

기상예보와 운항비용예측 기반의 선박경제운항시스템

장호섭*, 권영근**

*,**울산대학교 전기공학부

e-mail: edrizzle@mail.ulsan.ac.kr

An economic ship routing system based on a weather forecasting and a sailing cost prediction

Ho-Seop Jang*, Yung-Keun Kwon**

*,**School of Electrical Engineering, University of Ulsan

요 약

선박경제운항이란 파도와 바람과 같은 해양 기상정보 예측을 바탕으로 선박의 운항방법에 따른 연료 소모량과 운항시간을 예상해보고, 가장 경제적인 운항을 하는 것을 말한다. 본 논문에서는 실용화할 수 있는 범용의 경제운항시스템 개발에 중점을 두었다. 기존의 시스템들을 살펴보면 임의의 정해진 경로를 대상으로 실험하는 경우가 많은데, 이를 개선하여 임의의 출발점과 도착점이 주어지면 A*알고리즘을 통해서 지리상 최단경로를 찾아내도록 하여 시스템을 자동화하였으며 적용범위를 세계 전역으로 확대 하였다. 그리고 기존의 엔진출력을 고정하거나 속력을 일정하게 운항한다는 가정에서 벗어나서 엔진출력을 탐색하여 보다 효율적인 운항 솔루션을 찾아내도록 하였다. 그리고 사용측면에서는 운항사들에게 보다 효용성 높은 시스템이 되기 위해서, 일방적인 권고보다는 연료소모량과 운항시간 별로 다양한 솔루션들을 제공하여 운항사의 판단을 존중함과 동시에 운항보조시스템으로서의 역할에 충실할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

선박경제운항이란 기상예측정보와 선박의 제원정보 등을 활용하여 연료소모량을 최소화하도록 선박을 경제적으로 운항하는 것을 말한다. 이와 같은 연구들이 많이 이루어져 왔지만, 아직 상용화의 사례를 살펴보기 힘든 실정이다. 본 논문에서는 기존 시스템들의 한계를 분석하고 개선해서 실용화할 수 있는 범용의 경제운항시스템 개발에 중점을 두었다. 아래에 기존 시스템들의 한계점과 본 논문의 개선 사항을 간략히 설명한다.

첫째, 기존 시스템들은 임의의 정해진 경로를 대상으로 실험하거나 특정 지역에 국한되는 경우가 많다. 예를 들면, 경로별로 승객의 안락함, 도착시간, 안전, 연료소모량 측면을 다각도로 비교분석한 기존 연구에서는 지중해 내에 국한된 실험을 보이며 경로도 임의로 작도하여 사용함으로써 그 한계가 있다[1]. 반면, 본 논문에서는 A*알고리즘을 통해서 임의의 출발점과 도착점에 대한 지리상 최단경로 산출이 가능하며, 시스템 자동화와 동시에 적용범위를 세계 전역으로 확대하여 실용성을 높였다.

둘째, 기존 시스템에서는 엔진출력을 고정하거나 속력을 일정하게 운항한다는 가정으로 문제의 공간을 제한한다. 그 예로 SORAS라는 시스템의 경우, 동적 프로그래밍 기반의 Dijkstra 알고리즘 구현을 통해 부산에서 하와이까지 가는 항로에 대해 실험하였지만 일정한 속력으로 운항

하는 것을 전제로 한다[2]. 본 논문에서는 엔진출력량 역시 변수로서 탐색하여 주어진 기상정보와 항로에서 가장 효율적인 솔루션을 찾을 수 있도록 하였다. 실제로 출력을 적절하게 조절하게 되면 운항시간의 변화와 접촉하게 되는 기상환경의 변화, 그리고 선박이 받게 되는 저항의 변화를 유도하여 보다 효율적인 운항이 가능하게 된다.

