□ 研 究 論 文 □

韓國軍事運營分析學會誌
第 24 卷, 第 1 號, 1998. 6. 30

함정의 작전중 항해 안전성에 관한 종합 평가 (An Integrated Evaluation of Navigational Safety for Naval Vessels)

공 길 영*

Abstract

The seakeeping performance can be defined as the ability of a ship to go to sea, and successfully and safely execute its missions even in adverse environmental conditions. From the viewpoint of safe operation, it is primarily important to estimate the seakeeping performance of a ship in a seaway.

A method of evaluating navigational safety is presented by means of the integrated seakeeping performance index(ISPI) by measuring only vertical acceleration. Judgement of dangerousness is carried out for two types of naval vessels in applying the involuntary speed losses. The used models for computer simulation are Lpp 175m light aircraft carrier and Lpp 93m frigate. In developing the practical evaluation system of navigational safety, it is expected to be useful to solve the difficulties in measuring factors by sensors. The results are also useful for developing the optimum type of naval vessels by applying at the initial design phase.

* 국방과학연구소

1. 서 론

현대의 함정은 과거 고도의 기동성을 가지고 빠르게 적함 가까이 이동하여 전투를 수행하는 개념에서 고도의 정밀 무기를 원거리에서 발사할 수 있는 안정되고 은폐된 해상요새라는 개념으로 바뀌고 있다. 다시 말해서 작전중인 함정이 성공적으로 임무를 수행하기 위하여는 선체 시스템과 전투 시스템이 상호 조화된 최적 시스템으로 구성되어야 한다는 것이다. 함정 전투체계의 성능을 결정하는 요소는 레이다에 의한 최초 표적 확인으로부터 미사일을 발사하는 데까지 소요되는 반응시간, Fire Power, 내환경성, 교전범위 등이다. 하지만 이러한 고성능 전투체계 자체의 정밀성을 유지하기 위해서는 보다 엄격한 플랫폼의 안정성을 요구하고 있으며, 이러한 요구사항이 선형 개발에 주요한 참고 자료가 되고 있다. 따라서 최근 건조되는 함정에는 운동성능에 대한 요구 사항이 과거에 비하여 보다 다양하고 구체적으로 그 기준이 제시되고 있다. 예를 들면 헬리콥터 이착륙을 위하여는 해상상태 얼마에서는 함 동요가 기준치 이하여야 한다든지, 선수에 소나를 장착한 함정의 경우 기준 해상상태에서 선수부가 수면위로 돌출되지 않아야 한다든지, 또 함포나 미사일 등의 정확도를 감소시키지 않기 위하여는 선체운동 특성이 기준치 이하여야 한다는 등의 기준이 마련되어 있다. 뿐만 아니라 함정 전체의 항해 안전성에 관한 기준도 각 해상상태에서 선체운동으로부터 발생하는 갑판침수, 슬래밍, 횡·종동요, 상하·좌우 가속도, 프로펄러 레이싱 등을 이용하여 구체적으로 제시되고 있다[1)~4)].

작전중인 함정의 운항자는 해상이 대단히 거칠 때 매우 고민스러운 판단을 해야만 하는 상황에 봉착하게 된다. 즉, 어느 정도의 풍속과 파랑에서는 함정의 안전이 확보되므로 현 침로, 현 속도로 계속 항해를 하고, 또 어느 정도 이상의 풍속과 파고에서는 위험하므로 피항 조치를 취해야 하는데, 이에 대한 함정 안전의 판단을 어떻게 하고, 또 어떻게 피항할 것인가 하는 것이 바로 그것이다. 실제로 1993년 3월, 지중해에서 작전중이던 미국의 항공모함 전투단은 예기치 못한 황천(heavy sea)을 맞아 대단히 큰 손상을 입었다. 전투단중 항공모함은 별다른 손상이 없었으나, 함께 항해중이던 구축함 등은 갑판상의 구조물과 여러 장비들이 파손되었다. 이와 같이 대단히 거친 해상에서 작전중인 함정의 항해 안전성을 평가하는 일반적인 방법은 내항성능(seakeeping performance)을 그 지표로 이용하는 것이다. 내항성능은 '어떤 사명을 부여받은 함정이 예정된 취항 항로 혹은 해역을 항해함에 있어, 해상 조건에 관계없이 승조원의 안전은 물론이고 선체에 탑재된 무장, 설비 등의 기능 및 성능의 저하없이, 그 사명을 수행하는데 요구되는 성능'이다[5)].

따라서 본 연구에서는 먼저 현대 함정의 내항성능 특성을 알아본다. 그리고 작전중인 함정의 항해 안전성을 자연적 감속(involuntary speed loss)을 고려한 선속에서 내항성능 평가요소중 한 개의 요소만을 계측하여 종합적으로 평가할 수 있는 종합내항성능지표(ISPI : Integrated Seakeeping Performance Index)를 제안한다. 그리고 제안된 종합내항성능지표를 이용하여 함정의 항해 안전성을 해상 상태에 따라 침로별로 종합적으로 평가하여 레이다상에 오브랩하여 사용할 수 있는 평가도에 나타낸다. 수치 계산에 사용된 함정은 만재 배수량 25,000톤 경항공모함급 Type A와, 4,500톤 호위함급 Type B이다.

2. 함정의 내항성능 특성

함정 설계시 가장 중요한 요소는 순항시 최대성능과 고속시 최대성능 및 내항성능을 모두 만족시키는 것이다. 그러나 이러한 목적에 모두 맞는 선형은 찾을 수가 없으며, 여하히 이러한 목적에 부합되는 최적의 선형을 찾아낼 수 있는가 하는 것이 설계의 최대 목표이다. 표 1은 함정 선형의 발전 과정을 선형별로 나타낸 것으로, 각 선형의 주요 치수와 특징을 분석해 본다.

