

프로펠러 Edge수정에 의한 프로펠러 회전수 증가에 관한 소고

A Note on the Propeller Rotational Speed Increase due to the Propeller Blade Edge Modification



최 군 일
Chol. G. I.

- 현대선박해양연구소
- 1952년 8월 17일생
- 선박추진기설계 및 성능



김 동 진
Kim. D. J.

- 현대중공업(주)
- 1952년 1월 13일생
- 선박기본설계 및 CFD



박 명 규
Park. M. K.

- 한국해양대학교
- 1946년 9월 9일생
- 선박설계 및 CAD/
CAM/NC시스템

Abstract

The causes and the treatments of the rotational speed losses of marine propellers are examined and practical modification methods are discussed. The cutting of the propeller diameter, the modification of propeller pitch and the propeller blade edge modification are briefly reviewed. An example for the propeller blade edge modification, which is regarded to have advantages in cost and workmanship, is presented for a propeller of a large ship.

1. 서 언

본 논문에서는 고정피치 프로펠러의 경우 프로펠러가 예정 또는 설계된 프로펠러 회전수보다 저하되는 경우에 있어서 이의 치유책의 하나인 프로펠러 edge 수정방법에 대하여 기술하고자 한다. 새로 건조된 선박의 프로펠러 회전수가 설계 회전수보다 높거나 낮게 되는 경우가 가끔 발생하는데

시운전 시의 프로펠러 회전수가 설계 회전수보다 큰 경우에는 현재의 상태대로 선박을 운항하거나 또는 프로펠러를 재설계하여 교체하는 방법 이외에는 별다른 방도가 없다. 반면에 작은 경우에는 프로펠러 날개단면의 edge 부분을 절단(cutting) 함으로써 어느 정도까지는 프로펠러 회전수를 증가시킬 수 있다. 가변피치(Controllable Pitch) 프로펠러를 장착한 경우, 이러한 문제는 간단히 해

결될 수 있으나 C.P.프로펠러는 축계의 복잡성, 초기투자비, 강도문제로 인하여 대형유조선, 화물선 등에서는 많이 채용되고 있지 않으며 예인선, 어선, 여객선등 운항상태의 변화가 심한 선박에서 쓰이고 있는 정도이다. 고정피치 프로펠러 장착식 프로펠러 회전수의 저하는 곧 주기관회전수의 저하로 직결되어 주기관에 토크(torque)가 과도하게 작용, 엔진은 소위 토크리치(torque rich) 상태가 된다. 이러한 조건하에서 장시간 주기관을 운전하게 되면 피스톤크라운과 실린더라이너의 온도가 상승하여 피스톤링의 부러짐, 타붙음, 라이너의 균열, 이상마모등 주기관이 심한 손상을 입게 된다. 프로펠러 회전수 저하의 치유책으로 프로펠러 직경 절단(cutting)법, 프로펠러 날개 피치 수정법, 프로펠러 날개단면 edge 수정법 등이 있으나 대형 프로펠러의 경우 프로펠러 날개단면 edge 수정법이 경비, 작업성등 여러가지 면에서 유리하다고 평가되어 근래에는 이 방법이 많이 행하여지고 있다. 국내에서는 그 동안 중소형 선박에 있어서는 프로펠러 제작사를 중심으로 프로펠러 직경 절단(cutting)법 또는 프로펠러 피치 수정법에 의한 프로펠러 회전수 증가를 꾀하여 왔으나 대형선박에 있어서는 이들 방법에 있어 확신을 갖지 못하여 주로 국외 제작사가 작성한 도면에 따라 프로펠러 수정작업이 수행되어 왔다.

본 논문에서는 프로펠러 회전수 저하의 원인과 일반적인 치유책등에 대하여 살펴보고 대형선박에 있어서의 실제 수정방법에 대하여 논하고자 한다.

