

기상 예보 및 내항성능을 고려한 최적 항로 평가 시스템의 도입

박건일* · 최경순** · 이진호** · 김문성**

*, ** 삼성중공업 기제조선소 조선해양연구소

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

Gun-il Park* · Kyong-Soon Choi** · Jin-Ho Lee** · Mun-Sung Kim**

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

요약 : 본 논문은 기상 예보 및 목측 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 디지털화된 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, 파도 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 : ptimum 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 추정하여 안전하고 경제적인 경로를 선택하는 것으로 정의할 수 있는데 선항 연구에서는 Optimum Track Routing, Weather Routing, Optimum Ship Routing 등으로 표현된다(이·김, 2001). 선박의 항해중에 종종 거친 풍파 등의 외란으로 인하여 선체, 화물 및 인명에 큰 피해를 입을 수 있다.

이러한 경우의 발생을 줄이고자 선장은 이론 및 경험적 판단에 근거하여 RPM 조절 및 침로를 회두하여 안전 항해를 도모하게 되는데, 이러한 항해 계획의 정량적 평가가 이루어

지지 못하였고, 시간에 따라 변화하는 기상을 충분히 고려하기 어려웠다.

본 논문에서는 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 높이고자, 저자들이 개발한 시스템을 소개하고자 한다. 이러한 시스템은 1970년대부터 거론되었으나 기상예보와 위성통신 및 전산기의 한계로 현실화되지 못하다가 1990년대 후반부터 다시 주목받기 시작하게 된다.(Chen · Cardone, 1998).

저자들이 개발한 시스템에서는 기존의 시스템들과는 달리, 3D 판넬법(전 등, 1998), (Kim · Ha, 2002)을 이용한 내항 성능 계산 결과로 선박의 운항 안전성을 평가하며, 또한 대파고

* 대표저자 : 박건일(정회원), gi.park@samsung.com 055)630-5535
** 정회원, kyongsoon.choi@samsung.com 055)630-6893
** 정회원, jh1225.lee@samsung.com 055)630-5354
** 정회원, munsung.kim@samsung.com 055)630-6536

하에서 문제시되는 과도 횡요 현상(Parametric Roll)의 발생 유무도 수치 계산을 통해 판단할 수 있도록 하였다. 운항 효율성 관점에서는 운항 시간 및 연료 소모량을 정량적으로 계산하여 최적 항로 결정에 이용하도록 하였다. 운항 시간 및 연료 소모량의 추정과정에서는 파랑 중 자선의 운동에 의한 선속 저하 및 마력증가를 고려하여, 부가 저항의 계산 및 자선의 저항, 자항 특성을 이용하도록 설계하였다. 선박의 경제성에 대한 항로 계획의 영향을 분석한 연구에 의하면 운영비용(Operational Cost)중 연료 및 윤활유 등의 항해비용(Sailing Cost)이 차지하는 비율이 40%를 차지하게 된다.(Meijers, 1980). 저자들의 시스템에서는 운항 선박의 안전성 확보 및 이러한 항해비용을 줄이고자, 최적화 기법을 적용하여 시간과 연료소모량을 동시에 고려한 최적 항로를 제시하도록 하였고, 선장의 항해 계획 수립을 지원하도록 하였다. 또한 실시간 기상정보를 이용한 내항성능 추정 기능을 제공함으로써 항해자의 의사결정을 지원하도록 하였다.

2. 최적 항로 평가 시스템 개념

최적 항로 평가 시스템의 개념은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기상회사에서 송신하는 기상 분석 및 예보데이터를 이용하여 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 필요하다.

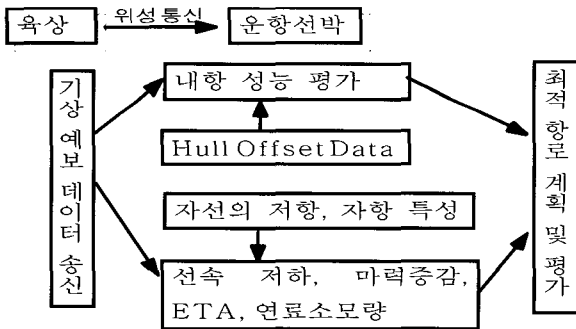


Fig. 1 Configuration of Optimum Navigation Route Assessment System

Fig. 1에서 보는 바와 같이 운항 선박 내에 본 시스템을 탑재하여 항해사의 항해 판단 보조 시스템으로서 그 기능을 수행하는 것을 목표로 설계하였는데, 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.