표 1. 각 함형의 주요 치수 비교표

구분 \ 선형	기준 선형	순항 선형	고속 선형	내항 선형
L_{PP} (m)	132.0	134.0	142.0	132.0
B (m)	17.53	17.79	16.75	16.48
T (m)	5.119	4.993	5.202	5.196
DISP. (ton)	6118	61.42	6325	6176
$\triangle/(0.01\times L)^3$	75.38	72.34	62.60	76.09
C_{WP}	0.732	0.707	0.742	0.784
C_P	0.6147	0.5771	0.6162	0.6182
L / P	7.53	7.53	8.48	8.01
B / T	3.42	3.56	3.22	3.17
KM_T (m)	8.44	8.39	8.15	8.11
C_M	0.8059	0.8567	0.7954	0.8473
C_P	0.689	0.727	0.688	0.679
BOW SECTION		약간 V형	약간 U형	약간 U형
AFT SECTION		약간 V형	약간 V형	약간 V형

표 1에서 순항선형은 기준선형에 비해 중앙단면계수(C_M)와 선폭/흘수(B/T)를 증가시켜 연간 연료 소모량을 약 5% 절약하였으나, 전투 능력은 2% 정도 감소하였다. 고속선형은 기준선형과 같은 추기 마력으로 최대속력을 증가시키기 위해 길이를 증가시켜 조파 저항을 줄이도록 설계하였다. 이렇게 함으로써 고속선형은 연속최대정격출력(MCR)에서 속력이 1노트 정도 향상되었지만, 상대적으로 길이가 늘어났기 때문에 건조비가 많이 소요되었다. 내항선형은 내항성능을 개선시키기 위해 기준선형에 비해 수선면 계수(C_{WP})를 증가시키고 주상비척계수(C_P)를 감소시켜, 전투 능력을 3% 정도 증가시켰으며 속도는 기준선형과 거의 유사하였다.

또한 그림 1에 나타낸 바와 같이 최근 건조되는 함정은 과거에 비해 L/B(전장/선폭)가 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 L/B가 아주 작은 구축함들이 속속 등장하고 있다. 이는 구축함의 전투 능력(combat capability) 개념이 기동성에서 고정밀 무기체계로 변함에 따라 내항성능에 더 큰 비중을 두고 있음을 나타낸다. 또한 무장이나 탐지 장비가 과거에 비해 많이 배치되고 스텔스 개념의 도입에 의해 형성되는 Top Heavy의 복원성 확보를 위해서 선폭 B를 확대한 것으로 분석된다.

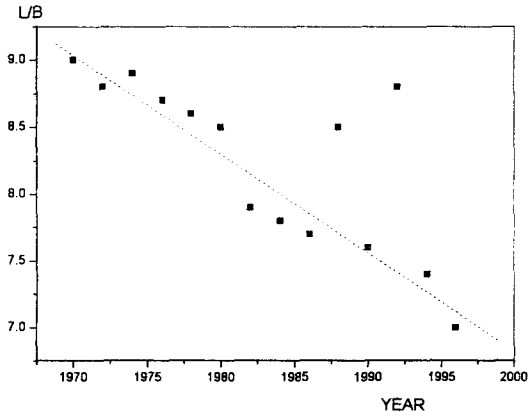


그림 1. 함정의 연도별 L/B 변화

함수 수선면의 경우 속도성능과 내항성능을 고려하여 일반적으로 구축함에는 Half Entrance Angle $10^{\circ}\sim11^{\circ}$ 범위에서 설계하고 있으며, 횡단면 형상은 약간의 속도 감소를 감안하더라도 내항성능과 전투 능력을 증대하기 위하여 V형에 가까운 U,V형의 함수횡단면을 채택하고 있다. 또한 내항성능에 큰 영향을 미치는 계수인 수선면 계수(C_{WP})는 내항성능 향상을 위하여 점점 증가되고 있다[6].

3. 내항성능의 평가 기준

거친 해상을 항해하고 있는 함정에서 바람과 파랑 등의 외력으로 인해 발생하는 위험 현상은 일반적으로 다음과 같이 분류된다.

(1) 조종불량으로 인한 타선과의 충돌 및 좌초 위험
(2) 갑판침수에 의한 무기체계, 장비 및 구조물 손상
(3) 프로펠러 노출에 따른 주추진 기관의 레이싱
(4) 대동요에 의한 복원성 상실
(5) 슬래밍에 의한 선저 및 갑판 장비의 손상
(6) 과대한 좌우 상하 가속도에 의한 선체, 장비 및 무기체계의 손상
(7) 과대한 종굽힘 모우멘트에 의한 선체의 파손
(8) 풍파로 인한 속도 저하에 따른 조종의 불가능성

따라서 파랑중을 항해하고 있는 함정에서 항해 안전성을 평가할 수 있는 내항성능 평가요소는 선체 운동으로부터 발생하는 선수 갑판 침수, 프로펠러 레이싱, 슬래밍, 횡동요, 상하 가속도, 좌우 가속도 등이다. 각 내항성능 평가요소에는 각각의 한계치와 한계발생확률이 설정되어 있는데, 일반적으로 통용되고 있는 것은 표 2와 같다. 여기에서 각 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어 있는 것은 각 요소에 대한 연구가 따로 따로 행하여진 결과이기도 하고, 다른 한편으로는 항해 안전성 평가시 각 요소의 중요도를 달리 부여한 의미도 있다[7].

각 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때 그 현상이 발생하고, 그 발생확률이 주어진 한계발생확률을 넘을 때 함정은 파랑중에서 그 기능을 잃거나 위험하게 된다.

표 2. 내항성능 평가요소의 한계치와 한계발생확률

내항성능 평가요소	한 계 치	한계발생확률
선수갑판 침수	정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 F.P.의 유효 건현	2×10^{-2}
프로펠러 레이싱	정수중 항주시의 수위 상승을 포함하지않고 프로펠러 반경의 ¼ 노출	10^{-1}
슬래밍	S.S.8½에서 선저 노출과 동시에 파에 돌입할 때 선저의 파면에 대한 상대 속도가 Threshold Velocity를 초과하는 것 단, Threshold Velocity = 0.09 $\sqrt{gL}$	10^{-2}
횡동요	선체중앙부 weather side의 bulwark top에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 정수중 홀수면에서 bulwark top 까지의 높이	10^{-3}
상하 가속도	Aertssen의 선박길이에 따른 한계치	10^{-3}
좌우 가속도	Aertssen의 선박길이에 따른 한계치	10^{-3}

그리고 각 내항성능 평가요소는 그림 2에 나타낸 바와 같이 한 개의 요소라도 그 발생확률이 한계발생확률을 초과했을 때 내항성능을 잃게되는 것을 나타내는 직렬 결합이다.

