

기상 예보 및 내항성능을 고려한 최적 항로 평가 시스템의 도입

박건일* · 최경순** · 이진호** · 김문성**

* · **삼성중공업 거제조선소 조선해양연구소

Introduction of Optimum Navigation Route Assessment System based on Weather Forecasting and Seakeeping Prediction

* · *Kyong Soon Choi*** · *Jin Ho Lee*** · *Mun Sung Kim***

* · ** *Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co.,Ltd. Geje Shipyard, 656-710, Korea*

요 약 : 본 논문은 기상 예보 및 복측 관측의 파랑 정보를 이용한 운항 선박의 최적 항로 평가 시스템 개발에 관한 내용을 다룬다. 예로부터 선장 및 항해사는 경험적으로 기상과 선박 상태를 고려하여 최적의 항로를 선택하여 항해하여 왔다. 이는 선장의 경험을 바탕으로 해류나 파랑에 대한 기상 예보 정보를 활용하여 최적항로를 결정하는 것으로 아직까지 선상에서 항로 결정을 보조해주는 디지털화한 시스템은 그 사례를 찾아보기 힘들다. 본 논문에서는 선박의 운항 효율성과 안전성 관점에서 구성되어 있는 선상 최적 항로 평가 시스템을 소개한다. 효율적인 항해를 위해서는 도착예정시간 및 연료소모량을 최소화 하는 최적 항로를 구한다. 이는 선박의 파랑 중 부가저항에 기초를 둔 선속 저하 및 마력 증가를 고려하여 계산한다. 안전성 관점에서는 3D 판넬법에 기초를 둔 선박의 내항 계산을 본 시스템에서 구현하여 내항 평가를 수행한다. 기본적으로 기상 예보는 본 시스템을 구동하기 위해 우선적으로 준비되어야만 한다.

핵심용어 : 최적 항로 평가, 과도 횡요, 도착예정시간, 선속 저하, 부가 저항, 해양 기상 예보, 내항 성능 예측

ABSTRACT : *This paper treats optimal route assessment system at seaway based on weather forecasting and wave measurement through observation. Since early times, captain & officer have been sailing to select the optimum route considering the weather and ship status condition empirically. However, it is rare to find digitalized onboard route support system whereas weather fax or wave and swell chart are utilized for the officer, based on officer's experience. In this paper, optimal route assessment system which is composed of voyage efficiency and safety component is introduced. Optimum route minimized ETA(estimated time of arrival) and fuel consumption is evaluated for efficient voyage considering speed loss and power increase based on wave added resistance of ship. In the view point of safety, seakeeping prediction is performed based on 3 dimensional panel method. Basically, the weather forecast is assumed to be prepared previously in order to operate this system.*

KEY WORDS : *Optimum navigation route assessment, Parametric roll, ETA, Speed reduction, Power increase, Added resistance, Marine weather forecast, Seakeeping Performance Prediction*

1. 서 론

최적 항로 계획 또는 결정이란 도양(渡洋, Transocean)할 때, 바람, 파도, 해류에 대한 선박의 응답을 적절히 적용하여 최적의 경로를 선택하는 것으로 정의할 수 있는데 선행 연구에서는 Optimum Track Routing, Weather Routing, Optimum Ship Routing 등으로 표현된다(이·김, 2001). 항해하는 선박은 거친 풍파 등의 외란으로 선체, 화물, 인명 및 환경에 큰 피해를 줄 수 있다.

이러한 상황을 줄이고자 선장은 이론 및 경험적 판단에 근거하여 RPM 조절 및 침로를 회피하여 안전 항해를 유도하였다.

본 논문에서는 운항 중 항해 보조 시스템으로서 객관적이고 디지털화된 접근 방법의 최적 항로 평가 시스템을 소개한다. 본 시스템의 역할은 선교에 탑재하여 항해 전 및 항해 중에 항해사의 항해 판단을 객관화하여서 파랑 등의 외란에 의해 야기될 수 있는 운항 선박의 운동 안전성 및 항로의 효율성을 높이는 데 있다(Chen·Cardone, 1998). 안전성 관점에서는 3D 판넬법을 이용하여(전 등, 1998), (Kim·Ha, 2002) 자선의 운동 특성의 포텐셜 값을 DB화해서 제반 내항 성능 계산에 의한 운항 선박의 안전성을 확보하며, 또한 대과고하에서 문치시되는 과도 횡요 현상(Parametric Roll)의 발생 유무도 수치 계산을 통해 판단할 수 있도록 하였다. 운항 효율성 관점에서의 접근

* 대표저자 : 박건일(정회원), gj.park@samsung.com 055)630-5535

**정회원, kyongsoon.choi@samsung.com 055)630-6889

**정회원, jh1225.lee@samsung.com 055)630-5354

**정회원, munsung.@samsung.com 055)630-6536

방법은 운항 시간 및 연료 소모량을 정량적으로 계산하여 최적 항로 결정에 이용하도록 하였다. 이러한 파라미터는 파랑 중 자선의 운동에 의한 선속 저하 및 마력증가량의 영향을 받으며, 부가 저항의 계산 및 자선의 저항, 자항 특성을 이용해서 추정할 수 있다. 선박의 경제성에 대한 항로 계획의 영향을 분석한 연구에 의하면 운영비용(Operational Cost)만을 100%로 고려할 경우 연료 및 윤활유 등의 항해비용(Sailing Cost)이 차지하는 비율이 40%를 차지한다(Meijers, 1980). 본 연구를 통해 운항 선박의 안전성 확보 및 이러한 항해비용을 줄이는데 기여하고자 한다.

2. 최적 항로 평가 시스템 개념

최적 항로 평가 시스템의 개념은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기상회사에서 송신하는 기상 분석 및 예보데이터가 필요하다. 또한, 시스템에 적용되는 운항 선박이 주어졌을 경우 이러한 기상 정보를 이용해서 선박의 내항 성능을 계산하고 선속저하 및 마력 증감을 고려한 ETA 및 연료소모량을 추정한다. 이러한 값들을 추정하기 위해서는 Hull Offset Data 및 자선의 저항, 자항 특성 데이터가 필요하며, 궁극적으로는 선박의 최적 항로 계획 및 평가에 의한 안전성과 효율성이 확보되도록 구성된다.

