

해상 정보 취득과 연료 소모량 추정을 기반으로 한 선박 경제 운항 경로 결정 방법

노명일[†]

울산대학교 조선해양공학부

A Method for Determining a Ship Economic Route based on the Acquisition of the Sea State and Estimation of Fuel Consumption

Myung-Il Roh[†]

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

Received 15 July 2011; received in revised form 10 January 2012; accepted 10 January 2012

ABSTRACT:

Recently, the ratio of fuel cost to the operational cost of a ship is increasing according to the increase of the international oil price. Thus, many studies are being made to reduce the cost; for example, a method for acquiring the sea state information, a method for estimating fuel consumption, a method for determining the ship's optimal route, and so on. However, these studies were not incorporated together and being independently made in different fields. In this study, by improving and incorporating such studies, a method for determining a ship economic route based on the acquisition of the sea state and estimation of fuel consumption was proposed. To evaluate the applicability of the proposed method, it was applied to an optimal routing problem of the ocean area including many islands. The result shows that the proposed method can yield the economic route minimizing fuel consumption.

Key Words: Fuel consumption, Optimization, Sea state, Ship economic route

1. 서 론

최근 국제 유가의 급등에 따라 산업 전 분야에 걸쳐 연료비를 줄이려는 노력이 많이 보이고 있다. 선박의 경제성에 대한 항로 계획의 영향을 분석한 연구에 의하면 운항 비용(operational cost) 중 연료비가 차지하는 비율이 40% 이상이 된다^[1]. 이에 본 연구에서는 해상 상태를 고려하여 선박의 연료비를 최소화하는 최적 운항 경로 결정에 대한

연구를 수행하였다. 최적 운항 경로 결정이란 해상 상태(파고, 파향 등의 파랑과 풍속, 풍향 등의 바람의 상태)가 선박에 미치는 영향을 고려하여 안전하고 경제적인 선박 운항 경로를 결정하는 것으로 정의할 수 있는데 선행 연구에서는 optimum track routing, weather routing, optimum ship routing 등으로 표현된다^[2].

지금까지 최적 운항 경로에 관련된 많은 연구가 수행되어왔다. 먼저 가장 대표적인 최적 운항 경로 결정 방법은 Hanssen과 James^[3]에 의해 제안된 등시선법(isochrone method)는 수계산이 용이하기 때문에 오랫동안 사용되어 왔으며,

[†]Corresponding Author, miroh@ulsan.ac.kr
©2012 Society of CAD/CAM Engineers

Hagiwara^[4]가 컴퓨터 계산이 용이한 변경된 등시선법을 제안하였다. Chung과 Rhyu^[5]는 A* 알고리즘을 이용하여 최적 운항 경로 결정에 대한 연구를 수행하였다. 최근 Choi 등^[6]과 Park 등^[7]은 대양 항해 기록 결과와 기상 예보 데이터를 근거로 선속 저하량을 도출하여 연료 소모량을 추정하는 방법을 제시하였고, 최적 운항 경로 도출 시 8 point 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘을 이용하였다. 하지만 이 방법들은 실시간 해상 정보를 반영하지 못했고 다수의 섬들을 포함하는 복잡한 해상 영역에서는 최적 운항 경로를 도출하기가 어렵거나 도출하는 데에 상당한 메모리와 시간을 필요로 하는 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 개선된 등시선법을 기반으로 하며, 해상 상태를 고려하여 연료 소모량을 추정한 후 선박의 최적 경제 운항 경로를 결정하는 방법을 제안하였다.

2. 최적 운항 경로 결정 문제

선박이 대양을 항해하는 중에 대권 항로(두 지점을 연결하는 최단 경로)의 해상 상태가 좋지 않을 때 크게 두 가지의 의사 결정이 존재한다. 첫 번째는 날씨가 좋지 않더라도 위험을 무릅쓰고 대권 항로를 계속 항해하는 경우이고, 두 번째는 항해 거리는 길어지지만 날씨가 좋은 안전한 항로로 초기의 항로를 변경하여 항해하는 경우이다.