실시간 의사결정 지원 기능에서는, 향후, 운항 중에 레이더를 이용하여 실시간으로 파도의 높이, 주기, 방향등의 정보를 획득해서 선박의 운동 안전성을 평가할 수 있도록 할 것이다(Hirayama et al. 2002). 현재까지 개발된 시스템에서는 파랑 정보 획득 방법으로는 항해사가 직접 목측(Observation)한 데이터를 입력하는 방법과 기상예보데이터의 정보(Wind, Wave, Swell & Current)를 이용한 방법을 사용할 수 있다. 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 최적항로 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 유의파고, 주기, 방향과 바람 및 해류의 방향과 속도가 포함되며 이러한 정보를 바탕으로 파랑스펙트럼을 정의하여 계산에 사용하게 된다.

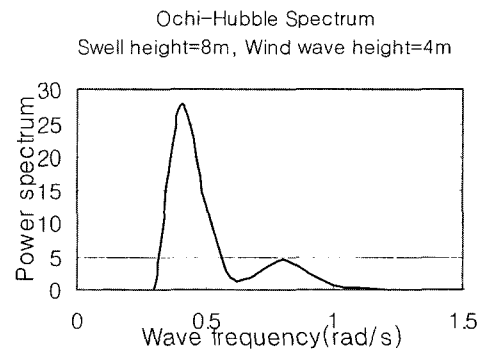


Fig. 2 Ochi-hubble spectrum

또한 본 시스템에는 항해사의 목측으로 얻어진 데이터도 사용할 수 있는데, 야간의 경우에 있어서는 시야의 제약을 받으므로 레이더의 파랑 계측 시스템을 도입한 정보 획득이 필요하며, 향후 적용할 예정이다.

Fig. 2는 전형적인 풍파와 너울을 함께 나타내는 6 Parameter Ochi-Hubble 스펙트럼을 나타낸 것이다.(Ochi, 1998). 스펙트럼 식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서,

- ω_{mj} : Modal주기(너울, 풍파)
- H_{sj} : 유의파고(너울, 풍파)
- λ_j : 스펙트럼 형상 파라미터($i=1,2$)
- $\Gamma(\lambda_j)$: Γ 함수

향후, 파 방향성을 고려한 내항 응답을 계산하기 위해서는 상기 Ochi-Hubble 스펙트럼을 응용한 10 Parameter의 방향 스펙트럼파의 도입이 필요하다고 사료된다(Graham, 1993).

4. 운항 안전성의 평가

운항 안전성 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 계산된다. 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 하였다. Fig. 3에서 이러한 기능의 화면 구성의 일례를 보여주고 있다.

4.1 내항 성능 예측

운항 안전성 평가의 주요 항목의 계산 결과는 Fig. 3과 같이 표시된다.

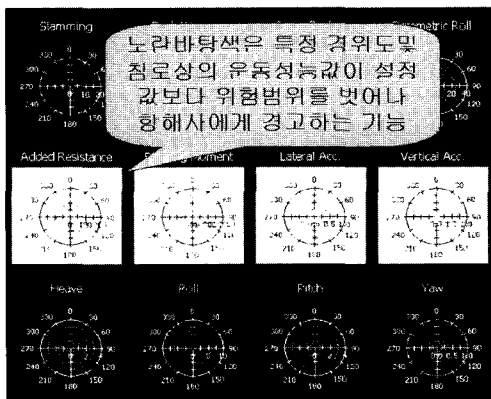


Fig. 3 Seakeeping monitoring

이러한 항목들에 있어서는 기본적으로 실제 운항 선박의 적양하용 Loading Computer로부터 자선의 흘수, 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 논문에서는 “내항성 이론의 설계에의

응용”(일본운동성능연구위원회, 1994)등에 수록된 내항 성능 Criteria를 참고하여 운항안전성을 평가하도록 하였고 이러한 Criteria는 사용자에게 의해서 재설정될 수 있도록 하였다. Table 1에서는 본 시스템에서의 내항 성능 Criteria의 초기값을 나타낸다.

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

Fig. 4에서는 항해사가 시스템 상에서 시뮬레이션 기능을 활용하여 우측의 침로와 선속의 변경을 통해 각 내항성능 평가요소의 변경된 결과를 확인할 수 있도록 구성한 결과를 예시하고 있다.

