

함정의 기상 변화에 따른 실시간 항해 안전성 평가 (An Evaluation of Real-Time Navigational Safety with Weather Conditions)

공길영*

Abstract

There is some limitations for ship to gather weather and sea state information. To make up for this weakness, land organizations can gather the wider variety of information, evaluate the navigational safety on a ship, and supply this information to the ship.

In this study, the involuntary speed loss are calculated using the real-time information on weather and considering the increase of resistance induced by wave, and the navigational safety in a seaway is evaluated. The used model for computer simulation is Lpp 93m frigate class ship. The feasibility study is made of using simulation results in actual operation.

* 국방과학연구소

1. 서 론

해상에서 작전중인 함정운항자는 함정의 항해안전성을 유지하기 위하여 선체에서 발행하는 동요각과 가속도의 크기와 한계를 내항성능 평가요소의 위험한계치 내에서 발생하도록 운항하여야 한다. 현재 함정의 항해 안전성과 관련된 연구는 계측된 선체운동 데이터를 이용하여 각 해상상태별로 안전도를 평가하고, 이 평가정보를 운항자에게 제공하여 위험이 예측되는 경우 침로나 속도의 변경 등으로 안전을 확보할 수 있는 시스템 개발이 진행중이다.[1][2]

함정의 안전 운항에 가장 밀접한 관계가 있는 것은 기상·해상에 관한 정보이다. 현재 기상·해상의 예측은 국제적인 규모의 관측, 정보의 교환, 기상 위성의 개발·이용 및 컴퓨터의 정보처리 능력의 급속한 향상과 더불어 예보 정밀도의 향상 및 예보 기간 연장 부문에서 급속히 발전하고 있다. 또한 인공위성을 이용한 통신 시스템 및 컴퓨터의 발달로 함정과 육상 부서간에 저렴한 가격으로 대량의 정보 교환이 가능해지고 있다. 그러나 작전중인 함정에서 기상·해상 정보를 수집하여 이를 분석하는 데에는 어느 정도 한계가 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 육상 부서에서는 보다 다양한 정보를 수집하여 작전중인 함정에 대한 항해 안전에 관한 평가를 행하여 안전 항해 및 최적 항로에 관한 정보를 제공하는 종합 항해 안전성 평가 시스템의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 먼저 실시간으로 제공되는 기상 정보에 대하여 조사하였다. 그리고 이를 이용하여 각 해상상태에 대한 선체운동 응답함수를 계산하고, 풍파에 의한 저항증가를 구하여 자연적 감속을 계산하였다. 끝으로 종합내항성능지표를 개발하

고 이를 이용하여 항해 안전성을 평가하였다. 본 평가에 사용된 기상정보는 항행중 대상 함정에서 실측하여 항해 일지(log book)에 기록한 정보와 작전 기간중 지속적으로 인터넷에서 제공되는 정보를 사용하였다.

2. 기상 정보

작전중인 함정에서 획득할 수 있는 기상·해상 정보는 각국에서 발송하는 기상 FAX, 무선 또는 음성 에 의한 각종 주의·경보 등이 있다. 이중 현재 FAX에 의해 수신 가능한 기상·해상도는 다음과 같은 종류가 있다.

- ① 지상해석
- ② 지상 24시간 예상천기도
- ③ 500hpa 고층 천기도
- ④ 외양 파랑 해석도
- ⑤ 외양 파랑 24시간 예상도

그러나 실제 함정에서는 장기예상천기도, 파랑예보, 해조류의 예상, 해부예보, 해빙·유빙의 상황, 기온·해수 온도의 현황 등 보다 유용하고 다양한 자료가 필요한 경우가 많다.

이와 같은 미흡한 정보를 보완하여 함정의 안전 항해 및 주어진 작전을 성공적으로 수행하기 위해서는 육상 부서에서 보다 많은 자료를 입수하여 이를 분석하고, 분석된 정보를 함정에 제공함으로써 소기의 목적을 달성하여야 할 것이다. 다음은 육상 부서에서 활용 가능한 기상 정보이다.