2. 프로펠러 회전수 판정

해상에서 실제 선박을 주행시키면서 프로펠러 회전수와 엔진 마력과의 관계를 계산하면 프로펠러가 계획된 대로의 성능을 발휘하는지 아닌지를 쉽게 알 수 있다. 이때, 실제 회전수가 계획된 회전수보다 빠르게 회전하는 것을 “가볍게” 설계되었다고 하고 느리게 회전하는 것을 “무겁게” 설계되었다고 한다. 배가 “무겁게” 설계된 프로펠러를 장착하고 운항을 계속하면 단기간에 엔진의 토크가 허용치에 접근하기 쉬우며 이러한 것을 “토르

크리치”라 하는데 이상태가 계속되면 주기관에 여러가지 손상이 발생하기 쉽다. 프로펠러 회전수의 적정 유무는 엔진의 load diagram 을 이용하면 용이하게 판정할 수 있다. 디젤엔진을 탑재한 특정한 선박에 대한 속력 시운전결과(Table 1 참조)를 엔진 load diagram 상에 도시하여 Fig. 1으로 나타낸다. Fig. 1에서 살펴보면 본 선박의 경우에는 실제 프로펠러곡선이 계획 프로펠러곡선보다 왼쪽에 위치하고 있어 프로펠러가 “무겁게” 설계되었음을 알 수 있다. 본 선박은 프로펠러 곡선이 회전수에서 3%의 여유(margin)를 가지고 있는데 이는 계약 당시 선주의 요구에 따른 것이다.

프로펠러 회전수에 약간의 여유를 고려하는 이유는 일반적으로 선박의 경년변화(aging effect)

Table 1. Sea - trial Result

Engine Load	Ship Speed	rpm	B.H.P
abt 75%	14.43KTS	95.37	12225.PS
89%	15.25KTS	100.8	14340.PS
100%	15.78KTS	104.5	16085.PS

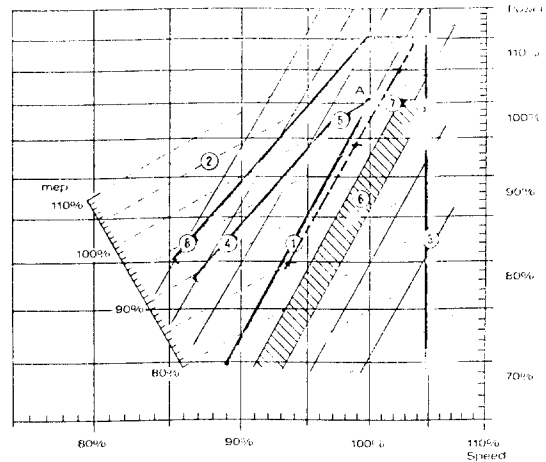


Fig. 1 Engine Load Diagram

1. Propeller curve through point A
2. Constant mean effective pressure lines
3. Speed limit
4. Torque/speed limit
5. Mean effective pressure limit
6. Light running range
7. Power limit for continuous running
8. Overload limit

때문이며 얼마의 여유를 주어야 하느냐 하는 것은 선주의 요구나 주기관에 따라 약간의 차이는 있으나 어느 경우에도 엔진의 최대 회전수를 넘어서는 안된다. 디젤엔진의 경우 3~5% 정도의 여유를 갖는 것이 일반적이다.

3. 프로펠러 회전수 차이의 원인

실선에서 프로펠러 회전수가 설계 회전수와 차이가 나는 이유에는 여러가지가 있겠으나 설계자의 입장에서 생각하면 대개 다음과 같은 사항으로부터 기인된다고 할 수 있다.

(1). 모형시험 생략

소형선박 건조시 선사 또는 선주들이 모형시험 비용을 절감하기 위하여 모형시험(프로펠러 단독 시험, 저항시험, 저항시험등)을 거치지 않고 선박을 건조하면서 프로펠러 설계를 하는 경우가 빈번하다. 이때 선속이나 반류계 수등은 경험식 또는 설계도표"로부터 구하게 되며 이러한 추정치에 근거한 프로펠러의 설계는 당연히 건조 후 문제의 발생소지가 많게 된다. 프로펠러 설계는 주로 계열시험도표^{2,3)}를 이용해서 프로펠러 직경, 피치등을 계산하며 날개단면은 선박의 특성에 맞게 선택하거나 계열시험도표에 따른다(MAU, Wagennin-gen-B).

