

항로최적화기술 시뮬레이션 비교 결과

유윤자[†] · 최형래 · 이정렬
(사)한국선급

Comparative Results of Weather Routing Simulation

Yunja Yoo[†] · Hyeong-Rae Choi · Jeong-Youl Lee
Korean Register of Shipping

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Weather routing method is one of the best practices of SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) for fuel-efficient operation of ship. KR is carrying out a basic research for development of the weather routing algorithm and making a monitoring system by FOC (Fuel Oil Consumption) analysis compared to the reference, which is the great circle route. The added resistances applied global sea/weather data can be calculated using ship data, and the results can be corrected to ship motions. The global sea/weather data such as significant wave height, ocean current and wind data can be used to calculate the added resistances. The reference route in a usual navigation is the great circle route, which is the shortest distance route. The global sea/weather data can be divided into grids, and the nearest grid data from a ship's position can be used to apply a ocean going vessel's sea conditions. Powell method is used as an optimized routing technique to minimize FOC considered sea/weather conditions, and FOC result can be compared with the great circle route result.

Keywords : Weather routing(항로최적화), Ship energy efficiency(선박에너지효율), Optimum route(최적항로), Great-circle route(대권항로), Fuel oil consumption(연료소모량)

1. 서론

현존선의 선박 경제운항을 위한 조치로 국제해사기구는 2013년 1월부터 MARPOL 부속서 VI, Regulation 22에 의해 SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan)의 시행을 강제화 하고, 기존 선박의 경제운항 지표 및 선박의 온실가스 배출량 저감을 위해 선박에서 배출되는 CO₂ 배출량 지표를 나타내는 EEOI (ship energy efficiency operational indicator)의 자발적인 사용을 권고하고 있다. SEEMP 시행의 목적은 선주/선박으로 하여금 운항적인 측면에서의 에너지 효율을 높이기 위해 1) 자발적인 계획 2) 계획 시행 3) 에너지 효율 개선 모니터링 4) 자체평가 및 개선의 4단계 절차를 거쳐 각각의 선박에 최적화된 에너지 절감 기술을 구축하는데 있다.

본 연구에서는 SEEMP에서 제안하는 에너지 절감기술 중 하나인 항로최적화 기술 구현을 위해 기상 및 해상데이터를 적용한 항해 시뮬레이션을 수행하고, 통상항로 대비 최적항로의 연료소모량 및 시뮬레이션 항해 결과 비교·분석을 통해 시뮬레이션 기반 최적항로 효율검증을 위한 기초연구를 수행하였다. 실선항차의 항로최적화 효율검증을 위해서는 장기적인 항차데이터를 기

반으로 하는 두 항로 (통상항로, 최적항로)의 비교가 효과적이지만, 실선운항에 있어서는 항차의 재현성이 불가능하기 때문에 시뮬레이션 기반의 항로비교를 통한 연료소모량 절감효과를 비교해보고자 하였다.

실해역 환경을 고려하기 위해 전지구적 기상-해상 데이터 및 선박 고유정보를 이용하여 선체에 미치는 외력을 계산하였다. 통상항해에서 기준이 되는 항로는 대권항로이며, 대권항로는 지구 중심을 지나는 원을 따라 항해하는 항로로써 전통적인 최단거리 항해방법이다. 전지구적 기상-해상 데이터는 격자로 나누어 파랑, 해류, 바람의 실해역 데이터를 선위에 해당하는 격자데이터를 적용하여 외력을 계산하였다. 실해역 환경을 고려하여 연료소모량을 최소화 할 수 있는 최적항로 탐색 기법으로는 연료소모량을 평가함수로 하는 Powell 최적화 기법을 적용하였다 (Mizunoe, et al., 2008).

2. 선체운동계산 및 최적화 기법

2.1 선체기본운동방정식

대양항해에 있어서 선체거동은 선체기본운동방정식의 시계열

계산으로부터 이동거리 및 침로를 기본으로 점장위도항법을 사용하여 선위를 추정한다 (Yoon & Jeon, 2005). 또한 선박에 작용하는 주요 외력요소로서 해류에 의한 유체력, 풍압력, 정면규칙파중 파랑부가저항을 고려한다. 일반적인 선박의 대양항해에서는 통상 급선회를 하지 않는다고 가정하여 횡경사로 인한 모멘트는 가정하지 않는다. 또한 비교적 온화한 파랑중에서는 파랑에 의한 운동과 선회운동의 연성이 작으므로 평수 가운데서 조타했을 경우의 선박응답으로 가정하여 surge, sway, yaw운동만 고려하고 식 (1)-(3)과 같이 나타낸다 (Ogawa, et al., 1977; Kijima, et al., 1990).

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y + X_{vr})\nu r - (u_{c0}\sin\psi - \nu_{c0}\cos\psi)(m_y - m_x + X_{vr}) = X_H + X_P + X_R + X_A + R_{AW} \quad (1)$$

$$(m + m_y)\dot{\nu} + (m + m_x)ur - (u_{c0}\cos\psi + \nu_{c0}\sin\psi)(-m_y + m_x)r = Y_H + Y_P + Y_R + Y_A \quad (2)$$

$$(I_{ZZ} + J_{ZZ})\dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_A$$

$$(I_{ZZ} + J_{ZZ})\dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_A \quad (3)$$

여기서, m 은 선박질량, m_x, m_y 은 전후, 좌우방향 선박 부가질량, I_{ZZ} 은 Z 주변 관성모멘트, J_{ZZ} 은 Z 주변 부가 관성모멘트, u, ν 은 선박의 전후, 좌우방향 속도성분, u_{c0}, ν_{c0} 은 해류 수평류의 x, y 방향 속도성분, r 는 Z 주변 회두각속도, ψ 는 회두각, $\dot{u}, \dot{\nu}$ 는 u, ν 가속도 성분, X_{vr} 은 유체력 미계수를 나타낸다. X_H, Y_H, N_H 는 선체에 작용하는 전후·좌우방향 유체력 및 Z 축 주변 모멘트, X_P, Y_P, N_P 는 프로펠러에 작용하는 전후·좌우방향 유체력 및 z 축주변 모멘트이며 Y_P, N_P 는 작기 때문에 일반적으로 무시된다. X_R, Y_R, N_R 는 타에 작용하는 전후·좌우방향 유체력 및 Z 축주변 모멘트, X_A, Y_A, N_A 은 바람에 의한 전후·좌우방향 풍압력 및 Z 축주변 모멘트, R_{AW} 은 파랑중 부가저항을 나타낸다.

