

主機와 프로펠러의 相關關係

金 極 天*

1. 序 言

船舶推進裝置의 計劃이 있어서 運航上: 要求되는 모든 運轉條件을 充足시킴과 아울러 各運轉狀態에서 最適한 燃料→推力轉換을 保障하기 爲하여서는 첫째 主機 및 프로펠러에 대하여 單獨의 特性을 理解하고 둘째 兩者의 matching 技法에 익숙하여야 한다. matching 이란 간단히 말하여 에너지保存則의 應用으로 安定된 平衡 運轉點을 찾는 일인데, 同時에 最適經濟性이 保障되어야 한다(附錄 2 參照).

現今 高速艇의 推進裝置에 普遍的으로 採用되고 있는 主機는 高速디젤機關, 게스터어빈, 또는 이들의 組合이고, 프로펠러는 螺旋프로펠러이다.

本稿의 목적은 먼저 디젤機關과 固定피치프로펠러의 경우를 例로하여 matching 技法의 基本의 事項을 詳述하고, 이어서 主機가 디젤機關과 게스터어빈의 組合인 경우 및 프로펠러가 可變피치프로펠러인 경우에 대하여 前記 matching 技法의 應用要領을 說明하겠다.

2. 디젤機關과 固定피치프로펠러

디젤機關의 制動馬力 BHP, 制動平均有效壓力 BM EP 및 每分回轉數 RPMe 사이에 關係式

$$BHP = K \cdot BMEP \cdot RPMe \quad (1)$$

但, K : 比例常數

이 成立함은 動力算式으로 부터 自明하다.

(1) 式으로 부터 토오크는 BMEP 에 比例함을 알 수 있는데, 機關의 常用運轉範圍內에서라던 體積效率 및 機械效率가 피스톤速度와는 無關하게 거의 一定한 값을 가지게 되므로, 사이클當 燃料噴射量이 一定하면 BMEP, 따라서 機關토오크가 RPMe 에 無關하게 一定하다고 看做된다. 따라서 디젤機關을 터어빈에 對比하여 말할 때 一定토오크機關이라고도 부른다.

matching 問題에서 엔진에 關하여 留意하여야 할 또 다른 事項은 주어진 RPMe 에 대하여 期待할 수 있는 出力을 燃料噴射量外에 다른 여러가지 因子들에 의하여 制限되는 일인데, 그들 制限條件이 機械마다 같지 아니함은 勿論이다.

敍上한 바를 馬力 對 RPM 面에 圖示하면 그림 1 과 같다. 그림中 數字는 하나의 例示이 不過하다.

어느 한 RPM 에서 프로펠러의 定常的 驅動을 爲하여 供給하여야 할 토오크 또는 馬力은 프로펠러自體 및 船舶의 艤매 艤매의 狀態에 따라 다르다. 주어진 船舶에서 일지라도 海上狀態, 船底汚損度, 吃水, 曳航 등의 條件이 달라지거나, 프로펠러翼의 損傷, 뫼치變化 또는 特性이 다른 프로펠러로 代替한다던가하면 프로펠러가 要求하는 토오크 또는 馬力 對 RPM 曲線이 달라진다. 따라서 matching 問題를 다루기 爲하여서는 主機와 마찬가지로 個個의 運航狀態에 대한 正確한 프로펠러要求 토오크曲線 또는 同 馬力曲線(以下 프로펠러曲線으로 略稱함)이 마련되어야 한다.

