大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 37 卷 第 1 號 2000年 2月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 37, No. 1, February 2000

2차원 날개단면의 앞날 형상 변화에 따른 캐비테이션 특성 연구

송인행*, 안종우*, 문일성*, 김기섭*

Influence of the Leading Edge Shape of a 2-Dimensional hydrofoil on Cavitation Characteristics

by

I.-H. Song*, J.-W. Ahn*, I.-S. Moon* and K.-S. Kim*

요 약

고속 프로펠러를 대상으로 캐비테이션 발생 특성에 가장 큰 영향을 미치는 2차원 날개단면의 앞날 형상에 관한 연구를 수행하였다. 앞날 주위의 유동장을 해석하기 위하여 비압축성 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 유한체적법(FVM)으로 차분하는 수치해석기법을 사용하였다. 또한 패널법을 이용하여 캐비테이션 발생두께를 예측하였다. 예측된 결과들은 실험결과와 비교해서 타당함을 알 수 있었으며, 이 결과를 이용하여 새로운 단면을 설계하였다.

Abstract

In order to improve cavitation characteristics for a high-speed propeller, leading edge shape of a 2-D hydrofoil is investigated numerically and experimentally. For flowfield analysis around the leading edge, the incompressible Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) equation is solved using the standard k-ε turbulence model and a finite volume method(FVM). The cavitation thickness, which is occurred on hydrofoil surface, is predicted using the panel code. It is shown that the calculation codes predict the experimental trend fairly well. From these results, new hydrofoils are designed

접수일자 : 1999년 5월 25일, 재접수일자 : 1999년 8월 6일
* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소 해양운송시스템연구센터

1. 서 언

고속선 프로펠러에서 발생되는 캐비테이션은 상선 프로펠러와 달리 날개 끝 부분에서만 발생하는 것이 아니고 허브 근처를 포함한 거의 전 반경에서 발생할 수 있다[1]. 이런 관점에서 캐비테이션의 제어가 최고의 설계목표가 되는 고속 프로펠러에서는 캐비테이션의 감소대책 중 가장 근본적인 2차원 날개단면의 성능향상도 함께 고려하여야 한다. 일반적으로 캐비테이션을 억제할 수 있도록 개발된 날개단면에서는 얇은층(sheet) 캐비테이션이 일정부분 억제되나, 소음에 큰 영향을 미치는 구름(cloud) 캐비테이션 및 기포(bubble) 캐비테이션 등이 발생할 가능성도 높다[2, 3]. 따라서 본 연구에서 고속선 프로펠러를 대상으로 캐비테이션 발생 특성에 가장 큰 영향을 미치는 2차원 날개단면의 앞날 형상에 관한 연구를 수행하였다.

앞날형상 변화에 따른 캐비테이션 특성 파악을 위하여 기존의 고속 프로펠러에 적합한 날개단면들을 선정하여 캐비테이션 성능을 예측하였으며, KRISO 캐비테이션 터널에서 캐비테이션 특성 및 소음실험을 수행하였다[4].

캐비테이션 발생에 주요 원인인 날개 표면에 압력분포를 계산하기 위하여 보통 포텐셜 이론이 널리 쓰이고 있다. 그러나, 앞날 주위의 압력분포는 난류·점성유동에 영향을 많이 받기 때문에 유동장을 해석하기 위하여 비압축성 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 유한체적법(FVM)으로 차분하는 수치해석기법을 사용하였다. 이와같은 수치해석 프로그램은 표준 k-ε 난류모형을 이용하여 전유동장을 난류로 가정하고, 날개표면에 많은 계산점을 주기 위하여 O-type 격자계를 사용하는데, 검증된 실험자료 등을 이용하여 그 성능이 확인된 바 있다[5,6]. 날개단면의 각각의 받음각에서 표면압력분포 및 양력-항력 특성이 계산결과로서 얻어졌으며, 앞날 부근에 최소 압력값을 이용하여 캐비테이션 초기발생 특성을 추정하였다. 또한 구름 캐비테이션의 발생원인을 파악하기 위하여 패널법을 이용하여 캐비테이션 발생두께를 예측하였다[7,8].

