

프로펠러와 디젤·엔진의 最適結合

서울大學校 工科大學

教授 金 極 天

1. 序 言

昨今, 船舶을 運航하는 사람이나 만드는 사람들이 함께 「에너지節約」과 「人間性回復」이란 口號를 많이 외친다. 前者는 燃料節約으로 거창하게는 人類의 可用에너지 資源을 아끼고 작게는 運航經濟性을 높이자는 뜻이고, 後者는 船員들을 振動·騒音으로부터 보호하고 동시에 作業能率을 極大化 하자는 뜻으로 풀이된다.

에너지 즉, 燃料의 節約을 위하여서는 무엇보다도 抵抗이 작은 船型, 燃料消費率이 작은 엔진, 效率이 높은 프로펠러 등의 開發이 根本課題이다. 이 세 課題는 지난 1世紀 동안의 수많은 碩學들의 努力으로 많은 成果가 있었고 지금도 많이 努力하고 있으나, 學理的으로는 부족되어 넘기 어려운 限界性이 있어 보인다. 그러므로 우리는 다른 보다 작은 要素들에 대하여서도 적극적으로 눈을 돌려야 하겠다. 그중의 하나가 推進裝置의 設計나 船舶運航에 있어서 프로펠러와 엔진의 最適結合을 實現하는 일이다.

이 문제에 관한 理論은 극히 간결한데, 저자의 見聞으로는 實際로 잘 實行되고 있지 못한 例가 많은 것 같으며, 특히 漁船에서 그러한 것 같다. 그래서 이 機會에 이 문제에 관한 基本知識을 소개하고자 한다.

2. 디젤·엔진의 運轉特性

디젤·엔진의 出力 즉, 制動馬力 BPS, 制動平均有效壓力 BMEP 및 每分回轉數 RPM_e 사이에는 定常運轉 範圍內에서 다음 관계식이 성

립한다.

$$BPS = K \cdot (BMEP) \cdot (RPM_e) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 K 는 주어진 엔진 고유의 常數인데, 作動形式(2行程式 또는 4行程式), 行程體積 및 실린더數 등에 따라 결정된다.

(1)로부터 엔진토크는 BMEP에 比例함을 알 수 있는데, 엔진의 常用運轉 範圍內에서라면 體積效率 및 機械效率이 피스톤速度와는 무관하게 一定値를 갖는다고 간주할 수 있어서, 每사이클 當 燃料噴射量이 일정할 경우 BMEP도 일정하다. 달리 표현하면 BMEP는 사이클당 燃料噴射量에 따라 결정되며, 엔진出力과 RPM_e의 관계는 直線比例的이다(그림 1 참조). 그러므로 우리는 디젤·엔진을 一定토크機關이라고 부른다.

프로펠러와 엔진의 最適結合 문제(以下 matching이라 표현함)에 있어서 엔진特性에 관련하여 留意하여야 할 일은 주어진 RPM_e에 대하여 期待할 수 있는 出力은 燃料噴射量 외에도 다른 因子들에 의하여 制限된다. 즉, 그림 1에서 보는 바와 같이 過給機의 脈動現象 또는 燃燒條件上의 制約, 排氣溫度上의 制約, 실린더의 最高壓力上의 制約, 過給機의 回轉速度上의 制約등이 있는데, 이와 같은 因子들의 制約條件은 엔진마다 다르다.

따라서 주어진 엔진에 대하여서 그림 1과 같이 運轉許容條件 및 (1)의 관계를 尺度를 넣어서 나타낸 그림 資料를 入手하여야 한다.

