

항해중 선박의 속도 감소에 관한 연구

공 길 영*

A Study of the Speed Loss of a Ship in a Seaway

Gil-Young Kong*

〈목 차〉	
Abstract	2.5 자동 운항 서브 시스템
1. 서 론	3. 자연적 감속
2. 선박 운항 시스템	3.1 자연적 감속량의 이론 계산식
2.1 운항 작동점의 이론적 고찰	3.2 수치계산의 조건
2.2 선체 서브 시스템	3.3 자연적 감속량의 계산 결과
2.3 프로펠러 서브 시스템	4. 결 론
2.4 주기관 서브 시스템	참고 문헌

Abstract

Ship system can be divided into four sub-systems: hull, propeller, main engine and operation system which severely affect the characteristics of a ship. In determining ship speed in waves, two factors are considered : the involuntary speed loss due to added resistance caused by wind and waves, and the voluntary speed loss by command of operation system to prevent severe ship motions.

In this paper, the main function of four sub-system is analyzed for input/output relations and propulsive coefficient and a useful method to predict involuntary speed loss of a ship is presented. Two calculated examples for a high speed container ship and a passenger ship with single screw and diesel engine are given.

1. 서 론

차세대를 지향하는 조선·항해 기술의 과제는 선박이 출항지에서 기항지까지 고도의 안전성과 신

뢰성을 유지하면서, 최적의 항로와 속력을 택하여 가장 경제적인 해상 수송을 수행하는 고신뢰도 지능화 선박을 연구·개발하는 것이다. 이러한 고신뢰도 지능화 선박의 운항시스템을 개발하기 위해서

* 정회원, 국방과학연구소, 선임연구원

반드시 해결해야 할 중요한 과제중의 하나는 선박의 주요 서브시스템인 선체-프로펠러-주기관-운항시스템의 주요 기능과 각 기능의 상관 관계 등을 분석하고, 이를 바탕으로 파랑중을 항해하는 선박의 속도 감소(speed loss)를 정확히 산출하는 것이다¹⁾.

파랑중을 항해하는 선박의 속도 감소는 선체 동요, 바람, 파랑 등이 원인이 되어 발생하는 저항 증가, 프로펠러 노출 등으로 인한 추진 효율 감소로 자연적으로 발생한다. 이 속도 감소를 통상 자연적 감속 또는 선속 손실(involuntary speed loss)이라고 한다. 그 상태에서 선박의 동요가 더욱 심해져 대각도 선체 운동, 프로펠러 레이싱, 슬래밍 및 갑판 침수 등이 발생하면, 선장은 선체, 화물, 승무원의 안전을 위하여 선속이나 침로를 조종하게 된다. 이러한 조종에 의해 발생하는 선속 저하를 의식적 감속(voluntary speed loss)이라고 한다.

선박이 파랑중을 항해할 때 선속의 손실이 발생한다는 것은 오래 전부터 잘 알려진 사실이다. 그에 따라 그 추정법도 간단한 것에서부터 여러 종류의 추정법이 소개되어 왔다. 그러나 선박 전체의 입장에서 각종 기능을 총괄하여 자연적 감속과 의식적 감속을 추정하는 것은 최근의 일이다. 의식적 감속이 선장이라는 인간이 개재됨으로써 별개 것으로 취급되었으나, 선박의 항해 안전에 관한 판단을 정량적으로 자동운항시스템에 의해 평가할 수 있다면 같이 취급할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 파랑중을 항해하는 선박에서 안전 확보를 위해서는 조선(操船)에 필요한 최소한의 선속(타효 속력)을 유지하는 것은 대단히 중요하다. 따라서 선박 조종에 필요한 최소한의 선속을 확보하기 위해서는 바람, 파랑 및 선체 동요에 의해 발생하는 자연적 감속을 고려하여 적절한 선속을 유지해야 한다. 또한 실제 해상에서 선체 운동을 정확히 계산하기 위해서도 자연적 감속을 고려해야 한다^{2,3)}.

따라서 본 연구에서는 파랑중을 항해하는 선박의 주요 서브시스템을 선체-프로펠러-주기관-자동운항시스템으로 구분하고, 각 서브 시스템의 주요 기능 및 운항 과정에서의 상관 관계를 파악하였다. 그리고 각 서브 시스템의 기능상 관계되는 입출력 요소, 파라메타의 상호작용, 각종 경로에 존재하는

효율계수 및 자항요소 등을 분석하였다. 이를 바탕으로 파랑중을 항해하고 있는 선박의 선속 손실량을 추정할 수 있는 이론 계산식을 제시하였다. 그리고 이론식을 이용하여 대상 선박에 대해서 수치시뮬레이션을 행하였다. 계산에 이용된 대상 선박은 컨테이너선, 여객선이며, 계산 결과를 해상 상태별로 선박과 파의 만남각에 따라 나타내었다.

2. 선박 운항 시스템

선박이 가지고 있는 고유의 기능을 분석해 볼 때, 선박을 구성하고 있는 기능은 다음과 같은 7가지로 분류할 수 있다.

- (1) 화물을 수송하는 선체 (ship body)
- (2) 선박을 추진하는 프로펠러 (propeller)
- (3) 프로펠러의 회전 동력 장치인 주기관 (main engine)
- (4) 선체, 주기관 및 화물 적재상태를 파악하고, 선박의 안전과 위험을 판단하여 그 상황에 맞는 의사 결정으로 적절한 조치를 취하는 선장 (captain)
- (5) 선박을 조종하는 타 (rudder)
- (6) 타를 움직이는 조종 시스템 (maneuvering system)
- (7) 하역설비와 계류장치 (cargo handling system and ship mooring system)

위의 7가지 기능중 선박 운항 성능과 직접적으로 관계가 있는 요소는 선체, 프로펠러, 주기관, 선장, 타, 조종 시스템이다. 여기서 항해중 침로를 일정하게 유지하고 있는 상황을 전제로 하면, 선체-프로펠러-주기관-선장이 중요한 역할을 하게 된다. 그런데 차세대 고신뢰도 지능화 선박은 기존 선박에서 선장이 하고 있는 선체, 주기관 및 화물 적재 상태의 파악, 선박의 안전과 위험에 대한 결정, 그 상황에 맞는 적절한 조치 등의 역할을 전문가 시스템인 자동운항시스템(automatic operation system)이 대신 행한다. 따라서 자동화 선박을 구성하고 있는 주요 기능은 선체-프로펠러-주기관-자동운항시스템이 된다. 자동화 선박 시스템에서 이들 주요 기

