

---

 ◎ 研究論文
 

---

## 內燃機關 크랭크軸系 縱振動에 관한 研究

(第2報 : 크랭크軸 縱振動의 共振振幅計算)

金永柱\* · 高長權\*\* · 金義珩\*\*\* · 全孝重\*\*\*

### The Axial Vibration of Internal Combustion Engine Crankshaft (Part II. Resonant Amplitudes Calculation of the Crankshaft Axial Vibration)

Yeungju Kim · Jangkwon Ko · Uekan Kim · Hyojung Jeon

#### Abstract

The major factors which affect the crankshaft axial vibration are such items as the axial stiffness and mass of crankshaft, the thrust block stiffness, the propeller's entrained water and the exciting and damping forces of engine, propeller and shafting. Among above mentioned items, the axial stiffness and mass of crankshaft, thrust block stiffness and propeller's entrained water were treated in detail in part I, and so in this paper, the rest of above items will be studied.

The exciting forces of crankshaft axial vibration are generated mainly from the gas explosion pressure of cylinder, the thrust fluctuation of propeller, and sometimes the torsional vibration of crankshaft induces the crankshaft axial vibration.

As for the propeller thrust fluctuation, its harmonic components can be fairly exactly calculated from the experimental results of propeller in the towing tank, but as the calculation process is rather tedious and laborious, the empirical values are ordinarily used. On the other hand, the table of harmonic components of gas pressure has been already published by major slow speed diesel engine makers, but the axial thrust conversion factor of radial force is not unknown yet, and as its estimated value is unreliable, the axial vibration force of gas pressure is uncertain.

As the calculation of damping force is very complicated and it includes some uncertain factors, the theoretically estimated amplitudes of axial vibration are much more incorrect in comparison with those of torsional vibrations.

---

\* 正會員, 韓國機械研究所 大德船舶分所

\*\* 正會員, 濟州大學校 海洋科學大學

\*\*\* 正會員, 韓國海洋大學

Authors have paid special attentions to deriving the theoretical calculation formula of axial conversion factor of radial force and damping force of crankshaft axial vibration and developed a computer program to calculate resonance amplitudes and additional stresses of crankshaft axial vibrations.

Also, to check the reliability of the developed computer program, the axial vibrations of three ships' propulsion shaftings were analyzed and their results were compared with those of measured values and makers' results.

## 1. 머리말

크랭크軸系 縱振動의 共振振幅計算과 關係 있는 事項들로서 크랭크軸縱剛性係數와 推力베어링剛性係數, 縱振動起振力 및 減衰力, 縱振動質量 및 推進器附加水 問題 등이 있다.

이들 中 크랭크軸縱剛性係數와 推力베어링剛性係數, 縱振動質量 및 推進器附加水 問題 등에 대하여서는 이미 第1報<sup>1)</sup>에서 詳細히 다루었으므로 本 研究에서는 나머지 問題들을 다루고져 한다.

먼저 縱振動起振力에는 機關의 가스爆發壓力에 의한 것과 推進器의 推力變動에 의한 것이 있다. 後者에 대하여서는 船體의 抵抗 및 推進器性能의 水槽實驗을 통하여 理論적으로 解析하는 方法이 相當히 進展 되었으며 漸次 實用化 되고 있다.<sup>2,3)</sup> 前者에 대하여서는 아직 推定의 段階에 있으며 이는 크랭크핀에 半徑方向으로 作用하는 가스壓力의 軸中心方向의 推力으로 變換하는 變換率 計算方法이 不確實 한 때문이다.<sup>4)</sup>

또한 機關側 起振力과 推進器側 起振力의 相互 相關係도 아직 未決狀態에 있으나 이 問題는 推進器 날개數에 따른 相當數의 實測例가 있어 必要에 따라 어느 程度 이러한 資料를 活用할 수 있을 것이다.<sup>5,6)</sup>

縱振動減衰力에 대하여서는 아직도 비틀림振動 만큼 많은 實測解析이 없는 關係로 資料가 不完全한 狀態이다. 特히 推力變動率이 確實하지 않기 때문에 共振振幅의 計算値와 實測値를 맞추기 위하여 任意로 推定하여 利用하는 경우가 많다.

本 研究에서는 上記 問題中 가스壓力의 軸方向 推力變換率 問題와 縱振動減衰 問題를 重點的

으로 다루고 이들을 利用하여 共振振幅을 計算하는 方法과 이것의 電算프로그램을 開發한 다음 實測値와 計算値를 比較檢討함으로써 本 研究에서 開發한 共振振幅計算方法의 妥當性을 確認하고자 한다.

## 2. 크랭크軸半徑力의 軸方向 推力에 로의 變換率

크랭크軸스로우에 直角方向으로 作用하는 가스壓力이나 往復慣性力의 軸中心方向으로 作用하는 推力에 로의 變換率에 대하여서는 아직 理論的인 方法은 發表된 것이 없고 推定한 값에 依存하고 있는 形便이다. 이 問題에 관하여 筆者中의 한사람은 이미 크랭크스로우兩端이 單純支持된 경우에 대하여 考察한 바가 있으나<sup>7)</sup> 本 研究에서는 兩端이 隣接크랭크스로우에 接續된 一般的인 경우에 대하여 다루고져 한다.

### 2-1 半徑力의 推力變換率計算式 誘導

單一크랭크스로우의 一端에 推力  $P_a$ 를 크랭크軸心方向으로 加하고 그 때의 軸心方向變位를  $\delta_{ax}$ , 單一크랭크스로우의 크랭크핀 中央에 半徑力  $P_r$ 을 加하여 그 때의 軸心方向變位를  $\delta_{rx}$ 라 하면 各各의 影響係數  $f_a, f_r$ 는  $f_a = \delta_{ax}/P_a, f_r = \delta_{rx}/P_r$ 로 되므로 半徑力의 推力變換率은  $f_r/f_a$ 로 된다.

影響係數의 計算方法과  $f_a$ (크랭크스로우 縱方向影響係數)의 計算結果는 이미 本 研究의 第1報<sup>1)</sup>에서 詳細하게 다루었으므로 여기서는  $f_r$ 의 計算方法에 관하여 考察하고자 한다. Fig. 1에서 任意의 크랭크스로우가 兩端單純支持로 되어 있

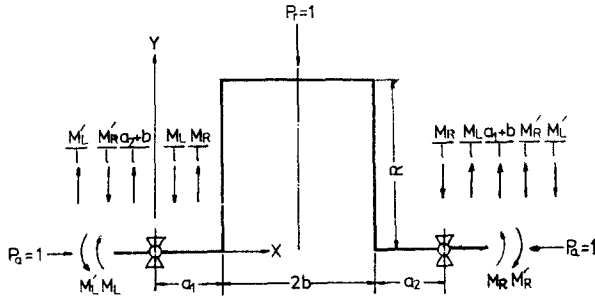


Fig. 1. Crank reduction by a radial force

다고 보고 假想軸力  $P_r=1$ 에 의한 兩端의 左右 拘束모멘트  $M_L, M_R$ , 半徑力  $P_r=1$ 에 의한 左右 兩端의 拘束모멘트를  $M_L', M_R'$ 라 한다.  $f_r$ 를 求한 方法과 같은 要領으로

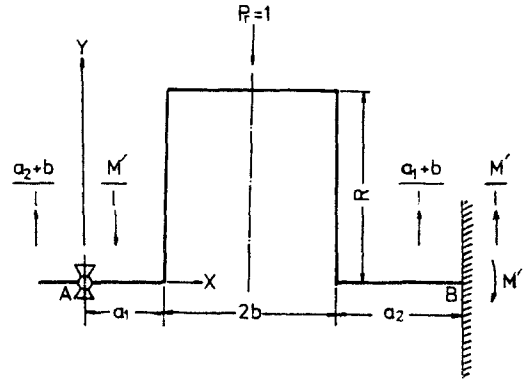


Fig. 2. Reactive moment by a radial force

$$\begin{aligned}
 f_r = & \frac{1}{EJ_j} \int_0^{a_1} \left\{ (-M_R' + M_L' + a_2 + b) \frac{x}{l} - M_L' \right\} \left\{ (M_R - M_L) \frac{x}{l} + M_L \right\} dx + \frac{1}{EJ_2} \int_0^R (-M_R' + M_L' \\
 & + a_2 + b) \frac{a_1}{l} - M_L' \left\{ (M_R - M_L) \frac{a_1}{l} + M_L - y \right\} dy + \frac{1}{EJ_p} \int_{a_1+b}^{a_1+b} \left\{ (-M_R' + M_L' + a_2 + b) \frac{x}{l} \right. \\
 & - M_L' \left\{ (M_R - M_L) \frac{x}{l} + M_L - R \right\} dx + \frac{1}{EJ_p} \int_{a_1+b}^{l-a_2} \left\{ (-M_R' + M_L' + a_2 + b) \frac{x}{l} - x + a_1 + b \right. \\
 & - M_L' \left\{ (M_R - M_L) \frac{x}{l} + M_L - R \right\} dx + \frac{1}{EJ_2} \int_0^R \left\{ (-M_R' + M_L' - a_1 - b) \frac{a_2}{l} + M_R' \right\} \left\{ (M_R \\
 & - M_L) \frac{a_2}{l} - M_R + y \right\} dy + \frac{1}{EJ_j} \int_{l-a_2}^l \left\{ (-M_R' + M_L' + a_2 + b) \frac{x}{l} - x + a_1 + b - M_L' \right\} \left\{ (M_R \\
 & - M_L) \frac{x}{l} + M_L \right\} dx
 \end{aligned} \tag{1}$$

이것을 풀어서 整理하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_r = & \frac{1}{EJ_j} \left\{ (-M_R' + M_L' + a_2 + b) (M_R - M_L) \frac{a_1^3}{3l^2} + M_L (-M_R' + M_L' + a_2 + b) \frac{a_1^2}{2l} - M_L' (M_R \right. \\
 & - M_L) \frac{a_1^2}{2l} - a_1 \cdot M_L \cdot M_L' \left. \right\} + \frac{1}{EJ_2} (-M_R' + M_L' + a_2 + b) (M_R - M_L) \frac{a_1^2 \cdot R}{l^2} + (-M_R' + M_L' \\
 & + a_2 + b) \frac{M_L \cdot a_1 \cdot R}{l} - (M_R - M_L) M_L' \frac{a_1 \cdot R}{l} - (-M_R' + M_L' + a_2 + b) \frac{a_1 \cdot R^2}{2l} + \frac{M_L' \cdot R^2}{2} \\
 & - M_L \cdot M_L' \cdot R \left. \right\} + \frac{1}{EJ_p} \left[ (-M_R' + M_L' + a_2 + b) (M_R - M_L) \left\{ \frac{(a_1 + b)^3 - a_1^3}{3l^2} \right\} - (-M_R' + M_L' \right. \\
 & + a_2 + b) M_L \left\{ \frac{(a_1 + b)^2 - a_1^2}{2l} \right\} - (M_R - M_L) M_L' \left\{ \frac{(a_1 + b)^2 - a_1^2}{2l} \right\} - (-M_R' + M_L' + a_2 \\
 & + b) R \left\{ \frac{(a_1 + b)^2 - a_1^2}{2l} \right\} - b \cdot M_L \cdot M_L' + M_L' \cdot b \cdot R \left. \right] + \frac{1}{EJ_p} \left[ (-M_R' + M_L' - a_1 - b) (M_R \right. \\
 & - M_L) \left\{ \frac{(l - a_2)^3 - (a_1 + b)^3}{3l^2} \right\} + (-M_R' + M_L' - a_1 - b) (M_L - R) \left\{ \frac{(l - a_2)^2 - (a_1 + b)^2}{2l} \right\} \\
 & + (a_1 + b - M_L') (M_R - M_L) \left\{ \frac{(l - a_2)^2 - (a_1 + b)^2}{2l} \right\} + (a_1 + b - M_L') (M_L - R) b \left. \right] \\
 & + \frac{1}{EJ_2} \left[ (-M_R' + M_L' - a_1 + b) (M_R - M_L) \frac{a_1^2 \cdot R}{l^2} - (-M_R' + M_L' - a_1 - b) M_R \frac{a_2 \cdot R}{l} \right. \\
 & + (M_R - M_L) M_R' \frac{a_2 \cdot R}{l} - M_R \cdot M_R' \cdot R + (-M_R' + M_L' - a_1 - b) \frac{a_2 \cdot R^2}{2l} + \frac{M_R' \cdot R^2}{2} \left. \right] \\
 & + \frac{1}{EJ_j} \left[ (-M_R' + M_L' - a_1 - b) (M_R - M_L) \left\{ \frac{l^3 - (l - a_2)^3}{3l^2} \right\} - (-M_R' + M_L' - a_1 - b) \right.
 \end{aligned}$$

$$\times M_L \left\{ \frac{l^2 - (l - a_2)^2}{2l} \right\} + (M_R - M_L)(a_1 + b - M_L') \left\{ \frac{l^2 - (l - a_2)^2}{2l} \right\} + (a_1 + b - M_L') a_2 \cdot M_L \quad (2)$$

만약  $a_1 = a_2 = a$ ,  $J_j = J_p = J$ 이면

$$f_r = \frac{1}{EJ} \left\{ -\frac{l}{6} (M_R \cdot M_L' + M_L \cdot M_R') - \frac{l}{3} (M_L \cdot M_L' + M_R \cdot M_R') + \frac{l^2}{16} (M_R - 3M_L) \right. \\ \left. + bR(M_R' + M_L') + \frac{l^2 M_L}{4} - \frac{Rl^2}{8} + \frac{a^2 R}{2} \right\} + \frac{1}{EJ_2} \left\{ \frac{2aR(a-l)}{l^2} (M_L \cdot M_R' + M_R \cdot M_L') \right. \\ \left. - \frac{R}{l} \left( 2b + \frac{2a^2}{l} \right) (M_R \cdot M_R' + M_L \cdot M_L') + \frac{aR}{2} (M_R + M_L) + \frac{R^2}{2} (M_R' + M_L') - \frac{aR^2}{2} \right\} \quad (3)$$

(1)~(3)式에서 各 記號는 Fig. 1을 参照바라며 이다.

