resistance	Due to formation of surface waves	N
T	T	Thrust		N
t	THDF	Thrust deduction fraction	$\frac{T - R_T}{T}$	
V	V	Speed of ship		m/sec $knot$
V_A	VA	Speed of advance of propeller	Speed in relation to water flow	
w	WFT	Taylor wake fraction	$\frac{V - V_A}{V}$	
ΔC_F	DCF	Roughness allowance		

ΔC_{FC}	DCFC	Trial correction for C_F		
η_D	ETAD	Propulsive efficiency or quasi-propulsive coefficient	$\frac{P_E}{P_D}$	
η_H	ETAH	Hull efficiency	$(1-t)/(1-w)$	
η_O	ETAO	Propeller open-water efficiency		
η_R	ETAR	Relative rotative efficiency		
ν	NU	Coefficient of kinematic viscosity		m^2/sec
ρ	RHO	Mass density		kg/m^3

Subscript M : Value for model ship or propeller
Subscript S : Value for full scale ship or propeller
Subscript T : Value from thrust-identity
Subscript O : Value for propeller open-water characteristics

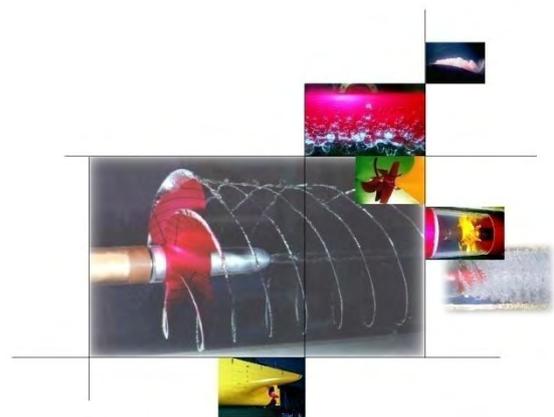
B-3 Wake Survey

<u>Symbol</u>	<u>C.Symbol</u>	<u>Title</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
a_k	A	Fourier cosine coefficients		
a_0	A0	Fourier coefficient		
b_k	B	Fourier sine coefficients		
c_k	C	Harmonic amplitude		
r	R	Radial coordinate		
V	V	Velocity of undisturbed flow or speed of ship model		m/sec
V_i	VI	Nondimensional velocity components		
V_M	VM	Mean velocity at the radius r		m/sec
V_r	VR	Radial velocity component		m/sec
V_{TM}	VTM	Mean velocity at the propeller plane		m/sec
V_t	VT	Tangential velocity component		m/sec
V_{tr}	VTR	Transverse component of velocity vector		m/sec
V_X	VX	Axial velocity component		m/sec
w_N	WN	Froude wake fraction	$\frac{V - V_A}{V_A}$	
θ	ANG	Position angle		deg.
ϕ	PHI	Phase angle		deg.

Subscript i : Axial, radial or tangential velocity components

PART II

CAVITATION TESTS



List of tables

- | | |
|---------|---|
| Table 1 | Principal Particulars of the Propeller |
| Table 2 | Conditions for Cavitation Test(KP1069) |
| Table 3 | The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069 in the Load Condition at Design Speed |
| Table 4 | The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069 in the Load Condition at Design Power |

List of figures

Figure 1	Drawing of KP1069 Propeller	.....	F1
Figure 2	Iso-Axial Velocity Curves of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel (Design Draft)	.....	F2
Figure 3	Comparison of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel with the Wake Measured in the Towing Tank (Design Draft)	.....	F3
Figure 4	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Speed; Suction Side)	.....	F4
Figure 5	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Speed; Pressure Side)	.....	F5
Figure 6	Photographs of the cavitation patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Speed; Suction Side)	.....	F6
Figure 7	Photographs of the cavitation patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Speed; Pressure Side)	.....	F7
Figure 8	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Power; Suction Side)	.....	F8
Figure 9	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Power; Pressure Side)	.....	F9
Figure 10	Photographs of the cavitation patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Power; Suction Side)	.....	F10
Figure 11	Photographs of the cavitation patterns of KP1069 Propeller (Load Condition at Design Power; Pressure Side)	.....	F11
Figure 12	The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069 (Load Conditoin at Design Speed)	.....	F12
Figure 13	The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069 (Load Conditoin at Design Power)	.....	F13

1. Introduction

캐비테이션 터널에서 190 톤 어선 프로펠러(KP1069)의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측시험에 대한 결과를 Part II 에서 설명하고 있다. 모형시험은 어선의 항주상태에서 설계선속(13knots) 및 설계시 사용한 엔진의 마력조건(NCR 1058.9kW x 300rpm) 두 가지 경우에 대하여 수행하였으며, 이때 사용한 반류 스크린은 항주상태의 설계선속의 반류를 사용하였다. 프로펠러 설계를 위한 해상여유는 15%를 기준으로 하였으며, 축전달효율은 96%를 사용하였다.

반류 스크린은 당 연구원의 표준기법을 사용하여 생성하였으며, 어선 프로펠러의 캐비테이션 성능을 파악하기 위한 모형시험은 당 연구원의 중형 캐비테이션 터널(시험부; 0.6 m × 0.6 m × 2.6 m; width × height × length)에서 수행하였다.

변동압력의 경우 주어진 날개끝 간극에서 시험을 수행하여야 하지만, 본 어선의 경우 당 연구소에 보유한 실험시설의 한계치에 가까운 날개끝 간극을 가지고 있다. 또한 변동압력의 값이 PHVC(Propeller Hull Vortex Cavitation)에 의하여 매우 불규칙하게 계측되어 변동압력의 계측지점을 실험시설의 최대치로 확장하여 계측하였다. 따라서 변동압력의 경우 경향 파악을 위한 것이다.

Hull Form (KS1354)

Wake Screen Fabrication : Design Draft(순항)

Propeller (KP1069, w/ 15% Sea Margin)

Cavitation Observation : 설계선속 및 설계마력

Pressure Fluctuation Measurement Test : 설계선속 및 설계마력

2. Propeller Geometry

The principal particulars of the design propeller and the propeller drawing are presented in tables and figures as follows:

Model Propeller Number	KP1069
Principal Particulars of the Propeller	Table 1
Propeller Drawing	Fig. 1

Table 1 Principal Particulars of the Propeller

Model Propeller Number	KP1069
Scale Ratio, λ	9.6
Full-Scale Propeller Diameter, D_s	2.40 m
Model Propeller Diameter, D_m	250.0 mm
Hub-Diameter Ratio, d_H/D	0.170
Number of Blades, Z	4
Mean Pitch-Diameter Ratio, $(P/D)_{mean}$	0.5761
Expanded Area Ratio, A_E/A_O	0.5905
Chord-Diameter Ratio at 0.7R, $C_{0.7R}/D$	0.3385
Skew Angle Extent, θ_s	19.15°
Rake-Diameter Ratio at Tip	0.0 mm
Blade Section Type	NACA66
Propeller Rotation Direction	R.H.
Material of Model Propeller	Aluminum

3. Tests Descriptions

Wake reproduce results are presented in tables and figures as follows:

(a) Hull Form (KS1354)

Wake Reproduce Results	Design Draft
Measured Axial Velocity Contour in Cavitation Tunnel	Fig. 2
Measured Axial Velocity along the Circumferential Direction	Fig. 3

In Fig. 3, the reproduced velocity distributions along the circumferential direction at various radial positions are compared with the corresponding one measured in the KORDI towing tank. The reproductions are considered acceptable.

