

해상 상태를 고려한 선박의 최적 운항 경로 결정

Determination of the Optimal Navigation Path of a Ship Considering the Sea State

김 주 영* · 노 명 일**
Kim, Joo-Young · Roh, Myung-Il

요 약

최근 국제 유가의 상승에 따라 선박 운항 시 연료비를 최소화하고자 하는 연구의 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 해상 상태를 고려하여 선박의 연료비를 최소화하는 운항 경로, 즉 최적 운항 경로를 결정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 해상 상태에 따라 선박에 추가적으로 가해지는 부가 저항을 추정하였고, 이를 기반으로 선속 저하량과 이의 보상을 위해 요구되는 마력 증가량을 추정하였으며, 마지막으로 연료 소모량과 운항 시간을 추정하였다. 또한 해상 상태의 취득 방법에 대해서도 연구하였다. 본 방법의 효용성을 검증하기 위해 이를 간단한 예제에 적용하였으며, 그 결과 연료 소모량을 최소화하는 선박 경제 항로 결정 과정에 활용할 수 있음을 확인하였다.

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(Meijers, 1980). 이에 본 연구에서는 해양 상태를 고려하여 선박의 연료비를 최소화하는 최적 운항 경로 결정에 대한 연구를 수행하였다. 최적 운항 경로 결정이란 해상 상태(파장, 파고, 파주기 등의 파랑과 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(Vessel) Routing 등으로 표현 된다(이희용 등, 2001).

지금까지 최적 운항 경로 결정과 관련하여 많은 연구가 수행된 바 있다. 먼저 가장 대표적인 최적 운항 경로 결정 방법은 Hanssen과 James(1960)에 의해 제안된 등시법(Isochrone Method)으로서 수계산이 용이하여 오랜 기간 동안 사용되어 왔다. 이후, Hagiwara(1989)가 컴퓨터를 이용한 등시법을 제안하였다. 최근, 최경순 등(2007)은 대양에서의 항해 기록 결과와 기상 예보 데이터를 근거로 선속 저하량을 도출하여 연료 소모량을 추정하는 방법을 제시하였다.

2. 해상 상태를 고려한 선박의 최적 운항 경로 결정 문제

* 정회원 · 울산대학교 조선해양공학부 교수 miroh@ulsan.ac.kr

** 학생회원 · 울산대학교 조선및해양공학과 rlawndud28@naver.com

2.1. 최적 운항 경로 결정 문제의 개념

선박이 대양을 항해하는 중에 대권 항로의 해상 상태가 좋지 않을 때 크게 두 가지의 의사 결정이 존재한다. 첫 번째는 대권 항로를 계속 항해하는 경우이고, 두 번째는 항해 거리는 길어지지만 해상 상태가 좋은 항로로 항로를 변경하여 항해하는 경우이다.

전자의 경우는 나쁜 해상 상태에 의해 선박의 저항이 증가하여 선속이 저하되고 따라서 저하된 선속을 보정하기 위해 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 비교하면 최적 운항 경로를 결정할 수 있다. 물론 최적 운항 경로의 결정 기준으로 연료비 대신 운항 시간을 활용할 수도 있다. 그림 1은 최적 운항 경로 결정 문제의 예를 나타낸다.