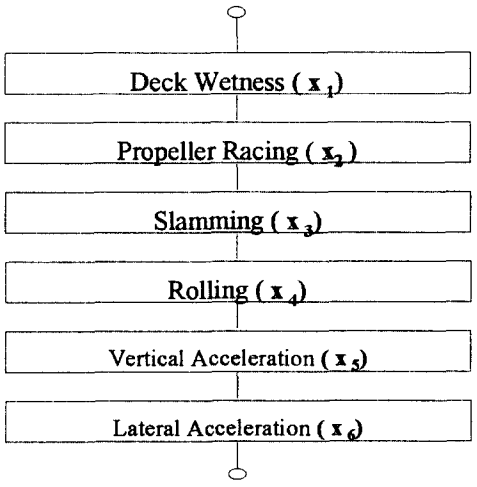


그림 2. 내항성능 평가요소의 시스템적 결합

4. 자연적 감속

파랑중을 항해하는 함정에서는 선체 동요, 바람, 파랑 등이 원인이 되어 발생하는 저항 증가, 프로펠러 노출 등으로 인한 추진 효율 감소 등으로 자연적 감속이 발생한다. 이 자연적 감속을 계산할 때 파랑중에서 일어나는 저항 증가의 정확한 계산이 필요하다. 풍파중에서 함정의 저항 증가량은 선체 운동에 기인한 저항 증가($R_{AW}(0)$), 선수부에서의 반사파에 기인한 저항 증가($R_{AW}(1)$) 및 풍압에 기인한 저항 증가(R_{wind})의 총합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{AW} = R_{AW}(0) + R_{AW}(1) + R_{wind} \qquad (1)$$

함정이 평수중에서 파랑중으로 항해할 때 발생하는 자연적 감속량은 침로 일정($\Delta\chi = 0$), 1회전당 연료 투입량 일정($\Delta\Lambda = 0$)이라고 가정하면, 자연 감속 ΔV에 대한 계산식은 식 2, 3과 같이 표시된다. 여기서 해상 상태(S)도 변수로서 고려되어야 하지만 해상이 급격히 변화하지 않는 단기적인 운항을 생각하고, 이하 해상은 일정한 것으로 가정한다. 아래 첨자 $_o$ 는 변화전의 값을 의미하고, 기호 위의 -(bar)는 시간적 평균치를 나타낸다.

$$R_{Vo}\cdot\Delta V = T_{Po}\cdot\Delta t + (1-t_o)\cdot P_{TNo}\cdot\Delta N_P + P_{TUo}\{(1-w_o)\cdot\Delta V + V_o\cdot\Delta w\} \qquad (2)$$

$$P_{QNo}\cdot\Delta N_P + P_{QUo}\{(1-w_o)\cdot\Delta V + \Delta w\cdot V_o\} = r^2\cdot\eta_t\cdot\eta_R\cdot E_{QNo}\cdot\Delta N_P \qquad (3)$$

여기서,

T_P : 프로펠러 트러스트

N_P : 프로펠러 회전수

E_{QN} : 주기의 프로펠러 회전수에 대한 미분계수

t : 트러스트 감소 계수

r : 주기축에서 프로펠러축에의 감속비

w : 반류 계수

η_t : 전달 계수

P_{TN}, P_{QN} : 프로펠러 회전수에 대한 프로펠러 트러스트와 토오크의 미분계수

P_{TU}, P_{QU} : 프로펠러 유입속도에 대한 프로펠러 트러스트와 토오크의 미분계수

파랑중에서의 선체 저항 $R(V,\chi)$는 평수중 저항 $R_o(V)$와 파랑중 저항 증가량 $\Delta R(V,\chi)$의 합으로, 다음과 같이 된다.

$$R(\overline{V},\overline{\chi}) = R_o(\overline{V}) + \Delta R(\overline{V},\overline{\chi}) \qquad (4)$$

식 2의 $R_V\cdot\Delta V$은 평수중 저항과 파랑중 선속 저하된 후 저항과의 차이이므로, 파랑중 선속을 V_C, 마찬가지로 평수중 선속을 V_A라 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{Vo}\cdot\Delta V &= R(\overline{V_A},\overline{\chi}) - R_o(\overline{V_C}) \\ &= R_o(\overline{V_A}) + \Delta R(\overline{V_A},\overline{\chi}) - R_o(\overline{V_C}) \end{aligned} \qquad (5)$$

식 5을 식 2, 3에 대입하고, 전달 효율 $\eta_t=\eta_R=1.0$으로 놓으면 자연 감속량 ΔV를 구하는 식은 다음과 같이 얻어진다[8,9].

$$\Delta V = \frac{R_o(\overline{V_A}) + \Delta R(\overline{V_A},\overline{\chi}) - R_o(\overline{V_C})}{(1-t_0)(1-w_0)\left(P_{TUo} + \dfrac{P_{TNo}P_{QUo}}{r^2E_{QNo} - P_{QNo}}\right)} \qquad (6)$$

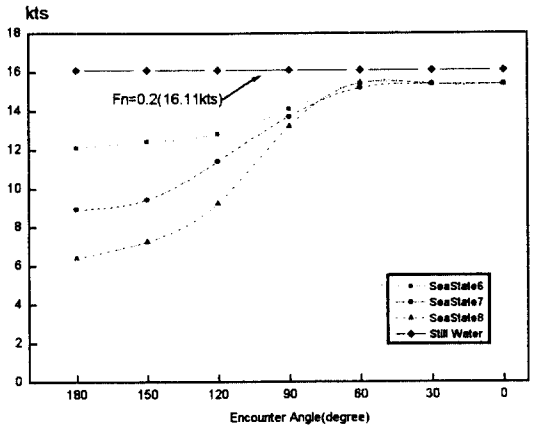
그림 3, 4는 대상선인 Type A와 Type B가 해상 상태 Beaufort Scale 6, 7, 8을 선수파($\chi=180^\circ$)에서 선미파($\chi=0^\circ$)를 받으며 속력 Fn=0.2, Fn=0.275로 항해할 때의 자연 감속량을 나타낸 것이다.