3. 프로펠러 特性

여기서 프로펠러라 함은 보통 사용하는 螺旋 프로펠러를 지칭한다. 어느 한 RPM에서 프로

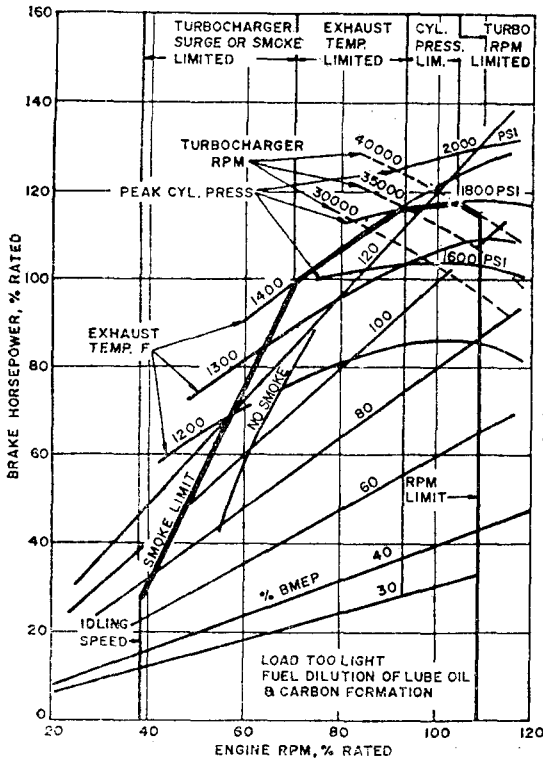


그림 1. 디젤·엔진의 運轉(또는 出力)限界

펠러의 定常的 驅動에 必要한 토크 또는 馬力은 프로펠러自體 및 船舶의 特性과 狀態에 따라 달라진다. 즉, 프로펠러의 날개 損傷이나 喫치變化, 特性이 다른 프로펠러의 代替, 海上狀態의 變化, 船底汚損, 吃水 寸, 積載量의 變化 등이 프로펠러 要求토크를 變化시키는 因子들이다. 프로펠러 要求토크 또는 馬力과 RPM 關係를 나타내는 曲線을 프로펠러曲線이라고 부른다.

特殊프로펠러를 除外하면, 프로펠러設計는 系統的 模型試驗結果를 圖表化한 資料에 의존하게 되는데, 이와 같은 圖表는 形式의 差異는 있으나 내용面에서는 共通된 相似則에 바탕을 두고 있으며 모든 數字들을 無次元化하고 있다. matching문제와 관련된 重要 因子는 토크 定數 K_q 인데, 이는 다음과 같이 표현된다

$$K_q = \frac{Q_p}{\rho \cdot (RPM_p)^2 \cdot D^5} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 Q_p 는 프로펠러 토크, ρ 는 물의 質量密度, D 는 프로펠러直徑, RPM_p 는 每分回轉數

이다. 프로펠러의 幾何學的 特性이 바뀌면 K_q 가 달라지는데, 여기서 특히 喫치比 寸, 喫치와 直徑의 比가 바뀌면 K_q 가 달라지는 點을 유의하고 넘어가자. (2)에 의하면, 주어진 프로펠러의 常用運轉範圍內에서는

$$Q_p \propto (RPM_p)^2 \dots\dots\dots(3)$$

이다. 따라서 프로펠러馬力 PPS는 Q_p 와 RPM_p 의 相乘積에 比例할 것이므로

$$PPS \propto (RPM_p)^3 \dots\dots\dots(4)$$

인 關係가 성립한다.

(2)의 關係式에서 Q_p 는 엔진으로부터 供給되는 에너지인데 엔진과 프로펠러 사이에는

$$Q_p \propto (BMEP) \dots\dots\dots(5)$$

인 關係가 성립함은 自明하다. 또 船速 V 는 一定喫치下에서는

$$V \propto (RPM_p) \dots\dots\dots(6)$$

이고, RPM_e 와 RPM_p 의 關係 및 BPS와 PPS와 의 關係는 각각 다음과 같다.

$$(RPM_p) = \frac{1}{\gamma} (RPM_e) \dots\dots\dots(7)$$

$$PPS = \eta_e \cdot (BPS) \dots\dots\dots(8)$$

여기서 γ 는 減速齒車比이고 η_e 는 軸系의 無動力傳達效率이다.