$J_p$ ,  $J_j$ 는 各 各 크랭크핀, 자아널의 断面2次모멘트  $J_2$ 는 크랭크핀 下端이 크랭크암과 接하는 곳의 크랭크암幅에 관한 断面2次모멘트 이다. 또한,  $E$ 와  $G$ 는 各 各 縱彈性係數와 橫斷性係數

$M'$ 의 값은 本 研究 第1報에서 求한바 있는  $M$ 의 경우와 마찬가지로 Fig. 2에서 半徑方向의 單位力  $P_r = 1$ 이 作用할 때 固定端  $B$ 點의 反力 모멘트로서 이를 求하면 다음과 같다.

$$M' = \frac{\frac{(a_2 + b)a_1^3}{3J_j l^2} + \frac{(a_2 + b)a_1^2 \cdot R}{J_2 \cdot l^2} + \frac{(a_2 + b)\{(a_1 + b)^3 - a_1^3\}}{3J_p \cdot l^2} - \frac{(a_1 + b)\{(l - a_2)^3 - (a_1 + b)^3\}}{3J_p l^2} \\ + \frac{(a_1 + b)\{(l - a_2)^2 - (a_1 + b)^2\}}{2J_p \cdot l} + \frac{(a_1 + b)(l - a_2)a_2 \cdot R}{J_2 \cdot l^2} - \frac{(a_1 + b)\{l^3 - (l - a_2)^3\}}{3J_1 \cdot l^2} \\ - \frac{(a_1 + b)\{l^2 - (l - a_2)^2\}}{2J_j \cdot l}}{\frac{a_1^3}{3J_j l^2} + \frac{a_1^2 \cdot R}{J_2 \cdot l^2} + \frac{(a_1 + b)^3 - a_1^3}{3J_p \cdot l^2} + \frac{(l - a_2)^3 - (a_1 + b)^3}{3J_p \cdot l^2} \\ - \frac{a_2 \cdot R \cdot (l - a_2)}{J_2 l^2} + \frac{(l - a_2)R \cdot l}{J_2 \cdot l^2} + \frac{l^3 - (l - a_2)^3}{3J_j l^2}} \quad (4)$$

萬若,  $a_1 = a_2 = a$ ,  $J_j = J_p = J$ 이면

$$M' = \frac{\frac{l^2}{16J} + \frac{R \cdot a}{2J_2}}{\frac{l}{3J} + \frac{R\{a^2 + (l - a)^2\}}{J_2 \cdot l^2}} \quad (5)$$

위의 諸式에서 求한  $f_r$ 과 本 研究 第1報<sup>1)</sup>에서 求한  $f_a$ 에 의하여 推力變換率  $f_r/f_a$ 가 計算된다.

### 2.2 推力變換率의 模型實驗<sup>3)</sup>

推力變換率計算式의 信賴性을 確認하기 위하여 Fig. 3 및 Table 1에 보이는 模型크랭크스로우의 軸方向影響係數  $f_a$ 와 半徑方向影響係數  $f_r$ 의 測定實驗을 行하고 이로부터 算出된 推力變換率과 計算式으로부터 얻은 推力變換率을 比較檢討하고자 한다.

模型크랭크軸 (A)는 크랭크자아널과 핀이 中實軸이며 材質은 一般構造用鋼 SB41이다. 암部分과 자아널 및 핀을 分離製作하여 接續部를 熔接組立하였고 模型軸 (B)는 크랭크자아널과 핀의 中心이 同心孔으로 加工된 中空軸으로서 材質은 鍛造鋼 SF45인 一體型構造로 되어 있다. 變位測定은 Schenk社 製品인 容量 120kg의

小形 材料試驗機를 利用하여 變形이 荷重에 比例하는 範圍內에서 3回 反復實驗을 行하여 그 結果를 平均하였고 變位の 읽음은 0.001mm 눈금의 다이알게이지 2個를 軸兩端에 設置하여 計測하였다.

軸方向影響係數와 半徑方向影響係數의 實驗値와 計算値는 Fig. 4, Fig. 5 및 Table 2와 같으며 實驗値의 計算値에 대한 推力變換率의 比는 模型 (A)가 +4.6%, 模型 (B)가 -1.7%로 나타나고 있다.

### 2.3 推力變換率의 計算例

크랭크半徑力의 推力變換率에 대하여서는 아직 理論的 計算方法이 없기 때문에 各 機關製作者는 機關型式이나 시린더數에 따라 약간 다른 값을 推定値로서 利用하고 있는 形便이다.

그 동안 發表된 論文이나 計算結果로부터 推定되는 推力變換率은 Sulzer社의 경우 0.15~0.4, B&W와 MAN社는 0.2~0.3程度로 假定하고 있으나 앞서 言及한바와 같이 理論적으로 計算하는 方法이 없었기 때문에 앞으로의 研

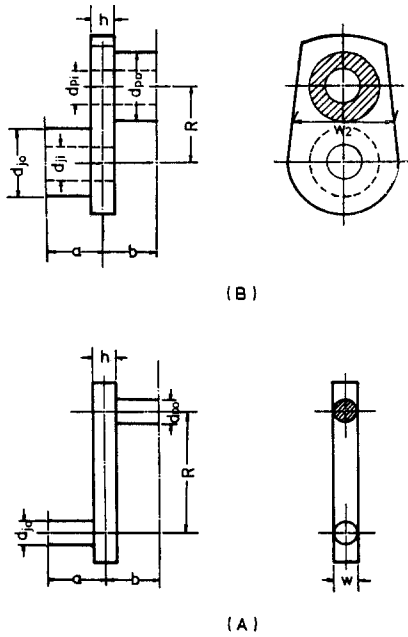


Fig. 3. Model crank

究에 期待하고 있는 形便이었다. 4)

다음에 實際機關에 대하여 製作者가 주고 있는 推力變換率과 本 研究에서 誘導한 推力變換率을 Table 3에 보인다.

上記 表에서 計算値는 各 크랭크스로우 推力變換率의 平均値이며 製作者의 것은 MAN의 값 만이 MAN 本社에서 주어진 것이다. 餘他의 機關에 대하여서는 各 製作者社에 따라 다른

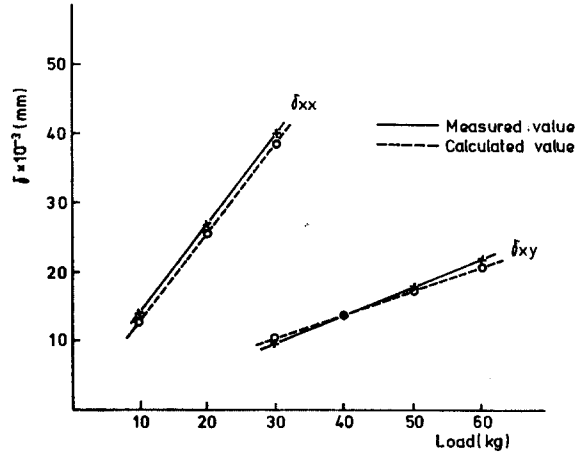


Fig. 4. Experimental results of influence number for model A

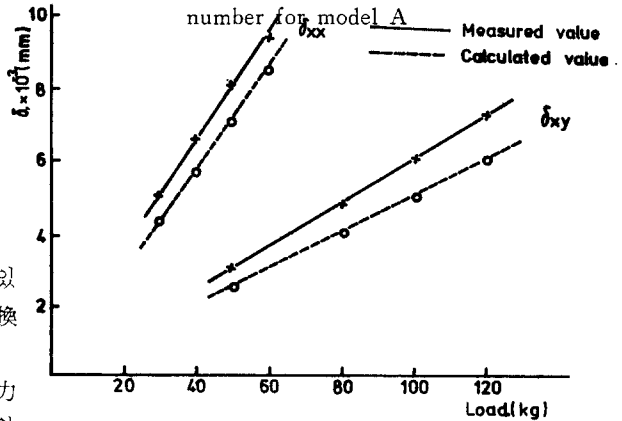


Fig. 5. Experimental results of influence number for model B

Table 1. Dimensions of model crank throws

Items	Symbol	Model (A) (cm)	Model (B) (cm)
Length between cylinder	1	10	5.6
Length of crank journal	2a	5	3.2
Length of crank pin	2b	5	2.4
Length of crank arm	R	5	2.6
Thickness of crank arm	h	3	3.5
Width of crank arm(R-d <sub>p</sub> /2)	w	1	1.2
O. D./I. D. of crank journal	d <sub>jo</sub> /d <sub>ji</sub>	2/0	2.0/1.6
O. D./I. D. of crank pin	d <sub>po</sub> /d <sub>pi</sub>	2/0	2.0/1.6
Built-up method		Welded	Full built
Sec. moment of inertia for pin and journal	J <sub>j</sub> , J <sub>p</sub>	0.785(cm <sup>4</sup> )	0.684(cm <sup>4</sup> )
Sec. moment of inertia for crank arm	J <sub>2</sub>	0.250(cm <sup>4</sup> )	0.504(cm <sup>4</sup> )

Table 2. Conversion factor of radial force for axial force

Crank throw	Measured values (mm)			Calculated values (mm)			Mea. Cal.	Diff. (%)
	$f_r \times 10^{-3}$	$f_a \times 10^{-3}$	$f_r/f_a$	$f_r \times 10^{-3}$	$f_a \times 10^{-3}$	$f_r/f_a$		
Model (A)	0.350	1.350	0.259	0.350	1.290	0.271	1.046	+4.6
Model (B)	0.060	0.165	0.363	0.050	0.140	0.357	0.982	-1.7

Table 3. Calculated results of radial force conversion factors

Engine types	Conversion factor $f_r/f_a$		Manuf. Val. Celcul. Val.	Remarks
	Calculated values	Manufacturer's values		
K7SZ70/125BL	0.274	0.300	1.095	Licensors data
K8SZ70/125BL	0.274	0.200	0.730	"
K9SZ70/125BL	0.345	0.200	0.580	"
K10SZ70/125BL	0.371	0.200	0.540	"
5L67GFCA	0.202	0.250	1.238	Licensee data
6L67GFCA	0.234	0.250	1.068	"
7L67GFCA	0.202	0.250	1.238	"
7RND90	0.407	0.250	0.614	"
9RND76M	0.340	0.250	0.735	"

값을 주고 있기 때문에 入手된 資料中에서 一部를 引用한 것이다.

### 3. 크랭크軸系 縱振動起振에너지의 計算

크랭크軸系縱振動的 起振力은 가스의 壓力에 의한 크랭크軸半徑方向의 힘과 피스톤, 피스톤棒, 크로스헤드 및 連接棒 等の 往復質量에 의한 慣性力을 軸方向의 推力으로 換算한 推力이 그 主된 成分이며 船用機關의 경우에는 여기에 船尾附近伴流의 不均一로 因하여 發生하는 推力變動이 加算된다. 또한 크랭크軸系의 비틀림振動에 의하여 縱振動이 誘發되기도 하는데 특히 兩側共振點이 接近하고 있을 때는 無視할 수 없을 程度의 크기로 되기도 한다.

#### 3.1 가스壓力의 半徑力

Fig. 6에서 가스壓力  $P_g$ , 連接棒의 길이  $l$ , 크

랭크 半徑  $r$ , 連接棒에 作用하는 힘  $Q$ , 크랭크핀의 接線力  $T$ , 크랭크半徑力  $P_r$ 라 하고  $\lambda=r/l$ 로 놓으면  $\sin \phi = \lambda \sin \theta$ 이므로

$$P_r = Q \cos(\theta + \phi) = P_g \sec \phi \cdot \cos(\theta + \phi) = P_g \{ \cos \theta - \lambda \sin^2 \theta (1 - \lambda^2 \sin^2 \theta)^{-1/2} \} \quad (6)$$

$\lambda = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ 이므로  $(1 - \lambda^2 \sin^2 \theta)^{-1/2}$ 項을 展開하여  $\lambda^3$  以上の 項을 省略하면

$$P_r \doteq P_g \left( -\frac{\lambda}{2} + \cos \theta + \frac{\lambda}{2} \cos 2\theta \right) \quad (7)$$

$P_g$ 를 指壓線圖에서 크랭크角度  $\theta$ 에 따라 求하여 (7)式에 代入하면 半徑力  $P_r$ 가 求하여 진다.  $P_r$ 를 縱振動起振力으로 換算하기 爲해서는 앞서 求한 半徑力의 推力變換率을 求하여야 한다. 實際로 縱振動을 計算할 경우에는 (7)式에서 求하여진  $P_r$ 의 값을 다시 調和分析한 하모닉스係數의 表나 式을 利用한다.

크랭크軸 縱振動起振力의 가스하모닉스係數는 各 機關製作會社가 實測한 指壓線圖를 利用하여

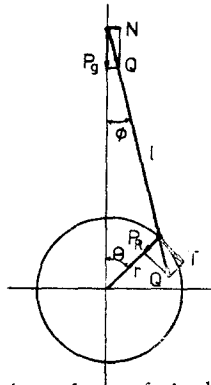


Fig. 6. Working force of single cylinder

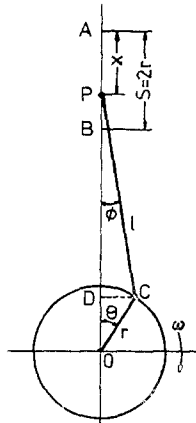


Fig. 7. Displacement of single cylinder

作成한 것이 있으므로 이것을 活用할 수 있다. 筆者들도 數個의 機關으로부터 擧取한 指壓線圖로 부터 가스壓力的 크랭크軸 縱振動起振力하모닉스를 電算機에 의하여 作成 公表한 일이 있다.<sup>8)</sup>

### 3.2 往復慣性力의 半徑力

往復慣性力  $F_p$ 는 往復質量  $m_{rec}$ 에 往復部分의 加速度를 곱함으로써 구하여 진다.

Fig. 7에서 피스틴變位  $x$ 는

$$x = (l+r) - (l \cos \phi + r \cos \theta) = r \left[ (1 - \cos \theta) + \frac{1}{\lambda} \{1 - (1 - \lambda^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}\} \right] \quad (8)$$

따라서 (8)식을 時間에 關하여 微分하면 速度  $v$ 가 구하여 지고 이를 다시 微分하면 加速度  $\alpha$

가 求하여 진다.

