

선박용 디젤엔진과 프로펠러 특성에 관한 해설 (2)

남성 프로펠러 공업사
대 표 김 용 직
해 사 기 술 연 구 소
선임연구원 강 병 윤

4. 프로펠러의 특성 및 설계

4.1 프로펠러 법칙 및 적용

프로펠러 법칙은 초기설계 단계에서 선속과 마력을 근사적으로 추정할 때 적용되는 법칙으로서 프로펠러의 토크-회전수 및 마력-회전수의 관계에 있어서 배의 저항은 선속의 자승에 비례하고 ($R_t \propto V_s^3$), 추진계수 (w, t)는 선속의 변화에 상관없이 일정하다는 가정하에 성립하는 이상적인 법칙이며, 간단히 정리하면 다음과 같다.

1) 프로펠러의 회전수는 선속에 비례한다 ($RPM \propto V_s$)

2) 프로펠러 토크는 회전수의 자승에 비례한다 ($Q \propto RPM^2$)

3) 프로펠러에서 발생하는 마력은 회전수의 삼승에 비례한다 ($DHP \propto RPM^3$)

그러나, 이러한 프로펠러 법칙은 모형시험자료 또는 시운전 결과를 토대로 정리한 Fig. 4-1에서도 알 수 있는 바와 같이 속장비 (V/\sqrt{L})가 1보다 작은 배수량형 선박에서는 비교적 잘 만족되어지나, 속장비 (V/\sqrt{L})가 1

을 넘어가거나 배수량형이 아닌 선박인(수중익선, 공기부양선, 활주정 등) 경우에는 잘 맞지 않는다.

이에따라, 선체나 프로펠러 표면의 거칠어짐, 날씨 또는 해면상태의 변화 등으로 인한 저항증가나, 특정속도에서의 급격한 저항증가(Hump point)에 대해서는 속도와 저항간의 비례상수에 가중치를 주어 계산한다.

Fig. 4-2는 이러한 관점에서 특히 배수량형 선박에 관하여 선속과 배의 저항, 선속과 마력, 회전수와 마력 등의 상호관계를 나타낸 실례로서 비교를 위하여 프로펠러 법칙에 근거한 값과 실선 계측치를 함께 나타내었다.

4.2 프로펠러 단독특성

(1) 단독특성의 개요

프로펠러 단독특성은 프로펠러의 거동을 지배하는 법칙을 연구하고 관련성능을 비교 혹은 논의함에 있어 필수적으로 동반되는 주요인자로서, 선체에 매달지 않은 프로펠러만의 모형실험을 통하여 구한다. 그리고, 이러

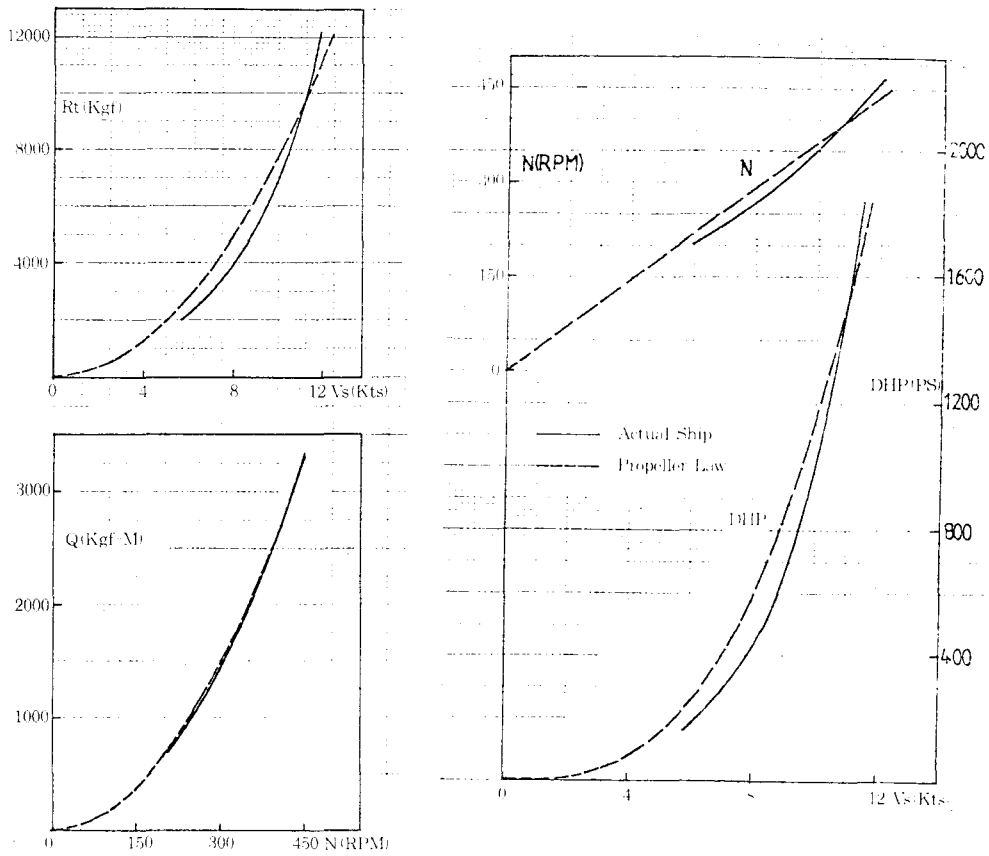


Fig. 4-2 실제 배수량형 선박의 저항, 추력, 마력 및 회전수 곡선

한 프로펠러만의 단독성능은 다음과 같은 무차원계수를 사용하여 나타낸다.

가) 전진계수 (J; Advance Coefficient) ; 프로펠러의 회전수 (N) 와 직경 (D), 전진속도 (VA) 를 구성인자로 한 값으로 다음과 같다.

$$J = \frac{V_A}{nD}$$

나) 추력계수 (Kt; Thrust Coefficient) ; 프로펠러의 회전수 (n) 와, 직경 (D), 물의 밀도 (ρ) 로 부터 추력 (T) 를 구할 때 사용하는 비례상수

$$K_t = \frac{T}{\rho n^3 D^5}$$

다) 토크계수 (KQ; Torque coefficient) ; 토크 (Q) 를 구할 때 사용하는 비례상수

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^3 D^5}$$

라) 단독효율 (ηo; efficiency in open water) ; 프로펠러에 전달되는 마력 (DHP) 과 그때 발생하는 추진마력 (THP) 과의 비로서, 프로펠러가 유효하게 일을 하는 비율을 나타낸다.

$$\eta_o = \frac{TV_A}{2\pi nQ} = \frac{K_t J}{2\pi K_Q}$$

이들 계수는 통상 단독성능곡선이라 불리는 Fig. 4-3 과 같은 도표로서 정리되어진

다. 그리고, 이러한 프로펠러 단독특성치의 이용은 모형시험을 통하여 실선프로펠러의 성능을 구할 때에 많이 사용되는데, 이것은 K_T 와 K_Q 가 무차원 값이므로 실선프로펠러와 어느 정도 큰 모형프로펠러가 그 형상이 기하학적으로 상사하다면, 그 2개 프로펠러의 K_T 및 K_Q 와 J 의 관계가 같다고 생각할 수 있기 때문이다. 또한, 전진계수 (J)는 프로펠러 날개의 성능을 나타내는 계수 중의 하나인 슬립과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$S_R = 1 - \frac{V_A}{P_n} = 1 - \frac{J}{P/D}$$

여기에서, P 는 피치, D 는 프로펠러직경, P/D 는 피치비이다.