2.1 기상 데이터

2.1.1 관측 데이터

세계기상협회(WMO), 각국의 기상청 등으로부터

제공되는 세계 규모의 육상·해상에 대한 기상관측 데이터와 선박으로부터 송신되는 기상정보

2.1.2 위성화상

일본의 GMS, 미국의 GOES, LANDSAT 및 유럽의 METEOSAT 등의 인공위성으로부터 제공되는 대양의 실시간 화상

2.1.3 천기 데이터

일본기상청(JMA : Japan Meteorological Agency)에 의한 지상 및 500hpa 해석도, 미국기상청(NWS : National Weather Service)에 의한 지상 및 고층해석도, 유럽중기예보센터(ECMWF : Europe Center For Medium-Range Weather Forecasts)에 의한 전지구 구역의 지상 및 500hpa 해석과 열대지역(35° N~35° S)에서의 850 hpa 및 200hpa의 바람해석 데이터, 미국해군수치해양센터(FNOC : Fleet Numerical Oceanography Center)의 지상기압 및 지상풍의 해석 데이터

2.1.4 수치기상예보(NWP : Numerical Weather

Prediction)에 의한 정보

가. JMA에 의한 72시간 지상 및 500hpa 예보와 8일간 예보의 개황

나. NWS에 의한 120시간 평균지상 및 고층예보와 6~10일간의 우세한 저기압의 운동을 예측하기 위한 북반구 고층도에서의 flow pattern에 관한 정보

다. FNOC에 의한 120시간 전지구상 기압 및 지상풍 예보

라. ECMWF에 의한 북반구 및 남반구(20° N~90N, 20° S~90° S)의 144시간 지상기압 및 500hpa의 예보, 72시간 열대(35° N~35° S) 바람예보

2.1.5 특수기상정보

가. 각국의 기상기관에서 제공하는 높은 파도경보, 강

풍경보, 폭풍 및 각 연안의 천기 및 해상의 예보

나. MMA, NWS의 Hurricane Center(Miami, Honolulu), JTWC(Joint Typhoon Warning Center), Manila, Hong Kong 및 Australia의 기상청 등에서 제공하는 태풍, 허리케인, 사이클론에 관한 예보

2.2 해양 데이터

2.2.1 파랑 데이터

가. JMA에서 제공되는 파랑 실태도 및 예보도

나. NWS에서 제공되는 북대서양 및 북태평양의 파고나 너울 높이 실태도 및 예보도

다. 전대양을 대상으로 하는 FNOC의 전지구 스펙트럼 파랑모델(GSOWMGlobal Spectrum Ocean Wave Model)에 의한 72시간 격자(grid)화된 해석 데이터 및 예보 데이터

2.2.1 해빙 데이터

가. 북대서양에 있어서 목격되었던 빙산을 대상으로 미국 연안경비대로부터의 해빙 통보

나. 북서대서양, 세인트로렌스만과 다른 캐나다 연안 수역에 있어서의 유빙 및 빙산 통보

다. 미 해군 및 NOAA(미국해양대기청)의 전세계에 대한 해빙 해석 및 30일 개황

라. 스웨덴의 보스니아만과 발틱해에 대한 해빙해석
마. 북해도, 천도열도(Kuriles) 부근의 북서태평양, 오토츠크해, 동해에 대한 해빙해석

바. NWS로부터의 베링해의 해빙 해석

사. 비행기 관측에 기초를 둔 Cape Horn 부근 및 이남지역의 해빙 해석

아. 항해중인 각 선박으로부터의 빙산 등의 관측 보고

2.2.2 해류 데이터

가. 우세한 해류를 표시하는 전대양의 Pilot chart

나. NWS에 의한 멕시코만류의 위치 해석 데이터

2.3 인터넷에 의한 기상·해상 정보

현재 WMO, 각국의 기상청, 기상관련¹⁾ 연구기관 및 민간 기상회사에서는 기상 및 해상에 대한 각종 정보를 인터넷을 통하여 제공하고 있다. 제공되는 정보의 종류 및 양은 각각의 제공 처벌로 다르지만 기상위성 및 데이터 처리를 위한 전자계산기 등의 발달에 의해 점차 정밀하고 신속한 정보가 제공되고 있다.