X_H, Y_H, N_H 는 각각 식 (4)-(6)과 같이 나타낸다 (Ogawa, et al., 1977).

$$X_H = -R + \frac{1}{2}\rho L d U^2 X'_H \quad (4)$$

$$Y_H = \frac{1}{2}\rho L d U^2 Y'_H \quad (5)$$

$$N_H = \frac{1}{2}\rho L^2 d U^2 N'_H \quad (6)$$

여기서, R 은 직진시 선체저항, ρ 는 해수밀도, L 은 선체길이, d 는 흘수, U 는 선속, X'_H, Y'_H, N'_H 는 운동변수 u, ν, r 의 다항식을 나타낸다.

X_P 는 각각 식 (7), (8)과 같이 나타낸다 (Hamamoto, 1977).

$$X_P = (1 - t) T \quad (7)$$

$$T = \rho n_P^2 D_P^4 K_T \quad (8)$$

여기서, t 는 추력감소계수, T 는 프로펠러 추력, n_P 는 프로펠러 회전수, D_P 는 프로펠러 직경, K_T 는 프로펠러 스러스트 계수를 나타낸다.

X_R, Y_R, N_R 은 식 (9)-(11)과 같이 나타낸다 (Kasai & Yumuro, 1977; Ogawa, et al., 1980; Yoshimura, et al., 2005).

$$X_R = -(1 - t_R) F_N \sin\delta \quad (9)$$

$$Y_R = -(1 + a_H) F_N \cos\delta \quad (10)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos\delta \quad (11)$$

여기서, t_R, a_H, x_H 는 타에서 선체와 프로펠러에 미치는 간섭계수, x_R 는 타축 위치의 x 방향 좌표, δ 는 타각, F_N 는 타직압력을 나타낸다.

X_A, Y_A, N_A 계산은 Fujiwara에 의한 풍압력 계수 추정식을 이용했다 (Fujiwara, et al., 2001).

$$X_A = \frac{1}{2}\rho_A V_A^2 A_T C_{XA}(\theta_A) \quad (12)$$

$$Y_A = \frac{1}{2}\rho_A V_A^2 A_L C_{YA}(\theta_A) \quad (13)$$

$$N_A = \frac{1}{2}\rho_A V_A^2 A_T C_{NA}(\theta_A) \quad (14)$$

여기서, ρ_A 는 공기밀도, θ_A 는 상대풍향, V_A 는 상대풍속, A_T 는 선체수선상부 정면투영면적, A_L 는 선체수선상부 측면투영면적, C_{XA}, C_{YA}, C_{NA} 는 각각 전후, 좌우방향 풍압력 계수 및 Z 축 주변 풍압력 모멘트계수를 나타낸다.

파랑중 부가저항 R_{AW} 는 정면규칙파로 가정하여 Sasaki에 의한 선속저항 간이계산법을 이용했다 (Sasaki, et al., 1998).

$$R_{AW} = C_1 \cdot \frac{1}{2}\rho g (1 + C_2 \cdot F_{nB}^{0.8}) \zeta_a^2 B \cdot B f_{cp} \quad (15)$$

$$F_{nB} = \frac{V_s}{\sqrt{g \cdot B}} \quad (16)$$

$$B f_{cp} = \frac{1}{1 + 2(1 - C_{pf}) L_{pp} / B^2} \quad (17)$$

여기서, ρ 는 해수밀도, g 는 중력가속도, ζ_a 는 입사파 진폭, L_{pp} 는 수선간장, B 는 선폭, C_{pf} 는 선체전반부 주형계수, V_s 는 선속, C_1 은 흡수영향계수, C_2 는 속도영향계수를 나타낸다.

미소시간 동안의 연료소모량 ΔFOC 에 대해 일정 항해시간 동안의 연료소모량 FOC 는 다음과 같다.

$$FOC = \int \Delta FOC \delta t \quad (18)$$

$$\Delta FOC = \frac{P_s}{1000} \cdot \frac{FOCR}{3600 \cdot 1000} \quad (19)$$

여기서, $FOCR$ 은 단위시간당 사용하는 연료소모량을 나타내는 연료소모율, P_s 는 축마력을 나타낸다.

2.2 최적화 기법

최적항로를 선정하기 위한 방법으로는 비구속 최적화 기법으로써 도함수를 구할 수 없는 문제의 경우 공역 방향에 대해 특정 평가함수의 최소값을 찾는 Powell 기법을 이용하였다 (Mizunoe, 2008). 대칭행렬 Q 에 대해 d^1, d^2, \dots, d^k 가 $(d_i)^T \cdot Q \cdot d_j = 0 (i \neq j)$ 을 만족하는 경우 d^1, d^2, \dots, d^k 는 Q 에 대해 서로 공역을 이루며, Powell 기법은 공역 방향에 대해 직선탐색을 반복하여 최소값을 구하는 방법이다. 1) - 5)는 Powell 최적화 기법 알고리즘에 대한 설명이다.

독립하는 n 개의 벡터 $d_0^0, d_1^0, \dots, d_{n-1}^0$ 에 대해 초기 시작점을 $x = 0, k = 0$ 으로 한다.

$f(x_i^k + \alpha_i d_i^k)$ 가 최소가 되는 α_i 를 구하고, $x_{i+1}^k = x_i^k + \alpha_i d_i^k$ 로 한다.

탐색 벡터를 갱신한다. $i = 0, 1, \dots, n-1$ 에 대해 $d_i^{k+1} = d_{i+1}^k$ 이고, $i = n$ 에 대해 $d_i^{k+1} = x_{n+1}^k - x_1^k$ 이다.

