

船舶에서 排氣 汚染物質의 低減*

Reduction of Air Pollution Induced by Diesel Exhaust in Ships

前田和幸

K. Maeda

1. 緒言

船舶의 機能은 大量의 物資를 먼 곳으로 輸送하는 데에 있다. 1980年代까지는 「보다 迅速하고」, 「보다 經濟的인」 輸送이 요구되어 왔지만, 1990年代부터는 「環境에 負擔을 줌이 없이」라고 하는 項目이 追加되었다. 여기에 對處하기 위하여 船用 디젤 機關에서 排出되는 汚染物質의 低減化에 關한 研究가 遂行되어 왔다.

그러나, 船舶은 通常 20年 以上の 長期間 동안에 同一한 船體 및 機關으로 運行되기 때문에, 낮은 排氣 汚染物質을 發生시키는 새로운 機關의 研究, 開發이 必要함은 勿論, 既存 船舶에서의 汚染物質 低減法에 對한 研究도 必要하다. 水産大學校의 內燃機關 研究室은 1991년부터 이 課題의 研究에 着手하여, 航行中인 船舶에서의 排氣 汚染物質의 低減에 關한 研究를 遂行하고 있다.

本 研究에서는 于先, 航行中인 船舶으로부터 排出되는 排氣 汚染物質(NO₂, CO₂, PM 等)을 低減시키기 위하여, 船舶의 抵抗과 推進 理論에 基礎한 評價 및 低減方法을 提案하였다.

다음으로 이것을 實證하기 위하여, 船舶의 크기와 推進機關의 出力, 回轉數가 서로 다른 3隻의 船舶을 使用해서 航行中인 船舶에서의 排氣 汚染物質의 排出特性을 明確히 함과 同時에, 엔진 性能 向上에 의한 低減, 推進性能 向上에 의한 低減, 船舶의 크기와 航行速度의 組合에 따른 低減結果를 나타내었다.

또한, 船舶用 디젤 機關에서의 PM(粒子狀物質)의 生成機構와 低減方法에 對하여 檢討하였다.

最後에, 이들의 結果를 基礎로, 漁船을 包含한 모든 船舶으로부터 排出되는 排氣 汚染物質의 具體的인 低減方法에 對하여 記述하였다.

2. 船舶으로부터 排出되는 汚染物質의 評價와 低減

船舶으로부터 排出되는 汚染物質은 大氣 汚染가스와 地球 溫暖化 가스로 分類할 수가 있다.

大氣 汚染 가스에는 酸性雨의 原因이 되는 NO_x(窒素酸化物), SO_x(黃酸化物), 人體의 呼吸器 系統疾患의 原因이 되는 것으로 알려진 PM(粒子狀物質) 등이 있다.

또, 地球 溫暖化 가스에는 現在 世界的으로 問題視되고 있는 CO₂(二酸化炭素)가 있다.

排氣 汚染物質은 通常的으로 出力·時間當의 排出量[g/kW·h]으로 評價되지만, 이것은 엔진에 關한 評價이고, 船舶의 運航時에 排氣 汚染物質의 低減이라고 하는 目的에 對해서는 充分하다고 말할 수는 없다.

船舶으로부터 排出되는 排氣 汚染物質은 航行時間當의 排出量[g/h], 航行距離當의 排出量[g/mile]에 의하여 評價하는 方法과 船舶의 機能을 「大量物資의 遠距離 輸送」에 있다고 하여, 輸送量, 距離當의 排出量[g/ton·mile]으로 評價하는 方法이 있다. 漁船을 包含한 모든 船舶을 對象으로 한 排氣 汚染物質의 低減을 생각하는 경우, 이 輸送量, 距離當의 排出量을 低減하는 것이 必要하다.

