

환경 외란의 불확실성을 고려한 선박 항로 최적화 기법 연구

유병현* · † 김진환

*† 한국과학기술원 기계공학과

Ship Route Optimization Considering Environmental Uncertainty

Byung-Hyun Yoo* · † Jin-Hwan Kim

*† Department of Mechanical Engineering, KAIST, Korea

요 약 : 선박에서 배출되는 환경오염 물질 및 온실가스에 대한 규제가 강화됨에 따라, 환경오염 물질 및 온실가스의 배출과 직접적으로 관련 있는 연료 소모량을 줄이려는 다양한 연구가 진행되고 있다. 연료 소모량을 줄이기 위한 방안 중 하나는 환경 및 기상 예보를 이용하여 연료가 가장 적게 소모되는 항로를 찾는 것이다. 기존 연구에서는 연료 소모량을 주된 목적함수로 최소화 하되, 도착 시간에 대한 조건을 평가하기 위해 도착 시간의 기댓값을 계산하고 추가적인 목적함수로 고려하는 경우가 많았다. 그러나 선박 운항 예측 시 적용되는 환경 외란 정보는 상당한 불확실성을 포함하고, 이로 인해 발생하는 운항 속도 및 도착 시간에 대한 불확실성도 상당히 클 수 있기 때문에, 도착 시간의 기댓값뿐만 아니라 도착 시간에 대한 불확실성을 기반으로 제한 시간 내에 선박이 도착할 확률을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 다목적 최적화 기법을 이용해 도착 시간의 기댓값과 연료 소모량에 대한 Pareto set을 구하되, 환경 외란으로부터 발생하는 도착 시간의 불확실성을 계산하여, 제한 시간 내에 선박이 도착할 확률을 계산하고 이를 항로 최적화 시 적용한다. 제안하는 방법의 유용성을 검증하기 위해 실제 환경에 가까운 맵을 기반으로 부산-도쿄 간의 항로를 최적화하고, 그 결과에 대해 논의한다.

핵심용어 : 선박 항로 최적화, 환경 외란의 불확실성, 도착 시간의 불확실성, 운항 제한 시간 내에 도착할 확률

1. 서 론

최근 들어 환경오염 및 지구 온난화에 대한 심각성이 증대됨에 따라, 환경오염 물질 및 온실가스에 대한 규제가 강화되고 있다. 국제해사기구(IMO)는 에너지 효율설계지표(EEDI)와 선박에너지효율관리계획서(SEEMP)와 같은 선박 관련 규제를 제시하고 준수하기를 권고하고 있으며, 이에 따라 환경오염 물질 및 온실가스의 배출과 밀접한 관련이 있는 선박의 연료 소모량을 줄이기 위한 연구의 중요성이 증대되고 있다. 연료 소모량을 줄이기 위한 방안 중 하나는 운항 할 영역의 환경 및 기상 예보를 이용하여 연료가 가장 적게 소모되는 최적의 항로를 찾는 것이다. 기존의 많은 선박 항로 최적화 연구에서는 연료 소모량이라는 단일 목적함수에 대해 A* 알고리즘과 같은 단일 목적함수 최적화 알고리즘을 이용하여 선박의 이동 경로만을 최적화하였다(Simonsen, 2015). 그러나 실제로 선박의 운용에 있어서는 도착 시간에 대한 평가도 중요하기 때문에, 최근에는 도착 시간의 기댓값(Expected time of arrival)을 추가적인 목적함수로 고려하여, 선박의 이동 경로뿐만 아니라 선박의 속도 조건까지 최적화하는 연구가 진행되고 있다. 이동 경로와 운항 속도를 동시에 최적화하는 문제는

비선형적이며 컨벡스 최적화 기법으로 풀기 어렵기 때문에, 경로와 속도를 개별적으로 두 단계에 걸쳐 최적화하는 연구가 진행된 바 있으며(Park, 2015), 다목적 최적화 기법을 이용하여 도착 시간의 기댓값과 연료 소모량의 두 가지 목적함수에 대한 Pareto set을 구하고, 얻어진 Pareto set에서 최적해를 선정하는 방식의 연구도 진행된 바 있다(Vettor, 2016).