난류·점성유동장 수치해석 프로그램(이후로는 RANS code)은 캐비테이션 초기발생 특성을 정성적으로 예측할 수 있다고 판단되며, 소음 수준을 크게 높이는 기포 캐비테이션의 예측도 가능할 것으로 판단된다. 또한 패널법을 이용한 캐비테이션 발생두께 예측 프로그램도 정성적으로 타당한 결과를 주는 것으로 나타났다. 3종의 날개단면에 대한 이와같은 계산결과와 캐비테이션 발생특성에 관한 실험결과를 분석하여 캐비테이션 특성 및 효율이 우수한 새로운 날개단면을 설계하였다.

2. 기존 날개단면의 성능평가

기존 고속선 날개단면으로 먼저 NACA16 + a=0.8 평균선 분포(KH52)를 선정하였으며, 소련의 노브로시스크호 항모 프로펠러의 날개단면(KH53)도 함께 선정되었다. 이들 단면에 대한 캐비테이션 초기발생 특성이 RANS Code를 통하여 추정되었으며, 이를 바탕으로 KH54 단면이 설계되었다. 이들 단면들은 2차원 유동의 확실한 재현 및 소음원을 최소화하기 위하여 스팬(span)을 600㎜로 제작하여 캐비테이션 특성실험을 수행하였다[4]. 제작된 3 종의 프로펠러 날개단면의 앞날 형상을 Fig.1에 나타난다.

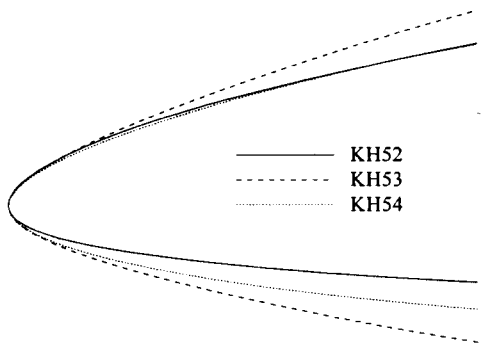

Fig.1 Leading edge shape of the existing hydrofoils

여기서 날개 두께 및 캠버비는 노브로시스크호 프로펠러의 0.7R의 반경의 단면과 유사하도록 채택하였으며, 3차원 효과를 고려하여 날개두께비

(to/C)는 0.060, 캠버비(fo/C)는 0.0168로 결정하였다.