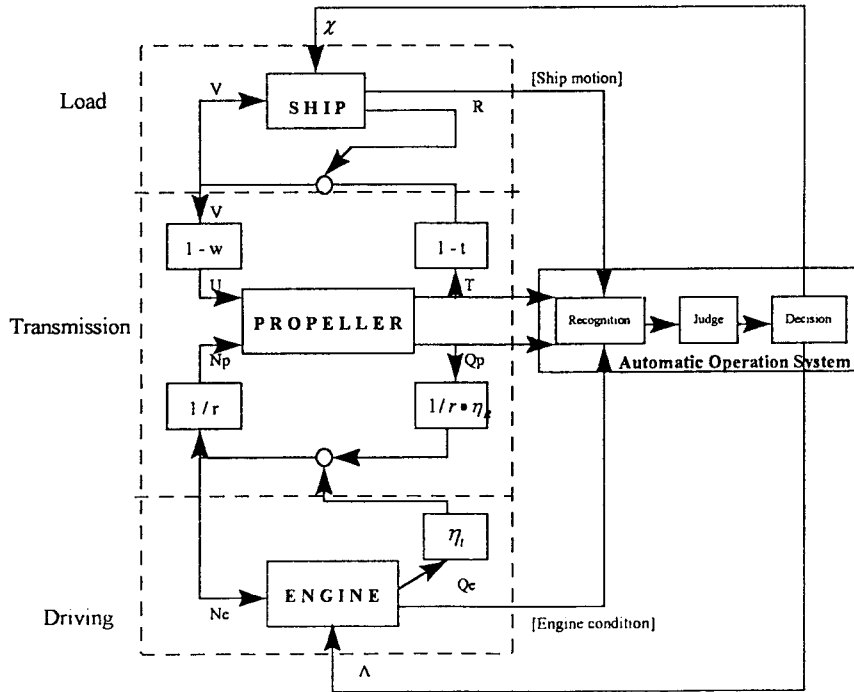


Fig. 1 Block diagram of operation system in the automated ship

능의 결합 상태를 나타낸 것이 그림 1이다.

이 그림에는 각 서브시스템 기능의 입·출력 관계, 파라메타의 상호 작용, 각종 경로에 존재하는 계수(효율과 저항 요소) 등의 관계가 표시되어 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 선체와 주기관은 프로펠러를 중심으로 상호 대칭적인 관계에 있음을 알 수 있다. 이것은 전달기인 프로펠러를 매개로 추진 동력원인 주기관과 부하인 선체가 결합된 것이며, 또한 프로펠러는 주기관의 부하로, 선체의 추진 동력원으로 두가지 측면의 역할을 동시에 하고 있다. 전체적으로는 자동운항시스템이 주기관, 프로펠러, 선체의 3가지 기능을 통합·제어하고 있는 관계로 되어 있다.

그림중 η_r 는 전달계수(transmission coefficient), w 는 반류 계수(wake fraction), t 는 추력 감소계수(thrust deduction fraction), η_r 는 프로펠러 효율비(relative rotative efficiency)를 나타낸다. 그리고 저항 요소(自航 要素)인 $1-w$ 와 $1/r$, $1-t$ 와 η_r 가 각각 대칭되는 위치에 있다. 이것은 $1-w$ 가 프로펠러

유입 속도와 선속의 비 [$1-w = U/V$] 이고, r 이 주기관과 프로펠러 회전수의 비 [$r = N_c/N_p$]을 나타낸다. 또한 $1-t$, η_r 은 공히 프로펠러 출력이 주기관과 선체의 출력과 비교되는 과정에서의 손실을 나타내고 있으므로 모두 그림에서 대칭적인 위치에 있는 것이다.

선체와 프로펠러를 결합하고 있는 물리량은 선박의 속도와 프로펠러 회전수를 매개로 한 선체 저항과 프로펠러 추력이며, 프로펠러와 주기관을 결합하는 물리량은 역시 속도와 회전수를 매개로 한 주기관 토크와 프로펠러 토크이다. 그리고 자동운항시스템은 주기관의 회전수 제어를 위한 연료 소모량과 침로 제어를 위한 조종 시스템을 통해서 주기관과 선체에 결합되어 있다.

2.1 운항 작동점의 이론적 고찰

선박이 파랑중을 항해할 때, 선체-프로펠러-주기관-자동운항시스템은 해상 상태에 따라 제 기능

을 유지하면서 작동함으로써 평형 상태를 이루게 된다. 이러한 선박의 작동은 다차원 변수로 이루어져 있어, 그 작동점을 입체적으로 표현하는 것은 불가능하다. 따라서 이를 벡터적으로 표현하여, 그림 2와 같이 x_1 축에 선체 저항(R), x_2 축에 프로펠러 추력(T_p), x_3 축에 프로펠러 토크(Q_p), x_4 축에 주기관 토크(Q_e)를 잡고, 이러한 x_i 축으로 만들어지는 공간에서 선박이 작동하고 있는 점을 벡터적으로 표현한다^{4,5)}.

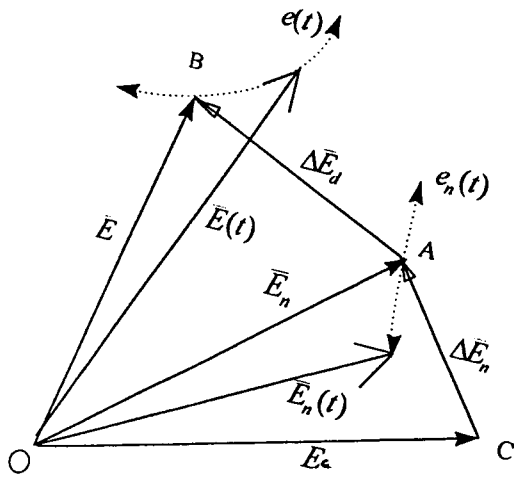


Fig. 2 Coordinate system of propulsive performance of a ship

선박이 평수중을 항행하고 있는 경우, 균형점 C (벡터 E_c)에서 선박이 파랑중으로 들어가면 ΔE_n 만큼 그 벡터가 변화하고, 점 A(벡터 E_n)에서 평균적으로는 균형이지만 점 A의 주위에서 변동한다(벡터 $e_n(t)$). 이 ΔE_n 을 구해서 새로운 균형점 A를 구하는 것이 자연적 감속의 문제이다. 이 A점에서 자동운항시스템은 선박의 안전 여부를 판단하고, 위험한 경우 선박의 안전을 확보하기 위하여 선속을 낮추거나 변침을 하게 된다. 이와 같이 변화한 벡터를 ΔE_d 라 한다. 자동운항시스템의 판단에 따라 점 B(벡터 E)로 평형점이 이동하고, 그 점 주위에서 변동한다(벡터 $e(t)$). 이 ΔE_d 를 구해 점 B를 구하는 것이 의식적 감속의 문제이다. 어떤 주어진 해상에서, 선박의 저항(R), 프로펠러

