

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第28卷 第2號 1991年 10月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol.28, No.2, October 1991

## 새로운 날개단면을 이용한 KD-프로펠러 씨리즈 개발

이진태\*, 김문찬\*, 안종우\*, 김호충\*\*

### Development of KD-Propeller Series using a New Blade Section

by

J.T. Lee\*, M.C. Kim\*, J.W. Ahn\* and H.C. Kim\*\*

#### 요 약

캐비테이션 특성이 우수하고 넓은 받음각에서 양력-항력비가 큰 새로운 날개단면(KH18 단면)을 사용하여 체계적인 방법으로 기하학적 형상을 변화시켜 설계된 새로운 계열 프로펠러의 개발을 시도하였다.

새로운 계열 프로펠러의 형상을 설계함에 있어 기존의 계열 프로펠러와는 달리 선택된 반류분포의 회전방향 평균 반류분포를 입력자료로 하여 반경방향 부하분포와 코오드 방향 부하분포를 동일하게 유지하면서 피치 및 캠버의 형상을 결정하였다. 또한 코오드 길이, 두께, 스큐 및 레이크 분포와 같은 형상은 최근 실적선 프로펠러의 형상 특성을 정형화 하여 선택되었기 때문에 초기설계시 설계된 형상이 최종 설계 프로펠러의 형상과 크게 다르지 않을 것으로 생각되어 초기성능을 보다 정확하게 추정할 수 있게 하였다. 설계된 계열 프로펠러는 날개수 4개인 프로펠러를 대상으로 날개 전개면적비 4개( $A_v/A_o=0.3, 0.45, 0.6, 0.75$ )에 대하여 각 전개면적비에서 평균피치비를 5개( $P/D=0.5, 0.65, 0.8, 0.95, 1.1$ )로 변화시켜 총 20개의 프로펠러로 구성되었으며 KD-프로펠러 씨리즈(KRISO-DAEWOO Propeller Series)라 명명하였다.

설계된 계열 프로펠러들에 대하여 단독특성시험, 캐비테이션 관찰시험, 변동압력 계측시험을 수행하였다. 프로펠러 단독특성 시험결과의 회귀해석결과로 부터  $B_p - \delta$  곡선을 도출하여 초기설계 단계에서 최적 프로펠러 직경등을 쉽게 결정할 수 있게 하였다. 기준으로 선택된 반류분포(2700TEU 콘테이너선의 반류) 후류에서 프로펠러 추력계수 및 캐비테이션 수를 체계적으로 변화시킨 상태에서 캐비테이션 관찰시험 및 변동압력계측시험을 수행하였다.

양력면이론에 의한 비정상 프로펠러 성능해석에 의해 계산된 최대 국부양력계수 ( $C_{L,0.8R}^{max}$ )와 국부캐비테이션 수 ( $\sigma_0 = \frac{p-p_v}{\frac{1}{2}\rho V_{0.8R}^2}$ )를 기준으로 캐비테이션 관찰시험 결과를 정리하여 KD-캐비테이션 차트를 도출하였다. 기존의 캐비테이션 차트는 균일류중의 시험 결과를 정리하여 작성되었으나

발표: 1990년도 대한조선학회 추계연구발표회('90. 11. 10)

접수일자: 1990년 11월 22일, 재접수일자: 1991년 3월 15일

\* 정회원, 한국해사기술연구소

\*\* 정회원, 대우조선공업(주)

KD-캐비테이션 차트는 반류분포중에서 시험된 프로펠러 관찰시험 결과로부터 도출되었으므로 초기설계 단계에서 보다 정확한 캐비테이션 발생량 추정이 가능하리라 예상된다.

### Abstract

A new propeller series is developed using the newly developed blade section(KH18 section) which behaves better cavitation characteristics and higher lift-drag ratio at wide range of angle-of-attack.

The pitch and camber distributions are designed in order to have the same radial and chordwise loading distribution with the selected circumferentially averaged wake input. Since the geometries of the series propeller, such as chord length, thickness, skew and rake distributions, are selected by regression of the recent full scale propeller geometric data, the performance prediction of a propeller at preliminary design stage can be more realistic. Number of blades of the series propellers is 4 and the expanded blade area ratios are 0.3, 0.45, 0.6 and 0.75. Mean pitch ratios are selected as 0.5, 0.65, 0.8, 0.95 and 1.1 for each expanded area ratio. The new propeller series is composed of 20 propellers and is named as KD (KRISO-DAEWOO) propeller series.

Propeller open water tests are performed at the experimental towing tank, and the cavitation observation tests and fluctuating pressure measurements are carried out at the cavitation tunnel of KRISO.  $B_p-\delta$  curves, which can be used to select the optimum propeller diameter at the preliminary design stage, are derived from a regression analysis of the propeller open water test results.

The KD-cavitation chart is derived from the cavitation observation test results by choosing the local maximum lift coefficient and the local cavitation number as parameters.

The cavity extent of a propeller can be predicted more accurately by using the KD-cavitation chart at a preliminary design stage, since it is derived from the results of the cavitation observation tests in the selected ship's wake, whereas the existing cavitation charts, such as the Burrill's cavitation chart, are derived from the test results in uniform flow.

## 1. 서 론

선박용 프로펠러의 설계는 초기설계, 상세설계 및 상세성능해석의 단계로 분류할 수 있다. 초기 설계 단계에서는 계열 프로펠러 자료를 이용하여 주어진 설계조건에 따라 최적 프로펠러 직경, 전개면적비 및 피치비등과 같은 형상 특성을 선정하고 선정된 프로펠러의 성능을 초기단계에서 추정한다. 상세설계 단계에서는 초기설계 단계에서 선정된 형상특성을 기준으로 양력선 이론 및 양력면 이론을 이용하여 반경 방향 및 코오드 방향 부하를 조절하면서 요구

되는 설계 요구조건을 만족하도록 프로펠러의 상세한 형상을 설계하게 된다. 설계된 프로펠러 형상에 대하여 상세 성능해석 단계에서 비설계점 단독특성해석, 비정상 성능해석, 캐비테이션 성능 추정등의 과정을 통하여 프로펠러 성능을 해석하게 되고 최종적으로 모형시험에 의하여 성능을 검증하게 된다.

고속 전산기의 출현과 이론 유체역학의 발달로 인하여 상세설계 과정의 설계시간이 단축되고 설계 정확도 역시 많이 높아졌으나 아직도

초기설계 단계에서의 정확한 초기성능 추정은 상세설계 과정 및 상세 성능해석 과정의 반복 설계회수를 최소한으로 줄일 수 있으며 모형시험에 의한 성능검증 회수를 줄일 수 있다. 특히 영업 설계시 설계조건에 따른 다양한 변화에 따른 초기설계 과정에서의 신속하고 정확한 성능 추정을 위하여서는 최근의 기하학적 형상을 갖고 보다 정확한 성능을 추정할 수 있는 계열 프로펠러의 필요성은 감소하지 않았다.

최근 한국해사기술(연)에서 개발된 새로운 날개 단면(KH18 단면)을 사용한 프로펠러의 설계 회수가 증가함에 따라 [1, 2] 초기 설계 단계에서 보다 정확한 성능 추정이 가능하도록 KH18 단면을 사용한 새로운 계열 프로펠러를 설계하였다. 특히 KH18 단면은 캐비테이션 특성이 우수하여 동일한 캐비테이션 성능을 유지하면서 프로펠러 날개 전개면적비를 감소시킴으로써 추진효율을 증가시킬 수 있어 컨테이너 선과 같이 고속으로 운항되는 선박의 프로펠러 날개단면으로 많이 채택될 전망이다[3, 4].

현재 세계적으로 쓰이고 있는 계열 프로펠러로는 네델란드의 B-씨리즈 프로펠러, 일본의 MAU-씨리즈 프로펠러 등이 있다. 이러한 기존 계열 프로펠러는 균일류에서 작동하는 프로펠러를 대상으로 설계되어 일정 피치분포를 갖고 있다. 또한 캐비테이션의 영향을 충분히 고려하여 설계되지 못하였기 때문에 캐비테이션 특성이 좋지 않다.

본 논문에서는 새로운 날개단면(KH18 단면)을 사용하고, 선택된 반류분포를 기준으로 반경방향 반류분포를 고려한 새로운 계열 프로펠러의 개발과정을 기술하였다. 특히 개발된 계열 프로펠러의 형상은 최근 실적선 프로펠러의 형상특성을 정형화하여 선택하였기 때문에 초기 설계에서 선정된 형상이 상세설계 과정에서 크게 변화되지 않을 것으로 판단되어 초기 성능추정이 보다 정확하게 수행될 수 있다. 개발된 계열 프로펠러를 KD-프로펠러 시리즈(KRISO-DAEWOO Propeller series)라 명명하

였다.

KD-씨리즈 프로펠러는 날개수 4개인 프로펠러를 대상으로 하여 날개 전개면적비 4개( $A/A_0=0.30, 0.45, 0.60, 0.75$ )에 대하여 각 전개면적비에서 평균 피치비를 5개( $P/D=0.5, 0.65, 0.8, 0.95, 1.1$ )로 변화시켜 총 20개의 프로펠러로 구성되었다.