도착 시간의 기댓값으로 도착 시간에 대한 조건을 평가하는 것은 일반적으로 많이 사용되는 방법이나, 선박 운항 예측 시 적용되는 환경 외란 정보는 상당한 불확실성을 포함하고, 이로 인해 발생하는 운항 속도 및 도착 시간에 대한 불확실성이 상당히 클 수 있기 때문에, 도착 시간의 기댓값만으로는 제한 시간 내에 안전하게 도착점에 도달하는 항로를 제공하지 못할 수 있다. 이러한 경우 도착 시간에 대한 불확실성을 기반으로 제한 시간 내에 도착할 확률을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 특히, 컨테이너선 및 여객선의 경우, 정해진 제한 시간 안에 항구에 들어가지 못했을 때 발생하는 불이익이 크기 때문에, 제한 시간 내에 도착할 확률을 평가하는 것이 상당히 유용할 수 있다.

본 논문에서는 다목적 최적화 기법을 이용해 도착 시간의 기댓값과 연료 소모량에 대한 항로의 Pareto set을 구하되, 얻

† 교신저자 : jinwhan@kaist.ac.kr

* wprlf4798@kaist.ac.kr

어진 해들에 대해 환경 외란의 불확실성으로부터 발생하는 도착 시간의 불확실성을 계산하고, 이를 기반으로 제한 시간 내에 선박이 도착점에 도착할 확률을 계산하여 항로 최적화에 적용함으로써, 연료 소모량이 적으면서 안전하게 도착점에 도달할 수 있는 항로를 찾는 방법을 제시하고자 한다.

2. 항로 최적화 목적함수

선박의 항로를 최적화하기 위해서는 목적함수로서 엔진 RPM 및 환경 조건에 따른 선박의 운항 속도 및 연료 소모율에 대한 모델이 필요하며, 운항 속도의 경우 그에 대한 불확실성까지 계산할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 컨테이너선의 운항 데이터를 기반으로 기계학습 기법을 포함한 통계적 모델링 방법을 이용해 선박의 등속 직선 운동 구간에서의 운항 속도 및 엔진 마력을 모델링 한 참고 문헌(Yoo, 2016)의 연구 내용을 이용해 운항 성능 모델을 구성하였다. 참고 문헌에서의 운항 성능 모델 구성 시 운항 속도는 엔진 RPM, 트림, 흘수, 정면 방향의 파고 및 바람, 타각을 입력으로 하는 가우시안 프로세스(Gaussian process) 모델로 구성되어 있고, 엔진 마력은 엔진 RPM 및 운항 속도에 대한 다항식 기반의 통계 모델로 구성되어 있으며, 이렇게 구성한 모델을 기반으로 운항 속도와 불확실성, 그리고 엔진 마력을 계산할 수 있다.

선박의 항로 최적화에서는 항로에 따른 연료 소모량을 계산할 수 있어야 하므로, 계산된 엔진 마력을 연료 소모율로 변환할 필요가 있다. 일반적으로는 엔진 및 연료에 대한 정보를 기반으로 결정되는 specific fuel oil consumption (SFOC)을 이용해 엔진 마력을 연료 소모율로 변환할 수 있으나, 참고 문헌에서는 엔진 및 연료에 대한 별도의 사전 정보가 없으므로, 엔진 마력과 연료 소모율 간의 관계를 파악하기 위해 참고 문헌에서 사용된 엔진 마력과 연료 소모율 데이터 간의 산포도를 Fig. 1에 나타내었다.