셋째, 항해사들은 전통적으로 내려오는 운항방식과 경험을 신뢰하기 때문에 디지털화 된 시스템의 수용에 어려움이 있다. 이에 본 시스템에서는 일방적인 권고보다는 연료소모량과 운항시간 별로 다양한 솔루션들을 제공하여 운항사의 판단을 존중함과 동시에 운항보조시스템으로서의 역할에 충실하도록 하였다.

2. 배경 지식

2.1 지리정보 및 기상예보데이터

경제운항 시스템을 구축하기 위해서는 유효한 해상 항로를 찾는 과정에서 전 세계 지리정보 데이터가, 연료소모량을 추정하는 과정에서는 기상정보 데이터가 각각 필요하다. 이를 위해, 미국국립지리원(<http://www.ngdc.noaa.gov/>)과 유럽중기예보센터(ECMWF; [http://www.ecmwf-int/](http://www.ecmwf.int/))의 자료들을 각각 활용하여 데이터베이스를 구축하였다. 지리정보 데이터는 총 1938개의 벡터로 이루어져 있으며, 주어진 항로에 인접한 지리정보만을 활용할 수 있도록

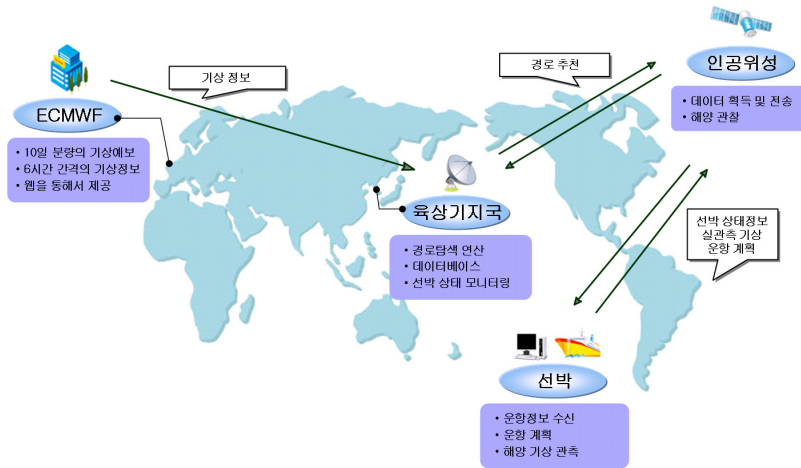


그림 1. 경제운항시스템 개념도

전 세계의 데이터를 위도 90도, 경도 90도 간격으로 8등분하여 저장하였다. 한편, 기상정보 데이터는 2008년 1월부터 12월까지 1년 동안의 세계 해양을 경위도 각각 1.5도 단위로 나눈 격자점에 대해서 6시간 단위로 이뤄진 예보 데이터이며 본 시스템에서는 많은 기상정보들 중에서 연료소모량 추정식에서 필요로 하는 파향, 파고, 풍향, 풍속 등 네 개의 정보에 대해서만 데이터베이스를 구축하였다.

2.2 연료소모량 추정식

가장 대표적인 연료소모량 추정식으로는 Nakamura/Naito의 선속 저하량과 선속 보정을 위한 마력 증가량에 대한 계산 방법[3]과 Townsin/Kwon의 해상 상태에 따른 선속 저하량의 계산 방법[4]을 들 수 있다. 이 논문에서는 그러한 방법들을 구현한 기존의 연구 결과[5]를 활용하였는데, 앞선 두 방법의 결과 값의 평균을 계산하는 방식이다. 연료소모량을 추정하기 위해서는 선박의 길이, 너비, 깊이 등의 9가지 선박제원 정보(4.1 절에서 설명)와 파고, 파향, 풍속, 풍향과 같은 4가지 기상정보, 그리고 선박 운항방향, 운항속도, 운항거리와 같은 3가지 운항 정보가 입력 데이터로서 필요하다.