각 프로펠러는 KH18 단면을 갖도록 설계되었으며 선택된 반류분포에 적합한 반경방향 부하분포와 코오드 방향 부하 분포가 유지되도록 피치분포 및 캠버분포를 선택하였다. 계열 프로펠러에 대한 프로펠러 단독시험, 캐비테이션 관찰시험 및 변동압력 계측시험을 수행하였고 프로펠러 단독 특성곡선을 회귀해석하여 초기 설계 단계에서 쉽게 사용할 수 있도록  $B_0-\delta$  곡선을 도출하였다.

초기설계 단계에서 캐비테이션 발생량을 추정하기 위한 방법으로 Burrill의 캐비테이션 차트가 많이 사용되어 왔다. Burrill의 캐비테이션 차트는 균일류중에서 수행되었던 캐비테이션 관찰시험을 토대로 작성되었기 때문에 캐비테이션 발생량 추정 정밀도가 낮아 초기설계 단계에서 보다 정확한 캐비테이션 발생량 추정도표가 필요하였다.

본 논문에서는 KD-씨리즈 프로펠러들이 선택된 반류분포 중에는 수행된 캐비테이션 관찰 시험 결과를 비정상 프로펠러 성능해석에 의한 최대 국부 양력계수( $C_{1.0, 0R}^{max}$ )와 국부 캐비테

이션 수 ( $\sigma_0 = \frac{p-p_v}{1/2\rho V_{0, 0R}^2}$ )를 기준으로 정리하여 KD-캐비테이션 차트(KRISO-DAEWOO Cavitation chart)를 도출하였다. KD-캐비테이션 차트를 사용한다면 초기설계 단계에서 보다 정확한 캐비테이션 발생량 추정이 가능하리라 예상된다.

## 2. 계열 프로펠러 설계

본 계열 프로펠러를 설계함에 있어 특기할

점은 선택된 컨테이너선의 반류분포를 고려하여 반경방향 부하분포 및 코오드 방향 부하분포를 가능한 한 동일하게 설계한 점이다. 기존의 계열 프로펠러들은 균일류에서 작동하는 프로펠러에 대한 설계를 수행하였기 때문에 반경방향 피치분포가 균일하다. 실제 프로펠러는 반류분포에 맞추어 피치분포가 반경방향으로 변화하는 경우가 많으므로 본 연구에서 선택된 반류분포와 유사한 반류분포를 갖는 선형에 대한 프로펠러 설계시 본 계열 프로펠러를 이용하여 초기설계 과정을 수행하면 보다 정확한 초기설계를 수행할 수 있으리라 판단된다. 또한 반류의 형태가 다소 다른 선형에 대한 프로펠러 설계시에는 그에 따른 보정량이 균일류에 대한 기존계열 프로펠러를 이용한 프로펠러 설계시에 비하여 크지 않을 것으로 생각된다.

계열 프로펠러의 설계는 기존 우수 프로펠러(KP197)를 참고하여 수행되었다. KP197 프로펠러는 KH18 단면을 이용하여 컨테이너선을 대상으로 설계되었던 프로펠러로서 이미 실선화된 프로펠러이다. KH18 단면을 이용한 컨테이너선의 프로펠러 설계는 코오드 방향 부하분포의 모양을 선택하게 되면 NACA형 단면을 갖는 프로펠러 설계시와 같은 방법으로 양력면 이론에 의하여 수행된다.

코오드방향 부하형태는 Fig.1에 보인 바와 같이 A, B, C형의 종류가 있다. A형의 경우 받음각에 의한 부하가 없어 캠버에 의한 부하만으로 이루어진 부하형태에서 효율이 우수할 것으로 생각되며, C형의 경우 앞날의 부하가 커서 캐비테이션이 많이 발생할 경우 캐비테이션이 안정될 것으로 보인다. KP197 프로펠러의 경우 전체 반경방향별로 효율이 우수한 A형 부하모양을 갖게 하였는데 캐비테이션이 많이 발생하는 0.7R 부터 날개끝까지는 C형 부하분포를 택하여 캐비티의 안정을 도모하였다. 설계된 KP197 프로펠러는 모형시험을 통하여 우수한 성능을 검증한 바 있으며 KP197프로펠러의 제원을 Table 1에 보였다.

계열 프로펠러는 날개수가 4개인 프로펠러에 대하여 설계되었으며 날개 전개면적비가 4종류 ( $A_E/A_0 = 0.3, 0.45, 0.6, 0.75$ ), 각 전개면적비에서 평균 피치비가 5종류 ( $(P/D)_{mean} = 0.5, 0.65, 0.8, 0.95, 1.1$ )로서 총 20개의 프로펠러로 구성되었다. 전개면적비 및 평균피치비가 다른 프로펠러들을 KP201-KP220로 명명하였다. 계열 프로펠러 설계를 위하여 KP197 프로펠러와 기본제원이 가장 비슷한 KP214 프로펠러( $A_E/A_0 = 0.6, P/D = 0.95$ )를 기준으로 삼아 전개면적비와 피치별 변화에 따라 체계적으로 설계 변수들을 변화시켰다. 대상선의 반류분포는 KP197 프로펠러 설계에 사용된 반류분포를 사용하였으며 반경방향별 회전방향평균 호칭반류와 추정된 유효반류를 Fig.2에 보였다.

계열 프로펠러를 설계하기 위한 프로펠러의 설계점을 기존 MAU와 B-시리즈 프로펠러를 참고하여 Table 2에 보인 바와 같이 결정하였

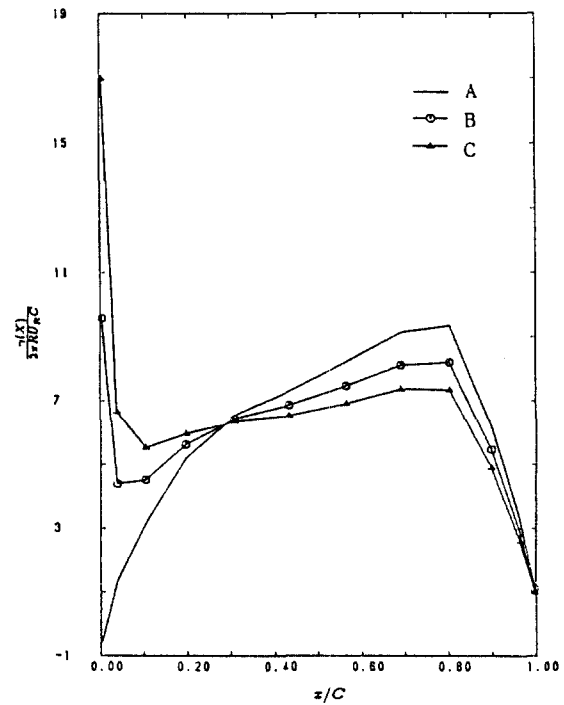


Fig. 1 Comparison of chordwise loading types

Table 1 Basic geometric data for the KP197 propeller

Propeller No.	KP197	Propeller Name	KP197
Designed by	KRISO	Ship Name	CONTAINER
Propeller Type	FPP	No. of Propeller	SINGLE
Diam.(Model)	254.902mm	Scale Ratio( $\lambda$ )	30.600
$A_E / A_0$	.5515	$(P/D)_{mean}$	.9810
Skew( $^\circ$ )	24.86	Rake( $^\circ$ )	.00
Section Type	KH18	Hub Ratio	.1800
No. of Blades	4	Comment	A+C Type

$r/R$	$P/D$	$Xm/D$	$\theta m(^\circ)$	$l/D$	$f_0/D(10^3)$	$t_0/D(10^3)$	$f_0/l$
.20	.6201	.0000	-1.92	.2069	12.68	46.00	.0613
.25	.6891	.0000	-3.37	.2234	12.42	42.40	.0556
.30	.7544	.0000	-4.27	.2398	11.87	38.90	.0497
.40	.8804	.0000	-4.56	.2684	10.68	32.29	.0398
.50	.9668	.0000	-3.10	.2948	9.52	26.00	.0323
.60	1.0130	.0000	-.18	.3150	8.38	20.29	.0266
.70	1.0336	.0000	3.92	.3213	6.94	15.50	.0216
.80	1.0381	.0000	8.89	.3007	5.38	11.00	.0179
.90	1.0314	.0000	14.45	.2342	3.61	6.90	.0154
.95	1.0251	.0000	17.36	.1757	2.60	5.00	.0148
1.00	1.0173	.0000	20.30	.0000	.00	3.21	.0000

으며 스큐 및 레이크 분포는 KP197 프로펠러와 동일하게 하였다. 전개면적비가 적은 프로펠러의 경우 같은 강도를 유지하기 위하여서는 프로펠러 두께가 커져야 되나 실제로 전개면적비가 적은 프로펠러의 경우 설계 부하점이 떨어지기 때문에 같은 강도를 유지할 필요가 없게 된다. 이것은 전개면적비와 두께비와의 관계를 실선 자료를 토대로 발표된 자료[5]에서도 볼 수 있다. 코오드 길이 분포 또한 KP197 프로펠러의 코오드 분포를 따라 주어진 전개면적비를 만족하도록 결정하였다. 계열 프로펠러의 단면은 앞에서 언급한 KH18 단면을 사용하였으나 KP197 프로펠러와 달리 날개끝(0.95R 이후)에서는 KH21 단면을 사용하였다. [3] KH21 단면의 챔버는 KH18 단면과 동일하나 두께분포의 경우 앞날 부근에서 타원형 두께분포를 갖고 최대 두께점이 코오드 중앙에 위치하고 있어 기포 캐비테이션의 발생을 억제