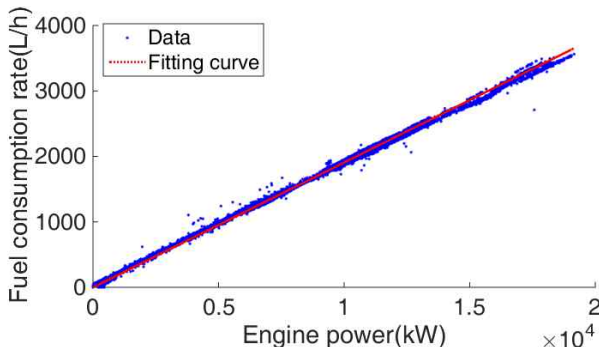


Fig. 1 Scatter plot between engine power and fuel consumption rate

Fig. 1을 통해 알 수 있듯이, 엔진 마력과 연료 소모율은 강한 선형적 관계를 갖기 때문에, 이 선형적 관계를 이용해 엔진 마력을 연료 소모율로 변환하여, 항로 최적화 시 사용하였다.

운항 속도와 연료 소모율의 모델이 주어지면, 항로에 따른

이동 시간 및 연료 소모량을 계산하여야 한다. 전체 항로가 여러 개의 격자로 구성되고, 두 격자 사이의 등속 운항을 가정하였을 때, 두 격자 사이를 이동하는데 걸리는 시간은 식 (1)과 같이 가우시안 랜덤 변수로 근사될 수 있다.

$$V = V_0 + w, w \sim N(0, \sigma_w^2)$$

$$\frac{dt}{ds} = \frac{1}{V} \approx \frac{1}{V_0} - \frac{w}{V_0^2}, t = \int_s \frac{dt}{ds} ds \quad (1)$$

V 는 운항 속도, V_0 는 평균 운항 속도, w 는 속도에 대한 가우시안 잡음, σ_w 는 속도 잡음 크기, t 는 이동 시간, s 는 운항 거리이다. 식 (1)과 같이 두 격자 간의 이동 시간을 가우시안 랜덤 변수로 가정하였기 때문에 여러 개의 격자로 구성된 전체 항로의 경우 각각의 격자 간의 이동 시간 및 불확실성의 합으로 전체 도착 시간 및 전체 도착 시간에 대한 불확실성을 계산할 수 있다.

두 격자 간 이동 시에 발생하는 연료 소모량은 연료 소모율과 이동 시간의 곱으로 나타낼 수 있으며, 이동 시간을 가우시안 랜덤 변수로 근사하였기 때문에 연료 소모량도 가우시안 랜덤 변수로 근사할 수 있다. 그러므로 전체 항로에서의 연료 소모량은 각각의 격자 사이에서의 연료 소모량의 합으로 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 항로에 대한 도착 시간 및 도착 시간에 대한 불확실성, 연료 소모량은 항로 최적화 시에 목적함수로 사용하게 된다.

3. 항로 최적화 알고리즘

항로 최적화를 위해서 본 논문에서는 우선적으로 환경 외란에 대한 맵을 기반으로, 도착 시간의 기댓값과 연료 소모량의 두 가지 목적함수에 대한 Pareto set을 계산한다. 최적화에 대한 변수는 항로에 해당하는 격자 위치와, 격자 간의 이동 시 적용되는 엔진 RPM 조건이며, 사용된 다목적 최적화 기법은 기존의 복잡한 문제들에 대해 효과적이고 좋은 성능으로 해를 찾는다 고 알려진 The Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2; Zitzler, 1999)이다. 다목적 최적화 기법을 사용할 때 초기 값은 수렴 속도에 상당한 영향을 주기 때문에, 효과적인 초기 값 설정을 위해 본 논문에서는 엔진 RPM이 고정된 조건에서의 최단 시간 항로와 최소 연료 소비 항로를 Dijkstra's algorithm을 이용해 계산하고, 이 때 계산한 해를 다목적 최적화 기법의 초기 값으로 사용한다.