그러므로, 전진계수가 증가한다는 것은 슬립이 감소하는 것을 의미하며, 이는 다시 프로펠러 날개와 물의 흐름 방향이 이루는 각(입사각)이 작아지고, 최대효율이 발생하는 입사각까지는 전반적으로 효율이 좋아지게 된다는 것을 쉽게 설명할 수 있게 한다.

그러므로 피치비 (pitch ratio)가 1.0인 경우에는 $1 - V_A/P_n = 1 - V_A/D_n$ 로 되고, 또한 J 의 눈금이 곧 바로 (1-슬립비)의 눈금으로 된다. 그리고 Fig. 4-3에서도 알 수 있는 바와 같이 $J=1.0$, 즉 슬립비가 0일 때도 추력이 존재하며, 이 보다 약간 높은 $J=1.10$ 부근에서

없어진다는 것이다. 이것은 프로펠러 날개 단면에서 발생하는 양력이 0이 되는 입사각 (zero lift angle)의 크기에 영향을 받은 것이다.

(2) 단독특성에 대한 이론적 고찰

프로펠러를 이상화하여, 그것을 통과하는 유체의 압력을 순간적으로 상승시켜 주는 원판 또는 기구로 간주하여 운동량이론 (Momentum Thoery)을 적용하면, 프로펠러가 발생하는 추력과 그에 따른 효율은 다음과 같이 나타내어진다.

$$T = \rho A_o V_A^2 \left(1 + \frac{S}{2}\right) S$$

$$= \rho V_A^2 \pi D^2 \left(1 + \frac{S}{2}\right) \frac{S}{4}$$

$$\eta_o = \frac{1}{1 + \frac{S}{2}}$$

여기에서, 슬립비 S 는 원판통과에 따른 유체의 속도증가량 bV_A 와 원판이 유체속을 지나가는 속도 V_A 와의 비로 주어진다. 즉

$$S = \frac{bV_A}{V_A} = b$$

그러므로, 프로펠러 효율은 슬립비를 작게 (전진계수를 크게) 하는 것이 유리하며, 이는 곧 프로펠러의 회전수를 줄여서 가속비 (fractional acceleration)를 작게 하는 것이 바람직하다는 결론에 도달하게 된다. 하지만, 이 경우에 프로펠러의 직경을 변화시키지 않고 그대로 둔다면 추력은 줄어들게 되기 때문에, 동일추력을 효율 좋게 발생시키기 위해서는 회전수의 감소에 따른 추력감소분을 보상할 만큼 직경을 키워야 한다. 이것이 흔히 이야기하는 저회전 대직경 프로펠러의 유리한 점이다.

그러므로, 이러한 저회전 대직경의 요구조건으로부터 프로펠러의 추력의 한계는 사용엔진의 용량 외에도 선형상 주어지는 직경의

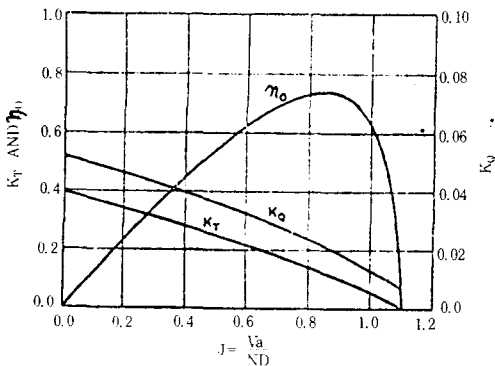


Fig. 4-3 프로펠러의 단독특성곡선

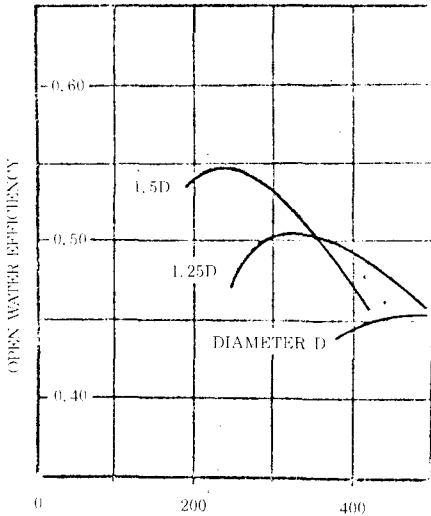


Fig. 4-4 프로펠러의 직경과 회전수의 변화에 따른 효율변화

제한조건과 회전수에 따른 캐비테이션, 그로 인한 날개의 손상에 대한 예방책 등에 따라 정해지게 된다.

Fig. 4 4는 프로펠러의 직경과 회전수, 효율의 상관관계를 이러한 관점에서 정리한 예이다.

4. 3 고정피치 프로펠러

(1) 고정피치 프로펠러의 개요 및 설계 주요 고려항목

고정피치 프로펠러는 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 선박용 추진기로서, 프로펠러의 날개(blade)와 보스(boss)가 일체로 구조되고, 보스의 중앙부에는 큰 구멍이 있어서 프로펠러축에 끼워넣게 되어 있다.

이러한 프로펠러의 설계에 필요한 주요 요목은 자항시험, 캐비테이션 시험 등의 관련 시험을 통하여 확정되기도 하나, 대개 프로펠러의 계통적 단독시험결과를 이용한 설계도표에 의한 방법과 이론적 계산(순환이론)

에 의한 방법으로 구하는 예가 많다.

설계조건으로 주어지는 것으로는 선체요목 및 형상, 주기종류, 출력 및 회전수(연속최대 및 상용), 프로펠러 장착위치 등이 있으며, 설계에 있어서 주의해야 할 주요점은 다음과 같다.

- 가) 주어진 주기의 출력을 가장 유효하게 추력으로 변환시킬 수 있도록 한다.
- 나) 캐비테이션으로 인한 추력감소(Trust Break down)를 최대한 줄인다.
- 다) 엔진이 과부하 상태가 되지 않도록 설계 한다.
- 라) 선체 거칠기 및 해상상태의 변화, 엔진의 노화 등에 기인하는 선체부하(Ship Loading)변화에 대한 여유를 고려한다.
- 마) 프로펠러 날개는 주기출력을 흡수함에 있어서 충분한 강도를 가지도록 한다.
- 바) 프로펠러 잠김률, 날개 끝 여유(Tip Clearance) 등을 고려하여 프로펠러의 작동에 기인하는 진동이 최소가 되도록 한다.