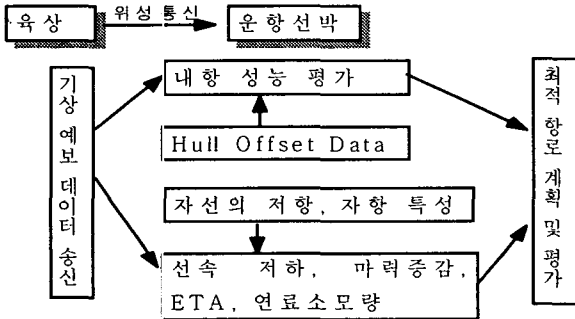


Fig. 1 Configuration of Optimum Navigation Route Assessment System

Fig. 1에서 보는 바와 같이 운항 선박 내에 본 시스템을 탑재하여 항해사의 항해 판단 보조 시스템으로서 그 기능을 수행하도록 하며, 기본적으로 해양 기상 예보 정보는 INMARSAT라는 위성통신 시스템을 이용한다.

육상의 기상회사가 천기도, 파랑도, 등압선도, 표층 기상도 등의 기상 예보 데이터를 INMARSAT 기지국(LES)에 송부하면 선박에서는 INMARSAT 통신 시스템을 이용하여 필요한 시간대별로 접촉한다. Inmarsat-A 혹은 B와 연동된 이메일 서버를 통해 수신된 기상 예보 데이터 파일은 LAN 케이블로 본 시스템 내에 전송 받을 수 있다. 기상 데이터 포맷방식은 기상정보의 유형 및 기상회사별로 상이하다. 본 시스템에서 기상파일에 운용하는 압축 유효리티는 기상데이터의 압축률과 에러를 최소

화한 arq 압축방법을 사용하고 있으며, 파일들의 호출은 일자 형식으로 구성하였으며 GRIB 포맷으로 가공하여 바이너리 파일로 구성되어져 있다. 본 최적 항로 평가 시스템의 경우에도 해양 기상 예보 전송 방식에 있어서 이러한 디지털 전송 방식을 통해 시스템을 구현시켜서 효율성을 높이려고 하고 있다.

내항모니터링 획득방법의 경우 향후, 운항 중에 레이더를 이용하여 실시간으로 파도의 높이, 주기, 방향등의 정보를 획득해서 선박의 운동 안전성을 평가할 수 있도록 할 것이다(Hirayama et al. 2002). 현재의 본 시스템에서 파랑 정보 획득 방법으로는 항해사가 직접 목측(Observation)한 데이터를 입력하는 방법과 기상예보데이터의 정보(Wind, Wave, Swell & Current)를 이용한 인터페이스 획득 방법을 사용한다. 최적 항로 계획에 있어서는 선박의 안전성과 경제적인 측면을 고려하는 것으로서 출발지로부터 목적지까지의 최소 항해 시간, 최소 연료 소모량 및 선박의 내항 계산 항목을 이용하여 항로를 탐색하는 것이다.

본 시스템에서는 이러한 파라미터를 정량적으로 추정하기 위해서 파랑 중에서의 선속 저하, 마력 증가 계산법 및 최적 항로 탐색 기법(5절)을 도입한다.

3. 파랑 정보

본 시스템에 있어서 파랑 정보는 육상에서의 해양 기상 예보의 정보 및 목측(Marine Weather Fax, or Officer Observation)으로 얻는다. 육상에서의 예보 정보에는 풍파(Wind wave) 및 너울(Swell)의 파고, 주기, 방향이 속한다. 그 외에도 바람 및 해류의 방향과 속도의 정보가 추가되어 운동 성능 추정치의 정도를 올릴 수 있다.

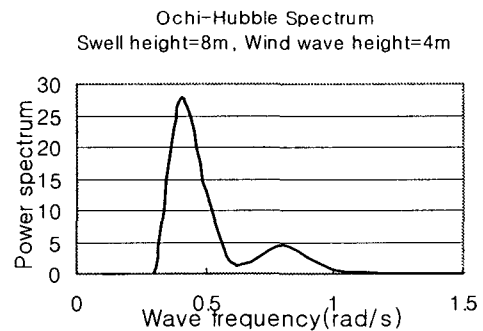


Fig. 2 Ochi-hubble spectrum

본 시스템에는 항해사의 목측으로 얻어진 데이터를 이용하여 데이터를 입력하도록 되어 있지만, 야간의 경우에 있어서는 시야의 제약을 받으므로 레이더의 파랑 계측 시스템을 도입한 정보 획득이 필요하며, 향후 적용할 예정이다.

여기서는 Fig. 2에서 볼 수 있는 풍파와 너울을 함께 나타내는 6 Parameter Ochi-Hubble 스펙트럼 모델을 도입한 것이다(Ochi, 1998). 스펙트럼 식은 다음과 같이 표현된다.

$$S(\omega) = \frac{1}{4} \sum_{j=1,2} \frac{\left(\frac{4\lambda_j+1}{4} \omega_{mj}^4\right)^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \frac{H_{sj}^2}{\omega^{4\lambda_j+1}} e^{-\left(\frac{4\lambda_j+1}{4}\right)\left(\frac{\omega_{mj}}{\omega}\right)^4} \quad (1)$$

여기서,

ω_{mj} : Modal 주기(너울, 풍파)

H_{sj} : 유의파고(너울, 풍파)

$\Gamma(\lambda_j)$: 스펙트럼 형상계수(너울, 풍파)

향후, 파 방향성을 고려한 내항 응답을 계산하기 위해서는 Ochi-Hubble 스펙트럼에서 파 방향을 고려한 3차원 방향 스펙트럼인 10 Parameter식의 도입이 필요하다고 사료된다 (Graham, 1993).

4. 내항 모니터링

내항 모니터링 평가 항목은 슬래밍, 갑판 침수, 프로펠러 레이싱, 파라메트릭 롤, 파랑의 부가 저항, 굽힘 모멘트, 국부 수직, 수평 가속도, Heave, Roll, Pitch, Yaw이다. 이러한 값들은 3D Panel법에 의해 계산되어진 선박 수선하면의 포텐셜 값을 저장하여서 각 항목별 응답을 구하게 된다. 입력된 파랑 정보로부터 진행 중인 침로의 응답상태를 파악 할 수 있을 뿐만 아니라, 0도에서 360도내의 전 구간에서의 응답을 파악하여 최소 응답을 나타내는 선박의 침로(Heading)를 제시해 줄 수 있다. 주요 내항 성능치를 계산하고, 정하여진 내항 성능 Criteria를 초과한 경우에는 해당 항목의 경고를 디스플레이 할 수 있도록 하며, 다수의 운동 성능 평가 항목 중 한 항목에 대해서 자세히 볼 수 있는 기능을 추가하였다. Fig. 3에서 이러한 기능의 화면 구성의 일례를 보여주고 있다.

4.1 내항 성능 예측

내항 모니터링의 주요 항목의 계산 결과는 Fig. 3과 같이 표시된다.