$f(x_{i+1}^k + \alpha d_n^{k+1})$ 가 최소가 되는 α 를 구하고, $x^{k+1} = x_{n+1}^k + \alpha d_n^{k+1}$ 로 한다.

종료 조건을 만족할 때까지 2) - 4)의 단계를 반복한다.

여기서, α 는 스텝폭, d 는 탐색방향을 나타낸다.

3. 대양항해 시뮬레이션

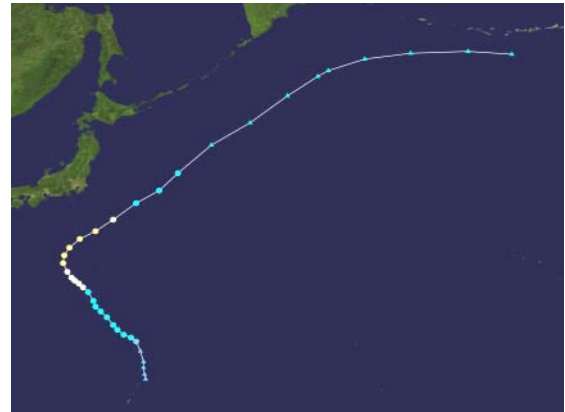
3.1 기상-해상 환경

3.1.1 기상시나리오 선정

대양항해에서 최적항로 탐색을 위한 기상시나리오는 2013년 북태평양에서 발생한 태풍을 기준으로 태풍강도에 따른 최적항로 탐색결과를 비교분석 하였다. 태풍이 자주 발생하는 9월말 -10월 사이에 북태평양 해역에서 발생한 태풍 중 홋카이도-롱비

치 항로와 유사한 진행경로를 가지는 세개의 태풍을 선정하여 시뮬레이션에 적용하였다.

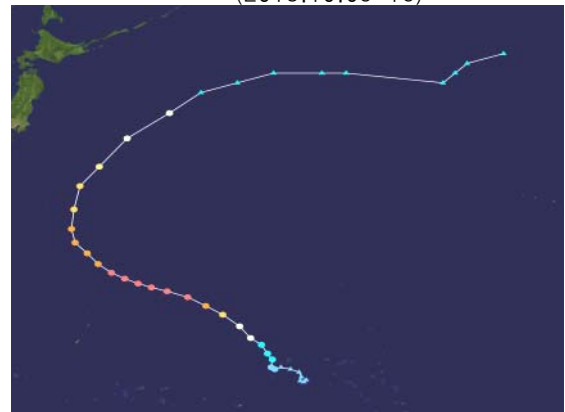
대상 태풍은 각각 Pabuk, Wipha, Lekima 태풍으로 9월에 발생한 Pabuk이 카테고리 2등급 (진행속도 154-177km/h)의 가장 약한 태풍이며, Wipha가 카테고리 4등급 (진행속도 209-251km/h), Lekima가 카테고리 5등급 (진행속도 251km/h 이상)의 가장 강한 태풍이다. 각각의 진행경로 및 발생기간은 Fig. 1과 같다.



(a) Track of category 2 typhoon Pabuk (2013.09.19-27)



(b) Track of category 4 typhoon Wipha (2013.10.09-16)



(c) Track of category 5 typhoon Lekima (2013.10.19-26)

Fig. 1 Tracks of three typhoons applied for weather routing simulation test (Wikipedia, 2013)

태풍 유무에 따른 선박의 연료소모량 비교를 위해 비교적 해상상태가 좋은 8월의 특정기간 (2013.08.12-08.19) 시나리오1을 기준으로 하여 태풍이 도래한 기간 동안의 해상데이터를 적용한 최적항로의 연료소모량과 비교분석 하였다.

3.1.2 실험역 데이터

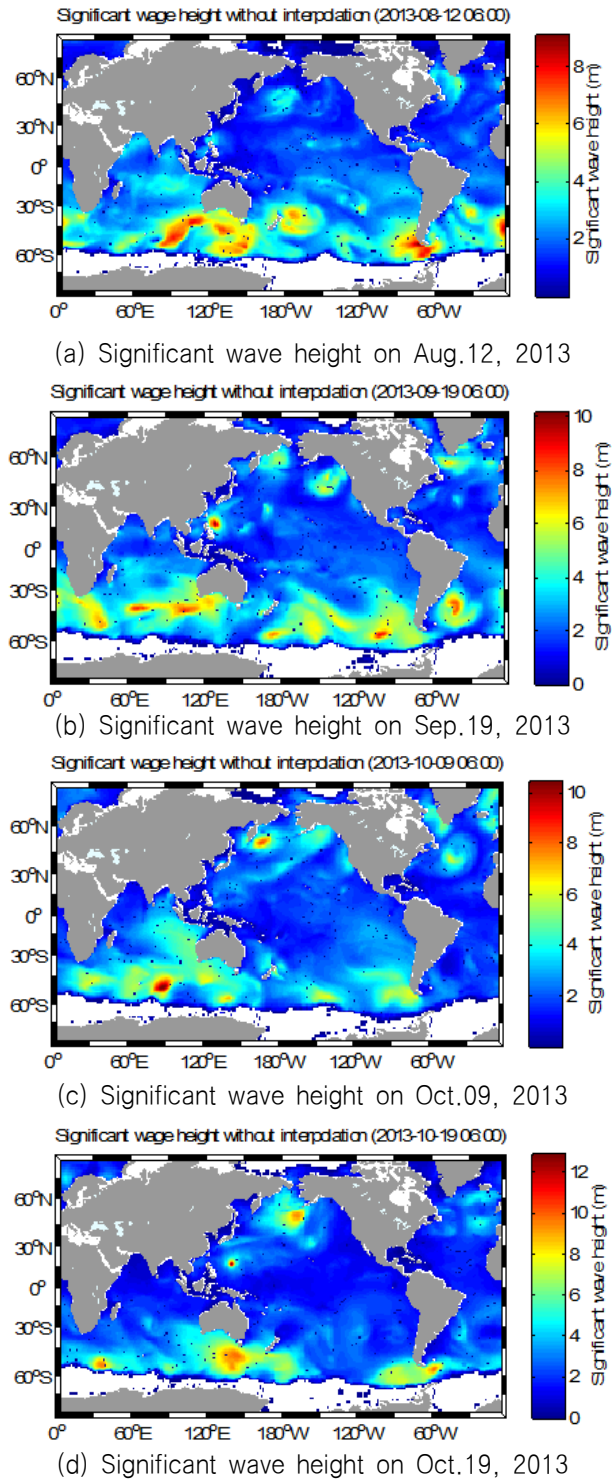
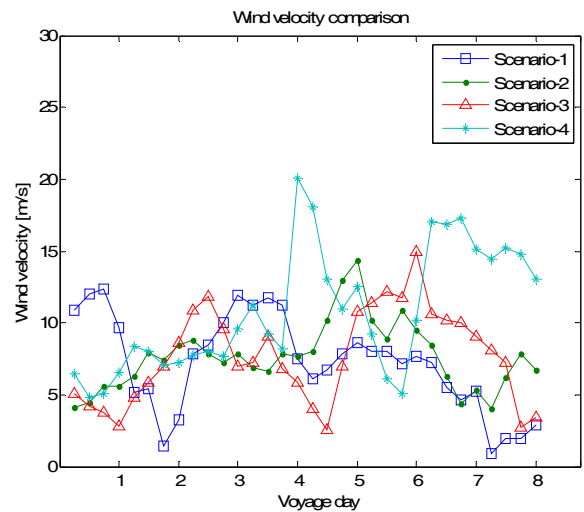