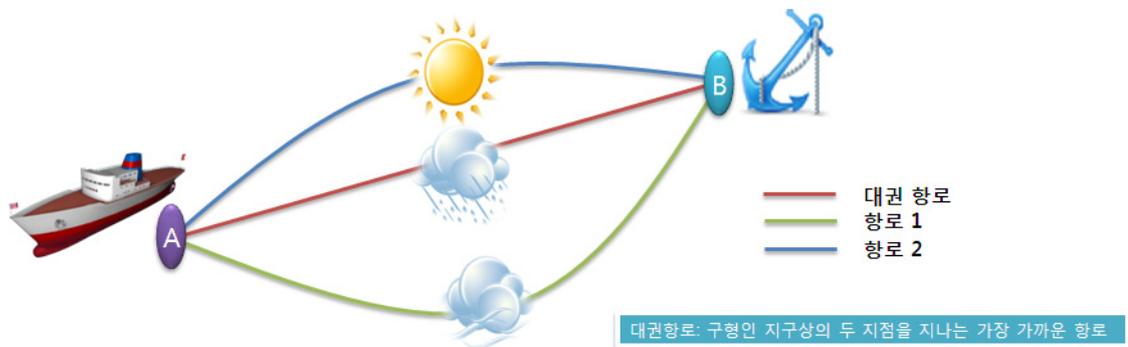


그림 1 최적 운항 경로 결정 문제의 예

2.2. 최적 운항 경로 결정 문제의 수학적 정식화

본 연구에서의 최적 운항 경로는 해상 상태를 고려하여 연료비, 연료 소모량이 최소인 선박 운항 경로를 의미한다고 가정하였다. 따라서 최적 운항 경로 결정 문제를 수학적으로 간단히 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } FOC &= f_c \cdot P_d \cdot T_t \\ \text{subject to } T_t &\leq T_{req} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, f_c 는 선박 주기관의 연료 소모율(SFOC, Specific Fuel Oil Consumption)로서 주기관의 단위 시간, 단위 마력 당 소비되는 연료량을 나타내고, P_d 는 선속 저하에 따른 마력 증가분을 고려한 주기관의 마력(Power)을 나타내며, T_t 는 선속 저하를 고려한 선박의 운항 시간을 나타낸다. 또한, T_{req} 는 도착 시간(운항 시간)에 대한 요구 조건을 나타낸다.

3. 해상 상태를 고려한 선박의 최적 운항 경로 결정 방법

3.1. 최적 운항 경로 결정 방법

본 연구에서는 Hanssen과 James에 의해 제안된 등시법(Isochrone Method)을 기반으로 최적 운항 경로를 결정하였다. 본 연구에서의 최적 운항 경로 결정 과정을 간략히 정리하면 다음과 같다. 첫째, 출발점과 도착 점을 대권으로 연결한다. 둘째, 출발점으로부터 각 방향으로 해상 상태를 고려하여 6시간(해상 상태를 얻을

수 있는 시간 간격의 최소값을 의미) 동안 최대로 갈 수 있는 점들을 연결하여 등시선(Isochrone Line, S_1)을 작성한다. 셋째, 등시선 S_1 에서 수선 방향으로 6시간 동안 최대로 갈 수 있는 점들을 계산하여 등시선 S_2 를 작성한다. 넷째, 같은 방법으로 도착점 근처까지 등시선을 계속 작성한다. 다섯째, 마지막 곡선 S_f 와 도착점을 연결한다. 마지막으로 각 구간별 연료 소모량을 계산하여 연료 소모량이 최소인 운항 경로를 결정한다. 그림 2는 본 연구에서의 최적 운항 경로 결정 과정을 나타내며, 그림 3은 등시법을 기반으로 한 최적 운항 경로 결정 과정의 예를 나타낸다.