普通船舶의 경우 주어진 프로펠러曲線에 대하여서는 常用運轉範圍內에서 프로펠러토오크 Q_p 또는 프로펠러

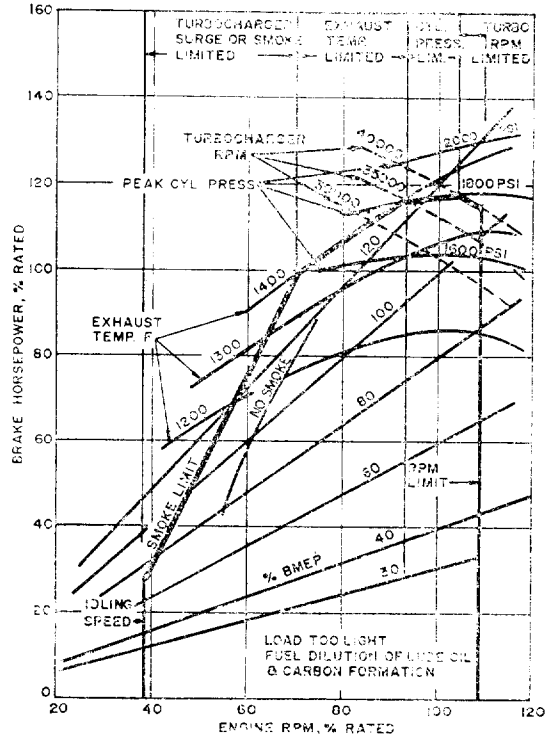


그림 1

* 正會員, 서울大學校 工科大学

馬力 PHP 와 프로펠러每分回轉數 RPM_P 사이에 다음關係式이 成立한다고 看做할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{P1}}{Q_{P2}} &= \left(\frac{RPM_{P1}}{RPM_{P2}} \right)^2 \\ \frac{PHP_1}{PHP_2} &= \left(\frac{RPM_{P1}}{RPM_{P2}} \right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

그러나 高速艇에서는 RPM_P의 增加에 따른 Q_P 또는 PHP의 增加率이 (2)式 보다 더 높다.

이제 matching 問題는 그림 1과 같은 主機出力曲線圖에 프로펠러曲線을 포개놓고(그림 2 參照), 그 위에서 安定된 最適 平衡運轉點이 設計 要望點과 一致하도록 하는 일이다.

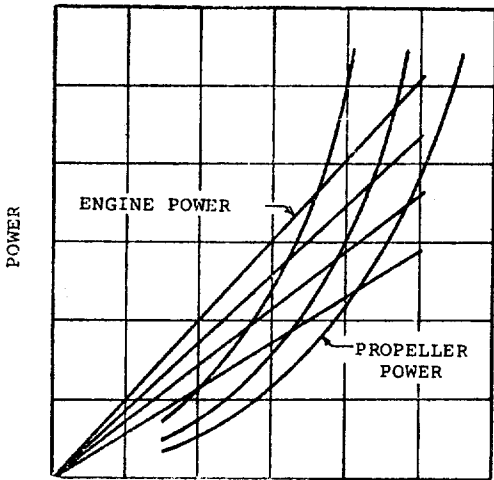


그림 2

그림 2에서 엔진曲線들은 한 엔진에 대한 것이라고 생각해도 좋고, 서로 다른 4대의 엔진의 定格 BMEP에 대한 것이라고 생각해도 좋다. 前者의 경우에는 4 曲線中 하나가 定格 BMEP에 해당할 것이다. 한편 프로펠러曲線들은 주어진 船舶에 대하여 匹치를 달리하는 3종의 프로펠러의 프로펠러曲線이라고 생각하자.

實際面에서 프로펠러直徑은 船尾 프로펠러間隙이 許容하는 限 最大로 하게 되며, 翼數는 船體固有振動數를 고려하면서 起振力이 最少限으로 抑制되도록 결정되고, 또 翼面積은 翼荷重見地에서 適正하도록 결정되므로 matching 觀點에서 프로펠러에 대하여 一次的으로 重要한 要素는 匹치이다.

그림 2의 프로펠러曲線에서 한가지 不透明한 것은 프로펠러效率이다. 이들중 最大效率을 갖는 것이 있을 것인즉, 素朴한 思考로는 一應 最大效率을 갖는 曲線을 選擇하려고 할 것이다. 그러나 이 問題는 엔진曲線에 照鑑하여 좀 더 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 通過하도록 調整되어야 한다. 그렇지 않으면 定格 BMEP에 到達하기 前에 定格 RPM에 到達한다면(匹치가 過小한 경우), 反對로 定格 RPM에 到達하기 前에 定格 BMEP에 到達하게 되어(匹치가 過大한 경우) 어느 경우에나 엔진의 定格出力을 얻지 못하는 結果가 된다.

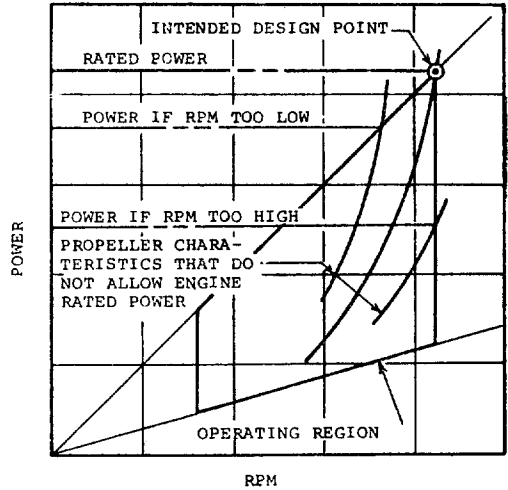


그림 3

敍上한 바를 要約하면 가장 合理的이고 適正한 matching은 最大 프로펠러效率을 保障하는 프로펠러曲線으로서 엔진의 定格出力點을 通過토록 하는 일이다. 그러나 이와 같은 最適 matching은 實제적으로 그리 용이하지 않다. 大概의 경우는 (1) 프로펠러效率을 多少犧牲시켜 匹치를 調整하거나, (2) 엔진을 若干 過速 또는 過負荷시켜 matching을 僻하게 된다. (1), (2)가 모두 余의치 않으면, (3) 엔진을 바꾸어 要望스러운 프로펠러曲線과 match 되도록 한다.