Fig. 2 Global data of significant wave height of scenario1-4

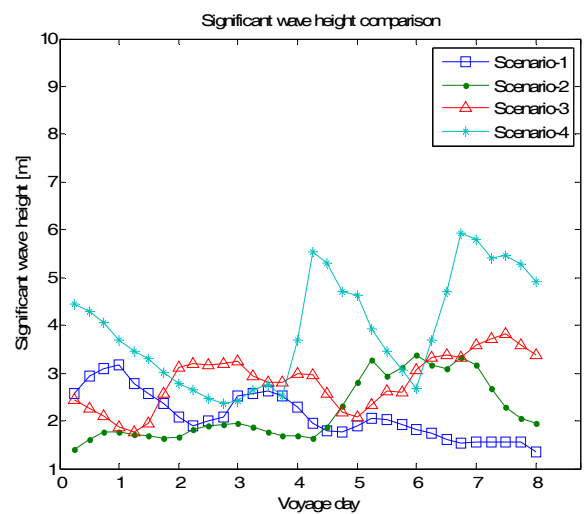
대양항해 시뮬레이션을 위한 실험역 데이터는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 NCE데이터 형식의 5일평균 조류 데이터 (1° x 1° grid), NCEP (National Center for Environmental Prediction)에서 제공하는 GRIB데이터 형식의 180시간 바람·파랑 데이터 (1° x 1.25° grid) 예측값을 사용했다 (NOAA, 2013; NCEP, 2013).

Fig. 2는 시나리오1-비교기준, 시나리오2-Pabuk, 시나리오3-Wipha, 시나리오4-Lekima 발생기간의 1일째 전지구적 유의파고 데이터를 나타낸다.

Fig. 3은 선정된 4개의 기상시나리오에 대한 특정해역의 풍속 데이터 및 유의파고데이터 결과를 향해 날짜별로 도시한 결과이다. 태풍 카테고리등급이 가장 높은 시나리오4의 풍속 및 유의파고가 향해 전반에 걸쳐 가장 큰 것을 알 수 있다.



(a) Wind velocity comparison of scenario1-4



(b) Significant wave height comparison of scenario1-4

Fig. 3 Wind velocity and significant wave height data comparison of scenario1-4 during voyage

3.2 항해 시뮬레이션

3.2.1 선박 및 항차 정보

항해 시뮬레이션에 적용된 선박상세 및 항차 정보는 Table 1 과 같다.

Table 1 Details of ship data and test conditions applied for weather routing simulation

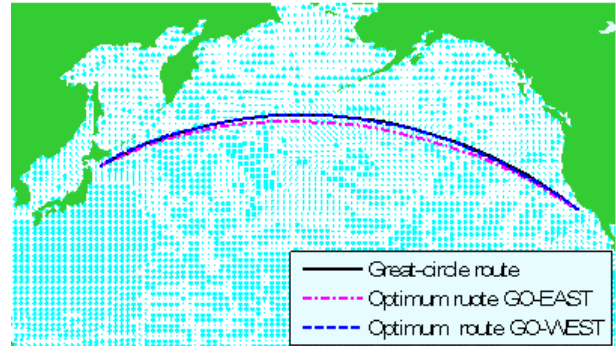
notation	description	unit
Ship Type	Container	-
Disp.	Displacement	94,511 [ton]
LOA	Length overall	339 [m]
Lpp	Length between perpendiculars	322.6 [m]
B	Breadth	45.6 [m]
D	Draft	13 [m]
Vs	Service speed	25 [knot]
PP	Propeller pitch	9.4 [m]
PD	Propeller diameter	9 [m]
Rh	Rudder height	9 [m]
Rb	Rudder breadth	7.4 [m]
A _T	Transverse projected area	630 [m ²]
A _L	Lateral projected area	4099 [m ²]
DEP(ARR)	Departure position	41.5N, 143.3E [deg]
ARR(DEP)	Arrival position	33.8N, 120.8W [deg]
DATE	Voyage date (Scenario1-4)	2013.08.12-19 2013.09.19-27 2013.10.08-16 2013.10.19-26
PROP_TORQ	Torque constrained	-

대상선박은 25 [knot]의 서비스 선속으로 항해하는 컨테이너 선으로 홋카이도-롱비치 구간을 토크일정으로 운항하여 왕복하는 대양항해 시뮬레이션을 수행했다. 또한, 선정된 4개 기상시나리오의 실험역 데이터를 적용하여 총 4개 항차의 항해결과를 분석하였다.