4. 固定喫치 프로펠러의 경우

이제 matching문제는 엔진出力曲線 (1)과 프로펠러曲線 (4)를 포개놓고 (그림 2 참조), 그 위에서 安定된 最適 平衡運轉點이 設計 要望點과 一致하도록 하는 일이다. 그림 2에서 엔진曲線들은 한 엔진의 자기 다른 BMEP에 대한 것이라고 생각하여도 좋고, 서로 다른 4대의 엔진의 각각의 定格 BMEP에 대한 것이라고 생각하여도 좋다. 前者의 경우라면 그들중 하나가 定格 BMEP에 대응하는 것이다. 프로펠러曲線들은 주어진 船舶에 대하여 喫치를 달리하는 3종의 프로펠러의 프로펠러曲線이라고 생각하자.

실제면에서 프로펠러의 直徑은 船尾 프로펠러間隙의 許容限界와 프로펠러發生 表面起振力の 抑制를 고려하면서 가능한 限 크게 하게 되며,

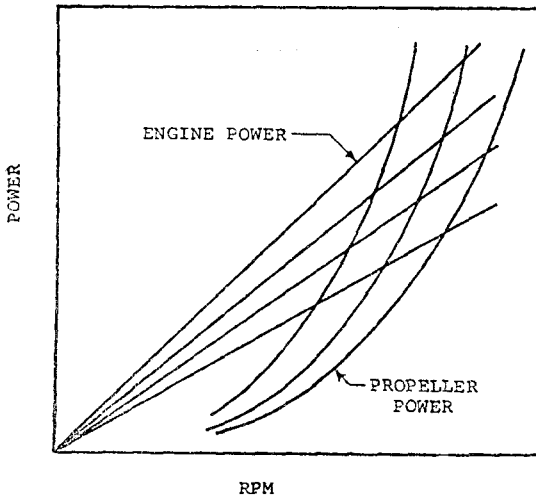


그림 2. 디젤·엔진 및 프로펠러의 馬力對 RPM曲線(常用運轉範圍內)

翼數는 船體振動의 共振現象을 回避할 수 있도록 선택하고, 翼面積은 翼負荷見地에서 適正하게 결정된다. 따라서 matching觀點에서 重要한 因子는 핏치이다.

그림 2의 프로펠러曲線에서 한가지 不透明한 것은 프로펠러效率인데, 이들중 最大效率를 갖는 것이 있을 것인즉, 素朴한 생각으로는 일층 最大效率를 갖는 曲線을 선택하려고 할 것이다. 그러나 이 問題는 엔진曲線에 照鑑하여 좀더 깊이 檢討되어야 한다.

原則的으로 프로펠러曲線은 그림 3에서 보는 바와 같이 엔진의 定格運轉點을 통과하며 그 交叉點이 船速 設計點과 一致하도록 계획되어야 한다. 그렇지 못하면 엔진이 定格 BMEP에 到達하기 前에 定格 RPM에 到達(핏치 過小)하던가, 반대로 엔진이 定格 RPM에 到達하기 前에 定格 BMEP에 到達(핏치 過大)하게 된다. 이를 다른 側面 즉, 船速과 엔진出力관계에서 살펴보면 前者는 計劃船速에 대하여 엔진 定格出力이 過大하고 後者는 엔진自體의 定格出力을 100% 活用 못하고 船速을 낮출 수 밖에 없는 결과가 되며, 또 어느 경우이나 엔진을 燃料消費率이 最適하지 못한 運轉點에서 運轉할 수 밖에 없게 된다.