3. 출력 조정을 통한 선박경제운항시스템

3.1 시스템 개념

본 논문에서 제안하는 선박경제운항 시스템의 전체적인 개념도는 그림 1에 보여진다. 모든 선박 정보들은 육상기지국에서 관리하며, 경로탐색 연산도 여기에서 이루어진다. 육상기지국에서 ECMWF의 기상정보를 토대로 산출한 경로를 인공위성을 통해서 선박으로 송신한다. 선박에서는 이 추천경로를 받아서 운항사의 판단을 더해서 운항하게 되고, 운항사의 결정과 모든 선박 상태정보를 비롯한 정보들이 인공위성을 통해서 주기적으로 육상기지국으로 송신된다. 육상기지국은 선박이 관측한 주변의 실제 기상을 이용해서 기상예보와 실제 기상의 오차를 체크하며, 줄일 수 있도록 한다. 이렇게 하여 육상기지국에서는 운항 중인 다수의 선박들을 관리하고 효율

적인 운항을 유도하는 역할을 한다.

3.2 격자좌표체계

본 논문에서는 운항 경로라는 해의 표현을 위해 전 세계의 해상 지리를 경위도 각각 1.5도 단위로 나눈 격자좌표체계를 정의하였다. 이 때 1.5도 단위로 나눈 이유는 유럽중기예보센터에서 제공하는 기상예보 데이터가 그러한 단위로 제공되기 때문이다. 이를 통해 전 세계의 지리를 총 $120 \times 240 = 28800$ 개의 블록으로 구분하게 된다.

3.3 경제운항경로 탐색 방법

사용자가 임의의 출항지와 입항지 정보를 설정하면 해당 좌표는 기존의 격자좌표체계에 맞추어 보정되고, 보정된 좌표를 바탕으로 A*알고리즘은 지리상 최단 거리를 구하게 된다. 이 때 구해진 지리적 최단 경로는 경로길이에 따라 m 개의 세부 구간들로 구성되며, 그림 2에서 설명하는 바와 같은 방법으로 출력탐색이 진행된다. 여기서 논의의 편의를 위해 경로의 각 세부구간에서 설정된 출력들을 $\beta \leftarrow [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_i]$ 와 같이 표기하는데, 이는 전체 m 개의 세부 구간 중 설정된 출력량 개수가 i 개($i \leq m$)임을 의미하고, α_i 는 i 번째 세부 구간의 엔진 출력량을 의미한다. 그림 2에서 초기해 γ 에서는 설정된 출력이 없으므로, NULL로 표기되며 이후 $\delta \cup \alpha_i$ 연산을 통해서 출력이 하나씩 추가되며, m 개의 출력이 추가되면 하나의 솔루션이 완성된다. 출력을 추가할 때에는 정의된 n 개의 출력후보군 $P \leftarrow [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n]$ 중 하나를 선택하여 추가하게 되는데, 이렇게 추가되는 n 가지 경우의 수를 모두 고려하게 되면, n^{m-1} 개의 다양한 솔루션과 계산복잡도를 지니게 된다. 하지만 운항시간과 연료소모량 둘다 상대적으로 나쁜 솔루션의 경우 필요가 없기 때문에 ParetoCompare 함수를 통해서 걸러내도록 한다. 그렇게 되면 n^{m-1} 보다는 적은 솔루션이 나타나지만, 여전히 계산 복잡도가 너무 큰 관계로 연산에 많은 시간이 소요되게 된다. 그래서 임의의 탐색깊이(d)를 두어서 탐색깊이 만큼의 경우의 수(n^d)를 다 찾게 되면