(2) 고정 피치프로펠러 설계 주요도표

앞에서 언급한 단독 특성곡선이 시험을 통한 고정피치 프로펠러의 성능평가에 주로 사용되는 것이라면, 설계에 있어서는 모형프로펠러의 계열시험결과를 토대로 작성되어진 다음과 같은 설계도표가 많이 사용되어 진다.

가) $Bp-\delta$ 또는 $Bu-\delta$ 도표

이들 두가지의 도표는 설계자의 편의를 고려하여 계산상의 적용마력만을 달리 취한 것에 불과하고 그 개념은 동일하며, 주로 저속 또는 중속 선박의 프로펠러 설계에 많이 사용된다.

이들 도표를 이용하면 설계조건으로서 주기출력 또는 프로펠러의 추력, 항해속력, 프로펠러 회전수, 반류계수 등이 주어진 경우

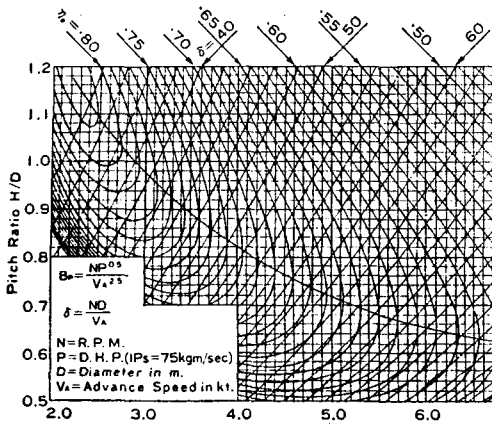


Fig4-5 Bp-δ 도표

에 프로펠러의 효율, 직경, 피치 등의 요목을 산정 할 수 있다.

이들 계열도표의 대표적인 것으로는 네델란드의 선형시험수조에서 작성한 바게닝겐 (Wageningen) 시리즈와 일본 선박연구소가 만든 MAU시리즈가 있으며, 시험에 사용된 프로펠러의 단면 형상은 모두 에어포일형을 개선한 형상이다. Bp~δ 도표에서의 Bp와 δ 는 통상 출력계수, 지름계수 등으로 불리우지며, 각각 다음과 같이 주어진다.

$$B_p = \frac{N \cdot P^{0.5}}{V_A^{2.5}}, \quad \delta = \frac{N \cdot D}{V_A}$$

여기에서, N은 프로펠러의 매분회전수, P는 전달마력, D는 프로펠러의 지름이며, V_A는 프로펠러의 전진속도로서 배의 속도와 반류계수로 부터 V_A = V_s(1-W)로 주어지게 된다.

그리고, Bu-δ 도표는 상기의 Bp의 산식 중 전달마력 P대신에 다음과 같이 정의되는 추력마력을 적용한 것이다.

$$B_u = \frac{N \cdot U^{0.5}}{V_A}, \quad U = \frac{T \cdot V_A}{75}$$

Fig4-5는 Bp-δ 도표의 예를 나타낸 것이다. 그리고 Bu-δ 도표는 도표중에 횡축 Bp값 대신에 Bu값을 산정해 넣으면 된다.

나) C_T-J 및 C_P-J도표

고속정프로펠러의 설계에 주로 사용되는 도표이며, 여기에서 C_P와 C_T는 앞서의 Bp및 Bu와 마찬가지로 계산상의 동력 기준만을 달리 취한 것으로 각각 다음과 같이 주어진다.

$$C_T = \frac{8T}{\rho \pi D^2 V_A^2}, \quad C_P = \frac{8P_s}{\rho \pi D^2 V_A^3}$$

여기에서, ρ는 유체의 밀도이며, P_s는 축력 (Shaft power), T는 프로펠러의 추력이다.

이들 도표는 Taylor선형시험수조 (DTMB)에서 작성되어진 것이며, 적용상의 조건인자이나 설계항목 등은 Bp-δ 및 Bu-δ의 경우와 대동소이하다.

Fig. 4-6과 Fig. 4-7은 이들 도표를 예시한 것이다.

다) 프로펠러 설계도표 사용상의 유의점

설계도표로부터 구한 프로펠러의 계산결과와 실제에 임밀히 말하자면 각각의 설계도표 작성에 사용된 계통적 모형프로펠러와 상사한 프로펠러에 한해서만 신빙성을 가진다고 할 수 있다. 그러나, 실제의 프로펠러 설계에 있어서 이들 모형프로펠러와 똑같은 형상의 것을 그대로 채용하는 경우는 극히 드물다. 그러므로, 프로펠러의 여러가지 설계 파라미터 중에서도 성능에 큰 영향을 주는 피치비 (Pitch ratio), 날개면적, 날개수 및 단면형상 등의 변화에 대해서는 삼간법을 적용하거나 축적된 경험적 감각을 토대로 수정작업을 행하여 그 효과를 반영하여야 한다.

이외에도, 프로펠러단독시험, 자항시험, 케비테이션시험 등을 동원하여 직접설계를 행하는 경우에는 시험결과를 정리한 관련도표의 적용에 있어 설계점 (Design Point)은 최대효율에 대하여 충분한 여유 (Margin)을 두

어 정하여야 하고, 필요시 설정하는 중간설계점(Off design Point)은 험프점(Hump-point)를 고려하여 결정하여야 한다.

4.4 가변피치 프로펠러

(1) 가변피치 프로펠러의 특성 및 주요 고려항목

가변피치 프로펠러에서는 한 축에 달린 날개들이 각각 개별적으로 허브(Hub)에 연결되어 있으며, 프로펠러가 회전하고 있는 동안에도 허브속에 들어 있는 연동장치에 의해서 날개들의 피치를 임의로 변화시킬 수 있고, 음(-)의 피치도 줄 수 있게 되어 있다.

배의 입장에서 본 가변피치 프로펠러의 주된 장점으로선 예선, 트롤 어선, 도선 및 소해정 등과 같이 운항조건이 심하게 바뀌는 배에서 항상 그 조건에 맞추어 프로펠러의 피치를 조정할 수 있다는 점으로, 즉 피치의

조정을 통하여 추력(Thrust)을 증감시킬 수 있고, 배의 조종성(Maneuverability)를 향상시킬 수 있으며, 저속조종성, 정지 및 후진성능이 우수한 이점이 있다.

이외에도 설계상의 구체적인 장점으로 다음과 같은 것들이 있다.