그림 3의 Type A의 경우에는 해상 상태가 거칠수록, 그리고 모든 해상 상태의 선수파($\chi=180$)에서

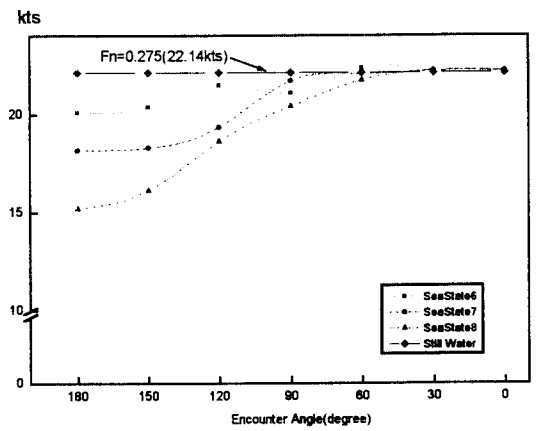
선속 저하량이 많다. 특이할 만한 사항으로는 고속일 때보다 저속으로 운항할 때 선속 저하량이 많아진다는 것이다.

그림 4의 Type B의 경우도 Type A의 경우와 마찬가지로 해상 상태가 거칠수록 선속 저하량이 많다.

그러나 Type A의 경우와 다른 것은 선수파(χ=180)보다는 χ=150 부근에서 선속 저하량이 많다는 것이다. 그리고 고속일 때보다는 저속으로 운항할 때 선속 저하량이 많아지는 경향을 보이는 것은 Type A의 경우와 같다.

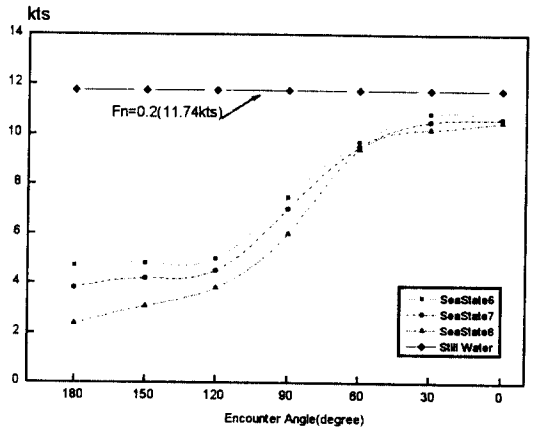


(a)

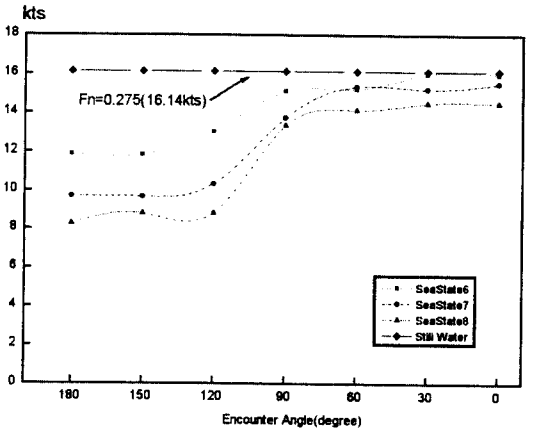


(b)

그림 3. Type A의 자연적 감속량



(a)



(b)

그림 4. Type B의 자연적 감속량

5. 종합내항성능지표의 정의

표 2에서 나타낸 바와 같이 기존의 각 내항성능 평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 가지는 요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 이것은 신뢰성 공학에서 시스템 요소의 고장 발생 확률이 같은 경우, 그 고장률이 동일하게 되는 것과 같은 의미를 가진다. 그러므로 각 내항성능 평가요소의 위험도가 같은 경우, 그 발생 확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 것으로 함정 시스템 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 종합내항성능지표를 개발할 수 있다. 이 종합내항성능지표는 임의의 1개 내항성능 평가요소만을 계측하여도 6개 내항성능 평가요소 전체의 위험도를 계산할 수 있다. 또한 이 지표는 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 모두 1보다 작은 경우 최대 위험도를 이용하면 전체 함정 시스템이 안전하게 평가되는 부분을 보완하여, 6개 내항성능 평가요소를 종합하여 보다 안전을 도모한 평가가 가능하다[10].

5.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치

현재까지 연구되어진 바에 따르면, 파랑중을 항해하는 함정 시스템의 내항성능을 평가할 수 있는 요소의 한계발생확률이 각각 다르게 설정되어 있다. 따라서 한계발생확률이 큰 요소에 비해서 작은 요소의 위험도가 전체 함정 시스템의 내항성능 평가에서 무시되어 위험한 상태가 안전한 상태로 평가되는 경우가 있다. 이것을 보완하기 위하여 각 내항성능 평가요소들이 한계발생확률에 도달하면, 그 위험도가 한계발생확률이 가장 큰 프로펠러 레이싱의 한계발생확률($Q_{Pc}=10^{-1}$)에 도달하는 것과 같은 값으로 변환하여 평가한다. 즉, 각 내항성능 평가요소의 위험도가 프로펠러 레이싱의 위험도와 같은 경우, 그 발생 확률도 프로펠러 레이싱의 발생 확률과 동일하게 되는 각 요소의 평가치(E_i)에 대한 변환 평가치($\widehat{E_i}$)를 다음과 같이 계산한다.