$d\theta/dt = \omega$ 이며  $(1 - \lambda^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$ 項을 앞의 경우와 마찬가지로 展開한 다음  $\lambda^3$ 以上을 無視하고 整理하면

$$v \approx \omega r (\sin \theta + \frac{1}{2} \lambda \sin 2\theta) \quad (9)$$

$$\alpha \approx \omega^2 r (\cos \theta + \lambda \cos 2\theta) \quad (10)$$

따라서 往復慣性質量을 (10)式에 곱한 다음 慣性力의 方向이 運動方向과 反對方向으로 作用함을 考慮하여

$$F_p = -m_{rec} \omega^2 r (\cos \theta + \lambda \cos 2\theta) \quad (11)$$

(11)式을 (7)式의  $P_g$ 代身에 代入하여 往復慣性力의 半徑力  $F_r$ 을 求한다.  $\lambda = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$  임을 勘案하여  $\lambda^3$ 以上의 項을 省略하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_r &= -\{m_{rec} r \omega^2 (\cos \theta + \lambda \cos 2\theta)\} \left(-\frac{\lambda}{2} + \cos \theta + \frac{\lambda}{2} \cos 2\theta\right) \\ &= -m_{rec} r \omega^2 \left\{ \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda^2}{4}\right) + \frac{\lambda}{2} \cos \theta - \frac{(1+\lambda^2)}{2} \cos 2\theta + \frac{3\lambda}{4} \cos 3\theta + \frac{\lambda^2}{4} \cos 4\theta \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

크랭크핀에 作用하는 全體半徑力은 (7)式과 (12)式으로 表示되는 가스壓力的 半徑力과 往復慣性力의 半徑力을 合成한 것이다.

一般的으로 軸系縱振動하모닉스는 피스틴 單位面積當의 값으로 주어지기 때문에 가스壓力的 피스틴單位面積當 半徑力  $p_r$ 는

$$\begin{aligned} p_r &= p_0 + \sum (a_i \sin i\theta + b_i \cos i\theta) \\ &= p_0 + \sum p_i \cos(i\theta + \xi_i) \quad (13) \end{aligned}$$

다만,  $p_0$ 는 가스壓력에 의한 平均半徑力,  $i$ 는 次數,  $p_i$ 는  $i$ 次하모닉係數( $= \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$ ),  $\theta$ 는 角變位,  $\xi_i$ 는 位相角, 往復慣性力의 半徑力  $F_r$ 을 피스틴 單位面積當으로 換算한 값을  $p_f$ 라 하면

$$p_f = C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos 2\theta + C_3 \cos 3\theta + C_4 \cos 4\theta \quad (14)$$

$$C_0 = -E_0(0.25)(2 + \lambda^2) / \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$$

$$C_1 = -E_0(0.50) (\lambda) / \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$$

$$C_2 = +E_0(0.50)(1 + \lambda^2) / \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$$

$$C_3 = -E_0(0.75)(\lambda) / \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$$

$$C_4 = -E_0(0.25)(\lambda^2) / \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$$

여기서  $E_0 = m_{r,c} r \omega^2$ ,  $D$ 는 피스틴의 直徑  
(13)式과 (14)式을 合成하면

$$\left. \begin{aligned} p_i &= \sqrt{a_i^2 + (b_i + c_i)^2} \\ \xi_i &= \tan^{-1} \left( \frac{-a_i}{b_i + c_i} \right), \quad i=1, 2, 3, 4 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

### 3.3 推進器의 推力變動에 의한 起振力

推進器의 推力變動値는 推進器의 水槽內에서

의 模型實驗結果를 分析하여 구할 수 있으나 많은 勞力과 時間이 必要하기 때문에 實際에 있어서는 다음에 說明하는 바와 같이 經驗値를 널리 利用하고 있다.<sup>2)</sup>

推進器 推力變動은 推進器날개數의 倍數次가 問題로 되고 특히 偶數날개數를 갖는 경우에는 平均推力\*에 대한 推力變動値가 Table 4와 같이 큰 값을 가지므로 軸系設計段階에서 注意할 必要가 있다.

또한 推進器의 推力變動起振力과 機關起振力의 位相이 正反對로 되면 서로 相殺되어 縱振動의 振幅은 減少하나 推進器推力變動位相은 船尾

Table 4. Thrust fluctuation of propeller (mean thrust)<sup>3)</sup>

Nos. of blades	Order	Percentage of fluctuation	Order	Percentage of fluctuation
4	4	13.0~9.0	8	4.0~2.0
5	5	3.5~2.5	10	3.0~2.0
6	6	9.0~5.0	12	3.0~2.0

의 狀態, 吃水, 船速波浪狀態 등 無數한 條件에 依하여 變動하므로 언제나 兩側이 相殺되도록 推進器를 固定하는 것은 困難하다.<sup>5,6)</sup> 現在까지 數件의 推進器推力變動位相의 實測例가 發表되고 있기는 하나 아직 一般의으로 活用할 수 있는 段階는 아니다. 따라서 設計段階에서는 機關起振力과 같은 位相으로 보고 計算하는 것이 보통이다.

### 3.4 起振에너지의 計算<sup>9)</sup>

크랭크핀 中央에 作用하는 半徑力  $P_r$ 에 의한 起振에너지를 計算하면 다음과 같다.

지금  $j$ 次 半徑力하모닉스를  $p_{rj}$ 라 하고 피스

틴直徑을  $D$ 라 하면

$$Q_{rj} = \frac{\pi}{4} D^2 p_{rj} (f_r / f_a) \quad (16)$$

$$q_{rj} = Q_{rj} \sin j\omega t \quad (17)$$

$q_{rj}$ 에 의한 振動變位를  $x_{ij}$ 라 하면

$$x_{ij} = a_{ij} \sin(j\omega t - \varphi_{ij}) \quad (18)$$

다만,  $\varphi_{ij}$ 는 起振力  $q_{rj}$ 에 대한 位相角이 때의 1사이클당 起振에너지  $U_{ij}$ 는

$$\begin{aligned} U_{ij} &= \oint q_{rj} dx_{ij} = \oint q_{rj} \frac{dx_{ij}}{dt} \cdot dt \\ &= Q_{rj} a_{ij} j\omega \int_0^{2\pi} \sin j\omega t \cdot \cos(j\omega t - \varphi_{ij}) dt \\ &= \pi Q_{rj} a_{ij} \sin \varphi_{ij} \end{aligned} \quad (19)$$

\*  $T = 145.7 \times \eta_p \times \text{BHP} \times \frac{1-w}{V_s(1-t)}$

$T$ : 推進器의 平均推力(kg)     $\eta_p$ : 推進係數(0.50~0.55)

BHP: 推進機關의 制動馬力     $V_s$ : 船體速度(次트)

$t$ : 推力減少係數(= $kw$ )

$k=0.5\sim0.7$  : 普通流線舵  
 $=0.7\sim0.9$  : 四角形斷面의 舵柱材에 設置한 複板舵  
 $=0.9\sim1.05$  : 普通型의 單板舵  
 以上 單軸舵에 對한 값임

$w$ : 伴流係數(= $0.50C_b - 0.05$ )

$C_b$ : 方形係數(=(排水容積)/(배의 垂線間長×幅×吃水)  
 (大串著, 理論造船學 下卷에서 引用)



共振狀態에서  $\sin \varphi_{ij}=1$ 이고  $U_j=\pi Q_{rj}a_{ij}$ 이다. 따라서 Fig. 8에서 右方向을 正으로 取하면  $m_{i+1}$  質點에 대하여  $P_i$ 는 正의 일을 하고  $m_i$ 點에 대하여서는 負의 일을 한다.

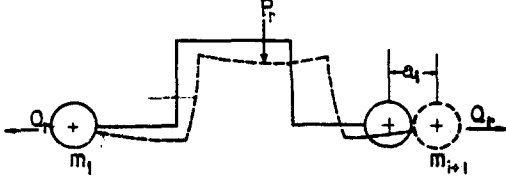


Fig. 8. Calculation of damping ratio

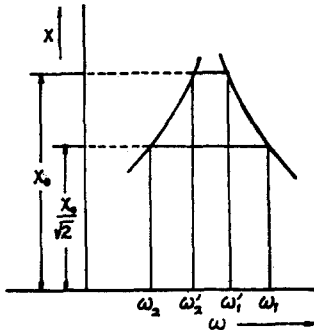


Fig. 9. Exciting energy of crankshaft axial vibration

따라서 크랭크軸全體의 크랭크스로우數가  $n$ 個,  $j$ 次의 振動에 대한 總起振에너지를  $W_e$ 라하면

$$W_e = \sum_{i=1}^n (U_{ij} - U_{(i+1)j}) = \pi Q_{rj} \sum_{i=1}^n (a_{ij} - a_{(i+1)j}) \quad (20)$$

만약,  $m_1$ 에 대한 比振幅을 利用하여 表示하면

$$W_e = \pi Q_{rj} a_{1j} \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma_{i+1}) = \pi Q_{rj} a_{1j} \sum_{i=1}^n v_i \quad (21)$$

$$\text{다만, } v_i = \gamma_i - \gamma_{i+1}, \quad \gamma_i = \frac{a_{ij}}{a_{1j}}, \quad \gamma_{i+1} = \frac{a_{(i+1)j}}{a_{1j}}$$

따라서 縱振動의 경우는 비틀림振動과는 달리 벡터합이 隣接質點의 比振幅差의 合으로서 求하여 진다.

한편 推進器의  $j$ 次 推力變動值  $Q_{pj}$ 에 의한 起振에너지는 上記 比振幅差의 合과의 位相角을  $\psi_j$ 라 하면

$$W_p = \pi Q_{pj} a_{1j} \gamma_p \cos \psi_j \quad (22)$$

$\gamma_p$ : 推進器質點  $m_p$ 의  $m_1$ 에 대한 比振幅

#### 4. 크랭크軸系 縱振動減衰에너지의 計算

크랭크軸系 縱振動減衰因子도 비틀림振動과 마찬가지로 매우 雜多하고 複雜하기 때문에 容易하게 決定할 수 없다. 따라서 本 研究에서는 縱振動에 대하여서도 비틀림振動과 마찬가지로 全減衰를 相當粘性減衰로 바꾸어 놓는 경우와 베어링減衰, 軸內部減衰, 推進器減衰로 나누어서 생각하는 경우를 考察하고자 한다.

一般的으로 全減衰를 相當粘性減衰로 置換하여 振幅을 計算하면 計算이 簡便하고 容易하다. 그러나 이 경우에는 減衰係數比를 어떻게 決定하느냐 하는 問題가 있다.

現在 크랭크軸系 縱振動은 말할것 없고 비틀림振動에 대하여서도 減衰比에 대한 具體的 基準이 없기 때문에 經驗, 또는 實績에 의하여 決定된다. 이것을 베어링, 軸內部, 推進器의 세가지 減衰로 나누어서 생각하면 自由振動을 計算한 段階에서 軸內部, 推進器減衰는 決定되고 當事者의 判斷에 의하여 決定되는 것은 베어링減衰의 計算에 必要한 減衰係數比만으로 되고 그 값에 약간의 誤差가 있더라도 全體적으로는 별로 큰 影響을 미치지 않는다. 특히 全減衰에 대한 軸內部減衰와 推進器減衰의 比率이 클 경우에 그러하다.

##### 4.1 相當粘性減衰<sup>7)</sup>

이것은 實測에 의하여 求할수 있으며 共振曲線과 位相曲線으로 부터 減衰係數比를 計算할 수 있다.

$\nu$ 를 減衰係數比,  $\omega_0$ 를 最大變位를 주는 周波數,  $\omega_1, \omega_2$ 를 最大變位の  $1/\sqrt{2}$ 의 處의 周波數라 하면

$$\nu = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_0} \quad (23)$$

位相線圖를 利用하는 경우에는

$$\tan \theta = \frac{2\nu \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (24)$$

$$\theta = \frac{\pi}{4} : \tan \theta = 1, \omega = \omega_2$$

$$\theta = \frac{3\pi}{4} : \tan \theta = -1, \omega = \omega_1$$

이라 놓고  $\nu$ 를 計算한다.

만약 共振曲線의 最大值가 不明한 경우에는 Fig. 9를 利用하여 求할 수 있다. 이 경우에는

$$\nu = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_0} \sqrt{1 - 2\left(\frac{\omega_1' - \omega_2'}{\omega_1 - \omega_2}\right)^2} \quad (25)$$

이와같은 關係를 利用하여 筆者들은 各造船所에서 實船試運轉時에 實施한 實測結果를 入手하여 이들의 共振曲線들을 分析한 結果 大體로 減衰係數比가 0.03~0.06의 範圍에 있음을 確認하였으며 A. J. Johnson<sup>10)</sup>은 縱振動의 對數減衰率(Log decrement)로서 0.20~0.52(≒2πν, ν=0.032~0.083)를 주고 있다.

따라서 本 研究에서는 크랭크軸系 縱振動減衰係數比가 不確實한 경우에는 筆者들이 實測值를 通하여 얻은 값의 平均値인 0.045를 利用키로 하였으며 이 값은 現在 一般造船所나 機關製作會社들이 利用하고 있는 0.025에 比하여 2배에 가까운 값이다.

減衰係數比가 決定되면 粘性減衰係數  $C_a$ 는 各質點의 質量을  $m_i$ , 크랭크軸先端에 대한 比振幅을  $r_i$ , 共振周波數를  $\omega_r$ 라하고 全軸系에 대하여

$$C_a = 2\nu\omega_r \sum m_i r_i^2 \quad (26)$$

質點當의 平均粘性減衰係數  $C_i$ 는

$$C_i = 2\nu\omega_r \sum m_i r_i^2 / \sum r_i^2 \quad (27)$$

#### 4.2 베어링減衰

비틀림振動에서 機關減衰라 稱하는 減衰에 相當하며 크랭크軸 縱振動의 경우에는 C. H. Brabury<sup>11)</sup>나 P. Draminsky<sup>12)</sup>가 主張하는 바와 같이 크랭크軸의 變形이나 運動에 의한 摩擦損失 및 베어링內의 펌프作用이 主된 減衰因子로 생각되며 시린더와 피스틴의 摩擦面減衰는 거의 影響이 없을 것으로 생각된다. 따라서 縱振動의 경우 베어링減衰로 表示하였다.

筆者들은 推進器의 振幅이 매우 작고(零節縱振動의 경우에는 通常 이 條件을 滿足한다) 推進器減衰가 軸系의 全減衰에 比較하여 無視할 수 있을 경우의 軸系全體의 相當粘性減衰係數比

를 (27)式으로 부터 求하고 이 보다 若干 작은 값을 베어링減衰係數比  $\nu_b$ 로 取하였다. 따라서 本 論文에서는  $\nu_b = 0.040$ 으로 보고 모든 計算을 行하였다.