The cavitation test conditions are determined by the torque identity method from the results of resistance, self-propulsion and open-water test in the towing tank. The blade angular position of a key blade is measured from the vertically upward position in clockwise direction when the propeller is viewed from afterward. The test items and conditions are as follows:

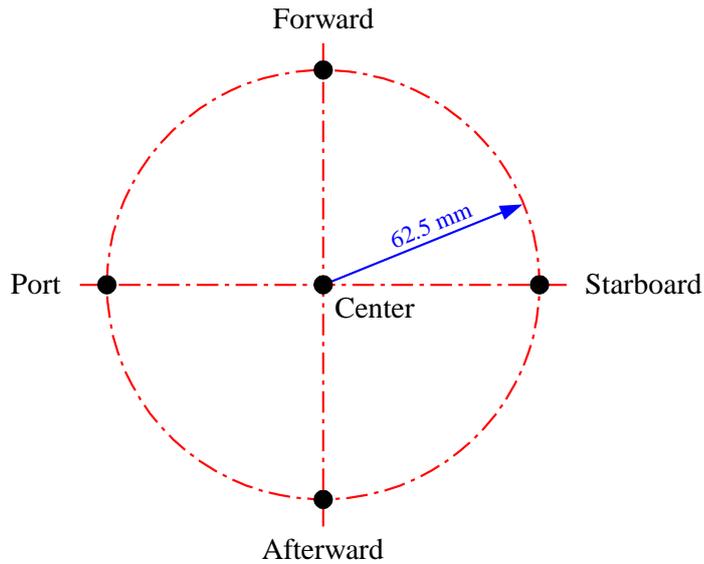
(b) Cavitation Observations

Propeller	KP1069	
Load Condition	설계선속	설계마력
Test Condition	Table 2	
Suction Side Cavitation Sketch	Fig. 4	Fig. 8
Suction Side Cavitation Photographs	Fig. 5	Fig. 9
Pressure Side Cavitation Sketch	Fig. 6	Fig. 10
Pressure Side Cavitation Photographs	Fig. 7	Fig. 11

(c) Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation

Propeller	KP1069	
Load Condition	설계선속	설계마력
Test Condition	Table 2	
Pressure Fluctuation Amplitude	Table 3	Table 4
	Fig. 12	Fig. 13

The pressure fluctuation was measured on a flat plate above the propeller. The XTM-190-25A pressure transducers of 25 psi (172.4 kPa) are used to pick up the pressure values. The five pick-up positions on the plate are depicted below.



Location of five pressure transducers on the flat plate

Using the method recommended by ITTC, the full-scale pressure fluctuation amplitudes can be predicted from the model scale measurement according to the following formula,

$$P_{si} = P_{mi} \times \frac{\rho_s}{\rho_m} \left(\frac{n_s}{n_m} \right)^2 \left(\frac{D_s}{D_m} \right)^2$$

Table 2 Conditions for Cavitation Test

Model Propeller Number	KP1069	
Load Condition	Design draft (Target Speed)	Design draft (Target Power)
Test Date	May 29, 2012	May 29, 2012
Water Temperature	20.5°C	20.5°C
Atmospheric Pressure	100.94 kPa	100.94 kPa
Full-Scale Propeller Brake Power	1154.2 PS	1439.6 PS
Full-Scale Propeller Rotational Speed	289.27 rpm	308.63 rpm
Full-Scale Propeller Shaft Submergence	2.11m	2.11m
Dynamometer	J25	J25
Tip Clearance	0.2136m	0.2136m
Model Propeller Rotational Speed, n_m	25.0rps	25.0rps
Advance Coefficient, J_A	0.4150	0.4083
Thrust Coefficient, K_T	0.1191	0.1219
Cavitation Number, $\sigma_{n0.7R}$	1.6367	1.4378
Reynolds Number, R_n	1.19×10^6	1.19×10^6
Air Content, α/α_s	62.2%	62.2%

4. Summery

Based on the cavitation observation and the pressure fluctuation measurement tests, the following characteristics can be deduced.

(a) Cavitation Observations

Test Item	Load Condition at Design Draft(Target Speed)	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Sheet Cavitation
Range of Blade Angle	-10° ~ 60°	30° ~ 340°
Maximum Extent	13% at 20°	2% at 250°

Test Item	Load Condition at Design Draft(Target Power)	
	Suction Side	Pressure Side
Type of Cavitation	Sheet Cavitation	Sheet Cavitation
Range of Blade Angle	-10° ~ 65°	30° ~ 340°
Maximum Extent	15% at 20°	3% at 250°

(b) Predicted Full-Scale Peak Pressure Fluctuation at Maximum Position

Load Condition	Target Speed	Target Power
Harmonic Component	1 st Blade Frequency	2 nd Blade Frequency
Amplitude	19.493kPa	3.434kPa
Location	Center	Center

Table 3 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069 in the Load Condition at Target Speed

Psi (kPa)	Port	Center	Starboard	Forward	Afterward
P _{s1}	0.447	1.189	1.137	0.905	0.848
P _{s2}	1.622	2.317	1.842	1.771	1.845
P _{s3}	1.545	2.231	1.872	1.845	1.956
P _{s4}	1.418	2.098	2.021	1.493	1.950

Table 4 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069 in the Load Condition at Target Power

Psi (kPa)	Port	Center	Starboard	Forward	Afterward
P _{s1}	0.635	1.653	1.588	1.073	1.219
P _{s2}	2.399	3.434	2.722	2.586	2.751
P _{s3}	2.140	2.950	2.679	2.564	2.793
P _{s4}	1.938	2.660	2.796	2.005	2.416

FIGURES

	190톤 어선	May 29, 2012
	190톤 어선	

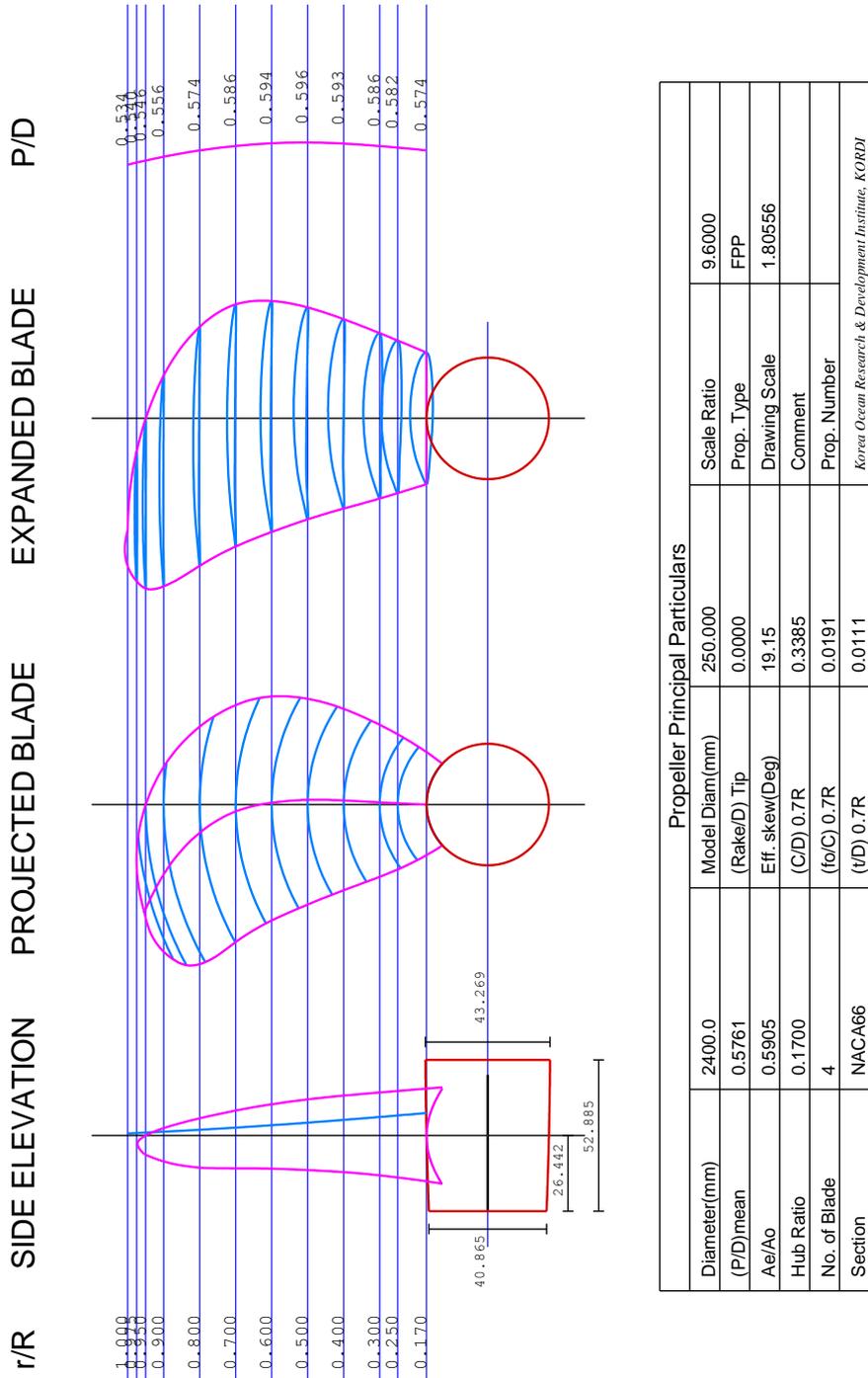


Figure 2

Iso-Axial Velocity Curves of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel

May 29, 2012

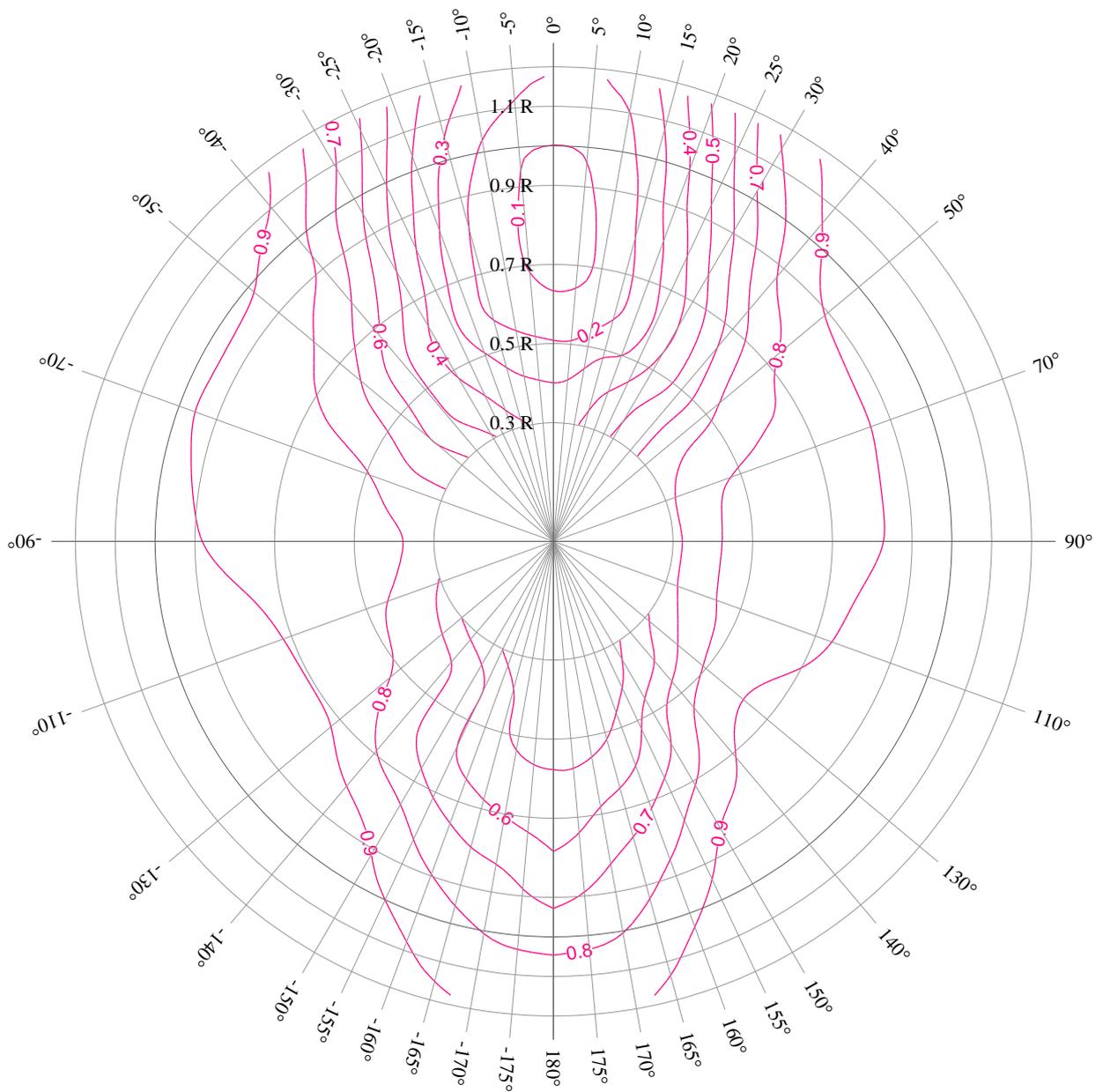
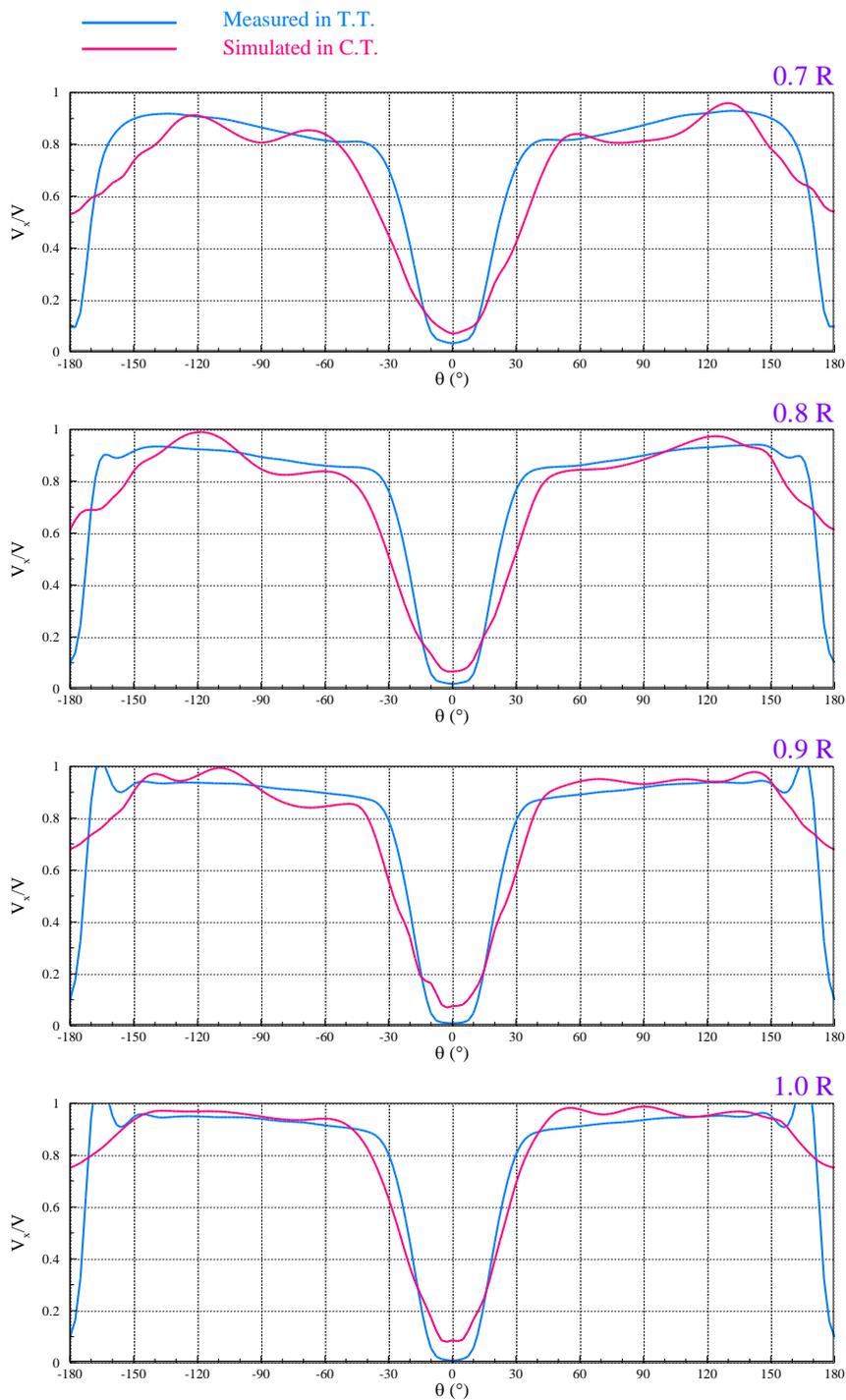
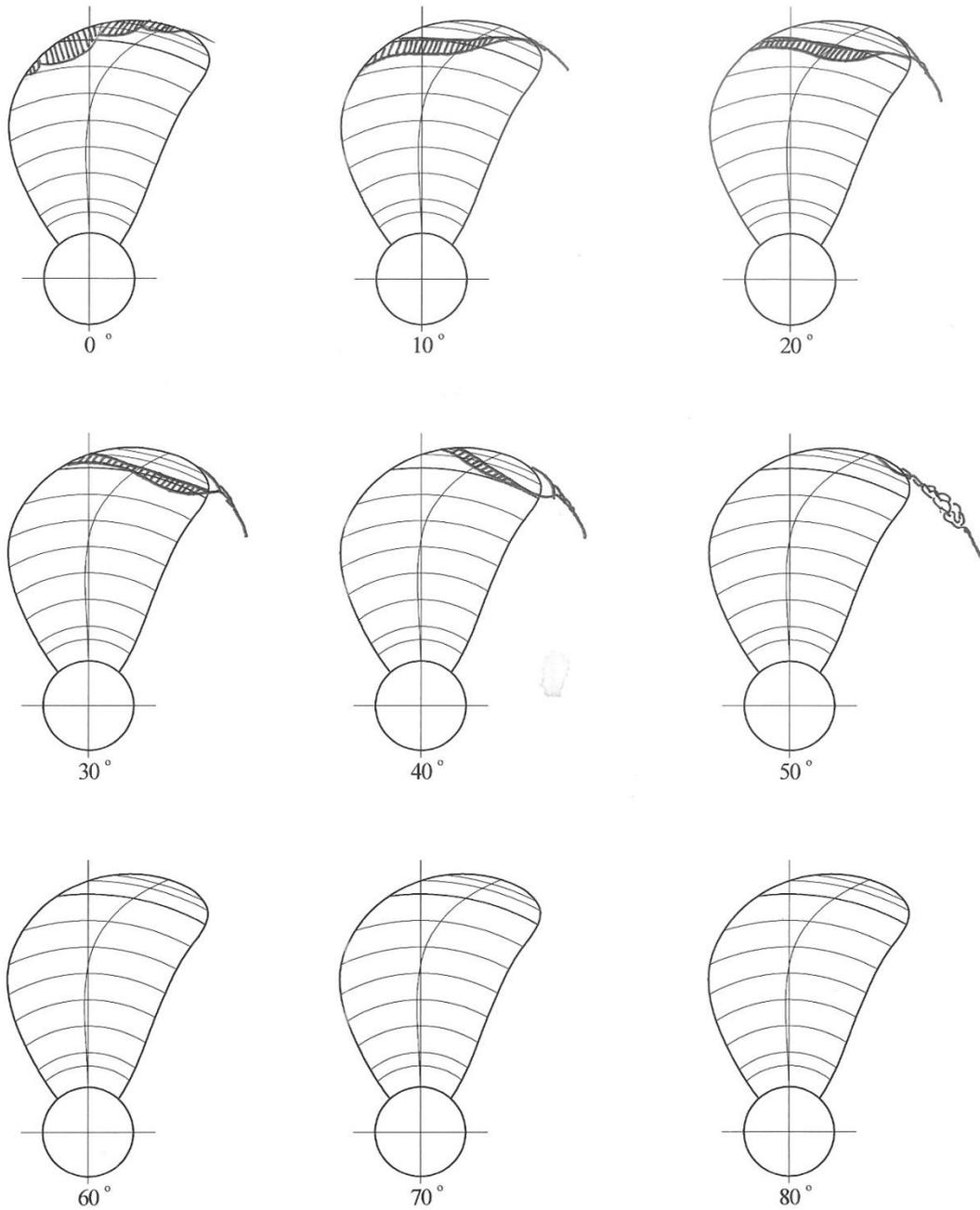