(1) 평가치

파랑중을 항해하는 함정의 내항성능을 평가할 수 있는 현상의 발생은 임의 내항성능 평가요소인 확률 과정 $X_i(t)$가 어떤 한계치 X_{ic}를 초과할 때 일어난다. 이 확률 과정 $X_i(t)$의 시간적 변동은 정상 가우스 과정(Gaussian process)이며, 그 수학적 평균치는 0인 것으로 알려져 있다. 따라서 임의 내항성능 평가요소의 극치 분포는 Rayleigh 분포에 따르며, 그 발생확률을 $Q(X_i)$라고 하면 임의 내항성능 평가요소의 평가치 E_i는 다음과 같이 정의된다.

$$E_i = \frac{1}{\sqrt{-2\ln\{Q(X_i)\}}} = \left[\frac{\sigma_i}{X_i}\right] \qquad (7)$$

여기서, σ_i : 내항성능 평가요소(i)의 표준편차

(2) 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치

$$\widehat{E_P} = \frac{E_P}{\alpha_{PP}} = E_P \cdot \frac{E_{Pc}}{E_{Pc}} = E_P \qquad (8)$$

여기서, E_P : 프로펠러 레이싱의 평가치

$\widehat{E_P}$: 프로펠러 레이싱의 변환 평가치

E_{Pc} : 프로펠러 레이싱의 한계 평가치

$$\alpha_{ij} = \frac{E_{jc}}{E_{ic}} = \left[\frac{X_{ic}}{\sigma_{ic}}\right] / \left[\frac{X_{jc}}{\sigma_{jc}}\right]$$

(3) 프로펠러 레이싱 이외 요소에 대한 변환 평가치

$$\widehat{E_i} = \frac{E_i}{\alpha_{pi}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_i = \mu_i \cdot E_{Pc} \qquad (9)$$

$$\widehat{E_j} = \frac{E_j}{\alpha_{pj}} = \frac{E_{Pc}}{E_{jc}} \cdot E_j = \mu_j \cdot E_{Pc}$$

여기서, α_{Pi} : 프로펠러 레이싱과 i 요소의 한계 평가치의 비

μ_i : i 요소의 위험도 ($= E_i/E_{ic}$)

5.2 종합내항성능지표의 정의

앞에서 제안한 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치를 이용하여, N개의 내항성능 평가요소로 구성되는 함정 전체 시스템의 변환 평가치($\widetilde{E_T}$)와 한계 평가치(E_{Tc})를 정리하고, 이를 이용하여 종합내항성능지표(μ_T)를 다음과 같이 정의한다.

먼저, 함정 전체 시스템의 변환 평가치 $\widetilde{E_T}$는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{E_T} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1-\widetilde{P_T})}} \tag{10}$$

여기서, $\widetilde{P_T} = \prod_{i=1}^{n} \widetilde{P_i}$

$$\begin{aligned}\widetilde{P_i} &= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\widetilde{E_i}}\right)^2\right\} \\ &= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{Pi}}{E_i}\right)^2\right\} \\ &= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{Pi}\cdot X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1-Q(X_i)^{\alpha_{Pi}^2}\end{aligned} \tag{11}$$

여기서, $Q(X_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\}$

그리고, 함정 시스템의 한계 평가치 E_{Tc}는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Tc} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1-P_{Tc})}} \tag{12}$$

여기에서,

$P_{Tc} = \prod_{i=1}^{n} P_{ic}$

$P_{ic} = 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_{ic}}\right)^2\right\} = 1-Q_{X_{ic}}$

P_{Tc} : 내항성능 신뢰도 함수

$Q_{X_{ic}}$: 내항성능 평가요소(i)의 한계발생확률

따라서 함정 시스템 전체의 항해 안전성을 평가하기 위해서는 식 12의 한계 평가치(E_{Tc})와 식 10의 변환 평가치($\widetilde{E_T}$)의 비를 종합내항성능지표 μ_T로 정의하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_T = \frac{\widetilde{E_T}}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1-P_{Tc})}{\ln(1-\widetilde{P_T})}} \tag{13}$$

여기서, 종합내항성능지표 μ_T가 1과 같으나 큰 경우 함정 시스템 전체는 위험하게 되고, μ_T가 1보다 작은 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다. 또한, 이 μ_T는 내항성능 평가요소중 1개의 요소라도 그 위험도가 1 보다 큰 경우, μ_T도 1 보다 크게 되는 성질을 가지고 있다. 따라서 μ_T는 내항성능 평가요소의 최대 위험도와 근사하는 값이 된다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능 평가요소의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있어, 간편하고 편리한 하드웨어 제작에 여러가지 이점이 있을 것으로 판단된다[11,12].

5.3 임의 1개 요소에 의한 항해 안전성 평가

식 11의 $\widetilde{P_i}$는 상대 위험도를 매개로 하여 임의 내항성능 평가요소 1개만을 계측하여 계산이 가능하며, 이것을 이용하여 파랑중을 항해하는 함정의 항해 안전성을 평가할 수 있는 종합내항성능지표를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\widetilde{P}_i &= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{Pi}}{E_i}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{Pi}}{\beta_i E_m}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{Pi}}{\beta_i}\cdot\frac{X_m}{\sigma_m}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{Pi}}{a_{mi}}\cdot\frac{X_m}{\mu_{mi}\,\sigma_m}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}}\cdot\frac{E_{mc}}{E_{ic}}\cdot\frac{X_m}{\mu_{mi}\,\sigma_m}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{Pm}}{\mu_{mi}}\cdot\frac{X_m}{\sigma_m}\right)^2\right\} \\
&= 1-Q(X_m)^{\left(\frac{a_{Pm}}{\mu_{mi}}\right)^2}
\end{aligned}
\tag{14}
$$

여기서,

X_m : 계측하는 임의의 내항성능 평가요소

$\beta_i = a_{mi} \cdot \mu_{mi}$

μ_{mi} : 계측하는 m요소에 대한 임의 i 요소의 상대 위험도

a_{Pi} : 프로펠러 레이싱에 대한 임의 i 요소의 한계평가치의 비

6. 상하 가속도를 계측한 항해 안전성

6.1 상하가속도를 이용한 종합내항성능지표

앞에서 정의된 종합내항성능지표는 기존의 내항성능 평가요소중 한 개 요소만을 계측하여 함정 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 기존 내항성능 평가요소중 계측성이 편리하고, 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하가속도 한 개의 요소만을 계측하여 함정 전체의 항해 안전성을 평가한다. 식 11의 $\widetilde{P}_i$는 상하 가속도를 계측하여 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 평가 지표 μ_T를 계산하는 것이 가능하다.