표 1. 본 논문의 시물레이션에서 사용된 파라미터 설정값

	Item	Value (단위)
선박제원 파라미터	길이 (Length)	315.0 (m)
	너비 (Breadth)	57.2 (m)
	깊이 (Depth)	30.4 (m)
	흘수 (Draft)	20.8 (m)
	블록 계수 (Block Coefficient)	0.8
	부력 중심 (Longitudinal Center of Buoyancy, Forward Direction in m)	10.17 (m)
	프로펠러 직경	9.1 (m)
	프로펠러 효율	0.6
	단위시간 마력당 사용 연료량 (SFOC)	125.0 (g/hr)
알고리즘 파라미터	강제 조정할 해의 개수 (그림 2에서 k)	3
	탐색깊이 (그림 2에서 d)	5
	출력 후보군 개수 (그림 2에서 n)	3
	출력량 1 (그림 2에서 α_1)	0.65 * 25,491
	출력량 2 (그림 2에서 α_2)	0.75 * 25,491
	출력량 3 (그림 2에서 α_3)	0.85 * 25,491

나타낸다. 우선, 선박제원 파라미터로는 선박의 길이, 너비, 깊이 등 9가지 파라미터가 포함되는데 이런 정보들은 2.2절의 연료소모량 추정식에서 사용된다. 본 논문에서는 기존 논문[5]에서 사용된 재화 중량 300,000톤급 VLCC(Very Large Crude Carrier)의 제원 정보를 활용하였고, 엔진의 최대 출력은 25,491마력이다. 그리고 알고리즘 파라미터의 경우 출력 후보군 등 그림 2에서 필요한 값들을 표 1에서와 같이 설정하였다.

4.2 계절별 시물레이션

본 논문에서 제안한 시스템의 성능을 검증하기 위하여 다양한 계절에 대해 시물레이션을 시도하였다. 이를 위해 부산에서 시드니까지의 항로에 대해 2008년 1월부터 12월까지 1개월 간격으로 출발날짜를 바꿔가면서 실험하였다(총 12개의 운항스케줄). 시물레이션에서는 다른 운항방법과의 성능 비교를 위해서 2가지 운항 방법을 정의하였다. 하나는 모든 세부 구간에서 동일한 출력으로 운항하는 방법(출력 고정 운항법이라고 지칭)이고 다른 하나는 모든 세부 구간에서 동일한 실속력으로 운항하는 방법(실속력 고정 운항법이라고 지칭)이다. 동일한 출력을 내더라도 기상환경에 따라서 실제로 나타나는 속력은 다른데 이를 출력조정으로 항상 보정하여 일정한 실속력을 유지하는 운항방법이 실속력 고정 운항법이다. 3가지

```

Search_solution {
//isEmpty(큐) : 큐가 비었으면 TRUE를 반환함
//enqueue(큐, 경로) : 큐에 경로를 추가함
//dequeue(큐) : 큐에서 경로를 가져와서 반환함
//lengthOf(경로) : 경로에 설정된 출력 개수를 반환함
//paretoKill(큐, 개수) : 큐에서 지정된 개수만큼의 경로만 남기고 삭제
//paretoCompare(큐, 경로) : 해당 경로가 큐에 추가되고, 큐 내의 모든
경로들에 대해서 큐 내의 다른 어떤 경로에 비해 소요시간과 연료소모량
모두 열등한 경로가 있다면 이를 큐에서 제거함
//copyPath(경로1, 경로2) : 경로2를 복사해서 경로1을 만들
//removePath(경로) : 해당 경로를 삭제함
P←[α1 α2 ... αn]; //출력후보군 집합, n : 출력후보군 개수
γ←NULL; //γ: 설정된 출력이 없는 경로, 최대 m개의 출력
집합으로 이루어질 수 있음.
//현재 lengthOf(γ)는 0을 반환함.
Q←NULL; //Q: 탐색할 경로들을 담은 큐
R←NULL; //R: 중간솔루션 경로들을 담은 큐
D←NULL; //D: 최종솔루션 경로들을 담은 큐
enqueue(Q, γ);
while (!isEmpty(Q)) {
β←dequeue(Q);
if (isEmpty(Q) && !isEmpty(R)) {
//탐색깊이 내의 경로를 다 찾았을 때
paretoKill(R, k); //k : 남길 경로 개수
while (!isEmpty(R))
enqueue(Q, dequeue(R));
}
if (lengthOf(β) ≡ m) {
//m : 경로에 설정 가능한 최대 출력 개수(세부구간 개수)
//목적지까지 탐색완료
paretoCompare(D, β);
continue;
}
if (lengthOf(β) % d ≡ 0 && lengthOf(β) ≠ 0) {
//탐색깊이 d 만큼 탐색완료
paretoCompare(R, β);
continue;
}
for (i = 1; i < n + 1; i++) {
copyPath(δ, β);
enqueue(Q, δ ∪ αi);
}
removePath(β);
}
}
    
```