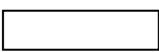
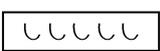
Figure 3

Comparison of the Wake Reproduced in the Cavitation Tunnel with the Wake Measured in the Towing Tank

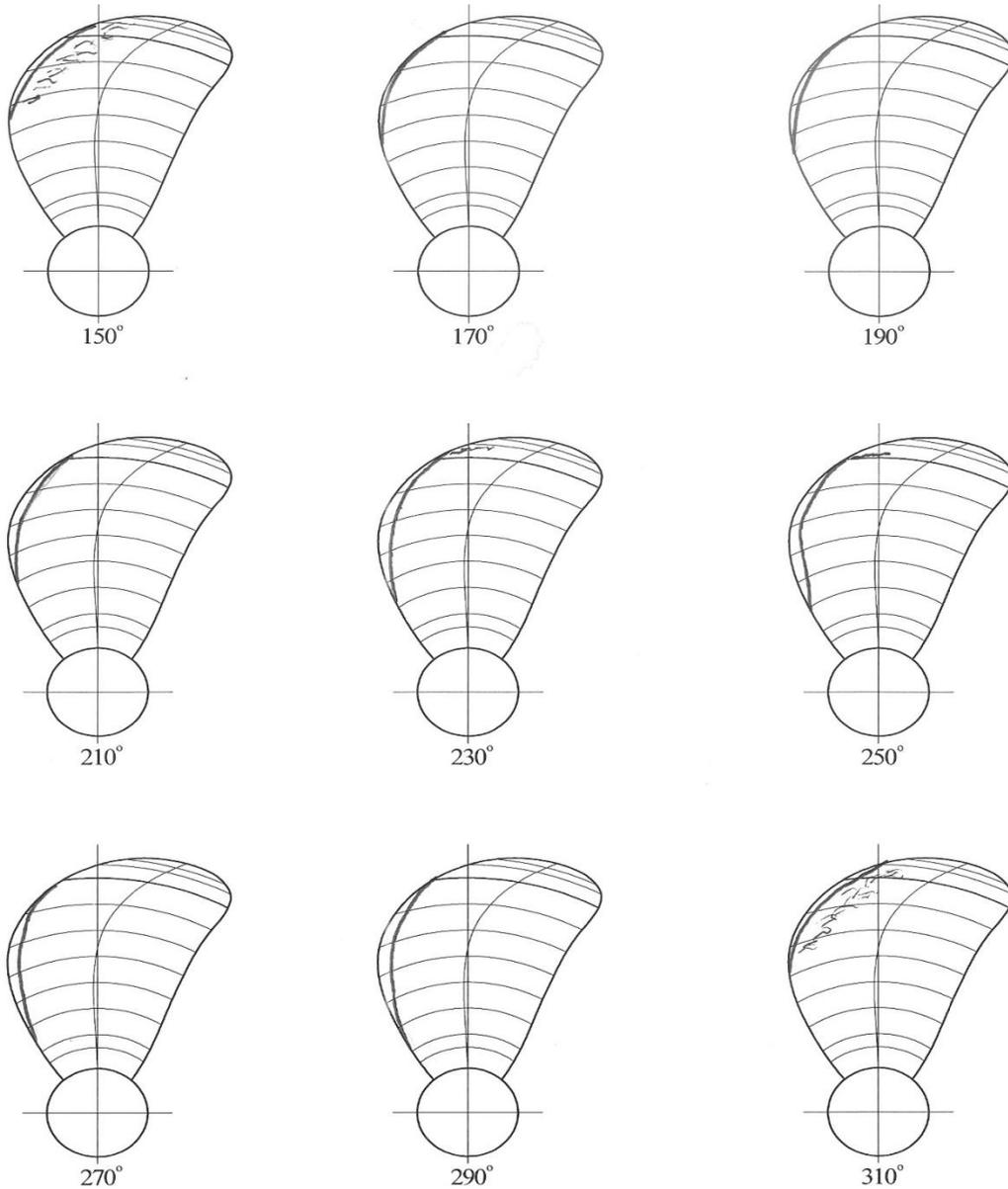


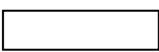
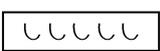
	190톤 어선	Load Condition at Design Draft
		Target Speed
		Suction Side
Figure 4	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	