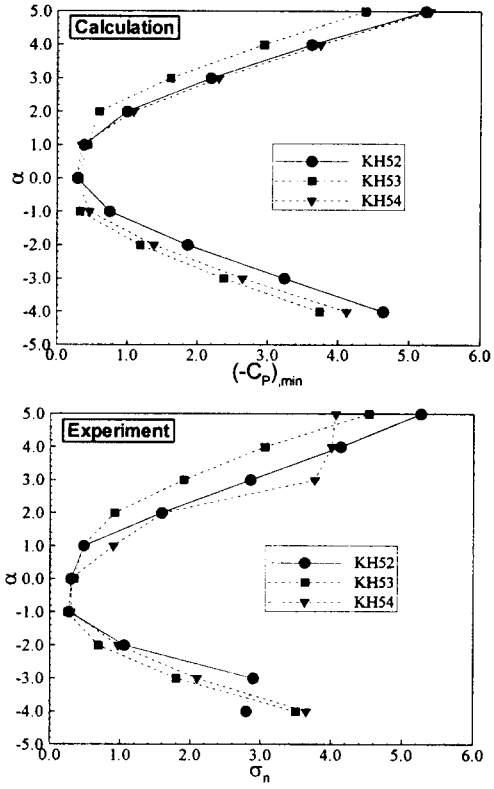

Fig.2 Cavitation free-bucket

3 종의 날개단면의 캐비테이션 초기발생 특성을 파악하기 위하여 RANS 방정식에 의하여 날개면에서의 압력분포를 계산하였다. 계산에 사용된 O-형 격자계는 계산결과에 영향을 거의 주지않는 (321×100)의 격자수를 선정하였다[5]. 각 기하학적 받음각(geometric angle of attack)에서 격자계를 다시 생성하지 않고 유입속도의 각도만 바꾸어서 계산을 수행하였다. 각 받음각에서 계산된 압력분포로부터 구한 최소압력값(-Cp,min)의 분포는 캐비테이션 초생 실험결과도 함께 Fig.2. 에 보였다.

각 단면에 대한 이론계산은 대체로 실험계측치와 정성적으로 일치하고 있으며, 두 결과 모두 KH53이 다른 두 단면에 비하여 기하학적 받음각이 2° 이상에서 초기발생 캐비테이션 수가 약 0.6 정도 낮아 캐비테이션 초생 특성이 우수함을 알 수 있다. KH52는 대체로 KH54와 캐비테이션 초생특성이 유사하나 음의 받음각에서는 초생특성이 약간 뒤떨어지는 것을 볼 수 있다. KH52 단면은 받음각이 -4° 에서 캐비테이션이 소음 관점에서는 이미 발생하였으나 아직 날개면에 부착되지 않은 상태에 있기 때문에 육안으로 판정하는 현재의 캐비테이션 초기발생 기준에서 볼 때에는 캐비테이션 초생특성이 우수한 것처럼 나타난 것이다. 이러한 캐비테이션은 얇은층 캐비테이션이 아니며, 높은 받음각에서 나타날 수 있는 박리성

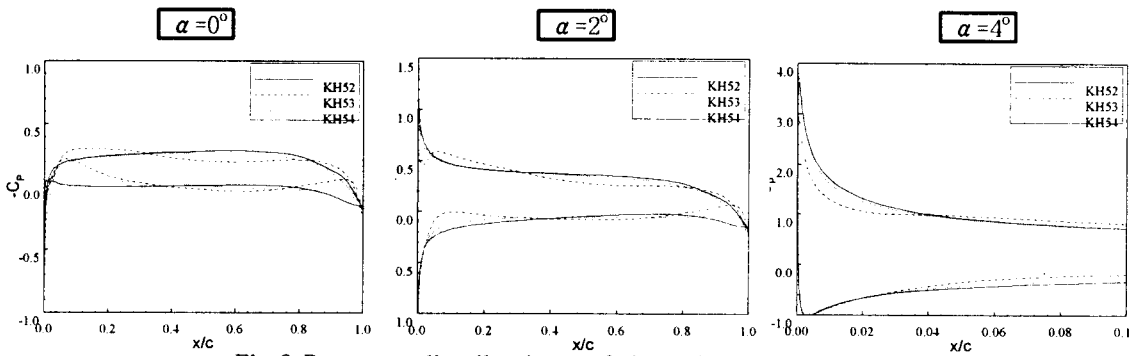

Fig.3 Pressure distributions of the existing hydrogoils

캐비테이션에 속한다. 이와같은 캐비테이션은 KH54의 경우에 5° 의 기하학적 받음각에서도 발생하고 있다. KH54의 1° 에서는 얇은층 캐비테이션이 아닌 줄(streak) 캐비티가 나타나 캐비테이션 초기특성이 나쁜 것으로 나타났다. 이러한 띠 캐비티는 제작 과정에 나타난 미세한 홈 또는 앞날 주위의 층류 유동으로 인한 것으로 보이는데, 이에 대해서는 추후 상세한 조사가 필요하다.