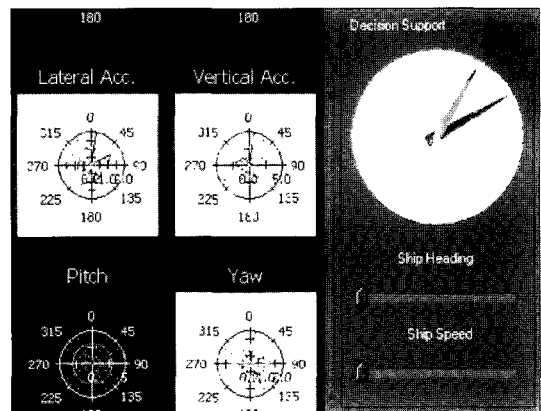


Fig. 4 Simulation through changing of ship heading and speed

Fig. 5에서는 시스템 상에 계획하여 결정된 항로선상의 변침점(Waypoint)의 구간별 내항성능 지표의 결과를 보여주고 있다. 횡축은 구간번호이고 종축은 횡축의 변침점에 대해 10가지 내항성능 항목의 한계치 100%를 기준으로 하여 계산되어진 결과 값이다. 이것을 통해서 항해사는 각 구간별 위험성

을 파악할 수 있고 이에 따른 항해 계획 및 운항중의 기상변화에 따른 대응을 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

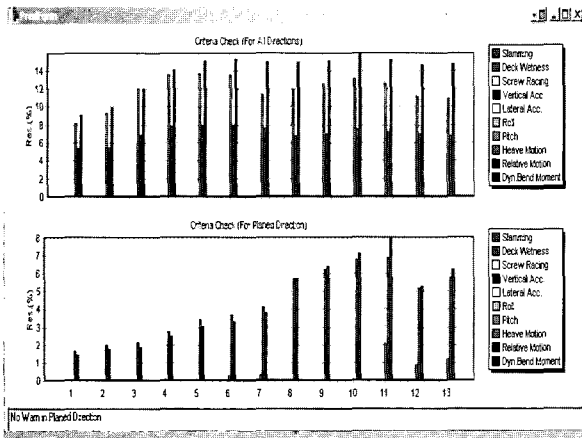


Fig. 5 Seakeeping assesment in Route

4.2 과도 횡요 예측

과도 횡요의 발생 유무는 운항 선박의 선수미부의 형상에 따른 GM 변화량, 횡요 주기 및 입사파 주기의 관계 및 입사파의 파고 및 파장 등의 영향에 따라 달리 나타난다. 본 시스템에서는 이러한 과도 횡요 발생 유무를 판단하기 위하여 아래의 선형 횡요 운동 방정식 (Francescutto, 2001)을 이용한 수치시뮬레이션을 수행하도록 하였고, 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,

Φ : 횡요각

I : Roll관성 모멘트

$A(t)$: Roll부가모멘트 계수

$B(t)$: 감쇄 계수

$\Delta(t)$: 배수 질량

$M(t)$: 횡요모멘트

본 예측에는 앞 절에서 언급한 파랑 정보가 필요하며, 운항 흘수에 해당하는 선박의 부가 질량 계수 및 감쇄 계수의 동유체력 계수는 3D 판별법을 이용한 계산 결과를 사용한다. 또한, 시간 변화에 따른 GM값을 추정하기 위해, 저장된 해당 선박의 Hull Offset 데이터로부터 수선면적 및 배수량 변화, 수선면의 관성 모멘트를 계산한다. 선속 및 흘수는 앞 절의 내항 성능 예측에 사용한 정보와 동일한 조건을 사용한다.

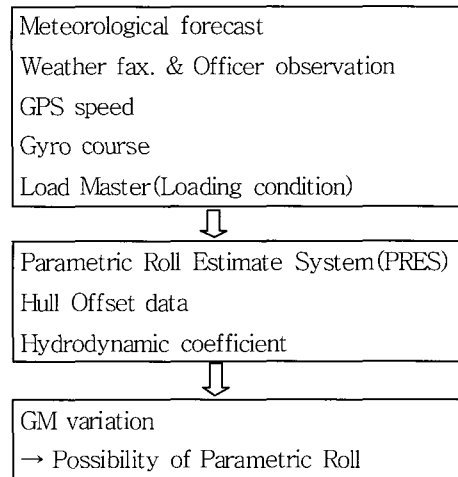


Fig. 6 Configuration of Parametric Roll System

Fig. 7은 추정 알고리즘을 통해 개발된 과도 횡요 (Parametric Roll) 발생 예측 프로그램을 이용하여 7,400TEU를 대상 선박으로 계산한 결과를 나타낸다. 선속이 12.3kts일 때 선수각이 선수파인 규칙파로 가정하였으며 각각의 파고 및 주기에 따른 계산 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 특정 조건에서는 낮은 파고일지라도 불안정 영역이 나타남을 확인할 수 있다.