추력(T_p), 프로펠러 토크(Q_p), 주기관의 토크(Q_e)를 정상 부분(steady part)과 변동 부분(fluctuating part)으로 나누면, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 R(V, \chi) &= \overline{R}(\overline{V}, \overline{\chi}) + r_s(v, \chi) \\
 &= R_o + \Delta \overline{R} + r_s(v, \chi) \\
 T_p(U, N_p) &= \overline{T}_p(\overline{U}, \overline{N}_p) + t_p(u, n_p) \\
 &= T_{p0} + \Delta \overline{T}_p + t_p(u, n_p) \quad \dots\dots (1) \\
 Q_p(U, N_p) &= \overline{Q}_p(\overline{U}, \overline{N}_p) + q_p(u, n_p) \\
 &= Q_{p0} + \Delta \overline{Q}_p + q_p(u, n_p) \\
 Q_e(rN_p, \Lambda) &= \overline{Q}_e(r\overline{N}_p, \overline{\Lambda}) + q_e(rm_p, \lambda) \\
 &= Q_{e0} + \Delta \overline{Q}_e + q_e(rm_p, \lambda)
 \end{aligned}$$

여기서 V 는 선박의 속도, U 는 프로펠러의 유입 속도, χ 는 선박과 파의 만남각, Λ 는 1회전당 연료 투입량, N_p 은 프로펠러 회전수이며, 이 변수들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V &= V_o + \Delta V = V_o + \Delta \overline{V} + v(t) \\
 U &= U_o + \Delta U = U_o + \Delta \overline{U} + u(t) \\
 N_p &= N_{p0} + \Delta N_p = N_{p0} + \Delta \overline{N}_p + n_p(t) \quad \dots\dots (2) \\
 \Lambda &= \Lambda_o + \Delta \Lambda = \Lambda_o + \Delta \overline{\Lambda} + \lambda(t) \\
 \chi &= \chi_o + \Delta \chi = \chi_o + \Delta \overline{\chi} + \chi(t)
 \end{aligned}$$

여기서 해상 상태도 변수로서 고려해야 하지만 해상이 급격히 변화하지 않는 단기적인 운항을 생각하고, 이하 해상 상태는 일정한 것으로 가정한다. 아래 첨자 o 는 변화전의 값을 의미하고, 기호 위의 - 표시는 시간적 평균치를 나타낸다.

이것들을 이용하여 선박의 작동을 표현하는 벡터 E 는 일반적으로 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned}
 E &= R(V, \chi)x_1 + T_p(U, N_p)x_2 + Q_p(U, N_p)x_3 \\
 &\quad + Q_e(rN_p, \Lambda)x_4 = \overline{E} + e(t) \quad \dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

우변 제 2식의 제 1항이 시간 평균값(time average value)이고, 제 2항이 변동량(fluctuating value)이

다. 이 벡터를 변화전의 벡터 E_0 를 사용해서 나타내면 다음과 같다.

$$E = E_0 + \Delta \bar{E} + e(t) \dots\dots\dots (4)$$

이 ΔE 나 $e(t)$ 를 구하기 위해서 어떤 시간 평균적인 작동점 주위의 미소 변화를 고려하여 식을 선형화하여 표현해 본다. 여기서 ΔE 는 변화전의 균형점 주위의 시간 평균적 미소 변화이고, $e(t)$ 는 변화후의 균형점 주위의 미소 변동이다. 미소 변화를 고려하여 각 변수에 대응하는 미계수를 구하면 다음과 같다.

$$[P_{kj}] = \begin{matrix} y_N \\ y_U \\ y_z \\ y_\Lambda \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial T_p}{\partial N_p} & \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} & \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} \\ \frac{\partial R}{\partial V} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial T_p}{\partial U} & \frac{\partial Q_p}{\partial U} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_e}{\partial \Lambda} \\ \frac{\partial R}{\partial \chi} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix} \dots\dots\dots (5)$$

< I > < II > < III >

여기에서 < I >은 선체 부분, < II >는 프로펠러 부분, < III >은 주기관 부분을 나타내며, 앞에서 설명한 선박의 3개 서브 시스템을 한 개의 매트릭스로 표현하였다.

초기의 균형점에서 ΔV , ΔU , ΔN_p , $\Delta \chi$, $\Delta \Lambda$ 만큼 변수가 미소 변화할 때, 벡터의 변화분 ΔE 는 식 5를 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= y_N \cdot \Delta N_p + y_U \cdot \Delta V + y_U \cdot \Delta U + y_z \cdot \Delta \chi + y_\Lambda \cdot \Delta \Lambda \\ &= \Delta \bar{E} + e(t) \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

이상의 결과에서 벡터 E 를 구체적으로 쓰면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E &= (R_0 + \frac{\partial R}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial R}{\partial \chi} \Delta \chi) x_1 \\ &+ (T_{p0} + \frac{\partial T_p}{\partial N_p} \Delta N_p + \frac{\partial T_p}{\partial U} \Delta U) x_2 \\ &+ (Q_{p0} + \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} \Delta N_p + \frac{\partial Q_p}{\partial U} \Delta U) x_3 \\ &+ (Q_{e0} + \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} \cdot r \cdot \Delta N_p + \frac{\partial Q_e}{\partial \Lambda} \Delta \Lambda) x_4 \end{aligned} \dots\dots (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial V} &= R_V, \quad \frac{\partial R}{\partial \chi} = R_\chi, \quad \frac{\partial T_p}{\partial N_p} = P_{TN}, \\ \frac{\partial T_p}{\partial U} &= P_{TU}, \quad \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} = P_{QN}, \\ \frac{\partial Q_p}{\partial U} &= P_{QU}, \quad \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} = E_{QN}, \quad \frac{\partial Q_e}{\partial \Lambda} = E_{QL} \end{aligned} \dots\dots\dots (8)$$

라고 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= (R_0 + R_V \Delta V + R_\chi \Delta \chi) x_1 \\ &+ (T_{p0} + P_{TN} \Delta N_p + P_{TU} \Delta U) x_2 \\ &+ (Q_{p0} + P_{QN} \Delta N_p + P_{QU} \Delta U) x_3 \\ &+ (Q_{e0} + E_{QN} \cdot r \cdot \Delta N_p + E_{QL} \Delta \Lambda) x_4 \end{aligned} \dots\dots\dots (9)$$

상기 과정을 통해서 초기 상태와 식 5에서 주어진 $[P_k]$ 의 각 요소 값을 계산함으로써, 미소 변화후의 상태를 추정하는 것이 가능하다. 식 9를 시간 평균적 정상 부분과 변동 부분으로 나누어, 각 미계수의 정상 성분은 대문자로, 변동 성분은 소문자로 표기하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{E} &= E_0 + \Delta \bar{E} \\ &= (R_0 + R_V \Delta \bar{V} + R_\chi \Delta \bar{\chi}) x_1 \\ &+ (T_{p0} + P_{TN} \Delta \bar{N}_p + P_{TU} \Delta \bar{U}) x_2 \\ &+ (Q_{p0} + P_{QN} \Delta \bar{N}_p + P_{QU} \Delta \bar{U}) x_3 \\ &+ (Q_{e0} + E_{QN} \cdot r \cdot \Delta \bar{N}_p + E_{QL} \Delta \bar{\Lambda}) x_4 \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned}
 e(t) = & \{r_e v(t) + r_x \chi(t)\} x_1 \\
 & + \{p_m n_p(t) + p_w u(t)\} x_2 \\
 & + \{p_{qm} n_p(t) + p_{qu} u(t)\} x_3 \\
 & + \{e_{qn} \cdot r \cdot n_p(t) + e_{q\lambda} \lambda(t)\} x_4
 \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

이상의 계산 결과를 이용해서, 선박을 구성하고 있는 주요 서브 시스템인 선체, 프로펠러, 주기관이 파랑중을 항해하는 선박의 운항에 어떤 영향을 미치는가를 각 서브 시스템별로 나누어 알아본다.