한편 Fig.3의 압력분포로부터 KH53 단면은 받음각이 0° 주위에서 캐비테이션 초생이 빨리 일어날 수 있으며, 이는 앞날 주위의 두께분포가 급격히 커졌기 때문이다. 또한 Fig.3에 보이는 KH53 단면의 압력분포는 2° 에서 낙타등 처럼 두 개의 압력 극한치(pressure peak)가 나타나고 있는 데, 캐비테이션 수가 두 번째 압력 극한치 이하로 떨어지게 되면 여기서 기포 캐비티의 발생을 유발시키게 된다. 그러나 앞의 압력 극한치가 더 높으므로 얇은층 캐비티가 먼저 발생하게 된다. 따라서 KH53 단면은 기포 캐비테이션이 상대적으로 잘 발생될 수 있는 특성을 갖는다고 할 수 있다. 이러한 결과로부터 현재의 RANS code는 캐비테이션 초기발생 특성을 정성적으로 예측하고 있다고 판단되며, 또한 소음수준을 크게 높이는 기포 캐비테이션의 예측도 가능할 것으로 생각된다.

3종의 날개 단면에 대한 캐비테이션 특성실험 결과로부터 살펴보면 KH53 단면은 기포 캐비테이션이 발생하는 받음각의 범위가 넓어(-2° ~ 2°) 프로펠러에 적용할 경우 기포 캐비테이션이 발생될 가능성이 높은 것으로 나타났다. 반면에 KH54 단면은 낮은 받음각($\alpha \leq 2^\circ$)에서 기포 캐비테이션 발생이 억제되는 우수한 특성을 보여주었지만, 받음각 3° 이상에서 KH52 단면과 마찬가지로 구름 캐비테이션이 발생되어 소음성능이 저하되는 특성을 보여주었다. Fig.3에 받음각 4° 에서의 압력분포를 살펴보면 KH52와 KH54 단면이 KH54단면보다 캐비테이션이 많이 발생될 가능성이 보이지만, 구름 캐비테이션의 발생 원인을 자세히 살펴보기 위하여 캐비테이션 발생길이가 같을 때 발생두께를 패널법으로 계산하였다. Fig.4는 코오드에 10%에 해당하는 캐비테이션이 발생했을 때 계산결과를 보여준다. KH53 단면의 캐비테이션 발생두께가 가장 작은 것을 볼 수 있다. 즉 낮은 받음각($\alpha \leq 2^\circ$)에서는 KH54단면의 캐비테이션 특성이 우수한 반면 받음각 3° 이상에서는 KH53 단면의 캐비테이션 특성이 우수한 것으로 나타났다. 결국 KH54 단면의 초생 특성도 개선하면서 KH53과 KH54 단면의 장점을 잘 살린 새로운 단면의 개발이 필요하다.

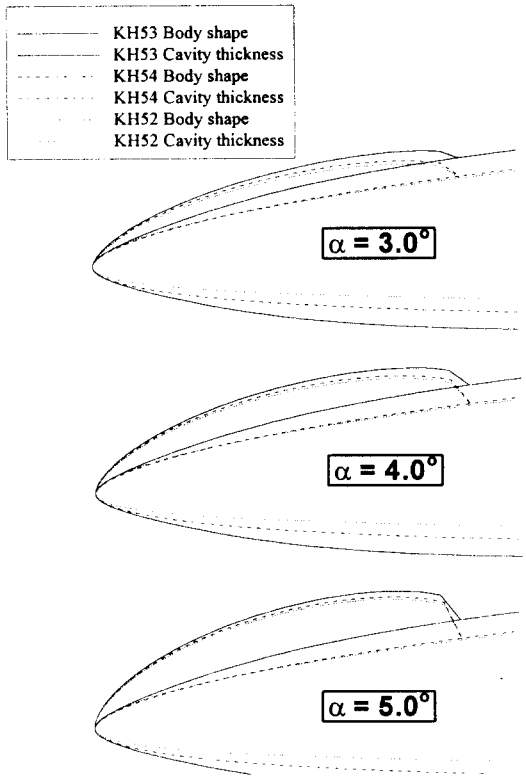

Fig.4 Cavity thickness of the existing hydrofoils(10%-cavity)