가장 바람직한 matching은 最大프로펠러效率

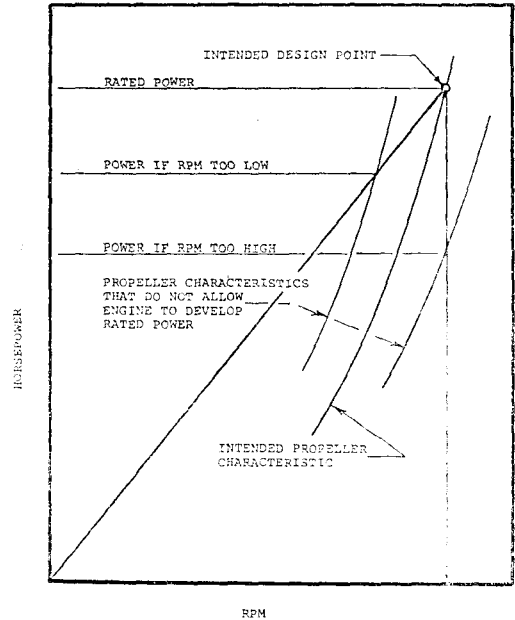


그림 3. 디젤·엔진과 프로펠러의 matching 要領(固定핏치 프로펠러의 경우)

을 보장하는 프로펠러曲線으로서 그것이 엔진의 定格出力點을 通過하도록 하고 또, 그 點에서 計劃船速이 保障되도록 하는 일이다. 이를 위하여서 때로는 프로펠러效率를 다소 희생시키거나 엔진을 바꿀 필요가 있을 경우도 있다.

5. 減速運航

現代産業社會에서 時間은 돈 임이 틀림없다. 그러나 船舶運航에 있어서 昨今과 같이 燃料費가 비싼 形便에서는 처음부터 필요 以上の 船速을 피하거나 때로는 減速運航을 하는 것이 賢明하다.

예를 들어 어떤 배가 300海里를 航海한다고 생각하자. 프로펠러直結 엔진의 定格出力이 500馬力이고 定格運轉點에서의 燃料消費率을 180gr/ps-hr이라고 가정하자. 또 定常 航海速力을 12노트 하자. 이 경우 航海時間은 25時間이며, 燃料消費量은 2,250kg(約 12D/M)이다. 이제 이 배를 10노트로 減速運航하자. 航海時間은 30時間이 되어 5時間 더 걸린다. 그러나 燃料消費量은 다음 계산과 같이 約 4D/M 減小하여 約 8D

/M로 줄어든다. 즉, 減速運航의 경우를 '을 붙여 구분하면,

$$(6) \text{으로 부터, } (RPM)' = \left(\frac{10}{12}\right) \cdot (RPM)$$

$$(3) \text{으로 부터, } Q_p' = \left[\frac{(RPM)'}{(RPM)}\right]^2 \cdot Q_p = \left(\frac{10}{12}\right)^2 \cdot Q_p = 0.694 \cdot Q_p$$

$$(1) \text{로 부터, } \frac{(BPS)'}{(BPS)} = \frac{(BMEP)' \cdot (RPM)'}{(BMEP) \cdot (RPM)}$$

$$= \left(\frac{Q_p'}{Q_p}\right) \left(\frac{RPM'}{RPM}\right) = 0.694 \times \frac{10}{12}$$

$$= 0.578$$

燃料消費量 $(500 \times 0.578) \text{ ps} \times 180 \text{ gr/ps-hr} \times 30 \text{ hr} = 1,560 \text{ kg}$ (約 8D/M) 그러므로 25時間만에 到着할 것을 5時間 늦추어 燃料 4D/M를 節約할 것인가는 때로 甚중히 검토할 가치가 있다. 이 문제는 航續距離가 길고 엔진 定格出力이 크며 定常航海速力이 큰 배일수록 減速運航이 招來하는 利得이 클 것이다.