輸送量·距離當의 汚染物質 排出量은, 엔진 性能에 關係하는 出力, 時間當의 排出量을 使用하여 式(1)과 같이 고쳐 쓸 수 있다. 또한, 式(1)에서 E [g]는 엔진의 排出量, W [ton]은 船舶의 排水量, D [mile]은 航行距離, V [knot]는 船速, P [KW]는 機關出力, h [hour]는 航行時間을 나타낸다.

접수일 : 2002년 6월 30일

前田和幸 : (日本)水産大學校 海洋機械工學科

* 이 해설기사는 저자가 2001년 11월에 부경대학교에서 특별강연한 내용을 본 학회 편집이사(이일영)가 저자와 협의하여 정리한 것임.

$$\frac{E}{W \cdot D} = \frac{E}{P \cdot h} \cdot \frac{P}{W \cdot V} \quad (1)$$

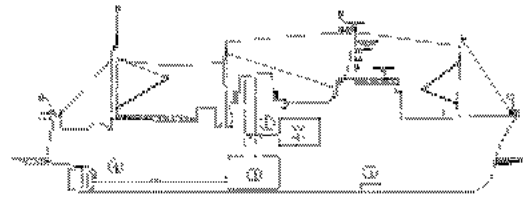
위 식 右邊의 $[E/(p \cdot h)]$ 는 機關性能에 關係된 部分이며, $[P/(W \cdot V)]$ 는 船舶의 推進性能에 關係된 部分이다. 이 推進性能에 關한 部分은 式(2)와 같이 고쳐 쓸 수가 있다. 또한, 式(2)에 있어서 G 는 全抵抗係數, η_p 는 프로펠러 효율, η_T 는 傳達效率, η_H 는 船殼效率를 나타낸다.

$$\frac{P}{W \cdot V} \propto \frac{C_T \cdot V^2}{W^{1/3} \cdot \eta_P \cdot \eta_T \cdot \eta_H} \quad (2)$$

式(2)를 式(1)에 代入하면, 輸送量, 距離當의 排出量은 다음 式(3)으로 表現된다.

$$\frac{E}{W \cdot D} \propto \frac{E}{P \cdot h} \frac{C_T \cdot V^2}{W^{1/3} \cdot \eta_P \cdot \eta_T \cdot \eta_H} \quad (3)$$

이와 같이 船舶에서 排出되는 汚染物質을 評價하는 境遇, 機關性能에 關한 評價에 推進性能에 關한 評價를 添加함으로써 低減의 指針이 明確해진다. 또, 式(3)으로부터 船舶에서 排出되는 汚染物質을 低減시키기 위하여, 出力, 時間當의 排出量을 적게 하는 同時에 全 抵抗係數, 船速을 작게, 排水量, 프로펠러 效率, 傳達效率, 船殼效率를 크게 할 필요가 있음을 알 수 있다.



① Sampling Probe, ② Exhaust Gas Analyzer, ③ Main Engine, ④ Controllable Pitch Propeller, ⑤ Doppler/EM Log

Fig. 1 Outline of test apparatus

3. 實驗裝置와 方法

前章에서는 航行中인 船舶으로부터 排出되는 汚染物質 低減의 指針을 나타내었으며, 이것을 實船에 適用한 境遇의 低減效果를 明確히 하기 위하여 實驗을 行하였다.

實驗에는 水産大學校의 實驗室에 있는 103kW/2400rpm의 小型 漁船用 4사이클 船用 디젤 機關과 練習船 耕洋號, 天鷹號 및 實驗·實習艇인 紺碧號를 使用하였다. 實驗에 使用한 船舶의 主要諸元을 Table 1에 나타낸다. 또, 實驗裝置의 概要를 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 排氣管에 挿入된 採取 프로브 ①에 의하여 排氣가스의 一部를 吸入하고, 過熱 保溫된 샘플링 라인에 의하여 排氣가스 分析裝置 ②로 誘導한 후, NO_x , CO, CO_2 , O_2 濃度 및 PM을 計測하였다.