- 가) 임의로 프로펠러의 회전수 마력곡선을 바꿀 수 있다. 즉, 여러가지 선체부하 조건 각각에 적합한 토크를 줄 수 있다. 그러므로, 프로펠러 설계시 회전수 여유(RM)와 엔진 여유(EM)을 고려할 필요가 없다.
- 나) 선체저항의 변화에 따라 추력을 적당히 증감시킬 수 있어 해상상태에 대한 여유(SM)을 고려할 필요가 없다.
- 다) 설계시 관련도표상의 험프점(Hump Point; Off-design point)을 고려하지 않아도 된다.
- 라) 기타 복합추진시스템(Combined Propulsion System), 즉 디젤·디젤 조합(CODAD),

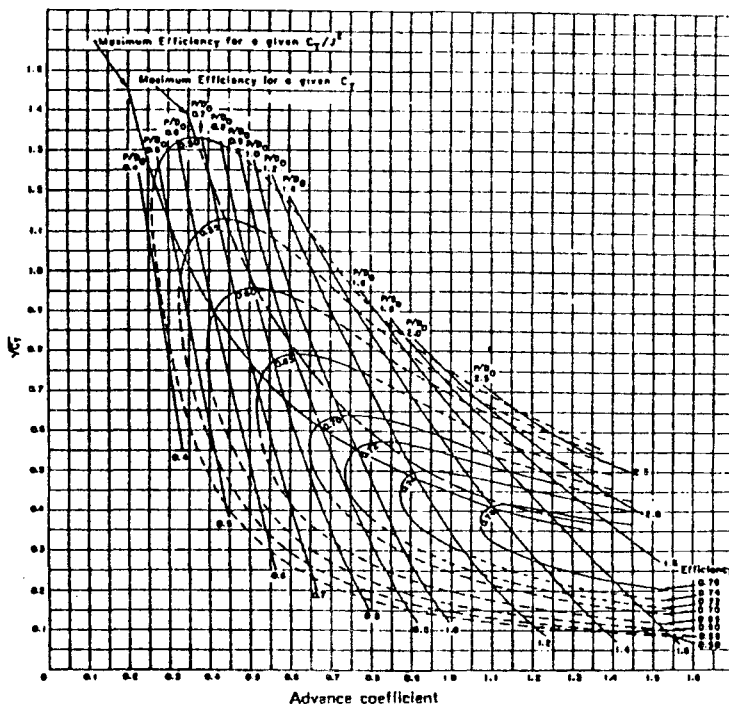


Fig. 4-6 C_T J

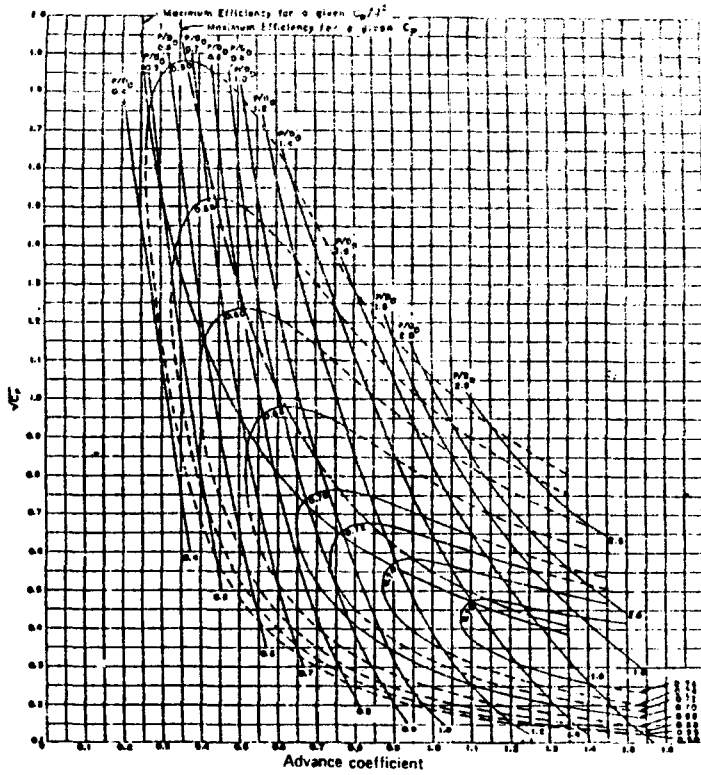


Fig. 4-7 CP-J

디젤 및 가스터빈조합(CODAG), 디젤 또는 가스터빈조합(CODOG) 등의 시스템을 설계하는데 편리하다.

그러나, 가변피치 프로펠러는 무엇보다도 가격이 비싸고 복잡하다는 것이 큰 단점의 하나로 지적되며, 최적 운항상태를 찾아서

그 조건에 따라 설계하여야 하는 어려움이 있고, 별도로 최적 피치-회전수 Setting Program을 필요로 한다.

(2) 가변피치 프로펠러 설계 주요도표

가) 단독 특성곡선

가변피치 프로펠러의 단독 특성곡선은 피치를 변수로 하는 여러개의 고정피치 프로펠러의 단독특성을 중첩시킨 것으로, Fig. 4-8과 같이 추력계수(K_T), 토크계수(K_Q) 및 프로펠러 효율(η_o)의 곡선군으로 나타난다. 이들 각각이 가지는 의미와 상호관계는 4.2절에서 설명한 바와 같다.

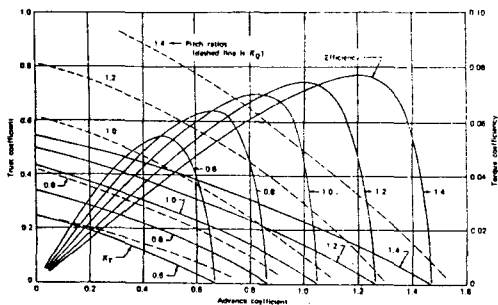


Fig. 4-8 가변피치프로펠러의 단독특성곡선

나) 회전수-마력 곡선

상기 Fig. 4-8과 같은 프로펠러 단독특성곡

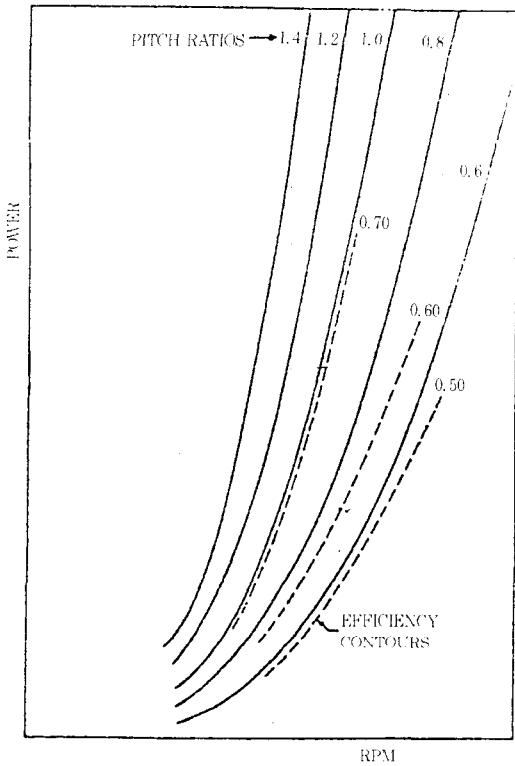


Fig. 4-9 가변피치프로펠러의 회전수-마력선도

선이 구해지면, 프로펠러법칙이 만족한다는 가정하에 가변피치 프로펠러의 회전수에 대한 마력(RPM-BHP)곡선은 다음과 같이 추정하여 마련될 수 있다.