附錄 1에 matching 技法의 演習을 위한 한 具體的인 事例를 다루었다.

3. 海上餘裕에 대한 考慮

船舶의 航行中에는 海上狀態, 船體 및 프로펠러翼의 表面의 汚損, 吃水變化 등 尙상 船體抵抗을 增加시키는데 要因이 存在한다. 이 경우 프로펠러曲線은 設計狀態보다 左側으로 移行하게 마련이어서 運轉上 엔진 RPM을 낮추어 出力減小을 甘受하거나, RPM을 固定시키려면 BMEP를 높여서 過負荷運轉을 하여야한다(그림 4 參照).

이러한 問題의 解決에 對備하는 한 方法은 試運轉 때 定格 BMEP 以下에서 設計船速이 얻어지도록 엔진 및 프로펠러匹치를 選擇하는 일이다. 그렇게 하면 試運轉時에는 엔진이 BMEP가 定格値에 達하기 前에 定

格 RPM에 達하게 되어 定格出力을 못내고 船速은 最高值에 到達하지 못하게 된다. 그러나 이 缺點은 엔진

RPM에도 餘裕를 둔다면가 또는 試運轉 때 엔진을 잠간 동안 過速運轉함으로써 補完될 수 있다(그림 5 參照).

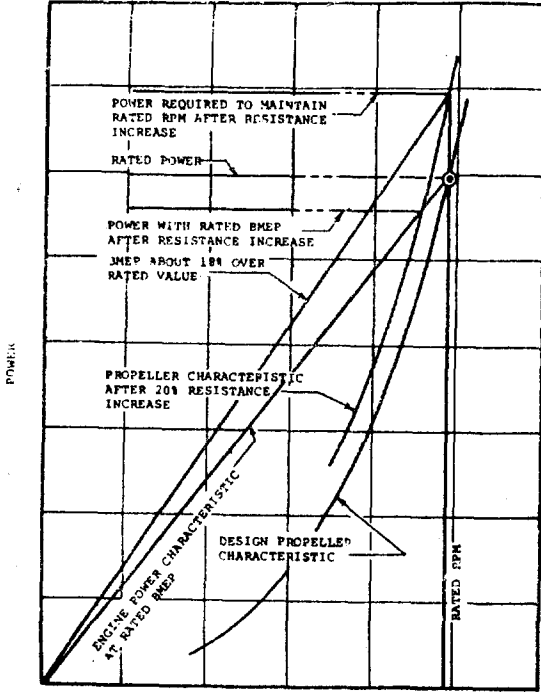


그림 4

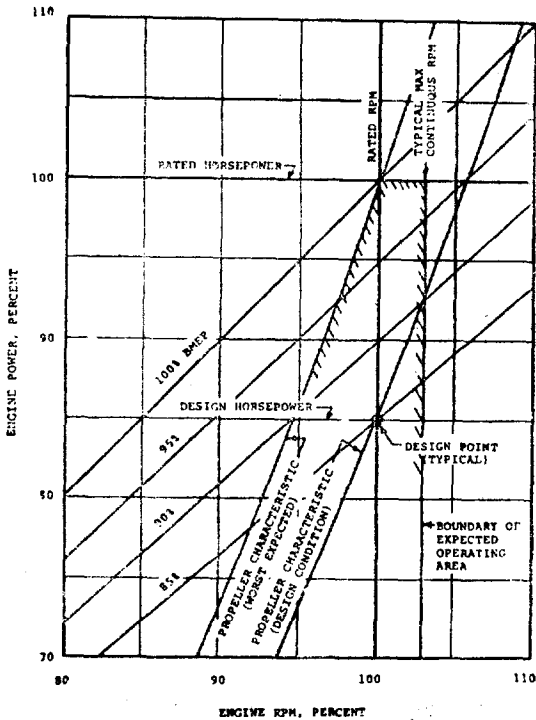


그림 5

4. 複數엔진驅動

高速艇에서의 複數엔진驅動은 (1) 디젤·디젤組合, (2) 디젤 및 개스터어빈組合(CODAG), (3) 디젤 또는 개스터어빈組合(CODOG) 등의 類型으로 分類하여 생각할 수 있다. 이러한 驅動方式에서는 한 推進軸에 두臺 이상의 엔진이 연결되는데, 巡航 때와 最高速航行 때 미리 定해진 運轉스케줄에 따라 어느 한 엔진의 클러치를 풀 수 있게 되어 있다.