Table 1 Principal specificatinos

Ship's Name		Koyo Maru	Tenyo Maru	Konpeki
Length	m	81.40	57.10	15.55
Breadth	m	13.00	10.40	3.40
Depth	m	8.40	6.45	1.49
Gross Tonnage	ton	2342	877	12
Trial Speed	knot	15.7	15.4	17.1
Main Engine				
Type		6UET 45/75C	6ELS 32	6GHA ST
Output	kW	2795	1618	265
Engine speed	rpm	230	280	2200
Pme	MPa	1.02	2.25	1.5
Bore	mm	450	320	118
Stroke	mm	750	640	140
Date of Delivery		June/1978	May/1985	March/1993

또, 이와 동시에 추진기관 ③의 指壓線圖를 採取함과 동시에, 煤煙濃度, 燃料消費量, 燃料 噴射管內 壓力, 軸馬力, 스톱스트, 可變 피치 프로펠러 ④의 翼角 및 船速을 計測하였다. 船速은 도플러 및 電磁 로그 ⑤에 의하여 對水速度를 計測하였다.

實驗은 于先 汚染物質의 排出特性을 明確히 하기 위하여 船舶의 機關 回轉數를 4種類로 設定하고, 各 回轉數에서 翼角을 變更함에 따라 負荷率을 變化시켜, 負荷率 및 船速에 對한 機關 回轉數마다의 汚染物質 排出量을 調査하였다. 또, 機關性能에 關한 汚染物質의 低減效果를 明確히 하기 위하여 船舶 巡航時의 機關 回轉數에서 燃料 噴射時期를 標準值로부터 3度, 5度 및 6度 遲延시키고, 負荷率 變更의 境遇와 마찬가지로의 計測을 하였다. 더욱이, 推進性能에 關한 汚染物質의 低減效果를 明確히 할 目的으로 天鷹號를 使用하여, 船體가 가장 더럽혀져 있는 夏季에 長期間 停泊 後(以後에는 이것을 入渠前이라 稱함)와 船體의 汚損이 가장 적은 出渠直後(船體 清掃, 塗裝後, 以後에는 이것을 出

渠後라 稱함)에서의 汚染物質의 排出特性을 比較하였다.

燃料는 耕洋號와 天鷹號에서는 市販의 Marine Diesel Oil을, 테스트 機關과 實驗 實習艇紺碧號에서는 市販의 Gas Oil을 使用하였다.

4. 實驗結果 및 考察

4.1 機關에 關聯된 低減 效果

Fig. 2에 天鷹號의 巡航時 機關 回轉數(255rpm)에서 燃料噴射 時期 遲延을 일으켰을 때, 發生하는 NO_x 排出量의 變化를 나타낸다. Fig. 2, (a)에서 出力·時間當의 NO_x 는 燃料 噴射時期 遲延을 일으키에 따라서 어느 船速에서도 減少하고, 그 比率은 3度에서 約 17%, 6度에서 約 38%이다. Fig. 2, (b)에서 輸送量, 距離當의 NO_x 는 燃料 噴射時期 遲延을 일으키에 따라 어느 船速에서도 減少하고,