3. 새로운 날개단면의 설계 및 성능평가

모형 실험에 사용된 3 개의 고속 프로펠러 단면에 대한 일련의 캐비테이션 및 소음실험자료를 바탕으로 단면의 개선방향을 설정하였으며, 캐비테이션 초생성능이 우수하며, 기포 캐비테이션이

억제되도록 새로운 날개 3 종, 즉 CH56, CH57 및 CH58들을 도출하였다.

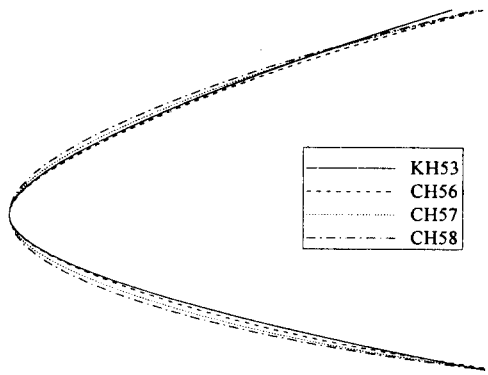

Fig.5 Shape of newly designed hydrofoils

KH54 단면의 날개두께분포는 KH53과 KH52 단면의 중간에 위치하고 있으나, 캐비테이션 초생 특성은 나아지지 않았기 때문에 새로운 날개들에서는 캐비테이션 초생에 큰 영향을 미치는 앞날 주위에서 두께를 증가시켰으며, 캠버를 감소시켰다. 그러나 너무 큰 앞날두께는 캐비테이션 초생 성능이 향상된다 하더라도 기포 캐비테이션을 피할 수 없기 때문에 KH53과 KH54의 중간형태의 날개두께를 갖도록 설계되었으며, 날개두께의 분포에 따라 각각 CH56, CH57 그리고 CH58 형상을 도출하였다. CH58의 앞날반경이 가장 크며 CH56의 앞날반경이 가장 작다.

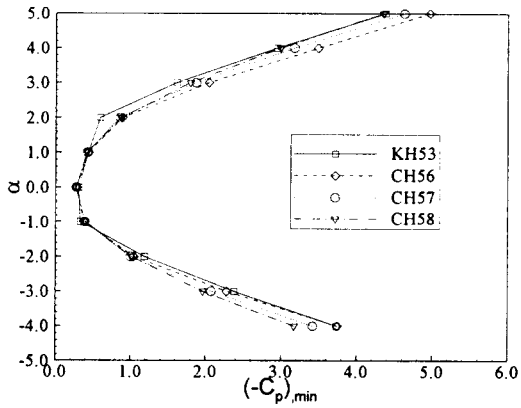

Fig.6 Minimum pressure distributions

새로운 날개단면들의 앞날 주위의 형상은 Fig.5에 보였으며 전술한 RANS code를 사용하여 받음각 별로 날개면상의 초생특성, 양·항력 특성과 압력분포을 계산하였다. 이들계산 결과는 Fig.6~Fig.8에 KH53과 비교 되어 보였다.

Fig.5에서 보듯이 KH54의 앞날부분 캠버를 약간 감소시킨 상태에서 앞날반경이 2.5 % 까지 선형적으로 설계된 CH58이 캐비테이션 초생 관점에서 KH54보다는 크게 개선된 것으로 나타났다. 4° 이상에서는 CH58이 KH53과 대등한 캐비테이션 초생성능을 보여주고 있다(Fig.6 참조).