$$
\begin{aligned}
\widetilde{P}_i &= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{pi}}{\beta_i}\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{Pi}}{a_{AVi}}\frac{X_{AV}}{\mu_{AVi}\;\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}}\frac{E_{AVc}}{E_{ic}}\cdot\frac{X_{AV}}{\mu_{AVi}\,\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
&= 1-\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_{PAV}}{\mu_{AVi}}\cdot\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
&= 1-Q(X_{AV})^{\left(\frac{a_{PAV}}{\mu_{AVi}}\right)^2}
\end{aligned}
\tag{15}
$$

여기서,

$$Q(X_{AV}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\}$$

$\beta_i = a_{AVi} \cdot \mu_{AVi}$

μ_{AVi} : 상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도

a_{PAV} : 프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의 한계평가치의 비

그런데 표 2에서 프로펠러 레이싱과 상하 가속도의 한계발생확률이 각각 $Q_{Pc}=10^{-1}$, $Q_{AVc}=10^{-3}$ 이므로, $a_{PAV}=1/\sqrt{3}$된다. 따라서 식 15는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{P}_i = 1-Q(X_{AV})^{\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\mu_{AVi}}\right)^2} \tag{16}$$

6.2 수치 계산의 조건

수치 계산에 사용한 대상 함종은 만재 배수량 25,000톤 경항공모함급 Lpp=175m Type A와 만재 배수량 4,500톤 호위함급 Lpp=93m Type B이다. 해상 상태는 Beaufort Scale No. 6, 7, 8, 9의 상태로 단파정 불규칙파 중에서 계산을 행하였다. 각 해상 상태에 대한 평균 파 주기와 유의 파고($H_{1/3}$)는 표 3에 나타낸다. 단파정 불규칙파 중에서 함정과 파와의 만남각(encounter angle) χ는 함수 정향파(head sea)로부터 30°의 간격으로 함미 추파(following sea)

까지 7개의 상태에 대하여 계산을 행하였다.

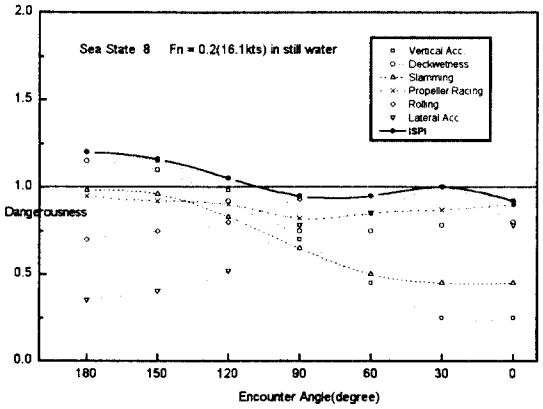
표 3. 해상 상태에 따른 해양파 특성

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

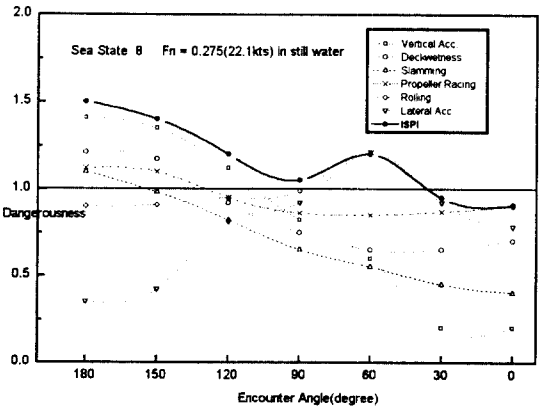
6.3 함종별 항해 안전성 평가

그림 5, 6은 식 16를 식 10, 식 12에 대입하여 계산한 수치 시뮬레이션 대상선인 Type A, Type B에 대한 종합내항성능지표(μ_T)와 내항성능 평가요소의 위험도(μ_i)를 비교하여 나타낸 것이다.

여기서 주어진 해상상태는 8이며, 항해 속력은 Fn=0.2, Fn=0.275이다. 그림에서 실선은 종합내항성

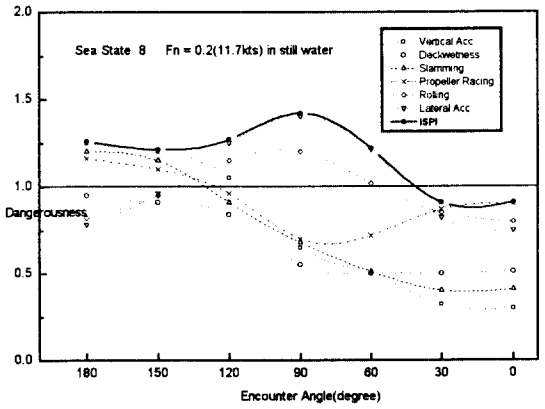


(a)

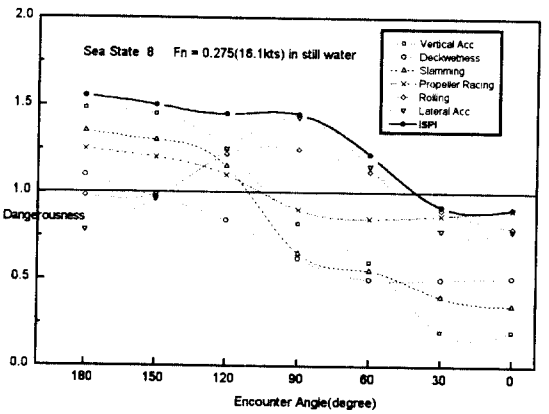


(b)

그림 5. Type A의 종합내항성능지표



(a)



(b)

그림 6. Type B의 종합내항성능지표

능지표를 나타내며, 각 점선은 각 내항성능 평가요소의 위험도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 해상 상태나 선속에 관계없이 종합내항성능지표와 최대 위험도가 근사하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 사실은 다른 선속과 해상 상태에서도 같은 경향을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다.