3. 자연적 감속

파랑증을 항해하는 함정에서는 선체 동요, 바람, 파랑 등이 원인이 되어 발생하는 저항 증가, 프로펠러 노출 등으로 인한 추진 효율 감소 등으로 자연적 감속(Involuntary Speed Loss)이 발생한다. 풍파증에서 함정의 저항 증가량은 다음과 같이 표현할 수 있다.[3][4]

$$R_{AW} = R_{AW}(0) + R_{AW}(1) + R_{wind} \quad (3-1)$$

여기서,

$R_{AW}(0)$: 선체 운동에 기인한 저항 증가량

$R_{AW}(1)$: 선수부의 반사파에 기인한 저항 증가량

R_{wind} : 바람에 의한 저항 증가량

함정이 정수 중에서 파랑 증으로 항해할 때 발생하는 자연적 감속은 침로 일정($\Delta \chi = 0$), 1회전당 연료 투입량 일정($\Delta A = 0$)이라고 가정하면, 자연 감속 ΔV 에 대한 계산식은 식 (3-2), (3-3)과 같이 표시된다. 여기서 해상 상태도 변수로 고려되어야 하지만 해상이 급격히 변화하지 않는 단기적인 운항을

생각하고, 이하 해상은 일정한 것으로 가정한다. 아래 첨자 $\bar{}$ 는 변화전의 값을 의미하고, 기호 위 $-(\bar{})$ 는 시간적 평균치를 나타낸다.

$$R_{V_0} \cdot \Delta V = T_{P_0} \cdot \Delta t + (1 - t_0) \cdot P_{TN_0} \cdot \Delta N_P + P_{TU_0} \{ (1 - w_0) \cdot \Delta V + V_0 \cdot \Delta w \} \quad (3-2)$$

$$P_{QN_0} \cdot \Delta N_P + P_{QU_0} \{ (1 - w_0) \cdot \Delta V + \Delta w \cdot V_0 \} = r^2 \cdot \eta_t \cdot \eta_R \cdot E_{QN_0} \cdot \Delta N_P \quad (3-3)$$

여기서,

T_P : 프로펠러 트러스트

N_P : 프로펠러 회전수

E_{QN} : 주기의 프로펠러 회전수에 대한 미분 계수

t : 트러스트 감소 계수

r : 주기측에서 프로펠러측에의 감속비

w : 반류 계수

η : 전달 계수

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

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

파랑증에서의 선체 저항 $R(V, \chi)$ 는 정수중 저항 $R_0(V)$ 와 파랑증 저항 증가량 $\Delta R(V, \chi)$ 의 합으로, 다음과 같이 된다.

$$R(\bar{V}, \bar{\chi}) = R_0(\bar{V}) + \Delta R(\bar{V}, \bar{\chi}) \quad (3-4)$$

식 (3-2)의 $R_V \cdot \Delta V$ 은 정수중 저항과 파랑증 선속 저하된 후 저항과의 차이이므로, 파랑증 선속을 V_0 , 마찬가지로 정수중 선속을 V_A 라 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{V_0} \cdot \Delta V = R(\bar{V}_A, \bar{\chi}) - R_0(\bar{V}_C) = R_0(\bar{V}_A) + \Delta R(\bar{V}_A, \bar{\chi}) - R_0(\bar{V}_C) \quad (3-5)$$

식 (3-5)를 식 (3-2), (3-3)에 대입하고, 전달 효율

$\eta_i = \eta_R = 1.0$ 으로 놓으면 자연 감속량 ΔV 를 구하는 식은 다음과 같이 얻어진다[5].

$$\Delta V = \frac{R_o(\overline{V_A}) + \Delta R(\overline{V_A}, \overline{\chi}) - R_o(\overline{V_C})}{(1-t_0)(1-w_0) \left(P_{TU_0} + \frac{P_{TN_0} P_{QU_0}}{r^2 E_{QN_0} - P_{QN_0}} \right)} \quad (3-6)$$