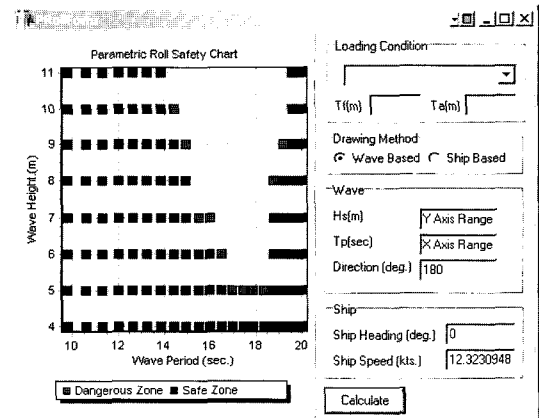


Fig. 7 Parametric Roll Stability Chart

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 소모량이다. 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 속도의 저하는 파랑, 바람, 해류 등의 외부 환경에 의해 나타나며, 이러한 선속저하는 도착예정시간을 변경시키는 요인이 된다. 또한, 이를 만회하기 위해서는 마력을 증가시키게 되는데, 이는 연료 소모량 증가의 직접적인 원인이 된다.

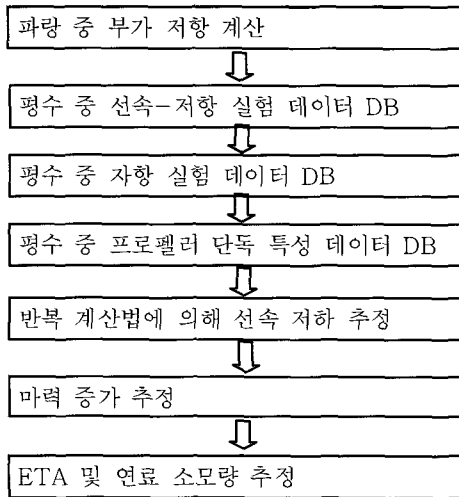


Fig. 8 Flow chart of speed reduction / Power increase estimation

선속 저하 추정을 위한 Flow Chart를 Fig. 8에 나타내었으며, 이를 토대로 최소 연료 소모량을 가지게 하는 항로 및 ETA를 추정하여 최적 항로 결정을 보조하도록 한다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 선속 저하량을 추정하기 위해서 자선의 운동에 의한 부가 저항의 조우파 주파수 특성을 계산할 필요가 있다. 또한, 해당 선박의 저항, 저항 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).

$$\delta V = \frac{R - R_o + R_{aw}}{(1 - t_o)(1 - w_o)(P_{tw} + \frac{P_{tm}P_{qv}}{r^2 E_{qm} - P_{qn}})} \quad (3)$$

여기서,

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

R_o : V_o 에서의 평수 중 저항

R_{aw} : 선속 $V_o + \delta V$ 일때의 파랑 중 저항 증가량

$P_{tw}, P_{tm}, P_{qv}, P_{qn}$: 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_o 일때의 평수중 프로펠러 회전수 및 토크