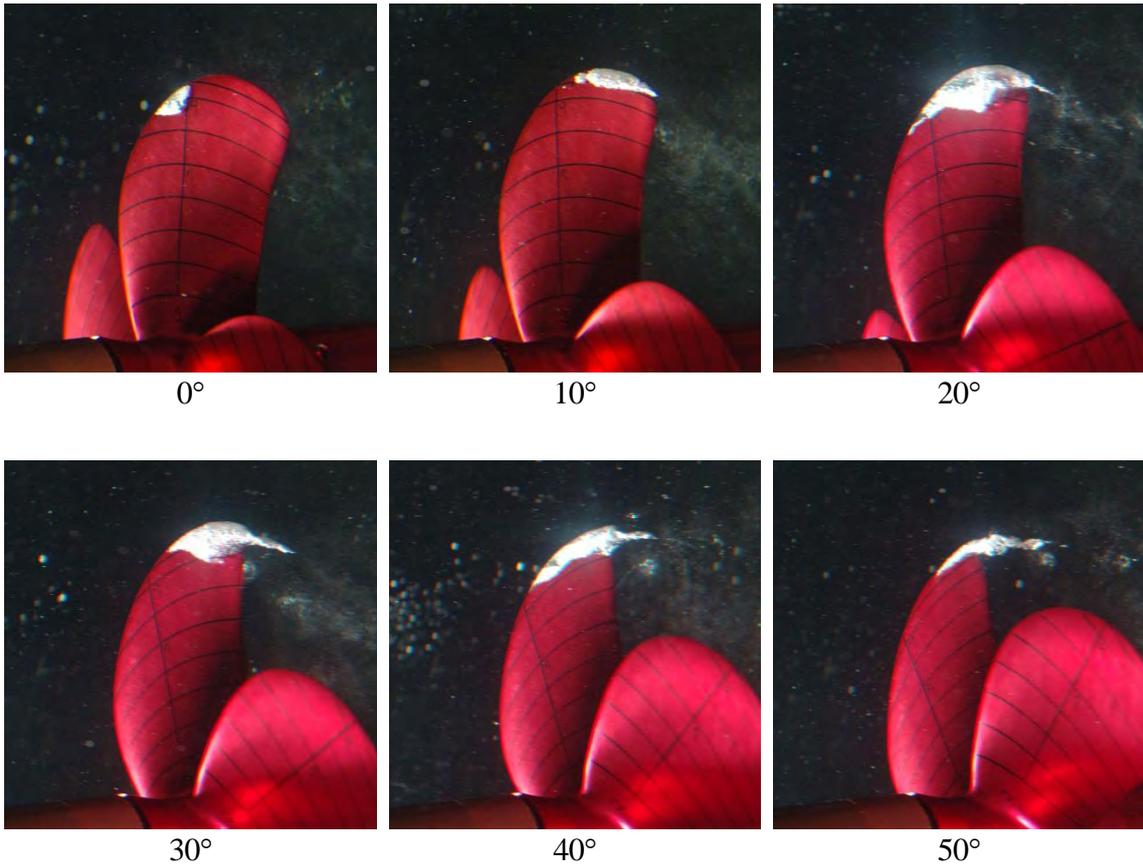
	Continuous type of the sheet cavitation		Bubble cavitation
	Intermittent type of the sheet cavitation		Thick sheet cavitation

	190톤 어선	Load Condition at Design Draft
		Target Speed
		Pressure Side
Figure 5	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	

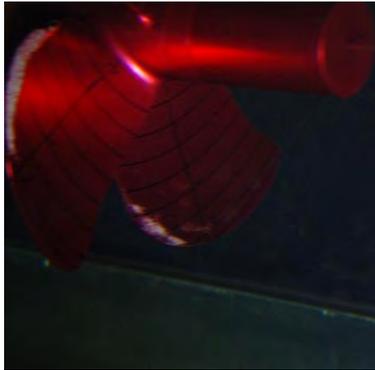


	Continuous type of the sheet cavitation		Bubble cavitation
	Intermittent type of the sheet cavitation		Thick sheet cavitation

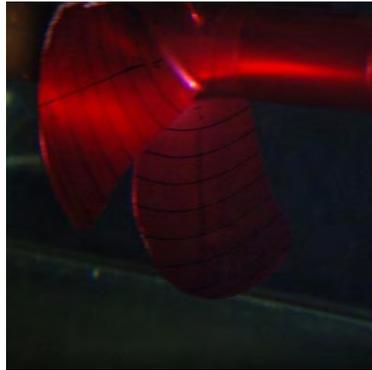
KORDI	190톤 어선	Target Speed
		May 29, 2012
Figure 6	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	Suction Side



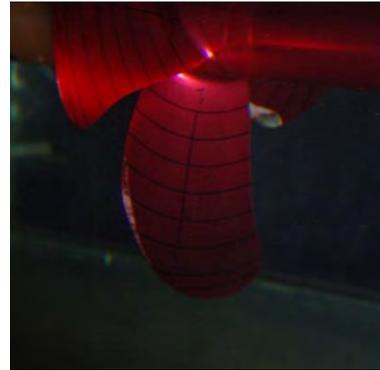
	190톤 어선	Target Speed
		May 29, 2012
Figure 7	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	Pressure Side