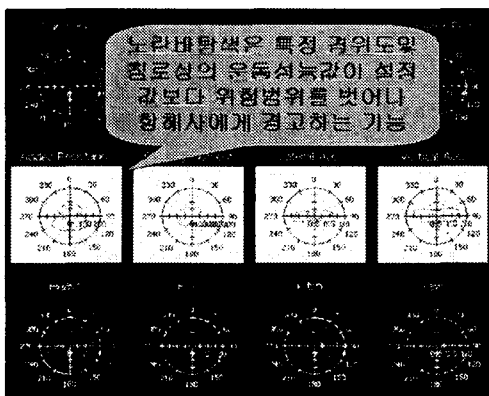


Fig. 3 Seakeeping monitoring

즉, Roll, Pitch, Heave의 기본적인 선박의 운동 성능, 선 수 슬래밍, 갑판 침수, 프로펠러 레이싱의 발생 확률을 계산한다. 그 외에 선체 중앙 부분에서의 굽힘 모멘트 및 선수 가속도의 값들을 모니터링하며, 과도 횡요 운동 추정이 포함된다. 이러한 항목들에 있어서는 기본적으로 실제 운항 선박의 적양하용 Loading Computer로부터 자선의 출수, GM 및 KG 등의 정보를 입력하여 계산하며, 계산 방법은 정교한 3D 판넬법을 통해 운동 계산에 필요한 포텐셜 값을 DB화해서 각종 내항 성능을 선상에서 추정한다.

아울러, 본 시스템을 통해 항해사는 침로 및 선속을 변화시키면서 내항 성능을 예측할 수 있으므로 항로 결정의 가이드 역할을 할 수 있다. 본 연구의 대상선박인 상선 선박 및 컨테이너선형 선박의 상대위험도 D/B를 구축하기 위하여 적용한 내항성능 평가요소는 불규칙한 해상을 항해하는 선박의 운동으로부터 발생하는 평가 값으로서 선급이나 항해 관련 협회에서 제시하고 있는 내항 성능 Criteria와의 비교를 통해 위험 여부를 판단할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 내항성 이론의 설계에의 응용에 수록된 Criteria를 채택하였다(일본운동성능연구위원회, 1994). Table 1에서는 본 시스템에서의 내항 성능 Criteria표를 나타내고 있으며, 사용자의 요구에 따라 한계치(Limiting Value) 값을 변경하여 입력할 수 있도록 한다.

Table 1 Seakeeping Performance Criteria

Response	Location	Criterion	Limiting Value
Slamming	bow	Prob. of occurrence	0.01
Deck Wetness	bow	Prob. of occurrence	0.01
Screw Racing	blade tip	Prob. of occurrence	0.01
Vertical Acc.	FP	RMS	0.215 g
Lateral Acc.	bridge	Significant amplitude	0.2 g
Roll	CG	RMS	6 deg
Pitch	CG	Significant amplitude	3 deg
Heave	LCG	RMS	3 m
Dynamic Bending moment	St. 10 (midship)	Significant amplitude	0.417 Mwx

이러한 내항성능 한계요소의 시스템적 결합은 직렬 결합(serial combination) 구조로서, 한 가지 한계요소만이라도 한계치(Limiting value)를 초과할 경우 선박은 전체 내항성능 기능을 잃어 항해 안전상 위험한 상태에 도달하게 된다. 위험한 상태를 화면상에 표시함으로써 항해사에게 알리고 시물레이션 기능을 채택하였다. Fig. 4에서는 항해사가 시스템 상에서 시물레이션 기능을 활용하여 우측의 침로와 선속의 변경을 통해 각 내항성능 평가요소의 변경된 결과를 확인할 수 있는 화면이다.

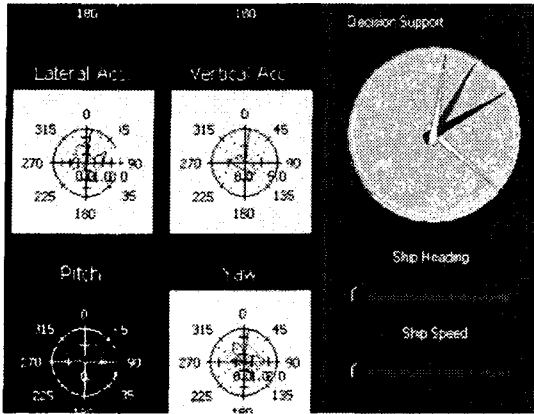


Fig. 4 Simulation through changing of ship heading and speed

Fig. 5에서는 시스템 상에 계획하여 결정한 항로선상의 변침점 (Waypoint)의 구간별 내항성능 지표의 결과를 보여주고 있다. 횡축은 출발한 항구의 첫 변침점이 1이고 도착한 항구의 마지막 변침점이 13이 되는데 변침점은 항해의 구간에 따라서 개수가 증감될 수 있다. 종축은 횡축의 변침점에 따른 10가지 내항성능 항목의 결과를 한계치 100% 기준할 때 계산되어진 결과 값이다.

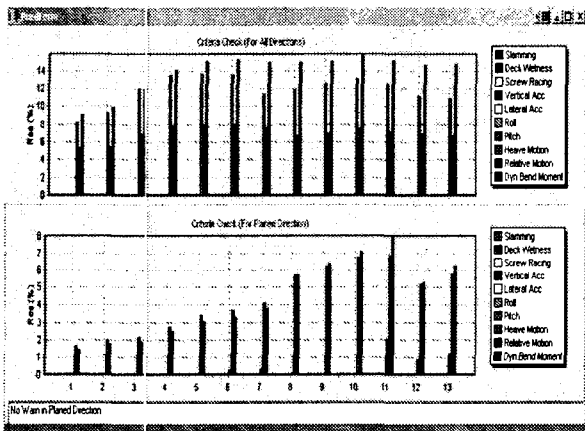


Fig. 5 Seakeeping assesment in Route

Fig. 5의 위 히스토그램은 선박의 항로 지점의 특정 항로선 (Route line)에 관계없이 전 방향에 대한 10가지 내항성능 항목의 최대 결과 값을 계산한 화면이고, 아래의 히스토그램은 항로 지점의 설정된 횡축의 변침점 점로 구간의 진행방향에 대한 종축의 10가지 내항성능 항목의 결과 값을 계산한 화면이다.