6. 可變뿔치프로펠러

可變뿔치프로펠러(以下 CPP로 略記함)의 採用은 船舶運航上의 要望에 따른 推進裝置의 制

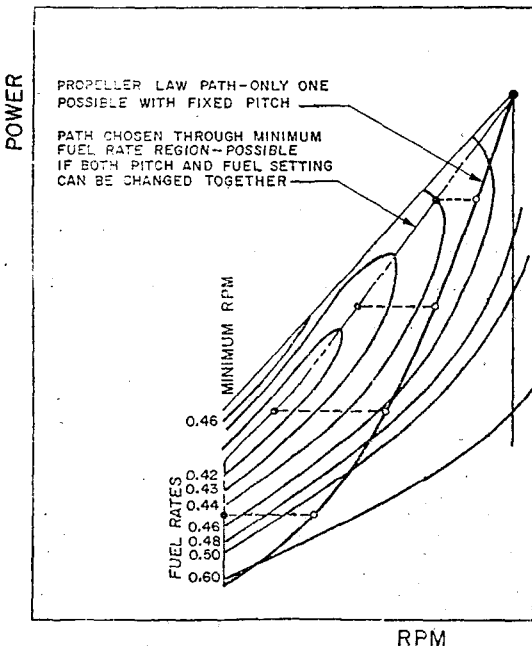
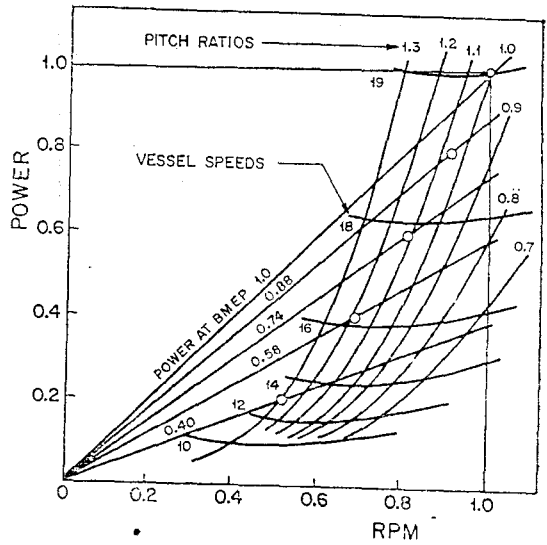


그림 4. 馬力對 RPM曲線과 等燃消費率曲線 (固定뿔치 프로펠러의 경우)



POWER	RPM	PITCH	BMEP	SPEED
1.00	1.00	1.00	1.00	15.0
0.80	0.91	1.05	0.88	18.5
0.60	0.81	1.11	0.74	17.7
0.40	0.68	1.19	0.58	16.2
0.20	0.52	1.30	0.40	13.0

그림 5. 可變뿔치 프로펠러 사용때의 分力運轉 프로그램

禦에 있어서, 燃料噴射量 調節이란 手段外에 프로펠러·뿔치 調節이란 또 하나의 自由度를 부여한다. 基本的으로는 船速, 船體抵抗等의 변화와는 관계없이 엔진 RPM을 항상 燃料經濟性見地 또는 其他 運轉條件上 最適狀態로 유지할 수 있다. 그 밖에도 逆轉性能, 低速操船, 補機運轉, 停船性能 등에 많은 利點을 제공한다.

엔진 RPM를 항상 最適狀態로 유지한다는 것은 다시 말하여 分力運轉時 最小燃料消費率 運轉點을 追求하여 運轉할 수 있다는 뜻이다.

그림 4는 固定뿔치프로펠러인 경우에 프로펠러 曲線과 엔진의 等燃料消費率 曲線을 포개 놓은 것이다. 모든 運轉點은 프로펠러 曲線에 있어야 하는데, 엔진의 分力에서의 最小燃料消費率 曲線은 일반적으로 프로펠러 曲線으로부터 많이 偏奇한다. 따라서 固定뿔치프로펠러로서는 分力에서의 最小燃料消費 運轉이 가능하지 않다.

CPP를 채용하면 미리 마련한 運轉프로그램 즉, 燃料-뿔치 프로그램(그림 5 下部의 例 參

照)에 따라 프로펠러·핏치를 조절하므로써 分力에서의 最小燃料消費 運轉이 가능하다.

CPP제용 때의 matching技法도 本質的으로는 固定핏치 때와 같다. 그림 5에서 핏치비가 바뀔 때 프로펠러曲線이 바뀔을 유의하기 바란다.