CODAG나 CODOG은 모두 디젤이 巡航用엔진이고 개스터어빈은 最高速을 위한 booster engine이며, 最高速 때 CODAG에서는 개스터어빈 및 디젤機關을 함께 運轉하고 CODOG에서는 개스터어빈 만을 運轉한다.

그림 6은 디젤 두臺에 의한 驅動의 경우의 馬力對 RPM 曲線이다. 假令 두臺가 꼭 같은 엔진이라고 하자. 各各 定格 BMEP로서 두臺運轉때의 運轉點이 $RP M_2$, SHP_2 이면, 한臺의 클러치를 풀고 나머지 한臺만을 定格 BMEP로 運轉할 경우의 安定된 平衡運轉點은 BMEP가 $\frac{1}{2}$ 로 줄었기 때문에 토오크도 $\frac{1}{2}$ 로 줄게 되어

$$RPM_1 = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot RPM_2 \approx 0.707 \cdot RPM_2$$

$$SHP_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot SHP_2 \approx 0.354 \cdot SHP_2$$

로 바뀐다. 또 새로운 運轉點을 $0.6 \cdot RPM_2$ 로 취하고자 한다면 (1), (2)式으로부터 엔진 1臺만을 定格 BMEP의 72%에서 運轉하게 됨을 알 수 있을 것이다.

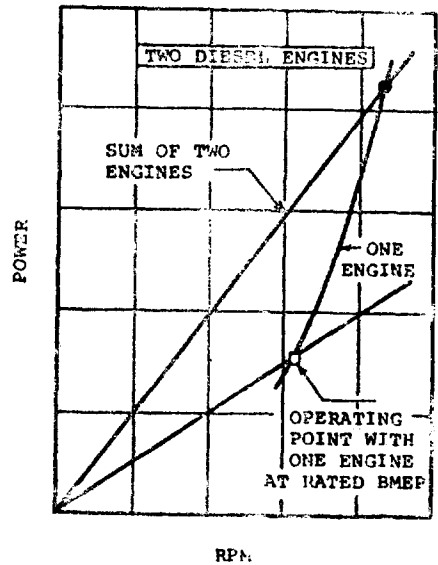
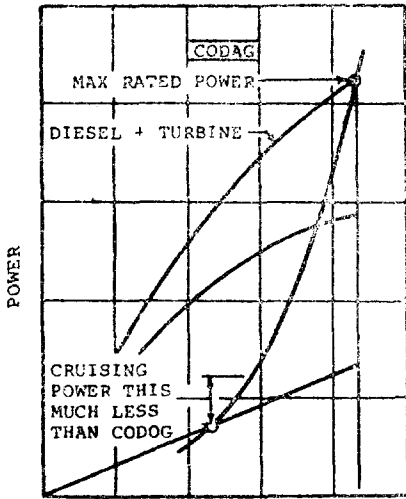
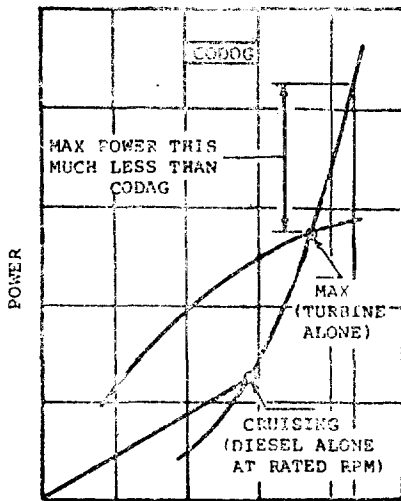


그림 6



RPM
그림 7



RPM
그림 8

CODAG 나 CODOG 방식에서 개스터어빈은 一定토 오코 엔진이 아님으로 엔진曲線은 그림 7 및 8에서 보는 바와 같이 디젤엔진과는 그 모양이 若干 다르나 matching 을 위한 基本的思考는 디젤엔진의 경우와 같다.

CODAG 방식에서는 프로펠러와의 matching 을 獨立的으로 할 수 없으므로 巡航 때 디젤의 全負荷運轉이 不可能한 缺點이 있고, 그 대신 最高速度 때의 디젤 및 개스터어빈을 함께 全負荷運轉할 수 있는 利點이 있다. CODOG 방식에서는 디젤과 개스터어빈을 각각 獨立的으로 프로펠러와 match 시킨다. 따라서 利害得失이 CODAG 의 경우와는 反對이다. 이러한 二難을 解決하는 한 手段이 可變피치프로펠러의 採用이

다.