4.2 과도 횡요 예측

과도 횡요의 발생 원인은 운항 선박의 선수미부의 형상에 따른 GM 변화량, 횡요 주기 및 입사파 주기의 관계 및 입사파의 파고 및 파장 등의 영향에 기인한다. 본 시스템에서는 이러한 과도 횡요 발생 유무를 판단해주는 기능을 선형 횡요

운동 방정식 알고리즘을 이용해서 추가하였으며 (Francescutto, 2001) 그 구성은 Fig. 6과 같다.

$$(I + A(t))\ddot{\Phi} + B(t)\dot{\Phi} + g\Delta(t)GM(t)\Phi = M(t) \quad (2)$$

여기서,

I는 Roll 관성 모멘트

A(t)는 Roll 부가 모멘트 계수

B(t)는 감쇄 계수

$\Delta(t)$ 는 배수 길량

본 예측에는 앞 절에서 언급한 파랑 정보가 필요하며, 운항 횡수에 해당하는 선박의 부가 질량 계수 및 감쇄 계수의 동유체력 계수를 3D 관법법을 통해서 시스템 내 DB화해서 저장한다. 또한, 시간 변화에 따른 GM값을 추정하기 위해, 저장된 해당 선박의 Hull Offset 데이터로부터 수선면적 및 배수량 변화, 수선면의 관성 모멘트를 계산한다. 선속 및 횡수 조건은 앞 절의 내항 성능 예측을 위한 정보와 동일한 조건을 사용한다.

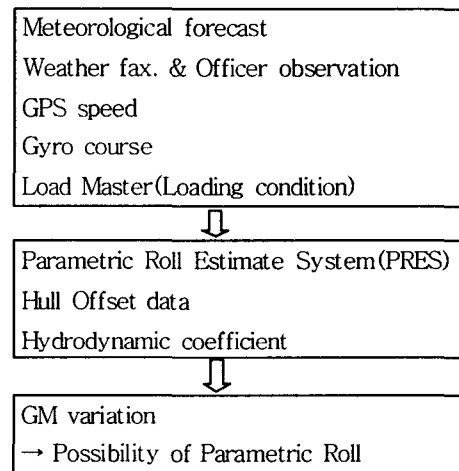


Fig. 6 Configuration of Parametric Roll System

Fig. 7은 추정 알고리즘을 통해 개발된 과도 횡요 (Parametric Roll) 발생 예측 프로그램을 이용하여 7,400TEU를 대상 선박으로 계산하였다. 선속이 12.3kts일때 선수각이 선수파인 가정 하에 주기 및 파고를 갖는 Regular wave로 가정하였으며 각각의 파고 및 주기에 따른 결과를 정리하여 전체 계산 영역에서의 과도 횡요 발생 유무를 판별해주는 차트이다. 횡축은 운항 해역 파랑 주기를 나타내며, 종축은 해당 파고를 의미한다.

이 차트를 통해서 운항 해역의 파고, 주기에 따른 과도 횡요 발생 가능성을 알 수 있고 Critical한 조건에서는 낮은 파고일지라도 unstable 영역이 나타남을 확인할 수 있다.

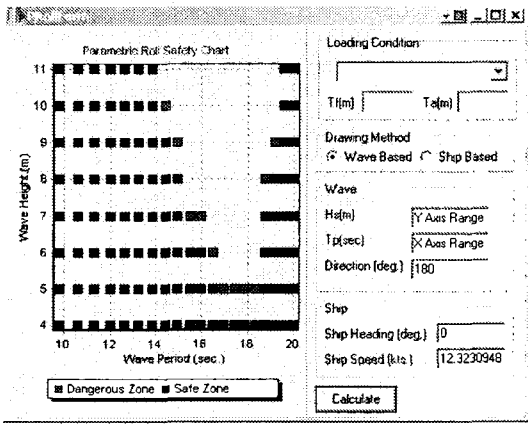


Fig. 7 Parametric Roll Stability Chart

5. 최적 항로 계획 및 평가

대양 항해에 있어서, 선박의 운항 효율을 올리기 위해서는 목적지까지의 항로 선정을 최적화할 필요가 있다. 최적화의 목적함수로서 일반적으로 사용되어지는 파라미터는 운항 시간 및 연료 소모량을 든다. 본 절에서는 이러한 파라미터의 계산법을 선속저하 및 마력증가 추정법과 관련지어 설명하였으며, 최적항로 탐색 기법을 소개한다.

5.1 선속 저하 및 마력 증가 추정

운항 선박의 속도는 파랑, 바람, 해류 등의 외부 환경에 의해 자연 감소되어진다. 이러한 선속저하는 도착예정시간을 변경시키는 요인이 된다. 또한, 이를 만회하기 위해서는 마력을 증가시키게 되는데, 이는 연료 소모량 증가의 직접적인 원인이 된다.

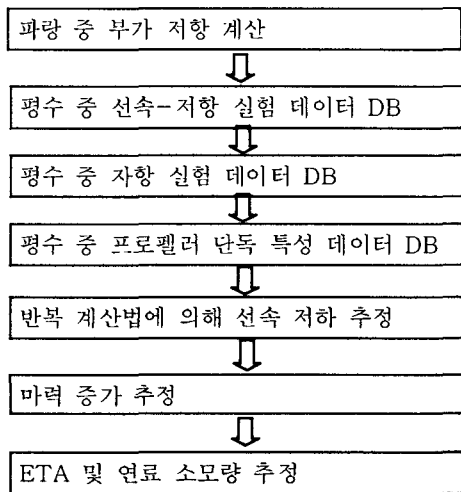


Fig. 8 Flow chart of speed reduction / Power increase estimation

이를 토대로 최소 연료 소모량을 가지게 하는 항로 및 ETA를 추정하여 최적 항로 결정을 보조하도록 한다. 선속 저하 추정을 위한 Flow Chart를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 선속 저하량을 추정하기 위해서 자선의 운동에 의한 부가 저항의 조우파 주파수 특성을 계산할 필요가 있다. 또한, 해당 선박의 저항, 자항 특성 데이터 및 사용 프로펠러의 단독 특성 데이터가 필요하다. 이상의 정보를 토대로 평수 중의 미소 속도 변화에 따른 추력 관계식을 이용한 반복법에 의해 선속 저하량 δV 를 추정할 수 있다 (Nakamura · Naito, 1977).

$$\delta V = \frac{R - R_0 + R_{unw}}{(1 - t_o)(1 - w_o)(P_{tw} + \frac{P_{tn}P_{qw}}{r^2 E_{qm} - P_{qn}})} \quad (3)$$

여기서,

R : 기준 선속 V_0 에 δV 만큼의 선속 변화량이 있을 때의 평수중의 저항

R_0 : V_0 에서의 평수 중 저항

R_{unw} : 선속 $V_0 + \delta V$ 일때의 파랑 중 저항 증가량

P_{tn} , P_{tw} , P_{qn} , P_{qw} : 프로펠러 특성을 나타내는 계수로서 프로펠러 단독 특성의 정보가 있으면 얻을 수 있다.