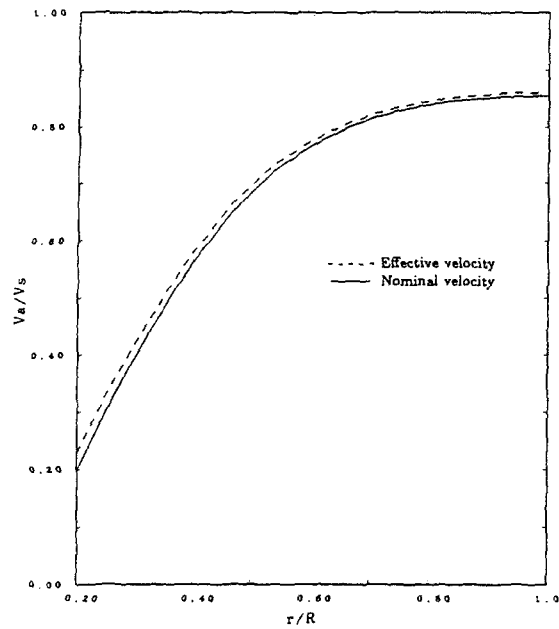


Fig. 2 Prediction of the circumferential mean effective velocity distribution

Table 2 Design points for the KD-Series propellers

$P/D$	$A_E / A_0$	0.30	0.45	0.60	0.75
0.50	$J$	0.233	0.203	0.173	0.143
	$K_T$	0.1312	0.1559	0.1717	0.1840
0.65	$J$	0.444	0.414	0.384	0.354
	$K_T$	0.1251	0.1532	0.1722	0.1882
0.80	$J$	0.625	0.595	0.565	0.535
	$K_T$	0.1231	0.1527	0.1730	0.1904
0.95	$J$	0.778	0.748	0.718	0.688
	$K_T$	0.1288	0.1596	0.1820	0.2013
1.10	$J$	0.905	0.875	0.845	0.815
	$K_T$	0.1418	0.1762	0.1999	0.2197

하리라 판단되어 선택되었다.

실제점과 기본계원들이 결정되면 양력면이론 프로그램에 의한 상세설계를 수행할 수 있다. 본 연구에서는 기준 프로펠러(KP214)의 부하모양을 KP197과 같게 하여 기준 프로펠러의 챔버와 피치를 결정한 후, 반경방향 및 코오드

방향부하모양이 맞도록 피치비별, 전개면적비 별로 결정하였으며, 결정된 계열 프로펠러 제원을 Table 3 및 Fig.3에 보였다. 설계된 계열 프로펠러중에서 전개면적비가 0.6이고 평균 피치비가 다른 프로펠러들의 반경방향 부하분포를 Fig.4에 보였고, 평균 피치비가 0.95이고 전개면적비가 다른 프로펠러들의 반경방향 부하분포를 Fig.5에서 보였다. Fig.4에서 볼 수 있듯이 평균 피치비 변화에 따른 반경방향 부하분포를 정확히 일치시키지 못하였다. 이것은 계열 프로펠러 전체에 걸쳐 동일한 반경방향 유효반류 분포를 사용하여 설계를 수행하였기 때문에 평균 피치비가 크게 다른 프로펠러들의 반경방향 부하모양을 정확히 맞출 경우 현실성이 없는 프로펠러의 형상이 설계되기 때문에 반경방향 부하를 정확히 일치시킬 수 없었다. 평균 피치비 및 전개면적비가 다른 프로펠러들의 코오드 방향 부하분포를 Fig.6, 7에서 각각 보였고, 이들은 비교적 같은 모양을 갖도록 설계되었다.

Table 3 Geometric characteristics of the KD-Series propellers

$r/R$	$P(r)^*$	$f_0(r)^{**}$	$c(r)$	$t_0(r)^{***}$	Skew( $^\circ$ )
	$D$	$c(r)$	$DA_E/A_0$	$c(r)$	
0.20	0.6005	1.0000	0.3763	1.1832	-1.921
0.25	0.6673	0.9057	0.4103	1.0000	-3.369
0.30	0.7306	0.8098	0.4407	0.8545	-4.267
0.40	0.8526	0.6498	0.4948	0.6321	-4.560
0.50	0.9362	0.5269	0.5387	0.4673	-3.103
0.60	0.9810	0.4343	0.5638	0.3484	-0.179
0.70	1.0010	0.3519	0.5638	0.2660	3.916
0.80	1.0053	0.2912	0.5325	0.1999	8.889
0.90	0.9988	0.2508	0.4402	0.1517	14.448
0.95	0.9927	0.2407	0.3372	0.1435	17.356
1.00	0.9852	-	0.0000	-	20.300

$$\begin{aligned}
 * P(r)/D &= \frac{(P/D)_{mean}}{0.95} P(r)/D^* \\
 &+ (0.43 (P/D)_{mean} - 0.95) \left( \frac{r}{R} - 0.683 \right) \\
 &- 0.30 (A_E/A_0 - 0.6) \left( \frac{r}{R} - 0.683 \right) \\
 &= f_0(r)/c(r)^{**} (0.165 (P/D)_{mean} + 0.4358) / 5.932 \\
 &\quad (0.2341 (A_E/A_0)^2 - 0.4013 (A_E/A_0) + 0.7493) \\
 *** t_0(r)/c(r) &= t_0(r)/c(r)^{***} \\
 &\quad (0.3756 (A_E/A_0)^2 - 0.685 (A_E/A_0) + 0.448)
 \end{aligned}$$

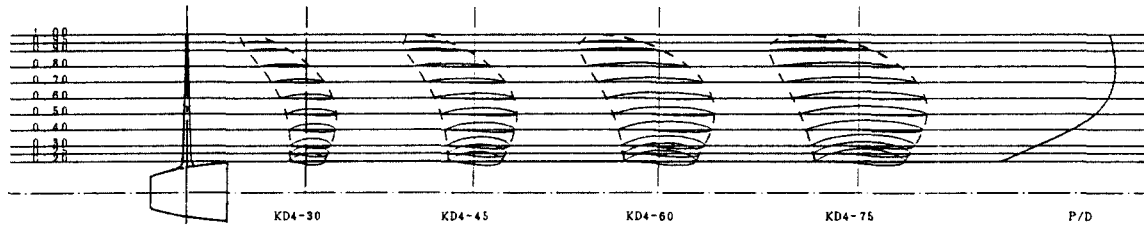


Fig. 3 General plan of KD4 propeller series

본 계열 프로펠러의 기준 설계자료로 채택된 콘테이너선의 반류분포가 다른 대상선들의 반류분포와 근본적으로 크게 차이가 나지 않는다면 초기 설계단계에서 다른 대상선에 적용할

경우 큰 문제가 없을 것으로 생각되며, 균일류를 기준으로 설계된 기존 시리즈에 비해 상세 설계와 상당히 가까운 프로펠러 설계가 되리라 생각된다.

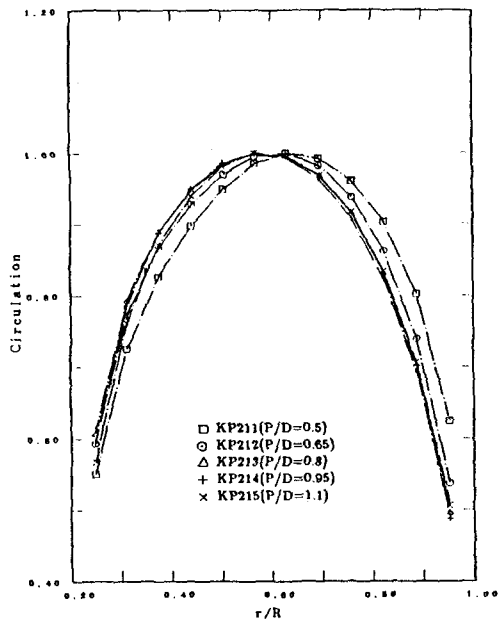


Fig. 4 Radial circulation distributions of the different (P/D) mean propellers with the same expanded area ( $A_E/A_0=0.6$ )

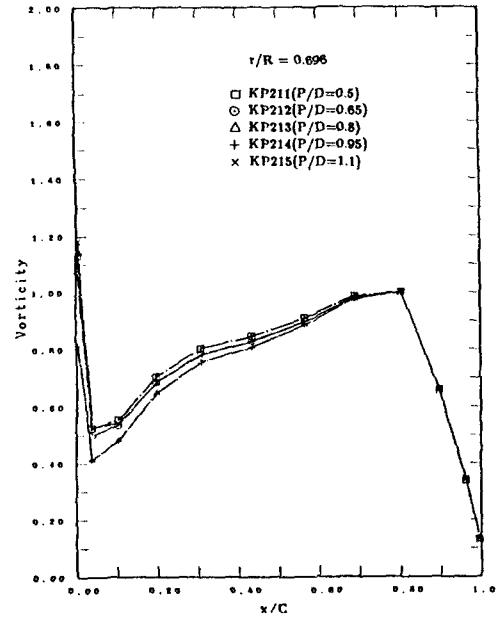


Fig. 6 Chordwise leading distributions of the different (P/D) mean propellers with the same expanded area at  $r/R=0.696$  ( $A_E/A_0=0.6$ )