$\delta Q_p, \delta N_p$: 선속저하에 따른 추력 증가 및 회전수 증가량

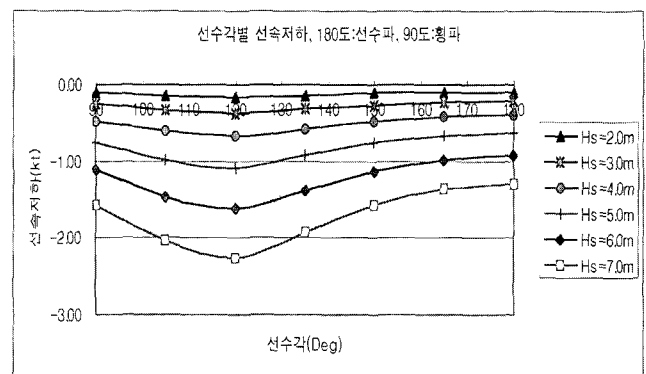


Fig. 9 Speed reduction according to ship heading

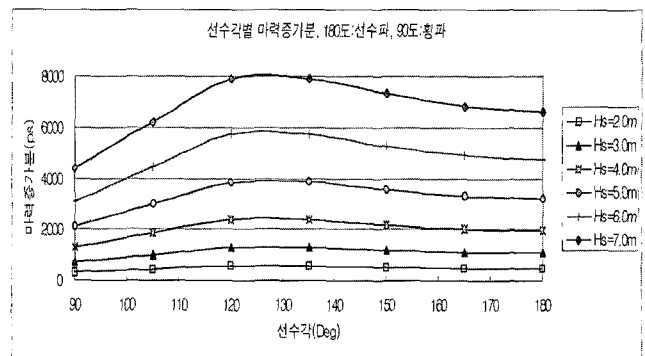


Fig. 10 Power increase according to ship heading

Fig. 9와 Fig. 10에서는 위의 Fig. 8의 알고리즘 및 수식(3), (4)를 이용하여 대상선인 4,250TEU의 선수 각도별 선속 저하량과 마력 증가량을 계산한 결과이다. 조우파 주기를 11초로 할 때 최대 저하량은 사과영역인 선수각 120도 부근에서 발생함을 알 수 있으며, 이는 부가 저항의 최대값을 나타내는 주파수가 항주 선박과 파랑의 조우파 주기와 일치함에 따른 영향으로 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 기준

으로 운항 시간을 산출하며, 연료 소모량 또한, 선속 저하량에 따른 마력 증가분을 고려하여 산정하여야 할 것이다.

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

Table 2 Comparison of Ship speed with SHI system speed
From : LONGBEACH To : YOKOHAMA

DATE(UTC)	Position		CO.	Wfnd			Wave			Swell			Ship Interval Speed	SHI Point Speed	Drafts (m)	
	Lat	Long		(deg)	dir	B.F	m	dir	Period	m	Fwd	Aft				
Nov 17	2042 Dep. Longbeach															
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	139.70 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	22.88	22.63					
Nov 21 2300	41.51 N	164.27 W	267	SE	4	1	205	8.6	1.8	23.28	22.73					
Nov 22 2400	40.39 N	177.00 W	260	E	6	3.25	110	9.9	1.7	23.34	22.80					
Nov 24 0100	40.05 N	170.57 E	270	E	4	1	110	10.9	3.6	22.99	22.79					
Nov 25 0200	38.96 N	158.37 E	258	E	6	3.25	69	11.0	2.9	22.82	22.60					
Nov 26 0300	36.73 N	147.03 E	252	N	8	7.5	72	10.6	2.7	22.23	22.39					
Nov 26	2042 Arr. URAGA									22.72	22.63	9.1	10.4			

동일 조건을 본 시스템에 적용하여 구간별 계산한 평균 선속은 22.63kts로서 선속 차이는 0.09kts를 나타내며, 이는 기상 데이터 공급의 빈도와 선박 및 화물의 적재에 따른 바람의 부가저항 변화 및 해류 정보의 제공 빈도 등에 기인한다고 본다.

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

	Load	Course	Speed(kts)	R.P.M	BHP(Kw)	Fuel (t)
Sea Trial	90%	200°	14.59	105.04	12282	2.086
	90%	20°	14.83	105.04	13386	2.156
	100%	200°	15.01	109.1	13974	2.309
	100%	20°	15.75	108.1	14562	2.382
SORAS Estimation	90%	200°	14.77	105.04	12608	2.057
	90%	20°	15.01	105.04	13292	2.188
	100%	200°	14.83	109.1	14121	2.334
	100%	20°	15.57	108.1	14731	2.457

Table 3은 113K 탱커선 시운전시 남해 앞바다에서의 항해 구간동안 계측된 선속, 마력 증가, 연료소모량 값과 본 계산법을 이용하여 얻은 데이터를 비교해서 나타낸 결과이다. 시운전 선박의 항정은 1마일이었고 기상조건은 파고 2.5-3m, 파주기 6-8s, 파 방향은 20°-30°였다.

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.

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

여기서,

f_c : SFOC(Specific fuel of consumption)로서 기관 연료의 고

유 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 도착예정시간 및 마력증가에 의한 연료소모량을 목적 함수로 하는 최적 항로 탐색 기법을 소개한다. 기본적으로 8 point 다익스트라(Dijkstra) 및 DP방법(Dynamic Programming)을 통해 최적의 항로를 추정하도록 한다. 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘은 경우점이 있는 경우에 한 지점에서 다른 지점으로 이동하는 최단 경로를 찾는 데 적용할 수 있다.