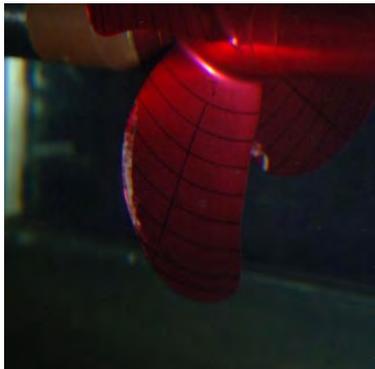
150°



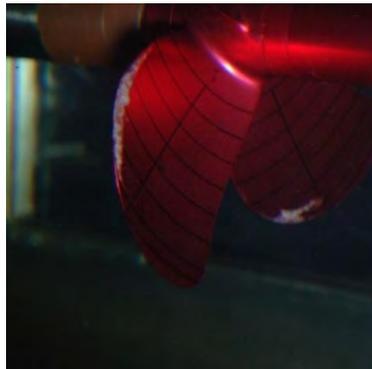
170°



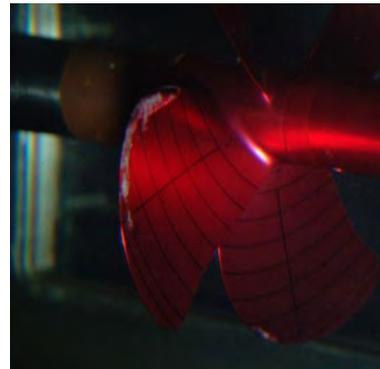
190°



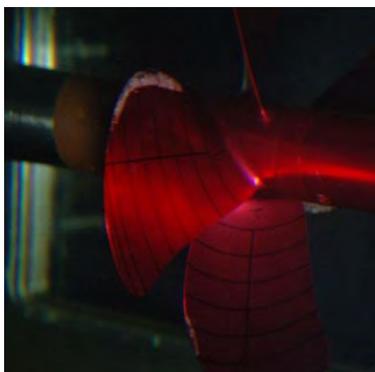
210°



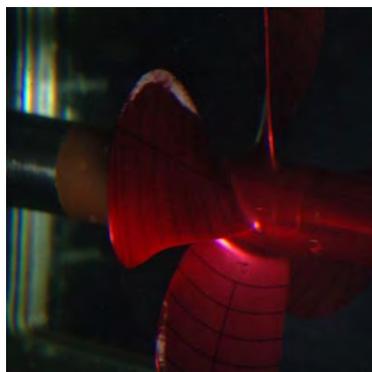
230°



250°



270°

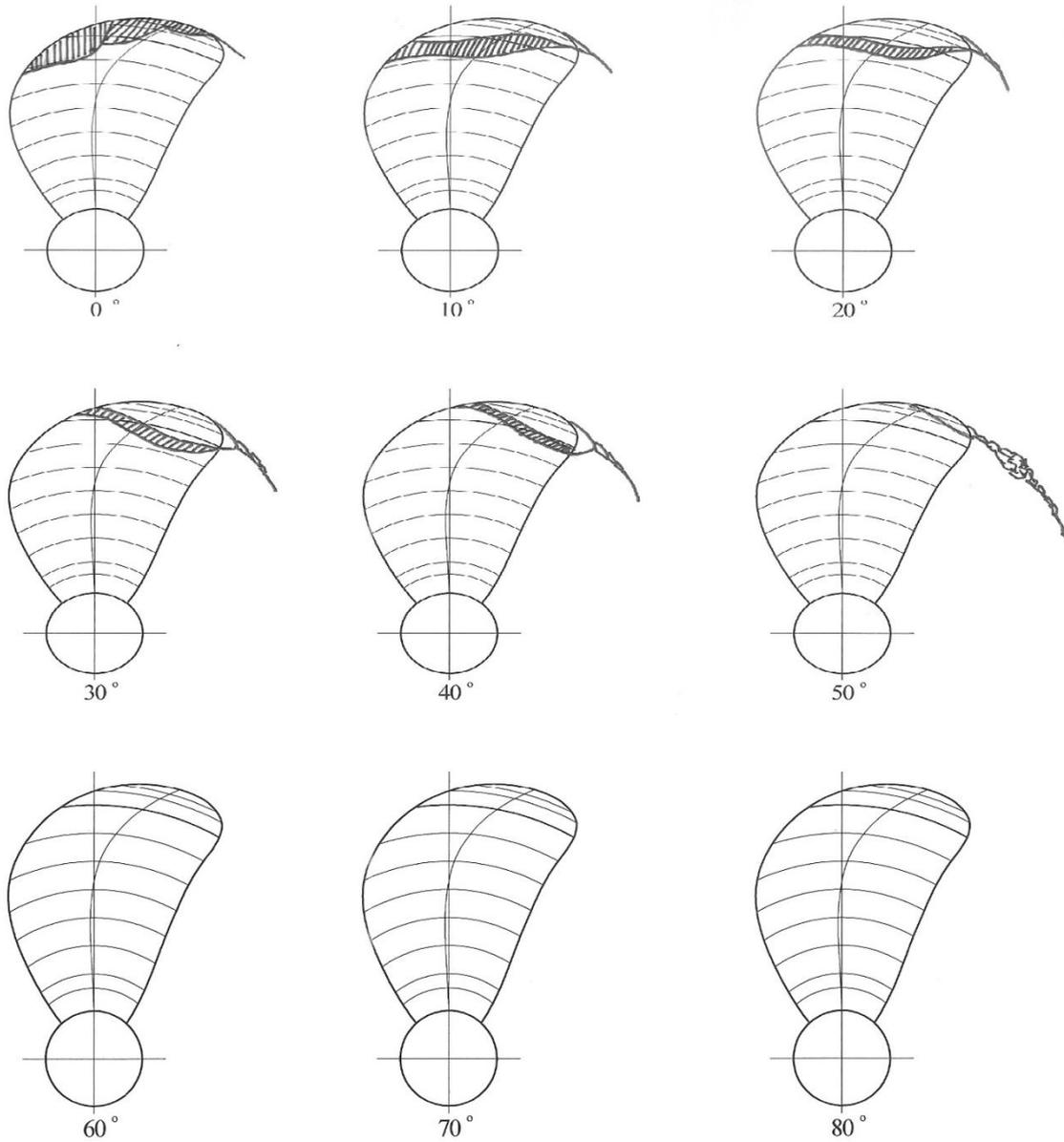


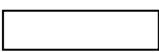
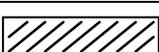
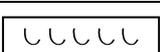
290°



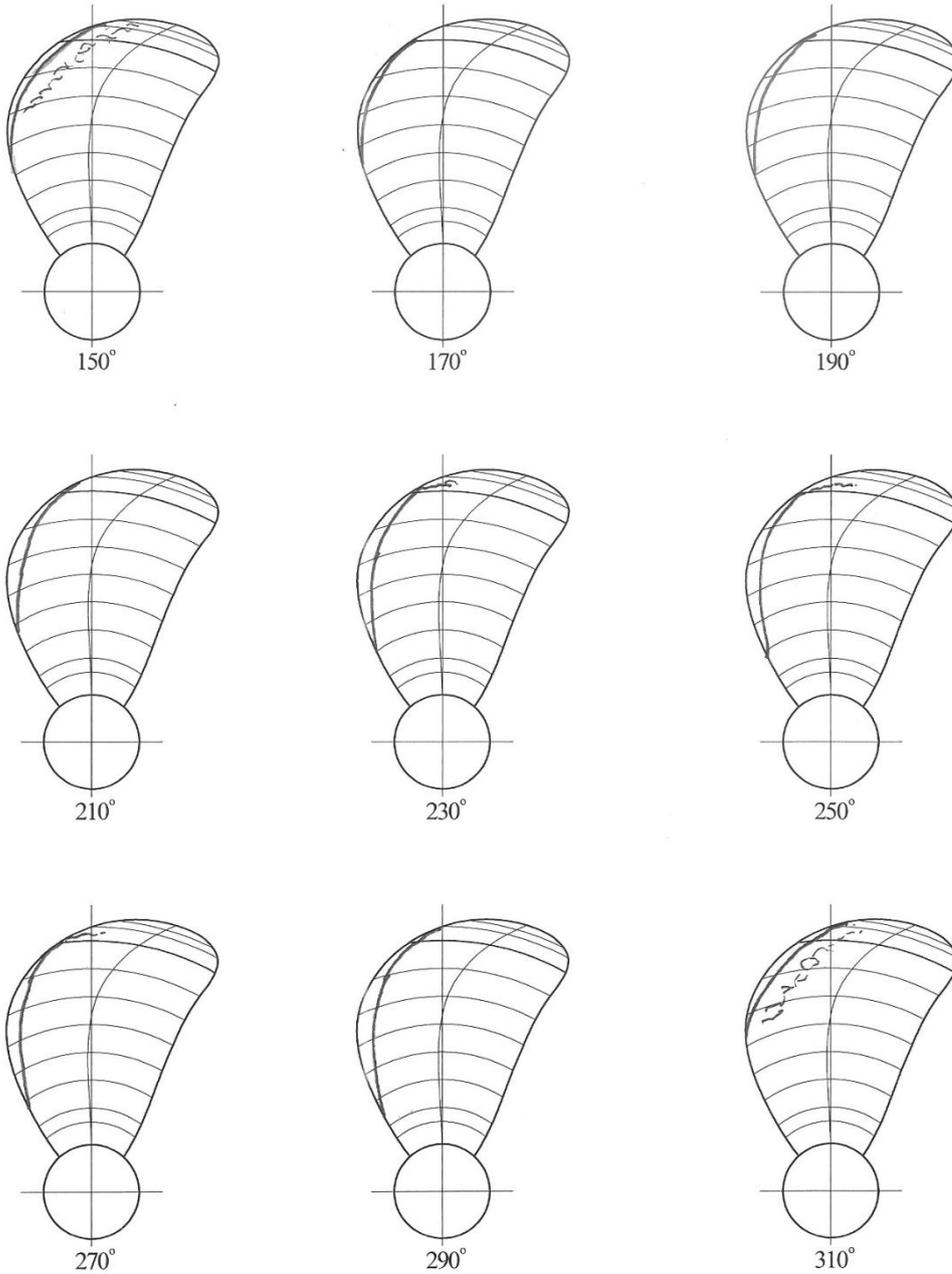
310°

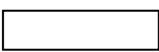
	190톤 어선	Target Power
		May 29, 2012
Figure 8	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	Suction Side