E_{qm} : 주기관 성능을 나타내는 계수

r : 감속비

t_o : 추력 감소계수

w_o : 반류 계수

선속 저하에 따른 마력 증가량 δP 의 계산법을 아래 식에 나타내었다(Nakamura · Naito, 1977).

$$\delta P = \frac{2\pi}{75} (N_{op}\delta Q_p + Q_{op}\delta N_p + \delta Q_p\delta N_p) \quad (4)$$

여기서,

N_{op} , Q_{op} : 선속 V_0 일때의 평수중 프로펠러 회전수 및 토오크

δQ_p , δN_p : 선속저하에 따른 추력 증가 및 회전수 증가량

Fig. 9와 Fig. 10에서는 위의 알고리즘 및 수식을 이용하여 대상선인 4,250TEU의 선속 각도별 선속 저하량과 마력 증가량을 계산하였다. 조우파 주기는 11초로 하여 최대 저하량은 사파영역인 선속각 120도 부근에서 발생함을 알 수 있으며, 이는 조우파 주기, 파고 및 부가 저항의 조우 주파수 특성의 관계에 의해 발생한다고 볼 수 있다. 동일 조우파 주기 조건에서도 파고를 높게 설정할수록 선속 저하량 및 마력 증가량이 커짐을 파악할 수 있다. 이상의 선속 저하 및 마력 증가 추정량은 항로 계획에 있어서 운항 시간 및 연료 소모량 추정에 이용되어진다. 즉, 파랑에 의한 선속 저하량이 고려된 선속과 항해 거리를 기준으로 운항 시간을 산출하며, 연료 소

모양 또한, 선속 저하량에 따른 마력 증가분을 고려하여 산정하여야 할 것이다.

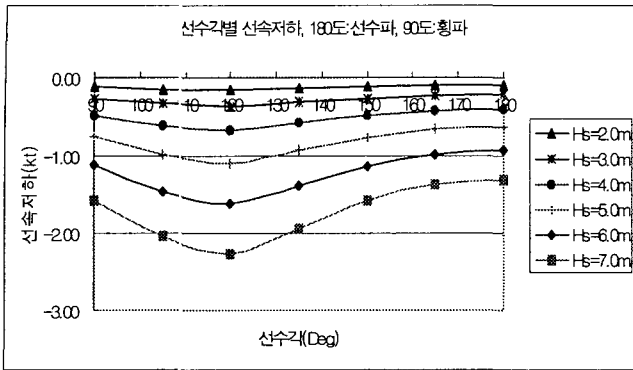


Fig. 9 Speed reduction according to ship heading

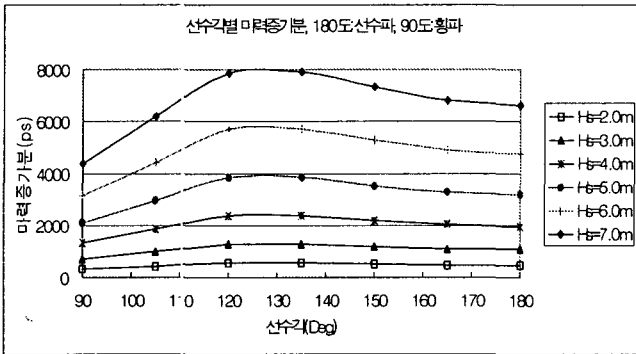


Fig. 10 Power increase according to ship heading

Table. 2에서는 운항선 4,250TEU인 M/V TMM AGUASCALIENTES의 실제 대양에서의 항해 구간동안 일자별 정오의 평균 선속과 선속 저하량을 이용하여 계산된 선속을 비교해서 나타낸 결과이다. 항해구간은 롱비치 P/S to 요코하마 P/S 이고 실선의 평균 선속은 22.72kts이다.

Table 2 Comparison of Ship speed with SHI system speed

From : LONGBEACH To : YOKOHAMA

DATE(UTC)	Position		CO.	Wind		Wave		Swell		Ship Interval Speed	SHI Point Speed	Drifts (m)	
	Lat	Long		dir	B.F	m	dir	Period	m			Fwd	Aft
Nov 17	2042 Dep. Longbeach											9.4	10.4
Nov 18 2100	36.96 N	128.38 W	292	S	4	3.25	315	11.0	3.9	22.04	22.41		
Nov 19 2200	39.77 N	136.70 W	287	NE	7	5	312	10.0	2.6	22.37	22.66		
Nov 20 2300	41.29 N	151.90 W	274	NE	6	3.25	356	9.7	2.8	22.69	22.63		
Nov 21 2300	41.51 N	164.27 W	267	SE	4	1	206	8.6	1.8	23.28	22.73		
Nov 22 2400	40.38 N	171.00 W	260	E	6	3.25	110	9.9	1.7	23.34	22.80		
Nov 24 0100	40.05 N	171.57 E	270	E	4	1	110	10.9	3.6	22.99	22.79		
Nov 25 0200	38.96 N	151.37 E	258	E	6	3.25	69	11.0	2.9	22.82	22.69		
Nov 26 0300	36.73 N	141.03 E	252	N	8	7.5	72	10.6	2.7	22.23	22.39		
Nov 26	2042 Arr. URBEGA									22.72	22.63	9.1	10.4

동일 조건에서 본 시스템에 적용하여 구간별 계산한 평균 선속은 22.63kts이다. 이에 대한 선속 차이는 0.09kts를 나타내며, 이는 기상데이터의 24시간 공급의 간극과 선박 및 화물

의 적재에 관한 바람의 부가저항 및 해류 정보의 증감 등에 기인한다고 본다.

Table 3에서는 113K 탱커선 시운전시 남해앞바다에서의 항해 구간동안 계측된 선속, 마력 증가, 연료소모량 값과 본 계산법을 이용하여 얻은 데이터를 비교해서 나타낸 결과이다. 시운전 선박의 항정은 1마일이었고 기상조건은 파고 3m, 파주기 8s, 파방향은 040° 였다. Table 3에서 보는 바와 같이 시운전 계측의 선속 결과가 시스템 계산의 선속보다 작은 이유는 해류의 역조현상을 받아 침로 200° 로 항해하였기 때문으로 사료된다.