2.2 선체 서브 시스템

선체 서브 시스템은 항해하고 있는 선박에서 풍파로 인해 발생하는 저항 증가량을 구하는 서브 시스템이다. 평수중의 선박이 파랑중으로 들어가는 경우, 전체 저항은 평수중의 저항(R_0)과 바람이나 파랑에 의한 저항 증가량(ΔR)의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = R_0 + \Delta R \dots\dots\dots (12)$$

식 12에서 ΔR 은 모든 원인에 의해 발생하는 저항 증가량을 의미하는 것으로, 큰 변수 요인으로는 선체 운동, 파랑 및 바람에 의한 성분이다. 풍파중에서 선박의 저항 증가량은 선체 운동에 기인한 저항 증가로서 Gerritsma 방법에 의한 저항 증가량 $R_{AW}(0)$ 에, 선수부에서의 반사파에 기인한 저항 증가로서 Fujii-Takahashi에 의한 수정치 $R_{AW}(1)$ 를 더하여, 바람에 기인한 저항 증가 R_{wind} 의 총합으로서 아래와 같이 표시된다^{6,7)}.

$$\Delta R = R_{AW}(0) + R_{AW}(1) + R_{wind} \dots\dots\dots (13)$$

$R_{AW}(0)$ 는 Gerritsma 근사식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$R_{AW}(0) = \frac{k}{2\omega_e} \int (N - \rho V \frac{\partial S}{\partial x}) U_{rn}^2 dx \dots (14)$$

여기서,

$$k(\text{파수}) = 2\pi/\lambda \quad N(\text{감쇄력}) = (\rho g^2/\omega_e^3) \bar{A}^2$$

S = (단면의 부가 질량) / ρU_{rn} : 상대 유속 진폭
 A = (발산파 진폭) / (상하요 진폭) V : 전진 속도
 ω_e : 만남 주파수(encounter frequency)

$R_{AW}(1)$ 은 Fujii-Takahashi에 의하면 불룩한(blunt) 선수에 의해서 발생하는 반사파에 기인한 저항 증가이고, 특히 비대선의 단파장역에서 현저하게 나타난다. 이 성분을 근사적으로 표현한 계산식은 다음과 같다.

$$R_{AW}(1) = \alpha_1(1 + \alpha_2) \frac{1}{2} \rho g h_A^2 B \overline{\sin^2 \beta} \dots (15)$$

여기서,

$$\overline{\sin^2 \beta} = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \sin^2 \beta dy \quad (\text{Bluntness계수})$$

$$\alpha_1 = \pi^2 I_1^2(kd) / \{ \pi^2 I_1^2(kd) + K_1^2(kd) \}$$

$$\alpha_2 = 5\sqrt{F_n} \quad (\text{실험식})$$

I_1, K_2 : 변형 Bessel 함수

α_1 : 유한홀수 영향 α_2 : 전진 속도 영향

R_{wind} 는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$R_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a \cdot K(\mu) \cdot C_{XLO} \cdot A_s \cdot V_R^2 \dots\dots (16)$$

여기서,

ρ_a : 공기 밀도 $K(\mu)$: 풍향 영향 계수

C_{XLO} : 정면 풍압 저항 계수

A_s : 수면상 선체 측면 투영 면적

V_R : 바람과 선박의 상대 속력

만약 바람과 파랑의 변화가 없는 상태라고 가정하면, 선체 저항 R (변수형 $R(V, x)$)는 선속(V), 침로(x)의 작은 변화에 대해 다음과 같이 변화한다.

$$\begin{aligned}
 R(V, x) = & R_0(V_0, x_0) + \left[\frac{\partial R}{\partial V} \right]_{V=V_0} \Delta V \\
 & + \left[\frac{\partial R}{\partial x} \right]_{x=x_0} \Delta x = R_0 + \Delta R
 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\Delta R = R_{V_0} \cdot \Delta V + R_{x_0} \cdot \Delta x \dots\dots\dots (18)$$

여기서,

- R_V : 파랑중 선체 저항(전저항)의 속도에 대한 미분 계수
- R_X : 파랑중 선체 저항(전저항)의 만남각에 대한 미분 계수

2.3 프로펠러 서브 시스템

프로펠러 서브 시스템은 프로펠러에 의한 선박 추진력을 구하기 위한 시스템으로, 프로펠러 추력(T_p)와 토크(Q_p)의 변동량을 계산한다. 프로펠러 추력과 토크는 프로펠러 회전수(N_p)와 유입 속도(U)가 그 변수가 된다. 따라서 이들을 각각 T_p(N_p,U)와 Q_p(N_p,U)로 나타내면 다음과 같다.

$$T_p(N_p, U) = T_{p0}(N_{p0}, U_0) + [\frac{\partial T_p}{\partial N_p}]_{N, U} \cdot \Delta N_p + [\frac{\partial T_p}{\partial U}]_{U=N} \cdot \Delta U = T_{p0} + \Delta T_p \dots\dots\dots (19)$$

$$Q_p(N_p, U) = Q_{p0}(N_{p0}, U_0) + [\frac{\partial Q_p}{\partial N_p}]_{N, U} \cdot \Delta N_p + [\frac{\partial Q_p}{\partial U}]_{U=N} \cdot \Delta U = Q_{p0} + \Delta Q_p \dots\dots\dots (20)$$

$$\Delta T_p = P_{TN0} \cdot \Delta N_p + P_{TU0} \cdot \Delta U \dots\dots\dots (21)$$

$$\Delta Q_p = P_{QN0} \cdot \Delta N_p + P_{QU0} \cdot \Delta U \dots\dots\dots (22)$$

P_{TU}, P_{QU}는 프로펠러 유입 속도 U에 대해 프로펠러 추력과 토크를 미분하는 미분 계수이고, P_{TN}, P_{QN}는 프로펠러 회전수 N_p에 대한 미분 계수이다. 여기에서 P_{TN0}, P_{TU0}, P_{QN0}, P_{QU0}을 평수중의 프로펠러 단독 시험(open water test)의 추력 T_p = f_T(U, N_p)와, 토크 Q_p = f_Q(U, N_p)로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$(P_{TN}, P_{TU}, P_{QN}, P_{QU}) = (\frac{\partial f_T}{\partial N_p}, \frac{\partial f_T}{\partial U}, \frac{\partial f_Q}{\partial N_p}, \frac{\partial f_Q}{\partial U}) \dots\dots\dots (23)$$