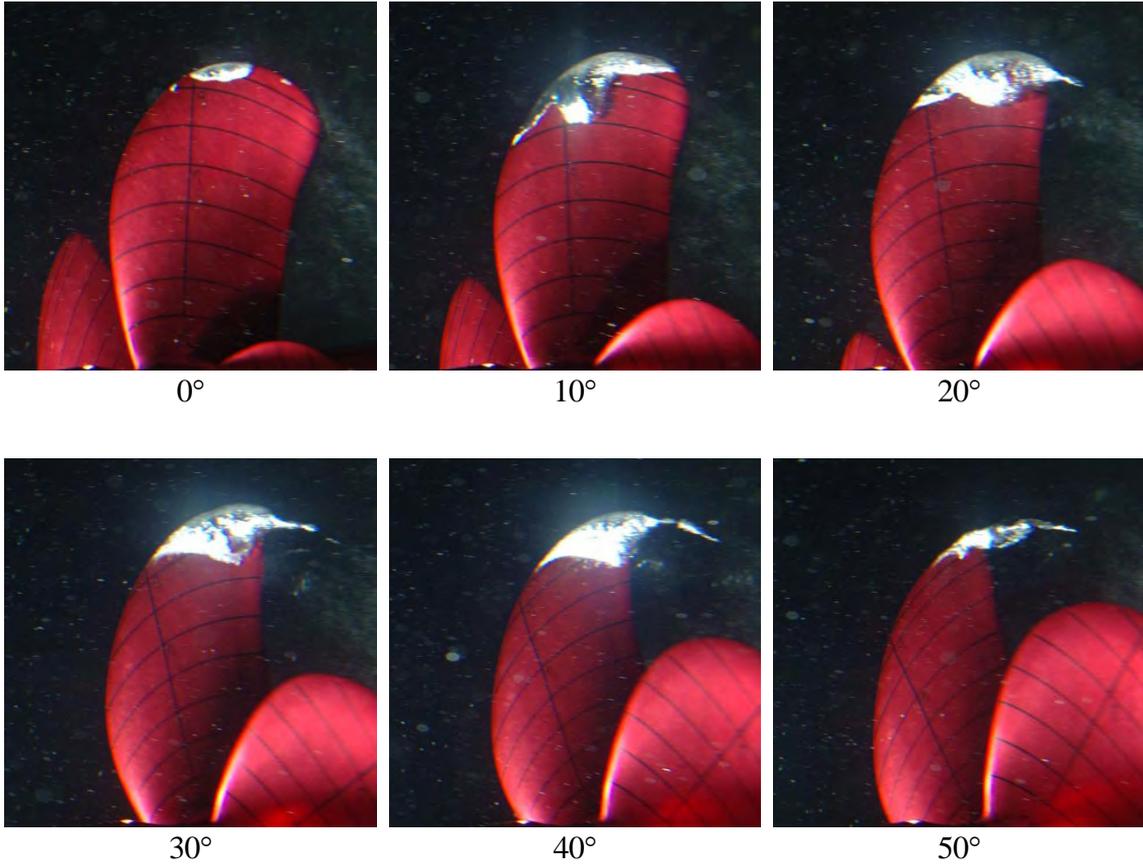
	Continuous type of the sheet cavitation		Bubble cavitation
	Intermittent type of the sheet cavitation		Thick sheet cavitation

	190톤 어선	Target Power
		May 29, 2012
Figure 9	Sketches of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	Pressure Side

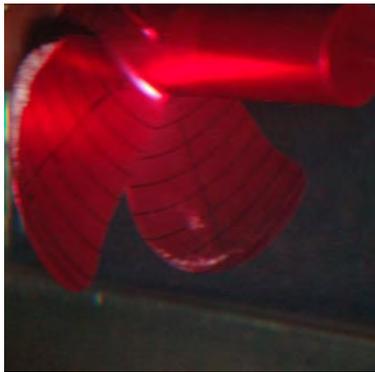


	Continuous type of the sheet cavitation		Bubble cavitation
	Intermittent type of the sheet cavitation		Thick sheet cavitation

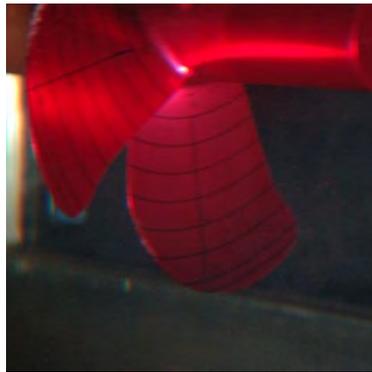
	190톤 어선	Target Power
		May 29, 2012
Figure 10	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	Suction Side



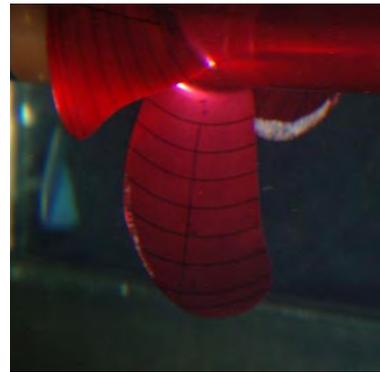
	190톤 어선	Target Power
		May 29, 2012
Figure 11	Photographs of the Cavitation Patterns of KP1069 Propeller	Pressure Side



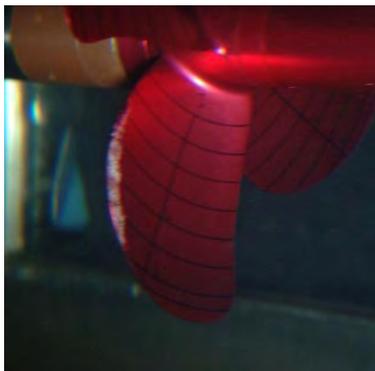
150°



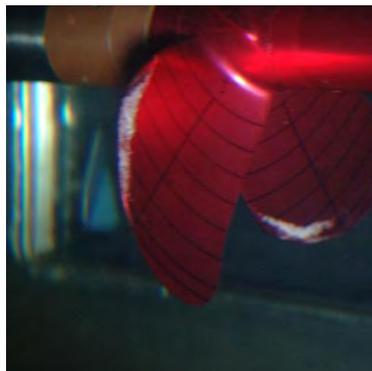
170°



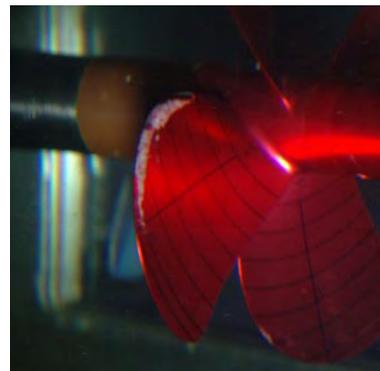
190°



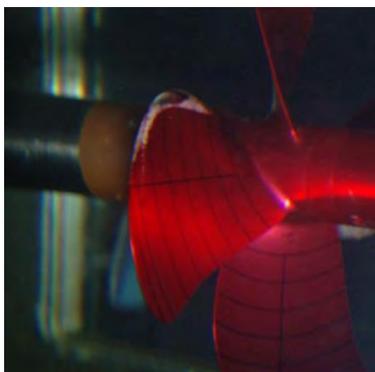
210°



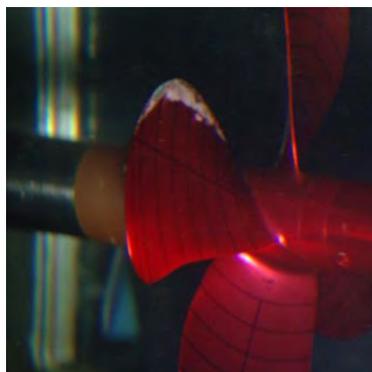
230°



250°



270°



290°



310°

Figure 12	190톤 어선 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069	Load Condition at Design Draft
		May 29, 2012
		Target Speed