#### 4.3 推進器減衰

비틀림振動의 경우는 보통 1節振動에 있어서 推進器減衰가 매우 重要한 役割을 하고 있으나 縱振動의 경우도 通常 1節縱振動의 경우가 問題로 된다. 비틀림振動에 대한 推進器減衰는 基本的으로 推進器의 瞬間角速度에 대한 토크變動率로서 주어지므로 縱振動에 대하여서도 推進器減衰는 瞬間線速度에 대한 推力變動率로서 주어진다. 卽,

$$C_p = \frac{dT}{dV} = \frac{d(N^2 P^2 D^2 C_i)}{d(NPS)} = \frac{N^2 P^2 D^2}{NP} \cdot \frac{dC_i}{dS} \\ = NP D^2 \frac{dC_i}{dS} \quad (28)$$

$C_p$  : 推進器減衰係數(kg·sec/cm)

$N$  : 推進器每秒回轉數

$T$  : 推進器推力(kg)

$P$  : 推進器핀치(cm)

$C_i$  : 推力係數( $C_i = T / (N^2 P^2 D^2)$  kg·s<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>)

$V$  : 推進器前進速度(cm/s)

$D$  : 推進器直徑(cm)

$S$  : 推進器의 軸의 슬립( $S = V / (NP)$ )

$C_i$ 와  $S$ 의 값은 模型實驗에 의하여 決定되므로  $C_i$ - $S$ 曲線이 있으면 縱振動의 推進器減衰를 計算할 수 있다. J. R. Kane<sup>13)</sup>은 3, 4, 5翼 推進器에 關한  $C_i$ - $S$ 曲線으로 부터  $dC_i/dS$ 의 平均値를 求하여 Fig. 10과 같은 圖表를 發表하고 있다. 이 圖表를 利用하여 (28)式을 計算할 경우에는

$$C_p = 0.5255 \times 10^{-8} \cdot N \cdot P \cdot D^2 \frac{dC_i}{dS} \quad (29)$$

(ft, lb單位의 경우에는 (28)式을 그대로 利用한다.)

推進器減衰에 대하여서는 이 以外에도 Schuster<sup>14)</sup>와 Schwanecke<sup>15)</sup>, Thomsen<sup>16)</sup> 등의 計算式이 發表되고 있는데 다음에 이들을 보인다.

$$\text{Schuster의 式: } \frac{\rho \pi^2 D^2 \omega}{32} \{ (1 - (P/D)^2 / 4) \} \times \text{DVA} \quad (30)$$

Schwanecke의 式 :  $0.0925\pi\rho D^3\omega \times DVA$   
(31)

上式에서  $\rho$  : 海水의 質量密度( $1.04592 \times 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{sec}^2$ )

DVA : 推進器의 展開面積比

$\omega$  : 推進器의 每秒當角速度(rad/sec)

나머지 記號는 (28)式과 같다.

지금 이들 計算式들의 結果를 比較해 보기 위하여 推進器要目이 알려져 있는 數隻의 實船 推進器에 대한 結果를 보이면 Table 7과 같다. 또한 Table 5는 供試船舶의 機關要目이며 Table 6은 推進器要目이다.

計算結果에 의하면 Schwanecke의 式이 가장 큰 값을 주며 Kane의 式 보다 2~3倍 정도 큰 값으로 된다. Schuster의 式은 그 보다 작은 값으로 된다. 그러나 가장 問題로 되고 있는 零節 振動에 있어 推進器減衰에너지는 微微하므로 어느 式에 의하든 實際의 計算에 있어서는 別差異가 없다.

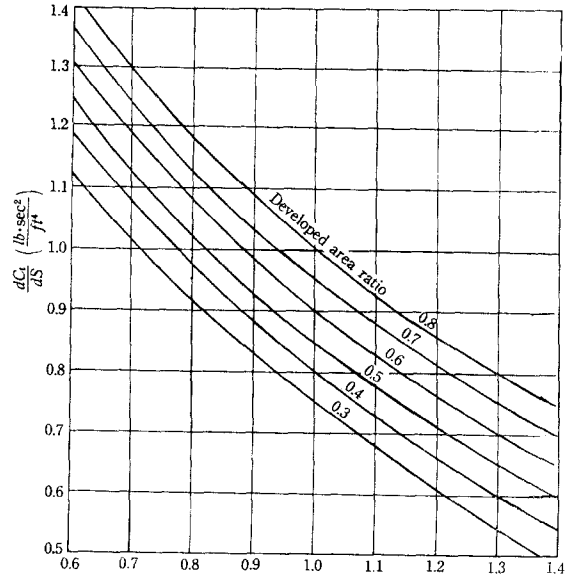


Fig. 10. Curves of  $dCl/dS$  for 3-, 4- and 5-bladed propellers [Reproduced from reference (13)]

Table 5. Principal specifications of engines

船名	실린더數	실린더行程mm	行程mm	連續最大出力BHP	回轉數RPM	平均有効壓力kg/cm <sup>2</sup>	着火順序	크랭크軸型式	機關型式
A	7	680	1250	11550	150	12.10	1-7-2-5-4-3-6	半組立	SULZER 7RND68
B	6	760	1550	12000	122	11.66	1-6-2-4-3-5	"	SULZER 6RND76
C	6	450	750	3800	230	10.39	1-6-2-4-3-5	一體	MITSUBISHI 6UET45/75D
D	6	680	1250	9000	137	12.06	1-6-2-4-3-5	半組立	SULZER 6RND68
E	6	760	1550	14400	122	14.00	1-6-2-4-3-5	"	SULZER 6RND76M
F	6	450	800	4500	230	12.81	1-6-2-4-3-5	一體	MITSUBISHI UET45/80D
G	9	740	1600	8000	110.5	6.50	1-8-3-6-5-4-7-2-9	全組立	B&W 974V TF160

Table 6. Principal specifications of propellers

船名	直徑mm	피치mm	피치比	展開面積比	보스比	날개比	材質	프러펠러型式
A	5150	3510	0.6816	0.6599	0.1748	4	당강黃銅	一體

B	5900	3900	0.7087	0.5639	0.1745	4	망강黃銅	一 體
C	3150	2320	0.7365	0.6499	0.1778	4	"	"
D	5200	3685	0.7087	0.5500	0.1769	4	"	"
E	6000	4610	0.7683	0.5670	0.1847	4	니켈알루미늄黃銅	"
F	3300	2160	0.6550	0.6380	0.1850	4	망강黃銅	"
G	5800	4670	0.8052	0.4670	0.2410	4	"	組 立

Table 7. Propeller damping coefficient calculated by various formulae

Name of Ship	By Form. Kane ×10 <sup>2</sup>	By Form. Schwanecke ×10 <sup>2</sup>	By Form. Schuster ×10 <sup>2</sup>
A	1.52876	4.30332	4.03691
B	1.66818	4.49709	4.17371
C	0.54256	1.48704	0.88973
D	1.42275	3.37217	3.12966
E	1.95063	4.75567	4.30260
F	0.60178	1.67844	1.59035
G	1.52038	3.20463	2.84996

4.4 軸內部減衰

一般的으로 機械材料의 內部減衰 卽 히스테리시스減衰는 다음 式과 같이 表示할 수 있다.

$$w_h = S\sigma^n \quad (32)$$

$w_h$ : 應力振幅  $\sigma$ 의 1사이클마다 單位體積 當消散하는 에너지(kg·cm/cm<sup>3</sup>·cycle)

S: 材料의 種類와 應力의 크기에 의한 定數

$\sigma$ : 비틀림, 剪斷, 引張, 또는 壓縮應力의 振幅(kg/cm<sup>2</sup>)

現在 크랭크軸系 비틀림振動의 경우에는 通常

$$w_h = 4.32 \times 10^{-8} \sigma^{2.3} \text{ (kg·cm/cm}^3 \cdot \text{cycle)} \quad (33)$$

로 보고 있는데 여기서 應力指數가 整數가 아니기 때문에 計算이 複雜하게 되는 難點이 있다. 따라서 筆者들은 이 問題를 Lazan<sup>17)</sup>의 研究結果를 引用하여 다음과 같이 簡略한 수정式을 提議한 바 있으며 本 研究에서도 이 方法을 採擇하였다.<sup>7)</sup>

$$w_h' = 0.711 \times 10^{-8} \sigma^2 \text{ (kg·cm/cm}^3 \cdot \text{cycle)} \quad (34)$$

(34)式을 利用하면 낮은 應力領域에서는 (33)式 보다 크게 높은 應力領域에서는 작게된다.

크랭크軸의 경우 비틀림, 굽힘, 引張, 壓縮

의 諸應力이 同時에 作用하고 있으며 軸系의 一部를 除外하고는 斷面形狀이 複雜하게 變化하고 있다. 本 研究에서는 크랭크軸系 縱振動의 內部減衰에 대하여서는 軸方向의 힘에 의하여 크랭크암 中央部에 發生하는 最大應力을 基準應力值로 取하고 體積은 자아널斷面과 스톱우 길이를 갖는 圓柱로 보고 計算하였으며 나머지 軸系部分은 振動에 의한 壓縮力을 計算하여 質點間의 實際軸의 體積을 곱한 다음 求하였다.

4.5 減衰에너지의 計算

크랭크軸系 全體의 減衰에너지를  $W_a$ 라 하고 相當粘性減衰係數를 利用하여 計算하면

$$W_a = 2\nu_a \pi \omega_r^2 a_1^2 \sum (m_i r_i^2) \text{ (kg·cm/cycle)} \quad (35)$$

$\nu_a$ : 縱減衰係數比(=0.030~0.060, 平均值로서 0.045)

$\omega_r$ : 共振周波數(rad/sec)

$\sum m_i r_i^2$ : 크랭크軸先端부터 推進器까지의 各 質量과 比振幅 제곱과의 相乘積의 合

$a_1$ : 크랭크 軸先端質點變位(cm)

減衰에너지를 베어링減衰에너지  $W_b$ , 軸內部減

衰에너지  $W_h$ , 推進器減衰에너지  $W_p$ 로 나누어서 計算할 때는 다음과 같다.

$$W_b = 2\nu_b \pi \omega_r^2 a_1^2 \sum (m_i r_i^2) (\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cycle}) \quad (36)$$

$\nu_b$ : 크랭크軸部 베어링縱減衰係數比(= 0.04)

$\sum m_i r_i^2$ : 크랭크軸 先端質點부터 스톱스트 베어링까지의 質量과 比振幅 제곱과의 相乘積의 合

$$W_h = \sum w_h a_1^2 (\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cycle}) \quad (37)$$

$$\sum w_h = 0.711 \times 10^{-8} \sum (V \sigma^2) (\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cycle}) \quad (38)$$

$V$ : 크랭크軸系의 體積( $\text{cm}^3$ )

$\sigma$ : 크랭크軸系의 振動應力( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\sum w_h$ 를 求하기 위해서는  $a_1 = 1\text{cm}$ 라 놓았을 때의 振動系 各斷面區分에 있어 굽힘應力代表值  $\sigma$ 를 求하고 (38)式에 의하여  $\sum w_h$ 를 計算한다.

$$W_p = C_p \pi \omega_r a_1^2 r_p^2 (\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cycle}) \quad (39)$$

$C_p$ : 推進器減衰係數로서 (29), (30), (31)式으로 計算한다. 電算프로그램에서는 簡略한 Schuster의 式을 利用

$r_p$ : 推進器의 比振幅( $\text{cm}$ )

## 5. 縱振動에 의한 附加應力の 計算

### 5.1 크랭크軸先端振幅

危險速度에 있어서의 定常振幅을 求하기 위하여 에너지法을 利用하면 起振에너지와 減衰에너지가 같다는 關係로부터

$$W_e + W_p = W_a \quad (40)$$

$$W_e + W_p = W_b + W_h + W_p \quad (41)$$

(40)式과 (41)式으로부터 크랭크軸先端振幅  $a_1$ 은

$$a_1 = \frac{\pi Q_{rj} \sum_{i=1}^n v_i + \pi Q_{pj} r_p \cos \psi_j}{2\nu_b \pi \omega_r^2 \sum m_i r_i^2} (\text{cm}) \dots\dots (42)$$

또는

$$a_1 = \frac{\pi Q_{rj} \sum_{i=1}^n v_i + \pi Q_{pj} r_p \cos \psi_j}{\left[ 2\nu_b \pi \omega_r^2 \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 + 0.711 \times 10^{-8} \sum V \sigma^2 + C_p \pi \omega_r r_p^2 (\text{cm}) \right]} \quad (43)$$

### 5.2 크랭크軸의 附加應力

어떤 特定振動型에 대한 共振應力은 앞節에서 求한  $a_1$  또는 實測으로 얻은 값을 利用하여 다음과 같이 計算할 수 있다.

$$\delta_i = |a_1| |r_i - r_{i+1}| \quad (44)$$

$$F_i = K_{ei} \delta_i \quad (45)$$

$\delta_i$ :  $i, i+1$  質點間의 實際變位

$K_{ei}$ : 그 部分의 스프링定數

$F_i$ : 振動으로 因한 縱方向 作用力

크랭크軸에 있어서의 最大應力은 通常 크랭크 암과 크랭크핀의 接續部內側 구석에서 發生하므로 (45)式으로 크랭크軸의 各 스톱우에 대하여 計算한 다음 그 값이 가장 큰 스톱우에 대하여 檢討한다. 이 경우 크랭크핀에 걸리는 引張應力 굽힘應力을 求하여 그 合을 求하고 여기에 接續部應力集中係數를 곱하여 最大應力振幅을 求한다. 卽

$$\sigma_{PT} = F_i / A_p \quad (46)$$

$$\sigma_{PB} = F_i R / Z_p \quad (47)$$

$$\sigma_P = \sigma_{PT} + \sigma_{PB} \quad (48)$$

$A_p$ : 크랭크핀 斷面積

$R$ : 크랭크半徑

$Z_p$ : 크랭크핀 굽힘斷面係數

$\sigma_{PT}$ : 크랭크핀 引張應力

$\sigma_{PB}$ : 크랭크핀 굽힘應力

$\sigma_P$ : 크랭크핀 合成應力

$\sigma_P$ 에 핀과 암의 接續部 應力集中係數  $\alpha^{(18)}$ (=3~5)를 곱하면 接續部 應力이 求하여 진다.

## 6. 크랭크軸系 縱振動共振振幅의

### 計算例

3隻의 實船 軸系에 대하여 本 研究에서 開發된 電算프로그램에 의하여 計算을 遂行한 結果는 다음과 같다.