- ① RPM-BHP도표상의 좌표(1.0, 1.0)를 설계점 (design point) 으로 가정한다.
- ② 설계점에 대한 프로펠러 전진계수(J_0), 추력(K_{T0}), 토크계수(K_{Q0}) 등을 계산한다.
- ③ 회전수를 동일한 상태로 두고 피치비(P/D)만을 변화시키면, 이로 인하여 추력, 토크, 마력, 전진속도 등이 달라지고 전진계수, 추력계수, 토크계수 등은 설계점과 아래와 같은 관계가 성립하게 된다.

$$J/J_0 = V/V_0$$

$$K_T/K_{T0} = T/T_0$$

$$K_Q/K_{Q0} = Q/Q_0 = P_s/P_{s0}$$

$$T/T_0 = (V/V_0)^2$$

여기에서, 점자O가 붙은 것은 설계점의 값을 표시하고, 점자가 없는 것은 다른 피치비에 대한 값을 나타낸다.

- ④ 상기식으로부터 프로펠러 부하계수는 $K_T/J^2 = K_{T0}/J_0^2$ 로 되며, 이를 관계식이 설계점을 지나도록 K_T - J 선도에 나타낸다.

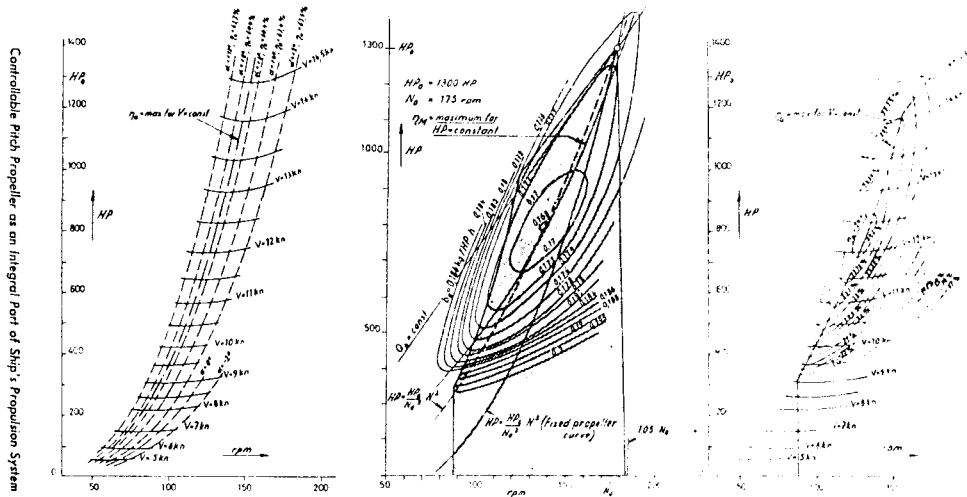


Fig. 4-10 실제 가변피치프로펠러의 선속, 회전수 마력, 연료소비율의 상호관계도표

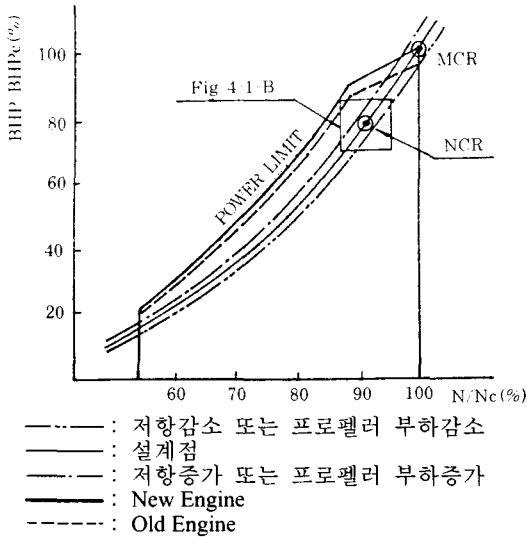


Fig. 5-1 엔진의 노화에 따른 성능곡선의 변화

- ⑤ '④' 식을 다시 고쳐쓰면 $K_T/K_{T0} = (J/J_0)^2$ 로 되며, 이식을 통하여 K_{T0} 와 J_0 의 값으로 임의의 K 값에 대한 피치별 J 값을 찾아낸다.
- ⑥ 피치별로 구한 J 값에 대해 단독특성곡선으로 부터 K_0 값을 구하고, '다' 항의 세 번째 식을 이용하여 P_s/P_{s0} 를 계산한다.
- ⑦ RPM-BHP평면에 N/N_0 에 따른 P_s/P_{s0} 를 표시하고, 프로펠러법칙에 근거하여 원점을 지나는 3차원 곡선으로 나타낸다.

그리고, 저항-속도곡선, 등 연료소비율 곡선, 등효율곡선, 프로펠러 단독특성 곡선, 기타 저항추진계수 (w, t, η_r, η_i) 등을 입수할 수 있으면, 이를 포개어 놓으므로써 Fig. 4-10과 같은 RPM-BHP곡선을 마련할 수 있다. 그리고 이들 도표를 이용함으로써 실제 프로펠러의 운전상태별 회전수, 피치, BMEP 및 선속 등의 적정조합을 구할 수 있다.

5. 엔진과 프로펠러의 상호관계

5.1 기본개념

특정엔진의 성능을 만족하면서 프로펠러가

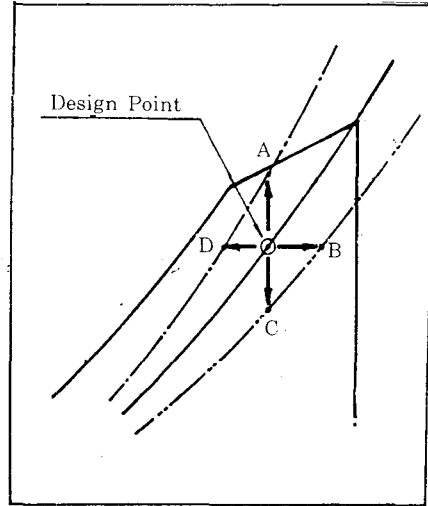


Fig 5-2 프로펠러 부하곡선의 변화에 따른 엔진회전수 및 선속의 변화

안정된 평형점에서 최적효율로 구동될 수 있도록 하기 위해서는 앞서 언급한 엔진과 프로펠러의 특성에 관한 충분한 이해를 토대로 이들 양자를 최적결합시키는 것이 중요하다.