5. 可變피치프로펠러

可變피치프로펠러(以下 CPP 로 略記함)의 採用은 船舶運航上의 要望에 따른 推進裝置의 制禦에 있어서 燃料噴射量調節이란 手段外에 프로펠러피치調節이란 또 하나의 自由度를 賦與하게 된다. 그리하여 基本的으로 船速 또는 船體抵抗 등의 變化하는 關係없이 엔진 RPM 을 항상 燃料經濟性見地 또는 기타 運轉條件上 最適狀態로 維持할 수 있다. 이 외에도 CPP 採用은 逆轉性能, 低速操船, 補機運轉, 停船性能 등에 許多한 利點을 제공한다.

엔진 RPM 을 항상 最適狀態로 유지한다는 것은 다시 말하여 分力運轉時 最上의 熱效率 即, 最少燃料消費率을 追求하는 運轉을 囑한다는 뜻이다.

그림 9 가 固定피치프로펠러인 경우에 대한 프로펠러 曲線에 디젤엔진의 等燃料消費率曲線을 포개놓은 것이다. 개스터어빈의 等燃料消費率曲線은 그림 10 과 같다. 모든 運轉點은 프로펠러曲線上에 있어야 하는 데, 엔진의 分力에서의 最適燃料消費率點들은 그로부터 많이 偏寄되어 있다. 따라서 固定피치프로펠러로서는 分力에서 燃料經濟性見地에서의 最適運轉이 不可能하다.

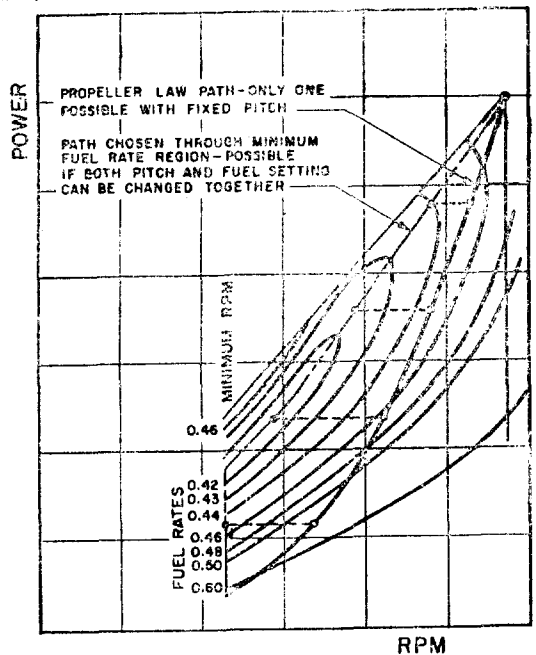


그림 9

그러나 CPP 를 採用하면 미리 마련한 燃料-피치 프로그램에 따라 프로펠러피치를 調節함으로써 分力에서의 엔진運轉點을 最適燃料消費率曲線上으로 移動시킬

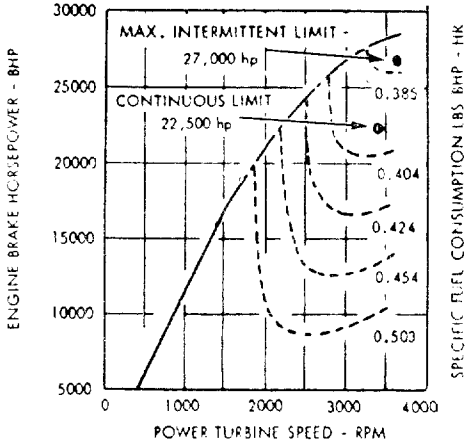
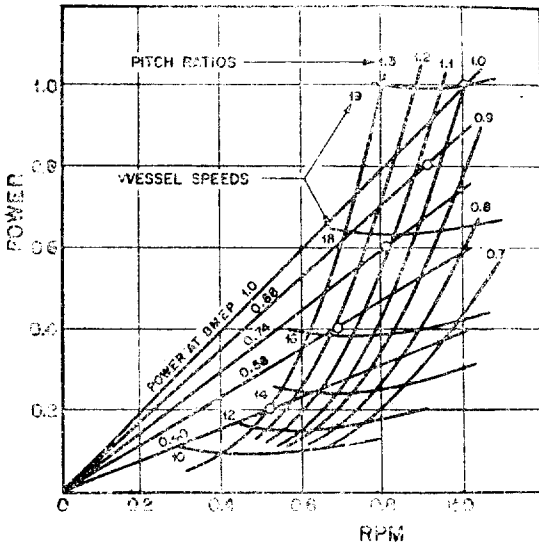


그림 10



POWER	RPM	PITCH	BMEP	SPEED
1.00	1.00	1.00	1.00	19.0
0.80	0.74	1.00	0.80	18.5
0.60	0.59	1.11	0.74	17.7
0.40	0.45	1.33	0.58	15.2
0.20	0.32	1.50	0.40	13.0

그림 11

수 있다. 그 요점은 그림 11로부터 쉽게 이해할 수 있으리라고 믿는다.