(2). 모형시험 수행

중형이나 대형선박은 모형시험 비용이 선박건조에 비해 적게 들기 때문에 대부분 모형시험을 실시하고 있으나 모형시험을 수행함에 있어서도 저항 시험은 그 내용상 초기에 예인수조에 비치되어있는 재고 프로펠러(stock propeller)로만 저항 시험을 수행하고 시험을 마무리하는 경우와 더 나아가 재고 프로펠러 시험결과를 근거로 한 최종 프로펠러(final propeller)를 설계한 후 새로 저항 시험을 실시하는 경우로 구분할 수 있다. 전자의 경우 재고 프로펠러의 저항시험 결과만으로 프로펠러 설계를 마무리하고 최종 설계된 프로펠러는 모형시험을 수행하지 않기 때문에 해상 시운전시 프로펠러 회전수가 설계회전수와 차이가 생길 가

능성이 크다. 설계 프로펠러로 저항시험을 거쳐 최종 수정, 설계된 프로펠러를 선박에 장착하는 후자의 경우에도 때에 따라서는 프로펠러 회전수가 일치하지 않는 불상사가 발생하는데 그 근본적인 이유는 하기와 같다.

- 모형시험의 부정확성(계측 및 시험결과 해석)
- scale effect 고려

실선 프로펠러 회전수가 예정 회전수와 차이가 나지 않도록하기 위해서는 설계 프로펠러를 사용한 저항시험을 수행하므로써 설계 프로펠러에 대한 성능을 필히 확인하여야 한다. 물론, 이와같이 하더라도 모형시험일 수밖에 없으므로 실선(full scale)에서는 차이가 날 수 있다. 그래도 최대한으로 오차를 방지하는 방법은 이방법 밖에 없다. 최근 선박이 대형화, 고속화하면서 프로펠러 날개에 가해지는 하중이 증가되어 프로펠러 날개면에서의 캐비테이션(cavitation)이 문제가 되고 있다. 캐비테이션이 과도하게 발생하면 선속 및 프로펠러 회전수 저하가 실제 선박운항시 발생하게 된다. 이러한 현상을 사전에 방지하기 위하여는 설계시 주의하여야하나 최종적으로 공동 수조에서 캐비테이션 성능시험을 수행하여 확인할 필요가 있다.

4. 프로펠러 회전수 저하

프로펠러 회전수 차이의 원인을 주로 신조선에 대하여 설명하였으나 이 단락에서는 현재 취항중인 선박에서의 프로펠러 회전수 저하의 원인에 대하여 논하고자 한다. 취항후 선박은 동일출력에 대한 주기관의 토크가 경년 변화(aging effect)에 따라 증가하는 경향이 있다. 이때 프로펠러 회전수 저하와 함께 주기관의 토크가 과도하게 되어 소위 토크 리치(torque rich) 상태가 된다. 이러한 상태는 선속 저하와 주기관 과부하의 원인이 되기 때 문에 시급히 치유해야 한다. 이러한 성능 저하의 원인은 하기와 같은 것으로 부터 기인된다고 할 수 있다.

- 선체자체의 표면상태의 변화(해양생물등의 부착물, 녹자국 표면파손)
- 프로펠러 표면상태 변화(캐비테이션에 의한

부식, 화학적부식, 부착물)

- 주기관 의 특성저하(주기관의 오손, 마모)

이들중 경년변화(aging effect)는 선박 입저시마다 선체표면의 청소, 프로펠러 표면청소및 수리, 주기관 정비등으로 일시적으로 해소될 수 있으나 원 래의 상태로는 회복이 어렵기 때문에 취항선은 신조선에 비해 영구적인 경년변화가 있기 마련이다. Fig. 2는 일시적인 경년변화와 영구적인 경년 변화에 따른 주기관회전수 저하를 나타낸 것이다. Fig. 2 에서 명백히 알 수 있듯이 일시적인 경년변화가 제거되어도 영구적인 경년변화는 남아있다. 문헌^{5,6)}에 의하면 디젤엔진을 탑재한 선박의 경우 동일마력에서 경년변화에 의한 프로펠러 회전수의 저하는 3~5% 정도이다.

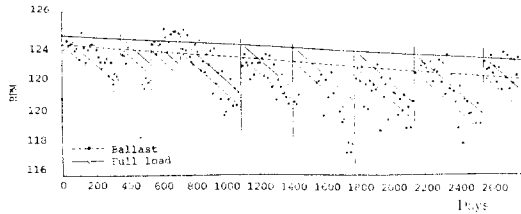


Fig. 2 Aging Effect of Average Propeller RPM

5. 프로펠러 회전수(rpm) 수정 방법

프로펠러 회전수 상승방법에는 아래와 같은 것들이 있다.