엔진과 프로펠러의 최적결합은 간단히 설명하면 엔진의 출력 제한곡선 (Limit Power Curve) 과 프로펠러 부하곡선 (Propeller Load Curve) 을 포개어 놓고 설계요망점과 최적평형운전점이 일치하도록 하는 일이다. 하지만, 이러한 출력제한곡선과 부하곡선은 엔진의 종류와 적용선종, 엔진의 노화상태, 프로펠러 날개의 손상이나 피치, 선저오손 및 해상상태 등에 따라 변화하기 때문에 정확한 Matching을 위해서는 이 두가지 곡선의 다음과 같은 기본적인 특성을 파악하고 있어야 한다.

(1) 엔진출력 제한곡선의 변화특성

일반적으로 엔진주변조건의 변화와 노화는 회전수의 범위에는 그다지 영향을 미치지 않으나, 엔진출력의 저하를 초래한다. 이러한 엔진출력의 저하는 대개 엔진의 종류에 따라 다소 차이는 있으나 Fig. 5-1과 같이 엔진출력제한곡선이 일률적으로 저하하는 것으로 나타난다.

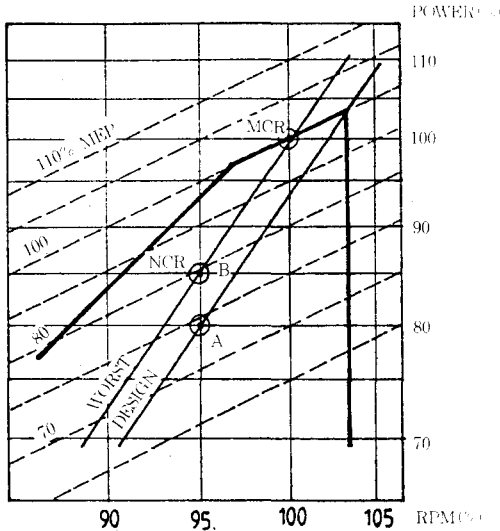


Fig. 5-3 허용여유

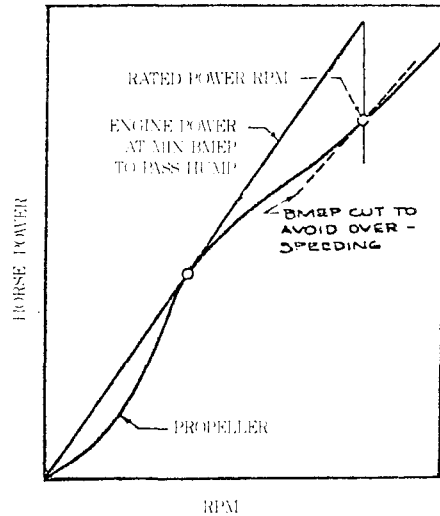


Fig. 5-4 부하곡선상의 험프(Hump)

따라서, 이러한 특성을 추정하기 위해서는 주변조건에 따른 저하특성을 파악할 수 있는 엔진제작업체의 상세한 자료가 필요하며, 엔진의 종류 및 적용선종, 사용연수 등에 기인하는 노화현상에 대한 기술적인 자료외에도 경험적인 감각이 뒤 따라야 한다.

(2) 프로펠러 부하곡선의 변화특성

프로펠러 부하곡선의 변화는 대개 다음과 같은 요인에 기인한다.

가) 선체부하 (Ship Loading), 해상상태, 선체저질기 등의 변화와 항주상태에 기인하는 선체저항의 변화

나) 프로펠러 설계시 고려하는 해상여유 (SM), 회전수 여유 (RM) 및 엔진여유 (EM) 등에 따른 설계점의 변화

다) 프로펠러 거칠기에 따른 프로펠러 효율 (η_p)의 변화

이러한 요인으로 인한 프로펠러 부하의 변화는 프로펠러 부하곡선을 Fig. 5-2와 같이 좌우로 이동시키는 결과를 초래하며, 이에 따라 프로펠러 부하곡선이 엔진의 정격출력점을 통과하지 못하게 된다.

부하의 증감에 따른 출력, 회전수 및 선속의 상호관계를 살펴보면,

- 가) 저항이 계획보다 적은 경우
 마 력 = 일정 ; 회전수 증가 → 선속 증가 (B)
 회전수 = 일정 ; 출력저하 → 계획선속 (C)
 - 나) 저항이 계획보다 큰 경우
 마 력 = 일정 ; 회전수 증가 → 선속 감소 (D)
 회전수 = 일정 ; 출력증가 → 계획선속 (A)
- 로 된다.

즉, 저항이 증가하거나 프로펠러 부하가 증가하면 프로펠러 부하곡선 (Load Curve) 은 왼쪽으로 기운다.

5.2 디젤엔진과 고정피치 프로펠러

앞서 설명한 바와같이 엔진이 선정되면 엔진의 특성상으로 주어지는 사용가능한 회전수 및 마력을 알 수 있으며, 그 영역의 범위 내에 Fig 5 3과 같은 최적운항점이 존재하게 된다.

따라서, 프로펠러 설계자는 프로펠러가 가능한 이 운항점에 맞게 구동되도록 피치를 정하고 제요소를 설계하여야 한다.

그러나, 통상 프로펠러 설계자료의 대부분은 선박의 이상적인 상태에 근거하고 있으며, 바람이나 파랑등으로인한 저항증가를 무시하고 있을 뿐만 아니라, 선체 및 프로펠러

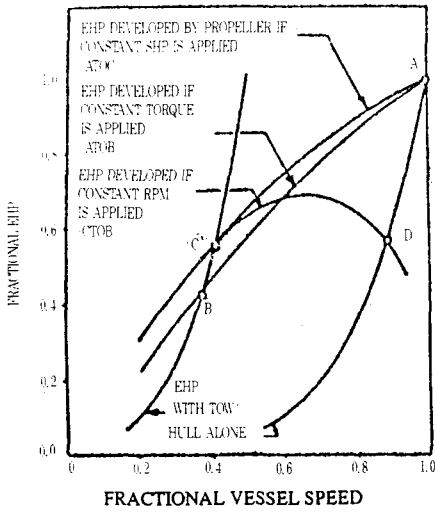


Fig. 5-5 예인선의 저항특성

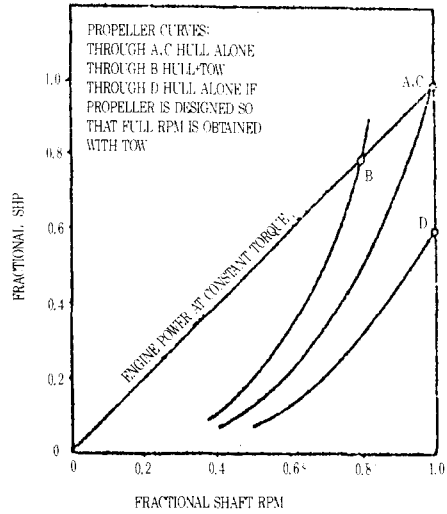


Fig. 5-6 예인선의 프로펠러 부하곡선(CPP)