Fig. 11은 전체적인 최적 항로 탐색 기법의 Flow chart를 나타내고 있다. 8 point 다익스트라(Dijkstra)를 적용하기 위해서는 Map상의 적절한 영역에서 출발지와 목적지를 선택하여 격자를 생성한 후 각 지점까지의 연료 소모량 및 도착 시각의 초기 탐색 영역에 대한 Cost 분포를 구한다. 또한, 초기 탐색 영역 중에서도 최적 항로가 존재 가능한 탐색 영역을 재설정하여 해상도를 2배로 높인 후 각 지점까지의 Cost를 재계산하였으며, 최적해 탐색을 위하여 목적지 방향으로 출발점으로부터의 등거리에 위치하는 Node를 집합으로 하는 Stage를 일정 거리수준마다 생성한다. 즉 Stage는 출발점으로부터 같은 거리만큼 떨어진 Node들의 집합이 되는데 Node들은 앞서의 격자상의 점이고 해석해에 일치하기가 어려우므로 이 등간격의 집합에서 내분점들을 생성하여서 Node의 수를 충분히 증가시킨다.

이렇게 정의된 각각의 Stage간에 Link를 생성하고 여기에 Fig. 12에서와 같은 Dynamic Programming 방법을 적용한다. DP법은 최적 항로 탐색 기법으로 널리 사용되어지고 있으며 Multi-stage decision process로 일컬어진다(Chen, 1978).

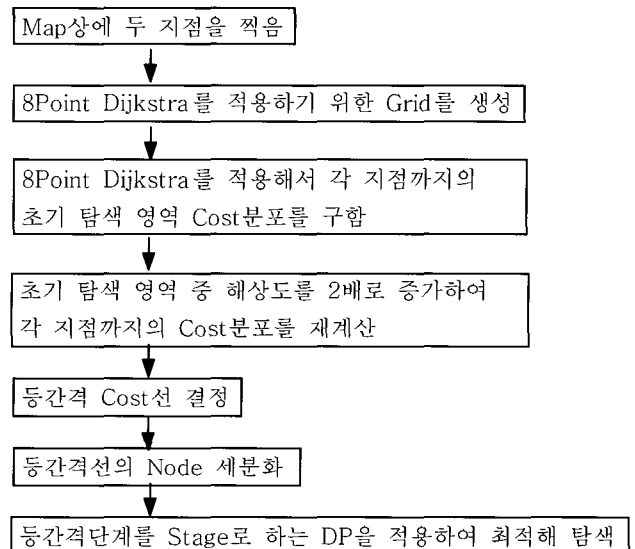


Fig. 11 Flow Chart of Whole Optimum Route Search

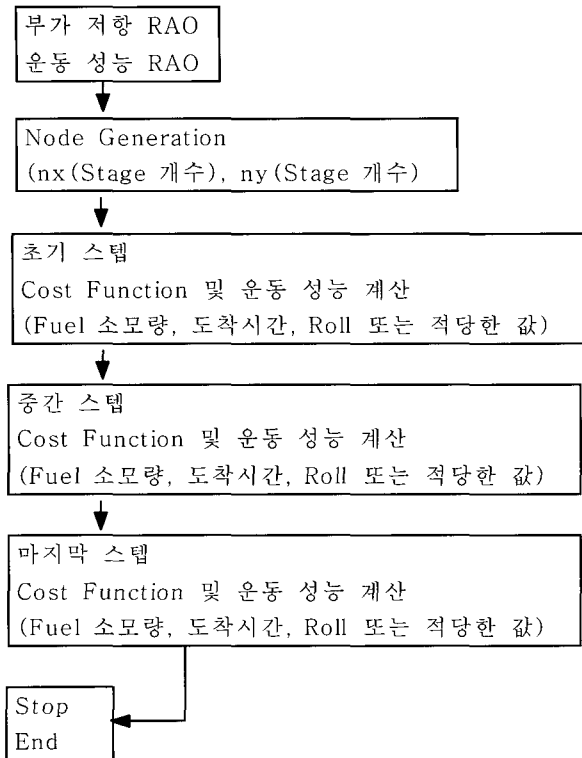


Fig. 12 Flow Chart of Optimum Route Search for DP

다익스트라(Dijkstra)의 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 등간격 수준으로 미리 Stage화 하는 것이 필수적이며 계산시간을 상당히 단축시킬 수 있다. 최적항로의 평가함수는 아래의 식을 사용하였다.

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

여기서,

$F(S)$: 운항경로 S의 평가함수

s : 운항경로

P : 소요마력 (BHP)

P_0 : 정수중설계속도에서의 소요마력

V : 속도

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.

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

항해사는 α 를 통해서 시간과 연료소모량의 가중정도를 결정할 수 있는데, 선박 고유의 운항 경비 분석 자료를 이용하는 데 필요하다.