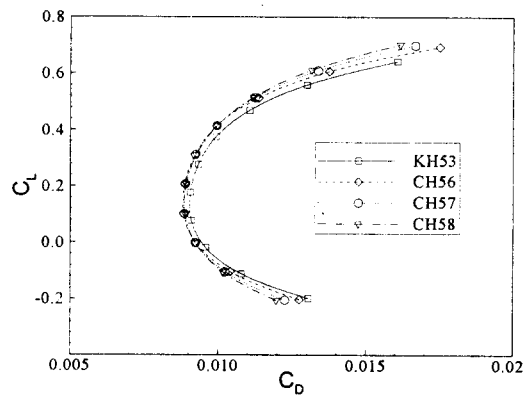

Fig.7 CL-CD bucket diagram

Fig.8의 압력분포에서 살펴보면 CH56은 앞날 부근의 낙타등 같은 두 개의 압력 극한치 (pressure peak)가 나타나고 있으며, CH57 단면도 미세한 두 개의 극한치를 보여주고 있어 기포 캐비티의 발생이 우려된다. 그러나 CH58 단면은 이러한 두 개의 압력 극한치가 나타나지 않아 기포 캐비테이션이 발생하지 않을 것으로 추정된다.

새로운 설계단면들은 양·항력 특성에서 KH53보다 우수할 것으로 추정되며, 특히 CH58의 양·항력 특성이 우수한 것으로 추정되었다 (Fig.7 참조). 한편 설계단면들도 3° 이상에서 양력판 이론을 사용하여 캐비테이션 두께를 계산하였으며, Fig.9에 보였다. 계산 결과 CH58 단면의 캐비테이션 두께는 5° 에서 KH53보다 약

5% 증가하나, KH54의 25% 증가 보다는 작은 것으로 나타나 받음각이 큰 경우에서도 KH54보다 소음특성이 우수할 것으로 추정된다.

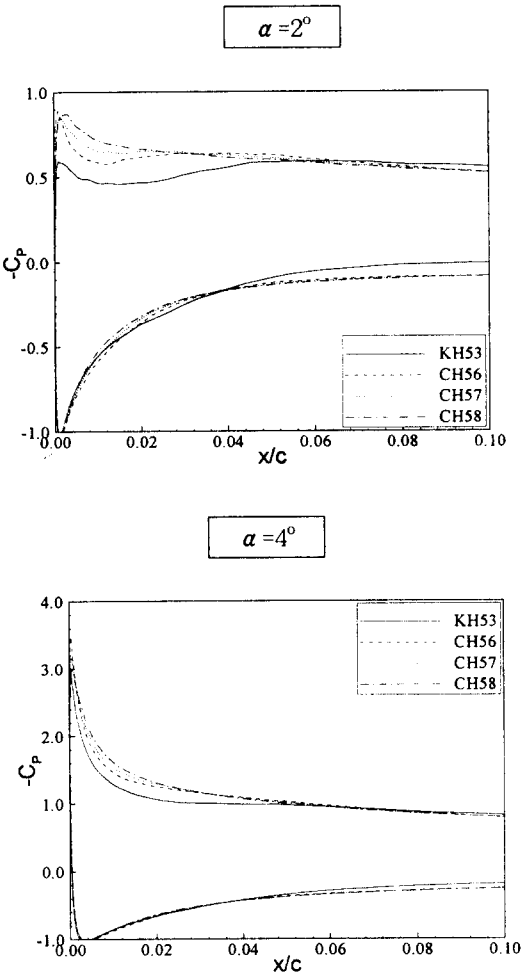

Fig.8 Pressure distributions(newly designed)

4. 결 언

3종류의 기존 날개단면에 대하여 캐비테이션 특성을 실험적, 이론적으로 분석하여 그 결과를 이용하여 새로운 단면을 설계하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 수행한 단면에 대한 실험 및 계산 결과를 비교하여 볼 때 당소에서 개발한 2차원 날개단면 주위의 난류·점성유동장 수치해석 프로그램(RANS Solver)은 캐비테이션 초기발생 특성을 대체로 정확히 예측하고 있으며, 기포 캐비테이션의 예측에도 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