여기에서 프로펠러 단독 시험 특성 계수인 추력 상수 K_T와 토크 상수 K_Q는 프로펠러 단독 시험 결과를 이용하여 전진 상수 J = U / N_pD 의 2차 방정

식으로 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$K_T(J) = a + bJ + cJ^2, K_Q(J) = d + eJ + fJ^2 \dots\dots\dots (24)$$

식 24를 이용하면, 미분 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} P_{TU} \\ P_{TN} \\ P_{QU} \\ P_{QN} \end{pmatrix} = \rho D^2 \cdot \begin{pmatrix} bD & 2c \\ 2aD^2 & bD \\ eD^2 & 2fD \\ 2dD^3 & eD^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_p \\ U \end{pmatrix} \dots\dots (25)$$

- 여기서,
- D : 프로펠러 직경
- ρ : 유체 밀도

2.4 주기관 서브 시스템

주기관 서브 시스템은 프로펠러의 구동 동력 장치인 주기관의 회전 토크를 결정하는 시스템이다. 주기관의 토크는 연료의 주입량(Λ)과 회전수(N_e)에 의해 결정되는 변수이다. 따라서 주기관 성능은 Q_e(Λ, N_e)로 나타낼 수 있으며 다음의 같이 표시된다.

$$Q_e(\Lambda, N_e) = Q_{e0}(\Lambda_0, N_{e0}) + [\frac{\partial Q_e}{\partial \Lambda}]_{\Lambda=N} \cdot \Delta \Lambda + [\frac{\partial Q_e}{\partial N_e}]_{N, \Lambda} \cdot \Delta N_e = Q_{e0} + \Delta Q_e \dots\dots\dots (26)$$

$$\Delta Q_e = E_{QA0} \cdot \Delta \Lambda + E_{QNe} \cdot \Delta N_e \dots\dots\dots (27)$$

E_{QN}, E_{QΛ}는 주기관의 회전수, 연료 소모량에 대해서 각각 미분되는 계수이다. 여기에서 E_{QN}, E_{QΛ}는 주기관의 특성을 나타내는 인자로서, 보통 주기관 성능도에는 이 상태로 기재되지 않는다. E_{QN}은 연료 노치(notch)을 일정하게 하고, 외부 부하를 증감시켜 회전수를 변화시킬 때 주기관 토크 곡선의 기울기를 나타내고, E_{QΛ}는 일정한 회전수에서 연료 노치를 변화시킬 때 주기관 토크 곡선의 기울기를 나타낸다.

2.5 자동 운항 서브 시스템

항해중인 선박이 거친 해상을 만나는 경우, 선장은 승무원, 선체 및 화물의 안전을 도모하기 위하여 인지 과정(작업), 판단 과정(작업), 실행(지령) 과정과 같은 3단계의 과정을 행하게 된다. 우선 선장은 인지 과정에서 현재 선박이 처해 있는 상황을 파악한다. 선장이 자신의 현 상황을 인지하기 위해서 어떤 것에 주목하고 있는가는 그 선장의 오랜 경험에 기인하는 것으로 일률적으로 결정할 수는 없다. 여러가지 입장이 있을 수 있지만, 일반적으로는 선박의 기능을 상실하지 않도록 해야 하므로, 앞에서 설명한 7가지 기능을 중심으로 해서 그 상황을 판단한다. 그러나 현실적으로는 선체, 프로펠러, 주기관 상태에 주목해서 판단하는 것이 좋을 것이다. 선박 조종을 위한 인식 지표로 고려되고 있는 상하·좌우 가속도, 선수 갑판 침수, 슬래밍, 횡요각 등은 선체 또는 화물의 상황 인식에 필요하고, 프로펠러 레이싱, 결보기 슬립(slip) 값은 프로펠러 또는 그것을 통하는 주기관의 상황 인식에 필요하다. 이러한 인식 지표에 대해서 선장은 [갑판 침수가 일정한 시간내에 몇 회 발생하는가?], [중동요와 횡동요는 어떤 주기로 몇 도 정도 동요하고 있는가?], [주추진 기관의 레이싱 상태는 어떤가?], [현재의 파고 높이는 어느 정도인가?] 등으로 선박의 항해 안전성 여부를 파악할 수 있는 근거를 마련한다.

판단 과정에서는 인지 과정에서 파악된 상황을 종합적으로 고려하여 현 상태의 안전 여부를 판단하고, 만약 안전하다면 주어진 임무를 계속 수행할 수 있는지를 결정한다. 이 판단 과정에서 선장이 생각하고 있는 선박 안전의 확신도를 안전 여부의 기준치로 설정한다. 이 판단 과정이 끝난 후 현재 선박이 위험하다고 판단되면 선장은 안전을 도모하기 위한 조선 명령을 하달한다. 이 실행 작업에는 조선 명령을 실행했을 경우 선박이 어떤 상태가 될 것인가를 미리 판단하여, 어느 정도의 변침과 변속을 하는 것이 최적인가를 예측하는 것까지를 포함한다.

항해중인 선박에서 선장이 행하는 이런 일련의

과정을 자동화함으로써 자동운항시스템을 개발할 수 있을 것이다. 자동운항시스템은 인명·선체·화물의 안전을 도모하기 위하여 여러 가지 현상에 대한 데이터를 센서를 통해서 입수하게 된다. 그리고 앞에서 기술한 선장의 상황 인식-판단 과정은 [어떤 현상이 주어진 한계치를 초과하는 확률을 구하는 문제, 즉 확률 과정론적 관점에서 어떤 현상의 발생 확률이 주어진 한계치를 초과하는 경우 선박은 위험한 상태에 있다]는 것으로 대치할 수 있다. 즉 선장의 판단 과정을 확률 과정론적으로 수식화 함으로써 선박의 항해 안전성을 정량적으로 평가할 수 있다. 만약 자동운항시스템의 평가 결과 선박이 위험하다고 판단되면, 침로의 변경이나 속도의 감소(연료 투입량 감소)를 병행 또는 독립적으로 사용하여 안전을 확보해야 할 것이다. 이때 자동 운항시스템이 조선 명령을 내리기 위해서는 다음 관계를 만족해야 한다³⁾.

즉 선체 저항 R는 프로펠러 추력 T_p 에, 주기관 토크 Q_c 는 프로펠러 토크 Q_p 에 각각 비례하므로, 두 조건으로부터 다음과 같은 두 개의 방정식을 얻을 수 있다.