도착 시간의 기댓값과 연료 소모량을 기준으로 Pareto set을 계산한 이후에는, 도착 시간의 기댓값이 제한 시간보다 작 으면서, 연료 소모량이 가장 적게 드는 해를 최적해로 선택할 수 있다. 그러나 선박 운항 시 적용되는 환경 외란의 불확실성이 상당히 클 수 있기 때문에, 이로 인해 발생하는 도착 시간에 대한 불확실성 및 제한 시간 내에 도착할 확률을 정량적으로 평가하고 이를 최적해 선정 시 반영할 필요가 있다. 본 논문에서는 계산된 Pareto set에 대해 도착 시간의 불확실성

을 계산하고, 이를 기반으로 제한 시간 내에 도착할 확률을 계산한다. 도착 시간을 가우시안 랜덤 변수로 근사하였기 때문에, 특정 시간 내에 도착할 확률은 가우시안 분포의 누적밀도 함수로부터 쉽게 계산이 가능하다. Pareto set에 대해 도착 시간의 기댓값, 운항 제한 시간 내에 도착할 확률, 연료 소모량을 모두 계산한 이후에는, 원하는 기준 값을 만족하는 범위 내에서 최적해를 찾을 수 있다.

4. 분석 결과

제안하는 항로 최적화 알고리즘을 검증하기 위해 부산항과 도쿄항 간의 항로를 최적화하고 그 결과를 분석해보았다. 계산 시간의 단축을 위해 운항 가능한 엔진 RPM 조건은 50과 70의 두 가지 경우만을 가정하였다. 항로 최적화를 위해서는 기본적으로 환경 정보에 대한 데이터가 필요하다. 본 논문에서는 제안하는 알고리즘의 유용성을 명확히 나타내기 위해 시간에 따라 파고 맵이 변하지 않는다는 가정 하에, 웹상에서 제공되는 파고 정보 데이터의 이미지를 기반으로 환경 맵을 생성하였으며, 생성한 파고 맵은 Fig. 2와 같다.

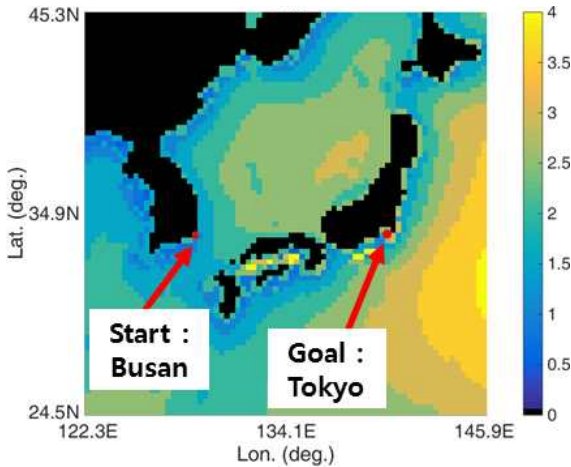


Fig. 2 Generated significant wave height map (<https://hindcast.metoceanview.com/>)

흑색 부분은 육지 부분을 나타내고, 파고의 크기는 색으로 구분하였으며, 파도의 방향은 모든 격자에서 동쪽에서 서쪽으로 진행한다고 가정하였다. Fig. 2에 나타난 파고 맵을 기반으로 앞서 기술한 다목적 최적화 기법을 통해 Pareto set을 계산하고, 구해진 Pareto set에 대해 도착 시간의 불확실성을 같이 계산하고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타나듯이 도착 시간의 기댓값과 연료 소모량에 따라 다양한 해가 계산되며, 구해진 해에 대해서 도착 시간의 불확실성이 계산될 수 있음을 확인하였다. Pareto set을 구한 이후에는 운항 제한 시간의 설정 값에 맞게 최적해를 선정할 수 있다. 본 논문에서는 운항 제한 시간을 44시간 50분으로 설정한 후, 도착 시간의 기댓값이 운항 제한 시간보다 작으며 운항 제한 시간 내에 도착할 확률이 90 % 이상인 조건을 만족하면서, 연료 소모량

이 가장 적게 드는 항로를 최적 항로로 설정하였다. Table 1은 전체 Pareto set에서 운항 제한 시간 근처에서의 해에 대한 값들을 나타낸 표이다.