(1) 프로펠러 피치 수정방법

프로펠러 날개를 강제적으로 비틀어서 피치를 수정하는 수법은 유럽에서 통상적으로 행해지고 있으나 우리나라나 일본에서는 70년대 전반에 걸쳐 행해져 왔다. 이 방법은 주로 날개두께가 비교적 얇은 소형 프로펠러에서 사용되고 있는데 프로펠러 날개를 강제적으로 비틀어서 영구 변형시켜 피치를 수정하는 것이다. 동작개요는 프로펠러 허브(hub) 부근의 범위를 버너등으로 가열하고 날개 앞부분을 고정시켜 유압재키등으로 날개의 뒷면에 하중을 걸고 날개를 비틀어서 피치를 감소시키는 것이다. 이는 소형어선에서 특히 빈번히 사용되

고 있는 방법으로서 어선의 특성상 시운전후 피치변경이 불가피한 경우가 많이 있기 때문이다. 작업시 주의할 점은 각 날개반경에서 피치변화가 매끈하게 변할 수있도록 날개의 모양에 충분히 주의해서 행할 필요가 있으며 날개를 비틀때 가열온도에 신경을 써서 재질에 변화가 생기지 않도록 해야한다. 소형프로펠러에 있어서 햄머등으로 날개를 때려서 피치를 수정하는 때가 흔히 있는데 이는 현명한 대책이 아니다. 햄머로 치는 경우 각 날개에서 같은 양의 피치를 수정하는 것이 거의 불가능하며 이로 인해 프로펠러에 불균형우력이 생기게된다. 이 방법의 장단점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

장점.

- 대폭적인 피치수정이 가능하다.
- 날개면적 감소가 없어 캐비테이션에 미치는 영향이 적다.

단점.

- 수정작업에 숙련된 기술이 요구된다.
- 프로펠러를 선체로부터 격리시켜야 한다.
- 수정에 공수가 많이 소요되며 특수한 공구가 필요하다.
- 프로펠러 재질에 변화가 생길 수 있다.
- 수정후 각 반경에서 피치계측을 정확히 하여 불균형 우력이 발생치 않도록 해야한다.

(2) 프로펠러 직경 cutting 방법

프로펠러의 단독효율은 아래와 같이 나타낸다.

$$\eta_0 = \frac{TV_A}{2\pi nQ} = \frac{T/\rho n^2 D^4}{Q/\rho n^2 D^5} \frac{1}{2\pi} \frac{V_A}{nD} = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi}$$

- 단
- ρ : 물의 밀도
 - V_A : 전진속도(Advance Speed)
 - T : 추력(Thrust)
 - Q : 토크(Torque)
 - n : 회전수(rpm)
 - D : 직경

위 식에서 알 수 있듯이 프로펠러 효율은 직경변화에 가장 크게 영향을 받는다. 따라서 대형선박등에서 직경 절단은 선속 저하 및 캐비테이션 등에 악영향을 미치므로 사전에 충분히 검토되어야 한다. 프로펠러직경 절단은 프로펠러직경 감소와 함

계 피치비, 전개면적비, 두께비등이 증가되는 결과를 가져오므로 이 점 또한 유의하여야 한다. 이 방법은 소형선박에서 자주 사용되고 있으며 피치수정법보다 공작이 간단하다. 동일 출력에 대한 회전수의 상승률(Δn)은 근사적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta n \% = (1.5 \sim 2.0) \Delta D \%$$

이 방법에 대한 장단점은 아래와 같이 정리할 수 있다.

장점.

- 프로펠러 회전수를 비교적 큰 범위에 걸쳐 수정하는 것이 가능하다.
- 프로펠러를 선체에 장착한 상태에서 가공하는 것이 가능하다.
- 프로펠러 재질에 미치는 영향이 없다.

단점.

- 프로펠러 성능저하로 인한 선속저하 및 캐비테이션 악화.
- 극관성 모멘트 감소에 따른 축계 비틀림진동 검토의 필요.
- Tip 부근에서 가공공수가 많이 소요.