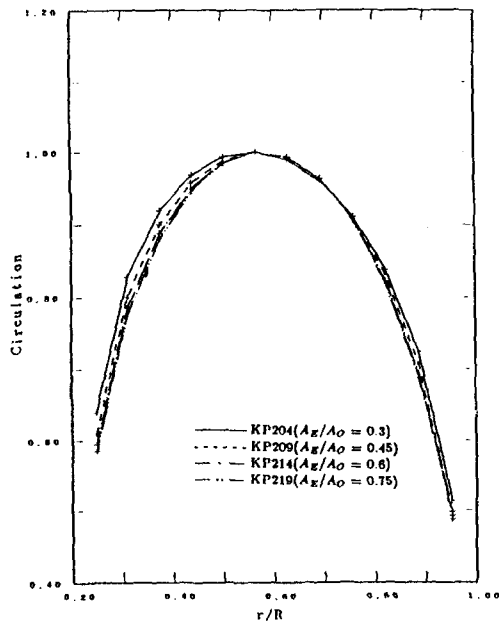


Fig. 5 Radial circulation distribution of the different  $A_E/A_0$  propellers with the same mean pitch ( $P/D=0.95$ )

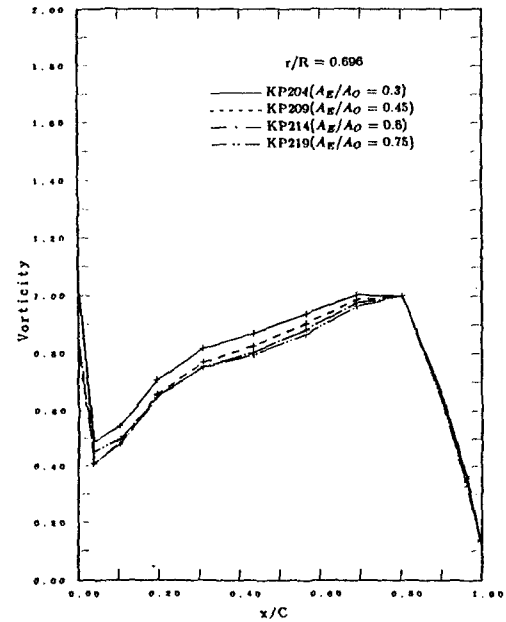


Fig. 7 Chordwise loading distributions of the different  $A_E/A_0=0.6$  propellers with the same mean pitch area at  $r/R=0.696$  ( $P/D=0.95$ )

### 3. 계열 프로펠러 모형시험

계열 프로펠러의 모형 시험은 심수대형수조에서 프로펠러 단독시험을 수행하였고, 캐비테이션 터널에서 캐비테이션관찰 및 변동압력계측시험을 수행하였다. 계열 프로펠러 단독시험은 심수대형수조의 예인전차에 프로펠러 단독시험용 동력계(H29)를 설치하여, 일정한 프로펠러 회전수에서 예인전차의 속도를 변화시키면서 프로펠러 전진계수(Ja)를 조절하였고, 그 결과로써 각 전진계수에서 추력 및 토크를 계측하는 것이다. 캐비테이션 관찰은 선형의 후류 속도분포를 재현하기 위한 반류스크린을 프로펠러 앞쪽에 설치하여 캐비테이션 현상을 관찰하고자 하는 선박의 운항점과 같은 실험조건을 조절하여 캐비테이션의 거동, 발생양 및 범위등을 조사하는 실험이다. 실험조건은 자항 시험 결과와 프로펠러 단독시험 결과 또는 프로펠러 설계점등을 고려하여 결정되고 캐비테이션 터널 주 동력계(J25)에서 추력계수를 조절한 후, 터널 시험부의 압력을 조절하여 캐비테이션 수를 조절한다. 변동압력 시험은 캐비테이션 관찰 시험과 같은 조건에서 프로펠러 상방 선체 표면의 위치에 5개의 압력변환기를 부착한 변동압력판을 설치하여 프로펠러에 의해 유기된 변동압력을 계측하는 것이다. 압력 변환기를 통하여 계측된 변동압력치는 날개진동수별로 FFT에서 해석되고 4차 날개 진동수 이내에 값을 가지고 실선의 변동압력을 예측하게 된다.

프로펠러 단독시험은 각각의 전개면적비( $A_E/A_0$ )에서 피치비(P/D)가 제일 큰 것과 제일 작은 것들로 선택된 8개모형 프로펠러에 대해서 레이놀즈수 변화에 따른 계측치의 안정성 여부를 실험적으로 검토한 후 수행되었다.

계열 프로펠러 시험을 위해 사용된 반류분포는 Fig.8에 나타나 있다. 계열 프로펠러의 실험은 넓은 범위의 전진계수에서 수행된다는 관점에서 속도 변화에 따른 반류 분포의 변화를 조사할 필요가 있는데, 조사결과 Fig.9에 나타난

것과 같이 유속변화에 따라 반류분포는 거의 변화가 없는것으로 나타났다. 또한 반류스크린을 장시간 사용하다 보면 반류스크린이 늘어나서 모양이 변화하게 되는데, 이를 방지하기 위하여 프로펠러 축이 통과할 수 있는 중앙 구멍에 황동망을 설치하여 주었다.

캐비테이션 실험은 각각의 프로펠러에서 전진계수를 변화시키면서 수행되었으며 각각의 전진계수에서 캐비테이션 최대 발생면적을 5%, 10%, 15%, 20%, 30%로 변화시키면서 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측을 동시에 수행하였다. 이때 프로펠러 회전수는 25rps였다. 변동압력 계측시 프로펠러상방 날개끝 간격(Tip clearance)은  $0.286D(7.16cm)$ 였으며,

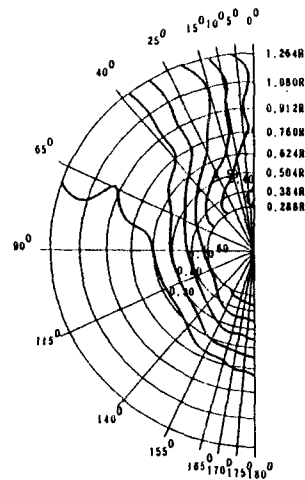


Fig. 8 Iso-axial velocity curves of the stimulated wake at 4.5m/s

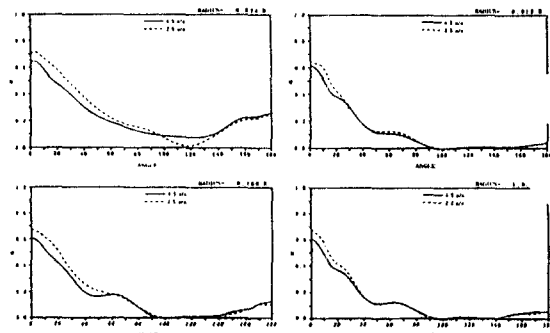


Fig. 9 Comparison of the model wake at 2.5m/s with that at 4.5m/s in the circumferential direction



Fig.10에 나타난 것과 같이 다섯 위치에서 계측을 수행하였다. 또한 KP214 프로펠러를 이용하여 전진계수 0.68 프로펠러 회전수 25rps에서 캐비테이션 수의 변화에 따른 변동압력의 변화 및 캐비테이션 관찰을 수행하였는데, 이는 Fig.11와 Fig.12에 나타나 있다. Fig.11에서 보인바와 같이 캐비테이션 수가 낮아짐에 따라

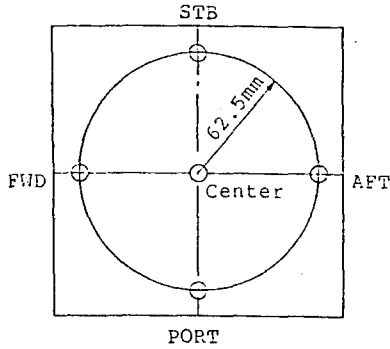


Fig. 10 Positions of 5 pressure transducers on the flat plate

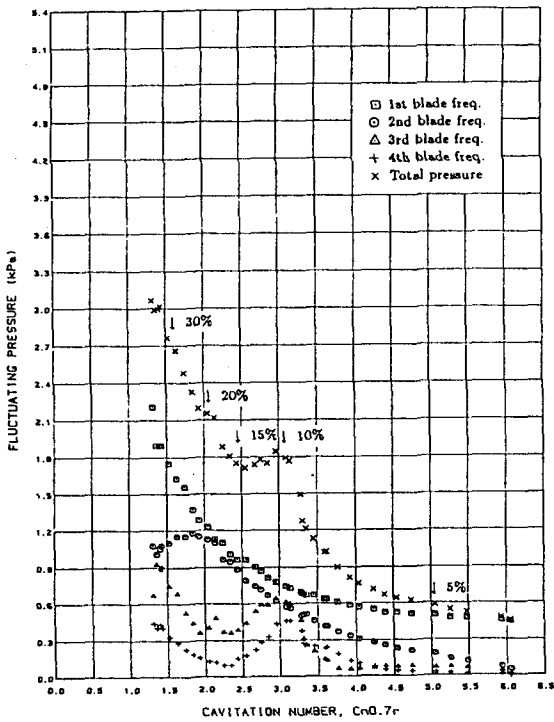


Fig.11 Fluctuating pressure as a function of cavitation number at 25rps for KP214 propeller

변동압력이 계속 증가하지 않으며 캐비테이션 최대 발생량이 10%와 15% 사이에서 변곡점이 발생하게 된다. 이는 최대 캐비테이션 발생량 10% 근처에서 캐비테이션 거동이 비교적 안정적이기 때문이라고 생각된다.