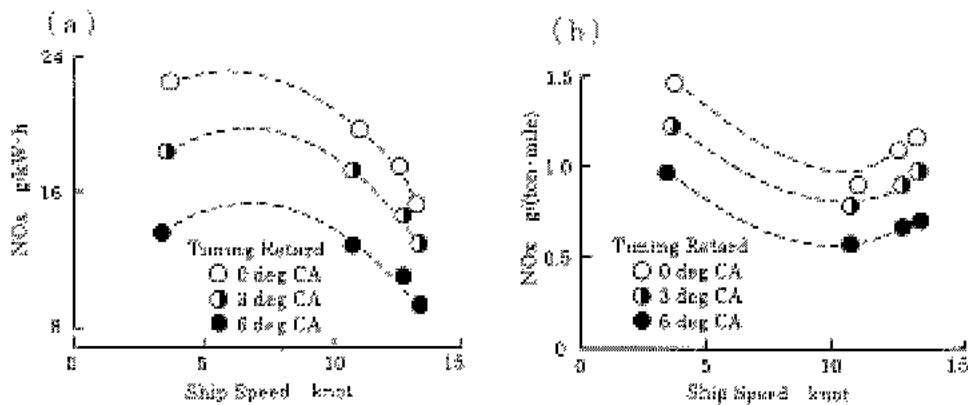


Fig. 2 Effect of fuel injection timing retard to NO_x emission

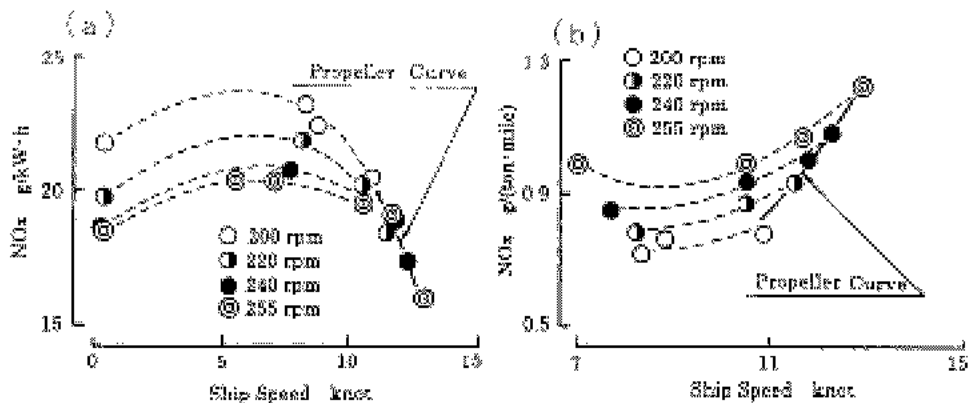


Fig. 3 Effect of engine speed to NO_x emission

그 比率은 出力 · 時間當의 NO_x 減少 比率과 同一하다. 이것은 式(3)에서 同一 船舶에서 同一 時期에 實驗을 行하는 境遇, V (船速)가 一定이면 C_T (全抵抗係數), η_P (프로펠러 效率), η_T (傳達效率), η_H (船殼效率)의 값은 變化하지 않기 때문에, 機關에 關聯된 項의 影響만이 나타나기 때문이다. 또 Fig. 2, (b)에서 輸送量 · 距離當 NO_x 値는 10노트 付根에서 最低値를 보이고 있다. 이것은 低速 領域에서는 Fig. 2, (a)에서 보듯이 出力 · 時間當의 NO_x 値가 크고, 프로펠러 效率도 낮기 때문에 높은 값을 보이지만, 船速의 增加와 더불어 出力 · 時間當의 NO_x 値가 x 減少함과 同時에 프로펠러 效率도 向上하므로, 그 값은 低下한다. 그러나, 船速이 어느 값 以上으로 되면 V^2 의 影響이 커지기 때문에 輸送量 · 距離當의 NO_x 値는 增加한다.