전자의 경우는 나쁜 해상 상태에 의해 선박의 저항이 증가하여 선속이 저하되고 따라서 저하된 선속을 보정하기 위해(제한된 시간 내에 도착해야 하므로) 추가 마력이 필요하여 결국은 추가 연료 소모량이 발생한다. 후자의 경우는 해상 상태에 따른 선속 저하는 발생하지 않으나 항해 거리가 길어지게 되기 때문에 초기의 운항 경로에 비해 추가 연료 소모량이 발생한다. 따라서 각 경우에 대해 연료 소모량을 추정하여 비교할 수 있다면 최적 운항 경로를 결정할 수 있다. 물론 최적 운항 경로의 결정 기준으로서 연료비 대신 운항 시간을 활용할 수도 있다. Fig. 1은 최적 운항 경로 결정 문제의 예를 나타낸다.

이상과 같은 최적 운항 경로 결정 문제는 최적화 문제에 해당되며, 본 연구에서는 이 문제를 아래와 같이 수학적으로 정식화하였다.

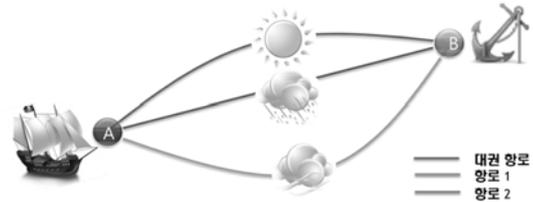


Fig. 1 Example of determining a ship economic route

$$\text{Minimize } TFOC(X) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } ETA(X) - ETA_{req} \leq 0 \quad (2)$$

여기서,

X: 선박 운항 경로

TFOC(Total Fuel Oil Consumption): 해당 경로에 대한 총 연료 소모량

ETA(Estimated Time of Arrival): 해당 경로에 대한 도착 예정 시간

ETA_{req} : 도착 요구 시간(주어진 값)

위 수학적 최적화 모델에서 우리가 구하고자 하는 설계 변수(design variable)는 선박 운항 경로이고, 식 (1)은 해당 경로에 대한 총 연료 소모량을 최소화해야 함을 나타내는 목적 함수(objective function)를 나타내며, 식 (2)는 요구되는 시간 내에 선박이 도착점에 도달해야 한다는 제약 조건(constraint)을 나타낸다.

3. 해상 정보의 취득 방법

앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 해상 상태를 고려하여 선박의 최적 운항 경로를 결정한다. 운항 중인 선박에서 해상 상태와 같은 실시간 정보를 얻기 위해서는 위성 통신을 활용해야 한다. 실시간 해상 정보는 다양한 기관으로부터 얻을 수 있지만 본 연구에서는 유럽중기기후예보센터(ECMWF: European Center for Medium-range Weather Forecasts)로부터 해당 정보를 얻는 것으로 가정하였다. 유럽중기기후예보센터는 유럽 18개 회원국이 GNP 비율에 따라 출자하여 운영하는데 모델의 개발, 중기 예보 및 기후 자료 제공, 예보 기술 향상을 위한 기술 개발 등에 142명의 전문가가 활동 중이다. 유럽중기기후예보센터에서는 실시간 해상 정보뿐만 아니라 기존 자료를

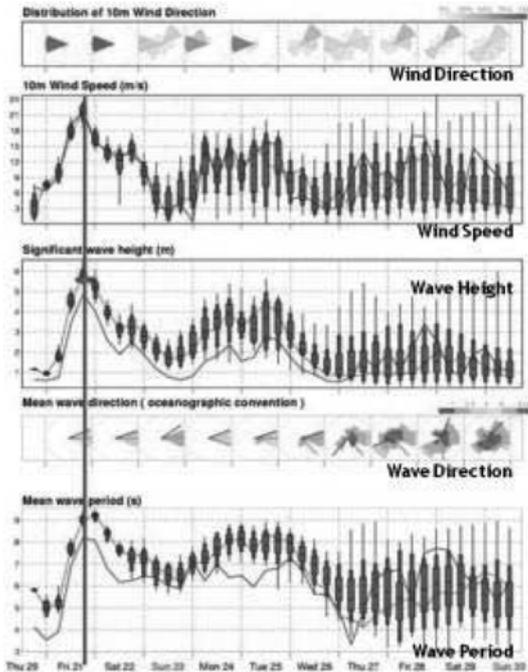


Fig. 2 Acquisition of the sea state from ECMWF

통한 장기 예보 자료까지도 함께 제공하고 있다. 실시간 정보는 경위도 0.5도의 해상도로 6시간 간격의 10일 예보치가 매일 제공되며, 장기 예보 자료는 경위도 1.5도의 해상도로 15년까지의 관측 자료가 제공된다. 제공되는 해상 상태로는 바람, 파랑, 기압 등이 포함되며, Fig. 2에 나타나 있듯이 바람 관련 상태는 풍향과 풍속이, 파랑 관련 상태는 파고, 파향, 파주기 등이 있다.