3.2.2 시뮬레이션 결과

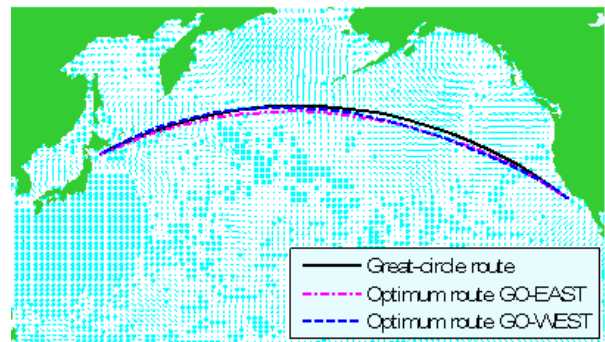
Fig.4는 시나리오1-4의 대상기간 동안 토크일정 제한으로 항해한 대권항로(흑색)와 최적항로(자색: 홋카이도→롱비치 동쪽 방향 항해, 청색: 롱비치→홋카이도 서쪽방향 항해)의 항해 시뮬레이션 결과를 도시한 그림이다.

Scenario-1 Route comparison (2013.08.12-08.19)



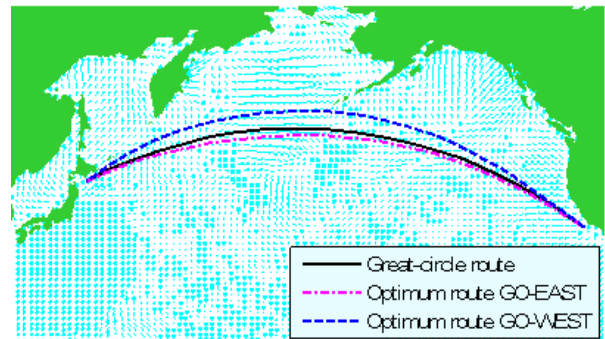
(a) Voyage tracks of scenario 1

Scenario-2 route comparison (2013.09.19-09.27)



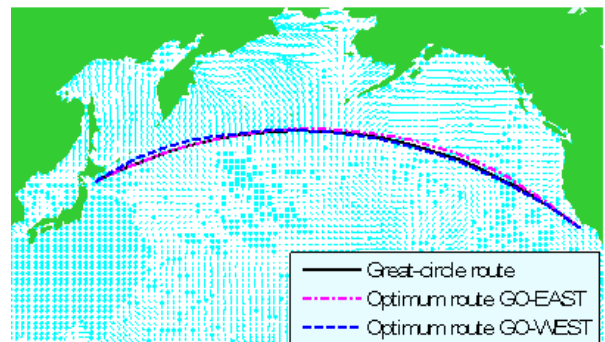
(b) Voyage tracks of scenario 2

Scenario-3 route comparison (2013.10.08-10.16)



(c) Voyage tracks of scenario 3

Scenario-4 route comparison (2013.10.19-10.26)



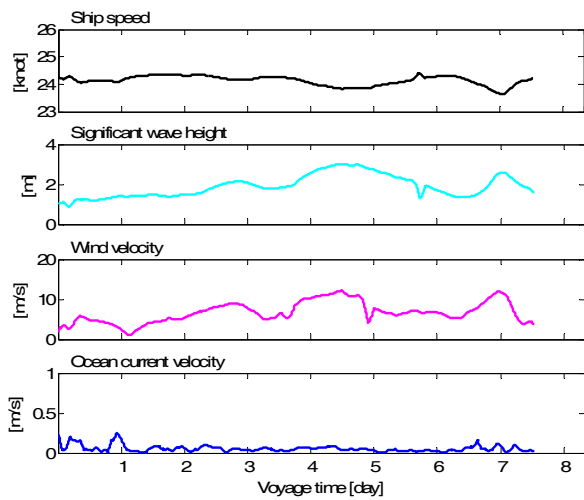
(d) Voyage tracks of scenario 4

Fig. 4 Route comparison simulation results with great-circle (black line), optimum route going-east (purple dash-dotted) and optimum route going-west (blue dash) of scenario1-4

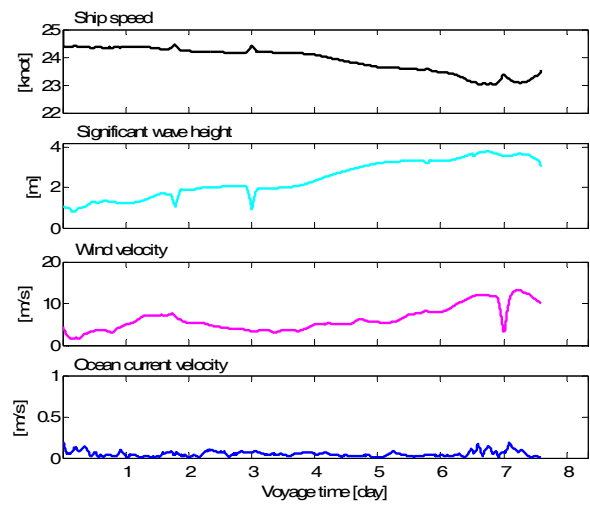
Fig. 4(a)는 시나리오1의 대권 및 최적항로의 비교결과이다. 결과로부터 태풍시즌이 아닌 시나리오1의 동쪽방향 최적항로 항적은 대권항로보다 남쪽으로 설정되었고, 서쪽방향 항적은 대권항로와 거의 유사하게 설정되었다. Fig. 4(b)는 시나리오2의 대권항로와 최적항로의 비교결과이다. 최적항로의 동쪽방향 항로는 전반적으로 대권항로보다 아래쪽으로 설정되었고, 서쪽방향 항로는 항해 전반부에는 대권항로보다 위쪽으로, 항해 중·후반부에서는 대권항로보다 아래쪽으로 항로가 설정되었다. 시나리오3의 항적비교결과 Fig. 4(c)로부터, 동쪽방향 최적항로의 항적은 대권항로보다 전반적으로 아래쪽으로 설정되었고, 서쪽방향 항적은 대권항로보다 크게 위쪽으로 설정되었다. 시나리오4의 결과 Fig.