20개의 씨리즈 프로펠러들에 대하여 캐비테이션 최대 발생면적 5%, 10%, 20%의 경우에서의 시험조건 및 Center에서의 변동압력 등을 요약하여 Table 4에 보였다. 이와 같은 자료를 이용하여 캐비테이션 회귀해석을 수행하였다. 캐비테이션 발생량이 변화할 때 KP214 프로펠러에 의한 변동압력 변화량을 Fig.13에 도시하였다.

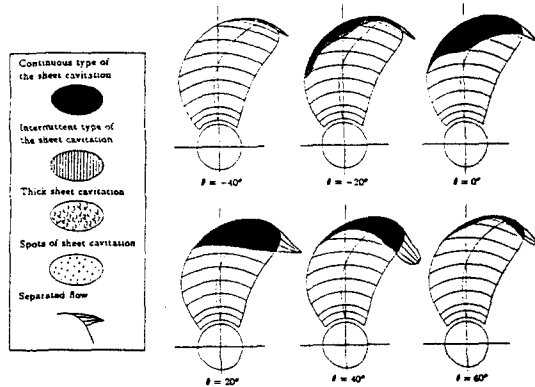


Fig. 12 Sketches of the cavitation pattern for KP214 propeller

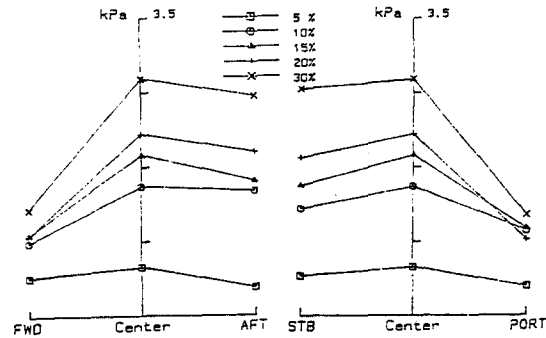


Fig. 13 Distribution of fluctuating pressures on the flat plate according to cavitation extent variation for KP214 propeller in  $J_p=0.68$

Table 4 The summary including test condition and max. fluctuating pressure at center

No.	$K_T$ ( $C_i^{max}$ )	캐비테이션 발생면적	$\sigma_0$	최대 변동압력 at Center	No.	$K_T$ ( $C_i^{max}$ )	캐비테이션 발생면적	$\sigma_0$	최대 변동압력 at Center
KP201	0.142 (0.172)	5%	0.643	0.410	KP206	0.148 (0.127)	5%	0.457	0.824
		10%	0.439	1.100			10%	0.303	2.251
		20%	0.220	2.048			20%	0.199	2.997
	0.131 (0.174)	5%	0.650	0.346		0.133 (0.127)	5%	0.455	0.661
		10%	0.426	1.014			10%	0.296	1.803
		20%	—	—			20%	0.154	2.078
	0.107 (0.171)	5%	0.596	0.316		0.098 (0.120)	5%	0.308	0.661
		10%	0.376	1.049			10%	0.202	1.803
		20%	—	—			20%	—	—
KP202	0.148 (0.225)	5%	0.845	0.297	KP207	0.156 (0.165)	5%	0.619	0.472
		10%	0.522	1.032			10%	0.394	1.253
		20%	0.325	1.889			20%	0.225	2.024
	0.130 (0.217)	5%	0.645	0.358		0.135 (0.159)	5%	0.430	0.779
		10%	0.459	0.922			10%	0.338	1.356
		20%	0.208	1.920			20%	0.218	2.235
	0.111 (0.209)	5%	—	—		0.103 (0.149)	5%	0.374	0.609
		10%	0.452	0.386			10%	0.251	1.236
		20%	0.263	1.600			20%	—	—
KP203	0.156 (0.263)	5%	—	—	KP208	0.108 (0.197)	5%	0.793	0.361
		10%	0.717	0.295			10%	0.490	0.905
		20%	0.536	0.810			20%	0.323	1.885
	0.130 (0.250)	5%	—	—		0.159 (0.189)	5%	0.775	0.368
		10%	0.609	0.346			10%	0.396	1.384
		20%	0.433	1.103			20%	0.280	2.039
	0.111 (0.239)	5%	0.757	0.272		0.142 (0.183)	5%	0.575	0.385
		10%	0.567	0.439			10%	0.379	1.346
		20%	0.403	1.166			20%	0.283	1.973
KP204	0.161 (0.294)	5%	—	—	KP209	0.208 (0.229)	5%	0.938	0.508
		10%	0.922	0.432			10%	0.668	0.795
		20%	0.645	0.722			20%	0.459	1.489
	0.139 (0.281)	5%	—	—		0.163 (0.211)	5%	0.724	0.537
		10%	0.856	0.424			10%	0.563	0.864
		20%	0.606	0.740			20%	0.417	1.280
	0.114 (0.266)	5%	—	—		0.141 (0.203)	5%	0.699	0.489
		10%	0.739	0.433			10%	0.532	0.769
		20%	0.495	1.060			20%	0.357	1.534
KP205	0.178 (0.325)	5%	—	—	KP210	0.208 (0.245)	5%	—	—
		10%	1.105	0.587			10%	0.787	1.664
		20%	0.789	0.674			20%	0.534	1.173
	0.139 (0.301)	5%	—	—		0.162 (0.226)	5%	—	—
		10%	0.926	0.446			10%	0.653	0.759
		20%	0.652	0.941			20%	0.439	1.655
		5%	—	—			5%	—	—
		10%	—	—			10%	—	—
		20%	—	—			20%	—	—

No.	$K_T$ ( $C_i^{max}$ )	캐비테이션 발생면적	$\sigma_0$	최대 변동압력 at Center	No.	$K_T$ ( $C_i^{max}$ )	캐비테이션 발생면적	$\sigma_0$	최대 변동압력 at Center
KP211	0.516 (0.097)	5%	0.371	0.795	KP216	0.160 (0.079)	5%	0.248	2.149
		10%	0.212	2.386			10%	0.184	2.836
		20%	0.120	2.018			20%	—	—
	0.142 (0.098)	5%	0.320	1.073		0.145 (0.080)	5%	0.280	1.458
		10%	0.198	2.518			10%	0.165	2.984
		20%	0.112	2.201			20%	—	—
	0.103 (0.095)	5%	0.186	1.826		0.103 (0.077)	5%	0.206	1.319
		10%	—	—			10%	0.123	2.819
		20%	0.109	3.180			20%	—	—
KP212	0.185 (0.133)	5%	0.656	0.459	KP217	0.210 (0.110)	5%	0.488	0.838
		10%	0.353	1.973			10%	0.279	2.623
		20%	0.209	2.252			20%	0.161	2.224
	0.154 (0.128)	5%	0.453	0.682		0.181 (0.108)	5%	0.432	0.811
		10%	0.267	2.253			10%	0.253	2.934
		20%	0.171	2.854			20%	0.112	3.130
	0.116 (0.119)	5%	0.244	1.411		0.155 (0.104)	5%	0.348	1.328
		10%	0.191	2.260			10%	0.200	3.265
		20%	—	—			20%	0.117	3.830
KP213	0.212 (0.161)	5%	0.690	0.541	KP218	0.214 (0.132)	5%	0.551	0.703
		10%	0.436	2.354			10%	0.359	3.021
		20%	0.287	2.153			20%	0.208	2.882
	0.184 (0.154)	5%	0.503	0.726		0.186 (0.126)	5%	0.472	0.966
		10%	0.348	1.662			10%	0.273	2.962
		20%	0.247	2.727			20%	0.180	3.196
	0.156 (0.147)	5%	0.481	0.613		0.152 (0.120)	5%	0.404	0.772
		10%	0.309	1.663			10%	0.241	2.462
		20%	0.207	3.156			20%	0.148	3.758
KP214	0.240 (0.186)	5%	0.769	0.617	KP219	0.230 (0.149)	5%	0.595	0.785
		10%	0.497	1.948			10%	0.457	1.919
		20%	0.319	2.260			20%	0.261	2.513
	0.203 (0.176)	5%	0.740	0.574		0.184 (0.139)	5%	0.548	0.780
		10%	0.467	1.520			10%	0.371	2.482
		20%	0.302	2.138			20%	0.215	3.498
	0.169 (0.166)	5%	0.653	0.563		0.161 (0.134)	5%	0.577	0.703
		10%	0.432	1.391			10%	0.352	2.387
		20%	0.296	2.380			20%	0.214	3.356
KP215	0.266 (0.208)	5%	1.025	0.679	KP220	0.224 (0.158)	5%	0.681	0.905
		10%	0.729	1.038			10%	0.482	1.960
		20%	0.453	2.120			20%	0.317	2.220
	0.220 (0.193)	5%	0.851	0.720		0.172 (0.147)	5%	0.564	0.839
		10%	0.690	0.819			10%	0.414	2.009
		20%	0.383	2.060			20%	0.272	2.837
	0.173 (0.179)	5%	0.660	0.818			5%	—	—
		10%	0.526	1.358			10%	—	—
		20%	0.341	2.380			20%	—	—

#### 4. 모형시험 결과 회귀해석 및 KD-캐비테이션 차트 도출

설계된 계열 프로펠러의 모형시험 결과를 체계적으로 정리하고 회귀해석을 수행하여 초기 설계 단계에서 유용하게 사용할 수 있는 씨리즈 차트를 도출하였다. 본 연구에서는 계열 프로펠러의 모형시험 단독특성 곡선을 회귀해석하여  $B_p - \delta$  곡선을 도출하였으며 일련의 캐비테이션 실험결과를 정리하여 캐비테이션 추정 곡선을 도출하였다. 본 연구에서는 이를 KD-씨리즈 차트 및 KD-캐비테이션 차트로 명명하였다.