CPP採用때의 matching 방법도 본質的으로는 固定피치 프로펠러 때와 같다. 다만 海上餘裕에 대한 考慮는 不必要하며, 分力運轉을 위한 燃料-피치 프로그램을 作成해야 한다. 卽, 그림 11의 下端의 表와 같이 分力別로 RPM, 피치, BMEP 및 船速(만드시 必要한 것은 아님)의 適正組合을 마련하는 일이 推進裝置設計者의 한 課題이다.

燃料-피치 프로그램을 마련하기 위하여서는

(1) 프로펠러의 可變피치別 馬力對 RPM 曲線 또는 토크對 RPM 曲線

(2) 엔진의 馬力對 RPM 曲線面 또는 토크對 RPM 曲線面에 等燃料消費率曲線을 포개놓은 線圖

(3) 運轉制禦用 入力資料에 대한 示方書

등이 必要하다. 이들中 (3)에 대해서는 普通 運轉者의 엔진操縱桿의 位置에 따라 分力出力이 識別되도록 하게 된다.

燃料-피치 프로그래밍 作成要領은 다음과 같다.

(1) 엔진의 馬力對 RPM 曲線面內에서 等燃料消費率曲線을 參照하면서 分力運轉時 要望스러운 運轉徑路를 그린다.

(2) 前記 徑路上에 制禦用 入力資料 示方에 맞게 數個의 分力座標點을 表示해 둔다.

(3) 上記 線圖面에 프로펠러曲線을 포개 놓는다.

(4) 이제 (2)와 같이 表示한 座標點에 따라 그에 對應하는 馬力, RPM, BMEP, 프로펠러피치, 船速等을 읽어 내어 그림 11의 下端表와 같은 表를 만들면 이것이 바로 燃料-피치 프로그램 이다.

그림 9 및 11이 叙上한 作業過程을 보인것인데, 그림 11에는 複雜性을 피하기 위하여 等燃料消費率曲線이 省略되어 있다.

그런데, 固定피치 프로펠러의 matching에서 프로펠러의 最高效率 만을 追求하는 것이 最善의 matching 方法이 아니었던 것 처럼, CPP 때는 分力運轉에서의 最少燃料消費率 만을 追求하는 것이 또한 最善의 方法이 아니다. 理由는 그 方法이 CPP의 높은 效率를 追求하는 일과는 別個의 것이기 때문이다. 卽, 이 경우에도 엔진을 위한 最適技法과 CPP를 위한 最適技法 사이에 不一致性이 있다. 그래서 兩者를 妥協시킬 必要가 있다.

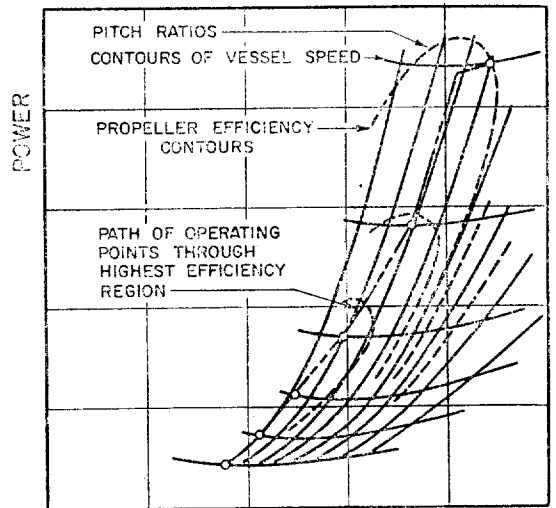


그림 12

그림 12가 CPP의 馬力對 RPM 曲線面에 프로펠러 等効率曲線을 포개놓은 것인데, 最適프로펠러効率 徑路를 追跡하면 이 徑路와 위에서 설명했던 最適燃料消費率 徑路와는 一般의으로 一致하지 않게 마련이다. 그래서 設計者는 이들 兩徑路를 銳意檢討하여 適正 妥協 徑路를 設定하게 된다. 이때 妥協基準은 亦是 經濟性으로서 1海哩當燃料消費量이 最少로 되는 徑路 또는 修正推進係數(附錄2 參照)가 最大인 徑路를 찾게된다.