4(d)로부터, 최적항로의 동쪽방향 항로는 항해전반부는 대권보다 남쪽으로, 항해 중·후반부에는 대권항로보다 위쪽으로 설정되었다. 서쪽방향의 최적항로는 항해 전반부에는 대권과 거의 유사하고, 항해 후반부에는 대권보다 약간 아래쪽으로 설정되었다.

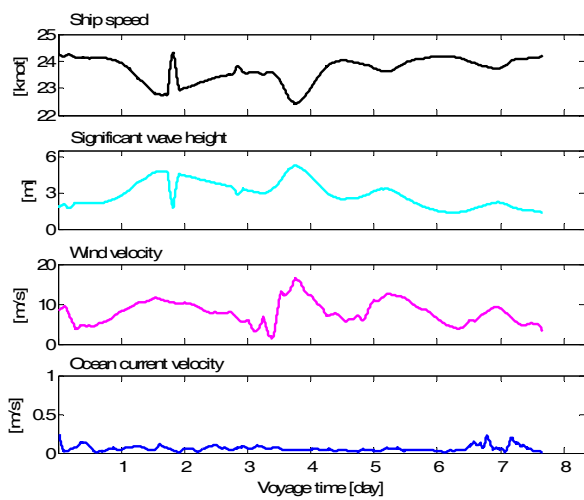
Fig. 5는 최적항로상의 기상데이터 (유의파고, 바람, 조류) 결과를 항해시간에 따라서 도시한 결과이다. 시나리오1-4 모두 전반적으로 유의파고가 높은 경우 선속은 감소하고 풍속은 증가하는 것을 알 수 있다. 선속과 유의파고는 거의 유사한 모양이지만 서로 반대 방향으로 결과가 나타나며, 풍속과 유의파고는 모양이 유사하지는 않지만 전체적인 경향은 서로 같은 방향으로 결과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 조속은 전체적으로 0.3[m/s] 이하로 나타난다.



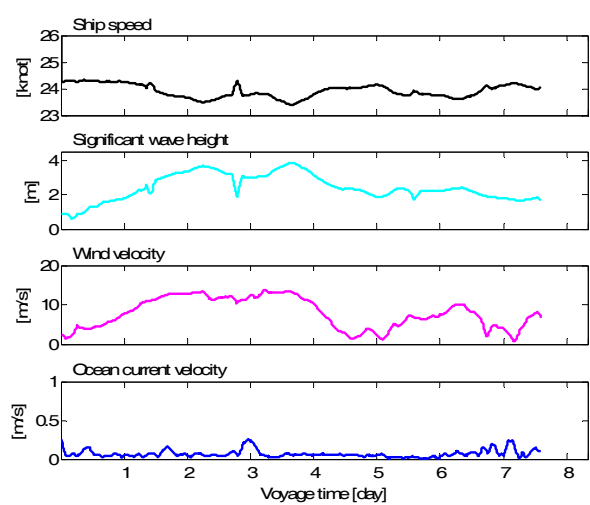
(a) Ship speed and weather data on the route of scenario 1



(b) Ship speed and weather data on the route of scenario 2

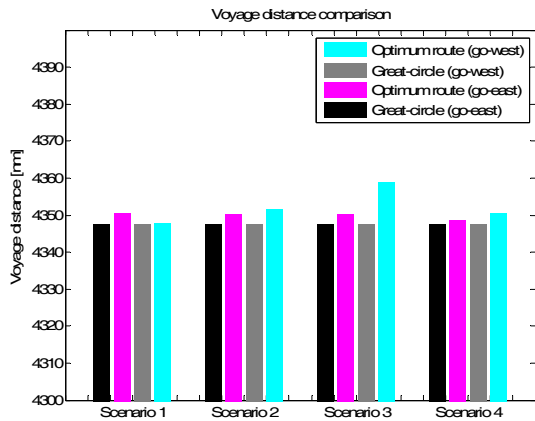


(c) Ship speed and weather data on the route of scenario 3

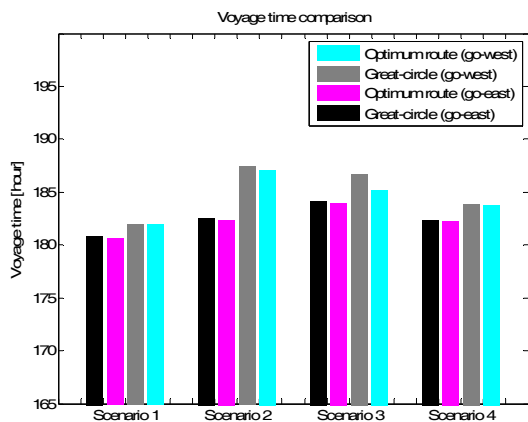


(d) Ship speed and weather data on the route of scenario 4

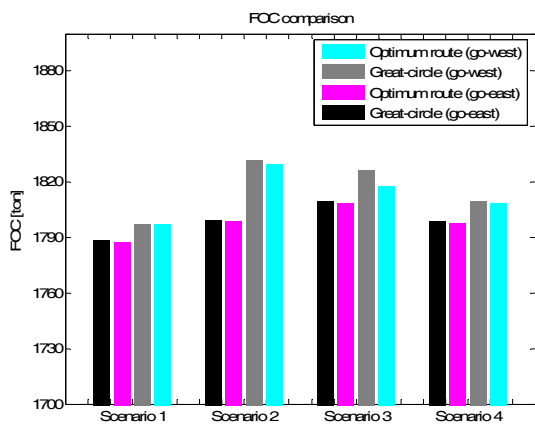
Fig. 5 Ship speed, significant wave-height, wind velocity and ocean current velocity on the route during simulation voyage



(a) Voyage distance comparison of scenario1-4



(b) Voyage time comparison of scenario1-4



(c) FOC comparison of scenario1-4

Fig. 6 Voyage results comparison of weather routing simulation test with optimum route go-west (cyan), great-circle go-west (gray), optimum route going-east (purple) and great-circle go-east (black) of scenario1-4