CALCULATION FOR AXIAL VIBRATION

MAIN ENGINE PARTICULARS

SHIP NAME	A HO
ENGINE TYPE	SULZER 9RND76M
	2 STROKE CYCLE, SINGLE ACTING CROSSHEAD TYPE
	REVERSIBLE DIESEL ENGINE WITH TURBOCHARGER
NUMBER OF CYLINDER	9
CYLINDER DIAMETER	76.000 CM
STROKE	155.000 CM
MAX. CONTINUOUS REVOLUTIONS	108 R.P.M.
MAX. CONTINUOUS OUT PUT	18500.000 B.H.P.
MEAN INDICATED PRESSURE	13.530 KG/CM2
FIRING ORDER(AHEAD)	1 6 7 3 4 9 2 5 8

NO	MASS (KG.SEC2/CM)	STIFFNESS (KG.SEC2/CM)	DIAMETER OF SHAFT (KG-CM/RAD)	LENGTH OF SHAFT (CM)		
1	0.17638399E 01	0.1796421E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1175000E 03	
2	0.1083590E 02	0.2340524E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
3	0.1083590E 02	0.3338340E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
4	0.1083590E 02	0.3529190E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
5	0.1360999E 01	0.6804200E 08	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.2350000E 03	
6	0.1360999E 01	0.2918989E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
7	0.1083590E 02	0.3338340E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
8	0.1083590E 02	0.3338353E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
9	0.1083590E 02	0.2340524E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.1450000E 03	
10	0.1083590E 02	0.2918986E 07	0.6300000E 02	0.6300000E 02	0.2830000E 03	
11	0.1360999E 01	0.5192400E 08	0.5400000E 02	0.5400000E 02	0.1000000E 02	
12	0.1121490E 02	0.1241100E 08	0.5400000E 02	0.5400000E 02	0.3737500E 03	
13	0.1490800E 02	0.9140200E 07	0.5400000E 02	0.5400000E 02	0.7432500E 03	
14	0.2004480E 02	0.1082300E 08	0.6250000E 02	0.6250000E 02	0.3620000E 03	
15	0.4395509E 02					

NATURAL FREQUENCY

NATURAL FREQUENCY	0	NODE=	74.185-1	11.81HZ	708.41MIN-1
NATURAL FREQUENCY	1	NODE=	150.085-1	23.89HZ	1433.15MIN-1
NATURAL FREQUENCY	2	NODE=	255.895-1	40.73HZ	2443.52MIN-1

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

0 NODE AXIAL VIBRATION P= 74.1845 / (RAD/SEC)

NO	MASS (KG.SEC2/CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.17638399E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.4203677E 05	0.1796421E 07	0.2340029E-01
2	0.1083590E 02	0.7765998E 00	0.0000000E 00	0.1002751E 06	0.2340524E 07	0.4284300E-01
3	0.1083590E 02	0.9337567E 00	0.0000000E 00	0.1559584E 06	0.3338340E 07	0.4671736E-01
4	0.1083590E 02	0.8870393E 00	0.0000000E 00	0.2088559E 06	0.3529190E 07	0.5917955E-01
5	0.1360999E 01	0.8278597E 00	0.0000000E 00	0.2423926E 06	0.6804200E 08	0.2753147E-02
6	0.1360999E 01	0.8251065E 00	0.0000000E 00	0.2758177E 06	0.2918989E 07	0.9449083E-01
7	0.1083590E 02	0.7306157E 00	0.0000000E 00	0.3193871E 06	0.3338340E 07	0.9567237E-01
8	0.1083590E 02	0.6349433E 00	0.0000000E 00	0.3572511E 06	0.3338353E 07	0.1070141E 00
9	0.1083590E 02	0.5279292E 00	0.0000000E 00	0.3887334E 06	0.2340524E 07	0.1660882E 00
10	0.1083590E 02	0.3618410E 00	0.0000000E 00	0.4103113E 06	0.2918986E 07	0.1405663E 00
11	0.1360999E 01	0.2212747E 00	0.0000000E 00	0.4192751E 06	0.5192400E 08	0.8074783E-02
12	0.1121490E 02	0.2151999E 00	0.2500000E 07	-0.1005659E 06	0.1241100E 08	-0.8102965E-02
13	0.1490800E 02	0.2213028E 00	0.0000000E 00	-0.8240937E 05	0.9140200E 07	-0.9016145E-02
14	0.2004480E 02	0.2303189E 00	0.0000000E 00	-0.5700209E 05	0.1082300E 08	-0.5266752E-02
15	0.4395509E 02	0.2355856E 00	0.0000000E 00	-0.1387109E 02		

0 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM2)	HAR.COEFF (KG/CM2)	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	708.40869	13.53000	25.36557	0.01181	0.4268031E 04	0.1188650E 05
2	354.20435	13.53000	20.00698	0.02629	0.7496270E 04	0.29771625E 04
3	236.13623	13.53000	13.48280	0.09873	0.1897093E 04	0.1320722E 04
4	177.10217	13.53000	8.32380	0.01437	0.1705125E 04	0.7429055E 03
5	141.68173	13.53000	5.65900	0.01438	0.1159478E 04	0.4754600E 03
6	118.06812	13.53000	3.97660	0.09873	0.5959215E 04	0.3301799E 03
7	101.20123	13.27981	2.65917	0.02629	0.9963210E 03	0.2425815E 03
8	88.55109	10.61269	1.76739	0.01181	0.2974639E 03	0.1857263E 03
9	78.71207	8.86712	1.08957	0.26317	0.4086589E 04	0.1467468E 03
10	70.84087	7.66276	0.77911	0.01180	0.1310676E 03	0.1188649E 03
11	64.40079	6.79644	0.60982	0.02629	0.2285059E 03	0.9823553E 02
12	59.03406	6.15193	0.50299	0.09873	0.7077322E 03	0.8254512E 02
13	54.49297	5.65891	0.41767	0.01437	0.8556013E 02	0.7033420E 02
14	50.60062	5.27290	0.36037	0.01438	0.7383591E 02	0.6064534E 02
15	47.22723	4.96463	0.31880	0.09873	0.4485532E 03	0.5282881E 02

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)
1	708.409	0.4268031E 04	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.2008382E 05	0.1226404E 06	0.03480
2	354.204	0.7496270E 04	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.1004191E 05	0.1125985E 06	0.06658
3	236.136	0.1897093E 05	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.6694605E 04	0.1092512E 06	0.17365
4	177.102	0.1705125E 04	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.5020949E 04	0.1075776E 06	0.01585
5	141.682	0.1159478E 04	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.4016761E 04	0.1065734E 06	0.01088
6	118.068	0.5595215E 04	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.334/300E 04	0.1059039E 06	0.05283
7	101.201	0.9963210E 03	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.2869115E 04	0.1054257E 06	0.00945
8	88.551	0.2974639E 03	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.2510475E 04	0.1050671E 06	0.00283
9	78.712	0.4086589E 04	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.2231432E 04	0.1047881E 06	0.00390
10	70.841	0.1310676E 03	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.2008380E 04	0.1045650E 06	0.00125
11	64.401	0.2285059E 03	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.1825801E 04	0.1043824E 06	0.00219
12	59.034	0.7073222E 03	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.1673651E 04	0.1042302E 06	0.00679
13	54.493	0.8596013E 02	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.1544909E 04	0.1041015E 06	0.00082
14	50.601	0.7383591E 02	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.1434558E 04	0.1039911E 06	0.00071
15	47.227	0.4485532E 03	0.7683331E 05	0.2572332E 05	0.1338921E 04	0.1038955E 06	0.00432

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

1 NODE AXIAL VIBRATION P= 150.07910 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG,SEC2/CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.7638399E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.1720452E 06	0.1796421E 07	0.9577107F-01
2	0.1083590E 02	0.9042289E 00	0.0000000E 00	0.3927357E 06	0.2340524E 07	0.1677982F 00
3	0.1083590E 02	0.7364308E 00	0.0000000E 00	0.5724726E 06	0.3338340E 07	0.1714842E 00
4	0.1083590E 02	0.5649466E 00	0.0000000E 00	0.7103562E 06	0.3529107E 07	0.2012802E 00
5	0.7360999E 01	0.3636664E 00	0.0000000E 00	0.7706510E 06	0.8804200E 08	0.8753218E-02
6	0.7360999E 01	0.3549132E 00	0.0000000E 00	0.8294946E 06	0.2918989E 07	0.2841718F 00
7	0.1083590E 02	0.7074136E-01	0.0000000E 00	0.8467600E 06	0.3338340E 07	0.2536470E 00
8	0.1083590E 02	-0.1829056E 00	0.0000000E 00	0.8021191E 06	0.3338353E 07	0.2402739F 00
9	0.1083590E 02	-0.4231795E 00	0.0000000E 00	0.6988359E 06	0.2340524E 07	0.2985809E 00
10	0.1083590E 02	-0.7217605E 00	0.0000000E 00	0.5226796E 06	0.2918986E 07	0.1790620F 00
11	0.7360999E 01	-0.9008225E 00	0.0000000E 00	0.3733258E 06	0.5192400E 08	0.7189848E-02
12	0.1121490E 02	-0.9080123E 00	0.2500000E 07	0.2413990E 07	0.1241100E 08	0.1945040E 00
13	0.1490800E 02	-0.1102516E 01	0.0000000E 00	0.2043782E 07	0.9140200E 07	0.2236036E 00
14	0.2004480E 02	-0.1326119E 01	0.0000000E 00	0.1445060E 07	0.1082300E 08	0.1335175F 00
15	0.4395509E 02	-0.1459637E 01	0.0000000E 00	-0.2700000E 02		

1 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM2)	HAR.COEFF (KG/CM2)	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	1433.14624	13.53000	25.36557	0.01257	0.4545754E 04	0.1233282F 07
2	716.57300	13.53000	20.00658	0.09741	0.2777298E 05	0.3083204E 06
3	477.71533	13.53000	13.48280	0.13290	0.2553707E 05	0.1370314E 06
4	358.28638	13.53000	8.32380	0.08512	0.1009773E 05	0.7708006E 05
5	286.62915	13.53000	5.65900	0.08512	0.6865359E 04	0.4933123E 05
6	238.85770	13.53000	3.97660	0.13290	0.7531848E 04	0.3425783E 05
7	204.73517	13.53000	2.69420	0.09740	0.3739978E 04	0.2516903E 05
8	179.14328	13.53000	2.08830	0.01259	0.3745859E 03	0.1927003E 05
9	159.23846	13.53000	1.42063	0.64846	0.1312887E 05	0.1522571E 05
10	143.31462	13.53000	1.10768	0.01257	0.1983880E 05	0.1233281E 05
11	130.28601	13.53000	0.94650	0.09741	0.1313963E 04	0.1019240E 05
12	119.42885	13.53000	0.84238	0.13290	0.1595518E 04	0.8564457F 04
13	110.24200	13.53000	0.74826	0.08512	0.9077341E 03	0.7297512E 04
14	102.36758	13.53000	0.67414	0.08513	0.8178521E 03	0.6292246E 04
15	95.54308	12.02569	0.55887	0.13290	0.1058512F 04	0.5481250E 04

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)
1	1433.146	0.4545754E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.3155375E 07	0.3589581E 07	0.00127
2	716.573	0.2777298E 05	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.1577688E 07	0.2011894E 07	0.01380
3	477.715	0.2553707E 05	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.1091793E 07	0.1485999E 07	0.01719
4	358.286	0.1009773E 05	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.7888447E 06	0.1223050E 07	0.00826
5	286.629	0.6865359E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.6310756E 06	0.1065281E 07	0.00644
6	238.858	0.7531848E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.528963E 06	0.9601026E 06	0.00784
7	204.735	0.3739978E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.4507679E 06	0.8849742E 06	0.00423
8	179.143	0.3745859E 03	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.3944221E 06	0.8286284E 06	0.00045
9	159.238	0.1312887E 05	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.3505973E 06	0.7848036E 06	0.01673
10	143.315	0.1983880E 05	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.3155376E 06	0.7497438E 06	0.00026
11	130.286	0.1313963E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.2868522E 06	0.7210585E 06	0.00182
12	119.429	0.1595518E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.2629479E 06	0.6971541E 06	0.00229
13	110.242	0.9077341E 03	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.2427209E 06	0.6769272E 06	0.00134
14	102.368	0.8178521E 03	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.2233839E 06	0.6595902E 06	0.00124
15	95.543	0.1058512E 04	0.1967844E 06	0.2374218E 06	0.2103583E 06	0.6445646E 06	0.00164

2 NODE AXIAL VIBRATION P= 255.88574 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG, SEC <sup>2</sup> /CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL, STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.7638399E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.5001433E 06	0.1796421E 07	0.2784109E 00
2	0.1083590E 02	0.7215891E 00	0.0000000E 00	0.1012116E 07	0.2340524E 07	0.4324315E 00
3	0.1083590E 02	0.2891576E 00	0.0000000E 00	0.1217275E 07	0.3338340E 07	0.3646348E 00
4	0.1083590E 02	-0.7547718E-01	0.0000000E 00	0.1163723E 07	0.3529190E 07	0.3297422E 00
5	0.7360999E 01	-0.4052194E 00	0.0000000E 00	0.9684154E 06	0.8804200E 08	0.1099947E-01
6	0.7360999E 01	-0.4162188E 00	0.0000000E 00	0.7678064E 06	0.2918989E 07	0.2630385E 00
7	0.1083590E 02	-0.6792573E 00	0.0000000E 00	0.2858681E 06	0.3338340E 07	0.8563179E-01
8	0.1083590E 02	-0.7648891E 00	0.0000000E 00	-0.2568265E 06	0.3338353E 07	-0.7693207E-01
9	0.1083590E 02	-0.6879570E 00	0.0000000E 00	-0.7449372E 06	0.2340524E 07	-0.3182780E 00
10	0.1083590E 02	-0.3696790E 00	0.0000000E 00	-0.1007227E 07	0.2918986E 07	-0.3450606E 00
11	0.7360999E 01	-0.2461839E-01	0.0000000E 00	-0.1019093E 07	0.5192400E 08	-0.1962662E-01
12	0.1121490E 02	-0.4991762E-02	0.2500000E 07	-0.1010279E 07	0.1241100E 08	-0.8140188E-01
13	0.1490300E 02	0.7641011E-01	0.0000000E 00	-0.9306922E 06	0.9140200E 07	-0.1023710E 00
14	0.2004480E 02	0.1787812E 00	0.0000000E 00	-0.7010452E 06	0.1082300E 08	-0.6477362E-01
15	0.4395509E 02	0.2435548E 00	0.0000000E 00	-0.7781250E 02		