燃料-밋치 프로그램作成에 있어서 주어진 엔진에 대한 等燃料消費率曲線 또는 프로펠러 等効率曲線을 入手하기 어려울 때가 있다. 이런 경우에는 Schanz [4]의 經驗式에 의거하여 最適運轉經路를 追跡함도 한 方法이다. 即, 馬力對 RPM 曲線面에서 算式

$$\left. \begin{aligned} \frac{N}{N_r} &= 0.5 \sqrt{\frac{P}{P_r}} + K \sqrt[3]{\frac{P}{P_r}} \\ \text{但, } K &= \frac{35R}{DN_r} \sqrt[3]{\frac{P_r}{A_d D^2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

N : RPM, P : 出力(馬力), R : 減速齒車比

D : 프로펠러直徑(m), A_d : 프로펠러展開面積比

下添字 r : 定格運轉點

에 의거하여 徑路를 얻는다. 이 때 얻은 點이 주어진 主機 및 프로펠러의 結合에 대하여 BMEP, RPM 또는 밋치등에 있어서 運轉許容範圍를 벗어나는 경우가 있으면 隣接한 境界點으로 移動 修正한다.

6. 結 言

以上으로 主로 matching 觀點에서의 主機와 프로펠러의 相關關係에 대한 概述을 마친다.

많은 細部事項들에 대한 記述이 省略되었는데, 그중 特別히 曳船作業을 하는 船舶(曳船, 트로울러등), 補機 驅動力이 主機로부터 供給되는 경우, 停船性能에 關連된 過渡的 舉動等에 關한 問題들에 대해서는 讀者의 關心을 誘起하고 싶다. 이러한 問題에 대한 具體的인 知識에 關해서는 아래에 紹介한 文獻으로부터 실마리를 풀어 주기 바란다.

參考文獻

[1] R.L. Harrington(editor), *Marine Engineering*, Chapt. 1,6,7,8, SNAME, 1971.
 [2] J. B. Woodward III, "Matching Engine and Propeller", *Report No. 142*, Dept. of N.A.M.E., University of Michigan, 1970.
 [3] R. Bennett, P. O. Chaplin and N.M. Kerr, "Controllable-Pitch Propellers in Large Stern Trawlers," *Trans. IME*, Vol. 80, 1968.

[4] F. Schanz, "The Controllable-Pitch Propellers as an Integral Part of the Ship's Propulsion System," *Trans. SNAME*, Vol. 75, 1967.

[5] G. M. Boatwright and J. J. Turner, "Effect of Ship Maneuvers on Machinery Component Design", *Buships Journal*, U.S.A., Sept. 1965.

附 錄

1. Matching 事例

設計船速 10 knot에서 375 SHP를 요구하는 船舶이 있다. 프로펠러의 最大許容直徑은 6'이다. 直徑 6', 5', 4'에 대하여 375 SHP를 吸收하도록 밋치를 調整할 경우 프로펠러單獨効率과 RPM 關係가 그림 13와 같다. 또 可用엔진은 다음 2種으로 制限되었을 경우 어떻게 match시킬 것인가를 생각해 보자.

機 種	V 12-500 M	V 12-635 M
定 格 SHP	376	458
定 格 RPM	1800	1800
減 速 齒 車 比	5.86 : 1	5.86 : 1

엔진만 살펴보면 一見 V 12-500M이 마땅해보인다. 그런데 그림 13으로부터 프로펠러最高効率點이 250 RPM이어서 이에 match시키려면 齒車比 7.2가 요구된다. 또 주어진 齒車比로서는 엔진을