주목할 만한 사항은 Type A가 해상상태 8, 속력 Fn=0.275에서 항해하는 경우 위험도를 이용하여 평가할 때 χ=90° 횡파(beam Sea) 부근에서 안전한 것으로 평가되고 있으나, 모든 요소의 위험도가 1에 근접해 있어 종합내항성능지표를 이용하는 경우 위험하게 평가된다. 이것은 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 1 보다 작아 전체 함정이 안전한 것으로 평가되는 부분을 보완하고 있는 것이다. 다시 말해서, 각 내항성능 평가요소의 위험도가 1보다 작다고 하더라도 전체 요소의 위험도를 종합적으로 평가하면 반드시 안전하다고 할 수 없다는 것이다. 이러한 부분도 보완해 주는 것이 종합내항성능지표이다.

파랑중을 항해하는 함정의 항해 안전성을 기존의 내항성능 평가요소중 상하 가속도 한 개만을 계측하여 상대 위험도를 매개로 전체 함정 시스템의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있는 식 13의 종합내항성능지표를 적용하여 함종별로 내항성능을 평가한다.

그림 7, 8은 대상 선형인 Type A, Type B가 만재 배수량 상태에서 일정한 속력으로 항해하는 경우, 각 해상 상태에 따른 침로별 종합내항성능지표를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 이 평가도는 컴퓨터 화면이나 레이다 스코프 상에 화상처리하여 편리하게 사용할 수 있도록 좌표의 원점을 위험도 0 으로 하여 시각적으로 쉽게 항해 안전성을 판정할 수 있도록 했다. 그리고, 함정 운항자가 이 평가도를 이용하여 다음 침로에 대한 항해 안전성을 쉽게 파악할 수 있어, 다음 침로 결정에 편리함을 더해 주고 있다.

그림에서 χ=180°는 선수파(head sea), χ=90°는 정횡파(beam sea), χ=0°는 선미파(following sea)를 나타낸다. 그리고 가는 실선의 반원중 μ_T=1 은 종합내항성능지표의 한계 위험치를 나타내고, 굵은 실선과 가는 실선은 각 침로별 종합내항성능지표를 나타낸다. 그 중 굵은 실선의 종합내항성능지표는 한계치인 μ_T=1의 반원을 초과하는 경우로 이 상태에서의 함정은 위험하게 된다.

그림 7은 Type A가 자연적 감속이 고려된 속력 Fn=0.2(16.1kts), Fn=0.275(22.1kts)로 항해할 때, 침로별 해상 상태에 따른 종합내항성능지표를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 해상 상태 6에서는 속력 Fn=0.2, Fn=0.275 공히 Type A의 종합내항성능지표가 1보다 작아 전 만남각에서 안전한 것으로 평가된다. 해상 상태 7에서는 해상 상태 6에 비해 전 만남각에서 종합내항성능지표가 전반적으로 커지만 안전한 것으로 평가된다. 다만, Fn=0.275, χ=60° 부근에서는 종합내항성능지표가 1에 접근하고 있으므로 주의 항해를 해야 할 것으로 판단된다. 해상 상태 8에서는 Fn=0.2의 경우 χ=180° ~120°, 그리고 χ=60°에서, Fn=0.275의 경우 χ=180° ~40°에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해상 상태 9에 이르면 위험 범위가 확대되어 전 만남각에서 위험한 상태가 된다.