4. 해상 상태를 고려한 연료 소모량 추정 방법

해상 상태에 따른 선박의 성능 변화를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 첫째, 해상 상태가 나쁜 경우(예, 높은 파도) 선박의 전체 저항은 증가하게 된다. 둘째, 선박 저항 증가로 인해 선속은 저하된다. 셋째, 저하된 선속을 초기 선속으로 보정하기 위해 추가 마력이 필요하며 이는 마력의 증가를 초래한다. 마지막으로, 마력 증가에 따라 추가 연료 소모량이 발생한다.

따라서 해상 상태에 따른 연료 소모량을 추정하기 위해서는 (1) 선박의 저항 증가량을 계산해야 하고, (2) 선박 저항 증가에 의한 선속 저하량을 계

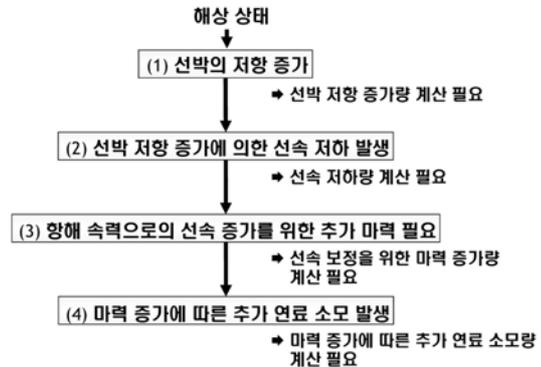


Fig. 3 Scenario of the change in ship performance according to the sea state

산해야 하며, (3) 선속 보정을 위한 마력 증가량을 계산한 후, (4) 최종적으로 마력 증가에 따른 추가 연료 소모량을 계산해야 한다.

4.1 선박의 부가 저항 계산

해상 상태에 따른 선박의 저항 증가량 즉, 부가 저항은 바람에 의한 부가 저항과 파랑에 의한 부가 저항으로 나눌 수 있다. 바람에 의한 부가 저항은 수계산으로도 간단히 추정이 가능하지만, 파랑에 의한 부가 저항은 계산이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ISO 15016^[8]에서 추천하고 있는 Maruo 방법^[9], Kwon 방법^[10], Berlekom 방법^[11], ITTC 표준 스펙트럼 방법 등을 체계적으로 조합하여 만든 부가 저항 산정용 표준 계열표를 이용하여 식 (1)과 같이 파랑 및 바람에 의한 부가 저항을 추정하였다.

$$\delta R = \delta R_{wave} + \delta R_{wind} \quad (3)$$

여기서, $\delta R, \delta R_{wave}, \delta R_{wind}$ 는 각각 해상 상태에 따른 선박의 부가 저항, 파도에 의한 부가 저항, 바람에 의한 부가 저항을 각각 나타낸다.

4.2 부가 저항에 따른 선속 저하량 계산

본 연구에서는 부가 저항에 의한 선속 저하량을 식 (4)의 Nakamura와 Naito 방법^[12]과 식 (5)의 Townsin과 Kwon 방법^[13]을 이용하여 계산하였다.

$$\delta V = \frac{R - R_0 + \delta R}{(1 - t_0)(1 - w_0) \left(\tilde{P}_{TU} + \frac{\tilde{P}_{TN} \cdot \tilde{P}_{QU}}{r^2 \tilde{E}_{QN} - \tilde{P}_{QN}} \right)} \quad (4)$$