$$BMEP = \frac{BMEP_r \times 1800}{250 \times 5.86} = 1.23 \times BMEP_r$$

即, 23% 過負荷시키지 않으면 375 SHP를 얻지 못하는

한편 V 12-635 M는 주어진 齒車比로서 프로펠러

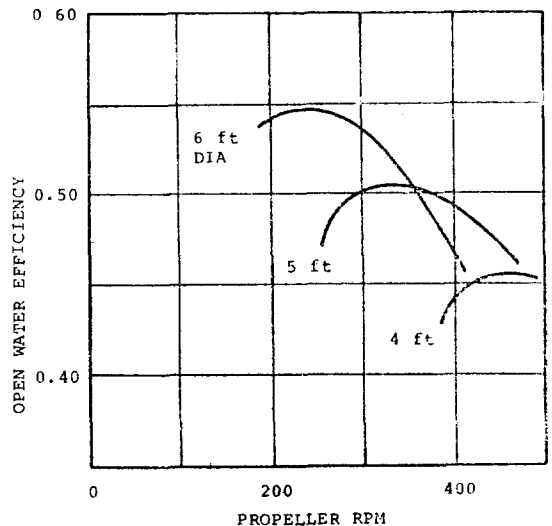


그림 13

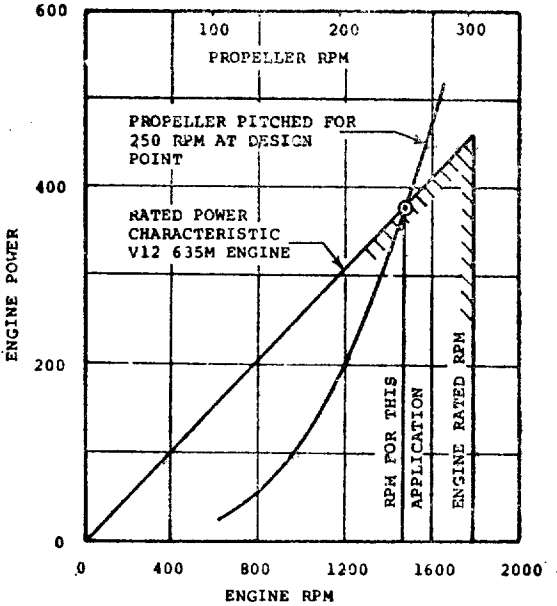


그림 14

RPM 250(엔진 RPM 1465)에서 375 SHP 를 얻을 수 있으나 定格出力에 대하여 損失이 크다(그림 14 參照). 결국 프로펠러의 最高效率는 포기해야 한다.

V 12-500 M 로서 定格運轉點에서의 matchin 을 얻을 수 있는 프로펠러 RPM 은 307 인데, 이 때 그림 13 으로부터 알 수 있는 바와 같이 프로펠러效率減少가 1.5% 이다.

또 다른 方案으로서는 프로펠러直徑을 바꾸는 일, 齒車比 7.2 인 減速齒車를 새로 設計製作케 하는 일 등을 생각할 수 있다.

그러나 前者는 그림 13 으로부터 프로펠러 單獨效率이 오히려 나빠지고 아울러 船殼效率도 나빠질 것이 分明하여 賢明하지 못하고, 後者는 減速齒車의 納期, 價格 등에 문제점이 생긴다.

결국 프로펠러피치를 엔진 V 12-500 M 의 定格出力

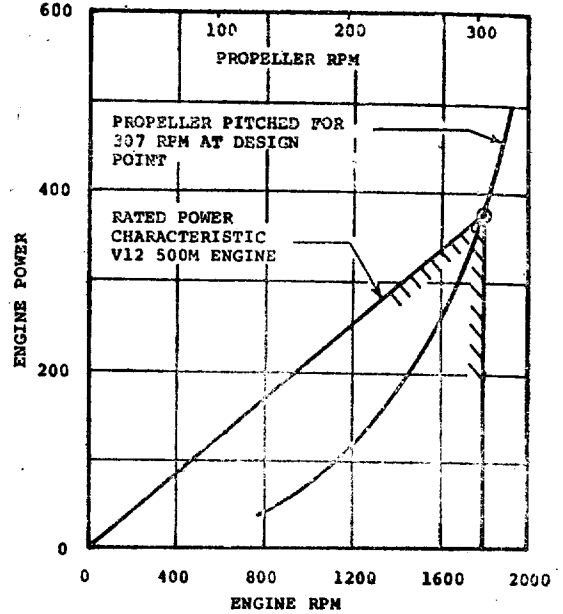


그림 15

點(프로펠러 RPM 307)에 match 되도록 調整하고 프로펠러效率 1.5% 의 減少를 甘受하는 것이 옳다(그림 15 參照).

2. Matching 技法見地에서의 最適經濟性判斷基準

主機의 軸馬力과 推進器가 發生하는 推力馬力만을 考慮할 경우 推進係數 P.C.는 推進器單獨效率, 船殼效率, 推進器效率比 및 傳達效率의 相乘積으로 定義된다.

그런데 推進裝置의 最適經濟性 即, 最適한 燃料→推力轉換見地에서는 소위 말하는 修正推進係數(modified propulsion coeff.)M.P.C.란 새 概念의 導入이 要望된다. 即, 主機의 燃料消費率 S.F.C.와 P.C.를 組合하여 M.P.C.를

$$M.P.C. = \frac{P.C.}{S.F.C.} \tag{4}$$

와 같이 定義하면 最適經濟性은 M.P.C.의 最大化에 의하여 保障된다.