그림 8은 속력 Fn=0.2(11.7kts), Fn=0.275(16.1

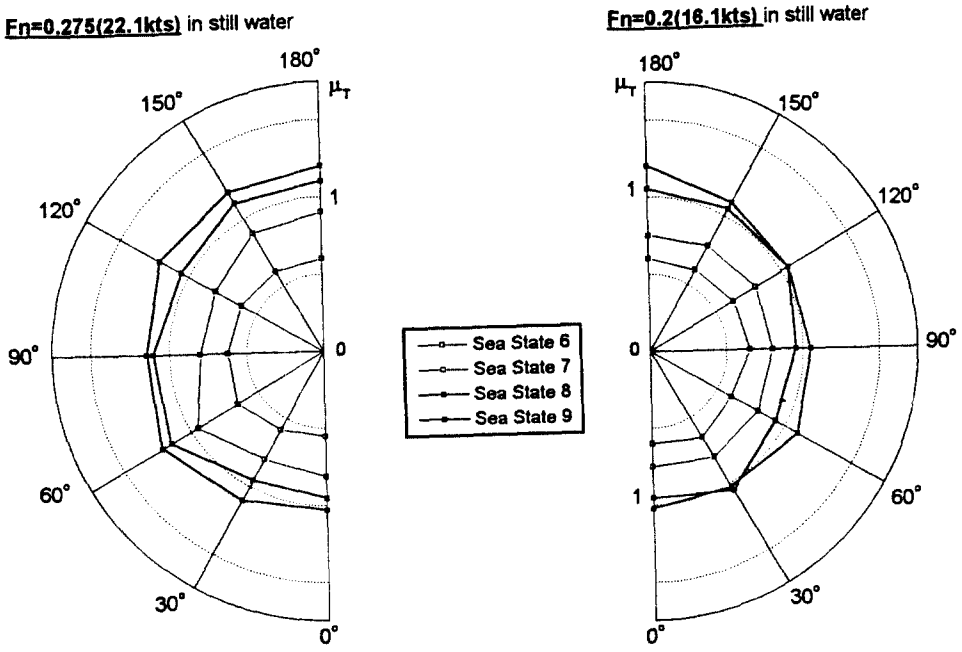


그림 7. Type A의 자연적 감속을 고려한 항해 안전성 평가도

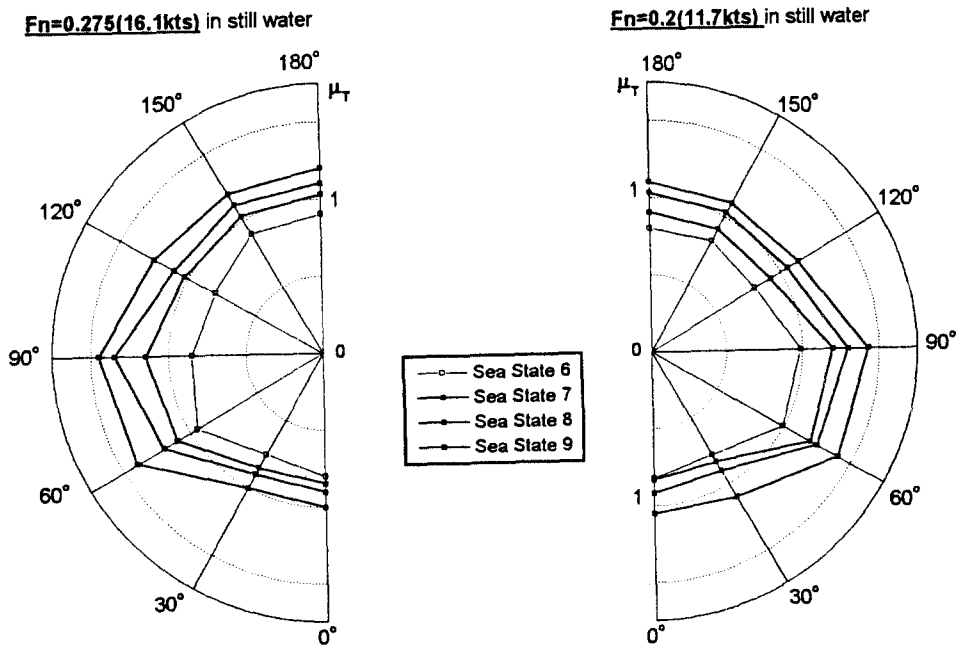


그림 8. Type B의 자연적 감속을 고려한 항해 안전성 평가도

kts)로 항해하는 Type B의 종합내항성능지표를 자연적 감속을 고려한 상태에서 계산하여 해상 상태별로 항해 안전성을 나타낸 평가도이다.

해상 상태 6에서, Type B의 경우 속력 Fn=0.2,에서 종합내항성능지표가 횡파(χ=60°~90°) 부근에서 1에 접근하고 있어서 주의 항해가 요구되지만, 그 밖의 만남각에서는 안전한 것으로 평가된다. 해상 상태 7에서는 해상 상태 6에 비해서 전반적으로 종합내항성능지표가 크고, 특히 속력 Fn=0.2에서는 χ=130°~50°, Fn=0.275에서는 χ=180°~50°에서 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해상 상태 8에서는 그 위험 범위가 확대되어, 속력 Fn=0.2, Fn=0.275 공히 χ=180°~45° 에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해상 상태 9에 이르면 전 만남각에서 위험한 것으로 평가된다.

이상을 종합해 보면, Type A은 해상 상태 8 이상이 되면 위험하다. 그리고 Type B은 해상 상태 7 이상이 되면 전반적으로 위험하고, 특히 횡파 부근에서의 위험도가 대단히 높다는 것에 주의해야 할 것이다.

이상의 여러 가지 상황을 감안할 때, 파랑중을 항해하는 함정의 운항자는 안전 확보를 위한 피항 조치시 대각도의 변침만을 사용하는 것보다, 변침과 함께 적절한 속도 감속을 병행한다면 보다 효과적으로 함정의 항해 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 논문에서는 현대 함정의 내항성능 특성을 알아보고, 항해하는 함정의 안전성을 자연적 감속을 고려한 선속에서 평가하였다. 평가에 이용된 종합내항성능지표는 내항성능 평가요소중 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 계산하였다. 이상의 연구 결과를 종합하여 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 현대 함정은 선체 시스템과 전투 시스템의 최적 조화를 위하여 약간의 속도 감소를 감수하면서도 내항선형을 채택하고 있다.

(2) 기존 내항성능 평가요소중 상하 가속도 한 개만을 계측하여 종합내항성능지표를 계산하고, 이를 이용하여 함정 전체의 항해 안전성을 정량적으로 평가하였다.

(3) 상하 가속도만을 계측하여 함정 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 방법을 제시함으로써 종합항해안전성 평가시스템 개발시 계측상의 난제를 해결할 수 있는 계기를 마련하였다.

(4) 본 논문의 연구 결과는, 의식적 감속을 고려한 최적항로 결정, 항해 안전성 면에서 보다 우수한 선형 개발 등의 연구에 이용될 수 있을 것이라고 생각된다.

참 고 문 헌

[1] Peter B. Zahn·Michael Grim : Determination of Extreme Seas Encountered by Operational Ships, pp. 197, May 1995

[2] Edward N. Comstock·Robert G. Keane : Seakeeping by design, Naval Engineers Journal, pp. 157, April 1980

[3] Comstock E.N.·Bales S. L.·Keane R.G. :

Seakeeping in Ships Operations, Proc. 5th SNAME STAR Symp., 1980. 6

[4] Comstock E.N.·Keane R.G. : Seakeeping by Design, Naval Engineers Journal, Vol. 92, No.2, 1980. 4

[5] A.R.J.M. LLOYD : Seakeeping ; Ship Behaviour in Rough Weather, Ellis Horwood Limited, 1989, pp. 337 - 339

[6] 김정환·박상철·이웅태 : 차세대구축함 선형개발, 제1회해상무기체계발전 세미나논문집, 1996.6

[7] 中村彰一 : 耐航性の諸要素, 第1回 耐航性に關しるシンポジウム, 日本造船學會, 1969

[8] Naito S.·Nakamura S.·Hara S. : On the Prediction of Speed Loss of a Ship in Waves, Naval Arch. & Ocean Eng., Vol.18, 1980

[9] 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

[10] V.V.ボロチン : 構造設計の確率論的方法と信頼性問題,培風館(1981,小林繁夫,他譯)

[11] 金順甲·內藤 林 : 船舶の波浪中耐航性能評價に關する研究,日本造船學會論文集 No.155, (1984)

[12] 공길영 : 함정의 종·횡요를 이용한 내항성능 평가에 관한 연구, 한국군사운영분석학회지, 제20권, 제2호, 1994. 12