5.3 최적 항로 평가 결과

앞 절의 최적 항로 탐색 기법의 유용성을 검증하기 위해서 항해사에 의해 계획된 항로, 대권항로 및 본 최적화기법에 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.

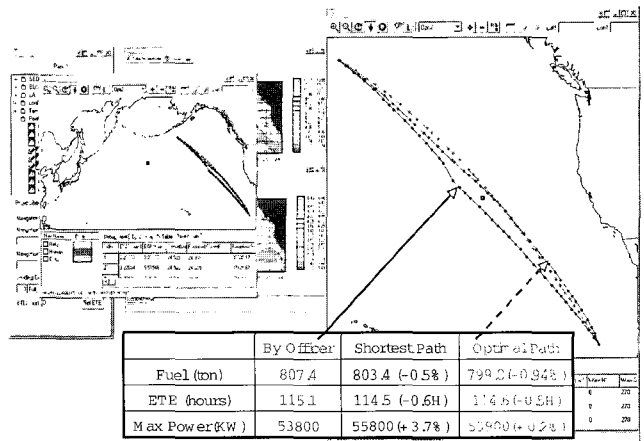


Fig. 13 Result of Three Alternative Routes

최단항로를 이용하는 경우에는 대권항로로서 표기되며 평균마력이 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)을 향해하기 때문이다. 항해사의 경우(By Officer Path)는 이러한 최단항로의 문제를 인지하고 회피를 시도하여서 최대 소요마력의 값이 가장 작으나 이 경우 회피경로의 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.

최적화 기법을 사용하지 않더라도 본 시스템의 항로의 운항성능 및 안전성 평가 기능을 적용하여, 수정과 평가를 반복하므로써 적절한 성능을 갖는 항해 계획을 수립할 수도 있다. Fig. 14는 항해사에 의해 작성된 서향(West bound) 항해중인 항로계획의 화면의 일부이다. 항해사는 출항항인 밴쿠버 항과 도착항인 부산항을 설정하고, 항해일자 범위를 설정한 후, 기

상 예보 데이터를 참조하여, 항로상의 Unimak Pass와 각 변침점을 설정한 후, 도착 예상 시각 및 연료소모량을 추정하고 된 내항성능 평가요소 항목을 확인한다. 만약 안전에 문제가 있는 것으로 추정되는 경유구간이 있는 경우에는 시스템의 사용자 인터페이스를 통해서 간단하게 수정하고 다시 운항 경제성 및 안전성 평가를 수행하게 된다.

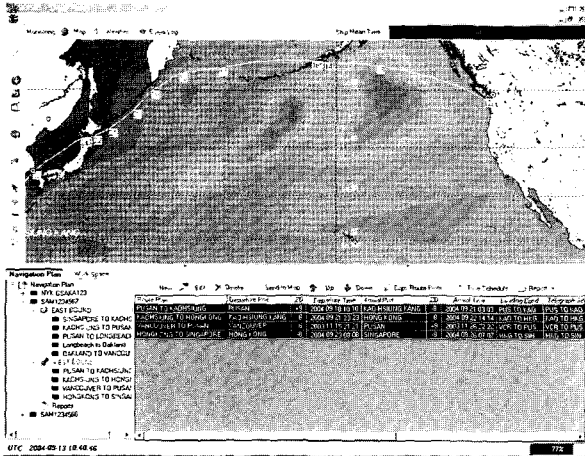


Fig. 14 Result of Optimum Navigation Route Assessment by manual

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 Cost선을 결정한 후, DP법을 적용하여 최적 항로를 구한 결과이다. 화