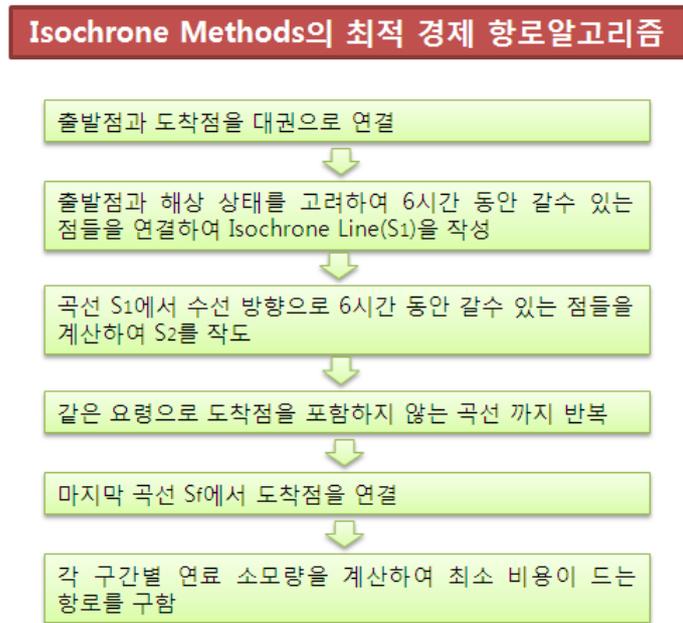


그림 2 본 연구에서의 최적 운항 경로 결정 과정

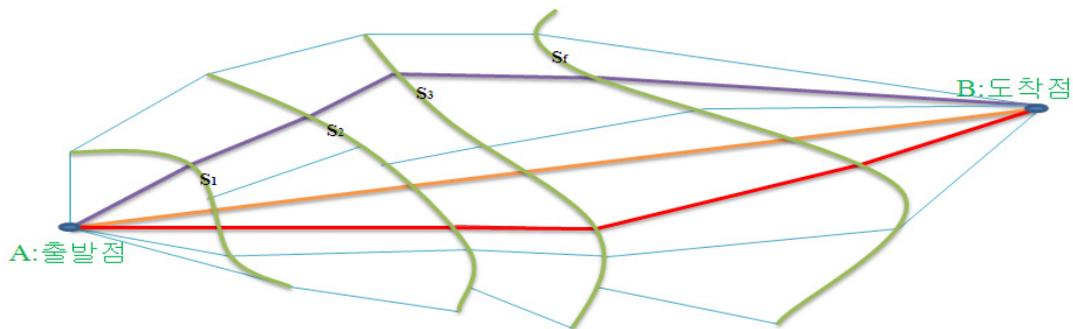


그림 3 등시법을 기반으로 한 최적 운항 경로 결정 과정의 예

3.2. 해상 상태의 취득 방법

앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 해상 상태를 고려하여 선박의 최적 운항 경로를 결정한다. 이를 위해 해상 상태는 유럽중기예보센터(ECMWF)의 자료를 활용한다. 유럽중기기후예보센터는 유럽 18개 회원국이

GNP비율에 따라 출자하여 운영하는데 모델의 개발, 중기 예보 및 기후 자료 제공, 예보 기술 향상을 위한 기술 개발 등에 142명의 전문가가 활동 중이다. 유럽중기예보센터에서 제공하는 해양 상태는 바람, 파랑, 기압, 폭풍을 포함하며, 바람은 풍향과 풍속 정보를 제공하고, 파랑은 너울과 풍파로 구분하여 파고, 파향, 파주기 정보를 제공한다. 실시간 정보는 0.5° 해상도로 6시간 간격의 10일 예보치가 매일 제공되며, 통계적 정보는 1.5°의 해상도의 15년 관측 자료를 이용하여 월평균 및 재현 주기별 최대값이 제공된다.