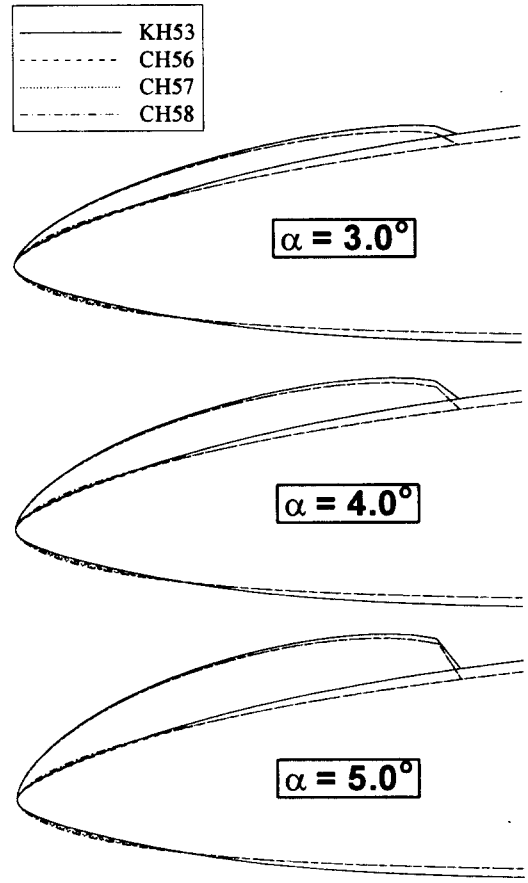

Fig.9 Cavity thickness of the newly designed hydrofoils (10%-cavity)

2) 프로펠러에서는 캐비테이션을 피할 수 없는 경우도 고려하여야 한다. 이때에는 캐비테이션 초기발생 성능보다는 캐비테이션이 발생된 이후의 거동에 관심을 가져야 한다. 기포 캐비테이션이나 얇은층 캐비테이션이 구름 캐비테이션으로 발전된다면 오히려 소음 수준이 크게 증가될 수 있다.

3) 1)과 2)의 결과로 미루어 볼 때 새로 설계된 CH58은 KH53의 장점과 KH54의 장점을 잘 살릴 수 있는 우수한 단면으로 평가된다. 앞으로 이 단면을 제작하여 모형실험을 포함한 연구가 계속 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 '98년도 과학기술처에서 시행한 기관고유사업 연구 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

[1] 안종우, 김은찬 외, "고부하 저소음 프로펠러 개발(I)", 한국기계연구원 보고서, 보고서번호 UCN033-2059.D, 1997. 12.

[2] D. Lange, et. als, "On the Mechanism of Cloud Cavitation-Experiment and Modelling", Int'l Symposium on Cavitation, Tokyo in Japan, 1995.

[3] M. Pham, et. als, "Investigation of Unstable cloud Cavitation", 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble in France, 1998.

[4] 안종우, 김은찬 외, "고부하 저소음 프로펠러 개발(II)", 한국기계연구원 보고서, 보고서 번호 UCNV056-2137·D, 1998. 12.

[5] Ahn, J.-W., Moon, I.-S., Lee, J.-T., "Influence of Leading Edge Radii on Hydrodynamic Performance of a foil section", Journal of Ship and Ocean Technology, SNAK, Vol. 3, No. 2, 1999.

[8] 나윤철, 송인행, 안종우, "선박 프로펠러용 고효율 2차원 날개단면 개발", 대한조선학회 논문집 제 34권 제 1호, 1997.

[7] Lee, C.-S., Kim, Y.-G., Lee, J.-T., "A potential-based panel method for the analysis of a two-dimensional super- or partially cavitating hydrofoils," J. of Ship Research, Vol. 36, No. 2, June, 1992.

[8] 이진태, 안종우 외, "새로운 날개 단면을 이용한 프로펠러 설계법 -콘테이너에 응용", 대한조선학회 논문집 제 28권 제 2호, 1991.