4.2 프로펠러 效率의 向上

Fig. 3, (a)에 船速과 出力 · 時間當의 NO_x 의 關係를 나타내며, Fig. 2, (b)에 船速과 輸送量 · 距離當의 NO_x 의 關係를 나타낸다. 그림 속의 破線은 各 機關 回轉數에서 프로펠러 翼角을 바꾸어 줌으로써 船速을 變化시킨 境遇의 排出特性(定 回轉特性)을 나타내고, 實線은 翼角을 最大值 付根으로 維持하면서 機關 回轉數를 바꾸어서 船速을 變化시키는 境遇의 排出特性(船用特性)을 나타낸다. 機關 性能에 關係되는 出力 · 時間當의 NO_x 는 Fig. 3, (a)에 나타나는 바와 같이 10노트 付根까지는 機關 回轉數가 높을수록 작은 값을 보이지만, 그 以上의 船速에서는 機關 回轉數의 影響을 거의 받지 않는다. 이에 反해서, 推進 性能에 關係된 評價를 追加한 輸送量 · 距離當의 NO_x 는 Fig. 3, (b)에 나타내는 바와 같이 모든 船速에서 機關 回轉數가 높을수록 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 同一 船速에서 機關 回轉數를 높게 設定한 경우, 그 만큼 翼角이 작아져서 프로펠러 效率이 低下되기 때문이다. 船舶이 集中되어 NO_x 가 特히 環境에 나쁜 影響을 미치는 港內나 狹水路 등에서 低速으로 航行할 때, 可變 피치 프로펠러 船에서는, 機關 回轉數를 높게 設定함으로써 出力 · 時間當의 排出量은 節減 可能하나, 船舶으로부터의 排出量은 增加한다.

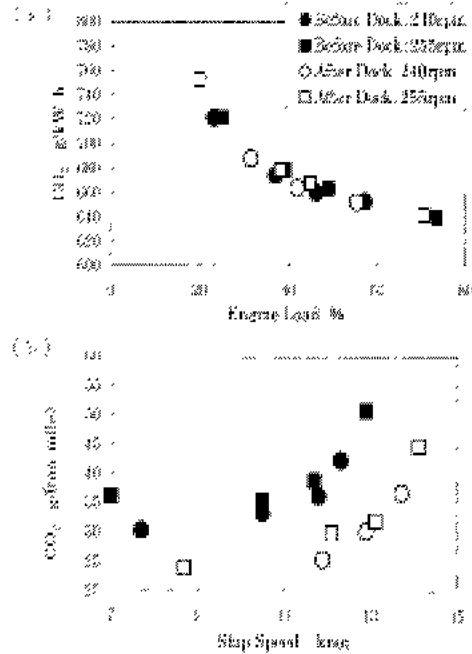


Fig. 4 Effect of change in the hull resistance to CO_2 emission

4.3 船體抵抗의 影響

Fig. 4에 船體 抵抗의 變化가 CO_2 排出量에 미치는 影響을 나타낸다. 그림 속의 黑色 点 및 黑色 4角은 入渠前의 長期 停泊後에 行한 實驗結果를 나타내고, 白色 圓 및 白色 4角은 入渠로부터 船體 및 프로펠러의 清掃를 行한 直後의 實驗 結果를 나타내고 있다. Fig. 4, (a)에 나타내는 바와 같이 出力 · 時間當의 CO_2 排出量은 船體의 狀態에 影響을 받지 않는다. 그러나, Fig. 4, (b)에 나타낸 바와 같이 輸送量 · 距離當의 CO_2 排出量은 同一 船速에서 船體가 汚損될수록 增大한다. 이것은 式(3)의 C_T (全抵抗係數)가 增加하기 때문이다.

4.4 船舶의 크기와 速度의 影響

Fig. 5에 3隻의 試驗 船舶에서의 船速과 輸送量 · 距離當의 NO_x 의 關係를 나타낸다. Fig. 5에 있어서, 輸送量 · 距離當의 排出量은 大型船일수록 적고, 同一 船舶에 있어서는 船速이 낮을수록 排出量이 적다. 이것은 式(3)에서 W (排水量)과 V (船速)의 影響이다. 또, 12 GT Ship에 있어서 13노트 付根으로부터 排出量이 減少하는 傾向으로 되어