Table 3 Comparison of Sea Trial measurement data with SHI System data

방법	침로 (deg)	선속 (kts)	마력 (ps)	연료소모량 (ton)
시운전 계측	200	14.59	16700	0.1206
시스템 계산	200	15.23	16948	0.1222

이상의 선속 저하 및 마력 증가 추정량은 항로 계획에 있어서 운항 시간 및 연료 소모량 추정에 이용되어진다. 즉, 선속 저하량이 고려된 선속과 항해거리를 기준으로 운항 시간을 산출하며, 연료 소모량 C_{fuel} 또한, 선속 저하량에 따른 마력 증가분을 고려하여 계산되어지며, 아래 식에 나타내었다.

$$C_{fuel} = \alpha * P * T \quad (5)$$

여기서,

α : SFOC(Specific fuel of consumption)로서 기관 연료의 고유 특성치이며 단위 시간 마력당 사용된 연료량

P : 기관 마력으로서 선속 저하에 따른 마력 증가분을 고려한 마력

T : 운항 시간을 나타내며 선속 저하량을 고려한 시간

5.2 최적 항로 탐색 기법

앞서 계산한 선박 운동 예측치, 선속저하를 고려한 도착 예정시간 및 마력증가에 의한 연료소모량을 목적 함수로 하는 최적 항로 탐색 기법을 소개한다. 기본적으로 8 point Dijkstra 및 DP방법(Dynamic Programming)을 통해 최적의 항로를 추정하도록 한다. 먼저 Fig. 11에 전체적인 최적 항로 탐색 기법의 Flow chart를 나타내고 있다. 8 point Dijkstra를 적용하기 위해서는 Map상의 적절한 영역에서 출발지와 목적지를 선택하여 Grid를 생성한 후 각 지점까지의 연료 소모량 및 도착 시각의 초기 탐색 영역 Cost 분포를 구한다. 또한, 초기 탐색 영역 중에서도 최적 항로가 존재 가능한 탐색 영역을 재설정하여 해상도를 2배로 높인 각 지점까지의 Cost를 재계산하여 최적해 탐색을 위한 목적지 방향으로 Stage를 생성하고 분할하는 등고선을 찾는다. 찾아진 등고선의 집합은

앞서의 Grid상의 점이고 해석해에 일치하지가 어려우므로 이 등고선의 집합에서 내분점들을 생성하여서 Node를 세분화한다.

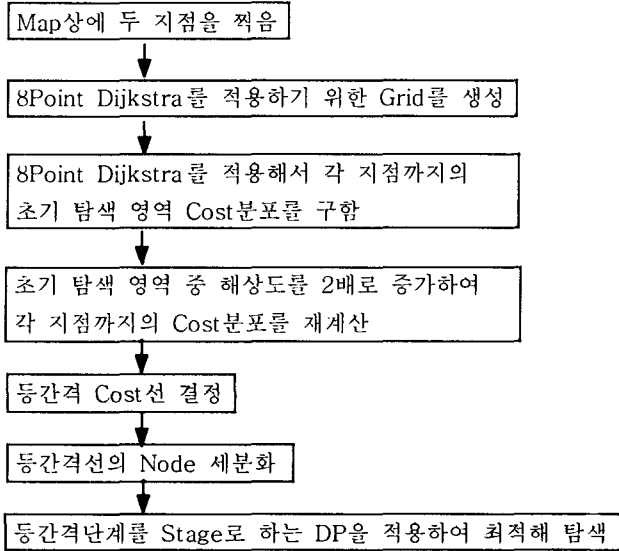


Fig. 11 Flow Chart of Whole Optimum Route Search

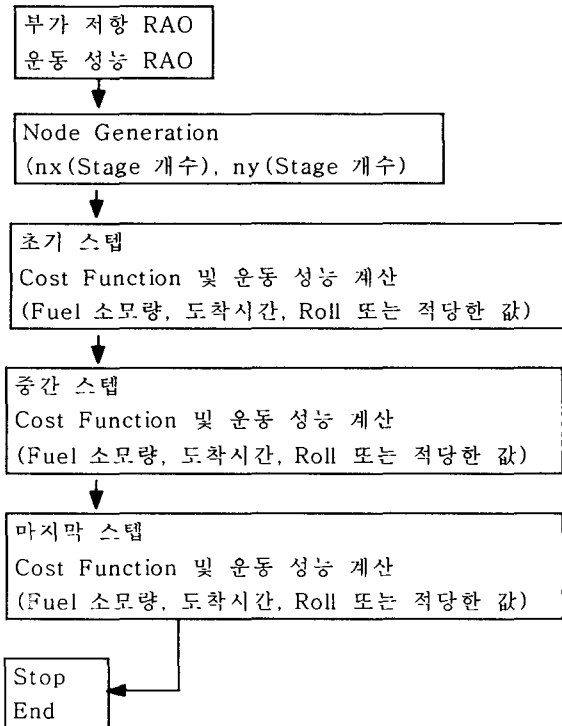


Fig. 12 Flow Chart of Optimum Route Search for DP

이러한 등고선의 거리 수준은 Fig. 12에서와 같은 Dynamic Programming 방법을 적용하기위해 임의의 간격으로 Stage화해서 최적해를 탐색한다. DP법은 최적 항로 탐색 기법으로 널리 사용되어지고 있으며 Multi-stage decision

process로 일컬어진다(Chen, 1978). Dijkstra의 장점은 주위의 Node와의 Link의 개수를 제한함으로써 고속의 탐색이 가능한 장점이 있다. 반면에 단점은 격자의 개수가 제한적이기 때문에 해석적인 최적해와 일치하지 않을 수 있다. DP 방법에서는 Stage로 구별되는 Node의 집합 간에는 Link가 존재하지 않는다. 그리고 최적해는 각 Stage상의 어느 한 점을 지나야 한다. 따라서 앞서의 등고선 간격 수준으로 미리 Stage화 하는 것이 필수적이며 계산시간을 상당히 단축시킬 수 있다. 최적항로의 평가함수는 아래의 식을 사용하였다.

$$F(S) = \oint_S W_0 (1 - \alpha + \alpha \frac{P(\vec{s})}{P_0}) \frac{d\vec{s}}{V(s)} \quad (6)$$

W_0 는 ($W_{time} + W_{fuel} f_c P_0$)로서 시간과 연료에 관한 가중치이고, α 는 연료소모량의 가중 정도로서 $\alpha=0$ 인 경우는 최단시간 경로를 찾는다. 평가함수를 거리의 차원으로 만들기 위해서 다음과 같이 정의하도록 한다.

$$F(S) = \oint_S (1 - \alpha + \alpha \frac{P(\vec{s})}{P_0}) \frac{V_0 d\vec{s}}{V(s)} \quad (7)$$

즉, $\alpha=0.5$ 인 경우, 시간과 연료에 대한 가중치를 갖게 되는 적당한 해가 된다고 볼 수 있다.