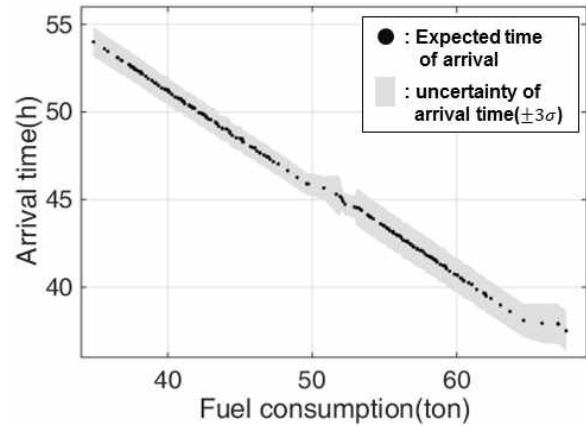


Fig. 3 Pareto set of ship route using SPEA2

Table 1 Solutions near the time constraint

	도착 시간의 기댓값	운항 제한 시간 내에 도착할 확률	연료 소모량
Case 1	45시간 05분	16.1 %	52.04 ton
Case 2	44시간 55분	41.2 %	52.11 ton
Case 3	44시간 44분	72.3 %	52.26 ton
Case 4	44시간 35분	90.8 %	52.92 ton
Case 5	44시간 32분	82.7 %	53.08 ton

Case 1, 2의 경우 도착 시간의 기댓값이 운항 제한 시간보다 크고, Case 3, 5는 운항 제한 시간 내에 도착할 확률이 90 %보다 작기 때문에 원하는 최적해로서 선택될 수 없다. Case 4는 도착 시간의 기댓값과 운항 제한 시간 내에 도착할 확률 조건을 모두 만족하기 때문에, 설정 조건을 만족하는 최적해는 case 4라고 할 수 있다. 운항 제한 시간 내에 도착할 확률을 고려하는 것의 유용성을 명확히 보이기 위해 Table 1의 case 4, 5에 대한 도착 시간의 확률 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

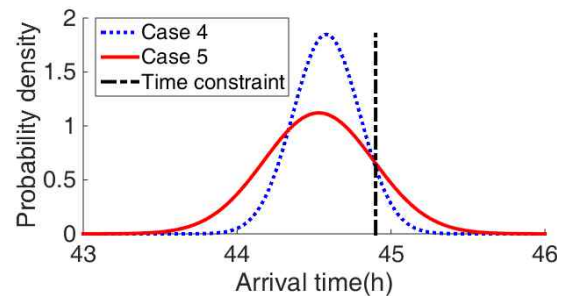


Fig. 4 Probability distributions of arrival time in case 4 and 5 with the time constraint

Table 1과 Fig. 4에 나타나듯이, 도착 시간의 기댓값에서는 case 5의 값이 더 작으나, 도착 시간의 불확실성에서는 case 5가 더 크다는 것을 알 수 있다. 두 결과를 도착 시간의 기댓값

및 연료 소모량으로만 평가한다면, case 4가 case 5 보다 연료 소모량은 적게 드나, case 4의 도착 시간의 기댓값이 case 5 보다 크기 때문에 운항 제한 시간 내에 도착할 가능성이 case 5 가 더 크다고 판단할 수 있다. 그러나 도착 시간의 불확실성으로부터 운항 제한 시간 내에 도착할 확률을 직접적으로 고려하면, case 5보다는 case 4의 항로가 운항 제한 시간 내에 안전하게 도착점에 도달할 수 있는 항로라고 할 수 있다. 이러한 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 항로 최적화 방법에 대한 유용성을 검증할 수 있었다. Fig. 5는 최종적으로 최적해로 선정한 case 4에 해당하는 항로를 나타낸 것이며, Fig. 6은 해당 항로를 운항할 때의 파고, 선속, 연료 소모량에 대한 시간 이력을 나타낸 것이다.