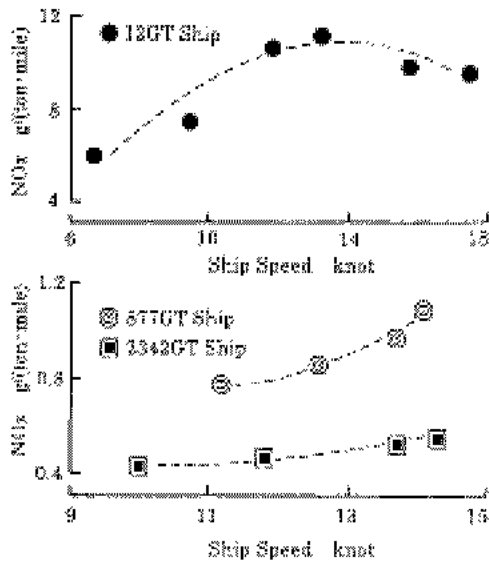
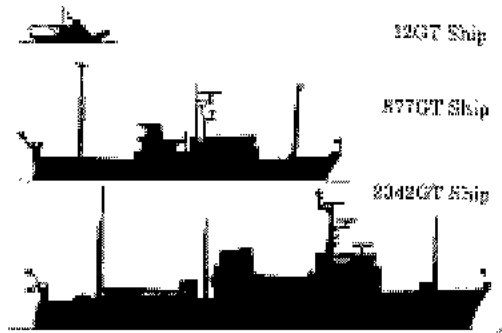


Fig. 5 Relationship between ship speed and NO_x emission

있으며, 이것은 그 이상의 船速에서는 船體 前部가 들어 올려져서 半滑走 狀態로 되어 있기 때문에 式(3)의 C_T (全抵抗係數)가 減少하기 때문이다.

4.5 PM의 生成과 低減

Fig. 6에 小型 漁船用 디젤 機關과 2隻의 漁船에서의 負荷率과 PM 排出量과의 關係를 나타낸다. 그림에서 PM 排出量은 負荷率의 增加와 함께 直線的으로 增大하고 있다. A重油나 輕油를 燃料로 하는 機關으로부터 排出되는 PM은 주로 드라이 수트와 燃料 및 潤滑油의 燃燒分인 SOF로 構成된다. 負荷率이 增加하면 1회의 燃料 噴射量이 增加함과 더불어, 燃燒 時間도 짧아지기 때문에 燃料의 不完全 燃燒에 의한 드라이 수트가 增加하는 것으로 생각된다. 또, 負荷率의 增加와 함께 燃燒 時間이 길어지면 실린더 內 平均 가스 溫度가 높아짐에 의하여 실린더 壁에 附着한 潤滑油가 高溫

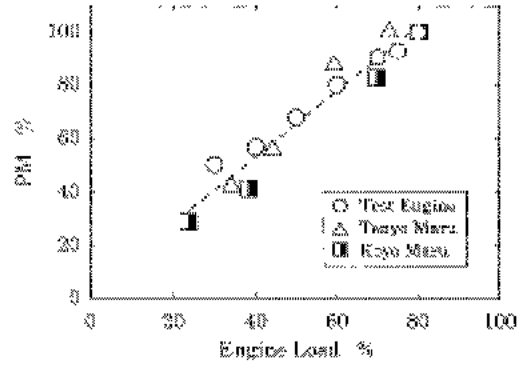


Fig. 6 Relationship between engine load and PM emission

가스에 露出되어 蒸發이 促進되기 때문에 PM 中의 SOF도 增加하는 것으로 생각된다. Fig. 7에는 ISO에 規定된 필터로 採取한 PM의 寫眞을 나타낸다. Fig. 7에서, (a)는 小型 高速機關으로부터 採取한 것을 (b)는 中型 低速機關으로부터 採取한 것을 나타내고, 質量은 어느 쪽도 약 3mg이다. 小型 高速 機關에서는 噴霧가 피스톤 頂面에 達한後 着火하기 때문에 피스톤과 실린더 라이너의 間隙이나 실린더 그루브 등에 들어간 燃料가 不完全 燃燒을 일으켜서 드라이 수트로 되므로, PM의 色이 검어진 것으로 생각된다. 한편, 中型 低速機關