2 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT. SPEED (R.P.M)	IND. PRES (KG/CM <sup>2</sup> )	HAR. COEFF (KG/CM <sup>2</sup> )	VECTOR SUM (RAD)	ENG. EXIT. ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP. EXIT. ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT. AMP OF SHAFT (CM)
1	2443.52319	13.53000	25.36557	0.12910	0.4667106E 05	0.1739313E 07	
2	1221.76147	13.53000	20.00658	0.05458	0.1556173E 05	0.4348250E 06	
3	814.50757	13.53000	13.48280	0.53591	0.1029757E 06	0.1932555E 06	
4	610.88062	13.53000	8.32380	0.20223	0.2399043E 05	0.1087062E 06	
5	488.70459	13.53000	5.65900	0.20223	0.1630957E 05	0.6957200E 05	
6	407.25366	13.53000	3.97660	0.53590	0.3037111E 05	0.4831382E 05	
7	349.07471	13.53000	2.69420	0.05458	0.2095803E 04	0.3549590E 05	
8	305.44019	13.53000	2.08830	0.12910	0.3842237E 04	0.2717652E 05	
9	271.50244	13.53000	1.42063	0.34926	0.7071316E 04	0.2147280E 05	
10	244.35231	13.53000	1.10768	0.12910	0.2038058E 04	0.1739299E 05	
11	222.13846	13.53000	0.94650	0.05458	0.7361877E 03	0.1437437E 05	
12	203.62692	13.53000	0.84258	0.53591	0.6433809E 04	0.1207845E 05	
13	187.96332	13.53000	0.74826	0.20223	0.2156581E 04	0.1029171E 05	
14	174.53737	13.53000	0.67414	0.20223	0.1942943E 04	0.8873973E 04	
15	162.90154	13.53000	0.61002	0.53590	0.4658984E 04	0.7730223E 04	

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT. AMP OF SHAFT (CM)
1	2443.523	0.4667106E 05	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.2553916E 06	0.1094351E 07	0.04265
2	1221.761	0.1556173E 05	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.1276958E 06	0.9666558E 06	0.01610
3	814.508	0.1029757E 06	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.8513056E 05	0.9240906E 06	0.11143
4	610.881	0.2399043E 05	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.6384793E 05	0.9028079E 06	0.02657
5	488.705	0.1630957E 05	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.5107838E 05	0.8900384E 06	0.01832
6	407.254	0.3037111E 05	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.4256531E 05	0.8815253E 06	0.03445
7	349.075	0.2095803E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.3648454E 05	0.8754466E 06	0.00239
8	305.440	0.3842237E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.3192396E 05	0.8708840E 06	0.00441
9	271.502	0.7071316E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.2837687E 05	0.8673369E 06	0.00815
10	244.352	0.2038058E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.2553918E 05	0.8644992E 06	0.00236
11	222.138	0.7361877E 03	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.2321744E 05	0.8621775E 06	0.00085
12	203.627	0.6433809E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.2128263E 05	0.8602427E 06	0.00748
13	187.963	0.2156581E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.1964550E 05	0.8586056E 06	0.00251
14	174.537	0.1942943E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.1824225E 05	0.8572023E 06	0.00227
15	162.902	0.4658984E 04	0.5508242E 06	0.2881358E 06	0.1702612E 05	0.8559861E 06	0.00544

CALCULATION FOR AXIAL VIBRATION

MAIN ENGINE PARTICULARS

SHIP NAME M HO  
 ENGINE TYPE SULZER TRND90  
 2 STROKE CYCLE, SINGLE ACTING CROSSHEAD TYPE  
 REVERSIBLE DIESEL ENGINE WITH TURBOCHARGER  
 NUMBER OF CYLINDER 7  
 CYLINDER DIAMETER 90.000 CM  
 STROKE 155.000 CM  
 MAX. CONTINUOUS REVOLUTIONS 122 R.P.M.  
 MAX. CONTINUOUS OUT PUT 20300.000 B.H.P.  
 MEAN INDICATED PRESSURE 12.060 KG/CM<sup>2</sup>  
 FIRING ORDER(AHEAD) 1 7 2 5 4 3 6

NO	MASS (KG, SEC <sup>2</sup> /CM)	STIFFNESS (KG-CM/RAD)	DIAMETER OF SHAFT (CM)	LENGTH OF SHAFT (CM)
1	0.9408799E 01	0.3372381E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
2	0.1365550E 02	0.3552581E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
3	0.1365550E 02	0.3880629E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
4	0.9269099E 01	0.9614720E 08	0.6800000E 02	0.9000000E 02
5	0.9269099E 01	0.5810859E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
6	0.1365550E 02	0.4591236E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
7	0.1365550E 02	0.3552578E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
8	0.1365550E 02	0.5250516E 07	0.6800000E 02	0.1680000E 03
9	0.9310900E 01	0.9614720E 08	0.6800000E 02	0.1680000E 03
10	0.1413150E 02	0.1947490E 08	0.5200000E 02	0.5000000E 03
11	0.7169700E 01	0.1106050E 08	0.5200000E 02	0.4030000E 03
12	0.7169700E 01	0.7905800E 07	0.6400000E 02	0.8540000E 03
13	0.5274719E 02			



NATURAL FREQUENCY

NATURAL FREQUENCY 0 NODE= 87.19S-1 13.88HZ 832.64MIN-1  
 NATURAL FREQUENCY 1 NODE= 171.93S-1 27.36HZ 1641.79MIN-1  
 NATURAL FREQUENCY 2 NODE= 330.73S-1 52.64HZ 3158.23MIN-1

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

0 NODE AXIAL VIBRATION P= 87.19439 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG.SEC2/CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.9408799E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.7153369E 05	0.3372381E 07	0.2121162E-01
2	0.1365550E 02	0.9787884E 00	0.0000000E 00	0.1731521E 06	0.3552581E 07	0.4873981E-01
3	0.1365550E 02	0.9300485E 00	0.0000000E 00	0.2697104E 06	0.3880629E 07	0.6950170E-01
4	0.9269099E 01	0.8609468E 00	0.0000000E 00	0.3303544E 06	0.9614720E 08	0.3435923E-02
5	0.9269099E 01	0.8771109E 00	0.0000000E 00	0.3907564E 06	0.5810859E 07	0.6724584E-01
6	0.1365550E 02	0.7898650E 00	0.0000000E 00	0.4721607E 06	0.4591236E 07	0.1029702E 00
7	0.1365550E 02	0.6868948E 00	0.0000000E 00	0.5440746E 06	0.3552578E 07	0.1531492E 00
8	0.1365550E 02	0.5337456E 00	0.0000000E 00	0.5994884E 06	0.5250516E 07	0.1141770E 00
9	0.9310900E 01	0.4195686E 00	0.0000000E 00	0.6291893E 06	0.9614720E 08	0.6544020E-02
10	0.1413150E 02	0.4130245E 00	0.2200000E 07	-0.2350894E 06	0.1947490E 08	-0.1207141E-01
11	0.7169700E 01	0.4250959E 00	0.0000000E 00	-0.2119174E 06	0.1106050E 08	-0.1915983E-01
12	0.7169700E 01	0.4442557E 00	0.0000000E 00	-0.1877009E 06	0.7905800E 07	-0.2374217E-01
13	0.5274719E 02	0.4679978E 00	0.0000000E 00	-0.2025000E 02		

0 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM2)	HAR.COEFF (KG/CM2)	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	832.64258	12.06000	23.13118	0.02124	0.9820852E 04	0.1192768E 05
2	416.32129	12.06000	18.21318	0.04220	0.1536230E 05	0.2981919E 04
3	277.54736	12.06000	12.36560	0.07732	0.1910768E 05	0.1325296E 04
4	208.16064	12.06000	7.64760	0.07731	0.1181715E 05	0.7454790E 03
5	166.52850	12.06000	5.21800	0.04220	0.4401277E 04	0.4771064E 03
6	138.77376	12.06000	3.65320	0.02124	0.1550833E 04	0.3313240E 03
7	118.94893	12.06000	2.48840	0.23680	0.1177657E 05	0.2434220E 03
8	104.08032	10.08904	1.70979	0.02125	0.7260056E 03	0.1863697E 03
9	92.51284	8.38096	1.05505	0.04220	0.8898972E 03	0.1472550E 03
10	83.26425	7.20449	0.75345	0.07732	0.1164262E 04	0.1192767E 03
11	75.69478	6.35997	0.58798	0.07731	0.9085479E 03	0.9857582E 02
12	69.38687	5.73188	0.48367	0.04220	0.4079624E 03	0.8283109E 02
13	64.04942	5.25240	0.40060	0.02124	0.1700622E 03	0.7057799E 02
14	59.47446	4.87745	0.34534	0.23680	0.1634367E 04	0.6085541E 02
15	55.50949	4.57838	0.30566	0.02125	0.1297922E 03	0.5301183E 02

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)
1	832.643	0.9820852E 04	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.8796456E 05	0.2202515E 06	0.04459
2	416.321	0.1536230E 05	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.4398229E 05	0.1762692E 06	0.08715
3	277.547	0.1910768E 05	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.2932154E 05	0.1616084E 06	0.11823
4	208.161	0.1181715E 05	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.2199113E 05	0.1542781E 06	0.07660
5	166.529	0.4401277E 04	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.1759290E 05	0.1498798E 06	0.02937
6	138.774	0.1550833E 04	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.1466075E 05	0.1469477E 06	0.01055
7	118.949	0.1177657E 05	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.1256636E 05	0.1448532E 06	0.08130
8	104.080	0.7260056E 03	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.1099556E 05	0.1432824E 06	0.00507
9	92.516	0.8898972E 03	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.9773832E 04	0.1420607E 06	0.00626
10	83.264	0.1164262E 04	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.8796449E 04	0.1410834E 06	0.00825
11	75.695	0.9085479E 03	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.7996781E 04	0.1402837E 06	0.00648
12	69.387	0.4079624E 03	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.7330379E 04	0.1396173E 06	0.00292
13	64.049	0.1700622E 03	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.6766504E 04	0.1390534E 06	0.00122
14	59.474	0.1634367E 04	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.6283184E 04	0.1385701E 06	0.01179
15	55.509	0.1297922E 03	0.1145816E 06	0.1770534E 05	0.5864305E 04	0.1381512E 06	0.00094

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

1 NODE AXIAL VIBRATION P= 171.92871 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG.SEC2/CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.9408799E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.2781192E 06	0.3372381E 07	0.8246964E-01
2	0.1365550E 02	0.9175304E 00	0.0000000E 00	0.6484797E 06	0.3552581E 07	0.1825376E 00
3	0.1365550E 02	0.7349927E 00	0.0000000E 00	0.9451591E 06	0.3880629E 07	0.2435582E 00
4	0.9269099E 01	0.4914345E 00	0.0000000E 00	0.1079807E 07	0.9614720E 08	0.1123077E-01
5	0.9269099E 01	0.4802037E 00	0.0000000E 00	0.1211377E 07	0.5810859E 07	0.2084678E 00
6	0.1365550E 02	0.2717360E 00	0.0000000E 00	0.1321063E 07	0.4591236E 07	0.2877358E 00
7	0.1365550E 02	-0.1999979E-01	0.0000000E 00	0.1314604E 07	0.3552578E 07	0.3700422E 00
8	0.1365550E 02	-0.3860420E 00	0.0000000E 00	0.1158778E 07	0.5250516E 07	0.2206979E 00
9	0.9310900E 01	-0.6067399E 00	0.0000000E 00	0.9917879E 06	0.9614720E 08	0.1031531E-01
10	0.1413150E 02	-0.6170552E 00	0.2200000E 07	0.2091552E 07	0.1947490E 08	0.1073973E 00
11	0.7169700E 01	-0.7244525E 00	0.0000000E 00	0.1938016E 07	0.1106050E 08	0.1752195E 00
12	0.7169700E 01	-0.8996720E 00	0.0000000E 00	0.1747346E 07	0.7905800E 07	0.2210208E 00
13	0.5274719E 02	-0.1120692E 01	0.0000000E 00	-0.1300000E 02		

1 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM <sup>2</sup> )	HAR.COEFF (KG/CM <sup>2</sup> )	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)		
1	1641.79395	12.06000	23.13118	0.09996	0.4621352E 05	0.4317072E 06		
2	820.89697	12.06000	18.21318	0.12898	0.4695103E 05	0.1079266E 06		
3	547.26465	12.06000	12.36560	0.13626	0.3367439E 05	0.4796741E 05		
4	410.44849	12.06000	7.64760	0.13626	0.2082582E 05	0.2698164E 05		
5	328.35864	12.06000	5.21800	0.12898	0.1345138E 05	0.1726821E 05		
6	273.63232	12.06000	3.65320	0.09996	0.1298051E 04	0.1199184E 05		
7	234.54199	12.06000	2.48840	0.65865	0.3275656E 05	0.8810336E 04		
8	205.22424	12.06000	1.92660	0.09997	0.3849384E 04	0.6745410E 04		
9	182.42154	12.06000	1.31626	0.12898	0.3393116E 04	0.5329707E 04		
10	164.17938	12.06000	1.02536	0.13626	0.2792315E 04	0.4317055E 04		
11	149.25398	12.06000	0.87300	0.13625	0.2377337E 04	0.3567816E 04		
12	136.81616	12.06000	0.77476	0.12898	0.1997233E 04	0.2997963E 04		
13	126.29184	12.06000	0.68652	0.09996	0.1371494E 04	0.2554471E 04		
14	117.27100	12.06000	0.61828	0.65865	0.8138852E 04	0.2202584E 04		
15	109.45293	10.97761	0.52324	0.09997	0.1045445E 04	0.1918692E 04		
ORDER	CRITICAL TOTAL SPEED (R.P.M)	ENGINE EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)		
1	1641.794	0.4621352E 05	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1961159E 07	0.2403913E 07	0.01922	
2	820.897	0.4695103E 05	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.9805799E 06	0.1423334E 07	0.03299	
3	547.265	0.3367439E 05	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.6537206E 06	0.1096474E 07	0.03071	
4	410.448	0.2082582E 05	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.4902905E 06	0.9330446E 06	0.02232	
5	328.359	0.1345138E 05	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.3922322E 06	0.8349863E 06	0.01611	
6	273.632	0.1298051E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.3268601E 06	0.7696142E 06	0.00948	
7	234.542	0.3275656E 05	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.2801657E 06	0.7229199E 06	0.04531	
8	205.224	0.3849384E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.2451449E 06	0.6878991E 06	0.00560	
9	182.422	0.3393116E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.2179066E 06	0.6606607E 06	0.00514	
10	164.179	0.2792315E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1961161E 06	0.6388702E 06	0.00437	
11	149.254	0.2377337E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1782871E 06	0.6210412E 06	0.00383	
12	136.816	0.1997233E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1634299E 06	0.6061840E 06	0.00329	
13	126.292	0.1371494E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1508584E 06	0.5936126E 06	0.00231	
14	117.271	0.8138852E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1400829E 06	0.5828370E 06	0.00196	
15	109.453	0.1045445E 04	0.2486225E 06	0.1941316E 06	0.1307438E 06	0.5734979E 06	0.00182	