燃料-핏치프로그램은 推進裝置 設計者가 마련하여야 하는데, 作成을 위하여서는 (1) 프로펠러의 핏치別 馬力對 RPM 曲線, (2) 엔진의 BMEP別 馬力對 RPM 曲線에 等燃料消費率 曲線을 포개 놓은 線圖, (3) 運轉制禦用 入力資料에 대한 示方書등이 필요하다. 作成要領은 다음과 같다. 즉, (1) 엔진의 馬力對 RPM 曲線面內에서 等燃料消費率 曲線을 參酌하면 分力運轉時 所望스러운 運轉徑路를 그리고, (2) 前記 徑路上, 制禦用 入力資料의 示方에 맞추어 分力座標點 數個를 表示하고, (3) 上記 線圖에 프로펠러曲線을 포개 놓는다. (4) (2)에서 表示한 座標點에 따라 馬力, RPM, BMEP, 핏치, 船速 등을 읽어 내어 가지고 그림 5 下部의 表와 같이 정리한다.

그런데, 固定핏치프로펠러의 matching에서 프로펠러의 最高效率만을 追求하는 것이 最善의 方法이 아니었던 것처럼, CPP때는 分力運轉에서의 最小燃料消費率만을 追求하는 것이 또한 最善의 方法이 아님을 유의할 필요가 있다. 즉, 燃料消費率의 最適化와 프로펠러效率의 最適化 사이에는 方法論上的의 不一致性이 있다. 따라서 兩者間의 妥協이 필요하다.

그림 6이 CPP의 馬力對 RPM 曲線에 프로펠러의 等效率曲線을 포개 놓은 것인데, 最適프로펠러效率 徑路를 追跡하면 이것이 一般적으로는 最小燃料消費率 徑路와는 일치하지 않는다. 그러므로 兩徑路를 銳意檢討하여 適正 妥協徑路를 설정하게 된다. 이 때 妥協基準은 亦是 經濟性으로서 1海里當 燃料消費量이 最小로 되도록 하는 일이다.

船舶의 推進裝置에 대하여서 經濟性 判斷의 참된 基準은 엔진의 熱效率과 推進效率를 결합한 綜合效率 즉,

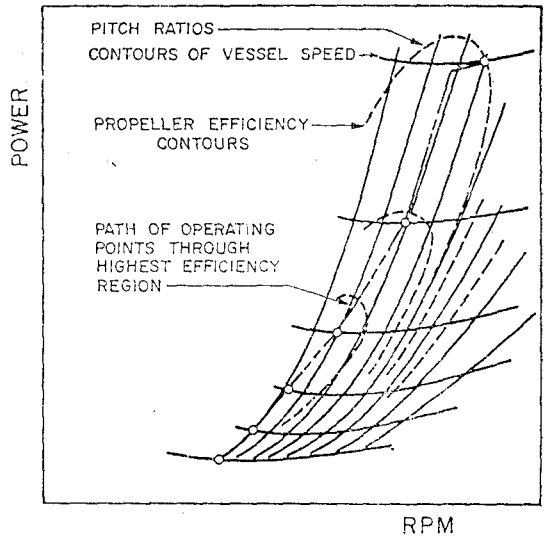


그림 6. 可變핏치프로펠러 사용 때 最小燃料消費率運轉과 最大프로펠러 效率運轉 條件의 妥協要領

$$(綜合效率) = (엔진의 熱效率) \times (推進效率) \dots\dots\dots(9)$$

임을 명심하여야 한다.

7. 結 言

序言에서 言及하였듯이 에너지節約 時代를 슬기롭게 살아 나가기 위하여서 우리는 可能한 모든 努力을 하여야 하겠는데, 造船設計나 船舶運航에 있어서도 거창한 根本問題와 씨름하는 일과 병행하여 손 쉽게 할 수 있는 일들을 등한히 하지 말아야 하겠다.

그런 뜻에서 디젤·엔진과 프로펠러의 最適結合 方法을 소개하였고, 이 글이 讀者들의 業務遂行에 도움이 되기를 바란다.

엔진과 프로펠러의 matching方法에 대하여서 筆者가 大韓造船學會誌 第12卷 第1號(1975年)에 “主機와 프로펠러의 相關關係”란 題下에 쓴 글이 있다. 좀 더 깊고 폭 넓은 지식을 원하는 讀者를 위하여 附記해 둔다.