5.3 최적 항로 평가 결과

앞 절의 최적 항로 탐색 기법의 유용성을 검증하기 위해서 기상을 활용한 User defined, 대권항로 및 본 기법에 의한 항로별 비교 결과를 제시하고자 한다.

Fig. 13은 특정 기상정보에 대해 항해사가 경험적인 판단에 의하여 선정한 항로(By Officer Path)와 최단항로(Shortest Path) 그리고 최적항로(Optimal Path)의 결과를 비교한 그림이다.

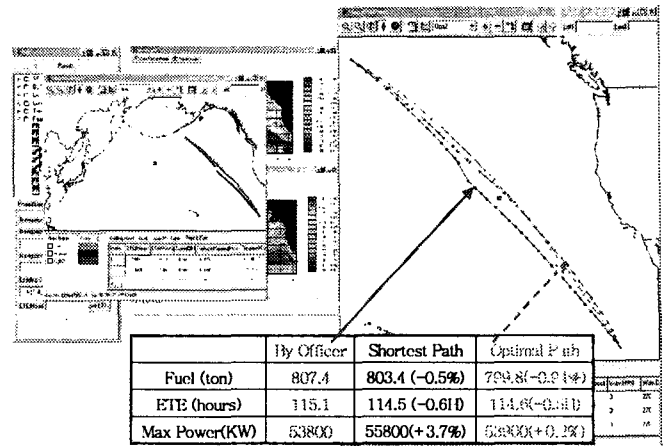


Fig. 13 Result of Three Alternative Routes

최단항로를 이용하는 경우에는 대권항로로서 표기되며 평균 마력이 커지는 것을 볼 수 있다. 반면 최적항로는 대권항로보다 평균마력이 감소한다. 최단항로의 경우에는 최대 소요마력의 증가가 가장 큰 것을 볼 수 있는데 이것은 파랑도상에서 최고점(Peak)를 향해가기 때문이다. 항해사의 경우(By Officer Path)는 이러한 최단항로의 문제를 인지하고 회피를 시도하여서 최대 소요마력의 값이 가장 작으나 이 경우 회피 경로의 거리 증가로 인한 연료소모량의 증가가 발생한다. 최적항로의 경우는 항해사 항로(By Officer Path)와 최단항로의 중간정도의 최대 소요마력을 갖는데 이것은 소요마력증가에 따른 연료소모량과 회피 경로 거리의 증가에 따른 연료소모량 사이의 적절한 최적해를 찾았기 때문이다.

Fig. 14는 User defined에 의한 서향(West bound)으로 항해중인 항로계획의 화면의 일부로서 기상예보 데이터를 이용하여 항해일자 범위를 설정한 후 DB화 되어 있는 항구코드(Port code)의 출발항인 밴쿠버 항에서 도착항인 부산항을 호출한다. 항해사는 날짜별 기상데이터를 호출하여 항로상의 Unimak Pass와 각 변침점을 설정한 후, 계산된 내항성능 평가요소 항목을 확인한다. 항정선에 표시되어 있는 각각의 숫자는 변침점의 번호를 알려준다.

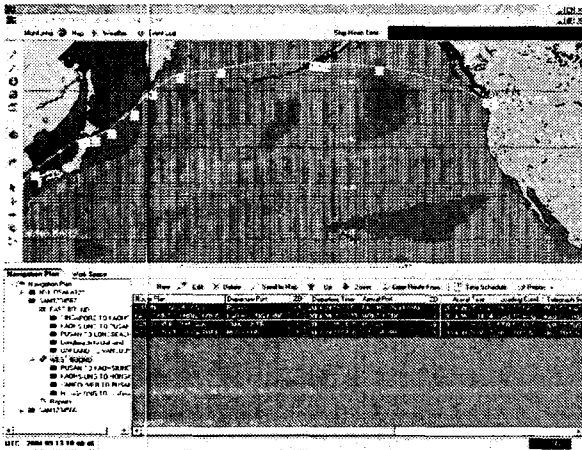


Fig. 14 Result of Optimum Navigation Route Assessment by manual

Fig. 15(a)~(e)는 최적 항해 탐색 기법과 기상데이터를 활용하여 항로 계획을 순서대로 나열한 화면이다. 앞서 설명한 Fig.11과 Fig.12의 항로 탐색 방법을 이용하여 부산에서 출항하여 하와이 도착항까지 자동으로 최적해를 찾아준다. Fig. 15(a)는 출발지와 목적지 사이의 대권항로를 나타내며, Fig. 15(b)는 해당날짜의 기상예보데이터를 호출한 후, 8 Point Dijkstra를 적용하기 위한 Grid를 생성한 화면이다. Fig. 15(c)는 각 지점까지의 Cost 분포를 재계산하여 등간격 Cost 선을 결정한 후, DP법을 적용하여 최적 항로를 구한 결과이다. 화면에서 보는 바와 같이 일본 사이로 항정선이 계획된 것을 볼 수 있으나 실제 운항하는 선박은 본 항정선을 따르지 않기 때문에 실제 항로를 생성하기 위해 Fig. 15(d)와 같이 갑문지역 및 쓰가루 해협과 같은 장애물 지역 혹은 위험지역

을 설정한다. 시스템 상에서는 위험지역 혹은 장애물 지역을 인식하여 등간격 Cost선과 Node 세분화 및 DP를 적용한 최적해 탐색을 통해 Fig. 15(e)와 같이 Map상에 큐슈 서남단 군도 지역으로 최적항로를 설정한 화면이다.