프로펠러 단독시험 결과를 수식으로 표시하는 방법으로 이들 결과를 비교적 간단히 고차 다항식으로 표시하는 통계적 회귀해석법이 많이 이용된다. 즉 동일 날개수와 동일 전개면적비를 갖는 프로펠러의 추력계수  $K_T$ 와 토크계수  $K_Q$ 를 아래식과 같이 피치비와 전진비의 고차 다항식으로 가정하고 최소 자승법을 이용하여 다항식의 계수를 구함으로써 수식으로 표현하였다[6].

$$K_T = \sum C_{ij}^T (J)^i (P/D)^j$$

$$10K_Q = \sum C_{ij}^Q (J)^i (P/D)^j$$

본 연구에서도 위의 방법을 사용하였으며 시

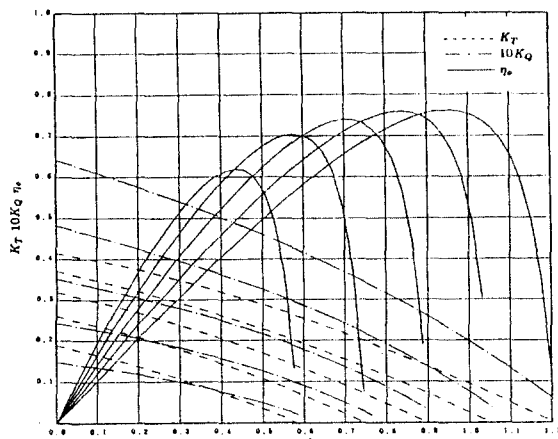


Fig. 14 Regression analysis results of the propeller open water characteristics for KD4-30

험자료의 특성과 가장 유사한 곡선을 얻을 수 있도록 피치비와 전진비에 대해 3차식으로 표시하였다. 최소자승법을 이용하여 계수  $C_{ij}^T$  및  $C_{ij}^Q$ 를 구하였고 이로부터 계산된 프로펠러 단독시험 곡선은 Fig.14, 15, 16, 17에 보였으며 이들 수식화된 식의 적용범위를 Table 5에 보였다.

프로펠러 초기설계시 주어진 설계조건(전달 마력  $P_D$ , 회전수  $N$ , 프로펠러 전진속도  $V_A$ )에서 최적 프로펠러 직경을 구하는 문제가 가장 실제적으로 많이 발생된다. 이러한 경우 Tayer의 동력계수

$$(B_p = \frac{NP^{0.5}}{V_A^{2.5}} = 13.353 \sqrt{\frac{K_Q}{J}})$$

와 Taylor의 전진계수 ( $\delta = \frac{ND}{V_A} = 30.886 \frac{1}{J}$ )를 좌표축으로 하는  $B_p - \delta$  곡선이 가장 널리 사용되고 있다.  $B_p - \delta$  곡선을 Fig.18, 19, 20, 21에서 보였다.

기존의 Burrill 캐비테이션 차트와 같은 캐비테이션 발생량 추정을 위한 도표들은 균일류 중에서 실험한 결과를 이용하여 만든 캐비테이션 차트이기 때문에 반류중에서 작동되는 프로펠러의 캐비테이션 양을 추정함이 정확하지 못하였다.

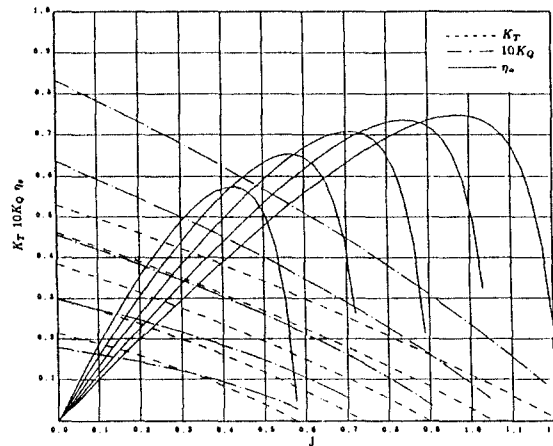


Fig. 15 Regression analysis results of the propeller open water characteristics for KD4-45

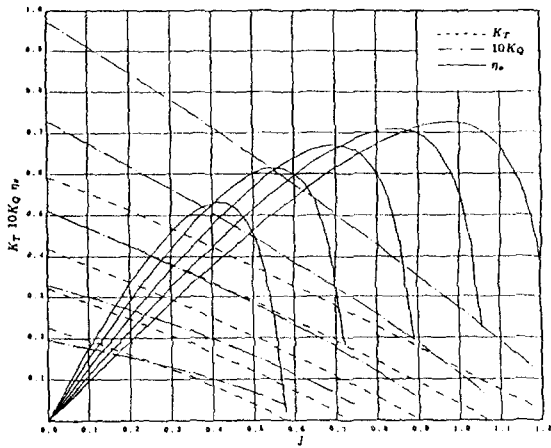


Fig. 16 Regression analysis results of the propeller open water characteristics for KD 4-60

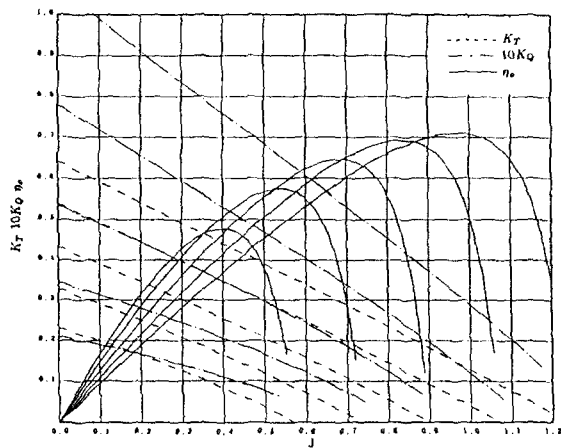


Fig. 17 Regression analysis results of the propeller open water characteristics for KD 4-75