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

2 NODE AXIAL VIBRATION P= 330.72949 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG.SEC <sup>2</sup> /CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.9408799E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.1029153E 07	0.3372381E 07	0.3051711E 00
2	0.1365550E 02	0.6948289E 00	0.0000000E 00	0.2066994E 07	0.3552581E 07	0.5818288E 00
3	0.1365550E 02	0.1130002E 00	0.0000000E 00	0.2235778E 07	0.3880629E 07	0.5761380E 00
4	0.9269099E 01	-0.4631379E 00	0.0000000E 00	0.1766215E 07	0.9614720E 07	0.1836991E -01
5	0.9269099E 01	-0.4815077E 00	0.0000000E 00	0.1278027E 07	0.5810859E 07	0.2199377E 00
6	0.1365550E 02	-0.7014454E 00	0.0000000E 00	0.2303033E 06	0.4591236E 07	0.5016150E -01
7	0.1365550E 02	-0.7516069E 00	0.0000000E 00	-0.8923447E 06	0.3552578E 07	-0.2511823E 00
8	0.1365550E 02	-0.3004246E 00	0.0000000E 00	-0.1639810E 07	0.5250516E 07	-0.3123140E 00
9	0.9310900E 01	-0.1881106E 00	0.0000000E 00	-0.1831390E 07	0.9614720E 07	-0.1904777E -01
10	0.1413150E 02	-0.1690628E 00	0.2200000E 07	-0.1720776E 07	0.1947490E 08	-0.8835864E -01
11	0.7169700E 01	-0.8070415E -01	0.0000000E 00	-0.1784067E 07	0.1106050E 08	-0.1613007E 00
12	0.7169700E 01	0.8059657E -01	0.0000000E 00	-0.1720860E 07	0.7905800E 08	-0.2176706E 00
13	0.5274719E 02	0.2982671E 00	0.0000000E 00	0.1900000E 02		

2 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM <sup>2</sup> )	HAR.COEFF (KG/CM <sup>2</sup> )	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	3158.22681	12.06000	23.13118	0.22050	0.1019346E 06	0.1573280E 07
2	1579.11328	12.06000	18.21318	0.18890	0.6876119E 05	0.3933191E 06
3	1052.74219	12.06000	12.36560	0.56644	0.1399880E 06	0.1748084E 06
4	789.55664	12.06000	7.64760	0.56643	0.8657619E 05	0.9832962E 05
5	631.64526	12.06000	5.21800	0.18891	0.1970046E 05	0.6293093E 05
6	526.37109	12.06000	3.65320	0.22049	0.1609860E 05	0.4370210E 05
7	451.17505	12.06000	2.48840	0.47534	0.2364030E 05	0.3210760E 05
8	394.77832	12.06000	1.92660	0.22050	0.8490340E 04	0.2458239E 05
9	350.91406	12.06000	1.31626	0.18889	0.4969156E 04	0.1942314E 05
10	315.82251	12.06000	1.02536	0.56644	0.1160793E 05	0.1573272E 05
11	287.11133	12.06000	0.87300	0.56643	0.9882906E 04	0.1300223E 05
12	263.18555	12.06000	0.77476	0.18891	0.2925132E 04	0.1092552E 05
13	242.94052	12.06000	0.68652	0.22049	0.3025324E 04	0.9309293E 04
14	225.98762	12.06000	0.61828	0.47534	0.5873781E 04	0.8026898E 04
15	210.94845	12.06000	0.56004	0.22050	0.24680008E 04	0.6992324E 04

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT. AMP OF SHAFT (CM)
1	3158.227	0.1019346E 06	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.5140438E 06	0.1841895E 07	0.05934
2	1579.113	0.6876119F 05	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.2570215E 06	0.1584873E 07	0.04339
3	1052.742	0.1399880E 06	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.1713479E 06	0.1499199E 07	0.09338
4	789.257	0.8657619F 05	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.1285109E 06	0.1456362E 07	0.05945
5	631.645	0.1970046E 05	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.1028087E 06	0.1430660E 07	0.01377
6	526.371	0.1609860E 05	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.8567400E 05	0.1413526E 07	0.01139
7	451.175	0.2364030E 05	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.7343488E 05	0.1401286E 07	0.01687
8	394.774	0.8490340F 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.6425550E 05	0.1392107E 07	0.00610
9	350.914	0.4969156E 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.5711603E 05	0.1384968E 07	0.00359
10	315.823	0.1160793E 05	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.5140441E 05	0.1379256E 07	0.00842
11	287.111	0.9882906E 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.4673129E 05	0.1374583E 07	0.00719
12	263.186	0.2925132E 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.4283701E 05	0.1370689E 07	0.00213
13	242.941	0.3025324E 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.3954182E 05	0.1367393E 07	0.00221
14	225.988	0.5873781F 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.3671741F 05	0.1364569E 07	0.00430
15	210.948	0.2468008E 04	0.9945458E 06	0.3333071E 06	0.3426959E 05	0.1362121E 07	0.00181

CALCULATION FOR AXIAL VIBRATION

MAIN ENGINE PARTICULARS

SHIP NAME  
ENGINE TYPE  
S HO  
B&W 6L55GF  
2 STROKE CYCLE, SINGLE ACTING CROSSHEAD TYPE  
REVERSIBLE DIESEL ENGINE WITH TURBOCHARGER  
NUMBER OF CYLINDER  
CYLINDER DIAMETER  
STROKE  
MAX. CONTINUOUS REVOLUTIONS  
MAX. CONTINUOUS OUT PUT  
MEAN INDICATED PRESSURE  
FIRING ORDER(AHEAD)

5 HO  
B&W 6L55GF  
2 STROKE CYCLE, SINGLE ACTING CROSSHEAD TYPE  
REVERSIBLE DIESEL ENGINE WITH TURBOCHARGER  
6  
55.000 CM  
138.000 CM  
150 R.P.M.  
8040.000 B.H.P.  
13.800 KG/CM2  
1 5 3 4 2 6

NO	MASS (KG)	STIFFNESS (KG-SEC2/CM)	DIAMETER OF SHAFT (CM)	LENGTH OF SHAFT (CM)	(CM)
1	0.3280000E 01	0.8505497E 06	0.5500000E 02	0.9400000E 02	0.9400000E 02
2	0.6059999E 01	0.1184366E 07	0.5500000E 02	0.9400000E 02	0.9400000E 02
3	0.6059999E 01	0.1592450E 07	0.5500000E 02	0.9400000E 02	0.9400000E 02
4	0.3450000E 01	0.5269973E 08	0.5500000E 02	0.1200000E 03	0.1200000E 03
5	0.6059999E 01	0.1592450E 07	0.5500000E 02	0.9400000E 02	0.9400000E 02
6	0.6059999E 01	0.1184366E 07	0.5500000E 02	0.9400000E 02	0.9400000E 02
7	0.6059999E 01	0.1568748E 07	0.5300000E 02	0.1100000E 03	0.1100000E 03
8	0.7719999E 01	0.6910000E 08	0.5000000E 02	0.6000000E 02	0.6000000E 02
9	0.9183999E 01	0.3780000E 07	0.5000000E 02	0.1091000E 04	0.1091000E 04
10	0.8940000E 01	0.8610000E 07	0.5000000E 02	0.4790000E 03	0.4790000E 03
11	0.1909999E 02				

NATURAL FREQUENCY

NATURAL FREQUENCY 0 NODE= 115.75S-1 18.42HZ 1105.34MIN-1  
 NATURAL FREQUENCY 1 NODE= 269.54S-1 42.90HZ 2573.91MIN-1  
 NATURAL FREQUENCY 2 NODE= 337.94S-1 53.78HZ 3227.09MIN-1

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

0 NODE AXIAL VIBRATION P= 115.75098 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FOMCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.3280000E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.4394637E 05	0.8505497E 06	0.5166820E-01
2	0.6059999E 01	0.9483318E 00	0.0000000E 00	0.1209447E 06	0.1184366E 07	0.1021177F 00
3	0.6059999E 01	0.8462142F 00	0.0000000E 00	0.1896519E 06	0.1592450E 07	0.1190944E 00
4	0.3450000E 01	0.7271198E 00	0.0000000E 00	0.2232623E 06	0.5269973E 08	0.4236497E-02
5	0.6059999E 01	0.7228833E 00	0.0000000E 00	0.2819557E 06	0.1592450E 07	0.1770578E 00
6	0.6059999E 01	0.5458255E 00	0.0000000E 00	0.3262732E 06	0.1184366E 07	0.2754834F 00
7	0.6059999E 01	0.2703421E 00	0.0000000E 00	0.3482232E 06	0.1568748E 07	0.2219752E 00
8	0.7719999E 01	0.4836684E-01	0.7857142E 07	-0.2679912E 05	0.6910000E 08	-0.3878309E-03
9	0.9183999E 01	0.4875467E-01	0.0000000E 00	-0.2079987E 05	0.3780000E 07	-0.5502611E-02
10	0.8940000E 01	0.5425728E-01	0.0000000E 00	-0.1430091E 05	0.8610000E 07	-0.1660965E-02
11	0.1909999E 02	0.5591825E-01	0.0000000E 00	0.8968750E 01		

0 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM <sup>2</sup> )	HAR.COEFF (KG/CM <sup>2</sup> )	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	1105.33716	13.80000	25.77597	0.01822	0.3504516E 04	0.2001261E 04
2	552.66846	13.80000	20.33598	0.03024	0.4590195E 04	0.5003149E 03
3	368.44456	13.80000	13.68800	0.06912	0.7061539F 04	0.2223622E 03
4	276.33423	13.80000	8.44800	0.03024	0.1906824E 04	0.1250788E 03
5	221.06743	13.80000	5.74000	0.01822	0.1804395F 03	0.8005054E 02
6	184.22285	13.80000	4.03600	0.16994	0.5119359F 04	0.5559061E 02
7	157.90530	13.80000	2.73200	0.01822	0.3714341E 03	0.4084203E 02
8	138.16714	13.14482	2.04593	0.03024	0.4618193E 03	0.3126974E 02
9	122.81523	10.80024	1.22682	0.06912	0.6329058E 03	0.2470692E 02
10	110.53371	4.19066	0.86468	0.03024	0.1951604F 03	0.2001262E 02
11	100.48518	8.03817	0.67191	0.01822	0.9135434F 02	0.1653937E 02
12	92.11142	7.18438	0.55048	0.16994	0.6982441E 03	0.1389764E 02
13	85.02592	6.53387	0.45442	0.01822	0.6178204E 02	0.1184178E 02
14	78.95265	6.02642	0.38900	0.03024	0.8780699E 02	0.1021052E 02
15	73.68913	5.62257	0.34117	0.06912	0.1760058E 03	0.8894485E 01

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTRESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)
1	1105.337	0.3504516E 04	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1126422E 04	0.9672062E 05	0.03623
2	552.668	0.4590195E 04	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.5632109E 03	0.9615744E 05	0.04774
3	368.446	0.7061539E 04	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.3754741E 03	0.9596969E 05	0.07358
4	276.334	0.1906824E 04	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.2816055E 03	0.9587581E 05	0.01989
5	221.067	0.7804395F 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.2252844E 03	0.9581950E 05	0.00814
6	184.223	0.5119359E 04	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1877369E 03	0.9578194E 05	0.05345
7	157.905	0.3714341E 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1609175E 03	0.9575512E 05	0.00388
8	138.167	0.4618193F 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1408028E 03	0.9573500E 05	0.00482
9	122.815	0.6329058E 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1251581E 03	0.9571938E 05	0.00661
10	110.534	0.1951604E 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1126423E 03	0.9570687E 05	0.00204
11	100.485	0.9135434E 02	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.1024021E 03	0.9569663E 05	0.00095
12	92.111	0.6982441E 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.9386856E 02	0.9568806E 05	0.00730
13	85.026	0.6178204E 02	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.8664790E 02	0.9568087E 05	0.00065
14	78.953	0.8780699E 02	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.8049874E 02	0.9567469E 05	0.00092
15	73.689	0.1760058E 03	0.6224362E 05	0.3335068E 05	0.7509480E 02	0.9566931E 05	0.00184

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

1 NODE AXIAL VIBRATION P= 269.54004 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG.SEC <sup>2</sup> /CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.3280000E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.2382979E 06	0.8505497E 06	0.2801693E 00
2	0.6059999E 01	0.7198307E 00	0.0000000E 00	0.5552177E 06	0.1184366E 07	0.4687890E 00
3	0.6059999E 01	0.2510417E 00	0.0000000E 00	0.6657439E 06	0.1592450E 07	0.4180626E 00
4	0.3450000E 01	-0.1670209E 00	0.0000000E 00	0.6238802E 06	0.5269973F 08	0.1183840E-01
5	0.6059999E 01	-0.1788993E 00	0.0000000E 00	0.5451339E 06	0.1592450E 07	0.3423240E 00
6	0.6059999E 01	-0.5211833E 00	0.0000000E 00	0.3126726E 06	0.1184366E 07	0.2665329F 00
7	0.6059999E 01	-0.7877162E 00	0.0000000E 00	-0.3113519E 05	0.1568748E 07	-0.1984715E-01
8	0.7719999E 01	-0.7675690F 00	0.7857142E 07	0.5571443E 07	0.6910000E 08	0.8062869F-01
9	0.9183999E 01	-0.8484977E 00	0.0000000E 00	0.5005296E 07	0.3780000E 07	0.1324152E 01
10	0.8940000E 01	-0.2172649E 01	0.0000000E 00	0.3594145E 07	0.8610000E 07	0.4174384E 00
11	0.1909999E 02	-0.2590087E 01	0.0000000E 00	0.1700000E 02		

1 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM <sup>2</sup> )	HAR.COEFF (KG/CM <sup>2</sup> )	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	2573.91162	13.80000	25.77597	0.05184	0.9972914E 04	0.2727313E 07
2	1286.95581	13.80000	20.33598	0.08003	0.1214743E 05	0.6818263E 06
3	857.97046	13.80000	13.68800	0.11182	0.1142409E 05	0.3030344E 06
4	643.47778	13.80000	8.44800	0.08003	0.5046207E 04	0.1704564E 06
5	514.78223	13.80000	5.74000	0.05183	0.2220733E 04	0.1090922E 06
6	428.98511	13.80000	4.03600	0.33271	0.1002273E 05	0.7575837E 05
7	367.70166	13.80000	2.73200	0.05184	0.1057096F 04	0.5565920E 05
8	321.73877	13.80000	2.11800	0.08003	0.1265190E 04	0.4261412E 05
9	285.98999	13.80000	1.43980	0.11182	0.1201666E 04	0.3367037E 05
10	257.39111	13.80000	1.12280	0.08003	0.6706724E 03	0.2727306E 05
11	233.99196	13.80000	0.96000	0.05184	0.3714150E 03	0.2253973E 05
12	214.49263	13.80000	0.85480	0.33271	0.2122754F 03	0.1893961E 05
13	197.99319	13.80000	0.75960	0.05184	0.2939104E 03	0.1613789E 05
14	183.85083	13.80000	0.68440	0.08003	0.4088293E 03	0.1391481E 05
15	171.59410	13.80000	0.61920	0.11182	0.5167878E 03	0.1212133E 05