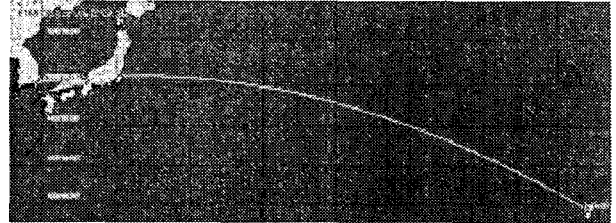


Fig. 15(a) Result of Optimum Navigation Route Search

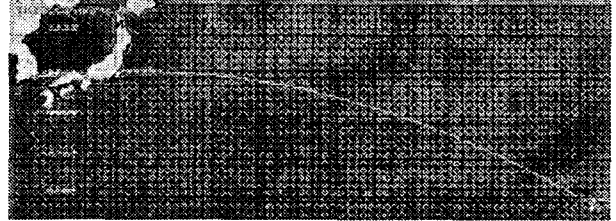


Fig. 15(b) Result of Optimum Navigation Route Search

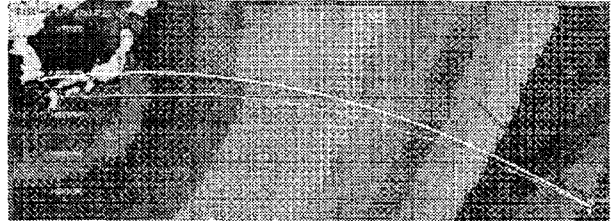


Fig. 15(c) Result of Optimum Navigation Route Search



Fig. 15(d) Result of Optimum Navigation Route Search

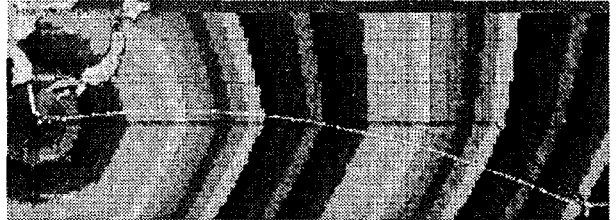


Fig. 15(e) Result of Optimum Navigation Route Search

6. 항해 계획 내용 출력

이상과 같이 시스템을 구현하면서 항로의 계획상 결정된 항해 정보들이 형식화된 문서로 자동으로 출력하는 기능을 추가하였다.

SORAS Passage Plan Report

Voyage No. 444		Prepared by J. C.	
Date 1998. 11. 11		Reviewed by J. C.	
App. date by C. 1998. 11. 11			

Navigation Plan Summary	
Voyage No.	444
Date	1998. 11. 11

Bounds Information				
Bound name	1234	ETG	Actual Port	ETA
1234	1234	(100.000000)	LA	(100.000000)
1234	1234	10.000000	13.300000	13.300000

Route Information	
Route No.	1234
Start	1234
End	1234

Route Plan Summary	
Route No.	1234
Date	1998. 11. 11

Waypoint Information	
Waypoint No.	1234
Name	1234
Lat	12.34
Long	100.00

Fig. 16 Summary of Passage plan

항로계획의 수립은 IMO에서 채택한 Voyage & Passage planning을 모든 선박에 적용하게 되며 항해 전 항해계획을 수립하여야 한다(IMO RESOLUTION A. 893 (21)). 이것은 보고서 기능으로 계획된 항해 내용을 선상에서 보고서 형태로 출력하도록 하여 항해 보고 자료 및 Back up 자료로 활용 가능하다. Fig.16은 IMO에서 채택한 항해계획에 필수적인 항목을 나열하여 정형화한 Route Passage Plan의 보고서 양식이다. Summary의 구성은 Navigation Plan Summary, Bound Plan Summary, Route Plan Summary이다. 이와 별도로 항로의 기상에 관한 보고서 및 내항 성능 보고서의 기능을 추가하였으나 본 논문에는 생략하였다.

7. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 선상 운항 보조 시스템으로서의 최적 항로 평가 시스템을 개발하였으며, 그 구성으로서 안전성 관점에서는 기상 예보 및 목적 데이터를 이용한 내항성 평가, 과도 횡요 예측 (Parametric Roll)을 수행하도록 하였으며, 효율성 관점에서는 파랑 중 선속 저하, 마력 증가 산정을 통한 도착 예정 시간 및 연료 소모량을 추정하도록 하였다.

둘째, 4,250TEU 컨테이너선의 대양 항해 기록 결과와 기상 예보 데이터를 근거로 한 본 알고리즘의 선속 저하 값을 도출하여 비교한 결과, 실적선과의 평균 선속 차이는 0.09kts로서 근접한 결과를 유추할 수 있었다. 또한, 113K 탱커선의 시스템 계산법을 통한 선속, 기관 마력값 및 연료 소모량을 시운전 계측 값과 비교한 결과 근접한 결과를 도출하였다.

마지막으로, 최적 항로 탐색 기법을 통해 시스템에서 계산되어진 최적항로는 항해사의 계획 항로 및 대권항로와 비교해서 연료소모량의 절감 및 항해시간 단축의 결과를 보였다.

향후 과제

향후, 해류 및 바람에 의한 부가저항을 추가하여 선속 저하 계산법을 확립해야 할 것이며, 선상 탑재에 의한 선속간 기상 예보 정보의 송수신을 통한 항로 계획 및 평가가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이진호, 박건일, 최경순, 김문성, 방창선(2004), 운항 선박의 안전 및 효율성 향상을 위한 최적 내항 시스템 개발, 대한조선학회 춘계학술대회 논문집(2), pp. 1284-1289
- [2] 이희용, 김시화(2001), 네트워크 모형화에 의한 최적 항로 결정, 한국항해학회지, 제25권, 제3호, pp.211-223
- [3] 전호환, 김문성, 주영렬, 이진호, 이명휘(1998), 내항 성능과 속도 성능이 우수한 고속 연안 여객 소수선면 쌍동 선형 개발, 대한조선학회지, 제35권, 제4호, pp. 87-97
- [4] 日本 運動性能 研究委員會 (1994), "耐航性 理論의 設計의 應用", "第11回 シンポジウム", pp. 77-80
- [5] Annex to IMO RESOLUTION A.893 (21) Guidelines for Voyage Planning
- [6] Chen, H. (1978), "A Stochastic Dynamic Program for Minimum Cost Ship Route", Ph. D Thesis, Department of Ocean Engineering, MIT
- [7] Chen, Henry and Cardone, V.J. (1998), "Use of Operation Support Information System to Increase Ship Safety and Efficiency". SNAME Transaction, Vol. 106, pp. 105-127
- [8] Francescutto, Alberto (2001), "An Experimental Investigation of Parametric Rolling in Head Waves", J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 123, pp. 65-69
- [9] Graham, R. and B. A. Juszko (1993), "Parameterization of Directional Spectra and Its Influence on Ship Motion Prediction". Journal of Ship Research, Vol. 137 No. 2 pp. 138-147
- [10] Hirayama, T., Park, S.G., Hirakawa, Y and Takayama, T. (2002), "Development of a Wave Field Detector using the Marine Radar and Measured Example". J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 191, pp. 51-56
- [11] J.H.C. Meijers (1980), "Part 2 Some Economical Aspects of the Routing of Ships" Transaction IME, Conference on Operation of Ships in Rough

Weather, pp. 12–21

- [12] Kim, M. S. and Ha, M. K. (2002), "Prediction of Motion Response between Two Offshore Floating Structures in Waves", *J. of Ship and Ocean Technology*, Vol. 6, pp. 13–25
- [13] Nakamura, S. and Naito, S. (1977), "Nominal Speed Loss and Propulsive Performance of a Ship in Waves", *Journ. of the Society of Naval Architects of Kansai*, Vol.166, pp. 25–34
- [14] Ochi, Michel K. (1998), "Ocean waves". Cambridge university press, New York