프로펠러 추력과 선체 저항

$$T_p(U, N_p) \cdot (1-t) = R(V, \chi) \dots (28)$$

주기관 토크와 프로펠러 토크

$$r \cdot \eta_i \cdot \eta_R \cdot Q_c(\Lambda, N_e) = Q_p(U, N_p) \dots (29)$$

여기서,

$$\bar{U} = \overline{(1-w)} \cdot V ; \quad \bar{N}_e = r \cdot \bar{N}_p$$

여기에서 선박의 항해 안전성을 확보하기 위한 선속, 선박과 파와의 만남각, 연료 등의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f(V, \chi, \Lambda) \in f_c(V, \chi, \Lambda) \dots (30)$$

여기서, $f_c(V, \chi, \Lambda)$ 는 항해중인 선박의 안전을 도모하기 위한 한계치를 나타낸 수학적 함수

식 30의 4개의 변수를 결정하기 위해서 변수들의 관계를 나타내는 다른 1개의 조건을 나타내는 방정식이 필요하다. 그 조건은 선박에 주어진 임무 내용에 따라 달라진다. 예를 들면, '최소 시간에 A 지점에서 B 지점으로 항해하는 조건', 또는 'A 지점에서 B 지점으로 최소 연료 소모량으로 항해하는 조건' 등의 외적인 조건이다.

3. 자연적 감속

3.1 자연적 감속량의 이론식

파랑중을 항행하는 선박의 시간 평균적인 정상 상태를 결정하기 위해서는 그림 2에 나타난 선체 저항(x_1 축)과 프로펠러 추력(x_2 축)의 균형과, 프로펠러 토크(x_3 축)와 주기관 토크(x_4 축)의 균형이 동시에 만족되어야 한다.

선체 저항과 프로펠러 추력 사이에서, 추력 감소 계수를 t 라 하면 다음 식이 성립된다.

$$\bar{R} = (1-t) \bar{T}_p \quad \dots\dots\dots (31)$$

선속 변화전의 추력 감소 계수를 t_0 라 하면, 새로운 균형 상태에서 t_0 가 Δt 만큼 변화한다면 $(1-t) = (1-t_0) + \Delta t$ 와 $R_0 = (1-t_0) T_{p0}$ 의 관계를 사용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \bar{R} = (1-t) \cdot \Delta \bar{T}_p + \Delta t \cdot T_{p0} \quad \dots\dots\dots (32)$$

또한 프로펠러 토크와 주기관 토크의 관계는 전달 효율 η_t , 프로펠러 효율비 η_R 이라고 하면, $Q_{p0}/\eta_R = r \cdot \eta_t \cdot Q_{e0}$ 의 관계를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \bar{Q}_p = r \cdot \eta_t \cdot \eta_R \cdot \Delta \bar{Q}_e \quad \dots\dots\dots (33)$$

또한 선박 속도 V 와 프로펠러 유입 속도 U 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$V \cdot (1-w) = U \quad \dots\dots\dots (34)$$

반류 계수 w 도 파랑중에서 변화해서 $(1-w_0) + \Delta w$ 로 되며, 증가분만의 관계는 다음 식으로 나타낼

수 있다.

$$\Delta U = (1-w_0) \cdot \Delta V + \Delta w \cdot V_0 \quad \dots\dots\dots (35)$$

식 18, 21, 35를 이용하여 식 32를, 식 22, 27, 35를 이용해서 식 33을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & R_{V_0} \cdot \Delta V + R_{\chi_0} \cdot \Delta \chi \\ &= T_{p0} \cdot \Delta t + (1-t_0) \cdot P_{TN_0} \cdot \Delta N_p \quad \dots\dots\dots (36) \\ &+ P_{TU_0} \{ (1-w_0) \cdot \Delta V + \Delta w \cdot V_0 \} \\ &P_{QN_0} \cdot \Delta N_p + P_{QU_0} \{ (1-w_0) \cdot \Delta V + \Delta w \cdot V_0 \} \\ &= r \cdot \eta_t \cdot \eta_R (E_{QN_0} \cdot \Delta N_e + E_{QL_0} \cdot \Delta \Lambda) \\ &\dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

식 36, 37은 그림 22에서 선박이 평수중의 초기 균형 상태에서 파랑중으로 들어가는 상태의 변화분에 대한 균형 조건식이다. 이 조건식에서 미지수는 ΔN_p (또는 ΔN_e), ΔV , $\Delta \Lambda$, $\Delta \chi$ 의 4개이고, 방정식은 2개이므로 이 상태로는 해결할 수가 없다. 그러나 자연적 감속의 경우 각각의 정의에 따라서 새로운 조건식이 더해지므로 양자를 나누어 계산하는 것이 가능하다.

선박이 평수중에서 파랑중으로 들어가면, 즉 그림 22에서 평수중 C점에서 파랑중 A점으로 변화하면 자연적 감속이 발생한다. 이 경우 침로는 일정 ($\Delta \chi = 0$)하고, 1회전당 연료 투입량도 일정 ($\Delta \Lambda = 0$)하다고 가정하면, 식 36, 37은 다음과 같이 표시된다. 여기서 연료 투입량이 일정한 상태에서의 선속 저하량은 평균 자연적 감속 ΔV 에 해당된다.

$$\begin{aligned} & R_{V_0} \cdot \Delta V \\ &= T_{p0} \cdot \Delta t + (1-t_0) \cdot P_{TN_0} \cdot \Delta N_p \quad \dots\dots\dots (38) \\ &+ P_{TU_0} \{ (1-w_0) \cdot \Delta V + V_0 \cdot \Delta w \} \\ &P_{QN_0} \cdot \Delta N_p + P_{QU_0} \{ (1-w_0) \cdot \Delta V + \Delta w \cdot V \} \\ &= r^2 \cdot \eta_t \cdot \eta_R \cdot E_{QN_0} \cdot \Delta N_p \\ &\dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

파랑중에서의 선체 저항 $R(V, \chi)$ 는 식 12에서와 같이 평수중 저항 $R_0(V)$ 와 파랑중 저항 증가량 Δ

R(V, χ)으로 나타내면, 다음과 같이 된다.

$$R(\bar{V}, \bar{\chi}) = R_o(\bar{V}) + \Delta R(\bar{V}, \bar{\chi}) \dots\dots\dots(40)$$

따라서 식 38의 $R_{V_o} \cdot \Delta V$ 은 C점에서의 선속을 V_c , 마찬가지로 A점에서의 선속을 V_A 라 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{V_o} \cdot \Delta V &= R(\bar{V}_A, \bar{\chi}) - R_o(\bar{V}_C) \\ &= R_o(\bar{V}_A) + \Delta R(\bar{V}_A, \bar{\chi}) - R_o(\bar{V}_C) \end{aligned} \dots\dots\dots(41)$$

식 41을 식 38, 39에 대입하고, 전달 효율 $\eta_t = \eta_R = 1.0$ 으로 놓으면 자연적 감속량 ΔV 를 구하는 식은 다음과 같이 얻어진다^{9,10)}.

$$\Delta V = \frac{R_o(\bar{V}_A) + \Delta R(\bar{V}_A, \bar{\chi}) - R_o(\bar{V}_C)}{(1 - t_0)(1 - w_0) \left(P_{T\tau_0} + \frac{P_{TN_0} P_{QL_0}}{r^2 E_{Q\eta_0} - P_{Q\eta_0}} \right)} \dots\dots\dots(42)$$

3.2 수치 계산의 조건

수치 계산에 사용한 대상 선박은 Lpp=175m 컨테이너선과 Lpp=93m 여객선이며, 그 선형과 주요 목은 그림 3, 4와 같다.