(3) 프로펠러 날개 edge수정방법

프로펠러 날개 edge 수정방법은 전술한 프로펠러 날개의 피치수정법, 프로펠러 직경절단법에 비하여 작업이 간단하고 공수도 적으며 선속등에 미치는 영향이 거의 없어서 최근에 많이 채용되고 있는 방법이다. 이 방법은 Fig. 3에 보인 바와 같이 프로펠러 날개단면의 끝단을 절단하는 것으로서 이로 인해 날개의 nose-tail line이 바뀌고 camber line이 감소하며 따라서 유효 피치가 감소하게 된다. 이와같은 가공으로 감소된 유효피치에 의해 프로펠러회전수를 상승시키는 것이 가능하나 이때 날개 끝단의 수정량은 프로펠러 효율과 캐비테

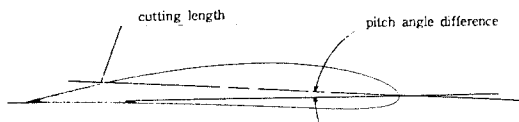


Fig. 3 Propeller Blade Section

이션 성능이 저하되지 않는 범위로 해야한다. 이 방법에 의하면 날개폭 1% 전후의 절단으로 프로펠러 회전수가 1% 정도 상승되는 것이 일반적이며 최대 절단량은 날개폭의 4% 정도가 적절하며⁷⁾ 그 이상의 절단량은 날개 끝단에서의 유체흐름에 악영향을 줄 수 있으므로 삼가는 것이 좋다. 그 이상의 회전수 증가가 요구될 때에는 직경 절단법과의 병용도 가능하지만 성능저하로 인한 선속저하, 캐비테이션 성능저하, 극관성 모멘트 감소에 따른 축계 비틀림진동에 영향을 끼치므로 충분히 주의하여 검토하여야 한다. 해상에서 날개를 절삭할 경우에는 절삭한 무게를 날개마다 확인하여 절삭 후 불균형 우력이 프로펠러 축에 작용치 않도록 해야 한다. Fig. 4에 edge 수정에 의한 증가 회전수를 일례로 나타내고 있으나 오차산포가 많음을 알 수 있다.

이 방법에 의한 장단점은 아래와 같다.

장점.

- 선속저하 및 캐비테이션 성능저하가 무시할

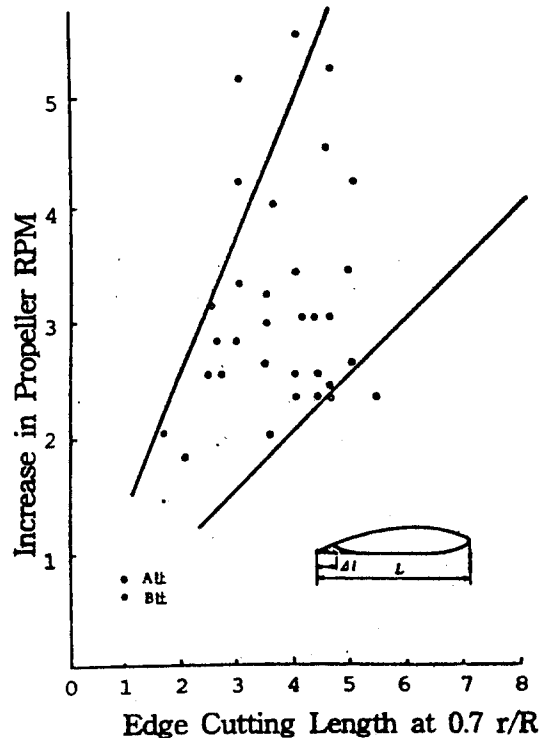


Fig. 4 Propeller RPM Increase by Edge Cutting

만하다.

- 해상에서의 프로펠러 절삭작업이 가능하다.
- 프로펠러의 재질에 변화가 없다.
- 가공이 비교적 간단하다.

단점.

- 회전수 증가량에 제한이 있다.
- 정확한 절삭범위의 계산이 어렵다.

6. 프로펠러 Edge수정법의 실적선 적용

대상 선박에 대한 주요 제원 및 프로펠러 제원은 Table 2 와 같다.