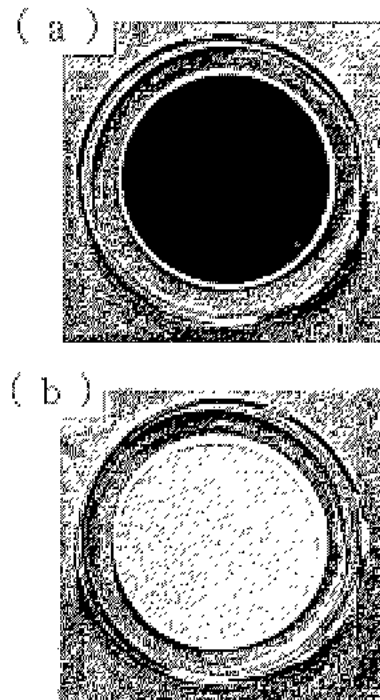


Fig. 7 Sampling filters

에서는 噴霧가 피스톤 頂面에 到達하기 前에 着火하고, 燃燒時의 時間과 空間이 充分히 있기 때문에, 燃料는 거의 完全燃燒하는 것으로 생각된다. 이 때문에 排出 가스 中에는 燃料의 不完全 燃燒에 의하여 發生하는 드라이 수트는 거의 없으며, PM은 옅은 灰色으로 되는 것으로 생각된다.

PM을 低減시키기 위하여, 現在 式(3)의 엔진 性能에 關係된 部分의 低減에 關한 研究가 遂行되고 있지만, PM은 機關의 種類와 運轉狀態에 따라서 그 生成機構가 다르기 때문에, 모든 境遇에 有效한 低減方法을 찾아내는 것은 困難하다. 그래서 式(3)의 推進性能에 關係된 部分에 注目한다. 式(3)의 推進性能에 關係된 部分은 式(1)로부터 同一船舶 (W 一定)이 同一速度(V 一定)로 航行할 時의 出力(P)를 意味한다. 또, Fig. 6에 있어서 PM 排出量은 負荷率에 比例하고, 負荷率은 出力에 比例한다. 이러한 性質에 의하여, 船舶으로부터 排出되는 PM은 機關 性能에 關係되는 部分인 出力·時間當의 排出量을 적게 함과 同時에, 全 抵抗係數, 船速을 작게, 排水量, 프로펠러 效率, 傳達效率, 船殼效率를 크게 함에 따라서 低減이 可能함을 알 수 있다.

5. 結言

船舶에 있어서 排氣 汚染物質의 低減方法을 明確히 하기 위하여, 于先 排出量의 評價方法에 對하여 檢討하고, 엔진 性能에 關係된 部分과 推進性能에 關係된 部分으로 構成되는 새로운 評價方法을 提案하였다. 다음으로 이것을 實證하기 위하여 3隻의 船舶을 使用하여 實船實驗을 行하였다. 그 結果, 船舶으로부터 排出되는 汚染物質을 低減시키기 위해서는, 機關性能에 關係된 部分인 出力·時間當의 排出量을 적게 함과 同時에, 推進性能에 關係된 部分인 全抵抗係數, 船速을 작게, 排水量, 프로펠러 效率, 傳達效率, 船殼效率를 크게 할 必要가 있음을 明確히 하였다.

參考文獻

1. Maeda K., et al. : Characteristics of NOx Emission from Two stroke Marine Diesel Engine, Bulletin of the Marine Engineering Society in Japan, Vol. 22, No. 1, 1994
2. Maeda K., et al. : Reduction Method of NOx Emission from Ships, Bulletin of the Marine

- Engineering Society in Japan, Vol. 26, No. 1, 1998
3. Maeda K., et al. : Studies on Reduction of Emissions from Marine Diesel Engine During Voyage, 22nd International Council on Combustion Engines(Copenhagen), pp. 729 738, 1998
4. Maeda K., et al. : Improvement in Measurement of Particulate Emission on Voyage, 23rd International Council on Combustion Engines(Hamburg), pp. 562 569, 2001