시나리오1-4의 시뮬레이션 항해결과 (항해거리, 항해시간, 연료 소모량)를 도시한 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)는 전체 시나리오의 동쪽방향, 서쪽방향 최적항로 및 대권항로의 항해거리 결과를 나타낸다. 대권항로의 거리는 동서방향 모두 4347.58[NM]로 동일하고, 최적항로의 거리는 동쪽방향의 경우 시나리오1-4에서 각각

4350.32[NM], 4350.18[NM], 4350.12[NM], 4348.75[NM]로 각각의 시나리오에서 큰 차이를 나타내지 않는다. 서쪽방향의 최적항로 거리는 시나리오1-4에서 각각 4347.70[NM], 4351.68[NM], 4358.76[NM], 4350.46[NM]로 시나리오 1이 가장 짧고, 시나리오 3이 가장 긴 항해거리를 나타낸다.

Fig. 6(b)의 결과로부터 항해시간은 동쪽방향으로 항해하는 대권항로 각각의 시나리오에서 180.83[hr], 182.54[hr], 184.18[hr], 182.33[hr]이 소요되었다. 최적항로의 동쪽방향 항해시간은 각각의 시나리오에서 180.64[hr], 182.38[hr], 183.97[hr], 182.26[hr]로 대권항로와 최적항로 모두 시나리오 1에서 가장 적고, 시나리오 3에서 가장 많은 항해시간이 소요되었다.

서쪽방향으로 항해하는 대권항로의 항해시간은 각각 181.97[hr], 187.42[hr], 186.68[hr], 183.90[hr]이다. 최적항로의 서쪽방향 항해시간은 각각의 시나리오에서 181.96[hr], 187.15[hr], 185.18[hr], 183.74[hr]로 대권항로와 최적항로 모두 시나리오 1에서 가장 적은 항해시간이 소요되었다.

Table 2 Overall voyage results of weather routing simulation test according to scenarios (E: go-east, W: go-west)

Scenario	Great-circle	Distance [NM]	Time [hr]	FOC [ton]
	Optimum route			
Scenario 1	(E)	4347.58	180.83	1788.91
	(W)	4347.58	181.97	1797.26
	(E)	4350.32	180.64	1787.77
	(W)	4347.7	181.96	1797.14
Scenario 2	(E)	4347.58	182.54	1799.1
	(W)	4347.58	187.42	1831.37
	(E)	4350.18	182.38	1798.3
	(W)	4351.68	187.15	1829.63
Scenario 3	(E)	4347.58	184.18	1809.79
	(W)	4347.58	186.68	1826.49
	(E)	4350.12	183.97	1808.2
	(W)	4358.76	185.18	1817.68
Scenario 4	(E)	4347.58	182.33	1798.4
	(W)	4347.58	183.9	1809.62
	(E)	4348.75	182.26	1798.07
	(W)	4350.46	183.74	1808.51

Fig. 6(c)의 결과로부터 연료소모량은 동쪽방향으로 항해하는 대권항로 각각의 시나리오에서 1788.91[ton], 1799.1[ton], 1809.79[ton], 1798.4[ton]이 소요되었다. 최적항로의 연료소모량은 각각 1787.77[ton], 1798.3[ton], 1808.2[ton], 1798.07[ton]이 소요되었고, 대권항로와 최적항로 모두 시나리오 1에서 가장 작고, 시나리오 3에서 가장 많은 연료를 소모하였다. 서쪽방향으로 항해하는 대권항로 각각의 시나리오에서 연료

소모량은 1797.26[ton], 1831.37[ton], 1826.49[ton], 1809.62[ton]이 소모되었고, 최적항로의 연료소모량은 각각 1797.14[ton], 1829.63[ton], 1817.68[ton], 1808.51[ton]이 소모되었다. 대권항로와 최적항로 모두 시나리오 1에서 연료소모량이 가장 적고, 시나리오 2에서 가장 많은 연료를 소모하였다. Fig.6의 항해종합결과를 각각의 시나리오 별로 Table 2에 나타냈다.

Table 3은 시나리오1-4의 시뮬레이션 항해결과 항해거리, 항해시간, 연료소모량의 대권항로 대비 최적항로의 비교결과를 나타낸다.

Table 3 Voyage results comparison of weather routing simulation test going-east and west (Voyage results of optimum route were subtracted from the voyage results of great-circle route.)

		Distance [NM]	Time [hr]	FOC [ton]
Scenario 1	(E)	+2.74	-0.19	-1.14
	(W)	+0.12	-0.01	-0.12
Scenario 2	(E)	+2.6	-0.16	-0.8
	(W)	+4.1	-0.27	-1.74
Scenario 3	(E)	+2.54	-0.21	-1.59
	(W)	+11.18	-1.5	-8.81
Scenario 4	(E)	+1.17	-0.07	-0.33
	(W)	+2.88	-0.16	-1.11

동쪽방향으로 항해하는 홋카이도-롱비치 구간의 시나리오 1-4에서 최적항로와 기준항로인 대권항로와의 결과를 비교한 항해종합결과, 최적항로의 항해거리는 기준항로와 비교하여 시나리오 1-4에서 각각 +2.74[NM], +2.60[NM], +2.54[NM], +1.17[NM] 늘어났으며, 항해시간은 각각 -0.19[hr], -0.16[hr], -0.21[hr], -0.07[hr] 감소하였음을 알 수 있다. 연료소모량은 각각의 시나리오에서 -0.14[ton], -0.80[ton], -1.59[ton], -0.33[ton] 감소하였으며 시나리오 3에서 가장 많은 연료가 절감되었다.

서쪽방향으로 항해하는 롱비치-홋카이도 구간의 시나리오 1-4에서 최적항로와 기준항로인 대권항로와의 결과를 비교한 항해종합결과, 최적항로의 항해거리는 기준항로와 비교하여 시나리오 1-4에서 각각 +0.12[NM], +4.10[NM], +11.18[NM], +2.88[NM] 늘어났고, 항해시간은 각각의 시나리오에서 -0.01[hr], -0.27[NM], -1.50[NM], -0.16[NM] 감소하였다. 연료소모량은 각 시나리오에서 -0.12[ton], -1.74[ton], -8.81[ton], -1.11[ton]로 시나리오 3에서 대권항로 대비 가장 많은 연료가 절감되었다.