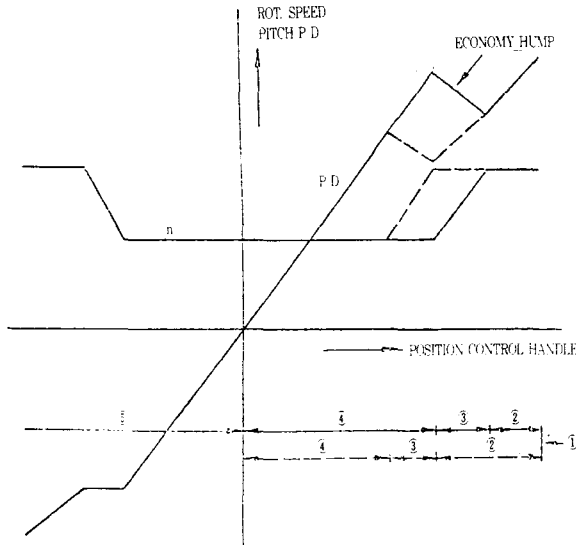


Fig. 5-7 Pitch Setting Program

- : 단독항주 상태 (free running cond.)
- - - : 예인 및 예망 상태 (towing & trawling cond)
- ① : 최대선속 운항점 (maximum speed point)
- ② : 예인 및 예망 영역 (towing & trawling range)
- ③ : 경제적 험프 (economy hump)
- ④ : 저속 조종 영역 (low manoeuvring speeds)
- ⑤ : 후진 상태 (astern conditions)

표면은 깨끗하다고 가정하고 있다. 하지만, 실제의 선박은 사용연수가 경과함에 따라 선체 및 프로펠러의 표면이 점점 거칠어지고, 또한 운항상의 바람이나 파랑에 의한 저항증가도 무시할 수 없다.

그러므로, 고정 피치 프로펠러를 설계하는 경우에는 이러한 영향을 고려하여 마력과 회

전수에 여유(Margin)를 두어야 하며, 만약 전혀 여유없이 Fig. 5-3 B점과 같은 점을 기준으로 설계하면 실제운항시에 엔진과부하(overload)를 초래한다. 이러한 설계점 및 설계여유는 선종 및 엔진의 종류에 따라 달라지는데 특히, 예인선이나 Trawler선 같은 선박은 표면거칠기나 해상상태에 의한 저항증가 보

다 예인시의 부하증가가 더욱 더 심각하다.

이에따라, 이들 선박의 경우에는 다소 값의 차이는 있기는 하지만 통상 단독 항주시에 A점, 예인시에 B점에 대응하여 구동되도록 설계한다.

이외에도 활주정(Planing Boat), 수중익선(Hydro-foil craft), 공기부양선(ACV, Hovercraft)의 경우에는 부하곡선상에 Fig 5 4와 같이 험프점(Hump point)이 나타나므로, 이를 고려하여 설계 하여야 한다.

5.3 디젤엔진과 가변피치프로펠러

가변피치프로펠러(Contralable pitch)는 4.4절에서도 설명한 바와같이 여러개의 고정 피치프로펠러의 효과를 하나로 조합한 것으로, 피치의 조종을 통하여 임의로 프로펠러 부하곡선을 바꿀 수 있는 이점이 있다.

그러므로, 가변피치프로펠러의 설계에 있어서는 고정피치의 경우와는 달리 저항증가 요인이나 회전수 여유, 엔진여유 등과 같은 부하변동요소를 고려할 필요가 없다. 이에따라, 가변피치프로펠러는 예선, 트롤어선, 도선 등과 같이 운항조건이 심하게 바뀌는 선종에 많이 채용된다.

Fig. 5-5와 Fig 5 6은 이들 선박의 선속, 엔진과 프로펠러의 출력, 회전수 등의 상호관계를 예를 들어 나타낸 것으로 Fig 5-5는 단독항주시(Free Running Cond.)와 예인시(Towing Cond.)의 선체저항과 엔진의 조건별 출력상태를 함께 도시한 것이며, Fig 5-6은 엔진을 일정 토크 기관의 개념으로 보고 피치를 고정피치라 가정하여 상기 EHP를 기준으로 SHP를 추정한 것이다.

Fig 5 5에서 단독 항주시의 설계점을 A점에 두면 예인시에는 B점에 대응하므로 고정 피치프로펠러의 경우에는 엔진 과부하가 예상된다. 하지만, 가변피치프로펠러에서는 피치를 감소시키면서 회전수를 상승시키므로써 C점에 대응하게 조정할 수 있다.

또한, 역으로 예인시의 설계점을 A점으로 하여 단독항주시에 D점에 대응할 것으로 예상되면 피치를 증가시키므로써 다시 A점으로 되돌릴 수 있다.

따라서 가변피치 프로펠러는 단독운항이나 예인에 상관없이 엔진의 평균 유효압력을 증가시키지 않고도 100%회전수에 100%출력으로 운전할 수 있다.

하지만, 선박의 운항상태에 따른 엔진의 최대회전수 달성, 최대출력흡수등의 조건만의 만족으로 가변피치프로펠러를 설계할 수 있는 것은 아니며, 앞서 소개한 Fig 4 10과 같은 도표를 통하여 최소연료소모량, 프로펠러 효율 등도 함께 고려하여야 하고, 선박 조종성의 관점에서도 검토가 뒤따라야 한다.

이상에서도 알 수 있는 바와 같이 가변피치프로펠러에서는 각 운항상태별로 날개의 피치를 정하는 것이 아주 중요하다. 이에따라, 가변피치프로펠러를 채택하는 선박에서는 통상 그 선박의 용도에 따라 엔진운전상태별로 출력, 회전수, 피치, 선속등의 상호관계를 나타내는 Pitching Setting Program을 작성한다.

Pitching Setting Program의 작성방법에는 엔진 회전수를 기준으로 피치를 설정하는 Speed Control법과 프로펠러 토크(Q)에 따라 설정하는 Load Control법이 있다. Fig 5 7은 그 대표적인 예를 나타낸 것인데, 운항상태에 따라 저속조종(Low Speed Maneuvering), 예인영역(Towing), 단독항주(Free Running), 후진(Astern)등으로 나누어져 있음을 알수있다. 하지만, 피치설정은 엔진특성 및 프로펠러 곡선의 변화특성에 대한 검토외에도 작동에 따른 기계적시스템, 선박조종성등과 함께 종합적으로 검토하여야 하기 때문에 매우 복잡하고 어렵다.

6. 엔진 선정 및 프로펠러 설계

6.1 엔진의 선정

선박주기관(Main Engine) 선정시의 고려요

소는 선종에 따라 그 중요도는 다소차이가 있으나 대개 다음과 같은 것을 검토하는 것이 바람직하다.