Table 2. Principal Particular of Hull and Propeller

Hull	LBP	234.0m
	Breadth	38.0m
	Depth	23.3m
	Draft	12.2m
	Sea - trial draft	12.22m
Main Engine	Hyundai B & W 6S6MC MCR 15,300ps × 102rpm NCR 13,600ps × 98.1rpm	
Propeller	Design Point Vs = 15.0knots at full load Power 13,600ps × 101rpm	
Propeller	No. of blades	4
	Diameter	6.90m
	Area ratio	0.55
	Hub ratio	0.16
	Blade section	NACA

대상선박은 8척의 동형선(series vessel)으로 3척의 해상 시운전결과, 실선의 프로펠러 회전수가 계획 회전수보다 적게 계속되어 실선 프로펠러 회전수를 2.0 rpm 증가시키기로 하였다. 선박의 속력은 radio log를 사용하여 계속하였으며 엔진출력(engine power)은 torsion meter로 측정하였다. 프로펠러 edge 수정으로 실선 회전수를 2.0rpm 증가시키기 위하여 날개반경 0.5r~0.95r 사이의 날개폭을 각각 1%, 2%, 3% 절삭을 가정한 후 초기 절삭 양을 계산하였다. Trailing edge에서의 절삭가정 도면을 Fig. 5에 나타내었으며 Table 3에 edge 절단에 따른 프로펠러 제원 변화가 나타나있다. 초기 절삭량은 edge 절단길이와 K_Q/J^3 사이의

Table 3. Comparison of Propeller Particulars

	original	1% cutting	2% cutting	3% cutting
Mean pitch(p/d)	0.7242	0.7202	0.7175	0.7140
Exp. area ratio	0.55	0.5468	0.5436	0.5420
Hub ratio	0.16	0.16	0.16	0.16

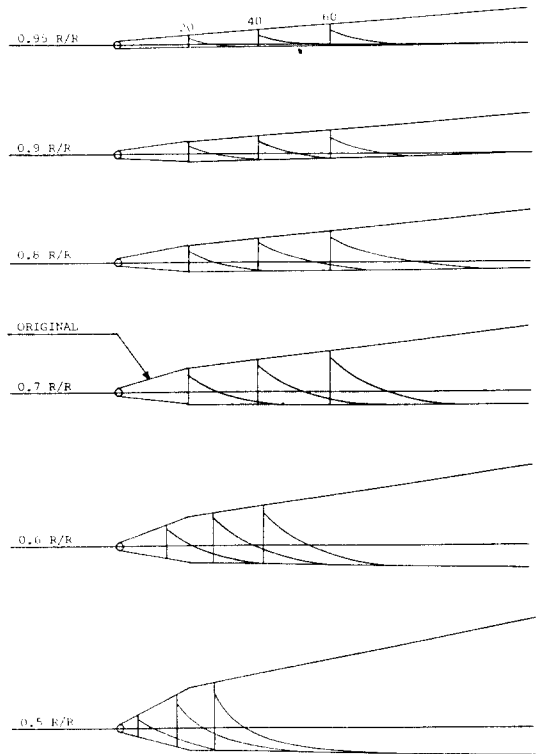


Fig. 5 Detail of Trailing Edge cutting

관계곡선으로부터 graphic interpolation 을 통해 결정된다. 최종 절삭도면은 초기 절삭도면을 기초로 해서 수정 반복계산에 의해 작성된다. 프로펠러 성능계산은 양력면 이론에 근거한 컴퓨터 프로그램¹⁾을 사용하였으며 계산결과는 Table 4 와 같다. Trailing edge의 미소 절삭량에 따른 프로펠러 성능 추정은 어떠한 수치해 법으로도 오차가 있게 마련이므로 세심한 주의가 필요하며 실제적으로 본 프로펠러 해석에서도 1차 절삭으로는 소기의 목적

Table 4. Results of computation

	Original	1% Cutting	2% Cutting	3% Cutting	4% Cutting
J	0.454	0.445	0.445	0.445	0.454
K_q	0.02473	0.02442	0.02383	0.02335	0.2216
K_q/J^3	0.2643	0.277	0.2704	0.2650	