여기서,

- δV : 부가 저항에 의한 선속 저하량
- V_0 : 선박의 속도
- δR : 선속 $V_0 + \delta V$ 일 때 해상 상태에 따른 부가 저항
- R : 선속 $V_0 + \delta V$ 일 때 정수(calm water) 중 선박의 저항
- R_0 : 선속 V_0 일 때 정수 중 선박의 저항
- $\tilde{P}_{TV}, \tilde{P}_{TN}, \tilde{P}_{QV}, \tilde{P}_{QU}$: 프로펠러의 특성을 나타내는 계수
- \tilde{E}_{QN} : 주기관(main engine)의 성능을 나타내는 계수
- t_0 : 선속 V_0 일 때의 추력 감소 계수(thrust deduction coefficient)
- w_0 : 선속 V_0 일 때의 반류 계수(wake coefficient)
- r : 감속비

$$\delta V = V_0 \left\{ \left(1 + \frac{\delta R}{R_0} \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (5)$$

여기서,

- δV : 부가 저항에 의한 선속 저하량
- V_0 : 정수 중 선박의 속도
- δR : 선속 $V_0 + \delta V$ 일 때 해상 상태에 따른 부가 저항
- R_0 : 선속 V_0 일 때 정수 중 선박의 저항

4.3 선속 보정을 위한 마력 증가량 계산

저하된 선속을 초기 선속으로 보정하기 위해서는 추가 마력이 필요하며 이는 마력의 증가를 초래한다. 본 연구에서는 선속 보정을 위한 마력 증가량을 식 (6)의 Nakamura와 Naito 방법^[12]과 식 (7)의 Townsin과 Kwon 방법^[13]을 이용하여 계산하였다.

$$\delta P = \frac{2\pi}{75} (N_{0p} \delta Q_p + Q_{0p} \delta N_p + \delta Q_p \delta N_p) \quad (6)$$

여기서,

- δP : 선속 보정을 위한 마력 증가량
- N_{0p}, Q_{0p} : 선속 V_0 일 때의 정수 중 프로펠러 회전수 및 토크
- $\delta Q_p, \delta N_p$: 선속 저하에 따른 추력 증가 및 회전수 증가량

$$\delta P = P_0 \left\{ \frac{\delta V}{V_0} \cdot (n+1) \right\} \quad (7)$$

여기서,

- δP : 선속 보정을 위한 마력 증가량
- δV : 부가 저항에 의한 선속 저하량
- V_0 : 정수 중 선박의 속도
- n : 선종에 따라 달라지는 상수

4.4 마력 증가에 따른 추가 연료 소모량 추정

이제 해당 경로에 대한 총 연료 소모량은 식 (8)과 같이 추정할 수 있다.

$$TFOC = FOC + \delta FOC \quad (8)$$

여기서, FOC 는 변화하는 해상 상태를 고려하지 않은 연료 소모량을 나타내고, δFOC 는 해상 상태를 고려하여 마력 증가에 따른 추가 연료 소모량을 나타내면 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\delta FOC = SFOC \cdot \delta P \cdot ETA$$

여기서,

- $SFOC$ (Specific Fuel Oil Consumption): 주기관의 연료 소모율(f/hp·h)
- δP : 선속 보정을 위한 마력 증가량
- ETA (Estimated Time of Arrival): 해당 경로에 대한 도착 예정 시간

5. 최적 운항 경로 결정 방법

5.1 등시선법(isochrone method)의 개요

등시선법^[3]이란 Fig. 4와 같이 한 점에서 주어진 시간 동안 항해하여 도착할 수 있는 점들을 연결한 등시선을 이용하여 최적 항로를 결정하는 방법을 말한다.

5.2 개선된 등시선법의 제안

등시선법은 간단한 방법으로 빠른 시간 내에 최적 운항 경로를 결정할 수 있다는 장점을 가지지만 해상 정보를 반영하지 않고 다수의 섬들을 포



Fig. 4 Overview of the isochrone method

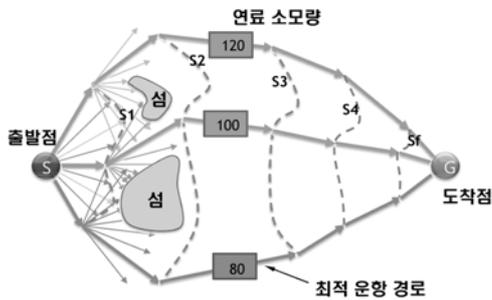


Fig. 5 Example of determining an optimal route by using the improved isochrone method

함하는 복잡한 해상 영역에서는 최적 운항 경로를 도출하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 등시선법의 단점을 개선한 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 전체 알고리즘을 다음과 같다.