3.3. 해상 상태를 고려한 연료 소모량의 추정 방법

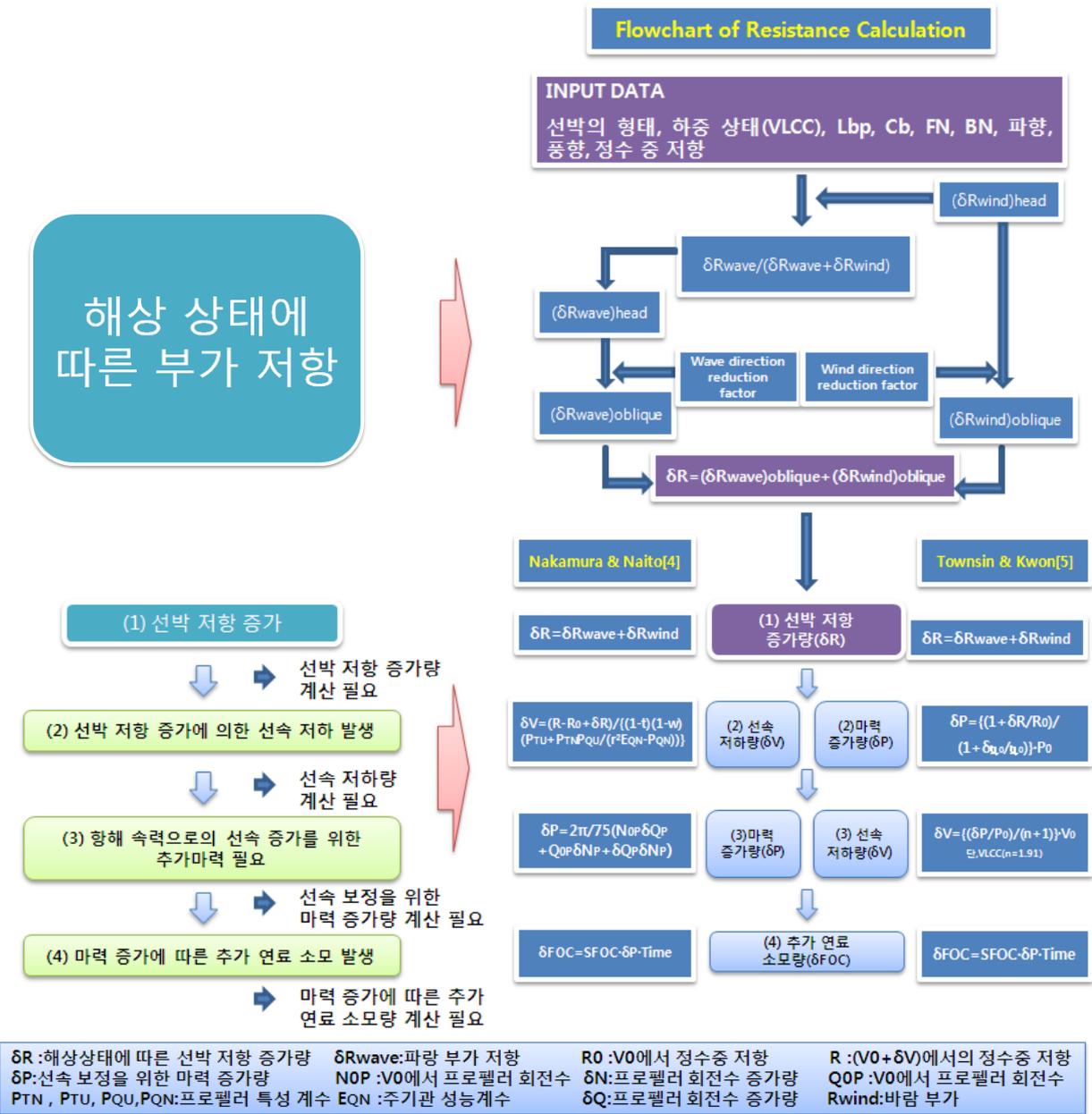


그림 4 해상 상태를 고려한 연료 소모량의 추정 방법

해상 상태에 따른 선박의 성능 변화 시나리오는 다음과 같다(그림 3 참조) 첫째, 해상 상태가 나쁜 경우 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.

해상 상태에 따른 부가 저항은 파랑에 의한 부가 저항과 바람에 의한 부가 저항으로 나눌 수 있다. 바람에 의한 부가 저항은 수계산으로도 간단히 추정이 가능하지만, 파랑에 의한 부가 저항은 계산이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ISO(2002)에서 추천하고 있는 Maruo 방법(1960), Kwon 방법, Berlekom 방법, ITTC 표준 스펙트럼 방법 등을 체계적으로 조합하여 만든 부가 저항 산정용 표준 계열표를 이용하여 파랑 및 바람에 의한 부가 저항을 추정하였다. 그리고 부가 저항에 의한 선속 저하량 및 마력 증가량은 Nakamura와 Naito 방법(1977)과 Townsin과 Kwon 방법(1992)을 이용하여 추정하였고, 최종적으로는 이를 이용하여 선박의 연료 소모량을 추정하였다.