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)
1	2573.912	0.9972414E 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1310448E 08	0.1392059E 08	0.00072
2	1286.956	0.1214743F 05	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.6552247E 07	0.7368353E 07	0.00165
3	857.970	0.1142409F 05	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.4368166E 07	0.5184272E 07	0.00220
4	643.478	0.5046207E 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.3276123E 07	0.4092229E 07	0.00123
5	514.782	0.2220733F 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.2620897E 07	0.3437003E 07	0.00065
6	428.985	0.1002273F 05	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.2184081E 07	0.3000187E 07	0.00334
7	367.702	0.1057096F 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1872068E 07	0.2688174E 07	0.00039
8	321.739	0.1265190E 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1638060E 07	0.2454166E 07	0.00052
9	285.990	0.1201666E 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1436054E 07	0.2272160E 07	0.00053
10	257.391	0.6706724E 03	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1310448E 07	0.2126554E 07	0.00032
11	233.992	0.3714150F 03	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1191317E 07	0.2007423E 07	0.00019
12	214.493	0.2127754F 04	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1092039E 07	0.1908145E 07	0.00111
13	197.993	0.2939104E 03	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.1008038E 07	0.1824144E 07	0.00016
14	183.851	0.4088293E 03	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.9360346E 06	0.1752141E 07	0.00023
15	171.594	0.5167878F 03	0.2264546E 06	0.5896518E 06	0.8736326E 06	0.1689739E 07	0.00031

HOLZER TABLE FOR AXIAL VIBRATION

2 NODE AXIAL VIBRATION P= 337.94043 (RAD/SEC)

NO	MASS (KG.SEC <sup>2</sup> /CM)	AMPLITUDE (CM)	TH.BL.STIF. (KG)	TOTAL FORCE (KG)	STIFFNESS (KG/CM)	DELTA AMP. (CM)
1	0.3280000E 01	0.1000000E 01	0.0000000E 00	0.3745881E 06	0.8505497E 06	0.4404071E 00
2	0.6059999E 01	0.5595929E 00	0.0000000E 00	0.7618681E 06	0.1184366E 07	0.6432708E 00
3	0.6059999E 01	-0.8367789E-01	0.0000000E 00	0.7039567E 06	0.1592450E 07	0.4420589F 00
4	0.3450000E 01	-0.5257367E 00	0.0000000E 00	0.4968149E 06	0.5269973E 08	0.9427276E-02
5	0.6059999E 01	-0.5351640E 00	0.0000000E 00	0.1264416E 06	0.1592450E 07	0.7940066F-01
6	0.6059999E 01	-0.6145647E 00	0.0000000E 00	-0.2988829E 06	0.1184366E 07	-0.2523568E 00
7	0.6059999E 01	-0.3622078E 00	0.0000000E 00	-0.5495576E 06	0.1568748E 07	-0.3503160E 00
8	0.7719999E 01	-0.1189178E-01	0.7857142E 07	-0.4666066E 06	0.6910000E 08	-0.6752625E-02
9	0.9183999E 01	-0.5139157E-02	0.0000000E 00	-0.4719967E 06	0.3780000E 07	-0.1248668E 00
10	0.8940000E 01	0.1197277E 00	0.0000000E 00	-0.3497571E 06	0.8610000E 07	-0.4062219E-01
11	0.1909999E 02	0.1603498E 00	0.0000000E 00	0.1225000E 02		

2 NODE ACTUAL AMPLITUDE OF AXIAL VIBRATION

ORDER	CRIT.SPEED (R.P.M)	IND.PRES (KG/CM <sup>2</sup> )	HAR.COEFF (KG/CM <sup>2</sup> )	VECTOR SUM (RAD)	ENG.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROP.EXIT.ENERGY (KG-CM/CYCLE)
1	3227.08545	13.80000	25.77597	0.08152	0.1568441E 05	0.4171972E 06
2	1613.54272	13.80000	20.33598	0.09008	0.1367223E 05	0.1042986E 06
3	1075.69507	13.80000	13.68800	0.38778	0.3961776E 05	0.4635487E 05
4	806.77124	13.80000	8.44800	0.09007	0.5679434E 04	0.2607462E 05
5	645.41699	13.80000	5.74000	0.08153	0.3492780E 04	0.1668776E 05
6	537.84741	13.80000	4.03600	0.20906	0.6297918E 04	0.1158872E 05
7	461.01221	13.80000	2.73200	0.08152	0.1662364E 04	0.8514156E 04
8	403.38550	13.80000	2.11800	0.09008	0.1424064E 04	0.6518652E 04
9	358.56494	13.80000	1.43980	0.38778	0.4167273F 04	0.5150943E 04
10	322.70850	13.80000	1.12280	0.09007	0.7548005E 03	0.4171937E 04
11	293.37134	13.80000	0.96000	0.08153	0.5841621E 03	0.3447882E 04
12	268.92358	13.80000	0.85480	0.20906	0.1333861E 04	0.2897177E 04
13	248.23734	13.80000	0.75960	0.08152	0.4621980E 03	0.2468605E 04
14	230.50610	13.80000	0.68440	0.09008	0.4601604E 03	0.2128540E 04
15	215.13902	13.80000	0.61920	0.38778	0.1792176E 04	0.1854195E 04

ORDER	CRITICAL SPEED (R.P.M)	TOTAL EXITING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ENGINE DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	HYSTERESIS DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	PROPELLER DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	TOTAL DAMPING ENERGY (KG-CM/CYCLE)	ACT.AMP OF SHAFT (CM)
1	3227.085	0.1568441E 05	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.7895181E 05	0.5509384E 06	0.02847
2	1613.543	0.1367223E 05	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.3947590E 05	0.5114625E 06	0.02673
3	1075.695	0.3961776E 05	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.2631730E 05	0.4983039E 06	0.07951
4	806.771	0.5679434E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.1973798E 05	0.4917246E 06	0.01155
5	645.417	0.3492780E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.1579037E 05	0.4877770E 06	0.00716
6	537.847	0.6297918E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.1315864E 05	0.4851452E 06	0.01298
7	461.012	0.1662364E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.1127883E 05	0.4832654E 06	0.00344
8	403.385	0.1424064E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.9868980E 04	0.4818556E 06	0.00296
9	358.565	0.4167273E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.8772430E 04	0.4807590E 06	0.00867
10	322.708	0.7548005E 03	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.7895184E 04	0.4798817E 06	0.00157
11	293.371	0.5841621E 03	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.7177437E 04	0.4791641E 06	0.00122
12	268.924	0.1333861E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.6579320E 04	0.4785659E 06	0.00279
13	248.237	0.4621980E 03	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.6073219E 04	0.4780998E 06	0.00097
14	230.506	0.4601604E 03	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.5639414E 04	0.4776260E 06	0.00096
15	215.139	0.1792176E 04	0.2881589E 06	0.1838277E 06	0.5263449E 04	0.4772501E 06	0.00376

Table 8. Calculated and measured results of critical speeds and resonance amplitudes

Name of ship	Node/Order	Critical speeds (rpm)			Amplitudes of crankshaft forward end (mm)		
		Maker's values	Measured values	Author's values	Maker's values	Measured values	Author's values
A	0/6	120	—	118	0.454	—	0.528
	0/9	80	78	79	0.304	0.490	0.390
M	0/7	121	119	119	0.572	0.700	0.813
S	0/12	92	92	92	0.114	0.070	0.073

計算結果와 實測值를 比較한 것이 Table 8이다.

Table 8에서 보면 共振振動數나 共振振幅 모두 筆者의 方法에 의한 結果가 實測值와 매우 좋은 一致를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 1節振動에 대한 實測結果가 없기 때문에 推力베어링의 스프링定數에 關하여서는 明確한 結論을 내리기에는 困難한 點이 없지 않으므로 今後 좀더 많은 實測資料를 蒐集하여 計算値와 對比함으로써 보다 信賴性있는 計算이 可能하게 될 것이다.

## 7. 結 論

本 研究에서는 第1報에서 自由振動計算에 必要한 크랭크軸 스프링定數計算式과 自由振動計算方法을 究明한데 이어서 強制振動의 共振振幅計算에 必要한 半徑力의 推力變換率 計算方法과 共振振幅의 計算方法을 究明하였다.

이들 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 理論적으로 誘導된 半徑力의 推力變換率 計算式을 利用하여 實際의 大形디젤機關 크랭크軸에 適用한 結果 0.2~0.4程度로 나타났으며 이는 各 機關製作者가 쓰고 있는 값과 大同少異하나 具體적으로 各 機關의 값을 比較하여 보면 큰 差異를 나타내고 있고 大體적으로 製作者가 利用하고 있는 變換率이 작은 값으로 되는 일이다.

(2) 減衰力에 대하여서는 이미 發表되고 있는 값과 本 研究에서 實測值로 부터 計算한 값을 比較한 結果 減衰係數比로서 0.03~0.06程度의

範圍內에 있음이 밝혀졌기 때문에 平均値로서 0.040~0.045를 利用하였다. 이 경우 軸系全體에 等價粘性減衰를 適用할 경우에는 0.045를 利用하고 軸系縱振動減衰를 베어링減衰, 軸內部減衰, 推進器減衰 등으로 나누어서 다룰 경우에는 베어링減衰의 減衰係數比로서 0.04를 取하며 軸內部減衰는 비틀림振動과 同一式을 採擇하였고 推進器減衰에 대하여서는 J.R. Kane, Schwanecke, Schuster 등의 諸式에 依한 結果를 利用한다.

이 경우에 있어 推進器減衰는 式에 따라 2.0~2.5倍 程度의 差異를 보이거나 크랭크軸系縱振動에 있어 가장 問題로 되고 있는 零節振動에 대하여 推進器減衰는 別影響을 미치지 않기 때문에 實用上으로는 어느 式에 의하든지 別差異가 없다.

(3) 起振力計算에 있어 비틀림振動과는 달리 起振力하모닉스의 값이 機種에 따라 큰 差異가 있기 때문에 可能的限 該當機種의 하모닉스를 利用할 必要가 있다. 또한 縱振動의 경우에도 1~4次까지는 往復慣性力의 影響을 考慮할 必要가 있다. 특히 起振力벡터를 求할 경우 비틀림振動과는 달리 隣接質點間의 變位差로서 求하여지는 點에 留意할 必要가 있다.

起振力計算에 있어 推進器 異數倍數次에 대하여서는 推進器에 의한 起振力을 考慮하여야 하는데 現在로서는 機關側 起振力과의 位相關係가 確實하지 않으므로 兩側起振力이 接치는 경우와 相反되는 경우에 대하여 吟味할 必要가 있다.

(4) 強制振動의 共振振幅計算을 위한 電算프

로그를 開發하고 軸系資料와 實測值가 入手된 3隻의 船用디젤 機關 크랭크軸系에 위의 結果를 適用한 結果, 計算된 共振回轉數, 共振振幅 모두 實測值와 좋은 一致를 보여 주었으며 現在 各 機關製作者가 計算한 結果보다 良好하였다.

끝으로 本 研究의 一部는 韓國科學財團의 研究費支援에 의하여 이루어진 것이며 同財團에 深甚한 謝意를 表하는 바입니다.

### 參 考 文 獻

- 1) 全孝重, 金義玕, 內燃機關 크랭크軸系縱振動에 관한 研究 (第1報; 크랭크軸의 縱剛性係數와 縱自由振動計算), 韓國船用機關學會誌, 第5卷第1號. 1981, pp. 34.
- 2) Kerwin J.E., Lee C. H., Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller performance by Numerical Lifting-Surface Theory, SNAME, 1978.11, 16-18, Presented at the Annual Meeting.
- 3) Van Manen J.D., Propeller Excited vibratory forces in the shaft of a single screw tanker, Inter. Shipb. Pro., 1960.
- 4) Iseki Y., Urushibara A., Axial Vibration in Crankshafts of Large Marine Diesel Engines, Japan Shipbuilding & Marine Engineering, Jan. 1967, pp.13.
- 5) Kleiner A., Axial Vibration of the Crankshaft and Propeller Shafting of Motorships, Inter. Shipb. Progress, Vol.11, 1964/1, pp.36.
- 6) 藤井克哉, 프로펠러 推力變動와 디젤 機關縱起振力의 位相調整による 振動輕減, 日本造船學會誌, 第580號, 1977/10, pp. 449.
- 7) 全孝重, 船用往復內燃機關軸系縱ねじ리連成強制振動의 理論的解析, 日本船用機關學會誌, 第5卷, 第3號, 1970/3.
- 8) 金永柱, 船用디젤 機關 크랭크軸系의 縱振動起振力에 관한 研究, 韓國海洋大學大學院論文集, 第4輯, 1982.
- 9) 全孝重, 機械力學, 太和出版社, 釜山, 1979, pp.64.
- 10) Johnson A. J., McClimont W., Machinery Induced Vibrations, Trans. I. M. E., 1963, pp. 121.
- 11) Bradbury C.H., Crankshaft Torsional Vibration, A Recent Exposition on a Difficult Subjects, Oil Engine and Gas Turbine, Vol.20, No.235, 1953/1.
- 12) Draminsky P., Crankshaft damping, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 159, pp.416, 1948.
- 13) Kane J.R., McGoldrick R. T., Longitudinal Vibrations of Marine Propulsion-Shafting Systems, Trans. SNAME, Vol.57, 1949, pp.193.
- 14) Schuster S., Über den Einfluss des Propellers und die Längs-und Drehschwingungen in der Wellenleitung, Schiff und Hafen, Jahrgang 13, H.6, S.498, 1961.
- 15) Schwanecke H., Gedanken zur Frage der hydrodynamischerregten Schwingungen des Propellers und Wellenleitung, STG-Jahrbuch, B.57, S.252, 1963.
- 16) Thomsen P., Dynamische Modellmessungen bei Propeller schwingungen, Schiff und Hafen, Jahrgang 13, H.2, S.89, 1961.
- 17) Lazan B. H., Damping of Materials and Members in Structural Mechanics, Pergamon Press, 1968.
- 18) 原三郎, 船用디젤 機關의 크랭크軸折損事故에 關連して考慮すべき諸問題, 日本船用機關學會誌, 第1卷第1號, pp.58, 1966/4.