KD 4-30 PROPELLER

TYPE: KT18 thickness, KC18 camber

$$B_p = \frac{NP^{0.6}}{V_A^{2.6}} (= 13.353 \sqrt{\frac{K_Q}{J^3}})$$

$N = R.P.M.$

$$\delta = \frac{ND}{V_A} (= 30.886 \frac{1}{J})$$

$P = D.H.P. \text{ in } PS$

$$A_B/A_O = 0.300$$

$D = \text{Diameter in } m$

$$\text{Hub Ratio} = 0.170$$

$V_A = \text{Advance Speed in } kt$

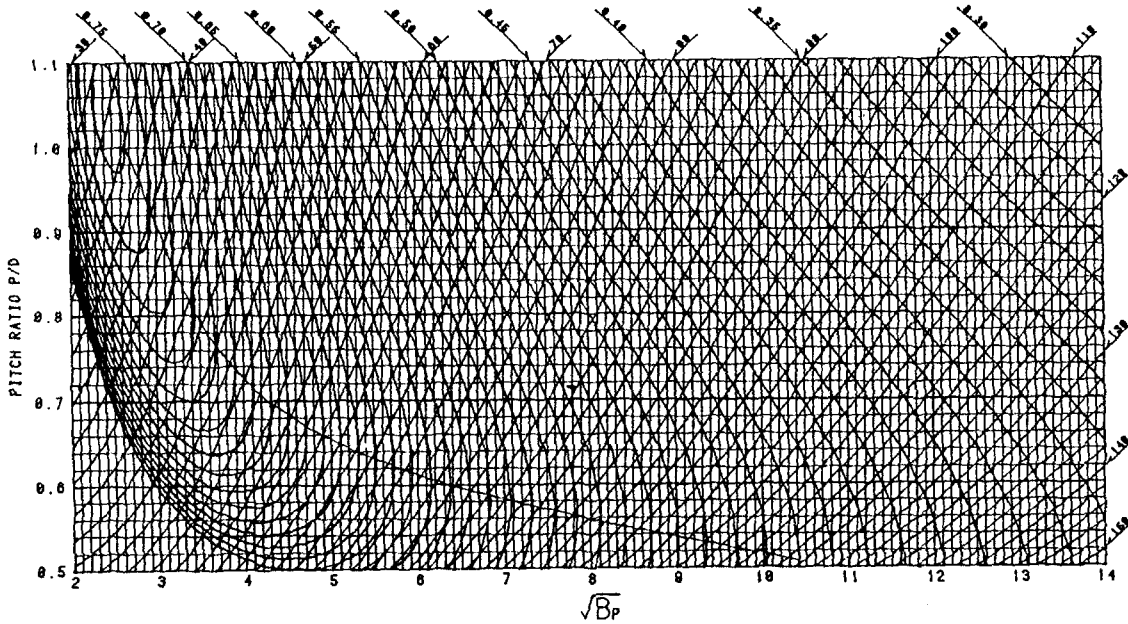


Fig. 18  $B_p - \delta$  curve for KD 4-30 propeller

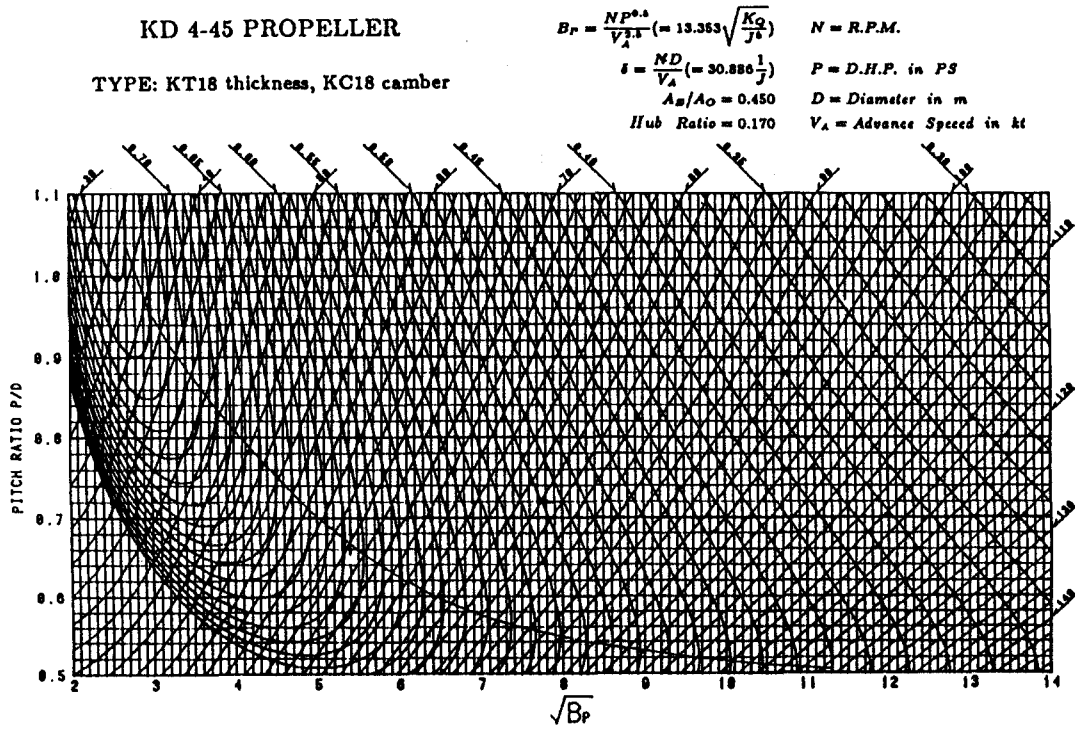


Fig. 19  $B_p-\delta$  curve for KD 4-45 propeller

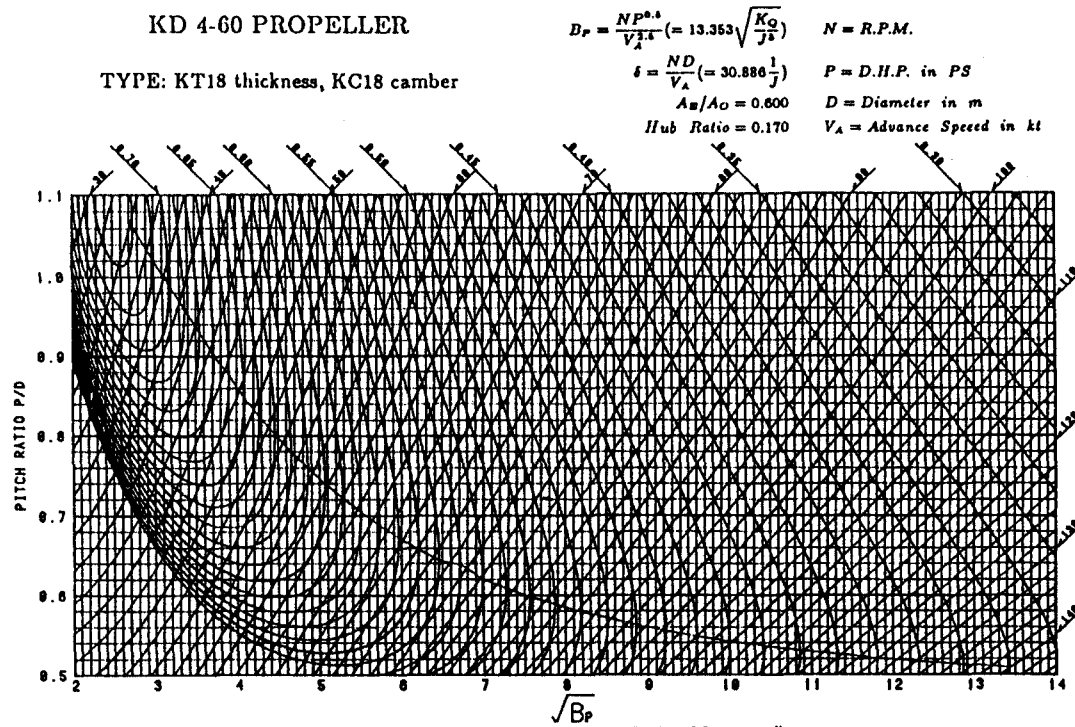


Fig. 20  $B_p-\delta$  curve for KD 4-60 propeller

KD 4-75 PROPELLER

TYPE: KT18 thickness, KC18 camber

$$B_r = \frac{NP^{0.8}}{V_A^{2.6}} (= 13.353 \sqrt{\frac{KQ}{J}}) \quad N = R.P.M.$$

$$\delta = \frac{ND}{V_A} (= 30.886 \frac{1}{J}) \quad P = D.H.P. \text{ in } PS$$

$$A_B/A_O = 0.750 \quad D = \text{Diameter in } m$$

$$\text{Hub Ratio} = 0.170 \quad V_A = \text{Advance Speed in } kt$$

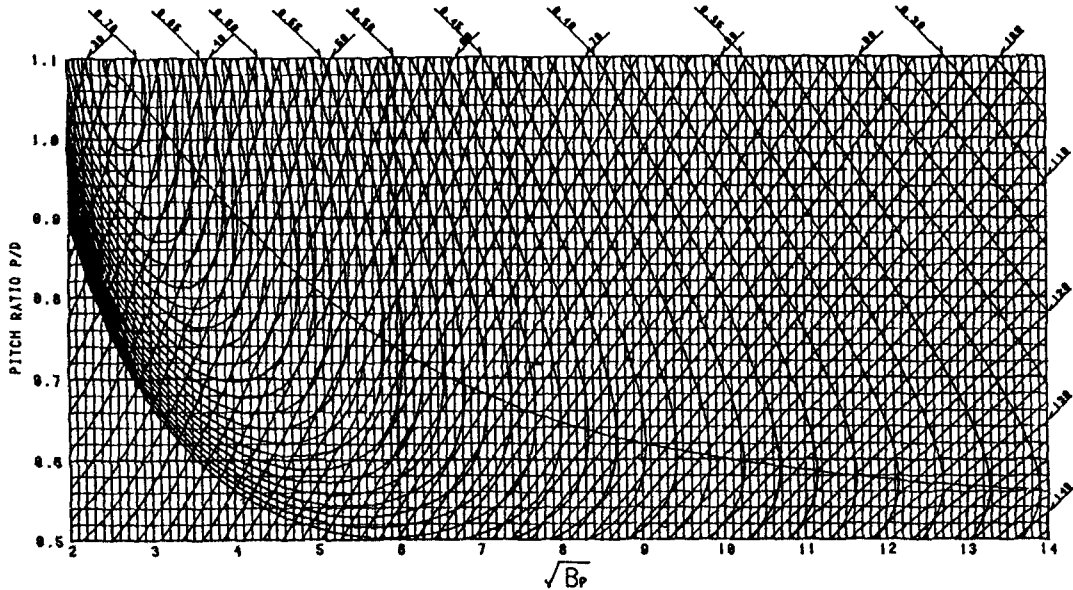


Fig. 21  $B_p-\delta$  curve for KD 4-75 propeller

Burrill의 캐비테이션 차트에서는 프로펠러 추력부하계수 ( $T_c = \frac{T/A_p}{\frac{1}{2}\rho V^2_{0.7R}}$ )를 좌표축으

로 하여 캐비테이션 발생량을 추정할 수 있는 곡선을 도출하였다. 이곳에서 추력부하계수는 프로펠러 날개에 작용하는 평균 추력을 기준으로 선정되었다. 캐비테이션의 발생은 일반적으로 캐비테이션이 발생하는 날개단면의 국부 추력 부하계수에 많은 영향을 받게 된다. 불균일한 선미후류에서 작동하는 프로펠러가 회전하는 순간별 각 날개 단면의 양력계수를 계산하였다. 캐비테이션의 최대발생량을 추정하기 위하여 최대 국부양력계수  $C_{l,0.8R}^{max}$  를 정의하였다.

$C_{l,0.8R}^{max}$  는 불균일 반류중에서 프로펠러가 작동할 때 0.8R 단면의 최대 양력계수로서 비정상 양력면이론에 의하여 계산된 최대 부하량 ( $T_{max}$ )을 이차원 단면 양력계수로 환산하여

다음과 같이 정의하였다.

$$C_{l,0.8R}^{max} = \left( \frac{L_{max}}{\frac{1}{2}\rho U_R^2 C_{0.8R}} \right) = \left( \frac{2\Gamma_{max}}{U_R C_{0.8R}} \right)$$

이때 기준 단면을 0.7R에서 취하지 않고 0.8R 단면을 택한 이유는 실제 캐비테이션이 이곳에서 가장 많이 발생되어지기 때문이며 국부 캐비테이션 수( $\sigma_0$ )의 계산도 0.8R에서 수행하였다.  $C_{l,0.8R}^{max}$  와  $\sigma_0$  를 기준으로 캐비테이션 관찰 시험결과로부터 5%, 10%, 20%, 30% 캐비테이션 발생선을 추정하였으며, 예로 20% 캐비테이션이 발생하는 상태에서의 계열 프로펠러의 시험점들과 그로부터 계산된 추정선을 Fig.22에 보였다.