- (1) 단계 1: 출발점(S)에서 각 방향(예, 5도, 10도 등 사용자가 정할 수 있음)으로 장애물과 해상 상태를 고려하여 일정한 시간 동안 운항할 수 있는 점들을 연결하여 등시선 S1을 작성한다. 예컨대, 진행 방향으로 육지, 섬 등과 같은 장애물이 존재할 경우, 해당 방향으로의 진행은 불가능하며, 해상 상태에 따라 일정한 시간 동안 운항할 수 있는 거리는 선속 저하 및 선속 보정 등을 고려하여 결정한다.
- (2) 단계 2: 등시선 S1 상의 각 점에서 각 방향으로 일정한 시간 동안 운항할 수 있는 점들 중 도착점(G)까지의 거리가 가장 가까운 점을 구하고 이들을 연결하여 등시선 S2를 작성한다.
- (3) 단계 3: 단계 2를 반복하여 도착점을 포함하지 않는 등시선까지 모두 작성한다.
- (4) 단계 4: 마지막 등시선 Sf 상의 각 점과 도착점을 연결한다.
- (5) 단계 5: 각 경로별 연료 소모량을 계산하여 그 값이 최소인 경로를 최적 운항 경로로 결정한다.

Fig. 5는 이상의 과정을 통해 출발점에서 도착점까지 연료 소모량이 최소인 최적 운항 경로를 결정하는 예를 나타낸 것이다.

5.3 기존 알고리즘과의 성능 비교

본 연구에서는 개선된 등시선법의 효율성을 검증하기 위해 최적 운항 경로 결정을 위해 많이 사

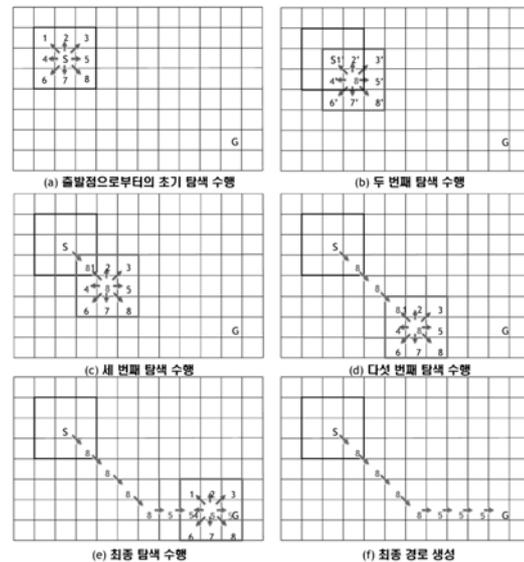


Fig. 6 Example of determining an optimal route by using the A* algorithm

용되고 있는 기존 알고리즘인 A* 알고리즘과의 성능 비교를 수행하였다.

(1) A* 알고리즘

A* 알고리즘¹⁵⁾은 초기 노드(출발점)에서 목표 노드(도착점)까지의 경로를 찾는 그래프 탐색 알고리즘이다. Fig. 6(a)에 나타나 있듯이, 한 지점에서 탐색이 이루어질 때 이 지점으로부터 탐색할 수 있는 방향은 8방향이 된다. 즉, 출발점 S로부터 1~8 층 8개의 노드로 이동할 수 있다. 하지만 이들 중 도착점 G에 가장 가까운 것은 노드 8이기 때문에 이것이 탐색 리스트에 저장되고 노드 1~7은 가까운 순으로 후보 리스트에 저장된다. 다시 노드 8에서 탐색을 시작하면 노드 8' 탐색 리스트에 다시 저장되고 나머지 노드 1'~7'는 가까운 순으로 후보 리스트에 저장된다(Fig. 6(b) 참조). 이상의 과정을 탐색 리스트에 저장된 노드에 대해 반복하여 수행하면 출발점으로부터 도착점까지의 최단 경로를 구할 수 있다(Fig. 6(f) 참조). 이와 같이 A* 알고리즘은 모든 영역에 대해 일일이 검사하기 때문에 다수의 섬들을 포함하는 복잡한 해상 영역에 적용할 수 있으나 상당한 메모리와 시간을 필요로 하는 등의 문제점을 가지고 있다.