그림 2. 경제운항 탐색 알고리즘

ParetoCompare 함수로 필요 없는 해를 걸러내게 되고, 이어서 ParetoKill 함수를 통해서 강제적으로 임의의 수(k) 만큼의 솔루션을 남기고 삭제하도록 한다. 이 때 살아남은 솔루션 선택 방법은 상대적으로 연료소모량과 운항시간이 한쪽으로 치우치지 않고 격차가 적은 솔루션들을 우선 선발하도록 하였다. 이러한 방법으로 탐색을 진행하면 $n^d + n^d * ((m/d)-1) * k + k * n^{(m/d)}$ 만큼의 계산복잡도를 지니게 된다. 이렇게 출력탐색까지 종료되면, 경제운항시스템은 다양하며 서로 우월을 판별하기 힘든 다수의 솔루션들을 제공하게 된다.

4. 시물레이션 결과

4.1 시물레이션 파라미터 설정

표 1은 본 논문의 시물레이션에서 사용된 파라미터 설정을

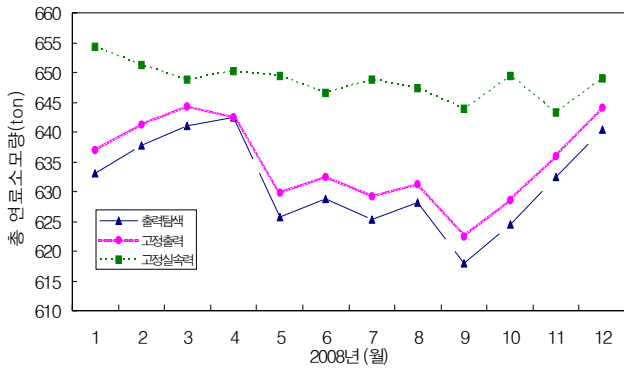


그림 3. 출발일자에 따른 연료소모량 분포

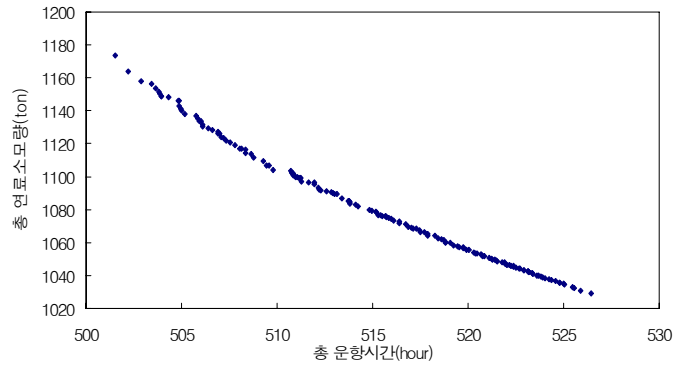


그림 4. 다양한 운항시간과 연료소모량별 솔루션 분포

운항법에 대해 공정한 비교를 위해서 운항시간을 모두 동일하도록 설정한 가운데, 연료소모량을 비교하였다. 이 시뮬레이션의 결과는 그림 3과 같이 나타난다. 실속력 고정 운항의 경우 모든 출발날짜에 대해서 다른 두 운항법에 비해 연료소모량이 높게 나타났다. 그리고 출력탐색 운항의 경우 4월을 제외한 모든 계절에서 출력고정 운항보다 연료소모량이 낮게 나타남을 관찰할 수 있다. 각 운항법 별로 1년의 총 연료소모량을 평균 내어 비교해 보면, 고정 실속력 운항은 648.52톤, 고정 출력 운항은 634.90톤, 출력 탐색 운항은 631.46톤으로 출력 탐색 운항의 연료소모량이 가장 적게 나타난다. 이러한 결과를 통해 동일한 경로 내에서도 출력량의 탐색으로 보다 효율적인 운항이 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 2008년 1월을 출발날짜로 칼라오에서 시드니까지의 운항에 대해 시뮬레이션 한 결과로, 다양한 연료소모량과 운항시간별 솔루션들의 분포를 잘 나타내고 있다. 운항사는 이와 같은 솔루션들을 제공받아서 원하는 도착시간과 연료소모량별로 솔루션을 선택하여 사용할 수가 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 경제운항시스템들의 한계점들을 개선하여 그 효율성을 높이는데 중점을 두었다. 이에 따라 A*알고리즘을 사용한 지리적 최단경로 탐색으로 시스템을 자동화하였으며, 시스템 적용영역을 세계 전역으로 확대하였다. 그리고 출력이라는 추가 변수를 고려함으로써 운항시간의 변화, 접촉하게 되는 기상의 변화, 선박이 받게 되는 저항의 변화를 유도하여 동일한 경로 내에서도 보다 효율적인 운항이 가능하도록 하였다. 그리고 운항사들의 경제운항시스템 수용 측면을 고려해서 솔루션들을 연료소모량과 운항시간별로 분류하여 제공함으로써 운항사들의 선택의 폭을 넓히고, 시스템의 효율성을 높일 수 있도록 하였다.