4. 선박의 최적 운항 경로 결정 방법의 적용 예

4.1. 최적 운항 경로 결정 방법을 위한 예제

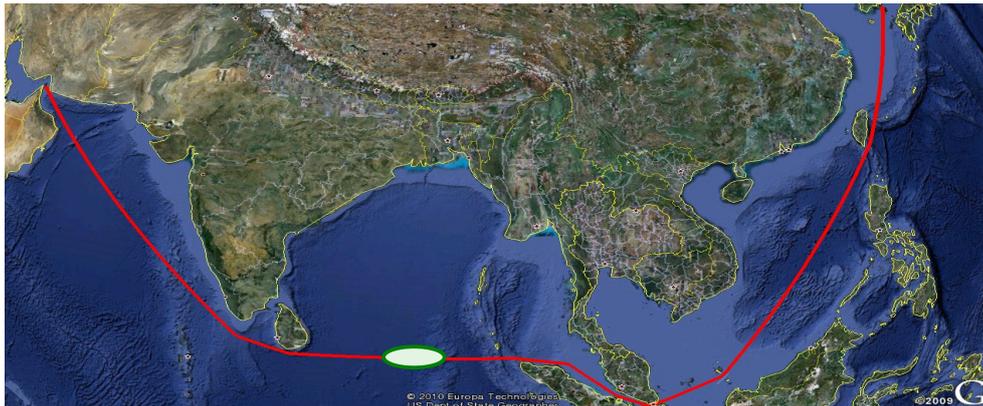


그림 5 본 연구에서 예제로 사용된 선박 운항 경로

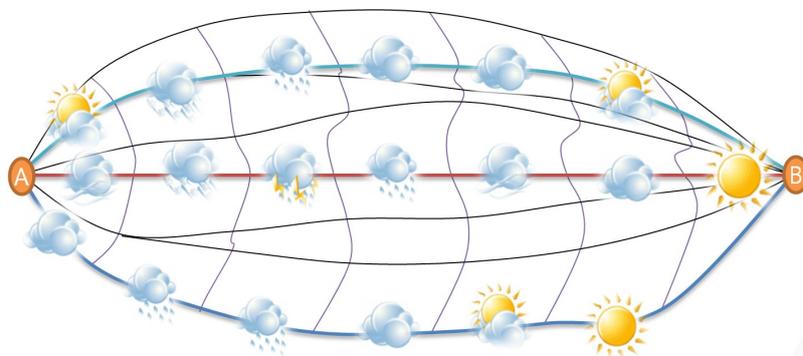


그림 5 선박 운항 경로에 대한 해상 상태

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. 선박이 주어진 항로에 따라 운항 중 해상 상태가 좋지 않은 A-B 구간을 지난다고 가정하였다(그림 5의 타원형 부분). A 지점에 도착한 선박은 B 지점까지의 해상 상태가 좋지 않은 것을 확인한 후, 연료 소모량을 최소화하는 최적 운항 경로를 따라 운항하기로 결정하였다. 따라서 본 연구에서는 등시법에 따라 기존의 대권 항로 외에 다양한 항로들을 등시법에 따라 탐색하였고(그림 6 참조). 이들 중 대권 항로, 항로 1, 항로 2 등 3개의 항로에 대해 연료 소모량을 추정하여 최적 운항 경로를 결정하였다.

4.2. 최적 운항 경로 결정 결과

본 연구에서는 A-B 항로를 일정한 시간 단위의 등시 구간으로 먼저 나누었다. 이후, 각 구간에 대해 해상 상태를 고려하여 선박 부가 저항, 선속 저하량, 추가 마력량을 계산한 후 연료 소모량을 추정하였다. 이때 선박이 각 등시 구간을 진입할 때 해상 상태에 따른 선속 변화는 1시간 후에 보정된다고 가정하였다. 대권 항로, 항로 1, 항로 2 각각에 대해 연료 소모량을 추정한 결과는 표 1과 같다.