(2) 예제를 통한 성능 비교

개선된 등시선법의 효율성을 검토하기 위해 간

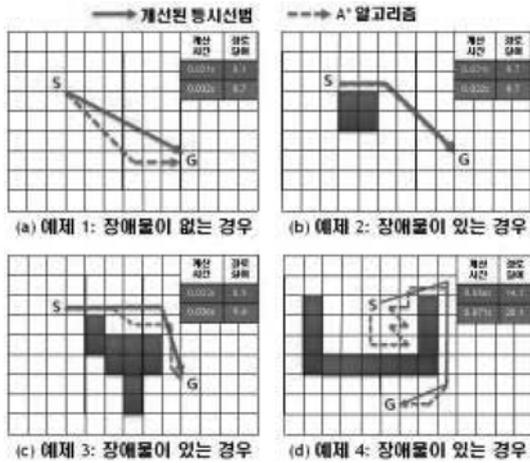


Fig. 7 Comparison of the improved isochrone method with the A* algorithm for 4 examples

Table 1 Comparison of the improved isochrone method with the A* algorithm for 4 examples

	개선된 등시선법			A* 알고리즘		
	경로 길이	계산 시간 (s)	메모리양 (KB)*1	경로 길이	계산 시간 (s)	메모리양 (KB)
예제 (a)	8.1	0.031	64	8.7	0.032	512
예제 (b)	8.7	0.031	80	8.7	0.032	512
예제 (c)	8.9	0.033	104	9.4	0.036	768
예제 (d)	14.1	0.056	136	20.1	0.071	1,344

*1: 경로 계산 시 사용된 메모리양만을 포함

단한 예제에 대해 A* 알고리즘과 비교하였으며 그 결과를 요약하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)에 나타나 있듯이, A* 알고리즘의 경우 주변 노드를 중심으로 탐색하기 때문에 등시선법에 비해 다소 거리가 긴 경로를 도출함을 알 수 있다.

Table 1은 위 예제에 대해 개선된 등시선법과 A* 알고리즘을 이용해 계산한 결과를 비교한 것이다.

6. 선박의 최적 운항 경로 결정 방법의 적용 예

본 연구에서 제안된 방법의 효용성을 검증하기 위하여 재화 중량 300,000톤 대형 원유 운반선 (VLCC: Very Large Crude oil Carrier)의 최적 운항 경로 결정 문제에 적용해 보았다. 적용 경로는 Fig. 8에 나타나 있듯이, 한국에서 두바이로 가는

운항 경로 중 다수의 섬이 포함된 인도양 지역이다. 해당 지역의 해상 상태는 앞서 설명하였듯이, 유럽중기후예보센터에서 제공된 자료를 활용하였다. 해상 정보는 편의상 BN(Beaufort Number)로 표현하여 사용하였다. BN은 해상 상태를 나타내는 지수로 큰 값일수록 해상 상태가 나쁨을 나타낸다.

본 예제에서는 선박이 주어진 항로에 따라 운항 중 해상 상태가 좋지 않은 인도양의 A-B 구간을 지난다고 가정하였다(Fig. 8의 타원형 부분). A 지