해상 상태는 Beaufort Scale No. 6, 7, 8, 9의 상태의 단파정 불규칙파 중에서 계산을 행하였다. 각 해상 상태에 대한 평균 파 주기와 유의 파고($H_{1/3}$)는 표 1에 나타낸다. 또한 단파정 불규칙파 중에서 선박과 파와의 만남각(encounter angle) χ 는 선수 정향파(head sea)로부터 30°의 간격으로 선미 추파

(Table 1) Beaufort scale number and wave characteristics

Beaufort Scale No.	Mean Wave Period To (sec)	Significant Wave Height $H_{1/3}$ (m)
6	7.60	3.90
7	8.90	5.30
8	10.30	7.10
9	11.70	9.21
10	13.10	11.0

(following sea)까지 7개의 상태에 대하여 계산을 행하였다.

3.3 자연적 감속량의 계산 결과

그림 5, 6은 대상 선박인 컨테이너선과 여객선이 해상 상태 (beaufort scale number) 6, 7, 8을 Fn=0.2, 0.275로 항해할 때의 자연적 감속량을 나타낸 것이다.

그림에서 X축은 선박과 파의 만남각(χ)으로, $\chi = 180^\circ$ 은 선수 정향파(head sea), $\chi = 90^\circ$ 은 정횡파 (beam sea), $\chi = 0^\circ$ 은 선미 추파(following sea)를 나타낸다. Y축은 선박의 속도를 노트(knots)로 표시하였다. 그림의 굵은 실선은 정수중 항해시의 속력을 나타내며, 점선, 일점 쇄선, 이점 쇄선은 해상 상태 6, 7, 8을 항해할 때의 침로별 선속을 나타낸다. 그림에서 컨테이너선과 여객선은 공히 해상 상태가 거칠수록, 그리고 선수와 부근에서 선속 저하량이 많다. 특히 고속으로 운항하는 경우보다는 저속일 때 선속 저하량이 많아진다.

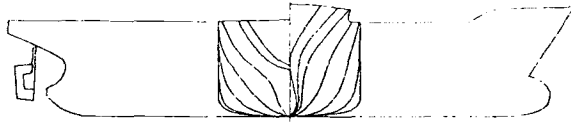
그림 5에 나타낸 컨테이너선 경우, 일반적으로 모든 항해 속력에서 정횡파 부근에서 감속량이 급격히 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 그리고 그림 5(b)의 항해 속력 Fn=0.275(22.14kts)의 경우에는 $\chi = 60^\circ \sim 0^\circ$ 에서 오히려 속도가 증가하는 것이 특이하다.

그림 6에 나타낸 여객선의 경우도, 컨테이너선과 마찬가지로 $\chi = 90^\circ$ 부근에서 감속량이 급격히 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 그러나 여객선의 경우에는 선속 증가 현상은 나타나지 않았다.

그림 7, 8은 컨테이너선과 여객선이 해상 상태 6, 7, 8을 Fn=0.2, 0.275로 항해할 때의 선속 저하율을 다음과 같이 정의해서 나타낸 것이다.

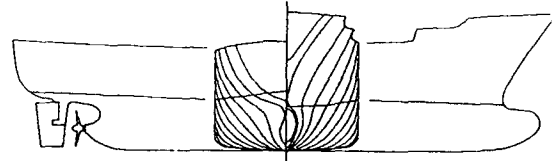
$$\frac{V_C - V_A}{V_C} = \frac{\Delta V}{V_C} \dots\dots\dots(43)$$

여기서,
 ΔV : 선속 저하량
 V_A : A점에서의 선속
 V_C : C점에서의 선속



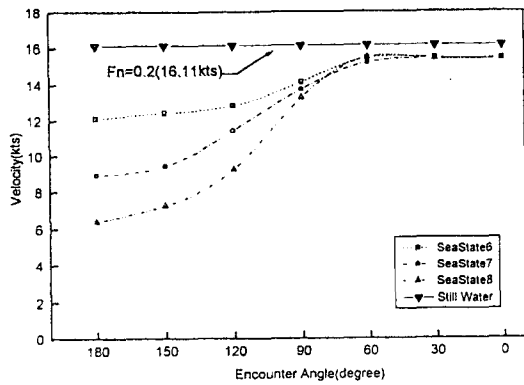
I T E M S		DIMENSION
Length P.P.	Lpp(m)	175.00
Breadth	B(m)	25.40
Depth	D(m)	15.40
Mean draft	d_m (m)	9.50
Displacement volume	(m^3)	24,742.00
Block coefficient	C_b	0.572
Length-breadth ratio	L/B	6.89
Breadth-draft ratio	B/D	2.67
Height of C.G.	KG(m)	9.52
Metacentric height	GM(m)	1.00
Rolling period	T_R (sec)	18.00
Propeller diameter	D_p (m)	6.50
Propeller pitch ratio	p	1.055

Fig. 3 Lines and particulars of container ship

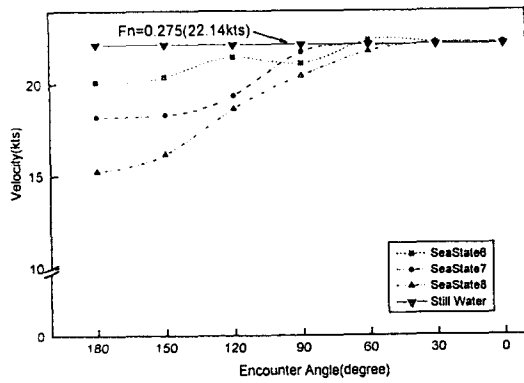


I T E M S		DIMENSION
Length P.P.	Lpp(m)	93
Breadth	B(m)	14.5
Depth	D(m)	7
Mean draft	d_m (m)	5.115
Displacement volume	(m^3)	4,274.82
Block coefficient	C_b	0.6028
Length-breadth ratio	L/B	6.414
Breadth-draft ratio	B/D	2.835
Height of C.G.	KG(m)	5.033
Metacentric height	GM(m)	1.355
Rolling period	T_R (sec)	13.142
Propeller diameter	D_p (m)	3.55
Propeller pitch ratio	p	0.751

Fig. 4 Lines and particulars of passenger ship

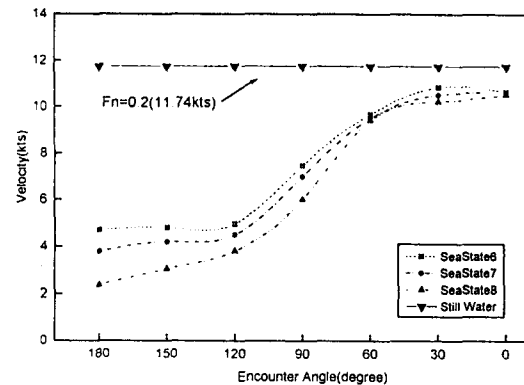


(a)