4. 고찰

항해 시뮬레이션에 사용된 시나리오는 각각 카테고리 2, 4, 5

등급의 태풍이 도래한 시기의 기상·해상 데이터가 적용되었으며, 비교적 잔잔한 날씨의 하계해역 데이터를 적용한 항해 시뮬레이션 (시나리오1) 결과를 포함하여 대권항로 결과와 비교·분석 하였다. 시뮬레이션 수행 결과 최단거리 항로인 대권항로 대비 가장 큰 항로변화를 가지는 결과는 시나리오3의 롱비치-홋카이도 (GO-WEST) 항로였다. 이는 시나리오3이 시나리오4보다 1등급 낮은 태풍임에도 불구하고 태풍의 경로와 항해 시뮬레이션의 경로가 시나리오4보다 일치도가 높기 때문일 것으로 사료된다.

연료절감 효과 또한 시나리오3의 롱비치-홋카이도 (GO-WEST) 구간이 -8.81[ton]으로 가장 많은 절감효과를 보였다. 금번 항해 시뮬레이션은 토크일정 제어로 수행되었기 때문에 항해 전반에 걸친 선속변화는 크지 않았고, 연료소모량 또한 높은 절감효과를 나타내지는 않았다. 하지만 PR일정 제어로 수행시 토크일정 제어 항해보다는 큰 연료절감 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 Powell 최적화 기법을 이용한 최적항로 탐색을 수행하였으며, 추후 육지피해가 가능한 타기법 (Dijkstra, A* 등) 과의 비교도 수행할 예정이다.

5. 결론

선박에너지효율 향상을 위한 선박운항효율 개선조치에는 장비의 개조, 개선장치의 선박탑재 등의 하드웨어적인 개선방법과, 선속최적화, 선박운항자세 최적화, 항로최적화 기술 등의 소프트웨어적인 개선방법이 있다. 소프트웨어적인 선박운항효율 개선방법 중 항로최적화 기법은 통상적으로 최단거리를 항해하는 대권항법 대비 실해역 환경을 고려, 선체에 미치는 외력을 최소화 하는 항로로 항해하여 연료소모량을 절감 할 수 있는 최적항로를 탐색하여 항해하는 기법이다.

본 연구에서는 북태평양 해역에 카테고리 2, 4, 5 등급의 태풍 Pabuk, Wipha, Lekima가 도래한 기간의 실해역 데이터를 적용하여 해상상태가 좋았던 특정기간 (하계해역 기준)의 대권항로 및 최적항로의 시뮬레이션 항해결과와 비교·분석 하였다. 시뮬레이션 결과 최적항로의 거리는 최단거리인 대권항로보다 항해거리가 늘어났지만, 항해시간과 연료소모량은 오히려 감소하였다. 따라서 항로최적화 기법은 선박의 에너지효율향상을 위한 선박 운항 개선조치의 하나로 활용 될 수 있으며, 향후 장기간의 항차 데이터 결과를 바탕으로 다양한 항로최적화 기법을 이용하여 통상항로 대비 최적항로의 정량적인 에너지효율향상 효과를 검토 할 필요가 있다.

후기

이 논문은 2013년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (친환경선박 TCS 시스템 구축).

References

- Fujiwara, T. Ueno, M. & Nimura, T., 2001. An estimation method of wind forces and moments acting on ships. *Mini Symposium on prediction of ship manoeuvring performance*, Tokyo, Japan, 18 October 2001.
- Hamamoto, Y., 1977. MMG Report – II : Theoretical Background of Manoeuvrability Methematical Model. *The Society of Naval Architects of Japan*, 577, pp.322–329.
- Kasai, H. & Yumuro, A., 1977. MMG Report – III : Rudder Force and Interactions between Rudder and Hull. *The Society of Naval Architects of Japan*, 578, pp.358–372.
- Kijima, K. Katsuno, T. Nakiri, Y. & Furukawa, Y., 1990. On the Manoeuvring Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition. *The Society of Naval Architects of Japan*, 168, pp.141–148.
- Mizunoe, T. Kobayashi, E. & Onoda, K., 2008. Research on the Optimization of the Automatic Route Tracking System using the Powell Method. *The Society of Naval Architects of Japan*, 7K, pp.49–52.
- NCEP (National Center for Environmental Prediction), 2013. *EMC non-operational NOMADS: NCEP server 5 nomad5*. [Online] Available at: http://nomad5.ncep.noaa.gov/ncep_data/ [Accessed 1 August 2013].
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2013. *Ocean surface current analyses*. [Online] Available at: <http://www.oscar.noaa.gov/datadisplay/> [Accessed 1 August 2013].
- Ogawa, A. Hasegawa, G. & Yoshimura, Y., 1980. MMG Report – V : Experimental Evaluation of Manoeuvrability Methematical Model and Improvement. *The Society of Naval Architects of Japan*, 616, pp.565–576.
- Ogawa, A. Ogawa, T. & Kijima, K., 1977. MMG Report – I : Manoeuvrability Methematical Model. *The Society of Naval Architects of Japan*, 575, pp.192–198.
- Sasaki, N. Hirata, N. Tsujimoto, M. & Kume, K., 1998. *Development of Basic Design Tools for High Performance Ships, National Maritime Research Institute Report No10(3)*. Mokpo: National Maritime Research Institute.
- Wikipedia, 2013. 2013 *Pacific typhoon season*. [Online] Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/>. [Accessed 1 August 2013].
- Yoon, Y.J. & Jeon, S.H., 2005. *Geo Navigation*. Korea Maritime and Ocean University Press: Pusan.
- Yoshimura, Y. Tomita, Y. & Abo, H., 2005. Examination about Mathematical Model of Rudder Force and Interactions between Rudder and Hull. *The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 1, pp.221–222.