4. 종합내항성능지표의 정의

기존의 각 내항성능 평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 갖는 요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 이것은 신뢰성 공학에서 시스템 요소의 고장 발생 확률이 같은 경우, 그 고장률이 동일하게 되는 것과 같은 의미를 갖는다. 그러므로 각 내항성능 평가요소의 위험도가 같은 경우, 그 발생 확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 것으로 함정 시스템 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 종합내항성능지표(ISPI)를 개발할 수 있다. 함정의 항해 안전성을 평가하기 위한 종합내항성능지표 μ_T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[6][7]

$$\mu_T = \frac{\widehat{E}_T}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{Tc})}{\ln(1 - \widehat{P}_T)}} \quad (4-1)$$

여기서,

P_{Tc} : 내항성능 신뢰도 함수

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

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

Q_{X_i} : 내항성능 평가요소의 한계발생확률 (Rayleigh 분포)

$$\widehat{P}_T = \prod_{i=1}^n \widehat{P}_i \quad \widehat{P}_i = 1 - Q(X_i)^{\alpha_{P_i}}$$

μ_{ij} : 임의 i 요소에 대한 임의 j 요소의 상대 위험도

α_{P_i} : 프로펠러 레이싱에 대한 임의 i 요소의 한계평가치의 비

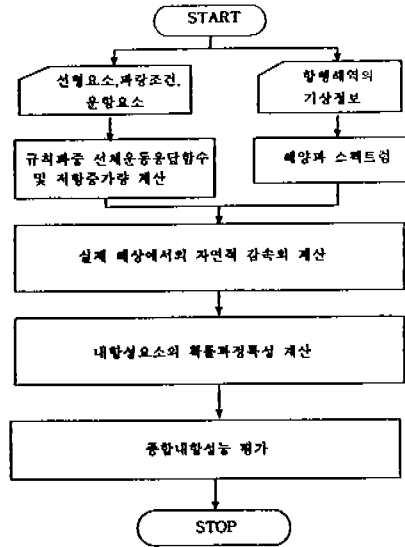
여기에서 종합내항성능지표 μ_T 가 1과 같거나 큰 경우 함정 시스템 전체는 위험하게 되고, μ_T 가 1보다 작은 경우 안전한 것으로 평가할 수 있다. 또한 이 μ_T 는 내항성능 평가 요소중 1개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우, μ_T 도 1보다 크게 되는 성질을 갖는다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능 평가요소의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있어, 간편하고 편리한 하드웨어 제작에 여러 가지 이점이 있을 것으로 판단된다.

5. 기상 변화에 따른 안전성 평가

5.1 수치 계산의 조건

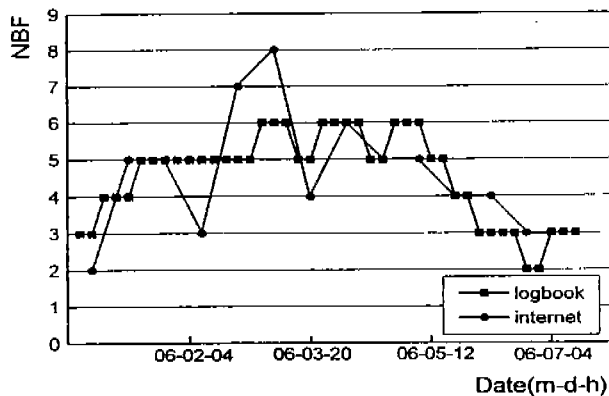
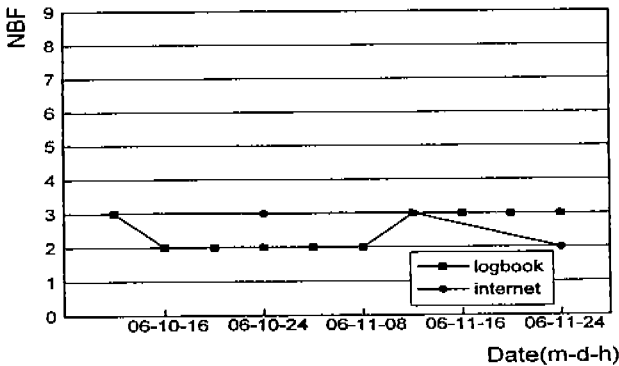
본 연구에서 수치 계산에 사용된 대상함은 $L_{pp}=93m$, 4,200톤급 호위함형이고, 해상상태는 WMO CODE1100의 유의 파고 및 평균 파주기를 이용하였다. 또한 기상 정보는 대상 함에서 운항자가 실측하여 항해 일지에 기록한 정보와 항행 기간중 실시간으로 제공된 인터넷 정보를 이용하였다. <그림 5-1>, <그림5-2>는 6월 2일 04시부터 6월 11일 24시까지 특정 해역에서 함정의 운항자가 항해 일지에 기록한 해상상태(NBF : Number of Beaufort Scale)와 인터넷 기상 정보에서 제공하는 해상상태를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실제 관측 기