- 신뢰성 (Reliability)
- 유지 및 보수성 (Maintainability)
- 공간 및 배치조건 (Space & Arrangement requirement)
- 중량조건 (Weight requirement)
- 진동 소음성능 (Vibration & Noise requirement)
- 가격 (Cost)
- 연료소모량 (Fuel consumption)
- 국부출력 및 과도성능 (Fractional power & Transient performance)
- 보기와의 상호관계 (Interrelations with auxiliaries)
- 후진성능 및 최소마력 (Astern capability & min. power)
- 레이팅 제한 (Rating limitation)

이들의 우선순위는 주로 설계 또는 건조예정 선박의 종류, 용도 및 추진장치 (propulsive device) 등에 따라 달라지는데, 예를 들면 소형고속정인 경우에는 설치가능 여부 및 중량, 어선은 조업성에 따른 요소, 군함인 경우에는 조종성 관련요소 등이 중요 요소로 된다.

간단히 요약하면, 최적 엔진은 선종, 선박의 성능, 선주의 운항채산성을 종합적으로 검토하여 선정하여야 한다.

6.2 프로펠러의 설계

상기의 엔진선정조건에 따라 엔진이 정해지면 선박의 용도에 따라 운항조건을 고려하여 프로펠러 설계가 행해지게 된다.

고정피치프로펠러 (FPP) 인 경우에는 일반적으로 프로펠러의 효율 (Efficiency), 진동 (Vibration), 케비테이션 (Cavitation) 등에 주안점을 두어 설계를 수행하게 되는데, 대부분 선박의 주운항 상태에서의 프로펠러 효율이 최대가 되도록 설계 하는것이 기본이며 선체 진동에 특히 문제시 되는 선박에 대해서는 다소

간의 효율감소를 감수하더라도 진동 측면을 제일로 고려하게 된다. 물론 어느 경우에도 케비테이션은 대체로 효율을 저하시키고 진동을 야기하기 쉽기 때문에 이를 피할수 있도록 설계한다. 하지만, 가끔 고속정에서는 최소한의 효율저하를 감수하는 범위 내에서 케비테이션을 설계에 미리 반영하는 경우도 있는데, 부분 케비테이션 프로펠러 (Partial Cavitation Propeller) 와 완전 케비테이션 프로펠러 (Super Cavitation Propeller) 가 그 예이다.

그리고, 프로펠러로 인한 진동은 우선 축계와의 공진여부, 선미반류의 조화차수 등을 고려하여 프로펠러 날개수 (Z) 를 정하고, 팁 언로딩 (Tip Unloading) 및 스큐 (Skew) 의 개념을 채택하여 Surface Force, Bearing Force 등의 선미변동 압력을 줄인다.

가변피치 프로펠러에 대해서도 기본개념은 이와 동일하며, 상반된 운항조건 (만재 및 경하, 예인과 단독항주 등), 후진 성능, 저속 조종성 등을 특히 고려하여야 할 경우에 채택하는 것이 바람직하다.

이외에도, 예인선의 예인력, 트롤어선의 예망력, 저속선의 선속증가 등을 위해서는 덕트 (Duct: Kort Nozzle) 을 설치하는 것도 좋은 방법 중의 하나이다.

그리고, 에너지 절약의 방안으로 프로펠러 주변의 선체에 부가물 (Energy Saving Device) 를 설치하기도 하고, 프로펠러 직경이 제한되는 경우에는 탠덤 프로펠러 (Tandem Propeller), 상반 회전프로펠러 (Contrarotating Propeller) 등을 채택하기도 하는데, 이들에 대해서는 다음 기회에 별도로 언급하기로 하고 여기에서는 제외한다.

7. 결론

우수한 성능의 경제적인 선박을 설계하기 위해서는 뛰어난 설계기술, 풍부한 경험 및 관련자료 등이 필수적이라 하겠다.

하지만, 선박설계의 가장 근본적인 기술은 선박 운용자의 요구조건과 조선공학적 이론

을 적절하게 조화시키는 것으로, 이를 위해서는 설계선박의 특성이 규명되는 초기 계획단계에서의 선주 또는 수산·해운 관계자와의 원활한 의사교환이 제일 전제조건이 된다.

본고에서는 이러한 의미에서 주기관과 프로펠러에 대한 기초지식과 관련주요 도표에 대하여 살펴보았다. 이 분야를 담당하는 조선기사들에게는 미흡한 점이 다수 있을 것으로 짐작되어지나, 선박을 운용 또는 관리하는 측면의 관점도 고려하여 가능한 한 복잡한 수식과 어려운 이론에 대해서는 기술하지 않았다. 그러므로, 좀 더 구체적이고 폭 넓은 지식을 원하는 분들에게는 참고문헌에 열거한 책자 및 자료가 충분한 도움을 줄 수 있을 것으로 기대하는 바이다.

[참고문헌]

- [1] SV.AA.Harvald "Resistance and Propulsion of Ship", JOHN WILEY & SONS, Nov., 1972.
- [2] Roderick A.Barr and Robert J. Etter, "Selection of Propulsion Systems for High-Speed Advanced Marine Vehicles", Marine Technology, Jan., 1975.
- [3] John B. Woodward, "A Summary of Engine - Propeller Interaction", SAE, Jan., 1972.
- [4] R. Herrmann and Y. Cochet., "Advanced Technology Diesel Engines to Meet the Requirements of modern naval Vessels", Symposium on Small Fast Warships and Security Vessels, May, 1980.
- [5] F. Schanz. "The Controllable Pitch Propeller as an Integral Part of the Ship's Propulsion System", Trans. of SNAME, vol. 75, 1967.
- [6] "The Design and Performance of Highly Skewed Controllable pitch Propellers", Motor Ship, Aug., 1981.
- [7] O. Bjorheden, "Controllable pitch Propellers", WEGEMT, Aug., 1983
- [8] Ir. L.A. Van Gunsteren, "Design and Performance of Controllable Pitch Propellers", SNAME, March. 1970
- [9] 金極天 "主機와 프로펠러의 相關關係", 大韓造船學會誌, 1975. 5.
- [10] 임상전譯, "基本造船學", 1975. 4.
- [11] 朴命圭, 金容直. "선박 프로펠러 설계시 여유개념과 설계점", 韓國船舶機關學會誌., 1988. 8.
- [12] 横尾幸一, 矢崎敦生, "中小型 船舶ふろべら設計法と參考圖表集", 成山堂 書店 (日本), 1973
- [13] 西島清一郎 編著, 船用機械工學 (第 1 分冊), 海文堂 (日本), 1965.
- [14] 池田勝 著, "高速艇の設計と製圖", 海文堂 (日本), 1978
- [15] John B. Woodward, "Low Speed Marine Diesel", JOHN WILEY & SONS, Nov., 1972.
- [16] "3500 & 3600 Engine Data Sheet-Performance Curve index", Catapillar, jan., 1986
- [17] "6M28AFTE Engine Performance Curves", Niigata Engineering CO. LTD.
- [18] "VASA 12V32 Operating Field", Wartsila Diesel and S, Borgundsvag.

노는 기쁨 순간이고

일한 보람 오래간다