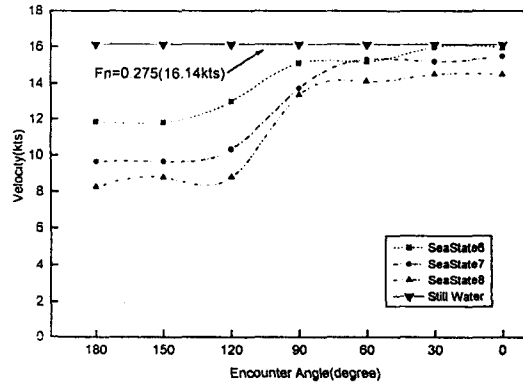


(b)

Fig. 5 Involuntary speed loss of container ship in a seaway



(a)



(b)

Fig. 6 Involuntary speed loss of passenger ship in a seaway

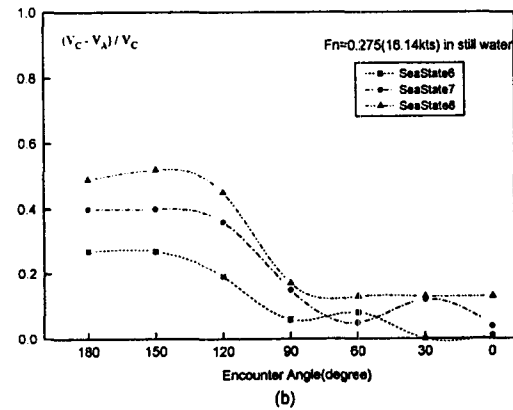
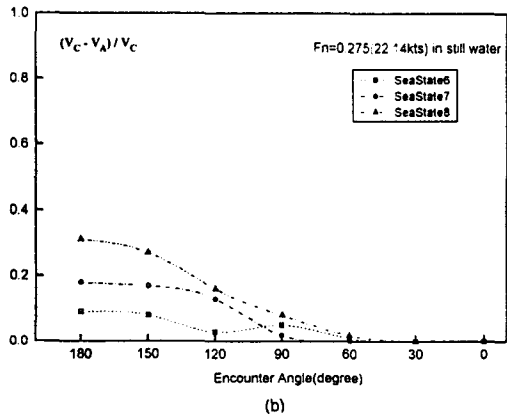
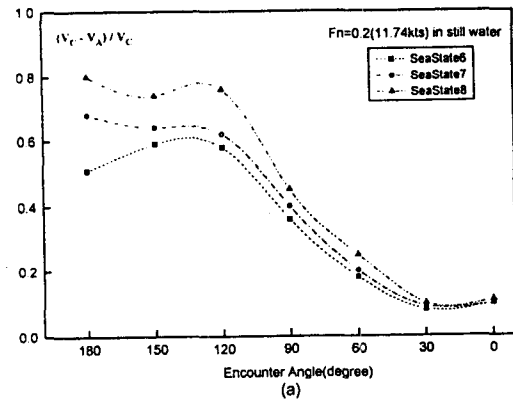
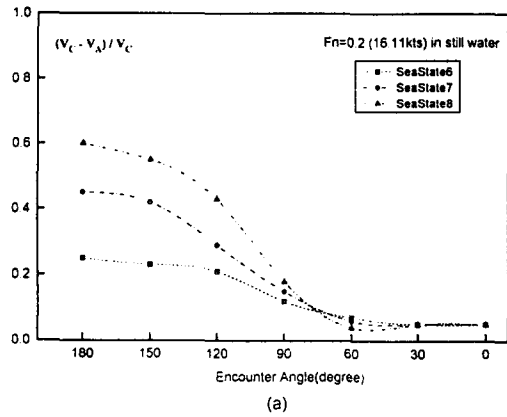


Fig. 7 Ratio of the involuntary speed loss of container ship

Fig. 8 Ratio of the involuntary speed loss of passenger ship

두 대상 선박의 선속 저하율을 보면, 저속선인 여객선이 고속선인 컨테이너선에 비해 선속 저하율이 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 저속선이 고속선에 비하여 풍파중에서 선속 저하율이 높다는 일반적인 연구 경향과 일치함을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 먼저 선박을 운항 성능과 직접적으로 관계가 있는 선체, 프로펠러, 주기관, 자동운항시스템 등 4개의 서브 시스템으로 나누고, 각 서브 시스템별로 파랑중에서의 특성을 알아 보았다. 그리고 선형별(컨테이너선, 여객선)로 각 해상 상태에 따른 자연적 감속량을 계산하였다. 이상의 연구 결과를 종합하여 요약하면 다음과 같은 결론을

얻을 수 있다.

- (1) 파랑중을 항해하고 있는 선박의 주요 서브 시스템을 선체-프로펠러-주기관-자동운항시스템으로 나누어 이들 서브 시스템의 파랑중 성능을 밝히고, 이를 이용하여 자연적 감속량을 계산하였다.
- (2) 파랑중을 항해하고 있는 선박의 해상 상태에 따른 침로별 자연적 감속량을 계산함으로써 실제 상황에 맞게 선체 운동 추정 등이 가능하다.
- (3) 거친 해상을 항해중인 선박의 안전 확보를 위해서 필수적인 타효 속력을 유지하는데 자연적 감속량을 정확히 고려할 수 있어서, 선박의 항해 안전성을 높일 수 있다.
- (4) 본 논문의 연구 결과는 의식적 감속을 고려한 최적 항로 결정, 항해중인 선박의 내항성

능 평가, 초기설계 과정에서의 최적 선형 개발 등의 연구에 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) K. Paetow : Ship of the Future, Marine Technology, 1991. 7
- 2) Nakamura S.·Fujii H. : Nominal Speed Loss of Ships in Waves, Proc. PRADS, 1977. 10
- 3) Naito S.·Nakamura S.·Hara S. : On the Prediction of Speed Loss of a Ship in Waves, Naval Arch. & Ocean Eng., Vol.18, 1980
- 4) Townsin R.L.·Kwon Y.J. : Approximate Formulae for the Speed Loss due to Added Resistance in Wind and waves, RINA, No.125, 1983.7
- 5) 김순갑·공길영 : 선박의 속도저하를 고려한 내항성능 평가에 관한 연구, 해양안전학회지, 제2권 제1호, 1996. 1
- 6) 大楠 丹 : 波浪中の抵抗増加, 日本造船協會誌, 第682號, 昭和61年4月
- 7) J.Gerritsma· W.Beukelman : Analysis of the Resistance Increase in Wave of a Fast Cargo Ship, I.S.P., Vol.19, No.217, 1972.9
- 8) 内藤 林·中村彰一·原 正一 : 波浪中における船速低下の推定法に關する研究, 日本造船學會論文集, 第146號, 昭和54年11月
- 9) 内藤 林·菅 信 : 船速低下の推定法, 運動性能研究委員會 第1回シンポジウム, 1984. 12.
- 10) 内藤 林 : 波浪中の推進定性能, 日本造船學會, 推進性能研究會, 第6回シンポジウム, 平成7年5月