상 정보와 인터넷 기상 정보는 6월 2일 12시, 24시, 6월 3일 12시에 서로 큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 당시 기상 정보를 제공하고 있는 weather point가 대상함의 작전 해석과 상당히 떨어져 있었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 문제점은 차후 국제적인 기상예보의 정밀성과 신속성의 발달에 의해 점차 개선되리라 여겨진다. 그 밖의 다른 날자, 시간대에서는 전반적으로 실제 운항 실적과 거의 일치하였다. 기상 변화에 따른 함정의 항해 안전성 평가에 필요한 세부 입력 사항 및 계산 절차와 내항성능 평가요소의 한계치 및 한계발생확률은 <그림5-2>, <표5-1>과 같다.[8]



<그림5-2> 기상 변화에 따른 함정의 항해 안전성평가 흐름도

<표5-1> 내항성능 평가요소의 한계치와 한계발생확률

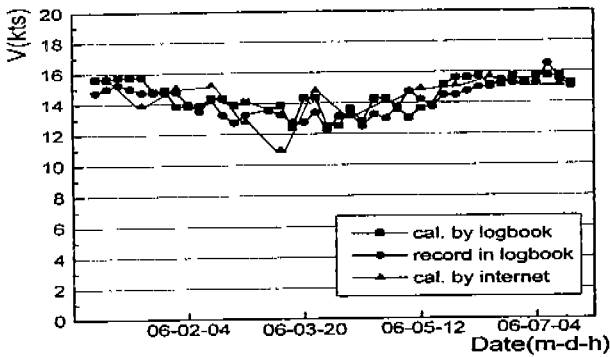


<그림 5-1> 작전 해석의 해상상태

| 내 항 성 능 평가 요소 | 한 계 치 | 한 계 발생 확률 |
|-------------------------|--|--------------------|
| 선수 갑판 침수 (deck wetness) | 정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 FP의 유효 건현 | 2×10^{-2} |
| 프로펠러 레이싱 | 정수중 항주시의 수위 상승을 포함하지 않고 프로펠러 반경의 1/3 노출 | 10^{-1} |
| 슬래밍 | S.S.8 1/2에서 선저 노출과 동시에 파에 돌입할 때 선저의 파면에 대한 상대 속도가 Threshold Velocity를 초과하는 것 단, Threshold Velocity = 0.09 / gL | 10^{-2} |
| 횡동요 | 선체중양부 weather side의 bulwark top에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 정수중 홀수면에서 bulwark top까지의 높이 | 10^{-3} |
| 상하 가속도 | Aertssen의 선박길이에 따른 한계치 | 10^{-3} |
| 좌우 가속도 | Aertssen의 선박길이에 따른 한계치 | 10^{-3} |

5.2 기상 변화에 따른 자연적 감속

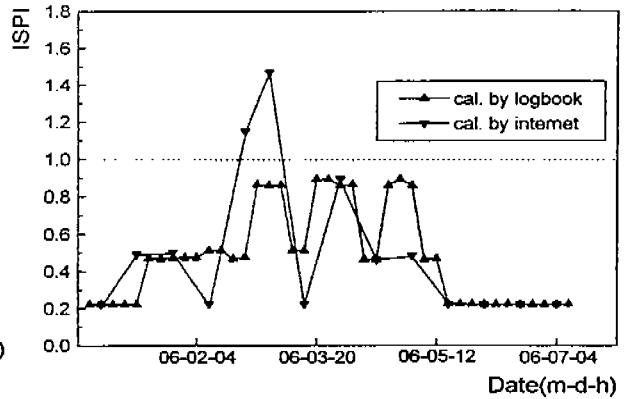
<그림 5-3> 은 기상 변화에 따른 대상함의 항해 일지에 기록된 실제 속도, 항해 일지에 기록된 기상 변화를 토대로 식 (5-6)을 이용한 계산에 의한 속도, 인터넷 기상 정보를 이용하여 계산한 속도를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실제 항해 속도와 항해 일지에 기록된 기상 변화를 근거로 계산한 속도는 평균 (+)0.08노트의 차이가 있으며, 인터넷의 기상 정보를 이용한 계산 결과와는 평균 (-)0.052노트의 차이가 있다.