* at V=14.95kts, wake=0.328, Pb=13600ps

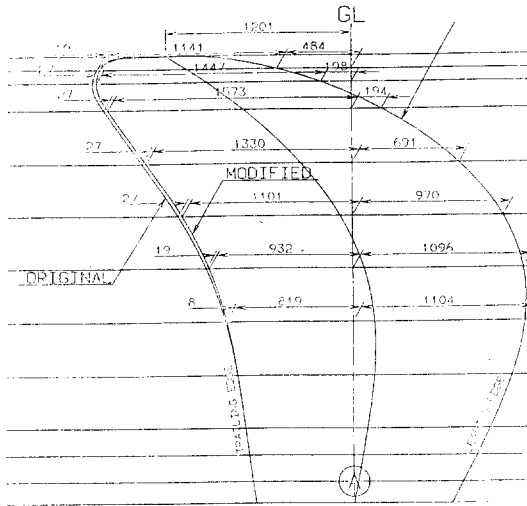


Fig. 6 Expanded View of Modified Propeller

을 달성치 못해 2차 수정을 실시하였다. 경험적으로 미루어 볼 때 1%의 절삭량이 회전수 1%의 초기 추정으로 타당하다고 사료된다. 최종적으로 작성된 수정 프로펠러도면을 Fig. 6에 나타내었다. 수정된 프로펠러를 장착하여 3척에 걸쳐 해상 시

Table 5. Comparison of main particulars

	Original	modified	difference
Diameter(m)	6.90	6.90	-
Disk area(m ²)	37.3928	37.3928	-
Expanded area(m ²)	20.6558	20.4950	- 0.1608
Expanded area ratio	0.5500	0.5450	- 0.0050
Pitch ratio(mean)	0.7242	0.7189	- 0.0053
Boss ratio	0.160	0.160	-
Moment of inertia in air(kg m ²)	0.20365E06	0.20335E06	- 0.00030E06
No. of Blades	4	4	-
Weight(kg)	23065.	23051.	- 14.
Material	IN. AL. BR	NI. AL. BR	NI. AL. BR

운전한 결과 실선 프로펠러 회전수가 예정 회전수 (rpm)대로 측정됨을 알 수 있었다.

7. 결 론

주기판의 과부하 여부는 엔진의 load diagram에 선박의 마력과 회전수 관계를 도시하므로써 판단할 수 있으며 프로펠러가 “무겁게” 되어 있는 경우에는 프로펠러 수정에 의해 프로펠러 회전수를 적정 회전수로 조절할 수 있다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 신조선의 경우, 설계 프로펠러를 사용한 저항시험을 수행하여 해상시운전에서 발생할 수 있는 프로펠러 문제를 사전에 최소화 하는 것이 최선이다.

(2) 프로펠러 회전수를 증가시키는 방법으로 프로펠러피치 수정법, 프로펠러 직경 절단법, 프로펠러 날개 edge 수정법등이 있으나 대형선박의 경우 선속 저하등의 문제를 고려할 때 프로펠러 날개 edge 수정법이 권고 할 만하며 실제적으로도 많이 이용되고 있다.

(3) 동형선의 시운전 결과로부터 프로펠러 날개 edge 수정방법의 유효성이 입증되었다.

(4) 프로펠러 날개 edge 수정방법에 의한 최대 회전수 증가는 3~4 rpm 정도가 적당하다.

(5) 프로펠러 설계시 회전수 여유는 경년변화에 의한다.

(6) 선박의 모형시험은 반드시 수행되어야 한다.

참고문헌

- 1) SV.AA. Harvald, "Resistance and propulsion", John Willey & Sons, 1983.
- 2) Van Lammeren, W.P.A. et al, "The Wageningen B - Screw series", Trans SNAME, 1969).
- 3) Kobe steel Ltd., "Design Chart of MAU type Marine Propellers", May, 1972.
- 4) Kobe steel Ltd., "Surface Roughness vs Efficiency of Propeller" June, 1982.
- 5) Propeller and Shafting Committee of MESJ, "Research of the Main Engine Manufacture's Recommendation on Propeller Design", Journal of the MESJ Vol. 13, No. 9, Sep. 1978.
- 6) K. Yokota, S. Okubo, K. Deguchi, M. Matsuda, "Aging Effect of Propulsion Efficiency of Ship", Sumitomo Technical Bulletin Vol. 83, Aug. 1980 .
- 7) Propeller and Shafting Committee of MESJ, "Propeller Modification for Recovery of Decreased Propeller Shaft Speed" Journal of the MESJ Vol. 26, No. 10, Oct. 1981.
- 8) 최 군일, 최 길환, 이 상규, 장 봉준, "Computer Integrated Propeller Design Package Program", 대한조선학회지 춘계 연구발표회, Apr. 1990