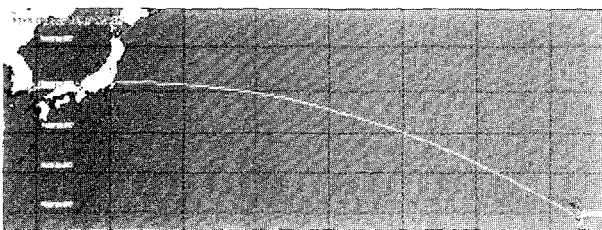


Fig. 15(a) Result of Optimum Navigation Route Search

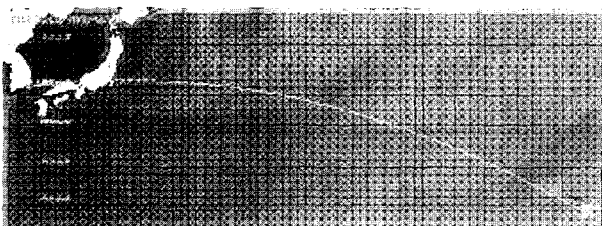


Fig. 15(b) Result of Optimum Navigation Route Search

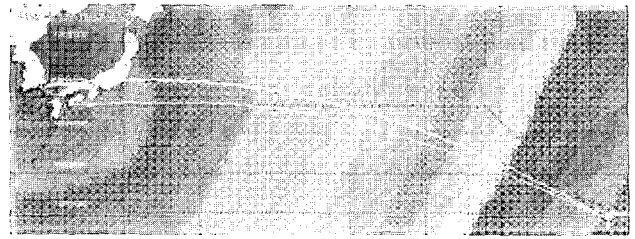


Fig. 15(c) Result of Optimum Navigation Route Search

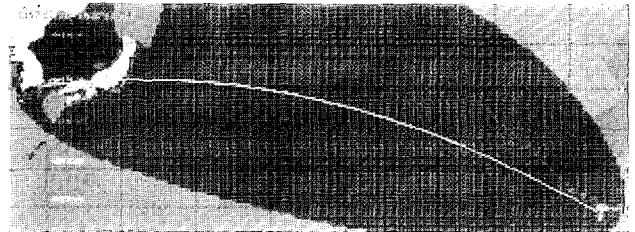


Fig. 15(d) Result of Optimum Navigation Route Search

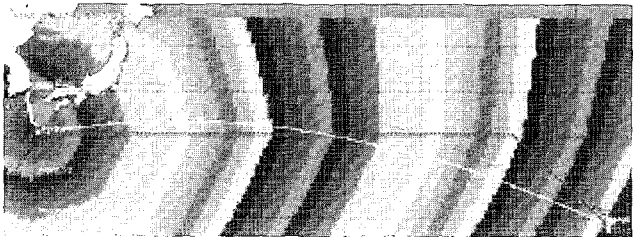


Fig. 15(e) Result of Optimum Navigation Route Search

면에서 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 위험지역을 설정한다. Fig. 15(e)는 위험지역 혹은 장애물 지역을 인식하여 큐슈 서남단 군도 지역으로 최적항로를 설정한 화면이다.

6. 항해 계획 내용 출력

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

일반적으로 항로계획은 IMO에서 권고하는 Voyage & Passage planning을 모든 선박에 적용하게 되며 출항 전 수립하여야 한다(IMO RESOLUTION A. 893 (21)). Fig. 16은 IMO에서 채택한 항해계획에 필수적인 항목을 나열하여 정형화한 본 시스템의 Route Passage Plan의 보고서 양식이다. 이 보고서는 선상에서의 항해 계획 보고 및 Back up 자료로 활용 가능하다. 이외에도 Navigation Plan Summary, Bound Plan Summary, Route Plan Summary등의 항해계획 보고서와 항로의 기상에 관한 보고서 및 내항 성능 보고서등이 본 시스템에서 제공된다.

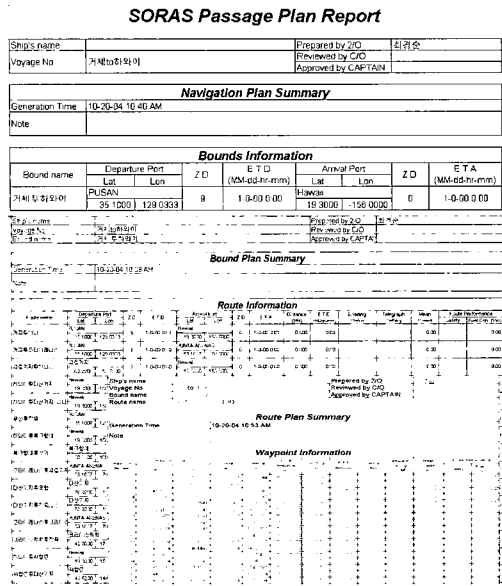


Fig. 16 Summary of Passage plan

7. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 선상 운항 보조 시스템으로서의 최적 항로 평가 시스템을 개발하였으며, 그 주요 개발 사항으로 안전성 관점에서는 기상 예보 및 목측 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

본 시스템의 실선 탑재후의 검증 과정이 필요하며, 주요 기능 및 알고리즘의 보완 작업등이 이루어질 예정이다. 참고로 본 논문에 수록되지 아니한 조류, 바람, 조타에 의한 선속저하 및 마력 변동 추정에 대한 알고리즘은 추후에 별도로 발표할 예정이다.

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] 이회용, 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 쌍동선형 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

원고접수일 : 2004년 10월 27일

원고채택일 : 2004년 12월 14일