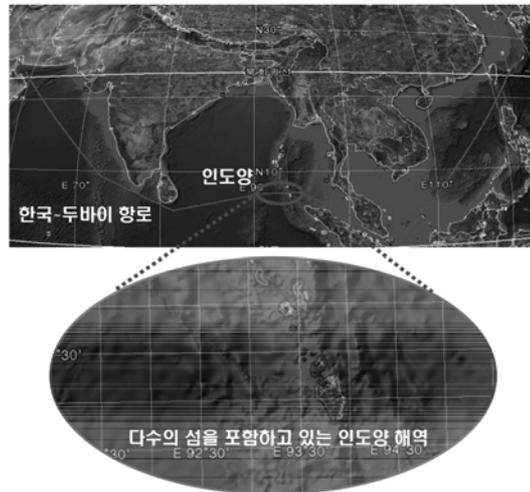


Fig. 8 Example of the route between Dubai and Korea, and Indian Ocean areas

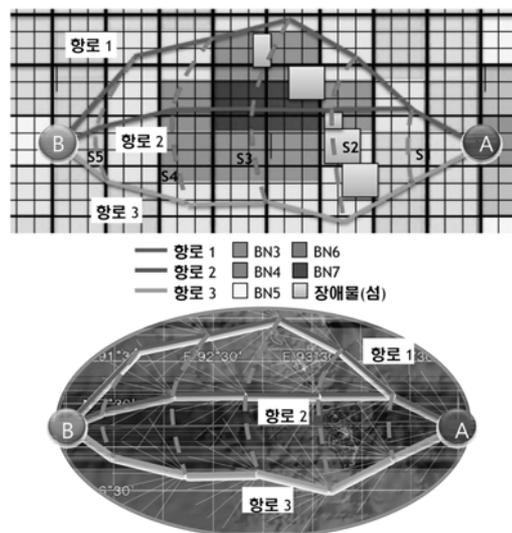


Fig. 9 Determining an optimal route by using the improved isochrone method

Table 2 Result of determining an optimal route by using the improved isochrone method

항로 1	선속 저하량 (knots)	항해 거리 (NM)	연료 소모량 (ton)
A-S1	0.26	44.22	10.22
S1-S2	0.55	43.41	10.56
S2-S3	0.65	43.05	10.61
S3-S4	0.61	43.18	10.59
S4-S5	0.55	43.41	10.56
S5-B	0.32	71.28	17.34
합계	-	288.55	69.88
항로 2	선속 저하량 (knots)	항해 거리 (NM)	연료 소모량 (ton)
A-S1	0.26	44.22	10.22
S1-S2	1.21	41.40	10.24
S2-S3	5.57	28.29	10.61
S3-S4	2.92	36.24	10.48
S4-S5	0.55	43.41	10.56
S5-B	0.32	56.22	12.99
합계	-	249.78	65.10
항로 3	선속 저하량 (knots)	항해 거리 (NM)	연료 소모량 (ton)
A-S1	0.16	44.22	10.11
S1-S2	0.31	44.07	10.31
S2-S3	0.55	43.41	10.56
S3-S4	0.55	43.43	10.59
S4-S5	0.28	44.48	10.56
S5-B	0.32	42.26	9.76
합계	-	261.87	61.89

점에 도착한 선박은 B 지점까지의 해상 상태가 좋지 않은 것을 확인한 후, 연료 소모량을 최소화 하는 최적 운항 경로를 결정한 후 이를 따라 운항하기로 하였다. 따라서 본 연구에서는 개선된 등시선법에 따라 다양한 항로들을 탐색하였고(Fig. 9 참조), 이들 중 3개의 항로에 대해 연료 소모량을 추정하여 최적 운항 경로를 결정하였다.