표 1 각 운항 경로에 대한 연료 소모량 추정 결과

항로1	항해 거리(nm)	선속 저하량(kt)	연료 소모량(kg)	대권 (600nm)	항해 거리(nm)	선속 저하량(kt)	연료 소모량(kg)	항로2	항해 거리(nm)	선속 저하량(kt)	연료 소모량(kg)
1(BN2)	89.88	0.21	20.21	1(BN4)	89.77	0.23	20.52	1(BN3)	89.84	0.23	20.38
2(BN6)	88.74	1.50	25.21	2(BN6)	88.73	1.50	24.35	2(BN5)	89.47	1.50	21.72
3(BN5)	91.26	0.53	22.15	3(BN7)	85.93	5.57	37.29	3(BN5)	90.00	5.57	21.85
4(BN3)	90.32	0.16	20.45	4(BN5)	95.04	0.53	26.68	4(BN3)	90.36	0.53	20.50
5(BN3)	90.00	0.16	20.42	5(BN4)	90.04	0.23	20.98	5(BN2)	90.04	0.23	20.25
6(BN2)	90.04	0.12	20.25	6(BN3)	90.07	0.16	20.49	6(BN1)	90.02	0.16	20.12
7(BN1)	78.70	0.08	17.59	7(BN1)	60.42	0.08	13.62	7(BN1)	102.23	0.08	22.85
합계	616.47		146.28		600		163.68		628.65		147.67

표 1에 나타나 있듯이, 대권 항로로 운항할 경우 선박은 최소 거리로 운항할 수 있으나 전체적인 해상 상태가 매우 나쁘기 때문에 선속 보정을 위한 과도한 마력 증가로 연료 소모량이 가장 크고 위험한 운항이 될 수 있다. 해상 상태가 비교적 양호한 항로 2는 해상 상태에 따른 선속 저하가 비교적 작기 때문에 선속 보정을 위한 마력 증가로 인한 연료 소모량은 작지만 대권 항로보다 항해 거리가 길어져 운항 시간이 가장 많이 증가했으며 그 결과 전체 연료 소모량 역시 증가하였다. 항로 1은 항로 2보다 해상 상태에 따른 연료 소모량이 더 증가하고 대권 항로보다 항해 거리도 증가하였지만 그 정도가 비교적 작아 전체 연료 소모량이 가장 작게 나왔다. 따라서 대권 항로, 항로 1, 항로 2 중 항로 1이 연료 소모량이 가장 적은 최적 운항 경로임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 해상 상태를 고려하여 선박의 연료비를 최소화하는 운항 경로, 즉 최적 운항 경로를 결정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 해상 상태에 따라 선박에 추가적으로 가해지는 부가 저항을 추정하였고, 이를 기반으로 선속 저하량과 이의 보상을 위해 요구되는 마력 증가량을 추정하였으며, 마지막으로 연료 소모량과 운항 시간을 추정하였다. 또한 해상 상태의 취득 방법에 대해서도 연구하였다. 본 방법의 효용성을 검증하기 위해 이를 간단한 예제에 적용하였으며, 그 결과 연료 소모량을 최소화하는 선박 경제 항로 결정 과정에 활용할 수 있음을 확인하였다. 향후에는 보다 실질적인 예제에의 적용을 통해 본 연구에서 제안한 방법의 효용성 및 실용성을 제고할 예정이다.

감사의 글

본 연구는

- a) 2009년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 기본연구지원사업(KRF-2008-314-D00494)과 핵심연구지원사업(KRF-2009-0086033)
- b) 울산대학교
의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 이회용, 김시화 (2001) 네트워크 모형화에 의한 최적 항로 결정, **한국항해학회지**, 25(3), pp.211~223.
- 최경순, 박명규, 이진호, 박건일 (2007) 실시간 기상정보를 이용한 최적 항로 안전 평가 시스템의 연구, **해양환경안전학회 춘계학술대회**, pp.221~230.
- Hagiwara, H. (1989) Weather Routing of Sail Assisted Motor Vessels, Ph.D. Thesis, Delft University.
- Hansen, G.L., James, R.W. (1960) Optimum ship routing, *The Institute of Navigation*, 13(3).
- Nakamura, S., Naito, S. (1972) Nominal speed loss and propulsive performance of a ship in waves, *Transactions of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 166, pp.25-34.
- Maruo, H. (1960) On the increase of the resistance of a ship in rough seas, *Transactions of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 108, pp.5.
- Meijers, J.H.C. (1980) Some economical aspects of the routing of ships, *IME, Conference on Operation of Ships in Rough Weather*, pp.12-21, 1980.2.21.
- Townsin, R.L., Kwon, Y.J. (1992) Estimating the influence of weather on ship performance, *Transactions of RINA*, 135, pp. 191-209.