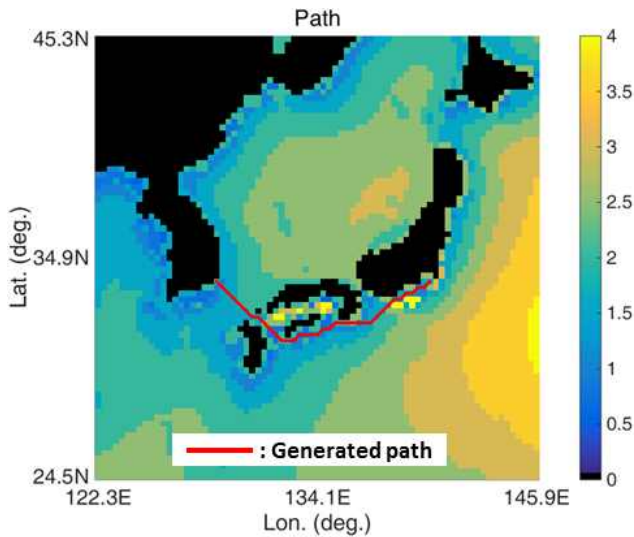


Fig. 5 Ship route as the final solution

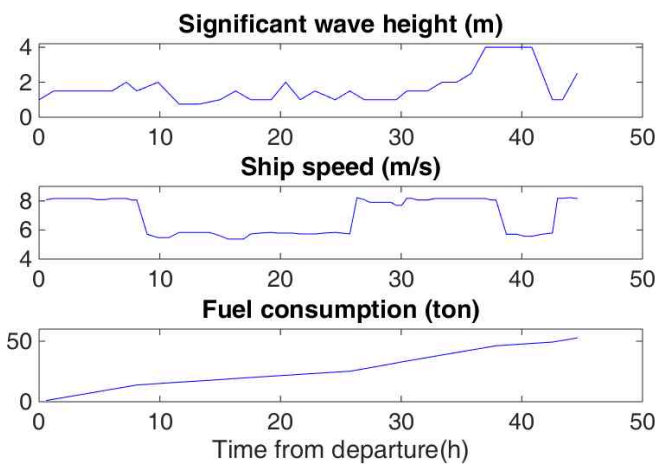


Fig. 6 Time history of encountered wave height, speed and fuel consumption in the final solution

5. 결 론

본 논문에서는 환경 외란의 불확실성으로부터 발생하는 도착 시간의 불확실성을 고려하여 운항 제한 시간 내에 도착

할 확률을 정량적으로 평가하고 이를 항로 최적화에 반영하여 최적 항로를 선정하는 방법을 제시하였다. 본 논문의 결과로서 제안하는 방법을 이용해 부산-도쿄 간 항로 최적화를 수행하였으며, 분석 결과를 통해 제안하는 알고리즘의 유용성을 검증하였다.

후 기

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('10077551')

참 고 문 헌

- [1] Simonsen, M. H., Larsson, E., Mao, W., and Ringsberg, J. W. (2015), "State-of-the-art within ship weather routing", In Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St. John's, Newfoundland, Canada.
- [2] Park, J., and Kim, N. (2015), "Two-phase approach to optimal weather routing using geometric programming", *Journal of Marine Science and Technology*, 20(4), pp. 679-688.
- [3] Vettor, R., and Soares, C. G. (2016), "Development of a ship weather routing system", *Ocean Engineering*, 123, pp. 1-14.
- [4] Yoo, B. and Kim J. (2017), "Powering performance analysis of full-scale ships under environmental disturbances", 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Toulouse, France.
- [5] Zitzler, E., and Thiele, L. (1999), "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach", *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), pp. 257-271.