본 연구에서는 먼저, A-B 항로를 일정한 시간 단위의 등시 구간으로 나누었다. 이후, 각 구간에 대해 해상 상태를 고려하여 선박 부가 저항, 선속 저하량, 추가 마력량을 계산한 후 연료 소모량을 추정하였다. 각 항로에 대해 연료 소모량을 추정한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에 나타나 있듯이, 항로 2로 운항할 경우 선박은 최소 거리(249.78 NM)로 운항할 수 있으나 전체적인 해상 상태가 매우 나쁘기 때문에 선속 보정을 위한 과도한 마력 증가로 연료 소모량이 다소 크고(65.10 ton) 위험한 운항이 될 수 있다. 항로 2에 비해 해상 상태가 비교적 양호한 항로 1은 해상 상태에 따른 선속 저하가 비교적 작기 때문에 선속 보정을 위한 연료 소모량은 작지만 항로 2보다 항해 거리가 상당히 길어져(288.55 NM) 운항 시간이 가장 많이 증가였으며 그 결과 전체 연료 소모량 역시 증가(69.88 ton)하였다. 항로 3은 항로 2보다 항해 거리가 증가하였지만(261.87 NM) 해상 상태에 따른 연료 소모량이 증가분이 비교적 작아 전체 연료 소모량이 가장 작게(61.89 ton) 나왔다. 따라서 항로 3이 연료 소모량이 가장 적은 최적 운항 경로임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 실시간 해상 정보 취득과 연료 소모량 추정을 기반으로 한 선박 경제 운항 경로 결정 방법에 대해 연구하였다. 즉, 해상 상태를 고려하여 선박의 연료비를 최소화하는 최적 운항 경로 결정에 대한 연구를 수행하였다. 유럽중기후예보센터로부터 해상 정보를 취득하였으며, 해상 상태에 따라 선박에 추가적으로 가해지는 부가 저항을 추정하였고, 이를 기반으로 선속 저하량과 선속 보정을 위한 마력 추가량을 추정한 후, 최종적으로 선박의 연료 소모량을 추정하였다. 이를 기반으로, 개선된 등시선법을 이용해 최적 운항 경로를 도출하였다. 제안된 방법의 효용성을 검증하기 위해, 이를 다수의 섬을 포함하는 해상 영역에서의 최적 운항 경로 결정 문제에 적용해 보았다. 그 결과, 본 연구에서 제안된 방법이 충분히 적용 가능함을 확인하였다. 향후에는 보다 정교한 연료 소모량 추정 방법에 대해 연구하고, 보다 많은 예제의 적용을 통해 제안된 방법의 신뢰성 및 효용성을 제고시킬 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2012년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Meijers, J. H. C., 1980, Some Economical Aspects of the Routing of Ships, *Transaction IME*, pp. 12-21.
2. Lee, H. Y. and Kim, S. H., 2001, On the Optimum Ship Routing by Network Modeling, *Journal of the Korean Institute of Navigation*, 25(3), pp. 211-223.
3. Hanssen, G. L. and James, R. W., 1960, Optimum Ship Routing, *Journal of Navigation*, 13(3), pp. 253-272.
4. Hagiwara, H., 1989, *Weather Routing of Sail Assisted Motor Vessels*, Ph.D. Thesis, Delft University.
5. Chung, C. S. and Rhyu, K. S., 1999, A Study on the Optimum Ship Routing Using A* Algorithm, *Journal of The Korean Institute of Office Automation*, 4(1), pp. 38-45.
6. Choi, K. S., Park, M. K., Lee, J. H. and Park, G. I., 2007, A Study on the Optimum Navigation Route Safety Assessment System using Real Time Weather Forecasting, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 13(2), pp. 133-140.
7. Park, K. I., Choi, K. S., Lee, J. H. and Kim, M. S., 2004, Introduction of Optimum Navigation Route Assessment System Based on Weather Forecasting and Seakeeping Prediction, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 28(10), pp. 833-841.
8. ISO, 2002, Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data, *ISO/DIS 15016*, pp. 1-45.
9. Maruo, H., 1960, On the Increase of the Resistance of a Ship in Rough Seas, *Journal of Society of Naval Architects of Japan*, 108, pp. 86-92.
10. Kwon, Y. J., 1982, *The Effect of Weather, Particularly Short Sea Waves, on Ship Speed Performance*, Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
11. Berlekom, W. B., 1981, Wind Forces on Modern Ship Forms - Effect on Performance, *Transactions of North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders*, 97, pp. 123-134.
12. Nakamura, S. and Naito, S., 1972, Nominal Speed Loss and Propulsive performance of a Ship in Waves, *Journal of Society of Naval Architects of Japan*, 166, pp. 25-34.
13. Townsin, R. L. and Kwon, Y. J., 1993, Estimating the Influence of Weather on Ship Performance, *Transactions of Royal Institution of Naval Architects*, 135, pp. 191-209.



노명일

1998년 서울대학교 조선해양공학과 학사

2000년 서울대학교 조선해양공학과 석사

2005년 서울대학교 조선해양공학과 박사

2005년~2007년 서울대학교 공학연구소/해양시스템공학연구소 선임연구원

2007년~현재 울산대학교 조선해양공학부 조교수

관심분야: 전산선박설계 및 생산, 시뮬레이션 기반 설계 및 생산, 최적 설계, 해양 구조물 설계, CAD/CAM/CAE, CAGD