이와 같은 방법으로 20개의 계열 프로펠러의 캐비테이션 관찰시험 결과를 종합하여 완성한 KD-캐비테이션 차트를 Fig.23에 보였다. KD-캐비테이션 차트는 기존 캐비테이션 차트와 달리 불균일 반류중에서 실험된 결과로 부

터 도출된 캐비테이션 차트이기 때문에 보다 정확한 캐비테이션 추정이 가능하여 졌다. 콘테이너선의 반류분포를 기준으로 택하였으므로 다른 선형에 대하여 캐비테이션을 추정할 경우

반류의 차이에 의한 오차가 발생할 수 있으나 기존의 Burrill 캐비테이션 차트에 의한 추정보다도 그 오차가 훨씬 적으리라 예상된다.

Table 5 Application range of the regression formula for KD-Propeller series

Z	$A_T/A_0$	Name	$P/D$
4	0.30	KD 4-30	0.50~1.10
	0.45	KD 4-45	0.50~1.10
	0.60	KD 4-60	0.50~1.10
	0.75	KD 4-75	0.50~1.10

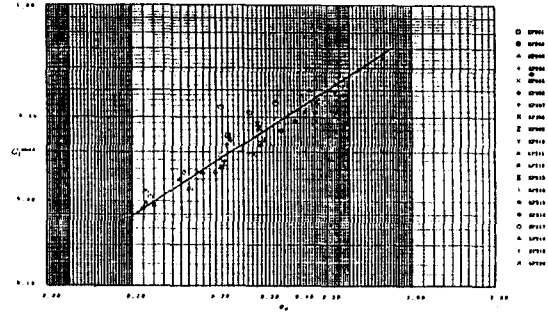


Fig. 22 Comparison of the cavitation prediction curve and the cavitation model test results for 20% cavitating area

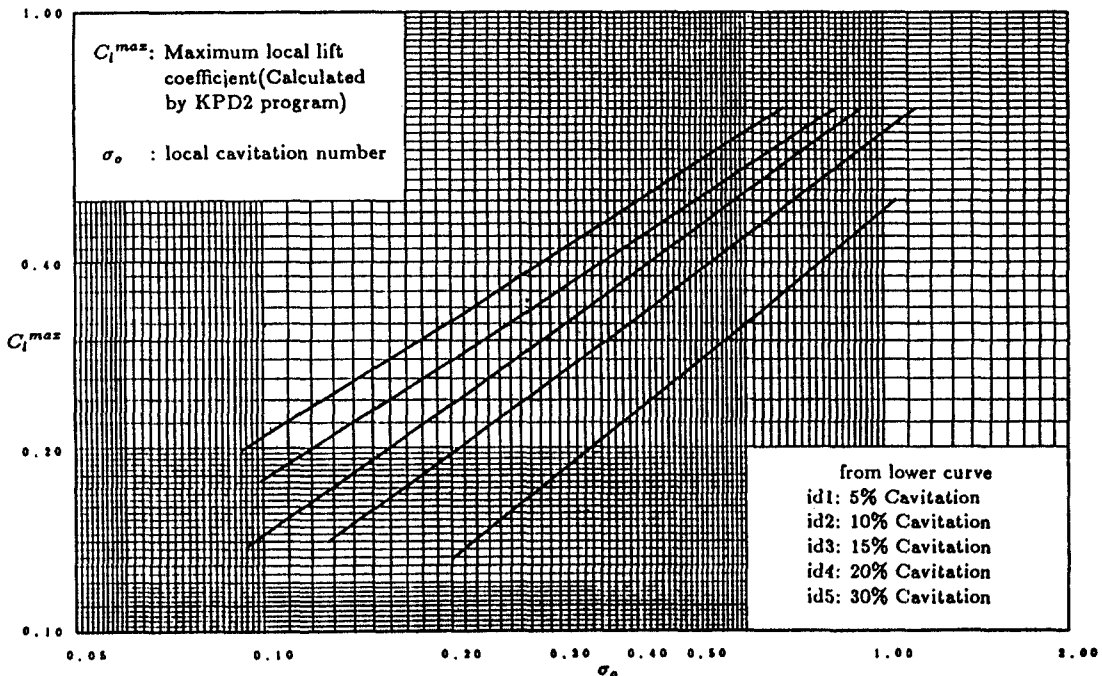


Fig. 23 KD-cavitation chart

5. 결 론

새로운 단면인 KH18 단면을 사용한 계열 프로펠러의 설계, 모형시험 및 회귀해석 과정을 정리하였고 초기설계단계에서 사용될 수 있는 KD-시리즈 프로펠러를 개발하였다.

KD-시리즈 프로펠러의 설계시 콘테이너선

의 반류분포를 기준으로 선택하여 반경방향 부하분포 및 코오드 방향 부하분포를 일정하게 유지시키며 정형화된 프로펠러 형상을 체계적으로 설계하였다. 특히 프로펠러의 코오드 길이, 두께, 스큐 및 레이크 분포는 최근 실적선 프로펠러의 기본 형상제원을 참고로 정형화되었기 때문에 초기설계 단계에서 보다 정확한



성능추정이 가능하리라 예상된다. KD-씨리즈 프로펠러는 날개수 4개인 프로펠러를 대상으로 하였고 날개 전개면적비 4개에 대하여 각각 평균피치비를 5개씩 변화시켜 총 20개의 프로펠러로 구성되어 있다.

설계된 계열 프로펠러에 대한 프로펠러 단독 시험, 캐비테이션 관찰시험 및 변동압력 계측 시험을 수행하여 그 결과를 정리하였고 프로펠러 단독시험 결과를 회귀해석하여 초기설계단계에서 쉽게 사용할 수 있는  $B_p-\sigma$  곡선을 도출하였다. 또한 선체반류중 수행된 캐비테이션 관찰시험 결과로부터 KD-캐비테이션 차트를 도출하였다.

기존의 캐비테이션 차트는 균일류중 캐비테이션 관찰시험 결과로부터 도출되었기 때문에 반류중 작동되는 프로펠러에 대하여서는 캐비테이션 발생량의 추정이 부정확하였다. KD-캐비테이션 차트는 선택된 반류분포중에서 작동하는 계열프로펠러의 캐비테이션 관찰시험 결과를 정리함에 있어 비정상 양력면 이론에 의한 최대 국부 양력계수  $C_{l, 0.8R}^{max}$  를 변수로 채택하여 정리하였기 때문에 반류중에 작동하는 프로펠러에 대하여서도 비교적 정확한 캐비테이션 발생량 추정이 가능하게 되었다.

개발된 KD-씨리즈 프로펠러가 널리 쓰여지기 위하여서는 앞으로 실선시운전을 통하여 KH18 단면을 사용한 프로펠러의 우수성이 확인되어야 한다. 현재 KH18 단면을 이용한 프로펠러의 실선화가 부분적으로 진행되고 있다. 실선 시운전은 여러가지 제약으로 인하여 면밀한 사전 시험계획에 의하여 수행되어야 하며 특히 실선 캐비테이션 관찰시험 및 실선 변동압력 계측시험을 통하여 모형선-실선 상관관계를 확인하여야 한다.

앞으로 실선 시운전 과정을 통하여 KD-씨리즈 프로펠러의 성능이 확인되어 현재 날개수 4개인 계열 프로펠러를 날개수 3개, 5개 및 6개의 프로펠러에 대한 계열 프로펠러로 확장한다면 초기설계 단계에서 유용하게 사용될 수

있는 완성된 계열 프로펠러를 확보할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 대우조선(주)의 수탁사업으로 수행되었으며 관련 제위께 감사드립니다. 본 연구의 진행과정시 여러조언을 아끼지 않으셨던 충남대 이창섭교수에게 감사드립니다. 또한 수많은 실험과 실험자료정리에 노고를 아끼지 않았던 김경열, 이창용氏에게 특별한 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이진태 외, "대우 표준 프로펠러 계열 개발 연구:중간보고서", 한국기계연구소 보고서 BSI584-1030.M.D, 1988. 8
- [2] 이진태 외, "대우 표준 프로펠러 계열 개발 연구:최종보고서", 한국기계연구소 보고서 BSI584-1030.D.
- [3] 이진태, 이창섭, 김문찬, 안종우, 김호충, "새로운 단면을 이용한 고효율 프로펠러 설계법," 대한조선학회 제26권 제3호, 1987.
- [4] 이진태, 김문찬, 안종우, 반석호, 김호충, "새로운 날개단면을 이용한 콘테이너선의 프로펠러 설계법", 대한조선학회 1990년 춘계 연구발표회.
- [5] S. Yamasaki et. al., "Open Water Test Series with Propeller Models for Small Blade Area Ratio(MAU 4-30, 5-35)", *West-Japan Society of Naval Architects, Tans.* No.64, 1982.
- [6] 김문찬, 이진태, "KIMM-NACA 프로펠러 회귀해석", 선박해양 공학연구 Vol.1, 1988.
- [7] J.E. Kerwin and Chang-Sup Lee, "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory", *SNAME Trans.*, Vol. 86, 1987.