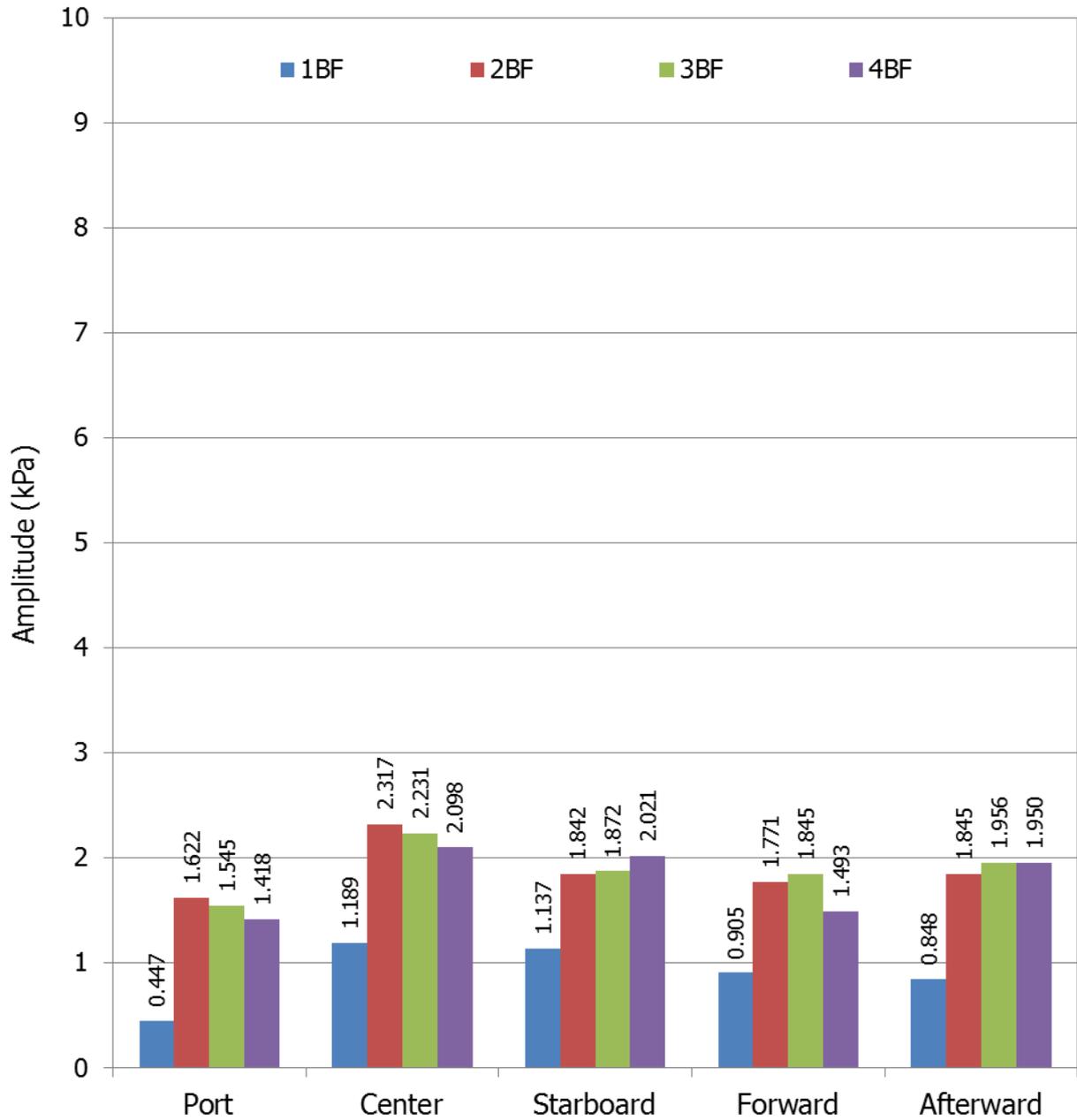
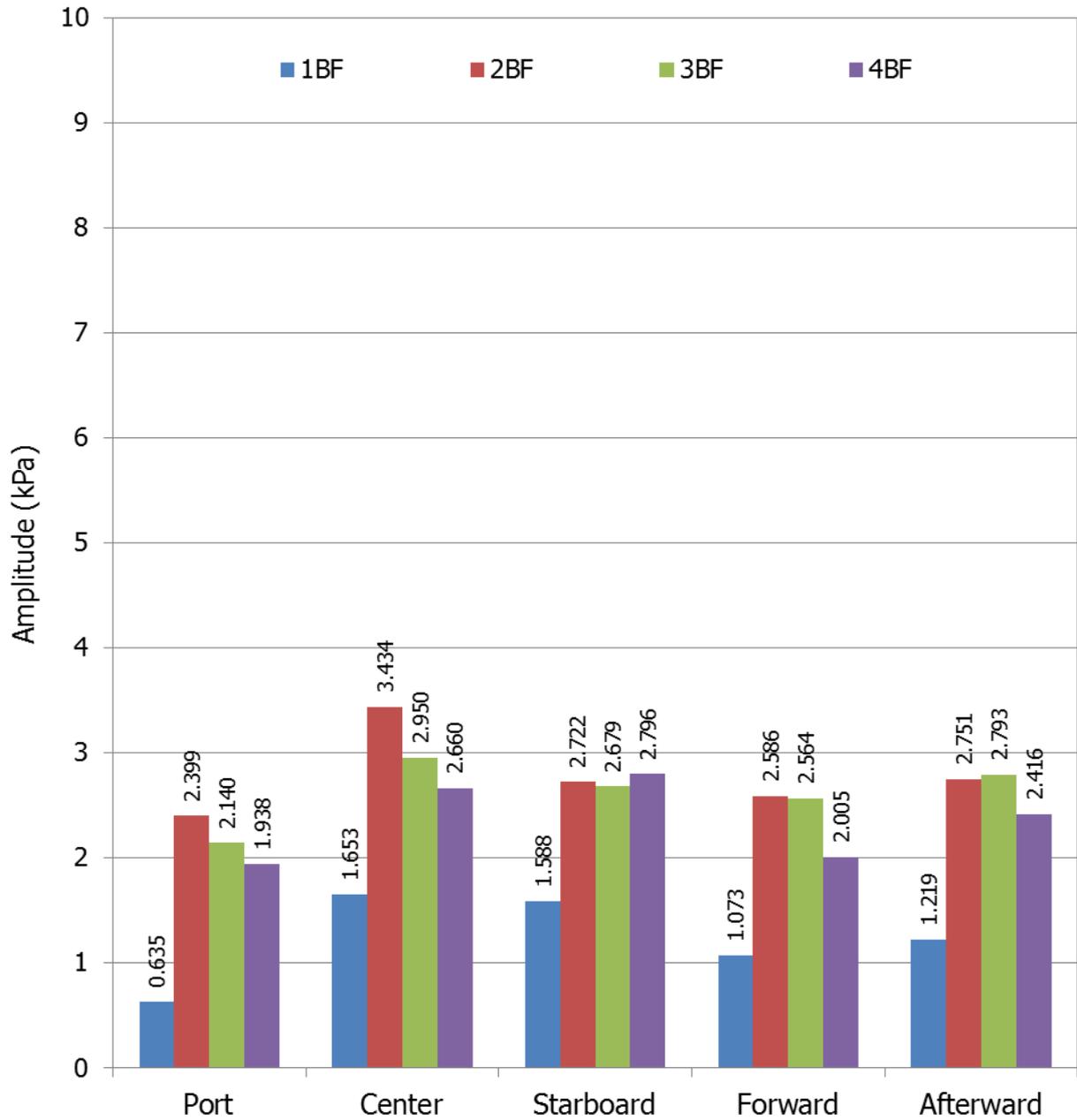


Figure 13	190톤 어선 The Predicted Full-Scale Pressure Fluctuation Amplitudes for KP1069	Load Condition at Design Draft
		May 29, 2012
		Target Power



APPENDIX

Nomenclature

■ Nomenclature

<u>Symbol</u>	<u>Definition</u>
A_E/A_O	Expanded area ratio
C	Chord length of propeller blade sections
D	Propeller diameter
D_m	Diameter of a model propeller
D_s	Diameter of a full-scale propeller
d_H/D	Hub-diameter ratio
h	Depth of submergence of the propeller shaft
J_A	Advance ratio based on propeller inflow velocity, V_A/nD
K_T	Propeller thrust coefficient, $T/\rho n^2 D^4$
n	Number of revolution of a propeller per second, <i>rps</i>
n_m	Number of revolution of a model propeller per second
n_s	Number of revolution of a full-scale propeller per second
N	Number of revolution of a propeller per minute, <i>rpm</i>
p_o	Static pressure for calculation of a cavitation number
p_v	Vapor pressure of sea water or fresh water
P_{mi}	i -th harmonic component of pressure fluctuation amplitude of model test
P_{si}	i -th harmonic component of pressure fluctuation amplitude of full-scale ship
R	Propeller radius
R_n	Reynolds number, based on ship speed & chord-length of blade section at $0.7R$
t_c	Tip clearance from propeller tip to hull surface vertically
V_A	Mean axial velocity of onset flow at the propeller plane
V_S	Ship speed
w	Taylor wake fraction
x, y, z	Cartesian coordinate system, x positive downstream from the propeller plane, and y vertically upward and z portside from the propeller axis
Z	Number of blades
α/α_s	Air content ratio
θ	Angular position of the reference line of the key blade of a propeller, measured from a vertically upward position in a propeller rotation direction
λ	Scale ratio
ρ	Fluid density
ρ_m	Density of fresh water
ρ_s	Density of sea water
$\sigma_{n0.7R}$	Cavitation number at $y = 0.7R, z = 0$ based on $n, (p_o - p_v)/\frac{1}{2}\rho n^2 D^2$

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 수산실용화기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 수산실용화기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.