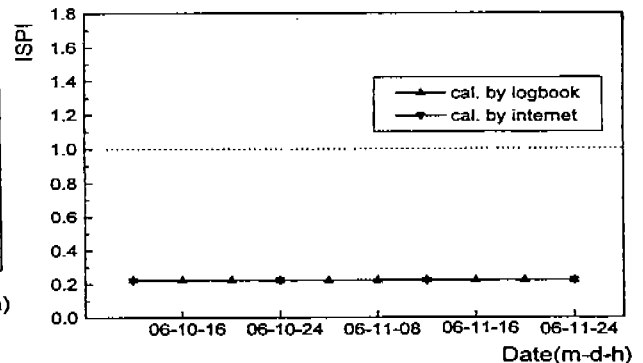
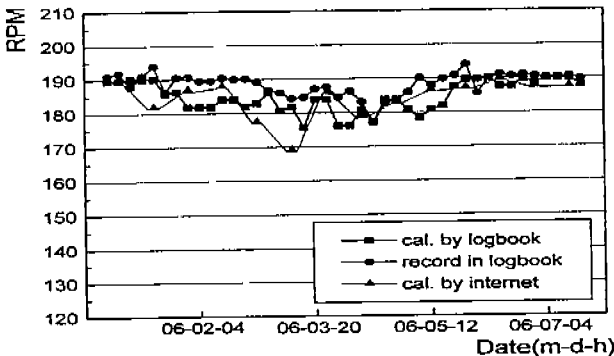
<그림5-3> 대상함의 자연적 감속 비교

5.3 기상 변화에 따른 자연적 감속을 고려한 안전성 평가

<그림5-4>는 대상함이 <그림5-3>의 자연적 감속이 고려된 속도로 항해하는 경우, 식 (5-7)을 이용하여 실제 관측된 기상 변화와 인터넷에 제공하는 기상 변화에 따른 종합내항성능지표를 계산하여 나타낸 것이다. 인터넷 기상 정보를 토대로 하여 계산한 6월 2일 24시경의 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 것으로 판정되었으나, 항해 일지에 기록된 실제 관측 기상 정보에 따른 종합내항성능지표는 안전한 것으로 나타났다.



<그림5-4> 대상함의 종합내항성능지표 비교



<그림5-5>는 함정 운항자의 위험 판단에 관한 식별을 쉽게 하기 위하여 <그림5-4>에 나타낸 6월 24일 24시경의 종합내항성능지표를 당시 실제 레이더 화면과 오버랩(overlap) 되도록 표시한 것이다. 그림의 위쪽은 침로(heading)를 그리고 굵은 실선의 화살표는 함정과 파랑이 만나는 각(encounter angle)을 나타낸다.

그림의 평가도를 분석해 보면 실제 관측 해상상태인 NBF 6에서는 현 침로를 비롯한 모든 만남각에 대하여 내항성능평가지표가 1보다 작아 안전한 것으로 평가되었다. 그러나 인터넷 기상 정보에서 제공하는 해상상태인 NBF 7에서는 함수로부터 좌우 60°까지와 함미좌우로부터 60°부근에서 위험한 것으로 평가되었다. 따라서 본 평가도를 당시 함정 운항자에게 제공할 수 있다면 함정의 다음 안전 침로를 판단하는데 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