이밖에 향후 연구해 나가야할 과제를 다음과 같이 정리한다. 첫째, 현재 출력탐색에서는 연산시간을 줄이기 위해 출력 후보군을 임의로 설정해서 문제공간을 줄이고 있다. 이렇게 시뮬레이션 하여 얻은 결과는 최적의 솔루션이라고 보기 어려우며 이러한 경우, 성능은 출력후보군 개수와 출력후보군

값의 설정에 따라서 영향을 받게 된다. 향후에는 진화전략 혹은 유전알고리즘을 적절히 활용하여, 다양한 출력을 고려하면서도 연산에 많은 시간을 소요하지 않도록 개선해야 할 것이다.

둘째, 현재 선박경제운항시스템에서는 특정경로(최단경로)가 주어졌을 경우, 그 경로 내에서의 출력탐색으로 문제의 공간이 한정되어 있다. 이를 확장시켜 출력과 동시에 경로탐색까지 이루어져야하며, 그 방안으로는 유전알고리즘을 통한 운항경로와 엔진출력 탐색이 고려될 수 있다.

이와 같은 부분들을 개선하여 좀 더 다양한 경로와 계절에 대해 시뮬레이션을 실시하여 시스템의 성능검증을 이루어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] A. M. S. Delitala, S. Gallino, L. Villa, K. Lagouvardos, A. Drago, "Weather routing in long-distance mediterranean routes", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 102, pp. 125-137, 2010.
- [2] 최경순, 박명규, 이진호, 박건일, "실시간 기상 정보를 이용한 최적 항로 안전 평가 시스템의 연구", *해양환경안전학회*, 제13권 제2호, pp. 133-140, 2007.
- [3] S. Nakamura, S. Naito, "Nominal speed loss and propulsive performance of a ship in waves", *Journal of the Society of Naval Architects of Kansai*, Vol. 166, pp. 25-34, 1977.
- [4] R. L. Townsin, Y. J. Kwon, "Estimating the influence of weather on ship performance", *Transactions RINA*, Vol. 135, pp. 191-209, 1993.
- [5] 김주영, 임병석, 노명일, 이주성, 윤범상, 권영근, "해상 상태를 고려한 선박 경제 운항 경로 결정에 관한 연구", *추계대한조선학회학술발표회* pp. 535-542, 2009.