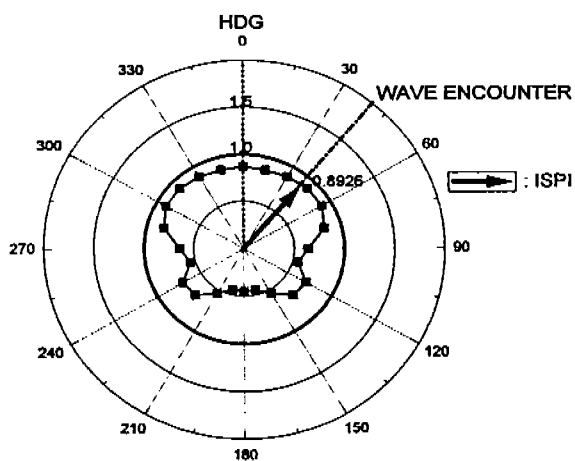
이상과 같은 함정의 항해 안전성을 평가한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 다른 만남각에 비하여 만남각 60°부근(quartering sea)일 때 상대적으로 위험도가 높게 평가되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 자연적 감속은 선수파를 받을 때 감속량이 크고, 횡파를 받을 때 다른 각도보다 비교적 선속이 적게 저하되었다.

6. 결 론

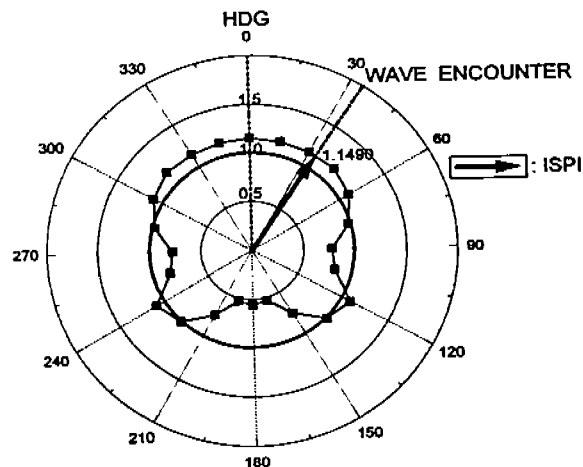
함정의 실제 항해 실적과 인터넷 기상 정보를 이용하여 자연적 감속과 항해 안전도를 평가한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 함정에서 실측된 기상 정보와 인터넷에서 제공하는 실시간 기상 정보는 거의 일치하고 있음을 알



speed 14.5 kts

(a) 대상함의 실제 운항 실적을 근거로 한 항해 안전성 평가도



speed 14.5 kts

(b) 대상함의 인터넷 기상 정보를 이용한 항해 안전성 평가도

<그림5-5> 항해 안전성 평가도

수 있었다.

(2) 주어진 해상상태에서 함정의 운항자가 기록한 실제 항해 속도와 수치 계산에 의한 항해 속도는 거의 일치하였다.

(3) 함정의 항해 안전성 평가에 대한 시뮬레이션 결과를 대상함의 실제 운항 실적과 비교함으로써 실제 시스템의 적용 가능성을 검토하였다.

따라서 본 함정의 항해 안전성 평가 절차를 각종 실시간 기상 정보를 이용하여 실행함으로써 함정의 안전 항로와 최적 항로의 선정에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 공길영, 함정의 중·횡요를 이용한 내항성능 평가에 관한 연구, 한국군사운영 분석학회지, 제20권, 제2호, 1994. 12.
- [2] Zahn, P.B., Grim, M., Determination of Extreme Seas Encountered by Operational Ships, p197, 1995.
- [3] 김순갑, 공길영, 선박의 속도감소를 고려한 내항성능 평가에 관한 연구, 한국해양안전 학회지, 제2권, 제1호, 1996. 1.
- [4] 内藤 林, 中村彰一, 原 正一: 波浪中における船速低下の推定に関する研究、日本造船學會論文集, 第146號, P.155~P.166.
- [5] Naito S., Nakamura S. and Hara S., On the Prediction of Speed Loss of a Ship in Waves, Naval Arch. & Ocean Eng., Vol.18, 1980.
- [6] 김순갑, 공길영, 선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구, 한국항해학회지, 제21권, 제2호, 1997. 6.

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

[8] 中村彰一, 耐航性の諸要素, 第1回耐航性に關するシンポジウム, 日本造船學會, 1969.

[99년 4월 6일 접수, 99년 4월 12일 심사완료]